

ランダム計測された ADCP データの 補間法の開発と流れの三次元構造の抽出

CORRECTION AND INTERPOLATION OF IRREGULARLY MEASURED ADCP DATA AND EXTRACTION OF 3-D FLOW CHARACTER

椿 涼太¹・藤田一郎²・武藤裕則³・萬矢敦啓⁴
Ryota TSUBAKI, Ichiro FUJITA, Yasunori MUTO and Atsuhiko YOROZUYA

¹ 正会員 博 (工) 神戸大学大学院 自然科学研究科 COE 研究員 (〒 657-8501 神戸市灘区六甲台町)

² 正会員 学博 神戸大学教授 工学部 建設学科 (同上)

³ Ph.D. 京都大学防災研究所 流域災害研究センター (〒 612-8235 伏見区横大路下三栖東ノ口)

⁴ Ph.D. 国土技術政策総合研究所 (〒 305-0802 茨城県つくば市立原 1 番地)

The procedure of extraction of three-dimensional distribution of velocity field from ADCP measurement data is presented in this study. Cross-sectional velocity distributions have been generally used to indicate three-dimensional feature of flow. However complex flow fields, generated by combination of a complex bathymetry, curve of the channel and river structure, are difficult to investigate only by using the cross sectional velocity distribution. In this study, anisotropic averaging and interpolation method is introduced to remove random component caused by turbulence of flow and random error of measurement. The continuity correction using pressure equation is also used to reduce both random and system errors. The validity of our procedure is confirmed by using three-dimensional numerical simulation result. Finally, by using our procedure, the complex flow around spur-dikes is explored.

Key Words : ADCP, data correction, interpolation, 3D flow structure, secondary flow, river flow measurement

1. はじめに

ADCP による流れの計測は、海洋、湖沼および河川の流れの計測法として広く用いられている。海洋に比べて、河川は水平スケールに対する水深スケールが小さく、また水平方向でも横断方向と流下方向では流れやスケールが大きく異なる。つまり、海洋流れと比較して河川流れはより異方性が強いといえる。開水路流れにおける異方性の強さに関連する現象に二次流構造の発生があげられる。この二次流という言葉自体が主流方向に対する二次的な速度成分ということであり、これも開水路流れの異方性の強さに基づく論考だといえる。

実河川における二次流は河床変動に大きな影響を及ぼす。また、河床形状・河道の曲がりおよび局所構造物により、その周辺において局所的な三次元流れが発生すると河床材料の移動速度や移動方向が変化し局所的な洗掘が発生する要因となる。このような現象がみられるため、実河川において流れの三次元構造を実測する必要性があ

り、ADCP 計測はそのための手法として広く用いられている。しかしながら、ADCP は瞬間的には測線上 (鉛直下向き) の計測しか行うことができないため、流れの特定断面 (たとえば横断測線) 上の速度成分を計測するためには船舶を一次元的 (横断方向) に移動させる必要がある。さらに三次元空間上での三次元速度を取得するためには、船舶を水面に沿って二次元的に移動させる必要がある。

ところで、ADCP により得られる流速値には流れの乱れによる変動や計測誤差が含まれているため平均的な流れ成分、流れの乱れ成分、計測誤差の識別を合理的に行う必要がありさまざまな検討がなされてきた。本研究では、これらの知見をもとに、従来広く用いられている横断測線での速度分布による検討が困難である、複雑河床形状・湾曲・河川構造物などが複合した流れ場の把握を目指し、特に流れ構造の基礎的な把握において重要である、時間平均速度の三次元分布を高精度かつ詳細に抽出する手法の確立を目指すこととした。

