



Title	潮汐に対する河口二層流の応答
Author(s)	吉田, 静男; Yoshida, Shizuo
Citation	北海道大學工學部研究報告, 85, 101-114
Issue Date	1977-09-16
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/41430">https://hdl.handle.net/2115/41430</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	85_101-114.pdf



## 潮汐に対する河口二層流の応答

吉田 静 男

(昭和 52 年 3 月 30 日受理)

### Tidal Response of Two-Layer Flow at a River Mouth

Shizuo YOSHIDA

(Received March 3, 1977)

#### Abstract

This paper describes various features of tidal effects on the behavior of a salt wedge and on an outflow pattern of fresh water.

The studies were performed through experimental work, field observations and theoretical considerations.

The condition upon which the fresh water begins to show a back flow owing to an increase of the tidal action was obtained with a parameter  $\lambda$  which is equal to the ratio of the tidal current to the mean velocity of fresh water.

The critical value of  $\lambda$  was as follows;  $\lambda_c = 0.1/\theta$  ( $0.1 < \theta < 0.5$ ) for the experiment and  $\lambda_c = 0.006/\theta$  ( $0.01 < \theta < 0.03$ ) for field observation, in which the parameter  $\theta$  is the so-called Keulegan number. The back flow should occur for a flow with a  $\lambda$  value greater than  $\lambda_c$ .

Further, it became evident that a tidal motion of salt wedge can not be understood without due consideration to internal waves caused by the tidal action, in addition to the direct effect of the tide.

#### 1. はじめに

日本では古来河口を自然の漁港として利用してきたが、近年利水或は海上輸送の点で有利である事から、その近くには様々な工場が立ち並び、活況を呈している。

勿論、河口近くの肥沃な土壌を利用しての農業も盛んであって、河口周辺はまさにあらゆる産業の基地となっている。しかし、周知のごとく、河口には塩水楔の遡上による塩害という利水上の問題が古くからあり、加えて、最近では工場廃液或は都市汚水が河川に排出される事による沿岸漁場の汚染という、深刻な問題も生じている。

この様な問題の水理学的な部分を解明しようという試みは、現在ようやく軌道に乗り、過去研究されてきた河口二層流の知識をもとに、多くの問題が取扱われ、得られた成果も少なくない。しかし、従来のこの種の研究では、河口汚染問題には欠かす事の出来ない潮汐の効果に関しては、取扱いの複雑さが原因であまり考察が進んでいないのが実状であって、本質的な問題解明は、むしろ今後の研究にかかっていると云ってよいであろう。

こうした現状を踏まえ、問題解決の基礎となる弱混合型の河口二層流に与える潮汐の影響を、水理実験、野外観測、及び理論考察を通じて、広範囲に検討を加えてみた。

## 2. 実験装置

河口から沖の淡水の流況、及び河口から上流における比較的広範囲の二層流の観測を行なう必要性から、図1に示す様な外海に相当する広い水槽と、河川に相当する長い水路からなる模型を使用した。模型は10mm厚の透明なアクリル樹脂で作られており、壁面を通じて色素の動きを観測する事が可能である。潮汐は図1の広い水槽の下部（ビニール膜の下方）に、淡水を自動制御バルブを通して出し入れすることによって発生させたが、この方法によれば、塩水に不必要な乱れを生じさせずに任意の振幅及び波長の正弦波を作り出すことが出来る。

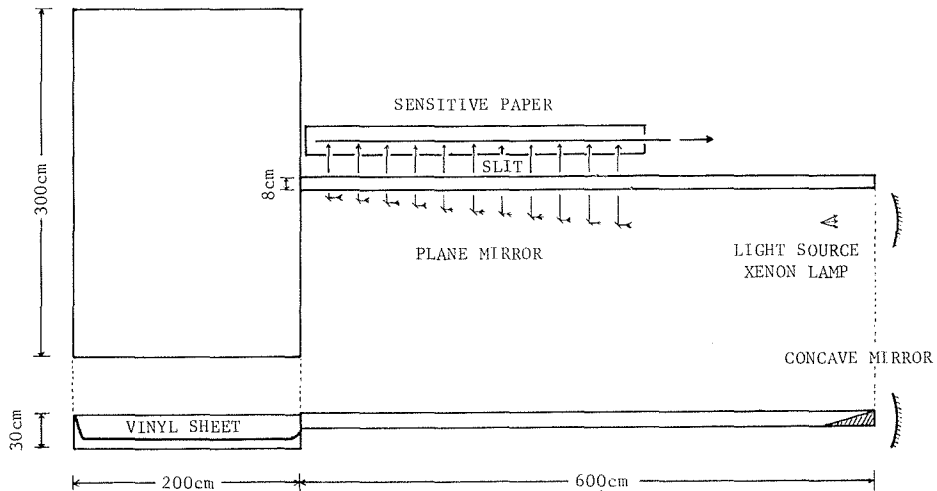


図-1

塩水楔の挙動は8mmカメラによる解析からだけでは不十分な点があるので、特殊な光学系を使用した。その光学系の概略が図1に示されているが、その測定原理は概ね次の通りである。

まず光源のキセノンランプがパルスの輝くと光は凹面鏡で平行光線となって数多く並んでいる平面鏡に到達する。この平面鏡により水路に直角に屈折された光は幅約0.3mmのスリットを経て印画紙をスリット幅だけ感光させる。この時、表面と界面を通過する光が屈折あるいは全反射を強いられるから、表面と界面に相当する部分だけが感光むらを生じ、その位置が識別出来る。次の瞬間、印画紙は水路の上流側に約0.3mm程度牽引され次の感光に備える。このような動作が自動的に正確な時間間隔で繰返されるので、水路内の成層状態が記録されることになる。以上が光学系の測定原理である。なお河口外の淡水流出流況の観測及び河口内の流速分布の測定は、フルオロセインナトリウムの水溶液をトレーサーとして使い、それを8mmカメラでとらえることによって行なわれている。

## 3. 淡水流出流況に与える潮汐の影響

まずはじめに、河口から沖に流出した淡水の流況から述べてみよう。以下説明の都合上強い潮汐というあまり明確でない表現がしばしば使用されるが、それは周期がより短く、振幅がより大きい潮汐を意味するものである事を、始めに断っておく。

潮汐のない定常状態下の淡水流出流況に関しては、柏村・吉田の研究(1967)<sup>1)</sup>(1969)<sup>2)</sup>(1972)<sup>3)</sup>がある。その研究によれば、淡水流出流況は無次元量  $\theta = (\nu \varepsilon g)^{1/3} / U_0$  と  $R = U_0 b / \nu$  (ここに  $\theta$ ,  $R$  はクーリガン数及びレイノルズ数,  $b$ ,  $g$ ,  $U_0$  は河口幅, 重力加速度, 河口における淡水平均流速,  $\nu$ ,  $\rho$  は動粘性係数及び密度,  $\varepsilon$  は  $(\rho_2 - \rho_1) / \rho_2$ , 添字 1, 2 は淡水層及び塩水層を示す) を使用して, 次のごとく密度流の性格の強い A 型から一流体の噴流型式の E 型に至るまで 5 段階に分けることが可能であって, それぞれのパターンは写真 1 に示すごとくである。

