

感潮河川の界面抵抗係数算定上の問題点

北海道大学工学部 正員 吉田静男

北海道大学工学部

八木史郎

ここでは自然河川等における塩濃二層の界面抵抗係数が著しく散乱する原因として潮汐による非定常運動の影響が大であることを、定常状態の水槽実験により得られる界面抵抗係数と同一座標で議論することには、問題のあることを指摘する。

1. 序 文

これまで、自然の河川におけるものから、非常に小さな規模の水槽実験にいたるまで、現実の塩濃二層界面についての界面抵抗係数の実験値が数多く発表されてきたが、現在この f_i を $\psi = Re \cdot F_i^2$ (Re :レイルス数、 F_i :フルド数)について整理し、一つの経験則を得ようと努力が続けられている。こうした研究の方向は、理論的に界面抵抗係数を求めようとする立場とは異なり、まず f_i の経験則を完成して実用に供しようとする立場にあるが、最終的には、両方の立場によって得られた結論が一致する必要があるわけで、理論的に考察を進める上にも甚だ重要な志向といえる。ただ取扱う現象が更に広範に及ぶため、測定精度の差異等による f_i の散乱が著しく、経験則を得ることが非常に困難な状態にあって現在その散乱の原因の究明に多くの関心がよせられている。今のところ、水槽実験に関する f_i の散乱の原因としては、水表面の勾配の無視、下層流静止の仮定、界面の定義のあいまいさ、静振等があげられており、これをもって f_i の散乱を説明することは十分可能と考えられているが自然河川における f_i の散乱については、野外観測の困難を示すものとして、これまで検討された例は無い。しかし f_i の散乱状況をよく検討してみると、水槽実験の結果にはさほど問題は無く、むしろ河川における、オーダーを超す散乱に問題があり、その原因を究明しない限り、決定的な経験則は得られそうにないのである。

2. 界面抵抗係数の定義

二層流の界面抵抗係数は、種々問題点を含みながらも次式の係数 f_i として定義される。¹⁾

$$\tau_i = f_i \frac{\rho}{2} (\bar{u}_1 - \bar{u}_2) |\bar{u}_1 - \bar{u}_2| \quad \text{----- (1)}$$

ここに τ_i は、界面での剪断応力、 $\bar{u}_1, \bar{u}_2$ はそれぞれ上下層の平均流速である。この式(1)をもって界面の抵抗係数とすることの是非論は、実は本質的で重要な問題であるが、 f_i の経験則を決定しかねている現在にあっては議論が進めたい状態にある。又 τ_i の直接測定が不可能であることから、現実の界面の上下層について成立する運動方程式中の界面における剪断応力を(1)式右辺で置換し連続式を用いて f_i についてまとめた次式により、間接的に f_i を求めるのが普通である。²⁾³⁾⁴⁾

$$f_i = -\frac{2g}{|\bar{u}_1| \bar{u}_1} \left(\frac{h_1 h_2}{h_1 + h_2} \right) \left\{ \frac{\partial h_1}{\partial x} \left(\varepsilon - \frac{\bar{u}_1^2}{g h_1} \right) - \frac{h_2}{2 \bar{P}_2} \frac{\partial \bar{P}_2}{\partial x} \right\} \quad \text{----- (2)}$$

ここに h_1, h_2 は上、下層

の厚さ、 $\varepsilon = (\bar{P}_2 - \bar{P}_1) / \bar{P}_2$ 、 $\bar{P}_1, \bar{P}_2$ は上下層鉛直断面平均密度、 g は重力加速度である。ただし式(2)は界面の上下層の流速を各層について平均化された方程式をさらに簡単化し⁵⁾式から得られており、速度分布のちがいはる効果は測定精度の如何にかかわらず無視されることになる。

3. 天塩川における界面抵抗係数

序文にも述べたごとく、散乱が問題となる f_i はすべて自然河川の塩水楔に関するものに限られるので、ここでは天塩川において f_i がどのような値をとるか、昼夜連続観測の記録をもとに考察してみることにしよう。

天塩川は周知のとうり比較的潮差の小さい(20cm内外)日本海に河口を有する河川であって、その潮汐の影響は外見上非常に小さく、これまでの f_i の算定においても無視し得るものと仮定されてきた。この仮定は、塩水楔

