

二成層密度流の境界面附近における乱れの一計測

東北大学工学部 正員 岩崎敏夫
東北大学大学院 学生員 阿部至雄

1. はしがき

河口などで発生する密度流的諸問題の中には、水質汚濁や大気汚染とも関連して、流れの場の安定度と拡散係数との関係など解決に迫られてゐる問題も少なくない。ところが、そこに生じる現象が乱流現象であるためそれらの問題の解決に一層難しくしてゐる。そこで、その種の乱流拡散現象を解明してゆくためには拡散機構を知るとともに、乱流の特性を明らかにしてゆく必要が生じてくる。

密度流などの拡散問題への最も直接的なアプローチの仕方は、流体の微小部分における拡散物質の保存の条件より導かれる拡散方程式に基づく方法であるが、この場合には拡散係数が問題である。一般にそれは一定でなく濃度・時間・場所などの関数であつて、流速その他の平均的特性に関して明白に表わすことは非常に難しい。そこで、現象の比較的安定した状態に着目し、不等流的に把握することにより、内部境界面の働くせん断応力によつて、それらの現象を解明しようとする方法がある。この系列の研究は純粋な摩擦抵抗や内部波発生に基づく造波抵抗などの主因と求める所まで研究は進んでゐる。また、現象の不安定な状態に着目し、乱流的立場から Orr-Sommerfeld Type の発生理論に基づいた不安定問題としての扱ひもあるが、実験的裏付けと得ることはかなり難しい。一般的に言へば、乱流の実験的研究と困難にしてゐる基本的要因は、乱流のデーターをいかにして入手し、その時々刻々変化する膨大なデーター量とをいかに処理して、然る後、その測定結果とどのようにして解析・評価してゆくかの点にある。

ゆゑわれらは、塩塩境界面の不安定状態および乱流拡散について研究するため、速度変動の計測と塩分の輸送速度によつてあこなつたが、今回さらに熱線流速計を用いて精度のある測定をあこなつたので、ここに報告する。

2. 実験

実験用水路は、長さ 3.8 m 、幅 15 cm 、深さ 30 cm の二次元水路で、その水路上流側にセキ高 10 cm 、長さ 182.4 cm の広頂セキが据ゑてある。その水路の勾配は水平に調整され、また、塩水は広頂セキセキ高 $(H_1) 10\text{ cm}$ で注入し、淡水層 (H_2) は実験流量 Q が 1.2 l/sec のとき、 10 cm 以内の水路の下流にあるセキによつて調整された。実験は密度差が 0% 及び 0.019% の下層静止の場合によつて、それぞれ、広頂セキセキ端と流程 $x=130$ とし、そこから下流へ 10 cm 毎に $140, 150, 160$ の各断面において、鉛直上から $y=0$ (広頂セキセキ頂)、 $0.5, 1.0, 1.5\text{ cm}$ の各測点で乱流の測定とあこなつた。流程 130 での断面平均流速 $U = (7.9\text{ cm/sec})$ と用いたときの $Fr = U/\sqrt{gH_1}$ 及び $Re = UH_1/\nu$ は、それぞれ 8.0×10^2 及び 6.32×10^3 であつた。

3. 実験結果に基づく解析

図-1 に得られた速度変動の記録の一例を示す。そのようなデータは、一般には定常確率過程とみなされるが、その測定結果を評価する際に注意しなければならないことは、測定器の感度 (周波数応答

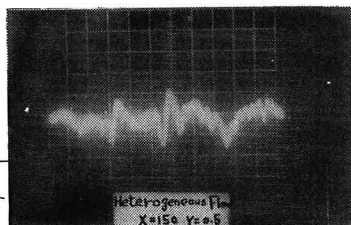


図-1 速度変動の記録の一例

特性) S や記録の読み取り間隔(平均化時間) Δt 及び記録時間 T が有限であることなどによって生じるスペクトルの歪みの問題である。すなわち、測定あるものは解析のとき、近似的に $1/2S$ (cps) 以上および $1/2T$ (cps) 以下の周波数成分はすべてカットされるかと同じ結果になってしまう。 $T/S=100$ の場合のこの関係を図2に示す($T \gg \Delta t \gg S$)。図中の $G(T,S)$ は計器のピックアップを示すものであって、それ故、得られたデータは計器の感度内、すなわち $G(T,S)=1$ の領域内で区分し、解析されるべきでない。すでに周知の如く、

