

感潮河川水理模型における成層流と界面波の水理特性

Experimental Studies on Stratified Flow and Interfacial Wave in Tidal River Model

愛媛大学農学部 正員 大橋 行三 Gyōzō ŌHASHI
愛媛大学大学院 三宮 知彦 Tomohiko SANNOMIYA
愛媛大学農学部 戒能 治 Osamu KAINOU

The physical processes of unsteady flow in tidal river estuary are studied experimentally. These flows may be treated as two-layer flows without mixing at or through the interface. Treating these flows as such requires to provide the interfacial shear known. Then, finding interfacial shear coefficient, this experiment by hydraulic model shows that the profiles composed of four typical patterns are P, A, Z and B and are likely to vary with tide stage of their stratification. Further, the data obtained on the interfacial shear are compared to the results by the former researchers in Fig.10. Patterns of P & Z are shown to be good agreement with the former's results, but A & B are not compatible with this approximation. Flowing states depended on the river run-off are evaluated and shown to be the same results.

Keywords: tidal river, salt intrusion, interfacial friction, hydraulic model

1. 緒言

感潮河川の密度流は、一周期間の流動過程に多様な成層形態が経時的・場所的に遷移し、その連続的な運動機構の把握が必要である。特に潮汐振幅と河川平均水深との比が 0.3 以上となる流れ場の解析には、大別して、

- (i) 淡水量と潮汐諸元等の外力要素の寄与、
 - (ii) 流路属性による損失や局所流況の変化、
 - (iii) 界面碎波や乱れに依る混合拡散特性、
- 等の検討が含まれる。

本研究の目的は、上記 (i), (ii) の実験的な究明であり、実用的には、「塩水くさび」の非定常挙動をより精緻に解析し、水資源や水辺環境の設計・整備に貢献することである。

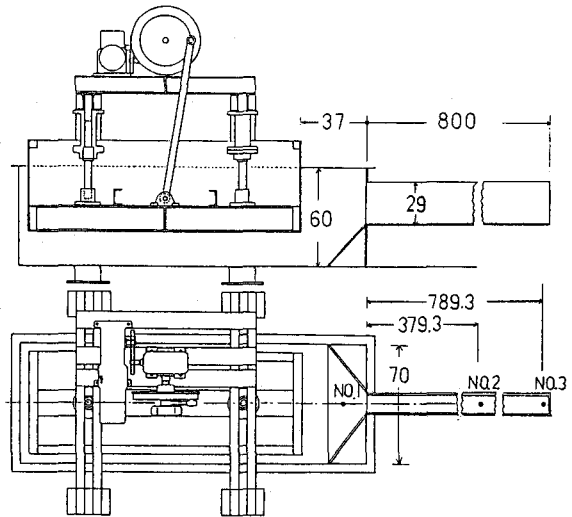


Fig. 1 Diagram of Experimental Set-up

2. 実験装置と手法

河川表流水が定常的に流下する感潮河川を想定し、周期変動に応答する塩水くさびの発生が可能な装置として、Fig. 1 に示す模型装置を作製した。海部に相当する水槽は 69.8×201.5cm、深さ60cm、河川流路部にアクリル水路の幅10cm、深さ29cm、長さ800cm(2~8m:水平底 0~2m: 1/100)を接続した。潮汐の発生は、水槽部に底面 60×160cm のBox(鉄製)を上から押込むプランジャ装置を用い、変速モータとクランクホイールの調整によって、Fig.2 の如く、周期が 280~830sec、表面波振幅が 0.5~4.0cm の範囲で駆動できる。

計測は、河口、中流、上流の表面波を 3 基の容量式波高計(CH-3) 3 基、二層流内部波高計(LC-101) 2 台、導電率計(MK-206) 3 基、サーマル式微流速計(VS-101) 1 台(いずれも計測技研製)を随所に用い、又、上流部 3~4m は約50cm 区間毎に VTR撮影し、後刻読み取った。淡水は水道水を用い、上流端の給水と河口表面

の排水はフロート式装置を考案し、5~45cc/sの水量が調節できる。塩水は原液を30%とし、食紅で着色した。

淡水のみによる基本造波特性は、Fig. 2に示す範囲で共に正強波と見做せる良好な性状であり、水路内伝播の位相遅れも無視できる程度であった。ただし、Ebb 初期に峰部分がわずかに偏平となる機械固有誤差が認められた。

