

二層流の表層流における変動速度について

金子 安 雄*

1. は し が き

河口の河道を航路および泊地として利用する河口港では、上流河川から輸送される土砂の沈殿・堆積により常時埋没の危機に直面しており、港の水深維持になやまされている。河口港での土砂沈殿堆積による水深の減少は港にとって、その機能を失う重要な問題であるにもかかわらず、いまだ埋没形式さえも不明な所が多い。

一般に河口付近の底層には海水が存在しているが、とくに河口港における航路・泊地の水深が上流河川部にくらべ局部的に過大な場合が多く、その底層には常に海水が侵入している。このような底層海水の存在は、河水で運搬される土砂の沈殿に重要な要素となっており、新潟港¹⁾の調査結果によれば、埋没土量のうち 20% 内外は掃流形式、65~70% は浮遊形式、その他となっており、浮遊物質の沈殿堆積には河海両水による混合層の形式が主因であると報告されている。

開水路における土砂輸送の力学的機構に関しては、掃流・浮遊形式いずれの場合についても古くから水路の水理量と底質の関連においてかなり明確な理論式が樹立されている。しかしながら海水の存在する河口部のこの問題、とくに埋没の主形式である浮遊物質の沈殿堆積機構に関しては、運動量輸送理論から河水（表層流）の渦動粘性係数の変化という取扱いにより、埋没の傾向を説明している例²⁾はあるが、土砂の堆積機構を明確に解析した例はきわめて少ない。これは現象の複雑化、構成要素の多様化、観測測定の困難、さらには地域特性などによるものであろうが、河口部における浮遊物質の沈殿堆積機構が解明され（非常に困難であるが）、河口部の水理量・地形などとの関係を見出し得たならば、河口港の埋没対策に一つの指針を与えることが可能であろうと考える。

以上のような観点から、河口港の埋没機構解析について密度流の実験を続けてきたが、今回報告するのは二層流の表層流の性質に関し、とくに乱れによる変動速度に注目し、表層流の乱れにおよぼす海水の効果について実験を行なったものである。しかしながら実験はその第一段階であり、いまだ流れの性質を決定するまでには至らないが、二、三興味ある結果が得られたのでここに述べ

る。

2. 実験装置および方法

(1) 実験装置

実験は長さ 22 m、幅 60 cm、深さ 50 cm 両面ガラス張り 2 次元水路で行なった。水路上流端には流量測定用矩形ぜきを取付けた樋頭水槽があり、水路下流端には海水を流入させるための混合槽がある。混合槽の下流側には全幅にわたり ($L=3.0$ m) 水位調節用の可動ぜきが設置されている。実験用の塩水は別に設けられた海水槽（貯水容量 80 m³）に海からポンプで揚水貯溜し、さらに槽上の高水槽に揚水し、水頭を一定に保持したのち径 3 in のパイプで海水槽に導水した。この導水パイプは水路にも連結され、海水の補給に使用できる。海水流量の調節はおのおのバルブによって調整され、水路内で塩水くさびを任意の点で定常的に保つことが可能である。なお水路の勾配はほとんど 0 である。

(2) 実験方法

実験を行なうについて現地河口港の現象を考えると、実験に考慮しなければならない要素として、河水の浮遊土砂量、浮遊砂濃度分布、粒径、海水の密度、海水の濃度分布、水深……数多くあり、これらのすべてを取り入れることは実験上不可能であり、また浮遊砂を考慮すると相似のうえでも困難があり、問題の本質を見失うおそれがある。したがって実験をできる限り単純化し、一つ一つの要素の効果を見出し得るような方法をとった。

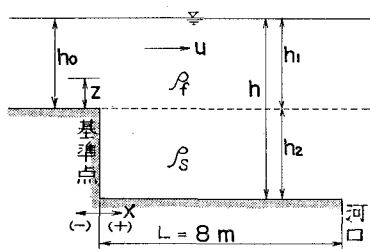
すなわち河水として清水を使用し、海水密度 $\rho \neq \text{const}$ 海水濃度分布は不連続な二層流を選定した（内部波による海水の拡散混合を極力生じないようにした）。そして実験は (i) 海水貯溜（境界面勾配水平）、(ii) 塩水くさび（境界面一定勾配）の case について、流量、水深を変化させて行なった。これを表—1、図—1 にそれぞれ示

