

河口での境界条件の変化による塩水くさび内中間層の発達とくさびの応答 Development of Mixed Layer and Dynamic Responce of a Saline Wedge to the Change in the Boundary Conditions at a River Mouth

東京工業大学 正 員 福 岡 捷 二 学生員 坪 田 勝 幸
同 上 〇 角 田 学 同 上 間 辺 本 文
同 上 作 中 秀 行

1. はじめに

塩水くさび内の流動は厳密には非定常な現象であるが、時間的に変化が緩やかな場合には、準定常な現象として取り扱うことが許される。このとき、くさびの遡上長さ、厚さは、実用的に十分な精度で算定可能となっている¹⁾。一方、潮汐、河川流量の変動、大規模な内部渦などにより塩水くさびが非定常になることがしばしば観察される²⁾。このとき、くさび内では、①流速分布、密度分布が空間的および時間的に変化し ②界面の抵抗および連行量が変動し ③中間層が形成、発達する。このため、塩水くさびの運動は複雑になる。従って、塩水くさびの非定常運動を明らかにするためには、非定常外力に伴うくさび内の流動を詳細に調べる必要がある。須賀・高橋^{2), 3)}は長良川、最上川での実測からくさび内の流動に関し興味ある現象を見出した。すなわち、くさび内に存在する内部渦の移動、変化過程を観測することにより、これらの内部渦が淡・塩水の中間の密度を有する流体を生産し、この混合層が塩水くさびの挙動に影響を及ぼすことを明らかにした。また、内部渦を大きく3つに分類し、中でも河川水が河口を流出する際に生じる大規模な渦を“主要内部渦”と称し、これらの渦は河口での境界条件を変化させうることを指摘した。

くさび内の流動を把握するためには基本的にはくさびを規定する境界条件を明確にする必要がある。本研究は、河口での境界条件（密度分布）の変化により塩水くさび内の流動がどのように変化し、くさび全体がどのように応答するかを調べることにより、塩水くさびの非定常運動特性を明らかにすることを目的とする。

2. 実験装置および方法

図-1に実験装置を示す。水路は幅6 cm、高さ25 cm、長さ6 mの亚克力板製水路（河道部）とそれに接続する縦2 m、横2 m、高さ1 mのベニヤ板製水槽（海部）から成る。ここでは、河道部と海部との接続する地点を河口と定義する。海部と河道部に密度 ρ_2 の塩水を満たし、水路上流端から密度 ρ_1 の淡水を流入させる。海部に流出した淡水は下流端に設置された越流ぜきから一様に排出される。塩水の連行量を考慮して海部底面から塩水を補給する。塩水くさび先端の位置がほぼ一定になり、くさびが定常状態に達したことを確認した後、海部に設置された超音波発生装置（周波数29 KHZ、出力0

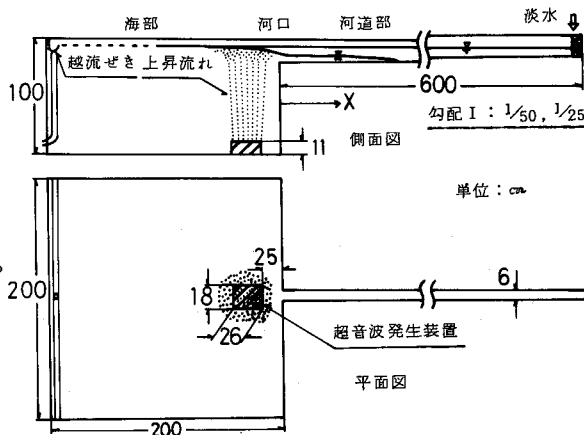


図-1 実験装置

～300 W)により上昇流れを起こす。この上昇流れにより淡水と塩水とが境界面から徐々に混合し、河口部の密度が減少する。この超音波発生装置による混合は河川水が河口を流出する際に生じる大規模な渦運動による混合を模擬したものである。

