

洪水時河川における浮遊ゴミ輸送量計測の試み

二瓶泰雄¹・若月宣人²

¹正会員 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)
E-mail:nihei@rs.noda.tus.ac.jp

²非会員 東京都建設局南多摩東部建設事務所工事課 (〒194-002 東京都町田市中町 1-31-12)

河川を經由して輸送されるゴミは沿岸部の漂着ゴミの重要な供給源となっているが、その実態は不明な点が多い。本研究では、千葉県・大堀川を対象として、洪水時における浮遊ゴミ輸送量の実態把握を目的とした現地調査を実施し、植生等の自然系ゴミの質量・有機物・栄養塩輸送量を算出した。その結果、洪水時におけるゴミ輸送量の最小値と最大値は、4, 5 オーダーも異なり、その変動幅は1 オーダー程度の流量と比べて非常に大きい。また、同一流量では増水期のゴミ輸送量は減水期よりも1 オーダー大きく、ゴミ輸送量と流量のヒステリシスは一般的な汚濁負荷よりも大きい。さらに、洪水規模が大きいほどゴミ輸送量は顕著になり、流域からの汚濁負荷を考える上ではゴミ輸送による寄与が有意であることが示された。

Key Words: marine litter, pollutant load, flood, L-Q curve, vegetation

1. はじめに

近年、沿岸域での大量の漂着ゴミが大きく問題視されている¹⁾。この漂着ゴミは、プラスチック製品や発泡スチロール、漁具、工業薬品用ポリ容器などの“人工系ゴミ”や流木や木片、植生などの“自然系ゴミ”から構成されている。これらの漂着ゴミは嵩張るものが多く、その回収・処理に多額の費用を要するため、それらを実施する行政機関には大きな負担となっている。また、漂着ゴミにより、漁業活動の被害や沿岸環境・生態系への影響が報告されている¹⁾。これより、漂着ゴミの実態やその起源や輸送ルートモニタリングし、対策を施すことは喫緊の課題である。

このような状況に対して、様々な研究者やNPOが我が国の海岸における漂着ゴミのモニタリング調査を精力的に展開している^{1)~4)}。これらの調査により、漂着ゴミの多くは現地海域以外から流入しており、近隣諸国からのゴミが多数を占める場所も存在している。このようなことから、日本海のような外洋や瀬戸内海等の内湾における漂流・漂着ゴミのモニタリングやその予測・評価シミュレーションが行われつつある^{5)~8)}。このような海洋の漂流・漂着ゴミは、元を辿ると陸域から河川を經由して運ばれるものが大部分を占めることから、海岸と同様に河川においてもゴミ分布調査が実施されている¹⁾。しかしながら、河川を經由して海域に流入する人工系・自然系ゴミの輸送量に関するモニタリング事例は皆無であり、洪水時に著しく増加すると考えられる河川経由の浮遊ゴミ輸送量の実態

は全く把握されていない。そのため、海域での漂流ゴミシミュレーションにおいて最も重要な河川でのゴミ流入条件の設定は実測データが無いがゆえに曖昧のままである。

本研究では、洪水時において河川を流下する浮遊ゴミを採取し、洪水時の自然系ゴミ輸送量の実態を把握することを試みる。ここでは、千葉県・手賀沼に流入する大堀川において、一つの洪水イベント時の浮遊ゴミ輸送量調査を実施した。採取されたゴミが自然系ゴミのみであったので、洪水時の自然系ゴミの質量・有機物・窒素 N・リン P 輸送量等を算出し、ゴミ起源の汚濁負荷と河川水の汚濁負荷量を比較する。なお、本来、海域に流入する大河川においてゴミ輸送量調査を行うべきであるが、観測準備の都合や降雨条件の関係で、目標とする洪水時調査を行うことができなかった。そのため、沼に流入する大堀川での調査を行ったが、調査結果から得られた洪水時のゴミ輸送量のヒステリシスや流量依存性は貴重な知見であると考え、速報という形でこれらの結果を以下に示す。