表—1 実験 ケー ス

実験 (case)	河川部水深 (cm)	河口部水深 (cm)	流 量 (l/sec)	人工粗度 (n)	海 水 (形式)
1	10	10	5	なし (0.0108)	なし
2	10	19	5	あり (0.0190)	貯 溜
3	15	24	7.5	あり (0.0194)	あ り
4	10	10	3	あり (0.0184)	(塩水くさび) ($L=8$ m)

* 正会員 運輸省港湾技術研究所

図-1 河床図



す。水深の設定は河口端(水路と混合槽の接合部とする)より上流 8 m 点を水深基準点とし、あらかじめ淡水について下流端の可動ぜきを調節し固定した。したがって塩水くさびを発生させるため海水侵入によって水位が上昇し水深が増加してもせきでの調節は行っていない。また海水貯溜の case は水深基準点より上流に木製の河床盤を水路に挿入し上流端までの河床を約 9 cm 上昇させた。したがって海水貯溜部の長さは 8 m あり、水深は 9 cm である。

さらに水深基準点より上流の河川部と見なす河床には人工粗度として、亀甲金網(網目 2 cm^2 , $\phi=0.6\text{ mm}$)を二重に、水路上流端まで張り、河床からの乱れの発生を助長している。ただし、この人工粗度は塩水くさびの case では河口端まで河床全面に施したが、河水のみの実験(case 1)では取り除いた。

測定箇所は図-1の基準点より 1 m 間隔に、上流側 1~2 点、下流側 6 点を選び、それぞれの断面につき、水深 -1.5, -2, -4...以深河海両水の境界面まで 1 cm 間隔に水路の中心線に沿ってとった。ただし塩水くさびの case 4 は基準点をくさびの先端とした。水理量の測定は流速、塩分濃度、温度、水位とし、流速は小型プロペラ流速計を用い連続 2 分間の記録をとり、塩分濃度計による塩分分布、温度とともにオシログラフに記録させた。

実験中河海両水の境界面には波高 0.5 cm 程度の内部波が発生(碎波までは至らない)し、このため貯溜した海水が輸送されて、水深変曲点の河床盤角部と海水面に高低差が出現してくる。このためこの箇所では流れの動揺が生じ、内部境界面が攪乱される。そこでこれからの乱れの発生を極力防止するため、水路底から海水を補給し、河床と海水面は常に水平になるよう努力した。

なお実験に使用した海水密度は $\rho=1.019\sim 1.020$ であり、水温は $21.5\sim 22.5^\circ\text{C}$ の範囲である。

(3) 流速計

乱流の測定方法としては、hot-wire, hot-film または超音波による方法その他種々の方法がある。けれども本実験のように流体の密度が異な

り、かつ低流速であることから目的に合致した方法が見出し得なかった。そこで流れ方向の変動速度成分の測定に従来一般に使用されている小型プロペラ流速計を使用した。この流速計は外径 2.0 cm プラスチックの 4 枚羽根根であり、回転数の検出はプロペラの回転によってランプの光を切断するのをフォトランジスターで感知しパルスが発生させる方式で、1 回転に 4 パルスが発生する。流速と回転数の関係は $\bar{u}=0.996n+1.613$ の関係が $\bar{u}=60\text{ cm/sec}$ ぐらいまで成立している。なお始動流速の下限値は約 3 cm/sec 程度である。

図-2 にこの流速計の追従性を示す始動特性を图示し

図-2 始動特性(小型プロペラ流速計)