が、準静的に挙動すると考えることに等しく、少なくとも観測中には定常状態を保つであろうという推定に主脚しているが、その周期の長さと潮差の程度から無理からぬ仮定である様に見える。ところが最近、詳細な観測によってこの僅かとも思える潮汐によって、塩水楔の界面が意外に大きく変動することが分かってきたのである。ここで潮汐によって二層流れがこうなる影響を示すため、柏村・吉田及び筆者らが天塩川において得た昼夜連続観測の結果のうち尤も算定に必要なデータを図-1, 2に示しておこう。ここに図-1は昭和49年8月23日～24日における1時間おきに25時間連続観測した結果であり、流量は終日ほとんど変化なく96m³/sであって、天候も快晴に近い、風のほとんど無い良い条件のもとで観測されている。又図-2は昭和50年10月2日～3日における筆者らの同様の観測結果で、平均流量44m³/s程度で強風と多少の雨を伴った悪天候下で観測されたものである。なお観測は河口上流0.5kmとそのさらに上流4.6kmの流心で行なったが、天塩川は河口から上流7kmにわたればほぼ一様な幅の直線に近い河道を有し、河床の起伏も平坦に近いことから、尤も観測には最も適した場所を選定しているといつてよい。図-1, 2から表層の平均流速が潮汐周期をもって約40cm/sの振幅で変動しているのが見えるが、このことは、上層流量自体も同じ程度で変動することを示しており、僅かな潮差であっても大きな流量変化をひきおこすことが分かる。従って仮に感潮部で適当な時刻に一回だけ観測した流量から平均流速 u_1 を求め、これを式(2)に用いて h_1 を算出しようとするに相当に散乱した h_1 を得る可能性があるものと思われる。しかしこれまでの h_1 の算出に使用されてきた u_1 は、たまたま上流遠方の、潮汐をほとんど感じない所での流量を観測点での上層断面積で除したものがほとんどであって、 h_1 の散乱の直接原因とはなっていない。次に水位変動について注目すると、表面では振幅15cm程度の潮差に等しい僅かな変動を見るにすぎず、 h_1, h_2 を通じて h_1 に与える影響は非常に小さい。他方界面の水位変動は表面のそれに比して数倍の振幅を有することが分かり、その位相は上、下流観測点間で、特に谷の部分において相異していることも分かる。この位相のずれは界面変動が上昇するとき

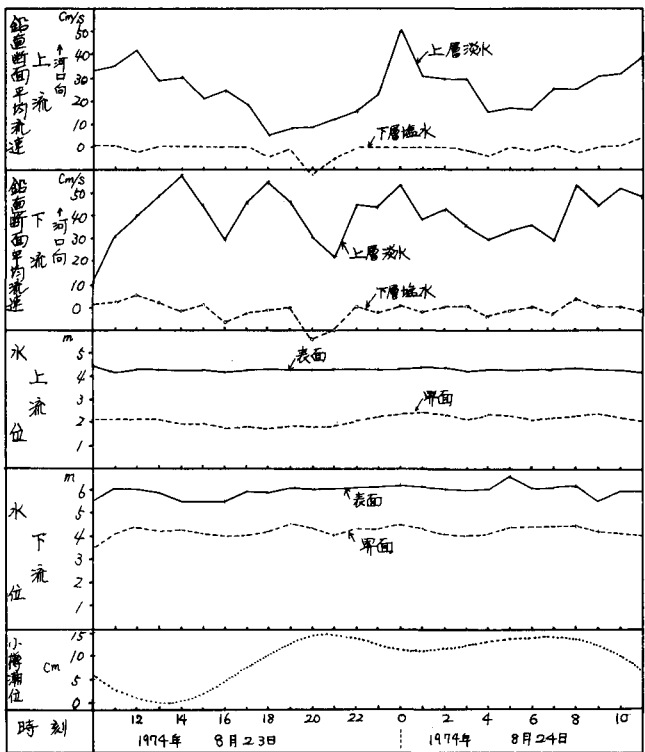


図-1

$$\varepsilon = 0.02265 \quad \bar{\varepsilon} = 1.0234 \quad \frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial x} = -2.609 \times 10^{-7} \frac{1}{m}$$

$$\bar{u}_1 = 0.231 \text{ m/s} \quad \bar{h}_1 = 2.04 \text{ m} \quad \bar{h}_2 = 2.37 \text{ m} \quad \psi = 4.829 \times 10^4$$