2. 現地調査の概要

(1) 観測サイト

観測対象とした河川は、図-1に示すように、手賀沼の主要流入河川である大堀川(全長 12.9km, 流域面積 31km²)である。大堀川流域の 75%は市街化されており、大堀川は典型的な中小都市河川の一つである⁹⁾。観測地点は、河

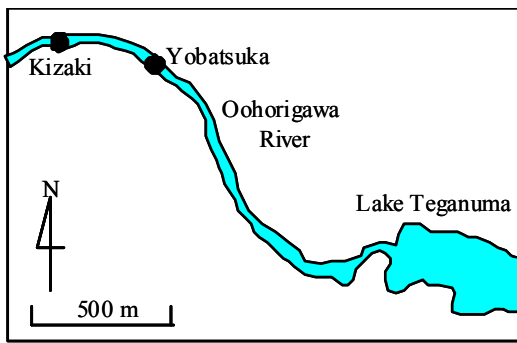


図-1 現地観測サイト

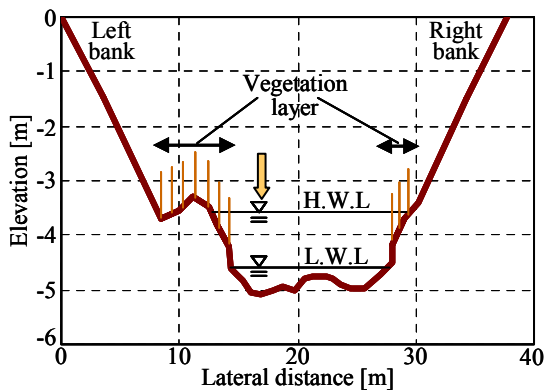


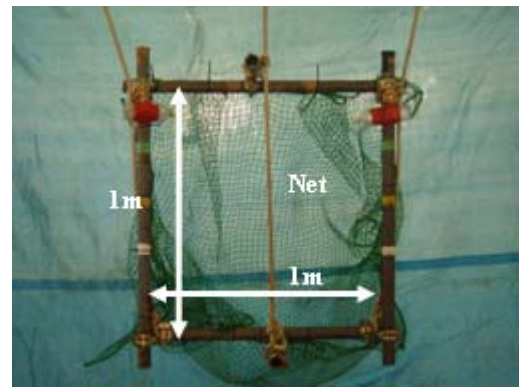
図-2 大堀川・木崎橋における横断面形と観測位置

口部から 1.4km 上流の湾曲部に位置している木崎橋である。この木崎橋の横断面では、図-2 に示すように、低水路幅は約 15m であり、高水敷を有する複断面河道となっており、その高水敷の一部に植生が自生している。また、木崎橋地点における流域面積は 20km² である。

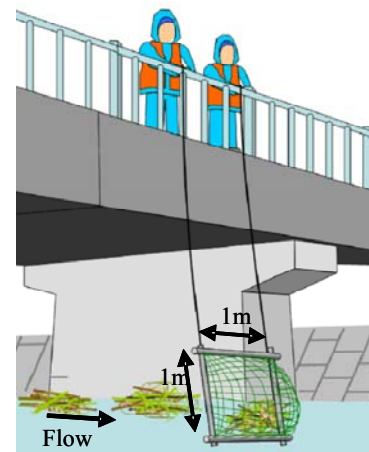
(2) 観測方法

洪水時河川における自然系ゴミ輸送量の実態を把握するために、自然系ゴミを回収することを試みる。具体的には、図-3 (a) に示す鉄枠 (1m 四方) に網目間隔 2.5cm のネットを装着したゴミ採取装置を作成し、この装置を橋上から河川内に一定時間投入した (同図 (b))。観測位置は、横断位置 17m (図-2 中矢印) の地点である。洪水中を輸送されるゴミの多くは、自然系・人工系に関わらず水表面付近を浮遊して流下すると考えられるので、河川表層の浮遊ゴミを捕獲できるようにゴミ採取装置の高さを 1m と決め、水表面上にゴミ採取装置の一部が出るように設置した。ただし、観測対象断面の水深が低水時では 1m 以下であったので、洪水ピーク付近を除いて、全層にわたるゴミを採取したことになる。また、ネットに捕獲されたゴミを落とさないように橋上に引き上げるために、ネットはある程度たるませられた形で本装置に装着されている。