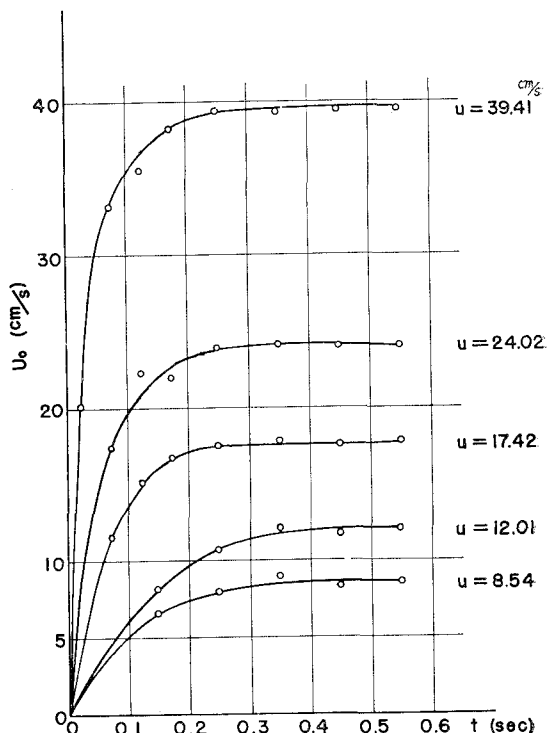
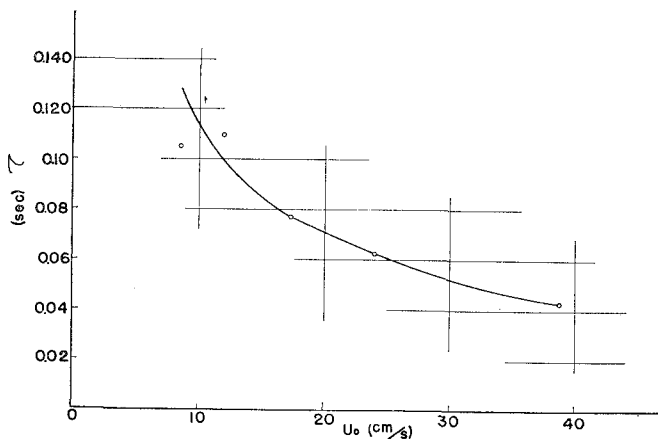


図-3 時定数(小型プロペラ流速計)



た。これは回転を止めた流速計を一定流速中に入れ、任意時刻 $t=0$ に回転を許して回転速度の増加状態を測ったものである。結果は予想以上に良好で、たとえば $u=8.5$ cm/sec で 0.2 sec あればほぼ応答していることがわかる。そこでこの応答が一つの指数曲線にしたがうものとみて図-2 から流速計の時定数 (τ)³⁾ を計算すると図-3 に示すごとく、 $u/u_0=1-e^{-t/\tau}$ の関係が得られる。これからこの流速計による変動の測定可能限界がわかる。したがってこの応答周波数以上の変動はこの流速計には感知されないことになる。

3. 流速記録の考察

元来この種の流速計は数時間のパルス数から、その時間内の平均流速を算出するものであるから、1秒間のパルス数が n としても、実際の流速は $n \pm 1$ に近くなる場合もありうる。この誤差は流速が小さく、平均化時間が短いほど大きい。平均時間1秒のときの誤差は流速と回転数の関係式から約1 cm/sec となり、かりに $\bar{u}=10$ cm/sec とすると相対誤差は10% となる。いま問題にしているのは変動速度 $\sqrt{u'^2}$ であるから、かりに $\sqrt{u'^2}=3$ cm とすればこれに対する相対誤差は30% 以上にもなる。またこの方法で得られた記録はある特定時間で切断された、その時間内の平均値の離散値の連続的な系列であることを理解しておかなければならない。

さらに重要なことは、このような流速指示機構の制約を受ける計器をもって、広いバンド幅の周波数をもつ乱流を計測して変動流速を扱う場合に、得られた記録の中で正当な変動として扱えるのはどの周波数帯にある乱れであるか明らかにしておく必要がある。今回の実験の測定時間はすべて120秒であり、かつ流速計の機構を考えれば、信頼できるその周波数のバンドはかなり狭いものと予想される。この判定は記録のスペクトル解析を行えば可能である。図-4の各図はその代表例である。図から $f > 0.5$ の高周波数領域のスペクトルは明らかに計器の指示機構の制約を受けた形であり、また低周波数領域のスペクトルも、測定時間120秒であることを考慮すれば $f < 0.1$ のエネルギー密度も信頼できるとはいいがたい。したがってこの流速計で測得された乱れの変動速度の評価ができるのは、ある程度 power を持った $0.1 \text{ c/sec} < f < 0.5 \text{ c/sec}$ 帯のものであり、この領域内での現象を対象としているのであることを断言しておく(スペクトルの計算は Tukey の方法により港研の TO SBAC-3400 を使用した)。

