

超音波流速分布計測法を用いた 河川流動計測

RIVER FLOW MEASUREMENT USING ULTRASONIC DOPPLER METHOD

和田守弘¹・木倉宏成²・有富正憲³・森治嗣⁴

Saneshiro WADA, Hiroshige KIKURA, Masanori ARITOMI, Michitsugu MORI

¹工修 東京工業大学 理工学研究科原子核工学専攻 (〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1)

²工博 東京工業大学助手 原子炉工学研究所 (同上)

³工博 東京工業大学教授 原子炉工学研究所 (同上)

⁴工博 東京電力株式会社 (〒230-8510 横浜市鶴見区江ヶ崎町4-1)

In this paper the study on the application of ultrasonic Doppler method to a river flow is reported. This method uses a pulsed ultrasonic echography together with detected instantaneous Doppler shift frequency to form a velocity profile. Velocity profiles measured by this method and the Electromagnetic Current Meter were compared, and similar profiles were obtained. And a software which can calculate a river flow rate by using velocity profiles from some ultrasonic transducers has been made, then a real river flow rate were obtained from this software.

Key Words : *ultrasound, Doppler, velocity profiles, river flow rate measurement*

1. はじめに

我が国における多くの都市は、局地的な集中豪雨などに起因した洪水氾濫が頻発する河川流域に存在していることから、比較的洪水による水害を被る危険性が高いと言える。特に近年、我が国のみならず世界各地における異常気象と、それに伴う自然災害の発生率を考慮すると、その危険度は年々増大傾向にある。

洪水による被害を最小限に抑制するためには、河道計画に基づく築堤や改修などのハード的な対策に加え、信頼性の高い洪水氾濫シミュレーションモデルの確立などソフト的な対策も求められている。また、河道の水理特性の中でも流速や流量などの実測値取得は、正確な実河川形態の把握とそれに基づく河道設計、さらには、数値計算に用いるパラメータとして非常に重要度の高い要素であり、簡易で高精度な計測技術の開発が強く望まれている。

河川流量を求める為には、河川の断面積および各単位断面における流速計測が不可欠である。しかし

ながら、従来のうき投下や電磁流速計、プロペラ式流速計による流速計測は点測定であるため、横断方向および水深方向の流速分布を仮定する必要がある。さらに電磁流速計・プロペラ流速計は共に接触式計測であるため、流砂などが高濃度で含まれている流れ場への適用は困難である。また、リモートセンシング等の人工衛星を利用した計測技術を適用するには中小規模の河川等は狭すぎ、また、流れ場の表面流速のみの計測となることから、水深方向の流速分布が得られない。

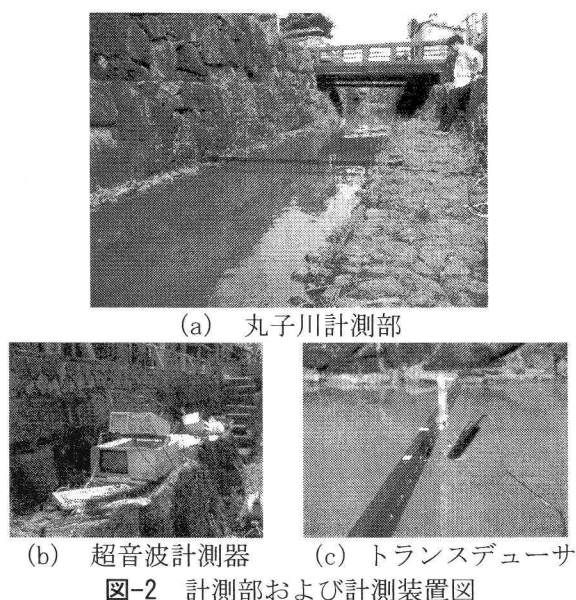
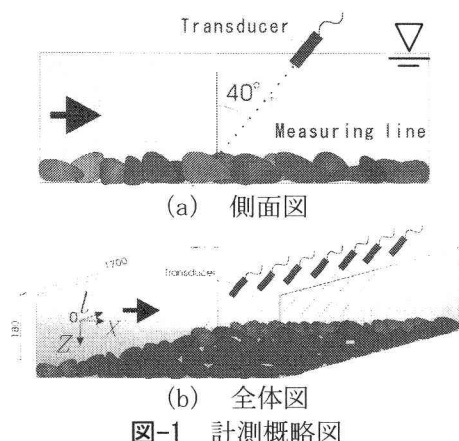
このような背景下、著者らは超音波を用いた簡易で高精度な流速分布計測技術の開発を進めており、本研究ではこの超音波流速分布計測法を河川の流速・流量計測に適用することを目的としている。超音波流速分布計測法とは、パルス超音波のドップラ効果を利用することで測定線上の流速分布を計測する手法であり、本手法の大きな特徴として非接触計測である点や不透明な流体への適用可能な点が挙げられる。本手法は、これまで主に原子炉における給水用配管の流量計測¹⁻³⁾や流れの物理的現象の解明