木崎橋において 2008/11/28 に生じた洪水イベント (総雨量 32.5mm, 時間最大雨量 10mm) を対象として現地観測を行った。ゴミ採取装置の投入時間は低水時には 5 分間と



(a) ゴミ回収用装置



(b) ゴミ回収用装置を橋上から吊るす様子

図-3 ゴミ採取の様子

したが、ゴミの量が多い出水中には 1~5 分間であり、このゴミ採取作業を概ね 30 分間隔で行った。本装置は、ネットをすり抜ける小さなゴミを捕獲することはできないが、塊となって流下することが多い植生を概ね採取できていることは目視により確認した。また、今回回収されたゴミは、すべて自然系ゴミの植生であり、人工系ゴミは採取されなかった。

ゴミ輸送量 L と流量 Q の関係を調べる際には、木崎橋における流量データを同時観測していなかったため、下流に位置する呼塚橋 (図-1) の流量データから木崎橋の流量データを求める。具体的には、流域面積 28km² の呼塚橋における流量データに流域面積比 (=20/28) を掛けたものを木崎橋の流量として与えた。なお、呼塚橋での流量データは、水位観測値と水位流量曲線から算出したものである。

(3) 分析方法

ゴミの質量、有機物、窒素 N、リン P とその輸送量を把握するため、分析項目は湿質量、乾燥質量、強熱減量 IL, N・P 含有量としている。まず、回収されて湿ったままのゴミの質量 (湿質量) 計測及び植生種の同定を行い、その後、ゴミを乾燥炉 (温度: 100 度) で乾燥させて乾燥

質量を計測した。さらに、そのゴミを600度の乾燥炉に入れて強熱残留物の質量から、有機物指標となる強熱減量ILを求めた¹⁰⁾。また、ゴミ中の窒素・リン含有量を計測する際には、細かくすりつぶしたゴミサンプルを蒸留水中に入れ、そのサンプル水のT-N, T-PをN・P自動分析装置であるオートアナライザー (swAAt, BLTEC 製) を用いて分析した。同じサンプル水のSSを別途計測して、得られたT-NとT-PをSSで除すことでゴミ中の窒素・リン含有量を求めた。

3. 現地調査結果と考察

(1) ゴミの質量・有機物・栄養塩輸送量の時間変化

洪水時河川におけるゴミ輸送量の実態を把握するために、2008/11/28に生じた洪水イベントにおける自然系ゴミの乾燥質量・有機物・窒素・リンの単位幅輸送量及び有機物・窒素・リン含有量の時系列変化を図-4に示す。ここでは、流量や時間雨量(我孫子アメダス)も合わせて示す。ゴミの質量輸送量は、ゴミサンプルの乾燥質量を装置投入時間で割られた値であり、ゴミ採取装置の横断方向の幅が1mであるので、得られた結果は単位幅あたりでの輸送量となる。また、この質量輸送量に有機物・窒素・リン含有量を掛けることにより、各物質の単位幅輸送量が得られる。なお、乾燥質量に関しては全てのゴミサンプルについて分析したが、有機物・窒素・リン含有量は流量変化に合わせてサンプルを間引いて分析を行っている。そのため、有機物・窒素・リン輸送量算出時には、各物質含有量の結果を線形内挿した結果を採用している。

