

ADCPとRTK-GPSの実測データに基づく 掃流砂量推定手法の考察

CONSIDERATION OF THE ESTIMATION METHOD OF BED-LOAD
DISCHARGE BASED ON MEASURED DATA USING ADCP AND RTK-GPS

岡田将治¹・和泉征良²・竹内慈永²・萬矢敦啓³・橋田隆史⁴

Shoji OKADA, Masayoshi IZUMI, Jei TAKEUCHI, Atsuhiko YOROZUYA and Takashi KITSUDA

¹正会員 博士(工学) 高知工業高等専門学校 准教授 (〒783-8508 高知県南国市物部乙200-1)

²学生会員 準学士(工学) 高知工業高等専門学校専攻科 (〒783-8508 高知県南国市物部乙200-1)

³正会員 Ph.D. 土木研究所水災害リスクマネジメント国際センター (〒305-8156 つくば市南原1-6)

⁴正会員 修士(農学) (株)ハイドロシステム開発 (〒550-0022 大阪市西区本田3丁目2-18)

Authors developed a bed-load discharge measurement system based on ADCP in the experimental flume and applied it to actual river. In order to verify the applicability of this method, flood flow observation by using tethered boat equipped with ADCP and RTK-GPS were conducted in several Japanese rivers with different grain size. The output data were compared with conventional formula and results of 2D bed deformation analysis using observed discharge and water level data. As a result, relationship between non-dimensional shear stress and non-dimensional bed-load discharge estimated by author's method showed similar tendency with conventional formula even though shear velocity calculated from vertical velocity distribution was larger than the other calculated values.

Key Words : *acoustic doppler current profiler, shear velocity, bed-load discharge measurement system*

1. はじめに

近年、断面内の詳細な流速分布と水深を計測できるADCP(Acoustic Doppler Current Profiler: 超音波ドップラー流速計)の特徴を活かした流量観測の高度化が進められており、既往の研究成果から観測手法やデータ処理等に係る基礎的な技術はほぼ確立されている。さらに、洪水時の土砂移動を把握するためのモニタリング技術として、ADCPのボトムトラッキング機能(以下、BT機能と記す)を用いた対地速度(掃流砂速度(*bed-load velocity*)と記す)の計測による掃流砂量計測手法の検討が進められている。この掃流砂量計測技術への展開は、Rennieら¹⁾によって早くから検討が行われてきた。

Ramoozら²⁾はADCPのBT機能で河床付近の土砂の移動を適切に計測できているかを検証するために、大型移動床水路にADCPを設置し、計測した対地速度とデジタル動画から追跡した河床砂 d_{50} (1.05mmおよび10.3mm)の移動速度の時系列データを比較し、粒径が小さい砂の場合にこれらの相関性がより高いことを示している。

一方、著者ら³⁾は鉛直流速分布を同時に計測できるADCPの利点を生かし、流況(摩擦速度)、掃流砂速度、掃流砂量の関連性を明らかにすることを目的として、大型移動床水路においてADCPで計測した鉛直流速分布から摩擦速度を推定するアルゴリズムを提案し、掃流砂速度との関係を考察した結果、Rennieら¹⁾が用いた対数則を仮定した推定手法よりもさらに正の相関を持つことを示した。また、利根川においてADCPおよびRTK-GPSを搭載した橋上操作艇による定点観測と採砂器による掃流砂量の同時計測を行い、手法の有効性を検証している⁴⁾。

実河川における洪水時の土砂動態について、さらに理解を深めるためには、異なる河川や水理条件においてこれらのデータを蓄積するとともに、従来から用いられている掃流砂式や河床変動解析手法との関係についても明らかにすることが重要となる。そこで、本研究ではADCPとRTK-GPSを搭載した橋上操作艇により、2011年7月四万十川および2012年9月仁淀川において洪水中に実測した水深平均流速および掃流砂速度、著者らの手法により求めた摩擦速度の関係について明らかにする

