

# 河川・湖沼における底質からの SS 及び 懸濁態窒素・リン巻上げフラックス

## PICK-UP RATE OF SUSPENDED SOLIDS AND PARTICULATE COMPONENTS OF NITROGEN AND PHOSPHORUS FROM BED IN RIVER AND LAKE

稲垣貴文<sup>1</sup>・二瓶泰雄<sup>2</sup>

Takafumi INAGAKI and Yasuo NIHEI

<sup>1</sup>非会員 修 (工) 国土交通省関東運輸局鉄道部 (〒231-8433 横浜市中区北仲通5-57)

<sup>2</sup>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)

We measured in-situ pick-up rates of sediment and particulate components of nitrogen (P-N) and phosphorus (P-P) in an urban river and a lake with a new device we developed. Field sites for this study were Lake Teganuma and its influent river, Oohori River. The measured results show that the temporal variations of pick-up rates of P-N, P-P and sediment in Oohori River were appreciably found and mainly caused by hydrologic conditions and sedimentation environments. Pick-up rates of P-N, P-P and sediment in the river and lake increase with flow velocity. Note that the pick-up rates of P-N and P-P are appropriately modeled with power functions of bottom shear stress similar to that of sediment.

**Key Words :** pick-up rate, nutrients, urban river, bed material, non-point source

### 1. 序論

富栄養化湖沼における水質汚濁化の主要因としては、流域からの過剰な汚濁物質の流入 (外部負荷) と湖沼内の内部生産や底質からの窒素・リン供給 (内部負荷) が挙げられる<sup>1)</sup>。このうち外部負荷は、下水道整備等の進展により点源負荷が削減傾向となり、結果として、近年、有効な削減策が確立していない面源負荷がクローズアップされている<sup>2)~4)</sup>。この面源負荷は点源負荷の余集合と定義され<sup>3)</sup>、主に市街地や農地、山林、河道内等に面的に広く分布する堆積物が降雨時に流出されるものから構成される。降雨時には河川を經由して湖沼へ大量の汚濁物質が流入しており<sup>5)</sup>、その一部は河床堆積物の巻上げ現象に起因しているものと考えられる<sup>6)</sup>。一方、内部負荷として挙げられる底質からの窒素・リンフラックスには、「静的」な水理条件下の溶出過程に加えて、流れや風浪等による「動的」な水理条件下での底質巻上げ過程から構成される<sup>7)・8)</sup>。このように底質の巻上げフラックスは、外部・内部負荷を評価する上で極めて重要である。

底質巻上げ現象に関する研究事例としては、従来より、底泥を敷き詰めた開水路流れの室内実験がベースとして行われている<sup>9)・10)</sup>。一方、現地調査としては、最新の計測機器による流れと懸濁粒子濃度の同時計測が実施されつつあるが<sup>11)・12)</sup>、現地試験事例はその困難さゆえに多くはない。さらに、調査対象のほとんどは SS (浮遊土砂濃度) のみであり、富栄養化に直接影響する窒素 N、

リン P については扱われていない。

本研究では、このような状況を鑑みて、著者らが作成した現地直接計測が可能な巻上げ装置<sup>13)</sup>を用いた現地調査に基づいて、河川や湖沼における底質からの SS・N・P 巻上げ特性の時間的・空間的変動特性を把握し、その変動要因の一端を明らかにすることを試みる。現地調査サイトは、富栄養化湖沼として有名な手賀沼とその主要流入河川である大堀川とする。ここでは、巻上げ装置を用いて、様々な流速条件下における底質浮遊状態を再現し、得られたサンプル水の水質分析を介して、底質巻上げに伴う SS, P-N (懸濁態窒素), P-P (懸濁態リン) フラックスを求める。それらの結果に基づいて、1) 河川における巻上げフラックスの非定常変化の実態とその要因、2) 底面せん断力と巻上げフラックスの関係、について検討した結果を示す。

### 2. 現地調査の概要

#### (1) 調査サイト

調査サイトは、**図-1**に示すように、手賀沼とその流入河川 (大堀川) である。手賀沼では、高度経済成長期以降、年平均 COD が 20mg/L を越える著しい富栄養化状態が長年続いた<sup>14)</sup>。しかしながら、H13 年からの北千葉導水事業の本格稼働により、手賀沼は水質汚濁度全国ワースト 1 から抜け出したものの、未だに年平均 COD は約

