

超音波ドップラー流速計計測に基づく 出水時河川の底質巻上げフラックスの把握

STUDY ON PICK-UP RATE IN A RIVER UNDER FLOODS BASED ON ACOUSTIC DOPPLER VELOCIMETER MEASUREMENT

杉村歩¹・二瓶泰雄²

Ayumu SUGIMURA and Yasuo NIHEI

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)

The present study aims to clarify the temporal variations of pick-up rates in a river under flood conditions. For this, an acoustic Doppler velocimeter which can measure three-dimensional velocities and echo intensity closely related to turbidity, was applied to measure the pick-up rates in the Oohori River, flowing into Lake Teganuma. The results indicated that 1) the echo intensity measured by the ADV was found to be highly related to the turbidity, 2) the hysteresis between water level and turbulent quantities under floods was dominant in the flood with relatively higher unsteadiness parameter, and 3) the correlations between the pick-up rates and bottom shear stress were influenced by API(Antecedent Precipitation Index) and flood magnitude.

Key Words : pick-up rate, suspended sediment transport, acoustic Doppler velocimeter, flood, turbulence

1. 序論

河川や湖沼, 沿岸海域における底面から水中への巻上げフラックスは, 底面もしくは掃流砂から浮遊砂への移行や地形変化など土砂動態を考える上で重要な輸送過程である¹⁾. また, この巻上げ過程では, 底質中の粒子状物質の移動のみならず, 底質粒子に含まれる窒素やリン, 有機物等の輸送も同時に生じている²⁾. そのため, 水域における物質循環を適切に評価する上では, 底質からの窒素・リン・有機物の巻上げフラックスの算定は極めて重要である^{3,4)}. このような底質巻上げフラックスに関する研究としては, 底泥を敷き詰めた開水路流れを再現した室内実験などが行われることが多いが⁵⁻⁷⁾, 現地での底質巻上げ量を直接計測した研究事例は少ない.

これに対して, 著者らは, 現地にて直接計測可能で可搬型の巻上げ装置 (図-1) を自作し, それを用いて, 手賀沼流入河川 (大堀川) において, 様々な流速条件下の土砂・窒素・リン巻上げフラックス特性に関する現地観測を日々行った (稲垣・二瓶⁸⁾, 前報と呼ぶ). その結果, 底質巻上げフラックスは, どの項目も, 降雨直後に大きく減少し, その後の無降雨期間に緩やかに増加する, という時間的変化が示され, 出水イベントに大きく影響されることが明らかとなった. しかしながら, この装置で

は, 実際の出水中において底質巻上げ特性がどのように変化しているかということは計測できず, 出水時における巻上げ動態を把握することはできない.

一方, 現地水域における巻上げフラックスの計測には超音波センサーの一つである超音波ドップラー流速計 (Acoustic Doppler Velocimeter, ADV, Nortek社製, 図-2) が用いられることが多い⁹⁻¹²⁾. このADVは, センサー部から離れた計測点において, 三次元流速と共に, 濁度との

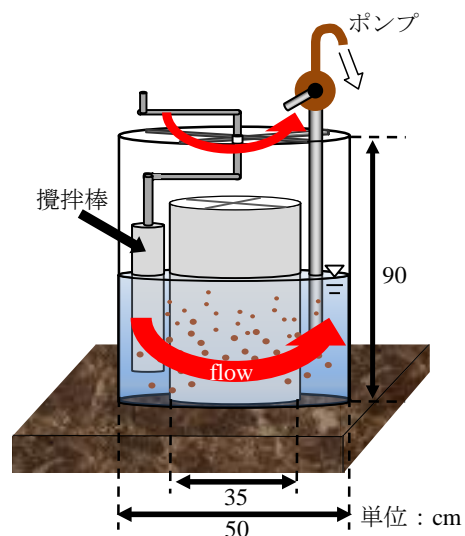


図-1 現地直接計測型巻上げ装置⁸⁾

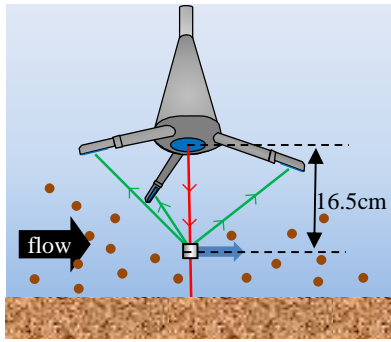


図-2 ADVの計測概略図

相関性の高い超音波反射強度を乱流成分まで含めて計測可能である。そのため、ADVは巻上げフラックスを自動連続的に計測でき、これまで沿岸域や河口域に適用されているが⁹⁻¹²⁾、出水時の河川における検討事例はない。

