

河口二層流における乱流構造の観測

Field Observation of Turbulent Flow in Two-Layer System at a River Mouth

北大工学部 正 員 田 城 徹 雄
北大工学部 正 員 吉 田 静 男
北大工学部 学生員 満 沢 巨 彦

1. はじめに

河口二層流における水理現象については、フィールドでの水理観測と、水理模型による実験的研究が行なわれ、それ等に基づいて理論的解明が試みられてきた。しかし、著しく規模の異なる二層流においては、水理現象の統一的な解明は緒についたばかりにすぎない。

著者等¹⁾は先に、整流格子によって主流の乱流構造を制御する水理模型実験を行い、主流の乱流構造が異なれば、同一の大域的物理量の下でも異った水理現象が発生することを見出した。

このことは、『流れの規模の異なる二つの系において大域的物理量が同一であるとき、水理現象における規模の効果を規定している主要なものが主流の乱流構造の相違である。』¹⁾という仮説を論理的に導く。

本研究の目的は、この仮説を検証することであり、この目的に沿って計画されたフィールド観測を行った。得られたデータから河川乱流の主流の大規模構造を始めとする乱流構造を解明し、水理模型実験の結果と比較検討する。

2. フィールド観測

フィールド観測は、1983年8月7日～13日に及ぶ天塩川での観測を行い、それに前後して数次にわたる石狩川での観測を行った。特に、天塩川は図-1に見るように、河口部で大きく湾曲して海に注いでいるが、河口部から上流8km地点まではほぼ様な水深と河幅を持ち、更に、河道は直線状である。これは、浚渫を伴う河川改修によって強化されている。また、この川は日本海に注ぐ内海河川であり、通常、弱混合型式の河口二層流を形成している。従って、天塩川は理想的な大規模二層流のフィールド観測を可能にしており、水理模型実験との比較においても一般性を持っていると予想される。

このことを考慮して本論文では、主に天塩川のフィールド観測結果について詳細を述べる。

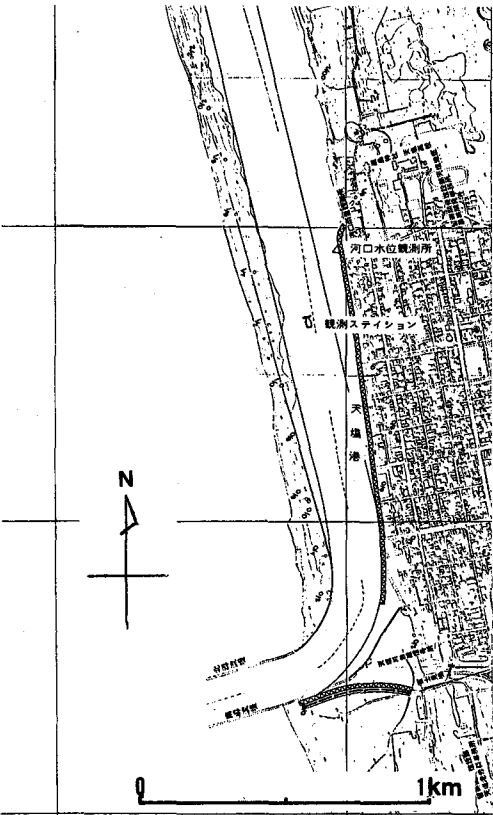


図-1 天塩川フィールド観測点
(観測ステーション位置及び河口水位観測所位置)

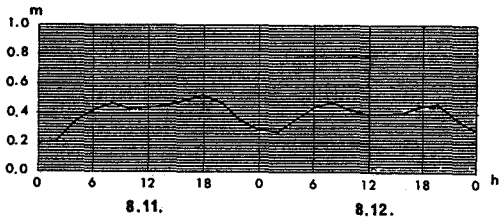


表-1 河口水位観測所潮位記録

引用したフィールド・データは、8月11日と12日に得られたものである。観測位置は、図-1に示す様に河口上流1.4kmにあり、流心より右岸寄りに位置する水深4.4mの地点であった。また、ほぼ同位置に、河口水位観測所があり、その地点での潮位記録表を表-1に示す。