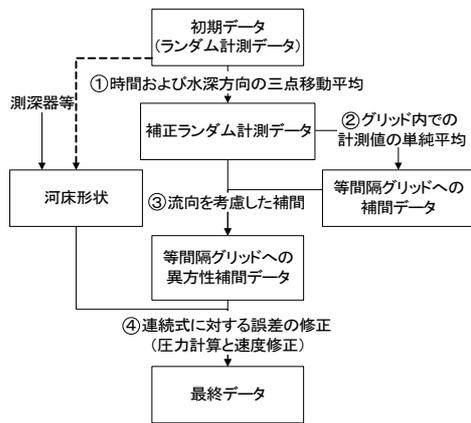


図-1 ADCP データの補間法手順

2. 既往研究

本研究で対象とする河川や湖沼といったある程度限られた空間スケールでの ADCP 計測に関する既往研究については、横断や縦断測線上の流速分布の取得における誤差要因の検討とその対処法の検討が、若岡ら¹⁾による湖沼を対象とした計測誤差の分析と補間関数を用いた誤差補正法の提案、大森ら²⁾による横断測線上の数点で1分～3分間ボートを固定して連続計測して平均流速を算出し二次流構造を検討したもの、Dinehart and Burau³⁾横断側線を往復計測。また濁度と二次流の関連性も検討などがなされている。

また、ADCP の利用目的としては上記のような流れ構造の理解の他に、河川を対象とした場合には流量算定も重要なテーマであり、このような観点では、二瓶・木水⁴⁾による横断測線上の数点での計測値を基に力学的内挿法によって横断速度分布の補間を提案や、橘田ら⁵⁾による計測手順についてのレビューなどがなされている。

このように、流量算出を目的としたものや流れの把握を目的としたものを含めて測線上のデータ処理方法については多くの検討がなされているが、ADCP による三次元空間上での三次元速度の取得法についての検討例はほとんどない。しかし、実河川における複雑な流れ場を対象とした場合、横断測線を用いた流れの解釈はしばしば困難となるため、三次元空間上での三次元速度の取得することができれば、より直接的に流れ構造の抽出や把握を行うことが可能となると考えられるため、本研究ではそのような情報を計測値から抽出する方法の開発を行うこととした。

3. ランダム計測された ADCP データの補間法の開発

計測対象範囲を面的に計測することを考えた場合に、実河川において船舶を精度良く規則的に移動させること

は困難であるため、規則的なグリッド状に計測するよりは、不規則な軌跡（ランダム計測）を想定することが現実的である。ただし、不規則とはいっても計測対象範囲をある程度全面的にカバーするものであり、また軌跡が交差する部分も見られる不規則な網目状の軌跡を念頭に置く。本研究で開発した ADCP データの補間法手順の概要を図-1 に示す。以下では図中の番号①等で示した各手順を説明する。

① まず第一段階として、細かな乱れおよび計測誤差による変動成分を除去するために、それぞれの計測値に対して水深方向および時間方向の移動平均を求める。ADCP では、水深方向に等間隔に流速成分が算出されるため、水深方向毎に計測値が層状に得られる。よって、水深方向についてはある計測値に対してその直下の層および直上の層の計測値を対象とし、また時間方向には同じ層で直前および直後に得られた計測を対象として移動平均を取る。

② 次に、水平面上に等間隔のグリッドを設定して、このグリッド毎に水深（層）別に平均速度を求める。グリッドへの補間法として距離による重み付け平均を用いると、乱れ成分および計測誤差（以下、変動成分）の影響がそのまま分布へ反映されるため、本研究で取得を目指す時間平均速度分布との相違が大きいと考えられる。そこで、各グリッド領域内で計測値の単純平均を求めることによりその領域における平均的な速度成分が得られることを狙った。グリッド幅については、これを細かくすると、速度分布の空間分解能は上がるがそれぞれのグリッドに含まれる計測値の個数が減ることや、また計測値が含まれないグリッドが増えるため、平均流れとの相違が大きくなる。よって、グリッド幅はランダム計測の密度にあわせて設定すべきであり、本研究では、流れ部分の全グリッドの 95% 以上に少なくとも一つの流速データが含まれるグリッド幅を用い、データの含まれない部分については周囲の水平四方向のデータの平均により補間した。

