

二枚貝が優占する湖沼の水塊形成に関する数値解析

中村 由行*・奥宮 英治**・中山 恵介***

浅い沿岸部に二枚貝が生息する宍道湖を対象として、熱及び風起因する水塊構造の形成に関する解析を行った。三次元乱流モデルに基づく湖流解析モデルに、日周期の風速及び水面熱収支の変動を与えて計算を行った。その結果、湖の北岸側に冷水塊が発達し、水温構造に南北非対称性が生じた。この非対称性は湖底地形に起因するが、夏季に典型的な西風は非対称性を強化することが見出された。計算の水温分布は観測値を良く再現すること、栄養塩濃度分布は水温と相似な分布を取る事から、水温構造が湖沼の物質循環やシジミ生息域の分布にも密接に関わっている事が示唆される。

1. ま え が き

近年、閉鎖性の沿岸海域において、干潟や浅場における水質浄化機能が注目されている。なかでも二枚貝による懸濁物除去機能に多くの関心が寄せられている。干潟・浅場の浄化機能が内湾全体の中でどの程度効果を持つのかを調べるためには、それらの場における生物生息状況や生態系の機能・構造に関する調査を行うばかりでなく、干潟・浅海域と、沖合の海域の相互依存関係を調べる事が重要であると考えられる。特に、両者の間の物理的輸送に基礎をおいた物質循環構造を理解することが必要である。

生態系の構造という観点から見れば、ヤマトシジミが優占するわが国の多くの汽水湖沼と、アサリ・シオフキなどが優占する砂質の干潟との間には多くの共通点がある。多くの汽水湖沼では、閉鎖性が強いために、物質循環機構を把握しやすいという利点を持つ。わが国最大のヤマトシジミの生産地である宍道湖を対象として、現地観測及び数値解析など、水質・生態系や物質循環構造に関する研究が行われてきている(Nakamura ら, 1988; Yamamuro・Koike, 1994; 中村, 1993; 山室, 1994; 中村ら, 1998a; 中村ら, 1998b; Nakamura・Kerciku, 2000; 奥宮ら, 2001; 中村(義)ら, 2001; 中村(由)ら, 2001)。宍道湖沿岸部には、岸から数百メートル程度の範囲でヤマトシジミが高密度で生息しており、その捕食圧によって、濁質やクロロフィル濃度が少なく栄養塩濃度が高い水塊が、形成・維持されている。沖合の水塊が、特に夏期には、クロロフィル濃度が高く栄養塩濃度が相対的に低めである事と対照的である。このような場では、沿岸水と沖合水塊との交換が、一次生産者と捕食者を物理的に連結し、食物連鎖を円滑にするとともに、捕食者の排泄する栄養塩を一次生産者に再供給する役割を演じており、湖水の物質循環の促進に大きく貢献していると考えられる。つまり、湖内に岸沖方向の循環流や混合が

生じることによって、シジミの持つ浄化機能が沖合に波及し、より広い範囲の湖水の浄化に寄与していると考えられている。

循環流が発生する原因としては、一般に吹送流の影響が大きいのと考えられるが、著者らの観測や数値実験によって、静穏な気象条件下においても、地形性貯熱効果による岸沖方向の水塊交換が起こり、それによって効率的なシジミによる水質浄化が促進されていることが示されている。特に夜間における熱の放出に起因した対流的循環流の発生が、植物プランクトンの効率的な捕食と岸沖方向の交換に寄与していることが見いだされている(中村ら, 1998a; 中村ら, 1998b; 奥宮ら, 2001)。

