

湖沼の物質循環に及ぼす夜間の水面冷却の影響

INFLUENCES OF NOCTURNAL COOLING ON MATERIAL CIRCULATION IN A SHALLOW LAKE

奥宮英治¹・中村由行²・中山恵介³・井上徹教⁴・石飛裕⁵

Eiji OKUMIYA, Yoshiyuki NAKAMURA, Keisuke NAKAYAMA

Tetsunori INOUE and Yu ISHITOBI

¹正会員 工修 中央復建コンサルタンツ(株) 港湾設計室 (〒532-0004 大阪市淀川区西宮原1-8-29)

²正会員 工博 国土交通省港湾技術研究所 海洋環境部海水浄化研究室長 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

³正会員 工博 国土交通省港湾技術研究所 海洋環境部環境評価研究室 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

⁴正会員 工修 九州大学大学院 工学研究院環境都市部門 助手 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

⁵理博 島根県保健環境科学研究所 水質科長 (〒690-0122 松江市西浜佐陀町582-1)

In a shallow lake, the interaction between convective circulation and biological activities are important for material circulation. The purpose of this paper is to estimate the effect of nocturnal cooling on convective circulation and purification activities in a shallow lake. We have conducted a 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. To confirm the mechanism of convective circulation, numerical simulation was also carried out. Results showed that diurnal heating and nocturnal cooling created density gradients that drove strong horizontal mass exchange. Those phenomena contribute the promotion of purification.

Key Words : convective circulation, nocturnal cooling, shallow lake, natural purification, bivalves.

1. 序論

近年、閉鎖性水域の浄化対策として、自然の浄化能力に着目して、これらを維持あるいは増進させる対策が提案されはじめています。著者らは宍道湖において、二枚貝の一種であるヤマトシジミに着目して、その浄化機構の解明と浄化力の推進に関する研究を進めてきている¹⁾²⁾。

ヤマトシジミは高い濾過能力を有しており、主に植物プランクトンを捕食することにより、すぐれた懸濁物除去機能を発揮している。シジミの餌となる植物プランクトンは、湖心部に比較して沿岸部でつねに現存量が少ないことが知られている。これはヤマトシジミが沿岸部のみ集中して生息しており、その捕食圧を反映しているためであると考えられている。さらに、沿岸部のChl-*a*濃度はしばしば明瞭に日周変動し、夜間から早朝には濃度が低く日中から夕刻にかけて高いことが知られている。これは、夜間の水面冷却によって励起された自然対流と、地形性貯熱効果による岸沖方向の水塊交換が、沿岸部に生息するヤマトシジミの代謝と関連して生じた現象であると考えられている³⁾。しかし、これまでに水面冷却に伴う対流の発生機構については、いくつかの物理的知見

が示されている⁴⁾⁵⁾が、生物作用による物質循環との関連について言及した研究は殆どみられない。

そこで、本研究では水面で熱の授受が行われることに起因する上記のような物質循環機構を解明するために、詳細な宍道湖の水温および水質の連続観測を行い、日周変動の様子を調べた。次に夜間の水面冷却による自然対流の発生機構について数値実験を行い、これらの結果から宍道湖における夜間の水面冷却が物質交換過程に及ぼす影響について考察した。

2. 宍道湖の概要

宍道湖は島根県東部に位置し、湖面積80km²平均水深4.5mの浅い汽水湖沼である。平面的には東西16km、南北6.2km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(図-1)。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。塩分は斐伊川流量や気象条件を反映して変動するが、平均