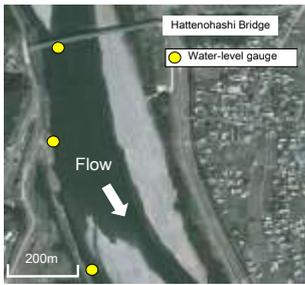


図-1 仁淀川八田地点の平面図

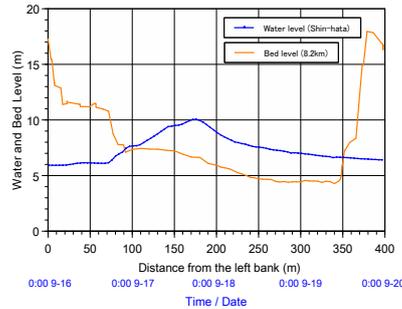


図-2 仁淀川8.2kmの横断面形状と2012年9月出水時の水位ハイドログラフ

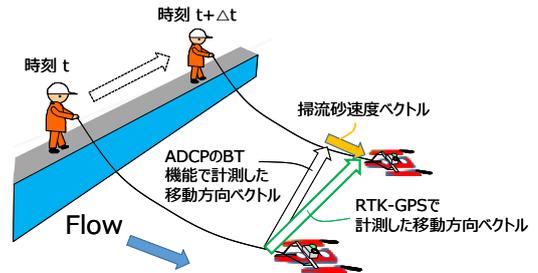


図-3 ADCPのBT機能とRTK-GPSのデータを用いた掃流砂速度算出手法

とともに、著者らが提案する掃流砂量の推定手法³⁾を四万十川および仁淀川にも適用し、粒径の異なる3つの河川の無次元掃流力と無次元流砂量の関係を示す。さらに、一般的に用いられている二次元河床変動解析手法を用いて現地観測時の四万十川および仁淀川の洪水流を再現し、解析モデルにより得られる摩擦速度、無次元掃流力、掃流砂量を実測値、あるいは実測値から推定した値と比較することにより、両者の関係について考察する。

2. 四万十川と仁淀川における洪水観測結果

四万十川では河口から8.6kmの渡川大橋において、2011年7月20日5時から13時の時間帯に流量が1500m³/sから3000m³/s規模において観測を実施した。観測内容の詳細については既報⁵⁾を参照されたい。仁淀川では図-1に示す河口から8.2kmに位置する八天大橋を対象地点として、2012年9月17日の12時から18時30分の時間帯の流量規模2600m³/sから流量3800m³/sにおいて、曳航観測を実施した。図-2に観測断面近傍の横断河床形状と八天大橋に設置した水位計で得られた洪水中の水位ハイドログラフを示す。橋上の観測者の移動速度は0.2~0.3m/sであり、水面幅約230mを10分間程度で計測している。四万十川、仁淀川の観測地点付近の50%粒径のd₅₀はそれぞれ25mm、10mmであった。

図-3に掃流砂速度算出手法を示す。掃流砂速度は、時間tから時間t+Δt秒間に移動したときのRTK-GPSで計測した移動方向ベクトルとADCPのBT機能により計測した移動方向ベクトルとの差によって算出することができる。図-4、図-5にそれぞれ仁淀川2012年出水時における観測期間内の流量が最大値(3800m³/s)、最小値(2600m³/s)および3000m³/sにおける水深平均流速と掃流砂速度の横断分布を示す。右岸の310m~350m区間は樹木が多く繁茂しているため、死水域となっており計測していない。水深平均流速は河道中央部で2.5~3m/sでほぼ一様となっている。また、掃流砂速度は低水路内全体で0.08m/s以上、大きい箇所では0.3m/s程度となっており、四万十川2011年出水時には流量3000m³/s時において最も大きい箇所でも0.2m/sであった⁵⁾ことから、仁淀川のこの流量規模では

