

H-ADCP 計測と数値解析を組み合わせた 浮遊土砂輸送量計測システムの提案

A MONITORING SYSTEM FOR SUSPENDED-SEDIMENT TRANSPORT
USING H-ADCP MEASUREMENT AND NUMERICAL SIMULATION

二瓶泰雄¹・北山秀飛²・木水啓³・原田靖生²

Yasuo NIHEI, Hideto KITAYAMA, Akira KIMIZU and Yasuo HARADA

¹正会員 博(工) 東京理科大学准教授 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(同上)

³正会員 修(工) 日本工営(株)(〒060-0005 札幌市中央区北 5 条西 6-2)

To realize an accurate and continuous monitoring for suspended-sediment transport, we attempt to develop a new real-time monitoring system with H-ADCP (horizontal acoustic Doppler current profiler) measurement and numerical simulation, in which the dynamic interpolation and extrapolation (DIEX) method recently developed by the authors is extended to conduct sediment-transport simulation. To validate the fundamental performance of the present system, we have applied the present system to evaluate the river discharge and suspended-sediment transport at the Edo River. The simulated suspended-sediment transport was compared with the observed data, showing the high performance of the present monitoring system for suspended-sediment transport.

Key Words: H-ADCP, suspended-sediment transport, DIEX method, echo intensity, data assimilation

1. 序論

水系一貫土砂管理¹⁾を行う上では、源流域から河口、沿岸にわたる流域圏全体の土砂動態を把握することは不可欠であり、掃流砂・浮遊砂量を自動連続的にモニタリングすることは必須である。このうち浮遊土砂輸送量(=浮遊土砂濃度(SS)×流量)の計測には、横断面内に大きく変化している流速・SS分布を把握する必要があるが²⁾、これらの量をほぼ瞬時に直接計測できる観測システムは皆無である。

一方、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)³⁾は、流速横断分布のみならず、濁度と関連性の高い超音波の反射強度の横断分布も計測できるため、H-ADCP は上記の要請に対して有望な機器である。しかしながら、鉛直式の ADCP による濁度計測の検討はこれまで多く行われているが^{4)~6)}、H-ADCP による濁度計測例は皆無に等しい。その上、H-ADCP はある高さの「線」データしか計測していないので、横断面全体の SS 分布を取得するには「線」データを「面」データに変換する手法の開発が必要となる。

これに対して、著者らは、H-ADCP 計測技術と数

値解析技術を融合した高規格流量計測システムを構築している^{7), 8)}。このシステムでは、H-ADCP により計測される「線」流速データを、数値解析を介して横断面全体に内外挿し、「面」流速データや流量を算出する。本研究では、その延長として、H-ADCP 計測と数値解析を融合した新しい浮遊土砂輸送量計測システムを提案する。まず、H-ADCP における超音波の反射強度特性と SS の関係を検討する。次に、H-ADCP データに基づく SS 観測値を取り込むためのデータ同化手法を含む浮遊土砂輸送モデルを構築し、力学条件を満たした形で浮遊土砂輸送量を算定する。また、本システムの有効性を調べるために、江戸川における浮遊土砂輸送量計測に対して本システムを適用し、別途行われた観測結果と比較する。

2. 本浮遊土砂輸送量計測システムの概要

(1) 基本構成

本研究で提案する浮遊土砂輸送量モニタリングシステムは、図-1のように、H-ADCPの流速・濁度計測技術と、河川流・浮遊土砂輸送解析技術、という2つのサブシステムを融合した方法である。こ

