

H-ADCP計測とDIEX法をベースとした 掃流砂量の自動連続推定システムの提案

AN AUTOMATIC CONTINUOUS MONITORING SYSTEM FOR BED LOAD TRANSPORT USING H-ADCP MEASUREMENT AND DIEX METHOD

鈴木大樹¹・二瓶泰雄²・御厨純¹

Taiki SUZUKI, Yasuo NIHEI and Jun MIKURIYA

¹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
(〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)²正会員 博 (工) 東京理科大学准教授 理工学部土木工学科 (同上)

An automatic continuous monitoring system for bed-load transport is newly presented using H-ADCP measurements and numerical simulation by a DIEX method. Using line velocity measured with the H-ADCP, the DIEX method may calculate cross-sectional velocity and lateral profile of bottom friction which is applied to evaluate bed-load transport with a conventional bed-load formula. The present system has been applied to monitor discharge and bed-load transport in Edogawa River. The results indicate that the discharge and bed-load transport obtained by the present system are in good agreement with observed data. The RMS values of relative errors for the calculated discharge and bed-load transport are respectively 3.3 and 5.8%, demonstrating high performance of the present monitoring system for bed-load transport.

Key Words : bed-load transport, H-ADCP, bottom friction, DIEX method, data assimilation

1. はじめに

「流砂系総合土砂管理」¹⁾の実現のために、ここ10年間以上にわたり多くの河川において土砂輸送量調査が実施されている。これらの調査のうち、浮遊砂もしくはウォッシュロード調査については、光学式及び超音波式機器を用いることにより比較的高精度で容易に現地モニタリングが可能であり、大規模・長期連続調査が既にいくつかの流域で行われている^{2)~5)}。

それに対して掃流砂については、音圧式(ハイドロフォン)や超音波式、転倒マス式等の計測機器が現地調査で用いられている^{6)~10)}。しかしながら、これらの機器は、一般的に浮遊砂観測で用いられる機器ほどの汎用性はなく、また、河川内のある横断位置での「点」計測に適用されることが大部分であり横断面全体にわたる長期連続観測に用いることは現実的に困難である。そのため、現時点で汎用的な掃流砂の現地観測手法が確立されているとは言い難く、長期連続的かつ横断面全体にわたる掃流砂量計測法の開発が急務の課題である。

一方、著者らは、ここ数年、水平設置型超音波ドップラー流速分布計 H-ADCP (Horizontal Acoustic Doppler Current Profiler) の計測技術と数値解析手法である DIEX 法

(Dynamic Interpolation and EXtrapolation method) を融合した新しい河川流量の自動連続モニタリングシステムを開発するとともに、その有用性を多くの河川で検証している^{11)~14)}。この手法の最大の特徴は、H-ADCPにより得られる「線」流速データを、DIEX法という流速内外挿技術を介して、横断面全体の「面」流速データに変換することである。それに加えて、DIEX法では横断面内の流体シミュレーションが行われているので、流速以外にも摩擦速度や底面せん断力の横断分布情報等も同時に得られることも大きな特徴として挙げられる。そのため今後、この手法が河川流量モニタリングのみならず、様々な河川管理用モニタリング技術として発展することが期待される。

そこで本研究では、現行の掃流砂モニタリング手法の課題を克服することを最終目的として、上述した H-ADCP 計測技術と DIEX 法による数値解析技術をベースとした掃流砂量の自動連続推定システムを提案する。ここでは上記の手法にて算出される底面せん断力の横断分布データを活用し、これを一般的な掃流砂量式¹⁵⁾に代入して横断面全体の掃流砂量を自動連続的に評価することが可能となる。本システムを江戸川における掃流砂量の長期連続モニタリングに適用し、検証用の ADCP 観測結果と比較し、本システムの有効性について検討する。

2. 本システムの概要

(1) 基本構成

本システムの基本構成は、現状では、図-1中の点線以外の部分に示すとおりである。このように本システムは、①H-ADCPによる「線」流速の計測と、②力学的内外挿法(DIEX法)に基づく数値解析による「面」流速データ・底面せん断力・掃流砂量の推定、から構成される。②のDIEX法では、「線」流速データを同化して「面」流速データを算出するとともに、この「面」流速データから底面せん断力 τ_0 の横断分布も算出する。この底面せん断力 τ_0 を用いて、底質の移動限界を岩垣式¹⁶⁾に基づいて判定し、さらに、一般的な掃流砂量式¹⁵⁾を反映した数値アルゴリズムを導入する。ここでは「芦田・道上の掃流砂量式」¹⁵⁾を用いることとし、それは次式に示す通りである。

$$q_B = 17\tau_*^{1.5} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}\right) \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}}\right) \sqrt{\left(\frac{\sigma}{\rho} - 1\right)gd^3} \quad (1)$$