8mg/Lと高濃度レベルで横ばいの経年変化を示している。手賀沼への主要流入河川は大堀川と大津川である。そのうち大堀川は、流路長12.9km、流域面積が31.0km<sup>2</sup>、市街地率は75%であり、典型的な都市河川である<sup>15)</sup>。

## (2) 調査内容

大堀川と手賀沼における底質巻上げ特性を多角的に把握するために、①現地直接計測型装置を用いた巻上げ調査、②底質調査、③土砂沈降量調査、④流量・濁度の自動連続調査、という4種類の現地調査を行った。

### a) 巻上げ調査

まず、①の巻上げ調査の地点としては、**図-1**に示すように、大堀川ではStn.O-1（河口から1.05km）、手賀沼内では大堀川河口付近のStn.T-1と大津川河口付近のStn.T-2の計3地点である。ここでは、**図-2**に示すような2重の円筒容器からなる現地直接計測型巻上げ装置を河川（もしくは湖沼）の底面に突き立て、2重の円筒間の隙間にある一定速度で攪拌し、様々な流速条件下の底質浮遊状態を再現する。巻上げ装置としては、相対的に浅い大堀川と深い手賀沼に合わせて2種類のサイズのものを作成した（詳細は**図-2**参照）。円筒間の攪拌速度は、二瓶ら<sup>13)</sup>を参考に、大堀川では0.13~1.34m/s、手賀沼では0.02~0.97m/sの範囲とし、各々8種類の流速条件を設定した。調査期間・回数としては、巻上げ特性の非定常性を把握することを目的とした調査では、Stn.O-1のみにて、2006/6/22~8/4（計17回）、同年10/17~12/8（計21回）とした。また、巻上げ特性の空間変化を把握するために、全3地点において、2007年夏期に3回、2008年夏期に4回の調査を行った。

具体的な作業手順としては、ある一定速度下において2分間にわたり攪拌し、手動ポンプ（SB-20、工進株式会社、吐出口径20mm）により0.8L採水する。二瓶ら<sup>13)</sup>と同様に、ある攪拌速度における採水が終了したら、順次攪拌速度を増加させて試験を行っている。採水高さは河川では底面上15cm、湖沼では底面上30cmとしている。得られたサンプル水について、濁度、SS、T-N、T-P、D-N、D-P、硝酸態窒素・亜硝酸態窒素（NO<sub>2</sub>-N+NO<sub>3</sub>-N）、リン酸態リン（PO<sub>4</sub>-P）、粒径分布を測定する（TとDは全成分と溶存態成分を各々示す）。また、全成分と溶存態成分の差から懸濁態成分（P-N、P-P）を算出する。なお、毎回の調査において分析するのは濁度のみであり、数回に一回程度の間隔で残りの水質項目も計測している。各項目の計測には、濁度には多項目水質計（WQC-24、東亜ディーケーケー株式会社）を用い、SS分析はガラス繊維ろ紙法により行う。また、窒素NとリンPの分析にはオートアナライザー（swAAI、BLTEC株式会社）を、粒径分析にはレーザー回折式粒度分布測定装置（SALD-3100、株式会社島津製作所製）をそれぞれを用いる。