この洪水時では、6, 7時台に降雨が観測され、それに伴い流量ピークは8時に現れた(同図(a))。ピーク流量(=21m³/s)は洪水前の流量値(=1m³/s)より1オーダー大きい。それに対して、ゴミ質量の単位幅輸送量(同図(b))に関しては、観測期間中の最低値は2*10⁻³g/s/m、ピーク時は1.6*10¹g/s/mであり、質量輸送量は洪水水中に約4オーダーも変化した。また、質量輸送量の変化は概ね流量に追従しているが、増水期の質量輸送量の方が減水期よりも大きい。次に、有機物に着目すると(同図(c))、その含有量(強熱減量)は65~75%を推移し、そのピークは流量ピークより早い増水期に現れている。また、有機物の単位幅輸送量は概ね乾燥質量輸送量と同様に変化している。さらに、同図(d), (e)に示す窒素・リン含有量は有機物含有量よりも洪水時に変化が大きく、その最小値と最大値は、窒素含有量では1.3→3.2%(2.5倍)、リン含有量では0.12→0.65%(5.4倍)である。これを反映して窒素・リン輸送量のピーク値は最小値よりも4, 5オーダー大きい。以上より、ゴミ輸送量の変動幅は、流量と比べて非常に大きく、ゴミ輸送量は洪水ピーク付近

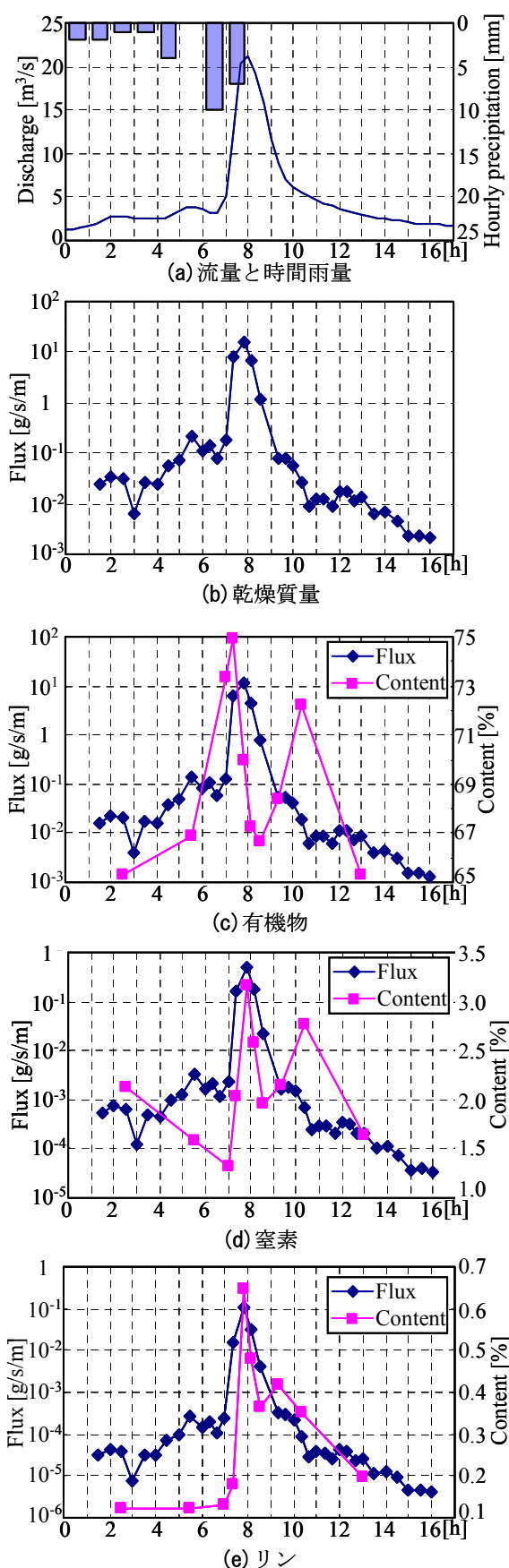


図-4 2008/11/28の洪水時における流量・時間雨量(我孫子アメダス)、ゴミの乾燥質量・有機物・窒素、リン輸送量及び含有量の時間変化(各輸送量は全て単位幅あたりの量を示す)



