

天塩川河口二層流の乱流計測

Turbulence Measurement of Two-layer Flow
in the Teshio River Estuary

西田修三・吉田静男・大谷守正

By Shuzo NISHIDA, Shizuo YOSHIDA and Morimasa OHTANI

We have made the field observation of turbulent flow in the tidal portion of Teshio river, using a two-dimensional LDV system of our making. The turbulence energy and Reynolds stress were higher in an upper layer than in a lower layer due to surface wave with the frequency of 0.3 Hz, but there existed the velocity fluctuation of 1 Hz in the whole depth with about equal intensity. Turbulent intensities of vertical velocity component were proportion to that of horizontal velocity component.

Keywords : field observation, turbulence, estuary, tidal river

1. はじめに

実河川の流況・水質の数値予測には、流れ場の正確な乱流量の把握が不可欠である。しかしながら、現在まで、実河川におけるレイノルズ応力や密度フラックスといった乱流量を測定した例はほとんどなく、流況・水質の数値シミュレーションに際しては、室内実験の結果や数少ない野外調査結果を基に、乱流係数が決定されてきた。これは、数値解析に十分応え得る乱流量の測定が可能な計測器が存在しなかったことにも起因している。そこで、筆者らは数値シミュレーションに必要な実河川の合理的・実用的な乱流係数の決定を最終目的に、試作の2次元レーザー流速計を用いた実河川の乱流計測システムの開発と現地調査を行っ

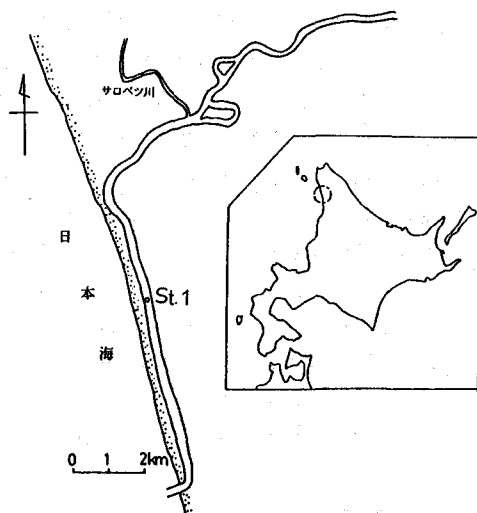


図-1 観測地点

- * 正会員 工博 八戸工業大学助教授 工学部土木工学科
(〒031 青森県八戸市大字妙字大開88-1)
- ** 正会員 工博 北海道大学助教授 工学部数物系共通講座
(〒060 北海道札幌市北区北13条西8丁目)
- *** 正会員 工博 北海道大学助手 工学部数物系共通講座
(〒060 北海道札幌市北区北13条西8丁目)

てきた^{1), 2)}。本論文では、1990年8月に北海道天塩川において実施した現地調査の結果について報告する。

2. 測定方法

天塩川(図-1)は、日本海に河口を有し、北海道では石狩川に次ぐ流路長をもつ一級河川である。河口から上流7kmまでは水深5m、河幅200~300mのほぼ様な直線流路となっており、密度構造は密度の急変する内部境界面を有する典型的な弱混合河川である。調査は、1990年8月3日~4日まで河口より上流5.5kmの河口大橋において実施した。観測地点(St. 1)の河幅は270m、水深は前年までのしゅんせつ工事により兩岸を除く約200mにわたり5mの一樣水深であった。主たる調査項目は以下のとおりである。

- 1) 試作2次元LDVによる乱流計測
 - 2) 界面追尾計(自作)による密度境界面の変動計測
 - 3) 電気伝導度計による電導度鉛直分布計測
 - 4) 圧力式水位計による水位計測
 - 5) CM2型流速計、EST3型水質計を用いた横断3地点における流速、塩分の鉛直分布測定
- 1)~3)の各計器の設置状況を図-2に示す。