時刻	上層流水 厚 h_1 (m)	上層流水 厚 h_2 (m)	下層流水 厚 h_3 (m)	下層流水 厚 h_4 (m)	$\bar{u}_1 \times 10^4$
10	2.30	2.05	2.50	1.55	-2.489
11	2.30	1.85	2.00	2.65	6.470
12	2.25	2.05	1.70	2.91	10.906
13	2.05	2.20	1.60	2.75	8.659
14	2.40	1.85	1.70	2.25	12.447
15	2.40	1.85	1.90	2.10	9.240
16	2.50	1.65	1.95	2.00	9.774
17	2.50	1.75	1.85	2.60	12.507
18	2.60	1.65	1.70	2.75	16.879
19	2.50	1.75	1.50	3.15	18.828
20	2.50	1.70	1.60	2.95	16.879
21	2.50	1.75	1.90	2.65	11.792
22	2.20	2.03	1.80	2.85	8.269
23	2.05	2.20	1.80	2.85	5.624
0	2.00	2.28	1.70	3.00	6.492
1	2.00	2.30	1.90	2.85	3.102
2	2.10	2.21	2.00	2.60	3.017
3	2.15	2.03	2.00	2.55	3.785
4	2.10	2.20	2.00	2.65	3.039
5	2.07	2.18	2.00	2.95	2.632
6	2.20	2.08	1.90	2.75	6.577
7	2.10	2.17	1.80	2.90	6.564
8	2.10	2.19	1.75	3.00	7.480
9	2.00	2.25	1.80	2.20	4.314
10	2.10	2.10	1.80	2.65	6.297
11	2.10	2.05	1.90	2.55	4.565
12	2.24	2.01	1.83	2.72	8.382

表-1 (上ツキ[-]は時間平均値を示す)

内部波速をもって上流に伝播する結果として説明されているが、これま⁶⁾でのような観測時刻を配慮しない測定結果を用いる場合、この位相のずれが式(2)の $\partial h_1 / \partial x$ に多大な影響を及ぼすを著しく散乱させる原因となる。事実 h_1, h_2 を図-1, 2 から読み取り h_1 を各時刻について計算した表 1, 2 からオーダーを超す非常に散乱した結果を読み取ることができ、これまでに得られている h_1 面上の観測値と比較しても、これまで以上に散乱した値の得られる可能性のあること 容易に知ることができる。さらに強調しておきたい点は、得られた h_1 が非常に潮差の小さい河川で、しかも観測点間の距離が 4.6 km に及んでいるにもかかわらず、この様に著しく散乱した値を得てしまうことであり、いかに潮汐による影響を無視することが重大な誤差をまねくか、分かるであろう。

4. h_1 値散乱の他の原因

これまで実際の河川における h_1 の散乱の原因として、専ら潮汐のみを考察してきたが、ほかにも程度の差はあるものの数多く存在する。しかしオーダーを超える様な h_1 の散乱が生ずるには、よほど特殊な流れを強いる河道を有する場合に限られる様に思われるのである。又そうした特殊な流れのもとでは、通常と著しく異なる場合あるいは水温分布を示すであろうから、界面の状態が h_1 の算出に⁷⁾適当か否か、事前に判断できるはずであり、これまでに得られた h_1 の中に、そうした特殊な界面に関するものが入っている可能性はほとんど無いであろう。その他定義のし方によって、異なる淡水厚 s_{h_1} 、あるいは潮汐に比して小さい周期の内部波による h_1 の散乱等も考えられるが、その h_1 に与える影響はいずれも小さく当面問題にならない。又一次元的取扱いによって(2)式が導出されている関係上、鉛直速度成分の比較的大きい塩水楔の先端部あるいは河口近傍の界面を使用すると h_1 が散乱するのが普通であるが、この事実は当初から認識されても、これまで得られた h_1 については考慮する必要がないものと思われる。以上のべたごとく、オーダーを超える h_1 の散乱は理論上の誤差では到底説明しきれないものであり、その散乱の原因はもっと本質的な要因にあるといわざるを得ない。その本質的な要因としては、勿論これまで得られた h_1 がどのような状況下で観測されたものであるか詳細に検討しなければ判明しないが、現在のところやはり潮汐

