超音波流速分布計を用いた環境流動場計測*

横山 馨^{*1}, 小嶋 慎哉^{*1}, 大窪 智行^{*2}
田坂 裕司^{*2}, 武田 靖^{*2}, 吉田 静男^{*2}

Environmental Flow Measurement Using Ultrasonic Velocity Profiler

Kaoru YOKOYAMA, Shinya KOJIMA, Tomoyuki OHKUBO,
Yuji TASAKA^{*3}, Yasushi TAKEDA and Shizuo YOSHIDA^{**} Division of Energy and Environmental Systems, Graduate School of Engineering, Hokkaido University,
N 13 W 8 Kita-ku, Sapporo-shi, Hokkaido, 060-8628 Japan

Ultrasonic Velocity Profiler (UVP) was applied to an environmental flow attempting an efficient measurement of river flow. In a lab-scale open channel, a velocity distribution in a channel cross section was obtained and a flow rate was estimated. We confirmed that the flow rate in an open channel can be measured with an accuracy as high as 5%. It was also established to detect the bottom position from a single velocity distribution, which might give us information about the geometry and condition of the bottom surface of the channel. We practiced the method in a small river, and showed that it might give us flow rate of the river with higher accuracy than conventional methods.

Key Words: Environmental Flow Measurements, Open Channel, Velocity Distribution, Flow Rate, Bottom Surface, Ultrasonic Velocity Profiler

1. 結 論

集中豪雨による河川の氾濫など、科学技術の発達した現在でさえ、水害の問題は深刻である。川の流れは河床を侵食し、土砂を輸送、堆積させることによって新たな地形を形成する。それにより流れの様子も時々刻々と変化しており、流れに適した堤防や橋桁を設計するためには、変化した河床の形状と流れの様子を正確に把握する必要がある。また近年、諫早湾の水門設置によるのり養殖の被害のように、河川や海岸に建設された人工構造物がもたらす流れの大規模な変化は、我々の生活に大きな影響を及ぼし、そこから回復するには長い年月が必要となるであろう。しかしながら、そのような流れの変化についての調査および改善には、広範囲の流れを計測する必要があり、対策が遅れている一つの原因となっている。これらの計測では、計測対象が広範囲にわたり、また流れも複雑であるため、河川などの底面形状も含めた環境流動場全体を、効率的に計測することが必要である。しかし、電磁流速計やプロペラ流速計など、現行の点計測式流速計により流動場を計測するには、膨大な時間が必要である。そ

こで近年、画像計測や音波などを用いて広範囲の流動場を効率的に計測する手法が研究、提案されている^{(1)~(4)}。しかしながら現在のところ、実用に足る汎用的な計測法は確立されていない。また流速計測とは別途行われる、断面形状の把握に必要な、ポールや音響測深器などを用いた水深計測も、流動場計測の高効率化を妨げる要因となっている。

本研究ではこれらの課題を大幅に解消できる計測手法として、超音波流速分布計⁽⁵⁾ (Ultrasonic Velocity Profiler, 以下 UVP) に着目した。UVP では超音波ビームの伝播方向に沿った瞬時流速分布計測が可能であり、流動場を効率的に把握することができる。また、高速アルゴリズムにより後処理を施すことなく瞬時速度分布が得られるため、流速分布のリアルタイムでの観測が可能である。さらに、LDA などの光学的な手法では計測できない、泥などで濁った流れの計測にも適用できる。このような特徴から、これを用いた高精度管内流量計が研究・開発され⁽⁶⁾、現在製品化が進められている⁽⁷⁾。これに対し環境流動場計測では、これまで実験室モデルを用いた基礎研究はいくつか行われているものの⁽⁸⁾⁽⁹⁾、実際の環境流動場で使用することを想定した研究はごく僅かである⁽¹⁰⁾。

流動場の断面形状計測については、UVP の特徴である流速分布計測に着目すると、底面では理論上流

* 原稿受付 2005 年 9 月 12 日。

^{*1} 北海道大学大学院工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8)。^{*2} 正員、北海道大学大学院工学研究科。

E-mail: tasaka@eng.hokudai.ac.jp

速がゼロとなることから、流速分布データの処理のみにより底面を自動検出することができる。したがって、これを用いることにより流速分布と水深の同時計測が可能となり、流動場計測の更なる効率化につながると予想される。