淡塩2層の形成には、計測機器の calibration 手順を考慮して、最初に淡水の給排水の無い成層状態を作り、3~4周期間波動させるのを「Stagnant状態」(S)と呼び、それに継続した給排水の開始後3~4周期間の波動を「Flowing状態」(F)とした。両者共に3,4周期目の挙動は定常波動と見做せる状態であった。

今回の実験は、周期が326s、淡水深(h_1)2~3cm、塩水深(h_2)約8cm、給排水量(Q_e)20~40cc/sの範囲とし、模型の相似は、縦横至比20程度を想定した。初期条件は、高潮位の静止から(S)を開始し、その後、所定周期のFlood時の平均潮位から給・排水を同時に与えて、最初から7~8周期目を(F)とした。

3. 界面波の造波特性

Fig. 3に、淡水表面波(η_1)、河口界面波(η_{21})、中、上流地点の界面波(η_{22} , η_{23})との波形を例示する。なお、表層淡水が形成する表面波(振幅 a_1 、周期 T_1)は、水路全域でほぼ同一波形、位相遅れ極く微小の条件を満たしている。

界面波(a_2 , T_2)は、周期は T_1 と同一であるが、位相が表面波より1/16周期程度早く励起され、振幅はFig. 4の $a_1/a_2=0.45h_1$ で増幅された。なお、経時波形は、Ebb時に水路疎通能に影響されて塩水流出が制御されるため、波形谷部が偏平となり、上弦1/2周期長(T_u)が下弦(T_w)より若干小さいL型と逆のR型($T_u > T_w$)とに大別される。

平均界面は、波形の峰と谷から求めた値と一周内24個の値による調和分解の値とはほぼ同一であった。

界面波の水路内への伝播特性は、Fig. 3の如く、振幅が減衰すると共に、上流端からの反射を受けて短い周期の分調波が重複し、位相のズレが増している。各波形を24個の値で与えて調和分解した結果から、型別に各地点の波形成分を比較すればTable 1.となる。表中の比(H_i)は、河口界面波の総成分に対する各地点の相当成分の比である。なお、2L, 2Rは $h_1=2$ cmの意である。

