

I S S N 0386—5878

土 研 資 料 第1485号

土 木 研 究 所 資 料

河 口 密 度 流 に 関 す る 研 究 資 料 集

昭和54年 2 月

建 設 省 土 木 研 究 所

鹿 島 試 験 所

目 次

ま え が き	1
第 1 章 河口部の塩水遡上現象	2
1-1 は じ め に	2
1-2 塩水遡上の形態	2
1-3 塩水遡上に伴う諸問題	3
第 2 章 弱混合型の塩水遡上と境界面形状	5
2-1 基礎方程式と解析	5
2-2 河口の水理条件	7
2-3 定常時における二層境界面形状	8
2-3-1 水平床における塩水くさび形状	8
2-3-2 河口地形, 河床抵抗を考慮した塩水くさび形状	9
2-3-3 混合を考慮した場合の塩水くさび形状	10
第 3 章 二層境界面の内部抵抗係数と連行係数	16
3-1 二層境界面の内部抵抗係数	16
3-1-1 実験装置および実験方法	16
3-1-2 実 験 結 果	16
3-1-3 塩水くさびの形状, 長さとの内部抵抗係数	17
3-2 淡塩二層流の連行係数	19
3-2-1 淡水流下と水質混合	19
3-2-2 実 験 概 要	19
3-2-3 実 験 結 果	20
3-3 混合を考慮した場合の内部抵抗係数	21
第 4 章 塩水遡上の実測値と解析結果	35
4-1 塩水くさびモデルの問題点と適用範囲	35
4-2 計 算 例	35
4-3 混合を考慮した場合の塩水くさびの特性と計算上の注意事項	36

第5章 最上川河口における塩水遡上観測	41
5-1 はじめに	41
5-2 観測時の水理量	41
5-3 河口部の流れと内部フルード数	41
5-4 境界面抵抗係数と二層間混合量	42
5-5 流れの拡がり幅	43
 (付) 第6章 最上川河口における密度流特性	60
(付) 第7章 最上川河口における塩水遡上と河口流について	90
(付) 第8章 最上川河口における淡塩水の混合と河口流について	131
 あ と が き	157
参 考 文 献	157

目 次

図-2.1	文 中	5
図-2.2	塩水くさびの形状	8
図-2.3	縦横断面図	10
図-3.1~3.2	実験水路概念図	22
図-3.3.1~3.3.8	濃度, 流速分布縦断図	24
図-3.4	境界図位置	17
図-3.5	$f_i \sim \psi$ 関係図	32
図-3.6	$\bar{f}_i \sim \psi$ 関係図	33
図-3.7	$E \sim Fr_i$ 関係図	34
図-4.1	下層塩分濃度の縦断変化	38
図-4.2	阿賀野川塩水くさび形状図	39
図-4.3	上層平均濃度変化図	40
図-5.1~5.3.3	流速と内部フルード数の縦断変化図	44
図-5.3.4	表層流速の縦断変化図	50
図-5.4	上層塩分濃度の縦断変化図	51
図-5.5	境界面形状図	52
図-5.6	上層塩分濃度の縦断変化	53
図-5.7	上層の塩分濃度(最上川)	54
図-5.7.1~5.7.2	境界面形状図(最上川)	55
図-5.8	表層流の拡がり状況図	57
図-5.9~5.10	河口流出流の流線の拡がり幅	58

ま え が き

本報告は，河口密度流に関するこれまでの実験と河口流を含む実際河川
の実測資料（最上川）を全般的にとりまとめたものである。

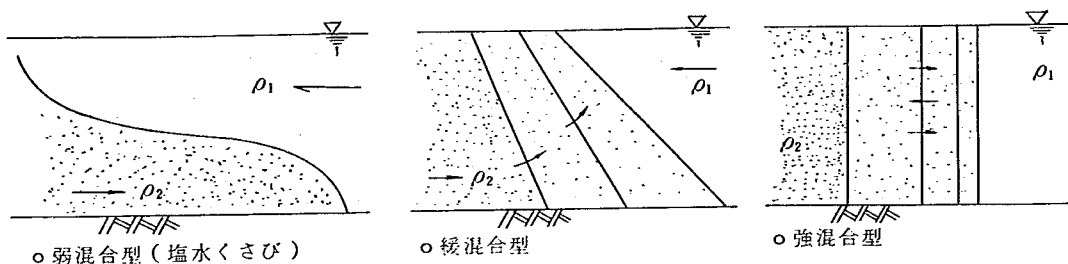
第1章 河口部の塩水遡上現象

1-1 はじめに

河口部における塩水の遡上現象は、取水、塩害、洪水の疎通、あるいは水産資源の保護などの問題に多大の影響をおよぼし、社会的にも技術的にも多くの関心が寄せられている。また、近年水資源の有効利用の必要性とともにその対策や計画の遂行上必要な塩水遡上現象を知るうえで、数多くの貴重な研究と基礎調査が行なわれてきた。そしてこれまでの研究成果の適用により、水理条件の変化に伴う塩水侵入パターンの予測や、観測計画についてもある程度までの問題解決が可能である。^{1)~3)}ここでは塩水遡上現象とそれに伴う問題等について述べる。

1-2 塩水遡上の形態

一般に河口部においては、海水と淡水の密度差により、海水は河水の下にはいり込んで力学的平衡に達しようとする流れを生ずる。この場合潮汐や河川流水の特性などの影響で淡塩水の混合状態が弱混合型（塩水くさび）、緩混合および強混合型の3種に分類されることがよく知られている。



弱混合型は、海水と淡水の混合を促すような働きが少なく、両者は鉛直方向に二層の状態となり、内部の境界面は、そこに働くせん断力の作用によってある傾きを有し、一般に塩水くさびと称する形状となる。したがって混合現象の役割は小さく、異種の流体の相互運動という面が大きい部分をしめる。緩混合型は、ある程度乱れによって河水と海水との混合が生ずる場合で、密度勾配が鉛直方向に連続しているような状態である。

強混合型は、鉛直方向の密度差は比較的少なく、縦断方向に密度の勾配が存在している場合の状態を示す。しかしこれらの間には明確な境界が存在するわけではなく、一般に潮位変動の小さい日本海側の河川では弱混合型が多く、潮位変動が大きくなると強混合型へと移行する。また、感潮面積の大きい河川ほど強混合型の特性が顕著になる。潮位変動量と周期は月令によって変化するので、混合形態もそれによって変化する。嶋⁴⁾の長良川における調査結果によると、低水時には、小潮後に弱混合、大潮後に強混合型が現われる。そこには、2~3回の位相差が存在する。

海水の遡上距離は弱混合のときが最も長く、強混合のときには短くなることが多い。潮位変動に伴って塩水くさびの長さや塩水濃度も変化する。くさび先端部の移動には、くさびの伝播速度および河床面の摩擦などが大きな影響を与える。このとき河床面のくぼみやみお筋などの効果により、下層高濃度の塩水層において混合が促進され、縦断的な濃度変化が生じる。上層の淡水層には、下層の高濃度の塩水が混入し、拡散によって濃度勾配を生じる。このようにして弱混合から緩混合型に、さらに緩混合から強混合型へと変化する。潮位変化が小さくなると、多少の位相おくれを伴って、逆の方向に混合形態が変化してゆく。このとき、過去の状態の影響が相当程度残存し、その履歴作用を無視できないといわれている。

流量の影響は、自流量と入退潮量とに分けて考える必要がある。入退潮量が大きい場合には、自流量の影響を無視しうることが多いが、裏日本などの潮位変化の小さい河川では自流量によって、くさびの遡上距離が大きく左右される。

河道内の塩分濃度およびその分布状態に影響を与える要素は、この他にも数多くのものが考えられ、これらの要素が複雑に作用し合うので、現在までの理論を用いて直ちにそれぞれの河川の種々の条件下で塩分状況を知ることは不可能な状態にあり、現地観測により、支配的な要素およびその相互関係を明らかにすることが重要視されている。

1-3 塩水遡上に伴う諸問題³⁾

塩水の遡上に関し、一般に現場の問題として、現象面からみて多く現われる事項は次のようである。

- (a) 維持流量の減少に伴う塩水遡上距離の増大
- (b) 砂利採取および河道掘削に伴う塩水遡上距離の増大
- (c) 河口処理計画に伴う塩水遡上距離の増大
- (d) 河道整正、および河床低下に伴う塩水遡上状況の変化
- (e) 感潮区域の増減に伴う塩水遡上距離の変化
- (f) 河口堰設置に伴う堰下流の水質変化
- (g) 河口堰水門操作に伴う塩水の水門通過特性
- (h) 河口堰水門操作に伴う堰下流塩水の排除
- (i) 高潮時の塩水遡上
- (j) 出水時の塩水排除特性と水路の有効断面積
- (k) 荒天時の風による水質変化
- (l) 湖の淡水化
- (m) 河川水の河口流出に伴う拡散と土砂沈積

以上のように塩水遡上現象は、河川の計画および維持管理等の実際面と深い関連を有するもの

である。さらに、これらの現象と密接な関係を有する具体的な治水、利水および河川環境上の主要な河川計画の諸問題を列挙すれば以下のようである。

- (a) 河口処理工および河道断面形の決定
- (b) 河口堰の設置位置および水門操作規定の決定
- (c) 維持流量の最小値の決定
- (d) 取水可能最下流地点の決定
- (e) 潮位変動利用取水
- (f) ヘドロの堆積とフラッシュ
- (g) 魚貝類の生息条件とその維持対策
- (h) 地下水の塩水化とその対策
- (i) 塩水遡上距離の短縮法
- (j) 湖沼の淡水化

以上の諸問題は、単独に塩水遡上現象の考察のみによって解決されることとはならないが、塩水遡上の現象が十分考慮されなければならないという意味である。また、現時点において問題の発生はみられなくとも将来の問題のために、現地点の資料をとっておくことも必要であろう。なお塩水遡上計画や調査法については、文献3)に詳しい。

第2章 弱混合型の塩水遡上と境界面形状

2-1 基礎方程式と解析

弱混合型の河川では、塩水と淡水の混合を促すような働きは少なく、塩水がくさび状に淡水の下を河道内に侵入する。これを一般に塩水くさびとよんでいるのは前述のとおりである。さてこのような現象については、通常つぎのような解析がとられている。^{5)~7)}

図-2.1のように密度の異なった淡塩二層の流れがあるとする。淡水については高度水頭と圧力水頭の和は、静水圧分布と仮定すれば $h_1 + h_2 + S$ が得られる。下層塩水については、上に自分より密度の小さい淡水がのっているからこれを自分の密度に換算して、高度水頭と圧力水頭の和は、

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} h_1 + h_2 + S \approx (1 - \varepsilon) h_1 + h_2 + S$$

$$\text{ただし, } \varepsilon = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1} \approx \frac{\rho_2 - \rho_2}{\rho_2} \ll 1$$

と表わしている。

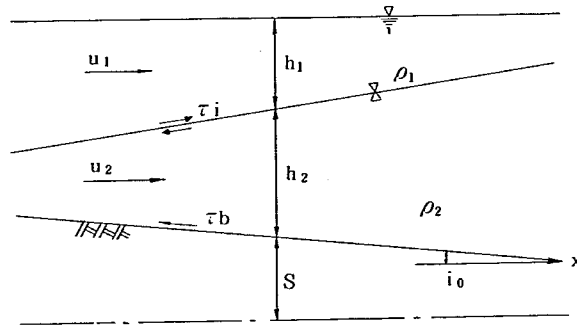


図 - 2. 1

これから両層に対する運動および連続の方程式は次のように書くことができる。

$$-i_0 + \frac{\partial h_1}{\partial x} + \frac{\partial h_2}{\partial x} + \alpha \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u_1^2}{2g} \right) + \frac{1}{g} \frac{\partial u_1}{\partial t} + i f_1 = 0 \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

$$-i_0 + (1 - \varepsilon) \frac{\partial h_1}{\partial x} + \frac{\partial h_2}{\partial x} + \alpha \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u_2^2}{2g} \right) + \frac{1}{g} \frac{\partial u_2}{\partial t} + i f_2 = 0 \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

$$\frac{\partial h_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial h_1}{\partial x} + h_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

$$\frac{\partial h_2}{\partial t} + u_2 \frac{\partial h_2}{\partial x} + h_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

ここに, h_1, h_2 : 上層および下層水深

u_1, u_2 : 上層および下層平均流速

ρ_1, ρ_2 : 上層および下層密度

S : 基準面の底面までの距離, i_0 : 底勾配

α : 流速補正係数 ($\alpha \approx 1$)

である。 if_1 および if_2 は, 上層および下層に対する摩擦勾配で, 内部境界面および底面での摩擦力を τ_i, τ_b で表わし, 水路幅が広いとして両側面での摩擦を無視すると,

$$if_1 = \frac{\tau_i}{\rho_1 g h_1}, \quad if_2 = \frac{\tau_b - \tau_i}{\rho_2 g h_2}$$

で表わされる。ここで内部境界面および底面での摩擦抵抗係数を f_i および f_b とすると,

$$if_1 = f_i \frac{(u_1 - u_2) |u_1 - u_2|}{2 g h_1}, \quad if_2 = f_b \frac{u_2 |u_2|}{2 g h_2} - f_i \frac{(u_1 - u_2) |u_1 - u_2|}{2 g h_2} (1 - \epsilon) \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

である。定常状態を考えれば (2.1) ~ (2.4) の時間に関する項は消え, これらの式を解くと,

$$\frac{dh_1}{dx} = \frac{1}{\phi(x)} \left[\left(1 - \frac{u_2^2}{g h_2}\right) (i_0 - if_1) - (i_0 - if_2) \right] \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

$$\frac{dh_2}{dx} = \frac{1}{\phi(x)} \left[\left(1 - \frac{u_1^2}{g h_1}\right) (i_0 - if_2) - (1 - \epsilon) (i_0 - if_1) \right] \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

ここに,

$$\phi(x) = \frac{u_1^2}{g h_1} \frac{u_2^2}{g h_2} - \frac{u_1^2}{g h_1} - \frac{u_2^2}{g h_2} + \epsilon \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

塩水くさびが静止している場合を考え, $u_2 = 0$ とし, (2.5) 式を代入すると,

$$\frac{dh_1}{dx} = \frac{1}{\phi(x')} \left[(i_0 - if_1) - (i_0 - if_2) \right] = \frac{-1}{\phi(x')} \frac{f_i}{2g} u_1^2 \left(\frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2} \right) \quad \dots\dots (2.9)$$

ここに,

$$\Phi(x') = \epsilon - \frac{u_1^2}{g h_1} = 1 - F_{r1}^2 \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

$$\frac{dh_2}{dx} = \frac{1}{\Phi(x')} \left[i_0 \left(\epsilon - \frac{u_1^2}{g h_1} \right) + f i \left(\frac{u_1^2}{2 g h_1} + \frac{u_1^2}{2 g h_2} - \frac{u_1^2}{2 g h_1} \frac{u_1^2}{g h_2} - \epsilon \frac{u_1^2}{2 g h_1} \right) \right]$$

ここで $f i$ の () の中の後部の 2 項は 2 次の微小項であるから省略する。ゆえに

$$\frac{dh_2}{dx} = i_0 + \frac{1}{\Phi(x')} \frac{f i}{2 g} u_1^2 \left(\frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2} \right) \quad \dots\dots\dots (2.11)$$

(2.9), (2.11) 式に (2.10) 式を代入して,

$$\frac{dh_1}{dx} = - \frac{F_{r1}^2}{1 - F_{r1}^2} \frac{f i}{2} \left(1 + \frac{h_1}{h_2} \right) \quad \dots\dots\dots (2.12)$$

$$\frac{dh_1}{dx} + \frac{dh_2}{dx} = i_0 \quad \dots\dots\dots (2.13)$$

ここに, F_{r1} は内部フルード数で, $F_{r1} = \frac{u_1}{\sqrt{\epsilon g h_1}}$ で定義される。(2.12), (2.13) 式より, 境界面抵抗係数 $f i$ が与えられれば数値積分により境界面形状を求めることができる。また, 微小項を省略したので自由水面は水平となる。

2-2 河口の水理条件

二層流の形成される河川では, 河口のように川幅が急激に拡大するところで, (2.9) 式の分母 $= 0$ ($dh_1/dx = \infty$), すなわち限界条件 $1 - F_{r1}^2 = 0$ が近似的に成り立つとされている。

このときの淡水水深が限界水深

$$h_{1c} = \frac{u_1^2}{\epsilon g} = \sqrt[3]{\frac{Q_1^2}{\epsilon g B^2}} \quad \dots\dots\dots (2.14)$$

であり, ここでいう限界水深とは, 通常限界水深ではなく, 密度差の影響を考慮した内部限界水深と称すべきものである。ここに Q_1 : 淡水流量, B : 河口幅である。河口ではこのように流れが $F_{r1} \approx 1$ の条件を満足するよう制御されることにより, 塩水くさびの河口内への侵入限界流量が, (2.14) 式より求められる。

$$Q_0 = \sqrt{\varepsilon g h_0} \cdot A \quad \dots\dots\dots (2.15)$$

ここに Q_0 : 塩水くさびが河口内に存在しえる限界淡水流量, h_0 : 河口水深, A : 河口断面積

2-3 定常時における二層境界面形状

2-3-1 水平床における塩水くさび形状

定常状態時の水平床における塩水くさびの方程式を求めるには, 既に述べたこともあるが次の事を仮定する。

- a) 河口で上層流は限界水深をとる。 $x = 0$, $Fr_1 = 1$
 - b) 全水深は一定である。 $h_0 = \text{const}$
 - c) 内部境界面抵抗係数は境界面上で一定である。 $fi = \bar{fi} = \text{const}$
 - d) 下層の流速は 0, したがって河床面摩擦は無い。
- $u_2 = 0$, $Fr_2 = 0$, $\tau_b = 0$,

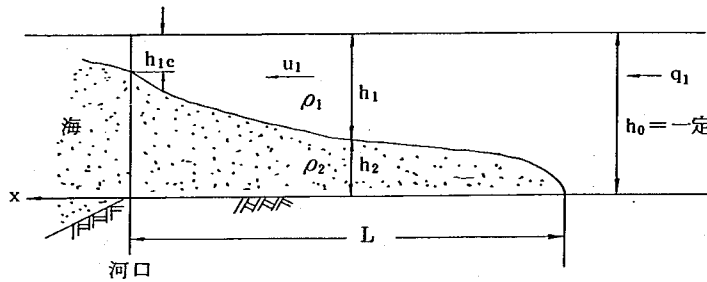


図-2.2 塩水くさびの形状

ここで(2.14)式より上層の単位幅当りの流量を q_1 とすると,

$$h_{1c} = \left(\frac{q_1^2}{\varepsilon g} \right)^{1/3} \quad \dots\dots\dots (2.16)$$

を得る。(2.16)式を用いると内部フルード数は次のように表わされる。

$$Fr_0^2 = \frac{u_0^2}{\varepsilon g h_0} = \frac{1}{\varepsilon g h_0} \left(\frac{q_1}{h_0} \right)^2 = \frac{q_1^2}{\varepsilon g h_0^3} = \left(\frac{h_{1c}}{h_0} \right)^3 \quad \dots\dots\dots (2.17)$$

$$Fr_1^2 = \left(\frac{h_{1c}}{h_1} \right)^3 \quad \dots\dots\dots (2.18)$$

よって(29)式は

$$\frac{dh_1}{dx} = \frac{\bar{f}_i}{2 F_{r0}^2} \cdot \frac{1}{\left(1 - \frac{h_1}{h_0}\right)} \cdot \frac{1}{\left(\frac{h_{1c}}{h_0}\right)^3 - \left(\frac{h_1}{h_0}\right)^3} \dots\dots\dots (2.19)$$

これより(2.19)式に(2.17)式を代入し、河口 $x=0$ で $h_1 = h_{1c}$ の条件を用いて積分することによって次のように求められる。

$$\frac{\bar{f}_i}{2 h_0} x = \frac{h_1}{h_0} \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{h_1}{h_0}\right) - \frac{1}{4 F_{r0}^2} \left(\frac{h_1}{h_0}\right)^3 + \frac{1}{5 F_{r0}^2} \left(\frac{h_1}{h_0}\right)^4 \right\} - 3 F_{r0}^{\frac{2}{3}} \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{10} F_{r0}^{\frac{2}{3}} \right) \dots\dots\dots (2.20)$$

これが塩水くさびの形を示す式である。

方程式(2.20)式において、 $h_1 = h_0$ 、 $h_1/h_0 = 1$ とおくときの x が塩水くさびの先端の位置であるから、塩水くさびの長さを河口から測って L とすると、

$$L = \frac{2 h_0}{\bar{f}_i} \left[\frac{1}{20 F_{r0}^2} - \frac{1}{2} + \frac{3}{4} F_{r0}^{\frac{2}{3}} - \frac{3}{10} F_{r0}^{\frac{4}{3}} \right] \dots\dots\dots (2.21)$$

となる。

2-3-2 河口地形、河床抵抗を考慮した塩水くさび形状

実河川の塩水くさび形状を計算するにあたって考慮しなければならない点として、断面変化の影響および淡水層と接する側岸と河床の抵抗などが挙げられる。中村、阿部⁸⁾はこの河口地形を考慮した塩水くさび形状の計算方法を次のように提案している。

定常時において、塩水の遡上流速を無視し、(2.1)、(2.2)式より Δx はなれた二断面における量に添字 I, II をつけ階差の形で表わし、水面を水平とみなせば、

$$\begin{aligned} \epsilon h_{1I} + \frac{Q_i^2}{2 g A_{1I}^3} \left\{ 1 - \frac{K_I (R_{1I} + R_{2I})}{2 R_{1I} R_{2I}} \Delta x \right\} \\ = \epsilon h_{1II} + \frac{Q_i^2}{2 g A_{1II}^3} \left\{ 1 + \frac{K_{II} (R_{1II} + R_{2II})}{2 R_{1II} R_{2II}} \Delta x \right\} \dots\dots\dots (2.22) \end{aligned}$$

$$K = \frac{f_i R_1 + \left(f_i \frac{B_2}{B_1} + \frac{2 n^2 g B_0}{R_1 B_1} \right) R_2}{R_1 + R_2} \dots\dots\dots (2.23)$$

ここに, Q_1 : 淡水流量, A_1 : 淡水層の流水断面積

B_2 : 炭塩境界面の長さ

B_0 : 淡水層の接する側岸, 河床の長さ

$B_1 = B_0 + B_2$: 淡水層の潤辺 ($\approx$ 水面幅), $R_1 = A_1/B_1$, $R_2 = A_2/B_2$

n : 淡水層の接する側岸, 河床の manning の粗度係数, Δx : 区間距離

f_i : 二層境界面抵抗係数

なお添字 I, II はそれぞれ下流断面 I および上流断面 II における値を示す。また x 軸は下流向きにとっているのて、河口から淡水水深を逐次計算する場合は負とする。

(2.22) 式において側岸, 河床の抵抗が無視できる場合は,

$$\begin{aligned} \epsilon h_{1I} + \frac{Q_1^2}{2gA_{1I}^2} \left\{ 1 - \frac{f_{iI}}{2} \left(\frac{1}{R_{1I}} + \frac{1}{R_{2I}} \right) \Delta x \right\} \\ = \epsilon h_{1II} + \frac{Q_1^2}{2gA_{1II}^2} \left\{ 1 + \frac{f_{iII}}{2} \left(\frac{1}{R_{1II}} + \frac{1}{R_{2II}} \right) \Delta x \right\} \end{aligned} \quad (2.24)$$

となる。(2.22) 式は、神通川⁸⁾ および九頭竜川⁹⁾ でその適合度が確められている。

2-3-3 混合を考慮した場合の塩水くさび形状

河口付近は単断面と仮定できる場合も多いが、高水敷が存在する下流河道も少なくないので図-2.3 のような複断面河道とし、境界面を通して二層間に塩水を含んだ流体の交換のあるモデル^{10), 11)} を考える。

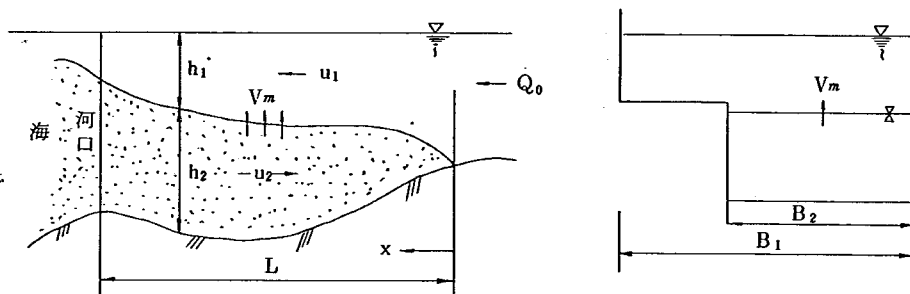


図-2.3 縦横断面図

上下層のそれぞれにおいて平均水理量にて表示できるとすると、基礎式は,

$$\frac{\partial h_1}{\partial x} + \frac{\partial h_2}{\partial x} + \frac{u_1}{g} \frac{\partial u_1}{\partial x} + i f'_1 - i_0 = 0 \quad (2.25)$$

$$\frac{\partial (1-\varepsilon) h_1}{\partial x} + \frac{\partial h_2}{\partial x} + \frac{u_2}{g} \frac{\partial u_2}{\partial x} + i f'_2 - i_0 = 0 \quad (2.26)$$

$$u_1 B_1 \frac{\partial h_1}{\partial x} + h_1 B_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} + u_1 h_1 \frac{\partial B_1}{\partial x} = V_m B_2 \quad (2.27)$$

$$u_2 B_2 \frac{\partial h_2}{\partial x} + h_2 B_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} + u_2 h_2 \frac{\partial B_2}{\partial x} = -V_m B_2 \quad (2.28)$$

が成り立つ。ここで i_0 は考えている横断の平均河床勾配、 B は図-23で定義されている川幅、 V_m は上層淡水流による二層界面から淡水中の塩水の混入速度を表わす。なお境界面は高水敷にのらない範囲を考えているが、この場合も同様の解析が可能である。また(2.27)式の連続条件では、淡塩境界面位置と高水敷の差が大きいときには、 B_1 と B_2 の差が小さくないとい結果をもたらさないで留意を要する。流速についても、低水路と高水敷上の流速を区別していない。

$i f'_1$ および $i f'_2$ は、前述したように上層および下層に対する摩擦勾配で、ここでは内部境界面の摩擦力を τ_a 、および底面での摩擦力を τ_b で表わすと、

$$i f'_1 = \frac{\tau'_1}{\rho_1 g h_1}, \quad i f'_2 = \frac{\tau_b - \tau'_1}{\rho_2 g h_2} \quad (2.29)$$

ここに $\tau'_1 = \tau_1 + \tau_a$

となる。ここで混合を考慮した内部境界面および底面での摩擦抵抗係数を $f'_i (= f_i + f_{ia})$ および f_b とすると、

$$\tau_1 = f_i \frac{\rho_1}{2} (u_1 - u_2) |u_1 - u_2|, \quad \tau_b = f_b \cdot \rho_2 u_2 |u_2| \quad (2.30)$$

τ_a は Keulegan¹⁹⁾ によれば

$$\tau_a = \rho V_m (u_1 - u_2) = \frac{\rho}{2} f_{ia} (u_1 - u_2) |u_1 - u_2| \quad (2.31)$$

(2.31)式より連行係数 $E = V_m / |u_1 - u_2|$ とすると

$$f_{ia} = 2 \frac{V_m}{u_1 - u_2} = 2 \cdot E \quad (2.32)$$

よって (2.29) 式は,

$$i f_1' = (f_1 + f_{1a}) \frac{(u_1 - u_2) |u_1 - u_2|}{2 g h_1} \dots\dots\dots (2.33)$$

$$i f_2' = f_b \frac{u_2 |u_2|}{2 g h_2} - (f_1 + f_{1a}) \frac{(u_1 - u_2) |u_1 - u_2|}{2 g h_2} (1 - \epsilon) \dots\dots\dots (2.34)$$

となる。(2.26) 式第 1 項については, $\rho_2 = \text{const}$ と仮定すれば,

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial x} = - \frac{1}{\rho_2} \frac{\partial \rho_1}{\partial x}$$

$$\therefore \frac{\partial (1 - \epsilon) h_1}{\partial x} = (1 - \epsilon) \frac{\partial h_1}{\partial x} + \frac{h_1}{\rho_2} \frac{\partial \rho_1}{\partial x} \dots\dots\dots (2.35)$$

となる。(2.35) 式を (2.26) 式に代入し, (2.25) ~ (2.28) 式から $\partial u_1 / \partial x$ および $\partial u_2 / \partial x$ を消去すると,

$$\begin{aligned} \frac{\partial h_1}{\partial x} = \frac{1}{\Phi(x)} & \left[\left(1 - \frac{u_2^2}{g h_2}\right) (i_0 - i f_1') - (i_0 - i f_2') + V_m \left(-\frac{u_2}{g h_2} + \frac{u_1}{g h_1} \frac{u_2^2}{g h_2} \frac{B_2}{B_1} - \frac{u_1}{g h_1} \frac{B_2}{B_1} \right) \right. \\ & \left. + \frac{h_1}{\rho_2} \frac{\partial \rho_1}{\partial x} - \frac{u_1^2}{g h_1} \frac{u_2^2}{g h_2} \frac{h_1}{B_1} \frac{\partial B_1}{\partial x} - \frac{u_2^2}{g h_2} \frac{h_2}{B_2} \frac{\partial B_2}{\partial x} + \frac{u_1^2}{g h_1} \frac{h_1}{B_1} \frac{\partial B_1}{\partial x} \right] \dots\dots\dots (2.36) \end{aligned}$$

ここに

$$\Phi(x) = \frac{u_1^2}{g h_1} \frac{u_2^2}{g h_2} - \frac{u_1^2}{g h_1} - \frac{u_2^2}{g h_2} + \epsilon \dots\dots\dots (2.37)$$

となる。 $\partial h_2 / \partial x$ の式も同様にして算出されるが, ここでは省略しておく。いま下層の流速 u_2 は十分小さく, $u_2^2 / g h_2 \ll 1$ および $u_2^2 / g h_2 \ll u_1^2 / g h_1$ とすれば (2.36) および (2.37) 式は,

$$\frac{\partial h_1}{\partial x} = \frac{1}{\Phi(x)} \left[- (i f_1' - i f_2') + \frac{h_1}{\rho_2} \frac{\partial \rho_1}{\partial x} - V_m \frac{u_1}{g h_1} \frac{B_2}{B_1} + \frac{u_1^2}{g h_1} \frac{h_1}{B_1} \frac{\partial B_1}{\partial x} \right] \dots\dots\dots (2.38)$$

$$\Phi(x) = \epsilon - \frac{u_1^2}{g h_1} = \epsilon (1 - F_{r1}^2) \dots\dots\dots (2.39)$$

のような簡単な式となる。この場合 u_2 を小さいと仮定したことにより, $\partial h_2 / \partial x$ 式を用いると, 水面はほぼ水平となる。(2.36) 式あるいは (2.38) 式は従来の式に加えて, 混入塩分による

上層の密度変化，塩水の混入量，および水路幅の変化を考慮していることになる。ここでは x 軸を図-23に示すように上層流の上流から下流にむけて正としているので混入量の増大はせん断力の増大とともにくさびの勾配を大きくし，逆に上層密度および川幅の増加率によってくさびの勾配は小さく，極端なケースとしては逆勾配の生ずることも示唆している。川幅が縮少するところで境界面が上昇することは，一見逆のように思われがちであるが，このことは実験によっても確かめられている。

さて(238)式および(239)式に基づいて実際の計算を行うためには， $\partial \rho_1 / \partial x$ について少し考察しなければならない。そこで上流からの純水流量 Q_0 ， x 地点までの塩水混入量を Q_x とすれば，

$$\rho_2 Q_x + \rho_0 Q_0 = \rho_1 (Q_x + Q_0) = \rho_1 Q_1 \quad \dots\dots\dots (2.40)$$

$$Q_x = \int_0^x B_2 \cdot V_m \cdot dx \quad \dots\dots\dots (2.41)$$

などの関係が認められている。(240)式では上層にて完全に混合されると仮定した。(240)式および(241)式より，

$$B_2 V_m = \frac{\partial Q_x}{\partial x} = \frac{\rho_2 - \rho_0}{(\rho_2 - \rho_1)^2} Q_0 \frac{\partial \rho_1}{\partial x} \quad \dots\dots\dots (2.42)$$

となる。したがって(238)式右辺第2項は，

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} \frac{\partial \rho_1}{\partial x} = \epsilon \frac{h_1 \cdot B_2 \cdot V_m}{Q_1} \quad \dots\dots\dots (2.43)$$

摩擦勾配 if' については，(233)式と(234)式の下層塩水層内の流速が微小な場合，および(243)式を用いることによって(238)式は，

$$\frac{\partial h_1}{\partial x} = \frac{Fr_1^2}{1 - Fr_1^2} \left[-\frac{fi + fia}{2} \left(1 + \frac{h_1}{h_2} \right) + \frac{h_1}{B_1} \frac{\partial B_1}{\partial x} + \frac{1}{Fr_1^2} \frac{h_1 \cdot B_2 \cdot V_m}{Q_1} - \frac{V_m}{u_1} \frac{B_2}{B_1} \right] \quad \dots\dots\dots (2.44)$$

と表わされる。ただし，以上は河川を幅の広い長方形断面とし，高水数の摩擦や側岸の影響を無視したものである。また連行係数 E と塩水の混入速度 V_m の関係は， $E = V_m / (u_1 - u_2)$ であるので(244)式は，

$$\frac{\partial h_1}{\partial x} = \frac{Fr_1^2}{1-Fr_1^2} \left[-\frac{fi+fia}{2} \left(1 + \frac{h_1}{h_2} \right) + \frac{h_1}{B_1} \frac{\partial B_1}{\partial x} + E \frac{B_2}{B_1} \left(\frac{1}{Fr_1^2} - 1 \right) \right] \dots\dots\dots (2.45)$$

なお $B_1=B_2=B$ の場合には,

$$\frac{\partial h_1}{\partial x} = \frac{Fr_1^2}{1-Fr_1^2} \left[-\frac{fi+fia}{2} \left(1 + \frac{h_1}{h_2} \right) + \frac{h_1}{B} \frac{\partial B}{\partial x} + E \left(\frac{1}{Fr_1^2} - 1 \right) \right] \dots\dots\dots (2.46)$$

となる。混合を考慮した場合のくさびの遡上計算は、河川の上流から下流に向って x 軸を考えた場合、(2.45) 式あるいは (2.46) 式を基に (2.40) 式および (2.41) 式を用いて逐次計算を行えばよい。この場合、河口における上層流量 Q_1 が上流の混合の度合によって変化し、未知量であるから河口から計算を行う場合は、塩水くさび先端において上層流量が淡水流量となるまで、支配断面位置での流量の仮定を反復して行わなければならない。式のうえからはどちらむきに計算してもさしつかえないが、上流から行う場合誤差の異積には注意しておくべきであろう。

差分の方法にはいろいろある。下流側断面に添字 I、および上流側断面に添字 II を付し、区間距離を Δx とすれば (2.45) 式は、

$$\begin{aligned} h_{1I} + \frac{Fr_1^2 I}{1-Fr_1^2 I} \left[-\frac{fi'I}{2} \left(1 + \frac{h_{2I}}{h_{2I}} \right) + \frac{h_{1I}}{B_{1I}} \frac{\Delta B_1}{\Delta x} + E_I \frac{B_{2I}}{B_{1I}} \left(\frac{1}{Fr_1^2 I} - 1 \right) \right] \frac{\Delta x}{2} \\ = h_{1II} - \frac{Fr_1^2 II}{1-Fr_1^2 II} \left[-\frac{fi''}{2} \left(1 + \frac{h_{2II}}{h_{2II}} \right) + \frac{h_{1II}}{B_{1II}} \frac{\Delta B_1}{\Delta x} + E_{II} \frac{B_{2II}}{B_{1II}} \left(\frac{1}{Fr_1^2 II} - 1 \right) \right] \frac{\Delta x}{2} \dots\dots\dots (2.47) \end{aligned}$$

ここに $fi' = fi + fia$, (2.40), (2.41) 式は

$$\begin{aligned} Q_{1II} &= Q_{1I} - \int_I^{II} B_2 \cdot V_m dx = Q_{1I} - Q_x \\ \rho_{1II} &= \frac{\rho_{1I} Q_{1I} - \rho_2 Q_x}{Q_{1II}} \dots\dots\dots (2.48) \end{aligned}$$

となる。したがって (2.47) 式上流側断面の h_1 によって Q_1 および ρ_1 が (2.48) 式によって変化する。なお Δx を小さくにとっておけば簡単のため下流側断面の水理量のみにて上流へすすむことも許されるであろう。ただし x 軸は下流向きにとっているの、河口から逐次計算する場合は負とする。また (2.47) 式は混合や川幅変化を無視すれば結局 (2.12) 式と同じになる。

いっぽう、(2.24) 式と同様に (2.48) 式を用いて示せば

$$\begin{aligned}
& \varepsilon_I h_{I,I} + \frac{Q_{I,I}^2}{2 \vartheta A_{I,I}^2} \left\{ 1 - \frac{f'_{I,I}}{2} \left(\frac{1}{R_{I,I}} + \frac{1}{R_{2,I}} \right) \Delta x \right\} \\
& = \varepsilon_{II} h_{I,II} + \frac{Q_{I,II}^2}{2 \vartheta A_{I,II}^2} \left\{ 1 + \frac{f'_{I,II}}{2} \left(\frac{1}{R_{I,II}} + \frac{1}{R_{2,II}} \right) \Delta x \right\} \dots\dots\dots (2.43)
\end{aligned}$$

となり， ε や Q_i も断面間で変化する。

第3章 二層境界面の内部抵抗係数と連行係数

3-1 二層境界面の内部抵抗係数

二層境界面の内部抵抗係数に関しては、第2章で述べてあるように塩水くさびの侵入距離、および境界面形状を決定する重要な要因として、従来も数多くの研究が行われており、その多くは二層境界面の安定性に関する Keulegan の無次元量、すなわち内部フルード数の二乗とレイノルズ数の積のかたちを採用しており、表示式もいくつか提案されている。しかし関数形として $f_i = a(Re \cdot Fr_i^2)^{-n}$ のかたちが是認されるにしても、係数およびべき数については相互に相違し、また実験値および実測値の散乱がいちぢるしいことから、さらに十分な検討が要望されるにいたっている。これらの原因として、内部抵抗係数の算出法、とくに境界面の定義、実験誤差、および混合の取扱いなどが問題となろう。理想的な塩水くさびは存在しないので、実際の弱混合河川における塩水遡上状況を予測するに際しては、明確な定義に基づいた内部抵抗係数 f_i の値が必要である。従来の研究結果では、二層流の境界面位置の定義などが必ずしも明確でないので土木研究所の大型水路による広範囲な実験、およびかなり明瞭な塩水くさびの現われている裏日本の河川における実測値に基づき、実験面に主眼をおいて検討した。¹⁶⁾

3-1-1 実験装置および実験方法

実験に使用した水路は、図-3.1~3.2に示す長さ3.0m、幅0.30m、深さ0.50mの両面ガラス張り密度流二次元水路と、長さ1.00m、幅0.80m、深さ1.0mの片面ガラス張り密度流大型水路で、これらの水路には付属設備として攪拌および貯塩水槽等の塩水製造装置があり、さらに高水槽、流量計を経てこれと接続した水槽が水路下流端にある。実験は上流から淡水流量 Q_f を与え、下流端水槽へ塩水流量 Q_s を与えると、塩水はくさび状になって、水路内へ侵入し、淡水は上に押し上げられて表層を流れる。ここで塩水流量を適当に調節すれば、塩水くさびを定常的に保つことが可能である。また実験中淡塩水の境界面をはっきりさせるため、塩水側にフルオレセインにて緑色に着色した。なお塩水密度は1.004~1.003について、淡水流量は3.0m水路の場合、1.0~6.0 ℓ/s 、水深10~30cm、1.00m水路の場合2.00~6.00 ℓ/s 、水深35.0~80.0cmについて実験を行った。測定したものは、塩水くさびの形状、流速分布、濃度分布、水位等であり、流速分布の測定には小型流速計を使用し、さらに流速が微弱なる場合は、色素等の移動距離を写真撮影により測定し、濃度分布は電導計を用いて測定を行った。

3-1-2 実験結果

塩水くさびの長さは、レイノルズ数あるいは、内部フルード数の増加とともに減少し、同一水量の場合は、密度差の大なるほど大きくなる。この実験結果の塩水くさび形状図および濃度、流速分布図の一例を図-3.3.1~図3.3.8に示す。流速分布は淡水部ではほぼ一定値を示し、境

界面付近で急激に変化しており、流速の正負の位置は内部波等の影響で多少変動している。濃度分布は上下両層の密度差が大なる場合は、境界面はよく安定しており、ガラス面を通して測定した塩水くさび形状と濃度分布の変曲点とよく一致している。しかし、上下両層の密度差が小さい場合は、一般に混合し易く、ガラス面より測定した形状は変曲点よりいくぶん上層を境界面としている。二層流の境界面位置の定義としては、図-3.4に示すように、1) 目視、2) $Z_c = C_2/2$ (ほぼ変曲点に近い)、3) $Z_c = C_2$ などが考えられる。この際流速分布は考慮されるべきであり、境界面において $\partial u / \partial Z$ が大きくなっていることが必要である。通常¹⁷⁾の定義は目視によるものあるいは $Z_c = C_2/2$ のものが多いと思われる。著者らのこれまでの解析は後者のものであった。これは理想的な二層流に近い場合には適用可能である。混合が促進している場合は $Z_c = C_2$ が取扱い易い。ただし境界面において ρ_2 の塩水塊が下層から上層へ混入するものが大部分と考えられるが、逆の混入も考えられるので濃度分布のかどがとれる。したがって

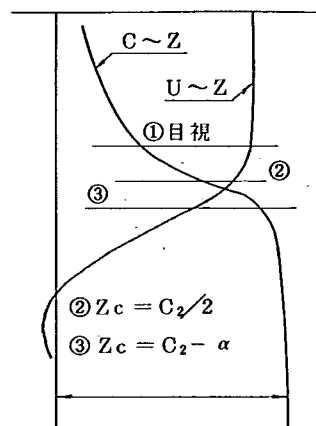


図-3.4 境界面位置

$Z_c = C_2 - \alpha$ とした方がよいであろう。これまでの研究の大部分は、混合の少ない場合のものであった。実際に混合の効果の入っていない式で、そのわずかな混合現象は係数のなかで取扱われていたと思われる。これは混合が少なく、その影響を無視し、その縦断変化を摩擦項のみで計算する場合はよいが、混合が進んだ場合やその影響を考慮したときの適用には困難が感じられる。そこで今回は、境界面位置を $Z_c = C_2 - \alpha$ ($\alpha = 0.1 C_2$) とし、混合の影響を無視し得る実験、および実測値から内部抵抗係数を定めることにした。

3-1-3 塩水くさびの形状長さや内部抵抗係数

淡塩水の境界面におけるせん断抵抗は、表現に多少の差はあるが、いずれも表層流の平均流速の二乗に比例する量として表わされている。したがって内部抵抗係数の算定には、境界面のせん断力を決定しなければならないが、ここでは定常状態の塩水くさび形状から、くさび各部の抵抗係数を次式¹⁸⁾によって求めた。

$$k = \frac{f_i}{2} = - \frac{\left(1 - \frac{u_1^2}{\varepsilon g h_1}\right) \cdot \frac{d h_1}{d x}}{\frac{u_1^2}{\varepsilon g h_1} \cdot \frac{h_1 + h_2}{h_2}} \quad \dots \dots \dots (3.1)$$

(3.1)式は(2.12)式からも得られ、これより求められた抵抗係数は、その点における内

部フルード数とくさびの勾配に関係づけられるため、一つの塩水くさび上においては、くさびの勾配の大きい先端および末端部で若干大きくなり、中央部はほぼ一定値でやや小さくなる傾向がみられる。この(3.1)式で求めた実験および実測値の f_i と $\Psi (=Re \cdot Fr_1^2)$ の関係図を示したのが図-3.5である。

先端および末端部は、実測値では履歴および混合の影響があるので除外したが、実験値は考慮してみた。この場合、さきに述べたように dh_1/dx が大きいので測定誤差および Δx のとり方により、点はばらつくが、くさび中央部と根本的な相違はないようである。くさび末端部では混合がある程度含んでいるが、このことは混合が多少あっても f_i の値の適用性を示しているものと考えられることもできよう。図-3.5の結果から多少の散乱はあるが、実用的見地から $f_i \sim \Psi$ の関係を求めると、

$$f_i = 0.35 \Psi^{-0.5} \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

が得られる。なおこの値は厳密には混合のある場合には適用不能である。混合による運動量の関係を考慮していないからである。しかし混合量が少ない場合は、 f_i におよぼす混合の影響は無視し得るので、その適用も可能であろう。

いっぽう、水平床における定常状態時の塩水くさびの長さ L がわかれば、くさび全長の平均抵抗係数 $\bar{f}_i$ は(2.21)式より、

$$\bar{f}_i = \frac{h_0}{2L} \left[\frac{1}{5Fr_0^2} - 2 + 3Fr_0^{\frac{2}{3}} - \frac{6}{5}Fr_0^{\frac{4}{3}} \right] \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

で表わされる。

(3.3)式より実験結果の塩水くさび全長の平均抵抗係数を求め、同様 $\Psi (=Re \cdot Fr_0^2, Re = u_0 h_0 / \nu, Fr_0 = u_0 / \sqrt{\varepsilon \eta h_0})$ との関係を図-3.6に示す。ただし、ここでは河口で内部限界水深となっていないケースは除いてある。これよりくさび全長の平均抵抗係数 $\bar{f}_i$ を求めると、

$$\bar{f}_i = 0.13 \Psi^{-0.415} \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

となり、水深が一定で河口で上層流が内部限界水深となっている場合は、くさび全長の平均抵抗係数もクーリガン数 Ψ の関数で表わされるようである。¹⁷⁾ (3.4)式が(3.2)式と異なるのは、くさび上の各点の f_i は縦断的に一定でないことと、内部フルード数 Fr_0 と Fr_1 の違いによるものと考えられる。

3-2 淡塩二層流の連行係数

淡塩二層境界面における混合現象は、塩水遡上、温排水、水質汚染、取水、あるいは湖の淡水化等、多くの問題に影響を及ぼし、これらの対策および計画上、その混合量を適切に評価することは非常に重要である。この二層間混合量に関しては、Keulegan¹⁹⁾をはじめ、数多くの研究が行われているが、ここでは内部抵抗係数と同様、前述した密度流大型水路による広範囲な実験結果をもとに検討を行った。

3-2-1 淡水流下と水質混合

淡水流下にもなう二層境界面から上層淡水中への塩水の混入速度については、つぎのKeuleganの実験式がある。

$$E = U_m/U = K(1 - 1.15 U_c/U) \quad (3.5)$$

ここに E : 連行係数, U_m : 塩水混入速度, U : 二層の相対速度, k : 混合量係数 (3.5×10^{-4}), $U_c = (\nu_2 \varepsilon g)^{1/3} / \theta$: 混入開始速度 ($\theta = 0.178$, $Re > 450$) で、下層塩分の混入速度は、流速に比例する値で表わされている。いっぽう、Ellison & Turner²⁰⁾ は、乱流加入についての実験的研究を行い、連行係数 E をリチャードソン数の関数で示している。(3.5)式については、 U_c の効果は小さく、混合量係数は流量や河口からの距離によって変わり、実際の現象を把握するには必ずしも十分でないといわれている。また U_c の式での θ は粘性を考慮した内部波の安定限界を知るうえで重要なパラメーターとなることが知られており、これより前述した二層境界面の抵抗係数の関数としてクーリガン数 $\Psi = Re \cdot Fr_1^2$ が導かれている。以上の研究から、二層間混合現象を支配する要素については、クーリガン数、リチャードソン数、内部フルード数等が考えられる。ただし鉛直方向塩分混合の安定度を示すリチャードソン数は、

$$Ri = - \frac{g \left(\frac{d\rho}{dy} \right)}{\rho \left(\frac{du}{dy} \right)^2} \quad (3.6)$$

で定義され、弱混合の二層流の場合、上流層に着目し、 $\Delta y = h_1$ のとき $\Delta u \approx u_1$ であるから(3.6)式は、

$$Ri = \frac{g(\rho_2 - \rho_1)h_1}{\rho_1 u_1^2} = \frac{1}{Fr_1^2} \quad (3.7)$$

となる。したがって内部フルード数と同様の結果が得られると考えられる。

3-2-2 実験概要

3.1.1 で述べた30 m水路と100 m水路により、塩水と淡水の二層流に関する実験を行った。

なお湖内の小さい流速も考えてとくに小さい淡水流までを実験の範囲内にいれた。この場合には、混入速度は非常に小さく、長時間の実験になるので、わずかの漏水や採水量も問題となるほどで注意深く行った。実験条件は、塩水くさびの実験も含めて、塩水比重 1.005 ~ 1.03, 淡水流量 2.0 ~ 6.0 l/s , 水深 20 ~ 80 cm である。また濃度、流速分布の測定は塩水くさびの場合と同じ方法であり、塩水の補給を行わない実験では、通水時間内の淡塩境界面の低下量より塩水の混入量を求めた。

3-2-3 実験結果

二層境界面位置は内部抵抗係数の算出と同様、 $Z_c = Z 0.9 C_2$ とし前述したように境界面の時間的低下量、および塩水くさびの実験では流速と濃度 flux の差により、淡水流下にもなう二層境界面から淡水中への塩水の連行量を求めた。この結果を前に述べた各無次元量で整理したところ、いずれにおいてもそれぞれ一定の傾向は認められるが、内部フルード数による整理が比較的良好な結果が得られた。これによると連行速度 V_m は内部フルード数のほぼ 4.5 乗に比例して増大し、連行量が内部フルード数の増大とともに急増する。^{23), 24)} これより内部フルード数と連行係数 E との関係を示したのが図-3.7 である。同図には他研究者の資料も付記したが、土研の実験とほぼ同じ傾向にあるようである。なお連行係数 E が $10^{-4} \sim 5 \times 10^{-3}$ の内部フルード数の大きい範囲は、塩水くさびの実験より求めたものである。この場合は内部波が発生しており、Keulegan の実験式に近い値を示す。しかし(3.5)式では密度差にあまり関係なく、上層の流速に比例するが、実験結果によると上下層の密度差による影響が大きい。また連行係数が 10^{-4} 以下の範囲は、内部フルード数が小さく、Keulegan の混入開始流速より小さい場合である。この場合の E がかなり小さい範囲は、実験が微妙なための誤差、あるいは他の拡散の影響によるものか、内部フルード数の大きい場合の傾向と若干異なるようである。

図-3.7 より連行係数 E と内部フルード数の関係はやや曲線になっているようにも見える。図中の直線は、

$$E = \frac{V_m}{u_1} = 2 \times 10^{-3} Fr_1^3 \quad \dots\dots\dots (3.8)$$

である。²⁵⁾ 同様(3.7)式の Qver-all-Richardson 数での連行係数を表わすと、(3.8)式の関係は、

$$E = 2 \times 10^{-3} / Ri^{\frac{3}{2}} \quad \dots\dots\dots (3.9)$$

となる。(3.8)式の現地への適用性については、後述する最上川等の観測例でほぼ満足する結果が得られ、実用上の適用性が実証されている。なお(3.8)式の関係は淡塩水以外の二層流に

も適用可能であろう。

3-3 混合を考慮した場合の内部抵抗係数

混合を考慮した場合の内部抵抗係数は、2-3-3で述べたように混合による付加摩擦力の影響がある。3-1で得られている内部抵抗係数は、その影響が無視し得る場合のものである。したがって混合を考慮した内部抵抗係数 f'_i は、(2.3.2)式に(3.2)式および(3.8)式を用いることによって、

$$\left. \begin{aligned} f'_i &= f_i + f_{ia} = 0.35 \psi^{-0.5} + 2E \\ \therefore f'_i &= 0.35 \psi^{-0.5} + 4 \times 10^{-3} Fr_i^3 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.10)$$

となる。この f'_i は、塩水くさびの形状から逆に(2.4.5)式を用いて求めることもできる。ただし実験で得られる f'_i は、(3.10)で明らかなように、 E が非常に小さく $f'_i \approx f_i$ に近い結果となる。しかし混合が進んだ場合や河口部では、 E による影響がかなり大きくなる。

図-3.1 実験水路概念図

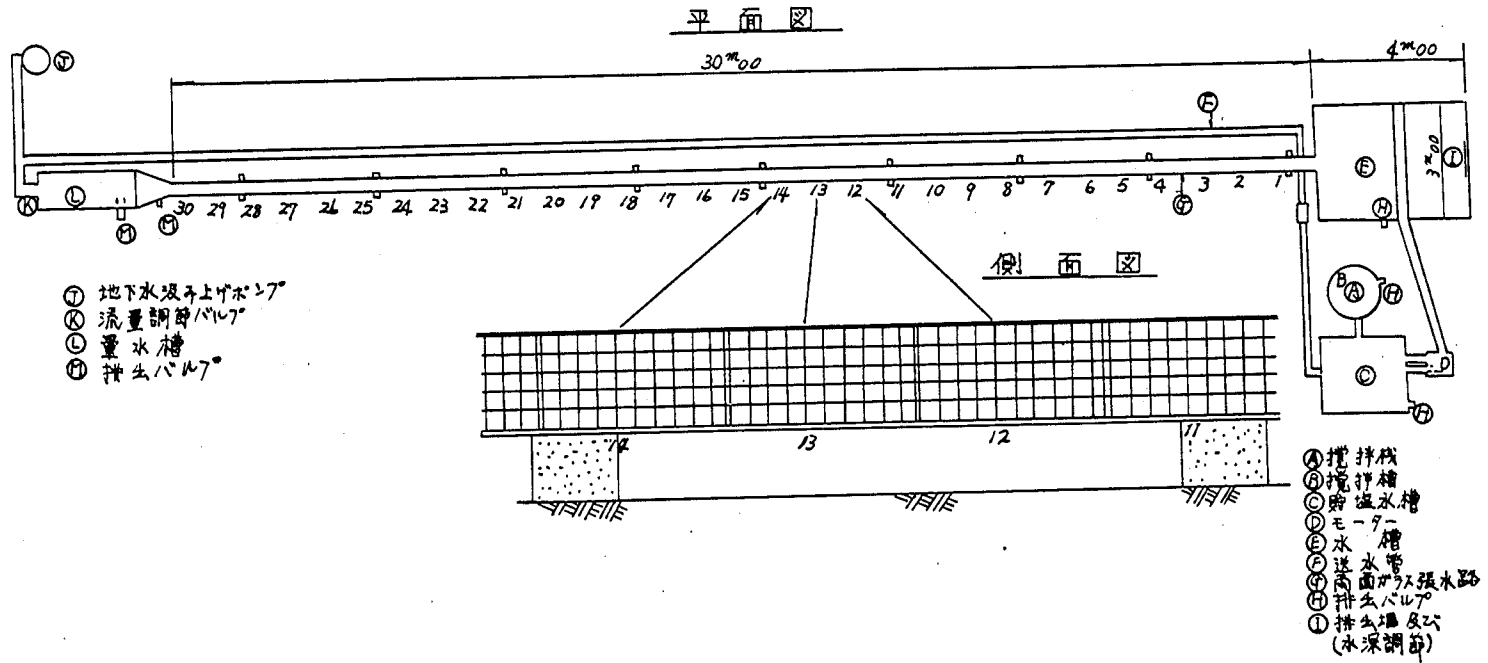
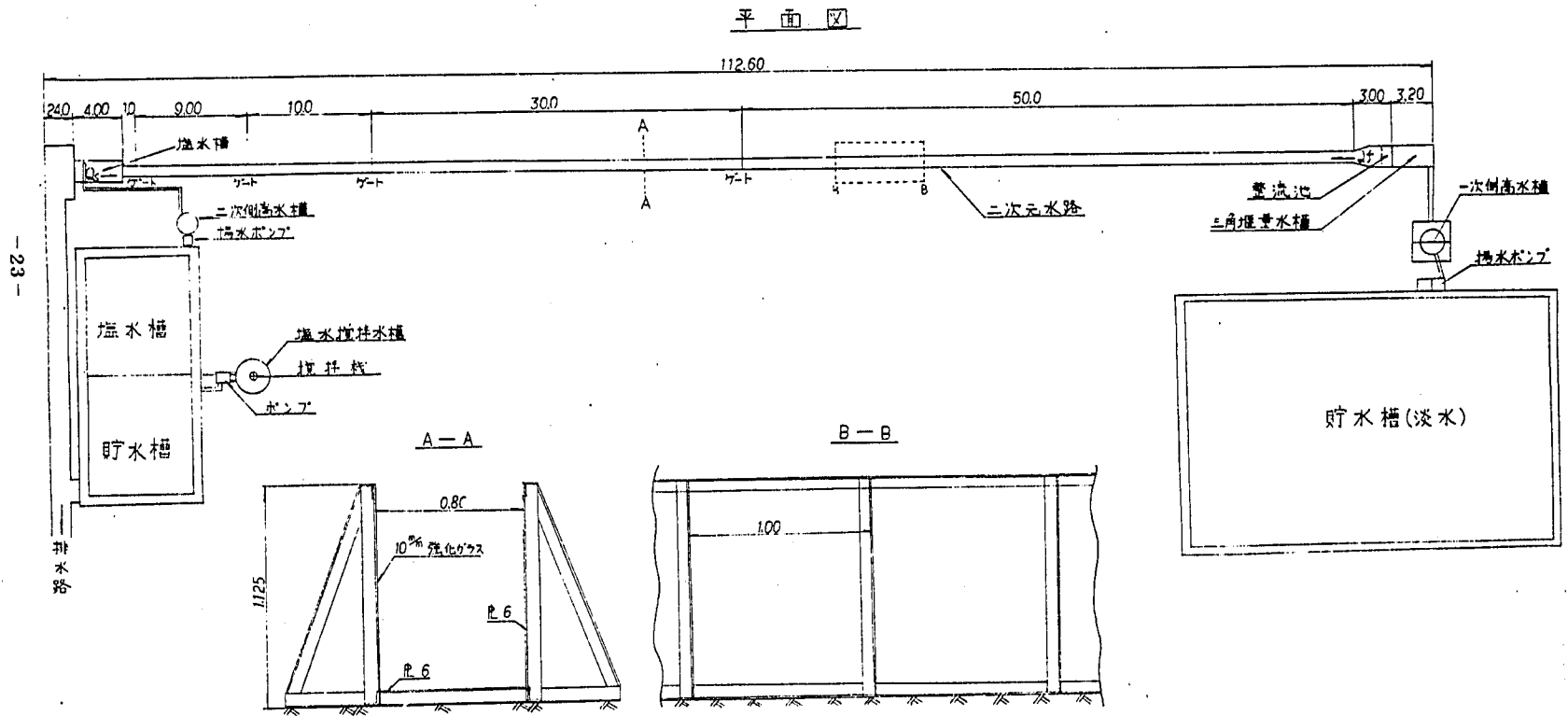


