

都市河川における流速・SS の鉛直構造に関する 高解像度 ADCP 調査

HIGH-RESOLUTION ADCP MEASUREMENTS ON VERTICAL STRUCTURES OF CURRENT AND SUSPENDED SOLID IN AN URBAN RIVER

二瓶泰雄¹・飯田裕介²・佐藤慶太³

Yasuo NIHEI, Yusuke IIDA and Keita SATO

¹正会員 博(工) 東京理科大学助教授 理工学部土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

²学生員 学(工) 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻修士課程 (同上)

³正会員 博(工) ㈱ドーコン 河川部 (〒004-8585 札幌市厚別区厚別中央 1 条 5 丁目 4-1)

To realize more accurate measurements for pollutant loads in an urban river, in the present study, a high-resolution, acoustic Doppler current profiler (HR-ADCP) was used to measure the vertical distributions of current and SS in an urban river under rainy conditions. The field measurements with the bottom-mounted HR-ADCP were carried out at the downstream point of the Oohori River, one of main inflow rivers in Lake Teganuma. The observed results show that characteristic vertical structures of the current and SS appear in hydrologic events and then the vertical distribution of SS flux in the streamwise direction vary considerably in rising and falling stages. With the HR-ADCP measurements, we grasp the temporal variation for the dependence of the erosion rate of sediments on flow conditions.

Key Words: ADCP, vertical structure, urban river, current, suspended solid

1. 序論

河川や湖沼、内湾における水環境管理の重要な指標となる河川経由の汚濁物質負荷量を調査する時には、流量と汚濁物質濃度(SS, 栄養塩, 有機物濃度等)をそれぞれ計測し、それらの積により汚濁物質フラックスを算定している。このうち流量観測の代表的なものとして、棒浮子を用いた調査法が挙げられる¹⁾。この調査では、流れのトレーサとなる棒浮子を河川水中に投入することにより、流速の横断・鉛直方向変化を加味した形で流量を算出し得るものの、この観測には様々な問題点が指摘されている²⁾。また、汚濁物質濃度の計測に関しては、断面内の一地点もしくは数地点において採水調査を行い、その結果を代表値として与えることが多い。しかしながら、一般的な浮遊砂理論^{3), 4)}からも明らかなように、少なくとも、SSや栄養塩・有機物の懸濁態濃度に関しては何らかの鉛直分布特性を有していると考えられる。以上のことから、汚濁物質フラックスの計測精度を向上させるためには、鉛直分布を含めた形で流速や汚濁物質濃度の計測が可能となるモニタリング手法の構築が望まれる。

このような要請に対する一つの指針として、超音波ドップラー流速分布計(ADCP)の適用が考えられる。このADCPは、水中にパルス上の超音波を発射し、その音波のドップラー効果を利用して多層の流速を計測すると

ともに、浮遊粒子からの反射強度を利用して土砂濃度を推定することができる機器である。これまでに、このADCPを用いて、大河川での洪水流調査^{5), 6)}や河口域⁷⁾や内湾⁸⁾での土砂動態調査が行われているものの、本研究で対象とする都市河川への適用例は皆無である。

本研究では、都市河川における汚濁負荷量の高精度評価のために、都市河川において高解像度超音波ドップラー流速分布計(以下、HR-ADCPと呼ぶ)を河床に設置し、流速やSSの鉛直分布に関する連続計測を実施することを試みた。そこで得られた結果を用いて、洪水時に着目して、都市河川における増水期・減水期の流速・SSの鉛直構造特性のみならず、主流方向SSフラックスや底質の巻上げフラックスについて検討を行う。

2. 現地観測の概要

観測サイトは、富栄養化湖沼として有名な手賀沼西部へ流入する都市河川である大堀川とした(図-1)。この大堀川下流部(呼塚橋)の低水路内において、図-2に示すように、河床に埋め込む形でHR-ADCP(RDI, WorkHorse ADCP Sentinel 1200kHz)を設置した。設置には、このHR-ADCPを木枠で囲い、この木枠を杭により固定した。なお、底面設置されたHR-ADCP周辺において局所的な洗掘や土砂堆積は確認されなかった。