本研究では、UVP の環境流動場計測への応用を目的とし、そのための基礎的研究を行った。実験室開水路において、UVP によって計測された速度分布から算出した流量の確度を検証した。現行で使用されている、ポールなどを用いた底面検出法に代わるものとして、計測した流速分布を利用した効率的な底面検出方法について検討した。また、実験室水路での結果を基に実際の河川において計測を行い、提案した底面検出法の実用性および計測の問題点を検討した。

2. 主な記号

- Q : UVP により得られた時間平均流量 l/s
 Q_r : UVP による円管内流量計測または四角堰によって得られた基準流量 l/s
 t : 計測開始からの時間 s
 u : 流速の x 方向成分 mm/s
 $\bar{u}$: u の時間平均 mm/s
 x, y, z : x 軸, y 軸, および z 軸の座標 mm
 Δy : y 軸方向の計測間隔 mm
 Δt : サンプル時間間隔 s
 Δu : 速度分解能 mm/s
 Δz : z 軸方向の計測点間距離 mm
 θ : 超音波トランスデューサの, z 軸に対してする設置角度 deg

3. UVP による開水路計測と流量算出法

図 1 に UVP の原理を示した概念図を示す。図 1 (a) のように、先端を水中に挿入して固定した超音波トランスデューサ (US transducer) から、基本周波数 f_0 の超音波パーストを発射する。水中に分散している散乱粒子からの反射波を、同じトランスデューサによって受信する (図 1 (b))。このとき反射波に加わる、粒子の速度に依存したドップラーシフト周波数を基に、次式により流速の ξ 方向成分 u_ξ を算出する。

$$u_\xi = \frac{cf_d}{2f_0} \quad (1)$$

ここで、 c は水の音速、 f_d はドップラーシフト周波数である。また粒子の位置は超音波の飛行時間から決定し、

$$\xi = \frac{cT}{2} \quad (2)$$

となる。なお、 T は超音波の飛行時間である。この

Fig.1 Schematic of process of velocity profile measurement using UVP at an open channel

処理を超音波の伝播線上の各位置について行うことにより、図 1 (c) に示すようにその線上の瞬時流速分布を得ることができる。なお、計測するのは u_ξ であるため、計測線と直交するような流れは流速がゼロとなる。したがって開水路計測では、主流方向の流速 u を計測するために、鉛直軸に対して角度 θ を付けてトランスデューサを設置する。 u は、流れが x 方向にしか流速を持たない 1 次元流であると仮定すると、図 1 に示すように u_ξ と θ から $u = u_\xi / \sin \theta$ として求まる。

流速分布計測は、Met-Flow 社製 UVP monitor model - Duo を用いて行った。連続して計測した 1024 枚の瞬時速度分布を時間平均し、平均速度分布を求めた。この計測を流路スパン方向に一定間隔 Δy で行い、断面流速分布を得た。またそれを用いて開水路流量を算出した。鉛直方向に z 軸、スパン方向に y 軸をとると、 $y-z$ 断面における全流量 Q は平均流速分布 $\bar{u}(y, z)$ を用いて次式によって与えられる。

$$Q = \iint \bar{u}(y, z) dy dz \quad (3)$$

$$\cong \sum_{i=0}^k \left(\sum_{j=0}^m \bar{u}_{i,j} \times \Delta y \times \Delta z \right)$$

ここでサフィックス i, j はそれぞれ y, z 方向の計測点を表している。また Δz は z 方向の計測点間距離であり、計測線方向の計測点間距離を $\Delta \xi$ とすると、 $\Delta z = \Delta \xi \cos \theta$ のように求められる。 $\Delta \xi$, 速度分解能 Δu , 時間分解能 Δt および ξ 方向の空間分解能は、通常測定対象となる流れの範囲、流速および液

Table 1 Specifications of measurement condition

	Open channel	River
Δu	12.8 mm/s	30.6 mm/s
$\Delta \xi$	1.85 mm	1.48 mm
Δy	10 mm	100 mm
Δt	0.12 sec	0.13 sec

体の音速, 使用する超音波の周波数などによって異なる. 本研究では超音波トランスデューサの基本周波数を 2 MHz とし, また一つの速度分布に含まれる計測区間の数を 128 区間に固定し, $\Delta \xi$ は空間分解能と等しい値に設定した. 開水路および小川を計測した際の各パラメータを表 1 に示す.

