

淡塩二層流における乱れ拡散に関する研究 (1)

岩崎敏夫*・阿部至雄**

1. はじめに

相対速度差によって生じる内部境界面の不安定問題は、古くは Helmholtz (1868), Kelvin (1871) に始まり, Taylor (1931), Goldstein (1931), Syngé (1933), Miles (1961) ら多くの理論的研究がある。また他方, 内部境界面の種々の現象については Ippen と Harleman (1952), Macagno-Rous (1961), 岩崎 (1964) らが実験に基づく研究を行っており, とくに密度混合あるいは連行に関する研究としては Keulegan (1949) および Ellison と Turner (1959) らのものがある。しかし, 対象としている流況は相対速度差が小さく安定した内部波が生じている場合とか, それより乱れた状態であっても乱流場や拡散量は平均的に取り扱われている。

われわれは前報¹⁾において, 相対速度がある程度大きくなると内部スペクトル波群が形成され, さらに内波が砕けて下層の流塊が乱れのために上方にまきあげられ, いわゆる乱れ拡散が生じ, この乱れ拡散が密度混合と連行のトリガーとしての役割を果たすことに着目し, ホットフィルム アネモメーターを用いて流れ方向の速度変動を測定して, 内部境界面付近の局所的流速分布, 乱れのエネルギー, 渦径およびスペクトルなどから乱れ場の特性を考察し, また, 拡散過程と密接な関係にあるオイラー相関や拡散現象を代表する拡散係数を求めた。

このような上層流の流況は上層へ放出された拡散物質の挙動を支配することはもちろん, それらの拡散源たる境界面の挙動へも影響をおよぼしており, また, その逆のことも考えられ, いわゆる“乱れと拡散物質との相互作用”が存在する。

濃度変動あるいは内部波のスペクトルの測定は椿・浜村・橋本²⁾や岩佐・井上・竹林³⁾らによってなされている。一方, 内部波のスペクトル形については Phillips⁴⁾は thermocline での密度が連続的に変化する場合に -3 乗則を導いており, 椿らは内部波を支配する不安定要素を $\left(\nu g \frac{\Delta \rho}{\rho}\right)$ と考えて次元解析によって -3 乗則を提示している。また, 日野・谷⁵⁾らは支配要素として Brunt-Väisälä 周期 $\left(-\frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial y}\right)^{1/2}$ に着目し同様に -3 乗則を

示し, さらに, 非混合型の場合の支配要素は卓越周数波で内部波に供給されるエネルギーの割合と風波の場合と同じく $\left(\frac{\Delta \rho}{\rho} g\right)$ であると考えて, それぞれ $-11/5$ 乗則および -5 乗則を導いている。

そこで, 今回われわれは水素気泡をトレーサーとして乱れ拡散場を可視化して現象を定性的に把握し, 次に, 濃度変動を測定することにより密度分布およびスペクトルを求め, 砕波を伴う内部スペクトル波群の挙動および上層にまき上げられた下層流塊すなわち塩水の挙動特性の考察を試みた。

2. 実験

(1) 実験装置および実験方法

実験装置および方法は既報¹⁾のものと同様であって, 長さ 3.8 m, 幅 0.15 m, 深さ 0.15 m の二次元水路を用い, 実験流量が 1.2 l/sec のとき, 比重 1.02, 水深 10 cm の静止塩水層上を淡水が淡水深 10 cm で流出する場合の二成層密度流について実験を行なった。また, 密度は温度によって変化するので実験中の温度変化はできるだけ少なくした。

濃度変動の測定断面は, 淡塩両層接触開始点を流程 $x = 0$ cm とし, その点の塩水層上面を $y = 0$ cm とし鉛直上向きに y をとり, そこから下流へ 10 cm ごとに, $x = 10, 20, 30$ cm および 65, 75, 85 cm の 6 断面とした。計測はそれらの断面について, Δy を 0.25 cm にとって約 2 分間行なった。また, およそ 2 時間の時間経過によって, 下層塩水の混入による淡水比重の変化は, 塩水消費量および測定開始時と終了時における淡水層の水位基準面の変化から換算して約 0.00016 であった。標準溶液の比重はボーメ比重計によって求めその有効数字は小数点以下 4 けたである。それゆえ, 30 分程度の時間経過に対する淡水の比重の補正は無視し, 測定開始時の比重 1.0016 をもって淡水の比重とした。なお, 塩水および淡水の平均温度はそれぞれ 7.7°C および 8.2°C で実験中ほとんど一定であった。