図-3.2 大型密度流二次元水路

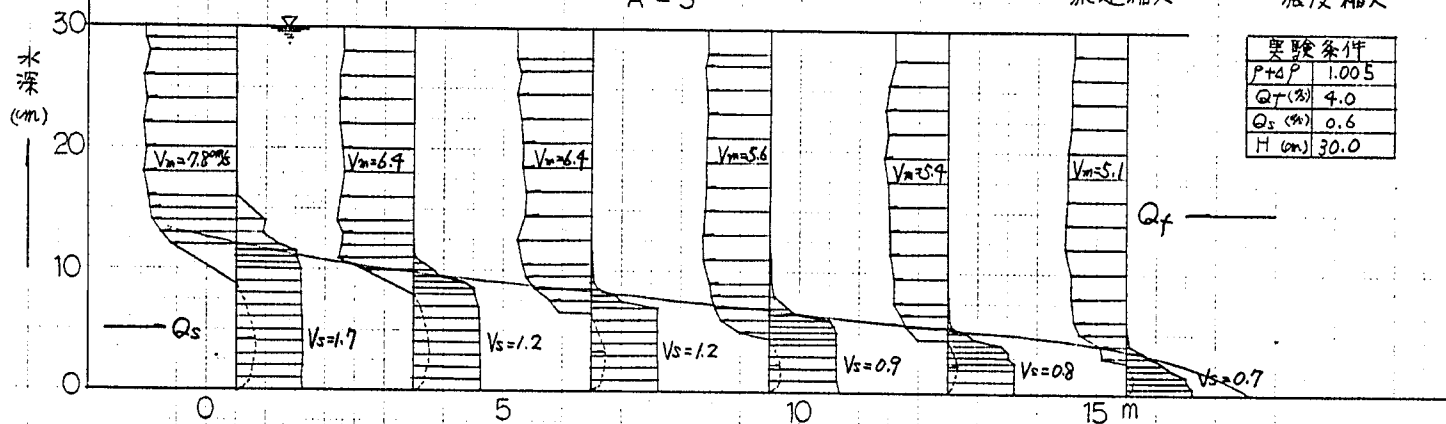


3.3.1 浓度、流速分布纵断面图

A-3

流速缩尺
0 5 10 $\frac{cm}{s}$

浓度缩尺
0 1.005 1.01



A-6

实验条件	
$P+4P$	1.010
Q_f (%)	4.0
Q_s (%)	0.97
H (cm)	19.87

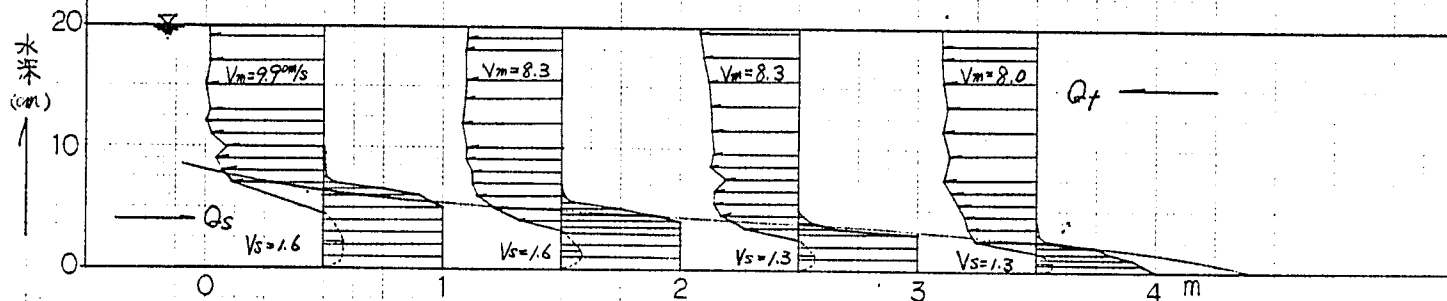


図-3.3.2 濃度・流速分布縦断面図

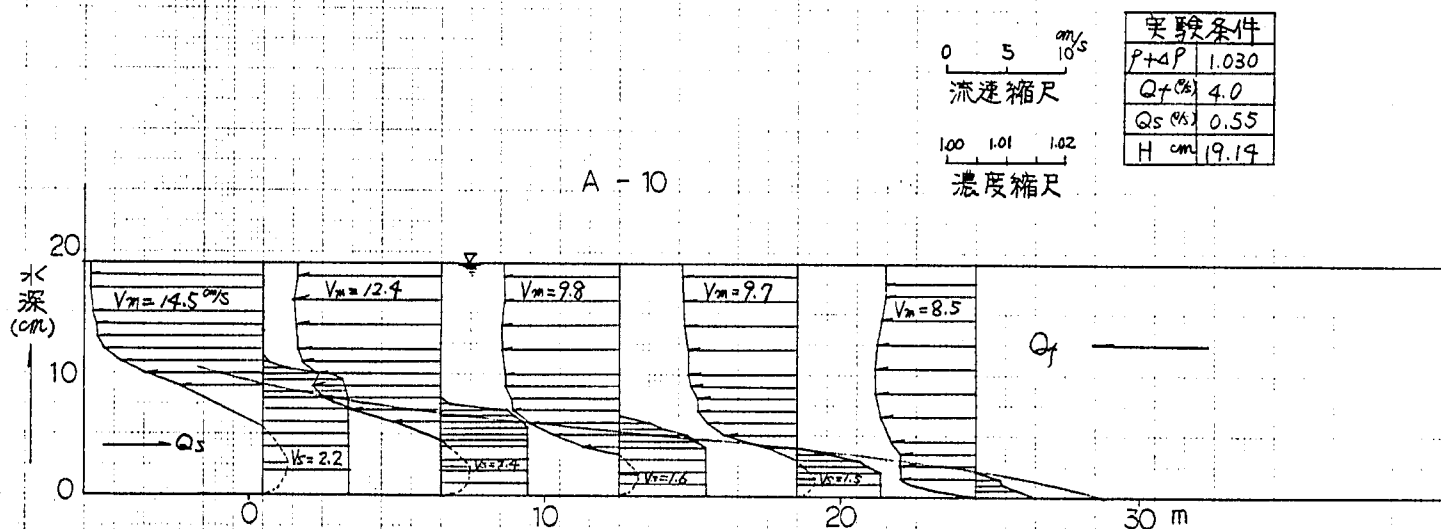


图-3.3.3 浓度、流速分布纵断面图

b-3

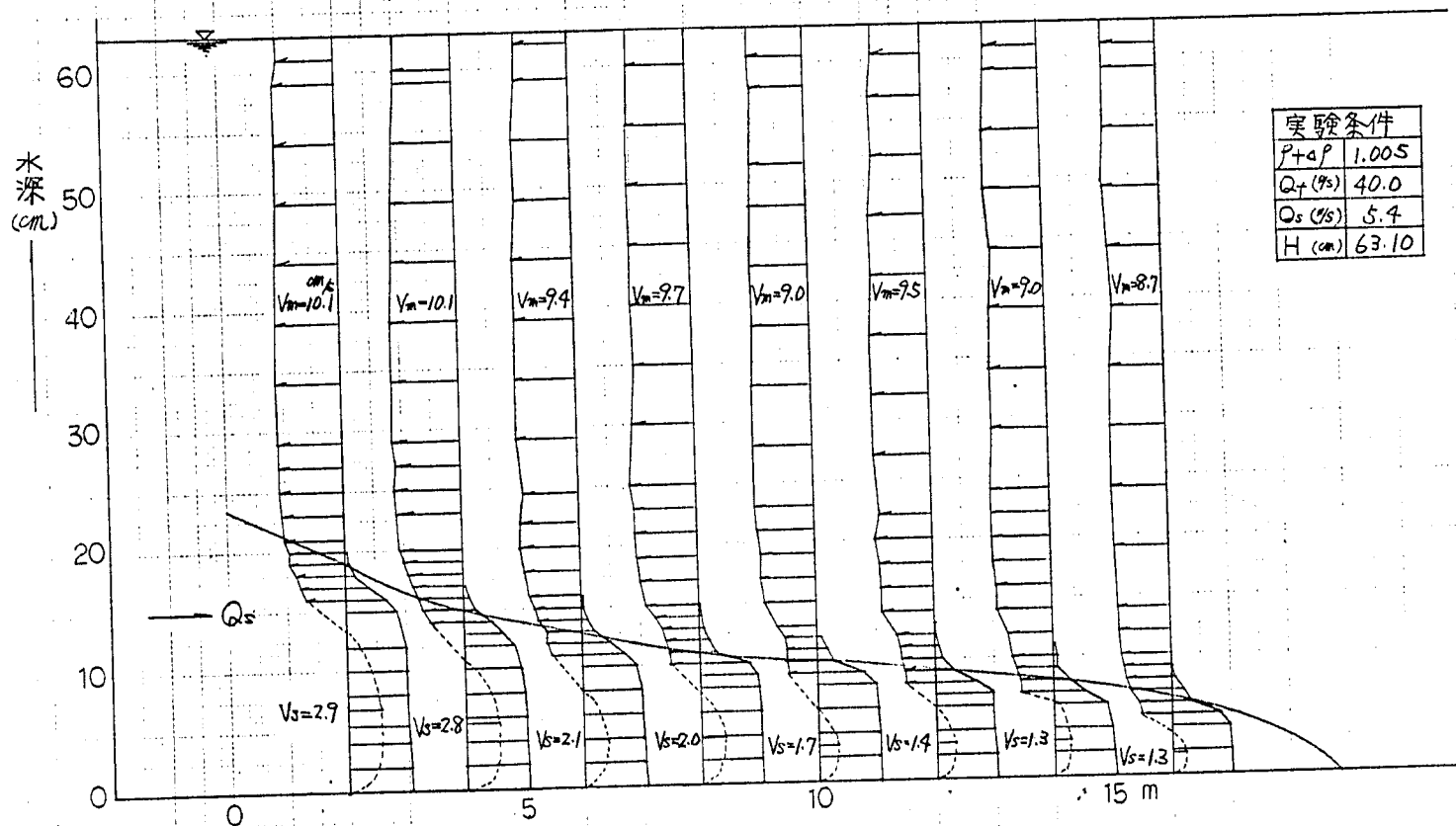
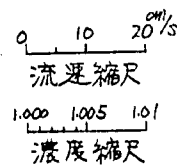


図-3.3.4 濃度・流速分布縦断面図

0 10 20 cm/s
流速縮尺
1.00 1.005 1.01
濃度縮尺

実験条件	
$P+4P$	1.0105
Q_+ (%)	40.0
Q_s (%)	3.6
H (cm)	54.99

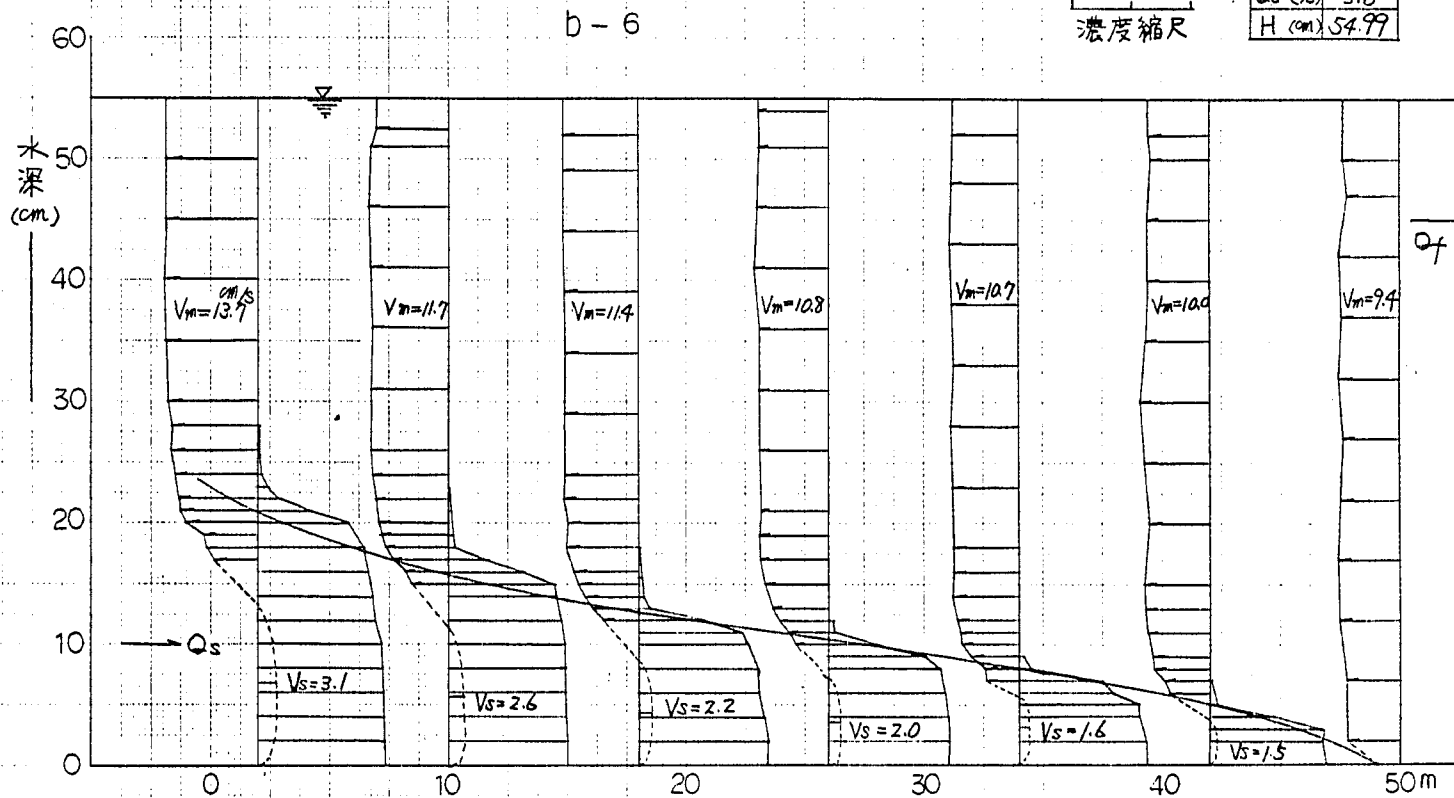
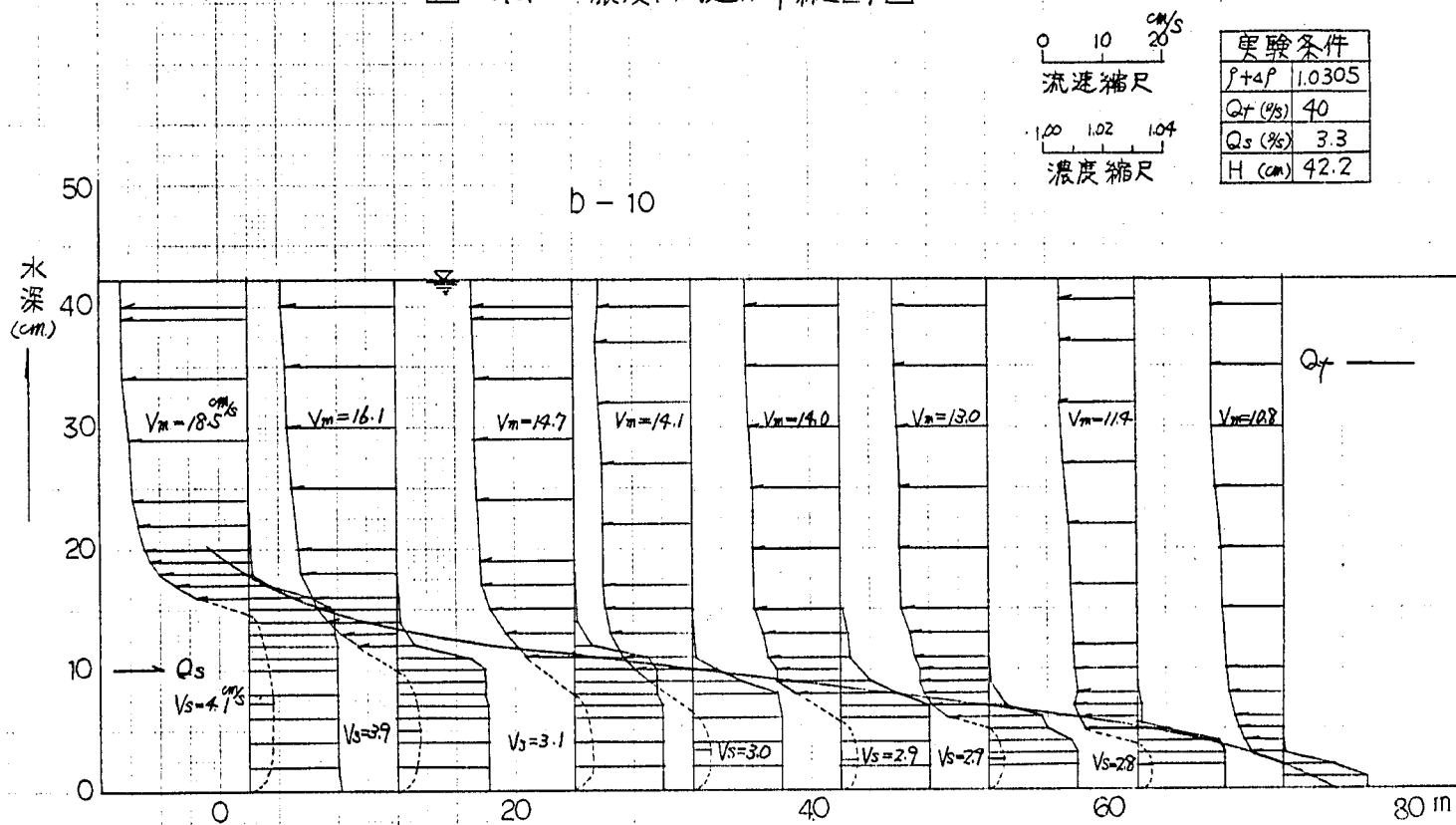


図-3.3.5 濃度・流速分布縦断面図



3.3.6 濃度、流速分布縦断面図

流速縮尺
0 5 10 cm/s

濃度縮尺
0 1.005 1.01

実験条件	
$P+4P$	1.006
Q_f (%)	40.0
Q_s (%)	
H (cm)	61.17

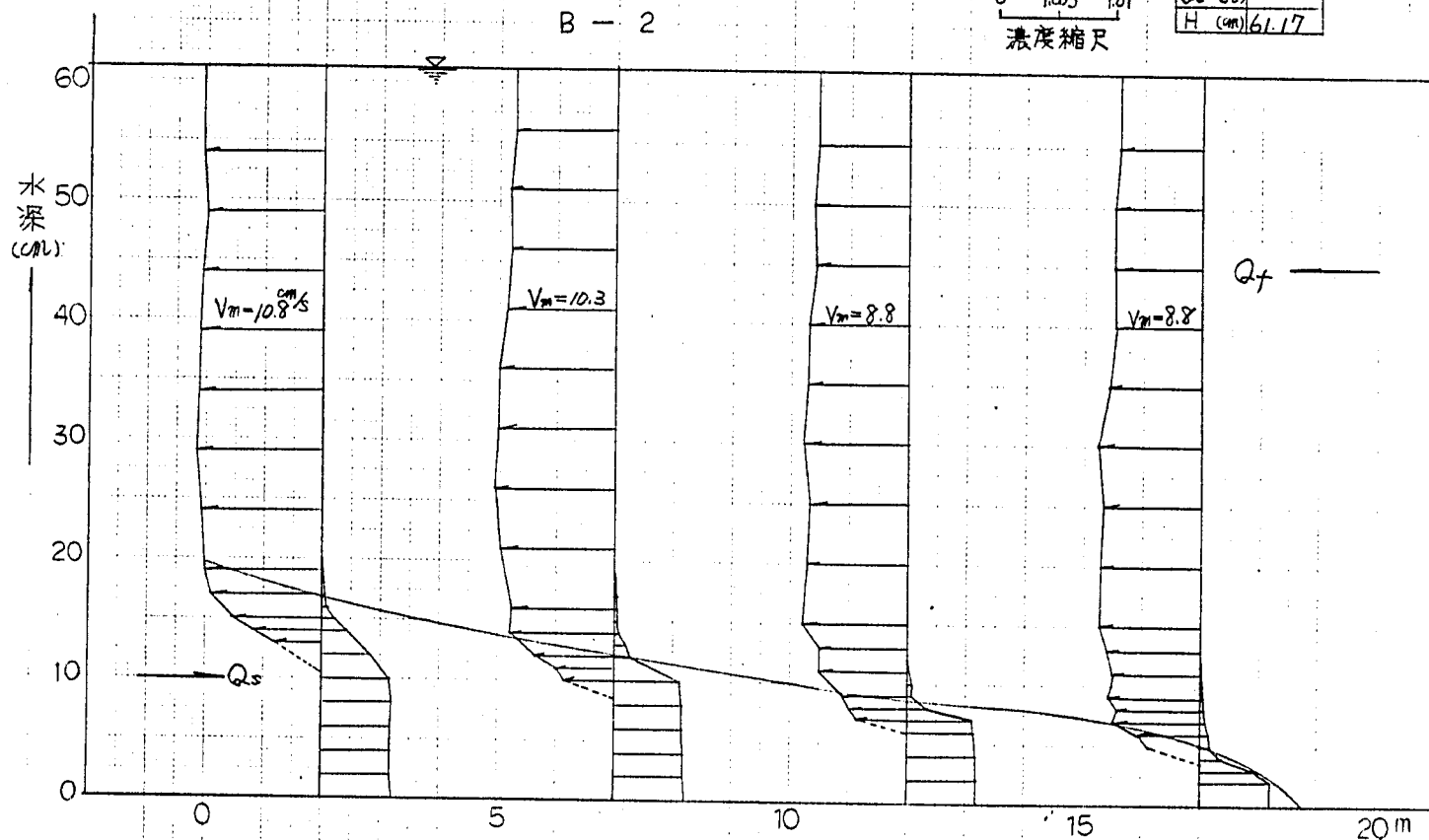


图 3.3.7 浓度、流速分布纵断面图

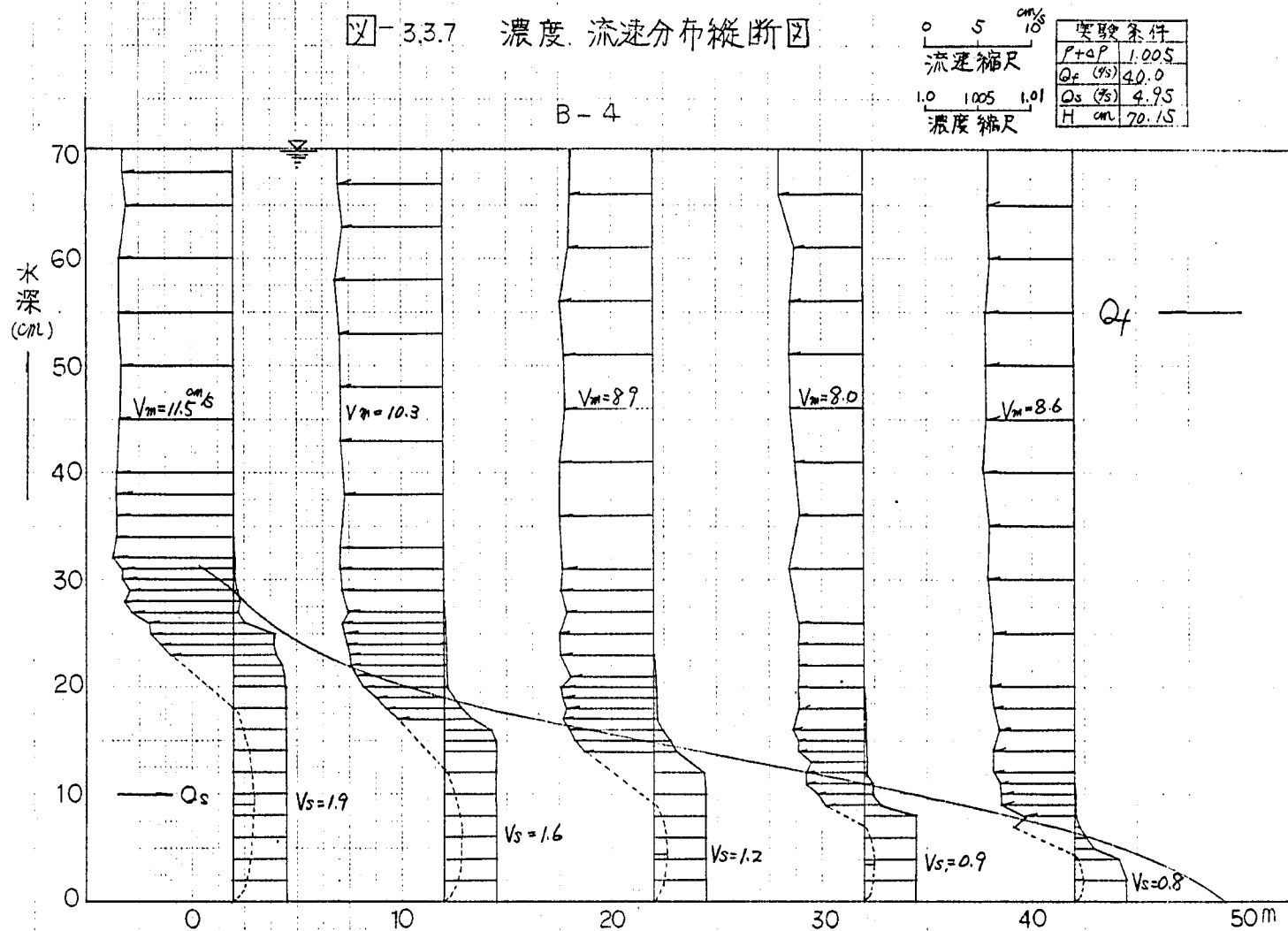


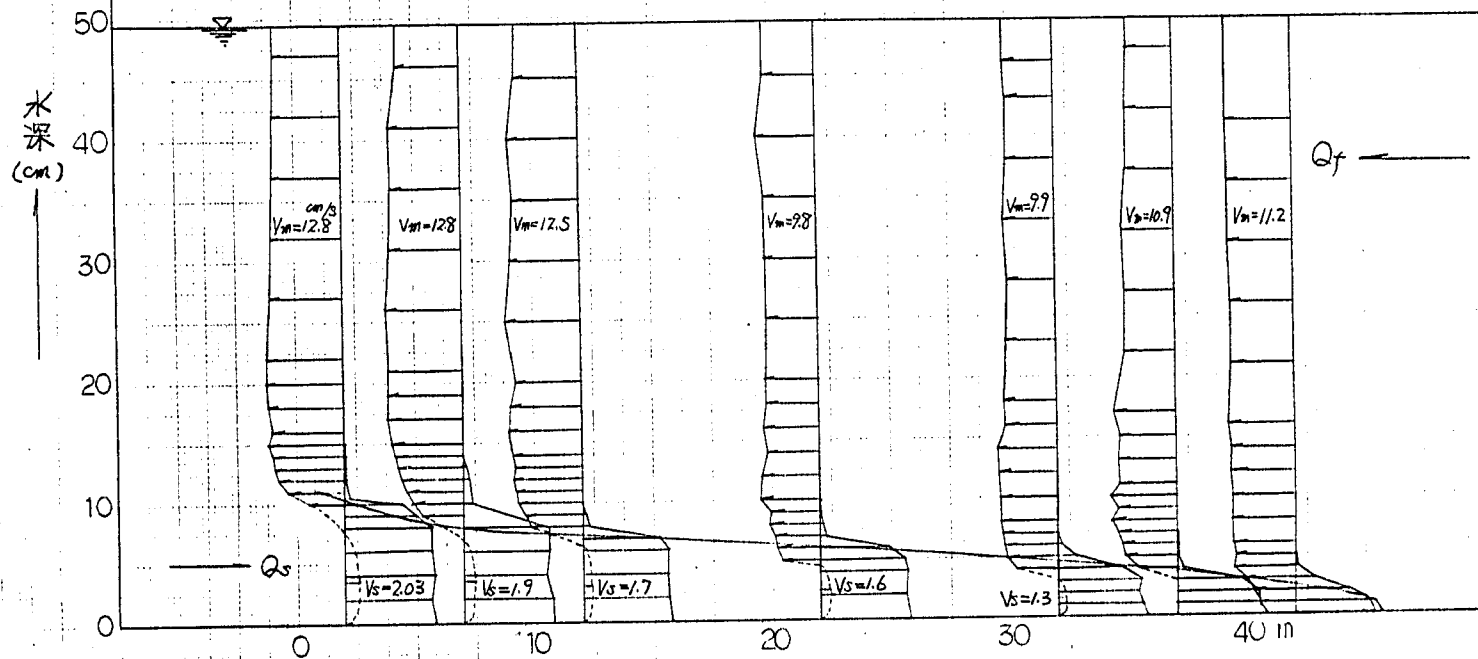
图-3.3.8 浓度、流速分布纵断面图

流速缩尺
0 10 20 $\frac{cm}{s}$

浓度缩尺
1.00 1.02 1.04

实验条件	
$P+\Delta P$	1.030
Q_T (%)	40
Q_S (%)	3.3
H (cm)	49.47

B - 8



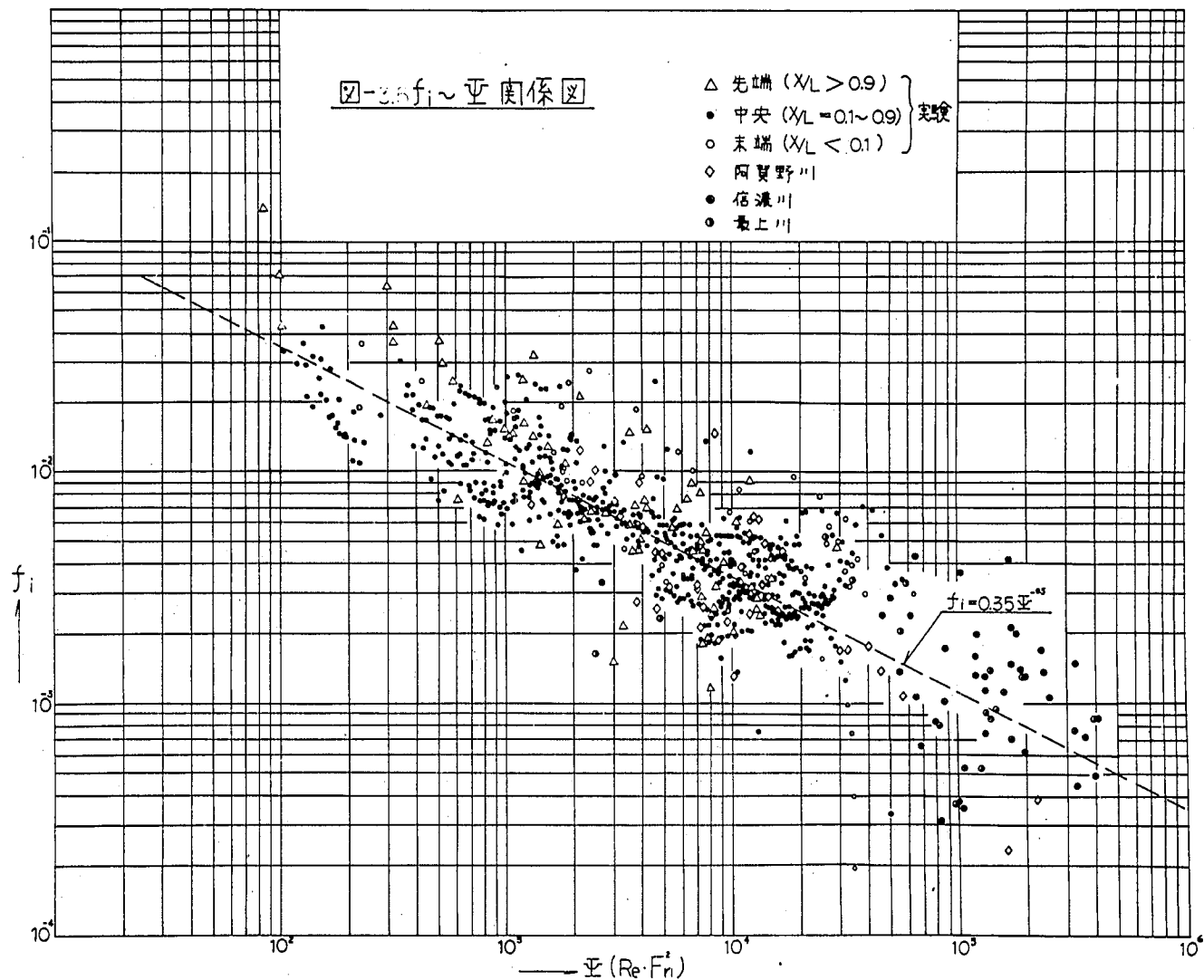
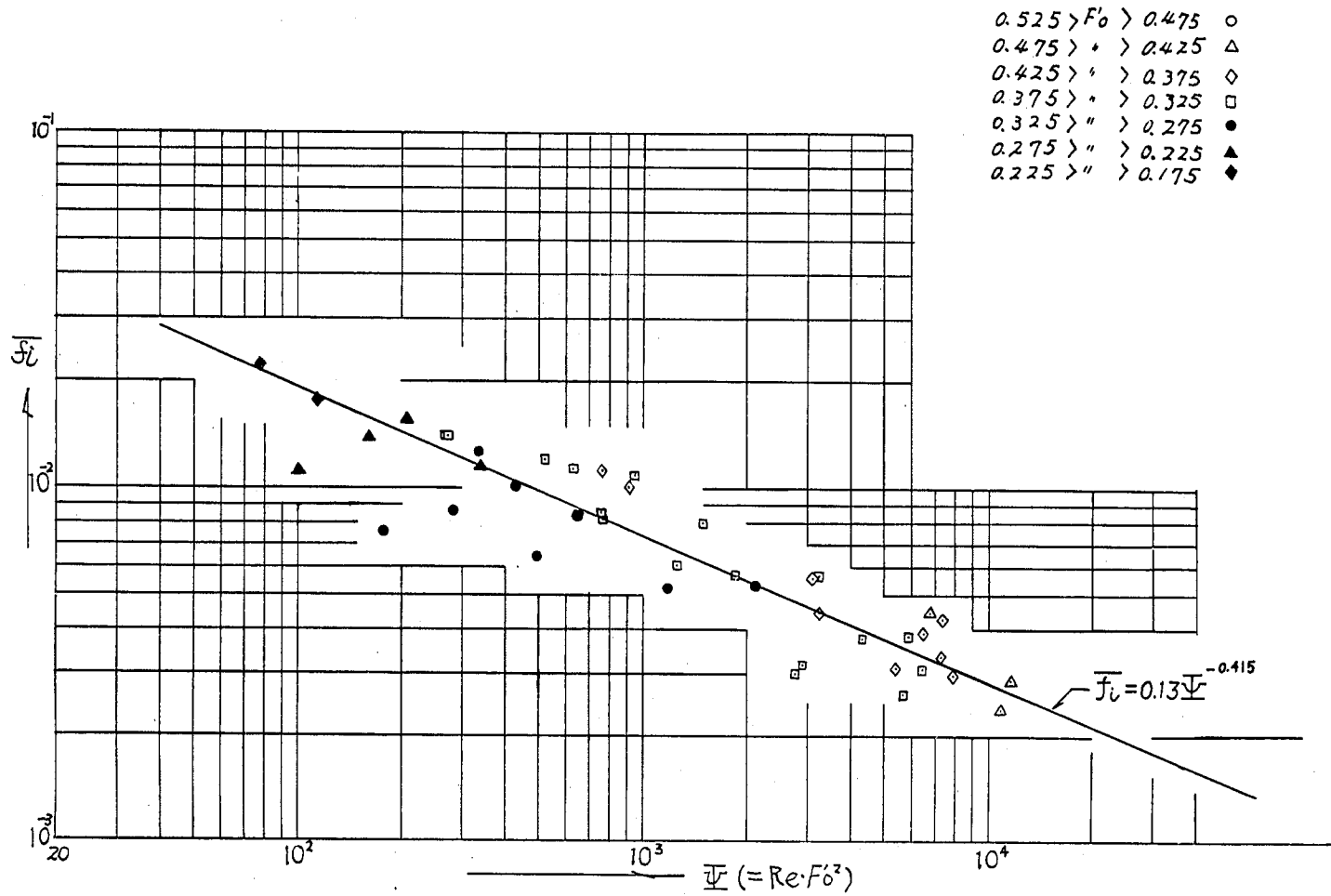
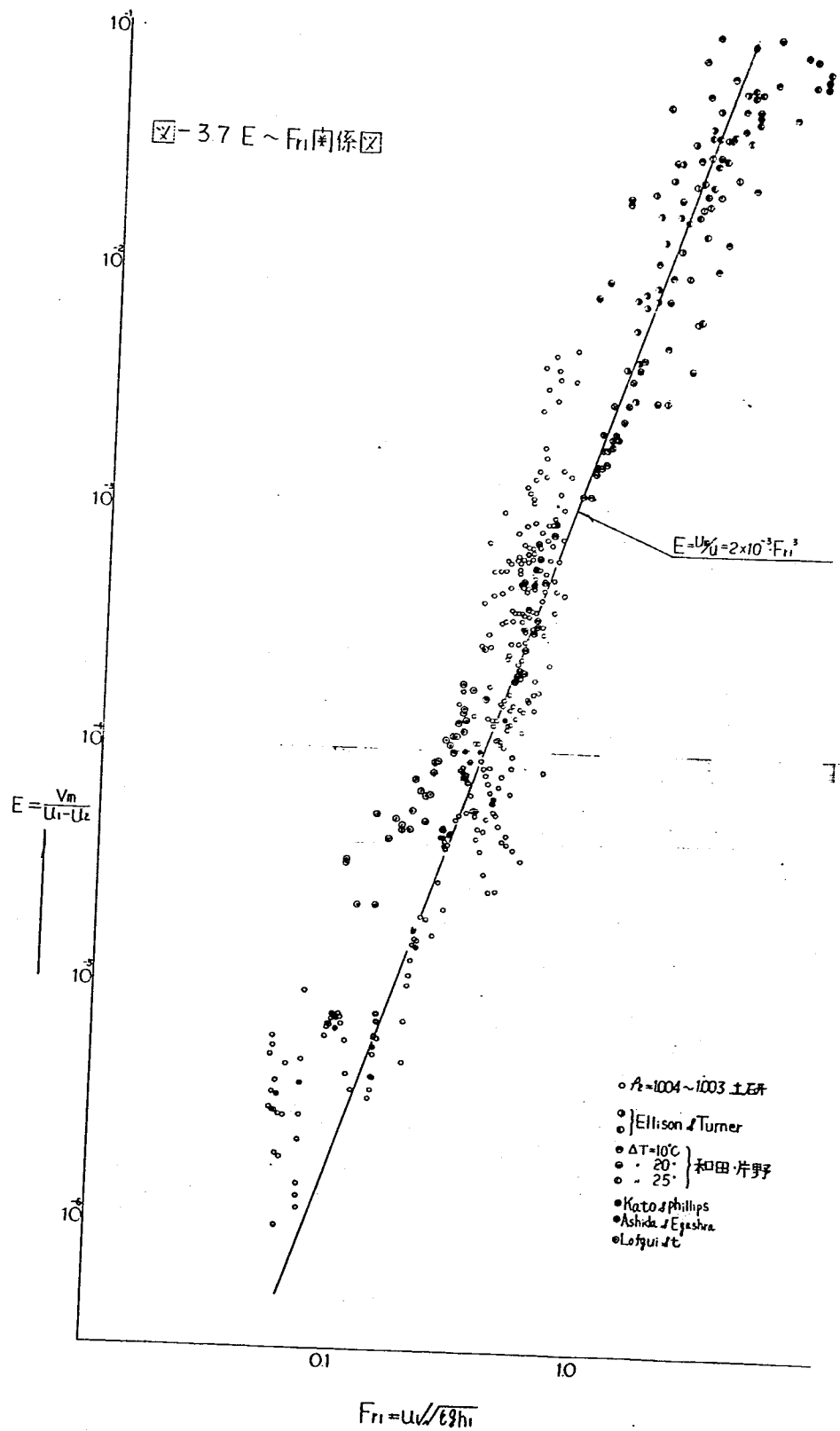


图-3.6 $\Psi \sim \overline{f}_L$ 关系图





第4章 塩水遡上の実測値と解析結果

塩水くさびの二層境界面形状を算定するための計算法およびそれに必要な境界面抵抗係数や連行係数についてこれまで述べたが、ここでは、実測例をもとに各計算式の適合性について検討を行う。

4-1 塩水くさびモデルの問題点と適用範囲

このモデルでは次の各項目の仮定を行っており、妥当性と適用範囲の検討が必要である。^{10)・11)}

- (1) 下層における塩分濃度を一定とし、混合を考慮した場合塩分は下層から上層へ連行されるものとし、その逆は無視する。
- (2) 上層に連行された塩分は短い区間において完全に混合し、平均濃度で代表しうる。
- (3) 境界面抵抗係数は(3.2)式を用い、混合を考慮した場合(3.10)式とし、連行係数は(3.8式)を用いる。

この他にも問題となる仮定はあるが、それらについては逐次ふれるとする。図-4.1は、下層塩分濃度の縦断変化を示す例である。緩混合の河川であっても弱混合の状態が存在すればその時点をとりあげている。これよりみると塩水くさびの上流端付近では、不定流効果、河床形状の影響、および履歴現象などによって(1)の仮定の条件は成立しない。したがって、(1)の仮定のもとでは塩水くさび長が若干長く計算される可能性が考えられるが、現在のところ実測値以外、縦断変化を与える方法がない。

いっぽう、混合を考慮した場合は先端付近での連行量はわずかであるからモデルに重要な障害は与えていない。(2)の条件について、濃度の鉛直分布は別途取扱わなければならないが、このモデルでは平均値を考えることとしている。(3)については3章で述べた大型水路の実験結果に基づき、かつ現地資料をも考慮した実験公式を用いる。

4-2 計算例

日本海などの潮位差の小さい緩流河川の河口では、かなり明瞭な塩水くさびの出現がみられる。図-4.2はS.48年における阿賀野川の実測例である。河道内の濃度分布は急激に変化しており、淡水部と塩水部の混合層は薄いようである。図中の淡塩境界面形状は、(2.22)式と(2.24)式および(2.45)式による計算値である。この計算に用いた横断形は、S.47年1月測量のものであるため、河床形状が塩水くさび観測時のものではなく、実測と計算の結果に先端付近で若干の差がある。しかし各計算式とも境界面位置の違いはあるが、塩水くさびの長さや形状はほぼ一致していると見なすことができよう。また(2.45)式で得られた上層平均塩分濃度、および

流量も同図に示したが、これらは境界面からの塩水の混入により、河口に向っていずれも増加している。

塩水くさびの実験では、図-3.3に示したようにくさび先端から末端部に向って淡水厚が減少すると同時に、淡水の流速が大きくなり、このため淡水と塩水の混合が促進され、くさび末端部付近では濃度勾配がゆるやかになる。また淡水の流下にもなつて下層塩水の境界面付近が連行され淡水中へ混合していく。このため淡水は河口に向って徐々に塩分濃度を増し、その結果密度の平衡を保つため、下層塩水は、わずかながら上流に向って流れることになる。観測結果では、このような現象まで明確に得られていないが、濃度および流速分布の様子は計算結果も含めて、このような考え方を裏づけるものであろう。なお下層から上層に混入した塩水は、阿賀野川の場合、上層中においてただちに完全に混合されることはない。したがって境界面付近と水面付近では塩分濃度にかなり差があるため、計算された上層の平均塩分濃度の比較には問題がある。一応実測の濃度分布より上層の平均塩分濃度を比較したのが図-4.3である。先端付近の上層平均濃度の与え方によって異なるが、実測値と傾向はかなり一致する。いっぽう混合を考慮しない計算結果は、側岸、淡水層と接する河床抵抗を考慮した(2.22)式がその影響を無視したものより界面位置が低い。これは実測時との横断形の違いが断面変化の影響に大きく現われるためと考えられる。また混合を考慮した場合も塩水くさび末端部を除いて他の形状と大差はない。これは境界面からの混入量からも判断される。すなわちこの例ではくさび末端部を除いて河道内での内部フルード数が小さく、混合の影響が少ないためである。しかし河口拡幅、あるいは河道断面を拡大する場合は、内部フルード数とともに上層への混合量も増大し、また躍層面積も大きくなるので、境界面形状とともにその影響は無視できないであろう。また混合が進んでいて緩混合に近い場合は、実測資料の解析を通して検討中であり、今後に残ってしまったが、従来のように摩擦項のみではよい結果は得られない。混合を考慮すれば上層濃度の縦断変化も含め、その適用が可能である。これらについては別の機会に詳しく報告する予定である。

4-3 混合を考慮した場合の塩水くさびの特性と計算上の注意事項

(2.12)式や(2.39)式に基づいて計算を実施する場合、河口において限界水深を与えると $dh_1/dx \rightarrow \infty$ となってしまうので、計算上は $h_1/h_{1c} = 1.05 \sim 1.1$ を出発水深とする。この場合河口付近は、 dh_1/dx の変化が大きいため区間距離 Δx を小さくとる必要がある。また(2.41)式では上流側 h_1 とともに Q_1 も未知量であるから、 Δx を小さくし、内部フルード数の変化量を少なくしても、 h_1 とともに Q_1 についても繰り返し計算を行なわなければならない、非常に煩雑である。したがって Δx を小さくしておけば、(2.39)式より下流側の水理量によって上流側 h_1 を求めても差はほとんどない。しかし、この場合でも上下流の内部フルード数に一致する Q_1 を見い出さなければならない。また水温の変化による密度差も大きいのでその考慮が

必要である。

いっぽう、混合を考慮した場合の内部境界面形状は、河道内において内部フルード数が大きければ、河口で与えられる支配断面等からして、混合を無視した場合より、塩水くさび長が短くなることを示している。実際の現象でも混合の進んでいる方が、遡上距離が短いことなどから理解されよう。ただし、下層から上層への混入が促進されると、(2.39)式 右辺第3項の影響により dh/dx も小さくなるので河口における境界面位置の下がった効果がそのまま遡上距離の減少につながるものではないことに留意する必要がある。

図-4.1 下層塩分濃度の縦断変化

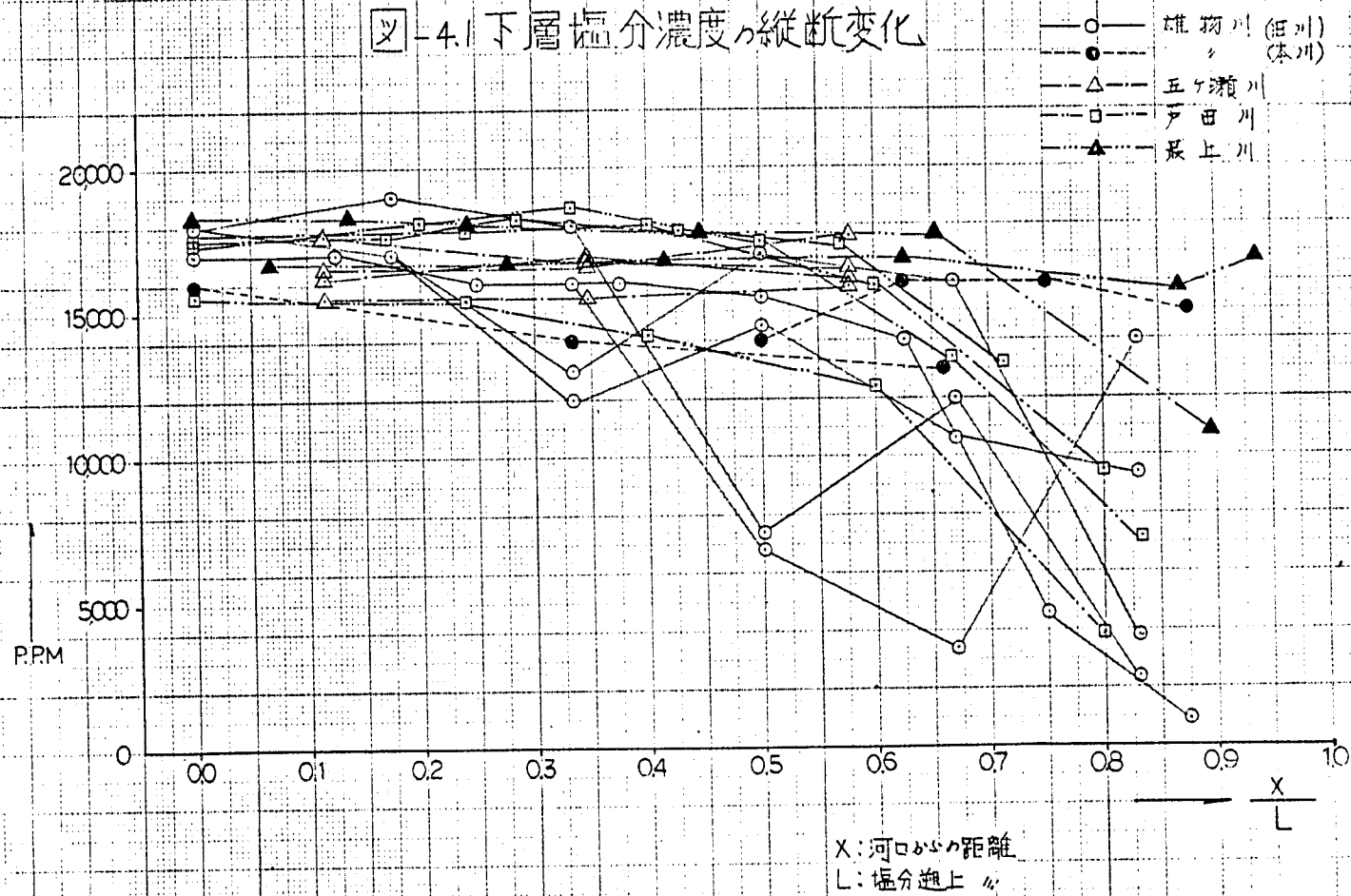


図-4.2 阿賀野川塩水くさび形状

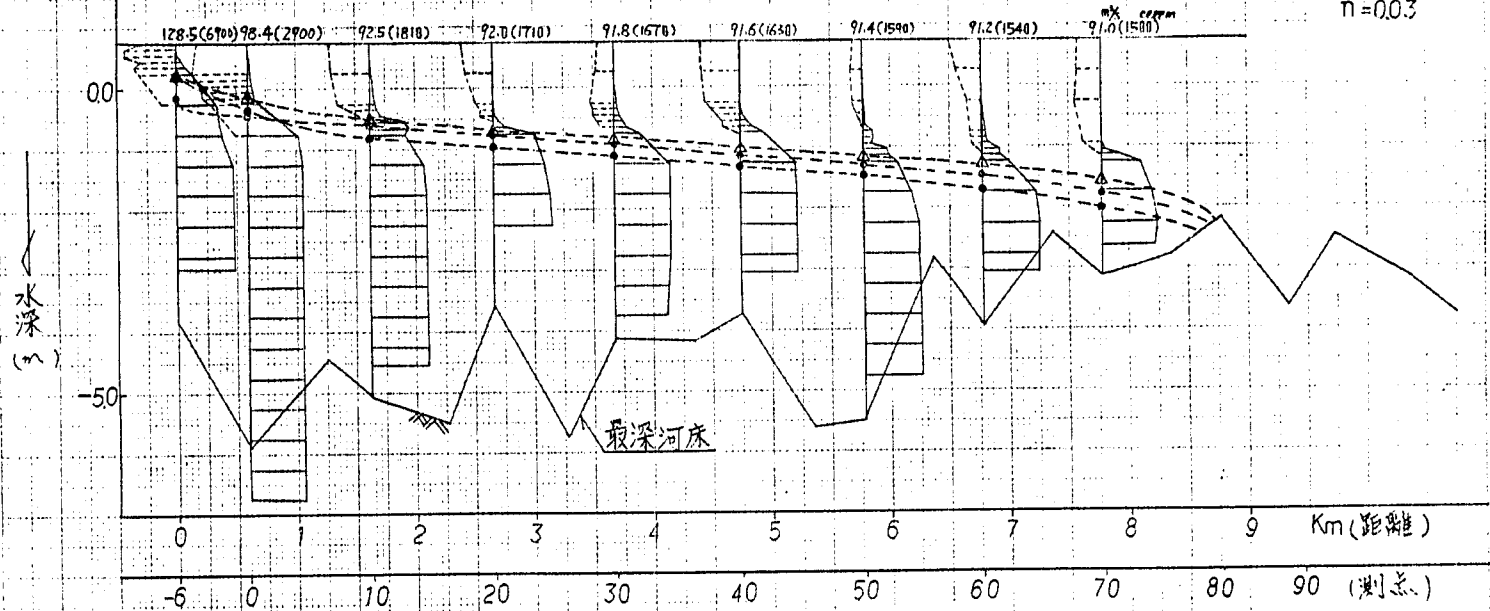
S 48, 8月 2日

$Q_0 = 91.0 \text{ m}^3/\text{s}$

$H_0 = T.P. 0.76 \text{ m}$

濃度縮尺 $0 \quad 20000 \quad 40000 \text{ PPm}$
流速縮尺 $0 \quad 0.5 \quad 1.0 \text{ m/s}$

計算形状 (2.22) 式 $C_2 = 19,000 \text{ PPm}$
" (2.24) " $f_2 = 1.024$
" (2.45) " $f_{10} = 0.9992$
 $f_1 = 0.35 \Psi^{-0.5}$
 $E = 2 \times 10^{-3} F_1^3$
 $n = 0.03$



☒-4.3 上層平均濃度变化☒

S 48.8月 2日

$Q_0 = 91.0 \text{ m}^3/\text{s}$

$H_0 = \text{T.P. } 0.76 \text{ m}$

—○— 実測値 ($h_1 = C_2/2$)
—●— " ($h_1 = 0.9C_2$)

—▲— 計算値 (2.45)式 $C_2 = 19000$
 $f_2 = 1.024$
 $f_1 = 0.9992$
 $f_L = 0.35 \text{ 距}^{-0.5}$
 $E = 2 \times 10^3 F_1^3$

Ch.P.Pm
10000

5000

0

-6

0

10

20

30

40

50

60

70

80

90 (測点)

0

1

2

3

4

5

6

7

8

9

Km (距離)

第5章 最上川河口における塩水遡上観測

5-1 はじめに

河口部における塩水の遡上現象は、潮汐、河川流等の関連において、淡塩水の混合状態が分類されることは前に述べたようによく知られている。わが国では潮差の比較的大きい大平洋側に流入する河川の河口で緩混合ないし強混合型の河口密度流が生ずる場合が多く、潮差の小さい日本海に流入する河口では、弱混合型の塩水くさびが形成され、塩水層を河道内へ奥深く侵入させる。この実河川の河道内へ遡上する塩水くさびについて、これまでの研究結果の適用性と河口流等の実態を把握するため、最上川河口部において3回（昭和49年～51年度）にわたる現地観測を行った。^{26), 27), 28)} 調査の詳細についてはあとに掲載し、ここではその結果の概要について述べる。

5-2 観測時の水理量

最上川河口における濃度、流速分布および浮子の流下位置観測時の水理量をまとめると以下のようである。

実施日	流 量	潮 位	備 考
S 49・7月17日	390 m^3/s + 京田川 ?	T・P 0.48 m	流量減水時（7日前にピーク1800 m^3/s ）
S 49・7月18日	355 m^3/s + 京田川 ?	T・P 0.46 m	
S 50・8月27日	61 m^3/s + 京田川 19 m^3/s	T・P 0.45 m	流量減水時（3日前にピーク240 m^3/s ） 波高 27日： $H\frac{1}{2}=10cm$, 28日： $H\frac{1}{2}=37cm$
S 50・8月28日	55 m^3/s + 京田川 19 m^3/s	T・P 0.46 m	
S 51・8月25日	290 m^3/s + 京田川 28 m^3/s	T・P 0.55 m	流量減水時（9日前にピーク1700 m^3/s ）
S 51・8月26日	250 m^3/s + 京田川 28 m^3/s	T・P 0.50 m	

なお潮位は観測時の平均値であり、第1回のS 49年7月17日の潮位変化量は約20 cm, 18日が10 cmであった。また第2回のS 50年8月27・28日の潮位変化量は約15 cm, 3回目のS 51年8月25日が約8 cm, 26日が約20 cmである。

5-3 河口部の流れと内部フルード数

二層流の形成される河川では、河口のように断面が急激に拡大されるところで内部フルード数 $Fr_1 = u_1 / \sqrt{\epsilon g h_1} \approx 1$ を満足するような条件が定常状態で成立つとされている。

各観測の濃度、流速分布測定結果より、表層淡水と下層塩水の平均濃度の深さ、および下層塩分濃度の9割の濃度の地点（ $Z_c = 0.9 C_2$ ）を境界面とし、各測点の内部フルード数を求めた。

これらを平均流速および表面流速とともに縦断的に示したのが図-5.1~5.3.4である。塩水くさび上の流れは、砂州部最狭川幅地点（S49年7月河道縦断距離約160m, S50年8月約120m, S51年8月観測時約190m地点）より下流で最大値を示し、やがて流れの拡がりとともに次第に遅くなっている。

また河口外では平均流速と表面流速の差は大きく、河口外では流れが遅くなるのにもかかわらず、その差はほぼ一定の傾向を示している。内部フルード数も同様河口最狭部を過ぎた地点で急激に大きくなり、その後いくぶん小さくなって、再び沖に向ってその値が増加している。この内部フルード数は河口外十分沖では再び減少するものと予想されるが、それらの現象をも把握するにはさらに沖合いまでの広範囲な観測が必要である。しかし以上のように塩水くさびでは、河道内で内部フルード数が1より小さく、河口外では1より大きくなり、河口部で大体内部フルード数が1となる。その位置は流量や河口砂州形状によっても異なるが、最狭部断面より下流側で、その距離は流量の増大とともに大きくなっている。

いっぽう、塩水くさびの実験では、内部フルード数が1に近づくにしたがい、急激に塩水の混入量が増大し、境界面から間欠的に渦が発生して、それが流下する現象が見られる。この渦は発生後まもなく急激に成長して、いわゆるジャンプ現象となる。この渦の発生領域では、表面流速が大きくなるが、その下流では流路幅拡大の効果により、流速が減衰する。このような現象は実験によって得られているが、図-5.1~図-5.3.4の様子はこのような考え方を裏づけるものであろう。²⁹⁾