(a) 低水時 (2:30)



(b) 洪水ピーク時 (8:10)

図-5 回収された自然系ゴミ

に集中することが示された。

(2) 洪水時における自然系ゴミの種類について

採取された自然系ゴミの一例として、洪水発生前の低水時 (2:30) と洪水ピーク時 (8:10) に採取されたゴミを図-5 に示す。洪水発生前ではイチョウ、ケヤキ等の葉が多く見られたが、洪水ピーク時にはセンダングサやセイタカアワダチソウ等の河川内に繁茂している植生が大部分を占めていた。このように、洪水前とピーク時では植生種が大きく変化し、これがゴミ中の有機物・窒素・リン含有量やその輸送量を変化させていることが分かる。

(3) ゴミ輸送量と流量の関係

洪水時におけるゴミ輸送量と流量の関係性を確認するために、単位幅質量輸送量と流量の相関図を図-6 に示す。ここでは、増水期と減水期を色分けして表示している。これを見ると、同一流量では、増水期の質量輸送量の方が減水期の値よりも1, 2 オーダーも大きくなっている。このような洪水中におけるゴミの単位幅質量輸送量と流量のヒステリシスは、SS フラックス等の場合よりも非常に大きなループを描いている。同様な状況は、有機物・

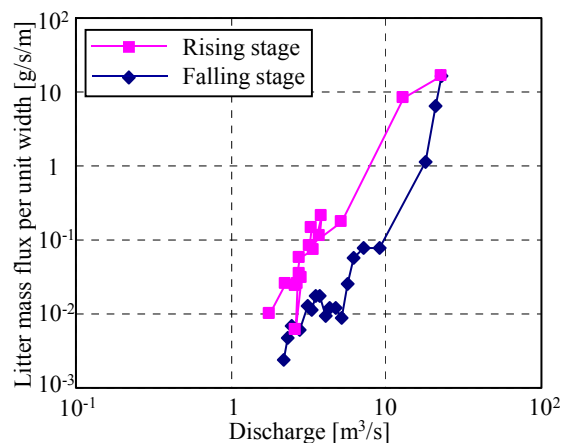
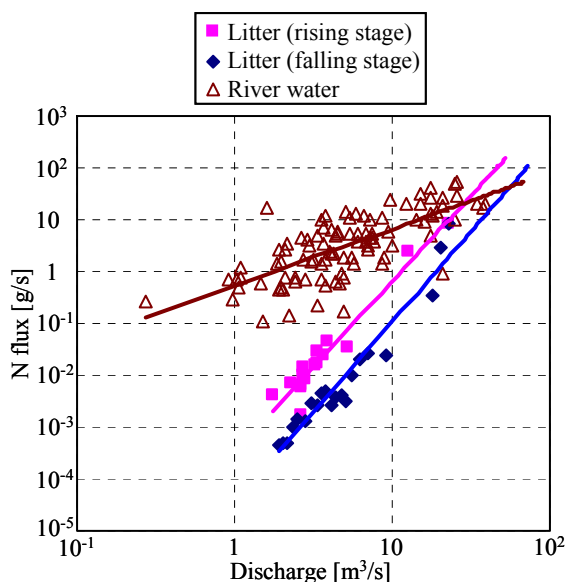


