

塩水くさびの先端渦による混合*

Mixing Effect of Front Vortex in a Salt-Wedge

建設省土木研究所 正員 須賀 堯三 Kyozo Suga

建設省土木研究所 正員 高橋 晃 Akira Takahashi

1. 概要

塩水くさびの先端渦について考察を行った。塩水くさびの先端は、理論的にも問題²⁾となるところであるが、実験水路における観察結果によると、小規模な巻き渦が、多数間欠的に発生・発達・減衰の過程を繰返し、全体として一つの渦域を形成する特異な区域である。この渦域は塩水くさびの他の部分と比して、多数の渦とその変動によって特徴づけられる領域となるので、先端渦と名づけることにした。このような先端渦は、河川の塩水くさびにおいても存在すると考えられ、長良川の非定常的な流れにおいても先端渦の存在を示唆する資料が得られている。本論文においては、実験水路における定常状態の塩水くさびの先端部に形成される先端渦が、下層の塩水の混入と淡水の混合の現象にとって重要な役割を果たしていることを見出した。ついで、先端渦による混入量が主としてクーリガン数ならびに内部フルード数によって定められることを明らかにし、その関係を実験的に求めた。この結果は、河川の資料によってもほぼ妥当であると考えられる。

2. 先端渦の存在とその性状

塩水くさびの先端の下層水深 h_2 が小さいところでは、椎貝²⁾によれば定常流においても内部波が不安定となり、特異点が一つ存在する。実際の塩水くさびのフロントにおいては、定常状態のとき、その表裏面において圧力がほぼ等しくなる。圧力には静圧と動圧があり、塩水くさび側の静圧は大きく、動圧は小さい。反対に、フロントの上流側では静圧は小さく、動圧は大きいと考えられる。このような圧力は、塩水くさびのフロントの夫々の点でだいたい釣り合っている。フロント上流側の動圧は、水路の底の点 ($Z=0$) で零で、水面に近づくにつれて大きくなる。したがって、フロント表裏面の静圧が、塩水くさび側において水面から離れるにしたがい、上流側との差が増大すると考えると矛盾が生じる。このことから、塩水くさび側では静圧が静水圧分布となっていないことがわかる。ちなみに、定常状態の実験によると、フロントの水路床付近において塩水くさび内への淡水の吸入や塩水くさびからの流出はなく、フロント表裏面の圧力は水路床においても釣り合っていると考えてよい。以上のことから、塩水くさびの先端部においては非静水圧分布であるので、渦の存在が示唆される。

実験水路に現われた先端渦の様子を図-1に示す。これは、下流端において安定した主要内部渦を有する完結した、長さ約20mの定常的な塩水くさびにおける先端渦で、水理量は単位幅流量 $q = 0.433 \text{ l/s/cm}$ 、水深 ($h = h_1 + h_2$) 50cm、下層塩水密度 $\rho_2 = 1.0057 \text{ gr/cm}^3$ ($\epsilon = 0.00646$) の場合である。塩水くさびの先端部の形状は、水路床との明確な接点より約25cmの間で約7cmの下層水深にまで急激に上昇し、この点より下流部における界面の上昇の度合は、下流端部を除いて緩慢となっている。先端部の界面付近からは、写真-1に示すようにリボン状の面を有する渦が、界面に沿ってやや上方に、その下流側のリボンの先端部に図-2に示すような回転成分を持って、上層流と共に約5~8cm伸びてくる。そして、先端の回転する下層水が主体の流体は回転と共にその一部は淡水と混合し、やがて減衰する。いっぽう、前述のリボン状渦の根元の部分の