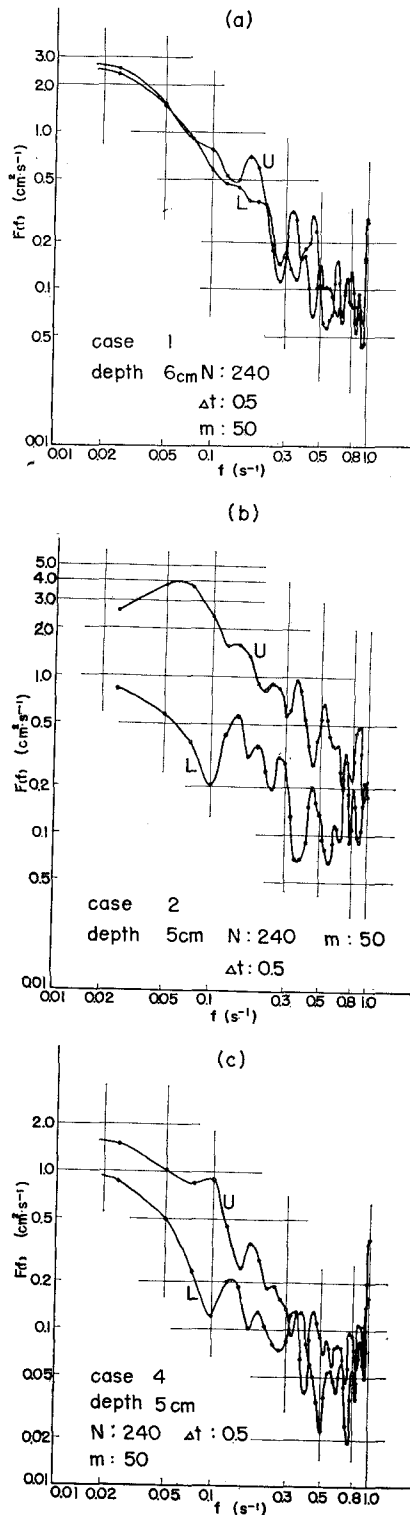
4. 実験結果の考察

以下の解析はすべて、流速測定時間120秒、平均化時間1秒(ただし Spectrum のみ0.5秒)にあるものである。

(1) 流速垂直分布

実験から得られた表層流の流速垂直分布および指定点での塩分、温度分布の代表例(case 3, 4)を図-5(a),

図-4 乱れのスペクトル



(b)に示す。両 case とも河川部 ($x=-1, -2$) の流速分布はほぼ対数分布式の傾向を示し、その勾配から $k \approx 0.4$ である。河口部で海水を貯溜した case 3 の表層流の流速分布は、水深変化点から発達する境界層のため、

河海両水の境界面直下の海水も正の流速を持ち、表層流下層部の流速増加が上層付近の増加にくらべて顕著である。このため流速垂直分布は直立してくる傾向を示している。case 4 の塩水くさび上の流れは、密度流特有の流速分布を示しはじめており、徐々に上層の流速が加速し舌状分布に変化してくる。

