土木研究所報告　第百二十二号　昭和三十九年十二月

土木研究所報告

第122号

土壌コロイドに関する研究（第7報）
——軟弱土質中に存在する粘土鉱物の検索—— ……有泉　昌，藤崎邦弥…（1）

土壌コロイドに関する研究（第8報）
——路床土，軟弱土質および地すべり粘土中の土壌コロイドと
$Ca(OH)_2$ との反応—— ……有泉　昌，藤崎邦弥…（23）

アロファン質粘土の消石灰—石膏による化学的安定処理方法に関する研究（6）
——消石灰—石膏による処理体の圧縮強度について——
……有泉　昌，牧　隆正…（35）

五ケ瀬川改修計画に伴う水理学的諸問題の検討 ……吉川秀夫，塚本義昭…（61）

コンクリート舗装の構造設計に関する実験的研究（4）
——千葉地方におけるコンクリート版の温度変化について—— ……月成　稔…(105)

酸性河川水の水質に関する調査研究（第7報）
——玉川温泉水の除毒工法の効果について—— ……有泉　昌…(133)

昭和39年12月

建設省土木研究所

土壌コロイドに関する研究（第7報）

——軟弱土質中に存在する粘土鉱物の検索——

（昭和37年6月）

有泉昌*
藤崎邦弥**

目次

まえがき……（1）
〔I〕試料……（1）
〔II〕実験方法……（2）
〔1〕X線回折……（2）
〔2〕DTA方法……（2）
〔3〕化学分析……（3）
〔4〕電子顕微鏡写真……（3）
〔III〕実験結果……（3）
〔IV〕実験結果の検討……（3）
〔V〕考察……（19）
〔VI〕結言……（21）

まえがき

土質は土壌コロイド中の粘土鉱物の種類により著しく支配されることとはすでに明らかにされている。著者は土木工事に関係の深い土として地すべり地帯の土および路床土について粘土鉱物を検索し，その粘土鉱物の種類と土質に相関性のあることを認めた。これらの研究結果はすでに第4報および第6報で報告した。

ここでは軟弱土質中にふくまれる粘土鉱物を検索した結果をのべる。研究結果によれば堆積環境により粘土鉱物の種類がある程度定まり，結晶度の特に低い鉱物またはモンモリロナイトが含まれる場合が一般に多いと考えた。しかしここで取扱った試料の数は余り多くないので引きつづき広範に試料を集め，土質と粘土鉱物の相関性を追求する必要を認めた。本報以降に収集した試料についての実験結果は別報として報告する予定である。

〔I〕試料

試料は建設省の工事現場で軟弱土質として取り扱われたもので，送付をうけた試料の一部である。主として道路工事に関係しているが，海岸工事，砂防工事に関係しているものも一部ふくむ。

つぎに試料について簡単に説明する。

〔1〕中部粘土 No.-12，No.-14

本試料は中部地建愛知工事々務所のボーリング試料である。採取した位置は No.-12 は木曽川左岸で河口から 2km，深さ 18.00～18.60m で粘土質土である。No.-14 は木曽川左岸で河口から 3km，深さ 24.40～25.00m で粘土質ロームである。

土質試験の結果を下に示す。

	自然含水比	現場含水当量	LL	PL	PI	収縮限界
No.-12	43.0	31.9	46.6	28.5	18.1	30.8
No.-14	56.6	45.2	64.1	33.1	31.0	27.8

	間隙比	粘着力	内部摩擦角	圧縮強度（乱されたもの）	鋭敏比
No.-12	1.19	0.34	18°—10′	0.17	5.56
No.-14	1.59	0.31	18°—32′	0.11	11.37

〔2〕中部粘土 No.-1，No.-4，No.-9

本試料は中部地建愛知工事事務所が筏川樋門工事での基礎土質であり，海岸汀線に近い。基礎土質試験のためにボーリングを実施したときの試料であり，No.-1 は −12.9m の位置で0.5m 層，No.-4は −20.0m の位置で0.45m 層，No.-9 は −31.3m の位置で0.5m 層である。詳細な土質試験結果は省略し，粒度分布とコンシステンシー等のみを下に記す。

* 地質化学部長 工博
** 地質化学部 化学研究室

	粘土 (%)	シルト (%)	LL	PL	PI	自然含水比 (%)	間隙比
No.-1	22.0	60.0	48.8	31.3	17.5	45.1	1.323
No.-4	33.0	31.0	81.2	36.1	45.1	68.2	1.577
No.-9	35.0	56.0	45.5	30.3	15.2	52.1	1.355

〔3〕 中部粘土 No.-15

本試料も中部地建愛知工事事務所のボーリング試料であり，木曽川左岸で河口より 7km の位置で，地下18.0～18.6mのシルト質ローム層である。粘土19.0%，シルト 56.0%，LL 41.3，PL 30.8，自然含水比45.2%，間隙比1.16，鋭敏比10.9である。

〔4〕 中部粘土 No.-19

中部地建愛知工事事務所のボーリング試料である。長良川左岸で河口より 1km の位置で地下 19.00～19.80m の層である。粘土 30.0%，シルト 63.0% であり，LL 58.9，PL 29.9，PI 29.0，間隙比 1.658，鋭敏比 8.0である。

〔5〕 岡山国道粘土 No.-1，No.-3，No.-4，No.-5

岡山工事事務所で工事中の国道30号線が国鉄宇野線と交差する跨線橋の橋台基礎の土質試料である。ボーリングにより採取した試料であり，深さは No.-1，No.3，No.4，No.-5 でそれぞれ 1.80～2.00m，3.80～4.00m，4.80～5.00m，5.80～6.00m である。

〔6〕 横浜工事粘土 No.-1，No.-2，No.-3

横浜工事事務所藤沢バイパス工事の土質試験のためのボーリング試料である。採取地点は日本建設コンサルタントの藤沢地区盛土設計基礎調査資料に示されるNo.-84の地点である。境川の東方約150mの位置である。No.-1は4.50～5.50mの深度のものの上部，No.-2 は下部であり，No-3 は 9.75～10.30m のものである。

No.-1，No.-2 は粘土 56.0%，シルト 40.7%，LL 115.3，PL 57.6，PI 57.7，自然含水比114.1%，間隙比3.20であり，No.-3 はそれぞれ70.0%，27.0%，150.1，68.6，81.5，209.5%，5.84%である。

〔7〕 大阪梅田粘土

大阪の軟弱地盤とされる梅田層試料であり，新阪急ビル基礎工事でウェルポイント施工中の土であり，深さは16.0mである。

〔8〕 熊本粘土

熊本工事事務所で工事中の国道３号線の基礎土質である。採取地点は下益城郡富合村南田尻北方の水田地帯である。表土約 1m の下方に約 4m までがシルト質ロームであり，その下方に約 5m まで砂質土，さらに下方はシルト質ロームがつづき，約15m位からシルト質粘土となる。試料は4m層であり，粘土は約5%，シルト約35%，であり，LL は約 65，PL は約 40であり，現場含水比は約100%である。

〔9〕 佐賀粘土 No.-31

佐賀県杵島郡南有明村前面の国営有明干拓地内の土である。東部に六角川，西部に塩田川が流れている。現地でガタと総称するものである。表層より33.6mまでが青色粘土であり，45mの位置に砂層がある。本試料は青色粘土である。

〔10〕 上松坂粘土 No.-3，No.-4

姫路工事事務所管内の国道２号線上松坂地点の土であり，路床土としては不適当とされているもの。

〔11〕 北陸粘土

北陸地建より送付の軟弱土試料であり，採取地点は菌地峠である。長岡工事事務所管内の国道７号線の盛土がすべって災害を起したときの盛土材料である。

〔12〕 新潟粘土

新津工事事務所管内の軟弱土である。採取地点の詳細は目下のところ不明であるが阿賀野川の沖積土である。

〔13〕 地山粘土

姫路工事事務所管内国道２号線有年跨線橋地山地点の土であり，路床土等としては特に不適当とされている。

〔14〕 夜久野粘土

福知山工事事務所管内，天田郡夜久野高原の土で路床土等としては特に不適当とされる黒色土である。

〔15〕 稲荷山粘土

福知山工事事務所管内，園部市稲荷山地すべりの地すべり粘土。

〔16〕 水沢粘土

山形県鶴岡市大字水沢地内で，国道７号線の工事関係の軟弱地盤であり，大淀川の沖積土である。

〔II〕 実験方法

実験方法としては X 線回折，DTA 法，化学分析および電顕写真法を採用し，粘土鉱物の検索はこれらの方法でえられた結果を併用して行った。

〔1〕 X 線 回 折

X線回折は Geigerflex により，銅を対陰極としニッケルでフィルターする。

回折図は普通の試料添付による場合と定方位試料による場合について求めた。定方位試料は水中でガラス板上に試料を沈降させてえた。この定方位試料は，150°C，300°C，350°C，450°C 等に１時間電気炉中で加熱して後，ふたたびX線回折図を求めた。また600°C に加熱することも試みた。

膨脹性格子の存否を知るために試料にエチレングライコール処理を加えたり，クロライトまたはバーミキュライトを推定するために HCl(1：2) 処理を１時間加えたりまたは NH_4NO_3 水溶液で処理し，これらの処理試料についてもX線回折図を求めた。

〔2〕 DTA 方法

DTA 曲線は既報でのべたと同じ装置により，加熱速度は 10°C/min である。試料の少量の場合は α-Al_2O_3 で

うすめている。モンモリロナイトの検出を計るために一部の試料についてはピペリヂン処理も試みた。

〔3〕 化学分析

一般の硅酸塩の分析方法により，アルカリは焔光光度計により測定する。

〔4〕 電子顕微鏡写真

電子顕微鏡用試料は支持膜固定法により，Ge Shadowing を施こす。観察時の条件は，加速電圧 100kV，ビーム電流 20μA，中間レンズ電流 32mA，直接倍率 4,200倍，写真倍率14,000倍である。観察結果は代表的視野について示す。

〔III〕 実験結果

定方位試料でない場合のX線回折図を図-1に示し，各粘土の定方位試料およびそれらの加熱試料のX線回折図を図-2～図-8に示す。

DTA 曲線およびピペリヂン処理試料の DTA 曲線を図-9～図-13に示す。

化学分析値は表-1に示す。

電子顕微鏡写真を写真-1に示す。

〔IV〕 実験結果の検討

試料粘土中に存在する粘土鉱物の検索に X 線回折，DTA 曲線，化学分析および電顕観察等の方法を併用したが，ここでは主として粘土鉱物のみに注目して検討を試みる。

〔1〕 中部粘土 No.-1

（1） X線回折

定方位試料についての回折図では15.50, 10.53, 7.38, 5.10, 3.62, 3.40, 3.28Åの粉末線を認める。

150°C に加熱処理を行なえば，15.5Å線はやや高角度側に移動し，幅広い回折線となる。300°C に加熱処理すれば14.5Å線は著しくその反射強度を減じ，これに反し10Å線はやや強度を増す。450°C では14Å線は消失し，7Å線は著しく強度が低下する反面 10Å のみは鋭く強い回折線となる。600°C に加熱すれば 7Å 線は完全に消失し，10Å線のみとなる。

エチレングライコール処理により 15Å線は 17.33Å に移動し，10Å線および7Å線は変化しない。また NH_4NO_3 処理で弱いが12.3Å線が見られる。

（2） DTA 曲線

150°C の吸熱ピークのほかに 220°C，330°C の小吸熱ピークが認められ，500°C から700°C におよぶ幅広い吸熱ピークが見られる。700°C 以上では明瞭な発熱ピークが見られがたい。ピペリヂン処理試料の DTA 曲線は，650°C および600°C に幅広い発熱ピークを持つ。

（3） 化学分析

SiO_2/Al_2O_3 は 3.50 で，K_2O は 2.90%，MgO は2.12%であり，H_2O^- は 4.95%で比較的小さい。

（4） 電子顕微鏡写真

不定形な伸長状のうすい板状晶が多く，六角形に近いものが散して多い。ゲル状物質も所所に見られ，管状体も見られるがくずれかかったものが多い。ほかに六角板状体の表面に孔があき篩のように見える場合がしばしば見られる。

（5） 粘土鉱物の推定

以上の実験結果より，モンモリロナイト，イライト，ハロイサイトをもふくめたカオリン鉱物の存在が考えられ，クロライトは存在しても少量であろうし，バーミキュライトは明確ではないが，MgO が余り多く含有されないことは，これら鉱物は主要組成には関係しないといえる。DTA 曲線で高温部の発熱ピークが明瞭でないことは，結晶度が特に低いことを示すのであろうと一応考えておく。

なお普通の方法でえた回折図からは，石英，長石類およびジプサイトの存在が考えられ，ジプサイトについては DTA 曲線からもその存在が支持される。

〔2〕 中部粘土 No.-9

（1） X線回折

定方位試料についての回折図では15.78, 10.40, 7.25, 5.07, 3.59, 3.38, 3.22Åの回折線が見られる。

150°C 加熱処理により 15Å 線はやや高角度側に移動し，その反射強度を減じる。300°C 加熱によりさらに強度を減じて著しく弱い反射となる。450°C 加熱により，14.7Å に弱い回折線を残して10Å線は反射強度を増し，一方 7Å 線は弱くなる。600°C 加熱で 7Å 線は消失し，10Å線と弱い15Å線が残る。

エチレングライコール処理により，全体に反射強度は弱くなるが，17.7, 10.53, 7.25Å の回折線を示す。また NH_4NO_3 処理により 14.25Å 線より高角度側に拡散した回折線を示し，12.6Å線は明瞭である。

1：2 HCl で処理した場合は反射強度は弱いが，10.28Åおよび7.31Å線は認め，一方無処理の場合に見られた15.78Å 線は認められない。

（2） DTA 曲線

150°C，220°C，330°Cの吸熱ピークは No.-1 と同じであるが，530°C の小ピークについで 570°C の大きい吸熱ピークが見られ，このピークは高温側に広がっていない点が No.-1 と異なる。さらに 950°C に幅の著しく広く単調でない発熱ピークおよび 800°C，840°C の小吸熱ピークも見られる。またピペリヂン処理の場合は 580°C に発熱ピークが見られる。

（3） 化学分析

SiO_2/Al_2O_3 は 3.40 で，K_2O は 2.49%，MgO は2.37%であり，H_2O^- は7.13%で No.-1 よりわずかに高かい。

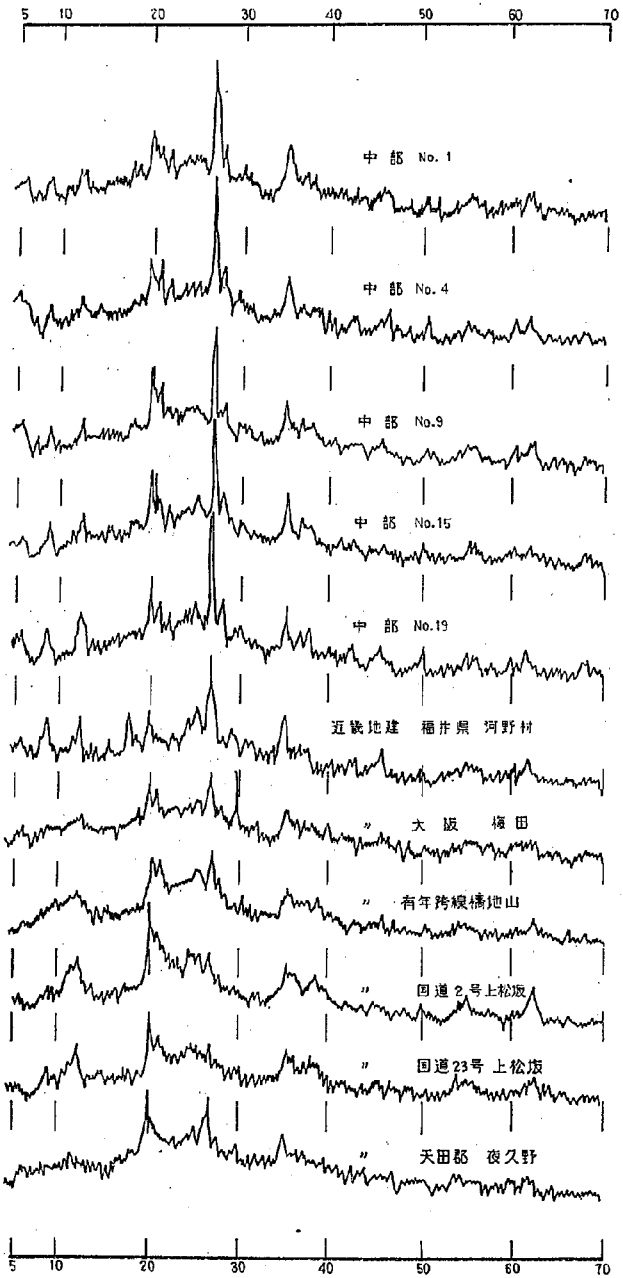


図-1（a） 軟弱土質中の土壌コロイドのX線回折図

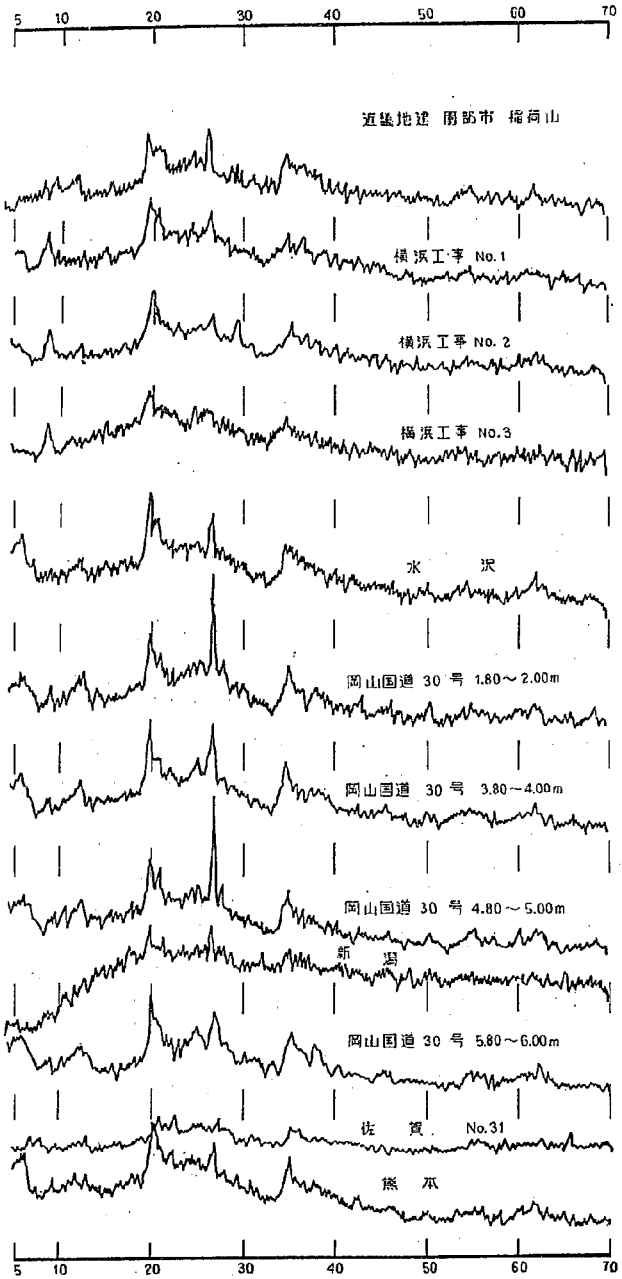


図-1（b）　軟弱土質中の土壌コロイドのX線回折図

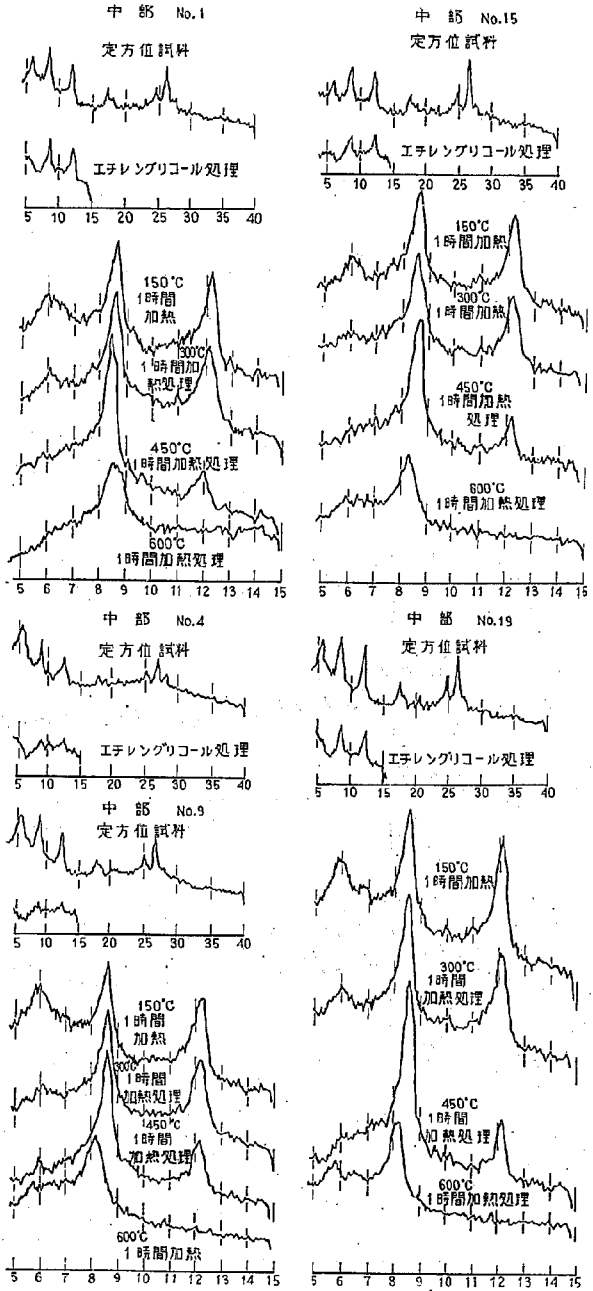


図-2 処理粘土のX線回折図（中部粘土）

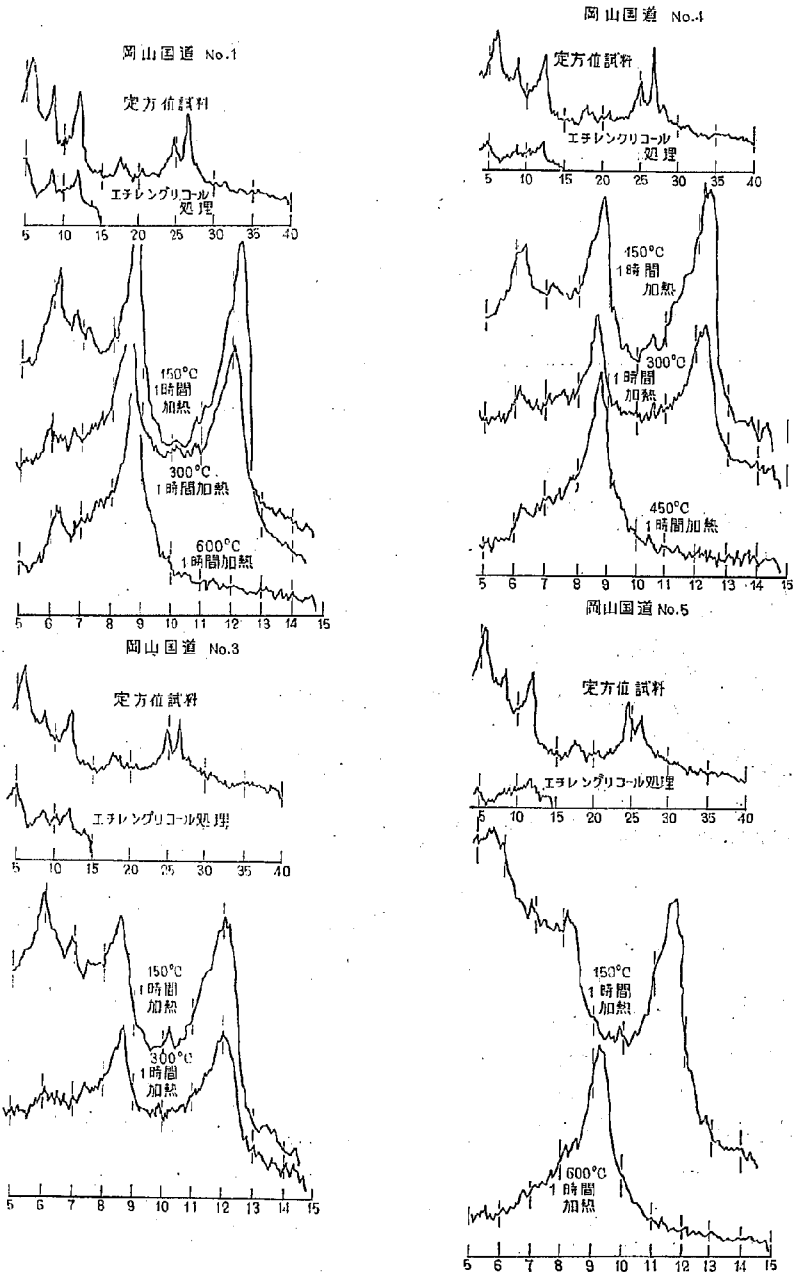


図-3　処理粘土のX線回折図（岡山国道粘土）

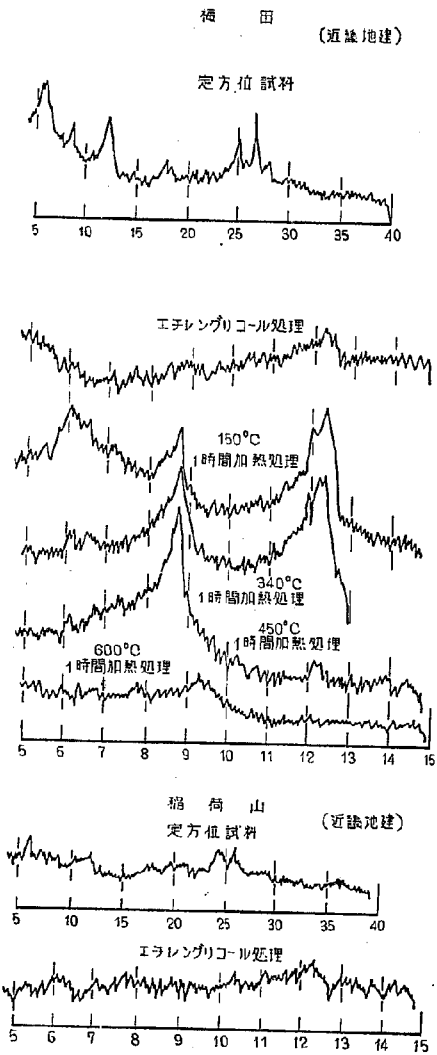


図-4 処理粘土のX線回折図
(梅田粘土，稲荷山粘土)

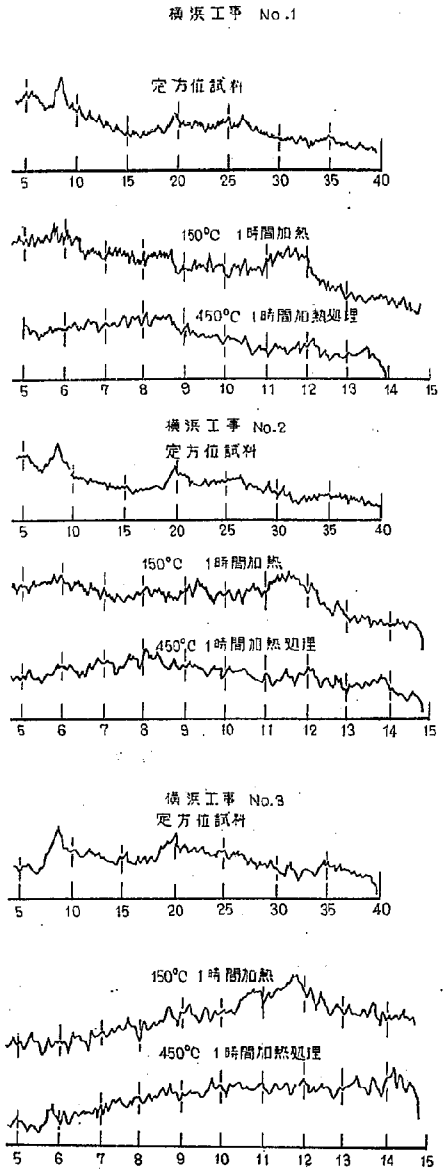


図-5 処理粘土のX線回折図
(横浜工事粘土)

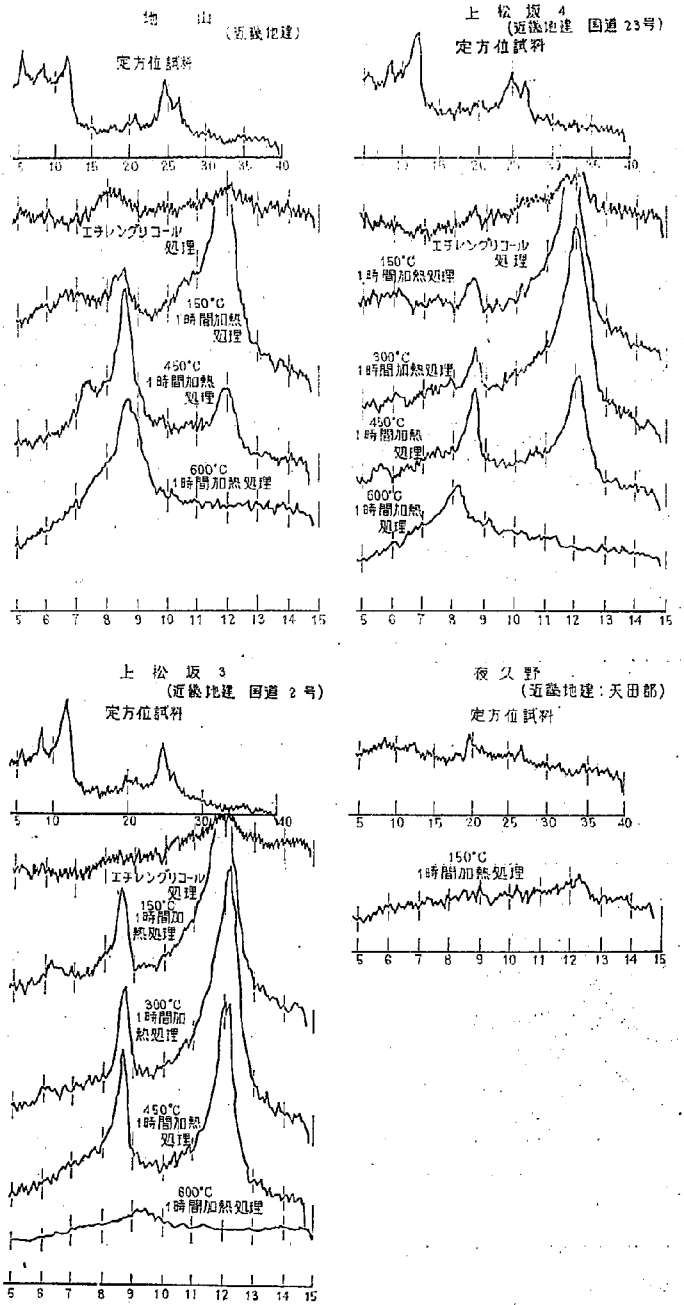


図-6　処理粘土のX線回折図（上松坂粘土，地山粘土）

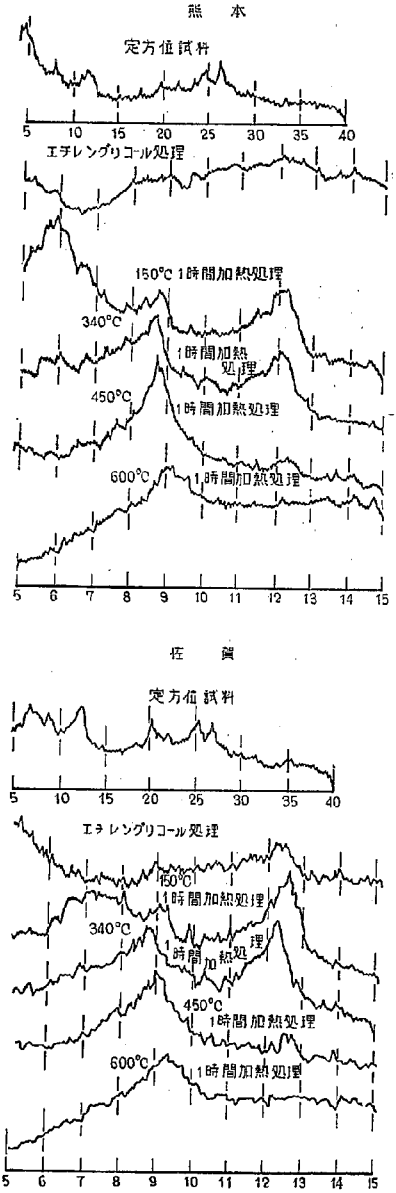


図-7 処理粘土のX線回折図
(熊本粘土，佐賀粘土)

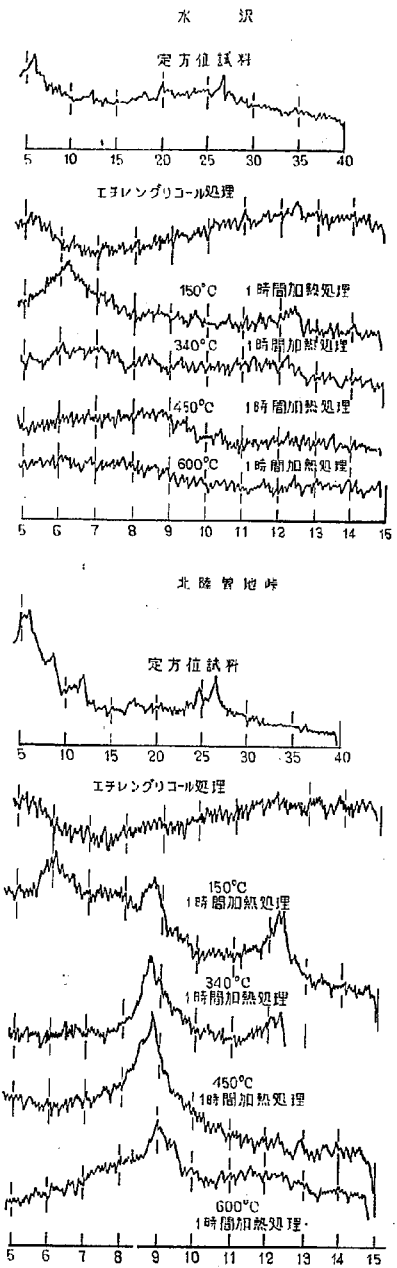


図-8 処理粘土のX線回折図
(水沢粘土，北陸粘土)

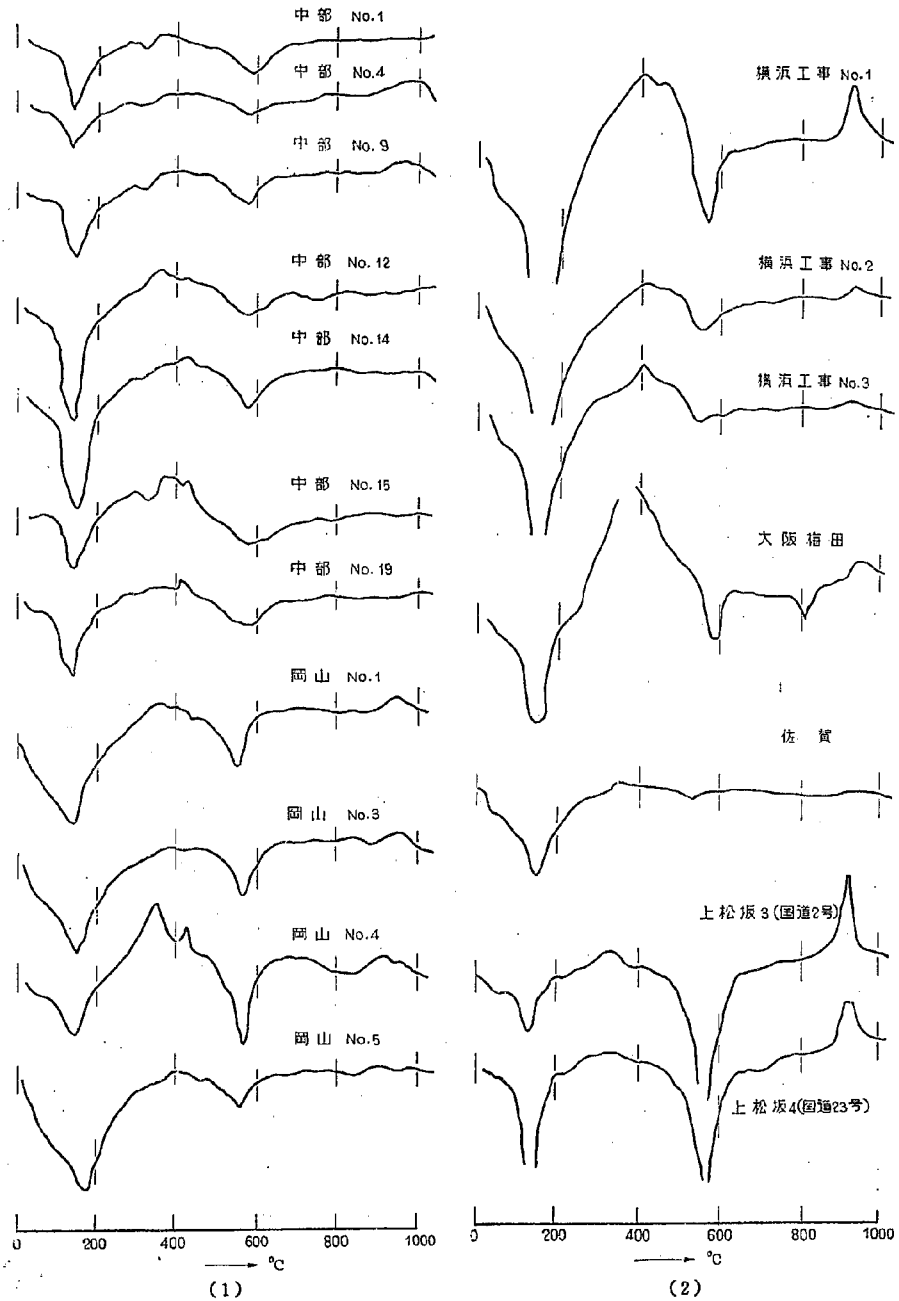

中部 No.1
中部 No.4
中部 No.9
中部 No.12
中部 No.14
中部 No.15
中部 No.19
岡山 No.1
岡山 No.3
岡山 No.4
岡山 No.5
0
200
400
600
800
1000
℃
(1)
横浜工事 No.1
横浜工事 No.2
横浜工事 No.3
大阪福田
佐賀
上松坂3(国道2号)
上松坂4(国道23号)
0
200
400
600
800
1000
℃
(2)

図-9 熱分析曲線

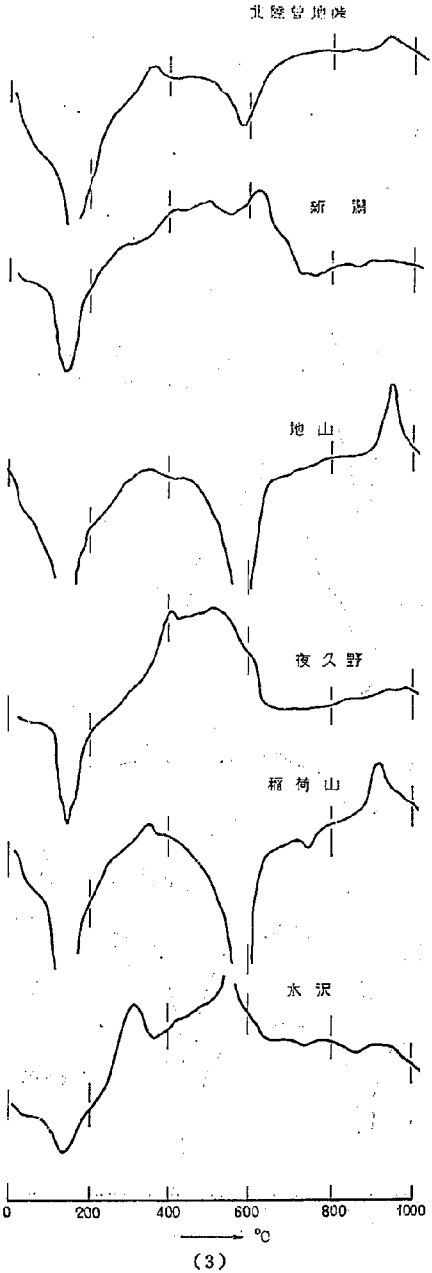


図-9 熱分析曲線

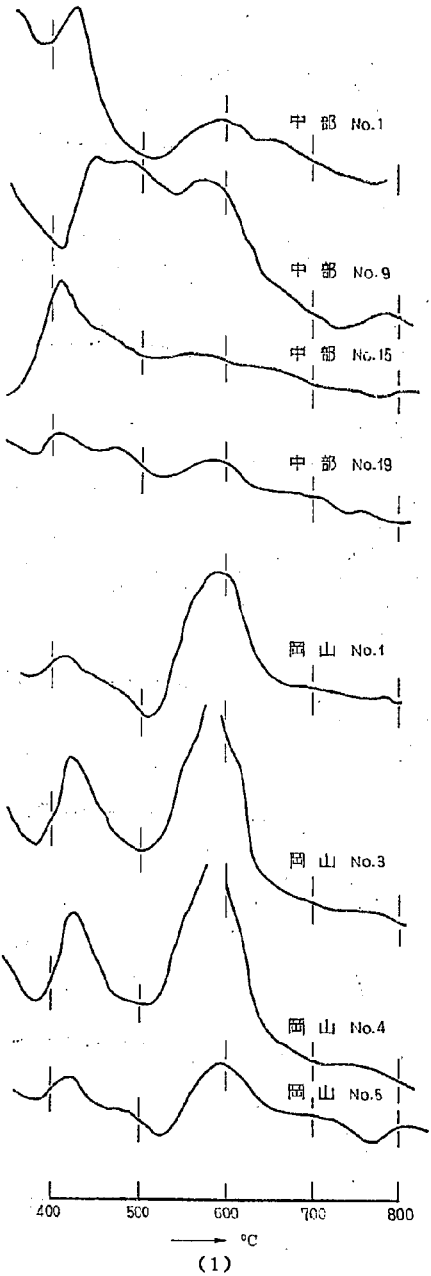


図-10 (1) ピペリジン処理粘土の熱分析曲線

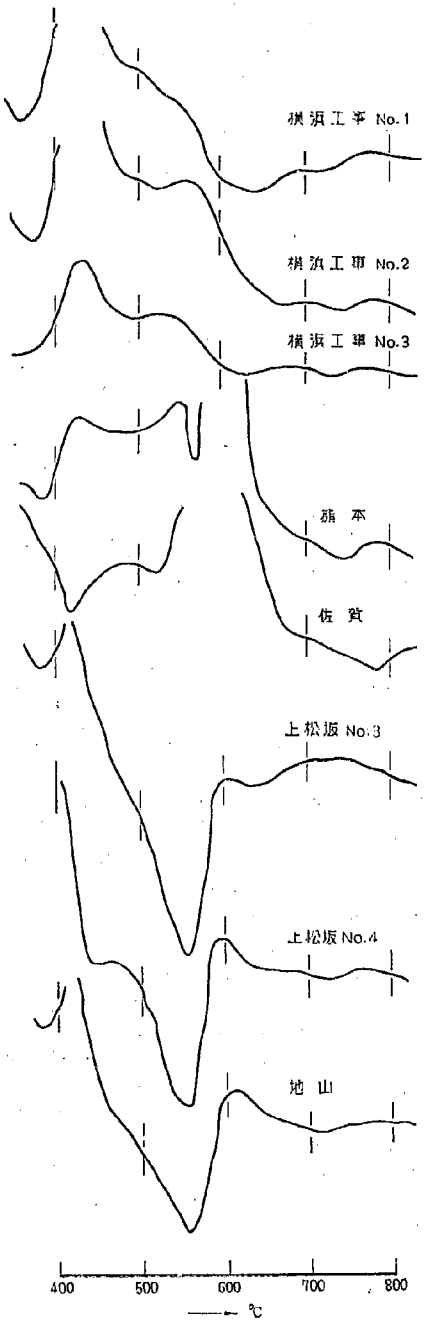


図-10（2）　ピペリジン処理粘土の熱分析曲線

（4）　粘土鉱物の推定

以上の実験結果からモンモリロナイト，イライト，カオリン鉱物の存在が推定されるが，クロライトについて明らかでない。加熱処理でも14Å線の残ることからクロライトについて検討する必要があり，HCl処理を加えた結果では，モンモリロナイトも検出されない結果となった。したがってモンモリロナイトはこの場合，1：2 HClにクロライトと同様に溶解すると考えねばならない。モンモリロナイトの HCl への可溶性については不明な点が多いので，この方法でモンモリロナイトとクロライトの共存を確認はできないが，DTA 曲線からも一部のクロライトの存在は推定しうる。この試料中のモンモリロナイトは No.-1 でも同様だが，ノントロナイト的のものであろうし，また H_2O^- の低いことおよび HCl に可溶であること，加熱時の回折線の状況等を考慮して，モンモリロナイトとクロライトの不規則混合層鉱物の可能性も考えられる。

〔3〕 中部粘土 No.-15

（1）　X線回折

定方位試料についての回折図では15.50, 10.53, 7.31, 5.10, 4.55, 4.31, 4.10, 3.59, 3.38, 3.24Åの粉末線を認める。

150°C 加熱処理では15Å線がやや高角度側に移動するのみで他の変化は見られない。300°C に加熱処理したものは14.49Å に幅広い回折線を残し他は変化なく，450°C に加熱処理すれば7Å線は強度低くなり，一方10Å線の強度は増加するとともに低角度側にやや尾を引いた形となる。600°C では7Å線は消失し，10Å線と13.81Åを中心とした高原状の反射が見られる。

エチレングライコール処理により18.0Å と15.0Å の2つのピークを持つ幅広い反射線と，10Å および7Å の鋭いピークが見られる。NH_4NO_3 処理で 14.26Å線は高角側に拡散した形となり，12.8Åのピークをともなう。

HCl 処理により15Å線は消失する。

（2）　DTA 曲線

150°C，330°C の吸熱ピークについで有機物によるらしい発熱反応が見られる。ついで450°C から700°C におよぶ幅広い吸熱が見られ，この吸熱曲線の中には530°C，570°C，630°C のピークが見られる。800°C に吸熱ピークが見られ，900°C および1,000°C の発熱ピークは明瞭ではない。ピペリヂン処理の場合には，特に鮮明な発熱ピークは認められない。

（3）　化学分析

SiO_2/Al_2O_3 は 3.73，K_2O は 3.22%，MgO は2.38%，H_2O^- は 4.79%である。組成は塩基を多くふくむ。

（4）　粘土鉱物の推定

以上の実験結果より，モンモリロナイト，イライト，カオリン鉱物，クロライトの存在が可能である。しかし

表-1 軟弱土質粘土の分析結果

	混分 %	灼減 %	SiO_2 %	Fe_2O_3 %	Al_2O_3 %	CaO %	MgO %	Na_2O %	K_2O %
地山	9.33	9.49	41.73	7.96	28.06	0.65	1.22	0.67	2.26
新潟	13.67	14.51	31.34	19.76	15.34	2.37	1.61	0.67	0.82
水沢	11.79	13.20	41.65	6.70	21.21	1.85	2.60	0.57	0.83
熊本	11.87	8.75	45.84	5.99	22.06	1.63	2.56	0.65	1.08
稲荷山	18.99	9.89	33.41	7.77	25.25	1.35	1.16	0.32	1.11
夜久野	18.08	20.72	25.83	7.75	23.26	1.97	1.33	0.40	0.84
上松 3	6.10	12.26	41.54	7.47	31.46	0.91	0.72	0.35	0.35
〃 4	9.52	11.58	37.74	9.85	28.61	1.23	0.63	0.34	0.61
梅田	7.27	13.74	39.97	5.34	23.02	4.98	2.28	1.08	2.01
佐賀 31	4.56	9.46	49.31	5.69	25.38	0.53	2.86	0.94	1.29
横浜 1	18.07	11.15	35.99	6.76	23.48	2.12	1.71	0.53	0.45
〃 2	11.62	13.00	40.05	7.13	23.04	2.20	2.17	0.49	0.33
〃 3	11.56	15.05	40.34	10.43	18.75	1.80	0.93	0.40	0.12
岡山 1	2.52	7.59	52.03	6.17	25.21	1.13	2.69	0.59	1.54
〃 4	3.41	7.47	52.01	6.02	23.81	1.14	2.72	1.06	1.95
〃 5	4.36	9.95	44.59	9.48	26.14	1.06	2.61	0.75	1.43
中部 1	4.95	7.54	48.57	7.46	24.15	1.14	2.12	1.05	2.90
〃 9	7.13	7.63	46.83	7.55	24.17	1.18	2.37	0.96	2.49
〃 15	4.79	7.31	49.06	7.14	22.97	1.37	2.38	1.20	3.22
〃 19	2.73	7.01	51.25	7.64	23.02	1.25	2.62	1.17	3.37
北陸	9.06	8.04	46.78	9.43	22.38	0.97	2.01	0.58	1.54

ピペリヂン処理試料の DTA 曲線は鮮明な発熱ピークを与えず，H_2O^- が著しく少なく，加熱または HCl 処理による回折線に見られる変化等を考えて，モンモリロナイトとクロライトの存在状態を明確にしえない。両者が単なる混合か，不規則混合層か，または両者の中間性鉱物か等についてこの実験結果では言及できない。

〔4〕 中部粘土 No.-19

（1） X線回折

定方位試料については 15.50, 10.53, 7.38, 5.07, 4.48, 4.35, 4.11, 3.62, 3.39, 3.24Å の粉末線を認める。

150°C 加熱処理で 15.5Å 線はやや強度が低下して 14.73Å に移動し，10Å および 7Å 線は変化なし。300°C では 14Å 線はさらに強度は低下し，450°C で 14Å 線は消失し，また 7Å 線の強度も低下しその反面 10Å 線のみ相対的に強度は増す。14Å 線が消失しても 11Å から 16Å にわたった幅広い回折線が見られる。600°C では 15.24, 13.39, 10.92Å 線のみが見られる。

エチレングライコール処理で15Å線は一部17Å に移動し，10Å および 7Å 線は変化しない。NH_4NO_3 処理で，14.49Å と 13.19Å 線が鮮明となる。

HCl 処理により反射強度は全体的に弱まるが，10.28, 7.25Å 線と，著しく弱い反射ではあるが 14.25Å 線が認められる。

（2） DTA 曲線

450°C から 700°C にわたる吸熱曲線上に 530°C，570°C および 630°C のピークが見られることは No.-15 と同様である。しかし 630°C のピークは No.-15 より相当に小さく，700°C にも小さい吸熱が見られるが，800°C の吸熱は見られない。ピペリヂン処理の場合は 580°C に広い発熱ピークが見られる。

（3） 化学分析

SiO_2/Al_2O_3 は 3.90，K_2O は 3.37%，MgO は 2.62%，H_2O^- は 2.73% である。中部の試料で K_2O および MgO は最も高かく，H_2O^- は最も低い。

（4） 粘土鉱物の推定

以上の実験結果から，モンモリロナイト，イライト，カオリン鉱物およびクロライトが存在すると推定できる。モンモリロナイトは H_2O^- が 2.73% であり，DTA 曲線で 630°C の吸熱が小さいことから，それ程多量存在するとは考えがたく，イライトが最も多く存在するといえる。モンモリロナイトとクロライトの存在状態については，明確な結論はくだしえない。

〔5〕 中部粘土 No.-4, No.-12, No.-14

これらの試料については一部の実験を実施したのみであるが，すでにのべた試料と関連して考えてみよう。

No.-4 は定方位試料で 15.50, 10.40, 7.31, 5.07, 4.80, 4.31, 3.60, 3.38, 3.22Å の粉末線を与え，エチレングライコール処理で18.0Å と8.93Å線を与え，10Å および7Å 線に変化はない。DTA 曲線は580°C の吸熱ピ

ークが浅いが，700°C の吸熱ピークも見られ，1,000°C での円味のある発熱ピークも見られる。モンモリロナイト，イライトの存在は十分考えられるが，クロライトについては明らかでないし，クロライトの存在にかかわらずカオリン鉱物の推定は可能といえる。

No.-12 は定方位試料で 15.24，10.40，7.31，5.10，4.80，4.08，3.59，3.36，3.25，3.07Å の粉末線を与え，エチレングライコール処理で17.7Å線と14.7Å線が見られる。DTA 曲線では，630°C の吸熱ピークは明瞭だし，700～800°C に広い吸熱ピークも見られる。イライト，モンモリロナイト，クロライト，カオリン鉱物を推定できる。

No.-14 は No.-12と同様であるが，630°C および750°C の吸熱ピークが見られない。しかし600°C から800°C にわたるゆるやかな吸熱曲線を持っている。イライト，モンモリロナイト，クロライト，カオリン鉱物を推定できる。

〔6〕 岡山国道粘土 No.-1，No.-3，No.-4，No.5

（1） X線回折

定方位試料についての回折図では，それぞれ次のような粉末線（Å）を与える。

No.-1：15.78，10.40，7.38，5.10，4.87，4.33，3.57，3.38

No.-3：15.78，10.53，7.44，5.00，4.87，3.60，3.39

No.-4：15.50，10.28，7.38，5.07，4.82，4.31，3.60，3.38，3.22

No.-5：16.00，10.78，7.56，5.02，4.78，4.40，3.62，3.39

これらの回折線のうち15Å線は反射強度は強いが割合に幅が広く，7Å線は低角側にやや尾を引いている。

エチレングライコール処理により，No.-1 は一部に15.2Å線を残して大部は18.0Å線に移り，10Å線および7Å線には変化はない。No.-3も同様であるが，回折図は鮮明さをかき，新たに8.59Å線が出現する。10Å線および7Å線は低角側に尾を引く傾向が明瞭となる。No.-4の回折図は一層鮮明さをかき，17.3Å線と18.8Å線が見られる。No.-5は18.4Å線が見られるが10Å線および7Å線は鮮明さをかき円味をもったものとなる。

150°C に加熱した場合は，No.-1 は14.98Å，10.28Å，7.44Å線は鋭いものとなり，13.6Å線も見られる。No.-3も同様であり，12.8Å線が見られる。No.-4は14.49Å，10.28Å，7.31Å 線を持ち，No.-5 は 18.4Å，16.37Å，11.05Å，7.69Å線を持つ。15Å 線は無処理のものに比してその反射強度は一般に低下している。

300°C に加熱した場合は，いずれの試料でも14Å線は強度が低下し，10Å 線および 7Å 線のみ鮮明である。600°C に加熱すると No.-1 および No.-4 では14Å線が残り，10Å 線は反射が強く，7Å 線は消失し，No.-5 では14Å線は明瞭には見られないが，9.72Å線が低角側に拡散した回折図を与え，7Å線は消失している。

（2） DTA 曲線

DTA 曲線はいずれも150°C の吸熱ピークは幅が広く，比較的浅い形状を示し，800°C から900°C の間に吸熱ピークを持ち，それに引きつづいて発熱ピークが見られる。560°C の吸熱ピークも幅が広いが比較的浅い形をしている。

ピペリディン処理試料ではいづれも580°C に著しい発熱ピークを持っている。

（3） 化学分析

No.-1，No.-4，No.-5 は SiO_2/Al_2O_3 がそれぞれ3.50，3.73，2.90であり，K_2O は 1.54%，1.95%，1.43%であり，MgO は 2.69%，2.72%，2.61% であり，H_2O^- は2.52%，3.41%，4.36%である。

（4） 電子顕微鏡写真（No.-1）

不定形のやや伸長形のうすい板状結晶が大部分をしめるが，六角形に近い形のものやむしろ円味を持ったものも見られる。これらの結晶は表面が平滑でないのが一般的傾向である。また所所にゲル状物質の集塊も見られ，ハロイサイトのような管状晶は見られない。

（5） 粘土鉱物の推定

以上の実験結果から，これら4個の試料粘土の鉱物組成は大体同じと考えることができる。X線回折の結果からはイライトの存在は確実であり，カオリン鉱物の存在も明らかである。15Å線を与える鉱物はモンモリロナイト，クロライト，バーミキュライトであるが，エチレングライコール処理で15Å線が変位することからモンモリロナイトの存在は推定しうる。クロライトは600°C 加熱試料でも 14Å 線が残ることから，その存在も推定できる。

DTA 曲線からはモンモリロナイトが知られ，むしろノントロナイト的のものと考えられるのであるが，化学分析値からは H_2O^- が相当に低く，特に No.-1 では2.5%にすぎないことはモンモリロナイトを考える場合説明しがたいことである。またイライトも K_2O の含量からは著しく多量に存在するとも考えがたく，クロライトも MgO 含量またはX線回折の結果から多量の存在は考えがたい。300°C に加熱した場合の X 線回折等より考えて，むしろ結晶度の低いカオリン鉱物（ハロイサイトではない）が相当量存在すると考えるべきであろう。

〔7〕 横浜工事粘土 No.-1，No.-2，No.-3

（1） X線回折

定方位試料についてのX線回折図ではそれぞれ次のような粉末線（Å）を与える。

No.-1：18.04,10.65,7.44,4.58,3.65,3.40,2.81,2.60

No.-2：17.67，10.65，4.51，3.39

No.-3：15.78，10.28，5.83，4.51，3.10，2.87，2.58

これらの回折線のうち10Å線のみは比較的鮮明である

が，そのほかの回折線の強度は弱い。しかしNo.-1の18Åおよび No.-2 の17.7Å線は拡散した線ではあるが明瞭に見られる。

150°C に加熱すると10Å線は消失し，7～8Åの拡散した回折線がいずれの試料でも認められる。また No.-1 では弱い15.2Å線が No.-2 では 14.7Å線がわずかに見られる。450°C に加熱すると7～8Å線はいずれも消失する。

（2） DTA 曲線

No.-1 は加水ハロイサイトの DTA 曲線を与えるが，600°C に小吸熱ピークを認め，さらに650°C にも幅広い吸熱ピークの存在が見られる。No.-2は600°Cから700°Cにおよぶ吸熱反応の存在を示し，870°C の小吸熱ピークに引きつづき930°Cに発熱ピークを持つ。No.-3は550°Cの吸熱ピークに引きつづき600°C と670°C に吸熱ピークを持ち，850°C の吸熱ピークにつづいて発熱ピークを持つ。ピペリディン処理の場合は550°C 近辺に発熱ピークを持つ。

（3） 化学分析

No.-1，No.-2，No.-3 は SiO_2/Al_2O_3 がそれぞれ2.60，2.96，3.65 であり，H_2O^- は 18.07%，11.62%，11.56 %であり，K_2O はいずれも 0.5% 以下であり，MgO も No.-2 を除いて特に大きくはないが，CaO が比較的多い。No.-3は Al_2O_3 が低い代りに Fe_2O_3含量がやや高い。

（4） 電子顕微鏡写真（No.-1）

著しくうすい伸長状の結晶とハロイサイトらしい管状体が見られる。ゲル状物質およびやや円味を持った粒状体も見られる。

（5） 粘土鉱物の推定

以上の実験結果より，加水ハロイサイトの存在は確実であり，一部のハロイサイトが加水ハロイサイトより生成していることも明らかである。モンモリロナイトの存在も推定されるが，ノントロナイト等に近いものではないかと推定できる。アロファンの存否は明らかでないが，続報（第8報）の実験で示すように，$Ca(OH)_2$との反応で Hydrated Gehlenite を生成しない点より，アロファンの存在は否定できる。イライト等は存在しないと考えられる。

〔8〕 大阪梅田粘土

定方位試料についてのX線回折曲線で粘土鉱物によると思われる回折線（Å）は15.50，10.28，7.25，5.04，3.58等である。エチレングライコール処理で15Å 線は17.7Å線に移動し，10Å線には変化はない。

150°C に加熱した場合は回折線にはとんど変化は見られない。340°C に加熱すると15Å線は強度の低い回折線となり，これに反して10Å線は鮮明となる。450°C に加熱すると 15Å 線は完全に消失し，7Å線は著しく弱い反射強度を示し，これに反して7Å 線のみ著しく鮮明となる。600°C に加熱すれば7Å 線は消失し，10Å線は反射強度減ずるとともにに 9Å に移動する。

X線回折の結果からモンモリロナイト，イライト，カオリン鉱物の存在が推定され，イライトおよびカオリン鉱物の結晶度は低いことが十分考えられる。また粘土鉱物以外のものとしては方解石とジプサイトの回折線が認められている。

DTA 曲線は 380°C に有機物によるらしい発熱ピークを示すが，580°C に吸熱ピークを持ち，このピークの形状は有機物の発熱ピークにマスクされて高温側に偏した形をしている。600°C から700°C にかけてゆるやかな吸熱の存在が推定され，さらに引きつづいて800°C に吸熱ピークが見られる。950°C に円味のある発熱ピークがあり，その前に小吸熱ピークも見られる。DTA 曲線と X 線回折の結果とは一致し，580°C のピークはカオリン鉱物とイライトにより，600°C から700°C での吸熱はモンモリロナイトにより，800°C の吸熱は方解石により，900°C の小吸熱とそれに引きつづく発熱はモンモリロナイト，イライトおよびカオリン鉱物によるといえる。

化学分析によれば SiO_2/Al_2O_3 は 2.83で一般に低く，K_2O は2.01%でイライトの存在を示し，MgO はモンモリロナイトに関係するものであろう。

電子顕微鏡写真は著しくうすい不定形板状晶と一部加水ハロイサイトらしい結晶とハロイサイトも見られ，またゲル状の無定形膜状体も見られる。

以上の結果よりイライト，ハロイサイト，モンモリロナイト，方解石等の存在が考えられる。

〔9〕 熊本粘土

定方位試料についての回折図では，15.50，10.28，7.38，5.13，4.51，4.04，3.60，3.36Åの粉末線を認める。

150°C に加熱処理を行なったときは大きな変化は認められないが，300°C に加熱したときは 15.24Å の反射強度は著しく減少し，それに比して 10.40Å の反射強度はやや増加する。450°C では 15.2Å 線は消失し，10.16Å線は鮮明となり，7.31Å線は弱くなる。600°C では9.61Åの反射のみが認められる。

エチレングライコール処理の場合は反射線強度は減少し，7Å線および 10Å 線は確認できないが，15.2Å線は17.33Åにのびている。

DTA 曲線では 150°C の吸熱は浅い谷をしており，有機物によると推定される360°C の発熱ピークを持つが，カオリン鉱物によると考えられる550°C の吸熱ピークも見られる。620°C の吸熱は小さく，850°C の小吸熱に引きつづいて 900°C に円味のある発熱を示す。DTA 曲線からはモンモリロナイト，イライト，カオリン鉱物が推定される。ピペリヂン処理の場合は600°C に顕著な発熱ピークが見られ，モンモリロナイトの存在を示す。

化学分析では SiO_2/Al_2O_3 は 3.54，K_2O は 1.08%，MgO は 2.56%であり，イライトの存在は十分推定できる。

電子顕微鏡写真では不規則な形をした板状体のほかにゲル状物質の集塊を多く認め，この塊状体はやや角ばっており，小針状晶や板状晶がからみ合って存在している様子が見られる。ほかに結晶度の低い管状体も見られる。

以上の結果よりモンモリロナイト，イライトおよびカオリン鉱物（おそらくハロイサイト）の存在が考えられる。

〔10〕 佐賀粘土 No.-31

定方位試料についての回折図では14.26,12.63,10.53 7.44, 4.90, 4.48, 4.29, 4.10, 3.58, 3.36Å の粉末線を認める。

150°C に加熱すれば，14.7Å から12.0Å におよぶ拡散した回折線を与え，11.6Å にも小さいピークが見られる。10.28Å および7.31Å 線には変化がない。300°C に加熱すれば，12Å および14Å 線は消失し，10Å 線の反射は強まり，7.31Å 線には変化は見られない。10Å 線は低角側に尾を引いた回折図を与える。450°C に加熱すれば，10Å 線には変化が見られないが，7Å 線の強度は著しく減少する。600°C に加熱すれば7Å 線は消失し，9.94Å のみが残る。

エチレングライコール処理により，回折線の強度はいずれも著しく弱まるが，18.0Å 線が明確に見られる。

X線回折の結果からはモンモリロナイト，イライト，カオリン鉱物が推定され，加水雲母も推定される。

DTA 曲線は，150°C に大きい吸熱ピークが見られ，この吸熱部は300°C にもおよんでいる。300°C に小さい吸熱ピークがあり，ついで 530°C に吸熱ピーク，850°C にゆるやかな吸熱ピーク950 にまる味のある拡散した発熱ピークが見られる。この実験では試料量の関係で通常の場合の30%で測定したことを付言しておく。

ピペリジン処理試料では，600°C に著しく大きい発熱ピークが見られる。

DTA 曲線からはノントロナイト的なモンモリロナイトの存在が推定される。

化学分析によれば SiO_2/Al_2O_3 は 3.31，K_2O は 1.29%，MgO は 2.86%であり，H_2O^- が 4.56%で比較的小さい値であり，Fe_2O_3 も 5.34% で比較的小さい値を示す。

電子顕微鏡写真によれば輪郭の明瞭でない膜状物質，これらゲル状物質が他の鉱物と集合した塊状体，無定形のむしろ伸長形の板状体，中空管状体が見られるほか，伸長形の板状体で一応の形は保持するが表面に飾のように孔があり崩壊しそうなものも見られる。このような風化をうけたと考えられる粘土は，たとえば熊本粘土を始め中部粘土等にも見られたのである。

以上の結果よりノントロナイト的なモンモリロナイトの存在は明らかであり，イライトの存在も考えられ，加水雲母もイライトとの関係で推定できる。カオリン鉱物は結晶度の低いハロイサイトであろう。ほかに一部のジプサイトの存在も考えられる。

〔11〕 上松坂粘土 No.-3，No.4

No.-3 と No.-4 はほとんど同じ実験結果を与えるので，ここでは No.-4 についてのべる。

定方位試料の回折図では15.78, 10.40, 7.44, 5.07, 4.37, 3.60, 3.38, 3.13Å の粉末線を認める。

150°C に加熱すれば15.2Å，11.8Å を中心とした著しく拡散した回折線と，10.28Å および7.44Å 線が見られる。300°C に加熱すれば14.5Å と11.3Å に著しく弱い反射を認めるが，10Å 線および 7Å 線には変化はない。450°C に加熱すれば，15Å 線と 11～12Å 線は依然見られ，10Å 線は鮮明となりその反面 7Å 線は弱くなる。600°C に加熱すれば，7Å 線は消失して10.78Å 線が残るが低角側に尾を引いた回折図を与える。

エチレングライコール処理により回折図は全体に反射強度の低いものとなり，10Å 線および 7Å 線は明瞭に認めうるが，17.6Å を中心とした拡散した回折線は鮮明には認めがたい。また HCl 処理を行なった場合は13.4Å に幅広い回折線が見られるほか，10Å 線および 7Å 線を認める。

定方位試料でない場合には，7Å 線は低角側に尾を引いており，15Å 線は著しく拡散し，(02) 線は No.-3の場合はカオリナイトの形を示し，(06)線は1.495Å となる。

DTA 曲線は No.-4 で 700°C に吸熱ピークを認めるが，No.-3ではむしろ600°C に吸熱が推定される。No.-4 は 150°C の吸熱ピークは深く，No.-3 は浅い。930°C の発熱ピークは No.-3 の方が鋭い。ピペリディン処理試料では No.-3，4とも発熱ピークを与えない。

化学分析結果では SiO_2/Al_2O_3 は No.-3，No.-4 でそれぞれ 2.23，2.24 であり，MgO はいずれも 1%以下，K_2O は No.-4 が0.61%でカオリン鉱物としてはわずか大きい値である。H_2O^+ も概して大きい値を示す。No.-3 と No.-4 では K_2O 含量と H_2O^- 含量にわずかの差はあるが，両者の組成は大体同じと考えられる。

電子顕微鏡写真は No.-3 についてえているが，輪郭の明瞭ではないものが多いが，六角板状体が多いほか，管状体も見られる。ほかにゲル状体も見られる。

以上の結果より結晶度の低いカオリナイトが主であり，一部のハロイサイトをふくみ，イライトも含有され一部の加水雲母も推定されるがそれらの量は少ないであろう。14Å 鉱物についてはピペリヂン処理で発熱を見ず，またエチレングライコール処理で (001) 線の明瞭な変位が見られないことから，モンモリロナイトの存在は

否定されると考える。しかし HCl 処理後にも 14Å 線を認め，450°C に加熱しても 15Å 線が残存することの説明はこの実験結果では不可能である。

〔12〕 北陸粘土

定方位試料の回折図では，15.50, 10.16, 7.31, 5.07, 3.36Å の粉末線を認める。

150°C に加熱すれば，14.73, 10.16, 7.25Å が見られ，340°C に加熱すれば，14Å 線は消失し10Å 線が強い反射で認められ，7Å 線は弱くなる。450°C に加熱すれば，7Å 線は消失し 10.05Å のみが残る。600°C に加熱すれば，9.83Å 線が見られ低角側に尾を引いている。

エチレングライコール処理試料では，19Å から16Å におよぶ拡散した回折線を与え，10Å 線および 7Å 線の反射強度は著しく低下する。

DTA 曲線は 150°C の著しい吸熱と 560°C の吸熱，940°C の発熱を認める。560°C の吸熱は700°C にまでおよんでおり，940°C の発熱ピークは鋭くなくて円味を持っている。

化学分析によれば SiO_2/Al_2O_3 は 3.39，K_2O は 1.54%，MgO 2.01%であり，Fe_2O_3 も比較的多く 9.43%に達している。

以上の実験結果から，イライト，カオリン鉱物，モンモリロナイトの存在が考えられ，イライトを除いてはいずれも結晶度は低いと推定できる。

〔13〕 新潟粘土

定方位試料でない場合は4.48Å 線をわずかに認めるのみで，明瞭な回折線はほとんど見られない。定方位試料では反射強度はいずれも弱いが，16.1, 9.7, 9.3, 7.44, 4.37, 4.15, 3.59, 3.39Å の粉末線を認めうる。150°C に加熱すれば，わずかに7.44Å を認め，300°C に加熱すれば7.31Å 線は著しく鮮明さをかくが認めうる。450°C に加熱しても，300°C 加熱の場合と同じであり，600°C に加熱すれば，7Å 線は消失し，7Å から14Å におよぶ著しく拡散した回折線が見られる。

DTA 曲線は 130°C の吸熱ピークについで，320°C および450°C にも吸熱ピークが見られ，540°C にも吸熱ピークが認められる。300°C から700°C におよぶ発熱が存在し，このためにこの間の DTA 曲線は複雑化しているが，630°C にも吸熱が一部見られ，850°C の吸熱に引きつづいて880°C から950°C におよぶ幅広い発熱ピークが見られる。

化学分析結果では SiO_2/Al_2O_3 は 3.48，K_2O は 0.82%，MgO は 1.61%であるが，特に Fe_2O_3 量の多いことが特徴であり，H_2O^+ および H_2O^- も大きい値を示す。

電子顕微鏡写真は無定形のむしろ円味のある板状体が多く見られるほか，円味のあるゲル状体の集塊状物も見られる。結晶度の低いハロイサイトも多く見られ，膜状のゲル状物質も見られる。

以上の実験結果より考えられることは，結晶度の著しく低いカオリン鉱物が存在し，その一部は少くもハロイサイトであり，モンモリロナイトも一部は存在すると推定され，Fe_2O_3 は一部はゲータイトとして存在するらしいことはX線回折と DTA 曲線より暗示される。モンモリロナイトはそのまま存在することはなく，カオリン鉱物と不規則混合層鉱物を造っているのではなかろうかと推定される。イライト等の存在は確認できない。なおゲル状物質の存在も考えられる。

〔14〕 地山粘土

定方位試料についての回折図では15.50, 10.65, 7.63, 5.04, 4.33, 3.63, 3.40の粉末線が見られる。

150°C に加熱すれば 15.50Å 線はその強度を減ずると共に高角度側に移動する。450°C 加熱では 11.95Å に弱い回折線があり，10Å 線の反射強度は大きくなり，反面 7Å 線は小さくなる。600°C 加熱では 11.95Å および 7Å 線は消失し，10.16Å のみが残るが一部 11Å の位置より低角側に尾を引いたような回折図が見られる。

エチレングライコール処理により回折線の強度は弱くなっているが，17.0Å および 10.92Å が見られる。

DTA 曲線は加水ハロイサイトに似た形を与えるが，600°C から630°C におよぶ吸熱も推定でき，700°C までにも緩除な吸熱が推定されるが，カオリン鉱物の DTA 曲線に近かい。ピペリディン処理では600°C に余り顕著でない発熱を与える。

化学分析結果では SiO_2/Al_2O_3 は 2.53で比較的低く，K_2O は2.26%におよぶが MgO は 1.22%で余り大きい値でない。

電子顕微鏡写真では管状体と六角板状体とゲル状体が見られ，板状体は輪郭の明瞭のものと不規則のものがある。

以上の実験結果から結晶度の低いハロイサイトを主とし，これにイライトとモンモリロナイトが共存すると考えるべきであろう。また続報でのべる $Ca(OH)_2$ 溶液との反応で Hydrated Gehlenite を生成することは，アロファンの存在をも示すものである。

〔15〕 夜久野粘土

定方位試料でない場合は，4.50, 3.56, 2.59Å 線のほかは鮮明な回折線はえられず，また 7Å から 14Å におよぶ帯状の回折図が見られる。

定方位試料でも回折線の反射強度は弱く，7Å から 11Å におよぶ回折線，4.46Å 線および3.35Å 線が見られるのみである。150°C に加熱した場合はやはり帯状の回折線が見られるほかにわずかに7.20Å 線が認めうる。

DTA 曲線は 300°C から 600°C におよぶ発熱反応のために，この範囲の吸熱特性を知りがたいのであるが，550°C から 600°C に吸熱ピークが存在すると考えてよ

い。900°C から1,000°C にわたってゆるやかな発熱ピークが見られる。

化学分析結果では SiO_2/Al_2O_3 は 1.92，K_2O は 0.84%，MgO は 1.33%であり，H_2O^+ および H_2O^- が著しく高い値を示す。H_2O^+，SiO_2，Al_2O_3 の値からは $2SiO_2 \cdot Al_2O_3 \cdot 5H_2O$ がえられる。

電子顕微鏡写真は輪郭の明瞭でない不定形の板状体，まる味を持ったゲル状物質の塊状体，表面が平滑でない網状体，ケイソウ，著しく結晶度の低いハロイサイト鉱物状物質等が見られる。

以上の実験結果から，著しく結晶度の低いハロイサイト，ハロイサイト鉱物の不規則混合層鉱物が存在すると推定される。モンモリロナイト等は存在しないと推定される。ほかにゲル状物質も存在すると推定できる。

〔16〕 稲荷山粘土

定方位試料についての回折図では，14.73，10.4～11.8，7.50，3.59，3.35Åの粉末線を認める。エチレングライコール処理で回折線は鮮明さをかくが，14.49Åが明確に示され，14Å線の変位は見られない。

DTA 曲線は結晶度の低い加水ハロイサイトに似た曲線を示し，750°C の小吸熱ピークも見られる。

化学分析結果では SiO_2/Al_2O_3 は 2.30，K_2O は 1.11%，MgO は1.16%であり，H_2O^- が19%に達している。H_2O^+，SiO_2，Al_2O_3 の組成はカオリン鉱物に近い。

電子顕微鏡写真では比較的厚い六角板状体が多く見られ，一部は不規則な輪郭を持ち伸長性をも持っている。ほかに短い棒状を示すものも比較的多く見られ一部にはハロイサイトらしい管状体も見られる。

以上の結果から，結晶度の低いカオリン鉱物が主として存在していることは明らかであるが，14Å鉱物はモンモリロナイトでないことは推定できるが，詳細は明らかでない。イライトも存在すると推定される。カオリン鉱物は一部ハロイサイト鉱物であろうが，多くはカオリナイト推定される。

〔17〕 水沢粘土

定方位試料でない場合は石英の粉末線を除けば，15.2，7.20，4.48，3.60，2.58，2.30，1.68，1.54，1.48Åの粉末線を示す。定方位試料では 15.24，7.25，5.00，4.46，3.79，3.56，3.36Åの粉末線が認められる。

150°C に加熱すれば比較的拡散した 14.26Å 線のほかに微弱な7.14Å線を示す。340°C に加熱すれば14.7Åから12.6Åにおよぶ弱い拡散した回折線と微弱な7.35Åの粉末線が見られる。450°C に加熱すれば，14.7Å から9.8Åにおよぶ著しく拡散した粉末線が見られ，7Å線は消失する。600°C に加熱すればいずれも粉末線は見られない。

エチレングライコール処理すれば16.7Åの拡散した粉末線が見られるが，その反射強度は低下する。

DTA 曲線は 150°C の吸熱，360°C の吸熱，570°C の発熱，720°C の吸熱，850°C の吸熱，920°C の発熱が見られ，570°C の発熱のためにこの部分に見られるべき吸熱が現われない。

化学分析結果では K_2O は 0.83%，MgO は 2.60%，SiO_2/Al_2O_3 は 3.34 であり，H_2O^+ および H_2O^- はいずれも比較的大きい値を示す。

電子顕微鏡写真は不定形の膜状で多くは伸長状の板状体，またはゲル状の塊を認める。ほかに著しく結晶度の低いハロイサイト鉱物らしい管状体も見られる。

以上の結果からモンモリロナイトと結晶度の低いハロイサイト鉱物の存在が推定され，モンモリロナイトも不規則混合層鉱物の形で存在する可能性も考えられる。

〔V〕 考　察

土の上に土木構造物が造られ，それが安定しているためには基盤となる土が崩壊することがなく，また構造物の重量のために沈下が起ってはならない。このためには土はせん断抵抗が大きく，圧縮されがたくまた透水性も小さくなければならない。