(2) 濃度変動の測定方法

図-1 は濃度変動測定のための Block-Diagram である。塩水の比抵抗は濃度差によって著しく変化するので, 塩水の比抵抗の変化を測定すれば濃度変動が求められる。そこで, 図-2 に示すような受感素子 (probe) 2

* 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 東北工業大学講師 工学部土木工学科

本をブリッジの相隣る 2 辺に接続し, probe 1 を濃度検出用に, 残りの probe 2 を回路の平衡をとりやすくするとともに, 温度補償のためのダミープローブとし用いた。このように, 通常のブリッジを用いて電極間の電気抵抗の変化を共和製 DPM-E 型ストレーンメーターを通して, 共和製 RMB-13 型電磁オシログラフ上に記録した。図-3 にオシログラフ上の記録例を示した。

次に, これらの記録を密度に変換するために, 塩水の比抵抗と濃度との関係をオシロ上のフレ δ と標準溶液 ρ (gr/cc) との関係において求め, その 1 例を図-4 に case I として示した。この図からもわかるように直線性は得られていないが, 2 次曲線によく近似でき, しかも再現性が確かめられたので, 測定開始時 (○印) と終了時 (●印) との平均値から求めた 2 次曲線をもってキャリブレーション曲線とした。

ところが, 測定高さが高くなると, 乱れ拡散によって拡散する小塩水塊の到達が観察されるにもかかわらず, 図-1 に示したブリッジ回路系ではその現象を感知し記録することができなくなる。そこで, そのような範囲の測定は図-5 に示した回路系によって行なった。この場合の記録例を図-6 に, また, キャリブレーション曲線の例を case II として図-4 に示した。この例は流程が 30

cm の所のものであるが, 比重 1.0032 の標準溶液に対し全変位 δ の約 80% が応答する。しかし, 図-6 から, オシロのフレ δ の最高はただだか 50 で, 比重にして 1.0021 程度である。

図-7 に温度の変化による密度の変化の割合を示した。実線は理科年表による密度 1.0 gr/cc (at 4°C) の変化の割合を示したもので, また, 実験値は縦のスケールをそれぞれ平行移動して示してある。この図は標準溶液作成時と較正時に温度差がある場合, 密度の補正をするために求めたが, 本実験での温度差は約 0.5°C であったので補正は省いた。

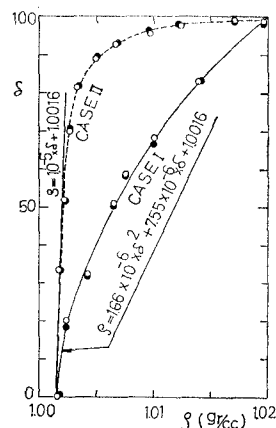


図-4 キャリブレーション

実験値は縦のスケールをそれぞれ平行移動して示してある。この図は標準溶液作成時と較正時に温度差がある場合, 密度の補正をするために求めたが, 本実験での温度差は約 0.5°C であったので補正は省いた。

