土木研究所報告 第百五号 昭和三十六年二月

土木研究所報告

第 105 号

河川の分流に関する研究（7）
——太田川分流の機能設計——
……吉川秀夫，高見昌信…（ 1 ）
堰堤放水管に関する研究（5）
——鐘状入口に関する実験的考察——
……村　幸雄，荒木正夫，伊集院敏，加藤鉄義…（ 27 ）
酸性河川水の水質に関する調査研究（第3報，第4報）
——吾妻川の水質およびセメントの耐酸性——
……有泉　昌，小松原正夫，牧　隆正，和田茂治，野本誠三…（ 41 ）
光弾性法によるダムの応力解析に関する研究（1）
——大型遠心力式負荷装置とこれを用いる実験法——
……高田孝信，栗林栄一…（103）
洪水流出計算機に関する研究（1）
——流域・河道用洪水流出計算機の基本設計——
……木村俊晃…（111）
開水路断面急拡部の水理に関する研究（2）
——段落ち部の水理——
……芦田和男…（133）
低水流量観測の精度に影響を及ぼす2，3の要素について
……竹内俊雄，江川太朗，篠田勝一…（157）
コアキシアル・リレイション法を用いた有効雨量の計算方法
……竹内俊雄，鶴岡稔雄…（171）

昭和 36 年 2 月

建設省土木研究所

河川の分流に関する研究（7）

——太田川分流の機能設計——

（昭和34年11月）

吉川秀夫*

高見昌信**

要旨：

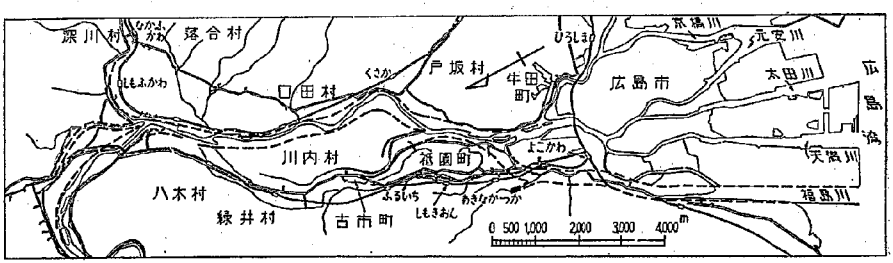
大型の水理模型試験によって新らしく掘削した太田川放水路分派点の水理現象を調べ，高水位の検討，堤防法線形状，設置すべき構造物の形状，位置を求めた。

目次

Ⅰ 緒言……（1）
Ⅱ 研究の目的及び順序……（2）
〔1〕目的……（2）
〔2〕順序……（2）
Ⅲ 越流堰及び水門に関する実験……（2）
〔1〕越流堰に関する実験……（2）
〔2〕水門に関する実験……（3）
Ⅳ 計算による分流の概算設計……（4）
〔1〕放水路及び市内派川の粗度係数……（4）
（i）放水路の粗度係数……（4）
（ii）市内派川及び模型区域内の粗度係数……（4）
（iii）模型下流端の水位流量曲線……（5）
〔2〕分流点構造物の概算設計……（5）
（i）水門有効幅の決定……（5）
（ii）固定堰の堰高堰巾の決定……（5）
〔3〕放水路の河道設計……（6）
（i）平衡河床……（6）
（ii）固定堰の堰高の決定……（6）
Ⅴ 分流に関する模型実験……（7）
〔1〕実験に関する基礎条件……（7）
〔2〕模型……（8）
〔3〕検証実験……（8）
（i）現況河床模型の検証……（8）
（ii）放水路模型の検証……（8）
（iii）改修計画断面の検証……（9）
〔4〕本実験……（9）
（i）実験概要……（9）
（ii）各案の堤防法線形状及び構造物の次元……（10）
（iii）流量配分……（11）
（iv）流向及び死水域……（13）
（v）流速……（15）
（vi）水位……（17）
（vii）エネルギーの減殺方法……（17）
（viii）構造物の位置及び構造……（21）
Ⅵ 結論……（22）

Ⅰ 緒言

太田川は，広島県の中央部を流れて広島湾に流入する流域面積約1,600km² 流路延長約109.7kmの河川である。広島市に入る手前で太田川は，一派川を分派し，更に市内で六派川に分れる。広島市は太田川の形成した三角洲の上に発達した都市である。



図—1 太田川改修平面図

* 工博 河川部河川研究室長　　** 中国地方建設局 太田川工事事務所技官

既往最大洪水は昭和18年9月の異常出水で，当時の洪水痕跡や各量水標の水位記録を検討し計画流量が6,000 m³/s に改訂された。しかし広島市内派川の洪水疎通能力は約2,000m³/s程度であり，河の拡幅或いは嵩上げを行って疎通能力を増す事は経済的にも又都市計画上の見地からも種々の困難が伴うので，市の西を流れる派川山手川を開削し福島川の下流部とあわせて放水路とし洪水の大半はこれに流す案がたてられた。

Ⅱ　研究の目的及び順序

〔1〕 目　　的

前述の如く計画流量6,000m³/s を放水路へ4,000m³/s 市内派川へ2,000m³/s に分流するが，その場合下記の種々の問題点が未解決なので大型の模型により水理実験を行い，結論を出すことになった。

(1) 分流点附近の堤防法線の検討
(2) 分流点附近の計画高水位の検討
(3) 堰，水門を設ける場合の位置及びその構造

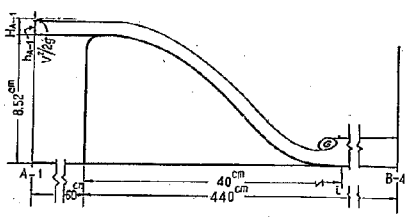
〔2〕 順　　序

改修計画案では本川側に堰及び水門を設けることになっているが堰については堰高と堰巾の関係はある範囲内で任意に決めうるので，まず2種類の堰高について越流係数及び下流流速を求める事にした。又水門については流出係数を求める実験をおこなうことにし，次いで原案による模型実験をおこない，逐次悪い点を改良していく方法をとった。

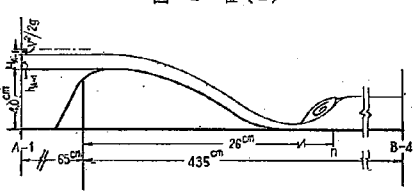
Ⅲ　越流堰及び水門に関する模型実験

〔1〕 越流堰に関する実験

堰高 8.52cm 堰巾 211.5cm（a）と堰高 4.00cm 堰巾 160.5cm（b）の2種類については矩形水平水路で実験をおこなった。



図—2　堰（a）



図—2　堰（b）

模型は図—2の通りである。

堰越流量 Q_1，は一般に次の式で表わされる。

$$Q=m\cdot B\cdot H\sqrt{2g\cdot H} \quad \text{——(Ⅲ—1)}$$

m：越流係数
B：堰　　幅
H：越流エネルギー水頭（A—1断面）
g：重力の加速度

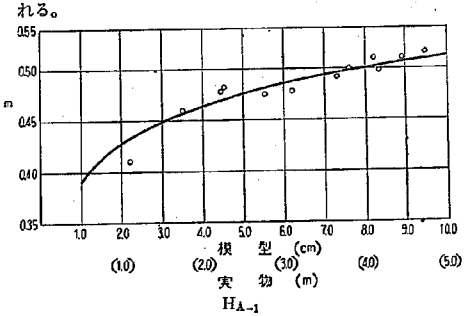
表—1　　堰（a）の越流係数の実測値

No.	流　量	越流深	平均流速	越流水頭	越流係数
	Q l/s	h_{A-1}cm	v cm/s	H_{A-1}cm	m
1	141.4	8.62	41.44	9.50	0.516
2	112.5	7.58	35.53	8.22	0.510
3	98.5	7.09	31.71	7.60	0.499
4	91.0	6.85	30.11	7.31	0.492
5	69.5	5.88	25.93	6.22	0.478
6	42.0	4.30	17.02	4.45	0.478
7	58.0	5.28	22.80	5.54	0.475
8	127.4	8.15	39.13	8.93	0.510
9	28.3	3.43	12.47	3.51	0.459
10	112.5	7.71	35.37	8.35	0.498
11	44.0	4.40	17.87	4.56	0.482
12	12.7	2.20	6.36	2.22	0.410

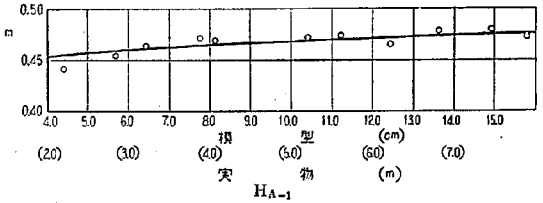
表—2　　堰（b）の越流係数の実測値

No.	Q l/s	h_{A-1}	v	H_{A-1}	m	H_{B-4}	$\frac{H_{B-4}}{H_{A-1}}$
1	145.2	9.68	73.6	12.44	0.466	11.29	0.900
2	170.6	10.24	81.5	13.63	0.477	12.78	0.931
3	112.3	8.30	64.2	10.40	0.471	8.30	0.839
4	44.3	5.04	36.0	5.70	0.455	3.71	0.637
5	53.6	5.57	41.1	6.43	0.463	4.36	0.669
6	72.0	6.50	49.1	7.73	0.472	5.89	0.753
7	77.2	6.77	51.8	8.14	0.468	6.27	0.762
8	212.3	11.89	87.4	15.79	0.474	14.96	0.919
9	125.9	8.04	73.9	11.20	0.473	8.49	0.534
10	197.0	11.20	85.6	14.94	0.480	14.00	0.921
11	29.0	4.03	27.1	4.40	0.442	2.55	0.567

堰（a）は完全越流の状態で，堰（b）は下流水位調節板の関係上完全越流の状態ではおこなえなかったが，H_{B-4} は堰上での限界水深より小さく且つ堰上ではフルード数が1より大きいので完全越流に近い状態であると見做される。



図—3（1）　越流係数



図—3 （2） 越流係数

実験の結果は表—1，2，図—3の如くである。

越流係数は今までにおこなわれた越流係数測定実験[1),2)]で認められているように

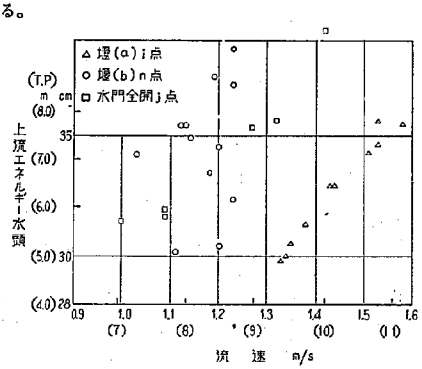
$$m=a\log H+b \quad (\text{Ⅲ}-2)$$

なる関係で近似させるのが妥当と思われる。

堰下流で射流が生じている場合，射流部の最大流速は上流の越流エネルギー水頭及び堰高の関数と考えられる。

堰(a)(b)についてこれを比較すれば図—4のようになり堰高が小さい程最大流速も小さくなるといえる。

但し堰下流部の洗掘或いは床固めの長さを論ずる場合には露出射流の長さ，跳水の発生の有無等をも考慮せねばならないので堰の低い方が良いとは言えないようである。



図—4 上流エネルギー水頭と各構造物下流の流速との関係

〔2〕・水門に関する実験

水門全開の場合と開高6.00cmの場合の2種類について実験をおこなった。模型次元は図—5の通りである。

現地ではいづれの場合も水門の下流で射流になることが予想されるのでこの実験でも下流水位を調節して自由流出の状態でおこなった。自由流出の場合は流出量は上流水位と水門開高とによって決まる。

$$Q=Cq\cdot B\cdot a\sqrt{2gh_0} \quad (\text{Ⅲ}-3)$$

Cq：流出係数

（1） 土木研究所報告 第92号 河川の分流に関する研究（2）—大野川分流の設計—

（2） 土木研究所報告 第97号 水門の水理に関する研究（1）

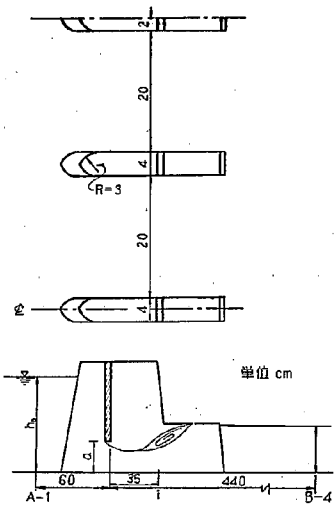
B：堰幅

a：水門の開高

h_0：水門上流部の水深（A—1断面）

g：重力の加速度

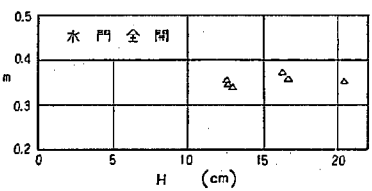
実験値は表—3,4の通りであり，それを図示すると図—6，7のようになる。任意の水門開高の場合の流出係数は太田川分水堰実験を通おして得られた結果をまとめて，図—8の如く示される。



図—5 水 門

表—3 水門開高60cmの流出係数実測値

No.	Q l/s	ql/s	$h_c$cm	$v^2/2g$cm	Hcm	$B_a\sqrt{2gh_0}$	Cq
1	32.0	4.00	9.93	0.57	10.50	67.0	0.478
2	44.5	5.56	15.27	0.46	15.73	83.1	0.535
3	42.0	5.25	16.15	0.35	17.00	85.4	0.491
4	40.2	5.02	12.48	0.57	13.05	75.1	0.535
5	47.0	5.87	16.59	0.44	17.03	86.5	0.543
6	49.0	6.12	17.39	0.44	17.78	88.6	0.553
7	49.0	6.12	16.09	0.51	16.60	85.0	0.576



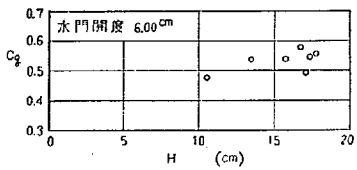
備考 現地水頭に直す時は（模型エネルギー水頭−10）÷2＝現地エネルギー水頭を用いればよい。

図—6 水門全開の流出係数

表—4　水門全開の場合の流出係数実測値

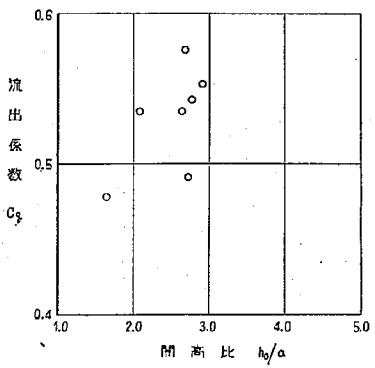
No.	流量	10cm幅当りの流量	水門上流水深
	Q l/s	g l/s	h_0 cm
1	115.5	14.40	18.18
2	87.0	10.87	14.26
3	57.5	7.19	11.22
4	55.0	6.88	11.07
5	55.0	6.88	11.24
6	86.5	10.81	14.78

No.	水門上流流速	エネルギー水頭	計算流量	流出係数
	$v^2/2g$cm	$H=h+\frac{v^2}{2g}$cm	$BH\sqrt{2gH}$l/s	m
1	3.23	20.41	326.6	0.354
2	2.05	16.31	233.2	0.373
3	1.69	12.91	164.3	0.340
4	1.37	12.44	155.3	0.354
5	1.40	12.64	159.1	0.346
6	1.91	16.69	241.4	0.358



備考　現地水頭に直す時は（模型エネルギー水頭−10）÷2＝現地エネルギー水頭を用いればよい。

図—7　水門開高6.00cmの流出係数



図—8　水門開高と流出係数の関係

IV計算による分流の概算設計

〔1〕 放水路及び市内派川の粗度係数

i）放水路の粗度係数

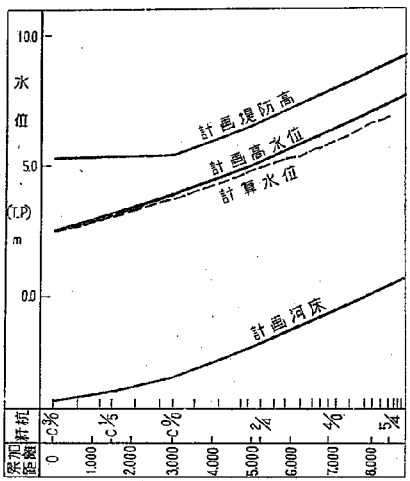
放水路は現在開削中で粗度係数の実測資料は全然ない。従って改修計画で採用している低水路 $n=0.025$，高水敷 $n=0.030$ の値を用いた。又低水路と高水敷とに分けない全断面で考える場合の前記粗度と同等な粗度（等価粗度）をマニング式から逆算すると $n=0.0261$ となる。

$$A\cdot\frac{1}{n}R^{2/3}I^{1/2}=A_L\cdot\frac{1}{n_L}R_L^{2/3}I^{1/2}+A_H\cdot\frac{1}{n_H}\cdot R_H^{2/3}I^{1/2}$$

より

$$n=\frac{A\cdot R^{2/3}}{\frac{A_L R_L^{2/3}}{n_L}+\frac{A_H R_H^{2/3}}{n_H}}$$

A：断面積（$A=A_L+A_H$）
n：粗度係数
R：径深
I：水面勾配
Suffix L, Hは各々低水路，高水敷の諸量を示す。



図—9　放水路縦断水面形

ii）市内派川及び模型区域内の粗度係数

市内派川の流量観測記録は少く，水位流量曲線を描くには不充分なので河口より不等流計算をおこなった。

実測流量及びその時刻の河口水位（江波観測所水位）を用い n を仮定して計算を進め何回も試算をおこなって水位観測所の実測水位に一致する n を求めた。使用資料は表—5，計算結果は表—6 の通りである。（図—10参照）

市内派川で途中から粗度が変化しているのは河床材料，堤防の材料等の境界条件が異なるからである。

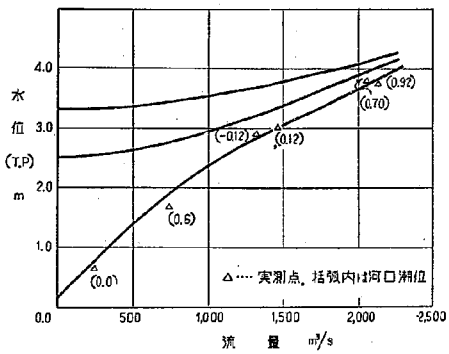
表—5　洪水資料

洪水発生年月日	三篠橋		工兵橋		牛田	西原	江波
	流量 m^3/s	水位 m	流量 m^3/s	水位 m	水位 m	水位 m	水位 m
31.8.17	1,465	3.02	521	3.37	3.93	4.76	0.12
32.7. 3	741	1.54	230	2.02	—	3.65	0.60
32.7. 4	2,057	3.81	968	4.10	4.78	5.62	0.92

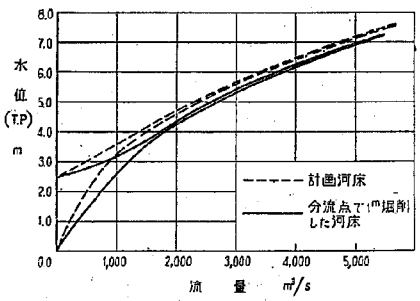
水位は東京中等潮位を基準としている。(略してT.Pと書く)

表—6　計算より求めた粗度係数

市内派川	神田川常盤橋より下流 本川 三篠橋より下流	$n=0.0210$
上記より上流西原量水標迄		$n=0.0285$



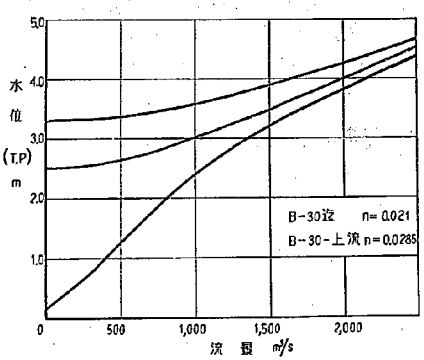
図—10　本川 B—30 Q—H Curve (三篠橋)



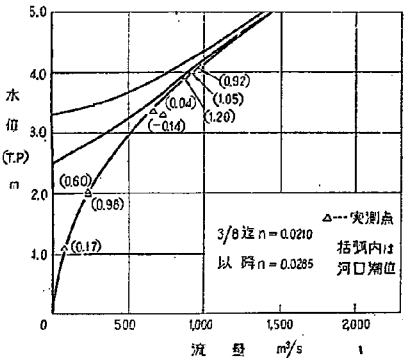
図—11　放水路 4/8 Q—H Curve

iii) 模型下流端の水位流量曲線

模型は途中で切れているので決められた水位まで下流



図—12　B—27 Q—H Curve



図—13　神田川 C—1 Q—H Curve (工兵橋)

水位を堰上げる事が必要になり，そのためには各河川の模型下流の水位—流量曲線が必要である。

放水路については 4 k800 断面で，本川はB—27断面で神田川ではC—1断面で水位を合わせることにし，おのおの水位流量曲線を求めた。図—11, 12, 13, がそれである。

〔2〕 分流点構造物の概算設計

i) 水門有効幅の決定

牛田量水標渇水位　0.35m($T.P$)〔昭30.32の平均〕

戸坂量水標渇水量　19.8m³/s〔昭24—昭30の平均〕

分流点における渇水流量を約20m³/sとし，水位流速等について現況を変えないものとする。又牛田量水標は感潮区域にあるため日に2回の定時観測資料では偏った数値があらわれると見做されるので検証実験の際に得られた水位流量曲線で河口水位が0.16m $T.P$ (平均潮位) の場合の20m³/sに相当する水位 $h=0.23$m $T.P$ を計算の対象にした。

上記の二つの仮定をもとに牛田量水標より不等流計算をおこなうと分流点の水位，断面積，流速は

$h=0.30$m $T.P$

$A=30$m²

$v \fallingdotseq 0.67$m/s

上記の値を用い水門設置箇所の最低河床 -0.50m $T.P$ を水門の敷高とすれば必要水門幅は

$$B=\frac{20}{0.67\times 0.80}=37\text{m}$$

将来上流ダムの流量調節による渇水量の増大をみこんで

$B=40$m

とする。

ii) 固定堰の堰高堰巾の決定

(1) 水門に流量を負担させない場合

計画流量6,000m³/sが流下した時に水門の操作方法を如何にするかによって堰負担流量が違ってくる。

従ってまず水門を完閉して水を流さないこととして堰

の諸量を決めた。

固定堰上流のエネルギー水頭は，放水路へ4,000m³/s流すに必要なエネルギー水頭で与えられる。放水路を不等流計算した結果　$H=7.46\mathrm{m}T.P$

堰高は越流堰測定実験で述べた如く高い程堰下の流速は大きくなる。又低くなると跳水がおきず摩擦による損失のみによってエネルギーが失われ流速の大なる個所が比較的長区間にわたって生ずることが予想される。

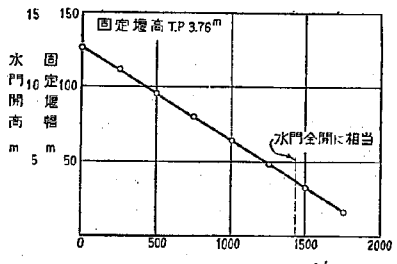
分派点の放水路高水敷の高さ程度を堰高の一応の目安とすれば　堰高 $3.76\mathrm{m}T.P$

式（Ⅲ—1）及び図—3より $Q=2{,}000\mathrm{m}^3/\mathrm{s}$ を越流させるに必要な堰幅を計算すれば

$B=126\mathrm{m}$

2）水門にも流量を負担させる場合

洪水流量を水門にも流す場合は，それに対応した量だけ堰巾を狭ばめるなり又は堰高を変えるなりせねばならない。前者の場合を，越流堰実験，水門流出係数実験等から得られた結果を利用して求めれば図—14の通りである。



図—14　水門開高と固定堰幅との関係

実験Ⅰ—4でこの妥当性を検討した。

$$2{,}000-Q_s=m\cdot B\cdot H\sqrt{2gH}$$

Q_s：水門流出量

m：越流係数 0.496

H：越流エネルギー水頭，7.46−3.76

$=3.7^{\mathrm{m}}$（A—1断面）

g：重力の加速度 $9.8m/sec^2$

又堰高を変える場合の一例として水門開高2.50m×4連とした場合の堰幅堰高の関係を求める。式（Ⅲ—3）図—8より水門流出量は

$$Q_s=0.555\times40\times250\times\sqrt{19.6\times7.46}$$
$$=671\mathrm{m}^3/\mathrm{s}$$

堰越流量は式（Ⅲ—1），図—3を使って計算を進めると表—7の通りである。

［3］ 放水路の河道設計

ⅰ）平衡河床

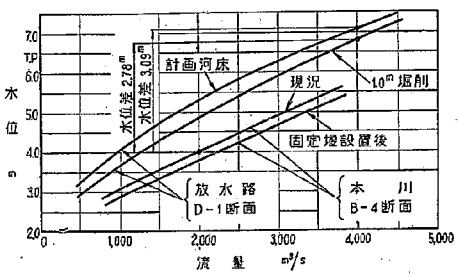
放水路及び市内派川の不等流計算並びに検証実験の結果，図—15に示すごとく分派点で3.09mの水位差が生じていることが判明した。このため後述するように本川固定堰下で約10.5m/sの流速が生じている。

表—7　　堰高—堰幅の関係

堰高 (m T.P)	越水流頭 (m)	越流係数	単位幅越流量 (m³/s)	堰幅 (m)
0.50	6.96	0.474	38.50	34.5
1.50	5.96	0.470	30.28	43.9
2.50	4.96	0.468	22.88	58.1
3.50	3.96	0.499	17.41	76.3
4.50	2.96	0.480	10.91	121.8
5.50	1.96	0.462	5.61	236.9

備考　堰高3.00m T.P以下は越流堰（Ⅱ）の越流係数の値を，3.00mT.P以上については越流堰（Ⅰ）の値を近似的に採った。

この落差を出来るだけ小さくするため放水路河床を分派点で1.0m掘削することにしその平衡勾配を掃流砂量の見地から求めた。



図—15　水位—流量曲線

掘削にあたっては掘削土量をすくなくするため出来るだけ上流断面から掘削をはじめること，護岸の根入れ並びに潮のあがるのを防ぐため高水敷は掘削しないこと，平水の蛇行乱流をふせぐため低水路の拡幅はさけること，等の制約により，0k00の杭より低水路のみを掘削する案をとった。D—1断面における水位は計画河床の場合7.08m，1.0m掘削した場合は6.78mで約0.30mの水位低下みた。

限界掃流力に岩垣公式を用いると

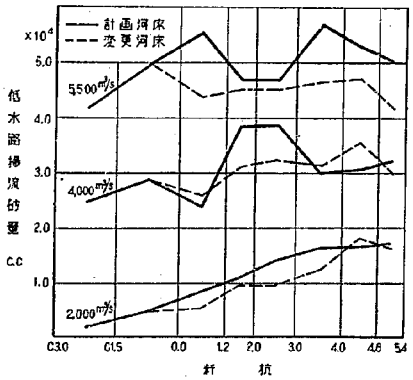
$\tau_c=37.93\,\mathrm{cm}^2\,\mathrm{sec}^{-2}$　（D=4.72mm）

掃流砂量算出に佐藤—吉川—芦田公式を用いると図—16，17に示す結果が得られた。新しい河床勾配は表—8に示す。

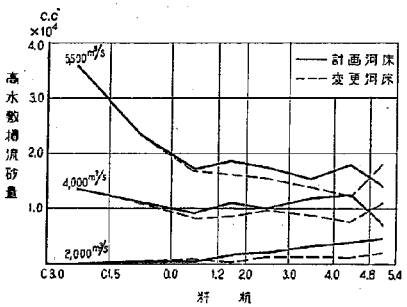
ⅱ）固定堰の堰高の決定

分派点における現況河床を図Ⅳ—10に示す。

渇水量を本川と放水路に各々9：1の比率で配分させる必要があるので，分派点で1.0m掘削した場合には放水路側にも固定堰が必要である。牛田量水標の記録より



図—16　低水路掃流砂量



図—17　高水敷掃流砂量

表—8

杆杭	計画河床		変更河床		備考
	河床高m	河床勾配	河床高m	河床勾配	
0.0	−3.084	1/1750	−3.084	1/2653	河口より0.0までは計画案どおりである。
2.0	−2.023	1/1510	−2.384	1/2165	
4.0	−0.660	1/1420	−1.440	1/1716	
6.0	0.619		−0.381		

全渇水量を 20m³/s として不等流計算した結果，分派点水位は 0.38m T.P である。低水路巾は 100m であるから接近流速を1.0m/sと仮定すれば

$$(0.38-S)\times 100m\times 1.0m/s = 2m^3/s$$

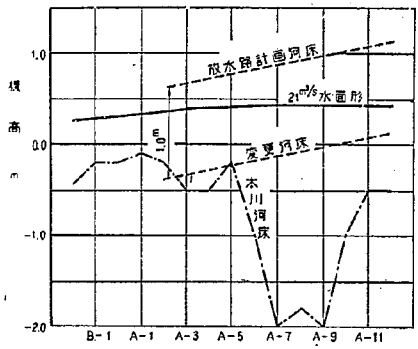
S＝0.36m T.P　　S：堰高 T.P

従って堰高0.38+0.36＝0.74mの固定堰が必要である。

Ⅴ．分流に関する模型実験

〔1〕 実験に関する基礎条件

1）計画流量 6,000m³/s に対して放水路4,000m³/s，市内派川 2,000m³/s のように流量配分を行う。



図—18　現況河床縦断図

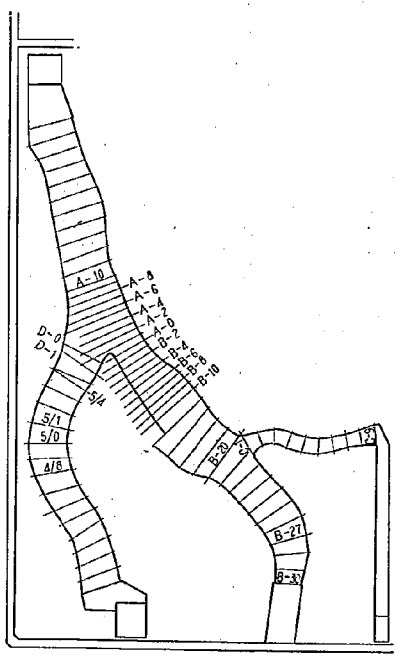
2）計画流量以外の諸洪水に対しても上記の比率で流量配分を行う。

3）年平均渇水量 20m³/s に対しては放水路 2 m³/s，本川18m³/sの比率で配分する。

4）分流点の計画に対しては計画河口水位2.50mを用いておこなう。

5）放水路の粗度係数は低水路 0.025 高水敷 0.030 である。

6）すでに工事施工中の堤防に関してはその法線を変えない。



図—19　模型平面図

〔2〕 模型

篠崎分室の敷地の大きさ，及び実験流量等の関係から模型は歪めないで1/50とし，且つ左右を現地と反対にして製作した。その範囲はA—26断面よりB—30断面及びC—9断面まで，放水路は4k000までである(図—19)。模型はモルタルで仕上げ固定床とし，水門，堰等は精確に製作した。実験流量は上流の幅2.0mの矩形堰で総流量を，放水路流量及び神田川流量は各々その下流の幅2.0m及び0.60mの矩形堰で測定した。

模型の相似律は流体の運動方程式中の慣性項と摩擦損失項とを同時に相似になるようにし，且つ摩擦抵抗法則はManning式を用いた。模型の諸縮尺は次の通りである。

平面縮尺	1/50	流速縮尺	1/7.071
鉛直縮尺	1/50	粗度縮尺	1/1.919
流量縮尺	1/17678		

〔3〕 検証実験

i) 現況河床模型の検証

模型は昭和31年実測の河床で製作し，その検証をおこなった。現況では放水路へ洪水が殆んど流れない状態である。検証実験は先ずモルタル河床に種々の流量を流して，モルタル河床の粗度係数を求め，それが前記粗度縮尺より求められた模型粗度に一致してしない場合には，相似が成立つように河床の粗度を修正する。修正はモルタル河床にアスファルト乳剤を塗布しそれに粒径4mmの砂利をつけておこなった。検証に用いた資料は表—9である。現地の粗度 $n=0.0285$ に対して模型に必要な

表—9　　洪水資料

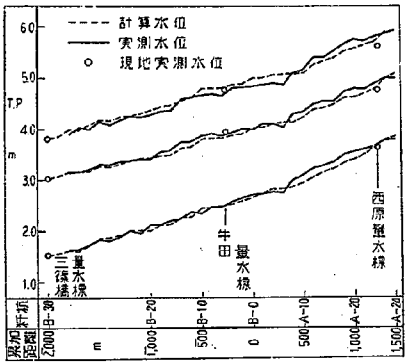
発生年月日	流量	西原水位	牛田水位	工兵橋水位	三篠橋水位
昭	m³/s	m	m	m	m
31. 8.17	1,990	4.76	3.93	3.37	3.02
32. 7. 3	970	3.66	—	2.02	1.54
32. 7. 4	3,030	5.61	4.78	4.10	3.81

(注) 流量は戸坂流量観測所のもの，水位はT.P.Oを基準としている。

表—10　　本川現況の模型粗度実測値

	修正前	修正後	100cm²当りの平均砂利数
B—26～B—22	0.0114	0.0145	20.45
B—18～B—4	0.0119	0.0145	25.50
A—4～A—18	0.0113	0.0147	21.00
平均	0.0115	0.0146	

粗度は $n=0.0148$ であるから表—10から所定の粗度はほぼ得られたものとみなし前記の三洪水を流し水位，流況，本川と神田川の流量配分等を測定した結果，その妥当性を確認した。



図—20　本川模型区域の検証実験

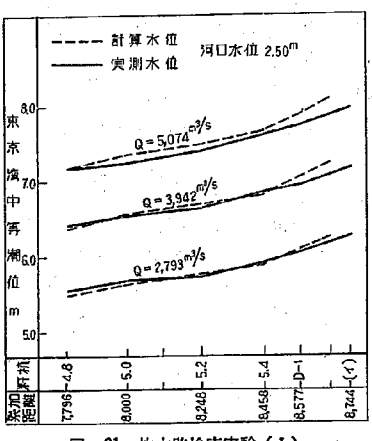
ii) 放水路模型の検証

放水路は高水敷と低水路との粗度係数が異なるので，それに応じて粗度修正のために河床につける砂利の数も違わせた。実験(Ⅰ)(Ⅱ)は計画河床で作り実験(Ⅲ)(Ⅳ)は分流点で1.0m掘削した河床で作ったがいづれの場合も検証の結果は表—11の通りとなり良い結果が得られた。(図—21, 22)

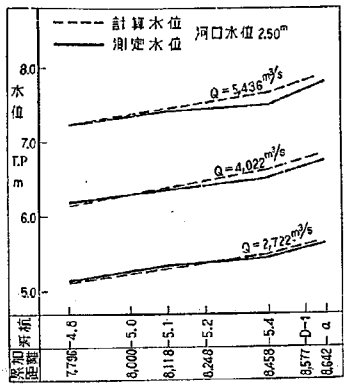
表—11　　放水路の模型粗度実測値

		修正前	修正後	100cm²当り平均砂利数 低水路	100cm²当り平均砂利数 高水敷
実験Ⅰ.Ⅱ	4k500—5k500	0.0093	0.0128	7.6	9.1
実験Ⅲ.Ⅳ	〃	—	0.0126	7.0	9.0

(注) 修正前の河床は木ごて仕上げのモルタル河床である。



図—21　放水路検床実験(Ⅰ)



図—22　放水路模床実験（II）

iii）改修計画断面の検証

本川の現況模型と改修計画模型とを比較すると断面全体に改修を加える個所は全然ない。殆んどが堤防位置の移動とわずかな河床掘削のみである。

従って本実験では現況模型で得られた粗度をそのまま踏襲し改めて検証はおこなわなかった。

〔4〕本実験

i）実験概要

実験は表—12に示すような4種類の場合についておこなった。改修計画案を基にして実験Iをおこない次いでその悪い点を逐次なくしてゆく方法をとった。

実験水位は放水路4k800断面でIV—〔1〕で求められた水位に一致するよう下流端の水位調節堰で調節をおこなった。本川はB—27断面で神田川はC—1断面でおこ

表—12　実験種類一覧表

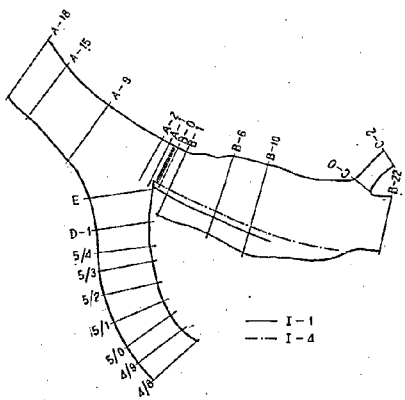
実験名	模型次元 堤防法線	放水路構造物	本川構造物	実験流量 m^3/s	測定項目
I—1	改修計画案に同じ。	なし 計画河床	水門 巾10m×4連 敷高—0.50m 右岸に設置 固定堰 高 3.76m 巾 126m	8,000 6,000 5,000 4,000 3,000 2,000	流量配分 水位 死水域 流向 流速
I—4	I—1に同じ	I—1に同じ	水門 I—1に同じ 固定堰 高 3.76m 巾 106m	6,000 5,000 4,000 2,000	流量配分 水位 死水域 流向
II—1	本川の河幅を狭める。 流頭部を上流に突き出す。	なし 4 k800水位を分流点で1m掘削した場合の水位に合わす。	なし 低水路 高—0.50m 巾 37.50m	8,000 6,000 5,000 4,000 3,000	流量配分 水位 死水域 流向 分流境界線 流速
II—2	本川下流の拡幅の割合を変える。	II—1に同じ	II—1に同じ	6,000	II—1に同じ
III	本川の河幅をIIの場合よりやや拡げる。 流頭部を下流に引く。	固定堰 高 0.35m 巾 102.5m	固定堰 高 0.50m 巾 28m 低水路 高—0.50m 巾 26m 高さ1.0mの梯型水制を堰下流に設ける。	8,000 6,000 5,000 4,000 2,000	流量配分 水位 死水域 流向 流速
IV—1	分流点上流右岸堤防が左岸堤防と平行になる様に河の方へ押し出す。	IIIに同じ 位置が下がる。	固定堰 高 3.10m 巾 82.8m 水門 巾 10m×4連 敷高 —0.50m 右岸に設置	6,000	I—4に同じ
IV—2	IV—1に同じ	IV—1に同じ	固定堰の角度を変える。 他はIV—1に同じ	8,000 6,000 5,000 4,000 2,000	I—4に同じ

実験名	横型次元			実験	測定項目
	堤防法線	放水路構造物	本川構造物	流量 m³/s	
Ⅳ—3 ～Ⅳ—7	Ⅳ—1に同じ	Ⅳ—1に同じ	水門を左岸に置く	6,000	流量配分 水位 死水域 流速
Ⅳ—8, 9	Ⅳ—1に同じ	Ⅳ—1に同じ	Ⅳ—2に同じ 堰下流に高0.50mの副ダムを設ける	8,000 6,000 4,000	Ⅳ—3に同じ

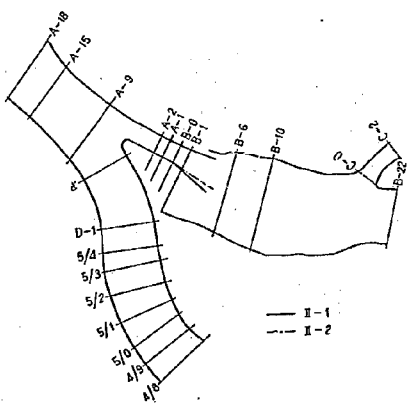
なった。水位は0.1mmまで正確に読みとれるポイントゲージで，流速はピトー管で，マノメーターの読みは0.1mmまで目読(ボクドク)出来るものを用いた。流向は水深方向に5％と95％の点で，針の先に糸をつけたものにより測定した。死水域，分流境界線等は紙片又はアルミ粉を流して求めた。

ii）各案の堤防法線形状及び構造物の次元

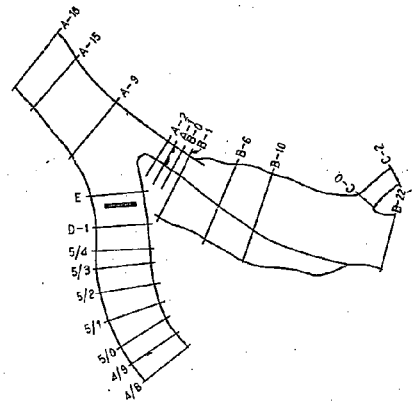
各案の堤防法線形状及び構造物位置は図—23, 24, 25, 26に示す。又実験Ⅰ及びⅣ—8で用いた本川固定堰は図—2堰(a)であり水門は図—5に示したものである。



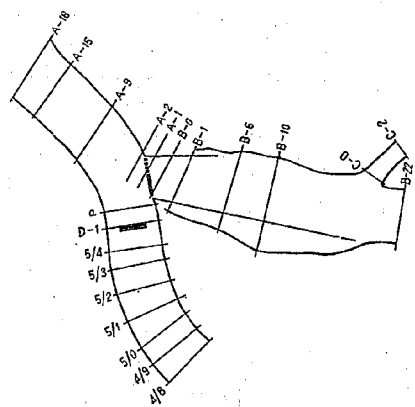
図—23　実験—Ⅰ



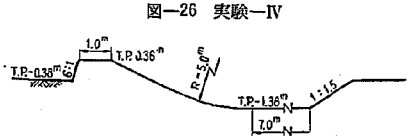
図—24　実験—Ⅱ



図—25　実験—Ⅲ



図—26　実験—Ⅳ



図—27　放水路固定堰横断図

実験Ⅲの堰及び水制は図—27に示す。

iii) 流量配分

各案について放水路と本川との分流量及び本川と神田川との分流量を測定した。実験流量は8,000m³/sから2,000m³/sまでの範囲でおこなった。結果を表—13, 14, 図—28, 29に示す。放水路への分流量は水門の操作によって異なるので各案について実験で採った水門の操作方法を述べる。

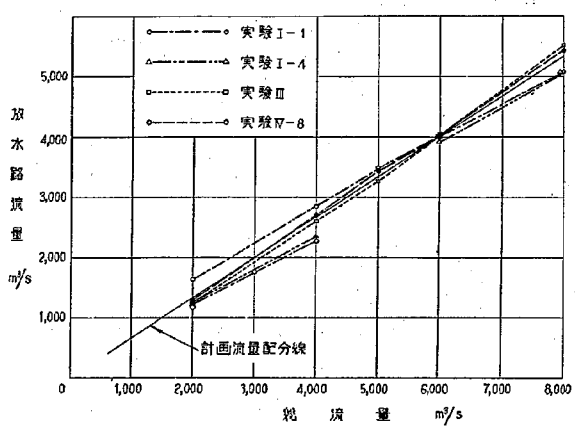
表—13　河口水位2.50mの場合の流量配分

実験名 / 河名 / 流量(m³/s)	実験Ⅰ—1 本川	実験Ⅰ—1 放水路	実験Ⅰ—4 本川	実験Ⅰ—4 放水路	実験Ⅲ 本川	実験Ⅲ 放水路	実験Ⅳ—8 本川	実験Ⅳ—8 放水路
8,000	2,927	5,073	2,926	5,074	2,481	5,519	2,564	5,436
6,000	1,995	4,005	2.058	3,942	1,978	4,022	1,978	4,022
5,000	1,509	3,491	—	—	1,721	3,279	1,553	3,477
4,000	1,163 (1,711)	2,837 (2,289)	— (1,631)	— (2,369)	1,375 —	2,625 —	1,278 (1,481)	2,722 (2,519)
3,000	— (1,223)	— (1,777)	— —	— —	— —	— —	— —	— —
2,000	365 (763)	1,635 (1,237)	— (724)	— (1,276)	731 —	1,269 —	— (701)	— (1,299)

備考　括弧内の数字は水門を全開にした場合の配分量である。

表—14　河口水位2.50mの場合の流量配分

現況 神田川	現況 本川	実験名 / 河名 / 総流量	実験Ⅰ—1 神田川	実験Ⅰ—1 本川	実験Ⅲ 神田川	実験Ⅲ 本川	実験Ⅳ—8 神田川	実験Ⅳ—8 本川
1,018	2,482	8,000	827	2,100	721	1,760	746	1,818
866	2,134	6,000	546	1,449	566	1,412	559	1,419
543	1,474	5,000	431	1,078	490	1,231	451	1,102
260	711	4,000	(486)	(1,225)	377	998	(463)	(1,018)
		3,000	(359)	(864)	—	—	—	—
		2,000	(231)	(532)	203	528	—	—



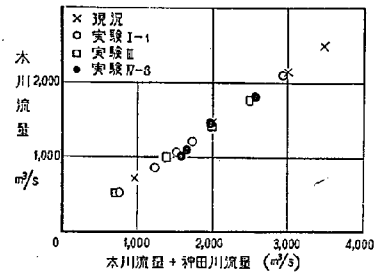
図—28　流量配分図

(1)実験Ⅰ—1　流量4,000m³/sまでは水門を全開にしておき4,000m³/sを越える場合は完全に閉めて水を流さない。

(2)実験Ⅰ—4　流量4,000m³/sまでは水門を全開にしておき，4,000m³/s以上の洪水に対しては4門共敷高より1.50mの開高をもたせる。

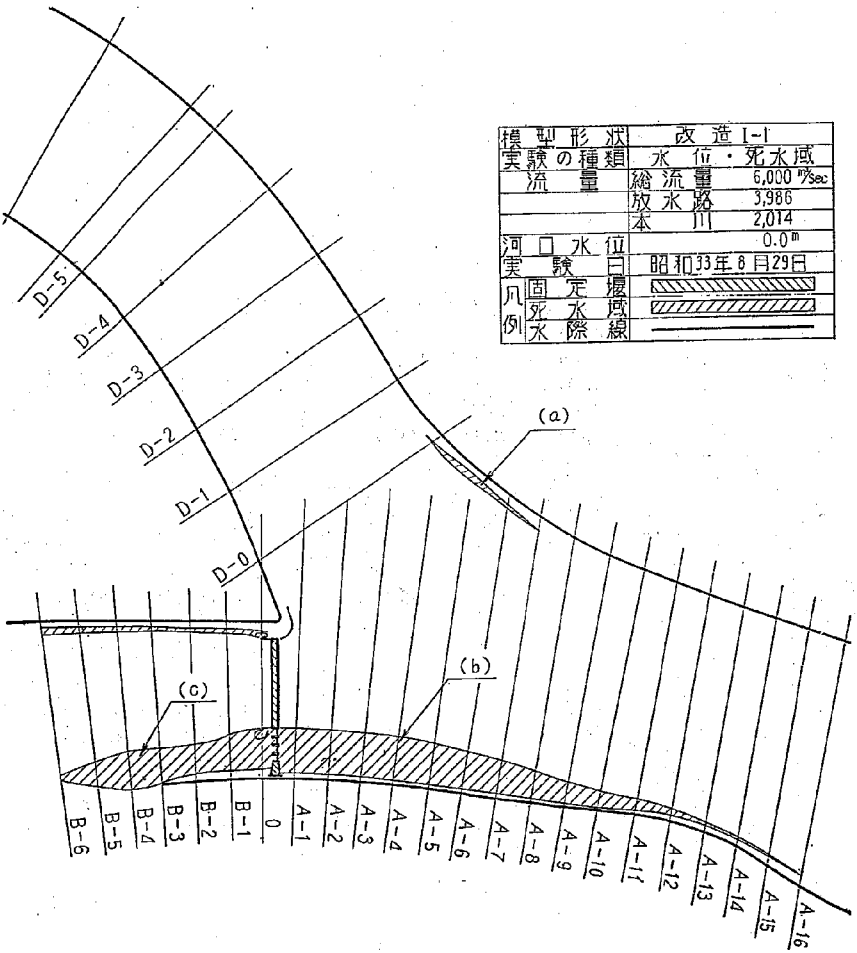
(3)実験Ⅳ—8　流量3,000m³/sまでは水門を全開にしておく。4,000m³/sに対しては岸に近い水門を完開，他の3門を敷高より2.45mの開高に保つ。それ以上の洪水に対しては4門共2.45mの開高にする。

図Ⅴ—10に示す如く計画流量以下の洪水に対しては配分量の偏よりか水門による調節能力の範囲内にあるので操作方法によって所定の流量配分することが可能である。計画流量6,000m³/s以上の異常洪水に対しては実験Ⅰ—1は本川へ流入する量がないため水門調節は不可能である。又実験Ⅲ及びⅣ—8は放水路へ多く入るので，この場合



図—29　本川流量配分図

は水門扉をすこし開けることによって計画配分線に一致させることが可能である。しかしいづれの場合にしろ計画配分線からのかたよりは4％を越えない程度である。河口水位が0.16m（平均潮位）の場合の配分量の変化は諸流量をとをして2％以内である。本川は固定堰と水門によって射流現象が生じ，下流の水位変化はこれらの構造物のため上流にまでおよばない。従って河口水位が低いと放水路へ多く流入し，高くなると本川へ多く流入する。本川側分流点より神田川分流点までの間で堤防法線を変えた場合にそれが市内派川に如何なる影響を与えるかを知るために本川と神田川との流量配分を測定し現況

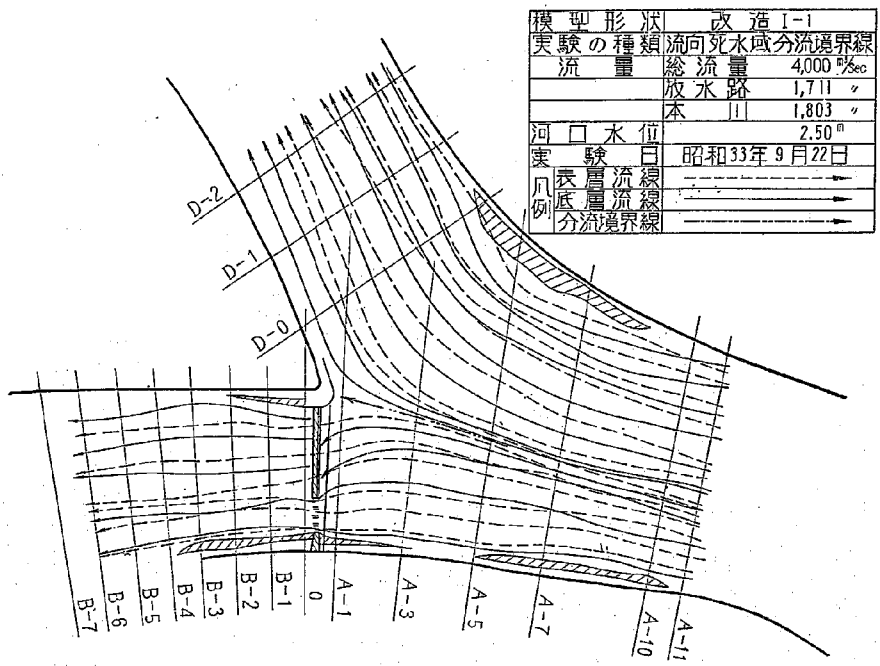


図—30　実験Ⅰ—1　死水域

と比較検討した。実験Ⅰと実験Ⅳにみる如く相当の変化を河状に与えても図—29でわかる如く分流量は殆んど現況と変らないことが判明した。

Ⅳ）流向及び死水域

(1)実験Ⅰ—1　　$Q=6{,}000 m^3/s$ の場合を図—30に示す。死水域(a)が放水路入口右岸側5K900より6K500迄の間に生じている。この死水域は流量が小さくなる程拡大してゆく傾向にある。これは高水敷の水深が浅くなるためと考えられる。水門が完全に閉まっているためその上流側はA—14附近まで死水域(b)が生じ，又水門下流側もB7断面あたりまで死んでいる。(c)。いづれも一部は1.0m/s～1.5m/sの速さで逆流している。図—31に示す$4{,}000 m^3/s$の場合には水門を開いているので死水域(b)及び(c)は消えている。中洪水の場合に死水域(a)が大きくなるのは水門を開くから流れが水門側に引きよせられるためと考えられる。図—38をみればこのことがはっきりと判る。流況は各所に大きな死水域があるので良好とは見做せない。放水路の入口で流れは小さな曲率半径で急に曲って流入し堤防とは平行でない。従って水衝部が各所に生ずることが予想される。本川側は流線が



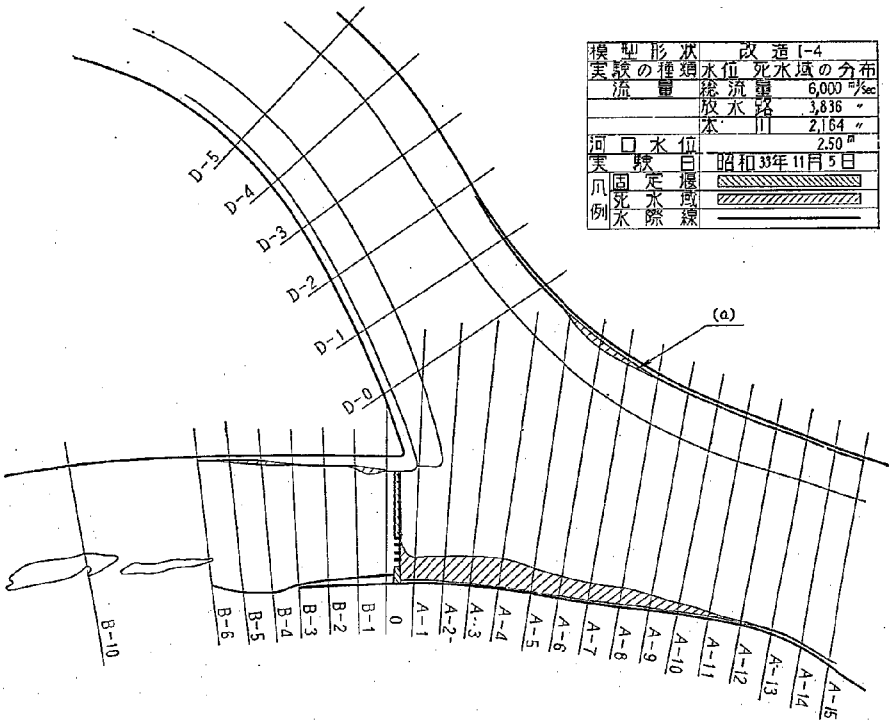
図—31　実験Ⅰ—1の流向死水域

堰に直角に越流していて，越流状況は良好である。

(2)実験Ⅰ—4　　計画流量に対して水門を4門共敷高より1.5m開けておくので実験Ⅰ—1にみられた死水域(c)は殆んどなくなっている。(図—32) 死水域(a)がやや大きくなっている。本川下流の流況は良好と思われる。堰下に生ずる射流長は実験Ⅰ—1と大差が見られない。

(3)実験Ⅱ—1，Ⅱ—2　　実験Ⅰの死水域(a)を消すために流頭部を上流に突き出し分流点上流の断面積を減らすような実験を行った。本川には構造物を設けず流入量は川幅で規制している。図—33に$6{,}000 m^3/s$の流況を示す。図から理解出来るように死水域(a)はなくなり全般として良好な流況である。

放水路の蛇行性はやや弱くはなっているが消えてはいない。本川左岸6K500附近からA—11あたりまで僅かに死水域(b)が生じているが，これはA—14，A—15断面附近で堤防法線がかなり川の方へ突き出て彎曲しているのでその裏側に当る個所である。底の分流境界線はやや放水路側により流頭部で大きく曲って本川下流に入っている。流量が小さい程この傾向は顕著になる。分派後の本川堤防法線は流心部の流線に対して3°から更に13°と拡幅されているが13°に拡がる所から水はこれに沿って流れ得ずB—1附近から，はく離して流れ，死水域を生じている。実験Ⅱ—2では13°を8°に修正して流況を観

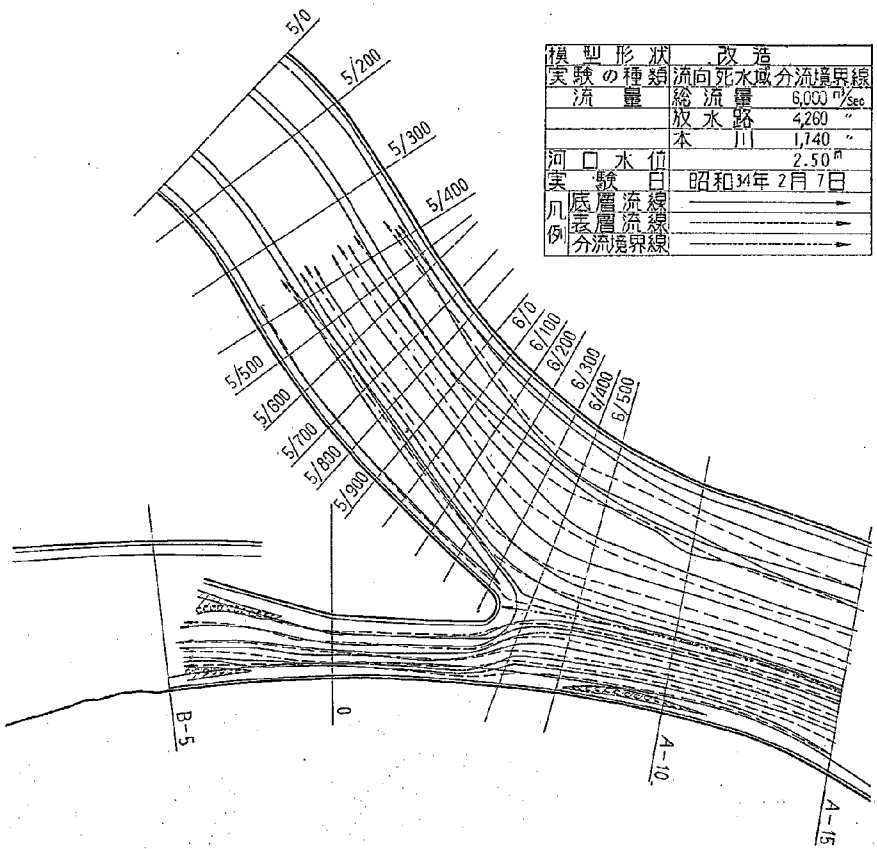


図—32　実験I—4

察した。図—34に示す如く流線はほぼ堤防に沿って流れ死水域は小さくなっている。

(4)実験III　　実験IとIIとの中間案として実験IIIをおこなった。やや実験IIに近い案である。計画流量の場合を図—35に示す。死水域(b)が実験IIに比較して大きくなっているのは分流点上流の水面積が広くなっている為と思われる。実験IIIでも死水域(a)は消えているが観察していると僅かに流れている状態で流向を測定するための糸も時々垂れ下がる状態である。これを完全になくすには本川側への分流Dを左岸側からもっと放水路寄りに移す必要があると思われる。即ち本川側に流入した流水は放水路の流速に比較して流速が大きいので水が本川側に引きつけられるためと思われる。分流境界線が放水路側に寄っていることを考えあわせると理解出来る。放水路へ入る流線は堤防法線に平行ではなく依然として下流で蛇行をおこす可能性をのこしている。放水路固定堰下流では水面に停止波が生じ流量が小さくなると顕著になる。流頭部の本川右岸に小さな渦流が生じているが，これは法線が急変しているためで実際の設計に当っては滑らかに取り付けねばならない。本川の堰を越流した流水は堰下流でjumpをおこし河心の低水路部分の水位が低く流線は中心部に集まる傾向にある。本川下流の堤防法線は実験IIの成果を利用して決めたが良好な流況が得られた。

(5)実験IV—8　　本川分流口を放水路側に近づけ，本川上流左岸側堤防を右岸と平行になるよう，川の中へ押しだした案であるが初期の意図に反して死水域(a)は完全には消えなかった。図—36にみられる如く放水路の流況は各案を通して最良と思われる。本川上流側の流況は右岸側A—2よりA—15までの間に死水域と呼び得る程のものはなくなっている。本川堰及び水門下流の流況は流心がほぼ河の中央に来ているので良好と思われる。後述する如く実験IVは斜め越流であるため堰の位置によって下流流況が異なる。実験IV—1からIV—8まで堰位置を種々に変えて実験をおこないIV—8が最良であることが判った。本川下流右岸に比較的大きな死水域があるが計画流量以上になるとこれが小さくなる。副ダムを設けると流線はそれを越流する前に横方向の移動を示し，越流後の流線は副ダムを設けない場合と比較して堰に直角な方向に曲げられる。堰下流を掘り下げてバケットを設け



図—33　実験Ⅱ—1の流向，死水域

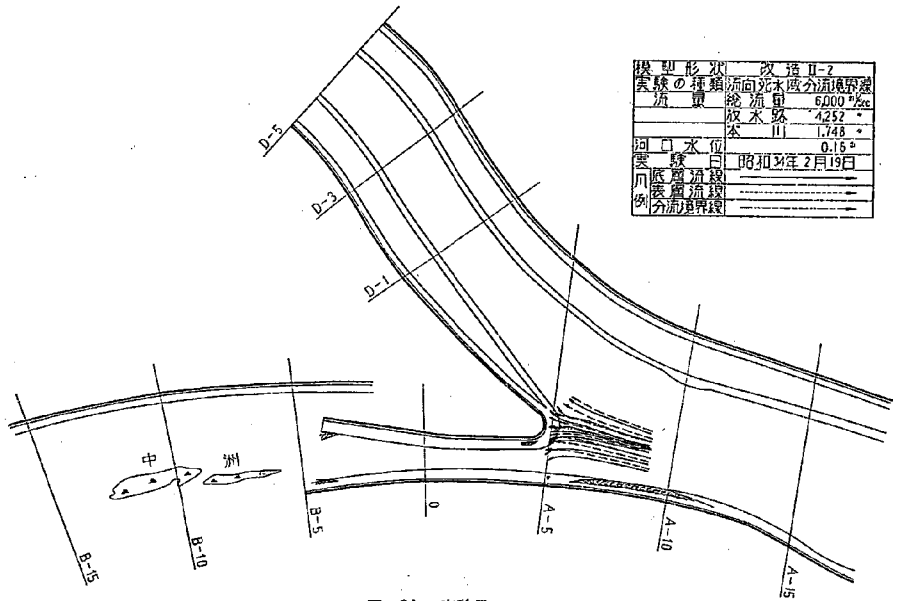
るとバケット内でらせん流を起し甚はだしい場合には木片を一端に落すと回転しながら堰の他端まで移動して後下流に流れ去る。流況を一様にするうえからはバケット型よりも副ダムの方が効果がある様に考えられる。分流境界線は流頭部より放水路側約15mの個所にある。

V）流　速

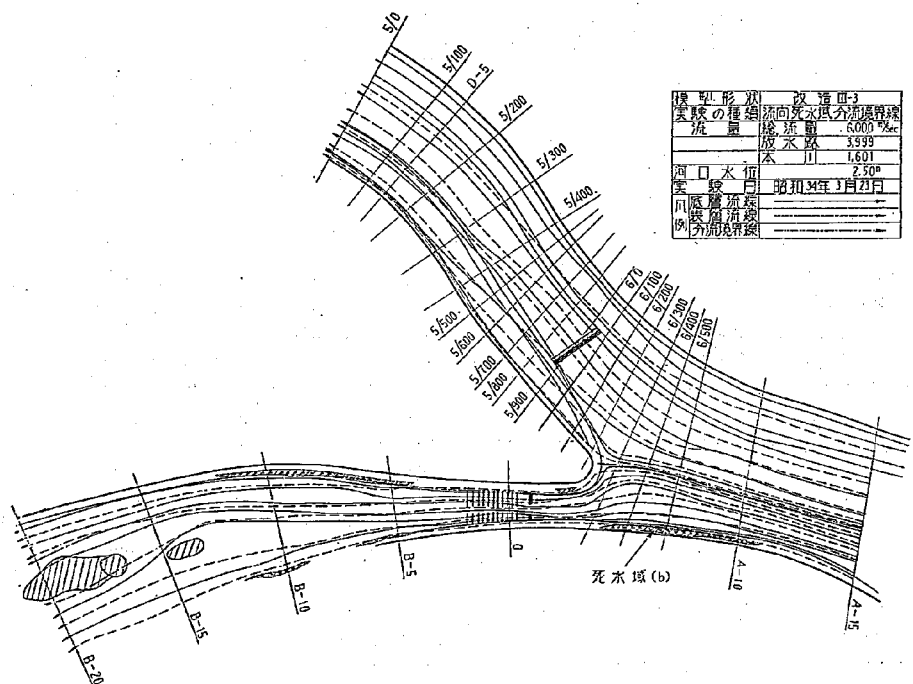
(1)本川上流の流速　流速は分流点上流A—9断面で6点法によって測定した。結果は図—37に示す。実験Ⅰ—1では流速最大の点が右岸放水路寄りにあるがこれは水門をしめているためと思われる。水門を全開にして4,000 m³/sを流した時は流れが二つに分けられる形となり川の中央にも流速大なる個所が生ずる（図—38)。実験Ⅱでは流速最大点が完全に分離して生じしかも右岸側本川流入口上流の方が規模が大きい。平均流速は実験Ⅰ—1では3.30m/s，Ⅱ—1では3.19m/sである。実験Ⅲは平均流速が3.55m/sでやや前実験に較べて速くなっている。放水路を1m掘削した影響であると思われる。実験Ⅳでは流心が川の中央よりやや左岸側に寄った点に生じ平均流速は3.73m/sである。

(2)放水路入口流速　実験Ⅰ—1はE断面で，Ⅱはd断面でⅢはE断面で，Ⅳはa断面で各々6点法により横断流速分布を測定した。6,000m³/sの測定成果を図Ⅴ—20に示す。

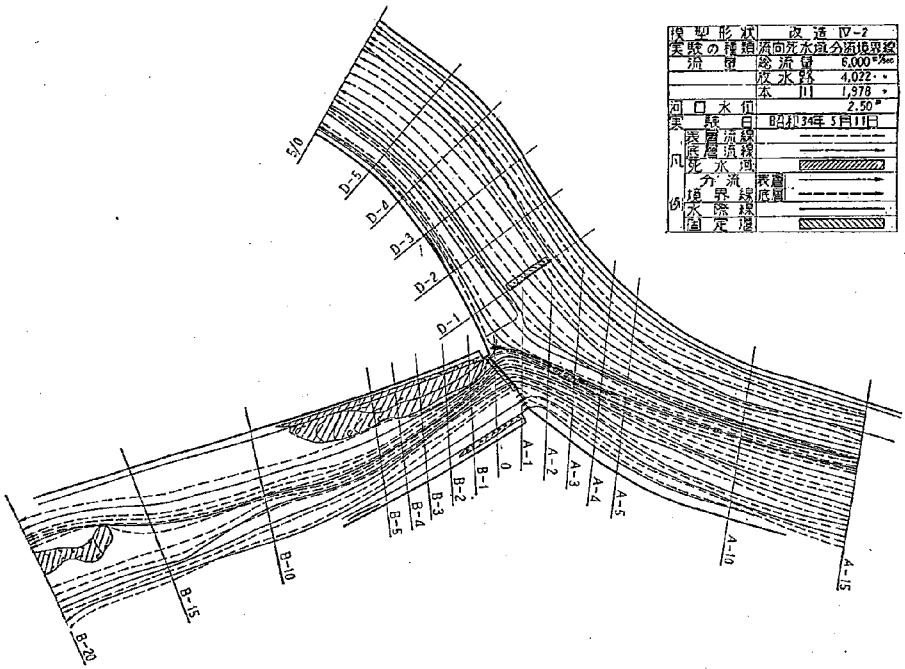
実験Ⅰ—1ではやはりA—9断面と同じく右岸寄りに流心部が見られる。実験Ⅱでは流頭部をつき出したためこの傾向が助長されている。平均流速は実験Ⅰで2.31m実験Ⅱで2.45m/sである。実験Ⅲは左岸高水敷上が相当速く流れ，堤防法面保護の面で注意せねばならない。流心は川のほぼ中央にある。平均流速は3.07m/sである。実験Ⅳでは流心が川のほぼ中央にあり，等速線も比較的左右対称である。平均流速は2.49m/sである。実験Ⅳ—8では計画流量で水面，水深の6割の点，河床，の3点



図—34 実験II—2



図—35 実験—III



図—36　実験IV—8

の平面流速分布図を測定した。図—40，41，42に示す。

(3)本川の堰及び水門下流の流速　　太田川分水をおこなうためには何らかの形で本川へ流入する流量を制限しなければ計画流量配分を満足させることは出来ない。

検証実験の際，本川を現況川幅のままとし手を加えないで計画流量6,000m³/sを流した所本川へ約4,000m³/s放水路へ2,000m³/sという計画とは逆の配分になった。2,000m³/sがB—10断面で持つエネルギー水頭は約4.20m程度であるから500m程の区間で3.00m近くのエネルギー水頭を減殺せねばならない。各案について平均流速が縦断的にてい減してゆく状況を比較すれば図—43の如くになる。

実験Ⅰ及び実験IVは堰下で跳水がおこり，エネルギーがそれによって失なわれ，B—4断面あたりで流速は4m/sに落ちている。それに反し実験Ⅱ及びⅢはエネルギーを長区間にわたって周辺の摩擦損失のみによって徐々に減らしてゆこうとするものであり，流速が4m/sに落ちるまでに実験Ⅰ，IVの2倍の区間が必要である。従って河床維持の床留め工が長区間にわたって必要となり工費が増大すると考えられる。

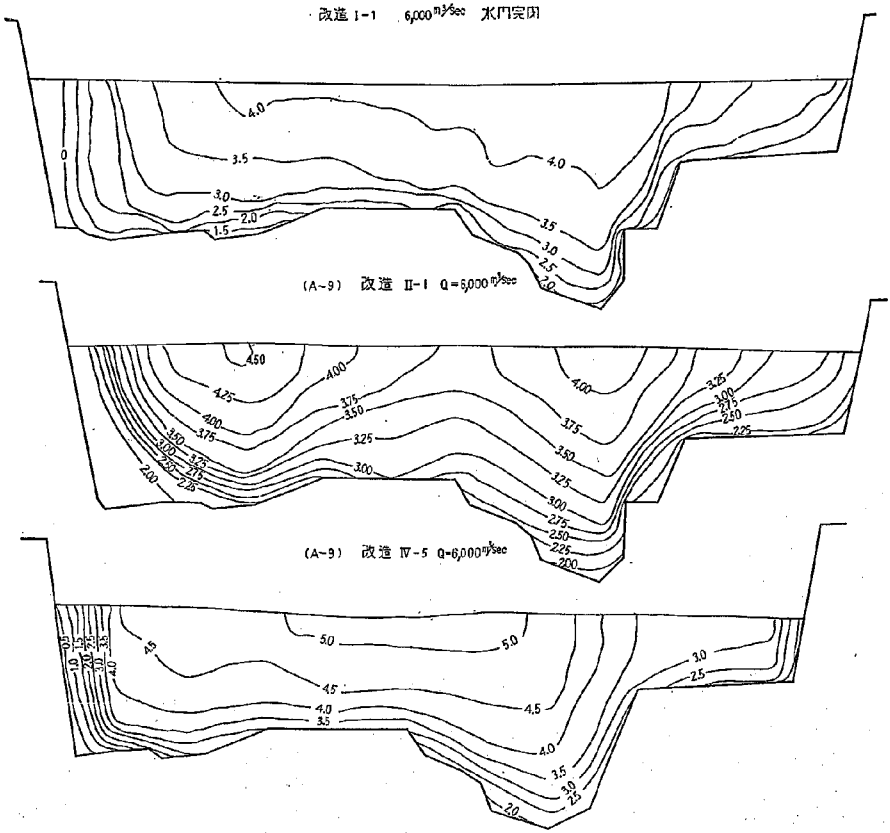
vi）水　位

各案で測定された水位は図—44に示す。いずれも計画高水位よりも低いので問題はないと思われる。本川下流の縦断水面形は図—45の通りである。

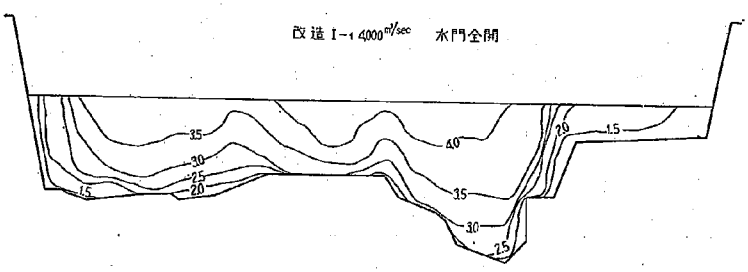
vii）エネルギー減殺方法

実験Ⅰ及びIVでは本川固定堰下の射流流速が約10.5m/sもあり且つ射流長が30～40mもあるので水叩きの長さが相当必要であることが判った。又現況にみられる流れに復するにはB—10断面程度まで必要であり河床安定上良くないと考えられる。又河口水位が異常に低くなった場合射流が常流に復さないで長区間にわたり流れることも予想される。このため堰下流にsillをおいたりバケット型にしたりしてjumpを確実に起し且つ流速を小さくする実験を実験IVの水門位置及び堰位置を決める際に同時におこなった。各型の平面流速分布図を示せば図—46①②③④⑤⑥⑦⑧⑨⑩⑪の通りである。前記のうち実験IV—1，IV—2，IV—8，IV—9水門が左岸にあり実験IV—4，IV—5，IV—6，IV—7は水門が右岸にある。IV—2とIV—6は堰と下流堤防法線との相対位置が全く同じ条件であるがIV—6は流心が右岸部に寄っている。IV—6は河床を2.0m掘り下げたバケット型であるからIV—2よりもエネルギーが殺され流況がより一様に平均化されるはずであるが図に示す通りの結果である。

ii）で述べた様にバケット型はその中でラセン流を起



図—37 6,000m³/s A—9 断面 流速分布図



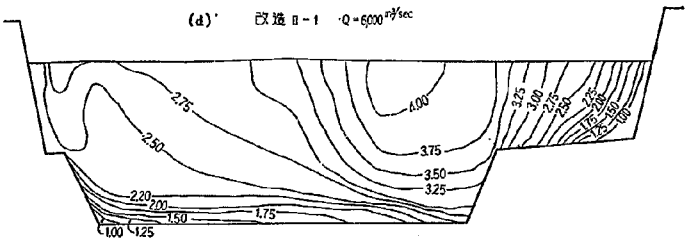
図—38 実験 I—1

し斜め越流の性質を助長するためと思われる。

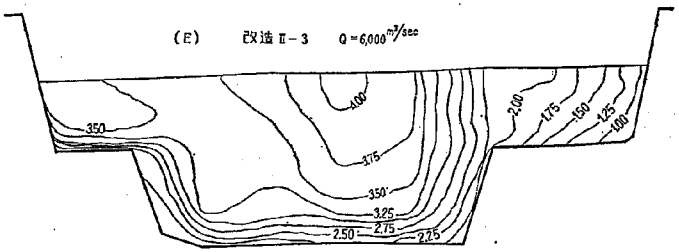
図V—26より各断面の最大流速をとり縦断的な流速でい減状態をみれば図—47の通りである。又各々の堰の平面位置は図—48のとおりである。図中のIV—8及びIV—9にみる如くバケットとsillを併用する場合のsill位置とsillのみをおく場合の位置とは異なる。

又概算によれば−2.50mT.Pまで掘り下げれば，バケット内で跳水がおきるに充分な水深が得られるのであるが，実験結果は，バケット内を射流で通過し，その下流で跳水がおきた。IV—9の如くsillを併用するとバケッ

(d)' 改造 II－1 Q＝6000 m³/sec

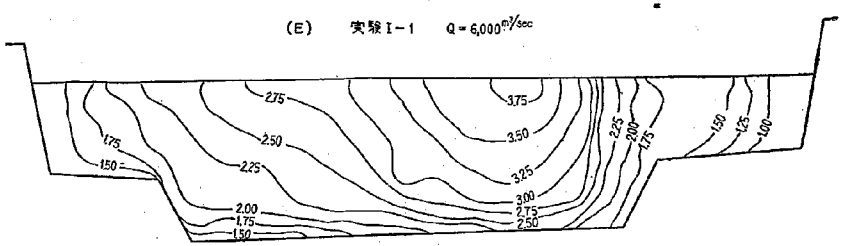


(E) 改造 II－3 Q＝6,000 m³/sec

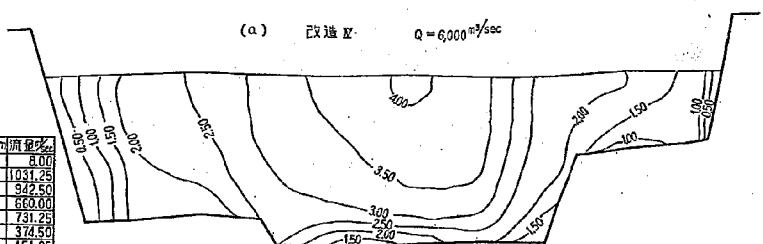


平均流速 m/sec	断面積 m²	流量 m³/sec
4.63	2.5	11.6
3.88	13.5	52.4
3.63	15.7	57.0
3.38	32.0	108.2
3.13	18.2	57.0
2.68	7.7	20.7
2.63	7.1	18.7
2.38	7.5	17.9
2.13	10.3	21.9
1.88	6.2	11.7
1.63	3.2	5.2
1.38	3.0	4.1
1.13	2.5	2.8
0.88	1.5	1.3
計	130.4	390.8

(E) 実験 I－1 Q＝6,000 m³/sec

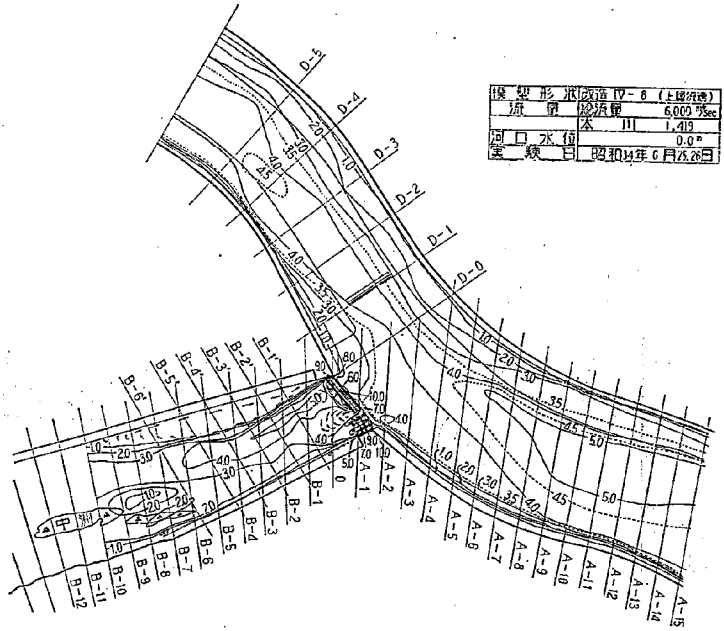


(a) 改造 IV Q＝6,000 m³/sec

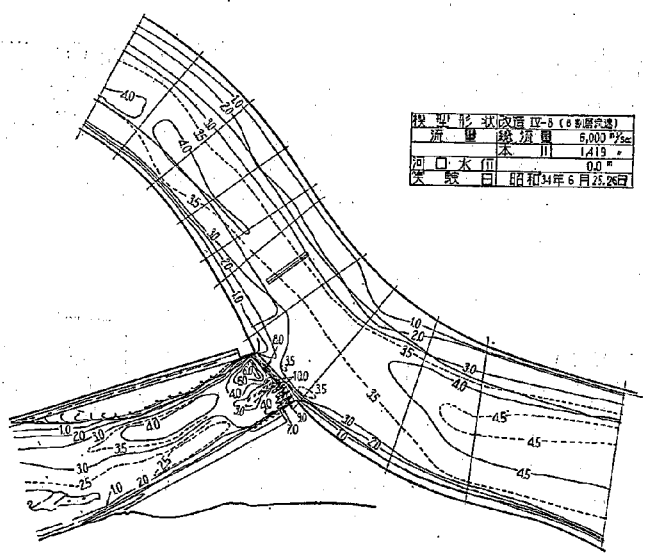


平均流速 m/sec	断面積 m²	流量 m³/sec
4.00	20	8.00
3.75	275	1031.25
3.25	290	942.50
2.75	240	660.00
2.25	325	731.25
1.75	214	374.50
1.25	121	151.25
0.75	69	51.75
0.50	7	3.50
0.25	48	12.00
計	1,609	4036.00

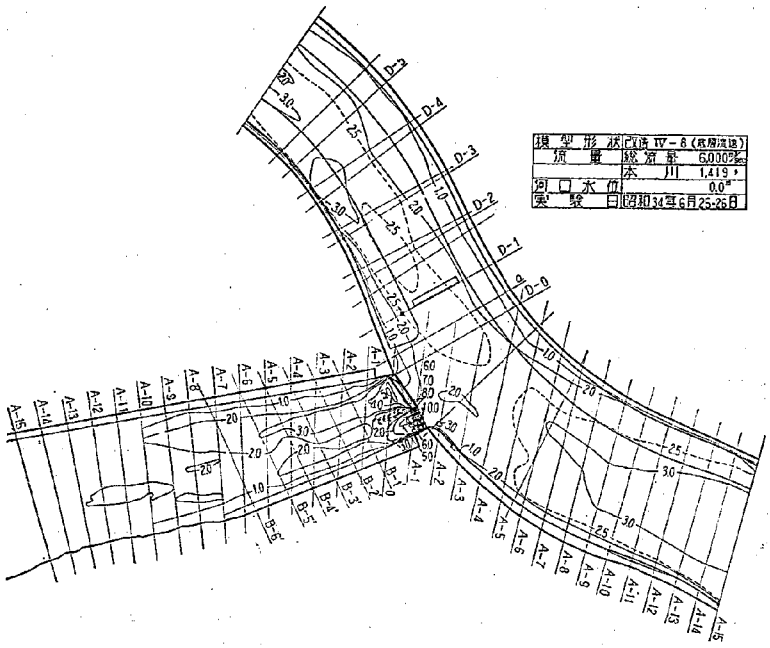
図 — 39


模型形状 改造 IV-6 (上越沖港)
流量 総流量 6,000 m³/sec
本川 1,419
河口水位 0.0 m
実験日 昭和34年6月25,26日
D-5
D-4
D-3
D-2
D-1
D-0
A-1
A-2
A-3
A-4
A-5
A-6
A-7
A-8
A-9
A-10
A-11
A-12
A-13
A-14
A-15
B-1
B-2
B-3
B-4
B-5
B-6
B-7
B-8
B-9
B-10
B-11
B-12
甲洲

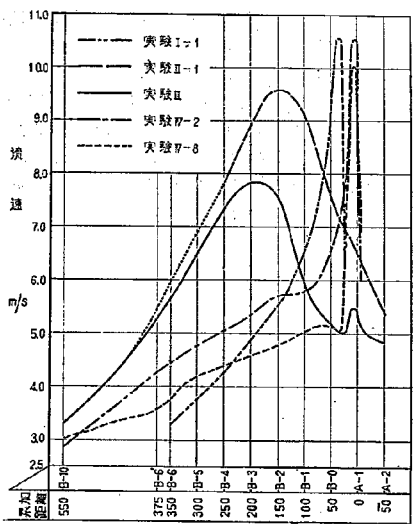
図—40


模型形状 改造 IV-8 (6号原突堤)
流量 総流量 5,000 m³/sec
本川 1,419
河口水位 0.0 m
実験日 昭和34年6月25,26日

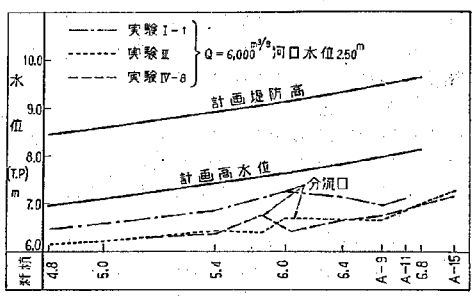
図—41



図—42



図—43　本川縦断流速図

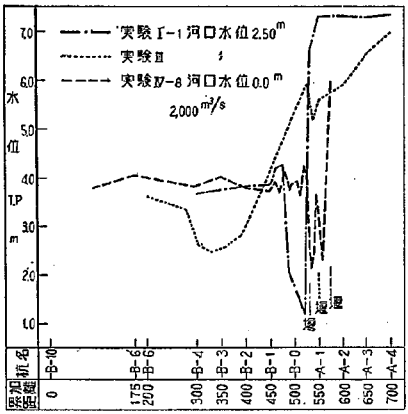


図—44　縦断水面形

ト内で跳水がおきた。エネルギー減殺法としての最も効果的な組み合わせは今後の理論的検討及び基礎実験にまたねばならない。

viii) 構造物の位置及び構造

(1)本川構造物　実験Ⅰの構造物の平面位置は改修計画案に従った。但し水門は左岸に越流堰は右岸に設置した。堰はクリーガー型をとり，水門はローラーゲート型を用いた。分流点流頭部は水衝部にあたるので右岸に水門をおく案は流頭部の流速を助長し，河床並びに構造物の維持が困難であると考えられるためとりやめた。その点左岸側に水門をおくことは流況の水衰にあたり流木等の漂流物に対しても安全であると思われる。又現況の平水は左岸寄りに流れているので，その点からも左岸がよいと思われる。実験Ⅳでも上述の理由から水門を左岸に



図—45　本川縦断水面形

おいたが更に上流の流速分布は左岸の方が速く，ここに堰をおいた場合には接近流速がはやいため斜め越流の性質が堰によって消えにくくなり，本川下流の流況上好ましくない。固定堰下流の跳水を固定するための副構造物についてはバケット，sill，或いは両者の併用等，その一部について実験したが最終の結論をだすまでには到らなかった。放水路側に設置する堰位置は低水路幅が一様になりはじめる個所においた。これにより上流におくと低水路が拡がってゆくので堰巾も大きくなり，且つ左右の法面への取付部附近の流況が河口にむかい流れの部分的集中をおこすと思われるからである。(3)

