

東京湾湾奥部における栄養塩の周年変動に関する現地観測

鯉 渕 幸 生* ・ 小 倉 久 子** ・ 安 藤 晴 夫***
五 明 美 智 男**** ・ 佐 々 木 淳***** ・ 磯 部 雅 彦*****

1. はじめに

東京湾をはじめとする内湾では長年にわたり富栄養化が問題となっている。中でも窒素とリンは富栄養化の原因物質として、総量規制項目への追加が検討されている。栄養塩の変動要因には、湾内流動や陸域からの負荷流入はもちろん、一次生産による取り込みや有機物分解による再生産、底泥からの溶出等があるため、内湾における栄養塩変動の時間スケールは小さく、外洋にみられるような恒常性は存在しない。各自治体では、月に 1 回程度の頻度で上下 2 層の定期モニタリングを実施しているが、河川出水や一次生産の時間スケールを捉えるには不十分であるため、栄養塩の動態には不明な点が多い。

一方、計算機の高速化にともない、数値モデルによる検討が精力的になされている。例えば堀口・中田 (1994) は東京湾において流入負荷削減の効果を検討しており、負荷削減により湾内の水質が若干よくなるという結果を得ている。これに対し鈴木ら (1999) や深野・和田 (1995) は負荷削減の効果はほとんど期待できないとしており、それぞれ正反対の結論が提示されている。栄養塩に関する現地観測の不足はこれら数値モデルの検証や信頼性向上の障壁にもなっている。

そこで本研究では東京湾湾奥部を対象に、河口からの距離の異なる 3 地点に観測点を設け、係留系と採水を併せた周年にわたる観測を実施することで、栄養塩の時空間変動とその要因を明らかにすることを試みる。

2. 観測方法

現地観測は 1999 年 4 月より湾奥に位置する東京灯標、千葉灯標、および京葉シーバースの 3 測点において実施した(図-1)。東京灯標は東京港沖水深 12.5 m の海域に

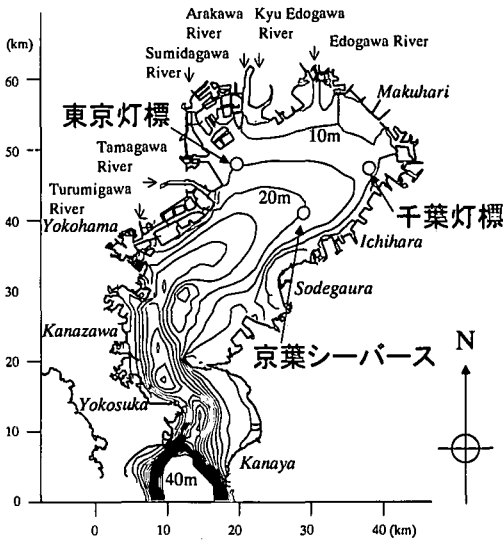


図-1 現地観測海域

位置し、荒川や旧江戸川等主要河川の河口部であることから、淡水の影響を直接受けている。千葉灯標は千葉港沖水深 12.5 m の海域に位置し、湾最奥部に位置することから海水交換が弱く、また北風系の吹込時には湧昇域となる。京葉シーバースは河川水の影響が相対的に小さい湾奥中央の水深 22 m の海域にあり、夏季にはしばしば底層水の貧酸素化が見られる。

栄養塩の測定のための採水には東亜建設工業(株)所有の「しおつる」および千葉県所有の「きよすみ」を作業船として交互に使用し、およそ週 1 回の頻度で鉛直方向に 1.5 m 間隔の採水を行った。その際、鉛直温度変化の大きい栄養塩を正確かつ簡便に測定するために、SMD (Simultaneous Multi-Depth) 採水器を使用した (安藤・山崎, 2000)。本採水器は複数のピストンタイプの小型採水セルを任意の間隔で連結した構造となっており海底面を基準として正確に採水深度を設定することが可能である。これにより、海底直上や躍層付近での急変を含めた栄養塩の鉛直濃度分布を精度よく測定することが可能となった。