③ ここまでで、速度成分が等間隔のグリッド上に補間されたが、より効果的に、時間平均流れ構造の抽出と変動成分の除去を図るために、この等間隔グリッドに補間された速度分布の水平速度成分（一段階目の補間値）を利用しつつ、補間前のデータを用いて二段階目の補間を行うことを考える。その際に、第一段階の補間値の水平速度成分に基づいて流下方向の補間範囲を広く、流下方向の直角方向への補間範囲を狭くして、その範囲内に含まれる計測値の平均値を求める。以上の操作（異方性を考慮した補間）により、流れ構造がある程度保たれると考えられる流下方向での平均が強調される。また、流下方向の直角方向への補間範囲を狭くすることにより流れのせん断部分において補間値が不当になまることを防ぐことができる。

④ 以上の操作により等間隔グリッドおよび層毎の三次元空間上（以下三次元グリッド）での三次元速度成分が得

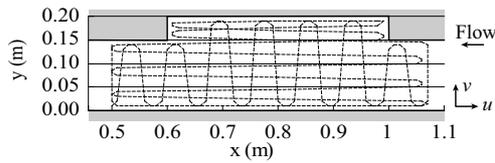


図-2 流れ領域の平面図と計測経路（黒点線）

られる。上記の操作は基本的に時間および空間平均であり、速度の変動成分の除去による平均速度場の抽出を狙っている。しかし、計測値にはたとえば速度 w 成分に対する系統的な誤差³⁾などの存在が指摘されており、このような誤差は平均操作では除去されない。よって、このような系統的な誤差の補正を主な目的として、三次元グリッド上の速度成分に対して流れの連続式を満たすような補正を行う。計測値自体は変動成分を含む瞬間値の時系列であり連続式を満たすものではないが、上記の異方性補間により流線に沿った空間方向の平均操作による変動成分の除去が行われるとともに、グリッドに含まれるデータの範囲内での時間平均操作が行われる。この近似的な時間平均速度分布における連続式の誤差を補正することで、局所的な水理学的矛盾が低減されてより適切な時間平均速度場へと近づくことが期待される。

流れ場の補正には、流れの数値計算により利用される圧力・速度の計算法のひとつである Fractional step 法と同様の手順による速度の補正を行うこととした。具体的には、手順③により得られた速度分布に基づき、ポワソン方程式の反復計算により各グリッド上での圧力分布を求め、次に、この圧力分布に基づいて各グリッド上の速度成分の補正を行う。圧力計算においては、速度および圧力を同一点で定義するレギュラー格子を用いることとし、水面で圧力 0、河床部分において圧力勾配 0 を与えた。

流れの基礎式に基づく ADCP 計測結果の精度向上については二瓶・木水⁴⁾らによる力学的内挿法があるが、これは、離散的に計測された値を正解値とみなして、その計測値の間の流速分布を内挿するというものであり、本手法のように各点で計測された流速分布の不整合を補正するという観点とは異なっている。また、力学的内挿法は浅水流をベースとしているため本研究のような三次元速度成分の再現にそのまま用いることはできない。計測された速度分布に含まれる誤差の緩和を目指すという観点で、若岡ら¹⁾は測線上の速度成分を補関関数を用いて誤差補正を行っているが、本研究の提案手法は三次元空間上の速度分布の取得へ適用できるという相違がある。

