

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

STUDY ON POLLUTANT LOAD INTO A EUTROPHIC LAKE WITH ATTENTION TO SEDIMENT TRANSPORT IN A LOWER REACH OF RIVER

二瓶泰雄¹・大関雅丈²・福地正宗³

Yasuo NIHEI, Masatake OOZEKI and Masatoshi FUKUCHI

¹ 正会員 東京理科大学助教授 理工学部土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

² 正会員 日揮㈱ (〒100-0004 東京都千代田区大手町 2-2-1)

³ 学生員 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)

Monitoring of pollutant load in an influent river flowing into a eutrophic lake is not generally conducted at the mouth of the river but at stations just upstream from the river mouth. To compare the pollutant load at the upstream station and the river mouth, we have conducted continuous measurements and numerical computations of pollutant load with special attention to the sediment transport in the lower reach of river. The observed data indicate that the appreciable differences of SS fluxes at the upstream stations and river mouth appear under rainy conditions while the yearly-averaged SS flux at the upstream station is almost comparable to that at the river mouth. It should be also noted that the numerical accuracy of sediment transport may be strongly dependent on the treatment of spatial variations of an erosion rate of sediment and evaluations of bottom friction.

Key Words: pollutant load, eutrophic lake, sediment transport, lower reach of river, pick-up rate

1. 序論

富栄養化が著しい湖沼における水環境管理を遂行する上では，流域からの流入負荷を適切にモニタリング及びモデリングすることは極めて重要である¹⁾．流域から河川経由で湖沼へ流入する総負荷量をモニタリングする上では，河川と湖沼の接続点（以下，単に接続点と呼ぶ）において，流量や水質濃度を実測することが必要となる²⁾．

この接続点は，当然，湖沼の水位変化や水質の影響を直接的に受けるため，通常，湖沼影響の小さい上流側の地点（以下，一般観測点と呼ぶ）が観測地点として選定される．接続点と一般観測点における流入負荷が同一になれば問題ないが，横流入がない場合でも，両地点の負荷に大きな違いが生じるケースが報告されており，その傾向は懸濁態物質の輸送量において顕著となる³⁾・⁴⁾．現状では，実測データが限られているため，一般観測点と接続点を含む河川下流域における流入負荷特性が，一降雨イベント，月，年などの様々な時間スケールでどのようになるかは不明な点が多い．さらに，これと対応した流入負荷のモデリング技術については，その実態が未解明なため，検討すべき課題が多々存在する．

本研究では，富栄養化湖沼の流入河川下流域にお

ける流入負荷特性の実態を把握するとともに，そのモデリング手法について検討する．ここでは，負荷量の大部分を占め，かつ，栄養塩回帰を引き起こす懸濁態物質⁵⁾・⁶⁾の動態（土砂動態）に着目して流入負荷特性を検討する．まず，富栄養化湖沼として有名な千葉県手賀沼⁷⁾に流入する大堀川を対象として，自記式濁度計等を用いて長期間にわたる土砂輸送量モニタリングを実施する．観測データより，一降雨イベント，月，年という様々な時間スケールを対象として，上流側の一般観測点と下流側の接続点の土砂輸送量を比較する．次に，下流域の物質循環を考慮した流入負荷のモデリング手法を検討するために，河床における底質巻上げ量の取り扱いに着目した土砂輸送計算を同じ大堀川において実施する．

2. 現地観測の概要

観測サイトである大堀川は，流域面積が 31km²，流路延長が 12.9km である．流域の約 8 割が市街地であり，流域の都市化に伴う過剰な汚濁物質流入が手賀沼の水質悪化の要因であると指摘されている⁷⁾．

観測地点は，図-1 に示すように，大堀川下流域 3 地点 (Stns.1～3)，湖沼 1 地点 (Stn.4) とする．Stns.1 と 2 は，河川と湖沼の接続点である Stn.3 から上流

