

汽水湖沼沿岸部における水温・水質構造の日周変動

-鉛直対流循環が二枚貝生態系に及ぼす影響-

Diurnal cycle of water temperature and water quality in a littoral zone of a eutrophic lake

-The role of convective circulation in ecosystems in a brackish lake-

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^{*****}

By Yoshiyuki NAKAMURA, Fatos KERCIKU,
Tetsunori INOUE, Takeshi YANAGIMACHI,
Yu ISHITOBI, Kenji KATO,
Hiroshi KAMIYA, Masumi YAMAMURO

We have conducted a continuous measurement of temperature and water quality in a littoral zone of a brackish lake, Lake Shinji, where filter-feeding bivalves (*Corbicula japonica*) are densely populated. Daytime heating and nighttime cooling created density gradients that drove strong horizontal mass exchange. Simultaneous measurement of Chlorophyll a. concentration suggests that this circulation, especially during cooling period, mainly supports feeding of phytoplankton by bivalves which are habited at the lake bottom, and thus controls natural purification process through benthic-pelagic coupling.

KEYWORDS : convective circulation, temperature, brackish lake, bivalves,
natural purification.

1.序論

湖沼、沿岸海域等の富栄養化（防止）対策として、下水道整備等による流入負荷の削減や、内部負荷源である底泥の処理（しゅんせつ・覆砂等）が実施されているが、これらの対策は一般に莫大な経費がかかり、必ずしも実効を挙げるに至っていない。一方、自然の浄化力に着目して維持あるいは増進させる方法がいくつか試みられている。著者らは二枚貝の一種であるシジミに着目し、宍道湖・中海を調査対象湖沼としてその浄化機構の解明と浄化能力の促進に関する研究を進めてきた。

宍道湖・中海は一本の河川（大橋川）によって連結した汽水湖沼である。湖面積・平均水深・TN・TP濃度ともほぼ同程度の両湖であるが、中海が恒常的に赤潮に悩まされているのに対し、宍道湖の方はそれほどでもない。また、宍道湖はシジミを中心として漁獲量が大さいのに対し、中海では、漁獲量は小さい。両湖の水質の差はシジミの成長と漁獲（N.Pの系外の持ち出し）によってもたらされている可能性が高いと言われている¹⁾。

-
- * 正会員 工博 九州大学助教授 工学部建設都市工学科（〒812-81 福岡市東区箱崎 6-10-1）
** 学生員 九州大学大学院 修士課程
*** 学生員 工修 九州大学大学院 博士課程
**** 理博 島根県衛生公害研究所（〒690 松江市西浜佐陀町 582-1）
***** 理修 島根県環境生活部環境保全課（〒690 松江市殿町 1 番地）
***** 島根県衛生公害研究所（〒690 松江市西浜佐陀町 582-1）
***** 理博 通商産業省工業技術院地質調査所（〒305 つくば市東 1-1-3）

シジミは沿岸部の砂地の底泥に棲息し、宍道湖において最大3,800個体/m²の個体密度となる²⁾。図-1に宍道湖におけるシジミの個体密度の分布を示す。湖底表面積のうち生息域は1/3に限られている。また、塩分躍層の深度は通常4m以深であり、シジミ生息域(水深0~3m程度まで)は表層混合層内に位置しており、貧酸素化することはない。シジミは植物プランクトンなどの水中懸濁物を捕食する。湖内の植物プランクトンの分布は詳細に調査されているが³⁾、湖の中心部付近で最大で沿岸部では小さい。図-2にChl.aの水平分布の一例を示す。沿岸部でChl.a濃度が小さく透明度が高い現象は一年を通じてみられるが、これはシジミによる捕食のためであると考えられている。

