

# 浅い汽水湖における密度成層の破壊特性

## THE BREAK OF DENSITY STRATUM IN SHALLOW BRACKISH LAKES

道上 正規<sup>1</sup>・檜谷 治<sup>2</sup>・矢島 啓<sup>3</sup>

Masanori MICHIE, Osamu HINOKIDANI and Hiroshi YAJIMA

<sup>1</sup>フェロー会員 工博 鳥取大学教授 工学部土木工学科 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

<sup>2</sup>正会員 工博 鳥取大学助教授 工学部土木工学科 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

<sup>3</sup>正会員 博(工) 鳥取大学助手 工学部土木工学科 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

In summer season, density stratum in shallow lakes can be often seen. Once the water has stratified layers, dissolved oxygen in the bottom layers could be easily lack and the water quality becomes worse. If new salt water intrudes into the bottom layers from the sea and strong density stratum has formed, it could not be easily broken. So the water quality may be a serious problem for a long time.

In this paper observations are conducted in Lake Koyama and Lake Togo. They are both brackish and each lake has strong density stratum. During our observation the stratification has broken in one lake in strong wind period, but the other has sustained its stratified structure. To clear the condition of the break of stratum, two parameters (1) *Ri* (Richardson number), (2) *We* (Wedderburn number) are examined. And the difference of the stratified variation in two lakes is discussed in terms of these parameters.

**Key Words :** *Shallow lake, brackish lake, density stratum, salt water, Richardson number, Wedderburn number.*

### 1. はじめに

鳥取県東部に位置し日本最大級の湖山池は、東西4km, 南北2.5km, 表面積6.1km<sup>2</sup>, 平均水深2.8m, 最大水深6.5m, 貯水量1.9x10<sup>7</sup>m<sup>3</sup>の規模を有する楕円形をした塩分濃度100~300ppmの低塩性汽水湖であり、湖山川より日本海に通じている。また、東郷池は鳥取県中部に位置し、表面積4.1km<sup>2</sup>, 平均水深2.1m, 最大水深4.6m, 貯水量0.8x10<sup>7</sup>m<sup>3</sup>の規模を有し、鶴が両翼を広げたような形から「鶴の池」とも呼ばれる塩分濃度3000~4000ppmの汽水湖で、橋津川より日本海に通じている。

これら両池はエビ・白魚・シジミなどの豊かな漁場となっているとともに、リクリエーションの場としても利用されている。しかしながら、近年周辺地域の発展に伴う生活雑排水の増加などにより、水質汚濁が深刻な問題となっている。特に、夏期において快晴で風の弱い日が連続すると、水温・密度成層が形成され底泥付近で低溶存酸素域が発生する。そして、悪化した底泥から栄養塩類が溶出し、さらに水質低下を招くという悪循環になっている。また、このような状況下に流入河川からあらたな海水の侵入があると、底泥付近に高い塩分濃度を示す高密度層ができ、成層は一層強固なものとなる。そして、容易にはこの成層が破壊されなくなり、長期間にわたっ

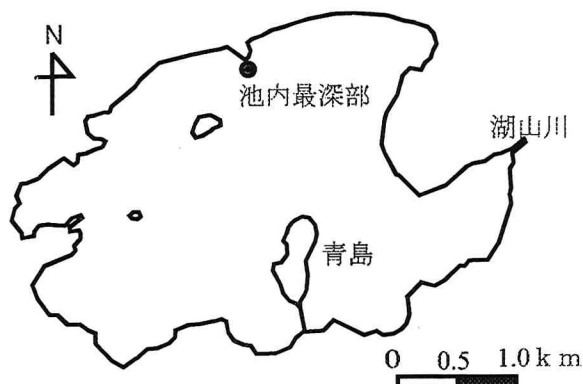
て水質の悪化が生じる。

そこで本研究では、塩分濃度の異なる2つの池において、水温、塩分濃度、DOなどの鉛直分布の観測を行うとともに、湖水採取による栄養塩類の分析を行う。それらの調査結果より、水温・密度成層の破壊過程について気象条件をもとに検討するとともに、成層が存在するときの水質の変化について検討を加える。ただし、過去の定期観測によると、異なる地点における同じ水深位置では、水温・DOなどの値は同程度であるため、成層の破壊が最も起こりにくいと考えられる最深部あるいはその付近で行った定点での観測結果を用いて議論する。