VI　結　　論

縮尺 1/50 の太田川分水堰実験でおこなった4案について水理的優劣を判定すれば次のとおりである。

(1) いづれの案でも計画流量配分よりの偏りは4％以内である。

(2) 実験Ⅰ—4，Ⅳ—8は水門操作によって計画に一致させ得るが実験Ⅰ—1は不可能である。

(3) 実験Ⅱ，実験Ⅲの如く構造物をもうけないで流量配分することも可能である。

(4) 河口水位の変化による流量配分量の変化は3％以内である。且つ河口水位が低くなると放水路へ多く流入する。

(5) 放水路の河床は分派点で1.0m 掘削したが放水路並びに本川河道維持の点から良好である。

(6) 放水路の流況は実験Ⅳ—8が最良である。即ち下流で蛇行をおこす原因となる流線の偏りが他の案に比較して僅かである。

(7) 放水路右岸高水敷はⅣ案のごとく張りだしてお

(3) 土木試験所報告　第49号　急流河川の床止堰下流部の洗掘に関する模型実験

く方が本川の固定堰越流流況の点からみて良い。Ⅲ案のごとく下流に向って徐々に張り出してゆく場合には高水敷上に速い流れが生じ，河床維持が困難である。

(8) 本川の流況は実験Ⅰ—4が最良である。但し跳水を固定するために堰下流に構造物を設ける場合は実験Ⅳ—8との間に水理的に優劣はつけ難い。

(9) 水門は左岸側に設置する方が下流流況の点より良い。

(10) 水門は洪水時にもオリフィスの形であけておく方が下流流況より判断して良い。

(11) 本川固定堰下に設ける構造物は sill 型の方が良い。但し実際の設計に当る前に基礎実験によってこれを確めることが必要である。

(12) 実験Ⅳでは流頭部形状を曲率の小さい円弧を用いる方が越流流況が平均化される。

(13) 本川の堤防法線を変えて河状整理をおこなっても市内派川にあたえる影響は殆んどないと思われる。

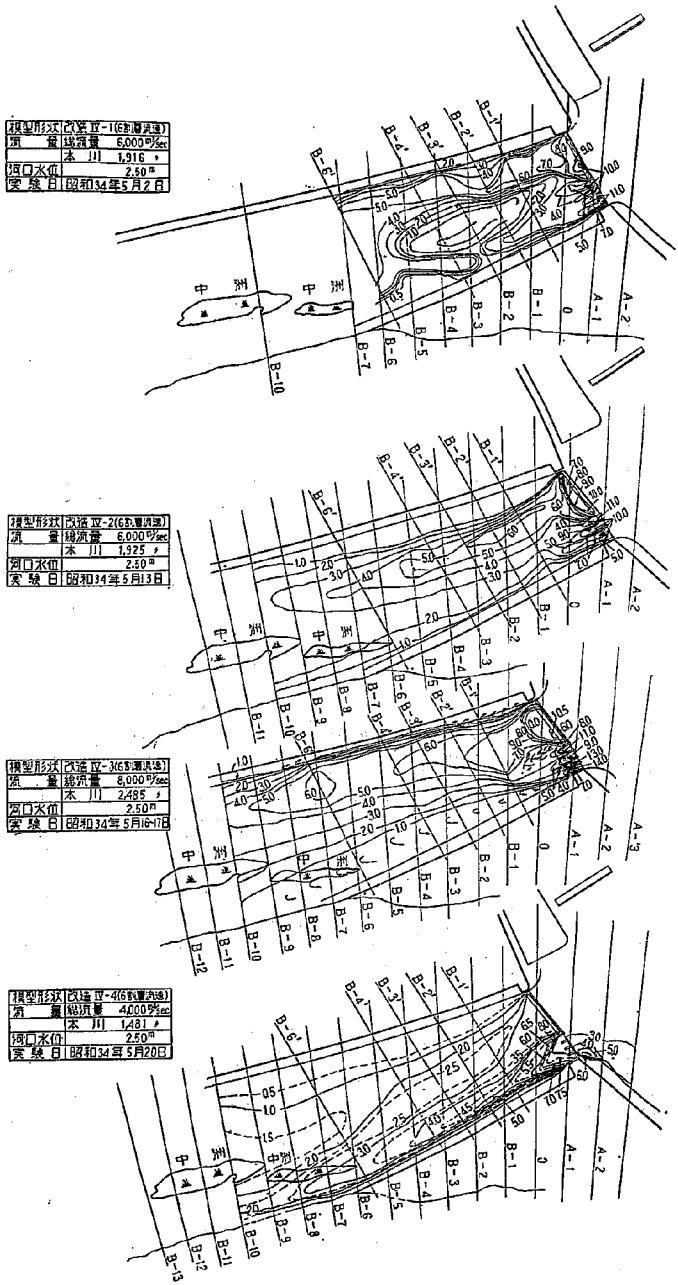
(14) 現況の砂洲はとばされてなくなることが予想される。

(15) 実験Ⅳ—8で水叩きの長さは底流速が4.0m に落ちる点までとして堰下より約68m必要である。

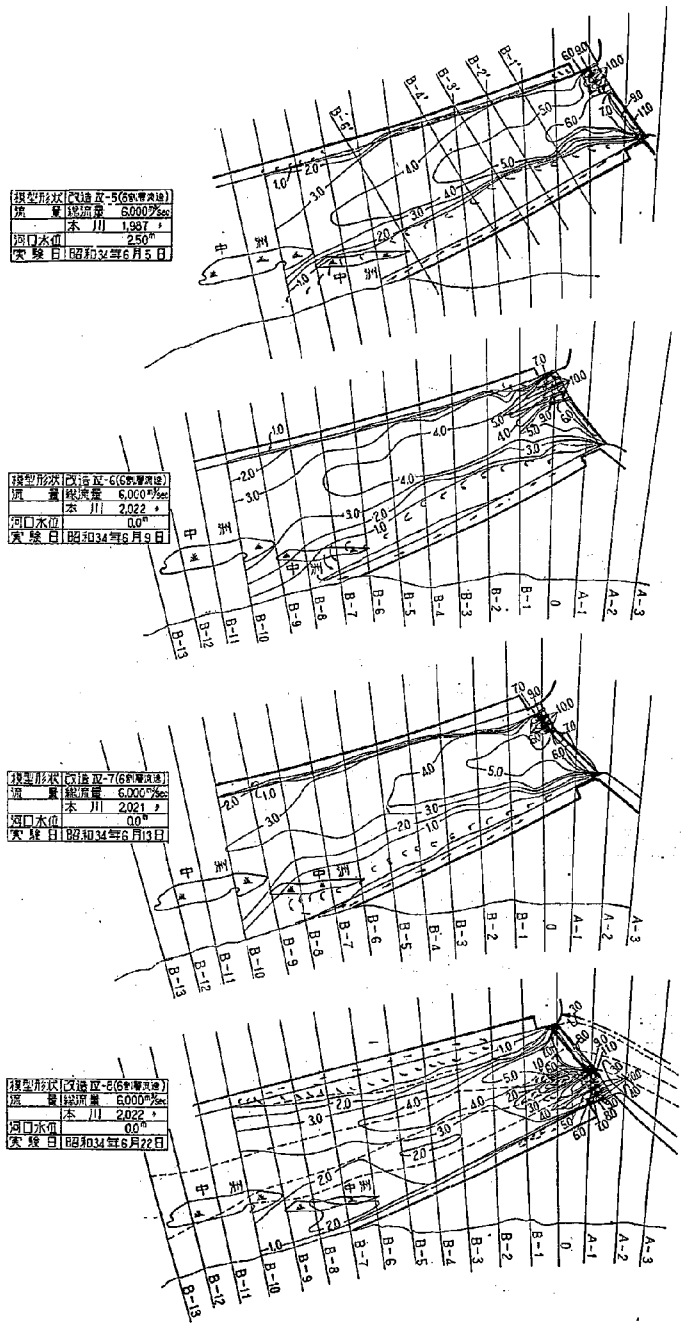
(16) 粗朶沈床をおく場合はその長さを図—43を参考にして求めれば良い。

(17) 実験Ⅳ—8の如く副ダムを設ける場合は水門下流の流速の方が減殺されないので水叩きの長さは堰下とは別に設計せねばならない。

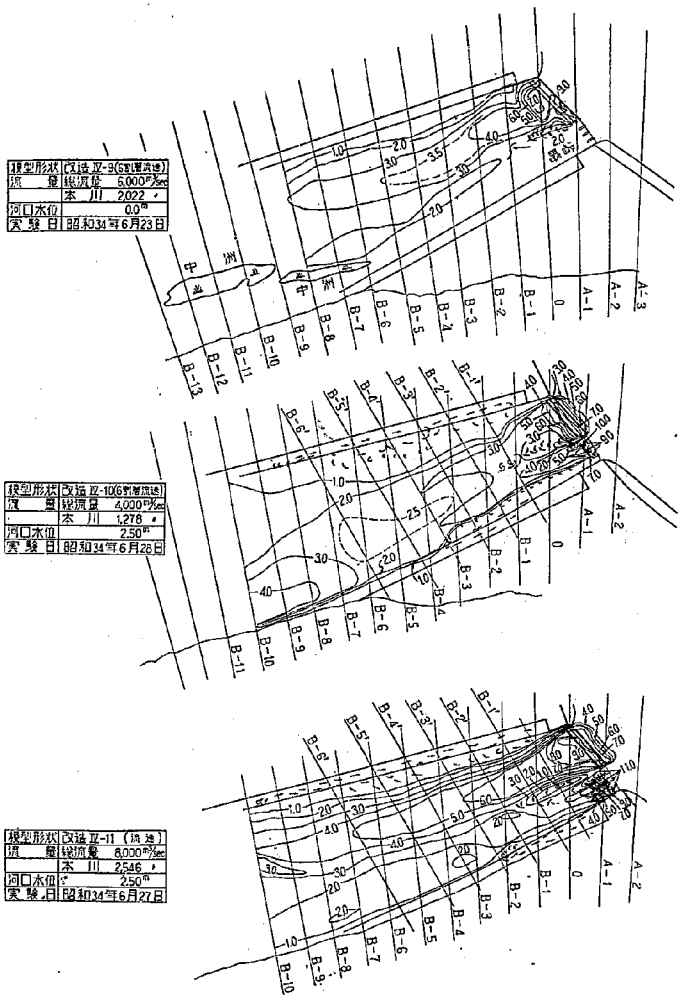
(18) 放水路の堰位置は感潮部にあるため，固定堰では平水の配分操作が充分におこなわれない危ぐがある。可動堰にすれば中小洪水時の停止波も消え，且平水配水も本川水門操作と相まって有機的におこなうことが出来る。


模型形状 改造 IV-1(6割潮流通)
流量 総流量 6,000 m³/sec
本川 1,916 〃
河口水位 2.50 m
実験日 昭和34年5月2日
模型形状 改造 IV-2(6割潮流通)
流量 総流量 6,000 m³/sec
本川 1,925 〃
河口水位 2.50 m
実験日 昭和34年5月13日
模型形状 改造 IV-3(6割潮流通)
流量 総流量 8,000 m³/sec
本川 2,485 〃
河口水位 2.50 m
実験日 昭和34年5月16~17日
模型形状 改造 IV-4(6割潮流通)
流量 総流量 4,000 m³/sec
本川 1,481 〃
河口水位 2.50 m
実験日 昭和34年5月20日
中洲

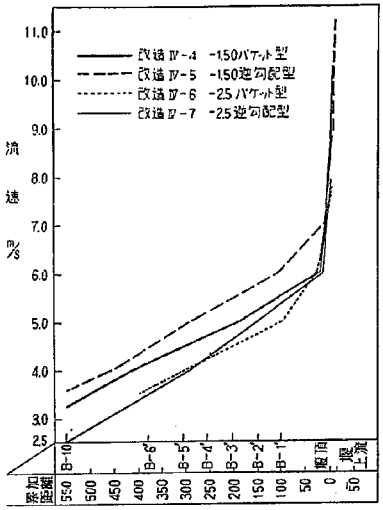
図—46 I～IV


模型形状 改造 IV-5(6割層流速)
流量 総流量 6,000m³/sec
本川 1,987 〃
河口水位 2.50m
実験日 昭和34年6月5日
模型形状 改造 IV-6(6割層流速)
流量 総流量 6,000m³/sec
本川 2,022 〃
河口水位 0.0m
実験日 昭和34年6月9日
模型形状 改造 IV-7(6割層流速)
流量 総流量 6,000m³/sec
本川 2,021 〃
河口水位 0.0m
実験日 昭和34年6月13日
模型形状 改造 IV-8(6割層流速)
流量 総流量 6,000m³/sec
本川 2,022 〃
河口水位 0.0m
実験日 昭和34年6月22日
中洲
B-1 B-2 B-3 B-4 B-5 B-6 B-7 B-8 B-9 B-10 B-11 B-12 B-13
A-1 A-2 A-3

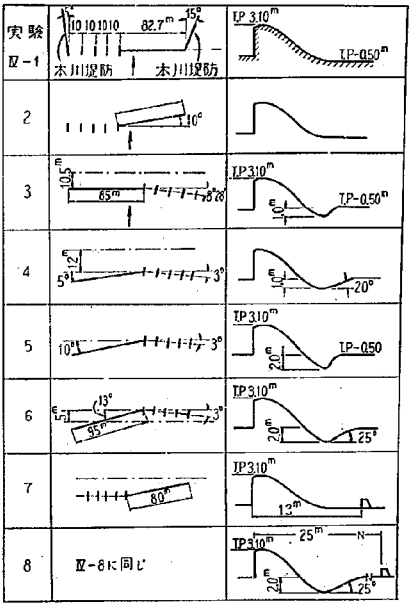
図—46 V～VIII


模型形状 改造 IV-9(6割層流速)
流量 総流量 6,000m³/sec
本川 2,022 〃
河口水位 0.0m
実験日 昭和34年6月23日
模型形状 改造 IV-10(6割層流速)
流量 総流量 4,000m³/sec
本川 1,278 〃
河口水位 2.50m
実験日 昭和34年6月26日
模型形状 改造 IV-11 (流速)
流量 総流量 8,000m³/sec
本川 2,546 〃
河口水位 2.50m
実験日 昭和34年6月27日
中洲
A-1
A-2
A-3
B-1
B-2
B-3
B-4
B-5
B-6
B-7
B-8
B-9
B-10
B-11
B-12
B-13

図—46 IX～XI



図—47 本川縦断流速図



図—48

堰堤放水管に関する研究

(5)

—— 鐘状入口に関する実験的考察 ——

昭和33年3月

村　　幸　　雄*
荒　木　　正　夫**
伊　集　院　　敏***
加　藤　　鉄　義****

要　旨：

本研究では，これまで総括的な放水管設計法ならびにⅢ型放水管に適する減勢機構について，述べてきた。

本編では，後記の式(1)から(4)で示されるような曲線を有するベルマウスについて行った実験の結果を提供する。この実験は，ベルマウス面上に発生する圧力の，分布および最低値を推定できるようにするために行われた。これらの実験結果に基づき，筆者等は，空洞現象により侵蝕を起さないようなベルマウスの設計法を求めようと努めている。方形放水管の流入口附近については，今後更に研究を進めていくつもりである。

$$\frac{X^2}{D^2} + \frac{Y^2}{(D/3)^2} = 1 \quad \cdots\cdots (1)$$

$$\frac{X^2}{(0.75D)^2} + \frac{Y^2}{(0.25D)^2} = 1 \quad \cdots\cdots (2)$$

$$\frac{X^2}{(0.6D)^2} + \frac{Y^2}{(0.2D)^2} = 1 \quad \cdots\cdots (3)$$

$$\frac{X^2}{(0.5D)^2} + \frac{Y^2}{(0.15D)^2} = 1 \quad \cdots\cdots (4)$$

目　　次

1　緒　　言……(2)
2　実験に用いられたベルマウス形状について……(2)
3　実験施設及び模型……(4)
4　円形ベルマウスに関する実験結果……(6)
5　方形ベルマウスに関する実験結果……(8)
6　結　　語……(9)

* ダム部長　　** 前河川構造物研究室研究員　　*** ダム水理研究室研究員　　**** ダム水理研究室員

1 緒　言

これまでは，ダム放水管の一般的な設計や，Ⅲ型放水管の場合の下流減勢機構について論述してきた。本文では，放水管入口に設けられる鐘状入口即ちベルマウスにつき，特に考察を加えてみたいと思う。

不注意に設計された高速取入口におけるエネルギー損失はきわめて大きく，そのため管路の容量を著しく減少させるので，このような場合にベルマウスというラッパ状の呑口をつけて損失を軽減させることは，衆知の事実である。ベルマウス設計に当って考慮すべき主な点は，1）経済的観点からできるだけ入口を小さくすること。2）空洞現象が起らない。換言すれば，ベルマウス面に極端な低圧が生じないようにすることの二つである。1）の条件は，放水管内面を鉄板等で内張りする場合や，ことに呑口前面にバルクヘッドゲートを用意する必要がある場合に重要であるが，そのような考慮を必要としない場合でも，構造的な面から呑口の大きさを制限される場合があるであろう。一方2）の条件からみると，勿論ベルマウス曲線形にいかなる種類の式を用いるかによって一概にはいえないが，入口が小さい程空洞現象発生の危険が多いという，1）の条件と相反した事実に会うであろう。

放水管内部，ことにベルマウスの部分では，空洞現象による破壊が生じたとしても，その発見はむづかしく補修はさらに困難であるから，建設に当って特別の注意を払い，破壊を生じないようにせねばならない。

ここに述べようとする一連の実験およびその考察は，一般に用いられることの多い楕円型ベルマウスについて，主として圧力状態を調査し，それに基ずき各種ベルマウスの空洞現象に対する安全性を検討したものである。

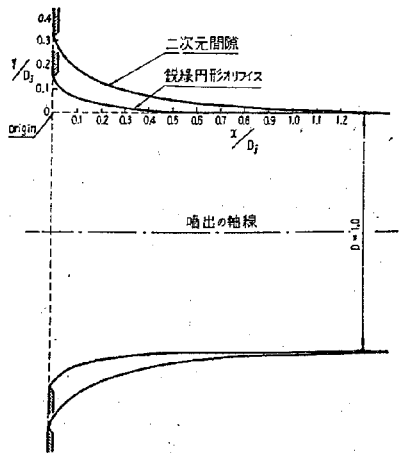
現実の放水管では，ベルマウスの始端及び終端の条件が，実験に抽出された状態と多少異っているかもしれない。ベルマウスの形状そのものが違えばもとよりであるが，全く実験に抽出されたものと同じものであっても，数門の放水管を並列して操作した場合等必ずしも実験結果を適用できるとはかぎらないから，特殊な状態については，それぞれ独自の実験をおこなって検討する必要がある。しかし円形放水管に関しては，本実験の資料が役に立つことが多いと思う。

2 実験に用いられたベルマウス形状について

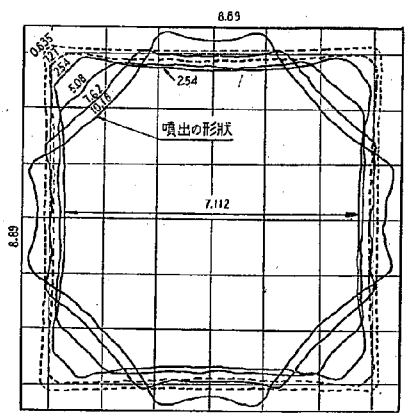
〔1〕 ベルマウスの合理的形状

緒言で述べたように，ベルマウス設計に当ってもっとも注意すべきことは，空洞現象発生の可能性の有無である。厳密にいえば，ある点で空洞現象を生じるためにはその附近で水蒸気圧以下の低圧が発生し，そのため空洞（cavity）を生ずることが必要であると考えられているし，これに対し安全率をみこんで定められた許容圧力は，普通－3m水柱程度とされている。しかし実際にこのような条件をみたす限界設計は困難なので，より安全かつより容易な方法として，我々は，大気圧以下のいわゆる負圧をまったく生じないようなベルマウス形状を，設計の基礎とすることにする。

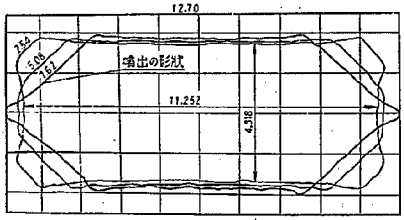
ダム上流面に或る鋭縁孔を仮定し，それからの噴出流のベナコントラクタに於ける断面が管路断面と等しくなるようにした場合，この噴出流の自由流線が，我々の求めるベルマウス曲線であるといえよう。だが現実の問題として，そのような曲線を用いることは簡単ではない。特に方形又は矩形管路の場合には，その曲線を求めるこ



図－1　二次元間隙及び円形鋭縁孔からの噴出流縦断曲線



図－2　方形鋭縁孔からの噴出流の形状



図—3　矩形鋭縁孔からの噴出流の形状の一例

と自体非常にむずかしい。主として実験的に求められた，鋭縁孔からの噴出流の自由流線の形状を，図—1～3に示す。図—1で二次元とは，無限に巾の広い矩形孔であり，理論値とは次式によって描かれたものである。

$$X'=\frac{1}{2}\log\frac{1+\sqrt{2Y'-Y'^2}}{1-\sqrt{2Y'-Y'^2}}-\sqrt{2Y'-Y'^2} \quad \cdots\cdots(1)$$

但し，X'，Y'はそれぞれ呑口の開孔先端に原点をおき，放水管軸に平行，垂直にとった座標であり，D/πを長さの単位とするものである。この自由流線の形状は，重力の影響を考慮せずに求められたものであるが，実験によれば，貯水池水頭の変化による自由流線の形状の違いはほとんど認められないという。[1] したがって，ベルマウスの設計に貯水池水頭を考慮する必要はなく，図示した曲線をそのまま適用すれば，合理的なベルマウスを設計できるであろう。

〔2〕 実験を行った実用型ベルマウスの形状について

前節で述べた自由流線の形状をそのままベルマウス曲線に応用することは，勿論可能であろうが，二次元理論曲線は，一般にそれほど巾が広くない放水管に応用する場合あまりに大きい開口部をもち，経済的に好ましくないことは明らかである。又式化されない実験値をそのまま座標として与えるのは不便なので，普通実用曲線として，実験値に近い楕円曲線を用いた例が多い。

筆者等が行った実験では，(2)～(5)の各式で与えられる楕円曲線を採用した。

$$X^2/D^2+Y^2/\left(\frac{D}{3}\right)^2=1 \quad \cdots\cdots(2)$$

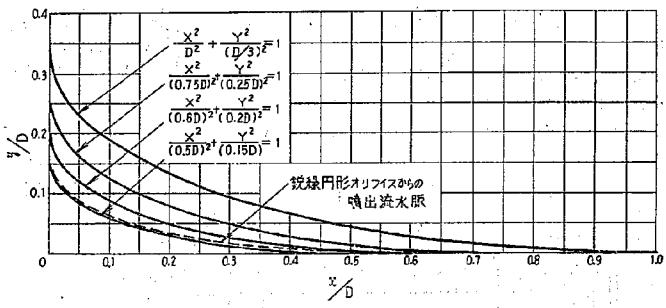
$$X^2/(0.75D)^2+Y^2/(0.25D)^2=1 \quad \cdots\cdots(3)$$

$$X^2/(0.6D)^2+Y^2/(0.2D)^2=1 \quad \cdots\cdots(4)$$

$$X^2/(0.5D)^2+Y^2/(0.15D)^2=1 \quad \cdots\cdots(5)$$

ここでX，Yは，ベルマウス終端断面の楕円中心を原点とし，それぞれ放水管軸と平行及び垂直にとられた座標であり，Dは放水管のベルマウス終端における直径である。二次元間隙からの流出の場合，ベナコントラクタにおける水脈の厚みは，間隙の長さの$\frac{\pi}{2+\pi}\cong 0.61$倍であり，これにもっとも類似した楕円曲線は，短径が$\frac{1}{\pi}D\cong 0.32D$，したがって(2)式はこれに基ずいてつくられたもっとも安全な形状をしめす。

これに対し(5)式は，米国開拓局の推奨する形状であって，円形鋭縁孔からの流出の自由流線にもっともよく似ている。円形放水管では，(5)式に類似した式[2] を使って良い結果を得た例もあり，施工が入念になされるならば，空洞現象による破壊のおそれはないが，施工の不手際があれば危険である。以上(2)及び(5)式で表わされる二つのベルマウスは，円形放水管に関するかぎり，最も安全な形状と，ぎりぎりの限界迄縮小された経済的な形状である。そしてこれらの中間的なものが，(3)，(4)両式で表わされる。これら各形状の比較を，図—4にしめす。



図—4　実験に採用された各ベルマウス曲線の比較

以上は円形放水管に用いられるベルマウス形状であるが，方形又は矩形放水管では，前節図—2および3からみてもわかるように，問題はかなり複雑である。

J. S. McNown と S. C. Ling は，方形放水管のベルマウス設計に一つの方法[3] を呈示しているが，この方法では入口が45度回転した方形となり実用的でない。

というのは，我々が方形放水管を設計する理由は，コースターゲート等の関係から，できるだけ入口巾を短くしようとする結果であって，そのためには入口も放水管路と同じ向きの正方形でなければ意味がないからである。このような点を考慮して提案されたものには，H. A. Thomas の方法と C. E. Bardsleyの方法[4] がある。それらの方法で設計された方形又は矩形ベルマウスの圧力分布についてはまだ資料がないが，いずれ必要を生じた場合に詳しく検討されるのをまつとして，本研究で

1) H. A. Thomas "Design of Bellmouths for Entrances to Conduits of Circular, Square and Rectangular Cross Sections" Carnegie Institute of Technology, July, 1946.
2) 米国開拓局では，$X^2/(0.5013D)^2+Y^2/(0.15041D)^2=1$ の楕円曲線を用いて試験の結果，空洞現象に関し良い結果を得ている。
3) J. S. McNown and S.C. Ling "Inlet for square conduits" La Houille Blanche n°5 Oct—nov. 1955
4) 脚注1)参照

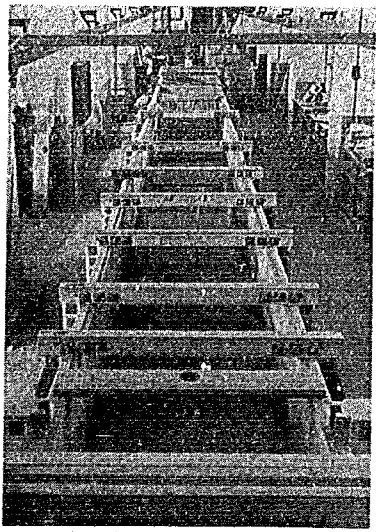
は，主として円形ベルマウスについて記述する。

なお方形又は矩形ベルマウスの設計で問題となるのは，隅角部の変形に対する処置であるが，従来その点に関する深い認識なしに，円形ベルマウス曲線をそのまま方形放水管に応用した例が散見されるので，このような場合の圧力状態について検討するための実験をも行った。その結果は，円形ベルマウスに関する記述の後に，簡単にまとめておく。

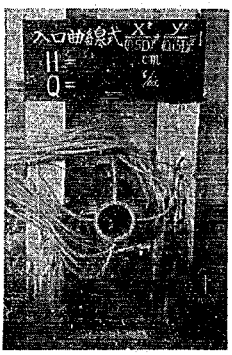
3　実験施設及び模型

〔1〕 実験施設

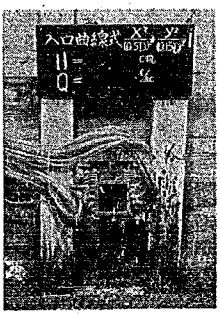
実験は，建設省土木研究所赤羽分室内の，巾1mの水路を使用して行われた。模型は，この水路を横断して設けられた鉛直隔壁の中央部，水路底から45cmの高さに管軸線がくるように取付けられた。管軸線は正しく水平，即ち隔壁に垂直になるよう充分注意を払った。流量は，水路上流端の巾1mの鋭縁矩形堰を用いて測定され，隔壁上流の水路水深即ち貯水深は，内径2.5cmの硝子管を使った連通管の水位から求められた。模型壁面の圧力は，ピエゾメーターに連絡した内径2.5cmの硝子管を使った水柱マノメーターにより測定された。実験施設の詳細については，図—5及び写真—1，2を参照されたい。



写真—1　実験水路全景

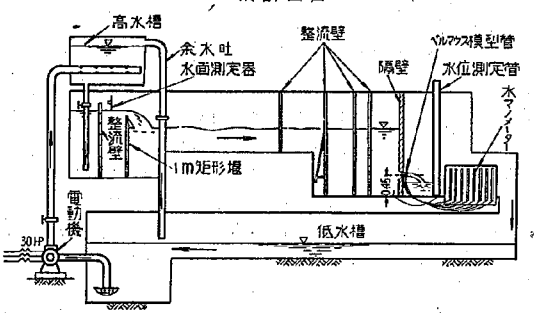


写真—2(a)模型取付状況

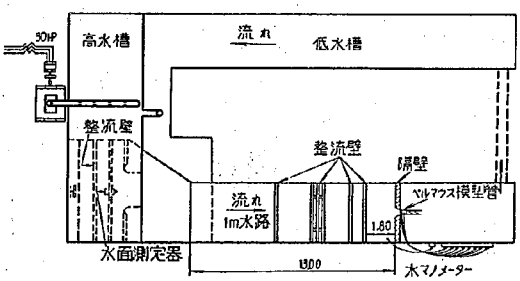


写真—2(b)

横断面図



平面図



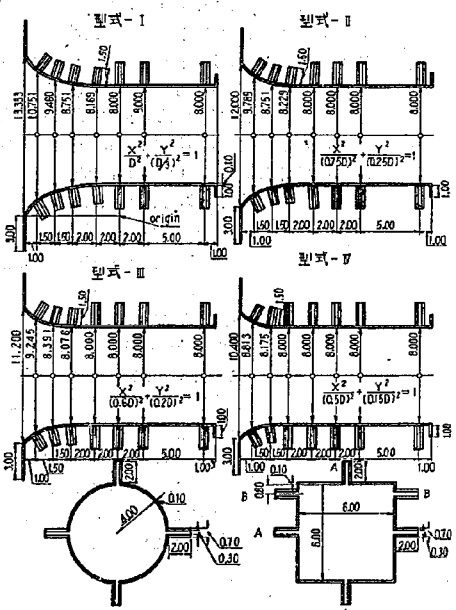
図—5　実験施設図

〔2〕 ベルマウス模型

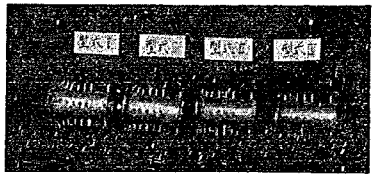
模型ベルマウスの曲線形状には，2—〔2〕であげた(2)～(5)式に示されるような四種の楕円曲線を採用した。便宜上(2)式にしたがうものをⅠ型，以下(3)式をⅡ型，(4)式をⅢ型，(5)式をⅣ型ベルマウスと名付けることにする。又これら各型ベルマウスの断面形状には，ベルマウス終端で，直径8cmの円及び一辺8cmの正方形の二種類を用いた。(正方形放水管の管径 D には辺長8cmを用いた。) したがって，実験に使用したベルマウス模型の数は8個である。模型の長さはすべて16cmにとった。この長さが過大であると，ベルマウス終端より下流の管路の損失や圧力分布の影響で，純粋にベルマウスのみを抽出して行うという実験目的に反し，かといってベルマウス終端で模型を切断すると，ベルマウス終端附近の圧力分布が実状にそわなくなるため，全模型管長を管径の二倍にとってみた。結果的にみて，ベルマウス終端断面の圧力分布は，放水管全長をとりいれた模型による実験の結果と一致した傾向をしめしたので，模型長さの選定は適当であったと思う。

模型は，管内面の平滑，仕上げ精度，圧力測定用パイプの取付けの正確さ等を考慮して，真鍮製とした。

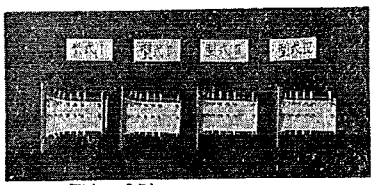
模型形状や，圧力測定孔の形状や配置等の詳細は，図—6及び写真—3にしめす。又各圧力測定孔間の水平距離，入口からの水平距離，管軸線を基準とした圧力測定孔の高低，各圧力測定孔配置断面の管路断面積を，表—1に示す。



図—6　ベルマウス模型の形状



写真—3(a)　ベルマウス模型



写真—3(b)

表—1　各圧力測定点配置状況一覧表

管軸線から面中央ピエゾメーター迄の高低差
(円形・方形) 単位：cm

ピエゾ断面 ＼ 距離及型式	ピエゾメーター点間距離	入口よりの距離	型式Ⅰ	型式Ⅱ	型式Ⅲ	型式Ⅳ
1	1,000	1,000	5,380	4,900	4,650	4,410
2	1,500	2,500	4,730	4,380	4,200	4,090
3	1,500	4,000	4,360	4,120	4,090	4,000
4	2,000	6,000	4,090	4,000	4,000	4,000
5	2,000	8,000	4,000	4,000	4,000	4,000
6	2,000	10,000	4,000	4,000	4,000	4,000
7	5,000	15,000	4,000	4,000	4,000	4,000

管軸線から隅角部ピエゾメーター迄の高低差
(方形)　単位：cm

ピエゾ断面 ＼ 距離及型式	ピエゾメーター点間距離	入口よりの距離	型式Ⅰ	型式Ⅱ	型式Ⅲ	型式Ⅳ
1	1,000	1,000	4,580	4,100	3,850	3,610
2	1,500	2,500	3,930	3,580	3,400	3,290
3	1,500	4,000	3,560	3,320	3,290	3,200
4	2,000	6,000	3,290	3,200	3,200	3,200
5	2,000	8,000	3,200	3,200	3,200	3,200
6	2,000	10,000	3,200	3,200	3,200	3,200
7	5,000	15,000	3,200	3,200	3,200	3,200

各ピエゾメーター点の断面積（円形）単位：cm²

ピエゾ断面 ＼ 型式	型式Ⅰ	型式Ⅱ	型式Ⅲ	型式Ⅳ
1	90.76	75.28	67.78	60.96
2	70.29	60.13	55.29	52.55
3	59.64	53.20	52.55	50.27
4	52.42	50.27	50.27	50.27
5	50.27	50.27	50.27	50.27
6	50.27	50.27	50.27	50.27
7	50.27	50.27	50.27	50.27

各ピエゾメーター点の断面積（方形）単位：cm²

ピエゾ断面 ＼ 型式	型式Ⅰ	型式Ⅱ	型式Ⅲ	型式Ⅳ
1	115.59	95.82	85.47	77.66
2	89.50	76.58	70.41	66.83
3	75.94	67.71	65.22	64.00
4	66.76	64.00	64.00	64.00
5	64.00	64.00	64.00	64.00
6	64.00	64.00	64.00	64.00
7	64.00	64.00	64.00	64.00

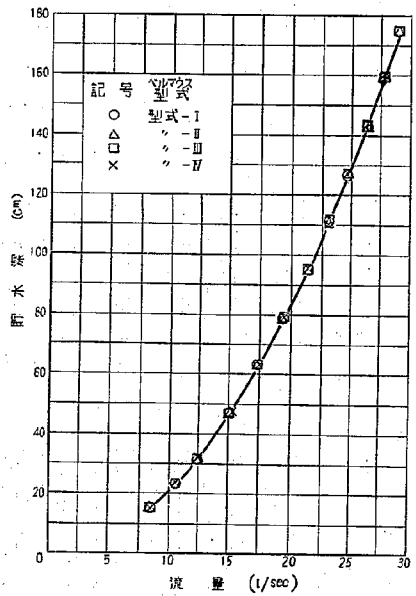
4　円形ベルマウスに関する実験結果

〔1〕 入口損失

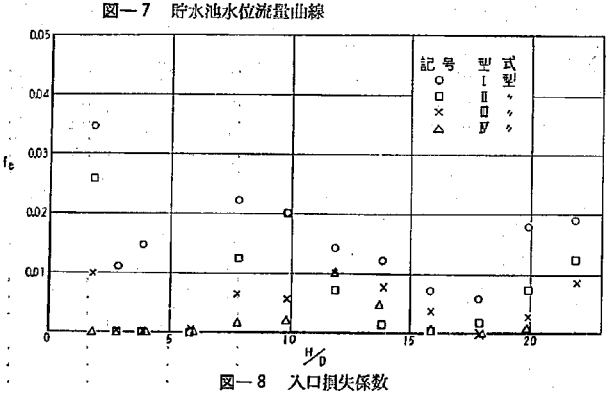
実験の結果得られた貯水池水位と流量の関係は，図—7に示す通りである。これをもとに計算された入口損失係数は，図—8のようになった。又短管としての流量係数の計算結果を，図—9に示す。これらの計算は，式(6)及び(7)によった。

$$\left.\begin{aligned} f &= \frac{2gH}{V^2} - 1 \\ fe &= f - \lambda\frac{l}{D} \end{aligned}\right\} \cdots\cdots(6)$$

円形ベルマウス



図—7　貯水池水位流量曲線



図—8　入口損失係数

$$C = \sqrt{1 - \frac{feV^2}{2gH}} \cdots\cdots(7)$$

ここで

H＝全水頭（上流水面と管軸線の標高差），cm.

V＝管終端断面平均流速，cm/sec.

D＝管路直径，cm.

l＝ベルマウス終端より管終端までの長さ，cm.

λ＝摩擦損失係数，

fe＝入口損失係数，

f＝全損失係数，

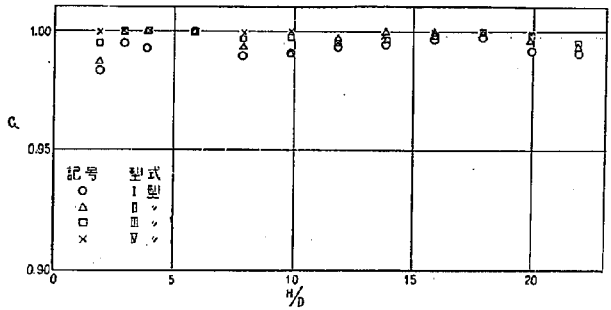
C＝短管の場合の流量係数，

この計算では，$\lambda = 0.018$ と仮定し，異型式ベルマウス間の比較の目的上，l は最長ベルマウス（I型）の場合に合せてすべて 8cm にとった。したがって，どの型のベルマウスでも，$\lambda\frac{l}{D} = 0.018$ としている。

図—8をみると，fe はあまり明らかな傾向をもたず，むしろ非常に不規則に分布しているといえよう。feの値は大体0.02以下できわめて小さく，そのため値かの測定誤差が大きくきいてくることが考えられるし，さらに，或る一つの流入型式に対して(6)式により計算された fe が一定値をとる，すなわち入口損失が管路の流速水頭に厳密に比例するということには，何等理論的根拠がないことを考え合せれば，これは当然である。普通の放水管にあっては，入口損失は，摩擦やゲートやバルブやトラシュラック等による損失に比しきわめて小さく，摩擦損失の1割にも達しないので，$fe = 0.01$ 程度に仮定すれば，その誤差は問題にならぬであろう。又小口径のIV，V型ベルマウスでは，入口損失は無視しうる程小さい。ただ入口上の水のかぶりが小さい場合には，流況は不安定となり貯水池内に渦を発生し，損失は急激に増大する。本実験の範囲では，大口径のI，II型ベルマウスでその傾向が表われている。このように，低水頭で操作するのを常態とする放水管では，実験や実例等により損失の値を推定せねばならない。

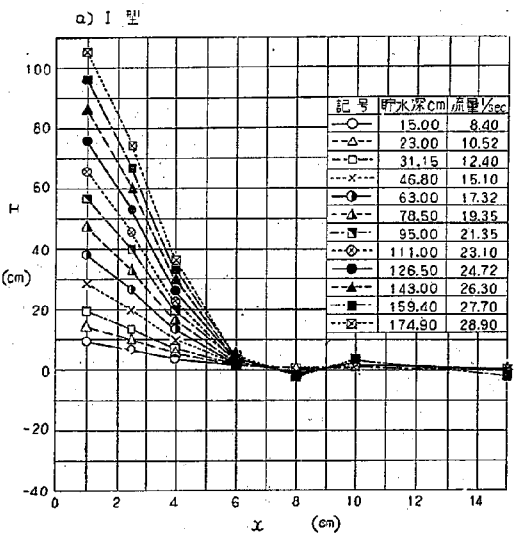
〔2〕 各断面の平均圧力分布

各断面の4箇の測点の圧力の平均値をプロットすると，図—10〔a)～b)〕のようになる。いずれの型式の場合でも，入口附近で，貯水池水頭に関連してかなり広範囲に分布した圧力は，ベルマウス終端附近で0に収れんし，直管部ではほとんど0である。平均圧力が完全に0に一致しないのは，自由流線と実用楕円曲線との間の相違のためと考えられるが，その影響は流速水頭が大きい程顕著に表わ



図—9　流量係数

れるものと推測される。事実図—10では，貯水池水頭が大きいほど，例外なく圧力水頭の絶対値が大きくなっている。



図—10 (a)　各断面平均圧力分布図

次に型式別にこの圧力分布を検討してみる。まず2—[2]の図—4をみると，Ⅰ及びⅡ型ベルマウス曲線は，つねに鋭縁円形孔噴出流線の外側にある。したがって一般に自由流線よりも曲率の変化は緩やかで，負圧発生のおそれは少ないであろう。ただベルマウス終端部では，自由流線が非常に偏平になって，漸近線的に平行流に近ずいているのに比して，楕円曲線は曲率の変化がやや急である。したがって，Ⅰ，Ⅱ型ベルマウスでは，ベルマウス終端附近でもっとも負圧発生の可能性が大きい。Ⅲ型ベルマウスと自由流線との関係もⅠ，Ⅱ型の場合に似ているが，この場合は，$x/D \cong 0.45$で自由流線と楕円曲線が交叉している。したがって，負圧が生じやすいのは，x/Dが0.45から0.6の間ということになるであろう。Ⅳ型ベルマウスの楕円曲線は，つねに自由流線の中側にあり，全曲線区間にわたって負圧を発生するおそれがある。これらの推定は，鋭縁円形孔噴出の自由流線と各楕円曲線との間の違いをしめす図—11をみれば，一層容易に判断出来るであろう。この図で，$(y/D)d$は，或る与えられた断面における楕円曲線の縦距（y座標値）から，同じ断面における自由流線の縦距を差引いたものである。

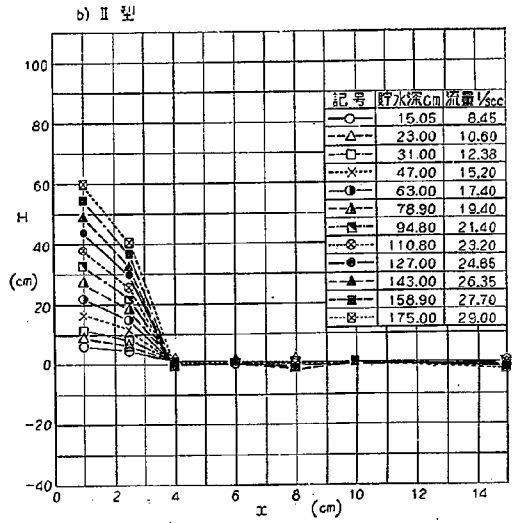
以上の事から，断面平均圧力が最低となるのは，次にしめすような断面であろうと推定される。

Ⅰ型ベルマウス：$x/D=0.025$，又は1.00.
Ⅱ型　〃　：$x/D=0.020$，又は0.75.
Ⅲ型　〃　：$x/D=0.015$，又は0.60.
Ⅳ型　〃　：$x/D=0.030$，又は0.37。

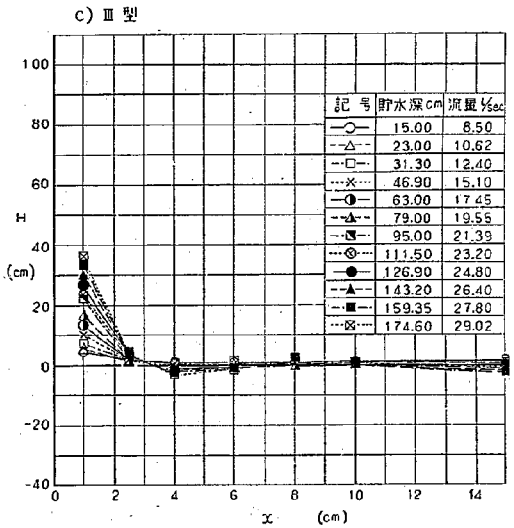
第一の危険推定点附近($x/D=0.01\sim0.03$)には，圧力測定点を設けなかったためはっきりしたことはわからないが，第二の危険推定点附近では，測定結果がこの推定の正しさを実証している。次節でふれるような圧力分布の残存の考え方がもし正しいならば，第一の危険推定点附近では負圧が発生しないかもしれないが，これは実験的に確められねばならぬ問題である。

〔3〕 管壁面圧力布分

空洞現象による管壁面の破壊の発生の有無は勿論，前節で述べた断面平均圧力の高低によるのではなく，壁面附近の圧力の高低による。鋭縁孔噴出流の自由流線上の圧力は，いかなる点においても大気圧と等しくなければならない。この場合，断面圧力分布はほぼ一様であると考えられる。しかし現実の問題として，重力の影響を考慮して上面と下面の曲線をかえ下方に彎曲したようなベルマウスを設計することは出来ないし，又多くの水理現象で観察されるように，入口断面での静水圧的圧力分布の形が，ベルマウス内への流入後直ちに消えることはなく，ある遷移区間の間は変形されながらもなおその分布が残存する。したがって現実の管路では，一般にあらゆる断面で，圧力分布が一様とはなりえない。水平管軸を有する円形ベルマウスの場合，同一断面の上下両圧力測定点附



図—10 (b)　各断面平均圧力分布図



図—10 (c)　各断面平均圧力分布図

近では，境界流線の形状が同じであるから，上下両点の圧力水頭の差が両点の標高差より大きくなることはあまり考えられないのであるが，実際測定したところでは，上下両点の標高差よりその圧力水頭差の方が大きい場合が非常に多く，これを測定誤差とばかりは思えぬ程度に達した。このような現象の原因はわからないが，実験から得られた結果を図—12に示す。この図で，h_U, h_L はそれぞれ上下両測点の圧力水頭，D'はその断面における管径である。

以上述べてきた結果から，負圧や最低圧力の発生点の分布を推定することができるが，次に実験の結果得られた負圧発生のひん度を，表—2に示す。—5 cm 以下の低圧の発生数はⅣ型ベルマウスで特に多く，この型のベルマウスは明らかに危険である。

〔4〕 最低圧力

先に，断面平均圧力の絶対値は流速水頭が大きいほど大きいと述べたが，これは当然壁面圧力の値についてもいえることである。そしてこれらの値が，流速水頭とほぼ一次的な比例関係で結ばれていることが，実験から確認された。このような関係があることはベルマウスの設計上非常に便利であって，利用価値が大きいと思われる。流速水頭の代りに貯水池水頭をとり，それと断面平均圧力水頭の最低値との関係を図示したのが図—13 であり，貯水池水頭と壁面圧力の最低値との関係を図示したのが図—14である。

断面平均圧力水頭最低値 $\overline{Pmin}/\gamma$ と，壁面圧力水頭最低値 $Pmin/\gamma$ が，それぞれ(8)式の形に表わされるものと考え，その係数を求めた結果を表—3にしめす。

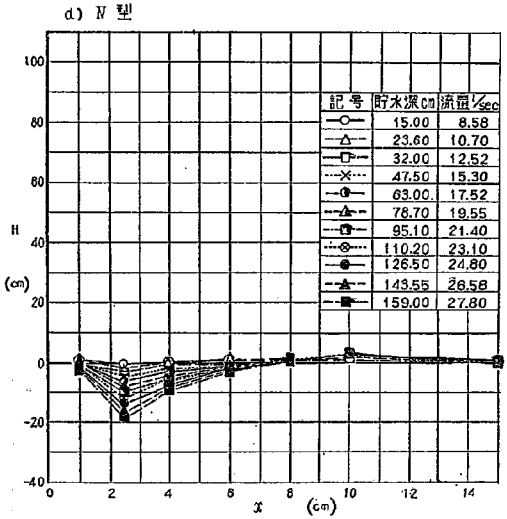
$$\left.\begin{aligned}\overline{Pmin}/\gamma &= \overline{\alpha} D + \overline{\beta} H \\ Pmin/\gamma &= \alpha D + \beta H\end{aligned}\right\} \cdots\cdots (8)$$

ここで，H = 管軸線上の貯水池水頭。ただし，トラシュラック等でかなり大きい水頭損失が期待される場合は，Hとして，貯水池水頭から損失水頭を減じたものを用いるのが妥当であろう。

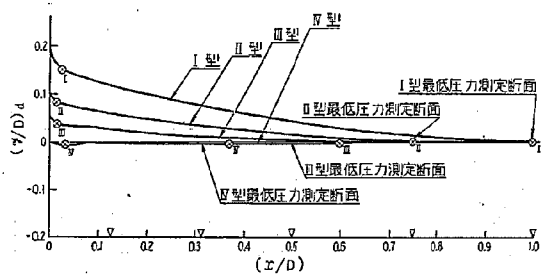
5　方形ベルマウスに関する実験結果

〔1〕 概　　説

流量，入口損失，短管としての流量係数等は，図—15～17に示す。損失の値は，円形ベルマウスの場合よりやや大きくなっており，低水頭の場合の fe の増加が明瞭であるが，大体の傾向は円形ベルマウスの場合と同様である。壁面圧力の貯水池水頭やベルマウス型式相互間の関係も，円形の場合と同様であるが，方形ベルマウスの場合の問題点は，2—〔2〕で述べたように隅角部にあるので，その他の部分の圧力について詳述する必要はないと思う。各面の中央部分の圧力に関するかぎり，その値が円形の場合より大きく，負圧を生じ難いことは，自由流線の形状よりみて当然であろう。



図—10 (d) 各断面平均圧力分布図



註 ▽：圧力測定断面
◎：最低圧力発生の危険ありと推定される断面
添字は型式を示す（この例ではⅠ型）

図—11 鋭縁円形孔噴出自由流線と実用楕円曲線の比較

〔2〕 隅角部圧力

方形ベルマウスの隅角部は，自由流線の隅角部における変形についての何の考慮も払われていないため，この部分の圧力が非常に低くなるものと予想された。実験の結果得られた圧力の資料を，図—18にしめす。面中央の四測点から計算した断面平均圧力は，円形の場合より高くほとんど正の値をとるから，隅角部圧力が，単なる位置水頭の差よりはるかに低くなることがわかるであろう。隅角部圧力水頭や，隅角部最低圧力水頭も，円形ベルマウスにおいてみられたように，その絶対値が貯水池水頭とほぼ一次的に比例する。その例として，最低圧力水頭と貯水池水頭との関係を図—19にしめす。ただし，ここにしめした圧力が，真の隅角から 8 mm ずれた点で測定されていることを考えると，隅角部圧力は実はもっと低いものなのではないかと考えられるが，実験装置の関係で推定できなかった。Madden Dam の放水管の破壊状況からみても，上部隅角附近はもっともひどい損害を受けるようである。このような隅角部負圧に対する対策としてはいく通りかの方法が考えられるが，それらの効果については現在なお検討中であり，いずれ機会をみて発表する予定である。

6 結　語

以上述べてきた実験結果を要約すると次のようになる。

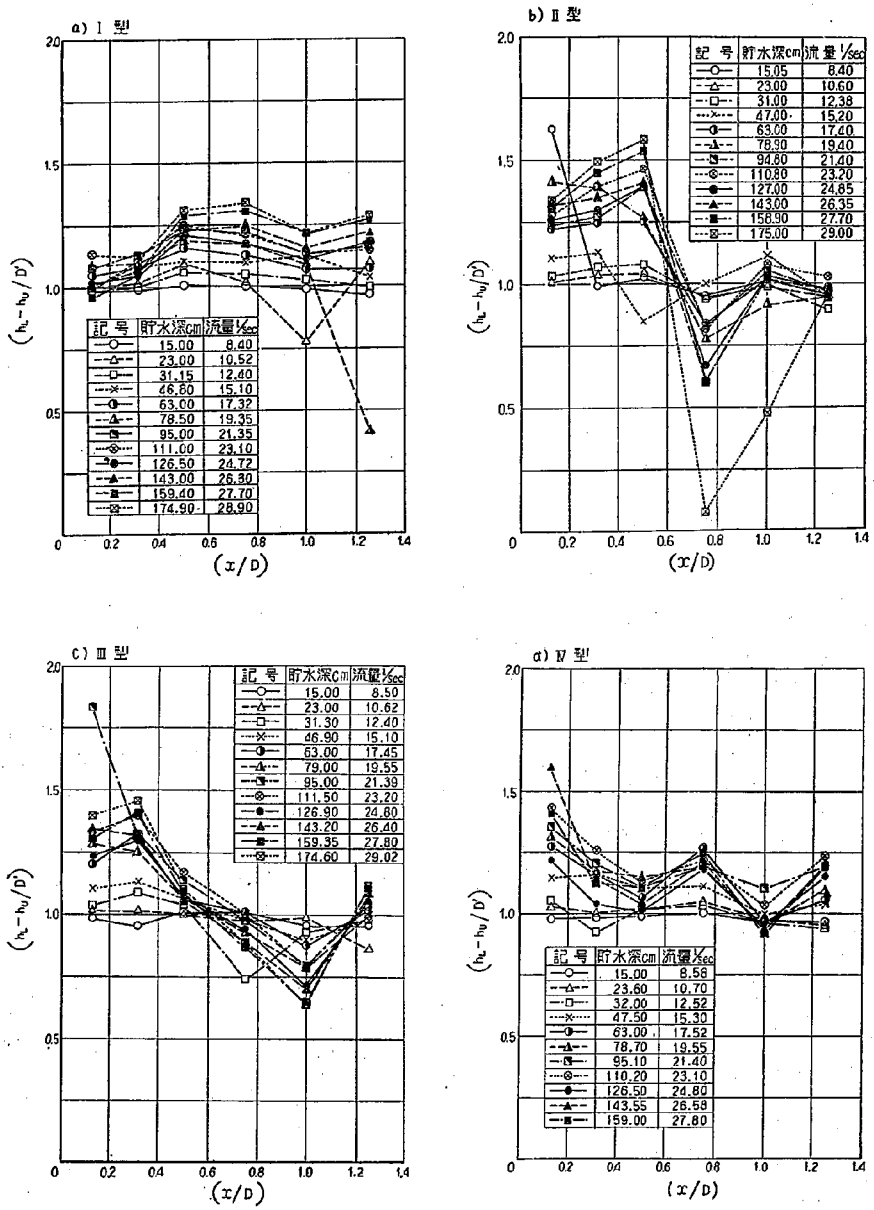
i）負圧および最低圧力の発生点は，ベルマウス曲線と鋭縁孔噴出流自由流線の相互の幾何学的形状の比較から，推定することが出来る。

ii）最低圧力は，流速水頭とほぼ直線的に比例するので，比較的容易に推定することができる。

iii）円形ベルマウスでは，Ⅰ～Ⅲ型ベルマウスのいずれも極端な負圧が発生するおそれはないが，高水頭のもとでⅣ型ベルマウスを用いるのは危険である。

iv）高水頭のもとで操作される方形ベルマウスに，円形ベルマウスと同じ形状を用いると，隅角部に極端な低圧を生じるおそれがある。

本研究で扱われたベルマウス形状が，四種の特定な楕円曲線になっていることに疑問をもつ人は多いであろう。我々がこれらの楕円曲線をとりあげた理由は，単にこのような曲線が多く実用に供せられているからにすぎず，したがって理想的なベルマウス曲線というものは，当然この他の形で求められなければならないはずである。円形ベルマウスで，出来るだけ開口部を小さくしたい場合には，噴出流の自由流線それ自体をとればはるかに合理的であろうし，技術的に不可能なことでもない，しいて楕円曲線を用いるならば，(5)式の楕円の長径をもっと延ばして，0.6～0.7D 程度にする方が好ましいのではなかろうか。最後に，設計の便宜のために，円形ベルマウスに関する圧力測定資料を，附表として提供する。



図—12 (a)—(d) 上下両測点圧力差

表－2　負　圧　発　生　回　数

円型ベルマウス

Ⅰ型

測点＼断面	1	2	3	4	5	6	7	計
頂面			1	12	12	11	10	46
側面					9	6	11	26
底面								0
計	0	0	1	12	21	17	21	72

Ⅱ型

測点＼断面	1	2	3	4	5	6	7	計
頂面		1	12	11	12	12	10	58
側面			9	8	9	1	9	36
底面					1		1	2
計	0	1	21	19	22	13	20	96

Ⅲ型

測点＼断面	1	2	3	4	5	6	7	計
頂面	1	12	12	12	12	12	9	70
側面			8	9	1	9	10	37
底面								0
計	1	12	20	21	13	21	19	107

Ⅳ型

測点＼断面	1	2	3	4	5	6	7	計
頂面	11	11	11	11	11	11	7	73
側面	8	11	11	9	6	1	8	54
底面		7	5				3	15
計	19	29	27	20	17	12	18	142

円型ベルマウス

Ⅰ型　(−5.0cm以下)

測点＼断面	1	2	3	4	5	6	7	計
頂面					7			7
側面								0
底面								0
計	0	0	0	0	7	0	0	7

Ⅱ型

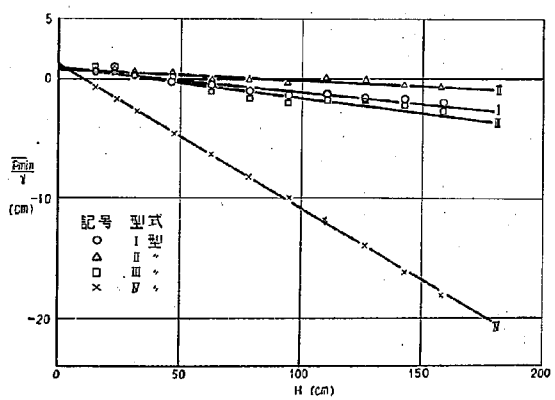
測点＼断面	1	2	3	4	5	6	7	計
頂面			8		6			14
側面								0
底面								0
計	0	0	8	0	6	0	0	14

Ⅲ型

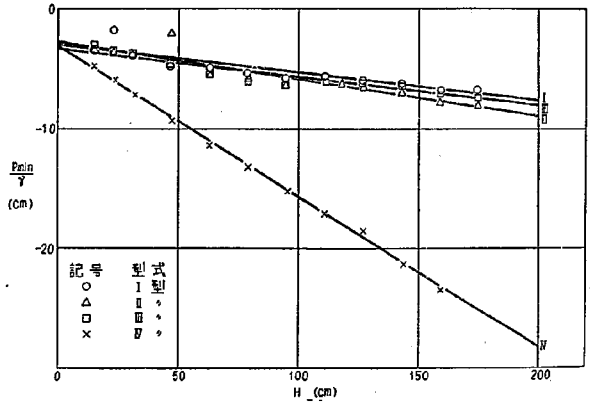
測点＼断面	1	2	3	4	5	6	7	計
頂面			8					8
側面			1					1
底面								0
計	0	0	9	0	0	0	0	9

Ⅳ型

測点＼断面	1	2	3	4	5	6	7	計
頂面	7	10	9	8				34
側面		7	6					13
底面		5	1					6
計	7	22	16	8	0	0	0	53



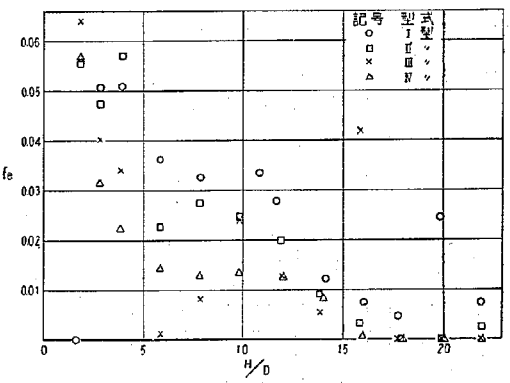
図－13　貯水池水頭と断面平均圧力最低値との関係



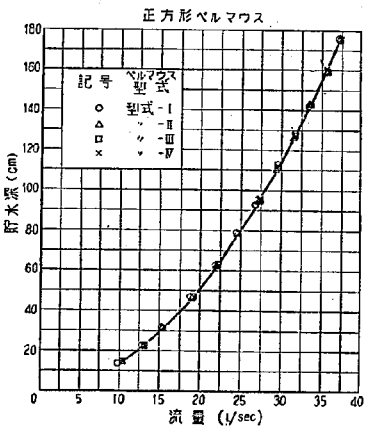
図—14　貯水池水頭と壁面圧力最低値との関係

表—3

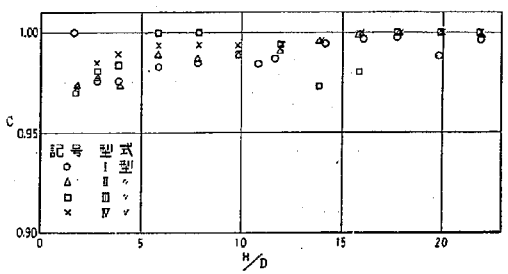
型＼係数	$\overline{\alpha}$	$\overline{\beta}$	α	β
I	0.104	−0.020	−0.368	−0.025
II	0.103	−0.009	−0.347	−0.030
III	0.129	−0.025	−0.416	−0.025
IV	0.152	−0.120	−0.384	−0.127



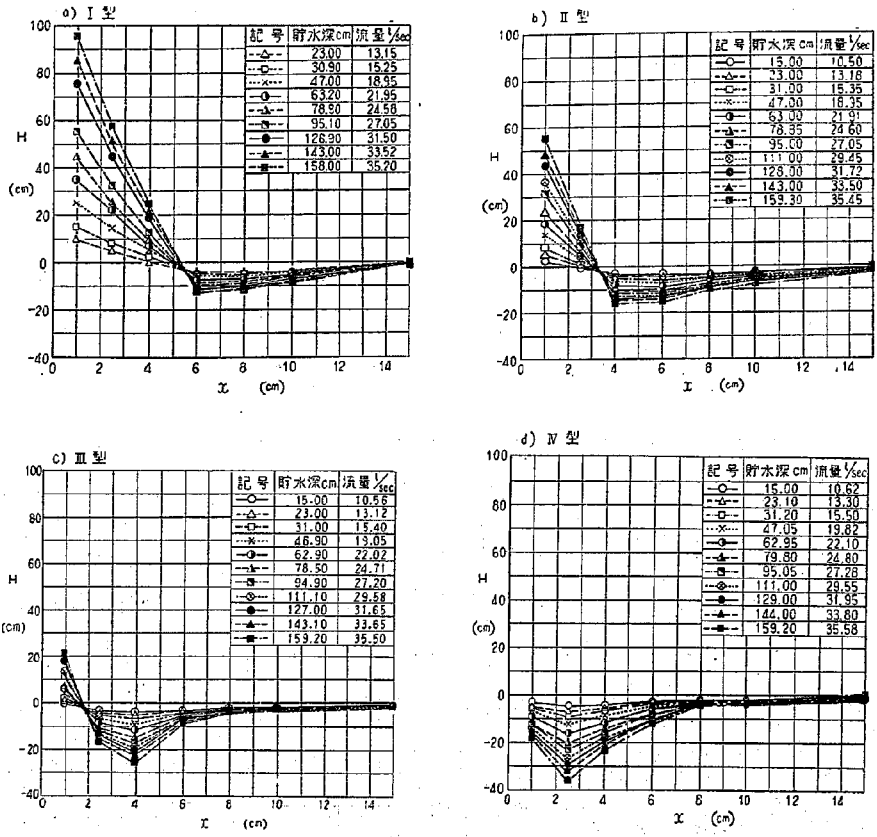
図—16　入口損失係数



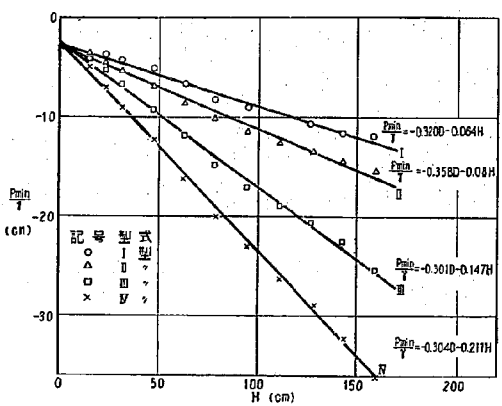
図—15　貯水池水位流量曲線



図—17　流量係数



図—18　(a)～(d)　隅角部圧力分布図



図—19　貯水池水頭と隅角部圧力最低値との関係

附表　円形ベルマウス壁面圧力水頭測定値表

ベルマウス型式	断面 x(cm) / 測点 / 貯水池水頭H(cm)	1.0 上	1.0 下	1.0 左右平均	2.5 上	2.5 下	2.5 左右平均	4.0 上	4.0 下	4.0 左右平均	6.0 上	6.0 下	6.0 左右平均	8.0 上	8.0 下	8.0 左右平均	10.0 上	10.0 下	10.0 左右平均	15.0 上	15.0 下	15.0 左右平均
I	15.00	4.2	14.7	9.3	2.0	11.4	6.9	−0.6	8.1	3.8	−3.0	5.2	1.7	−3.4	4.5	0.6	−2.9	4.8	0.9	−1.2	2.1	0.3
	23.00	8.7	19.4	14.0	5.2	14.8	10.2	0.9	10.3	5.5	−3.1	5.3	1.6	−1.8	4.4	0.4	−3.7	5.0	0.9	0.1	1.9	0
	31.15	13.9	24.5	19.1	8.9	18.3	13.6	2.5	11.7	7.1	−3.0	5.5	1.9	−3.9	4.3	0.2	−2.8	5.2	0.9	−0.8	1.7	−0.3
	46.80	23.2	33.8	28.3	14.6	24.9	20.0	5.3	14.9	10.1	−3.1	5.9	2.1	−4.8	4.2	−0.3	−2.6	5.7	0.8	−1.7	1.7	−0.7
	63.00	32.6	43.9	38.0	21.4	31.7	26.7	8.2	18.2	13.5	−3.2	6.0	2.7	−4.9	3.7	−0.5	−2.6	5.9	1.0	−0.7	1.1	−1.1
	78.50	41.1	52.8	47.0	27.4	37.8	33.0	10.8	21.1	16.5	−3.5	6.1	3.1	−5.4	3.3	−1.0	2.7	6.1	0.9	2.3	1.0	−1.7
	95.00	51.0	62.6	56.6	34.2	44.8	39.6	14.2	24.9	19.6	−3.3	6.6	3.3	−5.8	3.8	−1.6	−2.5	6.8	0.8	−2.3	0.8	−2.2
	111.00	59.9	72.1	65.8	40.3	50.9	45.9	17.2	28.0	22.7	−2.9	7.0	4.0	−5.7	3.4	−1.5	−1.9	7.3	1.2	−1.9	0.9	−2.0
	126.50	70.7	81.6	75.6	47.9	57.8	53.2	20.8	31.3	26.4	−2.5	7.0	4.7	−6.0	2.9	−1.7	−1.5	7.9	1.4	−2.1	1.0	−2.5
	143.00	80.5	91.4	85.6	54.8	64.9	59.9	24.1	34.8	29.6	−2.4	7.7	5.3	−6.3	3.0	−1.9	−1.2	8.5	1.7	−2.2	0.7	−2.8
	159.40	90.9	101.2	95.7	61.6	71.5	66.6	27.2	38.4	33.0	−2.7	8.0	5.7	−6.8	2.9	−2.3	−1.2	8.9	1.8	−2.3	0.7	−3.3
	174.90	99.8	110.4	104.7	67.7	78.2	75.0	30.3	41.7	36.1	−2.4	8.5	6.4	−6.8	2.9	−2.1	−0.8	9.5	2.1	−2.2	0.7	−3.4
II	15.05	1.1	17.0	5.6	− 0.2	8.5	4.2	−3.5	5.0	0.9	−3.0	4.6	0.7	−3.4	4.6	0.6	−3.1	4.8	0.7	0	2.3	0.4
	23.00	3.8	13.6	8.3	1.4	10.5	5.9	−3.7	5.0	1.0	−3.0	4.5	0.7	−3.5	4.4	0.6	−3.0	4.5	0.8	0.1	2.2	0.2
	31.00	6.4	16.4	11.1	3.1	12.4	7.5	−3.8	5.1	1.1	−3.1	4.4	0.6	−3.6	4.3	0.3	−3.1	4.0	0.8	−1.4	2.2	0.3
	47.00	11.5	22.3	16.4	6.3	16.2	11.3	−2.1	5.0	0.4	−3.3	4.7	0.2	−4.2	4.7	−0.2	−3.5	4.1	0.4	−1.8	−0.4	−0.5
	63.00	16.3	28.3	21.4	9.2	20.1	14.5	−5.5	4.8	−0.5	−3.4	3.3	0.2	−4.7	3.4	−0.3	−3.8	3.9	0.6	−1.9	2.1	−1.2
	78.90	20.5	34.3	26.2	11.8	23.9	17.7	−5.9	4.6	0.6	−3.2	3.0	−0.1	−4.4	2.9	−0.7	−3.9	3.6	0.2	−1.7	2.1	−1.8
	94.80	27.5	39.6	31.4	16.5	28.0	21.0	−6.4	5.1	−0.1	−3.3	3.3	−0.2	−5.3	3.1	−0.9	−3.9	3.8	0.1	−1.9	2.3	−2.1
	110.80	32.9	45.4	36.7	20.2	32.4	24.5	−6.3	5.9	0.2	−2.6	3.9	0	−5.0	3.6	−0.4	−3.8	4.4	0.5	−2.5	3.3	−1.8
	127.00	39.0	51.3	42.4	24.4	35.7	28.7	−6.5	5.0	0.4	−2.4	2.9	0.1	−5.3	2.8	−0.7	−3.6	4.2	0.5	−1.7	2.5	−2.2
	143.00	44.1	57.0	47.7	27.7	39.5	32.0	−7.0	4.7	0.1	−2.3	2.5	−0.3	−5.7	2.4	−1.3	−3.8	4.0	0.4	−1.7	2.8	−2.6
	158.90	49.6	62.4	52.6	30.8	43.4	35.6	−7.8	4.9	0.1	−2.2	2.6	−0.1	−5.9	2.3	−0.8	−3.7	4.1	0.3	−1.7	2.6	−2.9
	175.00	55.2	68.3	58.1	34.8	47.8	39.3	−8.0	5.1	0.2	1.9	2.6	0.1	−6.0	−2.3	0.9	−3.3	4.3	0.5	−1.6	3.2	−3.5
III	15.00	− 0.2	8.9	4.0	−2.2	5.8	1.6	−3.1	5.1	1.0	−2.9	5.1	1.1	−2.6	5.0	1.1	−2.6	5.0	1.1	3.4	3.4	0.4
	23.00	1.2	10.6	5.4	−2.7	5.8	1.5	−3.5	4.6	0.6	−3.2	4.6	0.6	−3.2	4.7	0.8	−2.6	4.5	0.8	0.5	2.1	0.2
	31.30	2.7	12.2	6.9	−2.9	6.1	1.5	−3.8	4.6	0.4	−1.4	4.5	0.4	−2.6	4.9	0.8	−3.2	4.7	0.8	0.8	2.1	0
	46.90	5.5	15.7	9.8	−3.0	6.5	1.4	−4.6	3.9	0.8	−3.9	3.9	0.2	−2.7	4.5	0.6	−3.6	4.2	0.5	−2.0	1.9	−0.8
	63.00	8.2	19.2	12.8	−3.5	7.6	1.4	−5.5	3.1	−1.0	−4.5	3.5	−0.7	−2.8	4.8	0.4	−4.2	3.9	0.4	−2.9	1.9	−1.7
	79.00	11.0	22.8	15.9	−3.5	7.0	1.5	−6.1	2.5	−1.5	−4.7	2.7	−1.0	−2.5	3.8	0.2	−4.4	3.6	0.3	−3.5	1.8	−2.3
	95.00	24.9	26.5	18.6	−3.0	8.1	1.4	−6.4	2.8	−2.2	−4.8	3.0	−1.6	−2.1	4.2	−0.1	−4.5	3.9	0.1	−3.6	1.9	−2.9
	111.50	18.4	30.7	22.3	−2.3	9.4	1.8	−6.1	3.3	−2.1	−4.4	3.6	−1.1	−1.4	4.9	0.6	−3.9	4.5	0.7	−3.4	2.4	−2.1
	126.90	22.4	33.8	25.8	−1.8	9.1	2.8	−6.2	2.5	−1.9	−4.4	3.1	−1.0	−1.0	4.7	1.0	−4.1	4.3	1.0	−3.6	2.1	−2.5
	143.20	25.2	37.6	28.8	−1.3	9.7	2.7	−6.5	2.0	−2.4	−4.4	2.7	−1.0	−0.9	4.7	1.2	−4.4	4.3	1.1	−3.8	2.1	−2.4
	159.35	29.0	41.0	31.9	−1.5	10.3	2.9	−7.0	1.7	−2.8	−4.4	2.5	−1.4	−0.2	4.9	1.5	−4.4	4.4	1.1	−4.1	2.0	−3.1
	174.60	31.5	44.4	34.8	−1.4	10.8	2.8	−7.4	1.5	−3.3	−4.6	2.4	−1.7	−0.1	5.0	1.1	−4.4	4.5	1.0	−4.4	2.6	−3.4
IV	15.00	− 3.4	5.2	0.8	− 4.7	3.3	− 0.7	− 4.0	3.9	− 0.1	−3.6	4.4	0.6	−3.2	4.6	0.7	−3.0	4.7	0.8	−1.3	2.1	0.4
	23.60	− 3.9	5.2	1.4	− 5.9	2.3	− 1.5	− 4.7	3.4	− 0.7	−4.2	4.2	0.2	−3.4	4.4	0.5	−3.0	4.6	0.8	−1.3	1.8	0.2
	32.00	− 4.3	5.0	0.2	− 7.2	0.3	− 2.6	− 5.4	2.7	− 1.4	−4.4	3.8	0	−3.4	4.3	0.4	−2.9	4.6	0.9	−1.2	1.6	0
	47.50	− 4.8	5.3	0.1	− 9.3	0.2	− 4.6	− 6.6	2.2	− 2.7	−5.2	3.7	−0.4	−3.5	4.5	0.4	−3.0	5.3	1.3	−1.1	1.3	−0.4
	63.00	− 5.6	5.7	0.2	−11.4	− 1.9	− 5.8	− 7.5	1.0	− 3.2	−5.6	4.5	−0.4	−3.0	4.7	1.0	−2.6	5.8	0.8	−0.7	0.8	−0.5
	78.70	− 5.9	5.6	−0.2	−13.2	− 3.6	− 7.7	− 8.4	0.8	− 4.1	−6.1	3.4	−0.5	−2.7	4.8	1.1	−2.5	6.2	2.5	−0.6	0.5	−0.8
	95.10	− 6.7	5.2	−0.5	−15.2	− 5.4	− 0.6	− 9.5	− 0.7	− 6.0	−6.7	2.9	−0.9	−4.0	4.8	0.9	−2.6	6.9	2.8	−0.3	0.2	−0.8
	110.20	− 7.1	5.5	−1.0	−17.1	− 6.8	−11.7	−10.6	− 1.5	− 6.7	−7.3	2.4	−1.5	−3.6	4.6	0.5	−2.7	7.1	2.4	0.3	0.2	−1.0
	126.50	− 6.8	3.9	−1.5	−18.5	−10.1	−13.6	−11.3	− 3.3	− 7.8	−7.8	1.6	−1.8	−3.6	4.0	0.5	−2.8	6.4	2.6	0.6	− 0.3	−1.2
	143.55	−10.1	4.0	−2.1	−21.3	−11.9	−15.8	−12.7	− 4.4	− 9.1	−8.8	0.9	−2.2	−3.8	3.7	0.3	−2.8	6.8	2.7	0.9	− 0.6	−1.5
	159.00	− 8.6	3.8	−2.4	−23.4	−14.2	−17.4	−13.9	− 5.0	−10.1	−9.4	0.5	−2.5	−3.6	3.7	0.4	−2.8	6.7	2.9	1.2	− 0.8	−1.7

（註）　圧力水頭値の単位：測定点上 cm 水柱.　　x：入口より断面までの軸線に平行な距離

吾妻川水質調査報告

(酸性河川水の水質に関する調査研究第3報)

(昭和34年3月)

有泉昌*
小松原正夫**
牧隆正**
野本誠三***

目次

第1編 水質
I まえがき……(1)
II 吾妻川水系の水質概要および既存の資料について……(1)
III 水質調査方法，結果および水質の概要……(2)
〔1〕調査方法……(2)
〔2〕調査結果……(2)
〔3〕水質の概要……(2)
IV 水質についての検討……(13)
〔1〕水質の変化について……(13)
〔2〕水質の特性について……(15)
〔3〕成分の流出量について……(18)
〔4〕太子精錬所の工場廃水について……(22)
〔5〕貯水池酸度の推定……(23)
〔6〕水質改良対策および水質調査結果の大要……(23)
V セメントおよび金属材料の耐酸性比較試験…(23)
〔1〕セメントの耐酸性比較試験……(24)
〔2〕金属材料の耐酸性比較試験……(34)
VI 総括……(35)

第1編 水質

I まえがき

利根川総合開発の一環として，吾妻川にダム建設計画が進められ，その候補地として群馬県吾妻郡長野原町八ツ場附近があげられている。吾妻川は古くから酸性河川として知られており，魚類は棲息しておらず，灌漑用水としても利用されていない。またこの水を利用する水力発電機の損耗は著るしい。

本調査はこの計画にもとづいて行なわれる諸調査のうち水質に関するものであり，吾妻川の酸性度の現況を明らかにし，流下中に起る水質の変化をしらべ，ダムが築造された場合の貯水池酸度について検討し，利水効果を推定し，水質改善および河川構造物の耐酸材料選定の基礎資料を得ることを目的としている。

なお本調査は関東地方建設局の依頼により実施したものであり，現地調査にあたっては躑原工事々務所の方々の協力を得たことを感謝する。

II 吾妻川水系の水質概要および既存の資料について

利根川の一支川である吾妻川は群馬県の西北部を流れ，その流域面積は1,370km²，流路延長は74kmにおよんでいる。吾妻川の水源は長野県と群馬県との県境にある鳥居峠附近に発し，万座川，遅沢，熊川等を合流し長野原町附近で須川と合流する。その後，温川，山田川を合流し中之条町附近で名久田川と合流しさらに東流して渋川市において利根川に合流する。

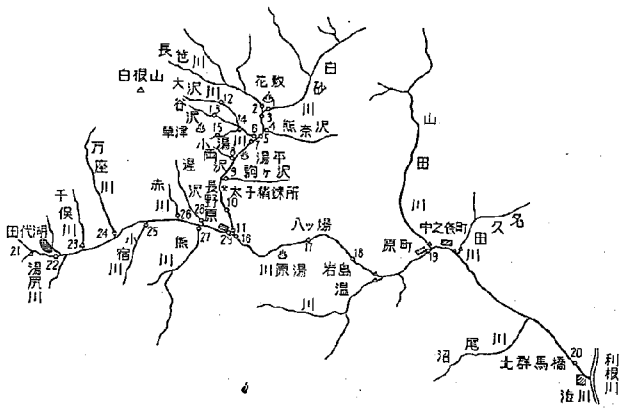
吾妻川の流域内には白根山中腹旧火口より湧出する毒水を初めとして，万座，草津，花敷，湯平，河原湯，四万等の温泉が湧出している。

吾妻川は古くから酸性河川として知られており，酸性化の原因について種々調査が行なわれたが公表されたものは少ない。吾妻川の酸性化の主因は草津温泉であることは明らかであり，草津温泉の泉質等については古くか

* 化学研究室長　** 主任研究員　*** 北陸地建企画室材料試験係長

ら多くの資料[1]がある。吾妻川水系全般については，昭和7年の石井の調査[2]，東京電力群馬電力所の調査[3]等があり，最近になって電力中央研究所[4]，渋川高校[5]によっても調査が行なわれた。

石井，群馬電力所および渋川高校の調査は主として，吾妻川各支川のPHについて調査し，支川の流入による吾妻川酸性化の原因をしらべ，電力中央研究所の調査は吾妻川の支川であり強酸性を示す須川流域に関するもので酸度と共にその上流部における中和の可能性，経済性について検討を行なっている。吾妻川全般，特に八ツ場より上流部の吾妻川の水質を，酸度のみならず水質を表示する他の資料および流量と共に報告したものはない。八ツ場地点における貯留水の酸度を推定し，水質の季節的変化を知るためには，長期にわたり継続して行なわれた調査資料が必要であり，今回の調査が行なわれた。



図—1　吾 妻 川 流 域 図

Ⅲ　水質調査の方法，結果および水質の概要

〔1〕調査方法

調査は昭和27年9月に予備調査が開始され，八ツ場より上流部の吾妻川本川，須川について各支川のPHを測定し既存の資料と比較対照し，流入する酸性支川を再確認し，採水点を選定した。この結果にもとづき同年10月に八ツ場附近および須川水系について全般的な調査を実施し，さらに採水点をしぼって第一期の調査を行なった。第一期調査では冬季渇水期，融雪期，夏季渇水期を選んで昭和27年12月3～4日，28年5月20～22日および8月25～27日に夫々実施した。

吾妻川水系には各所に発電用水路があり，その流量は自然的因子の他に発電状況によっても支配される。したがって各成分の流出量を明確にし，貯水池の終局平衡酸濃度の推定の精度をあげるためには，さらに長期にわたって定期的に調査した資料が必要であり，第二期の調査を行なった。第二期調査は昭和29年11月より30年12月にわたって行なわれ，毎月2回定期的に採水および流量観測を実施した。現地における採水，流量観測は関東地建藤原工事々務所調査課によって行なわれた。

採水方法，試水の分析方法は土研報告第90号[6]に報告したものと同様である。第二期調査では分析の迅速を期するため，前記方法の代りに次の方法によった。

1)　Cl^- …モール法
2)　$SO_4^=$ …陽イオン交換樹脂通過液の中和測定により求めた$Cl^-+SO_4^=$からモール法によるCl^-を差引く。
3)　SiO_2…モリブデン酸アンモンによる比色
4)　$Fe^{\#}$ …O^-フェナンスロリンによる比色
5)　$Al^{\#}$ …EBT指示薬を用い過剰のEDTAをPH 6で$Zn^{\#}$により逆滴定して$Fe^{\#}+Al^{\#}$を求め前記の$Fe^{\#}$を差引く。
6)　$Ca^{\#}$ …過マンガン酸カリ滴定法
7)　$Mg^{\#}$…EDTAにより$Ca^{\#}+Mg^{\#}$を滴定し前記$Ca^{\#}$を差引く。
8)　酸度，アルカリ度……常法

〔2〕調査結果

予備調査における各支川のPH吾妻川流域の温泉，湧水および湖水のPHの測定値を他の測定者による資料と共に表—1，2に，また第一期調査結果を表—4，第二期調査結果を表—5～8に夫々示す。さらに昭和30年9月に藤原工事々務所，東京都立大学理学部半谷，市川等と協同して行なった調査結果を表—9に示す。

〔3〕水質の概要

(1)　PHについて

吾妻川の流下中におけるPHの変化および流入する各支川のPHについて述べ，酸性化の状況を説明する。

吾妻川最上流部にある田代湖下ではPH6.4であり，左岸より流入する支川は上流より千俣川，万座川，赤川，遅沢等がある。千俣川はPH7.0，万座川は6.3，赤川は7.0，遅沢は2.6～3.1であった。この内万座川，赤川は昭和15～16年における東電の調査[3]によるとPHは夫々2.8～6.0，2.8～6.8と調査時期により大きく変動している。このことは此等河川の酸性化の原因が不定のものであることを示しており，おそらく此等河川の上流にある硫黄鉱山，硫化鉄鉱採取所等の操業と関連するものと思われる。

右岸より流入する支川をみると，上流より湯尻川，宿川，熊川がある。湯尻川はPH7.2であり，熊川は7.0，宿川は渋川高校[4]の調査結果では7.3である。

これら両岸より流入する支川を合流した吾妻川は長野原町附近でPH5.7～6.9で中性に近い。すなはち左岸より流入する酸性水は，右岸より流入する微アルカリ性の河川で中和稀釈されており，長野原町附近の吾妻川本川は酸性河川の様相を示すに至っていない。この後，須川を合流し吾妻川のPHは急激に低下する。須川のPHは2.3～2.8であり，須川合流後の吾妻川のPHは2.4となる。ダム予定地の八ツ場においてもPHは2.4～3.4で酸性が著るしく，さらに流下して岩島においても依然2.4～3.3である。そのご，温川を合流し原町附近でPHは3.0～4.5となる。さらに流下して山田川，名久田川を合流し，渋川市附近の北群馬橋に至って吾妻川のPHは5.1程度になる。吾妻川のPHは須川の流入によって急激に低下し，吾妻川の汚濁は須川の流入によって起る。つぎにこの吾妻川の酸性化の起源について述べる。

長笹川と白砂川が花敷において合流し須川となる。長笹川のPHは4.5，白砂川は4.9で共に酸性を示しているがこの原因については調査してなく明かでない。そのご，熊奈沢（PH6.6）を合し，湯川と合流する。湯川と合流する前の須川はPH4.5を示している。湯川は須川域における最も強酸性を示す支川であり，そのPHは1.9である。この強酸性の湯川の合流により須川は著るしく酸性化され，その合流点下流ではPHは急激に低下し2.0～3.0となる。さらに下って小雨沢（PH2.8）および駒ケ沢（PH6.7）を合し，長野原町附近で吾妻川に合流する。吾妻川に合流する前の須川は依然PH 2.3～2.8を示し，支川，沢等の流入によりあまりPHは変らない。

このように須川はその上流部の長笹川，白砂川がすでに酸性であるばかりでなく，右岸から流入する湯川，小雨沢等は強酸性であり，これらの流入によって須川はさらに酸性化されることが明らかである。

湯川が強酸性である第一の原因は草津温泉に由来する。草津温泉は湯川の最上流部に位している。温泉は湯畑を中心として19ケ所から湧出しており，このPHは湯畑では1.3である。また町外，西の河原ではPH1.4～1.7を示している。草津温泉の泉質は大体，酸性明礬緑礬泉に属し，日本鉱泉分析表によれば表—3の如くである。第二の原因としては白根山に水源を発する毒水をあげることが出来る。本調査では白根山毒水については調査を行なっていないが，昭和7年9月石井[2]の調査によれば，毒水は白根山の中腹南側やや東によった所より湧出しており東流して大沢川に流入する。毒水は白根山の爆発火口である湯釜，および水釜より湧出しており，流出水のPHは夫々1.6および2.7であった。これらの毒水，および草津温泉水はことごとく湯川に流入し，湯川のPHを低下させており，須川酸性化の主因をなしている。

須川水系には花敷，湯平の温泉があり，これ等の湧出湯は微アルカリ性を示すが，ともに湧出量少なく須川の酸度を低下させない。その他，須川の酸性化に影響をあたえるものとして，太子にある鉄鉱石製錬所の廃水も考えられるが，これについては後述する。以上吾妻川の酸性化の現状について，既存の資料と比較しつつ吾妻川本川および各支川のPHの変化について述べたのであるが酸度，アルカリ度については後にのべることとする。

(2) 溶存成分について

一般に吾妻川水系の酸性河川では溶存イオン量が多量であり，中性河川には少ない。この流域に湧出する草津温泉中には，Fe^{*}，Al^{*}，SiO_2，$SO_4^{=}$，Cl^{-}が多量に溶存しており，微アルカリ性泉である花敷，湯平温泉にはCa^{+}，$SO_4^{=}$，Cl^{-}の溶存量が多い。川原湯温泉中にはCa^{*}，Mg^{*}の溶存量少なく，Fe^{*}，Al^{*}は痕跡程度であり，$SO_4^{=}$，Cl^{-}が多量である。

〔SO_4〕および〔Cl^{-}〕：湯川は本水系中最も多量の$SO_4^{=}$を含有しており，測点No.6では600mg/L程度である。さらに上流部のNo. 14，15測点では1,200mg/L以上を含有する。次いで大沢川，遅沢で夫々400，250mg/L程度を含有する。100mg/L程度を含む支川には長笹川，谷沢，万座川等がある。熊奈沢，駒ケ沢等の中性河川水には$SO_4^{=}$含有量は少なく，8mg/L以下である。花敷，湯平，川原湯の温泉には400mg/L程度を含有し，草津温泉では1,300mg/L程度を含んでいる。

Cl^{-}は湯川水系および草津，花敷，湯平，川原湯の各温泉中に多量に存在する。No.15測点における湯川中には400mg/L，測点No.12における大沢川には130mg/L程度を含有する。

〔Ca^{*}〕および〔Mg^{*}〕：Ca^{*}およびMg^{*}は共に酸性水に多く，Ca^{*}は湯川で40mg/L，小雨沢では20mg/L程度を含有する。その他の酸性河川では10mg/L以下であるが長笹川は29～13mg/Lで比較的多量である。Mg^{*}は湯川，大沢川，小雨沢には22～11mg/L程度を含有する。花敷，湯平の微アルカリ性泉はCa^{*}を180～120mg/L含み多量に存在するがMg^{*}は非常に少ない。これに反し草津温泉ではCa^{*}は59mg/Lで比較的少なく，

表—1 吾妻川水系のPH値

採水地点	測点番号	石井	東電	土研	渋川高校	半谷，市川
湯尻川（支）	21	—	—	7.2 ※	7.9	—
田代湖下（吾）	22	—	—	—	—	6.4
千俣川（支）	23	—	—	7.0 ※	7.3	—
万座川合流前（吾）		7.1	—	—	—	—
万座川（支）	24	—	2.8~6.0	—	6.7	6.3
宿川（支）	25	—	—	—	7.3	—
赤川（支）	26	—	2.8~6.8	7.0 ※	4.8	6.5
遅沢（支）	28	—	—	3.1 ※	2.9	2.6
熊川（支）	27	7.3	—	7.0	7.1	—
須川合流前（吾）	29	6.9	—	5.7~6.9	5.7	—
須川（支）	11	2.9	2.2~3.4	2.3~2.8	2.8	2.3
須川合流後（吾）	16	—	—	2.4	—	—
八ツ場（吾）	17	—	—	2.4~3.4	2.8	2.4
岩島（吾）	18	—	—	2.4~3.3※	—	—
温川合流前（吾）		—	—	—	2.8	—
温川（支）		7.3	—	—	6.9	—
原町（吾）	19	4.3	—	3.0~4.5※	—	—
山田川（支）		6.5	—	6.9 ※	6.7	—
中之条町（吾）		4.5	—	—	4.8	—
名久田川（支）		7.3	—	—	7.2	—
沼尾川（支）		7.1	—	—	—	—
北群馬橋下（吾）	20	5.1	3.2~6.0	—	—	5.1
調査年月	—	昭7.9月	昭15~16	昭27 ~ 30	昭 29.8 月	昭 30.9 月
草津西の河原	—	—	—	1.4~1.7	—	1.3~1.4
〃 湯畑	—	—	—	1.3	—	—
白根山湯釜	—	1.6	—	—	—	—
〃 水釜	—	2.7	—	—	—	—
花敷温泉	—	7.5	—	7.8	—	7.1
湯平温泉	—	—	—	7.5	—	7.4
川原湯	—	—	—	6.6	—	6.7
田代湖	—	—	—	—	—	6.7
調査年月		昭7.9月		昭27 ~ 30	—	昭 30.9 月

※……関東地建藤原工事々務所調査課測定

表—2 須川水系のPH値

採水地点	測点番号	石井	土研	半谷，市川	採水地点	測点番号	石井	土研	半谷，市川
白砂川	1	5.1	4.8~4.9	5.0	谷沢	13	4.3	3.6~3.9	3.2
長笹川	2	4.3	4.5~5.8	4.2	草津町下湯川	15	1.9	—	1.5
同上合流後の須川	3	—	5.4	—	大沢川合流前湯川	14	1.9	1.9	2.0
熊奈沢	4	—	6.6	6.0	小雨沢	8	2.9	2.8~3.0	3.0
湯川合流前須川	5	4.9	4.5~5.8	4.5	駒ヶ沢	9	—	6.4~6.7	6.7
湯川	6	2.2	1.9~2.0	1.9	出立橋下須川	10	—	2.2~2.9	—
湯川合流後須川	7	—	2.0~3.2	—	調査年月		昭7.9月	昭27~30年	昭30.9月
大沢川	12	3.2	2.3~3.2	2.5					

表—3 草津温泉分析表

（鉱水1kg中に含有する各成分をmgで示す）

泉名	所在地	試験年月	水温°C	比重	湧出量 m³/day	H^+	K^+	Na^+	NH_4^+	Ca^{++}	Mg^{++}	Mn^{++}	Fe^{++}	Fe^{+++}	Al^{+++}	Cl^-	Br^-	J^-	HSO_4^-	SO_4^{--}	HPO_4^{--}	$HAsO_4^{--}$	HBO_2	H_2SiO_3	H_2S
湯畑	群馬郡吾妻郡草津町	大正2年5月	—	1.0032 (18°)	—	30.86	17.03	36.70	1.06	1099.67	32.71	—	114.44	—	170.22	645.37	—	—	2145.06	1092.75	8.60	—	15.02	249.78	5.46
西の河原	草津町	大正2年5月	43°	1.0028 (19°)	—	27.90	12.54	34.59	1.06	82.63	29.23	—	111.69	—	150.19	557.22	—	—	1971.31	986.97	3.43	—	11.32	214.93	trace
草津温泉	草津町字毒水沢	大正3年7月	60°	1.0026 (22°)	—	28.30	19.61	104.72	0.53	329.15	12.65	—	33.52	—	404.67	2170.16	—	—	—	1161.79	5.16	—	28.30	292.66	—
草津温泉	草津字白根乙甲718番地国有林内	大正8年8月	53°	1.0029 (15°)	—	25.1	26.9	73.6	0.7	267.8	12.6	—	275.8	—	16.7	1562.1	—	—	1058.1	—	trace	—	—	224.4	trace
草津温泉	草津字白根甲464番地の1	昭和3年12月	—	1.0063 (15°)	519.0	1.6	76.0	332.0	—	801.8	486.6	—	49.7	2.6	210.9	3075.9	4.5	6.5	162.8	1672.1	—	—	16.0	421.9	—

衛生試験所彙報第34号，日本鉱泉分析表，昭4

草津温泉	草津町大字草津白根甲464番地の1	昭和9年10月	41°	1.001 (15°)	288.5	10.2	8.92	20.04	—	74.39	54.5	—	22.6	23.83	161.0	470.5	—	—	—	109.3	4.67	—	39.97	177.2	—
草津温泉（白旗の湯）	草津町大字草津乙418番地	昭和11年9月	61°	1.002 (15°)	71.0	25.78	17.98	105.9	—	39.97	13.17	1.1	25.11	90.65	259.1	117.5	—	—	248.1	226.2	23.1	0.21	19.2	257.4	—

衛生試験所彙報第54号，日本鉱泉分析表，昭15

表—4 第一期吾妻川水質調査結果

昭和27年10月調査 (8.9.10日採水)