4. 実験水路における流動場計測

4・1 実験装置および実験方法 流動場計測に用いた実験水路の概略図を図 2 (a) に示す. 装置は開水路と円管, ポンプから構成されている. 円管部に設置したポンプによって, ループに水を循環させた. 流量は, インバータ制御器を用いてポンプの出力を制御し, 約 1 ~ 5 l/s の範囲で変化させた. 開水路は幅 300 mm, 高さ 300 mm, 全長 3000 mm のアクリル製である. 図 2 (b) のように, 流入口の壁面の角に原点をとり, 流れ方向に x 軸, 流路断面の水平方向に y 軸, 鉛直下方向に z 軸をとる. 開水路入り口は $y = 150$ mm, 底面からの高さ 60 mm の位置を中心とした直径 65 mm の円形である. 円管部は内径 50 mm, 全長 3000 mm である. 開水路計測部は $x = 1900$ mm に設けた. トランスデューサは, 先端付近での流れの乱れを抑えるために上流側へ向け, $\theta = 8 \text{ deg}$ として先端 10 mm を水中に挿入し固定した (図 2(c)). 本研究では, 構築したシステムの, 実際の環境流動場での使用を前提としているため, 流速計測のためのトレーサ粒子を意図的に混入することなく, タンクと開水路で自然混入される微小気泡を超音波反射体として用いた. $y - z$ 断面流速分布は, 流路中心軸に対して左右対称であると考え, $y = 10$ mm から 150 mm までの流路断面半分について 10 mm ごとに流速分布計測を行った. またポンプ手前の円管部において, 東京電力 (株) 製 Ud-Flow を使用した流量計測を行い, UVP による開水路流量計測との比較のための基準流量 Q_r とした. なお Ud-Flow は, 円管内流量計測に特化した UVP システムであり, 複数の流量試験場での検定で誤差 1 % 以下という高精度を持つことが確認されている⁽⁶⁾.

Fig. 2 (a) Schematic of open channel system, (b) enlarged inflow part and (c) configuration of US transducer

4・2 流速分布計測結果 図 3 は, $Q_r = 2.23 \text{ l/s}$ の流れについて, $y = 150$ mm において計測した鉛直方向流速分布であり, 図の横軸は z , 縦軸は時間平均流速 $\bar{u}$ である. エラーバーは, u の標準偏差 σ を示している. $z = 170$ mm 付近の, $\bar{u}$ と σ がともに小さくなっている部分が開水路の底面であり, 図中に破線で示すスケールによって計測した底面位置とほぼ一致する. 底面より先での流速は超音波が底面で反射し, 反射した先での流速を得たものである. 速度分布の形状に注目すると, $z = 80$ mm 付近から速度が大きくなっていることが分かる. これは開水路上流に設置された円管からの噴出しの影響であり, $\bar{u}$ が最大値を取る $z = 120$ mm は噴出し口の中心高さにほぼ一致する. またトランスデューサ先端付近では, 流体がトランスデューサの前面に沿うように流れるため u_e が小さくなる. その結果, この領域の点数で

Fig. 3 Temporally averaged velocity profile measured by UVP

Fig. 4 Velocity distribution at a y - z cross section in open channel

は現実と異なり、 $\bar{u}$ はゼロに近い値として計測されている。

同条件の下に y 方向の各位置で計測を行い、得られた平均流速分布を基に平均流速の y - z 断面分布を作成した。図 4 にその結果を示す。図の横軸と縦軸はそれぞれ y と z であり、グレースケールは各位置における $\bar{u}$ の大きさを示している。底面は、スケールによって計測した距離を基に決定した。断面流速分布から、 $\bar{u}$ が最大値を取る領域は $y = 120 \sim 150$ mm, $z = 100 \sim 160$ mm 付近であり、図中に破線で示した噴出し口からの流れの影響が明瞭に現れている。

4・3 流量補正方法 図 4 に示した平均流速の y - z 断面分布と (3) 式を用いて流量を算出する。算出にあたり、鉛直方向流速分布に対して 2 種類の補正を行った。1 つは超音波反射体の不足による、計測点の欠落に対する補正である。UVP では、計測点上に反射体が存在しない場合、速度を求める信号処理の過程で誤った流速が算出される。本実験では、自然混入される気泡を反射体として用いているため、そのような反射体の不足による誤差が生じやすい。そこで 1024 枚の瞬時流速分布から、各位置の流速についてショープネの判断基準⁽¹¹⁾を用いてデータの棄却を行った。 $Q_r = 2.23$ l/s, $y = 150$ mm での流速分布についてこの方法を用いた結果、約 15 % のデータが棄却された。図 5 にこの場合のデータ棄却前後の平均流速と標準偏差を示す。データ棄却後、平均流速は約 3 % 上昇し、標準偏差は大幅に減少している。これは反射体が存在しない場合、小さな流速値が出力されるためである。同様に各計測データについて新たな平均流速と標準偏差を求め、流量算出に用いた。

