

都市河川における易浮遊性堆積物環境の検討

STUDY ON EASILY SUSPENDED-DEPOSIT ENVIRONMENTS IN AN URBAN RIVER

二瓶泰雄¹・山崎裕介²・西村司³・丸山透⁴

Yasuo NIHEI, Yusuke YAMASAKI, Tsukasa NISHIMURA and Toru MARUYAMA

¹正会員 博(工) 東京理科大学講師 理工学部土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)²学生員 修(工) 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻博士課程 (同上)³正会員 工博 東京理科大学教授 理工学部土木工学科 (同上)⁴非会員 学(工) 東京理科大学 理工学部土木工学科 元学部生

One of non-point sources in the watershed of urban rivers is a river-bed deposit which may easily suspend as a river-flow velocity increases, referred to here as an easily suspended deposit (ESD). To evaluate ESD environments in an urban river, we conducted field measurements in Oohori River with a new device which can easily measure a pick-up rate of the ESD under various flow conditions. The observed data shows that the temporal and spatial variations of the ESD environments are caused due to hydrologic events and changes of flow rate from North-Chiba water conveyance channel. When the pick-up rate P_k is modeled as a power law dependence on bottom stress τ_b , $P_k = \alpha \tau_b^\eta$, the measured results suggest that the coefficients, α and η , also vary appreciably in time and space.

Key Words: urban river, easily suspended deposit, pick-up rate, non-point source

1. 序論

都市河川における水質環境保全・管理を行っていくためには、特定汚染源や非特定汚染源から構成される汚濁負荷発生量やその輸送過程を定量的に評価・検討していくことが重要となる。このうち、非特定汚染源からの汚濁負荷は、主として、市街地や農地、山林、下水管渠、雨水排水路、河川等における汚泥堆積物が降雨時に流送されることにより発生する^{1), 2)}。このような非特定汚染源としての汚泥堆積物に関しては、これまで数多くのモニタリング研究が存在するものの、場所的・地域毎にデータのばらつきが大きく、非特定汚染源としての堆積物環境の実態については不明な点が多い。特に、河川内では、流速の増加に伴って巻き上がる堆積物（以下、易浮遊性堆積物と呼ぶ）が降雨時の汚濁負荷量に直接的な影響を与えていると考えられているものの^{3), 4)}、都市河川における易浮遊性堆積物の巻上げ量と河川流速との関係性やそれらの時間的・空間的変化の実態に対する知見は皆無である。

そこで本研究では、易浮遊性堆積物量を現地で直接計測可能な試験装置（以下、巻上げ装置と呼ぶ）を作成し、それを用いて都市河川内における易浮遊性堆積物環境の実態を明らかにすることを試みる。ここでは観測対象地として、水質汚濁化が著しい手賀沼へ流入する都市河川

の一つである大堀川⁴⁾とする。この河川内において巻上げ装置を用いて易浮遊性堆積物量調査を行い、様々な流速条件下における易浮遊性堆積物の巻上げフラックスやそれらの時空間変動特性について検討する。

2. 巻上げ装置を用いた易浮遊性堆積物量の調査法

(1) 巻上げ装置の概要

上述した易浮遊性堆積物に関する既存の研究例として、浮田・関根³⁾は、直径 30cm の塩化ビニール円筒を河床に押しつけて立て、円筒内部の河川水を 1 秒間に 1 回程度の強さで攪拌して浮遊する懸濁物質（ここでは易掃流性堆積物と呼ばれている）を調査している。しかしながら、この方法では、円筒内の流速が、円筒中心部では小さく、外側では大きくなり、円筒内において流速差が生じてしまうこととなる。したがって、このような方法では、河川流速と易浮遊性堆積物の巻上げフラックスとの相関関係を定量化することは原理的に難しいものと考えられる。

そこで本研究では、易浮遊性堆積物量の巻上げフラックスの流速依存性を、現地河川で簡易的に直接計測することが可能な巻上げ装置を作成することを試みた。その巻上げ装置の概略図を図-1に示す。この装置では、大小 2 つの円筒を同心円状に配置し、二つの円筒のすき間