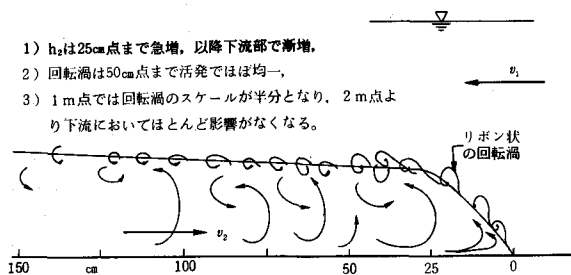


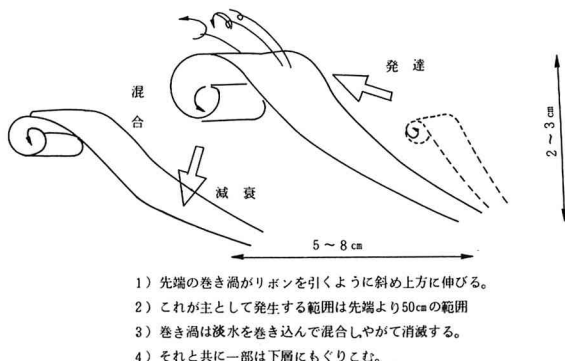
図-1 定常状態の先端渦の概念図

* 文献1)の一部に若干の資料を追加したものである。

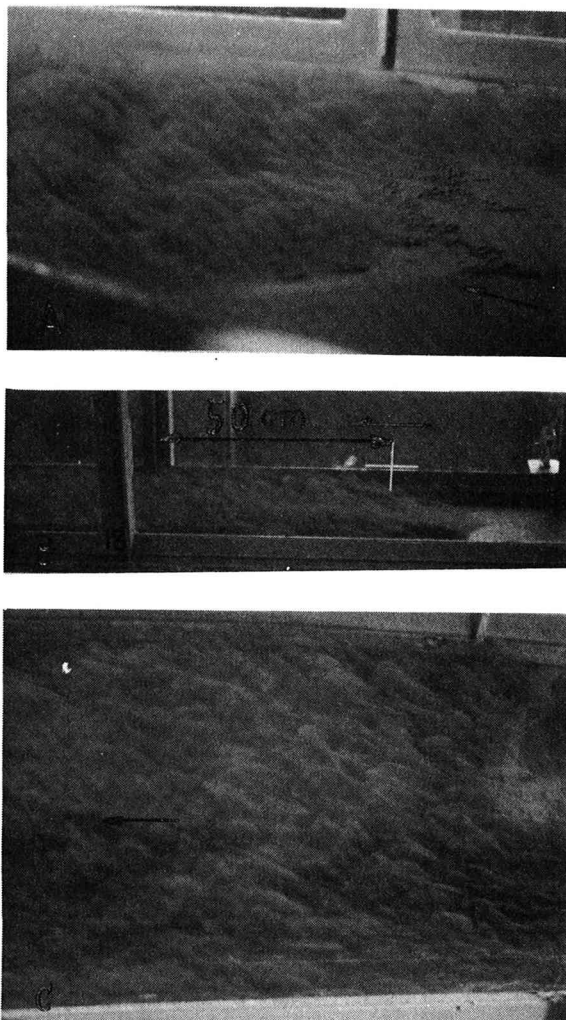
移動は小さく、ほとんど静止しているように観察されるが、それより上流側からの渦が十分伸びた段階で上から崩れかかりこの根元の部分は乱されるようになる。しかし、やがて崩れた付近より、小さな回転成分が1～2合体するようなかたちで、新たなリボン状渦となって発達し、ふたたび伸びていくといった、1秒程度の周期運動をする。このリボン状の渦は伸びる過程で横断方向の渦と干渉し合い、若干三次元的な運動ともなる。

このような渦は塩水くさびの先端より約50cmの区間では活発であるが、次の50cmの区間を過ぎて波高が約半分程度となり、さらに1m下流において、ほとんどその影響がなくなる。いっぽう、塩水くさびの部分の水路床付近からの下層水塊の舞い上りの現象がみられる。これは、実験によると先端より1mあたりより明確となり、50cmより上流部においては頻繁となり、25cmより上流では非常に顕著となる。以上のように、この実験の場合には、先端渦の範囲は直接的には1m余りとみられ、その影響は2m程度にまで及ぶと考えられる。先端から2mより下流では様相が一変し、ほぼ一様不変な区間が下流端近くまでつづく。

非定常状態では、先端渦は主として遡上時に発達する。特に小潮にむかうときに、下層濃度の一様化と共にウォーミングアップ現象が現われ、先端渦が大きく発達する。退潮時には渦は減衰し、中間層が削られて下層水深が小さくなるが、下層水は河床にへばりつく状態がつづく。このような非定常の先端部の運動について、長良川の実測の資料を図一3にあげる。これは昭和49年9月17日の月令1日の強混合と考えられる状態の先端部の濃度分布の消長を示す。同時測定の前1回目から第5回目まで3時間毎のフロント位置(2,000ppm)とそれぞれの潮位、および同じような潮位の条件となる第1回目および第5回目のループを描く塩度イオン濃度2,000ppmの等濃度曲線が示されている。これは先端渦が長さ約2kmにわたって存在することを示すものと考えられる。図一3によると、第1回目のときのやや発達した先端渦は第2回目観測の時刻には河口の外に出てしまい、先端あたりで新たに発生した渦が第3回目および第4回目に上下し、第5回目では、第1回目と同様に少し発達しかけている様子がうかがえる。