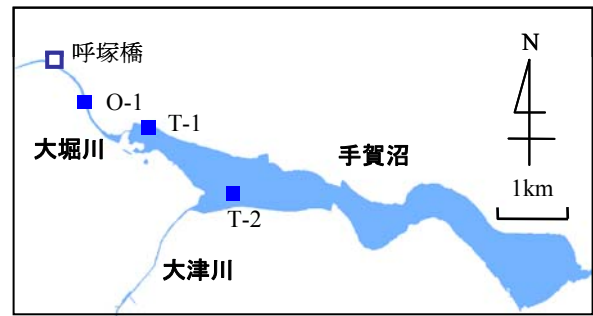


図-1 調査地点

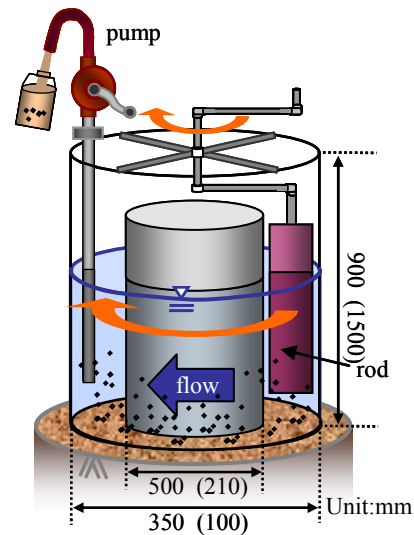


図-2 現地直接計測型巻上げ装置（カッコ内外は湖沼用と河川用のサイズを示す）

上記の試験により得られた、ある高さにおける水質濃度から底質巻上げフラックス $P_k$ を算定する際には、二瓶ら<sup>13)</sup>の方法に従う。ここでは対象物質をSSとP-N、P-Pという懸濁態物質のみとし、河床近傍における物質 $i$ の巻上げフラックス $P_{ki}$ と沈降フラックスの局所平衡を仮定した次式を用いる。

$$P_k = w_0 C_a \quad (1)$$

ここで、 $w_0$ は沈降速度、 $C_a$ は基準点高さ（ $=0.05h$ 、 $h$ :水深）における対象物質 $i$ の濃度である。沈降速度 $w_0$ は、幅広い粒子レイノルズ数に適用可能な抵抗係数<sup>16)</sup>を用い、浮遊土砂の中央粒径から算定する。また、基準点濃度 $C_a$ は、懸濁態物質濃度の鉛直分布がRouse分布<sup>17)</sup>に従うものとして、採水高さの水質濃度から変換して算定する。

### b) 他の関連調査

巻上げ調査と同時に進められた②の底質調査では、直径4cmの亚克力パイプを用いてコアサンプルを採取し、底質中のN・P含有量や粒径分布を計測した。また、③の土砂沈降量調査としては、セディメントトラップ（口径2cm）を河床上20cmに設置し、一定期間毎に交換することにより、水中から沈降した懸濁粒子を捕集した。調

査地点は Stn.O-1 のみであり、調査期間は 2006/10/17~12/8 とした。得られたサンプルに対して乾燥質量と粒径分布の分析を行う。さらに、大堀川の基本的な流況や土砂沈降特性に重要な濁度環境を把握するために、④の流量・濁度連続計測を Stn.O-1 より 500m 上流の呼塚橋において行った。流量計測のために小型水位計 (Diver, Eijkelkamp 社製) を設置し、独自の  $H-Q$  式により流量に換算している。また濁度計測にはワイパー付き光学式濁度計 (Compact-CLW, JFE アレック(株)製) を設置した。水位と濁度ともに、計測時間間隔は 10 分とした。

### 3. 結果と考察

#### (1) 調査生データの基本的特徴

本巻上げ試験における生データの特徴を見るために、河川 (Stn.O-1) における巻上げ試験時の SS, P-N, P-P と攪拌速度の相関図を図-3 に示す。ここでは、2006/10/17 から 12/8 までのデータを対象とし、生データ及び各攪拌速度における平均値を図示する。この SS は、今回の試験で得られた濁度と SS の相関関係を用いて濁度から変換されたものである。また、降雨イベント前後の代表的な生データも掲載している。なお、攪拌速度 0 の結果は、本試験を開始する前の河川水の各水質濃度に対応している。

これより、攪拌速度の増加に伴って SS と P-N, P-P は大きく増加すると共に、同一流速においても調査日毎のばらつきが大きく見られ、大流速ほどそのばらつきは顕著となっている。このように、同一地点においても、巻上げフラックスが時間的に大きく変化する様子が SS のみならず、P-N や P-P に共通して確認される。特に、降雨イベント前後の水質濃度を比較したところ、水質濃度は降雨後に大きく減少しており、巻上げフラックスの時間変化の一部は降雨イベントと密接に関係していることが分かる。また、巻上げ装置内を攪拌した時の各水質濃度は、河川水中の水質濃度 (攪拌速度 0 の結果) よりも大きく増加している。その比率は SS では 6~35 倍、P-N では 5~56 倍、P-P では 15~76 倍となっており、増加率は P-N や P-P の方が相対的に顕著である。