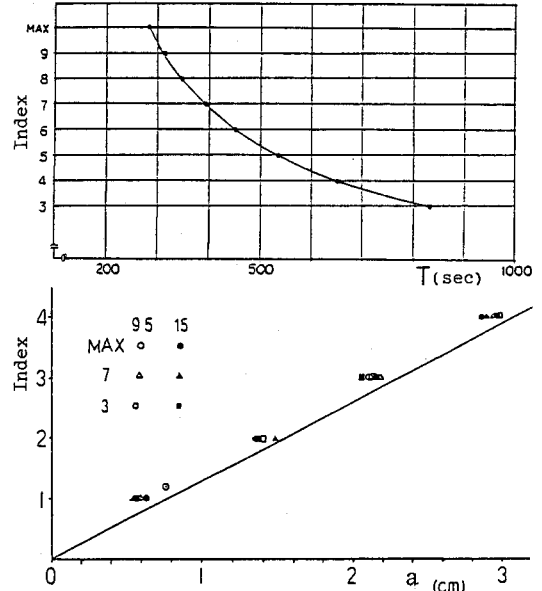


Fig. 2 Amplitude and Period of Regulated Surface Wave in Singl Layer

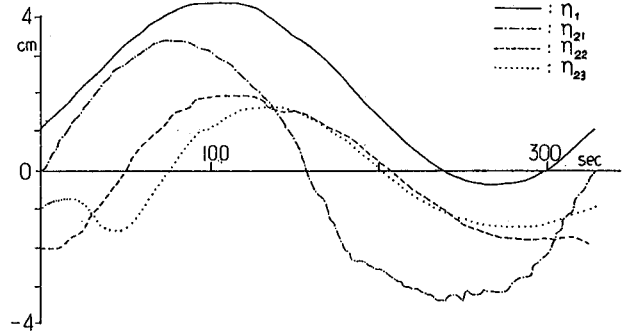


Fig. 3 Example of Profiels for $\eta_1, \eta_{21}, \eta_{22}, \eta_{23}$

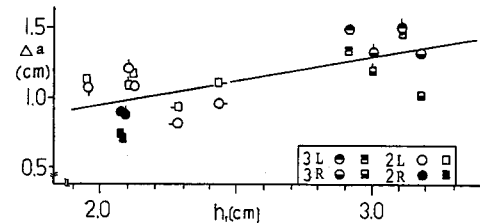


Fig. 4 Amplification Ratio a_1 to h_1 in Model

分解の結果から、静止淡水深が大きい影響は、短い周期の分潮成分の増加と位相のズレに現れ、3L, Rの方が2L, Rより顕著である。又、河川中央より上流の方がこの傾向が強い。(実験No.1~No.11)³⁾

Table 1. Comparison with Constituent in Amplitudes Analyzed

	%	x = 8.10 m					Hi	x=3.845 m					Hi	x=0.25 m				
		A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	On		A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	On		A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	On
2L	85	4.1	4.4	1.2	5.3	69	74	11	7.2	3.3	4.5	63	55	20	9.3	3.2	13	
2R	84	6.2	2.6	2.0	5.2	67	69	13	7.9	2.8	7.3	59	62	18	7.4	4.5	8.1	
3L	84	6.0	3.3	2.7	4.0	53	66	15	12	1.0	6.0	67	46	27	13	7.7	6.3	
3R	85	4.7	1.1	2.2	7.0	59	57	21	12	3.2	6.8	71	33	26	16	8.6	17	

4. 密度界面の遷移形状

海水の遡上過程に相当する密度界面波形の遷移性を知るため、Fig. 3の結果を1/16周期毎に分割し、各界面変化を模式的に表示すれば、Fig. 5を得る。なお、右端の水平な線は、表面波の位高であり、上げ潮平均潮位を⑩とした。この図から、S状態の定常波動の特徴として、③~⑤のtilting変動や④~⑨の一種のbeat現象が見られる。しかし、塩水塊のbore状遷移は、この図では判別できない。

次に、VTR画像から得た波形を、同様な1/16周期毎に内挿した結果の一部をFig. 6に示す。なお、図中の□印はS状態、○印はF状態とを併示した。

この図から、上流1/4部分の界面は、可成り停滞した後に、弱いbore状の遡上をもたらすことがわかる。ただし、2m付近で海面が凸状となる原因の一つとして、部分的な混合によるcloudが発生し、画像識別が不明確となる点を考慮する必要がある。

一方、F状態における同刻の分布形状は、明らかに淡水流下の影響を受けて全域の界面が低下すると共に、下流へ押流された状況となる。なお、最上流端には淡水受けのフロートがあり、そのリップに沿った巻き上げが発生する点と、フロート附近の現象が、実際の河川流況とは著しく相違するのは避けられない。

5. 平均流速の経時変化

いま、河口へ向かう流れを「正」と定め、x座標の原点を最上流端にとる。

上・下層内の鉛直流速分布が測定できれば理想的であるが、今回の模型では、一地点に微流速計を設えて、両層の中央位置の流速を経時的に測定した。その一例をFig. 7に示す。