水表面での熱交換が、水域の水塊形成と流動に及ぼす影響については研究が少なく、観測や解析例に限られている(例えば Monismith ら, 1990; Hiramatsu ら, 1996)。中村ら(2001)は宍道湖を対象とした現地観測及び、数値実験により、水温・流速の水平分布構造に水表面での熱収支が及ぼす影響を調べた。その結果、夜間の水面からの冷却作用が、湖底地形の南北非対称性により、水温構造に非対称性をもたらし、北岸に冷水塊を発達させるとともに時計回り環流が生じる原因になっていることを見いだしている。しかしながら、その解析では重要な外力である風の効果が考慮されていない。そこで本研究においては、夏季において典型的な風及び水表面熱フラックスを日周期変動として与え、それらの外力が三次元的な水塊形成及び物質交換過程に及ぼす影響を調べることを目的とする。

2. 宍道湖の概要

宍道湖は島根県東部に位置し、湖面積 80 km²、平均水深 4.5 m の浅い汽水湖沼である。平面的には東西 16 km、南北 6.2 km の東西に長い矩形状であり、また湖盆は単純な盆状の形状をとる。全体的に南岸は湖底の勾配が大きく急峻な地形を呈し、逆に北岸は緩やかな湖底勾配を呈する。宍道湖の東部からは大橋川が中海に通じており、日本海から海水が中海・大橋川を通じて宍道湖に間欠的に流入することで汽水条件が維持されている。塩

* 正会員 工博 (独法) 港湾空港技術研究所海洋・水工部

** 正会員 工修 中央復建コンサルタンツ(株)

*** 正会員 工博 国土技術政策総合研究所

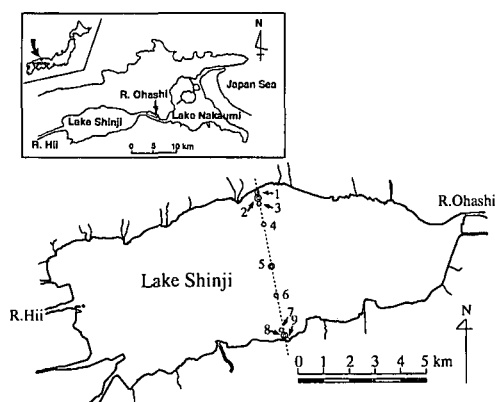


図-1 宍道湖の位置と現地観測地点

分は斐伊川流量や気象条件を反映して変動するが、平均的には海水の約10分の1程度である。既往の観測結果によると、北岸部は南岸部に比べて冷水塊が発達し易いことが知られている (Nakamura・Kerciku, 2000)。ヤマトシジミは、主に水深約4 m以浅の沿岸部に生息している。

3. 現地観測

3.1 観測の概要

宍道湖は矩形に近い単純な地形性状をとっている。しかしながら、北岸に冷水塊が発達し易いこと、時計廻りの環流が衛星画像から示唆されているなど、水塊構造としては南北非対称な構造を有していると考えられている (中村ら, 2001)。本研究では、南北断面における42時間集中観測と8日間の連続観測を組合せ、水塊構造の把握を行った。まず、1997年8月6日18時から8月8日12時まで、ほぼ6時間おきに、上述の三つの測点を結ぶ南北測線上で、船上からセンサーによるSTD・DO・クロロフィル観測、ならびに採水を実施した。日中には水中照度も計測した。また、Stn.2, 3及び5の測点の、それぞれ三層の深度において、一次生産速度の現場実験(24時間酸素法)を8月7日6時から同8日6時からの2回行った。さらに、8月1日～8月8日に、図-1に示す宍道湖の北岸部(Stn.2)、湖心部(Stn.5)及び南岸部(Stn.8)の3測点において、水表面下約50 cmの水深で、水温・流向・流速の連続測定を実施した。各測点にはブイを浮かべ、GPSによって複数回位置の確認を行った。さらに、採水したサンプルは直ちにろ過後、栄養塩濃度を測定した。観測期間中のうち8月6日から8日未明まで曇天または一時的に降雨があったが、最終日の8日午前中から晴天となった。風は8日11時以降を除いて2～3 m/s程度の微風であった。観測期間中明瞭な塩分層は認められなかった。観測の方法及び結果は、既に報告済みであ