栄養塩の測定項目は全窒素 (T-N)、全リン (T-P)、

* 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
** 千葉県水質保全研究所 主席研究員
*** 東京都環境科学研究所 主任
**** 正会員 水 修 東亜建設工業(株)技術研究所水環境研究室長
***** 正会員 博(工) 東京大学助教授 大学院新領域創成科学研究科環境学専攻
***** フェロー 工 博 東京大学教授 大学院新領域創成科学研究科環境学専攻

硝酸態窒素 ($\text{NO}_3\text{-N}$), 亜硝酸態窒素 ($\text{NO}_2\text{-N}$), アンモニア態窒素 ($\text{NH}_4\text{-N}$), リン酸態リン ($\text{PO}_4\text{-P}$), および珪酸態珪素 ($\text{SiO}_2\text{-Si}$) である。分析に際しては、採水後直ちに船上で濾過を行い、無機態栄養塩測定用と全窒素・全リン測定用にサンプルを分けて冷蔵保存し、観測終了後直ちに実験室において分析を行った。分析にはオートアナライザー (ブラン・ルーベ(株)製 TRAACS, AACS-II, III) を使用した。また採水と同時に投げ込み式多項目水質計 DataSonde 4 (Hydro Lab 社) によって、水温、塩分、クロロフィル a 等の鉛直分布の測定を行った。

以上と平行して 1999 年 4 月より同じ湾奥 3 測点において係留系による連続観測を実施した (詳細は鯉渚ら, 2000 参照)。計測項目は水温、塩分、溶存酸素濃度 (DO), クロロフィル a, および pH であり、千葉灯標においては成層がほぼ解消する 11 月まで、東京灯標および京葉シーバースにおいては 2000 年 5 月現在継続中である。

3. 成層の形成・崩壊と溶存酸素

図-2 は 1999 年 4 月から 11 月の千葉灯標における水温・塩分・溶存酸素 (DO) の時系列である。水温は 4 月中旬から 7 月にかけて、急激な成層化と一様化を繰り返す、上層では 8 月上旬にピークとなる。湾奥部は平均水深が 15 m 程度と浅く、北風にとまう沿岸湧昇や強風による鉛直混合の影響から、下層においても春季との水温差が大きい。特に 8 月上旬から 10 月上旬までは比較的风が弱く、この時期に成層が発達し上下の水温差が大きくなる。成層が解消されるのは 10 月上旬以降である。

上層の塩分は、主として河川流入に依存して変動し、特に 7 月中旬および 8 月中旬には、上層から中層にかけて急激に低塩分化した。一方、下層における塩分の変動は、北風に伴う沿岸湧昇時に高塩分化した、逆に南風時には表層水が湾奥に堆積するため低塩分化するなど主に風に対応した湾内流動に起因した変動となる。塩分躍層が解消するのは 10 月以降であった。

溶存酸素 (DO: 図-2C) は上層においては植物プランクトンの活発な光合成を反映して過飽和となるが、下層においては 6 月末までは主に水塊変動に起因する急激な変動が見られ、それ以降は 8 月から 10 月において安定な密度成層の発達と底質における有機物分解の促進により貧酸素化が顕著となる。

4. 栄養塩 (窒素・リン・珪素) の変動特性

(1) 窒素の周年変動

図-3 に 1999 年 4 月から 2000 年 2 月における栄養塩の時系列を示す。千葉灯標と京葉シーバースの変動は類似性が高く、ここでは紙面の都合上、東京灯標および千