採水地点	測点番号	Ca mg/L	Mg mg/L	Fe mg/L	Al mg/L	SiO_2 mg/L	SO_4 mg/L	Cl mg/L	蒸発残渣 mg/L	強熱減量 mg/L	酸度meq/L M.O	酸度meq/L P.P	アルカリ度meq/L M.O	アルカリ度meq/L P.P	水温 °C	PH	流量 m^3/sec
花敷温泉	—	183.3	1.4	0.8	0.8	40.0	527.1	189.8	mg/L	mg/L	—	—	0.48	0.06	44.6	7.8	—
長笹川	2	29.1	5.5	1.1	5.3	17.0	102.5	23.3	—	—	—	0.42	0.05	—	15.1	4.4	—
白砂川	1	12.0	4.1	0.9	2.2	14.3	35.0	5.2	—	—	—	0.14	0.08	—	12.8	4.9	0.35
長笹，白砂合流後	3	30.2	5.0	0.3	3.8	18.0	107.0	20.5	—	—	—	0.37	0.07	—	16.0	—	0.61
熊奈沢	4	6.1	2.0	0.5	1.0	9.5	1.7	2.6	—	—	—	—	—	—	15.2	6.6	0.20
湯川合流前の須川	5	20.7	4.5	0.4	1.9	13.3	61.7	13.0	—	—	—	0.19	0.12	—	16.4	4.5	1.11
湯川	6	53.6	20.1	16.3	54.3	78.5	647.3	218.0	—	—	9.21	13.93	—	—	20.8	1.9	1.04
湯川合流後の須川	7	43.2	14.4	10.1	37.4	68.8	440.7	143.5	—	—	5.60	8.95	—	—	19.2	2.0	2.25
小雨沢合流前の須川	—	46.8	10.4	11.4	53.3	63.8	453.9	147.2	—	—	5.36	9.47	—	—	17.9	2.3	—
小雨沢	8	26.1	8.9	11.5	16.2	47.8	197.1	25.5	—	—	0.80	2.45	—	—	17.8	2.6	0.06
小雨沢合流後の須川	—	44.9	20.9	12.4	38.7	73.5	449.8	105.9	—	—	5.13	8.85	—	—	18.1	2.0	—
駒ケ沢	9	3.6	1.9	R_2O_3として0.75		16.5	8.2	2.3	—	—	—	—	0.33	—	13.0	—	—
出立橋下須川	10	37.4	7.8	8.2	30.7	52.3	351.8	95.5	—	—	3.64	6.69	—	—	19.0	—	0.78
吾妻川合流前の須川	11	34.0	12.1	7.7	27.5	52.3	303.3	103.2	—	—	3.37	6.05	—	—	19.2	2.4	1.22
須川合流前の吾妻川	29	10.7	4.9	0.5	1.0	28.5	40.7	8.6	—	—	—	0.04	0.29	—	—	—	—
須川合流後の吾妻川	—	31.5	11.1	7.1	23.8	46.5	272.8	86.6	—	—	2.86	4.96	—	—	19.2	2.5	0.93
八ツ場	17	32.5	10.9	8.3	24.2	52.5	270.4	84.6	—	—	2.72	4.96	—	—	19.1	2.6	—

昭和27年12月調査 (3.4日採水)

湯川合流前の須川	5	50.0	7.9	0.2	16.9	37.8	124.3	25.0	—	—	—	0.09	0.20	—	6.0	6.2	0.29
湯川	6	62.5	23.0	16.6	69.5	66.0	746.9	252.4	—	—	11.10	16.80	—	—	11.4	1.8	0.32
湯川合流後の須川	7	59.5	20.6	20.3	56.6	64.5	666.2	222.4	—	—	10.37	15.51	—	—	10.1	1.9	0.60
出立橋下須川	10	45.2	15.9	15.9	38.4	56.8	458.4	137.1	—	—	6.04	9.82	—	—	9.0	2.2	1.00
吾妻川合流前の須川	11	42.6	14.5	17.3	32.8	62.0	408.2	148.2	—	—	5.04	9.03	—	—	5.6	2.3	1.09
須川合流前の吾妻川	29	12.7	5.8	2.9	30.2	34.8	21.4	2.0	—	—	—	0.07	0.71	—	2.4	6.9	—
須川合流後の吾妻川	—	39.8	13.1	19.7	26.5	62.0	356.8	124.7	—	—	4.44	7.65	—	—	5.2	2.4	0.79

昭和28年5月調査 (20.21.22日採水)

大沢川合流前の湯川	14	64.9	23.4	42.0	118.3	160.5	1478.9	494.8	2200	1546	24.51	37.18	—	—	28.0	1.5	—
湯川合流前の大沢川	—	46.3	16.7	9.6	42.3	45.3	214.4	76.9	687	530	0.41	2.87	—	—	12.6	2.9	—
湯川	6	50.9	19.2	18.2	62.8	74.8	618.1	221.4	1863	1195	8.52	13.82	—	—	15.5	2.0	1.27
湯川合流前の須川	5	24.1	3.5	1.1	7.6	13.0	90.9	25.2	202	171	—	0.25	0.12	—	12.0	4.9	0.53
湯川合流後の須川	7	44.5	15.3	13.3	65.2	64.0	478.2	137.3	762	662	6.02	10.28	—	—	18.0	2.1	1.94
小雨沢	8	29.3	10.6	9.6	28.2	55.3	225.9	57.9	466	413	1.13	3.48	—	—	17.8	2.9	—
駒ケ沢	9	3.6	1.6	0.5	3.2	17.3	2.5	1.3	71	49	—	0.02	0.42	—	12.8	6.4	0.12
出立橋下須川	10	36.6	12.5	44.8	36.0	57.3	348.1	112.3	586	531	3.64	6.94	—	—	17.0	2.3	2.64
吾妻川合流前の須川	11	34.8	11.8	10.9	32.6	52.0	315.2	38.1	593	492	3.01	6.18	—	—	17.0	2.5	2.75
八ッ場	17	35.9	11.5	8.6	41.9	54.8	288.5	41.8	515	452	2.44	5.19	—	—	19.0	2.8	3.95

昭和28年8月調査 (25.26.27日採水)

湯川合流前の須川	5	37.0	3.3	2.1	1.1	14.0	60.9	21.0	178	128	—	0.09	0.15	—	18.5	5.5	1.09
湯川	6	53.1	19.5	17.3	49.1	67.0	604.9	315.6	983	598	8.32	14.36	—	—	20.0	2.0	2.58
湯川合流後の須川	7	46.8	16.4	15.1	41.4	51.3	488.0	197.2	841	656	6.86	11.04	—	—	19.6	2.0	5.65
駒ケ沢	9	4.1	1.4	1.2	1.3	17.3	2.9	11.4	93	39	—	0.04	0.43	—	15.3	6.4	0.60
出立橋下須川	10	30.9	8.1	8.4	20.5	33.6	247.7	85.1	434	255	2.55	4.11	—	—	18.2	2.6	8.28
吾妻川合流前の須川	11	25.6	6.9	8.8	17.1	30.3	197.5	57.4	433	223	1.89	3.25	—	—	19.2	2.8	8.45
須川合流前の吾妻川	29	13.1	4.9	7.4	3.2	17.5	50.6	36.1	207	134	—	0.11	0.22	—	15.0	5.7	—
八ッ場	17	19.0	5.9	4.7	12.2	28.3	118.9	42.6	276	195	1.37	2.68	—	—	19.0	3.3	13.20
小雨沢	8	—	—	—		—	—	—	—	—	0.81	2.10	—	—	—	3.0	—
駒ケ沢合流前の須川	—	—	—	—		—	—	—	—	—	3.60	6.25	—	—	—	2.4	—

表— 5 No. 5 測点（湯川合流前の須川）における水質

採水年月	Ca mg/L	Mg mg/L	Fe mg/L	Al mg/L	Cl mg/L	SO_4 mg/L	SiO_2 mg/L	酸度 eq×10^{-3}/L			アルカリ度 eq×10^{-3}/L	水温	PH		流量 m^3/sec	備考
								BCG	BTB	PP	BCG	°C	比色	電極		
29.11.10	32.4	5.2	tr	tr	28.8	106.0	21.0	—	—	0.1>	0.08※	6.7	6.2	6.2	0.16	mg/L {Na…… 22 {K ……1.5
12.23	46.1	5.0	〃	〃	40.5	134.0	24.0	—	—	0.09	—	—	5.1	5.8	—	
30. 1.13	51.6	7.3	〃	〃	51.2	172.0	23.0	—	—	0.14	—	—	4.8	5.3	—	{Na…… 32 {K ……1.5
2.11	54.8	6.7	0.1	1.4	6.8	157.0	26.0	—	0.05	0.12	—	—	4.9	—	—	{Na…… 39 {K ……1.5
3. 1	17.2	5.1	0.1	1.2	25.2	66.0	26.0	—	0.20	0.24	—	—	4.3	—	—	
3.11	31.4	6.5	0.1	1.0	4.2	110.0	25.0	—	0.01	0.06	—	4.2	5.7	—	0.16	
5. 6	9.2	5.0	0	1.6	9.2	47.0	24.0	0.01	0.31	0.39	—	—	4.1	—	6.66	
5.23	11.8	4.4	0	1.1	9.9	40.3	24.0	0.01	0.28	0.31	—	10.5	4.2	—	5.08	
6. 6	10.8	7.4	0	0.5	15.8	52.7	24.0	—	0.20	0.23	—	10.5	4.3	—	0.93	
6.21	18.4	6.8	0	0	17.7	67.2	27.0	—	0.10	0.13	—	15.6	4.3	—	0.18	
7. 6	30.9	6.2	0	0	28.0	89.3	26.0	—	0.08	0.15	0.03	19.5	4.4	5.0	0.16	
7.22	21.8	4.6	0	0	19.5	65.4	21.0	—	0.02	0.06	0.10	24.0	4.6	6.5	0.37	
8. 4	25.7	3.9	0	0	19.5	79.3	23.0	—	0.01	0.02	0.11	—	5.7	6.7	0.25	
8.22	28.5	5.4	0	tr	26.7	103.0	21.0	—	0.01	0.09	0.11	20.0	5.8	—	0.25	
9. 5	10.5	5.5	0	〃	9.8	57.0	21.0	—	0.17	0.21	0.01	18.1	4.3	—	2.03	
9.19	22.2	3.7	tr	〃	14.0	79.8	20.0	—	0.09	0.13	0.02	17.0	4.5	—	0.71	
10. 5	11.0	5.0	〃	〃	10.5	60.8	22.0	—	0.23	0.28	—	15.5	4.3	—	2.46	
10.18	10.7	3.5	〃	〃	7.2	49.0	20.0	—	0.23	0.28	—	12.1	4.3	—	11.33	
11.11	23	3.8	〃	〃	19.2	67.2	21.0	—	0.02	0.04	0.09	6.7	5.4	—	0.27	
11.24	24	3.3	〃	〃	18.5	67.7	20.0	—	0.02	0.05	0.14	5.1	5.6	—	0.28	
12. 9	38	4.4	〃	〃	33.2	100.5	21.0	—	0.02	0.05	0.11	3.5	5.3	—	0.25	

※……メチールオレンジアルカリ度

表— 6 No.6 測点(湯川)における水質

採水年月	Ca mg/L	Mg mg/L	Fe mg/L	Al mg/L	Cl mg/L	SO_4 mg/L	SiO_2 mg/L	酸度 eq×10^{-3}/L			水温 ℃	PH		流量 m^3/sec	備考
								BCG	BTB	PP		比色	電極		
29.11.10	47.2	17.5	13.0	57.0	256.0	636	55	※10.69	.—	16.72	15.0	2.0	2.0	1.41	Na…21 K…11 mg/L
12.23	44.4	21.4	14.0	63.0	266.0	655	57	※11.16	.—	17.60	10.5	2.0	2.1	1.85	Na…21 K…11 mg/L
30. 1.13	50.8	22.4	14.0	53.0	278.0	672	60	※11.75	.—	19.05	9.0	2.0	2.1	1.29	Na…22 K…11 mg/L
2.11	47.8	24.4	14.3	59.0	278.0	645	51	12.70	16.10	17.20	8.0	2.1	—	1.14	
3. 1	38.2	22.5	12.7	55.0	262.0	546	52	10.80	14.32	14.70	11.5	2.1	—	1.37	
3.11	53.2	23.6	14.0	56.0	288.0	629	51	12.02	15.92	16.30	12.2	2.1	—	1.16	
5. 6	31.2	17.3	10.0	34.0	183.2	427	68	8.79	10.50	10.80	17.5	2.1	—	1.84	
2.23	30.0	14.8	9.7	32.0	170.0	370	64	7.72	9.06	9.37	13.5	2.3	—	2.49	
6. 6	41.0	18.5	10.8	40.0	214.2	422	68	9.68	11.70	12.00	19.5	2.1	—	1.77	
6.21	40.2	19.5	12.2	42.0	248.0	513	91	11.12	13.10	13.40	18.8	2.4~2.3	—	1.52	
7. 6	50.7	23.5	11.5	47.0	239.0	523	67	10.30	13.80	14.20	21.5	2.0	2.0	1.49	
7.22	54.3	22.1	14.0	46.5	253.0	562	70	10.70	14.90	15.40	25.9	2.0	2.0	1.28	
8. 4	54.2	24.0	14.5	49.0	259.0	634	71	11.60	15.90	16.20	—	2.0	2.0	1.17	
8.22	54.0	22.6	13.3	40.1	260.0	672	53	10.80	15.60	15.90	22.5	1.9	—	1.29	
9. 8	52.0	21.6	11.5	39.0	242.0	638	51	9.83	14.50	14.70	19.6	1.9	—	1.55	
9.19	44.7	22.4	12.0	47.2	246.0	584	94	9.83	14.10	14.60	—	1.9	—	1.53	
10. 5	42.9	21.2	11.0	43.2	186.0	589	94	9.06	12.90	13.04	20.5	1.9	—	1.58	
10.18	42.0	21.8	10.5	65.3	216.0	555	68	8.24	11.71	12.37	17.5	2.0	—	1.84	
11.11	48.3	21.1	10.5	47.9	228.0	562	65	9.21	13.59	—	12.0	2.1	—	1.67	
11.24	46.3	22.1	11.3	47.9	238.0	577	68	9.61	13.93	14.20	11.8	2.1	—	1.56	
12. 9	50.1	23.0	11.8	108.0	258.0	630	65	10.60	15.16	15.60	10.1	2.1	—	1.50	

※印……メチールオレンヂ酸度

表— 7　No.11（吾妻川合流前の須川）における水質

採水年月	Ca mg/L	Mg mg/L	Fe mg/L	Al mg/L	Cl mg/L	SO_4 mg/L	SiO_2 mg/L	酸度 eq×10^{-5}/L			水温 °C	PH		流量 m^3/sec	備考
								BCG	BTB	PP		比色	電極		
29.11. 9	30.4	16.5	13.0	57.0	134.0	346	55	※5.00	—	8.14	11.5	2.3	2.5	4.27	Na…15 K… 7 mg/L
12.23	30.6	17.4	10.0	42.0	145.0	434	43	※6.63	—	10.30	7.8	2.2	2.4	3.03	Na…17 K…10 mg/L
30. 1. 4	38.4	15.4	9.0	42.0	161.0	403	44	※7.20	—	12.21	0.6	2.1	2.3	2.65	Na…17 K… 9 mg/L
2.15	36.4	15.6	10.2	42.0	171.0	412	51	6.70	9.50	9.70	5.0	2.3	—	2.84	
3. 2	29.8	11.2	8.5	28.0	130.0	348	52	5.50	7.50	7.68	7.5	2.3	—	4.07	
3.10	31.4	14.6	9.0	32.0	141.0	366	53	5.80	8.02	8.20	8.7	2.3	—	2.95	
5. 9	28.2	9.1	3.3	12.5	59.6	173	42	2.18	3.07	3.22	—	2.6	—	7.26	
5.24	28.8	8.3	3.2	11.0	57.5	120	42	2.37	3.28	3.39	15.5	2.6	—	8.22	
6. 7	24.8	10.2	4.2	19.0	93.0	307	48	3.70	4.51	4.84	19.0	2.4	—	4.31	
6.20	39.2	13.3	6.5	22.5	119.0	317	59	5.06	6.29	6.53	19.8	2.3	—	3.37	
7. 5	—	—	8.0	30.0	138.0	415	53	6.20	8.60	8.80	20.6	—	2.3	2.99	
7.20	48.9	17.1	10.0	30.0	137.0	447	53	7.00	9.20	9.50	24.8	2.3	2.2	2.80	
8. 2	66.2	19.3	9.5	32.0	138.0	465	67	6.20	8.60	8.90	28.2	2.3	2.3	2.74	
8.23	61.0	18.0	8.7	37.1	149.0	514	46	6.43	9.61	9.77	21.7	2.2	—	2.49	
9. 6	39.0	12.0	5.1	17.0	91.0	330	52	3.76	5.86	5.99	20.2	2.4	—	4.18	
9.20	40.5	16.4	6.6	27.2	102.0	390	66	4.84	7.18	7.34	18.8	2.3	—	3.30	
10. 5	16.5	12.1	3.6	12.4	20.0	191	64	2.14	3.58	3.80	18.3	2.7	—	5.79	
10.19	16.2	8.3	2.2	12.1	41.9	142	39	1.66	2.56	2.67	13.0	2.7	—	14.37	
11.12	35.9	14.2	7.8	29.6	117.0	438	57	6.45	9.02	9.14	7.2	2.2	—	3.42	
11.25	32.9	15.4	7.8	25.6	117.0	405	60	6.12	8.51	8.7	8.8	2.2	—	3.96	
12.10	39.7	17.3	9.7	33.2	141.0	455	60	6.63	9.50	9.8	6.1	2.2	—	2.61	

※印……メチールオレンヂ酸度

表— 8 No.17 測点（吾妻川八ツ場）における水質

採水月日	Ca mg/L	Mg mg/L	Fe mg/L	Al mg/L	Cl mg/L	SO_4 mg/L	SiO_2 mg/L	酸度 eq×10⁻³/L			水温 °C	PH		流量 m³/sec	備考
								BCG	BTB	PP		比色	電極		
29.11. 9	27.0	13.7	8.0	29.0	113.0	360	35	※4.54	—	7.51	10.0	2.3	2.5	4.91	Na…14 K… 7 mg/L
12.23	30.0	18.1	8.0	34.0	126.0	389	44	※5.35	—	8.84	—	2.3	2.5	3.70	Na…16 K… 8 mg/L
30. 1.12	31.8	18.1	8.0	36.0	136.0	380	44	※6.28	—	10.51	1.0	2.2	2.4	4.23	Na…17 K… 8 mg/L
2.16	31.2	14.5	8.8	33.0	147.0	376	50	5.58	8.16	8.60	4.5	2.3	—	3.15	
3. 3	28.8	11.3	7.0	25.0	119.0	286	51	4.00	5.96	6.40	8.5	2.3	—	4.12	
3.12	30.0	14.2	8.2	32.0	137.0	345	54	5.04	7.32	7.90	6.5	2.3	—	3.96	
5. 9	24.0	7.8	2.8	12.0	52.3	164	42	2.16	2.78	2.96	13.9	2.6	—	7.09	
6. 3	16.6	6.3	2.8	9.3	45.8	115	42	1.54	2.20	2.36	15.5	2.6	—	11.70	
6. 8	24.4	9.2	4.8	16.0	78.8	230	48	2.57	3.81	3.99	20.0	2.5	—	5.85	
6.22	46.6	11.5	7.8	23.0	102.8	326	51	4.32	5.54	5.76	19.2	2.4	—	4.52	
7. 5	—	—	7	27.5	112.0	328	57	4.8	7.00	7.20	20.5	2.3	2.4	3.83	
7.19	39.3	15.4	6	27.0	125.0	304	52	4.5	6.60	6.90	—	2.3	2.4	2.91	
8. 1	57.9	15.3	6.5	29.0	131.0	392	57	4.8	7.20	7.70	27.4	2.3	2.4	3.64	
8.24	56.0	16.0	6.4	34.3	139.0	464	44	5.46	8.44	8.71	23.0	2.3	—	3.62	
9. 8	41.0	15.0	5.1	27.7	96.0	342	44	3.40	5.68	5.89	18.2	2.4	—	4.31	
9.21	36.1	13.5	5.1	23.7	102.0	318	53	3.40	6.19	6.32	18.8	2.4	—	5.05	
10. 8	14.5	7.7	2.0	7.3	21.9	116	39	1.13	1.99	2.10	14.5	2.9	—	—	
10.21	13.7	4.9	1.6	4.8	56.0	99	40	0.99	1.68	1.79	13.3	3.0	—	18.07	
11.13	30.3	11.5	6.0	25.9	94.4	336	61	4.64	6.74	6.90	8.5	2.4	—	3.73	
11.26	31.8	11.5	5.8	24.0	98.0	331	53	4.38	6.63	6.70	7.8	2.4	—	3.98	
12.11	37.6	13.0	6.5	29.7	119.0	389	62	5.30	7.85	8.00	4.7	2.3	—	3.23	

※印……メチールオレンヂ酸度

表— 9 昭和30年9月における吾妻川水系の水質

採水地点	測点番号	Ca mg/L	Mg mg/L	Fe mg/L	Al mg/L	SiO_2 mg/L	SO_4 mg/L	Cl mg/L	酸度 eq×10⁻³/L BCG	酸度 eq×10⁻³/L BTB	酸度 eq×10⁻³/L PP	アルカリ度 eq×10⁻³/L BCG	水温 °C	PH
長笹川	2	12.6	7.9	0.2	4.1	71.5	71.5	14.2	0.15	0.670	0.78	0	15.5	4.2
熊ノ沢	4	6.0	1.6	0	0	—	8.2	2.8	0	0.030	0.07	0.37	16.1	6.0
湯川合流前の須川	5	22.2	3.8	tr	tr	20.0	79.7	14.2	—	0.090	0.13	0.02	—	—
湯川	6	44.6	22.4	12.1	47.1	94.0	585.6	245.7	9.83	14.100	14.60	0	—	1.9
草津町下湯川	15	50.8	23.1	19.7	170.9	—	1190.4	436.1	23.2	31.500	32.00	0	40.0	1.5
大沢川合流後の湯川	14	49.6	22.4	19.7	112.4	116.0	1032.0	422.0	21.80	29.800	30.00	0	—	2.0
谷沢	13	6.0	9.7	0.7	8.0	31.0	134.9	42.2	0.65	1.670	1.78	0	15.0	3.2
大沢川	12	65.6	21.3	6.5	42.0	50.0	416.6	133.3	4.20	6.820	7.30	0	—	2.5
小雨沢	8	23.2	10.7	5.4	34.1	—	158.4	56.0	1.47	2.970	3.15	0	—	3.0
駒ケ沢	9	4.0	1.3	0	0	—	tr	2.8	0	0.025	—	0.35	18.3	6.7
太子精錬所廃水	—	33.2	3.9	0.3	33.0	32.0	16.8	9.9	0	0	0	4.90	—	7.4
吾妻川合流前の須川	11	40.4	16.4	0.5	27.1	66.0	390.2	110.3	4.84	7.180	7.34	0	—	2.3
田代湖下吾妻川	22	—	—	tr	0	25.0	6.7	7.0	0	0.020	0.04	0.35	—	6.4
万座川	24	6.6	3.4	tr	0	25.0	20.6	9.9	0	0.010	0.05	0.20	—	6.3
赤川	26	6.0	3.0	0	0	43.0	101.8	7.0	0	0.010	0.07	0.37	17.5	6.5
遅沢	28	17.0	7.2	8.7	30.0	50.0	252.9	7.0	2.70	4.140	4.20	0	17.9	2.6
八ツ場	17	36.0	13.5	5.0	23.7	53.0	316.8	101.8	3.80	6.190	6.32	0	—	2.4
北群馬橋下吾妻川	20	11.4	3.0	0	2.3	27.0	31.2	14.2	0	0.040	0.06	0.05	20.6	5.1
花敷温泉	—	(183.3) 171.4	(1.4) 6.1	(0.8) 0	(0.8) 0	(40.0) 45.0	(527.1) 497.8	(189.8) 224.8	0	0	0	(0.48) 0.46	45.0	7.1
湯平温泉	—	127.2	tr	tr	tr	79.0	403.7	239.0	0	0	0	0.36	73.0	7.4
西の河原	—	58.8	23.6	23.8	89.9	135.0	1303.6	524.8	28.9	37.90	37.90	0	37.3	1.3~1.4
川原湯温泉	—	10.4	10.4	t	t	63.0	421.4	309.2	0	0	0.16	0.31	73.0	6.6
田代湖	—	6.0	2.7	0	0	25.0	2.4	2.8	0	0	0.01	0.61	19.4	6.7

( ) 内の値は昭和27年10月の調査

Mg^{++} は 24mg/L で前記両泉に比較して Ca^{++} 少なく Mg^{++} は多量である。

〔Fe^{++}〕および〔Al^{+++}〕：Fe^{++} および Al^{+++} は湯川，小雨沢，大沢川，遅沢の酸性河川に多く，溶存金属イオンの主体をなしている。中性河川である熊奈沢，駒ケ沢，微アルカリ性泉である花敷，湯平，川原湯の各温泉中には，これ等の溶存量は当然少ない。

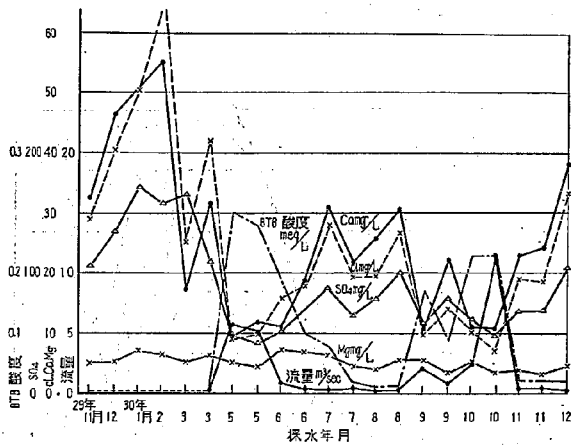
Ⅳ　水質についての検討

河川の溶存成分が流域の気象，地質，地形，人間の生活々動および生産活動等の環境要素に支配され，また濃度，流出量との間にも種々の関係が存在することが見出されている。

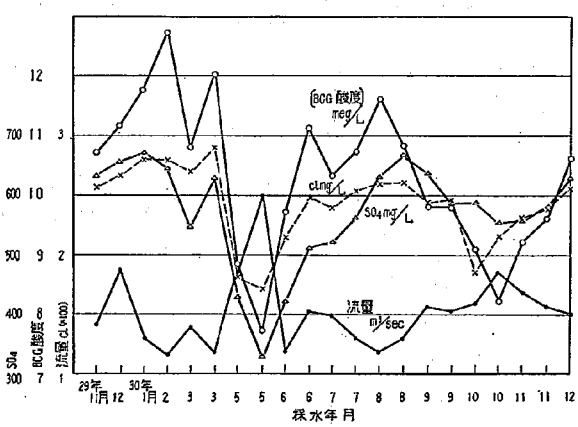
ここでは吾妻川水系の4地点，（測点 No.5，6，11，17）における成分濃度および流出量と流量等の関係について検討する。ここに報告する結果は主として昭和29年11月より30年12月に至る第二期調査の定期観測値を資料とする。調査は一年継続して行なわれたのみで，季節的影響を明確に述べることは出来ないが一応この点にも言及する。

〔1〕水質の変化について

各測点における溶存成分の濃度変化を流量と共に図—2～8に示した。一般に各測点における成分濃度は流量と負の相関々係がある。すなわち流量の少ない12月より翌年3月（冬期渇水期），7月より8月（夏期渇水期）に濃度は増大しており5月（融雪期）10月（雨期）に濃度は減少する。この現象は湯川に合流する前の須川，湯川，および吾妻川本川における八ツ場においても見られ一般的の稀釈効果を示すものである。



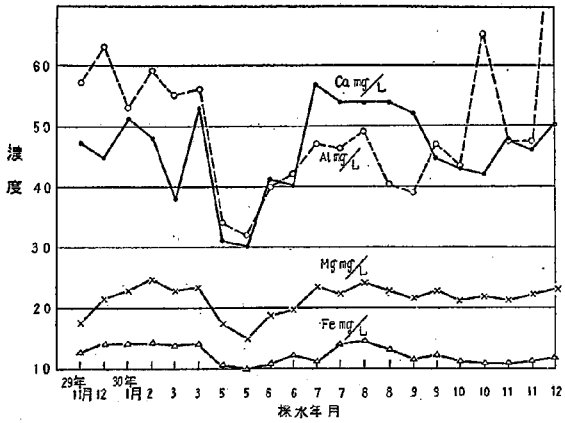
図—2　湯川合流前の須川（測点 No. 5）における成分濃度と流量



図—3　湯川（測点 No. 6）における流量，BCG 酸度，SO_4，Cl 濃度と流量

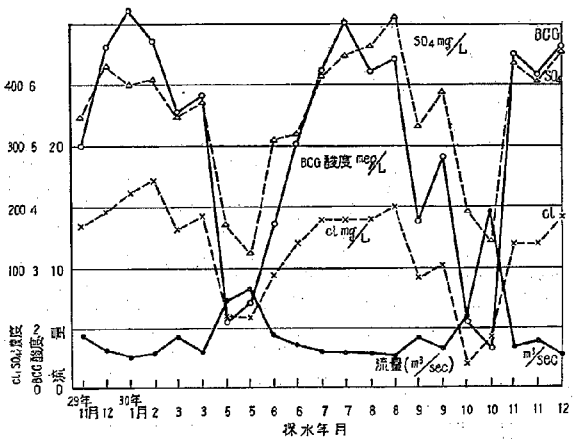
湯川合流前の須川（測点 No. 5）における BTB 酸度をみると流量の多い5月，10月に増大する傾向を認める。このことは他の成分が流量と負の相関があるのに対して逆の現象である。この原因を考えるに次の二つの場合を想定できる。長笹川と白砂川の合流点花敷にある中川発電所取水池から放水される水量は常時は少なく，熊奈沢その他無名の沢から緩衝能を持った中性水が流入することにより稀釈，中和され，酸度が低下していたものが高水時になって貯水池からの放水量が多くなり，または貯水されずに流下し，中性水が流入することによる稀釈効果が少なくなることが考えられる。また他の原因としては高水時に流入する水の方が酸性化されたまたはそのために Al の塩類を含有する地表を洗ふために，常時貯水池より流出しているものよりさらに酸性であることも考えられる。

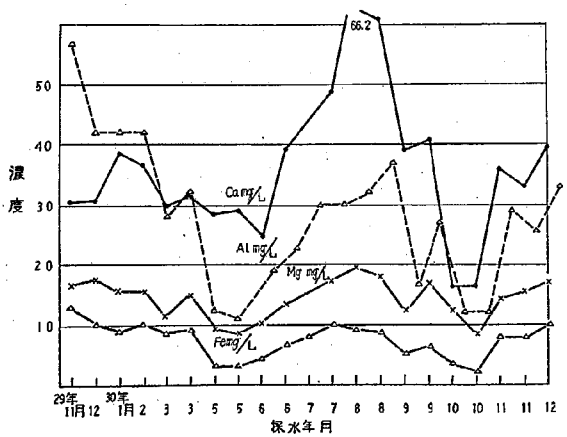
吾妻川合流前の須川（測点No.11）における Ca^{++} の濃度は6月終りより9月にわたって特に大である。流量はこの前後と比較して特に変化はない。これは恐らく太子精錬所の廃水処理用の石灰使用状況に関連するものと思われる。



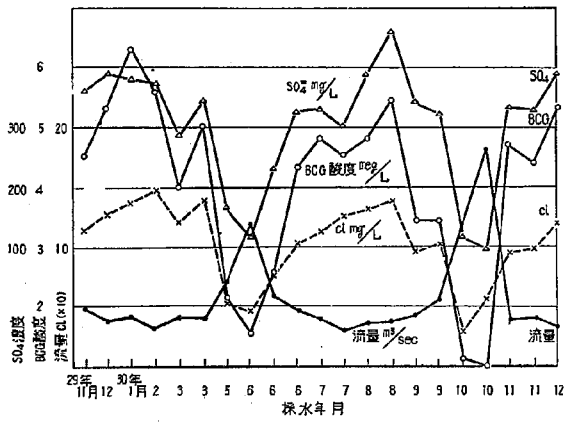
図—4 湯川（測点 No. 6）における Ca, Mg, Fe, Al 濃度

図—5 吾妻川合流前の須川（測点 No. 11）における成分濃度の変化

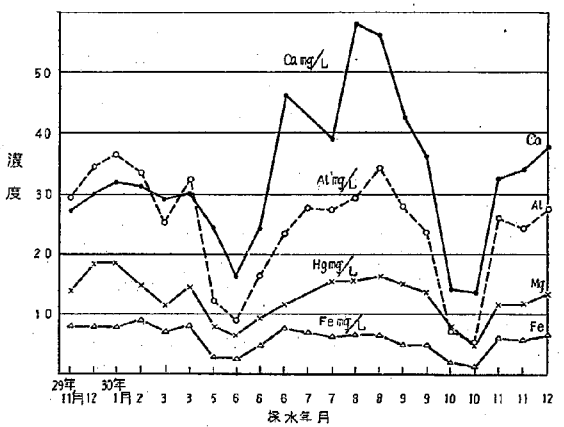




図—6 吾妻川合流前の須川（測点 No. 11）における成分濃度の変化



図—7　八ツ場（測点 No. 17）における濃度の変化



図—8　八ツ場（測点 No. 17）における濃度の変化

〔2〕水質の特性について

(1)　各測点における2,3の成分の濃度比

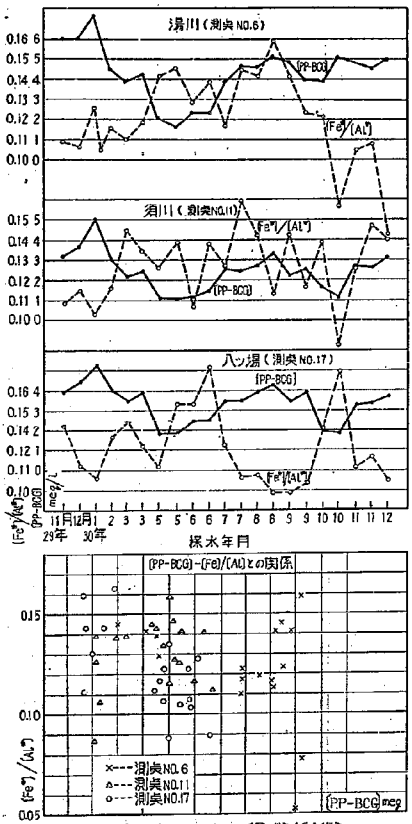
吾妻川上流部左岸より流入する遅沢，赤川について〔$SO_4^{=}$〕/〔Cl^-〕の当量比についてみると，夫々26および10で共に異状に高い。白砂川，長俣川，大沢川，小雨沢ではいづれも3～4で比較的高く湯川，谷沢では2である。湯川合流前の須川測点 No. 5では3，湯川では1.7であり湯川を合流したあとの須川測点 No. 11は1.9となる。この比の値の異状に高い河川ではその流域に $SO_4^{=}$ 供給源があることを示すもので，たとえば硫黄鉱床，$SO_4^{=}$ を含んだ湧水硫化鉄鉱床等の存在が考えられる。

〔Mg^{++}〕/〔Ca^{++}〕の当量比はアルカリ性泉である花敷温泉で0.01～0.05で非常に小さく，草津温泉では0.6程度である。測点 No 5 で 0.4 湯川は 0.8，測点 No. 11 では 0.7 である。須川右岸，長野原より上流部吾妻川左岸の支川ではこの比の値はやや大きい傾向を示す。

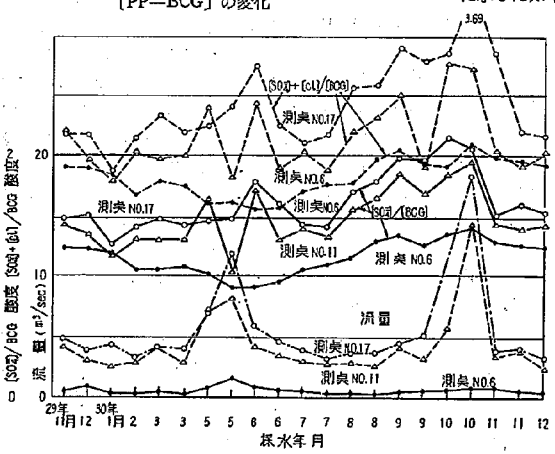
〔Fe^{++}〕/〔Al^{+++}〕は湯川で 0.05～0.16，測点 No. 11 の須川では 0.09～0.16，八ツ場では0.09～0.16であり，須川合流前の吾妻川（測点 No.29）は約0.06で上記酸性河水に比較するとこの比の値は小である。

湯川，須川，八ツ場における Fe/Al の変化および両酸度の差〔PP—BCG〕の値との関係は図—9 に示した。各測点〔PP—BCG〕の変化は，いづれもほぼ同様な傾向を示している。〔Fe^{+++}〕/〔Al^{+++}〕は八ツ場においては，流量が増加し，〔PP—BCG〕の値が減少する。5月および10月に増加する傾向にあり，湯川，須川では反対に低下し，その変化も複雑である。3測点相互の間には，〔PP—BCG〕と Fe/Al の間の関係は定まった傾向を示さない。この原因については，Fe，Al の沈澱析出の難易太子精鉱所よりの Fe の供給，高水時における中性水である吾妻川本川の流量増加等が関係することが考えられるが，明確なことは不明である。

〔$SO_4^{=}$〕/〔BCG 酸度〕および〔$SO_4^{=}$〕+〔Cl^-〕/〔BCG 酸度〕を湯川，吾妻川合流前の須川，および八ツ場について図示すると図—10の如である。これ等成分の当量比の変化は湯川では冬季より春季に向って小さくなり5月に至って最小となる。そのご夏季に向って次第に増加し10月に最大となり再び冬季に向って低下している。春季5月に流量が増加している場合にこの比が最小となり，秋季10月の流量増加する場合には最大となっている。これは5月における流量増加は主として融雪によるものと考へられ10月の流量増加は降雨によるものと思われる。降雨の流出機構と積雪の融解，流出機構に関する水文学的相異が，溶存成分の変動に関連するものと考える。例えば融雪時の水は水温低く，BCG 酸度は減少しがたいのに反し，渇水期の水温の高い時期に地表との接触により酸度を失い〔$SO_4^{=}$〕+〔Cl^-〕含量の増加した地表を降雨が急速に洗い溶出させることも考えられる。また測点 No.11，17 におけるこれ等の比の値の変化は測点 No. 6 に比較して同様な傾向を示すがやや複雑である。これは小雨沢等の流入および上流部貯水池から



図—9　3測点における〔Fe*〕/〔Al*〕，〔PP—BCG〕の変化



図—10　〔SO4=〕/BCG 酸度，〔SO4=〕+〔Cl-〕/BCG 酸度と流量

の放水状態，太子製鉄所の操業との関係等によるものと思われる。

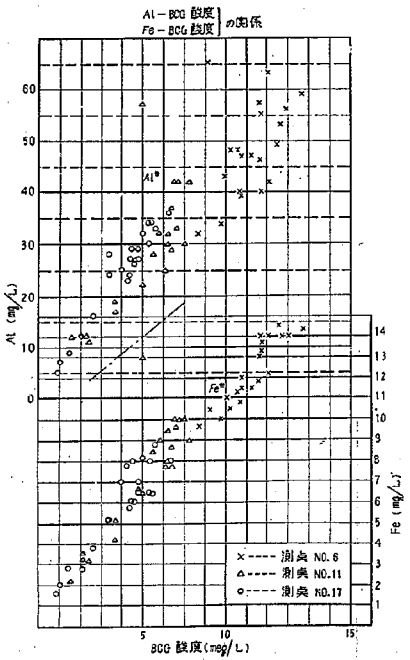
(2)　須川流下中における水質の変化

長笹川と白砂川が合流し須川となり花敷温泉，熊倉沢を流入する。湯川合流前の須川（測点 No. 5）は，PH 4.1～6.2で BCG に対してはアルカリ側にある。〔Mg*〕/〔Ca*〕は0.4，〔Mg*〕+〔Ca*〕/〔SO4=〕は 0.6，〔SO4=〕/〔Cl-〕は約 3 である。そのご〔Mg*〕/〔Ca*〕0.8，〔Mg*〕+〔Ca*〕/〔SO4=〕0.3，〔SO4=〕/〔Cl-〕1.7，〔SO4=〕+〔Cl-〕/〔BCG 酸度〕1.9の湯川を合流して測点 No. 11 における須川は，〔Mg*〕/〔Ca*〕0.7，〔Mg*〕+〔Ca*〕/〔SO4=〕0.4，〔SO4=〕/〔Cl-〕1.9，〔SO4=〕+〔Cl-〕/〔BCG酸度〕2.5となりこの値が八ツ場まで続いている。なお測点 No. 29の須川と合流する前の吾妻川は〔Mg*〕/〔Ca*〕0.8，〔Mg*〕+〔Ca*〕/〔SO4=〕1，〔SO4=〕/〔Cl-〕3であり PH は5.7～6.9である。すなわち駒ケ沢の流入，吾妻川との合流により湯川の水質は稀釈されるにしてもその性格は変らず，八ツ場における水質は湯川の性格を強く受けていることを知る。

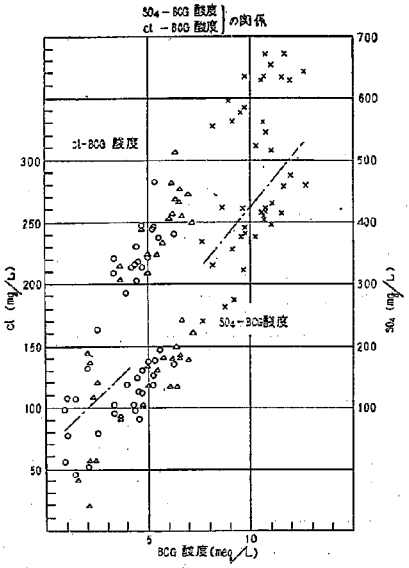
図—10 に示した如く〔SO4=〕/〔BCG 酸度〕，〔SO4=〕+〔Cl-〕/〔BCG 酸度〕の八ツ場における値は 1.1～2.1，1.8～3.6で3地点中最も大きく，これ等の比の値は流下するに従って大きくなる傾向を示し流下中に他から $SO_4^{=}$，Cl^- が供給されるかまたは中和が行なわれることを意味している。$SO_4^{=}$，Cl^- が供給されないとすれば測点 No. 6 より測点 No. 17 の間で河床との反応による減酸が行なはれたと考えられる。この場合は H^+ の減少に従って岩石よりの Al^{*}，Fe^{*} 等の溶出による増加がともなうであろう。

Al^{*} と BCG 酸度，Fe^{*} と BCG 酸度の関係は図—11 に示した如くほぼ3測点の測定値は同一直線の近くに分布しており正の相関を示している。従って岩石の溶出による Al^{*}，Fe^{*} の増加は認められない。なお岩石が溶解する場合 Fe^{*}，Al^{*} 以外の他の成分 Ca^{+}，Mg^{+}，Na^{+}，K^{+} 等の溶出も考えられ，また合流によるアルカリ度の供給等も考えられるがのちに述べる流出量でさらに検討することにする。

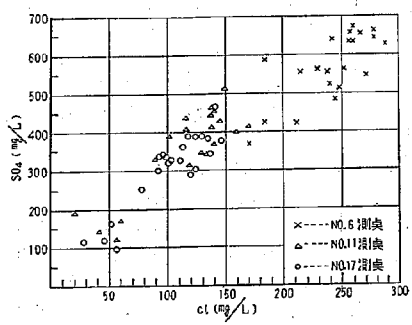
次に〔SO4=〕と BCG 酸度，〔Cl-〕と BCG 酸度の関係をみると図—12に示した如く，〔Cl-〕と BCG 酸度，〔SO4〕と BCG 酸度では3測点の測定値は同一直線の近くに分布する。この直線の方向係数は当量単位で計算すれば Cl^- の場合は約0.7 $SO_4^{=}$ の場合は約 0.9であり，$SO_4^{=}$ は他より供給される傾向のあることが推定される。



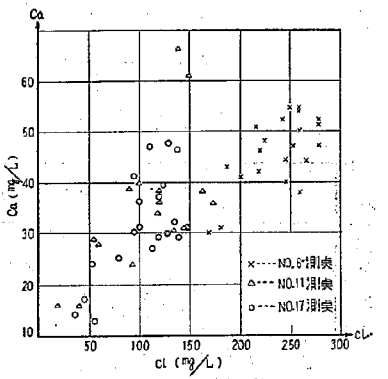
図—11



図—12



図—13 (1)　SO_4—Cl の関係

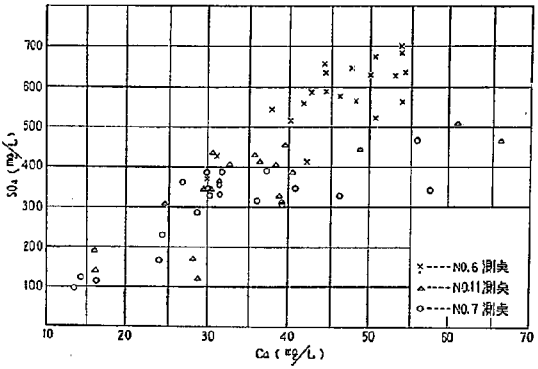


図—13 (2)　Ca—Cl の関係

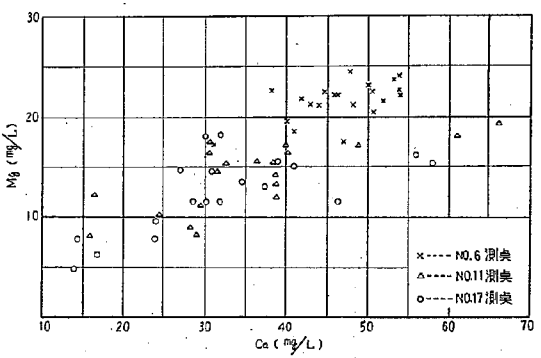
さらに〔$SO_4^{=}$〕と〔Cl^-〕，〔Ca^{++}〕と〔Cl^-〕の関係を示す図—13においても〔$SO_4^{=}$〕と〔Cl^-〕では，測点 No 6 の各点の群は，測点 No. 11，17の群と異なった位置にある。この傾向は〔Ca^{++}〕と〔Cl^-〕の関係においても認められる。〔Cl^-〕はその大部分が湯川から供給され，その他からの供給量はこれに比較して充分少なく，流下中にこの量の変動は小さい。したがって測点 No. 6 と No. 11の間で $SO_4^{=}$ の供給があることがわかり，Ca^{++} も不明瞭であるが供給されることが認められる。

〔$SO_4^{=}$〕と〔Ca^{++}〕，〔Mg^{++}〕と〔Ca^{++}〕の関係は図—14に示した。〔$SO_4^{=}$〕と〔Ca^{++}〕との関係図では数点を除いてはほ同一直線の近くに分布しており，〔Mg^{++}〕と〔Ca^{++}〕では明瞭な関係は認められない。

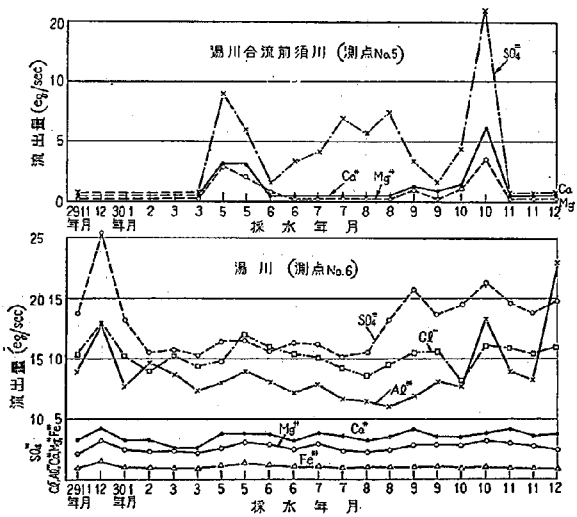
結局測点 No. 6 と No. 17との間では流下中の減酸は顕著には行なわれず，測点 No. 6 と No. 11 との間で $SO_4^{=}$，Ca^{++} の供給があるものと考えられる。この主な供給源として太子精錬所の工業廃水が考えられるが，これについてはさらに後に述べることにする。



図—14 (1) SO_4—Ca の関係



図—14 (2) Mg—Ca の関係



図—15 湯川合流前の須川および湯川における流出量

〔3〕成分の流出量について

各成分の流出量は濃度と流量の積として示される。河水溶存成分の起源が一定であり，その供給量が変らない場合には河水を通じて流出する溶存成分量は流量にかかわらず一定であるべきであるが，実際には支川の流入，河床との反応など未だ解明されない種々の化学反応のために

$C \cdot Q^n = K$ (C＝濃度 Q＝流量 n, K は恒数)

$\log C = -n \log Q + \log K$

がしばしば成立することが認められている。nの値について考えると，$n=1$ の場合には濃度は流量の増加により減少して行くが，流出量は一定であり稀釈が行なわれる場合である。$n>1$ の場合には，流量が増加してゆくと流出量が減少するもので，例えば酸性河水の場合には支流からのアルカリ度の供給があり，中和反応により酸度が減少するような場合である。$n<1$ の場合には濃度は流量の増加により減少するが，流出量は流量の増加と共に増大し，流入水が流下中に接触する地表等より溶解または交換的にこれら成分を溶出してくることを示すものである。次に溶存成分の流出量，流出量と流量との関係および各測点における流出量の検討結果について述べる。

(1) 測点 No.5，6，11，17における流出量

湯川合流前の須川（測点 No. 5）：この測点における流出量を図—15に示した。5，10月の流量が増大している場合の流出量は各成分とも増加している。6月より8月に至る間では流量は少なく，ほぼ一定で0.5m³/sec 以下であるが，$SO_4^{=}$ の流出量が大きくなっている。これはこの時期に流入する水が $SO_4^{=}$ を相当量供給することを示しており，温度の上昇による硫化磷等の酸化作用，溶解度が大きくなったことが考えられるが，明確な原因は不明である。この測点における $\log C$ と $\log Q$ との間には明らかな関係はない。これは川中発電所取水池の放水状況，中性水，温泉水の流入等に関連しているためと思われる。

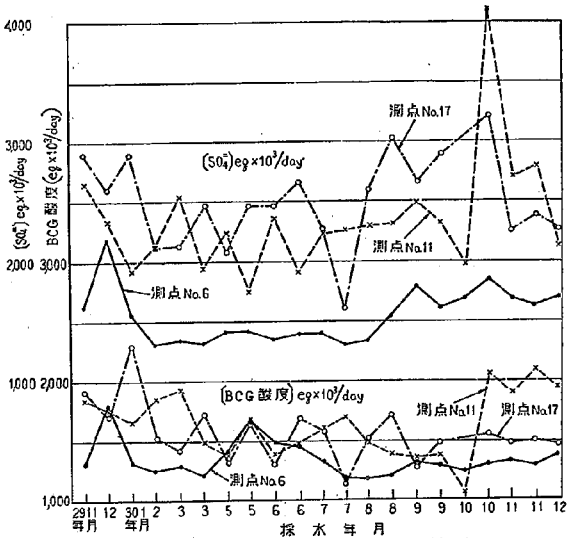
湯川（測点 No. 6）：この測点における各成分の流出量の変化は図—15に示した如くであり，$SO_4^{=}$ および BCG 酸度については，図—16に示す。この測点における各成分の流出量の変化は一般に少なく，一年を通じて流出量はほぼ一定であるが，Al^{+++} の流出量は10月下期および12月における変化は大であり，この原因については不明である。$SO_4^{=}$ 流出量は2月より8月に至る間で小さい傾向を示している。

吾妻川合流前の須川（測点 No. 11）：この測点における流出量の変化を図—17に示す。また図—16に示した流出酸量，$SO_4^{=}$ 流出量は湯川における値よりも一般に大である。この傾向は八ツ場においても認めることが出来る。3測点中でこの測点の流出量が特に大となっており，この原因は各成分の濃度比その他で指摘した様に他からの供給があることを示しており，太子精錬所に関係あるものと考えるが，また流量測定の誤差も含まれていると思われる。

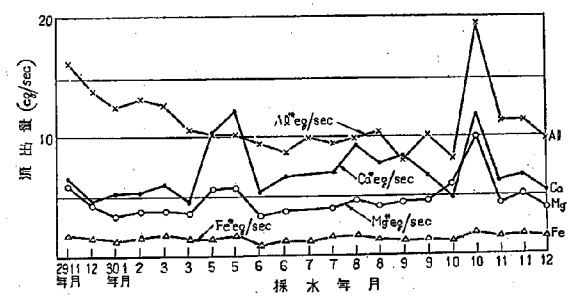
八ツ場（測点 No. 17）：この測点における溶存成分の流出量を図—18に示す。Mg^{++}，Fe^{+++} の流出量は1年を通じてあまり変化はなく，その値は測点 No. 11 と同程度である。Ca^{++} の流出量は5月より10月にかけて増加の傾向にあり，Al^{+++} の流出量は変化が激しく，その流出量は測点 No. 11より多量である。流出酸量，$SO_4^{=}$ 流出量を測点 No. 11と比較すると規則的な関係はなく，採水時によって測点 No. 11の方が流出量が大となる場合もあり，その逆の場合もある。一般的傾向として，第二期調査期間中の平均値で比較すれば，流出酸量は No. 11測点が大きく，$SO_4^{=}$流出量では No. 17 測点が大である傾向を認める。

(2)　流出量と流量との関係

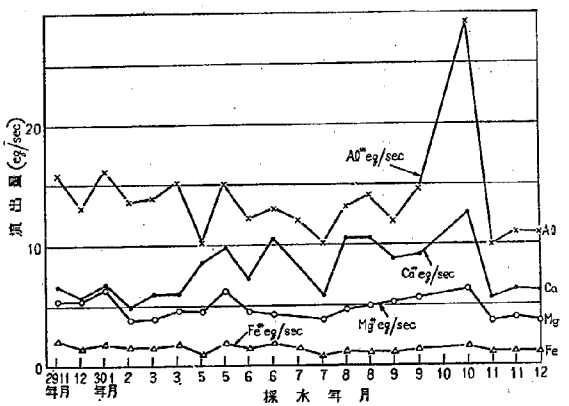
流出量と流量の間にはすでに述べた如く，$C \cdot Q^n = K$ なる関係がしばしば成立する。湯川合流前の須川では濁度と流量の間に定った関係が認められないので，湯川，吾妻川合流前の須川，八ツ場について比較する。各測点にお



図—16　湯川，須川，八ツ場（測点 No. 6，11，17）における $SO_4^{=}$，BCG 酸度流出量



図—17　吾妻川合流前の須川（測点 No. 11）における流出量の変化



図—18　八ツ場（測点 No. 17）における流出量の変化

ける濃度と流量との間には，負の相関を認めることができ，また log C と log Q との間にはほぼ直線関係が存在する。この直線式を log C=−N log Q+log K とし

表—10 溶存成分の濃度と流量との関係

	測点 No. 6		測点 No. 11		測点 No. 17	
	n	log K	n	log K	n	log K
Ca	0.76	3.0	0.64	4.4	0.53	3.2
Mg	0.89	2.3	0.70	2.9	0.59	2.3
SO_4	0.91	16	1.0	25	0.91	25
Cl	0.73	8.8	0.90	11	0.91	11
Fe	0.76	0.8	0.97	1.5	0.87	1.1
Al	0.76	6.9	1.08	11.7	1.10	13.4
BCG	0.59	13	0.89	15.5	0.98	17
P.P	0.77	19	0.96	26	0.95	25

て，各成分の各測点におけるNの値を表—10に示した。

湯川では Ca, Mg, Cl, Fe, Al, P.P に関するNの値はいづれも殆んど等しく，SO_4, BCG とは別の行動をとり，前記成分の流出機構は同じであると考えられる。

いま Cl の供給量を一定とすれば 1/[Cl] は流量に比例する量である。Cl のNの値を基準とすれば，他の成分のNの値は Ca, Mg, Cl, Al, Fe, P.P については約1となり，SO_4 は1より大，BCG では1より小となり，流出機構を別に考えることが必要となる。

$SO_4^{=}$ のnの値はいづれの点においても1に近く，$SO_4^{=}$ の流出量は比較的流量の影響を受けないことを示している。これは $SO_4^{=}$ の供給源が主に湯川に依存しており，供給量もほぼ一定であり，湯川以外からの供給が比較的少ないことを示している。Ca^{++} は特に各測点ともnの値は小さく，濃度は流量の増加にしたがって減少するが，流出量は流量の増加にしたがって増大することを意味しており，他からの供給があることを示している。湯川における BCG 酸度のnの値は特に小さい。これは湯川の酸度は主として草津温泉の湧出泉であり，湧出量はほぼ一定であり，流量の増加は湧出泉より酸度の低い大沢川，谷沢によるものであると推定することができる。また Ca^{++}, Mg^{++} に関するNは流下するに従い減少し，同一行動をとり，Al^{+++}, BCG 酸度および Cl^{-} に関するNは流下するに従い増加するものであり，これら成分の流下水での行動については今後さらに検討する必要がある。

表—11 湯川，須川，八ツ場における流出酸量及び流出 $SO_4^{=}$ 量

採水年月	測点 No. 6 $[H^+]$ kg/day	測点 No. 11 $[H^+]$ kg/day	測点 No. 17 $[H^+]$ kg/day	測点 No. 6 $SO_4^{=}$ eq×10³/day	測点 No. 11 $SO_4^{=}$ eq×10³/day	測点 No. 17 $SO_4^{=}$ eq×10³/day
27.10	824	474	233	1212	665	459
12	312	355	305	437	803	511
28. 5	935	715	833	1413	1558	2048
8	1617	1380	798	2809	3000	2828
29.11	1302	1844	1926	1617	2660	2885
12	1784	1776	1710	2182	2364	2589
30. 1	1310	1648	2295	1560	1923	2895
2	1251	1865	1519	1322	2132	2134
3	1278	1934	1424	1348	2553	2122
3	1205	1478	1724	1313	1947	2460
5	1397	1367	1323	1412	2239	2060
5	1661	1683	1557	1420	1740	2456
6	1480	1378	1299	1346	2376	2441
6	1460	1473	1687	1399	1916	2652
7	1326	1602	1584	1403	2232	2263
7	1183	1693	1131	1294	2252	1592
8	1173	1468	1510	1334	2292	2573
8	1204	1383	1708	1563	2302	3028
9	1316	1358	1269	1784	2488	2654
9	1299	1380	1483	1606	2318	2888
10	1237	1071	——	1674	1986	——
10	1310	2061	1546	1838	4110	3232
11	1329	1906	1495	1688	2698	2253
11	1295	2094	1506	1617	2891	2373
12	1374	1945	1479	1698	2136	2260

(3) 流出量の検討

湯川（測点 No. 6），吾妻川に合流前の須川（測点No. 11），八ツ場（測点 No. 17）の流出量を BCG 酸度 $SO_4^{=}$ について比較してみると表—11に示した如くである。この3測点について流出酸量を比較する。試水の採取は3測点同時に行ったものではなく，夫々異った日に行なわれている。第1期調査結果では測点 No. 6 の流出量が最大であり，次いで測点 No. 11 が大きく，測点 No. 17 の値が最小で流下中に流出量が減少する傾向を示しているが，$SO_4^{=}$ の流出量が減少することは解しがたいことであり，流量測定の誤りとも思われる。

実測流量値を検討するために湯川合流点を例にとって流量比を比較する。いま測点 No. 5 の須川の流量をA，湯川をB，測点 No. 7 における須川の流量をCとし，ある溶存成分の濃度を夫々 x_1, y_1, z_1 および x_2, y_2, z_2 とすれば，$Ax_1+By_1=CZ_1$ および $Ax_2+By_2=CZ_2$ が成立する。濃度は分析の結果既知であり，この値は流量測定値より相当の正確さをもっている。3点の流量比を算出して実測値と比較する。（濃度は27年10月，12月，28年5月，8月の資料を用う。）各成分からA，B，Cの流量比を算出すると表—12に示した様に算出に使用した成分によって異なっている。これは合流後なお均一に混合されていないこと，流路が刻々に変化し混合状態が変ること，採水時間が異なること，採水後分析に着手するまでの経過時間が長かったこと等が関連すると思われる。またA＋B＝Cであり，28年5月，8月における SO_4—Cl から算出した値は異状である。以上の点を考慮し，昭和34年2月には3点同時に採水し，流量比を検討した。特に合流後の採水点の選定には混合状態に注意をはらい。川幅の方向にわたって数点より同時に採水し，各々について酸度，Cl 量を定量し混合状態を検討した。その結果，混合状態はなお充分には均一に混合されていないが，これより下流では湯平温泉の影響を受けるので，採水点を湯平温泉より約 100m 上流に選定した。なお調査当時は，まれにみる暖冬であり，融雪はげしく須川の流量は増加していた。

各成分濃度と A＋B＝C＝10 として，AとBの流量比を比較すると表—13の如くである。各成分から算出した流量比はほぼ一定でA：Bは約3：7である。ただし Fe および Na の濃度より算出した流量比はAの値が大きく，他の成分と別行動を取ることを示している。なお，湯川—須川合流点より上流部の須川の酸度は非常に小さく，流量比の算出に用いるのは適当とは思われないが，一応算出した。試水の分析結果は表—13に示した。

第二期調査結果の流出量について検討する。個々の測定値については異なる場合もあるが，全体の傾向として平均値について比較すると，測点 No. 6 では流出酸量は 1.3ton〔H^+〕/day，測点 No. 11 では 1.6ton〔H^+〕/day，

表—12　湯川—須川合流点における流量比

採水年月	算出に用いた成分	測点 A	測点 B	測点 C
27年10月	実測流量	5.0	4.5	10
	SO_4—Ca	3.6	5.0	10
	SO_4—Cl	6.7	6.0	10
	Cl —Ca	4.5	6.6	10
27年12月	実測流量	4.7	5.2	10
	SO_4—Ca	3.1	6.5	10
	SO_4—Cl	1.7	8.6	10
	Cl —Ca	1.1	8.9	10
28年5月	実測流量	2.8	6.6	10
	SO_4—Ca	2.8	7.7	10
	SO_4—Cl	2.4	0.1	10
	Cl —Ca	7.1	5.0	10
28年8月	実測流量	1.9	4.4	10
	SO_4—Ca	1.2	8.7	10
	SO_4—Cl	2.3	2.7	10
	Cl —Ca	4.2	6.2	10

測点 No. 17 では 1.5ton〔H^+〕/day となっており，測点 No. 11の値が最大である。すなわち測点 No. 6 と No. 11 との間で他から供給されることがあり，測点 No. 11 と No. 17 の間ではほぼ等量であり，流出量は変らないものと認められる。$SO_4^{=}$ について同様に平均値についてみると測点 No. 6 の値は 1544eq×10^3/day で最少であり，測点 No. 11 では 2360eq×10^3/day，測点 No. 17 では 2491 eq×10^3/day で最大となっている。すなわち流下するに従って増加する傾向にあるが，測点 No. 6 より測点 No. 11に至る間の増加は著るしい。他の溶存成分 Ca^{++}, Mg^{++}, Fe^{++}, Al^{+++}, Cl^- 等についても $SO_4^{=}$ と同様な傾向にある。

いま酸度，$SO_4^{=}$ の供給源を考えると，湯川より上流部の須川からの流入，駒ケ沢，小雨沢等の沢水の流入をあげることが出来る。湯川合流点より上流部の須川は湯川に比較して著るしく酸度は低く，BCG に対してはむしろアルカリ側にある場合が多い。駒ケ沢は中性水であり，湯川の酸度を低下させることはあっても増加させることはない。河床との反応は酸度を減少させ，$SO_4^{=}$ 流出量に対し影響はないものと考える。結局須川右岸より流入する小雨沢その他無名の酸性を示す沢水の流入，および太子精錬所の工場廃水に原因があるものと思われる。

小雨沢について見ると，昭和27年10月および30年8月における調査結果では，M. O 酸度は夫々 0.80meq/L，0.81meq/L であり，流量は 27年10月 では 0.06m^3/sec である。また昭和30年9月の調査では BCG 酸度は1.47 meq/L である。小雨沢の酸度を1.5meq/L，流量を0.06 m^3/sec とすると流出酸量は7.8kg〔H^+〕/day となり，湯

川の流出酸量が1.3ton〔H^+〕/day あるのと比較して非常に少なく影響はないものと考える。太子精錬所工場廃水については次にのべる。

〔4〕太子精錬所の工場廃水について

この工場は主としてジャローサイトを原鉱としており，工場当局者の説明（昭和31年2月）によれば原鉱の品位は Fe 40~42%，S 6%，Si 5%であり，処理量は年間60,000 t である。製品の品位は Fe 56%，S 0.2%，Si 9% であり，焙焼により5.8%のSが失なわれる。これは煙道より燃焼ガスと共に大気中に放出する前に石灰水中を通過させて中和しているという。石灰は浜川市にある工場より，アセチレン製造時の副産水酸化石灰を購入使用し，水分50%で年間使用量は 5,000 t とのことである。

焙焼によって消失するSと当量の水酸化石灰量は無水物として約8,000 t であり，水分50%を含むものを使用すれば，16,000 t 必要である。工場の石灰使用量は非常に少なく完全な中和は行なわれないものと考える。

表—13　　昭和34年2月における湯川—須川合流点の水質調査結果および流量比

採水日時	採水点	Ca mg/L	Mg mg/L	Fe mg/L	Al mg/L	SO_4 mg/L	Cl mg/L	Na mg/L	K mg/L	酸度 meq/L M.O	酸度 meq/L P.P
18日 12時	湯川（測点6）	44.3	16.5	11.5	92.5	534.8	234.6	18.0	8.9	8.6	13.1
	須川（測点5）	16.8	1.8	—	2.6	54.3	8.7	4.4	0.8	0.1	0.2
	須川（測点7）	24.2	6.3	4.4	28.1	196.6	70.0	9.1	3.1	2.5	3.9
18日 13時	湯川（測点6）	44.9	16.2	12.5	91.5	535.6	231.1	18.2	8.9	8.4	13.3
	須川（測点5）	18.4	1.6	—	3.0	64.2	9.4	5.4	0.9	0.1	0.3
	須川（測点7）	25.4	5.0	3.9	26.2	177.7	64.8	9.1	3.0	2.3	3.7
18日 15時	湯川（測点6）	45.3	15.9	12.0	93.0	543.0	234.6	18.2	8.9	8.5	13.4
	須川（測点5）	18.4	1.6	—	3.0	64.2	9.4	5.4	0.9	0.1	0.3
	須川（測点7）	25.4	5.0	3.9	26.2	177.7	64.8	9.1	3.0	2.3	3.7
	須川 ※	26.2	6.4	3.6	28.3	203.2	75.3	10.0	3.4	2.6	4.1
19日 9時30分	湯川（測点5）	46.3	15.3	12.0	95.8	578.4	248.6	18.4	9.3	9.1	14.5
	須川（測点5）	20.4	1.7	—	3.9	71.6	14.0	6.5	1.1	0.1	0.3
	須川（測点7）	28.8	6.8	4.7	32.9	239.4	89.3	10.8	3.9	3.1	4.2

※　須川（測点7）において，川幅の方向で5点を流量を考慮して選定し，同時に採水したものを等量混合した試水

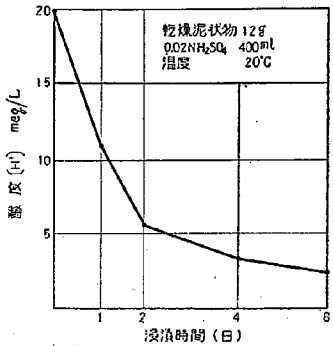
流量比

採水日時	34年2月18日 12時			同　左　13時			同　左　15時			34年2月19日 9時30分		
算出に用いた成分	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
M. O 酸度	2.8	7.2	10	2.6	7.3	10	3.0	7.0	10	3.3	6.6	10
P. P 酸度	2.9	7.1	10	2.6	7.4	10	2.8	7.1	10	2.7	7.3	10
$SO_4^{=}$	2.9	7.0	10	2.4	7.6	10	3.0	7.1	10	3.3	6.6	10
Cl^-	2.7	7.3	10	2.5	7.5	10	2.8	7.2	10	3.2	6.8	10
Ca^{++}	2.7	7.3	10	2.6	7.3	10	2.7	7.2	10	3.2	6.7	10
Mg^{++}	3.0	6.9	10	2.3	7.6	10	3.1	6.8	10	3.5	6.2	10
Fe^{+++}	3.8	6.2	10	3.1	6.8	10	3.7	6.3	10	3.9	6.1	10
Al^{+++}	2.8	7.1	10	2.6	7.4	10	2.8	7.2	10	3.1	6.8	10
Na^+	3.4	6.5	10	2.9	7.1	10	3.6	6.4	10	3.6	6.4	10
K^+	2.8	7.2	10	2.6	7.4	10	3.0	7.0	10	3.4	6.6	10

1日の平均原鉱処理量は 166 t であり，この内に含まれるSがすべて廃水中に流入したとすると，$SO_4^{=}$ の流出量としては 662×10^3 $SO_4^{=}$ eq/day 程度になる。この $SO_4^{=}$ 量は，さきに述べた如く湯川の流量が実際より小さい又はその合流後の流量が多く出る傾向のあることを考えると〔3〕の(3)で指摘した測点 No. 6 より No. 11 間の $SO_4^{=}$ 増加量 816×10^3 $SO_4^{=}$eq/day にほぼ匹敵し，両測点間の $SO_4^{=}$ 増加量の大部分が太子精錬所の廃水に原因し

ていると考えることができる。

太子精錬所の工場廃水中には暗赤色の泥状物が懸濁しており，これが流下中に河床に沈積している。この沈澱物の酸度に対する影響を明らかにするために，0.02Nの硫酸液中に沈澱物を振盪し，一定時間経過後滴定により酸度の変化を求めた。この結果を図示すると図—19の如



図—19　太子精錬所廃出泥状物の H_2SO_4 振盪試験

くである。6日間経過した後では乾燥泥状物1g当り1.44meq 相当の H^+ が減少しており酸度を低下させる。

〔5〕貯水池酸度の推定

吾妻川水系の流況，環境要素が現在とあまり変らない場合におけるダム貯水池の貯溜水の終局平衡酸濃度を推定する。八ツ場における流出酸量はすでに表—11に示した。今終局酸平衡濃度は次式に表わされると考える。

$$\text{平衡濃度}\,[H^+]g/m^3=\frac{\text{年間流入総}\,[H^+]\,g}{\text{年間流出水総量}}$$

八ツ場におけるBCG酸度は平均4.01meq/L その標準偏差は1.48meq/L，変異係数は36.9%であり，これより算出される流出酸量は1.1～2.3 t〔H^+〕/day である。また八ツ場における流量は2.91～18.07m^3/sec であり，平均値は 5.28m^3/sec，標準偏差は 3.48m^3/sec，変異係数は65.9%である。

吾妻川水系には発電用水路が各所にあり取水池の放水状態により流量が影響される。八ツ場においても測定時により流量に相当な差異があり，濃度の変化も激しい。したがって年間流入総量を算出する場合平均値のみでは実状と異なる心配もあり，年間を通じて平均した濃度，流量の値を推定した。危険率0.05の場合の信頼限界を求めると濃度については 3.32～4.70 meq/L，流量については 3.61～6.95m^3/sec を得た。一方八ツ場における年間流出水総量は岩島における東電の過去10年間の資料を基にして補正を行ない八ツ場の総流出水量を求めた関東地建藤原工事々務所の資料から 476×10^3 m^3 を採用した。

以上の値より平衡酸濃度を推定すると 0.78～2.31〔H^+〕g/m^3 を得る。これを PHに 換算すれば 3.1～2.7となる。

〔6〕水質改良対策および水質調査結果の大要

吾妻川の酸性化は須川の流入によって起る。須川が強酸性である原因は，湯川によって流入される草津温泉水，白根山の湧水が主たるものである。長野原町より上流部の吾妻川左岸，須川右岸より流入する支川では酸性水が多い。八ツ場における吾妻川の水質は強く湯川の影響を受けており，Al，Fe 等の溶存量多く，中性化に対して大きな緩衝能をもっている。

八ツ場および須川各測点では濃度と流量とは負の相関々係にある。流量は5月および10月に増加する傾向がある。湯川の流出酸量は1年を通じてほぼ一定である。

須川流下中に SO_4^{--} の供給があり太子精錬所の工場廃水によることを明らかにした。流下中におけるアルカリ性温泉水，沢水または河床との反応等による減酸はあまり認められない。

堰堤を構築した場合，貯溜水の酸度を推定し PH で3.1～2.7の範囲にあるとした。この様な水の利用価値は少なく吾妻川の綜合開発を計画する場合には，この水質の改良を計るべきであるが，種々な経済問題と関連する。ここでは経済的得失の検討はやめ，考えられる改良法を述べるに止める。

1) 草津，花敷，湯平，川原湯等の湧出機構を研究し，草津温泉の湧出量を制御すると共に花敷，湯平，川原湯等のアルカリ性泉の湧出量増加を計る。

2) 草津地区における酸性水の地下流入法の研究，この場合 Al の溶出による中和は望ましくなく，地下水脈中への酸性水の侵透を計る。

3) 太子精錬所の廃水処理の研究

4) アルカリ性廃物を出す工業の育成

5) 人工中和，これを実施するに際しては緩衝作用について定量的研究を行なう必要がある。また同時に有用成分の回収を計る必要がある。この問題については別の機会に見解をのべる。

6) 酸性水の利用研究，いづれにしても酸性水の対策をたてるにあたっては白根火山の活動について詳細な研究を行ない，雨水供給量の予期しない増加に対する対応策を考えねばならない。

なお，自然の力には自然の力で対応することを先づ考えるべきであろう。

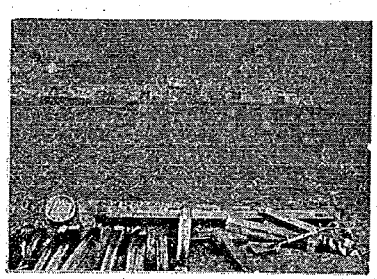
V　セメントおよび金属材料の耐酸性比較試験

八ツ場における吾妻川の酸度は数次の調査により，PH で2.3～3.1の範囲にあると判断され，また堰堤貯水池の終極平衡酸濃度は PH で2.7～3.1にあると推定された。この様な河川水に接する構造物を築造する場合に

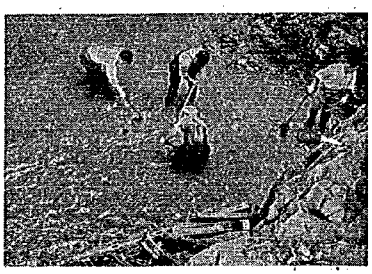
は使用材料の耐酸性及び工法について充分な見通しを持たなければならない。特にコンクリート構造物に使用するセメントは酸による侵蝕と共に溶存する硫酸塩による侵蝕に対して耐久的でなければならない。ここではダム構築の主材料であるセメント及び金属材料の耐酸性について比較試験を行なった結果について述べる。

〔1〕セメントの耐酸性比較試験

セメントの耐酸性を比較する目的で種類の異なる各種セメントを使用してコンクリート供試体を製作し八ツ場附近の吾妻川に浸漬した。使用したセメントの種類は普通ポルトランドセメント，中庸熱セメント，シリカセメント，高炉セメント，アルミナセメント，試製高硫酸塩セメント及び中庸熱セメントにフライアッシュを混合したものであり，シリカセメント及び高炉セメントでは夫々シリカ質混合材及びスラグの配合量を異にしたものがある。コンクリート供試体はセメント1種類につき3個づつ製作して総数36個になった。此等の供試体の配合は，セメントの耐酸性を比較するのが目的であり，またコンクリートの透水性の問題も考慮してここでは一応下記の如く一定とした。従ってコンクリートのスランプはセメントにより異なり，フライアッシュを混和したものが最も大きく次いで高硫酸塩セメント，中庸熱セメント，アルミナセメント，普通セメント，高炉セメント，シリカセメントの順に小さくなっている。



（平　水　時）



（高　水　時）

写真—1　コンクリート供試体浸漬状況

コンクリート供試体配合割合

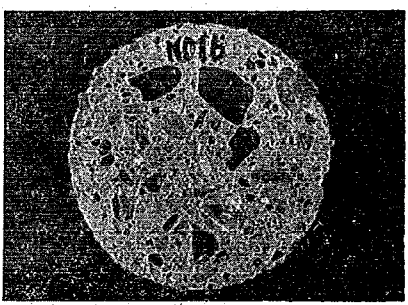
骨材最大寸法	1 m³当りの重量 kg		G/S %	W/C %
40 mm	セメント	320	1.5	53
	水	170		
	細骨材	770		
	粗骨材	1,160		

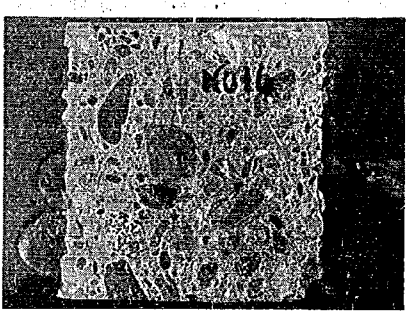
供試体は成型後28日間水中養生を行ない，材令28日で共振周波数及び重量を測定し現地に送付した。藤原工事事務所調査課ではこの供試体を一時水槽に貯蔵し29年9月9日に堰堤予定地の約600米上流に浸漬したので実際供試体が酸性水に接するまでには約3ヶ月間経過している。浸漬状況を写真—1に示す。

比較試験結果について：

供試体は浸漬後毎月1回藤原工事事務所調査課により計量され重量の減少により比較を行なった。浸漬期間は29年9月より30年12月に至る間で，その計量結果を表—14に示す。浸漬終了後再び土木研究所において共振周波数を測定した。また供試体を切断し内部状態を調べた。

この状況を写真2～6に示す。コンクリートの侵蝕状





写真—2　コンクリート試料切断面
（普通セメント）

態を知るために表面より 5mm までの層，10～15 mm 層，20～25mm層及び中心部のモルタル部分を採取し化学分析を行なった。分析法は A.S.T.M, C85～42に

表—14 (1)

供試体番号	セメントの種類	スランプ cm	共振周波数 (C/S)	土研測定重量 (kg)	9. 9	10. 8	11. 8	12.10	1.12	1.30	2.16	3. 3	3.12
1	大阪窯業シリカ (15%)	4	6200	12.660	12.670 100.0	12.660 99.9	12.520 98.8	12.440 98.2	12.439 98.2	12.360 97.6	12.280 96.9	12.240 96.6	12.222 96.5
2	〃	〃	6250	12.660	12.600 100.0	12.595 100.0	12.445 98.8	12.320 97.8	12.412 98.5	12.290 97.5	12.230 97.1	12.200 96.8	12.160 96.5
3	〃	〃	6230	12.640	12.660 100.0	12.640 99.8	12.505 98.8	12.435 98.2	12.412 98.0	12.330 97.4	12.240 96.7	12.100 96.4	12.192 96.3
4	同上 (30%)	2	6240	12.420	12.390 100.0	12.400 100.1	12.260 99.0	12.230 98.7	12.270 99.0	12.140 98.0	12.020 97.0	12.050 97.3	12.023 97.0
5	〃	〃	6230	12.440	12.450 100.0	12.450 100.0	12.320 99.0	12.310 98.9	12.280 98.6	12.180 97.8	12.100 97.2	12.090 97.1	12.0090 97.1
6	〃	〃	6230	12.500	12.480 100.0	12.485 100.0	12.350 99.0	12.220 97.9	12.345 98.9	12.250 98.2	12.160 97.6	12.150 97.4	12.141 97.3
7	第一高炉A (スラッグ含量30%)	5	6230	12.780	12.710 100.0	12.710 100.0	12.560 98.8	12.530 98.6	12.520 98.5	12.380 99.4	12.280 96.6	12.240 96.3	12.202 96.0
8	〃	〃	6280	12.720	12.660 100.0	12.640 99.8	12.480 98.6	12.330 97.4	12.440 98.3	12.310 97.2	12.240 96.7	12.210 96.4	12.146 95.9
9	〃	〃	6180	12.760	12.720 100.0	12.710 99.9	12.540 98.6	12.500 98.3	12.490 98.2	12.380 97.3	12.280 96.5	12.250 96.3	12.210 96.0
10	同上B (スラッグ含量50%)	8.5	6200	12.780	12.740 100.0	12.740 100.0	12.580 98.7	12.540 98.4	12.510 98.2	12.390 97.3	12.290 96.5	12.250 96.2	12.206 95.8
11	〃	〃	6250	12.800	12.780 100.0	12.755 99.8	12.600 98.6	12.545 98.2	12.520 98.0	12.400 97.0	12.290 96.2	12.265 96.0	12.226 95.7
12	〃	〃	6230	12.740	12.730 100.0	12.720 99.9	12.550 98.6	12.500 98.2	12.480 98.0	12.360 97.1	12.270 96.4	12.220 96.0	12.182 95.7
13	鉄父シリカ	3.5	6250	12.680	12.620 100.0	12.600 99.8	12.440 98.6	12.415 98.4	12.420 98.4	12.310 97.5	12.225 96.9	12.180 96.5	12.135 96.2
14	〃	〃	6280	12.660	12.620 100.0	12.580 99.7	12.420 98.4	12.400 98.3	12.360 97.9	12.250 97.1	12.155 96.3	12.115 96.0	12.061 95.6
15	〃	〃	6200	12.640	12.590 100.0	12.580 99.9	12.400 98,5	12.345 98.1	12.360 98.2	12.240 97.2	12.140 96.4	12.090 96.0	12.043 95.7
16	日本普通	8	6250	12.720	12.740 100.0	12.730 99.9	12.580 98.7	12.520 98.3	12.500 98.1	12.370 97.1	12.295 96.5	12.230 96.0	12.190 95.7
17	〃	〃	6280	12.660	12.630 100.0	12.635 100.0	12.480 98.8	12.430 98.4	12.440 98.5	12.290 97.3	12.155 96.2	12.080 95.7	12.093 95.8
18	〃	〃	6270	12.680	12.670 100.0	12.650 99.8	12.490 98.6	12.430 98.1	12.430 98.1	12.310 97.2	12.245 96.7	12.180 96.1	12.115 95.6

表—14 (2)

番号 供試体	セメントの種類	スランプ cm	共振周波数 (C/S)	土研測定重量 (kg)	3.29	4. 9	4.22	5. 9	5.26	6. 8	6.22	7. 5	7.19
1	大阪窯業シリカ (15%)	4	6200	12.660	12.185 96.2	12.230 96.5	12.050 95.1	12.040 95.0	12.050 95.1	12.000 94.7	11.970 94.5	11.950 94.3	11.950 94.3
2	〃	〃	6250	12.660	12.115 96.2	12.100 96.0	11.960 94.9	11.970 95.0	11.970 95.0	11.930 94.7	11.860 94.1	11.850 94.0	11.820 93.8
3	〃	〃	6230	12.640	12.175 96.2	12.200 96.4	12.000 94.8	12.000 94.8	11.990 94.7	11.980 94.6	11.900 94.0	11.890 93.9	11.880 93.8
4	同上 (30%)	2	6240	12.420	12.005 96.9	12.040 97.2	11.870 95.8	11.910 96.1	11.910 96.1	11.890 96.0	11.840 95.6	11.800 95.2	11.790 95.2
5	〃	〃	6230	12.440	12.065 96.9	12.040 96.7	11.920 95.7	11.950 96.1	11.960 96.1	11.940 95.9	11.890 95.5	11.840 95.1	11.840 95.1
6	〃	〃	6230	12.500	12.100 97.0	12.180 97.6	12.000 96.2	12.020 96.3	12.020 96.3	12.000 96.2	11.940 95.7	11.910 95.4	11.910 95.4
7	第一高炉A (スラッグ含量30%)	5	6230	12.780	12.170 95.8	12.090 95.1	12.000 94.4	12.000 94.4	11.990 94.3	11.970 94.2	11.920 93.8	11.890 93.5	11.880 93.5
8	〃	〃	6280	12.720	12.125 95.8	12.070 95.3	11.940 94.3	11.960 94.5	11.920 94.2	11.900 94.0	11.830 93.4	11.800 93.2	11.780 93.0
9	〃	〃	6180	12.760	12.170 95.7	12.160 95.6	11.970 94.1	12.010 94.4	11.990 94.3	11.980 94.2	11.890 93.5	11.830 93.5	11.830 93.0
10	同上B (スラッグ含量50%)	8.5	6200	12.780	12.190 95.7	12.150 95.4	12.050 94.6	12.060 94.7	12.060 94.7	12.030 94.4	11.960 93.9	11.920 93.6	11.920 93.6
11	〃	〃	6250	12.800	12.195 95.4	12.150 95.1	12.040 94.2	12.060 94.4	12.050 94.3	12.030 94.1	11.960 93.6	11.900 93.1	11.900 93.1
12	〃	〃	6230	12.740	12.170 95.6	12.120 95.2	12.020 94.4	12.040 94.6	12.010 94.3	11.990 94.2	11.900 93.5	11.860 93.2	11.850 93.1
13	秩父シリカ	3.5	6250	12.680	12.130 96.1	11.970 94.9	11.960 94.8	11.970 94.9	11.950 94.7	11.920 94.5	11.850 93.9	11.830 93.7	11.820 93.7
14	〃	〃	6280	12.660	12.065 95.6	11.880 94.1	11.900 94.3	11.790 93.4	11.880 94.1	11.840 98.8	11.770 93.3	11.730 92.9	11.730 92.9
15	〃	〃	6200	12.640	12.035 95.6	11.930 94.8	11.860 94.2	11.880 94.4	11.850 94.1	11.810 93.8	11.740 93.2	11.710 93.0	11.710 93.0
16	日本普通	8	6250	12.720	12.075 94.8	12.180 95.6	12.040 94.5	12.050 94.6	12.030 94.4	12.000 94.2	11.930 93.6	11.890 93.3	11.900 93.4
17	〃	〃	6280	12.660	12.060 95.5	11.950 94.6	11.930 94.5	11.960 94.7	11.940 94.5	11.910 94.3	11.830 93.7	11.780 93.3	11.800 93.4
18	〃	〃	6270	12.680	12.100 95.5	12.060 95.2	11.960 94.4	11.890 94.6	11.950 94.3	11.930 94.2	11.850 93.5	11.830 92.4	11.800 93.1

表—14 (3)

供試体番号	セメントの種類	スランプ cm	共振周波数 (C/S)	土研測定重量 (kg)	8. 1	8.24	9. 9	9.21	10. 8	10.27	11.13	11.26	12.11
1	大阪窯業シリカ (15%)	4	6200	12.660	11.860 93.6	11.790 93.1	11.740 92.7	11.670 92.1	11.660 92.0	11.660 92.0	11.640 91.9	11.620 91.7	11.580 91.4
2	〃	〃	6250	12.660	11.760 93.3	11.650 92.5	11.610 92.1	11.510 91.3	11.500 91.3	11.510 91.3	11.500 91.3	11.470 91.0	11.440 90.8
3	〃	〃	6230	12.640	11.780 93.0	11.680 92.3	11.650 92.0	11.550 91.2	11.560 91.3	11.520 91.0	11.510 90.9	11.480 90.7	11.460 90.5
4	同上 (30%)	2	6240	12.420	11.710 94.5	11.650 94.0	11.620 93.8	11.540 93.1	11.540 93.1	11.540 93.1	11.490 92.7	11.460 92.5	11.440 92.3
5	〃	〃	6230	12.440	11.770 94.5	11.640 93.5	11.630 93.4	11.550 92.8	11.550 92.8	11.520 92.5	11.490 92.3	11.460 92.0	11.430 91.8
6	〃	〃	6230	12.500	11.840 94.9	11.720 93.9	11.710 93.8	11.630 93.2	11.650 93.3	11.620 93.1	11.580 92.8	11.540 92.5	11.520 92.3
7	第一高炉A (スラッグ含量30%)	5	6230	12.780	11.820 93.0	11.730 92.3	11.720 92.2	11.660 91.7	11.650 91.7	11.640 91.6	11.610 91.3	11.580 91.1	11.560 91.0
8	〃	〃	6280	12.720	11.720 92.6	11.640 91.9	11.620 91.8	11.560 91.3	11.540 91.1	11.520 91.0	11.490 90.8	11.430 90.3	11.410 90.1
9	〃	〃	6180	12.760	11.750 92.4	11.660 91.7	11.620 91.4	11.590 91.1	11.530 90.6	11.510 90.5	11.470 90.2	11.420 89.8	11.400 89.6
10	同上B (スラッグ含量50%)	8.5	6200	12.780	11.820 92.8	11.760 92.3	11.770 92.4	11.710 91.9	11.710 91.9	11.690 91.8	11.650 91.4	11.630 91.3	11.610 91.1
11	〃	〃	6250	12.800	11.820 92.5	11.760 92.0	11.770 92.1	11.720 91.7	11.700 91.5	11.680 91.4	11.630 91.0	11.610 90.8	11.580 90.6
12	〃	〃	6230	12.740	11.740 92.2	11.690 91.8	11.700 91.9	11.650 91.5	11.640 91.4	11.620 91.3	11.560 90.8	11.530 90.6	11.510 90.4
13	秩父シリカ	3.5	6250	12.680	11.710 92.8	11.660 92.4	11.650 92.3	11.580 91.8	11.580 91.8	11.550 91.5	11.520 91.3	11.490 91.0	11.460 90.8
14	〃	〃	6280	12.660	11.640 92.2	11.580 91.8	11.560 91.6	11.500 91.1	11.460 90.8	11.430 90.6	11.380 90.2	11.360 90.0	11.320 89.7
15	〃	〃	6200	12.640	11.570 91.9	11.520 91.5	11.490 91.3	11.470 91.1	11.480 91.2	11.360 90.2	11.300 89.8	11.260 89.4	11.240 89.3
16	日本普通	8	6250	12.720	11.810 92.7	11.760 92.3	11.770 92.4	11.730 92.1	11.720 92.0	11.710 91.9	11.670 91.6	11.650 91.4	11.620 91.2
17	〃	〃	6280	12.660	11.670 92.4	11.630 92.1	11.640 92.2	11.600 91.8	11.590 91.8	11.580 91.7	11.540 91.4	11.510 91.1	11.460 90.7
18	〃	〃	6270	12.680	11.680 92.2	11.620 91.7	11.650 91.9	11.610 91.6	11.600 91.6	11.580 91.4	11.540 91.1	11.500 90.8	11.460 90.5

表—14 (4)