5-4 境界面抵抗係数と二層間混合量

境界面抵抗係数については第3章で述べたが、実測結果（第2回）より抵抗係数 f_i を求め、図-3.5の $f_i \sim \psi$ の関係図に示した。いっぽう二層間の連行係数についても(3.8)式が得られている。ここでは今回の観測結果より、上層塩分濃度の縦断変化を検討してみる。図-5.4は実測による河口外での上層塩分濃度の縦断変化図である。これによると上層塩分濃度は、河口から遠ざかるにつれて急増し、流れの拡がりとともに淡水厚も減じ、やがて流速も減衰して海水と完全に混合するものと考えられる。

この上層平均塩分濃度は、(3.8)式によって求めることができるが、河口外の場合、拡がり幅や横断方向の境界面形状、したがって断面積の与え方、また河口外では横断方向に上層塩分濃度も異なるため、そのまま適用しても実際の現象を把握することはむずかしい。一応ここでは実測値の拡がり幅を与え、濃度分布図より得た境界面形状図-5.5より、その時の断面を

$A = \frac{b_1}{4} (3B + B_0)$ とし、（ここに B ：その断面における拡がり幅、 B_0 ： $Fr_1 = 1$ となる位置の川幅）(3.8)式によって上層平均塩分濃度を算定し、実測値と比較したのが図-5.6である。

(3.8)式による連行係数 E は、河口外に向って内部フルード数が大きくなるとともに増大する

ため、拡がり幅とともに混合量が急増する。また計算では河口外 -1200 m 付近で海水とほぼ混合するような結果となっており、下層濃度 ($C_2 \approx 19000$ ppm) の約 $1/2$ 以上の上層濃度となる範囲では実測値と一致しない。実際は図-5.3.1~2 に示してあるように内部フルード数は急増しておらず、河口外十分沖では再び減少すると考えられるので、ある程度沖合になると実際の混合領域が他の影響も含め、拡がり幅全体ではないこと、あるいは河水流下にとまらう混合領域外とも考えられる。

いっぽう河道内塩水くさびの先端まで観測した第2回の資料より塩水くさびの上層平均塩分濃度を同様比較したのが図-5.7 である。塩水くさび先端付近では、不定流効果あるいは河床の影響等で境界面位置を $Z_c = 0.9 C_2$ とした場合、上層の平均塩分濃度は、1000~1500 ppm となる。計算では塩水くさび先端付近の上層濃度を 1000 ppm としたが、図-5.7 では 1500 ppm とすれば実測と計算値はほぼ一致する。この計算に用いた実測の境界面形状とその計算値を示したのが図-5.7.1~5.7.2 であり、境界面からの塩水混入量は、河口に向って内部フルード数が大きくなるとともに多くなり、このため河口先端および河口外では河川の自流量よりかなり多い流量が流れることになる。

5-5 流れの拡がり幅

河川から海上へ拡がる流れは密度効果が大きい。図-5.8 は観測結果の表層流の拡がり状況図である。

ここでは、この実測値に基づき $Fr_1 \approx 1$ となる点を基準として海域における河川水流の拡がり幅について考察する。^{28), 30)} 拡がりの境界の定義は明確ではないが、基準線における両端からの流線とする。しかし、最上川の例では任意の二点の流線によってもほぼ同様の整理ができることが判明している。図-5.9 は石狩川と同様な方法でまとめたものである。図-5.10 は基準点の上層水深 h_{10} ($= h_{1c}$) と幅 b_0 の幾何平均で無次元表示したものである。これによれば、MIT³²⁾ および林・有田³³⁾ の理論曲線とは異なるが、岸・板倉の実測値とほぼ一致し、aspect ratio h_{10}/b_0 の影響があまり顕著でないことがわかる。最上川および利根川の場合には、片側に長い導流堤状構造物があり、また波や沿岸流などの影響も含まれているものであるが、これらの要因により大きく支配されているとは考えにくく、実験値と非常によく一致したという事実は重視してもよいように思われる。内部ジャンプはスケールの大きい現象であり、わん曲流や河口付近の横断形の影響をかなり超越するので、基準点を $Fr_1 = 1$ の断面とすることは適当であろう。なお、導流堤先端より沖側の拡がりや浅瀬における碎波の影響については別途の考慮が望まれる。なお、図-5.10 でジャンプ渦領域と思われる区間を除くと、ほぼ直線的になっており、岸・板倉の実験値とは一層同様の傾向となる。

図-5.1 流速と内部フルード数の縦断変化

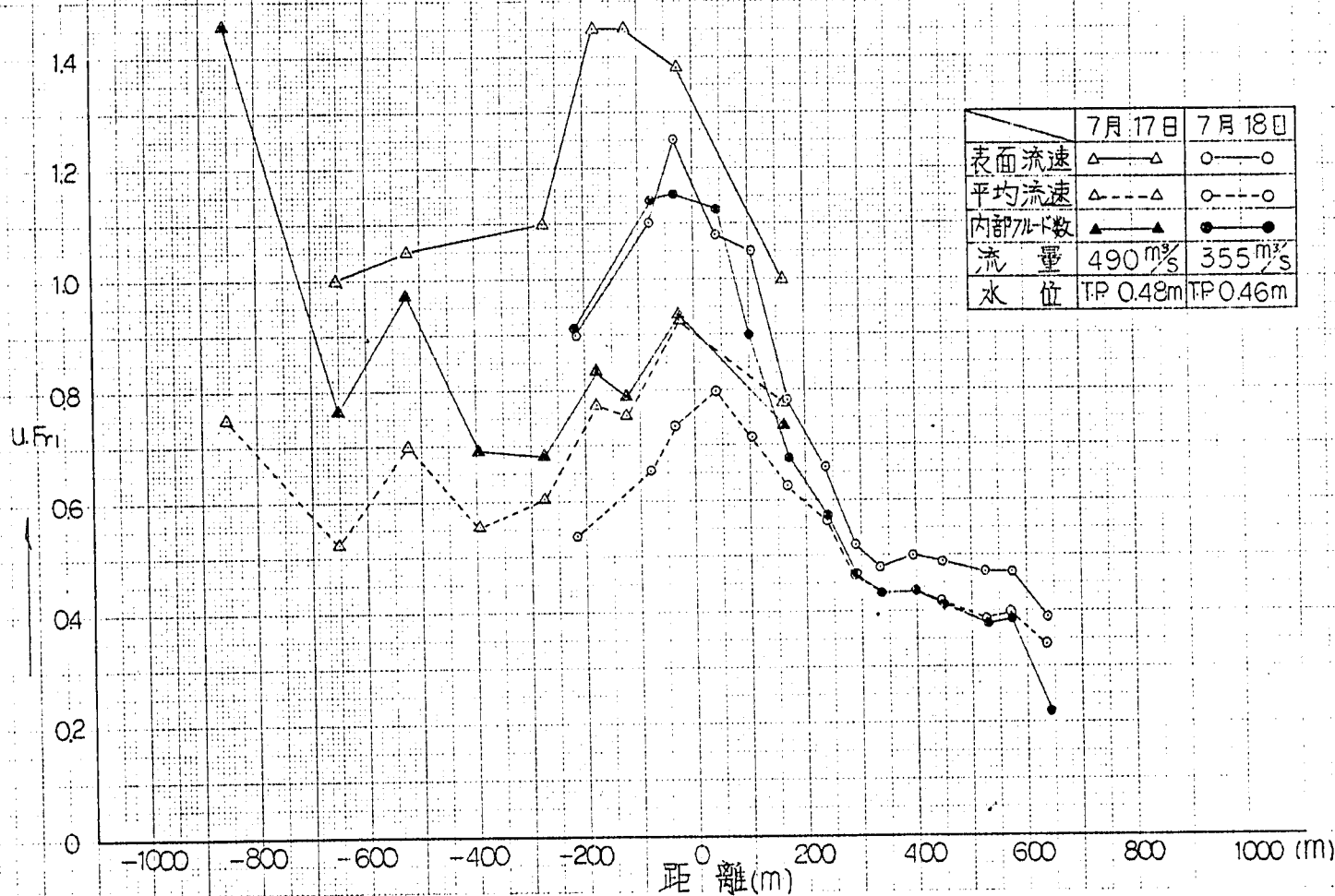
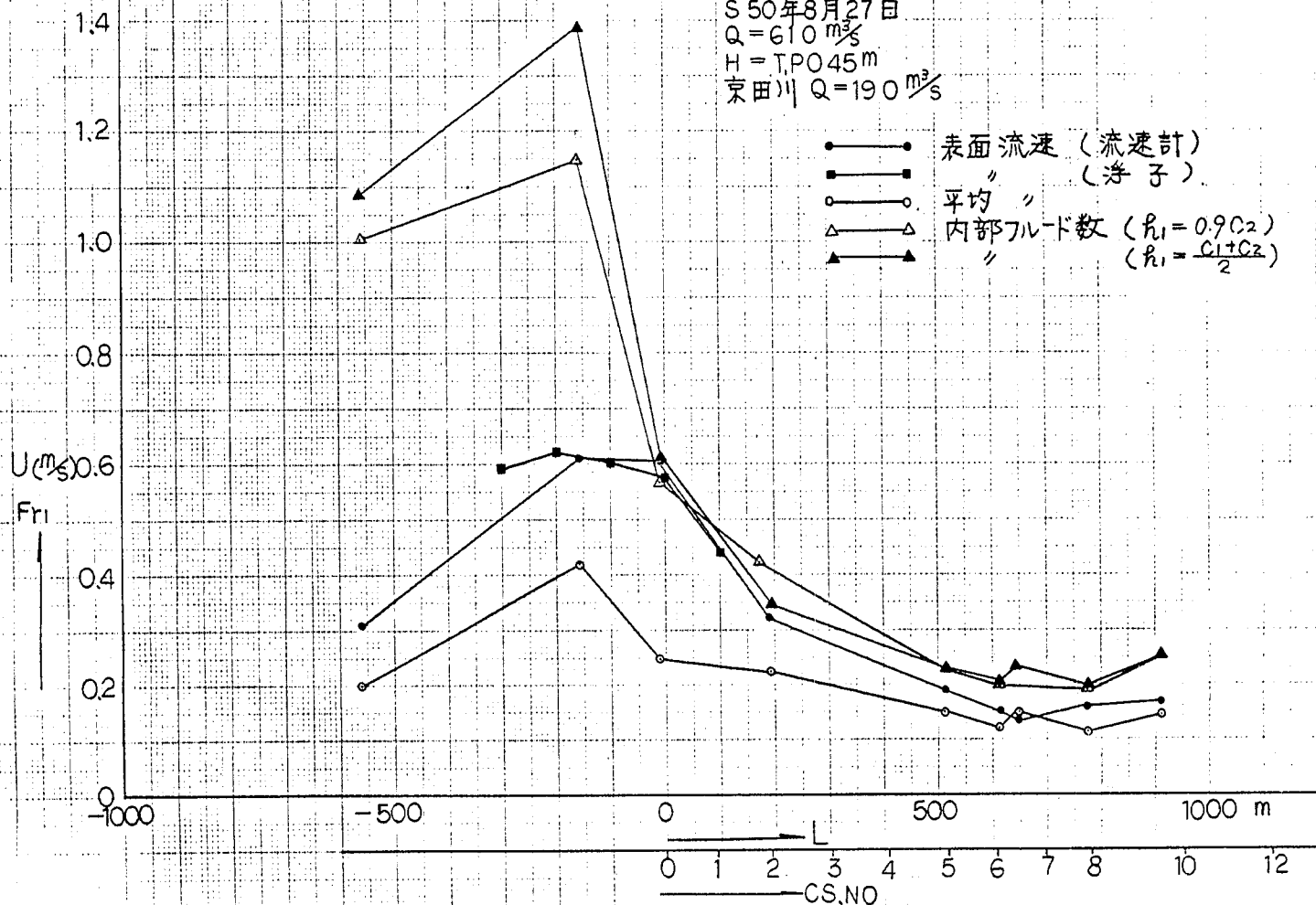


図-5.2.1 流速と内部フルード数の縦断変化

S 50年8月27日
 $Q = 610 \text{ m}^3/\text{s}$
 $H = \text{TP045 m}$
 京田川 $Q = 190 \text{ m}^3/\text{s}$



□ - 5.2.2 流速と内部フルード数の縦断変化

S.50年8月28日
 $Q = 55.0 \text{ m}^3/\text{s}$
 $H = T.P.O.46 \text{ m}$
 京田川 $\theta = 19.0 \text{ m}^2$

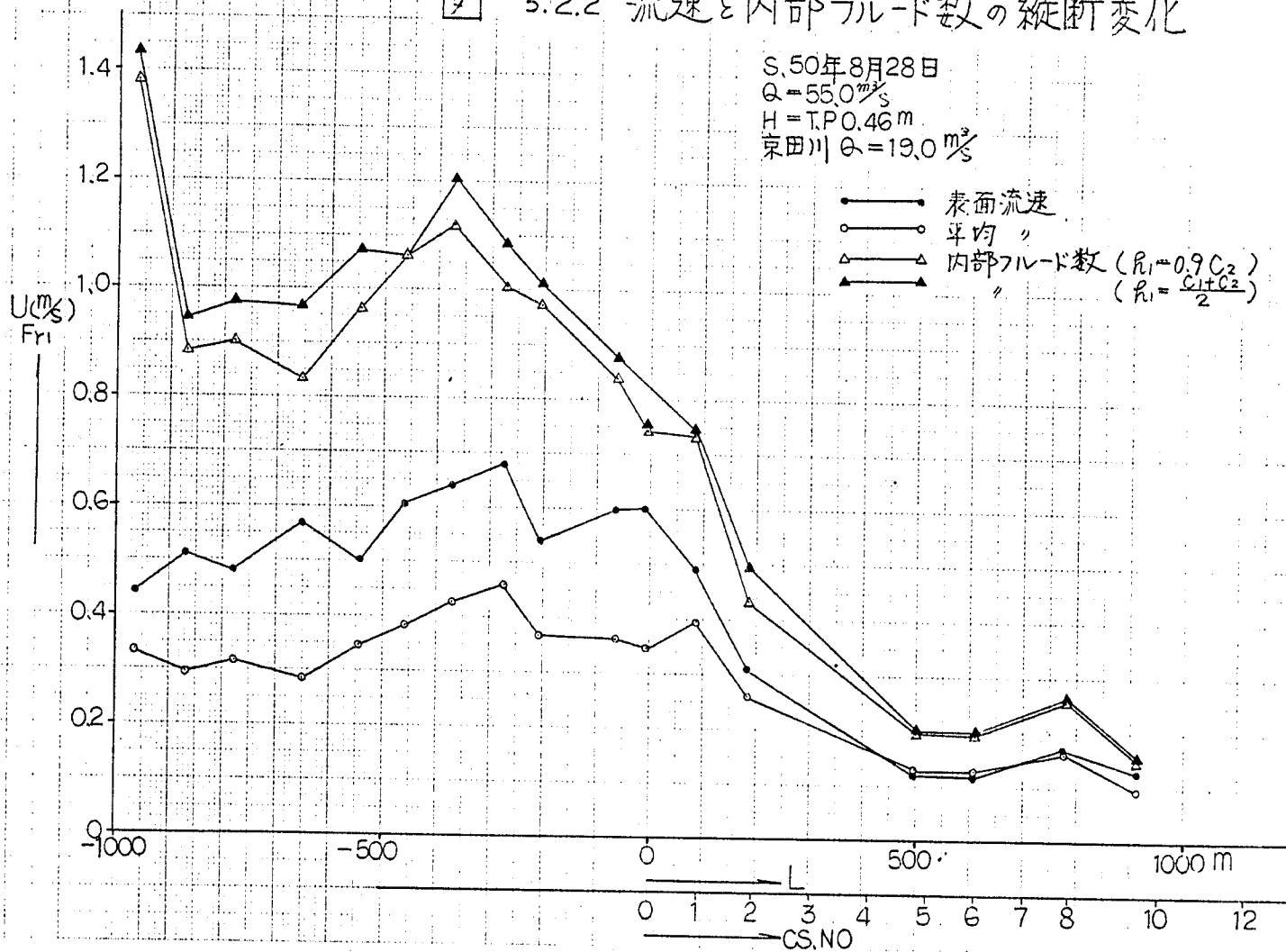


図-5.3.1 流速と内部フルード数の縦断変化図

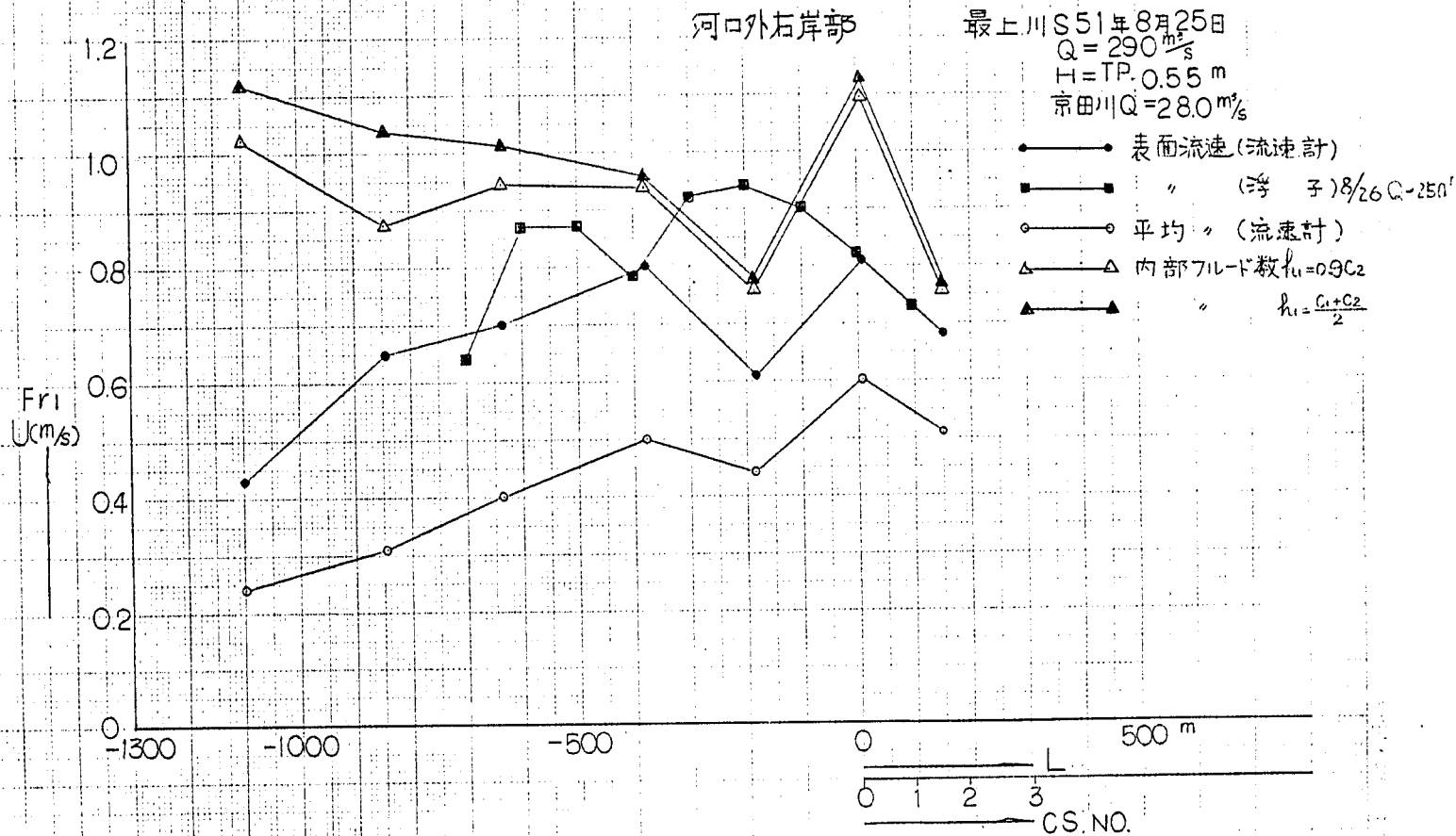
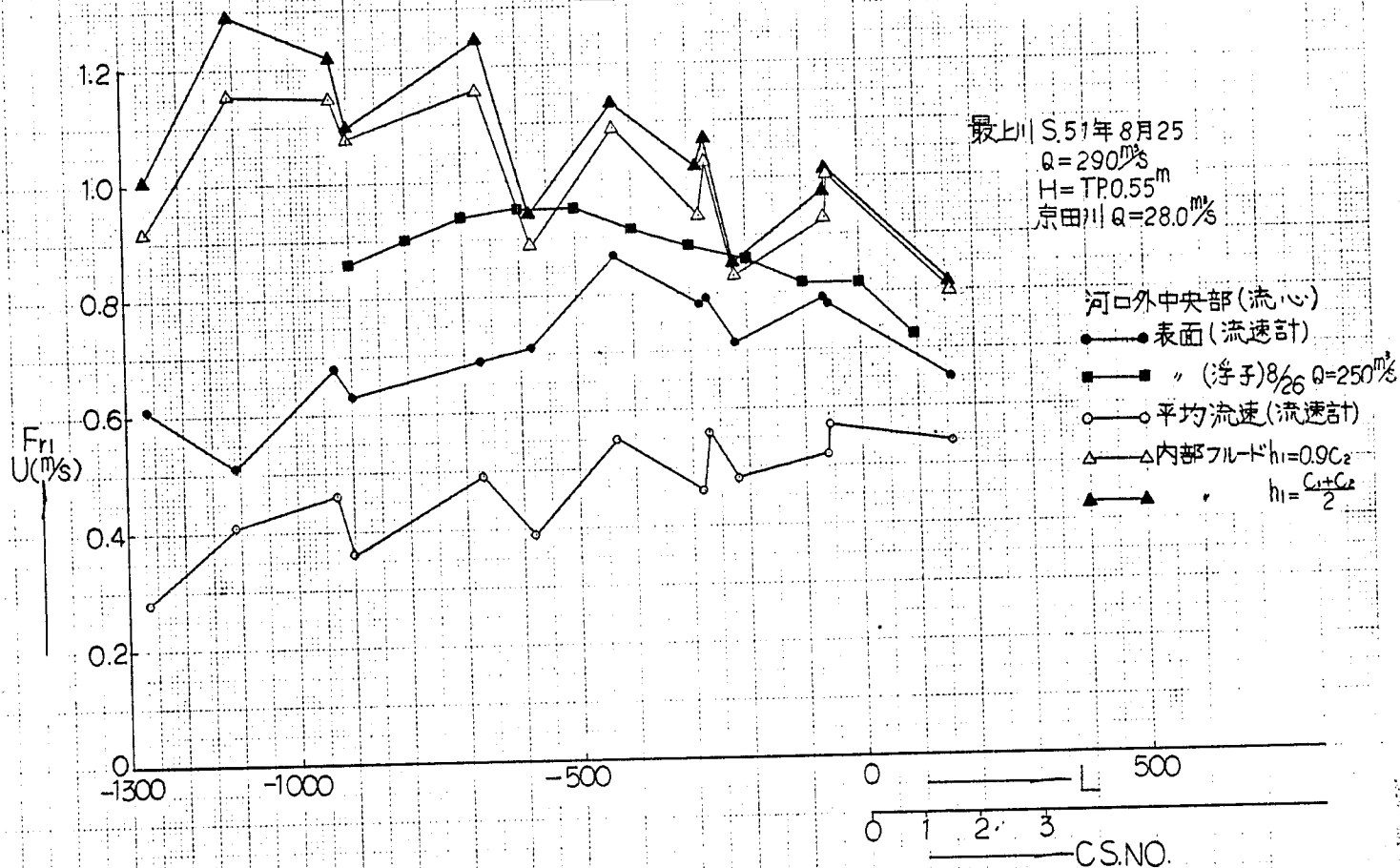


図-5.3.2 流速と内部フルード数縦断変化図



☒-5.3.3 流速と内部フルード数の縦断変化図

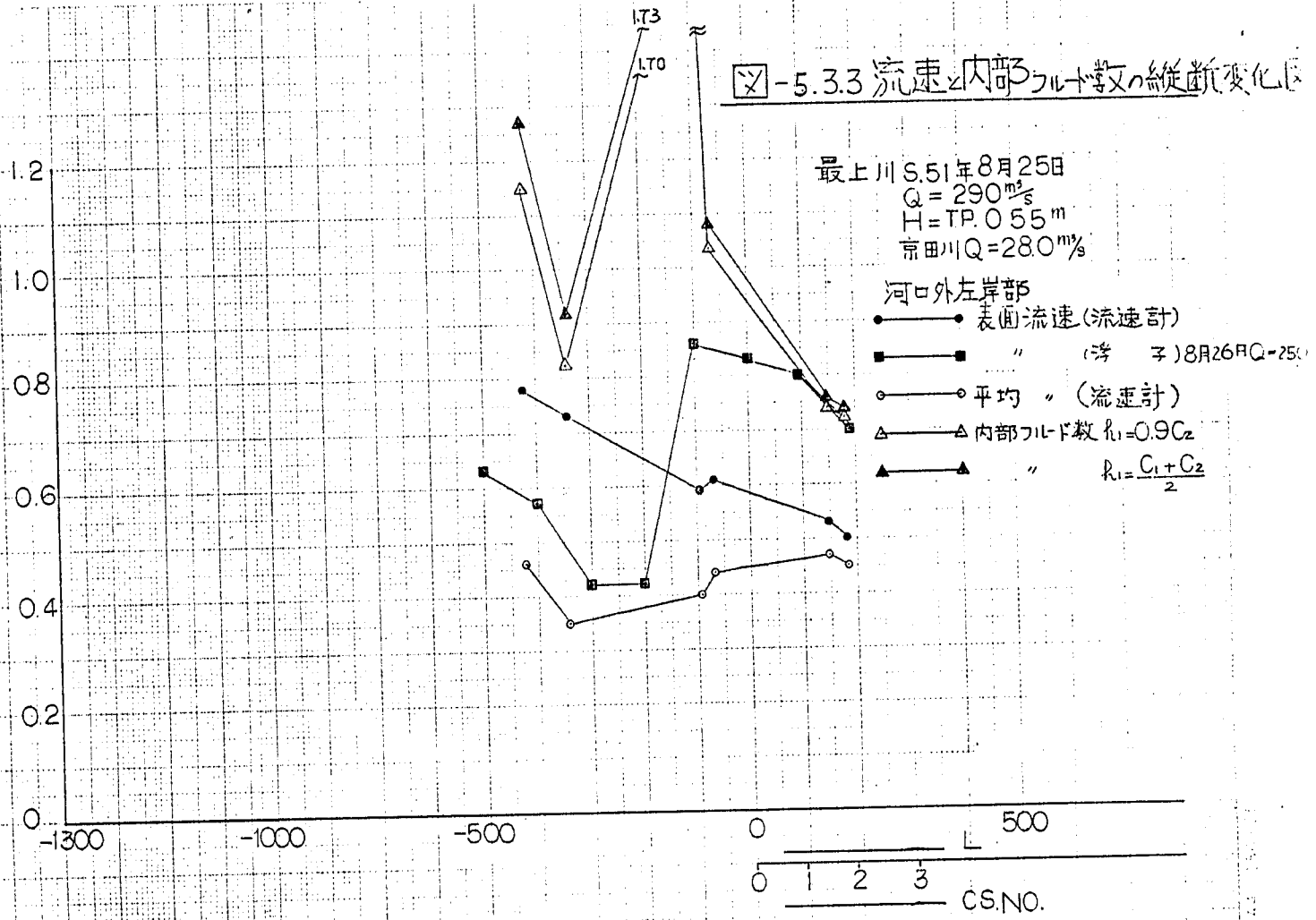


図-5.3.4 表層流速の縦断変化図

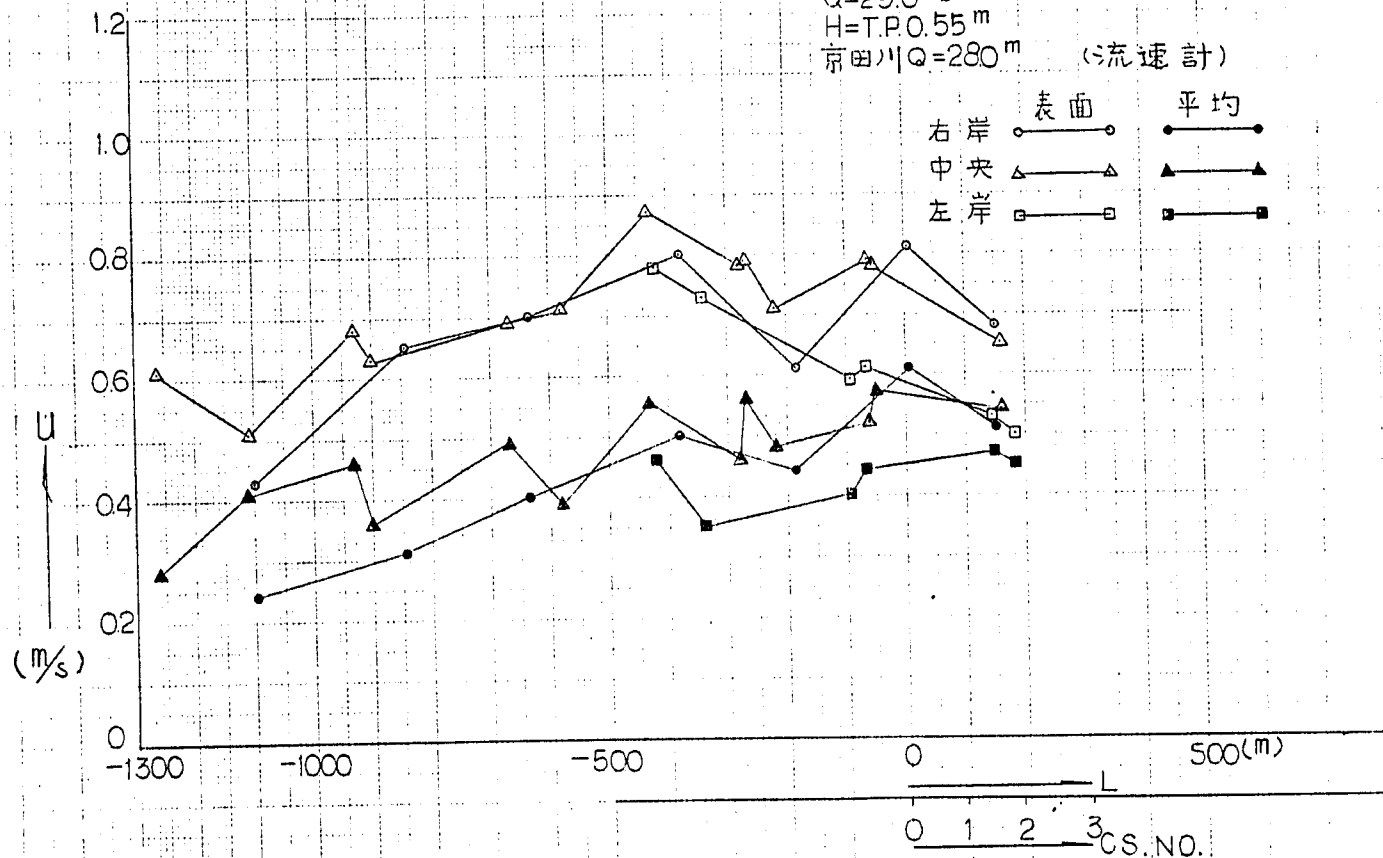
最上川 S 51年8月25日

$Q=29.0 \text{ m}^3/\text{s}$

$H=T.P.O.55 \text{ m}$

京田川 $Q=280 \text{ m}^3/\text{s}$

(流速計)



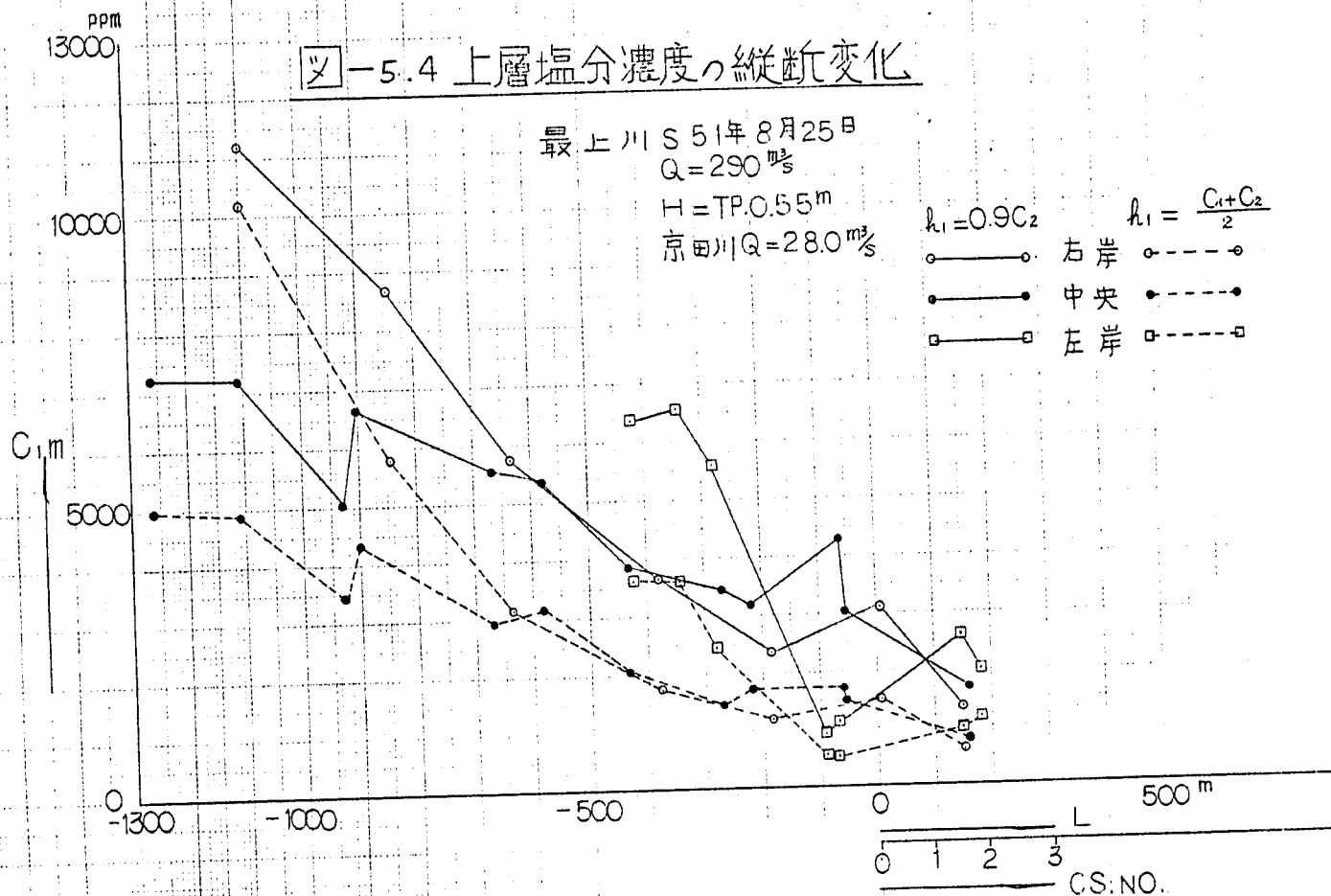


図-5.5 境界面形状

($h_1 = 0.9 \cdot C_2$)

最上川 S.51年8月25日

$Q = 290 \text{ m}^3/\text{s}$

$H = TP.0.55 \text{ m}$

京田川 $Q = 28.0 \text{ m}^3/\text{s}$

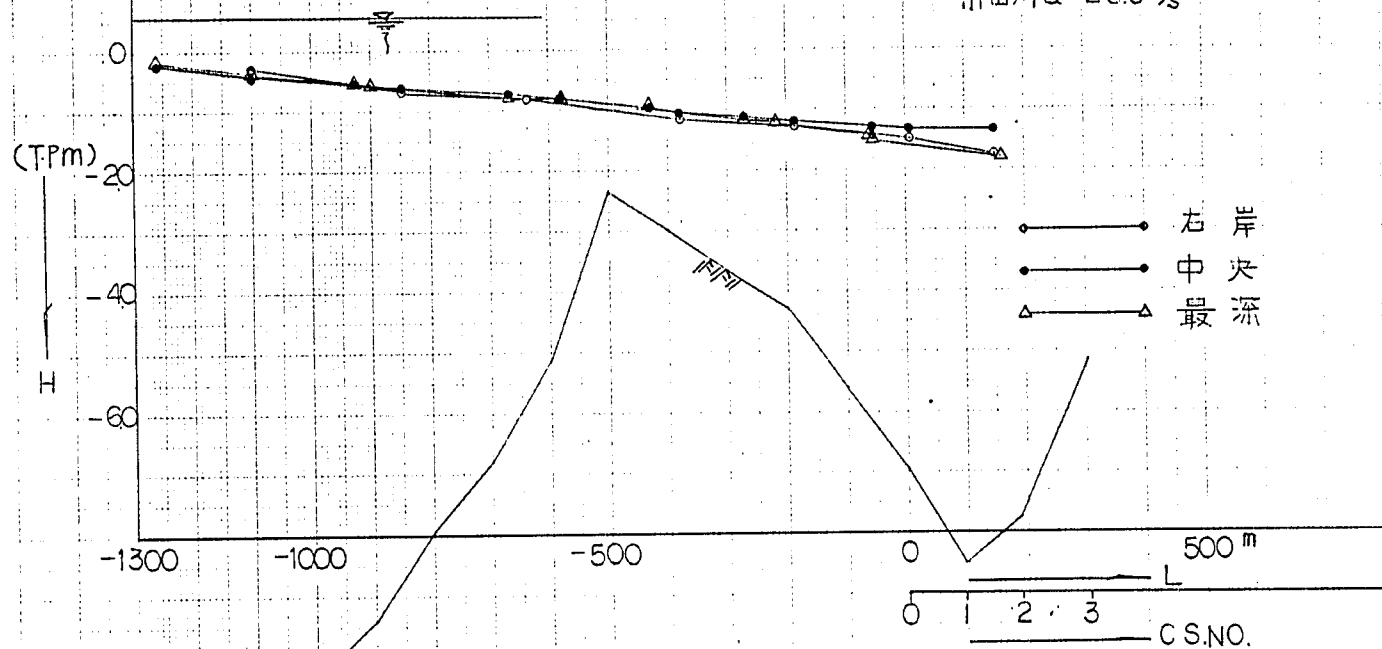


図-5.6 上層塩分濃度の縦断変化

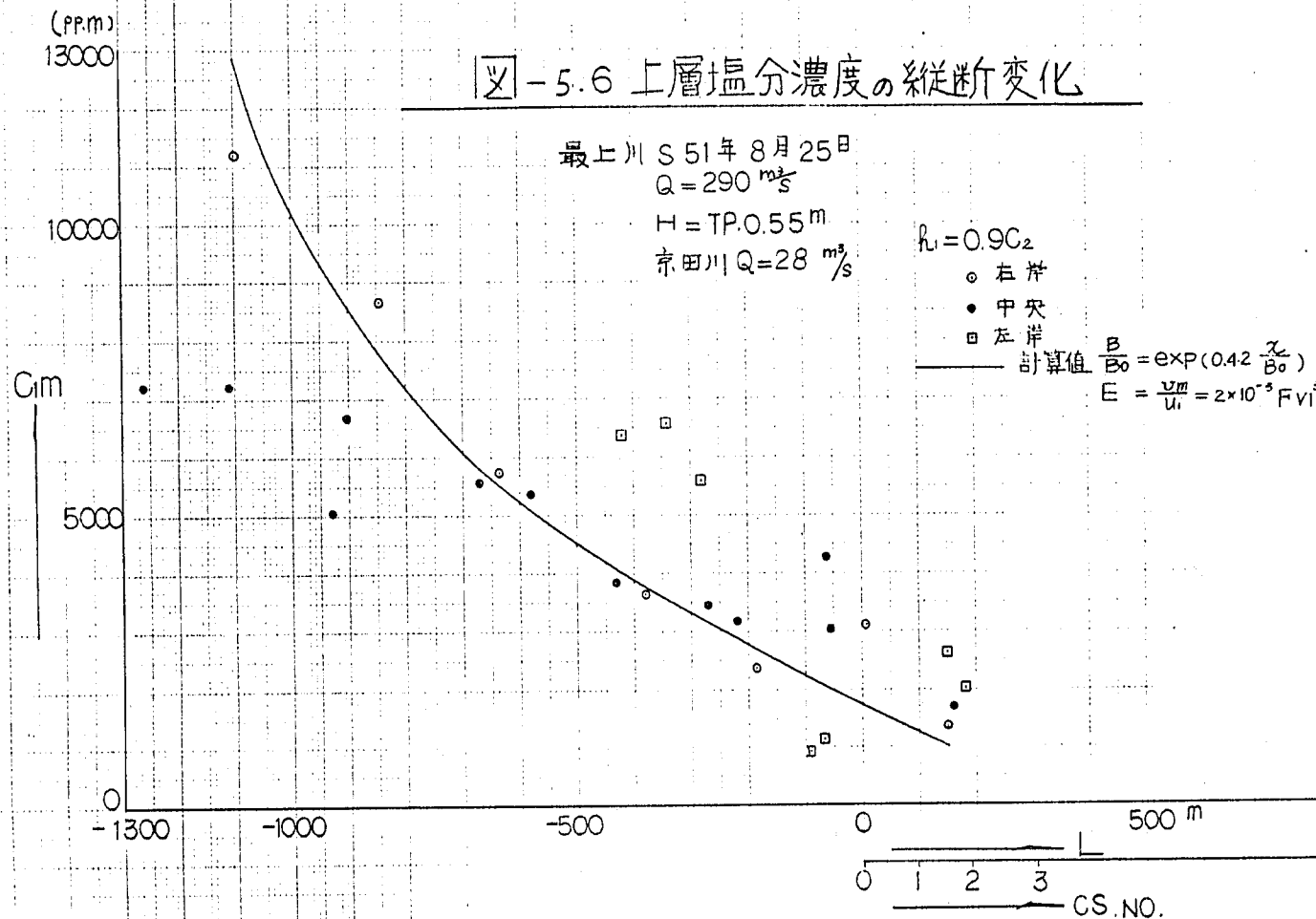


図-5.7 上層の塩分濃度(最上) (1)

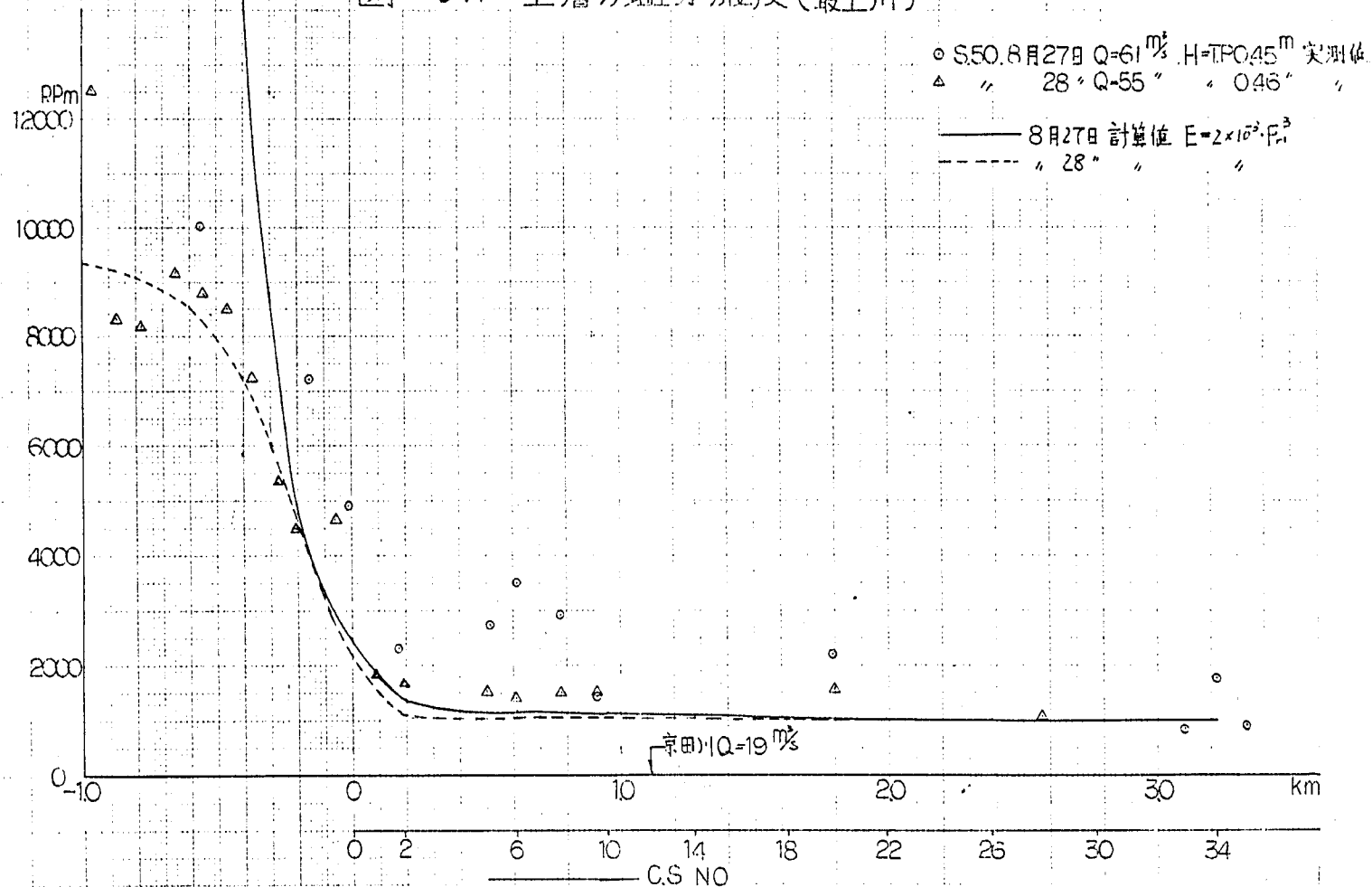


図 - 5.7.1 境界面形状図 (最上川)

S 50. 8月27日
 $Q = 61.0 \text{ m}^3/\text{s}$
 京田川 $Q = 19.0 \text{ m}^3/\text{s}$
 $H = \text{T.P. } 0.45 \text{ m}$

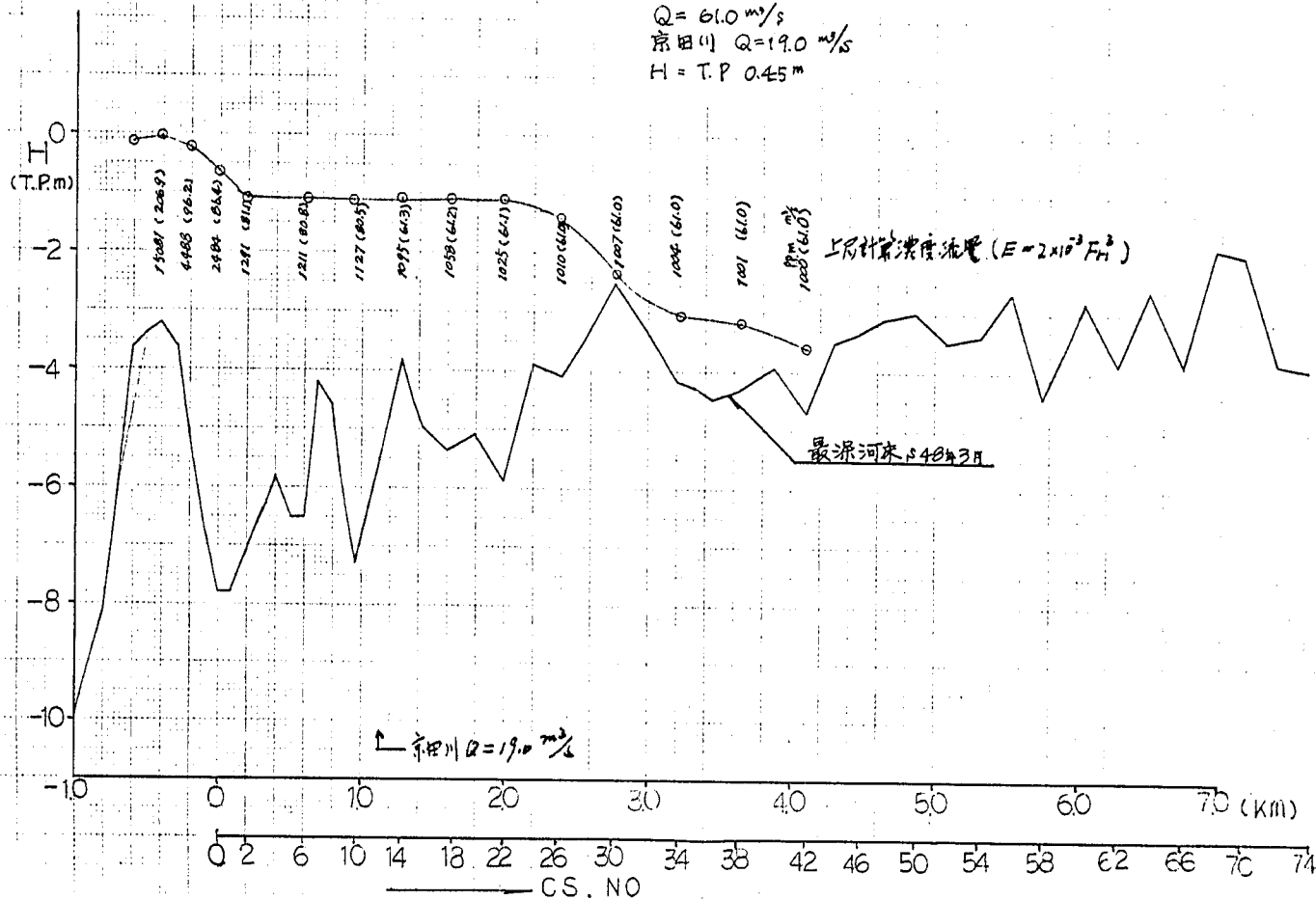
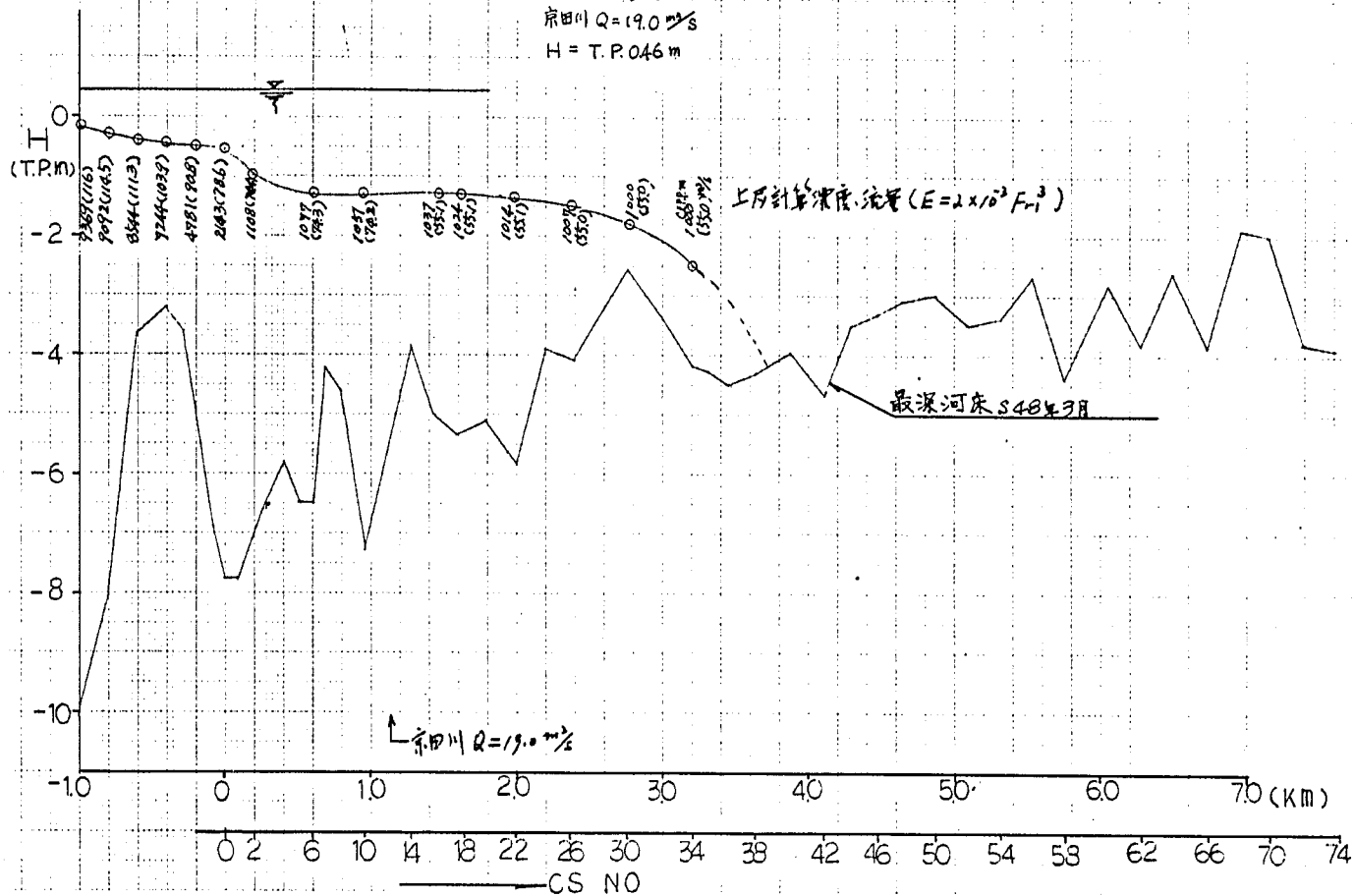


図-5.7.2 境界面形状図 (最上川)