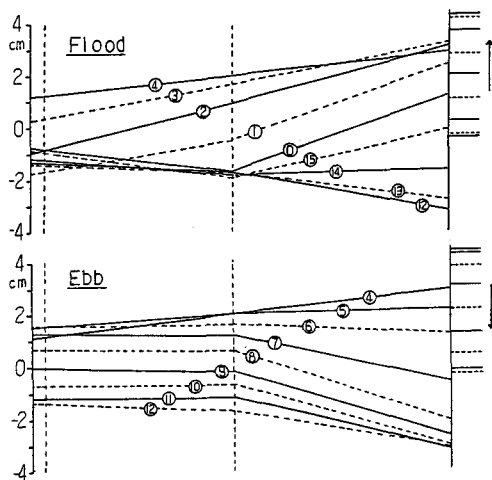


Fig.5 Time Series profiles of Interface at T/16

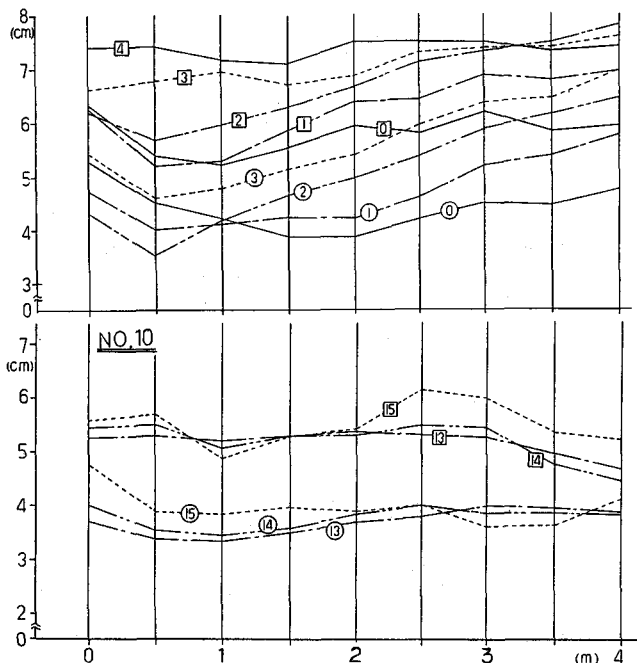


Fig.6 Time Series Profiles of Interface measured by VTR

一方、肱川の感潮域の観測で得た鉛直流速分布の30分毎の例をFig. 8に示す。(海水混合%も併示)

実験F状態の上下層流速の変化との対応を見れば遡上と流下の遷移過程の大まかな類似性が認められる。ただし、観測値の界面位置が不明確である。

6. 2成層流の流速分布パターン

潮汐一周期間に見られる2成層流過程を特徴的に捉えたとすれば、上下層の流向正負(P or M)と平均流速の強弱との組み合わせとして、Fig. 9に示す8種類のパターンに区分できる。更に典型的な下記の4種類に集約され、各条件が定義できる。

$$(1) \begin{cases} P: |u_1| \gg |u_2|, u_2 \approx 0 \\ A: |u_1| \ll |u_2|, u_1 \approx 0 \\ Z: u_1 * u_2 < 0, u_1, u_2; \text{Not Small} \\ B: u_1 * u_2 > 0, u_1, u_2; \text{Not Small} \end{cases}$$

又、具体的な代表現象との対応は、P: Arrested salt/Bottom/wedge, A: Arrested thermal/surface/wedge, Z: Lock Exchange Flow, B: Stream Flowを想定した。ただし、定常状態の研究が多い。

ここでは、実験で得た諸水理量の計量に基づいて2成層遷移過程を上記4種類のパターンの経時的配列として捉える評価方法を用いる。

7. 理論的考察

上、下層の水理諸量を添字1,2で表示し、両層の連続の式と運動方程式を次式とする。

$$(2) \frac{\partial h_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u_1 \cdot h_1) = 0$$

$$(3) \frac{\partial h_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u_2 \cdot h_2) = 0$$

$$(4) \frac{\partial u_1}{\partial t} + g \frac{\partial h}{\partial x} + u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} = \frac{\tau_i}{\rho h_1} - \frac{2\tau_{wt}}{\rho B}$$

$$(5) \frac{\partial u_2}{\partial t} + g \frac{\partial h}{\partial x} + u_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} + \frac{\Delta \rho}{\rho} g \frac{\partial h_2}{\partial x} = -\frac{1}{\rho_2} \left(\frac{\tau_i}{h_2} + \frac{2\tau_{w2}}{B} + \frac{\tau_b}{h_2} \right)$$

