

空間データの計測技術の発達と水工分野への展開

椿 涼太¹・河原能久²

¹広島大学大学院工学研究科（〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1）

²広島大学大学院工学研究科（〒739-8527東広島市鏡山1-4-1）



近年、リモートセンシング技術の発達や普及に伴って、新たな空間データの計測技術の実務での利用が可能となりつつある。このような新たな計測技術によって、今までにない詳細さ・精度で空間データを得ることができるようになりつつある。このような転換は、河川管理の場面においても、限られた予算のなかで的確かつ高度な管理手法を実施していく上で、大きな役割を果たすことが期待される。その際、従来の計測とはデータの性質や密度が大幅に異なる点に留意し、従来の計測法を代替するという視点の他に、新たな計測法の特徴を生かした情報の抽出法の開発や得られた情報の活かし方を模索することも重要となる。

キーワード 空間データ、計測技術、航空レーザー測量、ADCP

1. はじめに

河川およびその流域は空間スケールが大きく、その範囲すべての情報を把握することは困難であり、私たちは、限られた時間・場所での計測データに基づいて、水や物質の流れを評価したり管理のための判断を下したりする必要があり、限られた情報のみしか利用できない状況の中で、例えば、降雨・流出の関係をモデル化（流出解析）しようとするブラックボックス的なモデル、つまり、入力データと出力データは実測によく合うが、なぜ合うのか、なぜそのような結果になるのかは説明できないモデルを利用することになる。このようなモデルでも十分、実用的価値をもつ場面は多い。しかし、将来の予測や施策の適用効果といった、入力・出力のセットが存在しない問題に対して、このようなアプローチでは適切な結果が得られる保証がないという大きな問題を持つ。

近年では、リモートセンシング技術の発達や普及にともなって、今まで利用できなかった質・量の空間データの利用が可能となりつつあり、精度や分解能の問題もあるが、地表部分に関しては、流域レベルの空間スケールの情報を把握することも実用的に可能となっている¹⁾。流域よりも小さな空間スケールを持つ河川の様子についても、航空機等を利用した局所的かつ低高度なリモートセンシング技術などを用いることで、河原の石粒や草の一つ一つを識別することすらも可能となってきている。このように、今までにない詳細さ・精度で空間データが得られるということは、例えば河川管理を考える上で、より詳細な分析材料が手に入るということになり、歓迎すべきことといえる。その一方で、従来の計測法とは、

データの性質や密度は大幅に異なるため、今までの計測法を代替するというだけでなく、新たな計測法の特徴を生かした情報の分析や抽出法を開発する必要²⁾があるということでもある。さらには、得られる情報を活かす方法についても検討を加えて、限られた予算の中での安全と環境の両立のための最適な手法を模索し、場合によっては新たに管理手法を組み直すことも必要となる。

このような観点から、本論文では、航空レーザー測量により得られる高精度・高分解能の地形情報を活かした洪水氾濫シミュレーション、ならびにボートに搭載したADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) により計測される時々刻々の水深別データから実河川での複雑な局所流れ構造を実測する試みを紹介する。

2. 複雑地形の計測技術と洪水氾濫シミュレーション

(1) 背景

航空レーザー測量法は、航空機に搭載したレーザースキャナにより、地表面をなぞるように計測することにより、xyz座標により構成される膨大な量の点データを次々に計測していく手法である。得られるデータは、三次元座標点の集まりであるが、データの密度が大きいため、座標点の散布の様子から、建物や植生といった物体を推定することが可能である。例えば、平らな地面では、座標データはある面に沿って二次元的に分布するし、建物では屋根の形に盛り上がって計測点が分布することになる。植生の場合は、植生上面や中間の葉の座標などのばらつきを持つ集団として計測される。

航空レーザー測量法を文字通り測量法として、その特性について検討してみると、原理的にGPS (Global Positioning System) や、慣性航法装置等の様々な計測誤差の影響を受けるため、それぞれの測量点の位置精度は特に良いというわけではない。とはいえ、ある程度の誤差の範囲に収まる（高さ方向：数～数10 cm、水平歩行：数10～100cmオーダー）ことは経験的に確認されており、ある程度広い空間（kmオーダー）を対象として計測する際には実用的に十分な精度を有しているといえ、さらに高密度に計測できるため、局所的な地形勾配が把握できるという大きな利点を持っている。