S. 50. 8月28日
 $Q = 55.0 \text{ m}^3/\text{s}$
 京田川 $Q = 19.0 \text{ m}^3/\text{s}$
 $H = T.P. 0.46 \text{ m}$



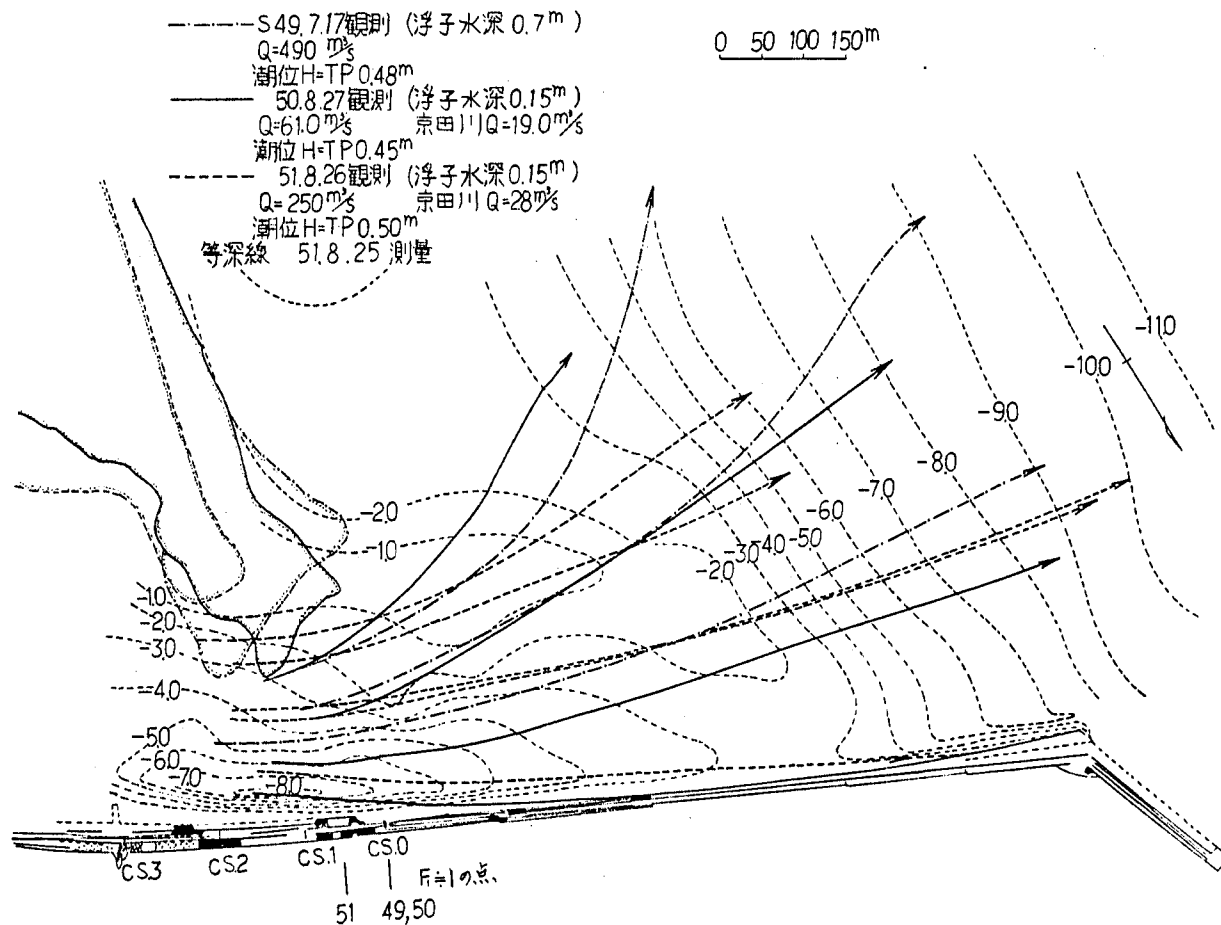


図-5.8 表層流の拡がり状況図

図-5.9 河口流出流の流線の拡がり幅

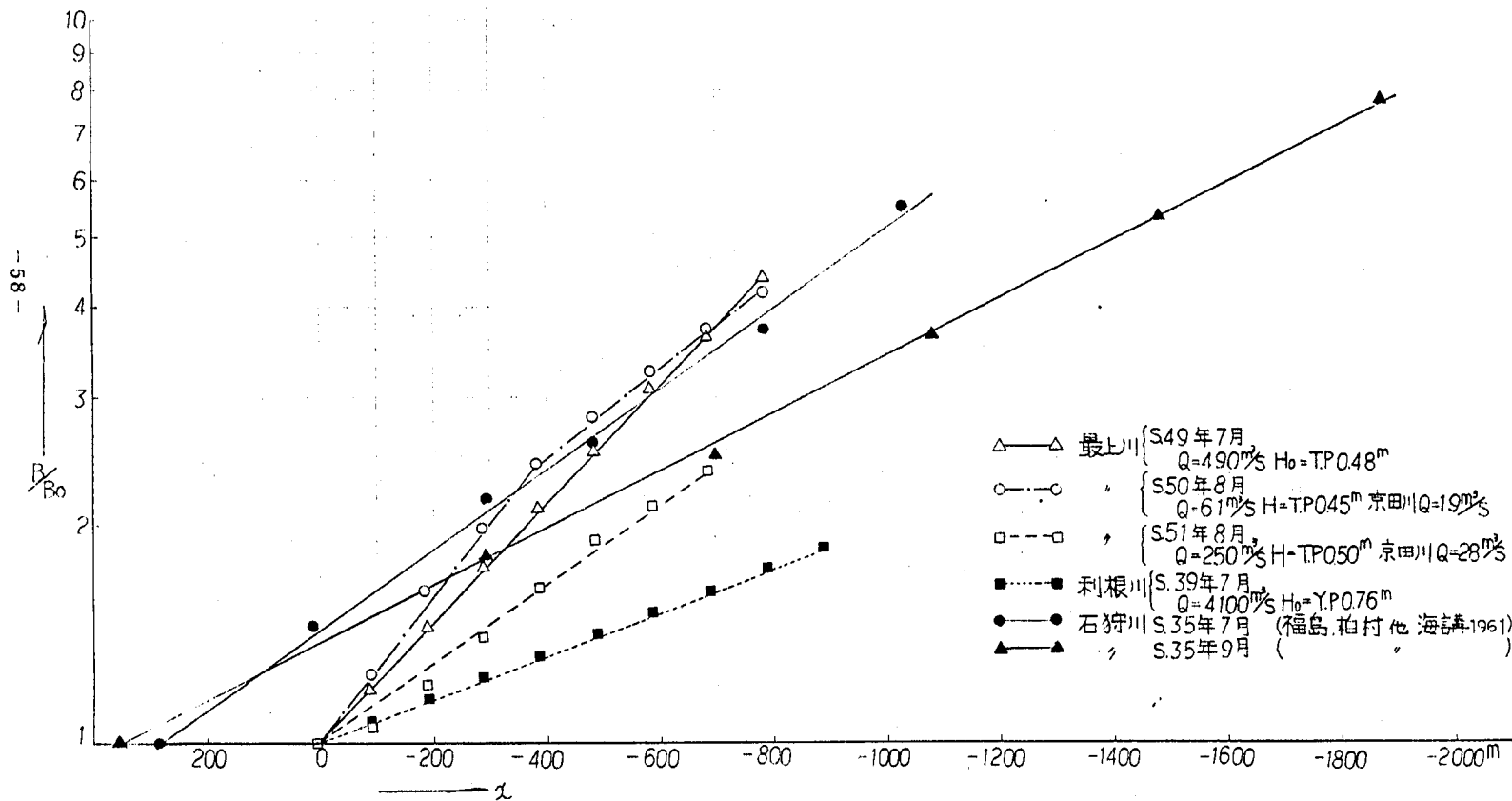
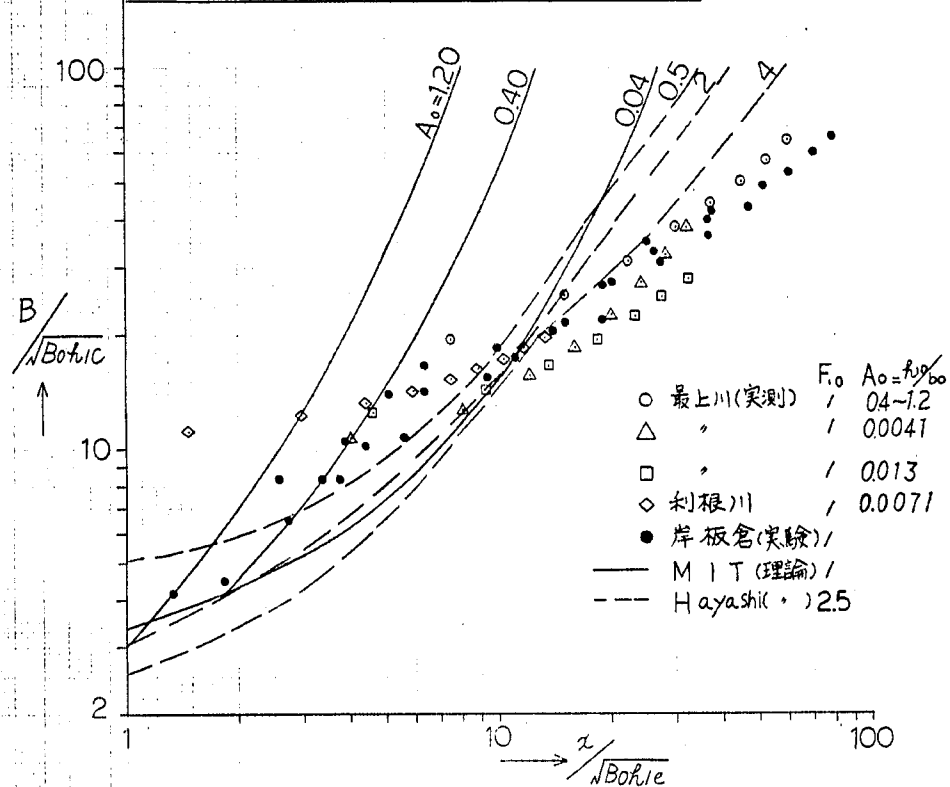


図-5.10 河口流出流の流線の拡がり幅



(付) 第6章 最上川河口における密度流特性

6-1 調査概要

最上川下流部における塩水遡上は、太平洋岸と違って潮差が小さいことなどから、成層性の強い弱混合型の河口密度流が生じ、塩水くさびの遡上範囲は洪水時の調査で、約6.2 km程度まで観測されている。この最上川河口部での塩水くさびの形状と河口条件等の把握のため、昭和49年7月16日～18日の

表-6.1 調査項目一覧表

3日間現地観測を行った。観測は表-6.1に示す項目について行ない、このうち濃度分布の測定は水深方向50 cm間隔の電導度計(E S T-3型)による電導度の直接測定と一部で採水による測定も行った。また流速分布の測定は濃度分布測定と

項 目	内 容	実施日
○河口砂州測量	河口砂州形状の測量	7月16日
○深 浅 測 量	河口外8測線を測量	16～17日
○水 位 測 定	河口外および河口より2.0 km地点、1～2時間間隔	16～18日
○流 量 観 測	2.9 km地点、横断方向6個所の流速分布測定	16日
○濃度、流速分布の測定	河口外10地点の測定 河口外および河道内14地点測定	17日 18日
○浮子の流下位置観測	河口外淡水流の拡がり状況 各水深別による流下位置測定	17日 18日

と同一地点でプロベラ式電流速速計にて、同様水深方向50 cm間隔で測定を行なった。浮子による観測は図-6.1に示すブリキ板を十字状に作り、これを各水深ごとにゴムまりで浮かせたものを用いて、河口部より流し、岸から2台のトランシットにより、時間と流下位置を求めた。

6-2 調査結果

6-2-1 水位、流量について

水位の観測は下瀬開門(河口より2084.6 m地点)および導流堤地点(河口外-67.0 m)で行なった。この時間水位曲線を図-6.2に示す。これによれば水位の時間的变化は、午前中はほとんどなく、午後においていずれも下降するようであり、潮位表より求めた鼠が関潮位とよく対応している。またこの水位変化は下瀬開門、導流堤とも17日が20 cm、他が10 cm程度であり、濃度および流速分布測定時の平均潮位は17日がT.P.0.48 m、18日はT.P.0.46 mであった。一方、最上川における流量は砂越(河口より11.0 km地点)と両羽橋(河口より5.0 km地点)のH-Q図より求めた時間流量曲線、および7月17日、18日に同地点で行なった流量観測結果が図-6.3.1～6.3.2である。これによれば我々の観測の1週間前に1800 m^3/s 程度の洪水が出ており、その後減水し、16日に再び700 m^3/s 程度のピークになった後の流量減水時

に観測を行なったことになる。また砂越地点の流量より両羽橋地点の流量の方が若干少なめであり、流観の結果では砂越地点の流量にほぼ一致する。一方、7月16日は出羽大橋下流の河口より約2.9 km地点で我々も流量観測を行なった。この観測結果の横断方向流速分布図を図-6.3に示す。観測時の横断河床は昭和48年3月測量の河床とかなり異なり、河床が高くなっている。これは48年3月以降に出羽大橋が建設され、この影響によるものと考えられる。なお我々の観測時の水深の測定は竹さおで求めたものであり、その信頼性は高いと思われる。また我々の観測点の横断幅は求めていなかったため、ここでは48年3月測量の横断図よりCS-28-30の横断幅を用いて流量を求めてみた。この結果によれば、我々の観測でも砂越地点流量に近い値であり、両羽橋地点流量よりは多い。このようなことから観測期間中の時間流量曲線は砂越地点のを用いることにした。これより塩水くさび観測時の平均流量は17日が $490 \text{ m}^3/\text{s}$ 、18日が $355 \text{ m}^3/\text{s}$ であった。

6-2-2 河口砂州、河口外深淺測量結果

最上川河口は、冬季のシベリア大陸からの季節風によって閉塞し（最小河口巾50～60 m）、春季の融雪出水（ $Q=2000\sim3000 \text{ m}^3/\text{s}$ ）によって砂州がフラッシュされる。その後徐々に砂州が伸長し、夏季の梅雨性集中豪雨による洪水によって、再びフラッシュされ、秋季より冬季にかけて閉塞傾向を強めていくというパターンを繰り返している。また最上川河口模型実験結果では、河口砂州の形成等に塩水くさびの存在が大きな影響を与え、波と河川流だけでは現地と相似な砂州ができず、むしろ河口を拡げるようなことがあった。そこで河口部に塩水が遡上している状態を考え、表層流速が一致するような流量を与えて、実験を行なったところ、ほぼ現地と同様な砂州を作ることができたことを述べている³⁶⁾。観測時に行なった河口砂州汀線測量結果では、砂州部の最小川幅は180 m程度である。この程度の河口幅は冬季を除いて各月で平均的に出現しているが、5～7月にかけて特に多いと言われている。またこの河口幅が1週間前の洪水（ $Q \approx 1800 \text{ m}^3/\text{s}$ ）によってどの程度フラッシュされたかは明らかでない。一方、海底地形の状況を知るための、河口外における深淺測量結果を砂州形状の測量結果とともに、昭和48年9月21日に測定された。深淺図と比較すると図-6.4のようになる。河口外深淺測量は昭和40年より年2回（洪水前後）調査が実施されており、この結果によれば、右岸堤より約700 m間付近が大きな変化が見られ、洪水によってはき出された土砂の堆積、波による変化が大きく、それより左岸側では大きな変化は見られないが、砕波点の違いによる沿岸砂州の移動があることが観測されている。我々の観測結果によればT-P-5.0 m以深の等深線が昭和48年9月時のものより全般的に陸側にきており、深くなっているのが認められる。しかし我々の観測は音響測深機の故障により、おもりを付けたロープで測定（測定位置は陸上の2台のトランシットにより測定）したため、波あるいは流れの影響のためいくぶん誤差があることも考えられる。また河口砂州先

端部の右岸側導流堤ぞいに局所的な深掘れ部が存在し、その下流導流堤中央部から先端にかけて浅くなっている。さらに導流堤先端付近で再び深部があり、この等深線は海岸線に平行に連なっている。

6-2-3 濃度および流速分布について

7月16日は河川横断方向の濃度分布を知るため、測定を行なったが、河川流量が多かったため、河道内へ塩水が遡上していなかった。このため予備調査として河口外に近いところで一部測定を行なった。7月17日は主として河口外における縦断方向の濃度、流速分布の測定を行ない、18日は河口外から塩水くさび先端まで濃度、流速分布の測定を行なった。これらの測定点位置図を図-6.5に、測定された濃度、流速分布図を図-6.6.1~6.6.5に示す。これによれば7月16日に測定された下層塩分濃度はかなりうすいものであった。これについては測定点が河口砂州先端の河口外にあたる局所的な深掘れ部付近であり、実際はもっと下流へ塩水が押しやられ、この深掘れ部に塩水が残っていたものを測定したものとも考えられる。もし海水と淡水の接点付近であれば下層塩水濃度はもっと大きいと思われる。そして下層塩水の混合現象が激しく行なわれ、下層塩水がうすくなったのであれば上層淡水層へ塩分が混入していてもよいと思われる。また流速分布もほぼ一様流を示しており、横断方向の流速変化も少ないようである。一方、17日の河口外で測定された濃度の鉛直分布は連続的に変化し、河口から遠ざかるにつれて表層水面まで塩水が混合していることがわかる。さらに流速分布も濃度分布と対応するように連続的に変化し、下層の海水部では逆流現象を呈している。河道内で測定された18日の濃度分布は淡塩境界面において急激に変化し、界面の安定を示しており、流速分布も淡水部でほぼ一定値を示し、境界面付近で急激に変化している。下層では17日の観測結果と同様、逆流現象を示している。またこれらの17日と18日の結果を縦断図に示したのが図-6.7.1~6.7.2である。河道内においては淡塩境界面が明瞭であるが、河口部から河口外においては淡水厚が減少すると同時に河水の流速が大きくなり、このため淡水と塩水の混合が促進され、濃度勾配がゆるやかになっているようである。さらに17日と18日の淡塩水境界層は異なるが、河口外では同様の濃度勾配を示している。また塩水くさびでは淡水の流下にともなっており、下層塩水の境界面付近が連行され、あるいは下層塩水が淡水中へわずかずつ拡散して行く。このため淡水は河口外に向かって徐々に塩分濃度を増し、その結果密度の平衡を保つため、下層塩水は図のようにわずかながら上流に流れることになる。さらに塩水上を流下する淡水の流速分布は淡水厚の減少とともに舌状分布を示してくる。特に河口を出た流速分布はこの傾向が著しく、河口での内部ジャンプとも何か関係しているものと考えられる。

6-2-4 浮子による流速、流向の測定

浮子による流下位置と時間の観測は7月17日と18日に行なった。7月17日は浮子水深

0.7 m による河口部から河口外での流向，すなわち河口外の淡水流のひろがり状況とその流下速度を測定し，18日は河口部での各水深ごとにおける浮子の流下位置を測定した。これらの浮子の流下位置を図-6.8.1～6.8.4に示す。河口を出た流れの拡がり方は距離とともに増大しており，淡水の厚さが減少し，海水の上を四方に拡がって行くようである。また濃度の測定結果でも明らかなように淡水厚がうすくなるにしたがって海水が混入して行き，それとともに海水に運動量を奪われ，同時に流れが拡がって行くために流速は減少している。なお模型実験では，密度効果がないため，拡がり方が少なく小流量の場合，あるいは塩水くさびが適上しているような状態では，このような密度効果を考慮しなければ，実際と異なったものとなることが考えられる。一方，18日に測定した各水深別の流下位置図は，河口中央部で流した浮子がいずれも河口外で左岸方向に寄った流れを示している。また流下位置図では浮子水深より浅い水深まで流下しているのがあり，これについては浮子の十字状ブリキ板が河床を引きずって流下したか，深浅測量誤差と考えられる。この各水深における流下位置と時間より測定点間の平均流下速度を求め，浮子水深1.0 m以上については次式により水面浮子の抵抗を考慮した流速補正を行なった。下図より浮子A・Bをつなぐ糸の影響を無視すると

$$u_2 = u \pm \left[\frac{CD_1 \cdot A_1}{CD_2 \cdot A_2} (u - u_1)^2 \right]^{1/2} \quad \dots\dots\dots (1) \quad \begin{array}{l} u_1 > u \rightarrow - \\ u_1 < u \rightarrow + \end{array}$$

ここに u_1 : 浮子A・Bがおのおのの個体のときの浮子A
の流速

u_2 : 浮子A・Bがおのおのの個体のときの浮子B
の流速

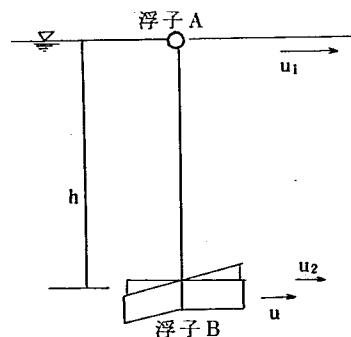
CD_1 : 浮子Aの抗力係数

CD_2 : 浮子Bの抗力係数

A_1 : 浮子Aの水面下流れ方向断面積

A_2 : 浮子Bの流れ方向断面積

u : 浮子A・Bが連結されたときの相対速度



となり，(1)式を用いて流下位置付近の表面流速 u_1 を用い

て，水深 h m 地点の流速 u_2 を求めたのが，図中の流速値である。水面付近の流速値は河口から河口外に出る区間では次第に速くなり，その後次第に減少しており，流速計で測定した淡水部の傾向と一致する。また水面付近の流速値は大きく，浮子水深が大となると，水面付近よりかなり小さな値となる。しかし下層塩水部の逆流現象は見られない。これについては糸の影響あるいは抗力係数等に若干の問題があるのかも知れない。一方，流速計での測定点付近の各水深ごとの流速値より流速分布を求め流速計との値と比較したのが図-6.9である。上層淡水部での流速値はか

なり一致するが、下層の塩水が存在する部分では一致しない。これについては前に述べたように水面浮子の抵抗等はまだ問題があると考えられる。なお17日の河口外での浮子の流下位置と昭和42年8月30日観測の表面流を比較したのを図-6.10に示す。

図-6.1 流速測定器具(浮子)概略図

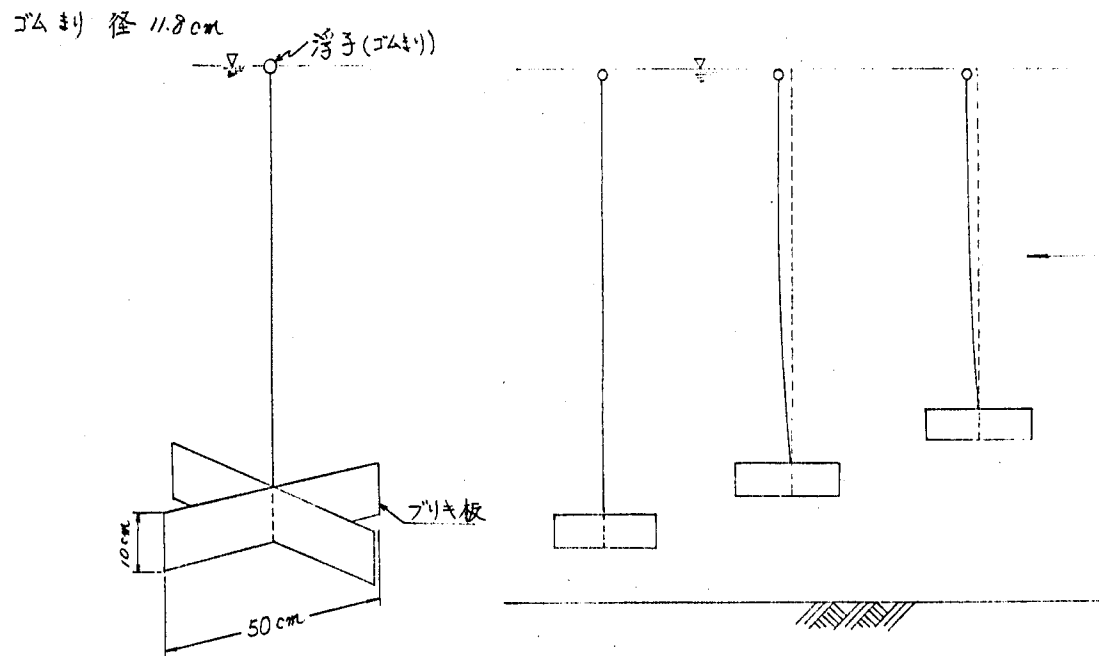


図-6.2 時間水位曲線(最上川)

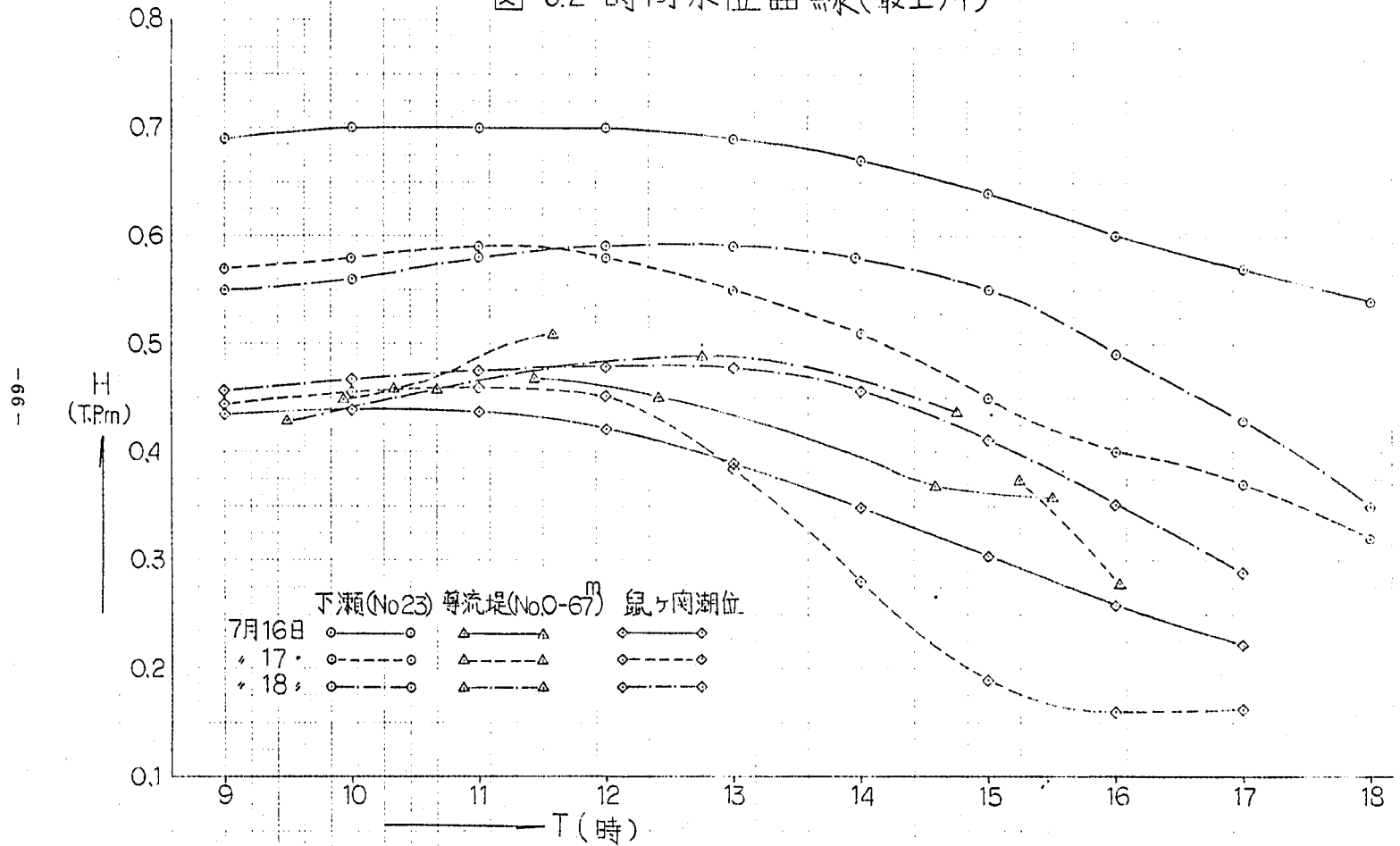


图-6.3. 流速分布图

549年7月16日 10:33'~11:45' 观测

0 0.5 1.0 m/s
流速缩尺

CS 28			CS 30		
1	116m ²	40%	1	221m ²	34%
2	149	111	2	151	112
3	117	95	3	122	99
4	131	120	4	128	119
5	157	145	5	155	143
6	155	132	6	152	130
7	136	55	7	175	70
計	961	698	計	1102	756
断面平均流速 0.730%			断面平均流速 0.690%		

CS-28 (2.6km) S-48年3月 測量
CS-30 (2.8km) S-48年3月 測量

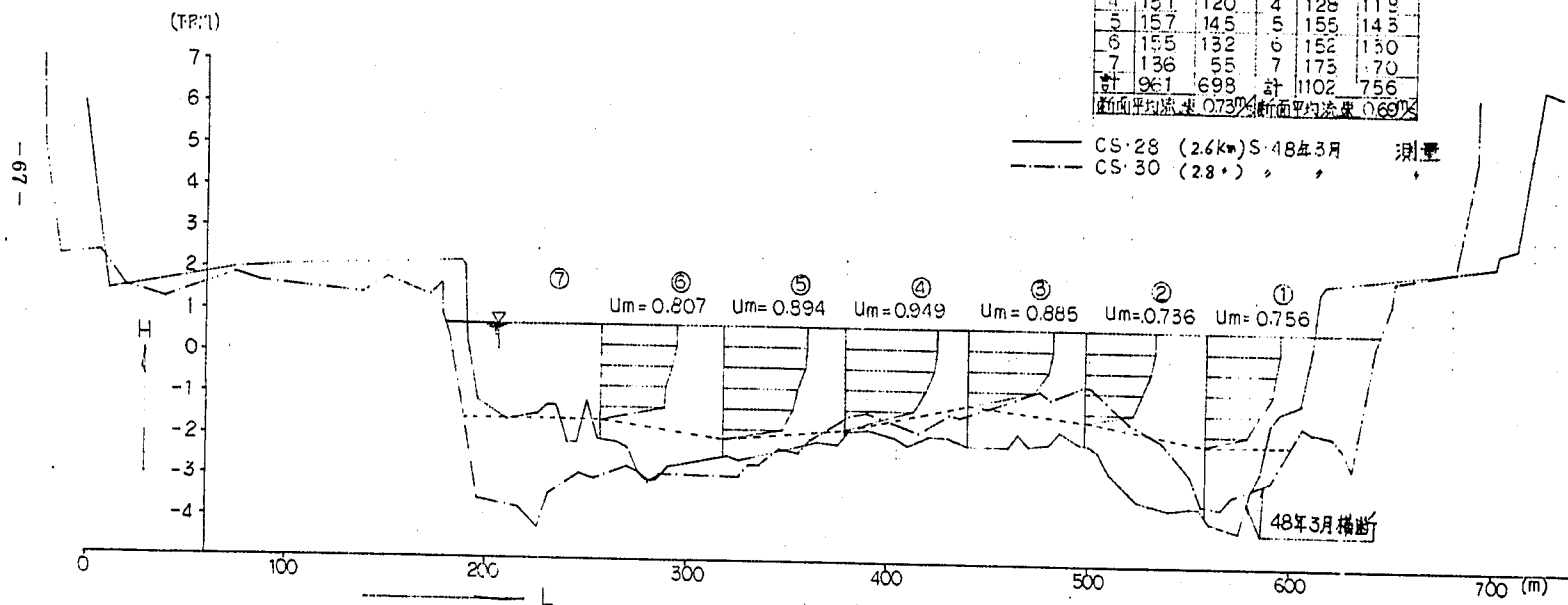


図-6.3.1 時間流量曲線
(最上川)

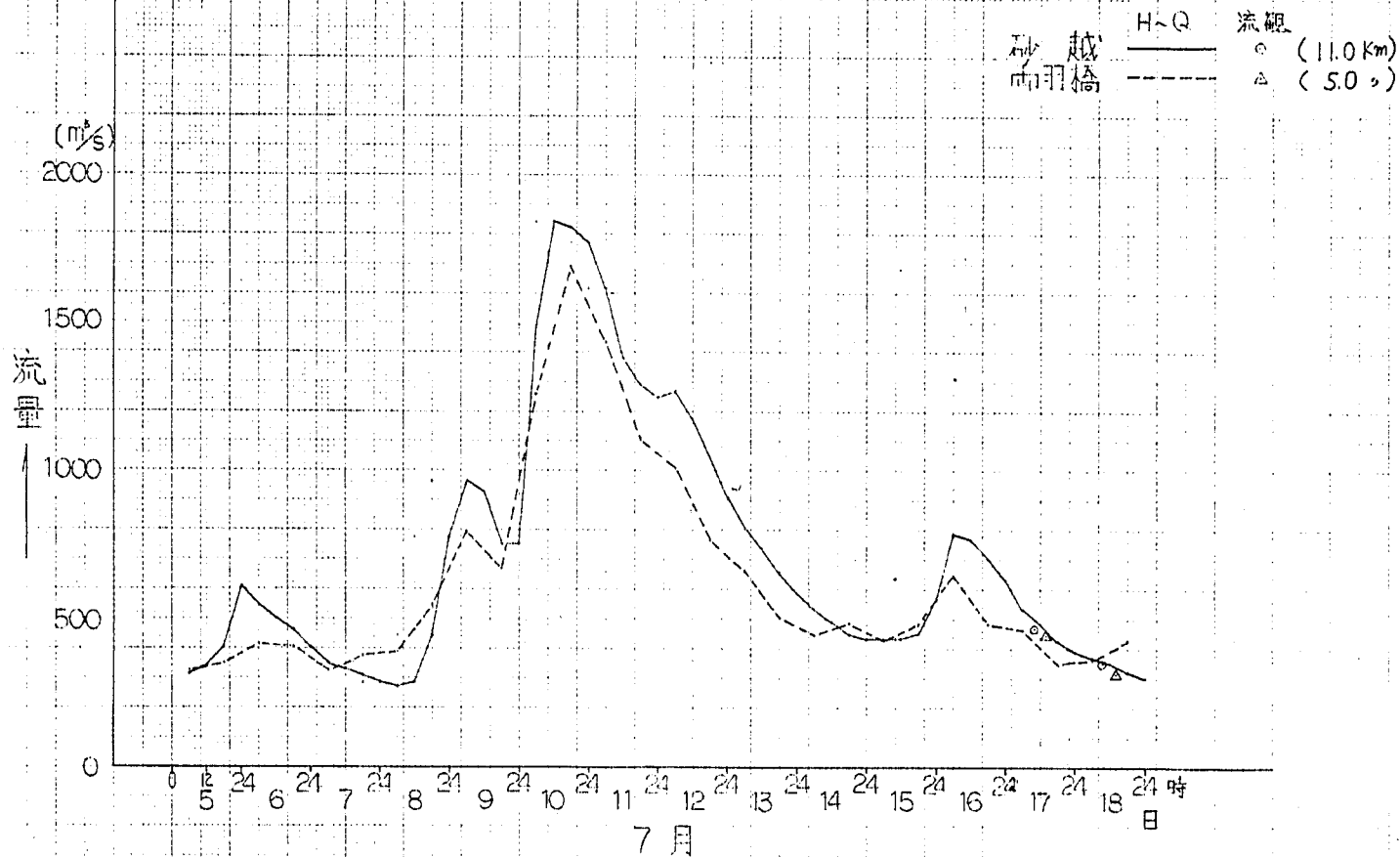


図-6.3.2 最上川端水かさ調査

時間流量曲線(H-Q図より)
S.47 川尻

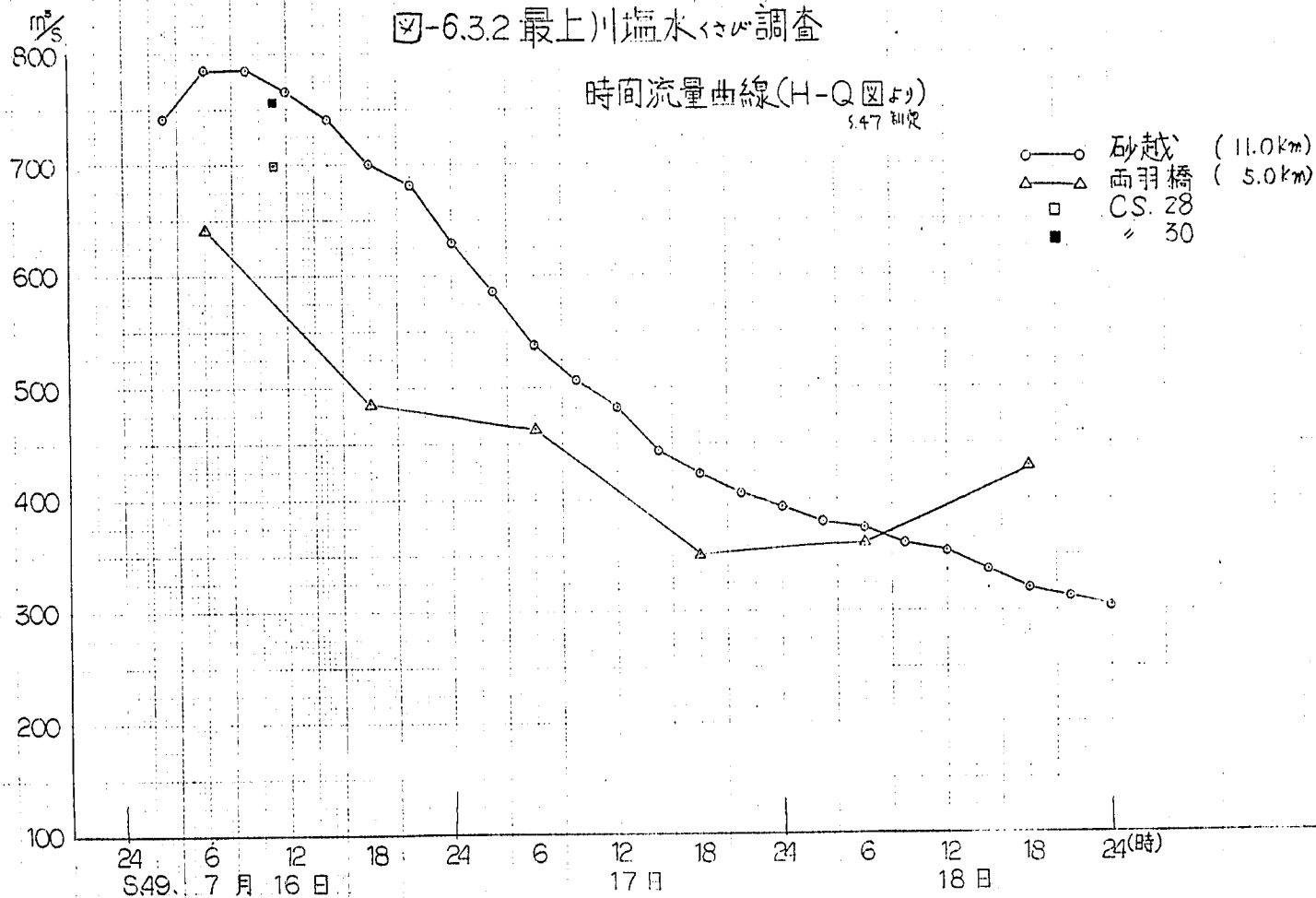


図-6.4 最上川河口深浅図

—— 昭和49年7月16日～17日測定

— 48年9月21日

0 50 100 150 200m
縮尺

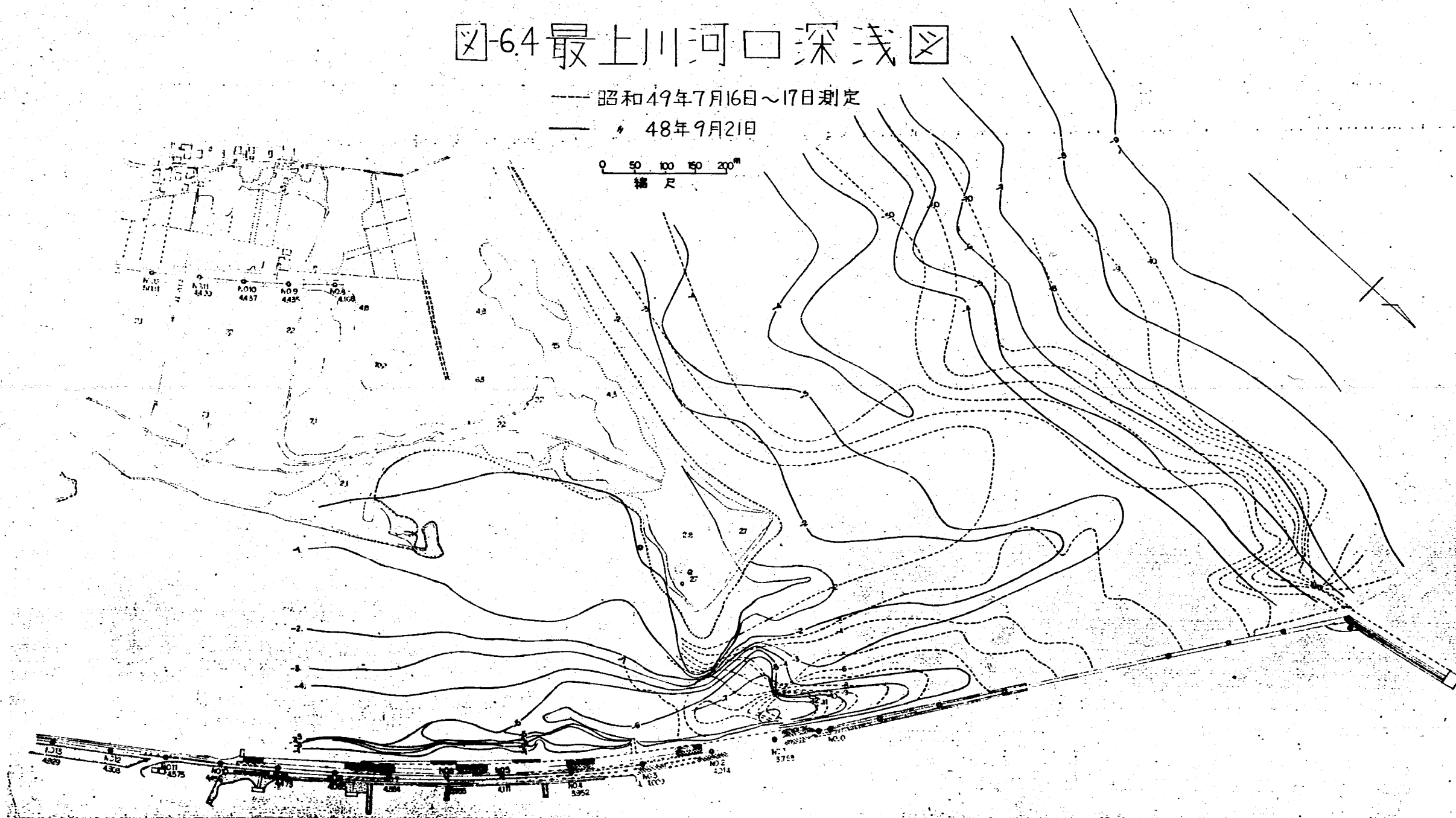


図-6.5 濃度・流速分布測定位置図

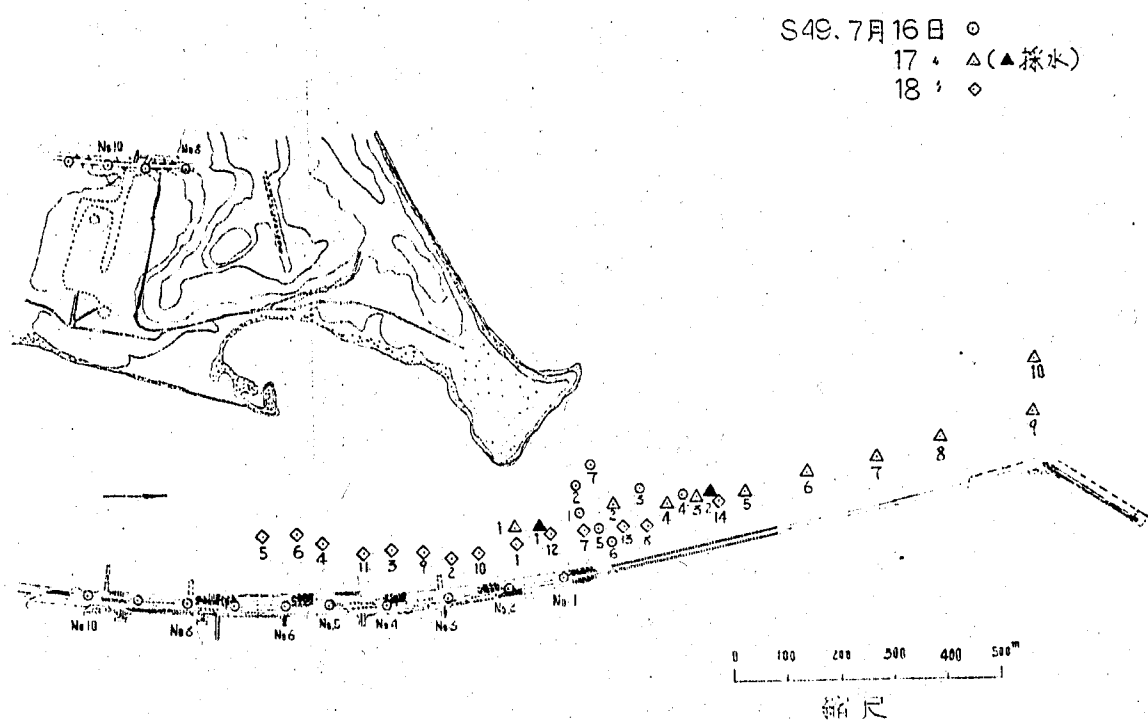


図-6.6.1 濃度、流速分布図 (最上川)

7月16日 14:00~17:00 測定

$Q = 725.0 \text{ m}^3/\text{s}$
 $H = T.P. 0.40 \text{ m}$

—— 塩分濃度
 - - - - 流速

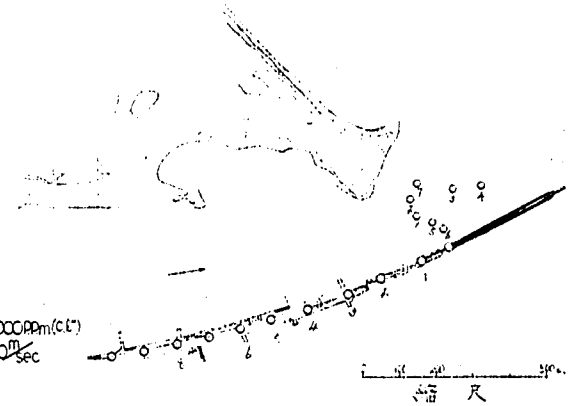
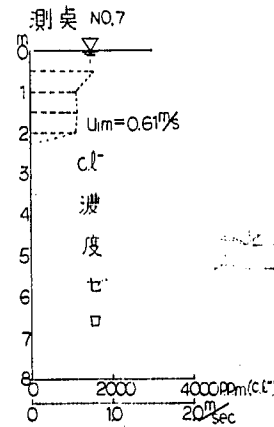
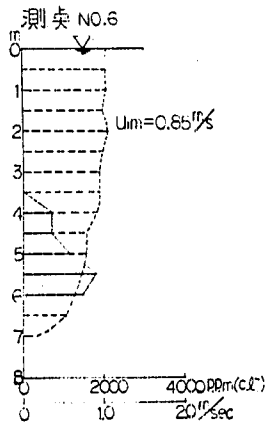
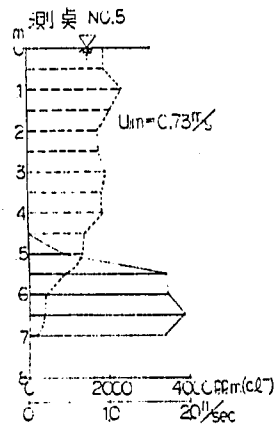
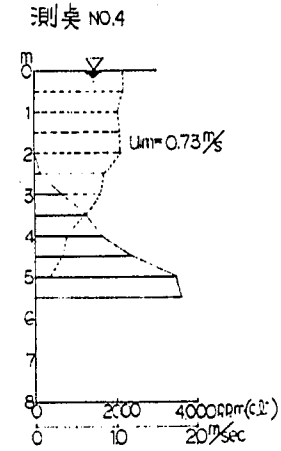
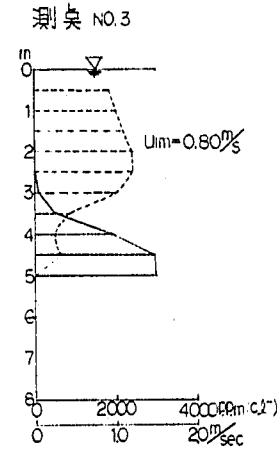
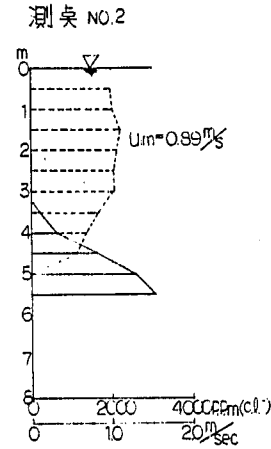
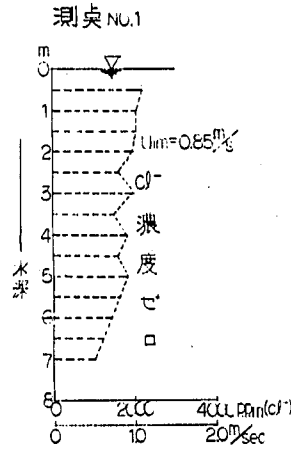


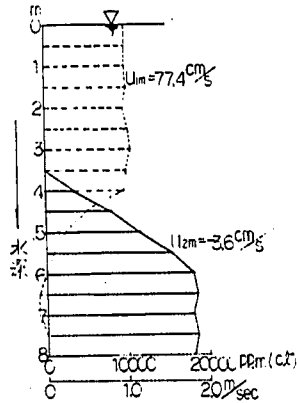
図-6.6.2 濃度・流速分布図 (最上川)

7月17日 10:00~12:00 測定

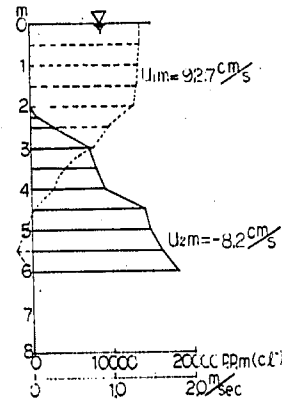
$Q = 490.0 \text{ m}^3/\text{s}$
 $H = \text{T.P. } 0.48 \text{ m}$

—— 塩分濃度
 - - - - 流速

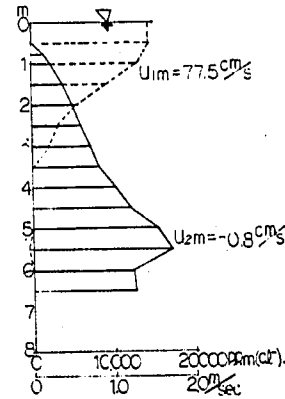
測点 NO.1



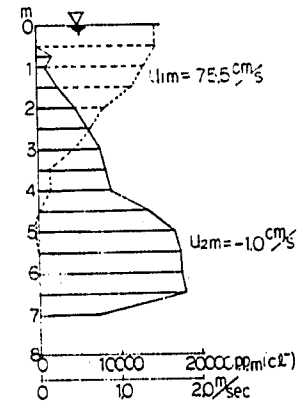
測点 NO.2



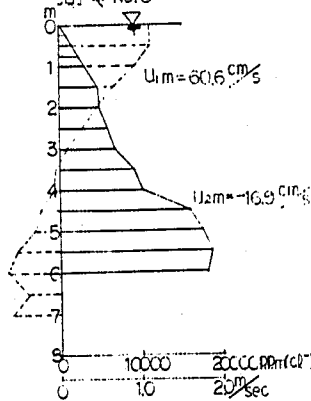
測点 NO.3



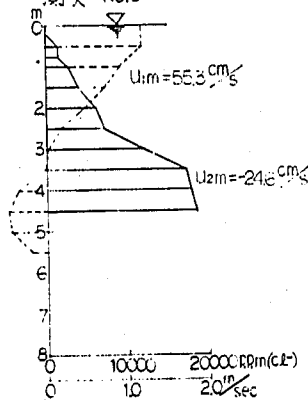
測点 NO.4



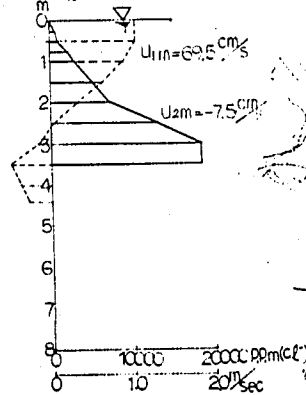
測点 NO.5



測点 NO.6



測点 NO.7



●排水箇所

0 10 20 30

縮入

図-6.6.3 濃度・流速分布図(最上川)

$Q = 450.0 \frac{m^3}{s}$
 $H = T.P. 0.48 \frac{m}{m}$

7月17日 10:00~12:00 測候

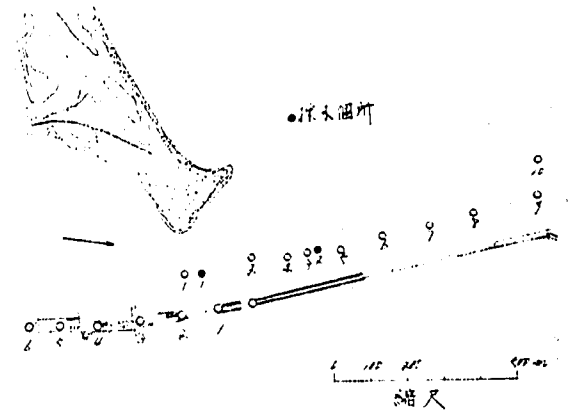
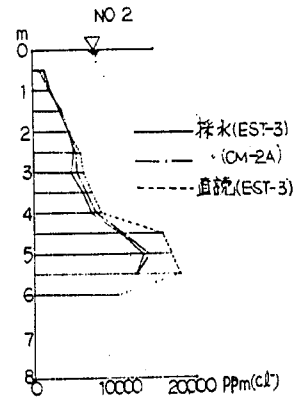
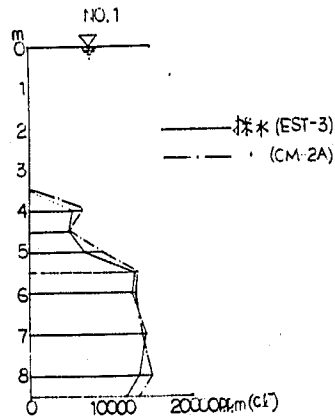
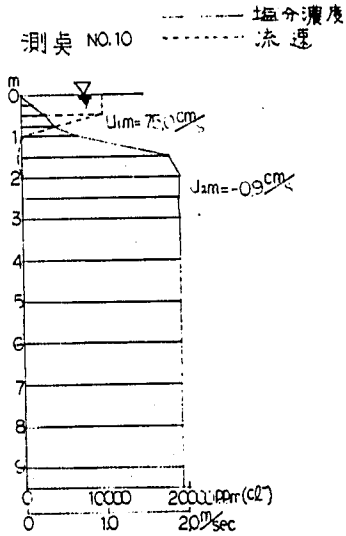
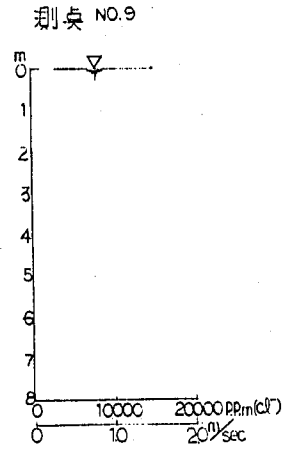
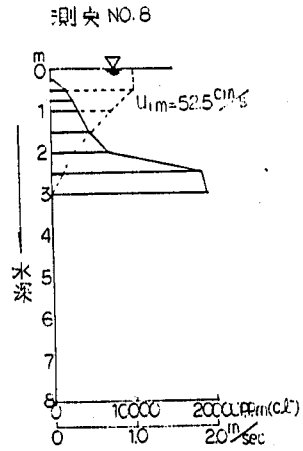
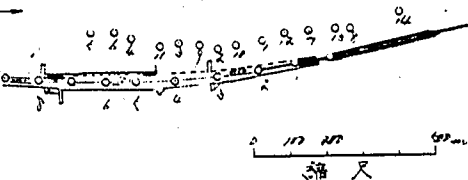
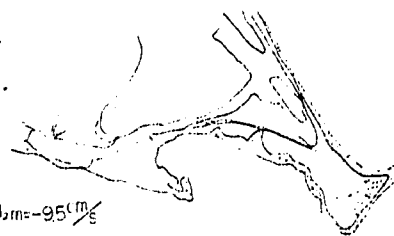
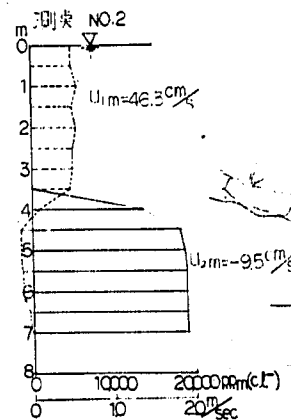
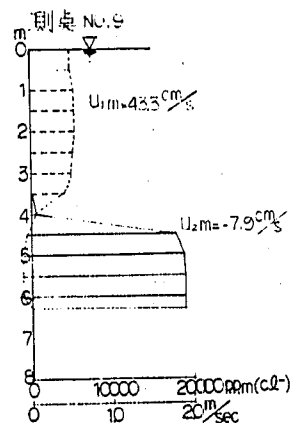
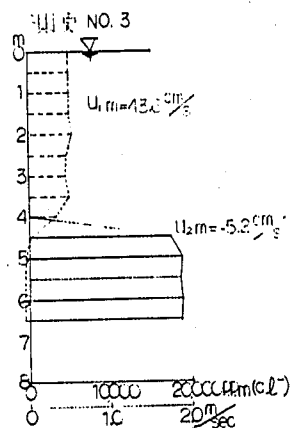
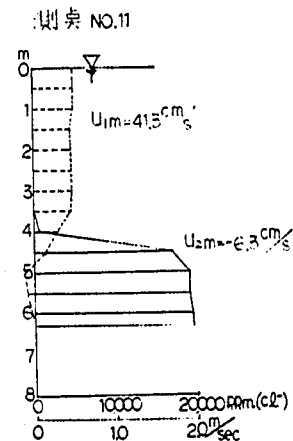
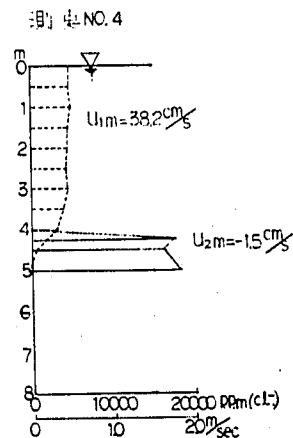
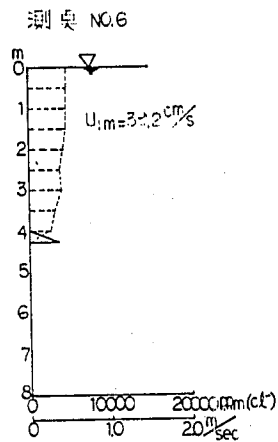
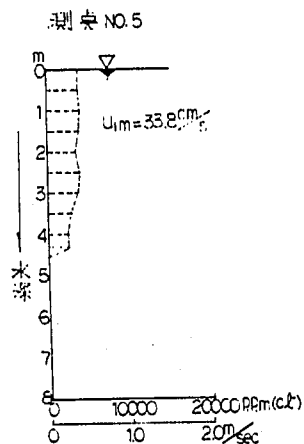


図-6.6.4 濃度・流速分布図(最上川)

7月18日 10:00~14:00測定

$Q = 355.0 \frac{m^3}{s}$
 $H = T.P. 0.46 \frac{m}{m}$

—— 塩分濃度
 - - - - 流速



7月18日 10:00~14:00 測定

図-6.6.5 濃度・流速分布図 (最上川)

$Q = 355.0 \frac{m^3}{s}$
 $\alpha = T.P. 0.46$

—— 塩分濃度
 - - - - 流速

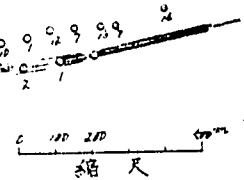
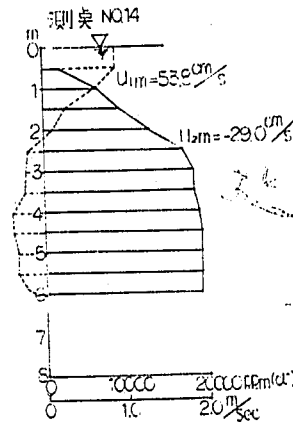
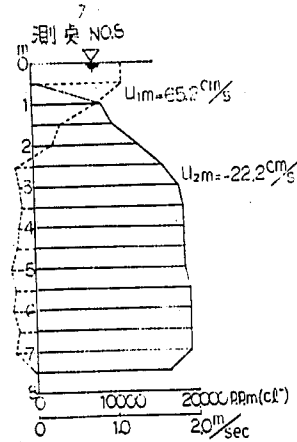
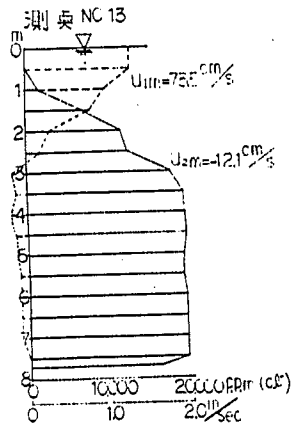
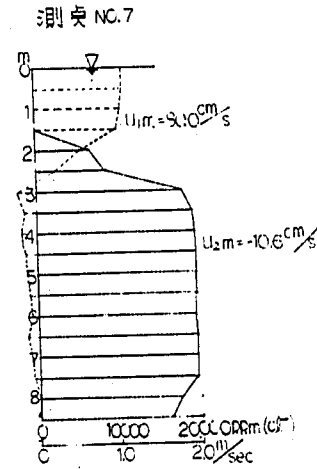
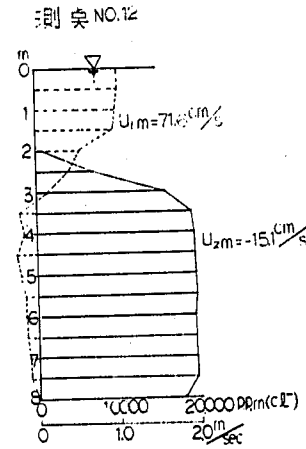
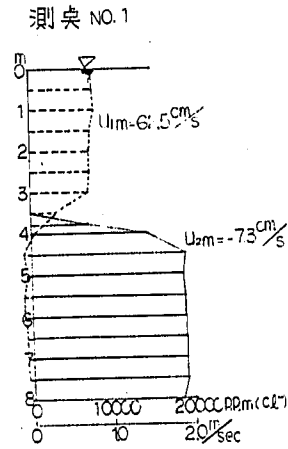
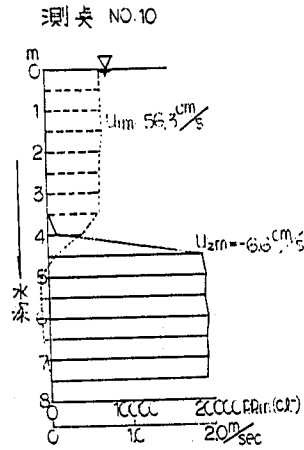


