

超音波流速計による河川流の測定

Measurement of River Flows with Ultrasonic Flowmeter

神戸大学工学部 正 員 瀬良昌憲 M. Sera
 神戸大学工学部 正 員 神田 徹 T. Kanda

1. まえがき

室内の模型実験水路における精緻な計測・解析を基にして河川の流れの構造を説明することは、近年の水理計測技術の進歩とも相俟って一層重要であることは言うまでもない。一方、河川流の現地観測も従来数多く実施されているが、乱流成分の測定など流れの比較的ミクロな構造を明らかにしようとする目的で行われた測定は少ない^{1), 2), 3)}。特に、実河川における流速の3方向成分に関する資料や解析結果はほとんど報告されていない。その理由の一つとして、実河川での流速測定に適した計測機器が少ないことが挙げられよう。以前より用いられているプロベラ流速計は取り扱いが簡単であるという長所を持つ反面、基本的には1方向のみの測定に限られ、流速変動の追従性にも問題がある。また、熱線流速計は実河川での測定となると水の汚れに対して弱く、長時間にわたる安定性が問題となる。最近乱流現象の解明によく利用されているレーザードップラー流速計は実験室水路での使用に限られ、実河川での使用は到底不可能である。これに対して、本研究で使用する超音波流速計は、流速測定のキャリブレーションが不要であること、水温変化による補正が不要であること、長時間安定性が優れていること、流速の3方向成分同時測定が可能であることなどの特長を有し、測定条件の厳しい実河川での利用が期待される。本研究では、実験室水路及び実河川において流速3方向成分の同時測定を行い、種々の乱れ特性量を従来の研究結果と比較することにより、実河川での3方向流速の計測に対する本流速計の有用性を検証すると共に、河川規模、河道形状、河床状態等の異なる種々の河川における現地観測をもとに河川流の特性を調べる。

2. 超音波流速計の概要

2.1 測定原理

本流速計は超音波の伝播方式として、X、Y軸方向は反射式、Z方向は対向式を採用し、素子間の超音波の伝達時間の差から3方向成分の流速を求めている（時間差法）。すなわち、図-1に示すように超音波発信圧電素子（ピエゾ素子）AとBの距離をL、A-E、E-B間の距離の和をe、A-BとA-E（あるいはB-E）とのなす角度を θ とし、AからBの方向の流速をV、その時の音速をcとすると、Aから発信された超音波が反射板を経てBに到達するのに要する時間 T_A およびその逆にBからAに到達するのに要する時間 T_B は、 $c \gg V$ を考慮して、

$$T_A = \frac{e}{c + V \cdot \cos \theta} = \frac{e}{c} - \frac{V \cdot L}{c^2}$$

$$T_B = \frac{e}{c - V \cdot \cos \theta} = \frac{e}{c} + \frac{V \cdot L}{c^2}$$

したがって、 T_A 、 T_B の時間差 ΔT は、次式で与えられる。

$$\Delta T = T_B - T_A = 2VL/c^2$$

上式でLとcが既知であれば、時間差 ΔT を測定することによって流速Vを求めることができる。本流速計では、A-B間、C-D間F-G間の順に超音波パルスを発信させ、直接 ΔT を測定する。そ

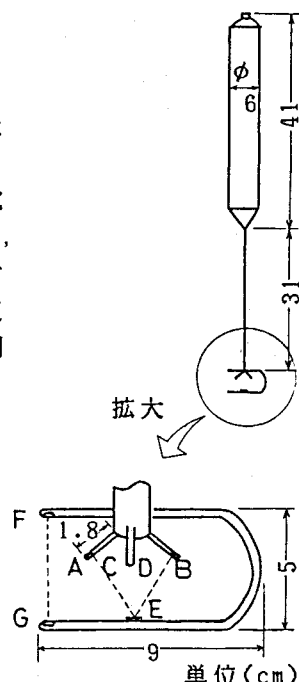


図-1 超音波流速計

して、時間差 ΔT はアナログ信号電圧に変換され、さらに水温その他による音速の変化を検出し、信号電圧値を自動補正して流速値としてのアナログ信号電圧が出力される。

2. 2 特徴

a) 長時間安定性

静水状態において約8時間にわたり信号電圧を記録した結果の一部を図-2に示す。この図に見られるように1時間以内の零点のドリフトはほとんどない。長時間連続して測定する場合は零点のドリフトが無視できないが、その変動は極めて緩慢であるから適時零点の調整を行えばよい。

