

東京湾湾奥部の水環境に与える河川水の影響について

八 木 宏*・鯉 渕 幸生**・日向 博文***・灘 岡 和 夫****

1. はじめに

東京湾は水質悪化の著しい我が国の代表的な内湾である。湾の形態が、海水の交換を制限する構造であることに加えて、河川水に含まれる大量の汚濁負荷が水質悪化を進行させる原因となっている(高田ら, 1997)。また河川水は単に水質悪化の原因としてだけではなく、密度場を通じて、エスチャリー循環(重力循環)やそれに伴う高気圧渦という形で湾内の流動構造に大きな影響を与えている可能性も指摘されている(中辻・藤原, 1995)。しかしながら、時空間的に大きく変動する湾奥部の流動構造が内湾水質環境に与える影響を河川水の挙動に注目して研究している例は少ない。これは、非定常性の強い河川水の影響を把握するための長期間連続計測や広域流動調査が一般に困難であることが原因と考えられる。

そこで本研究では、東京湾湾奥部の水質環境を考える上で重要でありながらこれまで実態把握があまり進んでいない湾奥部への河川水の寄与を、生物の一次生産や栄養物質の物理輸送過程を含めて明らかにすることを目的とし、湾奥部において係留系による長期水質連続観測、ADCPを用いた流動観測、および3次元流動シミュレーションを行った。

2. 長期水質観測

2.1 観測概要

長期水質観測は、千葉県幕張沖の千葉県海象・気象観測塔(図-1)において、1996年4月2日から実施し、1998年5月現在も観測を継続している(八木ら, 1997)。この観測地点は東京湾の中でも特に水質悪化が著しい湾奥部に位置し、主要な河川の河口が集中する東京港周辺からは20 km程度離れている。観測項目は水温・塩分・クロロフィル a・濁度(アレック電子製 MDS-T, MDS-CT, ACL 104-8 M)・溶存酸素(三洋測器製 MDO-1)で、測

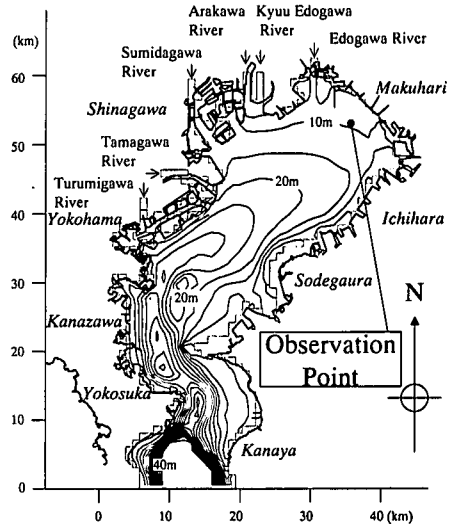


図-1 現地観測および計算海域

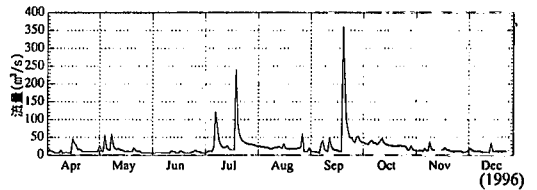


図-2 多摩川田園調布河口堰の流量時系列

定時間間隔は全て10分である。

2.2 湾奥部における水質の変動特性

図-2は1996年度に多摩川田園調布河口堰で計測された河川流量の時系列である。7月から9月にかけて数回にわたり河川流量が急増していることがわかる。このように7月から9月には台風や移動性の低気圧の通過に伴って、かなり大きな流量の変動が発生することが特徴である。そこで夏から秋にかけての東京湾湾奥部における水質変動を調査し、河川水が湾奥の水質へ及ぼす影響について検討を行う。

図-3は1996年7月1日から1996年10月30日までの海象・気象観測塔における風向ベクトル、水温(水面下1, 4, 8 m)、クロロフィル a(水面下1 m)および多摩

* 正 会 員 博(工) 東京工業大学助教授 工学部土木工学科
** 学生会員 修(工) 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤工学専攻
*** 正 会 員 修(工) 東京工業大学助手 工学部土木工学科
**** 正 会 員 博(工) 東京工業大学教授 大学院情報理工学研究科情報環境学専攻

