

琵琶湖疏水の3次元乱流計測

Three-Dimensional Measurements of Turbulence in Biwako-Sosui Rivers

福津家久¹⁾・中川博次²⁾・瀬谷和彦³⁾

By Iehisa NEZU, Hiroji NAKAGAWA and Kazuhiko SEYA

One can say at present that the basic structure of open-channel turbulence has been almost revealed through experimental data of high quality using laser Doppler anemometers in laboratory flumes. However, these experiments have been conducted at moderate Reynolds numbers, say $Re \approx 10^4$. Then, it is not so clear whether the laboratory data of open-channel turbulence can be applied to river turbulence at very high Reynolds numbers.

In this study, the turbulence measurements of the Biwa-Sosui River at $Re=8 \times 10^5$ have been conducted using three-component electromagnetic flow meters. As the result, it was first found that multi-cellular secondary currents really existed in the river at high Reynolds numbers. The features of secondary currents in rivers were in a good agreement with those in laboratory flumes.

Keywords: river turbulence, field measurements, secondary currents, turbulence intensities

1. まえがき

河川の流速計測は、80年以上前から行われている。筆者らの知る限り、最も古いものはGibson(1909)¹⁾による計測であり、アスペクト比の小さな水路で最大流速点が水面下に現れることを最初に指摘した。以後、同様な現地計測が行われ、Keulegan(1938)²⁾は河川の流速分布として管路流の対数則を適用できると初めて指摘した。その後、戦前までは、この対数則の検討や、もっと単純に断面平均流速の計測からマンシングの粗度係数の算定に終始しており、河川の乱れ計測はまったく行われなかったと言ってよい。

水流の乱れ計測は、空気流に比べてはるかに困難であり、実験室の計測でもホット・フィルム流速計が開発された1960年代後半からである。最近のここ10年間には、高精度のレーザ流速計も開発され、実験室規模の乱流構造は、境界層、管路、開水路に関してその概略はほぼ解明されたと考えられる。一方、この間に河川の乱流計測も一部の研究者によって試みられたが、世界的に見ても研究の主流ではなかったものと考えられる。この理由として私論ではあるが、①労力をかける割にはデータの質が悪い、②計測水域の特殊性が現れ、普遍的なデータが得にくく、科学研究としてなじまない、③河道計画上は重要であるが、これは水理模型実験で終始すればよい、等の風潮があり、また、あつたと思われる。

しかし、最近、河海水域の現地計測の重要性が再認識され、この種の研究が今後活発化するものと考えられる。実際、基礎水理部会でも、この認識に立って、「計測法に関する共同研究グループ」を組織し、実験室スケールから現地スケールに至るまでの種々の流れの構造とそれによって生ずる流砂運動を解明しようとしている(総合研究代表者: 芦田和男京大教授)。

本研究は、(人工)河川として非常に整備された琵琶湖疏水を対象として、この乱れ3成分同時計測を試みたものであり、これまでに得られている実験室データと比較検討するものである。

2. 現地計測の重要性

実験室と現地の流れのフルード数を一致させることは比較的容易である。またこれが、フルード相似則に則った模型実験の理論的背景であった。このとき、レイノルズ数 Re を一致させることは不可能であり、 Re が充分大きければ、水理特性に Re の影響はないというのが暗黙の認識であった。しかし、最近の「組織乱流」の研究によれば、 Re が非常に大きくなると乱流構造は劇的に変化する可能性があることが指摘され出した。最もよい例は、組織乱流の典型的特性であるバースト周期 T_b は Re には無関係に外部変数(流れ

1] 正会員 工博 京都大学助教授、土木工学教室、2] 正会員 工博 京都大学教授、土木工学教室 (〒606 京都市左京区吉田本町)、および、3] 正会員 工修 新日本製鉄(株)