#### (2) 巻上げフラックスの非定常変化

懸濁態物質の巻上げフラックスの時間変動特性の実態や要因を明らかにするために、図-3 と同じ地点 (Stn.O-1) と期間における SS・P-N・P-P の巻上げフラックスの時間変化を図-4 に表示する。ここでは、比較のために、日雨量、流量、SS、累積土砂沈降量の時間変化も合わせて示している。なお、巻上げフラックスに関しては、全攪拌速度における巻上げフラックスの平均値  $\overline{P_{kSS}}$ ,  $\overline{P_{kPN}}$ ,  $\overline{P_{kPP}}$  を採用している。また SS には光学式濁度計により得られた濁度から変換されたものを採用している。累積

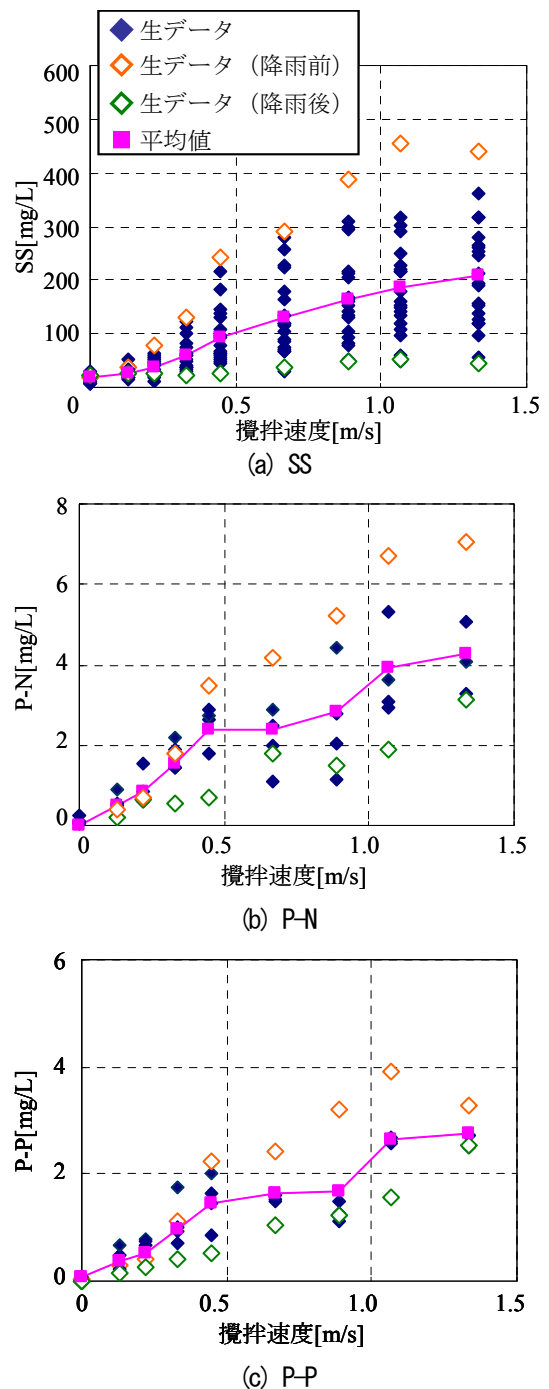


図-3 巻上げ試験時における攪拌速度と各水質濃度の関係 (Stn. O-1)

土砂沈降量は、セディメントトラップで計測された土砂沈降量の積算値であり、降雨イベント直後には 0 としている。これより、この期間中には、三つの降雨イベント (10/23~25, 11/19~20, 26~27) が発生しており、流量や SS が大きく増減している。このような降雨イベントと連動して、SS 巻上げフラックスは時間変化しており、降雨直後には大きく減少し、その後の無降雨期間には緩やかに増加している。P-N・P-P 巻上げフラックスはデータ数が多くないので SS ほど明確ではないものの、概ね類似した時間変動パターンが生じている。

