

小川原湖における塩水流入の現地観測

FIELD MEASUREMENT OF SALINE WATER INTRUSION IN LAKE OGAWARA

鶴田泰士¹・石川忠晴²・西田修三³・成田舞⁴・藤原広和⁵
Yasushi TSURUTA, Tadaharu ISHIKAWA, Shuzo NISHIDA, Mai NARITA
and Hirokazu FUJIWARA

- ¹学生会員 工修 東京工業大学大学院総合理工学研究科 (〒226-8502 神奈川県横浜市長津田町4259)
²フェロー 工博 東京工業大学大学院教授 総合理工学研究科 (〒226-8502 神奈川県横浜市長津田町4259)
³正会員 工博 大阪大学大学院助教授 工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)
⁴学生会員 東京工業大学土木工学科 (〒226-8502 神奈川県横浜市長津田町4259)
⁵正会員 八戸工業高専助教授 建設環境工学科 (〒039-1192 青森県八戸市田面木上野平16-1)

Field measurements were carried out on the flow field caused by seawater intrusion in a shallow water area near the outlet of the Lake Ogawara. 64 thermometers and 6 salinity meters were placed in the area for six days. First, a correlation between the temperature increment and the salinity was investigated with an expectation that the behavior of the intruding saline water could be estimated by the temperature data because the seawater temperature was lower than the lake water temperature in the period of the measurements. The results show that the expectation was realistic for the rising tide phase but not for the sinking tide phase. A series of detailed contour maps of salinity are obtained for the rising tide phase from the temperature data analysis. The maps clearly show that the saline water spreads widely over the shallow water area although it goes up the waterway along the north shore of the lake just at the beginning of an intrusion event. The salinity data obtained at several points show that high salinity water tends to stay for over ten hours at the bottom of the shallow area after the lake water starts to outflow at the sinking tide phase.

Key Words : seawater intrusion, field measurements, brackish water lake, flow field of a density current

1. はじめに

汽水湖は、塩水性と淡水性の生物が入り混じった豊かな生態系を有するため古くから漁場として利用される一方、低平地にあることから地域開発の圧力も高く、干拓や淡水化が推し進められることも多かった。しかし、近年、自然環境保全に対する社会的関心の高まりとともに、環境保全を前提とした開発が指向されるようになり、汽水湖の環境の成り立ちに関する理解をより一層深める必要が出てきている。

汽水湖の環境は下流からの間欠的塩水侵入によって特徴付けられるが、とりわけ湖口付近での塩水流動と拡散の過程が汽水生物の生息及び増殖にとって重要であると考えられる^{1),2)}。その一方で、湖口は、船の疎通の便や水害軽減などを目的とする地形改変が最も行われやすい区域である。したがって、塩水遡上時の湖口の流況を把握することは、汽水湖の環境管理を行っていく上で重要であると言える。

筆者らは、青森県東部にある小川原湖とその排水河川

である高瀬川の塩水流動現象について、それぞれ独自の観点から調査研究を進めているが^{3),4),5)}、上に述べた湖口浅瀬における塩水流動特性の重要性を認識し、このたび共同の現地観測を実施したので報告する。

2. 小川原湖及び塩水侵入現象の概要

小川原湖の形状を図-1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海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。またその際の遡上形態は概ね強混合であることが知られている⁶⁾。また過去の調査によれば、塩水侵入現象の発生は、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が、平均的には、湖水位が比較的低