4-6)に適用されてきている。また、実河川等への適用性を確認するため、実際の小規模河川において電磁流速計 (KENEK 社製) と比較し良好な結果を得ており、さらに、複数の超音波センサーをその測定線が交点を持つように配置することで流れ場の 2 次元フローマッピングが可能であることを示した^{7,8)}。

現在、本計測法と同様に超音波パルスのドップラ効果を利用した計測機器として ADCP⁹⁾ (Acoustic Doppler Current Profiler) が河川流や潮流等に適用されているが、ADCP と比べ本計測手法は複数の超音波トランスデューサを任意に設置可能であることから、さまざまな河道への適用や、河床付近等の複雑な流動場における詳細な解析等が期待できる。

また、現有の装置は先に述べた様に高精度流量・流動計測を目的として設計されていることから、現状では計測範囲が数メートルに限られている。しかしながら、著者らは最大 100 m まで適用が可能な新たな計測装置の開発も進めているため、その前段階として本研究では現有の装置を用いた小規模河川の流速・流量計測を目的としている。

2. 測定方法



本計測は多摩川支流の小規模河川 (丸子川) にて行った。丸子川は幅1700mm、水深約180mmであり、測定中の水温は熱電対により計測した結果、21℃～24℃と時間的には変化していたが温度分布はほぼ一様であった。これによる音速変化は0.6%である。基本周波数2MHzの超音波トランスデューサを図-1のように川の横断方向に岸から200mmおよび250mm間隔で7箇所において、水面から深さ20mm、垂直から40°の角度で川の流れ方向に向かい合うように設置した。流速分布の測定点間距離は2.3mmであるため、約65の測定点により速度分布が計測されている。

3. 測定結果および考察

(1) 計測プロフィール数

本計測のデータ処理を行うにあたり、流速データ取得数を決定する必要がある。そこで、図-3のように同河川においてトランスデューサを水平に、流れ方向に対して45°の角度で設置し、10,000プロフィールの流速分布計測を行った。図-4にデータ数を変化させた時のアンサンブル平均流速分布とRMS値すなわち乱流強度を示す。また、図-5には横軸にデータ数、縦軸に乱流強度をプロットしており、これらの図より乱流強度はアンサンブル数500以上で収束していることから、本計測はデータ取得数を1024プロフィールに設定して行った。

(2) 乱流統計量

右岸からの距離 1 における 1 次および 2 次の乱流統計量として水深方向 z の平均流速分布と RMS 値を図-6 に示す。本計測では、図-1 の様にトランスデューサを水面から 20mm の深さに入射角 40° で直接水中に設置していることから、トランスデューサ端面近傍ではトランスデューサ自身が流れに影響を与えてしまうことから、測定開始点を水面から 50mm として流速分布を計測した。アンサンブル平均に用いたプロフィール数は 1024 点である。