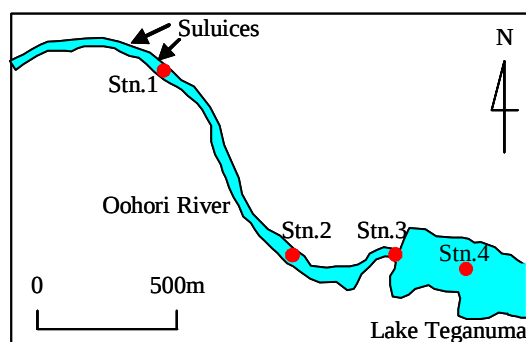


図-1 観測サイト及び観測地点

側 1.5km, 0.6km にそれぞれ位置し, Stn.1 は一般観測点に相当している. この観測は 2005 年 6 月 3 日から開始し, Stn.2 のみ同年 7 月 28 日に終了し, その他の 3 地点では現在でも継続している. 本論文では, 2006 年 6 月 3 日までの 1 年間の観測結果を解析対象とする. 観測項目は水位と濁度であり, それぞれ自記式水位計 (Diver, Eijikelkamp 社製) とワイパー付き光学式濁度計 (Compact-CLW, アレック電子株製) を用いる. これらの自記式測器の計測時間間隔は 5 分もしくは 10 分とする.

土砂輸送量を算出するためには, 水位と濁度をそれぞれ流量と土砂濃度 (SS) に変換する必要がある.

流量を得るためには, まず, Stn.1 における水位データ及び別途求められた $H-Q$ 曲線から Stn.1 における流量を算出する. そこで得られた流量値及び水位観測値を用いて, 連続式により Stn.1 から下流側に位置する Stn.3 の流量を算出する. また, 濁度から SS に換算するために, 降雨時 (2005 年 7 月 26 日 5~10 時) に表層バケツ採水を実施した. そのサンプル水に対して SS をガラス繊維ろ紙法⁸⁾により求め, SS と濁度の検定曲線を算出する.

3. 観測結果と考察

(1) SS の時系列変化

1 年間にわたる大堀川の流況や SS 環境の全体像を把握するために, 流量 Q (Stn.1) 及び SS (Stns.1, 3) の時間変化を図-2 に示す. 図中には, 1 時間移動平均値が示され, また特徴的な降雨イベント時を矢印で図示する. また同図 (b) と (c) の縦軸の目盛が異なることに注意されたい. まず, 流量 Q に関しては, 平常時にはおおよそ $1.0 \sim 2.0 \text{ m}^3/\text{s}$ となっている. 降雨イベント時には流量が大きく増加し, $20 \text{ m}^3/\text{s}$ を超える降雨イベントも発生している (降雨イベント,). また, 2005 年 11, 12 月及び 2006 年 4, 5 月には大きな出水は生じていない.