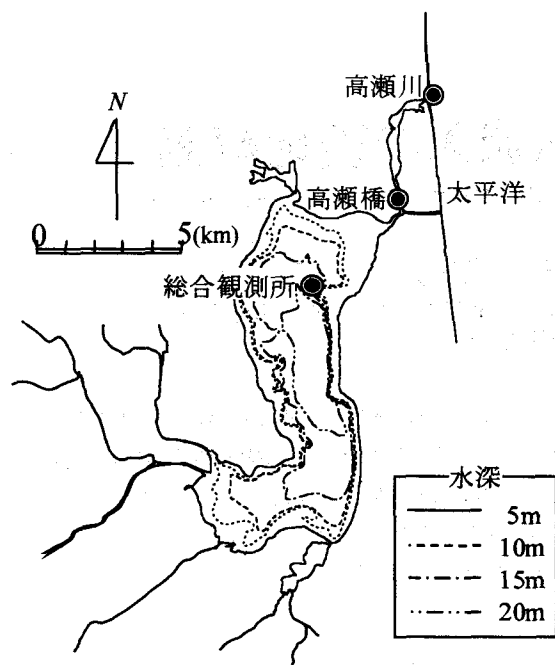


図-1 小川原湖の形状

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⁷⁾。

湖口付近の等深線図を図-2に示す。図中の記号は後述の観測機器の設置位置を示している。この水域では約1.5kmにわたって水深0.5~2mの湖棚が発達し、その先は急斜面となり湖盆につながっている。北岸沿いに幅約50m、深さ約2mの滞筋がある。これは船の疎通のために大分昔に開削されたもので、開削時期は不明であるが、堆積・洗掘はほとんどなく安定している。浅瀬には魚網が多く設置されており、また水深1m未満の水域には船を入れるのが難しいため、流速の直接計測等は行われていない。しかし水温計を用いた流動調査が過去に2例ある。一つは滞筋への塩水侵入に関するもので⁸⁾、それによれば、高瀬川を遡上した塩水は全層流として湖内滞筋に侵入したのち、図-2に▲で示す辺りで下層に潜り込み、傾斜ブルームとして深部に侵入する。もう一つは、浅瀬部での塩水の広がりに関するもので⁹⁾、それによれば、塩水は湖棚の縁に向かって比較的均等に移流拡散するが、等濃度線の重心は北岸滞筋にやや偏っている。ただし、いずれの観測においても測定器の数が少なく、全体的な流況は必ずしも十分把握されていない。

3. 観測方法

平成12年6月29日から7月5日にかけて、図-2に示した水域で現地観測を実施した。塩水侵入挙動を詳細に捉えるためには塩分計を多数設置することが望ましいが、一般に塩分計は高価であるため台数を十分確保することが難しく、また事故が生じた場合の損害が大きい。一方、この季節には、浅瀬部の湖水温に比べて海水温が低く、

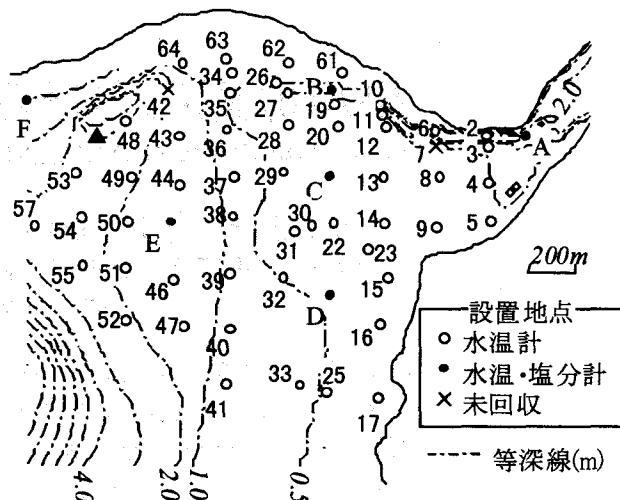


図-2 湖口付近の等深線図

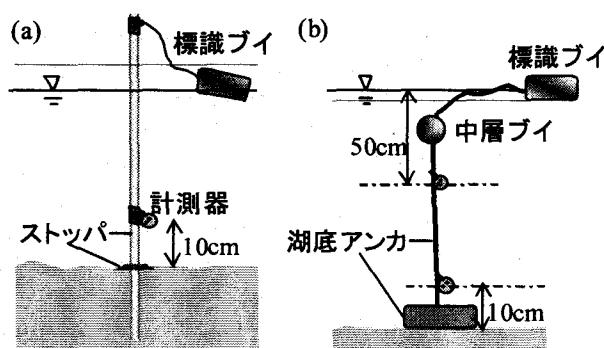


図-3 水温計設置方法

塩水侵入時には有意な水温低下の生じることが報告されている^{8), 9)}。そこで本研究でも、安価な水温計を多数設置することにより、水温低下量から塩分濃度の変化を推定することとした。