図-5 u, ρ, t 垂直分布図

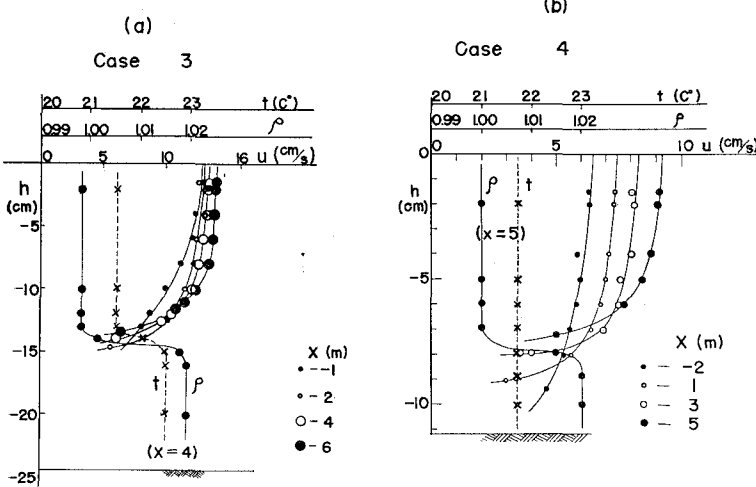
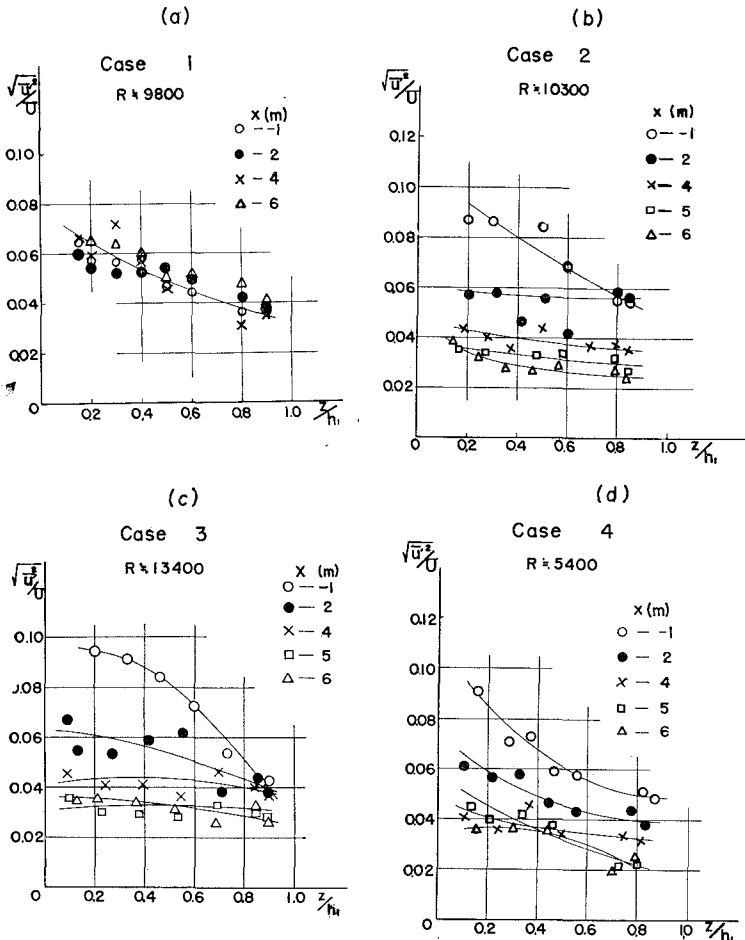


図-6 相対的乱れの強さの分布



(2) 乱れの分布

河口部での土砂沈殿に最も関係の大きいと思われる流れ方向の乱れの強さ $\sqrt{u'^2}$ の分布を、平均流速に対する比 $\sqrt{u'^2}/U$ をもって、海水層上の距離 x をパラメーターとし相対水深に対してプロットしたものを実験 case 別に示せば 図-6 (a)~(d) のごとくである。図の case 1 は清水のみの場合であるが乱れは底層が大きく約 6% を示し、河床から発達した境界層の乱れの効果を示している。これは Laufer⁽¹⁾ の風洞境界層における実験結果とよく似た傾向を示している。また流れ方向の分布は河床上に変化がないため、相対的乱れの強さはほぼ一定である。case 2 ~ 4 の二層流形式上の流れでは乱れが変化している状況が明瞭に示されている。すなわち全 case とも海水層上の流下距離に比例して減少し、距離 $x=6$ m の場所では上流にみられた z/h_1 の差異がなくなり、表層流上下層の乱れはともに均一化する様相を示して相対的乱れの強さは約 3% の値となっている。乱れ減少の度合は上層 ($z/h=0.8$) にくらべ下層 ($z/h_1=0.2$) ほど著しい。

なお case 1 と case 2 の河川部の水理条件は同じであるにもかかわらず case 2 の相対的乱れの強さが大きいのは河床粗度の有無による違いと考えられる。

