

洪水流観測への 高解像度超音波ドップラー流速分布計の適用 ～江戸川を例にして～

AN APPLICATION OF HIGH-RESOLUTION ACOUSTIC DOPPLER CURRENT PROFILER
INTO A FLOOD-FLOW MEASUREMENT

佐藤慶太¹・二瓶泰雄²・木水 啓³・飯田裕介³
Keita SATO, Yasuo NIHEI, Akira KIMIZU and Yusuke IIDA

¹ 学生員 修(工) 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻博士後期課程(〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

² 正会員 博(工) 東京理科大学講師 理工学部土木工学科(同上)

³ 非会員 東京理科大学 理工学部土木工学科(同上)

An acoustic doppler current profiler with low noise data and high resolution (HR-ADCP) recently developed has high potential to measure shallow-water flow like flood flow in river. In the present study, to examine the vertical structure of flood flow in river, we have attempted to apply the HR-ADCP into a flood-flow measurement in the Edo River. The observed data shows characteristic vertical structure of the velocity in the main channel that the relation between water elevation and velocity in the surface layer is quite different from that in the bottom layer. It is also noted that the friction velocity and vertical current profile in the main channel vary considerably in the rising and falling stages of the flood.

Key Words: ADCP, flood flow, vertical current profile, friction velocity, the Edo River

1. はじめに

治水, 利水, 環境を配慮した形で河道整備・管理を推進していく上では, それらのベースとなる河川における流量モニタリングの重要性が, これまで以上に増しつつある. 河川における流量測定手法の中で最も代表的なものとしては, 棒浮子をトレーサーとしたラグランジュ観測が挙げられる¹⁾. この棒浮子観測は, 簡便かつ低予算で実施できるため, これまで幅広く用いられているものの, この観測には様々な水理学的問題や実施上の問題点が指摘されている^{2)~5)}. この棒浮子観測以外の測定法としては, 非接触型で連続計測に適した電波流速計^{3), 5)}や水深方向の流速分布計測が可能な超音波ドップラー流速分布計(ADCP)^{6), 7)}を用いた調査や, 水表面上の浮遊物等をトレーサーとした画像解析法^{2), 8)~10)}などがある.

上記の手法の中で, 外洋や沿岸海域等の流動観測^{11), 12)}に主として用いられてきた ADCP は, 表面流計測を主とする電波流速計や画像解析法と異なり, 水深方向流速分布の連続計測が可能であるという利点を有している. さらに, ADCP は流速計測と同時に, 水中に浮遊する土砂やプランクトンからの反射強度を利用して土砂濃度の計測も行っており, ADCP の土砂・物質輸送観測への有用性も確認さ

れている^{13), 14)}. さらに, 最近では, pulse-to-pulse coherent ドップラー法¹⁵⁾などを利用して, 高精度かつ高時空間分解能計測を可能とする超音波流速分布計も開発されており, 洪水流のような浅水流場における詳細な調査が可能となりつつある¹⁶⁾. しかしながら, この ADCP を用いた洪水流観測の研究例は, 上述した沿岸海域などと比べて極めて少なく, 今後, ADCP を用いた洪水流調査を実施し, 未だ不明な点が多い洪水流の横断・鉛直分布特性に関する知見を蓄積していくことは必須である.

本研究では, 浅水流計測に適した高解像度超音波ドップラー流速分布計(以下では, HR-ADCP と呼ぶ)を用いて, 江戸川の洪水流に対して鉛直方向分解能 5cm で連続的な計測を行った. ここでは, 橋上より HR-ADCP を吊り下げて, 断面内の一地点で連続計測を実施するとともに, この HR-ADCP を橋上にて横断方向に移動させ, 横断面内の複数地点における流速の鉛直分布計測を行った. そこで得られた結果を用いて, 洪水の増水期・減水期における流速の鉛直分布構造や横断分布特性の変化について検討を行う.

