

優占二枚貝を考慮した汽水湖の水質変動解析

西田 修三* ・ 鈴木 誠二** ・ 山中 亮一***
金城 周平**** ・ 中辻 啓二*****

湖沼の水質と物質循環においてマクロベントスが重要な役割を果たしているという指摘は従来からなされている。本研究では、汽水湖である小川原湖を研究対象とし、多年にわたる水質観測データを基に水質の季節・年変動特性を明らかにするとともに、優占種であるヤマトシジミを考慮した水質モデルを用いて、小川原湖の水質と物質循環に及ぼすヤマトシジミの影響について解析を行った。その結果、小川原湖の水質はほぼ周年変動を示すものの、気象の影響を強く受け、大きく変動することがわかった。また、ヤマトシジミの水質への影響は水深 15 m 以浅で顕著に見られ、現存のヤマトシジミ量に対する水質の改善効果は COD で約 20% であると推算された。

1. はじめに

汽水湖は、陸域から豊富な有機物や栄養塩が供給されるとともに、淡水から海水に至る広範な塩分環境が形成され、多様な生態系を有する良好な漁場として利用されてきた。汽水域における生態系の安定性は、栄養塩等の物質循環に大きく依存し、その一方で、生息する生物自体が物質循環に大きく関与している。したがって、汽水域における水環境の管理と保全を行うためには、生態系を考慮した水質変動特性を把握する必要がある。

本研究で対象とする小川原湖は、高瀬川水系の河口部感潮域に位置する汽水湖である。小川原湖の塩分循環は、湖と太平洋の水位の逆転に伴う河道部の塩水遡上、湖口への流入拡散、湖心への流下と底層貯留、鉛直混合、河道への流下と海域への流出という各素過程より決定され、長期的にはほぼ安定した環境を保っている。窒素、

リンなどの栄養塩は、周辺 6 河川からの流入と底泥からの溶出により供給される。湖内では一時生産が活発に生じ、死滅、沈降、分解などを繰り返しながら、様々な状態に変化して物質循環が行われている。また、小川原湖の優占二枚貝であるヤマトシジミは高い浄化能力を有し、植物プランクトンを含む水中懸濁物を濾過しながら捕食する。小川原湖には高い密度でヤマトシジミが生息し、年間約 3000 トンが漁獲によって系外に運び出されている。この行為が小川原湖の汚濁物質の除去と水質浄化に少なからぬ役割を果たしていると考えられる。

本研究では多年にわたって蓄積された観測データを基に、小川原湖の水質の季節および年変動特性を明らかにするとともに、ヤマトシジミの浄化機能を考慮した水質モデルを用いて、その水質浄化の定量的評価と水質の時間構造に及ぼす影響について解析を行う。

2. 小川原湖の水質環境

小川原湖は、青森県の東部に位置し、約 6 km の高瀬川を介して太平洋に繋がる、湖面積 63 km²、平均水深 11 m、最大水深 25 m を有する汽水性の海跡湖である (図-1)。

小川原湖では水深 18~21 m 以深の底層部に一年を通して約 12 psu の塩水が存在するとともに、夏期には上層内に水温躍層が発達し、強い熱塩成層が形成される (西田ら, 2001)。

小川原湖では定期的な水質調査が実施されている。その調査結果によると、約 20 m 以深の塩水層では DO、Chl-a は一年を通してほぼ 0 の値を示し、それ以浅では COD、T-P、T-N はほぼ一様化している。図-2 は、湖中央における 1985 年から 1994 年まで 10 年間の観測結果をまとめたもので、DO、Chl-a については水深 1 m、18 m の観測値を、COD、T-P、T-N については、水深 1 m、24 m の観測値を示した。

表層 (水深 1 m) の DO は 3 月に最高値 12~14 mg/L、9 月に最小値 6~9 mg/L を示している。中層 (水深 18 m) では表層と同様の季節変動を示すが、水温躍層が発達す