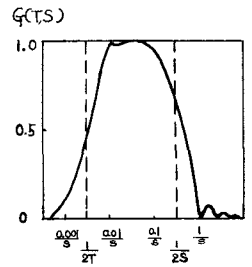


図2 $G(T,S) \sim 1/S$

この種のスペクトル解析の方法には BLACKMAN & TUKEY の方法と COOLEY & TUKEY の方法とがある。実際のデータ処理は、いったん アネモメーターの出力である速度変動のデータとデータレコーダーの、7磁気テープの収録し、その後そのデータと相関計に掛けることにより、生の自己相関函数 $R(r)$ と求めた。次に、それらの相関から WIENER-KINCHINE の関係式を用いてパワー・スペクトルと求めた。

$$P\left(\frac{r}{M}, \frac{1}{2\Delta t}\right) = 2\Delta t \left\{ R(0) + 2 \sum_{k=1}^M R(k) \cos(2\pi \frac{r}{2M} k) + (-1)^k R(M) \right\} \quad r=0, 1, \dots, M \quad (1)$$

さらに、SPECTRAL WINDOW として HANNING のものを用いて、(1)式で得られたスペクトルの平滑化を施した。

$$W\left(\frac{r}{M}, \frac{1}{2\Delta t}\right) = \sum_{m=-M}^M a_m P\left(\frac{r-m}{M}, \frac{1}{2\Delta t}\right) \quad r=0, 1, \dots, M \quad (2)$$

ここで、 $\sum_{m=-M}^M a_m = 1$ であり、 $a_0 = 0.50$, $a_1 (=a_{-1}) = 0.25$ である。

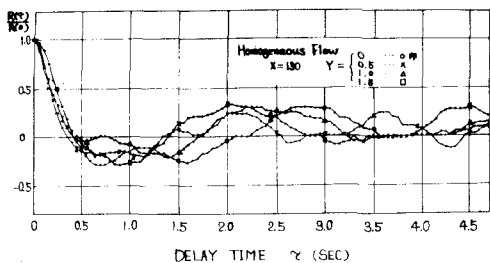
なお、計算の際のデータ読み取り間隔は 50 msec、LAQ の最大値 M は 95、計算時間は 43 秒であった。また、使用したアネモメーターの周波数応答は 350 kHz であるが、解析の都合上、0.36 Hz 以下および、6.6 Hz 以上の周波数成分は相関を求める過程でカットした。自己相関 $R(r)$ およびスペクトル $W(f)$ の計算結果と流程 130, 140, 150, 160 の場合について、図3および図4を示した。

4. 計算結果に基づく考察

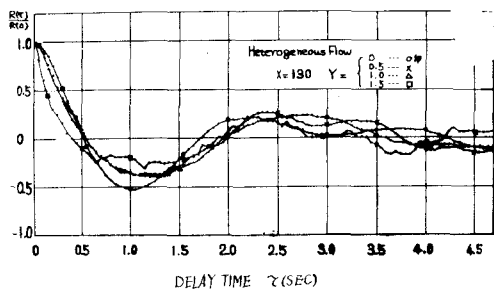
次に、得られた計算結果から、若干の傾向を簡単に考察する。

図4-1からわかるように、均質な流れの場合、各測点とも全体的な傾向として卓越周波数から高周波側にかけてのスペクトルの減衰の仕方は Kolmogoroff の言う $-5/3$ 乗則に比較的類似した傾向を示している。また、その卓越周波数は流程が 140 程度までは多少ばらつくといふものの、流程が 150 にもなると、水深方向にも、ほぼ 0.4 cps 程度で卓越した渦が支配的になってきている。図3-1からは、相関が零になる Time Lag は約 0.4 ~ 0.5 秒の範囲で各断面とも水深方向に亘りほぼ一定であることが知れる。

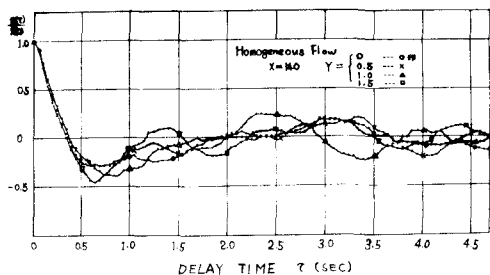
次に、不均質な流れになると、図3-2からわかるように、その Time Lag は流程が 160 の測定断面で約 0.3 秒程度で一定に近づくが、140 及び 150 ではかなりばらつく。また、全体的に相関が零になるもの、均質な流れに比較して早くなる。それ故、一応密度勾配によって乱れのスケーリングが減少していると考えられる。このことは図4-2のスペクトルのピークの高周波側への移動からわかる。流程が 150 の方が 0.5 および 1.0 の測点においてその傾向がよくあらわれている。また、全体的なスペクトルの形も不規則になり、支配的な渦のしめる周波数帯も広くなっている。したがって、内部境界面の影響が上部に直接顕著に及びるのは界面上の狭い領域で、それより上では乱れのエネルギーは減衰し、比較的定常的な乱流現象と呈していると思われる。