A 型	$\theta R^{0.14} \geq 0.94$	B 型	$0.94 \geq \theta R^{0.14} \geq 0.64$
C 型	$0.64 \geq \theta R^{0.14} \geq 0.53$	D 型	$0.53 \geq \theta R^{0.14} \geq 0.33$
E 型	$\theta R^{0.14} \leq 0.33$		

一方, 今回の実験からは, 潮汐がわずかでも存在すると, 一般的に図 2のごとく定常状態下の流況を中心として, 漲潮期にはより密度流的傾向の強い, そして落潮期には噴流形式に近い流況を示す様になることが分かった。ただその流況は潮汐の強さによって大いに異っており, 弱い潮汐の場合, 流況や淡水流速の変動はあってもわずかであり, 全潮時にわたって上層淡水は河口外に流出するが, 強い潮汐の場合には図 3のごとく漲潮最盛期に淡水が停止したり逆流したりする様になる。そしてさらに潮汐が強まると, 落潮期に一度河口外に出た淡水は, 漲潮期になっても水路内に戻る事が出来なくなる。従って, この場合には水路内の淡水と, 河口外に流出した

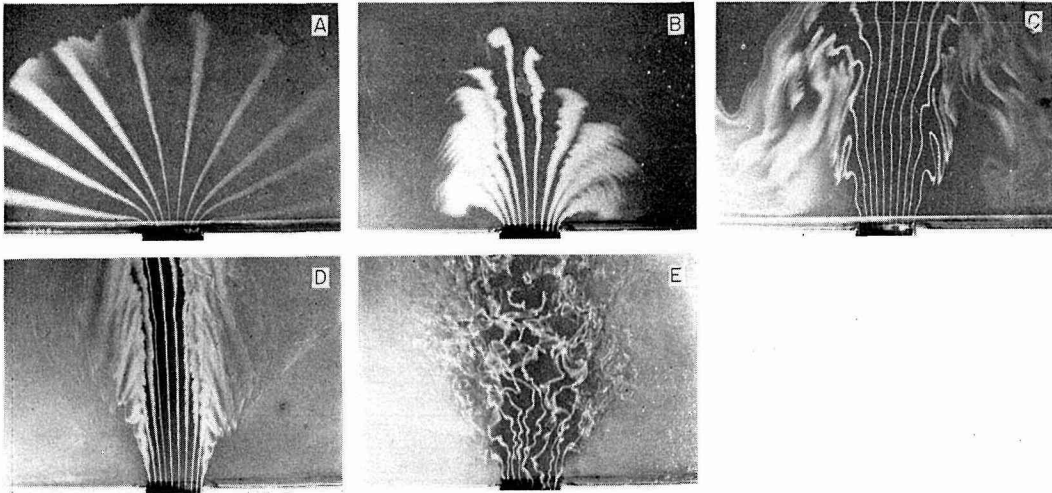


写真-1

塩水の連絡が断たれ, 淡水の流出流況は間歇流の形式になる。以後, いかにも潮汐が強くなっても, 淡水と塩水の混合が生じなければ, 同じ流況が見出されることになるが, 野外の河口では混合のために明瞭な二層を形成し得ず, 二層流としての取扱いは不可能になってくる。

さて, ここで二層の流速が潮汐の影響を受けて, どのように変動するかを調べ, 上層淡水が逆流に至る条件を理論的に求めてみよう。

今河口に近い二成層の流れにのみ注目し, 二成層の厚さは一様で, 川床の勾配は 0 と仮定すれば, 非粘性の河口二層流に対し, 次の運動及び連続方程式が第一近似として成立する。

$$h_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} (\gamma_1 - \gamma_2) = 0 \quad (1)$$

$$h_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} + \frac{\partial \eta_2}{\partial t} = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} = -g \frac{\partial \eta_1}{\partial x} \tag{3}$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial t} = -g \frac{\rho_1}{\rho_2} \frac{\partial \eta_1}{\partial x} - \varepsilon g \frac{\partial \eta_2}{\partial x} \tag{4}$$

ここに  $t$  は時間,  $g$  は重力加速度,  $x$  は河口を原点とし水路に沿ってとられた座標を示し,  $\eta_1, \eta_2$  はそれぞれ表面及び界面の平均水位からの変位,  $h, u, \rho$  はそれぞれ各層の厚さ, 平均流速及び密度を示す。又  $\varepsilon = (\rho_2 - \rho_1) / \rho_2$  であり添字 1, 2 は上層及び下層を示している。

次に (1)~(4) 式を  $u_1$  についてまとめると次式を得る。

$$\frac{\partial^4 u_1}{\partial t^4} - g(h_1 + h_2) \frac{\partial^4 u_1}{\partial t^2 \partial x^2} + \varepsilon g^2 h_1 h_2 \frac{\partial^4 u_1}{\partial x^4} = 0 \tag{5}$$

(5) 式に  $C_s^2 = g(h_1 + h_2)$  又は  $C_{s,i}^2 = \varepsilon g h_1 h_2 / (h_1 + h_2)$  なる  $C_{s,i}$  を導入し  $C_{s,i} = \sigma / m$  とおけば,  $u_1 = f(mx + \sigma t) + F(mx - \sigma t)$  が  $\varepsilon \ll 1$  という条件下で解となり得ることが示される。又  $u_2, \eta_1, \eta_2$  についても同形の解を得ることになるので, 水路の上流端での反射が無ければ,  $u, \eta$  ともに同位相の次の Proudman<sup>4)</sup> の解を得る。

$$\eta_1 = \eta_{10} \cos(mx - \sigma t) \tag{6-1}$$

$$\eta_2 = \left(1 - \frac{h_1 g}{C_{s,i}^2}\right) \eta_{10} \cos(mx - \sigma t) \tag{6-2}$$

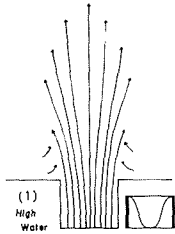
$$u_1 = \frac{g}{C_{s,i}} \eta_{10} \cos(mx - \sigma t) \tag{6-3}$$

$$u_2 = \frac{C_{s,i}}{h_2} \left(1 - \frac{h_1 g}{C_{s,i}^2}\right) \eta_{10} \cos(mx - \sigma t) \tag{6-4}$$

ここに  $\eta_{10}$  は  $\eta_1$  の振幅を示す。

一方  $x=l$  cm に水路の上流端がある場合には,  $x=l$  cm で  $u=0$ ,  $x=0$  で表面水位変動が潮汐に相当する  $\eta_1 = \eta_{10} \cos(\sigma t + \theta)$  に等しいとおく事によって次の解を得る。