洪水氾濫流は、河川からの越流や破堤により普段水路ではない部分が浸水するものであり、人的・経済的に大きな被害を及ぼすものである。ところで、この氾濫流に限らず、表流水の運動は基本的には重力が原動力となっており、高い部分から低い部分へと流れて行く。洪水氾濫もその例外ではなく、河川の流れの水位より周囲の土地の高さが低い場合にのみ起きるものであり、この点で、海面より高い陸域にも水が押し寄せ津波による浸水とは根本的に異なる。洪水氾濫は、主に重力により駆動されて流れて行くため、地面の標高、さらには、地面の標高の分布、すなわち地形勾配を把握することが極めて重要であり、このような情報を取得できる航空レーザー測量は、洪水氾濫の予測・評価を行う上で画期的な技術といえるものである。

(2) シミュレーションの設定と結果

次に、この高密度・高精度な地形データを活かした洪水氾濫シミュレーション例を示し、得られる情報の性質を確認し、防災という視点で有益な情報の抽出を試みる。図-1に示したのは、実際の航空レーザー測量により得られた地形データであり、細かな家屋の形状や配置などが精密に計測されていることが確認できる。また、この地域は、埋立地ということもあり、比較的平坦な地形となっていることも確認できる。この図の上（北）の部分に図-2で示したピーク時には地盤より高くなる水位の時系列を境界条件として与えて、氾濫水の広がり方を確認することとする。また、地形については、代表計算格子幅（三角の辺）を3m, 5m, 8m, 10m, 15m, 25mと変化させた非構造計算格子を作成³⁾し、それぞれの格子を用いた計算結果を確認する。

図-3に格子幅別の氾濫面積の時系列変化を比較する。同図より氾濫面積は全体的には単純に増加しているが、格子幅による違いをみると粗いメッシュの結果（16 m, 20 m, 25 m）の方が比較的、面積の増加が速くなっている。これは詳細なメッシュの結果（3 m, 5 m, 8 m）に比べ、粗いメッシュでは地形勾配の再現性が低下して地形が平坦化する傾向があることや細かな建物の存在を解像できないことが原因と考えられる³⁾。現在、ハザードマップ等の実務での氾濫シミュレーションでは50 m程度

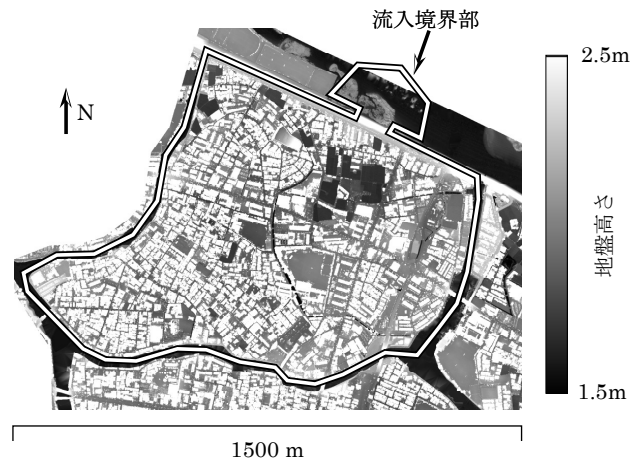


図-1 洪水氾濫シミュレーションを行う地形データ

の格子幅を用いる例が一般的であり、このようなシミュレーションでも地形の平坦化や建物の影響の簡略化の影響が発生していると考えられるべきである。図-3に示すように、荒い格子では氾濫域の広がり方が速くなる傾向があるが、実際の氾濫の例との比較により計算結果を合わせるために、荒い格子を用いる場合、半経験的に大きな粗度係数を設定する。しかし、これは、前述のいわばブラックボックス的なアプローチであり、どのような地形起伏、家屋配置でどのような粗度係数を設定すべきかといった因果関係について、特に地形起伏を粗視化することによる効果についてはほとんど検討されてこなかった。ところが、航空レーザー測量を利用することで、地形起伏や家屋配置などはモデル化することなく、直接解像ができるため、これらの効果についても的確に評価したシミュレーションが可能となるのである。