b) 流速成分の同時測定

本流速計はX、Y、Zの順に各素子間で300Hzの超音波パルスを発信させているので、ほぼ100Hzまでの流速変動の3方向成分を同時測定可能である。

c) 流速のキャリブレーション

流速と信号電圧との関係はあらかじめ検定用水槽において求めておく。本流速計は水温変化の影響も自動補正されるので、一度検定を行えばセンサー間の幾何学的形状が変化しない限り、その関係は不変であり、計測時に流速のキャリブレーションは不要である。

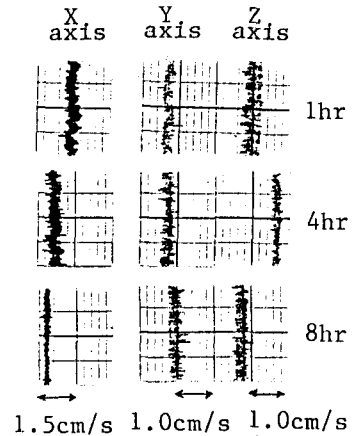


図-2 長時間安定性

3. 測定方法

3. 1 計測システムとデータ処理システム

本研究における計測システムを図-3(a)に示す。超音波流速計本体とモニター・ユニットから構成され、流速計から得られる信号電圧をモニター・ユニット内のアンプによって増幅し、出力電圧をアナログ・データレコーダに記録する。なお、本システムは現地観測における機動性を高め、不要な電源ノイズを除去するため、すべて直流電源を使用した。

データ処理システムを図-3(b)に示す。記録されたデータは2つの系に分けてデータ処理される。すなわち、スペクトラム・アナライザを用いてデータ処理する系と、50Hzのローパスフィルターを経てデータをA/D変換し、パソコンを用いてデータ処理する系である。データ処理において、平均流速、乱れ強度、レイノルズ応力については、サンプリング周波数100Hz、データ数5120個とし、相関係数については、サンプリング周波数128Hz、データ数1024個、アンサンブル平均回数8回とし、スペクトルについては、サンプリング周波数64Hz、データ数1024個、アンサンブル平均回数32回とした。

3. 2 測定条件

測定は実験室水路と河川で実施した。座標系は、測定点の座標原点を河床位置に置き、X軸の正方向を流下方向にとる左手系とした。

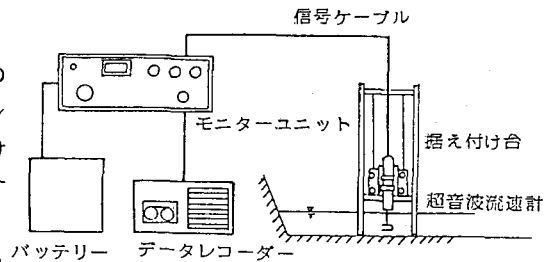


図-3(a) 計測システム

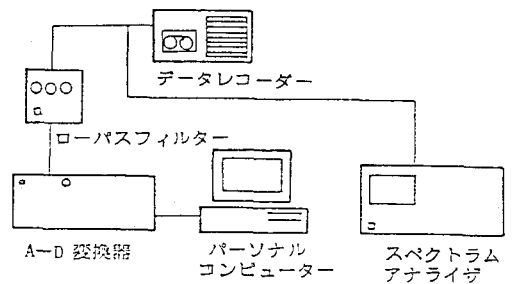


図-3(b) データ処理システム

(1) 実験室水路

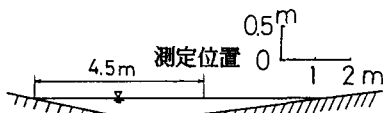
水路は幅 0.5 m, 高さ 0.6 m, 長さ 16.0 m, 床勾配 1/250 の鋼製の一樣矩形断面水路である。測定は水路上流端より 12.0 m の位置で行った。