山室¹⁾はシジミの培養実験等のデータ⁴⁾を整理して湖内の窒素循環フラックスを見積もった(図-3)。その結果、夏季植物プランクトンが取り込む窒素の約半分の速さでシジミが植物プランクトンを捕食することが示された。この様に高い二次生産が植物プランクトンの異常増殖を防止している事が予想されるが、シジミによる植物プランクトンの捕食量はシジミが生息している沿岸部直上の水柱だけではまかなえない⁵⁾。従って、植物プランクトンがどのようにシジミの生息している沿岸部の堆積物直上にまで効率的に供給されているかが問題となる。

シジミの捕食量から考えて、何らかの機構によって水平方向に植物プランクトンが輸送されている事が示唆される。輸送のメカニズムとして風による吹送流、河川水(洪水)や塩水の侵入に伴う密度流、更には乱流拡散等が考えられる。宍道湖は東西方向に平野が開けた場所に位置し、東西方向の風(特に西風)が卓越する事が知られており、風成循環流は東西の鉛直断面で発達し易い。また、淡水・塩水の主要な供給源である河川はいずれも湖の東西に位置しており、湖水と淡水、あるいは湖水と塩水の密度差によって生じる重力循環流は、やはり東西の鉛直断面で生じる⁶⁾。しかしながらシジミの生息域は湖の北岸や南岸沿いにも広く分布しており、その領域においてはChl.a濃度が小さい事が知られている。そのため、湖全体のシジミの生産を考えると、南北方向にも大量のChl.aが水平的に輸送されていると考えられる。南北方向の輸送は、前述の東西風や重力循環流では説明できないため、それら以外の機構が必要である。

我々は、風の微弱な早朝、湖の北岸・南岸の両方で透明度の高い現象がみられる事から、水表面を通じた日周の熱の授受のサイクルによって沿岸部で生じる密度流(夜間の対流的な循環流と昼間の湧昇流)が重要な輸送機構を果たしているのではないかと考え、風の微弱な日を選定して湖沼北岸沿岸部の水塊連続観測を行い、あわせてシジミによる浄化力に関する考察を行った。