観測手段は、概要、次の様である。観測地点に繫留された舳から上流側に約2m離れて、水中観測ステーションを設置した。水中観測ステーションは、樹脂被覆軟鋼パイプで製作したもので、正三角柱状に組立られており、2m単位で継ぎ足すことができる。今回は、全高8mとした。また、解体、運搬、再組立も容易である。この水中ステーションは、定置するとき、放射状に三方向に投錨したアンカーから伸びるトワインで固定されており揺動はない。

実河川主流の乱流構造を観測するためには、フィールド用LDVシステムと水中TVシステムが必要な観測器機系となる。そこで、著者等は、多くの試行の後、実用的な観測器機系を製作した。フィールド用LDVシステムのうちプローブの部分は、著者等³⁾が先に実験室用に開発した素子型プローブの設計仕様を適用して設計製作したものである。また、水中TVシステムは、既報の文献⁴⁾に紹介した水中TVカメラを用いている。この水中TVカメラと、細管ハロゲンランプを用いた可変幅スリット光束光源及び、可視化トレーサとしてのウラン水溶液の流出ノズルの三つを一体架台に取付け、相互の位置を調整できるようにした。この一体架台は、先の中ステーションに取付けられたガイドパイプに沿って任意の水深に移動し設定することができる。このフィールド用水中TVシステムは、初歩的なリモートコントロールが可能である。

この他、通常、フィールド観測に用いられる各種観測計器が配置され、実験室の測定システムをフィ

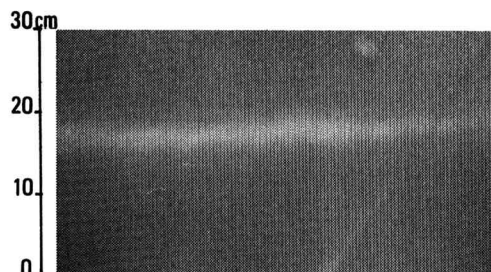


写真-1

ールドの観測システムで再現し、現象を同時に多面的に観測することと、現象の発展の時系列を追跡することが企画された。

3. 観測結果

界面位の揺動

上記の観測手段の体系は、河川乱流の主流の構造を解明するための多くのデータを提供する。

まず、視覚的な現象から述べれば、著者等の可視化システムは写真-1に見る様に、河口二層流の界面を捉え、長時間に渡って観測することを可能にした。このデータを記録したビデオテープから画像を再生し、界面変位を読み取ってプロットしたのが図-2である。この観測は8月12日の14時頃に行われており、潮流はほぼ停止して、主流の流速は20~30cm/secであった。界面は水面下2.2mにあって、界面付近の流速は4~5cm/secで流下していた。なお、風は風力2~3程度で時折風波が見られた。

写真-1からは、実河川の河口二層流の界面が、極めて静穏であることが知られる。界面での混合層の厚さは極めて薄く数cm以下である。その密度構造は著者等⁴⁾の報告したものと大略同様であるが、図-2に示された界面変位がほぼ10cmであることを考えると、絶対位置センサーで測定を行って得た混合層厚さよりも更に10cm程薄い混合層を持つことが分る。この密度構造は潮汐流によって流下流速が増大

