

3次元生態系・水質モデルによる東京湾の水質改善予測

鈴木雅晴*・三村信男**・塚田光博***

1. はじめに

東京湾における代表的な水質汚濁問題として、海底の無生物化や青潮発生をもたらす貧酸素水塊の形成が挙げられる。こういった内湾の水質汚濁問題に対する浄化対策として、流入負荷の削減や覆砂、浅場・人工干潟の形成などに期待が寄せられており、数値シミュレーションによる水質予測が対策効果の予測のための重要なツールとなりうる。

水質汚濁プロセスを構成する流体力学過程（流動場・密度場）と生物化学的過程（生態系）を結合し水質汚濁現象を再現する試みが進められ、富栄養化現象や貧酸素水塊の形成、青潮の発生をシミュレーションにより再現することが可能になりつつある（例えば、佐々木ら, 1998; 渡辺ら, 1998）。また、水質浄化対策や浅場の形成を想定し、その効果を予測した研究も存在するが（例えば、古川・細川, 1994; 堀口・中田, 1994）、貧酸素水塊を対象に長期的な水質予測を試みた研究例は少ない。

そこで、本研究では塚田ら（1997）により開発された3次元生態系・水質モデルを用いて、流入負荷削減や覆砂といった浄化対策の貧酸素水塊抑制効果の予測を試みた。

2. 予測モデルの概要

2.1 基礎方程式と対象領域

モデルは流動場、密度場、生態系の3つのサブモデルで構成されている。流動場及び密度場に対する支配方程式は、Navier-Stokesの式、連続の式、密度場に対しては塩分・熱収支を考慮した拡散方程式および塩分・水温による海水密度の状態方程式である。生態系モデルは、図-1に示すような物質循環を考慮して、中田（1993 a）に従い、植物プランクトン、動物プランクトン、懸濁態有機物（POM）、溶存態有機物（DOM）、全無機態窒素、リン酸態リン、溶存酸素（DO）、CODの8要素で構成されており、これらの変化は生物化学的変化項を加えた拡

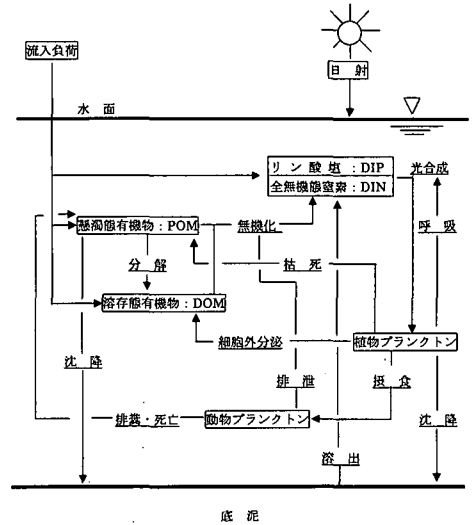


図-1 生態系モデルにおける物質循環

散方程式で表される。

解析対象領域は、図-2に示すように東京湾全域とし、水域を水平方向には1km×1kmの格子に、鉛直方向には20層（1～11層目：2m, 12層目：3m, 13～15層目：5m, 16層目：20m, 17～20層目：30m）に分割した。数値計算の時間ステップは240秒である。

2.2 境界条件および計算条件

解析は1993年を対象とした。1993年を選んだのは、塚田ら（1997）にもある通り、気象、海象、水質等のデータが相対的に密度高く収集できたためである。計算に用いた初期条件、境界条件は以下の通りである。

- 1) 密度：初期条件として湾全域で塩分34.3‰、水温14.0°C（密度1.0256 g/cm³）で一定とした。
- 2) 気象：気象庁「SDP・気象官署の地上気象観測データ（東京）」の1時間毎の観測値（降雨量、日射量、雲量、風速・風向）を与えた。
- 3) 河川流量・水質：江戸川、旧江戸川、荒川、隅田川、多摩川、鶴見川の主要6河川を対象に日流量を流量年表（建設省河川局編, 1995）より与えた。河川の塩分濃度は0‰とし、流入負荷は日本河川水質年鑑

* 正会員 修(工) 国土総合建設(株)
 ** 正会員 工 博 茨城大学教授広域水圏環境科学教育研究センター
 *** 修(工) (株)コンピュータ・テクノロジー・インテグリティ