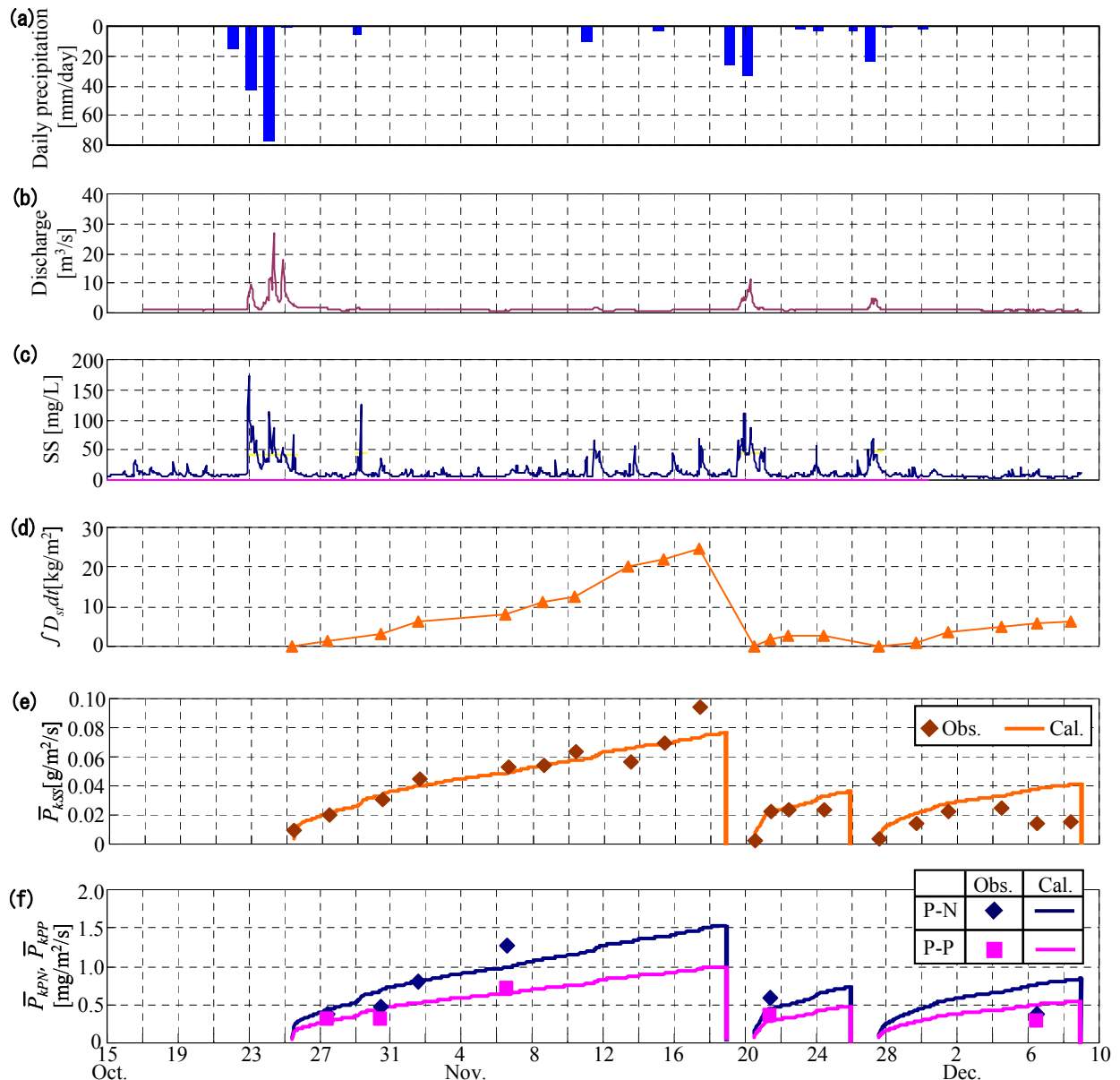


図-4 河川 (Stn. 0-1) における日雨量(a)と流量(b), SS(c), 累積土砂沈降フラックス(d), SS 卷上げフラックス(e), P-N・P-P 卷上げフラックス(f)の時系列変化 (2006/10/15~12/10)

また、SS・P-N・P-P 卷上げフラックスの時間変動特性は累積土砂沈降量  $\int D_{st} dt$  ( $D_{st}$ : 土砂沈降フラックス) と大局的には一致している。これより、水中から沈降して底面に堆積した土砂の一部は巻き上がり易い状態 (易浮遊性堆積物<sup>13)</sup>) となり、結果として卷上げフラックスも増加している。このような関係性は、屋根面堆積負荷と大気中から屋根面へのSPM沈着フラックスと極めて類似している<sup>18)</sup>。そこでSS 卷上げフラックスの平均値  $\bar{P}_{kSS}$  と累積土砂沈降量  $\int D_{st} dt$  の相関関係を調べたところ、図-5 に示すように、両者には概ね良好な相関性がある ( $R^2=0.85$ )。この土砂沈降量自体は、セディメントトラップを用いなくても、河川水中のSSと土粒子の沈降速度  $w_0$  の積から算出することは可能であり、図-4(c)に示す濁度から変換されたSSに土粒子沈降速度を掛けた土砂沈