軟弱地盤は沖積層よりなり，多くは粘土を主とした沖積土である。これら沖積粘土は母材より風化により生成した粘土が，主として水により運搬され，地球物理的または地球化学的環境条件の下で堆積し成層した層である。これらの堆積条件によって，海成とか淡水成とかに区別されたり，河底堆積とか沿岸堆積土とか静水堆積土等に区分される。沖積層はまた堆積条件によってその形成状態に著しい差異があり，粘土の含量および間隙比に差があり，とくに間隙比は一般に大きい。このことは軟弱土質を生成する基本的要因でもある。沖積土の土質については石井[1]の詳細な研究があるのでここではふれない。石井の研究は多くの沖積土の土質の一般性について重要な事実を発見しているのであるが，粘土の組成等には全然ふれていないし，海での堆積という同じ環境の下にある粘土層について土質の一般性をのべているとも考えられる。この研究に粘土鉱物に関する研究が行なわれていないことは，今後に問題を残すことでもある。軟弱地盤は海成の沖積層でなくとも淡水成でも成立すると考えられ，軟弱な土質ということに限定すれば必ずしも沖積土のみが対象とはならないであろう。

ここでは軟弱地盤を造る沖積粘土中の粘土鉱物を検索して，土質との関係を考察することを目的としたのであるが，実験の終了した試料も少ないしこの目的は達していない。この研究の中間報告として現在までに行なわれた結果について検討してみる。なお地質的の検討もいまだなされていない“軟弱土”も多くふくまれていることを付言する。

中部粘土 No.-1，No.-4，No.-9は木曽川の伊勢湾での

沖積土と考えられ，含有される粘土鉱物はモンモリロナイト，イライトおよびカオリン鉱物をふくむことは共通しているが，深い方の No.-9 にはクロライトの存在が推定され，結晶度についても多少の差が見られる。

中部粘土 No.-15，No.-19 も木曽川の沖積土であり，海成のものであろう。いずれもモンモリロナイト，イライト，カオリン鉱物をふくみ，両者ともクロライトの存在が推定できるが，モンモリロナイトの結晶度は低く，その量も多いといえない。

これらの結果から伊勢湾での木曽川の沖積土はイライト，カオリン鉱物，モンモリロナイトを含くみ，クロライトも一部には存在し，深度または堆積場所等によりそれらの含量または結晶度に相異のあることが考えられる。これらの関係を系統化することは今後の問題であろう。

岡山国道粘土は旭川等の沖積土と考えられ，カオリン鉱物，イライト，モンモリロナイトの存在が考えられ，クロライトの存在も推定される。上層の方が下層より結晶度がすぐれている傾向が見られる。岡山県の錦海湾底の沖積土の25mまでのボーリング試料については松下，高柳[2]の報告があり，上層は雲母粘土鉱物とカオリン鉱物が見られ，下層では結晶度は低くなり，クロライトも認められている。さらに青峰等[3]は児島湾の底土はハロイサイト，イライト，モンモリロナイトよりなり，イライトとモンモリロナイトの相互の変化過程にあり，モンモリロナイトの性質を持ったイライトの存在をのべている。ここで試験した試料は児島湾のものの K_2O が0.73%であるのに比してはるかに多い。したがってイライトとして存在するものは児島湾のものより多く，それと共にイライトとモンモリロナイトの混合層鉱物は児島湾のものに比して少ないといえる。モンモリロナイトが明瞭には認められないことは，その一部がイライトと混合層鉱物を造るためと考えられる。

大阪梅田粘土はイライト，ハロイサイト，モンモリロナイトの存在が考えられ，この粘土は淀川の大阪湾での沖積粘土である。市原[4]は大阪層群と現在の大阪湾底質および沖積層ボーリングコアについて報告している。それによればモンモリロナイト，ハロイサイト，イライトが含有されており，本実験でえられた結果とも一致している。

熊本粘土および佐賀粘土はいずれも有明湾の沖積土であるが，母材が同じかどうかは明らかでない。両者とも結晶度の低いカオリン鉱物，モンモリロナイト，イライトをふくむことが知られる。有明湾の沖積土の粘土鉱物については青峰[3]等の研究がありすでにのべた児島湾の粘土と大体同じで，イライトの性質を残しているモンモリロナイト（おそらくノントロナイトに近いもの）の存在が考えられている。また有明海沖積水田土壌について青峰，和田[5]はイライト－モンモリロナイト系ではかに微量のハロイサイトをふくむとし，耕作されてから長年月を経過してもいまだ変化していないとしている。また山内，田中[6]は有明干拓地のヘドロと博多港のヘドロの粘土鉱物を検索し，両者とも同一の粘土鉱物によりなり，イライトおよびモンモリロナイトを主とし，一部のハロイサイトを含むと結論している。本試料についての実験結果もここにのべた文献に記されている結果と一応一致していることが認められる。

中部粘土，岡山粘土，佐賀粘土，熊本粘土，大阪粘土等はいずれも陸地付近の海中での沖積土であることが共通しており，さらに存在する粘土も文献で示されるように児島湾粘土，博多湾粘土，錦海湾粘土等とともにモンモリロナイト，イライト，カオリン鉱物であることも共通している。これらの粘土の間ではクロライトの存否，または含有粘土鉱物の結晶度，混合層鉱物の生成等についてそれぞれ差異の存することは明らかである。しかしこれらの差異は別にして，これら粘土の間の共通性は注目されるべきと考える。

一方瀬戸内海沿岸の入浜塩田土壌および海泥の粘土鉱物については弘法，藤沢[7]の報告があり，これら粘土はハロイサイトのほかに常にイライトおよびクロライトの存在が特徴であるとし，香川県のものはハロイサイトとイライトからなり，徳島県のものはクロライト，イライトにハロイサイトを混ずるとしている。これらの結果からむしろ環境条件よりも母材の方が粘土鉱物組成と密接に関係するとしている。弘法等の報告ではモンモリロナイトを記載しないが，その存在を積極的に否定する実験資料も十分とはいえない。

Grim 等[8]の研究によれば，カリフォルニヤ湾の堆積物はすべてモンモリロナイト，イライト，カオリナイトをふくみ，イライトの含量が最も多く，カオリナイト含量が最少であり，一部試料ではクロライトが見られる。カオリナイトは陸地より運ばれて海水中の塩基的環境で，イライトまたはクロライトに変り，退化したイライトも海水中でイライトまたはクロライトに変るといっている。モンモリロナイトもカオリナイトから変化したものであろう。組成粘土鉱物間に見られる差異は，母材，堆積環境，堆積後の経過時間等によるものであろう。

淡水中での沖積土である横浜工事粘土，水沢粘土および新潟粘土はいずれも結晶度の低いハロイサイト鉱物であり，モンモリロナイトも一部含有され，モンモリロナイトも結晶度は低いものである。これらの土にはイライトの存在が明瞭ではない。モンモリロナイトの存在が沖積時に見られたか否かは不明であり，これら沖積土をもたらした河川の流域には第三紀層が見られることと関連して，母材にその起源を求めることも可能であろう。夜久野粘土はケイソウをふくむことより沖積土と考えられるが，モンモリロナイトを含有しないことは，母材に関係

あると考えるべきかも知れない。

上松坂粘土，地山粘土，北陸粘土は地質関係が不明であるからふれないが，結晶度が低いかモンモリロナイトの存在が知られ，イライトも存在する。

わが国の海岸に近い沖積粘土層で軟弱地盤を造る土質はモンモリロナイト，イライト，カオリン鉱物をふくむことは一般であり，一般に結晶度は高くはないし，モンモリロナイトとイライトの間に相互への変化が見られる場合もあり，クロライトも一部に存在する。海成であることがこれら粘土鉱物組成をもたらしたと考えられ，淡水性の場合にはイライトは見られない。軟弱地盤土質にはモンモリロナイトをふくむこと，結晶度の低い鉱物が多いことは共通しているといえる。また好ましくない軟弱土質を与える土はモンモリロナイトを含むことは多いが，モンモリロナイトが含まれなくてもカオリン鉱物の結晶度は著しく低いのが一般である。

モンモリロナイトの存在および結晶度の著しく低いカオリン鉱物の存在は，特に親水性を土に与えることを十分に期待しうる。これら鉱物の存在とその土質との相関性についての考察は今後の実験結果にまつこととする。

〔VI〕 結　言

軟弱土質粘土中の粘土鉱物をX線回折法，DTA 法，化学分析法，電顕観察等により検索した。

軟弱地盤を形成する海中沖積粘土中にはモンモリロナイト，イライト，カオリン鉱物が存在し，しかも結晶度は低いことが一般である。淡水中での沖積粘土で軟弱地盤を造るものは，著しく結晶度の劣るハロイサイト鉱物を主とし，モンモリロナイトが含まれている場合が多い。成因がいまだ明らかでない好ましくない土質を与える土では，粘土鉱物は結晶度の低く，モンモリロナイトをふくむ場合が多いと推定される。

今後広範に軟弱土質を集め，粘土鉱物を正確に同定することを試み，土質との相関性を追求する必要がある。

本研究に用いた試料を送付していただいた各工事事務所の皆様に感謝の意を表する。またX線回折実験の一部を担当していただいた金子幸子氏に感謝する。

参 考 文 献

1）石井靖丸　軟弱地盤工法，技報堂全書　昭35
2）松下浩，高柳淑子　粘土科学の進歩（I）121，1957
3）青峰重範，東俊雄，井ノ子昭夫
九大農学部学芸雑誌，14，387，昭29
4）市原優子　地質雑，66，812，1960
5）青峰重範，和田光史　九大農学部学芸雑誌
14，377，昭29
6）山内豊聡，田中信也　土木学会誌，39，437，昭29
7）弘法健三，藤沢　徹　日本塩学会誌，11，50，1957
8）R. E. Grim, R. S. Deitz, W. F. Bradley
Bull. Geo. Soc. Am. 60, 1785, 1949

写真-1　中部粘土 No. 1

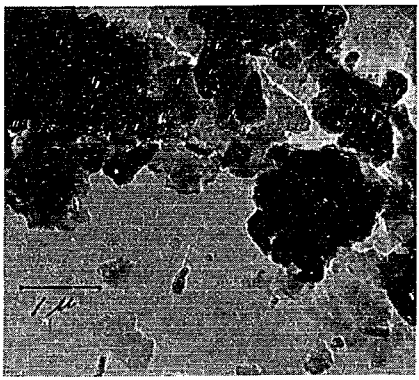


写真-2　横浜粘土 No. 1

写真-3　岡山国道粘土 No. 1

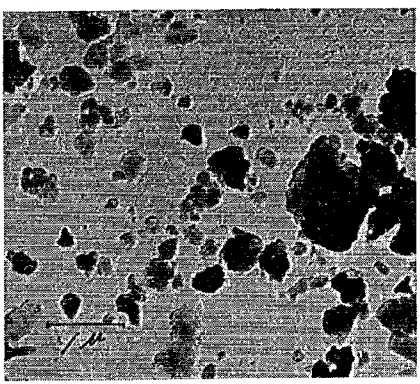


写真-4　梅　田　粘　土

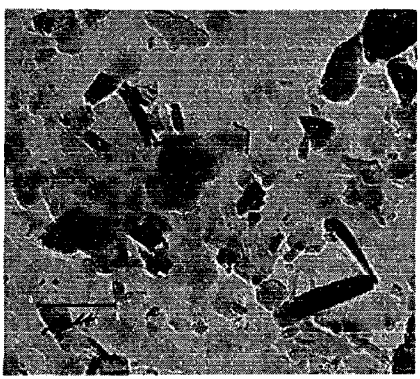


写真-5　熊　本　粘　土

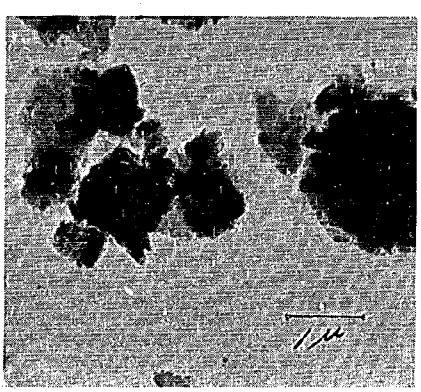


写真-6　上 松 坂 粘 土

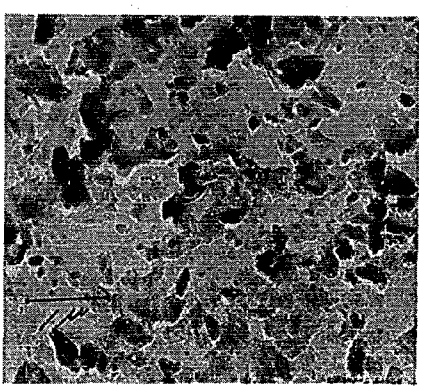


写真-7 佐賀粘土

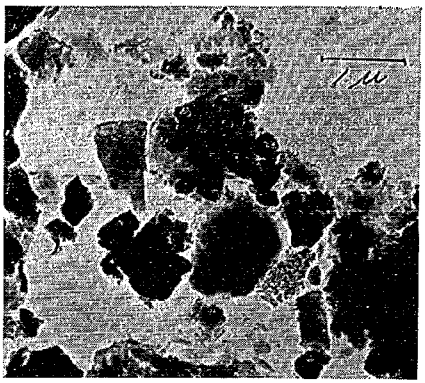


写真-8 新潟粘土

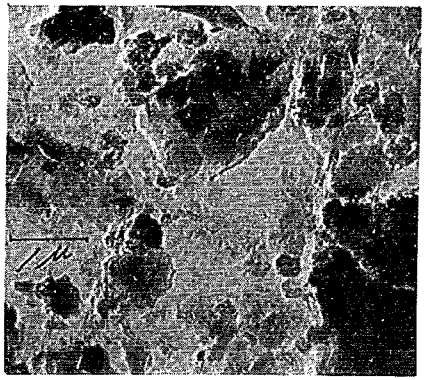


写真-9 地山粘土

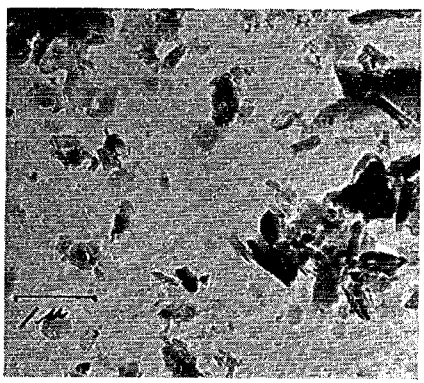


写真-10 稲荷山粘土

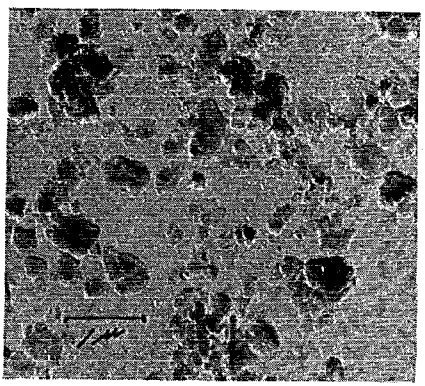


写真-11 夜久野粘土

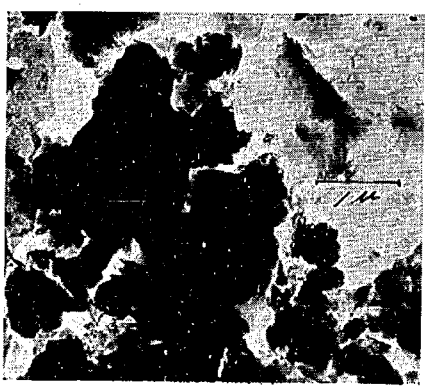
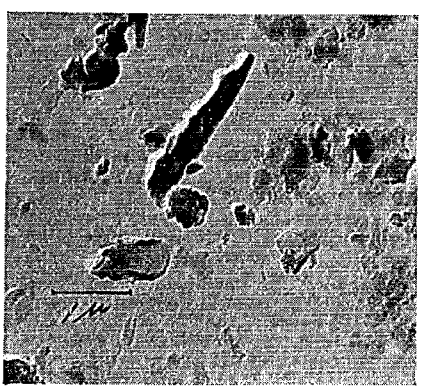


写真-12 水沢粘土



土壌コロイドに関する研究 (第8報)

——路床土，軟弱土質および地すべり粘土中の土壌コロイドと $Ca(OH)_2$ との反応——

(昭和39年3月)

有泉昌*
藤崎邦弥**

目次

まえがき……(1)
〔I〕試料および実験方法……(1)
〔II〕実験結果……(1)
〔III〕実験結果の検討……(1)
〔1〕東京都の路床土……(1)
〔2〕埼玉県の路床土……(2)
〔3〕群馬県の路床土……(2)
〔4〕茨城県の路床土……(2)
〔5〕三重県の路床土……(2)
〔6〕愛知県の路床土……(3)
〔7〕静岡県の路床土……(3)
〔8〕岩手県の路床土……(6)
〔9〕宮城県の路床土……(6)
〔10〕福島県の路床土……(6)
〔11〕軟弱土質について……(6)
〔12〕地べすり粘土について……(6)
〔IV〕考察……(9)
〔V〕結言……(11)

まえがき

アロファン粘土が $Ca(OH)_2$ と反応し結晶性物質を生成すること，およびこの反応を利用したアロファン粘土の安定方法の発見とその特性についてはすでに報告した。この方法がアロファン粘土以外の土の安定に利用しうるか否かは現在明らかでないが，$Ca(OH)_2$ との反応でなんらかの結晶性物質が生成すれば，同様の方法が効果あることを十分に推定することが可能である。

わが国の路床土，軟弱土質および地すべり粘土の土壌コロイドの粘土鉱物組成については，すでに本報第4報，第6報および第7報で論じたのであるが，これら土壌粘土について $Ca(OH)_2$ との反応でいかなる結晶性鉱物を生成するかを確かめた。

〔I〕試料および実験方法

路床土は第6報の研究に用いた東京都，埼玉県，群馬県，茨城県，三重県，愛知県，静岡県，福島県，宮城県および岩手県のものであり，粘土鉱物の検索に用いた土壌コロイドである。

軟弱土質は第7報の研究に用いたものであり，粘土鉱物の検索に用いた土壌コロイドである。

地すべり粘土は第4報の研究に用いたものであり，粘土鉱物の検索に用いた土壌コロイドである。ただし試料量の関係上，A—1，B—2，D—1，D—5，D—6，E—1，F—2，G—1，G—2，G—3，I—1，I—2，I—3，I—4 とする。

実験操作は“アロファン粘土の消石灰—石膏による化学的安定方法に関する研究”でのべたように，飽和 $Ca(OH)_2$ 溶液 100cc に風乾粘土試料 0.100g を加え，20°C で14日間放置し，沪過後風乾させてX線回折を行ない，一方液相の分析より試料コロイドに収着された CaO 量を求める。X線回折は Geigerflex により，銅を対陰極としている。

〔II〕実験結果

実験結果は X 線回折図として図-1～12に示す。なお CaO の収着量は図中に ( ) 印で記入しておいた。

〔III〕実験結果の検討

実験結果を図について検討する。

〔1〕東京都の路床土

東—3 が C_4AH_{13} と一部の C_3AH_6 の回折線を示すほかは，すべて C_2ASH_n の生成を示し，C_2ASH_n の生成を示すものは CaO 収着率が大きく，25% を超えている。弱い C_4AH_{13} の回折線を示すものは東—7，東—8 であり，C_3AH_6 は東—7 に見られる。東京都のコロイドの場合特に変った点は C_3AH_6 が C_2ASH_n と同時に

* 地質化学部長 工博
** 地質化学部 化学研究室

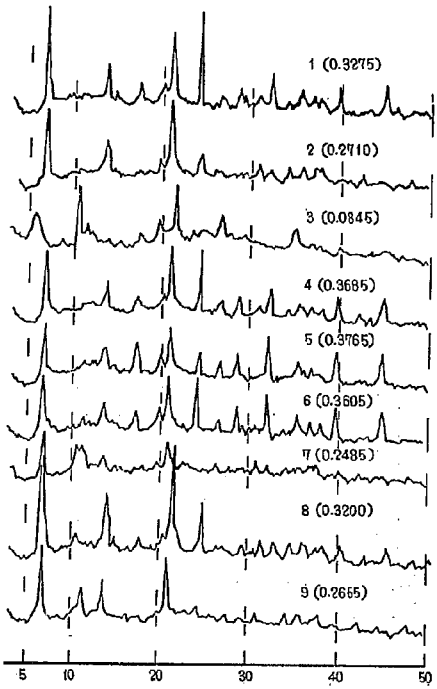


図-1 路床土中のコロイドと $Ca(OH)_2$ 溶液との反応生成物のX線回折図
(東京都路床土)

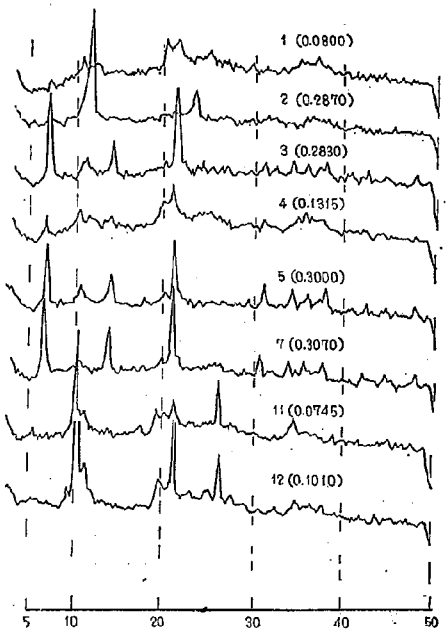


図-2 路床土中のコロイドと $Ca(OH)_2$ 溶液との反応生成物のX線回折図
(埼玉県路床土)

見られることと，3.7Å に強い回折線を認めることである。

〔2〕 埼玉県の路床土

アロファンを主成分とする埼—5，7，3は C_2ASH_n を明瞭に認め，これらは CaO 収着率も大きい。ハロイサイトの(001)線を与えない埼—11，12はいずれも C_4AH_{13} を示し，アロファンと推定された埼—2も C_4AH_{13} の生成を認める。C_3AH_6 の弱い回折線も示すものもある。

〔3〕 群馬県の路床土

群—5，7，10，12，14を除いて，C_2ASH_n の生成が明瞭であり，C_2ASH_n を生成するものは $Ca(OH)_2$ 収着率も大きいことは一般である。群—1を除いていずれも C_4AH_{13} または C_3AH_6 の生成が認められ，C_4AH_{13} の方が一般には C_3AH_6 よりも多い。

〔4〕 茨城県の路床土

茨—1，2，7を除いていずれも C_2ASH_n の生成が明瞭であり，C_2ASH_n を生成するものは $Ca(OH)_2$ 収着率も大きい。C_4AH_{13} および C_3AH_6 の生成も認められる。なお脱鉄操作により，C_2ASH_n の生成機構が破壊されないことが認められる。

〔5〕 三重県の路床土

三—1，2，27，34は C_2ASH_n を明確に生成し，三—3，11，12，17，18，26，37では弱いが回折線を明瞭に認める。C_4AH_{13} および C_3AH_6 も認められる。C_4AH_{13} の(001)線は8.0~8.6Å の間を変動するが，C_3AH_6 の(001)線はほとんど変化しない。したがって7.6Å から8.6Å の間にいくつかの回折線が見られることが多く，このほかに三—1のように9.3Å線，三—28および三—42のように9.5Å 線も見られる。しかしこれらの回折線がなににによるのかは明らかにしえない。C_3AH_6 を生成する場合は三—9，29，35，46等であり，この場合に3.7Å線をともなうことが多いがその原因については不明であり，すでにのべたX物質をふくむ試料にこの例が多いことはいえる。またジプサイトが含まれても $Ca(OH)_2$ との反応後の試料に依然としてジプサイトが見られる点も理解しがたい。三重県の試料では一般に $Ca(OH)_2$ の収着量は少ない。またモンモリロナイト，クロライトをふくむものは，この反応でそれらの(001)線が変化をうけないことも示される。

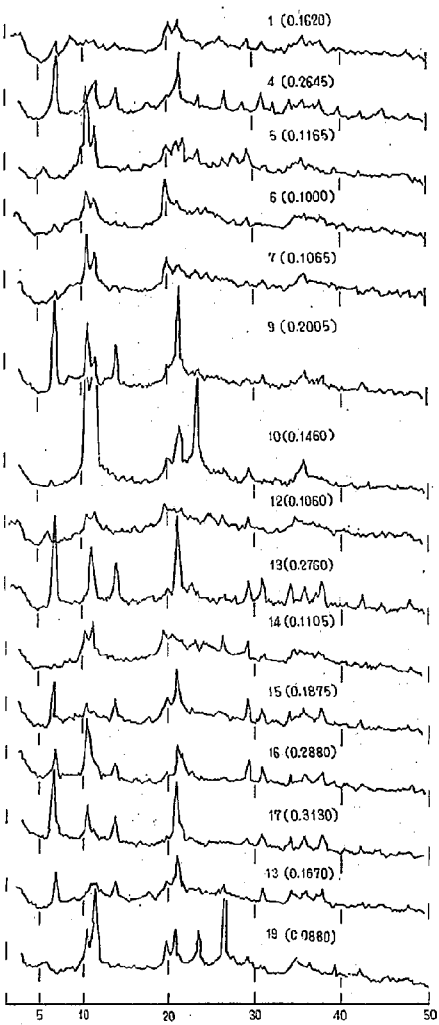


図-3　路床土中のコロイドと $Ca(OH)_2$ 溶液との反応生成物のX線回折図
（群馬県路床土）

〔6〕 愛知県の路床土

愛—15，31は明確に C_2ASH_8 を，愛—3，16，28は弱い C_2ASH_8 の回折線を示す。C_4AH_{13} および C_3AH_6 の明確な回折線がすべての試料に見られる。比較的結晶度のよいカオリン鉱物と考えられていても，$Ca(OH)_2$ との反応で相当量の $Ca(OH)_2$ を収着して C_4AH_{13} または C_3AH_6 を生成し，一方カオリン鉱物の（001）等は変化をうけてはないことが解る。このことは比較的結晶度がよいと考えられてもゲル状の Al_2O_3 化合物を含有することを示す。

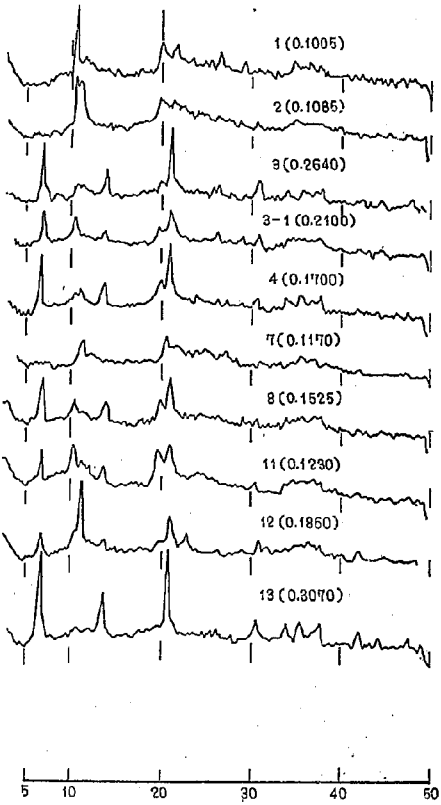


図-4　路床土中のコロイドと $Ca(OH)_2$ 溶液との反応生成物のX線回折図
（茨城県路床土）

愛知県路床土の実験結果でも C_4AH_{13} の（001）線は8.0～8.5までの幅を持っており，さらに愛—2，3，4，17等で見られるように 9.0～9.1Å 線も見られ，愛—8で見られるように 9.8Å および 4.8Å 線が見られたり，愛—31で見られるような著しく強い 11Å 線および 5.5Å 線が見られたりする。これらの原因については現在不明であり，今後の研究問題であろう。これらの試料ではいずれも $Ca(OH)_2$ の収着率は一般に低くい。

〔7〕 静岡県の路床土

静—8では C_2ASH_8 が明瞭に認められ，静—4および10でも C_2ASH_8 による回折線を認め，その他のものではこれら鉱物の生成は見られない。しかし C_4AH_{13} および C_3AH_6 は多くの試料に認められる。C_4AH_{13} の（001）は8.5Å線に近いものが多く，このほかに静—3，

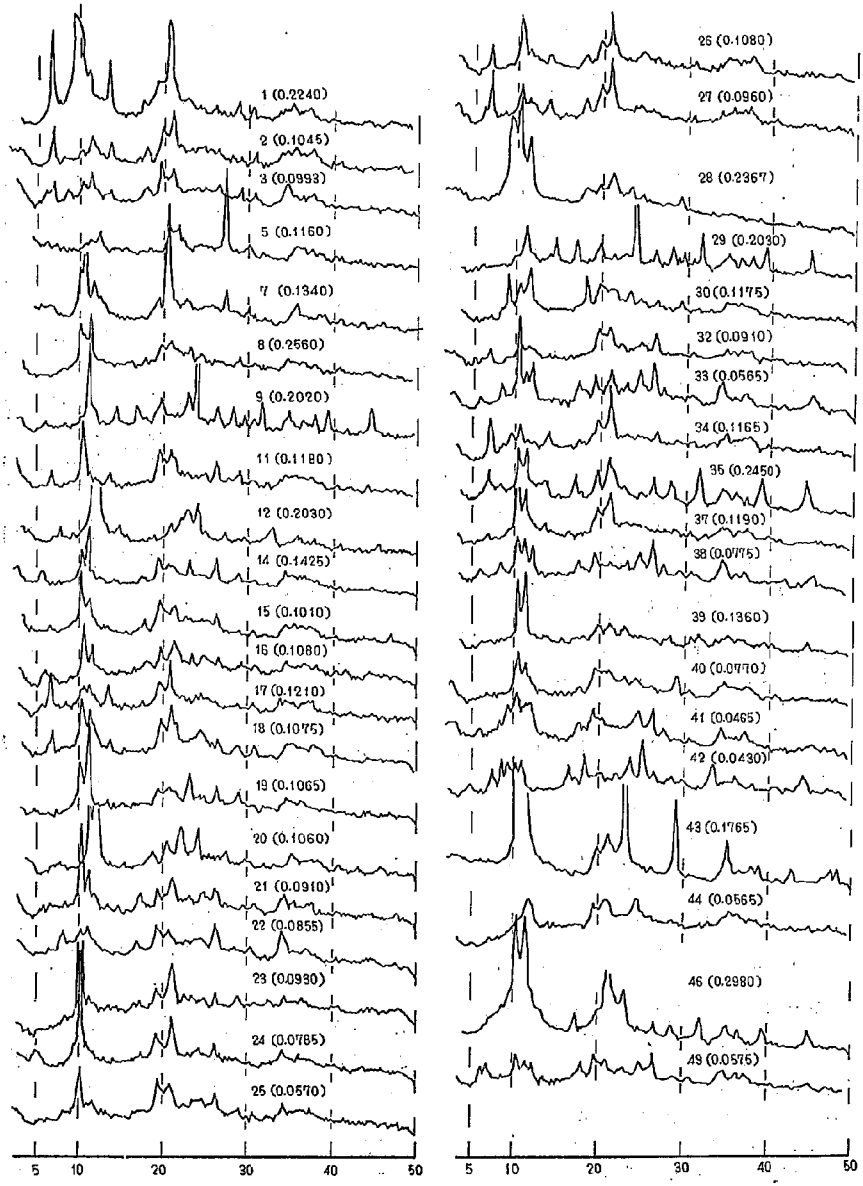


図-5 路床土中のコロイドと $Ca(OH)_2$ 溶液との反応生成物のX線回折図（三重県路床土）

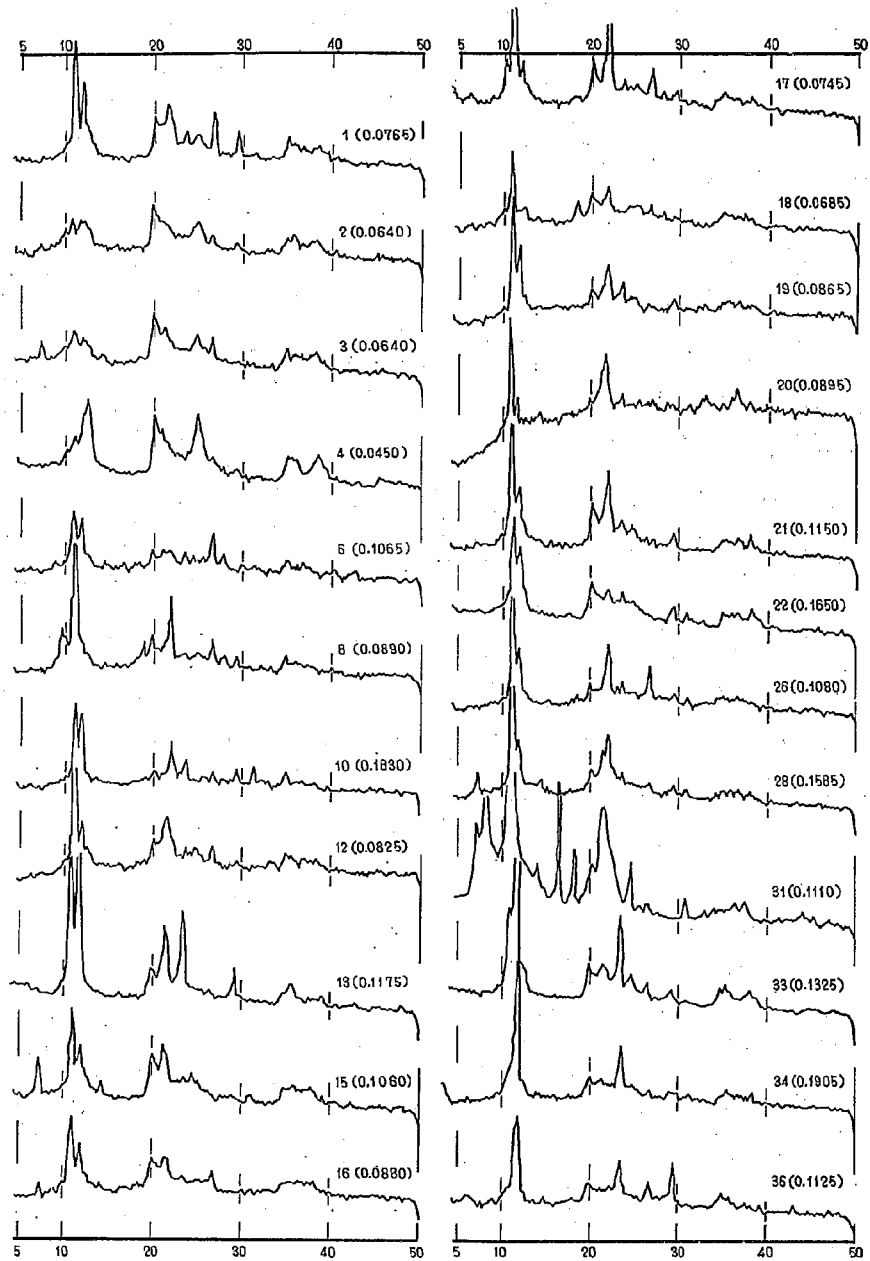


図-6　路床土中のコロイドと $Ca(OH)_2$ 溶液との反応生成物のX線回折図（愛知県路床土）

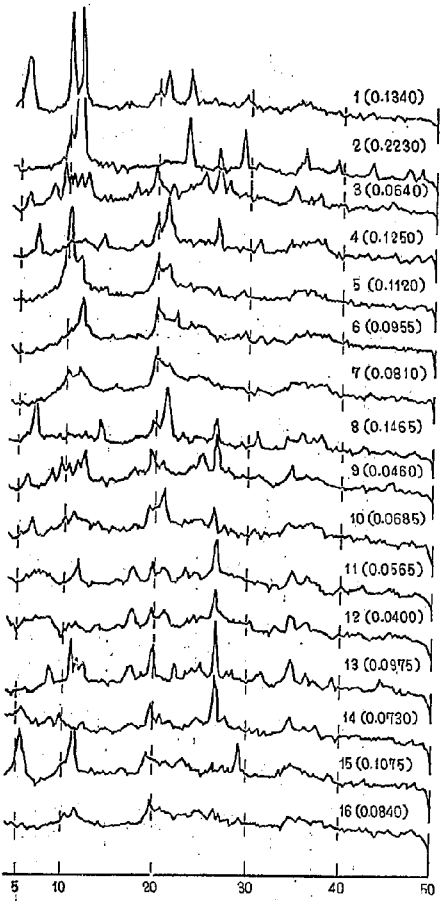


図-7 路床土中のコロイドと $Ca(OH)_2$ 溶液との反応生成物のX線回折図
(静岡県路床土)

9, 10に見られるように9.0Å線が見られる。静—1, 15で明らかなようにモンモリロナイトは $Ca(OH)_2$ との反応で変化をうけないし，イライト系鉱物も変化をうけない。静岡県の路床土では一般に $Ca(OH)_2$ の収着率は小さい。

〔8〕 岩手県の路床土

岩—2, 9, 8は C_2ASH_4 を生成し，$Ca(OH)_2$ 収着率も高い。いずれも C_4AH_{13} を示すが (001) は一般に大きい。岩—1, 6, 7は9.1Å線を示し，岩—4は9.6Åおよび4.8Å線を示す。C_4AH_{13} の回折線の方が C_3AH_6 のより一般に大きい。

〔9〕 宮城県の路床土

宮城県路床土の内宮—9, 10, 24, 26, 31, 45はいずれも，C_2ASH_n の生成が顕著に認められ，$Ca(OH)_2$ の収着率は比較的大きい。大部分の試料は C_4AH_{13} および C_3AH_6 を生成して，$Ca(OH)_2$ の収着率も大きく，収着率が27%におよぶものもある。9.0~9.2Å線を示すものも多く，宮—7, 17, 25, 32, 40は特に顕著であり，宮—2, 9, 16, 20, 29, 35, 41にも見られる。2θが9.5°~11.5°の間に数本の回折線が見られることが多いが，C_3AH_6 の回折線の位置は常に変動しない。宮城県の試料で特異なものは，宮—45であり，9.8Åの強い回折線を示し，もち論この回折線は $Ca(OH)_2$ 処理前のものには見られない。この点の解釈はできない。宮城県路床土の $Ca(OH)_2$ 収着率は一般に大きく，C_3AH_6 を生成すること等は見られない。

〔10〕 福島県の路床土

福島県の路床土では，福—1, 3, 11, 14, 15, 16, 18, 19, 20に C_2ASH_n の生成を認め，$Ca(OH)_2$ の収着率も大きい。C_4AH_{13} および C_3AH_6 の生成は大部分の試料に見られ，大部のものが C_4AH_{13} の回折線の方が C_3AH_6 よりも大きい。福島県でも宮城県の場合と同様に福—5, 7, 9, 17, 25, 28等に9.0~9.1Å線を認めるが，福—28は9.0Åの回折線が特に著しい。宮—45の場合と同様に福—13, 15でも9.7Åに強い回折線を示すが，その理由は明らかでない。また福—9では8.1Åと4.06Åに著しく強い回折線を認めたり，福—22では8.0Å，7.7Åのほかに明瞭な7.8Å線を認め，さらに福—21ではCa—Silicateの水和物を認める。宮城県の路床土と共に $Ca(OH)_2$ の収着率は大きい。

〔11〕 軟弱土質について

本報告第7報で実験試料とした軟弱土質の場合は，いずれも $Ca(OH)_2$ の収着率に低く，CaOとして10%を超えるものはまれである。C_2ASH_n を生成するものは地山試料を除いて他にない。海中での沖積土では収着率も特に低く回折線も弱い。C_4AH_{13} および C_3AH_6 を生成するものも多いが，その回折線は一般に弱い。

〔12〕 地すべり粘土について

本報告第4報で実験試料とした地すべり粘土の場合は，14個の試料に限られているが，C_2ASH_n の生成を認めたものはI—3, 4試料のみである。これらの試料は玄武岩の風化したものであることが明瞭であり，同地域の地すべり粘土でも頁岩の風化したものでは C_2ASH_n を生成しない。C_2ASH_n を生成する場合は一般に $Ca(OH)_2$ の収着率は一般に大きい値をとる。地すべり粘土では一般にモンモリロナイトが存在するが，$Ca(OH)_2$ との反応で C_2ASH_n のほか C_4AH_{13} または C_3AH_6 を生成することは比較的少ないと考えられ，むしろ3.0Å線で示されるように Ca—Silicate 水和物が生成しやすいと考えられる。すなわち地すべり粘土では遊離の Al_2O_3 ゲルは存在しても少量と考えられる。

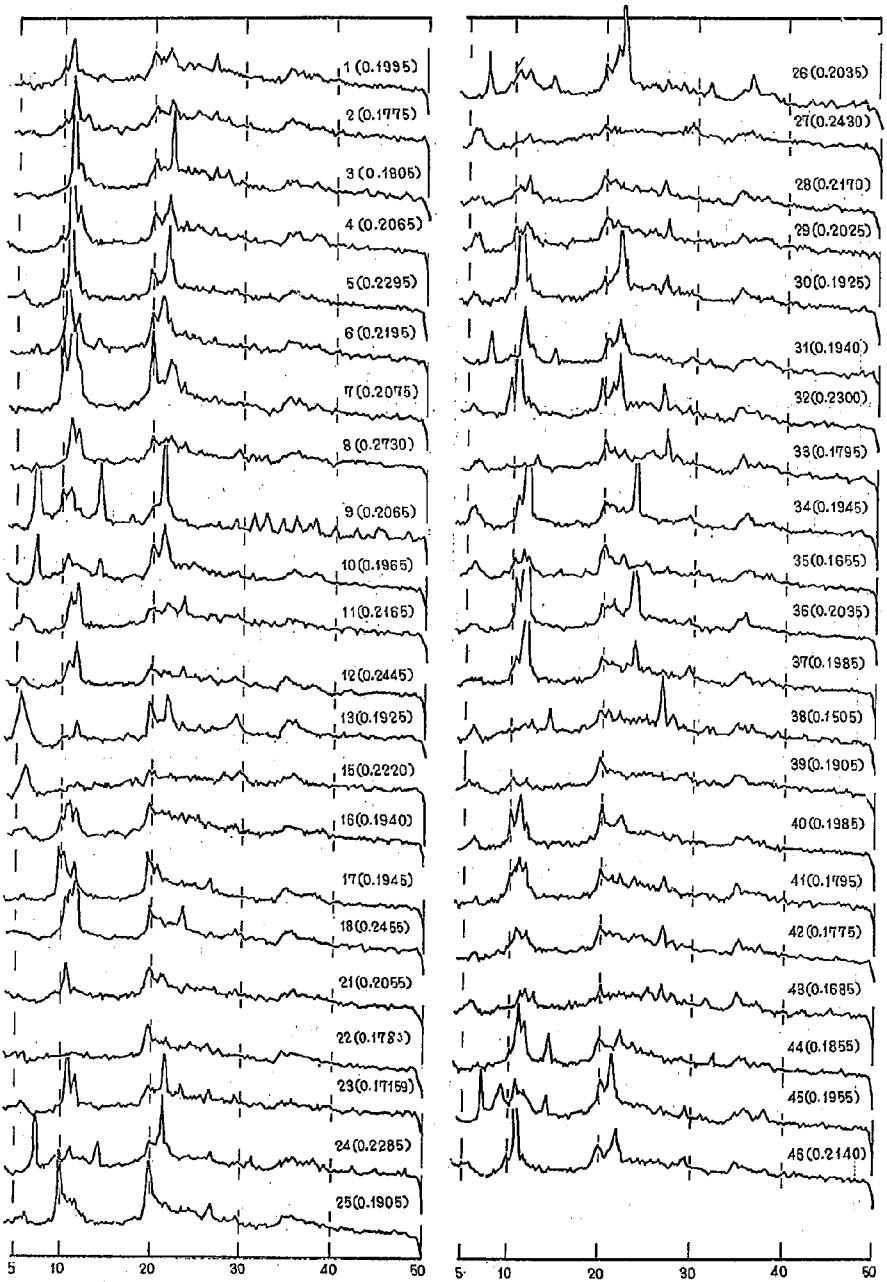


図-8　路床土中のコロイドと $Ca(OH)_2$ 溶液との反応生成物のX線回折図（宮城県路床土）

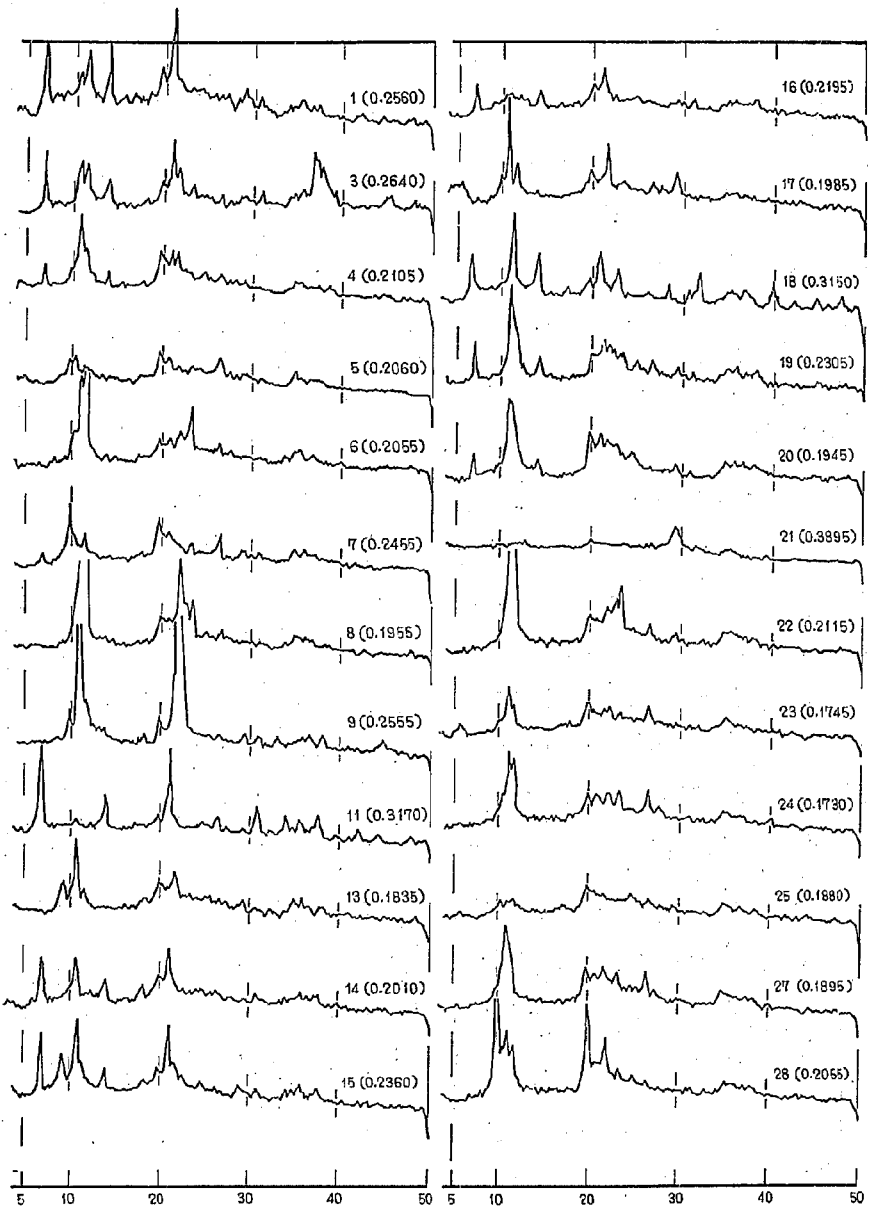


図-9 路床土中のコロイドと $Ca(OH)_2$ 溶液との反応生成物のX線回折図（福島県路床土）

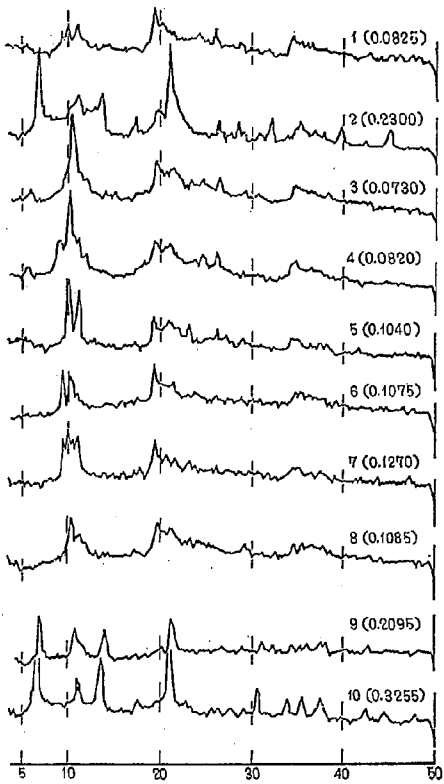


図-10　路床土中のコロイドと $Ca(OH)_2$ 溶液との反応生成物のX線回折図
（岩手県路床土）

〔IV〕 考　察

実験はX線回折によっており，この結果のみからは詳細について論ずることはできない。今後さらに研究を継続する予定であるが，この結果からも多くの重要な事実を知ることができる。これらの点について考える。

（1） 本報告第6報でのべたとこであるアロファンを含むとされる試料は必らず C_2ASH_n を生成する事実をしる。しかし一方アロファンの存在がX線回折，DTA曲線等で推知しえない場合，しかもカオリン鉱物等の結晶度がある程度高い場合でも，$Ca(OH)_2$ に対しアロファンと同一行動を取る物質の存在する場合がしばしば認められる。アロファンは火山灰起源とされるので三重県または愛知県では認めがたいと一応考えられるのであるが，事実アロファンまたはアロファン類似体の存在することは，それらの生成過程と密接に関係するものである。しかしこの点について現在明確にしえないが，土研報111号で SiO_2—Al_2O_3 共沈ゲルは合成アロファンと見なしうる点に論及したので，このアロファン類似体は恐らく共沈ゲルと同様な機構で生成したものと考えられる。

（2） C_4AH_{13} および C_3AH_8 は多くの試料で生成が認められる。C_4AH_{13} の (001) 線は8.0～8.6Åにわたって変動し，一方 C_3AH_8 の (001) 線は固定している。また8.0Å線と7.7Åの間にもその中間線が見られる。C_4AH_{13} の (001) 線の変動は，それが液相より析出したと考えるより，C_2ASH_n の生成の場合と同様に収着体よりの生長と考える方が合理的ともいえる。

土壌コロイド中に存在し $Ca(OH)_2$ との反応で C_4AH_{13} を与えるものが，どのような形態の Al_2O_3 化合物かは不明である。しかしすでに“アロファン質粘土の消石灰—石膏による化学的安定方法に関する研究”第3報で Bo"hmite 等を共存させる共沈ゲルで C_2AH_8 と推定される回折線をもえているので，種種の形態の Al_2O_3 化合物の存在が考えられ，C_4AH_{13} の (001) 線の変動はこの点と関係するといえる。

（3） C_4AH_{13}，C_3AH_8 のほかに9.1Å線，9.6Å線と4.8Å線，9.3Å線，8.8Å線，11Å線と5.5Å線等がしばしば見られるが，これら回折線を与える物質の同定は現在できない。おそらく CaO—Al_2O_3—H_2O 系化合物の混合層鉱物と関係しているであろう。

また試料によっては C_3AH_6 を生成する場合があり，最も安定な C_3AH_6 の生成は当然予期されるが，全試料の内数試料に認める程度であり，ジプサイトの存在とは関係がない。なおジプサイトは $Ca(OH)_2$ の濃度にもよるが本実験の条件下では C_3AH_6 に変り，消失すべきと考えられるが，実際にはジプサイトによる回折線が残り，その理由については明らかでない。さらに時に見られる強い3.7Å線についても不明である。

（4） $Ca(OH)_2$ での処理はモンモリロナイト，イライト，カオリン鉱物の (001) 線には変化を与えない。この点についてはさらに詳細な研究が必要であるが，アロファンの共存を識別する手段を提出するものと考えてよい。

（5） C_2ASH_n の生成が見られる場合は一般に $Ca(OH)_2$ の収着率は大きく，地域的には関東地方および東北地方の路床土で C_2ASH_n の生成を見ることが多い。東海地方では C_2ASH_n の生成は比較的まれであり，$Ca(OH)_2$ 収着率も一般に小さい。

（6） 土壌コロイド中には結晶性粘土鉱物のほかに，アロファン，Al_2O_3—SiO_2 共沈ゲル，種種の形態の Al_2O_3 ゲル，SiO_2 ゲル等が共存し，C_2ASH_n の生成または C_4AH_{13}，C_3AH_8 等の生成反応よりそれらを分別しうるに至ると考えられる。

C_4AH_{13}，C_3AH_8 等の生成によっても，膨潤作用が与

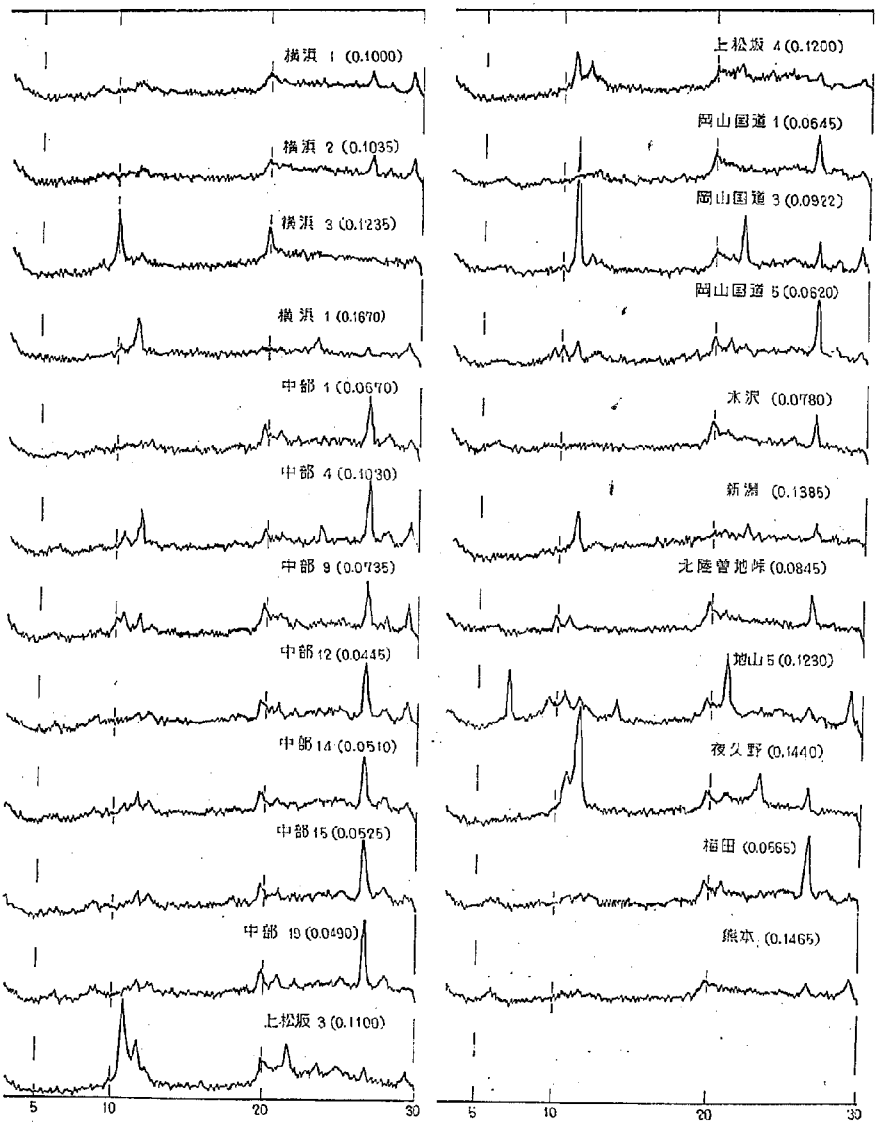


図-11 軟弱土質粘土と $Ca(OH)_2$ 溶液との反応生成物X線回折図
(カッコ内は $Ca(OH)_2$ 収着量 CaO g/g 試料)

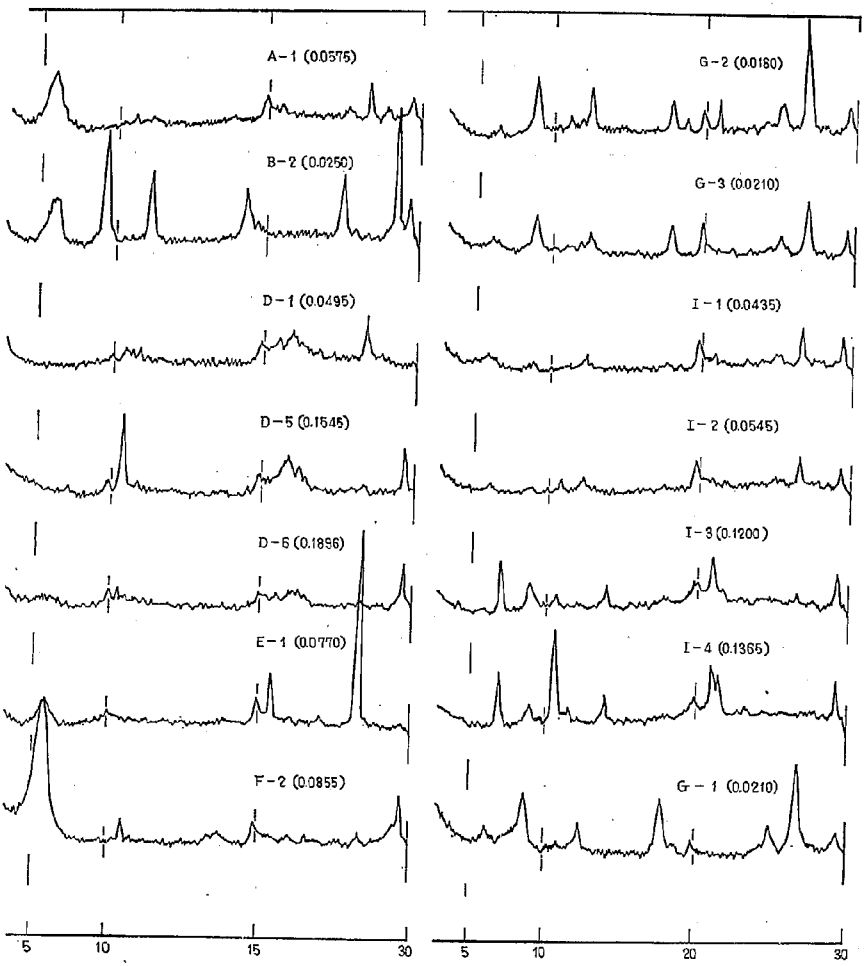


図-12　地すべり粘土と $Ca(OH)_2$ 溶液との反応生成物X線回折図
（カッコ内は $Ca(OH)_2$ 収着量 CaO g/g 試料）

えられるし，さらに $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ の添加により C_4AH_{13} 等はセメントバチルスに変りうるので，$Ca(OH)_2$ との反応生成物の回折線および $Ca(OH)_2$ の収着率の測定より，$Ca(OH)_2$—$CaSO_4$ 系による安定方法の適用について判定を下すことができよう。

（7）軟弱土質，地すべり粘土については C_2ASH_n の生成を見ることはまれであったが，C_4AH_{13} 等の生成は認められる。アロファンまたはアロファン類似体が見られがたく，特に地すべり粘土では C_4AH_{13} は生成しても少量であり，むしろ Ca—Silicate 水和物が見られることは，それら粘土の生成環境に関連すると考えられ今後の研究課題である。

〔V〕結　言

地すべり粘土の一部をふくめて軟弱土質のほか主として路床土について，土壌コロイドと $Ca(OH)_2$ 溶液との反応生成物を検索し，考察を加えた。

アロファンを含むものはいずれも C_2ASH_n を生成するが，Al_2O_3—SiO_2 共沈ゲルを含むために C_2ASH_n を生成すると考えられるものが三重県，愛知県でもしばしば見られる。

C_4AH_{13} および C_3AH_6 は一般に見られ，C_3AH_6 のほ

か8.8Å線，9.1Å線，9.3Å線，9.6Å線（4.8Å線をともなう），11Å線（5.5Å線をともなう）がしばしば見られる。種種の形態の Al_2O_3 ゲルの存在を示すと推定できる。

普通の結晶性粘土鉱物は $Ca(OH)_2$ とは反応しないので，共存するゲル状体の識別手段として $Ca(OH)_2$ 処理方法は役立つと同時に，$Ca(OH)_2$—$CaSO_4$ による安定工法の適合性の可否を判定する手段としても有効である。

C_2ASH_8 を生成する土は関東，東北地方に多く，東海地方には少ない。軟弱土質および地すべり粘土でも C_2ASH_8 を生成するものはまれである。

今後さらに詳細な研究が必要である点にもふれた。

アロファン質粘土の消石灰−石膏による化学的安定処理方法に関する研究(6)

——消石灰−石膏による処理体の圧縮強度について——

(昭和39年3月)

有泉　昌*・牧　隆正**

まえがき　好ましくない土質を与えるアロファン質土中のアロファンは消石灰と反応して加水ゲーレナイトを生成し，また石膏の共存ではセメントバチルスを生成することはすでに第1報[1]および第5報[2]で報告した。この反応の結果アロファンの性質が変化し，それにともない土質も影響をうけることが予想される。実験によればこの反応のために強度が発生し，水中ではスレーキングしないことが確かめられた。ここでは消石灰および石膏をアロファン質土に添加した場合の強度発生の状況を実験的に明らかにし，関東ローム等の安定処理を行なう場合の諸条件等を求めた。化学的土質安定方法として意義のあることを認めた。なお簡単のために CaO を C，Al_2O_3 を A，SiO_2 を S，H_2O を H と略記する場合がある。

目　次

まえがき……(1)
1. アロファン粘土に消石灰を加えた場合のコンシステンシーおよび単軸圧縮強度について……(1)
〔1〕試料および実験方法……(1)
〔2〕実験結果……(2)
〔3〕実験結果の検討……(6)
〔4〕要　約……(7)
2. アロファン粘土に消石灰−石膏を加えた場合の単軸圧縮強度および室内CBR試験について……(8)
〔1〕試料および実験方法……(8)
〔2〕実験結果……(9)
〔3〕実験結果の検討……(9)
〔4〕要　約……(16)
3. 消石灰および石膏を添加したアロファン粘土モルタルの単軸圧縮強度について……(17)
〔1〕試料および実験方法……(17)
〔2〕実験結果……(17)
〔3〕実験結果の検討……(17)
〔4〕要　約……(20)
4. 消石灰および石膏処理方法に対するポルトランドセメントの併用または酸化鉄等の添加の効果および非アロファン質土への本方法の適用について……(21)
〔1〕試料および実験方法……(21)
〔2〕実験結果とその検討……(21)
〔3〕要　約……(24)
5. 結　言……(24)

1. アロファン粘土に消石灰を加えた場合のコンシステンシーおよび単軸圧縮強度について

〔1〕試料および実験方法

(1) 試　料

アロファン粘土としては次のものを用いた。

鹿沼土　市場で入手したもので，第1報で示す D_0 を分離した原土

味噌土　長野県飯島味噌土。長野県より送付。

福バン土　岩手県北上市東洋化成工場より送付。

立川ローム　東京都二子多摩川付近ローム層。

消石灰は試薬とし，微量添加剤としての Na_2CO_3，NH_4Cl, $CaCl_2$, $MgCl_2 \cdot 6H_2O$, NaOH, NaCl, $KMnO_4$, $CoCl_2 \cdot 2H_2O$, $KClO_3$, $BaCl_2 \cdot 2H_2O$ 等はいずれも試薬である。

(2) コンシステンシーの測定方法

コンシステンシーは JIS A 1205, 1206 により測定する。供試体は次のようにして造る。

風乾粘土に対し加える $Ca(OH)_2$ 量は 5, 10, 15, 20, 30%とし，添加混合した供試体の表面にわずかに水がブリードする程度の水量で十分ねりまぜる。ねりまぜた供試体は広口ビン中に入れて密封し，20℃で3日，7日，14日，28日間養生する。一部の試料については 80℃ とした。

(3) 単軸圧縮強度の測定方法

最適含水比が81%の立川ロームを風乾させる。この風乾土に $Ca(OH)_2$ を加える。$Ca(OH)_2$ の量は105℃ 乾燥

* 地質化学部長　工博
** 地質化学部化学研究室長

土に対しそれぞれ5，10，15，25，30%の割合とする。$Ca(OH)_2$ を加え十分混合した土に加える水の量は，乾燥土と $Ca(OH)_2$ の重量に対して原土の最適含水比の値とする。水を加えてから十分ねりまぜ，ハーバード小型締固め試験器用の型枠に40ポンドタンパーで各層25回ずつ3層につきかためる。脱型後20℃で湿気養生を行なう。養生期間は7日，14日，28日および60日とし，強度測定前24時間水中に浸漬する。3個の供試体の平均強度を求める。

なお，微量添加剤の影響を求める場合は $Ca(OH)_2$ が20%で，水は150%とし，添加剤の量は1%とした。

（4） X線回折

コンシステンシーの測定試料についてはX線回折実験を行ない，$Ca(OH)_2$ の消失と新しい固相の生成状況をたしかめた。X線回折には Geigerflex を使用した。

〔2〕 実験結果

$Ca(OH)_2$ の添加によるアロファン粘土の液性限界(LL)，塑性限界(PL)，塑性指数(PI)を表-1に示す。この表より LL および PL の変化の状況を図に示したものが，図-1および図-2である。またX線回折法を用いて反応生成物を検索した結果を表-2および図-3に示す。

これらの実験結果より次のことが知られる。

図-1に示すように LL は一般に $Ca(OH)_2$ の添加量の増加にともない増大する。しかし $Ca(OH)_2$ の量が10～15%では，5%の場合より低くい値を示すことがしばしば見られ，このような LL の谷が見られるのは立川ロームを除いて3日の初期には見られず，多くは7日および14日に顕著であり，28日に至るとこの傾向は小さくなるようである。この添加量の少ない範囲を除けば，15%以上の場合はほぼ添加量に比例して LL の増大が見られる。試料粘土によってもその行動はやや異なり，味噌土が最もその影響をうけやすく，鹿沼土，福バン土，立川ロームがこれにつぐ。材令との関係を見れば鹿沼土が3日で LL はいずれも最も小さいのであるが，7日，14日，28日では材令との間に定まった関係が見いだされがたく，一方福バン土および味噌土では3日より7日の方が LL が小さいが，以後規則的上昇が見られる。立川ロームでは，14日でいったん LL の低下が見られる。

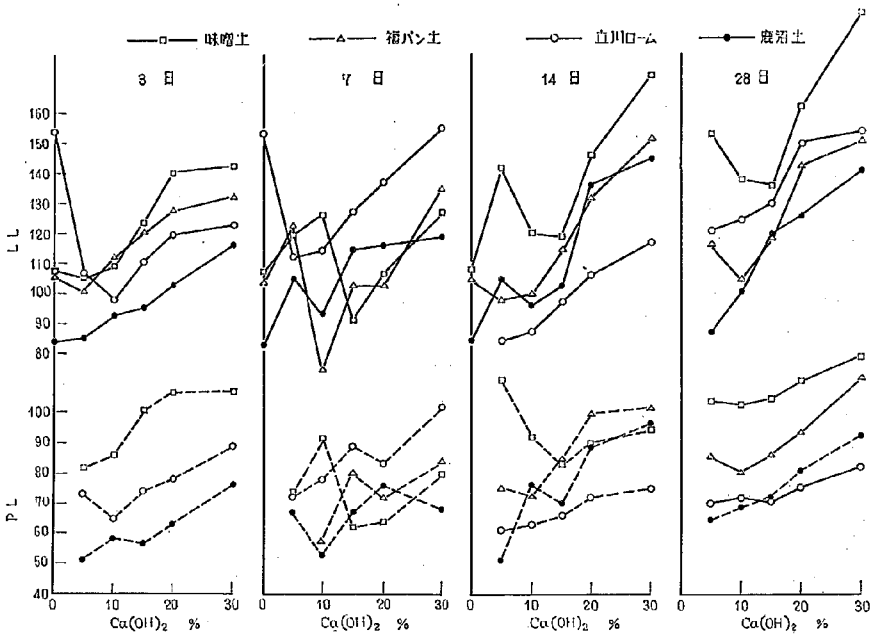
PL にも LL におけると同様な10～15%の辺に谷が見られ，PL の変化の傾向も LL の場合と大体同じであり，その変化の幅は LL の場合より小さい傾向が見られる。28日ではこの谷はほとんど見られない。しかし試料粘土別の行動の差は LL の場合より大きくなっており，たとえば，味噌土では3日の PL が最も大きく，立川ロームでは7日が最も大きく，PL の変化の幅は比較的小さい。

$Ca(OH)_2$ の添加により LL および PL の増加があるが，3日での PI は味噌土を除いて各粘土に関しては大きい変動は見られない。しかし7日以降は LL の方が PL より増加量が著しいため，一般には PI は増加し，味噌土の場合には最も $Ca(OH)_2$ 量に影響される。

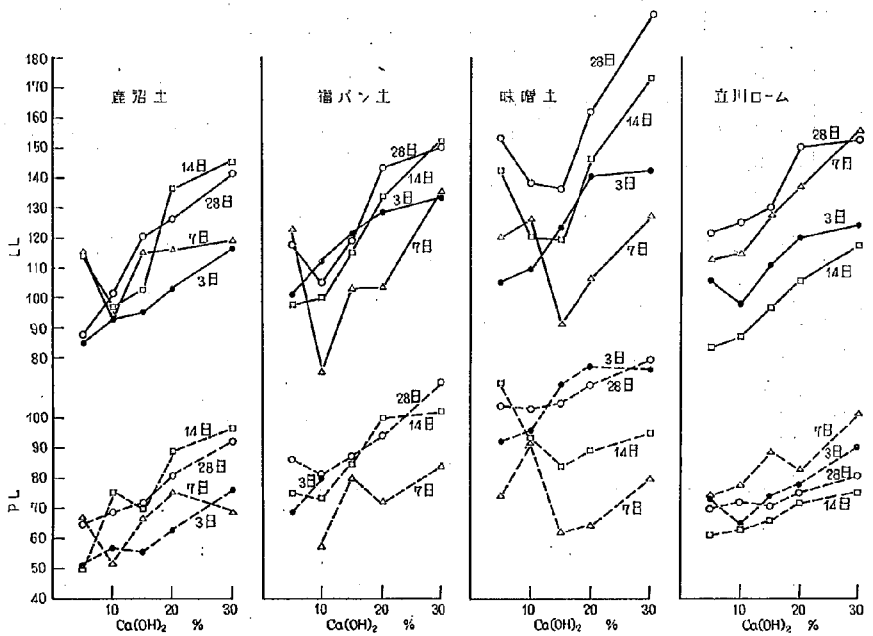
$Ca(OH)_2$ を添加した粘土中での結晶性物質の消長を示した表-2よりは次のことが知られる。すなわち，添加した $Ca(OH)_2$ は鹿沼土および味噌土が30%の添加量で3日でわずかに $Ca(OH)_2$ が認められる程度であり，その他の場合はすべて $Ca(OH)_2$ は X 線的には検出されない。C_2ASH_n は鹿沼土では3日で15%以上の $Ca(OH)_2$ 添加で痕跡的に認め，以後材令とともに明瞭となり，28日では10%添加の場合でも痕跡的に認めうる。福バン土は鹿沼土よりややおくれて C_2ASH_n を認め，味噌土は鹿沼土とほとんど同じであり，立川ロームは福バン土と大体同じと見られる。C_3AH_6 は鹿沼土の場合 C_2ASH_n とともに認めるが，材令が長くなればむしろ消失する傾向を有し，福バン土および味噌土の場合は30%の場合で7日のみ認めついで消失する。立川ロームの場合は30%の場合3日でも見られるが，その後も割合長時間残存する。その他の回折線は弱いものが多く見られ，また実験中での $CaCO_3$ の生成を防ぎえないため

表-1 $Ca(OH)_2$ の添加によるアロファン粘土のコンシステンシーの変化

試料		原土	3日					7日					14日					28日				
			5%	10	15	20	30	5%	10	15	21	30	5%	10	15	20	30	5%	10	15	20	30
鹿沼土	L. L	84	85	93	95	103	116	106	94	115	116	119	105	96	102	136	145	87	101	120	126	141
	P. L	63	51	57	56	63	76	67	52	67	76	69	51	76	70	89	97	65	69	72	81	92
	P. I	21	34	36	39	40	40	39	42	48	40	50	54	20	32	47	48	22	32	48	45	49
福バン土	L. L	106	101	112	121	128	132	123	75	103	103	135	98	100	115	133	152	117	105	119	143	151
	P. L	69	69	81	—	—	—	—	57	80	72	84	75	73	85	100	102	86	81	87	94	112
	P. I	37	32	31	—	—	—	—	18	23	31	51	23	27	30	33	50	31	24	32	49	39
味噌土	L. L	107	105	109	123	140	142	120	126	91	106	127	142	120	119	146	173	153	138	136	162	198
	P. L	67	92	96	101	107	106	74	92	62	64	80	111	92	84	89	95	104	103	105	111	119
	P. I	40	13	13	22	33	36	46	34	29	42	47	31	28	35	57	78	49	35	31	51	79
立川ローム	L. L	154	106	98	111	120	123	113	115	128	137	155	84	87	97	106	117	121	125	130	150	153
	P. L	58	73	65	74	78	89	74	78	89	83	102	61	63	66	72	75	70	72	71	75	81
	P. I	96	33	33	37	32	34	39	37	39	54	53	23	24	31	34	42	51	53	59	75	72



図－1 アロファン質粘土 $Ca(OH)_2$ 添加によるコンシステンシーの変化 （材令別）



図－2 アロファン質粘土 $Ca(OH)_2$ 添加によるコンシステンシーの変化 （粘土別）

表－2　$Ca(OH)_2$添加粘土中の結晶性物質の消長

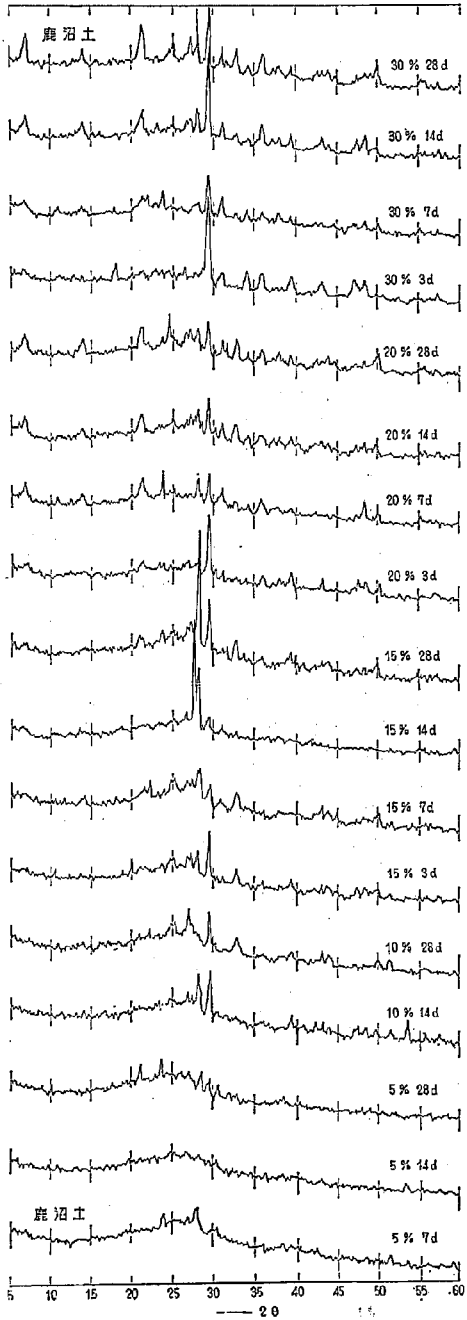
試料	材令 / $Ca(OH)_2$添加量 / 検出する結晶物質	3日 5%	3日 10	3日 15	3日 20	3日 30	7日 5	7日 10	7日 15	7日 20	7日 30
鹿沼土	$Ca(OH)_2$	——	——	−	−	+	−	——	−	−	−
	C_2ASH_n	——	——	tr	tr	tr	−	——	tr	+	+
	C_3AH_6	——	——	tr	−	tr	−	——	tr	+	+
	その他 (Å)	——	——	3.22 3.60 3.75	3.20 3.80	3.80 3.38	3.80 3.23	——	3.80 3.20 2.75	3.80 3.20 2.90	3.79 4.07
福パン土	$Ca(OH)_2$	−	−	−	——	——	−	−	−	−	−
	C_2ASH_n	−	−	−	——	——	−	−	−	tr	+
	C_3AH_6	−	−	−	——	——	−	−	−	−	tr
	その他 (Å)	−	−	−	——	——	−	−	+	+	+
味噌土	$Ca(OH)_2$	——	——	——	−	tr	−	−	−	−	−
	C_2ASH_n	——	——	——	tr	+	−	−	−	tr	++
	C_3AH_6	——	——	——	−	−	−	−	−	−	+
	その他 (Å)	——	——	——	3.77, 3.31 3.59, 3.15	+	−	−	−	−	tr
立川ローム	$Ca(OH)_2$	−	−	−	−	−	−	−	−	tr	−
	C_2ASH_n	−	−	−	−	tr	−	−	−	+	tr
	C_3AH_6	−	−	−	−	tr	−	−	−	tr	tr
	その他 (Å)	−	−	3.24	3.79	+	−	−	−	−	−

試料	材令 / $Ca(OH)_2$添加量 / 検出する結晶物質	14日 5	14日 10	14日 15	14日 20	14日 30	28日 5	28日 10	28日 15	28日 20	28日 30
鹿沼土	$Ca(OH)_2$	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−
	C_2ASH_n	−	tr	tr	+	++	−	tr	+	++	++
	C_3AH_6	−	−	tr	+	−	tr	tr	−	−	−
	その他 (Å)	−	3.18	3.26 3.19	3.80 2.90 3.20	3.21	3.80 3.16	3.59 2.70 3.35	3.20(S)	3.65 3.30 3.20	3.23 3.30 2.70
福パン土	$Ca(OH)_2$	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−
	C_2ASH_n	−	−	−	+	++	−	−	−	+	++
	C_3AH_6	−	−	−	−	−	−	−	−	−	tr
	その他 (Å)	−	−	3.62 3.30 2.75	2.95	2.88	−	−	2.03 +	2.88	+
味噌土	$Ca(OH)_2$	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−
	C_2ASH_n	−	tr	−	+	++	−	tr	tr	+	++
	C_3AH_6	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−
	その他 (Å)	−	tr	tr	−	−	−	−	−	3.30 3.20 2.75	2.90 9.8
立川ローム	$Ca(OH)_2$	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−
	C_2ASH_n	−	−	−	−	+	−	−	tr	+	+
	C_3AH_6	−	tr	−	−	+	−	−	−	−	tr
	その他 (Å)	3.23 3.38	3.38 1.88	3.38	3.38 3.19	3.40 3.22	3.38	+	+	+	−