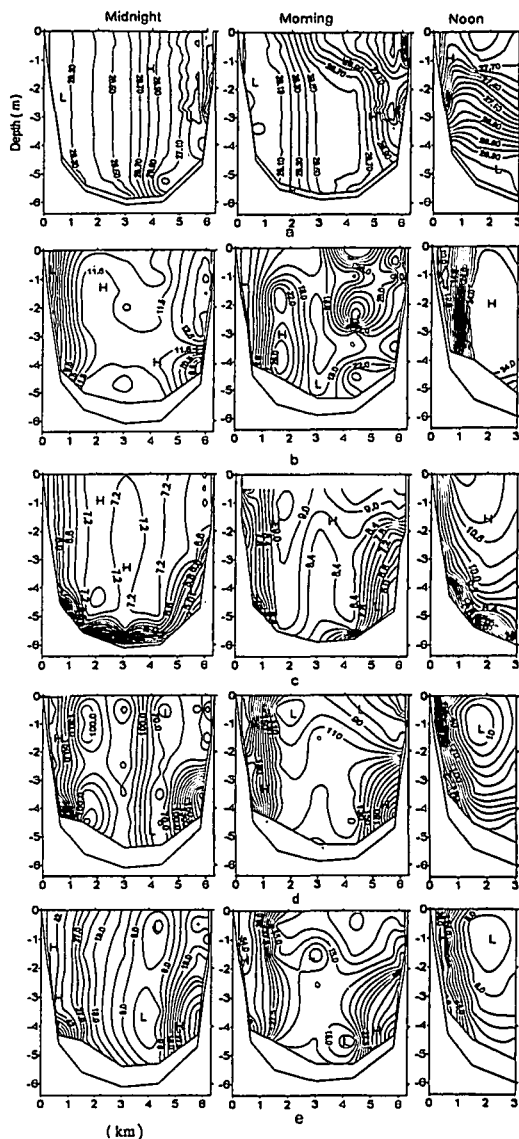


図-2 水温(a)・chl.a(b)・DO(c)・ NH_4 (d)・ PO_4 (e)の断面分布。左から1997年8月8日0時、6時および12時における観測結果を示す。図中の単位は、水温が $^{\circ}\text{C}$ 、DOは mg/l 、他は $\mu\text{g/l}$ である。

るので、詳細はそれらの文献を参考にされたい (中村ら, 1998b; 中村ら 2001)。本稿では、特に数値計算との比較に用いる観測結果について、その概略を述べる。

3.2 観測結果

図-2に、観測期間後半にあたる8月8日0時、6時および12時を中心とした時間帯における水温、クロロフィルa、溶存酸素、アンモニア及びリン酸態リン濃度の鉛直断面分布を示す。

水温(図-2a)は、夜間に北岸を中心として冷水塊が顕著に発達することが見いだされた。日中は水温の日成

層が発達し、水温のコンターはほぼ水平で、沿岸部においても高温となる。早朝の水温分布において、北岸側の冷水塊の分布からは弱い沈降流が生じていることが示唆される。一方、南岸側には朝の時点でも既に水温成層が見られ、冷却の影響があらわれにくいことを示している。当日の観測は5時過ぎに北岸から南岸に向けて行われ、南岸の観測は最終的に10時を過ぎたため、既に南岸側で日射の効果があらわれていた可能性がある。しかしながら、同時に行われた Stn. 2, 5 及び 8 における水温の連続測定の結果から、南岸と北岸で $1 \sim 2^{\circ}\text{C}$ の水温差が観測期間中継続していたことから、水平的な水温勾配の存在は普遍的な現象である事が示唆され、何らかの維持機構が働いていたことがわかる。

クロロフィル a (図-2b) は沿岸部で値が顕著に低く、沖合い側が高いという特徴的な分布をとっていた。沿岸部の低濃度域は明らかにヤマトシジミによる捕食を反映しているものと考えられる。詳細に検討すると、クロロフィル a の極大は湖心ではなく、岸から 1.5 ないし 2 km 離れた地点の亜表層で観測された。湖心での値はそれらの地点での値よりもやや低く、極小値をとっていた。また、南岸部の濃度の低下は北岸部に比べてそれほど顕著ではなかった。