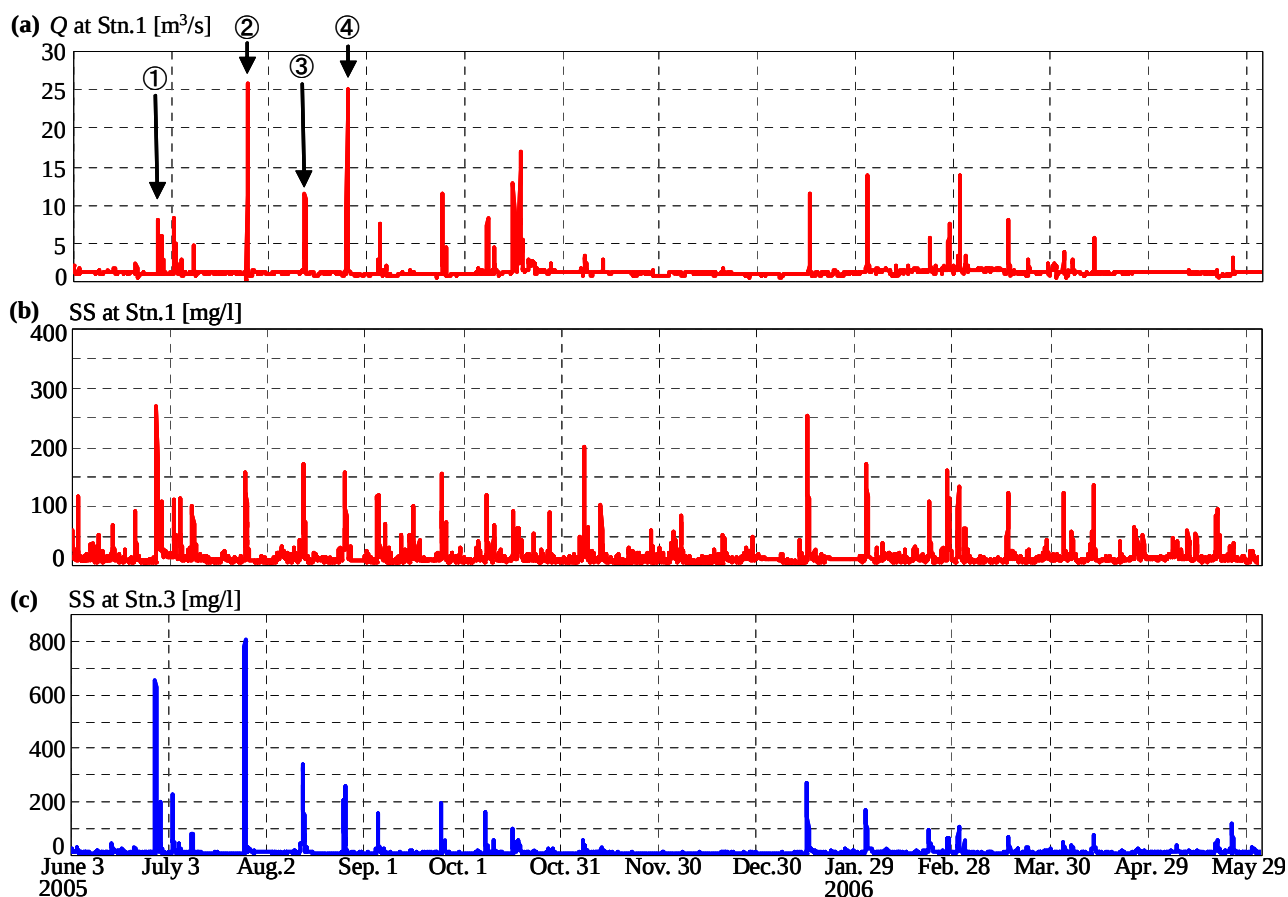


図-2 Stn.1 における流量 Q (a)と SS(b)及び Stn.3 における SS(c)の時間変化

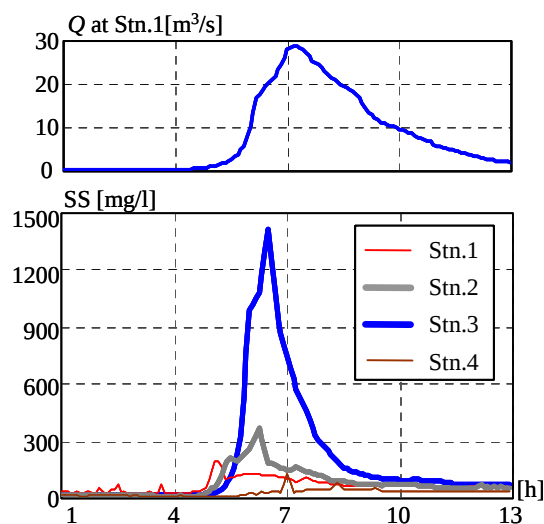


図-3 降雨イベント時における SS 変化の一例（降雨イベント，2005 年 7 月 26 日）

上流側の Stn.1 と下流側の Stn.3 における SS を見ると、両地点ともに降雨イベント時には SS は増加するが、その様子は大きく異なる。具体的には、年最大 SS については、Stn.1 では降雨イベントにおいて現れ、その大きさは 270mg/l である。一方、Stn.3 では、降雨イベントにおいて、800mg/l の年最大 SS が観測されている。また、Stn.3 においては、降雨時の SS は夏期（6 月から 8 月）の方がその他の期間よりも大きくなっているが、Stn.1 においてはそのような季節的な違いは明確ではない。さらに、Stn.1 における SS は、降雨時を含めて細かい変化が見られるが、Stn.3 ではそのような特徴は観測されていない。このように、上流側（Stn.1）と下流側（Stn.3）における SS 環境が異なる様子は、降雨イベント毎の短い時間スケールから季節毎の長い時間スケールまで生じていることが示された。