氾濫面積については、上記のように詳細な地形を考慮することによりある程度の確に評価できそうな目途があるといえそうであるが、他の情報についてはどうであろうか。図-4aに示したのは、図-1に示した計算範囲の中の、ある点での浸水深の時系列変化である。同図により、格子幅の小さな細メッシュグループの結果は、粗メッシュグループに対して、ばらつきが小さく、細メッシュでは狭い範囲に収束していることが確認できる。これは、地形の解像度および計算の精度の格子幅に依存性する計算結果の変化が、細メッシュの範囲では小さいことを示しており、逆に粗メッシュではこれらの影響が大きく、計算結果の信頼性が低くことを表している。ところが、局所的な流速を図-4bに確認してみると、細メッシュであってもばらつきが大きく、局所的な氾濫流の流速を評価することは、少なくとも数メートル程度の大きな計算格子では不十分なようである。無論、粗い格子ではさらに信頼性が低くと考えられ、ハザードマップでの局所的な水深や流速を用いた“避難困難度”を示す際には、その示す意味や信頼性について十分注意を払う必要がありそうである。

ところで、水位はある程度評価がしやすく、流速の予

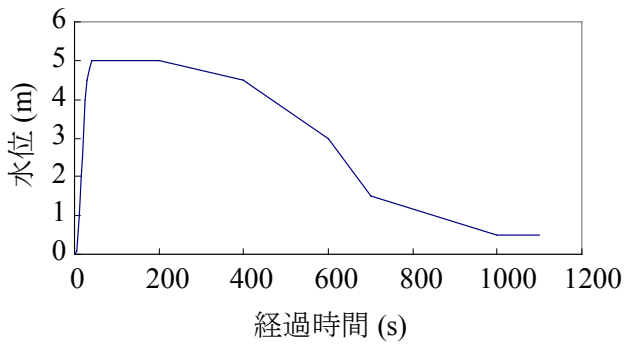
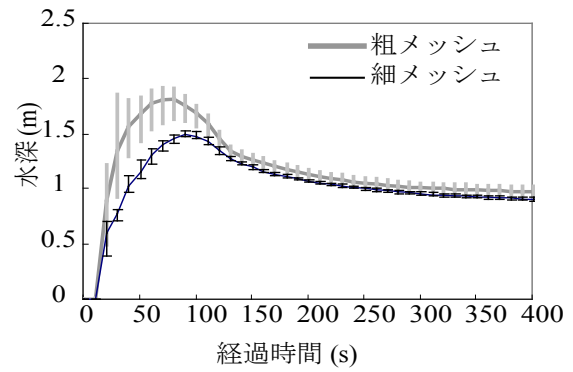


図-2 図流入部で与えた水位の時系列条件



a) 点での水深

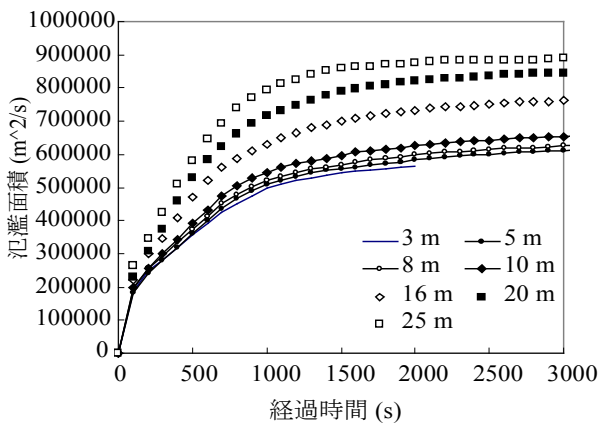
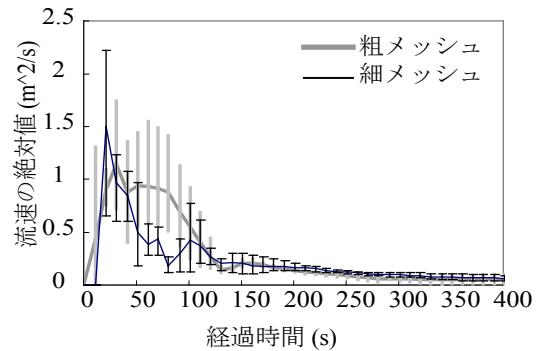