2. 現地観測の概要

(1) 観測地点・期間

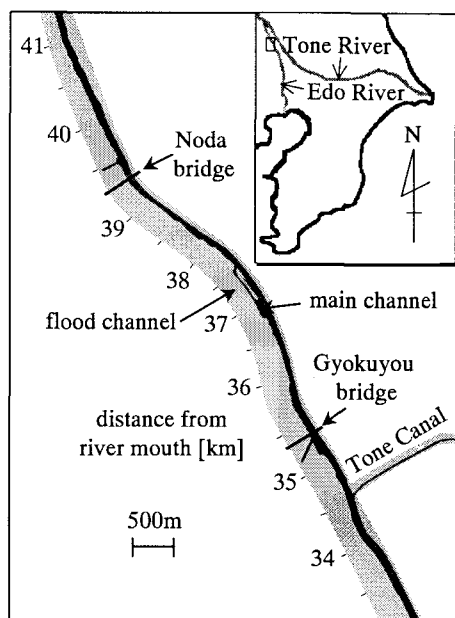


図-1 江戸川の位置と玉葉橋周辺の河道平面形状

本観測対象とする江戸川は、流域面積 158km^2 、流路延長 54.7km 、川幅約 400m である。HR-ADCP を用いた洪水流観測は、図-1 に示すように、江戸川中流部に位置する玉葉橋(河口部より+35.4k 地点)において行われた。玉葉橋での断面形状は、図-2 に示すような複断面河道となっており、低水路の幅は約 100m 、高水敷の幅は左岸側にはほとんどなく、右岸側では 250m 程度となっている。この観測点付近の低水路の蛇行度は約 1.04 である。

本観測は、台風 0310 号が日本列島を縦断した時に生じた洪水を対象として行われており、観測期間は 2003 年 8 月 9 日 10:54 から 12 日 0:06 までとした。このときの降雨状況としては、千葉県野田市で 8mm 、群馬県伊勢崎市八斗島で 46mm の雨量が観測された。

(2) 観測項目と計測方法

本研究では、洪水時における低水路や高水敷での流速の鉛直・横断分布特性に加えて、土砂・栄養塩・有機物輸送特性を把握するために、観測項目は水位と流速、水質項目(SS, T-N, T-P, COD)とした。これらの項目のうち、水位に関しては、自記式水位計(Diver, Eijkelkamp 社製)を低水路河岸部に設置して計測を行った。

流速計測には、まず、HR-ADCP (WorkHorse ADCP Sentinel 1200kHz, RD 社製) を 1 台用いて、低水路(図-2 中の断面 D)における連続観測と横断面内 5 地点(同図中断面 A~E)における移動観測を実施した。この 2 つの計測ともに、橋上より HR-ADCP を下向きに吊り下げて、センサーのトランスデューサー面が水面下約 20cm に来るように設置した。また、図-3 (a) 中矢印に示されている時間帯(計 10 回)において移動観測を実施して

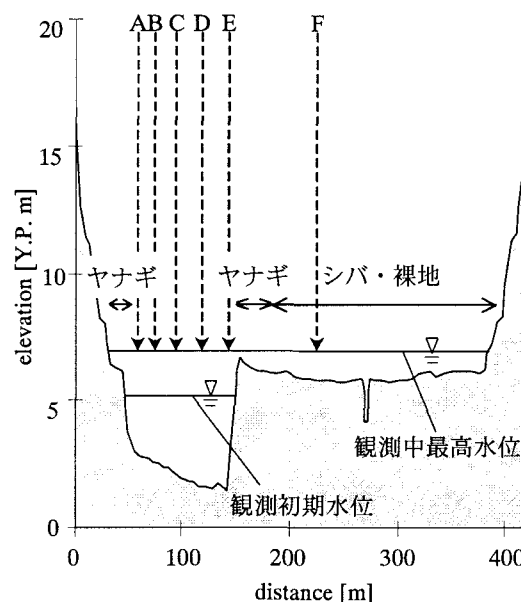


図-2 河川断面図と測定点

表-1 ADCP の計測条件

ボトムトラッキング機能	有効
サンプリング間隔	30s
水深方向分解能(層厚)	5cm
層数	200層
計測時間 (1サンプリング当たり)	4s
流速誤差の標準偏差	5.09cm/s