図一2 リボン状の回転渦のスケッチ



写真一1 塩水くさびの先端部(水路幅60cm)
A: 上流側より B: 側面より C: 上方より

実験水路と川とは、各種の内部渦はRe 数の効果によって相違し、主要内部渦の場合と同様に、先端渦の長さはオーダーが大幅に異なるが、これは今後の研究課題である。

以上のように、先端渦は密度成層流の圧力差に起因し、上層流による剪断力によって発達するものと認められる。なお、塩水くさびの先端渦は土石流の先端渦とは渦の回転方向が異なり、dune下流の渦とも密度効果の点で基本的に異なる。

3. 先端渦による混合現象の存在

100m水路における塩水くさびの非定常流の運動では明確な先端渦が現われることがあった。生成の範囲は、潮位上昇時で内部境界面が上昇し、塩水くさび先端付近の勾配が大きくなった状態から、潮位下降に転じた後下層水深が十分小さく先端付近の勾配が小さくなる迄の間である。このとき、先端付近の上層流速はある程度大きく、上下層の流速差がはっきりついていることが必要である。先端渦が発達するときには、この位置からの下層水の混入が活発である。下層水に色素を入れておくと、蒸気機関車が煙を吐きながら向い風の状態でゆっくり走っているのに似ている。先端位置は明確に識別することができ、流れは先端付近において上昇流となっている。

前述のように、河川においても定常流・非定常流を問わず先端渦が存在することがあると考えられる。図-4は最上川における上層濃度の実測値と連行を考慮した場合の計算値とを比較したものである。ただし、この場合計算値には1000ppmを先端部において加算した。最上川はほぼ定常流として取扱われ、中間層内の流向は大部分下流向きと考えられるので、主要内部渦の影響を無視し得、また河道内部渦の存在もないと思われるので、この1000ppmの加算濃度相当分は先端渦による混合の結果生じたものと判断される。この他、日本海側の同様の条件下にある信濃川、阿賀野川および九頭竜川の塩水くさび先端部における実測の上層塩素イオン濃度を表-1に示す。これによると若干のバラツキがあるが、最上川と同様またはそれ以下の混入量が認められる。非定常の河川を取扱ったものに、長良川の計算例³⁾がある。これによると上層濃度の計算値はいずれも実測値より小さい。そして、先端部において1000ppm程度の混入が別途存在したとすると、計算値と実測値とを合致させることができる。以上のように河川においても、塩水くさびの先端部において先端渦が存在し、それによる混合の現象がみられると考えられる。

4. 先端渦による混合に関する水理量

先端渦をはさんだ2断面において運動量の保存を考える。図-5に示すように、簡単のため一定幅・水平河床の長方形断面水路を考え、上下層の濃度 ρ および流速 v はそれぞれ平均値で代表しうものとし、下層濃度 ρ_2 を縦断的に一定と仮定し、底面および側面の摩擦を無視し、かつ水面を水平と仮定する。符号は下流向きを正とするが、図-5に示すように下層流速 v_2 に限り上流向きを正とする。先端渦の上下流点の断面における運動量の保存則は

$$\rho_0 g \frac{(h_1 + h_2)^2}{2} + \rho_0 \frac{q^2}{h_1 + h_2} = \frac{\rho_1 g h_1^2}{2} + (\rho_1 g h_1$$

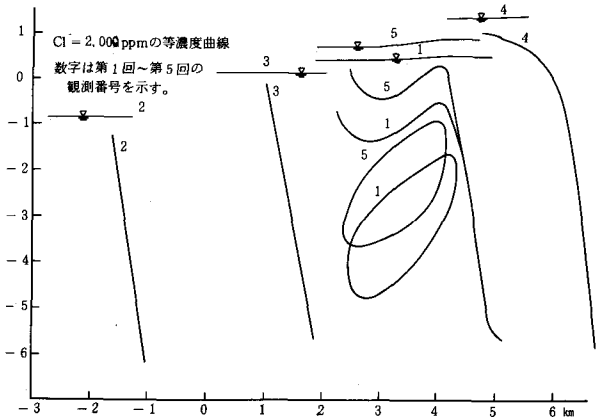


図-3 先端渦の発生と消滅
(長良川, 昭和49年 9月17日, 月令 1日)