図-6.7.1 濃度・流速分布図(最上川)

7月17日 10:00~12:00 測定

$Q = 1.1 \frac{m^3}{s}$
 $H = T.P. 0.48 \frac{m}{m}$

濃度縮尺
 0 20000 ppm

流速縮尺
 0 10 $\frac{m}{s}$

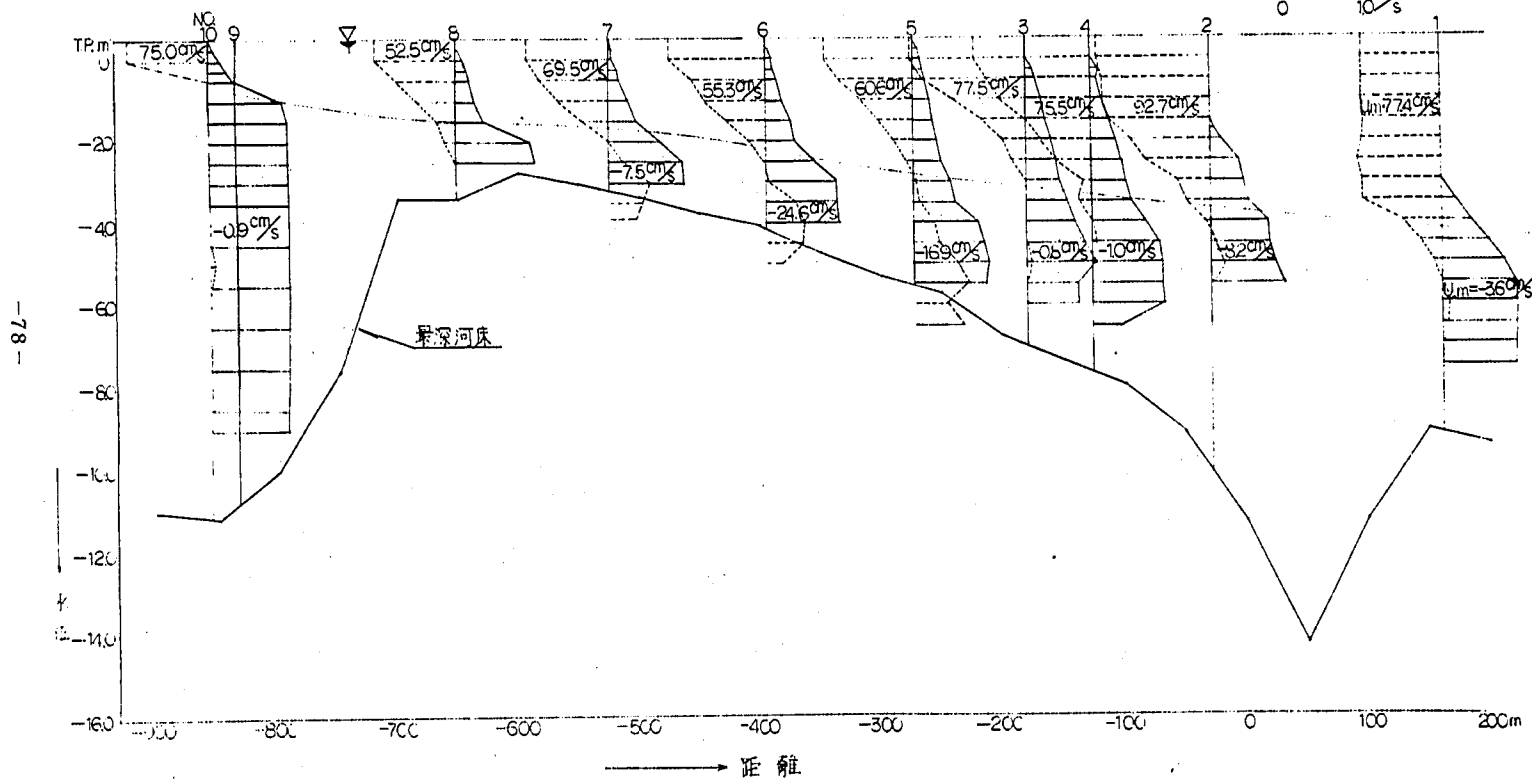


図-6.8.1 浮子の流下位置図

S.49. 7月17日観測

縮尺 0 50 100 150m

浮子水深 0.7m

--- 模型流線
 $Q = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$
 --- 模型流線
 $Q = 800 \text{ m}^3/\text{s}$
 潮位 T.P. 0.41m
 S.42. 8月測量断面

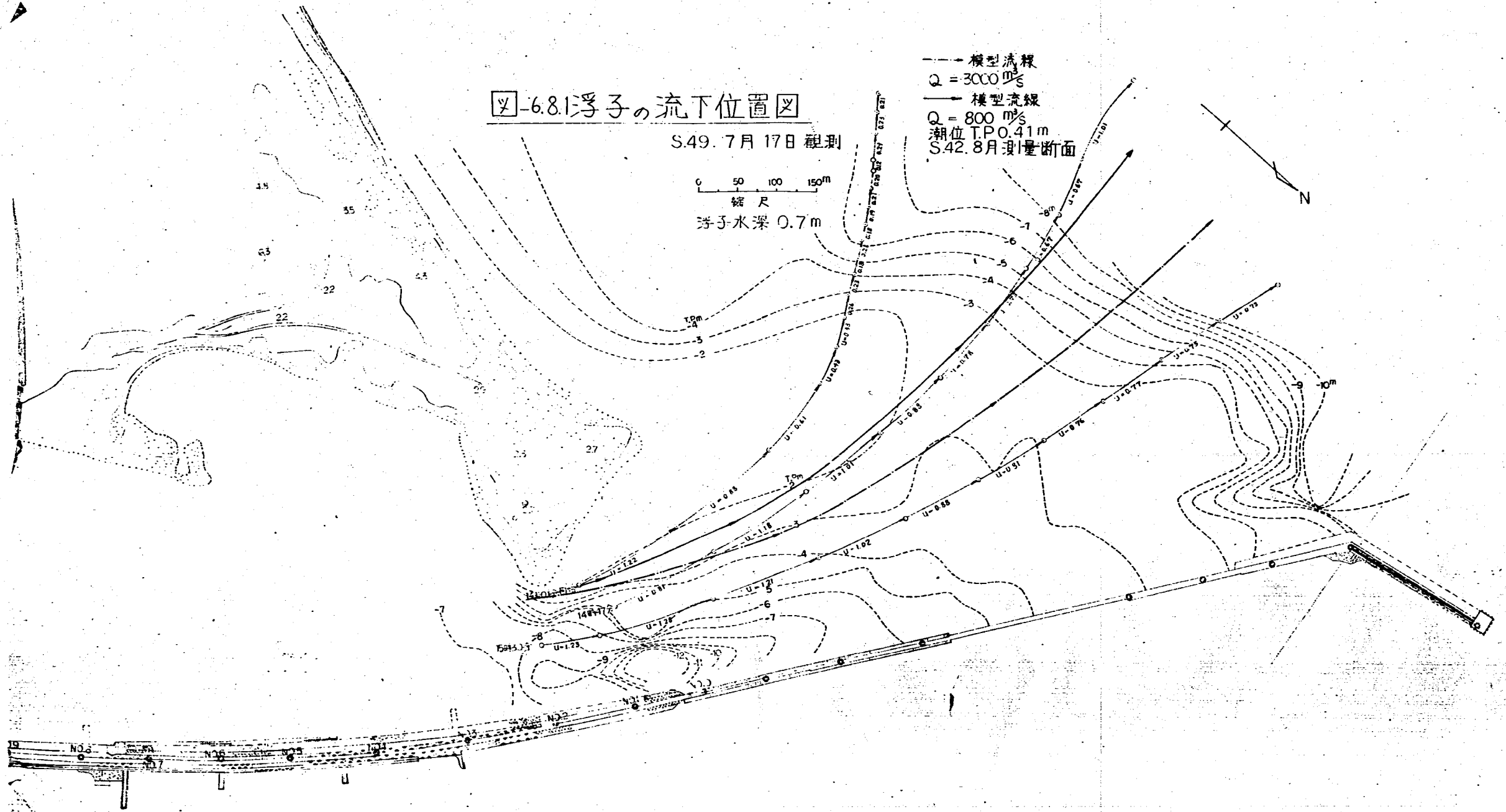
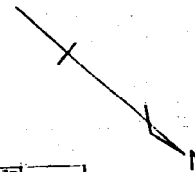


図-6.82 浮子の流下位置図

S49. 7月18日観測

0 50 100 150m
縮尺



浮子水深	1~2m	2~3m	3~4m	4~5m	5~6m	6~7m	7~8m	8~9m	9~10m	10~11m	11~12m	12~13m	測定時刻
0m	0.97	0.63	0.83	1.02	1.13	1.20							10:55'
0.1	1.00	0.90	0.97	1.10	1.15	1.15							10:45'
1	0.87	0.97	0.97	1.00	0.92	0.81	0.72						10:29'
2	0.75	0.68	0.61	0.61	0.52	0.44	0.29						10:19'
3	0.80	0.64	0.44	0.44	0.43	0.40	0.44	0.43	0.44	0.40	0.40	0.33	9:55'
4	0.27	0.31	0.31	0.26	0.42	0.26	0.30	0.26	0.30	0.25			9:33'

※ 浮子の低抗も考慮した流速

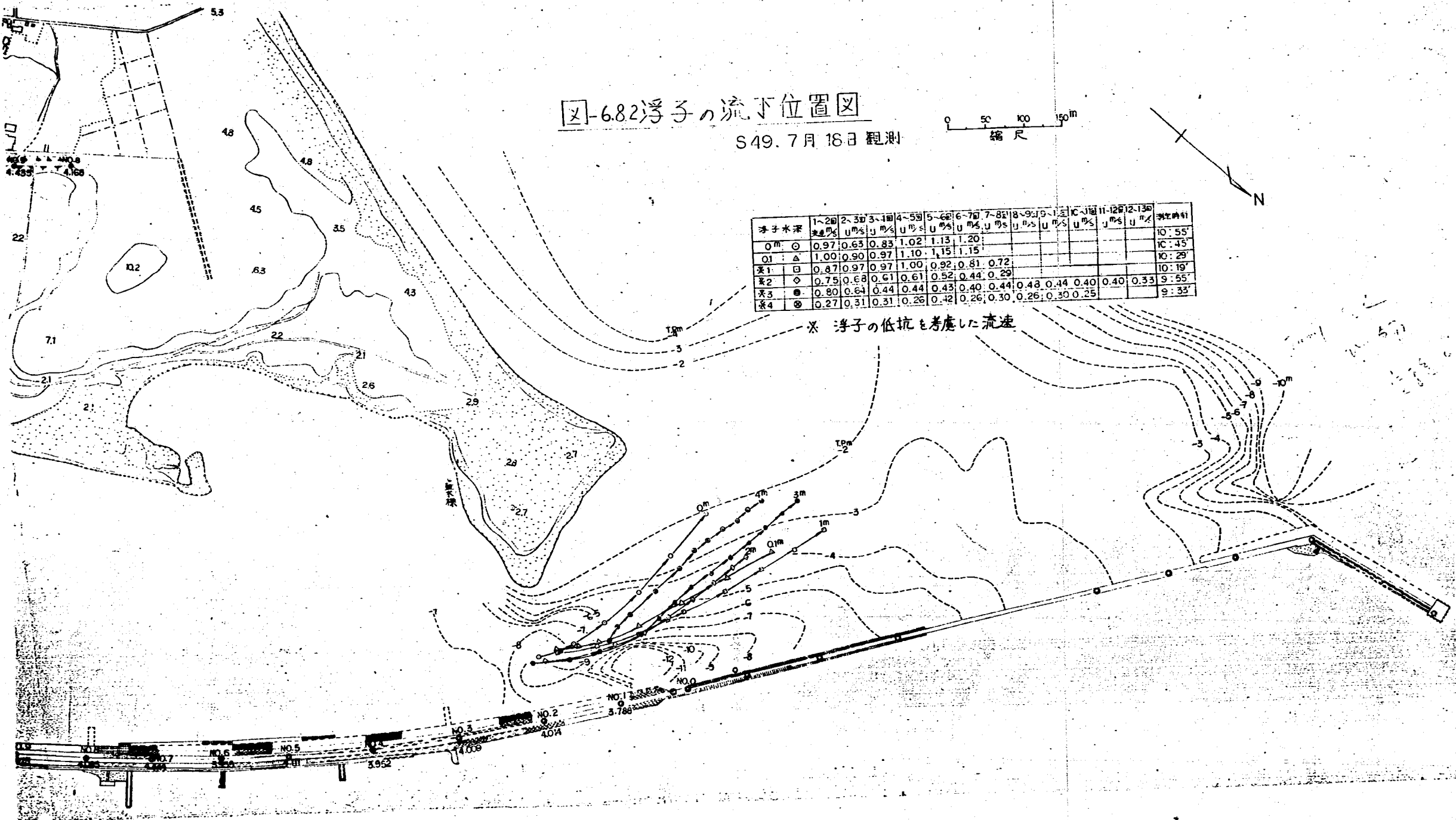
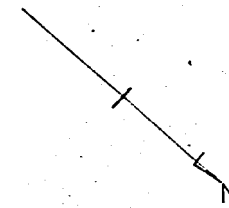


図-6.83 浮子の流下位置図

S49. 7月18日 観測

0 50 100 150m
縮尺



浮子水深	1-2回	2-3回	3-4回	4-5回	5-6回	6-7回	7-8回	8-9回	9-10回	10-11回	11-12回	観測時間
	U m/s	U m/s	U m/s	U m/s	U m/s	U m/s	U m/s	U m/s	U m/s	U m/s	U m/s	
※ 1 m	0.73	0.63	0.60	1.00	0.67	0.67						14:33
※ 2	0.21	0.02	0.40	0.40	0.35	0.53						14:26
※ 3	0.01	0.40	0.44	0.33	0.45	0.50						14:30
※ 4	0.44	0.38	0.61	0.11	0.78							14:13
※ 5	0.46	0.31	0.35	0.38	0.43	0.38	0.40					11:39
※ 5	0.40	0.27	0.38	0.32	0.32	0.37	0.38					14:00
※ 6	-0.02	0.31	-0.02	0.17	0.21	0.23	0.27	0.36	0.31	0.39		11:50
※ 6	0.46	0.50	0.38	0.43	0.38	0.26	0.55	0.31	0.50	0.25	0.33	13:46
※ 6.5	0.15	0.08	0.32	0.26	0.15	0.26	0.33	0.34	0.39			
※ 7	0.09	0.12	0.04	0.08	0.03	0.15	0.19	0.26	0.34	0.31		12:05

※ 浮子の抵抗を考慮した流速

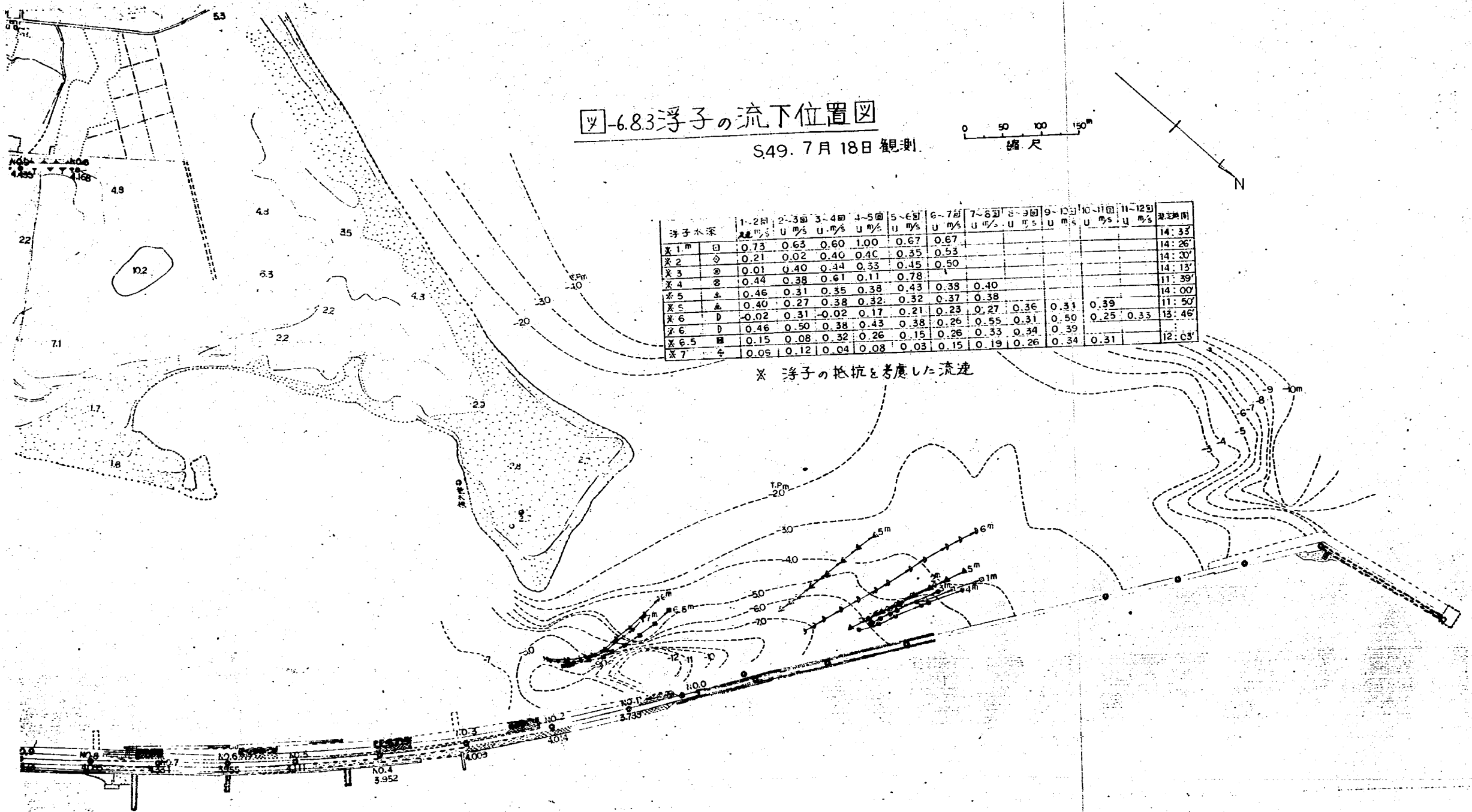


図-6.84 浮子の流下位置図

S.49. 7月18日 観測

0 50 100 150m
縮尺

浮子水深	1-2m	2-3m	3-4m	4-5m	5-6m	6-7m	7-8m	8-9m	9-10m	10-11m	11-12m	12-13m	13-14m	観測時間
0.1	0.73	0.77	0.82	1.03	1.08	1.08	1.13	1.14						11:05
3.5	0.58	0.31	0.26	0.38	0.37	0.39	0.42	0.42	0.39	0.41	0.36	0.38	0.44	13:23
4.5	0.15	0.79	0.09	0.29	0.38	0.41	0.39	0.42	0.39	0.39	0.44	0.22	0.50	12:53
5	0.23	0.12	0.09	0.12	0.20	0.29	0.32	0.30	0.40	0.36				11:20
5.5	0.04	0.68	0.17	0.37	0.20	0.36	0.39	0.39	0.44	0.49	0.41	0.38	0.38	

※ 浮子の低抗を考慮した流速

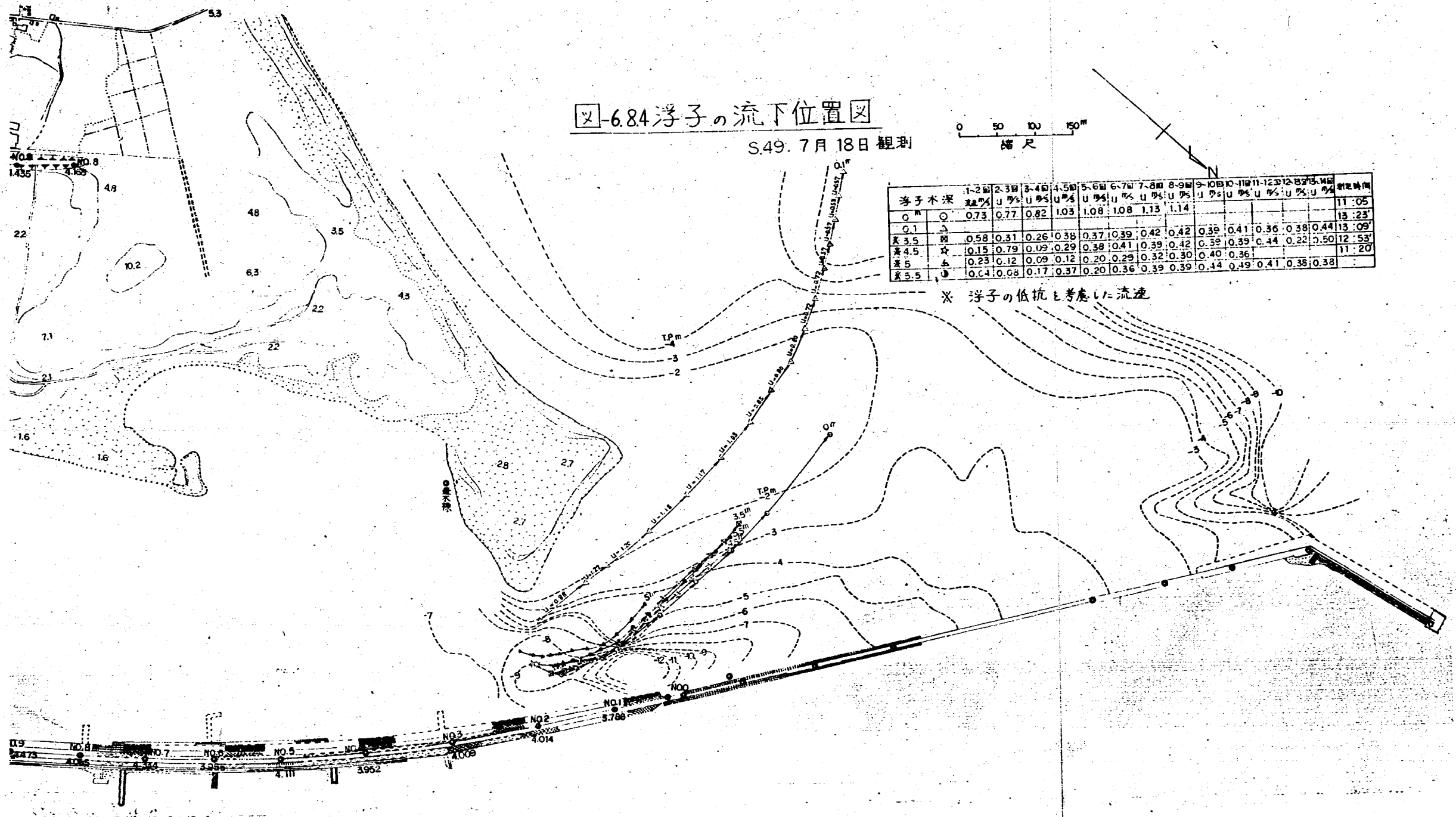


図-6.9 流速値の比較図

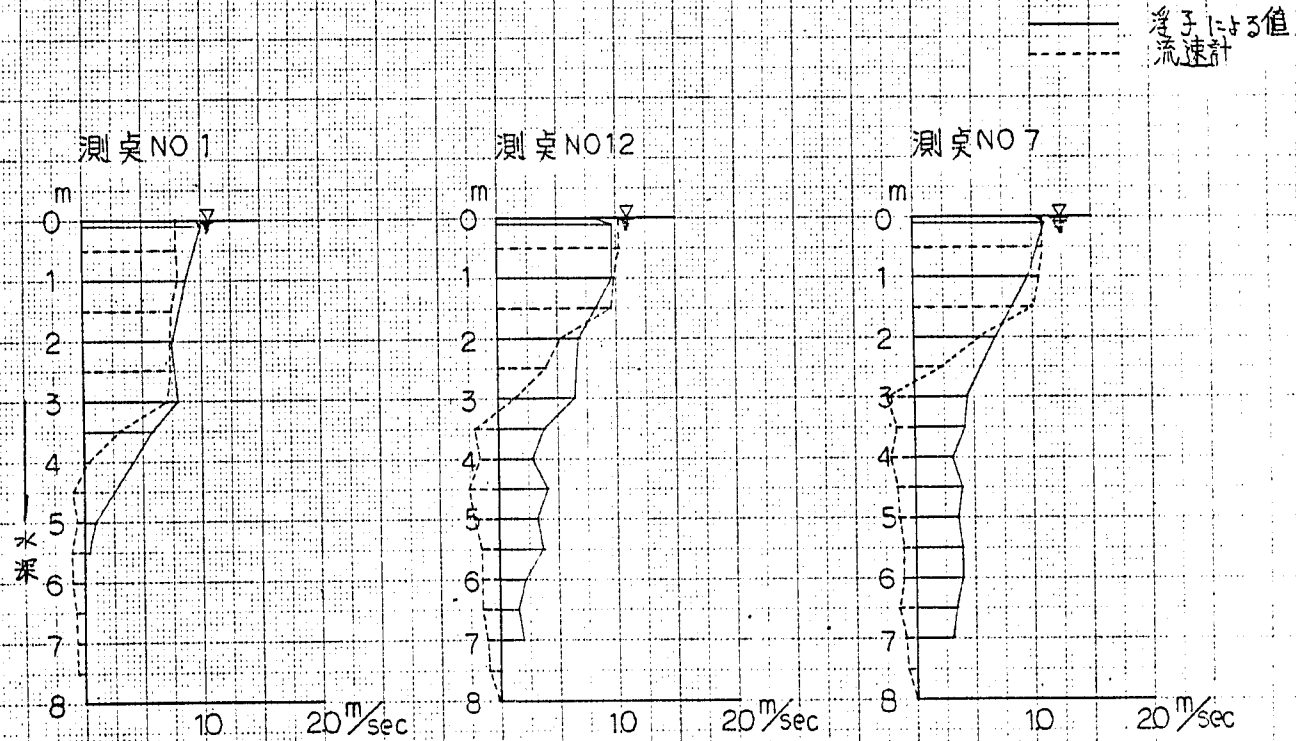
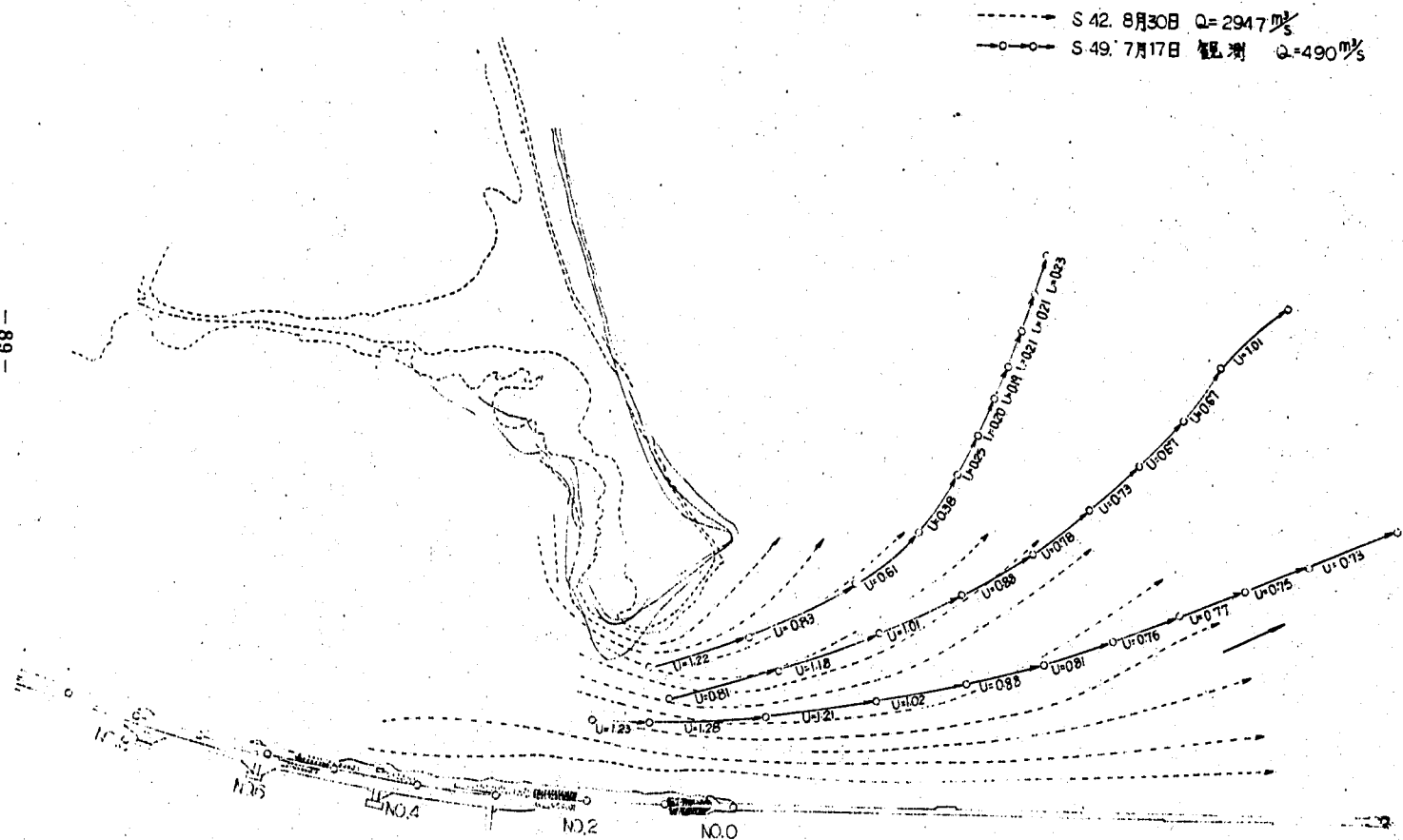


图-6.10 最上川河口部表面流



(付) 第7章 最上川河口における塩水遡上と河口流について

7-1 調査概要

最上川下流部における塩水遡上は、太平洋岸と違って潮位変動が少ないことなどから、安定した弱混合型の塩水くさびが生じ、遡上範囲は満水時の調査で、約6.2km程度まで観測されている。この最上川下流平面図を図-7.1に示す。また河口部は冬期季節風により閉塞し、流路幅が減っており、洪水の疎通上その対策が計画されている。この最上川下流部において、塩水くさびの形状と、河口部から河口外での混合状態および淡水の流出状況等を把握するため、前年度に引き続き、昭和50年8月26～28日にかけて現地観測を行なった。観測は表-7.1に示す項目について行なった。

このうち深浅測量については、音響測深機を用い、濃度分布の測定は水深方向が境界面付近で25cm間隔、他は50cm間隔で電導度計(EST-3型)による電導度の直接測定と、一部で採水による測定も行なった。また流速分布の測定は、濃度分布測定点と同一地点でブライス型流速計と一部でプロベラ式小型流速計にて、濃度分布測定と同一水深間隔で測定を行なった。河口外淡水流の拡がり状況は、図-7.2に示すブリキ板を十字状に作り、これを各水深ごとにゴムまりで浮かせたものを用いて河口部より流し、岸から2台のトランシットにより、時間と流下位置を求めた。

項 目	実 施 日	内 容
○河口砂州測量	8月26日	河口砂州形状の測量
○深浅測量	8月26日	河口部、河口外15測線を測量
○水位測定	8月26～28日	砂州内側、導流堤末端、酒田港側、下瀬閘門(CS・23)の5測点で測定
○流量観測	8月26・27日	26日：出羽大橋直下流、両羽橋直上流、京田川宮野浦橋直上流で観測 27日：出羽大橋直下流で観測
○浮子の流下位置の観測	8月27日	河口外淡水流の拡がり状況 各水深別による流下位置
○濃度、流速分布の測定	8月27・28日	河道内および河口外67地点の測定

表-7.1 調査項目一覧表

7-2 調査結果

7-2-1 水位 流量について

水位の測定は下瀬閘門(河口より2084.6m地点)、砂州内側(河口より247m地点)および導流堤末端(河口0m地点)の酒田港側との2カ所で行なった。この時間水位曲線を図-7.

3に示す。水位の時間的变化は、いずれも午前中は下降し、正午ごろ干潮になり、午後は水位が上昇する。これは潮位表より求めた酒田港の計算潮位とよく一致する。測定された観測中の水位変化は、河口部および下瀬開門とも約15cm程度であり、また導流堤末端での最上川と酒田港側では1.5～3.0cm酒田港側が低い。なお濃度および流速分布測定時の平均潮位は27日がT・P 0.45m, 28日はT・P 0.46mであった。

いっぽう、最上川における流量は砂越（河口より11.0km地点）のH～Q図より求めた時間流量曲線および8月26日、27日の両羽橋直下流と出羽大橋直上流で我々が行なった流量観測結果より求めた。この流量観測結果の横断方向流速分布図を図-7.4.1～7.4.4に示す。

観測時の横断河床は両羽橋地点では昭和48年3月測量の河床と大差はないが、出羽大橋地点では河床が高くなっている。これは昭和48年3月以降に出羽大橋が建設され、この影響によるものとも考えられる。

測定された流速分布はかなり小さく、測定誤差も多いと思われるが、流速計の検定曲線は図-7.5.1～7.5.3のようになかなり良い相関を示しており、流速 5 cm/s 以上は信頼性はあるものと思われる。また、この観測結果と砂越地点のH～Q図と比較したのが図-7.6である。これによれば8月24日に $240\text{ m}^3/\text{s}$ 程度の流量が出ており、その後の減水した時点で観測を行なっている。観測結果はH～Q図よりいくぶん少ない結果になっているが、流速値が小さいなどより誤差も考えられるので、観測期間中の時間流量曲線は砂越地点のを用いた方がよいと思われる。なお最上川河口部で合流する京田川のH～Q図および観測結果も同図に示してあるが、京田川の場合は、流速値もあまり小さくないため、観測値の方が信頼性があるのではないかとと思われる。これより塩水くさび観測時の平均流量は27日が $Q=61.0\text{ m}^3/\text{s}$ 、京田川 $Q=19.0\text{ m}^3/\text{s}$ 、28日が $Q=55.0\text{ m}^3/\text{s}$ 、京田川 $Q=19.0\text{ m}^3/\text{s}$ とした。

7-2-2 風速および波高について

我々の観測時における酒田港の風速、波高を示すと表-7.2のようである。

酒田港における風向は、冬季においてはNWが卓越し、春および夏、秋においてWNWまたはW方向が多いといわれている。観測時の8月26～28日は、午前9時頃までいずれもESE方向であり、昼から午後にかけて、26日がSからW方向を経てNNW方向となっており、27、28日は、W～NNW方向となっている。これらの風速はいずれも $2.0\sim4.0\text{ m/s}$ であり、あまり大きくはなかった。

いっぽう波高は、いずれも小さく、8月26日が最大で約30cm程度であり、 $H_{1/3}$ で20cm程度である。27日はさらに小さく最大で15cm、 $H_{1/3}$ が10cmである。28日は3日間のうちいちばん波高が大きく、最大で60cm、 $H_{1/3}$ は約37cm程度となっている。したがってこの3日間のうち観測条件としては8月27日がいちばんよかったと考えられる。

月日	8月26日					8月27日					8月28日				
	風向 風速(m/s)	波高(m)		周期(sec)		風向 風速	波高(m)		周期(sec)		風向 風速	波高(m)		周期(sec)	
		Hmax	H $\frac{1}{3}$	Hmax	H $\frac{1}{3}$		Hmax	H $\frac{1}{3}$	Hmax	H $\frac{1}{3}$		Hmax	H $\frac{1}{3}$	Hmax	H $\frac{1}{3}$
8	ESE 4.8	0.38	0.25			ESE 4.2	0.20	0.13			ESE 3.2	0.41	0.27		
9	ESE 4.3					SW 1.3					ESE 1.7				
10	SE 3.5	0.27	0.18			NW 2.8	0.16	0.11			WNW 2.8	0.60	0.37	6.0	6.5
11	S 1.0					WNW 3.5					W 3.3				
12	WSW 3.2	0.28	0.18			NW 2.8	0.12	0.08			WNW 2.8	0.50	0.37	5.5	6.5
13	WSW 3.5					SW 2.2					WNW 3.2				
14	W 3.7	0.29	0.19			WNW 2.5	0.11	0.07			WNW 3.7	0.60	0.35	6.0	6.3
15	W 4.0					NNW 3.3					W 3.2				
16	NW 2.3	0.23	0.15			NW 4.2	0.16	0.11			NW 3.7	0.55	0.36	6.0	6.0
17	NNW 2.0					NNW 5.2					NNW 2.8				

表-7.2 酒田港風速，波高資料

7-2-3 河口砂州，河口外深淺測量結果

最上川河口は，冬季のシベリア大陸からの季節風によって閉塞し（最小河口巾50～60m），春季の融雪出水（ $Q=2000\sim3000\text{ m}^3/\text{s}$ ）によって砂州がフラッシュされる。その後徐々に砂州が伸長し，夏季の梅雨性集中豪雨による洪水によって再びフラッシュされ，秋季より冬季にかけて閉塞傾向を強めていくというパターンを繰り返している。いっぽう河口砂州の形成には塩水くさびの存在も大きな影響を与えるし，河口砂州は塩水侵入防止のうえからは平水時の水質維持に功献している。我々の実験では，川幅を局所的に河口部で半分に狭めた場合は，狭窄部の川幅と同じ，一様水路の場合より塩水の遡上範囲が，少ない結果が得られている。観測時の河口砂州汀線測量結果では，砂州部の最小川幅は170m程度である。この程度の河口幅は冬季を除いて各月で平均的に出現しているが，5～7月にかけて特に多いと言われている³⁷⁾。これは前年度の7月の観測時における最小川幅とほぼ同程度である。しかし今回は砂州の一部で浚渫が行なわれているためか，その形状はいくぶん異なるようである。

つぎに河口部および河口外地形の状況を知るための深淺測量結果を，砂州形状の測量結果とともに，昭和49年7月に測定した深淺図と比較すると図-7.7のようになる。これまでの洪水前後の調査では，右岸導流堤から700m間付近で大きな変化が見られ，洪水によってはき出された土砂の堆積，波による変化が大きく，それより左岸側では大きな変化は見られないが，砕波点の違いによる沿岸砂州の移動があることが観測されている。今回の観測は音響測深機を用いたが，

前回はこれが故障のため、おもりをつけたロープで測定したため、波あるいは流れの影響により誤差もあると思われるが、河口砂州先端部の右岸側導流堤ぞいの局所的な深掘れ部の最深河床は前回より浅く、その範囲も小さくなっている。またその下流導流堤中央部から先端にかけても同様浅くなっている。導流堤先端付近の等深線は海岸線に平行に連なっており、前年7月観測時よりいくぶん浅くなっている。

7-2-4 濃度および流速分布について

濃度および流速分布の測定は河口外、河道内を含めて8月27日に35測点、28日に31測点について図-7.8に示す位置で測定を行なった。この27日の結果を図-7.9.1~7.9.5に、28日の結果を図-7.10.1~7.10.5に示す。河道内で測定された濃度分布は淡塩境界面において急激に変化し、界面の安定を示しており、流速分布も淡水部でほぼ一定値を示し、境界面付近で急激に変化している。しかし塩水くさび先端付近では、履歴あるいは河床地形変化による混合の影響等で濃度勾配がゆるやかになっており、また下層塩分濃度もうすくなっている。いっぽう河口部から河口外では、河口から遠ざかるにつれて淡水厚がうすくなり、やがて表層水面まで塩水が混合していることがわかる。流速分布も濃度分布と対応するように連続的に変化し、下層の海水部では逆流現象を呈している。横断方向については、河口部および河道内とも一部で測定を行なったが、河道内においては濃度変化、淡塩境界面位置等の差異はみられなかった。しかし、河口最小川幅部およびその下流では、右岸から左岸方向へ淡水深が小さくなっており、淡塩境界面が横断方向に勾配がついている。また最小川幅地点では、砂州の影響によるものか、あるいは淡水深が小さいためか、流速も左岸側の方が大きい傾向にある。さらにこれらの結果を縦断図に示したのが図-7.11.1~7.11.2である。河道内においては淡塩境界面が明瞭であるが、くさび先端付近では、最深箇所の一部のみに塩水が存在するため、最深部の蛇行や河床の起伏により、淡塩水が混合するの、あるいは塩水くさびがまだ遡上中なのか、塩分濃度がうすくなっている。とくにCS.28~32の間で河床が高くなっており、この地点で混合されるのか、あるいはこの地点から上流の深部へ落ち込むようなかたちで塩水が遡上中とも考えられ、これより上流ではとくに下層濃度もうすく、その位置も最深部の低い所に存在する。河口部から河口外においては、淡水厚が減少すると同時に河水の流速が大きくなり、このため淡水と塩水の混合が促進され、濃度勾配がゆるやかになっているようである。この河口部から河口外での濃度、流速分布図を別図に示したのが図-7.12.1~7.12.2である。塩水くさびは淡水の流下にもなっており下層塩水の境界面付近が連行され、あるいは下層塩水がわずかずつ拡散していく。このため淡水は河口外向かって徐々に塩分濃度を増し、その結果密度の平衡を保つため、下層塩水は図のように逆流現象を生ずる。さらに塩水上を流下する淡水の流速分布は、淡水厚の減少とともに舌状分布を示してくる。特に河口を出た流速分布はこの傾向が著しい。なお前年の7月18日の塩水くさび先端

位置は $Q = 355 \text{ m}^3/\text{s}$ で河口から 700 m 地点付近であった。

7-2-5 浮子による流速、拡がり状況の測定

浮子による淡水流の拡がり状況とその流下速度の測定は、河口砂州部の最小川幅付近より浮子を投下し、その流下位置と時間を求めた。この8月28日における各水深の浮子の流下位置図を図-7.13.1~7.13.2に示す。浮子水深は水面を含めて 2.0 m まで行なったが、河口外での拡がり状況が把握できるのは、水深 0.5 m 程度までと考えられる。これは流速分布測定結果でもわかるように、下層塩水部は逆流現象を呈しており、水面の浮子（ゴムまり）の影響により流下するのであって、実際は流下しないのではないかと考えられる。表層の流れは、河口を出た距離とともに拡がり方が増大しており、淡水の厚さが減少し、海水の上を四方に拡がって行くようである。またこの拡がり方は水面ほど大きい傾向を示しており、濃度の測定結果でも明らかに淡水厚がうすくなるにしたがって海水が混入して行き、それとともに海水に運動量を奪われ、同時に流れが拡がって行くために流速は減少していくようである。この各水深における流下位置と時間より測定点間の平均流下速度を求め、浮子水深 0.5 m 以上については、水面浮子の抵抗を考慮した流速補正を次式により行なった。²³⁾ 右図より浮子A・Bをつなぐ糸の影響を無視すると、

$$u_2 = u \pm \left[\frac{C_{D1} \cdot A_1}{C_{D2} \cdot A_2} (u - u_1)^2 \right]^{1/2} \dots\dots (I) \quad \begin{matrix} u_1 > u \rightarrow - \\ u_1 < u \rightarrow + \end{matrix}$$

ここに u_1 : 浮子A・Bがおのおのの個体のときの浮子Aの流速

u_2 : 浮子A・Bがおのおのの個体のときの浮子Bの流速

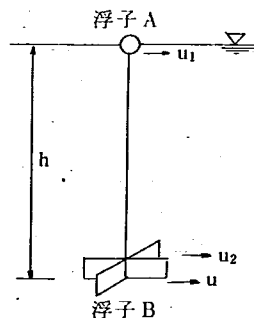
C_{D1} : 浮子Aの抗力係数

C_{D2} : 浮子Bの抗力係数

A_1 : 浮子Aの水面下流れ方向断面積

A_2 : 浮子Bの流れ方向断面積

u : 浮子A・Bが連結されたときの相対速度

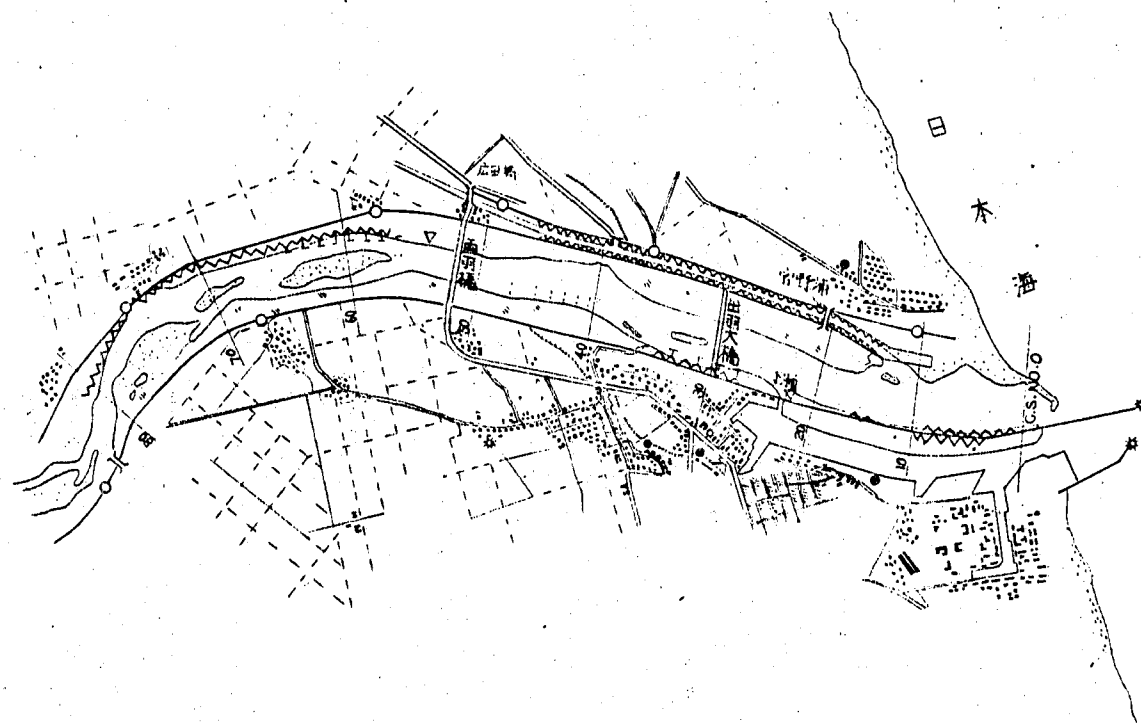


である。(I)式により、流下位置付近の表面流速 u_1 を用いて、水深 $h \text{ m}$ 地点の流速 u_2 を求めたのが、図中の流速値である。下層塩水部では流速計による測定で明らかに、逆流現象が生じているが、この計算結果では、糸の影響あるいは抗力係数等に問題があるのか、逆流現象は生じなかった。これら抗力係数等については今後さらに検討する必要がある。しかし、表層淡水部では流速計での測定点付近の流速値とかなり一致するようであり、表面付近³⁵⁾の流速値は河口から河口外に出る区間で速くなり、その後次第に遅くなっている。石狩川の観測では、表面流速は

河口を過ぎて川幅の約0.8倍程度沖でその最大値を示し、やがて減速して行く状況が観察されているが、最上川でも前年度の観測も含めて同様の傾向を示している。これら前年度も含めた表面付近の流速，流下位置図を図-7.13.3に示す。

図-7.1 最上川河口平面図

0 1.0 2.0 km
縮 尺



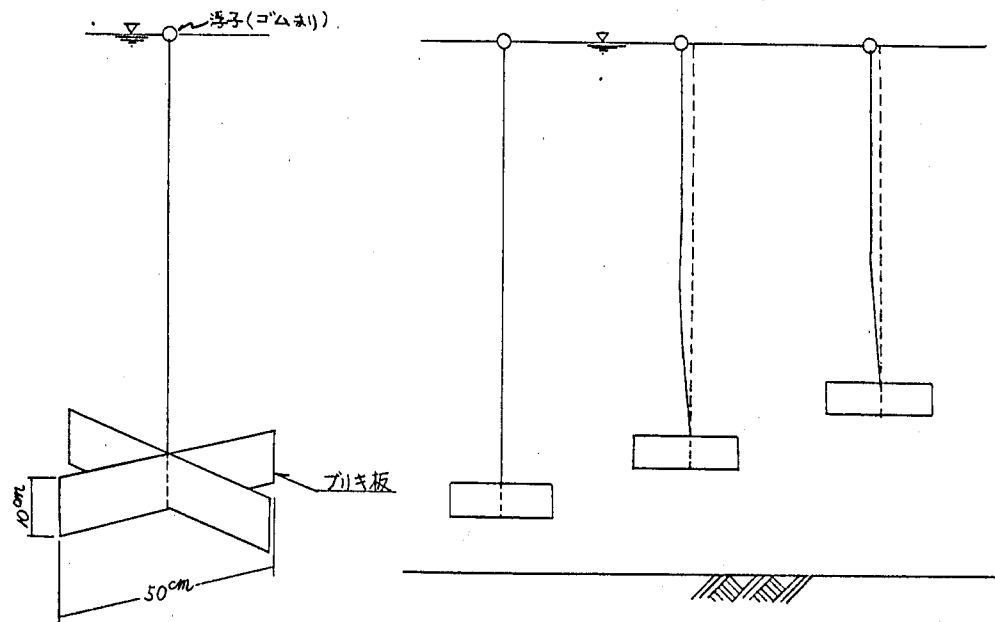


図-7.2 流速測定器具(浮子)概略図

図-7.3 時間水位曲線

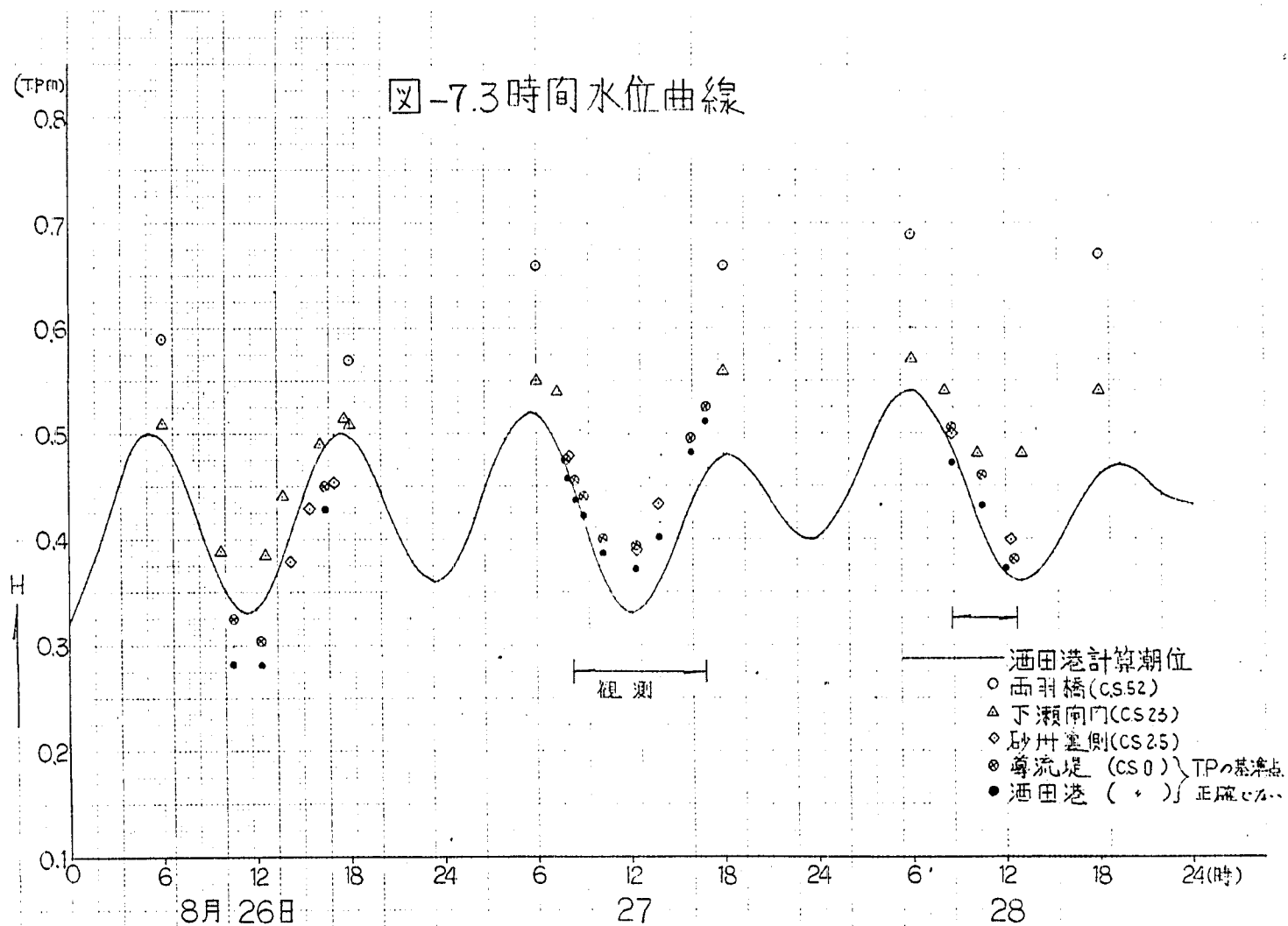


図-7.4.1 流速分布図

S.50年8月26日 15:10' ~ 15:51' 観測

出羽大橋直上流

—— CS.30

H-T.P.0.51^m

0 0.2 0.4 $\frac{m}{s}$
流速標尺

	A	Q
1	85.6 m	4.7 m ³ /s
2	82.2	7.8
3	71.4	6.4
4	81.6	6.1
5	92.2	7.8
6	86.6	8.2
7	57.8	4.3
8	84.0	3.2
9	21.8	1.9
10	20.4	0.8
11	29.5	1.2
12	68.8	2.4
13	85.9	2.6
14	66.0	1.0
計	886.8	58.4
断面平均流速 0.066 m/s		

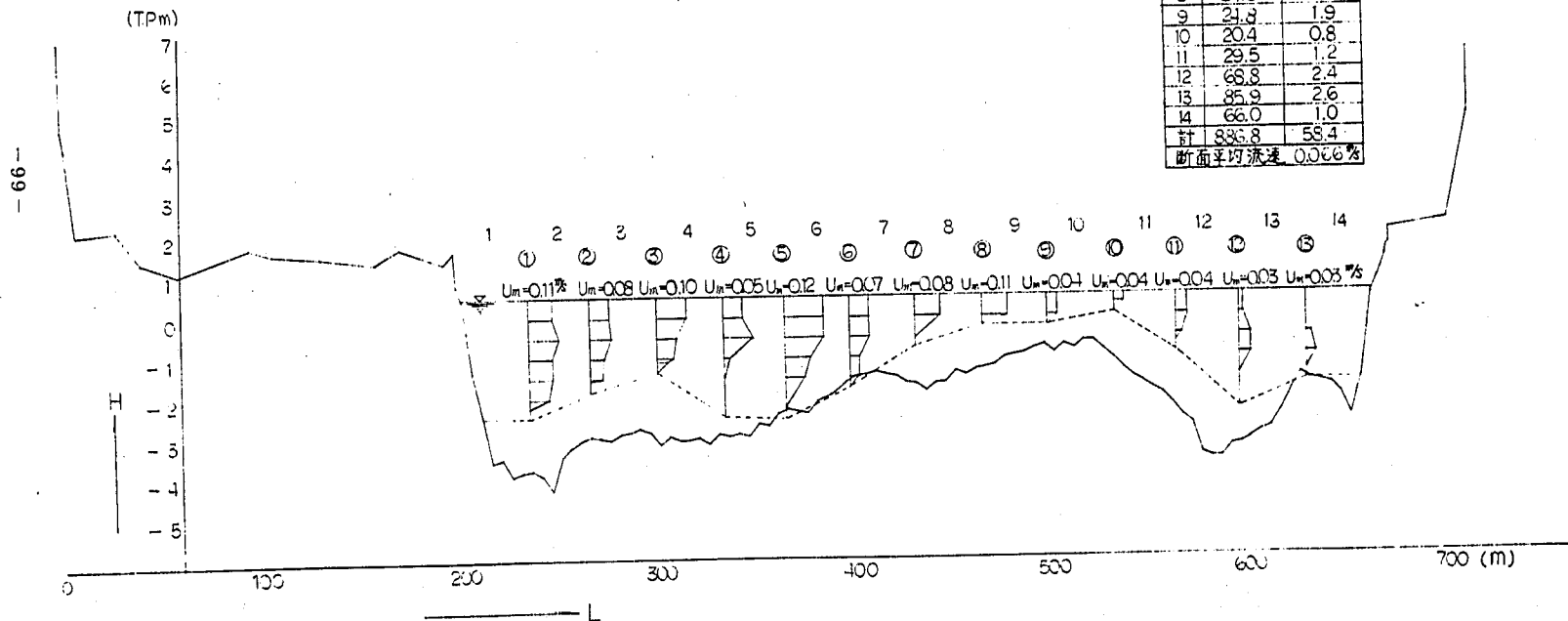


图-7.4.2 流速分布图

S.50年8月26日 13:56' ~ 14:36' 観測

両側橋直下流

—— CS.52

$H = T.P.055^m$

0 0.2 0.4 %
流速縮尺

	A	Q
1	16.3 m ²	1.1 m ³ /s
2	89.1	6.7
3	113.9	12.0
4	123.8	10.5
5	118.8	9.5
6	89.1	9.8
7	56.1	3.7
8	40.0	1.4
9	34.1	1.4
計	681.2	56.1
断面平均流速		0.082%