Q	flow rate of the fresh water	6.7 ml/sec
A <sub>s</sub>	amplitude	1.70 cm
T	period	1390 sec
E	$(\rho_2 - \rho_1) / \rho_2$ , $\rho_1$ : density of upper layer, $\rho_2$ : density of lower layer	0.018
G	Keulegan number	0.245
R	Reynolds number, $\frac{U_m b}{\nu}$ , b: width of channel	1577



Q	flow rate of the fresh water	2.9 ml/sec
A <sub>s</sub>	amplitude	2.29 cm
T	period	360 sec
E	$(\rho_2 - \rho_1) / \rho_2$	0.020
G	Keulegan number	0.321
R	Reynolds number	1213

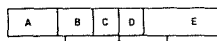
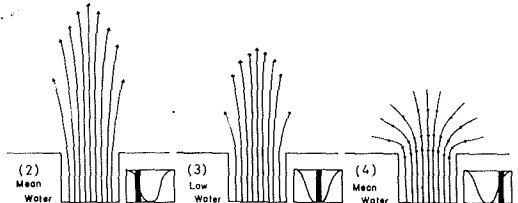
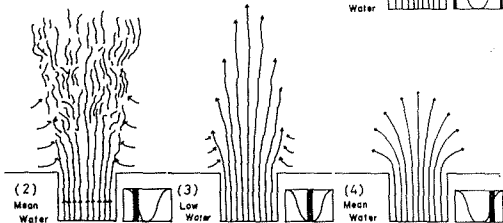
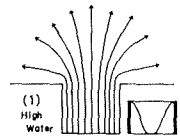


図-2

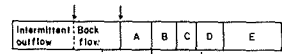


図-3

$$\eta_1 = \eta_{10} \frac{\cos \{m(x-l)\}}{\cos ml} \cos(\sigma t + \theta) \tag{7-1}$$

$$\eta_2 = \left(1 - \frac{h_1 g}{C_{s,i}^2}\right) \eta_{10} \frac{\cos \{m(x-l)\}}{\cos ml} \cos(\sigma t + \theta) \tag{7-2}$$

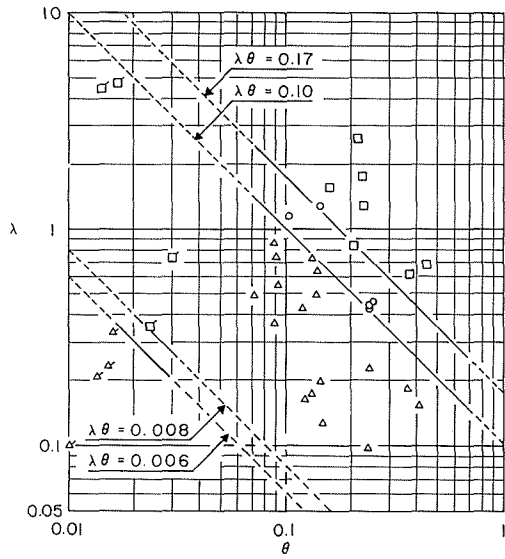
$$u_1 = \frac{g}{C_{s,i}} \eta_{10} \frac{\sin \{m(x-l)\}}{\cos ml} \sin(\sigma t + \theta) \tag{7-3}$$

$$u_2 = \frac{C_{s,i}}{h_2} \left(1 - \frac{h_1 g}{C_{s,i}^2}\right) \eta_{10} \frac{\sin \{m(x-l)\}}{\cos ml} \sin(\sigma t + \theta) \tag{7-4}$$

かくして河口における淡水の潮流流速式として(6-3), (7-3)を得たわけであるが, 後述のごとく, 前者は長い河川において近似的に成り立ち, 後者は実験水路においてほぼ成立する事が実証できるから, 河川の規模によらない潮流の振幅の表現式として次式を得る事になる。

$$u_{10} = Kg\eta_{10}/C_{s,i} \tag{8}$$

ここに  $K$  は非常に長く, 川床勾配の小さい比較的深い河川ではほぼ 1 に等しく, 上流端での反射率がほぼ 1 に近い短水路においては,  $K = \sin \{m(x-l)\} / \cos ml \approx 2\pi(x-l) / TC_s$ . (ここで  $l, T, C_s$  はそれぞれ水路長さ, 潮汐周期, 表面波速である) となる。ところで, 淡水の河口における平均流速は, 内部波の発生が無く, 全潮時にわたって淡水厚さに変化が無いものとみなせば, 河口条件  $F_{10} = U_0 / \sqrt{\varepsilon g h_1} = 1$ , 及び流量  $Q = U_0 b h_1$  より  $U_0 = (\varepsilon g Q / b)^{1/3}$  と求め得る。従って, この  $U_0$  及び(8)より, 河口における淡水の逆流条件として  $u_{10} / U_0 > 1$  を得ることになる。この  $u_{10} / U_0 = \lambda$  と河口に



	intermittent outflow	back flow	continuous outflow
EXPERIMENT	□ $\lambda\theta > 0.17$	○ $\lambda\theta > 0.10$	△ $\lambda\theta < 0.10$
FIELD	□ $\lambda\theta > 0.008$	○ $\lambda\theta > 0.006$	△ $\lambda\theta > 0.006$

図-4

における  $\theta$  を使用して淡水の流を分類してみると図4のごとくなり,  $\lambda > 1$  の領域ではすべて逆流状態にある事が分かる。しかし, 逆流に至る臨界値  $\lambda_c$  は定数 1 に等しくなく, 実験結果においてはむしろ  $\theta$  の関数となっていて,  $\lambda_c \theta = 0.1$  と表わし得る。