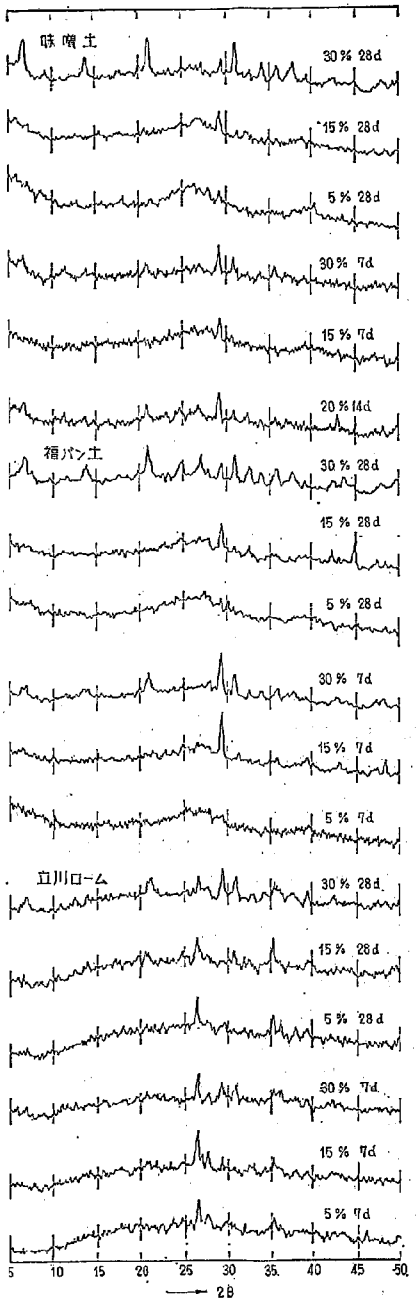
tr：痕跡を認める。　　−：存在を認めない。

＋：存在を明瞭に認める。　　——：実験を実施しない。

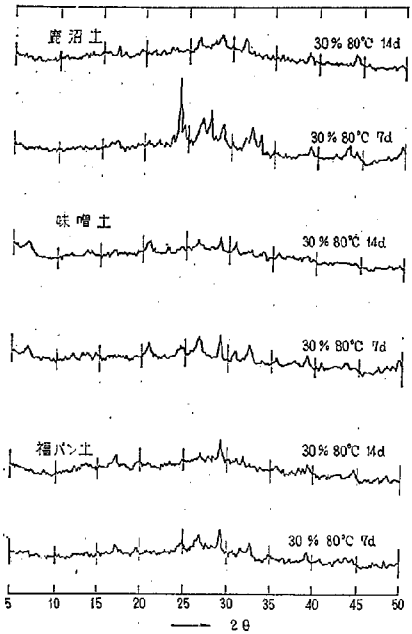
＋＋：存在を明瞭鮮明に認める。　　数字：主な回折線の値。



図－3(a)　アロファン粘土一消石灰との反応生成物のX線回折



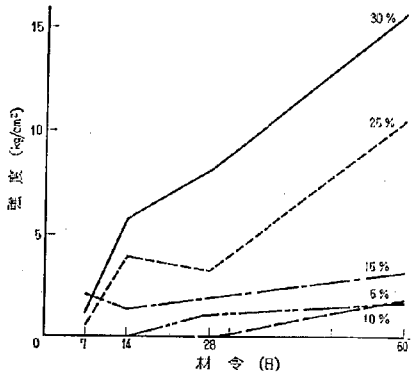
図－3(b)　アロファン粘土一消石灰との反応生成物のX線回折



図－3(c)　アロファン粘土―消石灰との反応生成物のX線回折

に $CaCO_3$ と明瞭に区別しがたい回折線も見られ，C_2ASH_n，C_3AH_6 および $CaCO_3$ と区別できる回折線を確認しがたい場合が多い。鹿沼土では 3.80Å，3.60Å，3.20Å，2.70Å 線等が明瞭に見られる場合が多く，特に7日以降にこの傾向が大きいのであるが，この粉末線が何によるかは現在明らかでない。福バン土では3日ではこれらの粉末線を認めず，7日では $Ca(OH)_2$ 量の多い側で認め，14日では明瞭となる。この粉末線を生じるものは不明である。味噌土では3日で $Ca(OH)_2$ 量の多い場合に明瞭に見られるが，以後は著しく弱くなる。立川ロームでは14日の場合特に明瞭である。

なお，80℃で $Ca(OH)_2$ を30%添加量のものを3日，7日，14日養生した場合のX線粉末線より生成物を推定すれば，鹿沼土の場合は7日および14日で C_3AH_6 を認め，3日では認めず，福バン土の場合は3日で C_3AH_6 と C_2ASH_n の共存を認め，7日に至れば C_2ASH_n は消失し C_3AH_6 が残り，味噌土の場合は3日および7日まで C_3AH_6 を認めずに



図－4　$Ca(OH)_2$ 添加アロファン粘土（立川ローム）の圧縮強度

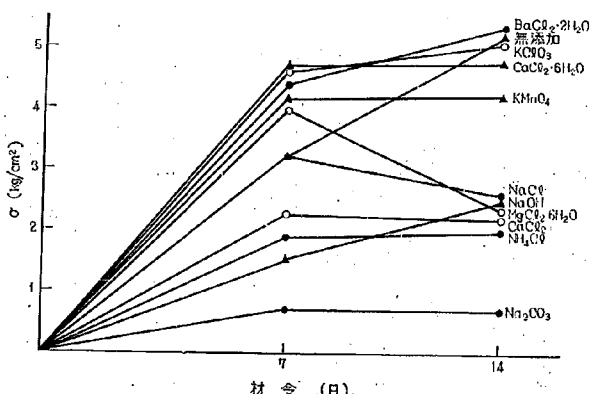
C_2ASH_n のみ認め，14日に至り両者を認める。また各粘土について不明の鉱物を認めるが，それらは材令とともに消失すると考えられ，その粉末線は3.60，3.31，3.20，3.06，2.75，2.28，2.07，1.83Åで示される。

$Ca(OH)_2$ を添加して締固めた供試体の圧縮強度を図－4に示す。この結果からは $Ca(OH)_2$ の添加により強度がえられ，$Ca(OH)_2$ の添加量が15%では，強度は小さいことが見られるが，この供試体は水中ではスレーキングしないことを確かめた。

微量添加剤の影響については図-5に示す。

〔3〕 実験結果の検討

$Ca(OH)_2$ の添加により土の安定をはかることは今まで多くの報告[3),4),5),6),7,8),9),10)]がある。$Ca(OH)_2$ の使用方法はソイルセメントにおけるセメントと同様に最適含水比で締固めることを原則とし，また少量の $Ca(OH)_2$ の添加により粘性土の粘着性を減少させる効果を利用し，また $Ca(OH)_2$ のポゾラン反応も考えられている。



図－5　微量添加剤の強度発生に対する効果（$Ca(OH)_2$ 20%　含水比 150%）

なお，$Ca(OH)_2$ の反応は徐徐に進み相当期間の後に効果が見られ，しかも $Ca(OH)_2$ の量には適量が存在するとされている。これらの研究では土質試験の結果により論じられているが，化学反応の機構についてはほとんど論じられていない。

本実験では $Ca(OH)_2$ の添加量または材令で，LL および PL は複雑に変化しているが，一般的には $Ca(OH)_2$ の添加量の多い方がこれらの値は大きい。Clare[6] 等は LL は $Ca(OH)_2$ 量との間に直線的関係はなく，ある添加量の場合に最大値のあること，材令とともにこの最大値を与える $Ca(OH)_2$ 量は大きくなることを見いだしている。また PL は $Ca(OH)_2$ 量とともに漸次大きくなっており，PI は材令とともに小さくなる。しかし，Clare の実験は $Ca(OH)_2$ 量の比較的少ない範囲であり，本実験のようにアロファン粘土について石灰量の特に多い場合では当然異なるであろう。Clare は初期には $Ca(OH)_2$ の収着があり，長期に至たりポゾラン反応により粒子間の結合が起こるためと考えている。

本実験の場合の LL および PL の変化を X 線回折の結果を考慮して考えて見れば，まず反応 3 日で $Ca(OH)_2$ を認めないので，$Ca(OH)_2$ は大部分がすでにアロファン粘土と反応して収着体を造っていると考えてよく，この収着体からは収着 CaO 量が多くないので C_2ASH_n の結晶化はおそいと考えるべきである。材令 3 日では LL および PL の増加は $Ca(OH)_2$ 量に比例した関係が見られるのは，収着によりアロファンの表面積の増加および表面に保持される水の膜が厚くなるためであろう。ついで 7 日および 14日で LL および PL に $Ca(OH)_2$ 量が10～15%の範囲で谷が見られることは，収着体内で徐徐に結晶化が起こり始め，表面積の減少と表面に配位される水の膜がうすくなるためと考えられる。この間 C_2ASH_n 等以外の結晶性物質が生成することもその原因となろう。$Ca(OH)_2$ 量が多いと LL，PL が高いのは C_2ASH_n の生成が早いためであろう。さらに長期に至るとこの谷が浅くなるのは C_2ASH_n の生成のために，粒子間に付着力が生じるためである。したがって，LL および PL は複雑な行動を示すが，その機構は収着体の生成，それよりの結晶性物質の生成と，そのための粒子間に生成する付着力に起因し，それらの反応速度や付着力の大きさは，収着された CaO 量または使用されたアロファンの構造，さらに粘土中のアロファン含量等により決定されたためであると考えて説明が可能となる。たとえば味噌土の構造が比較的規則性をもたないことは 80℃養生の場合 C_2ASH_n がはじめ生成することより知られるように，活性のあるアロファンの含量が多いためである。

X線回折の結果および前節で論じた結果と X線回折の結果とを考慮すれば，コンシステンシーと反応過程との相関性を理解できる。またやや C_2ASH_n の生成時間がおくれるが 20℃ では C_2ASH_n の生成を，80℃では C_3AH_6 の生成を認め，既報の $Ca(OH)_2$ 溶液との反応と同様であることを認めた。この反応は粘土と $Ca(OH)_2$ 混合体中に存在する水を通して行なわれると考えられる。さらに $Ca(OH)_2$ の消失が意外に早く見られることは，混合体中の $Ca(OH)_2$ 量と水量の多小とに関係があることを示すものであり，実際使用上の問題に関連する。

LL と PI の関係を示す塑性図では，アロファンは一般に "A" 線より下方にあり，本実験の結果ではいずれも "A" 線の下方にあり，必ずしも Clare 等の述べるように PI の低下が見られない。すなわち $Ca(OH)_2$ 処理により粘性が低下して粘性土の混合などが容易になる等のことは期待できない。

最適含水比で締固めた立川ロームの圧縮強度は，図-3 で明らかなように $Ca(OH)_2$ 量が 10%以下では余り効果は期待できない。$Ca(OH)_2$量が25%または30%となると 14日で 3.6kg/cm² または 6 kg/cm² の強度を発生し，60日では 11kg/cm² または 16kg/cm² と長期になるにしたがい強度の増進は著しい。これら処理粘土は X線回折によれば C_2ASH_n が生成していることが認められるので，強度の発生は C_2ASH_n の生成に関連している。すでにのべた[1] ようにアロファンと $Ca(OH)_2$ が反応すれば H_3O^- は減少し，H_3O^+ は増加する。したがって反応によって結合水が増加するのであり，水の存在量がむしろ望ましく，また水の量が多い方が $Ca(OH)_2$ の溶媒として作用する点から望ましい。このように水の量が多く存在することが好ましいことは，自然含水量の多いアロファン質粘土等の処理に適当していることを示すものである。水量の問題については次の2〔1〕において論じる。

なお，円筒内に立川ロームを適当につきかためておき，この上に $Ca(OH)_2$ 乳液を置き10日くらいの後にとり出し，水中に放置してもスレーキングしない。さらにバットに土を入れ，この中に $Ca(OH)_2$ の柱を立て，表面に $Ca(OH)_2$ 乳をおき放置すれば，柱の周辺部は硬化する。これらの硬化した部分には X 線回折によれば C_2ASH_n が生成していることを認めた。

また，微量添加剤により強度の増進を計ることを目的として，約 10 種程の塩類を約 1 % 添加した結果では，特に有効なものは見い出しがたかった。しかしながら，さらに今後の探索によっては有効な塩類等を見い出しうることが予期される。

〔4〕 要　約

アロファン質粘土に $Ca(OH)_2$ を混合添加すると，少なくも 3 日の内には $Ca(OH)_2$ は混合体中より消失し，7 日頃より徐徐に C_2ASH_n の生成が見られる。これらの反応にともない，$Ca(OH)_2$ 添加土のコンシステンシーは変わる。初期には $Ca(OH)_2$ の収着体の生成のた

めにLL，PLは増加し，時間が経過して結晶化が起こるとそれにともない低下し，さらに時間が経過して結晶化により結合力が生じればふたたび増加する。アロファン質粘土の種別，添加される $Ca(OH)_2$ 量等により反応速度が異なり，コンシステンシーの変化の状況は複雑に見える。アロファン粘土は $Ca(OH)_2$ の添加混合により塑性の減少は見られない。

アロファン粘土は $Ca(OH)_2$ の添加混合により徐徐に強度を発生し，30%くらいまでの添加量ではその量の多い方が強度は大きい。立川ロームの場合は15%以下では余り期待できない。またこの反応の性質上水量の余り少ないことは望ましくない。

また，この反応の促進剤としての有効な無機塩類は今までは発見できなかった。

2. アロファン粘土に消石灰—石膏を加えた場合の単軸圧縮強度および室内 CBR 試験について

1.で関東ロームの内でも特にアロファン性の強い立川ロームをもふくめたわが国の代表的アロファン粘土に消石灰を加えたとき強度が発生することをのべた。一方，すでにアロファン—消石灰溶液で $2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2 \cdot nH_2O$ が生成し，石膏 ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) 溶液の共存でセメントバチルスが初期に生成することは第1報および第5報でのべた。この反応を利用すれば，バチルスが多量の水を固定することに関連して初期強度と強度の増加が予期される。ここでは消石灰量，石膏量，水量の強度におよぼす影響を確かめるための実験結果をのべる。また実際に使用する場合の材料を考慮して工業用石灰または肥料用石灰，さらに各種副産石膏についても検討する。

なお，バチルス生成にともない膨張が予想されるのでその程度をも測定した。

〔1〕 試料および実験方法

試料として用いた立川ロームは二子多摩川台地のものであり，代表的な立川ロームとみなされており，X線回折によってもアロファンと考えられる。これらのローム試料は風乾後 350μ フルイでふるう。試料の最適含水比は81%である。

添加材である $Ca(OH)_2$ は試薬を用い，X線回折では炭酸石灰を検出しないものである。石膏はセメント用に用いる天然二水石膏を粉砕したものである。なお消石灰の品質の影響を確かめるために，工業用および肥料用消石灰をも使用し，石膏の型態の影響を確かめるために副生石膏も使用した。副生石膏としては，製塩石膏 (SO_3: 55.4%，H_2O: 3.7%)，弗酸石膏 (SO_3: 55.6%，H_2O: 4.3%) リン酸石膏，天然無水石膏および規格外天然二水石膏 (SO_3 として23～25%のもの3種) を用いた。X線回折の結果では製塩石膏および弗酸石膏は主として無水型であり，リン酸石膏は二水型であり，天然無水石膏は Anhydrite である。これら石膏の粉末度，または一部試料を除いては品位の測定等は実施していない。

実験方法は次のようである。

風乾試料土と添加材をハチで3分間十分に混合し，所定の水量を加えてさらに3分間ねりまぜ，径 5 cm 高さ 10 cm の円筒型枠に2層につめ，各層は突き棒で均一につきかためる。湿気箱中で24時間（脱型できないときは24時間以上）放置したのち，盛り上げ部を削り去り脱型する。これを水を張った20℃恒温密封容器中で材令前日まで養生する。強度試験を実施する場合は，その前に24時間20℃の水中に浸漬する。強度は3個の供試体についての平均値とする。なお，ねりまぜ後その一部についてセメント試験に準じフローを測定した。

添加材の添加量は乾燥土（110℃で18時間乾燥し重量一定としたもの）に対し，$Ca(OH)_2$ 量をそれぞれ10, 20, 25, 30%とし，石膏もそれぞれ2，4，6，8，10，12，16，20%とする。水量は原土の液性限界である133%のほか150%を選ぶ。

なお，工業用消石灰，肥料用消石灰の比較，または，石膏の種類を変えた場合には配合量は次のようにした。ただし，工業用および肥料用消石灰をそれぞれ L_1 および L_2 とし，石膏は G とする。含水比は試料粘土に対する値で130%および150%とする。材令は3，7，14，28日とする。

L_1—G：20—15, 20—10, 20—5, 15—12, 15—8, 15—5

L_2—G：〃 〃 〃 〃 〃 〃

低品位石膏の場合は試薬の消石灰とし，L—G として 20—15，15—10とする。

なお，石灰および石膏はその品位にかかわらず，そのまま乾燥土に対する配合割合とする。

室内 CBR 試験は JIS A 1211 による。最適含水比の場合は3層につめ各層55回つきかためた。このほか最適含水比以上の水量としては130，140，150，160および170%の水量を選ぶ。水量多くつきかための不可能の場合は型枠中に流し込む程度とする。$Ca(OH)_2$ は乾燥土に対し20%となるようにし，天然二水石膏は15%となるよう配合を定めた。供試体は型枠とともに20℃の水中に浸漬したり，また20℃の恒温室（湿度70--80%）中に放置する。材令は4日および14日とする。

膨張量の測定には JIS セメントモルタル強度測定用の型枠を用いた。$Ca(OH)_2$ の配合量を20%とし，石膏配合量は5，10，12，15，20%とし，含水量は130%および150%とする。配合物をよく混合して型枠中で成形時に乳白ガラス片を供試体の両端に埋め込む。24時間湿空中に放置して脱型し直ちた基長を求める。以後20℃で水中養生を行なったり，20℃で恒温室中で湿度約80%で非水浸養生を行なう。長さは20℃，湿度70～80%の恒温

室で，技術協会型コンパレーターにより測定する。材料は2，3，7，14，21 および 28日とする。

一軸圧縮強度測定試料について，その中心部から少量の試料をとり，X線回折法により結晶性物質の消長を確かめた。X線回折には Geigerflex を用い，対陰極は銅とし次の条件で回折線を求めた。

Scale Factor 16, Time Constant 4, Multiplier 1, Scanning Speed 2°/min, Chart Speed 1 cm/min, Slit 1°—1°—0.4mm, 30KV, 15mA

〔2〕 実験結果

消石灰および石膏の配合量，含水比，材令と単軸圧縮強度およびフロー等の測定結果を表-3 に示し，これらの値から求めた配合と強度または材令の関係を図-6（A）および図-6（B）に示す。

室内 CBR 値と水量との関係は図-7に示す。

膨張収縮量の測定結果は図-8，9に示す。

工業用消石灰および肥料用消石灰を使用し，各種副生石膏を使用した場合の単軸圧縮強度を 図-10～14 に示す。

X線回折結果では7.7 Å 線および4.29 Å 線で $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ を，4.93Å 線で $Ca(OH)_2$ を，9.8Å 線および 5.7Å 線でセメントバチルスを，12.8 Å 線で $2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2 \cdot nH_2O$ を表示するものとして結晶性物質の消長を求めて表-4 に示す。$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 8H_2O$ は $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ の 7.7 Å 線と重なるので 4.29 Å 線の強度から推定する。これら結晶性物質の存在量は回折線の見かけの強度で概算推定した。

〔3〕 実験結果の検討

（1） 圧縮強度と配合割合，含水比および材令との関係について

図-6 に見られる圧縮強度と材令の関係より見れば，水量が液性限界で $Ca(OH)_2$ 量が10%の場合には7日強度の増加はほとんど見られず，14日では添加 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ の多い方が強度の増加が見られ，$CaSO_4 \cdot 2H_2O$ を添加しないものに比してその効果は顕著に見られる。しかし28日に至たれば強度はむしろ減少する。$Ca(OH)_2$量が20%になれば7日強度の増加は明瞭に見られ，$CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 量が 10% 以上では14日の強度の増加は確実であり，ただしそれ以後は強度の低下の傾向が見られる。$Ca(OH)_2$量が25%では20%の場合と同様であるが，$CaSO_4 \cdot 2H_2O$ の添加量の少ない側では強度の着実な増加が見られる。$Ca(OH)_2$ 量が 30% に至ると材令が長くなる

表-3 立川ロームに $Ca(OH)_2$，$CaSO_4 \cdot 2H_2O$ を加えた場合の圧縮強度

水量 (%)	$Ca(OH)_2$量 (%)	材令 (日)	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$量 (%) 2	4	6	8	10	12	16	20
133	10	7	0.6(155)	1.1	1.6(149)	1.6	1.2(168)	1.1	0.8(163)	0.8(155)
		14	0.6	1.1	3.3	5.4	8.4	7.7	5.5	4.9
		28	0.7	0.9	1.9	1.8	3.0	1.0	1.5	1.3
	20	7	4.1(186)	1.3	3.0(158)	4.8	1.8(154)	6.8	5.2(134)	10.9(136)
		14	5.5	3.1	3.3	5.7	9.5	15.6	16.8	18.5
		28	1.5	1.8	1.7	3.9	6.5	17.0	22.2	16.5
	25	7	2.9	1.7	1.2	1.6	2.5	4.6	7.1	7.0
		14	4.4	3.3	4.8	6.5	7.1	12.1	14.9	17.2
		28	6.1	6.2	7.7	9.0	9.1	10.5	11.0	12.8
	30	7	6.0(148)	2.6	3.3(159)	7.4	5.5(157)	8.0	8.9(149)	12.0(148)
		14	8.2	5.4	7.3	9.3	10.3	10.2	13.2	17.5
		28	8.3	5.2	8.2	9.7	12.6	10.6	23.5	16.5
150	10	7	0.3(245)	1.2	3.1(223)	2.3	1.9(210)	2.2	2.6(196)	1.6(186)
		14	0.3	1.4	2.0	5.4	2.4	2.2	2.3	2.1
		28	0.5	1.3	1.8	2.3	2.4	2.2	2.0	1.4
	20	7	1.0(194)	1.1	2.3(196)	2.3	6.1(198)	10.4	15.1(190)	26.6(194)
		14	0.8	3.4	3.4	3.4	6.7	8.5	10.8	15.3
		28	1.4	1.0	1.7	3.4	7.8	5.8	11.9	14.5
	25	7	4.8	1.3	2.2	4.5	3.3	7.7	11.2	16.1
		14	4.7	3.4	2.5	4.9	7.4	7.6	11.8	21.3
		28	4.0	2.2	2.5	4.2	5.7	6.3	9.8	12.9
	30	7	7.5(174)	2.8	2.3(187)	3.3	2.7(193)	5.5	8.5(185)	10.4(188)
		14	8.0	4.0	2.9	3.5	4.9	6.1	6.9	13.2
		28	3.5	2.1	2.0	2.9	3.6	3.6	4.7	15.2

備考：（ ）内はフロー値 (mm)

表－4　$Ca(OH)_2$—$CaSO_4 \cdot 2H_2O$処理立川ローム層中の結晶性物質の消長

水量 (%)	$Ca(OH)_2$ (%)	材令 (日)	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$量 (%) 2	4	6	8	10	12	16	20
133	30	7	–	–	–	–	B(tr)	–	B	B,C(tr)
	〃	14	B(tr)A	–	–	–	B(tr)	–	–	B,A(tr)
	〃	28	H	H,B(tr)	–	–	B(tr)	A(tr)	B	BB,A(tr)
	25	7	H(tr),A(tr)	–	–	–	A(tr)	–	–	B
	〃	14	–	no	–	–	no	–	B	no
	〃	28	A	–	–	–	no	–	–	G(tr)
	20	7	–	no	–	–	no	–	B(tr)	B(tr) G(tr)
	〃	14	no	–	B	–	B	–	no	–
	〃	28	–	B(tr)	B(tr)	–	B(tr)	B	B,A,H	B,B,G
	〃	60	–	–	–	–	–	B	–	B,B
	10	7	–	–	B(tr)	–	B(tr)	–	G B	G B
	〃	14	–	–	–	–	–	–	–	G B
	〃	28	–	B(tr)	–	–	B(tr)	–	–	G,B, A
150	30	7	–	no	–	–	no	–	no	no
	〃	28	–	A	–	–	B	–	–	B
	25	28	–	–	–	–	B	–	–	B,B
	20	28	H	B(tr)	B	B	B	B,H(tr)	B	B,B H(?)G(?)
	10	28	G,B	–	B	–	–	–	–	G

（備考）B：セメントバチルス　C：$Ca(OH)_2$　tr：痕跡
G：$CaSO_4 \cdot 2H_2O$　H：C_2ASH_n
A：$C_4AH_{13}(C_3AH_6)$　no：粉末線をほとんど認めず。

ときの強度の低下はほとんど見られないようになる。この実験結果からは $Ca(OH)_2$ 量が少なくも20%以上が必要であり，$CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 量が10%程度以上で10kg/cm²程度以上の強度がえられる。$Ca(OH)_2$ 量が25%程度以上であれば $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ は10%以下でも強度の増進に有効である。

水量が150%の場合は，$Ca(OH)_2$ が10%では $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ の効果はほとんど見られないし，$Ca(OH)_2$ 量が20%では7日で $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 添加の影響は認められ，少なくも10%以上の添加が望ましく，材令とともに強度の低下が見られる。$Ca(OH)_2$ 量が25%では材令とともに強度の低下は余り見られないが，30%では強度の低下が見られる。

水量が133%と150%の場合を比較すれば，水量の少ない方が強度は大きいことが示される。

図－6は圧縮強度と $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 量の関係を主として示す。水量が133%では $Ca(OH)_2$ が10%のときは $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ の添加はほとんど効果はない。7日では10%以上で $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ の添加とともに強度が順次大となり，14日では4%以上の添加とともに強度が順次大となり，28日でも同様であるが，4%のときの強度がすでに14日の場合より大きいので，強度の増加割合はそれほど大きくはない。材令が長いほど $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ の添加量が少なくて効果が認められる。いずれの場合も $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 量が2%の方が4%よりも強度が大きい傾向が見られる。水量が150%の場合も大体同様な傾向を示す。

$Ca(OH)_2$ の量は20%以上でないと強度は期待できない。20%以上の場合には，水量が150%のとき $Ca(OH)_2$ 30%でやや強度の低下が見られるが，特に $Ca(OH)_2$ 量に顕著に関係はしないと考えられる。

これらの実験結果より考えられることは，アロファン粘土は，アロファンの含量またはアロファンの構造の程度によっても差はあるだろうが，$Ca(OH)_2$ 単独で処理するときよりも $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ を添加した方が強度は大となり，特に初期強度を期待できる。$Ca(OH)_2$ の添

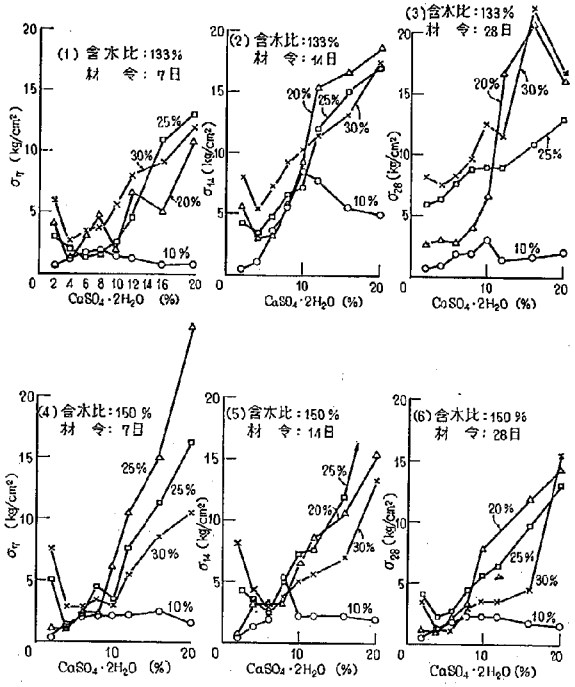


図-6 (A)　圧縮強度と配合，材令との関係

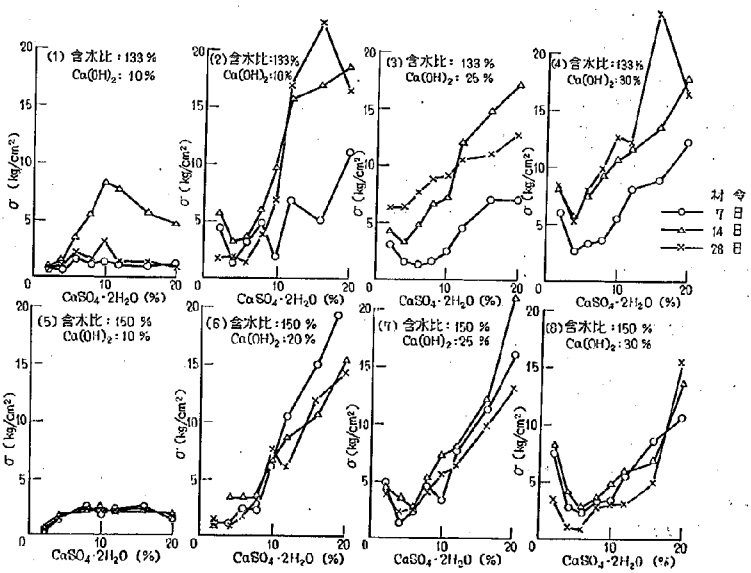


図-6 (B)　圧縮強度と配合，材令との関係

加量が10%程度では 1 kg/cm² 程度のわずかな強度で水中でスレーキングしない長所はあるが，強度の増加が見られない。20%程度以上で $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ を10%以上含有させれば，液性限界程度の水量またはその10%程度増の水量でも，7日で 5 kg/cm² 程度の圧縮強度を与え，さらに材令とともに強度の低下の見られる場合もあるが，14日以後には余りこの現象は見られない。特に水量の少ない場合とか，$Ca(OH)_2$ または $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 含量の大きい場合には強度の低下は見られがたい。水量の増加とともに，より強度の低下は見られるが，セメント等に見られるほど水量に対し敏感であるとは考えがたい。

一般に $Ca(OH)_2$ の添加により土の安定を計る実験では，$Ca(OH)_2$ の量が余り多量には使用されていないし，$CaSO_4 \cdot 2H_2O$ の共存の効果は試みられていないのであるが，この実験によって $Ca(OH)_2$—$CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 系の添加の有効性を知ることができる。元来関東ロームを始めアロファン質粘土は，その自然含水比が高かいためにソイルセメントの場合に，その混合に困難をきたしているのが実情である。しかし，この方法では自然含水比よりも高い水量をむしろ与えて，添加土を混合しうる点が長所であり，workability を与える程度に水量が相当高かくても，ある程度の強度を期待しうるし，混和土が水中でスレーキングしない長所をもっている。

液性限界の含水比の粘土に乾燥土に換算して $Ca(OH)_2$ を20%以上，$CaSO_4 \cdot 2H_2O$ を10%以上加えてもフロー値は 150mm 程度であり，液性限界値の10%増程度の含水比の場合でも同様の添加材の量でフロー値は 180 mm 程度であり，たとえばコンクリートミキサー等を使用すれば，添加材との混合は十分容易と判断される。

なお，関東ロームのセメントによる安定方法については竹下[11]等の研究がある。竹下等によれば関東ロームにポルトランドセメントを20%(内割)加え，最適含水比でしめかためたものの7日の圧縮強度は 14kg/cm² であり，最適含水比より10%多量の水では急激に低下して 5 kg/cm² 程度の圧縮強度となる。石灰と石膏を添加するこの方法では，最適含水比の約2倍の水量でも $Ca(OH)_2$ 20%，$CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 15%の添加で約15kg/cm² 程度の圧縮強度をうることができる。含水比の増加に対し強度の低下は著しく鈍感であることが重要な特長である。

土がセメントにより安定化されるためには，セメントと土が十分混合される必要があるので土のコンシステンシーに限度がある。HRB で規定する所では，ソイルセメントが経済的であるためには液性限界が40以下で，塑性指数が18以下であることを要する。アロファン粘土は自然含水比が大きく，液性限界および塑性指数も大きいので，セメントによる安定処理の対象とはなりがたく，たとえば関東ローム等は単独ではソイルセメントの対象とはなっていない。$Ca(OH)_2$ および $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ の添加によりアロファン粘土の安定処理を行なう場合，最適含水比でなくてむしろ含水比を大きくしてフロー値が見られる程度の水量でも，相当の強度を期待することができる。このことはソイルセメント工法を実施できない関東ローム等の処理を可能とするものである。

なお消石灰および石膏はポルトランドセメントの約6割程度の価格であり，また化学工業の副産品である場合はさらに低価格を期待できるであろう。

(2) 硬化体中の結晶性物質のX線回折による消長について

$Ca(OH)_2$ は7日では水量 133%の場合にわずかに見られるほかは一般には認められない。石膏についても同様であり，$Ca(OH)_2$ 量が10%程度で少なく，一方石膏量が16%以上の場合は石膏の残存はX線的にも認めうる。このように添加した $Ca(OH)_2$ および $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ がX線的には比較的早く消失しても，新しい結晶相は明確には認められない場合が多い。7日では石膏量が多いときはバチルスの生成が見られ，材令が大きくなるとバチルスは明瞭となる。また $Ca(OH)_2$ 量が一定であれば $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 量が多い方がバチルスは明瞭に見られる。石膏量の特に少ない場合は C_2ASH_n が生成したり，また，C_3AH_3 の生成も見られるが石膏量が増加し始めると，バチルスが生成しはじめる。さらに石膏が増加すればバチルスは増加の傾向があり，10%以上になればバチルスの量とともに結晶度もよくなると考えられる。強度と石膏量の関係については強度の谷が見られたが，低石膏側で C_2ASH_n または C_3AH_3 が生成し，高石膏側ではバチルスが生成することに関連すると思われる。$Ca(OH)_2$ はもちろん $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ も消失し，しかもX線的にはなんら結晶性物質が認められなくても強度の発生は認められ，バチルスが痕跡程度に見られる場合はそれ程強度の発生が見られず，バチルスの明瞭な回折線が認められる場合は一般に強度が大きい傾向が見られる。強度はバチルス生成の状況と関係があることが考えられる。

$Ca(OH)_2$ 消失はアロファンによる収着反応に見られたことであり，$CaSO_4 \cdot 2H_2O$ の消失も同様にアロファンによる収着と考えられる。アロファンはある程度以上のCaO を収着せねば C_2ASH_n を生成しないことはすでにのべたところであり，$CaSO_4 \cdot 2H_2O$ もある程度以上を必要とすると考えられるが，$Ca(OH)_2$ の場合よりも相当少量でもバチルスの生成にはさしつかえないと判断される。バチルスが生成される場合バチルスとして固定される石膏と消石灰の重量比で約2.7であり，$Ca(OH)_2$ はアロファンにさらに収着されるので，固定された石膏と消石灰の重量比はさらに小さくなるべきであろう。したがって $Ca(OH)_2$ が10%くらいでは $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ が20%にも達すると当然 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ は反応しない状態で存

在することが予想され，この実験結果からもこの点は明らかである。この反応では $Ca(OH)_2$ と $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ の量の間に最適の量的関係があると想定されるが，経済性も考慮されねばならず，今後の問題として残す。

（3） CBR 値について

舗装の設計では路床路盤の支持力として CBR 値を問題とする。ここでは消石灰と石膏で処理した関東ロームの CBR 値について検討する。

図-7 は含水比を異にする立川ロームを種種の配合で消石灰および石膏で処理した場合の CBR 値を示す。この図で明らかのように液性限界よりも相当に高い含水比でもこの処理により十分の CBR 値を示す。しかも含水比に対し CBR 値は著しく鈍感である。また，CBR 値は含水比の特に高い場合は水浸および非水浸でも影響されず，さらに材令 4 日でも14日でも余り関係はない。すでに記した竹下等の研究では最適含水比でしめかためた関東ロームは，その含水比を最適含水比より10%増加させれば，CBR 値は急激に低下することを示している。たとえば，セメント量20%，材令 7 日で最適含水比で CBR 値が92であるのに対し，最適含水比の 10%増の含水比の場合は45となる。消石灰および石膏で処理する場合は，最適含水比の約60%増の液性限界の含水比でも45程度の CBR 値を与える。また，竹下等の研究では最適含水比68%の関東ロームで含水比が80%となるようにして，これにセメントを 5，7.5，10，15，20% 添加し，締固め効果のよくないソイルセメントの CBR 値および単軸圧縮強度を測定している。その結果によれば，セメント量20%で 4 日水浸および14日の CBR 値はそれぞれ 5.8 および 13.8 であり，材令28日でも 15.8 である。このように含水比を最適含水比の約20%増し程度ですでに CBR 値の低下は顕著となる。消石灰および石膏を使用する場合は含水比が 150% でも CBR 値は 30 程度であり，ソイルセメントに対しこの方法はより有利と考えられる。なお関東ロームによるソイルセメントの単軸圧縮強度と CBR 値の間に直線関係の存在も竹下等により認められており，消石灰および石膏を使用する本方法の場合に同様の関係があるか否かは実験していない。しかし，同一 CBR 値では消石灰石膏法の方がソイルセメントより相当高い圧縮強度を与えることを認めうる。

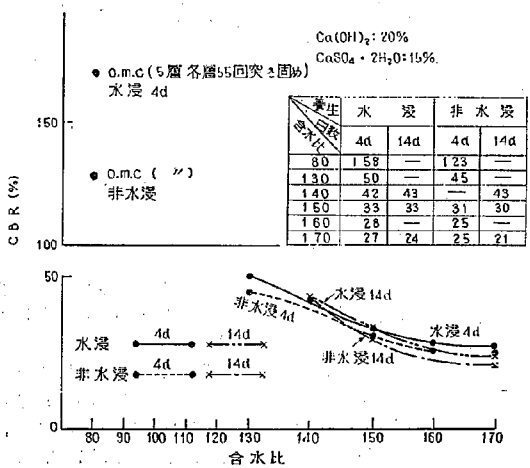


図-7 CBR 値と含水比との関係曲線

（4） 膨張および収縮量について

土に安定処理を加える目的は土に支持力を与えることであるが，処理の結果としてもまた処理体が環境の変化のためでも，その容積に変化の起こらないことが望ましい。ここでは消石灰と石膏で処理した供試体の水中養生および湿度80%での非水浸養生時の供試体の長さ変化を求めた。図-8，9 に示す測定結果によれば，水中養生の場合はいずれも膨張を示し，材令および配合割合で膨張量に顕著な差は認められない。膨張量は大体 0.3%以下である。また供試体の含水比が130%と150%の場合でも膨張量には大した差は認められない。ソイルセメントの場合は含水比が大きくなれば膨張量は減少し，また，セメントペーストの場合は材令とともに膨張量は増加するのが一般である。消石灰および石膏で安定処理を行なった場合，この反応により生成する化合物がセメントバチルスである点を考慮すれば当然相当量の膨張を予期することができ，またこの反応が著しく早いことも考え，さらに含水比の大きい供試体について実験していることも考えれば，この実験結果は一応妥当なものと考えてよい。しかし基長を測定するまでの24時間以内で膨張量がどのくらいであったかは明らかでない。

水浸を行なわない場合は 4 日以降は収縮を示し，収縮量は材令とともに増加する。含水比の大きい供試体の方が収縮量が大きい傾向があり，配合との関係は明瞭ではない。供試体によっては初期材令で膨張を示すものがあるが，セメントバチルス生成反応は早く，基長を測定する時間の選択と反応速度の関係でこのような不自然と見える場合があると考えられる。水浸しない供試体での収縮は，バチルス生成にともなう処理体の絶対容積の減少と，水の蒸発および水が結合水となり含水比が減少するために起こる毛細管水の表面に見られる応力による。

消石灰と石膏による安定処理の場合は収縮を防止するための手段を必要とし，また乾燥される環境に置かれることがないように注意せねばならない。殊にセメントバチルスが空気中の炭酸ガスで分解されることは，路床または，路盤の改良等に使用されべきものと考える。

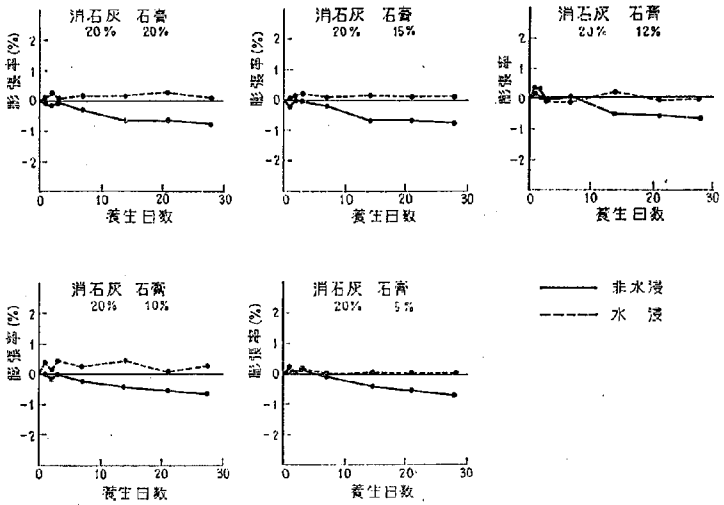


図-8 膨脹・収縮試験結果（含水比：130%）

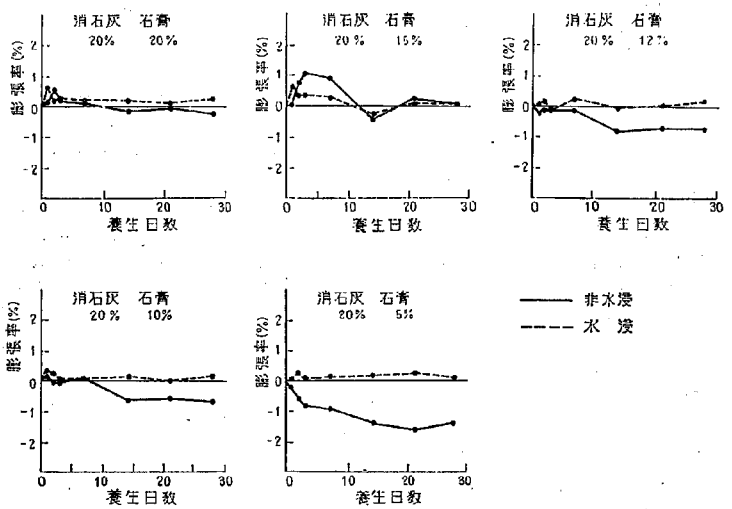
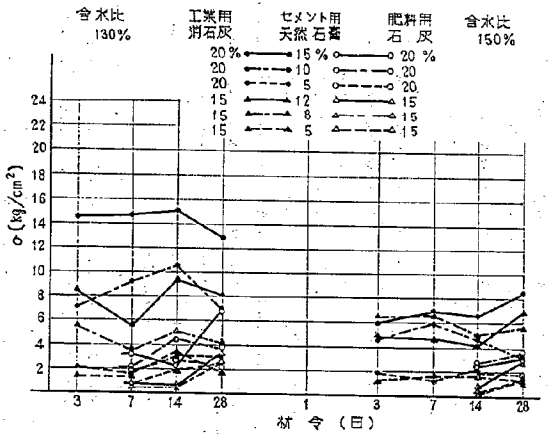


図-9 膨脹・収縮試験結果（含水比：150%）

（5） 石膏の形態および消石灰種別の圧縮強度に対する影響について

今までの実験に使用した消石灰は試薬であり，また石膏は天然二水石膏であった。実際に使用する消石灰は工業用消石灰または肥料用消石灰でなければならない。また石膏には二水石膏のほかに半水石膏，硬石膏さらに無水石膏等があり，副産石膏の多くは二水石膏または硬石膏等である。これら石膏の化学的形態は消石灰および石膏添加による強度の発生に関係があると考えられる。この点を解明するために行なった実験結果は図-10～13に示すようである。

この結果によれば，工業用消石灰を用いても試薬消石灰を使用した場合と大体同様な強度を与え，一方，肥料用消石灰を使用すれば水浸で破壊して強度はえられず，7日，14日および28日の強度はえられるが工業用消石灰に比べて低い値となる。また強度は石膏の量よりも消石



10-図　セメント用天然石膏を使用した場合の単軸圧縮強度

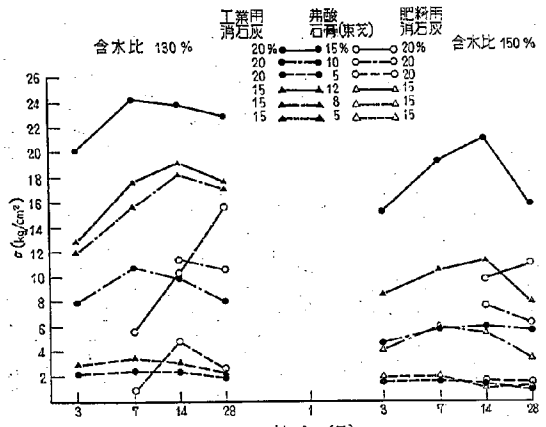


図-12　弗酸石膏を使用した場合の単軸圧縮強度

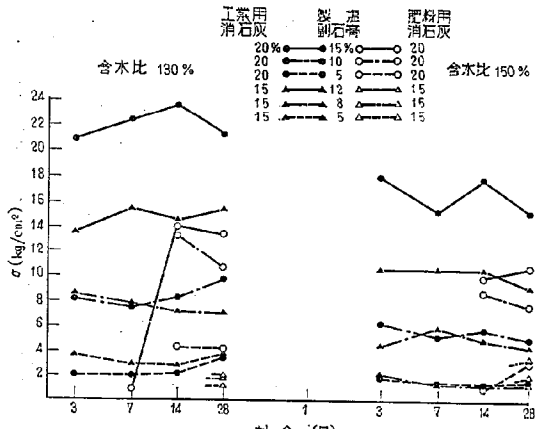


図-11　製塩石膏を使用した場合の単軸圧縮強度

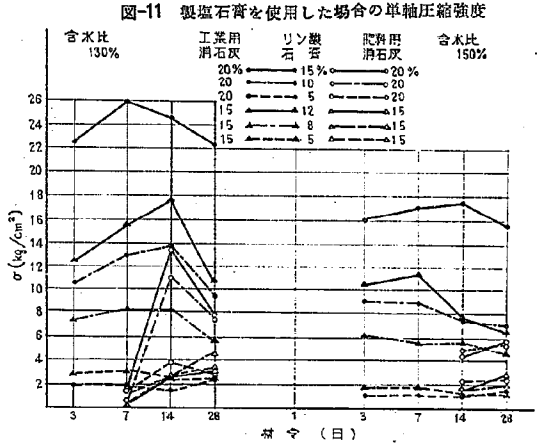


図-13　リン酸石膏を使用した場合の単軸圧縮強度

消石灰試験結果

	不溶解残分	CaO	MgO	$Al_2O_3+Fe_2O_3$	$Ca(OH)_2$ 換算値	88μ 残分	比　重
肥料用消石灰	3.5	60.7	3.3	11.8	81.3	37.0	2.53
工業用消石灰	0.2	68.8	5.4	1.3	92.2	6.1	2.49

灰の量により強く支配され，水量に対してもより敏感となる。このような結果を与える原因については現在明らかにしていないが，消石灰の品質の影響が特に大きいことは，化学的組成または粒度等に関係あるものと推定される。参考のため消石灰の試験結果を上表に示す。

なお，肥料用消石灰でも別報でのべるように現場施工の場合には，転圧等の効果のためか工業用石灰に比べてそれほど不良の結果を示していない。この問題についてはさらに検討が必要である。

石膏（焼石膏を除いて）には二水石膏と無水石膏があり，セメント用として使用されるものは主に二水石膏である。副産石膏では両者の形態のものがある。これら種種の石膏を使用した場合の処理体の圧縮強度を図-11，12，13に示す。セメント用天然二水石膏を使用した場合はすでにのべた結果と大体同じとなる。リン酸石膏の場合は二水石膏であるが天然二水石膏よりも著しく高い強度を与える。無水石膏である製塩石膏および弗酸石膏はリン酸石膏と大体似た強度を与える。この原因については明らかでないが，副産石膏の方が石膏としての純度が大で，また結晶度も低く反応しやすいためと考えられる。また含水比が大きくなると強度は低下するが，副産石膏の方が天然二水石膏よりも強度低下割合は小さい。特に製塩石膏ではこの傾向が顕著である。また肥料用消石灰の効果が小さいことを石膏の形態で改善することはできない。アロファン粘土の消石灰および石膏による安定処理の場合は，天然二水石膏よりもむしろ化学工場からの副産石膏を使用するのが好ましい。

副産石膏より安価なものとしては二水石膏鉱山の貧鉱が考えられる。貧鉱（SO_3 で 23～25%）を使用した結果を図-14に示す。この場合はあまり強度の発生は期待できない。本来消石灰および石膏による安定処理方法では，強度は石膏量に敏感であり，貧鉱中の純石膏量は約50%であるから，添加した石膏量は実質的には約半分となり，このために強度の発生が劣ると考えられる。したがって貧鉱を使用する場合は，その価格を考慮して純度の高い副産石膏等と混用すべきものと考える。なお，天然無水石膏を用いた場合はほとんど強度を発生しない。

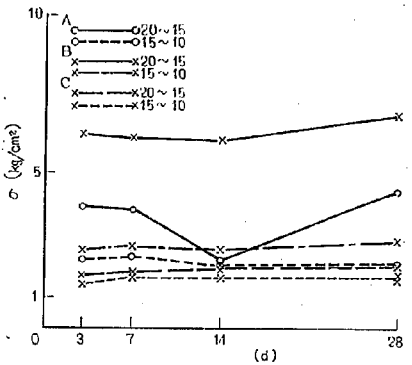


図-14　低品位石膏を使用した場合の圧縮強度
（含水比 150%）

〔4〕要　約

アロファン粘土の消石灰および石膏による安定処理方法について実験室内での実験結果をのべたが，次にその大要を要約する。

アロファン粘土は消石灰と混合すれば強度を発生するが，石膏をさらに加えれば著しく初期強度を発生すると同時に，全般的に強度の増加が認められる。

立川ロームでは消石灰が10%以下で強度は小さく，20%以上の添加とさらに石膏が10%以上添加される場合は著しい効果が認められる。水量が多い方が強度は小さいが，強度は水量に対し特に敏感とはいえない。強度は28日では14日より低下する傾向が一般に見られるが，消石灰量の多い場合，含水比の小さい場合および石膏の特に多くない場合などでは，この強度の低下はほとんど認められない。

硬化体中では消石灰および石膏は7日ですでにX線的には認められないが，他方新しい結晶性物質が認められない場合が多い。消石灰/石膏が小さいときは石膏が残り，大きいときは $2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2 \cdot nH_2O$ または $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 13H_2O$ が残り，一般にはセメントバチルスの生成が見られる。強度はバチルスの生成状況と関係がある。この反応における強度の発生と消石灰の量および石膏の量の間には適量のあることが想定される。

消石灰および石膏で安定処理したアロファン粘土の CBR 値は，単軸圧縮強度の発生状況と大体同じである。すなわち，含水比が150%程度の著しく高い場合でも30%前後の CBR 値を与え，4日以後においてもその増加はほとんど認められない。また含水比が高かく，締固めができないような場合の関東ロームに対するソイルセメントと比較して，より高い CBR 値を与える。

安定処理による容積変化については，セメントバチルスの生成を考えれば，当然顕著な膨張が予期される。水中養生の場合は膨張を示すが，ソイルセメントと比べて特に大きいとはいえないし，また水中養生でない場合は

収縮量が大きい。収縮量を少なくするためには水中養生に準ずるように配慮せねばならない。

工業用消石灰と肥料用消石灰を比較すれば，理由は明確ではないが後者は好ましい材料とはいえない。また石膏については二水型でも無水型でも副産石膏の方が天然二水石膏よりも著しい強度増加を示し，その使用が好ましい。

3. 消石灰および石膏を添加したアロファン粘土モルタルの単軸圧縮強度について

2.で立川ロームに消石灰および石膏を添加すれば，消石灰単独の場合よりも大きい強度がえられ，しかも初期強度がえられることをのべた。この際の配合割合，含水比，材令等による強度の発生状況等についてすでに検討した。ここでは消石灰—石膏—アロファン系混合物を結合材としたモルタルの強度についての実験結果をのべる。なお立川ローム以外に，ハロイサイト化の過程にある東京地区関東ロームを形成する武蔵野ローム，多摩ロームおよび下末吉ロームについての同様な実験結果についてのべる。

〔1〕 試料および実験方法

立川ロームは2.に用いたと同じものである。

武蔵野ローム，下末吉ローム，多摩ロームは海ノ口に見られる関東ローム層の代表的プロファルより採取した。これらローム試料は風乾後350μフルイでふるう。

$Ca(OH)_2$，$CaSO_4 \cdot 2H_2O$ は2.に用いたと同じものである。

実験方法は2.と大体同じであるが，型枠は JIS R 5201（セメントの物理試験方法）に規定される4×4×16 cm のものを用い，豊浦標準砂2に対し乾燥土1の割合になるように換算した風乾土を用いた。$Ca(OH)_2$ 量はいずれも乾燥土に対し20%とし，$CaSO_4 \cdot 2H_2O$ は0，5，10，15，20%とする。水量は乾燥土に対し含水比が140，150，160，170，180，190%となるように添加する。成型，養生等は2.と同じである。

なお，武蔵野ローム等については $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 量を10%と20%のみとし，含水比は140，160，180%とする。

また強度試験の終了したものについては，その中心部より少量の試料を取り，50℃で乾燥させてから乳ばちで粉砕し，Geigerflex によって銅を対陰極として回折線を求め，結晶性物質の消長をも確かめた。Geigerflex 作動の条件は2.の場合と同じである。

〔2〕 実験結果

実験結果を強度と材令，強度と石膏量，強度と水量との関係について図-15，16，17に示す。

X線回折結果では，標準砂としての石英が多量に存在し，$CaSO_4 \cdot 2H_2O$ の最強線は石英の線と重複するので7.7Å線で推定するが，C_3AH_3 との区別は不可能である。C_3AH_3 の（002）は3.85Å線として見られるが，セメントバチルスが共存すればそれと重複して識別が不可能となる。$Ca(OH)_2$ は4.93Å線で，C_2ASH_n は12.8Å線で，セメントバチルスは9.8Å線等で推定し，これら結晶性物質の消長を表-5に示す。なお，石英の回折線の強さはある程度の標準として役立つ。

また武蔵野，下末吉および多摩ロームの場合の実験結果も表-5および図-18に示す。

表-5 $Ca(OH)_2$—$CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 処理関東ローム モルタル中の結晶性物質（$Ca(OH)_2$：20%）

土の種類	水量 (%)	材令 (日)	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 量 (%) 10	15	20
立川ローム	140	7	B(tr)	–	B,A
	140	28	B, 3.49Å	–	B,B
	150	28	B(tr)	–	B,3.49Å
	160	14	–	B(tr)	B(tr),A
	170	14	B(tr)	B(tr)	B
	170	28	–	–	B,B
	180	28	–	–	B,B
	190	28	–	–	B,B
武蔵野ローム	140	21	B,A	–	B,A
	160	14	–	–	B,G
	180	7	no	–	B
下末吉ローム	160	14	B,H(tr)	–	B
	180	7	0	–	B
多摩ローム	160	14	B,H,A	–	B,H,G,C
	160	28	–	–	B,A(tr)

〔3〕 実験結果の検討

（1） モルタル強度について

アロファン粘土は $Ca(OH)_2$ 単独の添加でも強度の発生をみることはすでにのべたところであるが，モルタルとした場合でも材令7日で水量が140%のときに約2.5 kg/cm²，水量150%および160%でそれぞれ1.5 kg/cm² および1.0 kg/cm² の圧縮強度を示す。これ以上の水量では測定しうる強度を与えない。すなわちアロファンと $Ca(OH)_2$ はそれ自体が結合性材料としての性質を示すといえる。しかし，これだけでは強度は低くいので，さらに $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ を共存させることによりこの性質の改善が計られたのであり，土単独の場合の効果はすでに2.でのべたところである。この実験結果からも粘土と $Ca(OH)_2$ 混合物を結合した材料とするとき，$CaSO_4 \cdot 2H_2O$ もその重要な一成分として作用していることを知りうる。繰返していえばアロファン粘土は $Ca(OH)_2$ と $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ が共存すれば，セメントとしての機能を発揮することができる。

（2） 圧縮強度と材令との関係

図-15より明らかなように，粘土をセメントとして使用する場合に，モルタルの強度は28日までの期間では漸

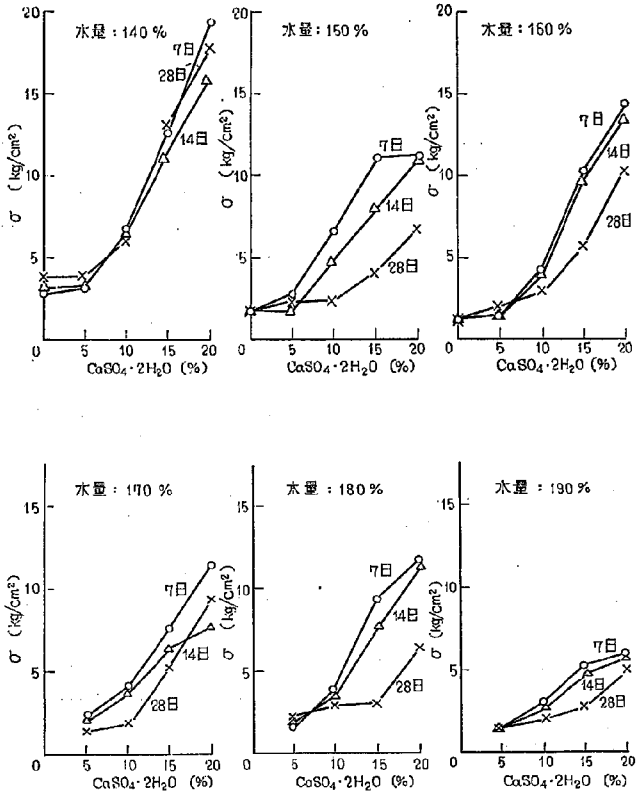


図-15 モルタルの圧縮強度と $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 量の関係 ($Ca(OH)_2$ 20%)

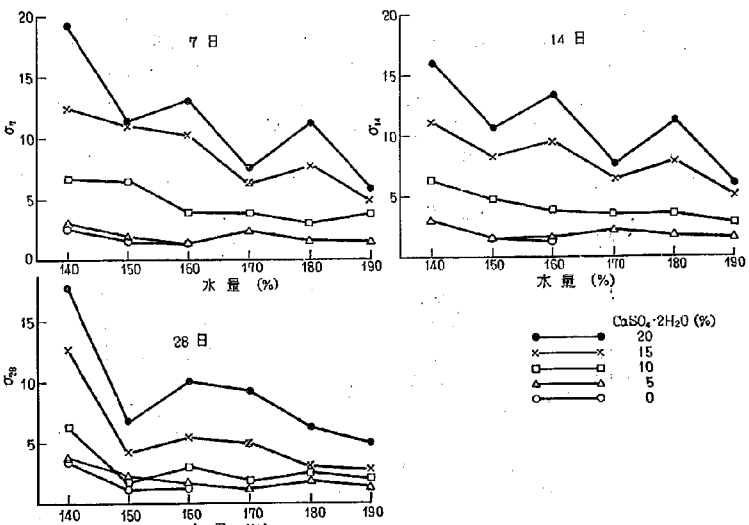


図-16 モルタルの圧縮強度と水量の関係 ($Ca(OH)_2$ 20%)

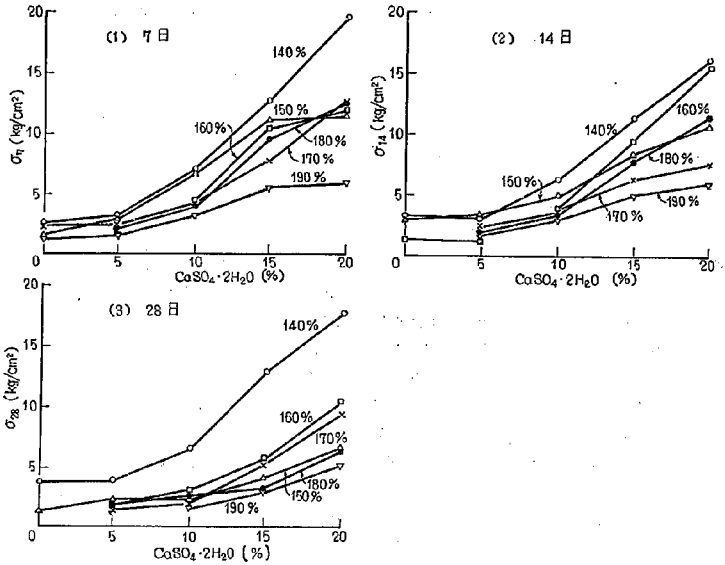


図-17 モルタルの圧縮強度と $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 量および水量の関係 ($Ca(OH)_2$ 20%)

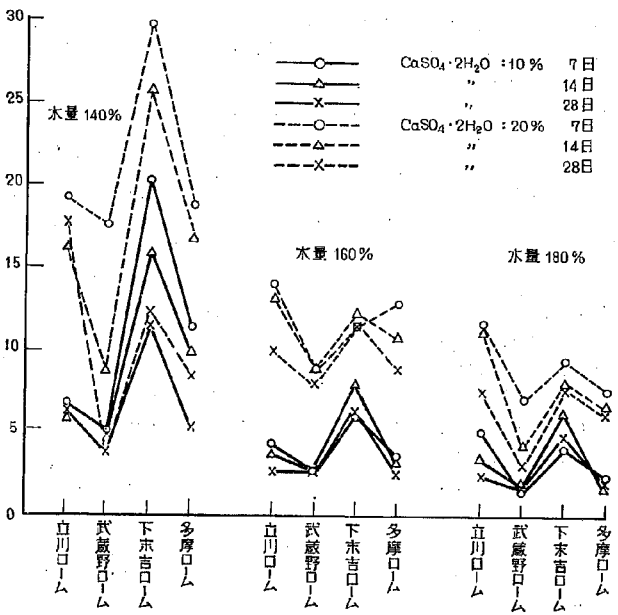


図-18 関東ローム層別のモルタル強度 ($Ca(OH)_2$20%)

次低下する傾向が水量を変えても，また $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 量を変えても見られる。しかし水量が140%のときは（液性限界は133%）はほとんど低下は見られない。$CaSO_4 \cdot 2H_2O$ の添加のない場合は強度は常に増加することがすでに知られており，$CaSO_4 \cdot 2H_2O$ が強度発生の促進材として作用すると考えられておるので，さらに長期の材令では再び強度の増加が考えられる。しかし，できるだけ少量の水で，$Ca(OH)_2$ をもう少し多く用いれば2．の結果からもわかるように強度の低下は見られないであろう。

（3） $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ の添加量

$CaSO_4 \cdot 2H_2O$ の添加量が多い方が強度が大きいことは，すべての材令および水量についていえることである。特に $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ の量が10%を超えると圧縮強度と添加量の間にはほぼ直線的関係が見いだされる。石膏添加の効果をうるためには10%程度以上の使用が望ましい。また，水量が多い場合および材令28日では $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 添加量の効果は，その他の場合に比して小さい傾向が見られる。ここでは $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ の量を問題としているが，すでに2．でのべたように種種の副産化学石膏等を用いれば，さらに効果が期待できると考える。

（4） 水量と圧縮強度との関係

$Ca(OH)_2$ を20%用いてさらに $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ を添加する場合には，水量の多い場合の方が強度が低くい傾向は認め，強度の高い場合にはこの傾向はやや顕著であるが，強度の低い場合はほとんど水量の影響をうけないといえる。水量が150%から190%の間では強度はほとんど変わらないと考えてよい。$CaSO_4 \cdot 2H_2O$ を加えない場合は160%以上の水量で強度を測定しがたいのに比べて，190%の水量でも強度をもつことは $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 添加の特徴と考えることができ，自然含水量の特に高かい場合での応用が考えられる。

（5） 関東ローム層別の強度の発生

関東ロームは東京近辺では上層から立川ローム，武蔵野ローム，下末吉ローム，多摩ローム層として区別され，それらに含くまれる粘土鉱物は，上層ほどアロファンが多く，下層に至るにしたがい加水ハロイサイト化し，ついで加水ハロイサイトとハロイサイトの混合層鉱物が多くなり，さらに下層ではハロイサイト化するとされている。これらのローム層について，$Ca(OH)_2$ および $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ の添加による強度発生を実験した結果では，これらローム層はいずれもこの処理により強度を発生し，水量との関係，材令との関係，$CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 添加量との関係は程度の相異はあるが，立川ローム層の場合と同様である。これらの差が生じるのは粘土別に水によるコンシステンシーが異なること，アロファンの含量等が異なることのためであろう。このように $Ca(OH)_2$ および $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ を添加した土がセメントとしての機能をもつことは，関東ローム全体に共通すると考えてよいであろう。しかし関東ロームの層別によっては添加量と強度の発生状況はそれぞれ異なるであろう。

（6） 硬化モルタル中の結晶性物質の消長

硬化体のX線回折法による結晶性物質の消長の状況は立川ロームの場合は，モルタルを使用しない2．の場合と大体同様であり，セメントバチルスの生成が硬化と関係のあることを示している。水量が特に多くても硬化している場合はバチルスの生成は明確であり，バチルスは多量の水量を取りうることと関係があると考える。なお，硬化体中に3.49Åの粉末線をしばしば認めるが，何によるかは不明である。

武蔵野ローム，下末吉ローム，多摩ロームでも硬化モルタル中にセメントバチルスを認め，アロファンの含量の少ない多摩ロームではバチルスのほかに C_4AH_{13} または C_2ASH_n の生成が見られ，とくに $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ の量が20%の場合には $Ca(OH)_2$ および $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ の残存が見られる。このことは当然アロファン量との関係から予想されるところである。

アロファンによる $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ および $Ca(OH)_2$ の収着，さらにセメントバチルスの生成等が強度発生の原因であるが，セメントバチルスが余り安定でないことは考慮すべき問題をも含むと考えておくべきだろう。しかし使用される場所と使用されている状態をまず考えねばならない。

（7） 高硫酸塩ソイルセメントの強度についての実験

近藤[12]は福バン土（1．に使用したものと同一試料）に $Ca(OH)_2$ および硬石膏を加えた1：3モルタルの強度を測定した。その結果を表－6に示す。この結果から見てもアロファン粘土は $Ca(OH)_2$ と $CaSO_4$ の添加により強度を発生することがわかる。近藤の実験では，添加材の量が土に対して著しく多いので，強度も高い結果となっているのであるが，強度は3日より7日の方が低いことおよび強度が水量に対し敏感でないことが知られる。この傾向はアロファン粘土を $Ca(OH)_2$ および $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ で処理する場合に共通しているといえる。

〔4〕 要　約

アロファン粘土に $Ca(OH)_2$ および $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ を加えたモルタルの強度を測定し，アロファン粘土はセメントとしての機能をもつことを明らかにした。$Ca(OH)_2$ 量は粘土に対し20%以上，$CaSO_4 \cdot 2H_2O$ は10%以上が必要であり，初期強度は十分期待できるが，28日強度は低下する傾向が見られる。水量ができるだけ少ないとこの傾向は見られない，$CaSO_4 \cdot 2H_2O$ が10%をこえると強度はそれに大体比例して大きくなる。また強度は水量に対し敏感ではない。

関東ロームでも特にアロファン的である立川ロームの

表-6 高硫酸塩ソイルセメントの実験結果（近藤による）

セメント配合			W/C	フロー	曲げ強度 (kg/cm²)		圧縮強度 (kg/cm²)	
福バン土	石灰	硬石膏			3日空中	7日水中	3日空中	7日水中
60	40	—	113	147	6.6	4.1	23.2	16.6
55	40	5	105	147	12.6	7.1	29.5	21.5
50	40	10	102	155	23.6	17.1	43.2	32.7
45	40	15	104	154	28.6	19.0	61	30.0
40	40	20	91	145	38.9	17.6	93	36.5
70	20	10	116	144	13.1	5.6	15.0	13.5
65	20	15	109	151	23.0	17.6	39.9	34.0
60	20	20	100	143	30.1	26.8	61	44.9
55	25	20	98	159	22.0	2.7	63	10.0
* 55	25	20	145	148	10.8	7.0	31.8	20.6

* この場合のみ 1:5 モルタル

ほかに，武蔵野ローム，下末吉ロームおよび多摩ロームでもこの処理により同様に強度を発生するので，関東ローム全般に消石灰および石膏処理は効果をもつ。強度の発生はセメントバチルスの生成に関係がある。

4. 消石灰および石膏処理方法に対するポルトランドセメントの併用または酸化鉄等の添加の効果および非アロファン質土への本方法の適用について

アロファン質粘土の消石灰および石膏による安定処理方法の特性等についてはすでに論じてきた。この方法には欠点もあるしまた不明確な点も多く，今後解明されるべき点もはなはだ多い。ここでは，この方法の反応機構を考えて，ポルトランドセメント等の併用または添加の効果を確かめることを試みた。また非アロファン質土に対する適用限界を知るために，既知粘土鉱物に対する本方法の効果をも測定した。

〔1〕 試料および実験方法

試料とする立川ロームは2，3.に使用したと同じ。消石灰は化学用試薬，石膏はセメント用天然二水石膏，セメントは市販ポルトランドセメント，酸化鉄はパイライトシンダーおよび化学用試薬を用う。過リン酸石灰は P_2O_5 で20%および40%のものを用う。

粘土鉱物としては既報[13]で用いたものであり，主要粘土鉱物等を次に示す。

関白カオリン	LL 80, PI 47	カオリナイト
蛙目粘土	LL 93, PI 64	カオリナイト
村上粘土	LL 83, PI 39	セリサイト
木節粘土	LL 78, PI 39	カオリナイト
香港カオリン	— —	ハロイサイト
苗木白土	LL 62, PI 27	加水ハロイサイト
ベントナイト(#200)	LL233, PI 207	モンモリロナイト

石膏（G）およびポルトランドセメント（C）で処理する場合は，セメント量100に対し石膏粉末を10，15，20，30，および50%加え，小型ボールミルで十分混合し，石膏—セメント混合物を造る。消石灰(L)を共存させる場合は，セメント量100に対し消石灰および石膏を次の割合とし，小型ボールミルで十分混合する。

L 10，15，20，20，30，40

G 5，10，10，15，20，30

供試体の作製養生等は3．にのべたと同様であり，処理するロームの含水比が110%となるようにし，安定処理材はロームの乾量に対しC—G処理のときは20，15，および10%とし，C—G—L処理のときは25，20，および15%とする。単軸圧縮強度は材令7日で測定し，測定前24時間水浸する。

酸化鉄(H)の効果を調べる場合は乾燥ロームに対し，L，GおよびHの配合を次のようにした。

L 20，15，10，8，10，10，10，10，20，20，20，20

G 5，5，5，5，3，3，3，3，0，0，0，0

H 5，5，5，5，10，8，5，2，15，10，8，5

単軸圧縮強度の測定は材令3，7，14および28日に実施し，化学用の酸化鉄の場合は7日のみとする。供試体の作製方法等は3．と同じである。

過リン酸石灰を添加する場合は添加量を10，15，20，25%とし，リン酸の場合は2%とする。

粘土鉱物について実験する場合はL 20%，G 15%の配合およびL 20%のみの配合とする。含水比はLLの40%増とし，材令7日養生後24時間水浸して強度を測定する。

〔2〕 実験結果とその検討

(1) 石膏を多量ふくむポルトランドセメントの効果

ポルトランドセメント単独で関東ロームを処理してもその効果が大きくないことはすでに知られている。セメ

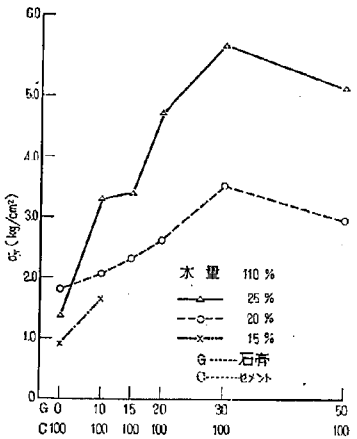


図-19　立川ロームに $CaSO_4 \cdot 2H_2O$—セメントを添加した場合の圧縮強度

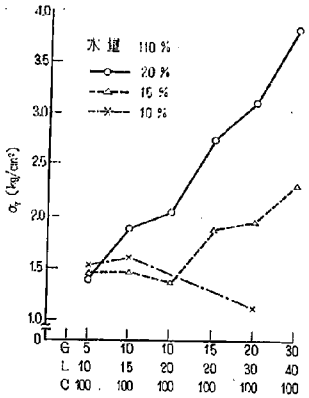


図-20　立川ロームに $Ca(OH)_2$—$CaSO_4 \cdot 2H_2O$—セメントを添加した場合の圧縮強度

ントの水和により $Ca(OH)_2$ が遊離するので，この $Ca(OH)_2$ と反応すべき $CaSO_4$ 量を加えれば消石灰および石膏処理方法とセメント硬化の効果の両者を期待できると推測される。この目的のために石膏量の多いセメントの効果を調べ，その結果を図-19に示す。

この結果によればポルトランドセメント単独の場合より石膏を加えた方が強度は大きくなり，セメントに対し30%くらいの石膏量までは石膏量が多い方が強度は大となる。しかし50%くらいの添加量ではむしろ強度は低下する。したがって関東ロームによるソイルセメントのためのセメントとしては石膏を約30%程度含有する特殊セメントが有効であることが明らかである。この場合，石膏の共存が有効なのは，セメントの水和反応により遊離する $Ca(OH)_2$ と石膏がアロファンと反応してセメントバチルスを生成するためと考えられる。多量の石膏をセメントと共存させることが関東ロームの安定処理に有効であることは明らかとなったが，消石灰および石膏で処理する場合と比較すれば特に有効と断定することはできない。

（2）　石膏—消石灰—セメント混合物の効果

セメント—石膏による処理が，セメント単独の場合に比べて効果のあることはすでにのべた。セメント—石膏で処理する場合，セメントの水和により生成する $Ca(OH)_2$ の量が消石灰—石膏系による効果を示すほど十分でないことが考えられるので，消石灰を共存させることを試みた。

図-20 に実験結果を示す。実験結果によれば，石膏および消石灰の量が増す方が有効であることが示される。しかし図-19の結果と比較すれば，消石灰を加えることが特に必要とは考えられない。なお，石膏および消石灰の割合をさらに多くすれば強度の増大することが予想されるので，これら3成分の間に適当な配合割合の存在が推定される。セメント単独で使用する場合と比較して，セメントよりも安価な石膏および消石灰でセメントの一部を代替してしかもより効果あることは，関東ロームを用いるソイルセメント用として適当した形式のセメントの探索を必要とする。この場合，石膏および消石灰は短期強度に関与し，セメントは長期強度および安定性の向上に関与すると考えられる。

（3）　酸化鉄およびリン酸塩添加の効果

消石灰および酸化鉄混合物による土質安定処理が有効であるとの報告[14]がある。その反応機構については現在明らかでないが，鉄酸石灰塩水和物の生成は十分予想される。消石灰および石膏で安定処理を行なう場合，酸化鉄の効果があるか否かを確かめるために行なった実験結果を表-7に示す。

実験結果によれば，消石灰のみの場合はすでに1．で示したように初期強度はえられないが，酸化鉄を添加すれば3日でも2～3 kg/cm² 程度の強度を与える。しかし，強度の増進は期待できないし，酸化鉄の添加量が5%でも15%でも強度はほとんど変わらないと考えてよい。消石灰および石膏で処理する場合に酸化鉄を添加すれば，3日でもある程度の強度は期待できるが，酸化鉄の効果を特に認めると判断することはできない。むしろ消石灰および石膏処理には有効には働かないというべきであろう。いずれにしても，酸化鉄の添加量は5%以下でよく，材令によって強度の増進はない。また酸化鉄は化学用の試薬を用いても，硫酸工場でのパイライトシンダーを用いても効果は同じである。

酸化鉄の効果がどのような機構によるかは明らかでな

表-7 Fe_2O_3 を添加した場合の圧縮強度

添加量(%) $Ca(OH)_2$—$CaSO_4\cdot 2H_2O$—Fe_2O_3	Fe_2O_3 (化学用純薬)	Fe_2O_3 (鉄 滓)			
材令	7	3	7	14	28
20—5— 5	1.4	1.5	1.9	1.5	1.4
15—5— 5	1.7	1.8	1.8	1.5	1.7
10—5— 5	1.5	1.9	1.9	2.0	2.0
8—5— 5	0.8	0.9	0.8	1.1	1.0
10—3—10	1.1	1.0	1.2	1.6	1.2
10—3— 8	1.2	1.4	1.5	1.4	1.6
10—3— 5	1.1	1.2	1.1	1.1	1.3
10—3— 2	1.1	1.2	1.2	1.2	1.1
20—0—15	2.6	2.6	2.9	3.0	2.9
20 — 10	2.2	2.9	2.9	2.7	2.8
20 — 8	2.2	1.9	2.2	2.1	2.1
20 — 5	2.1	2.4	2.5	3.1	3.0

単位は kg/cm^2 材令単位は d 添加量は土の乾燥重量に対する%

いが，消石灰および酸化鉄を加えた関東ロームのX線回折実験によれば，酸化鉄は時間とともに消失することを認めうる。しかし，新しい結晶性物質の生成は認められない。このことは酸化鉄が他の新しい化合物に変わったことを示すのであるが，新らたに生成した化合物は結晶度が低いためかX線回折線な明瞭でなく，酸化鉄の行動を明らかにすることは不可能であった。