（2）SS フラックスの比較

一般観測点（Stn.1）と接続点（Stn.3）における SS フラックスについて、降雨イベント毎、月毎、年間という様々な時間スケールで比較することを試みる。

a) 降雨イベント毎

降雨イベント時における SS 変化の一例として、年最大流量が観測された降雨イベントにおける河川内（Stns.1～3）及び沼内（Stn.4）における SS の時間変化を図-3 に示す。河川内では、Stns.1 と 2 に比べ Stn.3 の SS が大きい。Stn.1 から Stn.3 の間では横流入がないことから、この降雨時では Stn.2 から Stn.3 において河床堆積物の巻上げプロセスが顕著であったものと考えられる。また、沼内（Stn.4）の SS は、河川内よりも小さく、接続点より流出した懸

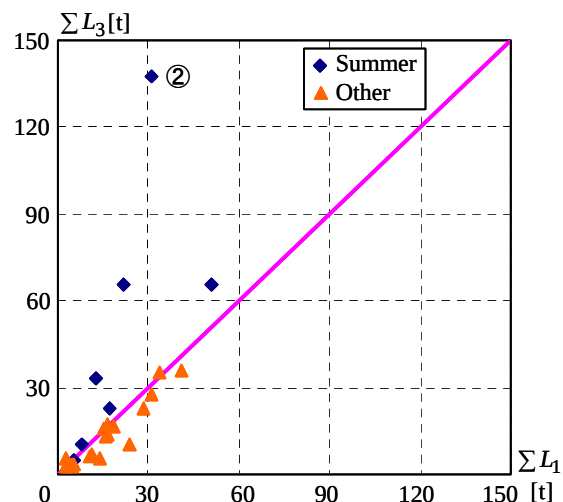


図-4 Stns.1 と 3 における各降雨イベント時の累積 SS フラックス ΣL_1 、 ΣL_3 の比較（夏期（6～8 月）とその他の時期を分けて表示）

濁物質の大部分は接続点近傍に沈降している。

降雨イベント時における累積 SS フラックス ΣL （各イベント中の SS フラックスの積算値）を比べるために、Stn.1 と Stn.3 の累積値 ΣL_1 、 ΣL_3 の相関図を図-4 に示す。ここでは、全観測期間中に生じた 28 の降雨イベントを対象として、夏期（2005 年 6 月～8 月、 $n=8$ ）とその他の期間（ $n=20$ ）に分けて表示している。これを見ると、夏期のケースに関しては、全体的に Stn.3 の累積 SS フラックスが大きくなっている。その中でも、最も差が大きいのは降雨イベントにおける結果である。それに対して、その他の期間では、夏期とは反対に、全体的に Stn.1 の累積 SS フラックスが大きい。より定量的に比べるために、降雨イベント毎に両地点間の累積 SS フラックスの相対差 ΔL （ $= (\Sigma L_3 - \Sigma L_1) / \Sigma L_1 \times 100$ ）を求めたところ、夏期では -44～342%，その他の期間では -60～125% となり、相対差は両者共に大きい。このように、降雨イベント毎では、一般観測点と接続点における流入負荷量が同一ではなく、その差が非常に大きいことが分かる。

降雨イベント時における累積 SS フラックス差について検討する。河川下流域の土砂輸送過程が水理条件に大きく依存することに着目して⁴⁾、降雨イベント時の最大流量 Q_{max} と累積 SS フラックス差 $\Sigma L_3 - \Sigma L_1$ の相関図を図-5 に示す。この累積 SS フラックス差が正の場合は対象区間で侵食傾向が、負の場合は堆積傾向が卓越することを意味する。これより、夏期では、累積 SS フラックス差は正となるケースが多いのに対して、その他の期間ではフラックス差は負となる傾向が見られる。また、同じ最大流量 Q_{max} における累積 SS フラックス差は、夏期の

