

小川原湖におけるヤマトシジミの 繁殖環境について

鶴田泰士¹・石川忠晴²・西田修三³・成田 舞⁴・藤原広和⁵

¹正会員 工博 (株)建設技術研究所 (〒103-8430 東京都中央区日本橋本町 4-9-11)

²フェロー 工博 東京工業大学教授 大学院総合理工学研究科 (〒226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259)

³正会員 工博 大阪大学助教授 大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

⁴学生会員 東京工業大学大学院総合理工学研究科 (〒226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259)

⁵正会員 工博 八戸工業高等専門学校助教授 建設環境工学科 (〒039-1192 青森県八戸市田面木字上野平 16-1)

小川原湖は青森県東部の汽水湖でヤマトシジミの産地である。しかし、湖の平常時の塩分は約 1psu であり、シジミの産卵に適していると言われる値よりも低い。そこで、本研究では小川原湖にシジミが多く生息する理由を、現地観測と数値シミュレーションにより水理的観点から検討した。その結果、北東部湖口付近の浅瀬では、比較的大規模な塩水侵入時に産卵・発生に適した塩分環境が形成されること、そのような規模の塩水侵入がシジミの産卵期に比較的高い頻度で発生することなどが示された。また、湖北東部で発生したシジミの浮遊幼生が 1 週間前後の浮遊幼生期に湖水流動によって拡散し、湖内の全域に分布する可能性が数値シミュレーションにより示唆された。以上より、小川原湖におけるヤマトシジミの再生産は、主に湖北東部の浅瀬において行われているものと推定された。

Key Words : sea water intrusion, *Corbicula japonica*, spawning, field measurement, numerical calculation

1. 序論

(1)はじめに

湖沼の水環境は、地形条件、水文条件、気象条件等によって異なる。それゆえ、開発行為などにより環境を改変する場合には、それぞれの湖沼の特性を十分把握した上での適切な対応が必要とされる。近年、環境アセスメント法の施行により、このことは社会制度上も明確化されてきており、それに伴い、水工学の分野においても、一般学術的研究だけでなく、湖沼の個別的特性を取り扱う研究が行われるようになってきている^{1), 2), 3)}。

本研究で対象とする小川原湖は青森県東部に位置する汽水湖で、現在は太平洋との間でほぼ自然的な流入が生じている。しかし将来的には、治水・利水の要請から湖口及び排水河川の改修が行われる可能性がある。一方、同湖にはヤマトシジミが多数生息し、その漁獲高は全国第 3 位となっている。しかし、後に述べるように、平常時の小川原湖の塩分はヤマトシジミの産卵にとって低くなっている。このことは、時折生じる塩水侵入現象と、その際の湖口付近の塩水流動がヤマトシジミの産卵環境の形成

に關与していることを示唆している。したがって、湖口及び排水河川の地形改変を計画する前に、この現象についての十分な調査が必要であると考えられる。

そこで本研究では、小川原湖湖口付近におけるヤマトシジミの産卵環境の形成について、現地観測と数値シミュレーションにより、水理的観点から検討した。

(2)ヤマトシジミの繁殖

ヤマトシジミの産卵期は生息地ごとに多少異なるが 5~9 月頃である。ヤマトシジミは雌雄異体で、放出された卵と精子は水中で受精する。受精卵は卵割を繰り返し、20 時間程度で回転運動を開始し、やがて外皮を破って水中に泳ぎ出る。その後、浮遊幼生として生活した後、受精から 3~10 日ほどで着底し底生生活に移行する^{4), 5), 6)}。

朝比奈⁴⁾によれば、ヤマトシジミの産卵・発生は塩分・水温の影響を強く受ける。放卵・放精は水温 19℃ 付近から始まり、20~25℃ において最も盛んである。未受精卵は、水中放出後 40~90 分で受精可能な状態となるが、淡水中に 20 分以上放置されると膨張して受精の反応を示さず、海水中に 4 時間以上放

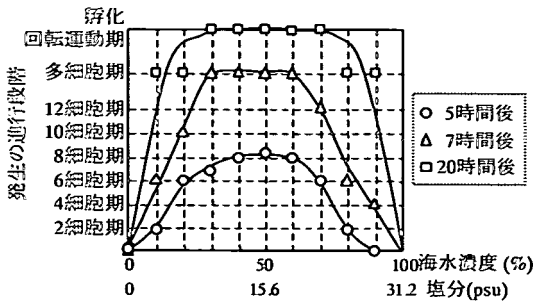


図-1 塩分濃度による発生進行段階の変化

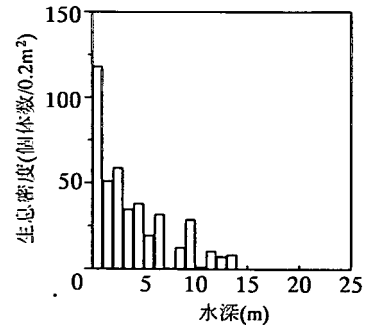


図-3 ヤマトシジミの水深方向の生息分布

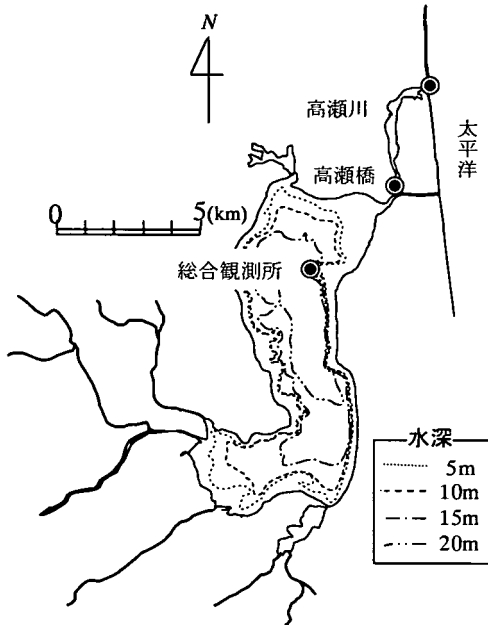


図-2 小川原湖の形状

置されると逆に脱水収縮して発生不能となる。図-1は朝比奈が孵化実験で調べた塩分と発生進行速度との関係を筆者らがプロットしたもので、横軸は塩分濃度、縦軸は受精卵が細胞分裂し孵化するまでの過程である。同図によれば、発生の進行は 3~28 psu で可能であり、約 1 日で孵化することができる。それより塩分が高くて低くても、進行速度は極端に低下していき、完全な淡水あるいは海水中では発生は全く進行しない。

なお、底生生活に移行した後は広範囲の塩分適応性を有しており、淡水に近い塩分濃度下においても生活することが可能である^{6),7)}。

(3) 小川原湖におけるヤマトシジミの生息環境

小川原湖の形状を図-2 に示す。湖面積は 63.2km² で我が国の湖沼では 11 番目にあたる。最大水深は 26m、平均水深は 11m、常時の水面標高は T.P.40cm

程度である。主要な流入河川はいずれも湖の南西部にあり、流出部は北東部の高瀬川のみである。潮位が湖水位を上回ると塩水が高瀬川を遡上する。しかし滞筋が狭小で且つ河道延長が 6.6km あるため、まとまった量の塩水が小川原湖に侵入するのは、比較的大きな水位差が長時間継続した場合のみである。過去の調査によれば、塩水侵入現象は、気圧変動など気象因子の影響によりかなり不規則である。しかし平均的には、湖水位が比較的低く且つ日潮不等の大きい 6, 7 月及び 11~1 月の頻度が高い⁸⁾。

