

複数連結汽水湖の水温，塩分の変動

Water Temperature and Salinity Variations
in Interconnected Saline Lakes

松本治彦*・合屋晏秀**・李寅鉄***
・羽田野袈裟義****・斎藤隆*****

By Haruhiko MATSUMOTO, Yasuhide GOHYA, In-Cheol LEE,
Kesayoshi HADANO and Takashi SAITO

This paper discusses field observation and model results for temperature and salinity in Myojin-ike, a group of saline lake. Myojin-ike is itself composed of three smaller interconnected basins, the largest of which is connected to the sea of Japan. Water temperature and salinity observed 0.5m and 3.0m below water surface showed abrupt variations like a step function during November to December 1985. This phenomenon is investigated in relation to the water movement in the lake.

Keywords: saline lake, water temperature, salinity, abrupt variation

1. はじめに

内湾や通水路を通じて外海と結ばれている湖沼の多くでは、水の交換が抑えられるため、水質汚濁が深刻な問題となっている。著者らはこのような水域の一例として夏季を中心に近年しばしば赤潮が発生している「明神池」（山口県萩市）をとり、水温と塩分の連続測定を数年来行ない、潮位変動に伴う池内の流動特性と水質変動を検討している。その結果、ある期間では表層と下層の塩分が約1日周期で急激に変化することを見いだした。本研究ではこの現象の生じる機構を潮位変動や各池間の流量変化から考察している。

2. 明神池の概要と観測方法

図・1に調査した明神池と観測点を示す。この池は大池，中の池および奥の池の3つの小さな池

* 正会員 工博 宇部短大助教授 附属環境科学研究所 (〒755 山口県宇部市文京町5-40)

** 農博 宇部短大教授 附属環境科学研究所

*** 山口大学大学院博士後期課程 (〒755 山口県宇部市常盤台)

**** 正会員 工博 山口大学助教授 工学部社会建設工学科

***** 正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科

からなり、表面積はそれぞれ 8646 m²、1553 m² および 321 m² である。大池は、最大水深が6m 程度で、外海とは暗渠で通じている。中の池は最大水深が1.5 m 程度の浅い皿状の池で、大池とは2本の短い水路で結ばれている。奥の池は玄武岩の山地で、岩塊に取り囲まれた平均水深が1 m 程度の小鉢状の形態をした池である。奥の池と中の池は長さ約 30 m の細い水路で連なっている¹⁾。また、図-1 の大池等深図をみると測点付近ですり鉢状に急激に深くなっていることがわかる。

現地観測は1985年11月8日～12月5日（前期調査）および12月14日～1986年1月15日（後期調査）までの期間に、図-1 に示した Stn. 1 の水面下0.5mおよび3.0mの位置にメモリー塩分・水温計（モデルCT-2000）を設置し、連続測定を行なった。測定間隔は30分である。解析には以上のデータの他に同期間の萩検潮場（国土地理院）の潮位記録を利用した。

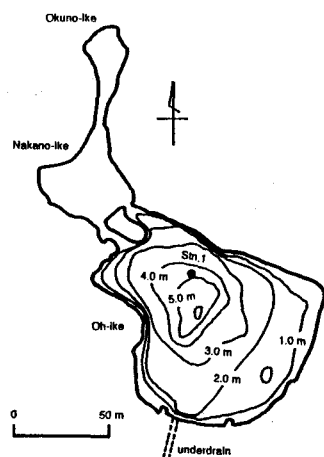


図-1 明神池と観測点

3. 観測結果

図-2 に1985年11月8日～12月5日までの期間（前期）にStn.1の0.5m層と3.0m層で測定した水温と塩分の時間変化を示す。図-3 に1985年12月14日～1986年1月15日までの期間（後期）に上述と同様に測定した結果を示す。また、図-4 には水温・塩分の観測期間に於ける萩検潮場の潮位記録を示す。以上の図より観測結果を前期と後期に分けて述べる。