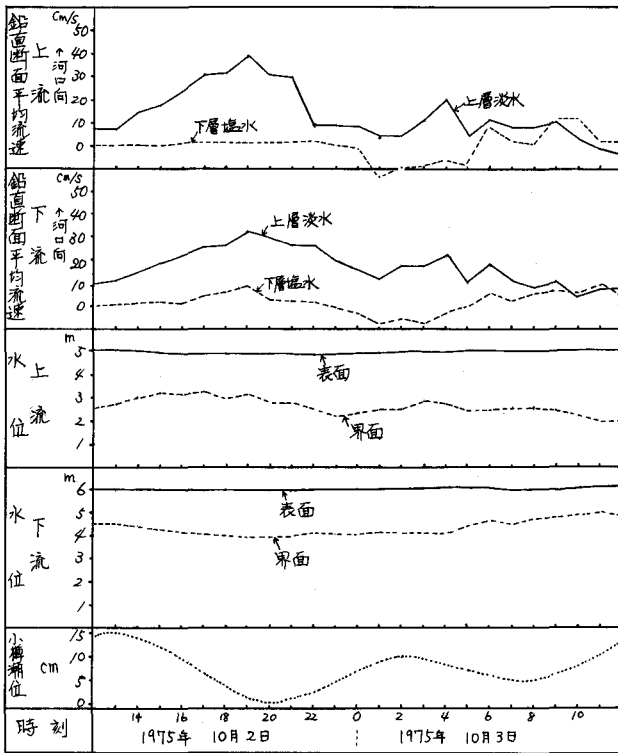


図-2

$$E = 0.02265 \quad \bar{E} = 1.0234 \quad \partial \bar{E} / \partial x = -2.609 \times 10^{-7} \text{ 1/m}$$

$$U_1 = 0.109 \text{ m/s} \quad \bar{U}_1 = 1.96 \text{ m} \quad \bar{U}_2 = 2.29 \text{ m} \quad \psi = 5.073 \times 10^3$$

時刻	上流淡水 厚 h_1 (m)	上流塩水 厚 h_2 (m)	下流淡水 厚 h_3 (m)	下流塩水 厚 h_4 (m)	$f_1 \times 10$
12	2.40	1.66	1.50	3.11	8.183
13	2.20	3.31	1.50	3.11	7.287
14	2.00	2.33	1.55	3.06	4.409
15	1.80	2.48	1.65	2.94	1.848
16	1.80	2.37	1.80	2.76	0.576
17	1.73	2.45	1.90	2.64	-0.856
18	1.90	2.27	1.95	2.61	0.126
19	1.78	2.35	2.00	2.49	-1.307
20	2.09	2.06	2.05	2.48	0.860
21	2.08	2.04	2.00	2.46	1.184
22	2.34	1.79	1.60	2.91	6.810
23	2.60	1.58	1.80	2.74	7.421
0	2.50	1.72	1.75	2.84	7.074
1	2.37	1.91	1.60	2.96	7.230
2	2.37	1.94	1.70	2.89	6.426
3	2.10	2.19	1.65	2.96	4.449
4	2.25	2.03	1.75	2.89	4.941
5	2.55	1.78	1.50	3.06	9.839
6	2.00	2.32	1.30	3.34	6.368
7	2.50	1.81	1.50	3.09	9.292
8	2.40	1.88	1.30	3.31	9.982
9	2.45	1.76	1.20	3.36	11.098
10	2.57	1.69	1.20	3.44	12.361
11	3.00	1.31	1.10	3.61	17.423
12	3.00	1.35	1.30	3.39	15.776
$\bar{h}$	2.30	1.95	1.62	2.73	6.411

表-2 (上向き[]は時間平均値を示す)

の影響の無視が有力と思われる。

5. 定常流河川における界面抵抗係数の推定

次に周期運動をする二層流の測定から定常界面の f_i を推定する方法を考察してみよう。勿論この考察は、正しくは運動方程式に立入って行なうべきであるが、周期運動をする二層流の時間平均流れが定常二層流とほぼ等しいと仮定すれば、理論的考察なしに時間平均の周期運動界面の抵抗係数が定常界面の抵抗係数に一致するといえる。ただ周期運動をする塩水楔の時間平均長さは定常塩水楔より短くなるのが普通で、上述の議論には多少問題がある。しかし天塩川のごとき潮差の小さい河川での塩水楔の変動の割合はさきわめて小さく f_i を算定する上にあまり大きな誤差を生ずるとは考えられない。いずれにしても理論的考察を進めてその誤差の程度を調べておく必要があるが、試みに先の天塩川のデータを使用して、時間平均の界面抵抗係数を計算してみると表-12の時刻 $\bar{t}$ のごとく f_i - ψ 平面では図-3のごとく記号 $\odot$ で示される。この僅かなプロットとこれまでの水槽実験による f_i とからでは勿論一本化された経験則を得ることはできないが、今後上述のごとく配慮された平均の f_i を求めることによりこれまでよりは散乱のない f_i - ψ の関係が見出せるものと思われる。

