

東京湾流入河川における土砂輸送・底質環境特性

Sediment Transports and Qualities of Sediment in Rivers Flowing into Tokyo Bay

二瓶泰雄¹・重田京助²・伊藤雅人³・星野彰成⁴・福田昌洋⁵・加藤靖之⁶

Yasuo NIHEI, Kyosuke SHIGETA, Masato ITO, Akinari HOSHINO
Masahiro FUKUDA and Yasuyuki KATO

To clarify sediment transport and qualities of sediment in rivers flowing into Tokyo Bay, we performed field measurements and numerical simulation for suspended- and bed-load transports and sediment qualities in the influent rivers. Particle size and ignition loss (IL) of sediment in several influent rivers were found to be similar to those in coastal area. Bed-load transport of coarse and fine sands, which are found in sediments of tidal flat, were larger than the corresponding suspended-load transport, indicating the importance of the bed-load transport for the sediment supply to tidal flat. It is also found that one third of the total sediment yield in the whole basin of Tokyo Bay was trapped in dams located in the basin.

1. はじめに

首都圏を背後に抱える東京湾の水質環境は未だ明確な改善傾向は見られず、貧酸素水塊は拡大傾向すら見られる(安藤ら, 2005)。東京湾における水質汚濁化の主要因としては、陸域からの過剰な汚濁物質の流入に加えて、水質浄化機能を有する干潟や浅場が埋立地造成などにより消失・減少したためである。そのため、水質環境改善のための様々な陸域・海域対策の取り組みに加えて、東京湾や流入河川における定期的な水質調査が行われている(中央環境審議会, 2005)。

この陸域・海域対策を進める上で、流域から東京湾への土砂供給の質と量を把握することは不可欠である。すなわち、陸域負荷においては「粒子態(懸濁態)」の有機物・栄養塩輸送量は有意であり、特に出水時には顕著になるため(坂井ら, 2008)、流域全体の土砂動態の知見が無いと精緻な陸域負荷評価は困難である。また、海域対策の一つの柱である干潟・浅場環境再生を遂行する上では陸域からの土砂供給量の把握は必須であるが、東京湾流入河川における土砂輸送量に関する本格的な調査事例は非常に少ない(重田ら, 2008)。結果として、既存の研究では、土砂供給量評価に際して、実測データが無いが故に、ダム堆砂量データのみから推定している(東京湾河口干潟保全検討会, 2004)。さらに、流入河川

における定期的な調査は、水質データに限定されており、水質環境や陸域負荷と直接関係する底質環境調査例は少ない。

本研究では、現地観測と数値シミュレーションに基づいて、東京湾流入河川における土砂輸送特性(浮遊砂、掃流砂量)や底質環境特性に関して多角的に検討することを試みる。具体的には、①光学式濁度計による浮遊砂量の長期連続計測、②簡易数値モデル(加藤ら, 2009)に基づく掃流砂量算定、③ダム堆砂データと①、②の結果を併用した土砂生産量推定、④全流入河川における底質環境調査、という4項目を実施した。

2. 研究方法

(1) 研究対象サイト

東京湾に流入する主な河川としては、図-1に示すように、江戸川(流域面積200km²)、荒川(2300km²)、中川(987km²)、隅田川(640km²)、多摩川(1240km²)、鶴見川(235km²)、小櫃川(267km²)、養老川(246km²)、小糸川(142km²)が挙げられる。これら主要9河川の流域面積の合計は、全流域面積の約90%を占める。また、東京湾には大小36の河川が流入しているが、公用水域水質測定が行われているのは主要9河川を含む26河川である。本論文では、主要9河川にて土砂輸送量調査・解析を実施し、26河川全てにて底質環境調査を行っている。

(2) 土砂輸送量調査・解析方法

a) 浮遊砂量

土砂輸送量のうち浮遊砂量に関しては、重田ら(2008)と同様に、光学式濁度計(Compact-CLW, JFEアレック(株))を設置し、濁度の長期連続観測を行っている。観測地点は、主要9河川のうち江戸川・野田橋(河口より+39km)、荒川・笹目橋(+29km)、多摩川・田園調布堰

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 修(工) 三菱重工業(株)(元東京理科大学大学院生)
3 三菱UFJインフォメーションテクノロジー(株)(元東京理科大学学部生)
4 東京都練馬区(元東京理科大学学部生)
5 東京都(元東京理科大学学部生)
6 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