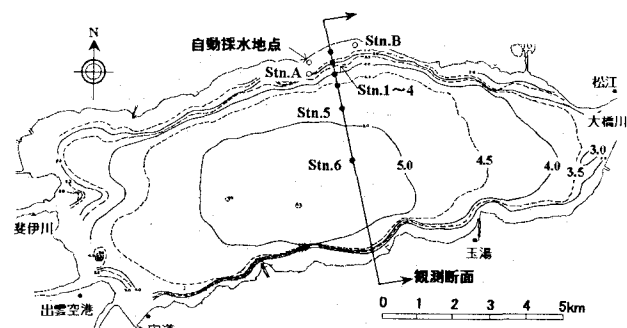


図-1 穴道湖の地形と観測地点

的には海水の約10分の1程度である。ヤマトシジミの生息域は沿岸部に集中している。

3. 現地観測

観測は1998年11月13日～16日に、穴道湖北岸部において実施した。岸に直角な南北の測線上に6点、岸に平行な東西の測線上に3点測点を設け、自記記録式の小型メモリー水温計を水深50cm間隔で設置し、20分間隔で水温時系列データを取得した。併せて、両測線が交差する点の近傍に位置する漁港の突堤に連続採水装置を設置し、水面下約1mの湖水を1時間間隔で自動採水した(図-1参照)。湖水は濾過後栄養塩類を分析した。観測を行った4日間は典型的な秋季の好天が継続し、日射量、気温、風速、熱フラックスともほぼ類似した日周変動パターンを示した(図-2)。特に夜21時から翌朝10時頃迄は風速が1m/s程度またはそれ以下であり事実上無風状態であった。

図-3に、南北側線での計測から得られた11月14日～16日にかけての早朝、および午後の水温鉛直断面分布の変化を示す。信号のノイズや短期的な変動の影響を除去するために、水温データは3時間毎に平均化されている。4m以深の高温域は海水起源の高塩分水を示す。図を見ると、沿岸部において早朝の低温水塊、午後的高温水塊が交互に形成されていることがわかる。特に風速が1m以下となる夜間に冷水塊が発達し、岸から約1kmまでその影響が及んでいることがわかる。一方、日中には沿岸側が高温低密度になり、特に風速が相対的に弱かった15日午後には沿岸の湧昇傾向が現れているが、その流れは水温コンターから判断する限り夜間の流れほど大きくない。早朝の冷水域は、水深1～2m層の水温コンターから判断すれば、約500mの幅で形成され、沖側との水温差は約0.5℃～0.6℃であった。ヤマトシジミの生息域は岸から約500m程度までの領域であるから、これらの循環流がシジミを中心とした物質循環に大きく影響しているものと考えられる。

図-4は、北岸部において採水した湖水の栄養塩濃度変化を示す。このうち、アンモニア濃度は夕方18時頃から

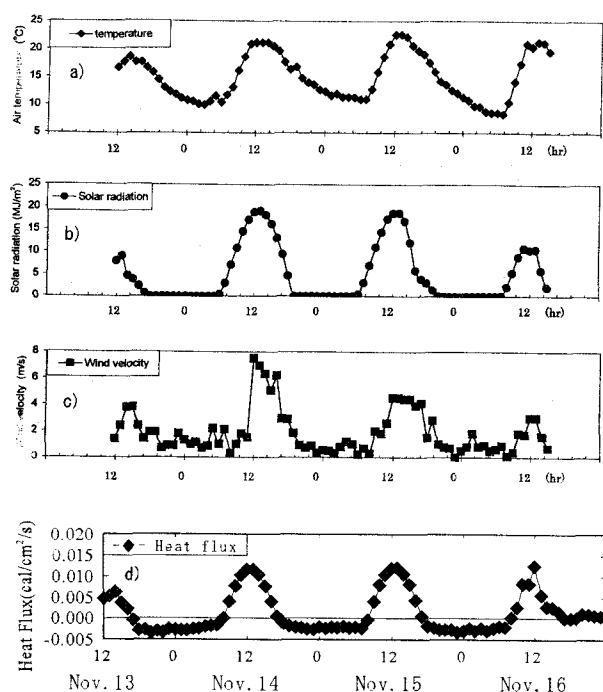


図-2 観測期間中の気温(a)、日射量(b)、風速(c)、熱フラックス(d)