そこで本研究では、ADVを用いて出水時河川における底質巻上げ量の連続計測を実施し、出水中における巻上げフラックスの非定常性を把握することを試みる。ここでは、前報と同じく大堀川を観測対象とし、同時計測された光学式濁度計やADCPデータと合わせて解析し、複数の降雨イベント時における底面せん断力（レイノルズ応力）と巻上げフラックスの関係を検討する。

2. 現地観測の概要

(1) 観測サイト

観測サイトは、富栄養化湖沼として有名な手賀沼に流入する大堀川である。大堀川は流路長12.9km、流域面積31.0km²、市街地率75%である。観測地点は、図-3のように、河口から0.5km上流にあり、河道法線形はやや右岸側に湾曲しているが概ね直線である。河床材料は、河口付近では粘土・シルトが多く含まれるが、この地点では、図-4のように細砂分が多く、中央粒径 $D_{50}=0.53$ [mm]である。

(2) 調査方法

本観測では、底質巻上げフラックス計測と共に、基本的な流速場や濁度環境を把握するために、前述のADVとADCP（Workhorse1200kHz, Teledyne RDI製）、自記式水位計（ウォーターレベルロガーU-20, Onset製）、光学式濁度計（Compact-CLW, JFEアドバンテック（株）製）をそれぞれ設置した。設置状況は、図-5に示すように、流速計測用のADCPとADVは横断方向に並べ、ADVによる超音波反射強度データとの相関性を検討する濁度計はADVのそばに設置した。これらの機器を河川中に設置する際に、上流から流れてくるゴミや藻が絡まないようにする必要があるので、ここでは上向きにしたADVの上流側にゴミ除けのV字形の板を設置した。今回の観測期間では、センサーにゴミが絡まず、また、ゴミ除け用板周辺も局所洗掘している様子は確認されなかった。計測範囲を広



図-3 観測地点

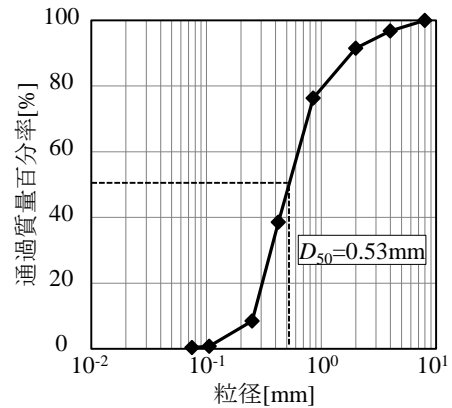


図-4 観測地点における河床材料の粒径分布

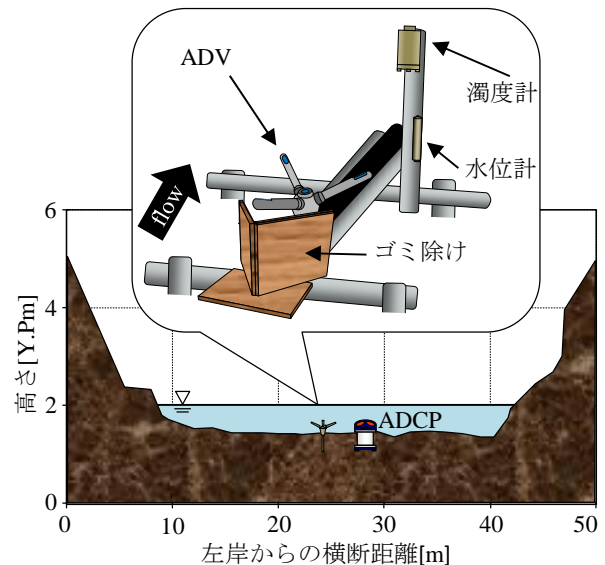


図-5 対象サイトの横断面形状と測器設置状況

げるためADCPを極力埋めて設置し、相関関係を検討するADVと濁度計の計測高さを一致させた。計測モードとしては、ADVについては、10分間に1回、4Hzで90秒間記録を行った。ADCPは層厚2cm、計測間隔を10分もしくは20分とした。濁度計や水位計も計測間隔を10分とした。