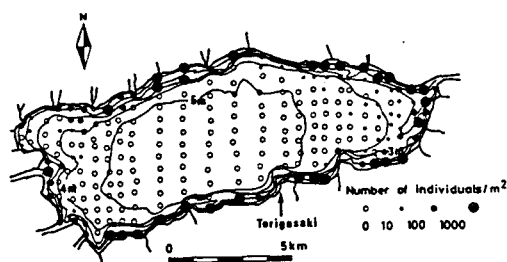


図-1 宍道湖におけるシジミの生息密度分布²⁾

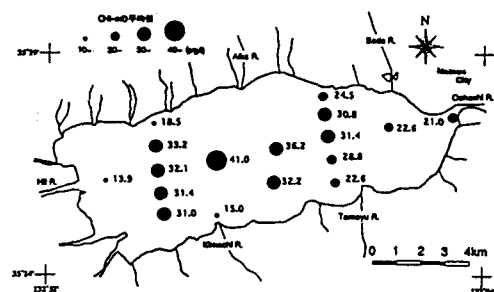


図-2 Chl.aの水平分布の一例³⁾

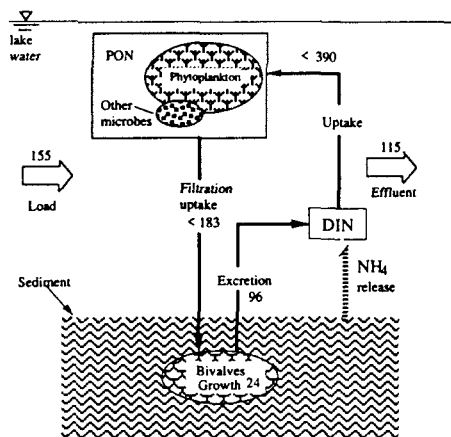


図-3 湖内の窒素循環フラックス¹⁾

数字の単位はkg atom N day⁻¹。

2. 観測方法

調査は図-4に示す北岸部の岸に対して垂直な測線で行った。調査測線付近の沿岸部ではシジミの漁獲が活発に行われている。測線上に、7つの定点を設け、1996年8月1日18時から8月3日13時まで、ほぼ6時間おきに連続して水質の水平・鉛直分布を計測した。各測点には目印のために夜間照明灯つきのブイを設置し、測点の位置はGPSによって数回確認した。測定項目は水温・塩分・深度・Chl.a・溶存酸素濃度である。水温・塩分・深度はSTD（アレック電子、ASD100-PK）によって深さ方向に0.1mおきに計測した。Chl.aは、ターナー現場型蛍光光度計(Turner Designs, model 10)によって0.5mおきに計測し、一部の試水についてはアセトン抽出法による方法を併用して校正した。校正結果を図-5に示す。溶存酸素は溶存酸素計(YSI, MODEL58)によって0.5mおきに計測した。また、湖水の一部を持ち帰り、植物プランクトンの組成を顕微鏡観察により調べた。

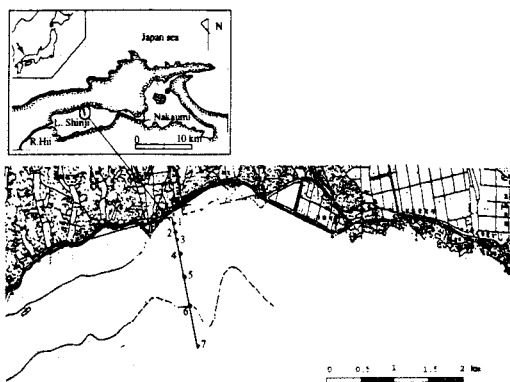


図-4 観測地点

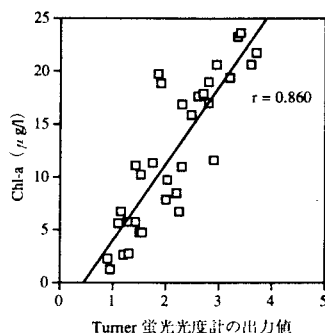


図-5 ターナー蛍光光度計の校正曲線

3. 観測結果

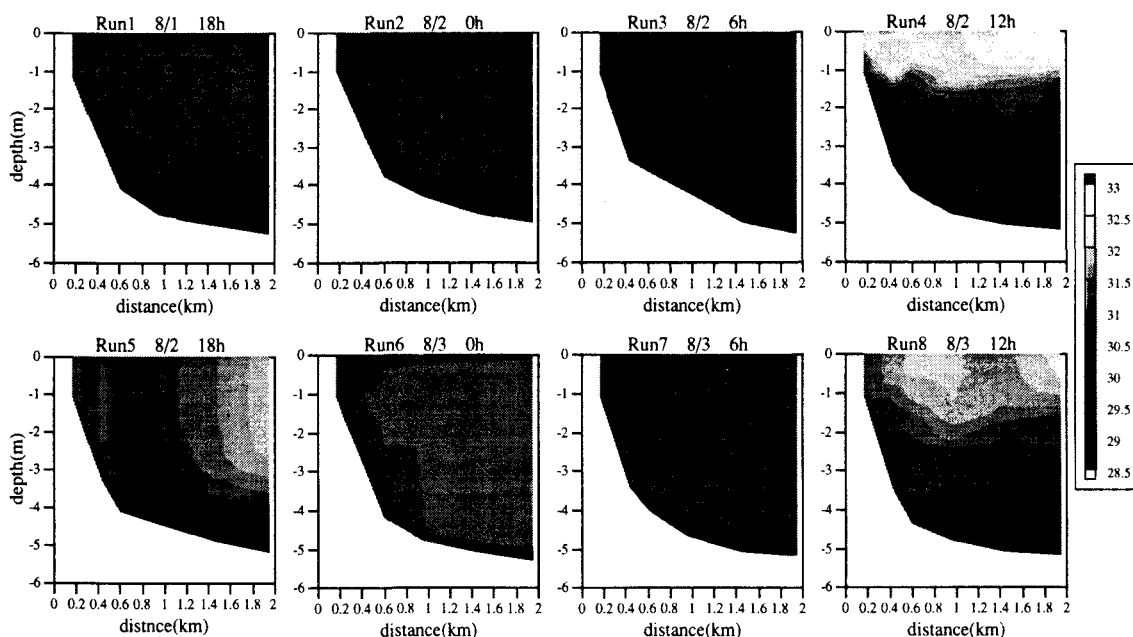
図-6に、観測した水温鉛直分布の結果を示す。昼間は弱い温度成層が発達するが、夕刻から次第に日成層が解消する。夜間冷却と共に温度が鉛直に一樣になりながら水温が低下するが、水温の低下は沿岸部ほど早い。再び昼間頃までには弱い水温成層が形成され、水温の水平分布が一樣に近づく、というパターンが繰り返される。夜0時及び朝6時の分布をみると、沿岸部の低温域は底面に沿いながら沖合いに進行している事がわかる。これは、convective circulation^{7) 8)}と呼ばれる対流を伴った鉛直循環流を示している。水深約4.5m付近には水温・塩分差の大きい密度躍層があり、冷水塊はこの躍層付近まで侵入している(図-6 Run2)。表層水は冷水塊の流れを補償して沖側から岸向きに流れる。