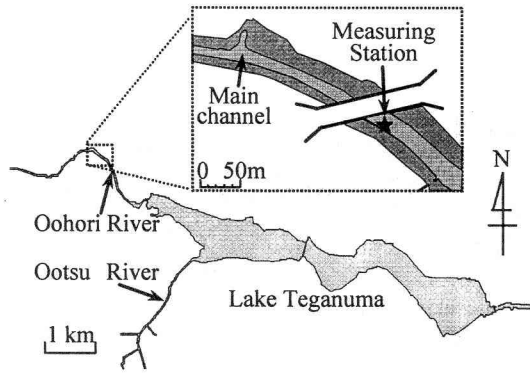


図-1 観測地点

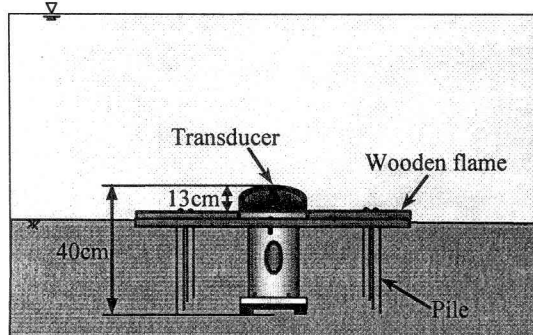


図-2 HR-ADCP の設置概況

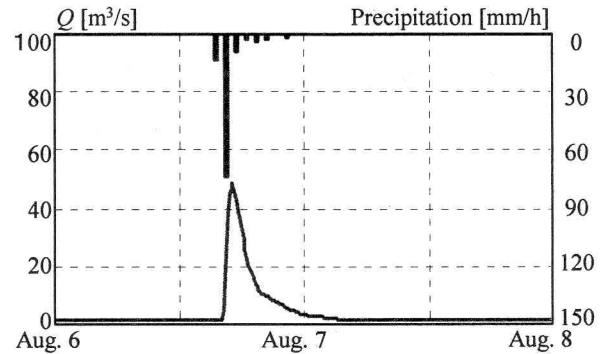
観測期間としては、2003 年 7 月 31 日～8 月 6 日と 9 月 19 日～29 日という 2 つの期間を選定した。前者の期間中では、8 月 5 日に時間最大雨量 73mm、総雨量 102mm という降雨イベント（以下、降雨イベント A と呼ぶ）が生じた。また、後者の期間中の 9 月 20 日～22 日にかけて、時間最大雨量 7mm、総雨量 102mm の降雨に伴って明確な河川出水（以下、降雨イベント B と呼ぶ）が観測された。本論文では、この二つの降雨イベント時での観測データを整理・検討する。

HR-ADCP の計測モードとしては、鉛直分解能 2cm、層数 150、サンプリング間隔 5 分とし、このときの計測誤差の標準偏差は 2.42cm/s である。HR-ADCP のセンサー一面から計測を行う第一層目までの領域（不感帯）の厚さは 14cm である。また、同時に水位を自記式水位計（Diver, Eijikelkamp 社製）により計測した。また、降雨イベント B では、別途、表層水をバケツ採水し、そのサンプル水に対して SS や他の水質項目の分析を行った。