観測期間としては、①2012年11月9～21日、②同年11月28日～12月12日、③2013年7月17日～8月8日とした。表-1は3つの降雨イベントにおける期間、総雨量、時間最大雨量、先行降雨指標API（Antecedent Precipitation Index）¹³⁾、非定常パラメータ α ¹⁴⁾を示す。3つのイベント共に小規模出水であるが、相対的にはイベントAが最大であった。

表-1 降雨イベントの概況

イベント	期間	総雨量 [mm]	時間最大雨量 [mm]	API [mm]	α
A	2012/11/17 ~11/18	43	17	15.7	1.8×10^{-4}
B	2012/12/4	4	3	13.7	5.7×10^{-5}
C	2013/7/27 ~7/28	9	5	3.9	3.3×10^{-5}

底質巻上げ量は、降雨イベント前にどの程度堆積物が蓄積されているかで決まるため⁸⁾、各イベント時の先行降雨状況として次の先行降雨指標APIを算出する。

$$API = \sum R_t k^t \quad (1)$$

ここで、 R_t は t 日前の日雨量[mm]、 k は減水係数 (=0.85) である。各イベントにおけるAPIより (表-1)、イベントCは先行雨量が非常に小さく、イベントAとBは先行降雨条件がほぼ同一である。

また、同表には、次式により定義される洪水の非定常パラメータ α ¹⁴⁾が示されている。

$$\alpha = \frac{\Delta h}{T_d} \frac{1}{U_c} \quad (2)$$

ここで、 Δh は洪水ピーク時と洪水前の水位差、 T_d は洪水開始から水位ピークまでの時間を表す。 U_c は洪水前と洪水ピーク時における水深平均流速の平均値である。

(3) 解析方法

これらの降雨イベント時における底面せん断力 τ_t (=レイノルズ応力 $-\rho u'w'$) や底質巻上げフラックス P_k 等を求める。レイノルズ応力は、90秒間の各データから主流・鉛直方向の平均流速を求め、それぞれの変動成分 u' 、 w' の積を平均したものである。一方、巻上げフラックス P_k は、超音波反射強度と濁度の相関式を作成し (後述の図-6)、別途得られた濁度と浮遊土砂濃度 c の相関関係 ($c[\text{mg/l}] = 1.59 \times \text{濁度}[\text{FTU}]$ ¹⁵⁾) を用いて、浮遊土砂濃度 c の時系列データを作成する。その後は、レイノルズ応力と同様に、 c の平均値を求め、得られる時々刻々の変動成分 c' と鉛直方向の乱れ成分 w' の積の平均を取り、底質巻上げフラックス P_k を求める。

$$P_k = \overline{c'w'} \quad (3)$$

3. 結果と考察

(1) 超音波反射強度と濁度の相関関係

ADVを用いて巻上げフラックスを算出するためには、前述したように、ADVによる超音波反射強度計測値と光学式濁度計による濁度計測値のキャリブレーション曲線を推定する必要がある。図-6は両者の相関関係を示す。ここでは、3つの降雨イベント時の結果を対象とし、これらを色分けして示す。これを見ると、濁度最大値が100[FTU]と高くは無い条件ではあるが、超音波反射強度

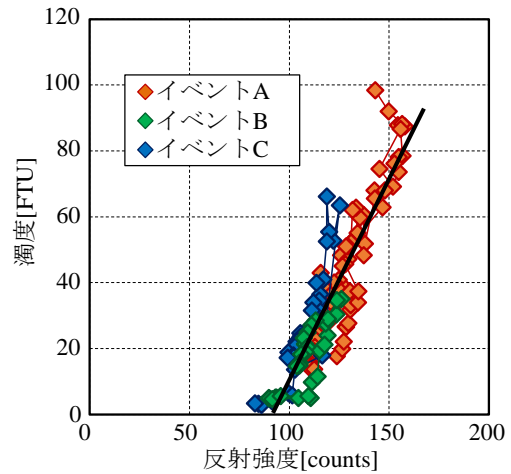


図-6 超音波反射強度と濁度の相関関係

と濁度には良好な相関関係が見られること、さらに、降雨イベント間でこの相関関係に大きな差異が生じていないことが分かる。3つの降雨イベントの全データに対して得られた近似式は、以下に示すとおりである。