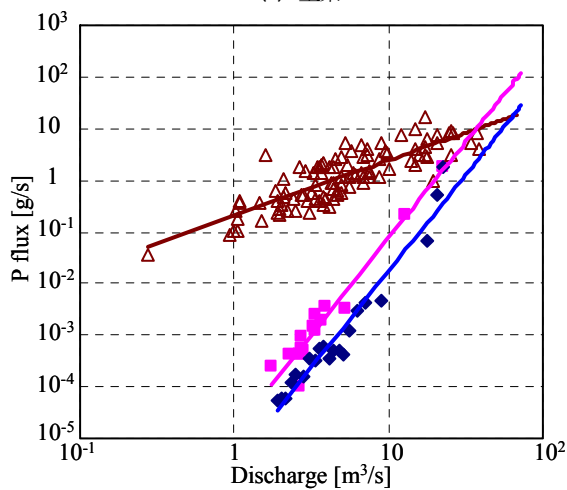
図-6 ゴミの単位幅質量輸送量と流量の関係

窒素・リンの単位幅輸送量についても確認されている。このようなヒステリシスの要因としては、増水期において水位が増加し高水敷が冠水すると、高水敷に多量に繁茂もしくは枯死した植生が流亡を開始し、急激に自然系ゴミ輸送量が増大する。その後の減水期には、高水敷上の植生の一部は既に流出して存在しないためゴミ輸送量が減少するものと考えられる。また、植生流亡の外力となる底面せん断力は一般に増水期の方が減水期よりも大きいことも、自然系ゴミ輸送量の大きなヒステリシスを発生させる要因になると考えられる。

このようなゴミの単位幅輸送量データを用いて、断面全体の輸送量を算出する。今回の観測では、横断面内のある固定点におけるゴミの単位幅輸送量のみを計測したので、単位幅データを横断面全体に拡張する上では、未計測エリアの低水路や高水敷におけるゴミ輸送量の横断分布データが必要となる。しかしながら、このようなゴミ輸送量の横断分布計測を実施していないので、ここでは横断面全体にゴミ輸送量が一律であると仮定し、ゴミの単位幅輸送量の観測値に各時刻の水面幅を掛けて断面全体のゴミ輸送量を求めることとする。この時の水面幅は、時々刻々の水位観測データと横断面形から算出されている。このようにして得られた断面全体のゴミ輸送量 L と流量 Q の相関図を図-7 に示す。ここでは、窒素 N とリン P の輸送量を対象としており、図-6 と同様に、増水期と減水期に分けて表示している。また、ゴミの窒素・リン輸送量の比較対象として、一般的な汚濁負荷量である河川水中の窒素・リン輸送量のうち、懸濁態窒素 P-N とリン P-P の輸送量と流量の結果も合わせて表示する。この河川水質データは、大堀川・呼塚橋における 2002 年～2004 年までの 6 つの出水イベント時の観測結果である¹¹⁾。これより、流量が小さい場合には河川水の P-N, P-P 輸送量がゴミ輸送量よりも数オーダー大きいが、流量が大きくなると両者は同オーダーとなっている。このように、流量に対するゴミ輸送量の増加率は、河川水



(a) 窒素



(b) リン

図-7 ゴミ及び河川水懸濁物質の輸送量 L と流量 Q の関係 (図中の実線は、各色に対応する観測値の近似曲線を示す)

(P-N, P-P 輸送量) の場合よりも大きい。

そこで、各データに対して $L-Q$ 式 ($L = aQ^b$, a, b : 係数) を近似曲線として当てはめ、得られた結果を同図の実線として表示する。このように、 $L-Q$ 式の傾きとしては、ゴミ輸送量の方が増水期・減水期共に P-N, P-P 輸送量よりも大きく、流量が大きくなると、ゴミ輸送量に関する近似曲線は河川水データのものとは交差する。各データに対する $L-Q$ 式中の係数 a, b をまとめたものを表-1 に示す。ここでは、窒素とリンに加えて、質量や有機物も対象として、ゴミ輸送量の増水期・減水期・全期間のデータに対する結果が表示されている。また、河川水データとしては、観測データが無い有機物を除いた質量、窒素、リン輸送量に関してそれぞれ SS, P-N, P-P の $L-Q$ 式を示している。なお、各輸送量 L と流量 Q の単位は、各々 $g/s, m^3/s$ である。これより、係数 a は、河川水とゴミでは 2~5 オーダーも異なっている。一方、べき指数 b に着目すると、河川水に関しては $b=1.1\sim 1.4$ であ