溶存酸素濃度の分布 (図-2c) はクロロフィル a の分布に類似しており、沿岸で低濃度、沖合い側で高濃度であり、濃度の極大域は湖心と岸の中間的な地点に存在した。また、クロロフィル a の分布よりも南北の対称性がより明瞭であった。沿岸部の低濃度域の形成にはヤマトシジミの呼吸が反映しているものと考えられる。

アンモニア及びリン酸態リン濃度の分布 (図-2d, e) は互いにきわめて酷似しており、クロロフィル a や溶存酸素濃度分布を反転させた様な分布であった。すなわち、沿岸部ほど濃度が顕著に高く、沖合い側で低い分布をとった。また、それらの栄養塩濃度の極小域は湖心ではなく、クロロフィル a や溶存酸素濃度の極大域とほぼ一致した。分布は南北方向に完全に対称ではなく、南岸では水深約 4 m の地点で極大域が認められた。沿岸の高濃度域はヤマトシジミの排泄を反映しているものと考えられる。

8 日 6 時から翌日 6 時まで測定した一次生産速度は、岸から約 600 m 離れた Stn.3 において最大で、最も岸よりの Stn.2 で最低であった。岸近傍で極小となるのは、ヤマトシジミの捕食活動によってもともとクロロフィル a 濃度が小さいことを反映しているものと考えられる。また、Stn. 3 はクロロフィル a 濃度、栄養塩濃度が水平方向に急変する濃度フロントのような位置にあり、沿岸水と沖合い水が接する地点であると言える。この事は、植物プランクトンにとってはヤマトシジミが排泄した栄養塩

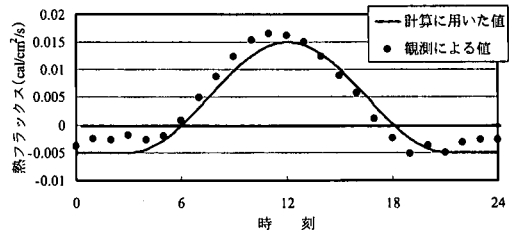


図-3 計算に用いられた水表面熱フラックス

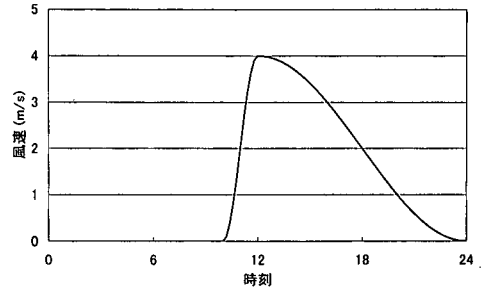


図-4 計算に用いられた風の日周期変動

類を摂取しやすい位置にあると考えられ、栄養塩利用可能性が光合成速度を高くしている原因ではないかと推察される。

4. 数値解析

4.1 解析方法

典型的な夏の気象条件下における湖内の水塊構造を数値実験により再現し、水塊形成のメカニズムの解明を試みる事を目的とする。そのために、水面での熱の授受と風を強制的に与え、それらが水温分布構造に及ぼす影響に着目した。湖沼の熱収支を直接支配しているのは水面での熱のやりとりであるので、計算は実測値に近い熱フラックスを水面に与えて、それに起因する流れと水塊形成機構を調べた。本研究で用いたモデルは、中山により開発された三次元非静水圧湾内流動モデル (CIP-CSF) (中山ら, 2000) である。また、移流項の計算に CIP, 乱流モデルの水平方向には 1 方程式 LES, 鉛直方向には、スカラー量の乱流拡散が抑制されるという効果を考慮するため、Shumann (1991) により提案された Second-Order Closer (SOC) モデルを用いた。計算領域は宍道湖全体とし、東西約 16 km, 南北約 6 km, 最大水深約 6 mであることを考慮して、メッシュ数 $50 \times 20 \times 10$ とした。水深は、宍道湖の地形図より判読して入力した。