もう一方の補正は、トランスデューサ先端部分の領域の補正である。トランスデューサを水中に挿入した領域では流速が計測されず、また前節で述べた理由か

Fig. 5 (a) Temporally averaged velocity profile and (b) standard deviation profile with and without data rejection

Fig. 6 Flow rate in open channel measured by UVP

らトランスデューサ近傍では実際の流速よりも小さな値として計測されるため、これらの部分を合わせて補正する必要がある。ここでは、流速が落ち込む直前の値を用いて補正を行った。各平均流速分布について、トランスデューサ先端付近の 10 点を対象とし、流速の差分を求めてその最大値を取る位置を、トランスデューサの影響を受けて速度が落ち込む位置とみなした。その後方点での流速を、その点から水面までの領域の代表値とした。

上記の 2 種類の補正を行って算出した開水路流量を図 6 に示す。グラフの横軸は基準流量 Q_r 、縦軸は UVP を用いて測定した開水路の平均流量 Q である。横軸方向のエラーバーは Q_r の標準偏差を、縦軸方向のエラーバーは各計測点での流速の標準偏差から見積もった Q の標準偏差を示している。 $Q_r = 2.23$ および 3.34 l/s では、基準流量との誤差は約 4 % と高精度の流量計測が実現されている。これに対し $Q_r = 4.30$ l/s では、誤差が約 14 % と他の 2 例と比較して大きくなっている。これは、円管部からの噴出しの影響が計測位置でも強く残っており、本研究が想定している 1 次元流から大きく

離れているためである。したがって、人為的な流れの噴出しなどのない、1 次元流の仮定が十分成り立つ流れであれば、この手法を用いて高精度の開水路流動場計測が実現できる。

5. 開水路底面検出

5・1 底面検出方法 図 3 に示したように、UVP により計測された速度分布では、底面付近で流速がほぼゼロとなり標準偏差も非常に小さい値となっていることから、流速のばらつきも小さいことがわかる。したがって、底面に相当する位置では流速がゼロと計測される割合が大きくなることが予想される。ここでいう流速がゼロとは、 $u=0$ を挟んだ速度分解能 Δu 分の範囲内の値、すなわち $-\Delta u/2 < u < \Delta u/2$ となるような流速である。図 3 と同じ条件で計測した 1024 枚の速度分布において、流速ゼロと計測された確率の分布を図 7 に示す。縦軸は各計測点で流速がゼロと計測される確率 P_{d0} である。ここで $P_{d0} = 0.5$ という値は、ある測定点で 1024 回の測定中 512 回流速がゼロと計測されたことを意味している。図から分かるように、 P_{d0} は底面付近で急激に大きくなっており、何らかのしきい値を設けてこの位置を決定することで、底面検出が可能であると考えられる。なお、データ棄却によって底面近傍での流速ゼロのデータが棄却される可能性を防ぐため、この底面検出はデータ棄却処理の前に行った。

5・2 底面検出方法の検証 この底面検出方法を検証するために、開水路において以下の 3 種類の底面状態に関して実験を行った。第一は、特に何も施さないフラットな底面、第二に底面に凹凸がある場合として、その形状が既知であるゴルフボールを底面に敷き詰めた場合、そして第三は、表面状態が複雑な人工芝の底面である。ゴルフボールは直径約 42.5 mm であり y 方向に 7 個設置した。 x 方向には、十分な助走距離を取るために計測部より約 1500 mm 上流から密接して敷き詰めた。人工芝は 30×30 mm、平均厚さ 20 mm の正方形であり、これを計測部底面に設置した。流量は $Q_r = 2.23$ l/s である。 y 方向計測位置は、底面がフラットな場合と人工芝の場合は $y = 10$ mm から 10 mm 間隔で 15 箇所とした。また、底面の凹凸が大きいゴルフボールの場合では超音波ビームの中心がボールの頂部にあたるようにトランスデューサを設置し、 $y = 15$ mm から 5 mm 間隔で 28 箇所において計測を行った。

図 8 に、フラットな底面に対して確率密度を用いて求めた底面位置を示す。各プロットは、確率密度に対するしきい値 Th を 0.3, 0.5 および 0.7 に設定した際に決定された底面位置である。また、破線がスケール