混合開始後しばらくしてくさび内に希釈流体が侵入し、“中間層”を形成する。この中間層の形成、発達

に伴い変化する河道部、海部および河口の密度分布、流速分布、くさび全体の形状等を測定した。密度分布は導電率計により、流速分布は水素気泡法および色素トレーサー法により測定した。界面形状、くさび内の流動は色素により可視化し、カメラおよびVTRを利用して測定し解析した。

実験条件を表-1に示す。

表-1 実験条件

くさびの挙動が、淡水流量 Q 、淡・塩水の相対密度差 ϵ 、水路床勾配 I および淡・塩水の混合の強さと密接な関係にあることを考慮し、これらの条件を系統的に変化させて実験

Run no.	Q cm ³ /s	ρ_1 g/cm ³	ρ_2 g/cm ³	$T_{1,c}$	ϵ	I	混合の強さ (超音波出力)	Re	A_R	H_0 cm
1-1	100	0.9982	1.0006	20.3	2.4×10^{-3}	1/50	大(300W)	1667	0.81	15.0
1-2	101	0.9998	1.0040	9.3	4.2×10^{-3}		大(300W)	1256	0.68	
1-3	100	0.9982	1.0080	20.1	9.8×10^{-3}		大(300W)	1667	0.51	
2-1	200	0.9989	1.0122	16.6	1.3×10^{-2}	1	中(200W)	3044	0.74	19.3
2-2	200	0.9989	1.0121	16.6	1.3×10^{-2}	25	小(150W)	3014	0.74	

を行った。Run 1は密度差の影響、Run 2は淡・塩水の混合の強さの影響を調べることを目的としている。また、Run 2は河口での境界条件の変化によるくさびの応答を直接的に調べることを目的としており、Run 1よりも Q 、 ϵ 、 I および河口全水深 H_0 を大きくしている。 Re 数、 A_R 数⁴⁾はくさびを規定する重要な無次元量であり、 $Re = Q/\nu \cdot B$ 、 $A_R = (Q^2/\epsilon g B^5)^{1/3}$ で定義される。ここに、 B は水路幅である。淡・塩水の混合の強さは超音波出力の大きさにより変えることができ、ここでは大きく、大、中、小に分類した。

3. 実験結果と考察

3-1 河口での境界条件の変化による塩水くさびの応答

最初に、河口での境界条件の変化により塩水くさび全体がどのように応答するかを示す。海部での淡・塩水の混合により河口での密度分布および河口淡水深は図-2のように変化し、境界条件が変わる。図の t は混合を開始してからの経過時間を示す。なお、 $t=0$ は混合を開始する前でくさびは定常状態にある。図より塩水の密度は時間とともに小さくなり、界面近傍の密度勾配も小さくなっていくことがわかる。このように河口での密度分布の変化により、くさび界面(目視)は図-3のように全体的に低下していく^{*)}。図-4はくさび先端部が時間とともに後退していく様子を示したものである。混合を開始してしばらくすると塩水くさびは急激に後退し、その後の後退は次第に緩やかになっていく。

くさびの後退についてさらに考察する。図-4の(a),(b)は

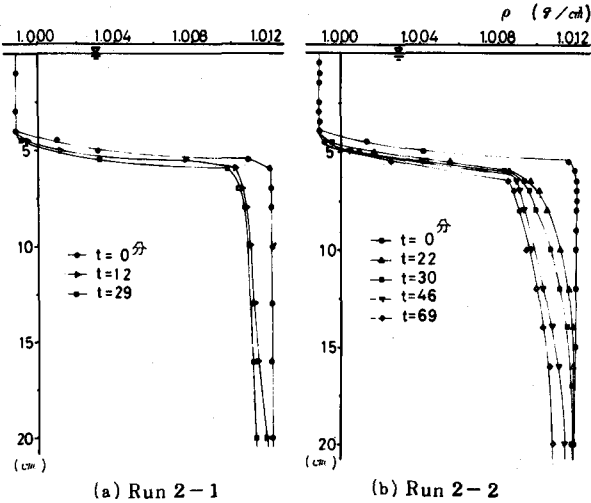


図-2 河口での密度分布の変化

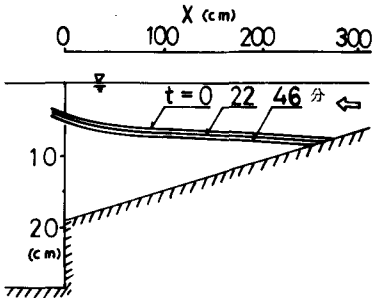


図-3 くさび界面の低下 (Run 2-2)