本解析においては、観測値を参考にして、日周期の風速変動および水表面熱フラックスを多項式で与えた。風速については、12 時に最大風速 (4 m/s) となる日周期の風速 (最大 4 m/s, 風向は常に西) を与え、水表面熱フラッ

クスについては一日で熱の収支がとれるように、いずれも多項式で与えた(図-3, 4参照)。初期条件として、流速は静止条件を与え、水温は一樣水温(30°C)を与えた。中村ら(2001)は、同じ計算モデルによって初期条件の影響が残存する時間スケールを調べており、計算開始後5日以降はほぼ周期的な定常状態が得られている。本研究では、風の与え方が中村ら(2001)とは異なるため、再度、定常解に達するまで計算を行ったが、前報と同様に、5日で周期的な定常状態が得られた。なお、本解析では現象を単純化して、塩分は計算に取り入れていない。淡水及び汽水の流入・流出も考慮していない。

4.2 解析結果及び考察

図-5は計算開始から12時間後の朝6時、およびほぼ周期的な定常解が得られた、96, 108時間後の最表層の水温コンター及び、流速ベクトル、観測断面と同じ南北断面における水温分布及び流速ベクトルを示している。

まず、翌朝6時($t=12$ hr)の水温分布をみると、沿岸部において早くも冷水塊が発達していることが分かる。特に北岸側で水温の低下が著しいが、南岸にも水温低下が見られる。これは北岸側が南岸側に比べて湖底勾配が緩く、水深が浅い地域が広がっているという地形的な特徴によるものと考えられる。このときの流速ベクトルをみると、沿岸部における冷水塊の発達に伴い、湖底部では沖向きに進行する密度流が、水面付近では湖心部から沿岸部への補償流が現れており、湖内全体で二次元的な循環流が発生している。これらの現象は、風を考慮していない著者らの計算結果(中村ら, 2001)とほぼ同様の結果となっている。

また、ほぼ周期的な定常解が得られた5日目早朝の水温分布を見ると、北岸では冷水塊が発達しているが、北岸側では早朝6時の分布にもかかわらず、鉛直混合が不十分であり、相対的に高温の水塊が形成されている事が分かる。水温分布の南北非対称性が顕著にあらわれている。流れのベクトルは、1日目(12時間後)とはかなり異なり、表層では北流する流れが顕著である。鉛直断面で見ると、北岸側で沈降、南岸側で湧昇する、大規模な一つのセルの循環流が形成されている事が分かる。これは、風の効果を考慮しなかった前方の流れの分布とはかなり異なる点である。流速の絶対値自体も、12時間後の流速に比べてかなり速い流れとなっている。

5日後夕方18時の水温分布は夜間とは対照的であり、南岸・北岸ともに高水温となる。観測を行った側線近傍の南北断面内での流れは表層で南下流が発達し、南岸側で沈降、北岸側で湧昇流となり、夜間とは流向が反転している。詳細に見ると、北岸から約1 km離れた地点で湧昇流が最大であり、表層水温が低い。反対に、早朝ではほぼ同じ地点で沈降流が発達し、北岸近傍では1 km程