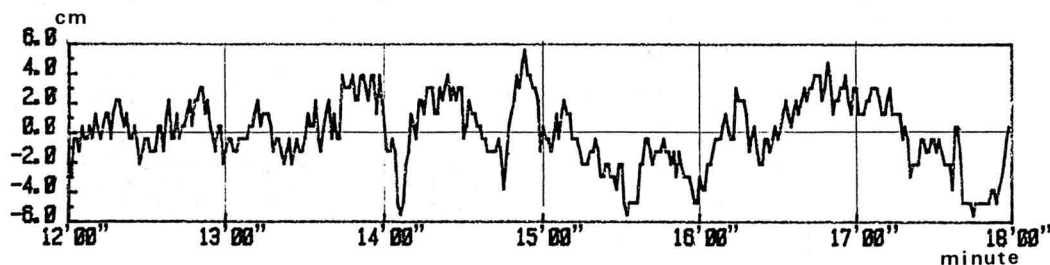


図-2 界面位の変動（水中TVカメラの再生画像による。）

8/11 自由表面

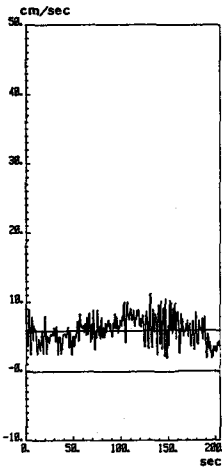


図-3 a

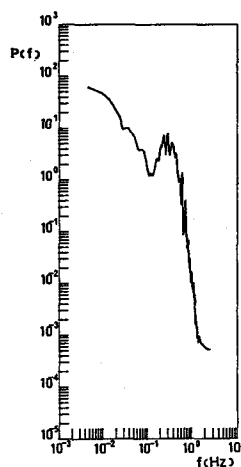


図-3 b

しても基本的に変ることはなく、河口上流十数kmにわたって塩水楔の続く限り維持される。

この時間帯での観測に関する限りでは、界面に不安定波は見られなかった。

各深度での流速変動

次いで、フィールド用LDVを用いて測定した流速データについて述べる。

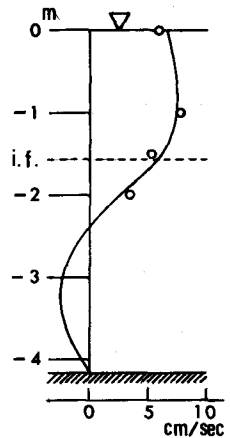


図-6 流速構造

図-3～5に示したデータは、流れの深さ方向での主流の乱流構造を調べるためにとったものであり、8月11日の午後に測定したデータである。流速構造は図-6に示す。このときは、風力3程度の風がSSW方向から吹いており、吹送流と風成波浪が主流の乱流構造に大きく影響している。

図-3aは水面下0.1mの位置にプローブを設定して測定したデータであり、風が強く風波の激しく起っているときは、上流方向の吹送流によって流速が減少し、風が弱まり風波が少ないときは流速が増大していることが読み取れる。また、図-3bはその変動成分のパワースペクトルであり、風波に対応する0.2～0.3Hzのスペクトルピークと 10^{-2} オーダーの低周波のスペクトルピークとを持っている。

同様に図-4、図-5は、それぞれ淡水の中水深と界面直上で得た流速データとその変動のパワースペクトルである。図-4bと5bを見ると、風波による0.2～0.3Hzのスペクトルピークが界面にまで及んでいることが分る。また、 10^{-2} オーダーの流速変動の周期も全淡水深にわたって存在する。これは、主流の基本的な流速変動の一つに対応する変動周期を表していると考えられる。

8/11 中水深

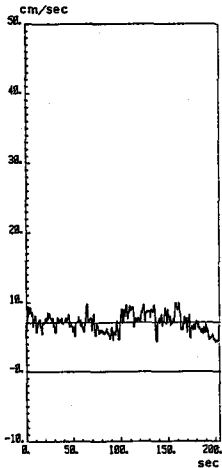


図-4 a

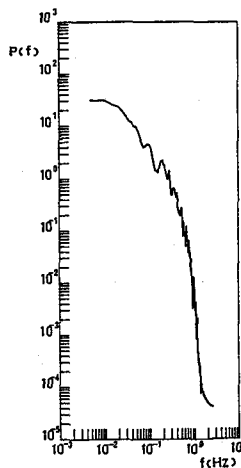


図-4 b

8/11 界面近傍

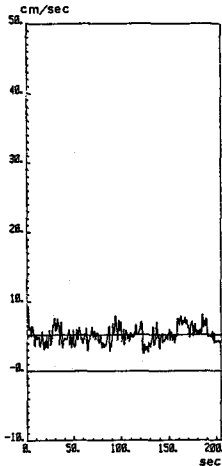


図-5 a

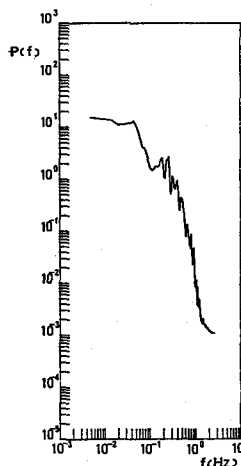


図-5 b

	$(\text{cm/sec})^2$	cm/sec	
	乱れ強さ	平均流速	乱れ度
水面	3.17	5.93	0.302
中水深	1.70	7.08	0.184
界面	1.39	5.20	0.227