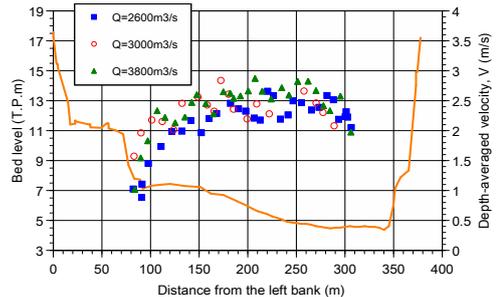


図-4 仁淀川における洪水中の水深平均流速

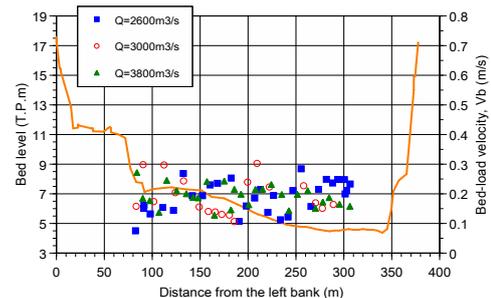


図-5 仁淀川における洪水中の掃流砂速度

さらに多い掃流砂が流下していることがわかる。

つぎに、四万十川と仁淀川の洪水観測により得られた水深平均流速と掃流砂速度、著者らの手法により推定した摩擦速度との関係について考察する。四万十川では観測期間内の流量の最大値(3000m³/s)と最小値(1500m³/s)の2ケース、仁淀川では図-4および図-5に示した3ケースのデータを用い、横断距離にして約5mに相当する20秒間の平均値を求めている。

図-6に四万十川および仁淀川における洪水中の水深平均流速と掃流砂速度の関係を示す。代表粒径d₅₀が10mmの仁淀川では、掃流砂速度が水深平均流速1m/s~3m/sの範囲において、その8%程度となっている。すなわち、ADCPのBT機能のみで曳航観測を実施した場合、流量値はその割合だけ実際の流量よりも大きく出力され、観測精度が低下する。一方、代表粒径d₅₀が25mmである四万十川ではデータの相関係数が仁淀川よりも低くはなるものの、0.5m/s~3.5m/sにおいて3%程度となっている。図-7には水深平均流速と摩擦速度の関係を示す。なお、摩擦速度u*は著者ら³⁾が提案している手法により算出して

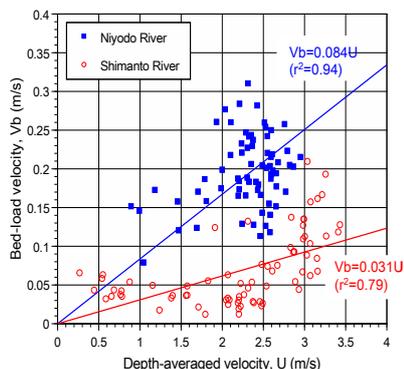


図-6 四万十川および仁淀川における
洪水時の水深平均流速と掃流砂速度の
関係(約20秒平均値)

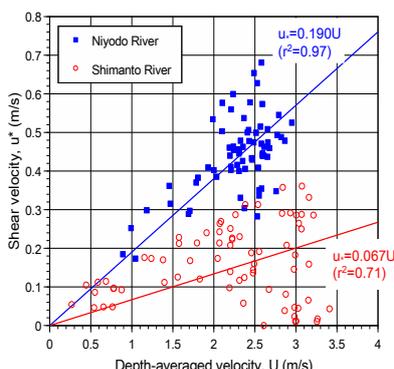


図-7 四万十川および仁淀川における
洪水時の水深平均流速と摩擦速度の
関係(20秒平均値)

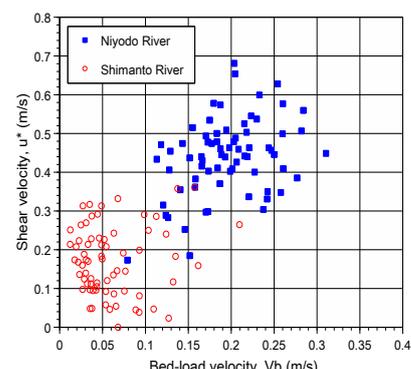


図-8 四万十川および仁淀川における
洪水時の掃流砂速度と摩擦速度の
関係(20秒平均値)

いる。四万十川では、摩擦速度が水深平均流速に対しておよそ7%程度となっているが、仁淀川のそれは20%程度となっており、同じ水深平均流速に対して約3倍の違いがあることがわかる。