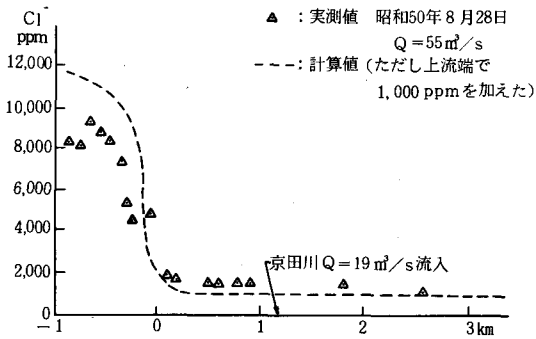


図-4 上層の塩素イオン濃度
(最上川における実測値と計算値)

表—1 塩水くさび先端部における上層塩素イオン濃度

河川名	観測日 昭和年月日	塩素イオン濃度 ppm	河川名	観測日 昭和年月日	塩素イオン濃度 ppm
信濃川	48. 8. 24	361	九頭竜川	44. 7. 27	600
	"	565		44. 8. 21	933
阿賀野川	47. 9. 1	472		44. 9. 4	655
	47. 9. 4	897		44. 9. 20	1,054
	47. 9. 8	989		44. 10. 4	604
	47. 9. 30	467		44. 10. 20	700
	47. 10. 4	342		44. 11. 3	920
	47. 10. 20	963		44. 11. 17	1,157
	47. 10. 29	550			
	47. 10. 30	282			
	48. 8. 2 (6 ~ 18 時)	345 ~ 666			
	48. 8. 28 (6 ~ 18 時)	912 ~ 2,400			
	48. 8. 28	400			

$$+ \frac{\rho_2 g_2 h_2}{2} h_2 + \rho_1 \frac{(q + v_2 h_2)^2}{h_1} - \rho_2 h_2 v_2^2 \quad (1)$$

である。淡水密度 ρ_0 と上層密度 ρ_1 の間には $\rho_1 = (\rho_0 q + \rho_2 v_2 h_2) / (q + v_2 h_2)$ の関係があるが、 $q \gg v_2 h_2$ であるから近似的に $\rho_1 \approx \rho_0$ とする。いっぽう、 $\rho_1 / \rho_2 = (1 - \epsilon)$ であるから、(1)式は

$$\frac{g}{2} \frac{\epsilon}{1 - \epsilon} h_1 h_2 (h_1 + h_2) = h_1^2 v_2^2 - \frac{h_2^2 v_2^2}{1 - \epsilon} - 2 (h_1 + h_2) v_2 q - q^2 \quad \dots\dots\dots(2)$$

となる。 $1 - \epsilon \approx 1$ において、下層流速 v_2 について整理すると、

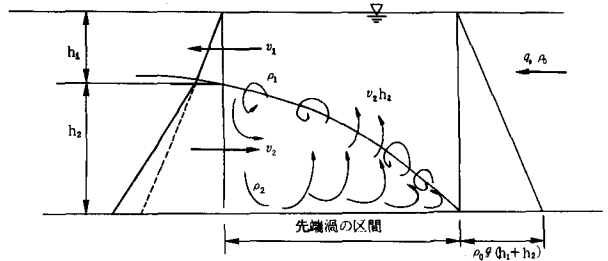
$$v_2 = \frac{q}{h_1 - h_2} \left\{ 1 + \sqrt{\frac{2h_1}{h_1 + h_2} + \frac{\epsilon g}{2q^2} h_1 h_2 (h_1 - h_2)} \right\} \quad \dots\dots\dots(3)$$

となる。水面を水平と仮定したので、 v_2 は大きな値となるが、ひとまずの目安とはなる。(3)式において無次元密度差 ϵ 、淡水の単位幅流量 q 、および全水深 $(h_1 + h_2)$ を与え、上層水深についてはたとえば次の近似式

$$\frac{\partial h_1}{\partial x} = - \frac{fi}{\epsilon (1 - F_1^2)} \frac{v_1^2}{2g} \left(\frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2} \right) \quad \dots\dots\dots(4)$$

によって与えれば、 v_2 を計算することができる。(4)式において fi は内部摩擦係数で一般にクーリガン数 $(Re \cdot F_1^2)$ の関数として表わされる。ここに、 $F_1 = v_1 / \sqrt{\epsilon g h_1}$ は内部フルード数、 $Re = v_1 h_1 / \nu$ はレイノルズ数である。以上の結果、下層流速 v_2 または先端渦による混入量は、第一近似としてクーリガン数および内部フルード数によって表現されることが考えられる。

