

河川における塩水くさびと内部渦の特性
Field Phenomena of Salt-wedge and Internal
Vortex at N. Estuary

建設省土木研究所 正 員 須 賀 堯 三

塩水くさびの運動形態について考察するが、内部渦に焦点を合わせることにする。この場合、内部渦の発生・発達および消滅などの現象については理論的な取扱い以前の問題が山積しており、また実験水路においても、変化に富む内部渦の運動を全てシミュレートすることは容易でない。このような問題では、特に、実際に起っている現象を知ることが大切である。そこで、長良川（河口部は揖斐川と呼ばれる）における現地観測の資料の一部を紹介し、内部渦を含めた塩水くさびの運動形態の内容を大づかみに明らかにしてゆく。その際に、強制的に内部渦を発生させた不定流実験の例を補足的に使用する。

1 内部渦に関する実験

最初に、内部渦の写真を示す。内部渦は、全体としての位置が固定している場合でも、その内部では通常、非定常的に激しい運動をしている回転渦が存在する。この回転渦は、写真のように、実験水路においても明確に観察できる。運動形態は、間欠的に回転成分が生じ、それが上層の流れによって発達しながら流下するが、十分に発達した状態では下層にまで大きく喰い込んで塩水をまき込み、淡塩水の混合をいっきに促進させたのち減衰する。回転渦は、長さおよび高さともに、上層水深のオーダーであり、移動速度は上層流速に相当するスケールを有するが、内部渦には、回転渦の発生からある距離移動して、やがて減衰し、下方のもどり流に対する影響がほとんど消失する範囲までを含めるものとする。

定常流の塩水くさびでは下流端において内部ジャンプ渦が生じる。そのための条件は、断面の拡大、水深の増大、および海水の補給が十分に存在することである。

今回は、感潮河川に存在する内部渦について考察することが目的であるから、水路実験も潮位変化を与え不定流の状態とした。実験水路は長さ100 m、巾80 cm、高さ1 mの片面ガラス張り水路で、下流端には海部と塩水供給装置が取付けられている。2ケース行った実験の条件は表1のようである。そして、今回は内部渦の状況を調べるため、下流端より13 mから16 mの3 mの区間を巾40 cmと半分に縮め、狭窄部区間の上下流部では、それぞれ長さ2 mの区間を直線で結び、巾80 cmの元水路に接続させている。

実験結果を図1に示す。渦は各潮位の段階に応じて変化して

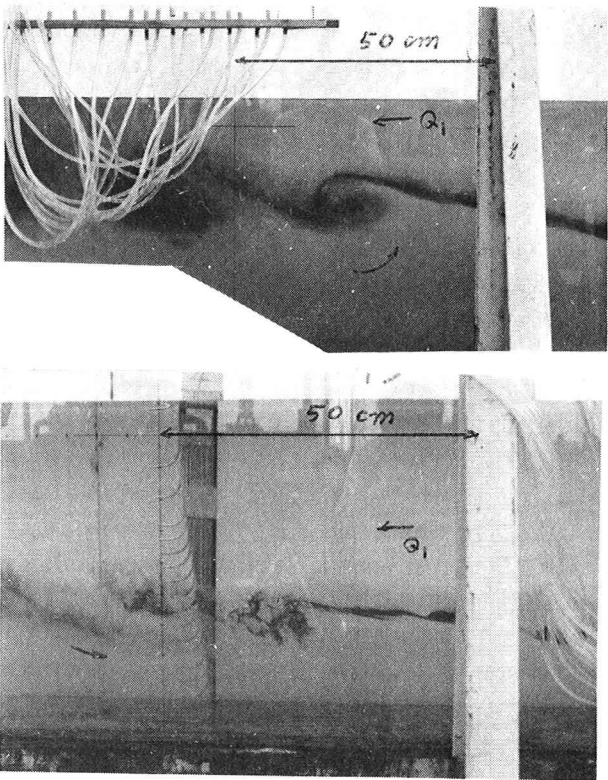


写真-1, 2 実験水路の回転渦

表-1 不定流の実験条件

	Run 1	Run 2
潮位半波高(サインカーブ)	5 cm	5 cm
潮 位 周 期	60 分	20 分
平 均 水 深	55 cm	55 cm
上流端 淡水流量(一定)	15 l/s	15 l/s
密 度 ρ_1	0.9988	0.9988
ρ_2	1.0052	1.0052
塩 水 補 給 量	10 l/s	10 l/s

