

続している。採水観測のイベント数は12であり、その中には、多摩川や荒川において戦後最大規模の洪水となった台風0709号出水も含まれる。採取したサンプル水に関して、SSと有機物起源のSSであるVSS（揮発性浮遊物質濃度）、COD、窒素、リンの全成分（T-）、懸濁態成分（P-）、溶存態成分（D-）の分析を行った。SSとVSSの分析は下水道試験法（日本下水道協会，1997）に準じて行われた。窒素・リンの分析にはオートアナライザー（swAAt，ビーエルテック（株）製）を用いた。CODには過マンガン酸カリウム法が適用された。

得られた出水時水質データにより、水質負荷 L と流量 Q の関係（ L - Q 式， $L=aQ^b$ ， a ， b ：係数）を河川毎に作成し、それに基づいて流域全体からの陸域負荷を算出する。ここで解析方法・手順については二瓶ら（2008b）の方法をベースとする。ただし、 L - Q 式中の係数 a ， b の見直し、小櫃川・養老川・小糸川における流量データ及び L - Q 式の作成などを追加した。また、海域のDOに影響する有機物輸送量（VSS輸送量）を算出する際には、 L - Q 式からSS輸送量を求め（重田ら，2008），そのSS輸送量にSS中のVSSの占有率を掛けてVSS輸送量を求める。解析期間は1990～2008年の19年間とする。

(2) 内湾水質環境のデータ解析

内湾水質データから出水影響を抽出するために、東京湾内でほぼ月一回の頻度で計測される公共用水域水質データを整理・解析する。その解析対象地点は図-1に示す47地点の表層と底層データである。ここでは、多摩川河口と木更津沖を結ぶ線を便宜的な境界にして、湾奥部（26地点）と湾口部（21地点）を定義する（図-1）。解析対象項目は水温、塩分、COD、全窒素（T-N）、全リン（T-P）、DOであり、解析対象期間は1998～2007年の10年間とする。

3. 出水時陸域負荷特性

(1) 台風0709号出水の特徴

大出水時における水質負荷の特徴を抽出するために、出水時・多摩川（田園調布堰，河口から13km）における流量・SS・T-CODの時間変化を図-2に示す。ここでは、石原（流量観測基準点）で戦後2番目の水位を記録した台風0709号による出水（台風0709号出水，2007/9/6～11）と、2008年8月末に生じた前線性豪雨の出水（08年8月出水，2008/8/29～9/2）を対象とする。なお、図中の横軸は、出水開始日0時からの経過日数である。また、08年8月出水では、高流量時のみ採水を行ったので、T-CODが存在しない期間がある。これより、両出水では流量の立ち上がりは類似するものの、08年8月出水ではピーク後速やかに流量が減少するのに対して、台風0709号出水では洪水の継続時間は相対的に長い。08年8月出水では、降雨継続時間が短くかつ降雨域が都市域に集中