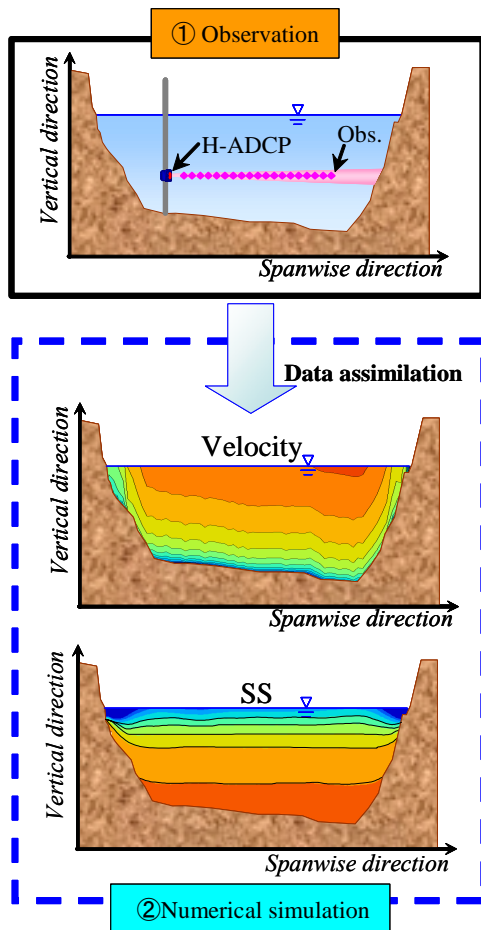


図-1 本システムの基本構成

これは、著者らが既に構築している流量計測システム^{7), 8)}をベースとして、H-ADCP計測技術に反射強度を用いた濁度・SS推定法を加え、また数値解析技術に浮遊土砂輸送モデルを組み込む。このような本システムでは、H-ADCPにより流速・SS横断分布という「線」データを計測し、数値解析により「線」データを横断面全体に内外挿して、流量や浮遊土砂輸送量を算定している。また、二つのサブシステムを融合するためにデータ同化手法を導入している。

(2) サブシステム (H-ADCP 計測システム)

H-ADCP計測システムでは、H-ADCPを低水路側岸部に固定設置し、ある高さにおける流速・反射強度の横断分布を連続計測する。本論文では、計測可能距離が最大70～100mである周波数600kHzのH-ADCP(Teledyne RDI製)を用いる。このH-ADCPでは、図-2に示すように超音波を送受信するトランスデューサーが3つ装着されている。本論文では、水平流速の算出には左右のトランスデューサー T_1, T_2 における計測結果を用い⁷⁾、反射強度データとしては中央のトランスデューサー T_3 の計測値を採用する。水中を浮遊する土粒子等からの超音波の反射強

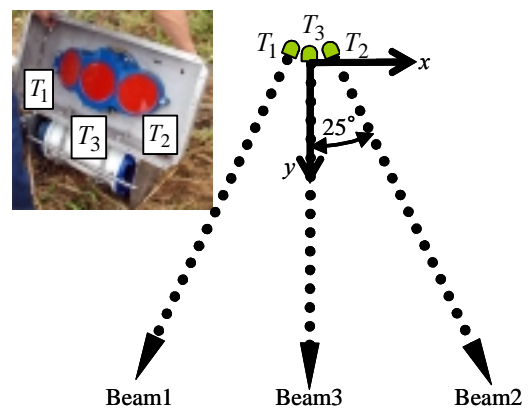


図-2 H-ADCPにおける超音波の発信方向

度から濁度を推定するには、厳密には水中の超音波吸収等⁴⁾を考慮する必要があるが、現段階では不明な点が多い。そこで本手法では、後述のように反射強度値や反射強度の横断方向勾配等を利用して濁度を簡易的に推定し、その濁度からSSに変換する。

(3) サブシステム (数値解析システム)

数値解析システムでは、H-ADCPにより得られた流速・SSデータを取り込んだ形で数値解析を実施し、横断面内の流速・SS分布や流量・浮遊土砂輸送量を算出する。この際には、「線」流速データを、力学条件を満たして横断面全体に内外挿することが可能な力学的内外挿法 (Dynamic Interpolation and Extrapolation method, DIEX法)^{7), 8)}を浮遊土砂輸送解析用に拡張することを試みる。