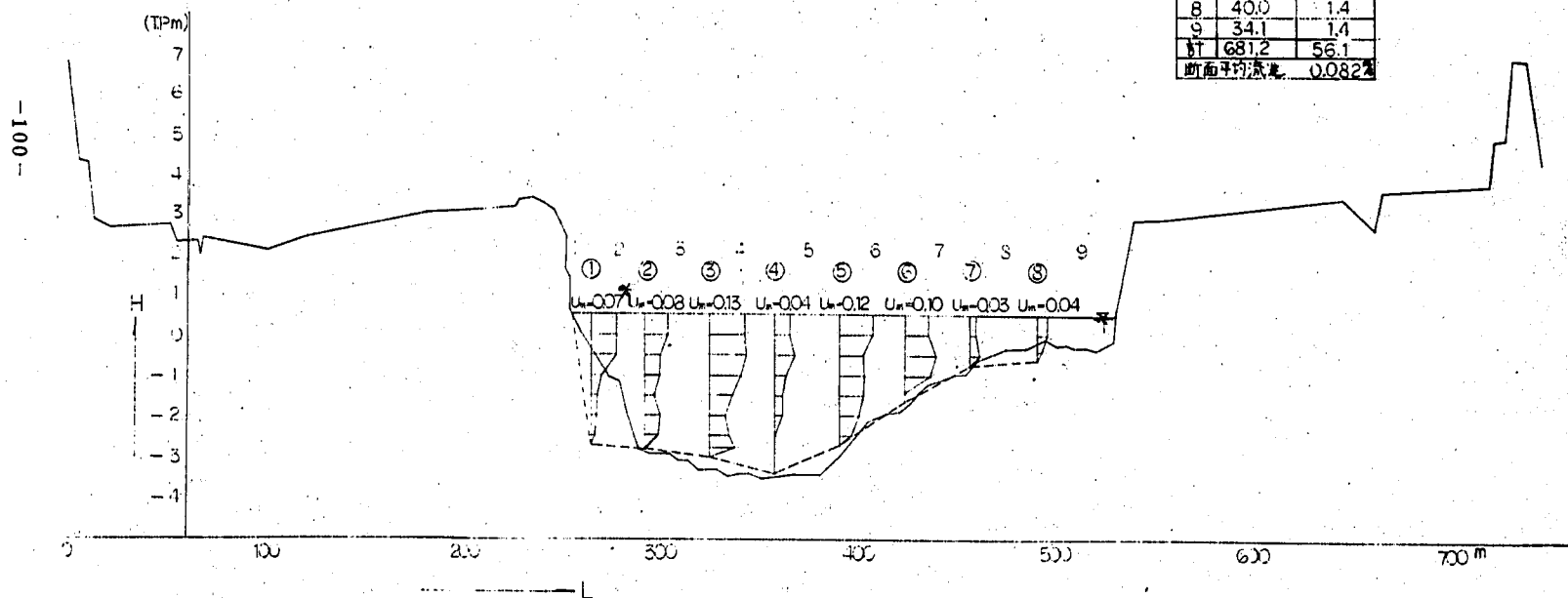


図-7.4.3 流速分布図

S.50年8月27日 8:12' ~ 8:55' 観測

両羽橋直下流

—— CS.52

H=T.P.O.66m

0 0.2 0.4 m/s
流速端尺

	A	Q
1	9.0m	0.0%
2	70.5	14
3	116.7	10.5
4	115.5	18.5
5	106.6	8.5
6	86.3	5.6
7	56.5	2.9
8	43.7	2.2
9	33.3	0
計	641.5	49.6
断面平均流速		0.077 m/s

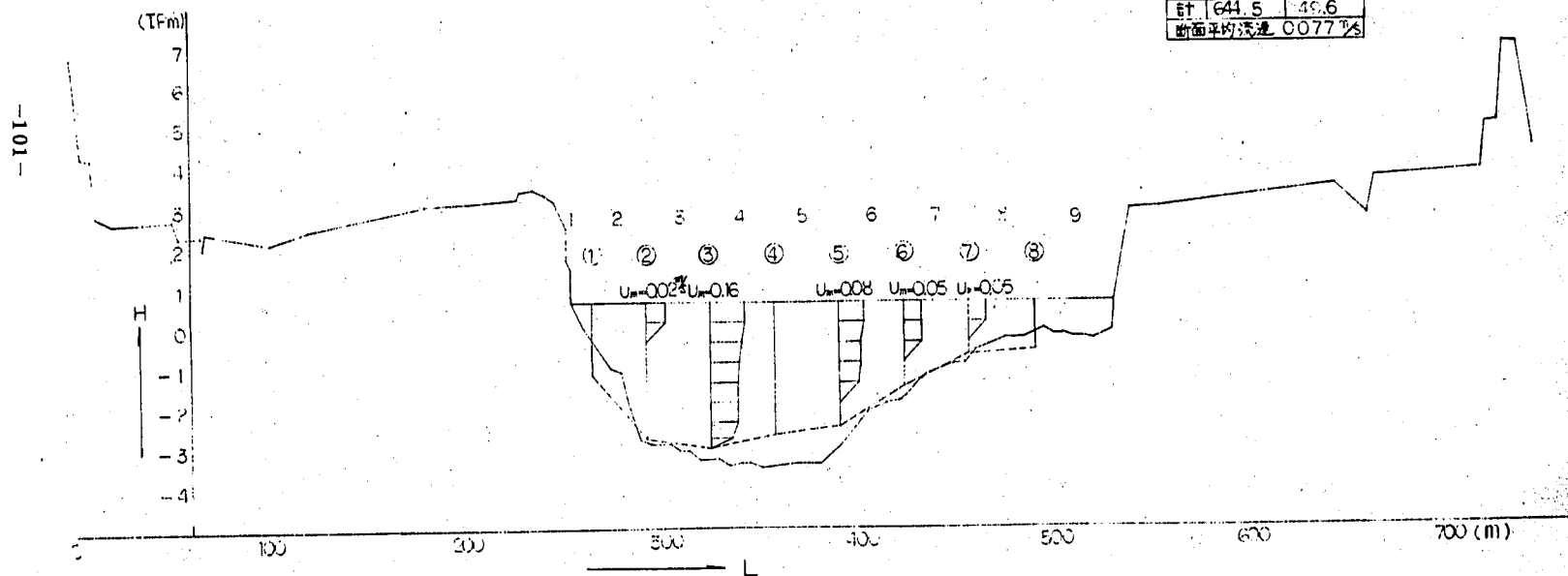


図-7.4.4流速分布図

京田川宮野浦橋直上流

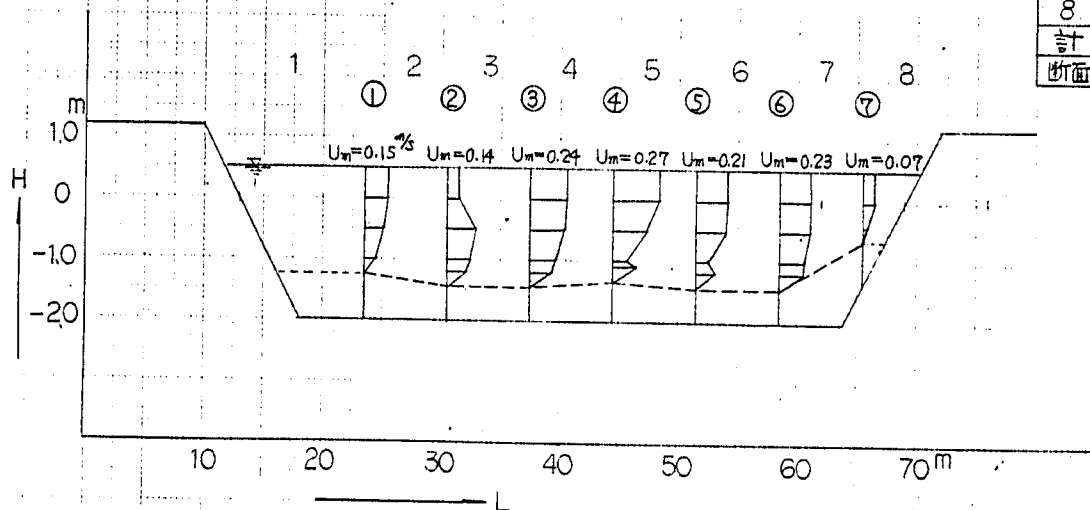
S.50年8月26日

16:29'~16:49' 観測

H=T.P.O.51 m

0 0.5 1.0 $\frac{m}{s}$
流速縮尺

	A	Q
1	16.7m	2.5 $\frac{m^3}{s}$
2	12.9	1.9
3	13.7	2.6
4	13.3	3.4
5	13.3	3.2
6	13.7	3.0
7	10.9	1.6
8	3.5	0.1
計	84.7	18.3
断面平均流速 0.22 $\frac{m}{s}$		



㊦-7.5.1 プライス型流速計検定曲線

流速計 N265
S, 50年9月20日 検定

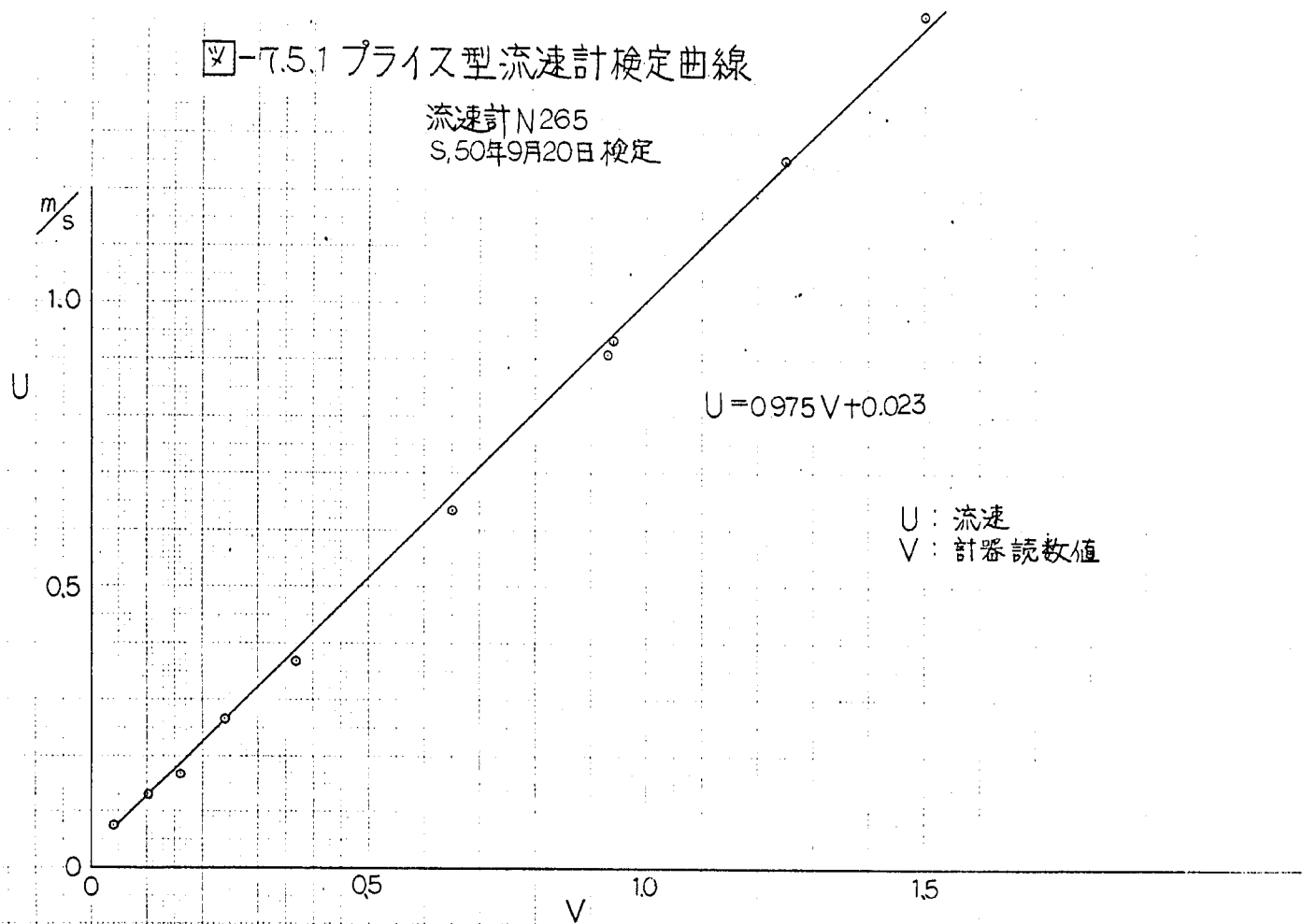


図-7.5.2 プライス型流速計検定曲線

流速計 NO3615
S.50年9月9日 検定

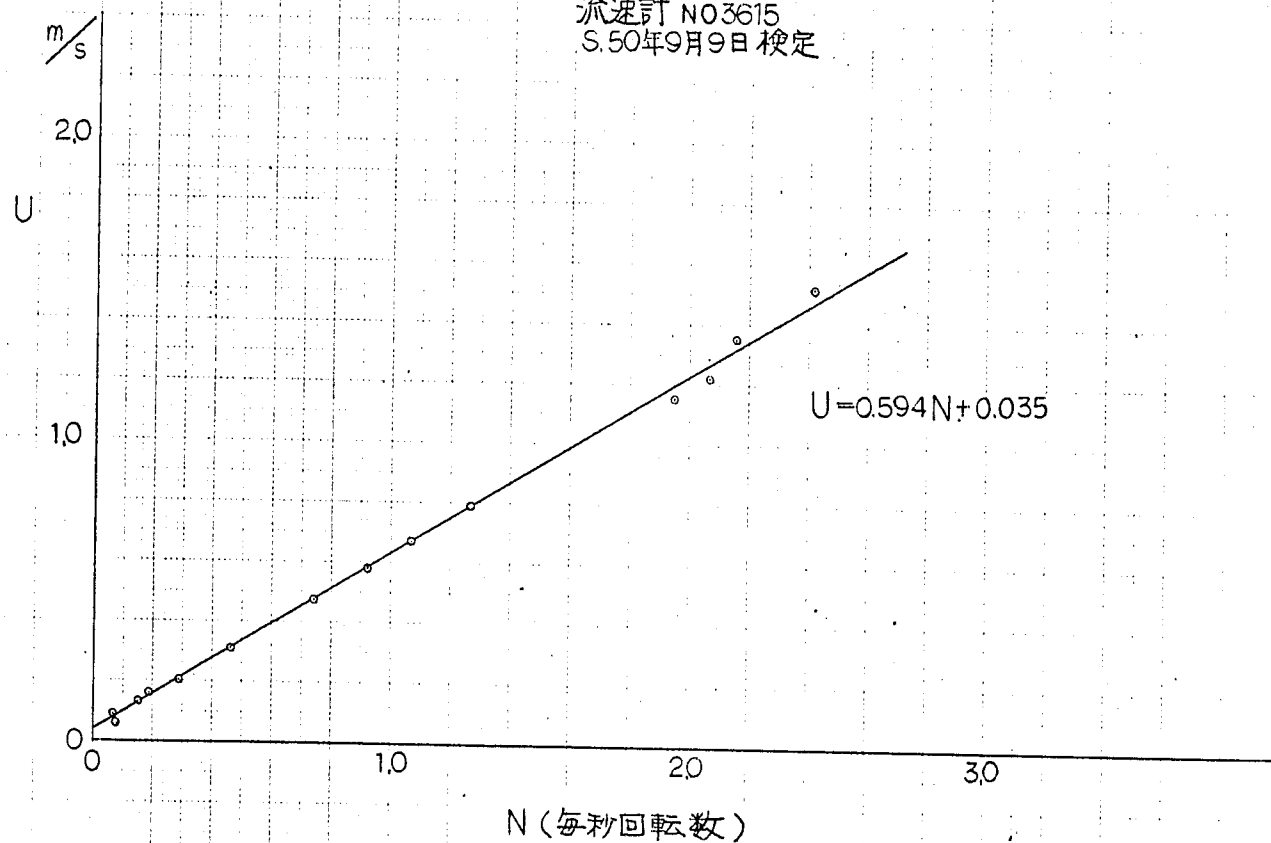


図-7.5.3 プライス型流速計検定曲線

流速計 NO3608
S.50年9月9日 検定

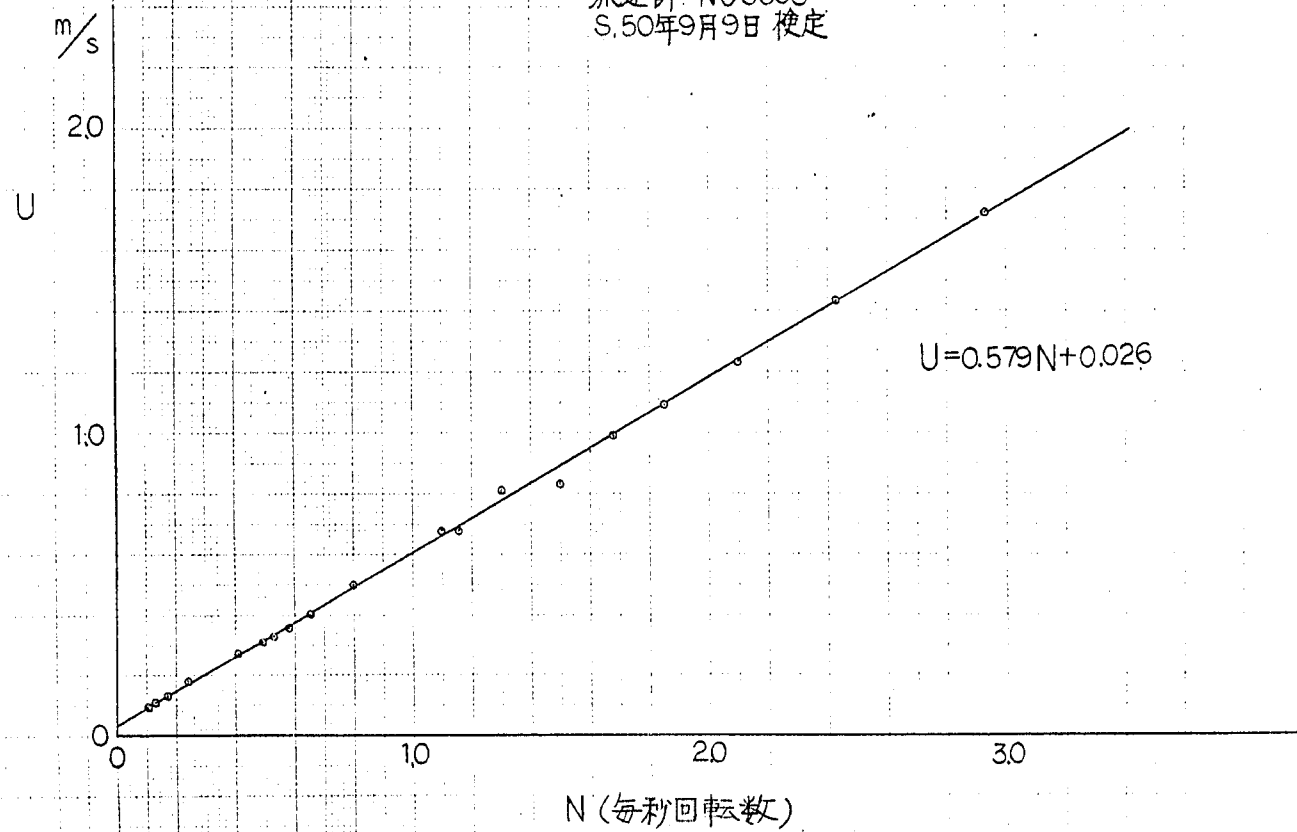


圖-7.6 時間流量曲線

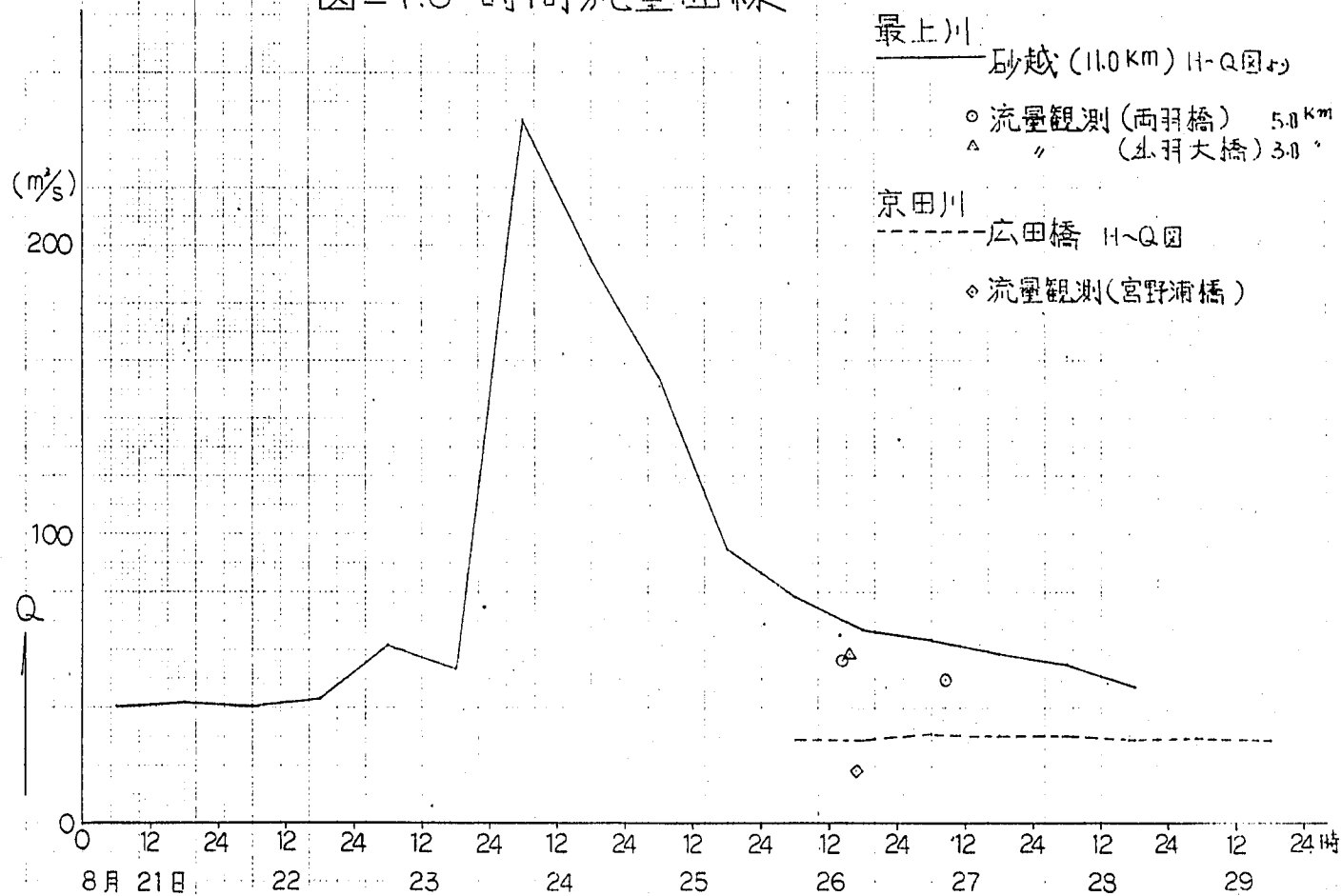


図-7.7最上川河口深浅図

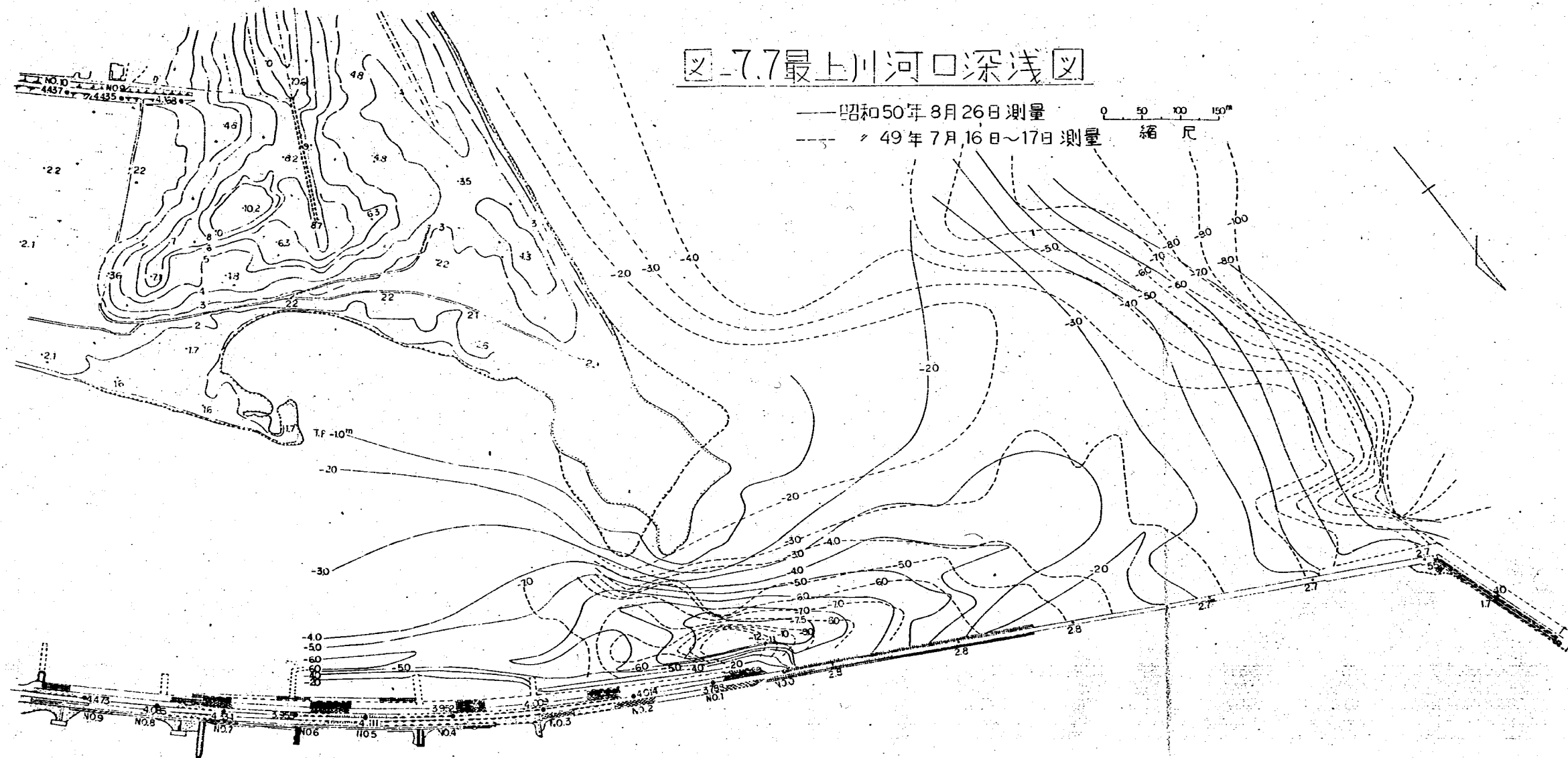


图-7.8测定与位置图

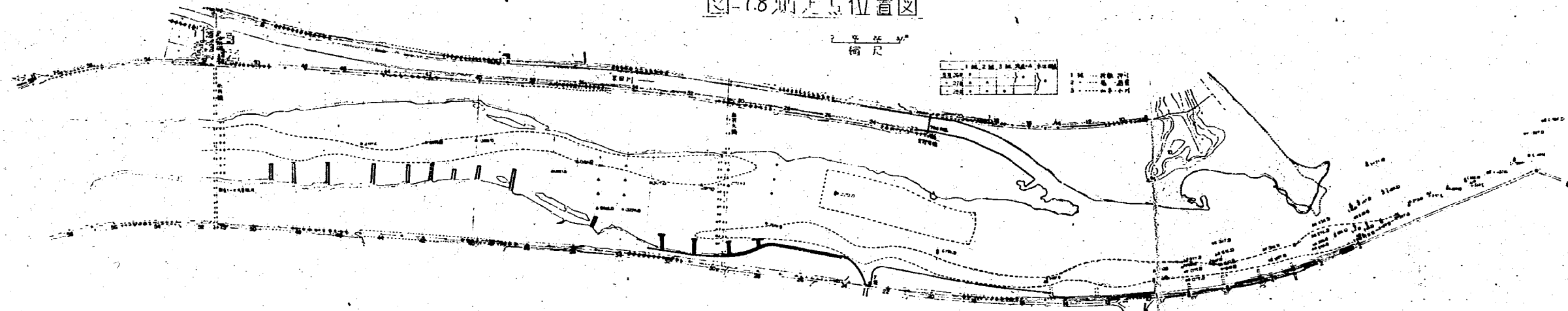


図-7.9.1 濃度・流速分布図

$Q = 61.0 \frac{m^3}{s}$
 $H = T.P. 0.45 m$
 京田川 $Q = 19.0 \frac{m^3}{s}$

S.50. 8月27日 NO.10~13 15:20~17:00 測定
 1~3 8:20~11:00
 濃度
 流速

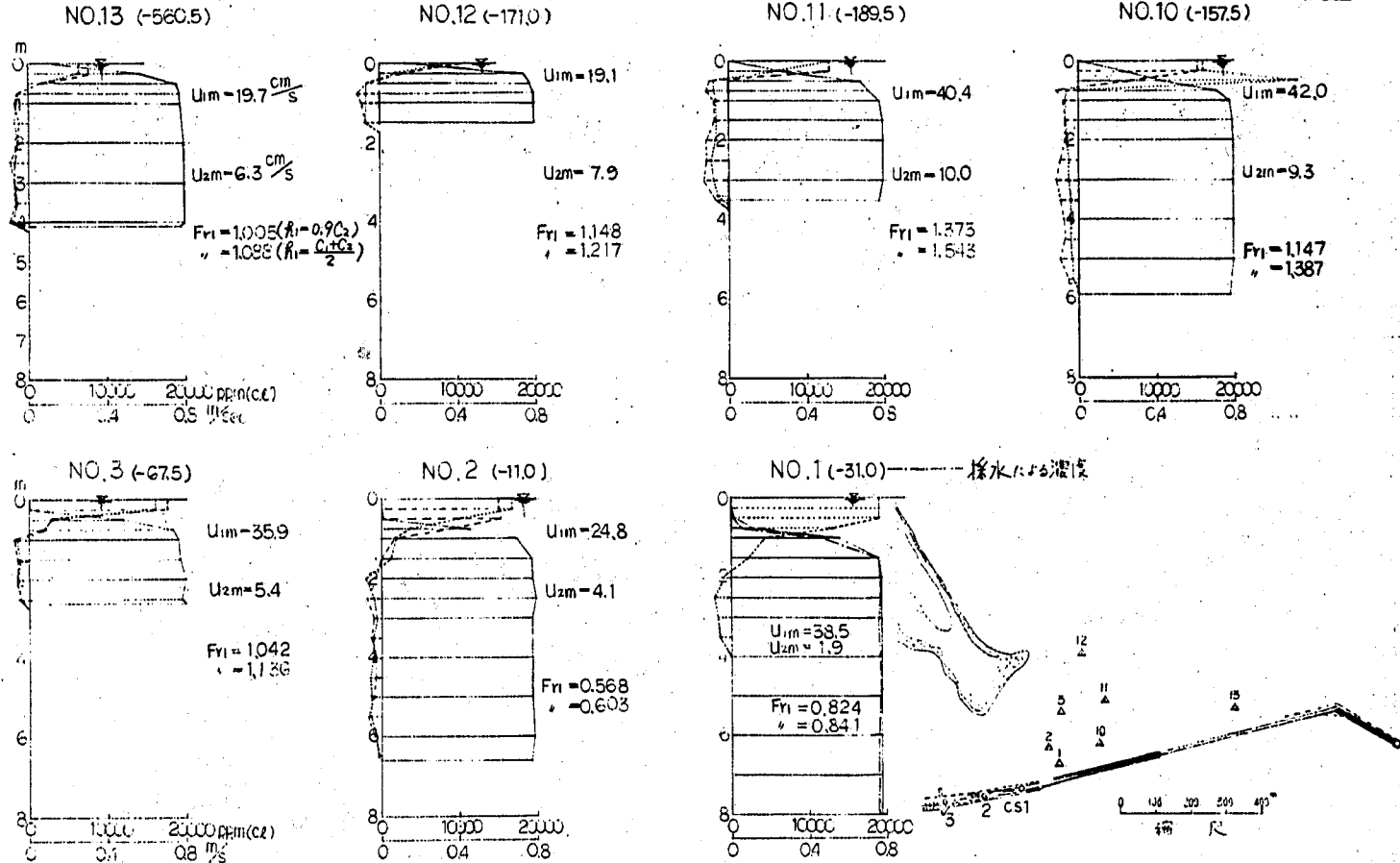


図-79.2 濃度・流速分布図

Q = 61.0 m³/s
H = T.P. 0.45 m
京田川 Q = 19.0 m³/s

S. 50年8月27日 NO.4 ~ 9 10:24 ~ 14:52 測定

—— 濃度
----- 流速

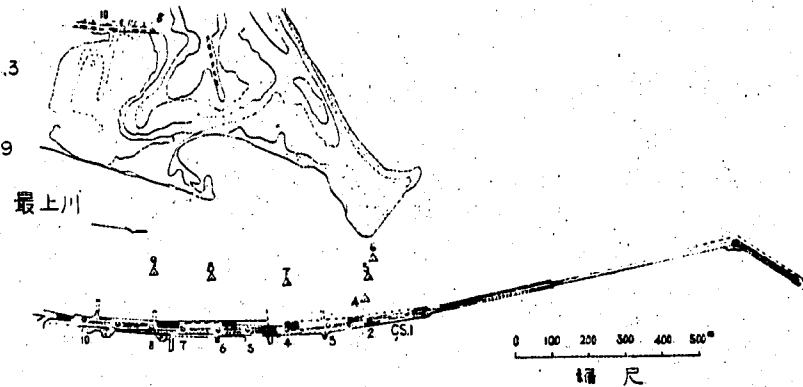
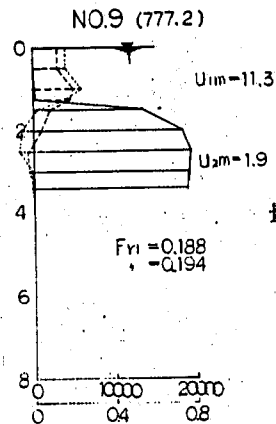
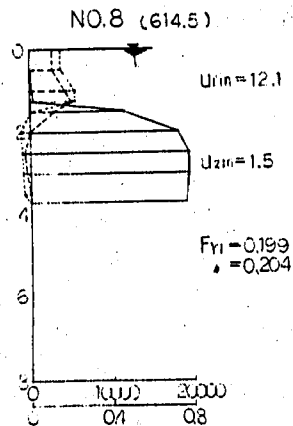
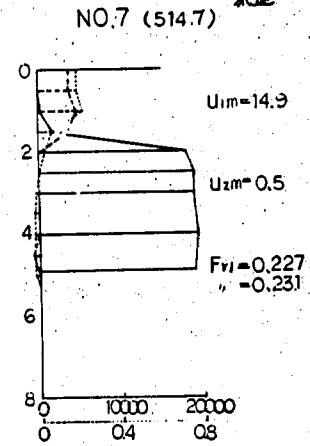
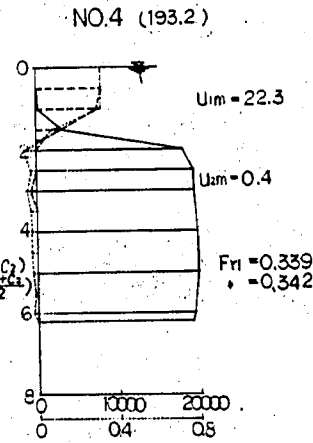
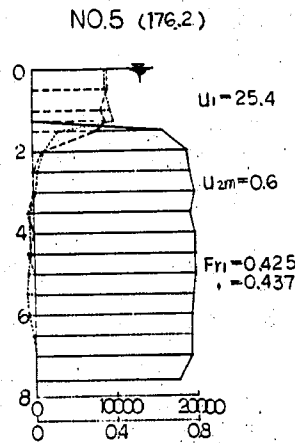
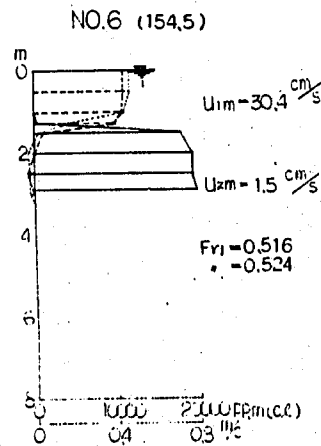


図-7.93 濃度・流速分布図

$Q = 61.0 \text{ m}^3/\text{s}$
 $H = 1.045 \text{ m}$
 京田川 $Q = 19.0 \text{ m}^3/\text{s}$
 S.50年3月27日 NO.1~CS.25 15:32~16:50 測定
 ——— 濃度
 - - - - - 流速

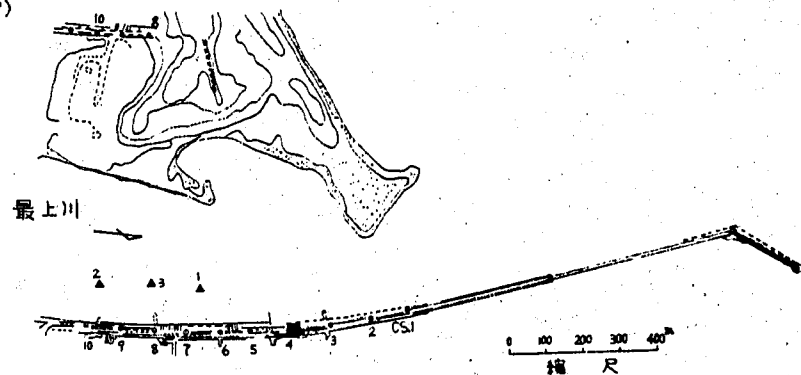
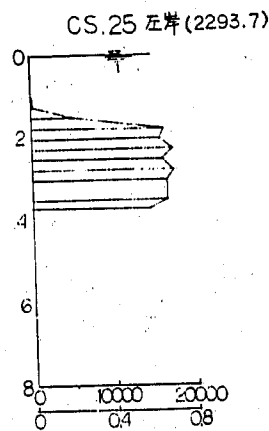
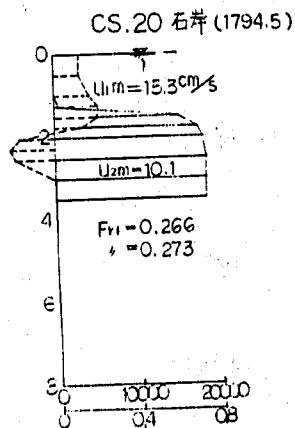
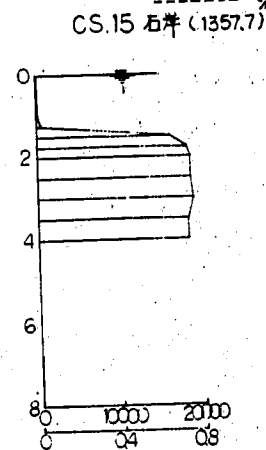
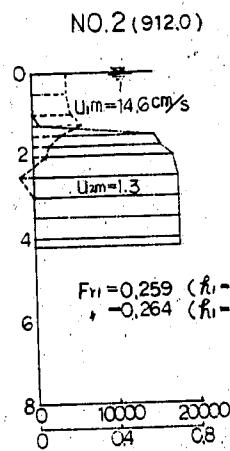
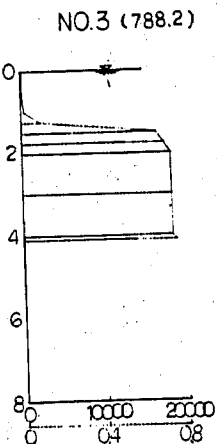
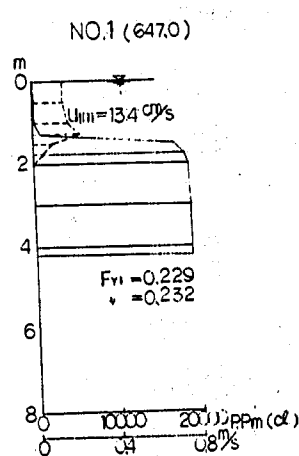


図-7.94 濃度、流速分布図

Q = 61.0 m³/s
H = 1.045 m
茅田川 Q = 19.0 m³/s

S. 50年 8月27日 CS 30~34 9:40 ~ 11:52 測定

—— 濃度
----- 流速

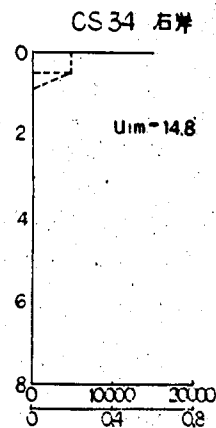
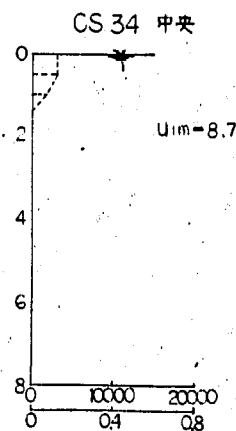
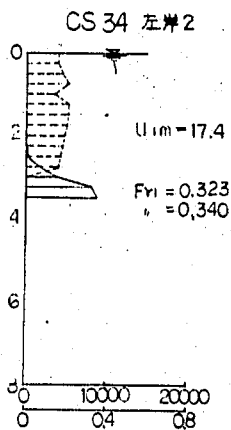
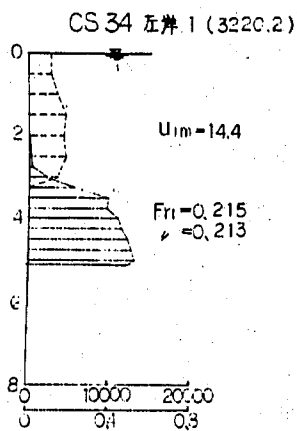
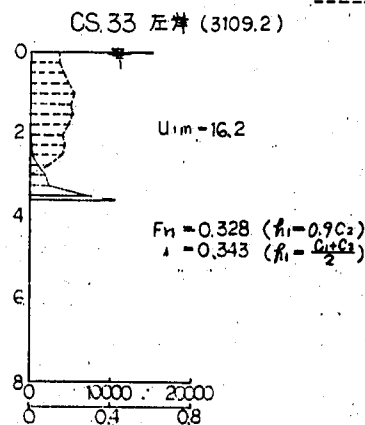
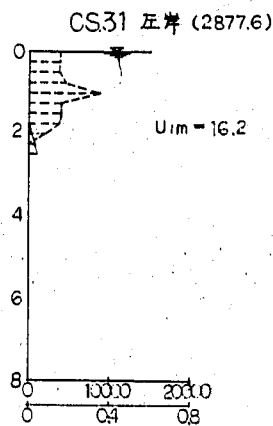
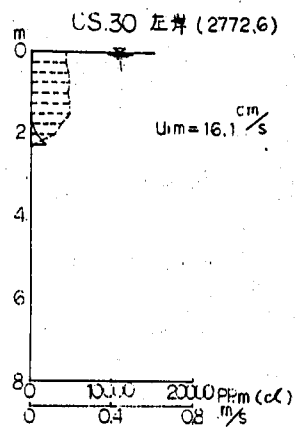


図-7.9.5 濃度・流速分布図

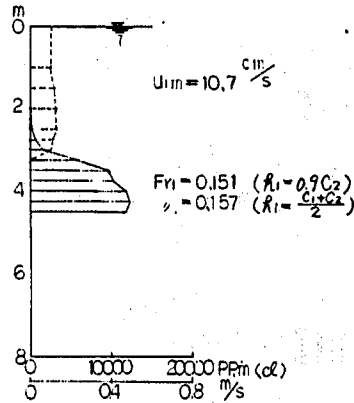
Q = 61.0 m³/s
 H = T.P. 0.45 m
 宇田川 Q = 19.0 m³/s

S 50年8月27日 CS.35 ~ 42

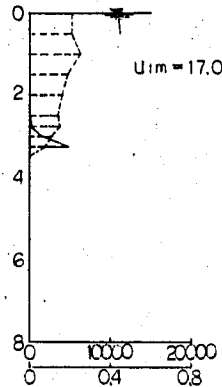
11:59 ~ 14:50 測定

—— 濃度
 - - - 流速

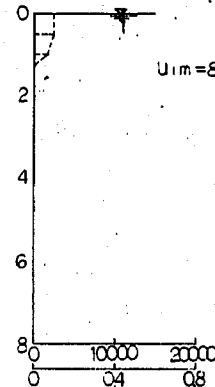
CS.35 左岸1 (3335.5)



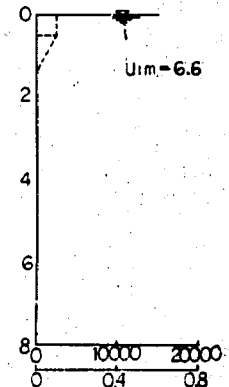
CS.35 左岸2



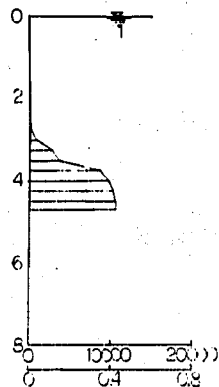
CS.35 中央



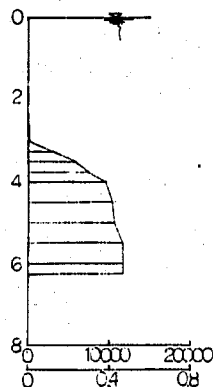
CS.35 右岸



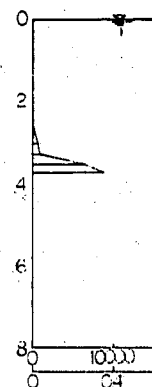
CS.36 左岸 (3441.5)



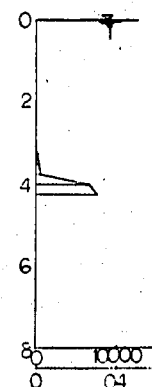
CS.37 中央 (3551.3)



(3888.9)
CS.40 中央



(4111.0)
CS.42 中央



(4389.4)
CS.45 中央

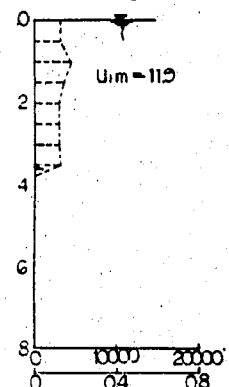


図-7.10.1 濃度、流速分布図

S 50年8月28日 NO.1 ~ 8 8:50 ~ 12:33 測定

Q = 55.0 m³/s
H = T.P. 0.46 m
安田川 Q = 19.0 m³/s

—— 濃度
----- 流速

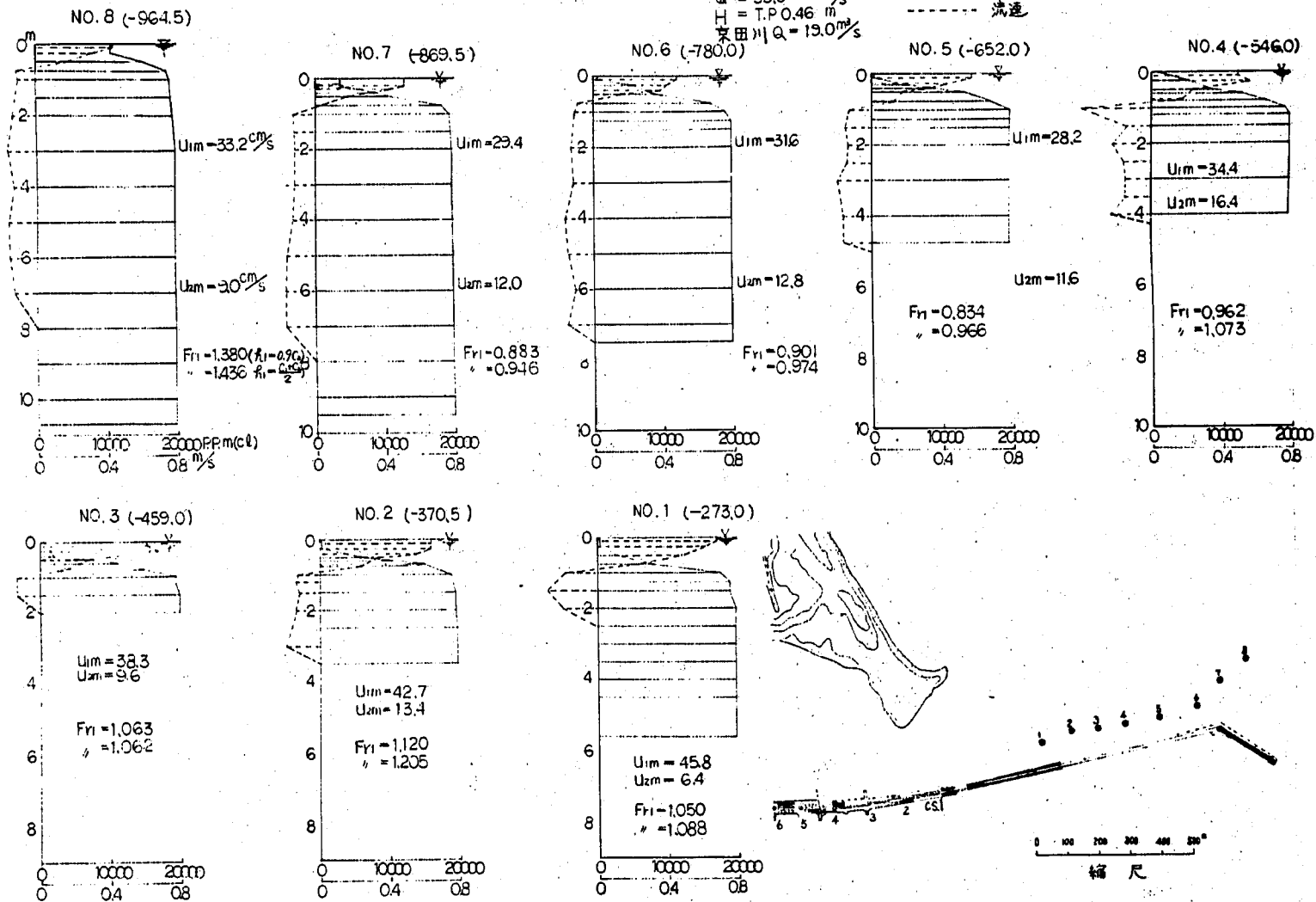


図-7.10.2 濃度、流速分布図

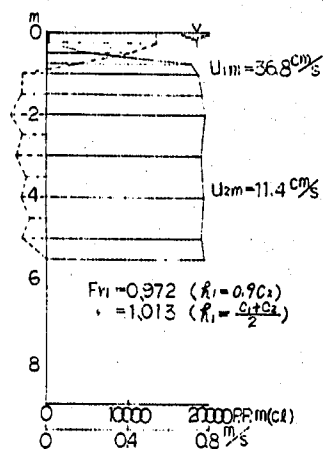
S.50年8月28日 NO.1 ~ 10 8:50 ~ 10:35 測定

$Q = 55.0 \frac{m^3}{s}$
 $H = T.P. 0.46 m$

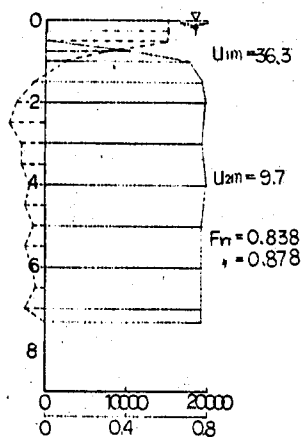
京田川 $Q = 19.0$ ㍔

—— 濃度
 - - - 流速

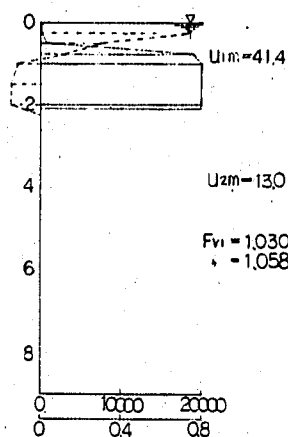
NO.1 (-207.0)



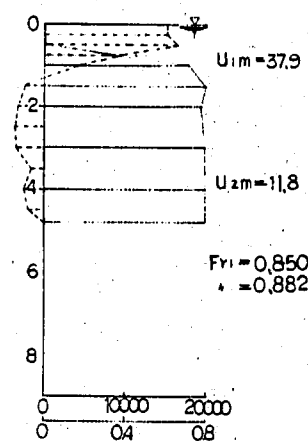
NO.2 (-63.5)



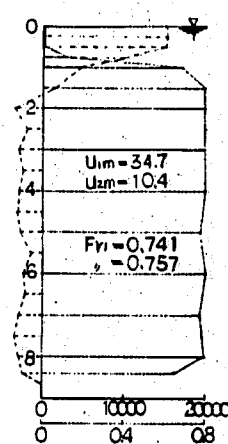
NO.10 (-34.0)



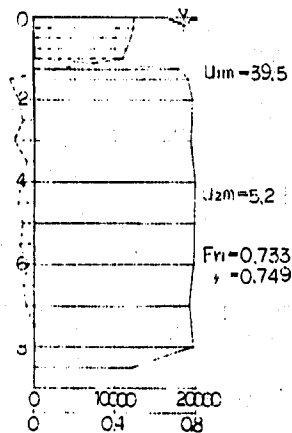
NO.9 (-28.0)



NO.8 (-5.5)



NO.3 (84.6)



NO.4 (186.2)

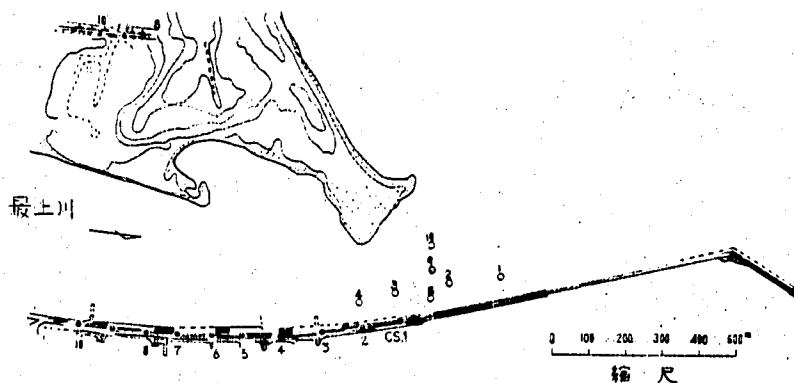
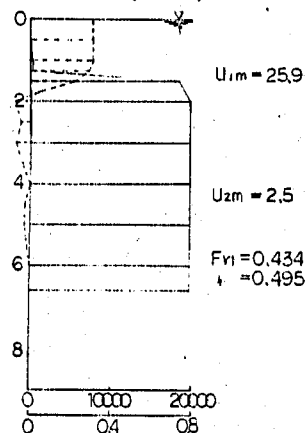


図-7.10.3 濃度、流速分布図

S.50年 8月28日 NO.1 ~ 7 8:46 ~ 11:04 測定

Q = 55.0 m³/s
H = 1.046 m
京田川 Q = 19.0 m³/s

—— 濃度
----- 流速

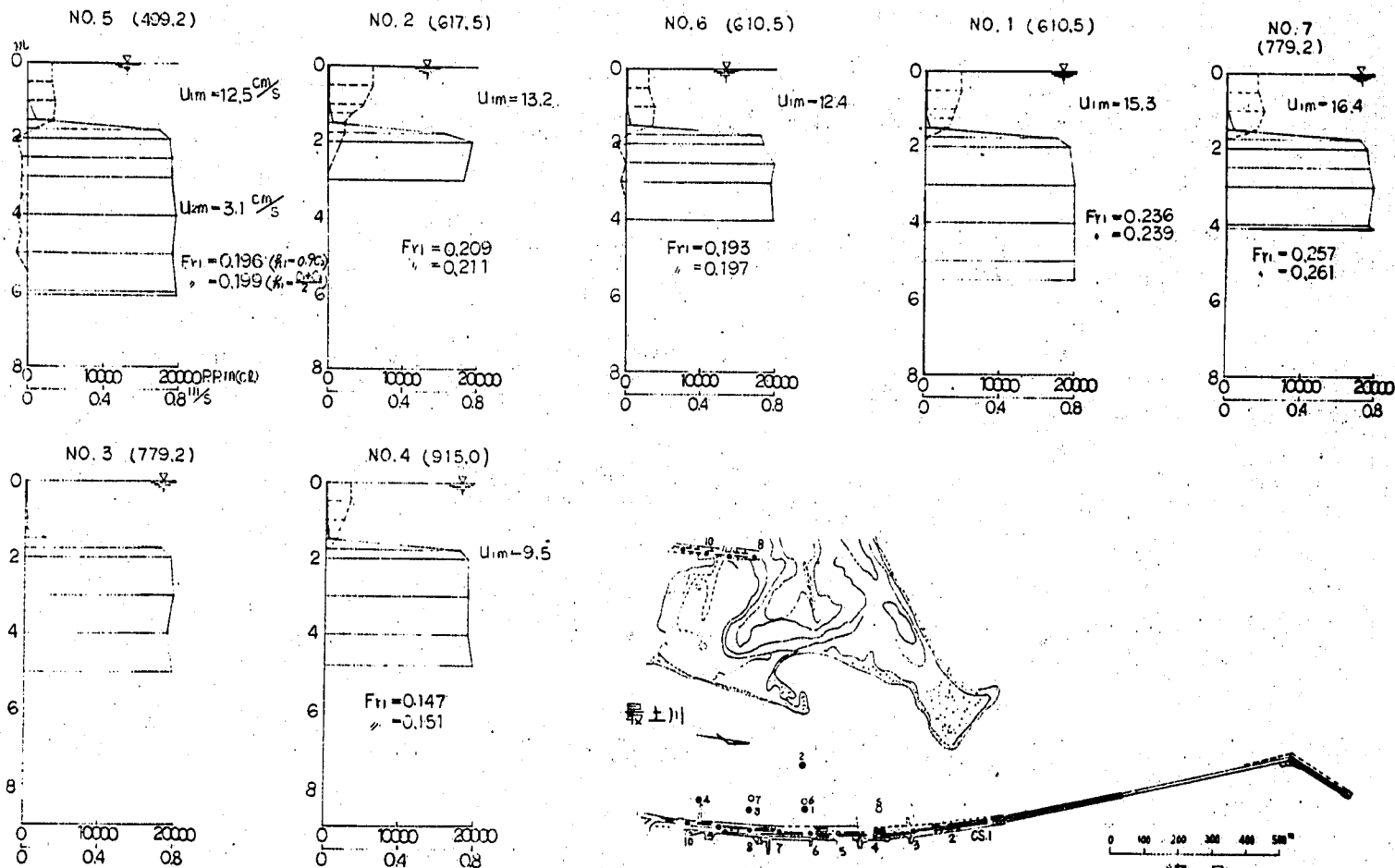


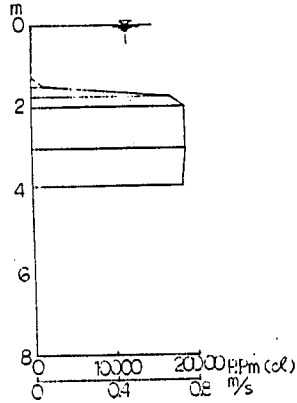
図-7.10.4 濃度、流速分布図

Q = 55.0 m³/s
 H = T.P.O.46 m
 京田川 Q = 19.0 m³/s

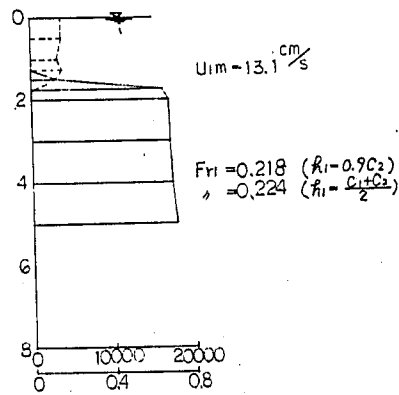
S 50年8月28日 9:45 ~ 11:54 測定

—— 濃度
 - - - 流速

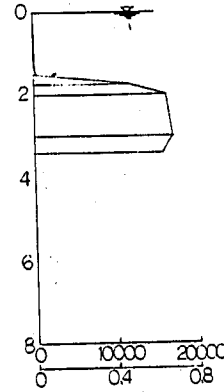
CS 15 石岸 (1357.7)



