舷側設置型 ADCP による河川横断面内流況観測

SECONDARY FLOW MEASUREMENTS IN A RIVER BY A BOAT-MOUNTED ADCP

武 藤 裕 則[1] ・ 馬 場 康 之[2]

MUTO Yasunori and BABA Yasuyuki

[1]正会員　Ph.D　京都大学准教授　防災研究所流域災害研究センター（〒649-2201 西牟婁郡白浜町堅田 2347）
[2]正会員　博(工)　京都大学助教　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）

Secondary flow in a river was measured by a boat-mounted Acoustic Doppler Current Profiler. Three methods were tested, i.e., A) measuring in a fixed cross section with single back-and-forth, B) measuring in a fixed cross section with multiple back-and-forth, and C) measuring without fixed sections but randomly in the whole tested area. Reliability of the methods was examined via drawn primary and secondary velocity distributions. Applicability of the methods for a particular purpose was also discussed.

The method A, which is widely used for river discharge estimations, gives primary velocity fairly accurately. The method B gives the best results for secondary flow structure amongst the tested if the estimated time is good enough. The method C shows similar performance in accuracy as the method A, but it has an advantage of covering the whole flow field, even roughly, but with less time and efforts.

Keywords : *secondary flow, velocity measurements, field measurements, ADCP*

１．はじめに

開水路流れにおける二次流の存在は古く Prandtl が指摘し，主として内部・外部摩擦との関連で詳細な検討が進められてきた．特に，60～70 年代以降の計測機器の進歩に伴い，様々な断面形状を有する開水路流れにおいて，二次流を含む三次元構造が明らかとされている[1), 2), 3)]．これらの検討は，点計測法及び流れの可視化法を駆使した室内実験による成果であるが，それに対して実河川における検討例は極めて少ない．これは，実河川では必要な労力が多大であることに加えて，計測機器とそのアプリケーションが十分に確立していなかったことが指摘される．

近年，海洋観測用に開発された超音波ドップラ流速分布形（Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP）を河川観測に適用する例が増えている[4), 5), 6)]．ADCP は，厳密な点計測法ではないものの，計測線上の流速分布を三成分について瞬時に得ることができるという計測器として極めて有力な特徴を有する．元来河川へは流量観測用として適用され，計測断面を片道または往復することで簡便かつ正確に河川流量を得ることができるとされている．一方，三次元構造自体を対象とした ADCP 計測も試みられている[7)]．著者ら[6)]は，水制群を有する河道区間を対象に，舷側に ADCP を設置したボートを縦断方向に隈無く操船し，観測区間内の速度情報を偏りなく得ることを目指した．いずれの方法も ADCP を曳航して観測する点では変わりはないが，得られるデータ総数は室内実験によるものに比して空間的にも時間的にもかなり少なくならざるを得ない．

最近，椿ら[8)]は，このような実河川における流速計測の困難さを前提とし，曳航観測のようなランダムに計測された流速データから流れの三次元構造を精度良く抽出するための補間法を提案しており，ADCP 曳航観測による二次流計測に多大な可能性を示唆した．その一方で，ADCP 曳航観測法自身の精度向上や，新たな横断面内流況観測法の開発も模索されるべきである[9)]．

そこで本研究では，流量観測を目的として一般的に行われる横断方向一往復計測法や，著者らが行った縦断方向多測線計測法[6)]により得られる横断面内流況がどの程度の確からしさを有するのかを検討するために，舷側設置型 ADCP によって河道の単一断面において横断方向に多数回往復して計測を行い，

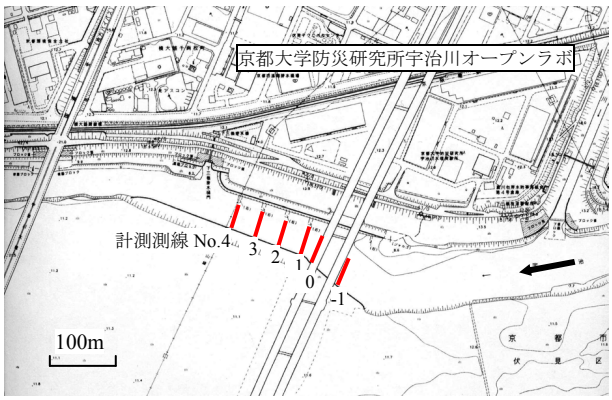


図-1　観測地点の平面図および測線位置

写真-1　観測地点の概要（直線部・水制設置区間）

横断面内流況をできるだけ詳細に計測することを試みた．各方法による結果の比較を通して，実河川における横断面内流況の簡易観測法としての ADCP 曳航観測法の可能性について検討する．