試作の2次元LDVプローブは、水平方向と鉛直方向の2成分流速を検出できるようになっている。LDVはその原理上、異なる周波数のビームを使用しない限り流向の判別はできず、試作のLDVシステムにおいても、このままでは流向が反転するV、W成分の測定はできない。しかし、主流 $U (= U_m + u)$ に対し 45° 傾いた2方向の流速成分を測定するようにプローブを設置し、その出力信号を基にU及びV(またはW)方向成分を一次変換により算定すれば、V(またはW)に関して正負の値を得ることができる³⁾。そこで、今回の測定ではプローブの2測定面を主流に対して 45° 傾けてフレームに固定し橋上よりガイドロープに沿わせて吊り下げ、プローブの動揺を除去した2次元の流速測定を行った。

界面追尾計は、設定された任意の電導度面をセンサーが上下に追尾し、その変位量に比例した電圧を出力するもので、通常の内部波高計とは原理的に異なるものである。漸変成層流における内部波の観測や表面波の観測にも使用が可能である。ただし、サーボモーターによる制御のため、周波数応答性に劣り、約5Hzの応答性である。また、自作電導度計の変換器の回路はブリッジ回路を用いた市販のものとはほぼ同じであるが、プローブを5mmφに小型化し、より正確な鉛直分布測定が可能にした。

LDVによる流速測定は、各水深においてサンプリング周波数20Hzで4100個のデータをデジタルデータレコーダに収録し、持ち帰ってデータの解析を行った。

3. 測定結果

図-3は、サンプリング間隔1分で計測された観測期間の水位変化である。また、図-4は時間軸を5倍に引き伸ばしたものである。潮差は約20cmと小さいが、周期が

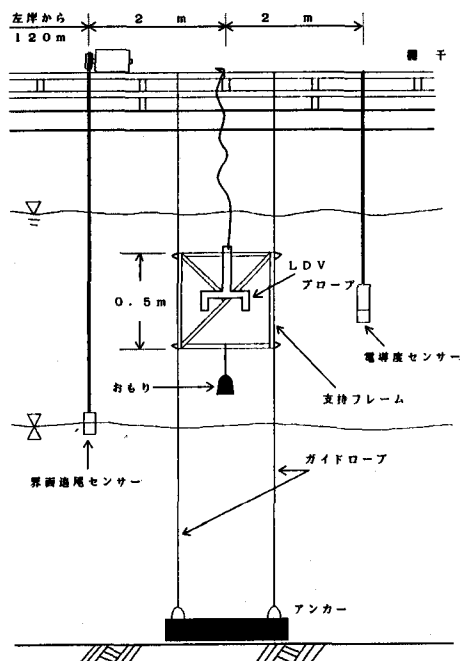


図-2 計器の設置状況

水位(m)

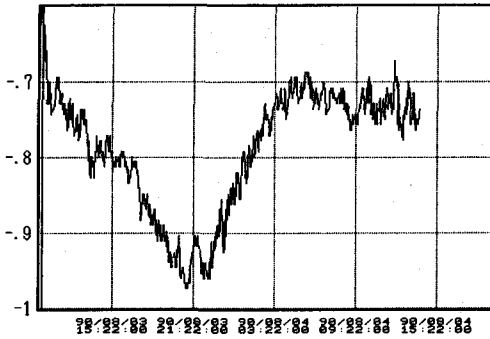


図-3 水位変化

水位(m)

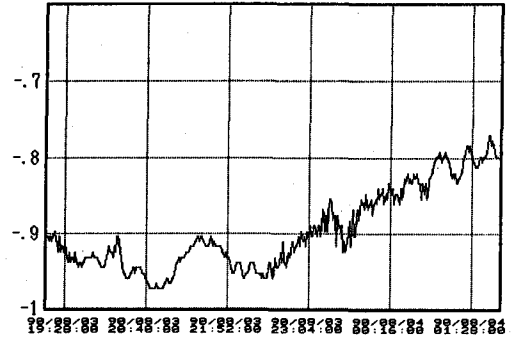


図-4 水位変化

数分から1時間にも及ぶ全振幅5 cm程度の水位変動が存在していることがわかる。FFT法を用いたスペクトル解析の結果(図-5)にも周期が約3分、10分、20分の卓越した水位変動が現れており、かなり強い非定常性が存在し、流れ場に少なからぬ影響を及ぼしていることがうかがえる。