昼間には、日射によって弱い温度躍層が水深1~2m付近に形成される。ここでの水温成層は、温度差が0.5~1℃程度であり、8/1及び8/2の午後に吹いた風速4~5m/s程度の風で3m付近まで均一に混合された。昼12時(図-6 Run4)に測定された水温分布のうち興味深いのは30.5~31℃の等温線が岸近くで浅くなっていることである。これは昼間岸近くがより温められ易くなることによって底層の圧力が岸側で低くなり湧昇流が生じているためと考えられる。従って、沿岸部底層水は夜間から早朝にかけて底面に沿いながら沖側に移動し、昼間には逆に岸側に湧昇しながら移動するという日周運動パターンの変化がみられる(図-6 Run2・4)。

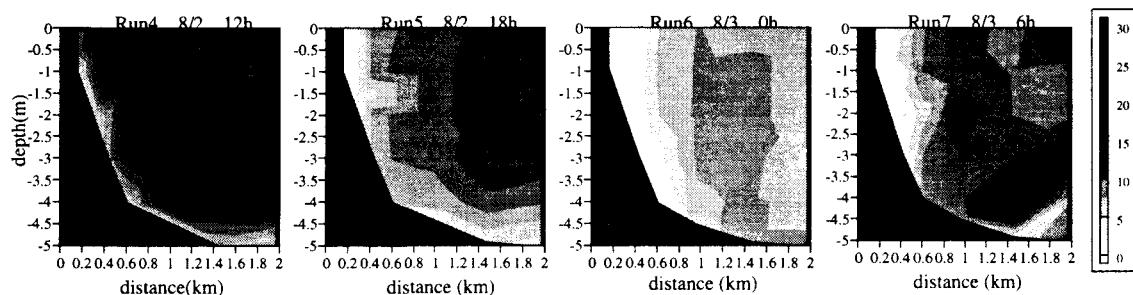
図-7に、8月2日13時~3日12時に測定されたChl.aの鉛直縦断面分布の一部を示す。8月2日12:30~14:00には表層Chl.a濃度は、水平的にあまり顕著な差はなく、最も岸よりの点を除いて15(µg/l)以上と高い値を示している。その後、夕方から深夜にかけて低いChl.a濃度の領域は拡大する。5(µg/l)以下の領域は3日午前0~1時前後において最大となった。低Chl.a領域の形成は冷水塊の形成パターンに酷似しており、冷水塊の拡がりと同じ様にChl.a濃度の低い水塊が底面に沿いながら沖向きに広がっている。図には示していないが、3日12時には、再び日射によって沿岸部が加熱されると共にChl.a濃度も上昇した。