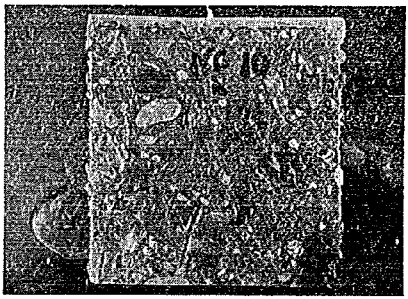
供試体番号	セメントの種類	スランプ cm	共振周波数 (C/S)	土研測定電量 (kg)	9. 9	10. 8	11. 8	12.10	1.12	1.30	2.16	3.3	3.12
19	アサノマスコン	12.2	6220	12.740	12.700 100.0	12.670 99.8	12.495 98.4	12.440 98.0	12.450 98.0	12.340 97.2	12.245 96.4	12.190 96.0	12.172 95.8
20	〃	〃	6250	12.720	12.690 100.0	12.680 99.9	12.495 98.5	12.435 98.0	12.445 98.1	12.300 96.9	12.255 96.6	12.240 96.5	12.208 96.2
21	〃	〃	6260	12.700	12.660 100.0	12.680 100.2	12.480 98.6	12.430 98.2	12.420 98.1	12.320 97.3	12.245 96.7	12.210 96.4	12.164 96.1
22	石灰スラグ	13	6200	12.780	12.750 100.0	12.730 99.8	12.570 98.6	12.510 98.1	12.530 98.3	12.420 97.4	12.345 96.8	12.320 96.6	12.287 96.4
23	〃	〃	6190	12.780	12.760 100.0	12.700 99.5	12.530 98.2	12.509 98.0	12.515 98.1	12.400 97.2	12.290 96.3	12.270 96.2	12.252 96.0
24	〃	〃	6200	12.720	12.720 100.0	12.665 99.6	12.510 98.4	12.440 97.8	12.470 98.0	12.380 97.3	12.305 96.7	12.265 96.4	12.233 96.2
25	アサノマスコン(70%) +フライアッシュ(30%)	15	6080	12.620	12.620 100.0	12.610 99.9	12.440 98.6	12.410 98.3	12.440 98.6	12.320 97.6	12.265 97.2	12.220 96.8	12.180 96.5
26	〃	〃	6050	12.720	12.680 100.0	12.700 100.2	12.510 98.7	12.500 98.6	12.480 98.4	12.390 97.7	12.315 97.1	12.280 96.8	12.240 96.5
27	〃	〃	6120	12.680	12.670 100.0	12.660 99.9	12.460 98.3	12.425 98.1	12.420 98.0	12.320 97.2	12.240 96.6	12.220 96.5	12.193 96.2
28	日本普通 (バリュウム塩添加) Wの2%	11	6250	12.680	12.670 100.0	12.650 99.8	12.490 98.6	12.435 98.1	12.395 97.8	12.300 97.1	12.195 96.3	12.150 95.9	12.115 95.6
29	〃	〃	6260	12.700	12.700 100.0	12.700 100.0	12.520 98.6	12.500 98.4	12.455 98.1	12.345 97.1	12.225 96.3	12.170 95.8	12.138 95.6
30	〃	〃	6230	12.760	12.740 100.0	12.720 99.8	12.550 98.5	12.510 98.2	12.525 98.3	12.400 97.3	12.305 96.6	12.240 96.1	12.200 95.8
31	アルミナセメント	9	6680	12.920	12.920 100.0	12.920 100.0	12.720 98.5	12.545 97.1	12.530 97.0	12.360 95.7	12.260 94.9	12.150 94.0	12.112 98.7
32	〃	〃	6500	13.020	13.010 100.0	12.960 99.6	12.760 98.1	12.600 96.9	12.530 96.3	12.380 95.2	12.270 94.3	12.160 93.5	12.141 93.3
33	〃	〃	6450	12.960	12.960 100.0	12.950 99.9	12.740 98.3	12.530 96.7	12.480 96.3	12.320 95.1	12.215 94.3	12.090 93.3	12.080 93.2
34	II型セメント(70%)+ 関電フライアッシュ(30%)	12.5	6050	12.620	12.580 100.0	12.570 99.9	12.400 98.6	12.340 98.1	12.370 98.0	12.270 97.5	12.180 96.8	12.100 96.2	12.121 96.4
35	〃	〃	6150	12.640	12.650 100.0	12.610 99.9	12.460 98.7	12.415 98.4	12.370 98.0	12.260 97.2	12.085 95.8	12.020 95.2	12.027 95.3
36	〃	〃	6180	12.520	12.520 100.0	12.500 99.8	12.360 98.7	12.300 98.2	12.290 98.2	12.190 97.4	12.200 97.4	12.100 96.7	12.135 96.9

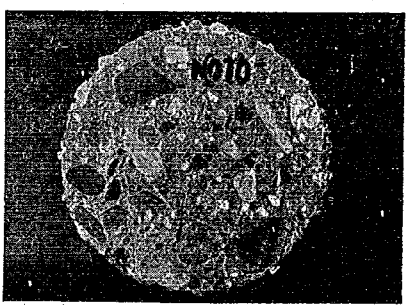
表—14 (5)

供試体番号	セメントの種類	スランプ cm	共振周波数 (C/S)	土研測定重量 (kg)	3.29	4. 9	4.22	5. 9	5.26	6. 8	6.22	7. 5	7.19
19	アサノマスコン	12.2	6220	12.740	12.160 95.8	11.940 94.0	12.050 94.9	12.030 94.7	12.030 94.7	12.020 94.6	11.960 94.2	11.920 93.9	11.940 94.0
20	〃	〃	6250	12.720	12.200 96.1	12.180 96.0	12.060 95.0	12.060 95.0	12.030 94.8	12.020 94.7	11.960 94.2	11.910 93.9	11.930 94.0
21	〃	〃	6260	12.700	12.170 96.1	12.060 95.3	12.020 94.9	12.010 94.9	11.990 94.7	11.990 94.7	11.900 94.0	11.840 93.5	11.860 93.7
22	石膏スラグ	13	6200	12.780	12.280 96.3	12.230 95.9	12.160 95.4	12.170 95.5	12.130 95.1	12.130 95.1	12.070 94.7	12.030 94.4	12.030 94.4
23	〃	〃	6190	12.780	12.245 96.0	12.210 95.7	12.120 95.0	12.180 95.1	12.090 94.7	12.090 94.7	12.020 94.2	11.980 93.9	11.970 93.8
24	〃	〃	6200	12.720	12.240 96.2	12.190 95.8	12.110 95.2	12.100 95.1	12.070 94.9	12.070 94.9	12.010 94.4	11.980 94.2	11.980 94.2
25	アサノマスコン(70%) +フライアッシュ(30%)	15	6080	12.620	12.150 96.3	12.090 95.8	12.060 95.6	12.040 95.4	12.020 95.3	12.010 95.2	11.950 94,7	11.910 9.44	11.930 94.5
26	〃	〃	6050	12.720	12.235 96.5	12.220 96.4	12.120 95.6	12.110 95.5	12.080 95.3	12.060 95.1	12.000 94.3	11.940 94.2	11.940 94.2
27	〃	〃	6120	12.680	12.190 96.2	12.210 96.4	12.060 95.2	12.060 95.2	12.030 95.0	12.020 94.9	11.950 94.3	11.910 94.0	11.900 93.9
28	日本普通 (バリュウム塩添加) Wの2%	11	6250	12.680	12.110 95.6	12.085 95.4	11.990 94.6	11.970 94.5	11.940 94.2	11.930 94.2	11.850 93.5	11.820 93.3	11.820 93.3
29	〃	〃	6260	12.700	12.140 95.6	12.080 95.1	12.020 94.7	12.000 94.5	11.960 94.2	11.950 94.1	11.880 93.5	11.830 93.1	11.830 93.1
30	〃	〃	6230	12.760	12.200 95.8	12.120 95.1	12.070 94.7	12.050 94.6	12.020 94.4	12.010 94.3	11.940 93.7	11.890 93.3	11.890 93.3
31	アルミナセメント	9	6680	12.920	12.065 93.4	11.970 92.7	11.980 92.7	11.980 92.7	11.980 92.7	11.960 92.6	11.900 92.1	11.870 91.9	11.870 91.9
32	〃	〃	6500	13.020	12.115 93.1	12.080 92.9	12.020 92.4	11.990 92.7	11.990 92.2	11.970 92.0	11.910 91.5	11.860 91.2	11.860 91.2
33	〃	〃	6450	12.960	12.065 93.1	12.070 93.1	11.940 92.1	11.990 91.9	11.910 91.9	11.880 91.7	11.820 91.2	11.770 90.8	11.770 90.8
34	II型セメント(70%)+ 関電フライアッシュ(30%)	12.5	6050	12.620	12.130 96.4	12.030 95.6	12.020 95.6	12.000 95.4	12.010 95.5	11.990 95.3	11.930 94.8	11.870 94.4	11.880 94.4
35	〃	〃	6150	12.640	12.040 95.4	12.160 96.4	11.940 94.6	11.940 94.6	11.960 94.8	11.920 94.5	11.860 94.0	11.810 93.6	11.800 93.5
36	〃	〃	6180	12.520	12.160 97.1	12.120 96.8	12.050 96.3	12.050 96.3	12.050 96.3	12.030 96.0	11.960 95.5	11.900 95.0	11.830 94.5

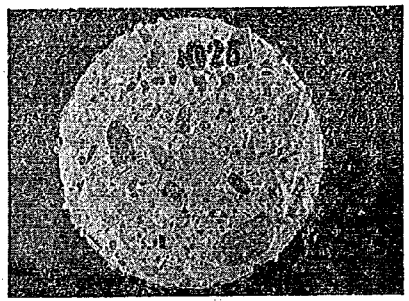
表—14 (6)

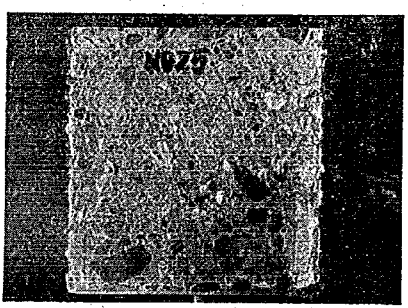
供試体番号	セメントの種類	スランプ cm	共振周波数 (C/S)	土研測定重量 (kg)	8. 1	8.24	9. 9	9.21	10. 8	10.27	11.13	11.26	12.11
19	アサノマスコン	12.2	6220	12.740	11.850 93.3	11.770 92.7	11.780 92.8	11.740 92.4	11.720 92.3	11.720 92.3	11.690 92.0	11.660 91.8	11.640 91.7
20	〃	〃	6250	12.720	11.820 93.1	11.790 92.9	11.770 92.7	11.710 92.3	11.680 92.0	11.660 91.9	11.640 91.7	11.610 91.5	11.590 91.3
21	〃	〃	6260	12.700	11.750 92.8	11.690 92.3	11.720 92.6	11.660 92.1	11.620 91.8	11.610 91.7	11.560 91.3	11.530 91.1	11.510 90.9
22	石膏スラグ	13	6200	12.780	11.930 93.6	11.880 93.2	11.850 92.9	11.810 92.6	11.800 92.5	11.780 92.4	11.720 91,9	11.700 91.8	11.670 91.5
23	〃	〃	6190	12.780	11.870 93.0	11.830 92.7	11.820 92.6	11.780 92.3	11.760 92.2	11.740 92.4	流失 流失	〃 〃	〃 〃
24	〃	〃	6220	12.720	11.880 93.4	11.810 92.8	11.800 92.8	11.760 92.5	11.720 92.1	11.720 92.1	11.650 91.6	11.610 91.3	11.590 91.1
25	アサノマスコン(70%) +フライアッシュ(30%)	15	6080	12.620	11.860 94.0	11.830 93.7	11.790 93.4	11.740 93.0	11.730 92.9	11.720 92.9	11.670 92.5	11.630 92.2	11.610 92.0
26	〃	〃	6050	12.720	11.870 93.6	11.830 93.3	11.810 93.1	11.750 92.7	11.740 92.6	11.720 92.4	11.680 92.1	11.650 91.9	11.610 91.6
27	〃	〃	6120	12.680	11.850 93.5	11.780 93.0	11.770 92.9	11.730 92.6	11.710 92.4	11.680 92.2	11.640 91.9	11.620 91.7	11.600 91.6
28	日本普通 (バリュウム塩添加) Wの2%	15	6250	12.680	11.730 92.6	11.680 92.2	11.700 92.3	11.650 91.9	11.630 91.8	11.600 91.6	11.560 91.2	11.540 91.1	11.510 90.8
29	〃	〃	6260	12.700	11.760 92.6	11.730 92.4	11.730 92.4	11.680 92.0	11.660 91.8	11.650 91.7	11.590 91.3	11.560 91.0	11.530 90.8
30	〃	〃	6230	12.760	11.760 92.3	11.720 92.0	11.730 92.1	11.700 91.8	11.670 91.6	11.660 91.5	11.600 91.1	11.580 90.9	11.550 90.7
31	アルミナセメント	9	6680	12.920	11.790 91.3	11.760 91.0	11.800 91.3	11.740 90.9	11.700 90.6	11.700 90.6	11.660 90.2	11.650 90.2	11.610 89.9
32	〃	〃	6500	13.020	11.790 90.6	11.750 90.3	11.760 90.4	11.700 89.9	11.650 89.5	11.650 89.5	11.590 89.1	11.560 88.9	11.520 88.9
33	〃	〃	6450	12.960	11.690 90.2	11.660 90.0	11.700 90.3	11.660 90.0	11.610 89.6	11.600 89.5	11.540 89.0	11.550 89.1	11.500 88.7
34	II型セメント(70%)+ 関電フライアッシュ(50%)	12.5	6050	12.620	11.750 93.4	11.690 92.9	11.680 92.8	11.630 92.4	11.570 92.0	11.570 92.0	11.510 91.5	11.500 91.4	11.470 91.2
35	〃	〃	6150	12.640	11.760 93.2	11.730 92.9	11.750 93.1	11.700 92.7	11.660 92.4	11.640 92.2	流失 流失	〃 〃	〃 〃
36	〃	〃	6180	12.520	11.700 93.5	11.600 92.7	11.620 92.8	11.580 92.5	11.530 92.1	11.520 92.0	11.470 91.6	11.450 91.5	11.430 91.3



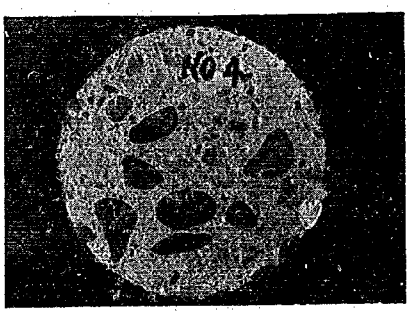


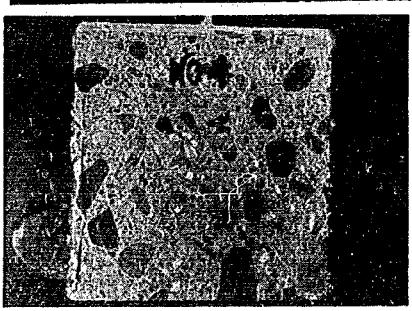
写真—3　コンクリート試料切断面〔高炉セメント（スラグ50%）〕



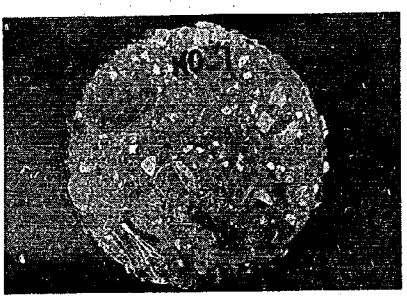


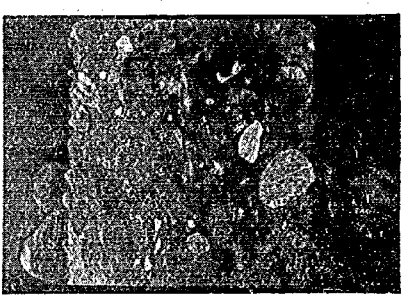
写真—5　コンクリート試料切断面（中庸熱セメント70%＋フライアッシュ30%）





写真—4　コンクリート試料切断面〔シリカセメント（シリカ質混合材30%）〕





写真—6　コンクリート試料切断面（アルミナセメント）

表—15 コンクリート供試体分析結果（カッコ内な可溶分に対する%）

種別	供試体表面よりの層厚	強熱減量	不溶解残分	SiO_2	CaO	SO_3	Cl	比率 CaO/SiO_2	SO_3/SiO_2	SO_3/Cl	CaO/SO_3
大阪窯業シリカセメント 30%	mm 0 ～ 5	6.46	78.40	4.25	8.21	0.47	0.06				
				(28.07)	(54.23)	(3.10)	(0.39)	1.93	0.11	7.75	17.46
	10 ～ 15	7.74	70.86	6.93	11.56	0.53	0.07				
				(32.38)	(54.02)	(2.48)	(0.33)	1.67	0.08	7.52	21.81
	20 ～ 25	7.72	68.47	7.92	10.24	0.52	0.02				
				(33.26)	(43.01)	(2.18)	(0.08)	1.29	0.07	27.25	19.69
	中心部	6.23	69.44	5.84	10.62	0.58	0.01				
				(24.00)	(43.65)	(2.38)	(0.04)	1.82	0.10	59.50	19.13
第一高炉セメント 50%	0 ～ 5	7.52	73.80	4.77	11.82	0.50	0.04				
				(25.60)	(63.28)	(2.68)	(0.21)	2.47	0.10	12.76	23.64
	10 ～ 15	6.73	75.32	4.09	11.96	0.36	0.05				
				(22.79)	(66.63)	(2.01)	(0.28)	2.92	0.09	7.18	33.22
	20 ～ 25	6.27	78.33	3.89	9.90	0.32	0.03				
				(25.26)	(64.29)	(2.08)	(0.19)	2.55	0.08	10.95	30.93
	中心部	6.20	80.35	3.59	8.96	0.32	0.01				
				(26.69)	(66.62)	(2.40)	(0.07)	2.50	0.09	34.29	28.00
日本普通セメント	0 ～ 5	10.36	69.19	4.22	14.23	2.33	0.06				
				(20.64)	(69.58)	(11.39)	(0.24)	3.37	0.55	47.46	6.11
	10 ～ 15	9.13	63.71	6.13	18.80	0.54	0.17				
				(22.59)	(69.27)	(1.99)	(0.64)	3.07	0.09	3.16	34.81
	20 ～ 25	11.11	57.37	6.42	21.86	0.65	0.09				
				(20.37)	(69.35)	(2.06)	(0.29)	3.40	0.10	7.10	33.63
	中心部	8.20	70.59	4.90	14.39	0.37	0.02				
				(23.10)	(67.85)	(1.74)	(0.09)	2.94	0.08	19.33	38.89
アサノマスコンセメント	0 ～ 5	8.20	72.48	4.79	12.30	1.70	0.08				
				(24.79)	(63.66)	(8.80)	(0.41)	2.57	0.35	21.71	7.23
	10 ～ 15	7.51	73.05	4.48	12.59	0.31	0.10				
				(23.05)	(64.76)	(1.59)	(0.52)	2.81	0.07	3.06	40.61
	20 ～ 25	7.36	71.55	5.06	14.09	0.28	0.08				
				(23.99)	(66.81)	(1.33)	(0.38)	2.78	0.06	3.50	50.32
	中心部	6.26	77.61	4.19	10.91	0.25	0.01				
				(25.98)	(67.64)	(1.55)	(0.06)	2.60	0.06	25.83	43.64

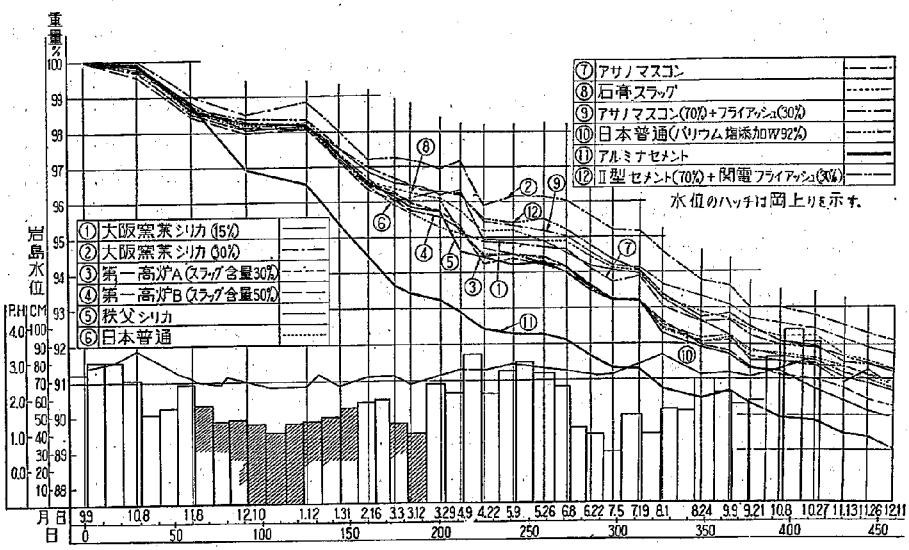
使用原セメントの組成

大阪窯業シリカセメント30%	—	—	42.03	46.27	1.39	0.01	1.10	0.03	139	33.28
第一高炉セメント50%	—	—	24.29	55.79	1.35	0.01	2.30	0.06	135	41.32
日本普通セメント	—	—	21.45	63.86	1.69	0.01	2.98	0.08	169	39.77
アサノマスコンセメント	—	—	22.80	63.20	1.77	0.01	2.77	0.08	177	39.57

準拠して行ない。Cl は別に分析試料を硫酸で溶解後陽イオン交換樹脂を通した濾液を苛性ソーダで中和し硝酸銀にて滴定して定量した。浸漬後の分析結果を表—15に示す。

浸漬後の供試体の外面は写真に示す如く表面のモルタル部分はいずれの試料でも溶出して骨材が露出している。表面モルタル部分は膠着力を失ない指先で摩擦することにより容易に脱落する。この様な供試体を切断した面にフェノールフタレン液を塗付すると外面から数mmの層を除いてアルカリ性反応を示す。供試体寸法は直径15cm高さ 30cm の円筒形であったが，吾妻川に約1年間浸漬後では直径約 14.6cm になっている。すなわち表面から 2 mm 程度の表層は酸による溶解作用，機械的な侵蝕により溶脱し更に 2 ～ 3 mm は酸が滲透してモルタル部の膠着力を失ない，フェノールフタレン液に対してアルカリ性を呈しない。結局表面から 5 mm 程度が一応侵蝕を受けたと考えられる。

供試体の重量減少は表—14に示した如くいずれのセメントを使用したものでも大差なく，浸漬期間中に 7.7～11.3%の減少を示した。これは1年間に毎平方 cm 当り約0.4cm³，すなわち 0.93g のコンクリートが溶脱した事に相当する。この内でも図—20に示した様にシリカ質



図—20

混合材30%混和したシリカセメント及びフライアッシュを混和したものの減量は比較的少ない。他の試料と比較するとアルミナセメントを使用した供試体の重量減は2ケ月以後急激に大となる。共振周波数は材令28日において6050～6680 C/S であり，浸漬後では7000～7200 C/S と増加している。中庸熱セメントとフライアッシュを混和したセメントを使用した供試体の共振周波数の増加割合は116～115%であり，高炉，シリカ，普通，高硫酸塩セメントでは 112～114 % に増加している。アルミナセメントを使用した供試体では増加率は 105% で他に比較して小さい。此等の共振周波数の増加は侵蝕による供試体の変形を考慮しても強度は幾分増加の傾向にあると認め

られる。

浸漬後のコンクリート供試体のモルタル部の化学組成を表—15に示した。ここでは4試料について実験を行った。分析法の精度が十分でないから，これ等の結果から吾妻川水によるセメントの浸食状況を明確にすることは出来ない。しかし興味ある種々の事項を知ることが出来る。シリカセメント，高炉セメント，ポルトランド系セメントでは，それぞれ供試体表面からの距離による組成の変化の様相は異っている。とくに SO_3 は顕著であり，ポルトランド系では表層での SO_3 の含量はことに高い。SO_3 は元来セメント中に存在するもので，CaO の酸による溶出のため見掛上 SO_3 含量が多いのではないかと一応考えられるが，CaO/SO_3 および SO_3/SiO_2 の表層よりの深さ別の値を考えれば，川水中の SO_3 が固定されたと考えるのが妥当である。しかしシリカセメントについては SO_3 の固定はほとんど認められず，また高炉セメントについてはこの性質は顕著ではない。

塩素イオン（Cl^-）はコンクリート中にいちじるしく多量に含有される。この量は練り混ぜに使用した水の塩素量を考えても多量にすぎる。塩素は表層で SO_3 と同様に相当量が固定されるが，その溶解度の大きなためにさらに内部に拡散すると考えられる。ポルトランド系セメントでは中間層に多く，SO_3 の行動と対比してみればおもしろい。なお，種々な添加材を加えてコンクリートの耐酸性を向上させる問題については別稿において述べる。

〔2〕金属材料の耐酸性比較試験

浸漬地点はコンクリート供試体を浸漬した所で，試料はいずれもステンレス系統のものである。試料番号 No. 1，2，3，5は18—8鋼，No. 4は18 Cr 鋼，No. 6，7は18Cr—12Ni 鋼でMoを1.75~2.75% を含む。試験片の大きさは No. 1～3 では 204×204×1.5mm 程度であり，No. 4は121×77×1.1mmで，No. 5～7では141×90×3mm程度である。浸漬期間は30年1月より同年12月に至る約1年間である。浸漬期間中藤原工事事務所調査課により計画された結果を表—16に示す。

表—16　金属試験片計量表

	重量	S.30.1.12	1.31	3. 3	3.12	3.29	4. 9	4.22	5. 9	5.26	6.22
Type 302	372.0	371.7	375.5	371.6	372.3	371.8	372.5	371.5	372.0	370.5	371.0
316	333.6	333.0	335.5	333.3	333.4	333.0	333.0	335.2	333.5	332.5	332.5
405	533.7	533.4	534.5	533.0	533.4	533.7	534.0	534.0	533.5	532.5	532.0
430	77.8	77.2	77.6	77.3	82.7	77.3	77.5	77.5	77.5	76.5	76.5
NTK 8AS6	314.8	314.5	315.5	314.7	314.4	314.9	315.0	314.5	314.5	314.0	313.5
SAS	296.9	296.5	297.5	296.5	297.0	297.0	297.5	296.6	297.0	296.0	295.5
8S	301.2	300.9	301.5	300.4	300.6	301.0	301.5	301.0	301.0	300.0	300.0

	7. 5	7.19	8. 1	8.24	9. 9	9.27	10. 8	11.13	11.26	12.11	
Type 302	371.5	371.5	371.5	371.5	372.5	371.5	371.5	372.0	372.0	372.0	
316	333.0	333.0	332.5	333.0	334.5	333.0	333.0	334.0	334.0	334.0	
405	532.5	533.0	532.0	533.0	533.0	533.5	533.0	533.5	533.5	533.5	
430	77.5	77.5	77.0	77.5	77.5	77.5	77.5	77.5	77.5	77.5	
NTK 8AS6	314.5	314.5	314.0	314.5	314.5	314.5	314.5	315.0	314.6	315.0	
SAS	296.5	296.5	296.0	297.0	297.0	297.0	297.5	297.0	297.5	297.5	
8S	300.0	300.5	300.0	300.5	301.0	300.5	300.5	300.5	301.0	301.0	

表に示される様にいずれの試料も重量の変化は認められず，表面の光沢は失なわれたが発錆したものはなく，これ等材質の金属材料は吾妻川の河水に対して相当の耐蝕性があるものと判断される。

28年においても18—8鋼，13Cr鋼，18Cr鋼，普通軟鋼等の試験庁の比較試験を行なつたが途中出水により流失し，18—8鋼及び普通軟鋼の2枚が残った。浸漬期間188日間で18—8鋼では重量減少は0.1%程度であり表面は正常であるが，普通軟鋼板では46%重量は減少し表面は侵蝕され凹凸が激しく相当侵蝕されていることを示した。

VI 総　括

吾妻川水系のうち主として八ツ場より上流部および須川について水質調査を行ない，吾妻川酸性化の現況とその主因を明確にした。さらに各支川の水質特性，濃度，流出量の季節変化について述べ，ダム貯水池の終極平衡酸濃度を推定した。またダム構築の主材料であるセメントおよび金属材料の吾妻川水質に対する耐蝕性の比較試験を現地において実施しその結果についてのべた。次に要点をのべて総括とする。

(1) 吾妻川酸性化の主因は既存の調査結果が認めている様に須川の流入によるものであり，須川は湯川の流入により著るしく酸性化される。湯川が強酸性である原因は草津温泉の流入と，白根山に源を発する毒水をあげることができる。

吾妻川は利根川合流まで須川流入の影響を受けている。

なお既存の調査結果では酸性化について定量的表現に欠けており，本調査結果と直接比較することは出来ない。この地区の火山活動にともない本調査の現況がどの程度影響を受けるかは想定出来ない。毒水対策を考える場合にはこの点について注意せねばならない。

(2) 須川右岸から流入する支川，沢および長野原より上流部の吾妻川左岸から流入する支川には酸性水が多い。須川左岸，上流部吾妻川右岸から流入する支川は総て中性水であり，上流部吾妻本流は熊川の影響を受けるのかBCGアルカリ度は比較的大きい。花敷，湯平，川原湯温泉はいずれも中性泉である。

(3) 成分濃度および流出量の季節変化は，自然的因子の外に発電所取水池の放水状況，工場廃水等の影響もあり明瞭な規則的関係を示さない。流量は測点 No. 5，No. 6，No. 11，No. 17 とも5月および10月に増加している。〔SO_4〕/〔Cl〕，〔SO_4〕+〔Cl〕/〔BCG酸度〕等の比は流下するに従って減少し，〔Fe〕+〔Al〕/〔PP—BCG 酸度〕では定まった関係を示さない。〔SO_4〕とBCG，〔Cl〕とBCG 酸度では直線関係を認め〔SO_4〕と〔Cl〕，〔Ca〕と〔Cl〕の間では，湯川の各点は須川，八ツ場と異った位置に分布し，測点 No. 6とNo. 11の間で SO_4，Ca の供給があることを示している。流下中の減酸は顕著ではない。

(4) 湯川については流量と濃度，流出量の関係は割合明瞭であり，流量と濃度は負の相関関係を認めることが出来る。流出量は他の観測点と比較して，1年を通じての変化は少なく，ほぼ一定量が流出している。H^+は1.2～1.8eq×10^1/day 平均 1.3eq×10^1/day，$SO_4^=$は2.2～1.3eq×10^5/day 平均 1.5eq×10^5/day，Cl^-は 0.7～1.4 eq×10^4/day，平均0.9eq×10^5/day である。

(5) 八ツ場における各成分濃度は10月に最小値を示す。Ca^{++} Mg^{++}の濃度は流量増加により減少してゆくが，流出量は流量の増加と共に増大してゆく傾向を示し，湯川以外の支川水中にもこれ等成分が溶存していることを知る。Al^{+++}の溶存量は 4.8～3.6mg/L Fe^{+++}の溶存量は1.6～8.8mg/L であり，〔PP酸度—BCG酸度〕の値は0.8～3.2meqで，中性化に対して緩衝能を有している。〔Cl〕は 45.8～147 mg/L で多量に含有している。$SO_4^=$BCG 酸度の流出量はあまり流量に関係しない。この原因は成分の河水への供給され方と関係あり，その機構は水文学的に重要な知見を与えるものと考えられるので今後の研究を要する点と思う。八ツ場における吾妻川の酸度の年間平均値を3.32～4.70meq/L流量値を3.61～6.95m^3/sec と推定した。

(6) 吾妻川水系が現在の状態のままである場合のダム貯水池の終極平衡酸濃度は BCG 酸度を無機強電解質によるとしてPH 値で2.7～3.1と推定する。貯留水は中性化に対して大きな緩衝能を持つことを留意しなければならない。

(7) 吾妻川河水に対する市販セメントの耐蝕性を単位セメント量320kg/m^3 のコンクリート供試体 (15φ×30) について実測した結果では重量減少率で比較して，その減少量は約1年間に7.7～11.3% であり，いずれのセメントでも大差はない。しかしシリカセメントおよび中庸熱セメントにフライアッシュを混合したものは他に比較すると幾分強い傾向がある。アルミナセメントの重量減少は大である。1年間浸漬によるコンクリートの侵蝕は表面から5mm程度であり，剝落量はコンクリートとして1年につき単位表面積当り約 0.4cm^3，重量としては約 0.93g程度である。

(8) 金属材料は18—8鋼，18Cr鋼，18Cr—12Ni 鋼とも吾妻川河水に対して充分な耐蝕性があるものと判断される。28年における浸漬試験結果では 13Cr 鋼でも耐蝕性は充分であることを示した。

(9) 八ツ場に構築されるダムの貯留水がPH で2.7～3.1であるとすれば工業用，農業用，水産用水としての利用は望むことは出来ない。またダム構築にあたっては耐酸セメントの研究を続けると共にコンクリートの透水性を出来る限り小さくさせ，コンクリート表面も耐酸性の処理を行なう等特別の考慮を必要とする。

(10) 吾妻川毒水対策として考慮せねばならない問題点について言及した。

文　献

1) 衛生試験所彙報第34号及び54号，昭4及び昭15：日本鉱泉分析表
2) 吾妻川の水質汚濁について：石井省一郎，陸水 3.83，昭8
3) 吾妻川水質について：東京電力群馬電力所土木

課，ガリ刷
4) 発電用水として利用のための須川水質調査報告：電力中央研究所化学課，河村英雄，石原義己，ガリ刷，昭28.4月
5) 吾妻水質と流程による組成成分の変化について：群馬県立渋川高校化学部，ガリ刷，昭29.8月
6) 酸性河川の水質に関する調査研究(2)：有泉昌，野本誠三，牧隆正，土研報告，第90号，昭30

謝　辞

この調査を実施するに当り河川局開発課，関東地方建設局の調査関係の諸氏から絶大な御援助を与えられた。感謝の意を表します。また分析方法について半谷高久氏から教えられた点があり謝意を表します。

なお，この調査結果の一部は日本化学会地球化学討論会（昭和31年11月）で発表された。

耐酸セメントについて

（酸性河川水の水質に関する調査研究第4報）

（昭和34年3月）

有泉　昌*
和田茂治**

目　次

第2篇　耐酸セメント

Ⅰ　まえがき……(37)
Ⅱ　セメントモルタルの希硫酸による腐蝕機構……(38)
Ⅲ　原材料の選定……(39)
〔1〕セメント……(39)
〔2〕添加剤……(40)
Ⅳ　実験および測定方法……(41)
Ⅴ　実験結果及びその考察……(41)
Ⅵ　結　言……(44)
（附　表）
（附　図）

第2編　耐酸セメント

Ⅰ　まえがき

利根川総合開発の一環として吾妻川に八ツ場ダムの計画がなされた。この吾妻川の水質は従来より酸性であることが著明であるため，八ツ場ダム計画にはそのダム構造物自体の酸性水に対する耐久性および貯水された水の利用面から水質について調査する必要が生じた。

水質調査は昭和28～30年に亘って実施し，貯水池のPHは2.7～3.1と推定した。さらに八ツ場の現地で各種セメントで作製したコンクリートの浸漬試験を実施し，コンクリートの耐久性について一応の推測資料を得たが，コンクリートの酸に対する耐久性の積極的な向上方法の究明が要求された。

酸性河川にセメント・コンクリートの堰堤が構築された場合，本質的にアルカリ特性であるポルトランドセメントの水和化合物は酸により著しい腐蝕が生起されるため，堰堤の寿命が短縮されることは経験的事例を挙げるまでもなく常識的にも考えられる。由って本研究はポルトランドセメント又はセメントコンクリートに化学的な耐酸処理を施して，構築体の酸腐蝕性を可及的に制禦して耐用年数の引延を図ることを主目的として，昭和31～33年に亘って室内実験を実施した。経済性，施工の簡便さを考慮した合目的な防蝕方策について見ると，アルカリ性を持つセメント自体の根本的改質はこの際除外して次の方法が考えられる。即ち1）耐酸性を附与すると考えられる添加剤をセメントに混入して水と共に均一混練，打設する添加剤法，2）セメントコンクリートの表面を合成樹脂又は瀝青剤で処理して含浸塗膜する表面処理法，3）耐酸煉瓦及び耐酸処理を施したプレカストコンクリートブロックの耐酸特殊目地による積上げ構築法，4）耐酸性の樹脂布をコンクリート表面に被覆接着する方法の外耐酸金属板による被覆等種々の方策が考えられる。これらのうちで実際の現地における施工条件，即ち重直性広面積，作業環境などを一義的に重視し，こ

* 化学研究室民　　** 研究員

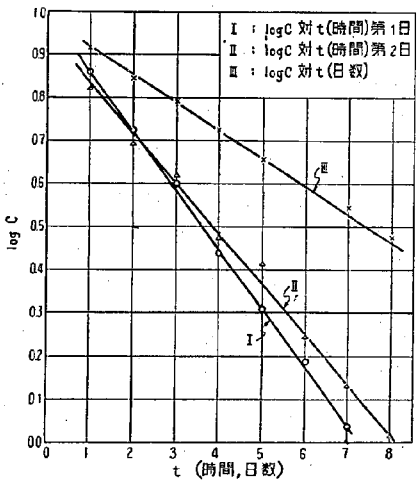
れに加えて耐酸処理体の長年月間に被むる苛酷な物理的諸条件に対する抵抗性，施工経験の欠除及び諸経費を織込んだ経済性等併せ考慮した場合，添加剤をセメントに混入し水と共に混練して打設する添加剤法が前述の諸条件に比較的適応した簡便な方法と考え本実験に採択した。添加剤法ではセメントの水硬性保持が重要な基本事項となるため添加剤の混入量に限界を生じることは避けられない。

ポルトランドセメントに添加剤を混入して低濃度酸液に対応した耐酸セメント作製に関連した実験的事例は内外共に余り見られず，この分野における未開発さが窺はれ，又現段階においてはセメントモルタルに混入した添加剤がセメントゲル構造中におけるセメントの水和反応，遊離水分，気泡等の物理的，化学的挙動に影響されて，その特性が如何程発揮され，所期の成果を与えるかについては界面化学的に的確な理論的推定を下し得ない場合が多いため，本実験は不可避的に Trial and Error による実験方法に頼らざるを得なかった。

Ⅱ　セメントモルタルの希硫酸による腐蝕機構

セメントモルタル（1：2）が実際の酸性河水に近似した酸度（PH2.0～3.0）をもつ硫酸酸性水溶液に浸漬された場合に起る腐蝕機構を速度論的に検討してみた。

先づ20%シリカセメントモルタル（1：2）が酸によって腐蝕される場合の化学反応速度次数を知るために，供試体を0.01N硫酸水溶液の一定量に浸漬して，第1日目と第2日目は各々1時間毎に，それ以降は24時間毎に酸



図—1

20%シリカセメントモルタルの0.01N H_2SO_4 溶液の場合における logC 対 t 線図

の減量xをアルカリ滴定により測定して任意の時間tに対応する酸の残量（a－x）＝Cを得た。aは浸漬開始時の初濃度である。この残量Cの対数 log C と，これに対応する時間tとの関係図（図—1）の直線性と，この直線の傾斜角度及び次に示す反応速度式から速度定数kの値を求めて，この反応が一次式を満足するかどうかを検討した。図—1に示されるようにⅠ（第1日目），Ⅱ（第2日目）及びⅢ（log C対t（日））のいづれも一次反応に要求される直線関係の成立することが明かにされた。更に次に示す一次反応速度式，すなわち

一次反応では反応物の一つたるAに関し次式が成立する；

$$-\frac{d[A]}{dt}=k[A] \quad \cdots\cdots(1)$$

今，反応の開始時のAの濃度をa，任意の時刻tにおける反応量をxとすれば，(1)式の〔A〕＝a－xとおき，t＝0において〔A〕＝aという初期条件下に(1)式を積分できる。かくして

$$-\frac{d(a-x)}{dt}=k(a-x) \quad \cdots\cdots(2)$$

$$\int_0^x dx/(a-x)=\int_0^t k\,dt$$

$$-\ln(a-x)+\ln a=kt \quad \text{または} \quad \ln\frac{a-x}{a}=-kt$$

$$\text{または} \quad a-x=ae^{-kt} \quad \cdots\cdots(3)$$

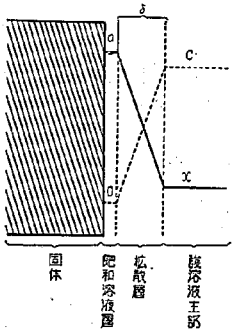
また速度定数は (3)式より

$$k=\frac{1}{t}\ln\frac{a}{a-x} \quad \text{または，} (a-x)=C\text{とすると}$$

$$k=\frac{1}{t}\ln\frac{a}{C}=\frac{2.303}{t}\log\frac{a}{C} \quad \cdots\cdots(4)\text{を得る。}$$

(4)式より速度定数 k の値を求めた結果，かなり揃った k 値Ⅰ（k=0.316），Ⅱ（k=0.286），Ⅲ（k=0.159）が得られた。したがって，本実験条件下においては，セメントモルタルの腐蝕機構は本質的に一次的な反応機作に基いて進行するものとして取扱えることが判明した。

図—1に見られるように log C 対 t（時間）関係線の勾配は浸漬日数の増加に伴い緩かになり腐蝕反応の速度は段階的に減少に向いながら進むことが，反応速度定数k値について併せ考えることにより支持される。と同時に log C 対 t（日）関係線（k値＝0.159）がこの反応速度の総体的傾向を示唆するものと考えられる。



図—2

又ここに，セメントモルタルが酸液に浸漬された場合を拡散速度論の立場から眺めてみると，図—2に示す点線の部分がこの場合の状態を示す。すなわちセメントモルタルに密接した酸液の硫酸は極めて速かに反応すると考えられるので，その接触界面の酸液の濃度は常にOとなり或る時刻tにおける酸液主部の酸濃度をCとすれば，この間には拡散層をへだてて C/δ なる 濃度勾配が生ずることになる。したがって酸液主部からセメントモルタルの表面に向って微小時間 dt の間に拡散し消失する硫酸の量 dm は Fick の定律に従い次の式によって与えられる。

$$dm = -D \cdot S \frac{O-C}{\delta} dt \quad \cdots\cdots(5)$$

Dは拡散定数 ($cm^2 \cdot sec^{-1}$)，Sはセメントモルタルの全表面積 (cm^2)，δ は拡散層の厚さ（固体が液体に溶解するとき多くの場合静置状態で約10^{-3} cm の値を取ることが多くの実験者によって実測されている。）である。

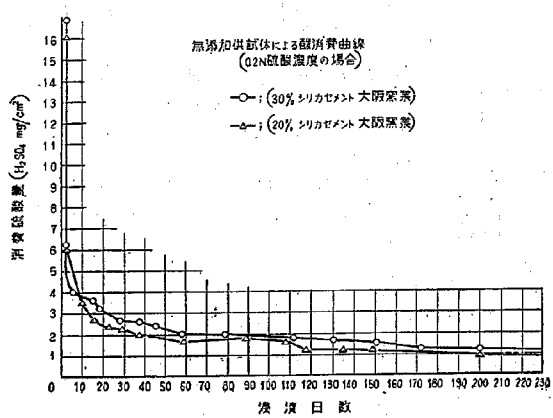
今浸漬酸の全容量をvとして，これをもって(5)式の両辺を除せば dm/v=dx となるから，$\frac{D \cdot S}{v \cdot \delta} = k$ として硫酸の初濃度を a，t 時間内に消費される酸の減量を x とすれば(5)式は次のようになる。

$$\frac{dx}{dt} = k\ (a-x) \quad \cdots\cdots(6)$$

この(6)式は，(2)式の速度式は $\frac{dx}{dt} = k\ (a-x)$ に変形できるから一次反応の速度式と全く同一であることがわかる。したがって拡散論の立場からも一次的に進行するとして取扱えることが理解されると共に酸液主部からセメントモルタルの表面に向って拡散する硫酸の速度がこの腐蝕速度を律速する支配要因であろうことが考えられる。図—2の実線の部分は接触界面に飽和溶液層が出来るときに飽和溶液層の溶質が酸液主部に向って拡散する場合を示したものであるが，セメントモルタルが希薄な0.01N硫酸酸性溶液に侵蝕されるような本実験の場合は飽和溶液層の形成の影響は殆んど無視し得るものと考えられるため酸液主部からセメントモルタルの表面に向って硫酸が拡散する場合のみを扱った。

図—3に示される酸消費の経過曲線からも見られるように浸漬初期においては酸消費が急速に起されて，20日位までは急傾斜して減退し，それ以降は定常に近い曲線に移行することが示されている。このことは前述した速度定数k値の経時変化についての要因を厳密に追求することによって解明されるのであるが，現在十分なる資料が不足しているため大体の概要について考えてみる。前述したように速度定数に相当するkは，$k = \frac{D \cdot S}{v \cdot \delta}$ で表はされる。この定数k値の変動に影響を及ぼす要因のうちで，浸漬酸液の全容積v，拡散定数Dは一定（本実験では温度一定，且又溶媒の粘性不変とみて）であるとみなされる。又拡散層の厚さ δ は多くの場合10^{-3}cm のorderをとることが実測的に知らされているが実験条件によって可成り変るものと推測される。この拡散層の厚さ δ 値が本実験の条件下でどのような値をとるかは実測し得なかったが，侵蝕反応の進行に伴いセメントモルタルの表層は珪砂，石膏，コロイド状シリカ等の難溶性成分による残留物質の多孔性組織が形成されて酸との有効接触面積（S）が減少し，難溶性組織層の厚さは漸次増加して δ 値は経時的に増大することが考えられる。この際初期段階で減少した有効接触面積Sは，時間経過に従い δ 値の増大に比して殆んど定常状態となり変動しないものと考えられるためk値の変動に対する影響因子としては拡散層の厚さ δ が主要な支配因子となることが推測される。

添加剤法によって耐酸効果をうるためにはセメントモルタルが硫酸との反応によって自然発生的に得られる20日以降の耐蝕性（表層の腐蝕層の微細毛管群に沈着充塡する難溶性石膏，コロイド状シリカなどによる抵抗層の発生による）を人為的に強化向上することを基本的狙いとすることが合理的，且効果的なものと考えられる。



図—3

Ⅲ　原材料の選定

〔1〕セメント

使用したセメントの種類はシリカセメント，普通セメント，中庸熱セメント，及び高炉セメントの4種類のセメントであるけれども，実験で主として用いたものは，30%シリカセメント，20%シリカセメントの2種類である。このシリカセメントは大阪窯業社の製品で良質の蛋白石系シリカ質混合剤が混合されているためか他種のセメントに比較して耐酸試験の結果は良好であった。

〔2〕添加剤

添加剤として具備すべき条件は，耐酸，耐アルカリ性，珪酸塩との親和性，水に溶解及び分散し得るもの水の混在或いは室温程度の低温においてその化学的機能を発揮するもの，有毒性及び其の他危険性のないこと，低廉で容易に入手し得るもの及び取扱い上容易なもの等の諸条件が要求され，又これらの添加剤がセメントに混入された場合，耐酸，耐水性は勿論であるが低膨脹・収縮性，耐候性，耐衝撃性及び耐摩耗性等の物理的耐久性及び圧縮強度，抗張力等の機械的強度の諸特性をセメント構築体に附与して始めて満足な添加剤としての資格が与えられるのである。たとえこれらの性質を劣化させても，その性質が使用上必要最少限度内でなければならない。しかし上に挙げた具体的諸条件を完備した添加剤を事前に見出すことはセメントモルタル内における添加剤の挙動推定が困難，容易でないため，耐酸，耐アルカリ性，珪酸塩粒子との物理的及び化学的な接着性及び操作上簡便さ等を主として選択基準において添加剤を選定した。使用した添加剤の種類を類別し，その添加剤についての選定理由の大要を次に述べる。

(1) 無機物質

イ）硅酸質及び珪酸塩：水ガラス（3号）($Na_2O \cdot 3SiO_2 \cdot nH_2O$) シリカゾル ($SiO_2 \cdot nH_2O$)，珪酸バリウム（$2BaO \cdot SiO_2$，$BaO \cdot SiO_2$）アルミン酸バリウム ($BaO \cdot Al_2O_3$)

ロ）珪弗化物：珪弗化ソーダ (Na_2SiF_6)，珪弗化カルシウム ($CaSiF_6$)，珪弗化鉛 ($PbSiF_6$)，珪弗化マグネシウム ($MgSiF_6$)

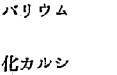
上記の無機物の添加はセメントモルタル中において複合反応，及び浸入する硫酸等によって生成される珪酸ゲル，硫酸バリウム，硫酸鉛，弗化カルシウム，弗化鉛等の不溶物質をセメントゲル構造内に在る空隙，微細毛管内に固定または充塡させ，硬化セメントペーストの安定化を狙ったものである。

(2) 有機物質

イ）高級脂肪酸金属塩：ステアリン酸バリウム ($(C_{18}H_{35}O_2)_2Ba$) ステアリン酸ソーダ ($C_{18}H_{35}O_2Na$) オレイン酸ソーダ ($C_{18}H_{33}O_2Na$)

ロ）有機アミン類：オクタ・デシルアミン・アセテート ($CH_3(CH_2)_{17}NHCOH_3$)，ラウリル・トリメチル・アンモニウム・クロライド ($CH_3(CH_2)_{10}CH_2-R(CH_3)_3$)，ステアリル・トメチル・アンモニウム・クロライド ($CH_3(CH_2)_{15}CH_2-R(CH_3)_3$)，パルミチル・トリメチル・アンモニウム・クロライド ($CH_3(CH_2)_{13}CH_2-R(CH_3)_3$)，デシルアミン ($CH_3(CH_2)_8CH_2NH_2$)，ドデシルアミン ($CH_3(CH_2)_{10}CH_2NH_2$)，ヂステアリルアミン ($CH_3(CH_2)_{15}CH_2)_2NH$，ヂラウリルアミン ($CH_3(CH_2)_{10}CH_2)_2NH$)，オクタ・デシルアミン ($CH_3(CH_2)_{16}CH_2NH_2$) 等これらの有機アミン類は長直鎖状疎水性炭化水素を持つ HLB が4～6位のものを選んだ。

ハ）合成樹脂類：酢酸ビニル，塩化ビニル，塩化ビニリヂン，尿素樹脂，チオ尿素樹脂，メラミン樹脂，珪素樹脂，弗素樹脂，フェノール樹脂，レゾルシン系樹脂，フラン樹脂（フルフラール＋フルフリルアルコール），ビニルアルコール樹脂，アクリル樹脂，ポリエステル樹脂，アルキッド樹脂（マレイン酸＋グリコール），ビニルメルカプタン樹脂（チオ尿素＋P.V.A），アニリン樹脂，ポリスチレン樹脂，ブチルアクリル酸樹脂，ビニルブチラート樹脂，メタアクリル酸樹脂，等，これ等の合成樹脂類は単量体，低重合体，高重合体，又他の樹脂との共重合体を，重合体の場合は乳剤の形で，それぞれの樹脂に適応した PH，及び帯電的雰囲気を与えてセメントモルタルに混入したものである。

ニ）キレート剤 (chelating agent)；硫酸法パルプ廃液より抽出したリグニンスルホン塩酸（単体はフェニルプロパン誘導体を骨格とし OCH_3，OH，CHO などの基を多量に持つ高分子），o－o′－ジオキシアゾ化合物（  ）4；4′－ビスアセトアセチルアミノ－3；－3′ヂメチルヂフエニル ($CH_3COCH_2CONH-C_6H_4-C_6H_4-NHCOCH_2COCH_3$)，ヘマチン，ブラジレン等

ホ）クロム金属のオキソ錯塩 (Oxolated Complex)；ステアリン酸と塩基性クロム酸 $\left(\left(H_{35}C_{17}-C\begin{matrix}O\rightarrow Cr\\O-Cr\end{matrix}\right)\begin{matrix}(H_2O)_4\\OH\\(H_2O)_4\end{matrix}\right)\begin{matrix}4^+\\4\,Cl\end{matrix}$ メタアクリル酸と塩基性クロム塩 $\left(\left(CH_2=\underset{CH_3}{\underset{|}{C}}-C\begin{matrix}O\rightarrow Cr\\O-Cr\end{matrix}\right)\begin{matrix}(H_2O)_4\\OH\\(H_2O)_4\end{matrix}\right)\begin{matrix}4^+\\4\,Cl\end{matrix}$

ヘ）合成ゴム類：ネオプレン（乳液）

ト）瀝青剤：アスファルト（乳液）

チ）其の他添加剤：アラビヤゴム，グリセリン，各種陽イオン活性剤，非イオン活性剤，タンニン酸，無水クロム酸，重クロム酸ソーダ，等

上述の有機物質で高級脂肪酸金属塩は複分解によって生ずるステアリン酸等の疎水性分子の均一配向成膜，硫酸バリウム等の不溶性微粒子の沈着充塡を，次に合成樹脂類は極性基（官能基）を保有し，酸，アルカリ等の簡単な触媒にて附加重合，縮合反応及び架橋結合をおこすもので，水に可溶又は乳化分散し得るものを選び，低重合度，高重合度のそれぞれの場合について添加混合し，

モルタルゲル構造内における架橋結合によって三次元の網状組織の形成を想定して本実験に試みたものである。キレート剤はクロム金属のような遷移多価金属の配位子に主原子価的に結合し得る極性基，及び副原子価的に配位結合する孤立対電子を持つ反応基のある多座配位の有機化合物とが，多員環の高分子金属錯化合物を作ることによる成膜，充塡を期待したものである。クロム金属のオキソ錯塩はステアリン酸等の長い炭化水素鎖の酸素原子とクロム金属とがオキソ橋（酸素の橋）によって結合した高分子の複核錯塩で，この化合物のクロムが珪酸塩の酸素原子などと強い配位性共有結合をなし，この上を疎水性の炭化水素分子が覆い撥水性を与えることを利用したものである。ゴム質，遅滞剤などはモルタルゲル構造内にて珪酸塩などとの水素結合，静電的分子間附着などによる化学的，物理的な均一充塡，成膜がなされることによって耐酸構造組織の形成を期待したものである。

Ⅳ　実験および測定方法

添加剤の特異性に応じて混合方法，添加量，配合割合及び補助添加剤などを変えてセメントモルタル（1：2）に混入し，水量はやや硬めのフロー値が165位の稠度を保持する程度に注加し，添加剤が均一に混合されるように充分混練して型枠（10cm×5cm円筒型）に注入し24時間後に脱型する。出来た供試体は一週間水中養生し，次いで一定濃度（0.2N，0.01N）の硫酸酸性水溶液の一定容に浸漬し24時間経過後アルカリ滴定により酸濃度の変化量を測定する。測定済の酸液は即時更新して前記と同一方法を繰返して測定を継続する。この実験操作は常時20°C恒温で実施した。

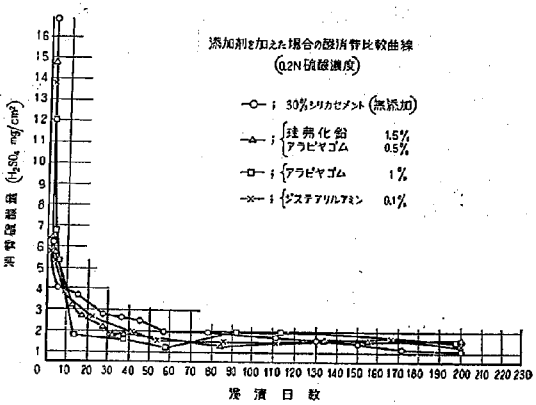
本実験では供試体によって消費される酸量の大小と，供試体の形状変化及び表面硬さなどの外観的なものとを耐酸度の主要な判定基準として有効な添加剤を見出すことを主眼とし，有効添加剤が見出された場合にそれについての具体的実験，すなわち適正な添加量及び引張り，圧縮強度などの物理試験を実施する手筈であった。試作した供試体の種類は別表－1に示した。別表－1は0.2Nの硫酸酸性水溶液で実験した供試体の種類を示し，別表－2は，0.01N硫酸酸性水溶液で実験した供試体の種類を表示したものである。表の実験番号欄のS符号はシリカセメントを，Mは中庸熱セメントを示す。添加剤の種類欄の数値は配合割合を，重量欄はセメントに対する重量%を示し，（S）は固形分を表はす。W/C欄の数字は添加剤の含有する水分を除いたセメントに対する水量(%)を示す。

摘要欄の○印は他の供試体に比較して良好と思はれたものを示したものである。

Ⅴ　実験結果及びその考察

本実験において実際の酸性河川の酸濃度に近接した酸液に供試体を浸漬して，酸性河川で実際に生起される腐蝕状況を実験に実現させることが高度の信頼性を実験結果にもたらすことになることは自明であると考えられるが，前述のようにセメントの水和作用の減退をおこさない程度に添加剤を混入して耐酸効果を期する場合，効果的な添加剤の選定などにおいて確定的な推定基準を摑みがたい現状にある。従って実験当初は添加剤の選定範囲は蓋然的な推定のもとに広範で多種多様面から物質を選び，多数の供試体を試作して耐酸試験の結果を早急に知る必要にせまられたため急速試験として，実際の酸性河川の酸濃度（PH2.0～3.0）の20～200倍にあたる0.2Nの硫酸酸性水溶液を使用して耐酸試験を実施した。

本実験に用いた主なセメントは予備試験の結果，シリカセメントを採用し，急速試験では30%シリカセメントを主に使用した。この実験と並行してシリカ質混合材の混合率の相違による比較試験（20%，30%，40%，50%の場合）を実施した結果は混合率の少いシリカセメント程（この試験では20%）良好な耐酸効果を示すことが得られたため，後述する0.01N硫酸酸性水溶液による実験には20%シリカセメントを主として使用した。30%シリカセメントと20%シリカセメントとの無添加の場合の酸消費比較図を図－3に示した。この急速試験に供用した供試体は別表－1に示すように370個であって，そのなかで良好と思はれたもののうちから代表的と考えられる3種の供試体の試験結果を図－4に酸消費比較線図で図示した。図で示されるように何れの場合も耐酸効果が認められたのは浸漬日数100日位の初期段階までであって，それ以降は無添加供試体の酸消費傾向と同一状態又

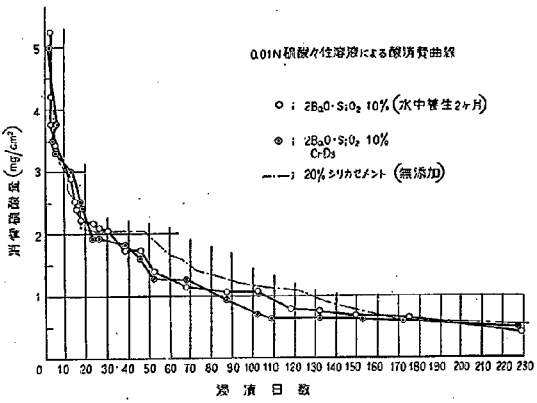


図－4

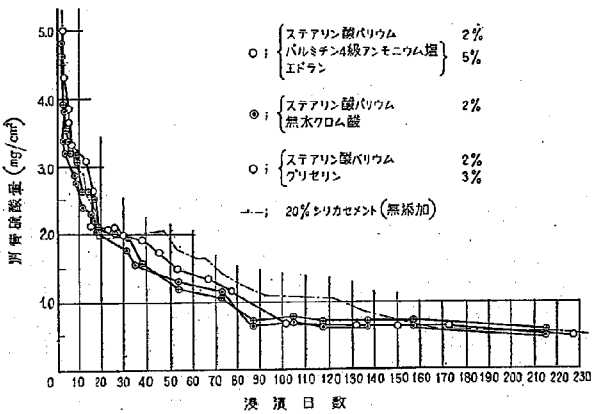
は次第に悪化する傾向が見られ，望ましい結果は得られなかった。

本実験での耐酸効果の判定は無添加のセメントモルタル供試体と添加剤を混入したセメントモルタル供試体とを同一条件で耐酸試験してその結果の比較によって良否を決める方法によっている。しかし耐酸試験の目標が堰堤などの構築体で，数十年以上にわたる酸性河水の流動水及び其の他の可成り苛酷な自然環境に充分耐えることを必須条件とするものを対象とするため，耐酸試験で実用的に良好であると確認し得る耐酸性は少くとも実験期間（約2ケ年）は無添加供試体のそれに比較して可成り良好な耐酸効果の定常的な持続性が実験的に示されなければならないものと考える。実験で使用した硫酸酸性水溶液が0.2 N，酸濃度で実際の酸性河川の20~200倍に相当する高濃度であるとしても，実験の初期100日位で耐酸効果の減衰がおり，無添加供試体の結果より悪化するということは，充分に期待し得る耐酸性をもつものとしての認定をさまたげるものと考えられる。

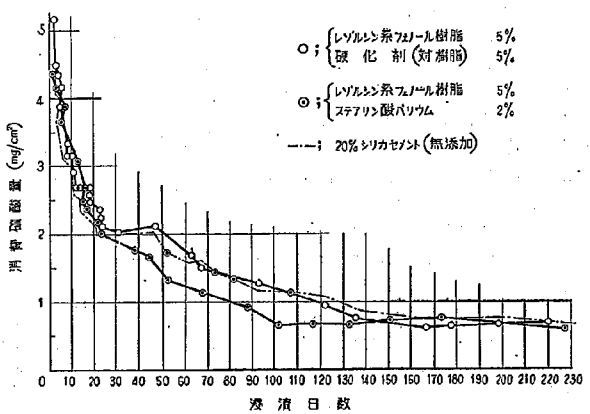
本実験の結果には，酸溶液の酸度が高いためによるやや苛酷な実験条件からくる結果判定の不明確性があるとも考えられるので，酸性河川の近似濃度すなわち0.01N（0.049%）の硫酸水溶液を試験用酸液として実験条件を変更して実施した。0.01Nの酸液による実験で試作した供試体は，表—2に示されるようなもので個数は170個である。この耐酸試験に用いたセメントは20%シリカセメントである。この実験で良好と考えられる供試体を10個ばかり選んで図5～9に酸消費曲線を図示した。この実験結果も0.2N硫酸酸性水溶液で得られた試験結果とほぼ類似した酸消費曲線が得られ，0.01Nによる場合は浸漬日数160日位まで耐酸性が保持されて0.2Nの場合より数十日ばかり耐酸期間が延長される程度で，それ以降は無添加供試体の場合と同一状態となり，酸性河川の酸度に近似した0.01Nの酸液による試験



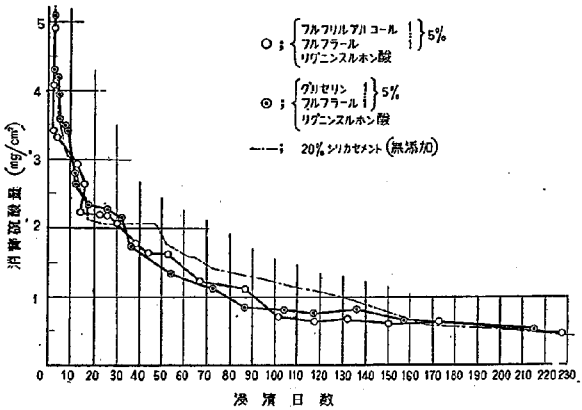
図—5



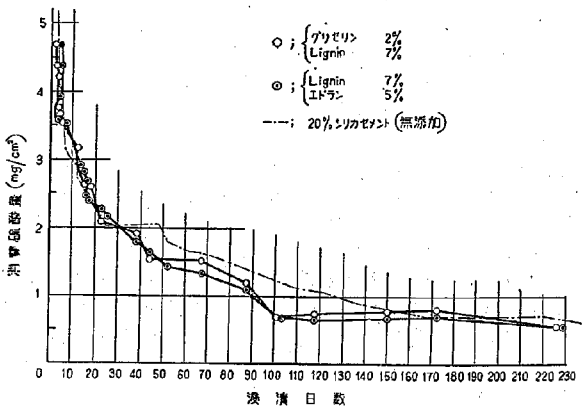
図—6



図—7



図—8



図—9

結果も0.2Nの場合といちぢるしい相違は見られず大体同様な試験結果であった。

図は何れも縦軸に1日当りの消費硫酸量（H_2SO_4 mg/cm_2）を，横軸に浸漬日数をとり，供試体が消費した硫酸量を点綴したものであるから，この曲線が囲む面積は一定の浸漬期間中にセメントモルタル供試体の表面積1 cm^2 当りに消費される全硫酸量（mg）を表はすことになり，面積が小さい程耐酸性の良好なることを示すことになる。この耐酸性の尺度を耐酸度なる数値で示すと表—3のごとく表はされる。無添加供試体の場合の面積をSoとし，添加供試体の場合の面積をSaとすると，その面積比（So/Sa）をもって耐酸度として表はすことができる。すなわち耐酸度=1.00が良否の境界点となり数値が増加するに従い耐酸性は増大することを示すことになる。表—3に示した耐酸度は図3～9に選択的に表示した16個の供試体の場合について浸漬日数200日までの期間に限定して計算例示したものである。

表—3の耐酸度から実験結果を眺めると，これは飽くまでも実験の初期段階での評価にすぎないけれども，0.01Nの酸液による場合はステアリン酸バリウム+無水クロム酸，ステアリン酸バリウム+グリセリンの各々を添加した供試体が他の供試体に比して耐酸性の良好さを示している。0.2Nの場合は，20%シリカセメントの無添加供試体が30%シリカセメント無添加供試体及び他の添加供試体よりも耐酸性が比較的良好であることが定量的に示されている。しかし前にも述べたように本実験で良好と思はれた供試体はいづれの場合も，実験初期100～160日位までの短期間において良好な耐酸性が保持されるのみで，ここに定量的数量をもってしても，この結果をコンクリート構築体のもつ本質的耐用年数の観点から長期的にならした場合，実用的な意味をもつ耐酸的成果をもつものとして認められがたいことが知られると思う。

このような実験結果から考えられることはセメントに混入された添加剤がそれぞれの特有の機能に応じてモルタルの硬化ペースト内において形成する耐酸組織は，実験初期においてはセメント水和物と酸液の接触を遮蔽した状態を保持するけれども浸漬日数の経過に従いその耐酸組織が次第に脆弱化し酸液の浸透拡散を許す結果となることであった。本研究の基本方針がセメントの水和作用をさまたげない程度に添加剤を混入して耐酸効果を期待することであるため，添加剤の混入量を無制限に増加することは研究目的から逸脱するものであるし，最少の添加量で最大の耐酸効果を狙ふ立前から本実験の意義は失はれることになる。しかし耐酸効果に対する添加量の影響によって，その成果に導入される危険率の増加は避けられない。セメントの諸性能を無視して添加剤の混入量を増加する場合は，充分なる耐酸効果の発現が期待される場合があることは，ここに述べるまでもないことであるが，この場合セメントは充填材的役割しか持たないものとなり，他の安価な充填材料で代替し得るから本実験の基本方針から遙かに遊離するものであ

る。

耐酸効果発現の支配因子としては多数の要因の交互作用がモルタルゲル構造内において働らくことが考えられ，添加剤の混入量の影響は複雑なこれらの交絡のなかに抱含され，支配要因の微小部分となる場合も考えられる。添加剤を混入してよりモルタル内にて比較的早期に形成されると考える耐酸構造組織，すなわち不溶性微粒子及びゲル物質の空隙充塡，疎水性炭化水素分子及び二次的生成の重合体である高分子化合物などのセメント硬化ペースト内での多次元の立体的網状組織，均一な配向，配列などによる成膜が形成されることが想像せられ，これらが耐酸構造としての機作を発現するものと考えられる。しかしこれ等の耐酸構造組織の緻密度，連続性及び物理的諸強度などがセメントモルタルの硬化ペースト内部に不可避的に包含される気泡，遊離水分，夾雑物の混在，及び珪酸塩の水和作用に基因する動的挙動などのため脆弱破壊される結果表層の微細毛管を通して内部に拡散浸入した酸は脆弱劣化した耐酸組織の欠陥部，すなわちセメント粒子と耐酸物質との剝離，破壊部面，気泡及び遊離水分の滞留する微細空隙面及びそれらに連なる無数の微細毛管などにおけるセメント粒子の露出面と直接に接触し化学反応が起されるものと考えられる。

この反応は浸漬初期においては無添加供試体の場合に比較して可成り抑制された状態で行はれることが実験的に示されたのであるが，浸漬日数が長期に及ぶに従い表面の腐蝕部分は漸次酸液により膨潤，軟化，脱離，溶出がなされ，それが次第に内層に向って進行するものと思はれる。又供試体の内層における添加剤による耐酸組織は表層に比べてその形成度合が緻密性，連続性，強靱性などの点で稍々脆弱であることもまぬかれ得ないために，無添加の供試体における耐酸度と同一な状態に逐次その耐酸度が低下するものと考えられる。

良好と思はれた供試体で，添加剤が異ったものでも何れの場合もほぼ同一な耐酸傾向を示す。このことは次の様に一応考えられる。添加剤がそれぞれの特性すなわち難溶性，コロイド状ないし繁状の微粒子の沈着または充塡，長直鎖状の疎水性炭化水素分子の二次元的層状の単分子膜の配向，配列，また重縮合性高分子化合物の三次元的立体状網目構造組織の形成等のことが，硬化セメントペースト内におけるさく綵した珪酸塩水和物の表面及び微細間隙等で行はれ，しかもこれらの組織は種々の妨害因子のためにその本質的な特性機能が十分に発揮されないで最少限度ながらもそれぞれ特有の耐酸組織を持つと考えてよい。しかしこれらの組織について，化学的耐久性の面から導出されることは，その組織の酸液に対する緻密性，化学的安定性，強靱性などが主要な抵抗因子であることが望ましいのであるが，実験結果では何れの場合もこの要因が同一程度なものであろうとしか今のところ説明できない。このような耐酸組織の欠陥部すなわち気泡，遊離水分，及び珪酸塩の水和作用などに基因する微細毛管，空隙などの発生を出来るだけ隠蔽緩和することが本実験での主要な鍵点であろうと考えるのである。しかし，ポルトランドセメントの水硬性を保持させるに足る添加剤の混入量で，このような欠陥部を消去して恒久的で強靱な耐酸組織構造の形成を期待することは，セメント自体の本質的な問題ともからんで，又未知の因子の交互作用に基く添加剤の複雑な挙動の察知が困難であることも関連して容易ならざるものであることが考えられる。

ここに早急な問題解決を迫れる現実の問題として一考するならば，各種のモルタル供試体を実際の酸性河川の酸度に近似する酸液に一年間浸漬した実験結果からは，20%シリカセメントが比較的良好であって，その浸蝕厚みは約5mmであった。この結果は各種セメントのコンクリート供試体を吾妻川の酸性河水に一年間浸漬して得られた試験結果とも良く一致した。この20%シリカセメントモルタルの構築体が酸性河川で長期間曝される場合を考慮して，浸蝕厚さに100%の最大安全率をとって概算すると，年間約10mmの浸蝕厚さになる。従って20%シリカセメントモルタルが酸性河川で50年間に浸食される厚さは約50cmとなる。この考えを基にして酸性河川に20%シリカセメントの堰堤を構築すると仮定するならば，堰堤コンクリートは規準厚さより50cm増加して設計打設されねばならない。この場合堤体コンクリートの酸による被害損失は厚さ50cmに使用されるセメントコンクリートの経費に止まり，セメントコンクリートの費用より高価な耐酸処理セメントを使用するよりも，消極的ではあるが経済的な一方法ではなかろうかと考えられる。

モルタルがコンクリートより耐酸性がすぐれることは十分合理的なことと推定されることから経験的知見を付け加えると秋田県玉川の田沢測水所（PH3前後）において約20年間河水に接触したコンクリート柱下部試料を見ても5cm位より内部はフェノールフタレンで赤色を示した。このコンクリートに用いた骨材の最大粒径は約50mm程度で大きな骨材の周辺は耐酸性を失っていることが認められるが，モルタル部は比較的耐酸性を保持することが見られている。

VI 結　言

ポルトランドセメントの水硬性を保持することを必須条件として，経済的で簡便な手法を用いてセメントに耐酸処理を施す方法として添加剤を混入する添加剤法を採択して31年度より実施した実験の結果について，その概要を記述した。使用した添加剤の種類を類別すると珪酸質，珪酸塩，珪弗化物などの無機物，合成樹脂類，高

級脂肪酸の金属塩，有機アミン類，キレート剤，澱青物質などの有機物質に大別される。これらの添加剤のなかから有効と思はれるものを選定して，添加量，配合割合，混合方法などを添加剤の特異性に応じて変更し，供試体を試作し実験に供した。

実際の酸性河川の酸度（PH 2.0～3.0）に近似する酸溶液による実験結果も，酸性河川の酸度の20～200倍に相当する酸度（0.2N）を持つ硫酸酸性水溶液による実験結果も，実験の初期段階100～160日位の期間良好な耐酸性が持続されるのみで，それ以降は無添加供試体の場合と重畳して同一傾向の酸消費過程が示され，この結果を堰堤の耐用年数に対応する長期間にプールした場合，何れも類似の腐蝕性向を表はし，実用上の意味からも良好な耐酸効果を持つ供試体は得られなかった。本実験はセメントの水硬性を阻害しない程度に耐酸処理を施して所期の成果を得るために，あらゆる可能性を許される範囲内において追究したのであるが，これまでの実験結果からは望ましい成果は得られず目的から背反したものであった。しかしこのことによって添加剤法が耐酸セメント作製の実験手段としての有用性を消失することにはならないものと考えられる。これまで用いた添加剤の種類は耐酸性を付与すると考えられる多数の物質から見れば極く一部分に過ぎないものであるし，今後のより多数の経験的知見の累積と，より広範な分野えの探索の触手を伸ばすことによって，その突破口が見出されることであろうことを疑はない。

尚この実験結果は飽くまでも PH2.0～3.0の酸度範囲を対象として得られた耐酸試験の結果であるため，本実験法による供試体が他の酸度範囲すなわち PH2.0 以下又は PH4.0 以上の酸度に対して如何なる耐酸性を示すかは今はっきりした断定を下すことは出来ないけれども，酸性領域全般にわたってその耐酸性を否定することはやや早計であろうかと考える。添加剤法以外の耐酸処理法に関しては今後の研究に俟たねばならない。

最後に本実験を実施するにあたって直接の参考資料となるべきものは余り見られなかったけれども，下記の文献は一応参考となった。

謝　辞

本実験を実施するにあたって本省河川局開発課，及び関東地建河川局の関係各位の御協力，並びに薬品及び材料を寄贈して戴いた川越氏（東京都濾過），高井，荒木氏（農林省林試），町田氏（日本パルプ），石川氏（日本触媒化学），伊藤氏（大日本セルロイド），中岡氏（日本化学），篠崎氏（菱江KK），吉江氏（日本合成化学），名越氏（山陽パルプ），三宅氏（住友化学），川上氏（昭和化工），岡田氏（藤化成），沢村氏（保土ケ谷化学），柴山氏（日東化学），桜井氏（日本油脂）の皆様に深く感謝致します。

参　考　文　献

1）V. EVANS : Some properties and applications of synthetic resin cements, Soc. Chem. Ind (London), Chem. Eng. Group, Proc., 35, 24—30 (1953)

2）F. K. Earp, S. Shapiro, and A. E. Wiggs : Synthetic resin cements in chemical engineering practice, Ibid, 35, 18—23 (1953)

3）K. Iwasaki : Porcelain-like surface over cement slate or cement coating, Japan, 3489 (54) June 15

4）G. Mall : Effect of fineness of grinding of metallurgic cement on its resistance to sulfate-containing water. Zement-Kalk-Gips, 7, 436—8 (1954)

5）H. Mogi : Water-resistant coating materials, Japan 3983 (54), July 3.

6）N. A. Toropov and E. R. Skue : Reaction of fluorides with The Crystalline Solutions of calcium aluminate ferrites, Doklady Akad. Nauk, U. S. S. R. 98, 415—18 (1954)

7）N. S. Dombrovs Kaya and M. R. Mitel' man : Thermographic investigation of acid proof cement. J. Appl. chem., U. S. S. R, 26, 15—21 (1953) (Engl. translations) : Zhur, prikład, Khim., 26, 18—24 (1953)

8）N. S. Dombrovs Kaya and M. R. Mitel' man : Interaction of liquid glass and Na_2SiF_6 in aicd-resistant cements, Ibid, 26, 829—35 (1953) (Engl. translation)

9）L. V. Farkas : Acid resisting cement and method of making, U. S. patent 2,492,790, Dec, 27, 1949

10）H. Hughes : Synthetic resin cements, Plastics Inst, Trans., 219, 23 〔53〕, 1955

11）常山源太郎：セメントの防水材，セメントコンクリート94，23—27 (1954)

12）正藤，山内：各種セメントの化学抵抗性に関する研究，窯協62，656—665 (1954)

13）福島，池田，丸山：セメント製品の性質改善法，特公，No. 6259，昭30.9.7

14）J. M. Geist : Improved portland cement mortars with polyvinyl Acetate Emulsions, Ind. Eng. Chem., 759, 4 (1954)

別表 — 1

実験番号	添加剤 種類	wt%(対セメント)	W/C	摘要
S — 0	無添加30% シリカセメント	0	0.60	
S30— 1	Na_2SiO_3 1) Na_2SiF_6 3) HCl 1.5 (対添加剤)	10%	0.64	
S30— 2	同上	5	0.63	
S30— 3	Na_2SiO_3 1) Na_2SiF_6 3) クエン酸 1.5	10	0.60	混練物 thixotropic state
S30— 4	同上	5	0.60	
S30— 5	Na_2SiO_3 1) Na_2SiF_6 3) CrO_3 0.5	10	0.66	
S30— 6	同上	5	0.64	
S30— 7	Na_2SiO_3 1) $MgSiF_6 \cdot 6H_2O$ 3) HCl 1.5	10	0.70	
S30— 8	同上	5	0.63	
S30— 9	Na_2SiO_3 1) $MgSiF_6 \cdot 6H_2O$ 3) クエン酸 1.5	10	0.63	
S30— 10	同上	5	0.62	
S30— 11	Na_2SiO_3 1) $MgSiF_6 \cdot 6H_2O$ 3) CrO_3 1	10	0.76	
S30— 12	同上	5	0.68	
S30— 13	Na_2SiO_3 1) $CaSiF_6 \cdot 2H_2O$ 3) HCl 0.5	10	0.70	
S30— 14	Na_2SiO_3 1) $CaSiF_6 \cdot 2H_2O$ 3) HCl 0.5	5	0.64	
S30— 15	Na_2SiO_3 1) $CaSiF_6 \cdot 2H_2O$ 3) クエン酸 0.5	10	0.64	
S30— 16	同上	5	0.60	
S30— 17	Na_2SiO_3 1) $CaSiF_6$ 3) CrO_3 0.5	10	0.73	
S30— 18	同上	5	0.64	

実験番号	添加剤 種類	wt%(対セメント)	W/C	摘要
S30— 19	Na_2SiO_3 1) $PbSiF_6$ 3) HCl 0.5	10	0.64	
S30— 20	同上	5	0.63	
S30— 21	Na_2SiO_3 1) $PbSiF_6$ 3) クエン酸 0.5	10	0.61	
S30— 22	同上	5	0.60	
S30— 23	Na_2SiO_3 1) $PbSiF_6$ 3) CrO_3 0.5	10	0.66	
S30— 24	Na_2SiO_3 1) $PbSiF_6$ 3) CrO_3 0.5	5	0.63	
S30— 25	Na_2SiO_3 3) Na_2SiF_6 1)	10	0.80	
S30— 26	Na_2SiO_3 3) Na_2SiF_6 1)	5	0.60	
S30— 27	Na_2SiO_3 3) $CaSiF_6$ 1)	10	0.73	
S30— 28	同上	5	0.60	
S30— 29	Na_2SiO_3 3) $MgSiF_6$ 1)	10	0.80	
S30— 30	同上	5	0.60	
S30— 31	$PbSiF_6 \cdot 4H_2O$	10	0.60	
S30— 32	同上	5	0.60	
S30— 34	$CaSiF_6 \cdot 2H_2O$	10	0.70	
S30— 35	同上	5	0.61	
S30— 36	$CaSiF_6 \cdot 2H_2O$ 3 P.V.A 1		0.60	
S30— 37	$CaSiF_6 \cdot 2H_2O$ 3 Na-Oleate 1		0.67	
S30— 38	Salan Latex(50%) (塩化ビニリデン)	Solid分 5%	0.67	
S30— 39	同上	Solid分 2%	0.61	
S30— 40	$PbSiF_6 \cdot 6H_2O$ 3 P.V.A 1	3 1	0.62	

実験番号	添加済 種類	wt%(対セメント)	W/C	摘要	実験番号	添加済 種類	wt%(対セメント)	W/C	摘要
S^{30}— 41	$PbSiF_6 \cdot 6H_2O$ Na-Oleate	3 1	0.60		S^{30}— 61	$Na_2O \cdot 3SiO_2$ 1) $MgSiF_6$ 3)	2	0.60	
S^{30}— 42	Na_2SiF_6 P.V.A	3 1	0.63		S^{30}— 62	Na_2SiF_6	2	0.60	○
S^{30}— 43	Na_2SiF_6 Na-Oleate	3 1	0.63		S^{30}— 63	$CaSiF_6$	2	0.60	○
S^{30}— 44	Na_2SiO_3 3) $PbSiF_6 \cdot 4H_2O$ 1)	10	0.83		S^{30}— 64	$MgSiF_6$	2	0.60	○
S^{30}— 45	同上	5	0.67		S^{30}— 65	$PbSiF_6$	2	0.60	○
S^{30}— 46	30%水ガラス (Na_2SiO_3)	3.9	0.62		S^{30}— 66	$Na_2O \cdot 3SiO_2$	2	0.60	○
S^{30}— 47	Na_2SiO_3 1) Na_2SiF_6 3) HCl 0.5	2	0.60		S^{30}— 66'	Na_2SiF_6 アラビヤゴム	2 0.5	0.60	
S^{30}— 48	Na_2SiO_3 1) Na_2SiF_6 3) クエン酸 0.5	2	0.60	○	S^{30}— 67	$CaSiF_6$ アラビヤゴム	2 0.5	0.57	
S^{30}— 49	$Na_2O \cdot 3SiO_2$ 1) Na_2SiF_6 3) CrO_3 0.5	2	0.60	○	S^{30}— 68	$MgSiF_6 \cdot 6H_2O$ アラビヤゴム	2 0.5	0.57	
S^{30}— 50	$Na_2O \cdot 3SiO_2$ 1) $CaSiF_6$ 3) HCl 0.5	2	0.60		S^{30}— 69	$PbSiF_6$ アラビヤゴム	2 0.5	0.57	○
S^{30}— 51	$Na_2O \cdot 3SiO_2$ 1) $CaSiF_6 \cdot 2H_2O$ 3) クエン酸 0.5	2	0.60		S^{30}— 70	Na_2SiF_6 Na-Stealate	2 0.5	0.60	
S^{30}— 52	$Na_2O \cdot 3SiO_2$ 1) $CaSiF_6$ 3) CrO_3 0.5	2	0.60		S^{30}— 71	$CaSiF_6$ Na-Stealate	2 0.5	0.60	
S^{30}— 53	$Na_2O \cdot 3SiO_2$ 1) $MgSiF_6$ 3) HCl 0.5	2	0.60		S^{30}— 72	$MgSiF_6 \cdot 6HO_2$ Na-Stealate	2 0.5	0.60	
S^{30}— 54	$Na_2O \cdot 3SiO_2$ 1) $MgSiF_6$ 3) クエン酸 0.5	2	0.60	○	S^{30}— 73	$PbSiF_6 \cdot 6H_2O$ Na-Stealate	2 0.5	0.60	
S^{30}— 55	$Na_2O \cdot 3SiO_2$ 1) $MgSiF_6$ 3) CrO_3 0.5	2	0.60		S^{30}— 74	シリコン Resin (30%) (ポロンC)	(S) 1	0.50	
S^{30}— 56	$Na_2O \cdot 3SiO_2$ 1) $PbSiF_6$ 3) HCl 0.5	2	0.60		S^{30}— 75	ゼオンラテックス (50%) (P.V.C+可塑剤)	(S) 1	0.58	
S^{30}— 57	$Na_2O \cdot 3SiO_2$ 1) $PbSiF_6$ 3) CrO_3 0.5	2	0.60		S^{30}— 76	ユーロイド(70%) (ポリ尿素 Resin) 硬化剤 10%(対R)	(S) 1	1.58	
S^{30}— 58	$Na_2O \cdot 3SiO_2$ 1) Na_2SiF_6 3)	2	0.60		S^{30}— 77	水溶性石炭酸樹脂 50% HCl	(S) 1 僅	0.58	
S^{30}— 59	$Na_2O \cdot 3SiO_2$ 1) $CaSiF_6$ 3)	2	0.60		S^{30}— 78	P.V.A 重クロム酸ソーダ 5%(対R)	1	0.61	○
S^{30}— 60	$Na_2O \cdot 3SiO_2$ 1) $PbSiF_6$ 3)	2	0.60		S^{30}— 79	Na-Stealate	1	0.63	○
					S^{30}— 80	シリコン Resin (Polon P)(10%)	(S) 1	0.50	○

実験番号	添加済 種類	wt%(対セメント)	W/C	摘要
S^{30}— 81	チオ尿素樹脂(50%) NH_4Cl 10%(対R)	(S) 1	0.57	○
S^{30}— 82	P.V.A(ポリビニルアルコール) NH_4Cl 10%(対R)	1	0.60	
S^{30}— 83	チオ尿素樹脂(50%) 硬化剤 10%(対R)	(S) 1	0.57	○
S^{30}— 84	P.V.A 水溶性石炭酸樹脂 10%(対R)	(S) 1	0.60	
S^{30}— 85	シリコン樹脂(ポロンC)	(S) 3	0.27	
S^{30}— 86	P.V.A+可塑剤(ゼオン Latex)(50% Soln)	(S) 3	0.57	
S^{30}— 87	チオ尿素樹脂(50%) NH_4Cl 10%(対R)	(S) 3	0.53	○
S^{30}— 88	ホルマリン尿素樹脂(ユーロイド) 50% 硬化剤 10%(対R)	(S) 3	0.57	
S^{30}— 89	シリコン樹脂(Polon P) 10%	(S) 3	0.33	○
S^{30}— 90	シリコン樹脂(ポロンC10%)	(S) 5	0.17	
S^{30}— 91	シリコン樹脂(ポロンP10%)	(S) 5	0.17	早硬性
S^{30}— 92	P.V.C+可塑剤(Geon Latex 50%)	(S) 5	0.53	
S^{30}— 93	チオ尿素樹脂(50%) 硬化剤 10%(対S)	(S) 3	0.57	○
S^{30}— 94	水溶性石炭酸樹脂 NH_4Cl 10%(対R)	1	0.58	
S^{30}— 95	P.V.C+可塑剤(ゼオン Latex 50%) シリコン樹脂(Polon P 10%)	(S) 1 (S)0.3	0.52	
S^{30}— 96	P.V.C+可塑剤(ゼオン Latex 50%) 酢酸ビニル(ボンド CV2000)	(S) 1 (S)0.5	0.63	
S^{30}— 97	非イオン酢ビエルマルジョン(ボンド CP_5S) 可塑剤なし (50% Soln)	(S) 1	0.57	
S^{30}— 98	酢ビ+P.V.A+D.O.P(ボンド CH_1)	(S) 1	0.57	○
S^{30}— 99	アラビヤゴム	1	0.57	○
S^{30}—100	アラビヤゴム	5	0.57	硬化不能
S^{30}—101	ゼオンテックス(P.V.C+可塑剤)(50%)	(S) 1	0.57	
S^{30}—102	尿素ホルマリン樹脂(ユーロイド)50% 硬化剤 10%(対Resin)	(S) 10	0.53	
S^{30}—103	チオ尿素樹脂(50%) 硬化剤 10%(対Resin)	(S) 10	0.50	
S^{30}—104	サランテックス(P.V.C+塩化ビニリデン)50%	(S) 10	0.80	スポンヂ状になる
S^{30}—104′	硫酸法パルプ廃+重クロム酸ソーダ(リグニンスルホン酸カルシウム塩)	(S) 3	0.56	硬化不能
S^{30}—105	サランラテックス(50%) 珪素樹脂(ポロンC) 10%	(S)1.5 (S)0.5	0.52	
S^{30}—106	サランラテックス ポロンp (珪素樹脂)10%	(S)1.5 (S)0.5	0.50	
S^{30}—107	P.V.C+可塑剤(ゼオンラテックス) 50% 珪素樹脂(ポロンC)	(S) 1 (S)0.5	0.53	
S^{30}—108	酢ビ+P.V.A+D.O.P(ボンド CH_1) 珪素樹脂(ポロンp)10%	(S) 1 (S) 1	0.50	
S^{30}—109	ボンド CP_5S(非イオン型酢ビエマルジョン 50% 可塑剤なし)	(S) 5	0.53	
S^{30}—110	ボンド CP_5S(〃)	(S) 10	0.50	
S^{30}—111	ボンド CH_1(酢ビ+P.V.A+D.O.P) 50%	(S) 5	0.53	

実験番号	添加剤 種類	添加剤 wt%(対セメント)	W/C	摘要
S30—112	ボンド CH_1 (同 上)	(S) 10	0.50	
S30—113	ボンド CV 2000 (酢ビ+可塑剤)	(S) 1	0.65	
S30—114	P.V.A 尿素ホルマリン樹脂 50% 重クロム酸カリ (対 P.V.A)	0.5 (S)0.5 5	0.60	
S30—115	P.V.A チオ尿素樹脂50% 重クローム酸カリ (対 P.V.A)	0.5 0.5 5	0.60	
S30—116	ボンド CV 2000 (酢ビ+可塑剤)	(S) 5	0.67	
S30—117	珪素樹脂(ポロンC) 10% リサポール N (Nonionic)	(S) 1 0.05	0.43	
S30—118	珪素樹脂(ポロン P) 10% リサポール N (Nonionic)	(S) 1 0.05	0.43	○
S30—119	珪素樹脂(ポロンC) 10% 〃 (ポロンP) 10%	(S) 1 (S) 1	0.37	
S30—120	サランラテックス 50% 珪素樹脂(ポロンC) 10%	(S) 30 (S) 1	0.53	
S30—121	Res Cor (単—脂肪酸アミン)10%	(S) 1	0.60	
S30—122	Res Cor (〃)	(S)0.5	0.57	
S30—123	弗素樹脂 (ダイフロンディスパーション) 40%	(S) 10	0.50	
S30—124	弗素樹脂 (ダイフロンディスパーション) 40%	(S) 5	0.53	
S30—125	サランラテックス (50%) (塩化ビニリデン)	(S) 20	0.87	
S30—126	ゼオン ラテックス 652 (50%) (P.V.C+可塑剤)	(S) 20	0.58	
S30—127	尿素ホルマリン樹脂 (ユーロイド)50% 硬化剤 (対 Resin)	(S) 20 10	0.40	