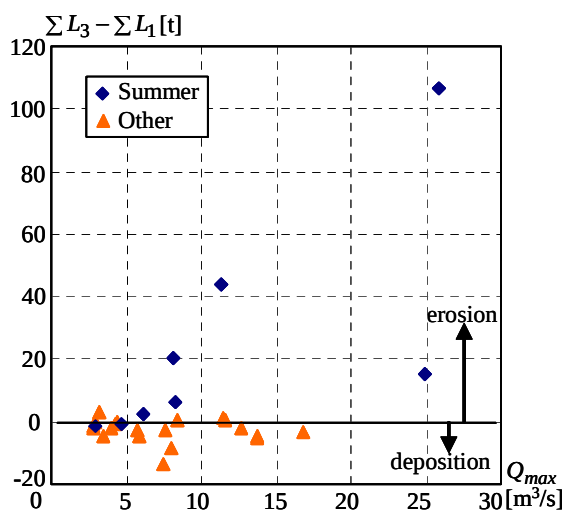


図-5 各降雨イベント時における最大流量 Q_{max} と累積 SS フラックス差 $\Sigma L_3 - \Sigma L_1$ の比較

方がその他の期間よりも大きい。これより、同程度の出水規模でも、時期により、大堀川下流域における侵食・堆積特性が変化することが示された。この要因の一つとして、底質の巻上げ特性が季節的に変化することが予想され、現在、別途検討中である。

b) 月毎

Stns.1 と 3 における累積 SS フラックスを月毎に算出した結果を図-6 に示す。これを見ると、夏期（6～8月）では Stn.3 の SS フラックスが Stn.1 の結果よりも大きいのに対して、その他の期間では、その逆となっており、降雨イベントにおける累積 SS フラックスの関係と対応している。また、大きな降雨イベントが見られなかった 2005 年 11, 12 月, 2006 年 4, 5 月においては, Stn.1 の累積 SS フラックスが Stn.3 の値よりも大きくなっている。これより、非降雨時においても、両地点間には SS フラックスの差が生じていることが分かる。

月毎の相対差 ΔL を求めると、夏期では 21～115%、その他の期間では -48～-7% と ΔL は大きく、その傾向は大規模な降雨イベントが生じた夏期において特に顕著となる。このように、月スケールで見た場合、Stn.1 と Stn.3 の累積 SS フラックス差は大きく、その傾向は降雨影響が強い夏期において明確となる。

c) 年間

1 年間にわたる累積 SS フラックスの時間変化を図-7 に示す。ここでも Stns.1 と 3 の結果が表示されている。累積 SS フラックスは、両地点ともに、降雨時に急激に、非降雨時では緩やかにそれぞれ増加する。両地点における累積 SS フラックスを比べると、観測開始直後は概ね同一であるが、降雨イベントの後では Stn.3 の累積値が Stn.1 よりも顕著に大