図-6 よりどの計測位置においてもデータ落ちのない良好な流速分布が得られていることから、河川水中に含まれる流砂等が超音波反射体として十分利用可能であることが確認できる。また水面から 160 ～ 200 mm の間で流速値が零となっていることから、その位置が川底であることが分かる為、各測定線上の詳細な流速分布と共に、堆積物の量などの河床状態の情報も得る事が可能である。

次に横断方向にどのような流動場が形成されてい

るかを調べるため、水深 $z = 60, 130, 150, 160, 170, 180 \text{ mm}$ における横断方向の平均流速分布を図-7 に示す。横軸は川幅を縦軸は流速を表している。 $z = 60 \text{ mm}$ においては河川中央から岸に向かうに従い、流速が増加している様子がわかる。この傾向は $z = 150 \text{ mm}$ 付近まで見られるが、その後は平坦な流速分布になっている。また、 $z = 180 \text{ mm}$ において $l = 200 \text{ mm}$ および $l = 1100 \text{ mm}$ では流速が計測されていることから、計測断面においてこれらの位置が最も水深が深いことがわかる。

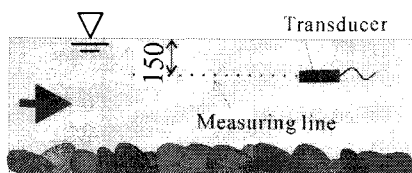
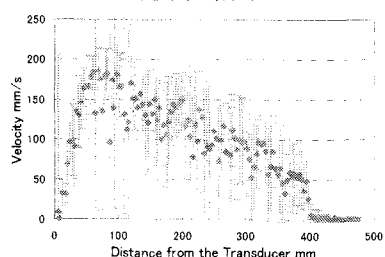
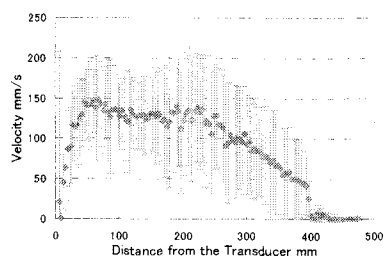


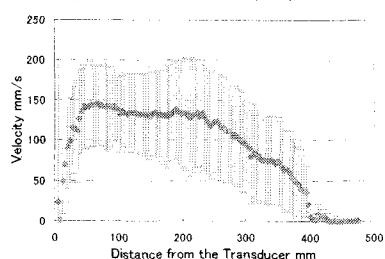
図-3 計測プロファイル数検証用
計測概略図



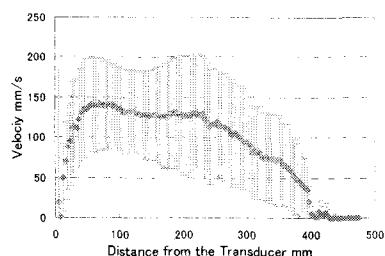
(a) 10プロファイル



(b) 100プロファイル



(c) 1000プロファイル



(d) 5000プロファイル

図-4 計測プロファイル数が平均流速分布に
与える影響

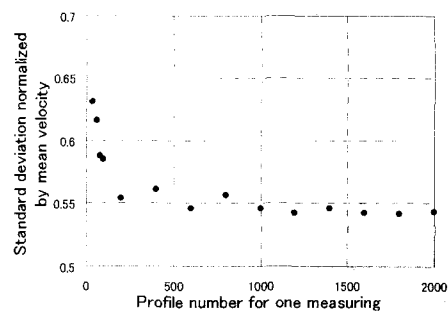
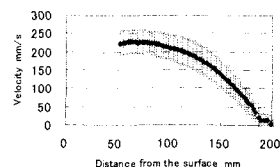
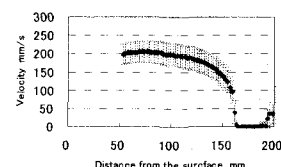