表-1 従来の河海水域での乱れ計測例

研究者	発表年	発表雑誌	計測器	速度成分	計測水域	水深 h (m)	$7\pi^{\circ}$ 外比	Re	研究成果
Grant, Stewartら	1962	JFM Vol.12	ホットフィルム流速計	u	バンクーバー海域	40	36	10^8	スペクトル解析 Kolmogoroff定数の決定
余越正一郎	1967	京大学位論文	プロベラ	u	宇治川	2.7	37	4×10^6	鉛直-水平乱流の2重構造
McQuivey	1973	USGS Prof. Paper	ホットフィルム流速計	u	リカランデ運河	0.9	24	10^6	乱れ強度、乱れスケール
Gordon	1974	Nature Vol.248	プロベラ流速計	u, v	英国の感潮河川	8-9	?	$10^6 - 10^7$	河川でのバースト現象の発見
Heathershaw	1974	Nature Vol.248	電磁流速計	u, v	水深40mの海域	40	?	10^7	海域でのバースト現象の発見
浅野富夫	1980	京大学位論文	プロベラ	u	濃尾用水	2.7	6.7	3×10^6	自己相関、乱れスケール
Griffith & Grimwood	1981	ASCE HY-3	電磁流速計 $\phi=38\text{mm}$	u, v	ミシシッピ川	2.4	?	10^6	乱れ強度
West, Knightら	1986	ASCE HY-3	電磁流速計 $\phi=50\text{mm}$	u, v	英国の感潮河川	3-6	?	3×10^6	乱れ強度 u' 、 v' バースト現象の寄与率
川西・余越	1986	水講論文集	電磁流速計	u, v	太田川	2-6	>50	3×10^6	乱れ強度、バースト周期
瀬良・神田	1988	水講論文集	超音波流速計	u, v, w	武庫川	0.3	32	4×10^4	乱れ強度3成分
松岡保正	1989	水講論文集	電磁流速計	u, v	千曲川	0.5-1.	?	10^5	乱れ強度、レイノルズ応力
福津・中川ら	1990	関西支部年講	電磁流速計	u, v, w	琵琶湖疏水	2.2	8	8×10^6	乱れ強度3成分

の外的な境界条件)によって支配されるというこれまでの定説に疑義が唱えられ、 T_0 はReの関数であり、むしろ内部変数(摩擦速度 U_* と動粘性係数 ν)に支配されるというBlackwelder(1987)³⁾の驚くべき指摘である。組織乱流は、運動量やエネルギーの発生原因であり、また各種の熱・物質輸送(浮遊砂、水質など)の主因であるから、もしもBlackwelderの指摘が正しければ実験室のデータのみから構築されてきた乱流理論を再検討せねばならず、この衝撃は決して小さくない。また、 $k-\epsilon$ モデルで代表される乱流モデルもReが極めて大きな現地の流れには適用できなくなる。しかし、上述の論争には、現在まったく決着が着いていない。もう1つの例は、実験室のカルマン渦は $Re < 500$ できれいに形成され、 $Re > 10^4$ では乱れてしまう。この結果は、数値計算でもシミュレートできる。しかし、よくご存知のように、済州島の後流で形成される組織渦は、Reが極度に大きいにもかかわらず、きれいなカルマン渦となっている。

したがって、レイノルズ数相似則を過信して、実験室のデータのみをすべてスケールアップして現地の流れ、特に、組織渦の特性などを見積るのは慎重を要すると思われる。実験室のデータは、「moderate」レイノルズ数と呼ばれるが、ではいったいどのレイノルズ数までスケールアップできるのかというきわめて重要な研究課題となる。境界層ではBlackwelderの疑義などを説明するためには、高レイノルズ数が出せる巨大風洞を建設せねばならない。しかし、水流を対象するのであれば、幸いにも、河海水域が正に実験場となり、いわゆるGeophysical Large-scale Turbulence(GLT)の特性が得られるから、実験室規模の組織渦との比較からReの依存性も解明されるであろう⁴⁾。この意味で、現地計測の意義が再認識される。また、種々の地球環境問題すなわちグローバルな水域環境を水理学的に解明する際にも現地データはますます重要である。