ここで、 q_B は単位幅掃流砂量、 τ_* は無次元掃流力、 τ_{*c} は無次元限界掃流力、 σ は土粒子密度、 ρ は水の密度、 d は土粒子直径である。式(1)より、単位幅当たりの掃流砂量を求め、それを横断方向に積分し、横断面全体の掃流砂量を算出している。このように本手法は長期連続的かつ、横断面全体の掃流砂量をカバーする従来に無い新しい掃流砂輸送量のモニタリング手法である。

上述した本システムによる掃流砂量推定精度は、流速・底面せん断力の推定精度に加えて、適用する掃流砂量式の精度の影響を受ける。そのため、本システムの最終形としては、同図中の点線で示されているように、横断面内の1地点もしくは複数地点において掃流砂量計測を実施し、それに基づいて使用している掃流砂量式を修正する、という部分を上記の本システムに組み込むものである。本論文では、追加部分の検討は今後の課題とするが、現行の本システムにおける底面せん断力やそれから得られる掃流砂量の推定精度の検証自体は極めて重要であるので、3.以降では、それらの検証結果を示す。

(2) DIEX法の概要

本システム②のDIEX法では、H-ADCPによる流速計測値を同化データとして取り込み、未計測エリアの流速を算定する。計算負荷や精度を考慮し計算対象は y 、 σ を横断・鉛直方向とする横断面である。基礎方程式としては、N-S方程式からH-ADCPでは計測が困難な項等を省略し簡略化された主流方向流速 u に関する次式を用いる。

$$gI + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{1}{D^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(A_V \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + F_a = 0 \quad (2)$$

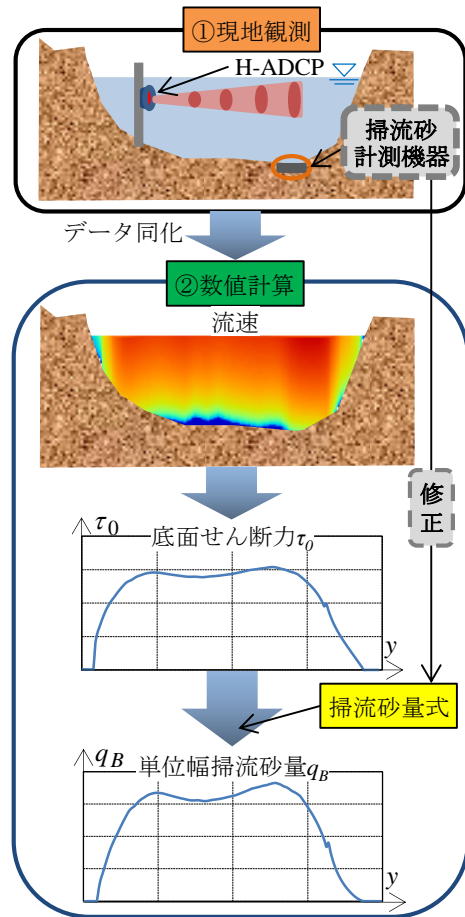


図-1 本システムの基本的枠組みと計算フロー

ここで、 g は重力加速度、 I は水面勾配、 A_H と A_V は水平・鉛直渦動粘性係数、 D は水深である。上式では、省略された移流項等の代わりに運動方程式を満たすために付加項 F_a を導入している。DIEX法の特徴としては、この付加項 F_a を導入していることと、この F_a を介してH-ADCPによる観測データの同化を行っていることである。この F_a 算出には、式(2)を水深平均した次式を用いる。

$$gI + \frac{\partial}{\partial y} \left(\overline{A_H} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) - \frac{C_f}{D} \bar{u}^2 + F_a = 0 \quad (3)$$