図-2に水温計(Onset社製StowAway Tid-bit)の設置位置を○印で示す。横に付した数字は地点番号である。水深が1m以下の地点では、図-3(a)に示すように、標識ブイとストッパーをつけた鉄筋を湖底に打ち込み、湖底から10cmの位置に水温計を取り付けた。水深が1m以上の地点では、図-3(b)に示すように、中層ブイと湖底アンカーでロープを緊張させ、水面下50cmと湖底上10cmの位置に水温計を取り付けた。また図中に●と英文字で示す地点の湖底から10cmの位置に塩分水温計(アレック電子社製MDS-CT)を同様の方法で設置し、後述するように塩分と水温変化の相関を調べた。計測間隔は1分とした。なお図中の×印は、標識ブイのロープが切断した等のアクシデントにより計測器を回収できなかった地点である。

図-4は、観測期間における湖水位、河口水位(計測地点は図-1参照)、高瀬橋地点の流量、St. Aの塩分、小川原湖総合観測所の日射および風ベクトルの時系列である。河口水位が湖水位を上回ると、約20分程度の時差を持って逆流が発生している。また塩分記録からわかるように、全観測日においてSt. Aに塩水が到達している。特に7月

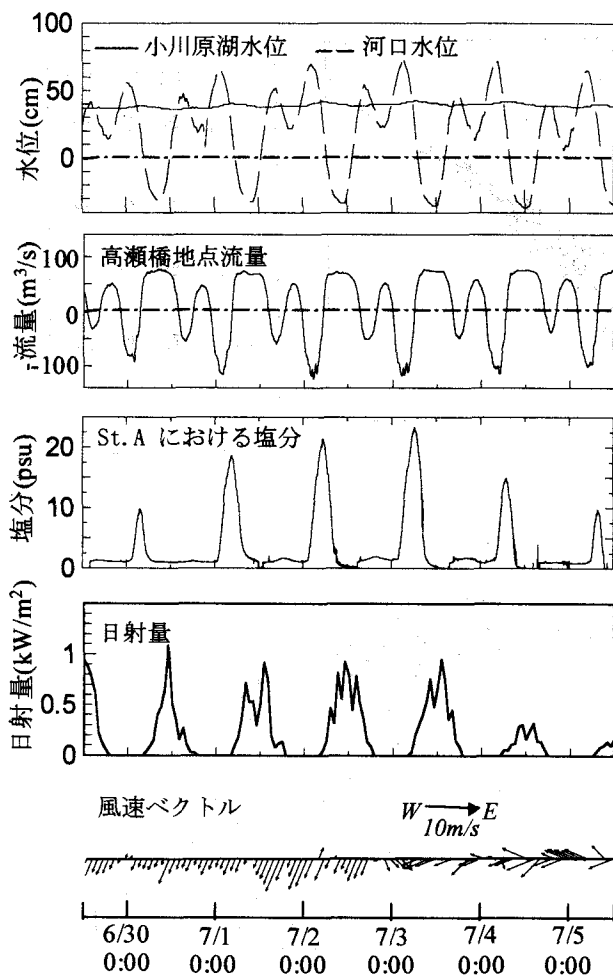


図-4 観測時の諸データ

1～3日の3日間には、かなり大きな塩水侵入が発生している。St. Aに海水が到達するのは、逆流開始時から2～4時間後となっている。観測期間の天候は晴れまたは薄曇りで風は比較的弱かった。