図-8に摩擦速度と掃流砂速度の関係を示す。岩垣の式より、限界摩擦速度を求めると、仁淀川の粒径を10mmとすれば0.09m/sであり、四万十川の粒径25mmに対しては0.14m/sとなる。四万十川では d_{50} に対する限界摩擦速度以下の場合でも掃流砂が移動している状況が確認できる。Ramoozら²⁾の実験結果において、ADCPのBT機能が粒径の小さい砂の動きを捉えやすいがわかっていることから、 d_{50} よりも小さい粒径の砂の移動を計測しているものと考えられる。また、仁淀川、四万十川においても摩擦速度と掃流砂速度の間に比例関係が確認できるものの、データのバラつきが大きく、既報の利根川における定点観測の結果から得られた傾向とは異なっている。この原因については、曳航観測では定点観測に比べて地点ごとの計測時間が短い(平均するアンサンブル数が少ない)ことや曳航時のボートの揺動等が考えられるが、ここでは曳航観測時の場合として考察を行い、定点観測時のデータとの関係については今後の課題とする。

3. 既往の掃流砂量式と観測データに基づいて 推定した流砂量との比較

著者ら³⁾はADCPとRTK-GPSを併用した洪水流観測によって得られる掃流砂速度と鉛直流速分布から算出した摩擦速度から掃流砂量を推定する手法として下記のBagnold型の掃流砂量算定式に基づいた方法を提案している。

$$q_B = \int_0^{h_s} c \cdot u \cdot dz \cong v_s \cdot h_s \cdot c_s \quad (1)$$

ここで、 q_B : 単位幅掃流砂量、 c : 土砂濃度、 u : 土砂移動速度、 v_s : 平均土砂移動速度、 h_s : 土砂の移動層厚、 c_s : 移動層内の鉛直平均濃度($c_s=0.6$)である。ここでは、実測した掃流砂速度を平均土砂移動速度と仮定した。移

動層厚については、式(2)の江頭ら⁶⁾が提案する推定式を用いる。

$$\frac{h_s}{d} = \frac{1}{c_s \cdot \cos \theta \cdot \{\tan \phi_s / (1 + \alpha) - \tan \theta\}} \tau_* \quad (2)$$

ここに、 ϕ_s : 砂粒子間の内部摩擦角、 α : 動圧水圧と静的水圧の比($\alpha=0.25$)、 θ : 河床勾配である。また、上記と比較するために、掃流砂量式として従来から多く用いられている芦田・道上の式⁷⁾により算出する。

$$q_{B*} = 17 \tau_{*c}^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*} \right) \left(1 - \frac{u_{*c}}{u_*} \right) \quad (3)$$

ここで、 $q_{B*} = q_B / \sqrt{(\sigma/\rho - 1)gd^3}$ 、 q_B : 掃流砂量、 τ_* : 無次元掃流力、 τ_{*c} : 無次元限界掃流力、 σ : 砂粒子の密度、 g : 重力加速度、 d : 河床粒径である。なお、 τ_* を求める際の摩擦速度 u_* は、各地点の水深と観測時の水面勾配から $u_* = \sqrt{ghI}$ により算出している。

上記の2通りの方法で求めた掃流砂量を無次元化し、無次元掃流力との関係を示したのが図-9である。参考のために、利根川の観測結果⁴⁾も併せてプロットしている。また、芦田・道上の式には、ADCPが計測した水深と水面勾配から求めた摩擦速度、無次元有効掃流力、無次元掃流力を代入しプロットしている。著者らが提案する手法で得られる無次元掃流力は、四万十川と仁淀川のデータでは、摩擦速度は水深と水面勾配から算出した摩擦速度よりも大きい値を示し、利根川のデータでは無次元掃流力の値の範囲が広がっている。また、著者らの手法で求めた無次元掃流力と無次元流砂量の関係は、河床粒径、水理条件の異なる3つの河川のデータをすべてプロットした結果、芦田・道上の式と同様な傾向を示した。しかし、2つの手法で求めた無次元掃流力および無次元掃流砂量の値は、異なる場所にプロットされている。そこで、これらの手法で得られる値を比較するために、図-10、図-11に無次元掃流力と無次元掃流砂量の関係をそれぞれ示す。これらの図より、著者らが提案する手法により得られた無次元掃流力と無次元掃流量が約4倍大きく算出されていることがわかった。