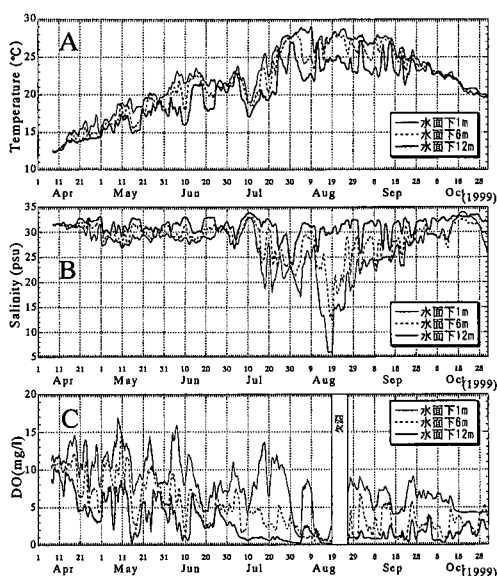


図-2 千葉灯標における水温・塩分・溶存酸素時系列

葉灯標の結果のみを示す。

東京灯標における $\text{NO}_3\text{-N}$ (図-3a) は総じて上層が高く、特に期間中 5 回 (4 月～5 月上旬, 6 月下旬～7 月中旬, 8 月中旬～9 月初旬, 9 月下旬～10 月初旬), 上層において急激に高濃度となり、8 月 15 日には最高値 125 μM を記録している。図-5 は江戸川放流量の一次推定値であるが、上層における $\text{NO}_3\text{-N}$ の高濃度化と放流量の増加、あるいは塩分低下 (図-2B) のタイミングはよく一致していることから、この高濃度化は出水に起因した陸域からの栄養塩供給によるものと考えられる。千葉灯標 (図-4a) においても出水時に高濃度化する傾向は同様であるが、河口から離れているため変化は小さい。

$\text{NH}_4\text{-N}$ (図-3b, 図-4b) についても上層で河川放流量の増加と一致する間欠的な高濃度化が見られる。ただし $\text{NH}_4\text{-N}$ では出水の規模との明瞭な対応が見られず、特に千葉灯標においては 8 月の出水時においても、低濃度となっている。また夏季の 8 月から 9 月には、下層において間欠的な高濃度化が見られ、 $\text{NO}_3\text{-N}$ とは変動傾向が異なる。図-6 に千葉灯標におけるクロロフィル a の時系列を示す。クロロフィル a の変動は主に日射と北風の連吹で増加の開始と終息が決まり、大局的には湾奥部全体でほぼ同様な変動を示すことが分かっている (鯉渚ら, 2000)。クロロフィル a は 5 月から 10 月中旬にかけて間欠的に高濃度化しており、その時期が特に千葉灯標上層における $\text{NH}_4\text{-N}$ の低下時期と一致していることが分かる。これらのことから $\text{NH}_4\text{-N}$ に関しては河川出水に加えて植物プランクトンによる吸収や底泥からの溶出にも大きく依存していると考えられる。クロロフィル