このような沿岸部におけるChl.aの日周変動(夜間~早朝に低く、昼~夕方高い)は夏季の宍道湖においては一般的な現象である⁹⁾。鉛直方向の分布をみるとChl.a濃度の極大は水深約3m付近に存在した。

図-8は、溶存酸素(DO)濃度分布の一例を示す。DO濃度は、昼間は光合成のために特に沖合いで高く過



図ー 6 水温分布 (単位は℃)



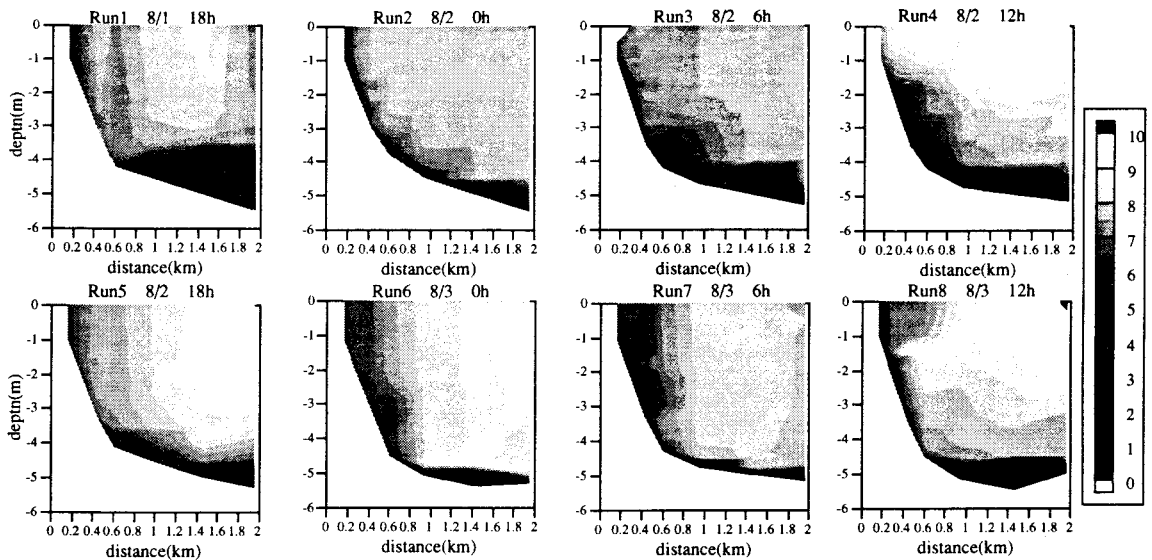
図ー 7 Chl.a分布 (単位は $\mu\text{g/l}$)

飽和となるが、夜間は呼吸のため低くなるという一日の循環パターンを示している。沖合いでDO濃度が高く岸付近で低いという分布はChl.a濃度の分布を反映している。このようにDO濃度分布はChl.a濃度分布と良く類似しているが、Chl.a濃度が水深約3m付近に極大値をとるのに対し、DO濃度は表層付近で最大となる違いがある。また、水深4.5m付近の強い密度成層のため、深層水は貧酸素化しているが、シジミの生息域（約3m以浅）は常にDO濃度が豊富である。

4. シジミによる植物プランクトンの摂取機構と浄化量

以上の水温・Chl.a及びDO濃度分布の特徴的な日変動パターンを総合すると、水塊の動き及びChl.aの減少の機構を以下のようにまとめることができる。昼間日射によって水温が上昇するが等温線は表層ではほぼ水平であり、光合成によってChl.a濃度・DO濃度ともに高くなる。夜間の冷却によって鉛直混合が次第に活発となると、特に水深の浅い沿岸部ほど早く冷却されるため水平方向に圧力の差が生じ、底層水は沖側へ、表層水は岸側に向かう循環流が生じる。このような鉛直対流循環によってChl.a濃度の高い沖合表層水が沿岸部に供給されるが、沿岸部表層水はよく鉛直混合されると共に、Chl.a濃度が急激に低下する。