流速解析ツールと浮遊土砂輸送解析ツールからなるDIEX法の概略を述べる。まず、流速解析ツールでは、これまでの計算法^{7), 8)}と同様に、低計算負荷で横断面内の流速分布を推定するために、三次元流動場の運動方程式を簡略化した次式を基礎式とする。

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

ここで、 y, σ は横断、鉛直方向、 u は主流 (x) 方向流速、 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。ここでは、移流項や主流方向乱流拡散項等が省略されている代わりに、流速用付加項 $F_{a,u}$ を導入し力学バランスを満たし、かつ、この付加項 $F_{a,u}$ を介してデータ同化を行う。また、観測値に含まれる誤差を最小化するための数値アルゴリズムも導入されている。なお、流速解析ツールの計算法や手順の詳細に関しては、著者らの論文^{7), 8)}を参照されたい。

浮遊土砂輸送解析ツールでは、流速解析ツールと同じコンセプトに基づいて、三次元浮遊土砂輸送方程

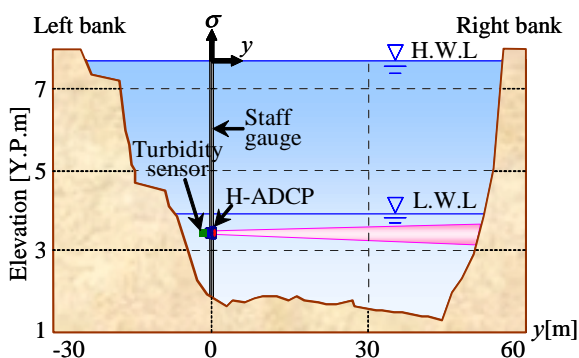


図-3 観測サイトの横断面図

式中のいくつかの項を省略した次式を基礎式とする。

$$-\frac{w_0}{D} \frac{\partial c}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{1}{D^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(A_V \frac{\partial c}{\partial \sigma} \right) + F_{a,c} \quad (2)$$

ここで、 c は浮遊土砂濃度 (SS), w_0 は土粒子の沈降速度であり、浮遊土砂濃度 c の水平・鉛直拡散係数は、運動量と同じものとする。上式では、1つの横断面内の計測では推定が困難な移流項の一部や主流方向拡散項を省略し、その代わりに浮遊土砂用付加項 $F_{a,c}$ を導入している。流速解析ツールと同様に、この付加項 $F_{a,c}$ を介して、SS 観測値を数値解析に取り込む。ここでの境界条件としては、水表面・底面上では局所平衡条件とし、側岸部では c の横断方向勾配が 0 となる条件を課す。本ツールの計算手順としては、次の 3 ステップから構成される。

H-ADCP により得られた SS 観測値を用いて、式 (2) から観測地点の付加項 $F_{a,c}$ を算出する。

で求められた付加項 $F_{a,c}$ と式 (2) より、浮遊土砂濃度 c を計算する。

付加項 $F_{a,c}$ と浮遊土砂濃度 c の解が収束するまで、このステップを繰り返し行う。

3. 江戸川における浮遊土砂輸送量モニタリングに対する本システムの適用

(1) 観測概要

本浮遊土砂輸送量モニタリングシステムの基本特性や有効性を検証するために、H-ADCP を用いた現地観測を行う。観測サイトは江戸川中流部に位置する野田橋 (河口より 39km) である。ここでは、図-3 に示すように、低水路左岸側に位置する水位標に H-ADCP を固定設置し、その設置高さは Y.P.3.4m である。対象とする観測断面は複断面形であるが、計測範囲は同図のように低水路のみである。この観測は 2006 年 6 月 6 日に開始し現在でも継続しているが、本論文では、観測開始から 6 月 30 日までを解析対象