以下、一例として、8月4日8:30~9:30に計測されたデータの解析結果について述べる。流速計測は各水深において205秒間行ない、計測終了後、電導度計を用いた密度の鉛直分布測定、および、界面追尾計による界面変動の計測を行った。

図-6に、LDVによって観測された各水深における流速成分(主流方向成分U、鉛直上方成分V)と流速Uのパワースペクトルを示す。図には30秒間の流速データしか示されていないが、解析には2048個(102.4秒)のデータを用いている。表層で卓越している変動のうち0.3 Hzの低周波変動は水深が深くなるにつれ、そのピークは下がり、パワーは $1/10$ (水深0.1 mに比べれば $1/100$)以下に低下している。一方、1 Hzのスペクトルピークは界面直上(界面位置は図-9)で若干低下するものの底層までそのレベルはほとんど変化がないことがわかる。界面直上の1.5 mでは、他の水深で見られるような鋭いスペクトルピークは存在しないが、幾つかの小さなピークが現れ、高周波側にエネルギーが分散していることがわかる。また、U、Vのパワーを比較してみたところ、低周波成分ではUはVの数倍の値を有したが、高周波成分ではほぼ同程度の値を示していた。

図-7は、界面追尾計によって得られた界面変動と同時刻に計測された水深2.25 mにおける流速のパワースペクトルである。両スペクトルとも0.6 Hzにスペクトルピークが見られ、界面変動と流速変動の良い対応関係が認められる。しかし、界面変動は約3 Hz付近に鋭いスペクトルピークが見られるが、流速変動にはそのようなピークは現れておらず、3 Hz程度の高周波の界面変動は流速変動を誘起するほどの振幅はもたず、影響範囲は界面近傍の狭い領域に限られていることがわかる。

図-8は、流速データを基に計算された平均流速($\bar{U}$)、乱れ強度($\sqrt{\bar{u}^2}$ 、 $\sqrt{\bar{v}^2}$)、乱れエネルギー($k = (\bar{u}^2 + \bar{v}^2) / 2$)及び、レイノルズ応力($\tau = -\rho \bar{u} \bar{v}$)の鉛直分布を描いたものである。前述のように、流れ場はかなりの非定常性を有しているため、平均流速の与え方が乱流量の算定に大きな影響を及ぼす。そこで、本研究では平均流速として、データ(2048個)の単純時間平均値と図-6を参考に1.2 H