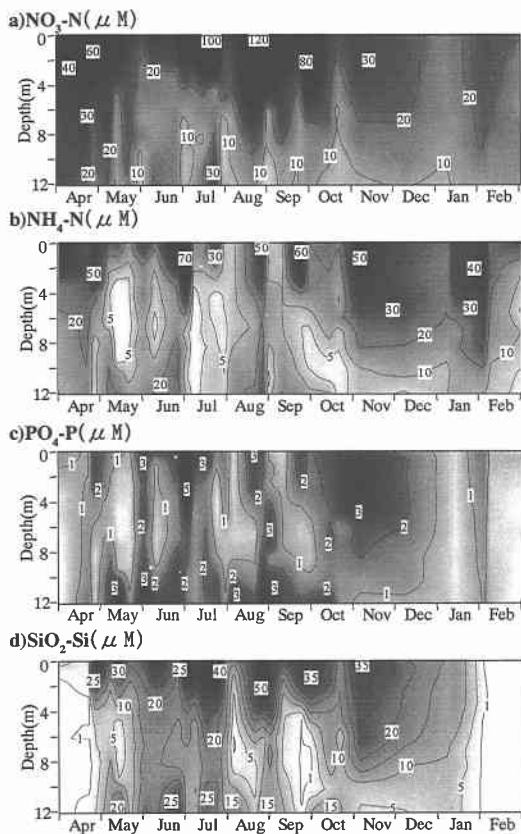


図-3 東京灯標における栄養塩時系列

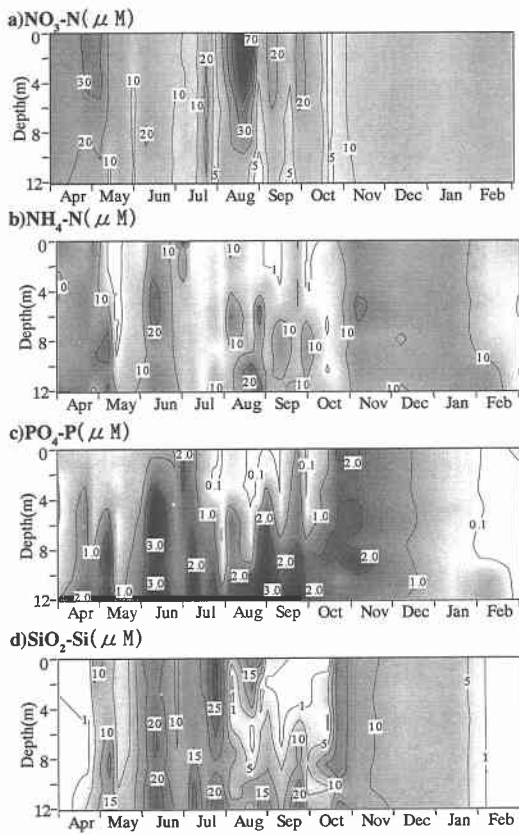


図-4 千葉灯標における栄養塩時系列

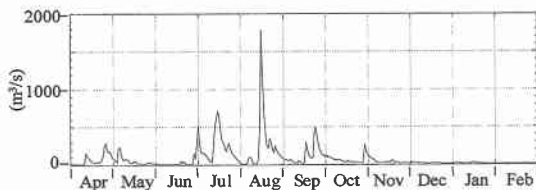


図-5 江戸川放流量

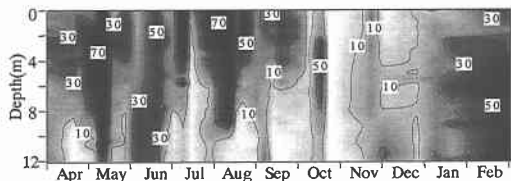


図-6 千葉灯標におけるクロロフィルa時系列 (μg/l)

a 増加時に $\text{NH}_4\text{-N}$ のみが減少し、 $\text{NO}_3\text{-N}$ がほとんど減少しないのは、植物プランクトンによる窒素の選択的取り込みに起因しており、湾奥部では $\text{NH}_4\text{-N}$ が十分に供給されるため、 $\text{NO}_3\text{-N}$ が減少するまでには至っていない。

(2) リンの周年変動

$\text{PO}_4\text{-P}$ (図-3c, 図-4c) は東京灯標において窒素と同様に上層における間欠的な高濃度化が見られるが、千葉灯標では上層濃度は非常に低く、むしろ下層において高濃度となる特徴がある。この下層における高濃度化は5月中旬から10月にかけて顕著であり、その時期は3地点共ほぼ同じであった。図-7は3地点における年平均の栄養塩鉛直プロファイルである。ただし図の縦軸は深度

を観測時の全水深 D で無次元化してある。この図から無機態窒素(DIN)が上層で高濃度となるのに対し、 $\text{PO}_4\text{-P}$ では下層にいくほど高濃度となる。