実験番号	添加剤 種類	添加剤 wt%(対セメント)	W/C	摘要
S30—128	サランテックス (50%)	(S) 20	1.0	
S30—129	レス・コール WF11 (10%)	(S) 0.25	0.58	
S30—130	弗素樹脂 (ダイフロンディスパーション) 40%	(S) 20	0.40	
S30—131	シリカゾル(20%) ($SiO_2 \cdot nH_2O$)	(S) 5	0.63	
S30—132	シリカゾル(20%) Na_2SiF_6	2.5 2.5	0.63	
S30—133	シリカゾル(20%) ニッサン SA 一級アミン (オクタデシルアミンアセテート)	5 0.25	0.67	同時混合
S30—134	シリカゾル(20%)	2	0.60	
S30—135	シリカゾル(20%)	10	0.63	
S30—136	シリカゾル(20%) SA一級アミン酢酸塩	5 0.1	0.53	同時混合
S30—137	シリカゾル(20%) SA一級アミン酢酸塩	5. 1	0.77	同混合
S30—138	シリカゾル(20%) SA一級アミン酢酸塩(前混合)	2 0.3	0.60	
S30—139	水ガラス ($\frac{SiO_2}{Na_2O}=3$) SA一級アミン酢酸塩(前混合)	(S) 2 0.5	0.70	
S30—140	水ガラス (30%) SA一級アミン酢酸塩(前混合)	5 0.5	0.87	
S30—141	水ガラス (30%) SA一級アミン酢酸塩(前混合)	10 0.5	1.00	
S30—142	水ガラス (30%) SA一級アミン酢酸塩(前混合)	2 1	0.70	
S30—143	水ガラス (30%) SA一級アミン酢酸塩(前混合)	2 0.1	0.63	
S30—144	水ガラス (30%) SA一級アミン酢酸塩(同混合)	2 0.5	0.62	
S30—145	SA一級アミン酢酸塩	1	0.63	○

実験番号	添加剤 種類	wt%(対セメント)	W/C	摘要
S30—146	SA一級 アミン酢酸塩	0.5	0.61	○
S30—147	SA一級 アミン酢酸塩	0.1	0.61	○
S30—148	ポンド CS_1 (ポリスチレン) 50%	(S) 2	0.57	
S30—149	ポンド CS_1 〃	(S) 5	0.50	
S30—150	ポンド CS_1 〃	(S) 10	0.37	
S30—151	ポンド CT_{60} (ポリ酢酸ビ50% 可塑剤 15% 非イオン)	(S) 2	0.57	○
S30—152	ポンド CT_{60} 〃	5	0.51	○
S30—153	ポンド CT_{60} 〃	10	0.43	○
S30—154	ゼオン 576 (P.V.C+可塑剤) 50%	(S) 2	0.63	
S30—155	ゼオン 576	5	0.67	
S30—156	ゼオン 576	10	0.77	
S30—157	ゼオン P×45 (P.V.C+可塑剤)	(S) 2	0.60	○
S30—158	ゼオン P×45	5	0.67	
S30—159	ゼオン P×45	10	0.73	
S30—160	ゼオン 251 (P.V.C+可塑剤)	2	0.60	
S30—161	ゼオン 251	5	0.60	
S30—162	ゼオン 251	10	0.60	
S30—163	シリカゾル 20% SA一級アミン (前混合)	(S) 5 0.5	0.67	
S30—164	シリカゾル 20% SA一級アミン (前混合)	(S) 5 0.1	0.62	
S30—165	シリカゾル 20% SA一級アミン (前混合)	5 1	0.67	
S30—166	シリカゾル20% 1 : 1 $CaSiF_6$	(S) 2 2	0.67	
S30—167	シリカゾル20% 1 : 1 $MgSiF_6.6H_2O$	2 2	0.65	
S30—168	シリカゾル20% 1 : 1 $PbSiF_6$	2 2	0.63	
S30—168′	シリカゾル20% 1 : 1 $PbSiF_6$	2 2	0.63	
S30—169	シリカゾル20% 1 : 1 Na_2SiF_6	5 5	0.67	
S30—170	シリカゾル20% 1 : 1 $CaSiF_6$	5 5	0.75	
S30—171	シリカゾル20% 1 : 1 $MgSiF_6$	5 5	0.67	
S30—172	シリカゾル20% 1 : 1 $PbSiF_6$	5 5	0.72	
S30—173	シリカゾル 3 : 1 Na_2SiF_6	(S) 2	(S) 0.61	○
S30—174	シリカゾル 1 : 3 Na_2SiF_6	2	0.61	○
S30—175	シリカゾル 1 : 3 $CaSiF_6$	2	0.62	○
S30—176	シリカゾル 1 : 3 $MgSiF_6$	2	0.62	○
S30—177	シリカゾル 1 : 3 $PbSiF_6$	2	0.60	○
S30—178	シリカゾル 1 : 3 Na_2SiF_6	5	0.62	○
S30—179	シリカゾル 1 : 3 $CaSiF_6$	5	0.66	
S30—180	シリカゾル 1 : 3 $MgSiF_6$	5	0.66	
S30—181	シリカゾル 1 : 3 $PbSiF_6$	5	0.62	
S30—182	ポンド CS_1 (ポリスチレン) 50%	(S) 20	0.16	
S30—183	ポンド CT_{60} (ポリ酢ビ，可塑剤，非イオン) 15%	(S) 20	0.33	
S30—184	ゼオン 576 (P.V.C+可塑剤) 50%	(S) 20	0.73	

実験番号	添加剤 種類	wt%(対セメント)	W/C	摘要
S30—185	ゼオンP×45 (P.V.C+可塑剤) 50%	(S) 20	0.70	
S30—186	珪素樹脂(ポロンP) 10% SA一級アミン 前処理	(S) 2 0.05	0.42	
S30—187	珪素樹脂(ポロンP) 10% SA一級アミン塩 (前処理)	(S) 2 0.1	0.42	
S30—188	珪素樹脂(ポロンP) 10% SA一級アミン (同時処理)	(S) 2 0.05	0.42	
S30—189	SA一級アミン塩 (オクダ・デシルアミンアセテート)	0.01	0.60	
S30—190	カチオンPB パルミチルトリメチルアンモニウムクロライド	1	0.57	
S30—191	カチオンPB (4級アンモニウム塩)	0.1	0.53	
S30—192	カチオンPB (〃)	0.01	0.57	
S30—193	カチオンAB (ステリアリルトリメチルアンモニウムクロライド)	1	0.53	
S30—194	カチオンAB (4級アンモニウム)	0.1	0.53	
S30—195	カチオンAB (〃)	0.01	0.57	
S30—196	カチオンBB (ラウリル・トリメチルアンモニウム・クロラード)	1	0.53	
S30—197	カチオンBB (4級アンモニウム)	0.1	0.53	
S30—198	カチオンBB (〃)	0.01	0.57	
S30—199	ベルベックス AB—7 (ノニオン+4級アミン)	1	0.53	
S30—200	ベルベックス AB—7	0.1	0.53	
S30—201	ベルベックス AB—7	0.01	0.55	
S30—202	アミンAB (単一脂肪酸アミン オクダ・デシル・アミン)	1	0.60	
S30—203	アミンAB (〃)	0.1	0.60	
S30—204	アミンAB (〃)	0.01	0.58	
S30—205	アミンBB (オクダ・デシルアミン・ドデシルアミン)	1	0.60	
S30—206	アミンBB (オクダ・デシルアミン・ドデシルアミン)	0.1	0.60	
S30—207	アミンBB (〃)	0.01	0.60	
S30—208	ノニオン 215—E (ポリ・オキシエチレンオレイル・エーテル)	1	0.60	
S30—209	ノニオン 215—E (〃)	0.1	0.60	
S30—210	ノニオン 215—E (〃)	0.01	0.60	○
S30—211	ノニオン 215—P (ポリ・オキシエチレンセチル・エーテル)	1	0.60	
S30—212	ノニオン 215—P (ポリ・オキシエチレンセチル・エーテル)	0.1	0.60	
S30—213	ノニオン 215—P (ポリ・オキシエチレンセチル・エーテル)	0.01	0.60	○
S30—214	ディスパノール56 (Nonionic アルキルフェノール系)	1	0.60	
S30—215	ディスパノール56 (〃)	0.1	0.60	
S30—216	ディスパノール56 (〃)	0.01	0.60	○
S30—217	ヂステアリルアミン	1	0.62	○

実験番号	添加剤 種類	wt%(対セメント)	W/C	摘要
S30—218	ヂステアリルアミン	0.1	0.60	○
S30—219	弗素樹脂(ダイフロンディスパーション)	(S) 2	0.58	○
S30—220	アラビヤゴム	2	0.56	水中崩カイ
S30—221	アラビヤゴム	3	0.56	水中崩カイ
S30—222	ボンド CT_{50}(酢ビ+可塑剤15%非イオン) アラビヤゴム 珪素樹脂(ポロンP)	10 1 0.5	0.50	
S30—223	ボンド CT_{50}(酢ビ+可塑剤15%非イオン) SA一級アミン	5 0.1	0.52	
S30—224	アラビヤゴム SA一級アミン	1 0.1	0.53	
S30—225	ボンド CT_{50} 重クロム酸ソーダ(対 Resin)	5 10	0.52	
S30—226	ボンド CT_{50} スノーテックス(シリカゾル) カチオンAB(4級アンモニウム)	(S) 5 (S) 2 0.61	0.58	
S30—227	ボンド CT_{50} 水溶性メラミン(対 Resin)	5 15	0.53	
S30—228	ボンド CT_{50} 水溶性石炭酸樹脂(対 Resin)	5 2	0.53	
S30—229	ボンド CT_5) 硼砂(対 Resin)	5 5	0.58	
S30—230	スノーテックス(シリカゾル) 弗化水素酸	(S) 2 1.5	0.58	
S30—231	ディスパノールN(アルキルフェノール系非イオン活性剤)	1	0.53	
S30—232	ディスパノールN(〃)	0.1	0.53	
S30—233	ディスパノールN(Nonion)(アルキルフェノール系)	0.01	0.56	
S30—234	シリカゾル 3 Na_2SiF_6 1 SA一級アミン	2 0.1	0.63	
S30—235	シリカゾル 3 Na_2SiF_6 1 アラビヤゴム SA一級アミン	2 1 trace	0.63	
S30—236	シリカゾル 珪素樹脂(ポロンP) SA一級アミン	(S) 2 2 0.05	0.53	
S30—237	アラビヤゴム 珪素樹脂(ポロンP)10% ディスパノールN	1 (S) 1 0.1	0.50	○
S30—238	アラビヤゴム 珪素樹脂(ポロンP) ディスパノールN	1 0.1 0.1	0.47	
S30—239	シリカゾル 20% アラビヤゴム SA一級アミン塩	(S) 2 1 0.1	0.70	
S30—240	シリカゾル 3 Na_2SiF_6 1 珪素樹脂 SA一級アミン塩	2 1 0.1	0.50	
S30—241	シリカゾル 3 Na_2SiF 1 ボンド CT_5(ポリ酢ビ+可塑剤5%) SA一級アミン塩	2 2 0.1	0.60	
S30—242	ボンド CT_5(ポリ酢ビ+可塑剤5%) SA一級アミン塩	(S) 5	0.53	
S30—243	ボンド CT_5(ポリ酢ビ+可塑剤5%) レス・コール SA一級アミン塩	(S) 5 1 0.1	0.57	
S30—244	高炉セメント(鐘畑小野田 Lot 35) 無添加	0	0.60	○ 水中4ケ月 別表
S30—245	マスコン(日本社美和 Lot 38) 無添加	0	0.60	○ 水中4ケ月 別製
S30—246	普通セメント(日立二瀬用) 無添加	0	0.60	○ 水中4ケ月 別製
S30—247	サラン・ラテックス(ボンド CL 9 可塑剤 30%含)一級SAアミン塩	(S) 5 0.1	0.80	

実験番号	添加剤 種類	添加剤 wt%(対セメント)	W/C	摘要
S30—248	サラン・ラテックス(ボンドM3 可塑剤5%含)	(S) 5	0.70	
	SA—級アミン	0.1		
S30—249	ポリ酢ビ(EM50—M ゴーセニル)	(S)	0.57	
	可塑剤なし 10000CP	5		
S30—250	ポリ酢ビ(EM50—M ゴーセニル)	5	0.53	○
	SA—級アミン	0.1		
S30—251	ポリ酢ビ(EM50—M ゴーセニル)	(S) 5	0.53	
	ステアリルヂアミン	0.1		
S30—252	ポリ酢ビ(EM50—M ゴーセニル)	(S) 5	0.53	
	ディスパノールN	0.1		
S30—253	ポリ酢ビ(EM50—M ゴーセニル)	(S) 5	0.52	
	ライポン(アニオン活剤)	0.05		
S30—254	ポリ酢ビ(EM50—M ゴーセニル)	(S) 5	0.53	
	重クロム酸ソーダ(対 Resin)	5		
S30—255	ポリ酢ビ(EM50—M ゴーセニル)	(S) 5	0.53	
	アラビヤゴム(対 Resin)	10		
S30—256	ポリ酢ビ(EM50—M ゴーセニル)	5	0.53	
	P.V.A(対 Resin)	10		
S30—257	ポリ酢ビ(EM50—M ゴーセニル)	5	0.53	
	水溶性メラミン樹脂(対 Resin)	20		
S30—258	ポリ酢ビ(EM50—M ゴーセニル)	5	0.53	
	硼砂(対 Resin)	2		
S30—259	ポリ酢ビ(EM50—M ゴーセニル)	(S) 5	0.60	
	ネオプレン(50% EM)	(S) 5		
S30—260	ポリ酢ビ(EM50—M ゴーセニル)	(S) 5	0.57	
	シリカゾル 20%(対 Resin)	30		
S30—261	ポリ酢ビ(EM50—SZ ゴーセニル)	(S)	0.50	○
	CP50 可塑剤なし	10		
S30—262	ポリ酢ビ(EM50—SZ ゴーセニル)	(S) 2	0.53	
	CP50 可塑剤不含			
S30—263	ポリ酢ビ(EM50—SZ)	(S) 5	0.50	
S30—264	ポリ酢ビ(EM50—SZ)	(S) 5	0.50	○
	SA—級アミン	0.1		
S30—265	ポリ酢ビ(EM50—SZ)	(S) 5	0.50	
	ディスパノールN(非イオン)	0.1		
S30—266	ポリ酢ビ(EM50—SZ)	(S) 5	0.50	
	重クロム酸ソーダ(対 Resin)	5		
S30—267	ポリ酢ビ(EM50—SZ)	5	0.52	
	P.V.A(対 Resin)	2		
	重クロム酸ソーダ(対 Resin)	5		
S30—268	ポリ酢ビ(EM50—SZ)	(S) 5	0.50	○
	アラビヤゴム(対 Resin)	10		
S30—269	ポリ酢ビ(EM50—SZ)	(S) 5	0.50	
	水溶メラミン Resin(対 Resin)	10		
S30—270	ポリ酢ビ(EM50—SZ)	(S) 5	0.50	
	ネオプレン(対セメント)	30		
S30—271	ポリ酢ビ(EM50—SZ)	5	0.50	
	シリカゾル(対 Resin)	10		
	SA—級アミン	0.1		
S30—272	ネオプレン(50% エマルション)	(S) 5	0.60	

実験番号	添加剤 種類	wt%(対セメント)	W/C	摘要
S30—273	ネオプレン	(S) 2	0.63	
S30—274	ネオプレン	(S) 10	0.53	
S30—275	ネオプレン SA—級アミン塩	(S) 5 0.1	0.63	
S30—276	ネオプレン ディスパノールN (非イオン)	(S) 5 0.1	0.60	
S30—277	ネオプレン アラビヤゴム (対 Resin)	(S) 5 10	0.63	
S30—278	ネオプレン アラビヤゴム	(S)1.5 1	0.57	
S30—279	ネオプレンゴム アラビヤゴム	0.5 1	0.53	
S30—280	ポリアクリル酸ソーダ (アロンA20L)	5	0.70	
S30—281	ポリアクリル酸ソーダ (アロンA20L)	1	0.63	○
S30—282	アロンA20L	0.5	0.67	
S30—283	ポリアクリ酸ソーダ (アロンA20H)	0.5	0.67	
S30—284	アロンA20H (ポリアクリル酸ソーダ) アラビヤゴム	0.4 0.8	0.67	○
S30—285	アロンA20L SA—級アミン	1 0.1	0.63	
S30—286	メタアクリル酸ソーダ	1	0.60	
S30—287	メタアクリル酸ソーダ	0.5	0.61	
S30—288	メタアクリル酸ソーダ SA—級アミン	1 0.1	0.63	
S30—289	メタアクリル酸ソーダ アクリル酸ソーダ (アロンA20L)	0.5 0.5	0.62	
S30—290	メタアクリル酸ソーダ アラビヤゴム	0.5 0.5	0.63	
M—291	マスコンセメント (西多摩) 無添加	0	0.60	○
M—292	アラビヤゴム	1	0.57	○

実験番号	添加剤 種類	wt%(対セメント)	W/C	摘要
M—293	クリリウム (酢ビ+マレイン酸)	0.5	0.73	
M—294	クリリウム (〃)	0.1	0.62	
M—295	クリリウム SA—級アミン	0.5 0.1	0.76	
M—296	クリリウム アラビヤゴム SA—級アミン	0.1 0.5 0.001	0.67	
M—297	クリリウム (粉末ヲ前混合)	0.5	0.65	
M—298	Chrome Black AH (O, O'—デオキシアゾ染料)	0.5	0.60	○
M—299	Chrome Black AH	0.1	0.60	
M—300	Chrome Black AH 酢酸クロム	0.5 0.3	0.60	
M—301	Chrome Black クロム Alum	0.5 0.3	0.60	○
M—302	Chrome Black AH クロム Alum	0.1 0.1	0.57	
M—303	Na—メタアクリレート クロム アラム	0.5 0.3	0.62	
M—304	Poly Butyl Acrylate	(S) 5	0.53	
M—305	Poly Butyl Acrylate	(S) 2	0.57	○
M—306	Poly Butyl Acrylate 過硫酸アンモン	10 微	0.40	
M—307	イビット No. 1 (複素環化合物+有機硫黄化合物)	1	0.55	
M—308	イビット No. 500 (〃)	1	0.57	
M—309	イビット No. 550 (〃)	1	0.57	
M—310	イビット No. 600 (〃)	1	0.57	
M—311	イビット No. 105 (〃)	1	0.57	○

実験番号	添加剤 種類	添加剤 wt%(対セメント)	W/C	摘要
M—312	Direct Copper Blue 2BH(O-O'-ジオキシアゾ化合物)	0.5	0.56	○
M—313	Direct Copper Blue 2BH(O-O'-ジオキシアゾ化合物) 硫酸銅	0.5 0.5	0.56	
M—314	Furfuryl Alc. 修酸 (対 Resin)	5 5	0.53	
M—315	Furfuryl Alc.	5	0.53	
M—316	4:4'—ビスアセトアセチルアミノ—3:3'—ヂメチルフェニル	1	0.56	
M—317	フルフラール	5	0.53	
M—318	フルフラール 修酸 (対 Resin)	5 5	0.53	
M—319	フルフラール H_2SO_4 (対 Resin)	5 2	0.55	
M—320	フルフリル・アルコール H_2SO_4 (対 Resin)	5 2	0.57	
M—321	フルフリル・アルコール 修酸 (対 Resin)	10 10	0.47	
M—322	フルフリル・アルコール H_2SO_4 (対 Resin)	10 10	0.47	
M—323	フルフラール 修酸 (対 Resin)	10 10	0.50	
M—324	フルフリル・アルコール フルフラール 修酸 (対 Resin)	5 5 10	0.50	
M—325	フルフリル・アルコール H_3PO_4 (対 Resin)	10 10	0.48	
M—326	フルフリル・アルコール CrO_3 (対 Resin)	10 5	0.47	
M—327	フルフリル・アルコール PhOH 修酸 (対 Resin)	5 5 10	0.47	
M—328	フルフラール PhOH	5 3	0.50	○

実験番号	添加剤 種類	添加剤 wt%(対セメント)	W/C	摘要
M—329	フルフリル・アルコール PhOH	5 3	0.47	○
M—330	フルフリル・アルコール CrO_3 (対 Resin) SA—級アミン	10 10 0.01	0.01	空中養生(H) 水中養生(W)
M—331	フルフリル・アルコール CrO_3 (対 Resin)	20 10	0.37	(H)空湿 (W)水中 Curing
M—332	フルフリル・アルコール CrO_3 (対 Resin)	30 10	0.30	(H) (W)
M—333	ポリ酢ビ (ボンド CT50可塑剤5%含) SA—級アミン	20 0.1	0.30	(H) (W)
M—334	Butyl Acrylate SA—級アミン	3.0 0.1	0.20	
M—335	Butyl Acrylate SA—級アミン	10 0.1	0.50	
M—336	ポリ酢ビ (ゴーセニル CP^{1}×10^{4}) ポリ酢ビ (ゴーセニル CP 50)	5 5	0.50	
S^{20}—337	(大阪シリカ20%) イビットNo. 105	1	0.60	
S^{20}—338	Chrome Black AH Chrome Alum	1 0.5	0.60	
S^{20}—339	4.4'- Bisacetacetyl amino 3.3'-diphenyl アルコール少量	1	0.60	
M—340	(マスコン) アスファルト乳剤 珪素樹脂 (ボロン P)	(S) 10 (S) 1	0.47	
S^{20}—341	(大阪シリカ20%) アスファルト乳剤 珪素樹脂 (ボロン P)	(S) 20 (S) 1	0.60	
S^{20}—342	アスファルト乳剤 シリカゾル	(S) 20 (S) 3	0.70	
S^{20}—343	アスファルト乳剤 4級アミン (ステアリルトリメチルアンモニウムクロライド)	(S) 20 (S) 3	(輪) 0.43	
S^{20}—344	アスファルト乳剤 珪素樹脂 (ボロン P)	(S) 20 (S) 2	0.40	
S^{20}—345	アスファルト乳剤 4級アミン (ラウリル系)	(S) 20 (S) 3	0.33	

実験番号	添加剤 種類	添加剤 wt%(対セメント)	W/C	摘要
S^{20}—346	Asphalt 乳剤 4級アミン (ステアリル系)	(S) 10 (S) 3	0.43	
S^{20}—347	Asphalt 乳剤 4級アミン (ステアリル系)	(S) 30 (S) 3	0.30	
S^{20}—348	Asphalt 乳剤 シリカゾル (対 Asphalt)	(S) 10 (S) 10	0.60	
S^{20}—349	Asphalt 乳剤 シリカゾル (対 Asphalt)	(S) 30 (S) 10	0.80	

注：1. M印はマスコンセメントを示す断りなき場合全て 24hr 脱型水中一週間養生 0.2N H_2SO_4 Soln. に浸漬試験である。
1. S^{20} は 20% シリカセメントを示す。
1. S^{30} は 30% シリカセメントを示す。
1. 添加量欄の (S) は固形分を示す。
1. w/c の数字は添加剤中の水分を含まない。

実験番号	添加剤 種類	添加剤 添加量%	W/C	摘要
S^{20}—350	土壌混用 アスファルト乳剤 (60%エマルジョン)	(S) 10%	0.50	
S^{20}—351	同上	(S) 20%	0.50	
S^{20}—352	同上	(S) 5%	0.53	
S^{20}—353	パラフィン乳剤 (35%)	(S) 5%	0.57	
S^{20}—354	同上	(S) 10%	0.57	
S^{20}—355	同上	(S) 2%	0.57	
S^{20}—356	メタアクリル酸 $+CrCl_3$	1%	0.57	
S^{20}—357	同上	0.5%	0.57	
S^{20}—358	ポリエステル樹脂 (メタアクリル酸 $+CrCl_3$) にて前処理	10% 1%	0.50	
S^{20}—359	ポリエステル樹脂 (アミン硬化剤+B.P.O.) (対 Resin)	10% 5%	0.43	
S^{20}—360	土混用アスファルト乳剤	(S) 30%	0.50	
S^{20}—361	(ステアリン酸+ $CrCl_3$)	5%	0.53	
S^{20}—362	同上	2%	0.57	
S^{20}—363	土混用アスファルト乳剤 (メタアクリル酸 $+CrCl_3$) にて前処理	(S) 10% 1%	0.50	
S^{20}—364	土混用アスファルト乳剤 (ステアリン酸+ $CrCl_3$) にて前処理	(S) 10% 1%	0.60	
S^{20}—365	メタアクリル酸 + ($Crcl_3$)	5%	0.53	
S^{20}—366	土混用アスファルト乳剤 (メタアクリル酸 $+CrCl_3$) にて前処理	(S) 20% 1%	0.50	
S^{20}—367	土混用アスファルト乳剤 (ステアリン酸+ $CrCl_3$) にて前処理	(S) 20% 1%	0.57	
S^{20}—369	酢酸ビニルとメタアクリル酸樹脂との共重合物	(S) 10%	0.53	
S^{20}—370	同上	(S) 20%	0.47	

別表－2

実験番号	添加剤 種類	添加剤 wt%(対セメント)	W/C	摘要
S^{20}— 1	$2BaO \cdot SiO_2$	5	0.60	
S^{20}— 2	$2BaO \cdot SiO_2$	10	0.60	
S^{20}— 3	$BaO \cdot SiO_2$	5	0.60	
S^{20}— 4	$BaO \cdot SiO_2$	10	0.60	
S^{20}— 5	$BaO \cdot Al_2O_3$	5	0.60	
S^{20}— 6	$BaO \cdot Al_2O_3$	10	0.60	
S^{20}— 7	20%シリカセメントモルタル	0	0.60	○無添加物
S^{20}— 8	ステアリン酸バリウム	2	0.60	
S^{20}— 9	ステアリン酸バリウム	5	0.60	
S^{20}— 10	珪弗化鉛 アラビアゴム	2 0.5	0.57	
S^{20}— 11	エドラン（クロムーステアリン酸錯化物）	1	0.57	
S^{20}— 12	エドフイックス（クロムーメタクリル酸錯化物）	1	0.57	
S^{20}— 14	Plyo Phen 6000（レゾルシン系フェノール樹脂）	5	0.47	
S^{20}— 15	グリセリン 1 リサーシ（P60） 3	5	0.60	
S^{20}— 16	$2BaO \cdot SiO_2$	10	0.60	水中養生2ケ月○
S^{20}— 17	フルフリルアルコール，フルフラール 1 リグニンスルホン酸	5 0.5	0.34	
S^{20}— 18	$2BaO \cdot SiO_2$ CrO_3	10	0.61	
S^{20}— 19	Plyophen 6000 ステアリン酸バリウムス	5 2	0.50	
S^{20}— 21	ステアリン酸バリウム エドラン パルミチン4級アンモニウム	2 5	0.60	

実験番号	添加剤 種類	添加剤 wt%(対セメント)	W/C	摘要
S^{20}— 22	リグニン グリセリン	7 2	0.63	
S^{20}— 23	リグニン エドラン	7 5	0.60	
S^{20}— 24	ステアリン酸バリウム CrO_3	2	0.60	
S^{20}— 25	グリセリン ステアリン酸バリウム	3 2	0.57	
S^{20}— 26	グリセリン 1 フルフラール 1 リグニンスルホン酸	5	0.53	
S^{20}— 27	リグニン	15	0.93	1:1 モルタル
S^{20}— 28	20%シリカセメント 無添加(1:1)（モルタル）	0	0.53	1:1 モルタル
S^{20}— 29	$2BaO \cdot SiO_2$	10	0.54	1:1 モルタル
S^{20}— 30	ステアリン酸バリウム	2	0.57	1:1 モルタル
S^{20}— 31	Plyophen 6000 $2BaO \cdot SiO_2$	5 5	0.45	
S^{20}— 32	Plyophen 6000 リグニン	5 4	0.50	
S^{20}— 34	Plyophen 6000 ブラジレン（キレート剤）	5 0.5	0.45	
S^{20}— 35	Plyophen 6000 ヘマテイン（キレート剤）	5 0.5	0.47	
S^{20}— 36	Plyophen 6000 酢ビ＋フルフラール	5 5	0.40	
S^{20}— 37	Plyophen 6000 ホルマリン ステアリン酸バリウム	5 2	0.43	
S^{23}— 38	Plyophen 6000 フルフリルアルコール	5 5	0.40	
S^{20}— 39	Plyophen 6000 フルフラール	5 5	0.40	
S^{20}— 40	Plyophen 6000 グリセリン パラトルエンスルホン酸	5 5 1	0.40	
S^{20}— 42	Plyophen 6000 パラトルエンスルホン酸	5 1	0.43	

実験番号	添加剤 種類	wt%(対セメント)	W/C	摘要
S[20]— 43	Plyophen 6000 サランラテックス	5 3	0.35	
S[20]— 44	Plyophen 6000 ゼオンラテックス #576	5 3	0.38	
S[20]— 46	Plyophen 6000 ブチルアクリレート	5 3	0.40	
S[20]— 49	リグニン アスファルト	3 5	0.60	
S[20]— 50	Plyophen 6000 ステアリン酸バリウム	5 2	0.45	
S[20]— 51	Plyophen 6000 ステアリン酸アルミニウム	5 2	0.47	
S[20]— 52	アスファルト ステアリン酸バリウム	5 2	0.47	
S[20]— 53	アスファルト(前処理) フルフリル・アルコール	5 3	0.53	
S[20]— 54	アスファルト グリセリン	5 2	0.50	
S[20]— 55	アスファルト クロムブラック(キレート剤)	5 0.5	0.51	
S[20]— 58	タンニン	5	0.53	
S[20]— 60	タンニン グリセリン	5 3	0.50	
S[20]— 64	Plyophen 6000 アラビヤゴム	5 1	0.45	
S[20]— 66	タンニン酸 ステアリン酸バリウム	3 2	0.53	
S[20]— 68	タンニン酸 フルフラール トリエタノールアミン	3 3 0.1	0.47	
S[20]— 69	タンニン酸 グリセリン	3 2	0.47	
S[20]— 70	タンニン酸 フルフリル・アルコール	3 3	0.48	
S[20]— 71	タンニン酸 アスファルト	2 5	0.50	
S[20]— 72	タンニン酸 アラビヤゴム	3 1	0.48	

実験番号	添加剤 種類	wt%(対セメント)	W/C	摘要
S[20]— 73	タンニン酸 酢酸ビニル	2 5	0.57	
30% シリカ → S[30]—74	30%シリカセメント 無添加	0	0.53	
S[30]— 75	ピロガロール フルフラール トリエタノール,アミン	3 2	0.52	
S[30]— 76	ピロガロール フルフラール	3 2	0.50	
S[30]— 77	レゾルシン ホルマリン	3 2	0.53	
S[30]— 78	ピロガロール フルフリル・アルコール フルフラール	3 2 2	0.53	
S[30]— 79	ピロガロール フルフラール タンニン	3 2 2	0.53	
S[30]— 80	ピロガロール フルフラール グリセリン	3 2 1	0.53	
S[30]— 81	ピロガロール フルフラール アラビヤゴム	3 2 1	0.53	
S[30]— 82	ピロガロール フルフラール アスファルト	3 2 5	0.53	
S[30]— 83	ピロガロール 3 フルフラール 2 クロームブラック(キレート剤)	5 0.5	0.52	
S[30]— 84	ピロガロール 3 フルフラール 2 ステアリン酸バリウム	5 1	0.52	
S[30]— 85	ピロガロール 3 フルフラール 2 $2BaO \cdot SiO_2$	5 5	0.53	
S[30]— 86	ピロガロール 3 フルフラール 2 エドラン	5 1	0.52	
S[30]— 87	ステアリン酸バリウム(アルコール分散) CrO_3	2	0.57	
S[30]— 88	フルフリル,アルコール 2 フルフラール 1 タンニン酸	5 0.5	0.50	
S[30]— 89	グリセリン クロムブラック(キレート剤)	2 0.5	0.53	

実験番号	添加剤 種類	添加剤 wt%(対セメント)	W/C	摘要
S^{30}— 90	グリセリン $2BaO \cdot SiO_2$	2 5	0.55	
S^{30}— 91	グリセリン リグニン	2 5	0.60	
S^{30}— 92	グリセリン エドラン	2 1	0.57	
S^{30}— 93	アスファルト $2BaO \cdot SiO_2$	5 5	0.55	
S^{30}— 94	アスファルト レゾルシン	5 2	0.57	
S^{30}— 95	アスファルト エドラン	5 1	0.57	
S^{30}— 97	$2BaO \cdot SiO_2$ クロムブラック	5 0.5	0.57	
S^{30}— 98	タンニン酸 エドラン	1 1	0.55	
S^{30}— 99	$2BaO \cdot SiO_2$ エドラン	5 1	0.58	
S^{30}—101	ステアリン酸バリウム(アルコール) グリセリン クロムブラック	2 1 0.2	0.55	
S^{30}—102	ステアリン酸バリウム(カチオンPB分散) アラビアゴム	1 1	0.53	
S^{30}—103	ステアリン酸バリウム(ノニオン分散) エドラン	1 1	0.57	
S^{30}—104	ステアリン酸バリウム(アルコール分散) グリセリン	1 1	0.53	
S^{30}—105	チオ尿素 P. V. A.	3 2	0.63	
S^{30}—106	チオ尿素 1 フルフラール 2	5	0.50	
S^{30}—111	パルプ廃液(K.S.P) エドラン	2 1	0.52	
S^{30}—113	アニリン 1 ホルマリン 3	5	0.53	
S^{30}—114	アニリン 1 フルフラール 1	5	0.53	
S^{30}—116	ステアリン酸バリウム アルコール グリセリン CrO_3	2 2 2	0.57	
S^{30}—117	ステアリン酸バリウム アルコール パルプ廃液(K.S.P) CrO_3	2 2 1	0.53	

実験番号	添加剤 種類	添加剤 wt%(対セメント)	W/C	摘要
S^{30}—119	ゴーセニル 128(酢ビ粒大)	5	0.47	
S^{30}—121	パルプ廃液(K.S.P) グリセリン	1 2	0.48	
S^{30}—122	パルプ廃液(K.S.P) アニリン(アルコール性)	1 2	0.50	
S^{30}—123	タンニン酸 重クロム酸ソーダ	3	0.53	
S^{30}—124	ブラジレン(キレート剤) 重クロム酸ソーダ	0.3	0.53	
S^{30}—125	パルプ廃液(K.S.P) $BaCl_2$ CrO_3	2 2	0.48	
S^{30}—126	ヘマテイン(キレート剤) 重クロム酸ソーダ	0.3	0.57	
S^{30}—127	ステアリン酸バリウム(アルコール分散) ゴーセニル 128 CrO_3	2 3	0.50	
S^{30}—128	ゴーセニル 128(酢ビ共重合物) ブラヂレン(キレート剤) CrO_3	5 0.3	0.53	
S^{30}—129	ゴーセニル 128 エドラン	5 2	0.50	
S^{30}—130	エドラン クロムブラック CrO_3	2 0.3	0.57	
S^{30}—131	ステアリン酸バリウム エドラン	2 2	0.57	
S^{30}—134	ブラジレン エドラン CrO_3	0.3 1		
S^{30}—135	グリセリン クロムブラックグ CrO_3	2 0.3	0.52	
S^{30}—136	グリセリン ブラヂレン CrO_3	2 0.3	0.53	
S^{30}—137	P.V.A エドラン	3 2	0.63	
S^{30}—138	グリセリン ヘマチン CrO_3	2 0.3	0.53	

実験番号	添加剤 種類	添加剤 wt%(対セメント%)	W/C	摘要
S30—140	P. V. A ステアリン酸バリウム	2 2	0.67	
S30—141	ステアリン酸バリウム カチオンBB (ドデシルトリメチルアンモニウムクロライド/CrO_3)	2 0.5	0.57	
S30—142	ステアリン酸バリウム カチオンBB (パルミチルトリメチルアンモニウムクロライド/CrO_3)	2 1	0.55	
S30—143	ステアリン酸バリウム カチオンBB エドラン	2 1 2	0.53	
S30—144	ステアリン酸バリウム グリセリン カチオンBB CrO_3	2 2 0.5	0.50	
S30—145	チオ尿素 1 フルフラール 1	5	0.52	
S30—146	チオ尿素 1 P. V. A 1	5	0.57	
S30—149	アニリン(アルコール性) ホルマリン(35%)	3 6	0.47	
S30—150	アスファルト チオ尿素	5 1	0.53	
S30—154	Plyophen 6000 フルフラール パラトルエンスルホン酸	5 5 5(対Re)	0.47	
S30—159	アスファルト	5	0.54	
S30—160	グリセリン	3	0.53	
S30—161	30%シリカセメント 無添加	0	0.60	
S30—165	アスファルト 表面加熱処理	5	0.55	
S30—166	アスファルト 表面加熱処理	8	0.55	
S30—167	アスファルト 表面加熱処理	10	0.57	別個に無処理物を実験
S30—168	アスファルト 表面加熱処理	15	0.55	別個に無処理物を実験

別表－3

① 0.2N 硫酸酸性水溶液による試験の場合

供試体の種類	面積(cm^2) 無添加：S_o 添加：S_a	耐酸度 S_o/S_a
30%シリカセメント（無添加）	41.4	——
20%シリカセメント（無添加）	35.1	1.16
珪弗化鉛 1.5% アラビヤゴム 0.5%	36.3	1.14
アラビヤゴム 1%	37.9	1.09
ジステアリムアミン 0.1%	37.8	1.10

② 0.01N 硫酸酸性水溶液による試験の場合

供試体の種類	面積(cm^2) 無添加：S_o 添加：S_a	耐酸度 S_o/S_a
20%シリカセメント（無添加）	83.7	——
2 BaO・SiO_2 10%（水中養生2ケ月）	73.2	1.14
2 BaO・SiO_2 10% 無水クロム酸	70.6	1.18
ステアリン酸バリウム 2% 4級アミン 1.5% エドラン 1%	72.5	1.15
ステアリン酸バリウム 2% 無水クロム酸	68.8	1.23
ステアリン酸バリウム 2% グリセリン 3%	69.3	1.20
レゾルシン系フエノール樹脂 5% ステアリン酸バリウム 2%	72.3	1.15
フルフリルアルコール 1 フルフラール 1 } 5% リグニンスルホン酸少量	73.9	1.13
グリセリン 1 フルフラール 1 } 5% リグニンスルホン酸少量	73.8	1.13
リグニン 7% グリセリン 5%	74.2	1.13
リグニン 7% エドラン 5%	72.3	1.16

光弾性法によるダムの応力解析に関する研究

(第 1 報)

——大型遠心力式負荷装置とこれを用いる実験法——

昭和 34 年 12 月

高田孝信*
栗林栄一**

要旨

本報告はダムの自重ならびに外荷重による応力を，応力凍結法を応用した三次元的光弾性実験法によって，解析する方法について述べ，さらに定常状態の温度応力の解式を三次元問題に拡張して，これを実験的に解析する方法について提案したものである。

第1報では，主として，温度応力の測定法と東北地方建設局の依頼によって行なわれた大倉アーチダムの構造模型試験のうち，特にそのために試作した“光弾性実験用大型遠心力式負荷装置”について述べる。本装置は遠心力利用により重力場に相似した重力の数百倍の加速度場をつくって，光弾性実験用模型供試体に応力凍結サイクルの全過程にわたり，自重あるいは液体圧を負荷せしめるものである。

第2報では大倉アーチダムの自重及び静水圧負荷による表面応力と内部応力の光弾性実験による測定結果について報告する予定である。

目　　次

1 緒　　言……(2)
2 光弾性による遠心力式液体圧負荷実験法……(2)
(1) 模型実験における負荷の概念……(2)
(2) 自重応力の測定法……(2)
(3) 液体圧負荷による応力測定法……(2)
3 温度応力の測定法……(3)
(1) M.A. Biot の理論の三次元問題への拡張……(3)
(2) 温度応力の測定法……(4)
4 光弾性実験用大型遠心力式負荷装置……(4)
(1) 本装置の概要……(4)
(2) 本装置における温度制御方法……(5)
(3) 実験法の検証……(6)

* 工博 材料構造部 構造研究室長　　** 材料構造部 構造研究室

1 緒 言

現在，構造物の応力測定法にはいろいろの方法があるが，ダム，橋梁，トンネル，舗装版などの土木構造物あるいはそれらの模型の応力測定法としては，電気抵抗線利用による測定法，光弾性実験による方法の2方法がきわめて有力な方法と思われる。本報告では光弾性法による応力測定の対象を特にダムとして考えた場合，遠心力利用による液体圧負荷実験法が，静水圧負荷および熱膨脹に伴う附加容積力により生ずる応力の測定法として極めて優れた方法であると云う観点から，負荷装置の試作ならびに応力解析の方法について検討し，実際問題としてダムの静水圧負荷による応力と温度応力の実験的解析法について言及する。

一方，三次元光弾性実験法では優れた凍結材料が，つぎつぎと見出されてきており，したがって応力凍結法による実験法が，他の2方法（収れん光法，散乱光法）に比べて実用問題解決のためには有力な手段であることが認められてきており，ダムなどの模型試験に用いるための背景は十分であると考えられる。

2 光弾性による遠心力式液体圧負荷実験法

（1） 模型実験における負荷の概念

一般に静的構造模型実験における負荷は，実物の負荷における力学的作用と相似させる必要があると考えられている。しかし物体に応力を生ずる原因は見掛け上つぎの二つに分けて考えることができる。

1) 外荷重のようなベクトル量に支配される負荷による応力

2) 力が連続するポテンシャルによって導かれるようなスカーラ量に支配される負荷による応力

したがって，2)のような弾性体の内部仕事に等位なポテンシャル空間のスカーラで規定される負荷では，弾性体の境界の変位を規定し，エネルギー保存の原理から，その保存力の場を適当な外荷重に置換することが概念的には可能である。

この性質を利用することにより模型に対しては実物とは外見上全く異なる負荷を与えておいて，実物の負荷と相似した作用を生ぜしめることが可能である。この点に関しては次節で詳細に述べる。

（2） 自重応力の測定法

自重応力の測定法としては，“流体圧荷重置換”による Biot の方法と遠心力による2方法が考えられる。流体圧荷重置換法は実験的には難点があるが，最近，高感度の光弾性材料によって実験室的試験に成功している[1]。また遠心力利用による方法は広凡な応用が試みられている。

（3） 液体圧負荷による応力測定法

液体圧の負荷法は模型実験の場合つぎの2方法が考えられる。

1) 集中荷重あるいは線荷重の有限個の集合に置換する方法。

2) 比重の大きな流体を用いる方法

前者は載荷面に接触応力を生じ光弾性縞が乱れて，実験の精度を低下させるおそれがあり，後者は流体として比重の最大なるものを考えても，水銀が 13.6 であるから，この場合所要の縞次数を得るためには，模型が途方もなく大きなものとなり，光弾性実験の本来の意義を失なわざるを得なくなる。

この流体圧負荷の難点を補なうために遠心力で流体に大きな加速度を与えることにより，見掛け上比重を大きくする方法が実験的には極めて有効な手段であると考えられる。しかし応力凍結法による光弾性実験では，“常温——凍結温度（一般の材料では 100°～125°C）——常温”と云う凍結サイクルを経過する全域にわたっての連続的な負荷が望ましい。しかし常温で液体化している物体では，遠心力負荷を与えるための回転の初期に漏洩しない方法を採ることが，実際には極めて困難であるので，結局，表—1，表—2，のような物理的性質をもった，Micro-Wax あるいは Straight Asphalt を負荷物体として採用した。この負荷法を用いることによってはほ理想的な液体圧負荷時の応力を凍結して所要の応力を求めることができるが，供試体材料に Araldite[3)4)] を用いれば実際のダムとの関係は

実際の場合：

水の比重／コンクリートの比重 ≒ 1/2.3

実験の場合

表—1 液体圧負荷物体 Micro-Wax の特性

針入度	25°C にて	50/60
粘度	100°C にて	Saybolt (universal) 85/100
溶融点		77°C
比重	15°C, 0.88;	80°C, 0.82
	100°C, 0.80;	120°C, 0.78
分解または蒸発減量	120°C にて	0.1 %/hr

表—2 液体圧負荷物体 Straight-Asphalt No.4 の特性

針入度	25°C にて (J.I.S)	80mm
粘度	25°C にて	12×10^9 poise
軟化点	(R.B)	440°C
比重	25°C 1.018;	120°C, 0.958
蒸発減量	165°C にて	0.61%
歴青量		99.76%

Micro-Wax の比重／Araldite の比重 $\fallingdotseq 0.78/1.20 = 1/1.54$

Straight Asphalt の比重／Araldite の比重 $\fallingdotseq 0.96/1.20 = 1/1.25$

であるから，したがってこの場合の硬結応力は実際の応力状態に対応していないのでつぎのような段階の操作を行う必要がある。

1) Araldite 自重のみによる応力の測定
2) Micro-Wax あるいは Straight Asphalt 液体圧負荷時の応力測定
3) 2)の測定応力より1)の測定応力を取り去り，液体圧のみによる応力を求める。
4) 1)および3)により求めた応力値を実際の応力に換算する。
5) 4)により求めた二つの応力値を加え合わせる

ただしこの場合実物と模型供試体との応力関係は，つぎの式で表わされる。

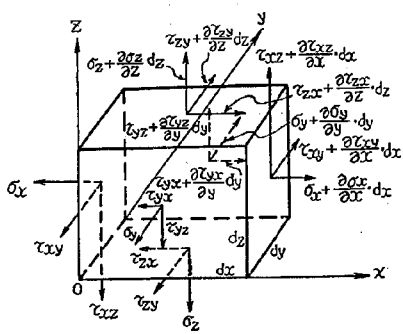
$$\frac{\sigma_p}{\sigma_m} = \frac{k_p}{k_m}, \quad \frac{\gamma_p}{\gamma_m}, \quad S \cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

ただし *Suffix* p, m はそれぞれ実物および模型に対するもの，S は実物と模型との比である。

3　温度応力の測定法 [5]

(1) M. A. Biot の理論の三次元問題への拡張

ここに取扱う温度応力とは，定常温度状態における温度応力である。本測定法の理論に対する提唱者は M. A. Biot である。Biot は保存力を受ける二次元物体の応力は，保存力を外荷重に置換することにより保存力のない物体と同様に求めうることを理論的に導き[2] 本理論は定常状態の温度応力に対しても適用しうることを示した。しかし保存力の外荷重置換はさらに三次元問題にもつぎのように適用しうることを証明することができる。すなわち今図—1.のように直角座標 x, y, z を取り，保存力として物体力 X, Y, Z を考え



図—1

$$X_1 = -\frac{\partial V_1}{\partial x}, \quad Y_1 = -\frac{\partial V_1}{\partial y}, \quad Z_1 = -\frac{\partial V_1}{\partial z}$$

と表わせば，x, y, z 各方向の釣合の式は

$$\left.\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_z}{\partial y} + \frac{\partial \tau_y}{\partial z} - \frac{\partial V_1}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_x}{\partial z} + \frac{\partial \tau_z}{\partial x} - \frac{\partial V_1}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_y}{\partial x} + \frac{\partial \tau_x}{\partial y} - \frac{\partial V_1}{\partial z} = 0 \end{aligned}\right\} \quad (2)$$

また V_1 は $\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right) V_1 = 0$

を満足する。今 *Neuber* の応力関数 F および三つの補助関数を Φ_1, Φ_2, Φ_3 とし x, y, z 各方向の変位 ξ, η, ρ を

$$\left.\begin{aligned} 2G\xi = -\frac{\partial F}{\partial x} + 2\alpha\Phi_1 \\ 2G\eta = -\frac{\partial F}{\partial y} + 2\alpha\Phi_2 \\ 2G\rho = -\frac{\partial F}{\partial z} + 2\alpha\Phi_3 \end{aligned}\right\} \quad (3)$$

とおく。ただし G は剪断弾性係数，α は常数にして，補助関数，Φ_1, Φ_2, Φ_3 は調和関数である。すなわち

$$\triangle\Phi_1 = \triangle\Phi_2 = \triangle\Phi_3 = 0$$

しかるときは，剪断応力 τ_z, τ_x, τ_y はつぎのようになる。

$$\left.\begin{aligned} \tau_z &= G\left(\frac{\partial \xi}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial x}\right) = -\frac{\partial^2 F}{\partial x, \partial y} + \alpha\left(\frac{\partial \Phi_1}{\partial y} + \frac{\partial \Phi_2}{\partial x}\right) \\ \tau_x &= G\left(\frac{\partial \eta}{\partial z} + \frac{\partial \tau}{\partial y}\right) = -\frac{\partial^2 F}{\partial y, \partial z} + \alpha\left(\frac{\partial \Phi_2}{\partial z} + \frac{\partial \Phi_3}{\partial y}\right) \\ \tau_y &= G\left(\frac{\partial \tau}{\partial x} + \frac{\partial \xi}{\partial z}\right) = -\frac{\partial^2 F}{\partial z, \partial x} + \alpha\left(\frac{\partial \Phi_3}{\partial x} + \frac{\partial \Phi_1}{\partial z}\right) \end{aligned}\right\} \quad (4)$$

(3)の各式を(1)の各式に代入すれば

$$\frac{\partial}{\partial x}\sigma_x - \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 F}{\partial z^2} + \alpha\left(-\frac{\partial \Phi_1}{\partial x} + \frac{\partial \Phi_2}{\partial y} + \frac{\partial \Phi_3}{\partial z}\right) - V_1 = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial y}\sigma_y - \frac{\partial^2 F}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} + \alpha\left(-\frac{\partial \Phi_2}{\partial y} + \frac{\partial \Phi_3}{\partial z} + \frac{\partial \Phi_1}{\partial x}\right) - V_1 = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial z}\sigma_z - \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} + \alpha\left(-\frac{\partial \Phi_3}{\partial z} + \frac{\partial \Phi_1}{\partial \lambda} + \frac{\partial \Phi_2}{\partial y}\right) - V_1 = 0$$

となり，したがってつぎのような応力成分がえられる。

$$\left.\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial z^2} + \alpha\left(\frac{\partial \Phi_1}{\partial x} - \frac{\partial \Phi_2}{\partial y} - \frac{\partial \Phi_3}{\partial z}\right) + V_1 = \sigma_x' + V_1 \\ \sigma_y &= \frac{\partial^2 F}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} + \alpha\left(\frac{\partial \Phi_2}{\partial y} - \frac{\partial \Phi_3}{\partial z} - \frac{\partial \Phi_1}{\partial x}\right) + V_1 = \sigma_y' + V_1 \\ \sigma_z &= \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} + \alpha\left(\frac{\partial \Phi_3}{\partial z} - \frac{\partial \Phi_1}{\partial x} - \frac{\partial \Phi_2}{\partial y}\right) + V_1 = \sigma_z' + V_1 \end{aligned}\right\} \cdots\cdots (5\text{-}1)$$

$$\tau_z = \tau_z', \quad \tau_x = \tau_x', \quad \tau_y = \tau_y' \quad (5\text{-}2)$$

ただし σ_x', σ_y', σ_z', τ_z', τ_y', τ_x' は物体力 X_1, Y_1, Z_1 が作用しない場合の応力である。

境界条件

外圧力 p の xyz 方向成分を $p_x\ p_y\ p_z$ とし，p の方向余弦を $l\ m\ n$ とすれば境界面を有する三角四面体の要素の釣合よりつぎのような境界条件をうる。

x方向：$-p_x+\sigma_x\cdot l+\tau_z\cdot m+\tau_y\cdot n=0$

y方向：$-p_y+\sigma_y\cdot m+\tau_x\cdot n+\tau_z\cdot l=0$

z方向：$-p_z+\sigma_z\cdot n+\tau_y\cdot l+\tau_x\cdot m=0$

したがって上の3条件に (5-1) (5-2) を代入すれば

$$\left.\begin{aligned} &l\cdot\sigma_x'+m\cdot\tau_z'+n\cdot\tau_y'=p_x-l\cdot\overline{V}_1\\ &m\cdot\sigma_y'+n\cdot\tau_x'+l\cdot\tau_z'=p_y-m\cdot\overline{V}_1\\ &n\cdot\sigma_z'+l\cdot\tau_y'+m\cdot\tau_x'=p_z-n\cdot\overline{V}_1 \end{aligned}\right\}\cdots(6)$$

となる。ただし $\overline{V}_1$ は境界部における物体力に対応するものである。上の三つの境界条件は外圧力 p $(l\,m\,n)$ の代りに $p_x-l\overline{V}_1$

$p_y-m\overline{V}_1$

$p_z-n\overline{V}_1$

の外圧力が物体力のない構造物に作用した場合の境界条件とも考えられる。したがって三次元の場合も物体力を外荷重に置換できる。つぎに定常温度状態における物体の歪状況を考えるに，温度 θ は

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2}+\frac{\partial^2}{\partial y^2}+\frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)\theta=0$$

を満足する。今 K を熱膨脹係数とすれば，温度歪 ε は

$$\varepsilon=K\theta$$

したがって熱膨脹に伴う物体の附加容積力 $X_2\ Y_2\ Z_2$ は

$$\left.\begin{aligned} X_2&=-\frac{E}{1-2\nu},\ \frac{\partial\varepsilon}{\partial x}=-\frac{\partial V_2}{\partial x}\\ Y_2&=-\frac{E}{1-2\nu},\ \frac{\partial\varepsilon}{\partial y}=-\frac{\partial V_2}{\partial y}\\ Z_2&=-\frac{E}{1-2\nu},\ \frac{\partial\varepsilon}{\partial z}=-\frac{\partial V_2}{\partial z} \end{aligned}\right\}\quad(7)$$

と表わすことができる。ただし ν は *Poissions ratio* である。よって定常状態の温度変化に伴う附加容積力の場合も，前記物体力の場合と同様に外圧置換が可能となり，温度応力を求めることができる。

(2) 温度応力の測定法

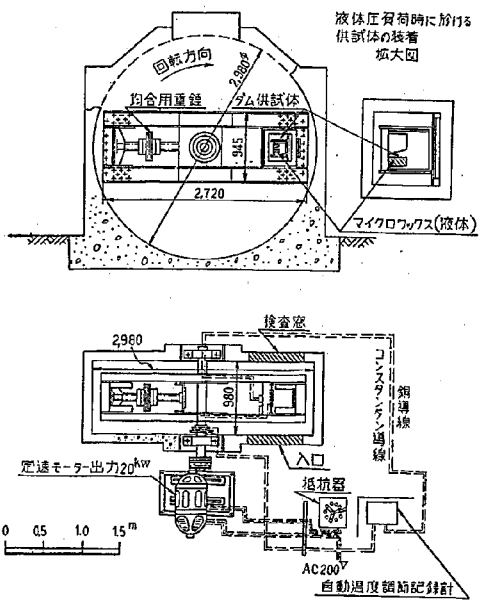
温度応力を測定する場合には，物体の周辺部に温度分布に対応した負荷を加えれば良いことになる。ダムの場合，上下流両面の温度分布がほぼ一様分布と見なしうる場合には近似的に遠心力式負荷法により温度応力分布の測定が可能となる。

4　光弾性実験用大型遠心力式負荷装置

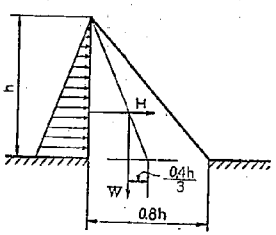
(1) 本装置の概要

ダムのような重量構造物の自重による応力を光弾性実験により求める方法としては供試体を等速回転させる，いわゆる遠心力利用による方法が用いられてきたが，本報告における装置では同方法を実用問題解決に便利なように大型化し，さらにその応用として自重による応力のみならず，ダムの場合水圧負荷時の応力をも求めうることを目的としたものである。

本装置は大型の三次元的な光弾性実験用模型の応力凍結を可能にするため，図－2に示すように電気炉回転式を採用し，炉内の加熱および温度の調節は回転軸に取りつけた Slip Ring を通して行った。今回転軸より電気炉中心（供試体中心）までの距離 r を1mとし，図－3のような断面を有するダムの模型について実験を行うものとすれば，基礎の影響を考慮しなければ自重Wおよび水圧力Hにより底部に生ずる応力 σ_W, σ_H はつぎの



図－2　大型遠心力式負荷装置(光弾性実験用)



図－3

ようになる。

$$\sigma_W = -0.4\,\gamma Wh^2\left(\frac{1}{0.8h} \pm \frac{0.4h}{3} \times \frac{6}{(0.8h)^2}\right)$$

$$= \begin{cases} \gamma Wh \cdots\cdots \text{上流側} \\ 0 \cdots\cdots \text{下流側} \end{cases}$$

$$\sigma_H = \pm \frac{\gamma_H h}{0.64} \cdots\cdots \text{上流側} \cdots\cdots \text{下流側}$$

したがって，荷重倍率を

$$k = \frac{1}{g},\ \frac{V^2}{r}$$

槇型および液体の比重をそれぞれ 1.2, 0.8 とすれば

$$\gamma_W = 1.2k\ gr/cm^3 = 1.2k \times 10^{-6}\ kg/mm^3$$

$$\gamma_H = 0.8k \times 10^{-6}\ kg/mm^3$$

となる。

よって，$h = 50mm$ とすれば

$$\sigma_W = \begin{cases} -1.2k \times 10^{-6} \times 50 = -6k \times 10^{-5}\ kg/cm^2 \cdots \text{上流側} \\ 0 \cdots \text{下流側} \end{cases}$$

$$\sigma_H = \pm \frac{0.8k \times 10^{-6} \times 50}{0.64} = \pm 6.25k \times 10^{-5}\ kg/mm^2 \begin{matrix} \cdots \text{上流側} \\ \cdots \text{下流側} \end{matrix}$$

となり，全体としての応力はつぎのようになる。

$$\sigma_W + \sigma_H = (-6 + 6.25)k \times 10^{-5} = 0.25k \times 10^{-5}\ kg/mm^2 \quad \cdots\cdots \text{上流側}$$

$$= 6.25k \times 10^{-5}\ kg/mm^2 \quad \cdots\cdots \text{下流側}$$

つぎに光弾性縞次数 n と二つの主応力 σ_1, σ_2 との関係は，$n = \alpha t\,(\sigma_1 - \sigma_2)$ であるから，供試体の *Slice*（切断薄片）厚さ $t = 5\ mm$，光弾性感度 $\alpha \fallingdotseq 40 kg^{-1} mm$ とすれば，自重と液体圧負荷時の場合

$$\left.\begin{aligned} \text{上流側：}\ n &= \alpha t\,[\sigma_1 - \sigma_2] = 200\,[\sigma_W + \sigma_H + \gamma_H h] \\ &= 8.5k \times 10^{-3} \\ \text{下流側：}\ n &= \alpha t\,[\sigma_1 - \sigma_2] = 200\,[\sigma_W + \sigma_H] \\ &= 1.25k \times 10^{-2} \end{aligned}\right\} \quad (8)$$

ただし $k = \dfrac{1}{g},\ \dfrac{V^2}{r} = \dfrac{(2N\pi)^2}{g} \fallingdotseq \dfrac{N^2 r}{90g} \fallingdotseq \left(\dfrac{N}{30}\right)^2$ (9)

N：電気炉（供試体）の回転数（$r\,p\,m$）

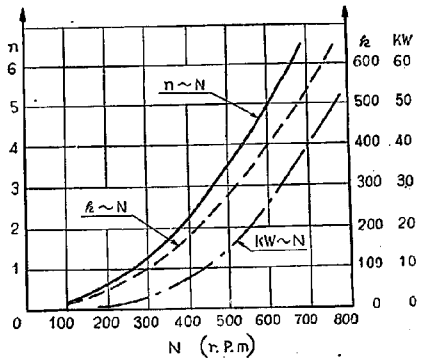
r：$100m$

g：重力の加速度

となる。

（8）（9）式より下流側底部について $n \sim N$, $k \sim N$ の関係を求めて見れば 図—4. の実線と点線のようになる。一方，回転室内空気の回転によって生ずる円周壁面と空気のマサツによる回転抵抗のために要する動力は，図—4 の $N \sim KW$（鎖線）のようになる。これらにより本装置の諸元はつぎのようにした。

動力：200V, 20 KW, 定速モーター（50 *cycle* にて 945 $r\,p\,m$）



図—4

電気炉の回転数：$N = 450, 500, 550, 600,\ r\,p\,m$（プーリーにより減速）

回転軸中心より供試体中心までの距離 r：　$100cm$

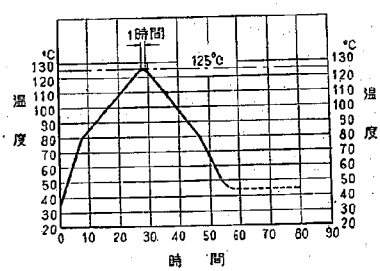
電気炉々内大きさ：　$50cm \times 30cm \times 28cm$

電気炉回転室大きさ：　直径 $300cm$, 巾 $100cm$

試験結果からみて，これら機能設計における見積りは，ほぼ満足すべきものであった。

（2）　本装置における温度制御方法

本装置は大型槇型の応力凍結を目的とするので，図—5 の実線のようなきわめて緩慢な凍結サイクルを予想し



図—5　　凍結サイクル

なければならない。したがって必要とする電気炉内の温度昇降率は

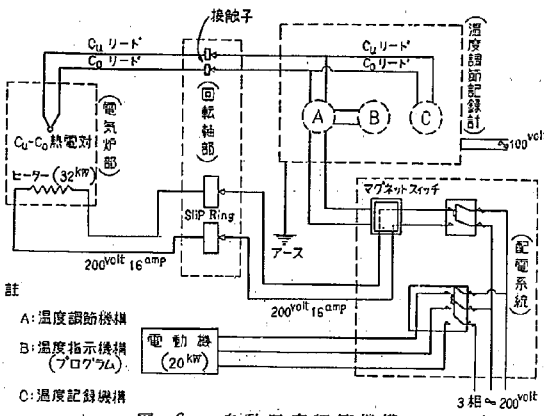
常温—80°C 間では 5°C/hr

80°C—125°C 間では 2.5°C/hr

というものになった。

電気炉は対流と輻射による加熱方式を併用して，最高温度を 200°C と考えた結果，前記の炉内容積に対し，3.2KW の電熱が必要となった。

電気炉内温度の測定には，低温特性の良い銅—コンスタンタン熱電対を用い，温度補償回路と回転軸端にある空冷式温度補償 *Slip Ring* によって，熱電対と平野式電子管自動温度調節記録計を結んだ。この記録計は "温



図—6　自動温度調節機構

度調節"，"温度指示"，"温度記録" の三つの部分からなっている。

本装置における自動温度調節記録機構は図—6に示すとおりである。

なお試験結果からみて，改良すべき二三の点はつぎのとおりである。

1) 本来滑らかな温度昇降率をねらいとしたが，常時±3°C前後の保温材による過渡的温度変動が，約40分を1サイクルとして，行なわれている。

2) 温度補償用 *Slip Ring* の材質のわずかな差のために完全な補償回路を構成せず，記録計は約5°C温度を高く記録する。

3) 回転負荷終期には調節計の指示にかかわりなく，空気のマサツによる発熱により常温より約15°C回転室内温度の上昇がみられる。

(3) 実験法の検証

図—7 (*a*) に示すような円筒水槽の *Micro—Wax* 液体圧と自重負荷による試験を行なった。

模型材料：　*Araldite B type*

比重：　1.20　　(120°C にて)

光弾性感度：　$38.5\,kg^{-1}\,mm$

液体圧負荷物体：　*Micro—Wax*

比重：　0.78　　(120°C にて)

模型寸法

円筒の径：　47*mm*

円筒の高さ：　100*mm*

円筒の肉厚：　5.0*mm*

液　　深：　100*mm*

遠心負荷時における諸要素

回転時平均半径：　987*mm*(±50*mm*)

回転数　：　390*rpm*

荷重負荷倍率　：　169.4

つぎに実験結果と計算結果との比較を示す。計算は薄肉円形水槽の理論による。すなわち

鉛直方向曲げモーメント

$$Mx=\frac{\rho a t}{\sqrt{12(1-\nu^2)}}\left\{\left(\frac{1}{K}-h\right)e^{-kx}\cos k x+he^{-kx}\sin\kappa x\right\} \quad (10)$$

水平方向応力

$$T_p=\rho a\left(h-x-he^{-\kappa x}\cos\kappa x+\left(\frac{1}{K}-h\right)e^{-\kappa x}\sin\kappa x\right) \quad (11)$$

ただし

ρ：液体の単重($=k\times0.78\times10^{-3}kg/cm^3$, k：負荷倍率)

a：円筒の半径

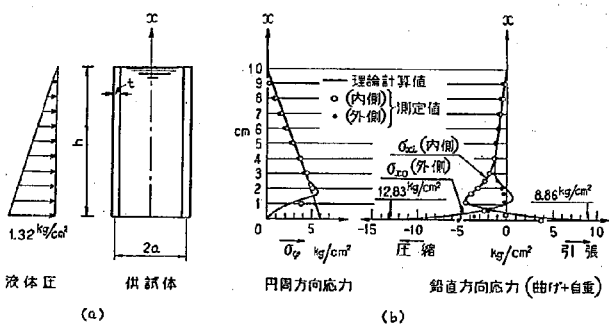
t：円筒の肉厚

h：円筒の高さ

ν：ポアッソン比

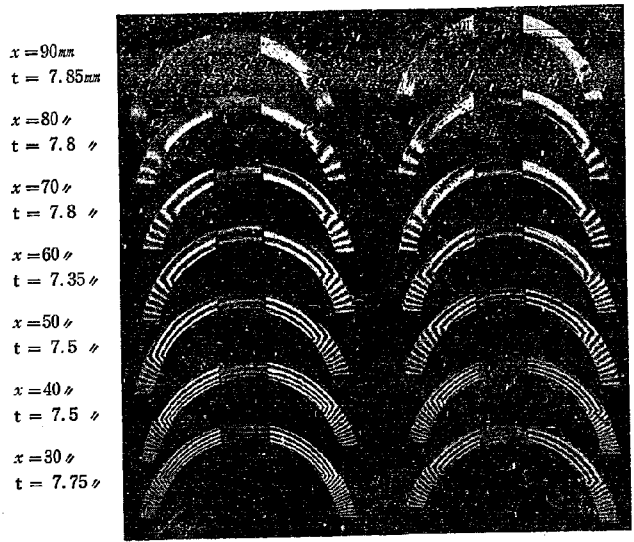
$$\kappa^4:=\frac{3}{a^2t^2}(1-\nu^2)$$

によって，図—7 (*b*) ならびに写真のような結果を得た。

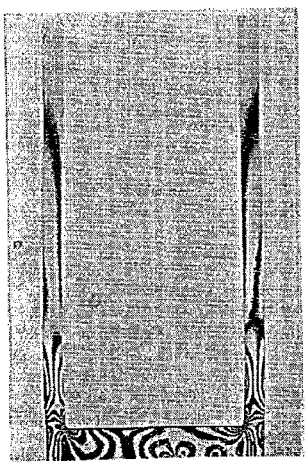


図—7

数値計算における仮定と供試体における境界条件の相違により，底盤と壁体との取り付け部で応力値は二者の間に差違を示したが，その他の部分では極めて良い一致を示している。



写真—1　水平方向スライス　光弾性縞写真（暗視野）



写真－2　鉛直方向 スライス
光弾性縞写真（明視野）

スライスの厚さ

x ＝ 100㎜	で	3.1 ㎜
x ＝ 50㎜	で	2.95 ㎜
x ＝ 0	で	3.05 ㎜

参考文献

1) 高田，貞升，曽根：光弾性による重量構造物の応力測定法について（2），建設省土木研究所報告，第92号，昭和31年2月

2) M.A.Biot：Distributed Gravity and Temperature Loading in Two-dimensional Elasticty Replaced by Boundary pressures and Dislocations,
Journal of Applied Mechanics June, 1935

3) 高田，貞升，：光弾性によるアーチダムの応力測定
建設省土木研究所報告，第95号　昭和31年6月

4) 高田，栗林，：光弾性実験法概説（I）1959
建設省土木研究所　構造研究室

5) 高田，：模型実験によるダムの一応力解析法
第12回建設省直轄技術研究会資料　昭和33年11月

6) その他

i）高田，栗林，：光弾実験用として試作せる二装置
土木学会第14回年次学術講演会講演概要，第1部会，39頁，昭和34年6月

ii）高田，品川：光弾性模型実験によるダムの新らしい応力解析法，土木技術資料　Vol. 1, No. 3
昭和34年3月

iii）西田正孝：応力測定法

iV）応力測定技術研究会編：応力測定法

V）Frocht：　Photo-elasticity　I，II

洪水流出計算機に関する研究 (1)

——流域・河道用洪水流出計算機の基本設計——

(昭和 35 年 1 月)

木 村 俊 晃*

要 旨

近時，河川計画や洪水予報のために，降雨からの洪水ハイドログラフの推定と追跡を迅速に行なう技術が強く要請され，すでに，わが国でも，水理学的基礎方程式による直接アナログ方式の計算機が二，三研究されているが，いまだ十分な実用性を有しているとはいえないようである。

この研究は貯留関数法の水文学的方程式を基礎とする電子管式微分解析器方式のアナログ洪水流出計算機の開発とその実際問題への応用を目的とするもので，ここでは，流域および河道用計算機の基本的設計についてのべた。

目 次

まえがき……(2)
1. 基本式と演算方式……(2)
(1) 一般的考察……(2)
(2) 基 本 式……(3)
(a) 洪水曲線の変形……(3)
(b) 水量の連続性……(3)
(c) 洪水流出計算機の基本式……(3)
(3) 演 算 方 式……(4)
(a) アナログ・コンピューター……(4)
(b) ディジタル・コンピューター……(4)
(c) 洪水流出計算機の演算方式……(4)
2. 洪水流出計算機の基本的構成……(5)
(1) 解 析 器……(5)
(2) 演 算 器……(5)
3. 仕様の主な問題点……(6)
(1) 演 算 時 間 (τ_c) ……(6)
(2) 任意時間関数発生器……(6)
(3) 任意関数発生器……(6)
(4) 解 指 示 器……(6)
(5) 解 記 録 器……(6)
(6) 各要素の基本的構成……(7)
4. 演算要素の定数の決定……(7)
(1) 解析器の定数……(7)
(2) 演算器の定数……(9)
あとがき……(9)
参考文献……(10)
〔附録－1〕洪水流出計算機仕様書（建設省土木研究所）……(11)
〔附録－2〕洪水流出計算機見積仕様書（日立製作所）……(14)

* 河川部 水文研究室長 建設技官

まえがき

近時，わが国でも，洪水調節計画が広く実施されるようになり，また，内水処理の問題が重視されるようになって，河川の高水流量計画を従来のような定流的な考え方ではなく，不定流的に行なうことが要求され，河川の流域・河道および貯水池における洪水追跡法の確立が河川工学上の重要課題となっている。

一方，昭和33年の狩野川台風，昭和34年の伊勢湾台風による洪水や高潮によって生じた多数の人命被害は，洪水予報の重要性をますます認識させたのであるが，この場合には，降雨流出の推定や洪水追跡の計算を迅速に行なうことが要求される。

これらの問題を解決するためには，降雨流出の推定法および洪水の追跡法の確立が必要であることはもちろんであるが，さらに，迅速・確実な計算法を研究しなければならない。

この研究は，これらの点にかんがみ，最近急速に発展してきた電子管式アナログ微分解析器を応用して，実用的な洪水追跡計算機を開発するとともに，その河川計画への応用について研究しようとするもので，この報告は，その第1報として，流域・河道用計算機の基本設計についてのべたものである。

1. 基本式と演算方式

(1) 一般的考察

洪水流量曲線の推定または追跡に関する問題は，

i）流域における降雨流出

ii）河道における洪水追跡

の二つの部分からなり，従来，この両者は一般には別個の問題として取り扱われている。これらの現象は前者が面的であり，後者が線的であるだけでなく，雨水の流出現象はたとえば損失現象などの複雑な現象を附加的に含んでいるのであるが，問題の支配的本質は非常に緩慢な非定流であるという点で同一である。したがって，Horton, R.E. [1941][1], Clark, C.O. [1945][2], 藤堀博暁 [1952][3], 著者 [1956][4] などは，これらの両者を共通の方法で取り扱わうとしており，このことはこれらの問題の計算機化にあたってとくに重視されるのであって，後述する各種の演算装置の研究はほとんどのものが一定の方式で両者を処理することを意途している。ここでは，以下にのべる洪水流出計算機の基礎とした貯留関数法に従がって，流域および河道における洪水流量曲線の追跡問題を一括して洪水流出追跡ということにする。

一般に，現象の自動計算機による計算にあたっては，つねに，問題を理論式または計算法によってモデル化する必要があり，それらの基本式などを演算する特殊目的の計算機を組立てるか，または，その演算を汎用計算機で実施することとなるのである。後者の場合は一見とくに研究を要しないようにみえるが，計算機の能力には一定の限界があるから，その応用研究が必要であり，逆に，計算機の能力を前提とした計算法の研究もありうるわけである。したがって，問題の自動計算機による処理にあたっての問題点は基本式と演算方式である。以

表－1 計算機による洪水の研究

No.	著者	年	適用範囲	基本式	演算方式
1	McCarthy, G.T.[5]	1940	貯水池	貯留法	機械式微分解析器
2	Linsley, R. K.[6]	1948	流域，河道，貯水池	貯留法 (Muskingum法)	電気式低速度型直接アナログ
3	石原藤次郎[7]	1955	流域，河道，貯水池	理論法（連水式）	電子管式低速度型直接アナログ
4	Lawler, E. A.[8]	1958	流域	単位図法	デイジ・コン，Burroughs E101
5	Kohler, M. A.[9]	〃	流域，河道，貯水池	貯留法 (Muskiugum法)	機械式直接アナログ
6	Rockwood, D. M.[10]	〃	流域，河道，貯水池	貯留法（連続追跡）	デイジ・コン，IBM－650
7	Isaacson, E.[11]	〃	河道，貯水池	理論法(不定流の式)	デイジ・コン，UNIVAC
8	伊藤剛[12]	1959	河道，感潮区域	理論法(不定流の式)	電子管式繰返型直接アナログ
9	木村俊晃[13]	〃	流域，河道，貯水池	貯留法(貯留関数法)	電子管式低速度型微分解析器

下，この観点から洪水流出計算機の位置ずけを行なうことにする。

なお，近時，アナログおよびディジタル計算機の発展にともない，計算機による洪水の研究が数多く行なわれるようになってきているが，参考のため，アメリカおよび日本で，従来行なわれた研究を文献で調らべた結果を分類すると，表－1のとおりである。

(2) 基本式

洪水流出追跡における主要な問題点は，つぎの二つである。

a. 洪水流量曲線の変形の問題

b. 水量の連続性の問題

(a) 洪水曲線の変形

これを取り扱う方法として，近時広く実施されているものは，つぎの三つに大別できよう。

i. 単位図による方法

線型現象における重ね合わせの原理を応用したもので，Sherman, L. K. [1932] が提案して以来，アメリカでは広く使用されており，わが国でも多くの研究があるが，近時，石原藤次郎ら [1956][14] の研究によって，降雨条件によって単位図が変動することが示されているように，わが国の洪水の非線型性が問題となり，佐藤清一ら [1954][15] は流出関数によってその変動を処理することを研究している。

ii. 貯留による方法

連続方程式と貯留量・流量関係式によって解くもので，貯水池については古くから利用されていたのであるが，洪水流出についての研究は Horton, R. E.[1936][16] に端を発し，McCarthy, G. T. [1938][17] による Muskingum 法がよく知られている。この貯留による方法は非線型性の強い洪水を取り扱うのに適しており，洪水流出計算機の基礎とした著者の貯留関数法はこれに属する。

iii. 理論式による方法

連続方程式と不定流の運動方程式を数値的に解くもので，Thomas, H. A. [1940][18]，中嶋義美 [1951][19] などの研究があり，近時，ディジタル自動計算機の利用によって発展の傾向にある。運動方程式は，各項の省略の程度によって，各種の段階を生ずる。最近では，摩擦項の採用のみで十分であるとする木下武雄 [1959][20] の研究がある。

なお，岩垣雄一 [1955][21] や末石富太郎 [1955][22] などの特性曲線法は水理学的考察に基礎をおく理論法の一つとして注目される。

(b) 水量の連続性

流入と流出のボリウムの連続関係の問題であって，従来から降雨流出で問題になっているいわゆる損失現象もこれに含まれるが，さらに広い意味では，河道の洪水追跡における横流入の問題や流入量や流出量がかならずしも全部は測定しえないことから生ずる測定値の代表性の問題も含まれるべきであるが，従来はかならずしもこのように広い立場からは処理されていない。

i. 流出係数による方法（流域）

流出量と流入量の比すなわち流出率を基本とするもので，近時，中安米蔵 [1951][23] の流出率，立神弘洋 [1954][24] の流出指示率などによって合理化されている。

ii. 浸透能による方法（流域）

本来，地表面における浸透現象に基礎をおくもので，米国では広く使用されており，Horton, R. E.[1933][25] などの数多くの研究があり，わが国でも，石原藤次郎ら [1956][26]，速水頌一郎 [1956][27]，竹内俊雄 [1959][28] などによって支持されている。

iii. Co-axial 図表による方法（流域）

降雨量・流出量・初期流量・通番号・降雨継続時間などの多くの変量の関係を直接に共軸図表で取り扱わうとするもので，Linsley, R. K. [1949][29]，竹内俊雄 [1959][30] などの研究がある。

iv. 横流入による方法（河道）

測定もしくは追跡した横流入を加算するものである。ただし，測定値のないいわゆる残流域を処理する方法ではない。

v. 流入係数による方法（流域および河道）

流入量群と流出量の水量の関係を損失・横流入・測定値の代表性などの広い立場から検討し，線型仮定を基礎として，流入群および流出の各測定値間の関係を取り扱わうとするもので，著者[31]の研究があり，洪水流出計算機はこれを基礎としている。

(c) 洪水流出計算機の基本式

この洪水流出計算機は，貯留関数・流入係数および遅滞時間による貯留関数法の基本式を採用した。その理論的・実験的根拠については，別に報告しており[32]，ここでは，たんに，基本式を示し，その特徴をのべるに止める。

貯留関数法の基本式はつぎのとおりである。

$$\sum_{j=1}^{n} f_j \cdot I_j = O_t + \varphi(O_t)\frac{dO_t}{dt} \quad \cdots\cdots(1)$$

$$O_t\ (t) = O\ (t+T_l) \quad \cdots\cdots(2)$$

ここに，

$I_j(t)$ ：流入量群（m³/sec）—各雨量計の雨量強度または本支川の流量

$O(t)$ ：流出量（m³/sec）

f_j ：流入係数群（無次元）—各流入量に対応する係数で，1洪水期間中は一定値と仮定する。

$\varphi(O_t)$：貯留関数（hr）—貯留量 $S_t=\int\varphi(O_t)\,dO_t$ と流量 O_t の関係を示す関数で，洪水ごとに定まるものと仮定する。

t　：時間（hr）

T_t　：遅滞時間（hr）—(2)式で定義されるものとし，洪水ごとに一定値と仮定する。

この方法は，与えられた $I_j(t)$ および $O(t)$ の実測資料を用いて，上式のパラメター f_j, φ, T_t を洪水ごとに解析し，つぎに，それを用いて，$I_j(t)$ から $O(t)$ を推算するのである。各パラメターは流域ごとにはもちろん，洪水ごとにも変動することが予想されるが，その場合には，それらの変動と洪水初期の保湿状態・降雨・流域・流路などの諸条件との関係を解析する必要がある。

(1)および(2)式の十分な精度での成立は流域または河道区間の大きさならびに流入数 j の選定が適当であることを前提条件とするのであるが，その特徴はつぎのとおりである。

i. 洪水の線型性を仮定していない。このことは，わが国の洪水にとっては，とくに必要であることが最近の研究で明らかになっている。

ii. 流入係数の採用によって，降雨流出にあっては洪水流出分，河道の洪水追跡では残流域からの横流入の近似値を容易に推定できる。

iii. 基底流量は初期流量に等しく，一定とする。これによって，流出成分の分離は簡明に行なわれる。

iv. パラメターの解析は $I_j(t)$ および $O(t)$ の実測資料のみによって行なう。方法は試算法であるが，すべてのパラメターが同時に一義的に決定される。

v. 流量資料が洪水頂点附近のみの場合でも利用できる。このことは，指定水位以下の資料が少ないわが国の既往洪水については，有効に利用できる資料数を増加しうることになる。

vi. 流域・河道および貯水池の洪水のいずれに対しても適用することができ，自然河川流域の分割と代表流入 I_j の選定に当って融通性に富んでいる。

vii. 計算が簡単で，デイジタル計算機を利用する場合も有利であるが，とくに，基本式が簡単な常微分方程式で，その形が電子管式微分解析器の基本回路と同じなので，アナログ・コンピューターの利用に適しており，水系網を容易に回路化できる。

viii. 演算のために，上流端の境界条件と下流端の初期条件（多数区間の場合は各区間の下流端での初期条件）のみしか必要としない。したがって，追跡計算を上流から下流に向って容易に実施できる。

(3) 演算方式

近時，いちじるしく発展してきた自動計算機はつぎの二つに大別される。

a. アナログ型

b. デイジタル型

(a) アナログ・コンピューター

長さ・回転角・電圧・電流などの物理量によって，目的の現象の量を模擬して計算を行なうものであり，つぎの三つの観点からさらに細分類される。

i. 機械・電気の別

機械式，電気機械式，電気式（電気式・電子管式）

ii. 直接・間接の別

直接アナログ，微分解析器

iii. 演算速度

高速度型（繰り返えし型），低速度型（直流型）

(b) デイジタル・コンピューター

計算のプログラムをみずから制御しつつ，数値的に計算を行なう自動計算機で，つぎのような観点から細分類される。

i. 用途

事務用，科学用

ii. 演算素子

トランジスター，パラメトロン，真空管，リレー

iii. 内部記憶装置

なし（小型），磁気ドラム（中型），磁気コアー（大型）

(c) 洪水流出計算機の演算方式

この洪水流出計算機では，演算方式として，電子管式・低速度型・アナログ微分解析器を採用したが，その理由を列挙すれば，つぎのとおりである。

a. 基本式が電子管式アナログ微分解析器の基本回路と一致していて，その利用に適している。

b. わが国の最大級の河川の場合でも，経費はデイジタル計算機よりは安価であると予想され，とくに，普通程度の河川やダム管理用程度の場合ははるかに安価で，現場での利用に適している。

c. 計算を，デイジタル方式では時間列で行なうのに対して，アナログ方式では空間網で行なうから，河川水系網が複雑な場合でも，演算所要時間は増加しない。

d. プログラミングは，デイジタル方式ではやや難解であるが，アナログ方式では皿の比例換算のみで容易である。

e. 貯留関数法では，パラメターを解析する際に，試算法を用いており，貯留関数 φ を図化してその適否を判定する必要があるが，アナログ方式では，この操作を直接かつ迅速に行なうことができる。

f. 演算の際，解の表現がアナログ方式の方が直感的である。

g. 安定性の点では機械式もしくは電気機械式アナログの方が優れているが，複雑な河川水系網の構成には電気アナログが適しており，また，将来の発展性の点でも優れている。

h. 微分解析器は，汎用計算機としてその方式が固定し，既製品化しつつあり，河川ごとの融通性，取り扱いの難易，安定性，保守の難易などの諸点で直接アナログより優れている。

i. 低速度型は，解の記録にペン書オッシログラフを使用することができ，精度も普通1％，最高 0.1％であって，定量的問題に適しており，洪水流出の計算の精度に見合っている。

j. 基本式は非線型であるが，低速度型では，高速度型に比べて，任意時間関数発生器や任意関数発生器などの非線型要素の製作が容易である。

2. 洪水流出計算機の基本的構成

従来研究されたアナログ洪水計算機は，いずれも，すでに決定されたパラメターを設定して，流入量から流出量を推算することのみを目的としているが，実際には，実測資料からパラメターを解析することが作業の重要な部分を占め，かつ，困難な問題である。したがって，この洪水流出計算機には，解析器および演算器の機能をもたせるよう計画した。

すなわち，実測によって与えられる流域の降雨量と流出量または河道の上下流端の流量の時間曲線 $I_j(t)$ および $O(t)$ の資料によって，単位追跡区間ごとに，(1)および(2)式の流入係数群 f_j，貯留関数 $\varphi(O_t)$ および遅滞時間 T_l を解析し，決定するのが解析器であり，これらのパラメターを設定して，$I_j(t)$ から $O(t)$ を演算・記録するのが演算器である。ただし，後でのべるように，これらの各部はたがいに共用しており，機能の変更は接続コードの接続を変えることによって行なうよう計画した。

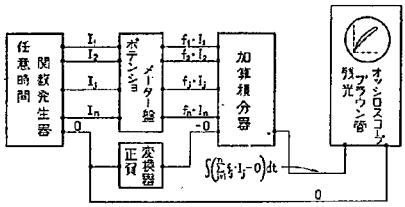
(1) 解析器

(1)式を変形して積分すると，

$$\int\left(\sum_{j=1}^{n} f_j \cdot I_j - O_l\right)dt = \int \varphi(O_l)dO_l + C \cdots\cdots\cdots\cdots (3)$$

となり，$(\Sigma f_j \cdot I_j - O_l)$ を時間で積分すれば，貯留関数 φ の O_l による積分関数がえられることがわかる。

したがって，任意時間関数発生器により，与えられた $I_j(t)$ および $O(t)$ を発生し，I_j にはポテンショメーターで f_j を乗じ，O_l は正負変換器で $-O_l$ として加算積分器の入力端子に加えれば，その出力として $\int\varphi(O_l)dO_l + C$ がえられる。これを解指示器の Y 軸に加え，また，O_l を X 軸に加えて，このリサージュ図形が一価関数となるまで，ポテンショメーターの調整および(2)式に相当する T_l 切換を行なって，試算的に，f_j および T_l を決定する。また，一価関数となったときの解指示器上の図形が $\varphi(O_l)$ を与えるから，これを写真か，または，X—Y レコーダーで記録する。



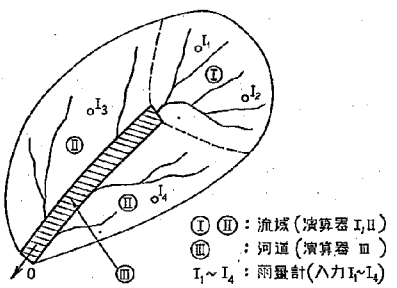
図—1　解析器のブロック・ダイヤグラム

解析器の基本的構成をブロック・ダイヤグラムで示すと，図—1のとおりである。

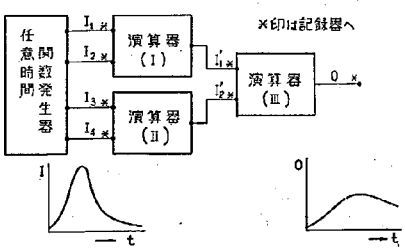
(2) 演算器

演算器は，解析器によって決定したパラメターを設定した演算器網を通じて，時間関数発生器で発生する降雨もしくは河道上流端の流量 $I_j(t)$ の入力波形を流出量 $O_l(t)$ に相当する出力波形に変形し，任意地点の流量曲線を解記録器で記録するものである。

演算回路は加算積分器および φ を設定する任意関数発生器によって構成され，各追跡区間に対応する単位演算回路の接続網を，河川流域の水系網や資料の状況に応じ



図—2　流域の一例



図—3　演算器のブロック・ダイヤグラムの一例

て，直列や並列に変更することによって，任意の水系を実現することが可能であり，たとえば，図—2のような流域分割に対応する回路をブロック・ダイヤグラムで示せば図—3のとおりである。

なお，f_j および φ はそれぞれポテンショメーターと

任意関数発生器で設定されるが，T_i については つぎのようにする。すなわち，各流入地点から流出地点に至る間に通過すべき単位追跡区間のT_i の合計を それぞれの流入量について考慮して発生するのである。たとえば，図—3の場合には，それぞれの区間の T_i を $T_{i\mathrm{I}}$，$T_{i\mathrm{II}}$，$T_{i\mathrm{III}}$ とすると，I_1 および I_2 については（$T_{i\mathrm{I}}+T_{i\mathrm{III}}$）を，$I_3$ および I_4 については（$T_{i\mathrm{II}}+T_{i\mathrm{III}}$）を考慮することとなり，$I_1'$ および I_2' の解については $T_{i\mathrm{III}}$ を考慮した結果がえられる。

3. 仕様の主な問題点

(1) 演算時間（τ_c）

演算時間はもっとも重要な仕様の一つであるが，つぎの観点から検討し，結局，後述する残光性ブラウン管の残光時間の関係から，5秒と決定した。

a. 解析器および演算器としての各部の共用を考慮して，演算時間は一定とする。

b. 演算精度・解の記録・任意時間関数の発生などの点を考慮して，なるべく低速とする。

c. 解指示器としてブラウン管オツシロスコープを使用できるようにする。

また，演算器として使用する場合，流入が降雨のときは，一定時間後に入力がゼロとなるが，降雨終了後も演算を継続することを目的として，任意時間関数発生器のみを1回の発生で停止するように制御し，解析器として使用する場合は，解指示器で解を継続的に示すことを目的として，時間関数の発生を繰返えすように制御することとした。なお，繰返えしの場合は，リセット時間を1秒とし，6秒ごとに5秒間の発生を繰返えす。

(2) 任意時間関数発生器

任意時間関数の発生装置は，アナログ・コンピューターの各要素の中でも，もっとも困難なもので，いまだ決定的方式に固定しておらず，つぎのような各種の方式が考案されている。

a. コミュテーターとポテンショメーターによる方式（低速用）

b. タップ付ポテンショメーターによる方式（低速用）

c. ブラウン管と光電管によるフォトフォーマー方式（高速・低速用）

d. 回転円筒とサーボ・モーターによる方式（低速用）

i. ポテンショメーターと導線

ii. ポテンショメーターと導電性インク

iii. 光電管とバランス機構

e. 模写電送装置を利用した方式

この洪水流出計算機では，つぎの点を考慮し，コミュテーター方式を採用することとした。

a. 所要の任意時間関数は同時に多数コ発生する必要があり，この点が最大の特徴であるが，この要求はコミュテーター方式によってもっとも容易に満足される。

b. 発生すべき関数は被積分関数であるから，階段関数で近似すれば十分である。

c. 関数形の変更を接続コードの差替えで容易に行なうことができる。

d. 技術的にも比較的容易で，経費も安価である。

発生関数の近似区間数は51×51とした。したがって，精度は2％である。しかし，上述したように，発生関数は被積分関数であるから，解における精度はさらに向上することが期待される。したがって，すでに実用されているところの，1近似区間ごとに1回転する副コミュテーターを用いて，階段を平滑化して折線近似とする方法は採用せず，機構の簡単化を計った。

なお，解析の場合の解を見やすくするために，線型演算回路を通った出力が所要の O_i となるような時間関数を発生することによって，O_i を平滑化することも可能である。

また，解析の際，試算の途中では，出力 $\int(\Sigma I_j-O_i)dt$ が過大となることが考えられるので，設定最大電圧を正規の$1/5$に減衰できるようにした。