*) 海部の大きさに実験装置上の制約があるために、希釈された塩水の一部が越流せきから系外に流出する。このため界面が次第に低下することになる。実際には、海部が十分に広いので希釈流体は河口近傍に滞留し河口での塩水深は徐々に上昇する場合がある。ここでは境界条件の変化による塩水くさびの応答のメカニズムを解明することを目的としているので本研究の結果の一般性は失われない。

それぞれ相対密度差の影響、混合の強さの影響を調べたものである。(a) より次のことがわかる。相対密度差の大きさは Run 1-3, 1-2, 1-1 の順である。混合の強さ、淡水流量、河口水深は同一であるため密度差が小さいほど定常時のくさび長は小さい。混合開始後のくさび先端の後退量は密度差が小さいほど顕著である。これは密度差が小さいほどくさびに働く微小な変化によって釣り合い状態が容易に破られるためと考えられる。

(b) より次のことがわかる。混合の強さは Run 2-2 よりも Run 2-1 の方が大きい。混合の強さが大きいほど混合開始後のくさびの応答が早く、再定常状態に至るまでの時間およびくさび後退量が小さい。このことを図-2 に示された河口での密度分布より比較すると Run 2-1 の方が Run 2-2 よりも密度分布の変化する速さが早く、また密度そのものの減少量は小さい。このため Run 2-1 の方がくさびの後退は急激となりくさび後退量は小さい。

3-2 中間層の形成、発達とその役割

河口での境界条件が変化するとくさび内の流動がどのように変化していくかを示す。

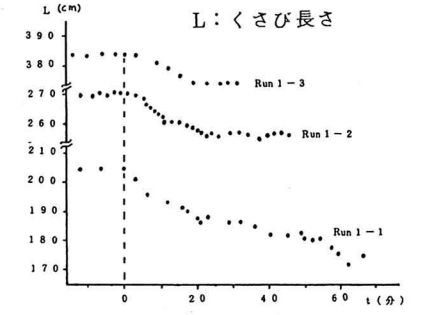
1) 中間層の発達

河口で密度分布が変化するとくさび内に希釈流体が侵入し

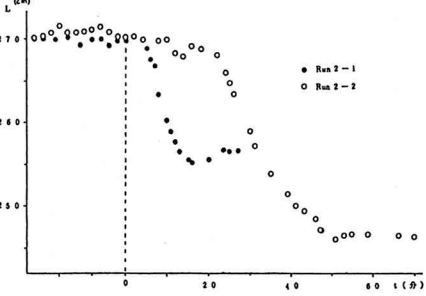
中間層が形成される。写真-1 は中間層がくさび内へ侵入している状態である。中間層は色素（フルオレセインナトリウム）により可視化されている。図-5 は中間層の侵入状況を示す。中間層はくさびの界面近傍から侵入し、次第に水深方向、縦断方向に広がりくさび全体を占めていく。中間層の境界面は上、下層とも比較的明確に可視化できるが、先端部は周囲の流体と混合するため一定の形状を保てず、たえず変動している。