図-3 氾濫面積の時間変化



b) 点での流速

図-4 氾濫面積の時間変化 (エラーバーはそれぞれのグループに含まれるデータの最大値および最小値の範囲を示す)

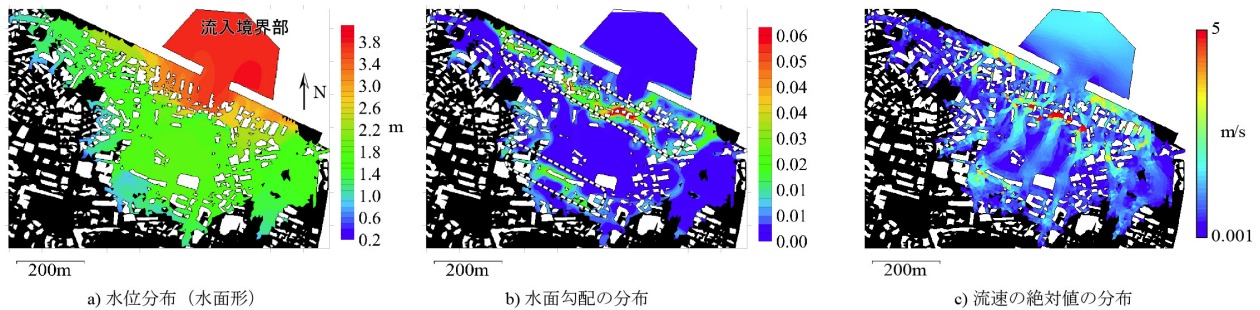


図-5 氾濫シミュレーション結果の例

測が難しい理由を考えてみると、流速というのは、局所的に容易に変化するものであり、道路を流れる氾濫流をとってみても、そこに車が駐車しているかどうかや、ガードレールや植え込みの有無や形状によって大きな影響を受けうることも容易に想像できる。一方、水位については、前述のように、水というのは低いところに流れようとする強い傾向があるため、どちらかといえば平らな面を形成しようとする性質があり、水面形というのは、局所的な地形の影響よりも、もう少し広いスケールでの総合的な地形の構造というのが大きな影響を及ぼす。このような点を確認するため、図-5に水深の分布(a)、水面勾配の分布(b)、流速の分布(c)を示している。建物が入り組んでいることもあり、込み入った図になっているが、

図-5bより水面勾配は特定の帯状の配置で大きな値を持っており、その帯を横切るように高速流は発生していることが確認できる。さらに、このような流れの構造は、高精度・高分解能の地形情報を活かすことで初めて評価することが可能となる。このような流れの構造に着目することで、家屋破壊のポテンシャルについても評価することが可能であることが確認されつつある⁴⁾。氾濫流の流れ構造という視点を新たに導入することで、航空レーザー測量の特徴を活かすとともに、高精度・高分解能の氾濫シミュレーションにより得られる大量の情報を防災に直結する情報に整理・集約することが可能となるのである。

3. 河川の局所構造流れの実測⁹⁾

(1) 背景

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。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。

(2) 方法と結果

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-6 に示す。また、図-7にはADCP によりランダム計測されたデータと、提案手法によりされたデータのベクトルプロット図を示す。計測データと補間結果を比較すると、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-7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-8に示すのは、離散データの補間法として一般的に用いられる手法の一つであるKriging法を用いて計測データを補間した速度分布と、提案手法により補間した速度