窒素と同様に、クロロフィルaと $\text{PO}_4\text{-P}$ の対応を比較すると、千葉灯標の上層における $\text{PO}_4\text{-P}$ 減少はクロロフィルa増加とよく一致している。その際、8月から9月の中旬にかけて3回、上層における $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度が検出限界値 $0.1 \mu\text{M}$ 以下となり、植物プランクトンによる $\text{PO}_4\text{-P}$ 取り込みの半飽和定数 $0.8 \mu\text{M}$ (Jørgensenら, 1991) を大きく下回ることから、この時期においては $\text{PO}_4\text{-P}$ が植物プランクトンの増殖を制限する可能性がある。

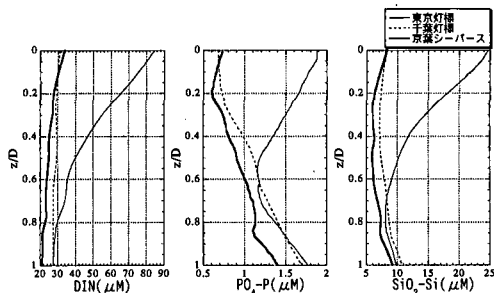


図-7 年平均栄養塩鉛直プロファイル

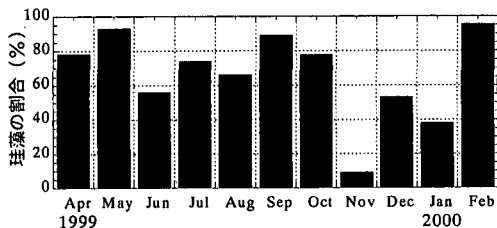


図-8 植物プランクトン細胞数に占める珪藻の割合

(3) 珪素の周年変動

珪素 (図-3d, 図-4d) においても, 東京灯標において $\text{NO}_3\text{-N}$ と同様の河川供給と考えられる傾向が見られる。このような傾向は千葉灯標においても同様であるが, 河川流量の多い9月から10月にかけて上層で著しく低濃度化する時期がある。この濃度低下は $\text{PO}_4\text{-P}$ が主に夏季に低濃度化したのとは時期が異なり, 1999年4月や9月, また2000年2月においても顕著である。珪素の利用が珪藻に限られることから, 千葉灯標における各植物プランクトン細胞数に占める珪藻の割合を図-8に示す(小倉ら, 2000)。これから1999年5月や9月, 2000年2月に珪藻の割合が特に高く, 珪素濃度が低下する時期と一致している。珪素濃度は珪素取り込みの代表的な半飽和値である $0.8 \mu\text{M}$ (Jørgensen ら, 1991) を下回り, 増殖を制限する可能性がある。鎌谷 (2000) によると珪藻のもつ窒素やリンは栄養源であるため珪藻捕食者の体内で利用され, 排泄された後も光合成経路にとりこまれるが, 珪藻の殻を構成する珪素は捕食者にとって栄養価値がなく, 糞として排泄され沈降するため有光層で欠乏しやすい。一方, 下層における珪素の濃度変動は, 比較的 $\text{PO}_4\text{-P}$ と類似しており, ほぼ同時期に高濃度となるものの, 年間平均プロファイルから分かるように, $\text{PO}_4\text{-P}$ ほど顕著には下層で高濃度化せず, その変動は窒素, リンのいずれとも異なっている。