4. 数値計算データを用いた本手法の推定精度の検証

本手法の有効性を確認するために、数値計算データを用いて精度検証を行う。計算データには、サイドキャビ

ティ一部を設けた直線開水路の流れを、水面変動を考慮した LES モデルを用いて再現したもの（門谷ら⁶⁾）を用いる。計算結果で見られる流れの代表的な変動周期は 1 秒程度であり、1/20 秒毎に三次元流速分布を記録した。対象とする流れ領域の平面図を図-2 に示す。同図中に示した点線は計測経路であり、ボートでの ADCP 計測を模して、各瞬間においてこの経路上の一点での水深方向の流速分布を時空間的な内挿により算出し、これを 1/100 秒毎に位置を経路に沿って移動させながら流速の算出を繰り返し、本手法の推定精度の検証の初期データとした。また、これとは別途、三次元流速分布の各点での 30 秒での時間平均を求め、これを正解値として比較を行う。流れの代表パラメータを列挙すると、代表水深 $H = 0.04$ m、フルード数 $Fr = 0.68$ 、断面平均流速 $U = 0.43$ m/s、レイノルズ数 $Re = 17100$ である。

まず、軌跡に沿って算出した水深方向の流速分布について、計測誤差を付加する。これは、ランダム誤差およびシステム誤差を模したものであり、標準偏差 σ が局所流速 $U = (u, v, w)$ の絶対値 $|U|$ の 2% となるホワイトノイズを速度の三成分へ付加し、さらに w 成分については、著者らおよび Dinehart and Burau³⁾による計測データを参考に、システム誤差を以下の式による模擬的に付加することとした。

$$w' = w - 0.05 \frac{\tan(1.5(H-z)/H)}{\tan(1.5\bar{U})} \quad (1)$$

ここに、 w' : 誤差を付加した流速、 z : 計測点の深さ、 H : 計測点での河床の深さである。

以上により得られた流速値に対して、0.02 m 幅の等間隔グリッドへの単純補間（等間隔補間）、等間隔グリッドへの異方性を考慮した補間（異方性補間）、これに対してさらに連続式補正を適用したもの（連続式補正）の三種類のデータ（算出値）を準備した。次に、三次元流速分布の 30 秒間の時間平均値をグリッドへ補間したものを正解値として上記の三種類のデータの精度を確認する。正解値との比較には、まずグリッドの各点における速度三成分について算出値と正解値の R^2 値（回帰分析における重決定。1 に近いほど再現性が高い）を用いる（図-3a）。同図から、等間隔補間に対して連続式補正の R^2 値は、速度三成分全てで大きくなっており単純な等間隔グリッドへの補間法に対する本研究の提案手法の有意性が確認できる。それぞれの速度成分について確認すると、主要な流速成分である u については、等間隔補間においても 0.93 と比較的良好な再現性をもっているが、異方性補間により 0.96 へと向上している。 u 成分に対して、 v 成分および w 成分については、 R^2 値が全体的に小さく、等間隔補間では、0.15 (v 成分)、0.23 (w 成分) とほとんど再現性がない。これはまず、平均値のオーダーが小さな v, w に対しては流れの変動による速度変動の影響がより顕在化すること、次に、付加したホワイトノイズを流速の絶対値に比例して与えているため、オーダー

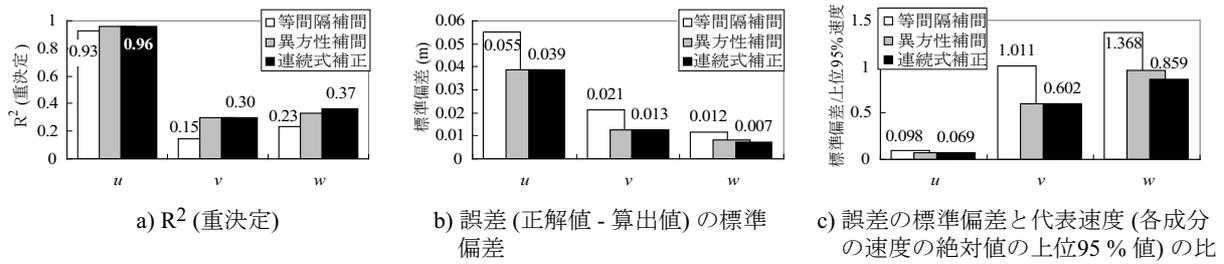


図-3 推定精度の検証

の小さな v, w 成分に対してより大きな影響が加わるためと考えられる。しかしながら異方性補間および連続式補正の適用によって、誤差や流速変動の影響を受けやすい v, w 成分についても R^2 値で 0.30 および 0.37 となっており再現性の向上が認められる。