小川原湖におけるヤマトシジミの生息分布については、過去に大規模な調査⁹⁾ が行われている。図-3 は 1989 年 8 月におけるシジミの水深方向の生息密度である(原調査のシジミ採取面積が 0.2m² となっているので、縦軸をそのままの表記としている)。水深 13.5m まで生息が確認されている。また、水深 5.0m 以浅の湖棚の生息密度が特に高くなっている。

図-4(a)~(c)は、1998 年に建設省の定期水質調査で計測された、小川原湖最深部における水温・塩分・溶存酸素の鉛直分布の季節変化である。小川原湖シジミの産卵期である 6 月末から 9 月⁹⁾ にかけては、表層近くに水温躍層が形成される。シジミの生息水域である水深 13.5m 以浅では水温は概ね 16℃以上、水深 5m 程度より浅い水域では 25℃以上に達することがある。既往の研究⁶⁾ によれば、ヤマトシジミの稚貝は水温 15℃以上で成長率が高まり、25~30℃で最大値を示す。また、発生は水温 20~25℃で活発になる⁴⁾。また、溶存酸素は、夏の水温躍層形成時には鉛直方向の物質移動が抑制されるため、7 月から 9 月にかけては中層部で減少するが、シジミ生息水深では概ね 6mg/l 以上が保たれている。これらのことから、小川原湖の水温・溶存酸素はシジミにとって良好であると言える。

一方、塩分濃度は年間を通じて概ね 1 psu 前後となっており、前節に示したデータからすると、小川原湖の平常時の塩分はヤマトシジミの産卵・発生にとっての下限値の目安(3psu)より大分低い。このことから、小川原湖におけるシジミの繁殖には、平常時の

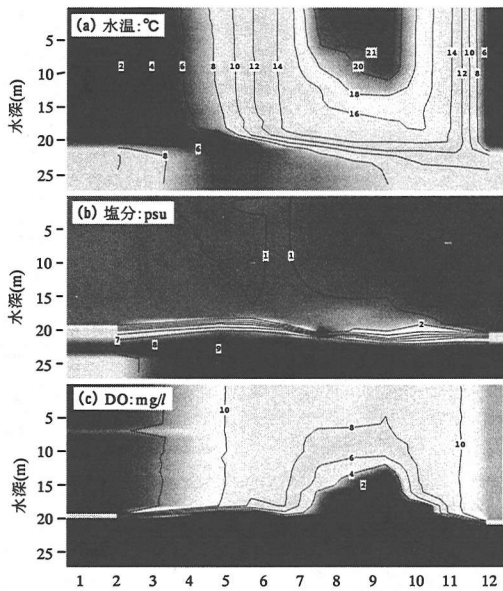


図-4 水質プロファイルの季節変動

調査ではわからない短期的な現象が深く関わっていると推測される。その現象の1つとして考えられるのは、水深20m以深に停滞する10psu程度の高塩分水塊が内部静振により浮上し、シジミ生息域の塩分が上昇することである。そこで、小川原湖を長軸方向10km、水深25mの箱形状とし、簡易的に内部静振の変動オーダを検討した。なお、塩分躍層は水深20mとし、上層塩分1psu、下層塩分10psuとした。これに風速10m/sの風を与えると、内部静振の周期は約7時間、静的バランスを考えた時の振幅は30cm程度であった。小川原湖の湖上風は風速10m/s以上となることもあるが、その場合でも内部静振の振幅のオーダは高々1mである。一方、図-3に示したようにシジミ生息域は水深13.5m以浅であるため、高塩分水塊がそこまで到達するには10m程度上昇しなければならない。以上の点から、底層の高塩分水塊がシジミの産卵・発生に及ぼす可能性は低いように思われる。また、底層の高塩分水塊は貧酸素水塊でもあるため、それがシジミ生息域にまで上昇したとしても、シジミの産卵・発生環境に良い影響を及ぼすとは思われない。

これとは別にもう1つの現象として考えられるのは高瀬川を遡上した海水が湖内にまで侵入した時に、湖内の塩分が一時的に上昇することである。これについては後に検討する。

(4) 小川原湖におけるヤマトシジミの分布状況

図-5(a)は1989年の調査⁹⁾によるヤマトシジミの個体数分布である。図中の円はシジミの個体数に対応し、円の直径が大きいほど個体数が多いことを示

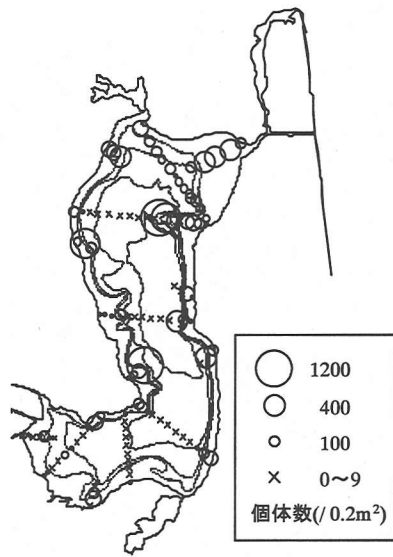


図-5(a) ヤマトシジミ個体数分布

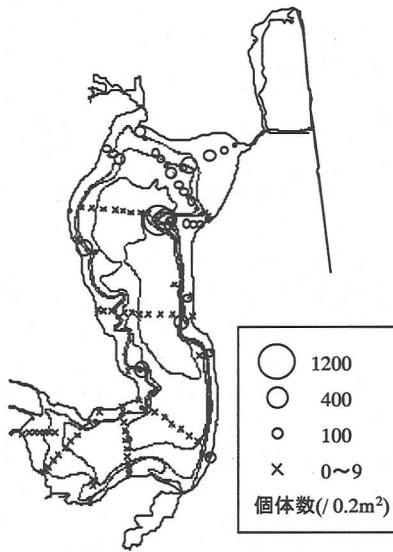


図-5(b) シジミ稚貝の個体数分布

している(図中に円の直径と個体数の関係を例示した)。小川原湖では浅瀬全域においてヤマトシジミが生息しているが、特に北東部に広く分布していることが確認できる。ただし、小川原湖ではシジミ漁が盛んであるため、図-5(a)は自然状態での分布と異なる可能性がある。小川原湖漁業協同組合によれば、漁獲対象は殻高15mm以上の成体である。また、漁獲量の安定確保のために毎年夏期に殻高10mm程度以上のシジミを北部や東岸部から南西部に人為的に移動している。そこで、上記の作用を受けていない