$$Turb = 1.2037 * I - 109.42 \quad (r=0.89) \quad (4)$$

ここで $Turb$ は濁度 (単位: FTU)、 I は超音波反射強度 (単位: counts) である。これより相関係数 $r=0.89$ となり、超音波反射強度と濁度は概ね良好な相関性を有している。

(2) 出水時における流れと濁質環境の時間変化

出水時におけるレイノルズ応力 $-\rho u'w'$ や巻上げフラックス P_k の非定常変化を把握するために、3つの降雨イベント中で出水規模が最大であったイベントA及び相対的に出水規模の小さいイベントCにおける水位 h 、主流方向流速 u 、浮遊土砂濃度 c 、 $-\rho u'w'$ 、 P_k の時間変化を図-7に示す。また、時間雨量データ (千葉県柏市) も合わせて表示している。ここでの主流方向流速とレイノルズ応力、巻上げフラックスは ADV の計測値 (底面からの高さはイベントAでは0.36m、イベントCでは0.41m)、浮遊土砂濃度は光学式濁度計の計測値から換算したものである。まず、イベントAでは、水位が0.7m上昇し、水位ピークは2012/11/17 20時30分に現れた。流速は出水前は0.25m/sであったが、最大で0.90m/sまで上昇し、水位ピークよりも前に流速ピークが出現した (20時00分)。浮遊土砂濃度については、増水期に顕著に増加し、浮遊土砂濃度ピークは水位・流速ピークよりも前に現れ (18時40分)、非常に明確な濃度先行型であった¹⁶⁾。また、レイノルズ応力は増水期に急速に増加して多少変動し、減水期にも急激に減少していた。巻上げフラックスに関しても、流速とともに増大し、減水期に減少するという挙動を示した。このレイノルズ応力や巻上げフラックスのピーク時間は、流速や濁度などと異なり、明確にはなっていない。