次に、グリッドの各点で三つの速度成分に対して個別に、算出値と正解値の差を求めその差の標準偏差を算出した結果を図-3b に示す。同図より等間隔補間に対して連続式補正の結果では速度の三成分のそれぞれで、標準偏差が小さくなっており、本手法により補間の精度が向上していることが改めて確認できる。それぞれの速度成分について確認すると、 u, v, w の順で大きさが小さくなっている。これは、この成分の順に速度のスケールが小さくなっているため変動のスケールもこれに比例して小さくなっているためと考えられる。この成分ごとの速度スケールの影響を調整するため、各速度成分の絶対値の上位 95% の値で、標準偏差を正規化したものを、図-3c に示す。これによれば、 u 成分については連続式補正の結果において 6.9% となっており、速度スケールに対する算出値の再現性がこの程度であると見積もることができる。 v 成分においては 60%、 w 成分については 86% 程度と誤差が大きいが、等間隔補間の結果と比べると 40% 程度の改善されている。

以上の、数値計算データを用いた精度検証によって、等間隔補間に比べて、異方性補間および連続式補正の適用によって時間平均速度分布の再現性が向上すること（誤差の標準偏差が 40% 程度低減）が確認された。速度オーダーの小さな二次流成分（ここでは v, w 成分）については、本手法の適用により再現性の向上が見られるものの依然誤差が大きいが、これは対象とする流れ場（河床や河道の形状等）の性質を大きく受けるものであり、今回の精度検証結果が他の流れ場に対してもそのまま適用させるものではないが、等間隔補間に対する提案手法の有意性を確認することができたと考えている。

5. 実河川データへの適用

宇治川 42.8kp 付近（京都市伏見区横大路下三栖）の河道区間を対象に ADCP によりランダム計測された実

測データを用いて、流れ構造の抽出を試みる。この河道区間およびその周囲には、4 基の水制、橋脚、河道の蛇行がみられる複雑な流れ場が形成され、流量等が変化することにより周囲の流況は大きく変化する（流れ構造等については文献^{7,8)}を参照）。

次に、ADCP によりランダム計測されたデータを図-4a に示す。切り出した領域については図-4e に示す。なおこのデータは 2004 年 8 月 26 日に観測されたもので、周辺の水位は 8.4 m (OP)、流量は 300 m³/s 強である。

図-4a に示すように、計測区間を全面的に計測するように何度も往復しつつ経路（点線）が少しずつ変わるように計測されている。同図では水面付近（水面下約 1 m）の層の流速分布を示している。同一軌跡での連続的なベクトルは比較的そろっている。同一地点を何度も通過しているときの流速を比較すると、それぞれの通過時毎に流速の傾向が異なっていることが確認できる。

系統的誤差については水平速度成分のみならず鉛直成分についても影響がみられ、特に表面付近の流速 w 成分（水深方向）の系統的誤差（一方向へのずれ）については船舶底面により周囲の流れが変化することが要因であると考えられている³⁾。

次に、計測データを 5 m の等間隔グリッドへと層毎に補間したものを図-4b に示す。同図では層の違いを色で示している。図-4a と比較すると、生データの持つ流速のばらつき（変動成分）が除去されるとともに、各点での流速はその近傍の流速と滑らかに接続している。また、上流部の第一水制（図-4b 中の矢印 1）の対岸付近では、水深方向（同一地点での色違い）の流向が水深に比例して変化しており、流れの三次元的なねじれの存在を示している。

図-4c に示したものは、図-4b により得られた局所的な流速分布に基づき図-4a から再度、等間隔格子へ層別に異方性補間を行ったもので、補間の際には流向へは 10 m、横断方向へは 2.5 m の半径を持つ楕円内の流速値の平均値を算出している。図-4d に示したものは、さらに連続式に対する誤差の修正を行ったものである。