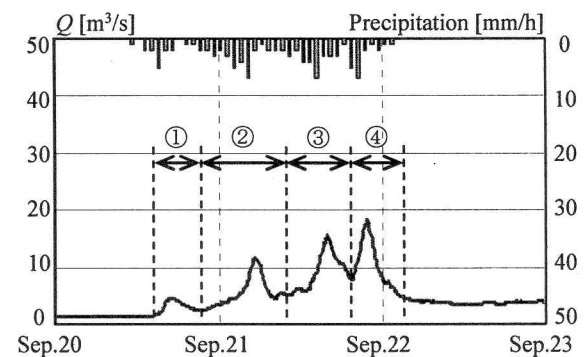
3. 観測結果と考察

(1) 洪水概況

本研究において現地調査を行った降雨イベントの洪水概況を説明するために、降雨イベント A 及び B におけるハイト・ハイドログラフを図-3 に示す。ここで雨量



(a) 降雨イベント A



(b) 降雨イベント B

図-3 ハイト・ハイドログラフ

データは、千葉県我孫子市におけるアメダスのデータである。また、流量に関しては、HR-ADCP により得られた水深平均流速値を同化データとして組み込んで数値シミュレーションを行う、という新しい河川流速・流量推定法⁹⁾に基づいて算出している。まず、降雨イベント A では、8 月 5 日 16 時前より雨が降り始め、16 時から 17 時の間に 73mm という記録的な集中豪雨が発生している。流量に関しては、降雨イベント前では約 1.5m³/s であったのが、16 時ごろより急激に増加して、17 時頃には 50m³/s にまで達している。その後、流量は緩やかに減少し、翌 6 日 3 時頃には降雨イベント前の流量に戻っている。一方、降雨イベント B では、4 つの明確な降雨ピークが見られ、それに対応して、4 つの流量ピークが生じていることが分かる。本論文では、各降雨ピークに対して、図-3 (b) に示すように、期間①～④と呼ぶこととする。

(2) 流れの鉛直構造

洪水時における流速鉛直構造の基本特性を調べるために、降雨イベント A における主流・横断方向流速の鉛直分布に関する時間変化を図-4 に示す。ここでは、図中太線で示されている水位変化に合わせて、流速コンターの図化範囲も変えており、図化の関係上、鉛直方向に 10cm の移動平均を施した結果を示している。また、横断方向流速の正と負の値はそれぞれ右岸、左岸向きを示し