なお，関東ローム等ではすでに遊離の酸化鉄を数パーセント含有しており，その多くは針鉄鉱の状態であり，添加した酸化鉄（赤鉄鉱）に比べれば粒径も小さく，その反応性もすぐれていることを考えれば，関東ローム等については赤鉄鉱の添加が特に重要な意義を持つか否かに一部の疑問が残る。むしろ土粒子間の粘結材として作用すると考えるべきかもしれない。

アロファンのリン酸イオン吸着能は大きく，比較的安価な肥料用過リン酸石灰を添加すれば，リン酸鉄およびリン酸アルミニウム等も生成し，粘土の性質を変えうることが予想される。過リン酸石灰（P_2O_5 20%および40%）を関東ロームに10～25%添加してみたが成型後4日を経過しても脱型不可能であり強度はえられない。また過リン酸石灰は多量の石膏をふくむので，消石灰および石膏処理方法の石膏源と考え，消石灰および過リン酸石灰処理を実験したが強度はえられなかった。またリン酸のみを約2%添加した場合は水中でスレーキングしない程度であり，効果は期待できない。

(4) 非アロファン質土に対する消石灰および石膏による安定処理方法の適用について

土の力学的性質は土壌コロイド中の粘土鉱物の種類により顕著に支配され，好ましくない土質を与える土には一般にモンモリロナイト，アロファンが存在すること，また結晶度の特に低い粘土鉱物が存在すること等についてはすでに論じた。[16][17][18] アロファンを主体とする関東ロームに対しては消石灰および石膏の添加による処理が有効であることはすでにのべてきた。非アロファン土の安定処理に消石灰および石膏法が適用できるか否かを検討する必要がある。わが国の土質には多様性が認められ，その粘土鉱物組成については一部の調査が行なわれているが，それらの安定処理を考えるとき消石灰および石膏処理法が効果あるか否かは予測できない。この予測のためには，まず粘土鉱物の判明している土についてこの方法の効果を確かめる必要がある。

この目的のために主要粘土鉱物の明らかな粘土を用いて，消石灰20%，石膏15%を加えたり，また消石灰のみ20%加えたりして7日の単軸圧縮強度を測定した。この際の含水比は液性限界の40%増とした。

実験結果によれば，関白カオリン，木節粘土，蛙目粘土，村上粘土では強度を示さず，香港カオリンでも測定しうるほどの強度を示さない。しかしベントナイトの場合は消石灰および石膏処理で 2.4kg/cm², 消石灰のみの処理で 4.8kg/cm² の強度を示す。一方，苗木白土では 70kg/cm² および 41kg/cm² の強度を示す。

ベントナイトは消石灰のみの処理が有効であり，その硬化機構は明らかでないが，ベントナイト中に共存する遊離シリカのポゾラン反応およびベントナイトの表面化学的性質の変化が硬化に関係すると考えられる。なおモンモリロナイトがポゾラン反応により $4CaO\cdot Al_2O_3\cdot 13H_2O$ と考えられる結晶性物質を生成することを，Hilt[15] がX線的に認めている。したがって，モンモリロナイト自体も消石灰と反応すると考えられるので，ここに用いたベントナイトの場合は，モンモリロナイトのポゾラン反応も硬化に関与していると推定できる。

ベントナイトと消石灰混合体のX線回折の結果では，材令とともに $Ca(OH)_2$ の回折線はその強度が低下し，7日では消失する。しかし (001) 線が高角度側に移る傾向は認められるが，$4CaO\cdot Al_2O_3\cdot 13H_2O$ 等の生成を認めうるに至らない。

モンモリロナイトが地すべり粘土の主要粘土鉱物であることは[16] 地すべり粘土を消石灰で処理して，ある程度の強度を与えうることを示し，今後検討すべき問題を残すといえる。

苗木白土が消石灰処理で異常な高強度を与えることは特に注目すべきことである。苗木白土は加水ハロイサイトとハロイサイトの混合物であり，ハロイサイトは消石灰処理で強度を与えないことは香港カオリンで認めている。したがって加水ハロイサイトのポゾラン反応が硬化の主体となるといえる。このことは苗木白土を 150℃ で加熱処理して，大部の加水ハロイサイトをハロイサイトに変えた場合に硬化を認めないことからも知りうる。

苗木白土と消石灰の混合体のX線回折の結果では，加水ハロイサイトの (001) 線は材令とともに漸次その強度は低下し，材令7日位でわずかに認めうる程度となる。一方新たに 7～9 Å に拡散した回折線を示し，この線は材令とともに明瞭となり，$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 8H_2O$ および $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 13H_2O$ の生成を示すようになる。また消石灰と石膏を共存させれば材令2日でセメントバチルスの生成を明確に示し，回折図でバチルスの最強線の低角度側での肩として認められる加水ハロイサイトの (001) 線は材令とともに弱くなる。

著者の現在までの研究では，アロファン粘土の処理に消石灰および石膏の添加が効果を示すとしてきたが，加水ハロイサイト質粘土の処理にも効果があり，この場合は消石灰のみでも短期強度を期待できるので特に石膏の添加は必要とならない。粘土の成因が一般の土壌化作用によらないようなこの実験に用いた試料粘土類では，加水ハロイサイトの効果を認めるが，土壌粘土の組成は複雑であり，また単一粘土鉱物よりなる場合はまれであり，主要粘土鉱物が加水ハロイサイトまたはアロファンでなくとも消石灰との反応性に富み，消石灰および石膏による安定処理方法が効果のある場合も十分考えられる。このような考えを支持するものとして，すでに土壌コロイドと消石灰溶液との反応についてのべた[19]。いずれにしてもわが国土壌粘土が主としてハロイサイト系鉱物であることは本安定処理方法の適用限界が相当広いことを推定させる。今後この問題についてさらに広範な実験研究が必要であると考える。

〔3〕 要　約

アロファン質粘土の消石灰および石膏による安定処理においてポルトランドセメントを共存させた場合の効果，または酸化鉄等の添加の効果を実験的に求めた。また，この方法の種種な土に対する適用限界を求めるために，既知粘土鉱物類に対する効果も求めた。

石膏を多量に含むポルトランドセメントはポルトランドセメント単味の場合に比して効果があるが，消石灰および石膏系に比して特に効果があるとは考えられない。消石灰，石膏およびセメントの共存もセメント単味の場合に比して効果を認めるが，消石灰の存在が特に必要とも考えられない。しかし，これら3成分系より成る特殊セメントは関東ロームを使用するソイルセメント工法における粘結材として適当であると考えられる。

消石灰および石膏による安定処理において，酸化鉄を添加すれば2～3 kg/cm² 程度であるが短期強度を与え，この効果は消石灰のみの処理においてもえられる。しかし，酸化鉄の量または材令によっても強度の増大はえられない。この反応機構については現在明らかにしえない。また，過リン酸石灰の添加は有効ではない。

この方法を非アロファン質土に適用できるか否かを知るために，種種の粘土鉱物について実験した。カオリナイト，ハロイサイトおよびイライト等は硬化せず，モンモリロナイトではある程度有効であり，加水ハロイサイトには特に効果がある。この方法はアロファンおよび加水ハロイサイトを含む土の安定処理には有効であり，わが国土壌粘土鉱物がハロイサイト系鉱物であることは本方法の適用限界を拡大させるものと考える。なお，土壌粘土と消石灰との反応性に関する研究結果からも，本方法の効果を認める場合があると考えた。

5. 結　言

アロファンが消石灰と常温で反応しゲーレナイト水和物（$2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2 \cdot nH_2O$）を生成し，さらに，石膏を共存させるとセメントバチルス（$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$）を生成することはすでに報告したところである。この反応によりアロファン粘土の性質は当然変化し，さらにこれら粘結性物質の生成はアロファン粘土に強度をもたらし，その安定化に寄与することが予期される。

アロファン粘土の化学的安定処理を目的として消石灰処理方法および消石灰・石膏による処理方法の効果を研究した。また，ポルトランドセメントの共存の効果，酸化鉄の添加の効果も測定した。実験方法としては主として単軸圧縮強度の測定によったが，一部 CBR 値の測定も併用した。なお，石膏の化学的形態，肥料用消石灰の効果も測定した。この方法の適用限界を知るために既知粘土鉱物に対する効果も測定した。

これら研究結果の概要と本方法の特徴をのべ，施工方法に関連する諸問題にも言及して結言とする。

（1） アロファン粘土は $Ca(OH)_2$ の添加により強度を発生するが，その発生速度は小さく，$Ca(OH)_2$ の添加量の多い方が強度も大きい。強度の発生は $2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2 \cdot nH_2O$ の生成と関係がある。

（2） アロファン粘土は $Ca(OH)_2$ の添加によりコンシステンシーが変化し，その状況は複雑であるが $Ca(OH)_2$ の結合状況と密接な関係のあることは明らかである。また $Ca(OH)_2$ の添加により短期材令

を別にすればLL，PL，PIはともに大きくなり，粘性土の粘性を低下させる機能はもたない。

（3） $Ca(OH)_2$ と $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ を共用すれば強度および強度発生速度は大きくなり，特に初期強度を与える。$CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 共用の効果は著しい。強度の発生はセメントバチルスの生成状況と関係があり，強度は $Ca(OH)_2$ および $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 量と関係があり，それらの間に適量のあることが想定される。

（4） アロファン粘土に $Ca(OH)_2$ および $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ を加えたものでモルタルを造れば，モルタルに強度が発生する。すなわちアロファンは $Ca(OH)_2$ 等の存在でセメントとして作用する機能をもつと考えられる。強度の点から考えれば，$Ca(OH)_2$ 量が20%以上，$CaSO_4 \cdot 2H_2O$ が10%以上で水量は少ない方が好ましいが，セメント試験における標準モルタル試験でのフロー値で 180mm 程度でも，アロファン粘土を処理しうるし，強度または CBR 値は含水比に対して著しく鈍感である。また，硬化体中にはセメントバチルスの生成を認める。

（5） アロファン粘土である関東ローム上層の特にアロファン性の強い立川ロームはもちろんのこと，その下層である加水ハロイサイト化の進行した武蔵野ロームまたは下末吉ローム，さらにハロイサイト化の進んだ多摩ローム等にこの方法は適用できる。わが国の火山灰性土でアロファン性のものにはこの方法の適用は可能と考えられる。

（6） この方法に用いる石膏は二水石膏でも無水石膏でもよい。天然の結晶性無水石膏はあまり効果はない。一般の化学工場からの副産石膏は結合水のいかんにかかわらず有効であり，副産石膏の方がむしろ天然二水石膏よりも効果が大きい。また，消石灰として用いた肥料用のものは効果が小さい。

（7） ポルトランドセメントの共存は効果を期待できないが，消石灰—石膏—セメント三成分混合物の中で適当の割合のものは，関東ローム等を対象とするソイルセメント用の特殊セメントとして価値があると思われる。また，酸化鉄の添加は短期強度を与える効果がある。

（8） この方法はアロファン粘土のみでなく，加水ハロイサイト性粘土にも効果があり，モンモリロナイト性粘土にも一部の効果がある。わが国土壌粘土が主としてハロイサイト系鉱物より成ることは本法の適用限界を拡張させるものと考えられる。加水ハロイサイトが消石灰と反応しやすいことは粘土鉱物学的にも重要な意義をもつものと考える。

（9） この方法の特徴は，最も好ましくない土質を与える関東ローム等のアロファン質粘土に，消石灰および石膏を添加し，これらの共存の下にアロファンをセメント性材料として行動させ，アロファン質粘土の安定に役立たせることである。自然含水比が高く，ソイルセメント工法が適用できないアロファン粘土を，自然含水比よりも高い水量でプラスティックとして施工を容易ならしめ，安定化することが可能となった。

使用する材料はポルトランドセメントの価格の半分であり，使用量は乾燥土に対し約30%に達するが，アロファン含量の少ない土ではその使用量が少なくてもよいし，現地の土をそのまま安定化の対象とすることが可能である。

（10） この方法はアロファン質粘土および加水ハロイサイト質粘土をもつ路床路盤材料の処理に有効な場合が多いほか，地すべり粘土および一部の軟弱土の処理にも有効な場合もあり，さらに土木材料として種種の応用が考えられる。しかしプラスティクソイルセメント工法に似た施工法を必要とするので，この点について研究が必要である。また乾燥収縮および空中の炭酸ガスによるセメントバチルスの分解等を考え，養生または使用個所等に考慮が払われねばならない。

なお，野外での現場実験の結果は次報にのべる。

本研究結果の一部はすでに下記のように発表された。

土木技術資料，4，64，昭37，5，108，昭38

道路，582，昭37

Annual Report of Roads, 22, 1962

第6回日本道路会議にて講演（昭36年）

粘土科学シンポジュームにて講演（昭和37年度）

本研究を実施するに当り貝原陞，西島高秀両君の協力をえた。謝意を表する。

参考文献

1. 有泉 昌
土研報，110号 97 昭37
2. 有泉 昌，大場正男
土研報，119号 83，昭39
3. M. G. Spangler, O. H. Patel
Proc. H.R.B., 561, 1949
4. E. A. Whitehurst, E. J. Yoder
Proc. H.R.B., 31, 529, 1952
5. C. McDowell, W. H. Moore
Proc. 2 nd. Intern. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., 5, 260, 1948
6. K. E. Clare, A. E. Cruchley
Geotech., 7, 97, 1957
7. R. F. Dawson
Bull. H.R.B., 129, 103, 1956
8. I. Goldberg, A. Klein

ASTM Special Pub., No 142
9. D. T. Davidson, L. W. Lu, R. L. Handy
Proc. H.R.B., 36, 794, 1957
10. 内田一郎，松田鉄三
土と基礎， 4, No. 2, 4
11. 竹下春見，田中淳七郎
土研報，95号，37，昭32
12. 近藤連一
セメント技術年報，XIV，248，1960
13. 有泉 昌，牧 隆正，和田茂治
土研報，116号，53，昭38
14. 井 月夫，溝口孝芳
土木施工， 3，No 10，83，昭37
15. G. H. Hilt, D. T. Davidson
Bull. H.R.B., No. 304, 51, 1961
16. 有泉 昌，牧 隆正
土研報，106号，129，昭36
17. 有泉 昌，
土研報，121号，63，昭39
18. 有泉 昌，藤崎邦弥
土研報 122号，1，昭39
19. 有泉 昌，藤崎邦弥
土研報，122号，23，昭39

五ケ瀬川改修計画に伴う水理学的諸問題の検討

(昭和39年3月)

吉川秀夫*
塚本義昭**

目次

1. 五ケ瀬川の概況……(2)
2. 改修計画に伴う問題点と検討方針……(2)
〔1〕分流についての検討……(3)
(1) 検討の目的……(3)
(2) 問題点……(3)
(3) 検討方針……(3)
〔2〕隔流提および河口処理についての検討…(3)
(1) 検討の目的……(3)
(2) 問題点……(3)
(3) 検討方針……(3)
3. 五ケ瀬川河口維持の検討……(3)
〔1〕河口部現地概況……(3)
〔2〕現地調査資料による考察……(4)
(1) 五ケ瀬川河口閉塞について……(4)
(2) 漂砂について……(7)
(3) 海底底質調査……(9)
(4) 沿岸流調査……(9)
(5) 河口内深浅測量結果……(9)
(6) 調査資料から得られる結論……(13)
〔3〕模型実験による河口閉塞の検討……(13)
(1) 模型……(13)
(2) 相似率……(14)
(3) 実験条件の検討……(14)
(4) 検証実験……(15)
(5) 防砂提改良案 1. ……(16)
(6) 防砂提改良案 2. ……(16)
(7) 防砂提改良案 3. ……(17)
(8) 河口に構造物を設けない場合……(18)
(9) 五ケ瀬川河口維持についての実験の結論……(18)
〔4〕五ケ瀬川河口水位の検討……(18)
(1) 既往の洪水による河口水位の検討……(19)
(2) 模型実験による河口水位の推定……(19)
(3) 防砂提の長さの検討……(20)
(4) 河口水位実験による結論……(20)
4. 大瀬川河口閉塞の検討……(20)
〔1〕現地概況と問題点……(20)
〔2〕現地調査資料による考察……(20)
(1) 砂洲欠壊の概況……(20)
(2) 河口閉塞について……(21)
(3) 調査資料による結論……(21)
〔3〕河口維持についての模型実験による検討 (21)
(1) 大瀬川流量0 m^3/s の場合 ……(22)
(2) 大瀬川瀬量 50 m^3/s の場合 ……(22)
(3) 大瀬川流量200 m^3/s の場合 ……(23)
(4) 海岸線変化の実験……(23)
(5) 河口維持に対する実験結果……(23)
〔4〕大瀬川河口水位の検討……(24)
(1) 三次元模型実験による検討……(24)
(2) 二次元模型実験による検討……(27)
(3) 大瀬川河口実験結論……(28)
5. 五ケ瀬川, 大瀬川隔流提の検討……(28)
〔1〕隔流提現地概況……(28)
〔2〕隔流提に対する検討……(28)
(1) 隔流提検討の方針……(28)
(2) 基礎資料……(28)
(3) 不等流計算による隔流提の検討……(29)
(4) 大瀬川水位および隔流提防高の検討…(31)
(5) 掃流土砂量の比較……(31)
(6) 隔流提検討の結論……(32)
6. 大瀬川, 五ケ瀬川分流ぜきの検討……(32)
〔1〕現地概況と問題点……(32)
〔2〕不等流計算による現状での分流量の推定 (32)
〔3〕模型実験による分流ぜきの検討……(33)
(1) 模型実験による検討方針……(33)
(2) 模型実験概要……(33)
(3) 検証実験と粗度調整……(33)
(4) 現状における分流実験……(34)
(5) 第1案分流ぜき実験……(34)
(6) 第2案分流ぜき実験……(40)
(7) 第3案分流水路実験……(42)
(8) 分流実験結論……(43)

* 河川部長 工博
** 派遣研究員 九州地建延岡工事事務所調査係長

1. 五ヶ瀬川の概況

五ヶ瀬川は熊本，宮崎両県境にある向坂山に源を発し流域面積 1,816 km²，流路延長 103 km であり，幹川，北川および祝子川をもって水系をなす九州有数の河川である。

この河川は下流部において延岡市を貫流し，河口に延岡港をもち，かつ地形的に非常に複雑な河状を呈し（図-1），治水上多くの問題点をもっている。

すなわち，本川は河口より約 8 km 上流で大瀬川を分派し，約 6 km 下流で再び合流している。さらに河口付近には広い水面をもち，これに祝子川，北川が流入し，日向灘に注いでいる。

五ヶ瀬川，北川の河口の大半は海からの漂砂により埋められ，河口にある延岡港の航路維持が困難になっている。

また，通常大瀬川河口と呼ばれている地点は T.P＋3～4 m，幅 150 m にわたる砂洲が全面的に発達し，完全に河口を閉塞し，出水時河口水位が高まるにつれて欠壊し，洪水後波浪により再び閉塞されている。

このような状況のために，出水により種種の障害が生じている。すなわち，主なものは(1)分流後再び合流するので，両川のうち高い方の水位（大瀬川）によって，他の一方の水位（五ヶ瀬川）がせき上げられ，分流後の五ヶ瀬川の水位を高めている。(2)河口部を閉塞した砂洲によって洪水がせき上げられるため，河口水位を高め，洪水被害の一因となっている。

これらの諸問題を水理的に検討するため，水理計算および模型実験が行なわれた。

2. 改修計画に伴う問題点と検討方針

前に述べたように，五ヶ瀬川水系の改修計画には次の二つの問題点が残されており，これを解決することが急務とされている。

その 1 は 8 K200 地点付近における大瀬川と五ヶ瀬川の分流の検討であり，その 2 は 2 K700 から 1 K600 までの間において大瀬川と五ヶ瀬川を隔流し，再び合流させないで別別に海に放流させるための隔流の水理的設計

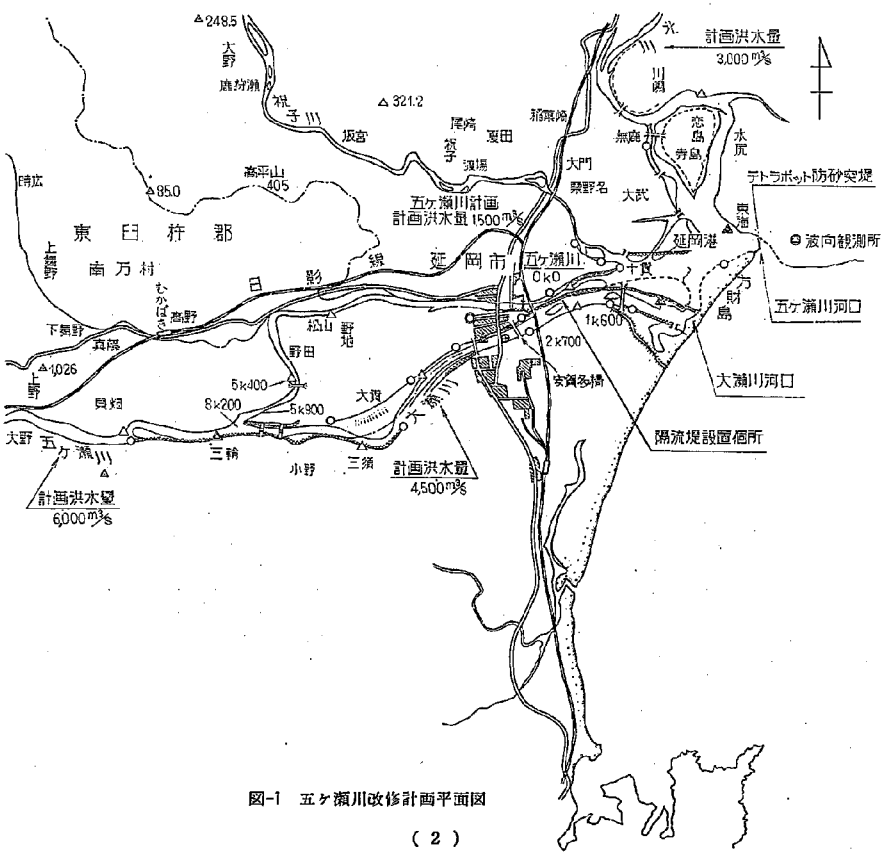


図-1　五ヶ瀬川改修計画平面図

ならびに両川の河口維持の検討である。

〔1〕 分流についての検討

（1） 検討の目的

出水のたびに不安定である大瀬川と五ケ瀬川の分流比を一定させ，両川の河道計画を樹立するためである。

（2） 問題点

分流に関する問題点は計画洪水に対し計画された分流量を得るためのせきの形状，その設置位置，分流点の形状，平水の場合の分流量などを決定することにある。

（3） 検討方針

分流点周辺の模型を製作し，水理実験を行なって問題を解決する。したがって，この実験に必要な資料（分流点下流の水位—流量曲線等）は不等流計算を行なって求める。

〔2〕 隔流堤および河口処理についての検討

（1） 検討の目的

2K700 から1K600 までの区間に大瀬川と五ケ瀬川に隔流堤を設ける目的は，8K200 地点で分流した両川が下流で再び合流するならば，分流ぜきで流量を規制しても，合流点で大瀬川の高い水位により流量の少ない五ケ瀬川の水位がせき上げられるため，両川を隔流することにより，分流点下流の五ケ瀬川の水位を下げるためである。また，同時に大瀬川，五ケ瀬川が別別の河口をもつことになるので，この点についても検討しなければならない。

（2） 問題点

両川の間に隔流堤を設ける場合には次に示すような問題点について検討しておくことが必要である。

その1は，現在では大瀬川と五ケ瀬川は分流した後下流において再び合流しているため，平水時には一つの河口となり，洪水時砂洲が切れて別の河口を生ずる状況にあるが，改修後隔流堤を設置すると別別の河川となる。したがって，現在完全に閉塞している大瀬川河口が改修後どのように変化し，また出水時にその河口砂洲によってせき上げ高はいかほどになるか検討しなければならない。

もしせき上げ高が大きい場合には，隔流堤を設置した場合，五ケ瀬川の水位が下がっても，大瀬川の水位が上がり，隔流堤両側の水位に差がつきすぎ，隔流堤の安全を害することになる。

その2は，隔流堤設置後の五ケ瀬川河口の変化についての検討である。すなわち，現在の五ケ瀬川河口は入退潮量と五ケ瀬川水系の平水流量で完全な河口閉塞はまぬがれている。しかし，隔流堤設置後は入退潮量，平水流量ともに減少するため，現在すでに困難な延岡港の航路維持がはたして可能であるかどうかの検討である。

その3は隔流堤の位置，形状を決定することである。

（3） 検討方針

その1：大瀬川河口水位の検討

この問題については三次元模型実験により，河口砂洲によるせき上げ高を検討し，さらに二次元実験の結果を用いて理論的な検討も行なう。

その2：五ケ瀬川河口維持の検討

この問題に対しては現地の調査資料を検討し，隔流堤設置後の河口状況を推定すること，および模型実験によって河口を維持するための防砂突堤の最良案を見いだし，この突堤が河口水位にどの程度の影響を及ぼすかを検討する。

その3：隔流堤の位置形状の検討

この問題に対しては分流実験により定められる分流量や両川の河口水位に関する実験の結果を用いて，二，三の設置予定位置に対して両川を完全分離した場合の不等流計算を行ない，その水位差などから検討する。

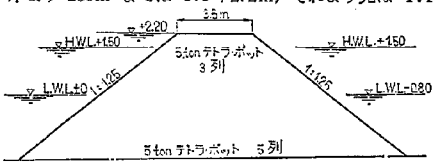
3. 五ケ瀬川河口維持の検討

〔1〕 河口部現地概況

五ケ瀬川河口の左岸は海に突出した岩盤よりなり，右岸は7 km にわたる砂浜海岸の最北端に流出している。河口内には約3 km²の感潮水面があり，幹川と北川との合流点に延岡港がある。

五ケ瀬川河口は漂砂による砂洲が発達し，平水時には河積が相当狭ばめられ，多量の漂砂が砂洲の先端を迂回し，河口内に侵入し，また砂洲自体も移動するため，延岡港の航路維持に支障をきたしている。

このため昭和34年2月より，方財島北端から河心に向って延長 300m のテトラポッドの防砂突堤が設けられ（図-1），漂砂の侵入防止と，河積を狭ばめ河口における掃流力を増す目的で施工されてきた。現在では突堤は図-2に示すとおりであって，5t テトラポッド3列で右岸より 150m までは T.P+2.2m，それより先は T.P



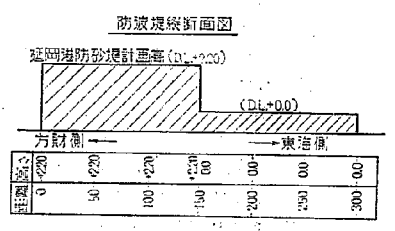


図-2　延岡港防砂堤標準断面図

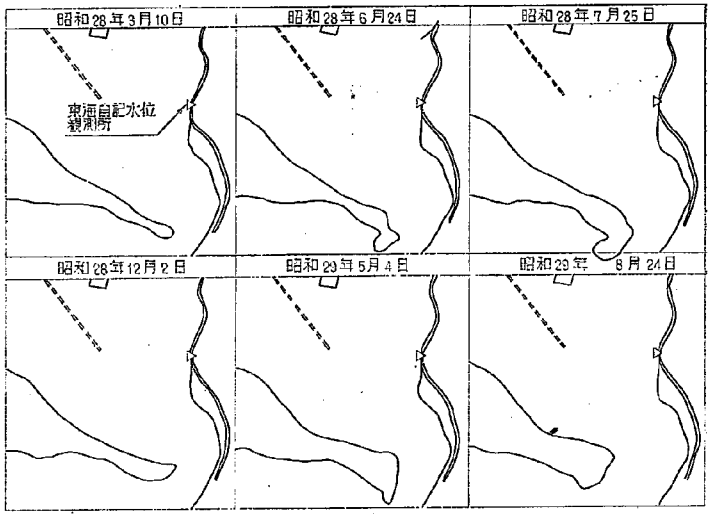


図-3 (1) 五ヶ瀬川河口砂洲

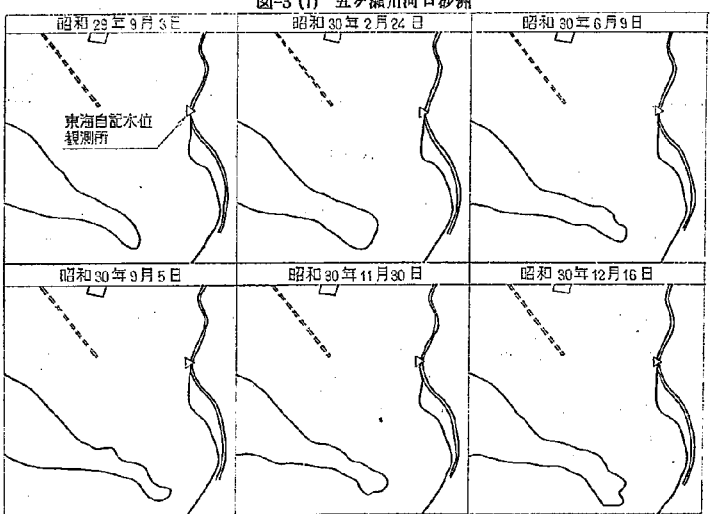


図-3(2) 五ヶ瀬川河口砂洲

+0.0m となっている。

〔2〕 現地調査資料による考察

(1) 五ヶ瀬川河口閉塞について

五ヶ瀬川河口に発達している砂洲の平面実測は昭和28年以来延岡工事事務所によって行なわれ，その結果は図-3 に示すごとくである。これより見ると，五ヶ瀬川河口では完全閉塞をすることはなく，左岸側には常に水路を残しており，また冬期間において砂洲が発達し，夏期には出水があるため，砂洲の発達が少ないことが認められる。砂洲の平面実測より，河口部における各点の砂洲の発生頻度を調べてみると図-4，5 に示すようになる。

図-4 は河口防砂堤設置前のものであり，図-5 は設置以後のものである。両図より見るに，防砂堤の設置の有無にかかわらず，砂洲の発生する範囲はほぼ同様であり，設置後の方が砂洲が左岸側に延びることが少なくなるように認められ，防砂堤の効果が認められる。

図-3 から横軸に時間，縦軸に月ごとの累計流量と砂洲の発達の長さをとり，河川流量と砂洲の形状との関係を調べて見ると図-6 に示すようになる。すなわち，砂洲の発達，方向をみるため方財島汀線の延長より砂洲の先端が海側に発達しているものを－(負)，河口内に発達している砂洲を＋(正)とし，砂洲の未発達の部分は実線

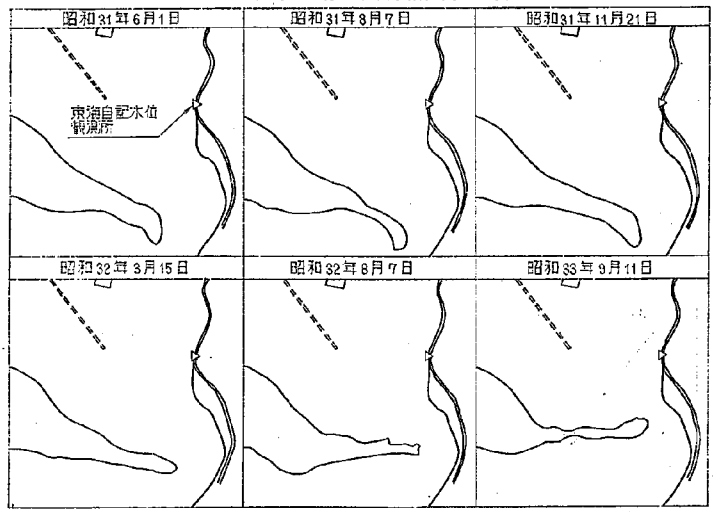


図-3(3)　五ヶ瀬川河口砂洲

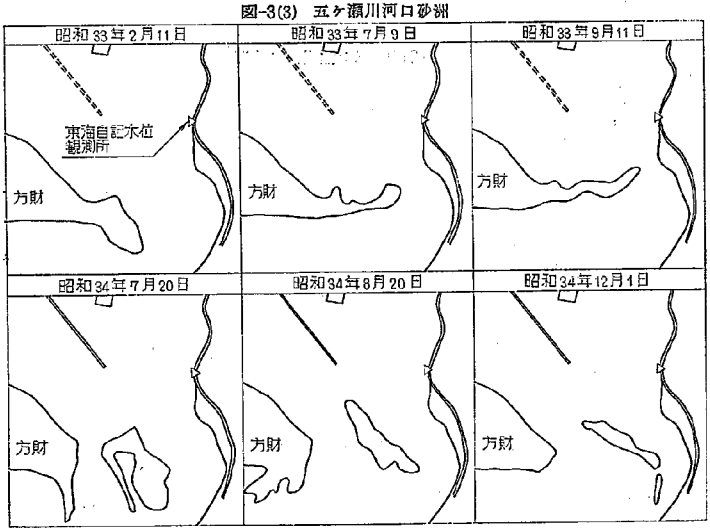


図-3(4)　五ヶ瀬川河口砂洲

で結ばなかった。なお，風向の頻度図をもあわせて写した。この図より，

a．昭和32年の出水までは実測された砂洲のほとんどが汀線の延長より海側に向って発達している。

b．昭和32年以降は砂洲が河口内に向って発達する傾向がある。

c．河口砂洲の延長が500m を越えることはない。

河口砂洲の形状は大別すれば図-7 に示すようになる。

この形状について考察すると次のように考えることができるであろう。

図-7 のⓐ形は砂洲としては最も単純な形で，矢印に示す沿岸流に伴った漂砂が次第に砂洲を発達させ，河川の平水流量による掃流砂量と，波により運ばれて来る漂砂量が釣り合った状態である。ⓑの形は河川流量による掃流砂量が波による漂砂量を上廻わり，砂洲の先端を掃流し，先端を海側に曲げた状態である。ⓒの形は河川流量による掃流量より，波による漂砂量が多くなり，次第に河口内に砂洲を移動せしめている状態である。ⓓの形は出水のため河口水位が高まり，河川流が砂洲をのり越し，その流れにより砂洲が分断されている状態である。これらの推論は後に述べる実験において確認された。すなわち，ⓐの形は比較的波高が小さく，波向が汀線に直

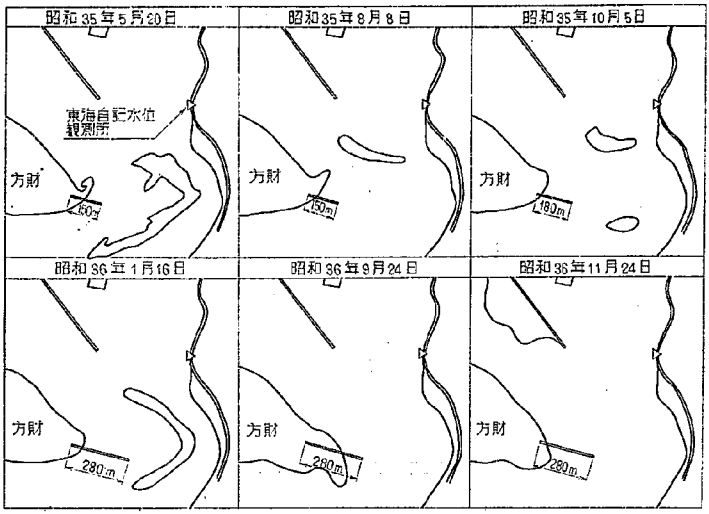


図-3(5) 五ヶ瀬川河口砂洲

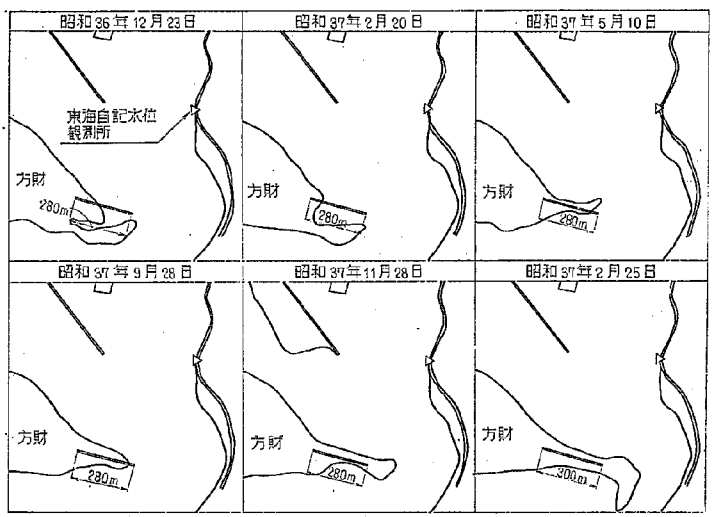


図-3(6) 五ヶ瀬川河口砂洲

角の場合に発生し，◎は比較的沿岸流による流れが強いとき，すなわち，波高が比較的高く，波高も汀線にある角度をもつときにみられた。

以上のことから砂洲の発達は河川流量，波高および波の方向によって定まるものと考えられる。

五ヶ瀬川河口は大瀬川河口とも関連しているので，両者の関連を調べてみる。昭和28年から32年までの両川の河口砂洲を比較してみると，五ヶ瀬川砂洲の発達が幅，高さともに著しく，大瀬川砂洲の発達はそれほどの規模でなかったと思われる。すなわち，出水があると，大瀬川の河口砂洲が未発達なため，越流水がこれを掃流し，大瀬川を開口する。この結果，五ヶ瀬川河口に流出する流量は砂洲の先端を海側に曲げる程度で，それをのり越す流れとならず，砂洲自体は安定していたと考えられる。

しかし，昭和32年の出水は五ヶ瀬川の河口形状を一変させた。すなわち，この出水は大瀬川の砂洲の一部を開

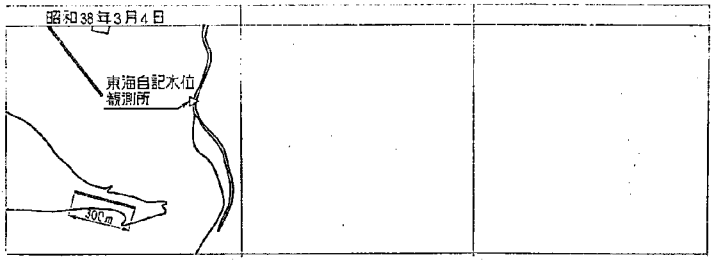
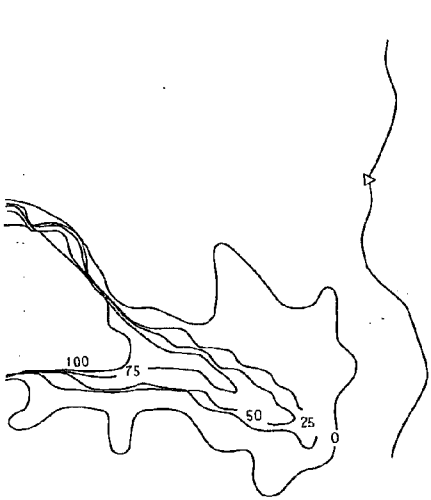
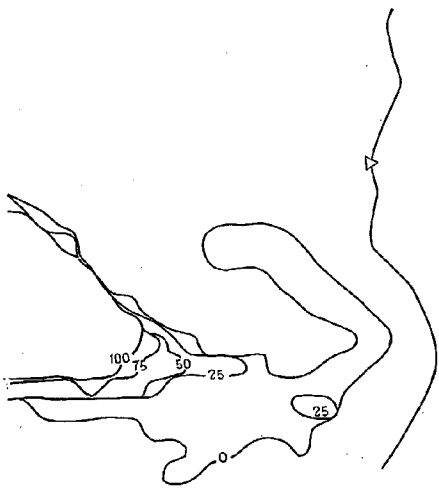


図-3(7)　五ヶ瀬川河口砂洲



数字は生起百分率を示す

図-4　五ヶ瀬川河口砂洲発生頻度（防砂堤設置前）



数字は生起百分率を示す

図-5　五ヶ瀬川河口砂洲発生頻度（防砂堤設置後）

口したにすぎず，多くの流量が五ヶ瀬川河口に流れたため，河口水位を高め，左岸側砂洲の一部を欠壊した。このため，五ヶ瀬川河口砂洲は島状の砂洲となり，これが波浪，河川流量等の関係で河口内を移動したと考えられる。なお，宮崎港に設けられた導流兼防波堤も河口における河状を不安定にした原因の一つと考えられる。

(2)　漂砂について

沿岸漂砂を調べるために漂砂箱を昭和34年11月18日から20日までの間，汀線よりほぼ300m沖合に設置して事務所が測定した。漂砂箱回収後，方向別の漂砂の粒度と重量を測定した結果は図-8に示すごとくであった。この結果から次の事実が認められる。

a）汀線杭0/5と1/0の地点ではN方向から来る漂砂が微小であり，S方向が最も多く，E，W方向がこれにつぐ。

b）漂砂量は五ヶ瀬河口付近が最も少なく，南に遠ざかるにつれて増加する。

c）平均粒径は1/0地点で0.5～0.6mmを示し，他の測点の平均粒径0.3mmより大きい。また平均粒径は方向によって差異は認められない。

これらのことから次のことが推論される。

a）漂砂の移動方向はS方向を中心としているものと推定される。

b）1/0地点で平均粒径が大きいのは昭和32年8月～

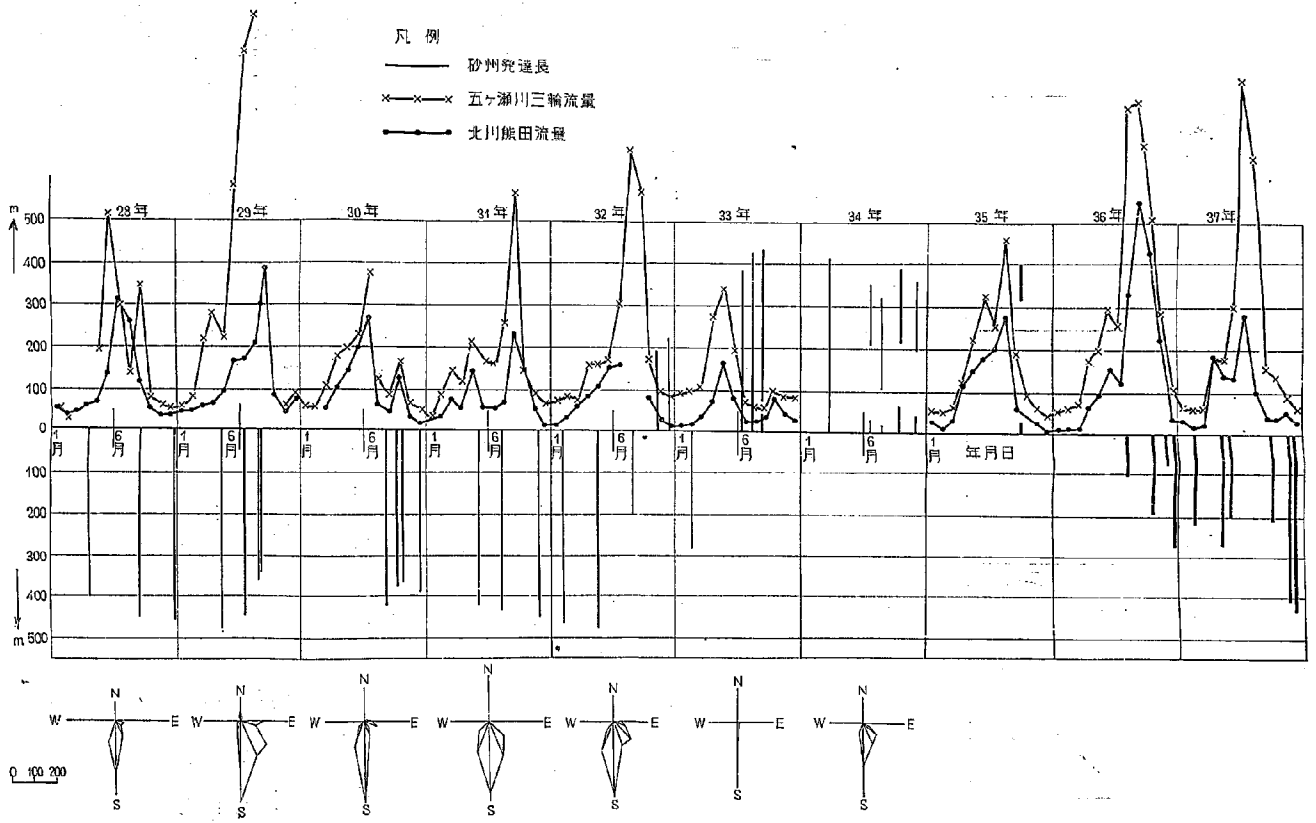

凡例
砂州発達長
五ヶ瀬川三輪流量
北川熊田流量
×10⁷m³
m
28年
29年
30年
31年
32年
33年
34年
35年
36年
37年
1月
6月
年月日
N
W
E
S
0 100 200

図-6 汀線移動図

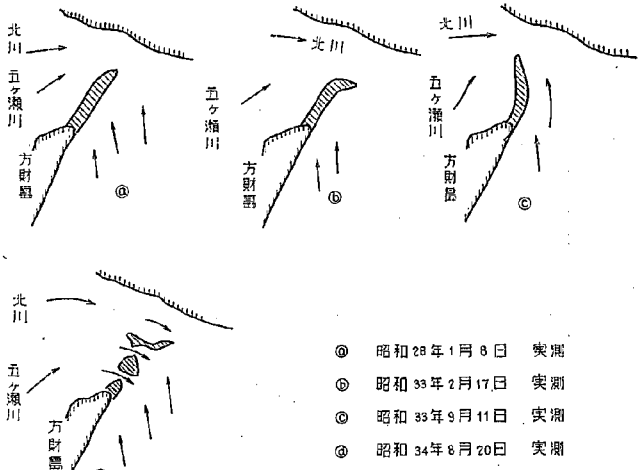
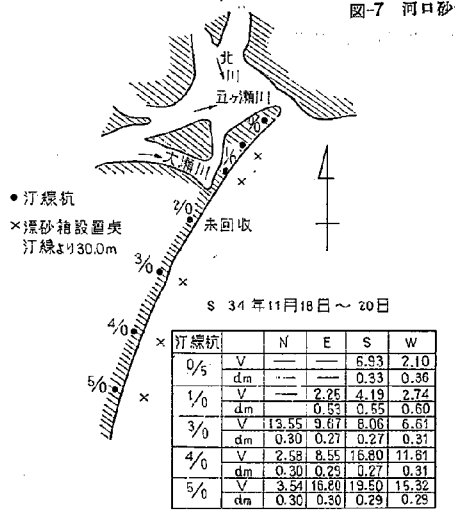


図-7　河口砂洲形状分類図



S 34年11月18日～20日

汀線杭		N	E	S	W
0/0	V	—	—	6.93	2.10
	dm	—	—	0.33	0.36
1/0	V	—	2.25	4.19	2.74
	dm		0.53	0.55	0.60
3/0	V	13.55	9.67	6.06	6.61
	dm	0.30	0.27	0.27	0.31
4/0	V	2.58	8.55	16.80	11.61
	dm	0.30	0.25	0.27	0.31
5/0	V	3.54	16.80	19.50	15.32
	dm	0.30	0.30	0.29	0.29

表中Vは漂砂量量(kg)，dmは平均粒径(mm)

図-8　漂砂調査結果

33年7月にかけて大瀬川が開口していたため，平均粒径の大きい砂が掃流されてきたためと考えられる。

c）測定期間中の波高は細島の風の資料から1m以下であったと推定され，この程度の波に対して相当の沖合において底質が移動することが知られた。

（3）　海底底質調査

海底底質については昭和35年1月9日と35年12月21日の2回汀線より沖合に50，100，300，500および1,000mの地点において測定した資料があり，その平均粒径の分布は図-9，10に示すごとくである。これによると次のことが認められる。

a）五ヶ瀬川河口右岸（0/0）から1/8地点にかけて，沖合300mぐらいまでは他に比して平均粒径が大きい。

b）1/8から5/2にかけて，汀線から1,000m沖合の底質の平均粒径はほぼ一定であり，0.23～0.3mmである。

c）2回の調査結果の比較から，0/0から1/8にかけて沖合300mぐらいまでは平均粒径に差が認められるが1/8から5/2にかけては差が認められない。

（4）　沿岸流調査

沿岸流を調査し，漂砂の卓越方向を知るために，浮子の移動を時間的に追跡したものであるが，荒天時でない時の測定が，この目的に合致するかどうかには疑問がある。この調査は30年から34年にかけて行なわれ，図-11，12，13にその一例を示す。

これらの調査結果より，ほとんどの浮子の流向が風に支配されていることが知られる。したがって，この調査は海水の表面の流れをとらえただけで，漂砂の原因となる海底の流れを知ることは本調査からは困難である。ただ31年3月の実測結果が示すようにSEの方向の風に対して浮子が河口内に運ばれるのを観測しているのは注目にあたいする。

（5）　河口内深浅測量結果

河口内深浅測量は昭和29年から現在に至るまで数回行なわれており，その結果は図-14(1)～(8)に示すごとくである。これから次のことが認められる。

a）昭和29年と32年の河口は右岸の堆砂が汀線より突出し，これが導流堤の役目をしているために左岸にみお筋を作り河道は安定した形となっている。

b）昭和35年3月と9月の河口は右岸の河口砂洲の一

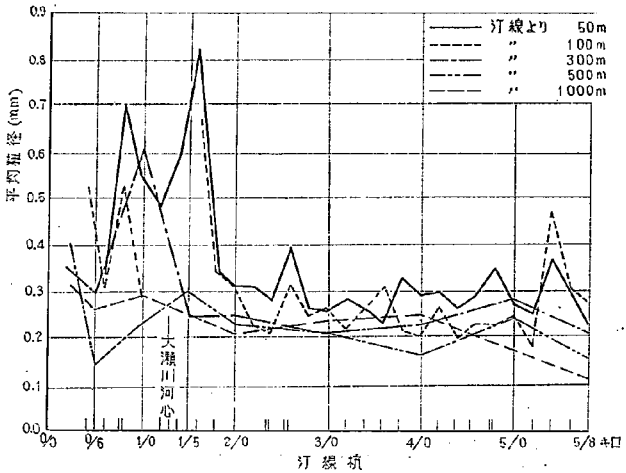


図-9 海底砂の平均粒径（昭和35年1月9日観測）

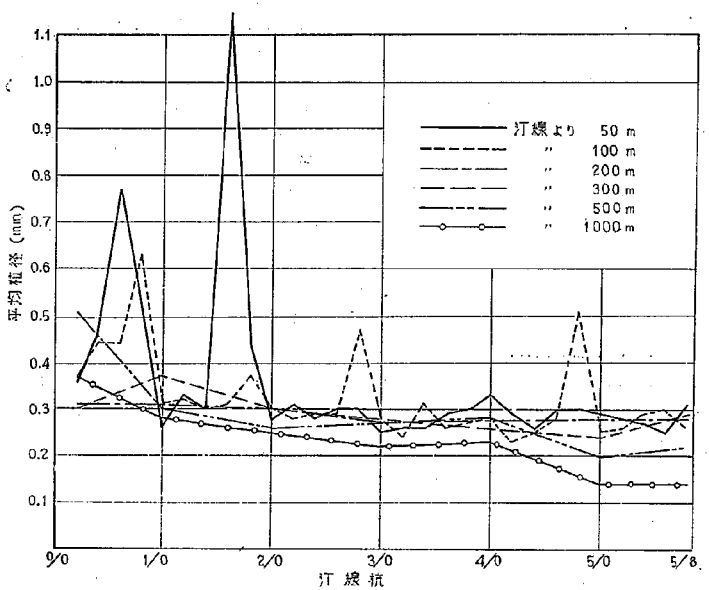


図-10 海底砂の平均粒径（昭和35年12月21日観測）

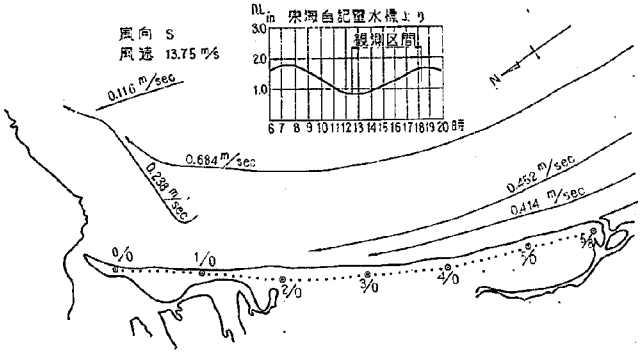


図-11 沿岸流（昭和30年3月17日観測）

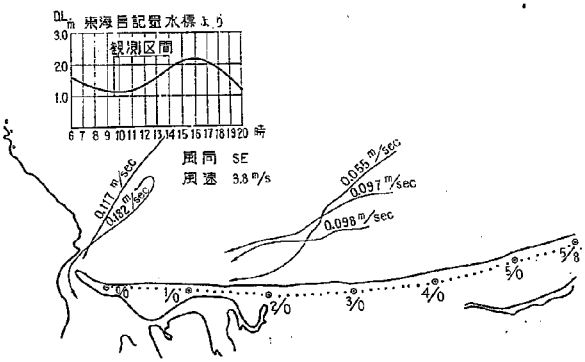


図-12 沿岸流（昭和31年3月23日観測）

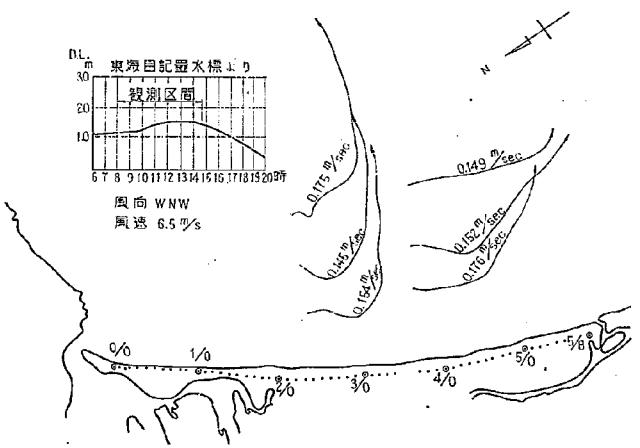


図-13 沿岸流（昭和32年2月10日観測）

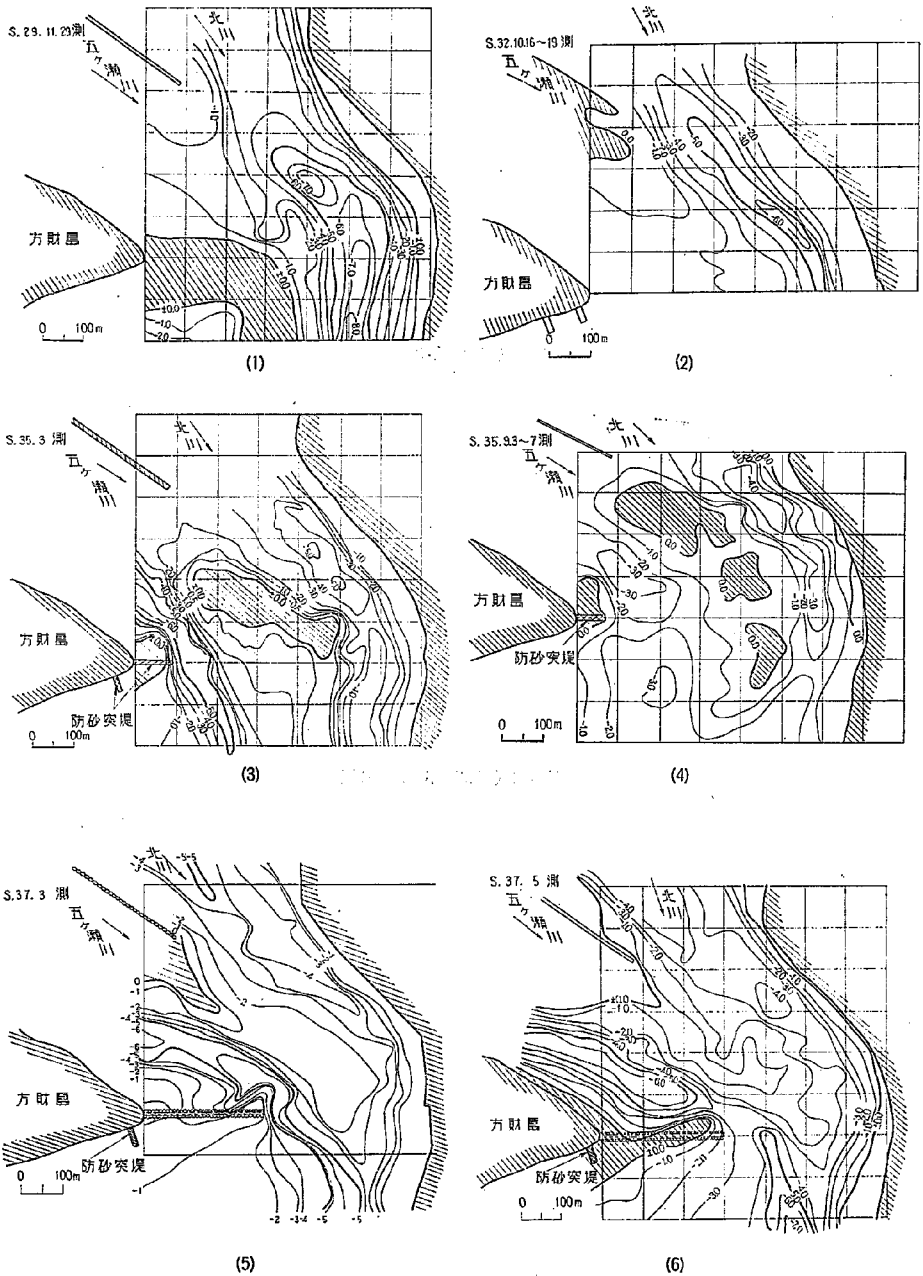
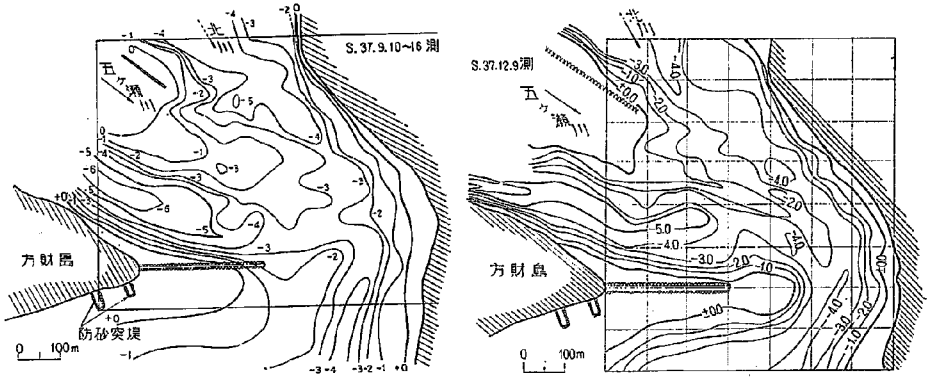


図-14 五ヶ瀬川河口深浅図



(7)　(8)

図-14 五ヶ瀬川河口深浅図

部が切れ，開口部が2カ所となり，島状になった河口砂洲は流れと波によって河口部全体に拡がり，そのため全般的に水深は浅くなり，延岡港の航路維持が困難になった。

c）昭和37年の河口は36年の集中豪雨によって河口外に掃流された土砂が再び河口内に向い始めた様子が観察される。

これらのことから，延岡港の航路維持のためには，昭和29年にみられた河状のように右岸から伸びる河口砂洲を固定し，左岸にみお筋を作り，河道を安定させることが良策と思われる。

（6） 調査資料から得られる結論

a）昭和32年の出水以前は五ヶ瀬川河口砂洲は右岸から500mにわたって発達していた。このため流心が左岸に寄り，みお筋を形成し，航路維持に良い結果を与えていたが，一度河口砂洲のバランスが崩れると，砂洲は切れ，砂は河口内一様に拡がり，航路維持が困難となった。

b）したがって，航路維持のためには防砂突堤により河口砂洲を固定し，29年頃の河状にすることが望ましいと考えられる。

c）河口砂洲は平水流量と入退潮量による掃流力と波による砂の運搬力と釣り合う位置まで発達する。したがって，導流堤の設置により，河川の水理量の減少のため砂洲の発達は過去ほぼ500mでつり合っていたものが，若干延長されることになるであろう。

d）漂砂箱による調査によると，漂砂量はS方向を中心として多かった。

e）海底底質の資料から，沖合ほぼ300m，五ヶ瀬川河口から右岸1K800にわたって平均粒径が大きく，河川の影響を受けていると考えられる。

f）右岸1K800以南および沖合500mより遠くは砂の平均粒径はほぼ均一であった。

g）沿岸流の調査によると，SEの風が河口内に運ぶ漂砂に最も影響があるように思われる。

〔3〕 模型実験による河口閉塞の検討

この模型実験は主に五ヶ瀬川河口の防砂堤について検討し，河口閉塞対策の資料とするために行なわれた。

（1） 模　型

模型は大瀬川をも含めて図-15の範囲で昭和34年の実測結果に基づいて製作された。

模型の縮尺：水平，鉛直方向とも 1/70

模型河床：モルタル仕上げで表面にアスファルト乳剤を散布した固定河床，ただし，漂砂移動観測のた

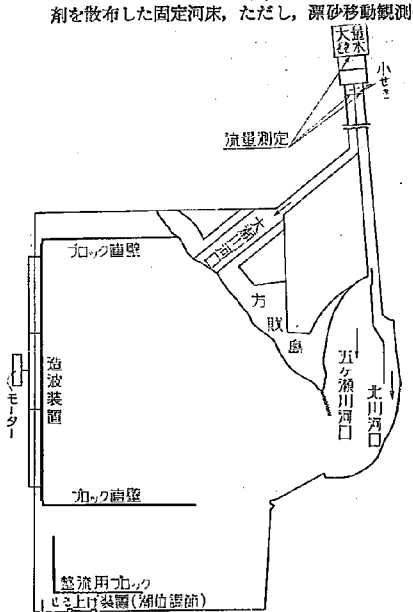


図-15 五ヶ瀬川模型平面図

めに，この河床上に比重1.085，平均径0.47mmのおがくずを敷いた。

造波装置：造波板の長さ 35m，高さ 0.5m
15馬力モーターを使用

（2） 相似率

一般に河川の模型実験は幾何学的縮尺を決定すると現地と模型のフルード数を一致させ，その結果からそれぞれの縮尺を定めるのが常である。

一方，河口を含む海岸の実験においては複雑な現象，すなわち，河川流，潮流，漂砂，潮汐，密度流，波浪等が重なり合っているため，実験上の相似関係が非常に複雑である。

したがって，現在では河口を含む海岸模型実験の相似律はほとんど確定されていない。

本実験ではフルードの相似率を主として考え，現地五ケ瀬川の河口砂洲の状況が条件に応じて模型に再現するよう，既往資料を基にして工夫することによって相似性を保つようにした。この詳細については検証実験の項において述べる。

（3） 実験条件の検討

a）波　向

波高の選定は実験結果を左右する最も大きな要素であると考えられる。したがって，その決定にあたり昭和25年から34年までの10年間細島（延岡の南約16 km）で観測された風向および風速の資料から 10 m/sec 以上の風速をもつ風について風向頻度図（図-16）を作成した。この結果S方向の風が年間を通じて卓越しているし，また，b）において検討する方向別の波のエネルギーにおいてもSおよびSSE 方向が卓越していることを考え合

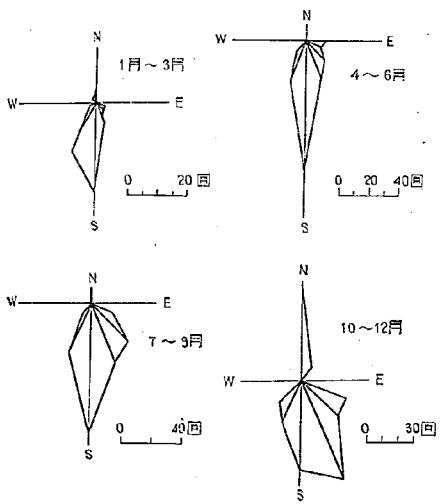


図-16　細島風向頻度図

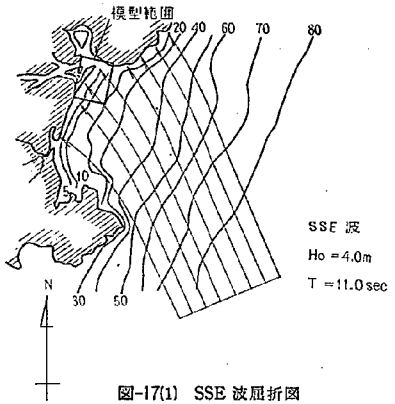


図-17(1)　SSE 波屈折図

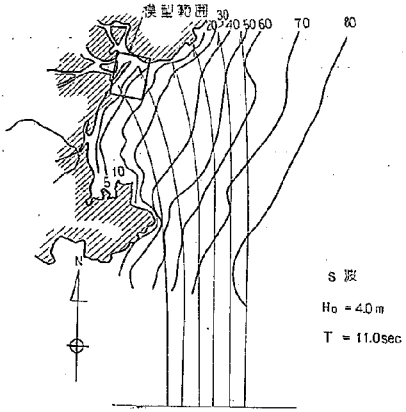


図-17(2)　S波屈折図

せ，S方向の波を検討の対称とする。したがって，これによって起こされるS方向の沖波に対し，波の屈折図（図-17(1)，(2)）を考慮して，SSE の波向を実験の対称とすることに決定した。

なお，この他の波についても検討するため，汀線に直角に入射する波についても実験を行なった。これは模型範囲が汀線より約2 km までのために，波高の小さい波はほとんどが屈折のために汀線に直角になるためである。

また細島の風の資料を実験の対象に選んだのは同時刻の都井岬および足摺岬の風向を調べた結果，3地点で若干のずれが認められるが，ほぼ同方向であったため，沖波の波向を定めるには適当であると判断されたからである。

b）波高および週期

波高および週期についても，実測資料が完備していないため，細島の昭和32年から36年にかけての風向，風速の資料を用いて，S.M.B 法により波高および週期を推

表-1　細島風向風速資料から SMB 法で推定した波高—周期頻度表（32.8～37.6）

波高(m) ＼ 周期(秒)	～3.0	～4.0	～5.0	～6.0	～7.0	～8.0	～9.0	～10.0	～11.0	～12.0
～ 1.0	27	111	118	21	4					
1.1 ～ 1.5			52	144	21					
1.6 ～ 2.0				85	106					
2.1 ～ 2.5					52	102				
2.6 ～ 3.0						64	65			
3.1 ～ 3.5						4	14			
3.6 ～ 4.0						11	16			
4.1 ～ 4.5								7		
4.6 ～ 5.0										
5.1 ～ 5.5										
5.6 ～ 6.0								9	22	
6.1 ～ 6.5								13	20	5
6.6 ～ 7.0										11

表-2　細島風向風速資料から SMB 法で推定した波高—周期から求めたエネルギー表（32.8～37.6）

波高(m) ＼ 周期(秒)	～3.0	～4.0	～5.0	～6.0	～7.0	～8.0	～9.0	～10.0	～11.0	～12.0
～ 1.0	29	277	285	111	16					
1.1 ～ 1.5			368	1,785	798					
1.6 ～ 2.0				1,051	1,818	109				
2.1 ～ 2.5					2,320	1.682	729			
2.6 ～ 3.0						3,669	4,511			
3.1 ～ 3.5										
3.6 ～ 4.0						1,245		2,330		
4.1 ～ 4.5								1,230		
4.6 ～ 5.0										
5.1 ～ 5.5								2,820	6,120	
5.6 ～ 6.0								5,560		
6.1 ～ 6.5									8,480	2,480
6.6 ～ 7.0										6,100

定した。その結果より，表-1 は同じ波高と週期をもっている波に対し，継続時間を含めた頻度表として作成した。また，これらの波に対し，単位幅を横切って輸送される波の平均のエネルギー量を求め，同じように同波高，同週期別の合計をした。表-2はその結果である。なお，波のエネルギー量（W）の算出には次式を用いた。

$$W=\frac{1}{16}wH^2\sqrt{\frac{g}{k}}$$

ここに，　H：波高，
　　k：$2\pi/L$
　　L：波長

である。

これらの結果から実験に用いる波は現地で波高 4 m，週期 7.8秒，模型にして波高 5.7cm，週期 1.9 秒の波とした。

c）海底材料

現地砂の平均粒径はほぼ 0.3mm である。したがって，模型にすると 0.3/70≒0.004 mm となり，このような平均粒径の砂はもはや砂の性質をもたない。このために河床材料はできるだけ平均粒径の小さい 0.2mmの砂とおがくずとが用いられた。なお，おがくずと砂の水中比重の比を求めると約 1/20 となり，この結果，おがくずもこの模型では少し河床材料としては大き目の河床材料と考えられる。

〔4〕　検証実験

検証実験とは現地の現象と模型の現象とが一致しているかどうかを確かめる実験である。

これは相似律で述べたように五ケ瀬川河口に発達している砂洲を模型に再現させることを目的とした。すなわち，36年の集中豪雨によって海に掃流された砂が沿岸流と波によって再び河口内に侵入していく状況を実験の対象とした。

実験条件は河床（漂砂）材料として数時間水にぬらしたおがくずと平均粒径 0.2 mm の砂の 2 種類を用い，波は海底材料の関係から最多頻度より，やや大きい波高 5.7cm，周期1.9秒のものとし，波向は SSE と汀線に直角（ほぼ ESE）の 2 種類とした。

実験方法は，現在現地で施されているテトラポッドによる防砂堤を模型に設け，漂砂源と思われる方財東部の海岸に海底材料を投入して，数時間にわたって波による移動を観察した。

なお，河川からの流出流量は平水流量に近い 50 m³/s とした。

検証実験の結果は砂による移動現象は非常に緩漫であった。すなわち，水深の深い所では砂漣が発生する程度で，漂砂の移動現象の再現は余りできなかった。

一方，おがくずを用いた場合は，現地の現象を数時間で再現した。すなわち，実験の始めは防砂堤によって河口内侵入は防止されるが，おがくずの補給を続けること

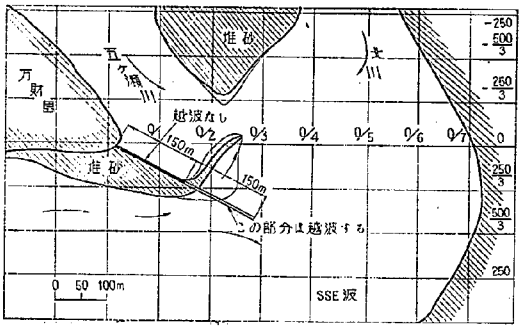


図-18(1)　堆砂状況（検証実験）

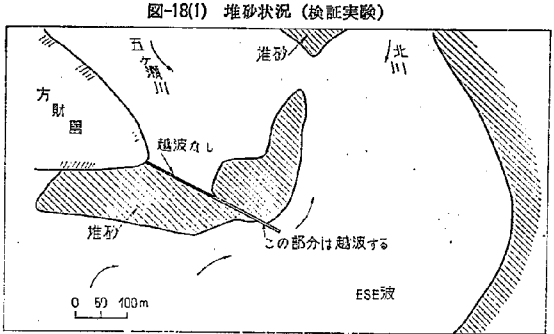


図-18(2)　堆砂状況（検証実験）

により，図-18(1)，(2)にみられるように波向SSEおよびESEの波とも，防波堤にそって堆砂が起こる。

砂洲の概要は不透過になっている防砂堤の前面（海側）に堆積し，低い部分の防波堤をのり越えた漂砂は河口内にかなり堆積し，この部分の防砂堤の前後にも堆砂がみられた。2種類の波のうちSSEの場合は汀線にほぼ平行な流れが卓越し，漂砂が河口内に流れ込むような現象を観測したし，汀線に直角の波は漂砂を河口に押し込むような現象を観測した。

これら2つの実験結果から，37年3月から5月にかけての深浅測量の結果が示すように，防砂堤周辺に砂がつく様子図-14(5)～(8)を再現したと思われる。すなわち，模型と現地の現象がほぼ相似となったと思われる。この結果，現在の防砂堤を若干変更した突堤に対し実験的検討を試みた。

（5）　防砂堤改良案1

防砂堤の目的は河口内に侵入して来る漂砂を防止し，延岡港の航路を維持することにある。

改良案1は現在設けられている突堤を補強した構造物とした。すなわち，突堤の300mのうち先端の150mに75m等間隔で50mにわたる直角の構造物を3本つけ，越波する波のエネルギーを削減し，沿岸流を河口外に向けようとしたものである（図-19参照）。

実験方法および実験条件は以下の実験においては検証実験に同じである。

実験の結果，かなりの量の漂砂が補強された構造物によって食い止められ，河口内に侵入するのが防止されるが，波が越波する限り，図-19(1)に示すように河口内堆砂があると思われる。しかし，波は補給された構造物によって弱められるので，河口内に侵入した漂砂の多くは防砂堤周辺に堆積した。したがって，砂洲を安定させるには効果がある。なお，図-19(2)は防砂堤先端までかさ上げを行ない，完全に越波しない状態での実験結果である。これによると突堤を迂回して漂砂は若干侵入するが，河口内侵入の防止にはかなりの効果が認められた。しかし，突堤の海側は漂砂によって埋まった。

（6）　防砂堤改良案2

検証実験および改良案1の実験において，波向がSSEの場合，汀線50mから200mにかけて非常に強い沿岸流が認められた。し

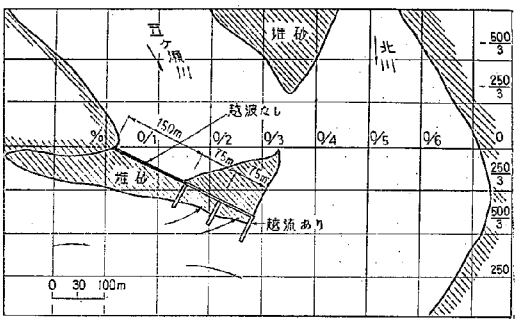


図-19(1)　防砂堤改良案1堆砂状況（SSE波）

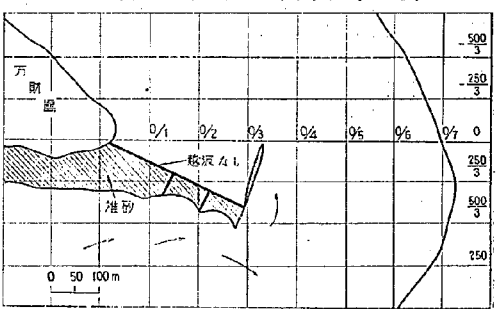


図-19(2)　防砂堤改良案1堆砂状況（SSE波）

たがって，漂砂の河口内侵入はこの沿岸流を弱めることによって解決されると思われる。

改良案2は，現在設けられている構造物を河口外に角度を変えることによって，沿岸流を海側にはね，漂砂の河口内侵入の防止を目的としたもので，その角度を，5°，10° および 15° の場合について実験を試みた。次にその実験結果について述べる。

（i） 5° 角度を変えた場合（図-20(1)参照）

検証実験の結果とほとんど変化がない。

すなわち，堆砂は越波しない構造物の前に汀線と平行につき，越波する 150 m の部分から河口内に侵入し堆積した。なお，河口内の堆砂と防砂堤の間は五ヶ瀬川の平水流量の掃流により，開口しているが，平水流量のない場合または少ない場合にはこれらの堆砂は河口内にまで連らなって発達するものと思われる。したがって，5°程度海側に防砂堤を出しただけでは防砂に関して効果があるとは考えられない。

（ii） 10°変えた場合（図-20(2)参照）

ほぼ 5° の場合と同じ結果であるが，沿岸流と防砂堤のなす角が増しただけ防砂堤前面の洲が海側に発達し，方財島北端の汀線を前進させる。しかし，波の越波する部分から砂洲は急角度で河口内に向い，やはり河口内に漂砂を運び込んでいる。

（iii） 15° 変えた場合（図-20(3)参照）

この程度の角度になると沿岸流と防砂堤の角度が 10° から 20° ぐらいになり，また方財島北端と防砂堤との間の三角形をなす部分に堆砂が発達して，方財島の汀線は前進する。しかし，5°，10° の場合と同じように防砂堤を越える波によって河口内の堆砂が認められた。

（iv） 15° 変え全面越波しない場合（図-20(4)参照）

この場合は砂防堤の海側の部分に全面にわたり堆砂し，河口内の侵入はその先端を回わってわずかしかはいらなかった。これは砂洲の発達により沿岸流を河口に向けなかったことにもよっている。

（7） 防砂堤改良案 3

実験において，500m 沖合に投入したおがくずは一部を残してほとんどが汀線におし寄せられ，汀線周辺に堆積し，前述の汀線と平行な強い沿岸流によって河口におがくずを運んでいる。