2．観測地点および観測方法概要

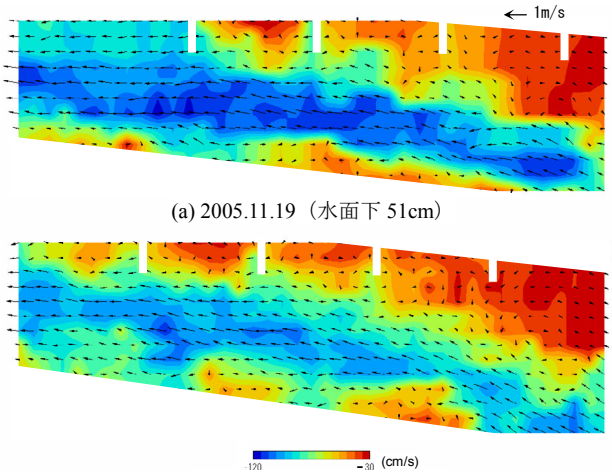
観測地点は，既報 [6]と同様に，宇治川（淀川）の河口より 42.6km から 42.8km にかけての約 200m である．この区間の低水路は，**図-1** および**写真-1** に示すように緩やかな右彎曲から直線部に続いており，直線部の右岸側には 4 基の石張水制が設置されている．今回の観測では，横断面内の流況を詳細に捉えることを目的に，測線を**図-1** に示すように河道の横断方向にとり，測線上を多数回往復することで流速データを得た．測線は，水制がそれぞれ設置されている位置に加えて，水制設置区間の上流側に 2 測線設定し，合わせて 6 測線とした．

今回の観測は 2005 年 11 月 19 日に実施された．**表-1** は，観測時の水理条件について示したものである．表には，参照データとなる既報 [6]における平水時（2004 年 4 月 7 日）の水理条件も示している．なお，水制の天端高は OP+7.81m であり，いずれも非越流状態である．表より，両者の水理条件はほぼ同様であることがわかる．

表-1　観測時水理条件

年月日	向島（44.9km）水位（OP+m）	淀（38.9km）水位（OP+m）	向島換算流量（m^3/s）**
04. 4. 7	7.11	5.97*	69.9
05.11.19	7.26	6.01	82.6

* 04.4.7 淀水位は欠測のため，前後の水位から推定
** 向島水位より H~Q（H15 年式）により換算



(a) 2005.11.19（水面下 51cm）

(b) 2004.4.7（水面下 61cm）

図-2　平面流速分布

今回の観測で用いたのは，既報 [6]と同様に，米国 R&D 社製のワークホース ADCP 1200 センチネルである．計測時設定は，層厚 25cm，ブランク距離 5cm，トランスデューサ設置位置 40cm（既報では 15cm）とし，ピンギング発信周波数 25Hz で 20 個のデータをアンサンブル平均することで 1 計測データとした．観測位置はボトムトラッキングにより把握した．

観測方法としては，船外機付き小型アルミボート（長さ 3.3m，幅 1.3m）の片側舷側に ADCP を取り付け，**図-1** に示した観測測線上を 10～20 往復し，断面内の流速データ得た．操船速度は，平均して 1kt（≒0.5m/s）である．データ収録には R&D 社のソフトウェア（WinRiver, Ver.1.03.000）を用いた．

