

出水時大河川における浮遊ゴミ輸送特性に関する現地観測と 湾内DO環境へ及ぼす影響

Field Measurements of Floating-Litter Transport in a Large River under Flooding Conditions and its relation to DO Environments in an Inner Bay

二瓶泰雄¹・白川明宏²・鈴木達裕³・赤松良久⁴

Yasuo NIHEI, Akihiro SHIRAKAWA, Tatsuhiro SUZUKI and Yoshihisa AKAMATSU

To examine temporal variations of floating-litter transport and evaluate annual flux into Tokyo Bay, we did field measurements of floating-litter transport in a large river (Edogawa River) under flooding conditions. We also did a laboratory experiment to investigate the effect of the litter on the dissolved oxygen (DO) consumption of the water column. The results indicate that the peak of the floating-litter transport in flooding events are significantly different with that of the discharge, and show an appreciable dependence of the temporal variations of floating-litter transport on the flooding conditions. The annual volume of floating litters flowing into Tokyo Bay under large-scale flooding condition is an order of 10^5 [m³], and thus the DO consumption of floating litter in this condition may be almost the same as those of bottom sediments and river water.

1. はじめに

近年の沿岸環境問題として注目される大量の漂着ゴミは、直接環境影響を受け、かつ、処理費用負担を行う海岸管理者や地方自治体のローカル問題から、ゴミの多くが外来起源であるがゆえに生じる多国間外交レベルの国際的課題まで含む。そのため、NPOや研究者等がネットワークを組み、ゴミ清掃の促進やゴミ減量、ゴミの起源の特定、海岸環境・生態系に及ぼす調査研究が精力的になされている（山口，1998；藤枝ら，2006；小島・眞，2007）。しかしながら、ゴミの起源と想定されている陸域から河川を経由して海域に流入する人工系ゴミ（ペットボトル等）や自然系ゴミ（植生等）については依然としてブラックボックスであり、それがボトルネックとなり陸域を含めた統合的ゴミ管理への展開に至っていない。

このことを背景として、著者らは、出水時河川におけるゴミ輸送量の調査方法を確立し、まず中小河川の出水時調査を実施し、ゴミ輸送量動態の一例を捉えるのに成功した（二瓶・若月，2010，以下前報）。

本論文では、この研究を大幅に発展させて、大河川（江戸川）とその受水域（東京湾）をターゲットとして、出水時ゴミ輸送量調査を実施した。大河川は中小河川と異なり、流速が大きく、かつ、川幅が広いとゴミ輸送量の顕著な横断変化が存在することが予想されるため、

①大流速にも耐えられるゴミ採取装置の構築、②ビデオモニタリングシステムによる横断分布計測手法の確立、という2種類の方法に基づいて調査する。また、これらの観測結果に基づいて、東京湾への主要流入河川である荒川や多摩川におけるゴミ輸送量を推定し、江戸川の結果と合わせて、流域から東京湾への年間ゴミ流入量を算出し、それと湾内でのゴミ回収量を比較・検討する。さらに、出水時に供給される浮遊ゴミの一部は内湾の海底に沈降・堆積し、湾内環境に何らかの影響を及ぼすことが予想される（例えば、二瓶ら，2009）。そのため、浮遊ゴミのDO消費に関する基礎的実験を行い、浮遊ゴミが湾内DO環境に及ぼす影響を把握することを試みる。

2. 出水時浮遊ゴミ観測・解析手法について

(1) 現地調査方法

観測サイトは東京湾に流入する大河川の一つである江戸川・野田橋（河口から+39km）である。観測を行った出水イベントは、台風0909号出水（2009/8/10～12，流域平均総雨量：74mm，野田橋H.W.L：7.84Y.P.m）と台風0918号出水（2009/10/8，9，流域平均総雨量80mm，野田橋H.W.L：7.16Y.P.m）の二つである。このうち、台風0909号出水は、2009年最大の出水であった。

大河川におけるゴミ輸送量調査法としては、①ゴミ採取装置による浮遊ゴミの直接採取と、②デジタルビデオ（DV）カメラ画像解析によるゴミ輸送量モニタリング、という2種類を実施している。①の調査では、前報と同様に、単管で組み立てられた長方形枠にネット（網目2.5cm間隔）を取りつけたゴミ採取装置を用いる。ゴミ採取装置を橋上から降ろし水表面付近に一定時間投入