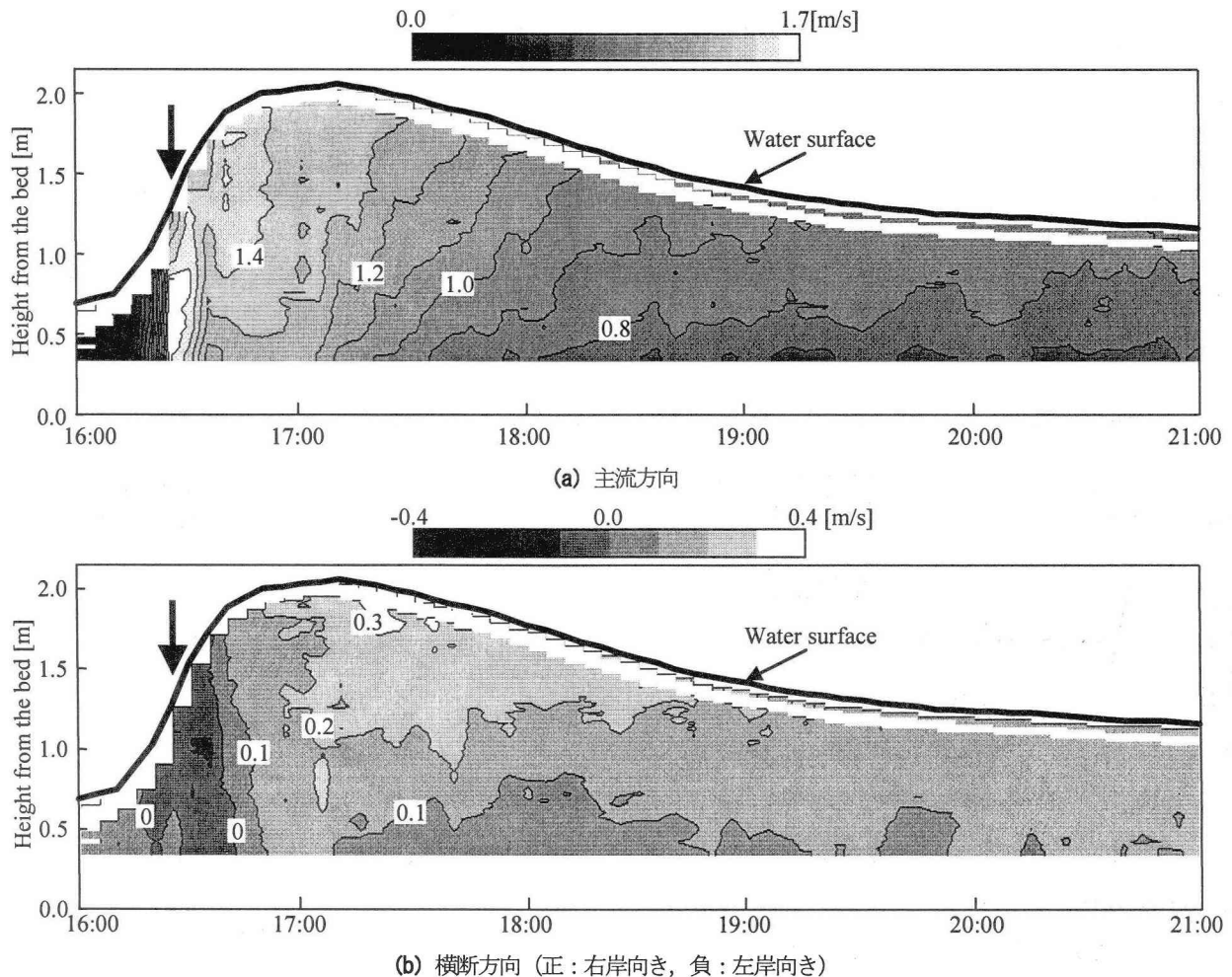


図-4 降雨イベント A における流速鉛直分布の時間変化 (8月5日 16:00~21:00)

ている。なお、ここでは、ADCP による計測値のうち、水面下でかつ Percent Good 値 (発射した超音波のパルス数に対する反射してきた超音波のパルス数の割合) が 90%以上の結果のみを図示しており、水面下で空白の部分は、この基準を満たさなかった部分に相当している。

この図を見ると、記録的な降雨に伴い水位が約 1 時間で 1.4m も上昇しており、降雨イベント A は極めて非定常性が高い洪水イベントであったといえる。主流方向流速に着目すると、水位ピーク前に流速ピーク (図-4 (a) 中矢印) が現れる、という開水路における典型的な流速変化¹⁰⁾が生じている。特筆すべきことは、この流速ピーク時には、表層流速よりも底層流速が大きくなるという**流速の上下逆転現象**が生じている、ということである。この流速逆転現象は、他の河川でも観測例がある⁵⁾。この流速ピークの後では、増水期における主流方向流速のコンター線が減水期よりも切り立っており、増水期の流速分布が減水期よりも相対的に鉛直方向に一樣化している。次に、同図 (b) に示されている横断方向流速に着目すると、増水期初期では概ね 0 であるのに対して、主流方向流速ピークが現れる時間帯では、負の値、すなわち左岸向きの流れが顕著となり、最大で 0.1m/s を越えてい

る。その後、増水期後期や減水期では概ね正の値 (右岸向きの流れ) となり、減水期初期に現れる横断方向流速のピーク値は約 0.3m/s にまで達している。このように、増水期と減水期において主流方向・横断方向流速の鉛直構造がダイナミックに変化している様子が、高解像度 ADCP によりはっきりと捉えられていることが分かる。

同様に、降雨イベント B における主流方向流速の鉛直分布変化を図-5 に示す。4つの降雨ピーク毎に水位ピークと流速ピークの関係を見ると、降雨イベント A と同様に、すべての期間において水位ピークよりも早く流速ピークが現れている。また、増水期における流速コンター線は減水期よりも切り立っており、降雨イベント A と同じく、降雨イベント B においても主流方向流速の鉛直一様化が増水期において顕著になっていることが分かる。なお、降雨イベント A において見られた流速の上下逆転現象は、降雨イベント B では明確には生じていない。

降雨イベント A において見られた流速の上下逆転現象の形成過程について考察する。主流方向流速と横断方向流速の関連性に着目すると、上下逆転現象が生じていた流速ピーク時には、左岸向きの横断方向流速が顕著になっているのに対して、それ以外の時には、右岸向きの横