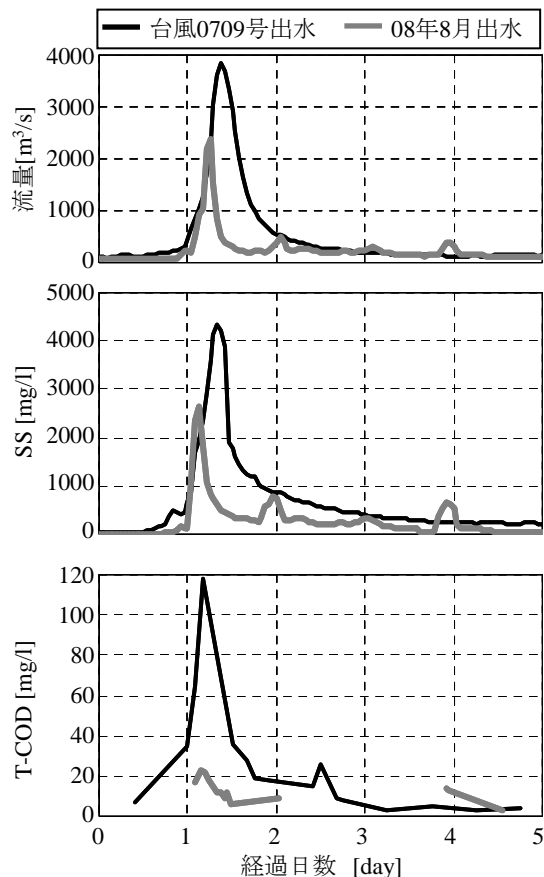


図-2 出水時における流量・SS・T-CODの時間変化（多摩川・田園調布堰，台風0709号出水と08年8月出水を表示）

したため、洪水の継続時間が短くなった。流量ピーク値としては、台風0709号出水と08年8月出水においてそれぞれ3950m³/s，2300m³/sであり、両者の比は約1.7である。一方、SSに関しても、流量と同様に、台風0709号出水では08年8月出水と比べて高SSを継続する時間が相対的に長く、経過日数が5日の時点でも200mg/lと高い。台風0709号出水のSSピーク値（=4200mg/l）は08年8月出水の値（=2500mg/l）の約1.7倍であり、その差は流量と同程度である。CODに関してもSSと同様な傾向が見られ、台風0709号出水では、水位や流量と共に、記録的な陸域負荷が生じたことが分かる。

台風0709号出水と多くの出水イベントの結果を比べるために、同じ多摩川におけるT-CODフラックスと流量 Q の相関図を図-3に示す。ここでは、多摩川で観測した8つの出水イベントを対象とし、台風0709号出水の増水期と減水期およびその他の出水イベントに分けて表示する。これより、同一流量条件下の台風0709号出水の増水期におけるT-CODフラックスは減水期やその他のイベントの値を大きく上回る。このように、台風0709号出水時におけるT-CODフラックスは、他の出水イベントよりも非常に大きく、その様子は増水期に顕著となる。このように、大規模出水となった台風0709号出水の L - Q 関係（ L ：

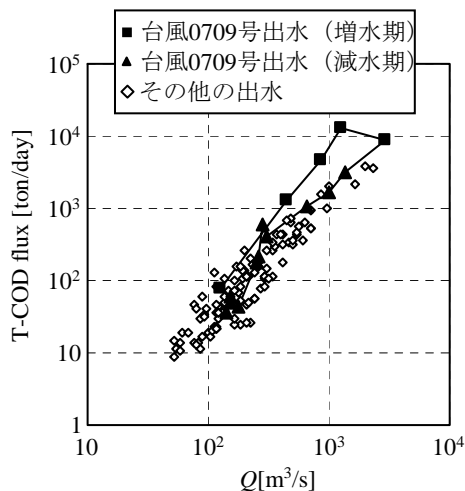


図-3 T-COD flux と流量 Q の相関 (多摩川・田園調布堰)

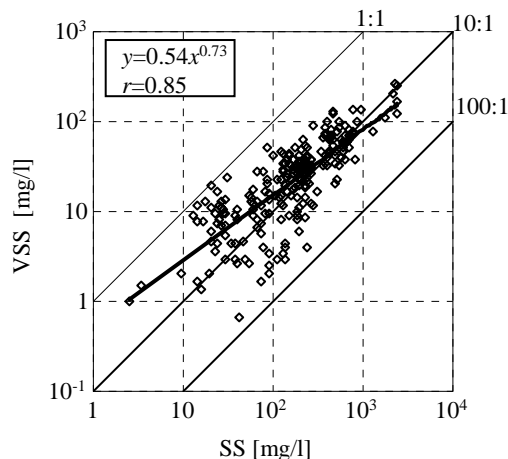


図-4 SS と VSS の相関関係 (荒川, 江戸川, 多摩川)

水質負荷量) がその他の中小規模の出水イベントの結果と異なる様子は, 多摩川のみならず, 江戸川や荒川においても確認される. この台風 0709 号出水は山地域に記録的豪雨が観測された. 一般に, 山地域では, 都市域と異なり“半無限”に汚濁物質が蓄積しており, 「山地型」出水の方が「都市型」出水よりも陸域負荷量は大きく, 豪雨エリアの違いにより陸域負荷特性が大きく変化することが示唆された.