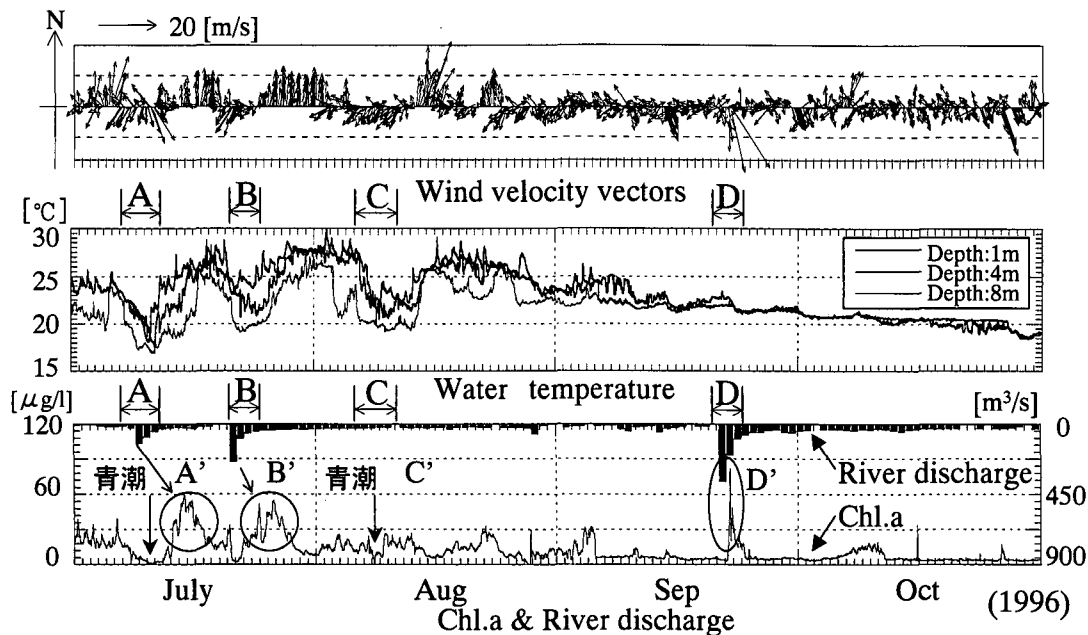


図-3 湾奥部における海上風速ベクトル、水温、河川流量、クロロフィルa量の時系列

川における河川流量の時系列である。ここでクロロフィルaは、蛍光光度からの推定値であり、以下本論文ではウラン換算の重量として表示する。

ここで特徴的な傾向として、夏季に特徴的な水温成層が、北風の連吹に伴って水温低下することを繰り返しながら、段階的に解消されることが分かる。この北風連吹時の水温低下は一般的に沿岸湧昇として知られており、北風が長時間連吹した際に、底層の水塊が表層に湧昇することによって引き起こされる現象である(図-3、期間A, B, C)。さらに、クロロフィルaについてみると、期間A, B, Cのいずれにおいても、沿岸湧昇にあわせて大幅に低下していることがわかる。図中の矢印は同海域において千葉県水質保全研究所により青潮の発生が確認された日を示しており、この沿岸湧昇時のクロロフィルaの低下は、水温の低い貧酸素水塊が湧昇したためと考えられる。従って、期間A, B, C 3回の沿岸湧昇においては、青潮に発展した期間A, Cにおいて特に湧昇の規模が大きく、期間Bでは沿岸湧昇の規模が小さいことが推測できる。これは期間Bにおける、風速レベルが期間A, Cに比べて小さく、また連吹時間が短いことが原因と考えられる。

一方、沿岸湧昇発生後については、水温上昇に伴いクロロフィルaが急増する傾向が見て取れる。これは青潮発生後に赤潮が発生することが多いという経験的な事実に対応するものであり、通常これは沿岸湧昇によって、底層で豊富な栄養塩が表層へ供給されたためと理解され

ているようである。しかしながら、沿岸湧昇とその後のクロロフィルa増加の対応関係を詳細に調べてみると、湧昇期間A, B, Cのうちクロロフィルaが明確に増加したのは期間A, B(図中A', B')だけであり、期間Cについては明確な増加は見られなかった。これを沿岸湧昇の規模との関係で考えれば、湧昇規模の小さい期間Bの後にクロロフィルaが増加し、湧昇規模の相対的に大きい期間Cの後にはクロロフィルaが増加しないことになる。さらに、東京湾湾奥部の栄養塩の存在量を調べてみると(図-4、千葉県水産試験場の観測値)、春から夏にかけて表層と底層の栄養塩量の差が小さくなり、夏以降においては表層と底層の栄養塩量にほとんど差がないことがわかった。このように、①クロロフィルaの増加が湧昇の規模と対応しないこと、②底層の栄養塩レベルが表層に比べてそれほど高くないこと、という事実は沿岸湧昇後にみられたクロロフィルaの増加は単に湧昇に伴う底層からの栄養塩供給では説明できないことを示している。