図-2 は，対象区間において既報 [6]と同様に縦断方向に操船しながら計測を行って得られた平面流速分布を，既報における結果と比較したものである．河岸部寄りの停滞域，特に水制による止水域・逆流域が第 4 水制下流部を除いて同様に形成されていることがわかる．一方，いわゆる主流域の流速については今回の観測結果の方がやや大きい．これは，トランスデューサの設置位置に起因する計測水深の違いの他，**表-1** に示したように，今回の観測時の方が流量が大きく，また水面勾配もやや大きいことから生じたものと考えられる．しかしながら，本論文の目的である横断面内流況の比較にあたっては，両者はほぼ同様の水理条件であると見なすことができる．

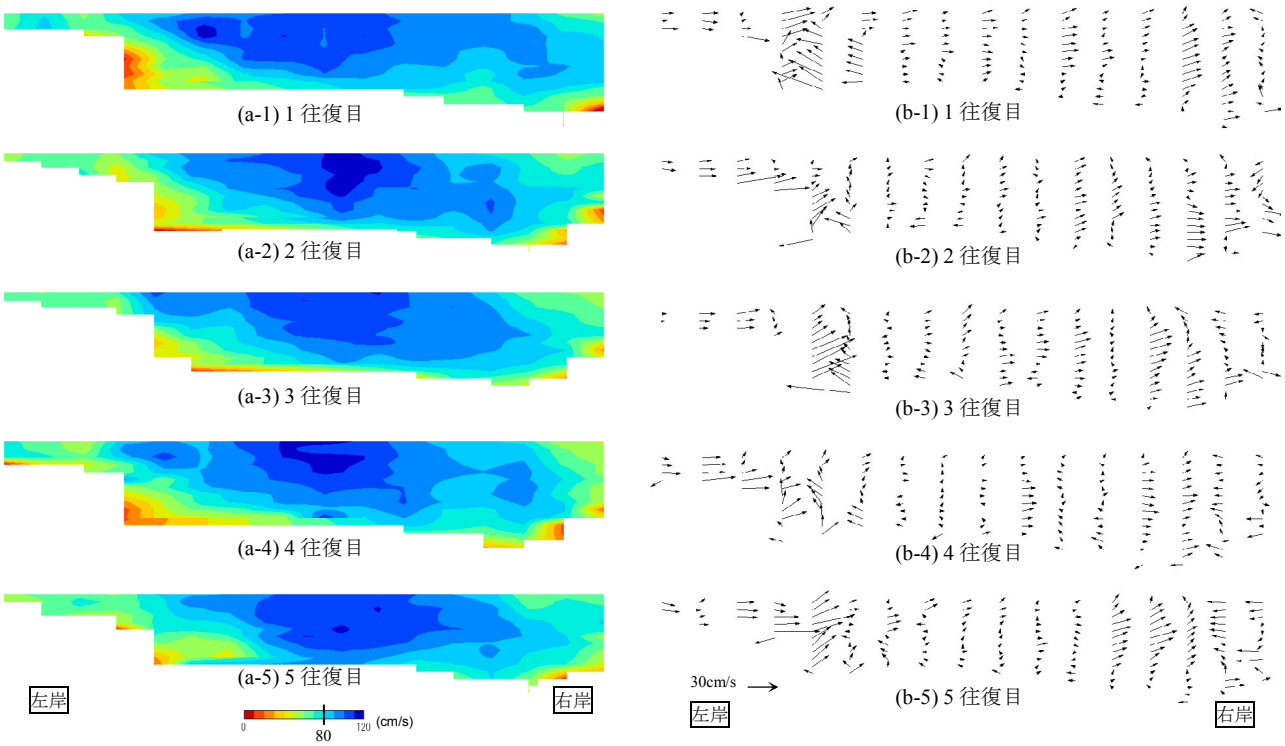


図-3　横断面内流況の変動特性（左：主流方向流速分布，右：横断面内二次流ベクトル）

3．観測結果および考察

(1) 横断面内流況の変動特性

図-3 は，主流方向流速および二次流速分布について，単一測線において 5 往復連続で計測を行った結果を一往復ごとに分割して平均し，時系列順に並べたものである．計測測線は No.4 であり（**図-1** 参照），一往復の計測に要した時間は約 2 分間である．なお，図示にあたっては，横断方向に 2m ごとのグリッドを設定し，グリッドの左右 1m 以内の計測データを平均して当該グリッドのデータとしている．鉛直方向は計測時設定と同じく 0.25m ピッチである．