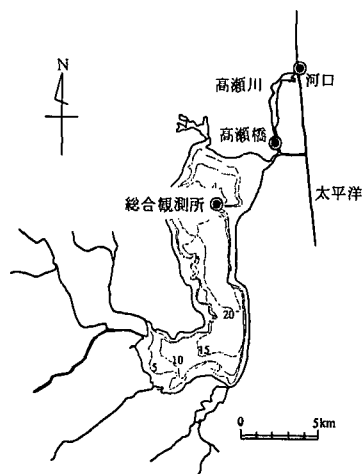


図-1 小川原湖と高瀬川

* 正会員 工 博 大阪大学大学院助教授 土木工学専攻
** 学生会員 修(工) 大阪大学大学院 土木工学専攻
*** 正会員 博(工) 横浜国立大学大学院助手 環境情報研究院
**** 学生会員 大阪大学大学院 土木工学専攻
***** 正会員 工 博 大阪大学大学院教授 土木工学専攻

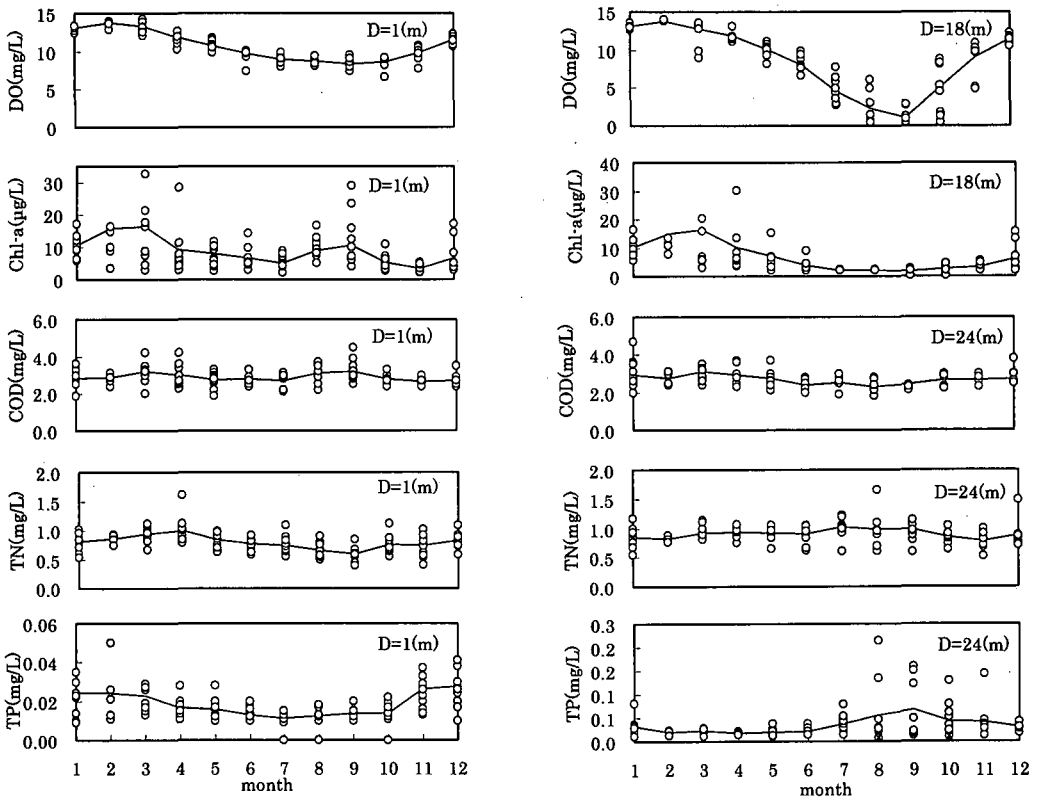


図-2 水質の季節変動 (○:観測値, —:平均値)

る8月から9月にかけて強い貧酸素化が生じている。表層の観測値には年ごとの違いはあまり見られないが、中層では成層期に約6 mg/Lに及ぶ変動が見てとれる。これは、水温躍層の形成水深とその強度が年によって異なるため、この違いが生物、とくに底生生物の生息に大きく影響を及ぼすものと考えられる(西田ら, 2001)。

Chl-aの観測値を見ると、中層では春に、表層では春と秋にブルーミングが生じていることがわかる。しかし、20 µg/L以上の大きな年較差を有している。これは、発生が気象に依存するとともに、急激な増殖を月一回の観測では捉えきれないことにも起因していると考えられる。

CODは、このブルーミングの影響を受け、とくに表層ではChl-aと同様の季節変動を有している。小川原湖におけるCODの環境基準は3.0 mg/L以下であり、実測された水質はこの上限値付近を示し、ブルーミングの発生により環境基準の適否が変わることが推察される。