ここに、 $\overline{A_H}$ は水深平均水平渦動粘性係数、 \bar{u} は水深平均主流方向流速、 C_f は底面摩擦係数(= $gn^2/D^{1/3}$, n :マニングの粗度係数)である。この式(2)と(3)により「横断面」二次元解析を行い、横断面内の流速分布を求め、その結果より底面せん断力や掃流砂量を求める。なお具体的な計算手順等は、二瓶・木水¹¹⁾を参照されたい。

3. 本システムの江戸川掃流砂量モニタリングへの適用状況

(1) 現地観測について

本システムによる実河川での掃流砂量推定精度を検証するために、本システムを江戸川・野田橋における掃流砂量モニタリングに適用する。観測サイトやH-ADCP設置状況は図-2に示すとおりであり、野田橋から約200m下流の低水路内に位置する水位標にH-ADCP (Workhorse 600kHz Teledyne RDI製) を水平方向に固定設置している (設置高さY.P.3.41m)。H-ADCPの計測設定としては、計測間隔10分、層数20、層厚3mである。このH-ADCPは2006年6月から現在まで設置されているが、本論文では解析対象期間を2010年1月～2010年12月の1年間とする。なお、江戸川野田橋では複断面河道 (低水路幅100m、高水敷幅約300m (右岸側)) であり、高水敷にも周波数300kHzのH-ADCPを設置している。しかしながら、解析対象期間には高水敷に有意な流れは生じなかったため、本論文では低水路のH-ADCPデータのみを用いる。

この水位標には、図-2に示すように、H-ADCPと共に光学式濁度計 (Compact-CLW, JFEアドバンテック(株)製) も設置しており、濁度の長期連続観測を実施している。この濁度から浮遊土砂濃度 (SS) を算出し¹⁷⁾、本システムにより得られる掃流砂量と比較する。

図-3は本解析対象期間における江戸川・野田橋の水位及び水面勾配の時間変化を示す。この水面勾配の算出に際しては、野田 (39km) と東金野井 (46km) における観測所の水位データを用いている。この期間では、前述したように高水敷が冠水する中・大規模出水はなく、小規模出水が数回生じた。このうち同図中に示す出水イベント① (2010/5/27)、② (9/24, 台風12号)、③ (10/31～11/2, 台風14号) において、検証用観測として、野田橋にてADCP移動観測¹⁸⁾ を実施し、流量観測を実施した。このADCP観測では、二瓶¹⁸⁾ と同じく流量を算出するとともに、ADCPから得られる流速鉛直分布データを対数の近似式に当てはめ、以下の式から摩擦速度 U_* を算出する。

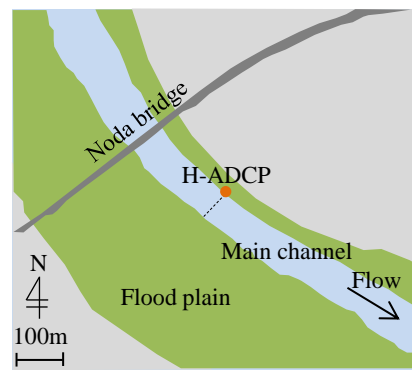
$$u = A \ln y + B, \quad A = \frac{U_*}{\kappa} \quad (4)$$

ここで、 κ はカルマン定数 (=0.40)、 A 、 B は定数である。この摩擦速度から底面せん断力 τ_0 を求め、それらより、本システムと同様に、岩垣式¹⁶⁾による掃流砂量の移動判定を経て、芦田・道上式⁵⁾により掃流砂量を求める。

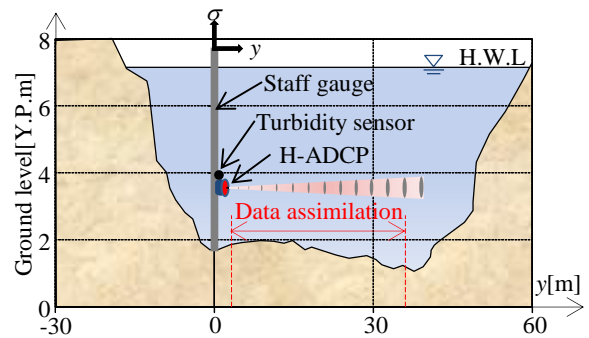
また、平常時 (同年8/23) ではH-ADCPの設置断面にてADCP観測を行い、本システムによる流速鉛直・横断分布や底面せん断力の横断分布の推定精度を検討する。