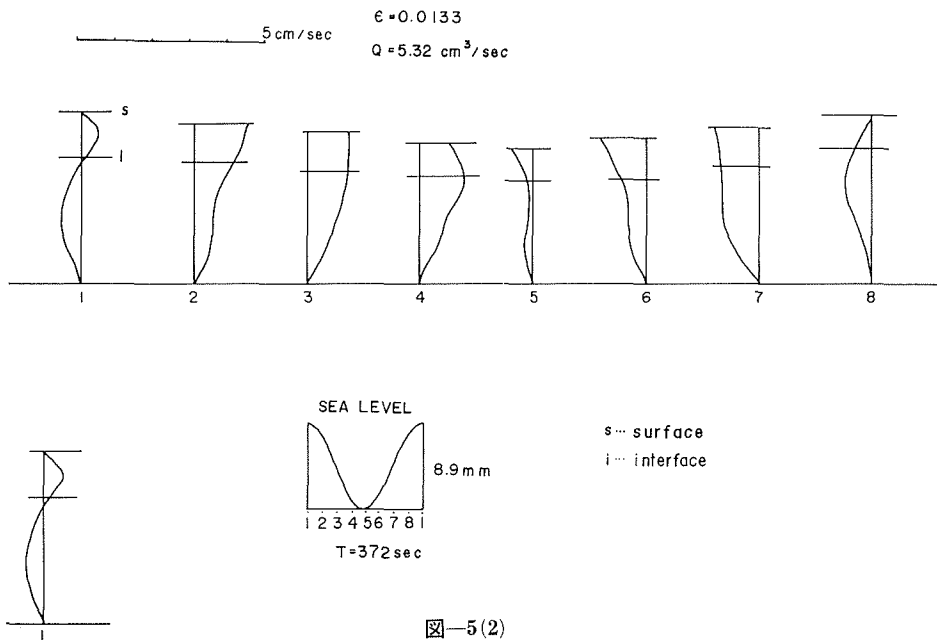
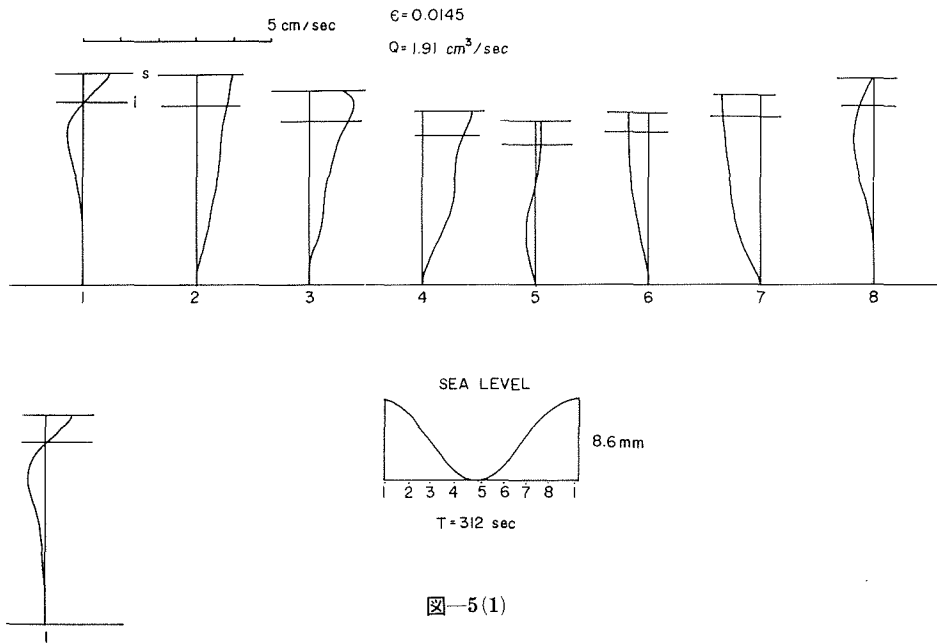
この結果は河口における淡水流れが基本流と潮汐による外部波に基づく潮流の和だけでなく第三の流れが介在している事を示している。この別種の流れとしては, まず内部波に基づくものが予想されるが, 事実, 後述のごとく潮汐による内部波の発生を立証する事が出来る。

又  $\lambda_c < 1$  という実験結果から推定すると, この流れは淡水の逆流開始の時点で上流に向かっているものと判断されるが, 内部波の発生機構が分かっていない現在, 正確な流速変動の算定が出来ず,  $\lambda$  の修正も不可能である。

一方野外の河川の場合にも, 後述のごとく, やはり界面には内部波が発生しており, 実験の場合と同じ理由によって  $\lambda_c < 1$  が得られるものと思われるが, なに分データが不十分であり, 前述の事柄と合わせて今後の課題とせざるを得ない。

4. 潮汐に対する河口内二層流の応答

河口より上流の定常状態下の二層流の問題は、種々の水理条件下での塩水楔の形状が予測出来れば、かなりの部分が解決された事になる。現在のところ、定常状態の塩水楔の形状は、二層の界面抵抗係数をパラメーターとして *Schijf-Schönfeld* の理論<sup>5)</sup> から求める事が出来る。又理論的には今のところ求め得ない界面抵抗係数も、水理実験と野外観測の両面から  $\Psi = RF_0^2$  ( $R$ : 代



表長さを淡水厚さにとったレイノルズ数,  $F_i$ : 内部フルード数) の関数としてまとめられつつあり, 近い将来一応の楔の形状予測が可能となるであろう。

一方, 潮汐の影響下における二層流の研究も野外観測を通じて或程度なされてきている。例えば塩水楔の先端が満潮時に急峻となり干潮時には平坦となること, 或は, 表面と界面が必らず

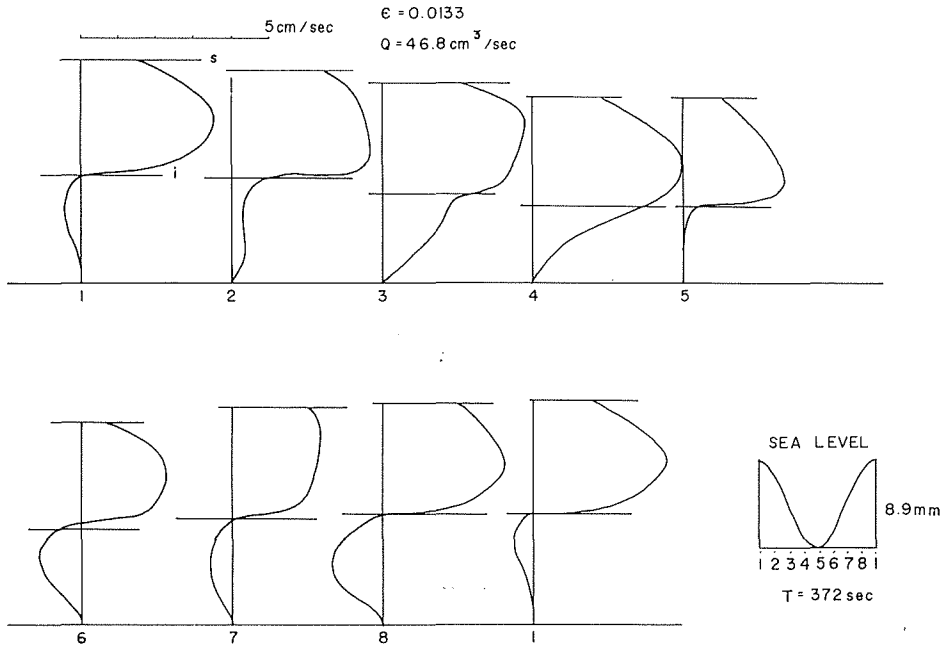


図-5(3)