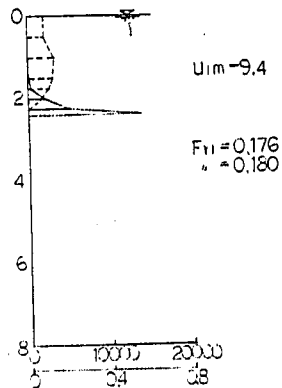
CS 20 石岸 (1794.5)



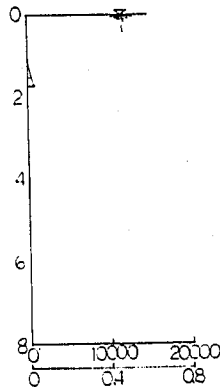
CS.25 石岸 (2293.7)



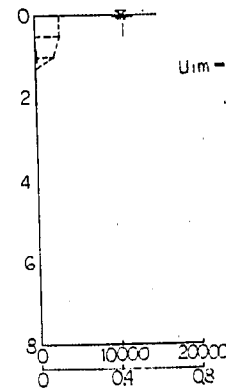
CS.28 石岸1 (2570.7)



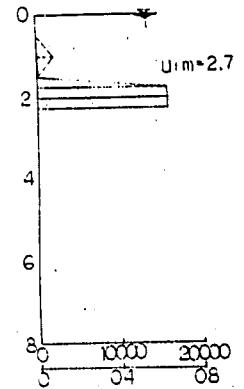
CS.28 石岸2



CS.28 中央



CS.28 石岸



▽-710.5 濃度、流速分布▽

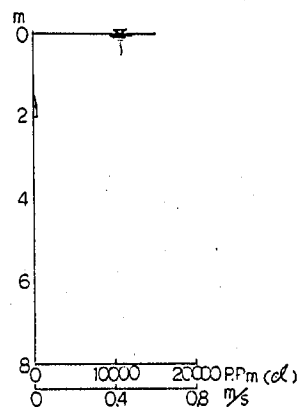
Q = 55.0 m³/s
 H = T.P.O.46 m
 東田川 Q = 19.0 m³/s

S.50年8月28日

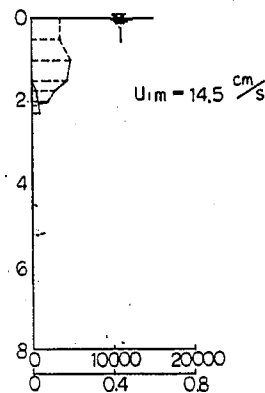
10:46 ~ 11:10 測定

—— 濃度
 ---- 流速

CS.30 左岸 1 (2772.6)



CS.30 左岸 2



CS.35 左岸

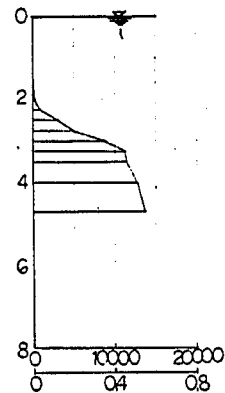


図-7.11.1 濃度・流速分布図(最上川)

S.50年8月27日

$Q = 61.0 \text{ m}^3/\text{s}$

$H = \text{TP}0.45 \text{ m}$

濃度縮尺
0 40000 ppm
流速縮尺
0 0.5 10 m/s

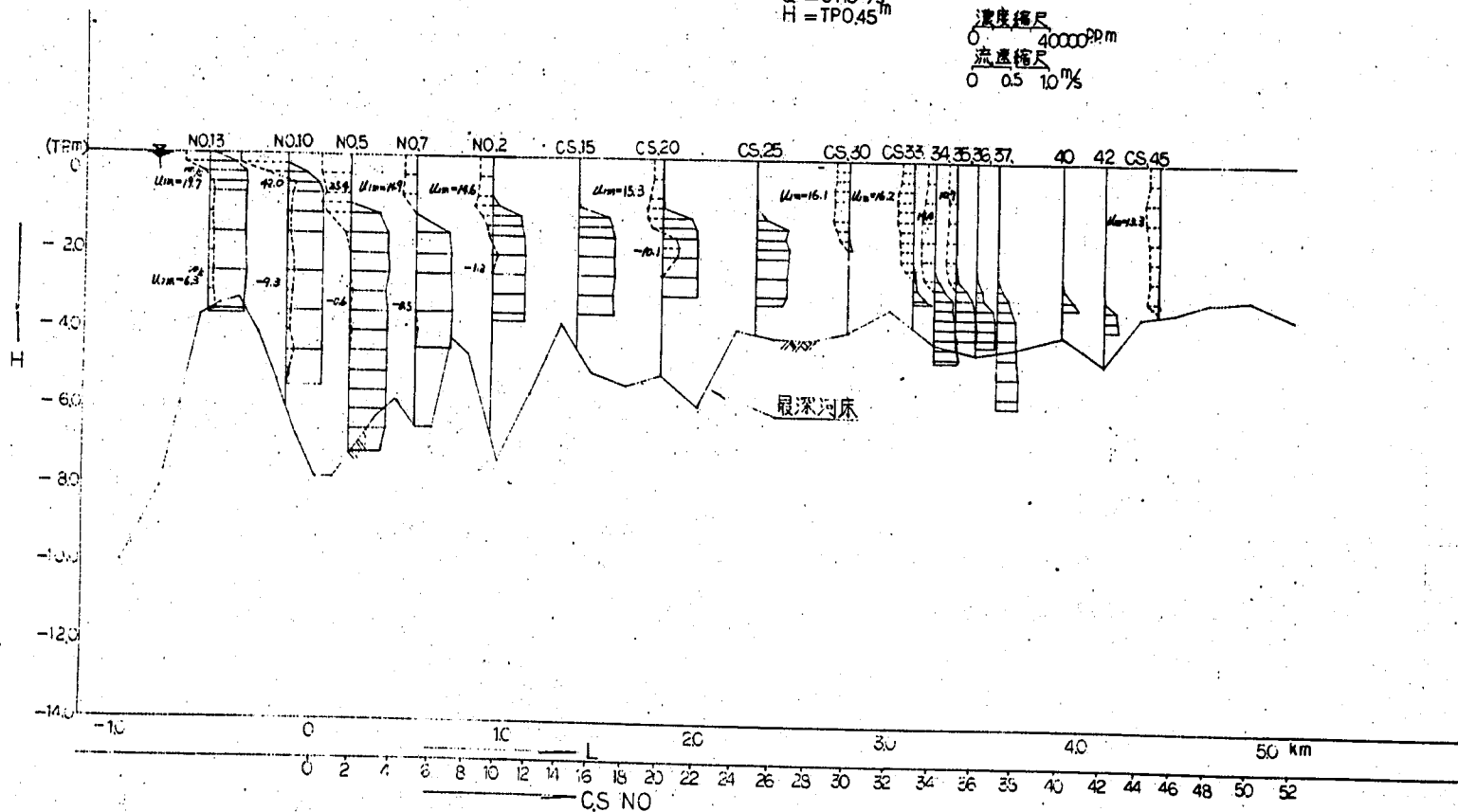


図-7.11.2 濃度・流速分布図 (最上川)

S.50 年 8 月 28 日

$Q = 55.0 \text{ m}^3/\text{s}$

$H = 10.46 \text{ m}$

京田川 $Q = 19.0 \text{ m}^3/\text{s}$

濃度縮尺 40000 ppm

流速縮尺 1.0 m/s

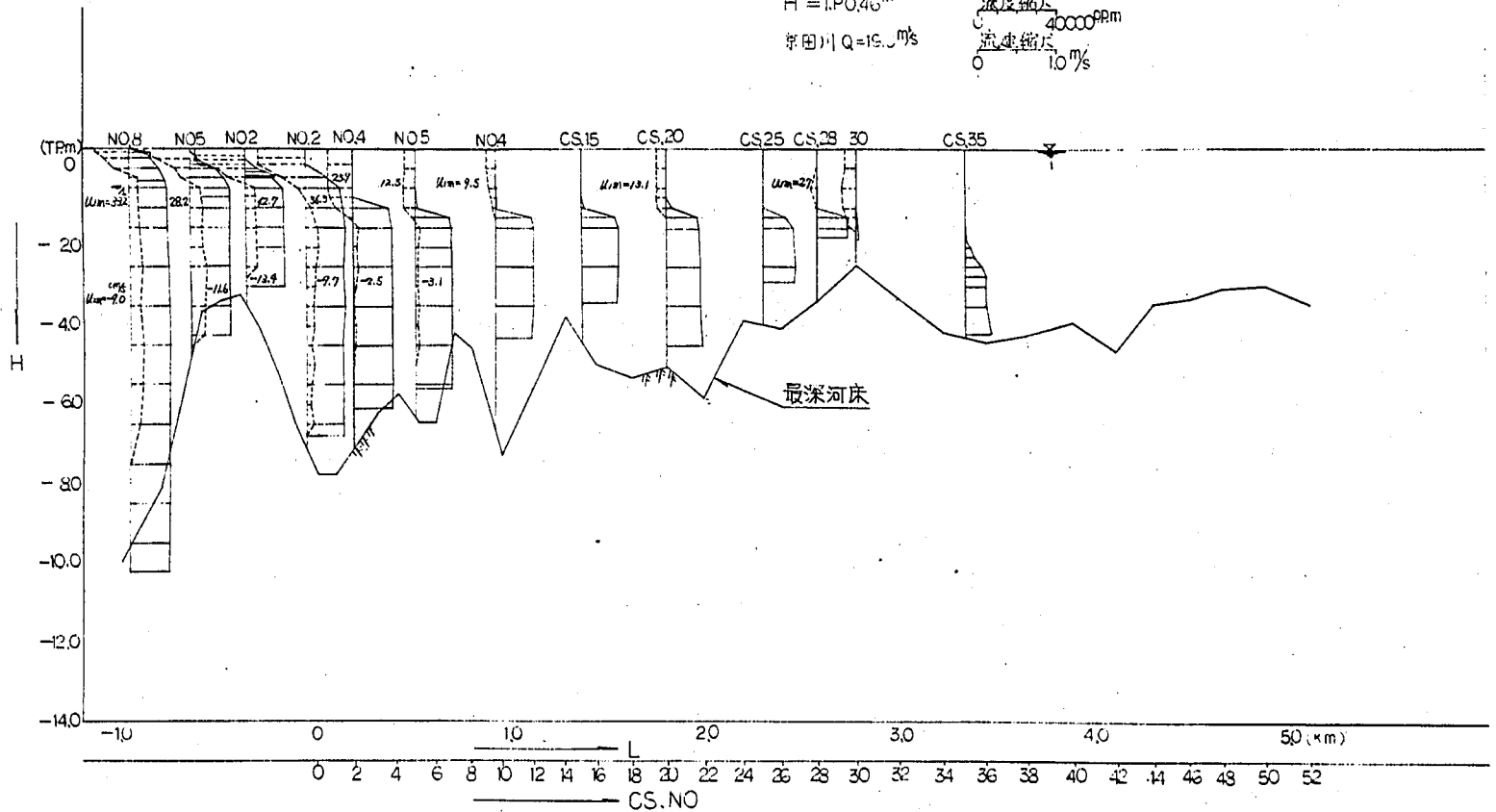


図-7.12.1 濃度、流速分佈図 (最上川)

S.50年8月27日
 $Q = 61.0 \text{ m}^3/\text{s}$
 $H = T.P. 45 \text{ m}$
 京田川 $Q = 19.0 \text{ m}^3/\text{s}$

濃度換尺
 0 20000 ppm
 流速換尺
 0 10 m/s

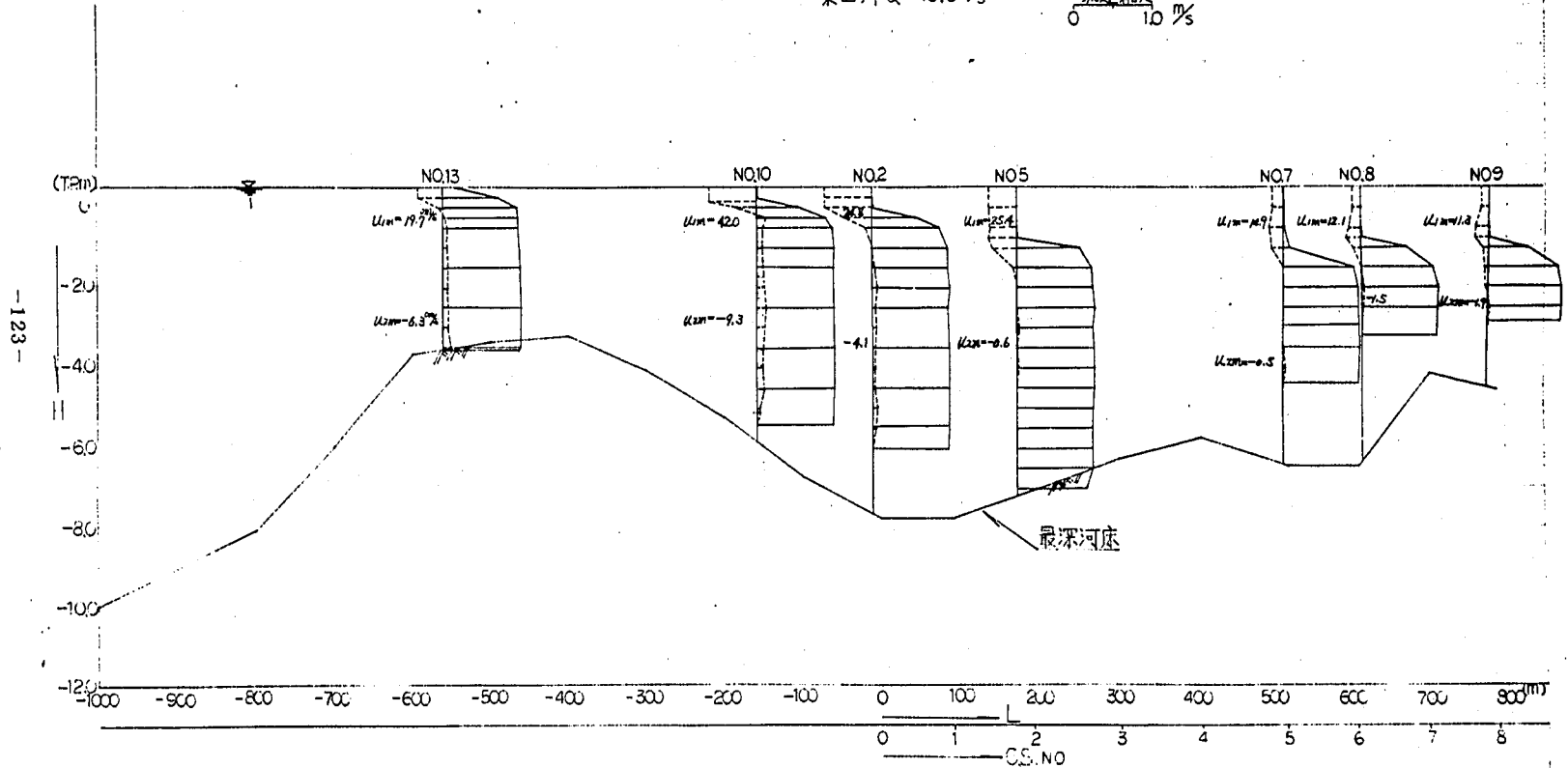
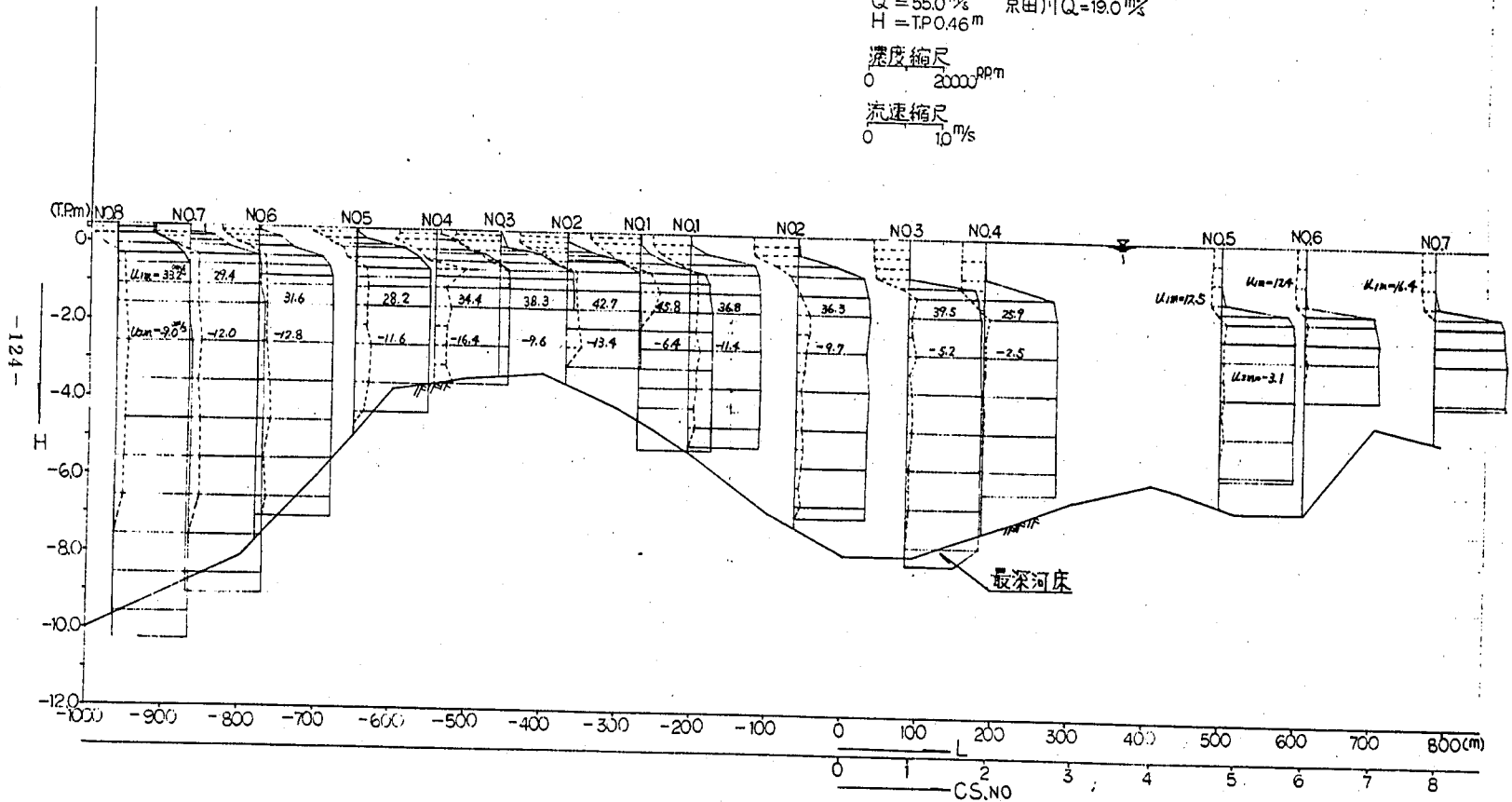


図-7.12.2 濃度・流速分布図(最上川)

S.50年8月28日 8:46~12:33 測定
 Q = 55.0 m³/s 京田川 Q = 19.0 m³/s
 H = TP0.46 m

濃度縮尺
 0 20000 ppm

流速縮尺
 0 10 m/s



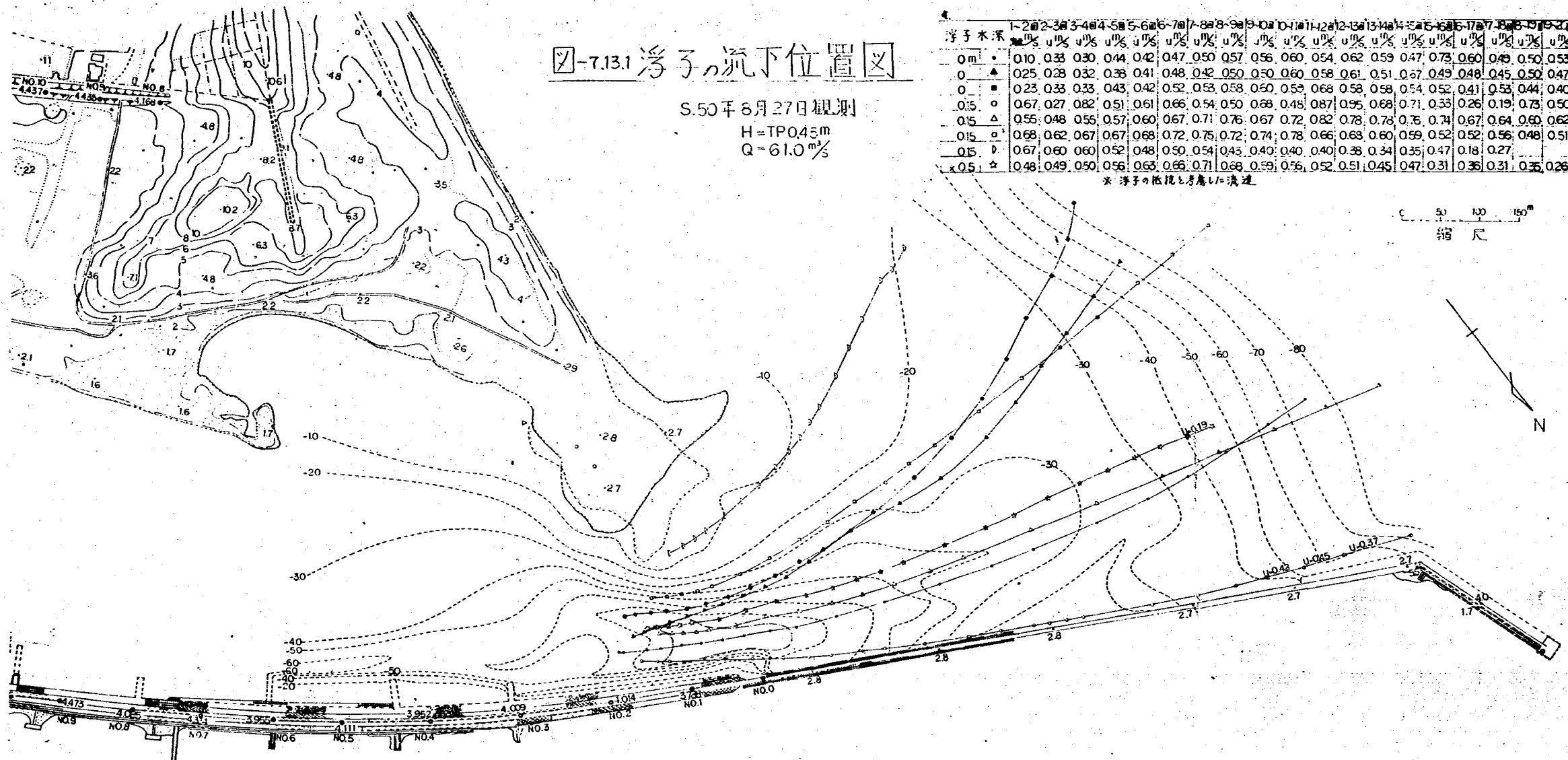


図-7.13.1 浮子の流下位置図

S.50年8月27日観測
 $H = TP0.45m$
 $Q = 61.0 m^3/s$

浮子水深	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22
0m	0.10	0.33	0.30	0.44	0.42	0.47	0.50	0.57	0.56	0.60	0.54	0.62	0.59	0.47	0.73	0.60	0.49	0.50	0.53	0.48	
0	0.25	0.28	0.32	0.38	0.41	0.48	0.42	0.50	0.50	0.60	0.58	0.61	0.51	0.67	0.49	0.48	0.45	0.50	0.47		
0	0.23	0.33	0.33	0.43	0.42	0.52	0.53	0.58	0.60	0.59	0.68	0.58	0.58	0.54	0.52	0.41	0.53	0.44	0.40		
0.5	0.67	0.27	0.82	0.51	0.61	0.66	0.54	0.50	0.68	0.48	0.87	0.95	0.68	0.71	0.33	0.26	0.19	0.73	0.50	0.43	0.33
0.5	0.55	0.48	0.55	0.57	0.60	0.67	0.71	0.76	0.67	0.72	0.82	0.78	0.78	0.76	0.74	0.67	0.64	0.60	0.62		
0.5	0.68	0.62	0.67	0.67	0.68	0.72	0.75	0.72	0.74	0.78	0.66	0.63	0.60	0.59	0.52	0.52	0.56	0.48	0.51		
0.5	0.67	0.60	0.60	0.52	0.48	0.50	0.54	0.43	0.40	0.40	0.40	0.38	0.34	0.35	0.47	0.18	0.27				
0.5	0.48	0.49	0.50	0.56	0.63	0.66	0.71	0.68	0.59	0.56	0.52	0.51	0.45	0.47	0.31	0.36	0.31	0.35	0.26	0.27	0.29

* 浮子の位置と考慮した流速

図-7.13.2 浮子の流下位置図

S.50年 8月27日観測

H=TP0.45m

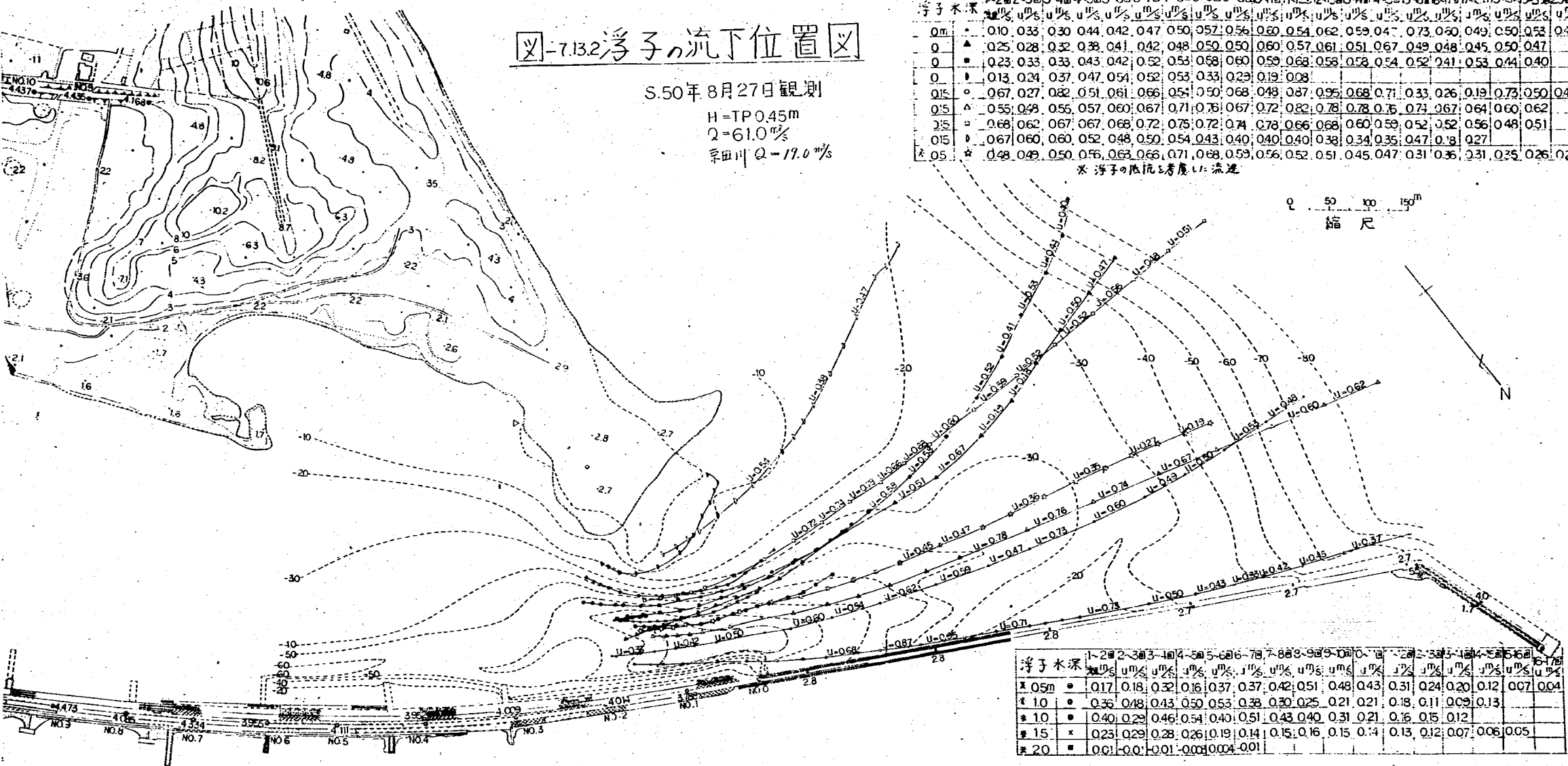
Q=61.0 m³/s

宇田川 Q=17.0 m³/s

浮子水深	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	22-23	23-24
0m	0.10	0.33	0.30	0.44	0.42	0.47	0.50	0.57	0.56	0.60	0.54	0.62	0.59	0.47	0.73	0.50	0.49	0.50	0.53	0.48			
0.25	0.25	0.28	0.32	0.38	0.41	0.42	0.48	0.50	0.50	0.60	0.57	0.61	0.51	0.67	0.49	0.48	0.45	0.50	0.47				
0.5	0.23	0.33	0.33	0.43	0.42	0.52	0.53	0.58	0.60	0.59	0.68	0.58	0.53	0.54	0.52	0.41	0.53	0.44	0.40				
0.75	0.13	0.24	0.37	0.47	0.51	0.52	0.53	0.33	0.29	0.19	0.08												
1.0	0.67	0.27	0.82	0.51	0.61	0.66	0.54	0.50	0.68	0.48	0.87	0.95	0.68	0.71	0.33	0.26	0.19	0.73	0.50	0.43	0.33		
1.25	0.55	0.58	0.55	0.57	0.60	0.67	0.71	0.76	0.67	0.72	0.82	0.78	0.78	0.75	0.74	0.67	0.64	0.60	0.62				
1.5	0.68	0.62	0.67	0.67	0.68	0.72	0.75	0.72	0.74	0.78	0.66	0.68	0.60	0.59	0.52	0.52	0.56	0.48	0.51				
1.75	0.67	0.60	0.60	0.52	0.48	0.50	0.54	0.43	0.40	0.40	0.40	0.38	0.34	0.35	0.47	0.31	0.27						
2.0	0.48	0.49	0.50	0.56	0.63	0.66	0.71	0.68	0.59	0.56	0.52	0.51	0.45	0.47	0.31	0.36	0.31	0.35	0.26	0.27	0.29		

* 浮子の流下位置を考慮し流速

0 50 100 150m
縮尺



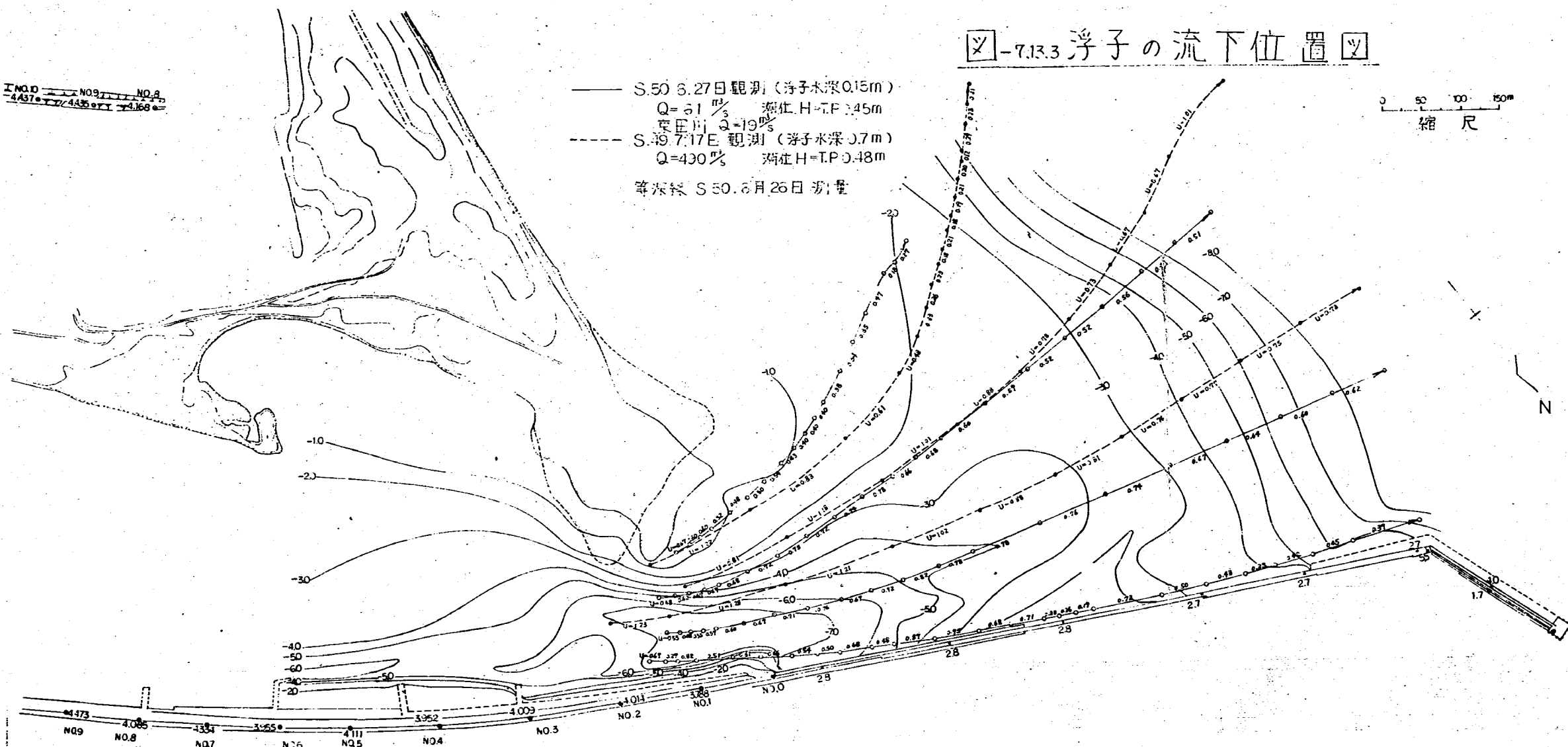
浮子水深	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	22-23	23-24
0.5m	0.17	0.18	0.32	0.16	0.37	0.37	0.42	0.51	0.48	0.43	0.31	0.24	0.20	0.12	0.07	0.04							
1.0	0.36	0.48	0.43	0.50	0.53	0.38	0.30	0.25	0.21	0.21	0.18	0.11	0.09	0.13									
1.5	0.40	0.29	0.46	0.54	0.40	0.51	0.43	0.40	0.31	0.21	0.16	0.15	0.12										
2.0	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01																	

INQ.D NO.9 NO.8
-4437- 4435 4433 4431

図-7.13.3 浮子の流下位置図

— S.50 8.27日観測 (浮子水深0.15m)
Q=51% 潮位H=T.F.45m
東京川 Q=19%
--- S.49 7.17日観測 (浮子水深0.7m)
Q=430% 潮位H=T.P.48m
等深線 S.50.8月26日測量

0 50 100 150m
縮尺



(付) 第 8 章 最上川河口流と淡塩水の混合について

8-1 調 査 概 要

最上川河口部における塩水遡上現象は、大平洋岸と違って潮位変動の影響力が小さいことなどから、安定した弱混合型の塩水くさびが形成され、潟水時には河道内奥深く塩水が侵入する。

また河口部は、冬期季節風により砂州が伸延し、流路幅が減じており洪水の疎通上その対策が計画されている。この最上川の河口部から河口外における河川水の流出状況、および淡塩水の混合状態を把握するため、前年度に引き続き、昭和51年8月24日～26日にかけて現地観測を行なった。

ただし、8月24日は、低気圧の通過により天候が悪く、導流堤先端付近では、酒田港側から越波するような状態の波が発生しており、観測は出来なかった。したがって、その後の観測も条件としては必ずしもよくはなかった。なお、観測は前回と同様、表-8.1に示す項目について行なった。

表-8.1 調査項目一覧表

○河口砂州測量	8月24日	河口砂州形状の測量
○深浅測量	" 26日	河口外縦断に6測線を測量
○水位測定	" 25～26日	導流堤末端川側、酒田港側、下瀬閘門、(CS23)の3測点で測定
○流量観測	" 24～26日	24日 京田川宮野浦橋直上流で観測、26日 出羽橋直下流で観測
○浮子の流下位置観測	" 26日	河口外淡水流拡がり状況観測
○濃度流速分布の測定	" 25日	河口外27測点について測定
○水準測量	" 25日	基準点高のチェック

このうち、深浅測量については、音響測深機を用い、濃度分布の測定は、水深方向が境界面付近で25cm間隔、他は50cm間隔で電導度計(EST-3型)による直接測定を行なった。

また流速分布の測定は、濃度分布測定点と同一地点で通常のブライス流速計、および高精度の微流速計にて濃度分布測定と同一水深間隔で測定を行なった。

河口外の淡水流の拡がり状況は、50×10cmのブリキ板を2枚十字に連結してこれをゴムマリで浮かせたものを用いて河口部より流し、岸から2台のトランシットにより、時間と流下位置を追跡した。

8-2 調査結果

8-2-1 水位、流量について

水位の測定は前回と同様、下瀬閘門（CS・23・河口より2084.6m地点）および導流堤末端（河口0m地点）の酒田港側との2ヶ所で行なった。

この時間水位曲線を図-8.1に示す。水位の時間的变化は、いずれも干潮時から満潮時にかけての上げ潮時に観測を行っており、観測中の水位変化は、8月25日が約8cm、26日は20cm程度である。これは潮位表より求めた酒田港の計算潮位の傾向とよく一致する。また導流堤末端と下瀬閘門との水位差はほとんどないようである。

なお、8月25日の濃度および流速分布測定時の平均潮位は、T.P 0.55m、8月26日の浮子の流下位置観測時の平均潮位が、T.P 0.50mであった。

いっぽう、最上川における流量は、砂越（河口より11.0m地点）のH~Q図より求めた時間流量曲線および、26日に出羽大橋直下流で行なった流量観測結果より求めた。この流量観測結果の横断方向流速分布図を図-8.2に示す。

測定された流速は、左岸側で大きい傾向となっており、流心が左岸部へ寄っているものと思われる。また昭和48年度以降に出羽大橋が建設され、この影響によるものか、48年度測量の横断より河床も高くなっている。

この観測結果と砂越地点のH~Q図より求めた時間流量曲線図8.3.1~8.3.2と比較すると前回と同様H~Q図よりいくぶん少ない結果となっている。しかし、我々の観測は、上げ潮時に測定したため、この影響による誤差等も考えられ、また、1回のみの測定であり、他の時間の流量もわからないので、観測期間中の時間流量曲線は、砂越地点のものをを用いることとした。

これによれば、8月17日に1700 m^3/s 程度の洪水が出ており、その後減水し、流量のほぼ一定している時期に観測を行なっている。なお最上川河口部で合流する京田川、広田橋のH~Q図による流量も同図に示したが、宮野浦橋における観測結果図-8.4よりは、反対に小さな値となっている。

京田川の場合は、断面も台形水路であり、流速値もあまり小さくないため、観測値の方が信頼性があるのではないかとと思われる。

以上より、8月25日の濃度、流速分布測定時の平均流量が、 $Q=290 m^3/s$ 、京田川 $Q=28 m^3/s$ 、26日の浮子流下位置観測時が $Q=250 m^3/s$ 、京田川 $Q=28 m^3/s$ とした。

8-2-2 河口砂州形状、河口外深淺測量結果

最上川河口は、冬季の季節風によって閉塞し、春季から夏季の洪水によって砂州がフラッシュされる。観測時の河口砂州汀線測量結果では、砂州部の最小川幅は250m程度である。これまでに250m以上の河口幅は、春季の融雪出水後、夏季洪水後と9月~12月に見られているが、

現在、砂州の砂採取を行っており、この人工掘削による影響も大きいと思われる。事実、砂州汀線も前年の観測にくらべ、30～50 m 浸食されている。

つぎに河口から河口外地形の状況を知るための深淺測量結果を、砂州形状の測量結果とともに、前回の昭和50年8月に測定した深淺図と比較すると図-8.5のようになる。今回は、砂州先端付近の海側延長線上にかなり沖まで浅くなっており、この浅い部分で波が砕波している状態であった。また海側のTP-3.0 m以深の等深線が前年にくらべ陸側にきており、深くなっているのが認められる。

さらに、河口砂州の先端部の右岸導流堤ぞいの局所的な深掘れ部は、下流側の範囲が小さくなっている。この深掘れ部は、洪水によって生じたものと考えられ、この洪水時の海水との接触する付近で、はこばれた土砂の堆積を見ることがになり、浅瀬が作られる。その位置は、河口から河口幅の4～5倍のところといわれているが、この観測結果では、砂州の浚渫の影響によるものか3倍程度のところであり、前回の観測では、約4倍程度である。

8-2-3 濃度および流速分布について

濃度および流速分布の測定は、図-8.6に示す河口外の27測点について測定を行なった。この結果を図-8.7.1～8.7.4に示す。これによると、河口最狭部では、濃度分布が急激に変化し、淡塩境界面が明瞭であるが、河口から遠ざかるにつれて淡水厚がうすくなると同時に、濃度勾配もゆるやかになっており、やがて表層水面まで塩水が混合している。

流速分布も濃度分布と対応するように連続的に変化し、下層の海水部では、逆流現象を呈している。なお、ここに測点No.1の流速は微流速計によって測定したものであり、No.2は通常のブライス流速計によって測定されたものである。

また、下層海水部の塩分濃度は、前回にくらべ濃度がいくぶん薄い。これについては、前日にかなりの波浪が生じ、この影響により濃度が薄くなったものとも考えられるが、その原因は明らかではない。

なおこれらの観測結果の横断方向測点より横断図に示したものが図-8.8.1～8.8.3である。砂州最狭部の横断方向濃度流速分布(図-8.8.1)は、水深の浅い右岸寄りのほうが淡塩境界面の濃度勾配がゆるやかになっており、また、淡水深もいくぶん小さいようである。流速は、中央部から右岸でやや大きい傾向を示し、流下水深も大きい。

最狭部より下流の河口外では、さらに淡水深が小さくなると同時に、また右岸導流堤から遠ざかるほど、濃度勾配もゆるやかになり、同様淡水深も小さくなっている。

いっぽう、最深部の結果を縦断図に示したのが図-8.9、および右岸、中央、左岸別に縦断図に示したのが図-8.10.1～8.10.3である。塩水くさび上の淡水は、下層塩水を少しずつ自身の中にとり入れながら流下し、河口をすぎると淡水は急激にその厚さを減じ、海上を四方に拡が

っていく。このため淡水は河口外に向かって徐々に塩分濃度を増し、その結果密度の平衡を保つため、下層塩水は、図のように逆流現象を生じる。

さらに、塩水上を流下する淡水の流速分布は、淡水厚の減少とともに舌状分布を示し、やがて流れの拡がりとともに流速は減衰していく。なお、これらの結果によると、前述したように流心部（中央）で淡水厚が大きく、左岸寄りでは、河口を出ると急激に淡水厚が減ずる。

またこの濃度分布測定時の塩水くさび先端は、京田川との合流点CS・16（1440m）付近であった。

8-2-4 浮子による河口外表層流速、拡がり状況の測定

浮子による表層淡水流の拡がり状況とその流下速度の測定は、前回と同様、河口砂州部の最小川幅付近より浮子を投下し、その流下位置と時間を求めた。この8月26日に観測した浮子の流下位置図を図-8.11に示す。

前回は、浮子水深を種々変えて測定したが、流速分布測定結果でもわかるように、下層塩水部は逆流現象を呈しており、実際の流速を把握するのは困難であるので、今回は表層（浮子水深0.15m）のみとした。表層の流れは、河口を出た距離とともに拡がり方が増大している。

しかし、流量の違いにもよるが、前回よりは拡がり方が少ないようである。これは砂州先端部の下流で400m程度沖まで浅くなっており、この地点で一部砕波している状態であり、この地形上の影響も大きいと思われる。表層流速は、河口最狭部を過ぎた地点で速くなり、その後、流れの拡がりとともに次第に遅くなっているが、流心部では、流速の減衰が少なく、ほぼ一定の流速値となっている。

これは、前回の観測でも同様の傾向であり、さらに沖合の流速値も把握する必要がある。石狩川³⁵⁾の観測では、表面流速は河口を過ぎて川幅の約0.8倍程度沖でその最大値を示し、やがて減速して行く状況が観察されているが、最上川でも前回の観測も含めて同様の傾向を示している。

しかし、今回の観測の流心部は前述したように、顕著な傾向は示していないようである。この河口最狭部を過ぎた地点で表面流速が大きくなる現象は、内部ジャンプとなんらかの関係を示しているものと考えられる。

図-8.1 時間水位曲線(最上)1)

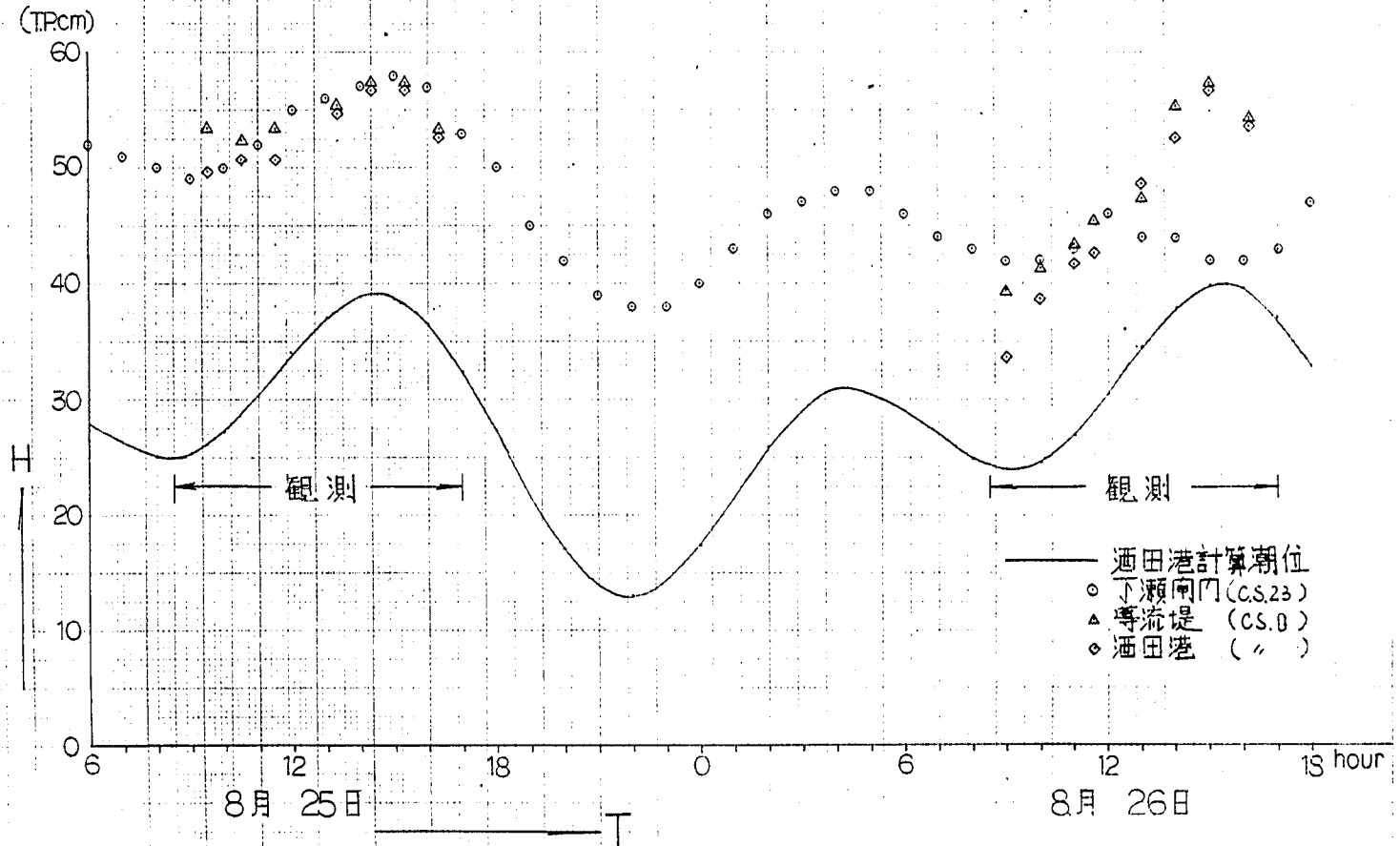


图-8.2 流速分布图

S 51 年8月26日 9:17 ~ 10:13' 観測

出状橋直下流

—— C.S. 30

H = TP 0.42^m

0 0.2 0.4 %
流速係数

	A	Q
1	48.0	16.7
2	115.5	42.4
3	121.9	48.8
4	102.2	31.9
5	88.8	21.1
6	118.8	23.2
7	218.0	31.2
	612.2	216.5
計算値の合計 216.5		

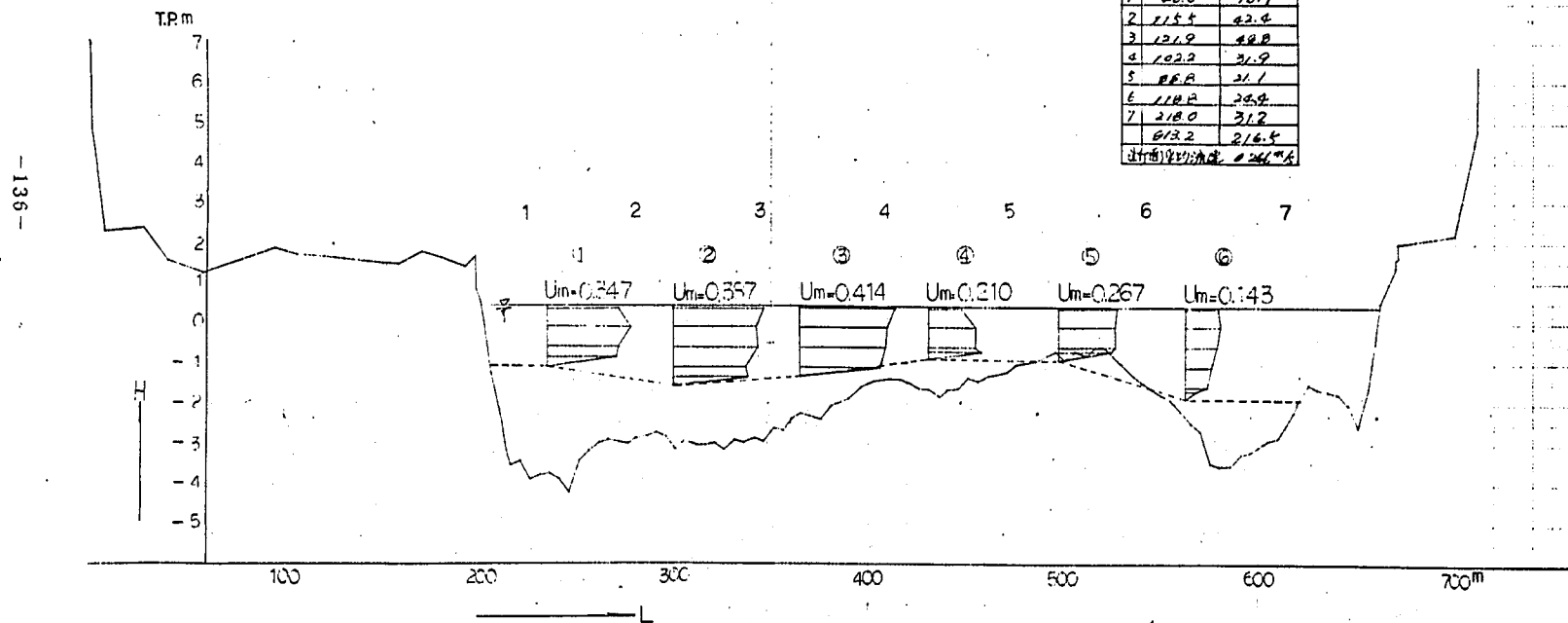


図-8.3.1 時間-流量曲線

(最上川)

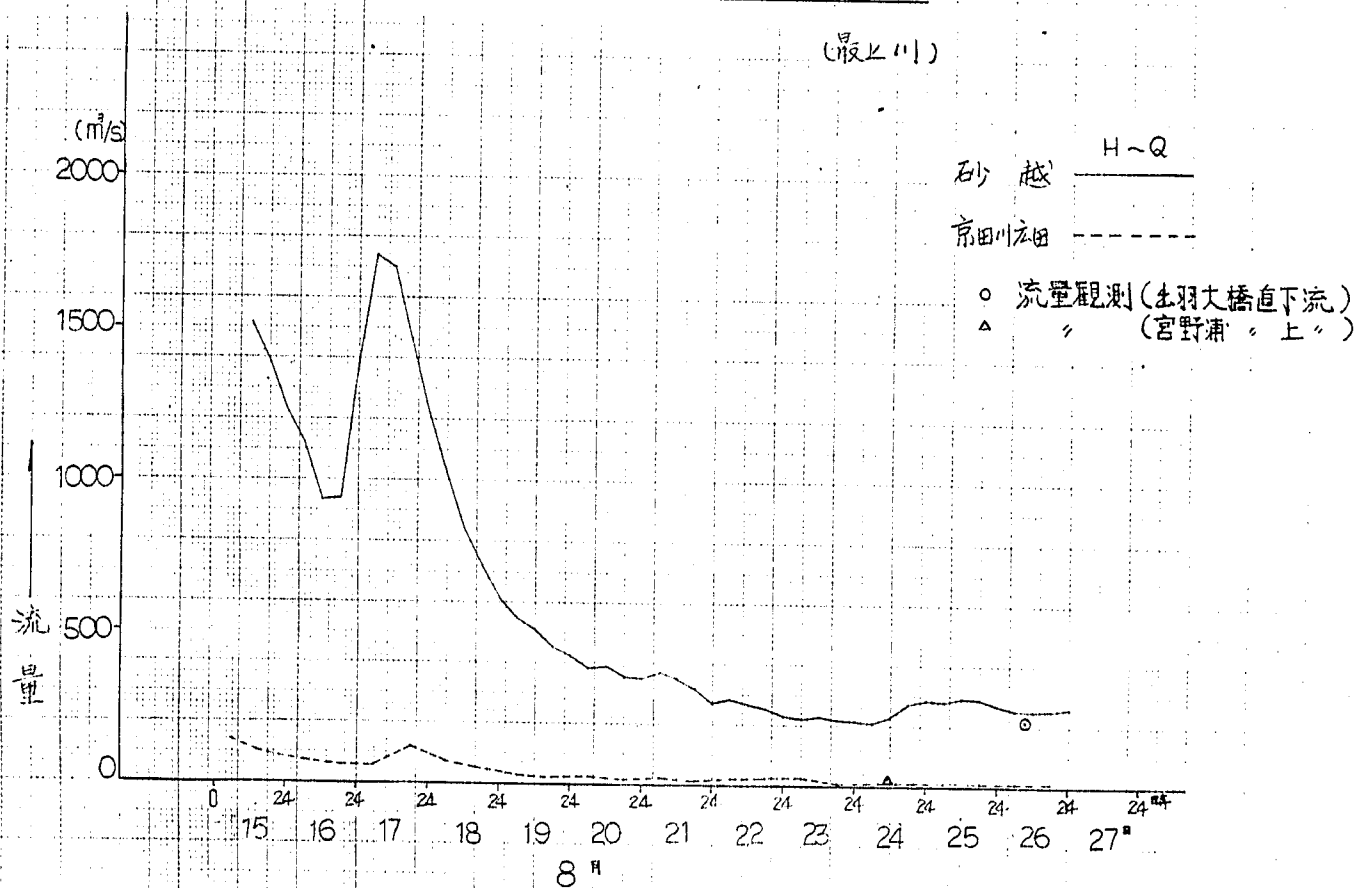


図-8.3.2 最上川塩水くみ調査

時間流量曲線 (H-Q 図表)