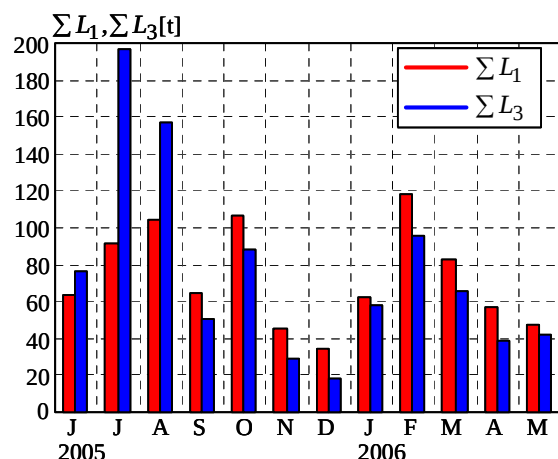


図-6 各月の累積 SS フラックスの比較（2005 年 6 月から 2006 年 5 月までの 1 年間）

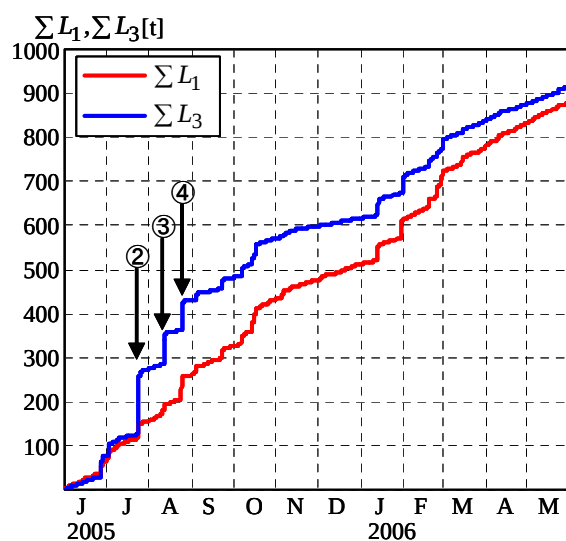


図-7 Stns.1 と 3 における累積 SS フラックス ΣL_1 , ΣL_3 の時間変化（2005 年 6 月から 2006 年 5 月まで）

きくなる。8 月の降雨時、にて両者の差は広がるものの、その後の期間では両者の差は減少する。

図-8 は、1 年間の累積 SS フラックスを降雨時と非降雨時に分けて表示したものである。年間 SS フラックスは、Stn.1 では 878t、Stn.3 では 916t となり、両者の差は 38t である。このときの相対差 ΔL は 4% と非常に小さく、Stns.1 と 3 における年間 SS フラックスはほぼ同一である。これを降雨時、非降雨時別に見ると、Stn.1 では降雨時 454t、非降雨時 424t とほぼ同程度である。一方、Stn.3 では降雨時 594t、非降雨時 323t となり、降雨時の占める割合が高い。また、非降雨時では Stn.1 の方が 101t 大きいのに対して、降雨時では Stn.3 の方が 139t 大きい。これより、非降雨時に下流域に堆積した土砂が降雨時に再懸濁させられ、年間スケールで見ると土砂堆積量と再懸濁量がほぼ同一であると言える。

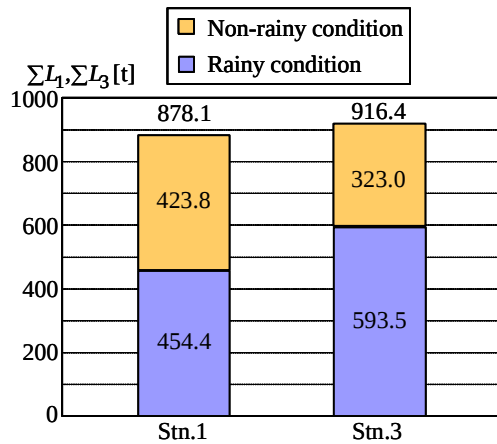


図-8 年間 SS フラックスの比較(図中の数字は、上から全体、非降雨時、降雨時の SS フラックスを示す)

以上の結果から、降雨イベント毎や月毎における SS フラックスは一般観測点(Stn.1)と接続点(Stn.3)では同一とならないが、年間スケールでは両者の結果はほぼ一致する。このことより、SS の場合、「一般観測点(Stn.1)と接続点(Stn.3)における流入負荷量が同一である」という仮定は、相対的に短い時間スケール(降雨イベント、月)では大きな誤差を生むものの、長い時間スケール(年)では概ね妥当であることが明らかとなった。さらに、土砂濃度と栄養塩・有機物の懸濁態濃度の相関性が概ね良いので、土砂輸送特性で得られた知見を懸濁物質の流入負荷特性に準用することは可能であると考えられる。

4. 底質巻上げ量の取り扱いに着目した土砂輸送シミュレーション

(1) 着目点と計算諸条件

河川下流域における土砂動態を考慮した流入負荷モデルを構築するに当たり、降雨イベント時に卓越する底質巻上げ量に着目する。底質巻上げ量 P_k は、一般に底面せん断力 τ のべき関数 ($P_k = a(\tau - \tau_c)^b$, τ_c : 限界せん断力, a, b : 係数) として与えられる。係数 a, b は場所毎・時間的に変化することが予想されるが、その実態は不明であり、経験的に設定される。一例として、大堀川下流域 5 地点における底質巻上げ量 P_k と底面せん断力 τ の相関図を図-9 に示す。これは現地直接計測型巻上げ装置⁹⁾ による計測結果(2005 年 11 月 1 日) であり、計測地点は接続点の上流側 0.4, 0.5, 0.6, 1.2, 1.5km の 5 地点である。ここでの河床材料の中央粒径はおよそ 200 ~ 600 μm であるのに対して、巻上げ装置内において浮遊した土砂の中央粒径はこれより 1 オーダー小さい¹⁰⁾。この図より、河川下流域では底質巻上げ特性が