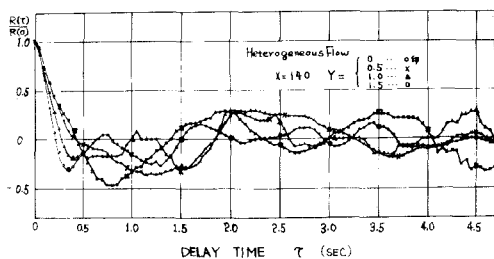
㉔ 3-1-1 X=130



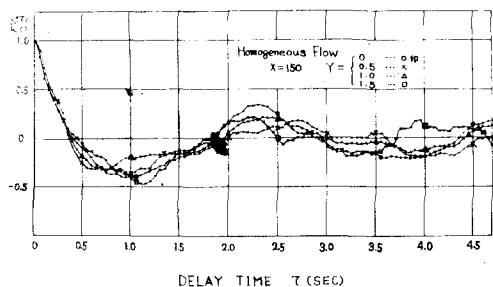
㉔ 3-2-1 X=130



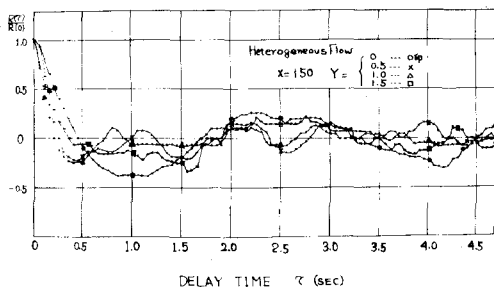
㉔ 3-1-2 X=140



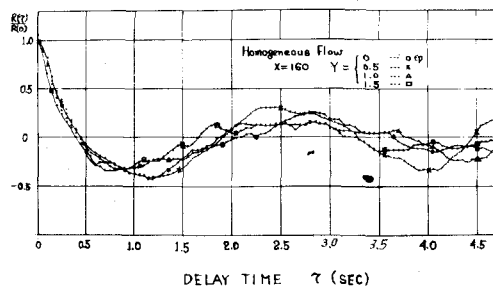
㉔ 3-2-2 X=140



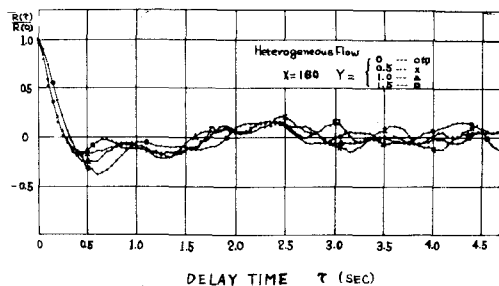
㉔ 3-1-3 X=150



㉔ 3-2-3 X=150



㉔ 3-1-4 X=160



㉔ 3-2-4 X=160

均質流れにおける自己相関関数

不均質流れにおける自己相関関数

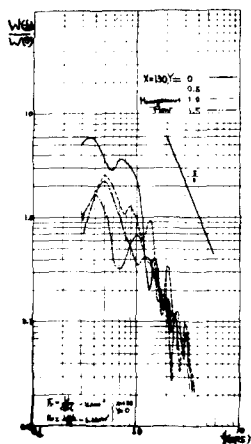


図4-1-1 $X=130$

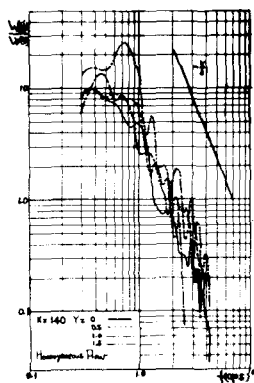


図4-1-2 $X=140$

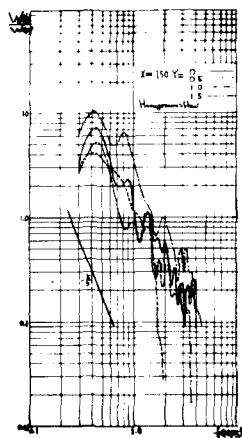


図4-1-3 $X=150$

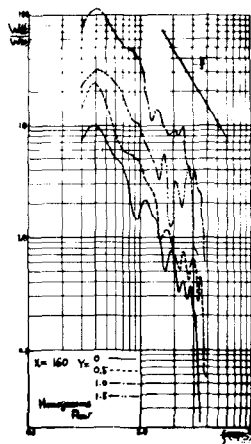


図4-1-4 $X=160$

均質流れにおけるパワースペクトル

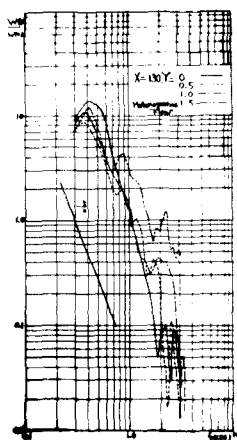


図4-2-1 $X=130$

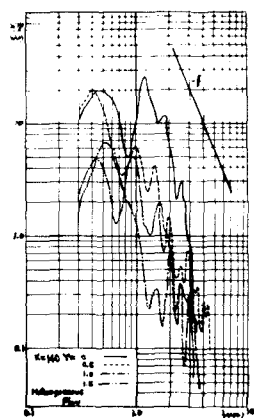


図4-2-2 $X=140$

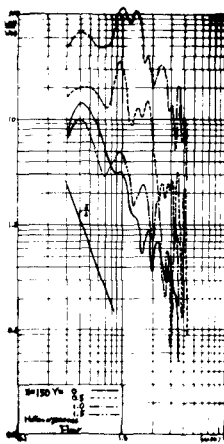


図4-2-3 $X=150$

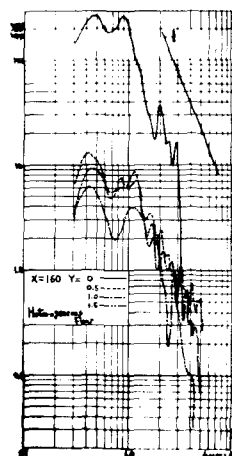


図4-2-4 $X=160$

不均質流れにおけるパワースペクトル

5. あとがき

土砂流⁽⁴⁾のような密度勾配をもった流れでは、その流速分布や抵抗係数が均質の流体と異なることはすでに知られているが、一般に言われるように、塩分濃度の变化による密度勾配によって流れのスケールは縮小していることがわかる。また、淡塩境界面附近の乱流拡散現象に内部境界面の影響が、直接顕著に及ぶのは、界面上、たかだか淡水層の10%程度の狭い範囲に限られるようである。さらに、流れのエネルギーやその透散率とか、渦径、拡散係数などとの関連について、定量的な把握を試みるとともに、濃度変動とか界面の変動とか流れの場と可視化することにより、もっと有機的な考察も合せてする必要があるので、今後これらの種の研究と継続してゆきたい。なお、スベフトルの計算は、東北大学計算センターのNEAC シリーズ2230 および2200を用いておこなった。

最後に、実験およびデータ整理にあたって、東北大学工学部学生三村寛一郎君に多大の労と煩ひした。ここに記して感謝の意を表したい。

参 考 文 献

- (1) W.H.Munk and E.R.Anderson "Notes On theory of the thermocline" Journal of Marine Research. vol.7. No.3. (1948)