以上乱れの減衰は図-4 のスペクトルからも理解できる。図の中で添字 U, L はそれぞれ上流河川部, 下流河口部を示しており, 測定水深同一の記録である。ここで前述した周波数帯 $f=0.1\sim 0.5$ c/sec 間の2つのスペクトルを比較すると, case 2~4 の下流側 (L) において $F(f)$ の減少が示され, case 1 では $F(f)$ の level down がみられない。これから

$$\bar{u}'^2 = \int_0^\infty F(f) df$$

であることを考慮すれば, 二層流の表層流の持つ乱れの減衰は明らかである。

(3) “乱れの強さ” の変化

流れ方向の乱れの強さの変化を図-6 から計算したものを図-7 に示す。ここで乱れの強さ $\sqrt{\bar{u}'^2}$ を $\bar{u}'$ と書き替え上流河川部の値には suffix 0 を付ける。図の縦軸に乱れの強さの比 $\bar{u}'/\bar{u}'_0$ を, 横軸には海水層上の相対距離 x/L をとった。そして z/h をパラメーターとし, z/h_1 は表層流の上, 中, 下層をもって代表させた。図から総体的に乱れの強さの減衰は明らかであるが, 表層と中, 下層および塩水くさびと貯溜した海水層上の減衰傾向はかなり異なっている。すなわち case 2, 3 の表層と case 4 の全層は測点の散乱が大きく, 明瞭な減衰傾向を示さないが, 総体的には x/L に比例して減衰している。反面 case 2, 3 の中, 下層の減衰は著しく, かつ一致しており, $x/L=0.6$ 付近で $\bar{u}'/\bar{u}'_0=0.4$ となり 60% の減衰をみせている。この減衰傾向は指数曲線分布を示している。

つぎに塩水くさびと海水貯溜形式では $\bar{u}'/\bar{u}'_0$ の変化が異なることから, 海水層の厚さ (水深 h_2) が乱れの強さの変化に影響することも考えられる。そこで図-7 の記録を全水深に対する海水層水深比 h_2/h に対してプロットすれば図-8 のごとくである。図で $h_2/h=0.2\sim 0.3$ は塩水くさび, $h_2/h=0.4\sim 0.5$ は海水貯溜形式の場合である。ここでも表層流上層部 $z/h_1=0.8$ では測点散乱が大きく h_2 の効果は明確でないが, 中, 下層 $z/h_1=0.2\sim 0.5$ ではかなり明瞭な相関関係が示され, 乱れの

図-7 $\bar{u}'/\bar{u}'_0 \sim x/c$ の関係

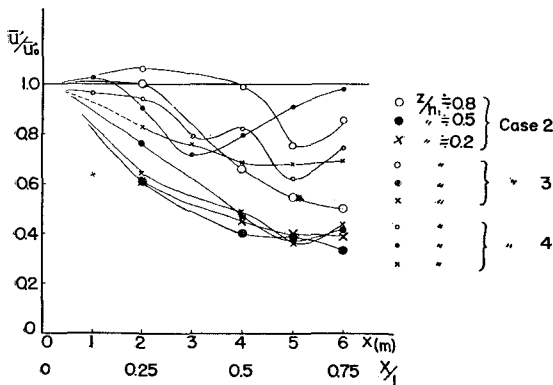
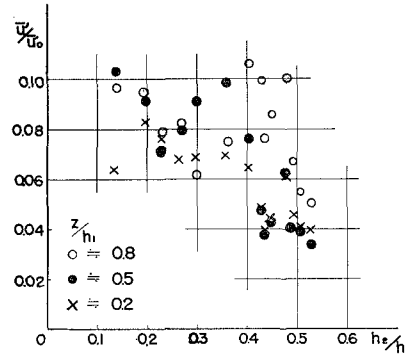