おり、それ以外では連続観測を行った。本観測で用いた HR-ADCP の主な仕様としては、発信する超音波のビーム傾斜角 20° 、最小層厚 1cm 、最大層数 255 層、最大流速レンジ約 5m/sec (標準値) である。本観測における ADCP の計測条件を表-1 に示す。計測時間は 4s であるものの、200 層分の流速を算出することから、実質的に 1 サンプリング当たり約 26s かかるために、サンプリング間隔を 30s としている。また、水面から吊り下げられたセンサーを完全に固定できないため、ボトムトラッキング機能を採用する。次に、高水敷上の表層流速を連続計測するために、自記式小型流速計(Compact-EM, アレック電子株製)を高水敷上の断面 F(図-2)に設置した。また、横断面内の表層流速分布を広範囲に計測するために、水面下約 15cm に設置された河川用 1 次元電磁流速計(AEM1-D, アレック電子株製)を用いて低水路最大 6 地点、高水敷最大 5 点において移動観測を行った。ここでは、流速値を 10 秒ごとに平均し、1 分間の計測を実施している。

水質項目に関しては、低水路(図-2、断面 D)と高

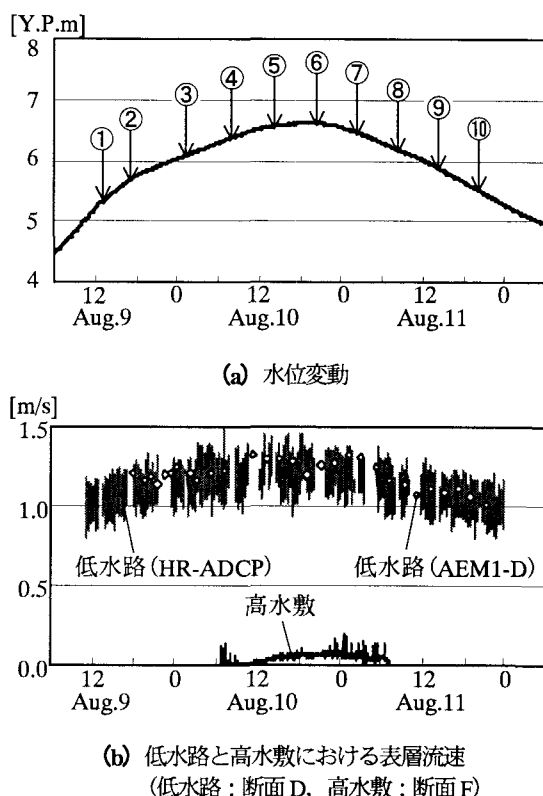


図-3 水位と表層流速の時系列変化 ((a)の矢印はHR-ADCPの移動観測期間を示す)

水敷(同図, 断面 F)において表層水をバケツ採水し, 本学実験室にて分析を行った. 本報では, 紙面の都合上, 水質項目の分析方法や観測結果については割愛する.

3. 観測結果と考察

(1) 洪水概況

本観測における洪水概況を述べるために, 水位変動及び低水路と高水敷における表層流速の時系列変化を図-3に示す. 図中の低水路における表層流速に関しては, 断面 D における1次元流速計(AEM1-D)及びHR-ADCPによる計測結果を合わせて図示している. HR-ADCPの計測結果は, 測器本体の流体抵抗の影響を受けないと判断された水面下70cmにおける流速値の生データであり, 移動観測及びHR-ADCPにメモリされたデータの収集作業, 測器本体に絡まったゴミ除去などを実施している時間帯を除いて図示している.

まず, 水位の時間変化(図-3(a))に着目すると, 8月10日20時頃に水位ピークが現れており, これは台風が最接近した時間帯(8月9日正午~夕方)から約一日後に相当している. また, 図-2に示すように, 観測開始時には, 高水敷は冠水していなかったものの, 8月9日19時頃には高水敷が冠水し, 水位ピーク時には, 観測開始時より約1.8mの水位上昇が見られた. なお, 水位

ピーク時においても, 高水敷の一部は冠水しておらず, 低水路と高水敷の間が分断されている部分が存在していたことが目視により確認された.