(+13km), 中川・八条橋 (+27km), 隅田川・白髭橋 (+9km), 小櫃川・富川橋 (+18km) の6河川である。観測開始時期としては、江戸川と多摩川は2006年, 荒川と中川, 隅田川は2007年, 小櫃川は2008年であり, 全地点とも2009年5月現在でも観測を継続している。また, 別途, 出水時に採水観測を行い, 得られたサンプル水のSSと濁度の相関式を河川毎に求め, この相関式と濁度計測値から時々刻々のSSを算出するとともに, 浮遊砂輸送量 L やこの L と流量 Q の相関式 (L - Q 式) を求める。河川毎の L - Q 式と河口部の流量データ (二瓶ら, 2007) を用いて, 各河川河口部における浮遊砂量を算定する。残りの鶴見川, 養老川, 小糸川の浮遊砂量に関しても L - Q 式から求めるが, その際には土地利用状況の類似性を考慮して, 鶴見川には中川の L - Q 式を, 養老川と小糸川には小櫃川の L - Q 式を各々適用する。

b) 掃流砂量

大河川において横断面全体を通過する掃流砂量の連続観測は現在の観測技術では容易ではない。本論文では, 加藤ら (2009) が提案している掃流砂量算定モデルに基づいて掃流砂量を算定する。この数値モデルでは, 横断面を計算対象とし, 1) 簡略化された運動方程式に基づいて水深平均流速と掃流力 (底面摩擦力) の横断分布を算定し, 2) 得られた掃流力と粒径別の掃流砂量式 (芦田ら, 1991) に基づいて単位幅掃流砂量を求め, それを横断面内で積分して掃流砂量を算出する。主要パラメータであるマンニングの粗度係数は全河川において $0.035\text{m}^{-1/3}\text{s}$ として与える。なお, 計算手法の詳細は, 加藤ら (2009) を参照されたい。

計算地点は, 主要9河川のうち江戸川・多摩川・中川・隅田川・小櫃川では浮遊砂量の観測地点と同じとする。荒川に関しては, 潮汐影響の無い順流域の治水橋 (+42km) とする。残りの河川については, 鶴見川・末吉橋 (+6km), 養老川・養老大橋 (+4km), 小糸川・人見橋 (+5km) とする。入力条件は, 横断面形と底質粒径分布, 水位, 流量の観測値である。底質粒径としては, 各断面2, 3箇所の表層堆積物 (厚さ: 約5-10cm) を採取し, その粒径分布の平均値を採用している。底質採取方法は後述の方法と同じである。また, 流量は二瓶ら (2007), 水位は国土交通省のデータを用いる。計算期間は2007/9/1~2008/8/31とし, 同期間の浮遊砂量と比較・検討する。

c) ダム堆砂量及び流域全体の土砂生産量の推定

東京湾流域には, 江戸川上流の利根川流域を含めると, 合計21のダムにおける堆砂量データが存在する。このデータを用いて, 最新の総堆砂量をダム供用年数で除して, 各ダムにおける堆砂速度 (1年間当たりの土砂トラップ量) を算出する。また, これらの結果と各河川における

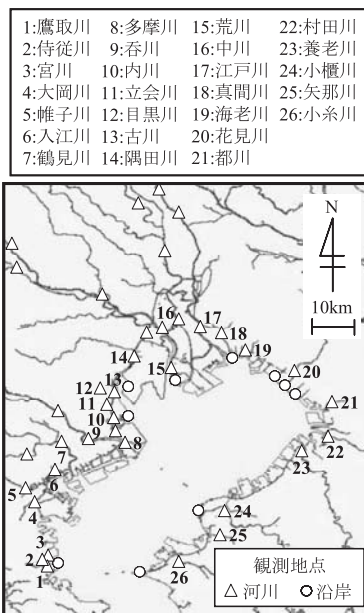


図-1 流入河川と海岸の底質環境調査地点

掃流砂量と浮遊砂量を比較して, 流域全体における土砂生産量やダムにおける土砂トラップ率を推定する。

(3) 底質環境調査方法

流入河川における底質環境調査は, 図-1に示すように, 公共用水域水質測定点である26河川38地点において行われた。各地点では, 低水路内2もしくは3箇所において橋上からグラブ式採泥器 (DIK-190A-B1, 大起理化学工業(株)製) を降ろし表層堆積物を採取した。この観測を夏期 (2008/7/24~30) と冬期 (同年11/27~12/5) の2回実施した。また, 流入河川と海岸や干潟を含む沿岸部の底質環境を比べるために, 図-1に示す沿岸部10地点において, スコップにより表層堆積物を採取した。沿岸部での観測は夏期 (2008/8/11~13) のみ行われた。