図より，まず主流方向について，流速 80cm/s 以上の部分に着目すると，いずれの時点においてもほぼ同様の形状であることが見て取れる．水路中央部の半水深より水面側は流速 100cm/s 以上の領域で占められている．最速域は各図ごとに表れる位置を異にし，かつその値もそれぞれ異なるが，全体としては安定した流況といえる．このことは，各図から計算される流量が最大 82.6m^3/s（**表-1** に示した換算流量に対して±0%），最低 77.2 m^3/s（同-6.5%）の範囲に収まっていることからも理解される．

次に，二次流をベクトルで表したものを見ると，左岸寄りの断面急変部や右岸沿いの部分でやや大きな変動が見られるものの，水路中央部では総じて右岸へ向かう弱い流れが卓越しており，その流速は 5cm/s 程度以下と小さい．中央右岸寄りの半水深付近で，10cm/s 程度の流速で右岸へ向かう流れが時折見られる．しかしながら，開水路流れに特有のいわゆる二次流のセル状の構造は全く見られない．平均化操作にあたって，各グリッドにおけるデータ個数は，一往復計測法の場合 10 個程度未満であり，仮にそれらの空間上の散らばりを無視して全てが同一地点における時系列上の離散データと見なせたとしても，セル構造を描くための平均個数としては不十分であると言わざるを得ない．

以上の結果から，流量観測を目的として行われる横断方向一往復計測法は，流況が安定している場合，主流速分布および流量算定に関する評価時間としてはほぼ十分であることが示された．

(2) 評価時間の影響

図-4 は，評価時間が流速分布の計測結果に及ぼす影響について検討するために，平均化操作に用いるデータ数を順次増やした場合の主流方向流速および二次流速分布を示したものである．先述のように，一往復の計測に要した時間は約 2 分でほぼ一定であるため，以下では評価時間を往復数で表す．図中の評価時間は上から順に，1 往復，3 往復，5 往復，7 往復，10 往復および 20 往復である．なお，計測測線は，前節と同様 No.4 である．

図より，主流方向流速に関しては，3 往復より評価時間を増加させてもほとんど変化しない．このことは，前節で示した評価時間 1 往復の結果を時系列で並べた場合にほとんど変化がなかったことからも理解される．