すなわち、先端渦による混合の現象は、先端渦の規模と強度によるところが大きい。先端渦の形状はクーリガン数



図—5 先端渦の両端の運動量の関係の概念図

によって主として定められるので、混合現象にとってもクーリガン数が支配的要素の一つと考えてよい。また、第2の要素としては、界面に沿う剪断力と界面現象に関係する水理量で、塩水くさびの先端部における内部フルード数が重要と考えられる。

5. 先端渦による混入量の定量評価

先端渦による混入量は(3)式によって求めることができる。しかし、この式には多くの仮定が含まれているので、物理的内容を考察したうえで、実験および実測によって定量評価を行うことが必要である。

先端渦による混合には3種類の現象がある。すなわち、上層への巻き上げ、中間層への中間密度を有する流体の供給、および下層への供給である。それぞれの方向に供給される流体は、下流より下層を通して補給される塩水と界面沿いの淡水が混合された流体である。実験は下流端において内部ジャンプ渦、および上流端において先端渦を有する完結した塩水くさびが安定した状態で形成される30mおよび100mの長さの水路を用いて24 ケース行った。図-6は100m 水路の定常的な塩水くさびの下層の流量 Q_2 の縦断変化を示す。 $-x/L=0$ の点は内部ジャンプ渦の上流端の位置であり、 $-x/L=1$ の点は塩水くさびの上流端である。下層流量は上流ほど小さくなり、減少量が連行による上層への混入量と考えられる。したがって、内部フルード数 F_1 は上流ほど小さいから、連行量は減少し、曲線はゆるやかとなっている。しかし、下層流量は塩水くさびの先端に近づいても零とならない。このことは先端渦による上層への混入量がそれだけ存在していることを示している。図-7は測定精度が流速よりまさる上層濃度について同様の関係として整理したものである。この図によっても、先端渦による下層水の混入によって、先端付近において上層の濃度が上昇していることがわかる。

図-8は図-7等の結果に基づいて、先端部 $-x/L=1$ の点の上層濃度の推定値 C_{if} とクーリガン数($\Psi = Re_0 F_0^2$, $Re_0 = q_0/\nu$, $F_0 = v_{10}/\sqrt{g(h_1+h_2)}$)および内部フルード数 F_{10} との関係求めたものである。 Ψ が小さいとき、内部抵抗は大きいから塩水くさびの先端部の形状はカマボコ状となり、先端渦の強度が F_{10} の増大と共に大きくなる。このような状態では上層への塩水の混入量が増大し、 C_{if} は大きくなる。反対に Ψ が大きくなると C_{if} は相対的に小さくなる。

図-8は図-7等の結果に基づいて、先端部 $-x/L=1$ の点の上層濃度の推定値 C_{if} とクーリガン数($\Psi = Re_0 F_0^2$, $Re_0 = q_0/\nu$, $F_0 = v_{10}/\sqrt{g(h_1+h_2)}$)および内部フルード数 F_{10} との関係求めたものである。 Ψ が小さいとき、内部抵抗は大きいから塩水くさびの先端部の形状はカマボコ状となり、先端渦の強度が F_{10} の増大と共に大きくなる。このような状態では上層への塩水の混入量が増大し、 C_{if} は大きくなる。反対に Ψ が大きくなると C_{if} は相対的に小さくなる。

つぎに、 C_{if}/C_2 を河川の実測値と対比させる。図-4の最上川の場合は $C_{if}/C_2 = 0.05$ であり、 $\Psi = 40 \times 10^3$ とすると若干大目であるが、表-1に示した他の河川の値は最上川より小さい C_{if} の値となっており、図-8の値に近づいている。非定常状態では主要内部渦や河道内部渦の影響も加わるが、長良川の場合で $C_{if} = 1,000 \sim 2,000$ ppmであるから、図-8の値とかけ離れたものではない。河川の場合には条件が複雑であるから、混入量が若干大くなるのは当然のことといえる。

また、河川では下層濃度が縦断的に変化するので、 C_2 よりは先端付近の水理量で表現することが必要である。そこで参考のため、先端における流量比 Q_{2f}/Q_{1f} によって表わしたのが図-9である。

ケース	b	h_1	h_2	q_0	F_0	F_{10}
e	b-1	20	40	4040	0.400	0.361
△	b-2	30	50	5085	0.518	0.434
○	b-3	40	63	6310	0.640	0.443
◇	b-4	50	70	7049	0.740	0.469
□	b-5	30	40	4078	0.590	0.417
●	b-6	40	50	5498	0.650	0.384
▲	b-7	45	60	6186	0.680	0.375
■	b-8	40	70	7020	0.800	0.382
●	b-9	20	80	8220	0.820	0.341
■	b-10	40	42	4220	0.420	0.341