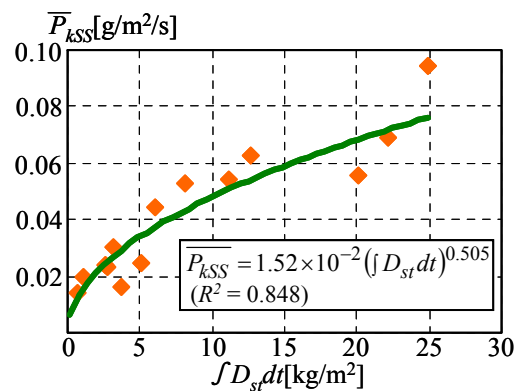


図-5 SS 卷上げフラックスの平均値  $\bar{P}_{kSS}$  と累積土砂沈降量  $\int D_{st} dt$  の相関関係 (Stn. 0-1)

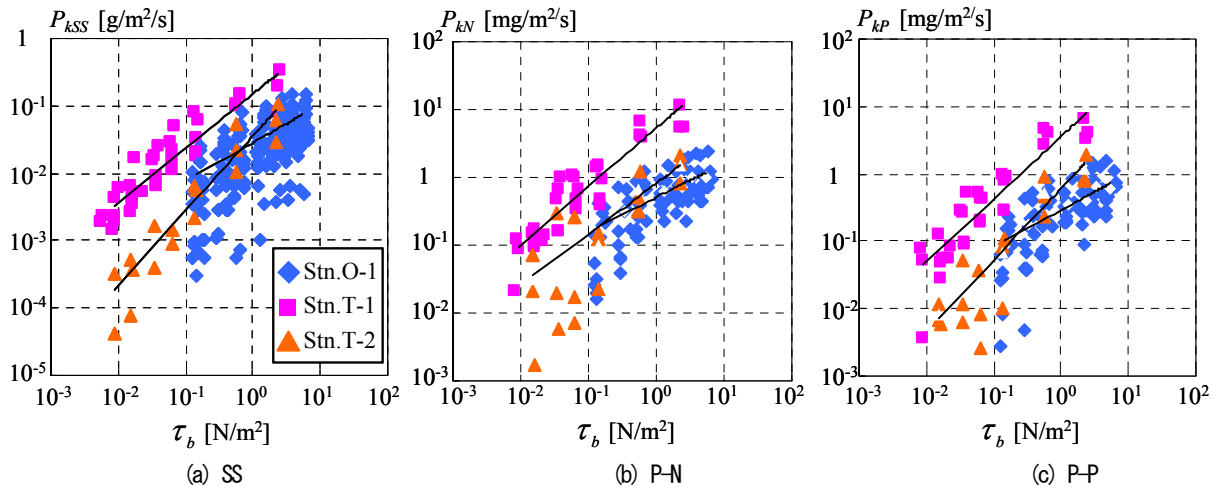


図6 巻上げフラックスと底面せん断力の関係（点は生データ，実線は各データに対するべき関数の近似式を各々示す）

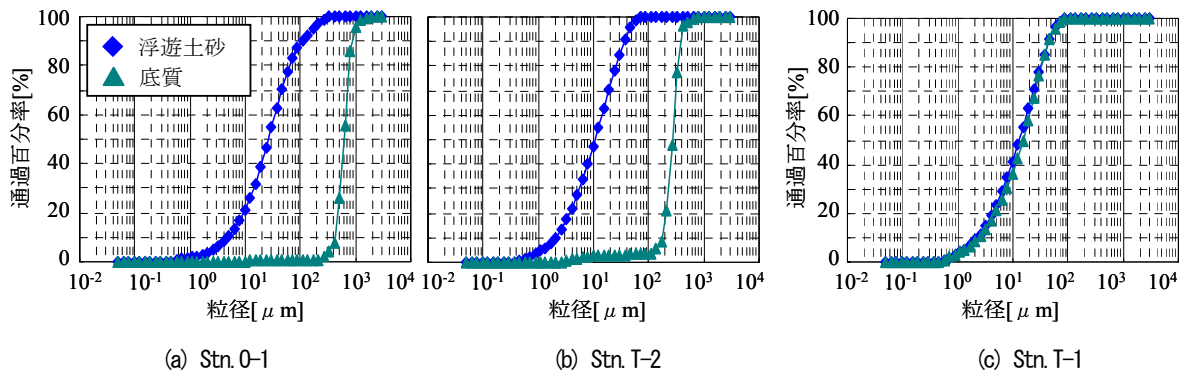


図7 巻上げ試験時における浮遊土砂（攪拌速度 0.45m/s）と底質の粒径分布

降フラックスの累積値  $\int D_{SS} dt$  は、セディメントトラップから得られた累積土砂沈降水量  $\int D_{st} dt$  と良好な相関関係が得られたことが確認されている ( $R^2=0.98$ , 図面省略)。

以上より、時々刻々の SS データから土砂沈降フラックスの時系列データを取得し、その累積値と図-5 の関係式等より時々刻々の SS 巻上げフラックスを推定することが可能となる。その結果を図-4(e) の実線で表示する。ここでも、降雨イベント直後において累積土砂沈降水量を 0 として SS 巻上げフラックスを推定している。これより、SS 巻上げフラックスの推定結果は観測値と概ね一致していることが分かる。このように、SS 巻上げフラックスの非定常性は降雨イベントや無降雨期間中の土砂沈降水量と密接に関与していること、さらに、それらの時間変動パターンを SS データから推定し得ることが明らかとなった。

また、同様なことを P-N・P-P 巻上げフラックスについても行うことは可能であるが、P-N・P-P の巻上げフラックスデータは SS と比べて少なく、図-5 と同じ相関式を作成することが難しい。そこで、巻上げ試験時における SS と P-N, P-P の相関関係を検討したところ、以下のような相関式が得られた。

$$P-N = 0.0201 \times SS \quad (R^2=0.807) \quad (2a)$$

$$P-P = 0.0131 \times SS \quad (R^2=0.887) \quad (2b)$$

ここで、各水質濃度の単位は全て mg/L である。これらの

関係式と SS 巻上げフラックス推定値を掛けることにより、時々刻々の P-N・P-P 巻上げフラックスの推定値が得られ、その結果を図-4(f) の実線で示す。SS と同様に、P-N・P-P 巻上げフラックスの推定値と観測値は良好に一致しており、ここで示した推定法の有用性が検証された。