2) 中間層の形成機構

このような中間層が形成される原因は次のように説明できる。図-6 (a) のように検査面をとると、塩水くさびに働く外力は、河口での圧力 P_e 、界面での圧力 P_i 、界面でのせん断力 F_i 、底面でのせん断力 F_{b1} (図の矢印の方向は逆の場合もある)、底面がくさびに及ぼす力 F_{b2} 、および重力 F_g である。これらの外力の流下方向成分の総和とくさび内への流体の出入りに伴う単位時間あたりのその方向の運動量の変化とが力学的に釣り合っている場合、塩水くさびは定常状態にあるといえる。この状態から海部で淡・塩水の混合を開始すると、河口の密度が減少し、圧



(a) 密度差の影響



(b) 混合の強さの影響

図-4 くさび先端部の後退

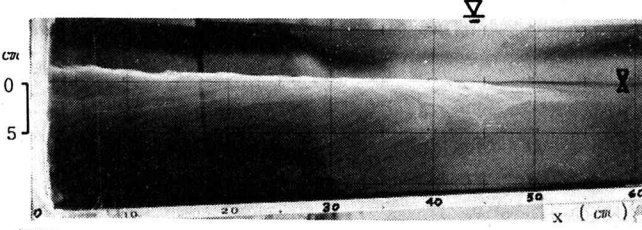


写真-1 可視化された中間層 (Run 2-2)

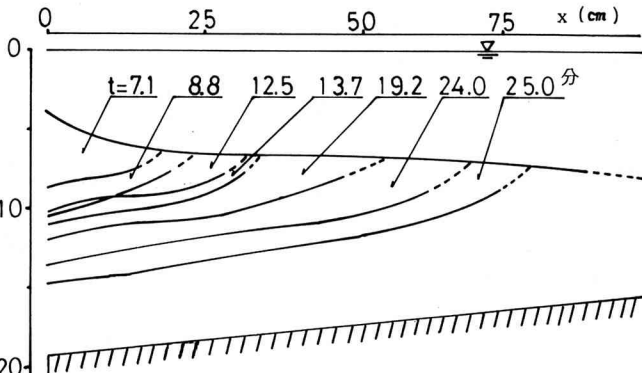


図-5 中間層の発達状況 (Run 2-2)

力 P_e が小さくなる。このため、河口でくさびに働く圧力よりも、河口より上流の検査面でくさびに働く力の方が相対的に大きくなる。その結果、塩水は海部へ流出する。このとき、連続条件を満たすように海部の希釈流体はくさび内へ侵入し中間層を形成する。この河口での圧力の低下および底勾配が大きいと F_g の流下方向成分のため底面近傍の塩水の海部への流出は促進される。

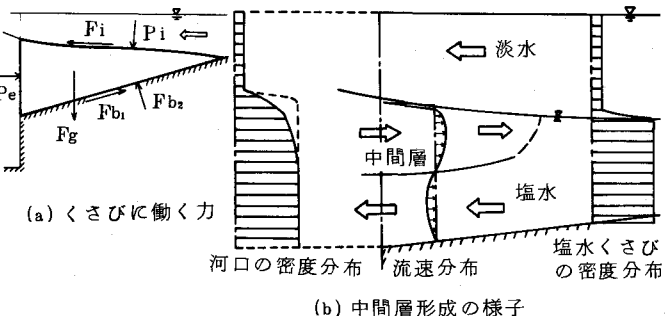


図-6 中間層の形成

3) 中間層先端付近の流れ

中間層先端付近では図-7に模式的に示すように周囲の流体と混合し、一部はくさび先端部の方へ流れ、一部は中間層の下側を通り海部へ流出する。河口での密度分布が変化する限り希釈流体はくさび内へたえず侵入するため中間層は発達する。そのためくさび内の密度は水深方向、縦断方向にわたり次第に減少していく。