1 正会員 博(工) 東京理科大学准教授理工学部土木工学科
2 大成建設(株)(元東京理科大学学部生)
3 学生会員 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
4 正会員 博(工) 山口大学准教授工学部社会建設工学科

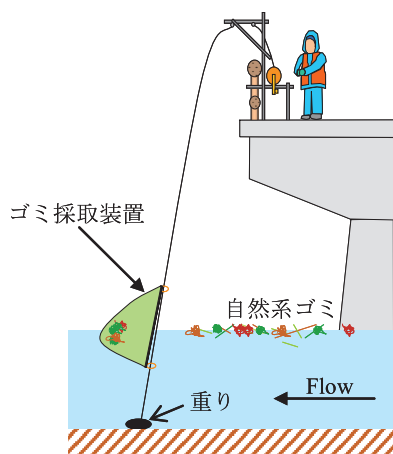


図-1 浮遊ゴミ採取の様子

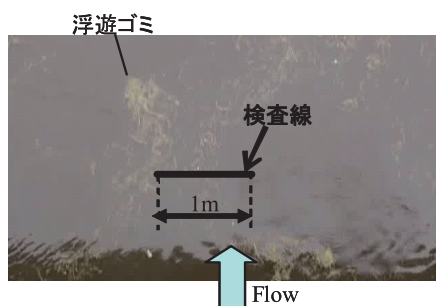


図-2 実際の撮影画像と解析方法の概要

し、一般に表層を流下する浮遊ゴミを採取し、単位横断面幅当たりのゴミ輸送量を計測する。ただ、大河川では流れが強いため本装置が著しく傾き、また、中小河川と異なり植片サイズが大きいことが予想されることから、ゴミ採取装置のサイズや重量を大きくして、姿勢をほぼ鉛直に保つ必要がある。そこで、重り（40～60kg）を付けたワイヤに本装置を通し、そのワイヤをウィンチにより上下する観測装置を構築した。この際、ゴミ採取装置自体は2本のロープを人力で上下させて位置を固定している。また、採取装置のサイズは、前報と同じ横1m×高さ1mのものと、新たに横2m×高さ1mのものを用意し、この二種類を使用した。ゴミ採取装置の投入時間は、ゴミの量に応じて、1～5分間とした。なお、このゴミ採取調査は、河川横断面内の低水路中央部の1点のみとしている。

前述したように、大河川では、横断面内における浮遊ゴミの空間変化が顕著である可能性が高いことから、ゴミ輸送量の横断分布計測を行う必要があるが、①のゴミ採取装置を用いた観測を横断面内の多地点で行うのは容易ではないため、①の観測は低水路中央部1点のみとしている。それを補うために、②のDVカメラを用いたゴミ輸送状況の撮影を複数地点で行い、画像解析によりゴミ輸送量の横断分布や総輸送量を算出する。具体的には、まず、DVカメラ（HDR-SR12, SONY製）を用いて橋上から河川水面をほぼ垂直に撮影する。今回の対象出水が低水路のみ流れ、高水敷には冠水はするものの低水路境界部を除き明確な流れやゴミ輸送は見られなかったことから、撮影範囲は低水路のみ、撮影地点の横断方向間隔は10mとする。この中には、①のゴミ採取観測と同地点で同時に行っているものも含まれている。各地点における撮影時間は最低1分間である。このようにして得られた動画を静止画に分割し、その中に図-2のように検査線

（長さ1mまたは2m）を設け、検査線内に占める浮遊ゴミの割合 D_f を算出する。浮遊ゴミの判定については目視で行っており、その一例を同図中に示している。これを①の観測と同時に実施し、①で得られた単位幅ゴミ輸送量と②の画像解析で求められた浮遊ゴミの割合 D_f の相関関係を求める。また、横断面内の複数地点でビデオ撮影を行い D_f を求めて、上記の関係式から単位幅ゴミ輸送量の横断分布を算出し、それを積分してゴミ輸送量を求めている。画像解析の対象時間は50秒間とする。