3. 河海水域での乱れ計測に関するレビュー

河海水域で行われた乱れ計測例を、筆者らが知る範囲内でレビューしたものが表-1である。この中には、水理学・流体力学の発展に多大な寄与を果たした優れた研究が含まれている。1つは、Grantら(1962)によって行われたバンクーバー海域でのホット・フィルム流速計による乱れ計測である。ホット・フィルムがまだ研究開発中であった時期に、コニカル型のプローブをいち早く試作して、ゴミや浮遊物の付着の影響を最小限にして現地計測に成功したことは驚異である。この海域の流れ(ある時間内では定常流と見なされる)はレイノルズ数が 10^8 と非常に大きいから慣性小領域が広範囲に存在し、乱れのスペクトル解析を行えば、有名なKolmogoroffの局所等方性理論が充分検証でき、また、この理論では未決定のKolmogoroff定数Cが実験

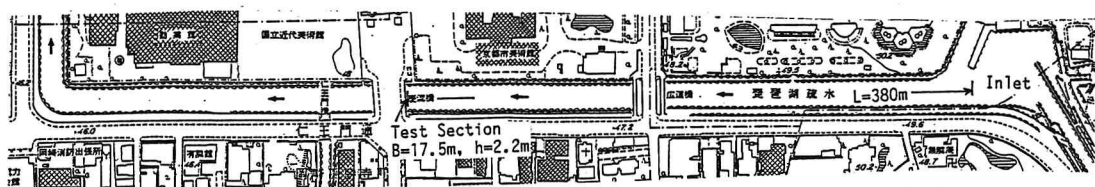


図-1 琵琶湖疏水（蹴上げから岡崎公園間）の平面図

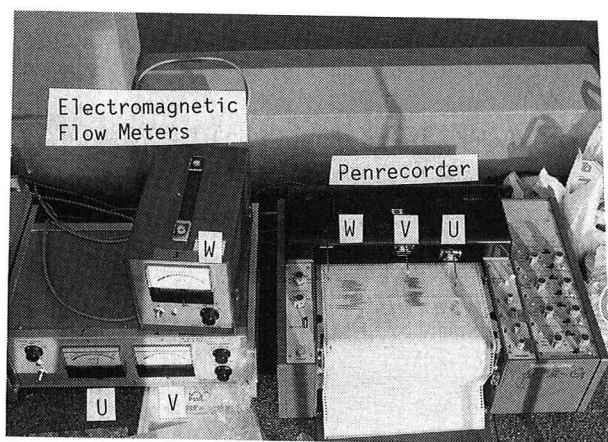


写真-1 計測システム



写真-2 プローブの移動装置

的に求められる。Grantらはこの動機で研究に着手して、Cの決定に成功したのである。彼らのCの値は現在でもほとんど正確であり、u成分の-5/3乗則分布がこのようにして決められた。その後、この分布が実験室の乱れに適用され、例えば、乱れエネルギーの逸散率が高精度に評価できるようになったのである。

もう1つの重要な計測は、Gordonや Heathershawによって行われた河海水域でのバースト現象の発見である。先のGrantらの研究が従来型の乱流統計理論であるのに対して、このバースト現象の計測・発見は最近の組織乱流理論であり、実験室で発見された組織渦が果してレイノルズ数の大きな自然界の流れにも存在するかといった学問的興味に答えるものであった。これは、(u, v)の乱れ2成分が同時計測できるようになり、瞬間レイノルズ応力 uv が計測可能になったからである。1980年代に入って、2成分電磁流速計のプローブが非常に小型化し、また応答性や安定性も向上した。この電磁流速計は浮遊砂や水質の影響を受けにくいから、現地での乱れ計測には最適であり、最近、この流速計がよく使われている。

表-1を見てさらに注目すべき点は、初期の乱れ計測は自己相関やそのフーリエ変換にあたるスペクトル解析が中心であった。これは、実河川等の乱れスケールを評価し、実験室規模の乱れ特性のスケールアップを狙ったものと思われるが、一方、乱れ強度の絶対値計測に比べてこれらの計測が若干容易であったことも見逃せない。1986年以降は、計測器の高精度化に伴って、流速分布や乱れ強度3成分の絶対値をかなりの精度で計測できるようになった。このため、野外水域、広くは地球規模の環境水圏の乱流構造を解明する幕開けが到来したものと考えられる。