いる様子がわかる。回転渦が発生する位置は、内部フルード数 F_1 が1に近づくところで、小さな渦が流下しながら急激に大きくなる。図-1で、渦の位置とは回転渦の発生の地点から、見掛け上消える位置までの範囲である。内部渦の範囲は、回転渦の下層においても、もどり流があり、もどり流の起源までを考えるとすると、多少下流側に長く取る必要がある。それは、回転渦が見掛け上消えても大きな乱れが残存し、下層のもどり流はさらに下流より規模の大きいかたちで存在するからである。また、渦の巾、高さ、および発生から消滅までの時間とあるのは、回転渦の見掛け上のスケールを指しており、影響範囲を除く、かなり明確な限定された現象を取扱っている。形状については、その最大値を示している。

回転渦は常に存在するわけではないが、おおよそ潮位の上昇時に上流に移動し、降下時に下流へさがる傾向がある。しかし、潮位曲線とは多少の位相差があり、Run 1では時間的に約1/6波長ほど潮位曲線に先行する。回転渦の発生から消滅までの距離はあまり変化なく、1～1.5 m程度である。渦の高さや巾については、さらに大きな位相差となっているように思われる。潮位曲線とこれらの現象の位相差は、塩水くさびの不定流特性によるものであり、当然Run 1とRun 2とは異なる。回転渦が大きく、かつ強く発達する条件は、 F_1 が1付近になること、および上・下層の相対流速が大きくなることである。反対に、上・下層の相対流速が小さくなることは一潮汐で2回存在する。たとえば、潮位がさがり始め、下層流速 U_2 が正となり、相対速度が減少すると渦は消える。このとき、 F_1 の大きい範囲で乱れが大きくなるだけである。強度の大きい内部渦も、短時間のうちに消失するので、水理量が変われば寿命は長くはない。回転渦の中では、渦の大きさとその移動速度を有するスケールの大きい攪乱作用により淡・塩水の混合が行われる。その混合の程度が大きく、連行が激しく行われれば、それだけ塩水のもどり流も大きくなるわけであるから、内部渦の長さが大きくなることとなる。

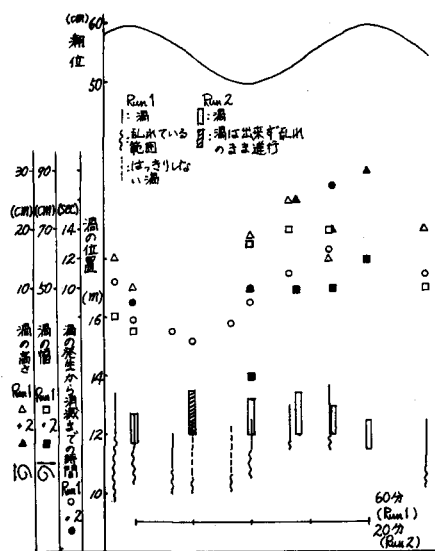


図-1 実験水路回転渦の特性

2 長良川における塩水くさびの実測とその特性

実験水路において観察されたような内部渦の河川における存在の確認、その特性調査、および塩水くさびシミュレーション・モデルの境界条件の考察などを行うため、長良川において現地観測が行われた。現地観測については、著者は計画段階までの協力を行ったが、実施は建設省木曽川下流工事事務局が担当した。

現地観測の内容は、縦断的に-3 km地点より海水遡上の及ばない15～16 kmあたりまでの範囲に亘って、ほぼ主流部の測点を1 km毎に1点選定し、水深方向に50 cm間隔で、1日に5回、塩素イオン濃度の測定を行った。このような観測を最低2日間隔で合計17日実施し、河川の自流量が低水程度で、月令の各段階の資料が得られるように計画されている。なお、最後の3日分については、密度分布のほか流速分布の実測が行われた。