低水路での表層流速(図-3(b))のうちHR-ADCPの計測結果に関しては, 水位変化に伴う流速値の時間変化とともに, 短い周期の時間変動が見られる. このうち, 後者における流速変動の幅は, およそ0.2~0.3m/sであり, 表-1に示される流速誤差の標準偏差よりも大きいことから, この短い周期の流速変動には, 流水中の乱れ成分が含まれているものと推察される. また, HR-ADCPの計測結果と, AEM1-Dの計測結果を比べると, 両者は概ね一致している. これより, 本観測では, HR-ADCPで用いているボトムトラッキング機能による計測誤差は概ね少ないものと考えられる.

また, 高水敷における流速値は, そこでの水深が60cm程度となる水位ピーク時においても概ね0.1m/s以下であり, 低水路内の流速値と比較して極めて小さいことが分かる. このような高水敷において流れが生じていない様子は, 目視により, 観測地点周辺における高水敷の大部分において確認された. 高水敷に繁茂するヤナギなどの植生は, 水位ピーク時においても, 完全には水没していないため, このような高水敷における低流速の状況になったものと考えられる. この結果として, 高水敷が冠水している水位ピーク付近の洪水流は, 複断面流れというよりはむしろ単断面流れに近いものと考えられる.

(2) 増水期・減水期における流速の鉛直構造

a) 水位と低水路流速の関係

前述したような状況下における洪水流の鉛直構造について検討を行う. まず, 洪水流の非定常性と流れの鉛直構造の関連性を調べるために, 低水路(断面 D)における鉛直平均流速及び表層・底層流速と水位の関係を図-4に示す. ここで, 流速値は, 玉葉橋の横断断面に対して直交方向(流下方向)の流速成分とし, 表層・底層の高さは, それぞれ, 水面下1.0m, 河床下1.0mとする. また, 低水路流速は, HR-ADCPによる連続観測結果を10分間移動平均した結果であり, それに対して, 非定常性を考慮するために増水期と減水期に分離して表示している. なお, 増水期と減水期は, 水位ピーク時(8月10日20時)を境として定義されている. まず, 同図(a)に示されている鉛直平均流速と水位の相関図を見てみると, 両者の関係は概ね線形となっていることが分かる. これは, 本観測における洪水流が単断面流れに近いためであると考えられる¹⁷⁾. また, このときの増水期と減水期の結果を比較すると, 同一水位に対して, 増水期の流速値は減水期の値よりも大きくなる, という一般的な洪水流における水位一流速関係のループを描いている.

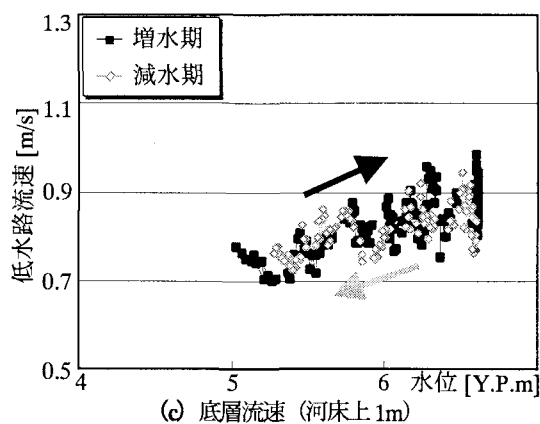
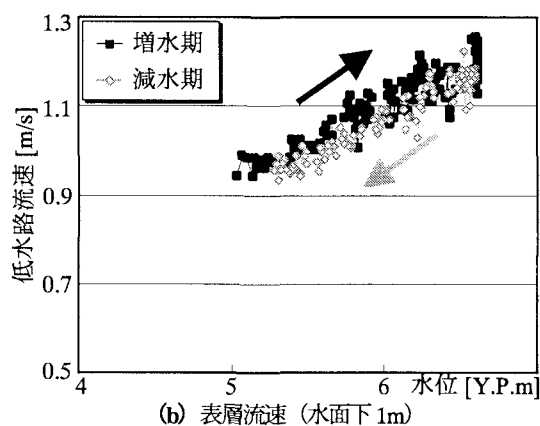
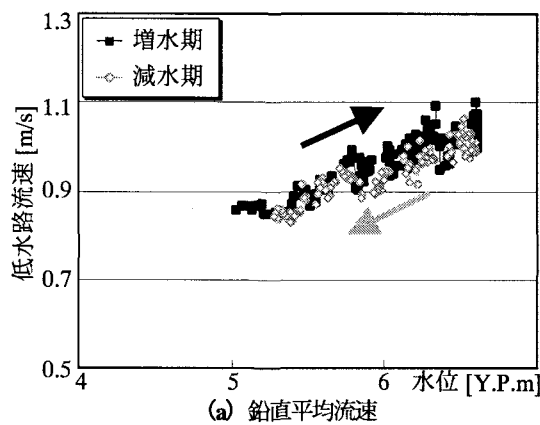