4. 観測結果

(1) 塩分と水温の相関性

塩水侵入直前の湖水の水温と塩分を T_1 、 S_1 、海水の水温と塩分を T_2 、 S_2 、湖水と海水の混合水の水温と塩分を T_3 、 S_3 とする。 T_1 、 S_1 、 T_2 、 S_2 が仮に一定値であり、また外界からの熱の流入がない場合、次式が成立する。

$$S_3 - S_1 = \alpha (T_1 - T_3) \quad (1)$$

ここに $\alpha = (S_2 - S_1) / (T_1 - T_2)$ ＝一定値である。実際には、湖水及び海水の状態が時間的・空間的に変化するから、式(1)は厳密に成立するわけではない。しかし、前述したように、この時期の湖水と海水の温度は異なるため、 $[S_3 - S_1]$ と $[T_1 - T_3]$ の間にはある程度の相関関係が期待できる。図-5は、塩水が到達しなかったF地点を除く7月3日の塩分・水温計の記録である。塩分の上昇と同時に水温の低下の生じていることがわかる。

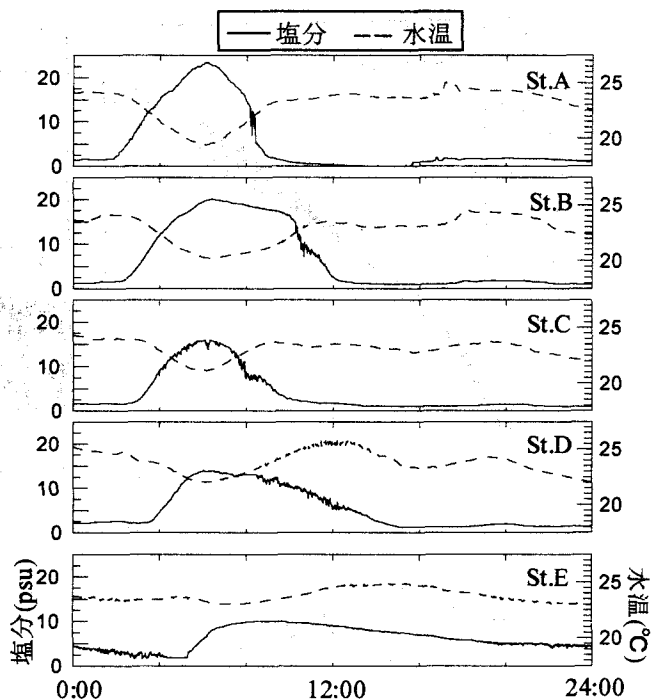


図-5 塩分・水温計のデータ(7/3)

そこで、大きな塩水流入のあった3日間について、塩分が上昇した時点以降の $[S_3 - S_1]$ と $[T_1 - T_3]$ の相関を逆流時(a)と順流時(b)に分けて図-6に示す。逆流時(塩水流入時)には高い相関関係が見られるが、順流に転じると測点間のばらつきの大きくなるのがわかる。この原因として2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。塩水流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、順流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変化である。観測の行われ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、順流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。

そこで、本論文では逆流時(塩水流入時)のみについて水温データ解析を行うこととした。図-6(a)によれば、 $[S_3 - S_1]$ は $[T_1 - T_3]$ に対して単調に増加するものの、式(1)で想定される直線関係からは若干ズレており、塩水流入初期(図の左側)の勾配 α は大きく、後期の α は小さい。この原因は明確でないが、恐らく流入海水温の変化によると思われる。すなわち、逆流が開始してしばらくは高瀬川下流河道内に滞留している海水及び海岸線近くの海水が高瀬川を遡上するが、逆流が継続すると海岸から離れた水域の海水も遡上するようになる。一般に後者は前者に比べて水温が低いことから、時間の経過とともに勾配 α は小さくなると考えられる。

以上のように、図-6(a)のデータは式(1)の直線関係から若干ズレているが、しかし少なくとも各日ごとには5個の塩分・水温計のデータが概ね同一曲線上にあることから、各日のデータについて回帰式を作成して水温変化から逆流時の塩分を推定することとした。