塩水くさびは、流量が低水程度以下のとき、月令により潮位変化による特性が異なる。測定結果のうち、ここでは極く概略的なことを述べる。大潮から小潮にかけて、成層化の傾向が現われ、下層濃度の縦断勾配 $\partial \rho_2 / \partial x$ が徐々に小さくなってゆく。二層流の内部境界面位置は徐々に高さを増し、塩水の先端位置の潮位変動に伴う変動巾は次第に減少してゆく。それと共に、混合形態は強混合から緩混合、緩混合から弱混合へと移りかわり、水面は成層化と共に水平変動をするようになる。海水の遡上距離は徐々に増大する。やがて、月令が小潮を過ぎると、潮汐変動に伴う入退潮流が増加し、塩水くさびの変動巾が急激に増加するようになり、混合度も大きくなる。ただし、海水の遡上距離の最大はこのときに生じることが多い。そして、成層化に要する時間がかなり要したのと対照的に、小潮を過ぎると短かい時間で成層域が破壊され、緩混合から強混合へと変化してゆく。図-2は長良川における1000 ppm程度の塩素イオン濃度となる海水遡上地点の最大値の月令変化を示したものである。墨俣流量は河川の自流量と考えてよい流量であるが、これが100 m³/s以下の場合にその影響がほとんどないことが判っている。100 m³/s以上となる2ケースについても図に示している。これによると、遡上距離は小潮時の上下弦からやや遅れて最大となり、朔望時には小さく

なる。いっぽう、一潮汐間の先端位置の変動巾は朔望で大きく、上下弦で小さくなるが、朔望から上下弦に移る過程で比較的早く小さくなり、上下弦より朔望に移る過程で逆に比較的早く大きくなる傾向を有する。このように、遡上距離および変動巾ともに、朔望から上下弦への変化の過程と、逆の過程とでは現象が異なるとみなすことができる。次に述べる内部渦は、成層化の程度および上下層の相対流速の影響を強く受け、以上のような海水遡上の現象に密接なかかわり合いを有する。

3 内部渦の存在と密度分布の特性

内部渦は、成層流の不安定性に起因し、特に内部フルード数が1に近づくとき、大きな乱れが生じ回転渦の発生をみることがあり、それに伴う連行現象ともども流れが生じて、全体として一つのまとまりを有する渦である。内部渦には、成層流の上流端付近に生じるもの、断面の変化と不定流の特性に応じて発生するもの、および河口付近に生じるものなどがあるが、ここでは最も重要であり、かつ強度の大きい一番後者のものを主として扱うこととする。また、内部渦には内部の回転渦が大きな役割を演じるが、回転渦までに発達しない場合も存在することがある。

さて、図-3は内部渦の存在を示す実測例である。この状態は月令11日、潮位が最低になる時刻のもので、上層の流速が急減しつつあり、やがて上下層とも逆流に転ずるところであり、内部渦としてはあまり安定したものではない。しかし、渦のスケールとしては長さ4 kmにも及び、非常に大きなものである。

このように、流速分布の実測により内部渦の存在は確認されたので、次に密度分布に現われる特性について考察する。3日間の合計15回の流速分布の実測資料から判断すると、内部渦は頭部が平たいタマゴ状で上流に向い頭を少しさげており、下流側では薄くなり水面近くまで浮上している。実測資料より密度分布に現われる特徴を列挙すると次のようである。

- (a) 塩塩境界面位置の縦断曲線が、内部渦頭部の直上流において急上昇し、頭部を過ぎていったん低下した後、再び下流にうつるに従いゆるやかに上昇する。
- (b) 上層における塩分濃度は、内部渦の頭部において急増する。密度勾配は内部境界面付近において、内部渦より上