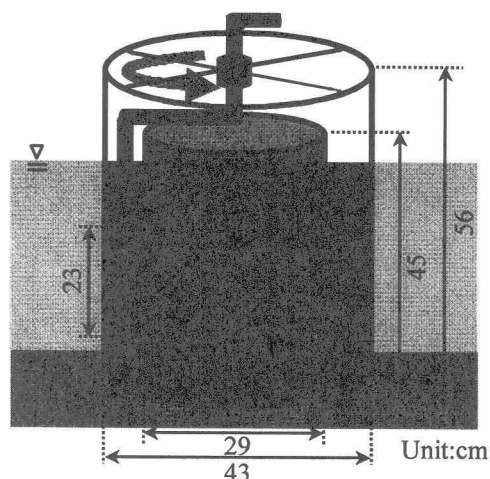


図-1 巻上げ試験装置の概略

(約 7cm) を攪拌できるようにしている。このように攪拌する領域を狭めることにより、前述した一つの円筒のみを用いる場合³⁾と異なり、攪拌領域の流速を一様化することが可能となる。この攪拌領域では任意の流速を発生させることが可能であるので、洪水時に生じるような高い流速レベルの条件を含めて、易浮遊性堆積物の巻上げ量の流速依存性を簡易的に計測することが実現可能となる。なお、本装置における攪拌作業は、現地での作業性を考慮して、手動により行う。

(2) 試験方法及び調査期間・地点

現地河川において巻上げ装置を用いて行う試験方法としては、次の3つの手順に従っている。

- ① 所定の河床位置に巻上げ装置を設置する。
- ② 30秒間にわたり所定の速度で円筒間を攪拌する。
- ③ 攪拌終了後10～40秒にわたり水面下約12cmの高さにおける濁度を計測する。

濁度測定には、多項目水質計(W-22P, HORIBA(株)製)を用いる。濁度計を巻上げ装置に常設していないために、この濁度測定は攪拌終了後のみに行われており、平衡状態と仮定される攪拌中の濁度を得るために、後述するような濁度の時間補正を行う必要がある。また、円筒内の攪拌速度は、非降雨時及び降雨時における流速条件を考慮して、0.32, 0.43, 0.64, 0.85, 1.28m/sという5種類とする。なお、巻上げ試験中に装置内側で巻き上げられた土砂が地中を通して装置外側へ流出しないように、装置先端部約5cmを底面に埋めて試験を行う。

この巻上げ装置を用いて、手賀沼流入河川の一つである大堀川における上流部(駒木橋)、中流部(昭和橋)、下流部(呼塚橋)の計3地点(図-2)において巻上げ調査を実施した。観測期間は2002年7月1日から7月26日であり、1～5日間隔で計測を行っており、特に降雨前後には時間的に密に実施した。なお、巻上げ試験は、非降雨時において実施しているので、計測中の巻上げ装置

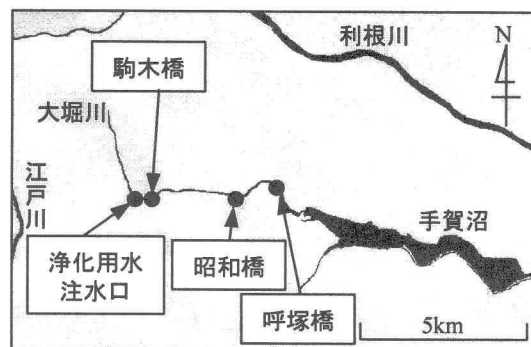


図-2 観測地点の配置図

内の水深は、概ね0.2～0.4mであった。

この巻上げ観測と同期する形で、大堀川における水環境の連続調査及び底質採取を行った。水環境調査に関しては、前述した大堀川の上流部(駒木橋)と下流部(呼塚橋)の2地点において水位と濁度を自記式測器により連続測定した。ここで、水位に関しては自記式水位計(Diver, Eijikelkamp 社製)を、濁度に関してはワイパー付きクロロフィル・濁度計(COMPACT-CLW, ACL104-8M, アレック電子(株)製)をそれぞれ用いた。ここで得られた水位値と著者らが別途行った調査⁴⁾により得られたH-Qカーブを用いて、駒木橋、呼塚橋における流量を求めた。また、濁度データからは、別途行われたキャリブレーション結果を用いてSSに変換している。また、底質調査としては、巻上げ調査を行った3地点における表層土壌を2002年6月28日に採取し、ふるい分け試験により底質の粒度分析を実施した。