Chl.a濃度は非保存物質であるが、このような夜間における濃度の急減は同一の生物量の生理的变化や分解



図－8 DO分布（単位はmg/l）

では説明できない。沿岸部堆積物表面には高密度の二枚貝（シジミ）が生息しており、盛んに直上水をろ過しながら懸濁物質を取り込み消化していることから、Chl.aの減少はシジミによる摂取のためと考えられる。シジミは堆積物表面に水管を出して換水しているにすぎないが、活発な鉛直対流が生じる時間帯では、水柱全体の懸濁物質を効率よく取り込めるものと考えられる。さらに、冷却期には鉛直対流と共にChl.a濃度の高い水塊が沖合から供給され、それが対流によって底質直上にまで輸送される。したがってシジミは生息域直上の水柱のみならず沖側のChl.a濃度の高い水塊の懸濁物質をも捕食することが可能となり、湖沼の広い範囲の水塊を浄化していることになる。一方、昼間には沿岸部でChl.a濃度の高い中層水が湧昇しており、これもシジミによる捕食の機会を与えている可能性が高い。しかしながら、鉛直混合期には水柱全体の水が堆積物表面に接触する機会があるのに対し、温度成層の発達する昼間は底泥直上の底層水のみシジミに利用され得ることから、シジミに摂食されるChl.aの量は鉛直混合期のほうが大きいものと考えられる。

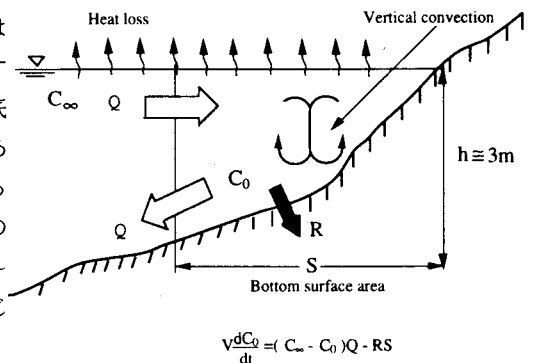
実際に観測された沿岸部のChl.a濃度の時間変化からシジミによる摂食量をみつめてみよう。粗い近似として、Chl.aを保存物質と同様の取り扱いができるとすると、沿岸部の水柱の物質収支から、沿岸部Chl.aの濃度 C_0 について

$$R \cdot S = V \cdot \left(-\frac{\Delta C_0}{\Delta t} \right) + (C_\infty - C_0) \cdot Q \quad \dots (1)$$

となる（図－9 参照）。 V は沿岸部の体積であり、ここではシジミの生息域を考慮して水深3m以浅の領域を沿岸部とする。 C_∞ は沖側Chl.a濃度、 Q は Δt 時間内の平均的な流入（＝底層流出）流量、 R はシジミによる捕食速度、 S は底面積である。温度分布から数値計算によって鉛直循環流が推定できるが、ここではごく簡単に30.8℃の等温線で囲まれた冷水塊の分布から岸側と沖側の水塊交換量を推定すると、8月2日13～14時から3日0～1時までに幅1mあたり約300m³となる。同じ期間におけるChl.a濃度変化から R を計算すると、

$$R = 0.82 \text{ mgChl.a/m}^2/\text{hr} \quad \dots (2)$$

が得られる。Nakamuraら²⁾は実道湖における水深別のシジ



図－9 クロロフィル物質収支のための模式図

ミ生息密度を求めているが、水深0~3mにおける平均のシジミのバイオマス密度 m は1,400g/m²である（湿重量基準）。彼らは現場及び室内の培養実験によりシジミの軟体部乾重量1g当りのろ過速度 F が30℃の時に平均4.2 ± 1.0 l/hr/gであることを見いだした。上述の時間中に $\overline{C_0}=5\mu\text{g/l}$ の濃度の水を換水し続けたとすれば

$$R' = F \overline{C_0} m \gamma = 0.72 \pm 0.17 \text{ mg Chl. a/m}^2/\text{hr} \quad \dots (3)$$