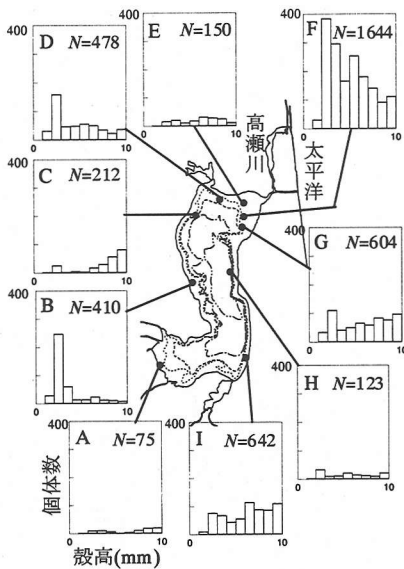


図-6 ヤマトシジミの殻高頻度分布

と思われる殻高 5mm 以下の稚貝の分布状況を調べると図-5 (b)を得る。稚貝は湖内で比較的偏って分布しており、特に北東部において高密度に生息している。

上記調査が実施された 10 年前と比べてヤマトシジミの生息状況に変化がないかどうかを確認するために、若干の補足調査を行った。湖内 9 地点 (いずれも水深は約 1m) において、湖底面に 1m×1m のコードラートを設定し、10cm の厚さで堆積物を採取した。この時期には、ヤマトシジミは湖底面近くに浮遊するプランクトンや懸濁物質を捕食して生活しているため⁴⁾、大多数のシジミは表層 10cm の採取堆積物内に含まれていると考えられる。採取した堆積物から、漁業による攪乱を受けることの少ない稚貝を目視により取り出し殻高を計測した。調査期間は 2000 年 6 月 30 日～7 月 1 日であった。

調査地点ごとの殻高頻度分布を図-6 に示す。図中の N は計測対象とした全個体数である。採取面積が比較的小さく各地点の代表性は必ずしも高くないので、地点ごとの差異の詳細な比較は難しいが、一見して分かることは、北東部の浅瀬付近 (F,G 地点) で特に個体数が多いことである。また東岸 (I 地点) や北部 (D 地点) でも個体数の多い地点が見られる。以上の傾向は、基本的に過去の調査結果と一致していることから、シジミの生息分布はこの 10 年間でそれほど変化していないものと思われる。

(5) シジミの産卵環境と塩水侵入現象の関わり

山室¹⁰⁾によれば、汽水湖沼に生息する貝類や多毛類の分布形成には、産卵及び幼生拡散時の塩分や流れが重要な役割を果たす。

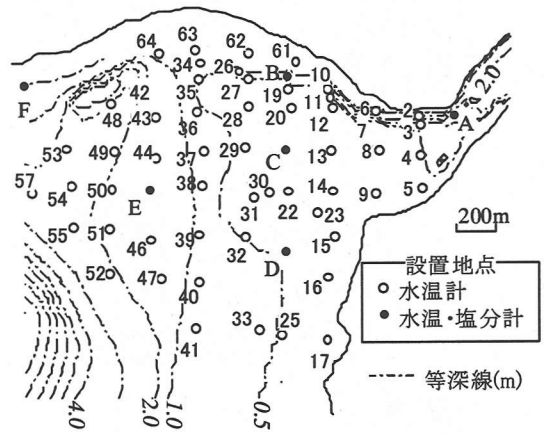


図-7 湖口付近の等深線図

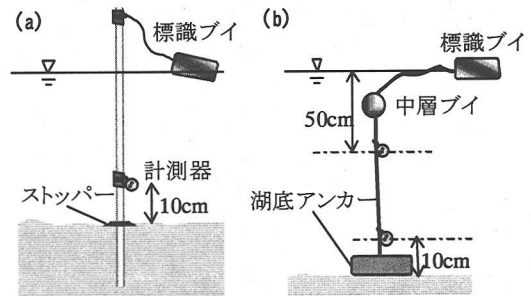


図-8 計測器設置方法

前述したように、小川原湖における平常時の平均表層塩分濃度は約 1 psu であり、ヤマトシジミの産卵・発生にとっての下限値の目安 (3 psu) より大分低い。一方、北東部に位置する高瀬川では、平常時は自然な流出が行われているが、高潮位時には塩水が遡上し、時に多量の塩水が湖内に侵入する。したがって、北東部で稚貝が高密度に生息しているのは、塩水侵入時に高塩分状態が一時的に形成され、その間にシジミの産卵が盛んに行われるためではないかと推測される。

そこで本研究では、塩水侵入に伴い高塩分が生じる範囲とその程度について、現地観測と数値シミュレーションにより検討した。また発生した浮遊幼生の湖内拡散を数値シミュレーションより推測した。

2. 塩水侵入の現地観測

(1) 観測方法

2000 年 6 月 29 日から 7 月 5 日にかけての大潮を含む期間に、図-7 に示した水域で現地観測を実施し、小川原湖に塩水が侵入した際に、北東部浅瀬でどのような塩分状態が形成されるかを調べた。当該水域

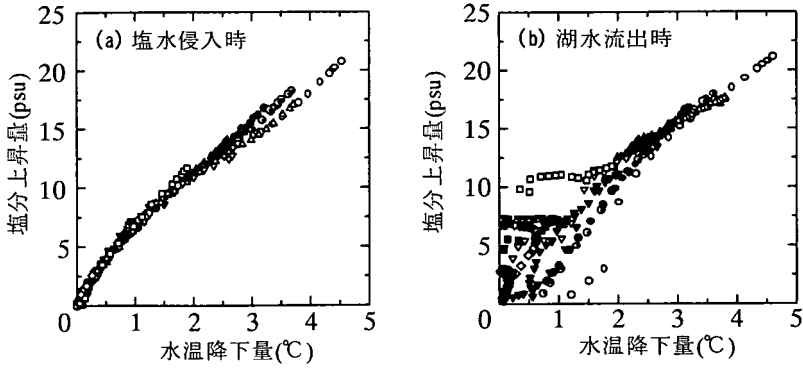


図-9 水温と塩分の相関

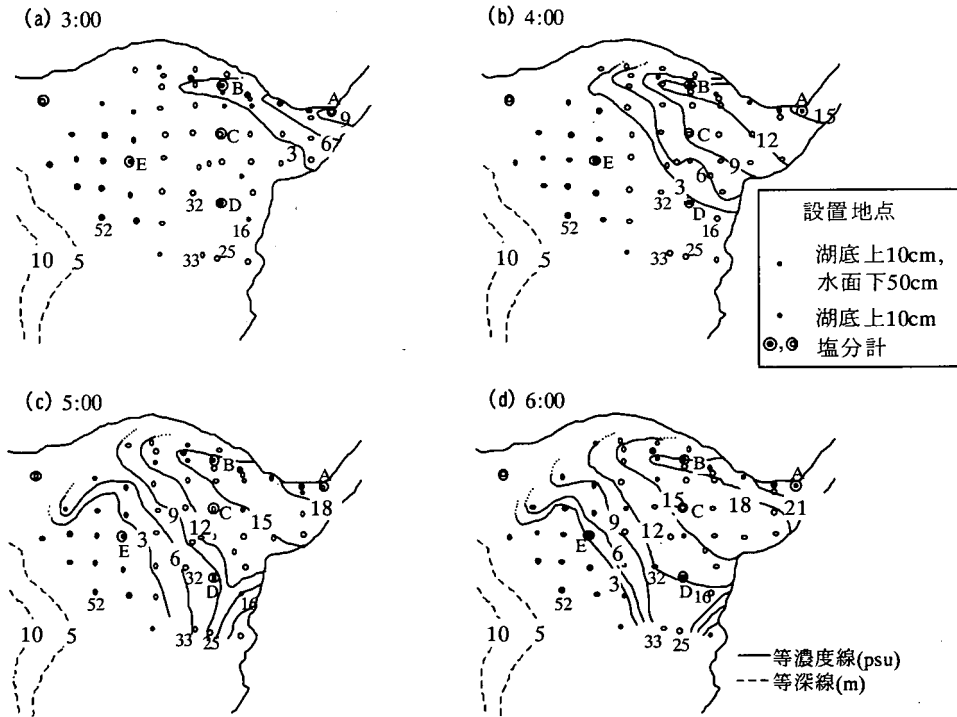


図-10 塩水侵入の様子 (2000.07.03)