底質分析項目は, 粒径分布と強熱減量IL, 窒素N含有量, リンP含有量である。粒径分布としては, ふるい分け試験とレーザー回折式粒度分布測定装置 (SALD-3100, (株) 島津製作所製) を用いる。また, 強熱減量については下水試験方法 (日本下水道協会, 1997) に基づいて行う。窒素・リン含有量分析では, 底質を蒸留水に混ぜて濁水サンプル (体積1L) を作成し, それを2つの500ml採水瓶に分け, 一方のサンプル水に対してオートアナライザー (swAAt, BLTEC (株) 製) を用いてT-N, T-Pを分析し, もう一方のサンプル水に対してSSを分析する。これらの結果から, 底質中の窒素・リン含有量を求める。

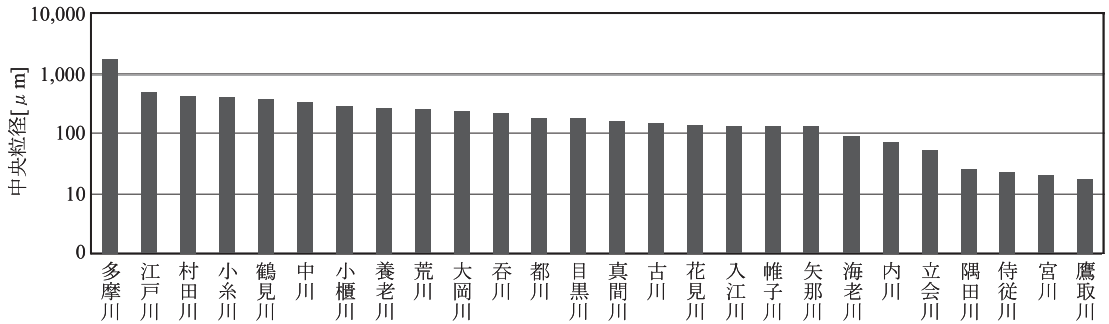


図-2 全河川における底質中央粒径（夏期と冬期の平均値）

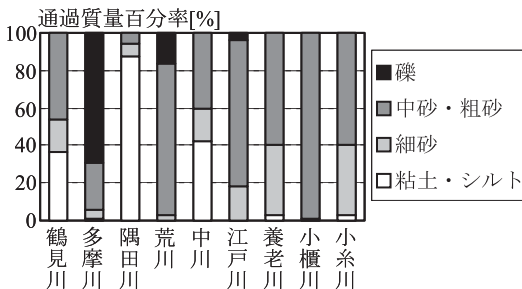
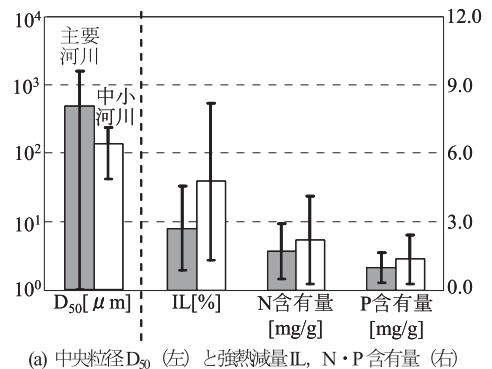
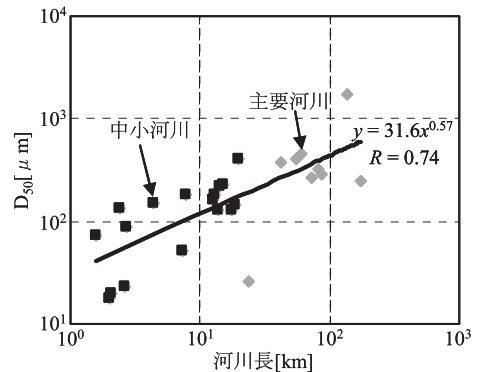


図-3 主要9河川における底質の粒径分布

(a) 中央粒径 D_{50} (左) と強熱減量 IL, N・P 含有量 (右)