とする。この期間中、6 月 16 日～20 日に高水敷が僅かに冠水する程度の小規模出水が発生した (最高水位は図-3 に示すとおりである)。H-ADCP の設定としては、層厚 0.5m、不感帯幅 (H-ADCP から計測第一層目までの距離) 2.0m、層数 128、サンプリング間隔 10 分である。本観測の詳細や流量算定結果については、木水ら⁷⁾を参照されたい。

H-ADCP による反射強度と濁度の関係を検討するために、光学式濁度計 (Compact-CLW, アレック電子(株)製) による濁度計測を同期して行う。光学式濁度計の設置位置は、図-3 のように、H-ADCP と同じ横断位置・高さとする。本来、H-ADCP の計測範囲における様々な横断位置にて濁度計測を行うべきであるが、観測の都合上、それを実現することはできなかった。本論文では、1 点の実測濁度と反射強度を比較する。また、この観測地点近傍に自動採水機 (6712 型ポータブルサンプラー, ISCO 製) を設置し、洪水時に河川水をサンプリングし、得られたサンプル水の SS (ガラス繊維ろ紙法) や粒径分布 (レーザー回折式粒度分布測定装置, SALD-3100, (株)島津製作所製) 等を分析した。その SS と実測濁度の関係を調べた結果、次の相関式が得られた。

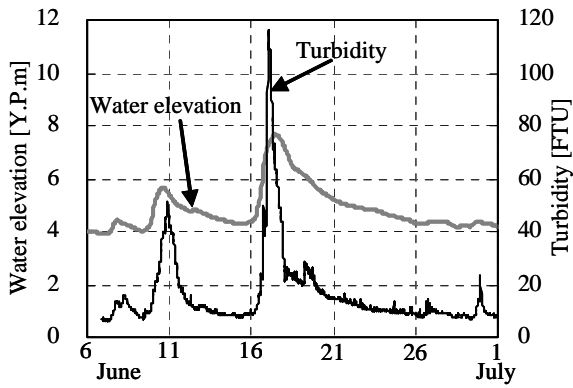
$$SS = 2.77Turb \quad (3)$$

ここで、 $Turb$ は光学式濁度計による実測濁度 (単位: FTU) であり、SS の単位は mg/L である。

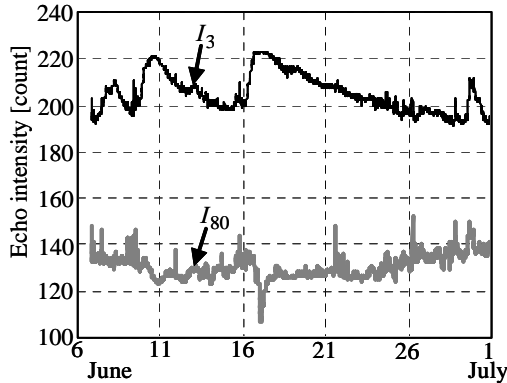
さらに、本システムによる浮遊土砂輸送量の推定精度を検証するために、ADCP (Workhorse 1200kHz, Teledyne RDI 製) と濁度計付き CTD センサー (Compact-STD, アレック電子(株)製) を用いて、横断面内における流速・濁度分布計測を行った。ここでは、H-ADCP の観測断面から約 200m 上流に位置する野田橋において、上述した出水時 (6 月 16～19 日) に計 26 回調査を行った。この調査法は二瓶ら²⁾を参考にして実施された。

(2) DIEX 法の計算条件

H-ADCP による流速・SS 計測値を用いて、浮遊土砂輸送モデルを組み込んだ DIEX 法に基づく数値シミュレーションにより、流量や浮遊土砂輸送量を推定する。計算期間は、上述した解析対象期間と同じ 2006 年 6 月 6 日～30 日とする。この期間中の出水では、高水敷において明確な流れは生じなかったことから、本計算の対象領域を低水路のみとする。計算格子や流速解析ツールのパラメータは、木水ら⁷⁾と同じとする。また、土粒子沈降速度 w_0 については、観測データを参考にして、平常時には粒径 $10 \mu\text{m}$ 、洪水時には $20 \mu\text{m}$ に相当する沈降速度を与える。