表-1 $L-Q$ 中の係数 a, b (a の単位: g/s)

		Litter			River water
		Rising stage	Falling stage	Total period	
Mass	a	2.07×10^{-2}	2.32×10^{-3}	9.92×10^{-3}	23.0
	b	3.18	3.28	2.87	1.40
Nitrogen	a	3.25×10^{-4}	3.45×10^{-5}	1.52×10^{-4}	0.533
	b	3.30	3.49	3.04	1.09
Phosphorus	a	1.43×10^{-5}	3.25×10^{-6}	9.51×10^{-6}	0.205
	b	3.72	3.73	3.40	1.07
Organic materials	a	6.18×10^{-3}	8.67×10^{-4}	3.57×10^{-3}	—
	b	3.50	3.35	2.99	—

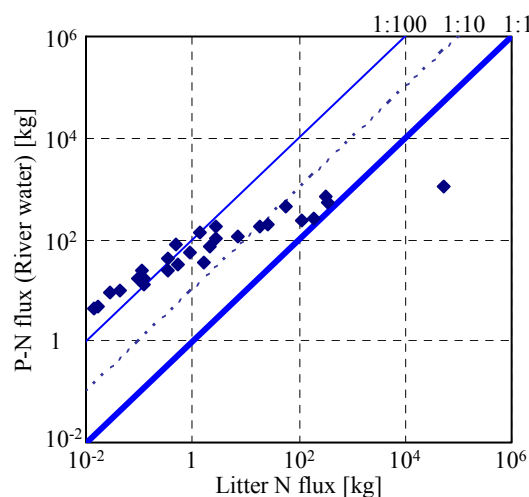


図-8 各洪水イベントにおけるゴミの窒素総輸送量と河川水 (P-N) の総輸送量の相関図

るが、ゴミに関して $b=2.9\sim 3.7$ と極めて大きい、ということが全項目に共通している。この結果より、洪水の規模とともにゴミ輸送量は大きくなり、大規模洪水時に集中的に多量のゴミが輸送されることが示唆された。

(4) 洪水イベント時のゴミ総輸送量の試算

このようなゴミ輸送量や河川水懸濁態物質輸送量に関する $L-Q$ 式に基づいて、様々な洪水イベント時における総輸送量を試算した結果を図-8 に示す。ここでは、大堀川・呼塚橋における 2007 年 1 年間の流量データを用いて、合計 27 の洪水イベント時における窒素総輸送量の結果を表示している。また両輸送量の差を見るために、ゴミの総窒素輸送量と P-N 総輸送量の比が 1:1, 1:10, 1:100 の実線も合わせて示す。P-N 総輸送量が相対的に小さい (洪水規模が小さい) と、ゴミ輸送量は P-N 輸送量の 1% 以下と非常に小さく、これは全イベント中の 9 イベントに相当する。洪水規模と共に両者の差は縮まり、両輸送量の比が 1~10% となるのは 11 イベント、10~100% となるのは 6 イベントである。さらに年最大の洪水イベント (2007/6/10, 最大時間雨量 57mm) では最大流量が $100m^3/s$ を越えたため、ゴミ総輸送量は P-N 総輸送量を

大幅に上回る。このように、大きな規模の洪水イベントほど河川水 (P-N) の輸送量と比べてゴミ輸送量は顕著になっている。以上のことから、流域からの汚濁負荷を考える上では、ゴミ輸送による寄与が有意であることが示唆された。なお、ゴミ輸送量に関するより定量的な議論を行う上では、多くの洪水イベントや別の河川におけるデータ収集及び断面全体のゴミ輸送量評価の精緻化を行うことは必須である。また、汚濁負荷の観点からゴミ輸送量を正確に評価するには水中におけるゴミの分解過程を把握する必要がある、これらは今後の課題とする。