3.1 前期調査

水温をみると、平均値は0.5m層（表層）が17.3℃、3.0m層（下層）が17.8℃で表層の方が下層よりも0.5℃低い。また観測を開始して6日目までは両層の水温はほぼ一致した値を示し、更にこの時期の水温は21℃前後から17℃台へと急低下している。一方、11月14日より12月5日までの観測期間では、両層の水温にはかなり差があり、最大では1℃以上も表層の方が低くなっている。塩分をみると、平均値は表層で29.12‰、下層で30.63‰と下層の方が表層よりも1.51‰高い。表層に注目すると

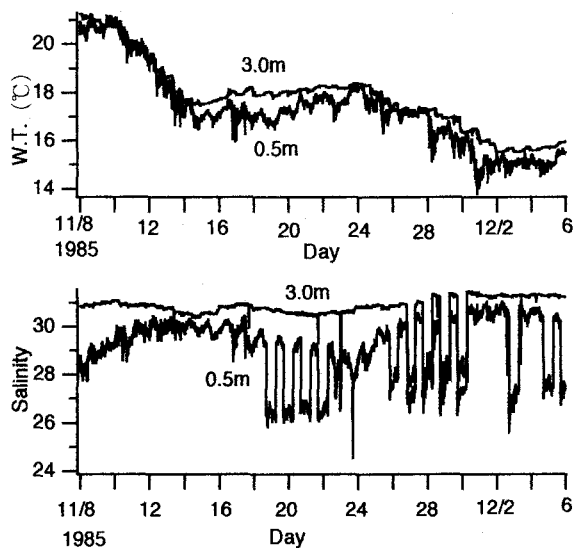


図-2 水温と塩分の時間変化（前期調査）

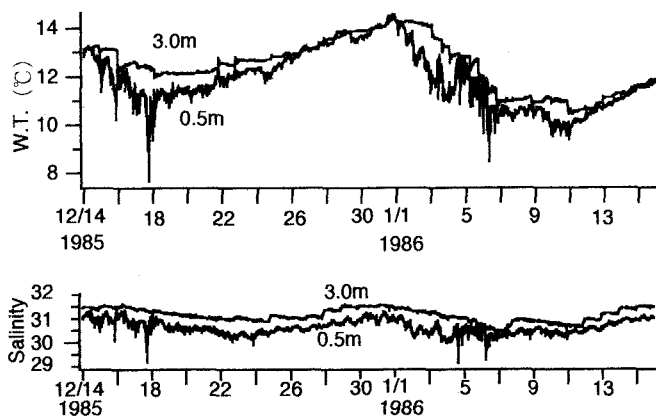


図-3 水温と塩分の時間変化（後期調査）

観測開始した11月8日には28‰台であるが、11月11日には30‰前後まで上昇し、その後は30‰を中心にした周期的な変動となっている。ところが11月18日午後にはそれまでより約3‰も急激に低下し、この状態が13時間続いた後に、塩分は29‰台に回復し、この状態が10時間続いた後にふたたび急低下した。この塩分の急変は11月18日から12月5日にかけて起こっており、このうち11月18日から23日および26日から30日の期間で周期約1日の急変が継続した。