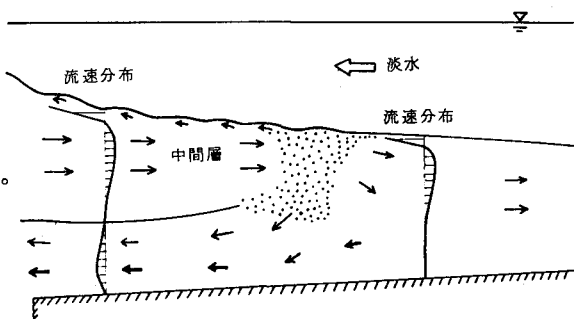


図-7 中間層先端付近の流れの様子

4) 中間層発達が塩水くさび内の流動に及ぼす影響

河口の密度分布の変化に伴い塩水くさびは後退することを示した。そのときのくさび内の流動は

次のようになる。くさび内の塩水は海部へ流出し、それに伴い中間層がくさび内へ侵入する。その結果、くさびの密度の減少と界面抵抗および連行量の増大が生じる。海部への塩水流出量は中間層の侵入速度、侵入量が大きいほど、また底勾配が大きいほど促進される。界面抵抗および連行量の増大は中間層の及んでいる領域の界面で、密度勾配が小さくなり、また相対速度が大きくなることにより生じる。

3-3 中間層の侵入速度とくさびの後退速度との関係

くさびの後退速度が中間

層の侵入によってどのよう

に変化していくかを図-8

に示す。 U_1 が中間層の侵入

速度、 U_2 がくさび先端の後

退速度である。中間層先端

部は侵入直後に周囲の流体

と混ざるため明確には測定

できない。そのため破線で

示した。侵入後しばらくす

ると速度は最大となり、そ

の後徐々に減少していく。

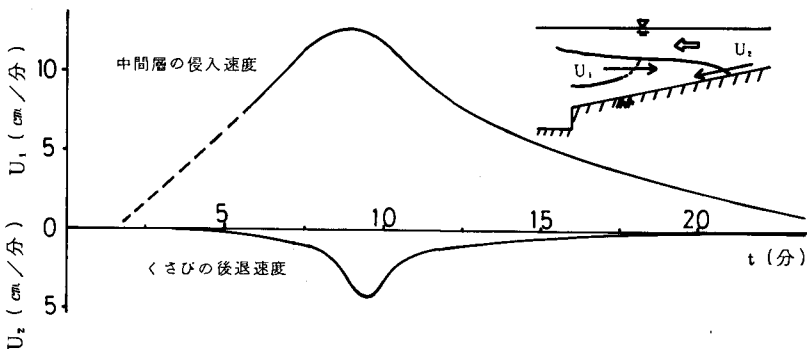


図-8 中間層の侵入速度とくさびの後退速度との関係 (Run 2-2)

一方、くさびの後退速度は次第に増大し、中間層とはほぼ同時に最大となり、その後徐々に減少していく。これより、中間層が塩水くさびの挙動を支配していることがわかる。

3-4 流速分布

図-9 (a) ~ (d) に中間層が侵入しているときの流速分布の縦断変化を示す。混合を開始する前、くさび

は定常状態にありくさび内の流速分布は(a)のようになっている。その後、混合を開始し、しばらくするとくさび内へ希釈流体が侵入し中間層を形成する。このとき、底面近傍の流れは上流に向いているが、中間層のすぐ下側の塩水は河口側へ流出し、(b)の $x = 0 \sim 30 \text{ cm}$ 地点のような流速分布を示す。

$x = 70 \text{ cm}$ 地点のように中間層の及んでいない領域の流れは、依然として上流に向いているが、くさびの急激な後退により定常状態の速度よりは小さく、また異なった分布を示す。中間層がさらに侵入すると(c)のような流速分布になる。くさび内の中間層の占める領域はさらに広くなり、中間層の下側の流れは底面近傍に至るまで河口側へ向かうようになる。この状態はくさびの急激な後退が終了する直前にある。中間層がさらに侵入するにつれて、中間層の占める領域は水深方向、縦断方向にわたり広くなる。そのため、くさび内の下流向きの流量は次第に小さくなり、(d)のような流速分布になる。このときには、もはやくさびはほとんど停止しており、(a)の状態のように再びくさびが定常に近くなる。しかし、流速分布はくさび内の密度場が異なるため(a)の状態とは著しく異なる。くさび内の密度は(a)ではほぼ一様であるが、(d)では中間層が侵入し水深方向、縦断方向にわたり変化しているためである。また、(a)から(d)になるに従い流速に小さな乱れが見られる。これはくさび内の密度が小さくなり、界面での乱れに大きく影響されるためであると推定される。