50年測定

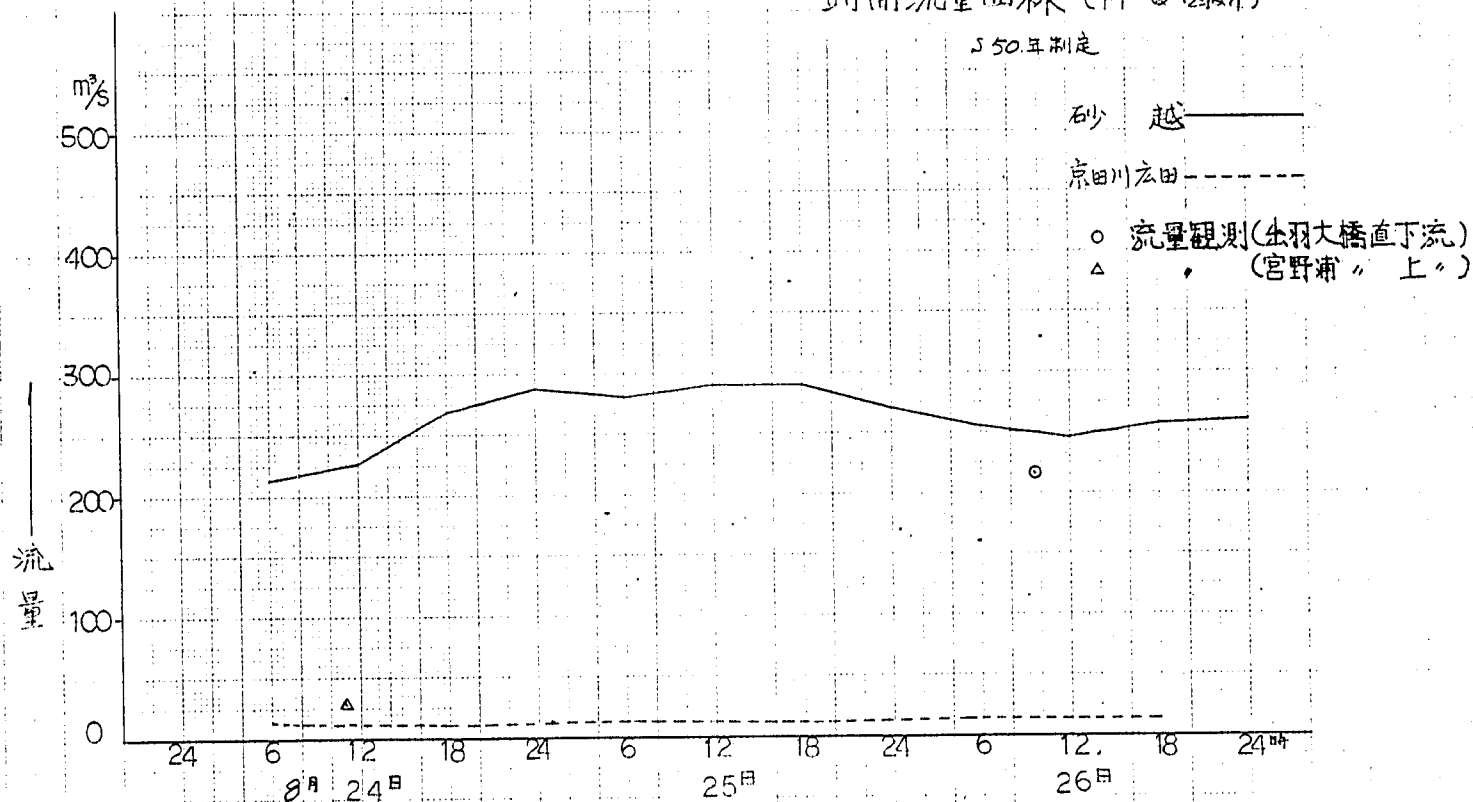


図-8.4 流速分布図

京田川宮野浦橋直上流

S. 51年8月24日 10:00~12:00

H = T.P.O. 65m

0 0.5 1.0 $\frac{m}{s}$
流速縮尺

	A	Q
1	24.2	1.4
2	16.6	2.8
3	16.3	4.2
4	15.6	4.7
5	16.3	5.1
6	18.9	6.0
7	23.6	3.9
計	131.00	28.1
断面平均流速		0.265 $\frac{m}{s}$

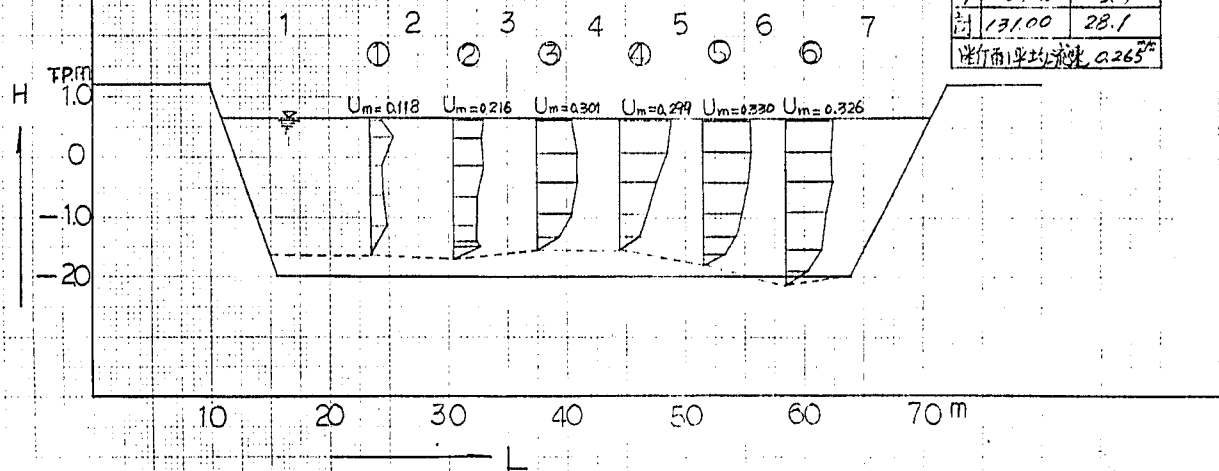


図-8.5 最上川河口深浅図

— 昭和51年8月26日観測
 - - - 昭和50年8月26日観測

0 50 100 150m
 縮尺

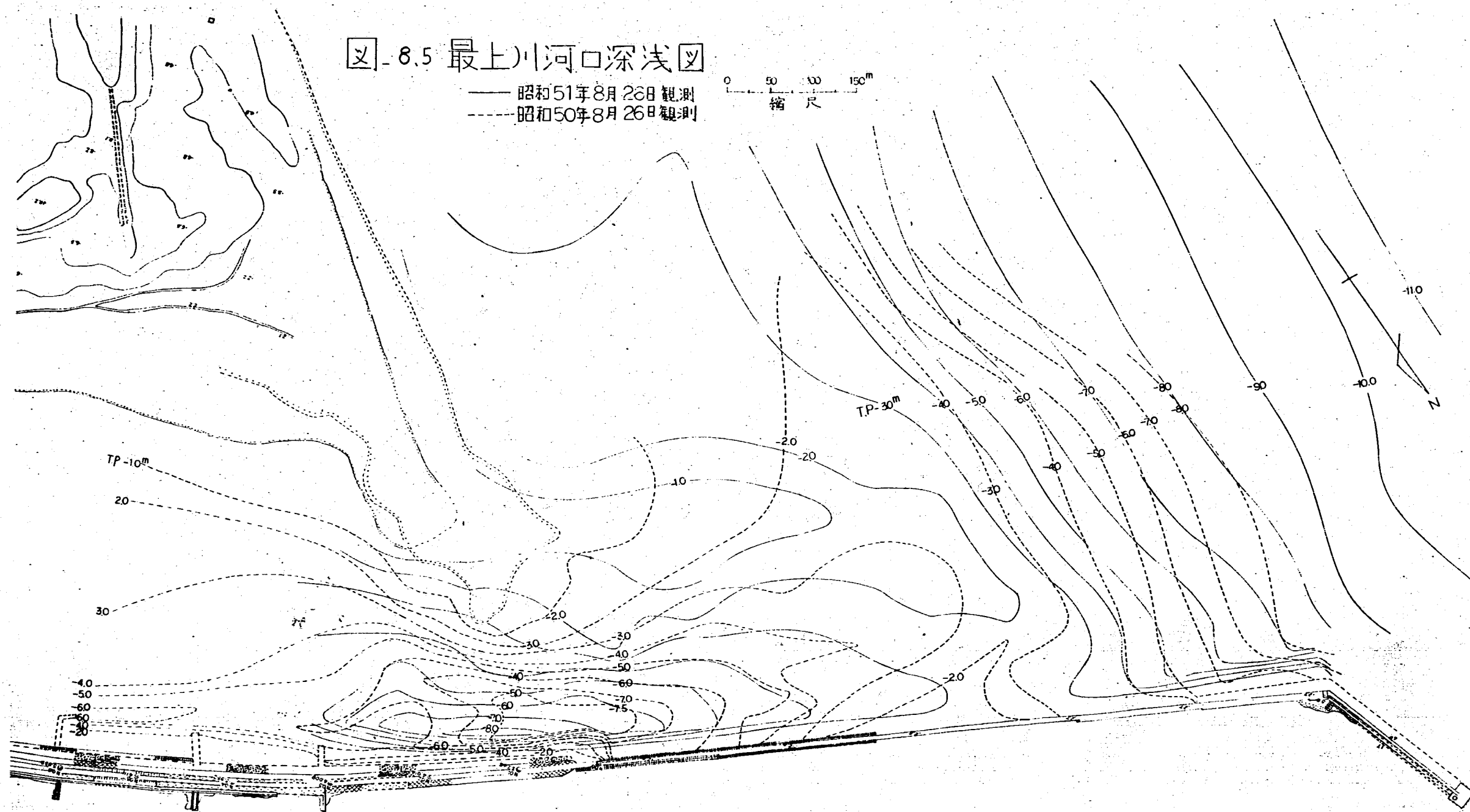


図-8.6 濃度・流速分布測定点位置図

1 班 } 55年6月25日観測
2 班 }

0 50 100 150m
縮 尺

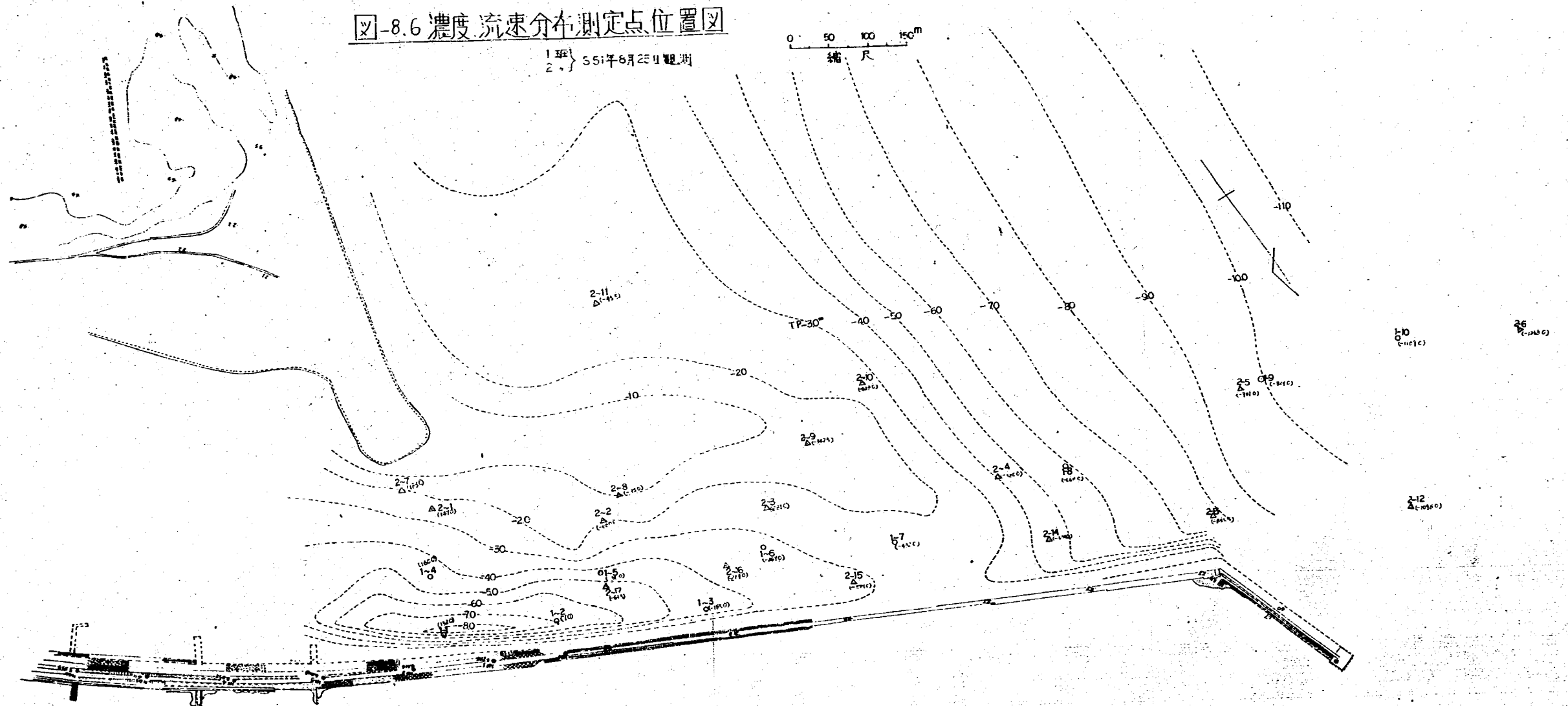


図-8.7.1 濃度・流速分布図

最上川 SS1 年 8 月 25 日
 $Q = 290 \text{ m}^3/\text{s}$
 $H = TP 0.55 \text{ m}$
 最上川 $Q = 280 \text{ m}^3/\text{s}$

NO 1-9 - NO 2-13 14: 21 ~ 15: 32 濃度

—— 濃度
 - - - 流速

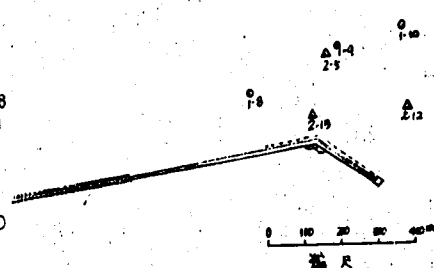
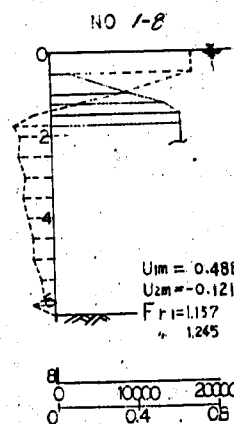
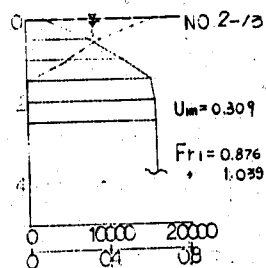
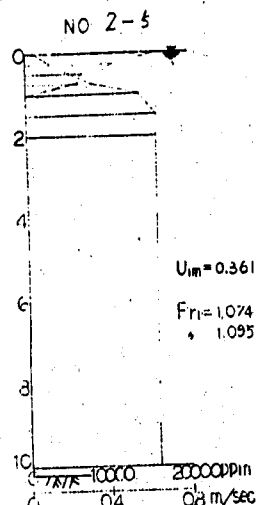
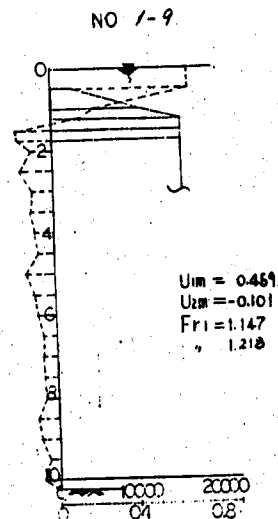
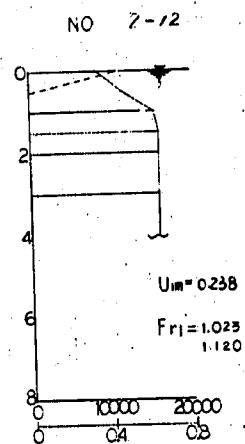
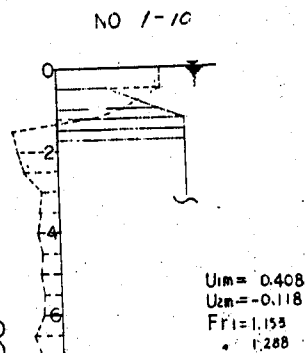
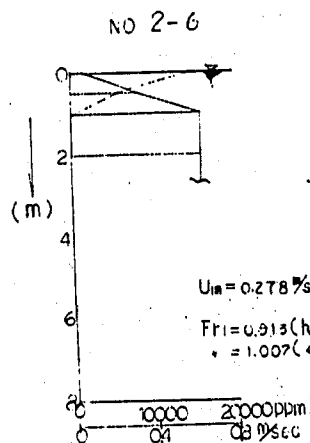
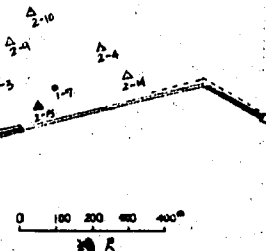
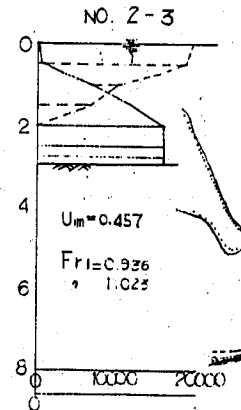
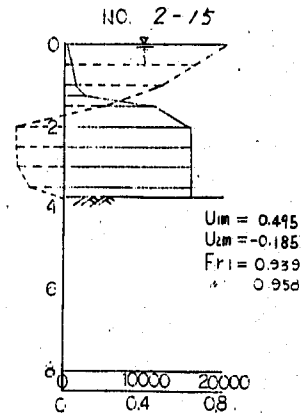
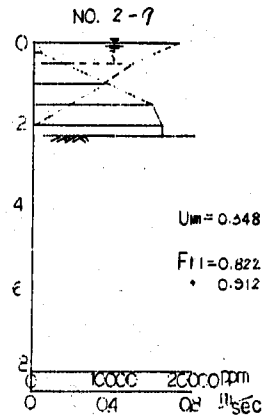
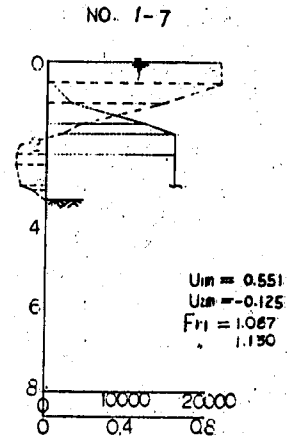
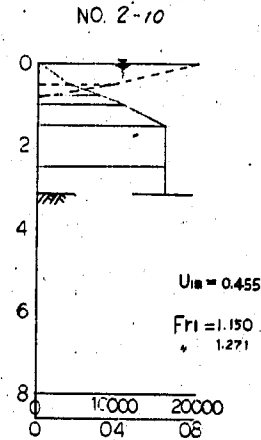
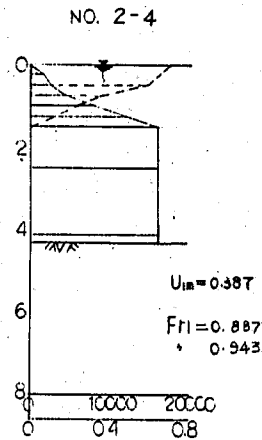
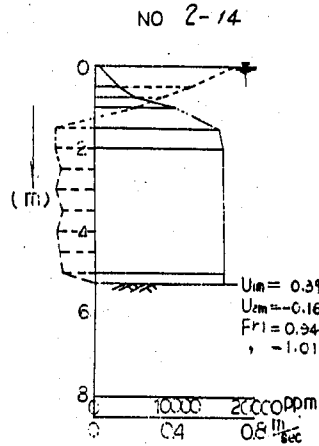


図-8.72 濃度 流速分布図

NO 2-14 ~ NO.2-3 10:00 ~ 14:45 測定

最上川 S51 年8月25日
 $Q=290\text{m}^3/\text{s}$
 $H=1.05\text{m}$
 京田川 $Q=280\text{m}^3/\text{s}$

—— 濃度
 - - - 流速



☒-8.7.3濃度 流速分布☒

NO.2-II ~ 2-17 13:37 ~ 15:58 4時

最上川S51年8月25日
Q=290 m³/s
H=170.5 m
前田川Q=280 m³/s

—— 濃度
----- 流速

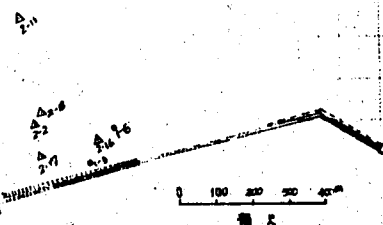
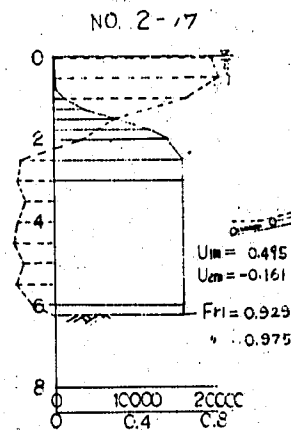
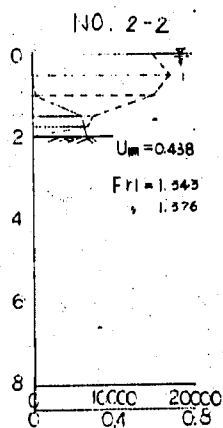
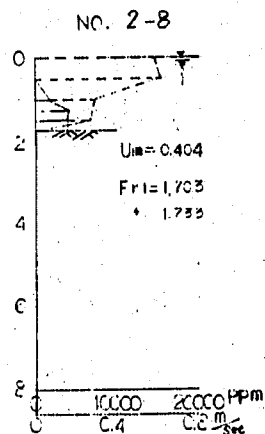
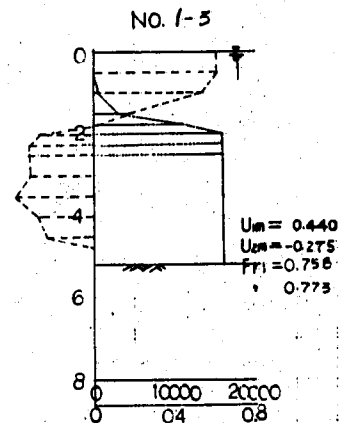
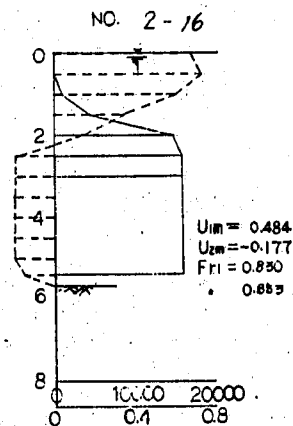
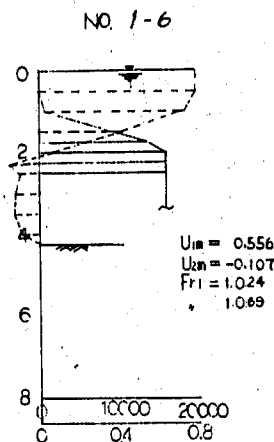
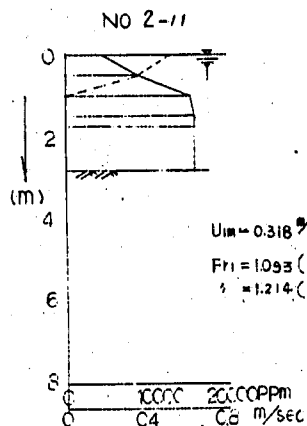


図-8.74 濃度・流速分布図

NO 1-1 ~ 2-7 9.45 ~ 11.12 濃度

最上川IS51 年8月25日
 $Q = 280 \text{ m}^3/\text{s}$
 $H = \text{TPC} 55 \text{ m}$
 京田川 $Q = 280 \text{ m}^3/\text{s}$

—— 濃度
 - - - 流速

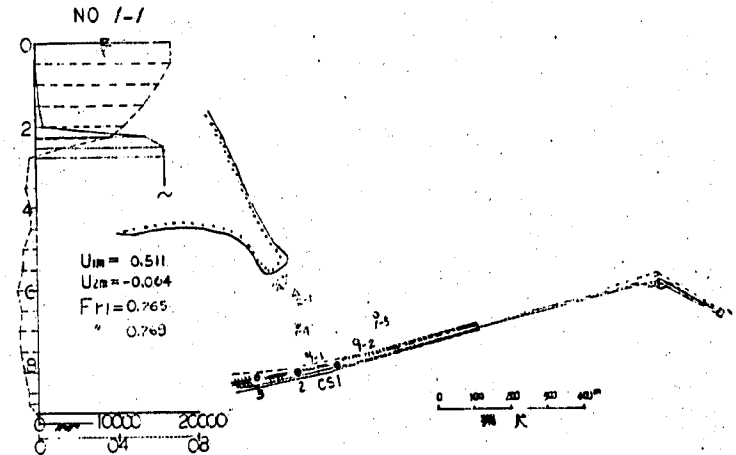
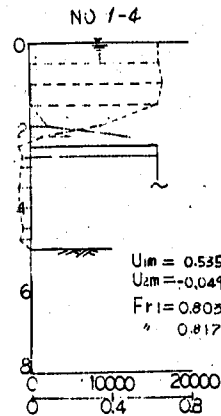
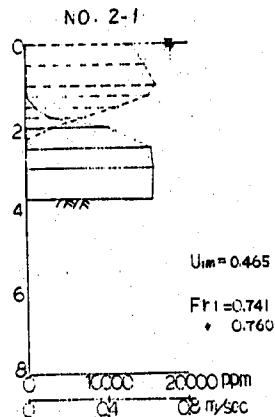
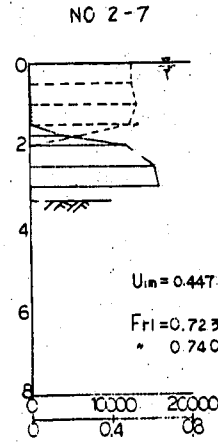
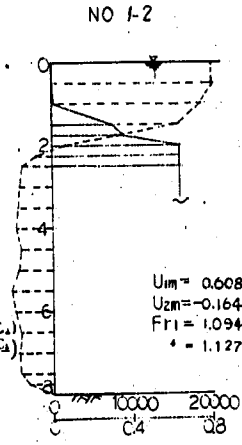
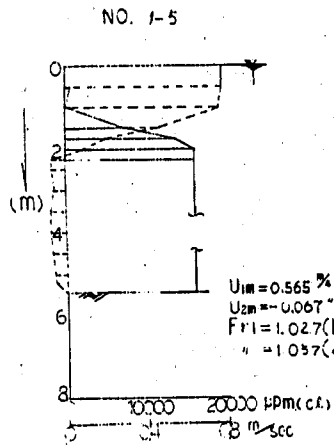


図-8.8.1 濃度・流速分布図

断面 C.S 0 +165 m

最上川 S.51年8月25日

$Q = 290 \text{ m}^3/\text{s}$

$H = \text{T.P.} 0.55 \text{ m}$

京田川 $Q = 120 \text{ m}^3/\text{s}$

0 20000 PPM

濃度縮尺
0 0.5 1.0 m^3/s

流速縮尺

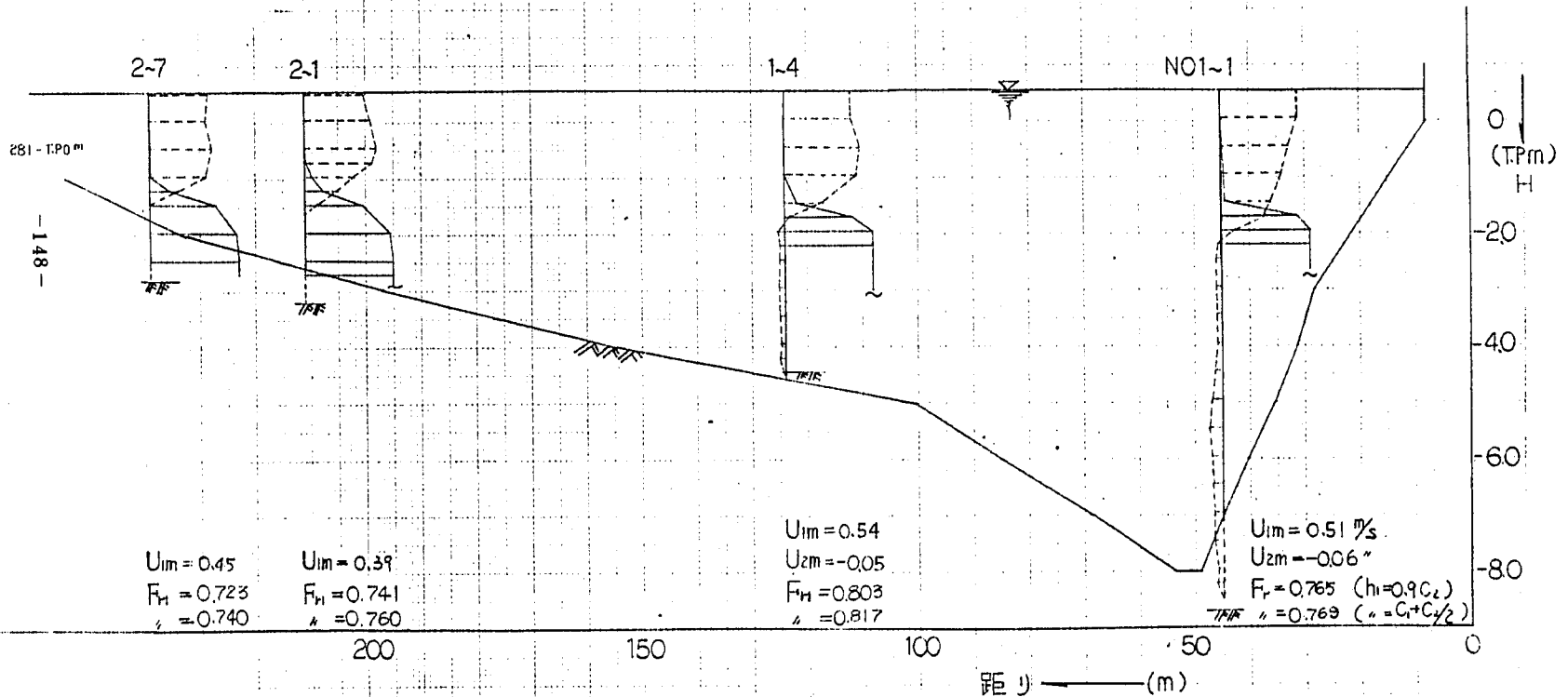


図-8.8.2 濃度・流速分布図

断面 CS0-82m

最上川 S51.8.25

$Q = 290 \text{ m}^3/\text{s}$

$H = \text{TP } 0.55 \text{ m}$

京田川 $Q = 12 \text{ m}^3/\text{s}$

0 20000 PPM

濃度縮尺

0 0.5 1.0 %

流速縮尺

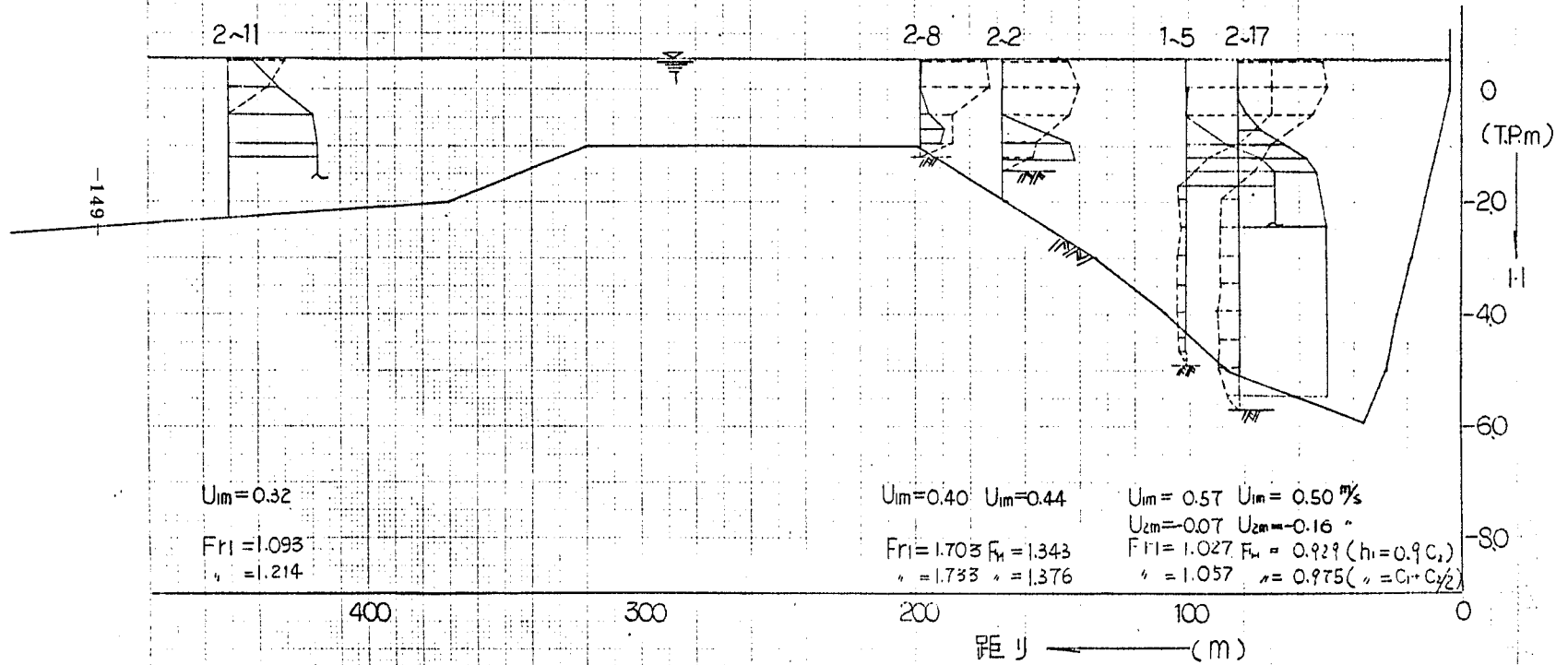


図 -8.8.3 濃度・流速分布図

断面 CS.0-387^m

最上川 LS.51.8、25

$Q = 290 \text{ m}^3/\text{s}$

$H = \text{TP}0.55 \text{ m}$

京田川 $Q = 12 \text{ m}^3/\text{s}$

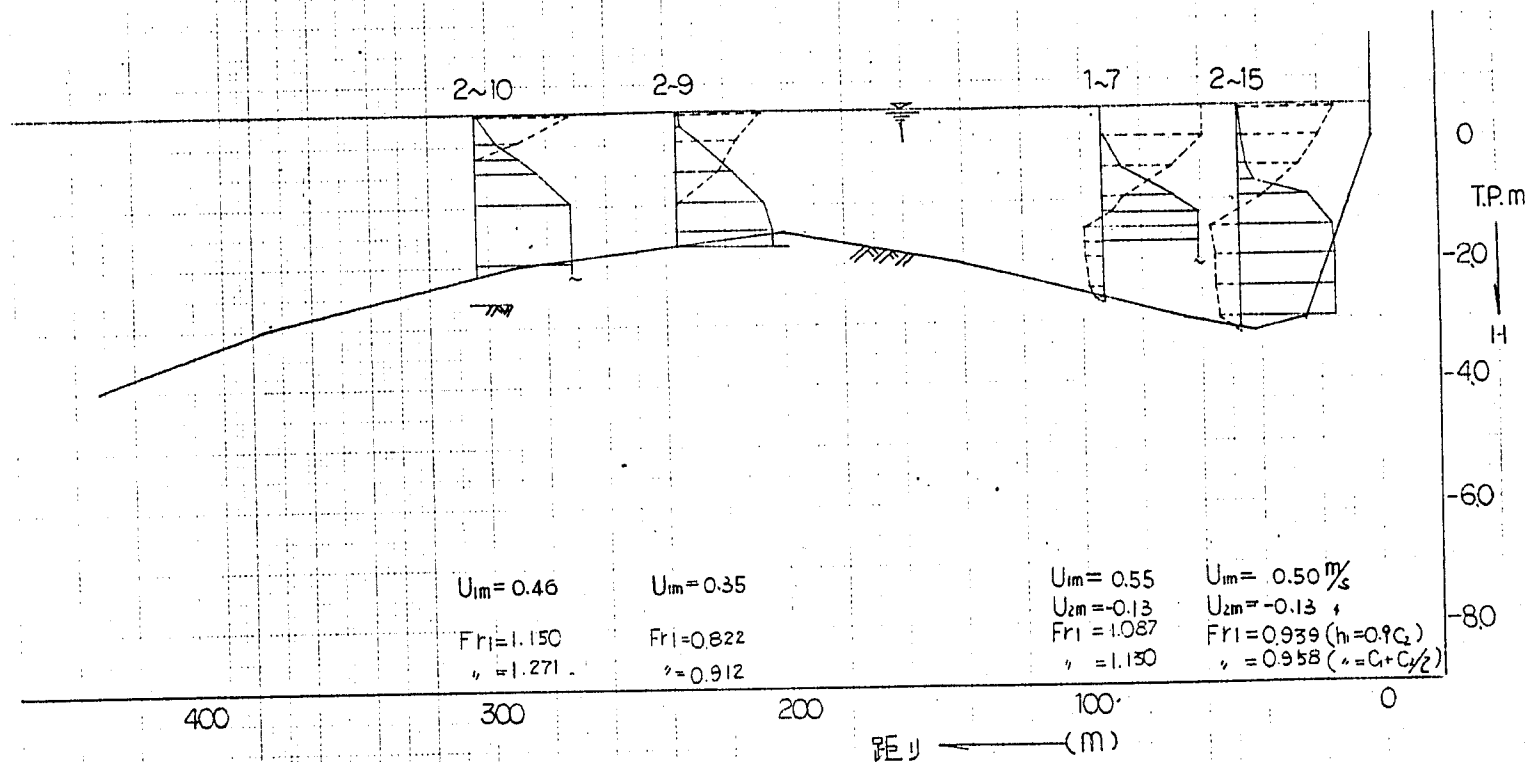
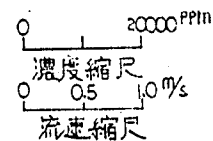


図-8.10.1 濃度・流速分布図 (右岸寄り)

最上川 S51 年 8 月 25 日

Q = 290 m³/s
H = TP 0.55 m
京田川 Q = 28 m³/s

濃度縮尺

0 20000 ppm

流速縮尺

0 10 m/s

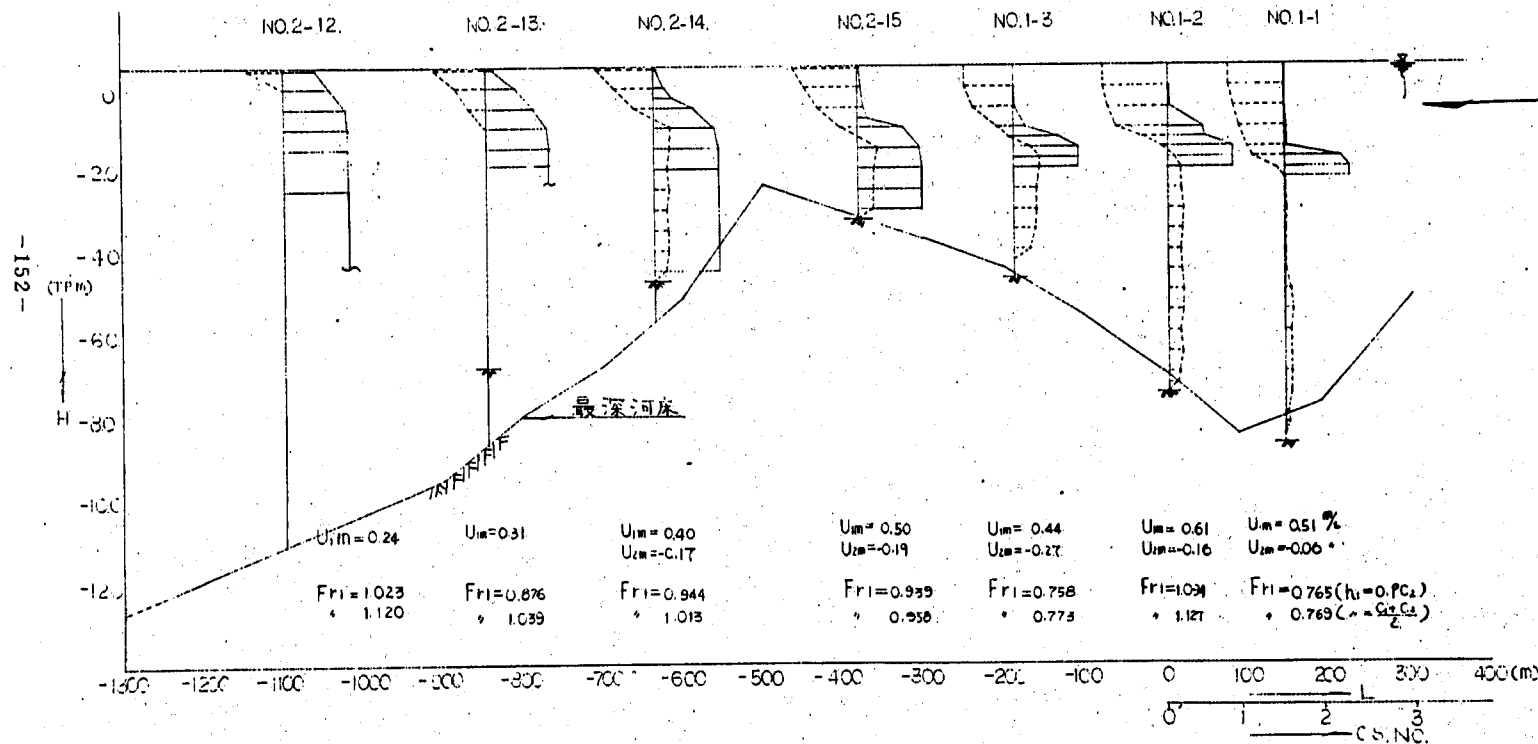


図-8.10.2 濃度 流速分布図 (左岸寄側)

最上川 S51年8月25日

$Q = 290 \text{ m}^3/\text{s}$
 $H = 170.55 \text{ m}$
 京田川 $Q = 28 \text{ m}^3/\text{s}$

0 2000 m^3/s 濃度縮尺
 0 0.5 1.0 % 流速

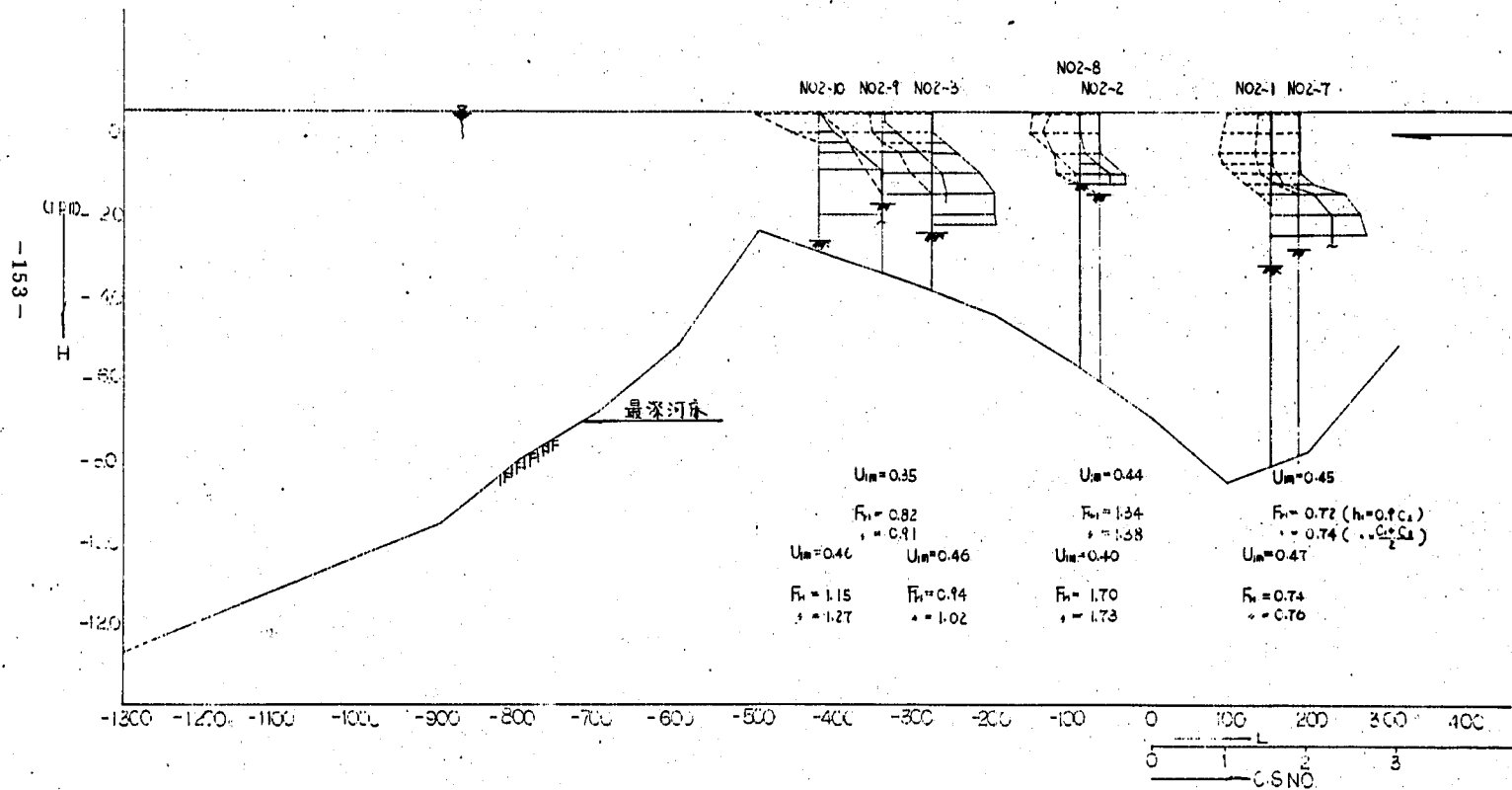


図-8.10.3 濃度・流速分布図 (中央部)

最上川 S51 年 8 月 25 日

$Q = 290 \text{ m}^3/\text{s}$
 $H = \text{TP} 0.55 \text{ m}$
 京田川 $Q = 28 \text{ m}^3/\text{s}$

0 2000 ppm 濃度縮尺
 0 0.5 1.0 % 流速

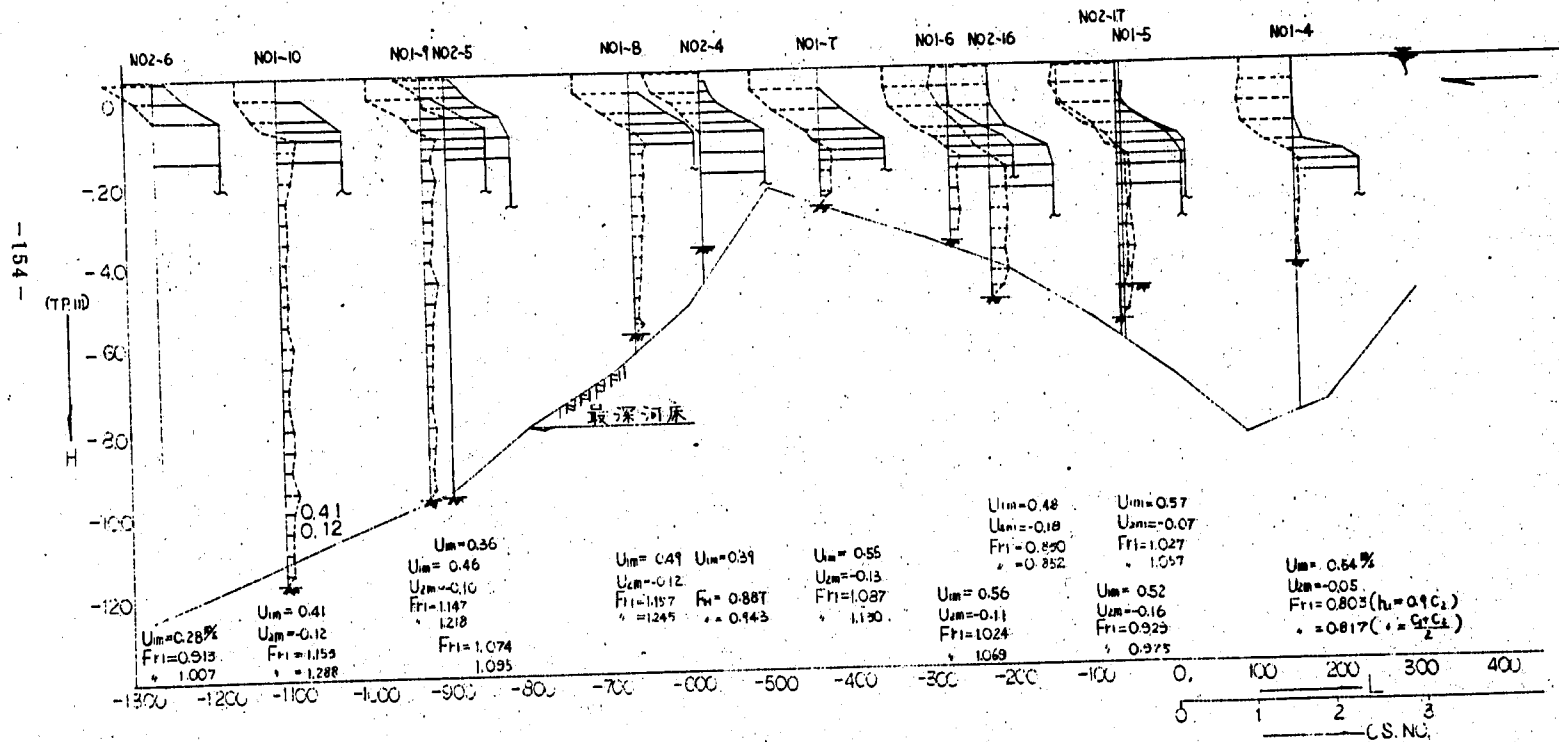
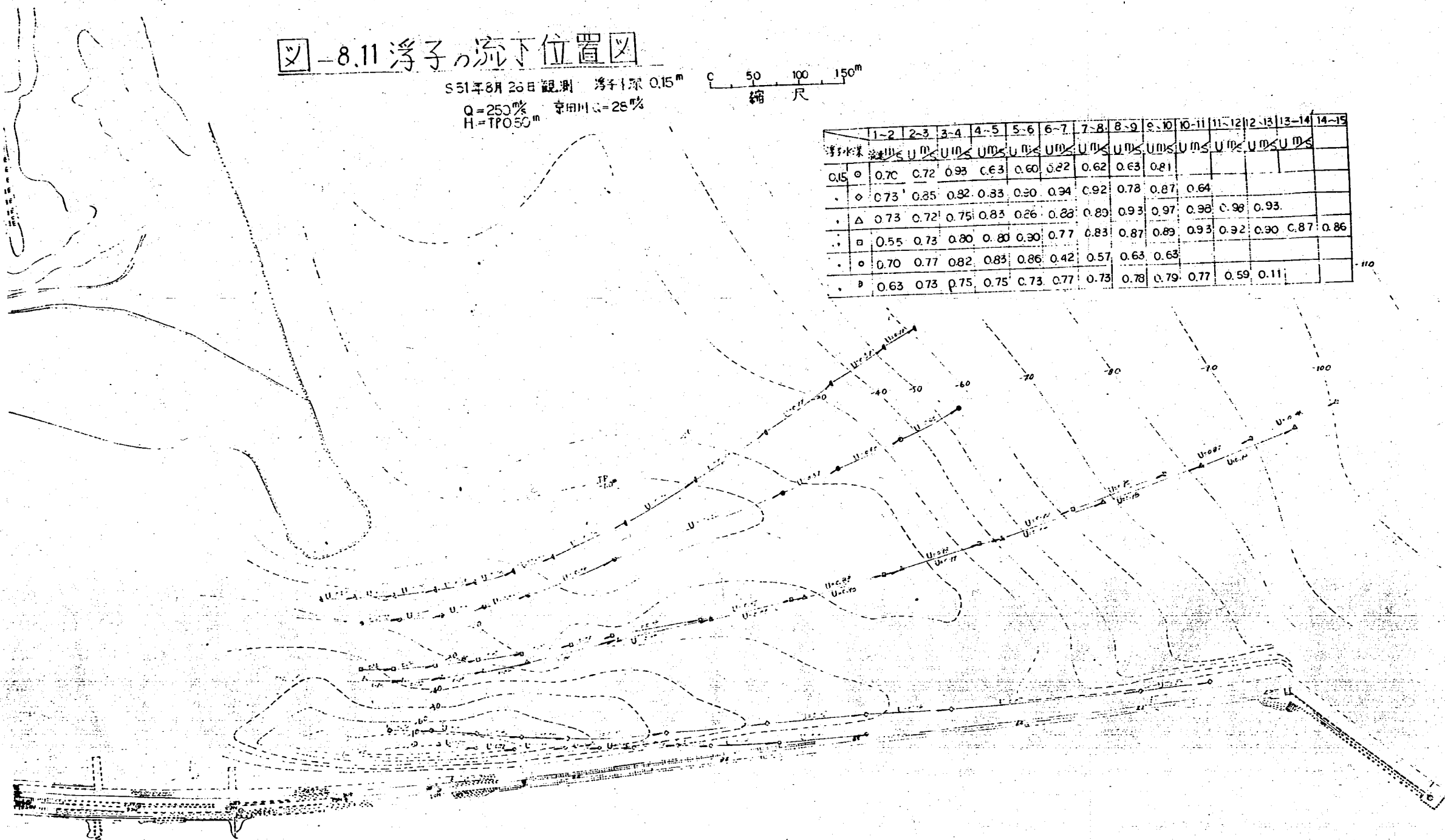


図-8.11 浮子の流下位置図

S51年8月26日観測 浮子水深 0.15m
 Q=253% 京田川 Q=28%
 H=TP0.50m

0 50 100 150m
 縮 尺

	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15
浮子水深	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
U	0.70	0.72	0.93	0.63	0.60	0.22	0.62	0.63	0.81					
△	0.73	0.72	0.75	0.83	0.26	0.28	0.89	0.93	0.97	0.98	0.98	0.93		
□	0.55	0.73	0.80	0.80	0.30	0.77	0.83	0.87	0.89	0.93	0.92	0.90	0.87	0.86
○	0.70	0.77	0.82	0.83	0.86	0.42	0.57	0.63	0.63					
●	0.63	0.73	0.75	0.75	0.73	0.77	0.73	0.78	0.79	0.77	0.59	0.11		



あ と が き

河口密度流に関して、土木研究所鹿島試験所でこれまでに行った実験、実測資料の定常状態時における現象を全般的にとりまとめた。各計算式の実測値との差異、および混合が進んだ場合等の検討が十分でなく今後に残ってしまったが、非定常時の現象も含めて別の機会に報告したい。

なお、最上川現地観測の調査の詳細は付として掲載したが、各調査ごとにまとめたものであるため、重複して述べているものもある。この最上川の現地観測に関しては、観測および資料等で建設省酒田工事事務所の関係各位に全面的な援助をいただいた。厚く感謝の意を表します。また観測には夏の暑さと船酔い等の困難にもめげず当所河川研究室、鹿島試験所両職員があたったことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 吉川秀夫：Estuaryの水理，土木学会水工学シリーズ，1966
- 2) 須賀堯三：河口からの塩水の遡上，土木技術資料13-9（1972）
- 3) 須賀堯三：河道内海水遡上現地調査法，土木技術資料18-6（1976）
- 4) 嶋 祐之：北伊勢工業用水道長良川水源に対する塩水くさびの遡上機構とその防止工法，1963，または長良川における塩水くさびの消長について，土木学会年講，1964
- 5) 嶋 祐之：密度流論，土木学会水工学シリーズ，1965
- 6) 柏村正和：河口密度流論，土木学会水工学シリーズ，1965
- 7) 岩崎敏夫：密度流の諸問題，土木学会水工学シリーズ，1966
- 8) 中村 宏，阿部宣行：河口二層流の研究，電研所報66074，1967
- 9) 中村 宏：河口密度流に関する二，三の問題，第17回海岸工学講演集（1970）
- 10) 須賀堯三，高橋 晃：混合を考慮した河口からの塩水くさびの遡上，土木学会水理講演会，1974
- 11) 須賀堯三，高橋 晃：混合を考慮した塩水くさびの計算法，土木技術資料17-10（1975）
- 12) 岩崎敏夫，齊藤 晃：二成層流の密度混合について，土木学会年講，1963
- 13) 金子安雄：2層流境界面抵抗係数の一例，第13回海岸工学講演集，1966
- 14) 中村 宏，稲松敏夫：神通川河口の塩水くさびについて，第13回海岸工学講演集，1966

- 15) 椎貝博美：塩水楔に関する研究，東京工業大学研究報告，1966
- 16) 須賀堯三，高橋 晃：弱混合河川における内部抵抗係数，土木学会年講，1975
- 17) 須賀堯三，高橋 晃：塩水くさびに関する大型水路実験による二，三の考察，土木学会年講，1971
- 18) 浜田徳一，堀口考男：塩水楔の性質について，第7回海岸工学講演集，1960
- 19) Keulegan, G. H : Interfacial instability and mixing in stratified flows, National B. of standards, Vol. 43, 1949
- 20) Ellison, T. H. & J. S. Turner : Turbulent entrainment in stratified flows, J. F. M., 1959
- 21) 和田 明，片野尚明：工業用水の取放水問題，第15回海岸工学講演集，1968
- 22) 芦田和夫，江頭進治：密度躍層のある場における濁水の挙動に関する研究(I)，京大防災研年報第18号B(昭50.4)
- 23) 土木研究資料，第834号：小川原湖淡水化調査報告書(2)，昭48.3
- 24) 須賀堯三，高橋 晃：炭塩境界面からの塩水の混入速度，土木学会年講，1972
- 25) 須賀堯三，高橋 晃：炭塩二層流の連行係数，土木学会年講，1976
- 26) 最上川河口における密度流特性：土木研究所資料第967号，昭50.3
- 27) 須賀堯三，高橋 晃：河口流出流に関する実測に基づく考察，第24回海岸工学講演集，(1977)
- 28) 須賀堯三，高橋 晃：河口流出流に関する実測に基づく考察(その2)，土木学会年講，1978
- 29) 須賀堯三，高橋 晃：二層流における内部ジャンプの条件，土木学会年講，1974
- 30) 須賀堯三，高橋 晃：航空写真による河口流出機構の考察，土木学会年講，1974
- 31) 福島，柏村，八畝，高橋：石狩川の河口構造，第15回海岸工学講演集，1968
- 32) Stolzenbach, K. D. & D. R. F. Harleman : An analytical and experimental investigation of surface discharges of heated water, M. I. T. Ralph M. Parsons, Lab. Rep. No 156, Sep. 1972
- 33) 林 泰造，有田光正：海面上に放出された温排水の拡がりについての数値解—第2報，第19回水理講演会，1975
- 34) 岸 力，板倉忠興：河口における河水の拡がり，土木学会年講，1975
- 35) 柏村正和，吉田静男：河口の流れの構造，第15回海岸工学講演集，1968
- 36) 最上川河口模型実験報告：土木研究所資料，第887号，昭49.3
- 37) 最上川の河口特性について：建設省酒田工事々務所，昭49.3