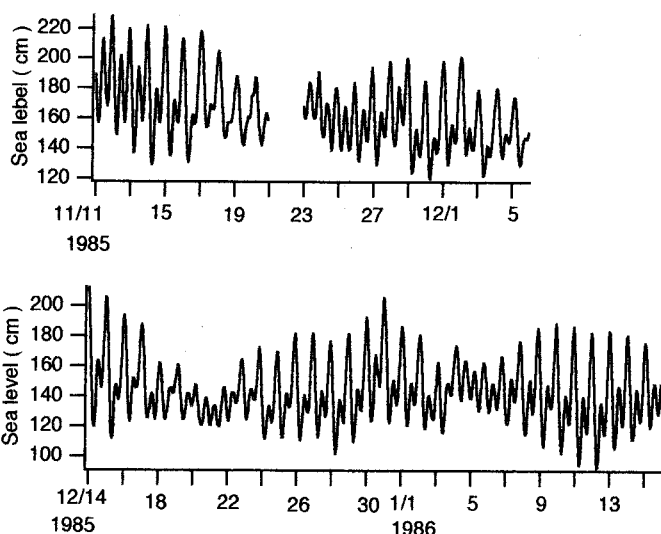


図-4 潮位の時間変化（萩検潮場）

次に下層の塩分をみると、11月8日より26日までの間、概ね30.5‰以上（平均で30.73‰）で変動の小さい安定した値を保っていた。なおこの期間、3度にわたって一時的にその直前の濃度より1‰から4‰低下した箇所がみられる。ところが11月26日の夜から30日までの間、表層と同様に約1日の周期で塩分が急変していた。特に塩分が急激に低下している間、一時的に下層の塩分が表層の塩分よりも低い期間のあることが注目される。

次に潮位変化についてみると、塩分急変の起こる前の一週間の潮位（11月11日から17日までの期間）は高高潮での潮位が220 cm近くと高い。次に急変期（11月18日から12月5日）の潮位をみると、表層のみ急変する時期（11月18日から25日）には、高高潮でも180 cm台と低い。表層と下層の塩分が急変する時期（11月26日から30日）には高高潮の潮位は200 cm前後と再び高くなっている。さらに観測期間の最後の方でみられた表層のみ急変する時期（12月1日から5日）には高高潮の潮位は再び180 cm前後と低い。以上のことから高高潮の潮位が塩分の急変と密接に関連することがわかる。

3.2 後期調査

水温をみると、平均値は表層で11.9℃、下層で12.4℃と表層の方が下層よりも0.5℃低い。前期と比べると両層とも平均で5.4℃低い。塩分をみると平均は表層で30.63‰、下層で31.14‰と下層の方が表層よりも0.51‰高い。前期と比べると両層とも塩分は高くなっている。特に表層の塩分は前期よりも1.51‰も高い。この期間、前期にみられたような塩分急変はない。しかし表層の塩分の時間変化をみると、塩分が一時的にその直前の値よりも1‰以上急激に低下している部分が数カ所みられる。これらの部分では水温も1℃から2℃程度直前の値よりも低下しており、この時期に表層では低塩分で低温の水が存在していた様子がうかがえる。

4. 解析結果と考察

4.1 スペクトル解析

前期と後期の両層における塩分と水温の観測データよりBlackman-Turkey法を使ってスペクトルを求めた²⁾。その結果を図-5に示す。この図より前期の塩分では、両層とも1日周期成分に最も大きなピークがあり、ついで半日周期成分にもピークが認められる。前期の水温では、両層とも