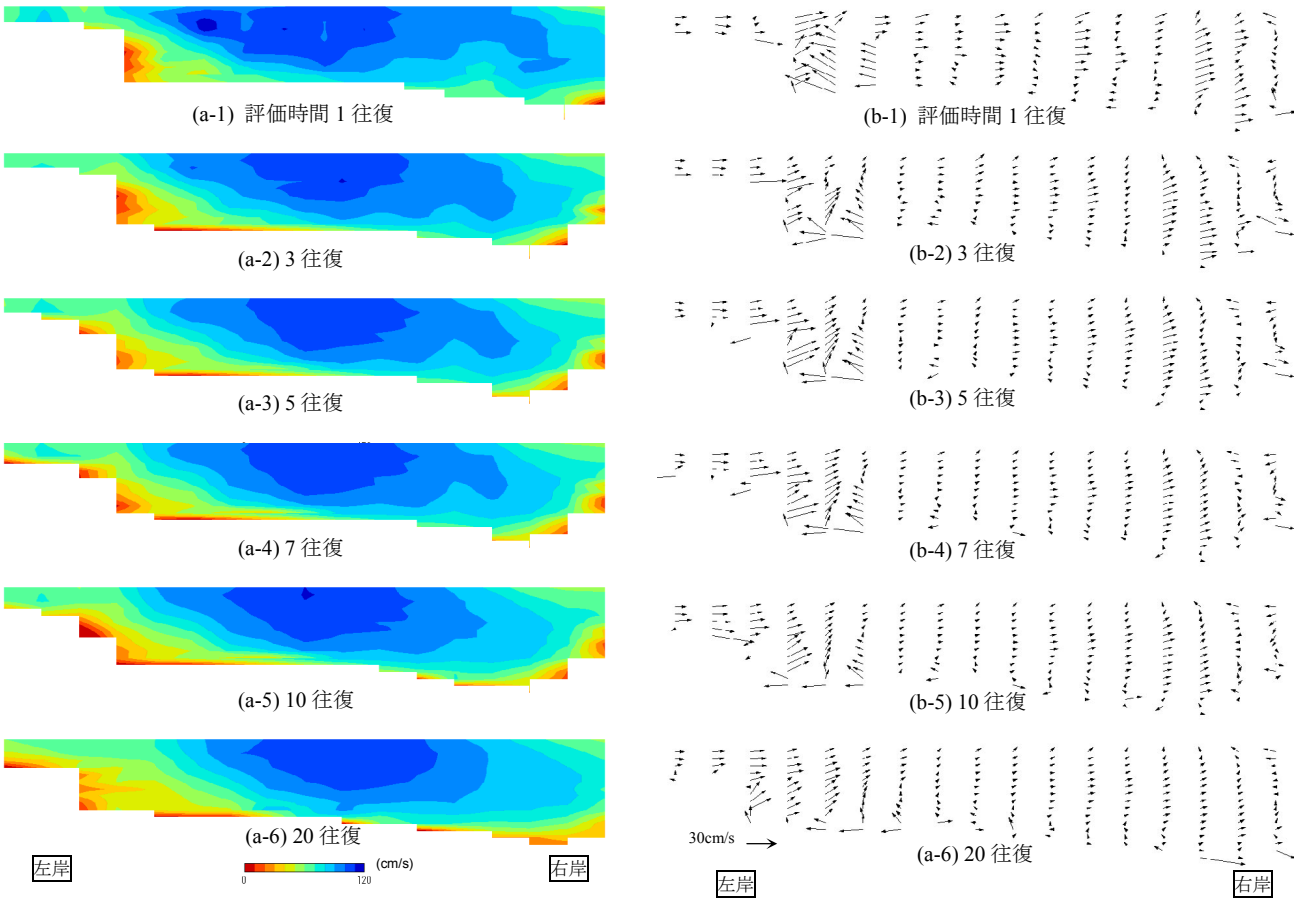


図-4　評価時間が流速計測結果に与える影響（左：主流方向流速分布，右：横断面内二次流ベクトル）

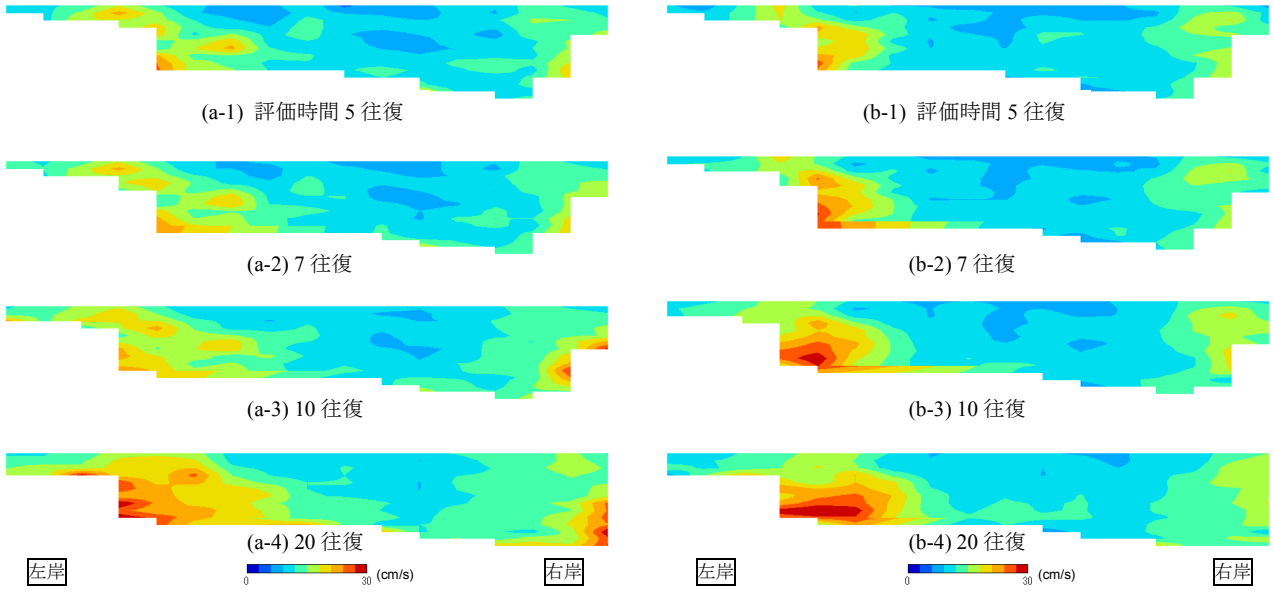


図-5　評価時間が乱れ強度分布の計測結果に与える影響（左：主流方向成分 u’，右：横断方向成分 v’）

一方，二次流ベクトルの分布を見ると，前節の検討で時系列的な変化があまり見られなかった水路中央部に関しては，3～20 往復まで大きな変化は見られない．これに対し，左岸寄り断面急変部や右岸側水面付近においては，評価時間が大きくなるにつれて渦状の流れの存在が明確になり，20 往復の結果では，左岸底面付近の時計回りの渦の一部が右岸へ向かい，右岸沿いでは水面側に反時計回り，底面側に時計回りの一対の弱い渦状の流れが見られるなど，セル構造がある程度補足可能である．

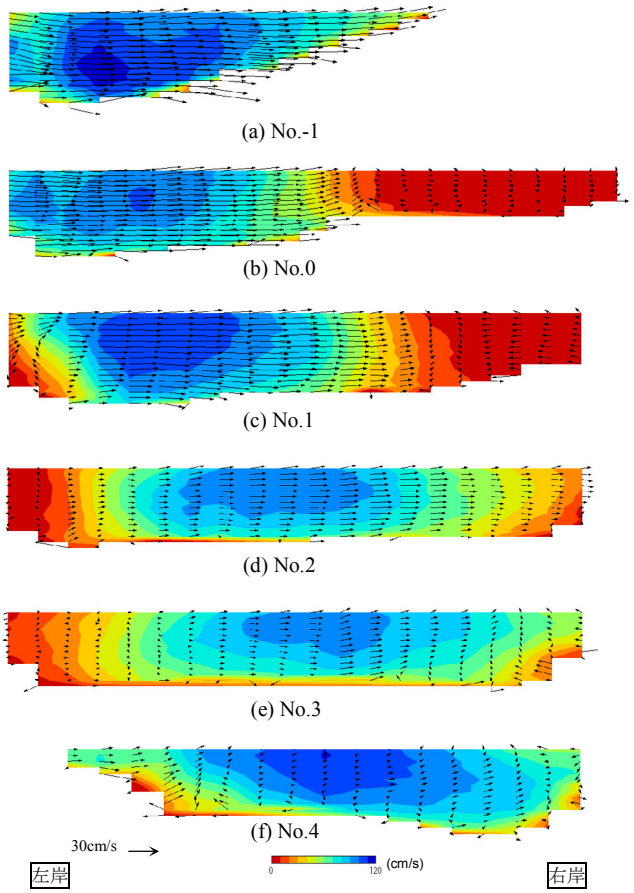


図-6　各測線における横断面内流況

以上のように，横断面内流況を評価するためには，ある程度の評価時間が必要であることが示されたが，**図-4** の結果からは，評価時間として必要な条件は明らかではない．そこで，そのような判定に乱れ強度を用いることを試みる．すなわち，乱れ強度の分布が安定した段階を変動の母集団を捉えた状態と見なし，その段階を必要評価時間と見なすのである．結果を**図-5** に示す．なお，評価時間 3 往復以下については，乱れ強度の評価に十分と考えられる個数のデータが得られていないため検討から外した．図より，今回の検討範囲では評価時間の変化に対して乱れ強度の分布は安定しておらず，評価時間の基準を導くことは厳密には困難である．しかしながら，二次元場と見なせるような水路中央部においては，乱れ強度は水面に向かって単調減少することから [10]，そのような状態がほぼ達成される 10 往復程度以上，理想的には 20 往復が，今回の検討地点において必要とされる評価時間と考えられる．