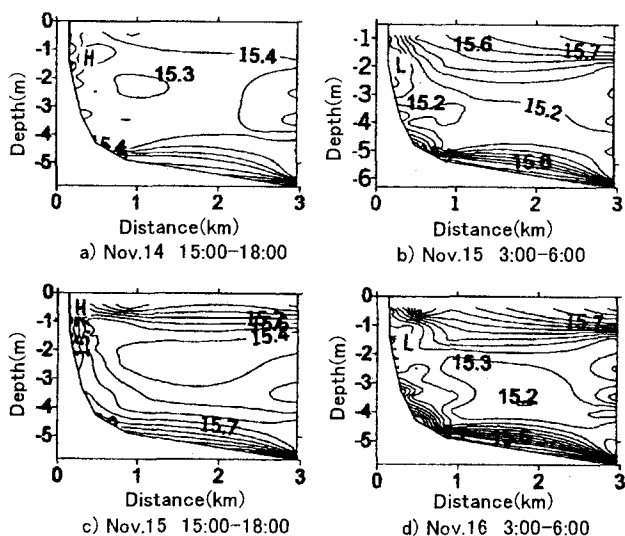


図-3 南北断面における水温の日周変動(数字は℃)

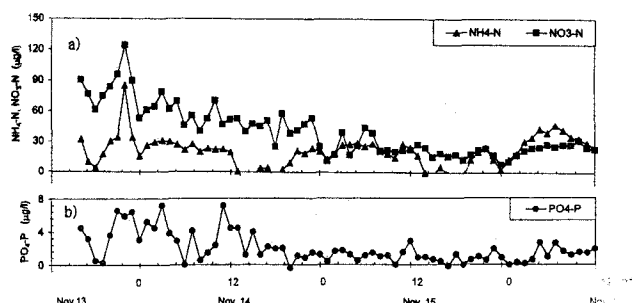


図-4 沿岸部における栄養塩濃度の時系列
(a) 溶存態無機窒素, (b) リン酸態リン

増加し始めて夜間に最大となり午後12時を過ぎると急減しほぼ涸渇するという、きわめて規則的な日周濃度変化を示している。夕刻から夜間にアンモニア濃度が極大となるのは冷却に伴う鉛直混合の強化がヤマトシジミの懸濁物捕食活動を活発化し、その結果アンモニアの排泄速度も増加するためであると考えられる¹⁾。一方、午後の減少の主因は植物プランクトンによる摂取の影響であると考えられる。

4. 数値解析

(1) 数値解析モデルの概要

湖沼沿岸部では、日周期の熱の授受によって、地形性貯熱効果により夜間に沈降流、昼間には湧昇流が生じるものと考えられる。しかしながら、現地観測の結果から、昼間には吹送流の影響が無視し得ないことが示された。そこで、本研究では夜間の冷却による効果に的を絞り、数値実験により宍道湖において発生する鉛直対流の再現計算を行う。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)⁶⁾を、浅い湖沼や沿岸海域用に修正したものを用いた。式(1)～式(12)に、基礎方程式を示す。

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial x_i} u_i = 0 \\ \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_k \frac{\partial u_i}{\partial x_k} + f \epsilon_{ij3} u_j \\ = -\frac{\partial R_k}{\partial x_k} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \delta_{i3} g \rho' / \rho + \nu \nabla^2 u_i \end{array} \right. \quad (1)$$

$$(2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \theta}{\partial t} + u_k \frac{\partial \theta}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(K_h \frac{\partial \theta}{\partial x_k} \right) + \kappa \nabla^2 \theta \\ \frac{\partial \theta_s}{\partial t} + u_k \frac{\partial \theta_s}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(K_h \frac{\partial \theta_s}{\partial x_k} \right) + \kappa_s \nabla^2 \theta_s \end{array} \right. \quad (3)$$

$$(4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial t} + u_k \frac{\partial E}{\partial x_k} + \overline{u_i u_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} &= \frac{\partial}{\partial x_k} \left(K_h \frac{\partial E}{\partial x_k} \right) \\ &+ \delta_{i3} g \left(\overline{\beta u_i \theta} - \overline{\beta_s u_i \theta_s} \right) - C_\epsilon E^{3/2} / \Delta \end{aligned} \quad (5)$$