一方、より小さい規模のイベントCでは、水位上昇量

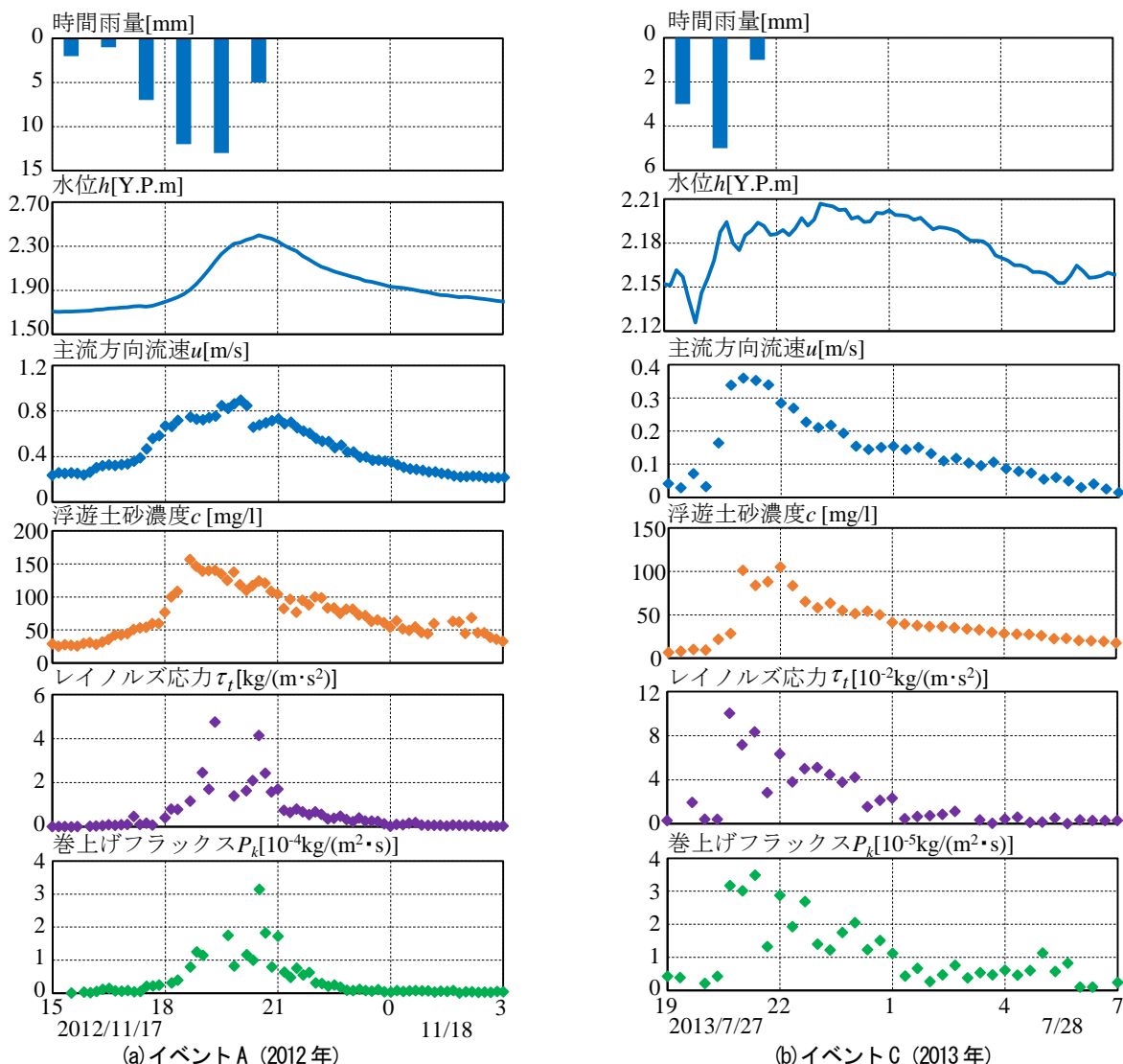


図-7 降雨イベント時における水位、主流方向流速、浮遊土砂濃度、レイノルズ応力、巻上げフラックスの時間変化

は小さいものの (0.08m) , 流速や浮遊土砂濃度等は明確に非定常変化していた. すなわち, 水位ピークの前に主流方向流速や浮遊土砂濃度のピークは現れた. また, レイノルズ応力や巻上げフラックスも増水期に大きくなり, これらのピークは流速や浮遊土砂濃度よりもやや早めに現れた. このように, 出水規模に関わらず流速や浮遊土砂濃度, レイノルズ応力, 巻上げフラックスの非定常変化が顕著であることが分かる.

(3) 出水時におけるヒステリシス

出水時に大きく変化している水位や流速, 乱流統計量の非定常性を調べるために, 水位 h と主流方向流速 u , レイノルズ応力 τ_t , 巻上げフラックス P_k の間のヒステリシスを図-8に示す. ここでは, 3つの降雨イベントについて, 増水期と減水期に色分けして表示している. これより, まず, 水位と主流方向流速に関しては, イベントAでは明確な右回りのループが見られる. 洪水規模が小さいイベントBやCにおいても, 右回りのループは見られるが, そのループ自体は非常に小さい (図面省略). これ

は, 表-1に示すように, イベントAの非定常パラメータは他のイベントの2倍以上になっており, イベントAでは非定常性の強い降雨イベントであったので, このように大きなループが現れた. 同様に, レイノルズ応力や巻上げフラックスについても, イベントAでは明確な右回りのループとなり, 増水期のほうが減水期よりも大きくなっていることが分かる. また, 非定常パラメータが小さい他の降雨イベントではこのような大きなループは見られない. このような出水時のヒステリシスは, 流速やレイノルズ応力に関しては, 増水期と減水期の水位勾配の違いにより生成されている¹⁴⁾. 巻上げフラックスに関しては, 増・減水期のレイノルズ応力の違いを反映すると共に, 後述する“易浮遊性堆積物”の差も影響している.

このように明確なヒステリシスが見られるイベントA ($\alpha = 1.8 \times 10^4$) においても, 実験結果では弱い非定常性と分類される¹⁴⁾. この弱い非定常性でも室内実験では見られないヒステリシスが現地観測では見られており¹⁸⁾, 室内と現地スケールの違いに着目した検討が必要である.