表-1 生態系モデルのパラメタ

パラメタ	単位	設定値	パラメタ	単位	設定値
植物プランクトン			懸濁懸有機物(POM)		
最大可能成長速度	day ⁻¹	0.59 exp(0.063 T)	分解速度	day ⁻¹	0.1 exp(0.0693 T)
吸収速度	day ⁻¹	0.03 exp(0.0519 T)	無機化に関する DO の半飽和値	mg/l	1.0
リン酸塩摂取の半飽和値	μg-at/l	0.1	無機化に対する分解余剰物生成の割合	%	25.0
無機窒素摂取の半飽和値	μg-at/l	3.0	沈降速度	m/day	0.432
沈降速度	day ⁻¹	0.1	P/C(換算比)		4.845×10 ⁻⁴
枯死速度	day ⁻¹	0.01 exp(0.0693 T)	N/C(換算比)		9.932×10 ⁻³
光合成の最適光強度	cal/cm ² ·day	150	TOD/C(換算比)		3.302×10 ⁻³
Chl-a 濃度によらない光消費係数	m ⁻¹	0.1	COD/C(換算比)		1.460×10 ⁻³
Chl-a の成分			溶解懸有機物(DOM)		
光消費係数の Chl-a 依存性を示す比例定数	m ⁻¹ (mg Chl-a m ³) ⁻¹	0.0179	無機化速度	day ⁻¹	0.02 exp(0.0693 T)
Chl-a/C(換算比)		0.02	無機化に関する DO の半飽和値	mg/l	1.0
P/C(換算比)		7.123×10 ⁻⁴	P/C(換算比)		2.510×10 ⁻⁴
N/C(換算比)		1.175×10 ⁻³	N/C(換算比)		7.430×10 ⁻³
TOD/C(換算比)		3.419×10 ⁻³	TOD/C(換算比)		3.143×10 ⁻³
COD/C(換算比)		1.511×10 ⁻³	COD/C(換算比)		1.380×10 ⁻³
動物プランクトン			リン酸懸リン(DIP)		
最大摂取速度	day ⁻¹	0.19 exp(0.0693 T)	リンの溶出速度	gP/m ² ·day	0.033-0.011 DO
自然死亡速度	day ⁻¹	0.053 exp(0.0693 T)	全無機態窒素(DIN)		
傾斜制限のパラメタ (Ivlev 指数)	(mgC/m ³) ⁻¹	0.01	窒素の溶出速度	mgN/m ² ·day	0.030×1.07 T
捕食の閾値	mg C/m ³	50	残存酸素(DO)		
同化効率	%	70	酸素消費速度	gO ₂ /m ² ·day	0.1×(T-10)
総成長効率	%	30	海面再曝気係数	day ⁻¹	0.15
日周鉛直移動速度	day ⁻¹	0			
P/C(換算比)		6.720×10 ⁻⁴			
N/C(換算比)		1.317×10 ⁻³			
TOD/C(換算比)		3.510×10 ⁻³			
COD/C(換算比)		1.550×10 ⁻³			

ここで、T: 水温 (°C), DO: 溶存酸素濃度 (mg/l)

(日本河川協会編, 1996)の年平均値を一定値で与えた。

- 4) 潮汐: 湾口部開境界にて, 布良 (北緯 34°55', 東経 139°50') における潮位データ (日本海洋データセンター提供) を与えた。
- 5) 生態系モデルの初期値: 平成 5 年度公共用水域水質測定データ (千葉県環境部編, 1994; 東京都水質保全局編, 1994) に基づいて設定した。
- 6) 生態系モデルのパラメタ: 塚田(1997)に従い, 表-1 のように設定した。

3. 予測モデルの検証の調整

3.1 検証

水質汚濁防止法に基づき, 周辺の各自治体では東京湾の水質監視を月 1 回程度の割合で実施しているが, 1993 年度は 49 地点で測定を行い, その結果を公表している (例えば, 千葉県環境部編, 1994; 東京都水質保全局編, 1994)。本モデルの季節変動の再現性検証のために, 貧酸素化が著しい湾奥 (19 地点) における水温, 塩分濃度などの現地観測結果と比較した。図-3 に湾奥中央付近 (C8, 湾中央) の水温と塩分濃度の時間変化を示す。

水温, 塩分濃度ともに, 春から夏にかけて表・底層間に差が生じ成層化する過程および秋から冬にかけて再び上下均一化する過程が再現されている。このことから本モデルが長期的な湾内の水温, 塩分濃度をほぼ再現していることが確認できる。