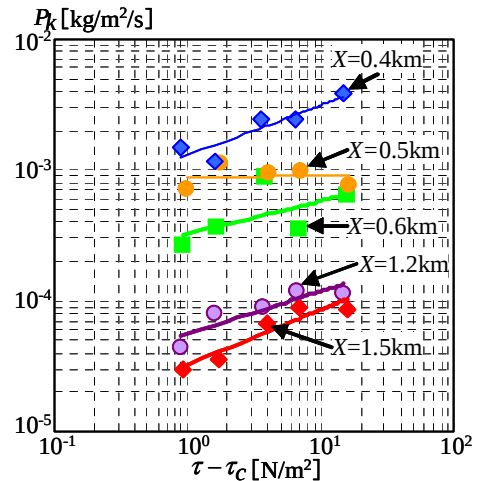


図-9 巻上げフラックス P_k と底面せん断力の関係 (2005 年 11 月 1 日、図中の X は接続点(Stn.3)からの縦断方向距離を示す)

空間的に非一様であり、同一の底面せん断力でも 1 オーダー以上 P_k が変化する。この底質巻上げ量の取り扱いに着目して浮遊土砂輸送計算を行う。

用いる数値モデルは、河道平面形状を合理的に表記する水平 σ 座標系に基づく平面二次元河川流モデルである¹¹⁾。計算領域は、大堀川下流域の Stn.1 から Stn.3 までである。計算期間は、上記の底質巻上げ調査を行った時と最も近い降雨イベント時(2005 年 11 月 6 ~ 7 日) とし、単一粒径の浮遊土砂輸送のみを対象とする。底質巻上げ量の取り扱いが土砂輸送量の計算結果に及ぼす影響を検討するために、底質巻上げ量 P_k の空間変化と計算格子解像度に着目する。まず、格子数 48×43 , 5 地点の実測巻上げ量を与える条件を Case1 (基準) とする。次に、格子解像度は Case1 と同じとし、巻上げ量として 2 地点 ($X=0.6, 1.5\text{km}$) の結果を与える条件 (Case2) と 1 地点 ($X=1.5\text{km}$) のみの結果を採用するケース (Case3) を設定する。また、巻上げ量の与え方は Case1 のままで、横断方向格子数を変える 2 ケース (Case4: 48×17 , Case5: 48×5) を設定する。

(2) 計算結果

図-10 は Case1, 2, 3 における Stn.3 の SS の計算結果及び観測結果を示す。図中には、Stn.1 における流量の計算結果も表示している。これより、3 ケースの計算結果のうち、巻上げ量の空間分布を最も詳細に考慮した Case1 の結果が観測値に最も近くなっている。また、空間分布を全く考慮しない Case3 の計算結果は、観測値との差が最も大きい。

各ケースの計算結果から累積 SS フラックスを算出し、その結果と観測値から求めた相対誤差 $Err (= (\text{観測値} - \text{計算値}) / \text{観測値} \times 100)$ を表-1 に示す。

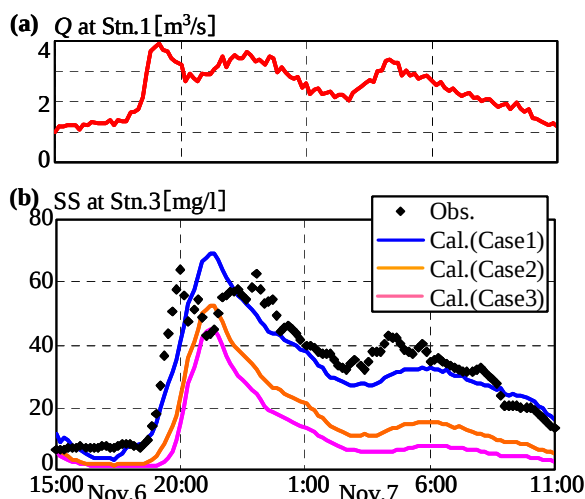


図-10 Case1, 2, 3における計算結果と観測結果の比較 (Stn.1の流量(a)とStn.3のSS(b)を示す)