図-4 水位と低水路流速の関係 (断面D)

一方、表層・底層における低水路流速と水位の関係 (同図 (b), (c)) を見てみると、鉛直平均流速の場合と同様に両者の関係は線形である、ということは両層において共通して確認される。しかしながら、増水期と減水期における流速値を比較すると、表層では、同一水位に対して増水期の流速値は減水期の結果よりも大きい、という水位-流速関係のループを描いており、その幅が鉛直平均流速の結果よりも大きいことが分かる。一方、底層流速については、水位と流速の関係が増水期と減水期とでは明確な差が見られず、同一水位に対して流速値が一義的に決まっている様子がうかがえる。このような底層流速と水位の関係は、一様断面水路での定常流における

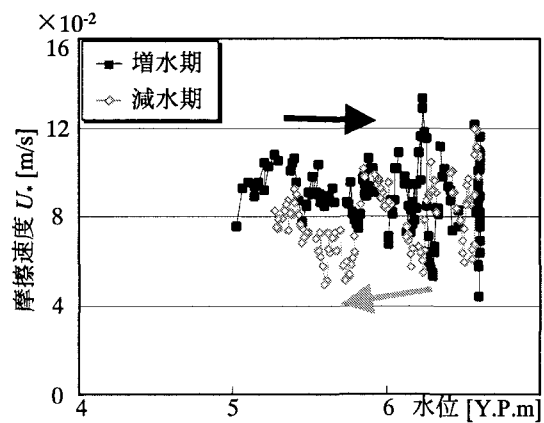


図-5 水位と摩擦速度 U_* の関係 (断面D)

関係に近いことが分かる¹⁷⁾。

以上の結果をまとめると、低水路における鉛直平均流速と水位の関係は、一般的な洪水流に見られる水位-流速関係のループとなっているものの、その水位-流速関係は表層流速と底層流速とは大きく異なっていることが明らかとなった。

b) 流速鉛直構造の時間変化

上述したような洪水流中の流速鉛直構造の時間変化を見るために、摩擦速度 U_* と水位の関係を図-5に示す。ここで、摩擦速度 U_* の算出方法としては、流速の鉛直分布 $U(z)$ が対数分布則となることを確認し、次式より算出する。

$$U(z) = A \ln z + B \quad (1)$$

$$A = \frac{U_*}{\kappa} \quad (2)$$

ここで、 κ はカルマン定数で、 B は定数である。カルマン定数 κ は、非定常流中では一定値とならないものの、その変化は小さいため、ここでは $\kappa = 0.41$ としている¹⁸⁾。なお、この摩擦速度 U_* は、10 分間移動平均した流下方向速度 $U(z)$ に対して算出した結果である。この図より、摩擦速度は水位とともに増加しておらず、この両者の関係は図-4に示した低水路流速と水位のような正の相関関係とは大きく異なっている。また、増水期と減水期における摩擦速度の大きさを比較すると、全般的には、増水期の方が減水期よりも大きくなるものの、そのような傾向は水位ピーク付近では不明確となる。さらに特徴的なこととしては、摩擦速度の変動幅が大きく、摩擦速度の時間的変化が顕著である様子がうかがえる。このことは、流速の鉛直構造が短時間で大きく変化していることを示唆している。