(2) 分析方法

①の観測により採取されたゴミを実験室に持ち帰り、種類別や写真撮影、湿質量計測を行い、その後、乾燥質量や強熱減量IL、窒素N・リンP含有量を分析する。分析手法としては前報と同じとする。分析結果及び画像解析結果により、横断面全体のゴミの質量・有機物・N・P輸送量を算出し得ることとなる。なお、本論文では、紙面の都合上、N・P輸送量の観測結果については省略する。

(3) データ解析

上記の結果から東京湾への総ゴミ流入量を推定するために、一般的な汚濁負荷解析（武田，2001）と同様に、江戸川におけるゴミ総輸送量 L と流量 Q の関係式である L - Q 式を算出する。さらに、上記の L - Q 式の両辺を流域面積で除した L' - Q' 式を合わせて求め、その式より観測データの無い荒川と多摩川のゴミ輸送量を求める。これら3河川の結果の総和を東京湾へのゴミ総流入量とし、2006年から2008年について算出する。その際に用いる各河川河口域の流量データに関しては、二瓶ら（2007）と同じ算出方法により得られた結果を用いる。さらに、東京湾内の7港区のゴミ回収量データを収集し、流域からのゴミ流入量と湾内でのゴミ回収量を比較・検討する。

3. 浮遊ゴミ輸送特性に関する観測結果と考察

(1) ゴミ輸送量の時間変化

出水時大河川におけるゴミ輸送量の基本的な特徴を把握するために、年最大出水を記録した台風0909号出水時

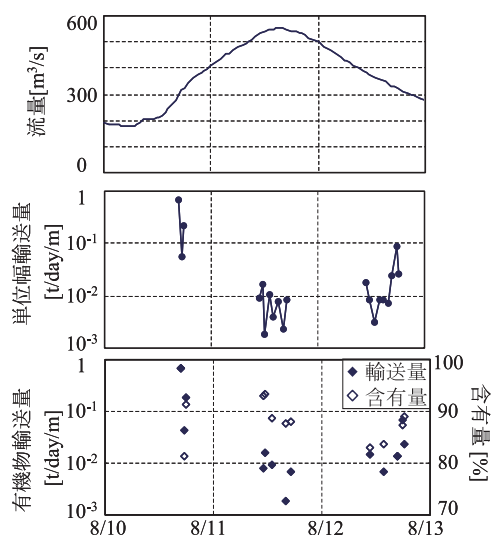


図-3 台風0909号出水における流量とゴミの乾燥質量・有機物に関する単位幅輸送量の時間変化（江戸川・野田橋）

における流量、単位幅質量輸送量、有機物に関する単位幅輸送量及び含有量の時間変化を図-3に示す。ここでは、江戸川・野田橋の結果を表示する。これより、ゴミの単位幅質量輸送量は増水期初期や減水期後期にピークを迎えており、逆に流量の最大値付近ではゴミの単位幅質量輸送量はピーク時よりも2オーダーも低くなっている。類似した傾向は有機物輸送量についても観測されている。また、ここでは省略しているN・P輸送量においても同じ傾向が見られる。前報で調べた中小都市河川（大堀川）では、概ね流量とゴミ輸送量はほぼ同時にピークを迎えており、ゴミ輸送量の時間変動特性は両河川において大きく異なっている。

大河川である江戸川においてゴミ輸送量と流量のピークが大きくずれる要因としては、ゴミ輸送量がピークを迎えるのは高水敷が冠水する程度の水位であるため、低水路と高水敷境界部に堆積する植片等のゴミが冠水・干出のタイミングで一気に流出したものと考えられる。また、高水敷が冠水すると断面積が一気に拡大し流速が低下するため、今回の出水規模では高水敷の植生が流出するほどの流速レベルに達しなかったものと考えられる。前報の大堀川はほぼ単断面河道であり、両岸に繁茂する植生が観測を行った出水時に流出していたことが確認されている。本論文で対象とした出水では高水敷の植生が流亡するほどの規模ではなかったため、流量ピークとゴミ輸送量のピークは大きくずれたが、高水敷の植生が流出する程度の大規模出水時では、大堀川で観測されたようなゴミ輸送量の時間変化を示すものと考えられる。

(2) 出水時の浮遊ゴミの種類

出水時のゴミの内訳を把握するために、採取されたゴ

表-1 ゴミ種類の割合（質量換算）

ゴミの種類	台風0909号	台風0918号
イネ科等植生	68.9%	31.4%
枝	24.1%	50.4%
木の葉	0.9%	12.0%
人工系ゴミ	6.1%	6.2%