(2) 河川

河川での測定は兵庫県下の 12 河川において実施した。その測定結果のうち、以下では武庫川と損保川の 2 地点について述べる。

a) 武庫川

測定地点は J R 福知山線広野駅より約 1.8 km 上流の地点である。河道は測定地点の少し上流側で多少湾曲しているが、測定地点付近は直線状に近い。河川横断面は図-4 (a) に示すようであり、河幅は 8.2 m, 測定位置は左岸より 4.5 m で、河床状態は細砂および泥から成っている。水理条件を表-1 に示す。



(a) 武庫川

b) 損保川

測定地点は J R 山陽本線、龍野駅の北部に位置する。測定地点付近で河道はやや湾曲しており、河幅は 37 m, 測定位置は右岸から 4.6 m である。横断面は図-4 (b) に示すようであり、河床状態は 30 ~ 40 cm 角の石が敷き詰まった状態で凹凸が激しい。水理条件を表-1 に示す。



(b) 損保川

図-4 河川横断面

表-1 水理条件

測定点	河幅 B (m)	水深 H (cm)	平均流速 $\bar{U}$ (cm/s)	摩擦速度 U_f (cm/s)	レイノルズ数 $Re = \bar{U}H/\nu$	フルード数 $Fr = \bar{U}/\sqrt{gH}$	河床状態
実験室	0.5	18.7	13.5	0.85	2.1×10^4	0.17	滑面
武庫川	8.2	26.0	14.5	1.06	3.6×10^4	0.09	砂および泥
損保川	37.0	37.0	73.0	8.04	2.8×10^5	0.31	30~40cm角の石

表中の摩擦速度 U_f は平均流速の対数分布則より求めた。

4. 測定結果とその考察

4.1 平均流速分布

平均流速の鉛直線上の分布を図-7 に示す。この図から明らかなように、X 方向の流速 U のみ値をもち、Y, Z 方向はほぼ零である。この平均流速 U を最大平均流速 U_{max} で無次元化し、 $\log(z/H)$ に対して示したものが図-8 である。この図より、 $z/H = 0.2 \sim 0.8$ の範囲で流速分布則が成立していると判断される。

4.2 乱れ強度分布

乱れ強度の鉛直線上の分布を図-9 に示す。横軸は X 方向の断面平均流速 $\bar{U}$ で無次元化している。各図とも水面付近および河床付近を除けば、乱れ強度は河床に近づくにつれて大きくなる傾向を示し、また各方向成分の大小関係については従来の多くの結果同様、 $u' > v' > w'$ である。実験室水路での結果と比較すると、武庫川での結果は X, Y 方向で 38% 程度、Z 方向で 30% 程度大きくなっている。

4.3 相関特性

半水深付近における X 方向成分の自己相関係数を図-10 に示す。これらの図から、フルード数 Fr の比

較的大きい損保川では、 Fr の小さい実験室水路や武庫川に比べ τ の増加とともに相関係数が急激に減少する傾向が認められる。さらに、 τ の増加に伴う Y 、 Z 方向成分の値の減少の度合いは、 X 方向成分のそれに比べてかなり大きいことが確認された。一般に相関係数はデータの評価時間によって大きく変化するので、通常相関係数の減衰過程で生ずる second mild maximum の時間 τ_s を正確に求めることはむずかしいが、ここでは前述のデータ・サンプリングで求めた τ_s を比較すると、実験室水路での平均値 0.17 sec に対して、武庫川では 0.33 sec と大きい。