この流速鉛直構造の時間変化をより詳細に検討するために、流下方向速度の鉛直分布 $U(z)$ の時間変化を図-6に示す。図中には、摩擦速度の時間変化も合わせて示されている。ここでは、観測期間中において摩擦速度の時

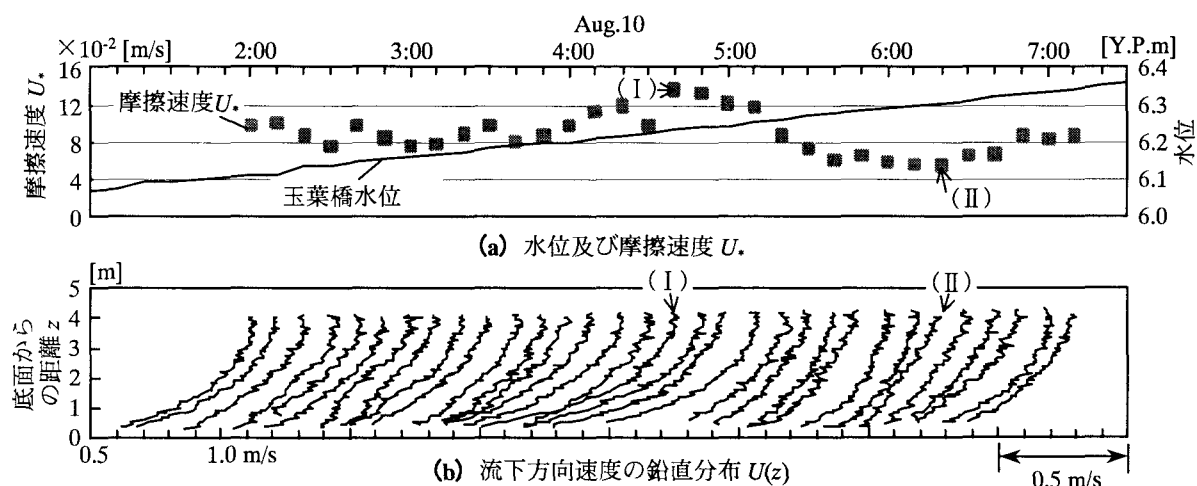


図-6 流速の鉛直分布構造の時間変化 (断面 D)

間変化が最も顕著であった時間帯(増水期, 8月10日 2:00 ~ 7:10)に着目して表示している。まず, 水位はほぼ直線的に滑らかに上昇しているのに対して, 摩擦速度 U_* は大きく変動している。この時間帯における摩擦速度の平均値は約 0.09m/s であり, 変動の標準偏差は 0.02m/s 程度であり, 摩擦速度は平均値の $1/4$ の大きさに増減している。このような状況下において流速鉛直分布の変化は, 摩擦速度の増減と対応して変化している。具体的には, 同図中矢印 I の時刻では, 水深全体の流速勾配が大きくなり摩擦速度は極大値となっているのに対して, 図中矢印 II の時刻では, 流速分布は切り立っており, 摩擦速度は極小値となっていることが分かる。このような摩擦速度や流速鉛直分布形は数時間程度の周期で変化しており, 同図中の時間帯ではおよそ 3 時間程度の周期となっている。

上述したように, 摩擦速度や流速鉛直構造が時間的に大きく変化する要因として, 並列らせん流²⁾における収束帯・発散帯や河床波の横断方向位置が時間とともに変化するということが挙げられる。今回の観測では, このような並列らせん流や河床波を捉えるための現地調査は行っていないため, 今後, HR-ADCP による流速の鉛直分布観測と同期する形でビデオ画像等を用いた表面流調査や音響測深機による河床形状調査を実施する必要がある。

(3) 低水路流速の断面分布

低水路流速の横断・鉛直分布特性を見るために, 低水路における横断面内の流下方向速度コンターを図-7 に示す。ここでは, 増水期 (図-3 (a) の①, ③) と水位ピーク期 (同図⑥), 減水期 (同図⑦, ⑨) において行われた横断面内 5 地点 (断面 A~E) での移動観測の結果を示している。なお, ここでは, 図化の関係上, 5cm 間隔で計測された結果を鉛直方向 15cm にわたり移動平