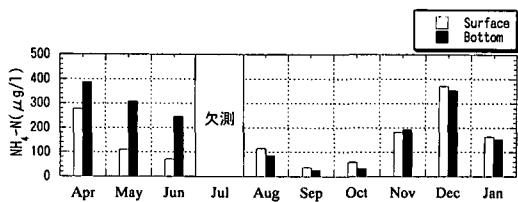


図-4 栄養塩時系列(千葉県水産試験場富津分県計測)

そこで次に、河川流量とクロロフィルaの変動との対応関係を調べてみた。その結果、クロロフィルaの急激な増加が見られたA', B'については、それぞれ対応する河川出水があることがわかり、クロロフィルaの明確な増加がみられなかったC'については対応する出水がないことがわかった。さらに、沿岸湧昇との関連が少ない成層解消期に発生した急激なクロロフィルaの増加(D')についても、出水とよく対応していることがわかり、成層期・成層解消期を通じて、河川流量とクロロフィルa急増との明確な関連がみられた。このことは、湾奥部のクロロフィルaの大きな変動は河川水の大規模な出水による栄養塩供給の影響を強く受けている可能性を示唆しているものと考えられる。

2.3 クロロフィルa変動と河川出水との応答関係

前節までの検討によって、成層期～成層解消期にかけて東京湾湾奥部でみられるクロロフィルaの変動は、河川出水によく対応しており、河川起源の栄養塩が湾奥の一次生産の動態に重要な役割を果たしていることがわかった。そこで、このような河川出水とクロロフィルa増加との応答関係を調べてみた。その結果、成層期に発生したクロロフィルaの急増A', B'では、出水のおおよそ5日後にクロロフィルaが増加しているのに対し、成層解消期のD'は、出水後1日程度でクロロフィルa増加が発生していることがわかった。さらに、成層期のA', B'は全体的にクロロフィルaの変動が緩やかなのに対して、成層解消期のD'にはその波形がよりシャープで約2日の間に急激にクロロフィルaが増減していることがわかる。このような河川出水に対する湾奥部クロロフィルaの応答の違いは、東京湾湾奥西部に集中する河口域から湾奥部への栄養塩輸送プロセスに変化が生じたこと、すなわち水平流動パターンの違いが原因の一つとして考えられるが、これについては次節で検討する。

表-1 観測概要

	第1回	第2回	第3回	第4回
観測日	96年9月13日	97年7月22日	97年8月7日	97年10月2日
測線数	2	1	3	1
観測項目	水温・塩分・クロロフィルa量、流速	水温、塩分、濁度、クロロフィルa量、流速	水温、塩分、濁度、クロロフィルa量、流速	水温、塩分、濁度、クロロフィルa量、流速

3. 広域流動観測

3.1 観測概要

広域流動観測は、図-5に示す測線で計4回実施した。それぞれの観測における項目を表-1に示す。1つの測線に対し5点～8点(約1.2 km 間隔)の測点を設定した。測定は各測点に到着後直ちにSTD((株)アレック)による水温塩分の測定(鉛直方向0.1 m 間隔)とブロー