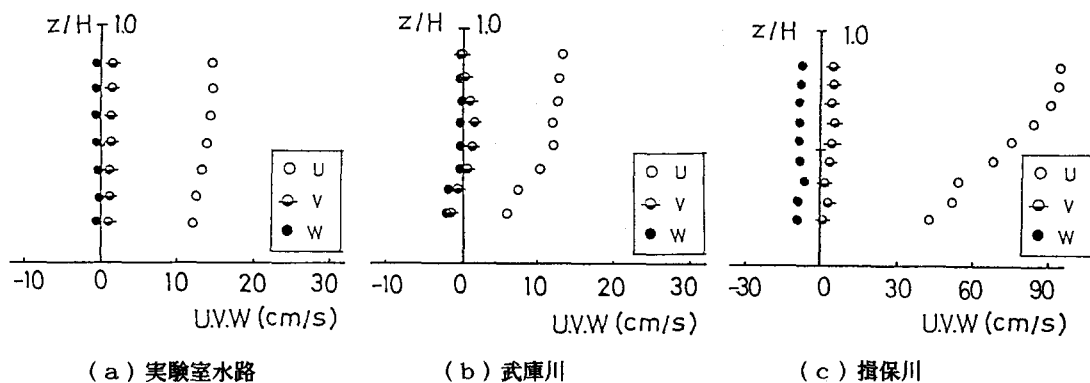


図-7 平均流速分布

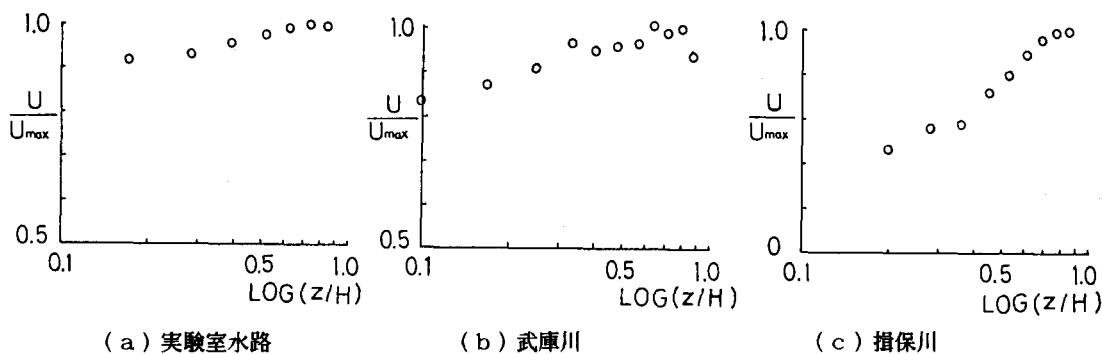


図-8 対数分布則

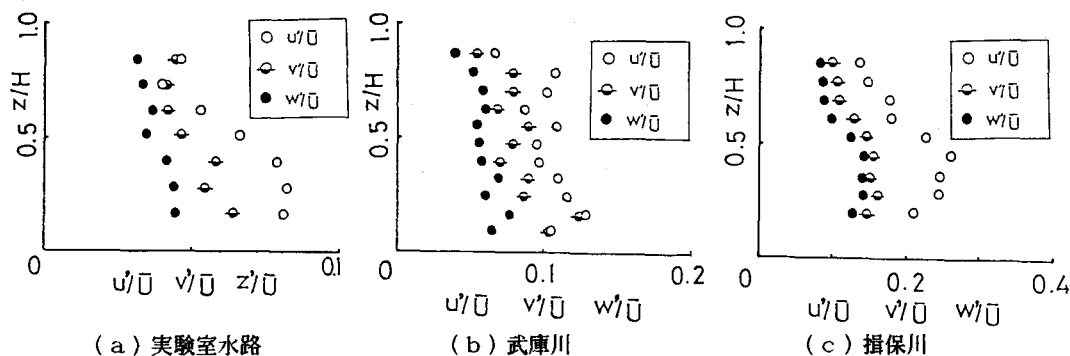


図-9 乱れ強度分布

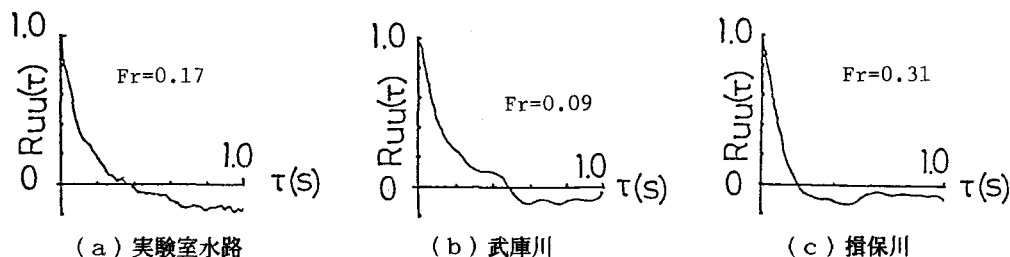


図-10 自己相関係数

4. 4 レイノルズ応力

レイノルズ応力の鉛直線上の分布を図-11に示す。今本らの実験結果⁴⁾と比較すると、実験室水路と武庫川では明確な分布特性は現れておらず、各レイノルズ応力間の大小関係は明確ではないが、損保川では $-\overline{uw}/U_f^2$ の分布が卓越して大きな正の値をとる。しかし、その分布形状の特異さは以下のような流速計の構造にも関係していると思われる。図-12に示すような流速の測定領域を考えると、X方向の測定領域とZ方向の測定領域(図中の斜線部分)は空間的に若干のずれがある。