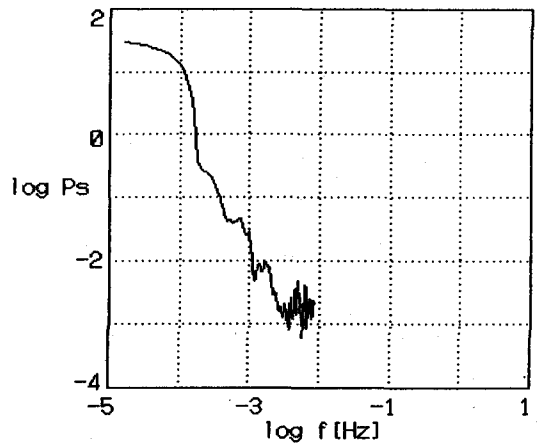


図-5 水位変動のパワースペクトル

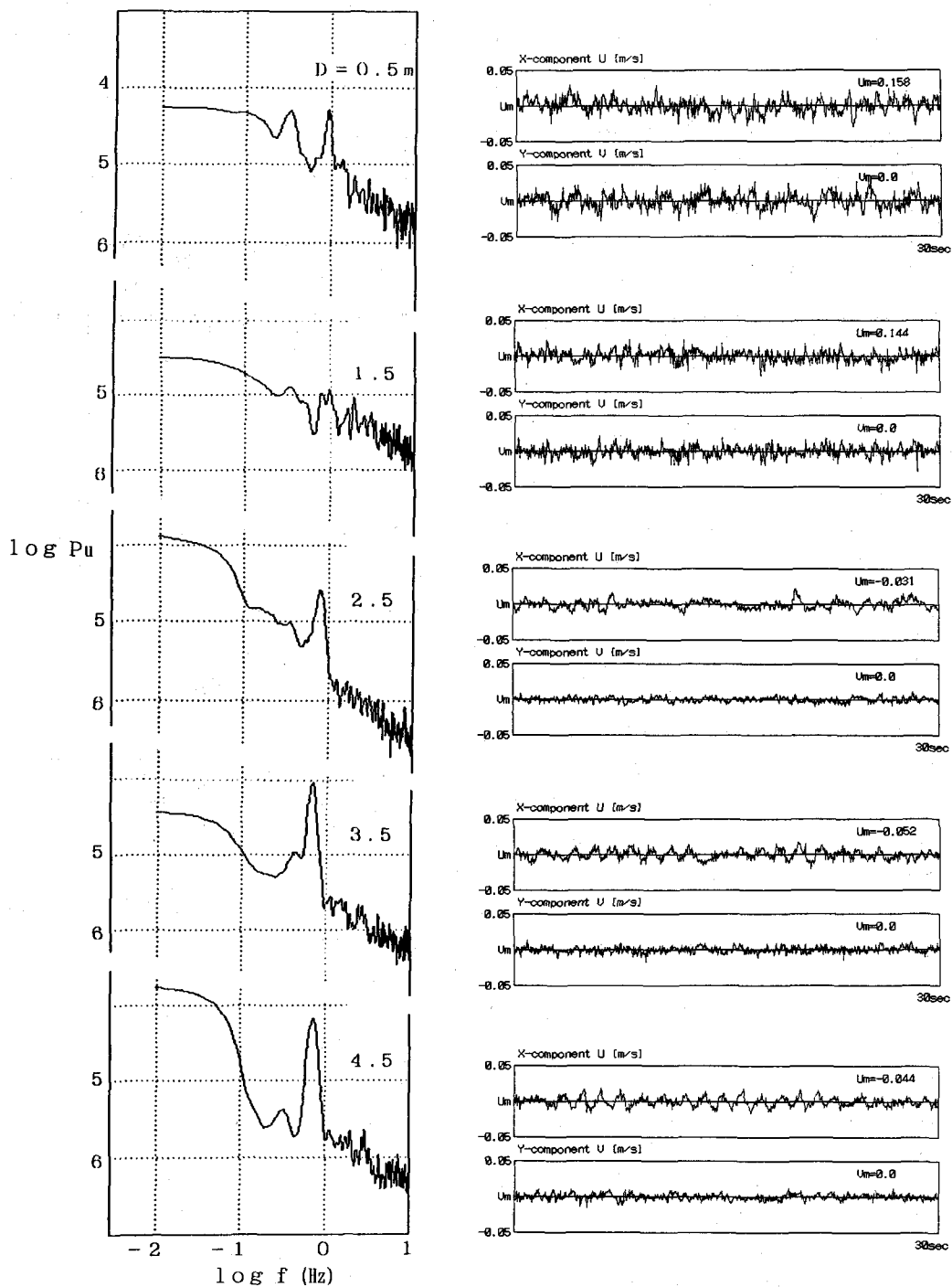


図-6 各水深における流速 U , V の時間変動と流速 U のパワースペクトル

z の数値LPFによる移動平均の2種類を採用し、乱流量の算定を行った。図中、実線が単純時間平均、破線が移動平均を用いた結果である。すべての乱流量は、表面波の影響で表層において極めて大きな値をもち、水深の増加とともに急激に減少し、下層内においては若干の減少傾向は見られるものの、ほぼ一定の値を示している。