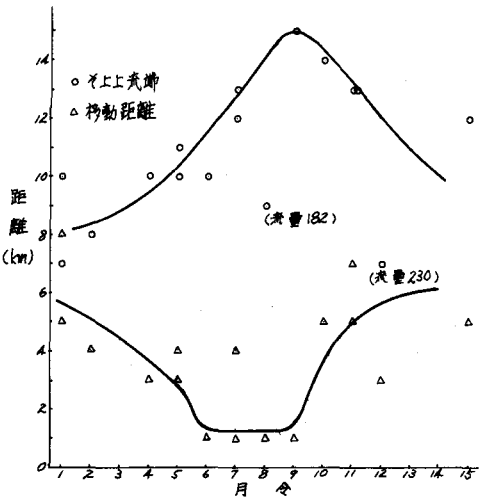


図-2 最長侵入長と変動巾の月令変化

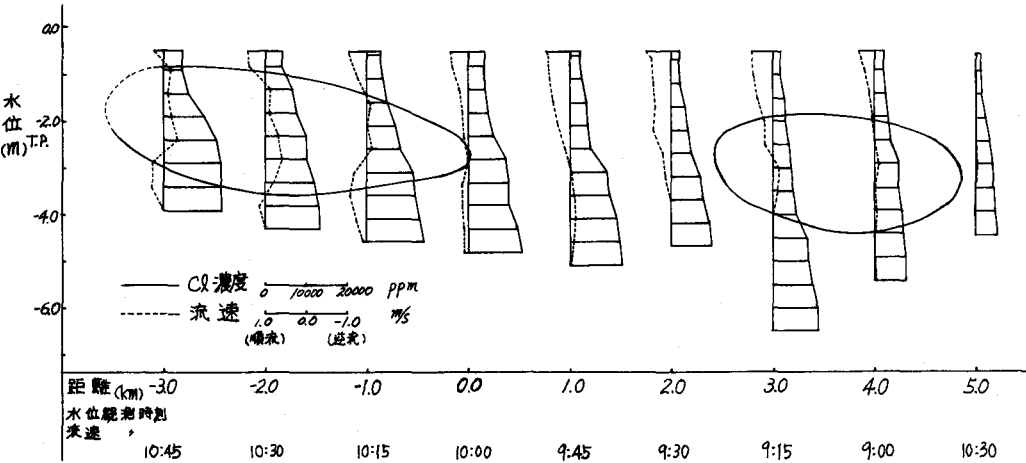


図-3 長良川の内部渦の範囲と形状 S. 49. 11. 26 第1回目観測 (9:00 ~ 10:45)

流では大きいですが、渦の範囲では均一化の方向に変化する。そして、回転渦の存在する範囲では、下層のかなり深いところまで影響を受ける。

(c) 内部渦の末尾付近で上層濃度は急変するが、特に上げ潮において渦の下流側で上層塩分濃度が急増する。

(d) 順流時には、上層の内部フルード数 F_1 の縦断曲線では、ジャンプ開始点付近で急増し、安定時には $F_1 \div 1$ となる。

以上のような基準に基づいて、17日各5回分の実測資料について内部渦の存在位置を推定して図-4を得た。

4 内部渦の特性とその影響

図-4は内部渦の存在する範囲を、15日周期の月令順に並べて示したものである。同図には、おのおの観測日毎に城南（-0.6 km）および船頭平（12 km）における水位曲線、河床付近の塩素イオン濃度で200, 500, 1000, 5000, 10,000, および15,000 ppmを示す地点の距離の時間変化、および内部渦については河口付近に生じる主要内部渦のほか、その他の原因で生じる他の内部渦についても示している。なお、1日に5回行われている各回の測定に要する時間は最大1時間45分となっているが、この間の変化は無視することとし、観測値の補正も行わずに各回の観測開始時に合わせて図に記入されている。