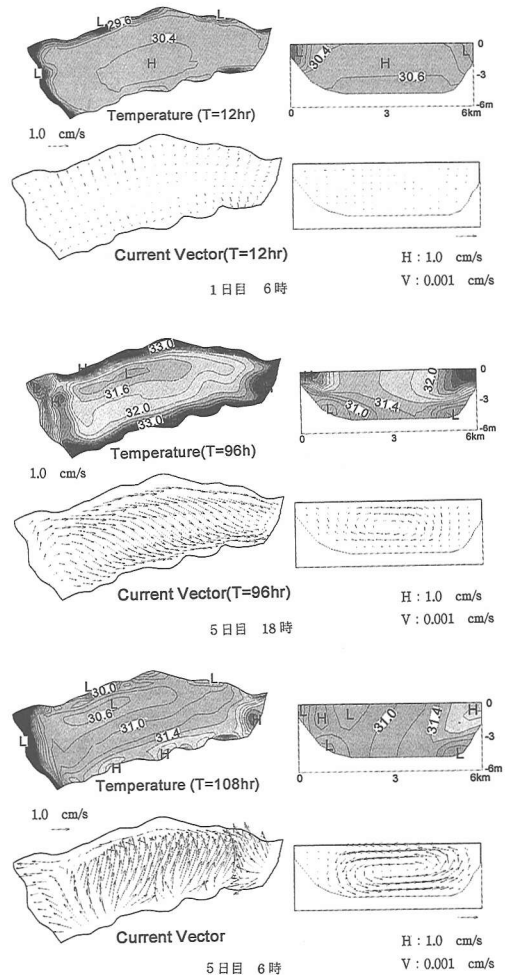


図-5 水温及び流速の数値計算結果(左図は最表層、右図は観測断面における計算結果)

度のスケールを持つ弱い鉛直セルが生じている。

風を考慮しなかった前報の計算結果(中村ら, 2001)と比較すると、水温の南北非対称性がより顕著にあらわれていることが分かる。定性的には、風を与えなかった場合においても水温構造の南北非対称性があらわれており、北岸に冷水塊がみられたのに対して、南岸側では冷水塊の発達を表層ではほぼ消滅している。南北断面で見ると、冷水塊は南岸側では水面下に限定されていた。流速ベクトルをみると、二次元的であった流れが、次第にコリオリ力の影響を受けて三次元的な流れに移行しており、その流速は徐々に小さくなる傾向を示していた。計算開始から日数の経過とともに循環流が形成するセルの数が増加し、初日は1つであった循環流のセルが3つから4つに増加し、より複雑な循環流が形成されていた。風を考慮に入れた今回のケースでは、水温構造の南北非

対称はより顕著にあらわれ、流れについても強化されている。南北断面で見た流れの分布はほぼ一つのセルの単純な流れとなり、日中と夜間とで流向が反転している。本解析で考慮した風速は最大で4 m/sであり、このような比較的穏やかな風速の場合には、湖沼内の水温差を解消する方向ではなく、むしろ強化する方向に働くことが分かった。また、計算で与えた風速ベクトルは宍道湖において夏季に観測される典型的なものである。

以上のことから、典型的な夏季における水面での熱交換及び風を外力として与えた数値解析により、北岸側の冷水塊の発達、時計廻りの循環流を再現することができたと考えられる。冷水塊の発達には、湖底地形と夜間の冷却の両方が密接に関与し、湖底勾配の南北非対称性が水塊の非対称性を生じる主因であると考えられる。しかしながら、比較的穏やかな(4 m/s以下)風の場合には南北非対称的な水塊の構造を強化する事が分かった。水温の計算結果を1997年8月における南北断面での水温・栄養塩の観測結果と比較すると、水温については極めて良く再現されている。また、栄養塩の断面分布は水温分布に相似な分布をしており、特に南岸における3 m以深の高濃度水塊は計算結果の低水温水塊の規模とほぼ一致している。NH₄濃度の極大域はヤマトシジミの分布域と一致し、ヤマトシジミの排泄の影響を反映していると考えられる。沿岸部と沖合い部において、ヤマトシジミの餌となる植物プランクトン濃度が顕著に異なり、またヤマトシジミが排泄した栄養塩は植物プランクトンに再利用される事から、水平方向の移流・混合が湖の物質交換と食物連鎖に深く関与している事が示唆される。従って、このような湖沼の水温構造の形成・維持機構は、湖沼の物質循環や、ヤマトシジミ生息域の分布にも大きな影響を及ぼしていると考えられる。