4. 本研究の計測地点と計測システム

4.1 野外計測地点

土木学会若手研究Gがレビューしたように⁵⁾、実河川には様々なスケールの組織乱流が存在するが、まだ体系だった研究は行われていない。このため、河川の最も基本的な特性を解明するには、先ず、湾曲流とか蛇行の影響がなく、また、複断面等の断面変化のない、いわゆる長方形断面直線河川が望ましい。この基準で、本研究では琵琶湖疏水が選ばれた。琵琶湖疏水は、本年(1990年)が竣工100年記念であり、最も整備された人工河川といえる。図-1に示すように、琵琶湖から一定流量の水流が南禅寺近くの減勢池に導かれ、ここから直線河川に流入する。有名な平安神宮の大鳥居近くの「麩橋」には橋脚があるから、この下流近くは計測に不適當である。しかし、麩橋の上流の「広道橋」には橋脚がなく、河川流入口から計測位置の麩橋までの長さ $L=380\text{m}$ 区間は幅 $B=17.5\text{m}$ の様な直線水路である。流入口は実験室水路とほぼ同様

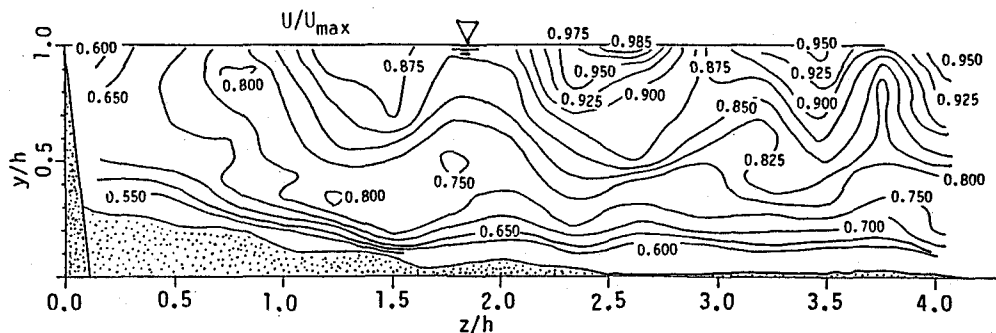


図-2 慶流橋地点の主流方向の平均流速分布 $U(y, z)$ の等流線図

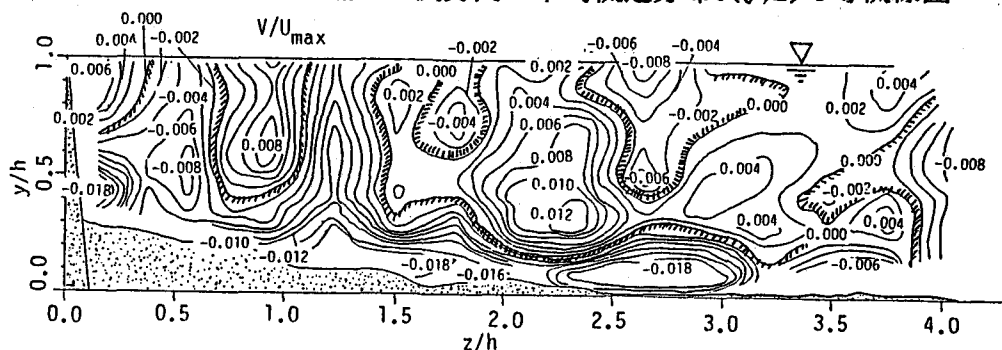


図-3 慶流橋地点の鉛直方向の平均流速分布 $V(y, z)$ の等流線図

に絞られておるから、大スケールの攪乱は減衰すると期待される。水深 h は、 $h=2.2\text{m}$ であったから、 $L/(4R)=53$ （ここで、 R は径深）となり、充分に発達した乱流と見なしてよい。この意味で、慶流橋地点の乱流計測は、実験室水路をいわばスケールアップしたほぼ理想的な流れと考えられる。同様に、この琵琶湖疏水が鴨川と並行して流れる伏見区のススハキ橋でも計測が行われた。この地点では、 $B=12\text{m}$ 、 $h=1.7\text{m}$ であった。