ここで導かれた 10 往復という評価時間の場合，1 つのグリッド・ポイントに対して平均化に用いたデータ個数は，平均して 50 個程度であることがわかっている．すなわち，1 グリッド・ポイントに対する実際の評価時間は，前述のようにデータのサンプリング長さが 25Hz×20 個＝0.8s であることから，約

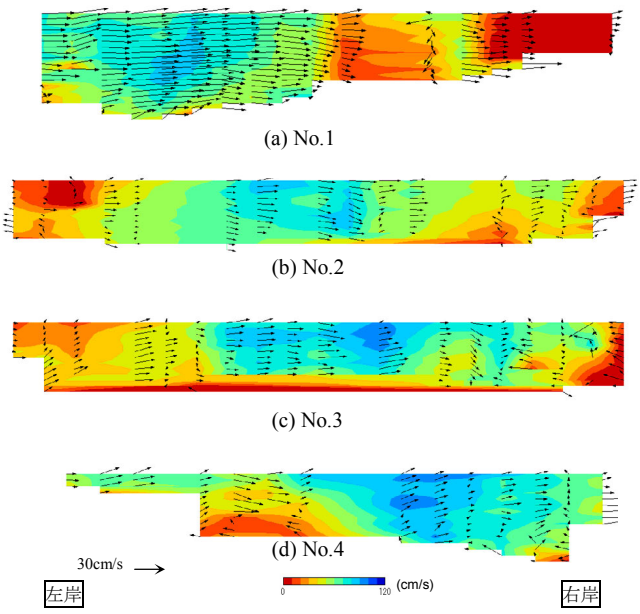


図-7　各測線における横断面内流況（縦断方向多測線計測法）

40s となる．Yalin[11]によれば，水深規模の渦が発生から消滅するまでの長さ＝バースト長さ L は水深の 6 倍程度であり，本検討では L＝約 30m となる．渦の移流速度が主流方向の平均流速 u に一致するとすれば，本検討における u＝約 1m/s であることから，渦の寿命は約 30s となる．したがって，上述の実評価時間は，渦の寿命の約 1.3 倍ということになる．

ただし，曳航観測であることから，元のデータは厳密に 1 ポイントにおける連続計測ではなく，またグリッド・ポイントに対して時間的にも不連続に計測していることに注意を有する．仮に，計測点の空間的な散らばりを無視し得ると考え，かつ，時間軸上に離散している個々の計測時間が十分ランダムであると仮定できるとするならば，データ数が十分多い場合には，1 点における時間的に連続したデータと同等と考えられ，上述のような評価が可能となる．

(3) 流下方向への流況変化

図-1 に示した各測線における流速分布の計測結果を**図-6** に示す．ここでは，前節の検討結果に基づき，各測線における評価時間を 10 往復分としている．図より，彎曲部（No.-1）では水面下に位置する最速域が，No.0～1 と流下するにしたがって水面付近へ上昇する様子が捉えられている．この両断面では，彎曲部内岸（右岸）側の砂州の後流域と見なされる止水域が形成されているが，No.2 に至ってほぼ解消し，水路有効幅の拡大と共に最大流速がやや低下する様子がうかがえる．No.4 では断面積が減少し，最速域が再度加速されている．一方，計測横断面内成分を見ると，止水域を除き総じて左岸から右岸への流れ

が卓越している．No.-1 および 0 については，水面上空にかかる橋梁を目標に操船したため，主流方向と計測測線が直角に交差しておらず，横断方向成分に主流方向成分を含んだ結果となっているものと考えられる．一方，No.1 以下の断面については，測線の設定は水路に直角としたことから，やや大きな横断方向成分は彎曲部の影響の解消過程と見られる．図に示したように，彎曲部の影響は No.3 もしくは 4 に至ってようやく解消している．