表-2 各水深での乱れ強度と分布特性

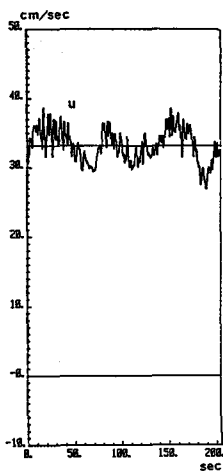


図-7 a

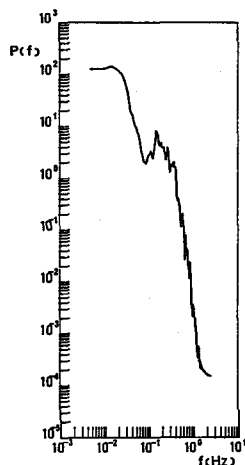


図-7 b

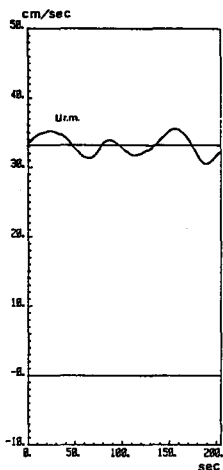


図-8 a

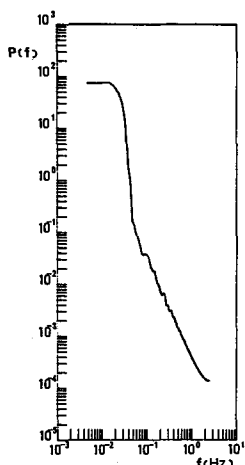


図-8 b

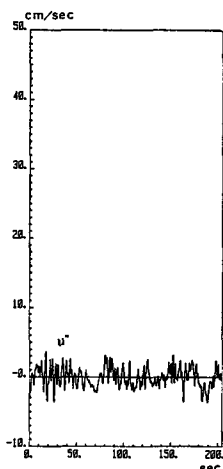


図-9 a

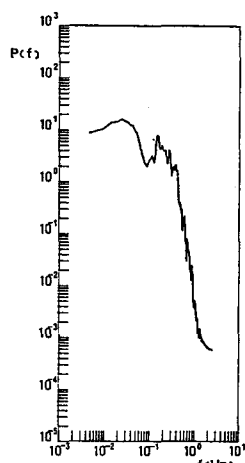


図-9 b

一方、これ等の流速変動の乱れの強さに注目すると表-2に示す様になるが、平均流速で正規化した相対乱れ強度を考えると界面付近で最大となる。また風波が無ければ絶対乱れ強度も界面直上で最大となる。

河川乱流の構造

河川乱流に存在する長周期の流速変動成分の基本的なものがいくつか考えられる。その基本的な流速変動のうちのいずれかに主流の乱流構造によって決定づけられた流速変動が存在するに違いない。

その解明のために、「時空相関のコヒーレンシ」を考慮した移動平均法²⁾を用いて、8月12日10時に測定した流速データを解析する。このときは小さな落潮期にあって主流の流速が大きく、風力2で時折風波の立つのが見られた。測定水深は1.0mで、界面は水面下2.1mにあった。図-7に流速データとその変動成分のパワースペクトルを示す。図-8は移動平均流速について、図-9は移動平均を差引いた変動流速について、同様の出力を示したものである。

図-9bに分離された変動流速のパワースペクトルのピークは風波の周期に対応している。図-8bに分離された移動平均流速の変動成分のパワースペクトルは $1 \times 10^{-2} \sim 3 \times 10^{-2}$ Hzのピークを持つ。これは、主流の乱流構造の持つ高速流体域と低速流体域との、定点から見た交替周期を表している。何故なら、この周期は、図-2に示す界面位の変動周期と一致しているからである。なお、界面位の変動幅(Δh)は、主流の流速変動($U_r - U_s$)によって生じる圧力水頭差とよい一致を示すことが、次式から算定できる。 $\Delta \rho$ は二層の流体の密度差である。