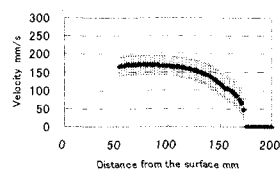
図-5 データ数が乱流強度に与える影響



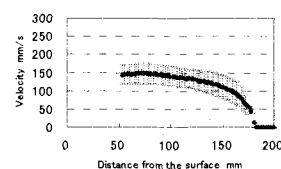
(a) $l = 200$



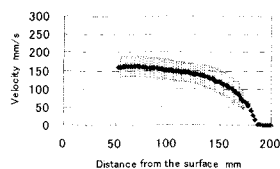
(b) $l = 400$



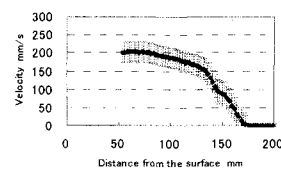
(c) $l = 600$



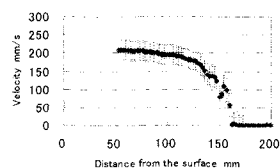
(d) $l = 850$



(e) $l = 1100$



(f) 1300



(g) $l = 1500$

図-6 各横断方向位置に対する
水深方向平均流速分布

(3) 流量算出法

本計測法は、トランスデューサの設置位置や角度により、図-6のように各測定線上の詳細な流速分布や水深の情報、また、図-4や図-7のような横断面流速分布が計測可能である。そこで、本研究ではこれらの情報を利用した複数のトランスデューサを用いた河川流量算出法を以下に示す。

本算出法は、水深方向および横断方向の流速分布が得られていることから、図-7のように各横断面ごとに断面積を求め、それらを高さ方向に積分することで流量を算出する方法である。断面積を求める際、両岸の流速値は零とし、隣り合う流速間には線形補間を行っている。また、本計測ではトランスデューサ