B = 80cm

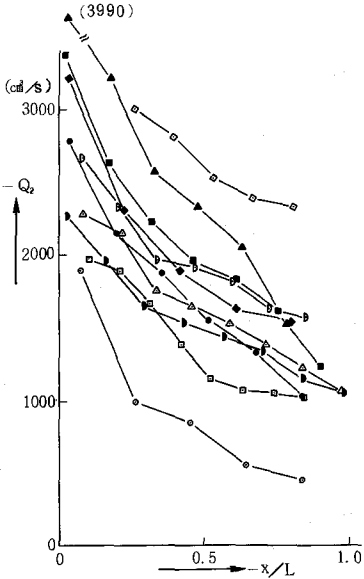
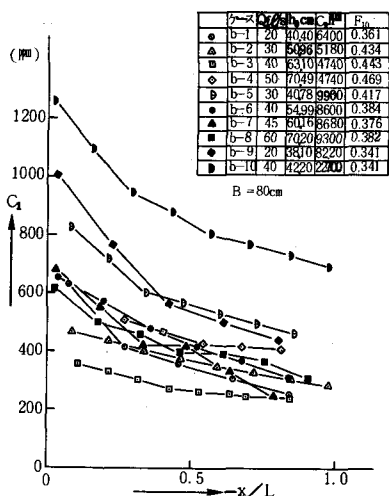


図-6 下層の塩水流量の縦断変化
(実験水路、定常状態)



図一七 上層の塩素イオン濃度の縦断変化,
(実験水路, 定常状態)

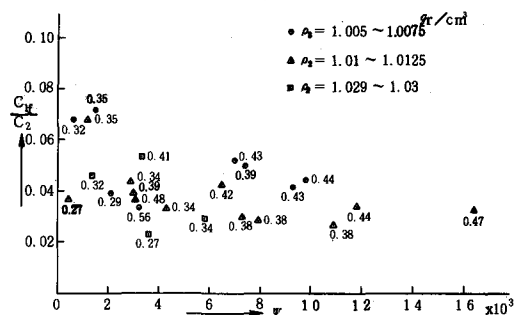
6. おわりに

先端渦の存在とその性状を示し, 先端渦による混合現象について, 運動量保存則から現象を支配する水理量を求め, 実験的な考察結果に基づいて, 定量評価を行った。これは河川における先端渦による混入量を推定する場合の基本量ともなりうるものである。

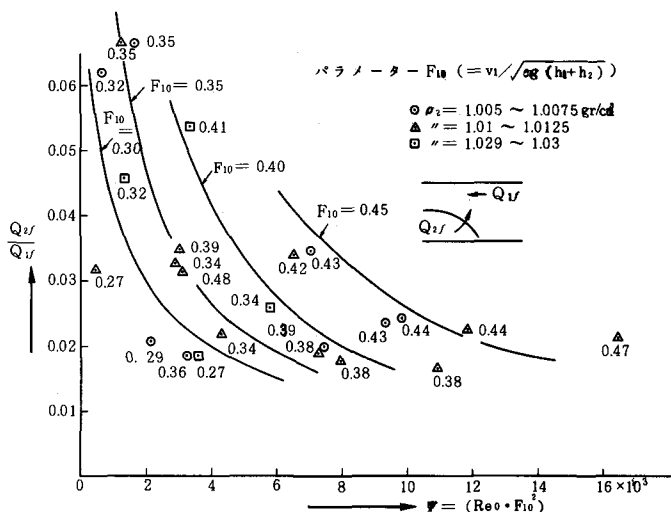
しかしながら, 先端渦の発生条件, 内部機構やスケール, および境界の条件や水理の条件による効果などについては未解決なところが多い。本論文においては将来の課題をも示唆しえたものとする。

参考文献

- 1) 須賀堯三: 感潮河川における塩水くさびの水理に関する基礎的研究, 東京大学学位論文 1980。
- 2) 椎井博美: 塩水楔に関する研究, 東工大土木科研究報告, No 1, p.19~62, 1966。
- 3) 須賀堯三: 一次元二層不定流の数値計算(その3), 土木学会海講, p.567 ~ 571, 1979。



図一八 先端渦に基づく混入によって上昇した上層の濃度



図一九 先端渦による上層への混入量