$$(6) \tau_{wt} = \lambda_{w1} \cdot \rho_1 u_1 |u_1| / 8$$

$$(7) \tau_{w2} = \lambda_{w2} \cdot \rho_2 u_2 |u_2| / 8$$

$$(8) \tau_b = \lambda_b \cdot \rho_2 u_2 |u_2| / 8$$

$$(9) \tau_i = \lambda_i \cdot \rho_2 (u_1 - u_2) |u_1 - u_2| / 8$$

ここに、 $h = h_1 + h_2$, $\Delta \rho = \rho_2 - \rho_1$

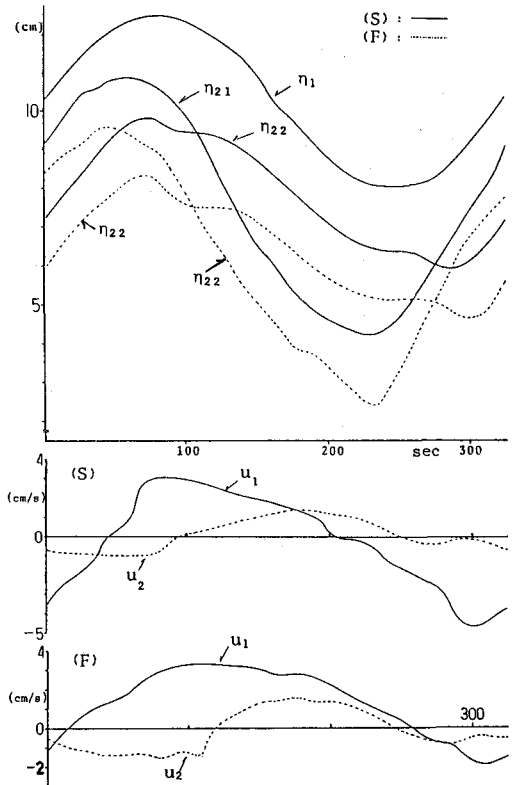


Fig.7 Examples of Waves & Mean Velocity(No.14)

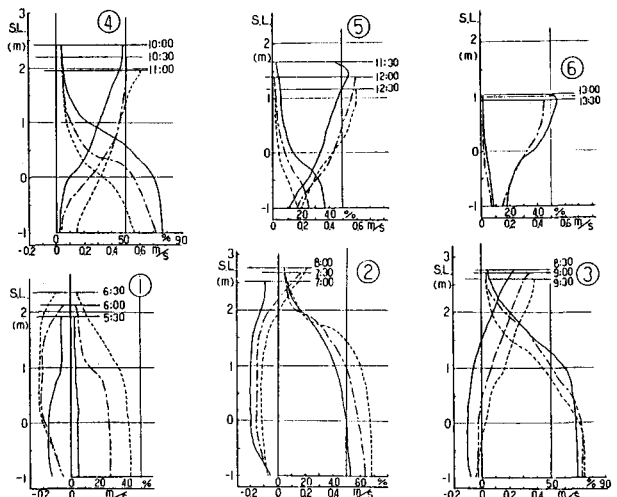


Fig.8 Velocity Profiles Observed at Hiji (1984.8.11, Q=10t)

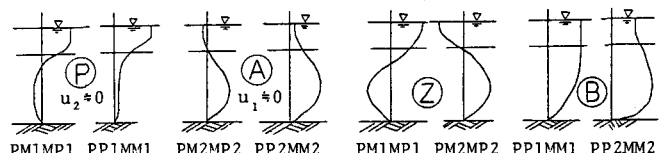


Fig.9 Definition Sketch for 4-kinds of Velocity Profiles

$\tau_{w1}, \tau_{w2}, \tau_b, \tau_i$: 上, 下層側壁, 底面及び密度界面の剪断応力, 同様に, λ : 摩擦抵抗係数, B : 水路幅

$$(10) \text{Re}_1 = \frac{h_1 u_1}{\nu_1}, \text{Re}_2 = \frac{h_2 u_2}{\nu_2}, \text{Re}_R = \frac{R_2 u_2}{\nu_2}, R_2 = \frac{B h_2}{2(B+h_2)}, \text{Re}_{us} = \frac{|u_1 - u_2| h}{2\nu_2} \quad \text{Re}: \text{Reynolds 数}$$

$$(11) \text{Fd} = \frac{|u_1 - u_2|}{\sqrt{\varepsilon g h}}, \text{Ri}_A = \frac{\varepsilon g h}{(u_1 - u_2)^2}, \text{Ri}_Q = \frac{\Delta \rho g h}{2 \rho_2 (u_1 - u_2)^2}, \text{Ku} = \left(\frac{\varepsilon g \nu_2}{(u_1 - u_2)} \right)^3 \quad \text{F}: \text{密度 Froude 数}$$