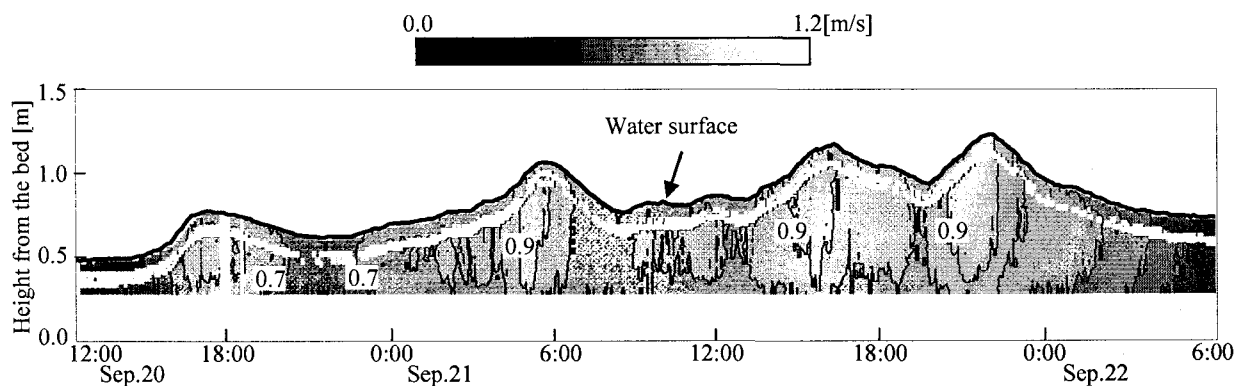


図-5 降雨イベント B における主流方向流速の鉛直分布の時間変化 (9 月 20 日 12:00~9 月 22 日 6:00)

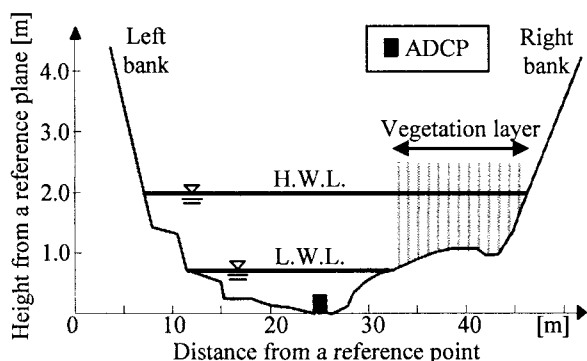
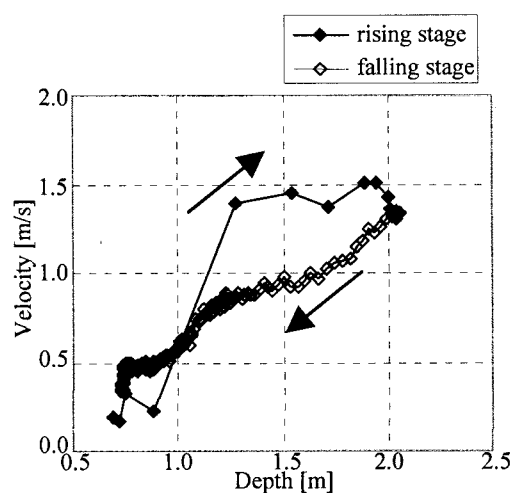


図-6 ADCP が設置された横断面の状況

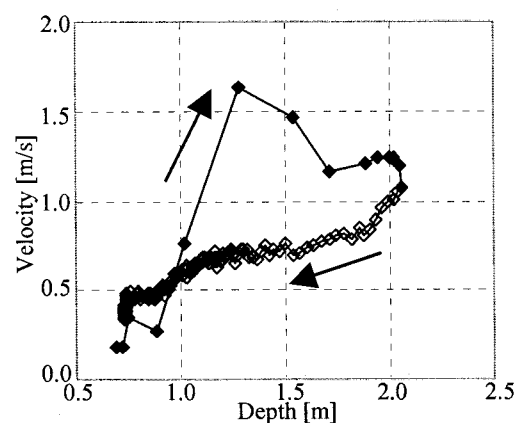
断方向流速が卓越していることが分かる。次に、図-6 に示している ADCP が設置された横断面の状況を見ると、ADCP 自体は最深部である低水路右岸寄りに設置されており、また、右岸側の高水敷には植生帯が存在していた。これらのことをまとめると、流速の上下逆転現象が生じたときには、植生が繁茂する右岸側高水敷より低速流体塊が低水路表層部に輸送され、その結果として、表層における主流方向流速は減少し、流速の上下逆転現象が生じたものと推察される。なお、このようにダイナミックに変化する横断方向流速の形成要因としては、河道の平面形や植生の倒伏状況と関連しているものと考えられるものの、現時点では不明な点が多く、今後類似した現地調査を行い検討する予定である。