このため、本流速計のプローブの規模以上のスケールの乱流成分であれば2方向の流速成分の相関を求めることができるが、より小さいスケールの乱れに対する相関の計測には精度の限界がある。

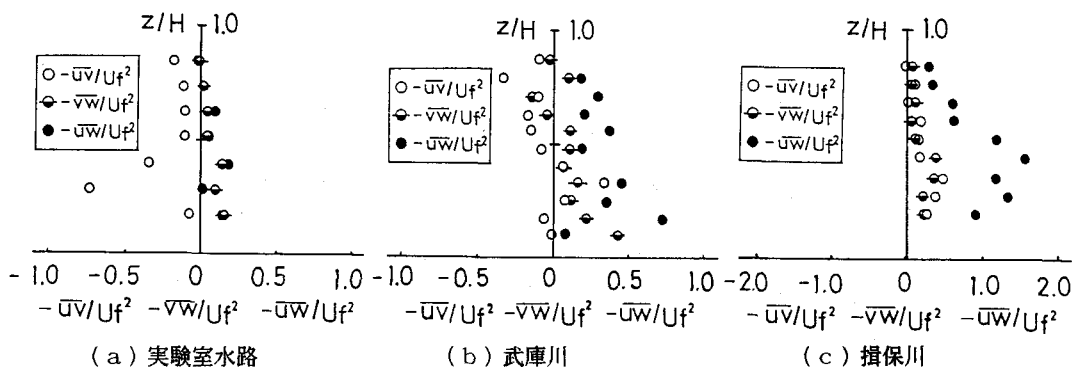


図-11 レイノルズ応力

4. 5 エネルギー・スペクトル

半水深付近のX方向成分のエネルギー・スペクトルを図-13に示す。実験室水路と武庫川では0.25Hz から5Hz まで-5/3の傾きを持つ慣性領域と、5Hzから15Hzまで-3の傾きを持つ粘性領域が認められたが、生成領域は認められなかった。Y, Z方向についても同様の結果が得られた。一方、損保川における粘性領域の傾きは必ずしも-3乗則では説明できず、椿らの結果⁵⁾で示されている-13/3に近い値をとっている。今回の現地観測で得られた他の河川の結果についても、乱れの比較的大きい河川の場合は粘性領域の傾きは-3より大きい値をとるようである。