4. 2 計測システム

疏水の水は群青色に濁っているから（水面下はまったく見えない）、この水質の影響を受けない電磁流速計が最も適切な計測器として選択された。流速3成分(u, v, w)を同時計測するために、市販の電磁流速計をメーカー（計測技研社）に改良特注した。すなわち、主流成分 u と鉛直成分 v は、瞬間レイノルズ応力- uv を構成するからほぼ同一点計測が可能ないように直径 $\phi=6\text{mm}$ のプロブが製作された。また、水平成分 w は、 uv -プロブから 5cm 離して w -プロブが設置された。これらのプロブはいずれも実験室用として開発されたものだが、乱流計測にはむしろ大規模水路しか使えず、今回の疏水計測には最適であった。写真-1に示すように、(u, v)は2成分用のアンプ、 w は1成分用アンプにつながれた。 u のアンプのフルスケールは、 100cm/s 、一方 v と w は 25cm/s であった。3成分の流速変動は、フィルターなどの信号前処理器を通してA/D変換器にかけられ、磁気テープMTに記録された。その後、このMTは京大大型計算センターに入力され、各種の統計計算がなされた。また、MTへの記録と同時に、ペンレコーダで(u, v, w)の信号がモニターされ、計測中に異常が無いことを確認した。なお、慶流橋では270測点、ススハキ橋では180測点設定し、1測点あたり40Hzで7分間あるいは100Hzで3分間計測した（データ数 $N=17,000$ ）。なお、最大流速 $U_{\max}$ は、慶流橋で 40.7cm/s 、ススハキ橋で 73.8cm/s であった。

4. 3 計測プロブの移動装置

実験室でのプロブの移動装置は比較的容易であるが、野外計測ではこれが最も大きな困難となる。多くの場合、パイや観測船に係留されるが、プロブ自体がカルマン渦の放出等で振動し、流速変動にこの影響が混入する可能性が高い。そこで本研究では、実験室の移動装置と同様な機構をもつ野外装置を開発した。2本の固定ボールを河床に固定し、主ボール（ $\phi=40\text{mm}$ ）に沿ってスライドして上下方向にプロブをハンドルで正確に移動できる構造とした（写真-2を参照）。この移動装置は組立製であり、現地で最大 8m まで移動可能に設計されている。しかし、主流速が 70cm/s 以上だとボールが流体力で下流側にわずかにたわみ、スライドの摩擦のためにプロブの移動がかなり困難となった。このため、ボールの数力所にロープで上流側に張力を加えた。なお、主ボールの河床への固定に関しては、レベルで正確に測量した。