$$R_k = \overline{u_i u_k} \quad (6)$$

$$\rho = f(\theta, \theta_s) \quad (7)$$

$$\overline{u_i u_k} = \delta_{i3} \frac{2}{3} E - K_m \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \right) \quad (8)$$

$$\overline{u_i \theta} = K_h \frac{\partial \theta}{\partial x_i} \quad (9)$$

$$\overline{u_i \theta_s} = K_h \frac{\partial \theta_s}{\partial x_i} \quad (10)$$

$$K_m = C_m E^{1/2} \Delta \quad (11)$$

$$K_h = \frac{K_m}{Pr_t} \quad (12)$$

ここで、 ρ : 液体の密度、 $i, k = 1 \sim 3$: x, y, z 方向、 u_i : 流体の流速、 p : 圧力、 g : 重力加速度、 f : コリオリ係数、 θ : 温度、 β : 温度に関する浮力換算係数、 θ_s : 塩分、 β_s : 塩分に関する浮力換算係数、 Δ : 空間の代表スケール(水平方向(300m)と鉛直方向(0.3m)はアスペクト比が大きいので分離した。)、 ν : 動粘性係数、 κ : 温度に関する拡散係数、 κ_s : 塩分に関する拡散係数、 E : 乱流エネルギー、 Pr_t : 乱流プラントル数である。また、'がない場合 : 空間平均値、'がある場合 : 空間平均値からの変動量を示している。

本モデルは、Deardorff⁷⁾による1方程式LESモデルを基本としているが、成層の影響により鉛直方向の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、Shumann⁸⁾により提案されたSecond-Order Closer(SOC)に基づいた浮力振動数による乱流プラントル数の変化が考慮されている。

$$Pr_t = Pr_{t0} \left[1 + 0.3 (\Delta z)^2 N^2 / E \right] \quad (13)$$

$$N^2 = \frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} \quad (14)$$

ここで、 Pr_{t0} : 中立状態での乱流プラントル数、 N : 浮力振動数である。

LES定数に関しては、式(15)～式(17)で示されるLilly⁹⁾による慣性小領域におけるエネルギースペクトルからの推定値を用いることとする。

$$C_\epsilon = 0.845 \quad (15)$$

$$C_m = 0.0856 \quad (16)$$

$$Pr_{t0} = 0.420 \quad (17)$$

計算スキームは、中山によるCIP法を運動方程式、塩分、水温の移流拡散方程式に適用したもの¹⁰⁾を用いた。自由表面の再現は、Arbitrary Lagrangian Eulerian法(ALE法)¹¹⁾を用いた。

(2) 計算条件及び計算ケース

計算は水面からの熱の放射のみによって発生する温度分布の変化及び、対流の発生に着目する。そのため、風や河川からの流入水の影響は考慮しないものとした。計算領域は宍道湖全体とし、東西約16km、南北約6km、最大水深約6mであることを考慮して、メッシュ数50×20×10とした。水深は、宍道湖の地形図より判読して入力した。図-5に解析メッシュおよび検討断面を示す。検討

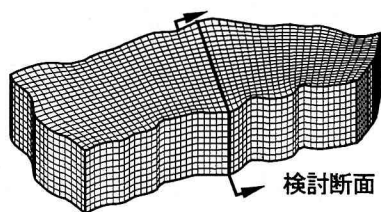


図-5 解析メッシュ及び検討断面

表-1 各計算ケースの初期水温・地形条件

	水温の初期条件	湖底の地形
Case-1	96年8月2日18時 ¹⁾ の観測値	現地形
Case-2	98年11月15日18時の観測値	//
Case-3	一様に31℃	//
Case-4	96年8月2日18時 ¹⁾ の観測値	南岸を岸壁状に単純化
Case-5	一様に31℃	//

断面は現地観測を行った断面を選定した。計算時間は夕方18時～明朝6時までを想定して12時間とし、 $\Delta t=6(s)$ で計算を行った。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。湖心の湖底付近に分布する高温で塩分濃度の高い水塊は、上層の水塊と同じ温度分布を初期条件として与えた。熱フラックスは一定の効率で水面から熱を放出するものとし、観測値に近い値として $0.005\text{cal/cm}^2\text{s}$ ($3.5\text{W/m}^2\text{s}$)設定とした。また、流速の初期条件として静止状態を与えた。