改良案3は1，2の案のように河口で漂砂を防止する方法でなく，漂砂源と思われる。方財

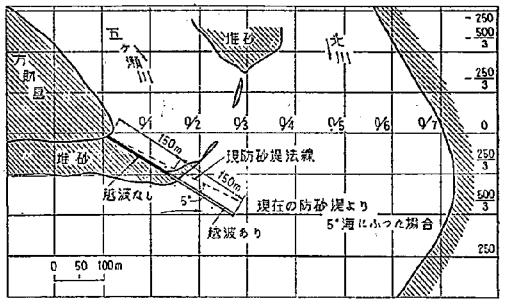


図-20(1)　防砂堤改良案 2 堆砂状況（SSE 波）

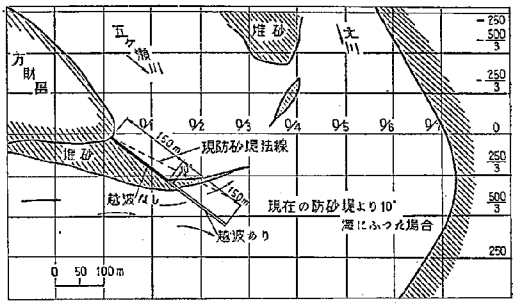


図-20(2)　防砂堤改良案 2 堆砂状況（SSE 波）

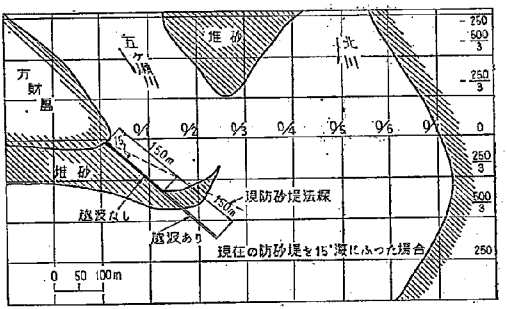


図-20(3)　防砂堤改良案 2 堆砂状況（SSE 波）

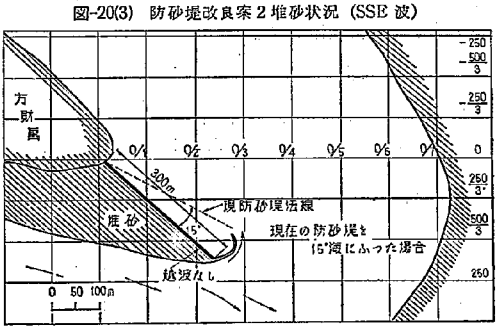


図-20(4)　防砂堤改良案 2 堆砂状況（SSE 波）

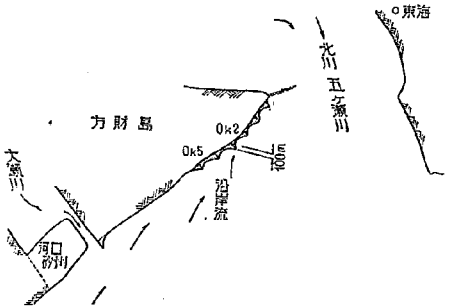


図-21　防砂堤改良案3堆砂状況（SSE 波）

東部の海岸線に 100m の防砂堤を突出させて，これによって防砂させようとするものである（図-21 参照）。

この実験の結果は汀線に平行な流れはほとんど球止され，河口内にはいる漂砂は激減した。しかし，このような構造物を設けることによって，河口に向う漂砂が減少した場合，現地の調査資料で結論したように，河口右岸から発達している砂洲と河口開口部のバランスがくずれ，流量によって種種のみお筋を作り，河口全般が浅くなり，延岡港航路維持が困難となるおそれがある。ただ，一時的に河口内の漂砂侵入を防ぐには改良案の内で最も良い効果をもっているものと思われる。

（8）　河口に構造物を設けない場合

河口にまったく防砂堤を設けない場合，いかなる河状になるか検討を試みた。これは検証実験の裏付け実験で昭和28年から32年の河状を再現することでもある。

この実験の結果，SSE および ESE の2種類の波ともに河口砂洲は 400m を越えて発達した。（図-22(1)，(2)参照）。なお，砂洲の 500m にわたる発達は実測平面図（図-23）によっても確認され検証実験の裏付けにもなった。

（9）　五ヶ瀬川河口維持についての実験の結論

（i）　検証実験は昭和36年の集中豪雨によって掃流された砂洲が再び河口内に侵入していくようすを模型に再現させて模型における再現性を調べた結果，比較的再現性のよいことが知られた。

（ii）　改良案1，2の比較（19頁参照）

（iii）　防砂突堤は越波しない構造物とする方が望ましい。

（iv）　河口付近の汀線に 100m の突堤を数本出すことによって，河口に向う漂砂防止に効果が認められた。しかし河口に補給される漂砂が減少し，流量とのバランスがくずれ，みお筋が安定せず，航路維持が困難となるおそれがある。

（v）　防砂堤は漂砂の河口内侵入防止と河口砂洲の安定のためには，改良案1の全面にわたって越波しない構造物が良案であると思われる。

〔4〕　五ヶ瀬川河口水位の検討

一般に河口港維持のために，河口に構造物を設けると治水上問題がある場合がかなりある。最大の問題点は，その構造物によって流量をせき上げ，河口水位を高め，洪水の一因となることである。五ヶ瀬

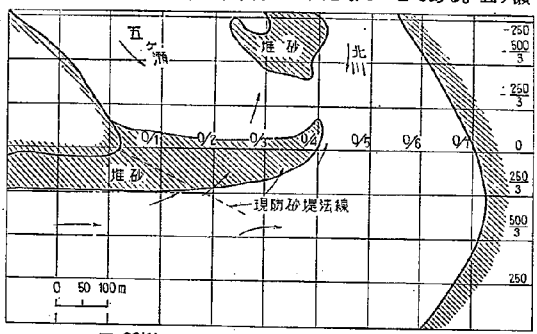


図-22(1)　防砂堤のない場合の堆砂状況（SSE 波）

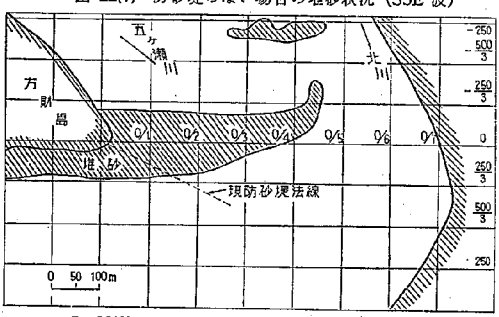


図-22(2)　防砂堤のない場合の堆砂状況（ESE 波）

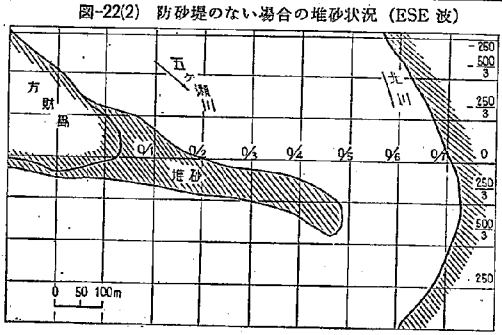


図-23　実測砂洲平面図（昭和32年2月観測）

改良案1，2の比較表

実験名	実験結果
検証実験	・砂洲は防砂堤の前面に沿って，ほぼ汀線の延長に堆砂し防砂堤を越波する部分から漂砂は河口内に侵入した。
改良案1	・補強された横方向に突出した構造物のため，波は弱められ構造物周辺に堆積が多かった。 ・波が越波しない場合，漂砂の河口内侵入をほとんど防ぐが，構造物の前面に多くの堆砂が発生する。
改良案2	・5° の場合，ほぼ検証実験の場合と変わらない。すなわち，現状とあまり変わりがない。 ・10° の場合，方財北端と突堤の間の三角形の部分に砂洲がつき，汀線はやや前進するが越波する部分からの漂砂の侵入量は5°の場合と変わらない。 ・15° の場合，三角形の部分にますます砂がつき汀線を前進させるが，越波する部分からの漂砂の河口内侵入はそれほど変わらない。 ・15° の場合について波を越波しない構造物とした実験によると，先端を迂回して侵入する漂砂が若干ある程度であった。

川河口に防砂堤を設けることによって，河口の水位をどのくらいせき上げるかの検討のため，過去の洪水時の河口水位と潮位の資料から，河口水位を推定し，これを実験によって裏付けた。

（1） 既往の洪水による河口水位の検討

砂洲によるせき上げ高の直接の資料がないため，河口水位（東海の水位）と潮位（細島の潮位）の差を砂洲によるせき上げ高とし，そのときの五ヶ瀬川河口に流出した流量との関係をグラフに表わした。すなわち，昭和32年および34年の洪水時の実測された結果および35年の平水時の資料より縦軸に水位差，横軸に流量をとり，図-24のように示した。この結果，せき上げ高はほぼ流量の関数になることを知り，以下実験によって検証を試みた。

（2） 模型実験による河口水位の推定

防砂堤改良案1の河口維持の実験の結果，おがくずが堆積した部分を d_m=0.19mm の砂におき変え，上流からの現地流量 1,000m³/s，2,000m³/s，3,000m³/s，4,000m³/s，6,000m³/s および 9,000m³/s に相当する模型流量を流し，河口の水位差を測定した。実験に用いた潮位は危険な状態を予想し，昭和29年9月，12号台風時の細島の最も高い潮位 T.P 1.94m を加味して実験潮位は 1.90m とした。この結果，河口水位は表-3に示す値を得た。

表-3　改良案1における河口水位

流量 (m³/s)	1,000	2,000	3,000	4,500	6,000	9,000
河口水位差 (m)	0.04	0.15	0.23	0.68	1.32	0.48
河口水位 (m)	1.94	2.05	2.13	2.58	3.22	2.38

なお，図-25 は流量と河口水位の関係を図示したものである。この実験において，流量が 3,000～4,000m³/s 程度になると河口内の砂が掃流されはじめ砂洲の先端の砂が一塑になる。これは図-7 の ⓑ にあたる。流量が 6,000m³/s 以上になると掃流は激しく，砂洲をのり越す流れが生じ，河積は広まり，河口の水位差と流量には関係がみられなくなる。この実験の結果，河口砂洲によるせき上げは計画流量において異常潮位を加味しても，3.5m よりは若干下まわると思われる。したがって，この程度の防砂堤では現計画洪水流量に対し河川管理上支障はないと思われる。防砂堤改良案2に対する河口水位の推定も，改良案1と同じようにして実験した結果表-4を得た。

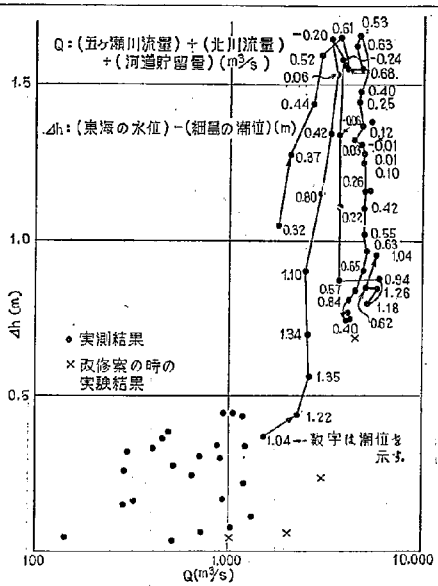


図-24　河川流量と河口水位差との関係

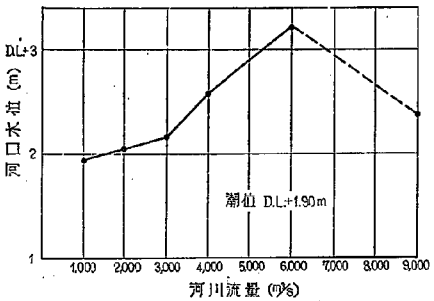


図-25　防砂堤改良案1の場合の河口水位

表-4　改良案2における河口水位（15°の場合）

流　量 (m³/s)	1,000	2,000	3,000	4,500	6,000	9,000
河口水位差 (m)	0.04	0.15	0.26	0.45	0.87	0.49
河口水位 (m)	1.94	2.05	2.16	2.35	2.27	1.39

改修案2の方が1より若干水位が下まわっているのは防砂堤が海に15°ふってあるだけ導流堤の効果をなしているものと思われる。

（3）　防砂堤の長さの検討

300m の防砂堤についての河口水位の検討を試みたが，計画流量 4,500m³/s に対し防砂堤の長さを変えた場合について河口水位を求めた。その結果は表-5 および図-26 に示すごとくである。

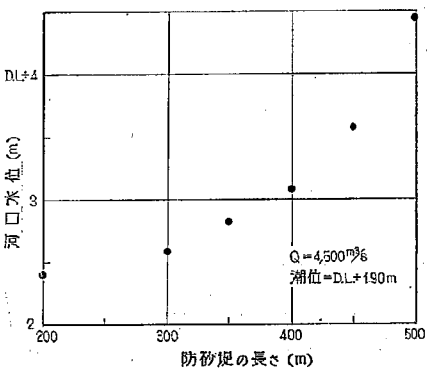


図-26　防砂堤長さと河口水位との関係

表-5　計画流量時の防砂堤のせき上げ高

防砂堤長 (m)	200	300	350	400	450	500
流　量 (m³/s)	4,500	4,500	4,500	4,500	4,500	4,500
河口水位差 (m)	0.51	0.68	0.92	1.18	1.53	2.55
河口水位 (m)	2.41	2.58	2.82	3.08	3.43	4.45

この結果，防砂堤の高さについては河口水位以上の構造物を設けない限り出水により，これをのり越す流れにより堤体は保たれないものと思われる。

（4）　河口水位実験による結論

（i）　既往の洪水により，砂洲による河口せき上げ水位（Δh）と流量（Q）の相関関係を調べた結果は Δh は Q の関数となった（図-24）。

（ii）　防砂堤の改良案1，2において，各種流量についての河口水位を求め表-3 を得た。この結果，異常潮位 1.9m を加味しても河口水位は計画河口水位 3.5m 以下になることが知られた。

（iii）　防砂堤の長さを種種に変え計画流量 4,500 m³/s について，河口水位を実験的に求め表-5を得た。これによると，ほぼ 450m の突堤の場合計画河口水位となった。

4.　大瀬川河口閉塞の検討

〔1〕　現地概況と問題点

現在の大瀬川河口は海からの漂砂によって完全に河口を閉塞され，平水流量は方財島に沿って五ケ瀬川から流出しているのが現況である。この河口閉塞の規模は砂洲縦断幅約 150m，高さ約3～4m（平均海面上）にわたり，大瀬川の河口を完全にふさいでいる。河口砂洲横断図の一例を示せば図-27 のごとくである。全体から見ると，五ケ瀬川と大瀬川の河口に方財島という河口砂洲が発達したと見るべきような河状である。したがって，出水時初期には五ケ瀬川水系の流量はすべて，五ケ瀬川河口に集まるため河口水位が高まり，洪水被害の一因となっている。

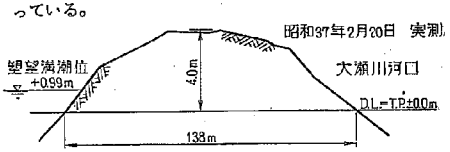


図-27　大瀬川河口砂洲横断図

一方，河口水位が高まると，大瀬川河口砂洲を越流する流れと越波する波浪によって，この砂洲をくずし河口を開口する。したがって，ここでは

①　改修後の大瀬川の河口がどのようになるか。

②　また，この結果，砂洲の発達により，出水時のせき上げはどのくらいになるかを検討する。

〔2〕　現地調査資料による考察

（1）　砂洲欠壊の概況

大瀬川河口砂洲欠壊は最近では昭和24，25，29，30，32年の5回生じた。その規模は開口幅 150m～400m にわたっている。しかし，一度開口しても2～3カ月を経ずして，再び河口を閉塞する。したがって，この調査資料を図-28 のようにまとめた。すなわち，縦軸に汀線杭を（汀線杭0K0は五ケ瀬川左岸，1K300 はほぼ大瀬川流心），横軸に時間（年月）をとり開口の位置とその

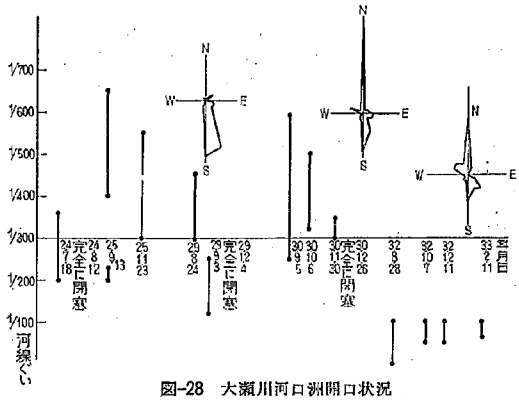


図-28　大瀬川河口洲開口状況

開口幅を示した。なお，図中の風向頻度図は砂洲の開口から閉塞するまでのものを示している。これによると大瀬川右岸で開口しても卓越する河口周辺の漂砂によって次第に開口部を左岸に移し，やがては河口を閉塞する。例外として，32年の欠壊は最初から左岸100mあまりが欠壊し，かなり長期にわたって河口が維持されていた。

（2）　河口閉塞について

a）漂砂について

開口後2カ月を経ずして完全に河口を閉塞する漂砂は特殊な漂砂であろうと思われる。すなわち，出水により掃流された河口砂洲が沖にまで掃流されず開口部に扇形砂洲を作り（模型実験によると D.L−1.5～2.0m ぐらいの高さで，幅約 200m，長さ約 300～400m にわたって堆砂した），これが波によって，再び河口に打ち寄せられ，閉塞の原因となっているものと思われる。

また，この砂の移動は波の性質から海岸に，ある角度をもち，河口右岸から左岸寄りに移動するものと思われる。（図-29は 模型における洪水後の扇形砂洲の 概 要と波浪の進行方向を示したものである）。

開口部が右岸から左岸に変わっていくのは五ヶ瀬川河口砂洲でみられたように右岸から次第に砂洲が発達しはじめると，平水量が次第に左岸の砂洲をけずり開口地点を変えていく。したがって，開口部分は右岸から左岸に変化しているように観測される。一方，海浜こう配は扇形砂洲のため波に対して平衡こう配でないため，あらゆる波に対して多量の漂砂源をもつことになり，漂砂は平水流量の掃流力を上回わり，2カ月を経ずして河口を完全に閉塞してしまうことになると考えられる。

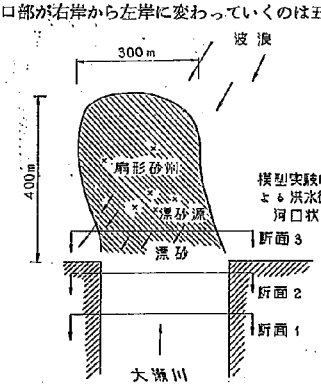


図-29　河口扇形砂洲および波浪の方向の概要

b）32年度左岸開口の特殊性

32年の開口の場合には33年の7月まで完全閉塞しないで開口していた。過去4回の開口がほとんど2～3カ月で閉塞してしまったのが，一年近く開口を続けたのはなぜであろうか。32年の開口当時の砂洲の平面図（図-3 参照）より見られるように，掃流された砂洲が開口部に扇形洲とならず，あたかも右岸に防砂堤を突出させたように，ほぼ100m近く海に伸びて堆積した。また，左岸は32年に施工された川倉によって導流堤の働きをなし，掃流力と漂砂の量がつり合った形となり，河口を維持し，この結果，開口が長期にわたったものと思われる。

（3）　調査資料による結論

i）大瀬川河口は縦断幅150m，高さ D.L＋3～4 m の砂洲が発達し完全に河口を閉塞している。

ii）砂洲は出水により河口水位が高まると開口する。しかし，2カ月を経ずして再び閉塞する。これは河口砂洲が掃流された結果開口部に扇形洲を作り，これが直接の漂砂源になっているものと思われる。

iii）開口から閉塞までの砂洲の開口部は右岸から次第に左岸に変遷していく。この原因は漂砂の卓越方向が右岸から左岸寄りであるためと思われる。

iv）32年の大瀬川河口の開口は川倉が導流堤の働きをなしたことや砂洲が開口部右岸に 100m ほど突出していたため，これが防砂堤の働きをなしていたことなどから，長期にわたって開口していたと思われる。

〔3〕　河口維持についての模型実験による検討

改修後大瀬川は現在の河状のように五ヶ瀬川に付随した河川でなく独立の河川となる。この結果，改修後の河口は種種の条件で，どのような河状になるか，実験による検討を試みた。

この実験に用いた模型は五ヶ瀬川河口模型と同じ条件で製作した。したがって，実験条件（波，河床材料，縮尺等）は五ヶ瀬川河口実験と同じである。すなわち，実験の方法は周期1.9秒，波高 5.7cm の波を模型に起こし漂砂源と思われる。大瀬川右岸におがくずを投入して時間の経過にしたがって，おがくずの移動，堆積状況を観測した。実験時間は1～1.5時間であった。

（1）　大瀬川流量0m³/sの場合

大瀬川に流量がない場合，いかなる河床になるかを導流堤の有無の場合について検討を試みた。

a）導流堤のない場合

この場合は現在の河状とほぼ同一の条件である。実験の結果，大瀬川の砂洲が既往の資料のように完全に河口を閉塞した場合，現地と模型の相似性を検討することができ，検証実験になる。実験の観察によると，河口砂洲は時間とともに右岸から次第に発達しはじめ，約45分で河口を閉塞した。また，砂洲は河道内，すなわち汀線より河口内にでき，その高さも，D.L＋2～2.5m となり，砂洲横断幅約 70m になった（図-30(1)参照）。

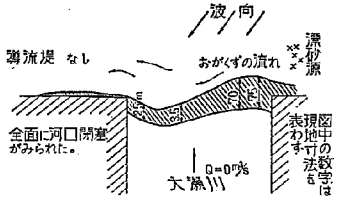


図-30(1)　大瀬川河口実験（$Q=0$）

b）左岸に 50m の導流堤を設けた場合

導流堤を設けても砂洲は完全に河口を閉塞するが，砂洲は河道内よりやや外（海側）に発達する。これは導流堤によって沿岸流が汀線に一様でなくなるためと思われる。しかし，導流堤を設けたことにより，その裏面におびただしいおがくずの堆積があった。これらのことから防砂堤を出すことによっても，河口に流量がない場合には特別の効果がないが，砂洲は河口外に発達する傾向にある。また，導流堤裏面には砂の堆積が起こると予想される（図-30(2)参照）。なお，導流堤を延長し100m としたが，50m の場合とほとんど変化がなかった。

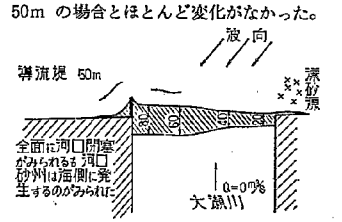


図-30(2)　大瀬川河口実験（$Q=0$）

c）右岸に 50m の導流堤を設けた場合

右岸に導流堤を設けた場合，やはり完全に河口は閉塞するが，砂洲は河口外に発達した。すなわち，その河状は右岸導流堤の右側におがくずが堆積し，河口左岸に100m もの突出した堆積が発生した。そして，これを結ぶ中心線をもつ河口洲が幅 40～100m にわたって発達した。

（2）　大瀬川流量 50m³/s の場合

河口閉塞に重要な関連をもつ河川流量を実験条件に入れた場合，すなわち，年平均流量と思われる 50m³/s を上流から与え，（1）と同じ3ケースについて実験を試みた。このことは改修後五ケ瀬川と大瀬川を完全分離した場合に生ずる。

a）導流堤のない場合

この程度の流量があっても砂洲は右岸から次第に発達して河口の大半を閉塞する。また，一部は河口左岸周辺にも堆砂がみられた。図-3(3)はその結果を示したものであるが，この程度の平水流量があれば完全な河口閉塞はまぬがれるものと思われる。すなわち，その河状は河幅とほぼ等しい長さの砂洲が海に発達し，左岸のわずかな断面で平水流量を流下している。したがって，なんらかの条件が変れば砂洲の形状は変化するものと思われる。この点を裏付ける意味で，この実験の途中で流量を増した結果，砂洲の未発達の部分が開口し，新しい河口を作り右岸の砂洲と左岸の砂洲が連絡した。

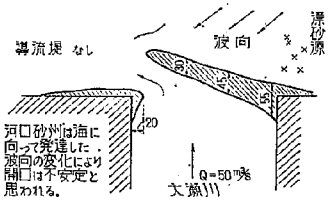


図-30(3)　大瀬川河口実験（$Q=50m^3/s$）

b）左岸に 50m の導流堤を設けた場合

この場合，右岸から次第に砂洲は伸び河積を狭ばめるのは（a）の場合と同じであるが，流量が導流堤にそって流れるため河口は左岸に安定する（図-30(4)参照）。砂洲の規模は a）の場合とほぼ同じで方向はやや海寄りで，この場合も導流堤裏面は砂洲が堆積する。また，導流堤を 100m に伸ばした場合についても実験したが，50m の場合とほとんど変わらなかった。

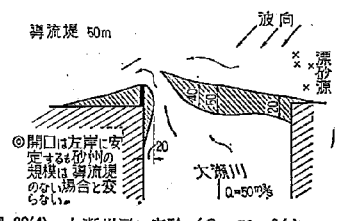


図-30(4)　大瀬川河口実験（$Q=50m^3/s$）

c）右岸に 50m の導流堤を設けた場合

この場合，砂洲の発達は右岸にある導流堤にさえぎられ，順次右岸から伸びずに漂砂が導流堤の先端部から河口にほぼ平行に低く堆積し，これが時間の経過につれて次第に高くなっていった。また，左岸の 70m にわたる突出部とこの砂洲の切れ目から平水流量を流下させ開口部ができた（図-30(5)参照）。

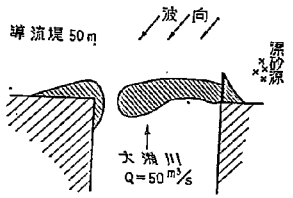


図-30(5)　大瀬川河口実験（$Q=50m^3/s$）

（3）　大瀬川流量 $200m^3/s$ の場合

昭和35，36，37年の出水時，すなわち，6，7，8月の平均流量がほぼ $200m^3/s$ に近いので，実験の対象として大瀬川に $200m^3/s$ の流量を与えた場合について実験を試みた。

a）導流堤のない場合

この程度の流量になると，波が漂砂を運ぶエネルギーと掃流力が実験初期においてつり合ったような形となり砂洲の発達は遅れた。時間の経過に伴なって右岸から次第に河積を狭ばめる河口洲は流量 $50m^3/s$ の場合と同じようであるが，砂洲の先端における流れの掃流力は大きく，容易に砂洲は生長しない。したがって，河口幅は 90m にわたり開口し，また，波によってくずされた砂洲の低い部分より流量が流出し，河口は2カ所になり，河口洲が島のように発達した（図-30(6)参照）。

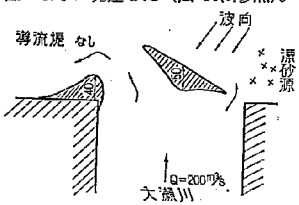


図-36(6)　大瀬川河口実験（$Q=200m^3/s$）

b）左岸に 50m の導流堤を設けた場合

実験結果の河状は a）の場合とほとんど変わらなかった（図-30(7)参照）。しかし，左岸の導流堤に沿った流れによる掃流力が大きく，この部分にはおがくずはまったく堆積しなかった。したがって，この部分の河床はかなり洗掘されるものと思われる。

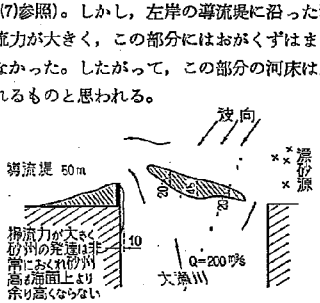


図-30(7)　大瀬川河口実験（$Q=200m^3/s$）

c）右岸に 50m の導流堤を設けた場合

砂洲は左岸に導流堤を設けた場合と異なり，河口のみお筋は安定したものがなく，数カ所にわたる開口があったが，水深が b）の場合と比べて一般に浅いのが目立った。すなわち，右岸の突堤は導流堤の働きよりも，防砂堤の働きをなしていた。

（4）　海岸線変化の実験

この実験の目的は大瀬川に導流堤を出した場合，汀線がどのように変化するかを観察することにある。実験条件などは前の実験と同じであるが，ただ，この場合模型が固定河床であるため，汀線の変化が記録できないので，汀線を現地尺で 35 m 前進した状態にし，この部分におがくずを投入し波を与え，その変化を観察した。

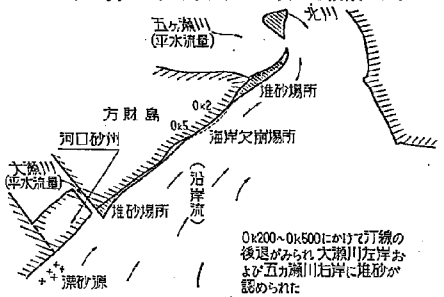


図-31　海岸線変化状況

実験の結果は図-31に示すごとくであり，導流堤裏は多くの堆砂で埋まり，海岸線の 0K200～0K500 にかけて汀線は後退し，この部分の砂が直接，五ヶ瀬川河口に侵入するのが観測された。

（5）　河口維持に対する実験結果

a）導流堤を設けない場合

i）$Q=0\ m^3/s$ の場合

河口は現在の規模で同じ形状の砂洲が発達する。

ii）$Q=50m^3/s$ の場合

砂洲は右岸から発達し，一応左岸に開口部を作るが，条件が変わることによって開口部は変化する。

iii）$Q=200m^3/s$ 場合

流量による掃流力が大きく，右岸からの発達過程において，波によって低くなった部分の砂を掃流し，開口部は一カ所とは定まらない。しかし，実験の条件は常時 $200\ m^3/s$ であったためこの結果を得たが，一時的に $200\ m^3/s$ 程度の流量があっても開口部は一カ所で，やや広くなる程度と推定される。

b）左岸に 50m の導流堤を設けた場合

i）$Q=0\ m^3/s$ の場合

砂洲により完全に河口閉塞を生じるが，砂洲は導流堤のため河口のやや外に発達した。

ii）$Q=50m^3/s$ の場合

開口部は左岸に安定するが，河口幅は狭まい。

iii）$Q=200m^3/s$ の場合

掃流力が大きく，導流堤周辺の河床は，かなり深く洗掘されているものと思われる。

c）右岸に 50m の導流堤を設けた場合

（i）　$Q=0\,m^3/s$ の場合

砂洲により河口は完全に閉塞されるが，現在の発達位置より 70m ほど前進する。

（ii）　$Q=50m^3/s$ の場合

右岸導流堤としての効果がなく，左岸部より流量の流出があった。

（iii）　$Q=200m^3/s$ の場合

開口幅は左岸導流堤と比べて広く，河口全域にわたって水深が浅い。

d）表-6 は実験時間，砂洲高等についてまとめた結果である（実験時間以外の数字はすべて現地尺で示してある）。

e）汀線の変化

（i）　左岸に導流堤を設けた場合にはその裏面は堆砂が発達し，海岸線は前方に出る。

（ii）　右岸に導流堤を設けた場合には，その右側に若干の堆砂が認められた。

（iii）　汀線の 0K200～0K500 にかけて海岸線は後退し，これが直接の五ケ瀬川河口閉塞の原因となっている。

f）導流堤の有無およびその右岸，左岸の比較

（i）　導流堤のない場合と，ある場合の顕著に異なるのは，導流堤のために砂洲の位置が異なることである。すなわち，ある場合は左，右岸にかかわらず河口外に発達する。

（ii）　右岸に導流堤を設けた場合には，この突堤は防砂堤の働きの方が大きく導流堤の働きをしない。したがって，河口は左岸に設けたように深く洗掘された部分がなく，河口は一般に広く浅く開口している。

これは本間教授による，波による河口付近の砂の移動に関する実験（土木試験所報告46号）によっても確認されている。

〔4〕 大瀬川河口水位の検討

改修後，種種の条件による河口河床を 3. で検討したが，河口閉塞を防ぐ完全な方法は相当長い導流堤を設ける以外にはないと思われる。このため発達した河口砂洲によって，出水時にどの程度水位をせき上げるか検討を行なっておくことが必要である。もし，河口水位が砂洲のために計画高水位 3.5m より高くなる場合には，洪水防禦上堤防高に関係するし，また，隔流堤周辺の五ケ瀬川との水位差がつき，そのため堤体の維持が困難になると思われるからである。このために，三次元および二次元模型実験により検討を行なった。

（1）　三次元模型実験による検討

a）実験条件

この実験に用いた条件は河口水位が高くなるような条件すなわち，最も危険な状態を予測して作成した。

縮　　尺：現地の 1/70 の縮尺

河口砂洲：昭和 37 年 2 月縦断測量結果（図-27）を使用した。

砂の粒径：模型に用いた砂の粒径は $d_m=0.40mm$ で砂の粒度分布は図-32 に示す。これは現地の砂と平均粒径がほぼ等しく，したがって土砂の流送関係の相似関係は成立していなく，模型においては現地よりもより流失しがたいと考えられる。河口内水位を調べるためにはより安全側にあるのでこの砂を使用した。

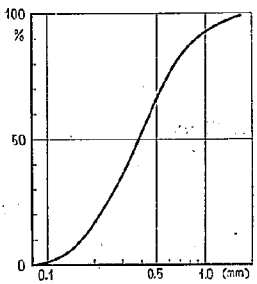


図-32　三次元実験に用いた砂の粒度分布

海の潮位：潮位は塑望満潮位よりやや高い，D.L＋1.0～1.5m とした。

時間―流量の関係：この作成に当って河口水位に対して最も影響を与えるハイドログラフと思われる昭和29年洪水（図-33）と，昭和32年洪水（図-34）の洪水波形を合成して図-35 に示すハイドログラフを設

表-6　大瀬川河口実験結果

条　　件	実験時間（分）	水面上砂洲幅（m）	水面下砂洲幅（m）	砂洲高（D.L＋m）
$Q=0\,m^3/s$　$L=0m$	45	30～ 70	60～100	2.5
$Q=0$　$L=50$左	50	20～ 80	50～120	2.5
$Q=0$　$L=50$右	90	40～100	60～120	2.0
$Q=50$　$L=0$	50	30～ 50	40～ 80	2.0
$Q=50$　$L=50$左	60	20～ 50	30～ 80	2.0
$Q=50$　$L=50$右	90	40～ 80	60～120	2.0
$Q=200$　$L=0$	70	10～ 50	10～ 60	1.5
$Q=200$　$L=50$左	70	20～ 40	20～ 60	1.0
$Q=200$　$L=50$右	90	30～ 70	30～ 80	1.0

ただし，1分は現地に換算して約 8.4分である。Q は河川流量（m^3/s），L は導流堤長（m）を表わす。

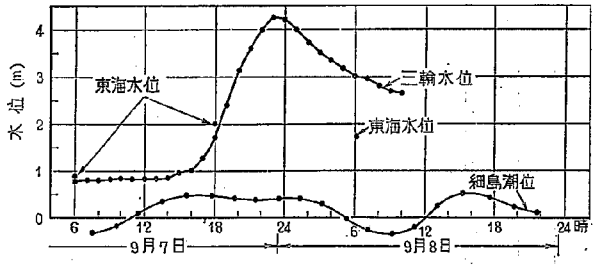


図-33　昭和29年13号台風水位曲線

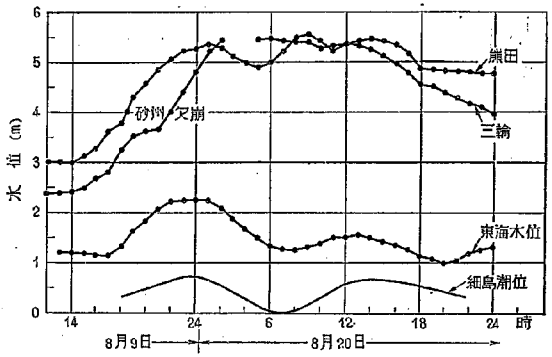


図-34　昭和32年7号台風水位曲線

定し，これを用いた。

縮尺比：縮尺比は現地と模型のフルード数を一致させた場合から導かれる縮尺比で，時間は縮尺の 1/2 乗，流量は縮尺の 5/2 乗で示される。したがって，現地1時間は模型で約 7.2分であり，4,500m³/s は 109ℓ/s にあたる。

b）模型実験方法

三次元実験は砂洲の左岸を一部切欠き，平水流量を数十分流下させ開口部を安定させた後，実験条件の項で述べた模型の洪水を上流より流した。直接開口部を流れる流量，水位を知るため砂洲の上流水位を1分ごとに測定した。

c）三次元模型実験1

この実験は，実験条件に示した条件にしたがって実験を行ない測定したもので，河口水位として図-35(1) を得た。なお，この実験の再現性を確かめるために，同じ条件で二ケースの実験を更に加して行ない，その結果を図-35(2), (3) に示す。これらの実験結果から流量に対して，観測事項をまとめると

(i)　Q=500～1,000m³/s の場合

流量の増加に比例して砂洲は欠壊し，左岸の開口幅を広める。しかし，河口水位は上昇し，D.L +2.4～2.7m になる。

(ii)　Q=1,000～2,000m³/s の場合

掃流力は次第に大きくなり，開口断面では射流に近い流れとなる。また，流量は開口部だけでは排出できず，ますます河口水位は高まり，D.L+2.8～3.4 となる。河口の右岸の水位は左岸に流心がかたよっているため高く，したがって，流量は右岸よりの砂洲をのり越えはじめる。

(iii)　Q=2,000～3,000m³/s の場合

左岸の流れはますます掃流力が強まり，河口幅の 1/3 くらいのみお筋が見られた。また，河幅全域にわたって砂洲は水をかぶり，砂洲の全面掃流がはじまった。しかし，流心は依然として左岸にかたより，河床を洗掘し D.L－6～7 mm になる。なお，この時の水位は計画水位 3.5m にほぼ等しくなった。

(IV)　Q=3,000～4,500m³/s の場合

洪水が 3,000 m³/s を越えると砂洲の全面掃流のため河積が広まり，次第に河口水位は下りはじめる。また，流れは依然として射流に近い流れとなり，砂洲は沖合 400m くらいまで扇形砂洲を作った。

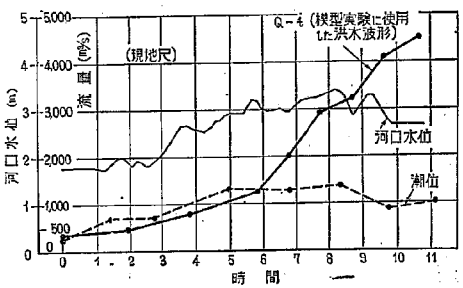


図-35(1)　河口水位実験結果

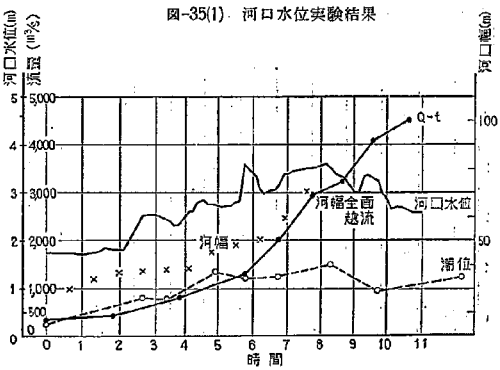


図-35(2)　河口水位実験結果

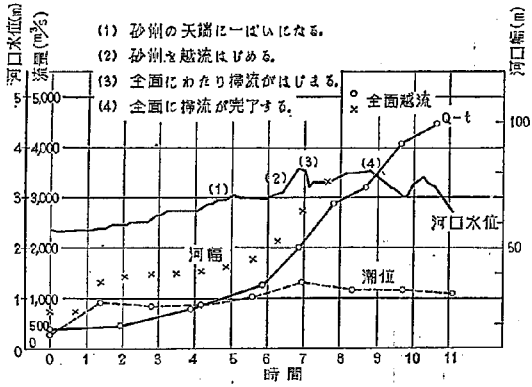


図-35 (3) 河口水位実験結果

d) 三次元実験2

実験1においては，河口砂洲全体が図-27 に示すような形状をしている場合について実験がなされた。これは非常に危険側を予想した場合であるが，実際には砂洲の一部が低くなっているのが普通であるので，そのような場合には，どのような河口水位になるかを検討するためにこの実験を行なった。本実験は河口砂洲上に現地尺で幅 50m，深さ 1m の凹部がある場合について，a) 項で述べた条件によって実験した。この結果，図-36 を得た。これによって，河口水位はこの程度の砂洲の掘削ではほとんど実験1と変わらず，砂洲掘削の効果が認められなかった。すなわち，実験において河口水位が高まると掘削部分より流量の排出が始まるが掃流力が小さく，したがって，断面は拡大せず，流心は左岸に片より，実験1でみられたように河道内の砂堆の発生で，ますます，掘削部分の効果が減殺される。したがって，河口砂洲全体にわたって砂洲をけずらなければ，幅 50m ぐらいでは効果がないことが判明した。

e) 三次元実験3

実験2の場合，幅広く掘削しても効果が認められなかったので，実験1により右岸の水位が高くなることにより，右岸の砂洲を深く掘削した場合について実験した。すなわち，その幅 5 m，深さ 3.5m とした。この結果，河口水位として図-37 を得た。

流量ごとの考察を試みると

(i) $Q=500\sim1,000\ m^2/s$ の場合

右岸の切欠き部の通水断面の幅は変わらないが水路の河床の砂は掃流をはじめた。

(ii) $Q=1,000\sim2,000\ m^3/s$ の場合

右岸水路幅は 10m を越え掃流は大となるが，全流量の2割程度がこの部分から排出しているにすぎない。

しかし，1,500 m^3/s をこえる頃，河口水位は次第に高まる。河道には砂堆が生じた。

(iii) $Q=2,000\sim3,000\ m^3/s$ の場合

水がしばしば砂洲を越えはじめ，右岸の開口は15～20 mに達する。この時，河道中に残った砂洲は 100m 余りであった。

(iv) $Q=3,000\sim4,500\ m^3/s$ の場合

3,000m^3/s 近くになると，右岸の流量は左岸の流量の1/4を越すものと思われる。河口の真中に残っていた砂洲は，ほぼ現地時間30分で全面に掃流された。全面掃流された後の扇形砂洲は，実験1，2の結果とほぼ等しく沖合 400m にわたって伸びていた。

なお，実験1の場合と比べると，表-7 となり，中程度の洪水には効果がある。

表-7

流　量	河口水位(実験1)	河口水位(実験2)
500～1,000 m^3/s	2.4～2.7m	2.1～2.3m
1,000～2,000	2.8～3.4	2.4～3.0
2,000～3,000	3.4～3.5	3.0～3.6
3,000～4,500	3.5～3.4	3.6～3.0

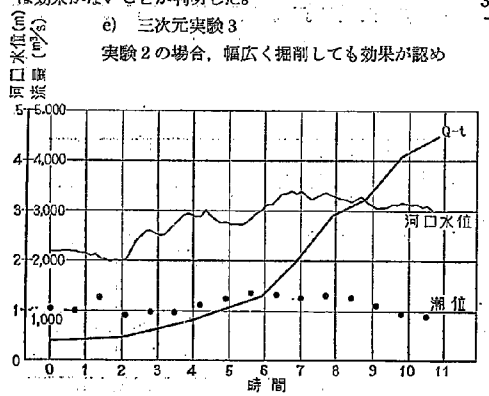


図-36 河口砂洲に幅 50m，深さ 1m の水路を設けた場合の河口水位

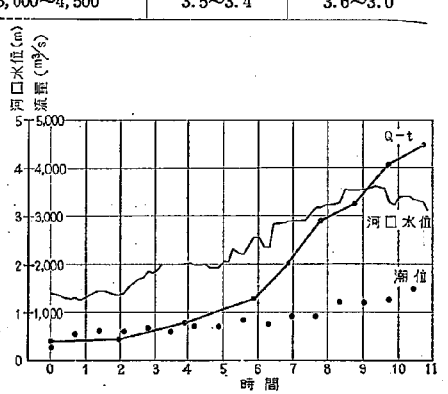


図-37 河口砂洲に幅 5 m，深さ3.5mの水路を設けた場合の河口水位

f)　三次元実験結果

i)　河口砂洲によるせき上げは，開口している左岸よりの方が右岸側より約1.5m低い。このため，河口水位が高まると砂洲の欠損が右岸から始まる。

ii)　河口水位はほぼ流量の関数となる。

流量と河口水位との関係は表-8のとおりである。

表-8　全面砂洲の場合

流量(m^3/s)	50	70	150	300	500	1,000	2,000	3,000	4,500
河口水位(m)	1.40	1.60	1.80	2.10	2.30	2.90	3.35	3.50	3.40

表-9　右岸に幅5m深さ3.5mの水路を設けた場合

流量(m^3/s)	500	1,000	2,000	3,000	3,500	4.500
河口水位 (m)	1.5	2.0	2.9	3.2	3.5	3.3

iii)　幅50m，深さ1mの水路を砂洲上に設け水位を調べたが，河口水位に対してはほとんど効果がなかった。

iv)　右岸に深さ3.5m，幅5mの水路を作り，河口水位を調べた結果，2,000～3,000 m^3/s ぐらいの流量の洪水に対しては水位を低める効果があった。

v)　大瀬川と五ヶ瀬川を完全分離した場合に，どの程度の開口部が平水時に維持されるかが，洪水時の河口水位を決定する主要な要素となることがわかった。

（2）　二次元模型実験による検討

a)　実験の目的

前述した三次元実験においては，模型縮尺の関係から模型としては大きすぎる砂洲材料を使用せざるを得なかった。大きすぎる材料を用いたことは，河口水位として安全側の値を与えるものであるが，前述した実験においては，このような材料を用いた場合には，平水時の開口幅が相当開いていない限り，現在定められている河口水位以内になることは望めないことが判明した。したがって，実際の場合にどのようになるかは，三次元実験では材料として安全率をとりすぎたために推定することができなかった。また，三次元実験の結果では，砂洲の崩壊は二次元的になるのではなく，一部が深掘れして，大部分の水流がその部分を通過して流れ，砂洲全体として二次元的に崩壊する場合に比し，河口水位が低くなることが推論される。したがって，三次元実験より大型の二次元模型実験で，できる限り土砂の流送の関係を実物におけるものと相似になるような砂洲材料を使用して実験を行なえば，二次元と三次元との差は河口水位の決定に対して，安全側になると考えられるので，次にこのような実験を行なった。もちろん，この場合には砂洲の幅方向の変化は考えないで代表として単位幅の砂洲について実験を行なうことになる。

b)　実験条件

縮　　尺：1/20

河口砂洲：図-27に示すとおりである。砂洲は模型において1m幅について実験が行なわれた。

砂の粒径：d_m=0.40mm

したがって，現地に換算すると d_m=8.0mm

潮の潮位：ほぼ(1) a) と同じであるが，実験中流量の変化があるため，完全に一様にできなかった。

時間流量：(1) a) と同じ。

縮 尺 比：現地の1時間は模型13.4分，計画流量4,500m^3/s は模型において252 l である。

c)　二次元実験

せき上げ高を3分ごとに測定した。模型砂洲に実験条件で述べた流量を流し，この結果図-38に示す河口水位を得た。なお，この実験について観測された事項は次のようである。

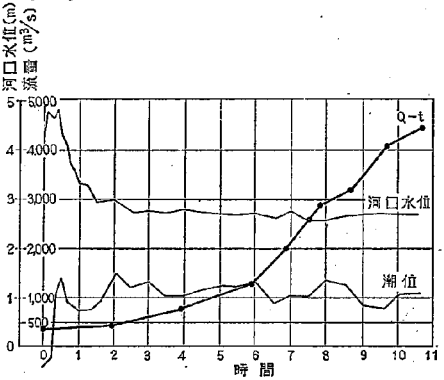


図-38　河口水位（二次元実験）

i)　現地時間30～40分で砂洲は幅60cm，深さ10cmほどの水路を作り，砂洲の海側はこのため，数個所にわたり跳水が発生した。

ii)　現地時間にして約45分後，流れは砂洲の天端を一様に越流し，高さ4mの砂洲はほぼ2mに近く掃流された。

iii)　現地時間140分後，砂洲の天端はほぼ3m掃流され，洲ののりじりは約100～110mに伸びる。

iv)　現地時間310分後，砂洲の天端はほぼ4m掃流され，洲はほとんど D.L＋0m より上にはなくなった。なおこの時の砂洲ののりじりは約160mとなる。

v)　現地時間500分後，砂洲は約250mにまで海に掃流された。実験終了後の砂洲の形状はほぼ D.L−1.0mの高さで一様にほぼ350mにまで伸びているが，この実験が二次元的であり，扇形砂洲として発達しなかったので，現地においてはこの砂洲は広く拡がるため，実験結果より低く堆積すると思われる。

d)　二次元実験結果

i)　二次元実験の結果，計画高水流量 4.500 m^3/s に対して河口水位は計画高水位を突破しないと判定され

る。

ii)　この実験において，洪水初期に水位が高まるが，これは現象を二次元的に検討しているため，流量が河口砂洲（D.L+4.0m）をのり越すことによっておこるもので，実際の河口部では平水量による開口部から流量が排出するため，このような水位にならないと思われる。

iii)　粒径の効果，現地砂の模型縮尺から考えられるものより大きい砂を用い，また，二次元的な実験をした結果，河口水位は計画水位以下になることが確められたもので，ある程度の安全度をもって計画河口水位は安全であることが考えられる。

（3）　大瀬川河口実験結論

a)　大瀬川の新河口維持のためには，50 m³/s 程度の流量が必要と思われる。ただし，河口開口に要する最少流量は実験的に検討し得なかったが，完全閉塞した場合，砂洲を伏流する流量は計算結果で 1 m³/s に満たなかったため，それ以上の流量を確保する限り河口の一部開口は予想される。

b)　完全に河口を閉塞した場合，出水時の（計画洪水流量について）河口水位はある程度の安全率をもって，計画水位 3.5m よりは高くならないと考えられる。したがって，出水時の砂洲による水位のせき上げ高は河口水位 T.P+3.5m をとって安全と思われる。

5.　五ケ瀬川，大瀬川隔流堤の検討

〔1〕　隔流堤現地概況

隔流堤設置予定地点は河口から1K600から2K700の区間である（図-1 参照）。すなわち，8K200 の地点で分流した両川が2K700 で再び分流し，さらに1K 600 の鷺島によって分派する地点である。この間，河幅はほぼ 400m で分流後のみお筋は左岸寄（五ケ瀬川）に広く，右岸寄（大瀬川）には狭まく発達している。2K 400 地点の現状横断図および改修後の断面を図-39 に示す。このような河状のため出水になると大瀬川水位によって五ケ瀬川水位がせき上げられ，合流点から上流の五ケ瀬川に被害を及ぼして来た。このため，改修計画はこの両川を再び合流することなく海に放流し，五ケ瀬川筋の水位を低めることを目的として計画された。

〔2〕　隔流堤に対する検討

（1）　隔流堤検討の方針

隔流堤の検討は，①完全隔流か不完全隔流かを検討し，② その設置位置の最良な場所を検討しようとする。このため，五ケ瀬川と大瀬川の完全隔流堤を設けた場合について水理計算を行ない，これらの問題を検討した。

（2）　基礎資料

隔流堤の検討および後章で述べる分流ぜきの検討においても，これらの水理現象を解析するには，まず該当地点の水位と流量の間にいかなる関係があるかを知る必要がある。しかるに実測された資料がないため，これらを推定しなければならない。水理計算（不等流計算）に必要な基礎資料は両川の粗度係数と流量に対応する河口水位および断面の3つである。

a)　両川の粗度係数の検討

粗度係数の検討には現在2，3の方法がある。その1は2断面間の水位と流量からマニングの式から求めるものであり，その2は開水路における流速の対数分布法則および河床の相当粗度から導かれる U_m/U_* を使って

$$n=\frac{R^{1/6}}{\sqrt{g}}\cdot\frac{1}{U_m/U_*}$$

から n を求めるもので，この式中 U_m/U_* が d_m/RI と一定の関係があることから d_m（河床材料）が定まれば n が求められる方式である。（土木技術資料 1-7 参照）。その3は実測された流量と数カ所の水位を用い粗度を仮定して不等流計算を行ない，これらの関係を満足する粗度を得る方法である。ここではその3の方法を用い区間ごとの粒度を求め他の2つの方法でその値を検討した。

i)　大瀬川の粗度について

計算に用いた水位と流量の関係は昭和34年の洪水を対象とした。すなわち，8K200 の分流点までは三輪の実測流量 3,490 m³/s を用い分流後の大瀬川は三ツ瀬の実測流量，2,390m³/s を用い，再び分流後は 3,490m³/s とした。また，水位は十貫他5カ所の実測水位を用い，これらの関係を満足するような粗度を算出したところ，大瀬川筋は 0.023～0.028 の値を得た。

一例として，図-40 に三輪の粗度係数の検討結果を示す。

ii)　五ケ瀬川の粗度について

分流後の五ケ瀬川の実測水位は少ない。すなわち，北小路一カ所のみであるため，大瀬川の水位縦断図の結果

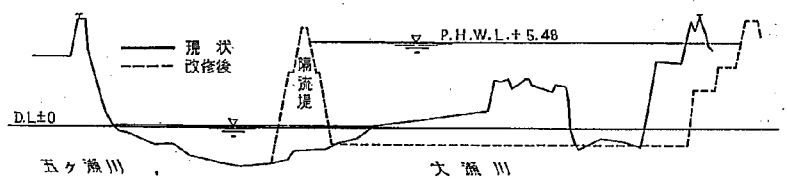


図-39　隔流部横断図

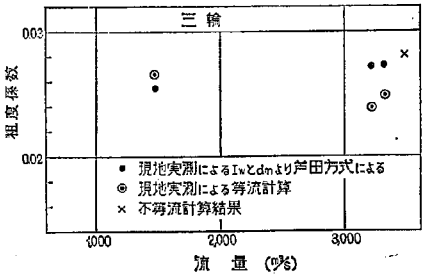


図-40　三輪地点における粗度係数

2 K700 の分流点と 8 K200 の分流点の水位を利用した。この結果不等流計算を行なった結果，粗度は0.22程度であり，北小路から分流点までは河川の構造物等の影響のため，0.033 と全川の粗度よりやや大き目となった。

b)　計算出発水位（河口水位）

この計算に用いた出発水位は 3，4 章の五ケ瀬川，大瀬川の検討で得られた結果を用いた。すなわち，五ケ瀬川の河口水位は表-5，大瀬川の河口水位は表-9 に示すものを用いた。

（3）　不等流計算による隔流堤の検討

不等流計算に用いた式は

$$-i+\frac{dH}{dx}+\frac{Q^3}{C^2RA^2}+\alpha\frac{Q^2}{2g}\cdot\frac{d}{dx}\left(\frac{1}{A^2}\right)=0$$

i：水路こう配，　A：断面積，
R：径深，　H：水深，　Q流量，
C：Chezy の定数，
α：10/9，流速分布状態に対する常数

である。

a)　現状における不等流計算

現状の場合についての不等流計算は砂洲によるせき上げを考慮し，隔流堤を設けない場合について行なったもので，その方法は両川の河口より流量を仮定し，両川の河口の $H-Q$ から流量に対する河口水位を定め鷺島による分流点までおのおの計算し，1 K600で両川の水位が一致するまで両川流量を仮定し直して分流量を計算した。この結果を表-10 に示す。なお，分流点の水位が定まったので2 K700 まで両川の合計流量で計算を行ない，図

表-10　鷺島による分流量表（河口砂洲によるせき上げを含む）

分流量 ＼ 全流量	6,000 (m³/s)	4,000 (m³/s)	2,000 (m³/s)
五ケ瀬川	4,400	3,160	1,580
大瀬川	1,600	840	420

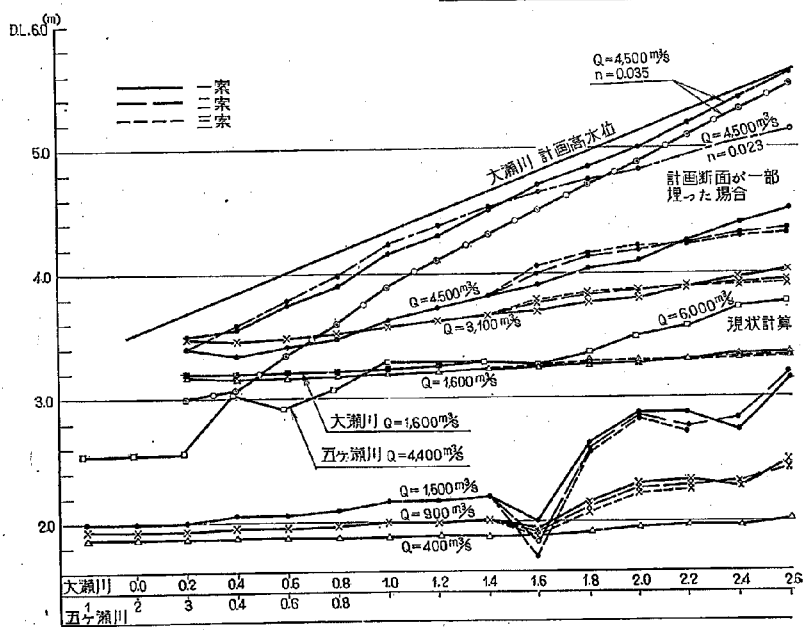


図-41　水位縦断図

-41 に示す結果を得た。これらの計算から現状のままでは河口砂洲によるせき上げのため計算流量 6,000m³/s に対し，ほぼ 3/4 が五ケ瀬川に流下し，2,000m³/s 程度の中小洪水ではほとんどが五ケ瀬川から流下することが知られる。

b) 完全隔流案1

完全隔流案1は総体計画において立案されている地点に完全隔流堤を設けた場合，両川がいかなる水位になるか検討を加えるもので，計算の方法は 8K200 での分流ぜきの検討の結果から得られた 6,000，4,000，2,000 m³/s の分流量（表-11 参照）からそれぞれの分流量に対する河口水位を定め計算を行なったもので（図-41参照），これから両川の隔流堤位置における水位差を求めると，表-9 のようになり，分流量 6,000m³/s の場合水位の差は 1.5～2.0 m となる。

表-11　分流ぜきによる分流量

分流量 ＼ 全流量	6,000 (m³/s)	4,000 (m³/s)	2,000 (m³/s)
五ケ瀬川分流	1,500	900	400
大瀬川分流	4,500	3,100	1,600

なお，隔流堤を設けた場合の水位と現状の場合と比較してみると表-12 のようになり，改修後大瀬川の水位がほぼ 0.6～0.7m 高く，五ケ瀬川の水位はほぼ 0.6～0.7m 低くなっている。この結果，改修前は 2K700 で合流して大瀬川によってせき上げられていた五ケ瀬川は，改修後は隔流堤により合流しなくなるので計画流量でほぼ 0.6m 水位が下がる。

表-12　隔流堤水位差表（完全隔流案1）

大瀬川流量　4,500 m³/sec
五ケ瀬川流量　1,500 m³/sec

距離	1K600	1K800	2K000	2K200	2K400	2K600
大瀬川水位	390	4.03	4.10	4.26	4.41	4.51
五ケ瀬川水位	2.01	2.64	2.88	2.87	2.73	3.15
水位差	1.89	1.39	1.22	1.39	1.68	1.36

大瀬川流量　3,100 m³/sec
五ケ瀬川流量　900 m³/sec

大瀬川水位	3.90	3.77	3.80	3.88	4.40	4.03
五ケ瀬川水位	1.94	2.15	2.31	2.33	2.28	2.48
水位差	1.96	1.62	1.49	1.55	2.12	1.55

大瀬川流量　1,600 m³/sec
五ケ瀬川流量　400 m³/sec

大瀬川水位	3.24	3.26	3.28	3.31	3.34	3.36
五ケ瀬川水位	1.88	1.92	1.96	1.97	1.97	2.02
水位差	1.36	1.34	1.32	1.34	1.37	1.34

なお，全流量 4,000，2,000m³/s，の場合にもそれぞれ 0.5，0.4 m水位が下がることが予想される。

c) 完全隔流案2

完全隔流案1の結果，両川の水位に 1.5～2.0m の水位差が認められたので，隔流堤をより五ケ瀬川寄りに設けた場合計算したもので，その位置は1案より左岸側に表-12 のようにずらせた。

表-13

距離	1/6	1/8	2/0	2/2	1/4	2/6
左岸側を引いた距離(m)	30	50	50	30	30	20

この場合，1の場合と同様3ケースの流量について計算し，図-41 に示す結果を得た。なお，これらの水位から両川の水位差を求めると表-14 となり，2.2～1.3mの水位差ができる。

表-14　隔流堤水位差表（完全隔流案2）

大瀬川流量　4,500 m³/sec
五ケ瀬川流量　1,500 m³/sec

大瀬川水位	4.01	4.15	4.19	4.25	4.32	4.36
五ケ瀬川水位	1.85	2.60	2.86	2.77	2.85	3.03
水位差	2.16	1.55	1.33	1.48	1.47	1.33

大瀬川流量　3,100 m³/sec
五ケ瀬川流量　900 m³/sec

大瀬川水位	3.76	3.83	3.85	3.89	3.93	3.95
五ケ瀬川水位	1.91	2.12	2.28	2.29	2.33	2.45
水位差	1.85	1.71	1.57	1.60	1.60	1.50

大瀬川流量　1,600 m³/sec
五ケ瀬川流量　400 m³/sec

距離	1K600	1K800	2K00	2K200	2K400	2K600
大瀬川水位	3.26	3.28	3.29	3.31	3.33	3.33
五ケ瀬川水位	1.88	1.92	1.95	1.96	1.97	2.00
水位差	1.38	1.36	1.34	1.35	1.36	1.33

なお，1K600～2K700にかけて隔流堤を五ケ瀬川寄りに設置したにもかかわらず，同じような水位差が認められるのは，1K600から1K400にかけての断面の急拡のため一部射流に近い流れが発生したために起こったものと思われる。なお，現状形の水位を比較すると改修後の大瀬川水位がほぼ0.7 m高く，五ケ瀬川の水位は 0.7～1.2 m 低くなっている。なお，分流点での水位は 0.8 m下がり，中小洪水 4,000，2,000 m³/s の場合はそれぞれ0.6，0.4m水位が下がることが予想される。

d) 完全隔流案3

この案はさらに表-14 のように五ケ瀬川寄りに隔流堤を設けたもので，

表-15

距離	1/6	1/8	2/0	2/2	2/4	2/6
左岸より引いた距離(m)	50	70	70	50	50	40

同様3ケースの流量について計算し，図-41 に示す結果を得た。なお，これらの水位から両川の水位差を求めると，両川にほぼ 1.2～2.4m の水位差がつく。これは2案にみられた断面の急拡による射流状態が発生し，計算が正確にできなかったためである。

e)　隔流堤計算結果

i)　現状の河状について，河口砂洲を考慮した計算を行なった結果，両川の蛇島による分流量は表-10 に示すようになる。

ii)　隔流案1の計算結果，両川の計画流量に対してほぼ水位差は 1.5~2.0m くらいつくと思われる。

iii)　隔流堤案2 および3は堤体より，五ヶ瀬川寄りに寄せたものであるが，五ヶ瀬川断面が縮少しすぎるため設置位置としては適当とは思われない。

iv)　現状の水位と隔流案の水位を比較すると，2K 700 で合流点の五ヶ瀬川の水位は計画流量についてはほぼ 0.6m，中小洪水 4,000，2,000m³/s についてはそれぞれ 0.5，0.4m の水位が下げられる。

v)　計画流量に対して，両川に 1.5~2.0m の水位がつくことから，不完全隔流の場合は堤体の維持が困難であると思われる。

(4)　大瀬川水位および隔流堤防高の検討

大瀬川と五ヶ瀬川を隔流することによって，五ヶ瀬川の水位を下げられるが，大瀬川の水位は改修前より高くなることが予想される。したがって，大瀬川および隔流堤の堤防の高さについて検討を加えた。

a)　計画粗度および計画流量に対する計算

この計算は計画水位の最も危険な状態，すなわち全川の粗度係数 0.035（計画粗度）出発河口水位3.50m および 4.20m として，大瀬川に完全隔流（隔流案1）を設置した場合について計算を試みたものである。この結果を総体計画において定められた計画水位と比較すると図-41に示すようになる。

b)　計画河床1m上げた場合の計算

大瀬川河口砂洲崩壊の二次元，三次元両実験においては（一部実験中途では，開口洗掘断面が D.L－5m ぐらいまで洗掘されたが）全面掃流後の河床は計画河床にまで掃流されなかった。これらの実験結果より計画河床が河口堆砂のため埋まると思われ，その埋まる高さを D.L－1mとし，1K200 までその状態にして計算を試みた（図-41参照）。その結果，河口から1K200 までは前記計算の場合より約0.1m ぐらい高くなることが認められる。なお，この場合に粗度係数を0.035にとった場合にはどのようになるか検討しておくことが必要であろう。

c)　隔流堤高検討の結果

i)　河口水位 3.5m，計画粗度 0.035，完全隔流案1の断面では，現在の計画堤防高は妥当である。

ii)　改修後の河口調査の結果，土砂の堆積が認められる場合堤防高の再検討が必要である。

(5)　掃流土砂量の比較

改修前後の掃流量を比較することによって，河川から排出される土砂を推定し，河状変化の一資料とするために計算を行なった。

a)　計算の条件

改修前後の水位縦断図を用いて，各200m 区間の掃流砂量を求めるために用いた式は，佐藤，吉川，芦田公式

$$q_B=\{0.623f(\tau_c/\tau_0)\cdot(\tau_0/\rho)^{3/2}\}\Big/\left(g\frac{(\sigma-\rho)}{\sigma}\right)$$

である。

すなわち，　σ：砂の比重，ρ：水の比重，

g：重力の加速度，τ_0：掃流力

$f(\tau_c/\tau_0)$：粒径による係数

である。

なお，現地粒径は河床材料調査資料の昭和36年度のものを用いた（図-42）

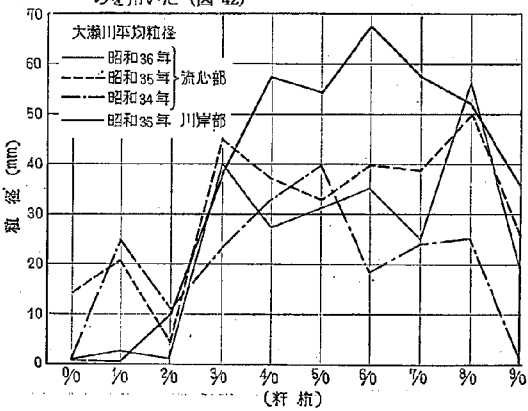


図-42(1)　大瀬川平均粒径

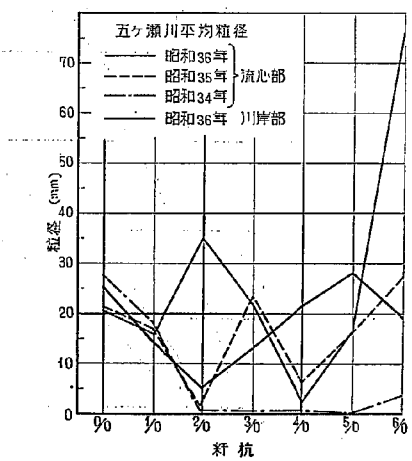


図-42(2)　五ヶ瀬川平均粒径

b）掃流土砂量の計算

a)で述べた条件を用いて計算を行なった。これによると分流点上流の掃流砂量は大瀬川，五ケ瀬川ともに改修前後の土砂量には変化はないが，隔流堤を設けることによって，改修後の大瀬川の掃流砂量はほぼ10倍になり五ケ瀬川の掃流砂量はほぼ1/10倍になる。この結果，大瀬川河口は掃流砂量の増加により現在より河床は低下することが予想され，五ケ瀬川はその逆になることが予想される。

（6）隔流堤検討の結論

（1）隔流堤設置地点は総体計画によって定められた地点が望ましい。

（2）この結果，計画流量に対して隔流堤設置部分の五ケ瀬川と大瀬川にほぼ1m余りの水位差がつくことが予想される。

（3）掃流砂量の計算結果，隔流堤を設置することにより，大瀬川は改修前より掃流砂量が増し，五ケ瀬川の方が掃流砂量が減少することが予想される。

6. 大瀬川，五ケ瀬川分流ぜきの検討

〔1〕現地概況と問題点

五ケ瀬川は河口より8K200の地点で大瀬川と分派している。五ケ瀬川の分派地点はおびただしい堆砂により埋まり，平水流量がほとんど大瀬川に流れこんでいるため，若干の伏流水が五ケ瀬川に流下しているにすぎない。（図-1参照）。したがって，一度出水するとこの堆砂部分が変化し，分流量が一定しないため河道計画に一支障となっている。このため固定ぜきを設け分流量を一定にし，河道の安定を計ることが計画された。なお，表-16は既往の洪水の分流量の実測結果である。実測資料は流量測定に相当な誤差があるが，大略の分流の状況を知ることができる。

表-16　既往洪水分流比

年月日	三　輪	三ツ瀬	北小路	松　山	分流比
29. 8.18	6,440	3,513	947		3.7：1
29. 9.13	8,560	4,521	1,416		3.1：1
30. 9.30	3,060	2,330	1,240		1.9：1
30.10. 3	1,450				
31. 9. 9	1,137	662	440	1,400	1.5：1
32. 8.20	2,400	2,310	1,140	1,790	2.0：1
32. 9. 7	3,260	2,950	1,520		1.9：1
33. 4.23	396				
34. 8. 8	3,830	2,390	1,100		2.2：1
35. 8.29	1,110				
36. 9.16	3,810				
37. 8.26	1,900				
37. 8. 2		936			

〔2〕不等流計算による現状での分流量の推定

2章で述べたように，五ケ瀬川と大瀬川との分流において，改修計画に定められた分流量を得るためのせきの形状は模型実験によって解決を試みるが，これに先だち，必要な基礎資料である各断面おのおのの水位と流量の関係を求める必要がある。しかし，これらの実測資料がないため，水理計算によって推定した。すなわち，隔流堤の章で検討した条件を用い大瀬川，五ケ瀬川に完全隔流堤を設けた場合，数種の流量について不等流計算を行ない，この計算の結果から8K200の分流点における水位分流量の関係を図-43に表わした。すなわち，水理計算の結果から大瀬川8K200，五ケ瀬川6K200の水位流量曲線を作り，これを分流量での水位流量曲線に合成した。

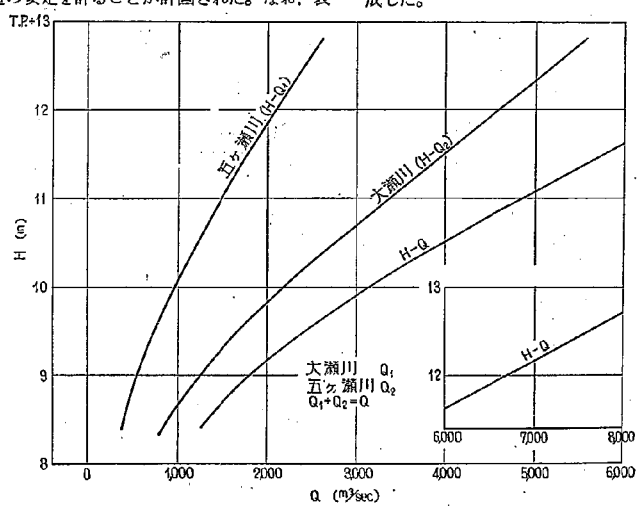


図-43　五ケ瀬川分流点（8.2K）水位—流量曲線

分流量の決め方は，たとえば 6,000m³/s の場合岩熊6,000m³/sの時の合成水位をよみ，その水位に対する両川の流量をよみとることにより，分流量が求まる。この結果をまとめると表-17となり，計画流量 6,000m³/s に対し，現状では大瀬川 4,140m³/s 五ヶ瀬川に 1,860 m³/s が分流し，五ヶ瀬川の計画洪水量 1,500m³/s より約360m³/s が多く本川に流入する。このため，本川にせきを設けこの流量を規制しなければならない。ただし，この計算では五ヶ瀬川分流口の堆砂による損失水頭は考慮されていないので，実際は五ヶ瀬川への流入量は計算値より若干少ないものと考えられる。

表-17

全流量 (m³/s)	6,000	5,000	4,000	3,000
五ヶ瀬川流量 (〃)	1,860	1,530	1,210	910
大瀬川流量 (〃)	4,140	3,470	2,790	2,090

〔3〕 模型実験による分流せきの検討

(1) 模型実験による検討方針

計画流量 6,000m³/s に対し，実測資料および水理計算の結果から五ヶ瀬川に多く流入することが知られた。五ヶ瀬川に余分に流入する流量を規制するにはいかなる場所にいかなるせきを設ければよいかを検討した結果，次の3つの案が有力となり，実験による検討の対象とした。

(イ) 五ヶ瀬川 5K900 にせきを設け分流量を規制する

(ロ) 〃 5K400 〃

(ハ) 現在の五ヶ瀬川の分流口を締め切り，大瀬川7K500 と五ヶ瀬川 5K400 とを横越流により流入する新水路を設け分流する。

なお，2. で述べたように五ヶ瀬川計画洪水量1,500m³/s に対する360m³/s 余の流量に対する検討であるため，実験は越流係数の小さい台形せきに近い形とした(図-47参照)。

(2) 模型実験概要

a) 模型および測定方法

五ヶ瀬川，大瀬川（8K200）の分流点模型は昭和35年実測された結果を用い製作され，その概要は次のとおりである（図-46)。すなわち，

模型の縮尺：水平鉛直とも実物の 1/50

模型の範囲：五ヶ瀬川 6K00～5K200
　　大瀬川 8K800～7K00

模型の河床：固定床モルタル仕上げ

測定方法：流量は模型の流頭部および大瀬川流末に長方形せきを設け測定し，五ヶ瀬川流入量はこれより推算した。水位はポイントゲージにより，流速はピトー管により測定した。

水位調節：模型末流にせき板を設けこれにより調節する。

b) 相似律

この実験の相似律は現地と模型のフルード数 ($F_r=v/\sqrt{gh}$，v：平均流速，g：重力加速度，h：水深) を一致させることでおのおのの縮尺を決定した。その主なものについての縮尺を下に記すと，

流速の縮尺：$r=l^{1/2}$　ただし，$l=l_n/l_m$ であって，l_n，l_m は実物および模型の長さに関する量，すなわち，l は縮尺の逆数である。

時間の縮尺：$t=l^{1/2}$

流量縮尺：$Q=l^{5/2}$

また，移動床河床にした場合，力学的相似を得ることが相当困難なので，固定河床について実験した。したがって，分流点の堆砂の概況は実験中の観察結果により推定した。

(3) 検証実験と粗度調整

模型を幾何学的に相似にしても，水理的特性が相似でなければ実験の意味はなさない。したがって，分流点付近での不等流計算を行なった結果と模型の水位が一致するよう粗度調整を試みた。

a) 大瀬川粗度調整

大瀬川の粗度係数は現地において 0.028 が目標である

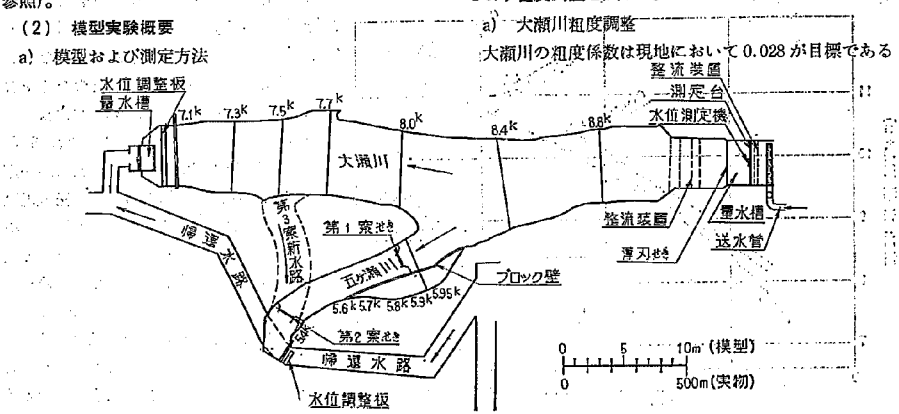


図-44　分流実験模型平面図

ため，8K800，8K400，8K00および7K500の4断面で測定した水位により3区間に分け，あらかじめ模型粗度を計算し，目標に近づくよう，粒径 2.5～5.0mmの小砂利を河床にモルタルでつけた。実験を行なった結果，模型における測定水位と計算水位とは充分な精度をもってほぼ一致させることができたので，水流の関係としては本模型を信頼してよいと思われる。

b）五ケ瀬川粗度調整

五ケ瀬川の粗度調整は大瀬川の場合と同じであり，対象とした粗度は $n=0.033$（現地）である。この場合も満足すべき水理条件を得ることができた。

（4）　現状における分流実験

a）分流量

分流量は分流点に近い断面，すなわち，大瀬川8K00，五ケ瀬川 5K950 の水位が計算結果と一致する状態で，6,000，5,000，4,000m³/s の3種類の流量について分流量を測定した。すなわち，実験の方法は大瀬川 8K00 の水位が計算水位に一致している時，五ケ瀬川下流のせき上げ装置で五ケ瀬川の 5K950 の水位を任意に変え，その場合に応じて五ケ瀬川の分流量の水位の関係を測定し，これを連ねる直線が五ケ瀬川 5K950 の計算された水位流量曲線と交わる点を五ケ瀬川の分流量とする方法である。これによって，現状での分流量を測定すると図-45のごとくなり，6,000m³/s 以下3種の分流量は表-18のようになり，計算による分流量とほぼ一致した。

表-18　五ケ瀬川分流量

全　流　量	(m³/s)	6,000	5,000	4,000
計算分流量	(m³/s)	1,860	1,530	1,210
実験分流量	(m³/s)	1,770	1,450	1,140

b）水　位

現状形における模型の水位縦断の測定は大瀬川8K00，五ケ瀬川 5K950 の水位を計算水位と一致させた場合測定した。この結果，図-46 となり，ほぼ計算値に近い水位が得られたので，模型の検証にもなったと思われる。

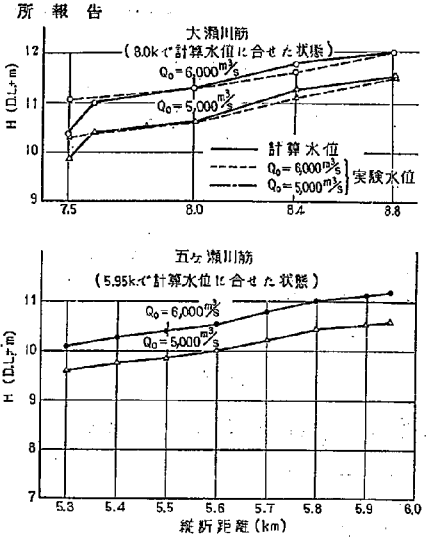


図-46　現状分流水位縦断図

（5）　第1案分流せき実験

この案は分流せきを分流点直下，すなわち，5K900点に設けた場合の検討である。なお，この実験条件は計画流量 6,000m³/s に対し，五ケ瀬川に 1,500 m³/s 分派させることである。

a）せき高，せき幅を求める実験

実験条件を満足するようなせきを実験的に求めるために，5K900 点の河状を考慮して D.L+6.2m, 6.7m および 7.2m の3種のせき高に対し，せき幅を 65m, 70mおよび75mの3種について都合9種について計画洪水量6,000 m³/s に対し実験を試みた。なお，図-47はせきの形状の概要である。分流量の測定は先に現状形の分流量で述べた方法を用い，大瀬川 8K00 の計算水位を一致した状態で分流量に影響をもつせき下流部 5K800 の水位を任意に変えた点を数点求め，この曲線と五ケ瀬川 5K800 の計算水位との交点を求めた実験結果を図-48にまとめて示した。