(3) 巻上げフラックスの算定方法

巻上げ試験により得られた濁度値を用いて、易浮遊性堆積物の巻上げフラックス P_k に関する算定方法を記述する。この巻上げ試験中では、底面において局所平衡性が成立する、すなわち巻上げフラックスと沈降フラックスが等しいものと仮定して、図-3に示すような4つの手順により巻上げフラックスを算出する。まず、同図中①においては、別途行われたキャリブレーション結果を用いて、濁度値をSSに変換する。ここでは、以下のようなSS[mg/l]と濁度[NTU]の関係を用いている。

$$SS = 1.46 \times (\text{濁度}) \quad (1)$$

次に、②の時間補正に関しては、前述したように、攪拌中に濁度計測を行っていないため、攪拌終了後の濁度値を何らかの形で攪拌中の値に時間的に補正する。図-4は、巻上げ試験における攪拌終了後10秒から40秒までのSSの時間変化の一例を示す。ここでは、7月17日における駒木橋での結果(攪拌速度0.85m/s)を図示している。これを見ると、攪拌終了後のSS値は時間とともに指数関数的に減少している様子がうかがえる。そこで、

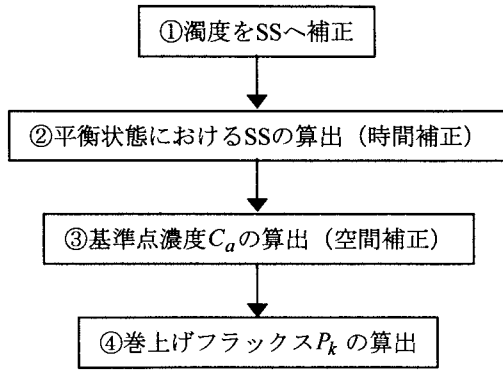


図-3 易浮遊性堆積物量の巻上げフラックス P_k の算出手順

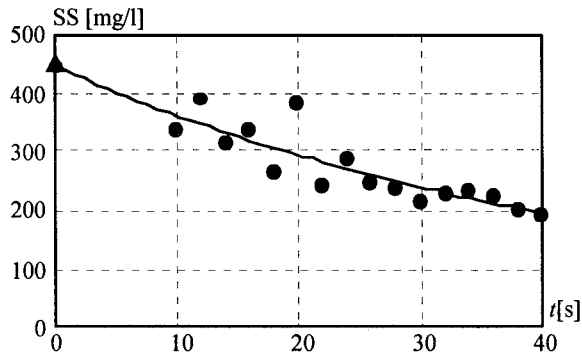


図-4 攪拌終了後の SS の時系列変化の一例
(7/17, 駒木橋, 攪拌流速 0.85m/s)

各試験において、図-4のような指数関数の近似曲線を求めて、攪拌終了時 ($t=0$ s) における SS 値を算出する。

③においては、浮遊砂濃度に関する Rouse 分布^{5), 6)}を用いて、水面下 12cm における SS 値を基準点高さの濃度 C_a に変換する。ここでは、底面からの高さ y における SS 値 $C(y)$ は、次式の Rouse 分布に従うものとする。

$$\frac{C(y)}{C_a} = \left[\frac{a}{h-a} \cdot \frac{h-y}{y} \right]^Z \quad (2a)$$

$$Z = \frac{w_0}{\beta \kappa U_*} \quad (2b)$$

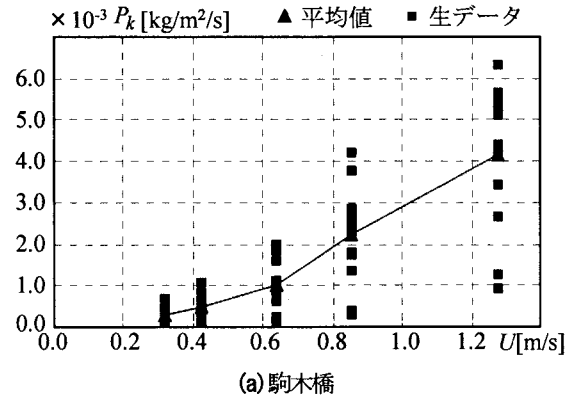
ここで、 a は基準点高さ ($=0.05h$, h : 水深), w_0 は底質粒子の沈降速度, κ はカルマン定数, β は定数 ($=1.2$)⁶⁾であり、摩擦速度 U_* は、攪拌速度 U と底面摩擦係数 C_f を用いて、次のように記述される。