5. 結 論

本研究では、夏季の典型的な風が宍道湖における水塊分布構造に及ぼす影響を明らかにするために、現地観測及び数値実験を用いて検討を行った。従来の解析及び観測によって、宍道湖では夏季に北岸側の水温が最も低く、南岸に向かって水温が高くなる傾向があることが示されている。これらの現象は、熱フラックスのみを外力として与えた、三次元の数値実験によって再現することが可能であることから、宍道湖における水平面的な水塊構造には、湖底勾配の南北非対称性と夜間の水面冷却が大きな影響を及ぼしていることが示唆されていた。しかしながら、今回、風の影響を考慮した解析を行うことにより、

南北非対称の構造が比較的穏やかな風によって強化されることが見いだされた。栄養塩濃度の断面分布はヤマトシジミの栄養塩の排泄を反映し、水温と酷似した分布を取っている。このことから、水温構造がシジミ生息域の分布にも密接に関わっている事が示唆された。

参 考 文 献

- 奥宮英治・中村由行・中山恵介・井上徹教・石飛 裕 (2001): 湖沼の物質循環に及ぼす夜間の水面冷却の影響, 水工学論文集, 第45巻, pp. 1147-1152.
- 中村幹雄 (1993): 汽水湖の生物と漁業, アーバンクボタ, 32, 14-23.
- 中村義治・寺澤知彦・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・Fatos Kerciku・井上徹教・柳町武志・石飛 裕・神谷宏・嘉藤健二・山室真澄 (1997): 汽水湖沼における水温・水質構造の日周変動, 水工学論文集, 第41巻, pp. 496-474.
- 中村由行・Fatos Kerciku・井上徹教・二塚本晃造 (1998a): 汽水湖沼におけるヤマトシジミの水質浄化機能に関するボックスモデル解析, 用水と廃水, Vol. 40, pp. 18-26.
- 中村由行・Fatos Kerciku・二塚本晃造・井上徹教・山室真澄・石飛 裕・嘉藤健二 (1998b): 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.
- 中村由行・奥宮英治・中山恵介 (2001): 湖沼の平面的な水塊分布構造に及ぼす水表面熱収支の影響, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 1051-1055.
- 中山恵介・岡田知也・野村宗弘・日比野忠史・細川恭史・古川恵太 (2000): 大潮, 小潮における湾外水の影響, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 421-425.
- 山室真澄 (1994): 食物連鎖を利用した水質浄化技術, 化学工学, Vol. 58, pp. 217-220.
- Monismith, S. G., J. Imberger and M. L. Morison (1990): Convective motions in the sidearm of a small reservoir, Limnol. Oceanogr., Vol. 35, pp. 1676-1702.
- Nakamura, M., M. Yamamuro, M. Ishikawa and H. Nishimura (1988): Role of bivalve *Corbicula japonica* in the nitrogen cycle in a mesohaline lagoon, Marine Biology, Vol. 99, pp. 369-374.
- Nakamura, Y. and F. Kerciku (2000): Effects of filter-feeding bivalves on the distribution of water quality and nutrient cycling in a eutrophic coastal lagoon, Journal of Marine Systems, Vol. 26, pp. 209-221.
- Hiramatsu, K., T. Kwachi, H. Kim and Y. Yoshitake (1996): Polynomial Finite Element Solution of 3-D Density Driven Currents using the Velocity Correction Method, Trans. of JSIDRE, No. 185, pp. 23-30.
- Schumann, U. (1991): Subgrid length-scales for large-eddy simulation of stratified turbulence, Theoret. Comput. Fluid Dynamics, Vol. 2, pp. 279-290.
- Yamamuro, M. and I. Koike (1994): Diel changes of nitrogen species in surface and overlying water of an estuarine lake in summer: Evidence for benthic-pelagic coupling, Limnol. Oceanogr., Vol. 39, pp. 1726-1733.