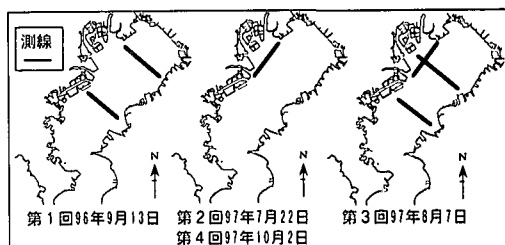


図-5 広域流動観測の測線

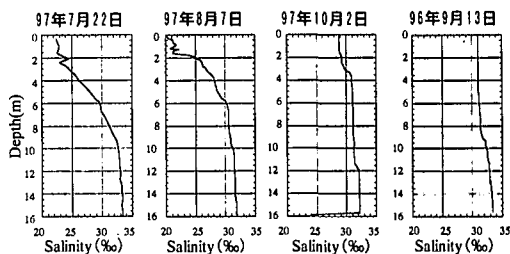


図-6 塩分プロファイル

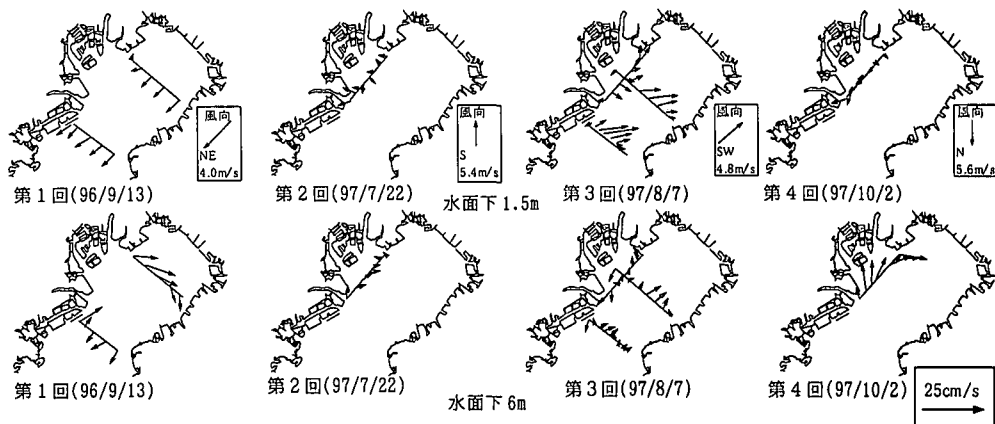


図-7 残差流の平面分布

ドバンド ADCP (RD インストルメンズ社製, 1200 kHz) による流速の鉛直分布の測定 (鉛直方向 0.5 m 間隔) を行い, 測定終了とともに速やかに次の測点に移動する方法で行った。1 回の観測は残差流を算出するために 1 潮汐間行い, 1 潮汐間に一つの測点において 7 回程度の計測を行った。(中川ら, 1997)

3.2 観測結果・考察

4 回の観測時の風向は, 夏季 (第 2, 3 回) には南風が, 秋季 (第 1, 4 回) には北風がそれぞれ卓越していた。また, 図-6 に湾中央部水深 15 m 地点で観測された満潮時の塩分プロファイルを示す。この図から塩分成層が夏の観測時に強く, 秋には弱くなっていることがわかる。水温, 塩分の上下差は夏季においてはそれぞれ, 6°C , 10‰ 程度であるのに対し, 秋季においては 1.5°C , 2‰ 程度であった。

図-7 は湾奥部の物質輸送に大きな影響を与える残差流の水平面内の分布図である。残差流は観測から得られた時間的に離散的な流速から杉山ら (1995) の方法を用いて算出した。いずれの観測日においても表層 (水面下 1.5 m) における残差流は風向とよく対応していることが分かる。一方, 水面下 6 m では, 夏季と秋季で流れのパターンが大きく異なり, 秋季においてのみ強い時計回りの環流が確認できる。このように, 湾奥部の時計まわり環流が夏季 (成層期) に弱く, 秋季 (成層解消期) に強ければ, 河口集中域から湾奥に向かう物質フラックスに大きな違いが生じ, 夏季から秋季にかけてクロロフィル a の河川流量に対する応答時間が変化することが十分説明できる。

4. 数値計算

4.1 数値計算概要

ここでは, 前節の現地観測で得られた夏季と秋季の東京湾湾奥部での水平流動パターンの違いを数値実験によって検証する。図-1 に計算対象領域を, 表-2 に計算条件を示す。数値実験では, 夏季と秋季における平均的な流動場の構造をシミュレートするために, 1997 年 7 月～8 月及び 9 月～10 月の平均的な気象条件, 河川流量をそれぞれ夏季, 秋季の条件として与え計算を行った。数値モデルは静水圧・Boussinesq 近似を仮定した 3 次元の NS 方程式と連続式を基礎式としたレベルモデルである (日向ら 1997)。なお, 鉛直・水平渦動粘性係数・渦動拡散係数については, リチャードソン数の関数で与えた。