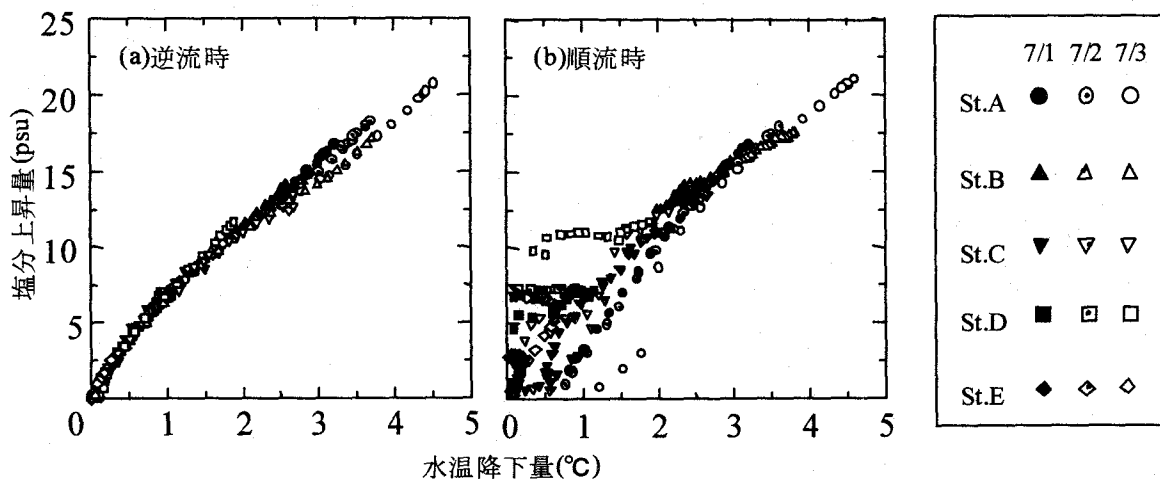


図-6 $[S_3-S_1]$ と $[T_1-T_3]$ の相関

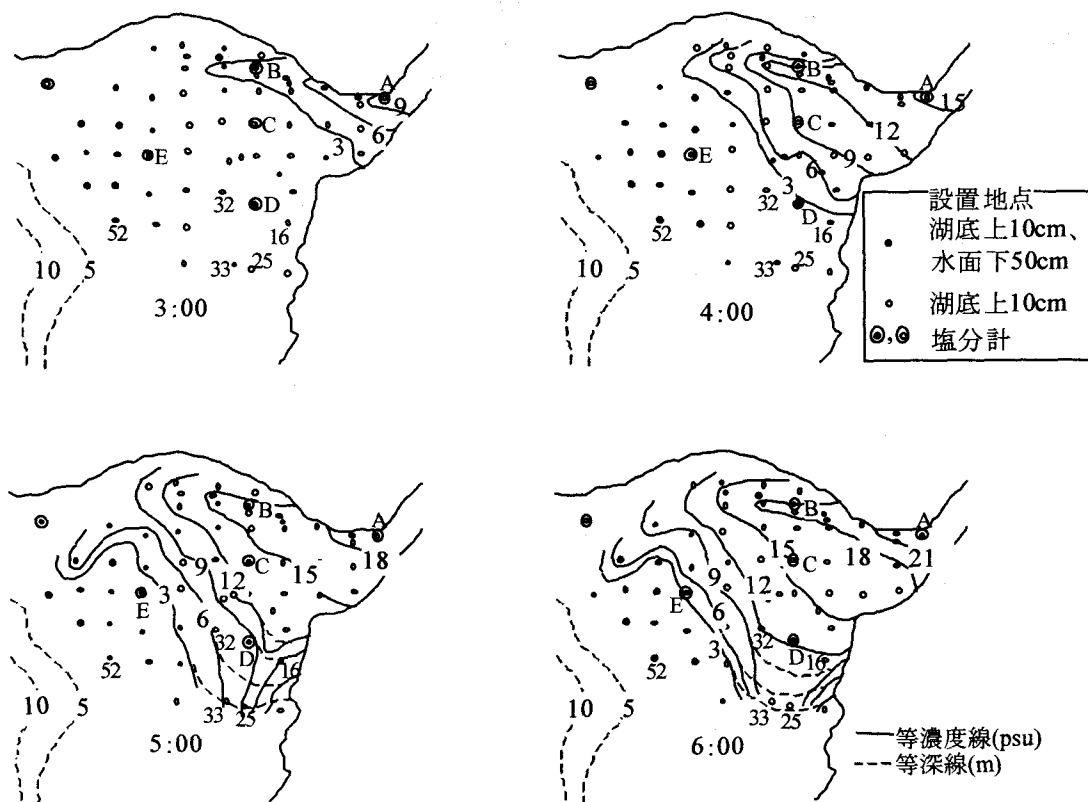


図-7 塩水侵入の様子(7/3)