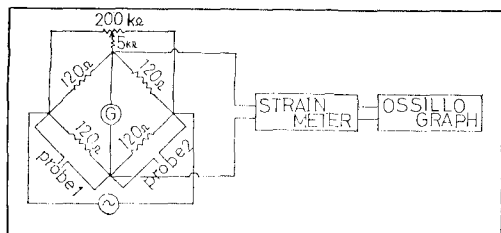


図-1 濃度変動測定のための Block-Diagram

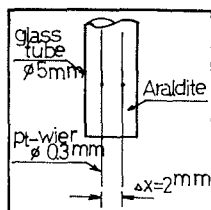


図-2 受感素子の構造

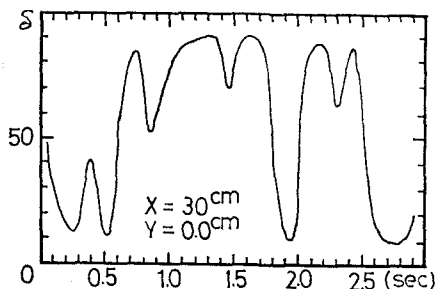


図-3 濃度変動の記録例

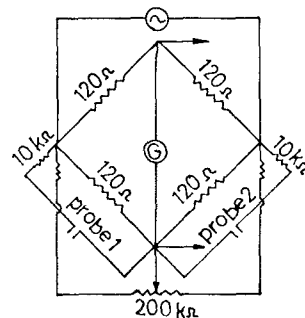


図-5 ブリッジ回路

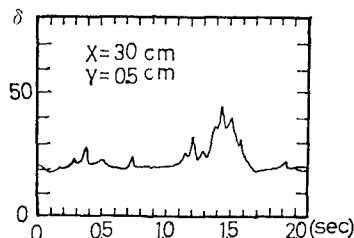


図-6 濃度変動の記録例

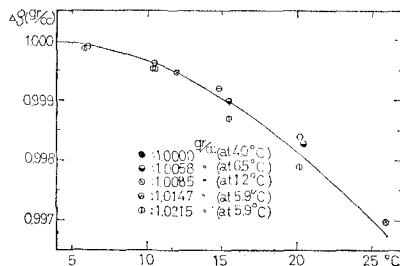


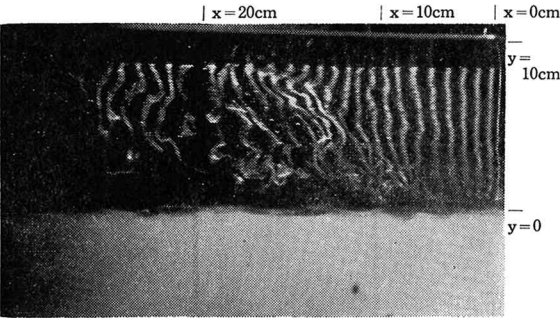
図-7 密度の温度による変化

3. 実験結果および考察

(1) 内部境界面付近の流況

内部フルード数は速度差のとり方に問題があるが、流程 $x=30\text{ cm}$, $y=1.5\text{ cm}$ の局所平均流速 5.8 cm/sec に対し 0.430 であり、そのときの内部レイノルズ数はほぼ 4.0×10^3 で、また Keulegan 数は 0.110 程度なのですべて不安定領域に入る。

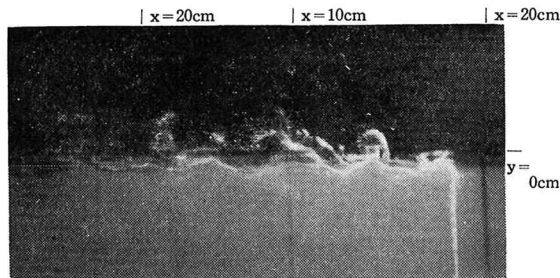
写真—1 は流下距離 $0 \sim 30\text{ cm}$ 付近の淡水層の流況を示したものである。パルス間隔は 8.5 Hz で、水素トレーサー源の白金線は流程 $x=0\text{ cm}$ の所においてある。流下距離が 10 cm を過ぎる付近から、下層塩水の存在による上層淡水の乱れの流況がよく観察される。



写真—1 流出付近の上層流の流況

頻度の高い内部波の波高はおおよそ 0.5 cm 程度で、周期はほぼ 1.2 秒前後であるが、同規模の内部波であってもすべてが砕波に関与するわけではなく、また、砕波の状態も流下距離の大小によって異なり、 $x=10\text{ cm}$ 付近までは内部波の先端が尖って徐々にまき上げられるが、流下距離が増すにつれ一度に放り出されるような砕波の状態も生じてくる。

砕波した小塩水塊は $x=0 \sim 30\text{ cm}$ の流下距離では界面上 $2 \sim 3\text{ cm}$ まで、また、 $x=65 \sim 85\text{ cm}$ 付近では $3 \sim 4\text{ cm}$ 程度まで達している。このように砕波し拡散する小塩水塊の状況を直接写真にとらえることはむずかしいので、小塩水塊の挙動を便宜的に水素気泡の挙動をもって代表させ、示したものが写真—2 である。写真—1 ではよく観察できないような顕著なタービュレンスによって上方に放出され拡散してゆく境界面付近の様子が観察される。