(a) 水位と実測濁度



(b) 反射強度

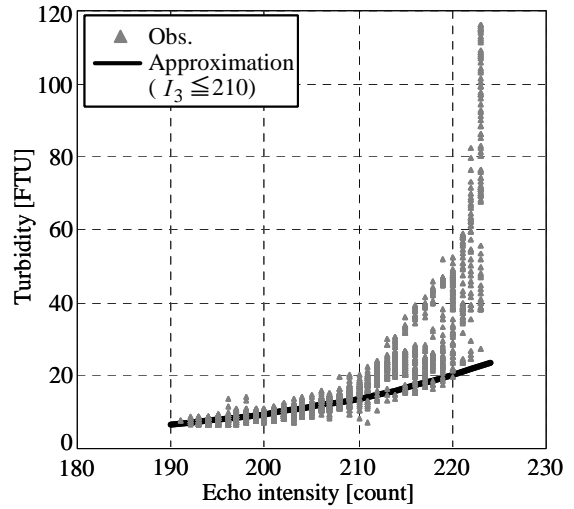
図-4 観測期間中の濁度と反射強度の時間変化

(3) 観測結果

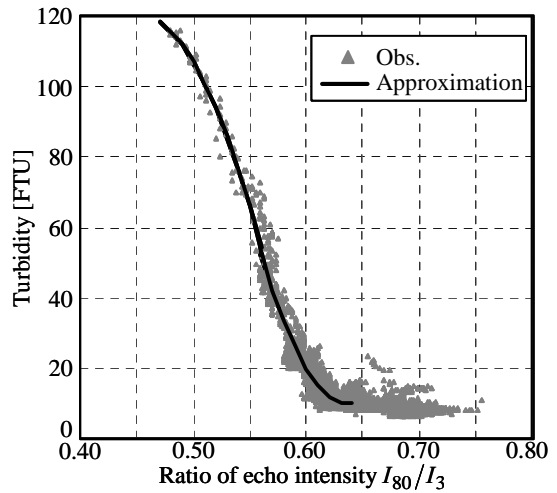
a) 反射強度の基本的特徴

超音波の反射強度に関する基本的な特徴を抽出するために、観測期間中の水位と実測濁度、反射強度の時間変化を図-4に示す。ここでの反射強度 I は、水中の超音波減衰等の補正を施していない生データであり、単位は独自に基準化されている count というものである。また、反射強度の計測データのうち、H-ADCP 近傍と遠方の代表的なデータとして、第3、80層目(H-ADCPからの横断距離 $y=3.25\text{m}, 41.75\text{m}$)における反射強度 I_3, I_{80} を選定している。

これより、実測濁度は、水位変化に応答して増減しており、出水時には100FTUを超えている。次に、第3層目の反射強度 I_3 は、実測濁度に追随しているように見られるが、出水時には一定となっており、高濁度時には反射強度の上限値が存在している。一方、第80層目の反射強度 I_{80} に関しては、反射強度レベルが第三層目の結果 I_3 よりも大幅に小さく、超音波の距離減衰の影響が現われている。また、実測濁度が大きくなると反射強度 I_{80} は減少しており、 I_3 とは逆の傾向となっている。これは、高濁度水による超音波減衰が顕著になったためである。このよ