(3) 水位と流速の関係

洪水流の非定常性と流れの鉛直構造の関連性を見るために、降雨イベント A での表層・底層における主流方向流速と水位の関係を図-7 に示す。ここで、表層及び底層流速は、各々、水面下 0.14m~0.24m および底面上 0.34~0.44m における流速の平均値である。また、非定常性を考慮するために、増水期と減水期を分けて表示している。これらを見ると、表層・底層ともに、増水期の流速が減水期よりも大きく、図中の矢印で示されているように、水位-流速関係が時計回りのループとなっている。このようなループ特性を表層と底層で比べると、底層でのル



(a) 表層流速



(b) 底層流速

図-7 水位と主流方向流速の関係 (降雨イベント A)

ープの方が大きく、増水期と減水期における流速の差が大きいことが分かる。類似した傾向は、降雨イベント B においても確認されている。このような水位-流速関係に対する表層と底層の違いは、Nezu ら¹¹⁾の実験結果と一致しているものの、著者らが行った江戸川での結果⁶⁾とは異なっており、興味深い結果となっている。

また、表層流速の最大値は最大水位よりも約 20cm 低い高さで現れるのに対して、底層流速に関しては最大水位

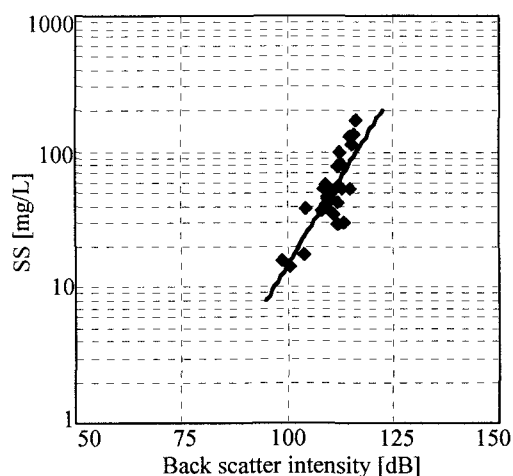


図-8 後方散乱強度 I と SS のキャリブレーション結果
(降雨イベント B)

よりも約 80cm 低い水位で現れている。これらの結果は、**図-4**のように、流速の上下逆転現象の発生と密接に関連しているものと思われる。

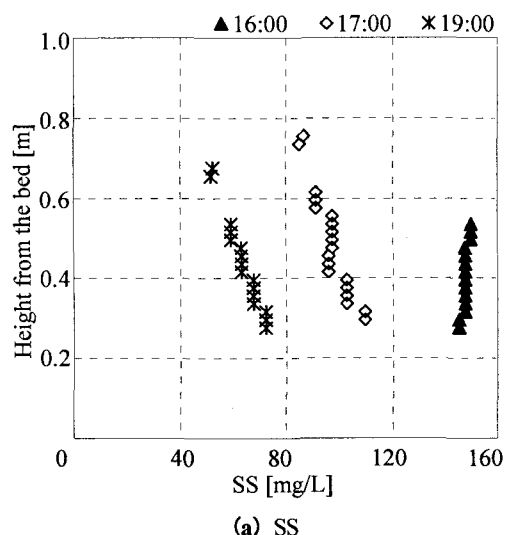
(4) SS 及び主流方向 SS フラックスの鉛直分布

次に、HR-ADCP により計測された後方散乱強度値より、SS の鉛直分布や主流方向・鉛直方向 SS フラックスを算定することを試みる。まず、後方散乱強度 I と SS の関係性を見るために、表層における後方散乱強度と SS の相関図を**図-8**に示す。ここでは、表層採水を行い、SS の分析値を求めた降雨イベント B における結果を表示している。これを見ると、両者の関係には多少ばらつきが見られるものの、以下のような近似式が得られた。