Ri : Richardson 数

Ku : Keulegan 数

実験から u_1, u_2, h_1, h_2 を得れば, (2), (3)式から $\partial u_1 / \partial x, \partial u_2 / \partial x$ が求まる。一方, (10)式の各層ごとの Reynolds 数に対して, $\lambda_{w1}, \lambda_{w2}, \lambda_b$ が決定できれば, 各剪断応力は計算できる。いま, G. Abraham¹⁾の研究を参照して, Nikuradse の剪断応力係数から λ の値を算定する。又, (4), (5)式の差から τ_i の値が求まる。結局, λ_i の値は, 形式的には求まるが, 流れパターンの識別と吟味が必要である。(ν : 動粘性係数)

8. 離散処理と結果の表示

流速の測定の左右で界面波を測定し, それらから同点の h_1, h_2 を内挿した。又, 時間単位は, 周期の 1/24 であり, 各諸元等は, 次頁の Table. 2 に示した。

前項 6. の流速分布パターンの識別結果を含む諸計算結果例を同じく Table 3 に示した。

「KATA2」の各桁の内容は, 第 1, 4 桁が上層の流向と層・乱流 ($\text{Re}=500$), 第 2, 5 桁が同下層, 第 3 桁の "1" は $u_1 > u_2$, 第 6 桁がパターン, 第 7 桁が上層の層・乱流の再判定である。又, 上下層共に静止状態 (Q 型) の判定は, $u_1 < 0.15 \text{ cm/s}, \text{Re}_1 < 160$ である。

各結果の流況のうち, Z 型と P 型は, λ_i が適正な範囲にあり, 他の研究者の結果と対比して, 右の Fig. 10 に示す。

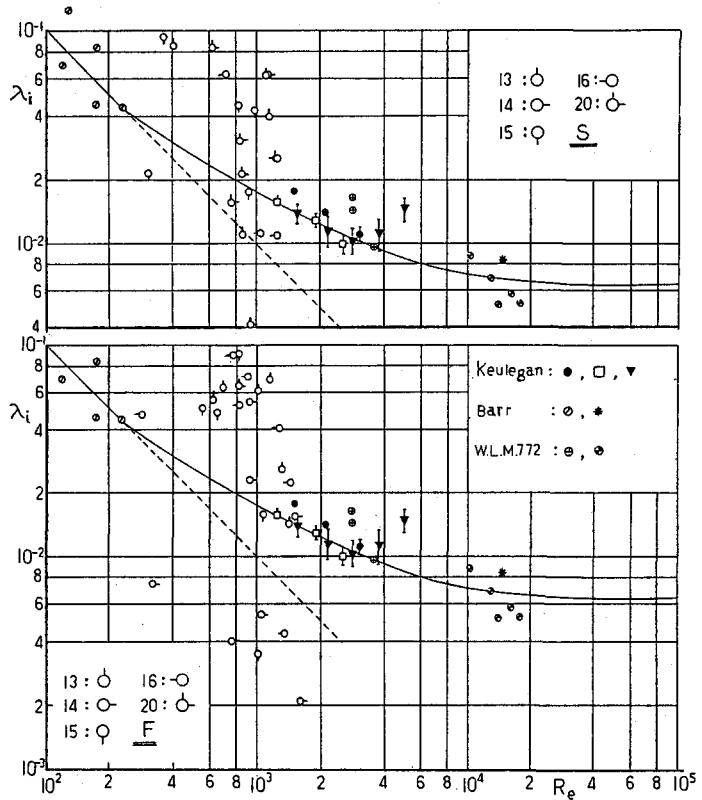


Fig. 10 Relationship between λ_i and Re by Experiment & Other's

9. 結 論

(1) 本実験の極めて大まかな水理特性は, 吉田ら²⁾の文献から類別できるが, 遡上と流下の周期応答特性と一連の遷移過程の詳細な把握のためには, 再現性の容易さを備えた本模型の有用性が評価できる。

(2) 潮汐一周期間の遷移過程の内, 流速分布パターンの Z 型と P 型の運動機構は, 本研究の界面摩擦抵抗係数の評価から, Fig. 10 の如く, 定常状態の結果との整合性が見出された。但し, 個別の吟味を要する。

(3) 淡水流下の F 状態は, S の遷移性状を下流へ平行移動したものと見做せるが, 平均塩水位の低下と共に分潮振幅の減衰をもたらし, Flood 期間が短縮される。又, Q_* の減少が S 状態への漸近となる。