計算ケースとしては、中村ら⁷⁾が96年8月に現地観測を行って得られた 8月2日18時の温度分布(Case-1)と、第3章で述べた98年11月15日18時の温度分布(Case-2)を初期の温度分布として与えた計算を行った。この際に観測断面以外水温については、観測断面と相似な水温分布構造であると仮定した(図-6 $t=0$ の水温分布)。また、水温の初期条件や湖底の地形の影響をみるために、初期水温を一様に31℃(夏季を想定)とした場合(Case-3)、南岸側の地形を岸壁状にした場合(Case-4)及び、Case-3とCase-4の条件を同時に変化させた場合(Case-5)の計算も行った。表-1に各計算ケースの条件を整理して示す。

(3) 解析結果及び考察

a) 水温分布の計算結果と観測値との比較及び循環流

図-6に、Case-1(8月)の計算結果のうち、初期($t=0$)の水温分布及び、12時間後($t=12$)の水温分布と流速ベクトルを示す。初期の水温分布は、水面付近の特に湖心部及び、沿岸部の水面付近に高温水塊が分布し、底層に冷水塊が分布しており、閉鎖性水域で夏期にみられる典型的な温度成層状態に近い水温分布構造を呈している。まず、12時間後の水温分布に着目すると、湖水全体で冷却が進行しているが、特に沿岸部の水深の浅い地域での水温の減少が早いことが分かる。この傾向は、湖底の傾斜が緩

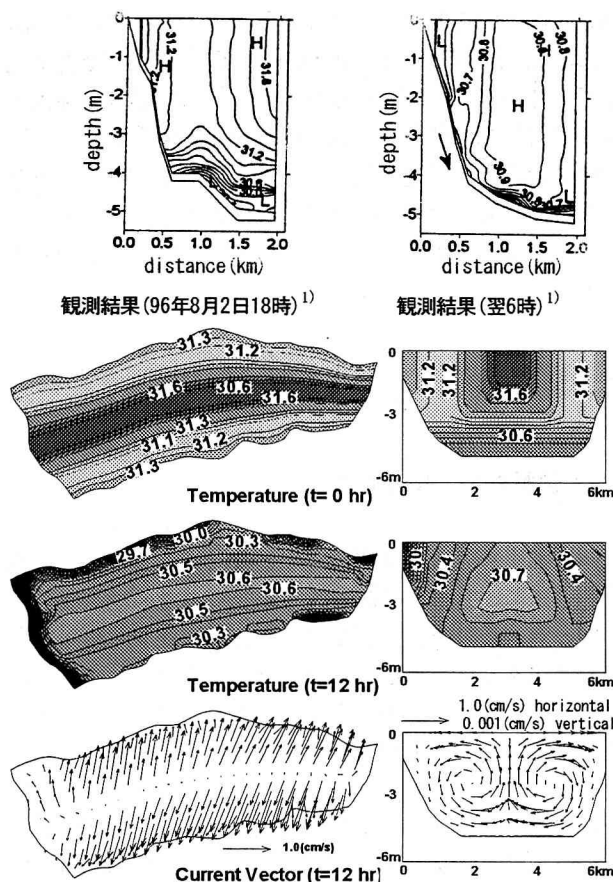


図-6 Case-1(8月)の計算結果と観測結果の比較
(水平分布は水面における分布、鉛直断面分布は図-5の検討断面における分布を示す。)

い北岸でより顕著に現れている。また、この計算結果と早朝6時の現地観測データと比較すると、湖心部に高温域が分布し、沿岸部に冷水塊が分布している様子が類似しており、定性的な水温分布の構造が計算によって比較的良好に再現されている。一方、流速ベクトル図では冷水塊の発達に伴って、沿岸部の湖底付近では沖合方向に進行し、沖合の水面付近では沿岸方向に進行する対流がみられる。これは沿岸部で冷水塊が発達したことに起因する密度流と、それに対する補流であると考えられる。