では、北岸沿いに水深 2m 前後の舟通しが開削されており、その南側には水深 2m 程度までの浅瀬が約 1.5km にわたって広がっている。

湖内に侵入した塩水の平面的な挙動を捉えるために、数地点において湖底直上 10cm の位置に塩分水温計(アレック電子社製 MDS-CT)を設置した(図中●)。過去の調査によれば^{11), 12), 13)}、この季節には、浅瀬部の湖水温に比べて海水温が低く、塩水侵入時には有意な水温低下が生じる。そこで本研究でも、水温計(Onset 社製 StowAway Tid-bit)を多地点に設置し、水温低下量から高塩分の発生領域を推定することとし

た。設置位置は、○印の地点では湖底直上 10cm、◎の地点では湖底直上 10cm と水面下 50cm とした。設置方法を図-8 に示す。なお、計測間隔は塩分・水温ともに 1 分とした。

図-9(a), (b) は塩分水温計を設置した A~E 地点における塩分と水温の関係である。F 地点は観測期間を通して塩水が到達しなかったので除外してある。図-9(a) は塩水侵入時、図-9(b) は塩水侵入が終了し湖水流出に転じた後の結果である。塩水侵入時には、両者には一対一の良い相関が見られるが、湖水流出時には測点間のばらつきが大きくなるのがわかる。

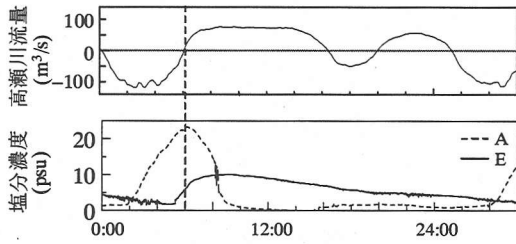


図-11 A, E 地点における塩分時系列

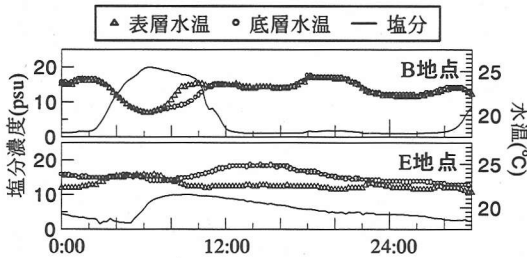


図-12 B, E 地点における水温・塩分時系列

この原因として以下の二つのことが考えられる。一つは日射の影響による湖水温の上昇である。この時期の塩水侵入は未明から明け方にかけて生じるので湖水温はほとんど変化しないが、湖水流出時には日射があるため浅瀬の水は加熱される。もう一つは湖水温の空間的变化である。観測を行った季節は湖水の昇温期にあたるので、湖棚部の水温は湖盆部に比べて高い。このため、湖水流出時に湖盆部の水が湖口に達すると水温が低下すると考えられる。しかし、図-9(a)より、少なくとも塩水侵入時には水温変化によって塩分の変化を十分推測できると考えられる。

(2) 観測結果

図-10(a)～(d)は、観測期間中最も規模の大きかった7月3日の塩水侵入の様子を水温データにもとづいて推測した結果である。図中に実線で示すコンターは湖底直上10cmにおける塩分の等濃度線である。湖内に侵入した塩水は、まず舟通しに沿って進んでいき、徐々に浅瀬に広がっていく。前述したように、ヤマトシジミの産卵・発生に適した塩分は約3 psu以上だが、最も塩水が侵入した6:00(図-10(d))には、浅瀬の広い範囲でこの値に到達していることがわかる。

図-11の下段はAおよびE地点(図-7参照)における塩分記録である。また上段は高瀬川流量時系列で、マイナス値が塩水の遡上、プラス値が湖水流出を示す。湖口近傍に位置するA地点の塩分は、塩水の遡上開始後約2時間で上昇し始め、湖水流出に転じると急速に低下する。これに対して、浅瀬際の湖底に位置するE地点では、湖水流出に転じた後も3

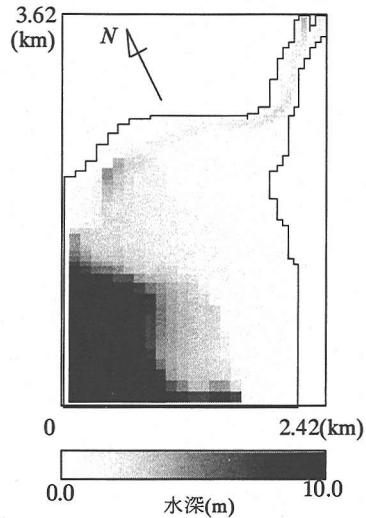


図-13 湖口浅瀬の水深分布

psu以上の塩分が23時間程度にわたって継続している。前述したように、受精卵が孵化するまでにおよそ1日程度の時間を要するが、この地点では高塩分状態がその程度の時間継続していることになる。

(3) 浅瀬で高塩分が継続する理由

浅瀬で高塩分が長時間継続する理由は以下のように考えられる。図-12はB地点とE地点の表層及び底層の水温変化と底層の塩分変化を示している。どちらの地点でも塩分の上昇期には表層と底層の水温が同じであることがわかる。すなわち、塩水侵入は全層的に生じている。一方、湖水が高瀬川に流出し始める6:00以降は上層と下層の水温が異なっている。このことから、湖水流出時には二層流的な状態が生じ、湖底付近に高塩分の層が滞留している可能性がある。そこで、次章において、数値シミュレーションによりこの点を検討する。

3. 湖口付近の塩水流動数値シミュレーション

(1) 計算モデルの概要

計算には3次元k-ε乱流モデルを用いた^{14),15)}。基礎方程式を以下に示す。なお、密度効果についてはブシネスク近似を施している。

x方向の運動方程式：

$$\begin{aligned} \frac{Du}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_L \frac{\partial u}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_L \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_T \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ = fv - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \end{aligned} \quad (1)$$

y 方向の運動方程式：

$$\begin{aligned} \frac{Dv}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_L \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_L \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_T \frac{\partial v}{\partial z} \right) \\ = -fu - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \end{aligned} \quad (2)$$

z 方向の運動方程式：

$$\begin{aligned} \frac{Dw}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_L \frac{\partial w}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_L \frac{\partial w}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_T \frac{\partial w}{\partial z} \right) \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \delta g \end{aligned} \quad (3)$$

乱れエネルギー k の保存式：

$$\begin{aligned} \frac{Dk}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_{Lk} \frac{\partial k}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_{Lk} \frac{\partial k}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_{Tk} \frac{\partial k}{\partial z} \right) \\ = P_r + G - \varepsilon \end{aligned} \quad (4)$$

散逸率 ε の保存式：

$$\begin{aligned} \frac{D\varepsilon}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_{L\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_{L\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_{T\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) \\ = C_1 \frac{\varepsilon}{k} P_r + C_1(1-C_3) \frac{\varepsilon}{k} G - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (5)$$