(2) 有機物輸送量の経年変化

台風 0709 号時のような大出水時における河川から東京湾への環境インパクトを示すために, 内湾の DO に直接関与する有機物輸送量 (VSS flux) を求める. その際に用いる SS と VSS の相関図を図-4 に示す. ここでは, 多摩川と荒川, 江戸川の結果をまとめて表示する. SS と VSS の相関式は $VSS = 0.54 SS^{0.73}$ となり, 概ね良好な相関関係が得られた ($r=0.85$). これより, SS が増加すると SS に対する VSS の比率は低下していることが分かる.

この相関式と SS 輸送量に関する $L-Q$ 式に基づいて, 河川経由の VSS 輸送量の年間値を算出した結果を図-5 に示す. ここでは, SS 輸送量が顕著な荒川と江戸川, 多摩川とその他の河川に分けて表示する. また, 上記 3 河川の年最大流量も合わせて図示する. 大規模な出水が見られた 1999, 2001, 2007 年において VSS 輸送量は大きい. また, 年最大規模の出水が 2 回以上生じた 1991, 1998, 2004 年も VSS 輸送量は大きい. VSS 輸送量の内訳としては, 荒川, 江戸川, 多摩川の 3 河川合計値の占める割合は 50~90% と高い. また, 3 河川の中では, 大出水時の最大流量が大きい荒川が最も顕著である.

台風 0709 号出水における VSS 輸送量の総和は 7.6 万 ton であり, これは, 年間値として大出水が無い 2002, 2003, 2005, 2006 年の平均値を採用すると, 0.4 年分に相当しており, 大出水時では非常に短期間で大量の有機物が東京湾に輸送される. また, 解析期間中に生じた出

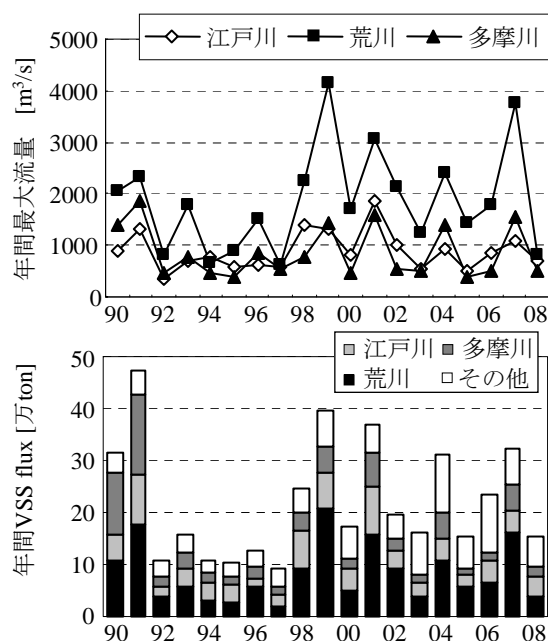


図-5 年最大流量 (a) と VSS 輸送量 (b) の経年変化

水毎に総 VSS 輸送量を求めた結果, 台風 0709 号出水の結果は全体で 3 番目である. なお, 総 VSS 輸送量が最大値を記録したのは 99 年 8 月出水 (8.5 万 ton) であり, 2 番目は 01 年 9 月出水 (8.1 万 ton) である.