4.2 夏季および秋季における平均的な流動の特性

図-8, 9 に夏季と秋季の平均的な気象・海象条件で計算した残差流の水平面内分布を示す。夏季 (図-8), 秋季 (図-9) とともに, 水面下 1 m では風向に対応した残差流パターンとなっている。一方, 水面下 6 m では, 夏季

において湾奥部に明確な環流系は見られないが, 秋季には強い時計回り環流が形成されており, ADCP による観測結果と定性的に一致している。さらに潮汐や風応力を省略した計算との比較から, 北風の出現頻度の高い秋季においては, 吹送流によって形成される時計回りの環流系とエスチャリー循環に伴う時計回り環流 (高気圧性渦) の両者の方向が一致するために強い時計回り環流が形成され, 逆に南風の出現頻度の高い夏季においては, それらが一致しないために環流系が弱められることが分かった。従って, 湾奥部の流動構造は, 海上風に伴う吹送流と河川水に起因した流れのバランスによって, 夏季から秋季にかけて大きく変動しており, このように流れのパターンが変化することで, 湾奥部のクロロフィル a の河川水に対する応答が, 夏季から秋季にかけて異なること

表-2 計算条件

計算ケース	夏季の流動	秋季の流動	出水時
初期条件	水温 20°C , 塩分 33‰		
計算格子	$63 \times 43 \times 30$ (水平間隔 1 km, 鉛直方向 1.0～8.0 m)		
開境界	M2 塩分一定 (33‰)		
河川流量	260 [m^3/s]	310 [m^3/s]	1200 [m^3/s]
風向・風速	S 3.2 [m/s]	NNW 3.2 [m/s]	NNE 9.4 [m/s]
気象条件	気圧 1009.5 hpa	気圧 1013.7 hpa	変化なし
	気温 26.8°C	気温 20.8°C	
	蒸気圧 25.6 hpa	蒸気圧 17.0 hpa	
	全天日射量 15.82 [MJ/m^2]	全天日射量 10.84 [MJ/m^2]	

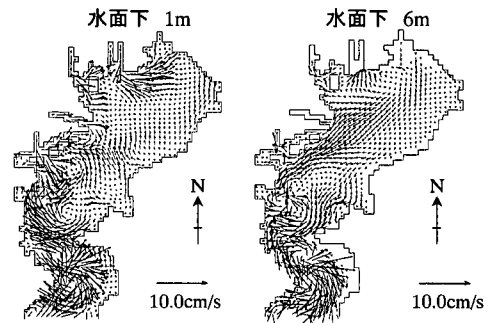


図-8 残差流の平面分布 (夏季)

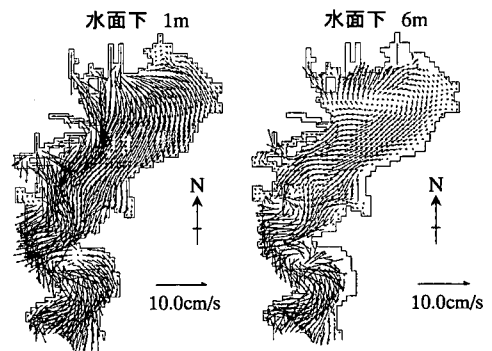


図-9 残差流の平面分布 (秋季)

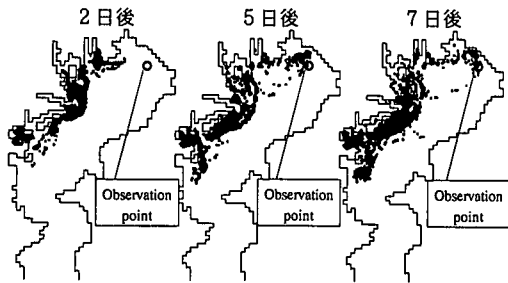


図-10 中立粒子の挙動 (夏季)

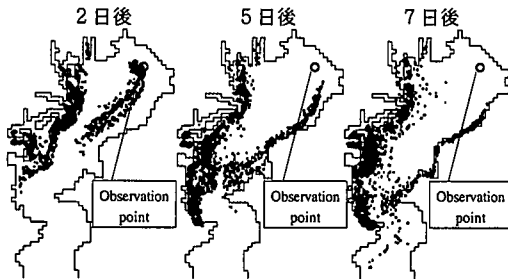


図-11 中立粒子の挙動 (秋季)