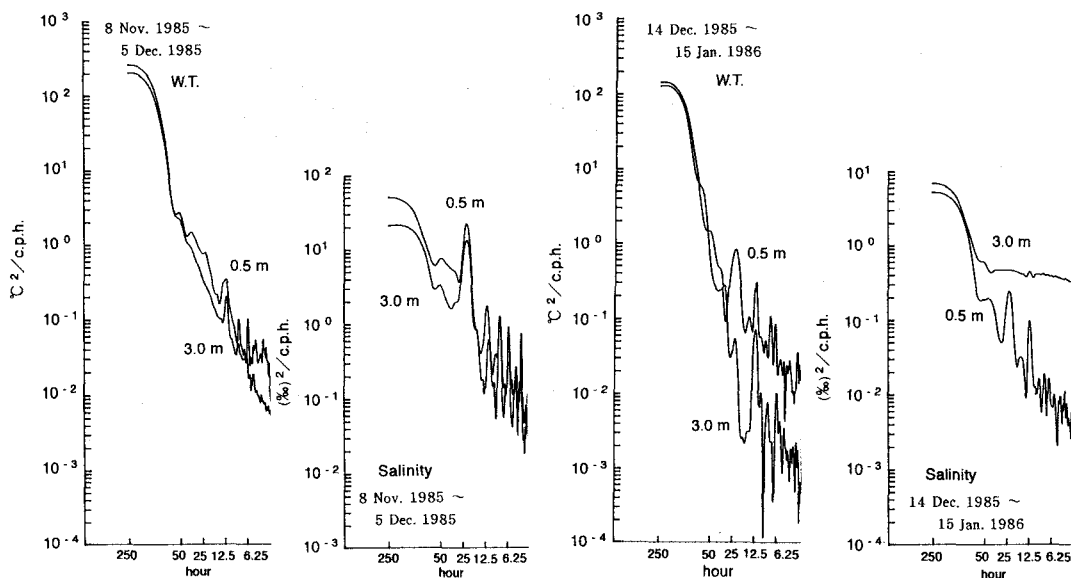


図-5 水温と塩分のパワースペクトル

半日成分に最も大きなピークがあり，1日成分には表層に僅かにピークが認められるが，下層にはまったくない．後期の塩分では，表層では前期と同様に1日周期成分に最も大きなピークがあり，ついで半日周期成分にもピークが認められる．しかし，下層では半日周期成分に僅かなピークが認められる以外にはピークはない．後期の水温では，表層をみると1日周期成分に最も大きなピークがあり，ついで半日周期成分にもピークが認められる．一方，下層をみると半日周期成分に大きなピークがあり，1日周期成分にも僅かなピークが認められる．

4.2 調和分解

水温・塩分の観測期間中の潮位データを1985年11月23日から12月7日，12月14日から28日および1986年1月1日から1月15日までの3期間（各15日間）に分けて調和分解を行なっ

た．求めた各分潮のうち，主太陰半日周潮（ M_2 ），主太陽半日周潮（ S_2 ），主太陰日周潮（ O_1 ）および気象日周潮（ S_1 ）の4つの分潮の振幅を表1に記載した．なお，調和解析はフーリエ級数による方法を用いた³⁾．この表から4分潮の中で各期間とも M_2 の振幅がもっとも大きく，ついで S_1 の順となっている．

また3期間で各分潮に大きな違いはみられない．

4.3 流動の評価

前述のように池内の塩分の変化パターンは外海潮位と密接に関連している．しかし，塩分の変化パターンは池内の流況とより直接的に結びついているはずである．このことを検討するため，池の流動，特に各池を結ぶ水路の流量の変化を求め，これと塩分の変化パターンとの対応関係を調べる．流量の評価は，前報^{4, 5)}の水収支モデルにより行なう．前報の水収支モデルを若干説明する．大池と中の池の水位が低下する時間帯では，両池はいずれも外海や奥の池の水位よりも高くなっている．したがって，この時間帯には大池，中の池の水は外海と奥の池の両方に流れ出しているはずである．一方，奥の池の水位は他の2池の水位よりも急激に低下しており，したがって，この時間帯のうち奥の池の水位が下降から上昇に転ずるまでの間，相当量の奥の池の水が周界に流出してい

表1 潮汐の調和分解
(振幅；cm)

	O_1	S_1	M_2	S_2
11 Nov. 1985 ~ 7 Dec.	10.97	12.04	14.35	6.67
14 Dec. 1985 ~ 28 Dec.	11.75	14.41	15.06	5.18
1 Jan. 1986 ~ 15 Jan.	12.18	13.97	18.21	6.66

ることになる。一方、外海水が大池へ流入する時間帯では奥の池から中の池方向に水が流れる。
 以上の水の動きを図-6のようにモデル化すると、池水位を規定する方程式は次式となる⁴⁾。

$$S_a \frac{dZ_a}{dt} = Q_{ea} - Q_{ab} \dots\dots\dots (1), \quad S_b \frac{dZ_b}{dt} = Q_{ab} - Q_{bs} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 Z_a 、 Z_b は池 A（奥の池）、B（大池+中の池）の水位、 S_a と S_b は各々池 A と B の水表面積、 Q_{ea} 、 Q_{ab} および Q_{bs} は各々周界から池 A へ、池 A から池 B へ、池 B から外海への流量、 t は時間である。 Q_{ab} 、 Q_{bs} および Q_{ea} は簡単のため次のようにおいた。