図-4 に溶存酸素の計算結果と現地観測結果の比較を示す。現地観測の結果では, 6 月初旬から底層の溶存酸素

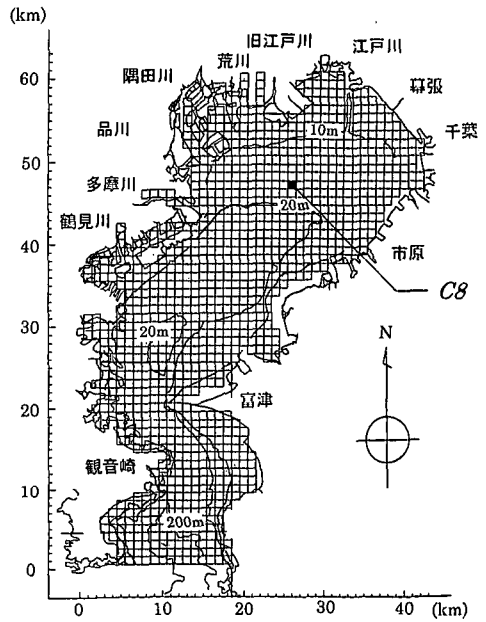
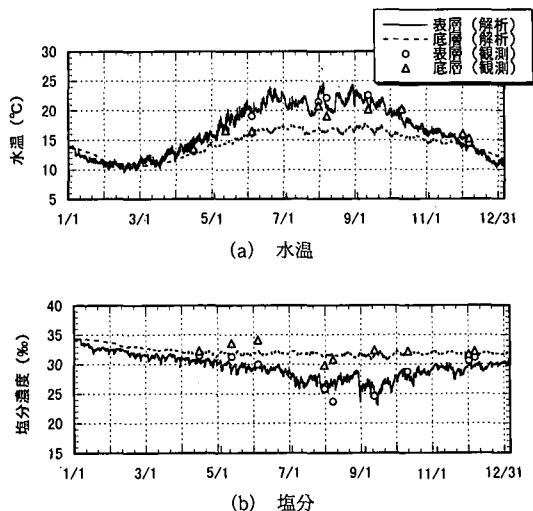


図-2 東京湾の解析領域

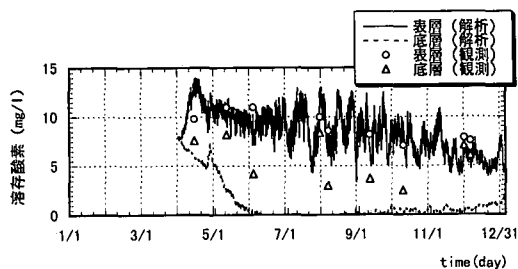
濃度が低下し 10 月まで続いて, 11 月には低酸素状態が解消している。これに対して, 計算結果では, 5 月下旬以降は, 無酸素状態が 200 日近く続いており, 明らかに貧酸素化を強調する傾向が見られた。こうした傾向を調整するために以下に示すような検討を行った。

3.2 無機化速度の検討

モデルの問題点として, まず生態系モデルのパラメタに着目した。生態系モデルには数多くのパラメタが存在

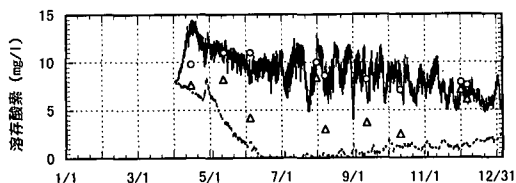


図一三 湾中央の測点 (C8) における水温と塩分の計算結果と観測結果の比較



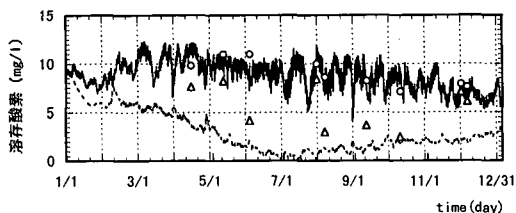
図一四 溶存酸素の計算結果と現地観測結果

(計算開始：4月1日，無機化速度＝変更せず)



図一五 溶存酸素の計算結果と現地観測結果

(計算開始：4月1日，無機化速度＝0.5倍)