$$U_* = \sqrt{C_f} U \quad (3a)$$

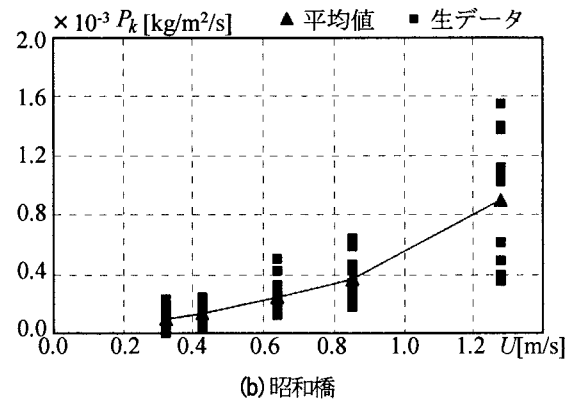
$$C_f = \frac{gn^2}{h^{1/3}} \quad (3b)$$

上式中において、 g は重力加速度であり、 n はマンニングの粗度係数であり、本論文では、既存の結果⁷⁾を参考にして $n=0.025\text{m}^{-1/3}\text{s}$ としている。

最後に、④では、底面における局所平衡性の仮定、す



(a) 駒木橋



(b) 昭和橋

図-5 巻上げフラックス P_k の生データ

なわち巻上げフラックス P_k と沈降フラックスが等しいと仮定して、巻上げフラックスを求める。

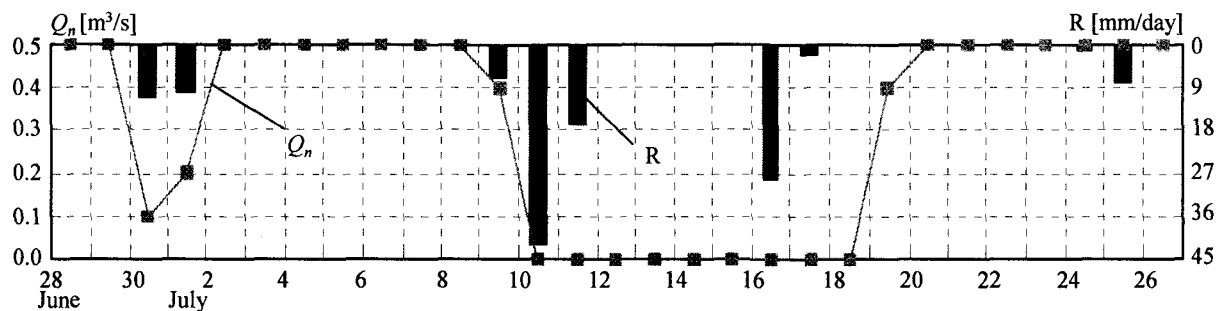
$$P_k = w_0 C_a \quad (4)$$

なお、式 (2b) と (4) 中の沈降速度 w_0 に対しては、現地で採取された底質に対して沈降試験を実施して得られた 0.293cm/s を与えている。この w_0 やマンニングの粗度係数 n は、場所的及び時間的に変化することが考えられるが、ここではこれらに関する十分な観測データを得ていない。今後、 w_0 や n の時空間変化を含めた形で、巻上げフラックス P_k を定量化していく必要がある。