(2) 塩水侵入の平面分布

図-7は、そのようにして得られた7月3日の塩水侵入の様子を、湖底上10cmについて等濃度線で描いたものである。A地点を通過した塩水は、まず北岸沿いの滞筋を逆流するが、次第に浅瀬にも広がっていく。その広がり方は、先端がD地点を通過するまでは、浅瀬全域にわたって概ね一定速度(等濃度線が平行)で進行する。しかし、その後、東岸のやや沖で等濃度線が不自然な形に歪み、南に向かう流れが形成されているかのようにになっている。このような流れの成因は定かでない。あるいは湖

盆部の比較的低温の水塊が逆に北流したことも考えられる。ただし、図-5に示したように、塩分計を設置したSt. Dでは塩分上昇が認められたことから、少なくともSt. 16、St. 32の解析結果はほぼ妥当であったと思われる。そこで、仮にSt. 25とSt. 33の水温低下が塩水到達以外の原因によっているとした場合、等濃度線は破線のように修正されるであろう。ただし、どちらが適当かは現時点では判断できない。

7月1日と2日の各2時刻の等濃度線を図-8及び図-9に示す。高濃度の塩水が滞筋沿いに逆流し、浅瀬の等濃度線が平行に形成されるという特徴は図-7(7月3日)と

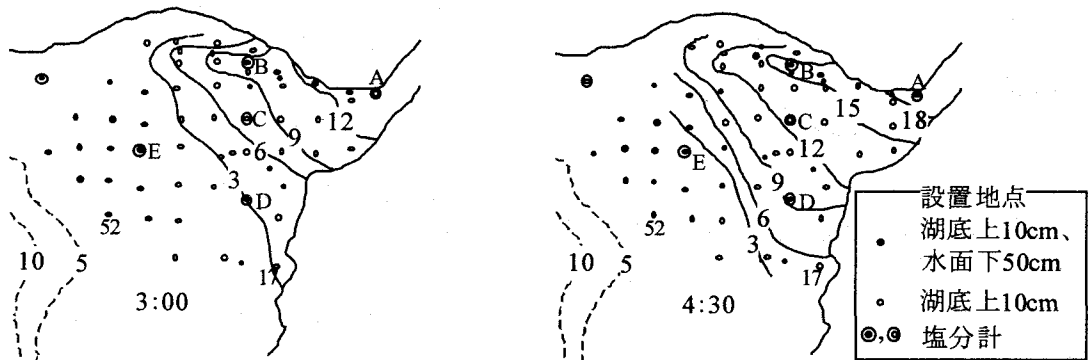


図-8 塩水侵入の様子(7/1)

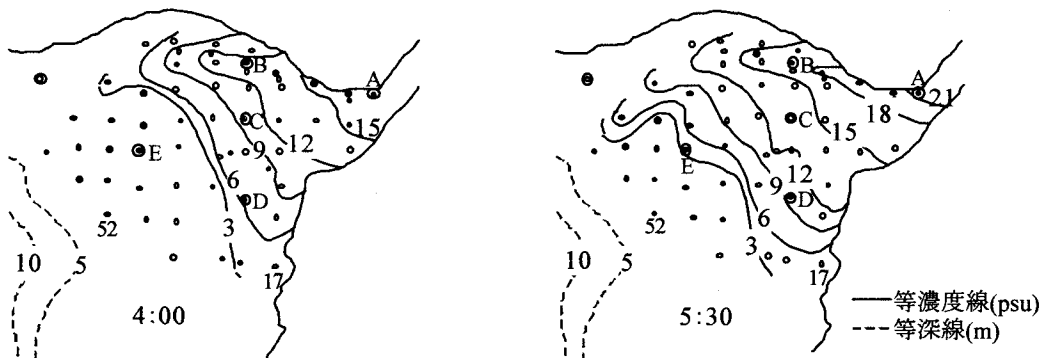


図-9 塩水侵入の様子(7/2)