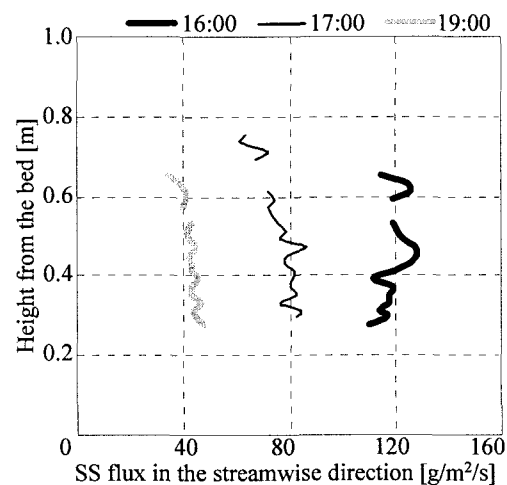
$$SS = 1.04 \times 10^{-4} \exp(0.118I) \quad (1)$$

ここでの単位としては、SS は mg/L、後方散乱強度 I は dB である。この近似式に対する相関係数は 0.82 であり、後方散乱強度と SS の間には概ね良好な相関性がある。

この式 (1) より得られた、降雨イベント B 中の期間①における SS の鉛直分布を**図-9 (a)**に示す。ここでは、増水期 (9月20日 16:00)、水位ピーク時 (同日 17:00)、減水期 (同日 19:00) の結果が図示されている。これを見ると、増水期における SS は鉛直方向にほぼ一様であり、若干表層の SS 値が底層よりも大きい。その後、水位ピーク時や減水期には、底層の SS が表層値よりも大きく、底層に近づくとともに指数関数的に SS が増加している。著者らが別途行った検討結果¹²⁾によると、この降雨イベント B における SS の起源としては、水位ピーク時や減水期では河床堆積物が主であるのに対して、増水期では河床ではなく路面・屋根面などの流域における堆積物であることを示唆している。このことより、増水期には河床堆積物起源ではないウォッシュロード成分が卓越しているために、SS が鉛直一様化したものと推察される。



(a) SS



(b) 主流方向 SS フラックス

図-9 SS と主流方向 SS フラックスの鉛直分布
(降雨イベント B、期間①、9月20日)

同図 (b) は、同じ降雨イベント B における主流方向 SS フラックスの鉛直分布を示す。ここでは、後方散乱強度より推定される SS の鉛直分布に対して指数関数近似し、その近似曲線で表される SS と主流方向流速の積により主流方向 SS フラックスを算出している。これより、主流方向 SS フラックスの鉛直構造については、前述している SS 鉛直分布を反映して、増水期では表層の方が底層よりも大きいのに対して、水位ピーク時や減水期ではその逆の傾向となっている。これより、都市河川において SS や懸濁態水質濃度の負荷量を正確に評価するには、流速のみならず汚濁物質濃度の鉛直分布特性を考慮することの重要性が実証的に明らかとなった。

(5) 底質の巻上げフラックス

図-10は、降雨イベント B における底質の巻上げフラックス P_k と水深平均流速の相関図を示す。ここでは、巻上げフラックス P_k を算出する際に、局所平衡性の仮定、

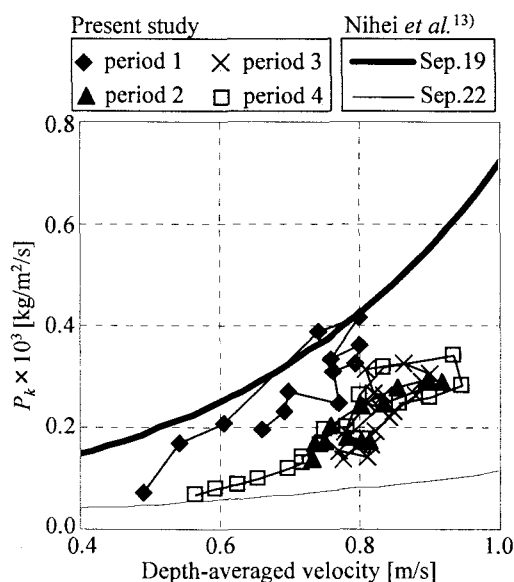


図-10 降雨イベント B での底質の巻上げフラックス P_k
(太線・細線は、降雨イベント前(9月19日)と後(9月22日)に行われた巻上げ試験(二瓶ら¹³⁾)による結果である)