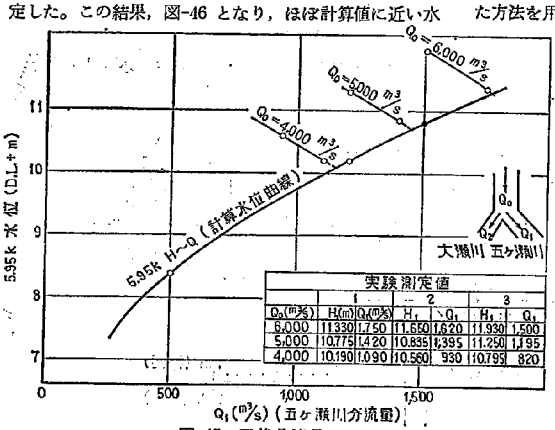


図-45　現状分流量

これらの結果，せき幅 75m でせき高 6.7，6.2m 以外は水位が変化しても分流量が一定している。これは，これらのせきが完全越流であることを示している。また，これら3種のせき幅に対し，それぞれのせき高での分流量が求まったのでせき高と分流量の関係をせき幅の関数として図-49に示した。また，図-50はこの結果からせき幅と分流量の関係をせき高の関数として表わした。なお，これらの実験により，計画高水流量の場合 1,500m³/s を分流するに必要なせき幅，せき高の関係は

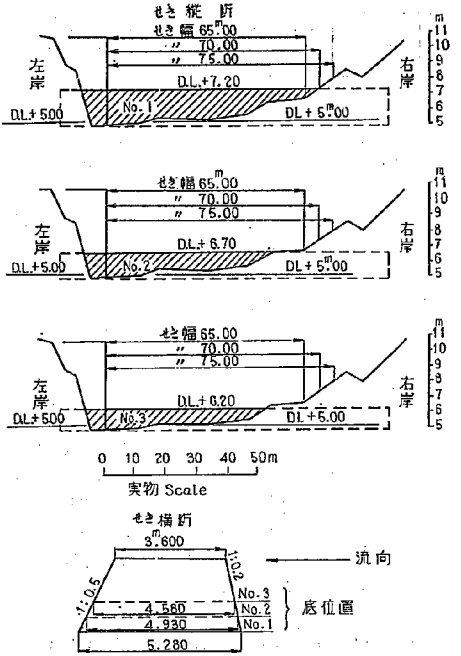


図-47　第1案分流ぜき，せき幅およびせき高寸法図

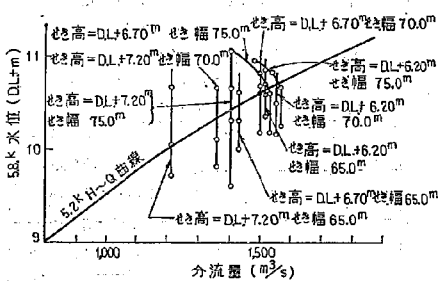


図-48　第1案分流ぜき分流量図

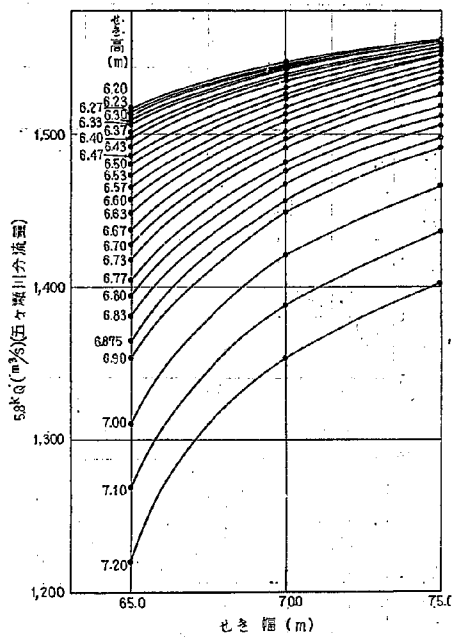


図-50　第1案分量ぜきの分流量

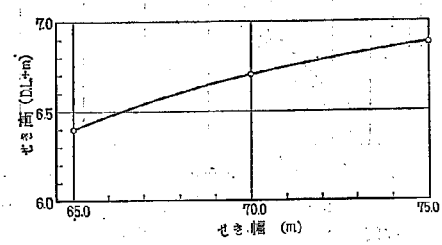
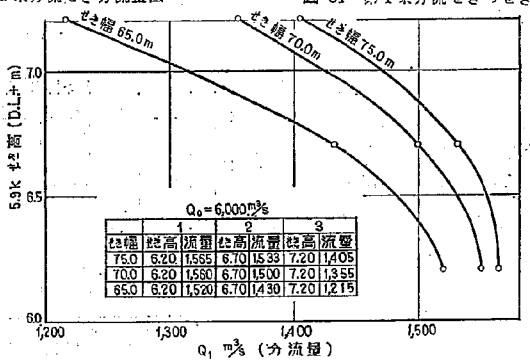


図-51　第1案分流せきのせき高とせき幅の関係



	1		2		3	
せき幅	せき高	流量	せき高	流量	せき高	流量
75.0	6.20	1,565	6.70	1,533	7.20	1,405
70.0	6.20	1,560	6.70	1,500	7.20	1,355
65.0	6.20	1,520	6.70	1,430	7.20	1,215

図-49　第1案分流ぜきのせき高と分流量との関係

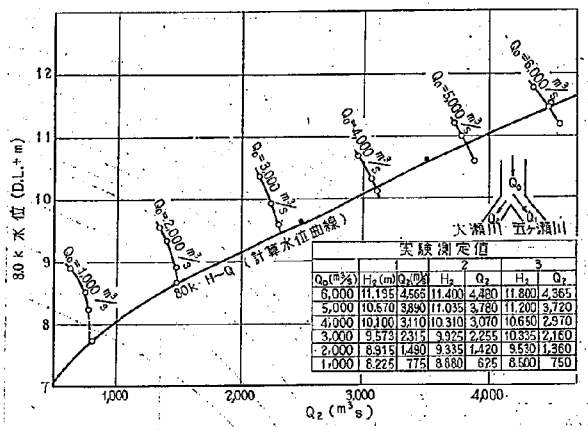


図-52　第1案分流せき分流量曲線

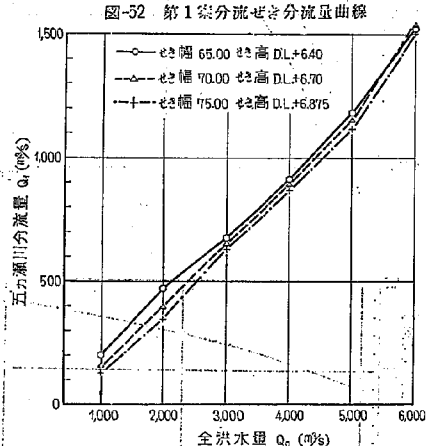


図-53　第1案分流せき分流量曲線

図-51となり

ⓐ　せき幅　65m　　せき高 D.L+6.4m
ⓑ　〃　70m　　〃　〃　6.7m
ⓒ　〃　75m　　〃　〃　6.875m

の3種のせきが計画を満足することが知られた。

b）せきによる分流比

a)で求めた計画を満足する三種の組合みせのせきについて，各種流量に対し分流量を求めた。分流量測定の方法

表-19　第一案分流せきによる分流量

分流量 (m^3/s)	ⓐせきによる五ヶ瀬川分流量 (m^3/s)	ⓑせきによる五ヶ瀬川分流量 (m^3/s)	ⓒせきによる五ヶ瀬川分流量 (m^3/s)
6,000	1,590	1,500	1,500
5,000	1,180	1,165	1,120
4,000	910	900	880
3,000	630	670	640

は検証実験で述べた方法で，対象とした水位は大瀬川 8K00，五ケ瀬川せき下流 5K800 の水位である。すなわち，大瀬川8K00の水位を任意に変え，そのときの分流量に対する水位を五ケ瀬川 5K800 で合せた結果と計算水位と一致する点を求める。図-52 は一例として第1案の分流せきのせき幅 65m，せき高 D.L+6.4m の場合についての測定結果を示す。これらの結果，第一案分流せき，3種のせきについて，おのおのの分流量は図-53 のようになり，表にあらわすと表-19となる。

c）水　位

これらの3種のせきについて実験水位を測定した結果，図-54～56 に示す水位縦断図を得た。この測定は大瀬川 8K00 と五ケ瀬川 5K800 の水位が，いずれもその場所のその時の測量に相当する計算水位に一致する状態で水位を測定したものであり，測定個所は図-57 に示す点で横断方向3カ所測定し，これを平均してその断面の水位とした。

d）せき下流の流速分布

第1案中，3種のせきについて計画洪水量を流したときのせき下流の流速分布を測定した。流速測定位置は図-58 に示した。すなわち，せき中心線から 7.5m～100m の間において，5横断で各横断方向5カ所ずつとし，各点で大体 0.75m 間隔で流速の鉛直分布を測定した。その

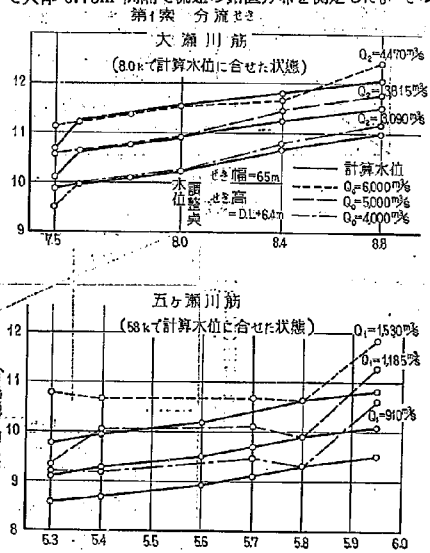
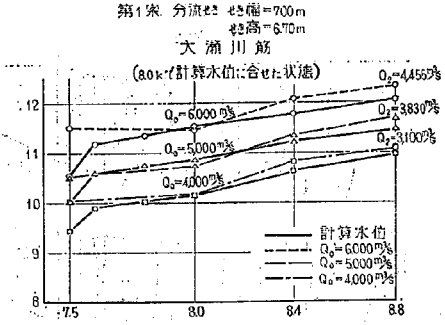
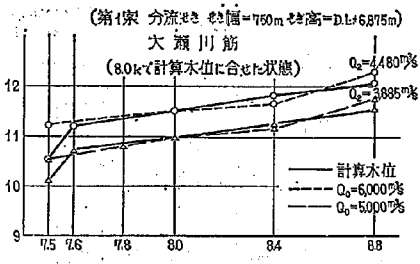


図-54　第1案ⓐせき水位縦断図





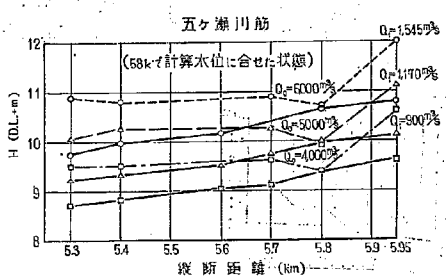


図-55　第1案ⓑぜき水位縦断図

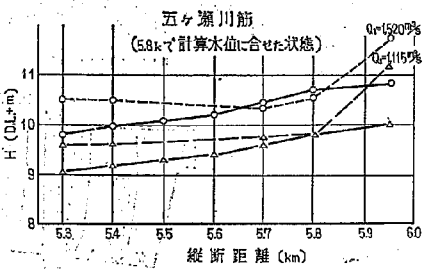


図-56　第1案ⓒぜき水位縦断図

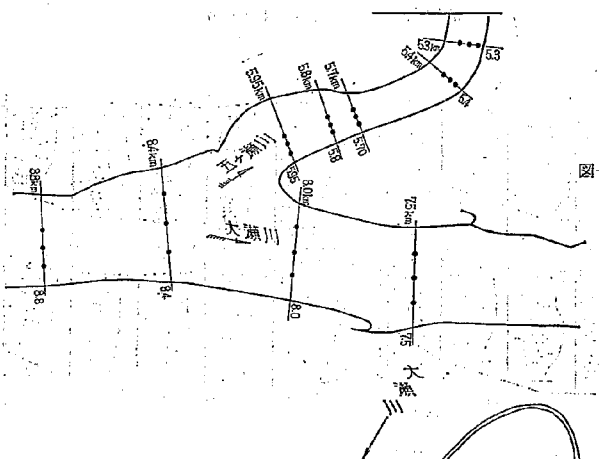


図-57　水位測定位置図

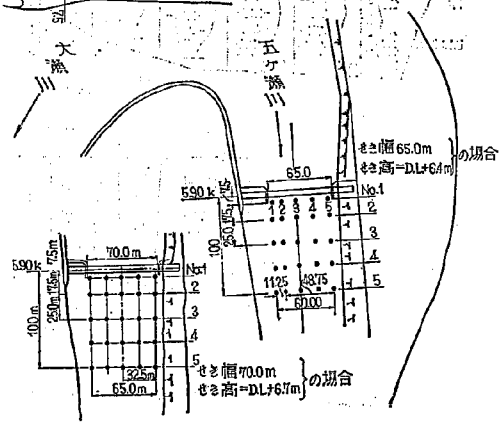


図-58
分流ぜき下流流速測定箇所図

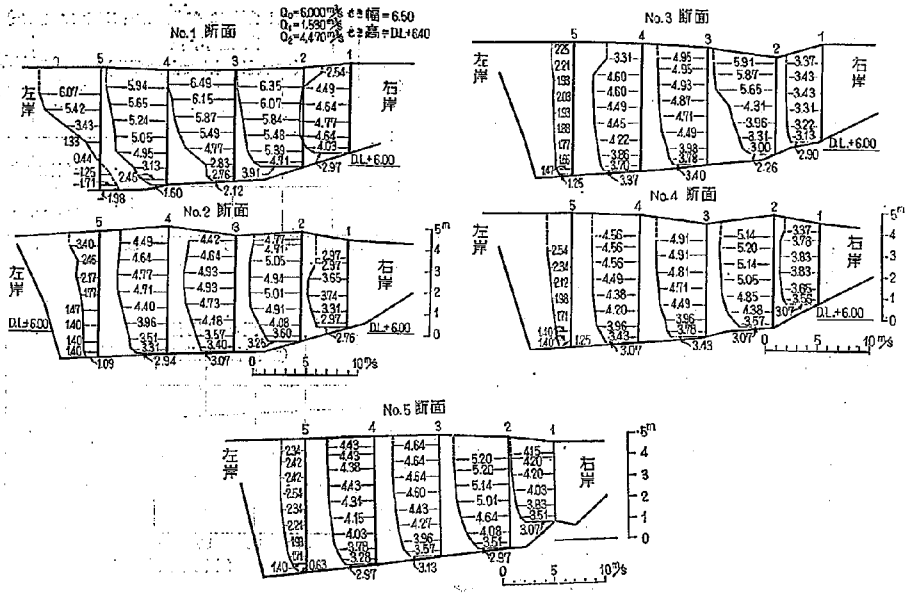


図-59 (1) 第1案ⓐぜきの場合の流速分布図

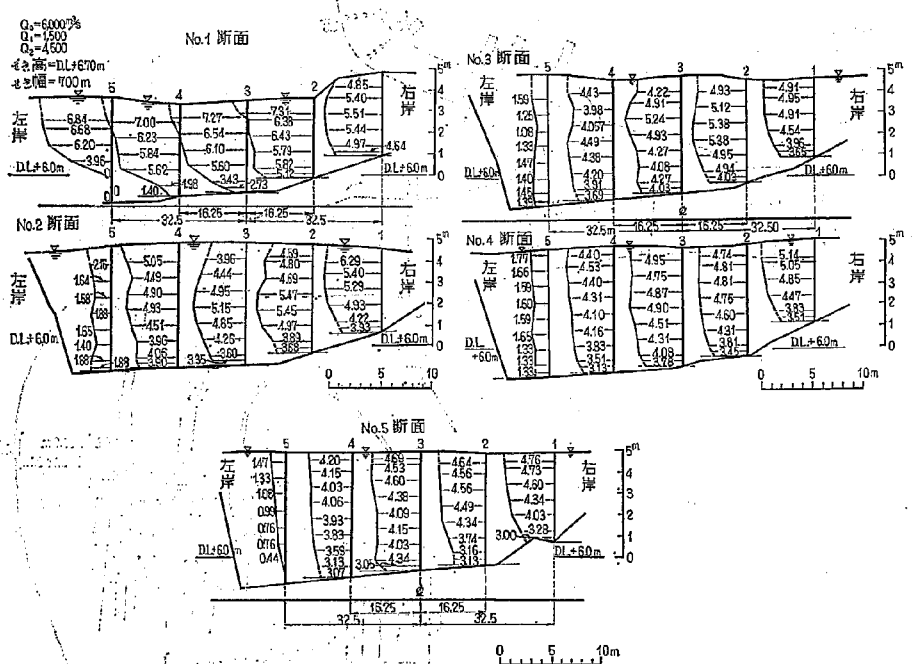


図-59 (2) 第1案ⓑぜきの場合の流速分布図

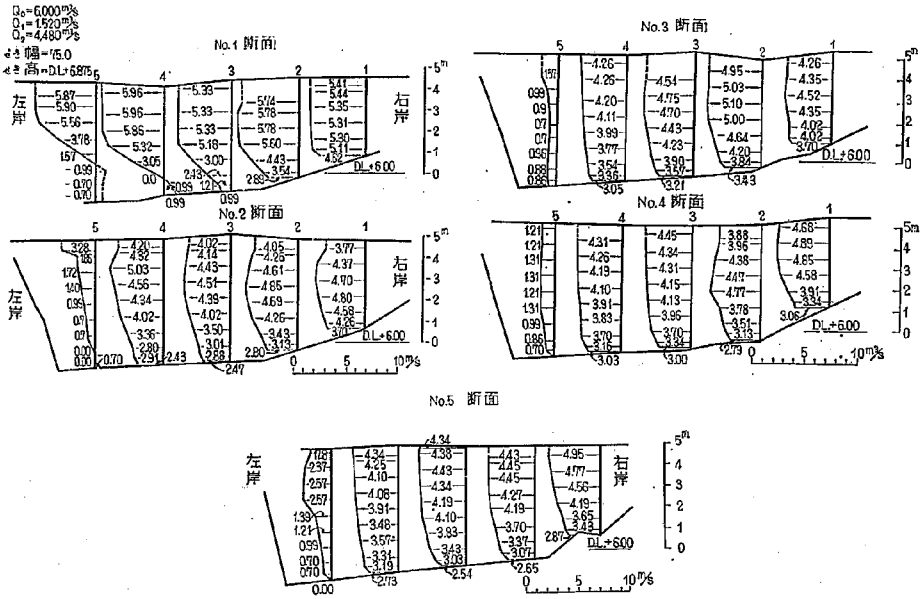


図-59 (3)第1案⑥せきの場合の流速分布図

結果を図-59(1)~(3)にまとめた。なお　不等流計算の結果，せきを設けないときの平均流速はほぼ 2.2m/s となる。

e) 堆　砂

現地分流点概況で述べたように，五ケ瀬川分流点の周辺は堆砂により埋まり，その高さは D.L+6.5m にまで発達し（36年10月実測），70m³/s を越える流量がない限り五ケ瀬川には流下していない。このため分流せきを設けた後，いかなる河状になるか傾向を知るため堆砂実験を試みた。実験の条件としては次のようにした。

(i)　分流せき：第一案⑥形（せき高=D.L+6.7m，せき幅 70.0m）

(ii)　流量：計画流量（6,000m³/s）についてのみ行なう。

(iii)　水位および分流量：五ケ瀬川に 1,500m³/s を分流するよう五ケ瀬川 5K800，大瀬川 8.0K の水位を計算水位に一致させた状態

(iv)　使用砂：d_m=0.3mm これは現地に換算すると d_m=15mm となり，現地砂（d_m=50mm）より小さい。

(v)　砂投入位置：8K800 横断一線に投入。

(vi)　投入砂量および経過時間：

103 l の砂を7.5分間にわたって投入し45分後に通水を止めた。この結果を図-60 に示す。これから見てもわかるように，本川寄りは砂漣が発達し掃流力は少なかったが，模型左岸はほとんどの砂が掃流されていた。このことから，8K300 周辺から右岸にかけて堆砂が発達するものと思われる。

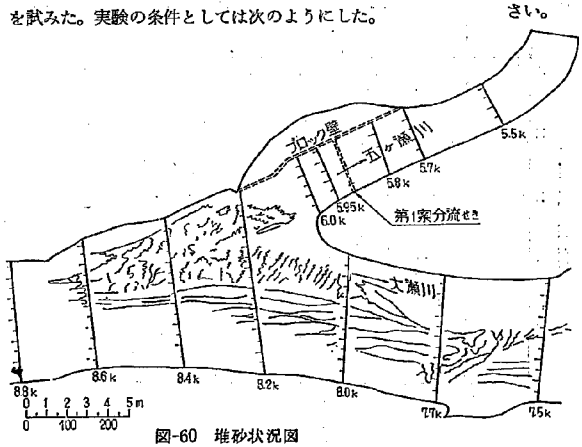


図-60　堆砂状況図

f) 堆砂実験と同じ目的で模型内の流向を知るために，流線を観測した。実験条件は次のようである。

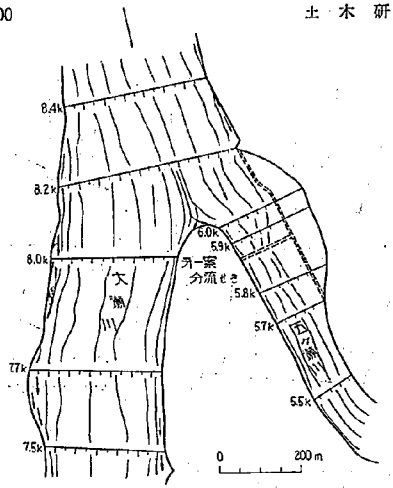


図-61　流線図

(i)　分流せきは堆砂実験の場合と同じである。

(ii)　流量は 6,000, 5,000, 4,000m³/s の3種類について行なう。

(iii)　流線スケッチのため過マンガン酸カリの結晶を使用した。

流線観測の結果の一例を $Q=6,000m^3/s$ の場合について図-61 に示した。これによると，流線は 8K400 辺で完全に大瀬川，五ケ瀬川の流れを分流していることが観測された。流量の変化によってはほとんど流線の変化はなく，また，総流量が少なくなるにつれて分流境界線はわずか五ケ瀬側（左岸）によることがわかった。

g). 第一案分流せき実験結果

(i)　第一案実験は，ⓐ幅65m，せき高D.L 6.4m，ⓑ 70m，せき高 6.7m，ⓒ 75m せき高 6.875m の3種の案を実験の対象とした。

(ii)　このせきのうち計画流量に対し，ⓒせきは不完全越流となるが，ⓐ，ⓑせきは完全越流となる。

(iii)　ⓐ，ⓑ，ⓒせきについて，中小洪水についての分流量を求めた結果，表-19のようになった。

(iv)　計画流量でそれぞれのせきについて流速測定の結果，せき下流の最大流速はⓒの場合が最も小さく 6m/s ほど，ⓑの場合が最も大きく 7.3m/s 程度となる。せき下流の河床は3案の内ではⓑが最も困難であろう。

(v)　6,000, 5,000, 4,000m³/s の流量で流線観測を行なった結果，8K400 辺で明確な分流境界がみられたが，分流点周辺は複雑な流況を示す。

(vi)　堆砂実験の結果，8K300周辺から五ケ瀬川分流点にかけて，右岸よりに堆砂が発達するものと思われる。

(6)　第2案分流せき実験

第2案分流実験は五ケ瀬川 5K400 の位置に固定せきを設置しようとするもので，せき堤体等の形状は第1案と同じにした。

a)　せき高せき幅を求める実験

5K400地点にせきを設ける場合，断面の地形上せき幅は 65～70m が適当と思われたので（図-62参照），せき幅65m および70m の2種について実験した。

なお，せき高は D.L+6.3m とした。これは第一案分流せきの実験で求めた 5K900 の水位にするためには，あらかじめ，5K400 をどのくらいの水位が必要かを求め，せきによるせき上げ高を加味してせき高を決定した。実験方法は，第1案の場合と同じであり，実験の対象とした水位地点は，大瀬川 8K00 と五ケ瀬川5K300である。

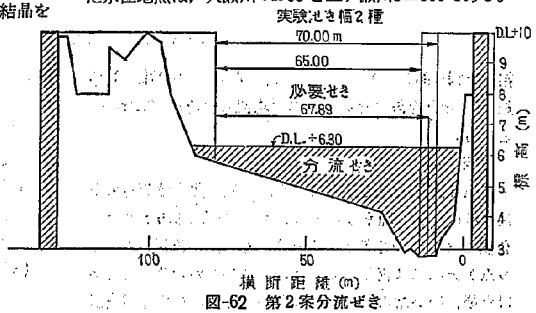


図-62　第2案分流せき

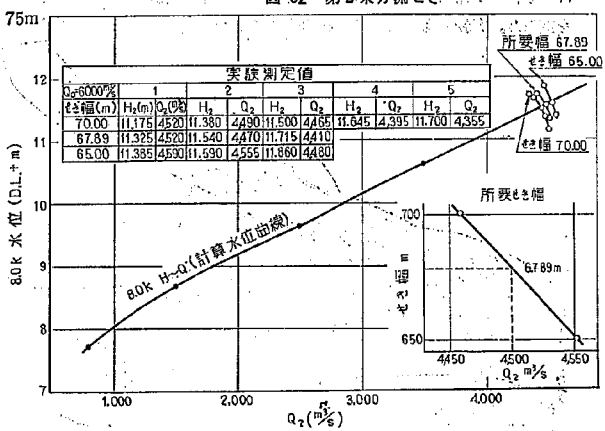


図-63　第2案分流せき分流量

第2案の2種のせきについて五ヶ瀬川5.3Kの水位を計算水位流量曲線に合せ，大瀬川 8K0 の水位を変化させて，分流量を測定した結果図-63 に示すようになった。これら実験の結果から，せき幅を 70m，65mにした場合の分流量はそれぞれ 1,580m³/s，1,445m³/sであることが知られたので，この間を直線的に変化するものとして，せき高 D.L+6.30m に対するせき幅は67.89mが適当であることが推定された。

b）分流量

a）の実験結果，第2案分流ぜきとして，せき高6.30m，せき幅 67.89m の結果を得たので，これについて6,000m³/s以下の流量について，分流量測定の実験を行なった（図-64，65参照）。この結果，図-65よりせき下流の水位を変えても分流量に変化がないことから完全越流であり図-64より分流量を求めると，図-66に示すようになった。すなわち，表-20 に示すように，中小洪水は第1案の場合のどれよりも多く五ヶ瀬川に分流する。

表-20

全　流　量 (m³/s)	6,000	5,000	4,000	3,000	2,000
本川分流量 (m³/s)	1,500	1,260	980	720	430

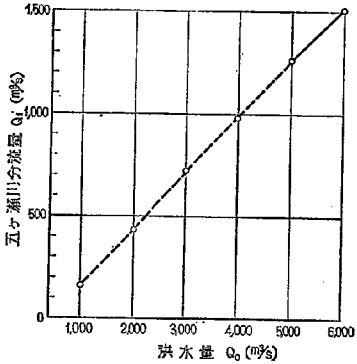


図-66　第2案分流ぜき五ヶ瀬川分流量

（c）水　位

第2案分流ぜきの水位測定は，大瀬川 8K00 と五ヶ瀬川 5K300 で計算水位に一致させたとき，それぞれの

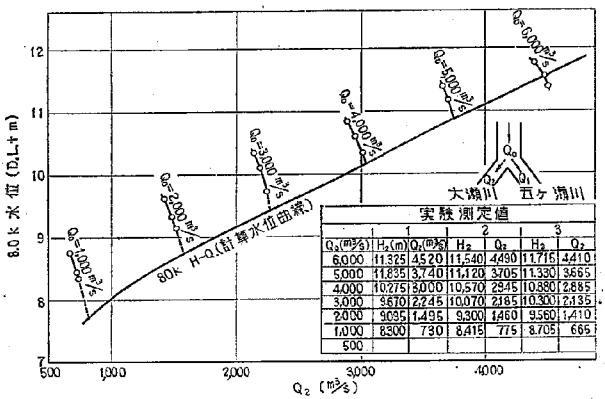


図-64　第2案分流ぜき分流量

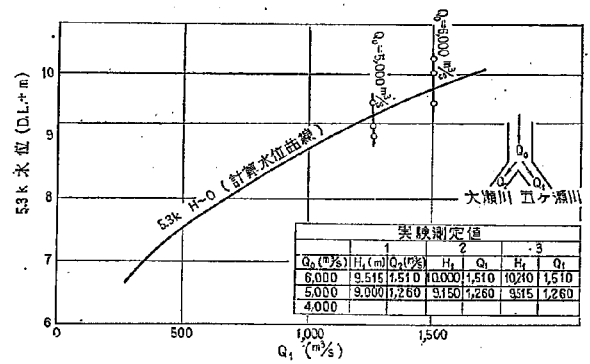


図-65　第2案分流ぜき分流量

断面について水位を実測した。その結果，大瀬川の水位縦断は第1案分流ぜきとほぼ変化を認められないが，五ケ瀬川水位縦断は第1案よりせき上流部は0.5Kにわたり0.7m程度高くなっている。

d）流　線

第1案分流ぜきにおいて，流線観測を行なったと同じ方法で第2案についても実験を試みた。実験の対象とした流量は 6,000m³/s，5,000m³/s の2種類である。図-67に $Q=6,000$m³/s の場合の観測を示す。これによると，第一案の観測結果とほとんど差異は認められなかった。

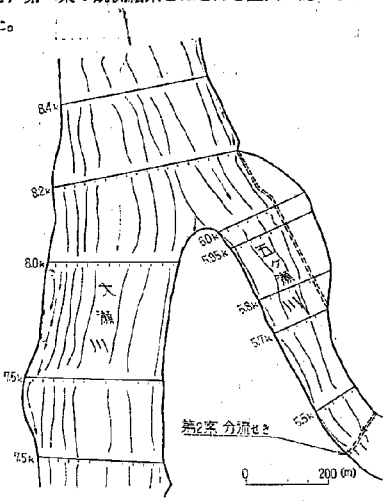


図-67　第2案流線図

e）第2案分流ぜき実験結果

（i）　第2案分流ぜきは 5K400 点に設置し，そのせき高は D.L+6.3m，せき幅 67.89m とすれば計画の条件を満足する。

(ii)　第2案分流ぜきにおいて，水位縦断を測定した結果，大瀬川の水位は第1案とほとんど変わらなかったが，五ケ瀬川の水位に関してはせき上流約 0.5K にわたり，0.7m ほど水位の上昇が認められた。

(iii)　流線の観測結果は第1案とほとんどの差異が認められなかった。

(iv)　第2案分流ぜきによる中小洪水の分流量は表-20，図-66のごとくである。

（7）　第3案分流水路実験

第3案の分流方式は第1案，第2案が分流ぜきによって本川への流量規制を行なっているものであるが，この案は五ケ瀬川流頭部 6K00 付近で締切り，大瀬川7.5K 辺に横越流ぜきを設け，大瀬川と五ケ瀬川を結ぶ新水路を作り，これによって分流する方式である。すなわち，大瀬川の水位計算および分流実験の結果，大瀬川の 7.7～8.0K の間で相当水位差があることが知られ，このため8.2K 付近で分流すると大瀬川水位が高いために，計画どおり分流するためには固定ぜきを必要とした。したがって，大瀬川7.5K 付近において分流すれば計画どおり分流するためには固定ぜきを必要としないと考えられるので，この考えにもとづいて実験を行なった。

a）第3案水路設計

この水路の製作にあたって，横越流堤の所要の高さ，長さ等は実験的に求める計画で，最初横越流堤のない場合について新水路の大瀬川呑口と五ケ瀬川吐口の高さをほぼ両河川の河床に合せることにし，両川の横断図から大瀬川河床を D.L 5.00m，五ケ瀬川 D.L 4.5m とした。平面形は現地形を考慮して定めた。なお，水路の長さは約 500m であり，したがって，河床こう配は約 1/1,000 となる。一方，五ケ瀬川 5K4 の計算水位は流量 1,500m³/s のとき，D.L+9.93m，大瀬川 7.5K の計算水位は流量 4,500m³/s のとき，D.L+10.58m．したがって，水位差は 0.65m となり河床こう配よりやや急となるが，一応，水面こう配る 1/1,000 として，新水路の断面を算出すると，前記新水路河床高と呑口，吐口の水位から底幅 80.0m，両側こう配2割，$n=0.030$ とすればほぼ計画分流量を流すことができることが知られ

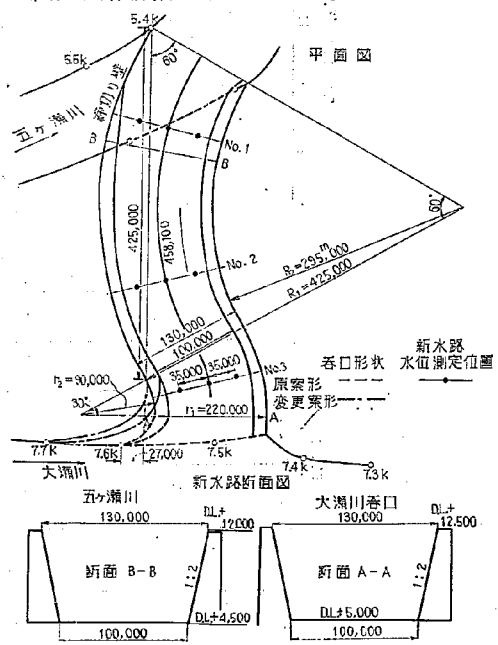


図-68　第3案新水路図

る。この実験では，呑口に必要な横越流堤の形状を求める考えで，水路幅は余裕を見込んで底幅 100m とした。模型実験に用いた新水路の形状，寸法は図-68 に示す。

b）新水路分流量

分流量測定のため，水位の対象としたのは大瀬川 7.3 K と五ヶ瀬川 5.4K である。分流量測定は前実験と同じく計画洪水量 6,000 m³/s に対し，大瀬川 7.3K の水位を変化させ五ヶ瀬川への分流量に求めた結果，五ヶ瀬川への分流量は 960m³/s 程度にすぎなかった。すなわち，計画分流量 1,500m³/s に対し非常に少ない分流量を得たので，呑口を図-68 の変更案形に示すように広げて同じように測定した。このようにしても，五ヶ瀬川への分流量は 1,000m³/s となり，計画した 1,500m³/s は分派しなかった。これは大瀬川 7K500 辺が，流れが早く流向が新水路の方に曲がりがたく，そのため，新水路呑口右岸に広域な死水域が生じ，新水路呑口の右岸を拡げても効果が少ないのではないかと思われる。参考までに計画流量の場合の流線図を図-69に示す。

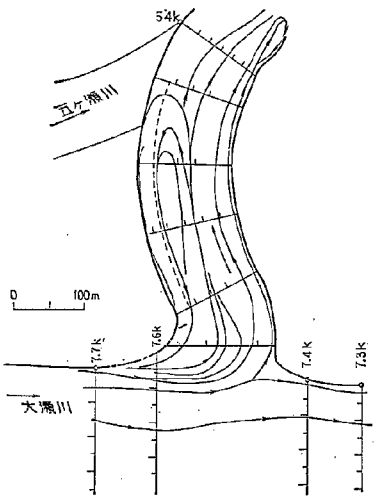


図-69　第３案新水路流線図（改良案）

c）第３案新水路方式による実験結果

（i）　第３案新水路による実験は，大瀬川 7K500 と五ヶ瀬川 5K400 を結んだ水路について行なった。

（ii）　水路幅底幅 100m，その両側こう配２割，水路延長約 500m，呑口での河床高 D.L 5.00 m，吐口での河床高 D.L 4.50m とした。

（iii）　新水路による分流量は水路右岸に河積の 1/3 程度の死水域が発生すること，および大瀬川の分流点 7K500 の右岸と左岸の水位差が 1m 余りもあり，分流に必要な水位にならない等から，計画に定められた分流量を得ることができなかった。

（8）　分流実験結論

a）　分流案は１第案分流点直下（5K900），第２案分流点よりやや下流（5K300），第３案現在の分流地点を締切り新水路で分流する方式が実験の対象になった。

b）　第２案はせき上流の水位を高めること，第３案は計画流量に対して，所定の分流ができなかったことより第一案が最良案と考えられる。

c）　現在の分流点左岸より砂洲が，ほぼ D.L+7m まで発達していることより，この砂洲の発達を促さないため，できるだけせきを低くした方が良いと思われる。この結果，第一案中せき高の低い幅 75m，高さ 6.86m が分流ぜき中，最も望ましいと判断される。

コンクリート舗装の構造設計に関する実験的研究（4）

——千葉地方におけるコンクリート版の温度変化について——

（昭和39年3月）

月成稔*

要旨

先に土木研究所報告109号において東京地方のコンクリート舗装の温度を3年間測定した結果を報告した。本報告は千葉地方におけるコンクリート舗装の温度変化を先の報告から引続いて，昭和35年4月から昭和38年3月までの3カ年間測定した結果をとりまとめたものである。

本調査の結果より千葉地方におけるコンクリート版の温度変化に関する諸資料（温度応力の大きさとその発生頻度など）を統計的に集成した。

その結果コンクリート版温度の絶対値は相違するにもかかわらず，千葉地方のコンクリート版の温度変化（温度振幅）は先の調査における東京地方のコンクリート版の場合とほとんど等しく，気象条件が多少違っている場所でもほとんど同じであると考えて良いこと，またコンクリート版の温度の絶対値は年によって相違するにもかかわらず温度変化（温度振幅）は年によってもほとんど相違しないことを確かめた。

目次

1. 緒言……(1)
2. 試験舗装の概要……(1)
3. 測定方法……(2)
4. コンクリート版の温度変化……(2)
［1］コンクリート版温度の1日間の変化……(2)
［2］コンクリート版の日最高温度と日最低温度……(4)
［3］コンクリート版の表面温度の日振幅……(7)
［4］コンクリート版の上下両面の温度が等しくなる時刻……(7)
［5］コンクリート版の上下両面の温度差の最大値とその時刻……(12)
［6］コンクリート版の上下両面の2時間ごとの温度差……(12)
［7］コンクリート版温度の深さ方向の分布…(17)
［8］コンクリート版温度の年変化……(19)
5. 気温とコンクリート版温度の関係……(22)
［1］気温および雨量……(22)
［2］気温日振幅とコンクリート版表面温度日振幅の関係……(23)
［3］最高，最低気温とコンクリート版最高，最低温度の関係……(23)
6. 結論……(23)

1. 緒言

コンクリート舗装版の温度変化については，すでに東京地方において版厚 15cm, 20cm, 25cm の三種類の実物大のコンクリート舗装版について各種の比較観測を行なった結果を土木研究所報告第109号に本研究の第1報[1]として報告している。しかし東京地方のコンクリート舗装版の温度変化における種種の関係が気象条件の異なる全国各地に適用できるか，また温度の変化が年によって著しく相違するかどうかを検討するため，青森，千葉，鹿児島，長崎（アスファルト床版舗装についてはこの他第二阪神の安治川橋）の各地方において観測を続けている。

このうち本報告は千葉地方におけるコンクリート版の温度変化を昭和35年4月から昭和38年3月までの3カ年間連続観測した結果を報告するものである。

本報告における測定資料の整理の方法はおおむね土木研究所報告第109号にしたがった。

2. 試験舗装の概要

温度測定を行なった試験舗装は，昭和35年3月土木研究所千葉支所構内に主として交通工学の研究に供する目的から建設された延長 819m のコンクリート舗装およびアスファルト舗装からなる舗装であって，その標準断面は図-1に示すものである。

温度の測定はコンクリート舗装およびアスファルト舗装について行なったが，本報告ではコンクリート舗装における測定のみをとりあつかっている。

舗装版は厚さ 20cm の鉄鋼コンクリート版である。コンクリートの示方配合は，骨材最大寸法40mm，単位セメント量300kg，単位水量140kg，絶対細骨材率33%，スランプ範囲 1～3cm である。このコンクリートからつ

* 道路部舗装研究室 研究員

（1）岩間 滋 コンクリート舗装の構造設計に関する実験的研究[1] コンクリート版の温度変化について 土木研究所報告，109号

交通試験路標準断面図

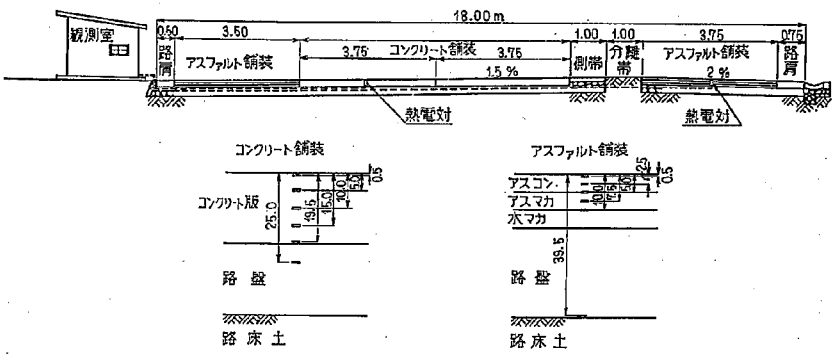


図-1　試験道路標準断面および熱電対埋設位置

表-1　コンクリートのヤング率とポアソン比

			平均値	変動係数(%)	試験数
ヤング率 (kg/cm²)	現場養生	第1回	314,000	11.9	46
		第2回	297,000	15.8	46
	標準養生	第1回	335,000	15.5	20
		第2回	308,000	21.1	20
ポアソン比	現場養生	第1回	0.24	10.0	46
		第2回	0.26	28.0	46
	標準養生	第1回	0.24	22.6	19
		第2回	0.28	48.8	20

表-2　コンクリートの圧縮強度

	平均値 (kg/cm²)	変動係数 (%)	試験数
現場養生	319	18.4	21
標準養生	322	11.3	10

くられた供試体の試験結果は表-1，表-2に示すとおりである。

表-1 および表-2は同じ試験舗装の研究をとりあつかった本研究第2報[2]から引用したものである。表-1の結果からコンクリートのヤング率は 310,000kg/cm²，ポアソン比は0.25として本報告の解析を行なった。

3.　測定方法

温度の測定方法は第1報の方法と同じく，銅線とコンスタンタン線の先端をより合せブラックテープを巻いて十分コンクリートと絶縁したものをコンクリート版に埋設し，12点式電子管式熱電温度記録計に接続して自記記録した。温度の測定位置は図-1に示すように2車線コンクリート舗装版の片版中央部1ヵ所において深さ方向に6点（アスファルト舗装も6点）とした。すなわちコンクリート版の表面より 0.5, 5.0, 10.0, 15.0, 19.5 cm, の5点および路盤表面より5.0cm下の温度を測定した。

4.　コンクリート版の温度変化

[1]　コンクリート版温度の1日間の変化

コンクリート版温度の時間的変化を図示してみると，図-2, 3 および4のように3つの型に分類することができる。この図は深さ方向における2時間ごとの時間変化の一例を示したものである。

図-2 は，晴天が続いた時の温度変化であって，温度の上昇はきわめて急で約8時間であるが，降下はゆるやか

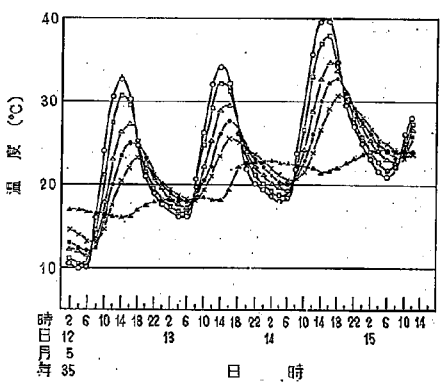


図-2　晴天が続いた場合のコンクリート版の温度変化の1例（I型）

（2）岩間　滋　コンクリート舗装の構造設計に関する実験的研究(2)　摩擦応力，鉄筋継部こう束応力およびそりこう束応力について　土木研究所報告,112号

で約16時間である。また，コンクリート版表面温度と底面温度が最高温度になる時間は約4時間のずれがある。表面と底面の最大温度差は，温度差正の場合の方が大きく，負の最大温度差が絶対値の約3倍である。コンクリート版の温度は正弦曲線に似た変化をしているが正確には正弦変化ではない。もしそうであれば，正の最大温度差は負の最大温度差に絶対値が等しくなくてはならない。また温度上昇と降下も，同じ時間を要するはずである。コンクリート版表面と底面の温度は朝7時30分頃，夕方18時30分頃に等しくなる。この時の温度は朝と夕方では相違している。このような変化するものをⅠ型としておく。

図-3は大体晴天の日のコンクリート版の温度変化を示

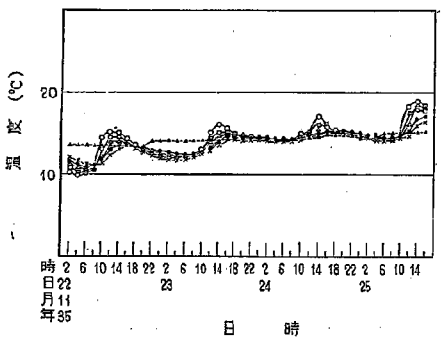


図-3　晴天が続いた場合のコンクリート版の温度変化の1例（Ⅱ型）

するものである。この変化は，Ⅰ型の温度変化を縮少した型をしているが夜間は深さ方向の温度変化も時間的な温度変化もきわめて小さい。これをⅡ型とする。

図-4は大体雨天の日のコンクリート版の温度変化を示すものである。このような変化をする日は，日中も夜間

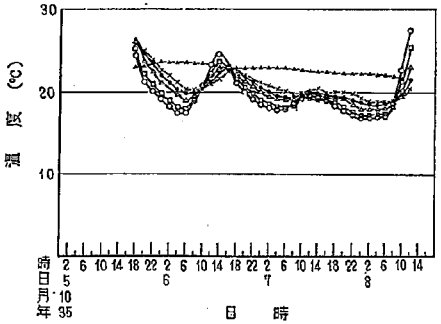


図-4　雨が続いた場合のコンクリート版の温度変化の1例（Ⅲ型）

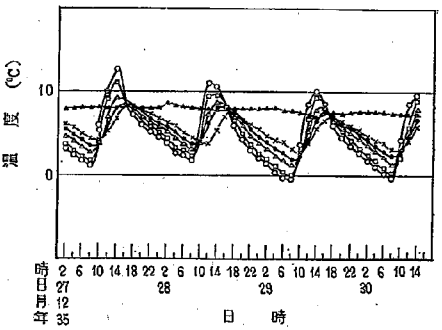


図-5　夜間の冷え込みが強かった場合のコンクリート版の温度変化の1例

も深さ方向ならびに時間的温度変化はきわめて小さい。これをⅢ型とする。

図-5は夜間の冷え込みが強かった場合のコンクリート版の温度変化を示す，昼間曇って夜間に晴れ，冷え込みが強かった場合に，このような温度変化が見られる。こ

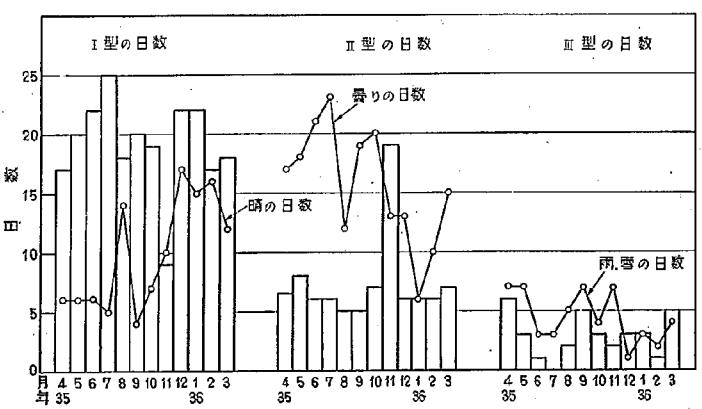


図-6　昭和35年4月～昭和36年3月のコンクリート版温度変化

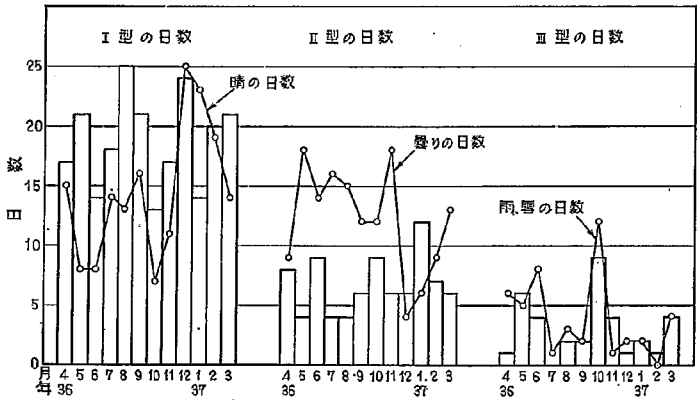


図-7 昭和36年4月～昭和37年3月のコンクリート版温度変化

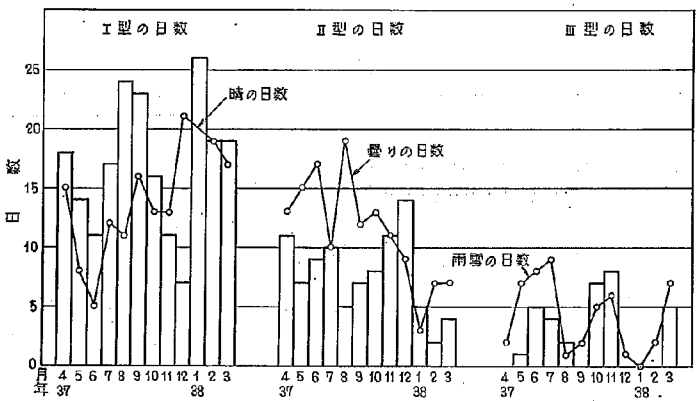


図-8 昭和37年4月～昭和38年3月のコンクリート版温度変化

の型は年間通じてまれである。

これらのコンクリート版温度変化Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ型の月別日数と天候の変化晴，曇，雨(雪)，の月別日数の関係を，昭和35年4月～昭和38年3月までの3カ年間について年別に図-6，7，および8に示した。この天候は千葉測候所において観測された資料を利用したものである。

表-3 コンクリート版変化の全体に対する割合

年別＼変化型	Ⅰ 型	Ⅱ 型	Ⅲ 型
昭和35年	66.4(%)	24.9(%)	9.7(%)
昭和36年	65.8 〃	23.4 〃	10.5 〃
昭和37年	62.4 〃	28.2 〃	9.7 〃

表-4 天候の全体に対する割合

年別＼天候	晴 天	曇 天	雨 天
昭和35年	32.9(%)	52.2(%)	14.8(%)
昭和36年	47.4 〃	40.0 〃	12.6 〃
昭和37年	48.9 〃	37.4 〃	13.7 〃

温度変化Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ型の全体の割合および天候の晴天，曇天，雨天の全体の割合は表-3，4に示すとおりである。

表-3. 表-4から晴天になった日は約50%以内であるにもかかわらずコンクリート版温度変化（Ⅰ型）は65%前後であって15%ほど多い。

コンクリート版温度変化は，天候に左右されるが，必らずしも，その日の天気とは一致していないことがわかる。おそらく天気の履歴に影響されることが多いためであろう。35年においては晴天の日は非常に少なく曇天が多かった。

[2] コンクリート版の日最高温度と日最低温度

昭和35年4月～昭和38年3月までの3カ年について，コンクリート版表面および底面の日最高温度および日最低温度の度数分布を図-9～20に示す。

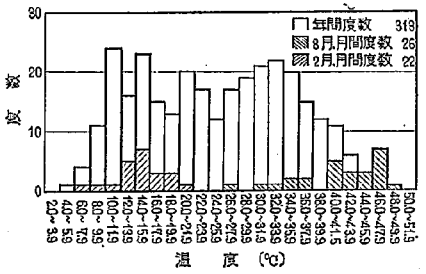


図-9　昭和35年4月～昭和36年3月1カ年間のコンクリート版表面の日最高温度の度数分布

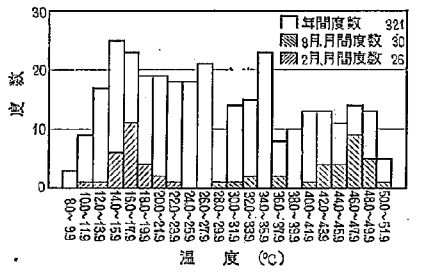


図-10　昭和36年4月～昭和37年3月1カ年間のコンクリート版表面の日最高温度の度数分布

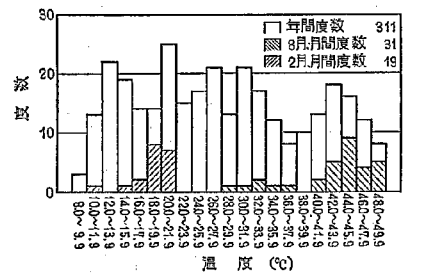


図-11　昭和37年4月～昭和38年3月1カ年間のコンクリート版表面の日最高温度の度数分布

この図には年間全度数と，8月，2月の月間度数が記入されている。この年間全度数が365でないのは，雨天などで最高温度の不明であったり，計器が故障で正しく記録されなかった日を除いたためである（以下同様）。

千葉地方におけるコンクリート版表面の日最高温度の度数分布を年別にまとめた図-9，10および11を見ると，昭和35年，36年，および37年において表面最高温度が48°Cに達した度数は，それぞれ1～2日，18日，および8日であった。（35年には51°Cに達したことが5日あったことが含まれている）。これは年間全度数に対してそれぞれ0.1%，0.5%および0.3%である。また，40°C以上になることは，35年では，30日，36年で70日，37年で67日あり，年間全度数に対してそれぞれ，0.9%，2.2%，

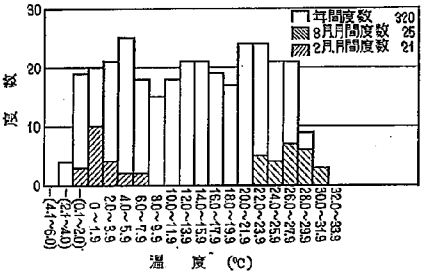


図-12　昭和35年4月～昭和36年3月1カ年間のコンクリート版表面の日最低温度の度数分布

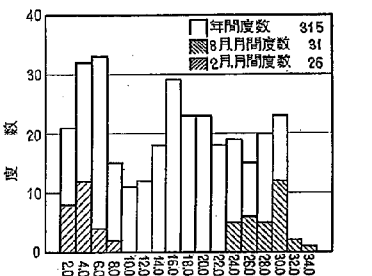


図-13　昭和36年4月～昭和37年3月1カ年間のコンクリート版表面の日最低温度の度数分布

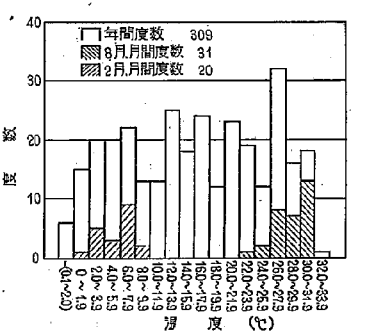


図-14　昭和37年4月～昭和38年3月1カ年間のコンクリート版表面の日最低温度の度数分布

2.1%である。この温度に達する時期は主として8月頃であることは明らかである。

千葉地方におけるコンクリート版表面の日最低温度の度数分布を年別にまとめた図-12，13および14によると，昭和35年，36年，および37年において日最低温度が0°C以下になる度数は，それぞれ23日，0日および6日であった。年間全度数に対する比はそれぞれ0.7%，0%および0.2%であり，時期は2月ごろが多いこと，千葉地

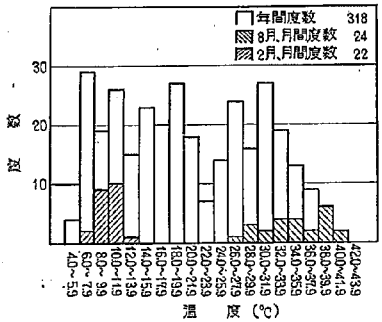


図-15 昭和35年4月～昭和36年3月1カ年間のコンクリート版底面の日最高温度の度数分布

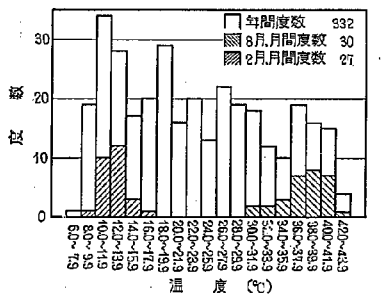


図-16 昭和36年4月～昭和37年3月1カ年間のコンクリート版底面の日最高温度の度数分布

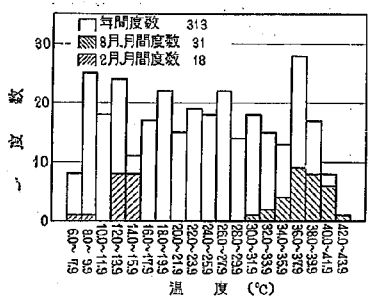


図-17 昭和37年4月～昭和38年3月1カ年間のコンクリート版底面の日最高温度の度数分布

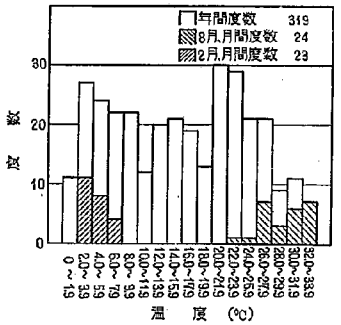


図-18 昭和35年4月～昭和36年3月1カ年間のコンクリート版底面の日最低温度の度数分布

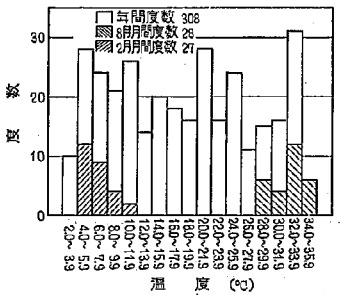


図-19 昭和36年4月～昭和37年3月1カ年間のコンクリート版底面の日最低温度の度数分布

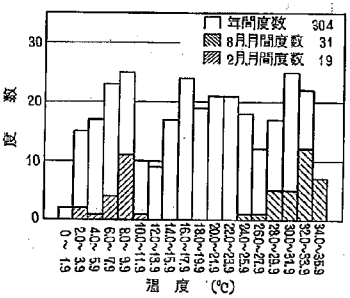


図-20 昭和37年4月～昭和38年3月1カ年間のコンクリート版底面の日最低温度の度数分布

方において，表面最高温度と最低温度は約 50°C の差があることがわかる。

コンクリート版底面温度については，図-15，16および17に示す。底面日最高温度の度数分布図からわかるように，日最高温度が 40°C に達することが35年では2日，36年で4日，37年で9日である。年間全度数に対する比はそれぞれ 0.1%，0.1%，および 0.3% である。

また図-18，19 および20によると底面の日最低温度が 0°C 以下になることは年間を通じてほとんどない。これらの図から千葉地方におけるコンクリート版底面の最高温度と最低温度は約 33°C の差があることがわかる。これらのコンクリート版表面，底面の最高，最低温度の度数分布図において8月の最高温度ないし最低温度の度数分布は，右(高温)に寄り，2月では左(低温)に寄っていることはきわめて当然である。月間度数分布が正規分布に比較的近いのに対し，年間度数分布は山が高くない。

コンクリート版表面および底面の温度が日最高および日最低に達する時刻の度数分布をこの3年間について

図-21～32 に示した。

これらの図によると，日最高最低温度に対する時刻については，年間度数も月間度数もともにほぼ正規分布をなしており，月間度数分布は温度の場合と違って，2月，8月の間にいちじるしい相違はない。

図-21，22 および23から千葉地方では，この3カ年間通じていずれもコンクリート版表面の温度は13時から15時までの間に最高に達すること，また図-24，25 および26に示すように早朝5時から7時までの間に最低に達することがわかる。したがって表面温度の上昇に要する時間は約8時間であるのに対し，降下に要する時間は約16時間である。

図-27，28および29に示すように，コンクリート版底面の温度は17時から19時までの間に最高となる。また図-30，31および32に示すように，7時から9時までの間に最低となる。したがってコンクリート版底面の温度の上昇に約10時間，降下に約14時間を要し，表面の場合と多少相違する。

以上の結果を第1報の結果と比較すると，千葉地方のコンクリート版の温度は，東京地方のそれより約4°C高い。日最高，最低温度に達する時刻は，すべて千葉地方の方が約30分遅れているようである。しかし温度の時間的変化は位相がずれていることを除けば同じである。

また同一舗装であってもその温度の絶対値は，年によって 2～4°C 程度相違するが，時間的な関係はほとんど変らない。

[3] コンクリートの版表面温度の日振幅

昭和35年4月から昭和38年3月までの3カ年間のコンクリート版表面温度振幅（全振幅）の度数分布を年間別に図-33，34 および35に示す。これらの図から千葉地方ではコンクリート版表面温度日振幅（半振幅）が 12°C に達することが各年間それぞれ 3～4 日あること 10°C 以上になることが10～20日あることがわかる。

この結果を第1報の結果と比べるとほとんど同じである。また図-33，34，35はたがいにほとんど同じである。すなわち温度の絶対値は，場所や年によって相違するにもかかわらず，版表面温度の日振幅はほとんど一定である。Thomlinson によれば，コンクリート版温度応力は版表面温度変化の振幅によってきまるから，コンクリート版の温度応力は，東京と千葉程度の場所の相違や年の相違によってほとんど変らないことが推定される。

[4] コンクリート版の上下両面の温度が等しくなる時刻

コンクリート版表面温度と底面温度が等しくなる時刻の度数分布を昭和35年4月から昭和38年3月までの3カ年間の記録から年別に図-36，37および38に示した。これらの図からコンクリート版の上下両面の温度が等しくなるのは午前と午後1回ずつあること，その時刻はこの

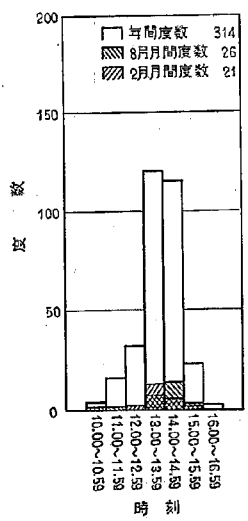


図-21　昭和35年4月～昭和36年3月1カ年間のコンクリート版表面の日最高温度時刻度数分布

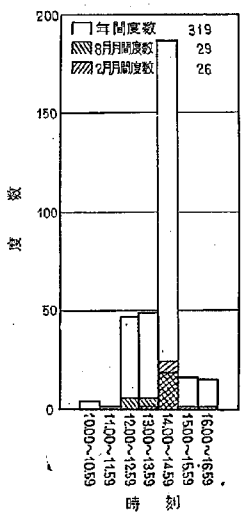


図-22　昭和36年4月～昭和37年3月1カ年間のコンクリート版表面の日最高温度時刻度数分布

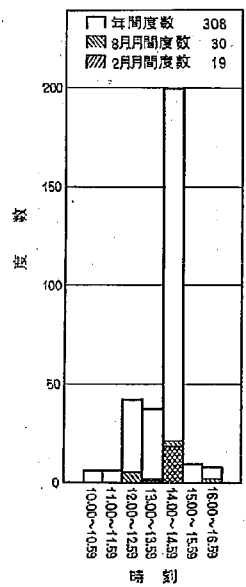


図-23　昭和37年4月～昭和38年3月1カ年間のコンクリート版表面の日最高温度時刻度数分布

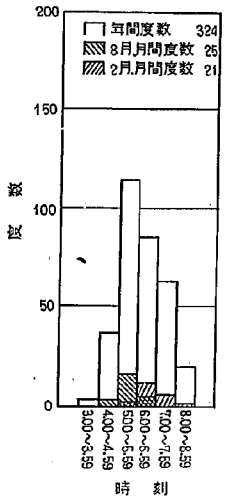


図-24 昭和35年4月～昭和36年3月1カ年間のコンクリート版表面の日最低温度時刻度数分布

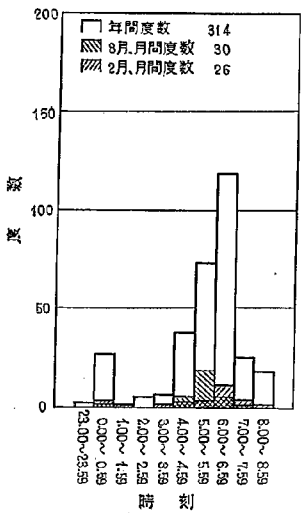


図-25 昭和36年4月～昭和37年3月1カ年間のコンクリート版表面の日最低温度時刻度数分布

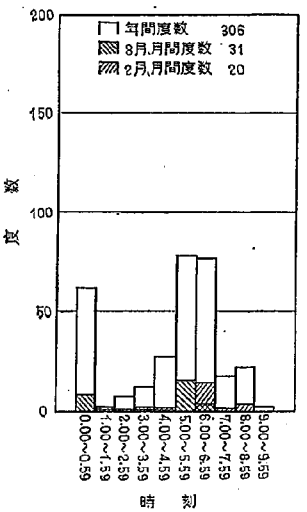


図-26 昭和37年4月～昭和38年3月1カ年間のコンクリート版表面の日最低温度時刻度数分布

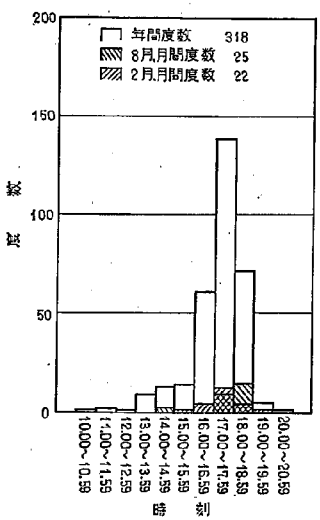


図-27 昭和35年4月～昭和36年3月1カ年間のコンクリート版底面の日最高温度時刻度数分布

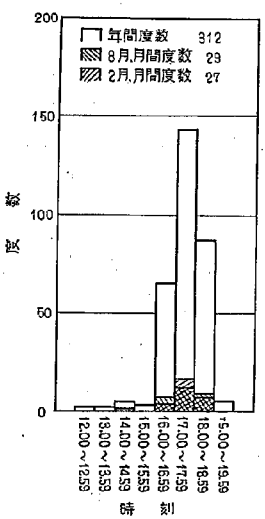


図-28 昭和36年4月～昭和37年3月1カ年間のコンクリート版底面の日最高温度時刻度数分布

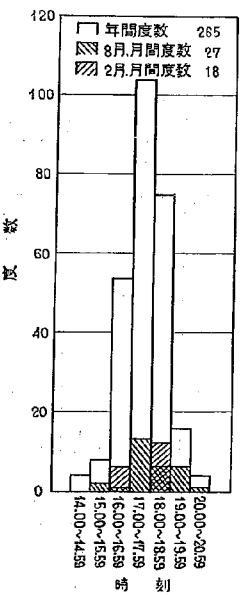


図-29 昭和37年4月～昭和38年3月1カ年間のコンクリート版底面の日最高温度時刻度数分布

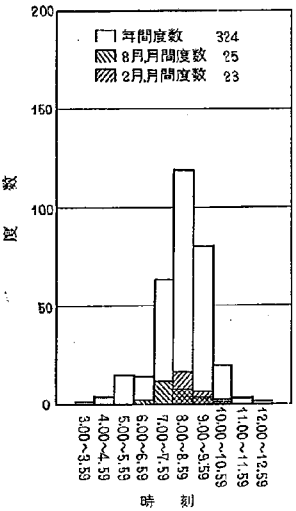


図-30　昭和35年4月～昭和36年3月1カ年間のコンクリート版底面の日最低温度時刻度数分布

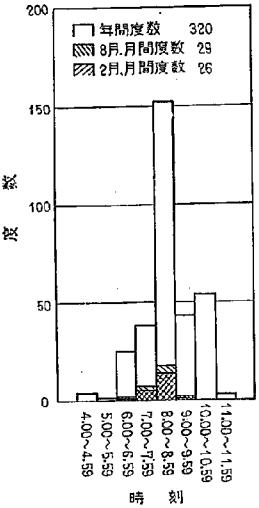


図-31　昭和36年4月～昭和37年3月1カ年間のコンクリート版底面の日最低温度時刻度数分布

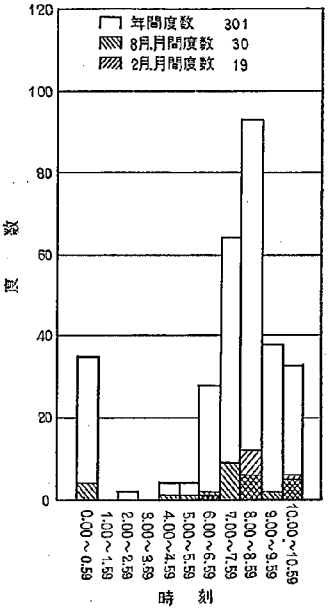


図-32　昭和37年4月～昭和38年3月1カ年間のコンクリート版底面の日最低温度時刻度数分布

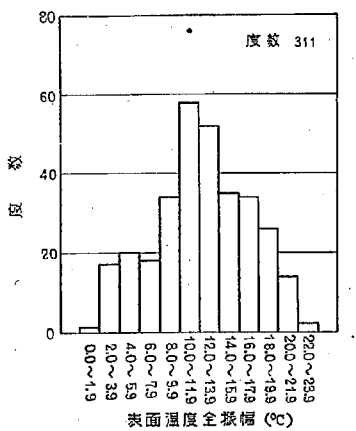


図-33　昭和35年4月～昭和36年3月1カ年間のコンクリート版表面温度の日振幅度数分布

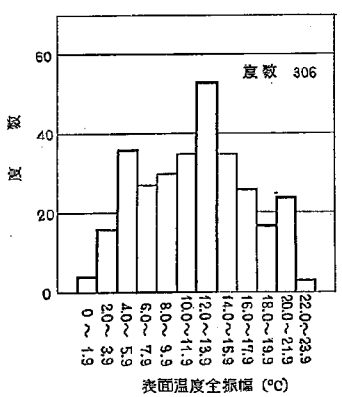


図-34　昭和36年4月～昭和37年3月1カ年間のコンクリート版表面の日振幅度数分布

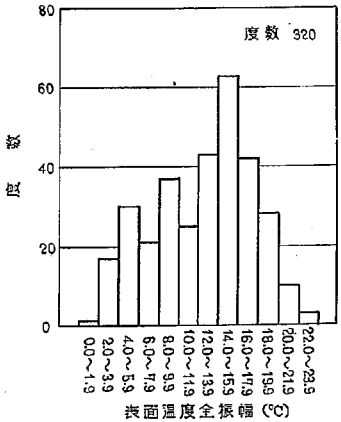
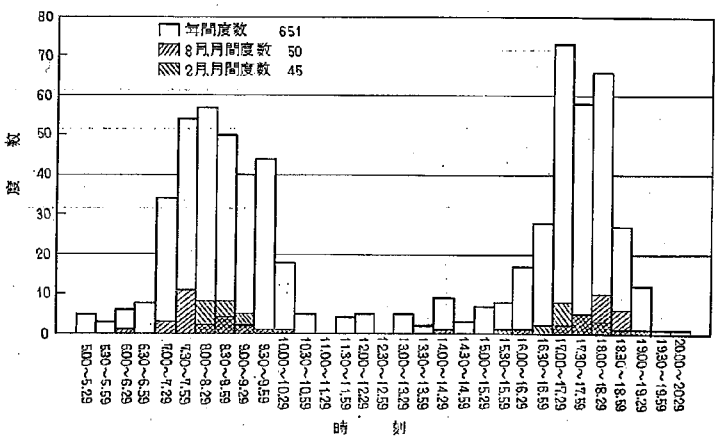


図 35 昭和37年4月～昭和38年3月1カ年間のコンクリート版表面の日振幅度数分布



図·36 昭和35年4月～昭和36年3月1カ年間のコンクリート版表面と底面の温度が等しくなった時の時刻度数分布

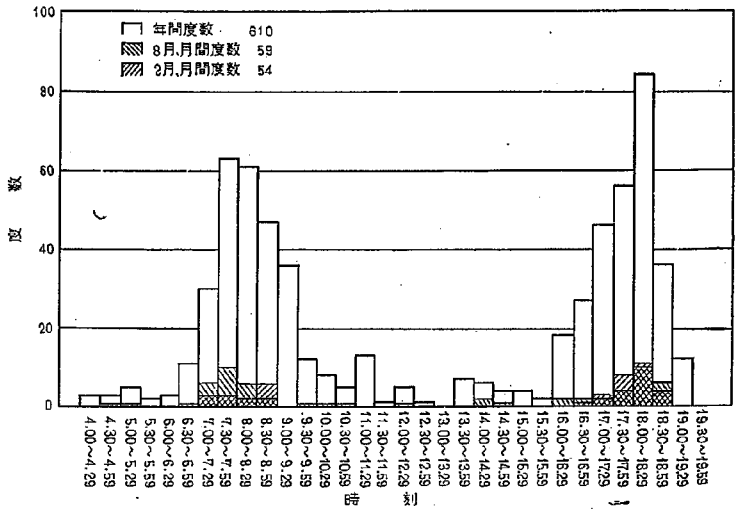


図-37　昭和36年4月～昭和37年3月1カ年間のコンクリート版表面と底面の温度が等しくなった時の時刻度数分布

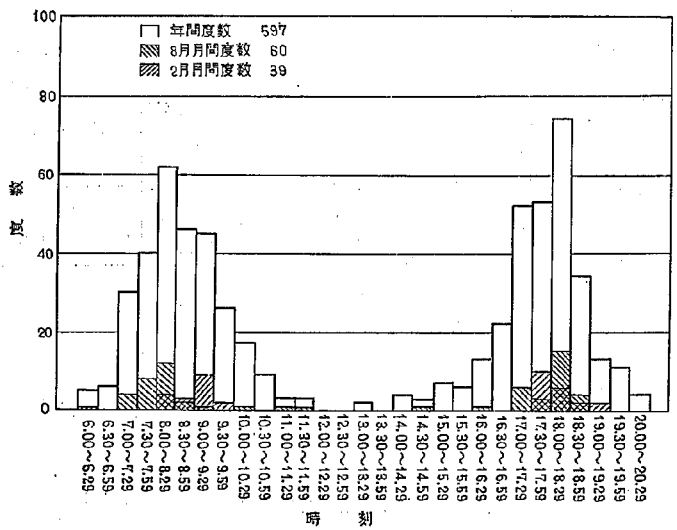


図-38　昭和37年4月～昭和38年3月1カ年間のコンクリート版表面と底面の温度が等しくなった時の時刻度数分布

3カ年間千葉地方においては7時～9時30分ごろと，17時～18時30分であることがわかる。

これらのことから温度応力の位相の基準となる時刻は午前8時であると実用上考えられる。

[5] コンクリート版の上下両面の温度差の最大値とその時刻

コンクリート版の表面が底面より高温である場合を正の温度差と定義する。

コンクリート版の表面と底面の温度差が極大値（毎日の最大値）に達するのは図-2を見てわかるように1日に2度あり正午付近に正の最大となり，早朝に負の最大となる。

昭和35年4月から昭和38年3月の3カ年において正，負，日最大温度差の度数分布を年別に図-39～44に示した。

図-39，40および41から千葉地方においては正の最大温度差が12°C以上に達することが35年では19日，36年で27日，37年で23日あること，これに対して，図-42，43および44から負の最大温度差が6°C以上になることは年間それぞれ1日～2日で，4°C以上に達することは，35年では100日，36年で110日，37年で95日あること，負の最大温度差は正の最大温度差の約1/3であることがわかる。

この結果を第1報の結果と比較すると，東京地方も千葉地方においてもコンクリート版の正および負の最大温度差はほとんど同じであるが，最大温度差の年間度数分布は東京地方に比べて絶対値の大きい日が多くなっており，（正で12°C以上になることが5日前後に対し千葉では20日前後，負では4°C以上になることが50日前後に対して，千葉では100日前後），いくぶん相違がある。

コンクリート版正，負の最大温度差の時刻については，この3カ年間の度数分布を図-45，50に示すとおりである。正の最大温度差の時刻は年別に図-45，46および47に示すように，12時～15時であり，負の最大温度差の時刻は図-48，49および50に示すように4時～6時であって，東京地方の場合と同じであり，年によってもほとんど変わらない。

[6] コンクリート版の上下両面の2時間ごとの温度差

千葉地方における昭和35年4月～昭和38年3月の3カ年間についてコンクリート版表面と底面の2時間ごとの温度差の度数分布を調べて，そりこう束応力の大きさと，頻度を求める基礎資料とした。また，そりこう束応力は第1報により温度差による Westergaard の方法によって求めた。

表-5はこの3カ年間について2時間ごとの温度差の度数，累加度数，累加度数の百分率を求めたものである。それをグラフに表わしたものが図-51および52である。表-5には第1報に発表した東京地方の厚さ20cmのコンクリート版の温度差の測定値も付記した。

表-5からわかるように，温度差が12°C以上になることは非常に少なく，この3カ年間を通じて30時間前後であって，全時間数の約0.3%，10°C以上となることは，200時間前後で全時間数の2.0%，6°C以上となることは，800時間前後で全時間数の11%にすぎない。