同様である。また、この2つのケースにおいても、東岸沿いの塩分が高くなる傾向にあるので、東岸沿いに塩水が南流する可能性は高いように思われる。そうすると、図-7の右下部に現われた不自然な等濃度線は、St. 17(図の右下)の水温値が何らかの理由で周囲と異なったためとも考えられる。

(3) 引き潮時の流れの特徴

引き潮時については、水温計のデータから塩分を定量的に推定できないので、まず図-5に示した湖底上10cmの塩分水温計データの特徴について考察する。St. AとSt. Bの塩分波形を比較すると、上昇時にはほとんど一致している一方、下降時には湖内側にあるSt. Bで高塩分が長時間続いていることがわかる。すなわち、7:30以降は湖側の塩分の方が高くなっている。この原因は、図-10(a)に示すSt. Bの水温データより以下のように解釈できる。同図によれば、流れが順流に転じてから約1時間後までは2深度の水温値がほとんど一致している。しかしその後4時間ほど水面下50cmの水温(以下、表層水温という)が湖底上10cmの水温(以下、底層水温という)を一時的に上回っている。この時間帯は、St. Bの底層塩分がSt. Aのそれを上回っている時間帯に一致する。したがって、St. Bでは、底層に塩水が滞留し、その上を湖水が下流に流れる二層流が出現していたと考えられる。この現象は過去

の観測⁹⁾でも確認されている。

浅瀬部にあるSt. C、St. D、St. Eのデータも、湖口に近い地点よりも遠い地点の方が高塩分が長時間継続する傾向にある。St. CとSt. Dでは表層に水温計を設置していないので、St. Bと同様の状態が出現しているかどうかは確認できない。しかし図-10(b)に示すSt. Eの水温データから以下のように考察できる。まず4:00頃までは2深度の水温が異なっているが、これは図-5(St. E)からわかるように前日に侵入した塩水が底層に若干残っていたためと考えられる。その証拠に、塩分変動がなくなる4:00から5:18までは両水温は完全に一致している。塩分が到達した5:18からは底層水温が低下するが表層水温が変化しないことから、塩分二層状態が形成されたものと解釈できる。その後、7:00辺りから表層水温が低下し始めるが、この時刻は流れが順流に転じた時刻に近い。したがって、湖盆部の方向からわずかに冷たい水塊が到達したものである。図-10(c)に観測全期間を通して塩水が到達しなかったSt. 52の表層水温を示すが、図-10(b)のSt. Eの表層水温が低下しきった9:00以降では、両者はほぼ完全に一致している。一方、St. Eの底層水温は時間とともに増加しており、この原因は不明だが、しかし、少なくとも、St. Eの表層水温と底層水温の特性が異なることは明らかである。以上のことを総合すると、St. Eの底層には塩分の高い層が薄く形成され、図-5(St. E)に示したよう

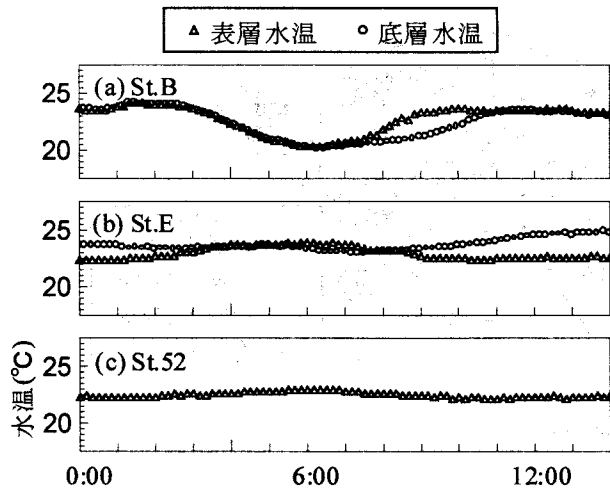


図-10 水温データ(7/3)