ミを植片等の「自然系ゴミ」とプラスチックなどの「人工系ゴミ」に分け、さらに自然系ゴミについてはイネ科植生、枝、木の葉に分類した。その結果の一例として、ゴミの総質量に対する各種類の質量割合を表-1に表示する。ここでは、各出水イベントにおいて採取されたゴミの総和を対象としている。これより、両イベントともに、自然系ゴミが全体の94%を占めており、人工系ゴミ輸送量は少ないことが分かる。海岸漂着ゴミに関しては、一般に人工系ゴミが問題視されることが多いが、観測を行った江戸川や前報で対象とした大堀川では大部分は自然系ゴミが流下していた。また、自然系ゴミの内訳としては、8月に生じた台風0909号時ではイネ科植生が全体の約70%を占めているが、10月に発生した台風0918号時では枝や木の葉が60%を超えている。これは、植生の繁茂状況の季節変化を反映していると考えられる。

(3) 画像解析手法の計測精度

ゴミの総輸送量を把握するのに不可欠なDVカメラの撮影画像に関する解析結果をゴミ輸送量に変換するために、画像解析により判定された検査線上の浮遊ゴミ輸送量 D_f と、ゴミ採取装置により得られた単位幅ゴミ質量輸送量の相関関係を図-4に示す。これを見ると、両者には、図中に示すような直線関係が得られており、良好な相関関係が得られた（ $R^2=0.99$ ）。これより、本論文で提示しているゴミ輸送量に関する画像解析手法の精度は良好であることが示された。また、この相関関係を用いて、画像解析結果から単位幅ゴミ輸送量に変換し、ゴミ輸送量の横断分布や総輸送量を算出する。

(4) 流量とゴミ輸送量の相関関係

ゴミ輸送量特性を江戸川と大堀川とで比較するために、流量やゴミ輸送量を流域面積で除した比流量と比ゴミ輸送量の相関図を図-5に示す。ここでは、ヒステリシス効果が分かるように観測データを線で繋ぎ、矢印で増水期から減水期への変化を表示する。前述したように、大堀川では流量と共にゴミ輸送量が大きくなる右肩上がりの傾向が見られるが、江戸川では高水敷に冠水する程度の流量でゴミ輸送量のピークが見られる、という“山型”の形になっており、土砂や栄養塩・有機物等の一般的なL-Q関係では見られない結果となっている。また、両河川ともに、増水期のゴミ輸送量の方が減水期よりも