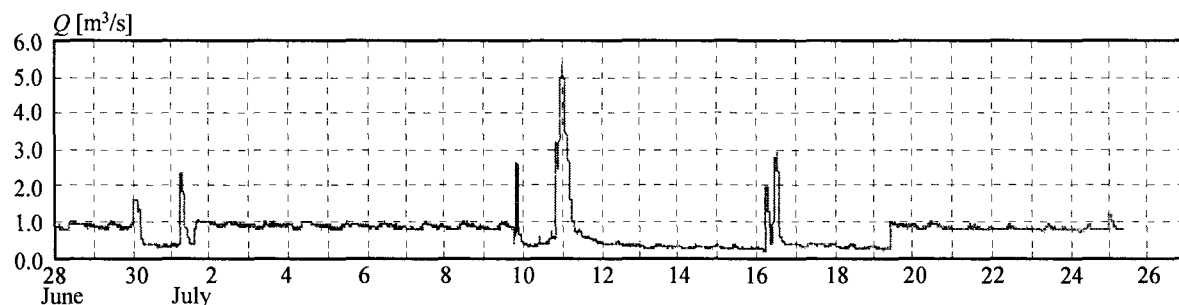
3. 巻上げ試験結果と考察

(1) 巻上げフラックスの生データの特徴

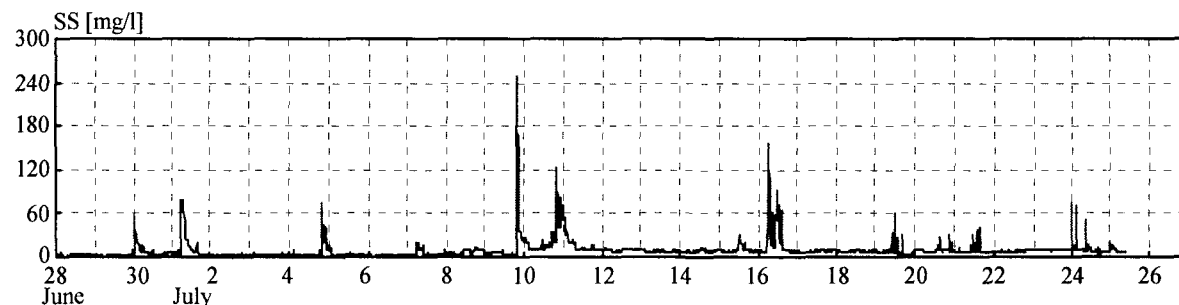
まず、本試験において得られた巻上げフラックスデータの特徴を見るために、代表例として、駒木橋と昭和橋における巻上げフラックス P_k と攪拌速度 U の相関図を図-5に示す。ここでは、巻上げフラックスの生データ及び各攪拌速度における平均値を図示している。なお、計測中に濁度計の測定レンジを越えたデータ等を除外して示している。この図より、攪拌速度が大きくなると、巻上げフラックスの生データやその平均値が大きくなるのみならず、各攪拌速度におけるデータのばらつきも増



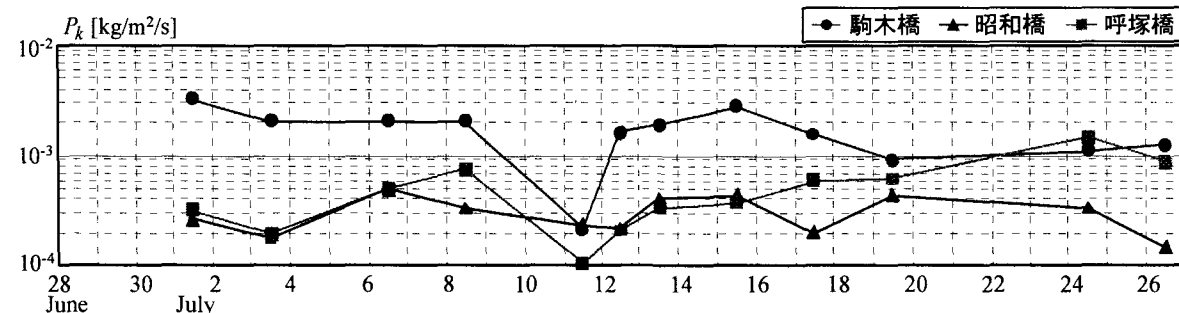
(a) 日雨量 R と日平均浄化用水注水量 Q_n



(b) 流量 Q (駒木橋)



(c) SS (駒木橋)



(d) 駒木橋と昭和橋、呼塚橋における巻上げフラックス (攪拌速度 0.64m/s と 0.85m/s の平均値)

図-6 河川環境と易浮遊性堆積物量の経時変化

加している様子が、両地点において共通して見られる。このように、同じ攪拌速度においても巻上げフラックスは測定日より大きく変化しており、巻上げフラックスの時間的変化が顕著であることがうかがえる。