(b) 中央粒径と河川長の関係

図-4 河川間における底質環境の比較

3. 底質環境特性

(1) 底質粒径

全河川における底質の中央粒径を図-2に示す。ここでは、夏期と冬期の観測結果の平均値を採用し、また、複数の地点で調査を行った河川については得られた全データの平均値を表示している。これを見ると、隅田川を除く主要河川は上位を占めており、特に多摩川の粒径は $1700\mu\text{m}$ と顕著に大きい。この多摩川を除く多くの河川における中央粒径は $100\sim 450\mu\text{m}$ の細砂・中砂成分となっているが、隅田川やいくつかの中小河川（目黒川等）では中央粒径が $30\mu\text{m}$ 以下と非常に小さい。このような底質粒径のうち、掃流砂量計算に用いられる主要9河川の底質粒径分布を図-3に示す。ここでは、粘土・シルト、細砂、中・粗砂、礫の百分率を表示している。これより、多摩川は礫、隅田川は粘土・シルトが卓越しているが、その他の7河川では細砂や中砂・粗砂の占有率が最も高い。これより、大部分の河川では細砂・中砂が多い干潟の底質材料と類似していることが分かる。

(2) 河川間の底質環境の比較

流入河川間における底質環境の違いを抽出するために、主要9河川とその他の中小河川における中央粒径 D_{50} と強熱減量 IL, N・P 含有量の平均値と標準偏差を図-4(a)に示す。ここでの主要河川の結果は9河川21地点の結果であり、中小河川に関しては他の17河川の結果であ

る。各項目の標準偏差は大きいものの、平均値としては、中央粒径 D_{50} に関しては主要河川の方が中小河川を上回るが、その他の項目では逆の大小関係となる。これは、粒径が小さいほど土粒子の表面積が大きく、相対的に多くの有機物・栄養塩を吸着し得るためである。

この河川規模と底質環境の定量関係を見るために、中央粒径 D_{50} と河川長の相関図を同図(b)に示す。河川長とともに中央粒径も増加し、べき関数を用いた近似式の相関係数 R は 0.74 と概ね良好である。同様の関係は中央粒径と流域面積の間にも確認された。このように土砂粒

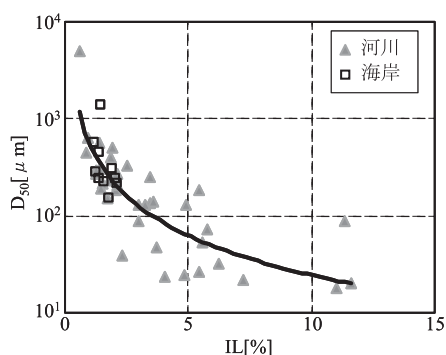


図-5 河川と沿岸部における中央粒径と強熱減量の相関関係

径が河川長や流域面積に依存する要因としては、河川長が長くなると、土砂生産量が多い山地の割合が大きくなり、かつ、河川流量が相対的に大きく底質中の微細土砂がフラッシュされやすくなることが挙げられる。ただし、底質粒径は同一河川でも大きく変化し、その変化は感潮域で顕著に見られるため（例えば加藤ら，2009），全河川の上流から河口部までの底質調査を行い河川間の粒径分布と底質環境を比較する必要がある、今後の課題である。

(3) 河川と沿岸の底質環境の比較

次に、河川と沿岸における底質環境を比べるために、河川と沿岸の強熱減量ILと中央粒径 D_{50} の相関図を図-5に示す。河川データでは、強熱減量が粒径と共に減少する、という一般的な関係が見られる。沿岸においても類似の傾向が見られ、そこでの中央粒径は0.1～1mm、強熱減量は1～2%の部分に集中している。これに該当する河川は多く、主要河川では江戸川、中川、養老川、小櫃川、小糸川、中小河川では目黒川、大岡川、真間川等がある。干潟環境の基礎となる粒径や強熱減量を指標とすると、干潟材料に適した底質環境を有するのは主要河川のみならず、中小河川も多く存在することが示された。