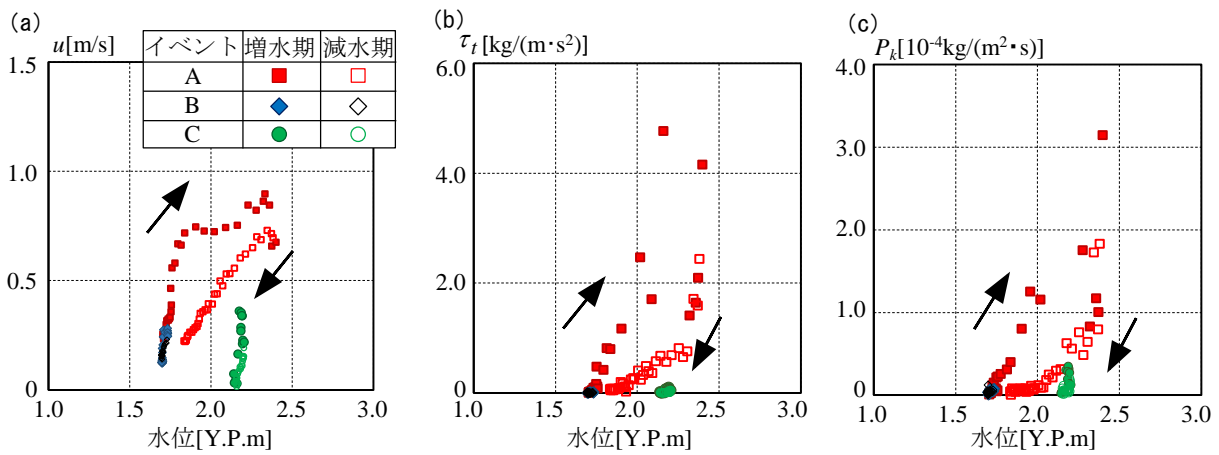


図-8 水位と主流方向流速(a), レイノルズ応力(b), 巻上げフラックス(c)のヒステリシス

(4) 乱れのエネルギースペクトル

出水中に大きく増減した乱流統計量を詳細に検討するために、主流方向流速 u と浮遊土砂濃度 c の乱れ成分 u' , c' に関するエネルギースペクトル密度を図-9に表示する。ここでは、洪水規模が最も大きかったイベントAの流速ピーク時(2012年11月17日20:00)の結果を例示している。まず、主流方向流速に関しては、低周波数領域にいくつかのピークを持ち(0.063, 0.125, 0.180Hz), そのピーク周波数の間隔は概ね倍数である。また、これよりも高周波数領域では、エネルギースペクトル密度は概ね $5/3$ 乗則に従って減少し、いわゆる慣性小領域が存在していることが分かる。これより、乱れ成分 u' に関しては典型的なカスケードダウンが生じている¹⁸⁾。一方、浮遊土砂濃度に関しては、低周波数領域においてピークがいくつか見られるが(0.063, 0.188, 0.266Hz), その間隔は必ずしも倍数とはならず、流速変動成分とは異なる。また、高周波数領域では流速と同じくエネルギースペクトル密度は減少するものの、その傾きは流速よりも緩やかであり、 -1 乗則に近く、興味深い結果が見られた。また、 u' , c' 共に、全体として、長周期成分が卓越しており、巻上げフラックスがより長い周期の渦により生成されているものと推察される。

(5) 底面せん断力と巻上げフラックスの相関関係

巻上げフラックスは底面せん断力(=レイノルズ応力)の関数として与えられることが多い。そこで、降雨イベント時における両者の相関関係をまとめたものを図-10に示す。ここでは、3つのイベント時を対象とし、増水期と減水期に色分けして表示している。また、前報において実施された巻上げ試験のうち、出水前(2006年11月17日)と出水後(同年11月21日)における結果も表示している。この間には総雨量60mmの降雨が発生し、出水前観測を行った時点のAPIは13.2mmであった。なお、巻上げ試験結果に関しては、元々、底面せん断力と巻上げフラックスのデータセットがあるが、図化の関係上、それら