(a) 反射強度(第三層目) I_3



(b) 反射強度比 I_{80}/I_3

図-5 反射強度データと実測濁度の相関関係

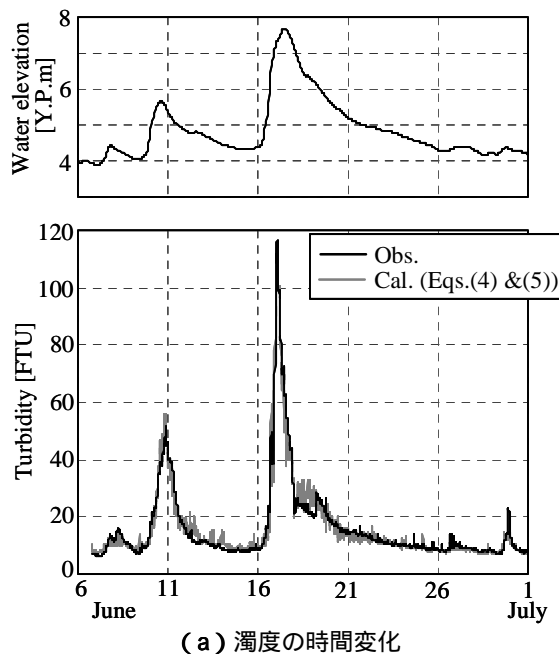
うに、反射強度の濁度依存性はH-ADCPからの距離により異なることが示された。

b) 反射強度データによる濁度推定

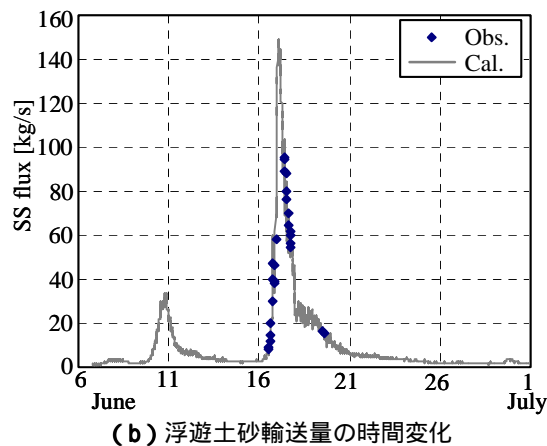
反射強度データと実測濁度の相関性を見るために、実測濁度と第三層目の反射強度 I_3 の相関図を図-5(a)に示す。低濁度時には実測濁度と反射強度には正の相関関係が認められるものの、高濁度時には反射強度は上限値(=223count)付近に留まる。このことから、単純に、反射強度から濁度を推定する場合、低濁度時には概ね良好な精度が期待されるが、高濁度時には推定そのものが困難である。なお、低濁度時における実測濁度と反射強度の相関式としては、反射強度 $I_3 = 210\text{count}$ の場合、次式が得られた。

$$Turb = 0.0034 * \exp(0.0397 * I_3) \quad (4)$$

ここでの単位としては $Turb$ には FTU, I_3 には count を用いる。また、上式の相関係数は 0.86 である。



(a) 濁度の時間変化



(b) 浮遊土砂輸送量の時間変化

図-6 実測値と本システムによる推定値の比較

高濃度条件下における濁度を何らかの形で反射強度データと関連付けるために、反射強度の濁度依存性が横断位置により異なることに着目して、第 80 層目と第 3 層目の反射強度の比 I_{80}/I_3 と実測濁度の相関図を図-5(b) に示す。低濁度の場合には同一濁度に対して幅広く反射強度比 I_{80}/I_3 が分布するものの、高濁度の場合には実測濁度と I_{80}/I_3 には良好な相関関係が見られる。これは、高濁度時には、水中の超音波減衰が濁度レベルに大きく依存するためである。高濁度条件下における実測濁度と反射強度比の間には、次の近似式が与えられる。