表層におけるT-Nは、4月にピークを迎え9月に最も低くなる。一方、底層(水深24 m)では夏期に若干濃度が高くなる傾向にある。T-Pに関しては、変動が大きく定量的評価は難しいが、表層では冬に若干増加するものの、一年間を通して極めて低濃度であり、小川原湖がリン制限の湖となっていることがわかる。また、底層では

無機態の溶出により夏期から秋期にかけて高濃度を示している。

このように小川原湖の水質は、年変動、季節変動が大きく、さらに上層と底層では異なる変動特性を有していることがわかる。しかし、月一回の観測データでは時間間変動特性の詳細を明らかにすることはできない。そこで、以下では数値シミュレーションにより水質変動の特性を明らかにするとともに、水質に及ぼすヤマトシジミの影響について解析を行う。

3. 数値解析

(1) モデルの概要

a) 水質モデルの概要

図-3は、水質モデルにヤマトシジミの浄化効果を組み込んだモデルの概念図である。ヤマトシジミは、湖水中の植物プランクトンを捕食し、糞として無機態窒素(アンモニア)を排泄する。さらに、呼吸によって溶存酸素を消費する。このような水質に及ぼす生態系の影響に関しては、いくつかのモデルが提案されている(例えば、上野ら, 2001; 中村ら, 1998)。本研究では、ヤマトシジミの影響を次式によってモデル化し、既往の水質モデル(山根, 1998)に組み込んで計算を行った。

$$S(P) = (G_p - D_p - \gamma FB) \cdot P \cdots \cdots (1)$$

$$S(\text{DIN}) = -\beta \cdot G_p \cdot P + R_N \cdot \theta_{\text{ON}}^{(T-20)} \cdot (C_{\text{ON}} - \beta \cdot P) \\ + W_{\text{IN}} \cdot \theta_{\text{IN}}^{(T-20)} \cdot \frac{A}{V} + \gamma EB \cdots \cdots (2)$$

ここで、 $S(P)$:植物プランクトンの生成項、 $S(\text{DIN})$:無機態窒素の生成項、 G_p :増殖速度、 D_p :死滅速度、 γ :シジミ軟体部重量比、 F :ろ過速度、 B :シジミ生息密度、 β :藻類 N/Chl-a 比、 R_N :無機化速度、 θ_{ON} :温度補正係数、 W_{IN} :溶出速度、 θ_{IN} :温度補正係数、 E :シジミ排泄速度である。

計算に必要なヤマトシジミの現存量は、富士 (1990) と鶴田ら (2002) の観測結果を参考に推定し、また、簡単のためヤマトシジミの増加量と漁獲量が等しいと考えて、一年を通じてヤマトシジミの個体数は変化しないものとして計算を行った。

ヤマトシジミの懸濁物の濾過特性については、最大濾過能力を $8 \text{ L/g} \cdot \text{h}$ とし、中村ら (2001) による実験結果を参考に水温依存性を考慮した。また、呼吸による酸素消費については位田・浜田 (1978) の提案式を用いた。

b) 鉛直一次元モデル

湖盆形状 (等深面積) を考慮した以下の鉛直一次元モデルを用いて、水質の季節変動特性の解析を行った。また、ヤマトシジミの個体数を仮想的に変化させることにより浄化効果の定量的評価を行った。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{A(z)} \frac{\partial}{\partial z} \left(A(z) K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + \sum S(C) \cdots \cdots (3)$$

渦動拡散係数については、尹ら (1990) の提案したものを採用し、風と密度成層の効果を取り込んでいる。水表面における境界条件としては、水面と大気間の熱収支を考え、全熱収支式で与えた。計算期間は 1993 年 1 月 1 日から 1994 年 12 月 31 日までの 2 年間とした。水温、塩分、DO、Chl-a、無機・有機態の窒素・リン、および COD の実測データを初期条件として与え、気象変化を境界条件として取り込みながら経日変化を求めた。塩水の流入に関しては、別途、塩水遡上モデルを用いて、各層への貫入量と濃度を算定し、上記一次元モデルに導入した。また、周辺 6 河川からの流入と負荷量については、推算値を第 1 層に与えた。

c) 3 次元モデル

実測では捉えきれない水質の三次元構造を捉えるために、準三次元パロクリニックモデル (ODEM) (中辻, 1994) に前述の水質モデルを組み込んで流動と水質の計算を行った。ただし、移流項の算定には最高 3 次精度となる MUSCL-TVD スキーム (van Leer, 1977) を用いた。小川原湖全域を対象とし、200 m メッシュで東西 41 × 南北 69 分割した。鉛直方向には層厚 1 m とし、表層第 1 層のみをさらに 3 分割した。差分時間間隔は 6 秒とした。初