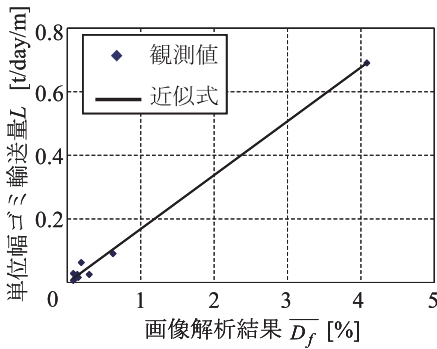


図-4 単位幅ゴミ輸送量の観測値と画像解析結果の比較

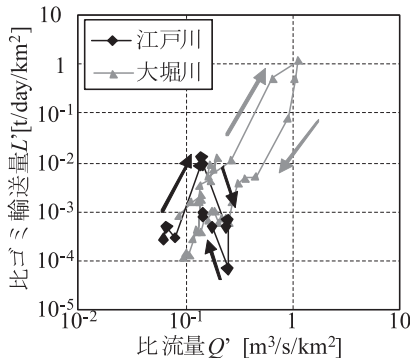


図-5 比流量と比ゴミ輸送量の相関図

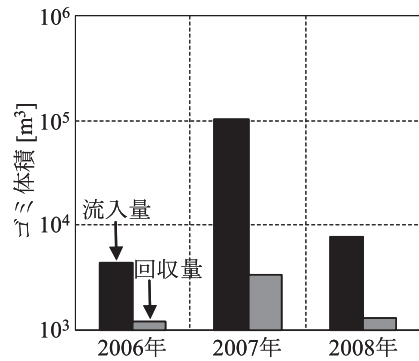


図-6 東京湾へのゴミ流入量推定結果と回収量の経年変化

対象となる河川水、底泥（河床堆積物）、出水時懸濁物質の4種類とする。これらのサンプルは江戸川（全種類）と神田川（河川水と底泥のみ）で採取された。このうち出水時懸濁物質に関しては、河川内に設置したセディメントトラップにより採取した。DO消費実験で用いた装置は、遮光条件下で、恒温制御用ヒーターが取り付けられた水槽（60×30×36cm）に、サンプルを入れたアクリルパイプ（内径4cm）を入れ、実験初期にDOを飽和させ、2時間毎に12時間までパイプ内のDOを計測した。「河川水」の実験ではアクリルパイプ内にサンプル水300mlを入れて実験を行った。「底泥」と「出水時懸濁物質」の実験ではアクリルパイプ内に厚さ5cmのサンプルを敷き、その上に純水300mlを入れた。「植生」についても、所定量（=300mg）をアクリルパイプに入れ、同様に純水300mlを入れた。実験条件としては、水温を25、20、15℃及び塩分条件は0（淡水）と30‰（海水）、という環境下で上記サンプルの実験を行った。また、実験前後の水質（COD、T-N、T-P等）や底質等も計測した。

(2) 実験結果

各サンプルのDO低下量 ΔDO の時間変化に対して近似式（ $\Delta DO = a \exp(-bt)$, t : 時間[hour], a, b : 係数）を適用して得られた酸素消費係数 b を図-7に示す。どのサンプルも概ね水温25℃の酸素消費係数が大きく、有機物の種類により結果は異なる。河川水はバルクでDO消費するのに対して、他は底面でのDO消費となるので、上記のままでは比較できない。そのため次式に示すDOシンク項Sinkの形で各サンプルのDO消費量を試算した結果を図-8に示す。

$$Sink = bCOD + \frac{1}{h}(D_m + D_p) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで D_m と D_p は、河床堆積物（出水時懸濁物質も含む）と植生によるDO消費速度、CODは現地データ（=4mg/L）を与え、 h は想定する底層厚さ（=5m）とする。植生の

大きく、ヒステリシスが顕著であることは共通している。前述したように、大規模出水では大量のゴミ輸送が流量ピーク時にも生じることを考慮すると、大河川では、今回観測した中小規模出水では「山型」（図中太線）、大規模出水では「直線型」（図中細線）の L' - Q' 関係を用いてゴミ輸送量を評価することが適切であると考えられる。

(5) 海域へのゴミ輸送量及び回収量の比較

上記の L' - Q' 式から得られた江戸川・荒川・多摩川経由のゴミ流入量推定結果と東京湾内のゴミ回収量の年間値（2006-2008年）を比べた結果を図-6に示す。これより、ゴミ流入量は回収量を大幅に上回っており、その差は大規模出水が生じた2007年で顕著になっている。このようなことから、東京湾への流入ゴミの多くは、海底や海岸に堆積するか外洋に流出しているものと推察される。

4. 浮遊ゴミのDO消費特性に関する基礎実験

(1) 実験方法

大量に湾内に流入する自然系浮遊ゴミの何割かは海底に堆積し、分解することで湾内の水底質環境に何らかの影響を及ぼすと考えられる。そこで水質項目としてDOに着目し、浮遊ゴミのDO消費特性を調べる。

DO消費実験の対象サンプルは、浮遊ゴミとして想定される植生（イネ科）に加え、一般的なDO消費実験で

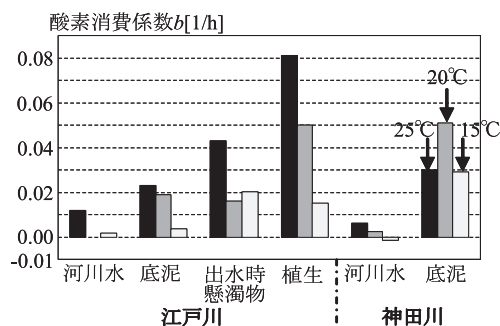
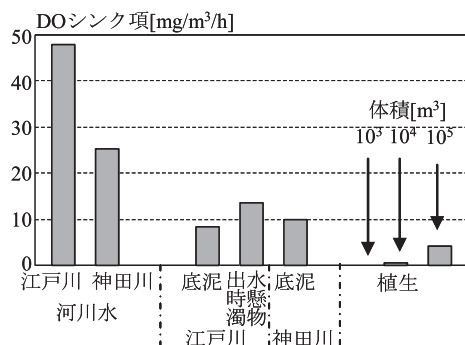
図-7 各有機物サンプルの酸素消費係数 b 