次に、両地点における巻上げフラックスを比較すると、駒木橋における巻上げフラックスの平均値は、昭和橋の結果の3~6倍程度大きく、巻上げフラックスの大きさそのものが地点毎に明確に変化している。また、巻上げフラックスの流速依存性に着目すると、巻上げフラックスの平均値に対してべき関数の近似曲線を当てはめると、

巻上げフラックスは、駒木橋では攪拌流速の2.0乗に、昭和橋では1.7乗に比例していることが確認された。このように、巻上げフラックスの大きさのみならず、巻上げフラックスの流速依存性に関しても、両地点において異なることが示された。なお、泉⁸⁾、池田・泉⁹⁾は、河道部における浮遊砂の巻上げフラックスは流速の2乗に比例するとしており、これらの結果と駒木橋の結果は類似しているものの、昭和橋における流速に対するべき指数がこれらの結果よりもやや小さい。

(2) 易浮遊性堆積物の時空間変動特性とその要因

a) 観測期間中の河川水環境の概況

前述した易浮遊性堆積物の巻上げフラックスに関する時間的・空間的な変化の様子やその要因を検討するために、観測期間中における巻上げフラックス P_k といくつかの河川環境指標の経時変化を図-6に示す。図中には、河川環境の指標として、日雨量 R (千葉県我孫子市) と北千葉導水路からの日平均浄化用水量 Q_n (大堀川上流部、図-2)、駒木橋における流量 Q 及び SS を示している。また、易浮遊性堆積物の巻上げフラックスについては、全3地点を対象として、攪拌流速が 0.64m/s と 0.85m/s の時の平均値を図示している。まず、河川環境に関しては、大きな2つの降雨イベント (7/9~11, 16) 時には、流量や濁度の顕著な増減が見られる。このうち7/9~11における降雨イベントは、台風0206号の接近のために生じている。また、北千葉導水路からの浄化用水量 Q_n は一定となっており、最大注水量 ($0.5\text{m}^3/\text{s}$) の日は期間中約半分であり、全く注水されていない期間 (7/10~17) も見られる。このような浄化用水量の変化の影響を受けて、駒木橋における流量も変動している。

b) 巻上げフラックスの空間変化

図-6 (d) に示されている易浮遊性堆積物の巻上げフラックス P_k を見ると、図-5の結果と同様に、巻上げフラックスは場所的・時間的に大きく変化していることが分かる。まず、3地点の巻上げフラックスの大きさを比較すると、駒木橋の巻上げフラックスは全般的に他の2地点の結果よりも大きく、最大で10倍程度の差が生じていることが分かる。また、昭和橋と呼塚橋の巻上げフラックスは同程度であるものの、その大小関係は測定日により変化している。

このような巻上げフラックスの場所的な違いの要因を検討するために、6/28に各地点において採泥した表層土壌の粒度分布を図-7に示す。これを見ると、駒木橋の堆積物は、他の地点と比べて微細土砂成分を多く含んでいることが分かる。一般的には、同じ流速条件下では、粒径が小さい底質の巻上げ量は、相対的に粒径が大きい場合よりも大きくなる。このようなことから、底質の粒径分布の違いを反映して、駒木橋の巻上げフラックスが他の2地点よりも大きくなったものと推察される。

c) 巻上げフラックスの時間変動特性

各地点における巻上げフラックス P_k が時間的に変化する様子やその要因を調べるために、巻上げフラックスと河川環境指標の経時変化を比較する。まず、降雨量と易浮遊性堆積物の関係に着目すると、7/9~11の降雨イベント時には、3地点ともに巻上げフラックス P_k は減少している。それに対して、7/9~11のときよりも降雨量や流量が小さい7/16の降雨イベントにおいては、駒木橋と昭和橋では巻上げフラックス P_k は減少するものの、呼塚