(2) 計算条件

本システムにおけるDIEX法の計算条件について記述する。横断方向の格子幅や格子数はそれぞれ0.5mと211とする。鉛直方向の座標系は、河床高さの変化を簡便に表し得る σ 座標系を採用し、格子数は100とする。計算パラメータであるマンシングの粗度係数 n は、基本的には流量推



(a) 平面図



(b) 横断面図

図-2 研究対象サイトとH-ADCP設置状況 (江戸川・野田橋)

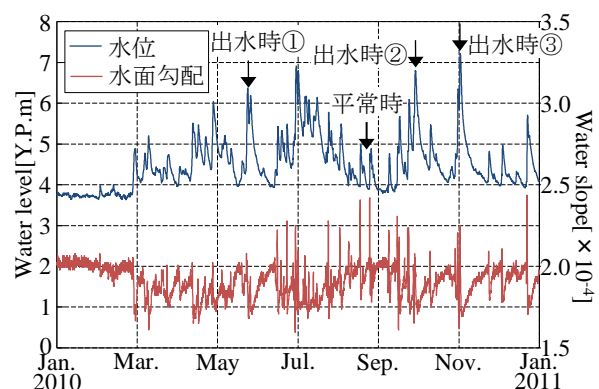


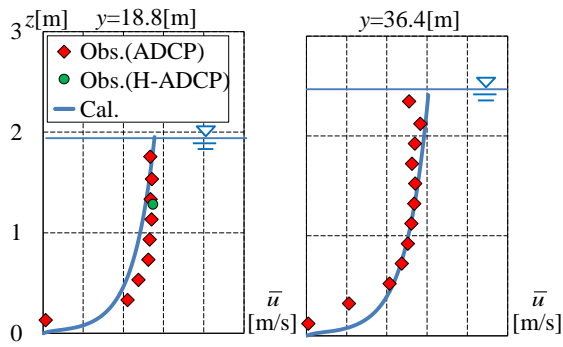
図-3 江戸川野田橋における水位と水面勾配の時間変化 (2010)

定精度が最も良い $0.035\text{m}^{-1/3}\text{s}$ とするが、底面せん断力の推定精度へのマンシングの粗度係数依存性を検討するために、マンシングの粗度係数 n の感度分析も行っている。また、掃流砂量算定に必要な底質粒径としては、現地底質サンプルの中央粒径 (=0.51mm) を与える。その他の計算パラメータは二瓶・木水¹¹⁾と同じとする。

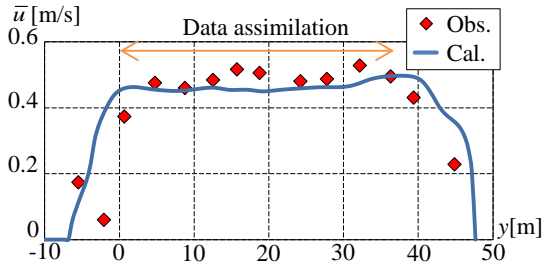
4. 結果と考察

(1) 流速・摩擦速度の推定精度

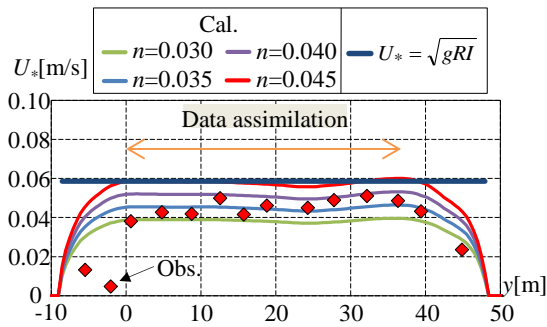
掃流砂量推定精度のキーとなる流速や摩擦速度の推定精度を検証するために、平常時 (2010/8/23 17:00) における流速分布と摩擦速度に関する観測値と本システムの推定値を比較したものを図-4に示す。ここで、同図 (a) には、流速鉛直分布に関するADCPの観測値及び同化デ



(a) 流速鉛直分布 (同化範囲内 (左) と外 (右))