単純時間平均と移動平均の2つの結果を比較してみると、すべての乱流量に関し表層部でフィルター処理による急激な乱流量の低下がみられる。しかし、下層部では U の乱れ強度はフィルター処理により、その値は半減しているものの、 V の乱れ強度およびレイノルズ応力に関しては、その減少はほとんど認められない。これらの結果と前述の図-6の結果とを総合すると次のことが言える。0.3 Hzの卓越した流速変動は表面波モードの波に起因した乱れと考えられ、表層部でのみ流速変動を誘起し、その乱れは水深方向に

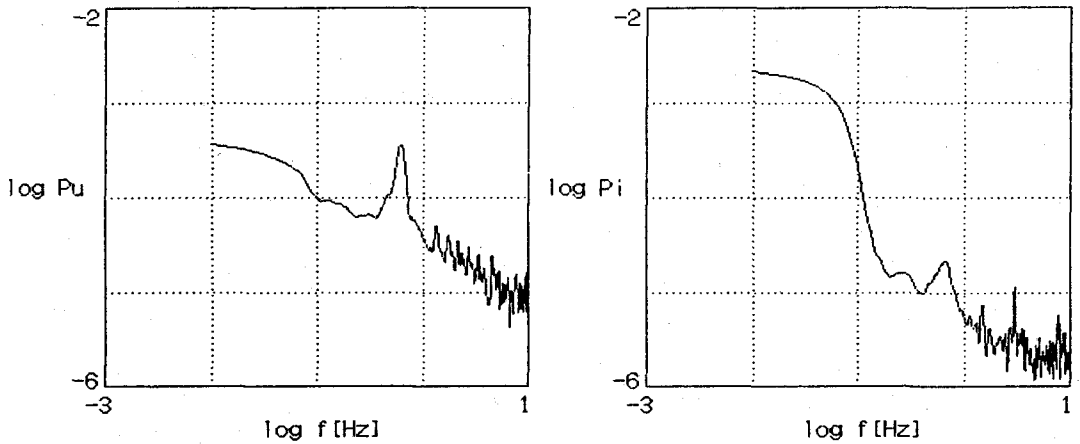


図-7 流速 U と界面変動のパワースペクトル (水深2.25 m)