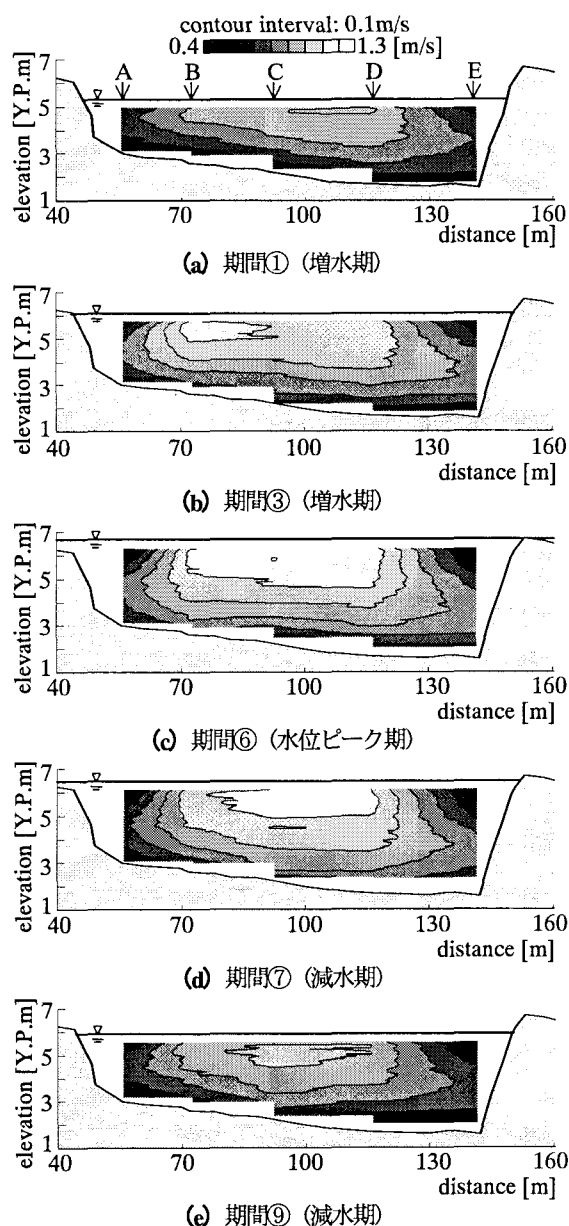


図-7 横断面内における流下方向速度コンター (期間は, 図-3 (a) に対応している)

均操作を施して表示している。なお、河床近傍や低水路側岸部付近の空白は、流速の実測値がない部分に相当している。これを見ると、低水路中央部付近では、表層流速が底層流速よりも大きくなっているのに対して、低水路側岸部では、その逆の傾向が見られる。すなわち、側岸部近傍では、水面下1~2mの表層流速は、その層より下の流速値よりも小さくなっていることが分かる。この要因としては、低水路側岸部には上部に葉が繁茂するヤナギ群落が形成されており（図-2）、そのヤナギによる植生抵抗のために、表層での流速値が低下しているものと考えられる。また、各時刻における最大流速位置に関しては、増水期の①では右岸側、③では左岸側と大きく変化していたのに対して、水位ピーク期⑥や減水期⑦、⑨では中央部に見られており、流速最大位置が増水期と減水期では異なることが示された。

このような鉛直・横断方向変化に富んだ洪水流において流量計測を実施する際には、表層流速値を用いる方法では精度良く流量を算定するには限界があり、ADCPを用いた流速の鉛直分布計測の重要性が示唆された。

4. まとめ

浅水流計測に適した高解像度超音波ドップラー流速分布計（HR-ADCP）を用いて、江戸川における洪水流観測を実施した。そこで得られた主要な結果を以下に示す。

（1）低水路流速と水位の関係を検討したところ、表層流速に関しては、同一水位に対して増水期の流速値が減水期よりも大きい、という水位-流速関係のループとなっていた。それに対して底層流速に関しては、水位に対して流速がほぼ一義的に決まっており、水位-流速関係が鉛直方向に大きく変化していることが明らかとなった。