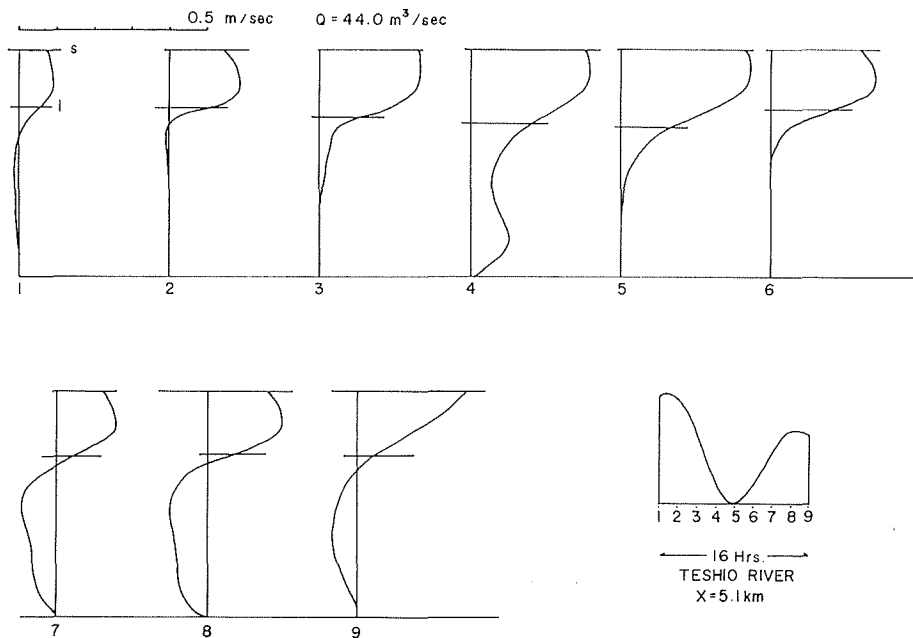


図-5(4)

しも同位相で変動していない事、そして、上層淡水が全潮時にわたって連続的に流出する場合でも塩水楔は漲潮期には上流に侵入し、落潮期に押し出されるといった定性的な幾かの事実が明らかにされてきた<sup>6)</sup>。ここでは従来の結果を参考にし、さらに高い精度で水理実験と野外観測を行ない、二層流の潮汐に対する応答を調べてみよう。

(a) 水理模型実験の結果と解析 まず二成層の鉛直方向流速分布と潮汐の関係について記述してみる。図5(1)~(3)は二層流の流速分布の一潮時にわたる変動を測定した結果であり、(1)、(2)は河口から2.75 m、(3)は河口から1.30 mの地点で測定が行なわれている。又図6は上記実験とほぼ同じ条件下での河口表面電気伝導度と潮時の関係を示し、図7は河口上流諸点での表面電気伝導度と潮時の関係を示している。なおこの実験及び以下すべての実験において潮汐波は正弦波である。以上の結果から、同じ程度の潮汐でも流量が著しく少ない場合、例えば  $Q=1.80$  cc/秒の場合には、河口から上流の或る距離にわたって図8のごとく下層塩水が表面に露出し、流出流況が间歇流になる事が分かるが、この時  $\lambda\theta=0.239$  で、図4に示す间歇流の条件を確に満たしている。他方流量が増加するに従って順流に転ずる様になるが、下層塩水だけはこれまでも知られている様に、淡水流量が順流であっても漲潮期には上流に遡上し、落潮期には押し戻されるといった性質を有しており、野外における観測結果図5(4)とも定性的に合致している。ただ野外では表面水位変動に比して界面水位変動が著しく大きい点が実験と大いに異っており、この相違が前節で明らかになった野外と室内実験における、逆流条件の相異に重大な関係をもつものと思われる。さて以上の様な鉛直方向の二層流の観測結果から、流速や表面及び界面の潮汐変動を知る事

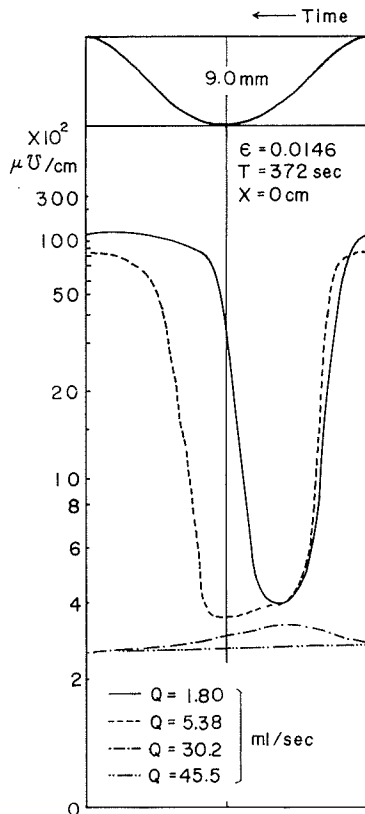


図-6

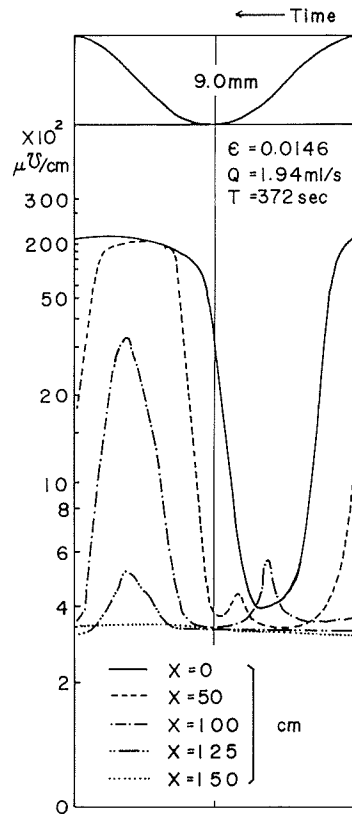


図-7

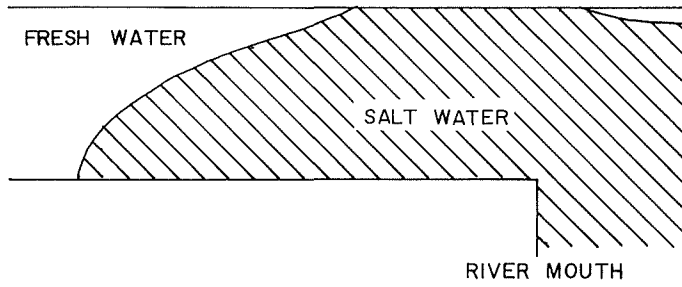


図-8

は可能であるが、その変動がどの様に伝播するかという点については、全く知り得ない。そこで次に適当な2点で同時観測を行った結果について検討を加え、各潮汐変動の伝播性について調べてみよう。

図9は淡水流量が0の場合の河口から50 cmと350 cmの流心における平均流速と表面及び界面の水位変動を、色素トレーサーと8 mmカメラを使用して観測した結果である。これによると  $T=33.3$  秒、100秒のいずれの場合にも流速変動の位相が水位変動の位相より  $\pi/2$  だけ進む事、及び流速は上流側ほど遅い事などが分かるが、これらはいずれも短い水路を使用しているために、潮汐による表面波が定常波を形成する事に起因している。又  $T=33$  秒の場合は  $T=100$  秒の場合に比して流速変動も表面水位変動も全く逆位相になっているが、これは水路水の固有振動周期31.9秒に共振した結果であると見る事が出来る。