(b) 水深平均流速の横断分布

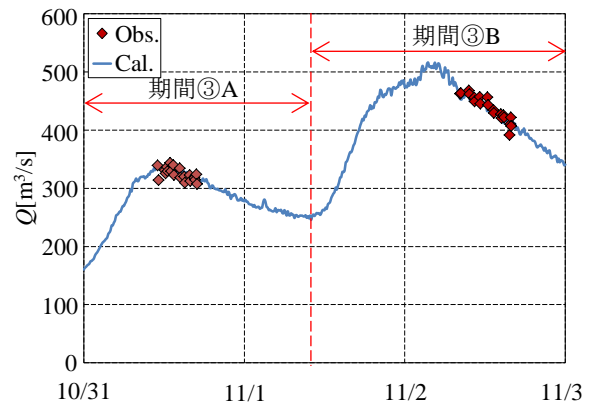


(c) 摩擦速度の横断分布

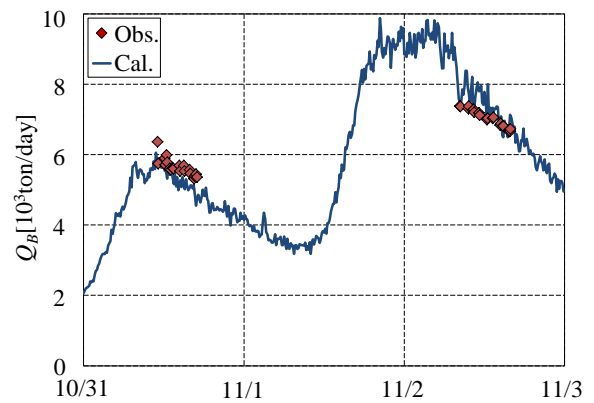
図-4 流速・摩擦速度の観測値と推定値の比較 (8/23 17時)

ータとして用いたH-ADCP観測値, DIEX法による推定値が示されている。ここでの横断地点としては, データ同化範囲内にある $y=18.8\text{m}$ と範囲外の $y=36.4\text{m}$ の2地点分を選定している。また, 同図 (b), (c)には, それぞれ水深平均流速分布と摩擦速度に関する横断分布が図示されており, ADCP観測値と本システムによる推定値が表示されている。これらの推定値には, 流速分布については, マニングの粗度係数 $n=0.035[\text{m}^{-1/3}\text{s}]$ のみの結果とし, 摩擦速度算定結果には n を $0.030\sim 0.045[\text{m}^{-1/3}\text{s}]$ と変化させた結果を示す。また, 摩擦速度には水面勾配と径深 R から求めた推定結果 ($=\sqrt{gRI}$) も表示する。

これより, まず, 流速鉛直分布に関しては, 同化範囲内・外を問わず, 本システムによる推定値はADCP観測値を良好に再現していることが分かる。また, H-ADCP観測値はスムーズに鉛直方向に内外挿されており, 著者らのこれまでの成果¹²⁾と同じ傾向が確認された。次に, 水深平均流速に関しては, 本システムによる推定結果は流速鉛直分布と同様に, 同化範囲内外において概ね観測