(3) 任意関数発生器

演算の際，貯留関数 φ の設定に使用するもので，サーボ式のものもあるが，もっとも一般的な二極管・抵抗および電池による電子管式折線近似任意関数発生器を採用することとし，近似区間数は問題の精度と経費を考慮して6区間とした。なお，日立製作所は各区間がまったく独立に設定しうるものを製作している。

(4) 解指示器

解析の際の貯留関数 φ の解指示器としては，$X-Y$ レコーダーも考慮したが，解析計算は試算であって，消去が容易である必要があり，また，$X-Y$ レコーダーはわが国ではいまだ製品としての実績が少ないので，とりあえずブラウン管オツシロスコープを採用することとした。ただし，演算速度はなるべく低速度とし，かつ，解を継続して直視できるように，残光性のものを用い，また，十分の精度がえられるように直径は5″とした。

貯留関数 φ の最終解の記録は $X-Y$ レコーダーによることが望ましいが，とりあえずは写真による予定である。

なお，O_i についてはその一部分のみを拡大する必要があるので，X 軸については，任意の一定電圧を加算して，図形を正しく平行移動できる機構を附することとした。

(5) 解記録器

演算の際の O_i の解記録器としては，電磁オツシログラフも利用できるが，ただちに解が直視できて取り扱い

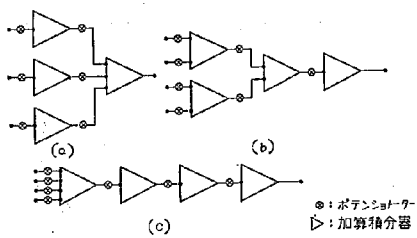
に手数を要しないペン書オツシログラフを採用し，流入量 I_j，流出量 O_l，貯留量 $S_l=\int\varphi(O_l)dO_l$ などの記録を同時にとることを考慮して，6チャンネルとした。

なお，O_l の解の符号は正または負の一方のみとなるので，記録紙の巾を有効に利用するために，ゼロ点の位置を記録紙の両端まで自由に移動できる機構を附することとした。

(3) 各要素の基本的構成

この計算機の基礎とした貯留関数法に関する水文学的研究の結果によると，特定の貯水池に注目するような場合を除けば，大部分の自然河川では，流域として図—2の状態を想定すれば十分であると考えられた。したがって，演算器は3台でよいわけであるが，日立製作所の既製品は増巾器および折線近似関数発生器がそれぞれ2台で一組となっており，奇数台数を使用することは不経済であることが明らかとなったので，演算器数は4台とした。

かくて，演算器の入力数は，図—4(a)の状態を想定して，最大のものが3コ，図—4(b)の状態を想定して，他の3台は2コとなるが，後述するように，外に O_l 用の入力を必要とするので，結局，入力数は4コのもの1台，3コのもの3台となる。ところで，演算に当って後



図—4　演算器の接続例

にのべる時間関数の発生数をフルに利用するとすれば，図—4(c)の状態も一応想定されるので，上記の入力数4コの1台は入力数5コとした。

時間関数の発生数は，図—4(a)の場合の最下流区間について，それぞれの I_j を独立に解析する場合を想定して，I_j 用3コ，O_l 用1コ，計4コとした。

つぎに，ポテンショメーターは初期値設定用が加算積分器と同数で4コ，O_l 用が同じく4コ，I_j 用は図—4(b)および(c)の場合が最大で7コ，計15コあれば十分であるが，日立製作所の既製品は7コ1組となっているので，これを14コとし，不足分は O_l 用について折線近似関数発生器の増巾度の増減などによりカバーすることとした。

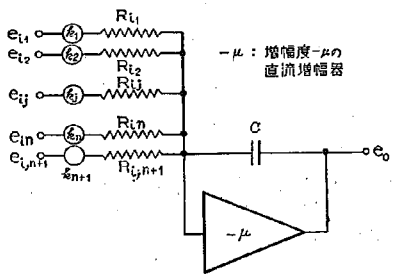
なお，各演算器には正負変換器がそれぞれ附随するが，貯水池におけるダム人工操作の導入の研究などへの応用を考慮して，4台のうち2台は入力数2コの加算器とすることとした。

4. 演算要素の定数の決定

積分器の演算インピーダンスおよび折線近似関数発生器の定数決定についてのべる。

(1) 解析器の定数

解析器の場合は，係数比 $k<1$ のポテンショメーターを $(n+1)$ コ，入力抵抗 R_{ij}～$R_{ij,n+1}$ およびフィードバック容量Cを有する加算積分器によって，図—5のように，回路を構成する。



図—5　解析器の回路

このような加算積分回路では，入力電圧 e_{ij} と出力電圧 e_o の間には，$e_{o,t}$ を初期値とすると，つぎの関係が成立する。

$$\int\left(\sum_{j=1}^{n+1}\frac{k_i}{R_{ij}\cdot C}\cdot e_{ij}\right)d\tau=-(e_o+e_{o,t}) \quad \cdots\cdots(4)$$

τ：計算機時間

ところで，変換係数をつぎのように定め，

$$I_j=\alpha_{ij}(-e_{ij}),\ (j=1\sim n) \quad \cdots\cdots(5)$$

$$O_l=\alpha_o\ (e_{i,n+1}) \quad \cdots\cdots(6)$$

$$t=\beta\cdot\tau \quad \cdots\cdots(7)$$

$$\int\varphi(O_l)dO_l+C=\gamma(e_o+e_{o,t}) \quad \cdots\cdots(8)$$

これを(3)式に代入すれば，

$$\frac{\beta}{\gamma}\int\left(\sum_{j=1}^{n}\alpha_{ij}\cdot f_j\cdot e_{ij}+\alpha_o\cdot e_{i,n+1}\right)d\tau$$

$$=-(e_o+e_{o,t}) \quad \cdots\cdots(9)$$

がえられる。

よって，(9)式を(4)式と比較することによって，換算条件式として，つぎの各式がえられる。

$$(k_j/R_{ij}\cdot C)=(\alpha_{ij}\cdot\beta/\gamma)f_j,\ (j=1\sim n) \quad \cdots\cdots(10)$$

$$(k_{n+1}/R_{i,n+1}\cdot C)=(\alpha_o\cdot\beta/\gamma) \quad \cdots\cdots(11)$$

さらに，(10)の各式を(11)式で除して変形すると，

$$(k_j/k_{n+1})(R_{i,n+1}/R_{ij})=(\alpha_{ij}/\alpha_o)f_j,$$

$$(j=1\sim n) \quad \cdots\cdots(12)$$

$$(k_{n+1}/R_{t,n+1}C)=(\alpha_o\cdot\beta/\gamma)\quad\cdots\cdots(11)$$

となる。

しかして，換算係数 α_{ij}，α_o，β，γ をそれぞれつぎのように定めるものとすると，

$$\alpha_{ij}=(I_j)_{max}/(e_{ij})_{max}\quad\cdots\cdots(13)$$

$$\alpha_o=(O_t)_{max}/(e_{t,n+1})_{max}\quad\cdots\cdots(14)$$

$$\beta=T_f/\tau_c\quad\cdots\cdots(15)$$

$$\gamma=[\int\varphi(O_t)dO_t]_{max}/(e_o)_{max}\quad\cdots\cdots(16)$$

ここに，

$(I_j)_{max}$，$(O_t)_{max}$，$[\int\varphi(O_t)dO_t]_{max}$：与えられた流入量，流出量，貯留量の最大値

$(e_i)_{max}$，$(e_o)_{max}$：計算機の入力および出力最大電圧

T_f：計算すべき洪水期間

τ_c：演算時間

まず，(11)式はつぎのようになる。

$$\frac{R_{t,n+1}\cdot C}{k_{n+1}\cdot\tau_c}\cdot\frac{(e_o)_{max}}{(e_{t,n+1})_{max}}=\frac{[\int\varphi(O_t)dO_t]_{max}}{(O_t)_{max}\ T_f}\quad\cdots\cdots(17)$$

ここで，$(e_{t,n+1})_{max}$ および $(e_o)_{max}$ を定格最大電圧附近で使用することを条件として導入し，

$$(e_o)_{max}/(e_{t,n+1})_{max}=1\quad\cdots\cdots(18)$$

と仮定すれば，(17)式はつぎのようになる。

$$\frac{1}{k_{n+1}}\cdot\frac{R_{t,n+1}\cdot C}{\tau_c}=\frac{[\int\varphi(O_t)dO_t]_{max}}{(O_t)_{max}\cdot T_f}\quad\cdots\cdots(19)$$

しかして，すでに筆算で解析した洪水の実例によると，(19)式の右辺の値は，表—2のとおり，

$$\frac{[\int\varphi(O_t)dO_t]_{max}}{(O_t)_{max}\cdot T_f}=0.01\sim1\quad\cdots\cdots(20)$$

である。

一方，ポテンショメーターのとりうる係数範囲を

$$k_{n+1}=0.1\sim1\quad\cdots\cdots(21)$$

とすれば，これらを(19)式に代入して，

$$(1\sim10)\frac{R_{t,n+1}\cdot C}{\tau_c}=0.01\sim1\quad\cdots\cdots(22)$$

がえられる。

よって，この式から，$R_{t,n+1}$ および C の決定条件として，

$$\frac{R_{t,n+1}\cdot C}{\tau_c}=0.01,\ 0.1\quad\cdots\cdots(23)$$

がえられる。

つぎに，(13)式および(14)式を(12)式に代入すると，j についてそれぞれ独立に，つぎの式がえられる。

$$\frac{k_j}{k_{n+1}}\cdot\frac{R_{t,n+1}}{R_{tj}}=\frac{(I_j)_{max}}{(O_t)_{max}}\cdot\frac{(e_{t,n+1})_{max}}{(e_{ij})_{max}}\cdot f_j\quad\cdots\cdots(24)$$

ここでも，同様に，(18)式を仮定すれば，

$$\frac{k_j}{k_{n+1}}\cdot\frac{R_{t,n+1}}{R_{tj}}=\frac{(I_j)_{max}}{(O_t)_{max}}\cdot f_j\quad\cdots\cdots(25)$$

となる。

表—2　　筆算で解析した洪水の定数一覧表

河川名	区間または地点名	洪水数	最大洪水継続時間 T_f(hr)	φ_{max} (hr)	φ_{min} (hr)	f	T_l (hr)	$[\int\varphi dO_t]_{max}$ (m^3/sec·hr)	$(O_t)_{max}$ (m^3/sec)	$\frac{\varphi_{max}}{\varphi_{min}}$	$\frac{[\int\varphi dO_t]_{max}}{(O_t)_{max}\cdot T_f}$	$\frac{[\int\varphi dO_t]_{max}}{(O_t)_{max}\cdot\varphi}$
狩野川	大仁	6	50	60	3.8	0.316～0.542	1	7,000	950	16	1/ 6.8	0.123～1.530
〃	大仁～徳倉	4	40	9	3	1.95～2.27	0	8,000	1,500	3	1/ 7.5	0.593～1.780
〃	大仁～千才橋	1	20	0.85	—	1.53	0	900	1,200	1	1/26.7	0.882
〃	千才橋～徳倉	1	20	13	2.4	1.32	-1	3,000	1,200	5	1/ 8.0	0.192～1.040
利根川	中瀬～川俣	1	24	1.20	0.67	0.91	1	4,000	8,500	2	1/51.0	0.392～0.703
〃	八斗島	1	40	70	12	—	3	150,000	10,000	6	1/ 2.7	0.214～1.250
〃	八斗島～栗橋	1	110	5.0	—	1.22	1	30,000	10,000	1	1/36.7	0.600
〃	栗橋～布川	1	25	10	5.5	0.84	4	12,000	6,000	2	1/12.5	0.200～0.364
神流川	若泉	4	40	12	6	—	1.5	18,000	2,200	2	1/ 4.9	0.682～1.365
筑後川	夜明～瀬ノ下	2	155	20	4	0.96～7.76	3	27,000	3,000	5	1/17.2	0.450～2.250
吉野川	池田	1	50	4	0.75	—	4	27,000	12,000	5	1/22.2	0.563～3.000
〃	池田～中央橋	3	70	12	2	1.10～1.40	1.5	18,000	5,000	6	1/19.5	0.300～1.800

〔注〕　本表の T_f は解析した洪水期間の意味であつて，ふつうの意味の洪水継続時間ではない。

しかして，実例によれば，大略

$$(I_i)_{max}/(O_i)_{max}=0.3\sim 3 \quad \cdots\cdots(26)$$

$$f_j = 0.3\sim 3 \quad \cdots\cdots(27)$$

であるから，結局，(23)式の左辺に対する十分な条件として，つぎの式がえられる。

$$\frac{k_j}{k_{n+1}}\cdot\frac{R_{ij,n+1}}{R_{ij}}=0.1\sim 10 \quad \cdots\cdots(28)$$

よって，(21)式と同様に，

$$k_j = 0.1\sim 1 \quad \cdots\cdots(29)$$

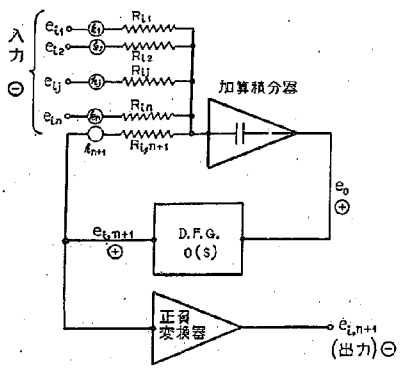
とすれば，

$$R_{ij}=R_{i,n+1} \quad \cdots\cdots(30)$$

としても十分であることがわかる。

(2) 演算器の定数

演算器の場合は，解析器の場合とまったく同様な係数ポテンショメーターと加算積分器に折線近似任意関数発生器を加え，図—6のように接続して，加算積分器の出力を O_i に変換してフィードバックすることにより，$I_j(t)$ を与えて O_i を演算する。



図—6　演算器の回路

すなわち，$\int\varphi(O_i)dO_i+C\equiv S_i$ とすれば，

$$\int\left(\sum_{j=1}^{n} f_j I_j - O_i\right)dt = S_i \quad \cdots\cdots(31)$$

$$O_i = O_i(S_i) \quad \cdots\cdots(32)$$

の2式を連立に解くのである。

加算積分器については，解析器の場合とまったく同様であるから，ここでは，折線近似任意関数発生器について考察する。

(6)式の両辺を $e_{i,n+1}$ で微分し，(8)式の両辺を e_o で微分すれば，

$$dO_i/de_{i,n+1}=\alpha_o \quad \cdots\cdots(33)$$

$$dS_i/de_o=\gamma \quad \cdots\cdots(34)$$

$$\therefore de_{i,n+1}/de_o=(\gamma/\alpha_o)\,(dO_i/dS_i) \quad \cdots\cdots(35)$$

さらに，(14)式および(10)式を代入し，

$$\frac{dS_i}{dO_i}=\varphi(O_i) \quad \cdots\cdots(36)$$

を考慮すれば，(35)式はつぎのようになる。

$$\frac{de_{i,n+1}}{de_o}=\frac{(e_{i,n+1})_{max}}{(e_o)_{max}}\cdot\frac{[\int\varphi(O_i)dO_i]_{max}}{(O_i)_{max}}\cdot\frac{1}{\varphi(O_i)} \quad \cdots\cdots(37)$$

ここで，(18)式を考慮すれば，

$$\frac{de_{i,n+1}}{de_o}=\frac{[\int\varphi(O_i)dO_i]_{max}}{(O_i)_{max}}\cdot\frac{1}{\varphi(O_i)} \quad \cdots\cdots(38)$$

がえられる。

実例によると，表—2のように，

$$\frac{[\int\varphi(O_i)dO_i]_{max}}{(O_i)_{max}}\cdot\frac{1}{\varphi(O_i)}=0.1\sim 3.0 \quad \cdots\cdots(39)$$

であるから，折線近似任意関数発生器のコウ配は，

$$\frac{de_{i,n+1}}{de_o}=0\sim 5 \quad \cdots\cdots(40)$$

とすれば十分である。

また，明らかに，(18)式により，折線近似任意関数発生器の入力および出力の最大電圧の比は，

$$e_{i,n+1}/e_o = 1 \quad \cdots\cdots(41)$$

である。

あとがき

洪水流出計算機の基本設計に関する検討は以上のとおりであるが，詳細示機の参考として，「洪水流出計算機仕様書」およびそれにもとづいて日立製作所が提出した「洪水流出計算機見積仕様書」を示せば，附録のとおりである。

なお，この洪水流出計算機の各部は，すでにのべたように，わが国のいずれの河川流域および河道に対しても適用できるように設計したものであり，また，ここで検討してはいないが，貯水池または貯水池を含む河道に対しても適用できるはずであって，十分な汎用性をもっている。ただし，複雑な河川水系網の高水流量計画，貯水池群についての洪水調節計画などの場合には，演算器の構成をもっと大規模にする必要があり，また，ダムの人工操作や遊水・内水機構を設定する装置についても研究しなければならない。これらについては，この計算機の使用経験を基礎にして，今後，研究を進めたいと考えている。

この研究は，本来，土木研究所の基礎研究として行な

ってきたものであるが，たまたま，国土総合開発事業調査費による有明海流入河川調査の依頼をうけ，解析器についてはその一部として実施した。ここに記して，経済企画庁，建設省河川局，同九州地方建設局の関係者の方々に深甚の謝意を表する。

また，元河川部長佐藤清一博士および河川部長竹内俊雄技官から終始御指導を頂き，この計算機の詳細設計については，株式会社日立製作所の担当者各位の御協力をえた。ここに，厚く謝意を表する。

参考文献

1) Horton, R. E., [1941], "Virtual Channel-Inflow Graphs", Trans. AGU., Vol. 22, pp. 811～819.

2) Clark, C.O., [1945], "Storage and the Unit Hydrograph", Trans. ASCE., Vol. 110, pp. 1419～1488.

3) 藤極博暁・横戸・永野, [1952], "岩木川計画高水量計算法", 建設省直轄工事第5回技術研究報告.

4) 木村俊晃, [1956], "洪水時における流域の貯留量と流出量の関係およびその流出推定への応用について", 土木工学, 第5巻, 第2・3・5号.
木村俊晃, [1956], "横流入を考慮した洪水追跡の一方法について", 建設省沼津工事々務所.

5) McCarthy, G. T., [1940], "Engineering Construction; Flood Control", pp. 204～205, The Engineer School, Ft. Belvoir, Va. (by Linsley, "Applied Hydrology", p. 536).

6) Linsley, R. K., L. W. Foskett and M. A. Kohler, [1948], "Electronic Device Speeds Flood Routing", Eng. News-Record, Vol.141, No.26, pp. 64～66.
Kohler, M. A., [1952], "Application of Electronic Flow Routing Analog", Proc. ASCE., Vol. 78, Sep. No.135, June, 1952.

7) 石原藤次郎・石原安雄, [1955], "洪水追跡用アナログ・コンピューターについて", 土木学会論文集, 24号, 昭.30.4., pp. 44～57.
石原安雄, [1957], "洪水追跡器の実河川への適用について", 土木学会論文集, 43号, 昭.32.3., pp. 43～47.
石原藤次郎・石原安雄, [1956], "貯水池用アナログ・コンピューターの試作について", 土木学会誌, 41巻, 2号, 昭.31.2., pp. 18～23.
石原安雄, [1959], "雨水流出用演算器について", 土木学会論文集, 60号, 昭.34.1., pp. 37～45.

8) Lawler, E. A. and F. U. Druml, [1958], "Hydraulic Problem Solution on Electronic Computers", Proc. ASCE, Vol. 84, No. WW1, Paper 1515.

9) Kohler, M. A., [1958], "Mechanical Analogs Aid Graphical Flood Routing", Proc. ASCE., Vol. 84, No. HY 2, Part I, Paper 1585.

10) Rockwood, D. M., [1958], "Columbia Basin Streamflow Routing by Computer", Civil Eng., Vol. 28, No. 5, pp. 66～69.

11) Isaacson, E., J. J. Stoker and A. Troesch, [1958], "Numerical Soluion of Flow Problems in Rivers", Proc. ASCE., No. HY5, Part I, Paper 1810.

12) 伊藤剛・佐藤・吉川・芦田・鈴木・土屋, [1959], "洪水流に関する研究", 土木研究所報告, 第100号, pp. 145～160.

13) 木村俊晃, [1959], "土研で試作中の電子管式洪水計算機", 土木技術資料, 1巻, 2号, pp. 62～65.

14) 石原藤次郎・金丸, [1956], "降雨条件の変動による単位図の変化について", 土木学会論文集, 32号, 昭.31.3., pp. 50～56.

15) 佐藤清一・吉川・木村, [1954], "降雨から流出を推定する一方法", 土木研究所報告, 87号, 昭.29., pp. 27～42.

16) Horton, R. E., [1936], "Natural Stream Channel Storage", Trans. AGU., Vol. 17, pp. 406～415.

17) McCarthy, G. T., [1938], "The Unit Hydrograph and Flood Routing", unpublished manuscript presented on a conference of the North Atlantic Division, Corps of Engineers, War Depertment, June 24, 1938.

18) Thomas, H. A., [1940], "Graphical Integration of the Flood Wave Equations", Trans. AGU. Part II. Vol. 21, April, 1940, pp. 596～602.

19) 中嶋義美, [1951], "木曽川における不定流計算について", 建設省直轄工事第4回技術研究報告, 昭.26.3., pp. 57～68.

20) Kinosita, T., [1959], "On the Motion of the Flood-Flow Running down through the River", 土木学会論文集, 63号. 昭.34.7. pp. 57～65.

21) Iwagaki, Y, [1955], "Fundamental Studies on the Runoff Analysis by Characteristics", Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute, No. 10.

22) 末石富太郎, [1955], "特性曲線による出水解析について", 土木学会論文集, 29号, 昭.30.12., pp. 74～87.
23) 中安米蔵, [1951], "雨量より洪水量の推定に就いて", 建設省直轄工事第4回技術研究報告, 昭. 26.3., pp. 159～194.
24) 立神弘洋, [1954], "木曽川洪水の水文学的研究", 建設省中部地方建設局, 昭.29.
25) Horton, R.E., [1933], "The Role of Infiltration in the Hydrologic Cycle", Trans. AGU., Vol. 14, pp. 446～460.
26) 石原藤次郎・金丸・中川, [1956], "わが国河川の綜合単位図の研究", 京大防災研・創立5周年記念論文集, 昭.31.11., pp. 181～190.
27) 速水頌一郎, [1956], "降雨の流出解析について", 京大防災研・創立5周年記念論文集, 昭. 31.11., pp. 168～180.
28) 竹内俊雄, [1960], "河川流出に関する2・3の計算法", 土木研究所報告, 103号, 昭. 35.2., pp. 87～110.
29) Linsley, R.K., [1949], "Applied Hydrology", McGraw-Hill, pp. 418～424.
30) 竹内俊雄, [1960], 前出 28.
31) 木村俊晃, [1960], "流入係数とその解析法", 土木研究所報告, (予定).
32) 木村俊晃, [1959], "貯留関数に関する一考察", 土木研究所報告, 第102号, pp. 9～16.

〔附 録 1〕

洪水流出計算機仕様書

(土 木 研 究 所)

第1章 一 般 仕 様

1. 品名 洪水流出計算機
2. 数量 (省略)
3. 納入場所 (省略)
4. 納期 (省略)
5. 受註者は, 見積りの際, 本仕様書の示すところに従がい, さらに詳細な電気的・機械的示様を記した見積仕様書を発註者に提出するものとする。
6. 受註者は, 製作に先だち, 外観図・パネル彫刻図・回路図を提出し, 発註者の承認をえるものとする。
7. 受註者は, 製作に先だち, 次の各項について発註者の承認をえるものとする。
   a. 時間関数発生時間 τ_e の値
   b. 第2節7に対する構造
   c. つぎの部品のメーカーと規格
      リレー, サーボ・モーター, ジャック, プラグ, 演算インピーダンス, 係数ポテンショメーター, 真空管, ブラウン管
8. 取扱説明書および試験成績表の記載事項については, あらかじめ発註者の承認をえるものとする。
9. 納品は, 製作後, 運搬に先だち, 発註者側係官立会のもとに, 本仕様書および受註者の提出した見積仕様書にもとづく検査を行なうものとする。
10. 受註者は明らかな取扱不備および天災その他不可抗力による場合を除き, 納入後1年間一切の保証をなすものとする。
11. 本仕様書について疑義のある場合は発註者側係官の指示に従がうものとする。

第2章 詳 細 仕 様

第1節 総 説

1. 洪水流出計算機の構成はつぎのとおりとする。

a.	任意時間関数発生器 (O_t, I_1～I_n用)	1台
b.	任意時間関数発生器電源	1台
c.	加算積分器	4台
d.	加算器	2台
e.	電子管式折線近似任意関数発生器(6区間用)	4台
f.	ポテンショメーター盤 (14個)	1台
g.	正負変換器	1台
h.	リレーおよびインピーダンス盤	1台
i.	制御盤	1台
j.	電源盤	1台
k.	筐体	1台
l.	解指示器 (5"残光ブラウン管オツシロスコープ)	1台
m.	解記録器 (6チャンネル・ペン書オツシログラフ)	1台

n. 附属品

パッチ・コード	30本
時間関数設定用パッチコード	250本
取扱説明書	3部
試験成績書	1部
電源コード	1本
試験用コード	2本

2. 本装置は遅滞時間 T_l を考慮した場合に流入量 I_j と流出量 O の間に成立する洪水流出追跡方程式

$$\left.\begin{aligned}&\sum_{j=1}^{n} f_j \cdot I_j = O_l + \varphi(O_l)\frac{dO_l}{dt}\\ &O_l(t) = O(t+T_l)\end{aligned}\right\} \cdots\cdots(1)$$

I_j ： 流入量 (m^3/sec)
O ： 流出量 (〃)
f_j ： 流入係数 (無次元)
$\varphi(O_l)$ ：貯留関数 (hr)
T_l ： 遅滞時間 (hr)
t ： 時間 (hr)

を基礎演算式とする電子管式アナログ計算機とし，機能的に解析器および演算器の2部よりなり，その変更はパッチコードによって行なうものとする。

3. 本装置においては(1)式の n は，

$$n = 3$$

とする。

4. 解析器は(1)式に含まれるパラメター f_j, $\varphi(O_l)$ および T_l を解析する装置であり，基礎資料として与えられた I_j および O を発生する任意時間関数発生器，(1)式を変形してえられる次式

$$\int\left(\sum_{j=1}^{n} f_j \cdot I_j - O_l\right)dt = \int \varphi(O_l)dO_l + C \cdots\cdots(2)$$

の左辺の積分を行なう加算積分器，この積分値 $\int\varphi(O_l)dO_l + C$ を Y 軸，O_l を X 軸として指示する残光ブラウン管オツシロスコープによって構成されるものとする。

5. 演算器は，(1)式を伝達関数として，I_j を与えて O_l を演算し記録する装置であって，I_j を発生する任意時間関数発生器，(1)式の伝達関数を構成する加算積分器および電子管式折線近似任意関数発生器，O_l を記録する電磁オツシログラフによって構成されるものとする。

6. 本装置は低速度型とし，任意時間関数の1回の発生時間 τ_c は一定とする。

7. 本装置は解指示器および解記録器を除き1つの筐体に組立てるものとする。

8. 各要素の接続はパッチコードによるものとする。

9. 本装置の電源は商用 $100V$ とし，$+5V$～$-10V$ の電圧変動に対して所定の精度を有するものとする。

10. 本装置は室温 5～30°C，湿度80％以下において連続5時間以上の使用に耐えるものとする。

11. 部品はすべて一流品を使用するものとする。

12. 真空管など取替えを要する部品については銘板によってその種類と位置を表示するものとする。

13. 端子，押ボタン，ツマミ，ダイアルなどについては，その操作に便なように，取扱説明書と関連した記号を銘板によって表示するものとする。

第2節 任意時間関数発生器

1. 本器は，その出力端子において，同一時間軸上に(1)式の I_j および O_l に相当する4個の任意の形の階段状電圧波形を発生する機能を有するものとする。

2. 本器の関数発生時間は τ_c とし，解析器として使用する場合はそれを繰り返えし，演算器として使用する場合は1回のみで繰り返さずに停止するものとする。

3. 本器は定速度モーター，コミュテーター，電圧設定板および演算制御機構からなり，分圧された定電圧を設定板によってコミュテーターに送り，ブラッシの回転によって出力をえるものとする。

4. 本器の性能はつぎのとおりとする。

a. 近似区間（時間） 50区間，区間巾固定
b. 発生電圧区間 0～50，一定間隔で51種類
c. 電圧設定精度 使用状態で最大出力に対し誤差1％以下
d. 発生時間精度 誤差1％以下
e. 設定最大電圧 $50V$ および $10V$

5. 電圧設定は，パネル上において，分圧定電圧の端子とコミュテーター各接点の端子とをパッチコードで連結することにより行なうものとし，各端子はつぎのとおりとする。

a. 設定電圧端子 8端子連結×51
b. 接続用U端子 4端子連結×51
c. コミュテーター端子 56×3組（I_j 用）
51×1組（O_l 用）

6. 前項の C の I_j 用コミュテーター端子はパッチコードを接続しない場合は $0V$ に接続するよう構成するものとする。

7. I_j の時間関数は，その波形をそのままで，時間の50区間中5区間だけそれぞれ独立に1区間ずつ移動しうるよう構成するものとする。

8. 出力数は I_j, O_l ともに各2とする。

9. 時間区間2区間につき1コ，計25コの動作指示ネオンランプを附するものとする。

10. 起動停止ならびに2項による演算状態の制御機構を附するものとする。

第3節　任意時間関数発生器電源

1. 本器は任意時間関数発生器に対して必要なすべての電力を供給するものとする。
2. 本器の構成はつぎのとおりとする。
   a. 定速度モーター用電源　1
   b. 設定電圧電源　1

第4節　加算積分器

1. 本器は直流増巾器および加算積分要素よりなり，4台のうち1台は入力数5，出力数2とし，3台は入力数3，出力数2とする。
2. 本器は初期値を設定しうるよう構成するものとする。
3. 直流増巾器の特性はつぎのとおりとし，過電圧指示ネオンを附するものとする。
   a. 利得　DC にて 90 db
   b. グリッド換算ドリフト　$10mV/8\,hr$
   c. 出力電圧　$\pm 50\,V$
   d. 許容負荷抵抗　$16K\Omega$ 以上
4. 演算抵抗は精度 $\pm 0.5\%$ 以下の無誘導捲線抵抗とする。
5. 演算コンデンサーは精度 $\pm 0.5\%$ 以下のポリエチレン・コンデンサーとする。
6. 本器の入力抵抗 R_t，フイードバック容量 C はつぎの条件を満足しうるよう構成し，これを手動で切換えうるようにするとともに，$(R_t \cdot C/\tau_c)$ の値を表示するものとする。
   $$R_t \cdot C/\tau_c = 0.01,\ 0.1$$
7. 演算制御用リレー回路を附するものとする。

第5節　加算器

1. 本器は直流増巾器および加算要素よりなり，入力数2，出力数2とする。
2. 直流増巾器の特性および演算インピーダンスの仕様は加算積分器と同様とする。
3. 本器の係数比はいづれも1：1とする。
4. 演算制御用リレー回路を附するものとする。

第6節　電子管式折線近似任意関数発生器

1. 本器の近似区間は正符号に対し6区間，コウ配は0～5とし，区間巾およびコウ配は各区間独立に設定しうるものとする。
2. 入力電圧は最大+50V，1区間最大20V，出力電圧は負荷抵抗16$K\Omega$ にて最大 +50V とし，ドリフトは100mV/hr 以下，全コウ配0のとき 10mV/hr 以下とする。
3. 本器の精度は設定に対して2％以下，再現に対して0.5％以下とする。

第7節　ポテンショメーター盤

1. 本器は流入係数 f_i 用および加算積分器初期値設定用ポテンショメーターを内蔵するもので，その入出力はすべてパネル面でパッチコードにより接続しうるものとする。
2. 構成はつぎのとおりとする。
   a. f_i 用　係数比精度 0.5%　10
   b. 初期値用　係数比精度 0.5%　4
3. ダイヤルは10回転で目盛数は1回転につき100とする。
4. f_i 用に対しては入出力端子各1，初期値用に対しては出力端子1のみパネル面に設けるものとする。

第8節　正負変換器

1. 本器は直流増巾器および正負変換演算要素よりなり，入力数1，出力数2とする。
2. 直流増巾器の特性および演算インピーダンスの仕様は加算積分器と同様とする。
3. 演算制御用リレー回路を附するものとする。

第9節　リレーおよびインピーダンス盤

1. 本パネルは内部に加算積分器，加算器および正負変換器の演算要素すなわち演算インピーダンス，制御リレーを内蔵するとともに，パネル面にこれら要素の入出力端子を設けるものとする。
2. パネル面に設けるべき端子および切換スイッチの構成はつぎのとおりとする。
   a. 加算積分器入出力端子　4組
   b. 加算器入出力端子　2組
   c. 正負変換器入出力端子　2組
   d. 加算積分器演算用蓄電器容量切換機構　4組
   e. 時間関数発生器 I_j 出力端子　3組
   f. 同上 O_t 〃　1組
   g. 電子管式折線近似任意関数発生器入出力端子　4組
   h. 記録器入力端子　6組

第10節　制御盤

1. 電源制御スイッチ，レコーダー・モーター・スイッチ，演算制御機構，過電圧指示ネオン，出力監視機構よりなるものとする。
2. 過電圧指示ネオンは点火電圧50±5Vとし，折線近似器用4，積分器用4，加算器用2，正負変換器用2，計12コとする。
3. 出力監視機構は電圧計により，選択スイッチで切換えて，線型演算要素，折線近似器内増巾器，時間関数発生器の出力を監視しうるものとする。

4. 演算制御は押釦スイッチによって行なうものとする。

第11節 電 源 盤

1. 本電源は本洪水流出計算機の各要素に十分な電力を供給するものとし，直流高圧電源，直流低圧安定電源，ヒーター用 AC 電源，リレー電源よりなるものとする。
2. 本電源は50～60cps，$100V\ ^{+5V}_{-10V}$ の電源電圧に対し，十分な安定度を有するものとする。

第12節 筐 体

1. 裏ドア付キャビネット型の米国式標準架 2架とする。
2. 塗装はパネルともマンセル $N6.5$ 焼付つや出しとし，彫刻は黒色とする。

第13節 解 指 示 器

1. 残光性ブラウン管 $5UP7F$ を使用したポータブル型オツシロスコープとし，時間軸発生装置は含まないものとする。
2. 本器は電源電圧 90～105V で働作し，十分な安定性を有するものとする。
3. X 軸および Y 軸増巾器は入力 $5Vrms$ 以上の時フルスケールの指示を得るに十分な感度を有する直流増巾器とし，入力に最大35V，可変の初期値を加算する機構を有するものとする。
4. キヤノン $CO-133$ 接写座金を附するものとする。

第14節 解 記 録 器

1. 本器は記録計用直流増巾器および渡辺測器製 $EO-6$ 型ペン書オツシログラフよりなるものとし，規定の附属品および予備品を附するものとする。
2. 記録計用直流増巾器は6チャンネル分の回路を有するものとし，ペン書オツシログラフのゼロ点を−20目盛に移動して使用するに十分なレベル調整装置を附するものとする。
3. 記録計用直流増巾器には較正電圧発生装置を附するものとし，その仕様はつぎのとおりとする。
   a. 基準電圧 $\pm1V$，$\pm5V$，$\pm10V$，$\pm50V$
   b. 精 度 ±2％
4. ガルバノメーターは渡辺測器製Ⅲ−50型（感度一様な周波数範囲 0～50cps，感度1 mm/mA）を6コ附するものとする。

以 上

〔附 録 2〕

洪水流出計算機見積仕様書

（日 立 製 作 所）

1. 概 要 本装置は次式

$$\sum_{j=1}^{n} f_j \cdot I_j = O + \varphi(O)\frac{dO}{dt}$$

を基礎演算式とする電子管式アナログ計算機であって，河川の流入量 I_j と流出量 O の関係を解析して，流入係数 f_j，遅滞時間 T_i および貯留関数 $\varphi(O)$ を求め，またこれらの係数を設定して流入量 I_j より流出量 O を演算する計算機であります。

したがって，本機の用途は解析器および演算器の2種に大別されますが，これらの変更は各要素の接続コード（パッチ・コード）の接続を変えれば容易に行なえます。

解析器として本器を使用する場合は，モータ式時間関数発生器により I_j におのおの係数 f_j を乗じ，その出力をインピーダンス・パネル上で加算積分器の入力端子に加えます。また，O は正負変換器により符号を反転し，同様に加算積分器に加え，この積分器出力を求めれば

$$\int\left(\sum_{j=1}^{n} f_j \cdot I_j - O\right)dt = \int \varphi(O)\,dO + C$$

となります。この解を解指示器の Y 入力に，また，O を X 入力に加え，XY 間のリサージ波形が一価関数となるまで f_j 用ポテンショメーターを調整すれば f_j の値を決定できます。なお O に対する $I_1 \sim I_n$ の関係は時間関数発生器パネル上の切換スイッチにより，全50区間に対し5区間まで各個に遅延させることが可能ですから，これにより T_i を求めることができます。

本装置を解析器として使用する場合，演算は5秒ずつ自動的に繰り返され，解はポータブル型の解指示器で観測されます。また，演算器として使用する際の演算時間は手動により制御され，解はペン書きオシログラフによって記録されます。

なお，本装置は，解指示器を除き，2架のキャビネット型筐体に実装され，電源としては商用 100Vを利用し，電圧の $^{+5\ V}_{-10\ V}$ の変動に対して，所定の精度を維持します。ただし，本装置は室温 5°C～30°C，湿度80%以下で塵の少ない室内に設置して下さい。

本機の製作に当っては，外観図・パネル彫刻図・回路図を承認図として提出し御承認を得るものとし，検査仕様については御打合せの上決定するものとします。

なお，納入後一年以内に生じた設計・製作上の原因に基く故障に対しては責任をもって修理または改造を行ないます。

2. 構　成

本機は下記の構成を有し，各パネルの実装配置は添附第1図の外観図のとおりです。

(1) 時間関数発生器（O, I_1～I_n用）　1台($n=3$)
(2) 時間関数発生器用電源　1台
(3) 加算積分器　4台
　内訳 { $DA-224$型直流増巾器盤　2台
　　5入力加算積分演算素子　※ 1
　　3入力加算積分演算素子　※ 3
(4) 加算器　2台
　内訳 { $DA-224$型直流増巾器盤　1台
　　加算演算素子　2
(5) $DG-322B$型電子管式任意関数発生器　2台
　（正6区間用2台実装）
(6) ポテンショメーター盤　1台
　内訳 { 係数用ポテンショメーター　10コ
　　初期値設定用ポテンショメーター　4コ
(7) 正負変換器
　内訳 { $DA-224$型直流増巾器盤　1台
　　正負変換演算素子　2
(8) リレーおよびインピーダンス盤　1台
　（上記※印演算要素を実装）
(9) 制御盤　1台
(10) 電源盤　1台
(11) 筐体　1式
(12) 附属品
　(Ⅰ) 解指示器　1台
　(Ⅱ) 渡辺測器製ペン書きオシログラフ（$EO-6$型）（6チャンネル用）　1台
　(Ⅲ) パッチコード　30本
　(Ⅳ) 時間関数設定用パッチコード　200mm　400mm　計250本
　(Ⅴ) 取扱説明書　3部
　(Ⅵ) 試験成績書　1部
　(Ⅶ) 電源コード　1本
　(Ⅷ) 試験用コード　2本
　以上

(注) $DA-224$は1パネルに増巾器2台を実装しております。

3. 各部仕様

3.1 時間関数発生器

本器はI_1～I_3, Oの各電圧を発生するもので，5連のコミュテーターを有し，内I_1～I_3用コミュテーターは刷子の切換により5区間分移動し得るものです。コミュテーターの電圧設定は，パネル面において，パッチコードにより行ないます。本器は直流定速度モーターにより駆動され，6秒間でコミュテーターは1回転します。このコミュテーターは60分割のもので，6秒の内5秒間を演算に，残り1秒間を積分器のリセットに使用します。

コミュテーターのうち1連は接点指示ネオンの点火および演算制御に利用されております。本器を解析器に使用する時は，コミュテーターは回転をつづけ，4種の電圧は繰返して発生されますが，演算器に使用する際は最終接点で電圧発生を終止し，繰り返しては発生致しません。

本器の詳細仕様はつぎのとおりです。

仕　様

電気的仕様

1. 構成　定速度モーター，5連コミュテーター，電圧設定板および演算制御機構からなる。
2. 方式　分圧された定電圧を設定板によりコミュテーターに送り，刷子の回転により階段近似の時間関数$F_j(t)$を発生する。
　I_jに対応する$F_1(t)$～$F_3(t)$は刷子の切換により50区間中5区間だけtを移動せしめ，Oに対応する$F_4(t)$はこれを行なわない。
　電圧の設定は，パネル上において，分圧定電圧の端子とコミュテーター各接点の端子とをパッチ・コードで連結することにより行なう。
3. 性能
　(1) 近似区間　50区間，各区間巾固定
　(2) 発生電圧　0～50V，1V間隔で51種類
　(3) 最大出力インピーダンス　刷子位置および設定電圧により変化し，約200～500Ωの間を変化する。
　(4) 設定精度　最大出力に対し誤差1%
　(5) 演算時間精度　誤差1%
　(6) 演算時間　5秒
　(7) リセット時間　1秒

4. I_j用コミュテーター（3速）
(1) 接点数 60（接点巾3mm，間隔1mm）
(2) 刷子数 1速につき5組
ただし，1組は2刷子より構成される。

5. Oおよび演算制御用コミュテーター（2速）
(1) 接点数 60
(2) 刷子数 O用 1組（2刷子）
制御用 1刷子

6. 設定電圧源
(1) 設定最大電圧 50V ただし，調整時10Vに減衰させる機構を付するものとする。
(2) 設定電圧数 51（0Vを含む）
(3) 区間電圧 1V, 0.2V
(4) 区間抵抗 4Ω ±0.5%
(5) 最大出力インピーダンス 100Ω

7. 電圧設定機構
パネル面において設定電圧端子とコミューテーター端子との接続を行なう。
(1) 設定電圧端子 0～50Vまで51種
1種につき8端子とす。
(2) 接続用U端子 4端子連結で51組
(3) コミュテーター端子 I用 各56コ
O用 51コ

8. 動作指示ネオン・ランプ 25コ（2区間1コ）

9. 演算制御機構
(1) 解析器用 第1端子で計算器全体をコンピュート，第51端子でバランスチエックとし，コミュテーターは繰り返し回転する。始動および停止はパネル面のスイッチにより行なう。
(2) 演算器用 第1端子で計算器をコンピュートとし，第51端子で電圧の発生を停止し，ついで回転を停止する。

機械的仕様
(1) パネル・シャシー寸法
縦 355mm，横 482mm，
奥行 500mm以内
(2) 電圧設定板 パネル中央に設置する。

3．2 時間関数発生器用電源
本器は 3．1 時間関数発生器に対して必要なすべての電力を供給する電源であります。

仕 様

電気的仕様

1. 構成 定速度モーター用電源 1
設定電圧用電源 1
（ただし，分圧器を含まず）

2. 方式 設定電圧用電源は電子管式安定電源を用い，モーター用電源はセレン整流方式

3. 性能
(1) モーター用電源 22V DC, 1.5A
(2) 設定電圧用電源 100V, 250mA

機械的仕様
パネル寸法 縦 177mm，横 482mm
奥行 400mm以下

3．3 加算積分器
本器は $DA-224$ 型直流増巾器1台と加算積分演算素子により構成されます。
これらの演算素子はリレーおよびインピーダンス盤中に実装され，増巾器と背面で結合されております。
増巾器の仕様は下記のとおりです。

3.3.1 $DA-224$仕様
電気的仕様
(1) 構 成 直流増巾器2台実装
(2) 利 得 直流にて約90db
(3) 出力電圧 ±50V
(4) 許容負荷抵抗 16KΩ以上
(5) グリット換算ドリフト 10mV/8時間以内

機械的仕様
縦 177mm（7吋），横 120mm
また，加算積分器は第2図の構成を有し，加算積分素子の仕様は下記のとおりです。

3.3.2 加算積分器演算素子仕様
電気的仕様
(1) 構 成 演算用抵抗 1式
〃 蓄電器 1〃
〃 〃 容量切換機構 1
演算制御リレー 1式
(2) 入力数 (1台) $\frac{5}{3}$ (3台) $\frac{3}{1}$
(初期値入力) 1 1
(3) 出力数 2 2
(4) 入力抵抗 (R_i) 2.5MΩ，巻線型，誤差±0.5%
(5) 帰還容量 (C)0.2μF, 0.02μF，ポリ・エチレン・コンデンサー，誤差±0.5%
(6) 時定数 (R_1C) 0.5秒，0.05秒
(7) リセット時定数 (R_5C) 0.02秒，0.002秒
(8) 演算制御 高速度リレー2コを用い，制御盤の操作によって
1. バランスチエック BC
リセット R
2. コンピュート C
3. ホールド H
の3状態に切換え可能。ただしRにおいては初期

値が入らないのでBCと同一状態となる。

時間関数発生器により制御されるときは，BCとCの2状態を反復する。

3．4 加算器

本器は DA－224型 直流増巾器1台と加算演算素子により構成されます。これらの演算素子はリレーおよびインピーダンス盤中に実装され，増巾器と背面で結合されております。増巾器の仕様は3.3.1と同様です。

3.4.1 加算器演算素子仕様

(1) 構　成　演算用抵抗　3コ
　　演算制御リレー　1コ
(2) 入力数　2
(3) 出力数　2
(4) 入力抵抗　(R_i) 2.5MΩ巻線型，誤差± 0.5%
(5) 帰還抵抗　(R_f) 2.5MΩ　〃　〃
(6) 演算制御　リレー1コを用い制御盤の操作で

1. { バランス　チエック　BC
　 { リセット　R
2. { ホールド　H
　 { コンピュート　C

の2状態に切換え得る。

(7) 係数比　1;1
(8) 係数比誤差　±0.5%

3．5 電子管式折線近似関数発生器（2台実装） DG－322B

本器は正入力6区間の電子管式折線近似関数発生器2台を1パネルに実装したものです。本器の特徴は独立に区間巾およびコウ配を設定しうることであります。

〔電気的仕様〕

1．方　式

2極管の一方向性を利用し，任意の入力Xに対し折線で近似された関数F(X)を電圧として発生する。

2．性　能

(1) 近似区間　正符号入力に対し6区間
(2) コ ウ 配　0 ～ 5
　各コウ配はまったく他区間と独立に与えることができる。
(3) 入力電圧　最大+50V
　1区間最大　20V
(4) 出力電圧　最大+50V（負荷抵抗16KΩにて）
(5) ドリフト　100mV/H以下
　全コウ配ゼロのとき 10mV/H以下
(6) 精　度　設定に対し　2％以下（較正曲線使用により）
　再現に対して　0.5%以下
(7) 周波数特性　位相のずれ 10 c/s で10度以内

3．コウ配設定ポテンショメーター

30KΩ　2連　1回転
直線性　±2％

4．区間設定ポテンショメーター

10KΩ　±1％
直線性　1％

〔機械的仕様〕

1．パネル寸法　縦 266mm，横 48.2mm
2．奥　行　414mm
3．重　量　約 20kg

3．6 ポテンショメーター盤

本器は流入係数 f_j を設定するポテンショメーターと加算積分器初期値設定用ポテンショメーターを内蔵するもので，その入出力はすべてパネル面においてパッチ・コードにより接続されます。仕様は下記のとおりです。

〔電気的仕様〕

1．構　成

f_j 設定用ポテンショメーター　10コ
初期値設定用ポテンショメーター　4コ

2．f_j 設定用ポテンショメーター

抵抗値	50KΩ
係数比精度	0.5%
ダイヤル目盛数	100（1回転）
ダイヤル回転数	10
入出力端子	入力1，出力1をパネル面に設ける。

3．初期値設定用ポテンショメーター

抵抗値	50KΩ
係数比精度	0.5%
ダイヤル目盛数	100（1回転）
ダイヤル回転数	10
入出力端子	出力端子1のみパネル面に設ける。
設定電圧	最大 100V

〔機械的仕様〕

横 482mm，縦 177mm

3．7 正負変換器

本器は 3.1時間関数発生器で発生した流出量Oの電圧の符号を反転し，3.3の加算積分器に加えるためのもので，DA－224型 直流増巾器1台と正負変換要素から構成されています。この演算要素は3.8 にのべるリレーおよびインピーダンス盤内に置かれ，入出力はこのパネル面においてパッチ・コードにより接続されます。演算要素仕様は下記のとおりです。

正負変換要素仕様

1. 構　成　演算用抵抗　2コ
　　演算制御リレー　1コ
2. 入力数　1
3. 入力抵抗　R_i 2.5 $M\Omega$ 巻線型，誤差±0.5%
4. 帰還抵抗　R_f 2.5$M\Omega$ 〃　〃
5. 出力数　2
6. 演算制御機構　リレー1コを用い，制御盤の操作で
   1. バランス・チエック　BC
      リセット　R
   2. ホールド　H
      コンピュート　C
   の2状態に切換え得る。
7. 係数比精度　± 0.5%

3.8 リレーおよびインピーダンス盤

本パネルは，内部は 3.3，3.4，3.7でのべた線型演算器の演算要素，すなわち演算インピーダンス，制御リレーを内蔵するとともに，パネル面にこれら要素の入出力端子を設けたものです。各要素の仕様は個々の章でのべましたから，ここではパネル端子についてのみのべます。

〔電気的仕様〕

1. 構　成

加算積分器入出力端子	4組
加算器入出力端子	2組
正負変換器入出力端子	2組
加算積分器演算用蓄電器容量切換機構	4組
時間関数発生器 I_j 出力端子	3組
時間関数発生器O出力端子	1組
電子管式折線近似関数発生器入出力端子	4組
記録器入力端子	6組

2. 加算積分器入出力端子

	(一台)	(3台)
入力端子	5	3
出力端子	2	2
初期値入力端子	1	1

3. 加算器入出力端子

入力端子	2
出力端子	2

4. 正負変換器入出力端子

入力端子	1
出力端子	2

5. 時間関数発生器出力端子

I_j 出力端子	2×3=6
O 出力端子	2

6. 電子管式折線近似関数発生器入出力端子

入力端子	1
出力端子	2

7. 記録器入力端子 (6CH)
   1CH ごとに　1

〔機械的仕様〕

横 482mm，縦 177mm

3.9 制御盤

〔電気的仕様〕

1. 構　成
   電源制御スイッチ，レコーダー・モーター・スイッチ，演算制御機構，過電圧指示ネオン，出力監視機構
2. 過電圧指示ネオン

個　数		12
用　途	折線近似器用	4
	積分器用	4
	加算器用	2
	正負変換器用	2

   点火電圧　50± 5 V
3. 出力監視機構
   出力選択スイッチ　2

用　途	線型演算要素	8
	折線近似器内増巾器	8
	時間関数発生器	4

   出力監視電圧計　1
   電圧範囲　±50V，±5V，±0.5V，±0.1V
   内部抵抗　100Ω (0.1Vにて)
   精　度　1.5%
4. 演算制御機構　押釦スイッチにより行なう。

〔機械的仕様〕

横 482mm，縦 355mm

3.10 電　源

本電源は電子管式安定装置を用いた直流高圧電源，トランジスターを用いた直流低圧安定電源，ヒーター用AC電源およびリレー電源より構成されます。すべての電源は本機内要素に十分な電力を供給するとともに，50~60 c/s，$100V^{+5V}_{-10V}$の電源電圧に対し，すべての要素が仕様を満足するに十分な安定度をもつものとします。

〔機械的仕様〕

横 482mm，縦 355mm

3.11 筐　体

筐体は米国式標準架で，2架の構成となっております。裏ドア付のキャビネット型で塗装はパネルともN6.5（マンセル記号）焼付つや出しとし，彫刻は黒色とします。

3.12 付属品

(I) 解指示器仕様

1. 一般事項
   残光性ブラウン管 5UP 7P を使用した直線性

の高いポータブル型オシロスコープで，時間軸発生装置は含まない。本器は電源電圧 90～105 Vで動作し，消費電力は約 80VA 以下である。

2. 電気的仕様

(1) X軸増巾器　直流増巾器にして，入力5 $Vrms$ 以上の時フルスケールの指示を得るに十分な感度を有するとともに，入力に最大50Vの可変の初期値を加算する機構を有するものとする。
周波数特性 DC～30KC, ± 3db以内

(2) Y軸増巾器　X軸増巾器と同じ（ただし初期値加算機構を除く）

(3) 使用ブラウン管　5$UP7F$
残光性は10秒後約14%
5秒後約23%

(4) 使用真空管　12$AT7$ 2本, 1$X2B$ 1本
6X4 1本, 5$Y3GT$ 1本
6$AQ5$ 1本, 6$AU6$ 1本
$VR150MT$ 1本, 6$U8$ 1本

3. 機械的仕様

寸法　高さ376mm, 巾262mm, 奥行430mm
筐体に収容され，キヤノンCO−133接写座金を装備する

重量　25kg以下

塗色　マンセル N 6.5

4. 付属品

ブラウン管用フード	1
電源コード	3m

(II) ペン書きオシログラフ仕様

本器は記録計用増巾器および渡辺測器製ペン書き記録器により構成されます。
詳細仕様は下記のとおりです。

記録計用増巾器(RA−601)仕様

1. 概要

本装置は低速度型アナログ計算機およびシミュレーターの解または出力波形を高忠実度にて増巾し，ペン書き記録計を駆動するための直流増巾器で，6 チャンネルの回路を持ちます。

2. 構成

(1) 増巾器盤	1パネル
直流増巾器(プリント配線)6回路	
較正用電圧発生装置	1 式
出力指示装置	1 〃
(2) 電源盤	1パネル
(3) 筐体	1 式
(4) 接続用ケーブル類	
信号接続用ケーブル(5m)	1 本
電源接続用ケーブル(5m)	1 本
記録計接続用 〃 (2m)	6 本
盤間接続用 〃 (0.7m)	1 本
(5) ビニールカバー	1 枚
(6) 取扱説明書	3 部
(7) 試験成績書	2 部

3. 電気的仕様

(1) 直流増巾器

イ) 増巾度　無帰還時DCにて　90db±5db

ロ) ドリフト　グリッド換算　10mV/H以下

ハ) 出力電圧　負荷3$K\Omega$にて　±100V以上

ニ) 利得調整

粗調整　ロータリスイッチにて　×1
×5
×25
×100

微調整　可変抵抗器にて　×0.1～×1 連続可変

ホ) 入力インピーダンス

利得	×1の場合	約2 $M\Omega$
	×5の場合	約400$K\Omega$
	×25 〃	約80$K\Omega$
	×100 〃	約20$K\Omega$

ヘ) レベル調整

粗調整　−90V～−30V(ロータリスイッチ)
−30V～+30V(〃)
+30V～+90V(〃)

微調整　上記各区間内を連続可変(可変抵抗器)

ト) 使用電子管
12$AX7$, 6$U8$, 6$AQ5$, 6$AQ5$

(2) 較正装置

イ) 基準電圧　±1 V, ±5 V, ±10V, ±50 V, ロータリスイッチにて大きさを，シーメンスキーにて正負を切換える。

ロ) 較正電圧精度　±2 %

ハ) 使用電子管　$VR105MT$, $VR105MT$

(3) 出力指示装置

イ) 出力選択　ロータリスイッチにより6チャンネルの出力を電圧計に接続可能

ロ) 電圧計指示範囲切換
±100V, ±10V, ±1 Vの3レンジ切換可能

(4) 電源盤

イ) 出力電圧および電流

+250V (安定化)	300mA
−250V (安定化)	300mA
−500V (安定化)	10mA

ロ) 使用電子管

5U4GB	4 本
6AS7G	4 〃
6X4	1 〃
1ZAU7	1 〃
6U8	3 〃
1ZAX7	3 〃
5651	1 〃

ハ) 電圧指示装置　ロータリスイッチにより各電圧を切換え電圧計に指示可能

4. 機械的仕様

外形寸法
530(巾)×510(高さ)×483(奥行) ただし，突出部を含まず

ペン書き記録器仕様

1. 概　要

本装置はアナログ計算機およびシミュレーターの解または出力波形を記録するための装置です。

2. 構　成

(1) EO−6型ペン書き記録器　1台
(III〜50型ガルバーメーター6台付)

(2) 付属品　1式

内訳 コード	1組
補用記録ペン	6個
記録紙	10本
黒インク 150cc	1本
ペンスパナまたはドライバー	1個
スポイト	1本
ピンセット	1本
ペン先修正用サンドペーパー	1枚
ペン先掃除用ピアノ線	1巻
インク清浄液，グリセリン	各1本
ビニールカバー	1枚
付属品収容木箱	1個

3. 仕　様

(1) EO−6型ペン書き記録器

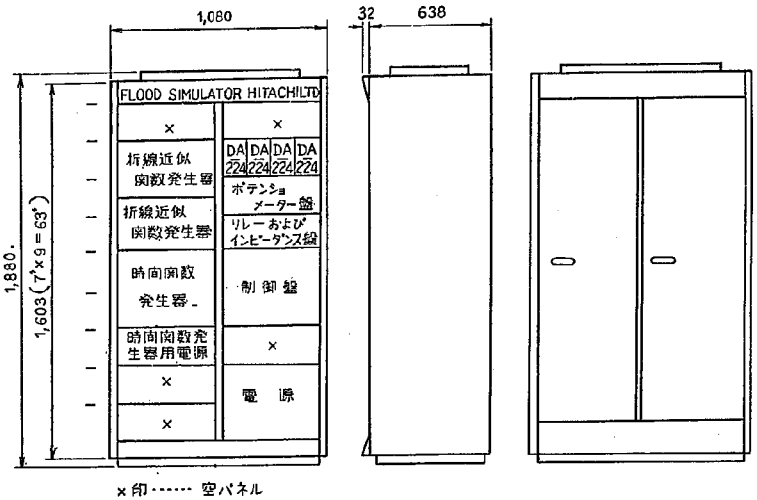
ガルバノメーター数	6
記録速度	5, 15, 30, 60, 120mm毎分，毎秒の10段切換
マーカ数	2 外部からの短絡により動作する。電源内蔵 (電圧30V，抵抗3KΩ)
記録紙	巾 260mm，円弧セクション (2mm×1mm) または白紙，長さ 40m巻込
電　源	AC 100V，180mA
記録紙送りモーター	出力5W，シンクロナス
外形寸法	42cm×26cm×35cm
重　量	約 24kg

(2) III−50型ガルバノメーター

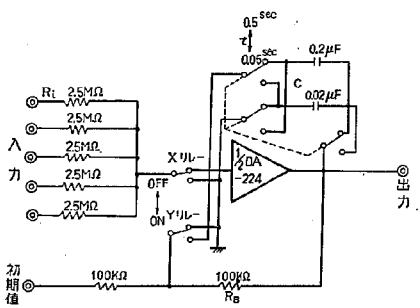
感　度	1mm/1mA
感度一様な周波数範囲	0〜50〜 (±10%)
内部抵抗	3.8KΩ以下
中　点	有
電流対振巾の直線性	2.5%以内
制動 (8KΩ並列)	5%以内
ペンの長さ	130mm
最大振巾	±20mm

以　上

外　観　図

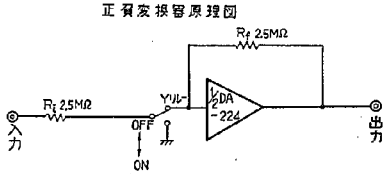


加算積分器原理図



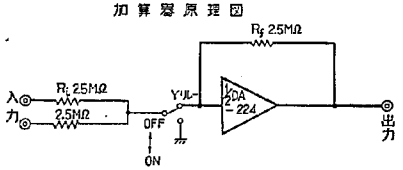
	Xリレー	Yリレー
B C	ON	ON
R	ON	ON
H	ON	OFF
C	OFF	OFF

正負変換器原理図



	Yリレー
B C	ON
R	ON
H	OFF
C	OFF

加算器原理図



	Yリレー
B C	ON
R	ON
H	OFF
C	OFF

開水路断面急拡部の水理に関する研究 (2)

——段落ち部の水理——

(昭和35年3月)

芦田和男*

要旨:

本論では，段落ち部の常流流れについて，急拡による損失水頭，死水域の大きさ，流速分布が一様になる区間長，拡がり角度と損失水頭との関係射流と常流との限界等について実験的，理論的研究をおこない，段落ち部の水理計算法を明らかにした。

目　次

1 緒言……(1)
2 実験的研究……(2)
〔1〕実験装置……(2)
〔2〕水面形……(2)
〔3〕死水域……(4)
〔4〕流速分布……(11)
3 理論的考察……(12)
〔1〕急拡による損失水頭……(12)
(a) 形状損失と摩擦損失とを分離する方法……(12)
(b) 形状損失と摩擦損失とを分離しない方法……(15)
〔2〕射流と常流との限界条件……(16)
(a) 損失水頭を無視する場合……(16)
(b) 損失水頭を無視しない場合……(18)
〔3〕死水域の大きさ，水位が回復するに必要な距離……(19)
〔4〕拡がり角度と損失水頭との関係……(20)
4 段落ち部における水理計算法……(20)
(a) 2断面の位置……(20)
(b) 射流か常流かの判定……(20)
(c) 急拡による損失水頭……(21)
(d) 1断面の水深……(21)
(e) 1断面より上流の水面形……(21)
(f) 1～2断面間の水面形……(21)
5 計算値と実測値との比較……(21)
6 結論……(22)

1. 緒言

河川や水路に人工構造物を設ける場合には，それが水流に対していかなる影響を与えるかを明らかにして，水理設計を行わねばならぬ，人工構造物が一様流れに対して与える変化は流れの収縮と拡大とに分けられる。流れの収縮と拡大とでは水理的にかなり異る。すなわち前者では境界に急激な変化を与えなければ**流れは壁面から離れず，計算が比較的容易であり，水流に対してどのような影響を与えるか比較的簡単に知り得る。これに対して水流が拡大する場合には流れ方向に圧力が増加し，このため拡大角がある程度以上になると流れは壁面より剥離する。この剥離流れのために水理的にいろいろ複雑な問題を生ずる。したがって水流に対してどのような影響を与えるかも簡単ではない。構造物が流れに対する影響は一般に流れの収縮と拡大との組合せであるが，拡大流れと収縮流れとでは水理的に異る。これを拡大流れと収縮流れとの基本的な型に分類してそれぞれについて研究することは実験技術上からも，問題をより明確化する点においても有効である。この意義において著者は断面拡大部における水理について研究を行なっている。

断面の拡大には横方向の拡大（水路幅の拡大）と鉛直方向の拡大（段落ちによる拡大）とがある。***前者については著者はすでに第1報[1]において述べたので本論は後者について論ずる。

拡大部の流れには射流と常流とがあり，両者は水理的に全く異る。射流拡大部の水理については2，3の研究[2][3]があり，かなり明らかにされている。これに対して常流の場合については研究されたものをほとんど見受けない。本論ではこの場合を取り扱う。

本論で取り扱っている内容は，常流の場合について，急拡による損失水頭，死水域の大きさ，流速分布，流速分布が一様になる区間長，拡がり角度と損失水頭との関係等であり，これらについて実験をおこない，さらに理論的検討を加えて，これらの計算法を明らかにし，最後に段落ちを伴う場合の水理計算法を述べる。

---

* 河川部河川研究室研究員

** これについての考察は次の機会にする。

*** もちろん両者の組み合せもあるが，それぞれについて明らかにしておけば，これは比較的簡単である。

さらに断面拡大部においては下流水位がある程度以下になると断面急拡点が支配断面となり，限界水深が生ずる。構造物の設計においてはこの限界を的確にしかも容易に求める必要があるが，本論ではこれの簡単な判定法について述べる。なお段落ち部の水理計算を容易に行うため計算図表をかかげておいた。

河川においては，段落ち部の常流流れとして，低いせき，床固め等があるが，本論によりこれらの水理的取り扱い法が明らかになったと考えられる。

2　実験的研究

〔1〕実験装置

実験に用いた水路は図—1に示すとおり，長さ20m，幅57cm深さ40cm，こう配$\frac{1}{1,000}$長方形断面の木製水路である。水路の上流端から5.5m～7.5mの区間の河床を高め，段落ち部を作った。河床が高くなる上流端には図に示すとおりの丸みをつけて縮流の影響をなくした。下流部はθを4°～90°までいろいろ変化させた。河床には平均粒径2mmの砂をラッカーで張りつけた。一定の流量に対してFroude数をいろいろ変化させて実測を行ったが，このために河床こう配を変化させることはなく水位調節せきで水面こう配のみを変化させた。したがって実測結果には下流部が等流でない場合の資料も含まれている。

流量の測定は量水せきによった。

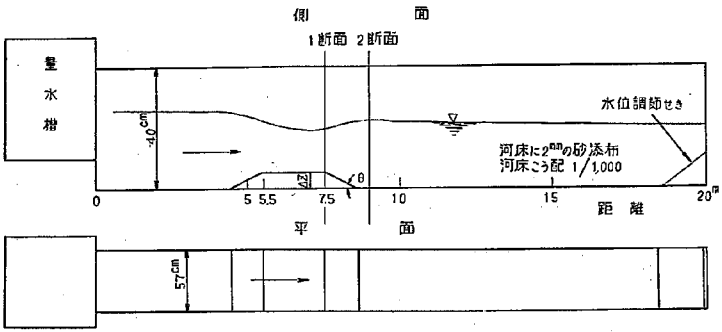


図 — 1

〔2〕水　面　形

表—1に示す種類について実験を行った。水位は各断面3点～5点の平均として求めた。1例を表—2に示す。同表のP_tの位置は図—2のとおりである。エネルギー水頭H_tを求める場合のVとしては死水域を除かず全断面を考え，αは一様区間に対する実測値1.04を使用した。後記のごとく，断面急拡点で低下した水位が回復するまでの区間のαの値は1.04よりもかなり大きいので，この区間については表—2のエネルギー水頭は真の値ではない。

表—2を図—3に示す。断面急拡点（7.5m）から下流は流速水頭が水位に変換するため，水位が上昇し，l_α下流で水位は最高となる。この断面を2断面とし急拡点を1断面とする。2断面より下流には急拡による影響はない。また1断面より上流は低下背水となるが，1断面の水理量が求まると計算により容易にその水位を求めることができるから，ここでは1断面～2断面間の水理量を問題とする。表—2および図—3に示したと同様な方法によりl_αおよび1,2　断面の水深を求めて表—1に示した。

表—1の$\triangle Z$として図—9のA点およびC点の差を取るべきであるが，死水域の長さが本実験においては20cm～50cmであり，C点およびB点の差は0.3mm程度以内であるので簡単のためにA点，B点の河床差として求めた。

(7)　欄のF_2は2断面のFroude数で

$$F_2=\frac{V_2}{\sqrt{gh_2}}$$

(8)　欄は　$K=\dfrac{\triangle Z}{h_2}$

(9)　欄は1～2断面間の全損失水頭で

$$h_{tl}=Z_1+h_1+\frac{\alpha V_1^2}{2g}-\left(Z_2+h_2+\frac{\alpha V_2^2}{2g}\right),\quad \alpha=1.04$$

(10)　欄のh_fは1～2断面間の摩擦損失水頭である。1～2断面間の流速分布が複雑に変化しているので，これを厳密に求めることは困難である。ここでは一様区間の摩擦損失と同じであると仮定して2断面より下流のエネルギーこう配に1～2断面間の距離を掛けて求めた。このように仮定してもほぼ満足すべき結果を得ることを後記する。

(11)　欄のh_lは形状損失水頭であり

$$h_l=h_{tl}-h_f$$ として求めた。

表—1　死水域，損失水頭の実測資料

No	(1) Q (l/sec)	(2) h_1 (cm)	(3) h_2 (cm)	(4) l_D (cm)	(5) l_α (cm)	(6) $\triangle Z$ (cm)	(7) F_s	(8) K	(9) h_{it} (cm)	(10) h_f (cm)	(11) h_l (cm)	(12) $\frac{h_{it}}{h_2}$	(13) $\frac{h_l}{h_2}$
1	5	1.88	5.49	37.5	100	2.65	0.214	0.483	0.17	0.05	0.12	0.031	0.024
2	5	2.23	8.16	51.0	175	5.41	0.120	0.663	0.37	0.03	0.34	0.045	0.042
3	5	2.78	5.96	24.0	100	2.69	0.191	0.451	0.10	0.03	0.07	0.017	0.012
4	5	2.86	6.01	—	100	2.67	0.190	0.443	0.08	0.02	0.06	0.013	0.010
5	5	2.90	6.08	—	100	2.67	0.182	0.440	0.09	0.03	0.06	0.015	0.010
6	5	3.31	9.18	39.0	100	5.44	0.101	0.593	0.08	0.00	0.08	0.009	0.009
7	7.5	3.58	6.85	26.0	125	2.64	0.234	0.393	0.12	0.06	0.06	0.018	0.009
8	7.5	3.88	9.88	41.0	100	5.44	0.135	0.550	0.15	0.01	0.14	0.015	0.014
9	7.5	4.97	7.99	19.0	100	2.69	0.204	0.338	0.08	0.02	0.06	0.010	0.008
10	10	3.81	7.33	26.0	125	2.64	0.281	0.360	0.12	0.08	0.04	0.016	0.006
11	10	3.82	10.01	47.0	175	5.41	0.177	0.540	0.29	0.05	0.24	0.029	0.024
12	10	4.18	7.52	26.5	125	2.69	0.272	0.359	0.10	0.07	0.03	0.013	0.004
13	10	4.96	8.08	—	75	2.68	0.241	0.332	0.08	0.02	0.06	0.010	0.007
14	10	5.07	8.26	—	100	2.68	0.236	0.324	0.09	0.04	0.05	0.011	0.006
15	10	5.24	11.22	52.0	125	5.44	0.149	0.484	0.12	0.02	0.10	0.011	0.009
16	15	4.07	8.38	—	150	2.68	0.347	0.319	0.38	0.10	0.28	0.046	0.033
17	15	4.56	11.13	58.0	200	5.43	0.226	0.487	0.48	0.03	0.45	0.043	0.040
18	15	4.85	8.54	27	125	2.64	0.336	0.310	0.14	0.09	0.05	0.016	0.006
19	15	5.29	8.85	28.5	125	2.69	0.319	0.306	0.17	0.07	0.10	0.019	0.011
20	15	6.84	12.95	52.0	150	5.44	0.180	0.420	0.12	0.02	0.10	0.0093	0.008
21	20	6.36	10.01	29.0	150	2.64	0.353	0.264	0.08	0.11	0.03	0.008	—
22	20	6.38	12.89	52.0	175	5.43	0.242	0.421	0.29	0.04	0.25	0.023	0.019
23	20	7.52	11.03	—	150	2.68	0.306	0.243	0.09	0.04	0.05	0.008	0.004
24	20	8.13	14.35	50.0	150	5.44	0.206	0.379	0.14	0.02	+0.12	0.0098	0.008
25	20	9.05	12.41	—	125	2.68	0.257	0.216	0.03	0.05	−0.02	0.002	—
26	30	7.25	14.2	50.0	200	5.43	0.314	0.383	0.69	0.09	0.60	0.049	0.004
27	30	9.55	15.95	49.5	175	5.43	0.264	0.340	0.25	0.04	0.21	0.016	0.013
28	30	11.45	17.56	36.0	125	5.43	0.229	0.309	0.12	0.01	0.11	0.0068	0.006
29	35	7.86	15.14	50.5	200	5.43	0.352	0.358	0.62	0.14	0.48	0.041	0.032
30	37.5	9.94	16.71	49.0	200	5.43	0.307	0.324	0.33	0.08	0.25	0.020	0.015
31	37.5	12.60	18.85	37.3	125	5.43	0.256	0.288	0.11	0.02	0.09	0.0058	0.005

表—2　水位の実測資料（1例）

表2—(1)

No. 1　$Q=5$ l/sec　$\triangle Z=2.65$cm

Sec \ Pt.	水深 (h) (cm) 1	2	℄	2′	1′	平均	(cm) Z	(cm) $h+Z$	(cm) $\alpha\frac{V^2}{2g}$	(cm) H_e
5.50	2.71	—	2.52	—	2.76	2.66	4.72	7.38	0.58	7.96
6.00	2.49	—	2.30	—	2.38	2.39	4.75	7.14	0.72	7.86
6.50	2.73	—	2.45	—	2.63	2.60	4.54	7.14	0.60	7.84
7.00	2.25	2.16	2.10	2.18	2.23	2.18	4.59	6.77	0.85	7.62
7.25	1.92	1.92	1.73	1.82	1.92	1.86	4.53	6.39	1.18	7.57
7.50	1.97	1.87	1.74	1.86	1.98	1.88	4.35	6.23	1.15	7.38
7.60	4.56	4.54	4.56	4.51	4.56	4.55	1.70	6.25	0.20	6.45
7.75	5.30	5.34	5.35	5.40	5.28	5.32	1.70	7.02	0.14	7.16
8.00	5.36	5.37	5.31	5.33	—	5.34	1.67	7.01	0.14	7.15
8.25	5.39	5.41	5.43	5.46	5.43	5.42	1.64	7.06	0.14	7.20
8.50	5.44	5.49	5.50	5.50	5.51	5.49	1.58	7.07	0.14	7.21
8.75	5.47	5.45	5.49	5.51	5.53	5.49	1.58	7.07	0.14	7.21
9.00	5.48	5.45	5.45	5.48	—	5.47	1.58	7.05	0.14	7.19
9.25	5.49	5.47	5.45	5.51	5.49	5.48	1.57	7.05	0.14	7.19
9.50	5.48	5.47	5.47	5.50	5.50	5.48	1.54	7.02	0.14	7.16
9.75	5.46	—	5.51	—	5.46	5.48	1.53	7.01	0.14	7.15
10.00	5.42	—	5.45	—	5.48	5.46	1.51	6.97	0.14	7.11
10.50	5.54	—	5.55	—	5.55	5.55	1.40	6.95	0.13	7.08
11.00	5.56	—	5.60	—	5.55	5.56	1.39	6.95	0.13	7.08
11.50	5.66	—	5.66	—	5.64	5.65	1.31	6.96	0.13	7.09
12.50	5.71	—	5.82	—	5.73	5.75	1.14	6.89	0.12	7.01
14.25	6.01	—	5.93	—	5.92	5.93	0.93	6.88	0.12	7.00

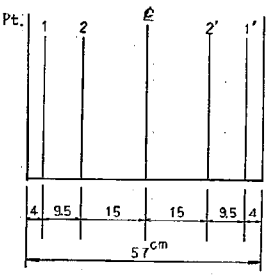
表2—(2)

No. 22　$\triangle Z=5.43$cm

Sec \ Pt.	水深 (h) (cm) 1	2	℄	2′	1′	平均	(cm) Z	(cm) $h+Z$	(cm) $\alpha\frac{V^2}{2g}$	(cm) H_e
5.50	6.57	—	6.69	—	6.65	6.64	6.68	13.32	1.49	14.81
6.00	6.81	—	6.73	—	6.74	6.76	6.49	13.25	1.43	14.68
6.50	6.75	—	6.66	—	6.65	6.69	6.43	13.12	1.46	14.58
7.00	6.51	6.37	6.32	6.46	6.50	6.43	6.53	12.96	1.58	14.54
7.25	6.33	6.36	6.37	6.49	6.50	6.41	6.44	12.85	1.59	14.44
7.50	6.30	6.38	6.41	6.39	6.44	6.38	6.46	12.84	1.60	14.44
7.60	11.74	11.69	11.75	11.78	11.67	11.73	1.03	12.76	0.47	13.23
7.75	11.81	11.89	11.92	11.88	11.80	11.86	1.02	12.88	0.46	13.34
8.00	12.41	12.30	12.30	12.21	—	12.31	0.99	13.30	0.43	13.73
8.25	12.53	12.71	12.62	12.61	12.55	12.60	0.96	13.56	0.41	13.97
8.50	12.67	12.73	12.72	12.80	12.79	12.74	0.87	13.61	0.41	14.02
8.75	12.73	12.80	12.85	12.80	12.88	12.81	0.88	13.69	0.40	14.09
9.00	12.84	12.81	12.82	12.84	—	12.83	0.89	13.72	0.40	14.12
9.25	12.89	12.89	12.83	12.95	12.91	12.89	0.88	13.77	0.39	14.16
9.50	12.90	12.91	12.91	12.90	12.90	12.90	0.87	13.77	0.39	14.16
9.75	12.90	—	12.92	—	12.88	12.90	0.87	13.77	0.39	14.16
10.00	12.89	—	12.93	—	12.84	12.89	0.84	13.73	0.39	14.12
10.50	12.93	—	13.00	—	12.97	12.98	0.73	13.71	0.39	14.10
11.00	12.99	—	13.02	—	12.97	12.99	0.70	13.69	0.39	14.08
11.50	13.06	—	13.12	—	13.04	13.07	0.63	13.70	0.38	14.08
12.50	13.11	—	13.24	—	13.18	13.18	0.50	13.68	0.38	14.06
14.25	13.43	—	13.31	—	13.30	13.35	0.32	13.67	0.37	14.04

次に拡がり角度と水面形との関係を図—4に示す。$\theta=4°\sim8°$ではほぼ同じである。10°で拡大始点の水位が多少高くなる。$\theta=15°$でこの水位は急に高くなり，θがそれ以上（$\theta=20°$，30°，45°，90°）においては$\theta=15°$の水面形とほとんど同じである。

角度と損失水頭との関係をさらに調べるためsec 11.5の水位，Q，およびΔZを一定にしてθのみ変化させ，7.5mの水位を測定した結果を表—3に示す。h_{11}は断面7.5と断面11.5間の全損失水頭であり，h_tはh_{11}の最小の値（摩擦のみによる損失と考えられる）を各h_{11}から差し引いたものである。



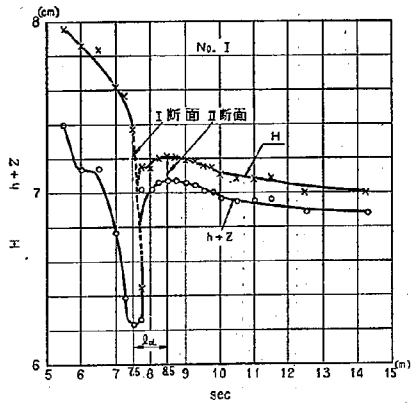
図—2　測点の位置

〔3〕死　水　域

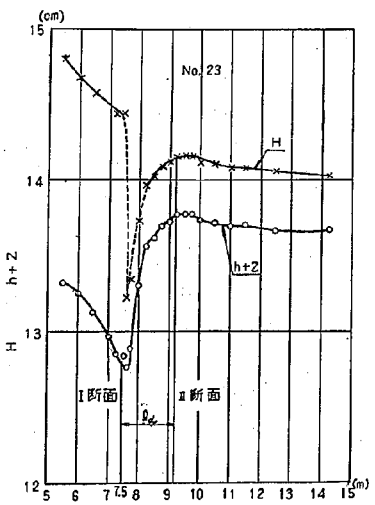
急拡点より下流は流れが剥離して死水域（厳密には後流領域）を生ずる。剥離した流れには instant stop boundary と separation boundary とがある。[4] 瞬間流速をV，変動速度をV'時間的平均速度を$\overline{V}$とすれば

$$V=\overline{V}+V'$$

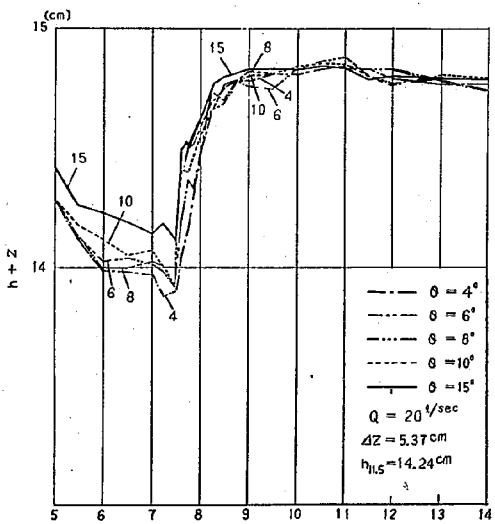
である。剥離した流れでは$\overline{V}$に比べてV'がかなり大きく，$\overline{V}=V'$となる所では瞬間的に$V=o$となる時があ



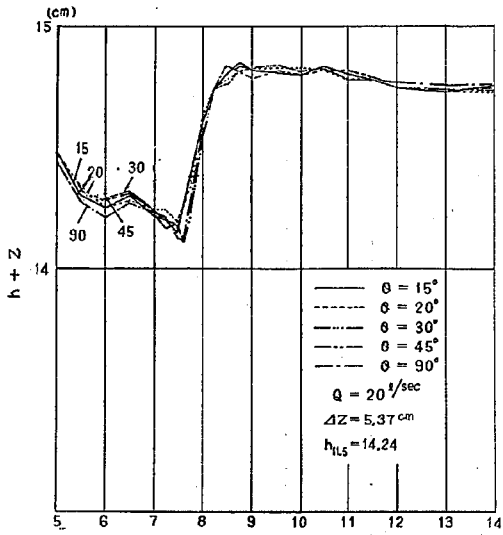
図—3 (1)　水面形（1例）



図—3 (2)



図—4 (1)　拡大角と水面形との関係



図—4 (2)　拡大角と損失水頭との関係

る。このように瞬間的に流れが止まる境界をつらねたものが，instant stop boundary である。この境界より壁面の方では瞬間的な逆流が生ずる。さらに壁面の方になるにつれ，その継続時間と振幅が段々大きくなる。ついには逆流と順流との継続時間が相半ばするに至る。

これは $V=V'$ すなわち $\overline{V}=o$ の境界であり，Separation boundary であると考えられる。ここで死水域というのはこの separation boundary をさすことにする。測定は過マンガン酸カリで水を着色し，肉眼で観測した。死水域の長さのみを測定した結果を表—1に示したが，これとは別に死水域の形状を測定して表—4，および図—5に示す。点はかなり分散しているが，死水域の境界線をほぼ直線的であると考えて実用上差しつかえないであろう。

表—3　拡大角と損失水頭との関係　　2断面　11.5m

$h_2=7.67cm$　$V_2=22.9cm/sec$　$F_2=0.264$

$K=0.423\dfrac{h_{t190°}}{h_2}=0.033$

$Q=10l/sec$　$\Delta Z=3.24cm$

No.	θ (°)	h_{t1} (cm)	h_t (cm)	h_1 (cm)	V_1 (cm/sec)	h_{t1}/h_{t1} 90°	h_t/h_t 90°	
1	4	0.20	0.01	3.74	46.9	0.80	0.17	0.681
	6	0.20	0.01	3.73	47.1	0.80	0.17	0.675
	8	0.19	0	3.72	47.2	0.76	0	0.629
	10	0.20	0.01	3.74	46.9	0.80	0.17	0.681
	15	0.20	0.01	3.74	46.9	0.80	0.17	0.681
	20	0.30	0.11	3.97	44.2	1.20	1.83	1.29
	30	0.26	0.07	3.89	45.1	1.04	1.17	1.03
	45	0.26	0.07	3.89	45.1	1.04	1.17	1.03
	90	0.25	0.06	3.88	45.2	1.00	1.0	0.973
	$Q=7.5l/sec$	$\Delta Z=3.24cm$	$F_2=0.214$	$K=0.445$				
	$h_2=7.27cm$	$V_2=18.1$						
2	4	0.03	0.01	3.47	37.9	0.23	0.091	
	6	0.03	0.01	3.47	37.9	0.23	0.091	
	8	0.02	0	3.46	38.0	0.15	0	
	10	0.03	0.01	3.47	37.9	0.23	0.091	
	15	0.09	0.07	3.57	36.9	0.69	0.636	
	20	0.11	0.09	3.60	36.6	0.85	0.819	
	30	0.14	0.12	3.65	36.1	1.08	1.09	
	45	0.14	0.12	3.65	36.1	1.08	1.09	
	90	0.13	0.11	3.63	36.2	1.00	1.0	
	$Q=5.0l/sec$	$\Delta Z=3.24cm$	$F_2=0.181$					
	$h_2=6.21cm$	$V_2=14.1cm/sec$	$K=0.522\dfrac{h_{t1}}{h_2}=0.024$					
3	4	0.08	0.02	2.49	35.2	0.53	0.221	
	6	0.07	0.01	2.48	35.4	0.47	0.110	
	8	0.06	0	2.44	36.0	0.40	0	
	10	0.06	0	2.44	36.0	0.40	0	
	15	0.08	0.02	2.50	35.1	0.53	0.221	
	20	0.13	0.07	2.60	33.7	0.87	0.779	
	30	0.15	0.09	2.64	33.2	1.00	1.0	
	45	0.16	0.10	2.65	33.1	1.07	1.11	
	90	0.15	0.09	2.63	33.3	1.00	1.0	

$Q=5.0l/sec$ $\triangle Z=6.0cm$ $F_2=0.099$
$h_2=9.30cm$ $V_2=53cm/sec$ $K=0.645\ \frac{h_{t1}}{h_2}=0.015$

No.	θ (°)	h_{t1} (cm)	h_t (cm)	h_1 (cm)	V_1(cm/sec)	h_{t1}/h_{t1} 90°	h_t/h_t 90°		
4	4	0.04	0.01	2.90	—	0.29	0.091		
	6	0.04	0.01	2.90	—	0.29	0.091		
	8	0.03	0	2.88	—	0.21	0		
	10	0.03	0	2.89	30.4	0.21	0		
	15	0.11	0.08	3.00	29.3	0.79	0.727		
	20	0.12	0.09	3.02	29.1	0.86	0.818		
	30	0.14	0.11	3.05	27.7	1.00	1.0		
	45	0.15	0.12	3.06	28.7	1.07	1.09		
	90	0.14	0.11	3.05	28.8	1.00	1.0		

$Q=7.5l/sec$ $\triangle Z=6.0cm$ $F_2=0.128$
$h_2=10.25$ $V_2=12.8cm/sec$ $K=0.585\ \frac{h_{t1}}{h_2}=0.019$

5	4	0.09	0.02	3.73	35.0	0.45	0.154		
	6	0.08	0.01	3.72	35.4	0.40	0.077		
	8	0.07	0	3.71	35.4	0.35	0		
	10	0.07	0	3.71	35.4	0.35	0		
	15	0.13	0.06	3.80	34.6	0.65	0.462		
	20	0.17	0.10	3.86	34.1	0.85	0.77		
	30	0.20	0.13	3.90	33.8	1.00	1.0		
	45	0.20	0.13	3.90	33.8	1.00	1.0		
	90	0.20	0.13	3.90	33.8	1.00	1.0		

$Q=20l/sec$ $\triangle Z=6.10cm$ $V_2=23.9cm/sec$
$h_2=14.69cm$ $F_2=0.199$ $K=0.415\ \frac{h_{t1}}{h_2}=0.013$

6	4	0.01	—	7.88	44.6	0.05	—		
	6	0.04	0	7.92	44.4	0.20	0		
	8	0.05	0.01	7.93	44.3	0.25	0.0625		
	10	0.11	0.07	8.01	43.8	0.55	0.437		
	15	0.15	0.11	8.08	43.5	0.75	0.686		
	20	0.19	0.15	8.11	43.3	0.95	0.936		
	30	0.19	0.15	8.12	43.3	0.95	0.936		
	45	0.21	0.17	8.13	43.2	1.00	1.06		
	90	0.20	0·16	8.12	43.2	1.00	1.0		

$Q=20l/sec$ $\triangle Z=5.83cm$ $V_2=25.0cm/sec$
$h_2=14.05cm$ $F_2=0.214$ $K=0.415\ \frac{h_{t1}}{h_2}=0.016$

7	4	0.09		7.51	46.7	0.39	—		
	6	0.12	0.01	7.55	46.5	0.52	0.0834		
	8	0.11	0	7.54	46.5	0.48	0		
	10	0.14	0.03	7.58	46.3	0.61	0.25		
	15	0.22	0.11	7.70	45.6	0.96	0.916		
	20	0.24	0.13	7.72	45.5	1.04	1.08		
	30	0.26	0.15	7.75	45.3	1.16	1.25		
	45	0.24	0.13	7.73	45.4	1.04	1.08		
	90	0.23	0.12	7.71	45.6	1.00	1.0		

$Q=20l/sec$ $\triangle Z=5.97cm$ $V_2=23.9cm/sec$
$h_2=14.68cm$ $F_2=0.199$ $K=0.406\ \frac{h_{t1}}{h_2}=0.016$

8	4	0.05	0	7.97	44.0	0.21	0		
	6	0.06	0.01	7.98	44.0	0.25	0.0526		
	8	0.07	0.02	8.00	43.9	0.29	0.105		
	10	0·09	0.04	8.03	43.7	0.38	0.210		
	15	0.14	0.09	8.10	43.3	0.58	0.474		
	20	0.21	0.16	8.18	42.9	0.88	0.841		
	30	0.23	0.18	8.21	42.8	0.96	0.946		
	45	0.22	0.17	8.20	42.8	0.92	0.894		
	90	0.24	0.19	8.22	42.7	1.00	1.0		

$Q=10l/sec$ $\triangle Z=5.97cm$ $V_2=15.7cm/sec$
$h_2=11.15cm$ $F_2=0.150$ $K=0.534$ $\frac{h_{t1}}{h_2}=0.021$

No.	θ (°)	h_{t1} (cm)	h_t (cm)	h_1 (cm)	V_1(cm/sec)	h_{t1}/h_{t1} 90°	h_t/h_t 90
9	4	0.07	0.02	4.52	38.8	0.30	0.111
	6	0.05	0	4.48	39.2	0.22	0
	8	0.08	0.03	4.54	38.6	0.35	0.167
	10	0.11	0.06	4.58	38.3	0.48	0.333
	15	0.19	0.14	4.70	37.3	0.83	0.778
	20	0.23	0.18	4.75	36.9	1.00	1.0—
	30	0.23	0.18	4.76	36.9	1.00	1.0—
	45	0.23	0.18	4.76	36.9	1.00	1.0—
	90	0.23	0.18	4.76	36.9	1.00	1.0—

$Q=15l/sec$ $\triangle Z=5.97cm$ $V_2=20.3cm/sec$
$h_2=12.97cm$ $F_2=0.181$ $K=0.460$ $\frac{h_{t1}}{h_2}=0.018$

10	4	0.06	—	6.29	41.8	0.26	—
	6	0.08	0	6.31	41.7	0.35	0.0
	8	0.08	0	6.31	41.7	0.35	0.0
	10	0.08	0	6.31	41.7	0.35	0.0
	15	0.14	0.06	6.40	41.1	0.61	0.4
	20	0.16	0.08	6.42	41.0	0.70	0.533
	30	0.21	0.13	6.50	40.5	0.91	0.867
	45	0.23	0.15	6.52	40.4	1.00	1.0—
	90	0.23	0.15	6.52	40.4	1.00	1.0—

$Q=10l/sec$ $\triangle Z=5.95cm$ $V_2=15.6cm/sec$
$h_2=11.23cm$ $F_2=0.149$ $K=0.529$ $\frac{h_{t1}}{h_2}=0.017$

11	4	0.01	—	4.67	37.6	—	—
	6	0.06	0	4.75	36.9	0.32	0
	8	0.06	0	4.74	37.0	0.32	0
	10	0.08	0.02	4.77	36.8	0.42	0.154
	15	0.15	0.09	4.87	35.9	0.79	0.692
	20	0.16	0.10	4.89	35.8	0.84	0.77
	30	0.20	0.14	4.94	35.5	1.05	1.08
	45	0.21	0.15	4.95	35.5	1.10	1.15
	90	0.19	0.13	4.93	35.6	1.00	1.0

$Q=15l/sec$ $\triangle Z=5.95cm$ $V_2=20.65cm/sec$
$h_2=12.77cm$ $F_2=0.185$ $K=0.467$ $\frac{h_{t1}}{h_2}=0.019$

12	4	0.11	—	6.20	42.5	0.46	—
	6	0.16	0.02	6.27	42.0	0.67	0.2
	8	0.14	0	6.25	42.2	0.58	0
	10	0.15	0.01	6.26	42.0	0.63	0.1
	15	0.21	0.07	6.35	41.4	0.88	0.7
	20	0.25	0.11	6.40	41.1	1.04	1.1
	30	0.23	0.09	6.37	41.3	0.96	0.9
	45	0.24	0.10	6.39	41.2	1.00	1.0
	90	0.24	0.10	6.39	41.2	1.00	1.0

$Q=30l/sec$ $\triangle Z=5.95cm$ $V_2=33.5cm/sec$
$h_2=15.68cm$ $F_2=0.270$ $K=0.380$ $\frac{h_{t1}}{h_2}=0.026$

13	4	0.14	0	8.36	62.9	0.34	0
	6	0.16	0.02	8.41	62.5	0.39	0.074
	8	0.22	0.08	8.52	61.7	0.54	0.296
	10	0.22	0.08	8.51	61.9	0.54	0.296
	15	0.40	0.26	8.85	59.4	0.97	0.96
	20	0.40	0.26	8.81	59.7	0.97	0.96
	30	0.41	0.27	8.85	59.4	1.00	1.0
	45	0.41	0.27	8.86	59.4	1.00	1.0
	90	0.41	0.27	8.86	59.4	1.00	1.0

$Q=35l/sec$ $\triangle Z=5.95cm$ $V_2=34.8cm/sec$
$h_2=17.62cm$ $F_2=0.281$ $K=0.337$ $\frac{h_{11}}{h_2}=0.015$

No.	θ (°)	h_I (cm)	h_{II} (cm)	h_1 (cm)	V_1(cm/sec)	h_{II}/h_{II} 90°	h_I/h_I 90		
14	4	0.02		10.54	58.2	0.07			
	6	0.16	0.11	10.61	57.9	0.62			
	8	0.05	0	10.59	58.0	0.19			
	10	0.10	0.05	10.65	57.7	0.38			
	15	0.25	0.10	10.87	56.6	0.96			
	20	0.29	0.24	10.92	56.3	1.11			
	30	0.25	0.20	10.87	56.5	0.96			
	45	0.29	0.24	10.93	56.2	1.11			
	90	0.26	0.21	10.89	56.4	1.00			

$Q=25l/sec$ $h_2=14.29cm$ $\triangle Z=5.95cm$
$V_2=30.7cm/sec$ $F_2=0.259$ $K=0.417$ $\frac{h_{11}}{h_2}=0.031$

15	4	0.26	—	7.06	62.1	0.59	—		
	6	0.32	0.03	7.19	61.0	0.73	0.20		
	8	0.29	0	7.11	61.7	0.66	0		
	10	0.38	0.09	7.32	59.9	0.86	0.60		
	15	0.42	0.13	7.39	59.3	0.95	0.866		
	20	0.45	0.16	7.43	59.0	1.02	1.07		
	30	0.45	0.16	7.46	58.7	1.02	1.07		
	45	0.47	0.18	7.50	58.4	1.07	1.20		
	90	0.44	0.15	7.45	58.8	1.00	1.0		

$Q=5\ l/sec$ $V_2=9.37cm/sec$ $\triangle Z=6.03cm$
$h_2=9.37cm$ $F_2=0.0977$ $K=0.643$ $\frac{h_{11}}{h_2}=0.020$

16	4	0.06	0	2.99	29.4	0.32	0		
	6	0.07	0.1	3.00	29.3	0.37	0.077		
	8	0.06	0	2.99	29.4	0.32	0		
	10	0.07	0.1	3.00	29.3	0.37	0.077		
	15	0.12	0.06	3.07	28.6	0.63	0.462		
	20	0.16	0.10	3.13	28.0	0.84	0.77		
	30	0.18	0.12	3.15	27.9	0.95	0.924		
	45	0.19	0.13	3.17	27.7	1.0	1.0		
	90	0.19	0.13	3.17	27.7	1.0	1.0		

表—4 (1) 死水域の境界線

A $\triangle Z=5.39$ cm

$Q=15l/sec$ $h_{7.5}=4.29$ cm $h_{10}=10.94$ cm

sec	7.5	7.55	7.6	7.7	7.8	7.9	8.0	8.1
d (cm)	5.0	4.3	3.7	3.5	2.8	1.9	2.1	0

B $Q=20$ $h_{7.5}=5.92$ $h_{10}=12.27$

sec	7.5	7.55	7.6	7.7	7.8	7.9	8.0	8.08
d	5.0	4.4	4.0	3.5	2.8	2.3	1.5	0

C $Q=35$ $h_{7.5}=8.77$ $h_{10}=15.89$

sec	7.5	7.55	7.6	7.7	7.8	7.9	8.0	8.05
d	5.0	4.4	3.9	3.4	3.2	2.0	1.2	0

D $Q=40$ $h_{7.5}=9.44$ $h_{10}=16.63$

sec	7.5	7.55	7.6	7.7	7.8	7.9	8.0	8.10
d	5.0	4.4	3.7	3.2	3.2	2.1	1.4	0

E $Q=25$ $h_{7.5}=7.31$ $h_{10}=14.03$

sec	7.5	7.55	7.6	7.7	7.8	7.9	8.0
d	5.0	4.4	4.1	3.6	3.1	2.4	0

F $Q=30$ $h_{7.5}=8.00$ $h_{10}=14.94$

sec	7.5	7.55	7.6	7.7	7.8	7.9	8.0
d	5.0	4.5	4.2	3.5	2.9	2.6	0.