さてこれまで自然河川における f_i の散乱についてのべてきたが、水槽実験に関する f_i についても一つの大きな問題が残されている。それは二次元ジェットについて f_i を求めた岩崎教授らの結果が塩水楔の f_i と非常に異なるという問題である。この相違については今のところ界面波の生成条件の差異にあると推測されているが、吉田によれば、サイクロイド波形の発達する界面での f_i が他の層流状態での f_i の傾向からずれて岩崎教授らの求めた f_i の傾向を持つようになる⁴⁾ことが分かっており、ある程度先の推測を裏づけていて興味深い。又先に算出した天塩川での時間平均の f_i は、岩崎教授らの求めた f_i と塩水楔の層流の界面に関する f_i の延長の交点近くにあつて、自然河川における f_i がどのような傾向になるかまったく予断を許さない。こうしたことから今後 f_i の経験式を得るにあつては、界面波の発生の有無により分岐した経験式を得る可能性もあることを念頭において研究が進められる必要がある。終るにあたり親しい御協力いただいた北大工学部柏村正和教授をはじめとする工業力学第2講座の諸氏に心から感謝の意を表します。

文献 1) 嶋：成層密度流の界面現象に関する水工学的研究 (昭49) 2) 桑田・

堀口：第7回沿岸工学講演会報告集(1960) 3) 吉田：第29回年報 概説集 I (昭49) 4) 吉田：土木学会北海道支部論文報告集(昭50) 5) 柏村：北大工学部研究報告 第28号 (昭57) 6) 吉田・柏村：第22回沿岸工学講演会報告集(1975) 7) 吉田：第30回年報 概説集 I (1975)

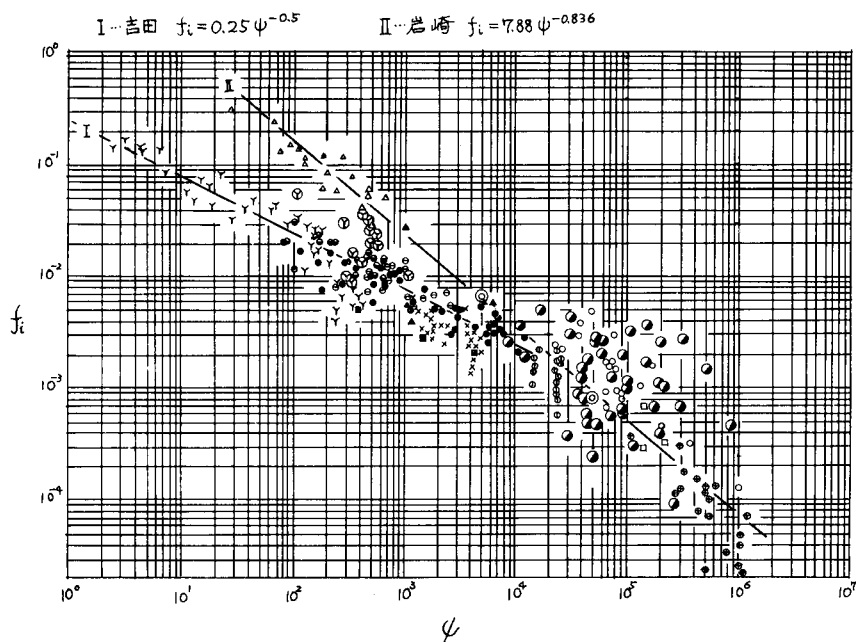


図-3

- △ 岩崎
- ▲ 桑田・堀口
- 大坪・福島(石狩川)
- VALEMBOIS
- 椎貝・玉井
- ① 金子(伏木港)
- × " (実験)
- 中村・阿部(神通川)
- " (九頭竜川)
- ⊖ " (実験)
- ⊕ 須賀・高橋(利根川)
- "
- Y 吉田(実験-定常界面)
- ⊙ 吉田(実験-不定界面)
注: C流界面
- ⊙ 吉田(天塩川-時間平均値)