Fig. 7 Probability density of velocity in open channel

によって求められた実際の底面位置である。 $Th = 0.3$ の場合、全ての点で実際の底面位置とよく一致している。一方で $Th = 0.5, 0.7$ としきい値が大きくなるにつれ、実際の底面位置よりも深く検出される場合が多くなっている。この傾向はどの底面の場合でも共通して見られ、本実験では全ての場合で $Th = 0.3$ において誤差が最小となった。図 9 および図 10 にゴルフボール、人工芝の底面に対する底面検出結果を示す。図中の各プロットが検出位置、破線が実際の底面位置であり、エラーバーは速度分布計測における空間分解能を示している。ゴルフボールの場合、ボール頂部では検出された底面と実際の底面がよく一致しているが、谷部では大きく誤差が生じている。本実験で使用したトランスデューサでは、超音波ビームは約 5 度の広がり角で水中を伝播し、ゴルフボール表面付近ではビーム径が発射時の 2 倍の約 20 mm となる。その結果、ビームは実際の底面より先にボールの側面に反射し、流速はゼロと計測されるため、ボールの谷部では実際の底面と誤差が生じる。より表面の凹凸が細かい人工芝の場合、ビーム径よりも細かな凹凸は検出されず、底面がフラットな場合と似た結果となった。スケールによって計測した人工芝の平均表面位置と比較すると、その差は流速分布計測における分解能程度である。以上の結果から、計測した流速分布に基づいた底面検出法では、その空間分解能は使用する超音波のビーム径に依存す

Fig. 8 Bottom of open channel determined by probability density method

Fig. 9 Bottom of open channel paved with golf balls determined by probability density method

Fig. 10 Bottom of open channel paved with artificial grass determined by probability density method

るが、従来行われてきたスケールによる計測と比較して、十分な確度での底面検出が実現できることが分かった。

6. 環境流動場計測

6・1 計測対象および計測条件 計測した川の概略図を図 11 に示す。川は約 50 m^3 の池から流出しており、川幅 1700 mm 、平均水深約 100 mm である。計測部は流出部から約 5 m の位置に設定した。座標軸は右岸水面を原点に取り、図のように設定した。 $y = 1000 \text{ mm}$ 付近の上流側に岩が存在する。底面は $y = 0 \sim 1300 \text{ mm}$ では粒径 10 mm 程度の砂利であり、 $y = 1300 \sim 1700 \text{ mm}$ では水草に覆われている。計測は $y = 50 \sim 1650 \text{ mm}$ まで 100 mm 毎に 17 個所を行った。流量の比較対照として川の流出部に四角堰を設け、越流水深を観測することにより流量を算出した。UVP の計測パラメータは表 1 のとおりである。

6・2 計測結果 計測結果の一例として、 $y = 350 \text{ mm}$ で計測された流速分布を図 12 に示す。図 3 と同様に、エラーバーは u の標準偏差 σ を示している。図からわかるように、実験室開水路での計測結果（図 3）に比べて速度のばらつきが小さくなっており、より高確度の流量計測が期待される。また、 $\bar{u}$

Fig. 11 Coordinates and measurement location at river

Fig. 12 Temporally averaged velocity profile in the river

がほぼゼロとなる底面近傍の点では標準偏差も小さくなっており、実際の川の計測においても実験室水路での底面検出方法をそのまま適用できる。なお実験室開水路での計測と比較して、瞬時速度分布にはトレーサ不足の際に見られるデータの落ちがほとんど存在しなかった。これは、実際の川では気泡の他に、水中に浮遊する微細なちりなどがトレーサの役割を果たしているためである。

実験室開水路での計測と同様に、速度がゼロとなる確率を用いて底面検出を行った。図 13 に、確率 Pd に対するしきい値を 0.3 として底面位置の検出を行った結果を、平均流速の y - z 断面分布とともに示す。図中の実線が流速データをもとに検出した底面位置であり、破線は各計測位置においてスケールを用いて計測した底面位置である。カラースケールは、速度の大きさを示している。図から確認できるように、 $y = 900 \text{ mm}$ 付近に低速の領域が、またその両側に比較的速度の大きい領域があり、上流の岩が