写真—2 内部境界面付近の流況

(2) 密度分布

図—3 または図—6 に示したような 60 秒間の記録を 0.1 秒間隔でカーブリーダーでもって読み取り、得られた平均密度の鉛直分布を図—8 に示した。

流下距離が小さい、淡塩接触開始付近 ($x=0 \sim 30\text{ cm}$) では、乱れのために上層にまき上げられる塩分は速かに希釈され、たとえば、流程 $x=30\text{ cm}$ の高さ $y=0.5\text{ cm}$ での密度は 1.0021 gr/cc

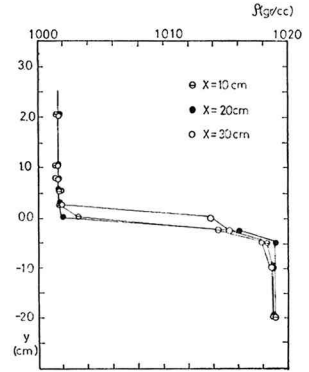
程度でほとんど一定である。このことは著者の 1 人が淡水流出付近の流速分布、密度分布の解析をする際に行なった仮定にほかならない⁶⁾。また塩水層内の密度の変化もわずかであって、安定性が高い流れのときのように鉛直混合量は少なく、流れの密度分布はほとんど不連続分布に近い。

流下距離が増し、流程が $65 \sim 85\text{ cm}$ 付近では鉛直方向の密度混合がとくに塩水層内で生じ、流れは連続的な密度分布形を有するようになる。このような鉛直混合がある場合、密度分布内に存在する変曲点を連ねた曲線の挙動は塩水くさび的性質を呈するとして知られているが、この見かけ上の内部境界面の高さは、 y が $0 \pm 0.25\text{ cm}$ 程度の範囲内で、流下距離の増大とともにその高さを増している。

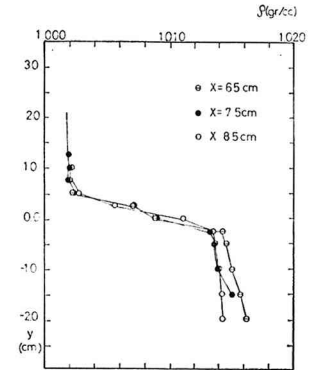
(3) 濃度変動 (内部波) のスペクトル

内部境界面付近での密度混合の特性を調べるために、濃度変動のスペクトルを Wiener-Khinchine の関係式によって求め、自由度が 30 の場合のものを図—9 に流程の関係において示した。また、図—10 は流程 $x=30\text{ cm}$ および流下距離の大きな場合の例として $x=75\text{ cm}$ での鉛直方向のスペクトルの変化を示したものである。

砕波をともなう内部スペクトル波群が形成され、密度が連続分布をしているような場合の内部波の波高測定は困難であると思われる。そこでわれわれは見かけ上の内



図—8.1 密度の鉛直分布
(流程 $x=0 \sim 30\text{ cm}$)



図—8.2 密度の鉛直分布
(流程 $x=65 \sim 85\text{ cm}$)

部境界面が $y=0 \pm 0.25 \text{ cm}$ の範囲に存在するものと考え、そこでの濃度変動のスペクトルから内部波群のスペクトルを考察した。

前述のように、流下距離が小さい場合の流れは密度混合も少なく、安定性が高いときのような流況を呈することを知った。そこで、図-9.1の流程が10 cmでのスペクトルの変化をみてみると、卓越周波数はほぼ0.8 cps

の所にあつて、そこから高周波側にかけてのエネルギーは周波数のほぼ $-11/5$ 乗に比例して減少し、さらに、約2 cpsの所からは風波でいう -5 乗則に近く、日野らが提示した非混合型の場合のスペクトル波形とよく合致している。また、高周波側における卓越した短周期成分の発達も小さく、上下層間のエネルギー授受が比較的バランスしていると考えられる。