分布に基づいて流線を描いたものである。同図より、Kriging法では流線のぶれがみられ、速度分布の揺らぎが大きい一方で、提案手法による結果は、本川での流れや水制付近での循環流などがよりはっきりととらえられていることが確認できる。これは、Kriging法では計測データの誤差や、乱流による速度変動が補間された速度分布にも反映されてしまうが、提案手法では、データ処理の工夫により、流れ構造を保ったまま速度変動成分を除去するため、より正確な時間平均的な流れ構造の把握できるためである。

このように、ADCP計測により得られる特徴的か大量のデータを活かした情報の処理法を開発することで、いままでは困難と考えられてきた複雑な実河道での流れの三次元的な構造を実測することができるようになってきている。ADCPは現在のところ比較的単純な洪水流量観測に利用される例が多いが、観測方法やデータ処理方法

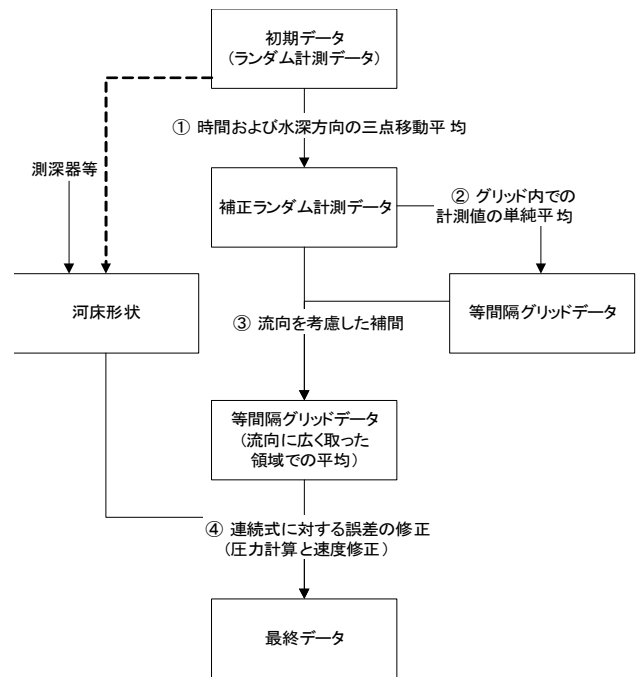


図-6 ADCPデータの補間法手順⁹⁾

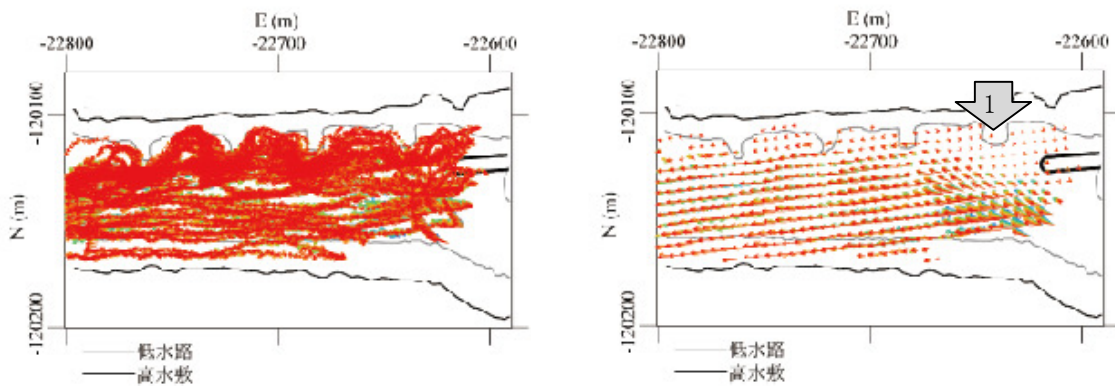


図-7 ADCPによる計測生データ（左）と提案手法による補間結果（右）のベクトル図⁹⁾

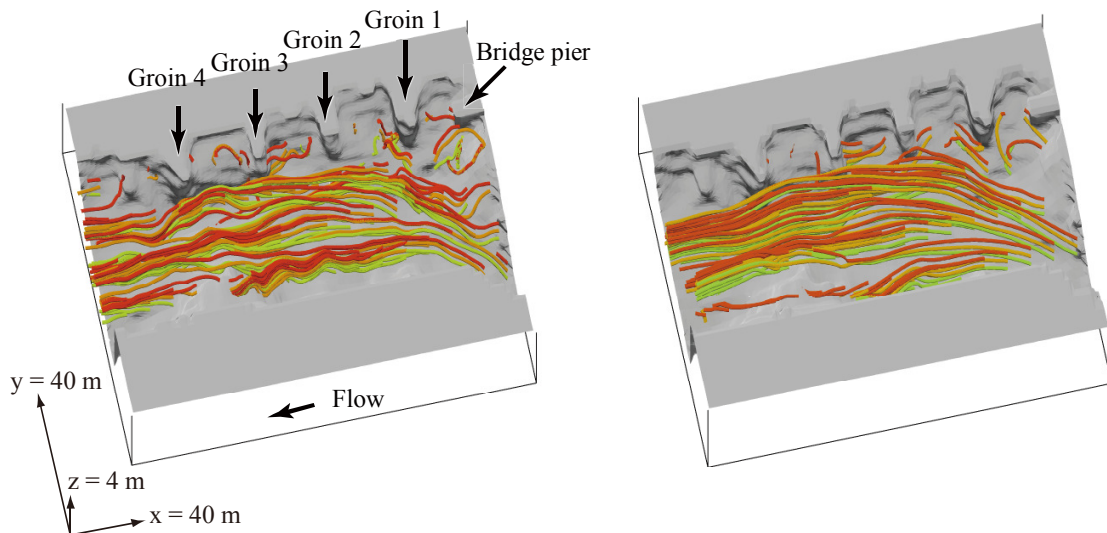


図-8 一般的な補間法 (Kriging) による補間結果 (左) と提案手法による補間結果 (右) の流線図⁶⁾

を工夫することにより、多自然工法を含めた河道設計や生態的機能の評価などにも広げることが可能となり、定量的な河道評価・河川管理につながるものと期待される。

4. おわりに

本論文では、近年普及が進みつつある空間データの計測技術の実務での利用を踏まえ、これらの計測法によりえられるデータの特徴に着目し、そのデータを活かす処理法を開発・利用例を紹介した。このようなデータの利用については、従来の計測法の代替としてとらえるだけでなく、計測技術の特徴を活かした情報を得ることにより、防災や環境での有益な新たなデータソースととらえる、その特徴を活かしていくことが重要である。計測技術自体の進展、データ処理能力の向上と、それに伴う分析アプローチの革新などによって、今後もこのような計測方法や処理方法の転換は、さらに加速していくものと考えられ、限られたリソースの範囲で的確かつ高度な環境管理や防災活動を行う上で、これらの技術が担う役割がますます大きくなっていくものと考えられる。