相対浮力の保存式：

$$\begin{aligned} \frac{D\delta}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_{L\delta} \frac{\partial \delta}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_{L\delta} \frac{\partial \delta}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_{T\delta} \frac{\partial \delta}{\partial z} \right) \\ = S = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

連続式：

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

ただし

$$\begin{aligned} P_r = \nu_t \left[2 \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right\} \right. \\ \left. + \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right\} \right] \end{aligned} \quad (8)$$

$$G = -g \nu_\delta \frac{\partial \delta}{\partial z} \quad (9)$$

$$\nu_T = \nu + \nu_t = \nu + C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (10)$$

$$\nu_L = 0.01L^{4/3} \quad (11)$$

$$\nu_{Lk} = \nu_L, \quad \nu_{Tk} = \nu_T \quad (12)$$

$$\nu_{L\varepsilon} = 0.77\nu_L, \quad \nu_{T\varepsilon} = 0.77\nu_T \quad (13)$$

$$\nu_{L\delta} = 1.2\nu_L, \quad \nu_{T\delta} = 1.2\nu_T \quad (14)$$

$$C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, C_3 = 1.0, C_\mu = 0.09 \quad (15)$$

ここに x, y は水平座標, z は鉛直上向き座標, u, v, w は, それぞれ x, y, z 方向の流速, k は乱れエネルギー, ε は粘性散逸率, δ は相対密度差である. また, p は圧力, ν_L は鉛直方向の渦動粘性係数, ν_T は鉛直方向の実効動粘性係数, ν_L は水平方向の渦動粘性係数, $\nu_{T\pi}, \nu_{Li}$ は, それぞれ物理量の鉛直, 水平方向の拡散係数である. また, f はコリオリ係数 ($8.6 \times 10^{-5} \text{ (s}^{-1}\text{)}$), g は重力加速度である. C_1, C_2, C_μ は $k-\varepsilon$ モデル固有の係数であり, 従来の研究で推奨されている標準値¹⁴⁾を採用した. 一方, C_3 の値は $0 \sim 1$ の範囲で種々の提案がされているが, ここでは 1.0 としている.

計算領域は小川原湖北東部の湖口周辺とした. 水平方向のメッシュサイズは浅瀬付近では $25 \sim 50\text{m}$, 沖合では $50 \sim 100\text{m}$ とした. 鉛直方向のメッシュサイズは $5\text{cm} \sim 1\text{m}$ の範囲とし, 水深が浅いほどメッシュを細かく設定した. 図-13 に水深分布を濃淡で示す. また, 計算時間ステップは 60 秒である. 流入条件は高瀬橋地点 (図-2 参照) でモニタリングされている流速・塩分データから与えた.

一方, 湖沖側境界 (西側, 南側) の流速条件を厳密に与えることは難しい. そこで次のような便宜的方法をとった. 塩水侵入に伴う湖水面の上昇が近似的に一樣と仮定すると, 沖側境界での平均流速を連続条件式から計算できる. そこでこの流速値を沖側境界のグリッド上で与えることとした. 湖内に流入した塩水の湖口付近の流速は 60cm/s まで達するが, 水深の大きな沖側境界付近では平均的に極めてゆっくりと動くので, 沖側境界の取り扱いが湖口付近浅瀬の塩水流動特性に大きく影響しないことが期待できる. 実際, 極端なケースとして, 西側あるいは南側の境界を不透境界として計算してみたが, 後に述べるように, 密度流の特性はほとんど変わらなかった.

湖水流出時に湖の沖合から入ってくる湖水の塩分は 1 psu とした. また, 湖内の初期流速は静止状態とし, 初期塩分は現地観測で水温塩分計を設置した地点の塩水侵入直前の塩分平均値とした. なお, 湖水の密度は塩分濃度のみの一価関数として計算した.

(2) 計算結果

図-14 に 7 月 3 日の塩水侵入の計算結果を示す. 図-14(b) は図-10(b) に, 図-14(c) は図-10(d) に相当する. 塩水が北岸沿いの舟通しから侵入していき,

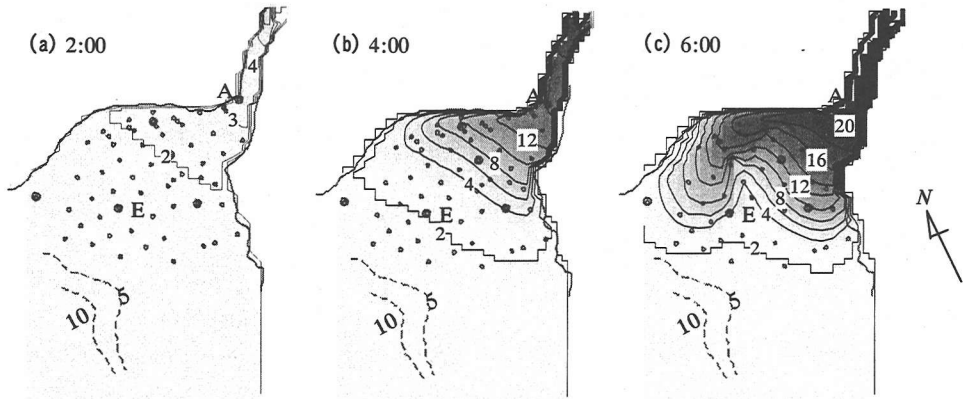


図-14 塩水侵入の様子 (計算結果)

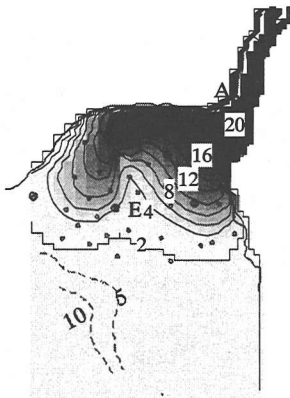


図-15 塩水侵入の様子
(西側を不透境界とした時の計算結果)

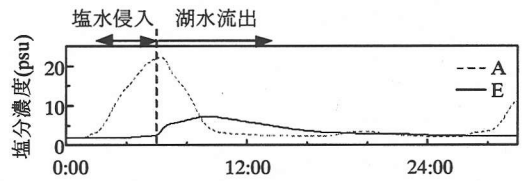


図-16 A, E 地点の塩分時系列 (計算結果)

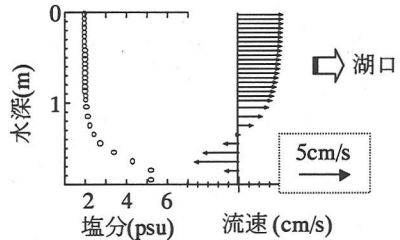


図-17 E地点における塩分・流速の鉛直プロファイル

次第に浅瀬に広がっていく様子は、観測結果と概ね一致している。侵入ピーク時にあたる6:00の塩水侵入範囲及び濃度レベルも概ね再現されている。また、図-15は、沖側境界条件の極端なケースとして、西側を不透境界とした時の6:00の計算結果であるが、図-14(c)とほとんど変わっていない。

図-16はAおよびE地点における湖底直上の塩分変化の計算結果である(図-11に対応)。E地点の塩分レベルは実際より若干低めにでている。しかし、A地点の塩分が塩水侵入終了とともに低下するのに対し、E地点で比較的高塩分の状態が長時間継続する傾向は、観測結果と一致している。