$$Q_{ab} = \frac{1}{n_{ab}} b_{ab} \left| \frac{Z_a + Z_b}{2} - Z_h \right|^{\frac{5}{3}} \left| \frac{Z_a - Z_b}{L_{ab}} \right|^{\frac{1}{2}} \text{sgn}(Z_a - Z_b) \dots\dots\dots (3)$$

$$Q_{bs} = \frac{\pi}{4} D^2 \left\{ \frac{2g |Z_b - Z_{sea}|}{\zeta_e + \zeta_o + f \frac{L_{bs}}{D}} \right\}^{\frac{1}{2}} \text{sgn}(Z_b - Z_{sea}) \dots\dots\dots (4)$$

$$Q_{ea} = k b_{ea} h_{ea} \frac{Z_e - Z_a}{L_{ea}} \dots\dots\dots (5)$$

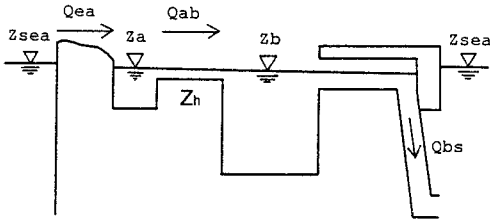


図-6 モデル池

記号および諸量の諸元については前報に詳述されている。図-7は外海水位の測定値（1985年11月11日から21日および11月23日から12月5日までの期間）と水収支式から得られた流量 Q_{bs} 、 Q_{ea} および Q_{ab} の時間変化を示している。まず、急変期の起こる前一週間では Q_{ab} の出入が相当量あったことがわかる。次に急変期間では、低塩分の時期は Q_{ab} の出入りのある時と一致しており、逆に高塩分の時期は $Q_{ab} = 0$ すなわち B 池と A 池の水の出入りの無い時期と一致している。ただし、両層が急変している時期から表層のみ急変期への移行期には Q_{ab} の出入りのある時期に表層の塩分が高くなっている。 Q_{bs} との関係を見ると、両層が急変期の間は振幅の大きい間に低塩分となり、振幅の小さい間に高塩分となっている。一方、表層のみ急変期には振幅の小さい間に低塩分となり、振幅の大きい間に高塩分となり、上述と逆の傾向である。以上のことから、水の動きを考察すると次のようになる。池内水位の上昇期に奥の池より大池に流入した低塩分で低水温の水は、池内水位の下降期に大池内にその一部が閉じ込められ、大池が干潮から満潮の間に測点の表層ではこの水が占め、満潮から干潮の間にこの付近では高塩分の水が占める。さらに池内水位が上昇期にはこのパターンは表層から下層まで拡大している。以上で考察した低塩分で低温の水の動きは前報で考察した地下水の流動と一致する。なお、大池表層と下層では基本的に密度が異なっており、したがって物質収支を考える際には大池内の成層を考慮する必要がある。

4.4 密度

水温と塩分より表層と下層の池水の密度を算出した⁶⁾。その結果を図-8に示す。図をみると、塩分の急変期に一時的に表層よりも下層の池水の密度が僅かながら小さくなっている。これは測点付近の地形が浅瀬から急激に深くなっていることから、コアンダ効果^{7, 8)}の影響が考えられる。

5. まとめ

池内で水温と塩分の連続測定を行ない、表層と下層の塩分が約1日周期で急激に変化する期間のあることを見いだした。この現象の生じる機構について検討した結果次のようなことがわかった。

1) 塩分急変の起こる前の一週間の潮位は上昇期（高高潮で220 cm）にあたり、表層のみ急変する時期の潮位は逆に下降期（高高潮で180 cm）にあたる。また、塩分急変の生じない期間では、その期間の潮位は高高潮でもほとんど200 cm以下である。2) 各池間の流量算出結果より塩分急変の起こる一週間前に奥の池と大池で相当量の水の出入りがあった。塩分急変期では、低塩分の状態にある時間帯に奥の池と大池とで水の出入りがあり、逆に高塩分の状態にある時間帯では両池で水の出入りは無かった。謝辞：本研究の現地調査にあたり、萩市教育委員会、（同）越ヶ浜漁業協同組合の各位と宇部短期大学付属環境科学研究所の諸氏に多大な助力を頂いた。また、国土地理院に貴重な潮位データを提供頂いた。さらに山口大学工学部4年生の酒見正明君には資料整理に協力頂いた。記して深甚の謝意を表す。