4. 土砂輸送特性

(1) 掃流砂・浮遊砂輸送特性

基本的な掃流砂特性を把握するために、累積流量と累積掃流砂量の時間変化を図-6に示す。ここでは紙面の都合上、江戸川、荒川、多摩川、隅田川、中川、小櫃川の結果のみを示す。総流量としては、台風0709号時（同図中矢印）のような大洪水時にはステップ的に増加するが、大部分では概ね傾きが一定の右肩上がりとなる。総流量の大小関係としては、荒川＞江戸川＞隅田川＞多摩川＝中川＞小櫃川となる。一方、累積掃流砂量は、江戸川、小櫃川、隅田川では洪水時ならず低水時も増加するが、他の河川では洪水時のみステップ的に増加し、流量とは変動パターンが異なる。これは、他の3河川では、低水

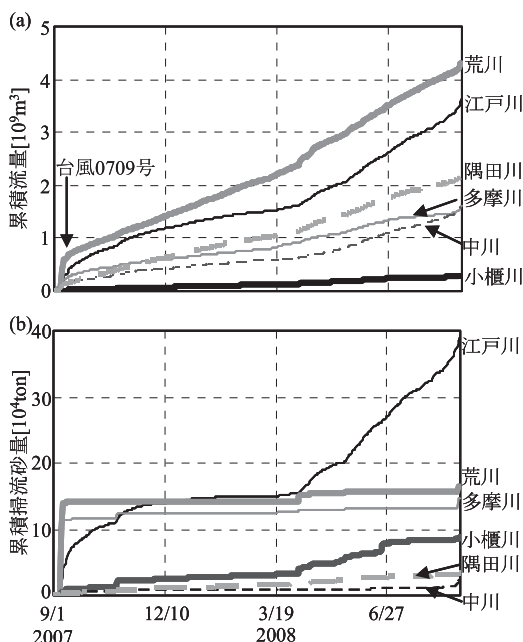


図-6 累積流量 (a) と累積掃流砂量 (b) の時間変化

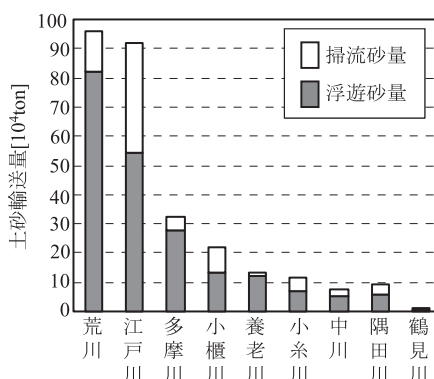


図-7 各河川における掃流砂量と浮遊砂量の年間値

時に掃流力が限界掃流力を下回るためであり、それには低水時流量が小さいことや底質粒径が大きいことが寄与する。掃流砂量の大小関係は、江戸川が最も大きく、次いで荒川と多摩川が大きい。また、小櫃川では流量は最も小さいが掃流砂量では隅田川や中川を上回る。

このような掃流砂量に浮遊砂量を加えた土砂輸送量の年間値を図-7に示す。ここでは主要9河川の結果を示す。これより、流域面積が大きく山地が多い荒川や江戸川、多摩川が上位を占めており、これら3河川における土砂輸送量の合計（＝221ton/year）は、主要9河川の総量（＝285ton/year）の77%に相当する。また、山地率が高い小櫃川・養老川・小糸川（千葉3河川）の土砂輸送量は、都市や農地が多い中川や隅田川、鶴見川より大きくなっている。千葉3河川における流域面積は荒川の1/10程度