図-7にCase-2(11月)の計算結果を示す。初期の水温は、8月(Case-1)に比べて温度差は小さいものの、成層状態の温度分布構造を呈している。12時間後($t=12$)の水温分布をみると、Case-1と同様に沿岸部の水深の浅い領域に冷水塊が形成されている様子が確認できる。この時の水温分布構造を現地観測結果と比較すると、計算による水温のほうが観測に比べてやや低い値を示すものの、北側の沿岸部に冷水塊が発達する様子や、湖心の水温が周辺に比べて高くなっている様子が再現されている。流速ベクトルについては、8月(Case-1)と同様に湖心部から沿岸部へと流れる循環流が発生している。しかし、流大さは8月(Case-1)に比べて10分の1程度とかなり小さくなる。これは同じ熱フラックスにおいても、夏季の高温条

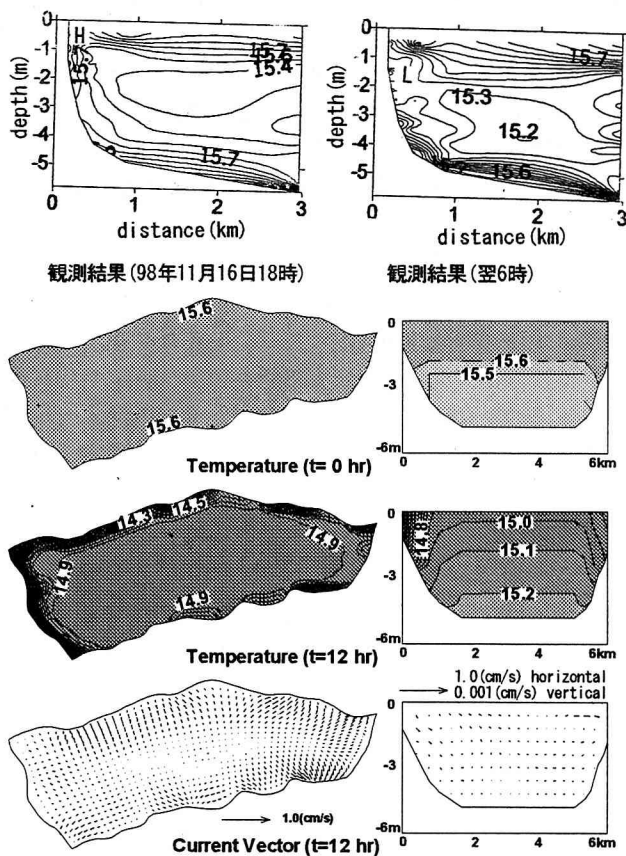


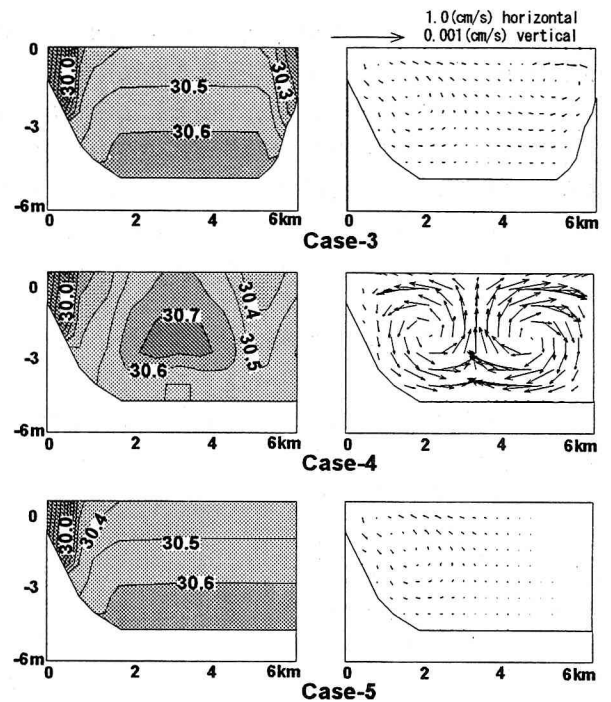
図-7 Case-2(11月)の計算結果と観測結果の比較

件の方が浮力変化に及ぼす影響が大きい(β が大きい)のためであると考えられる。また、初期の水温分布の影響も考えられるが、それについては後述する。

b) 湖底地形と初期水温の影響

著者³⁾が行った別の南北断面観測によれば、南北の水温構造は非対称であり、北側がより低温な状態が夏季二週間に亘って継続していた。従って表面冷却による対流の影響が、既にCase-1及びCase-2の初期条件に表れていた可能性がある。そのことを考慮し、さらに初期の水温分布および、湖底地形が流れと水温分布に及ぼす影響についての検討を行う。図-8にCase-3～Case-5の計算結果のうち、12時間後($t=12$)の温度分布コンタ図および、流速ベクトル図を示す。

まず、初期水温の影響について考える。Case-3とCase-1(図-6)の計算結果を比較すると、初期の水温分布を一樣としたCase-3の流速は、Case-1の半以下となっている。また、Case-4では、南岸側の湖底地形を大きく変化させて、沿岸部の水温冷却が進行しにくくしたにも拘わらず、流速はCase-1と殆ど変わらない結果となった。このことから、Case-1で与えた初期の水温分布自体が、対流を促進するものであったことが分かる。従って、Case-1及びCase-2の初期条件は、過去の熱対流の影響を



Temperature (°C) Current Vector
図-8 Case-3～5の計算結果($t=12$ hr)

表-2 沿岸部(水深4m地点)における循環流量

	北 岸	南 岸
Case-1	78	60
Case-2	11	3
Case-3	29	10
Case-4	80	—
Case-5	29	—

単位: $\text{m}^3/12\text{hr/m}$