すなわち、底面上にて巻上げフラックスと沈降フラックスが等しい、という仮定を用いて、指数近似された SS 分布の底面上での値と土粒子の沈降速度の積として P_k を与える。また、図中には、巻上げ試験方法¹³⁾を用いて得られた、降雨イベント前後(9月19, 22日)での巻上げフラックス P_k の結果も図示されている。なお、ここでは、土砂沈降速度としては、対象地点の河床堆積物に対する沈降速度(=0.293cm/s)を一定値として与えているが、洪水中では浮遊土砂の粒径分布は変化することが予想され、沈降速度の与え方に関しては今後検討を要する。

まず、巻上げ試験による結果に着目すると、降雨イベント前(9月19日)における巻上げフラックスは、イベント後(9月22日)よりも大きく、河川出水により易浮遊性堆積物が減少していることが分かる¹³⁾。一方、HR-ADCPの結果に関しては、期間①における底質巻上げフラックスは巻上げ試験の降雨前(9/19)の値に近いのに対して、その後の期間②～④に関しては、巻上げ試験による降雨後(9/22)の結果に近づいていることが分かる。これは、河床に堆積しているヘドロ状の易浮遊性堆積物の大部分が期間①にて河床より巻き上げられ、河川流速と巻上げフラックスの関係が降雨イベント中に変化したことを示唆している。このように、HR-ADCPによる計測は、降雨イベントにより底質の巻上げフラックスが減少することや、降雨イベント中に底質巻上げフラックスの流速依存性が変化する様子を捉えることに成功している。

4. 結論

高解像度 ADCP を用いて、洪水時都市河川における流

速・土砂輸送観測を行った。その結果、流速に関しては、増水期にて流速の上下逆転現象が生じている等、特徴的な流速鉛直構造が存在することが示された。また、後方散乱強度より SS を推定した結果、主流方向 SS フラックスの鉛直構造が増水期と減水期とでは明確に変化していることが示された。さらに、底質の巻上げフラックスを求めたところ、降雨イベント中に巻上げフラックスの流速依存性が変化する、ということが実証的に明らかとなった。これらの結果より、都市河川における汚濁負荷量評価の精度向上に対して HR-ADCP が極めて有効であることが明らかとなった。

謝辞：本論文における現地観測の実施や図面作成に際しては、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多大なる御助力を頂いた。東京都立大学横山勝英講師には、HR-ADCP の後方散乱強度データに基づく SS の算出に対して有益な助言を頂いた。本研究の一部は、下水道振興基金研究助成金(研究代表者：二瓶泰雄)と科学研究費補助金基盤研究(C)(2)(研究代表者：二瓶泰雄)によるものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) (社)中部建設協会：絵で見る水文観測，水谷印刷，pp.175-199，2001。
- 2) 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。
- 3) Rouse, H.: Modern conception of the mechanics of turbulence, Trans. ASCE, Vol.102, pp.463-543, 1937。
- 4) 吉川秀夫：流砂の水理学，丸善，pp.130-141，1985。
- 5) 木下良作：河川流量と流れの構造 - ADCP による観測報告 -，pp.1-56，2002。
- 6) 佐藤慶太，二瓶泰雄，木水啓，飯田裕介：洪水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 -，水工学論文集，Vol.48，pp.763-768，2004。
- 7) 横山勝英，藤田光一：多摩川感潮域の土砂動態に関する研究，水工学論文集，Vol.45，pp.937-942，2001。
- 8) 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.203-211，1998。
- 9) 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，2004 (投稿予定)。
- 10) 瀬津家久，富永晃宏：水理学，朝倉書店，pp.246-266，2000。
- 11) 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。
- 12) 今野篤，二瓶泰雄，大竹野歩，水口陽介：複数の都市河川における降雨時水質環境の比較解析，水工学論文集，Vol.49，2005 (印刷中)。
- 13) 二瓶泰雄，山崎裕介，西村司，丸山透：都市河川における易浮遊性堆積物環境の検討，水工学論文集，Vol.48，pp.1447-1452，2004。

(2004.9.30 受付)