以上のように各無機態栄養塩濃度は時間的には短いスケールで変動するという共通した傾向は見られるものの, 変動パターンは栄養塩ごとに異なり, 各栄養塩の供

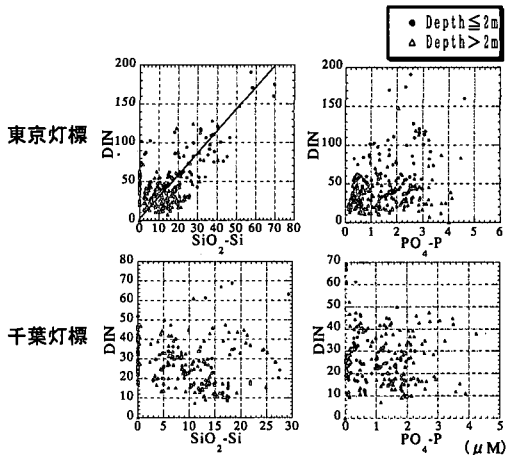


図-9 栄養塩 (N, P, Si) の相関

給過程の相違や, 植物プランクトンによる取り込みによって決定づけられることが明らかとなった。また富栄養化の進んだ東京湾においてもリンや珪素については, 時期によっては著しく低濃度となり, 植物プランクトンの増殖を制限する可能性が示された。東京湾における植物プランクトン種は, 珪藻類が卓越する傾向にあり, 珪素の減少と珪藻類の増殖との相関が高いことは興味深い。ただし下層での高濃度化については有機物分解による再生産や溶出等の生物・化学的な過程が同時に作用するため, 以上のような時間的なタイミングのみからその変動を把握することは困難である。そこで以下では各栄養塩の比に着目した検討を行う。

(4) N/P比と N/Si比による検討

1999年4月から2000年2月にほぼ週に一度の割合で採取した試料について DIN, $\text{SiO}_2\text{-Si}$, $\text{PO}_4\text{-P}$ 間の相関を図-9に示す。

東京灯標では DIN と $\text{SiO}_2\text{-Si}$ に正の相関が見られ, 特に上層においてこの傾向が顕著であることから, 窒素と珪素の供給源が共に河川水であると考えられる。一方, 千葉灯標における DIN と $\text{SiO}_2\text{-Si}$ には相関が認められない。京葉シーバースにおいても相関が認められなかったことから, 河口からの距離の違いが相関の有無に反映されているものと考えられ, 珪素が千葉灯標に到達する間に, 植物プランクトンに利用され減少したか, もしくは, 河口付近で吸着され減少したことを意味していると考えられる。

また DIN と $\text{PO}_4\text{-P}$ については, 両地点で相関が認められないが, $\text{PO}_4\text{-P}$ は主に下層から供給されるため, 河川水起源が卓越する DIN とは増加のタイミングが異なるためと考えられる。小倉ら (1986) は, 東京湾表層水中の炭素安定同位体比と塩分, 珪素, リンの相関から, リンや珪素が河口付近で急速に減少することを示してお

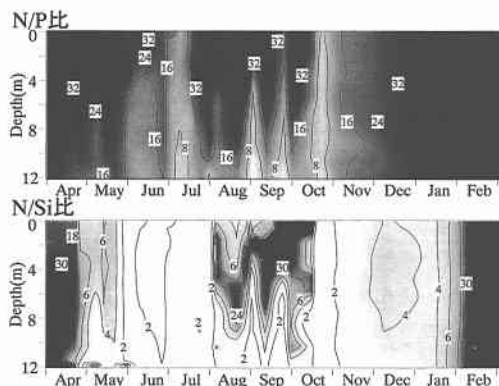


図-10 千葉灯標における N/P, N/Si 比の時系列

り、今回の結果と一致している。

図-10 は千葉灯標における N/P 比と N/Si 比の時系列である。上層においてはこれまで説明したように出水に対応し無機態窒素が増加するため N/P 比は高い値をとり、植物プランクトンの平均的な N/P 比 16 を著しく超過していることが分かる。この結果は陸域から窒素が過剰供給されているというこれまでの結果を支持するものである。一方、水面下 5 m 以深においては 5 月中旬から 10 月の成層時に、N/P 比が低くなり 16 を下回っている。植物プランクトンの分解により下層の栄養塩が供給されたとすれば、N/P 比が 16 以下になることは考えにくく、5 月中旬以降の成層時に貧酸素化(図-2C)によってリンが溶出し、N/P 比が 16 を下回ったと考えられる。なお 7 月中旬から 10 月においては一時的に下層における N/P 比が著しく低くなり 8 程度となるが、これには $\text{NO}_3\text{-N}$ の低濃度化も影響しており、夏季の下層においては $\text{NO}_3\text{-N}$ が脱窒・除去されている可能性が示唆される。