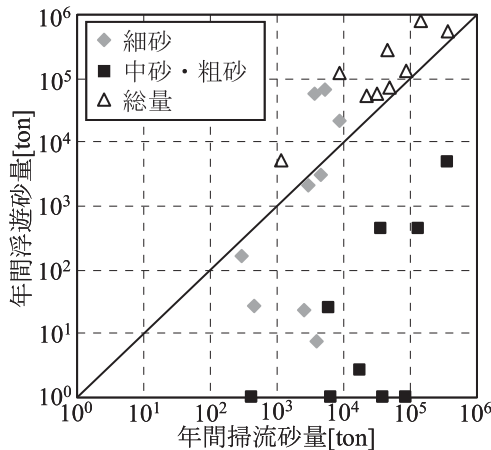


図-8 掃流砂量と浮遊砂量の年間値の比較（粒径別及び総量）

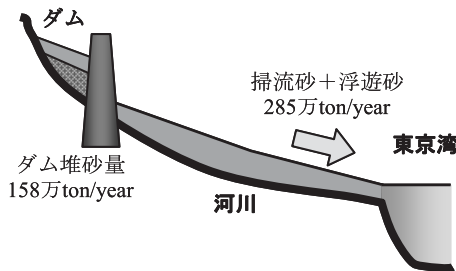


図-9 流域全体における土砂動態

であることを考慮すると、千葉3河川の比土砂輸送量は東京湾流域内では極めて高い。

また、掃流砂量は浮遊砂量より小さい、ということが全河川に共通しており、その比率（＝掃流砂量／浮遊砂量）は荒川・多摩川・養老川で低く（～20％）、江戸川・小櫃川等で高い（60～70％）。より詳細に両者を比べるために、総量及び粒径別（細砂と中砂・粗砂）の掃流砂量と浮遊砂量の相関図を図-8に示す。総量では浮遊砂量が掃流砂量より大きい、細砂の一部や中砂・粗砂の全てでは逆の関係となっている。これより、細砂・中砂・粗砂が多い干潟への土砂供給過程には掃流砂による土砂輸送が大きな役割を果たしていることが示唆された。

（2）ダムにおける土砂トラップ率

ダムの堆砂データと図-7の土砂輸送量データに基づいて、流域全体における土砂動態の模式図を図-9に示す。主要9河川における土砂輸送量の総和は285万ton／年となり、ダムにおける総堆砂量は158万ton／年である。流域全体の土砂生産量を浮遊砂量と掃流砂量、ダム堆砂量の和と単純に置くと、総生産量は443万ton／年であり、ダムにおける土砂トラップ率は約1/3である。以上のことから、多量の土砂が流域内のダムにトラップされ東京湾に土砂が流出していないことが明らかとなった。

5. 結論

本研究で得られた主な結論は、以下の通りである。

- 1) 強熱減量や粒径を指標とすると、干潟材料に適した底質環境を有するのは主要河川（江戸川等）に加えて中小河川（目黒川等）も多く存在する。
- 2) 荒川、江戸川、多摩川における土砂輸送量は他の主要河川よりも卓越しており、それは総輸送量の77％に達する。また、千葉3河川（小櫃川、養老川、小糸川）の土砂輸送量は、相対的に大きな流域面積を有する隅田川や中川の結果よりも大きく、これらの河川流域における土砂生産量は極めて高いことが明らかとなった。
- 3) 掃流砂量と浮遊砂量を比べると、総量では、全河川において浮遊砂量が多いものの、細砂の一部や中砂・粗砂は掃流砂量の方が大きく、細砂・中砂・粗砂が卓越する干潟への土砂供給プロセスとして掃流砂が重要な役割を果たしている。
- 4) 流域全体の土砂生産量は443万ton／年であり、その約1/3は流域内のダムにおいてトラップされていることが示された。

謝辞：掃流砂計算に用いた水位データ等やダム堆砂量データは、国土交通省関東地方整備局、東京都、千葉県よりご提供頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 芦田和男・江頭進治・劉 炳義（1991）：蛇行流路における流砂の分級および河床変動に関する数値解析：水工学論文集，Vol. 35，pp.383-390。
- 安藤晴夫・柏木宣久・二宮勝幸・小倉久子・川井利雄（2005）：1980年以降の東京湾の水質汚濁状況の変遷について－公共用水域水質測定データによる東京湾水質の長期変動解析－，東京都環境科学研究所年報，pp.141-150。
- 加藤靖之・二瓶泰雄・重田京助（2009）：簡易数値モデルに基づく粒径別掃流砂量の算定，水工学論文集，Vol. 53，pp.679-684。
- 坂井文子・二瓶泰雄・江原圭介・白田美穂・重田京助・大塚 慧（2008）：江戸川・荒川・多摩川・中川における出水時栄養塩・COD負荷特性，水工学論文集，Vol. 52，pp.1117-1122。
- 重田京助・二瓶泰雄・坂井文子・大塚 慧（2008）：東京湾主要流入河川における浮遊土砂輸送特性に関する基礎的検討，水工学論文集，Vol.52，pp.913-918。
- 中央環境審議会（2005）：第6次水質総量規制の在り方について（答申），21p。
- 東京湾河口干潟保全検討会（2004）：東京湾河口干潟保全再検討 報告書，302p。
- 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。
- （社）日本下水道協会（1997）：下水試験方法上巻－1997年版－，297p。