図10は上層に淡水を流した場合の結果である。この結果からは各層の流速変動及び上、下

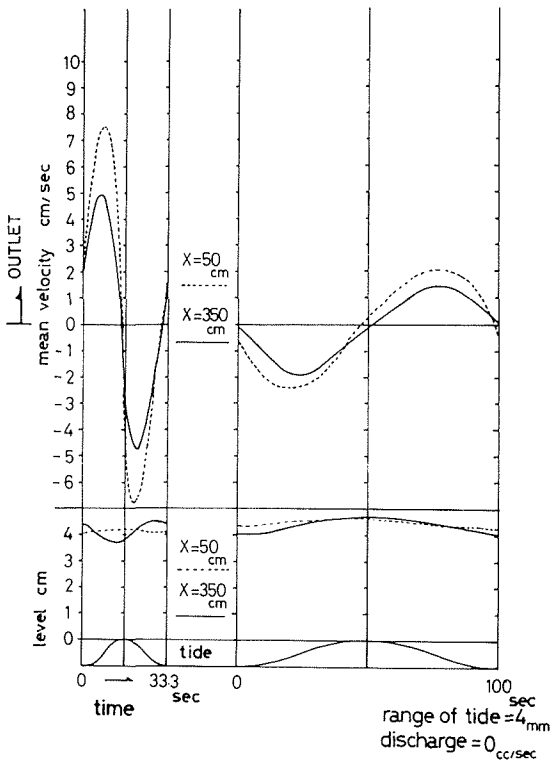


図-9

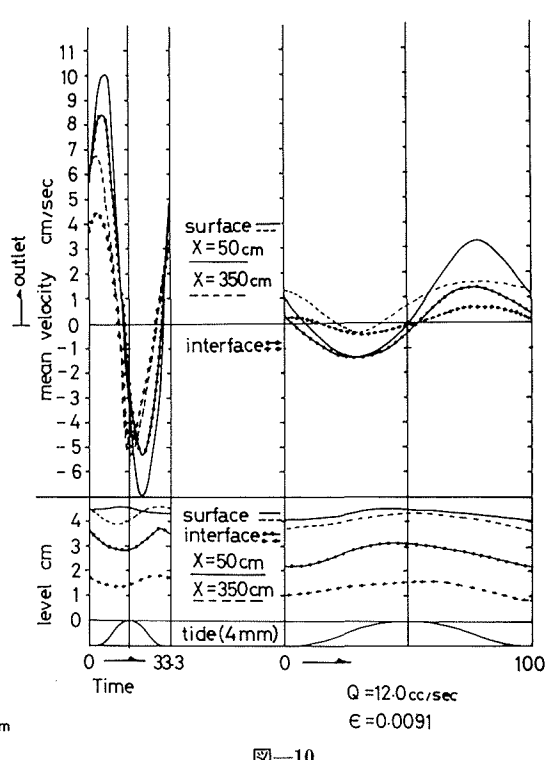


図-10

流の2観測点間の流速変動に位相差が無く、表面水位変動は流量が0の場合と全く同じ傾向を示す事が見出される。この事実に加えて、表面と界面の水位変動にも位相差が無いという事実は見出される事から、この実験においては塩水楔及び淡水の挙動は専ら潮汐による外部波のみによっていると言えよう。

ここで上記の実験結果と(7-3)式の比較を行ってみよう。(7-3)式に図10の実験データ  $\eta_{10}=0.2\text{ cm}$ ,  $T=100\text{ 秒}$ ,  $l=450\text{ cm}$ ,  $x=50\text{ cm}$  を代入すると、 $u_1$  及び  $u_2$  の振幅として約  $1.36\text{ cm/秒}$  を得る。一方図10の流速は流心における鉛直方向の平均値である事、及び横方向の流速分布が流心で最大、側壁で0の放物形に近い事から、その平均流速振幅は  $1.2\text{ cm/秒}$  程度と考えられ、(7-3)式による結果とはほぼ一致する。又各潮汐変動の位相関係もよく一致しており、それらがまさしく潮汐による表面波に起因していると結論することが出来る。

さてこの様にして得られた  $T=100\text{ 秒}$  の結果は水路水の固有振動周期から十分にずれた場合のもので、 $T>100\text{ 秒}$  のいかなる周期の潮汐に対しても適用出来そうに思われるのであるが、実際にはそれが出来ない。その理由は潮汐周期が十分長くなると、上流側で界面水位変動が表面水位変動より遅れるという事が見出されるからである。その事実を示す一例が写真2に示されている。この写真は第2節で述べた光学系を使用して、等しい時間間隔で表面と界面の水位を同時にとらえたもので、表面水位変動はいたる所で同位相であるが、界面水位変動は確かに上流側で表面水位変動より遅れている(なおこの時の水理条件は  $Q=9.67\text{ cc/秒}$ ,  $\varepsilon=0.0067$ ,  $\eta_{10}=1.0\text{ cm}$ ,  $T=1623\text{ 秒}$ , サンプルング間隔  $\Delta\tau=8.92\text{ 秒}$  である)。そこで次にこの位相差と潮汐の間どの様な関係があるか実験的に調べてみよう。

図11は  $Q=10\text{ cc/秒}$ ,  $\eta_{10}=0.27\text{ cm}$  と固定し周期をパラメーターとした場合の表面の干潮時