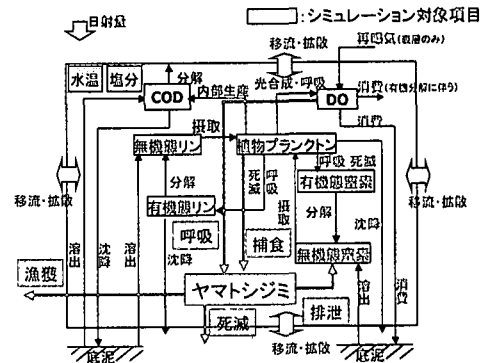


図-3 水質モデルの概念

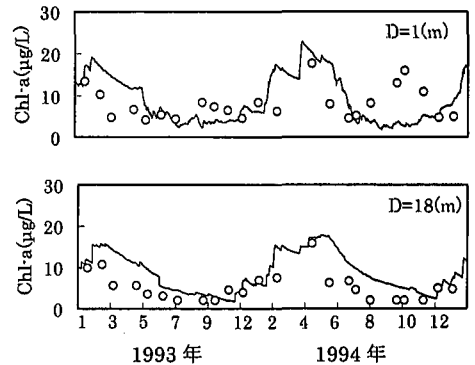


図-4 Chl-a の再現性の比較 (○: 実測, —: 計算値)

期分布としては、湖内 3 点で実測されたデータを空間補間して与えた。境界条件としては、河川流入、湖水面での熱収支と風の経時変化をそれぞれ考慮し、1994 年 8 月 24 日から 9 月 7 日までの再現計算を行った。

(2) 計算結果

a) 季節変動特性

図-4 は、一次元モデルで得られた表層 (水深 1 m) と中層 (水深 18 m) における Chl-a の計算値と実測値の比較である。計算結果は実測値を概ね良好に再現していると言える。しかし、表層の夏期、とくに 2 年目の夏期の増殖が再現されていない。夏期に活発に活動するヤマトシジミは湖岸浅水域に多く生息しており、その影響は湖岸ほど大きいと考えられる。ここに示した実測値は湖心における観測で得られたもので、最もヤマトシジミの影響が現われにくい地点のデータと言える。これが、計算結果と実測値に差異が生じた一因と考えられる。

同じく一次元解析で得られた水温、DO、Chl-a、COD、TN、TP の季節変動を図-5 に示す。猛暑水を記録した 1994 年の DO 構造は、1993 年 (気温、降雨ともに平年並) の構造と異なり、夏期に 3 mg/L 以下の貧酸素水塊が水深約 7 m にまで及んでいる。また、ほぼ一年を通じ水深 20 m 以深の塩水層には、高濃度の COD、窒素、リンが

存在している。鉛直混合が強まる1月～4月に底層内の高濃度の栄養塩が塩淡水界面より上層に取り込まれる。これにより1993年、1994年ともに3月には春のブルームが生じており、前述の観測データとも一致した傾向が見られる。小川原湖ではリンが慢性的に不足しており、底層からのリンの供給が小川原湖の植物プランクトンの増殖に支配的な役割を果たしていると考えられる。

b) ヤマトシジミが水質に及ぼす影響

推定されたヤマトシジミの現存量を基本に、個体数を変化させた計算を行い、個体数と水質の関係を解析した。表層(水深1m)と底層(水深24m)の結果について図-6に示す。個体数比(仮想個体数/現存個体数)が0で表さ

れるヤマトシジミが存在しない場合には、表層でChl-aが1.7倍、CODが1.2倍、TNは1.0倍、TPは1.4倍の濃度を示し、水質が悪化することがわかる。一方、底層では表層と同様に個体数の減少に伴い線形的に濃度が増加する傾向を示すが、表層ほど顕著ではなく、20%程度の濃度上昇に止まっている。これらの結果より、現存のヤマトシジミによる水質の改善効果はCODで約20%であると言うことができる。