図一六 溶存酸素の計算結果と現地観測結果

(計算開始：1月1日，無機化速度＝0.5倍)

し、現地観測や実験により決定されるが、求めることが著しく困難なものについては、各生物量の定常状態における値を算定して用いる方法がとられている (中田, 1993b)。

本研究では溶存酸素の消費に直接関わる懸濁態有機物 (POM) および溶存態有機物 (DOM) の分解 (無機化) に着目した。POM, DOM による分解の速度係数 (無機化速度, $v_i = a_i \exp(\beta_i T)$, a_i, β_i : 定数, T : 水温) は、場所や季節によってばらつき、合理的な根拠をもって決めにくいものの1つである。例えば、小倉 (1973) は室内実験により DOM 分解速度を求めているが、自然状態における分解速度が実験的に得られた値より小さいことを示唆している。こうしたことから無機化速度が過大評価になっているために溶存酸素量の消費が大きくなると考え、無機化速度を0.5倍に調整した。DOM については不明だが、POM の無機化速度が0.5倍という値は、中田 (1993b) に示されている大阪湾での調査結果と近い値になり、現実離れた仮定ではない。

図一五に無機化速度を0.5倍にしたときの溶存酸素の時間変化を示す。5月から6月末における底層溶存酸素の急激な減少は変わらないものの、無酸素状態が60日前後に短縮し、さらに秋季に入り上昇の兆しが現れており、貧 (無) 酸素化の過大評価が多少緩和された。いずれにしても、無機化速度が底層の溶存酸素に与える影響は大きく、今後、より詳細な感度分析を行い、再現性向上を図ることが必要である。

3.3 解析開始時期の検討

塚田ら (1997) は夏季の水質悪化を再現するために海象が安定している3月、4月を計算開始時期に設定していた。しかし、図一四、図一五を見る限り4月に入ると急激に、表層と底層の間に差が生じはじめる。そこで、境界条件データを補充し、より海象が安定した冬季 (1月1日) を解析開始時間とし、1年間を通した再現計算を試みた。図一六に解析開始時間を1月1日に設定したときの溶存酸素の計算結果を示す。計算結果を見ると、計算初期の底層の急激な貧酸素化と年間を通した無酸素状態は緩和されて、季節変動の再現性は高くなった。このように、解析開始時間の設定が、水質解析に大きく寄与することが分かる。

4. 水質改善効果の予測

4.1 貧酸素水塊の挙動

以上のように、水質現象の再現性を高めるためのモデルの調整を行った上で、水質浄化対策実施を想定し、貧酸素水塊発生抑制効果の予測を試みた。浄化対策は陸上からの流入対策と海域での浄化の2つに大別できる。本研究では主要6河川 (江戸川, 旧江戸川, 荒川, 隅田川,

多摩川、鶴見川)からの流入負荷削減(20%, 50%)と覆砂(10m以浅全域, 20m以浅全域)を想定した。

対策効果の定量的な評価を行うために、本研究では湾全域に占める貧酸素水塊の規模を貧酸素化率として次式のように定義した。

$$\text{貧酸素化率} = \text{貧酸素水塊の体積} / \text{東京湾の容積}$$

本研究では、貧酸素水塊を DO 3 mg/l 以下の水塊と定義した。したがって、ここで用いる貧酸素水塊の体積は、計算結果から溶存酸素濃度 3 mg/l 以下の計算セルの体積を合算して求めた。

まず、無対策時の貧酸素化率の時系列変化を図-7(a)に示す。貧酸素水塊は5月初旬から7月初旬に向けて急速に形成されていく。この時期は気温の上昇、降水量や河川からの淡水供給の増大があり、湾内の密度成層形成がすすみ、貧酸素化率が急激に上昇したと考えられる。貧酸素化率は7月初旬にピークに達し、湾水の約30%が貧酸素化されている。その後は、変動を繰り返しながら減少する。この変動パターンは気温・降水量の時系列変化(図-7(b), (c))と対応しており、気象条件が貧酸素水塊の消長に大きく影響することが伺える。

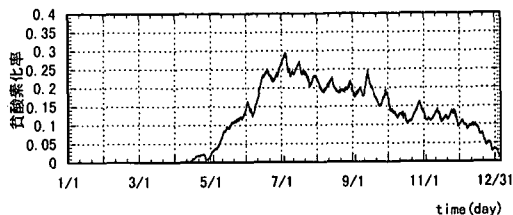
本研究の溶存酸素の解析結果では、11月から12月にかけても依然として貧酸素水塊は存在しており、秋季における底層の貧酸素化解消の再現性が不十分であった。この点は今後の課題である。