・ I_{80}/I_3 0.56 の場合

$$Turb = -5516(I_{80}/I_3)^2 + 4973(I_{80}/I_3) - 1001 \quad (5a)$$

・ $0.56 < I_{80}/I_3 < 0.64$ の場合

$$Turb = 7334(I_{80}/I_3)^2 - 9333(I_{80}/I_3) + 2979 \quad (5b)$$

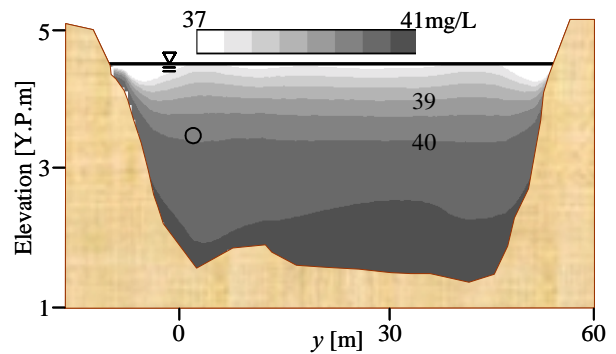


図-7 横断面内における浮遊土砂濃度分布の推定結果の一例(2006年6月14日0時、図中の丸印はデータ同化を行った地点を示す)

ここでは、近似式として2次関数を選んだため、 I_{80}/I_3 を2つに分けて近似式を算出している。これらの近似式の相関係数は0.94~0.96と高い値である。

これらの結果に基づいて、低濁度時には式(4)、高濁度時には式(5)、を各々用いて得られる推定濁度の時間変化を図-6(a)に示す。ここでは、実測濁度も合わせて表示している。これより、H-ADCPにより得られた推定濁度は、低水時・出水時共に、実測濁度と良好に一致していることが分かる。

c) 同化データ用のSSの取り扱い

以上の結果から、H-ADCPにより計測された反射強度データから式(4)、(5)を介して濁度を推定し、さらに、その推定濁度と式(3)からSSを算出する。今回は、検証用の実測濁度を一地点分しか取得できなかったため、サブシステムから得られるSSは「点」データのみとする。ただし、この「点」SSデータの算出にはH-ADCPによる「線」データも利用しているため、このSSデータは一種の横断平均SSと見なされる。このSSデータを同化データとして与えており、その同化位置はH-ADCPと同じ高さで、第三層目の横断地点($y=3.25m$)に相当する計算格子とする。また、式(2)から求められる付加項 $F_{a,c}$ はSSデータが得られる1地点分のみ算出され、この付加項 $F_{a,c}$ を横断面内で一様と仮定して与えている。なお、本システムを進展させる上では、H-ADCP計測高さにおけるSSの横断分布を抽出することは不可欠であり、今後検討する予定である。

(4) 浮遊土砂輸送量の推定結果

DIEX法により得られる横断面内のSS分布の推定結果の一例を図-7に示す。ここでは、低水時(2006年6月14日0時)の推定結果を図示している。また、図中には、データ同化を行った地点を丸印で表示している。これより、同化地点近傍において不自然なSS分布は見られず、SS観測値がスムーズに数値計

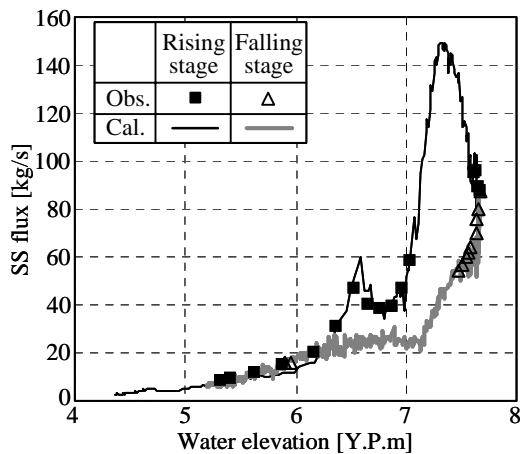


図-8 出水時における水位と浮遊土砂輸送量の関係

算に反映されている。また、流速レベルが低下している両側岸部ではSSも小さい。このように、DIEX法は、SS観測値から横断面全体のSS分布を良好に推定し得ることが示された。

本システムにより推定された浮遊土砂輸送量の時間変化を図-6(b)に示す。図中には、ADCPとSTDによる浮遊土砂輸送量の観測値も表示している。これより、本システムは全期間にわたり欠測なく浮遊土砂輸送量を推定できている。また、本システムの推定結果は、水位変動に追従して変化しており、観測結果とも良好に一致している。