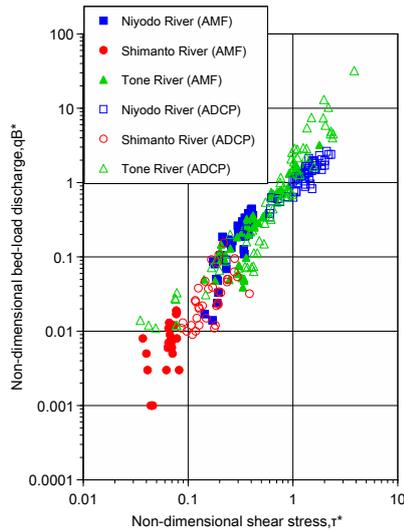


図-9 芦田・道上式およびADCPの計測値から求めた無次元掃流力と無次元掃流砂量の関係

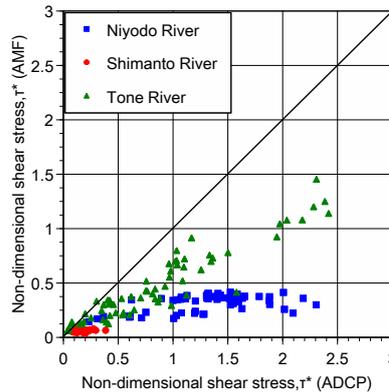


図-10 水面勾配およびADCPの計測値から求めた無次元掃流力

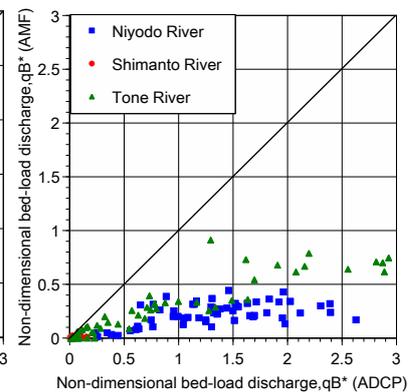


図-11 芦田・道上式およびADCPの計測値から求めた無次元掃流砂量

4. 二次元河床変動解析を用いた洪水流の再現と摩擦速度、無次元掃流力および掃流砂量の考察

既報の利根川の現地観測⁴⁾では、橋上操作艇による定点観測と掃流砂採取を主として実施し、摩擦速度と掃流砂速度の関係について明らかにしている。一方、本研究で対象とする四万十川および仁淀川においては、曳航観測によって断面流量を計測することにより、縦断的に設置した簡易水位計のデータと併せて洪水時の流れや河床変動について解析が行えるようにした。そこで、現地観測結果と解析手法で一般に用いられている摩擦速度、無次元掃流力および掃流砂量の算定手法との関連性を考察するために、近年、多くのユーザーに使用されているiRIC Nays2D⁸⁾により、ADCP観測流量、複数箇所の水位計データおよび洪水後の断面データに基づいて二次元河床変動解析を行い、四万十川および仁淀川の実測値と比較して考察を行った。本研究では、最新の定期横断測量データを初期河床として、洪水時にADCPで計測した流量と実測した水位データをそれぞれ上流・下流の境界条件として与え流れ場を計算し、ADCPで計測した結果と比較している。四万十川では河口から9.0kmから7.8kmの1.2km、仁淀川では河口から8.6kmから7.2kmの1.4kmを解析対象区間とした。なお、解析結果の縦断水面形の時間変化が実測データとほぼ同じであったことを確認している。マンニングの粗度係数は両河川とも低水路0.032、高水敷0.035とし、樹木繁茂が確認される箇所には、状況に応じて相当する密生度と抵抗係数を設定した。また、粒径は観測地点付近において採取した河床材料の粒度分布から、 d_{50} の25mm(四万十川)、10mm(仁淀川)の一樣粒径として設定した。

四万十川および仁淀川で観測したピーク流量時の解析結果と実測値および実測値から推定した結果の比較を以

下に示す。図-12に示す水深平均流速の横断分布をみると、河岸際に若干違いがみられるものの、河道中央部において同様な値となっており、流況をほぼ再現できている。図-13に示す摩擦速度の横断分布をみると、解析および水面勾配から求めた摩擦速度は同程度となっている。しかし、実測した結果から算出した摩擦速度は、仁淀川では2~3倍になっている。この原因を考察するために、図-14にADCPで計測した代表的な地点の鉛直流速分布を示す。河床変動が生じていると考えられる地点では流速分布が鉛直方向に一様な分布になっている。それらの地点では、著者らの提案する摩擦速度算定手法を用いると大きく算出される。図-15に無次元掃流力の横断分布を示す。本研究で用いた解析手法では、摩擦速度、無次元掃流力を以下の式(4)、(5)、(6)で定義している⁸⁾。