(4) Stagnant 状態の諸特性は, Flowing 状態との対比資料となるのみでなく, 河口セキ下流域や床止段落工下流部の感潮域の現象説明に役立ち, 更に, F 状態は浅瀬を越える河川密度流の解析に適用できる。

(5) 本実験の周期が 1 種類であるため周波数領域面の検討と A, B 型の流速分布の考慮が今後必要である。

本研究は、文部省科研総合
(A) (62302056) と (01302057)
の成果の一部であり、計算に
は愛媛大、京大大型を用いた。

10. 参考文献等

- 1) G. Abraham et : J. of Hy.
Res. Vol. 9 (1971), p. 125-151
& Vol. 17 ('79), p. 273-287
- 2) 吉田ら; 海工講論, No. 22
(1975), p. 167~171
- 3) 大橋・三宮ら: 農業土木学
会, 1989年講, '88, '89 中四
支講 (口頭発表)

Table 2. Summary of Experimental Data and Analyzed Results

番号/測周期	13/3	14/3	15/3	16/3	17/3	18/3	19/3	20/3	8
初水位/型	H/2L	H/2L	H/2L	H/2L	H/2L	H/2L	H/2L	H/2L	H/2L
水深 (cm)	2.31	2.31	2.55	2.55	1.95	2.00	2.38	2.38	2.33
波 平位 (m)	9.48	9.80	10.25	10.10	9.16	9.13	9.41	9.34	9.91
分潮A ₁	2.32	2.20	2.30	2.26	2.32	2.25	2.30	2.32	2.29
測周期 (sec)	900	2531	896	2534	899	2529	900	2530	902
測終 (sec)	1226	2857	1222	2860	1225	2855	1228	2857	1229
西平相ズレ	-1.0	0	0	0	-1.0	0	-0.5	-0.5	-1.0
水量/測周期	40/5	40/5	30/5	20/5	40/5	30/5	20/5	40/5	30/5
平位 (m)	---	---	---	---	---	---	---	---	---
分潮A ₁	---	---	3.34	3.34	3.22	3.81	3.53	3.98	3.75
測周期 (sec)	---	---	870	2489	875	2499	882	2507	874
西平相ズレ	---	---	1196	2821	1201	2833	1208	2835	1201
内波計点	中央	中央	中央	中央	中央	中央	中央	中央	中央
平位 (m)	7.07	6.12	7.86	6.42	7.42	5.91	7.38	6.73	7.72
分潮A ₁	2.40	1.72	1.84	1.62	2.10	1.73	1.82	1.71	1.83
測周期 (sec)	906	2553	910	2546	902	2548	913	2544	909
測終 (sec)	1232	2884	1235	2877	1228	2880	1240	2873	1235
表波相ズレ	6	22.27	14	12.17	3	19.25	13	14.18	7
西平相ズレ	2.0	4.0	0	2.0	0	5.0	2.0	3.0	0

Table 3. Example of Numerical Data-Map on Experimental Data and Processed Results

(No. 13~16: X(HL, U, HR)=(249, 282, 384), No. 17~20: X(384, 658, 794), unit: cm)