12:00のE地点における流速・塩分の鉛直プロファイルを図-17に示す。流速の横軸は正(+)が湖口の方向、負(-)が湖沖の方向である。E地点では2層状態が形成されており、上層では塩分濃度の低い湖水が湖口に向かって流れ、下層では塩分濃度の高い湖水が逆方向にゆっくりと流れている。この時の計算結果の流れ構造を図-18に概念的に示す。すなわち、

水面傾斜による湖口方向の圧力勾配と、底層の塩水を湖底斜面に沿って湖沖方向に流下させようとする重力とが微妙にバランスし、その結果として底層の塩水が高瀬川に流出せずに長時間高塩分状態が継続したものと考えられる。

4. シジミ産卵期における塩水侵入の発生頻度

前節に述べたように、高瀬川から塩水が侵入する時にヤマトシジミの産卵・発生に適した塩分環境が形成される可能性が高いと考えられる。しかし、そのような状況が産卵期に生じる頻度が少なければ、シジミの繁殖に適しているとは言えないであろう。そこで次に、このような塩水侵入イベントの発生頻度について考察した。

国土交通省は、高瀬橋地点において流速・塩分を

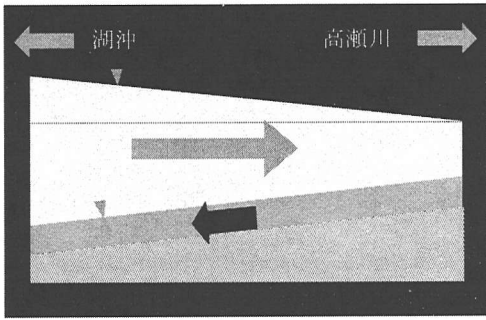


図-18 応力状態 (概念図)

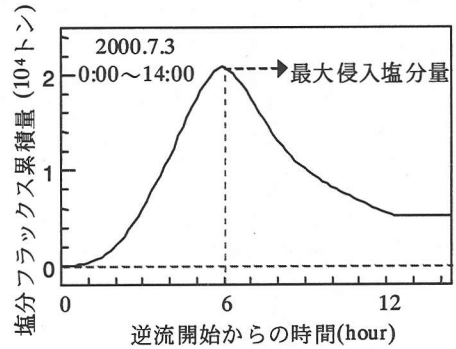


図-19 高瀬橋塩分フラックス累積量の時系列

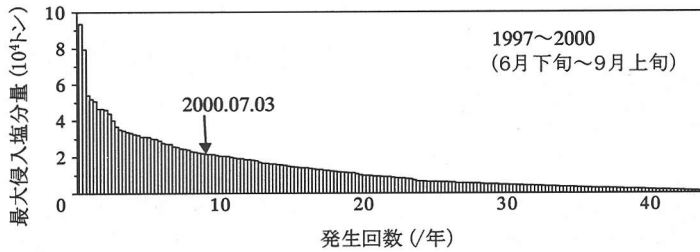


図-20 シジミ産卵期における塩水侵入の発生頻度

10分間隔でモニターしている。西田・中辻¹⁶⁾はこのデータより塩分フラックスを概算する方法を提示している。図-19はその方法で算定した7月3日の高瀬橋地点における塩分フラックス累積量の時間変化である。図-11との比較からわかるように、逆流が開始してから2時間ほどで増加し始め、逆流から順流に転じる時点でピークに達し、その後は減少する。本研究ではこのピーク値を「最大侵入塩分量」と呼び、塩水侵入規模の指標とし、塩水侵入の規模と頻度の関係を調べた。高瀬橋で現在の形態の観測が開始された1997年から2000年の4年間において、シジミ産卵期(6月下旬~9月上旬)の各塩水遡上について最大侵入塩分量を調べると図-20を得る。縦軸は最大侵入塩分量、横軸は各規模の塩水侵入の1年あたりに期待される発生回数である。図中の矢印は、図10~12にデータを示した2000年7月3日の塩水侵入イベントを示している。この図から、観測されたイベントよりも大きな規模の塩水侵入は、シジミ産卵期にあたる約3ヶ月の間に9回ほど期待されることが分かる。したがって、ヤマトシジミは産卵、発生に十分な機会をかなりの回数得ていると推測できる。

5. 浮遊幼生の移流拡散

これまでの検討結果から、小川原湖北東部におい

ては、塩水侵入時にシジミの産卵・発生に適した環境が一時的に形成されることがわかった。一方、湖内の他の水域ではこのような塩分上昇の機会がないにもかかわらず、シジミは広く分布している(図-5(b), 図-6参照)。この理由として、シジミの浮遊幼生が湖流により湖内に拡散することが考えられる。そこで、湖北東端で発生した浮遊幼生が短い浮遊生活期間(3~10日)に湖流に乗り、湖奥まで拡散する可能性を数値実験により検討した。この際、浮遊幼生の拡散に対して湖流が及ぼす影響について次のように考えた。塩水侵入に伴う密度流の影響は、湖口付近では大きいですが、その後塩水は底層密度流となって湖深層(図-2水深20m以深の水域)へ流れ下るので、これに浮遊幼生が乗ったとしても、これだけでは湖奥にまで到達することはできないと思われる。そこで、数値実験では、主に吹送流が浮遊幼生の拡散に影響していると考え、湖流を誘起する外力を風応力のみに限定した。

湖上の風は一般に非定常・非一様であり、現実的に即して流れ場を計算するには、そのような風応力を与える必要がある。しかし実際に得られる風データは限られている。そこで本研究では、非定常で一様な風の場合と、定常で非一様な風の場合のもとの湖流を計算し、浮遊幼生が湖奥まで拡散される可能性を調べることにした。前者については、総合観測所(図-2参照)で観測された風時系列を湖面全体に与えた。

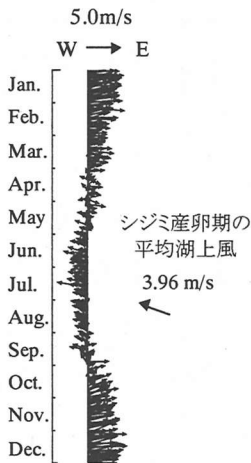


図-21 小川原湖における湖上風の季節変動

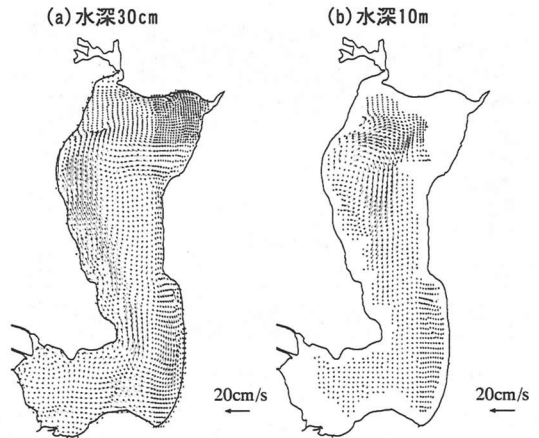


図-23 シジミ産卵期の平均的湖水流動

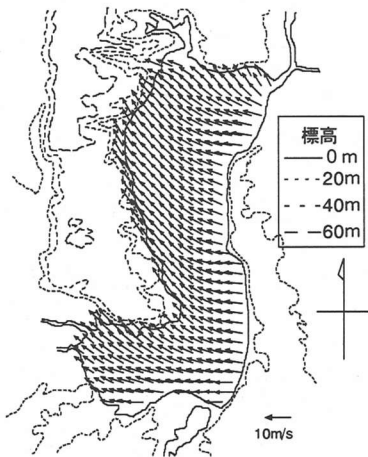


図-22 湖上風の分布パターン

後者については、筆者らが現地観測した風の空間分布（後述）を与えた。なお、どちらの場合も現実とは異なるが、前述したように、数値実験の目的が「湖北東部で発生した浮遊幼生が湖奥まで輸送される可能性を調べる」ことにあり、仮想的な風場もとの計算でもその目的は達せられるものと考えた。