図-4b, c, d のそれぞれを比較すると全体的な流れの傾向には大きな違いはみられないが、局所的な流速には若干の違いがみられ、図-4b から図-4d に向かって局所的な

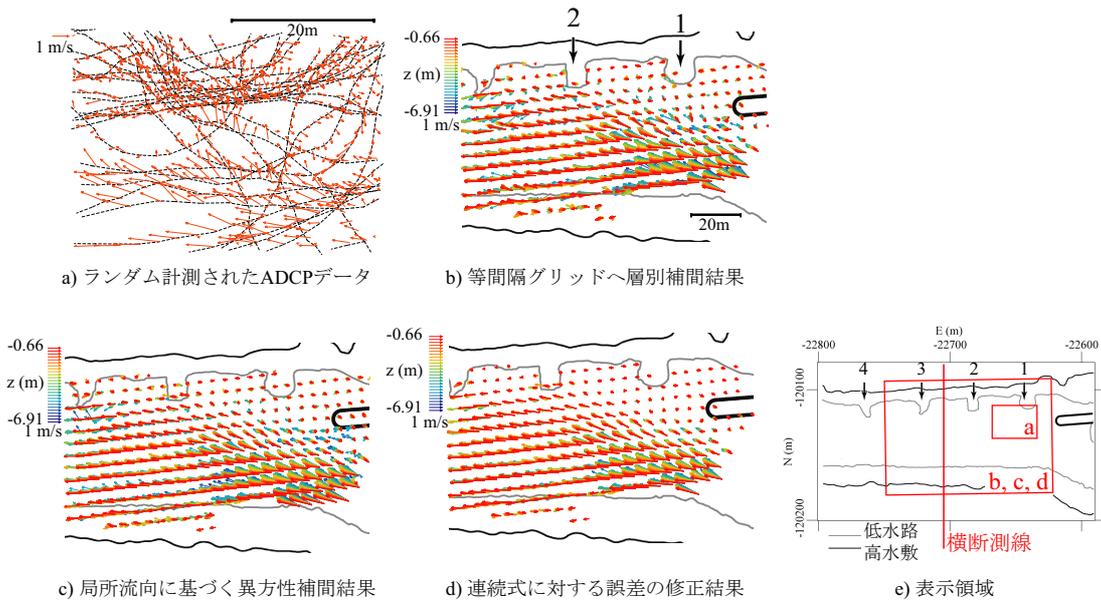


図-4 データ補間の処理経過。ベクトルの色の違いは、層別（水深毎）を表す。a, b, c, d で示した部分の位置関係は e に示す。

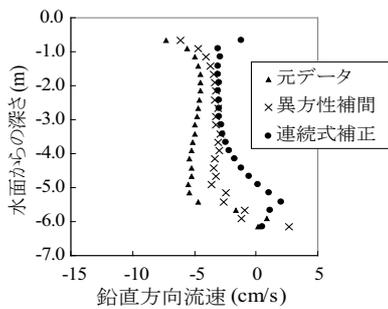


図-5 各水深（層）毎の鉛直方向流速の平均値

流速のばらつきが小さくなっていることが確認できる。これらの操作は、単純に滑らかな流速分布を得ることを目的としたものではなく、異方性補間（図-4c）においては移流経路に沿った平均による変動成分（乱れ成分およびランダム誤差）の除去を、連続式補正（図-4d）では変動成分および系統的誤差の低減を狙うという流体力学的な配慮に基づくデータ操作となっている。

次に、この流下方向流速についての補正効果を具体的に確認するために、各水深層毎に鉛直方向流速 w の平均値を求め、これを水深毎にプロットしたものを図-5 に示す。図中の元データはランダム計測された ADCP 計測値により求めたものであり、すべての水深において平均値は-（沈降方向）となっており、特に水面付近ではより小さな値となっていることが確認できる。このような誤差（ w 成分の系統的誤差）は、計測データに異方性空間平均操作を行うことで若干軽減され、さらに連続式補正を加えることで、水面付近の誤差は大幅に解消されていることが図から確認することができる。