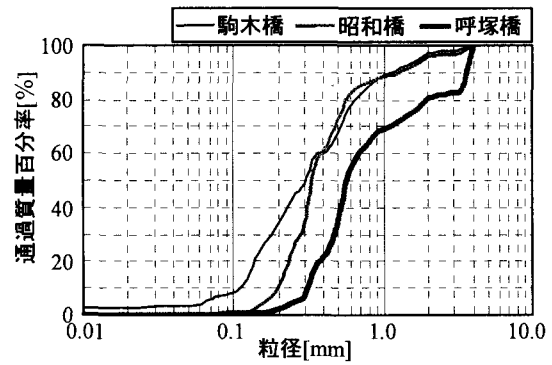


図-7 河床表層堆積物の粒度分布

橋では逆に増加していることが分かる。このような降雨量や流量が相対的に小さい降雨イベントでは、上流から輸送されてきた土砂は大堀川下流域では堆積傾向となるので¹⁰⁾、河川上・中流部と下流部とで巻上げフラックスの変動傾向が異なったものと考えられる。

また、7/9~11の降雨イベント時に減少した巻上げフラックスは、その後、全地点において増加しており、降雨イベント前の巻上げフラックスの値まで増加するのに要する日数は、駒木橋では2日、昭和橋や呼塚橋では3日程度である。このように、大堀川において極めて短期間で易浮遊性堆積物量が増加するのは、都市流域から大堀川への過剰な汚濁物質流入の結果を反映している¹¹⁾。

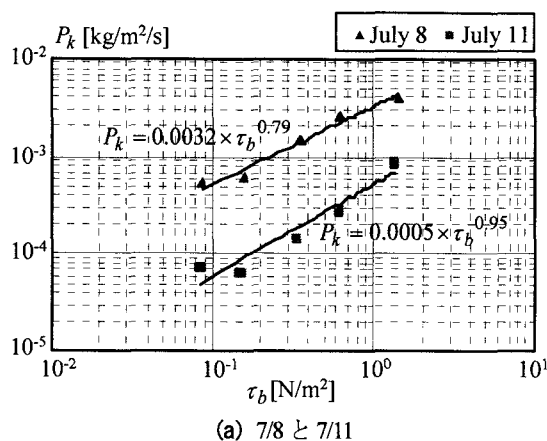
次に、浄化用水量と易浮遊性堆積物の巻上げフラックスの対応関係について記述する。浄化用水が注水されていた7/3~6と注水されていない7/12~15の巻上げフラックスを比較すると、浄化用水注水口に近い駒木橋では、注水の行われていない期間の値は注水中の時より大きくなるものの、中流部の昭和橋や下流部の呼塚橋ではそのような明確な変化は見られない。このように、北千葉導水路からの浄化用水は、河床堆積物環境の改善に対しても一定の効果を有しているものの、この効果は浄化用水注水口に近い上流部のみで見られるものと推察される。

(3) 巻上げフラックスと底面せん断力の相関関係

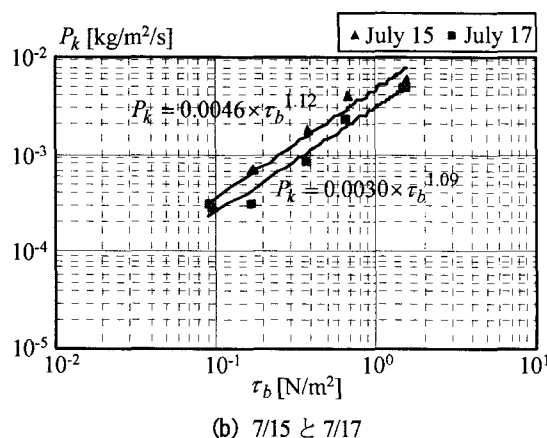
底質の巻上げフラックスは、一般的に、摩擦速度 U_* や底面せん断力 τ_b の関数としてモデル化される^{8), 9), 12)}。これに倣って、本試験により得られた易浮遊性堆積物の巻上げフラックス P_k と底面せん断力 τ_b の相関図を図-8に示す。ここでは、7/9~11と7/16の降雨イベント前後における結果を比較している。また、図中には、 P_k と τ_b に対して、次式のような近似曲線を測定日毎に求めて、それぞれ図示している。

$$P_k = \alpha \tau_b^\eta \quad (5)$$

ここで、 α, η は係数である。これを見ると、本巻上げ試験における底面せん断力の範囲では、降雨後の巻上げ



(a) 7/8 と 7/11



(b) 7/15 と 7/17

図-8 巻上げフラックス P_k と底面せん断力 τ_b の関係

フラックスは、どの底面せん断力においても、降雨前の巻上げフラックスよりも減少している。降雨イベント前後における巻上げフラックスの減少の大きさは、降雨規模の大きい 7/9～11 のイベント時の方が相対的に大きいことが分かる。