観測結果と本システムによる推定結果を詳細に比較するために、出水時(2006年6月16日~20日)における水位と浮遊土砂輸送量の相関図を図-8に示す。ここでは、増水期と減水期に分けた形で表示する。観測結果には出水時特有のファーストフラッシュや時計回りのループが見られるが、本システムによる推定結果においても類似した傾向が見られ、観測結果と推定結果は良好に一致している。そこで、浮遊土砂輸送量の推定結果に関する相対誤差(=(観測値-推定値)/観測値*100)を求め、全てのデータに対する相対誤差のRMS(Root Mean Square)値を算出したところ、相対誤差のRMS値は10.3%となった。このときの流量推定誤差は4.8%であり⁷⁾、今回の推定誤差の半分程度である。このことから、浮遊土砂濃度の推定誤差は、単純には、残り半分の誤差(5%程度)に相当し、これは十分小さい。また、既存の浮遊土砂輸送量算定精度の検討例では、同じ江戸川において大きくて30~50%となるので⁹⁾、本研究で提案している浮遊土砂輸送量計測システムの推定精度は良好であることが示された。

4. 結論

本研究で得られた主な結論は以下のとおりである。

- (1) H-ADCPによる流速・SS計測技術と流速・浮遊土砂輸送シミュレーション技術を融合した新しい浮遊土砂輸送量計測システムを提案した。この際には、DIEX法を浮遊土砂輸送解析用に拡張し、付加項を用いるデータ同化手法を採用した。
- (2) H-ADCPの反射強度特性に基づいて、低濁度時には反射強度値を、高濁度時には反射強度比を各々用いることにより、反射強度データから精度良く濁度・SSを推定し得ることが示された。
- (3) 江戸川における浮遊土砂輸送量計測に本システムを適用した結果、本システムによる推定結果は別途行われた観測結果と良好に一致しており、本システムの有効性が検証された。

謝辞: 本研究は、NEDO・平成17年度産業技術研究助成事業(研究代表者:二瓶泰雄)の成果の一部である。国土交通省関東地方整備局江戸川河川事務所には、現地観測に関して様々な便宜を図って頂いた。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) 二瓶泰雄,植田雅康,木水啓:江戸川における土砂濃度の横断・鉛直分布特性と土砂輸送量算定法の検討,水工学論文集, Vol.50, pp.937-942, 2006.
- 3) Wang, F. and Huang, H.: Horizontal acoustic Doppler current profiler (H-ADCP) for real-time open channel flow measurement: Flow calculation model and field validation, XXXI IAHR CONGRESS, pp.319-328, 2005.
- 4) Young, R. A., Merrill, J. T., Clarke, T. L. and Proni, J. R.: Acoustic profiling of suspended sediments in the marine bottom boundary, *Geophysical Research Letters*, Vol.9, No.3, pp.175-178, 1982.
- 5) Deines, K. L.: Backscatter estimation using broadband acoustic Doppler current profilers, *Proc.IEEE*, pp.249-253, 1999.
- 6) 橋田隆史,岡田将治,新井励,下田力,熊田康邦: ADCPを用いた河川流況計測法における課題と国内外における応用観測事例,河川技術論文集, Vol.12, pp.133-138, 2006.
- 7) 木水啓,二瓶泰雄,北山秀飛:H-ADCPとDIEX法を用いた河川流量計測法の洪水流河川観測への適用,水工学論文集, Vol.51, pp.1057-1062, 2007.
- 8) 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, 2007(投稿中).
- 9) 二瓶泰雄,木水啓,植田雅康,中岡亮,望月健:陸域環境負荷評価のための調査方法及び解析方法に関する検討~江戸川を例にして~,海岸工学論文集, Vol.52, No.2, pp.1106-1110, 2005.

(2007.4.5 受付)