次に得られた流速分布（三次元・三成分速度分布）を用いて計測河道区間の流れ構造の抽出を試みる。図-6a は河床形状を示しており、第一から第四までの水制の位置を矢印で示している。

まず渦度 $\Omega_x = \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z}$ の等値面の分布（図-6b）を調べると、主流部上流の水面付近に大きな+の領域が確認できる。これは、図-4d で確認できる第一水制対岸付近にみられる水深（色）変化に対応して流向が変化している部分と一致しており、三次元的なねじれ（流下方向を向いて半時計回りの二次流）が Ω_x+ として抽出されている。

次に、渦度 $\Omega_y = \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x}$ （図-6c）を調べると、第一水制対岸付近において、水面付近では+領域、底面付近で一領域が形成されているが、これは二次流の発達による最大流速地点の降下を示しているものと考えられる。下流側の底面に広がっている一領域は、底面付近でのせん断流れによるものと考えられる。

渦度 $\Omega_z = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$ （図-6d）では、河道中央の主流部を挟むように左岸側に+領域、右岸側に一領域が帯状に現れており、水平せん断の領域を明確に確認することができる。この+領域と一領域の幅は下流部と比較して上流付近で狭くなっていることが確認できる。このことから、第一水制対岸付近においては、流れの集中が見られることが確認でき、その位置と河床の深掘れ位置（図-6a を参照）が対応していることがわかる。また一領域（青）は第三、第四水制の先端部と接続しており、第三、第四水制間の内部は平均流速場の観点からみるとせん断層によって主流部と分離されており、第三、第四水制の間で一つの死水域が形成されていることがわかる。一方、第一、第二水制の先端部と、その周辺に形成され