の摂取量が期待できる事になる。ここで $\gamma (=0.026)$ はシジミ単位湿重量あたりの軟体部の平均乾燥重量である。 R' を R と比較すると、極めて近い値であることから、仮定の妥当性つまりChl.aの急激な減少がシジミによって摂食・同化されたためである事を強く示唆する。また(1)式における右辺第二項（循環流による交換量）が第一項（沿岸部領域内部での減少量）と同じオーダーであることから、この様なシジミによる植物プランクトンの効率的な摂取は、表面冷却による鉛直対流と循環流の両方によってささえられていると考えられる。つまり、シジミによる植物プランクトンの取り込みはシジミ生息域である沿岸部のみならず沖合にまで及び、湖沼全体の物質収支に関与していることになる。

このような活発なシジミの摂食作用は植物プランクトンの異常増殖を抑制しているのみならず、シジミが漁獲によって確実に湖沼系外に持ち出されているため、湖沼の栄養レベルを下げる効果がある。人為的に増加しているN,Pの湖沼への負荷の一部が効率良く回収されていると考える事ができる。この様なシジミによる自然浄化力を維持・増強する事ができれば、閉鎖性水域の水質改善をはかることが可能になると思われる。

謝辞

本研究は国立機関公害防止等試験研究「富栄養化湖沼における食物連鎖を利用した水質浄化技術に関する研究（代表者：山室真澄）」の一環として行われたものである。連続観測の実施と水質の分析にあたっては島根県衛生公害研究所水質科の方々の御協力を得た。ここに記して深甚なる謝意を表す。

参考文献

- 1) 山室真澄, 1994. 植物連鎖を利用した水質浄化技術, 化学工学 vol.58, pp.217-220.
- 2) Nakamura, M., M. Yamamuro, M. Ishikawa, and H. Nisimura, 1988. Role of the bivalve *Corbicula japonica* in the nitrogen cycle in a mesohaline lagoon. *Marine Biology*, vol.99, pp.369-374.
- 3) 作野裕司・高安克巳・松永恒雄・中村幹雄・國井秀伸, 1996, 宍道湖における衛星同期水質調査, LA-GUNA(汽水域研究), vol.3 pp.57-72.
- 4) Yamamuro, M and I. Koike. 1993. Nitrogen metabolism of the filter-feeding bivalve *Corbicula japonica* and its significance in primary production of a brackish lake in Japan. *Limnology and Oceanography*, vol.38, pp.997-1007.
- 5) Yamamuro, M. 1991. Role of filter-feeding bivalve on nitrogen cycling in eutrophic brackish water, Ph.D. thesis, University of Tokyo. 182p.
- 6) 沢村和彦・神谷宏, 1991 宍道湖へ逆流した高塩分水塊の動態, 島根県衛生公害研究所, 大橋川における栄養塩フラックス調査報告書 pp.195-202.
- 7) Horsch, G.M. and H.G. Stefan, 1988. Convective circulation in littoral water due to surface cooling, *Limnology and Oceanography*, vol.33, pp.1068-1083.
- 8) Monismith, S.G., J. Imberger, and M.L. Morison. 1990. Convective motions in the sidearm of a small reservoir, *Limnology and Oceanography*, vol.35, pp.1676-1702.
- 9) Yamamuro, M and I. Koike. 1994. Diel change of nitrogen species in surface and overlying water of shallow eutrophic lake in summer: Evidence for benthic-pelagic coupling. *Limnology and Oceanography*, vol.39, pp.1726-1733.