- (2) T.H.Ellison and J.S.Turner "Mixing of dense fluid in a turbulent pipe flow" Journal of Fluid Mechanics. vol.8. (1960.)
- (3) A.Ippen and Harleman, D.R.F. "Steady-state characteristics of subsurface flow," Gravity wave Symposium, Nat. Bur. of Standards, Circulation, 521, (1961)
- (4) G.H. Kenelgan "Interfacial instability and mixing in stratified flows." Journ. of Res. of the National Bureau of Standards, Vol.43, Nov., (1949)
- (5) 岩崎 "二成分密度流における乱流拡散について" 土木学会、第19回年次学術講演会、(1964)
- (6) 椎貝 "塩水楔の研究。(修士論文)、(1964) "on the resistance coefficient at the interface between salt and fresh water" 土木学会論集和洋(1965)
- (7) G.I.Taylor "Effect of variation in density on the stability of superposed streams of fluid," Proc. of the Royal Society of London, vol.132, Aug. (1931)
- (8) S. Goldstein "On the stability of superposed streams of fluids of different densities" Proc. of the Royal Society of London, Vol.132, Aug. (1931)
- (9) J.W.Miles "Internal waves in a continuously stratified atmosphere or ocean" J. Fluid Mech. (1967), vol.28, Part 2.
- (10) 岩崎 所部 "淡塩境界面における乱流拡散-実験" 第14回海岸工学講演会講演集 (1967)
- (11) 白野 "河川の乱流現象" 1966年度土木学会第2回夏季研修会講演集 A 部、河川コース。
- (12) R.B.Blackman and J.W.Tukey "The measurement of power spectra from the point of view of communications engineering" Dover.
- (13) J.W.Cooley and J.W.Tukey "IEEE Transactions on audio and electroacoustics" Vol. AU-15 No.2 June (1967)
- (14) V.A.Varoni "Transportation of suspended sediment by water" Proc. A.S.C.E. Vol. 70, (1944)