G $Q=20$ $h_{7.5}=10.15$ $h_{10}=16.24$

sec	7.5	7.55	7.6	7.7	7.8	7.9	8.0
d	5.0	4.3	3.7	3.6	2.9	2.2	0

表—4 (2)

H　$Q=20$　$h_{7.5}=8.26$　$h_{10}=14.57$

sec	7.5	7.75	7.6	7.7	7.8	7.9	8.01
d	5.0	4.2	3.3	3.0	2.1	1.3	0

I　$Q=30$　$h_{7.5}=10.04$　$h_{10}=16.51$

sec	7.5	7.55	7.6	7.7	7.8	7.9	7.98
d	5.0	4.1	3.6	3.3	2.2	2.0	0

J　$Q=30$　$h_{7.5}=15.43$　$h_{10}=21.4$

sec	7.5	7.55	7.6	7.7	7.8	7.89	
d	5.0	4.1	3.5	2.8	1.9	0	

K　$Q=40$　$h_{7.5}=13.20$　$h_{10}=19.67$

sec	7.5	7.55	7.6	7.7	7.8	7.9	
d	5.0	4.3	3.4	3.0	2.6	0	

L　$Q=40$　$h_{7.5}=16.09$　$h_{10}=22.29$

sec	7.5	7.55	7.6	7.7	7.8	7.85	
d	5.0	4.4	3.6	3.3	1.7	0	

M　$Q=25$　$h_{7.5}=12.80$　$h_{10}=18.92$

sec	7.5	7.55	7.6	7.7	7.8	7.9	7.93
d	5.0	4.0	3.6	3.1	2.7	1.4	0

N　$Q=25$　$h_{7.5}=9.25$　$h_{10}=15.63$

sec	7.5	7.55	7.6	7.7	7.8	7.9	7.97
d	5.0	4.3	3.4	3.1	2.3	1.5	0

O　$Q=15$　$h_{7.5}=8.44$　$h_{10}=14.51$

sec	7.5	7.55	7.6	7.7	7.8	7.9	7.95
d	5.0	4.5	4.1	3.5	2.2	1.5	0

P　$Q=15$　$h_{7.5}=9.99$　$h_{10}=16.00$

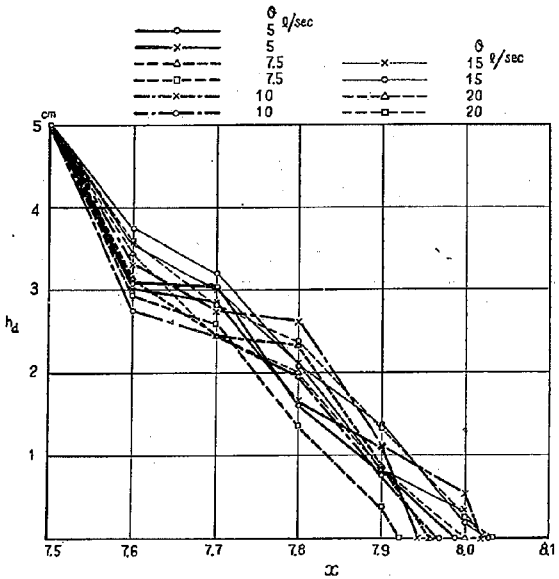
sec	7.5	7.55	7.6	7.7	7.8	7.9	7.93
d	5.0	4.7	3.9	3.3	2.4	1.2	0

Q　$Q=35$　$h_{7.5}=12.26$　$h_{10}=18.57$

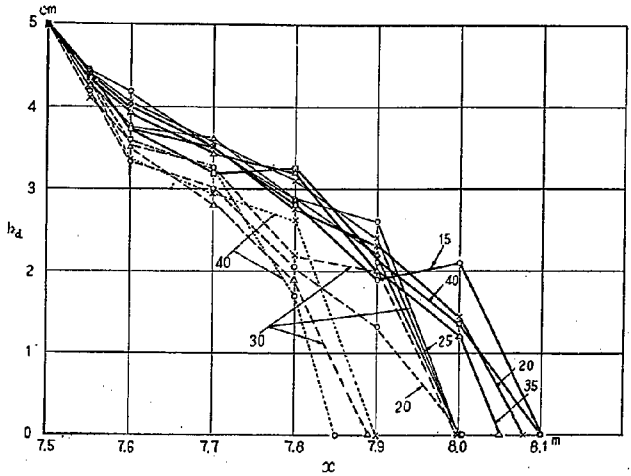
sec	7.5	7.55	7.6	7.7	7.8	7.9	
d	5.0	4.1	3.2	2.3	1.4	0	

R　$Q=35$

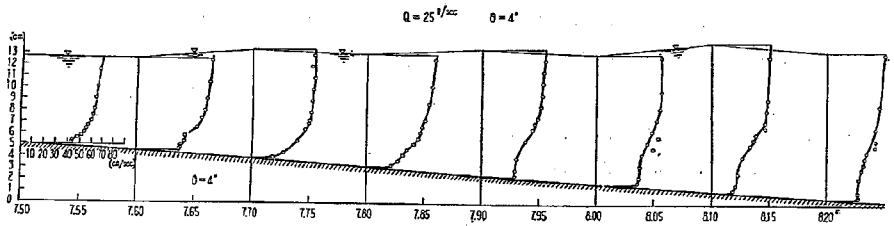
sec	7.5	7.55	7.6	7.7	7.8	7.83	
d	5.0	4.3	3.5	2.6	1.2	0	



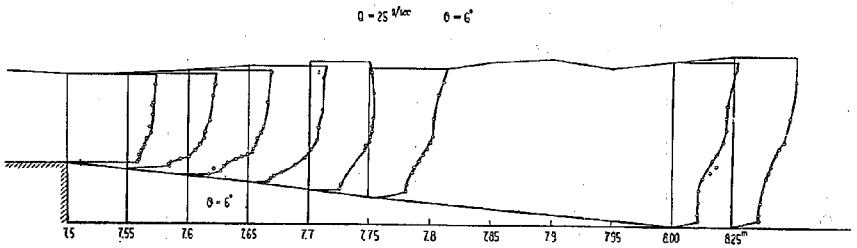
図—5 (1)　死水域の境界線



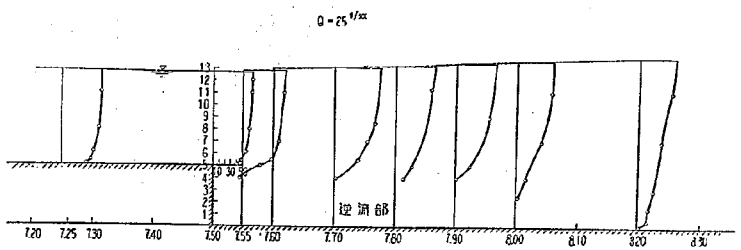
図—5 (2) 死水域の境界線



図—6 (1) 流速分布



図—6 (2)



図—6 (5)

〔4〕流速分布

急拡部の流速分布を水路の中央部に沿って測ると図—6のとおり，$\theta=4°,6°,10°$ ではそれぞれ 7.9m,7.6m, 7.65m,7.6m 附近から底面がやせてくるが，何れの場合にもいまだ逆流は現われない。流速分布のいちじるしい特徴は段部の河床の延長上に変曲点が現われることである。これはこの付近の乱れが断面内において最も大きいことによるであろう。すなわち，

剪断応力は　$\tau=\rho\overline{u'v'}=\rho l^2\left(\frac{du}{dy}\right)^2$

であらわされるから　$\rho\overline{u'v'}$ の最大は $\frac{d\tau}{dy}=0$ で与えられる。断面内の l の分布は壁面の影響があらわれている場合には壁面附近では小さく，離れるにつれて大きくなり断面内で一様ではないが拡がり角度が大きくなるにつれ，また同じ拡がり角度でも流下距離が長くなるにつれて，壁面の影響は小さくなり，漸時，噴流におけるごとき，l が断面内で一様な分布に近ずくものと思われる。

いま　$l=Const$ の場合について

$\frac{d\tau}{dy}=0$　より　$\frac{d^2u}{dy^2}=0$ を得る。

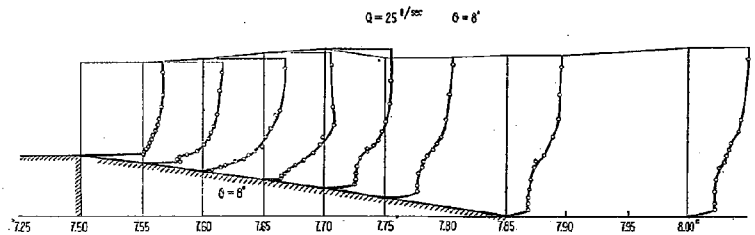
すなわち　$\rho\overline{u'v'}$ の最大の点において流速分布は変曲点を持つ，$\theta=4°$ では実験した条件に対しては7.9m附近までは壁面の影響があらわれていることを示している。

$\theta=6°\sim10°$ となるにつれて急拡点のすぐ下流から壁面の影響が少いもののように思われる。

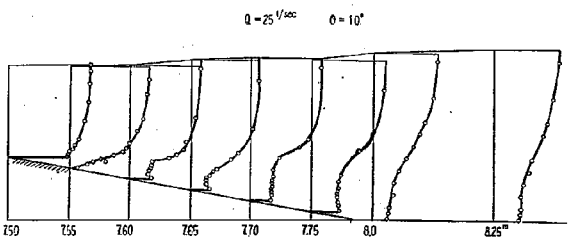
なお管水路の拡大部について Kalinske[5] は乱れを実測し拡大部の近傍では狭い方の壁面のほぼ延長上に $\overline{u'^2}$，$\overline{v'^2}$ の最大が生じていることを示している。これより $\overline{u'v'}$ も同様な傾向を示すであろうことが類推される。

次に $\theta=90°$ では 8.0 附近までは逆流が現われ，その下流 (8.2m) の流速は底面附近でやせているが，上層部の運動量が輸送され，漸時底面附近の流速が早くなり，8.5m 附近に至つて一様分布の流速となる。

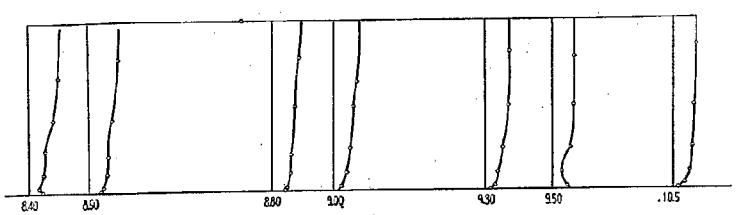
次に $\theta=90°$ の場合について断面全体の流速分布を測



図—6 (3)



図—6 (4)

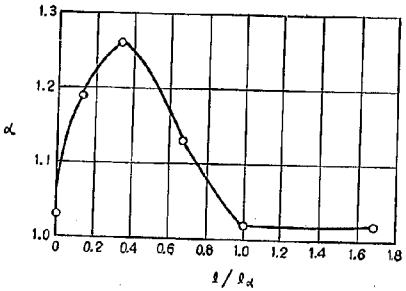


図—6 (5)

定し流速分布の補正係数。

表—5　流速分布の補正係数

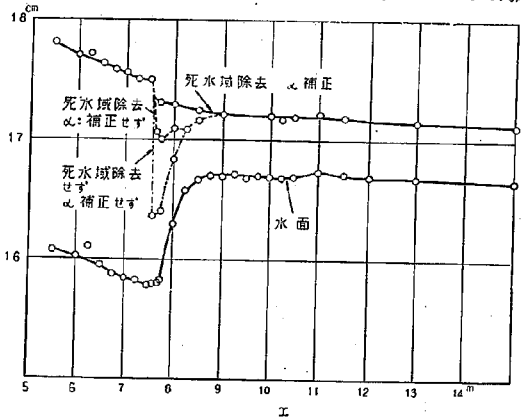
Sec	7.5	7.7	8.0	8.5	9.0	1.0
$l/l\alpha$	0	0.13	0.33	0.67	1.0	1.67
α	1.03	1.19	1.26	1.13	1.02	1.02



図—7　流速分布の補正係数

$$\alpha=\frac{\int_A v^3dA}{v^3\cdot\Sigma A}$$　A：逆流部を除いた通水断面で

αを求めると表—5および図—7のとおりとなる。この



図—8　エネルギー水頭に対する補正係数の影響

中8.5，9.0におけるαは死水域の実測値を用いてエネルギー水頭を求め，これをなめらかに結んだ曲線から逆算したものである。αの値は水流の状態により多少変化するであろうから，この1例で確定的な値は定めかねるが，その大きさの程度および$l\alpha$の中における変化のようすは知り得る。このように死水域を除きαの変化を考慮してエネルギー水頭を求めれば図—8のようになめらかな変化となり，図—3に示した不合理な点がなくなる。なお図—8には図—3に示したと同じ方法による場合と死水域のみ除いてαの補正を行なわなかった場合とのエネルギー水頭を示した。後者の場合はエネルギー水頭の下り量は前者に比して小さくはなるが，それでもかなりの量を示している。

3　理論的考察

〔1〕急拡による損失水頭

(a)　形状損失と摩擦損失とを分離する方法

急拡および漸拡の損失水頭の機構を図—9に示す。漸拡の場合はAC面にそって底面のやせた流速分布となり，ここに働く剪断力は小さい。急拡の場合には底面にそって逆流を生じ，AC面で速度こう配が大きく，ここに大きな剪断力が働く，この剪断力による損失が形状損失である。したがって形状損失を求めるためにはAC面にそう剪断力の大きさを知らなければならない。これはABCの部分の水に対する力の釣合いの条件から求めることができる。したがって1～2断面間のその他の面における剪断力を漸拡（はく離を生じない場合）の場合のそれと等しいと仮定できれば摩擦損失と形状損失とを分離し得る。このような仮定は水路幅急拡の場合には正しいことがすでに示された。このことは漸拡の場合と急拡の場合とで，鉛直方向の流速分布はほぼ等しく，したがって河床面に沿う剪断力はほぼ等しいと考えられることおよびこの剪断力が漸拡の場合の全体の剪断力の大部分をしめていることによる。

これをいいかえれば摩擦損失は鉛直方向の流速分布形に関係し，形状損失は横方向の急こう配を持った流速分布形に関係しており，もともとそれらの損失が分離しやすい形になっていることによる。

段落ちの場合には鉛直方向の流速分布形が漸拡の場合と急拡の場合とではかなり異るためこのような取り扱いでかならずしも十分ではない。しかしここでは水路幅急拡の場合と比較する意味で，この方法を示すとともに，これによる形状損失水頭と実測値のそれを比較検討して，逆にこのような仮定がどのていど正しいかを調べる。

図—9を参照して，漸拡の場合の1～2断面間のエネルギー式は

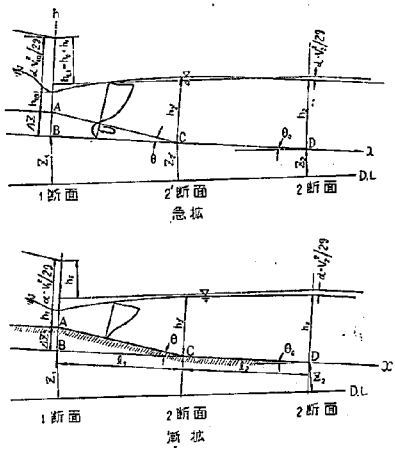
$$Z_1+(h_1+\triangle Z)\cos\theta_0+\alpha\frac{V_1^2}{2g}\cos\theta_0=Z_2+h_2\cdot\cos\theta_0+\alpha\frac{V_2^2}{2g}\cos\theta_0+h_f \quad\cdots\cdots(1)$$

$\cos\theta_0\fallingdotseq1$の時（以下$\cos\theta_0=1$として取り扱う）

$$Z_1+h_1+\triangle Z+\alpha\frac{V_1^2}{2g}=Z_2+h_2+\alpha\frac{V_2^2}{2g}+h_f \quad\cdots\cdots(2)$$

1～2断面間の運動量方程式は，1～2断面の圧力分布を静圧的として

$$\frac{\omega}{2}h_1^2\cdot b+\rho\eta V_1^2\cdot h_1b=\frac{\omega}{2}h_2^2b+\rho\eta V_2^2\cdot h_2b+\tau-\frac{\omega}{2}\left\{(h_1+h_2')l_1+(h_2'+h_2)l_2\right\}b\sin\theta_0-b\int_1^{2'}\omega h\sin\theta\frac{dl}{\cos\theta} \quad\cdots\cdots(3)$$



図—9

となる。ここに右辺および左辺の第1項はそれぞれ1断面，2断面に働く水圧，第2項は運動量，右辺第3項は1～2断面間に働く摩擦力，第4項は1～2断面間の水に働く重力の x 方向の分力第5項は1～2断面間の河床に働く水圧の反力の x 方向の分力である。また

w：単位体積の水の重量

ρ：水の密度

v：流　速

h：水　深

α：η：流速分布の補正係数

b：水路幅

$\triangle Z$：段落ちの高さ

h_f：1～2断面間の摩擦損失

添字 1，2 はそれぞれ1断面，2断面の値を示す。

(3)式において　　$h=h_1+(h_{2'}-h_1)\cdot\frac{l}{l_1}$ と仮定すれば右辺の最後の項は

$$b\cdot\int_1^{2'}\cdot w\cdot h\cdot\sin\theta\cdot\frac{dl}{\cos\theta}=\frac{b\,w}{2}(h_{2'}+h_1)\cdot$$

$$\tan\theta\cdot l_1=\frac{bw}{2}(h_{2'}+h_1)\cdot\Delta Z\cdot\quad\cdots\cdots\cdots\cdots(4)$$

(4)式を(3)式に代入して，さらに近似的に $h_{2'}=h_2$ と仮定すれば

$$\frac{wh_1^2}{2}+\rho\cdot\eta V_1^2h_1=\frac{wh_2^2}{2}+\rho\cdot\eta\cdot V^2{}_2h_2$$

$$+\tau/b-w\cdot h_2\cdot(Z_1-Z_2)+\frac{w}{2}(h_2-h_1)$$

$$(Z_1-Z'_{2'})-\frac{w}{2}(h_1+h_2)\cdot\triangle Z\quad\cdots\cdots\cdots(5)'$$

$\frac{w}{2}(h_2-h_1)(Z_1-Z_{2'})$ の項は小さいので省略して

$$\frac{w}{2}h^2{}_1+\rho\eta V^2{}_1h_1=-\frac{w}{2}h_2+\rho\eta V^2{}_2\cdot$$

$$+\tau/b-wh_2(Z_1-Z_2)-\frac{w}{2}(h_1+h_2)\triangle Z\cdots\cdots(5)$$

急拡のエネルギー式は

$$Z_1+h_{1a}+\triangle Z+\alpha\frac{V^2{}_{1a}}{2g}=Z_2+h_2+\alpha\cdot$$

$$\frac{V^2{}_2}{2g}+h_l+h_f\quad\cdots\cdots(6)$$

ここに h_l：形状損失，h_f：摩擦損失，1_a は急拡の値を示す。

急拡の場合の運動量方程式は

$$\frac{wh^2{}_{1a}\cdot b}{2}+\rho\,\eta V^2{}_{1a}\cdot h_{1a}\cdot b=\frac{wh^2{}_2b}{2}$$

$$+\rho\eta V^2{}_2\cdot h_2\cdot b+\tau_a+\tau-\frac{w}{2}\Big\{(h_{1a}+h_{2'})l_1$$

$$+(h_{2'}+h_2)\,l_2\Big\}b\sin\theta_0-b\int_1^{2'}wh\sin\theta\frac{dl}{\cos}$$

τ_a：AC 面にそう全剪断力

τ：AC 面以外の1～2断面間の全剪断力

τ_a を求めるために ABC の部分についての力の釣合いを考える。

$$\frac{w(h_{1a}+\triangle Z)^2b}{2}-\frac{wh^2{}_{1a}b}{2}-b\int_1^{2'}wh\sin\theta$$

$$\frac{dl}{\cos}+\tau_a+\tau_0+\frac{w\triangle Zb}{2}l_1\sin\theta_0=0$$

τ_0：BC 面に沿う剪断力，0と考えて差しつかえない

これを上式の τ_a に代入して

$$\frac{w(h_{1a}+\triangle Z)^2b}{2}+\rho\eta V^2{}_{1a}\cdot h_{1a}b=$$

$$\frac{wh^2{}_2b}{2}+\rho\eta V^2{}_2\cdot h_2b+\tau-wh_2b(Z_1-Z_2)$$

$$+\frac{w}{2}(h_2-h_{1a}-\triangle Z)(Z_1-Z_{2'})b\cdots\cdots\cdots(7)'$$

(7)′ 式は境界 $A\cdot B\cdot C\cdot D$ に対して直接運動量方程式を適用しても求めることができる。

すなわち

$$\frac{w(h_{1a}+\triangle Z)^2b}{2}+\rho\,\eta V^2{}_{1a}\cdot h_{1a}\cdot b=$$

$$\frac{wh^2{}_2\cdot b}{2}+\rho\eta\cdot V^2{}_2\cdot h_2\cdot b+\tau-w$$

$$\frac{h_{1a}+\triangle Z+h_2}{2}(Z_1-Z_2)b+w$$

$$\frac{h_{1a}+\triangle Z-h_2}{2}(Z_{2'}-Z_2)\cdots\cdots\cdots\cdots(7)''$$

(7)′ 式と (7)″ 式は (Z_1-Z_2) の項のみ異っているが他の部分は一致している。(Z_1-Z_2) の項が一致しないのは両方において近似のしかたが異るために生じたものであるが，その量はごくわずかである。(7)″ 式の $Z_{2'}-Z_2$ の項は小さいのでこれを省略し，b で割り，

$$\frac{w(h_{1a}+\triangle Z)^2}{2}+\rho\cdot\eta V^2{}_{1a}\cdot h_{1a}=$$

$$\frac{wh^2{}_2}{2}+\rho\eta v^2{}_2\cdot h_2+\tau/b-\frac{w(h_{1a}+\triangle Z+h_2)}{2}$$

$$(Z_1-Z_2)\cdots\cdots(7)$$

$$\left.\begin{aligned}&\frac{h_1}{h_2}=\beta'\quad\frac{h_{1a}}{h_2}=\beta\quad\frac{\triangle Z}{h_2}=K\text{とおけば}\\&h_1=\beta'h_2,\quad h_{1a}=\beta h_2,\quad V_1=\frac{1}{\beta'}V_2,\\&V_{1a}=\frac{1}{\beta}V_2\end{aligned}\right\}\cdots(8)$$

となる。漸拡の場合の h_f と急拡の場合の h_f を等しいと仮定すれば，(2)，(6)式より

$$h_l=h_{1a}-h_1+\alpha\left(\frac{V^2_{1a}}{2g}-\frac{V^2}{2g}\right)$$
$$=\frac{V^2_2}{2g}\left\{\frac{2}{F^2_2}(\beta-\beta')+\alpha\left(\frac{1}{\beta^2}-\frac{1}{\beta'^2}\right)\right\}$$
$$=\zeta\frac{V^2_2}{2g} \quad \cdots\cdots(9)$$

ここに $\zeta=\frac{2}{F^2_2}(\beta-\beta')+\alpha\left(\frac{1}{\beta^2}-\frac{1}{\beta'^2}\right)$

β' は2断面から1断面まで不等流計算により求めることができる。また(2)式より求め得る。すなわち

(2)式に(8)式を代入して整理すれば

$$\beta'^3-\left\{1+\frac{\alpha F^2_2}{2}-K+\frac{h_f+(Z_2-Z_1)}{h_2}\right\}$$
$$\beta'^2+\frac{\alpha F^2_2}{2}=0 \quad \cdots\cdots(10)$$
$$a=-\left\{1+\frac{\alpha F^2_2}{2}-K+\frac{h_f+(Z_2-Z_1)}{h_2}\right\} \cdots(11)$$

とおけば(10)式は

$$\left(\beta'+\frac{a}{3}\right)^3-\frac{a^2}{3}\left(\beta'+\frac{a}{3}\right)+\frac{2a^3}{27}+$$
$$\frac{\alpha F^2_2}{2}=0 \quad \cdots\cdots(12)$$

$$\left.\begin{aligned}P&=\frac{a^2}{3}\\ \pm q&=\frac{2a_3}{27}+\frac{\alpha F^2_2}{2}\end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots(13)$$

とおけば

$\left(\frac{1}{3}P\right)^3\geqq\left(\frac{1}{2}q\right)^2$ に対して，(12)式の解は

$$\left.\begin{aligned}\beta'_1&=-\frac{a}{3}\mp 2\sqrt{\frac{1}{3}P}\cdot\cos\frac{\varphi}{3}\\ \beta'_2&=-\frac{a}{3}\mp 2\sqrt{\frac{1}{3}P}\cdot\cos\left(\frac{\varphi}{3}+120°\right)\\ \beta'_3&=-\frac{a}{3}\mp 2\sqrt{\frac{1}{3}P}\cdot\cos\left(\frac{\varphi}{3}+240°\right)\end{aligned}\right\} \cdots(14)$$

となる。ここに $\cos\varphi=\left|\frac{\frac{1}{2}q}{\frac{1}{3}P\sqrt{\frac{1}{3}P}}\right|$ ・次に β を求める。

(5)式と(7)式の差を取れば

$$\frac{w\cdot(h_{1a}+\triangle Z)^2}{2}+\rho\cdot\eta\cdot V^2_{1a}\cdot h_{1a}-\frac{wh^2_1}{2}$$
$$-\rho\cdot\eta\cdot V^2_1\cdot h_1=-\frac{w(h_{1a}+\triangle Z+h_2)}{2}$$
$$(Z_1-Z_2)+wh_2(Z_1-Z_2)+\frac{w}{2}(h_1+h_2)\cdot\triangle Z$$

これに(8)式を代入して整理すれば

$$\beta^3+\left(2K+\frac{Z_1-Z_2}{h_2}\right)\beta^2-\left\{-K^2+\frac{2\eta F^2_2}{\beta'}\right.$$
$$\left.+\beta'^2+(1-K)\frac{Z_1-Z_2}{h_2}+(1+\beta')\cdot K\right\}\beta$$
$$+2\eta F^2_2=0 \quad \cdots\cdots(15)$$

$$\left.\begin{aligned}&2K+\frac{Z_1-Z_2}{h_2}=a' \quad \cdots\cdots\\ &-\left\{-K^2+\frac{2\eta F^2_2}{\beta'}+(1-K)\frac{Z_1-Z_2}{h_2}\right.\\ &\left.+\beta'^2+(1+\beta')K\right\}=b' \quad \cdots\cdots\\ &2\eta F^2_2=C \quad \cdots\cdots\end{aligned}\right\} \cdots(16)$$

とおけば(15)式は

$$\left(\beta+\frac{a'}{3}\right)^3+\left(\beta+\frac{a'}{3}\right)\left(b'-\frac{a'^2}{3}\right)$$
$$+\frac{2a'^3}{27}-\frac{a'b'}{3}+C'=0 \quad \cdots\cdots(17)$$

となる。

$$\left.\begin{aligned}-b'+\frac{a'^2}{3}&=P'\\ \frac{2a'^3}{27}-\frac{a'b'}{3}+C'&=\pm q'\end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots(18)$$

とおけば

$\left(\frac{1}{3}P'\right)^3\geqq\left(\frac{1}{2}q'\right)^2$ に対して

(17)式の解は

$$\left.\begin{aligned}\beta_1&=-\frac{a'}{3}\mp 2\sqrt{\frac{1}{3}\cdot P'}\cdot\cos\frac{\varphi}{3}\\ \beta_2&=-\frac{a'}{3}\mp 2\sqrt{\frac{1}{3}\cdot P'}\cdot\cos\left(\frac{\varphi}{3}+120°\right)\\ \beta_3&=-\frac{a'}{3}\mp 2\sqrt{\frac{1}{3}\cdot P'}\cdot\cos\left(\frac{\varphi}{3}+240°\right)\end{aligned}\right\} \cdots(19)$$

ここに $\cos\varphi=\left|\frac{\frac{1}{2}q'}{\frac{1}{3}P'\sqrt{\frac{1}{3}P'}}\right|$

(10)式における (Z_2-Z_1) の項の大きさを調べる。

2～2' 断面の距離はせいぜい $30\triangle Z$ 程度であるので

$Z_2-Z_1=-30\cdot\triangle Z\cdot I$ (I は河床こう配)

I が $\frac{1}{1,000}$ 程度の大きさであれば $\frac{Z_2-Z_1}{h_2}=-0.03K$ の程度の大きさとなる。

さらに h_f の項は＋であるので $\frac{Z_2-Z_1}{h_2}$ の項と相殺する。したがって $\frac{h_f+(Z_2-Z_1)}{h_1}$ は $0.03K$ よりもさらに小さく K の項に比して省略し得る。一般に K の項に比して h_f および Z_2-Z_1 の項を省略し得る場合が非常に多い。

この場合には

(11)式，(13)式，(14)式は次のように簡単になる。

$$a=-\left(1+\frac{\alpha F^2_2}{2}-K\right) \quad \cdots\cdots(11')$$

$$\left.\begin{aligned}P&=\frac{a^2}{3} \quad \cdots\cdots\\ \pm q&=\frac{2a^3}{27}+\frac{\alpha F^2_2}{2} \quad \cdots\cdots\end{aligned}\right\} \cdots(13')$$

$$\left.\begin{aligned}\beta'_1&=-\frac{a}{3}\mp 2\sqrt{\frac{1}{3}P}\cdot\cos\frac{\varphi}{3}\\ \beta'_2&=-\frac{a}{3}\mp 2\sqrt{\frac{1}{3}P}\cdot\cos\left(\frac{\varphi}{3}+120°\right)\\ \beta'_3&=-\frac{a}{3}\mp 2\sqrt{\frac{1}{3}P}\cdot\cos\left(\frac{\varphi}{3}+240°\right)\end{aligned}\right\} \cdots(14')$$

ここに $\cos\varphi=\left|\frac{\frac{1}{2}q}{\frac{1}{3}P\sqrt{\frac{1}{3}P}}\right|$

(16)式において(10)式におけると同様に $\frac{Z_1-Z_2}{h_2}$ の項を省

略し得る場合には(10)式は

$$\left.\begin{aligned} &2K=a' \\ &-\left\{-K^2+\beta'^2+\frac{2\eta F^2{}_2}{\beta'}\right. \\ &\left.+(1+\beta')K\cdot\cos\theta\right\}=b' \\ &2\eta F^2{}_2=C' \end{aligned}\right\}\cdots\cdots(16')$$

となる。(18)式，(19)式は

$$\left.\begin{aligned} &-b'+\frac{a'^2}{3}=P' \\ &\frac{2a'^3}{27}-\frac{a'b'}{3}+C'=\pm q' \end{aligned}\right\}\cdots\cdots(18')$$

$$\left.\begin{aligned} \beta_1&=-\frac{a'}{3}\mp 2\sqrt{\frac{1}{3}P'}\cdot\cos\frac{\varphi}{3} \\ \beta_2&=-\frac{a'}{3}\mp 2\sqrt{\frac{1}{3}P'}\cdot\cos\left(\frac{\varphi}{3}+120^\circ\right) \\ \beta_3&=-\frac{a'}{3}\mp 2\sqrt{\frac{1}{3}P'}\cdot\cos\left(\frac{\varphi}{3}+240^\circ\right) \end{aligned}\right\}\cdots(19')$$

ここに $\cos\varphi=\left|\dfrac{\frac{1}{2}q'}{\frac{1}{3}P'\sqrt{\frac{1}{3}P'}}\right|$

となる。下流条件および境界条件が与えられると(14)式または(14')式により β' を求め，これを(18)式または(19')式に代入して β を得る。この β', β を(9)式に代入して形状損失を求め得る。(14)式，(19)式の第2項は(13)式，(19)式の q', q の符号の正，負に従って，負，正の符号を取る。

また β', β の1根は必ず正の値であるが，他の2根は正根となる。この中大きい方が常流解である。この2根は $\cos\varphi=1$ の場合に一致する。これは1断面に限界水深が生じている場合である。

(14'), (19')式および(9)式より，h_1/h_2 は Froude 数および K の函数であることが分かるが，これを計算すると図—10のとおりとなる。h_1/h_2 の最大は $F_2=0.26$ 附近に生じているが，これについては後記する。

表—1の資料について実測値と計算値と比較すると図—11のとおりであり両者はほぼ一致する。しかし実測値で常流で計算上射流となる場合が生じ，この場合には実測値と計算値とを比較することができないから図—11から除いた。また h_1 が実測値で負の値を示す場合が2，3現われたが，これは急変流と漸変流との摩擦を厳密には等しいと仮定し得ないことに基因しているものと考えられる。このように水路幅の急拡の場合に比し，摩擦損失と形状損失との分離が困難であるので，次に両者を分離せずに取り扱う簡便な方法を示す。

(b)　形状損失と摩擦損失とを分離しない方法

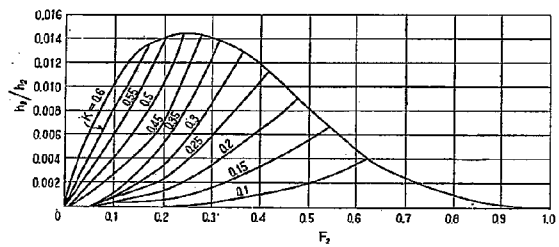
1断面と2断面間におけるエネルギー方程式は

$$Z_1+\triangle Z+h_1+\alpha\frac{V^2_1}{2g}=Z_2+h_2+\alpha\frac{V^2_2}{2g}+h_{f1}\cdots\cdots(20)$$

運動量方程式は

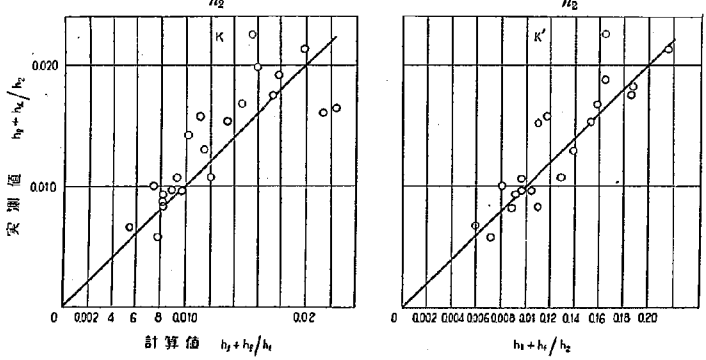
$$\frac{w(h_1+\triangle Z)^2\cdot b}{2}+\rho\cdot\eta\cdot V^2{}_2\cdot h_1\cdot b=\frac{wh^2{}_2b}{2}+\rho\cdot\eta\cdot V^2{}_2\cdot h_2\cdot b+b\int_1^2\tau dx-\rho\cdot gV'\cdot\sin\theta\cdots\cdots(21)$$

ここに V' は1～2断面間の水の体積で近似的に



図—10　$\dfrac{h_1}{h_2}\left(\begin{matrix}\text{Froude 数}\\ \text{および K}\end{matrix}\right)$

$$K=\frac{\triangle ZA\sim B}{h_2}\qquad K'=\frac{\triangle ZA\sim D}{h_2}$$



図—11　損失水頭—実測値と計算値との比較
(形状損失と摩擦損失との分離法)

$$\rho\cdot g\cdot V'\sin\theta=\frac{h_1+\triangle Z+h_2}{2}\cdot(Z_1-Z_2)\cdot b\cdot\rho\cdot g \quad\cdots\cdots(22)$$

であらわされる。

$$\left.\begin{aligned}&\frac{h_1}{h_2}=\beta,\ \frac{\triangle Z}{h_2}=K \text{ とおけば}\cdots\cdots\\ &h_1=\beta h_2,\ V_1=\frac{1}{\beta}V_2,\ \triangle Z=K\cdot h_2\cdots\end{aligned}\right\}\cdots\cdots(23)$$

(22), (23)式を(21)式に代入し

$$(\beta+K)^2\cdot h_2^2+2\frac{\eta\cdot V_2^2\cdot\beta}{\beta^2\cdot g}\cdot h_2-h_2^2-2\frac{\eta\cdot V_2^2\cdot h_2}{g}+(\beta+K+1)(Z_1-Z_2)h_2=0$$

整理して

$$(\beta+K)^2-1+\frac{2\eta F_1^2}{\beta}-2\eta F_2^2+(\beta+K+1)\cdot\frac{Z_1-Z_2}{h_2}=0$$

ここに

$$F_2=\frac{V_2}{\sqrt{gh_2}}$$

上式は次に示す β についての3次式である。

$$\beta^3+(2K+\triangle K)\cdot\beta^2-\{1-K^2+2\eta\cdot F_2^2-(1+K)\cdot\triangle K\}\beta+2\cdot\eta\cdot F_2^2=0 \quad\cdots\cdots(24)$$

ここに $\triangle K=\dfrac{Z_1-Z_2}{h_2}$

$$\left.\begin{aligned}&2K+\triangle K=a' \quad\cdots\cdots\\ &-\{1-K^2+2\eta\cdot F_2^2-(1+K)\cdot\triangle K\}=b'\cdots\\ &2\eta F_2^2=C' \quad\cdots\cdots\\ &-b'+\frac{a'^2}{3}=P' \quad\cdots\cdots\\ &\frac{2a'^3}{27}-\frac{a'b'}{3}+C'=\pm q' \quad\cdots\cdots\end{aligned}\right\}\cdots(25)$$

とおけば

$\left(\dfrac{1}{3}P'\right)^3>\left(\dfrac{1}{2}q'\right)^2$ に対して

(24)式の解は

$$\left.\begin{aligned}\beta_1&=-\frac{a'}{3}\mp2\sqrt{\frac{1}{3}P'}\cdot\cos\frac{\varphi}{3}\\ \beta_2&=-\frac{a'}{3}\mp2\sqrt{\frac{1}{3}P'}\cdot\cos\left(\frac{\varphi}{3}+120^\circ\right)\\ \beta_3&=-\frac{a'}{3}\mp2\sqrt{\frac{1}{3}P'}\cdot\cos\left(\frac{\varphi}{3}+240^\circ\right)\end{aligned}\right\}\cdots(26)$$

ただし

$$\cos\varphi=\left|\frac{\frac{1}{2}q'}{\frac{1}{3}P'\sqrt{\frac{1}{3}P'}}\right|$$

(21)式を整理して

$$\frac{h_{t1}}{h_2}=(K+\triangle K)+\beta-1+\frac{\alpha F_2^2}{2}\left(\frac{1}{\beta^2}-1\right)\quad\cdots\cdots(27)$$

(26)式の β の中正根の大きい方が常流に対する解である。これを(27)式に代入して損失水頭を求めることができる。

特に

$\dfrac{\triangle K}{K}\ll1$ の場合には

$$\left.\begin{aligned}a'&=2K+\triangle K=2K\left(1+\frac{\triangle K}{2K}\right)\fallingdotseq2K\quad\cdots\cdots\\ b'&=K^2-1-2\eta F_2^2\quad\cdots\cdots\\ c'&=2\eta F_2^2\quad\cdots\cdots\\ P'&=-\frac{1}{3}K^2+1+2\eta F_2^2\cdots\quad\cdots\cdots\\ \pm q'&=-\frac{2}{27}K^3+\frac{2}{3}K(1+2\eta F_2^2)+2\eta F_2^2\cdots\end{aligned}\right\}\cdots(25)'$$

とおいて

$$\left.\begin{aligned}\beta_1&=-\frac{2}{3}K-2\sqrt{\frac{1}{3}\left(1+2\eta F_2^2+\frac{1}{3}K^2\right)}\cdot\cos\frac{\varphi}{3}\\ \beta_2&=-\frac{2}{3}K-2\sqrt{\frac{1}{3}\left(1+2\eta F_2^2+\frac{1}{3}K^2\right)}\cdot\cos\left(\frac{\varphi}{3}+120^\circ\right)\\ \beta_3&=-\frac{2}{3}K-2\sqrt{\frac{1}{3}\left(1+2\eta F_2^2+\frac{1}{3}K^2\right)}\cdot\cos\left(\frac{\varphi}{3}+240^\circ\right)\end{aligned}\right\}\cdots(26)'$$

ここに

$$\cos\varphi=\frac{\frac{1}{2}\left\{2\eta F_2^2+\frac{2}{3}K(1+2\eta F_2^2)-\frac{2}{27}K^3\right\}}{\left\{\frac{1}{3}(1+2\eta F_2^2+\frac{1}{3}K^2)\right\}^{3/2}}$$

また(27)式は

$$\frac{h_{t1}}{h_2}=K+\beta-1+\frac{\alpha F_2^2}{2}\left(\frac{1}{\beta^2}-1\right)\quad\cdots\cdots(27)'$$

となる。

$\eta=\alpha=1.0$ として，(23)′，(27)′式を計算した結果を表—6および図—12に示す。図—10に示したと同様な傾向を示す。図により K および F_2 を知って損失水頭を求めることができる。

表—1に示した資料について実測値と計算値とを比較すると図—13のごとく良く一致する。

〔2〕 射流と常流との限界条件。

(a) 損失水頭を無視する場合。

1断面に限界水深の生ずる条件は(14)式の

$$\cos\varphi=1$$

すなわち

$$\frac{1}{2}q=\frac{1}{3}P\sqrt{\frac{1}{3}P}$$ である。

上式において右辺の方が大きければ常流である。

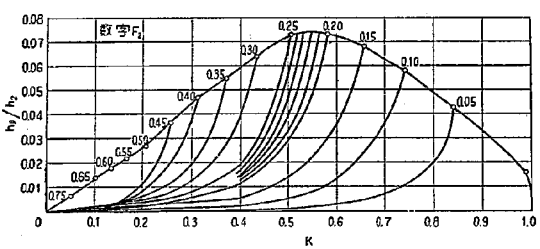
上式に(11)′，(13)′式を代入して整理すれば

$$K=1+\frac{F_2^2}{2}-\frac{3}{2}F_2^{2/3}\quad\cdots\cdots(28)$$

となる。(28)式は表—7または図—14のとおりとなる。

表—6　全損失水頭～K, Froude $\frac{h_{l1}}{h_2}$

F_2										
0.05	K	0.841	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1
	β	0.136	0.184	0.293	0.396	0.497	0.593	0.699	0.800	0.900
0.10	K	0.740	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	
	β	0.216	0.270	0.384	0.490	0.593	0.696	0.798	0.899	
0.15	K	0.657	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1		
	β	0.281	0.358	0.475	0.583	0.689	0.794	0.897		
0.20	K	0.580	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1			
	β	0.342	0.450	0.569	0.681	0.789	0.895			
0.25	K	0.507	0.45	0.4	0.3	0.2	0.1			
	β	0.397	0.480	0.546	0.670	0.782	0.893			
0.30	K	0.437	0.4	0.3	0.2	0.1	0.05			
	β	0.448	0.509	0.650	0.782	0.893	0.944			
0.35	K	0.372	0.275	0.225	0.1	0.05				
	β	0.497	0.659	0.729	0.883	0.942				
0.40	K	0.312	0.3	0.2	0.1	0.05				
	β	0.543	0.572	0.743	0.877	0.940				
0.45	K	0.258	0.225	0.175	0.1	0.05				
	β	0.585	0.665	0.754	0.864	0.936				
0.50	K	0.207	0.15	0.1	0.05					
	β	0.630	0.775	0.856	0.932					
0.55	K	0.167	0.15	0.1	0.05					
	β	0.671	0.731	0.842	0.927					
0.60	K	0.132	0.1	0.05						
	β	0.711	0.818	0.917						
0.70	K	0.073	0.05	0.02						
	β	0.797	0.882	0.959						
0.80	K	0.0296	0.02							
	β	0.889	0.933							



図—12　全損失水頭～K, Froude

次に限界状態における損失水頭，損失水頭が最大となる条件，等を求める。

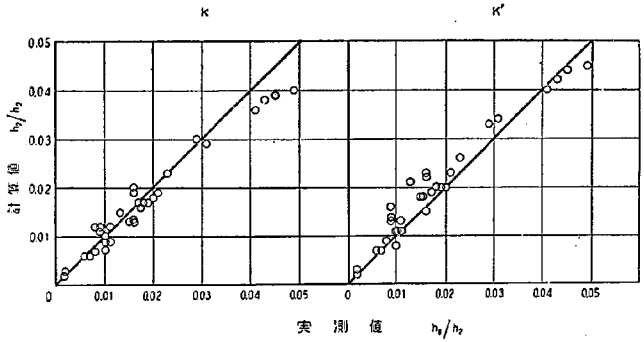
(4)式の $\cos\varphi=1$ の条件から

$$\beta'=F_2^{2/3} \quad \cdots\cdots(3)$$

その時の損失水頭は

$$\frac{h_l}{h_2}=\left\{(\beta-\beta')\frac{2}{F^2_2}+\left(\frac{1}{\beta^2}-\frac{1}{\beta'^2}\right)\right\}\frac{F^2_2}{2} \quad \cdots\cdots(3)$$

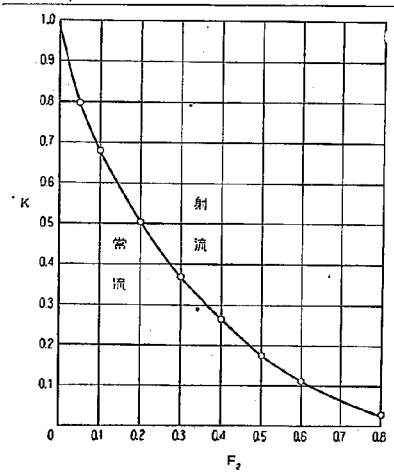
ここに



図—13 損失水頭—実測値と計算値との比較
(形状損失水頭と摩擦損失水頭とを分離しない方法)

表—7 支配断面の生ずる限界条件（損失水頭を無視およびその時の損失水頭）

F_2	0	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.80	1.0
K	1.0	0.797	0.681	0.505	0.370	0.265	0.177	0.112	0.027	0
β'	0	—	0.216	0.342	0.448	0.543	0.630	0.711	—	1.0
β	0	—	0.263	0.405	0.520	0.615	0.696	—	—	1.0
h_1/h_2	0	0.006	0.012	0.014	0.014	0.012	0.008	0.005	0.001	0



図—14 支配断面の生ずる限界条件
(損失水頭を無視)

$$\left(\beta^2+\frac{2F_2^2}{\beta}+K\beta\right)-\left(\beta'^2+\frac{2F_2^2}{\beta'}+K\beta'\right)=K(1-\beta)-K^2 \quad \cdots\cdots(31)$$

(28), (29), (30), (31), 式より

$\beta,\ \beta'=f_1(K)$ 又は $f_2(F_2)$

であらわされる。これを計算すれば表—7のごとくなる。

h_1/h_2 最大は $F_2=0.26$ であらわれる。

(b) 損失水頭を無視しない場合

1断面に限界水深の生ずる条件は

$$\frac{V_1}{\sqrt{gh_1}}=1.0$$

これより $\beta=F_2^{2/3}$

これを(28)式の第2式に代入して

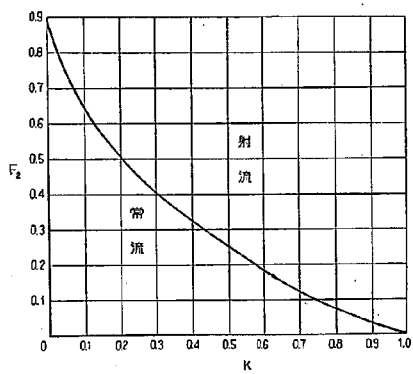
$$F_2^{2/3}=-\frac{2K}{3}-2\sqrt{\frac{1}{3}\left(1+2\eta F_2^2+\frac{1}{3}K^2\right)}\cdot\cos\left(\frac{\varphi}{3}+120^\circ\right) \quad \cdots\cdots(32)$$

(32)式により K および β を F_2 の函数として求めることができる。結果を表—8に示す。また(27)'式より $\frac{h_1}{h_2}$ を求めると表—8のごとくなり，$F_2=0.25$ 附近で，最大となる。

表—8を図—15に示す。図—14と図—15とを比較すれば明らかなように損失水頭を考慮した場合には考慮しな

表—8　支配断面の生ずる限界条件（損失水頭を考慮）及びその時の損失水頭

F_2	0	0.05	0.10	0.20	0.25	0.30	0.40	0.50	0.6	0.8	1.0
K	1	0.841	0.740	0.580	0.507	0.437	0.312	0.207	0.132	0.0296	0
β	0	0.136	0.216	0.342	0.397	0.448	0.543	0.630	0.711	0.889	1.0
h_{l1}/h_2	0	0.0438	0.0590	0.0730	0.0798	0.0670	0.047	0.027	0.016	0	0



図—15　支配断面の生ずる限界条件
（損失水頭を考慮）

い場合に比し同一の Froude 数に対して限界水深を生ずるKの値が大きい。このことにより一定の Froude 数に対して急変流に対して常流であるが，損失水頭の少い漸変流に対しては射流となる場合があることがわかる。

〔3〕死水域の大きさ，水位が回復するに必要な距離

壁面がなく，流れ方向に圧力上昇のない噴流の場合に比べて流れの拡がり方はゆるやかである。この拡がり方は圧力上昇の割合に関係しているように思われる。圧力上昇の割合として2断面，1断面の圧力差を両断面の平均圧力で割ったものをとる。すなわち

$$\frac{\triangle P}{P_m}=\frac{\dfrac{wh_2^2}{2}-\dfrac{w}{2}(h_1+\triangle Z)^2}{\dfrac{1}{2}\left\{\dfrac{wh_2^2}{2}+\dfrac{w}{2}(h_1+\triangle Z)^2\right\}}=\frac{h_2-(h_1+\triangle Z)}{\dfrac{1}{2}\left\{h_2+(h_1+\triangle Z)\right\}}=\frac{1-(\beta-K)}{\frac{1}{2}(1+\beta+K)}\quad\cdots\cdots(8)$$

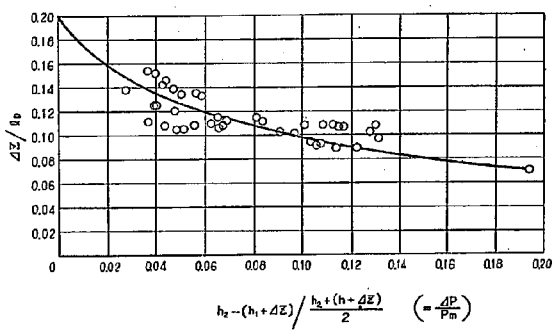
をとり，これと$\frac{\triangle Z}{l_D}$との関係を調べると図—16のごとく，水路幅急拡の場合と同じような曲線によって表わされる。

$\frac{\triangle P}{P_m}=0$ となるにつれて Tollmien の実測値 0.20 に近ずき，$\frac{\triangle P}{P_m}$が大きくなるにつれて$\frac{\triangle Z}{l_D}$の値は小さくなる（流線の拡がり方がゆるやかになる）傾向を示す。

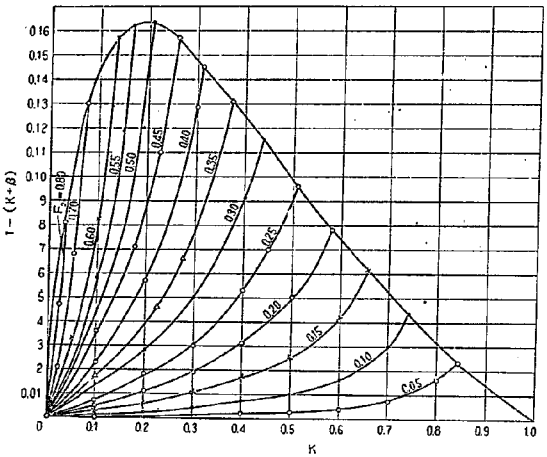
$\triangle K=0$ の場合について $\frac{\triangle P}{P_m}$ を(8)式により求めると図—17のごとくなり，一定のKに対しては Froude 数が大きくなるにつれ，また一定の Froude 数に対しては Kが大きくなるにつれ，$\frac{\triangle P}{P_m}$の値は大きくなり，流れの拡がり方がゆるやかになることがわかる。

次に流速分布が一様となり，水位が回復するに要する距離について考察する。

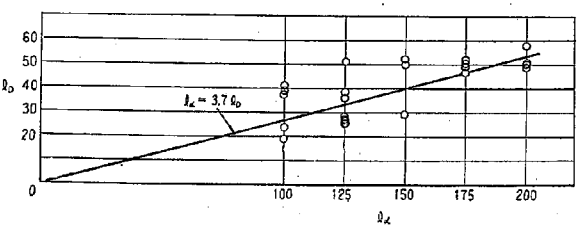
死水域の末端においては図—6のように底面附近で流速分布がやせているが，上流部の運動量が輸送され，漸時一様な分布に近ずき，2断面に至り，一様分布となり，水位は完全に回復する。1断面の一様分布が，2′断面の分布となり，それがさらに一様分布になるのであるから，図—20の l_D と $l_{a'}$ の間には一定の関係があることが予想される。流速分布の変換は運動量の輸送にもとづくものであり，これは乱れの割合$\frac{\sqrt{\overline{V'^2}}}{U}$が大きければ大きい程大である。したがって$\frac{\sqrt{\overline{V'^2}}}{U}$が大きい程，変換はすみやかにおこなわれる。1～2断面間は自由な乱れの場であり，2′～2間は壁面の存在のためにV'が制約されるので$\frac{\sqrt{\overline{V'^2}}}{U}$の値は1～2′間に比し2′～2間の方が小さい。したがって$l_{a'}$の方が l_D よりも大きいと考えられる。実測値について l_2/l_D の関係を調べると図



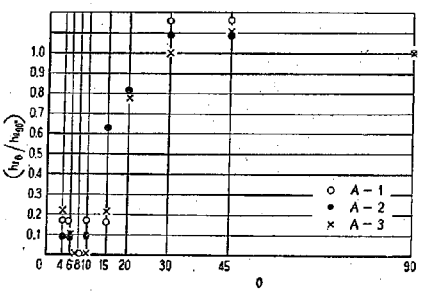
図—16　死水域の長さと圧力上昇率との関係



図—17　$\frac{\triangle P}{P_m}\sim(F.K)$



図—18　l_α—l_D



図—19 (1)　拡がり角度と形状損失水頭との関係

—18のとおりとなる。点はかなり分散しているが，実測の精度の点から，実用上から l_a/l_D を一定の値3.6と考えて差しつかえないと思われる。すなわち $l_a=2.6l_D$ となり上に考察したとおりとなる。

〔4〕拡がり角度と損失水頭との関係

拡がり角度 θ の場合の形状損失水頭と急拡の場合のそれとの比と拡がり角度との関係は図—19(1～4)に示すとおりである。$\theta=10°$ 附近まではほとんど形状損失水頭がない。また $\theta=30°$ 付近より大きい拡がり角度の場合は急拡の場合とほとんど同じである。$\theta=10°$ 付近から $\theta=30°$ 付近までに形状損失水頭は急激に増加する。

この区間の形状損失水頭と角度との関係は不安定であり，点はかなり分散しているが $\theta=20°$ 附近においてほとんど急拡の損失水頭に近ずいている。図—19 (1～4) の平均的な曲線を示すと図—19～0のごとくである。

4　段落ち部における水理計算法

図—20を参照し段落ち部の水理計算法を説明する。

与える条件

$$\frac{\triangle Z}{h_2}=K\ ,\quad \frac{V_2}{\sqrt{gh_2}}=F_2$$

$$\frac{Z_1-Z_2}{h_2}=\triangle K\ ,\ h_2$$

計算法

(a)　2断面の位置

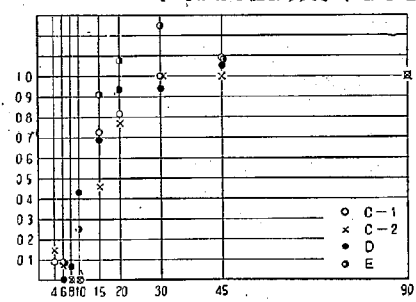
近似的に $\triangle K=0$ として，K，F_2 を用い，図—17により $\frac{\triangle P}{P_m}$ を求め，さらに図—16により l_D を求める。さらに

$$l_\alpha=3.6l_D$$

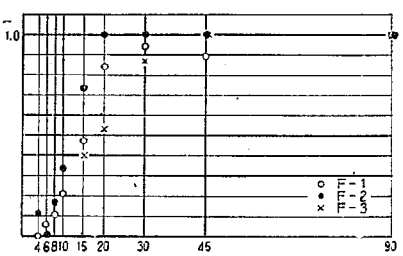
の関係により，2断面の位置を求める。

(b)　射流か常流かの判定

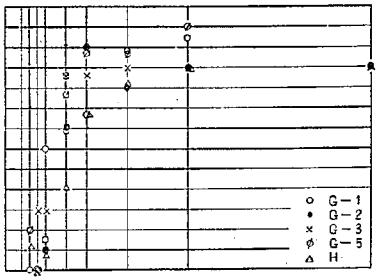
K_1 F_2 がある値より大きくなると



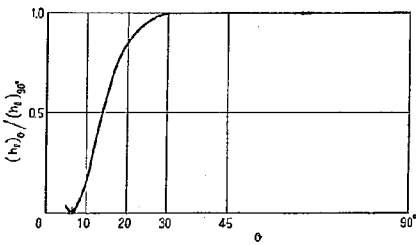
図—19 (2)



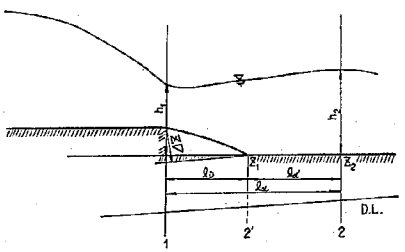
図—19 (3)



図—19 (4)



図—19 (0)　拡がり角度と形状損失水頭との関係



図—20

1断面が支配断面となり，2断面の水理量に無関係に1断面の水理量がきまる。$\triangle K=0$ の場合には，この限界は K_1，F_2 を用いて図—15により容易に知ることができる。$\triangle K\neq 0$ の場合には図—21により知り得る。

(6)　急拡による損失水頭

1～2断面間の全損失水頭は(83)，(84)式により求めることができる。一般には $\frac{\triangle K}{K}\ll 1$ の場合が多いが，この場合には(85)′，(86)′式によればよい。(85)′，(86)′式を計算図表として示したのが図—12であり，K_1 F_2 を用いて同図により容易に損失水頭を求めることができる。

拡がり角度 θ が30°以上の場合には，全損失水頭は急拡の場合と全く同じであると考えられる。

拡がり角度 θ が 8° までは摩擦損失のみを考えればよい。θ が 8° を越し10°附近までは損失水頭が小さく実際上，摩擦による損失のみを考えて差しつかえない。

θ が10°から30°の間に損失水頭は急激に増加する。この間における損失水頭は，次のようにして求める。

K_1 F_2 を用いて図—10により，$\theta=90°$ の形状損失水頭を求め，これと図—19(0)とにより任意の θ に対して形状損失水頭を求めることができる。これに $\theta=8°$ の場合の摩擦損失水頭を加えて1～2断面間の全損失水頭を求めることができる。

(d)　1断面の水深

1～2断面の全損失水頭が求まれば(80)式により1断面の水理量を求めることができる。これは試算的に求めてもよいが，$\triangle K=0$ の場合には，β は $\left(=\frac{h'}{h_2}\right)$ K，F_2 の次の函数であるので，図—17に示した計算図表を使うことができる。

$\triangle K\neq 0$ の場合には(80)式を変形して

$$\beta+\frac{\alpha F_2^2}{2\beta^2}+\left(K+\triangle K-\frac{h_{II}}{h_2}\right)-\left(1+\frac{\alpha F_2^2}{2}\right)=0 \quad \cdots\cdots(94)$$

となる。$\triangle K\neq 0$ の場合でも h_{II} を求めるに際しては近似的に $\triangle K=0$ としても誤差がかなり小さいが，β を求めるに際しては上式でも分かるように誤差が大きい。この場合 β は(84)式に示すように，$\alpha\cdot F_2$ および $\left(K+\triangle K-\frac{h_{II}}{h_2}\right)$ の函数として表わされる。これを図—21に示す。図—21の $\frac{h_{II}}{h_2}$ は $\triangle K=0$ として図—12より求めることができる。限界状態では一定の F_2 に対して $\left(K+\triangle K-\frac{h_{II}}{h_2}\right)$ が最大となる。限界状態の近傍では $K+\triangle K-\frac{h_{II}}{h_2}$ の多少の変化に対して β は大きく変化する。

すなわち水深を比較的精度よく推定するためには，多少の $\triangle K$ でも無視することはできない。以上により β が求まると　$h_1=\beta\cdot h_2$

により1断面の水深を求めることができる。

(e)　1断面より上流の水面形。

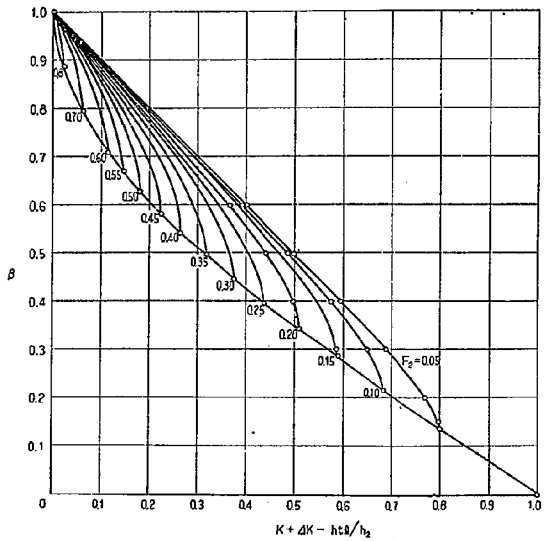
1断面より上流は低下背水の水面形となるが，1断面の水理量を用いて不等流計算により求めることができる。

(f)　1～2断面間の水面形

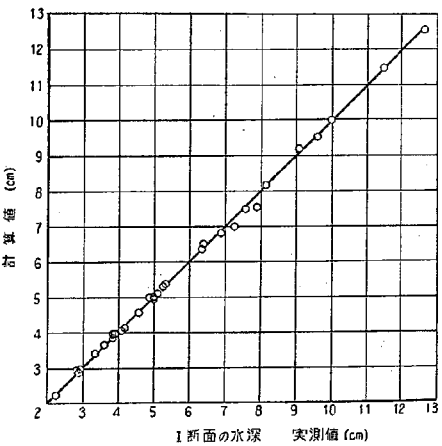
1～2断面間は死水域があり，流速分布も複雑に変化するので，死水域の形状，流速分布の変化の模様を完全に知らなければ正確な水面形を求めることができない。しかし実用上からは，1～2断面間のエネルギー損失を直線的であるとし，また死水域の形状を直線的であるとして，これを無効断面として除去し，流水部分について α の分布を図—7のごとくであるとして，水面形を求める方法で十分であると考えられる。

5.　計算値と実測値との比較

4に示した方法を表—1の資料に適用して，計算値と実測値とを比較すると図—22のごとく，両者はかなり良く一致する。



図—21　β～Froude数，$\left(K+\triangle K-\frac{h_{t1}}{h_2}\right)$



図—22　実測値と計算値の比較

6. 結　論

本論で明らかにされた主な事項は次のとおりである。

(1) 流れ方向に圧力が上昇し，流れの拡がり方は圧力上昇のない噴流の場合に比べてゆるやかである。

死水域の長さは圧力上昇の割合が大きいほど長い。

圧力上昇の割合と死水域の長さとの関係は図—16に示すとおりである。

(2) 拡がり流れの場合の流速分布は底面がやせているが $\theta=10°$ 付近までは逆流が生じない。

流速分布の変曲点は段上流部の河床の延長上にあらわれるがこれはこの付近で乱れが最大なことによる。

(3) θ が大きくなると逆流を生ずる。逆流部の末端においてなお底面付近がやせた流速分布を示し，その下流流速分布が一様になるまでの区間はなお水位が上昇する。

この区間においては，壁面の存在のために，はく離流れよりも乱れのていどが減少するため，この距離は死水域の長さよりも長い。

実測の結果によれば $l_a \fallingdotseq 3.6 l_b$ である。

(4) $\theta=90°$ の場合について，死水域の除去した断面についての流速分布の補正係数の1例は図—7のとおりであり，同図よりの分布および大きさのてい度を知ることができる。

(5) 急拡による損失水頭は連続式，エネルギー式，運動量方程式から導くことができる。この方法として形状損失水頭と摩擦損失水頭とを分離する方法，分離しない方法があり，それぞれ(9)，(10)，(19)式および(26)(27)式で表わされる。

一般に $\triangle K=0$ とみなし得るが，この場合には上式はそれぞれ(14)′，(19)′および(26)′，(27)′式のように簡単になる。これは K および β のみの函数であるから，この2要素を変数として図—10および図—12に示すように計算図表によって表わされる。

(6) 水路幅急拡の場合には形状損失と摩擦損失とを分離する方法で損失水頭を精度よく求めることができるが，段落ちの場合には両者を分離しない方法の方がむしろ簡単であり，精度もよい。これは前者においては摩擦損失の主要因が河床面に沿うものであり，水路幅急拡による損失は横方向の剪断力であって両者を分離し得るに反し，後者においては摩擦損失の主要因である河床面摩擦が流速分布の一様水路における場合との差異によって一様水路の場合と異ることによる。

(7) 拡がり角度と損失水頭との関係は図—19に示すとおりであり，$\theta=10°$ 付近において最小となる。$\theta=30°$ 付近より大きい拡がり角度の場合は急拡の場合とほとんど同じである。$\theta=10°$ から $\theta=30°$ 付近までに損失水頭は急激に増加する。

(8) K，F_2 がある値より大きくなると1断面が支配断面となる。この限界は損失水頭がない場合とある場合とで異なり，それぞれに対して(28)式および(32)式で与えられ，これを図示すると図—14，図—15のとおりとなる。

これによれば後者に比べて前者の場合には支配断面となりやすく，したがって同じ拡がり度と Froude 数に対

して急拡の場合には常流であり水面がおだやかであるが，漸拡にすると1断面に支配断面があらわれ，水面が波状をていしかえって水理的には好ましくない場合がある。

(9) 損失水頭を求める場合には$\triangle K=0$として誤差が少い場合でも，1断面の水深を求めるに際しては$\triangle K=0$とすると誤差が大きい，したがって水深を求めるに当っては図—21の関係を用いなければならない。

(10) 段落ち部の水理計算法として本文4に示した方法を得た。

終りに本研究に対していろいろ有益な御助言を下さった吉川河川研究室長および実験や資料整理に御協力戴いた建設省大分工事事務所荒木技官に深謝いたします。

参考文献

(1) 芦田和男，荒木民哉：開水路断面急拡部における水理に関する研究(1)，土木研究所報告101号 昭和34年

(2) High-Velocity flow in open channel (a simposium), Proc・of A. S. C. E. 1949

(3) 鳴 祐之：漸の拡がる水路に関する実験，土木学会誌，37巻2号

(4) Harold Tults : Flow expansion and pressure recovery in fluids, Proceedings of A. S. C. E. Vol. 80, 1954

(5) A.A.Kalinske : Conversion of kinetic to Potential energy in flow expansions, Trans of A. S. C. E. Vol. 111, 1946

低水流量観測の精度に影響を及ぼす2,3の要素について

竹　内　俊　雄*
江　川　太　朗**
篠　田　勝　一***

(昭和35年2月)

要　旨：

流量観測の精度を支配する諸要素のうちここでは次の3つをとりあげた。

(イ) 流量計算方式
(ロ) 横断方向の水深及び流速測線間隔
(ハ) 流速測線上の水深方向の流速測点間隔

(イ)については，各方式で計算される流量の体積を幾何学的に検討してそれぞれの方式の優劣を比べた。(ロ)，(ハ)については，10流量観測所の観測資料を用い測線或は測点間隔によって低水流量の精度がどう変るかを実験的に論じた。その結果次のことが明らかにされた。

(イ) 従来から我が国で使用されて来た計算方式が普通用いられている3つの方式のうちで最もよい。
(ロ) 水深測線に比べて流速測線間隔を狭める方が流量精度を高めるのに有効である。
(ハ) 流速測線上では2点法を用いても流量としては充分よい結果が得られる。

目　　次

1. 緒　　言……(2)
〔1〕 まえがき……(2)
〔2〕 誤差の原因……(2)
〔3〕 誤差の表わし方……(2)
〔4〕 本研究でとりあげた要素……(4)
2. 計算に使用した資料……(6)
3. 流量の計算方式……(6)
4. 流速及び水深測線間隔の流量精度に及ぼす影響……(10)
5. 2点法，1点法の流量精度に及ぼす影響……(13)
〔1〕 流速について……(13)
〔2〕 流量について……(13)
6. 結　　語……(14)

*河川部長兼水文研究室長　　**前水文研究室研究員　　***水文研究室研究員

1. 緒言

〔1〕 まえがき

河川の流量値は河川計画，管理上重要な要素であるためこれまで数多くの観測が行われて来た。およそ「量」には精度がつきものであるが，河川の流量の精度についてこれまで論ぜられたものは殆んどない。

精度は真値と比べて初めて論ぜられるものであるが，河川の流量観測となるとその真値を得ることが非常に困難なのである。その原因は現在の測定器械，方法を以てしては流量を常に正確におさえることが極めてむづかしいからである。よってここでは流量の精度を全般的に論ずるということはしないで，限られた範囲で明らかに出来るものだけを取り上げていくことにする。

洪水時の流況は刻々変化しているがその瞬間値をとらえるような観測器械は未だ出来ていないから，この時の流量値を正確におさえることは不可能である。然し低水時には数時間に亘って流況が殆んど変化しないと考えてよいような状況が続くから，この場合には現在の器械を用いても丹念に測れば可成り正しい値が得られると考えてよいであろう。本研究ではかような条件の下の低水時のみを対象とすることにする。

流量観測所に於ける断面の形状と流速分布に関して何か法則でも確立していれば流量は理論的に計算されるわけであるが現在の我々の知識では未だ遠く及ばない。よってここでは理論ではなく実験によることとし数多くの実測値を用い流量観測値の精度を論ずることにした。

〔2〕 誤差の原因

流量を観測する場合，観測値に含まれると考えられる誤差の原因を分類すると次の様になる。

- 測定
  - 測器の精度
  - 測り方
    - 水深測線間隔
    - 流速測線間隔
    - 流速測線上の水深方向の流速測点間隔
- 計算
  - 計算方式
  - 数値の取扱い方
- 流速の時間的変動

測器の精度の例としては水深計及びプライス流速計によるものがあげられる。水深計として測量用のポールをそのまま使用したとすると，これは尖端が尖って居るので河床につきささり水深を実際の値より大きく読みすぎることが有る。又プライス流速計でカップの廻転を電気シグナルに変えるところに電気接点が有るが，この接点は円周上で中心に対して等角度に配置されていないことがある。かような器械を使用する場合には接点数の整数倍の音数を読取らないと正確な流速の値は得られない。

河川の横断面内に水深測線及び流速測線を設定する場合，その間隔をいくらにとるかで流量の観測値は違って来る。又その流速測線上に配置する流速測点の間隔をいくらに決めるかも流量の観測値に影響してくる。

水深と流速とを測定してこれ等より流量を計算する場合，その計算方式として幾つかの方法が考えられるが，各方式によって得られる流量値は違うものである。

数字の取扱いとしては，有効数字をどこまでとるのか，4捨5入によるのか，数字をまるめる方法を採用するのか等が考えられるので，実際の計算に当ってはこれ等についてどこまで規定したかを明らかにすることが必要である。

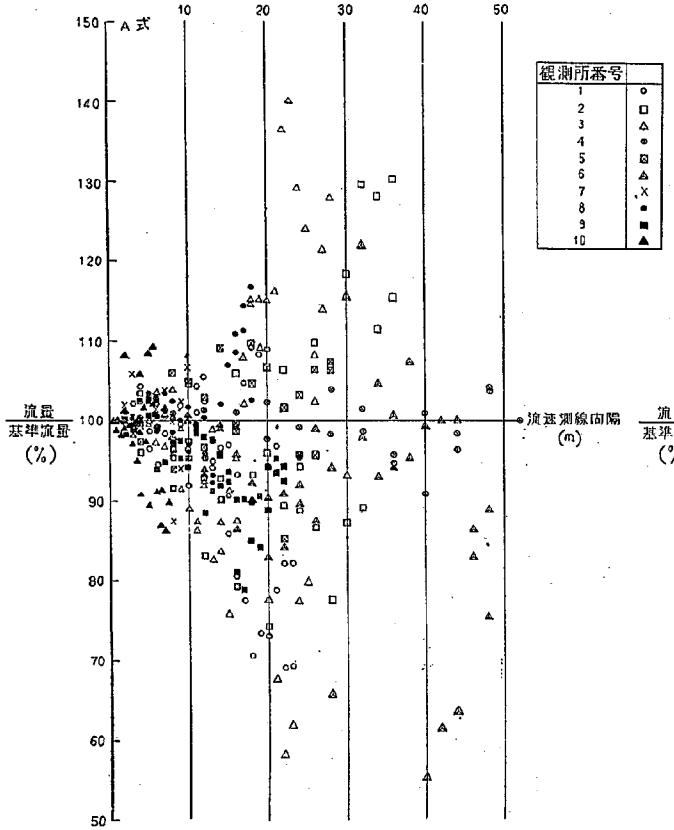
一般の河川で流速を長時間に亘り連続観測をしているとこまかい変動現象が認められる。現在の観測方法では河川の横断面内の流速を同時測定はして居らず，代表点で順繰りに測定しているような状態であるから，求められるものは或る時間に亘る値であって瞬間値ではない。

以上述べたように誤差の原因として種々な要素をとりあげることは出来る。然しながらこれ等と流量との間の函数関係が理論的に求められているわけではないから，流量の精度の全体に対する各要素の受持つ割合を理論的に表わすことは出来ない。例えば，流量の精度を全体として10%におさえたい場合，測器から来るものは何%，水深測線間隔から来るものは何%，流速測線間隔からは何%，流速測線上の水深方向の流速測点間隔からは何%等の様に各要素が全体に対して受持つ割合を定量的にきめることは出来ない。よってここでは各要素の流量に対する影響を求めるのに，調べたいと思う要素だけをそれぞれ変化させ他の要素は固定して行うことにしている。従って各要素別にその影響をみたのであって，これ等を綜合して判断することは出来ないのが現状である。

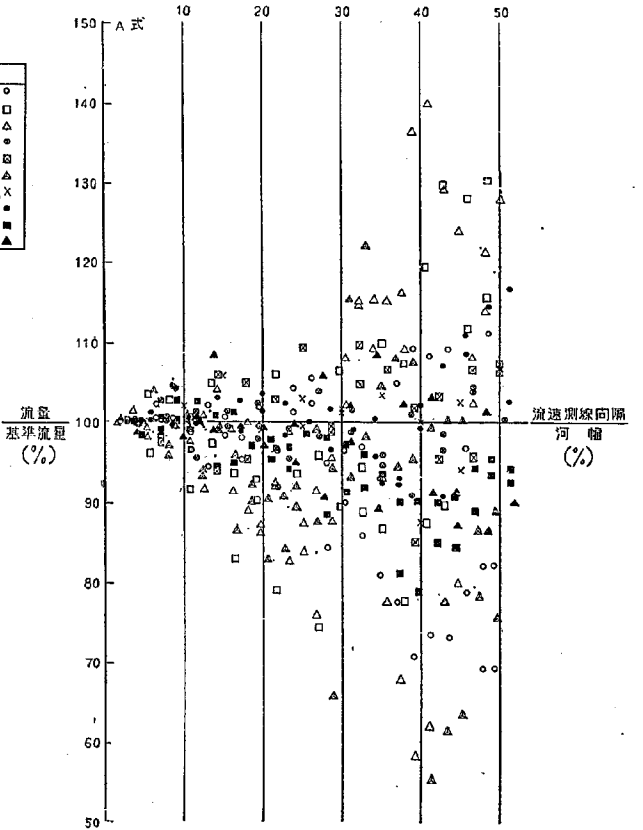
〔3〕 誤差の表わし方

或る観測値の精度が知りたいという場合には先ず真値がわかっていて，これと観測値とを比べその差の大小によって判断するのである。その真値はどうして求められるのであろうか。例えば或る長さの紐について考えると，その長さを何度も測ってそれ等を平均した値を以て最も確からしい値即ち真値と仮定している。実際問題として河川では流量観測を何度も繰返して行えるほど長時間に亘り流量の変化が殆んどないという様な流況を期待することは殆んど不可能である。ここでいう真値とは同じ作業を繰返すことによって得られた値とは違う性質のものを考えている。

前述の誤差の原因のうち測り方にのみ注目して，横断方向の水深及び流速測線間隔を最も狭くし，流速測線上の水深方向の流速測点間隔を最も狭くした場合に得られた水深，流速の値を用い，流量計算方式としては最も精密な値を与えると考えられる方式で計算された値を以て各流量観測地点に於ける真値と考え，これを基準流量と名づける。例えば，横断方向の流速測線間隔を変えるこ



図—1　ばらつきと河幅との関係



図—2　ばらつきと$\frac{\text{流速測線間隔}}{\text{河幅}}$%との関係（A式）

とによって流量の影響がどう変るかを考えるには，最も狭い間隔で測ったものを基本とし，これからまびき計算によって種々なる間隔の場合の流量を計算し，これ等の計算値を基準流量で割った比率を%で表わしこれを縦軸にとり，この場合の流速測線間隔の河幅に対する比率を%で表わしこれを横軸にとってこれ等の関係を求めた。最初横軸には流速測線間隔をちかにとったところ図—1に示す様な関係が得られたが図—2の様にこれを河幅で割った値$\frac{\text{流速測線間隔}}{\text{河　幅}}$%に変えたところ点のばらつきはずっとせばまって来たので横軸には$\frac{\text{流速測線間隔}}{\text{河　幅}}$%を採用することにした。但し，これらの図には10流量観測所で得られた値を一纏めにしてプロットしてあり，流速測線間隔は左岸を距離零にして等間隔にとったものと，右岸を距離零にして等間隔にしたものとを用い資料数をふやしている。又ここでは水深測線と流速測線とが一致する場合についてのみ考えている。

図—2を見ると縦軸の値100%のまわりのばらつきは$\frac{\text{流速測線間隔}}{\text{河　幅}}$%の値を零に近づけるに伴い急に収斂することがわかる。このことは我々の行った程度の観測に於て間隔の最小単位は充分小さく選ばれていたことを示していると解してよい。

次にこのばらつきの表わし方であるが，或る$\frac{\text{流速測線間隔}}{\text{河　幅}}$の値或はその幅の値に対して，流量観測値と基準流量との差の基準流量に対する比率の%が幾つも得られている場合にはそれ等の標準偏差を以てその代表値と考えることにする。

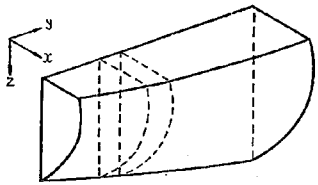
水深及び流速測線の間隔のきめ方であるが，過去に資料の無い所で初めて観測する様な場合には先ず等間隔法より始めるより致し方あるまい。流量について等間隔とは断面内に於ける区分流量が等分割されることであるが，この為には全流量が予め与えられて初めて出来ることであって，初めての観測所ではこの方法は実施出来ない。よってここでは水深，流速測線共に等間隔法を採用する。

〔4〕　本研究でとりあげた要素

誤差の原因としては〔2〕にあげたようにいろいろ考えられるが，本研究では計算と測り方について次の諸要素をとりあげることにする。

(イ) 流量計算方式
(ロ) 横断方向の水深及び流速測線間隔
(ハ) 流速測線上の水深方向の流速測点間隔

河川の横断面を通る流量は図—3に示すような容積で表わされる。この容積を表わす理論式は一般には得られないので，ここでは実際に測られた多くの資料を基にして計算をすすめていくことにする。この為にはこの容積を幾つかの多面体に分割し，それぞれを計算し加え合わせ全流量を求めるという計算方法を採用する。図に於てxを流速方向，yを横断方向，zを水深方向とした場



図—3 河川横断面を通る流量

合，この多面体を切断するのに，㋑x y面に平行な面㋺x z面に平行な面との2方法が考えられるが，ここでは後者を採用し面も等間隔にとることにする。

流速はz軸上で分布して居るがこの測線上の分布をどう取扱うかが問題である。初めは測線上で詳しく等間隔に測定しこれにより平均流速を求め，これと測線上の特定の2点で代表される2点法流速，1点で代表される1点法流速とを比べてそれぞれの代表性を調べようというものである。

流量計算方式としてこれまで提案されて居るものに3つある。これ等は横断方向の流速の変化に関して，或る区間を一定と考えたり，或は相隣る2流速測線間でその平均値を用うるという考え方であるが，この他に2流速測線間で流速は直線的に変化するという考え方も成立つわけであって，この方が仮定の省略が少いため前の2者よりも精密な値を与えると考えられるので基準流量の計算にはこれによることにした。

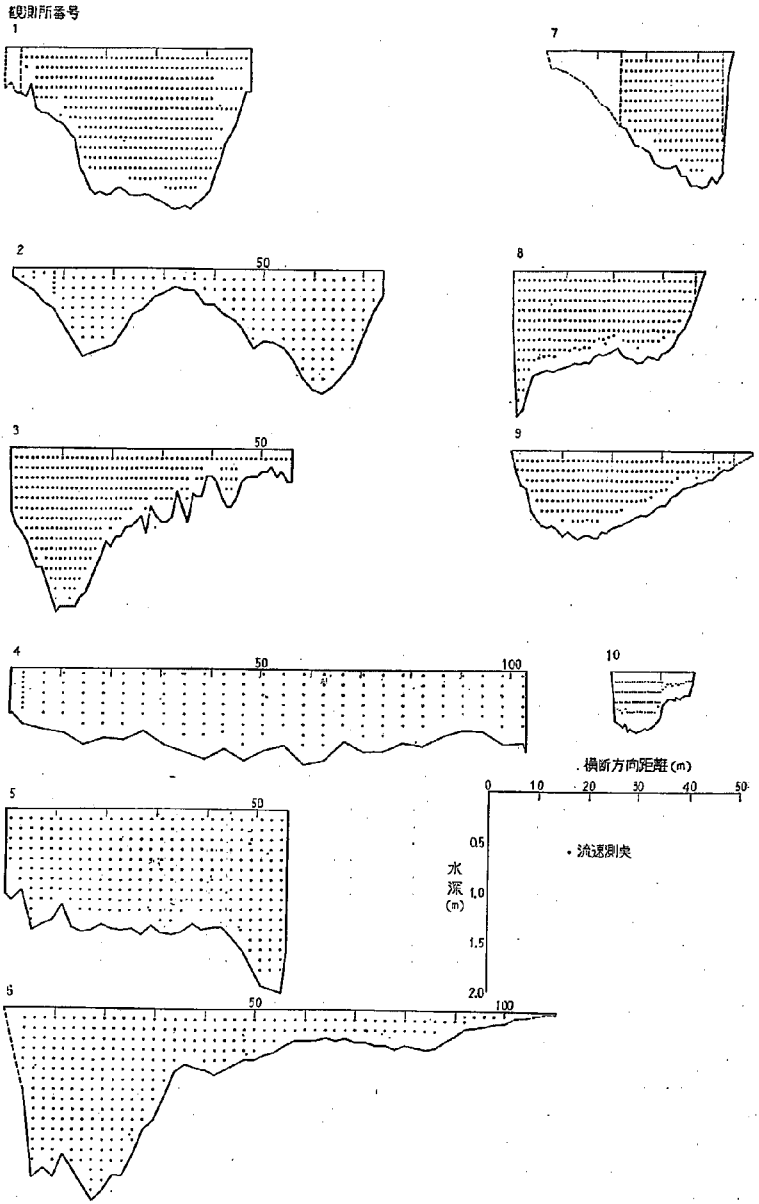
上記3要素がこれまで実際の観測にどの程度考慮されて来たかについて述べる。㋑の流量計算方式についてこれまで論議されたものはない。㋺水深及び流速測線について，我国でこれまで流量観測法の基準となって来た通産省の規定には次の様になっている。

「水深測線の水平距離は河幅の大小，流速の変化の状況に応じて適宜に決めて差支えない。流速測線は水深測線のうち1つおきにとった位置とする。」

即ち，流速測線間隔について量的に明確な規定は与えていない。アメリカ・ジオロジカル・サーベイーに於ける流量観測法の基準を示しているウオター・サプライ・ペーパー888には次の様に示されている。