資料により、内部渦およびそれに関連する現象について特徴的な事項を挙げれば次のようである。

(a) 月令にして7~11日および22~26日において弱混合状態となることが多い。このとき、水位は理論どおりほぼ水平で成層流の傾向が強まる。海水の侵入長が最大となるのは月令9~11日（24~26日）で、侵入長の時間変化が少なくなるのは月令7~9日（22~24日）の頃である。塩水くさびの発達するに合わせ、下層濃度が高くなり、縦断的な均一化がすすむ。月令10~12日（25~27日）では弱混合から緩混合へと変化をするようになるが、潮位変動量が大きくなるので、瞬間的には海水の侵入長が相当大きくなることもある。

(b) 月令11~15日（26~30日）、および月令4~6日（19~21日）はそれぞれ弱混合より緩混合、および強混合より緩混合へと変化し、ほぼ緩混合と考えられる期間である。この期間の水位は水平に近いが、順流末時に水面勾配がつき、多少の位相差も生じる。 $\partial \rho_2 / \partial x$ も大きくなるが、弱混合から緩混合状態へ移る場合には侵入長の変動巾も、ときには侵入長も大きくなるのに対し、強混合から緩混合状態へ移る場合には高濃度部の変動巾が小さくなるのが特徴といえる。

(c) 明確な定義に基づく議論ではないが、月令1~4日（16~19日）は強混合状態と考えられる。逆流時の水面勾配は小さいが、順流時には大きくなり、位相差も存在する。海水侵入長は潮位変化に伴い大きく変動し、侵入長はあまり大きくならない。

(d) 内部渦は、流速分布の実測が行われた3日間の資料では3つ存在すると考えられることが多かったが、他は多くの場合には1つの渦を推定するにとどまった。これは安定して河道の中に移動しつつ存在するので、主要渦として図中にその位置と範囲を実線で示した。他の2つは塩水くさび先端付近と河口の断面急変部に生じるものと思われる、破線で示した。

(e) 強混合期間の内部渦は、先端に近い $C_L = 500 \sim 1000$ ppm の範囲に存在し、入退潮に伴って上下流に大きく移動する。渦の長さは上下層の流速差の大きくなる引き潮時に発達し長くなるが、0.5~3 km程度であり、2 km以下が多い。

(f) 強混合の次に現われる緩混合期間の内部渦は、先端より少し離れ、変動巾も減少する。長さは1.5~4 km、平均2.5 kmである。潮位変化による長さの変化は、強混合の場合と同様であるが、その変化の度合は小さくなる。

(g) 弱混合期間の内部渦は、下流端にさがり、存在位置の変動巾も小さく安定してくる。主要内部渦の先端位置は3~4 km地点であり、長さは3 kmほどである。

(h) 弱混合の次に現われる緩混合期間の主要内部渦は、渦位置の変動が大きくなり、かなり上流まで遡ることもあり、また河口外に出てしまうこともある。渦の長さは変動巾が大きくなると2 km程度に短くなる。

(i) 内部渦は上下層の中間の密度を有し、潮位曲線から判断される平均的な流れの方向に移動する。弱混合時に渦が停止する理由は、流速が小さいことのほか、渦上方において連行・混合現象により上層の密度分布が変化し、これによって流速分布が三角分布することとなり、渦境界面における流速が平均流速に比し小さいためである。また、渦は成層化と共に下流へ移動し、かつ海上に出ると減衰するため、流路の下流端付近において安定するものと思われる。