図-7 は，既報 [6]における縦断方向多測線計測法によるデータを用い，No.1～4 に該当する断面内の流速分布を示したものである．図より，流下方向成分に関してはほぼ妥当な結果が得られているが，横断面内成分に関しては，左岸から右岸への卓越した流れの様子は捉えられているものの，データのばらつきが大きい．縦断方向多測線計測法では，測線の設定は流れの状況と操船技術に大きく依存するため，測線間隔を正確に設定することが非常に困難である．加えて，流下・横断両方向に広がりを有する空間を計測対象とするため，ある特定のポイントで見た場合，平均操作の対象領域内の蓄積データはそれほど多くはない．今回の場合，平均化対象領域を流下方向に±5m，横断方向に±1m としたが，各ポイントのデータ個数は平均して 10 個程度であり，図に示したように場所によってはデータが存在しない箇所もあった．

以上のことから，縦断方向多測線計測法は，横断方向一往復計測法とほぼ同様の精度で流速分布を与えるものの，計測手法自体に起因するデータの粗密が生じ易く，適用法を慎重に検討する必要性のあることが示唆された．

４．おわりに

今回の検討の結果明らかとなった ADCP 曳航観測の各適用法の特徴は以下のようである．

1. 河川流量観測時に通常採用される横断方向一往復計測法は，主流方向成分についてはほぼ満足な精度で計測が可能であり，横断面内成分についても定性的には概ね妥当な結果を与えている．これより横断方向一往復計測法は，簡便ながら信頼できる流量観測法としての長所がある．
2. 著者ら [6]による縦断方向多測線計測法は，計測精度としては横断方向一往復法と大差ないが，条件によっては欠測域が生じやすい短所を有する．しかしながら，空間的に広がりのあるデータ取得が可能である他，計測測線の設定がし難い複雑な流れ場での概略計測に有利である．
3. 本研究において試用した横断方向多往復計測法は，ある程度以上の平均化評価時間を採った場合，3 つの手法の中で最も精度良く横断面内流況を捉えられる．しかしながら，今回の検討では評価時間の基準値を示すことはできなかった．このことは，本手法における平均化操作時の時空間の混在の問題と合わせて，今後の検討課題である．

謝辞：現地観測にあたっては，伊藤直樹君（京都大学大学院修士課程学生：当時）ならびに當内大三郎君（京都大学大学院修士課程学生）に多大なる協力を賜った．深くお礼申し上げます．

参考文献

1) Nezu, I. and Rodi, W.: Open-channel flow measurements with a Laser Doppler anemometer, *J. Hydr. Eng.*, Vol.112, No.5, pp.335-355, 1986.
2) Tominaga, A. and Nezu, I.: Turbulent structure in compound open-channel flows, *J. Hydr. Eng.*, Vol.117, No.1, pp.21-41, 1991.
3) Shiono, K. and Muto, Y.: Complex flow mechanisms in compound meandering channels with overbank flow, *J. Fluid Mech.*, Vol.376, pp.221-261, 1998.
4) 木下良作：ADCP（超音波流速計）によりうかがわれる洪水時の流れ構造, 第 51 回水工学講演会特別講演別刷, 2007.
5) 佐藤慶太・二瓶泰雄・木水　啓・飯田裕介：洪水流観測への高解像度超音波ドップラー流速分布形の適用～江戸川を例にして～，水工学論文集，第 48 巻，pp.763-768, 2004.
6) 武藤裕則・北村耕一・馬場康之・中川　一：ADCP を用いた水制域における流速分布計測，水工学論文集，第 49 巻，pp.637-642, 2005.
7) 渡邊康玄：ADCP による三次元流速の観測，川の技術のフロント，技報堂出版，pp.30-31, 2007.
8) 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，水工学論文集，第 51 巻，pp.1063-1068, 2007.
9) 萬矢敦啓・宇野哲平・木下良作・山下武宣：ADCP 観測値を用いた新たな試み～高度処理について～, 土木学会第 62 回年次学術講演会，2-104, pp.207-208, 2007.
10) Nezu, I. and Nakagawa, H.: *Turbulence in Open-Channel Flows*, IAHR Monograph, Balkema, pp.53-55, 1993.
11) Yalin, M.S.: River Mechanics, Pergamon Press, pp.36-42, 1992.

（2007.9.30 受付）