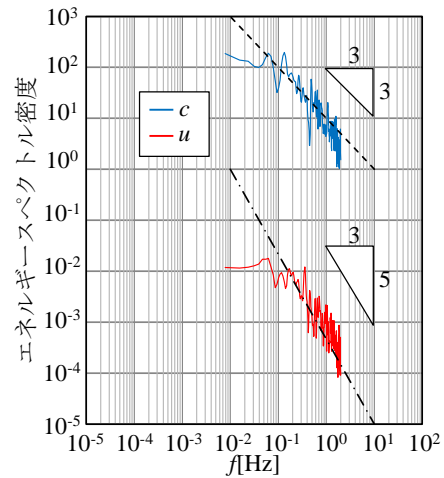


図-9 主流方向流速 u と浮遊土砂濃度 c に関する乱れのエネルギースペクトル密度(イベントA, 2012/11/17 20:00, 単位 c : (mg/L) \cdot s, u : m/s)

の実測値に適用された近似式の結果のみを表示している。まず、本観測結果としては、イベントAでは、データの多少のばらつきはあるものの、増水期の巻上げフラックスは減水期の値よりも概ね上回り、図-8と同じ右回りのループが確認される。この差は、底面せん断力が小さい時に顕著であり、同一の底面せん断力に対して巻上げフラックスは増水期と減水期で最大で6倍程度の差が生じている。一方、他の降雨イベントB, Cでは、このような明確なループは見られない。これより、図-8に見られたヒステリシスの出現と非定常性パラメータの関係は、巻上げフラックスと底面せん断力においても確認された。

これらの出水中の観測結果と前報の巻上げ試験結果を比べる。巻上げ試験における出水前の底面せん断力と巻上げフラックスの関係は、APIがほぼ一致するイベントAの増水期と減水期前半やイベントB全体の結果と類似し、出水後の結果はイベントAの減水期後半の結果と類似している。また、イベントCの結果は概ね出水前の巻上げ試験結果を上回る。出水前の河川に蓄積して容易に流送される堆積物(易浮遊性堆積物)は同一河川ならばAPIに依存するため⁸⁾, APIが同じ場合(イベントA, Bと出

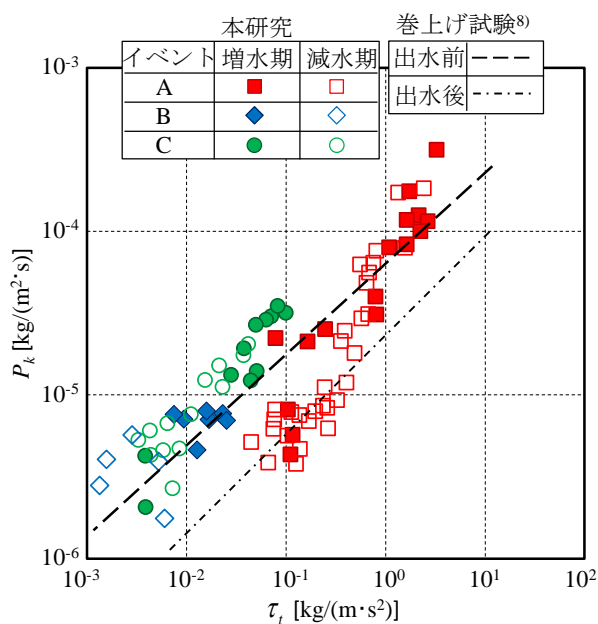


図10 卷上げフラックス P_k と底面せん断力 τ_b の相関関係

水前の卷上げ試験結果)は卷上げ特性は一致するものと考えられる。ただし、出水規模が小さいイベントBでは、出水中に易浮遊性堆積物が全て流されるわけではないので卷上げ特性は変化しないが、出水規模が大きいイベントAでは大部分の易浮遊性堆積物が出水中に流送されてしまうため、卷上げ特性が易浮遊性堆積物が十分ある出水前の状況から、易浮遊性堆積物がほとんどない出水後の状況へとシフトしており、本観測はその様子を捉えることに成功した。卷上げ特性が出水前から出水後にシフトしたものと考えられる。また、イベントCでは、イベントA、BよりもAPIが小さく易浮遊性堆積物がより多く溜まっていたため、同一の底面せん断力に対して卷上げフラックスが大きめに出了ものと考えられる。