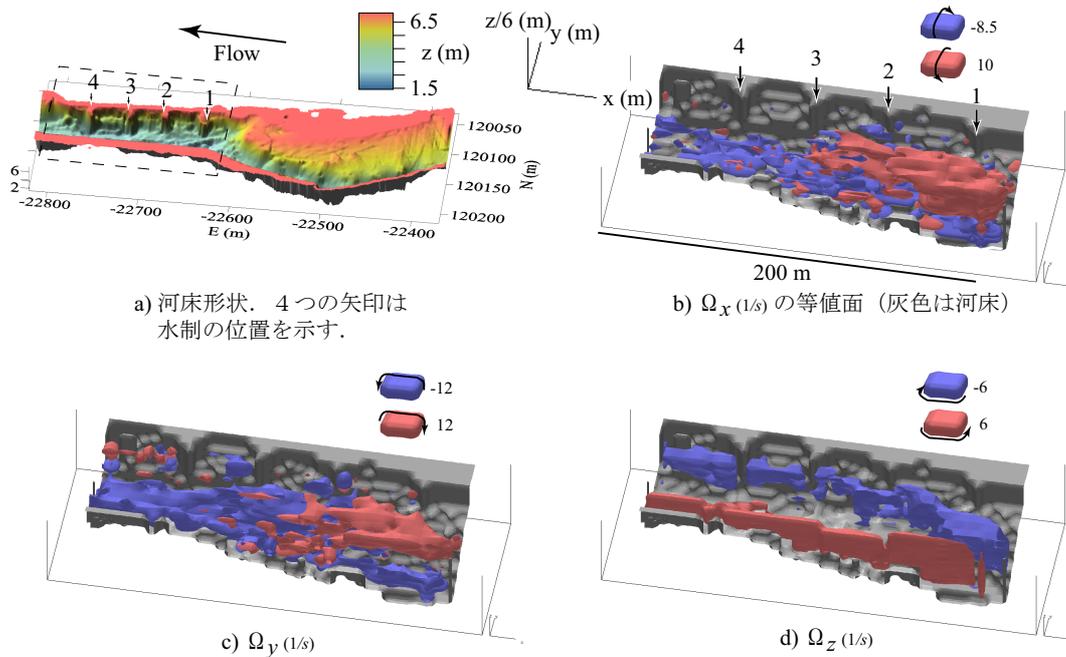


図-6 河床形状と流速分布から算出された渦度等値面. 水深方向 (z) を6倍して示している

ているせん断層 (青で示した一領域) とは距離がみられることから, 第一, 第二水制付近においては水制の内部にとどまらない, より広範囲な死水域が形成されていることがわかる.

6. おわりに

本研究では船舶を用いた河川流の ADCP 計測において, ランダム計測された計測データの補間・補正の開発と三次元流れ構造の抽出を行った. 計測値に含まれる変動成分 (乱流および計測のランダム誤差) の除去を図るために, 流下方向に空間スケールを広く取った異方性補間を用い, さらに変動成分に加えてシステム誤差を含めた補正のため連続式に対する誤差修正を行った. これらの効果を確認するため, 数値計算結果を用いて精度検証を行い, 本手法の有意性を確認した. 最後に, 横断計測では得られない三次元的な流速分布が取得できる本手法の特徴を生かし, 実測データを基に渦度の三次元分布を表示して流れの三次元構造との対応を確認した.

今後は, 本研究で開発した手法をベースとして実河川における複雑流れにおける三次元構造の抽出と解明に取り組むと考えている. また, 異方性補間における空間スケールの決定法や, 連続式に対する補正の方法などについてはさらなる検討が必要と考えている.

謝辞: ADCP を用いた河川計測に関して木下良作博士による貴重なコメントを頂きました. 厚く御礼申し上げます. また, 京都大学防災研究所・馬場康之氏には現地

計測等で多大なご助力を頂きました. 神戸大学自然科学研究科・大藪政志氏, 門谷 健氏には論文作成に協力いただきました. 本研究は神戸大学 21 世紀 COE プログラム (安全と共生のための都市空間デザイン戦略) の援助を受けて進められました.

参考文献

- 1) 若岡圭子, 横山勝英, 石川忠晴. 湖沼・貯水池における ADCP 観測の問題点と誤差補正に関する研究. 水工学論文集, Vol. 41, pp. 1041-1047, 1997.
- 2) 大森隆裕, 清水康行, 崇田徳彦. ADCP を用いた河川湾曲部の密度流の計測. 水工学論文集, Vol. 41, pp. 1035-1040, 1997.
- 3) R. L. Dinehart and J. R. Burau. Averaged indicators of secondary flow in repeated acoustic doppler current profiler crossings of bends. *Water Resources Research*, Vol. 41, No. 9, p. W09405, 2005.
- 4) 二瓶泰雄, 木水啓. 新しいデータ同化手法に基づく河川流速・流量推定法の提案. 土木学会論文集, Vol. 803/II-73, pp. 155-160, Nov. 2005.
- 5) 橘田隆史, 岡田将治, 新井励, 下田力, 熊田康邦. ADCP を用いた河川流況計測法における課題と国内外における応用観測事例. 河川技術論文集, Vol. 12, , 2006.
- 6) 門谷健, 椿涼太, 松原隆幸, 宝来佑太, 藤田一郎. 水面の変形を考慮した開水路側岸凹部流れの LES 解析. 第 61 回年土木学会次学術講演会概要集. 土木学会, 2006.
- 7) 藤田一郎, 武藤裕則, 島津良郎, 椿涼太, 綾史郎. LSPIV 法による水制周辺部の平水時および洪水時流れに関する検討. 水工学論文集, Vol. 47, pp. 943-948, 2003.
- 8) 武藤裕則. ADCP による河川流観測. 京都大学防災研究所年報, Vol. 47/B, pp. 571-580, 2004.

(2006.9.30 受付)