図-8 DOシンク項(式(1)第1, 2, 3項)

DO消費速度 D_p は、植生体積濃度に依存するため、実験値に対し現地での体積濃度と実験での体積濃度($=1.05 \times 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{m}^3$)の比を掛けている。現地での植生体積濃度は、前章の植生流入量を参考に $10^3 \sim 10^5 \text{ m}^3$ とし、それが大河川河口(面積: 50 km^2)に堆積する場合を考える。河川水によるDO消費が大きい、底泥や懸濁物質は河川水の半分程度と大きい。植生は、平年の出水規模(植生: 10^3 m^3)では有意でないが、大出水(同 $10^4 \sim 10^5 \text{ m}^3$)では底泥と同程度の有意なDO消費を行っている。これより、大出水時には、懸濁物質や植生が大量に輸送されるため、湾内の貧酸素化が強化・長期化される可能性が高いことが示唆された。

5. まとめ

本研究では、陸域から河川経由のゴミ輸送量の実態やそれが湾内水質環境への影響を把握するために、出水時大河川(江戸川)におけるゴミ輸送量調査、湾へのゴミ流入量推定、浮遊ゴミのDO消費実験を行った。得られた主な結論は、以下の通りである。

1) 今回対象とした中小規模出水時のゴミ輸送量は増水期初期や減水期後期にピークを迎え、流量ピーク付近

のゴミ輸送量は小さく、出水規模によりゴミ輸送量の時間変動特性が変化することが示された。

2) ゴミの種類としては、自然系ゴミが全体の94%を占め、その大部分が河道内に自生する植生であり、人工系ゴミは非常に少なかった。

3) L' - Q' 関係に関しては中小規模出水では「山型」、大規模出水では「直線型」となり、一般の汚濁負荷では見られない興味深い現象が生じた。

4) 江戸川・荒川・多摩川経由のゴミ流入量と東京湾内のゴミ回収量を比べた結果、ゴミ流入量は回収量を大幅に上回り、その差は大規模出水が生じた2007年で顕著である。そのため東京湾への流入ゴミの多くは海底や海岸に堆積するか外洋に流出する可能性が示唆された。

5) 植生のDO消費量は平年の出水規模(植生: 10^3 m^3)では有意でないが、大出水(同 $10^4 \sim 10^5 \text{ m}^3$)では底泥と同程度であり、大出水時には懸濁物質や植生が大量に輸送されて湾内貧酸素化が強化・長期化される可能性が高い。

なお、今回は一河川・二つの出水時の結果からゴミ輸送量特性を示したが、今後より多くの河川や出水時のデータを蓄積し、一般性の高い特性を把握する必要がある。

謝辞: 国土交通省関東地方整備局江戸川河川下流事務所には、現地観測実施に際して便宜をはかって頂いた。東京理科大学理工学部土木工学科水理研究室学生には、観測作業を実施して頂いた。ここに記して深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 小島あずさ・眞 淳平 (2007): 海のゴミ—拡大する地球環境汚染, 中公新書, pp. 1-232.
- 武田育郎 (2001): 水と水質環境の基礎知識, オーム社, pp. 155-166.
- 二瓶泰雄・高村智之・渡邊敬之 (2007): 東京湾主要流入河川における流量モニタリングの現状と課題, 海岸工学論文集, Vol.54, pp. 1221-1225.
- 二瓶泰雄・滝岡健太郎・坂井文子・重田京助 (2009): 大規模出水が東京湾の水質環境に及ぼす影響, 土木学会海岸工学論文集, Vol.56, No.2, pp. 1016-1020.
- 二瓶泰雄・若月宜人 (2010): 洪水時河川における浮遊ゴミ輸送量計測の試み, 土木学会論文集B, Vol.66, No.1, pp. 19-24.
- 藤枝 繁, 小島あずさ, 金子 (2006): 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.
- 山口晴幸 (1998): 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.