「流速測線の間隔をきめる一定法則はない。河幅400呎(122m)のところでは流速測線間隔は15～20呎(4.6～6.1m)，河幅1000呎(305m)のところでは流速測線間隔40呎(12m)，従って測線数は常に20本以上とする。1流速測線の受持つ区分流量が全流量の10%を越えることが一つも無いようにする。」

ここで注目すべきことは1流速測線の受持つ区分流量について規定を設けたことである。区分流量の全流量に対する%は流量観測が終了しなければわからない筈のものである。それでは作業に間に合はないから既往の流量観測資料に基づき作成された水位流量曲線を観測現場に持



図—4　10流量観測所の河川横断形状

参し，観測開始前に水位を読みこれに対応する流量を水位流量曲線から読取りこの値を便宜上求むべき全流量の近似値であると仮定する。観測を開始すると，観測しながら各流速測線毎の区分流量を計算し，それぞれの値を上記全流量の近似値で割り何れもが10%の限度を越えないことを確かめつつ観測を続けるのである。原則としては等間隔法によって流速測線を設けていくのであるが，区分流量が全流量の10%を越えるような場合が有ると，直ちにその区分断面内にもう1本流速測線を添加して未だ10%の限度を越えるかどうかをチエックする。これを確認して初めて次の区分断面の観測にうつる。この方法は確かに合理的であるが，我が国の様に流量観測を全部終らしてから流量を計算するところではこの規定は適用出来ないことになる。(A)の流速測線上の水深方向の流速測定点についてアメリカではすべて2点法或は1点法を採用している。従来の建設省の低水観測法は通産省の規定を借用したものであったが，これでは次の様に規定されている。

「流速測定には精密法と簡単法とが有るが原則として精密法によることとし，水位の変動の著るしいときその他やむを得ない状態のときのみ簡単法を採用する。」

建設省では従来より流速測線上で幾点も測定する精密法が一般的な方法と考えられて来たのは上記規定を準用して来たからである。流速測線上の流速測点の規定のみがはっきり明文化されているためこのことが余りにも忠実に守られて来たようである。実際問題としては一定作業時間内に最も精度の高い観測が出来ればよいのである。流速測線上では2点法或は1点法を用いても可成り正確な平均流速が得られるならこの方法を採用し流速測線上でかける時間をもっと軽減し，その代り流速測線の数をまし全体としてバランスのとれた観測を行うのが望ましいと考える。

2. 計算に使用した資料

流量精度を論ずるには先ず真値を求めることが必要であるが，従来得られている観測値をみてもここでいう真値に近いものを得ようとして特に詳しく観測したという例はないようである。よって我々は特に詳細な流量観測を行うのを目的とし，横断方向の流速測線間隔は河幅の3%程度，流速測線上の水深方向の流速測点の間隔は10cm単位を目標とした。観測場所としては既存の建設省流量観測所より選び，主として中流河川を対象とした。作業の便宜上一つ河川でまとまったところとして鬼怒川を選びここで6地点，烏神流川で4地点を選んだ。これ等10流量観測所の河川横断形状は図—4に示す通りである。図中の・印は流速測点の位置を示している。なお観測所の河幅，平均水深，平均流速，最大流速，基準流量の値は表—1に示す通りである。

流量観測の方法としては水深測線の数を流速測線の数よりもふやすことも考えられるが，基準流量の観測では水深測線即流速測線の場合に限った。又流速測線の間隔は等間隔とした。

観測は主として舟を用い，使用した流速計もプライス流速計で特殊な器具は何等用いてはいない。

流速測線上で水深方向に流速を求める場合，表面流速及び底流速は測定出来ないのが実際である。これ等は推定により求めることとし，表面流速は表面より10cm下ったところの流速と等しいとし，底流速は底に近い2点の流速の延長として推定した。流速測線上で平均流速を求めるには，等間隔に測った点流速間で直線変化をしているとして計算した。2点法，1点法の点流速は直接測定せず等間隔に測定した点流速に内挿して計算より求めた。又横断方向で死水のあるところは流量計算の上からは無視することにした。この場合流速が測定出来なくなった流速測線を以て死水の境界と考えた。

表—1　10流量観測所に於ける河幅，平均水深，平均流速，最大流速，基準流量

観測所番号	河川名	観測所名	観測年月日	河幅 m	基準流量 m^3/sec	断面積 m^2	平均流速 m/sec	最大流速 m/sec	最大水深 m	平均水深 m	流速測線間隔 m	流速測線上流速測点間隔 m
1	鬼怒川	佐貫	27.10.31	47	23.01	53.45	0.43	0.78	1.60	1.14	2.0	0.1
2	〃	石井	〃 11. 1	74	19.40	44.98	0.43	0.77	1.23	0.61	2.0	0.1
3	〃	船玉	〃 10.29	56	53.38	43.08	1.24	2.25	1.62	0.77	1.0	0.1
4	〃	方平	〃 10.29	103	45.51	75.77	0.60	0.92	0.94	0.74	4.0	0.1
5	〃	鎌庭	〃 10.30	56	41.53	69.65	0.60	0.87	1.83	1.24	2.0	0.1
6	〃	水海道	〃 10.30	97	51.70	68.87	0.75	1.15	1.90	0.71	2.0	0.1
7	烏川	佐野	29.10.26	20	11.11	22.81	0.49	0.74	1.37	1.14	1.0	0.1
8	〃	倉賀野	〃 10.27	36	12.61	31.15	0.40	0.63	1.45	0.87	1.0	0.1
9	〃	岩鼻	〃 10.27	44	20.23	25.26	0.80	1.22	0.88	0.57	1.0	0.1
10	神流川	渡瀬	〃 10.29	14.5	6.09	6.53	0.93	1.37	0.60	0.45	0.5	0.1

3. 流量の計算方式

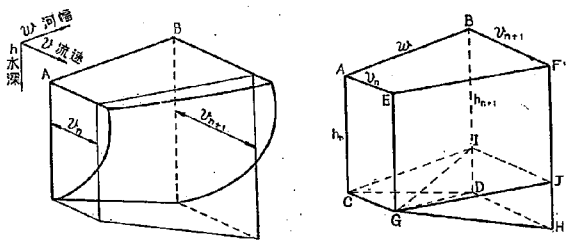
測定によって得られるのは流速と水深とであって，流量というものはこれ等測定値から間接に計算により求まる量である。従って採用する計算方式が違えば得られる流量値はそれぞれ違って来ることになる。本章では4種

類の計算方式について互いにどれ位差が有るかを比較検討することにした。

流速は流速測線上の幾つもの点に於て測定されているが，流速測線としては平均化された1つの値で代表されていると考える。これ等の代表流速を河幅の方向に考えた場合測線間ではどの様に変化しているかという考え方に幾つかの場合が考えられるようである。即ち1〔4〕でも触れた様に，流速測線と次の流速測線との間で流速は直線的に変化しているものとするもの，流速測線毎に独立した値を持ちその支配力は相互の距離の中間までとするもの，2流速測線間では両流速の平均値で代表されるとするもの等3つの違った考え方をとりあげることにする。第1の場合は他の2つに比べて仮定の省略の程度が一番少いから流量の精度は最も良いと見做されるのでこの計算方式を標準式とよび，この方式を用いて他の3方式の特性を検討することにする。

（1）　区分流量

全流量は横断面上河幅に沿い等間隔に区切られた区分流量の和として表わされるので，先ず区分流量の標準式による計算から始めよう。この場合の区分流量は図―5に示すように流速測線間で流速，水深共に直線的に変化するものとしている。横断面の河幅線上に於てn番目の点Aとn＋1番目のB点との流速測線間を通る区分流量



図―5　区分流量の計算，標準式

につき考える。点A，Bに於て測定された水深を h_n，h_{n+1}，流速測線上の平均流速を V_n，V_{n+1} とし，AB間の間隔を w とする。今ABに垂直にAC，BDを引き，その長さをそれぞれ水深 h_n，h_{n+1} に等しいようにとる。次に横断面に垂直にAE，BFを引きその長さをそれぞれ流速 V_n，V_{n+1} に等しいようにとる。

点A，B間では水深，流速はそれぞれ直線的に変化すると仮定して居るから，区分流量 $q'_{n,n+1}$ は容積（ABFE−CDHG）で表わされることになる。但しCG//AE，DH//BFにとる。この容積を立体幾何学によって計算しよう。今CI//AB，GJ//EFなるようにそれぞれBD，FH上に点I，Jを求める。容積（ABFE−CDHG）は次の3つの部分の和として表わされる。

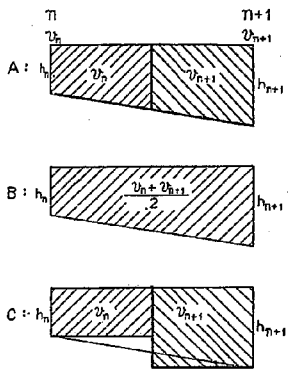
容積（ABFE−CDHG）

＝容積（ABFE−CIJG）＋容積（G−IJHD）

＋容積（D−CGI）$= \frac{V_n+V_{n+1}}{2} \times w \times h_n + \frac{1}{3} V_{n+1}(h_{n+1}-h_n)w + \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{2} V_n w (h_{n+1}-h_n) = \frac{1}{2} w \cdot \left\{(V_n+V_{n+1})\ h_n + \frac{1}{3}(V_n+2V_{n+1})(h_{n+1}-h_n)\right\} \cdots$ ……（3.1）

但し $h_{n+1} > h_n$ とする。

区分流量を最も詳しく計算したのが（3.1）であって，こ



図―6　区分流量の計算，A，B，C式

れを標準区分流量とよび，これに対して従来より実際に用いられて来た計算方式はもっと簡略化された次の3方式である。（図―6）

A式：

1つの流速測線の支配する範囲は両隣りの流速測線までの間隔のうちそれぞれ半分まで及ぶとする。流速測線間n，n＋1を通過する区分流量 $q'_{n,n+1}$ は流速測線nの右側の受持つ流量と流速測線n＋1の左側の受持つ流量との和として与えられる。断面積は図に示す様にそれぞれ梯形として計算する。

B式：

流速測線n，n＋1間で同一の流速を考え，この値としては両端の値の平均を用う。断面積は図に示す様に梯形として計算する。

C式：

流速測線の支配する範囲はA式と同様であるが，断面積としては図に示すようにそれぞれ矩形を考える。

上記3式の区分流量を計算式で表わすと次の様になる。即ちA式に於て流速測線nの受持つ区分流量はその

流速と受持断面積の積として表わされる。

$$V_n\times\frac{1}{2}\left(h_n+\frac{h_n+h_{n+1}}{2}\right)\frac{w}{2}$$

又流速測線n+1の受持つ区分流量は同様にして

$$V_{n+1}\times\frac{1}{2}\left(\frac{h_n+h_{n+1}}{2}+h_{n+1}\right)\frac{w}{2}$$

よって流速測線n,n+1を通る区分流量 $q_{n'},_{n+1}$ は次の様になる。

$$q'_{n,n+1}=\frac{w}{4}\left\{V_n\left(h_n+\frac{h_n+h_{n+1}}{2}\right)+V_{n+1}\left(\frac{h_n+h_{n+1}}{2}+h_{n+1}\right)\right\}\cdots\cdots\cdots\cdots(3.2)$$

B式に於ては流速測線間で同一の平均流速を考えるのであるが，その大きさは両端の値の平均値 $\frac{V_n+V_{n+1}}{2}$ をとり，断面積は横形として $\frac{h_n+h_{n+1}}{2}\cdot w$ をとる。区分流量 $q''_{n,n+1}$ は次の様になる。

$$q''_{n,n+1}=\left(\frac{V_n+V_{n+1}}{2}\right)\left(\frac{h_n+h_{n+1}}{2}\right)w$$

$$=\frac{w}{4}(V_n+V_{n+1})(h_n+h_{n+1})$$

C式に於ては流速測線nの受持つ区分流量は断面積を矩形と考えているので $V_nh_n\cdot\frac{w}{2}$，流速測線n+1の受持つ区分流量は同様に $V_{n+1}\ h_{n+1}\cdot\frac{w}{2}$，全体の区分流量 $q'''_{n,n+1}$ は次の様になる。

$$q'''_{n,n+1}=\frac{w}{2}(V_nh_n+V_{n+1}h_{n+1})\cdots\cdots\cdots\cdots(3.4)$$

区分流量の計算に於て標準式による $q^\circ_{n,n+1}$ が最も精密な値を与えると考えられるので，これを基準と考えこれと上の3式とで求めた流量との差をそれぞれ求めると次の様になる。但し $V_{n+1}>V_n$，$h_{n+1}>h_n$ とする。

$$q'_{n,n+1}-q^\circ_{n,n+1}=\frac{1}{24}w(V_{n+1}-V_n)(h_{n+1}-h_n)\cdots\cdots\cdots\cdots(3.5)$$

$$q''_{n,n+1}-q^\circ_{n,n+1}=-\frac{1}{12}w(V_{n+1}-V_n)(h_{n+1}-h_n)\cdots\cdots\cdots\cdots(3.6)$$

$$q'''_{n,n+1}-q_{n,n+1}=\frac{1}{6}w(V_{n+1}-V_n)(h_{n+1}-h_n)\cdots\cdots\cdots\cdots(3.7)$$

上記3式を比較してみて次のことが言える。

（i）　A式による誤差が最も少く，B式によるものがこれにつぎ2倍で，C式によるものが最も大きく4倍である。

（ii）　区分流量を大きさの順に並べると，C式によるものが最も大きく，A式によるものがこれにつぎ，B式によるものは標準式によるものより小さく最小である。

なお前述の標準区分流量 $q^\circ_{n,n+1}$ は(3.1)より計算により求まるわけであるが，これは間接にも次の様にして得られる。即ち (3.5) (3.6) (3.7) の右辺は係数が違うだけであり，而もその1つは負であるから，

$$(3.5)\times2+(4.6)\times3+(4.7)\times1=0$$

となり従って

$$q^\circ_{n,n+1}=\frac{1}{6}\left\{2q'_{n,n+1}+3q''_{n,n+1}+q'''_{n,n+1}\right\}$$

即ち右辺の3個が既知であれば標準区分流量は上式を用い計算により求まることになる。

(2)　全流量

区分流量を横断面内で累加すれば全断面を通る全流量が得られる。区分のとり方がA，B，Cの3方式でそれぞれ同様であれば (3.5) (3.6) (3.7) に於て右辺の $(V_{n+1}-V_n)$ $(h_{n+1}-h_n)$ は何れにも共通であるから，これを区分数nについて加え合わせた全断面を通る全流量 $\Sigma q'$，$\Sigma q''$，$\Sigma q'''$ についても区分流量について得られた（i），（ii）の結果が当嵌るわけである。

区分流量より全流量を実際に計算するに当ってA式，C式では (3.2) (3.4) は用いない。前式では各方式の区分流量を比較するため特に流速測線n，n+1間に注目したが，実際の計算では各流速測線の受持つ区分流量の累加値として全流量を計算した。即ちこの場合の区分流量 q'_n，q'''_n は次式で表わされるとした。

A式：

$$q'_n=V_n\left\{\left(\frac{h_{n-1}+h_n}{2}+h_n\right)\frac{w}{2}+\left(h_n+\frac{h_n+h_{n+1}}{2}\right)\frac{w}{2}\right\}$$

$$=\frac{V_nw}{4}(h_{n-1}+6h_n+h_{n+1})\cdots\cdots\cdots\cdots(3.8)$$

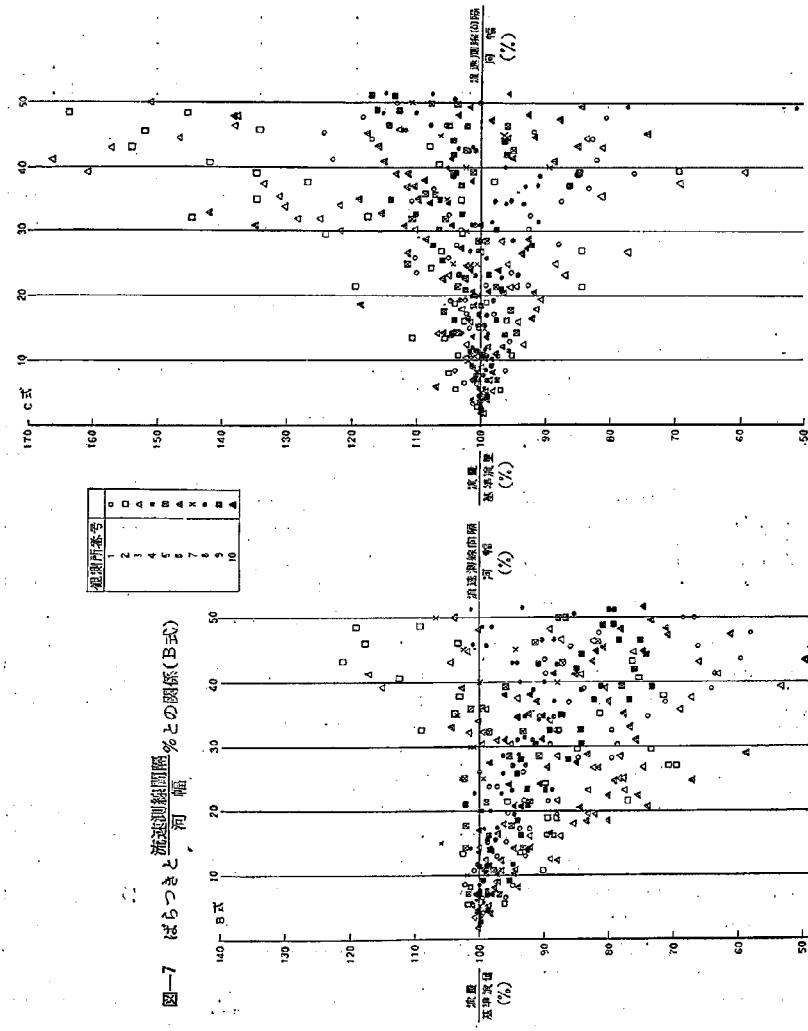
C式：

$$q'''_n=V_nh_nw\cdots\cdots\cdots\cdots(3.9)$$

但しB式では $q''_{n,n+1}$ の値をそのまま，使用することにした。

(3)　3方式の比較

3方式のうちでどれを用いたら最も精度のよい結果が得られるかを説明するのに1ケ所の或る限られた条件の下で観測された値だけによるとすると資料数が足りないのでここでは10ケ所の観測値を全部使用することにし，真値よりまびき計算によって流速測線間隔を変えていった場合の数多くの計算値について全体的に論ずることにした。この場合の誤差の表わし方は1[3]に示した通りであって，縦軸には計算流量を基準流量で割った比率を%で表わしたものを用いている。A式によって計算したものが図—2であるが，B式，C式によって計算した値を図—7，8に示す。横軸の流速測線間隔の河幅に対する比率の%を10%毎の5段階に分ち，各級別内では資料を一纏めにして真値に対する各流量の比率の%の平均値及びその標準偏差を3方式について求めたものを表—2に示す。この表より横軸に級別の中央値をとって標準偏差をプロットすると図—9が得られる。図—2，7，8及び図—9に於て各流量の真値に対する比率の%が100%に近いほど即ち基準流量に近いほど計算値として変動の少いことを示し，その標準偏差の小さいほどばらつきの少いことを示すと考えられるから，全資料の結果からA式による計算値が最も優れて居ると考えてよいであろう。

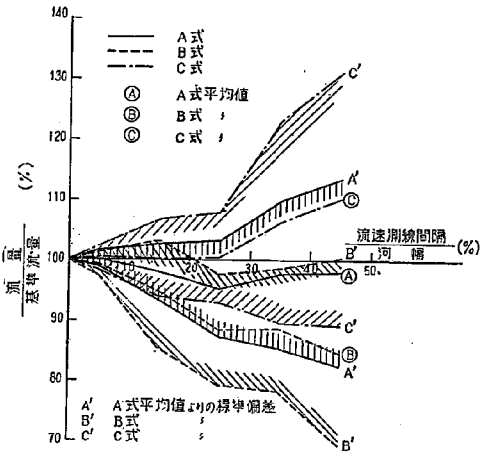


図—7　ばらつきと $\frac{\text{流速測線間隔}}{\text{河　幅}}$ %との関係(B式)

図—8　ばらつきと $\frac{\text{流速測線間隔}}{\text{河　幅}}$ %との関係(C式)

表—2　ばらつきの平均値と標準偏差

流速測線間隔/河幅 % ＼ 計算方式	計算流量を基準流量で割って%で表はしたものの平均値			計算流量と基準流量との差を基準流量で割ったものの%の標準偏差		
	A	B	C	A	B	C
0—10	100.2	99.4	100.4	·1.7	1.8	2.2
10—20	98.1	95.2	100.3	5.0	5.0	6.7
20—30	95.2	88.5	100.4	8.1	9.4	7.6
30—40	97.7	88.8	106.4	12.5	10.5	17.0
40—50	97.9	84.7	110.1	15.7	15.4	21.1



図—9　A，B，C式の比較

然し図—9より横軸上で流速測線間隔の河幅に対する比率の%が20%以下ではC式とA式とでは優劣をつけ難い。以下の計算には常に良好な結果を与えると考えられるA式を採用することにする。

4. 流速及び水深測線間隔の流量精度に及ぼす影響

3では流速測線と水深測線とが一致する場合についてのみ考えた。然し観測の作業時間の上から言えば，水深測定にはあまり時間がかからないので流速測線間に幾つか水深測線を添加し，これによって流量精度がよくなれば非常に効果的である。よってここでは流速測線及び水深測線間隔を共に変えていった場合について流量精度の変化について考えることにする。

流速及び水深を測定する場合河岸を距離零と置いて等間隔に測線をとるのが常識である。然し測線の原点をこの零点より少しずらしてとることも実際にはありうるわけであって，この様な場合には前と違った流速及び水深の値が得られることになる。即ち或る1つの観測値というものは零点をずらすことによって無限に考えられる幾つかのうち唯一つの場合を表わしているに過ぎない。一つでは数が少いし，無限にあっても取扱いが不可能になるのでその中間位の適当なサンプル数を得るための方法を考えようというのである。それには詳しい観測値を基とし，測線間隔をもとの最小単位の整数倍にとり，零点をこの整数回だけずらしてサンプル数をふやすことにした。

基準流量の観測を行った場合，測線間隔は測定に便利なように場所場所で1.0，2.0m等のような整数を採用した。従って10流量観測所の測線数は皆違っており，断面内の測線の分布に相似性が無い。本章では各観測所の値を同じ重みで取扱うため，それぞれ最も詳しく測られた観測値から同じ分割法によって読取り，かようにして揃った資料をもとにして以下議論をすすめていくことにする。こうすれば測線の距離零を左岸にとるとか右岸にとるとかの問題も同時になくなる。ここでは最も詳しく測られた流速，水深の観測値より測線間隔が河幅の2%に対する流速，水深を読取り，これ等の値を用いて計算した流量を本章に於ける基準流量とする。この値はA式により求められた値に（3.5）による修正を加えて求めた。本章の基準流量と前章3の基準流量とを比べたがその差は僅小であった。

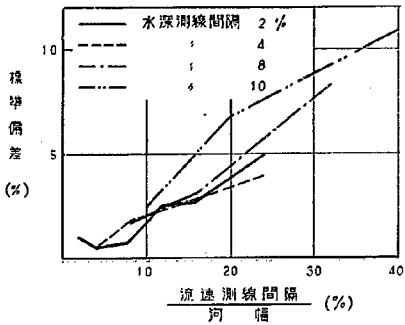
この新たな真値を基本としてまびきにより表—3に示すような流速，水深測線間隔の組合わせを作った。ここで，流速測線間隔2，4%の場合には最も詳しい観測値より更に1%毎に読取ったものを1%ずつずらして2組及び4組の流量を計算し，流速測線8%以上の場合には

表—3　水深測線間隔と流速測線間隔との組合せ

水深測線間隔（%）	流速測線間隔（%）
2	2, 4, 8, 10, 12,14,16,24
4	4, 8, 12, 16, 24
8	8,16, 24, 32
10	10,20, 30, 40
12	12,24
16	16,32
20	20

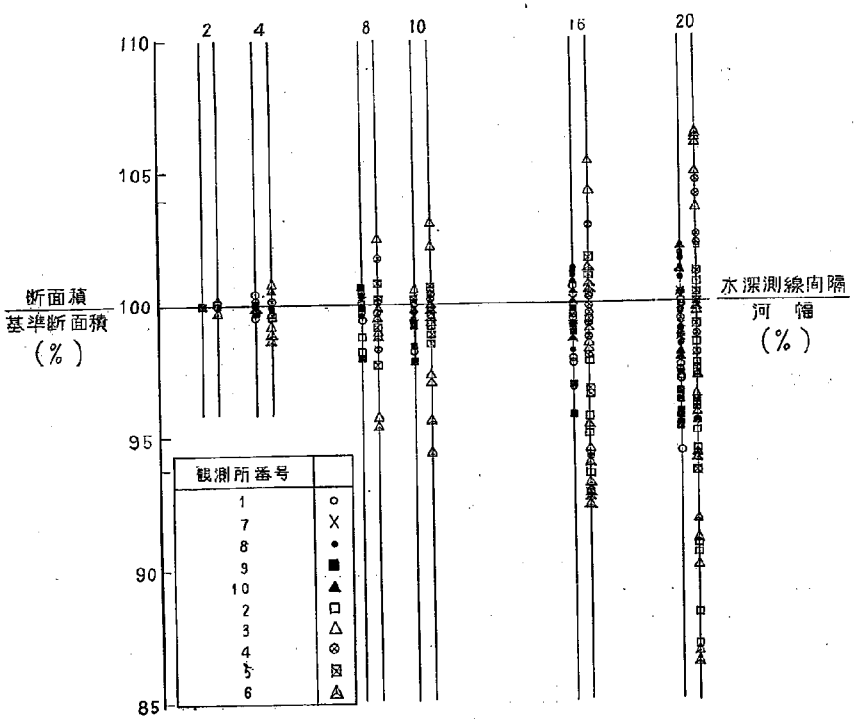
2％毎に読をとり2％ずつずらして流量を計算した。

表—3に示すような水深及び流速測線についての流量をそれぞれA式を用いて計算し，各計算流量と基準流量との差の基準流量に対する比率の％の標準偏差を計算すると図—10，表—4に示す様な値が得られる。この図ではパラメーターである水深測線による曲線群の分離がはっきり出ていない。その原因として河川の横断形状をとりあげることとし，各観測所の断面について水深測線間隔を変えていった場合それに対する断面積の変化率を調べた。ここでも流量の場合と同様最も狭い水深測線間隔で測った断面積を基準断面積と名づけ，各計算断面積をこの基準断面積で割った比率を％で求めこれを縦軸にとり水深測線間隔を河幅で割ったものを％で表わしこれは横軸にとりこの関係を示したものが図—11である。この図では場所により水深測線間隔が大きくなるにつれこのばらつきが大きくなる組とそうでない組とに分けられることがわかる。同様な傾向は計算流量と基準流量との差を基準流量で割った値の絶体値の％の標準偏差と測線間隔との関係を場所別で表わした図—12に於ても見られる。即ちばらつきの大きいものとしては観測所番号1，



図—10　流速測線間隔，水深測線間隔に対する標準偏差

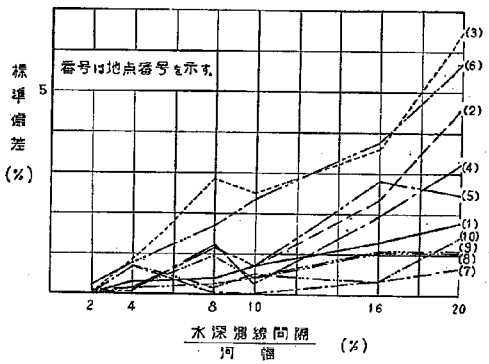
7，8，9，10，中位のものとしては観測所番号2，6，小さいものとしては観測所番号3，4，5等に分離出来る。然し資料のあまり少くなることを避けるために観測所番号1，7，8，9，10の5ケ所と他の5ケ所との2つの組に分け，各組の標準偏差を計算すると表—5，6の様になる。それぞれの組に於ける流量のばらつきと測



図—11 断面積のばらつき

表—4　流速測線間隔，水深測線間隔に対する標準偏差

水深測線間隔(%) ＼ 流速測線間隔(%)	2	4	8	10	12	14	16	20	24	30	32	40
2	1.02	0.48	0.75		2.48		2.80		5.00			
4		0.53	1.77				2.81		3.85			
8			1.72				3.14				8.28	
10				2.41				6.68				10.76
16							3.83					
20								5.55				
30										12.89		21.24
40												



図—12　標準偏差（場所別）

$$\frac{\Sigma|\Delta h|}{\frac{n}{A}{B}}$$

ここに

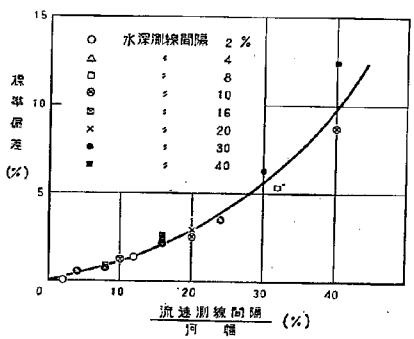
Δh：水深測線間隔を河幅の4％にとった場合相隣る水深の差

n：水深測線数より1を引いた数

A：全断面積

B：河幅

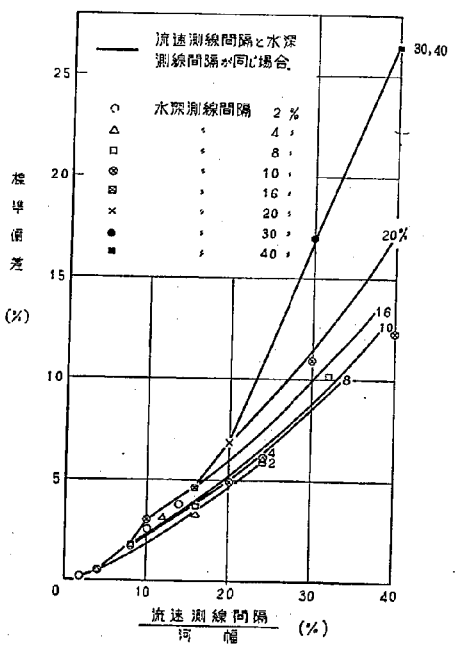
この指標は河床の凹凸の程度が同じであっても全体として水深の深い場合には小さく，浅い場合には大きくなるようなものである。各流量観測所に於てこの指標を計算すると表—7の様になる。この表では上から5つは図—12のばらつきの小さ



図—13　標準偏差

線間隔との関係を示したのが図—13，14である。図—13では水深測線間隔は流量のばらつきに殆んど影響しないが，図—14では水深測線間隔もはっきり影響していることを示して居るが，流速測線間隔20％以内では流量のばらつきの幅は極めて小さいことがわかった。

ここでは流量観測所の断面の性格を2つの組に分離したのであるが，この場合断面積と水深測線間隔との関係を用いた。次に断面積の代りに水深について場所別の特性を考えてみよう。河床の凹凸の平均水深に対する割合として次のような項を計算してみる。



図—14　標準偏差

表—5　標準偏差(%)(第1組)

水深測線間隔(%) ＼ 流速測線間隔(%)	2	4	8	10	12	14	16	20	24	30	32	40
2	0.10	0.45	0.78		1.42		2.18		3.49			
4		0.49	0.76				2.16		3.56			
8			0.98				2.29				5.44	
10				1.16				2.49				8.73
16							2.67					
20								2.94				
30										6.34		
40												12.40

表—6　標準偏差(%)(第2組)

水深測線間隔(%) ＼ 流速測線間隔(%)	2	4	8	10	12	14	16	20	24	30	32	40
2	0.20	0.50	1.80	2.47	3.10	3.76	3.29		6.12			
4		0.55	1.92		3.14		3.29		6.07			
8			1.94				3.72		5.97		10.18	
10				3.02				4.91		10.97		12.28
16							4.61					
20								6.90				
30										16.95		
40												26.40

表—7　河床の凹凸の程度

観測所番号	標準偏差(%)	$\frac{\Sigma\lvert\Delta h\rvert}{n}$ / $\frac{A}{B}$
7	0.82	0.039
8	1.12	0.089
10	0.52	0.052
9	1.53	0.113
1	1.77	0.098
4	1.88	0.112
5	2.20	0.067
3	4.48	0.174
6	4.25	0.192
2	3.64	0.307

い組に属し，この指標の値も小さく，下の5つは大きな値を示している。部分的には合わないところもあるが断面積のばらつきの場合と略対応した関係を示している。

5. 2点法，1点法の流量精度に及ぼす影響

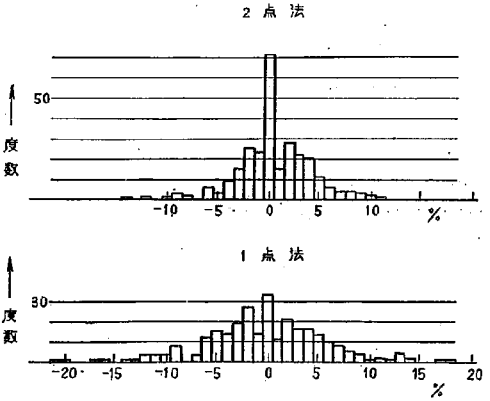
流速測線上の水深方向の流速分布を抛物線で代表されるとすると，流速測線上の平均流速はその上の2点或は1点で充分代表されると考えられて来た。その代表性を調べるため先ず流速測線上で数多く測定された値より求めた平均流速と2点法或は1点法で求められた流速とを流速のままで比べ，ついで2点法，1点法による流速を用いて計算した流量が平均流速を用いて計算した流量とどれ位差異を生ずるかについて流速測線間隔を種々変えて比較することにした。

〔1〕　流速について

10流量観測所で測定した流速測線について，測線上の流速測点が4点以上のものを調べたところ276本あった。これ等流速測線上に於て詳しく測った流速より求めた平均流速，2点法流速，1点法流速を計算より求める。2点法流速及び1点法流速と平均流速との差を平均流速で割って%で示し，その度数分布を求めると図—15の様になる。2点法流速の方がずっとシャープな形状を示す。2点法流速及び1点法流速に対する上記値の全資料についての標準偏差を求めると表—8に示す様な値が得られ，これでも2点法流速の方が良好な値を示していることがわかる。

〔2〕　流量について

流量の計算はA式によることとする。各測線間隔に対



図—15　2点法，1点法の誤差の度数分布

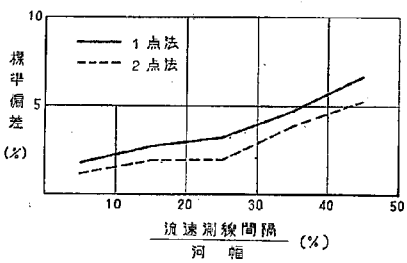
表—8 標準偏差

	標準偏差(%)
2 点法	3.60
1 点法	5.77

して平均流速，2点法流速，1点法流速による流速を計算し，ここでは4で用いたような基準流量ではなく，平均流速を用いて計算した流量を基本に考え2点法流量，1点法流量と平均流速流量との差を平均流速流量で割って%で求めた。但しこの場合，流速測線と水深測線とは一致する場合について考え，流速測線は実測値をそのまま用い4で作った様な仮想した測線は用いていない。このばらつきを表わすため流速測線間隔の幅毎について上記値の標準偏差を求めると表—9に示す様な値が得られ，これを図にしたものが図—16である。これよりも2点法のばらつきの方が1点法よりも小さいことが明らかである。

表—9 標準偏差

流速測線間隔 (%)	標準偏差 (%) 2点法	1点法
0—10	1.15	1.74
10—20	1.94	2.67
20—30	1.97	3.18
30—40	3.88	4.72
40—50	5.31	6.67



図—16 2点法，1点法の標準偏差

6. 結語

本研究の結果は限られた観測資料から導かれたものではあるが，低水流量観測に関して次の様な結論が得られる。

（1） 3の結果より

流量計算方式として従来我国で使用されて来たA式は最も良い結果を与へる。但し測線間隔20%の様な通常の場合にはC式と優劣をつけ難い。C式は計算の手間が省けるので現在アメリカではB式よりこの方法にきりかえられたが，我国でも将来は作業能率の上からこの方法を採用したい。但し流速測線間隔を5%まで下げるという条件を満足して居らねばならないのは言うまでもない。

（2） 4の結果より

（i） 河床の断面形状が整っていて平均水深に比べて河床の凹凸の少いところでも横断方向の流速測線間隔は流量の精度に大きい影響を与へるが，水深測線の方は更に狭い間隔で測定しても流量精度には殆んど寄与しない。

然し比較的河床の凹凸の大きいところでは流速測線の間で更に水深を測定することによって精度を向上せしめることが出来る。

（ii） 河幅に対して流速測線間隔を等間隔に河幅の10%以下にとれば，流速測線間隔によるばらつきを表わす比率の標準偏差を3%以下に見込むことが出来る。

（3） 5の結果より

2点法或は1点法流速を用いても，詳しく測った流速より計算した平均流速を用いても流量としては大して差の無いことがわかった。然し1点法では2点法に比べて測定の際の錯誤の発見が容易でないし，2点法の方が1点法よりやや，よい標準偏差を示して居るのでなるべく2点法を用い，2点法が用いられない場合に限り1点法を用うるようにしたい。

建設省でこれまで用いて来た方法では水深方向には可成り詳しく測定するのにその割には横断方向の測線数が足りなかったが，2点法でも充分な精度の得られることがわかった以上今後はこの方法を採用し余力を測線数をふやすことにむけるべきである。

附記

本研究のためには特に大規模な現場観測を実施した。鬼怒川に於て流量観測を行った際には関工事事務所より絶大な御支援をいただいた。観測には水文研究室の全員がこれに当った。資料整理は数年に亘ったため数多くの所員の協力を得た。最後の取纏めには永尾勝義君（当時東大学生）をわずらわした。ここに記して深甚な謝意を表するものである。

コアキシアル・リレイション法を用いた有効雨量の計算方法

竹　内　俊　雄*
鶴　岡　稔　雄**

(昭和35年3月)

要　旨:

流出に影響を及ぼす諸要素のうちここではＡＰＩ，週番号，降雨継続時間，雨量をとりあげた。これ等4変数と有効雨量との関係をコアキシアル・リレイション法による図式解法で示した。

この方法を用いて有効雨量を求める場合その精度は次の要素によって支配される。

(イ) 使用する資料数
(ロ) 上記4変数のうち幾つをとりあげるのか。
(ハ) 流域の乾湿度を表わす要素として何を採用するか。
(ニ) 計算の作業を何度繰返すのか。

これ等の要素によって有効雨量の値はどのように変化するものであるかについて検討を行った。

計算に用いた資料はアメリカ・モノカシ川のものと神流川のものとの2種類である。

目　　次

1. 流出に影響を及ぼす諸要素……(2)
〔1〕降雨開始時に於ける流域の乾湿度……(2)
〔2〕被覆の性状……(2)
〔3〕雨量……(2)
〔4〕降雨継続時間……(2)
2. 基礎資料……(2)
〔1〕計算方法……(2)
〔2〕2種類の資料の比較……(5)
3. 各象限に於ける曲線群の形……(5)
4. コアキシアル・リレイション法の作図（その1）……(7)
〔1〕作業順序……(7)
〔2〕計算例……(10)
5. コアキシアル・リレイション法の作図（その2）……(12)
——曲線群を他より一部借用する場合——
6. 計算により求められた有効雨量の精度に影響を及ぼす諸要素……(13)
〔1〕資料数……(13)
〔2〕元数……(13)
〔3〕乾湿度……(14)
〔4〕次数……(15)
7. 結語……(15)

*河川部長兼水文研究室長　　**前水文研究室研究員

1. 流出に影響を及ぼす諸要素

流域に降雨が有った場合，その流域よりの流出量は種々なる要素によって影響を受けると考えられるが，ここではそれ等のうち最も支配的であると考えられる次に示すものを取り上げることにする。

(A) 流域特性 (1) 降雨開始時に於ける流域の乾湿度
(2) 被覆の性状

(B) 降雨特性 (1) 雨量
(2) 降雨継続時間

〔1〕 降雨開始時に於ける流域の乾湿度

流域の土壌の乾湿度の表わし方として間接的に，直接的に次の3つが考えられる。

(イ) 前期降雨

出水の始まる時期より以前に雨量がどれだけあったかということは流域の乾湿度と関係のある要素であることは容易に考えられる。この場合降雨の影響は日数がたつにつれて減衰するものであるという仮定と，各降雨は独立であって互に影響はし合わないという仮定とを設ける。出水以前に降った雨のその出水に対する影響を表わす指標として次の形で示すAPIを用う。

$$API = \sum_{i=1}^{n} P_i k^i$$

茲に

P：日雨量 (mm)

k：逓減係数

n：出水より対象とする降雨まで遡った日数

雨量として流域の平均値を採用すればAPIも流域を代表する値が得られる。

(ロ) 土壌中の含水量

土壌中の水分を表わす方法はいろいろ考えられ，目測によって湿潤，普通，乾燥等の3種類に分類することも出来るが，これをもっと定量的に表わすには土壌中に水分の変化を示す計器を埋め，これより読取った値によって土壌の乾湿度を得るという方法が有る。これでは流域内の特定点での値は得られるが，これは必ずしも流域を代表する値にはならない。

(ハ) 初期流量，初期地下水位

流域の乾湿度を表わす場合(イ)の降雨による方法は間接的な方法である。直接的に表わす方法として(ロ)の様な特定点で考えるという考え方を更に拡張して(ハ)は前期降雨が流域というフイルターを通ってしみ出て来たものについて考えようという方法である。初期流量は出水の始まる直前の流量であって，これはその時期に於ける流域の乾湿と密接に関係するわけである。(イ)と(ハ)との考え方の違いは流域というフイルターの表面で考えるか，底面で考えるかということであって考え方としてはそれだけの時間的のずれはあるわけである。この流量には流域各地点よりの流出がすべて関与して居るから，これは流域を代表する値と考えてよいが，初期地下水位となると特定地点の値となって流域の極く小部分の代表値としか考えられなくなる。

〔2〕 被覆の性状

流域の植生の変化の様子は1年間を週間として循環すると考えられる。各段階の表わし方としては年間を53週に分けその週番号によることにする。季節の変動が年によってあってもそれは無視するものとする。

〔3〕 雨量

ここでは独立降雨とこれに基づく独立流出との関係についての解析をとりあげて居る。従ってここでいう雨量とは一雨の全雨量のことである。

〔4〕 降雨継続時間

一雨雨量に対する降雨開始より終了までの時間を降雨継続時間という。全雨量と同時にこの要素を考慮に入れるということは間接的に降雨強度も考えたことになる。

2. 基礎資料

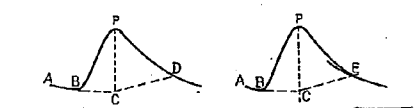
資料としては出来るだけ独立降雨による流出を選ぶことが望ましい。第1の降雨と第2の降雨とが接近して居るとそれぞれに対応する流出を分離することがむづかしいからである。各出水に対して次に示す要素を取揃へることが必要である。

(a) 有効雨量 (Effective Rainfall)
(b) API (Antecedent Precipitation Index)
(c) 週番号 (Week of Year)
(d) 一雨雨量 (Storm Precipitation)
(e) 降雨継続時間 (Duration of Storm)

〔1〕 計算方法

(i) 有効雨量

降雨によってひきおこされる流出現象のうち，ここでは一雨降雨対一雨流出という全体的な現象に注目することにする。或る期間即ち表面流出とか全流出期間中の流量を総計したものを以て一雨流出量とする。従ってその単位は m^3 或はこれを流域面積で割った mm を用う。雨量に注目してそのうち幾何が流出に寄与したかということを中心にして考える場合には，流出量のことを有効雨量とよびこの単位は mm を用う。表面流出とは何所から何所までをいうかという定義は現在のところ確立して居らず，人々によって違うようである。ここで用いたアメリカ・モノカシ川の資料では図—1に示すように前期降雨による逓減部ABを初期流量Bを越えて延長し，ピー



図—1 流出の分離

ク流量Cに対応する点Cを求める。ピーク流量以降の逓減部の表面流出の終点はその勾配の急変点Dを視察により求める。又神流川の資料ではピーク流量以前については前者と取扱いが同じであるが，ピーク流量以降の表面流出の終点はこの部分が標準逓減曲線に乗った点Eを以てした。

（ii） API

(a) 問題点について

(イ) 0日のとり方

降雨が2日以上にまたがる場合には大部分の降雨のあった日附の方を0日とする。

(ロ) 逓減係数の大きさ

アメリカに於ける使用例を示すと表—1の通りである。これらは流域毎に試算によってよく合う値を探して決めたのである。神流川の流域は被覆が厚い方ではないので減衰がなるべく早くなるようにと思い 0.88 を採用することにした。

表—1 逓減係数の大きさ

地域	逓減係数の大きさ
カンサスシテイ・洪水予報センター	0.84
シンシナテイ　〃	0.90
ワシントン気象局	0.90
リンスレー計算例	0.88

(ハ) 何日で打切るか

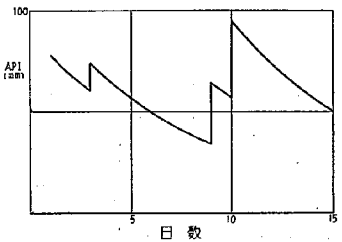
前期降雨の影響を何日で打切ってよいかは逓減係数の値とも関係してくるところである。神流川の資料の計算では出水前30日まで遡ってAPIを求めた。出水の直前に大きい降雨のあったものでは大して遡る必要はないが，そうでない場合に20日で打切ったAPIと30日で打切ったAPIとで25%も違うこともあった。

表—2 API の計算

日数 n	初期値 API_0 (mm)	無降雨期間中の API (mm) k^n	無降雨期間中の API (mm) $API=API_0\cdot k^n$	雨量 r (mm)	降雨後の API (mm) API+r
0	88.9				
1		$(0.88)^1$	78.2		
2		$(\ )^2$	68.8		
3		$(\ )^3$	60.5	12.7	73.2
4		$(\ )^1$	64.4		
5		$(\ )^2$	56.7		
6		$(\ )^3$	49.8		
7		$(\ )^4$	43.9		
8		$(\ )^5$	38.6		
9		$(\ )^6$	34.0	30.5	64.5
10		$(\ )^1$	56.8	38.1	94.9
11		$(\ )^1$	83.5		
12		$(\ )^2$	73.5		
13		$(\ )^3$	64.6		
14		$(\ )^4$	56.9		
15		$(\ )^5$	50.1		

(b) 計算の様式

API式の計算にはその使用目的によってその様式を変えた方が便利のようである。第1は洪水予報の為の様に毎日毎日のAPIの値を知りたいという様な場合であって，この目的には表—2を用うとよい。これを図示したものが図—2である。第2は流出計算の様にあとになって何日かを取纏めて計算する場合であって，この目的には表—3に示す様式を用いた方が便利である。APIの逓減係数kが日数と共に変化する状況は Linsley and others:Applied Hydrology Fig.16-1 (p. 416) に示されて居るからこれを利用するとよい。



図—2 API の計算

表—3 API の計算

日数 n	k^n	雨量 (mm)	雨量×k^n
30	0.022		
29	0.025		
28	0.028		
27	0.032		
26	0.036		
5	0.528		
4	0.600		
3	0.681		
2	0.774		
1	0.880		
計	——	——	

(iii) 週番号

最大流量を支配する降雨のあった日附を含む週の番号を表—4より選び出せばよい。

(iv) 一雨雨量

ここでいう雨量は一雨雨量のことである。神流川の資料では流域に雨量計が幾つも置いてあるので，流域平均値としては等雨量線法或はテーセン法で計算したものを用いた。

(v) 降雨継続時間

神流川の資料では流域内の自記雨量計それぞれについて一雨雨量の降雨開始より終了までの時間を求めこれらの算術平均値を以て流域の平均降雨継続時間と考えた。

表—4 週番号

週番号	期間	週番号	期間	週番号	期間	週番号	期間	週番号	期間	週番号	期間	週番号	期間
1	1.1~1.7	11	3.12~3.18	21	5.21~5.27	31	7.30~8.5	41	10.8~10.14	51	12.17~12.23		
2	1.8~1.14	12	3.19~3.25	22	5.28~6.3	32	8.6~8.12	42	10.15~10.21	52	12.24~12.30		
3	1.15~1.21	13	3.26~4.1	23	6.4~6.10	33	8.13~8.19	43	10.22~10.28	53	12.31		
4	1.22~1.28	14	4.2~4.8	24	6.11~6.17	34	8.20~8.26	44	10.29~11.4				
5	1.29~2.4	15	4.9~4.15	25	6.18~6.24	35	8.27~9.2	45	11.5~11.11				
6	2.5~2.11	16	4.16~4.22	26	6.25~7.1	36	9.3~9.9	46	11.12~11.18				
7	2.12~2.18	17	4.23~4.29	27	7.2~7.8	37	9.10~9.16	47	11.19~11.25				
8	2.19~2.25	18	4.30~5.6	28	7.9~7.15	38	9.17~9.23	48	11.26~12.2				
9	2.26~3.4	19	5.7~5.13	29	7.16~7.22	39	9.24~9.30	49	12.3~12.9				
10	3.5~3.11	20	5.14~5.20	30	7.23~7.29	40	10.1~10.7	50	12.10~12.16				

表—5 アメリカ・モノカシ川資料

番号	API (mm)	週番号	降雨継続時間 (hr)	雨量 (mm)	有効雨量 (mm)	リチャージ (mm)	番号	API (mm)	週番号	降雨継続時間 (hr)	雨量 (mm)	有効雨量 (mm)	リチャージ (mm)
1	28.4	49	16	25.6	5.3	20.3	26	30.7	10	40	22.9	6.6	16.3
2	36.3	50	42	25.1	7.3	17.8	27	27.7	16	36	39.1	15.0	24.1
3	36.1	50	12	19.0	5.8	13.2	28	29.0	14	24	53.1	24.1	29.0
4	27.9	1	12	17.0	5.6	11.4	29	11.4	39	12	89.9	25.9	64.0
5	33.0	3	24	23.4	8.4	15.0	30	22.9	7	24	17.3	4.9	12.4
6	43.9	3	12	28.2	13.2	15.0	31	24.1	15	24	29.7	9.9	19.8
7	24.6	6	48	29.7	10.1	19.6	32	48.5	22	48	31.5	5.6	25.9
8	25.7	8	24	45.4	24.6	20.8	33	32.5	24	3	29.2	5.8	23.4
9	23.1	17	72	142.7	74.1	68.6	34	33.5	32	30	65.3	11.5	53.8
10	19.1	22	18	28.7	4.3	24.4	35	66.8	33	36	90.7	40.4	50.3
11	63.8	25	10	20.3	3.3	17.0	36	18.5	42	96	129.8	44.2	85.6
12	21.1	28	24	39.1	4.8	34.3	37	56.6	43	18	38.6	14.2	24.4
13	45.5	34	40	55.1	12.2	42.9	38	16.0	48	6	18.3	4.1	14.2
14	15.5	42	36	81.0	19.3	61.7	39	11.2	19	12	24.4	2.8	21.6
15	64.5	43	12	43.9	16.7	27.2	40	38.4	45	24	74.4	28.4	46.0
16	70.9	43	30	53.1	19.8	33.3	41	16.5	1	27	77.0	46.0	31.0
17	25.1	46	18	69.9	31.5	38.4	42	38.1	11	12	29.5	16.3	13.2
18	22.4	48	36	30.5	9.9	20.6							
19	7.6	4	24	19.8	5.3	14.5							
20	6.4	8	30	25.7	7.6	18.1							
21	50.8	11	72	41.7	17.8	23.9							
22	50.8	49	24	39.9	19.6	20.3							
23	40.6	50	36	23.6	6.1	17.5							
24	13.2	5	30	49.8	24.4	25.4							
25	32.5	7	12	21.3	8.3	13.0							

表—6 神流川資料

番号	API (mm)	週番号	降雨継続時間 (hr)	雨量 (mm)	有効雨量 (mm)	リチャージ (mm)	番号	API (mm)	週番号	降雨継続時間 (hr)	雨量 (mm)	有効雨量 (mm)	リチャージ (mm)
1	23.9	37	28	239.6	207.8	31.8	26	66.4	40	36	41.0	11.3	29.7
2	49.6	25	28	87.7	53.9	33.8	27	11.1	21	29	58.3	16.3	42.0
3	41.5	34	30	83.2	31.6	51.6	28	24.5	23	25	46.7	12.5	34.2
4	38.0	38	49	112.7	60.1	52.6	29	32.4	25	17	38.2	15.6	22.6
5	16.1	43	26	91.2	43.5	47.7	30	46·7	25	31	56.6	31.9	24.7
6	22.7	47	63	73.1	11.8	61.3	31	21.1	38	43	123.2	72.6	50.6
7	72.0	24	36	63.0	46.1	16.9	32	14.2	48	15	51.0	10.9	40.1
8	27.7	30	60	201.8	123.7	78.1	33	45.9	30	21	47.7	17.1	30.6
9	120.0	31	20	212.1	186.6	25.5	34	24.0	37	20	43.6	7.5	36.1
10	150.6	32	10	82.8	46.4	36.4	35	13.3	39	33	88.5	19.6	68.9
11	15.8	40	37	65.3	11.9	53.4	36	37.4	41	31	102.4	73.9	28.5
12	12.5	44	31	103.9	53.1	50.8	37	32.5	43	18	39.9	9.5	30.4
13	21.8	26	15	79.4	20.9	58.5	38	8.0	12	37	44.8	11.8	33.0
14	51.5	28	41	52.0	26.7	25.3	39	27.7	20	22	42.0	14.1	27.9
15	28.4	34	41	46.5	8.0	38.5	40	18.7	23	15	35.7	5.7	30.0

番号	API (mm)	週番号	降雨継続時間 (hr)	雨量 (mm)	有効雨量 (mm)	リチャージ (mm)	番号	API (mm)	週番号	降雨継続時間 (hr)	雨量 (mm)	有効雨量 (mm)	リチャージ (mm)
16	16.3	39	55	47.9	6.9	41.0	41	29.7	26	45	73.5	18.1	55.4
17	13.6	41	37	44.0	9.4	34.6	42	48.0	27	46	24.6	19.8	4.8
18	22.3	17	10	47.1	19.8	27.3	43	29.3	35	44	56.7	9.4	47.3
19	27.6	25	27	92.8	31.8	61.0	44	23.9	39	33	119.3	62.4	56.9
20	61.1	28	27	35.5	16.1	19.4	45	81.4	40	42	43.6	18.1	25.5
21	35.3	30	10	69.8	11.6	58.2	46	14.0	44	62	63.2	15.9	47.3
22	53.0	27	32	57.0	26.0	31.0							
23	59.6	28	23	40.5	14.9	25.6							
24	49.4	29	58	68.8	56.7	12.1							
25	28.4	38	59	112.1	75.3	36.8							

以上の方法によって求められたアメリカ・モノカシ川及び神流川の資料を表—5，6に示す。但しモノカシ川の資料はその計算方法に一部不明のところが有る。又雨量より有効雨量を差引いたリチャージの値も計算してそれぞれの表の最後の列に記してある。

〔2〕2種類の資料の比較

モノカシ川と神流川との資料を比較すると表—7の様になる。これら2川の流域面積の差は大きいから2種類の資料を直接比較するのはおんとうでないかもしらないが，それぞれの特徴をみくらべるという意味で表を眺めていただきたい。使用した資料はモノカシ川では年間比較的一様に分布して居るのに対し，神流川では雨期がかたよっている。APIとしては大体似たような値を示している。又降雨継続時間もそんなに違っていない。然し一雨雨量及びこれに対する有効雨量となると神流川の方が倍も大きいが，これは流域面積と降雨特性との2つの原因によるものと考えられる。

表—7　2種類の資料の比較

河川名	モノカシ川	神流川
流量観測所	Monocacy River at Jug Bridge, Md. U.S.A.	埼玉県児玉郡神川村渡瀬 群馬県多野郡鬼石町浄法寺　県境
流域面積 (km^2)	2116	376
使用した資料数	42	46
API (mm)	最大 70.9，最小 6.4，平均 32.2	最大 150.6，最小 8.0 平均 37.2
週番号	年間に略均等に分布	6—7月，9—10月の2期に分れる
降雨継続時間 (hr)	最大 96，最小 3，平均 28.2	最大 63，最小10，平均33.0
一雨雨量 (mm)	最大 142.7，最小 17.0，平均 44.3	最大 239.6，最小 24.6，平均 75.0
有効雨量 (mm)	最大 74.1，最小 2.8，平均 16.0	最大 207.8，最小 5.7，平均 36.4

3. 各象限に於ける曲線群の形

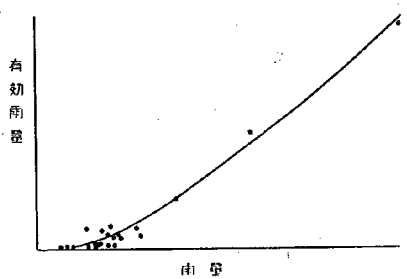
有効雨量Zは1で指摘した(A)流域の特性を示す要素 X_1，X_2……及び(B)降雨の特性を示す要素 Y_1，Y_2……の函数として表わすことが出来る。

$$Z=f(X_1, X_2\cdots\cdots, Y_1, Y_2\cdots\cdots)$$

有効雨量の最も単純な表わし方は(B)降雨特性のうち(1)の雨量だけの函数とすることである。

$$Z=f(Y_1)$$

実測値について上の関係を求めると図—3の様になり，この形だけで充分表わしきれないことは良く知られているところである。

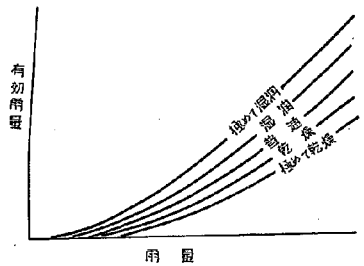


図—3　有効雨量と雨量との関係

有効雨量を表わす為の変数として雨量の他にもう1つ取り入れる事にしよう。今度は流域の特性を表わすもののうち流域の土壌の乾湿度を表わすものをとりあげこれを導入しよう。乾湿度としては前述の土壌の中の含水量或は初期流量が用いられる。この場合の函数形は

$$Z = f(X_1, Y_1)$$

となる。この関係は図で示すと図—4の様になる。

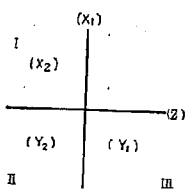


図—4　有効雨量と乾湿度，雨量との関係

有効雨量の計算に支配的であると考えられる代表的な要素はすべてとりあげることとし，1に示した4つの要素を変数として考慮に入れることにする。即ち流域特性を表わすものとして乾湿度を示す前期降雨 API X_1，週番号 X_2，降雨特性を表わすものとして雨量 Y_1，降雨継続時間 Y_2 等の4変数と函数との関係は次式で示される。

$$Z = f(X_1, X_2, Y_1, Y_2)$$

この関係を図式によって解くのである。この方法はリンスレイ* 等によって提唱されたものであって，コアキシアル・リレイション法とよばれている。函数及び変数は図—5に示す様に配置することにする。最後の象限に雨量と有効雨量とが配列されているが，これは後者は前者の値を絶体に越へるものでないという関係が直感的にわかるように留意したからである。

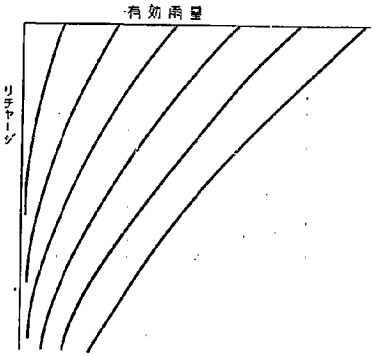


図—5　函数と変数との配置

各象限に於て函数と変数とはどんな関係をとるものであるかを考えてみることにする。それには図—5の第Ⅲ象限から始めることにする。

(ｲ)　第Ⅲ象限

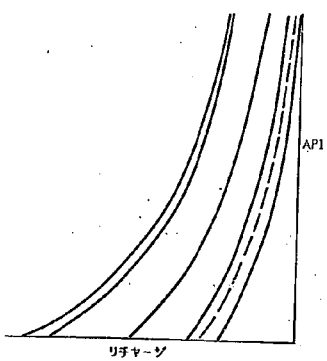
第Ⅲ象限の部分を取出して特に図—6の様に考える。この縦軸はこれまで中間値として取扱われ表面には出て来なかったが，雨量から有効雨量を差引いたリチャージをとることにする。これは流域の吸収を表わす要素であって，雨量に対してこれを考慮に入れると有効雨量が得られるという関係を示している。今吸収が0なる場合を考えると雨量と有効雨量とは一致するわけであって，有効雨量の軸上即ちリチャージ＝0に於て等雨量の曲線群は等間隔に並ぶべきである。次に吸収が非常に大きくなった場合を考えると雨量の如何に拘らず有効雨量が0になることが予想される。有効雨量の軸上での雨量曲線群の勾配は雨量が小さいほど吸収の影響を受けやすいことが予想されるので，雨量の小さいほど関係は横にねてくる傾向を持つと考えられ，従ってこの象限に於ける曲線群は図—6に示すような形をとることが予想される。



図—6　有効雨量とリチャージ，雨量との関係

(ﾛ)　第Ⅰ象限

ここでは API と吸収との関係を考えてみよう。この場合 API ⟶∞ が吸収0に対応することは明らかであり，大ざっぱにみて API と吸収との関係は逆数関係にあるから図—7に示す様な曲線が予想される。週番号に



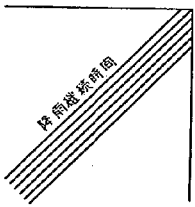
図—7　API，リチャージ，週番号

*Linsley and others: Applied Hydrology p. 419

よる曲線群の間隔については先づ1年を週期としてもとに戻るものであり，極端な場合を除けば変化は一般にゆるやかであると考えられる。曲線群の順位は夏の最繁茂期と冬の最盛期とを両極端に配置するように選ぶ。

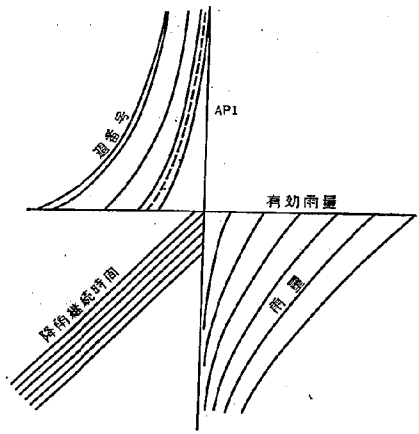
(ハ) 第Ⅱ象限

最後に降雨継続時間の影響について考えよう。以上2つの象限に於て曲線の大体の形をそれぞれ推定したのであるがこれら2曲線群にしわをよせればこの象限の曲線の形状を最も単純化することが出来る。その代表的なものとして直線群を採用すると図—8に示すようになる。



図—8　降雨継続時間

以上の結果を綜合すれば図—9に示すようなコアキシアル・リレイション図が得られることになる。



図—9　コアキシアル・リレイション図

4. コアキシアル・リレイション法の作図（その1）

コアキシアル・リレイション図といえば一般に4変数の場合を指して居るようではあるが，変数を1つから2つ，2つから3つとふやしそれによって得られる有効雨量の精度が高まることを確認しつつ変数が4つまでふえて来た筈のものであるから，ここでは話しの順序として変数が1～4の場合について作図法を述べることにする。変数が1つの場合には有効雨量に最も影響のある要素として雨量をとっても問題はないが，変数が2つ或は3つの場合には変数4つの中からそれぞれの数を選び出す組合せは幾つも考えられるわけではあるが，ここでは便宜的に表—8に示すようなそれぞれ1組についてだけ考えることにする。

表—8　変数の組合せ

変数の数元	変数の種類
1	雨量
2	雨量，API
3	雨量，API，週番号
4	雨量，API，週番号，降雨継続時間

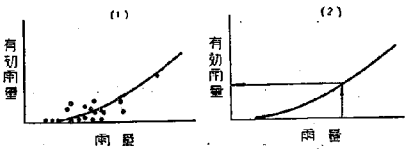
ここでは変数の数を元とよぶことにする。即ち変数1つの場合を1元と称する。又変数より函数を求めるための第1回目の作業を第1次作業とよび，曲線群を作り直した第2回目の作業を第2次作業と称すことにする。

〔1〕 作業順序

(i) 1元

(a) 有効雨量と雨量との関係を図—10 (1) の様にプロットし，これらの点を通る曲線を1本引く。

(b) 図—10 (2) に於て，雨量の値を与えると有効雨量の値が読取れる。



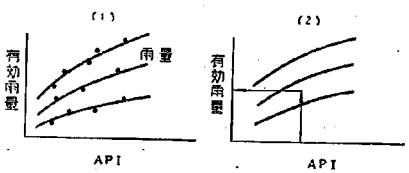
図—10　1　元

(ii) 2元

(a) 有効雨量と API との関係を図—11 (1)の様にプロットし，これらの点の位置に雨量の値を記入する。

(b) 上記に対して雨量の曲線群を引く。

(c) API，雨量の値を与えると図—11 (2)より有効雨量の値が読取れる。

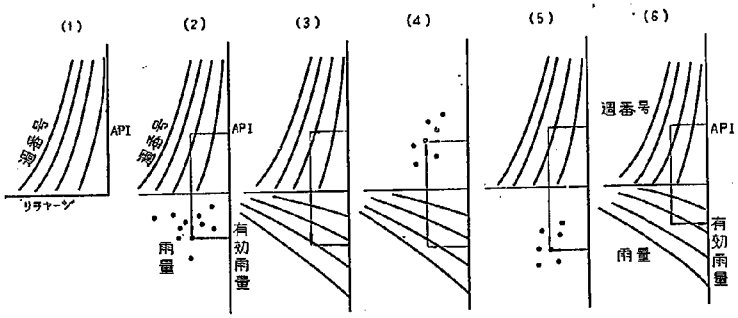


図—11　2　元

(iii) 3元

① 1次

(a) API とリチャージとの関係を図—12(1)の様



図—12　3　元

にプロットし，これらの点の位置に週番号を記入する。

(b) 上記の点に対して週番号の曲線群を引く。

(c) 第Ⅱ象限に於て，第Ⅰ象限のＡＰＩ，週番号から求めた値と有効雨量との関係を図—12(2)の様にプロットし，これらの点の位置に雨量の値を記入する。

(d) 上記の点に対して雨量の曲線群を記入する。

(e) API，週番号，雨量を与えると図—12(3)より有効雨量の値が読取れる。これを第１次値とよぶ。

② 2次

(a) 図—12(3)の第Ⅱ象限はそのままとし，図—12(4)の様に第Ⅰ象限に週番号の点をプロットし直す。

(b) 上記の点に対して週番号の曲線群を引く。

(c) 図—12(5)に示すようにこの新な曲線群を使用し，API，週番号を読取りこれより求むる値と有効雨量との交点に雨量の値をプロットする。

(d) 上記の点に対して雨量の曲線群を引く。

(e) API，週番号，雨量を与えると図—12(6)より有効雨量の第２次値が読取れる。

(iv) 4元

① 1次

(a) 図—13(1)に示す第1象限の作図法は３元①(a)と同じである。

(b) 第Ⅱ象限に於ては縦軸にリチャージをとる。この領域に於てAPI，週番号より求めた値とリチャージより求めた値との交点を図—13(2)の様にプロットし；この交点に降雨継続時間の値を記入する。

(c) 上記の点に対して降雨継続時間の曲線群を引く。図—13(3)

(d) 第Ⅲ象限に於でAPI，週番号，降雨継続時間より求めた値と有効雨量との交点を図—13(4)の様にプロットし，これらの点に雨量の値を記入する。

(e) 上記の点に対して雨量の曲線群を引く。

(f) 図—13(5)にＡＰＩ，週番号，降雨継続時間，雨量を与えると有効雨量の値が読取れる。これを第１次値とよぶ。

② 2次

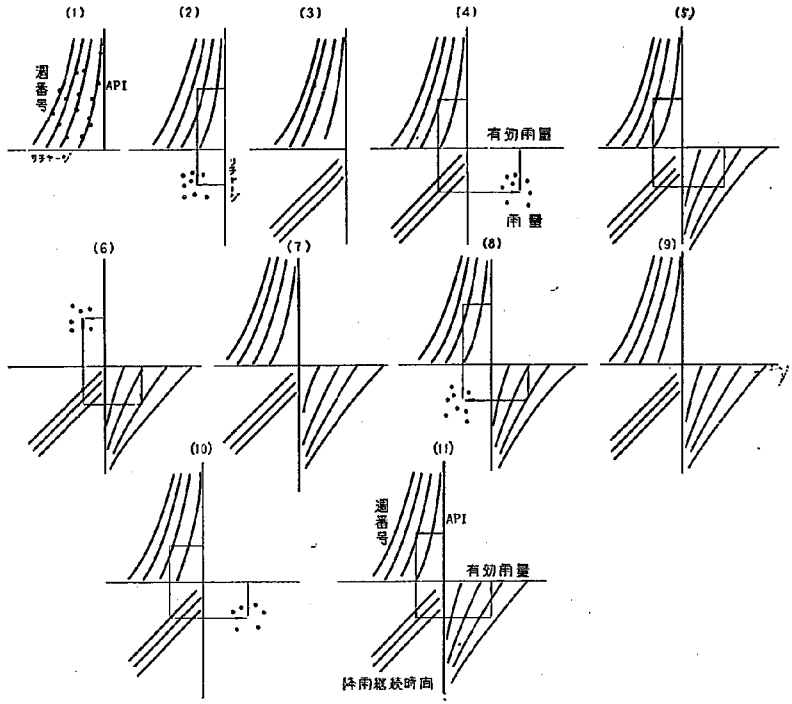
(a) 先づ第Ⅱ，Ⅲ象限はそのままとして第Ⅰ象限から図—13(5)の修正を始めよう。図—13(6)に示すように図—13(5)の第１象限の図形を先づ取除き，第Ⅱ，Ⅲ象限に於て有効雨量，雨量，降雨継続時間を読取った値から求められる値と API の値との交点を第Ⅰ象限で求め，これらの点の位置に週番号を記入する。

(b) 上記の点に対して週番号の曲線群を図—13(7)の様に引く。これで第Ⅰ象限での修正は終了した。

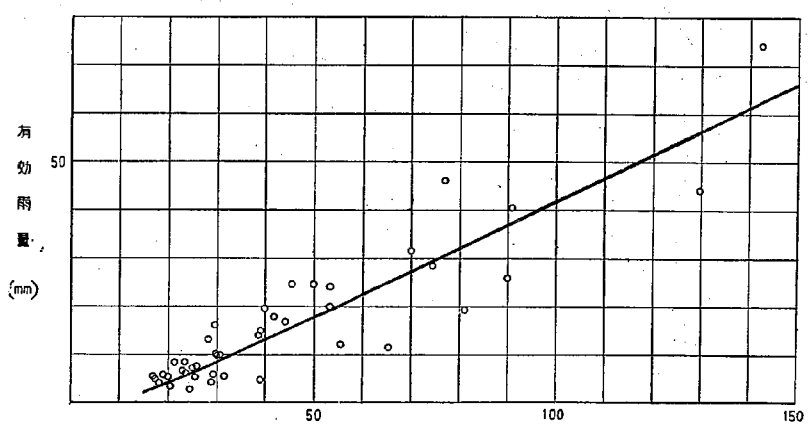
(c) 次に第Ⅱ象限で修正しよう。図—13(8)に示すようにこの象限の既往の曲線群を取除く。第Ⅰ象限のＡＰＩ，週番号より求むる値と，第Ⅲ象限の有効雨量，雨量より求むる値との交点を第Ⅱ象限でプロットし，その点の位置に降雨継続時間の値を記入する。

(d) 上記の点に対して降雨継続時間の曲線群を図—13(9)の様に引く。これで第Ⅱ象限の修正を終了した。

(e) 最後に第Ⅲ象限での修正を行わんとする。それには前図に於けるここの曲線群を除去し，図—13(10)に示すように新に得られた第Ⅰ，Ⅱ象限の曲線群を利用し，API，週番号，降雨継続時間より求める値と，第Ⅲ象限の有効雨量より求める値との交点をプロットし，その位置に雨量の値を記入する。


(1)
(2)
(3)
(4)
(5)
週番号
API
有効雨量
雨量
(6)
(7)
(8)
(9)
(10)
(11)
週番号
API
有効雨量
降雨継続時間

図—13　4　元


有効雨量
(mm)
50
50
100
150

図—14　1　元

(f) 上記の値に対して雨量の曲線群を図—13 (ii) の様に引く。

(g) 図—13 (ii)に於てAPI，週番号，降雨継続時間，雨量を与えると有効雨量の第2次値が得られる。

(h) 以下同様な作業を繰返すと3，4……次値が求められる。

〔2〕 計算例

表—5に示すモノカシ川の資料を用いて計算方法を示そう。

(i) 1元

有効雨量と雨量との関係をプロットすると図—14の様になり点はひどく散乱するが，これらを代表する可成り大胆な曲線を1本引く。表—6に示す雨量の観測値をこの図に当嵌ると計算有効雨量が求まる。

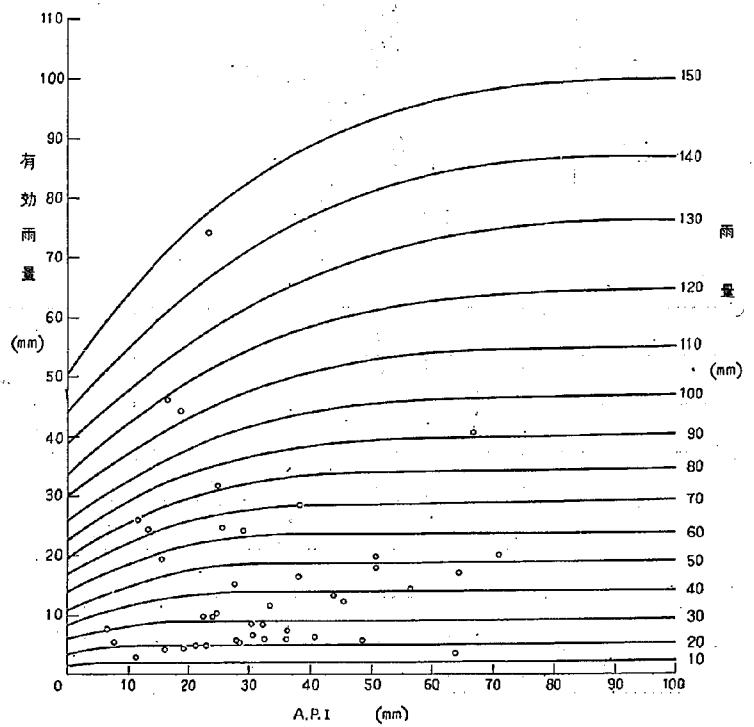
(ii) 2元

有効雨量と API との関係をプロットし，これらの点の位置に雨量の値を図—15の様に記入する。これらの点を通る雨量の曲線群を引く。その範囲は10~150mm である。表—5に示すAPI，雨量の観測値をこの図に当嵌ると計算有効雨量が得られる。

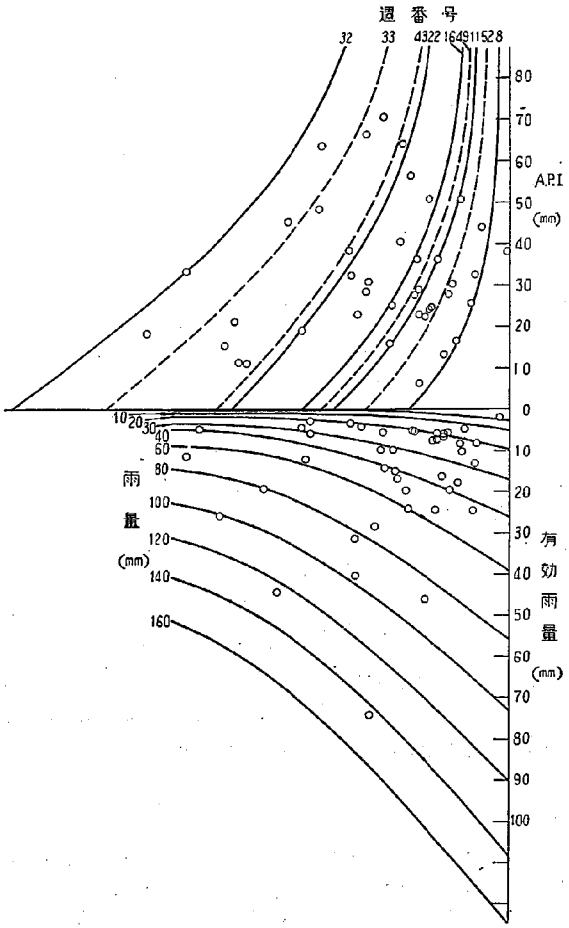
(iii) 3元

この場合の曲線群は第Ⅰ，Ⅱ象限で表わすことにする。第Ⅰ象限では API とリチャージとの関係をプロットし，これらの点に週番号を入れそれらに曲線群を引くと図—16に示す様な関係が得られる。この場合曲線群の週番号は1年間を1循環とみなし，番号32及び8を両外側線に考える。次に第Ⅱ象限に移る。ここでは雨量の曲線群を作成する。これら2組の曲線群を用いこれに観測値のAPI，週番号，雨量の値を入れていくと計算有効雨量の第1次値が得られる。

次に第2次値を求めるには，図—16の第Ⅱ象限はそのままにして第Ⅰ象限で修正を加え，再び第Ⅱ象限で曲線群を作成し直し，これより読取ったものが第2次値である。



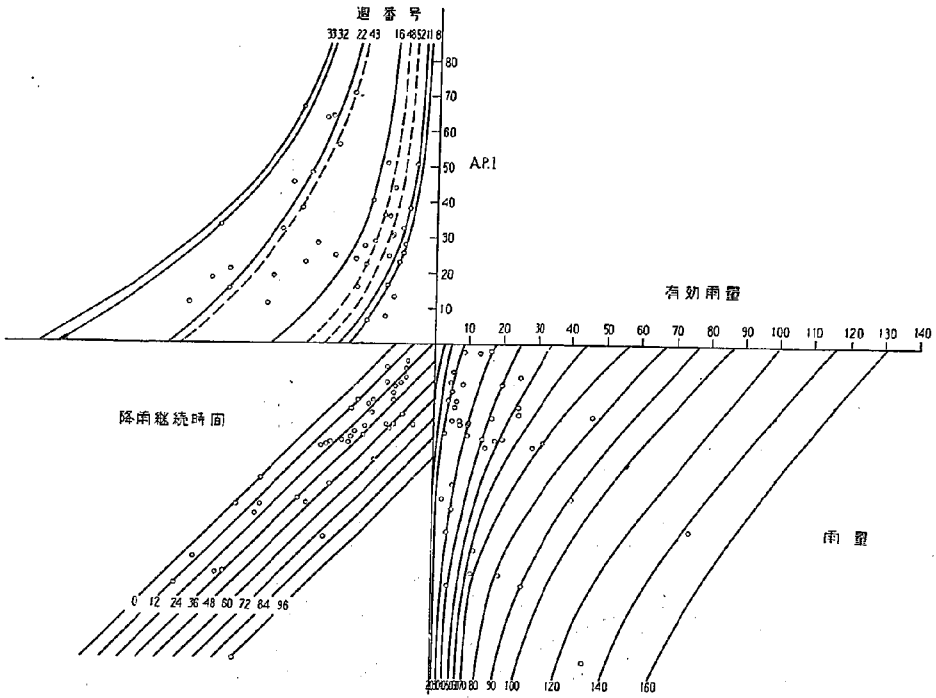
図—15 2 元


週番号
32
33
43
22
16
49
11
52
8
80
70
60
50
40
30
20
10
0
A.P.I
(mm)
10
20
30
40
60
80
100
120
140
160
雨量
(mm)
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
有効雨量
(mm)

図—16　3　元　(2 次)

(iv)　4元

第II象限に降雨継続時間の要素だけふやすと3元は図—17に示すような4元に拡張することが出来る。〔1〕作業順序(iv)②に従って作業を繰返すと第2次値が得られる。



図—17　4　元

5. コアキシアル・リレイション法の作図（その2）

——曲線群を他より借用する場合——

4では各象限に於ける曲線群の形を1つ1つかためていったが，若し参考としていいような図形が1つでも2つでも得られるような場合にはその図形を先づ借用して計算をすすめると初めから図形を組立てるより早く最終結果が得られることになる。こうして得られたのは第1次値であるから，次の段階で借用図形を修正していけば第2次値が得られることになる。

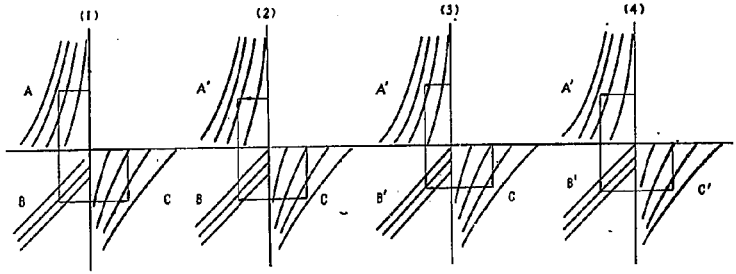
次に変数が4つあって，第I，II象限の曲線が借用出来る場合の例について説明しよう。

①　1次

図—18(1)に示すように第I，II象限で曲線群A，Bが借用出来るとする。与えられた観測値を第I，II象限に当嵌めこれより得られる値と，与えられた有効雨量よりの値との交点を第III象限に於てプロットして，この位置に雨量の値を記入し，雨量の曲線群Cを作る。与えられた観測値を曲線群A，B，Cに適用すると有効雨量の第I次値が得られる。

②　2次

次に借用した曲線群A，Bの修正法を示そう。それには第1象限より始める。即ち第II，III象限はそのままとし，第1象限の曲線群Aを作り直そう。図—18(2)に示すように第II，III象限の有効雨量，雨量，降雨継続時間より求まる値と，API より求まる値との交点を第I象限に於てプロットし，この位置に週番号を記入し，週番号の曲線群A′を求める。次に図—18(3)に示すように第II象限で修正する。第I象限のAPI，週番号より求まる値と，第III象限の有効雨量，雨量より求まる値との交点を第II象限でプロットし，その点の位置に降雨継続時間を記入し，降雨継続時間の曲線群B′を求める。これで最初借用した曲線群A，Bに代るA′，B′が新に得られたわけである。この新たな曲線群A′，B′に対して第III象限に新



図—18　曲線群A，B借用

たな曲線群C′を図—18(4)に示すように作り直す。これら曲線群A′，B′，C′を使用して求め直した有効雨量が第2次値である。

6. 計算により求められた有効雨量の精度に影響を及ぼす諸要素

計算により求められた有効雨量が観測で得られた値とどれだけ違うかという程度の表わし方として，ここではそれらの差の絶体値の平均値及びそれらの差の絶体値の観測値に対する%の平均値との2つの指標を併用して考えることにする。

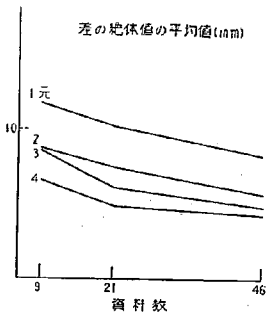
有効雨量の精度に影響を及ぼす要素としてここで取上げたのは資料数，元数，乾湿度，次数等の4種類であって，各変数の数を変えることによって有効雨量がどう変るかを示したのが表—9である。

表—9　有効雨量の精度

資料数	元 / 乾湿度	差の絶体値の平均値(mm) 1	2	3	4	差の絶体値の%の平均値(%) 1	2	3	4
9	API	11.8	10.1	8.6	5.9	12	10	9	7
	Q_b		8.7	8.5	6.6		10	9	7
21	API	10.2	10.0	7.9	5.8	26	20	17	16
	Q_b		7.4	6.0	4.8		11	10	9
46	API	8.2	6.8	6.0	5.0	38	23	21	21
	Q_b		5.6	4.8	4.3		23	20	17

〔1〕資料数

有効雨量を表わす関係図を作成する場合，その得られた図形はこれを作図する場合に用いた資料数によって可成り違って来るものであり，実際に資料の数が少いと作図は困難となり高い精度は望めない。経験上作図の為には少くとも50個は必要とされて居る。



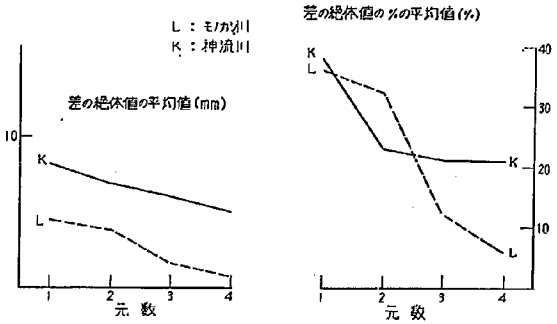
図—19　資料数

然し3に述べたように各要素の性質から図の傾向を予想し，又5に述べたように曲線群を一部借用してこれを修正する方法を用うれば少数の資料からも可成り有効な図を作成することが出来ることになる。神流川の資料数は46個であるが，このうち大きいものより順に21，9個をそれぞれ取出し，これら3種類の資料を用いてそれぞれ関係図を作成する。この3合元数は1より4まで変へ，流域の乾湿度としては初期流量Q_bを採用することにする。これらの3関係図に対して資料数46，21，9個を当嵌めた結果は図—19に示すようになる。

資料数が少くしかもその分布がかたよっている資料から作られた関係図と全資料から作られたそれとは当然違って来るべきであるが，現実にはさほど違った結果は得られていない。これは作図者が何度も作図の練習を積むうちに46個に対する作図の記憶を残しているためであろうと考えられる。

〔2〕元数

モノカシ川（資料数42）及び神流川（資料数46）の資



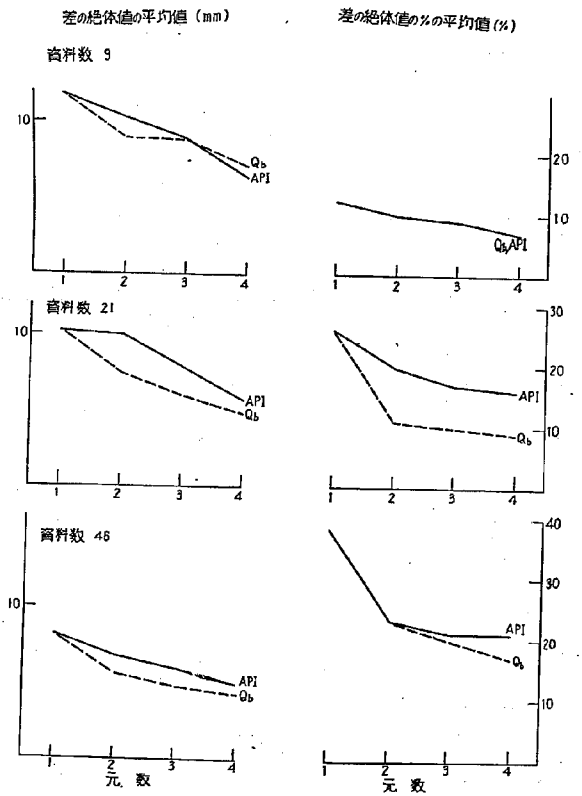
図—20　元　数

料について元数を1より4まで変えていった場合，有効雨量に対する2つの指標がどう変るかを示したのが図—20である。元数をふやすほど有効雨量の精度はよくなるものであることは何れの資料についても明らかである。

〔3〕 乾湿度

乾湿度を表わす係数としてAPIと初期流量 Q_b とで何れを用いた方が計算の最終値である有効雨量の精度をよく表わしているかについて，神流川の資料を用いて調べた。この場合資料数は9，21，46個の3種類について考えた，

図—21 に示すように，資料数が 46，



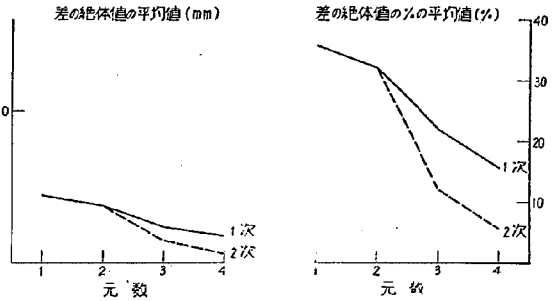
図—21　乾　湿　度

21の様に多い場合について考えると，Q_b を用いて得られた有効雨量の方が精度がいくらかよいように見られるが，その傾向はそうはっきりしたものではない。観測値が容易に得られる場合には観測より直接求められる Q_b を用いて差支えないが，観測値の無い場合や，洪水予報の様にこの値を得ることが時間的に余裕の無いような場合には雨量より導いたAPIを用いざるを得なくなる。

〔4〕 次数

3元以上の場合には一先ず有効雨量を計算により求め，つづいて作業を繰返し修正して精度のよい2次値が得られるのである。更にもう一度修正を繰返せばもっと精度のよい値が得られるわけであるが，ここでは2次値までしか計算しておらない。

モノカシ川の資料によって繰返しの効果を示すと図—22の様になる。



図—22　次　数

7. 結　語

本論文ではコアキシアル・リレイション法で示される各象限での曲線群の形状について検討し，つづいてその作図法を詳細に説明した。

有効雨量の精度を支配するものとして4要素をとりあげたのであるが，それぞれについて次のことが明らかにされた。

(1) 資料数

各象限で得られる曲線群の形状はこれを作図する時に使用した資料数によって可成り違って来るものである。然し，各要素の性質が可成り似た場合の図を借りて来ることによって少い資料からでも一応適用出来る図を作ることが出来る。勿論この場合の信頼度はその後の適用の中で再検討すべきである。従ってコアキシアル・リレイション図が与えられた場合にはこれがどのような資料によりどの様にして作図されたかは一応念頭に置くことが必要である。

(2) 元数

変数を4つまでとったコアキシアル・リレイション図ではそれより小さい変数で得られる有効雨量の値に比べてずっと精度のよい値が得られる。

(3) 乾湿度

乾湿度としてAPIと初期流量 Q_b とをここではとりあげたが，与えられた資料については何れをとりあげても有効雨量の計算値に大して差がないことがわかった。

(4) 次数

作業を2度繰返して第2次値まで求めると有効雨量の計算値の精度は可成り向上するものである。

附　記

本文は筆者が1955年アメリカ・スタンフォード大学留学中恩師リンスレー教授の下で研究したものに，帰国後手を加えたものである。数カ月に亘って懇切に指導下さった教授の御厚情は筆者の終生忘れ得ぬところである。また計算及び作図には水文研究室全員の協力を得た。共に深甚な謝意を表わすものである。