4. 大出水時における湾内 DO・栄養塩環境の変化

(1) DO

a) 大出水の有無による DO の経月変化の違い

大出水の影響が東京湾の DO 環境に及ぼす影響を抽出するために, 大出水が生じた年と無かった年 (平年値) における湾奥部・底層 DO の経月変化を図-6 に示す. ここでは, 大出水有の年として, 図-5 に示す VSS 輸送量が上位となった出水イベントを含む 1999, 2001, 2007 年を選定する. 大出水が無い平年値としては, 3. (2) と同じ 4 年分の平均を採用する. また, 湾奥部の値として

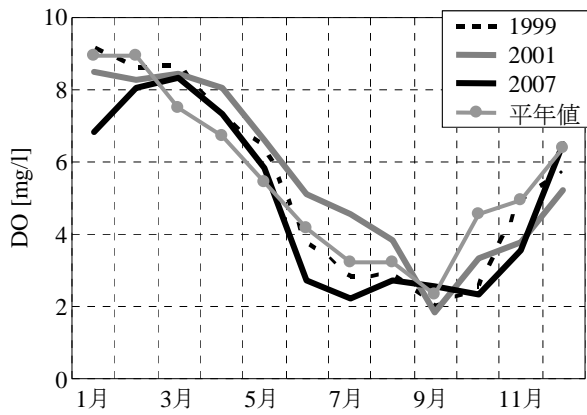


図-6 大出水有無による湾奥部・底層 DO の経月変化の違い (1999, 2001, 2007 年; 大出水有, 平年値: 大出水無)

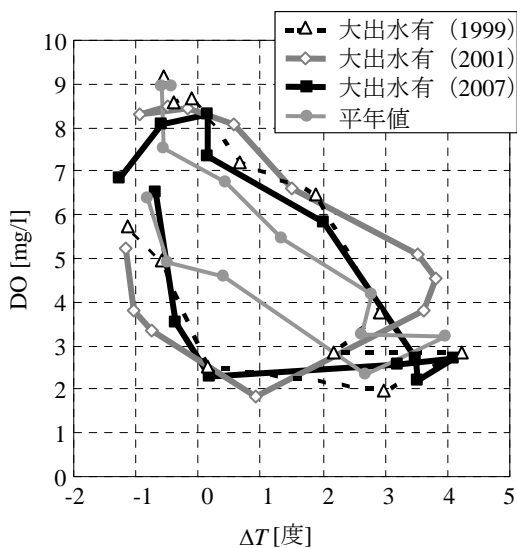


図-7 底層 DO と水温差 ΔT (表層-底層) の相関図 (湾奥部)

は、湾奥部に位置する全 26 地点の平均値を用いる。平年値としては、夏期に貧酸素化が進み 9 月に最低値を取り、その後の 10 月には貧酸素化が解消される。一方、大出水有の年では、出水が生じた月もしくはその翌月に DO の極小値が現れる。そのため、大出水有の年の DO は平年値と比べて 10 月では 1.3~2.6mg/L, 11 月では 0~1.4mg/L も下回り、大出水後に DO 低下状態が長期化している。

DO 低下と成層状況の関係を調べるために、湾奥部における底層 DO と水温差 (=表層水温-底層水温) の相関図を図-7 に示す。ここでも大出水有(1999, 2001, 2007 年)と無(平年値)の結果について、各年 1 月から順に線でつないで表示する。平年値における底層 DO と水温差の関係としては、水温差が大きくなる、すなわち成層強度が強まると、上層からの酸素供給が無くなるので底層 DO は低下する。また、両者の関係は右回りのループを描いており、同一成層条件でも、4, 5 月よりも 9, 10 月の方が DO は低い。一方、大出水有の年ではこの右回りのループが平年値より大きく、特に、水温差が無い 9 月もしくは 10 月において低 DO 状態を維持している。