(1) 計算方法

前述の三次元 $k-\epsilon$ モデルにより、湖全域の湖流を計算した。水平方向の計算メッシュは、湖北東部の浅瀬付近では 100m、それ以外では 200m とした。鉛直方向の計算メッシュは 5cm~3m の範囲とし、シジミ生息域となる浅い水深では細かく、それより深い所では粗く設定した。また、湖面の風応力は次式¹⁷⁾で与えた。

$$\rho_w U_*^2 = 0.5 \times 10^{-3} \rho_a U_{10}^{2.5} \quad (16)$$

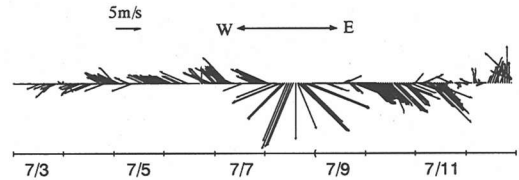


図-24 小川原湖総合観測所における風記録 (2000.07.03~07.12)

ここで ρ_a : 空気密度, ρ_w : 水密度, U_* : 風による水面の摩擦速度である。また U_{10} は水面上 10m 高さの風速であり、非一様性のみを考慮する計算では以下のように設定した。

図-21 は小川原湖総合観測所における 1982~1999 年の日平均風速の季節変動（アンサンブル平均）である。シジミ産卵期（図中の網掛け部）の平均的な湖上風は、風速約 4m/s の東南東の風である。一方、小川原湖の湖上風は周囲地形の影響により湖内で不均一に分布することが知られている。図-22 は総合観測所で風速 7m/s 程度の東南東の風が安定して吹いている時期に観測された湖上風分布である¹⁸⁾。そこで、総合観測所地点の風速が 4m/s となるように図-21 の速度ベクトル全体を縮小し、湖流計算の外力として与え、96 時間計算したところ、湖流はほぼ定常流となった。図-23 に例として表層(水深 30cm) 及び中層(水深 10m)における流速分布を示す。表層では西岸沿いを北上する強い流れがあり、その東側には逆に南進する流れが生じている。また、湖口付近の浅瀬の北部では反時計回りの環流があり、北岸沿いを西へ向かう流れにつながっている。浅瀬の南部では時計回りの環流が生じ、東岸沿いを南進する流れにつながっている。中層では表層に比べて流速が全

体的に弱い、湖北部には時計回りの強い環流ができています。これは表層の西岸沿いを北上する流れが、この地点で沈み込んでいるものと思われる。

一方、風の非定常性のみを考慮した計算では、塩水侵入を観測した2000年7月3日以降の風変化(図-24)を湖全域に一様に与えた。

以上の方法で計算された流れ場での中立浮遊粒子の移流拡散を次式で計算した。

$$\frac{DC}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_{LC} \frac{\partial C}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_{LC} \frac{\partial C}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_{TC} \frac{\partial C}{\partial z} \right) = 0 \quad (17)$$

$$\nu_T = \nu + \nu_t = \nu + C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}, \quad \nu_L = 0.01L^{4/3} \quad (18)$$

$$\nu_{LC} = \nu_L, \quad \nu_{TC} = \nu_T \quad (19)$$

ここに、 C は中立浮遊粒子の存在密度、 k は乱れエネルギー、 ϵ は粘性散逸率である。また、 ν_t は鉛直方向の渦動粘性係数、 ν_T は鉛直方向の実効動粘性係数、 ν_L は水平方向の渦動粘性係数、 ν_{TC} 、 ν_{LC} は、それぞれ鉛直、水平方向の拡散係数である。中立浮遊粒子の初期存在密度は、シジミの浮遊幼生が発生すると考えられる北東部の浅瀬(水深5.0m以浅)の湖底に単位面積あたり1の量で与えた。

(2) 計算結果

計算開始から6日後に全ての中立浮遊粒子を着底させた場合の存在密度を、各計算ケースについて図-25に示す。図-25(a)はシジミ産卵期の平均風を与えた場合、図-25(b)は2001年7月3日以降の風変化を与えた場合の結果である。色の濃淡は、初期状態における単位面積あたりの量に対する着底時の単位面積あたりの量を示している。なお、小川原湖においては水深13.5m以深ではシジミの生息が確認されていないため、そこに着底したものは生存できないものとし、空白で表示した。

どちらの場合も、湖北東部から南西湖奥部まで移流されている。しかし非一様・定常の場合(10^{-3})に比べ非定常・一様の場合(10^{-5})かなり少なくなっている。これは、前者の非一様な風が環流の形成を促進し且つ定常性により実際より安定であるのに対し、後者の一様な風(場所的差異がない)では実際より環流が弱く且つ時間的に変化するためである。すなわち、前者では移流を大きめに見積もり、後者では小さめに見積もる傾向があると考えられる。

佐藤・佐藤⁵⁾の産卵実験によれば一対の雌雄のシジミから 10^4 のオウダの卵が孵る。これが移流拡散するとすれば、過小評価と考えられる非定常・一様の風の場の計算結果でも、0.1個程度の浮遊幼生が湖奥

(a) 非一様・定常

(b) 非定常・一様

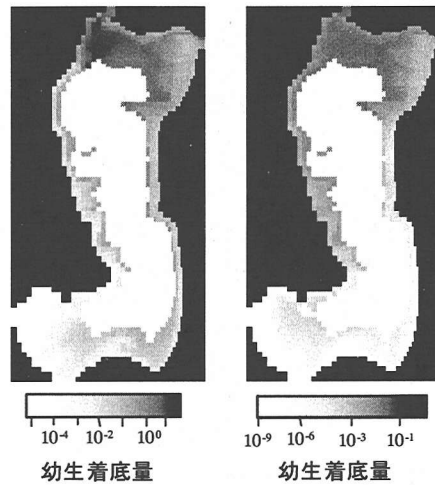


図-25 シジミ浮遊幼生の着底分布

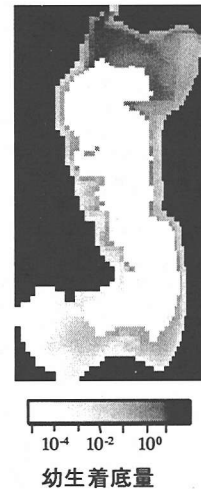


図-26 拡散をなくしたときのシジミ浮遊幼生の着底分布 (非一様・定常)