$$u_*^2 = C_f \cdot V^2 \quad (4)$$

$$C_f = \frac{n_m^2 g}{h^{1/3}} \quad (5)$$

$$\tau_* = \frac{u_*^2}{s_g g d} \quad (6)$$

ここで、 C_f ：河床摩擦係数、 V ：合成流速、 n_m ：マンニングの粗度係数、 h ：水深、 s_g ：砂粒子の水中比重である。掃流量の算定には芦田・道上の式を用いた。なお、本研究で用いた解析手法では式(3)の無次元有効掃流力 τ_{*e} の項を τ_* としている。図-15左図の四万十川では河道中央部の砂州上で無次元掃流力が0.15から0.4の範囲であり、解析結果は0.1であることから実測値に基づいて求めた値は約2~4倍となっている。一方、右図の仁淀川では、解析結果は0.2から0.4であるのに対し、実測値に基づいて求めた値は0.5から3となっており、2~7倍の大

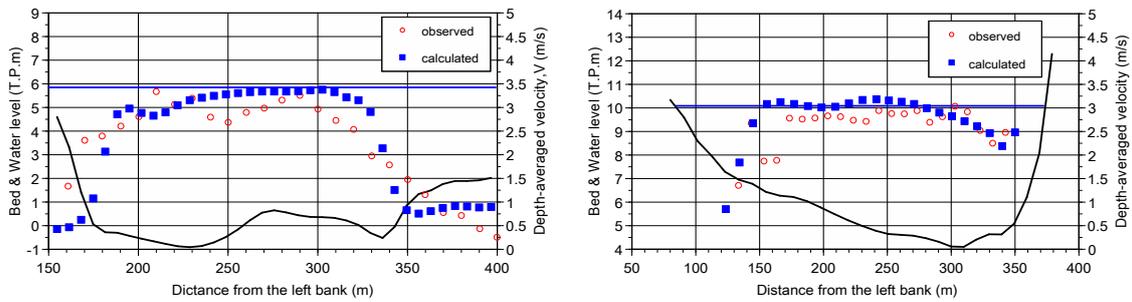


図-12 四万十川(3000m³/s : 左), 仁淀川(3800m³/s : 右)におけるADCP計測断面の水深平均流速分布

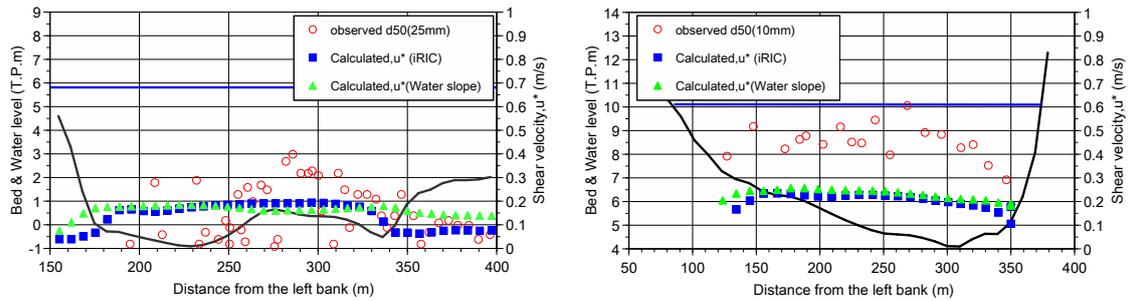


図-13 四万十川(3000m³/s : 左), 仁淀川(3800m³/s : 右)におけるADCP計測断面の摩擦速度分布

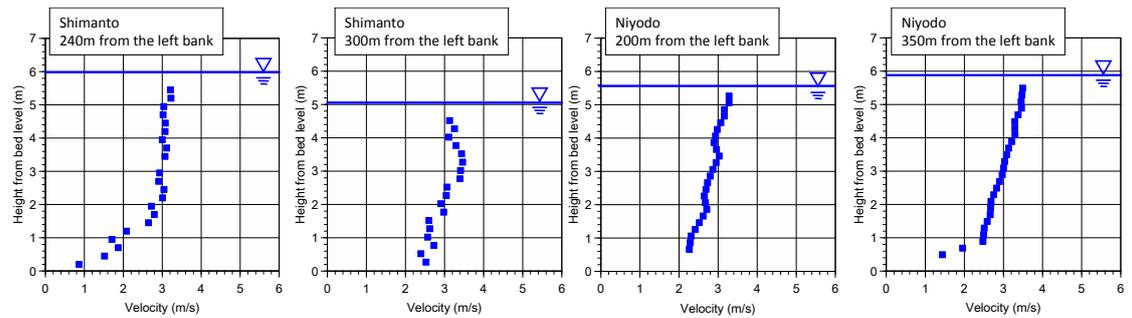


図-14 四万十川, 仁淀川におけるADCPで計測した鉛直流速分布