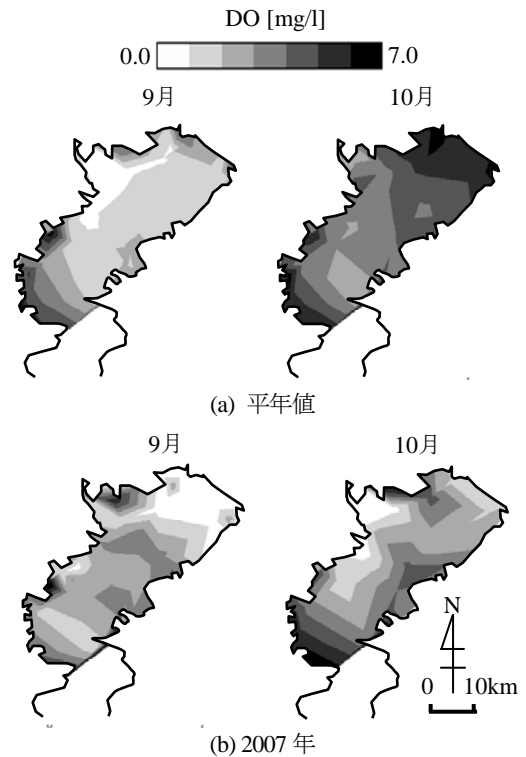


図-8 大出水無(平年値)と有(2007 年)における底層 DO に関する空間コンターの比較

この状況は底層 DO と塩分差に関しても同じ傾向が確認されている。これより、大出水から 1, 2 か月後において成層状態がほぼ解消されても DO が低下しているのは、上層からの酸素供給を上回る酸素消費が生じているためであり、それには出水時に大量供給された有機物の分解が大きく寄与しているものと考えられる。

b) 底層 DO の空間コンター

大出水時における DO 低下状況の空間分布を把握するために、台風 0709 号出水の直後(2007 年 9 月)とその 1 ヶ月後(10 月)における底層 DO の空間コンターを図-8 に示す。ここでも、比較のため、大出水の無い平年値の 9 月と 10 月の結果も示す。平年値としては、9 月に荒川河口付近を中心として湾内全域に貧酸素水塊 ($DO < 2\text{mg/l}$) が形成されているが、10 月には貧酸素状況は完全に解消されている。一方、2007 年では、大出水直後(9 月)において湾奥部に貧酸素水塊が集中し、その濃度レベルは平年値より低い。さらに、10 月においても貧酸素水塊が存在しており、それらは出水による多量の有機物が堆積したと思われる荒川や多摩川の河口付近に出現している。2007 年 10 月時点では、表層と底層における水温・塩分差は平年値とほぼ同じである(図-7)。底層 DO への大出水の影響としては、1) エスチャリー循環強化による DO 増加、2) 成層強度増加や多量の有機物供給・分解による DO 低下、が考えられる(藤原ら, 2004)。上記の結果より、大出水時では有機物分解による