くさび内の流速分布は中間層の侵入速度と侵入量の大きさにより異なった分布形を示す。河口での密度分布の変化する速さを大きくした Run 2-1 と前述の Run 2-2 とを比較する。図10は Run 2-1 の場合のくさび内の流速分布の時間変化である。くさび内の流れは混合開始後6分という短時間のうちに中間層の下側から底面までの塩

水がすべて河口側へ向かうようになる。これは、図-9の(a)の状態から(c)の状態へ一気に移ったことと対応する。実際には(b)の状態のように底面近傍の流れが上流に向きつつ中間層が侵入していく状況はきわめて短時間に急激に起こると思われ、観測することは困難である。一方、(c)の状態に対応する $t = 6$ 分、9分の流れは生じやすく、安定な状態にあると考えられる。以上のように、中間層の侵入速度、侵入量、およ

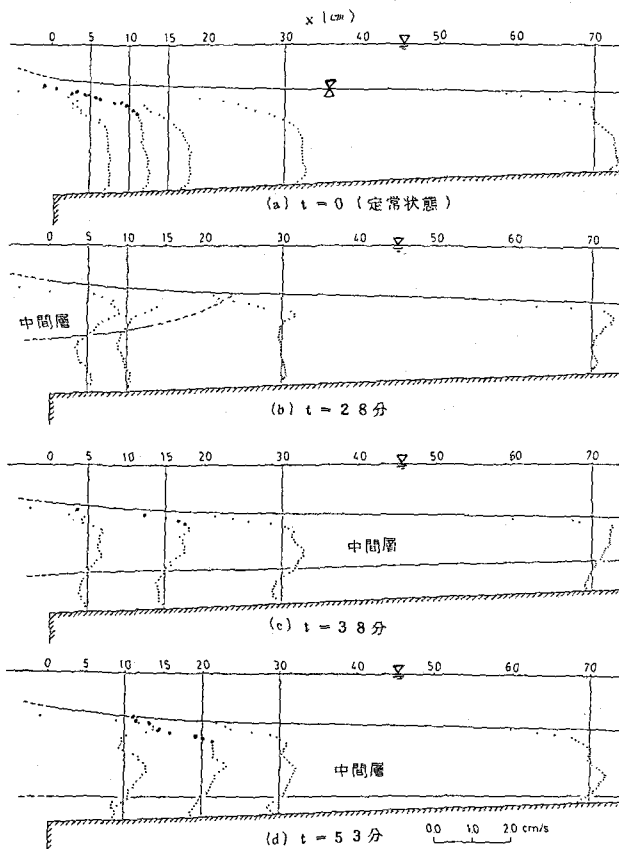


図-9 流速分布の時間変化 (Run 2-2)

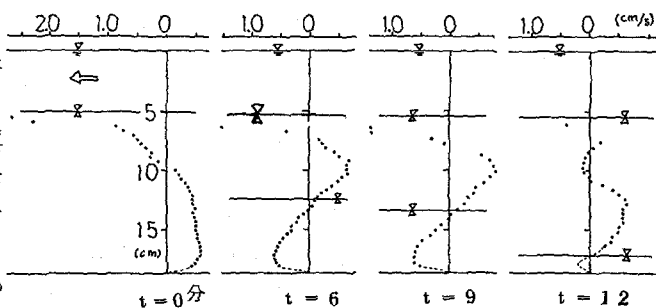


図-10 混合の強さが大きい場合の流速分布の時間変化
(Run 2-1, $x = 15 \text{ cm}$)

び密度分布形の違いにより異なる流速分布が生じる。

3-5 密度分布

図-11はくさび内の等密度線の時間変化を示す。等密度線は河道部中央断面の5地点($x = 0, 15, 30, 70, 120$ cm)の密度分布を測定することにより求めた。