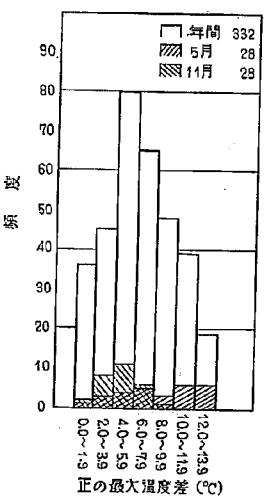


図-39　昭和35年4月～昭和36年3月1カ年間のコンクリート版上下両面の正の最大温度差の度数分布

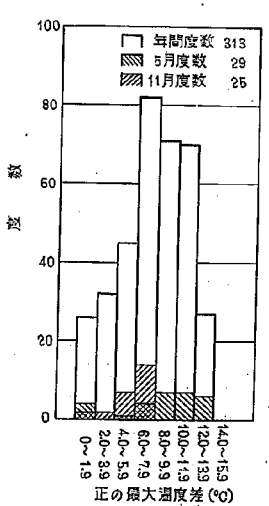


図-40　昭和36年4月～昭和37年3月1カ年間のコンクリート版上下両面の正の最大温度差の度数分布

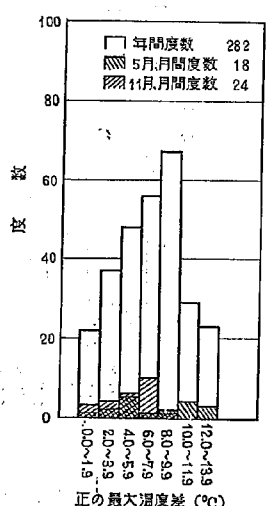


図-41　昭和37年4月～昭和38年3月1カ年間のコンクリート版上下両面の正の最大温度差の度数分布

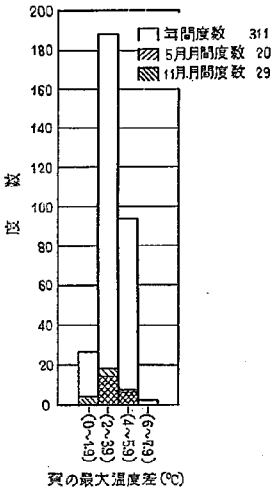


図-42　昭和35年4月～昭和36年3月1カ年間のコンクリート版上下両面の負の最大温度差の度数分布

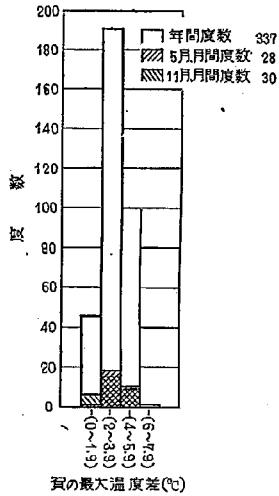


図-43　昭和36年4月～昭和37年3月1カ年間のコンクリート版上下両面の負の最大温度差の度数分布

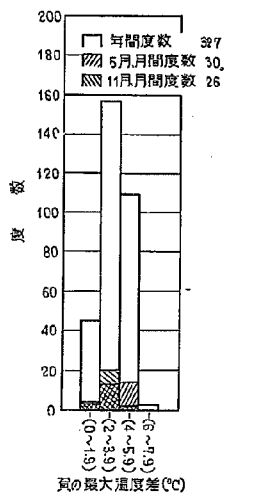


図-44　昭和37年4月～昭和38年3月1カ年間のコンクリート版上下両面の負の最大温度差の度数分布

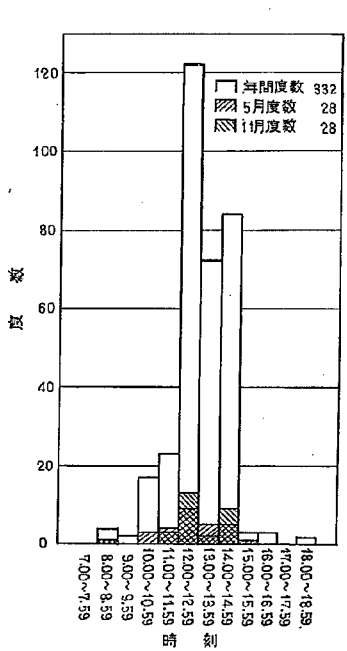


図-45　昭和35年4月～昭和36年3月1カ年間のコンクリート版上下両面の温度差が正の最大になる時刻の度数分布

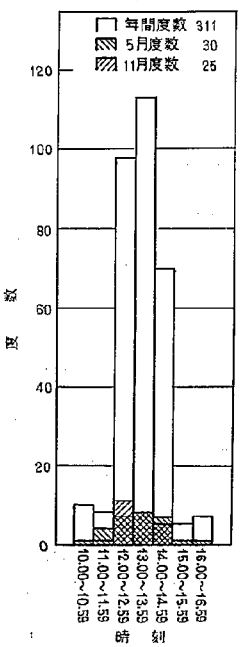


図-46　昭和36年4月～昭和37年3月1カ年間のコンクリート版上下両面の温度差が正の最大になる時刻の度数分布

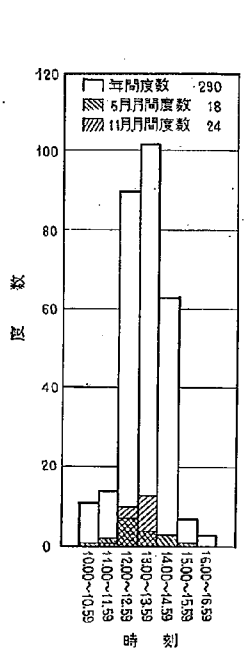


図-47　昭和37年4月～昭和38年3月1カ年間のコンクリート版上下両面の温度差が正の最大になる時刻の度数分布

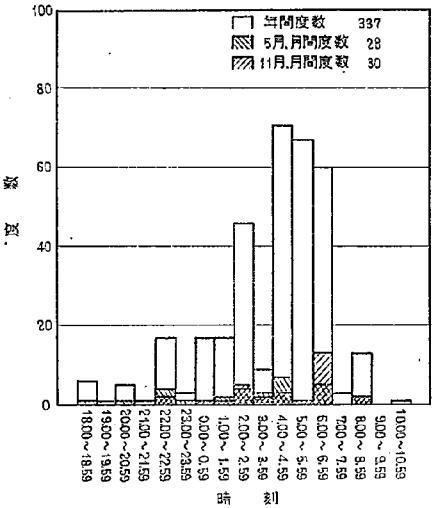


図-48　昭和35年4月～昭和36年3月1カ年間のコンクリート版上下両面の温度差が負の最大になる時刻の度数分布

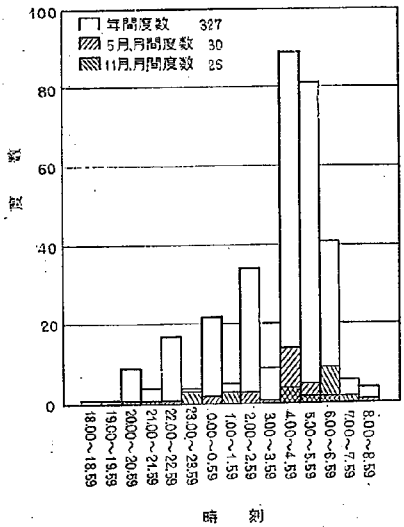


図-49　昭和36年4月～昭和37年3月1カ年間のコンクリート版上下両面の温度差が負の最大になる時刻の度数分布

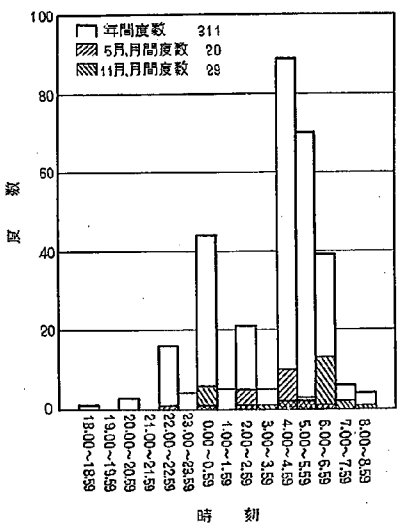
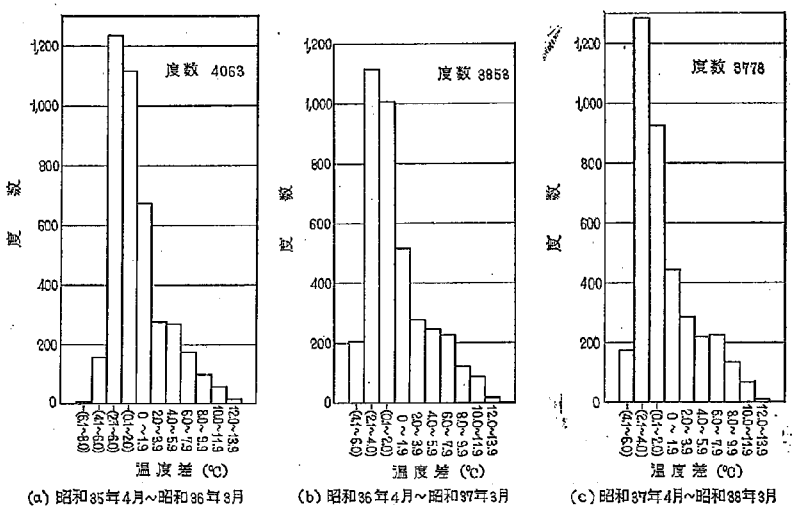


図-50　昭和37年4月～昭和38年3月1カ年間のコンクリート版上下両面の温度差が負の最大になる時刻の度数分布

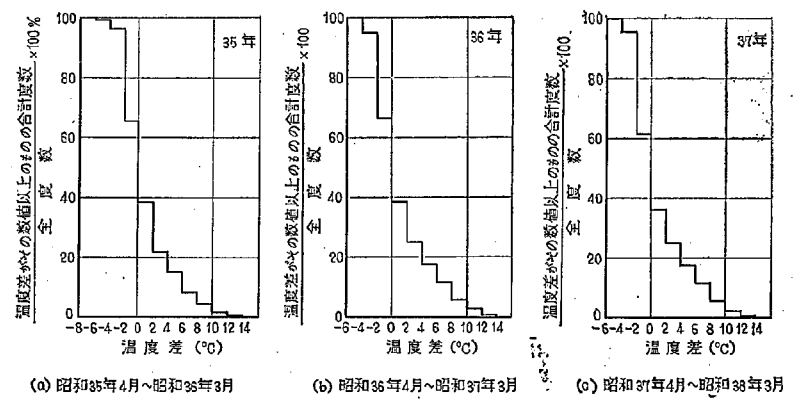
表-5　2時間ごとの温度差の度数累加度数

場所	千葉市六川町土木研究所千葉支所構内									東京都北区赤羽荒川下流工事事務所構内					
年度	35, 4, 1～36, 3, 31			36, 4, 1～37, 3, 31			37, 4, 1～38, 3, 31			33, 4, 1～34, 3, 3			34, 2, 23～35, 2, 2		
温度差 範囲 / 度数(%)	度数	累加度数	累加度数(%)	度数	累加度数	累加度数(%)	度数	累加度数	累加度数(%)	度数	累加度数	累加度数(%)	度数	累加度数	累加度数(%)
12.0～13.9	14	14	0.3	17	17	0.4	10	10	0.3	18	18	0.4	9	9	0.2
10.0～11.9	58	72	1.8	87	104	2.7	68	78	2.1	64	82	2.0	38	47	1.2
8.0～9.9	98	170	4.2	118	222	5.8	134	212	5.6	112	194	4.7	120	167	4.1
6.0～7.9	172	342	8.4	224	446	11.5	227	439	11.6	221	415	10.1	196	363	9.0
4.0～5.9	268	610	15.0	244	690	17.9	219	658	17.5	244	659	16.0	265	628	15.5
2.0～3.9	272	882	21.7	275	965	25.0	287	945	25.0	333	992	24.1	390	1018	25.1
0～1.9	672	1554	38.3	513	1478	38.5	444	1389	36.8	858	1850	44.9	810	1828	45.1
−(0.1～2.0)	1113	2667	65.6	1058	2536	66.2	927	2316	61.5	1354	3204	77.8	1407	3235	79.7
−(2.1～4.0)	1233	3900	96.0	1114	3650	95.0	1289	3605	95.5	852	4056	98.4	763	3998	98.6
−(4.1～6.0)	159	4059	99.8	203	3853	100.0	173	3778	100.0	65	4121	100.0	59	4057	100.0
−(6.1～8.0)	4	4063	100.0	0			0			0			0		



(a) 昭和35年4月～昭和36年3月　(b) 昭和36年4月～昭和37年3月　(c) 昭和37年4月～昭和38年3月

図-51　年別の2時間ごとの温度差の度数分布



(a) 昭和35年4月～昭和36年3月　(b) 昭和36年4月～昭和37年3月　(c) 昭和37年4月～昭和38年3月

図-52　年別の2時間ごとの温度差累加度数分布

表-5において，千葉地方のコンクリート版の温度差と東京地方のコンクリート版の温度差を比べると，温度差0～1.9°C，−(0.1～2.0)°C および −(2.1～4.0)°C の時間数がいくぶん相違するが，他はおおむね同じである。すなわち温度応力がきわめて小さい場合の時間数を除けば，東京と千葉のコンクリート版の温度応力はほとんど同じである。表-5において，同一コンクリート版の温度差の年による相違を見ると，極めて小さく設計上まったく無視できると考えられる。

コンクリート版が完全にこう束された縦横無限に拡がったコンクリート版中央部のそりこう束応力 $w\sigma_t$ は Westergaard の式

$$w\sigma_t=\alpha E\theta'/2(1-\mu)$$

から求められる。

ここに

α：温度膨脹率 (°C^{-1})

E：コンクリートのヤング率 (kg/cm^2)

θ'：コンクリート版表面の温度と底面の温度の差 (°C)

μ：コンクリートのポアソン比

である。

表-1 の舗装版コンクリートの試験結果によると，

E=310,000 kg/cm^2

μ=0,25

α=0.000009 °C^{-1}

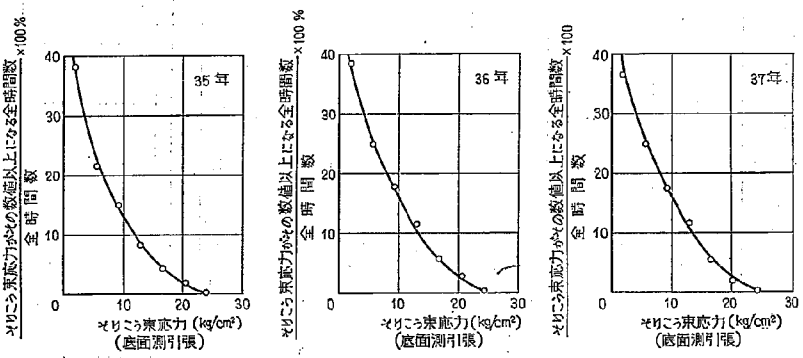
θ=温度差 °C

であるから，そりこう束応力は

$$[(0.000009\times310,000/2\times(1-0.25)]\theta'$$
$$=1.86\theta' \text{ kg/cm}^2$$

である。

表-5から各温度区分の中央値を平均温度差とし，そりは完全にこう束されるものとして計算すると，図-53に示すようにそりこう束応力の頻度曲線を求めることができる。コンクリート版のそりが完全にこう束されると仮



(a) 昭和35年4月～昭和36年3月　(b) 昭和36年4月～昭和37年3月　(c) 昭和37年4月～昭和38年3月

図-53　そりが完全に拘束されていると仮定した場合のそりこう束応力の頻度曲線

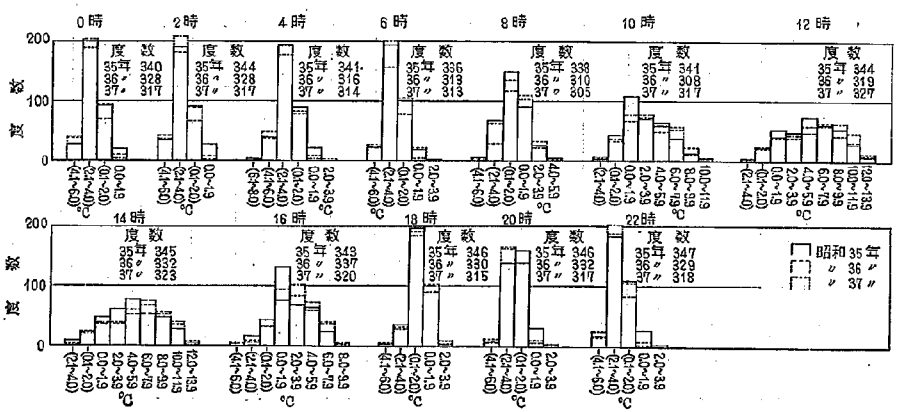


図-54　昭和35年4月～昭和38年3月3カ年間の時刻別温度差の度数分布

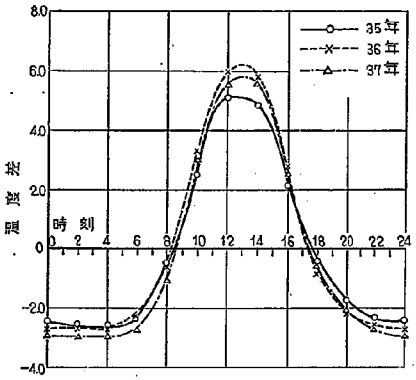


図-55　各時刻におけるコンクリート版上下両面の温度差の年間平均を結んだ曲線

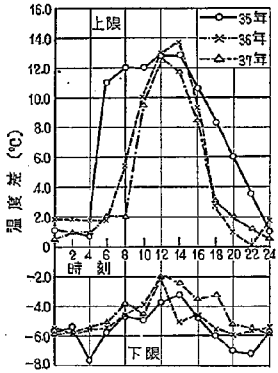


図-56　各時刻におけるコンクリート版上下両面の温度差の範囲

定すればこの図から年間の0.3%くらいの時間に 24kg/cm²，また2%くらいの時間に 20kg/cm²，6%くらいの時間に，15kg/cm² 13%くらいの時間に 10kg/cm²，程度のそりこう束応力が生じていることがわかる。

これらの温度差の時間変化を知るために2時間ごとの温度差の時刻別度数分布を図-54に示した。昼間は天候に左右されやすいため度数分布グラフの山が低いが，夜間は山が高く，ばらつきが少ない。

各時刻別の温度差の平均値を年別に求め日変化曲線にしたものを図-55 に示す。また各時刻における年間最大温度差と最小温度差の範囲を図-56に示す。

図-55 に示す時刻別年間平均温度差の日変化曲線からわかるように最高温度になる時刻は12時～14時で，最低温度差になる時刻は早朝4時～5時30分頃である。これが完全にこう束される場合，そりこう束応力の平均値は4時～5時30分頃に 5 kg/cm²（コンクリート版底面で圧縮）8時30分頃で0となり，12時～14時頃に 10kg/cm²（コンクリート版底面で引張）また，18時頃に0となり，21時～22時にかけ 4.7kg/cm²（コンクリート版底面で圧縮）と，そりこう束応力は変化していることがわかる。

[7] コンクリート版温度の深さ方向の分布

図-2～5 などの温度曲線より同一時刻における深さ方向の温度分布を求めることができる。深さ方向の温度分布も時間的に変化している。

図-57 はコンクリート版の深さ方向に温度分布を観測した1例である。深さ方向の温度変化は直線変化をしていない。そりこう束応力は深さ方向の温度変化が直線変化をしていると仮定して求めた応力であるから，深さ方向の曲線的な温度変化によって実際には別の応力が発生する。このように深さ方向の温度変化が直線でないために生じる応力を内部応力と称している。

図-57 から10時～14時の深さ方向の温度変化は左に凸になっているからコンクリート版の上下両面には圧縮応力が生じ，18時～22時の深さ方向の温度変化は左に凹になっているから，コンクリート版上下両面に引張応力が生じていることがわかる。

この圧縮および引張り内部応力を求める方法として第1報において図解法で求める方法が最も適当であると提

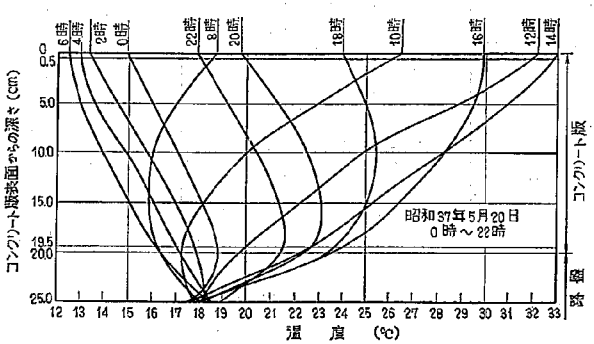


図-57　コンクリート版の深さ方向の温度変化の1例

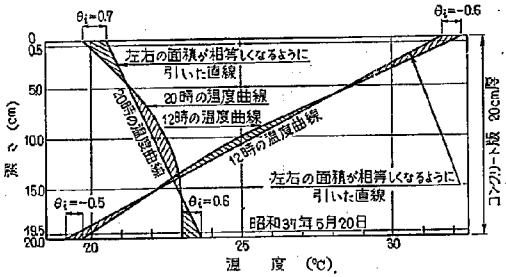


図-58 内部応力の図解法の説明図

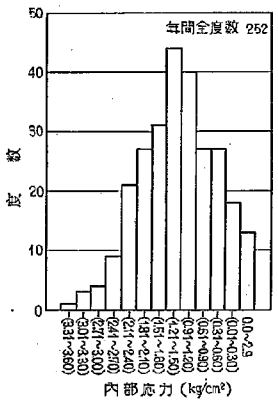


図-59 昭和35年4月～昭和36年3月までの12時における内部応力度数分布

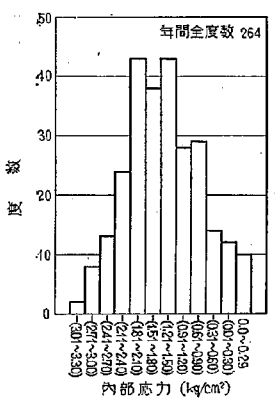


図-60 昭和36年4月～昭和37年3月までの12時における内部応力度数分布

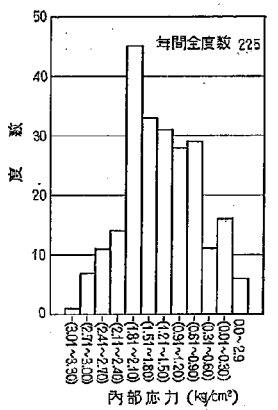


図-61 昭和37年4月～昭和38年3月までの12時における内部応力度数分布

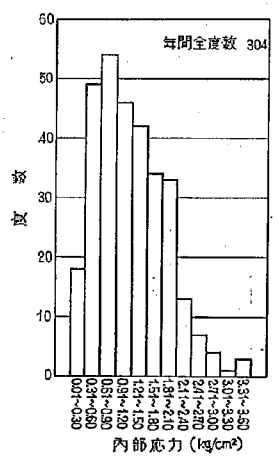


図-62 昭和35年4月～昭和36年3月までの20時における内部応力度数分布

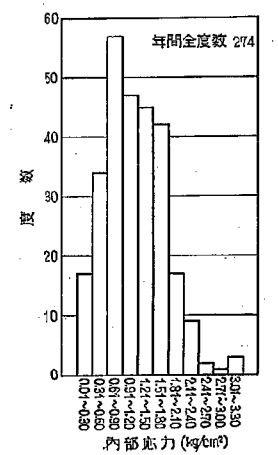


図-63 昭和36年4月～昭和37年3月までの20時における内部応力度数分布

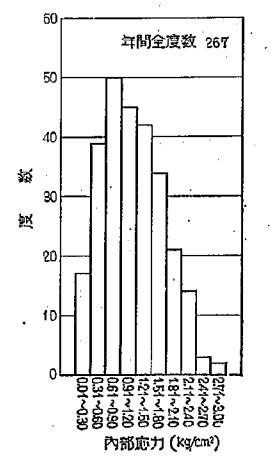


図-64 昭和37年4月～昭和38年3月までの20時における内部応力度数分布

案されている。本報告においても，この図解法で内部応力を求めた。

図解法は，図-58 の説明のように左，右の面積が相等しくなるような直線を探しその直線がコンクリート版の表面と底面に交わるところの温度と，実測温度との差 θ_i（底面），θ_i'（表面）を読みとり，それに理論式からだされた $\alpha E/(1-\mu)$ を掛ければコンクリート版中央部における内部応力が得られる。

ここで問題にする内部応力は荷重応力，そりこう束応力共に縁部底面に引張り応力を生じさせることから底面の温度差 θ_i だけを取り上げた。

第1報において，東京地方では日最大引張り内部応力の生ずる時期は，20時ごろに生ずることが明かにされ，また内部応力は日中に圧縮応力が生じて理論的に日最大圧縮内部応力の生ずる時刻は10時ごろに生ずることが明かにされている。

本報告においては第1報を参考にし圧縮内部応力を12時，引張り内部応力については20時に求めた。

千葉地方において昭和35年4月～昭和38年3月の3カ年間の温度実測結果から，$\mu=0.25$，$\alpha=0.000009(°C^{-1})$ $E=310,000\ kg/cm^2$ として求めた。圧縮および引張りの内部応力度数分布は図-59，60，61 および図-62，63，64のようであった。

これらの図から12時における温度変化で厚さ 20cm のコンクリート版に生ずる圧縮内部応力が 2.5kg/cm² 以上になることが年間に 35 年には17日（6%），36年で23日（9%），37年では19日（8.5%）で，平均20日（8%）前後であること，また20時における温度変化で生ずる引張り内部応力が 2.5 kg/cm² 以上になることが年間に35年には15日（5%），36年で6日（2%），37年では5日（1.9%）で，平均9日（3%）前後であること，さらに年間通じて圧縮，引張り内部応力ともに90%前後は 0.5～2.5kg/cm²の内部応力がコンクリート舗装版には生じていることがわかる。

本研究第1報においては，厚さ 25cm のコンクリート版についてしか内部応力を求めていない上ヤング率が相違するから本報告の結果と比較することがむずかしいが，Thamlinson の理論式を計算した第1報図-4 によれば，内部応力振幅は版厚にほぼ比例することを利用して比較すると，両者はほとんど同じであると考えられる。

図-59～61 および 62～64 を相互比較すると，内部応力の年による相違は無視できるほど小さい。

[8] コンクリート版温度の年変化

昭和35年4月～昭和38年3月までの3カ年間連続に観測しコンクリート版表面温度の日変化，およびコンクリート版底面温度の日変化（最高温度と最低温度を結んだ直線）の年間推移を図-65，66 に示した。またこの3カ年間のコンクリート版表面，底面の温度が等しくなった

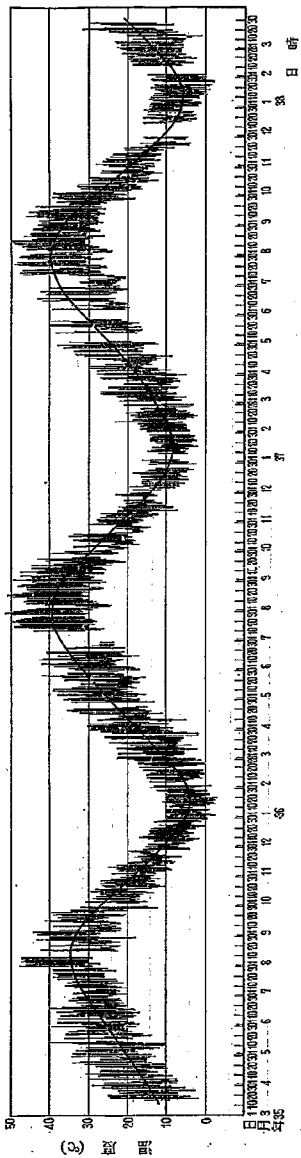


図-65　コンクリート版の表面 0.5cm の温度の最高，最低日変化の3カ年間推移

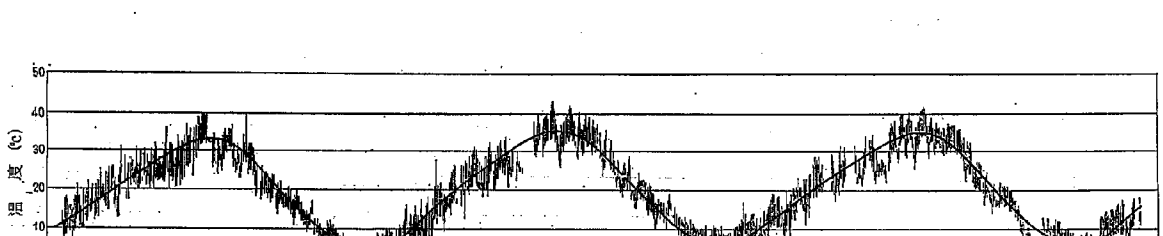


図-66　コンクート版の底面 0.5cm の温度の最高，最低日変化の３カ年間推移

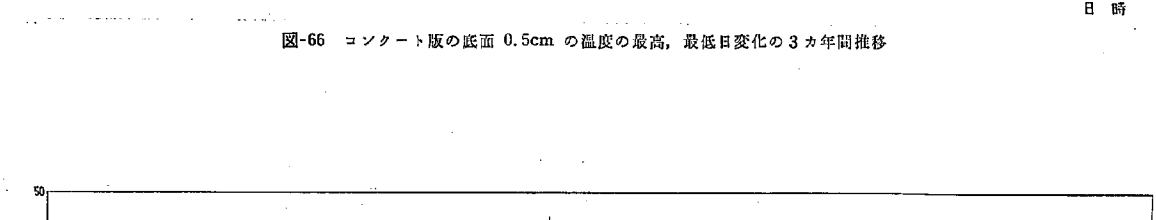


図-67　コンクリート版の上下両面の温度が等しくなった時の温度の日変化の３カ年間推移

時の日変化（これは午前，午後と1日に2度あり一般に午後の温度が高い）を図-67に示した。

図-65 から千葉地方におけるコンクリート版表面温度の年振幅は大体 32°C（半振幅 16°C）であること，温度変化は大体7月末から8月上旬にかけて最高となり1月に最低になることがわかる。なおこの図においてコンクリート版表面温度の日平均値は年間最高温度は35年には35°C，36年，37年には 40°C に達し年間最低温度は35年には 4°C，36年で 8°C，37年では 5°C に達すること，表面温度の最高，最低値はそれぞれ35年では47°C，−3°C，36年で 51°C，3°C，37年では 49°C，−2°C であることがわかる。

35年は36，37年に比較して温度がいくぶん低いがこれは図-6でわかるように曇の日が晴の日より年間通じて約15% 程多いためと考えられる。

図-66 からコンクリート版底面温度の年振幅については 29°C（半振幅 14.5～15°C）であって表面振幅よりわずかに小さい。底面温度の年間最高日平均値は3カ年間を通じて大体 35°C，最低温度については 5°C 前後で大差はないことがわかる。また底面温度の最高，最低値はそれぞれ年間通じて 42°C，2°C であり35年にはいくぶんひくいようである。

図-67 に示すコンクリート版表面，底面の温度が等しくなった時の温度は版全体の平均温度にほぼ近い。この図の中点を結んだ曲線はコンクリート版平均温度の年間変化を示すと考えられる，図から版の平均温度は年間に 28～29°C（半振幅 14～14.5°C）の振幅で変化していることがわかる。

以上の結果から千葉地方においてはコンクリート版の平均温度は年間に 28～29°C の全振幅で変化していること，また版底面温度年振幅もこれにほぼ近いこと版表面温度年振幅は約 32°C であること等がわかった。

コンクリート版温度の年変化についても，その絶対値

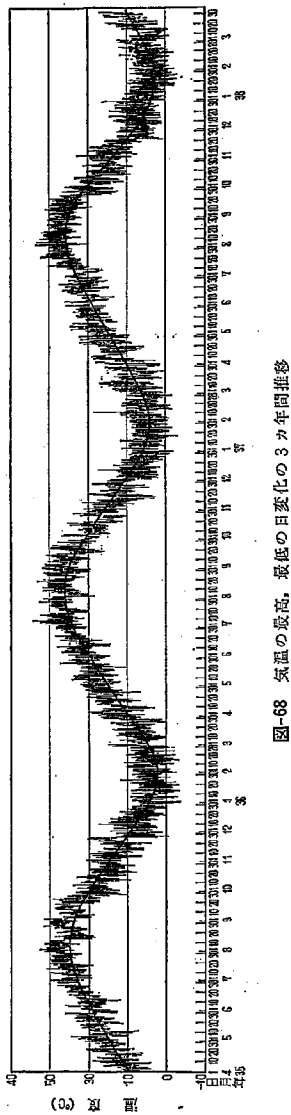


図-68　気温の最高，最低の日変化の3カ年間推移

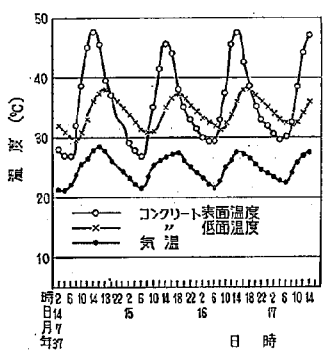


図-69　晴天が続いた場合におけるコンクリート版上下および気温の時間変化

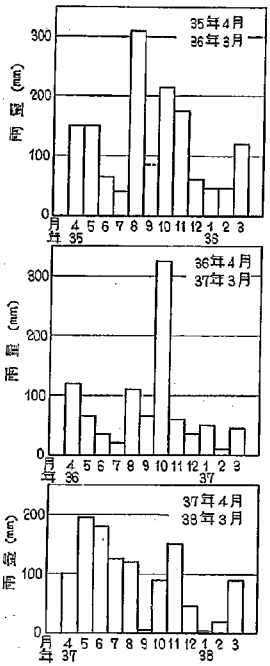


図-70　月平均年間雨量

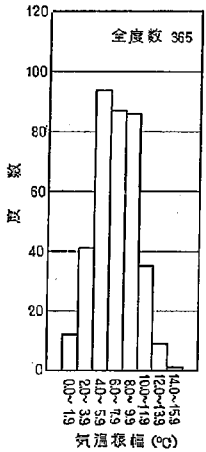


図-71　昭和35年4月～昭和36年3月1カ年間の気温の日振幅の年間度数分布

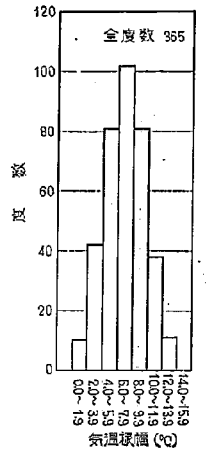


図-72　昭和36年4月～昭和37年3月1カ年間の気温の日振幅の年間度数分布

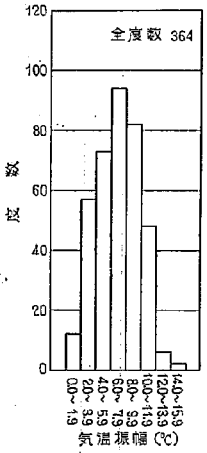


図-73　昭和37年4月～昭和38年3月1カ年間の気温の日振幅の年間度数分布

は場所により，年により多少相違するが，年変化量に関してはほとんど一定である。

5.　気温とコンクリート版温度の関係

[1]　気温および雨量

気温は土木研究所千葉支所構内では観測しなかったため，千葉測候所において観測された日温度変化の資料を利用した。千葉測候所は研究所よりやや海岸寄りに位置しているため研究所構内の気温といくぶん温度差があると思われる。

図-68 は連続3カ年間の気温変化を示すもので中点を結ぶ曲線が平均気温変化である。気温の年間振幅は22～23°C でコンクリート版の年間振幅より 6°C 程度低い。

この観測記録からプロットした気温と時間変化の関係は図-69 に示すとおりであり，コンクリート版温度変化

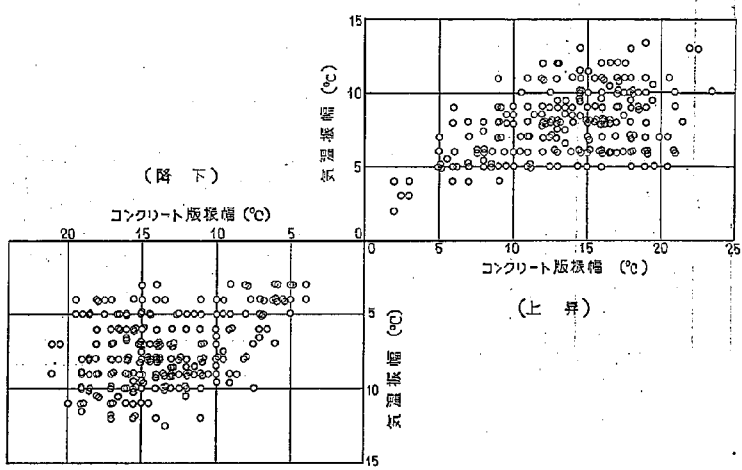


図-74　気温とコンクリート版表面における上昇，降下温度日振幅

の型と似た周期的変化をしている。気温が最高になる時刻は大体14時前後が多くコンクリート版表面温度が最高になる時刻よりいくぶん遅くなっている。最高気温はコンクリート版表面最高温度より 18°C 程度低く，気温が最低になる時刻は早朝 5～6 時ごろで最低気温はコンクリート版表面最低温度より 5～6°C（晴天の場合）低い。

図-70 は参考のため千葉地方におけるこの 3 カ年間の月平均年間雨量を求めた。この図によると 8 月，10月に最も雨量が多い。

[2] 気温日振幅とコンクリート版表面温度日振幅の関係

図-71，72 および73は昭和35年 4 月～昭和38年 3 月の 3 カ年間における気温日振幅の度数分布を示したものである。

この図を図-33, 34および35に比べると，コンクリート版表面温度日振幅が最大度数の 温度振幅は35年に 10°C～11.9°C，36 年に 12°C～13.9°C，37 年に 14°C～15.9 °C それに比べ気温日振幅は35年に 4°C～5.9°C, 36 年に 6°C～7.9°C，37 年に 6°C～7.9°C でコンクリート版表面温度日振幅の約 1/2 くらいになっている。

第 1 報において気温日振幅からコンクリート版日振幅を求めることは不可能であると報告されている。図-74 は千葉地方において気温とコンクリート版温度の上昇および降下時の温度振幅の関係を調べたものである。この図からもわかるように，やはりばらつきが多く両者の相関性が非常にうすいことからコンクリート版日振幅を求めることはむずかしいことがわかる。

[3] 最高，最低気温とコンクリート版最高，最低温度の関係

日最高気温とコンクリート版表面日最高温の関係および日最低気温とコンクリート版表面日最低温度の関係を図-75，76 にそれぞれ示した。

図-75 でわかるように，コンクリート版表面の日最高温度は，日最高気温が高くなるほど高くなることは明らかである。同じ日最高気温に対して版表面の温度は ± 7～8°C のばらつきがあるが，相関係数は0.95で比較的大きい。

図-76 に示す日最低気温と，コンクリート版表面の日最低温度との関係については同じ気温に対して，舗装表面温度のばらつきは ±3°C で相関係数も 0.97 で版表面最高温度よりばらつきが少ない。

図-77，78 に示すとおり，日最高，最低気温とコンクリート版底面の日最高および最低温度については，ともに版表面温度にくらべてばらつきが少なく，同じ気温に対して ±3°C 程度で相関係数も 0.96～0.97 である。

本章 [2] において気温日振幅とコンクリート版日振幅の関係については，相関性が比較的うすく，気温日振幅からコンクリート舗装版表面温度の日振幅を求めるのはむずかしいことを述べたが，図-75，76 の関係グラフから気温振幅を取れば版表面振幅はかなり正確に推定することができると考えられる。これらの日最高最低気温とコンクリート版表面の日最高最低温度の関係を一次式で表わすと，

日最高気温 $\theta_{a\,max}$(°C) とコンクリート版表面の日最高温度 $\theta_{c\,max}$ (°C) の関係

$$\theta_{a\,max}=0.64\,\theta_{c\,max}+1.6 \quad \cdots\cdots(1)$$

相関係数　0.95

日最低気温 $\theta_{a\,min}$ (°C) とコンクリート版表面の日最低温度 $\theta_{c\,min}$ (°C) の関係

$$\theta_{a\,min}=0.96\,\theta_{c\,min}-2.6 \quad \cdots\cdots(2)$$

相関係数　0.97

日最高気温 $\theta_{a\,max}$ (°C) とコンクリート版底面の日最高温度 $\theta'_{c\,max}$ (°C) の関係

$$\theta_{a\,max}=0.78\,\theta'_{c\,max}+1.2 \quad \cdots\cdots(3)$$

相関係数　0.97

日最低気温 $\theta_{a\,min}$ (°C) とコンクリート版底面の日最低温度 $\theta'_{c\,min}$ (°C) の関係

$$\theta_{a\,min}=0.86\,\theta'_{c\,min}+1.0 \quad \cdots\cdots(4)$$

相関係数　0.96

である。

気温日振幅からコンクリート版表面温度の日振幅を推定するために，(1) 式から (2) 式を引くと，版表面温度日振幅 $\Delta\theta_c$ は

$$\Delta\theta_c=1/0.64\,\theta_{a\,max}-1/0.96\,\theta_{a\,min}-5.2 \quad \cdots(5)$$

の関係式が求まる。

この関係式で図-80 に示す計算図表を作ることができる。図表においてA尺を日最高気温，B尺に日最低気温を取り，C尺に交わった点を読み取れば版表面の日振幅温度の近似値がわかる。

この (5) 式からコンクリート版表面温度日振幅 $\Delta\theta_c$ を求め，その度数分布をつくり，それと実際に測定した版表面温度の日振幅の度数分布，図-33，34 および35と比較した。(図-79)

図-79 によると，実測値の方がややばらつきが大きく，たとえば日振幅の最大値は実測値の方が 2°C くらい大きくなっている。これは同一気温に対してコンクリート版表面温度は実際には ±7～8 °C のばらつきがあるにもかかわらず年間平均値によって推定したためであると考えられる。しかし，いずれの場合もその度数分布の中心は 8～14°C であって，分布の形も比較的良く一致している。ある程度の誤差を許容すれば，気温のデータからコンクリート版表面温度振幅の度数分布を推定できると考えられる。

6. 結　論

コンクリート舗装の設計に関する実験的研究の第 4 報

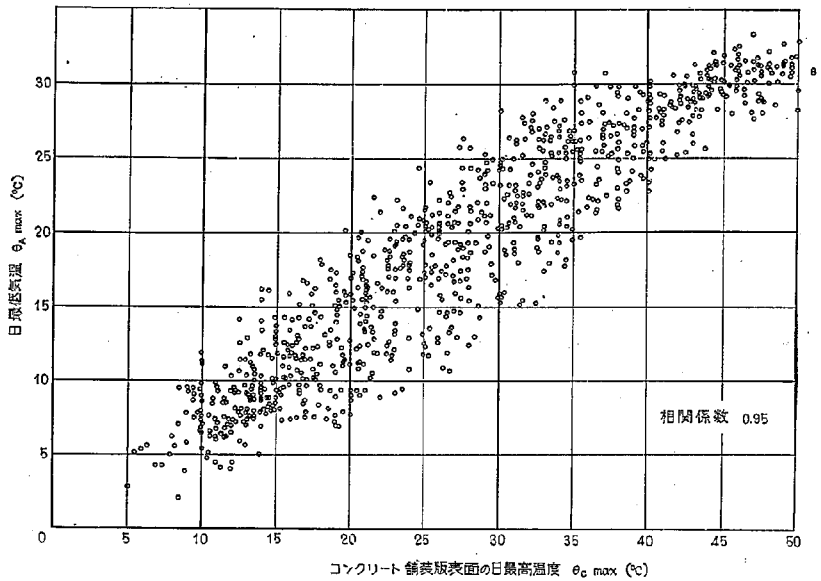


図-75 昭和35年4月～昭和38年3月の3カ年間の気温最高温度とコンクリート版表面最高温度の関係

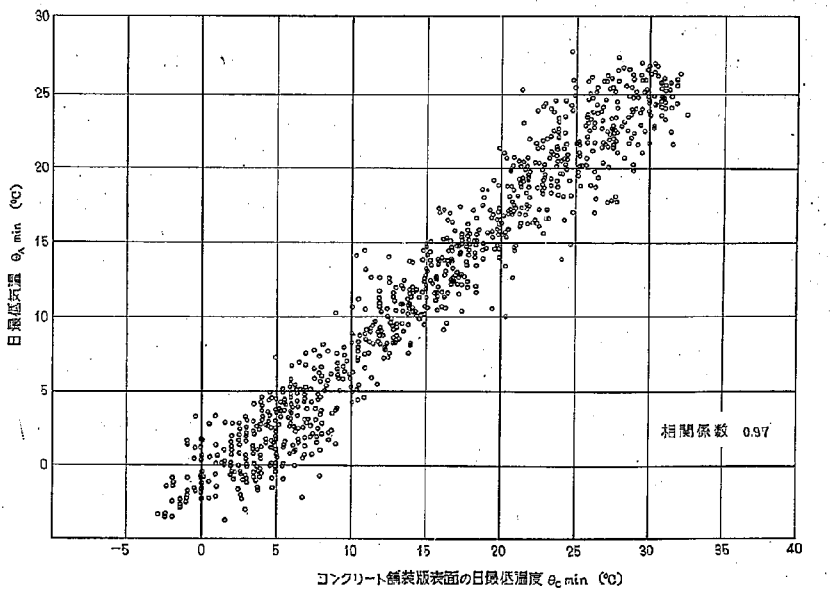


図-76 昭和35年4月～昭和38年3月の3カ年間の気温最低温度とコンクリート版表面最低温度の関係

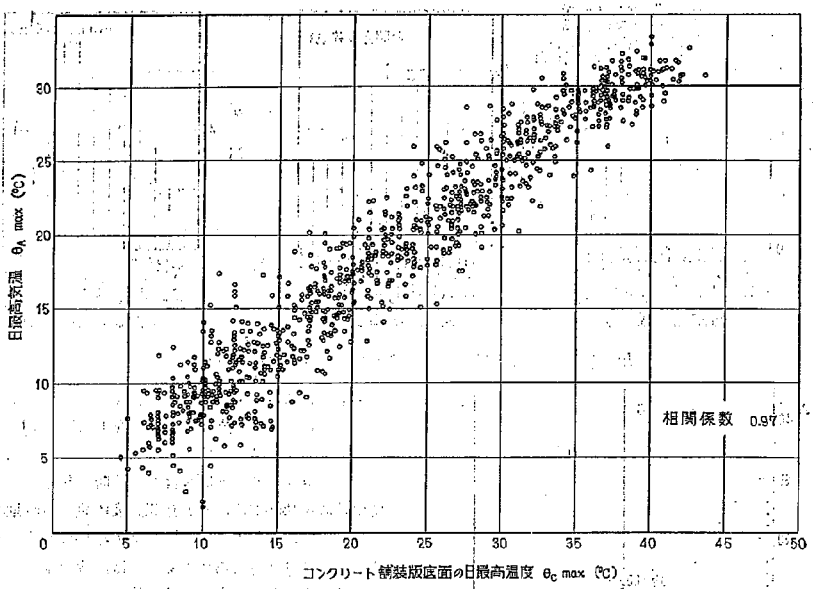


図-77　昭和35年4月～昭和38年3月の3ヵ年間の気温最高温度とコンクリート版底面最高温度の関係

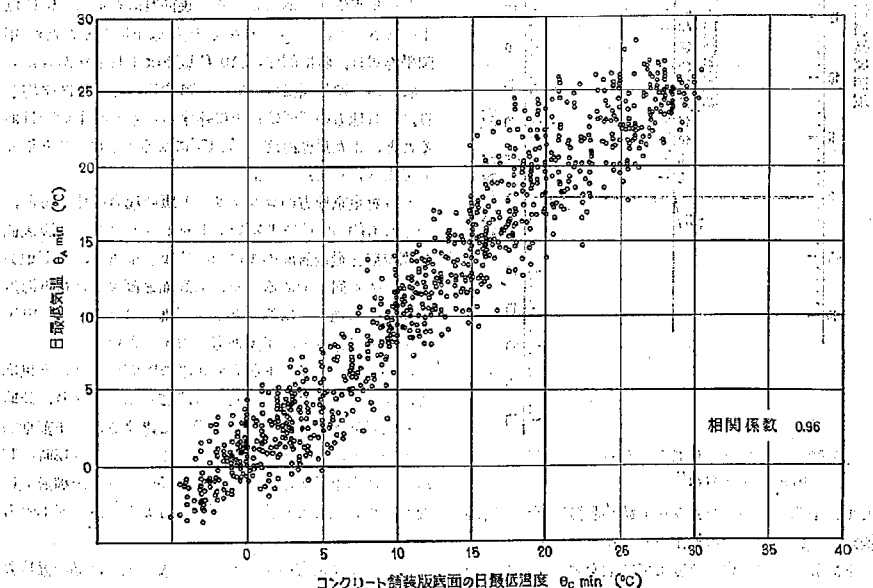


図-78　昭和35年4月～昭和38年3月の3ヵ年間の気温最低温度とコンクリート版底面最低温度の関係

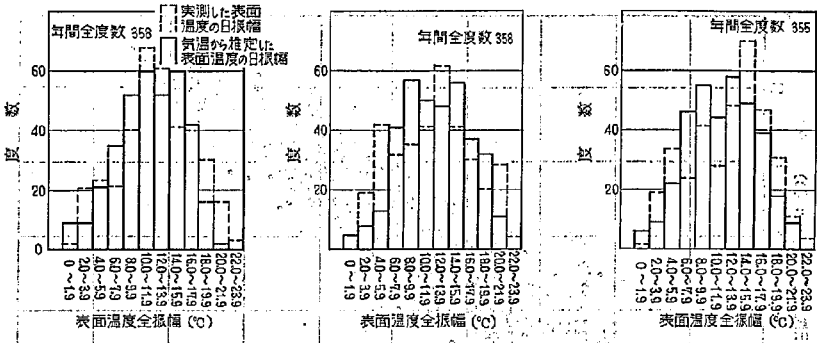


図-79　気温から推定したコンクリート版表面温度の日振幅

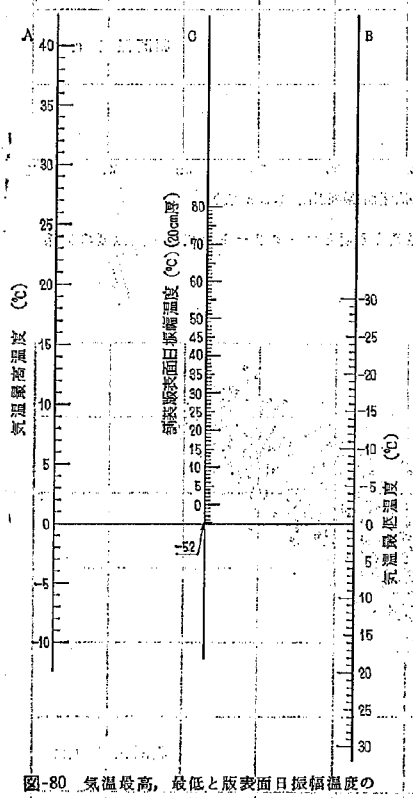


図-80　気温最高，最低と版表面日振幅温度の関係"計算図表"

として，千葉地方のコンクリート舗装版温度変化を観測し統計的に調べた。その結果を第1報東京地方のコンクリート舗装版温度変化と比較して結論を要約すると次のようになる。

（1）コンクリート版表面の温度は東京地方においても千葉地方においても，晴天が続くと正弦曲線に似ているが，それとは別の規則的な変化をしている。

（2）コンクリート版が最高温度に達する時期は8月ごろで，コンクリート版表面では13時～14時ごろ，底面では17時～18時ごろ，また最低温度に達する時期は1～2月ごろで，コンクリート版表面では早朝5時～6時ごろ，底面では8時ごろであることは，東京地方においても千葉地方においても大きくは違わない。

（3）千葉地方においてはコンクリート版表面温度が最高 48°C 以上に達することが年間平均10日，特に36年には51°C に達したことが数日ある。40°C以上に達したことが年平均60日あった。また表面温度が最低−5°C 以下になることはまったくなく 0°C 以下になることが年間平均10日，特に36年には0°C 以下は1日もなかった。

版底面では最高温度 40°C に達することが年間平均5日，東京地方の 34°C 以上に達することが年平均50日あること，また最低温度 0°C 以下になることは，3カ年通じてまったくなかった。

これを東京地方のコンクリート版の場合に比べると，いずれも約 4°C ほど高い。しかしコンクリート版表面最高温度と最低温度の差は 50°C 東京地方も，千葉地方においても同じである。ただし底面最高温度と最低温度の差は東京地方では約35°C，千葉地方においては 40°C の温度差であって，千葉地方の方が大きい。

（4）コンクリート版 20cm 厚の底面のそりこう束応力は東京地方では8時ごろと17時ごろに0となり，13時ごろ引張最大に3時ごろ圧縮最大に達するが，千葉地方においては，8時30分ごろと18時ごろ0となり12時～14時ごろに引張最大に，4時～5時30分ごろに圧縮最大になり，東京地方より約30分遅くなるようであるがあまり大差はない。

（5）千葉地方のコンクリート版の上下両面の温度差を2時間ごとに測定した結果は，温度差が 2°C 以下の場合を例外として，ほとんど同じである。またこれらの

値は，年による変化もほとんどない。

（6） コンクリート版温度の日変化による版底面の内部応力は，東京地方でも，千葉地方においても20時ごろ引張最大に，10時ごろ圧縮最大になる。千葉地方における20時および12時におけるコンクリート版の内部応力の大きさと頻度が求められた。その結果は東京地方の場合とほとんど同じである。

（7） 東京地方のコンクリート版表面温度の年変化は全振幅で30°C，千葉地方においては全振幅で 32°C であること，また平均温度の年変化は東京地方で全振幅 24°C～28°C であるのに対し千葉地方においては 28°C～29°C であり多少の差がある。

（8） 気温日振幅とコンクリート版表面温度日振幅との関係は，東京地方も千葉地方においてもあまり強い相関性がない。

（9） 日最高，最低気温とコンクリート舗装版の日最高最低温度との関係は千葉地方においてはかなり強い相関性が得られた。日最高最低気温に対するコンクリート版表面の日最高最低温度は ±7～8°C のばらつきはあるが相関係数は0.95であった。日最高最低気温コンクリート版底面の日最高最低温度については±3°C のばらつきで相関係数0.97で信頼性がある。

この関係を利用して版表面温度の日振幅の度数分布を求めてみると，実測値とかなり良く似ていることがわかった。

最後に本報告につきましては終始有益な助言を与えて下さった岩間 滋，（現日本道路公団），土木研究所 舗装研究室室長松野三朗，研究員福田正の諸氏，また非常な助力を寄せられた菅原功技官，真田輝臣技官，鈴木稔技官の方方に厚くお礼を申し上げます。

酸性河川水の水質に関する調査研究(第7報)

玉川温泉水の除毒工法の効果について

昭和39年3月

有　泉　　昌*

目　次

まえがき……(1)
1. 玉川温泉水の溶透除毒工法による水質の変化について……(1)
［1］ 測定方法……(1)
［2］ 測定結果……(2)
［3］ 測定結果の検討と考察……(2)
2. 除毒工法の実施にともなう渋黒川水質の変化および除毒効率について……(7)
［1］ 測定方法……(7)
［2］ 測定結果……(8)
［3］ 測定結果の検討……(8)
3. 除毒工法の実施にともなう田沢測水所における水質変化について……(9)
［1］ 測定方法……(14)
［2］ 測定結果……(14)
［3］ 測定結果の検討……(14)
4. 除毒工法の実施にともなう玉川の水質変化について……(15)
［1］ 測定方法……(15)
［2］ 測定結果……(16)
［3］ 測定結果の検討……(16)
5. 鑓畑ダム貯水池のpHおよび除毒対策について……(18)
6. 結　言……(21)
参考文献……(22)

1. まえがき

現在までに報告した一連の本調査研究の目的の一つは秋田県で実施中の玉川温泉水の溶透除毒工事が完成し，定常的な除毒が実施されたときの除毒放果を測定することである。除毒効果は総合された経済効果で評価されるべきであるが，ここでは狭義に解して玉川河水の酸度流出量の減少効果として論ずる。

本調査開始以来除毒実施にともなう玉川水の水質変化について測定する機会を待ったのであるが，水路の破損等のために除毒はしばしば中断され，その機会にめぐまれなかった。幸い昭和31年10月除毒工事の完成の機会に，除毒実施にともなう渋黒川および玉川水の化学的性格の変化を測定することができた。なお，除毒実施にともなう玉川水のpH変化等については，すでに溝口[1]，三浦[2]等の報告があることはすでに既報[3]で言及したところである。しかし，これらの報告はpH測定のみを主とし，pH値より酸度を算出する等その化学的内容も満足しうるものではない。ここでは昭和26年以降著者の実施した調査結果に基づき，除毒工法の化学的性格を明確にし，除毒にともなう玉川水の流下中での水質変化の様相を求め，鑓畑貯水池の酸性におよぼす除毒工法の影響を田沢測水所での水質内容等から検討し，除毒工法の化学的内容に考察を加えた。

除毒効果は除毒工事現場，五十曲地点，田沢測水所および玉川の各採水点での資料について論じる。なお除毒工事の概要は著者による放射性同位元素による玉川温泉水の地下溶透除毒工法の調査報告[4~7]に略記したが，詳細なる説明は三浦[8]の報告を参照されたい。

1. 玉川温泉水の溶透除毒工法による水質の変化について

現在玉川温泉水の除毒のために実施されている地下注入方式による溶透除毒工法の効果を，水質変化に関連して化学的に検討し，減酸機構を考察する。

［1］ 測定方法

現場付近の地形等を図-1に示す。温泉水は約300m流下して導水路にはいり，400m流れて複線の導水路に達する。導水路の長さは1,230mである。この間22本の溶透井をもって導水路よりの排水は地下に注入される。溶透井は導水路から約8mくらいはなれており，注入された排水は地下を150~200m溶透して渋黒川左岸に湧出する。

すでに報告したラジオアイソトープを使用する地下水追跡実験は溶透井にアイソトープを投入し，湧出口よりの湧水中の放射能を検出したのであり，この実験は昭和31年8月および10月，32年6月，9月および11月，さ

＊ 地質化学部長　工博

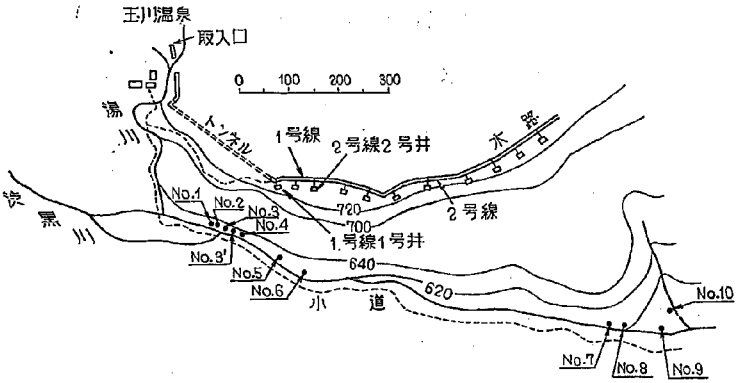


図-1 除毒工事現場略図

らに昭和33年9月にも実施した。実験結果はすでに報告[4),5),6),7)]したところであるが，ここに取り扱う試水は上記実験の際採取したもので，酸度または [Cl] の分析結果より除毒反応は平衡状態に達していると考えられる。上記の各報告において水質の一部測定結果等も検討されているが，ここでは除毒反応をさらに詳細に論ずるため，多くの成分について分析を実施する。

昭和32年9月の場合は，溶透井 1—1 号と 2—1 号を用い，あらかじめ2週間前から注入量を 5*l*/sec と12*l*/sec とする。湧水は各湧出口で15分間隔で採水する。昭和32年11月の場合は 1—5号井を用い，あらかじめ3週間前から通水する。採水は15分間隔とする。なお，湧水 No. 7～10 は渋黒川岸に沿うて No. 6 湧出口から約 600～700m 下流に見られる湧出口群からのもので，湧出量，pH，水温等については既報[6)]を参照されたい。昭和33年9月の場合は 1—1号井への注入を6月から継続しておき，採水は5分間隔とする。分析に用いた試水は採取した試水のそれぞれ一部を混合したものである。

［2］ 測定結果

測定結果を 表-1，2 に示す。

表には分析値として，mg/*l*，meq/*l* 単位を用いる。また金属イオン濃度の増加等を比較するため試水の Cl^- 濃度を鹿湯の Cl^- 濃度に等しいとして換算した値も用いる。なお 表-1 では Fe^{3+} および Al^{3+} は R_2O_3 として求めてあるのみで，それぞれ分離していない。表-2 の場合は Fe^{3+} および Al^{3+} を分離定量している。

［3］ 測定結果の検討と考察

湧出水の組成を注入水の組成と比較して，注入水が地下水路を通過する間の化学的挙動を考えてみる。湧出水の水質は湧出口別にまた測定時期により異なるのであるが，まず No. 2～No. 6 の湧出口群について検討する。

$[Cl^-]$ は湧出口別に差があり，No. 6 は常に高濃度の湧出水を排出する。$[Cl^-]$ が注入水より低いことは地下水路に温泉水でない $[Cl^-]$ の低い別の地下水の混入を示すものである。No. 2 は測定時期により $[Cl^-]$ の変動があり，水路に何かの変化のあることを示す。$[SO_4^{2-}]$ は32年9月に No. 4 で低く，11月に No. 3′ で高いが，その他の測定例ではいずれも $[Cl^-]$ と行動をともにすることが $[Cl^-]/[SO_4^{2-}]$ の値がほぼ一定であることから推知できる。主要な陰イオンである Cl^- および SO_4^{2-} が行動をともにすることから，注入温泉水を稀釈する地下水は特に濃度の高いものとは考えがたい。湧出水の $[Cl^-]$ を稀釈が起こらない場合に換算し，この稀釈率を用いて $[SO_4^{2-}]$ をも換算し，この換算した $[Cl^-]$ と $[SO_4^{2-}]$ との和を求めれば，各湧水口とも注入水とほとんど変らない値を与える。したがって地下水路を通過する間に Cl^- と SO_4^{2-} はともに付加されたり，消失したりしないと考えてよい。

$[Na^+]$ および $[K^+]$ の $[Cl^-]$ に対する割合は注入水より常に大であり，Na^+ および K^+ の溶出が認められる。溶出による増加率は $Na^+ > K^+$ であるが，両者の差異は著しくはない。

$[Ca^{2+}]$ は $[Na^+]$ および $[K^+]$ とともに常に注入水より増加する。しかし $[Mg^{2+}]$ については昭和32年9月および11月のように $[Ca^{2+}]$ と別行動をとり湧出水中より除去される場合もある。しかし昭和33年の例では No. 6 を除いて増加を示し，その増加率は Ca^{2+} に比してはなはだしく小さい。増加と減少の場合が見られるが，その理由の説明は現在できない。湧出水中での $[Ca^{2+}]$ の増加率は $[Na^+]$ の増加率と大体同じ程度である。

$[Fe^{3+}]$ および $[Al^{3+}]$ は昭和33年の場合をのぞき別別に定量していない。R_2O_3 を水酸化物として求めたが，HBO_2（温泉水中には約 100mg/*l* 程度含有されることが知られている）等の存在のために，この R_2O_3 の値より $[Al^{3+}]$ を求めても信頼性が少ない。したがって昭和32年度の測定値については量的に論じえない。しかし陽

イオン濃度を $[Cl^-]+[SO_4^{2-}]$ に等しいとし，MO酸度，$[Na^++K^+]$ および $[Ca^{2+}+Mg^{2+}]$ との差を $[Fe^{3+}+Al^{3+}]$ と考えれば，Al^{3+} および Fe^{3+} は湧出水中で著しく増加することを知る。Al^{3+} および Fe^{3+} を直接定量した昭和33年度の試水でも，湧出水中の Al^{3+} の増加は顕著である。Fe^{3+} が湧出水中でわずかに減少するのは pH の上昇にともない沈澱化するためであろう。昭和32年度の場合と同様にして求めた $[Fe^{3+}+Al^{3+}]$ と直接分析で求めた値では，表-2 に示すように比較的よい一致を示す。湧出水中では Al^{3+} の増加が大きい特徴として認められる。

MO 酸度はその減少がはなはだしい。しかし PP 酸度の減少は MO 酸度の減少に較べればはるかに低い。また SiO_2 は 2, 3 の例を除いていずれも湧出水中で増加する。

つぎに No. 7～No. 10 の湧出水は $[Cl^-]$ が注入水の約1/3に低下している。したがって地下水による稀釈は No. 2等の湧出口群の場合よりはなはだしい。$[Ca^{2+}]$ は注入水の場合よりも高くなることもあるが，他の成分はいずれも注入水よりも低い。しかし注入水の $[Cl^-]$ に換算した濃度について考えれば，金属イオンの湧出水中での増加が明確であり，特に Ca^{2+} の増加が著しい。MO 酸度の減少は特に顕著であり，PP 酸度の減少は比較的少ない。

No. 2～No. 6 の湧水群と No. 7～No. 10 の湧水群を比較すれば，前者の方が酸度の減少率は小さく，Ca^{2+} および Mg^{2+} の増加率は小さく，Na および K の増加率は同程度がわずかに小さい。前者の湧出口群はすでに長期間使用されており，後者の湧出口群はほとんど使用されていないため，地下水路を構成する岩石の成分が溶出について選択性を示し，両湧出口群での水質の差が見られると考える。なお No. 2 から No. 6 までの湧出水群の間でも多少の差異が認められ，さらに測定時期によっては同一湧出口でも多少の差異が認められる。このことはすでにアイソトープによる地下水追跡実験[5,6]でのべたように，地下の水路はそれぞれ透水係数の異なる水路の網状構造であり，水路別に岩石成分の溶出に選択性があり，酸度の低下によっては溶存成分の選択的折出等もあり，それぞれ異なった水路を通過した水の総和が湧出口に見られると考えるべきである。また，一部水路の崩壊または閉ソク等も測定時期による差異の原因と考えられる。

以上にのべた結果から明らかであるように，注入水は地下水路中で別の地下水と混合し，水路を構成する岩石等と接触して金属イオンを増加させ，その反面遊離の酸が消費される。この酸の減少が除害工法の効果とされるのである。ここでは酸の減少についてさらに詳細に考えて見よう。

酸の減少に関与する金属イオンは何であるかを考える。分析結果から陽イオンの 100 分率を求め，H^+, Na^++K^+, $Ca^{2+}+Mg^{2+}$ および $Al^{3+}+Fe^{3+}$ について示すと図-2 をうる。昭和33年度試水について $Al^{3+}+Fe^{3+}$ を分析値から求めたものと，他の成分の分析値より推算したものを使用してえられる 100 分率はわずかの差を認めるが十分一致しており，直接分析を行なわない昭和32年度の100 分率は十分信頼しうると考える。湧出口群で多少の差はあるが，MO 酸度の減少にともない $Al^{3+}+Fe^{3+}$, $Ca^{2+}+Mg^{2+}$, Na^++K^+ はそれぞれ増加する。この MO 酸度の減少量を各陽イオンがどのように分担しているかを求めると 表-3 のようになる。すなわち，すでに長期間利用されてきた注入口からの湧出水では，MO 酸度の中和はその80%以上が Al^{3+} の溶出により，$Ca^{2+}+Mg^{2+}$ の溶出による割合は 12% 程度で，Na^++K^+ による割合は最も少くない。しかし新しい注入口を利用すれば

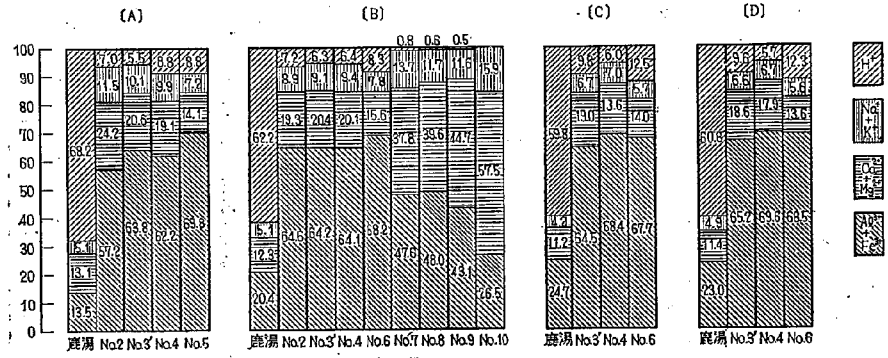


図-2　温泉水および湧出水の陽イオン百分率

[A, B, C の $Fe^{3+}+Al^{3+}$ は $Cl^-+SO_4^{2-}$ から $H^++Na^++K^++Ca^{2+}+Mg^{2+}$ をさし引きもとめる。
D の $Fe^{3+}+Al^{3+}$ は分析値による。]

表-1 分析結果（第1行：mg/l，第2行：meq/l，

採水日	採水番号＼項目	Na	K	Ca	Mg	$Fe_2O_3+Al_2O_3$	Cl	SO_4	SiO_2	MO酸度	PP酸度
昭和32年9月	鹿湯	105	43.3	198.8	56.7	784	3023	1239	270	—	—
		4.58	1.11	9.92	4.66	—	85.3	25.8		75.7	94.6
	No. 2	114	32.0	202.0	25.2	879	1349	570	214	—	—
		4.95	0.82	10.08	2.07	—	38.05	11.88		3.5	35.35
		11.09	1.84	22.57	4.64	—	85.3	26.7		7.88	79.18
	No. 3′	127	36.4	231.2	19.2	1062	1718	747	196	—	—
		5.52	0.93	11.58	1.58	—	48.45	15.55		4.7	43.25
		9.72	1.64	20.38	2.78	—	85.3	27.6		6.20	76.12
	No. 4	133	39.6	242.1	12.4	1594	1908	703	241	—	—
		5.77	1.01	12.08	1.02	—	53.80	14.64		6.0	48.90
		9.12	1.60	19.09	1.61	—	85.3	23.1		9.54	77.26
	No. 6	137	35.2	248.9	12.2	1156	2521	1146	256	—	—
		5.97	0.90	12.42	1.00	—	71.10	23.87		8.4	68.15
		7.16	1.08	14.90	1.20	—	85.3	28.5		10.14	81.72
昭和32年11月	鹿湯	105	43.1	181.2	57.1	782	2933	1358	273	—	—
		4.58	1.10	9.04	4.70	—	82.70	28.27		69.1	95.05
	No. 2	142	41.7	282.0	21.1	1281	2176	986	263	—	—
		6.16	1.07	14.07	1.74	—	61.36	20.53		5.85	54.65
		8.32	1.44	18.95	2.34	—	82.7	27.6		7.88	73.61
	No. 3′	131	35.3	267.7	18.2	1038	1805	1042	216	—	—
		5.71	0.90	13.36	1.50	—	50.90	21.69		4.55	43.85
		9.27	1.46	21.70	2.43	—	82.7	35.0		7.39	71.21
	No. 4	132	36.4	248.9	14.7	1185	1840	924	122	—	—
		5.74	0.93	12.42	1.21	—	51.90	19.24		4.60	46.40
		9.14	1.48	19.79	2.39	—	82.7	30.5		7.33	73.92
	No. 6	132	36.0	246.9	12.1	1366	2278	1026	179	—	—
		5.74	0.92	12.32	1.00	—	64.26	21.35		7.15	61.60
		7.39	1.18	15.86	1.29	—	82.7	27.7		9.20	79.46
	No. 7	73	29.5	153.9	49.2	371	956	198	89.3	—	—
		3.19	0.75	7.68	4.05	—	26.95	4.12		0.25	14.25
		9.79	2.30	23.58	12.43	—	82.7	12.6		0.77	43.75
	No. 8	65	28.9	173.5	41.2	334	947	183	77.2	—	—
		2.84	0.74	8.66	3.39	—	26.70	3.80		0.20	13.10
		8.80	2.29	26.85	10.51	—	82.7	11.8		0.62	40.61
	No. 9	56	25.0	193.2	27.9	308	832	153	110.3	—	—
		2.45	0.64	9.64	2.29	—	23.45	3.18		0.13	10.40
		8.65	2.26	34.03	8.08	—	82.7	11.2		0.46	36.91
	No. 10	45	19.5	187.2	18.7	217	578	126	62.5	—	—
		1.97	0.50	9.34	1.54	—	16.30	2.63		0.00	5.65
		9.99	2.54	47.35	7.81	—	82.7	13.2		0.00	28.65

表-2 分析結果（昭和33年9月）

	Na	K	Ca	Mg	Fe	Al	Cl	SO_4	SiO_2	MO酸度	PP酸度
鹿湯	96	37.2	146.7	72.5	101	224	3134	1449	58.0	—	—
	(4.17)	(0.95)	(7.33)	(5.95)	(1.9)	(24.8)	(88.3)	(30.2)	—	(70.8)	(99.6)
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
No. 3′	100.0	36.0	183.9	52.5	29.0	440	1936	965	75.2	—	—
	(4.35)	(0.92)	(9.20)	(4.88)	(0.54)	(49.0)	(54.6)	(20.2)	—	(7.3)	(56.2)
	[7.04]	[1.49]	[14.9]	[7.90]	[0.88]	[79.0]	[88.3]	[32.7]	—	[11.8]	[91.1]
No. 4	98.4	29.2	188.0	52.0	10.8	472	1915	909	75.0	—	—
	(4.27)	(0.75)	(9.40)	(4.27)	(0.20)	(52.4)	(54.0)	(18.9)	—	(4.4)	(51.6)
	[7.06]	[1.21]	[15.2]	[6.90]	[0.33]	[85.7]	[88.3]	[30.6]	—	[7.1]	[83.5]
No. 6	92.0	30.0	179.9	34.0	42.5	530	2220	1014	80.0	—	—
	(4.00)	(0.77)	(9.00)	(2.79)	(0.80)	(59.0)	(62.6)	(21.1)	—	(10.5)	(66.6)
	[5.64]	[1.09]	[12.7]	[3.94]	[0.76]	[83.3]	[88.3]	[29.8]	—	[14.8]	[94.0]

（ ）内は meq/l

〔 〕内は鹿湯の Cl 濃度を基準としたときの濃度（meg/l）

第3行：鹿湯の Cl 濃度に換算した濃度 meq/l)

Na+K (R^+)	Ca+Mg (R^{2+})	Fe+Al (R^{3+})	$R^+ + R^{2+} + R^{3+}$	PP酸度 −MO酸度	$Cl + SO_4$	MO酸度 $+R^+ + R^{2+}$	MO酸度減少率	PP酸度減少率	pH
—	—	—		—	—	—	—	—	—
5.69	14.58	15.1	35.4	18.9	111.1	96.0			2.6
—	—	—		—	—	—			
5.77	12.15	—		31.85	49.93	—			
12.93	27.21	64.0	104.1	71.30	112.0	48.0	89.4	16.3	2.2
—	—	—		—	—	—			
6.45	13.16	—		38.55	64.00	—			
11.36	23.16	72.1	106.7	69.92	112.9	40.8	91.7	19.5	2.2
—	—	—		—	—	—			
6.78	13.10	—		42.90	68.44	—			
10.72	20.70	67.5	98.9	67.72	108.4	40.9	87.6	18.3	2.1
—	—	—		—	—	—			
6.87	13.42	—		59.75	94.97	—			
8.24	16.10	79.4	103.7	71.58	113.8	34.4	86.8	13.6	
—	—	—		—	—	—			—
5.68	13.74	22.5	41.9	26.0	111.0	88.5	—	—	2.1
—	—	—		—	—	—			
7.23	15.81	—		58.80	81.89	—			
9.76	21.29	71.3	102.4	65.70	110.3	39.0	88.6	22.6	2.2
—	—	—		—	—	—			
6.61	14.86	—		39.30	82.59	—			
10.73	24.13	75.5	110.3	63.82	117.7	42.2	89.4	25.1	2.2
—	—	—		—	—	—			
6.67	13.63	—		41.80	71.14	—			
10.62	22.18	73.1	105.9	66.59	113.2	40.1	89.5	22.3	2.0
—	—	—		—	—	—			
6.66	13.32	—		54.45	85.61	—			
8.57	17.15	75.4	101.2	70.67	110.4	35.0	86.9	16.4	3.4
—	—	—		—	—	—			
3.94	11.73	—		14.00	31.07	—			
12.09	36.01	46.4	94.5	42.98	95.3	48.9	99.0	54.0	3.4
—	—	—		—	—	—			
3.58	12.05	—		12.90	40.5	—			
11.09	37.36	45.4	93.9	39.99	94.5	49.1	99.3	57.3	3.5
—	—	—		—	—	—			
3.09	11.93	—		10.27	26.63	—			
10.91	42.11	40.4	93.4	36.25	93.9	53.5	99.4	61.2	3.8
—	—	—		—	—	—			
2.47	10.88	—		5.65	18.93	—			
12.53	55.16	28.2	95.9	28.65	95.9	67.7	100	69.8	

(Fe+Al) は $[Cl+SO_4]-[$Mo酸度$+R^+ + R^{2+}]$ とする

Na+K (R^+)	Ca+Mg (R^{2+})	Fe+Al (R^{3+})	$R^+ + R^{2+} + R^{3+}$	PP酸度 −MO酸度	$Cl + SO_4$	MO酸度+ $R^+ + R^{2+}$	MO酸度減少率	PP酸度減少率	pH
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
(5.12)	(13.28)	(26.7)	(45.1)	(28.8)	(118.5)	(89.2)			2.1
—	—	—	—	—	—	—	—	—	
(5.27)	(14.08)	(49.5)	(68.9)	(48.9)	(74.8)	(26.7)	—	—	
[8.13]	[22.8]	[79.9]	[110.8]	[79.3]	[120.1]	[42.7]	83.3	9.4	2.4
—	—	—	—	—	—	—	—	—	
(5.02)	(13.67)	(52.6)	(71.3)	(47.2)	(72.9)	(23.1)	—	—	
[8.27]	[22.1]	[86.1]	[116.5]	[76.4]	[118.9]	[37.5]	89.9	16.8	2.1
—	—	—	—	—	—	—	—	—	
(4.77)	(11.79)	(59.8)	(76.4)	(56.1)	(83.7)	(27.1)	—	—	
[6.73]	[16.6]	[84.1]	[107.4]	[79.2]	[118.1]	[38.1]	79.2	6.5	

表-3　金属イオンの酸度減少量分担係数

湧水番号	採水時	R^+ Na^++K^+	R^{2+} $Ca^{2+}+Mg^{2+}$	R^{3+} $Fe^{3+}+Al^{3+}$	MO酸度減少率	PP酸度減少率
*No. 2～No. 6	昭和32年9月	7.6	10.6	81.8	89.1	16.9
*No. 2～No. 6	昭和32年11月	6.7	12.0	81.4	88.7	21.6
*No. 7～No. 10	昭和32年11月	13.1	52.9	34.0	99.2	60.6
*No. 3'～No. 6	昭和33年9月	4.5	11.9	83.6	84.2	10.9
**No. 3'～No. 6	昭和33年9月	2.7	10.3	87.0	84.2	10.9