部に達する。一方、図-5(a)に示したように湖北東部浅瀬のシジミ個体密度は 10^3 個/ m^2 のオウダであるから、湖奥部に達する個体密度は 10^2 個/ m^2 のオウダとなる。一方、非一様・定常の風の場での結果からは 10^4 個/ m^2 程度となる。実際の状態が両者の中間にあるとすれば、産卵が主に湖北部で行われるとしても、湖奥部にシジミが存在する事実と必ずしも矛盾するわけではないと言える。

なお、この計算では、水平拡散係数をリチャードソンの3分の4乗則により与えているが、係数値が結果に及ぼす影響をみるために、拡散項を無視し移流によってのみ中立粒子が輸送されるという極端な場合の計算を、シジミ産卵期の平均風を与える条件

設定のもとで行った。その結果を図-26 に示す。分布傾向は図-25 (a) と大差ないことから、浮遊幼生の湖奥への輸送は、乱流拡散が小さい場合でも移流のみで達成できるものと考えられる。

以上の計算は、湖流を誘起する外力を風だけとし、風の非定常・非一様性についても限られた情報だけを用いて計算しているため、現実の流れとは異なる流れ場での検討にとどまっている。しかし、ここで重要なことは、たとえ仮想的な流れ場であっても、中立浮遊粒子が湖内のほぼ全域に移流拡散し得るということである。すなわち、シジミの産卵・発生が主に北東部の浅瀬で生じるという推測は、湖内全域にシジミが生息するという事実と必ずしも矛盾しない。

6. おわりに

小川原湖ではヤマトシジミが多数生息するが、常時の塩分濃度はその産卵に適していない。そこで本研究では、同湖におけるヤマトシジミの産卵環境の形成について水理学的観点から検討した。

シジミ分布調査によると、漁業による攪乱を受けにくい稚貝は北東部の湖口浅瀬に特に多く生息している。そこで、北東部では塩水侵入時にシジミの産卵・発生に適した塩分環境が一時的に形成されると推測し、現地観測と数値シミュレーションによる検証を行った。

現地観測の結果、浅瀬の広い範囲でシジミの産卵に適した高塩分状態 (3 psu 以上) となること、また浅瀬の一部ではそのような状態が 1 日程度継続する可能性のあることがわかった。また、数値シミュレーションにより塩水挙動を再現したところ、そのような高塩分状態の継続は、引き潮時に二層流の状態が生じ、底層に塩分が滞留するためであると考えられた。

次に、塩水侵入の規模と発生頻度を高瀬川の流速・塩分データを用いて検討した。その結果、現地観測で捉えられた状況は、ヤマトシジミ産卵期に平均 9 回程度生じることがわかった。以上より、小川原湖におけるヤマトシジミの再生産は主に北東部の浅瀬で行われているのではないかと推測された。

また北東部以外の水域にも広くシジミが生息する点については、北東部の浅瀬で発生したシジミの浮遊幼生が湖水流動によって拡散するためではないかと推測し、その可能性を数値実験により検討した。その結果、北東部で発生したシジミ幼生は、1 週間前後の浮遊生活期間内に湖内全域に拡散する可能性が示された。

本研究を行うにあたり、島根県内水面水産試験場の中村幹雄場長からヤマトシジミに関して種々お教

えいただいた。また、現地調査・観測を実施するにあたり、小川原湖漁業協同組合および国土交通省東北地方整備局高瀬川総合開発工事事務所に御世話になった。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 池永均, 山田正, 向山公人, 大島伸介, 内島邦秀: 網走湖の塩水化の機構と塩淡二層流の長期変動特性に関する研究, 土木学会論文集, No.600/II-44, pp.85-104, 1998.
- 2) 福岡捷二, 黒川岳司, 日比野忠史, 鈴木篤, 中村剛, 上原浩: 中海における気象変化に伴う流れと貧酸素水塊の挙動, 土木学会論文集, No.636/VII-13, pp.61-79, 1999.
- 3) 奥宮英治, 中村由行, 中山恵介, 井上徹教, 石飛裕: 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, 2001.
- 4) 朝比奈英三: 北海道に於ける蜆の生態学的研究, 日水誌, Vol.10, No.3, pp.146-152, 1941.
- 5) 佐藤善雄, 佐藤時好: ヤマトシジミ再生産機構解明調査, 平成 4 年度秋田県水産振興センター事業報告書, pp.264-280, 1993.
- 6) 田中彌太郎: ヤマトシジミ稚仔期の形態および生理的特性について, 養殖研報, Vol.6, pp.23-27, 1984.
- 7) 中村幹雄, 安木茂, 高橋文子, 品川明, 中尾繁: ヤマトシジミの塩分耐性, 水産増殖, Vol.44, pp.31-35, 1996.
- 8) 長尾正之, 西部隆宏, 石川忠晴, 山浦勝明: 小川原湖への塩分侵入現象の確率統計的考察, 水工学論文集, 第 40 巻, pp.583-588, 1996.
- 9) 富士昭: 小川原湖の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工事事務所, 1990.
- 10) 山室真澄: 日本の汽水性海跡湖における多毛類・貝類の分布とそれを規定する環境条件, 東京大学大学院理学系研究科地理学専門課程修士論文, pp.106, 1986.
- 11) 長島伸介, 松本潤也, 石川忠晴, 西田修三: 小川原湖の塩水侵入挙動, 土木学会第 48 回年次学術講演会, pp.624-625, 1993.
- 12) 西田修三: 小川原湖の塩分流入過程に関する現地観測, 土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集, pp.82-83, 1995.
- 13) 藤原広和, 石川忠晴, 西田修三, 鶴田泰士, 沢本正樹: 高瀬川の複断面河道部における塩水遡上特性, 水工学論文集, 第 44 巻, pp.1005-1010, 2000.
- 14) 銭新, 石川忠晴: k-ε モデルによる DI 型連行現象の再現性について, 土木学会論文集, No.593/II-43, pp.177-182, 1998.
- 15) 梅田信, 横山勝英, 石川忠晴, 銭新, 高橋迪夫: セヶ宿貯水池における濁質の流入・流動・堆積過程に関する観測と数値シミュレーション, 土木学会論文集,

- 16) 西田修三, 中辻啓二: 緩混合河川における流量と塩分輸送量の算定. 水工学論文集, 第 43 卷, pp.869-874, 1999.
- 17) 水理公式集, pp.578, 1997.
- 18) 鶴田泰士, 石川忠晴: 小川原湖における風速分布の現

(2001.6.19 受付)

HYDRAULIC STUDY ON REPRODUCTIVE CONDITION OF *CORBICULA JAPONICA* IN LAKE OGAWARA

Yasushi TSURUTA, Tadaharu ISHIKAWA, Shuzo NISHIDA
Mai NARITA and Hirokazu FUJIWARA

Lake Ogawara is a brackish water lake where the most dominant water organism for fishery is *Corbicula japonica*. There is a mystery about the reproduction of the clams in the lake: The usual salinity concentration of the lake is only 1 psu, which is far lower than the salinity needed for the spawning of the clams. In this study, reason of the mystery is investigated from the standpoint of hydraulics by field measurement, numerical simulation and statistical analysis. The results show the following: The salinity condition favorable to the spawning of the clams is developed in a restricted area near the lake exit in a restricted period of seawater intrusion and the expectation of this condition is considered to be frequent enough for the propagation of the clams. The spawned larva is diffused by wind driven current and can spread over whole area of the lake within floating period of about only 1 week.