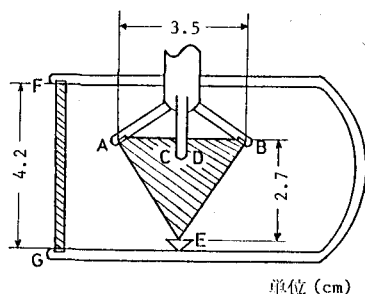


図-12 測定領域

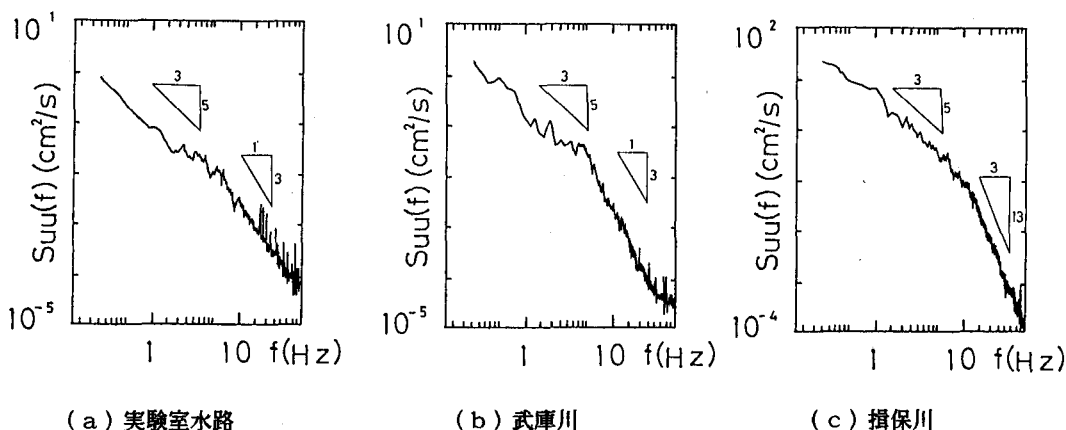


図-13 エネルギー・スペクトル

5. 結 語

本研究は超音波流速計を用いて実河川における流速測定を実施し、実験室水路での測定結果と比較・検討を行った。得られた結果をまとめると以下の通りである。(1) 本研究で用いた超音波流速計は、長時間安定性が良好で、取り扱いも簡便であり、実河川での3方向流速の観測に十分利用できることがわかった。

(2) 平均流速分布、乱れ強度、レイノルズ応力、エネルギー・スペクトルなどに関して実験室水路の結果と比較したところ、河川規模が小さく、流速が小さい場合には、実験室水路と実河川ではこれらの量はほぼ同じ特性を示す。(3) フルード数 Fr の比較的大きい流れにおける相関係数のラグの増加に伴う減少の割合は Fr の小さい流れのそれに比べかなり急激に減少する。(4) 河川の規模が比較的大きく、流速が大きい場合は、乱れ強度が大きく、エネルギー・スペクトルの粘性領域の傾きは-3より大きい値をとるようである。

以上のように実河川における本流速計の有用性が確認されたので、今後、さらに河川規模、河道形状、河床状態等の異なる種々の河川において現地観測を重ね、データの蓄積とその特性解明に努めるつもりである。

末筆ながら、本研究を行うにあたり適切な御助言を賜った神戸大学工学部、寛 源亮 教授に感謝の意を表します。また、現地観測とデータ解析に協力して頂いた神戸大学学生、川崎哲人君に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 余越正一郎：琵琶湖疎水における乱れの観測，京大防災研究所年報，9B，pp.513-523，1966。
- 2) 浅野富夫・岩佐義朗・西原 巧：河川における乱れの時間構造について，第23回水理講演会論文集，pp.99-105，1979。
- 3) 中川武夫・今井 悟 他：河川内における乱流特性，第28回水理講演会論文集，pp.219-224，1984。
- 4) 今本博健・石垣泰輔：LDVによる開水路流れの速度ベクトル計測について(1)，京大防災研究所年報，28B，pp.471-486，1985。
- 5) 椿東一郎・小松利光：成層密度噴流における乱れおよび密度変動のスペクトル特性，土木学会論文報告集，No.268，PP.63-74，1977。