Fig. 13 Velocity distribution and detected bottom at y - z section

形成する後流の影響が残っていることが分かる。底面検出の結果では、底面が砂利である $y = 1300$ mm までは両者の差は平均約 5 mm と、砂利の粒径程度である。一方、底面が水草で覆われている $y = 1300$ mm 以降では、スケールによる計測結果と比較して 20 mm 程度浅く検出されている。このような誤差が生じる原因を、流速分布の時間変動を用いて説明する。図 14 に、(a) $y = 350$ mm と (b) $y = 1350$ mm における流速分布 u (z) の時間変動を示す。図の横軸は時間 t 、縦軸は z 、またカラープロットによって u の変化を示している。 $y = 350$ mm の場合は、 $u = 0$ となる z 座標が $z = 100$ mm 付近ではほぼ一定であることがわかる。このような場合では底面の時間変動がなく、精度の高い底面位置検出が可能である。これに対して $y = 1350$ mm の場合は、 $u = 0$ となる z 座標が一定でなく変化している。これは流れにともなって、底面を覆う水草が変動しているためである。なお、スケールによる計測では水草表面までの正確な距離は計測できないため、スケールに力を加えて静止する位置を底面とした。一方、超音波は水草の表面で反射されるため、水草が揺らいでいる場合には、スケールによって計測した底面よりも浅い位置で速度がゼロとなり、底面がより浅く検出される。スケールを目視で確認したところ、水草の高さは 10~20 mm であり、誤差と一致する。また水草の揺らぎにより、底面近傍では速度が非常に遅く $u = 0$ となる確率が高くなっており、これも誤差を生じさせる要因となっている。

y - z 断面流速分布から前述の方法で補正を行い、流量を算出した。なお、河川では実験室水路と比較して各計測線間での流速分布や断面形状の変化が大きく、また実用化を考えてあえて y 軸方向の計測間隔を粗くしているため、断面流速分布に対して y 方向にスプライン補間を施した。その結果 $Q = 53.1$ l/s となり、堰によって計測された基準流量 $Q_r = 55.0$

Fig. 14 Temporal-spatial velocity distribution; (a) gravel condition (at $y = 350$ mm) and (b) waterweed condition (at $y = 1350$ mm)

l/s からのずれは約 4 % となった。これは実験室水路での流量計測精度と同程度であり、5~10% 程度の誤差といわれる現行の河川流量計測精度^{(3) (12)}を上回るものである。

7. 結 論

本研究では、UVP を用いた環境流動場計測法の実用化を目的として、開水路計測と実際の川での計測を行った。得られた結論を以下に要約する。

(1) 室内開水路において、流速分布をもとにいくつかの補正を加えて流量を算出した。その結果、流れを 1 次元流と仮定できるような、比較的乱れの小さい場合には、誤差が 4 % 程度の高精度流量計測が実現できた。

(2) UVP によって計測した瞬時流速分布をもとに、流速がゼロになる、流体力学的な底面を検出するこ

とで、スケールを用いることなく底面を測定する方法を提案した。開水路および川での検証実験の結果、水草など底面位置が時間変動する場合を除き、理想的な平板や砂利など底面状態に関わらず、固定底面では高精度での検出が可能であることを示した。ただし、ここで求められるのは UVP における測定体積内の空間平均値としての底面である。

(3) 計測の効率化を図るため川幅方向の計測間隔を粗くしたにもかかわらず、実際の川での流量計測誤差は、四角堰を用いて計測した基準流量に対して約 4%であった。これは現行の流量計測方法よりも高精度である。

文 献

- (1) Okada, T., *et al.*, *Proceedings of Hydraulic Engineering*, Vol. 44 (2000), pp. 1227 – 1231.
- (2) Yamaguchi, T. and Nizato, K., *Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers*, No.497/II-28 (1994), pp. 41 – 50.
- (3) Kizawa, K. and Ide, Y., *Proceedings of River engineering*, Vol.7 (2001), pp.251 – 256.
- (4) Morlock, S.E., *U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report*, (1996), pp. 37.
- (5) Takeda, Y., *JSME International Journal*, B38 (1995), pp. 8 – 16.
- (6) Mori, M., *et al.*, *Experiments in Fluid*, 32 (2002), pp. 153 – 160.
- (7) Mori, M., *ELECTRICAL REVIEW*, Vol.475 (2004), pp. 62 – 66.
- (8) Hersberger, D.S., *Third International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering* (2002), pp.59 – 66.
- (9) O'Donoghue, T., *Costal engineering*, Vol.51 (2004), pp. 1163-1184.
- (10) Wada, M., *et al.*, *Simposium on the river engineering '03*, Vol.19 (2003), pp. 231 – 234.
- (11) Ex., Taylor, J.R., *An Introduction to Error Analysis*, (2000), pp.165-172.
- (12) Kinoshita, T., *Journal of Japan Rivers Association*, 2004-1 (2004), pp.29-41.