が考えられる。

4.3 中立粒子による出水時の河川水の追跡計算

さらに夏季と秋季に同規模の出水があった場合に河川水が湾内にどのように広がるかを検討するために、中立粒子を用いた計算を行なった。具体的には夏季と秋季の平均的な流れ場を再現後、出水時の気象条件を24時間与え、その後再び夏季と秋季の平均的な条件を与えて計算を行った。中立粒子は出水と同時に東京湾における主要な河川(荒川・隅田川・旧江戸川・多摩川・鶴見川)の河口から24時間放出し、その後の湾内における挙動を追跡した。

図-10, 11はそれぞれ夏季と秋季に同規模の出水があった場合を想定した、中立粒子の空間分布を表している。この図から夏季と秋季での中立粒子のパターンが、①湾奥への到達時間、②湾奥到達後の粒子の挙動、の2点で大きく異なることが分かる。まず湾奥への粒子の移動に注目すると、夏季の場合にはおよそ5日間かかって湾奥に粒子が到達するのにに対し、秋季の出水では2日ほどで湾奥部に接近している。さらに、湾奥部到達後の粒子の挙動は、夏季においては湾奥に到達した中立粒子が、その後もその周辺に留まるのに対し、秋季においては、岸に到達した粒子を除くほとんどが湾口に向かって移動している。これは、秋季に形成される時計回り環流により、いったん湾奥に向かった河川水がその後、湾の東岸に沿って流れるために、湾奥に長時間滞留しないことが原因と考えられる。

これらの計算結果は、秋季における河川水の出水に対し湾奥部のクロロフィルaが、敏速に反応し増加するこ

と、およびその変化が非常に急激であることに対応している。野村(1996)は湾外性動物プランクトン種の湾内への加入を調査して、秋季に東京湾内の海水交換率が高まることを指摘しているが、このように湾奥部の環流系強度が大きく変化することが、夏季から秋季にかけての東京湾内湾部における河川水に対する一次生産の応答の違いや、海水交換率が夏季から秋季にかけて高くなることの原因と考えられる。

5. 結 論

本論文で得られた結論を以下にまとめる。

(1) 成層期に東京湾湾奥部で見られる植物プランクトンの増加(赤潮)は、沿岸湧昇に伴う底層からの栄養塩供給よりも、河川水の直接的な栄養塩供給につよく影響を受けている。またその河川の出水に対する応答時間は時期によって異なる。

(2) 湾奥部の流動は、吹送流と河川水による高気圧性渦のバランスで環流系の強度が変化し、夏季から秋季にかけて湾奥部の流動が大きく変化する。このような環流系強度の変化は、夏季から秋季にかけての東京湾内湾部の一次生産の応答や海水交換過程に大きな影響を与える。

謝辞: 本観測は鹿島(株)技術研究所、港湾技研技術研究所、(株)東京久栄との共同観測として行われたものであり、観測に協力いただいた関係機関各位に対し謝意を表します。また、千葉県水質保全研究所・小倉久子氏、東京都環境科学研究所基盤研究部・安藤晴夫氏には水質の分析でご協力いただきましたので謝意を表します。さらに、本研究中で解析に用いた東京湾内湾部の栄養塩観測データは千葉県水産試験場富津分場から提供されたものである。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 高田秀重 (1997): 陸域から沿岸海域への物質フラックス, 沿岸海洋研究ノート, 34巻, 2号.
- 中辻啓二・藤原建紀 (1995): 大阪湾におけるエスチャリー循環機構, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 396-400.
- 杉山陽一・藤原建紀・中辻啓二・福井真吾 (1995): ADCPによる伊勢湾の流動構造調査, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 1096-1100.
- 野村英明 (1996): 湾と外洋の相互作用: 生物学からの視点「動物プランクトンを例として」, 沿岸海洋研究ノート, 34巻, 1号.
- 八木 宏・内山雄介・鯉淵幸生・日向博文・宮崎早苗・瀧岡和夫 (1997): 東京湾湾奥部における成層形成期の水環境特性に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 1076-1080.
- 中川康之・八木 宏・鯉淵幸生・日向博文・稲垣 聡・小倉久子 (1997): 東京湾内湾部における成層期の流動特性に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 401-405.
- 日向博文・八木 宏・杉田繁樹 (1997): 熱塩フロントを考慮した冬期東京湾の海水交換特性に関する数値計算, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 391-395.