図の(a), (b), (c)は、それぞれ $t = 0, 15, 35$ 分の場合であり、 $t = 15, 35$ 分では中間層が形成されている。

定常状態である(a)では等密度線は界面近傍で密になっており、くさび内の密度は界面付近を除き水深方向、縦断方向とも一様になっている。希釈流体がくさび内に侵入するに伴い、図の(b), (c)に示すように等密度線の間隔は広がっていき、中間層が次第にくさび内全体を占めていく。それによってくさび内の密度は次第に水深方向、縦断方向に変化し、

小さくなっていく。中間層上側の界面は塩水くさびの境界面と一致する。下側の界面は目視により定めたものであり、等密度線のひとつと対応している。以上のように、くさび内の密度は中間層の侵入にともない全体的に低下し、密度分布は一様分布から水深方向、縦断方向に変化していく分布となる。

4 おわりに

河口での境界条件は、くさび内の流動、くさびの厚さおよび邇上長さを決定する重要な要因である。本研究では、この河口での境界条件(密度分布)の変化にともない、くさびがどのように応答するかを明らかにした。このとき、河口での境界条件とくさびの応答との間に、中間層の形成、発達が仲介作用として重要な役割を果たすことを実験を通して明確にした。

本研究は昭和57年度文部省科学研究費総合研究(A)(代表者：堀川清司東大教授)の補助を受けた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 椎貝博美：塩水楔に関する研究，東京工業大学土木工学科研究報告，第1号，1966，pp.19~62.
- 2) 須賀堯三：河道内への海水侵入の現象の実態，土木技術資料23-9，1981，pp.15~20.
- 3) 須賀堯三・高橋晃：準定常河口流出と内部ジャンプ渦，第28回海岸工学講演会論文集，1981，pp.540~544.
- 4) 福岡捷二・福岡祐介・守屋祥一・新庄高久：河口密度流の流動機構と塩水くさびの河口条件，土木学会論文報告集，No.327，1982，pp.61~71.
- 5) 福岡捷二・角田学・坪田勝幸・間辺本文：河口での大規模渦運動による塩水楔中間層の形成と楔の応答，第37回年次学術講演会講演概要集，1982，pp.393~394.

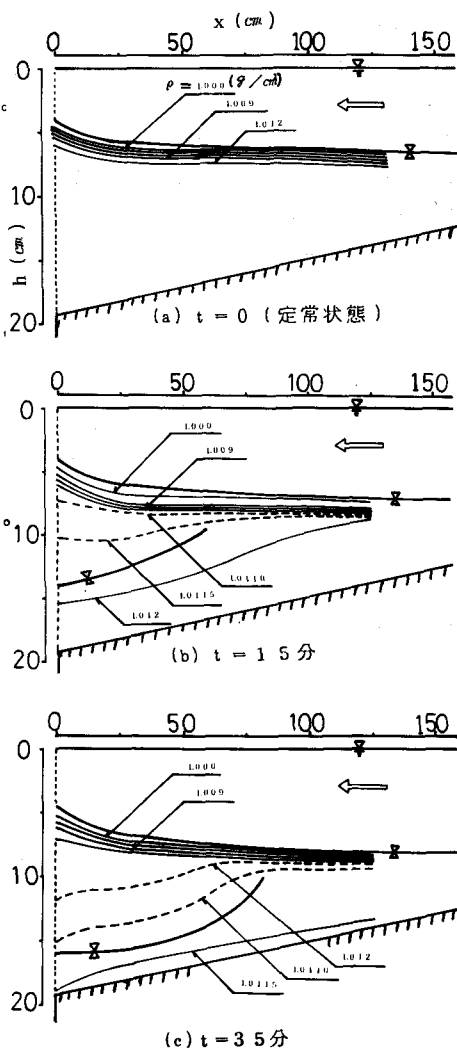


図-11 くさび内の等密度線 (Run 2-2)