(a) 流量 Q



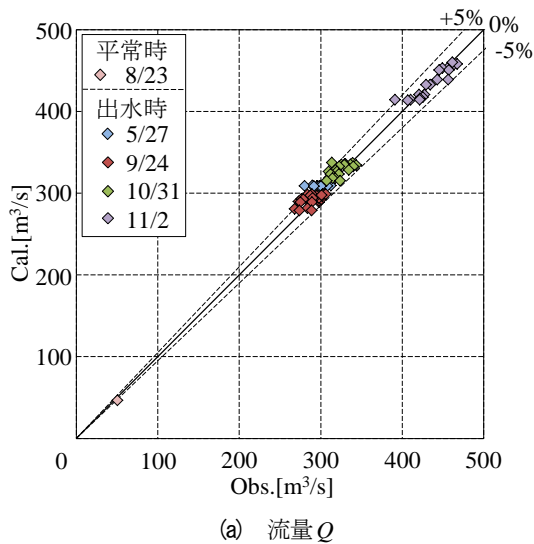
(b) 掃流砂量 Q_B

図-5 出水イベント③における流量 Q と掃流砂量 Q_B の時間変化

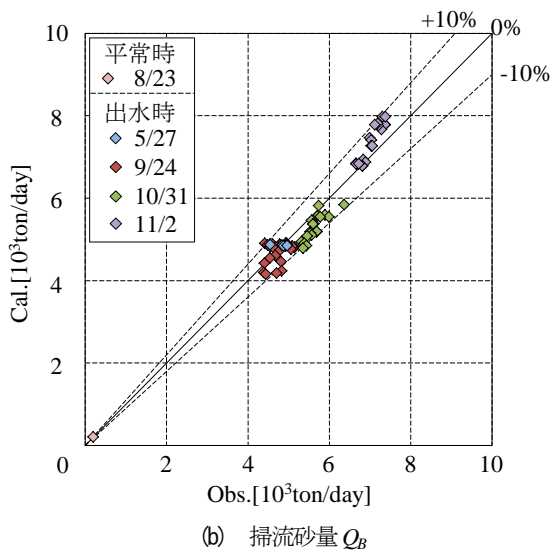
値と類似しており, 右岸側の流速がやや大きい傾向も推定結果は再現している。摩擦速度の推定値に関しては, マニングの粗度係数 n を大きくすると過大評価, その逆に n を小さくすると過小評価となり, $n=0.035[\text{m}^{-1/3}\text{s}]$ の推定結果が最も観測値と一致している。これは, 流速分布推定精度が最も高い粗度係数 n が $n=0.035[\text{m}^{-1/3}\text{s}]$ であるという結果¹¹⁾と整合している。このため, 以下では $n=0.035[\text{m}^{-1/3}\text{s}]$ の推定結果のみを示す。また, 摩擦速度の推定値 ($=\sqrt{gRI}$) は, $n=0.035[\text{m}^{-1/3}\text{s}]$ における本手法の推定結果よりもやや大きい。これは, 本対象サイトでは, 水面勾配と底面摩擦力が等しいという単純な力学バランスになっていないことが考えられる。それに加えて, 水面勾配の算定には, 7km 離れた区間の水位データを用いており, その算定精度には疑問が残る。そのため, 今後, 河道内の多地点における水位縦断計測を実施し, 精度の良い水面勾配を求める必要がある。

(2) 流量・掃流砂量の推定精度

本システムによる掃流砂量の推定結果の特徴を把握するために, 出水イベント③ (台風1014号) における流量と掃流砂量の時間変化を図-5に示す。ここでは, 本システムの推定値とADCPによる観測値を表示している。こ



(a) 流量 Q



(b) 掃流砂量 Q_B

図-6 流量と掃流砂量に関する観測値と推定値の相関図

の出水イベントでは、台風14号通過後に再び降雨が生じたため、二山の水位ピークが見られており、一山目を期間③A、二山目を期間③Bとしている。これより、本システムによる流量・掃流砂量の推定結果は、概ねADCP観測値の時間変化をトレースしている。このように、本システムは、流量のみならず、掃流砂量に関する洪水時の非定常変化を良好に再現できていることが分かる。

本システムの推定精度を定量的に検討するために、流量と掃流砂量に関する観測値と推定値の相関図を図-6に示す。ここでは、3回の出水イベントと平常時(8/23)の計4期間における結果が示されている。なお、本システムによる推定結果については、ADCP移動観測の観測時間を考慮して、1時間の移動平均した結果を採用している。これより、まず、流量に関しては、既存の研究¹¹⁾と同様に、推定値は観測値と概ね一致しており、推定値の誤差のRMS値は3.3%となっている。一方、掃流砂量に関しても、本システムによる推定値は観測値と一致しており、推定値全体の51%が誤差5%以内に入り、さらに全体の

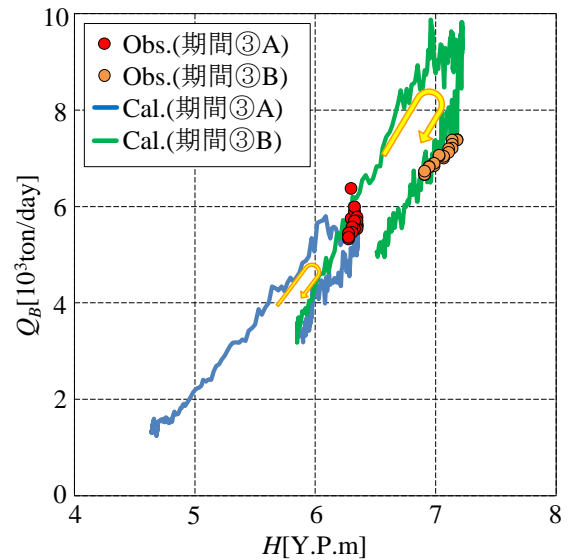
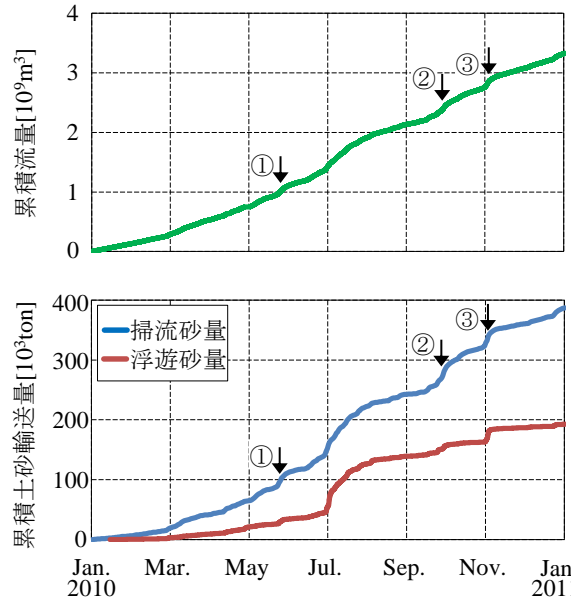