ひきずっていた可能性が大きい。また、対流の初期発生機構を考えるには、むしろ初期水温が一樣の計算(Case-3, 5)の方が適切であると言える。

次に、湖底の地形の影響について述べる。Case-3とCase-5を比較すると、Case-5の北岸ではCase-3と類似した水温分布と対流がみられるが、地形勾配を極端に大きく垂直とした南岸側では、冷水塊の発達がみられず、また対流が殆ど起こっていないことが分かる。このことから、湖底の地形勾配が熱対流の初期発生機構と南北の非対称性に大きな影響を与えていることが示唆された。

c) 循環流量と水質浄化機能の関連性

表-2は、ヤマトシジミの生息域を考慮して水深4m以浅の領域を沿岸部、それ以深を沖合部として、各領域間での循環流量を時間平均して求めたものである。ここでは穴道湖の湖心部、東部および西部の3地点の南北断面についてそれぞれ循環流量の算定を行い、その平均値を示している。8月における循環流量は、北岸で78 $\text{m}^3/12\text{hr/m}$ 、南岸で60 $\text{m}^3/12\text{hr/m}$ と算定された。中村¹⁾は、穴道湖における8月の観測による等水温線で囲まれ

た水塊分布から、岸側と沖側の水塊交換量を $300 \text{ m}^3/12\text{hr/m}$ と推定し、シジミの濾過量を推算している。そしてそれらの推定値をもとに、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支えられているとの考えを示している。今回の計算による沿岸部における水塊交換量($78 \sim 60 \text{ m}^3/12\text{hr/m}$)は、中村らの推定値($300 \text{ m}^3/12\text{hr/m}$)よりも小さな値である。実際の物質輸送には拡散による輸送もあるため、中村らの推定値とオーダー的にはほぼ同程度のプランクトンの輸送があると判断できる。このことから水面冷却により発生する熱対流が、宍道湖のヤマトシジミの摂食に大きく寄与していることが、数値実験によっても確認することができたと言える。

これまでに述べてきたことから、夜間の放射冷却によって発生した循環流は、ヤマトシジミを中心とした湖内の物質循環及び水質浄化に対して次のように寄与していると考えられる。夜間の水面冷却によって発生した対流は、Chl-*a*濃度の高い沖合の表層水を沿岸部の底質直上に供給する。沿岸部には高密度のヤマトシジミが生息しており、盛んに直上水を濾過しながら懸濁物質を取り込み消化する。そのため、シジミは直上水のみならず沖側の水塊の懸濁物をも濾過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。