ヤマトシジミの個体数が増加するとCODやChl-aは低下し、水質は改善されるが、窒素に関しては悪化し、リンは個体数が4倍を超えると僅かではあるが現状より増加することがわかる。窒素が増加するのは、ヤマトシジミの排泄による影響であり、また、リンに関してはヤマトシジミの個体数に対して餌となる植物プランクトンが常に不足し、その絶対量が減少するために溶出するリンの植物プランクトンへの取り込みが少なくなるためと考えられる。

c) 短期的な時空間変動特性

図-7に三次元モデルによる水質変動の計算結果を示す。計算開始から7日目の表層(水深1m)におけるChl-aの空間分布を示している。ヤマトシジミの空間分布を考慮した結果を左図に、比較のためにヤマトシジミを考慮しなかった場合の結果を右図に示す。両図を比較すると、ヤマトシジミが多く生息する北東部、西岸においてヤマトシジミの捕食によるChl-aの減少が認められる。一方、湖央域では上記の水域ほどの濃度の減少は見られず、Chl-a濃度がヤマトシジミの分布特性に大きく依存していることがわかる。

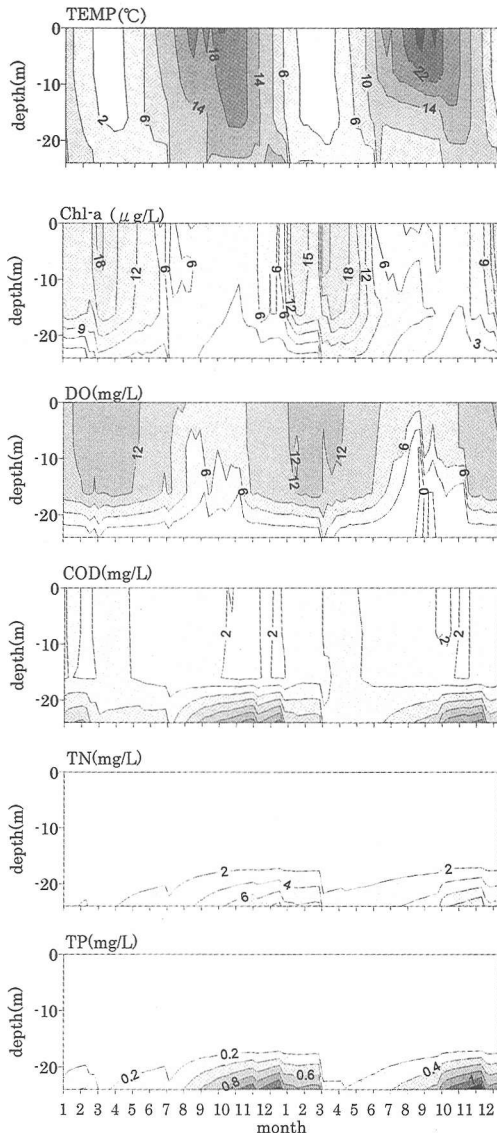


図-5 水質の季節変動 (1993年と1994年)

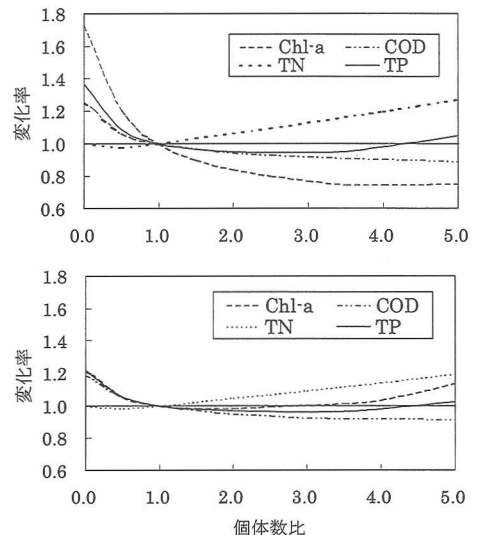


図-6 個体数変動による水質変動

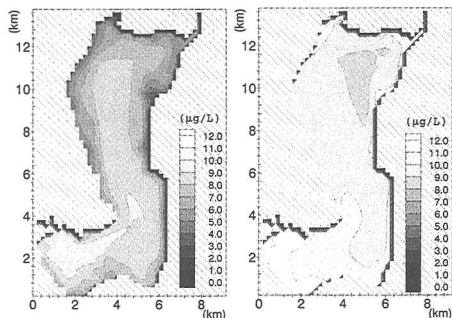


図-7 計算7日後のChl-a表層分布(左図:シジミあり, 右図:シジミなし)