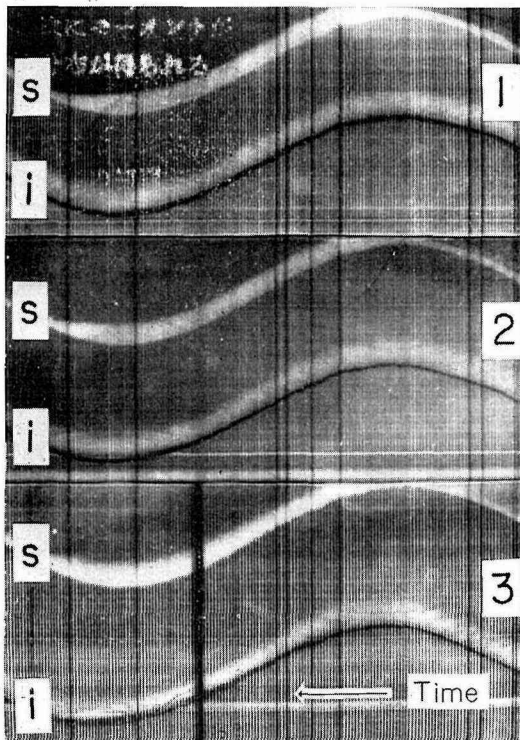


写真-2

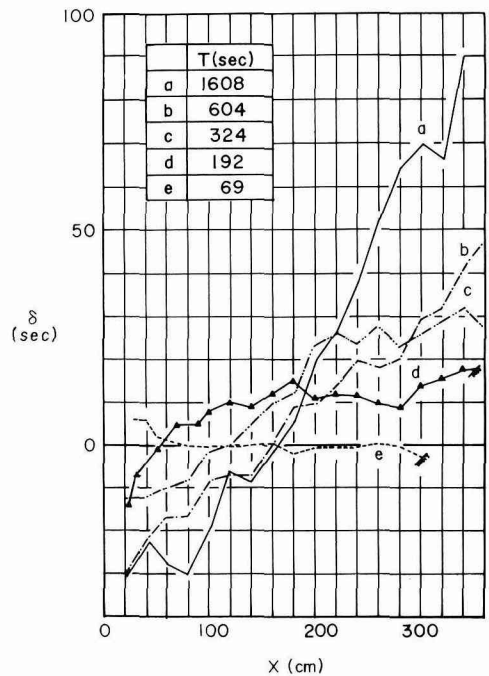


図-11

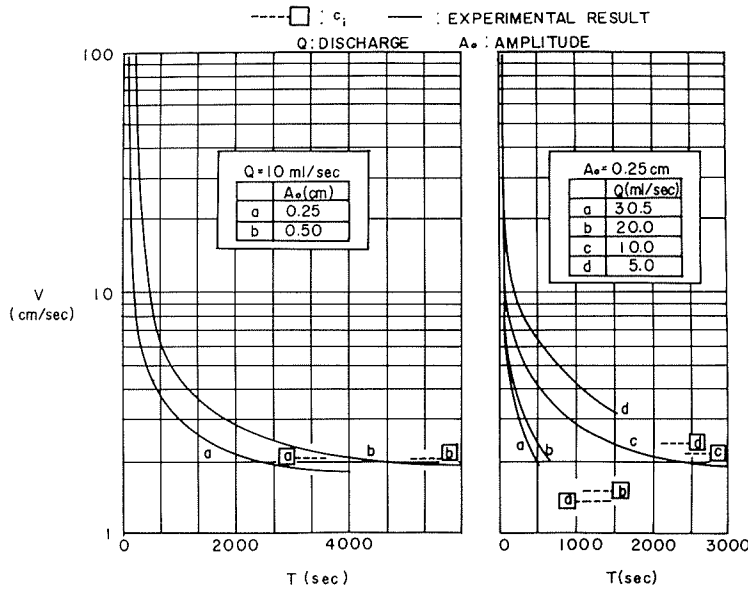


図-12(1)

図-12(2)

刻に対する界面の干潮時刻の遅れが、河口から上流に向かってどの様に変化するかを示している(なお  $\delta$  の正の値が遅れを、負の値は進みを表わしている)。この結果から  $x$  の増大に伴う  $\delta$  の増加が上流側ではほぼ直線的に変化し、その  $x$  方向の勾配 ( $\delta_i$ ) は長周期ほど急になる事が分かる。この事は界面水位変動が或速度で上流側に伝播している事を意味するが、その伝播速度は、界面水位の波形が伝播によってあまり変形しない事から、 $1/\delta_i = V$  で与えられると考えてよい。

この伝播速度が周期だけでなく、さらに流量や潮汐振幅にいかにか依存するかを調べてみると、図 12(1), (2) の結果を得る(なお(1)は振幅、(2)は流量をパラメーターとしているが、いずれの場合も振幅は全水深に比してかなり小さい)。この結果からは  $T < 100$  秒の領域ではほとんど速度が無限大、つまり界面と表面の水位変動に位相差がなく、 $T > 100$  秒では  $T$  の増大につれて或特定の値に収束する傾向を有する事が分かる。その収束値は一般に潮汐振幅にはあまり関係せず(全水位に比して振幅が十分小さいことに因る)、流量に強く依存しており個々の収束値は内部波を表わす次式から求められる値とほぼ等しい。

$$C_i = -\frac{U_2 h_1 + U_1 h_2}{h_1 + h_2} + \sqrt{\varepsilon g \frac{h_1 h_2}{h_1 + h_2} - \frac{(U_1 - U_2)^2 h_1 h_2}{(h_1 + h_2)^2}} \quad (10)$$

こうした一連の実験結果から二層流の潮汐に対する応答が一応次のごとく説明できる。まず潮汐のきわめて弱い場合から説明していこう。この場合 (7-3), (7-4) 式も示すごとく表面水位と淡水流速とは位相が  $\pi/2$  ずれており、潮流もきわめて小さいが、塩水内流速は河床との摩擦のため淡水流速変動よりは遅れる。それ故表面水位が上昇を開始しても界面は依然として降下し続けるといった現象が比較的上流側で見られる事になる。こうした二層流の河口に潮汐が加えられると、塩水楔の力学的バランスが崩れ、安定状態を求めて刻々その形状が修正され続ける。勿論この修正は楔全長にわたって、一瞬にしてなされるのではなく、河口のやや沖から上流に向かって内部波速をもってなされてゆく。これはちょうど、潮汐周期の内部波が河口から侵入すると考えても同じであり、界面の上昇は摩擦による先述の事情もあって、この内部波が到達したときにはじめて見出される事になる。

潮汐が或程度強くなると、潮流も強まり、二層全域が非粘性状態に似た流れになるので、淡水層及び塩水層内の潮流は、ほぼ同位相、従って表面水位と界面水位がほぼ同位相で変動する様になる。しかし潮流の弱い干潮、或は満潮の頃には、前例のごとく、界面は内部波が原因で変動するから、図 11 の d に見られる様な、河口から 1 m 程度までは  $\delta$  が単調に増加し、それよりさらに上流では  $\delta$  の変化が非常に小さいという結果を得るのである。

さらに潮汐が強まると、ほぼ全潮時にわたって潮流が強くなり、界面上昇は専ら潮流に基づくものとなるから、図 11 の e に示されるごとく、内部波に基づく  $\delta$  の変化が、 $x$  の全領域で 0 という結果を得、本実験の方法では内部波の発生の有無を検知することができなくなる。

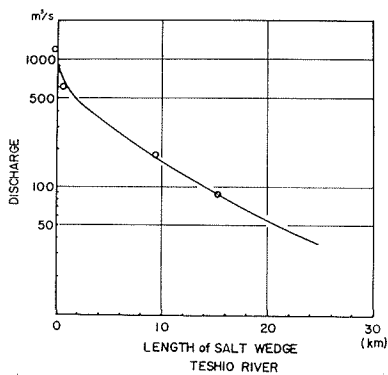
この様にして、二層流の潮汐に対する応答が様々な潮汐について定性的に説明する事が出来るが、この結果から、今後二層流の非定常問題を取扱う場合には、河床、或は界面での摩擦抵抗よりは、むしろ潮汐に基づき発生する内部波の寄与を第一に考慮せねばならない事が理解出来る。