また、図中に表示されている式 (5) 中の係数 α, η を見れば分かるように、降雨前後において α や η は一定値となっていない。駒木橋における巻上げ試験結果に対して、測定日毎に式 (5) の近似式をあてはめたところ、 $\alpha = 5.0 \times 10^{-4} \sim 9.2 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^2/\text{s}$ 、 $\eta = 0.78 \sim 1.64$ の範囲で変化していることが確認された。これらの結果より、式 (5) のような易浮遊性堆積物量の巻上げフラックスと底面せん断力の関係性が、同一地点においても大きく変化していることが定量的に明らかとなった。さらに、このような試験結果により、大堀川のような都市河川におけるポルーグラフシミュレーション¹⁾において、べき関数を用いて底面せん断力から巻上げフラックスを記述する際には、近似式中 (式 (5)) の係数 α, η の時間的変化を考慮したモデリングが必要であることが実証的に示された。

5. 結論

易浮遊性堆積物量の流速依存性を現地で直接計測可能

な試験装置 (巻上げ装置) を作成し、都市河川における易浮遊性堆積物環境の調査を実施した。手賀沼へ流入する都市河川である大堀川を対象とした調査結果から得られた主要な結論は以下のとおりである。

(1) 易浮遊性堆積物の巻上げフラックスは、降雨イベントや浄化用水量変化、底質粒径の影響を受けて、時間的・空間的に大きく変化していることが示された。

(2) 降雨イベント直後の巻上げフラックスは、概ね、どの攪拌流速においても、降雨前の結果と比べて減少することが示された。また、降雨後における巻上げフラックスは、降雨イベントから 2, 3 日後には、降雨前の値にまで急増していることが明らかとなった。

(3) 巻上げフラックスと底面せん断力に対してべき関数の近似式を算出したところ、近似式中の係数が測定日により変化していた。そのため、べき関数を用いて底面せん断力から巻上げフラックスを記述する際には、近似式中の係数の時間的変化を考慮したモデリングの必要性が実証的に示された。

謝辞：現地調査を行う際には、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は多大なる御助力を頂いた。本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費若手研究 (B) (課題番号：13750498, 研究代表者：二瓶泰雄) と下水道振興基金研究助成金 (研究代表者：二瓶泰雄) によるものである。ここに記して謝意を表する。

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) 和田安彦: 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) 浮田正夫・関根雅彦: 河川汚濁のモデル解析 (国松孝男・村岡浩爾編), 技報堂出版, pp.109-116, 1989.
- 4) 二瓶泰雄, 大竹野歩, 小久保武: 降雨時における手賀沼流入河川の水質負荷特性, 土木学会論文集, 2004 (投稿予定).
- 5) Rouse, H.: Modern conception of the mechanics of turbulence, Trans. ASCE, Vol.102, pp.463-543, 1937.
- 6) 吉川秀夫: 流砂の水理学, 丸善, pp.130-141, 1985.
- 7) 土木学会: 水理公式集 [平成 11 年版], 丸善, pp.87-92, 1999.
- 8) 泉典洋, 池田駿介, 伊藤力生: 流水抵抗及び浮遊砂濃度に及ぼす植生の効果, 水理講演会論文集, Vol.33, pp.313-318, 1989.
- 9) 池田駿介, 泉典洋: 浮遊砂の横断方向の拡散係数について, 土木学会論文集, No.434/II-16, pp.47-55, 1991.
- 10) 山崎裕介, 二瓶泰雄, 大関雅文, 今野篤, 西村司: 都市河川河口域における土砂・栄養塩・有機物輸送特性に関する現地観測, 水工学論文集, Vol.48, 2004 (印刷中).
- 11) 二瓶泰雄, 服部祐司, 小久保武, 大竹野歩: GIS を用いた手賀沼流入河川の汚濁負荷解析, 水工学論文集, Vol.48, 2004 (印刷中).
- 12) Lavelle, J.W., Mofield, H.O. and Baker, E.T.: An in situ erosion rate for a fine-grained marine sediment, J. Geophys. Res., Vol.89, No.C4, pp.6543-6552, 1984.

(2003. 9. 30 受付)