きさとなっている。これらの結果、掃流砂量の横断分布として算出したものを図-16に示す。四万十川, 仁淀川の両河川においても解析上で芦田・道上式から求めた結果と著者らが提案する手法で求めた結果は同様な傾向を示している。特に、右図の仁淀川の比較結果では、図-15右図で無次元掃流力が大きく異なっていたにも関わらず、掃流砂量としては同程度となった。これは、式(3)において本解析手法では無次元掃流力により計算していることが原因として考えられたことから、解析結果を無次元有効掃流力についてもプロットした。その結果、実測結果から求めた掃流砂量が無次元有効掃流力から求めた値に比べて2~4倍程度大きくなり、図-11と同じ傾向を示す。これらの結果は、他の流量のケースにおいても同様に確認されたことから、本研究で提案するADCPとRTK-GPSの実計測データにより推定した掃流砂量と河床変動解析から得られる掃流砂量の関係について、洪水中の掃流砂量の実測結果も踏まえてさらに検証する必要がある。

5. おわりに

本研究で得られた結果を以下に示す。

- 1) 計測した掃流砂速度と水深平均流速の比、摩擦速度と水深平均流速の比は、粒径が小さく河床が移動しやすい仁淀川で大きく、前者が8%程度、後者が20%程度であった。
- 2) 曳航観測により得られた摩擦速度と掃流砂速度との関係は、粒径の大きさに関わらず正の相関がみられた。ただし、定点観測時に比べてデータのバラつきが大きかったため、定点および曳航観測で得られるデータの質についての検討を今後の課題とした。
- 3) 観測結果を用いて著者らが提案するBagnold型の掃流砂量算定式から掃流砂量を推定し、無次元掃流力と無次元流砂量の関係を考察した結果、無次元掃流力の大きさに違いはみられたが、芦田・道上の式と同様な曲線が得られた。しかし、ADCPの計測結果から求めた無次元掃流力および無次元掃流砂量が芦田・道上の式で求めた値に比べて4倍程度大きくなった。

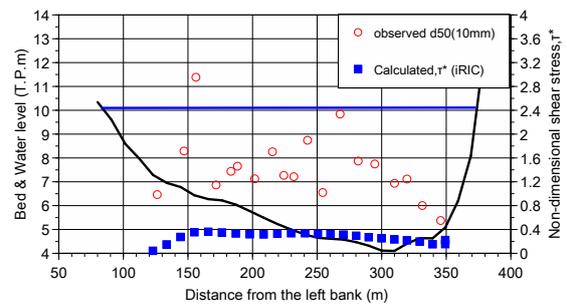
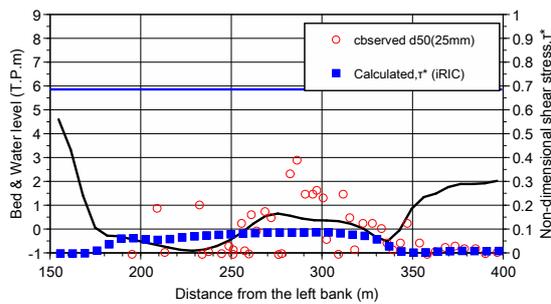