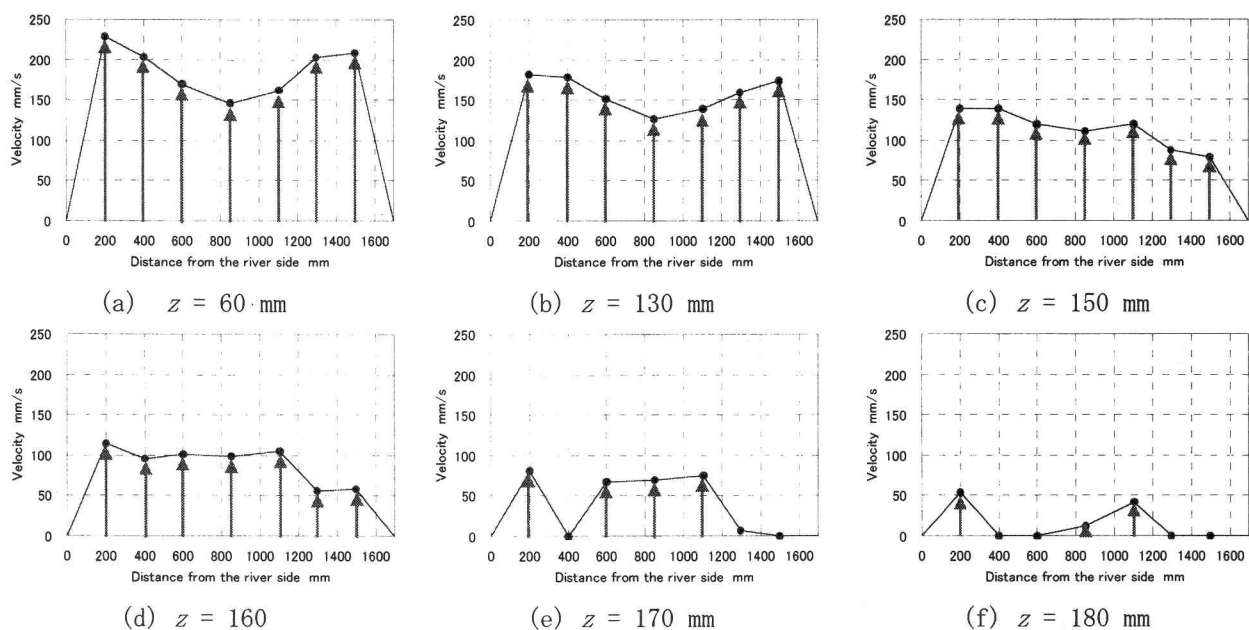


図-7 各水深における横断方向平均流速分布

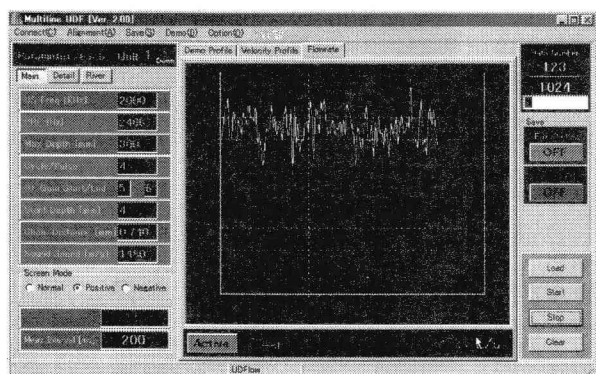


図-8 河川流量算出プログラム

自身が流動に与える影響を無視するために、流速測定開始位置を水深 $z = 50$ mmとしているが、図-6に示す様に $z = 50$ mm 付近の流速勾配は非常に小さい為、 $z < 50$ mm の領域における流速分布は $z = 50$ mm と同様であるとし次式を用いて補間を行った。

$$Q = \sum_{p=1}^m \sum_{i=1}^n \frac{\Delta l \cdot \Delta z}{4} (v_{p,i} + v_{p,i+1} + v_{p+1,i} + v_{p+1,i+1})$$

ここで、 m および Δl は横断方向に設置したトランスデューサ数およびトランスデューサ間距離、 n と Δz は水深方向の超音波測定体積数とその測定体積間距離、 v は得られた流速値である。

図-8は上記の式に基づく河川流量計測プログラムである。本プログラムでは、トランスデューサ設置位置や計測パラメータを任意に決定することができ、複数のトランスデューサによって得た瞬時流速情報から瞬時流量の演算が可能であることから、河川流動の過渡変化を捉えることも可能である。本計測データ及び本プログラムを用いて算出した平均流量は

35 l/s であった。

4. 結論

実河川において、複数の超音波センサーを利用した超音波流速分布計測法を用いて流速分布計測を行った結果、水深方向および横断方向の流速分布を取得することが出来た。さらに、河川流量算出プログラムを作成し、得られたデータにより流量演算を行うことで、河川流量計測システムを構築した。

参考文献

- 1) 古市他: 日本原子力学会 99 年秋季大会 H12, 1999.
- 2) 森他: 日本原子力学会 99 年秋季大会 H13, 1999.
- 3) 和田他: 日本伝熱シンポ講演論文集 3, p. 729, 2001.
- 4) Aritomi, M.: J. Nucl. Sci. Tech., 34, pp. 783-791, 1997.
- 5) Takeda, Y.: J. Fluid Mech., 389, pp. 81-99, 1999.
- 6) Suzuki, Y., et al.: Proc. 8th Int. Conf. Nucl. Eng., ICONE-7163, 2000.
- 7) 和田他: 日本流体力学会 2001 講演論文集 B125, pp. 63-64, 2001.
- 8) 和田他: 日本流体力学会 2002 講演論文集 E325, pp. 490-491, 2002.
- 9) 金子新, 伊藤集通: ADCP の普及と海洋学の発展, 海の研究, 3, 359-372, 1994.

(2003. 4. 11 受付)