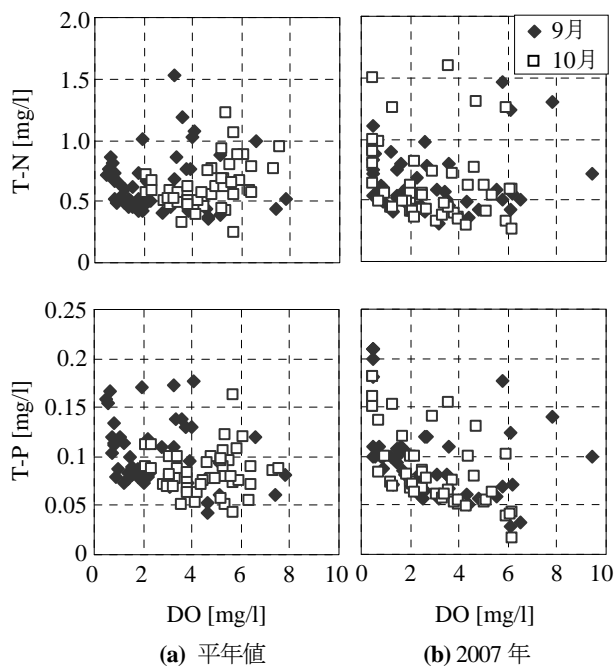


図-9 湾奥部底層における T-N, T-P と DO の相関関係

DO の大量消費が顕著になり、貧酸素状態が形成・維持されることが明らかとなった。

(2) 栄養塩と DO の相関性

大出水が栄養塩環境に及ぼす影響を見るために、底層における DO と T-N, T-P の相関を調べた結果を図-9 に示す。平年値は9月には DO の減少と共に T-N, T-P が増加する、という溶出の特徴が見られるが、10月にはその様子は確認できない。一方、2007年では、9・10月共に、DO と T-N, T-P は概ね逆相関となっており、DO が減少するほど T-N, T-P の増加する溶出特性が顕著になっていることが分かる。これより、台風 0709 号出水のような大出水時の環境インパクトにより、貧酸素水塊の長期化に加えて、栄養塩溶出量の増加を引き起こしていることが示唆された。

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) 台風 0709 号出水時の総 VSS 輸送量は 7.6 万 ton であり、これは大出水の無い平年値の 0.4 年分に相当しており、大出水時には大量の有機物が短期間で東京湾に輸送されたことが分かる。
- 2) 大出水有りの年では、出水後の 10 月、11 月において成層状況が解消されても DO 低下状況を維持することが示された。また、大出水後では、貧酸素水塊は多量の有機物が堆積した荒川・多摩川河口付近に出現する。
- 3) 大出水による DO への影響としては、エスチュアリー循環強化や成層強度増加よりも、底層に堆積した有機物分解による大量の DO 消費が顕著となり、これが貧酸素

水塊の形成・拡大に大きく寄与することが示唆された。

4) 底層における DO と T-N, T-P の相関を調べた結果、平年値は9月には DO の減少と共に T-N, T-P が増加する溶出の特徴が見られるが、10月には確認できない。一方 2007 年では、9・10 月共に概ね逆相関となる。これより、大出水時の環境インパクトにより、貧酸素水塊の長期化に加えて、栄養塩溶出量の増加を引き起こすことが示された。

謝辞：公共用水域水質データとしては、国立環境研究所「環境数値データベース」より収集した。国土交通省関東地方整備局江戸川河川事務所・荒川下流河川事務所、水資源機構・利根導水総合管理所、東京都水道局、神奈川県環境科学センター、千葉県環境生活部には流量や水質データをご提供して頂くと共に、現地観測実施にご協力頂いた。多摩川調査の一部は、国交省関東地方整備局「羽田周辺水域環境調査研究委員会」として行われた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 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.
- (財) 河川環境管理財団 (2008) : 流木災害軽減対策と河川樹木管理に関する総合的研究, pp.4-1~4-46.
- 川崎浩司・村上智一・戸田圭亮・大久保陽介 (2008) : 東海豪雨時における伊勢湾海域の海水交換と土砂輸送に関する粒子追跡解析, 海岸工学論文集, Vol.55, No.2, pp.986-990.
- 喜岡渉・堀孝博・堀部扶実・北野利一 (2008) : 伊勢湾・三河湾における降雨後の物質輸送特性, 海岸工学論文集, Vol.55, No.2, pp.1036-1040.
- 坂井文子・二瓶泰雄・江原圭介・臼田美穂・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.
- 高田秀重 (1997) : 陸域から沿岸海域への物質フラックス, 沿岸海洋研究, Vol.34, No.2, pp.111-117.
- 二瓶泰雄・坂井文子・重田京助・灘岡和夫・八木宏・諸星一信・鈴木信昭・松坂省一・有路隆一・峯浩二 (2008a) : 2007 年台風 9 号出水時における多摩川の土砂・栄養塩・有機物負荷特性, 河川技術論文集, Vol.14, pp.473-478.
- 二瓶泰雄・大塚慧・影山英将・広瀬久也 (2008b) : 東京湾における流入負荷の経年変化, 海岸工学論文集, Vol.55, No.2, pp.1226-1230.
- 藤原建紀・岸本綾夫・中嶋昌紀 (2004) : 大阪湾の貧酸素水塊の短期的および長期的変動, 海岸工学論文集, Vol.51, No.2, pp.931-935.