図-7 出水時③における水位と掃流砂量のヒステリシス



93%が誤差10%以内に収まっている。掃流砂量の推定誤差のRMS値は5.8%であり、本システムにおける掃流砂量推定精度が極めて良好であることが示された。

(3) 出水時における掃流砂量のヒステリシス

本システムの掃流砂量推定結果に基づいて、出水時における掃流砂量変化の特徴を抽出するために、出水イベント③における水位と掃流砂量の相関関係を図-7に示す。ここでは、図-5に示したように、この出水イベント中に二山のピークが見られたので、それを分けて表示している。また、図中には、ADCPによる観測結果も合わせて図示している。これより、期間③A、Bともに、時計回りのループを描いており、浮遊土砂輸送量と同様に、掃流砂量にもヒステリシス¹⁹⁾が存在することが分かる。この出水イベントでは、流量に関してもヒステリシスが見られており、増水期と減水期における流速・流量の違いが底面せん断力に反映したためであると考えられる。

(4) 掃流砂量と浮遊砂量の比較

江戸川・野田橋における土砂輸送特性を把握するために、本システムによる掃流砂量推定結果と濁度計測による浮遊砂量推定結果¹⁷⁾の累積値の時間変化を図-8に示す。図中には、観測を行った3つの出水イベントを矢印で示している。これより、一般的には掃流砂量が浮遊砂量を上回り、加藤らの結果²⁰⁾と一致している。また浮遊砂は出水時に急激に増加する期間も見られるが、掃流砂に関しては浮遊砂ほどの増加は見られない。以上より、江戸川・野田では、相対的に平常時は掃流砂、出水時は浮遊砂が卓越することが確認された。なお、このように、本システムと光学式濁度計などの計測値を組み合わせることで、掃流砂・浮遊砂輸送量を含む総合土砂観測システムが実現可能となり、そのためには、本システムの更なる汎用化が大きな役割を果たせるものと考えられる。

4. おわりに

本研究により得られた結論は以下のとおりである。

- 1) 汎用的な観測手法が確立されていない掃流砂輸送量の長期自動連続モニタリング手法として、H-ADCP計測とDIEX法による数値計算技術を組み合わせた掃流砂量の自動連続推定システムを提案した。
- 2) 本システムに基づいて、江戸川・野田における掃流砂量モニタリングへ適用したところ、本システムの流速鉛直・横断分布や底面せん断力の推定精度が概ね良好であることが示された。
- 3) 本システムによる流量と掃流砂量の推定誤差のRMS値は、それぞれ33%、58%であり、本システムの有効性が検証された。
- 4) 出水時における水位と掃流砂量の関係は、流量や浮遊砂量と同様に、時計回りのヒステリシスが確認されており、水位ピーク直前の増水期に掃流砂輸送量がピークとなることが明らかとなった。

なお、本システムによる掃流砂量の推定精度を検証する上では、何らかの方法で行われた掃流砂量の観測値と比較するべきであるが、本論文ではこの比較を実施できていない。また、掃流砂量評価に対する河床形状変化等の影響は考慮されていない。今後、図-2のように本システムに掃流砂量計測を組み込み、掃流砂量の実測値との比較・精度検証を行うことは喫緊の課題である。