図-15 四万十川(3000³/s : 左), 仁淀川(3800³/s : 右)におけるADCP計測断面の無次元掃流力分布

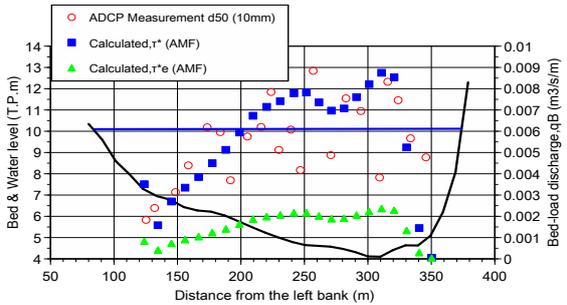
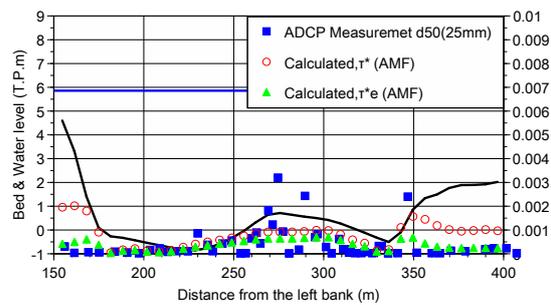


図-16 四万十川(3000³/s : 左), 仁淀川(3800³/s : 右)におけるADCP計測断面の掃流砂量分布

4) 実測した流量, 複数地点の水位計データに基づいて二次元河床変動解析を行って洪水流を再現し, 実測値と解析値を比較した. その結果, 土砂移動が顕著なほど実測値は, 解析から算出される摩擦速度よりも大きく評価されており, その結果無次元掃流力も同様に大きいことがわかった. 解析上の無次元掃流力から得られた掃流砂量と著者らの提案する手法によって算出した掃流砂量が同程度となった. また, 著者らの手法により求めた掃流砂量は無次元有効掃流力から求めた掃流砂量に比べ, 2~4倍程度大きくなった. 今後, 採砂器を用いた洪水中の掃流砂量計測を実施し, 本手法の妥当性について定量的な検証を行う予定である.

謝辞

四万十川および仁淀川において実施した現地観測は, 科学研究費補助金(基盤研究C)「ADCPを用いた洪水流況, 河床速度, 浮遊砂量の同時計測技術の開発と実洪水への適用」(課題番号: 23560614)の一環として行った. 国土交通省高知河川国道事務所および中村河川国道事務所には仁淀川および四万十川に関する資料提供や現地観測に際してご協力いただいた. また, 利根川の現地観測データは国土技術政策総合研究所河川部河川研究室から提供いただいた. ここに記して謝意を表す.

参考文献

- Collin D. Rennie, Robert G. Millar and Michael A. Church : Measurement of Bed Load Velocity using an Acoustic Doppler Current Profiler, *Journal of Hydraulic Engineering*, MAY 2002, pp.473-483, 2002.
- Ramooz, R., and Rennie, C. D. : borator measurement of bedload with an ADCP, *United States Geological Survey Scientific Investigations Rep.* 2010-5091, Reston, VA, 2010.
- 萬矢敦啓, 岡田将治, 江島敬三, 菅野裕也, 深見和彦 : ADCP を用いた摩擦速度と掃流砂量の算定手法, *水工学論文集*, 第 54 巻, pp.1068-1098, 2010.
- Atsuhiko Yorozyua, Yuya kanno, Kazuhiko Fukami, Syoji Okada : Bed-load discharge measurement by ADCP in actual rivers, *River Flow 2010*, pp.1687-1692, 2010.
- 岡田将治, 萬矢敦啓, 本永良樹, 橋田隆史 : ADCP による洪水流況・掃流砂・浮遊砂量の同時計測技術構築のための基礎的検討, *土木学会論文集 B1(水工学)*, Vol.69, No.4, I_751-I_756, 2013.
- 江頭進治, 芦田和男, 田野中新, 高橋徹也 : 連続体手法による掃流砂量式に関する研究, *京都大学防災研究所年報*, 第 34 号, PP261 -273, 1991.
- 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*, 第 206 号, pp.59-69, 1972.
- iRIC Software : Nays2D Solver Manual (Last Update 2013.3.10 version), pp.11-12.

(2013. 9. 30受付)