（2）洪水流中の摩擦速度や流速鉛直分布は、数時間周期で大きく時間的に変化していることが示された。また、このときの摩擦速度の変動の標準偏差は、最大で平均値の1/4程度であることが明らかとなった。

（3）低水路流速の横断・鉛直分布特性を調べた結果、低水路側岸部付近における水面下1~2mの表層流速は、側岸部に繁茂する植生抵抗により、その層より下の流速よりも小さくなっていたことや、断面内における流速最大位置が洪水期間中に変化していることが示された。

なお、本論文では、1つの洪水イベントにおける観測結果から洪水流の鉛直・横断分布特性の一端を示しているものの、HR-ADCPを用いた洪水流観測を積み重ねて、本論文で示した水位-流速関係や流速鉛直構造を詳細に検討することは必要不可欠であり、今後実施していく予定である。

謝辞：本調査を行う際には、東京理科大学理工学部土木工学科水理研究室学生諸氏には多大なる御助力を頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 土木学会：水理公式集 [平成11年度版]，丸善，pp.75-86，1999.
- 2) 木下良作：航空写真による洪水流解析の現状と今後の課題，土木学会論文集，No.345/II-1，pp.1-19，1984.
- 3) 山口高志，新里邦生：電波流速計による洪水流量観測，土木学会論文集，No.497/II-28，pp.41-50，1994.
- 4) 福岡捷二，渡辺明英，高次 渉，坂本博紀：浮子による流量観測精度に水路平面形，横断面形の与える影響評価，水工学論文集，Vol.46，pp.37-42，2002.
- 5) 山口高志：洪水流速および流量観測 -その1-，水文・水資源学会誌，Vol.15，No.6，pp.625-635，2002.
- 6) 木下良作：無人ラジコンボートによる洪水流観測，ACVの研究，Vol.28，No.1，1998.
- 7) 松浦達郎，金木 誠：ラジコンボートを用いたADCPによる流量観測システムの開発，土木学会第53回年次学術講演会，pp.782-783，1998.
- 8) 宇民 正，上野鉄男：写真画像処理による洪水流解析，土木学会論文集，No.503/II-29，pp.1-17，1994.
- 9) 藤田一郎，河村三郎：ビデオ画像解析による河川表面流計測の試み，水工学論文集，Vol.38，pp.733-738，1994.
- 10) 藤田一郎，竹原幸生，綾 史郎，酒井信行，玉井昌宏，高野保英，宮本仁志：ITV 施設を利用した河川流の画像計測，河川技術論文集，Vol.8，pp.459-464，2002.
- 11) 金子 新，伊東集通：ADCPの普及と海洋学の発展，海の研究，Vol.3，pp.359-372，1994.
- 12) Takasugi, Y., Fujiwara, T. and Sugimoto T.: Formation of sand banks due to tidal vortices around straits, *J. Oceanogr.*, Vol.50, pp.81-98, 1994.
- 13) 川西 澄，内田卓志，松山幸彦，余越正一郎：浅海域におけるADCPを用いた濁度分布の観測，沿岸海洋研究，Vol.35，No.2，pp.203-210，1998.
- 14) 末次忠司，藤田光一，諏訪義雄，横山勝英：沖積河川の河口域における土砂動態と地形・底質変化に関する研究，国土技術政策総合研究所資料，No.32，pp.38-48，2002.
- 15) Lohrmann, A., Hackett, B. and Roed, L.P.: High resolution measurements of turbulence, velocity and stress using a pulse-to pulse coherent sonar, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, Vol.7, pp.19-37, 1990.
- 16) 川西 澄，鳥居義仁：高解像度ドップラー流速分布計による感潮河川における乱流境界層の観測，水工学論文集，Vol.46，pp.815-820，2002.
- 17) 福岡捷二，渡辺明英，關 浩太郎，栗栖大輔，時岡利和：河道における洪水流の貯留機能とその評価，土木学会論文集，No.740/II-64，pp.31-44，2003.
- 18) Nezu, I., Kadota, A. and Nakagawa, H.: Turbulent structure in unsteady depth-varying open-channel flows, *J. Hydraulic Eng.*, Vol.123, pp.752-763, 1997.

(2003. 9. 30 受付)