謝辞：本論文の内容は、参考文献^{3),4),5),6)}に発表されたものを含んでおり、多くの方々の協力のもと遂行されたものです。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) P. D. Bates: Remote sensing and flood inundation modelling, Hydrological processes, Vol. 18, pp. 2593-2597, 2004.
- 2) G. Bell, T. Hey and A. Szalay: Beyond the data deluge, Science, Vol. 323, pp. 1297-1298, 2009.
- 3) 椿 涼太, 藤田一郎, 岡部健士: 航空レーザー測量を用いた高解像度非構造格子の自動生成と氾濫解析, 土木学会論文集 B, Vol.62, No.1, pp. 41-52, 2006
- 4) R. Tsubaki, I. Fujita, I. and T. Okabe: Sensitivity of grid spacing to prediction and coherent flow structure of inundation on urbanized area, 32nd congress of IAHR, Theme A, on CD-ROM, Venice, Jul., 2007.
- 5) 椿 涼太, 藤田一郎, 武藤裕則, 萬矢敦啓: 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, 土木学会水工学論文集, p. 178, 2007.
- 6) R. Tsubaki, Y. Muto, I. Fujita and Y. Kawahara: Measurement of river flow structure using randomly-measured acoustic Doppler velocity data. ICCEE2009, Korea, Oct. 2009.