4. おわりに

本研究で得られた主な知見は、以下の通りである。

- (1) 既存の調査例が皆無である洪水時河川の浮遊ゴミ輸送量の観測・分析・データ解析法の一例を示した。
- (2) 洪水イベント時におけるゴミ輸送量の最小値と最大値は4, 5 オーダーも異なり、この変動幅は1 オーダー程度の流量と比べて非常に大きい。
- (3) 同一流量条件では、増水期のゴミ輸送量は減水期よりも1 オーダーも大きく、ゴミ輸送量と流量の非定常ループ (ヒステリシス) は一般的な汚濁負荷よりも大きい。また、流量に対するゴミ輸送量の増加率が河川水 (P-N, P-P 輸送量) の場合よりも大きい。
- (4) 洪水規模が大きいほどゴミ輸送量は大きくなり、流域からの汚濁負荷を考える上ではゴミ輸送による寄与が有意であることが示された。

謝辞：本研究の一部は、(財) 河川環境管理財団の河川整備基金助成事業 (研究代表者：二瓶泰雄) によって実施さ

れた。現地調査を実施する際には、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多大なる御助力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 小島あずさ, 眞淳平: 海のゴミ—拡大する地球環境汚染, 中公新書, pp.1-232, 2007.
- 2) 山口晴幸: 外国から漂着するゴミによる海岸汚染, 土木学会誌, Vol.83, No.3, pp.60-62, 1998.
- 3) 藤枝繁, 小島あずさ, 兼広春之: ディスポーザブルライターを指標とした海岸漂着ごみのモニタリング, 廃棄物学会論文誌, Vol.17, No.2, pp.117-124, 2006.
- 4) 藤枝繁, 小島あずさ, 金子博: 国内海岸漂着ごみのモニタリング手法の整理と今後の進め方, 沿岸域学会誌, Vol.18, No.4, pp.93-100, 2006.
- 5) 張碩勲, 磯辺篤彦, 松野健, 清水学: 東シナ海における漂流ブイの追跡モデルとその応用, 沿岸海洋研究, Vol.45, pp.125-135, 2008.
- 6) 日向博文, 諸星一信, 金津伸好: HF レーダーによる漂着ゴミ回収効率化の試み, 沿岸海洋研究, Vol.45, pp.105-114, 2008.
- 7) 橋本英資, 谷本照己, 星加章, 高杉由夫: 瀬戸内海における漂流予測モデルによる海洋ごみ分布域の推定, 海岸工学論文集, Vol.55, No.1, pp.401-405, 2008.
- 8) 目黒邦夫, 佐藤慎司, 鯉淵幸生: 海岸に漂着する流木群の挙動解析, 海岸工学論文集, Vol.53, No.2, pp.1301-1305, 2006.
- 9) 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, No.2, pp.1459-1464, 2004.
- 10) (社) 日本下水道協会: 下水試験方法上巻—1997 年版—, 297p., 1997.
- 11) 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, 水工学論文集, Vol.49, No.2, pp.1501-1506, 2005.

(2009. 5. 7 受付)

FIELD MEASUREMENT OF FLOATING-LITTER TRANSPORT IN A RIVER UNDER FLOODING CONDITIONS

Yasuo NIHEI and Norito WAKATSUKI

We conducted field measurement on floating-litter transport in an urban river under flooding conditions to determine the amount of organic materials and nutrients contained in the floating litter which comprises a major portion of marine litter. The observed result indicates that the maximum values of the transported litter volume were 10^4 - 10^5 times greater than the minimum values. The volume of floating litter transported during the rising stage was about 10 times that transported during the falling stage for the same discharge, showing appreciable hysteresis between the floating-litter transport and discharge. The floating-litter transport under flooding conditions was also found to contribute significantly to the pollutant load from watersheds.