### 2. 調査の概要

#### (1) 湖山池における観測概要

1997年9月2日18:00~8日18:00の6日間にわたり、湖内最深部(水深約6.5m) (図-1(a)参照)において約3時間間隔で水温・塩分濃度(東亜電波工業CM-14P型及び柏木デジタル塩分計S-31型を使用)、DO(東亜電波工業DO-14P型使用)について鉛直方向に20cm毎に観測を行うとともに、9月4日~8日の毎日18:00に同地点において上・下層の採水を行い、窒素およびリンの栄養塩類の測定を行った(セントラルカクHC-1000型及びTNP88M型使用)。



(a) 湖山池の概要



(b) 東郷池の概要

図-1 観測対象池の概要

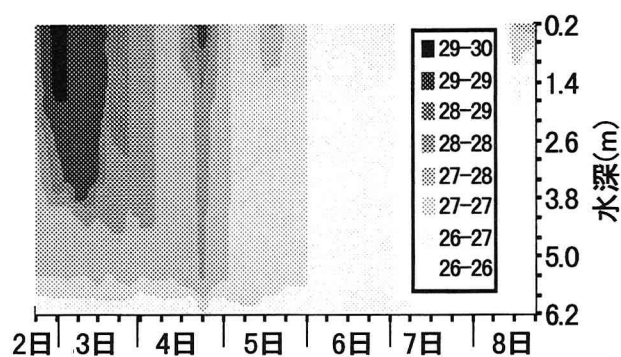
また、9月16日には台風の通過があり、その数日前から強風が生じていたため、9月16日にも水温等の測定を行った。また、10月22日には湖水採水による栄養塩類の調査を行った。

なお、湖山川には水門が設置され海水の流入が制限されており、今回の観測データより観測期間中は新たな海水の流入はなかったものと思われる。

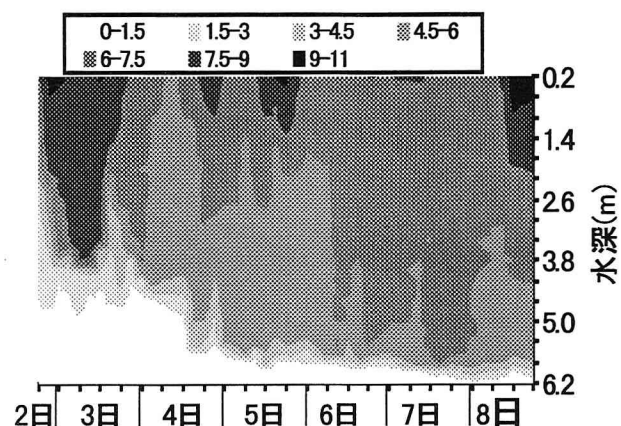
## (2) 東郷池における観測概要

1998年7月8日から湖内中央部（図-1(b)参照）の水深約3.3mの地点に小型水温計(onset社TidbiT使用)を鉛直方向に20cm間隔で16個設置し、10分間隔で水温を自動計測した。また、7月10日、14日および31日の3回同地点で20cm間隔でのDO、塩分濃度などの測定(YSI社SCOOT使用)および10日と31日については上・下層の採水を行い、窒素およびリンの栄養塩類の測定(前述の機器使用)を行った。

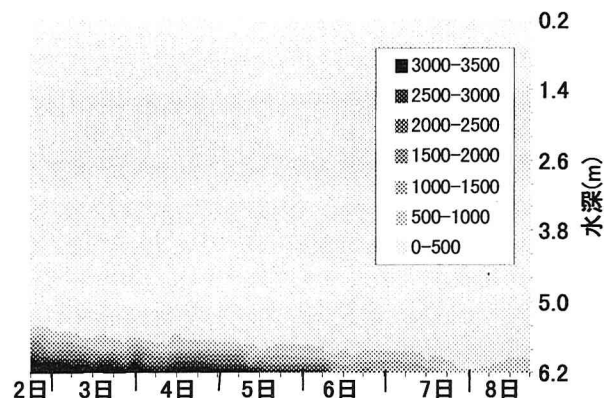
なお、橋津川には水門が設置されており、湖山池と同様に海水の流入制御がなされている。しかし観測期間中、7月11日の降雨の影響で、上昇した池内水位を低下させるために水門を開放した。この時この操作に伴ない、13日ごろから湖内低層部に海水が流入したことが得られた水温データより確認できた(詳細は4章で述べる。).