(b) 野外の河口二層流の観測結果と解析 さて、野外における河口二層流についても上述のごとき内部波が見られるかどうかを比較的弱い潮汐の天塩川河口二層流について調べてみよう。

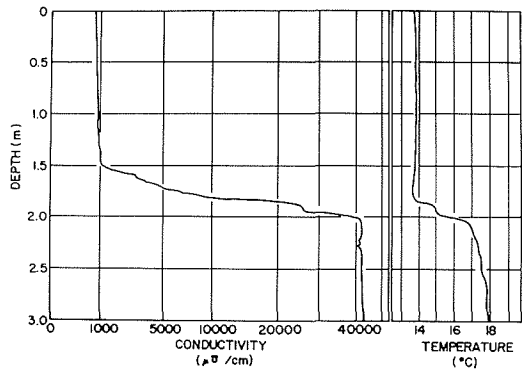
天塩川は周知のごとく、最大振幅 30 cm 程度の弱い潮汐の日本海に河口を有しており、塩水楔の長さの変動も潮汐よりは淡水流量に強く依存している。因に塩水楔の長ささと淡水流量の関係を示せば、図 13 のごとくである。

図 15, 16 は河口の上流 0.5 km 及び 5.1 km の 2 点で 1 時間おきに一昼夜にわたって同時観測された表面及び界面水位の変動を示している。なお淡水と塩水の境界は図 14 に示すごとく不明瞭なものであるから、電気伝導度が 30,000  $\mu\sigma/cm$  を示す位置をもって界面とみなした。この 2 つの観測例における淡水流量と図 13 から、塩水楔の全長はおよそ 20 km 程度と判断されるが、この長さは潮汐による表面波の波長に比して十分小さい。又、ここには紙面の都合で記述出来なかった、表面水位の連続記録あるいは流速変動の測定結果<sup>7)</sup>によると河口 20 km までは潮汐波の変形や減衰は無視出来る程度であり、流速変動の長周期成分は潮汐よりわずかに位相が進んでいる程度である。こうした事実から、表面水位変動は定常波ではなく進行波性の強いものであり、河口近くの二層においては (6) 式が近似的に成立するものと推定されるが、実際に (6) 式と実験結果の一致度は良好である。

さて図 15, 16 の水位変動に注目してみると、いずれの場合にも河口に近い下流点では表面及び界面の水位変動が同位相に近いが、上流ではかなりの差のある事に気づく。その位相差は図 15 の場合には 3~4 時間、図 16 の場合には 2.5~3 時間の程度であって、界面水位変動が (10) 式で示される内部波速をもって二観測点間を通過するに要する時間（前者の場合には 3.1 時間、後者



図—13



図—14

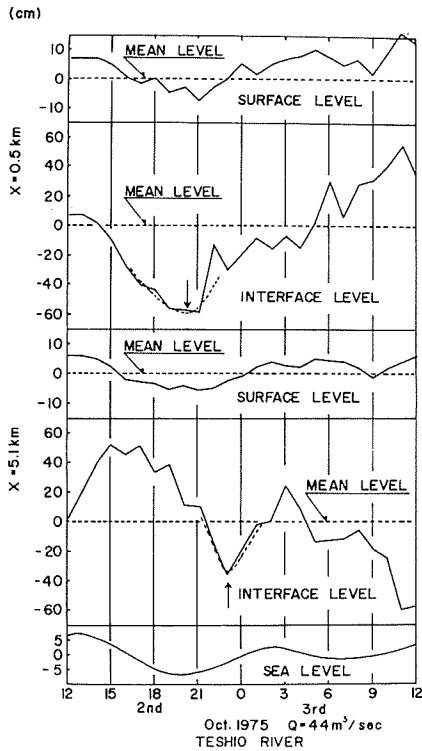


図-15

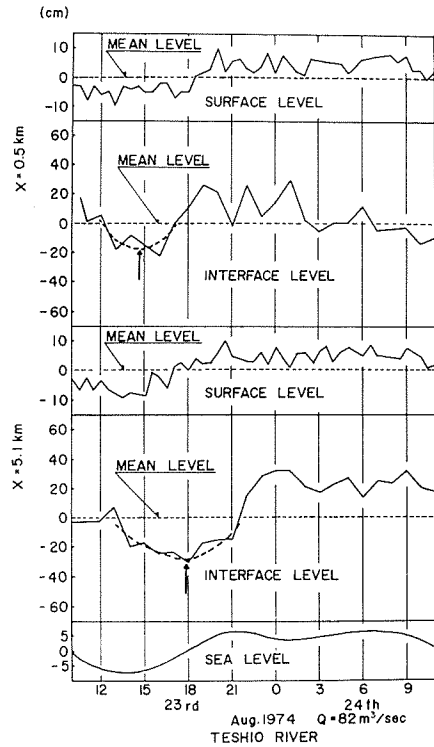


図-16

の場合には2.7時間)にきわめて近い。この事実と河口近くで表面と界面の水位変動が同位相に近い事及び界面水位変動が潮汐と同じ周期を有している事から、周期の長い、弱い潮汐の実験結果と良く符号する事が分かり、外部波が進行波性を有する場合であっても定常波性を有する場合であっても、同じ機構で河口に内部波が誘発され上流に伝播すると結論する事が出来る。

### 5. 結 語

ここでは様々な潮汐条件のもとでの河口二層流の挙動を詳細に検討し多くの知見を得た。中でも淡水流出流況及び河口内二層流の問題は、潮汐により誘発される内部波を無視しては議論出来ないという結論は重要である。他方この研究によって何故界面変動振幅が実験水路よりも実際の河川において大きいのかという問題も生じた。この新たな問題は結局上述の潮汐による内部波の発生機構に深くかかわっており、その問題解決のためには今後、潮汐波のエネルギーが二層の表面波と内部波にどのような割合で分散するかという課題に取り組んでゆかねばならない。

終るにあたり、終始有益な御助言を賜った本学柏村正和教授並びに天塩川河口観測に参加された本学工業力学第二講座諸氏に深く感謝の意を表したい。

## 参 考 文 献

- 1) Kashiwamura, M. and Yoshida, S.: *Coast. Eng. Japan*, 10, (1967), p. 109-115.
- 2) Kashiwamura, M. and Yoshida, S.: *Proc. 13th Cong. IAHR, Kyoto Japan*, (1969), p. 181-190.
- 3) Kashiwamura, M. and Yoshida, S.: *Proc. IAHR Sympo., Novosibirsk U.S.S.R.* (1972).
- 4) Proudman, J.: "Dynamical Oceanography", Wiley, New York, (1953).
- 5) Schijf, J. B. and Schönfeld, J. C.: *Proc. Minnesota, Intern. Hydr. Conv., IAHR*, (1953).
- 6) 柏村正和: 北大工学部研究報告, 第 28 号, (昭 37), p. 1-44.
- 7) 吉田静男, 柏村正和: 第 22 回海岸工学講演会講演論文集, (昭 50), p. 167-171.