$$\Delta h = \frac{U_r^2 - U_s^2}{2 \Delta \rho g} \quad (1)$$

更に、同時に記録された超音波測深機のデータは、海から河口を経て壱上する長波はなかったことを示している。

こうして、河川乱流の主流中には、高速流体域と低速流体域が存在する

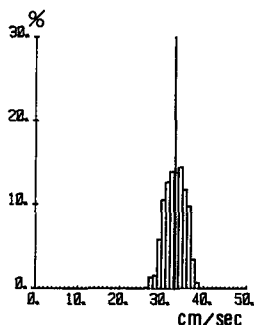


図-10 乱れの分布

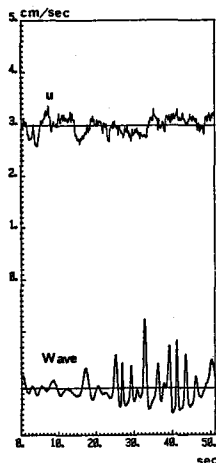


図-11 a

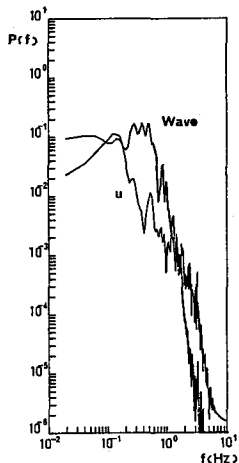


図-11 b

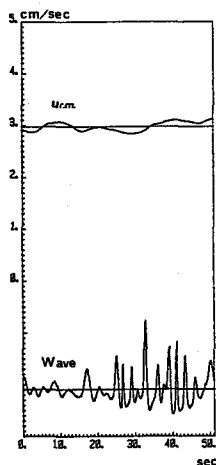


図-12 a

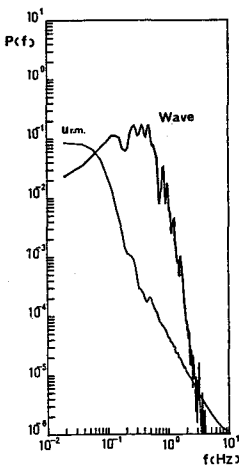


図-12 b

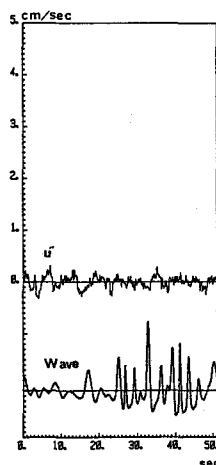


図-13 a

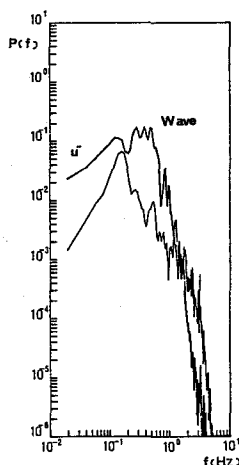


図-13 b

ことが確認されたが、それが高速帯域と低速帯域として存在するかどうかについては、にわかに論断できない。ただそのタイムスケールから流下方向に10 m～30 mの空間スケールを持つ流速構造域として定点観測されたと云えるにすぎない。しかし、その可能性は極めて大きい。

なお、この観測時には内部 Froude 数 $Fi=0.46$ であった。

水理模型実験における乱流構造

一方、河口二層流型水理模型による実験では、容易に界面不安定波が発生し、発達して碎波する。その機構については、主流の乱流構造に決定づけられていることを著者等^{5), 2), 1)}が明らかにした。

ここで、フィールド現象との比較検討のために、水理模型実験について述べる。実験に用いた河口二層流型水理模型の設計仕様の詳細と実験方法等は既報の文献^{6), 5), 1)}に譲るが、この水理模型の河道部の全長は8.00 mで全水深が9.6 cm河道幅は50.0 cmである。

実験データは前項との比較のために、主流の中水深に相当する水深4.2 cmでの測定によるものを採り、前項と同様の方法で解析した結果を図-11～14に示す。測定位置での塩水楔の厚さは1.4 cmであり、その先端は測定位置より0.53 m上流にあって、塩水楔の全長は2.28 mであった。なお、このとき同時に測定した界面波高計のデータを出力してある。