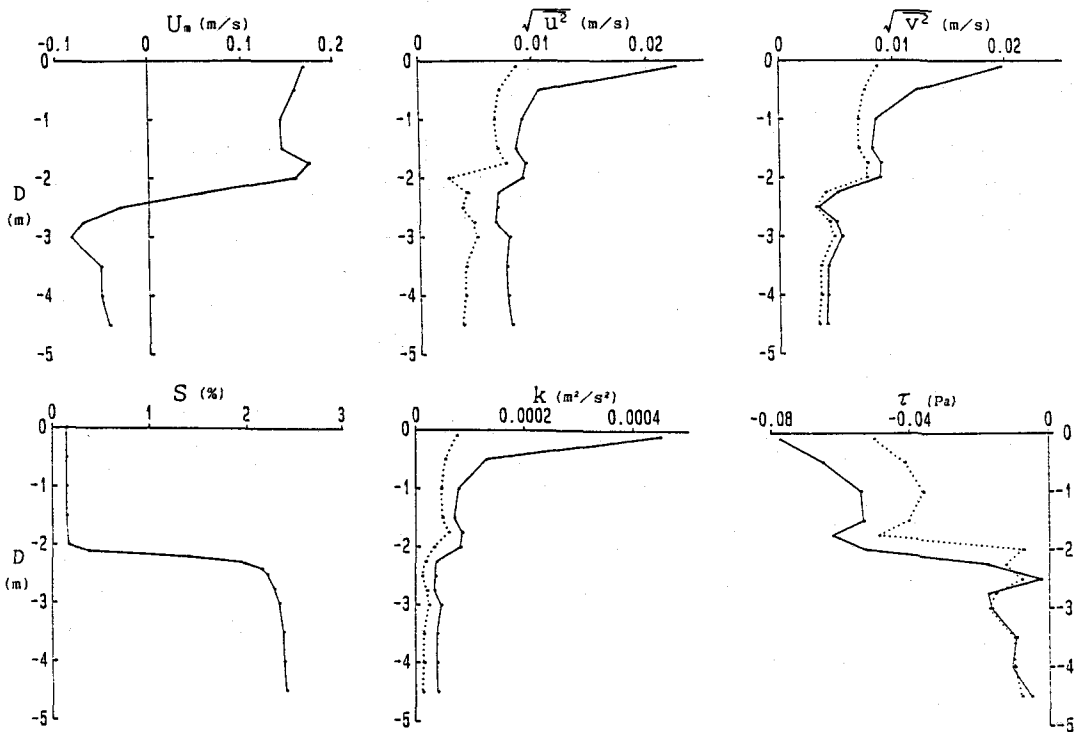


図-8 平均流速 (U_m)、乱れ強度 ($\sqrt{u^2}$ 、 $\sqrt{v^2}$)、乱れエネルギー (k)、レイノルズ応力 (τ) の鉛直分布

指数関数的に減少する。一方、1 Hz の卓越した流速変動は全層に及んでおり、かつ、その変動の主方向は鉛直方向ではなく主流方向であると言える。

U と V の乱れ強度分布はともに密度境界面付近とその上下で僅かに極大、極小値を有しており、その分布形状は極めて良い相似性を示している。図-9 は、乱れ強度（単純時間平均）の関係を他の計測データとともにプロットしたものである。乱れ強度が大きい場合にはかなりのデータのばらつきが見られるが、0.02 m/s 程度まではほぼ線形の関係にあり、U の乱れ強度は V の約 1.3 倍を示している。

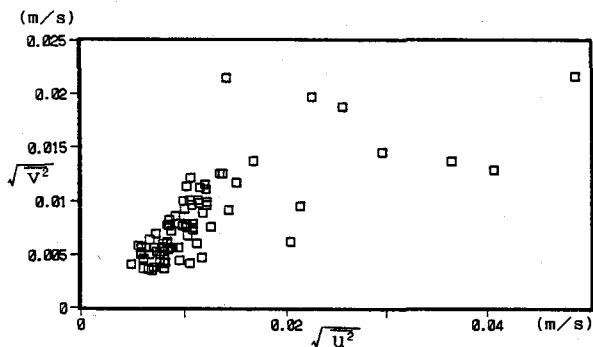


図-9 U, V の乱れ強度の関係

4. おわりに

今回の解析では、流速勾配やリチャードソン数といった平均場の量と乱流量とを結び付けるところまでは解析が進まなかった。今後、さらに多くのデータ収集と詳細なデータ解析により実河川の乱流特性を明らかにしていくつもりである。

本研究を進めるにあたり、現地調査およびデータの整理・解析において北海道大学大学院学生 北元正宏君と八戸工業大学学生 児玉幸雄君の助力を頂いた。また、本研究は文部省科学研究費（奨励 A No.02855134）の補助を受け実施できたことを報告するとともに、感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- (1) 吉田静男・西田修三：天塩川河口密度流における鉛直流速分布、第31回水理講演会論文集、1987。
- (2) 西田修三：実河川の乱流計測（2）、土木学会東北支部技術研究発表会、1990。
- (3) 吉田静男：レーザードップラー流速計によるフィールド水流計測、光学、Vol.16、No.7、1987。