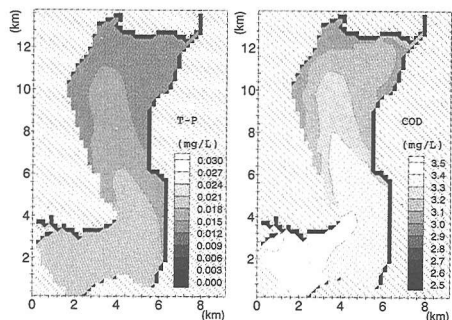


図-8 計算7日後のTP(左図)とCOD(右図)表層分布

図-8は表層のTPとCODの平面分布であり、図-7と同じくヤマトシジミを考慮した7日目の計算結果である。ヤマトシジミの生息分布の影響を顕著に受けたChl-aの分布状況とは大きく異なり、河川(南西端)からの流入負荷の影響を強く受け、下流に向かって縦断的に濃度が減少していることがわかる。このような濃度分布の空間的非一様性の度合いは、物理的因子である湖水流動の規模と水域の大きさと、生物・化学的因子である各水質項目の生成・消滅過程の時間スケールに依存している。本研究で対象としている小川原湖のスケールを考えると、今回得られたような水質の空間構造は、季節変化は生じるものの比較的安定に存在するものと考えられる。

4. おわりに

本研究より得られた主たる結果は以下の通りである。

(1) 水質はほぼ周年変化を示すものの、その年の気象状況の影響を強く受け大きく変動する。

(2) 成層期には、上層でのリンの不足により植物プランクトンの増殖が抑えられる。しかし1月~4月の循環期には溶出したリンが底層から上層に供給され、ブルーミングが生じる。

(3) ヤマトシジミの水質への影響は、水深15m以浅で顕著に見られ、現存のシジミ量に対する水質の改善効果はCODで約20%であった。

(4) ヤマトシジミの個体数が増加すると、CODやChl-aは低下し、水質は改善されるが、窒素はシジミの排泄の影響を受け増加する。

(5) Chl-aの空間分布は、ヤマトシジミの分布特性に大きく依存し、湖央域に比べ沿岸浅水域において低い値を示す。

今後より精度の高い水質浄化の定量的評価を行うためにヤマトシジミに関する生態特性に関する情報の収集と、生活史を取り込んだ解析が必要と考える。

謝辞: 資料提供にご高配いただいた国土交通省高瀬川河川事務所に感謝の意を表します。

参考文献

- 位田俊臣・浜田篤信 (1978): 貧酸素欠乏にともなうヤマトシジミの代謝変動について, 水産増殖, 23, pp. 111-114.
- 上野成三・高山百合子・灘岡和夫・藤井秀博 (2001): アコヤガイ代謝モデルと低次生態系モデルを統合した英虞湾の海域シミュレーション, 海岸工学論文集, 第48巻, pp.1241-1245.
- 鶴田泰士・石川忠晴・西田修三・成田 舞・藤原広和 (2002): 小川原湖におけるヤマトシジミの繁殖環境について, 土木学会論文集, No. 705/II-59, pp. 175-187.
- 中辻啓二 (1994): 大阪湾における残差流系と物質輸送, 水工学シリーズ 94-A-9, 土木学会水理委員会, pp. A 9. 1-28.
- 中村義治・寺澤和彦・中村幹雄・三村信男 (2001): 宍道湖ヤマトシジミ個体群の水質浄化機能の評価解析, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 1236-1240.
- 中村由行 他(1998): 二枚貝が優占する汽水湖沼の水質のモデル化, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 1046-1050.
- 西田修三・佐野俊幸・中辻啓二 (2001): 汽水湖における流動構造と物質循環過程, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 1116-1120.
- 富士 昭 (1990): 環境とヤマトシジミの生態, 小川原湖漁業調査報告書, 東北地方建設局高瀬川総合開発工事事務所.
- 山根伸之 (1998): 大阪湾の流動と生態系を考慮した水質予測モデルに関する研究, 大阪大学学位論文, 185 p.
- 尹 鐘星・中辻啓二・伊藤 渉・村岡浩爾 (1993): 閉鎖性水域における鉛直一次元水温成層モデルに関する一考察, 水工学論文集, 第37巻, pp. 325-330.
- van Leer, B. (1977): Toward the Ultimate Conservative Difference Scheme. 4, A New Approach to Numerical Convection, Journal of Computational Physics, 23, pp. 276-299.