*　R^{3+} を $(SO_4^{2-}+Cl^-)-$(MO酸度$+R^++R^{2+}$) とする
**　R^{3+} は分析値による

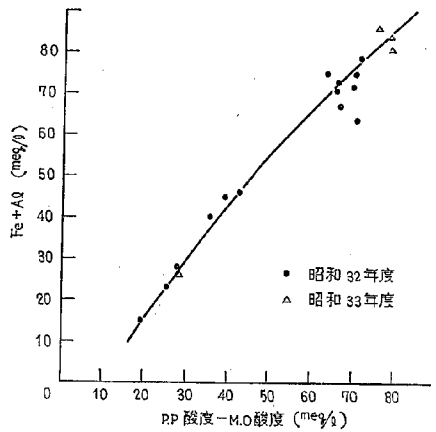


図-3　(PP酸度−MO酸度) と (Fe+Al) の関係

$Ca^{2+}+Mg^{2+}$ の溶出による中和が半分以上をしめ $Fe^{3+}+Al^{3+}$ の溶出による中和は約1/3程度となる。水路の老化現象にともない Al^{3+} の溶出が中和の大部分を占めるに至ると考えられる。

溶存成分間の関係を考えてみる。まず，PP酸度とMO酸度の差と $Al^{3+}+Fe^{3+}$ の関係を求めると図-3のようになる。ただし，昭和32年度測定分については，$Al^{3+}+Fe^{3+}$ として $Cl^-+SO_4^{2-}-$MO酸度$-Ca^{2+}-Mg^{2+}-Na^+-K^-$ を用いたものであり，昭和33年度測定分は直接 $Al^{3+}+Fe^{3+}$ を定量したものである。他成分の分析結果から間接に求めた値と直接に求めた値は大体一直線上にあり，間接に求めた方法も信頼するにたることを知る。さらにこの直線は下式で示される。

$$[Al^{3+}+Fe^{3+}]=1.2(\text{PP酸度}-\text{MO酸度})-6$$

したがって，酸度を測定すれば $Al^{3+}+Fe^{3+}$ の濃度を推定しうるし，すでに第5報でのべた渋黒川での下式と大体近い。

$$Al^{3+}=1.14(\text{PP酸度}-\text{MO酸度})$$

結局，PP酸度とMO酸度の差は $Al^{3+}+Fe^{3+}$ に大体近い値であり，酸度の測定は重要な意味をもつといえる。

また，$[Cl^-]$ とPP酸度およびMO酸度との関係を図-4に示す。図によればPP酸度と $[Cl^-]$ は各湧出口について一直線上にあり，この直線は第5報で論じた五十曲地点における渋黒川水の場合になりたつ直線よりわずかに下方にあるが，それに平行している。さらにMO酸度と $[Cl^-]$ との間にも大体直線関係がある。昭和33年度測定でこの直線の傾斜が急なのは減酸率が低いためである。

除毒反応をうけると酸度の減少率はどのようになるかを考えてみる。No. 7～No. 9 を除く各湧出口につき，MO酸度の減少率は常にPP酸度の減少率よりも著しく大きく，MO酸度では80～90%程度，PP酸度では5～25%である。測定時期によって湧出口ごとに酸度減少率は異なり，湧出口ごとの酸度減少率の順位も異な

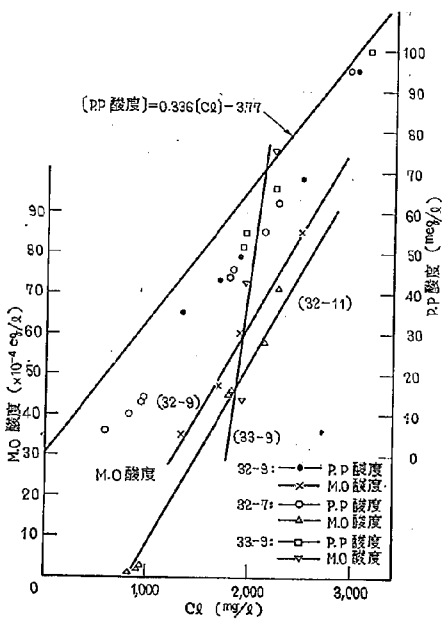


図-4　湧出水 [Cl] と酸度

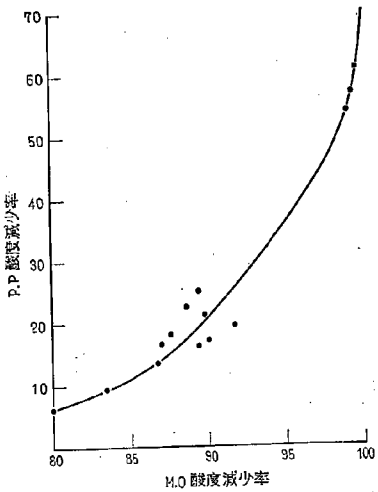


図-5　除毒反応による PP 酸度減少率と MO 酸度減少率の関係

る。このことは注入口への流量配分または水路の状況が異なるためであろう。また MO 酸度減少率と PP 酸度減少率の間には図-5に示す関係があり，MO 酸度減少率が大となれば PP 酸度減少率も大となる。このことは MO 酸度減少率が大となれば，Al^{3+} 等の溶出割合が少なくなり，その反面 Ca^{2+} または Na^{+} 等の溶出割合が大きくなることを示す。

以上の調査結果から大体下記の結論がえられる。

この除毒工法では MO 酸度が減少すれば，その 80% 程度は Al^{3+} の溶出に基づき，pH は約2程度低下するが H^{+} が潜在性の酸である Al^{3+} に変化し，PP 酸度の低下はわずかである。このことは酸性を中和する場合には多くのアルカリを要し，中和に対し緩衝能をもつことを示している。pH のみで除毒の効果を判定することは重大な誤りをおかすと考えてよい。また長期間使用した注入口では水路の老化が認められ，主として Al^{3+} の溶出が見られる。なお，PP 酸度と MO 酸度の差をもって $[Al^{3+}]$ と見なすことが可能である。

2.　除毒工法の実施にともなう渋黒川水質の変化および除毒効率について

昭和31年断続的に実施した除毒は水路修理のため9月21日完全に中止し，毒水全量を渋黒川に流入させていたが，水路修理の完成にともない10月6日午前6時から毒水全量について除毒が実施された。この機会を利用して除毒工法の実施にともなう渋黒川水質の変化を測定し，除毒効率を求めることとした。

［1］ 測定方法

測定地点は渋黒川が玉川に合流する五十曲地点とし，10月2日から測定を始め，6日以降除毒を開始してからは1時間ないし数時間間隔で9日まで採水分析する。この間流量の測定をしばしば実施する一方水位の変化には注意をはらった。除毒が平衡状態に達したときの水質を求めるため，11月23日から25日まで再び測定を実施する。この間11月1日には玉川工事事務所に依頼して採水する。

測定は pH，PP 酸度，MO 酸度，Cl^{-} 濃度および流量とし，測定方法は既報にのべたと同様である。

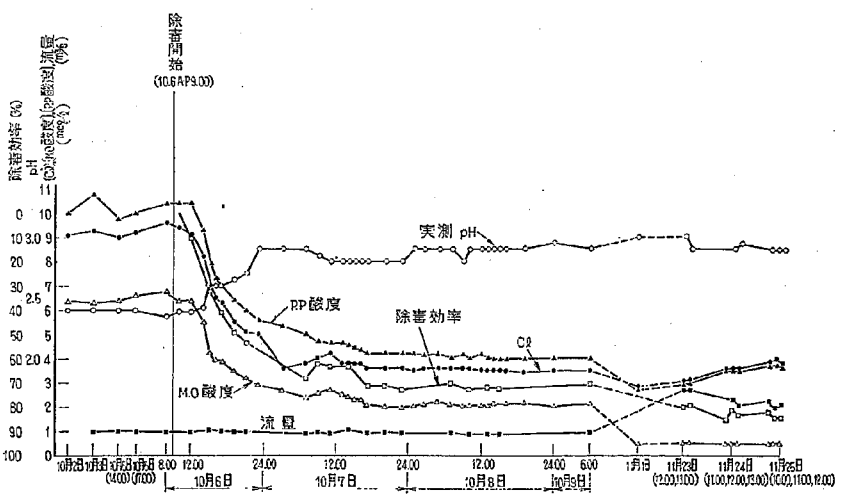


図-6　除毒前後における渋黒川（五十曲地点）の水質（31.10.2～31.11.25）

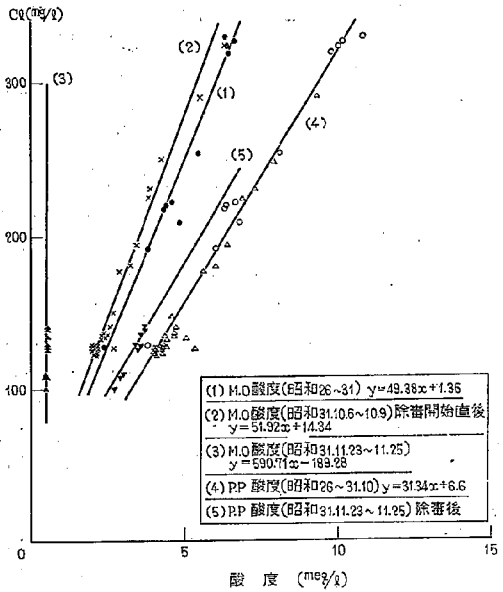


図-7 渋黒川水の Cl^- 濃度と酸度の関係

また除毒効率としては，除毒を実施しない場合の MO 酸度流出量に対する除毒実施後の MO 酸度流出量の減少割合を用いる。

［2］ 測定結果

測定結果を図-6 に示す。図によれば MO 酸度，PP酸度および［Cl^-］は除毒開始とともに減少し，約 20 時間で一定値に達している。pH は 2.4 から上昇し，同様に 2.8～2.9 でほぼ一定値に達している。MO 酸度について求めた除毒効率も約 70% に達する。この一定値に達してから約50時間は，流量の変化がほとんど認められないにもかかわらず同じ値を示している。

MO 酸度/［Cl^-］（当量比）は始め 0.70 であったのが減少する傾向を示し，特に著しい減少ではないが 0.6 近くなり，MO 酸度の減少割合の方が［Cl^-］の減少割合よりも大きいこと示す。

図-7 には酸度と［Cl^-］の関係を示し，比較のためにすでに既報[9]で示した除毒を実施しない場合のこれらの関係も図示した。MO 酸度と［Cl^-］の関係は，除毒の初期には酸度の方が［Cl^-］よりやや低く目ではあるが，除毒前と大した差は見られない。除毒開始にともない両者の値はこの直線上を上方から下方にたどる。一方，PP酸度と［Cl^-］間の関係は除毒の有無にかかわらず，大体同一直線上にある。また，11月23日～25日の測定では MO 酸度は［Cl^-］に関せずほとんど一定であり，PP酸度は除毒前と比較して余り異ならない。つぎに，これらの現象を検討する。

［3］ 測定結果の検討

除毒の開始とともに［Cl^-］および酸度が減少するが，それらの間に存在する関係は除毒前の渋黒川の性格を持っている。すなわち測点を通過する渋黒川の水は毒水を締めきる前の渋黒川水と同じ性格を持ち，鹿湯川流入前の渋黒川の水により稀釈混合され，乱流，拡散または河床伏流水と交換しながら流れる状況を示している。除毒の開始とともにMO酸度/［Cl^-］がやや減少しているのであるが，叶沢より流入する一部の遊離酸の存在を考えれば，むしろ増加すべきものと期待される。この点については既報[9]で論じた減酸機構に関与する河床伏流水の行動として理解できる。

渋黒川は鹿湯川の合流後約 4 時間で五十曲測点に到達することは流速と距離から推定されるのであるが，毒水の締めきり後約 4 時間で濃度変化が見られることから，水質分析結果からも支持される。一方，水質が一応一定になるのには約20時間を要する。毒水が地下浸透中でいまだ渋黒川中に湧出しない状態で水質が一応一定に達したときでも，除毒効率は約70%であり，その後徐徐に除毒効率は増す傾向はあるが，なお溶存している酸量は叶沢よりの流入酸量（玉川温泉の湧出酸量の約 0.5%）では説明しえない。

渋黒川の水質は表流水について論じているのであるが，河床伏流水についても考えねばならない。伏流水は流速も小さいし，河床材料との接触面積も大きいので減酸される割合は当然大きいのであり，MO 酸度/［Cl^-］は表流水より小さく，その反面 PP 酸度/［Cl^-］は Fe^{3+} または Al^{3+} の溶出が主であれば表流水と変らないはずである。したがって測定結果は，毒水流入の影響をうけなくなっても，それ以前から表流水と平衡状態で存在する河床伏流水と表流水の間に交換反応が行なわれていることを示す。ここで交換というのはもちろん表流水と伏流水との濃度差に基づく拡散をもふくめ，また伏流水の中には河川の粗度とも関係する河床材料表面近くに存在する層状水をもふくむものとする。しかし，一定値に達してから測定を打ち切るまでの60時間にわたり，いまだ相当量の遊離酸の存在することを，この交換反応だけで説明するには多量の河床伏流水を考えねばならない。この点に関しては今後も検討する必要があるが，毒水の注入状況等について詳細な資料を欠くので，この問題について深く論ずることはできない。ただ毒水の注入には，すでにのべた放射性同位元素を使用して追跡実験を実施したときの No, 1, 2注入口も使用されており，この注入

ロを使用すれば注入水は注入後10時間で渋黒川中へ到達することはすでに明らかにされており，図-6に見られる毒水締めきり後約15時間での $[Cl^-]$ および酸度のわずかな上昇は一部除毒された毒水の流入を示すと考えられる。なお，注入口への流量配分がうまくなく一部の毒水が地表上を越流したか否かは明らかでない。

除毒開始後20～70時間では $[Cl^-]$，酸度および流量にほとんど変化がなく，この時間内では今まで余り使用されなかったり，または今度新たに使用されるに至った注入口群に注入された毒水は，いまだ渋黒川中に流入していないと考えられる。この期間での Cl^- の流出量は除毒前に較べて約65%程度減少しており，各注入口への流量配分については明らかでないが，No. 1 または No. 2 近辺の注入口群の毒水処理能力はせいぜい全処理能力の20%であるし，さらに酸度と $[Cl^-]$ の関係が除毒前後で著しい変化を示さない等を考慮すれば，河床伏流水のもつ意義を評価せねばならない。

除毒開始後70時間の渋黒川の水質は，全面的な浸透除毒水の流入のない遷移状態を示すものであり，この結果から除毒工法の効果を求めることはできない。したがって各注入口からの除毒された毒水が渋黒川に流入し，定常状態に至ったときの測点での流出酸量を求めねばならない。この目的のために11月1日（流量は欠測），11月23日～25日に調査した結果では，pH は 2.9～3.0 と少し上昇し，MO 酸度流出量は 1～1.3 eq/sec となり，10月9日の測定値より約半減している。Cl^- の流出量は 270～310 g/sec となり10月9日の値の 2.2～2.6 倍となり，除毒前の10月6日の値の 80～93% となり，さらに MO 酸度/$[Cl^-]$ は 0.13～0.17 となり10月9日の値である 0.61 よりははるかに減少している。ここで注意せねばならない点は除毒を実施しても Cl^- の流出量は変らないことである。すなわち除毒処理された毒水は必ず渋黒川に流入し，別の地下水系にはいって再び地表に出現しないとは考えられない。また MO 酸度と $[Cl^-]$ との関係は図-6に示されるように除毒前の渋黒川の性格とは著しく異なり，除毒反応の進行を示す。一方，PP 酸度と $[Cl^-]$ の関係は除毒反応により余り影響をうけない。しかし PP 酸度の内容は除毒前と異なり，そのほとんど大部は Al^{3+} および Fe^{3+} により占められ，除毒反応そのものを示している。

以上に種種論じたのであるが，結局除毒工事の効果はどの位かの問題が残る。ここでは五十曲地点を通過して流出する MO 酸度の減少率をもって除毒効率と考える。除毒効率は除毒効果を一義的に表示する値ではないが，除毒反応が遊離酸の中和反応であるので中和効率をもって除毒効率とする。しかし潜在性酸とみなされる PP 酸度の中和を目標とすれば，その場合の中和効率は著しく小さい値となる。

除毒を実施しない場合の MO 酸度流出量は，昭和26年以降5ヵ年間の測定結果では 5.8 eq/sec であることはすでにのべた。昭和31年11月の測定では，除毒を実施したときの MO 酸度流出量は 1.0～1.3 eq/sec である。したがって除毒効率は 78～83%，平均して 80% となる。ただし河床材料との反応は除毒いかんに関せず同じであり，また叫沢よりの流入酸量は無視することとした。この 80% という値は昭和31年に完成した全水路にわたる注入口に毒水の流量配分を行なって除毒を実施した場合の除毒効率である。

ここでのべた除毒効率（K）は毒水が注入口からその湧出口に達するまでにうける減酸率（a）とは異なり，また毒水処理率（x）によっても異なった値を与えるものであり，河床との反応による減酸を無視すれば，$K=ax$ の関係がある。したがって MO 酸度流出量の減少割合で表示される五十曲地点での除毒効率は，地下浸透中和過程の効率を示すものではない。

いま，毒水処理率が 80% であった昭和29年11月6日，10日，16日に五十曲地点で測定した結果を次に示す。

	pH	BCG 酸度 (meq/l)	PP 酸度 (meq/l)	流量 (m^3/s)	水温 (°C)
11月6日	3.1	1.47	3.10	1.92	7.0
11月10日	2.8	2.09	4.54	1.46	7.5
11月16日	3.0	2.48	4.90	1.32	6.2

この測定値より BCG 酸度の流出量（eq/sec）を求むれば 2.83, 3.06, 3.27 となり，平均値では 3.05 eq/sec となる。BCG 酸度は MO 酸度より大きく，定まった換算関係はないが，除毒前の渋黒川水の BCG 酸度は滴定曲線より考えて MO 酸度の約10%増と推定されるので，除毒前の BCG 酸度の流出量は大体 6.4 eq/sec と推定される。したがって，この場合 BCG 酸度についての除毒効率は約 53% であり，BCG 酸度から推定換算した MO 酸度についての除毒効率も約 52% となる。この値は $K=ax$ 式において，$a=0.8$ とし $x=0.8$ として求めた K の値である 64% に近い値となる。

3. 除毒工法の実施にともなう田沢測水所における水質変化について

玉川温泉の除毒は昭和13年以降断続的に実施されており，その効果についてはすでに三浦[9]により報告されている。三浦の報告は田沢測水所での流量と pH（比色法による）に基いて論じられており，流出酸量を pH 値より算出する等必ずしも妥当とは思えない。著者は田沢測水所にて昭和31年6月1日より昭和31年11月27日にわたり連日採水し，酸度，pH および $[Cl^-]$ 等を測定した。これらの資料により除毒実施が田沢測水所での水質におよぼす影響について検討する。

表-4 田沢測水所における分析結果と流出量（昭和31年6月～昭和31年11月）

採水年月日＼測定値	酸度 ×10⁻⁴eq/l MO	酸度 ×10⁻⁴eq/l PP	アルカリ度 ×10⁻⁴eq/l MO	Cl mg/l	pH	流量 m³/l
31年6月2日	—	2.10	0.76	18.9	4.9	24.7
〃 3	—	3.04	0.76	18.7	4.4	22.7
〃 4	—	2.83	0.76	17.1	4.3	22.1
〃 5	—	2.67	0.76	17.4	4.3	20.9
〃 6	—	0.81	0.96	5.8	5.1	106
〃 7	—	1.12	0.84	12.2	4.8	40.2
〃 8	—	3.44	0.76	13.0	4.2	29.6
〃 9	—	4.44	0.69	21.7	4.1	24.7
〃 10	—	4.66	0.54	23.3	4.0	22.7
〃 11	—	3.44	0.69	17.9	4.1	27.5
〃 12	—	3.32	0.76	22.2	4.4	20.9
〃 13	—	4.05	0.61	18.9	4.0	28.9
〃 14	—	4.52	0.54	20.1	3.9	22.7
〃 15	—	4.64	0.19	23.7	3.8	19.7
〃 16	—	4.92	0.19	18.9	3.8	17.4
〃 17	0.10	5.28		26.1	3.7	16.3
〃 18	—	3.64	0.19	19.7	3.9	24.0
〃 19	—	3.32	0.46	19.8	4.0	25.4
〃 20	—	3.97	0.57	19.7	4.2	19.7
〃 21	—	0.73	0.99	5.9	5.0	245
〃 22	—	0.61	0.91	11.2	4.7	61.0
〃 23	—	1.72	0.76	13.0	4.4	46.6
〃 24	—	1.22	0.76	9.8	4.5	59.9
〃 25	—	2.83	0.76	13.7	4.3	37.6
〃 26	—	2.63	0.76	16.1	4.2	30.4
〃 27	—	2.53	0.76	17.0	4.1	29.6
7月2日	0.97	—		25.5	3.8	16.9
〃 4	0.97	—		25.5	4.0	17.9
〃 6	0.97	—		26.6	3.9	15.8
〃 7	0.97	—		24.8	4.0	14.3
〃 8	0.97	—		24.8	4.0	15.8
〃 9	0.97	—		25.9	3.8	14.3
〃 11	1.9	—		28.4	3.8	12.0
〃 12	0.97	—		28.4	3.9	11.6

表-4 つづき

採水年月日＼測定値	酸度 ×10⁻⁴eq/l MO	酸度 ×10⁻⁴eq/l PP	アルカリ度 ×10⁻⁴eq/l MO	Cl mg/l	PH	流量 m³/sec
9月6日	1.8	8.1	—	38.7	3.6	10.8
〃 7	1.6	7.2	—	36.2	3.6	10.4
〃 8	2.0	8.5	—	40.4	3.6	10.0
〃 9	1.7	8.5	—	41.1	3.6	8.94
〃 10	—	9.1	1.0	43.6	5.2	8.60
〃 11	2.0	9.1	—	43.3	3.6	8.60
〃 12	2.3	9.1	—	44.7	3.5	8.94
〃 15	2.5	9.5	—	44.7	3.5	8.27
〃 16	2.3	9.8	—	45.7	3.5	7.95
〃 17	2.3	9.8	—	45.7	3.5	7.95
〃 18	2.5	10.0	—	45.0	3.5	7.64
〃 19	2.3	9.2	—	42.2	3.5	9.29
〃 20	2.2	9.6	—	43.6	3.5	8.69
〃 21	2.3	10.4	—	45.7	3.5	8.27
〃 22	2.5	10.6	—	45.7	3.4	7.95
〃 23	2.8	10.7	—	47.5	3.5	7.64
〃 24	2.5	11.4	—	48.2	3.4	7.34
〃 25	2.7	11.6	—	48.6	3.4	7.34
〃 26	2.6	11.5	—	48.9	3.4	7.64
〃 27	1.8	7.5	—	37.2	3.6	8.60
〃 28	1.7	8.1	—	35.5	3.6	14.8
〃 29	1.5	8.3	—	38.3	3.6	8.60
〃 30	1.5	10.0	—	44.3	3.5	7.95
10月 1日	0.5	10.6	—	47.9	4.0	7.64
〃 2	2.3	11.4	—	48.9	3.5	7.34
〃 3	2.7	11.4	—	49.6	3.4	7.05
〃 4	3.2	12.2	—	50.4	3.3	7.64
〃 5	3.0	11.6	—	50.4	3.4	7.34
〃 6	2.7	11.9	—	51.4	3.4	7.05
〃 7	3.0	12.1	—	52.1	3.4	7.05
〃 8	0.8	7.8	—	36.2	3.8	6.78
〃 9	—	6.2	0.5	30.1	4.0	6.78
〃 10	—	3.6	1.0	16.0	4.4	19.1
〃 11	—	3.6	1.0	16.0	4.5	19.1

7月13日	1.5	—		28.4	3.8	11.2
〃 14	1.5	—		31.9	3.8	10.4
〃 15	1.5	—		36.2	3.7	10.0
〃 16	1.5	—		36.2	3.8	9.65
〃 17	1.5	—		37.2	3.7	9.65
〃 18	1.5	—		35.5	3.7	10.0
〃 19	—	—	0.5	24.8	4.1	12.5
〃 20	1.26	—	—	35.5	3.8	9.65
〃 21	—	—	0.5	24.8	4.2	13.8
〃 22	1.56	—	—	35.5	3.8	11.2
〃 23	—	—	0.6	17.7	4.2	61.0
〃 24	—	—	0.96	28.4	4.1	81.2
〃 25	—	—	0.6	17.7	5.2	41.1
〃 26	—	—	0.6	21.3	4.7	28.9
〃 27	—	—	0.4	23.0	4.5	22.7
〃 28	—	—	0.4	28.4	4.5	13.8
〃 29	0.96	—	—	31.9	3.9	10.8
〃 30	0.2	—	—	29.1	4.2	16.3
〃 31	0.39	—	—	30.1	4.0	15.3
8月1日	0.96	—	—	28.4	3.8	13.8
〃 2	0.76	—	—	28.4	4.0	13.4
〃 3	0.76	—	—	30.1	4.0	12.5
〃 4	—	—	0.6	29.1	4.5	20.8
〃 6	0.9	—	—	30.1	3.9	12.0
〃 10	—	—	0.6	20.6	4.6	35.9
〃 11	—	—	0.4	17.7	4.5	24.0
〃 12	—	—	0.4	21.3	4.4	20.9
〃 13	0.6	—	—	26.6	4.0	17.9
〃 14	0.39	—	—	21.3	4.1	20.9
〃 15	0.76	—	—	24.1	4.0	17.9
〃 20	—	—	0.4	18.4	4.4	35.9
〃 21	0.39	—	—	23.0	4.2	27.5
〃 23	0.39	—	—	20.6	4.2	17.9
〃 24	—	—	0.4	22.0	4.6	16.9
〃 25	—	—	0.6	12.4	5.2	15.8
〃 26	—	—	0.6	22.3	4.1	15.3
〃 28	0.76	—	—	23.8	4.2	20.3
〃 29	0.39	—	—	24.1	4.0	17.9
〃 31	1.2	6.2	—	32.3	3.7	12.5
9月1日	1.3	6.9	—	33.0	3.7	12.5
〃 2	1.5	6.7	—	35.8	3.7	12.0
〃 3	—	7.2	1.0	36.5	5.3	12.0
〃 4	1.5	7.5	—	35.8	3.6	11.6
〃 5	2.0	8.1	—	37.9	3.6	11.2
〃 12	—	1.6	1.0	11.3	4.7	34.3
〃 13	—	2.2	1.0	12.8	4.4	18.5
〃 14	—	3.0	1.0	13.5	4.3	13.8
〃 15	—	3.3	1.0	19.5	4.9	21.9
〃 16	—	4.5	1.0	22.0	4.7	10.8
〃 17	—	4.3	1.0	24.1	4.8	9.65
〃 18	—	5.2	0.5	24.1	4.4	8.94
〃 19	（止水中）	3.4	1.0	18.4	4.8	0.60
〃 20		1.9	0.5	17.7	4.2	0.40
〃 21		1.8	0.5	18.8	4.2	0.20
〃 22		0.7	1.0	27.7	4.2	0.50
〃 23		1.0	1.0	21.3	5.4	0.30
〃 24		1.0	1.0	20.6	5.1	0.90
〃 25		4.7	0.5	33.7	5.0	5.54
〃 26	（放流中）	5.4	0.5	34.8	4.7	6.01
〃 28		5.7	0.5	33.0	4.7	6.25
〃 29		5.4	0.5	31.9	4.4	5.13
〃 30		5.3	0.5	30.1	4.5	4.93
〃 31		6.2	0.5	30.1	4.4	5.35
11月1日	—	4.7	0.8	26.6	4.4	35.1
〃 2	—	3.4	0.8	19.5	4.9	13.8
〃 3	—	2.9	1.0	18.8	4.9	14.3
〃 4	—	2.9	1.0	18.8	4.0	12.5
〃 5	—	3.1	1.0	19.5	4.0	14.8
〃 7	—	2.7	1.0	20.2	4.0	19.1
〃 8	—	3.1	1.0	16.7	4.2	18.5
〃 9	—	3.6	1.0	20.2	4.2	15.3
〃 10	—	3.6	1.0	19.5	4.1	14.3
〃 11	—	3.3	1.0	19.5	4.2	13.4
〃 12	—	3.6	1.0	19.9	4.1	19.1
〃 13	—	2.9	1.0	18.8	4.2	35.9
〃 14	—	1.6	1.0	12.4	4.2	53.6
〃 15	—	1.0	1.0	8.2	4.4	75.0
〃 16	—	1.2	1.0	10.6	4.6	37.8
〃 18	—	1.0	1.0	10.6	4.6	19.1
〃 19	—	1.6	1.0	13.1	4.4	21.5
〃 20	—	1.7	1.0	11.0	4.3	20.3
〃 21	—	2.6	1.0	17.0	4.4	22.7
〃 22	—	2.9	1.0	17.0	4.2	9.29
〃 23	—	2.4	1.0	16.0	4.3	20.9
〃 24	—	2.2	1.0	14.9	4.4	13.4
〃 25	—	3.4	1.0	18.8	4.3	11.6
〃 26	—	1.9	1.0	17.7	4.6	11.2
〃 27	—	3.2	1.0	17.7	4.5	13.8

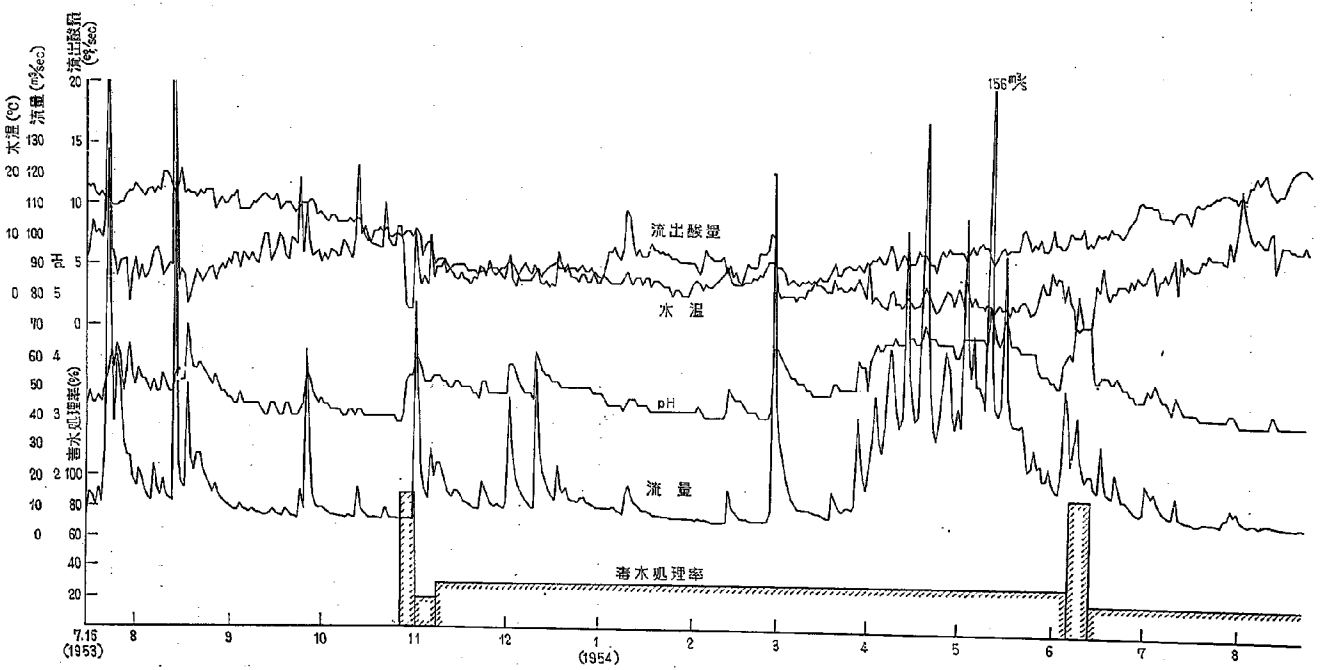


図-8(a) 田沢測水所における流量，pH，水温，流出 H^+ 量（昭和28年7月～昭和30年9月）

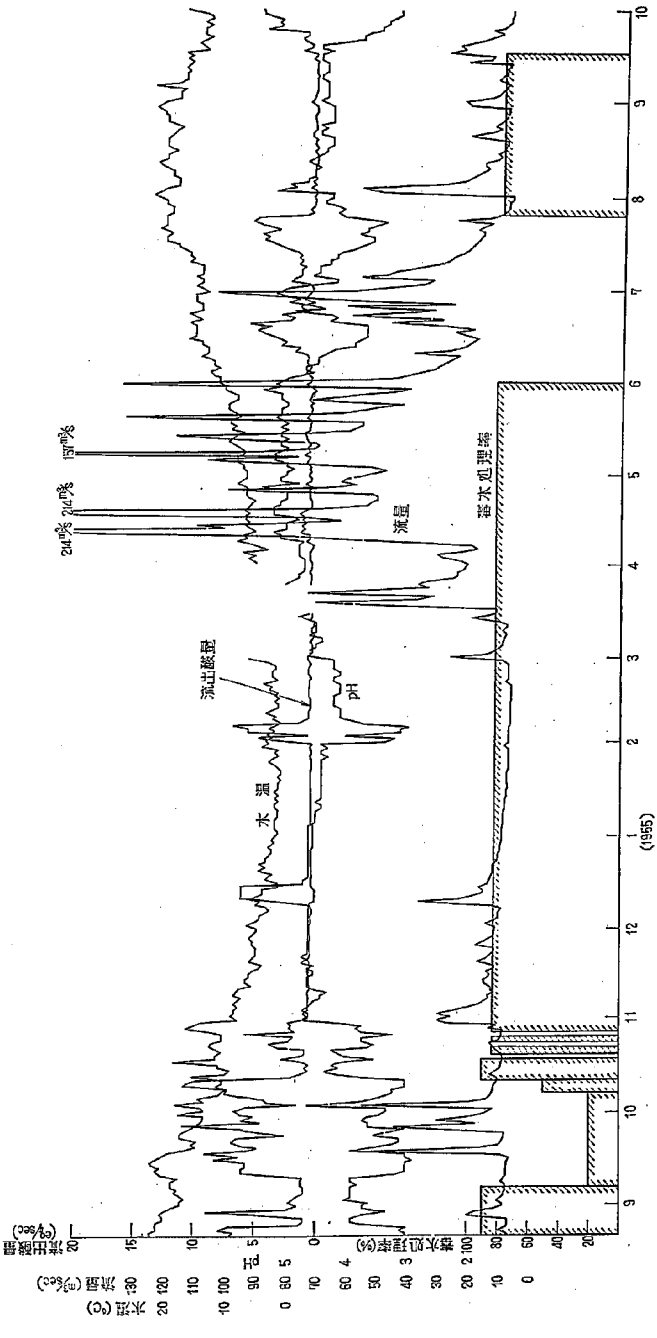


図-8(b) 田沢測水所における流量，pH，水温，流出 H^+ 量（昭和28年7月～昭和30年9月）

表-5 排水処理率と田沢測水所の pH および H^+ 流出量

排水処理率 (%)	期間 (年月日)	流量 (m^3/sec)	pH	H^+ 流出量 (eq/sec)	備考
0	28. 9. 5～28.10.27	8～15	3.0～3.2	5～7	
* 0	31. 7. 2～31. 7.18	10～18	3.7～4.0	(MO酸度) 1.1～2.3平均1.5	(PP酸度) 8 eq/sec
* 0	31. 9. 1～31.10. 5	7～12	3.3～3.6	(MO酸度) 1.5～2.5平均1.9	
20	29. 7. 1～29. 8.25	10前後	3.0～3.5	3～8	
30	28.11. 7～29. 3.30	6～20	3.0～3.5	3～6	
80	29.11. 1～30. 3.10	6～15	4.5一定	0.5	* 11.6 pH 4.4 PP酸度 eq/sec 5.7 流量 16.1 11.10 4.3 4.7 11.8 11.16 4.3 4.8 11.4
90	29. 8.26～29. 9. 7	10前後	3.5～4.0	1～2	
90	30. 4 ～30. 6	変動著し	5 前後	1 前後	
* 100	31. 6. 1～31. 6.27	15～25	3.9～5.0	(MO酸度) 0.0	MOアルカリ度：0.02～0.88eq/l PP 酸度：0.5～0.6 eq/l

*著者の測定

［1］ 測定方法

測定は昭和31年6月1日から11月27日まで連日採水した試水について分析を実施する。採水は測水所に依頼し，採水時間は測水所の定常測定時とする。試水は1カ月ごとに送付をうける。試水容器はポリエチレン製とする。採水時の水温および流量は測水所での測定値資料の提供をうけた。

［2］ 測定結果

著者の測定した結果および測水所で定常業務として実施している昭和28年8月以降30年10月までの流量，pHおよび水温等の諸資料を利用して水素イオン流出量を求めた。水素イオン流出量は，pH 測定値しか利用できないときは $pH=-\log[H^+]$ から $[H^+]$ を求め，流量との積として算出する。酸度を測定しているときは酸度の流出量を求める。H^+ 流出量と MO 酸度流出量は低pHで Fe^{3+} 等の濃度低い場合は大体同じ値を与える。

資料を整理した結果を表-4，5および図-8に示す。

［3］ 測定結果の検討

この結果によれば除毒を実施しない場合，田沢測水所でのpHは昭和28年9月5日～昭和28年10月28日間では3.0～3.2を示し，pHより算出した H^+ の流出量は5～7 g/sec（または eq/sec）となり著しく大きい値を示す。三浦[8]によれば昭和24年7月1日～昭和27年8月30日までのpHは3～4であり，H^+ 流出量は5～8 g/secである。除毒を実施すれば，毒水処理率20％，30％ではpHは3.0～3.5であり，H^+ 流出量は3～8 g/secであり，この結果からは除毒前とほとんど変らない。毒水処理率を80％とすればpHは4.5となり大体一定値を示し，H^+ 流出量は0.5 g/secとなり，90％の処理率とすればpHは3.5～4.0となり，H^+ 流出量は1～2 g/secとなる。なおこの期間は除毒前の河床伏流水の影響をうけているためにpH上昇が小さいと推定される。また，90％処理率でも融雪期で流量多く，その値の変動も著しい場合はpHは5前後となり，H^+ 流出量は1.0g/sec 前後の値を示す。以上の値より毒水処理率80％程度ではpHは4以上とはならない，しかし80％を超せばpHは4以上となることは確実といえる。

玉川水はアルカリに対し緩衝能をもつ，ゆえにpHより $[H^+]$ を算出する場合は，その内容について諒解しておかねばならない。この内容については既報[9]においても触れたところである。ここでは酸度の流出量について考えてみることとする。すなわち，除毒前で流量が7～12 m^3/sec でほぼ一定の場合には，pH は3.3～3.6であり，MO 酸度流出量は1.5～2.5 eq/sec，平均して1.9 eq/sec であり，稀釈効果の認められる流量10～18m^3/sec の場合はpH 3.7～4.0であり，MO 酸度流出量は1.1～2.3 平均して1.5 eq/sec であり，その標準偏差は0.37 eq/sec である。これらの値はすでにのべた鎧畑渡舟点での平均 MO 酸度流出量 2.5 eq/sec に比べて一応妥当な値である。

一方，PP 酸度は MO 酸度の約4倍であり，その流出量の平均値は 8.4 eq/sec であり，標準偏差は 1.22 eq/sec である。毒水処理率100％で流量15～25 m^3/sec の場合はpH 3.9～5.0であり，MO 酸度はほとんど持たなく，むしろ $0.2～0.8\times10^{-4}$ eq/l 程度の MO アルカリ度をもつに至る。また，この場合 PP 酸度の流出量は平均して8.5 eq/sec，標準偏差は2.7 eq/sec である。すなわち毒水処理のいかんにかかわらず PP 酸度の流出量はそれほど変化なく，しかも渋黒川での PP 酸度流出量の平均値 8.9 eq/sec に近い点は特に注意を要する。除毒を100％実施すれば玉川水は田沢測水所で確実にpH 4 以上となり，MO アルカリ度を保有するに至る。

玉川温泉で除毒を始めれば田沢測水所での水質はどのように変化するかを，昭和31年10月の測定値について図示すると，図-9 のようになる。この場合10月6日午前9時に除毒を始め，試水の採取は午前10時に実施してい

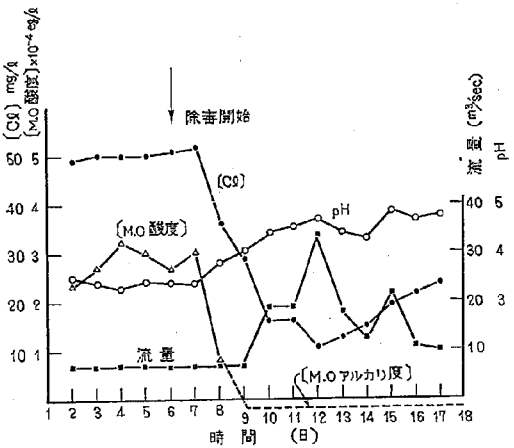


図-9　除毒開始の前後における田沢測水所の水質
(31. 10. 2～31. 10. 17)

る。除毒開始前の数日は pH, [Cl⁻], MO 酸度および流量もほとんど変動していない。除毒開始にともない, pH は上昇し溶存成分濃度は急激に低下するのであるが, 少なくも24時間は田沢測水所では除毒の影響は認められなく, 72 時間で pH は 4 以上となり, MO アルカリ度を示すようになる。6日目から [Cl⁻] は上昇し始め, 除毒反応をうけた水が到着する。況黒川と玉川の合流点での観測の場合は, 少なくも70時間は除毒処理をうけた温泉水は地中にあり, 況黒川には流入しないことをすでにのべたが, このようなおくれが田沢測水所でも認められる。玉川の流速から考えて, 12時間後には除毒をうけた水が田沢測水所に到達するはずであるが, このようなおくれが存在することは上記のような地下貯溜時間の問題であると同時に, 流れが乱流であること, 河床伏流水との交換があること, 河床に粗度があること等が要因と考えられる。

なお, 田沢測水所における [Cl⁻] および PP 酸度と流量の関係を図-10および図-11に示す。両者の間には $[Cl^-][流量]^{0.77}=210$ の関係が見られる。流出 Cl⁻ 量は昭和31年9月1日～昭和31年10月5日の間では平均値 379 g/sec, 標準偏差 38 g/sec であり, 一部の除毒を実施していた昭和31年7月2日～昭和31年7月18日の間では平均値 369 g/sec, 標準偏差 40g/sec である。流量が著しく変らないときは除毒に関せず Cl⁻ の流出量は変らない。しかし Cl⁻ の流出量は, 流量の関数であり流量の増加とともに増加する。流量の対数と [Cl⁻] との間には直線関係はなく, 両者の対数間に直線関係があり, その方向係数は −1より小さい。溶存成分の流出量が流量に依存しない場合, または流量とともに増減する場合が知られてるが,[9),10),11)] 田沢測水所においては Cl⁻ についてはすでにのべた関係がある。一方, PP 酸度については両者の対数間に直線関係があり, その方向係数はほぼ−1に近く, PP 酸度の流出量は流量に関せず大体一定といえる。玉川ではこれらの関係を用うれば, Cl⁻ または PP 酸度の測定値から, 流量の推定を試みることが可能となる。

なお酸度, アルカリ度, pH 等との関係は後記 5. でのべる。

4. 除毒工法の実施にともなう玉川の水質変化について

すでに既報[12)]において除毒を実施しない場合, 流下中に起こる水質の変化について論じた。除毒を実施した場合は流下中にどのような変化が見られるかを確かめるために行なった調査結果を次にのべる。

[1] 測定方法

除毒の前後に水質を比較する必要があるので, 測定は除毒前は昭和31年10月3日, 除毒後は10月9日とする。

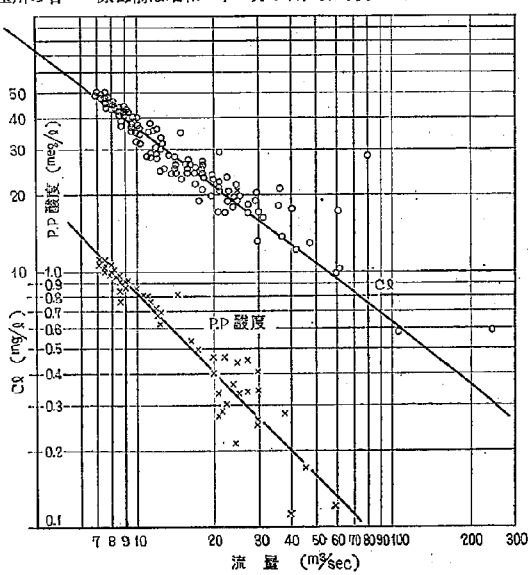


図-10　田沢測水所における流量と Cl⁻ 濃度および酸度との関係（昭和31年6月～31年9月）

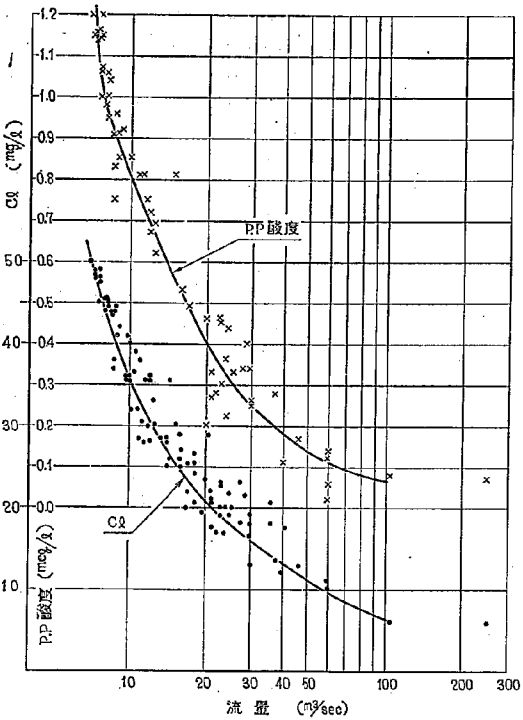


図-11 田沢測水所における流量と酸度，Cl⁻ 濃度の関係
（昭和31年6月～31年9月）

このほか除毒された水が玉川に合流して平衡状態に達したと考えられる11月16日にも測定を試みた。なお，毒水処理率が80%で平衡状態にある場合として昭和29年11月16日にも測定を試みた。昭和31年の場合は一応各成分について，昭和29年の場合は主として酸度およびアルカリ度について分析した。酸度としては BCG 酸度，BTB 酸度および PP 酸度とし，アルカリ度は BCG アルカリ度とする。

［2］ 測定結果

10月3日および9日の測定結果を 表-6 に示し，昭和29年11月16日の測定結果は 表-7 に示す。

［3］ 測定結果の検討

玉川流下中の流量と [Cl⁻]，または酸度の間には，その対数をとれば直線的関係があることはすでにのべた。[3] 10月3日と9日の測定値を図示すれば図-12 のようになる。この場合処理された毒水はいまだ全部は渋黒川に流入していないのであり，玉川の水質が平衡状態に達していないことを考慮せねばならないが，除毒の前後で流量と濃度の関係が著しく異なることを知る。特に MO 酸度は流量の増加にともない著しく減少しており，支流中

表-6 除毒実施前後における水質（昭和31年10月）

採水地点	化学成分 Ca	Mg	R_2O_3	SiO_2	SO_4	Cl	酸度×10⁻⁴eq/l M.O	P.P	pH	水温 °C	流量 m³/s	採水日時	天候
渋黒川：合流点上流 80m	25.9	12.0	87.2	56.0	138.1	329.1	63.1	108.0	2.4	16.2	1.02	昭31. 10. 3, 10. 30	晴
玉川：棚の目上流	12.4	6.1	29.2	26.0	34.4	134.8	18.16	33.68	2.9	15.7	2.76	〃 11. 00	〃
玉川：岩の目上流 600m	11.4	5.9	23.6	23.8	75.7	87.0	10.88	24.40	3.1	15.8	3.67	〃 13. 00	〃
玉川：玉川温泉前	9.1	4.1	19.6	21.4	53.5	67.0	7.60	17.04	3.3	16.2	5.66	〃 14. 00	〃
玉川：屏風岩	8.8	4.3	16.8	16.0	50.6	57.9	5.44	13.60	3.4	16.5	6.00	〃 16. 00	〃
玉川：鏡 畑渡舟場	8.9	3.3	17.0	15.0	45.7	52.7	4.48	12.0	3.5	—	6.13	〃 17. 00	〃
渋黒川：合流点上流 80m	15.2	6.8	41.0	26.8	107.4	124.8	21.6	40.0	2.9	12.3	0.95	昭31. 10. 9, 7. 00	雲
玉川：棚の目上流	8.8	4.2	16.0	16.4	58.8	40.2	4.0	11.2	3.6	12.3	3.30	〃 8. 00	小雨
玉川：岩の目上流 600m	8.9	3.3	16.0	8.4	47.3	36.3	2.96	10.88	3.8	15.0	3.21	〃 11. 30	雨
玉川：玉川温泉前	7.5	2.3	12.0	7.0	36.6	31.9	1.36	7.28	3.9	15.0	4.74	〃 12. 00	〃
玉川：屏風岩	6.5	3.1	8.8	6.2	32.9	31.2	0.96	6.16	4.0	15.2	7.87	〃 15. 00	〃
玉川：鏡 畑渡舟場	7.3	3.6	9.8	11.2	30.0	28.9	0.64	5.6	4.1	15.2	11.59	〃 17. 00	〃

表-7　除毒実施後（昭 31.11.16）の流下中の酸度

採水地点	pH（比色）	水温（C°）	BCG 酸度 (meq/l)	BTB 酸度 (meq/l)	PP 酸度 (meq/l)	BCG アルカリ度 (meq/l)	流量 (m^3/sec)
五十曲	3.0	6.2	2.48	4.63	4.90	—	1.32
棚白	3.6	5.5	0.39	1.39	1.52	—	—
金倉沢合流前	3.9	5.5	0.25	0.88	0.97	—	—
岩目	4.1	6.0	0.00	0.77	0.85	—	—
小沢合流前	4.2	5.6	0.00	0.36	0.56	—	—
尻高沢合流前	4.3	5.7	—	0.20	0.26	0.01	—
鎧畑渡舟点	4.3	6.0	—	0.23	0.30	0.01	—
田沢測水所	4.4	6.5	—	0.39	0.48	0.01	11.4

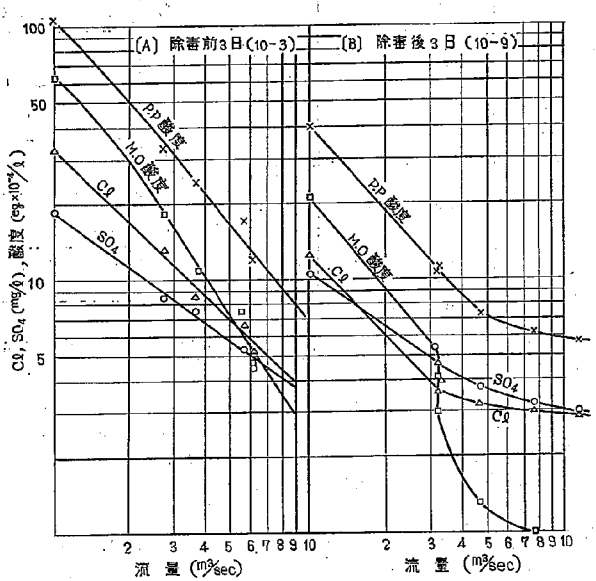


図-12　除毒前後における玉川の流量と水質（昭和31年10月）

に含まれるアルカリ度の影響が顕著に認められる。Cl^- および SO_4^{2-} 等の濃度減少の機構は MO 酸度の場合とは異なることが明瞭である。流下するにしたがい河床伏流水による影響を多くうけ，流量の増加にもかかわらず濃度の低下は顕著でないことが示される。

上にのべた例は除毒された水も流入せず，河床伏流水との平衡も失われた状態であったが，昭和29年11月16日の測定は一応平衡状態にあると考えられる場合である。まず pH をとり上げると，除毒を実施しない場合についてはすでに報告[12]してあるので，毒水処理率の異なる場合と比較を試みる。昭和29年11月16日の測定値を昭和13年8月下旬の毒水処理率 65% の場合[13]と比較すれば，五十曲，岩目，田沢測水所での pH は 80% および 65% の毒水処理率でそれぞれ 3.0 および 2.8，4.1 および 3.1，4.4 および 3.5 であり，毒水処理率の多少で玉川水の pH が著しく異なる。このことは既報[12]の玉川の流下中での減酸機構より考えて当然予想されるところである。著者は pH のほかに酸度，アルカリ度も測定しており，酸度等の方が pH よりも信頼度が大きいと考える。毒水処理率が80%では岩目地点ですでにメチルオレンジに対してアルカリ性を示し，BCG 酸度も持たない。尻高沢合流点近くに至り BCG アルカリ度を示すに至る。尻高沢合流後は MO アルカリ度と PP 酸度を持つ支流の合流によって PP 酸度はわずかに増加するに至る。

以上は主として酸度等について除毒工事の影響を調べたのであるが，他の溶存成分がどのような変化をうけているかに論及する必要がある。除毒を実施しない場合の玉川の流下中での溶存成分間の関係は，すでに詳細に論じたのであるが，ここでは除毒前後の溶存成分の消長を表-8 により比較してみる。

MO 酸度/[Cl] は除毒前の方が大きい。この値は流下中に減少するのであるが，除毒を行なうとこの減少する

表-8 除毒前後における溶存成分間の比（昭和31年10月）

項目＼測点	渋黒五十曲	棚白	岩目	玉川	尻高	鎧畑
MO/Cl	0.20 0.17	0.16 0.10	0.14 0.08	0.11 0.04	0.094 0.03	0.076 0.02
SO_4/Cl	0.60 0.86	0.88 1.46	0.90 1.02	0.85 1.15	0.88 1.05	0.79 1.04
SiO_2/R_2O_3	0.87 0.65	1.12 1.03	1.15 0.53	1.23 0.58	1.13 0.70	1.70 1.14
SiO_2/Cl	0.18 0.21	0.27 0.41	0.32 0.23	0.34 0.22	0.28 0.20	0.33 0.39
R_2O_3/Cl	0.28 0.33	0.25 0.40	0.29 0.44	0.29 0.38	0.28 0.28	0.25 0.34
SiO_2/MO	0.89 1.24	1.71 4.10	2.80 2.84	3.18 5.14	3.14 6.46	3.25 17.44
R_2O_3/MO	1.08 1.90	1.54 4.0	2.01 5.40	2.66 8.82	3.70 9.17	5.13 15.3
Ca/Cl	0.08 0.12	0.14 0.22	0.17 0.25	0.20 0.24	0.19 0.21	0.22 0.25
pH	2.4 2.9	2.9 3.6	3.1 3.8	3.3 3.9	3.4 4.0	3.5 4.1

備考 上段は除毒前，下段は除毒3日後

割合は特に大きくなる。このことは MO 酸度減少機構より考えても当然のことである。$[SO_4]/[Cl]$ は除毒前の方が大きいのであるが，おそらく鹿湯川合流前の渋黒川についてこの値が高いためと考えられる。流下中でのこの値の変化は除毒前後で余り異らない。

$[SiO_2]/[Cl]$ は大深川でのこの値が大きいため棚白で大きい値を示し，流下中に大きくなるが，pH が増大してある値に至れば $[SiO_2]/[Cl]$ は減少する。除毒前にはこの現象は玉川部落より下流で認められたが，除毒後は pH が高くなるので，上流地点でたとえば棚白と岩目間で SiO_2 の析出が起こる。なお尻高と鎧畑間で SiO_2 の供給が見られる。

$[R_2O_3]/[Cl]$ は除毒前の方がより小さい値を示し，除毒後は流下にともないこの値の減少率は大きい。除毒されれば当然 $[R_2O_3]/[Cl]$ は大きくなるのであり，一方 pH は上昇して R_2O_3 の析出沈澱が起こる。除毒後は除毒前よりも上流部で R_2O_3 の析出が認められる。$[SiO_2]/[R_2O_3]$ は各地点で除毒前の方がより大きい値を示す。除毒後は棚白と岩目間でこの値は急減することが認められ，除毒のために pH が上昇して SiO_2 の析出は岩目より上流で顕著に起こると推定される。

除毒の実施により玉川の水質がうける影響は，遊離酸の減少，遊離酸の減少にともなう Al^{3+} または Fe^{3+} 濃度の増加，流下中での pH の上昇とそれにともなう不安定成分である Al^{3+}，Fe^{3+} または SiO_2 等の沈殿析出である。なお上にのべた場合は除毒された玉川水が渋黒川に一部しか流入していない場合であり，定常状態にある場合の玉川水質の特性については別に調査する機会をえたいと考えている。

田沢測水所より下流部の玉川水質については調査していないので，玉川が平地部に出て農業用水として使用される地点で除毒の影響がどの位であるかを著者の測定資料で論ずることはできない。これらの点に関し滝口[1]の報告から引用してみよう。すなわち玉川が田沢湖に導入されない前の昭和9～11年の資料によると白岩村上ぜきでの pH は除毒を実施しない場合は，特に流量の多い場合を除いて 4.1～5.4 程度であり，除毒を実施すれば 5.3～5.6 となり 5 以下の pH は示さないので確かに除毒効果は認められた。しかし現在では多くの貯水池を通過するので，平地部での玉川水に対する除毒の影響は解明させがたいと考える。

5. 鎧畑ダム貯水池の pH および除毒対策について

鎧畑ダム貯水池の pH については，すでに既報[3]で検討した。しかし無機酸の稀薄溶液として考えたのであり，緩衝能を持つ水としては考えなかった。ここでは緩衝能をも考慮してさらに貯水池の pH について検討し，それに関連させて除毒方策に論及する。

この問題を検討するに当り使用した資料は主として 3. でのべた田沢測水所での著者の測定結果および測水所の観測資料である。また第5報でのべた渋黒川水の滴定曲線等も利用した。

貯水池の pH を推定する場合，無機強酸の稀薄溶液と

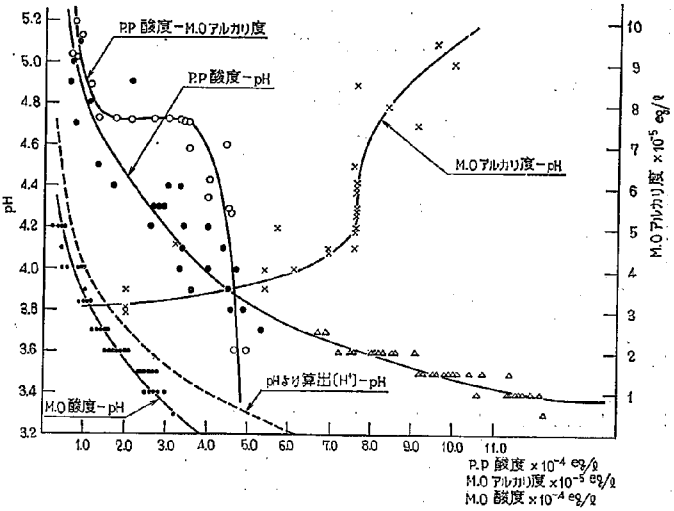


図-13　田沢測水所における PP 酸度，MO アルカリ度，MO 酸度と pH の関係（昭31.6,2～11,5）

して取扱うことは pH 3 以下の場合には理論的にも一応の妥当性を持つ。しかし pH の上昇に対し緩衝作用を持つ酸性河川水では，このようにして簡単に計算して pH を求めることは妥当でない。結局緩衝作用の内容に立至って検討する必要がある[13]。他方この緩衝作用は試水によりそれぞれ異なるし，また pH の値または溶存成分およびその濃度によっても異なり，一般的な数式で論じることはできない。したがって既報で示した流入酸量の対数と pH 間の直線は pH 4 以上の範囲では高pH 側に対し凸になった曲線となる。この場合緩衝作用の量的表示が不可能であるから，ここでは一応過去の資料および著者の測定値に基づいて貯水池の pH を推定する。

すでに一部論じたのであるが，田沢測水所の昭和13年以降の資料によっても，pH は除毒を実施しても 4.6 以上となることは稀であり，5 以上を示す場合は流量多く稀釈効果のあるときである。したがって，毒水処理率が 80～90％ 程度では，田沢測水所より上流に位置する貯水池は洪水を収容しても，pH が 5 以上となることは期待できない。著者の測定によれば鎧畑ダムが一部湛水を開始し，田沢測水所での流量の特に少ない昭和31年10月19日以降ですら pH は 5.2 であり，貯水池から放流し始めた10月25日以降11月27日までの pH は 4.0～4.9，PP 酸度は 0.1～0.6 meq/l で，それらの平均値では pH は 4.37，PP 酸度は 0.33 meq/l であり，わずかであるが MO アルカリ度を持つ。この期間は一応 90% 以上の毒水処理率とされており，流量も少ないときであるが，流量が多くなればさらに pH の上昇は考えられる。しかし年平均流量は約 25 m³/sec 程度であるから，流量増加のための pH 上昇を考えても貯水池の pH はせいぜい 4.6～4.8 程度と推定される。なお三浦[18]はすでに毒水全量を地下浸透させて除毒を実施すれば，鎧畑地点で pH は 5.05 となり，ダムを築造すれば貯水池の pH は 5.25 に上昇すると推定した。しかし玉川水が中和に対し緩衝能を持つことが特に考慮されていない。

著者が測定を実施した昭和31年6月2日から11月5日の間は，全面的でないが除毒が実施されており，田沢測水所での試水については PP 酸度および MO酸度と pH の間，および MO アルカリ度と pH の間に図-13 に示すような関係がある。すなわち pH が 4.6 以上になるためには PP 酸度は 0.15 meq/l 以下であり，MO アルカリ度は 0.08 meq/l 以上を必要とし，pH が 5 以上となる場合は PP 酸度は 0.1meq/l 以下で，MO アルカリ度は大体 0.1 meq/l 以上である。この関係は一般の水には適用できないし，除毒処理率の特に異なる場合にも適用できないことは当然であるが，PP 酸度と MO アルカリ度の間にはある定まった関係があって，酸度とアルカリ度がある値になって pH が定まるといえる。たとえば PP 酸度 0.12 meq/l で pH 4.7 の水では MO アルカリ度は 0.08 meq/l であり，酸の添加で酸度が 0.32 meq/l と増加してもアルカリ度は変らず，pH のみ 4.1 に低下する。すでにのべたように除毒のいかんに関せず PP 酸度の流出量はその平均値 8.5 eq/sec より著しい変動を示さないので，PP 酸度が 0.1 meq/l 以下になるためには流量は 85 m³/sec となり，洪水時以外は pH が 5 以上となることは考えられない。

次に酸性毒水について除毒を論じるとき pH を一つの

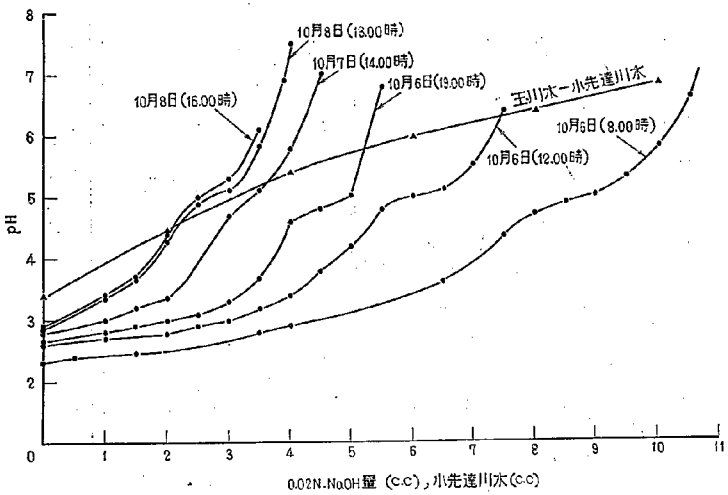


図-14　0,02 N NaOH による渋黒川水（20cc）滴定曲線（昭和31年10月）と小先達川による玉川（尻高）水（20cc）の滴定曲線（昭和31年10月３日）（10月６日 8.00時より除毒）

指標とすることについて検討する。pH の定義等については触れないが，pH の測定は簡単のようであるけれど正しい値をうることがなかなか困難であることだけ述べるに止どめる。図-13 に見られるように pH から算出した酸度は比較的 MO 酸度に近いが，PP 酸度よりは相当に小さい。pH より算出する酸量の内容が何を意味するのかその解釈が明確でない。したがって，pH のみによって毒水を論じることは危険であり，測定 pH の内容に関連する酸度およびアルカリ度とともに論ずる必要がある。一方，酸度およびアルカリ度は指示薬を用いて測定するので，指示薬のいかんによって異なる。したがって任意の pH を指定すればその pH での酸度またはアルカリ度が定まる。本報では指示薬としてメチルオレンジ (MO)，フェノルフタレン (PP) を主として用いてきたが，緩衝能の大きい玉川水の場合には，pH 4～8 の間のある pH で酸度またはアルカリ度を論じる必要があることは，すでに貯水池の pH の推定の項で明らかである。結局水の酸性を示す一つの係数としての pH を，どのような目的でまたどのような範囲で利用するかによって，問題としようとする pH は変ってくると考えてよいであろう。酸性毒水の中和を考える場合は，有害であるか否かの pH を対象として酸度アルカリ度を測定すべきであり，河水の汚染は一応 pH 5 を限度としているので，pH 5 での酸度を測定した方がより実際的と考える。しかし，この場合の酸度は MO 酸度に比べより複雑な内容を持つ。

除毒を開始したときの五十曲地点での渋黒川水 20cc を 0.02 N の NaOH 溶液で滴定した場合の pH と NaOH 溶液の関係を図-14 に示す。いま，pH 4 から 5 までの酸度を $[A]_4^5$ として表示すれば，除毒を実施しない場合は $[A]_{4.0}^{4.5}$, $[A]_{4.5}^{5.0}$, $[A]_{5.0}^{5.5}$, $[A]_{5.5}^{6.0}$, $[A]_{6.0}^{6.5}$ はそれぞれ 0.4, 1.5, 0.7, 0.5, 0.3 meq/l となる。すなわち，MO 酸度は 7.1 meq/l であるのに対し pH 4.5 酸度は 7.5 meq/l，pH 5.0 酸度は 9.0 meq/l である。したがって渋黒川水を中和して無害な水として pH 5.0 にするのには MO 酸度を中和するよりも多くのアルカリを要する。この量はこの場合 MO 酸度の約 30% に達する。除毒が始まり毒水流入量のより少ない他の試水についても滴定曲線を図示してあり，ΔpH 0.5 では $[A]_{4.5}^{5.0}$ が最も大きい値である。このように玉川水が中和に対して大きい抵抗を示すのは，通常の天然水の pH が HCO_3^-－CO_2－H_2CO_3 系として定まるのとは別の機構によるものであり，(PP 酸度－MO 酸度) の大部をしめる Al^{3+} および Fe^{3+} が水酸化物として沈澱する場合の消費アルカリ量および pH と溶解度との関係が，玉川水の緩衝作用に関与している。除毒の実施によっても貯水池の pH が予想のように上昇しないと考えられる根拠は，この Al^{3+} 等の存在および PP 酸度の流出量がそれほど除毒によっても減少しないことによる。

貯水池の pH を上昇させる手段について次に考える。この問題に対する一つの答は小先達川水の貯水池への導入であり，すでに既報[3]でも論及したのであるが，さらに図-14 に小先達川水で除毒を実施しない場合の玉川水（尻高渡舟点）を滴定したときの滴定曲線を示す。この結果から pH 3.4 を示す玉川水 20cc に小先達川水 2cc を加えれば pH は 4.5 となり，3cc を加えれば pH は

5となる。当時玉川の流量は尻高渡舟点で約6 m³/secであるから，この水をpH 5とするためには小先達川水0.9 m³/secを要することとなる。しかし，小先達川水の流量が測定されていないので詳しく論ずることができない。小先達川のMOアルカリ度流出量を推定するために，昭和29年10月4日および昭和31年10月14日の流量を推定して0.5および1.0 m³/secとした。この推定には小先達川の流域面積と鎧畑地点での玉川の流域面積および実測流量を使用し，小先達川の流出率が玉川よりやや大きいとし，推定結果では小先達川の流量は鎧畑地点での玉川流量の5％とする。この推定値および昭和28年10月5日の測定値を用うれば MO アルカリ度流出量の推定値は，昭和28年，29年，30年で1.5，0.8，1.8 eq/secであり平均すれば約1.4 eq/secとなる。流量によってアリカリ度の流出量に差はあるが1 eq/sec程度と考えておけばよいであろう。昭和31年10月3日の尻高渡舟点での MO 酸度の流出量は3.3 eq/secであり，小先達川水の量は0.3 m³/sec程度と推定されるので，小先達川の導入だけではpHを4.0にはできるが，4.5とするためには0.6 m³/secを要し，さらに5.0とするためには0.9 m³/secを要することとなり，小先達川導入だけでは貯水池の pH は除毒を実施しないときに4.0以上には上げえないであろう。

つぎに小先達川の導入と除毒を同時に実施した場合はどのようになるかについて推算を試みよう。すでに第5報で論じたように玉川は五十曲から鎧畑まで流下する間に，MO酸度（約6.5 eq/sec）の約25％は支流の MO アルカリ度により，25％は河床材料との反応により消失し，50％がそのまま流下する。除毒を実施すればpHは上昇するので河床材料による減酸効果は減少すると考えられ，流下中の減酸は約40％程度と推定される。結局，2.6（6.5×0.4）eq/sec の MO 酸度が失われると推定される。小先達川水の MO アルカリ度の流出量は1 eq/secと考えられるので，五十曲での MO 酸度の流出量を3.6 eq/sec程度に保持すれば，貯水池の pH は4以上となり MO に対してアルカリ性を示すと期待される。五十曲での MO 酸度流出量を3.6 eq/secとすれば除毒効率は45％となるので，除毒現場での減酸率を80％とすれば，毒水処理率は56％となる。したがって小先達川を導入する場合を考えれば，毒水処理率はせいぜい60％とすればよく，常時毒水全量を処理する必要はない。

小先達川の導入の外に考えられる点は，小先達川についで MO アルカリ度の大きい鳩湯温泉の湧出量の増加を計ることである。

つぎに考えられる点は除毒工事の根本的性格にふれる問題であるが，PP 酸度と MO 酸度の差が示す化学的内容である。つまり除毒工事の実施により MO 酸度の低下をきたすが，その反面 Al^{3+} および Fe^{3+} 等が岩石より供給されて潜在性の酸となり，これらイオンが中和によって水酸化物を生成する限りは pH の上昇は困難となる。したがって Al^{3+} 等の溶解をともなわない中和，または Al^{3+} が水酸化物として沈澱しない方法等が将来研究されねばならないと考える。

このための一つの方法は炭酸石灰または消石灰による中和であり，現在までに多くの人により論じられてきた。しかし所要石灰量が余りに多いとされてきた。今五十曲での MO 酸度流出量6.5 eq/sec のみを中和するとすれば $Ca(OH)_2$ で20.7 ton/day，$CaCO_3$ で28 ton/dayとなり，玉川水は支流のアルカリ度のために MO に対しアルカリ性を示すに至るであろう。$Ca(OH)_2$ の1年間の所要量を購入するには約 22×10^5 円を要する。もし貯水池を MO に対し中性にする程度であれば，支流の MO アルカリ度流出量 1.7 eq/sec を $Ca(OH)_2$ に換算した量だけ所要 $Ca(OH)_2$ は減少する。すなわち14.5 ton/day の $Ca(OH)_2$ で十分であり，その価格は 16×10^5 円/年となる。もし石灰中和法を実施する場合は玉川温泉現地で実施する方が有利であり，温泉水中の有価成分の回収を考えるべきであろう。

6. 結　言

昭和26年以降8年にわたり実施した玉川の水質調査結果に基づき，玉川温泉水の地下溶透除毒工法の玉川水質に及ぼす効果について考察した。次にえられた結果を要約して結言とする。

（1） 地下溶透除毒工法により玉川温泉水の pH は約2位上昇する。遊離酸の減少は約 80～90％ であり，酸の減少量の約 80％ は岩石または粘土等からの Al^{3+} 溶出に基づく。したがって MO 酸度は減少しても PP 酸度は余り減少しない。Al^{3+} の溶出は遊離酸が潜在性の酸に姿を変えたことを示し，玉川水が中和に対し緩衝能の大きい原因を与える。また地下の水路には老化の現象が認められ，Ca^{2+} または Na^{+} 等の溶出は少なくなる。

（2） 除毒工法の実施にともなう渋黒川五十曲地点での水質について検討し，除毒のいかんに関せず Cl^{-} の流出量に変化ないことおよび PP 酸度の流出量はわずかに減少するにすぎないことを確かめた。五十曲での MO 酸度の流出量減少率で除毒効率と考えれば，全毒水を処理した場合は除毒効率は約80％，毒水処理率80％のときは除毒効率は約 52％ である。

（3） 田沢測水所での玉川水の pH は除毒を実施しないときは3～4であり，30％の毒水処理率では pH 4以下，80％ の処理率で確実に4以上となる。MO 酸度の流出量は除毒を実施しないときは大体 1.5～1.9 eq/secであり，100％ の毒水処理率で MO 酸度は持たず，む

しろわずかながら MO アルカリ度を持つ。一方 PP 酸度の流出量は除毒のいかんに関せずほとんど変らない。$[Cl^-]$ と流量 (Q) の間には $[Cl^-][Q]^{0.77}=210$ の関係があり，Cl^- 濃度の測定から一応流量の推定ができる。

（4） 除毒の実施にともなう玉川水の流下中での水質の変化は，MO 酸度と $[Cl^-]$ の比は低下し，$[R_2O_3]$ と $[Cl^-]$ の比は増加する。流下中に見られる R_2O_3 および SiO_2 の水中からの析出は比較的上流部で起こる。また玉川部落地点で MO アルカリ度を持つに至る。

（5） 除毒処理後平衡状態に達するまでの水質から，表流水と伏流水との交換または粗度に関連する資料がえられる。

（6） pH の測定値から遊離酸の量を算出することは緩衝能を持つ玉川水には適用しがたいことをのべ，緩衝能の化学的内容について考察した。玉川水の pH は MO 酸度，MO アルカリ度および PP 酸度間の相関において定まることを田沢測水所での試水分析結果から求めた。またこれら資料から鎧畑貯水池の pH は 80～90% の毒水処理率では 5 以上となることは期待できなく，4.6～4.8 程度と推定した。

（7） 貯水池の pH を上昇させる手段として小先達川の導入効果を検討した。小先達川を導入すれば毒水処理率 60% でも確実に pH を 4 以上とすることが可能である。また石灰による中和方法も今まで考えられた石灰量よりも少なくて効果ありと考えられるので，今後再検討する必要がある。

謝 辞

本研究を実施するに当り東北地方建設局，玉川工事事務所，秋田県当局，東北電力田沢測水所の多くの方方の御協力をえた。三浦彦次郎氏からは貴重な文献をいただいた。また，当研究所化学研究室の牧 隆正技官の長期間にわたる協力をえたほか，近藤 紀技官を始め研究室各位の協力をえた。

諸氏に感謝の意を表する。

参考文献

1） 溝口 三郎
田沢湖疎水計画と玉川毒水問題（Ⅰ～Ⅳ），農土研10，64，191，288，407，昭13

2） 三浦彦次郎
玉川毒水除害の化学的研究，日化 60,958,1939

3） 有泉 昌，牧 隆正
酸性河川水の水質に関する調査研究 (2)
土研報 No.90，93，昭30

4） 有泉 昌，近藤 紀，森 芳徳
放射性同位元素を使用した地下水調査報告(1)
土研報 No.98，123，昭32

5） 有泉 昌，近藤 紀，森 芳徳，大場正男
放射性同位元素を使用した地下水調査報告(2)
土研報 No.101，139，昭33

6） 有泉 昌，近藤 紀，森 芳徳，大場正男
放射性同位元素を使用した地下水調査報告(3)
土研報 No.102，1，昭33

7） 有泉 昌，近藤 紀，森 芳徳
放射性同位元素を使用した地下水調査報告(4)
土研報 No.110，1，昭36

8） 三浦彦次郎
玉川毒水地下溶透除毒方法の研究（Ⅰ，Ⅱ），農土研 23，341，昭31，24，45，昭31

9） 有泉 昌，小松原正夫，牧 隆正，和田茂治，野本誠三
酸性河川水の水質に関する調査研究(3)
土研報 No.105，41，昭34

10） 半谷 高久
千曲川及び湯川に関する化学的研究（No.4，No.7），土地調整委員会 1955

11） 後藤 達夫
河川の化学的研究，日化 78，1241，1957

12） 有泉 昌，牧 隆正
酸性河川水の水質に関する調査研究(5)，土研報 No.119号，103，昭39

13） 三浦彦次郎
鎧畑貯水池築造の効果，秋田県土木部，昭25

Report
of
The Public Works Research Institute
Ministry of Construction
Vol. 122, December 1964

CONTENTS

1. A. Ariizumi, K. Fujisaki
Studies on Soil Colloids (Ⅶ)
——Clay Minerals in the Soils Forming Soft Foundation—— ……(1)

2. A. Ariizumi, K. Fujisaki
Studies on Soil Colloids (Ⅷ)
——Pozzolanic Reaction of Soil Colloids from Subgrades, Soft Foundations and Landsliding Areas.——……(23)

3. A. Ariizumi, T. Maki
Stabilization of Allophane Soils by Lime and Gypsum (6)
——Strength of Stabilized Allophane Soils by Means of Lime—Gypsum Admixture—— ……(35)

4. H. Kikkawa, Y. Tsukamoto
The Hydraulic Design of the Gokase River Project and its Model Test.
——On the Protection Against Flood Damages by the Sand Bar at the River Mouth and on the Diversion Weir of the Oose River.——……(61)

5. M. Tsukinari
Experimental Studies on the Structural Design of Concrete Pavement.
——On the Temperature Variation of Concrete Pavement at Chiba District.—— ……(105)

6. A. Ariizumi, T. Maki
Studies on the Water Quality of Acidic River Waters in Japan (7)
——On the Water Qualities of the Tama River due to the Neutralizing Treatment (Chemically Disolving Method by Percolating for Underground Clays) of the Tamagawa Hot Spring Water.—— ……(133)