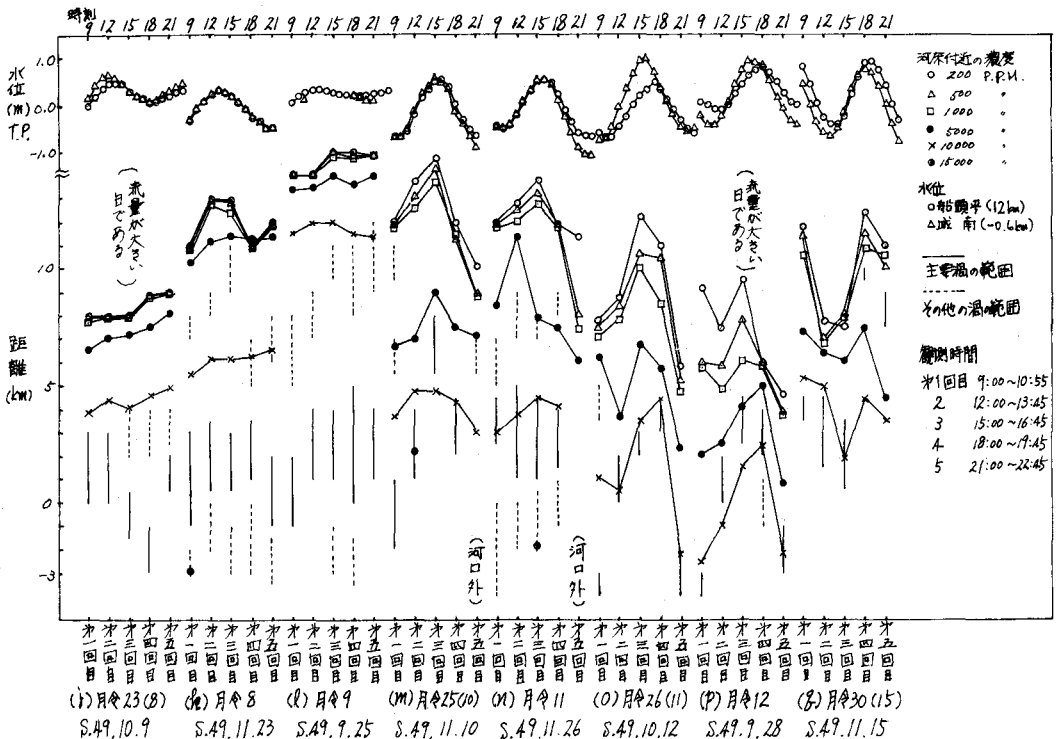
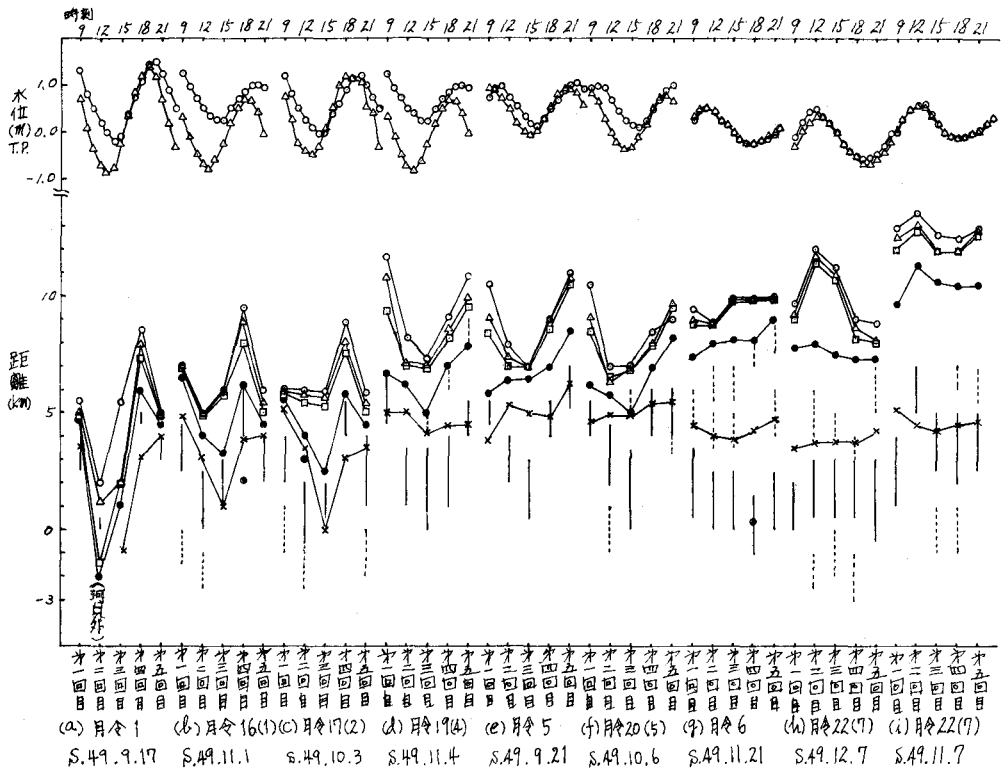