図-8 $\bar{u}'/\bar{u}'_0 \sim h_2/h$ の関係



強さの減衰によらず海水層の厚さの効果が推測できる。したがって実験 case 4 の場合もある程度 h_2 の影響が入ったものと思われる。

(4) 考察

図-6, 7, 8 から乱れの特性を考察すると, 海水の存在しない上流河川部における乱れの分布は z/h_1 に関係し上層より下層の方が強い。この傾向は風洞境界層における実験結果と似ており, 大気乱流や風洞乱流理論を河川乱流に適用できる可能性を示唆しているものと考ええる。つぎに流れが海水層上に乗りあげた二層流の場合, 表層流の乱れはその流下距離に比例して減少しつつは z/h_1 による差異がなくなりほぼ均等となる。この傾向は表層流の下層ほど著しい (図-6(b)~(d))。この理由はいままで河床の凹凸から得ていた乱れは, 流れが海水層上に乗り上げるにより河床の性質が変わるとともに境界面に内部波を発生させるため Energy の消費が行なわれる。一方内部波の波高はまた小さく乱れへの勢力の寄与は少ない。したがって以前より乱れは減衰するのであろうと推察される。

図-7 の乱れの強さの減衰は実験 case 2~3 の海水貯溜と case 4 塩水くさびでは異なる傾向があるように見受けられた。一般に密度流形成場においては混合層の生成によって流れの乱れは減少するといわれている。これからすれば本実験のごとく二層流上の流れで乱れの強さが 60% も減衰する実験 case 2~3 の中, 下層の現象は, たとえ図-8 の海水層厚さの効果が加わったとしても過大と思われるが, 詳細な理由は不明である。けれども表層流上層の減衰が少ないのは, 下層にくらべ上層ほど渦径の大きな渦が多く存在しているので, 大きな渦ほど乱れ Energy の減衰が生じがたいためであろうと考える。

5. 結 論

以上小型実験水路で定常流による安定した二層流の実験によって, 表層流の変動速度とくに乱れの強さの変化に関して得られた結果を要約すれば

a) 淡水のみの実験から 河川部と想定される 流路内の

乱れの特性は断面内で一様に変化するのではなく z/h_1 に関係し、相対的な乱れの強さ $\sqrt{\bar{u}^2}/U$ は上層より下層の方が強い。また流下方向への乱れの減少はみられない。

b) 二層流の表層流の $\sqrt{\bar{u}^2}/U$ には底層海水の効果が明瞭に現われ、 z/h_1 による変化は消失し、ある一定値に近づく。この減衰は下層ほど大きい。この現象の傾向は海水層上の流下距離に比例している。

c) 乱れの強さの変化 $\bar{u}'/\bar{u}'_0$ は海水貯溜 (実験 case 2-3) の中、下層で異常と思われるほど激しく 40% を示している。

d) 二層流の表層流の乱れの強さの減衰には底層海水層の厚さ h_2 が関係する傾向がみられる。

上記の要約は非常に限定された条件、case の実験から得られたものであり、とくに測定計器には強い不満が存している。したがって実験結果の傾向は風洞乱流の結果とよく似ている点もあり、二層流の表層流の乱れの強さの減衰傾向は認められるであろうが、その絶対値はかなり異なるであろう。そしてこの結果は今回の測定だけの特異性かもわからず、今後多くの測定をまたなければ

ならない。

今後よりいっそう実際の現象に近づくためには、混合密度流の実験を行なうとともに測定計器の開発により乱流構造の解明が必要である。さらに河口部での土砂沈殿堆積機構への接近を計るためには表層流として土砂流を扱わねばならないであろう。いずれにしてもこの実験結果は二層流の表層流の乱れについて若干の知識を提供するものと思われ、今後実験的研究が多くなされるとともに、それを理解するための理論的研究の発展が望まれる。

最後に本研究に対して有益な助言を与えられた浜田博士、実験資料の整理に尽力してくれた上野信行、須藤茂の両君に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 新潟港改良計画資料 No. 1, 第一港湾建設局, 昭和 36 年
- 2) 浜田徳一: 河口不等流における乱れ粘性係数の一例, 土木学会論文集第 4 号, 昭和 24 年
- 3) 余越正一郎: びわ湖疎水における乱れの観測, 京大防災研報告第 9 号, 昭和 41 年
- 4) J. Laufer: Recent measurement in a two-dimensional turbulent channel, Jour of Aeronautical Science, Vol. 17, No. 5, May, 1950.