4.2 流入負荷削減の効果

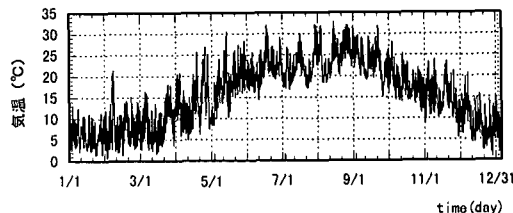
流入負荷削減は、計算開始時から一率に河川からの栄養塩と有機物の供給を削除したケースである。図-8に流入負荷削減時の貧酸素化率時系列変化を示す。「20%削減」では、「浄化対策なし」との差が少なく、効果が現れていない。一方、削減率を「50%削減」に上げて大きな効果が現れておらず、ピーク時の貧酸素化率は、「浄化対策なし」の約0.3に対して「50%削減」では約0.25であり、17%程度の貧酸素化抑制効果に過ぎない。「50%削減」等は、非現実的なほどの過大な想定であるが、それにも関わらず、大きな改善効果は現れなかった。

4.3 覆砂の効果

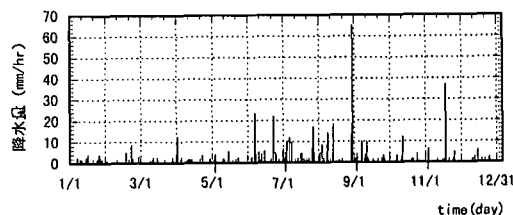
覆砂は、砂を海底上にかぶせることによって、底泥における栄養塩の溶出と溶存酸素消費の完全な抑制を想定したものであり、流入負荷削減同様、計算開始時から対策実施を想定している。図-9に覆砂実施時の貧酸素化率の時系列変化を示す。「覆砂10m以浅」では「浄化対策なし」の6%程度の減少に止まっており、対策効果は小さい。また「覆砂20m以浅」では年間を通し16%以上の貧酸素化を防止しているものの、本研究で設定した領域では、10m以浅海域の面積は東京湾全域の25%、20m以浅海域は同じく64%で、湾奥のほぼ全域を占める。現



(a) 貧酸素化率



(b) 気温



(c) 降水量

図-7 貧酸素化率と気象条件の時系列変化

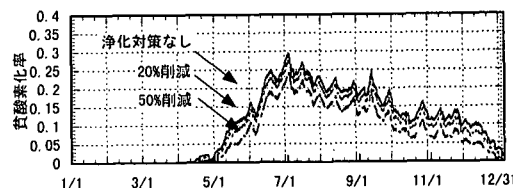


図-8 貧酸素化率時系列変化(流入負荷削減ケース)

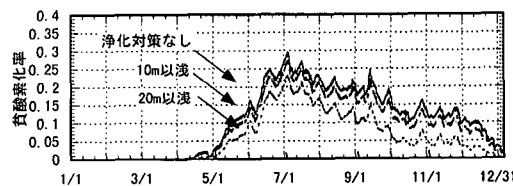


図-9 貧酸素化率時系列変化(覆砂のケース)

実は想定しにくい大規模な対策を実施しても貧酸素化抑制は困難であるという結果になった。

4.5 青潮に対する対策の効果

水質浄化対策を実施したときの効果をみるため、「浄化対策なし」と「流入負荷50%削減」の2つのケースについて溶存酸素の平面分布を比較した。環境庁水質保全局

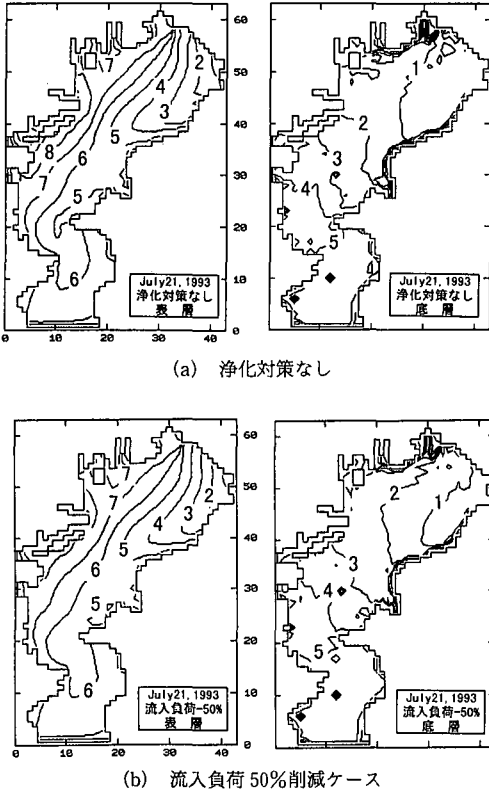


図-10 溶存酸素の平面分布の比較 (1993年7月21日)