に約20時間残留し、その上部を湖水が湖口に向かって流れていたと推定される。

このことは、ヤマトシジミの産卵・孵化にとって重要な意味を持っている可能性がある。小川原湖にはヤマトシジミが多数生息し主要な水産物の一つになっているが、シジミが主に生息する水深5m以浅の湖棚部での常時の塩分は通年にわたり全域で1psu程度しかない¹⁰⁾。一方、佐藤ら¹¹⁾によれば、ヤマトシジミの孵化に適した塩分は3~7psuであり、また丸¹²⁾によれば、孵化してから浮遊幼生状態になるのに1日程度の時間を要する。これらは必ずしも孵化の絶対必要条件ではないが、しかし、少なくとも大量の再生産が行われるためには、常時より高塩分の状態が1日程度継続する必要があると言える。一方、過去に行われたシジミ分布調査¹³⁾によれば、稚貝の個体密度は湖口の浅瀬付近で著しく高く、その他の水域では概ね低い。実際、小川原湖漁業共同組合では、この水域で小型の貝を採取して湖奥に散布し、収穫量の増大を図っている。以上の事項を総合的に考えると、塩水侵入時に湖口の浅瀬付近で1日程度の塩分上昇が生じることは、小川原湖の特産であるヤマトシジミの産卵・孵化にとって重要な因子となっている可能性がある。この点を確認するためには、もちろん、シジミそのものに関する調査や、塩水侵入の規模と頻度に関する調査が別途必要とされるが、生態環境と水理環境の関連を示す一つの例となる可能性があると考えられる。

5. おわりに

本研究では、小川原湖湖口部に侵入した塩水の挙動を、水温及び塩分観測により検討した。その結果は、まだ必ずしも十分に解釈し尽くされていないが、以下の事項が概ね明らかにされた。

- 1) 小川原湖に侵入した塩水は、まず北岸沿いの滞筋を通して侵入するが、その後は浅瀬全域に広がっていく。その際、東岸沿いに南下する分派流が存

在している可能性がある。

- 2) 逆流から順流に転じると、滞筋の底層には塩水が若干残留し、その上を湖水が高瀬川に向かって流れる。
- 3) 浅瀬においても、流れが順流に転じた後に、塩水が底層に残留する傾向が見られる。残留時間は浅瀬部周辺の観測点において長く、ST.Eでは20時間にも及んでいた。このことは、ヤマトシジミの繁殖にとって重要な意味を持っている可能性がある。

謝辞：現地観測を実施するにあたり、建設省高瀬川総合開発工事事務所と小川原湖漁業共同組合にご協力いただいた。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 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。
- 2) 菊地泰二：海産ベントス幼生生態学の現状、月刊海洋、23、pp.617-622。
- 3) 藤原広和、田中博通：高瀬川感潮域の現地観測による水理特性について、水工学論文集、第37巻、pp.171-176、1993。
- 4) 石川忠晴、長尾正之、長島伸介：小川原湖に発生する傾斜ブルームの連行係数に関する考察、水工学論文集、第40巻、pp.595-600、1996。
- 5) 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巻、pp.869-874、1999。
- 6) 石川忠晴、板井雅之、小沢康彦：小川原湖に侵入する塩分の計算モデルの検討、水工学論文集、第35巻、pp.191-196、1991。
- 7) 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。
- 8) 長島伸介、松本潤也、石川忠晴、西田修三：小川原湖浅瀬への塩水侵入挙動、土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集(平成4年度)、pp.82-83、1993。
- 9) 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(平成7年度)、pp.131-132、1995。
- 10) 建設省高瀬川総合開発工事事務所：小川原湖淡水化(水質)解析業務報告書、pp.51-87、1991。
- 11) 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。
- 12) 丸邦義：ヤマトシジミについて、北水試だより、pp.6-13、1993。
- 13) 建設省高瀬川総合開発工事事務所：平成3年度小川原湖漁業調査報告書、pp.153-387、1992。

(2000.10.2受付)