NO. 15-S. 30.0CC/S. (10M28D) ST1= 20.5 ST2= 21.1 QF= 0 SALT= 22.3									
TM	HS	H1	H2	U1	U2	USA	KATA2	REY1	REY2
1	9.15	2.35	6.80	-3.36	-0.96	-2.40	MM1TTB0	-793	-635
2	9.75	2.37	7.38	-2.12	-1.10	-1.02	MM1TTB0	-504	-790
3	10.31	2.48	7.83	-0.74	-1.19	-0.45	MM2LTBT	-184	-906
4	10.78	2.50	8.28	0.01	-1.22	1.23	PM2LTA0	3	-982
5	11.16	2.55	8.61	1.16	-1.16	2.32	PM2LT2T	297	-971
6	11.37	2.61	8.76	2.24	-1.00	3.24	PM1TT20	588	-852
7	11.43	2.50	8.93	2.72	-0.76	4.48	PM1TT20	682	-660
8	11.42	2.46	8.96	2.56	-0.34	2.90	PM1TL20	632	-296
9	11.28	2.39	8.89	2.31	0.06	2.25	PP1TLPO	555	52
10	10.87	2.32	8.55	2.12	0.36	1.76	PP1LLBL	494	299
11	10.38	2.15	8.23	2.02	0.68	1.34	PP1LTBT	436	544
12	9.75	2.03	7.72	1.84	1.00	0.84	PP1LTBT	375	751
13	9.10	1.89	7.21	1.62	1.28	0.34	PP1LTBT	308	897
14	8.47	1.76	6.71	1.44	1.42	0.02	PP1LTBT	254	927
15	7.90	1.66	6.24	1.20	1.45	0.25	PP2LTBT	200	880
16	7.47	1.65	5.82	0.76	1.33	0.57	PP2LTA0	126	753
17	7.16	1.67	5.49	-0.04	1.12	-1.16	MP2LTA0	-7	598
18	6.97	1.72	5.25	-0.96	0.80	-1.76	MP1LL2L	-166	409
19	6.87	1.79	5.08	-1.72	0.40	-2.12	MP1LL2L	-308	198
20	7.02	1.89	5.13	-2.64	-0.02	-2.62	MM1TLPO	-501	-10
21	7.19	1.92	5.27	-3.40	-0.19	-3.21	MM1TLPO	-657	-97
22	7.46	2.04	5.42	-4.00	-0.47	-3.53	MM1TLPO	-821	-248
23	7.95	2.25	5.70	-4.76	-0.40	-4.36	MM1TLPO	-1075	-222
24	8.55	2.34	6.21	-4.28	-0.68	-3.60	MM1TLPO	-1004	-411
25	9.15	2.35	6.80	-3.32	-0.92	-2.40	MM1TTB0	-783	-608
NO. 15-F. 30.0CC/S. (10M28D) ST1= 20.5 ST2= 21.1 QF= 30 SALT= 22.3									
TM	HS	H1	H2	U1	U2	USA	KATA2	REY1	REY2
1	9.10	4.74	4.36	-0.58	-0.84	-0.26	MM2LLBL	-276	-354
2	9.70	5.00	4.70	-0.44	-1.10	-0.66	MM2LTBT	-221	-503
3	10.27	4.96	5.31	0.20	-1.35	1.55	PM2LTA0	100	-697
4	10.71	5.04	5.67	1.00	-1.72	2.72	PM2TT20	506	-948
5	11.07	5.11	5.96	1.76	-1.68	3.44	PM1TT20	903	-974
6	11.27	4.87	6.40	2.28	-1.51	3.79	PM1TT20	1116	-939
7	11.31	4.76	6.55	3.08	-1.44	4.52	PM1TT20	1473	-917
8	11.30	4.66	6.64	3.62	-1.16	4.78	PM1TT20	1694	-749
9	11.22	4.43	6.79	3.76	-0.68	4.44	PM1TL20	1673	-449
10	10.82	4.02	6.80	3.64	-0.01	3.65	PM1TLPO	1468	-7
11	10.35	3.35	7.00	3.63	0.48	3.15	PP1TLPO	1222	327
12	9.70	3.10	6.60	3.40	0.84	2.56	PP1TTB0	1059	539
13	9.03	2.87	6.16	3.32	1.26	2.06	PP1TTB0	956	755
14	8.45	2.72	5.73	3.16	1.32	1.84	PP1TTB0	861	736
15	7.85	2.63	5.22	2.92	1.38	1.54	PP1TTB0	772	700
16	7.45	2.47	4.98	2.56	1.42	1.14	PP1TTB0	634	688
17	7.17	2.65	4.52	1.96	1.20	0.76	PP1TTB0	522	527
18	6.98	2.74	4.24	1.12	0.88	0.24	PP1LLBL	308	363
19	6.90	2.77	4.13	0.54	0.48	0.06	PP1LLBL	150	193
20	7.06	2.94	4.12	0.12	0.01	0.11	PP1LLBL	35	4
21	7.34	3.18	4.16	-0.84	-0.24	-0.60	MM1LLPO	-269	-97
22	7.65	3.38	4.27	-1.12	-0.60	-0.52	MM1LLBL	-380	-249
23	7.98	3.56	4.42	-1.60	-0.82	-0.78	MM1TLBO	-572	-352
24	8.50	3.99	4.51	-1.90	-0.48	-1.42	MM1TLBO	-762	-210
25	9.10	4.44	4.66	-1.34	-0.50	-0.84	MM1TLBO	-597	-227