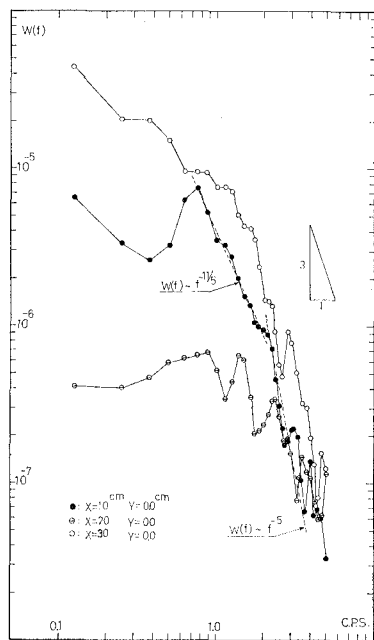


図-9.1 流程による濃度のスペクトル変化

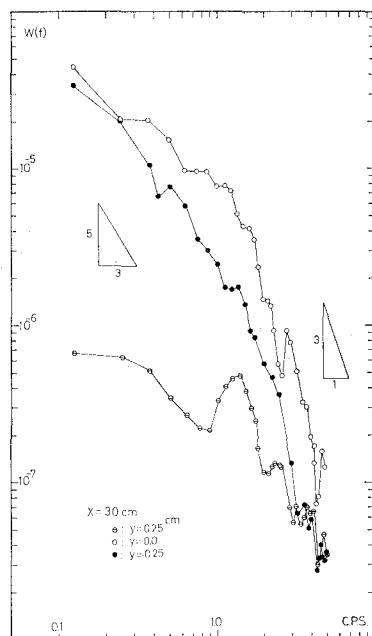


図-10.1 濃度スペクトルの鉛直方向の変化

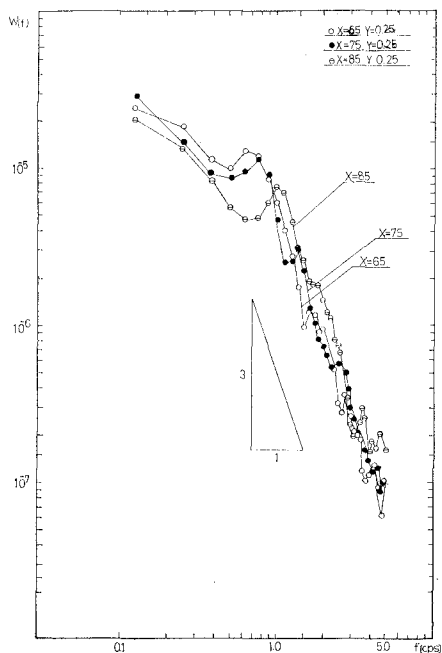


図-10.2 流程による濃度のスペクトル変化

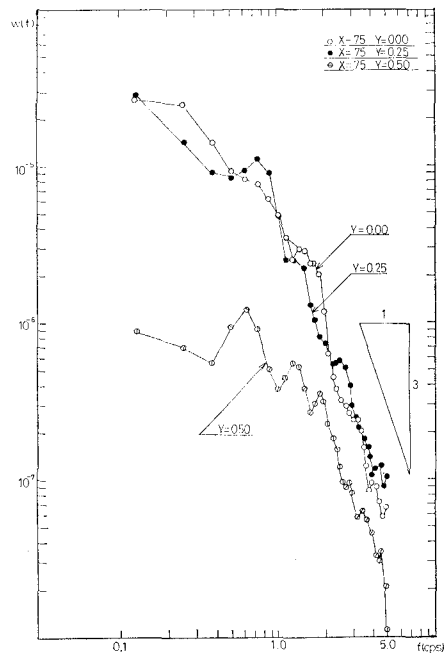


図-10.2 濃度スペクトルの鉛直方向の変化

次に、流程 20 cm のスペクトルをみると、その強さが相対的にかなり小さい。この傾向は図—8.1 に示した密度分布からもうかがえるし、また、既報¹⁾の流速分布においてもそうであった。流況観測およびスペクトルのオーダーから考えると、原因の一つとして噴流の影響による内部境界面の低下が考えられたが、この小規模水路特有の現象であるのかもしれない今後検討を要する。しかし、系全体のエネルギー分布に比し、高周波領域での短周期成分のエネルギーの発達とその急な減衰がほぼ 1.4 cps と 2.8 cps の所でみられるので、これら不安定な短周期成分の砕波などによる塩水塊の放出が活発になっていると考えられる。

そこで、流程 $x=30$ cm でのスペクトルをみてみると、内部波のスペクトルの強さが大幅に増している。また、周波数が 1 cps の所から高周波側にかけてのエネルギーの減少は—5 乗則に近く、—3 乗より急な減衰を示す。このことから高周波成分のエネルギーは砕波などによる拡散混合のために減衰していることがわかる。