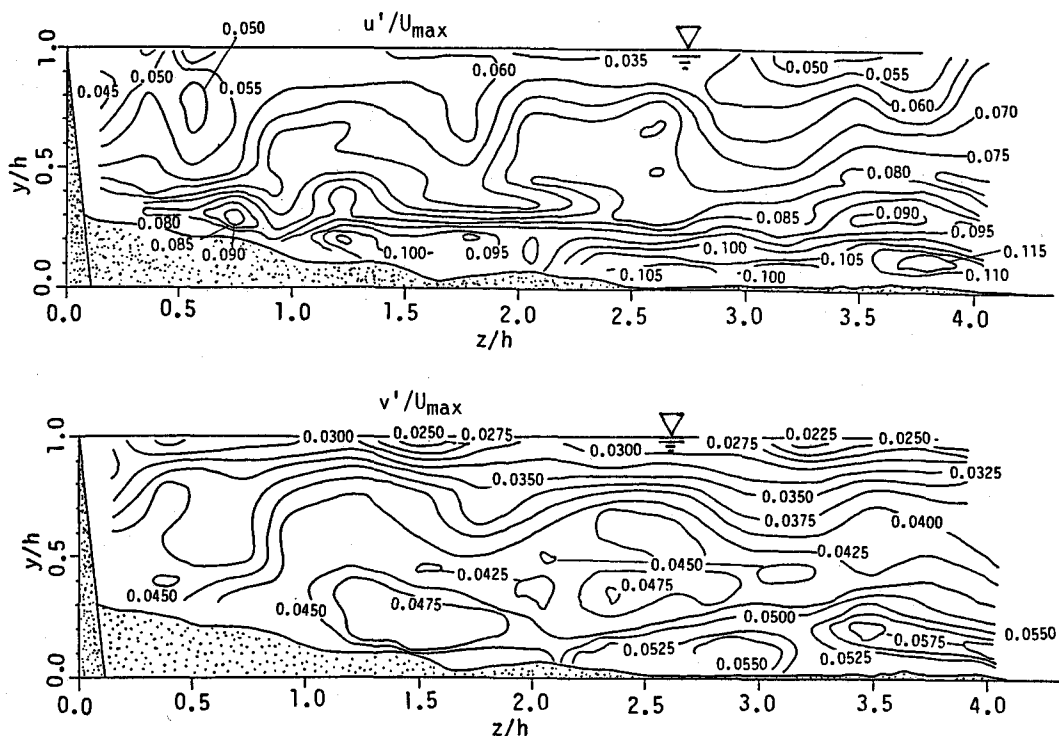


図-4 慶流橋地点の乱れ強度分布 u' および v' のコンター

5. 計測結果およびその考察

5.1 平均流速分布

慶流橋及びスハキ橋で計測した平均流速 U を鉛直方向の座標 y に対して片対数プロットすると、側壁からの距離 z を変化させても、各測線で直線分布した。すなわち、平均流速分布は対数則を良好に示したから、実験室ですでに確定しているカルマン定数 $k=0.41$ を用いて⁶⁾、摩擦速度 U_* が評価された。図-2は、慶流橋地点で270測点から得られた平均流速 U の等値線をプロットしたものである。河床高は測量して決められた。側壁部で土砂の堆積が見られるが、アスペクト比 $B/h=8$ のほぼ長方形断面水路とみなされる。この等流速線図から最も注目されるのは、水面近くに高速域と低速域が交互に帯状に現れている点である。すなわち、木下(1984)⁷⁾ が河川の航空写真測量から発見した並列らせん流の存在が琵琶湖疏水の流れにも見いだされる。しかし、隣合う高速域の距離は $(1-1.5)h$ であり、木下が指摘した $2h$ よりかなり小さい。

5.2 2次流分布

図-3に鉛直方向の平均流速成分 V の等値線を示す。 V の最大値は、 4cm/s 程度であったから、電磁流速計のフルスケールの16%程度に相当し、この計器の測定誤差とされている $\pm 2\%$ (or 0.5cm/s) より大きい値は信頼性が高いと考えられる。この計器の精度を考慮して図-3を解釈すると、 $z/h=0.5$ と 1.0 にそれぞれ強い下降流と上昇流がペアで現れ、また $z/h=2.1$ と 2.7 にもこれが見られる。図-2と比較すると、高速域で下降流が、一方低速域で上昇流がほぼ対応し、この結果は実験室で高精度レーザ流速計を用いて得られたものと基本的に同じであり、注目される。すなわち、レイノルズ数が大きい河川で、並列らせん流(2次流セル群)の実態を初めて野外計測から明らかにしたものである。

5.3 乱れ強度のコンタ分布

図-4に乱れ強度 u' 及び v' のコンタを示す。一定値の U_{max} で無次元化表示しているからこのコンタは絶対変化を示している。乱れ構造も3次元変化を示し、水路幅方向にかなり波状性を呈す。 u' 、 v' また w' は、共に上昇流部で高乱れ、一方下降流部で低乱れとなる。 u' と v' を比較すると、 v' は水面に向かって単調に減少するが、 u' は強い下降流部では水面下に最小値をとる点が注目される (i.e. $z/h=0.5, 2.7$)。このように、水面近傍の乱れの非等方性のために、2次流セルは発生することがすでに実験室で詳細に検討されている⁸⁾。したがって、スケールアップした実河川でも同様なメカニズムで2次流や縦渦が発生すると結論づけてよい。