N/Si 比は、1999 年 4 月、8 月から 10 月、および 2000 年 2 月を除いては、2 から 4 程度の値で安定している。夏季に下層で低くなる傾向は N/P 比と同様であるが、植物プランクトンの N/Si 比である 2 (Jørgensen ら, 1991) とほぼ等しいことから、珪素については植物プランクトンの分解によって供給されている可能性が高い。鎌谷・上野 (1980) は、懸濁態窒素やリンと比べ懸濁態珪素の分解が遅いことを指摘しており、このような分解速度の違いにより珪素の下層供給が多くなるものと考えられる。

5. ま と め

東京湾湾奥の 3 点において、周年にわたる高頻度の栄養塩鉛直分布の観測を行った結果、湾内における栄養塩

が月 1 回程度の従来の観測では捉えられない小さい時間スケールで変動していることが分かった。また局所的な河川水の影響の度合いや湧昇等の影響に違いがあるものの、大局的な変動は湾奥部ではほぼ同様であることが明らかとなった。さらに、各栄養塩はそれぞれ変動特性が異なり、窒素に関しては、陸起源の負荷による過剰供給が、リンや珪素は河口付近で迅速に吸着・沈降することもあり、リンでは溶出が、珪素では下層での分解がその変動に重要な役割を果たしていると考えられた。これらの栄養塩は上層においては河口から離れた地点において枯渇し、植物プランクトンの増殖を制限している可能性があるため、湾内の富栄養化や総量規制の問題を考える上では、リンや珪素についてさらに高頻度の観測を行うていく必要がある。

謝辞：本研究を進めるにあたり、千葉県調査船「きよすみ」および東亜建設工業㈱「しおつる」の乗組員の方々に大変お世話になった。また観測にあたって、㈱京葉シーバースには係留地点を提供いただくと同時に、通船を利用させていただく等便宜を図っていただいた。建設省関東地方建設局江戸川工事事務所には河川流量データを提供して頂いた。本研究は RITE/NEDO 研究費の補助を得て行われたことをここに記し、謝意を表する。

参 考 文 献

- 安藤晴夫・山崎正夫 (2000): 新たな同時多層採水器の開発, 水環境学会誌, 第 23 巻, 第 4 号, pp. 238-242.
- 小倉紀雄・木村健司・関川朋樹・山田和人・南川雅男 (1986): 東京湾内湾部における懸濁有機物の炭素安定同位対比, 地球化学, 20, pp. 13-19.
- 鎌谷明善 (2000): 生物ケイ酸の測定法—現状と問題点—, 海の研究, Vol. 9, No. 3, pp. 143-159.
- 鎌谷明善・上野康弘 (1980): 植物プランクトンの分解にともなう燐と珪素の再生, 日本水産学会誌, Vol. 46 (5), pp. 537-542.
- 鯉淵幸生・五明美智男・佐々木 淳・磯部雅彦 (2000): 現地観測に基づく春季の東京湾における赤潮発生機構, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 1071-1075.
- 鈴木雅晴・三村信男・塚田光博 (1999): 3 次元生態系水質モデルによる東京湾の水質改善予測, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 1011-1015.
- 小倉久子・飯村 晃・杉島英樹 (2000): 赤潮等プランクトン調査, 平成 11 年度千葉県水質保全研究所年報, 印刷中.
- 堀口文男・中田喜三郎 (1994): 閉鎖性海域の水質とリン・窒素規制—数理モデルによる検討—, 資源と環境, Vol. 3, No. 3, pp. 143-151.
- 深野 寿・和田 明 (1995): 東京湾に流入する負荷量を削減した場合の水質改善効果, 東海大学紀要海洋学部, 第 40 号, pp. 19-40.
- Jørgensen, S. E., S. N. Nielsen and L. A. Jørgensen (1991): HANDBOOK OF ECOLOGICAL PARAMETERS AND ECOTOXICOLOGY, ELSEVIER, pp. 64-88.