4. 結論

超音波ドップラー流速計ADVを用いて、出水時大堀川において卷上げフラックスの非定常性や底面せん断力との関係を調べた。得られた主要な結論は次の通りである。

- 1) ADVの超音波反射強度と濁度の相関性は高く ($r=0.89$)、本観測範囲 (濁度100[FTU]以下) ではADV計測から濁度連続観測を精度良く行えることが確認された。
- 2) 出水時には、水位と流速や乱流統計量、浮遊土砂濃度などの非定常変化が見られ、これらのヒステリシスは洪水の非定常パラメータが大きいほど顕著であった。
- 3) 出水時における底面せん断力と卷上げフラックスの相関関係は、APIにより変化することが確認された。また、洪水規模が大きいと、易浮遊性堆積物が流送されて

しまうため、卷上げ特性が易浮遊性堆積物が十分ある出水前の状況から、易浮遊性堆積物がほとんどない出水後の状況へとシフトすることを捉えることに成功した。

謝辞：現地調査に関して、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。ここに記して深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 吉川秀雄：流砂の水理学，丸善，pp.1-543，1985.
- 2) 国松孝男，村岡浩爾：河川汚濁のモデル解析，技報堂出版，pp.1-266，1989.
- 3) 天野邦彦，安田佳哉，鈴木宏幸：浅い貯水池における表層底泥の巻き上げによる水質変化のモデリング，水工学論文集，Vol.46，pp.1085-1090，2002.
- 4) 関智弥，福島武彦，今井章雄，松重一夫：霞ヶ浦の濁度上昇と底泥巻き上げ現象，土木学会論文集，No.811，pp.149-161，2006.
- 5) 楠田哲也，海田輝之，栗谷陽一，石原達弘：底泥の巻き上げと沈降に関する基礎的研究II，Vol.18，衛生工学研究討論会講演論文集，pp.160-165，1982.
- 6) 大坪国順，村岡浩爾：底泥の物性および限界掃流力に関する実験的研究，土木学会論文集，No.363，pp.225-234，1985.
- 7) 海田輝之，楠田哲也，栗原陽一：柔らかい底泥の上げ過程に関する研究，土木学会論文集，No.393/II-9，pp.33-37，1988.
- 8) 稲垣貴文，二瓶泰雄：河川・湖沼における底質からのSS及び懸濁態窒素・リン卷上げフラックス，水工学論文集，Vol.55，pp.1321-1326，2011.
- 9) 川西澄，余越正一郎，小谷英史：超音波ドップラー流速計を用いた感潮域の流動と懸濁物質濃度の現地観測，海岸工学論文集，Vol.43，No.2，pp.1086-1090，1996.
- 10) 川西澄，稲田景：超音波流速計による浮遊粒子の粒径を考慮した浮遊砂濃度の測定法，海岸工学論文集，Vol.53，pp.1401-1405，2006.
- 11) 中川康之，吉田秀樹，田中克己，大波多昌志：底泥の巻き上げと底面境界層内の乱れの現地観測，海岸工学論文集，Vol.54，pp.446-450，2007.
- 12) 中川康之，有路隆一，松坂省一，諸星一信，八木宏，瀧岡和夫，田中晋：東京湾多摩川河口沖における底泥の巻き上げに関する現地観測，海岸工学論文集，Vol.55，pp.516-520，2008.
- 13) 水村和正：水圏水文学，山海堂出版，pp.82-88，1998.
- 14) Nezu, I., Kadota, A., Nakagawa, H.: Turbulent structure in unsteady depth-varying open-channel flows, *J. Hydraul. Eng.*, Vol.123, No.9, pp.752-763, 1997.
- 15) 二瓶泰雄，大関雅丈，福地正宗：河川下流域の土砂動態に着目した富栄養化湖沼の流入負荷特性に関する検討，水工学論文集，Vol.51，pp.1111-1116，2007.
- 16) Williams, G. P.: Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers, *J. Hydrology*, Vol.111, pp.89-106, 1989.
- 17) 酒井雄弘，二瓶泰雄：ADCPを用いた中小河川の流量計測法に関する検討，水工学論文集，Vol.50，pp.721-726，2006.
- 18) 日野幹雄：流体力学，朝倉書店，376p.，1992.

(2013. 9. 30 受付)