### (3) 巻上げフラックスと底面せん断力の関係

各水質濃度の巻上げフラックスと底面せん断力  $\tau_b$  の関係性を把握するために、河川 (Stn.O-1) と湖沼 (Stns.T-1, T-2) の全データを図-6 に示す。SS 巻上げフラックスと底面せん断力の関係には、べき関数 ( $P_k = a\tau_b^\eta$ ,  $a, \eta$ : 係数) が近似式の一つに用いられることから、調査データに対するべき関数の近似式を適用した結果も図中の実線で表示している。これより、同一の底面せん断力  $\tau_b$  の場合、Stn.O-1 と Stn.T-2 における巻上げフラックスはどの項目も概ね同程度であるが、Stn.T-1 の結果は他の二地点の結果を全般的に上回っている。また、前節で示したように同一地点においても巻上げフラックスの非定常変化が顕著であるためデータのばらつきは大きいものの、調査データへの近似式の適用性は概ね良好である。これより、SS のみならず、P-N や P-P の巻上げフラックスのモデル化に際しても、底面せん断力を変数とするべき関数を適用し得ることが分かる。また、係数  $\eta$  は、どの項目

においても概ね0.6~1.1の範囲になっている。

前述したように、SS・P-N・P-P巻上げフラックスの大きさは調査地点により明確に異なる。その要因を検討するために、巻上げ試験時における浮遊土砂と底質の粒径分布を図-7に示す。この浮遊土砂の結果は攪拌速度が0.45m/sの時のものである。これより、巻上げ試験時の浮遊土砂には、全地点において、100 $\mu$ m以下の微細土砂が大部分を占めており、それらの中央粒径は10-20 $\mu$ m程度となっている。一方、底質の粒径分布に着目すると、Stns.O-1とT-2における底質粒径は、浮遊土砂と異なり、主として100 $\mu$ m以上から構成されており、その中央粒径は200~500 $\mu$ mと浮遊土砂と比べて1オーダーも大きい。それに対して、Stn.T-1における底質と浮遊土砂の粒径分布は概ね一致しており、他の地点とは底質中の微細土砂の割合が極めて高い。以上より、底質中の微細土砂の割合が少ないStns.O-1やStn.T-2では浮遊し易い微細土砂が全粒径の中から選択的に巻き上げられるのに対して、底質の大部分が微細土砂で占められるStn.T-1では多くの浮遊し易い微細土砂が大量に巻き上げられ、結果として地点間の巻上げ特性の違いを生んだものと考えられる。