図-4 内部渦の範囲とその移動状況, および濃度分布と水位変化の関係 (長良川)

渦の位置と長さが定常流の場合と以上の点で異っている。

(j) 内部渦の移動速度は、上層の密度および流速分布によって異なるが、おおよそ上層流速から、定常状態と考えた場合の自流量の上層流速の絶対値相当分を差引いた流速ほどである。この速度を10cm/sとすると3時間で1km移動することになる。強混合状態では3時間で最大6km以上移動することもあり、緩混合でも3～5km程度の移動が観測されている。なお、逆流時にはほぼ上層流速程度で遡上しているようである。

(k) 内部渦は濃度の小さいところで沈み、大きいところで浮ぶ。遡上時で下流側が高濃度のとき、渦の長さは短くなり、強度も弱まる。順流時には渦は若干長くなる。ただし、成層度が弱ければ減衰する。内部渦は、渦周辺の流れにのり、発生・発達と減衰および変形と強度変化の現象を伴いながら上・下流へ移動する。

5 ま と め

内部渦を実験によって観察し、長良川における観測資料によって、内部渦の存在を確認したのち、その現象の特性について第一的な考察を行った。そして、今回は水理講演会の課題の主旨にそい、現象の紹介のみにとどめた。しかしながら、内部渦は二層流モデルの下流端条件の決定上支配的な役割を果す。ちなみに、表-2は流速測定が行われた3日分の内部渦先端付近の内部フルード数を示す。内部境界面位置、密度、および流速の誤差を考慮し、かつ通常 $F_1 > 0.7$ の範囲は渦近傍に限られることからすると、順流時にはこの付近において $F_1 = 1$ と判断してよいと思われる。また図-5は上層水深について弱混合時の実測例である。さらに、内部渦は中間層の発達に重要な役割を果す。中間層は上層の密度分布や流速分布に直接関係し、それがまた、連行係数や内部摩擦係数をも変化させる。以上のような問題、および二層流の不安定性に基づく渦の発生などの問題については別途報告の予定である。

表-2 内部渦先端における内部フルード数

測定日	測定順	ϵ	h_1 (m)	u_1 (m/s)	F_1	
11月23日	第1回目	0.0130	1.7	-0.09	-0.193	
	2	0.0116	1.5	0.00	0	
	3	0.0131	1.5	0.29	0.661	順流初期
	4	0.0125	1.5	0.35	0.816	順流
	5	0.0155	1.6	0.08	0.162	流
11月26日	1	0.0044	1.5	0.22	0.866	順流
	2	0.0073	1.7	-0.07	-0.576	
	3	0.0057	1.4	0.20	0.715	順流
	4	0.0051	2.7	0.33	0.898	順流
	5	-	-	-	-	-
12月7日	1	0.0105	2.7	0.58	1.100	順流
	2	0.0056	1.1	-0.07	-0.285	
	3	0.0103	3.0	0.51	0.927	順流
	4	0.0142	2.7	0.27	0.440	順流
	5	0.0140	2.3	-0.04	-0.071	順流末期

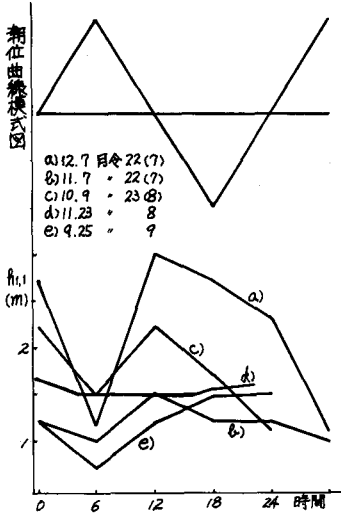


図-5 内部渦先端の上層水深