参 考 文 献

1) 合屋・松本・城田：塩水池「明神池」の富栄養化におよぼす地下水起源の低塩分水塊の影響, 宇部短大環科研報告, 4, 1983. 2) 日野：スペクトル解析, 朝倉書店, 1983. 3) 松本：河口と沿岸部における表層水温の周期成分とその季節変化, 宇部短大報告, 26, 1989. 4) 松本・羽田野・斎藤：外海と連結された湖沼の水位変動, 水工学論文集, 36, 1992. 5) 松本・合屋・羽田野・斎藤：明神池における水塊の流動と物質濃度の変動, 土木学会論文集, No. 491/II-27, 1994.

6) 気象庁編：海洋観測指針, 日本海洋学会, 1985. 7) 玉井・有田：斜めに放流される表層密度噴流の流軸の曲がりに関する研究, 第29回海岸工学講演会論文集, 1982. 8) 有田・玉井：汀線に対して斜めに放流される噴流の再付着現象に関する実験的研究, 第29回水理講演会論文集, 1985.

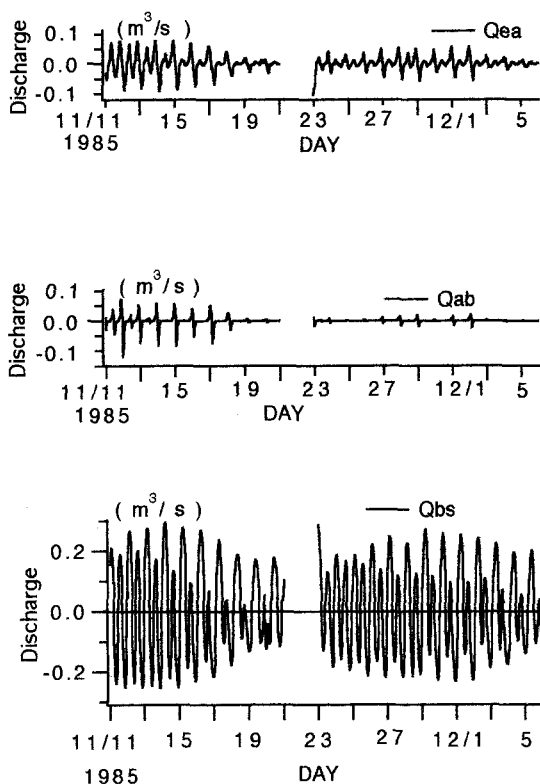


図-7 流量の時間変化

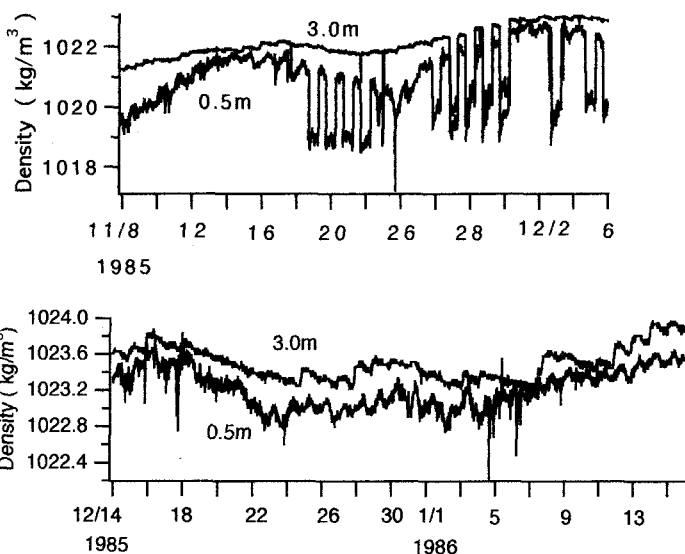


図-8 密度の時間変化