#### 4. 結論

現地直接計測が可能な巻上げ装置を用いて、手賀沼と主要河川(大堀川)を対象として、従来のSSのみならず、懸濁態窒素・リンの巻上げフラックス調査を行い、巻上げフラックスの非定常性や底面せん断力との関係を検討した。得られた主要な結論は以下の通りである。

- 1) 河川のSS・P-N・P-P巻上げフラックスは、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、という非定常変化を示すことが明らかとなった。
- 2) 巻上げフラックスの時間変動パターンは土砂沈降量の累積値と概ね類似し、両者の間には良好な相関関係が得られた。この結果より、濁度の自動計測データから累積土砂沈降量を算定し、時々刻々のSS・P-N・P-P巻上げフラックスを精度良く推定することが可能となった。
- 3) 巻上げフラックスと底面せん断力の関係を大堀川のStn.O-1と手賀沼のStns.T-1、T-2で比較した結果、Stn.O-1とStn.T-2では類似した結果となったが、Stn.T-1における巻上げフラックスは他の二地点よりも大きい、という巻上げフラックスの空間的な違いが見られた。その要因としては、底質中の微細土砂の割合が少ないStn.O-1やStn.T-2では浮遊し易い微細土砂が少なく全粒径の中から選択的に巻き上げられるのに対して、大部分の底質が微細土砂で占められるStn.T-1では、多くの浮遊し易い微細土砂が大量に巻き上げられたためであると考えられる。

なお、本論文では、Rouse分布を用いて懸濁態窒素・リ

ンの巻上げフラックスを推定しているが、より精度を向上させるには底面近傍における懸濁態窒素・リンを直接計測する必要があり、今後の課題とする。

**謝辞：**現地調査及びデータ解析に対して、東京理科大学理工学部土木工学科水理研究室学生諸氏、特に、水口陽介氏(現戸田建設株)、福地正宗氏(現株不動テトラ)相場清志氏(現前田建設工業株)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) 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.
- 2) 和田彦彦: ノンポイント汚染源のモデル解析, 技報堂出版, pp.1-214, 1990.
- 3) 山田淳: 面源負荷—その現状と課題—, 環境技術, Vol.29, No.7, pp.496-501, 2000.
- 4) 古米弘明: 都市域の雨天時汚濁負荷流出解析の現状と課題, 水環境学会誌, Vol.25, No.9, pp.524-528, 2002.
- 5) 海老瀬潜一: 汚濁物質の降雨時流出特性と流出負荷量, 水質汚濁研究, Vol.8, No.8, pp.31-36, 1985.
- 6) 浮田正夫, 関根雅彦: 河川汚濁のモデル解析, 技報堂出版, pp.109-116, 1989.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 楠田哲也, 海田輝之, 粟谷陽一, 石原達弘: 底泥の巻き上げと沈降に関する基礎的研究II, 衛生工学研究討論会講演論文集, Vol.18, pp.160-165, 1982.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 中川康之: 東京湾奥部での底泥巻き上げとその粒度分布特性について, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 1046-1050, 2002.
- 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.
- 14) (社)日本水環境学会編: 日本の水環境3 関東・信越編, 技報堂出版, pp.153-166, 2000.
- 15) 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, 土木学会水工学論文集, Vol.49, No.2, pp.1501-1506, 2005.
- 16) Nadaoka, K., Nihei, Y. and Yagi, H.: Grid-Averaged Lagrangian LES Model for Multiphase Turbulent Flow, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol.25, pp.1619-1643, 1999.
- 17) Rouse, H.: Modern conceptions of the mechanics of turbulence, *Trans. ASCE*, pp. 463-543, 1937.
- 18) 吉田拓司, 二瓶泰雄: 屋根面堆積負荷に関する非定常原単位モデルの提案, 水工学論文集, Vol.52, pp.271-276, 2008.

(2010.9.30 受付)