なお、表-2において宍道湖の北岸と南岸における夜間の水塊交換量は、各ケースともに地形の影響によって南岸に比べて浅海域が広がる北岸の方が大きくなる。また、前述の秋季における対流の流速が、夏季の流速に対して極端に小さい値を示したことに起因して、Case-1(8月)とCase-2(11月)の水塊交換量を比較すると、Case-1のほうが1オーダー大きな値を示している。

5. 結論

ヤマトシジミが優占する宍道湖において、夜間の水面冷却により発生する自然対流の発生機構と、それに伴う水質浄化機構について検討を行い、以下の結論を得た。

- (1) 現地観測により、沿岸部では岸から1km以内の領域で、日中は高温水塊、夜間は低温水塊の発達が交互に規則的に繰り返されていることが示された。
- (2) また、水温及び栄養塩濃度の変動が明瞭な日周変動を示すことから、地形性貯熱効果に基づく水塊交換が、ヤマトシジミを中心とした物質循環に密接に関わっていることが示された。
- (3) 夜間の水面冷却が湖水の温度分布構造に及ぼす影響を数値実験より、ある程度再現することができた。
- (4) 比較的静穏な日においても水面冷却による熱対流の発生するメカニズムが明らかとなった。また、発生する対流の大きさは、沿岸部の地形や初期の水温分布が大きな影響を与えることが確認された。

- (5) 沿岸部に生息するヤマトシジミは直上水のみならず、熱対流によって沖合の水が供給されることによって植物プランクトンの供給を受け、湖沼全体の物質収支に関与していることが、現地観測と数値実験の両方により明らかにされた。

本研究では計算の諸条件(初期流速、熱フラックス、塩分等)を簡素化して数値計算を実施した。これらに対する詳細な検討は今後の課題としたい。

謝辞：本研究では現地観測を行うにあたり、岡山大学の大久保賢治氏、九州大学大学院のFatos Kerciku氏、島根県保健環境科学研究所水質科の方々に多大の御協力を頂いた。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 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：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，pp469-474,1997.
- 2) 中村由行・Fatos Kerciku・井上徹教・二塚本晃造：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.18-26,1998.
- 3) 中村由行・Fatos Kerciku・二塚本晃造・井上徹教・山室真澄・石飛裕・嘉藤健二：二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，pp1046-1050,1998
- 4) Monismith, S. G, Imberger, J. and Morison, . M. L. : Convective motions in the sidearm of a small reservoir: Limnol. Oceanogr., 35(8), pp.1676-1702, 1990.
- 5) Hiramatsu, K., Kwachi,T., Kim, H. and Yoshitake, Y. : Polynomial Finite Element Solution of 3-D Density Driven Currents using the Velocity Correction Method: Trans. of JSIDRE, No.185, pp.23-30, 1996.
- 6) 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：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,421-425,2000.
- 7) Deardoff,J.: The development of boundary-layer turbulence models for use in studying the severe storm environment, Proc. SMSAME Meeting, Boulder, NOAA-ERL, pp251-264,1975.
- 8) Schumann, U.: Subgrid length-scales for large-eddy simulation of stratified turbulence, Theoret. Comput. Fluid Dynamics, Vol.2, pp279-290,1991.
- 9) Lilly, D.K., D.E., Waco and S.I. ,Adelfang : The representation of small-scale turbulence in numerical simulation experiments, Proc. IBM Sci. Comput. Symp. on Environmental Science, pp195-210,1967.
- 10) 中山恵介・佐藤圭洋：LESモデルによる水面上張り出しブルーム解析：土木学会論文集 No.628/II-48, pp97-114,1999.
- 11) Hirt, C.W., Amsden, A.A., and Cook, J.L.: An arbitrary Lagrangian-Eulerian computing method for all flow speeds. J. Comp.Phys., 14: 227-253, 1992.

(2000. 10. 2受付)