(1994)によると、1993年には青潮が7回発生しており、そのうち7月21～24日、9月22～26日に発生したものは比較的大規模であった。そこで、7月21日の表層と底層における溶存酸素の平面分布を図-10に示す。表層では、船橋から市原へ向かって貧酸素水塊が湧昇している。「流入負荷50%削減」では、約1km幅で貧酸素水塊の分布が縮小している。底層においても1～4km幅で縮小しているが、空間的にさほど大きな効果は現れていない。

5. おわりに

本研究は、水質浄化対策実施時の水質を予測、定量的な評価を目的とし、3次元生態系・水質モデルを用いて1993年の貧酸素水塊の消長を追算をした。その結果、以下のような結論が得られた。

1) 本モデルが水温、塩分濃度、溶存酸素を長期間・広域にわたり相当程度再現できることが確認され、かつ貧酸素化率により、水質改善効果を定量的に把握することができた。

2) 計算開始時間の設定が、夏場の水質解析に大きく関与することがわかったが、理由は不明である。

3) 極端に大規模な対策(流入負荷削減と覆砂)を想定しても、単年度的な効果は小さく、長期にわたる対策が必要であるように見える。本モデルは1年間通して計算できる計算上の安定性と効率性を持っており、境界条件が与えられれば数年間の水質予測が可能である。今後はより長期の予測を試みたい。

一方、河川からの流入負荷、底泥における酸素消費速度、栄養塩溶出速度などはデータが乏しい。また、今回計算したいずれのケースでも動・植物プランクトンなどの変化が小さく、生態系に外部の擾乱(対策効果)を吸収する緩衝能があるように推察された。今後、こういった問題解明に向けて、現地観測とモデルの両面での研究を進める必要がある。

参考文献

- 小倉紀雄(1973): 無機化の過程, 海洋学講座7 海洋生化学(服部明彦編), 東京大学出版会, pp. 141-173.
- 環境庁水質保全局(1994): 平成5年度環境庁委託業務結果報告書 青潮発生予測手法の確立調査, 環境庁, 183p.
- 建設省河川局編(1995): 流量年表(平成5年), 日本河川協会, 431p.
- 佐々木 淳・佐賀 宏・磯部雅彦(1998): 東京湾における富栄養化現象の再現計算, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 1036-1040.
- 千葉県環境部(1994): 平成5年度 公共用水域水質測定結果及び地下水の水質測定結果, 565p.
- 塚田光博(1997): 東京湾における貧酸素水塊発生の予測モデル, 茨城大学大学院理工学研究科修士論文, 137p.
- 塚田光博・三村信男・鈴木雅晴(1997): 東京湾における貧酸素水塊の形成・停滞・消滅過程のシミュレーション, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 1086-1090.
- 東京都環境保全局編(1994): 平成5年度公共用水域の水質測定結果(資料編), 514p.
- 中田喜三郎(1993a): 沿岸生態系モデル, 環境流体汚染(松梨順三郎編著), 森北出版, pp. 165-231.
- 中田喜三郎(1993b): 生態系モデル一定式化と未知パラメータの推定法一, 海洋工学コンファレンス論文集, Vol. 8, pp. 99-138.
- 日本河川協会編(1996): 日本河川水質年鑑, 山海堂, 1158p.
- 古川恵太・細川恭史(1994): 浅場の窒素収支を考慮した循環モデルの構築と計算事例, 港湾技術研究所報告, 第33巻, 第3号, pp. 27-56.
- 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.
- 渡辺正孝・天野邦彦・石川裕二・木幡邦男(1998): 秋期の東京湾奥部における風による成層破壊と無酸素水塊の湧昇過程, 土木学会論文集, No. 608/VII-9, pp. 13-29.