この一連の図に見る様に中水深では、流速変動のパワースペクトルの低周波の方のピークは、移動平均流速の変動成分のパワースペクトルのピークとして分離され、界面波のwave packetの周期に整合する。高周波サイドの小さなピークは、図-13bの様に分離され、界面波の周期と一致するが、そのパワーレベルは低く、界面波が主流に及ぼす反作用は界面から隔たると共に急速に減衰することを示している。勿論、界面直上ではこの反作用は大きく既報の文献²⁾に示す通りであり、水理模型実験での主流の乱流と界面波動の相互作用の実態は

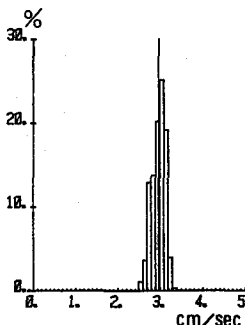


図-14 乱れの分布

この様なものである。

なお、この測定位置の内部 Froude 数 $Fi=0.63$ であった。

4. 結 論

河口二層流に関する水理模型実験とフィールド観測とによって、両者の主流の乱流構造の基本的な相似性も示されてはいる。しかし、層流状態により近い水理模型実験では界面不安定波の発生とその碎波によって容易に破壊される界面が、発達した乱流状態にある河川乱流では極めて安定な界面として存在するという、一見流体力学的相似則に矛盾する現象が克明に確認された。

このパラドックスを帰結しているのは、直接的には両者の流速構造の相違にある。同一の Froude 数の下では、水理模型の主流の速度プロファイルは実河川の様に緩やかに漸変せず、密度界面近くで大きな速度勾配を持つ。これは主流の乱流構造の相違に起因している。前節で見た様に、実河川の発達した乱流は剪断流場を維持するための運動量輸送を担うことができるが、より層流に近い水理模型の流れはその運動量輸送を直接主流の大規模構造に委ねる他はないからである。

本研究は、実河川の主流の乱流構造の一端を解明することによって、このパラドックスに基本的な解答を与えた。しかし、主流の乱流構造の実体はなお不明である。今後の主流の乱流構造の研究によって、

柏村・吉田⁷⁾等が解明した、アウトフローパターンと塩水楔形状の範囲を超えて、流体力学的相似則の適用条件とその適用限界とが解明されなければならない。

主流の乱流構造を考慮した流体力学的相似則が確立されるなら、流体力学の理論と模型実験の意義は決定的なものとなる。著者等⁵⁾は、成層密度流の界面不安定現象に関して、大域的物理量の他に局所瞬間 Richardson 数への概念の拡張を行って、主流の乱流構造の評価を試みている。

謝 辞

本研究のフィールド観測は、北海道栽培漁業公社主任技師であった 故 谷藤康造氏との共同研究として観測技術上の解決を得たものです。記して故人に衷心からの謝意と致します。

本研究のフィールド観測に用いられた水中 TV カメラは、旭川工業高等専門学校の平間和由実習工場長の裁量の下に、南部健二技官と田川清三技官によってその缶体部を製作していただいたものです。ここに記して謝意を表します。

本研究のフィールド観測を計画し、組織し、実行するにあたって共働者であった、理学第1講座の大川原馨先生、工業力学第2講座の石崎健二先生、及び、工業力学第二講座の全構成員に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 田城徹雄・吉田静男：河口二層流における主流の乱流構造と界面現象，第30回海岸工学講演会論文集，pp. 580～584，1983.
- 2) 田城徹雄・吉田静男・米谷慎：成層密度流における界面波の発生機構，第27回水理講演会論文集，pp. 523～530，1983.
- 3) 吉田静男・田城徹雄：プローブタイプLDVを用いた界面波近傍の流速測定，第14回流体力学会講演集，pp. 102～105，1982.
- 4) 吉田静男・谷藤康造・田城徹雄・西田修三：弱混合河口二層流の特性，第26回水理講演会論文集，pp. 507～512，1982.
- 5) 田城徹雄・吉田静男：淡塩水二層流における界面波と微細流れ構造，第29回海岸工学講演会論文集，pp. 545～549，1982.
- 6) 吉田静男・西田修三・田城徹雄：定常二層流の三次元混合過程，第28回海岸工学講演会論文集，pp. 525～529，1981.
- 7) Kashiwamura, M. and S. Yoshida: Outflow dynamics at a river mouth, Proc. 16th Conf. Coast. Eng., 1978, ASCE, 1979.