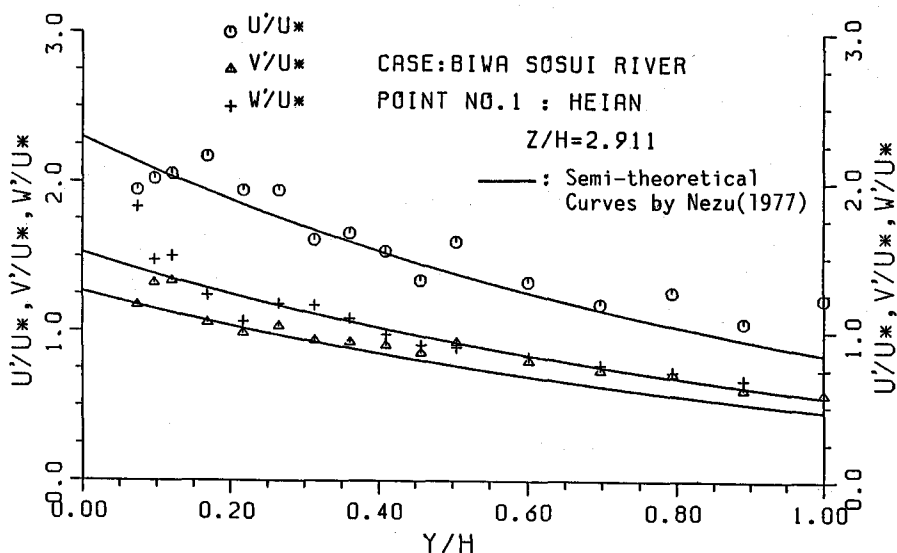


図-5 乱れ強度3成分の普遍関数表示 u'/U_* 、 v'/U_* 、 w'/U_*

5. 4 乱れ強度3成分の普遍関数表示

図-5は、乱れ強度3成分をその計測位置の摩擦速度 U_* で無次元表示したものである。図中の実線は、禰津(1977)⁹⁾によって実験室規模の乱れをホット・フィルム流速計で計測して確定された半理論曲線である。野外実測値とこの理論曲線との一致は思いのほか良好である。このことは、乱れ強度3成分に関して、実験室規模の乱れから得られた普遍関数をレイノルズ数が非常に大きな河川乱流にもスケールアップして適用できることを示している。

6. あとがき

理想的な野外計測地点と考えられる琵琶湖疏水の3次元乱流計測を今回初めて行った。計測方法等にはまだ改善の余地があるが、琵琶湖疏水までスケールアップした流れの長時間平均の乱流構造は実験室で高精度に計測された結果とほぼ同じであり、レイノルズ相似が成立していると結論される。今後、バースト周期等を精力的に検討し、短時間構造すなわち河川の組織乱流を解明して行きたい。

最後に、本計測に当り、京都市水道局及び京都市美術館に便宜をとっていただいた。また、本学大学院生の鈴木康弘及び村瀬勝彦には計測協力をいただいたことを記し、併せてこれらに感謝したい。

【参考文献】

- 1) Gibson, A.H.(1909): On the Depression of the Filament of Maximum Velocity in a Stream Flowing through an Open Channel, Proc. Royal Soc. London, vol.82, pp.149-159.
- 2) Keulegan, G.H.(1938): Laws of Turbulent Flow in Open Channels, J. Research, National Bureau of Standards, vol.121.
- 3) Blackwelder, R.F.(1987): Coherent Structures Associated with Turbulent Transport, Proc. of 2nd Symp. on Transport Phenomena in Turbulent Flows, Tokyo, pp.1-20.
- 4) 禰津家久(1989): 水理学における乱流研究の動向、日本流体力学誌、第8巻、第2号、pp.106-120.
- 5) 玉井信行(編)(1989): 乱流における組織構造の役割、土木学会水理委員会若手研究分科会活動成果報告書、[この総括が、現在、土木学会論文集に印刷中である]。
- 6) Nezu, I. and Rodi, W.(1986): Open-Channel Flow Measurements with a Laser Doppler Anemometer, J. Hydraulic Eng., ASCE, vol.112, pp.335-355.
- 7) 木下良作(1984): 洪水流の航空写真、土木学会論文集、第345号、pp.1-19.
- 8) 富永晃宏(1988): 直線開水路流の3次元乱流構造に関する研究、京都大学学位論文。
- 9) 禰津家久(1977): 開水路乱流の乱れ強度に関する研究、土木学会論文集、第261号、pp.67-76.