次に図—10.1 から、流程 30 cm での濃度変動の鉛直方向の変化について考察する。高さ y が 0.25 cm の所のスペクトルの強さはかなり減少している。すなわち、この高さまで内部波の影響は直接および、塩分の挙動は上層流の乱れに支配されると考えられる。また、その上層流の乱れも界面の存在によって、影響を受けているので、エネルギーの減衰は全体として内部波の—3 乗則と同じような傾向を示している。

高さ $y=0$ cm および —0.25 cm の所は、波高がほぼ 0.5 cm の内部波の通過にともないその影響を直接受けている所である。高さ y が 0 cm の所で砕波に関与すると考えられる短周期成分のスペクトルの強さの増加がほぼ 3 cps の所にみられる。

次に、流下距離が大きい場合の例が図—9.2 および図—10.2 である。図—9.2 から、流程が 65, 75, 85 cm と増すにつれ卓越周波数がほぼ 0.6 cps から 0.75 cps, 1.0 cps と高周波側へ移動し、かつ、高周波領域ではエネルギーの増加があるが、逆に低周波側では減少している。しかし、巨視的にみた場合高周波側の平衡領域は Phillips らのいう—3 乗則をよく実証している。次に図—10.2 から、さきと同様に、流程 75 cm 付近では高さ y が 0 cm および 0.25 cm の所で内部波の影響を受けていることがわかるが、高さが 0.5 cm 程度になると内部波との直接的な関連性は消失することがわかる。

4. おわりに

写真—2 からわかるように、対象とした流況はかなり乱れており、顕著なタービュレンスによる拡散混合も観察される。このような流れにおける濃度および内部波

の特性に関して得られた結果を要約すれば、

(1) 図—8 から、流下距離が増すにつれ密度の鉛直混合は促進されるが、密度分布の形成は主に塩水層内に生じ、乱れのために上層にまき上げられる塩分は速かに希釈される。たとえば、流程 30 cm では拡散する塩分は内部境界面上 2~3 cm の高さまでおよぶが、その高さ y が 0.5 cm の所での塩水の比重は 1.0021 程度であって、淡水の比重 (1.0016) とほとんど変わらない。また、流下距離が小さい場合には、定安性が高いときの流れのように鉛直混合量は少なく密度分布は不連続に近い様相を呈する。

(2) 図—9 から、乱れ拡散などによって密度混合が生じ連続的な密度変化がある場合の内部波におけるスペクトル形は、Phillips, 椿, 日野らのいう—3 乗則に比較的良好に一致する。また、流下距離が小さく、たとえば流程 10 cm での安定性が高いと思われるような内部波のスペクトル形は日野らが非混合型の場合に提示した—11/5 乗則および—5 乗則に比較的良好に一致する。

(3) 図—10 から、乱れのために上層にまき上げられる塩分の内部波との直接の関連は、流出付近では内部境界面からほぼ 0.25 cm 程度離れると消失し、また、流下距離の大きい流程が 75 cm 付近においてはほぼ 0.5 cm 程度の高さと消失する。

定量的な濃度の測定を行なう場合には温度の変化による影響に十分注意することが必要で、とくに淡水温と塩水温とを一致させることが望ましい。また、乱れのため上層にまき上げられ拡散混合する塩分はたちまち希釈されることが実証され、速度変動の解析をするための有意義な手がかりを得た。

最後に、資料の整理などにあたって、東北大学大学院学生 日下 理 および北海道開発局渡部義信両氏の助力を得た。ここに記して感謝の意を表したい。

参 考 文 献

- 1) 岩崎敏夫・阿部至雄：“淡塩境界面付近の乱れ測定”，第 16 回海岸工学講演会講演集 (1969)。
- 2) T. Tsubaki, M. Hamamura and M. Hasimoto: “On the statistical properties of internal waves formed at the interface of arrested saline wedges”, IAHR, (1969), Vol. 3.
- 3) 岩佐義明・井上和也・竹林征三：“成層密度流における内部波の特性について”，第 23 回年次学術講演会講演概要 (1968)。
- 4) Phillips, O. M.: “The dynamics of upper ocean”, Camb. (1966)。
- 5) 日野幹雄・谷 順一：“二層密度流に関する一実験”，第 24 回年次学術講演会講演概要 (1969)。
- 6) T. Iwasaki: “On the shear stress at the interface and its effects in the stratified” Coastal Engineering (1964)