謝辞：国土交通省関東地方整備局江戸川河川事務所には、現地観測実施に際して様々な便宜をはかって頂いた。また、ADCPを用いた現地観測を行う際には、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多大なる御助力を頂いた。ここに記して深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 藤田光一：『広域総合土砂（物質）管理』の理念と実践との隔たりをどう埋めるか、月刊海洋、Vol.32, No.3, pp.179-184, 2000.
- 2) 横山勝英, 諏訪義雄, 二村貴幸, 谷口丞, 末次忠司：涸沼川下流域における土砂・栄養塩動態の特性, 水工学論文集, Vol.46, pp.659-664, 2002.
- 3) 川西澄, 山本洋久, 余越正一郎：超音波流速計と散乱光式濁度計を用いた懸濁粒子の濃度, 粒径, フラックスの測定, 水工学論文集, Vol.42, pp.559-564, 1998.
- 4) 横山勝英, 藤塚慎太郎, 中沢哲弘, 高島創太郎：多点濁度観測による筑後川水系のSS流出・輸送特性に関する研究, 水工論文集, Vol.52, pp.553-558, 2008.
- 5) 重田京助, 二瓶泰雄, 坂井文子, 大塚慧：東京湾主要流入河川における浮遊土砂輸送特性に関する基礎的検討, 水工学論文集, Vol.52, pp.913-918, 2008.
- 6) Larone, J. B. and Reid, I.: Very high rates of bedload sediment transport by ephemeral desert rivers, *Nature*, Vol.366, pp.148-150, 1993.
- 7) 水山高久, 野中理伸, 野中伸久：音響法（ハイドロフォン）による流砂量の連続計測, 砂防学会誌, Vol.49, No.4, pp.34-37, 1996.
- 8) 澤井健二：流砂計測技術の現状と展望, 砂防学会誌, Vol.54, No.2, pp.75-84, 2001.
- 9) 二瓶泰雄, 塗師隆生：河床内トラップ型簡易掃流砂計の試作, 河川技術論文集, Vol.11, pp.327-332, 2005.
- 10) 横山勝英, 和田昌行, 藤塚慎太郎, 末次忠司, 川口浩司：超音波による河床波・転動粒子の追跡と掃流砂量の推定方法, 水工学論文集, Vol.50, pp.1039-1044, 2006.
- 11) 二瓶泰雄, 木水啓：H-ADCP観測と河川流計算を融合した新しい河川流量モニタリングシステムの構築, 土木学会論文集B, Vol.63, No.4, pp.295-310, 2007.
- 12) Nihei, Y. and Kimizu, A.: A new monitoring system for river discharge with H-ADCP measurements and river-flow simulation, *Water Resources Research*, Vol.44, W00D20, doi:10.1029/2008WR006970, 2008.
- 13) 原田靖生, 二瓶泰雄, 北山秀飛, 高崎忠勝：H-ADCP計測と数値計算に基づく感潮域の河川流量モニタリングへ隅田川を例として～, 水工学論文集, Vol.52, pp.943-948, 2008.
- 14) 岩本演崇, 二瓶泰雄：H-ADCP計測と河川流シミュレーションに基づく複断面河道の洪水流量モニタリング, 水工学論文集, Vol.53, pp.1009-1014, 2009.
- 15) 芦田和男, 道上正規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, No.206, pp.59-69, 1972.
- 16) 岩垣雄一：限界掃流力に関する基礎的研究（I）限界掃流力の流体力学的研究, 土木学会論文集, No.41, pp.1-21, 1956.
- 17) 田中健太郎, 二瓶泰雄：SSモニタリングネットワークに基づく東京湾への浮遊土砂供給特性の把握, 水工学論文集, Vol.55, pp.S_1327-S_1332, 2011.
- 18) 二瓶泰雄, 色川有, 井出恭平, 高村智之：超音波ドップラ一流速分布計を用いた河川流量計測法に関する検討, 土木学会論文集B, Vol.64, No.2, pp.99-114, 2008.
- 19) 恩田裕一, 奥西一夫, 飯田智之, 辻村真貴（編）：水文地形学—山地の水循環と地形変化の相互作用—, 古今書院, pp.132-142, 1996.
- 20) 加藤靖之, 二瓶泰雄, 重田京助：簡易数値モデルに基づく粒径別掃流量の算定, 水工学論文集, Vol.53, pp.679-684, 2009.

(2011.9.30 受付)