表-1 累積SSフラックスの相対誤差 Err

No.	Err [%]
Case1	7.4
Case2	48.9
Case3	65.5
Case4	13.7
Case5	21.5

上述した Case1, 2, 3 では, 相対誤差 Err は 7, 49, 66% となり, 巻上げ量の空間分布を実態に則していない Case2 や Case3 では計算誤差が非常に大きい。また, 横断方向格子数を変えた Case4 と Case5 の Err は 14, 22% となり, 格子解像度が粗くなると計算誤差も増える。これは, 格子解像度を変化させると流速横断分布の再現性が悪くなり, 底面せん断力の評価精度が低下するためである。このように, 河川下流域における懸濁物質フラックスを高精度に評価する上では, 底質巻上げ量や底面せん断力を精度良く評価することが必要である。そのためには, 実測データに基づいて底質巻上げ量を評価するとともに, 流速横断分布を正確に表すのに必要な格子解像度を確保することが必須である。

5. 結論

富栄養化湖沼の流入負荷特性の実態やその計測法を検討するために, 手賀沼の主要流入河川である大堀川下流域を対象として, 1 年間の土砂輸送量モニタリング及び底質巻上げ量に着目した土砂輸送計算を実施した。得られた結論は次のとおりである。

(1) 上流側の一般観測点 (Stn.1) と下流側の接続点 (Stn.3) における SS フラックスを様々な時間ス

ケールで比較した。その結果, 降雨イベントや月という相対的に短い時間スケールでは, 両地点における SS フラックスの差は非常に大きいのにに対して, 両地点の年間 SS フラックスはほぼ一致していた。

(2) このような観測結果より, 流域から河川経由で湖沼へ流入する懸濁態物質の総負荷量評価に対して, 一般観測点におけるモニタリング結果を準用することは, 年間負荷量については問題ないものの, 降雨イベント毎や月間の総負荷量に関しては大きな誤差を生むことが明らかとなった。

(3) 河川下流域の土砂動態を考慮した形で流入負荷モデルを構築するには, 河床における底質巻上げ量や底面せん断力の高精度評価が極めて重要である。そのためには, 底質巻上げ量の空間分布を適切に与え, また十分な格子解像度を確保する必要がある。

謝辞: 現地調査の実施には, 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御助力を頂いた。本研究の一部は, 科学研究費補助金基盤研究 (C) (2) (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) 岩佐義朗: 湖沼工学, 山海堂, pp.455-504, 1990.
- 2) (社)日本河川協会編: 建設省河川砂防技術基準(案) 同解説, 山海堂, pp.329-384, 1997.
- 3) Fukushima, T., Aizaki, M. and Ebise, S.: Dynamics of particulate matter near the mouth of influx river in Takahamairi Bay of Lake Kasumigaura with special reference to nitrogen and phosphorus, *Jpn. J. Limnol.*, Vol.52, No.1, pp.13-26, 1991.
- 4) 山崎裕介, 二瓶泰雄, 大関雅丈, 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, pp.1489-1494, 2004.
- 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) 大久保卓也: 懸濁態リンの生物利用可能性, 用水と廃水, Vol.38, No.3, pp.34-46, 1996.
- 7) 山田安彦, 白鳥孝治, 立本英機: 印旛沼・手賀沼 - 水環境への提言 -, 古今書院, pp.1-167, 1993.
- 8) (社)日本下水道協会: 下水試験方法上巻 - 1997 年版 -, pp.136-201, 1997.
- 9) 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.
- 10) 福地正宗, 二瓶泰雄, 大関雅丈: 底質巻上げ計測データに基づくウォッシュロードの供給源に関する一考察 土木学会年次学術講演会講演概要集第2部, Vol.61, pp.526-527, 2006.
- 11) 山崎裕介, 二瓶泰雄, 大関雅丈: 河川 - 湖沼結合モデルに基づく手賀沼における土砂輸送シミュレーション, 水工学論文集, Vol.49, pp.1225-1230, 2005.

(2006.9.30 受付)