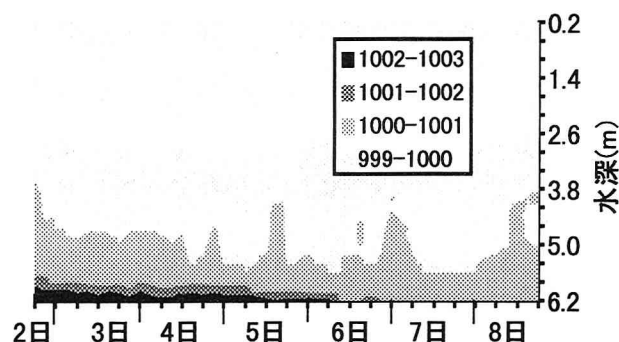
(a) 水温(°C)



(b) DO(mg/ℓ)



(c) 塩分濃度(ppm)



(d) 密度分布(kg/m³)

図-2 定点観測における鉛直分布の時間変化

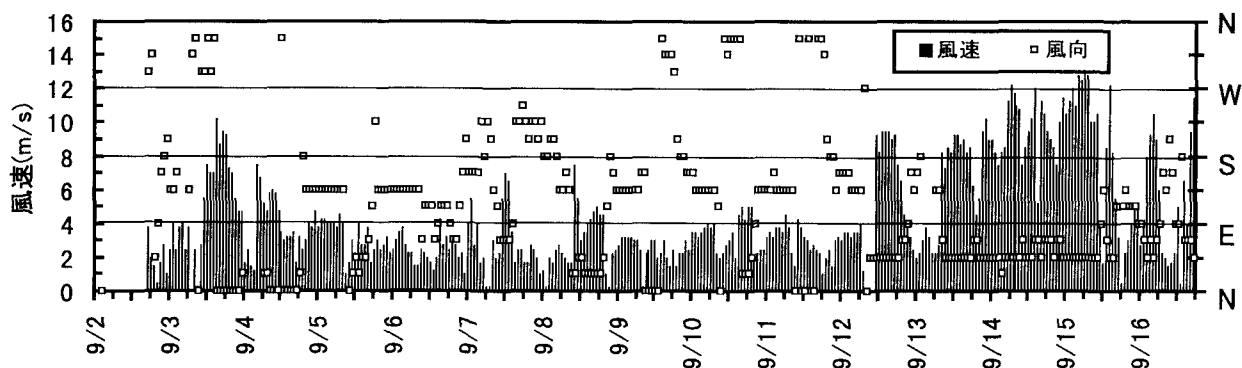


図-3 鳥取空港における風況（1997年9月2日～9月16日）

### 3. 湖山池における調査結果および検討

#### (1) 湖山池における集中観測結果

定点観測における鉛直分布の時間変化を図-2(a)～(d)に示す。調査結果より、調査開始直後は8月下旬の3m/s未満の風速の継続が影響し、上下層で水温差約3～4℃の水温成層が(図-2(a))、また8月中旬に流入した塩水が滞留して塩分成層を伴った密度の二重成層が形成されている(図-2(c))。その後、水温に関しては9月3日以降徐々に鉛直方向に混合している。また、密度に関しては、最下層以外は明確な時間的変化は見られないが、最下層厚約0.2m程度の塩水層は、9月5日の正午からやや減少している(図-2(d))。しかしながら、9月8日でも消滅しなかった。これらの成層破壊の条件として湖山池から約1km北にある鳥取空港での風況(地上10.2m)(図-3)に着目すると、水温成層の破壊時には9月3日～4日の風速約5～10m/sの北風、塩分成層の減衰時には9月5日からの風速約3～5m/sの南風が吹いており、この風による吹送流が影響していると考えられる。塩分成層に関しては、北風より南風の影響を受けているが、この原因は、塩水の滞留する最深部が湖山池の北側に位置しており、南方向からの風の場合に吹送流が卓越するためであると考えられる。

つぎに、同地点での1週間後の9月16日の鉛直分布調査結果を図-4に示す。図からわかるように最下層の塩分層は完全に消滅している。この間では、9月12日～15日の台風時の風速10m/sを越える北東の風が発生しており、この風による流れによって、最下層の塩分成層が破壊されたものと思われる。

#### (2) 塩分・水温成層状態とDOの鉛直分布変化

DOの鉛直分布は、調査開始直後は水温と同様、上下層における差が大きく、低溶存酸素域の層も厚い(図-2(b))。そして、風の影響により湖水が循環し始め、水温成層が徐々に破壊されるにつれ、DOも同様に鉛直方向に混合されているが、水温が上下層において一様になっても、低溶存酸素域は減少はしているが残っている。これ最下層に滞留する塩水層により、湖水が循環を妨げ

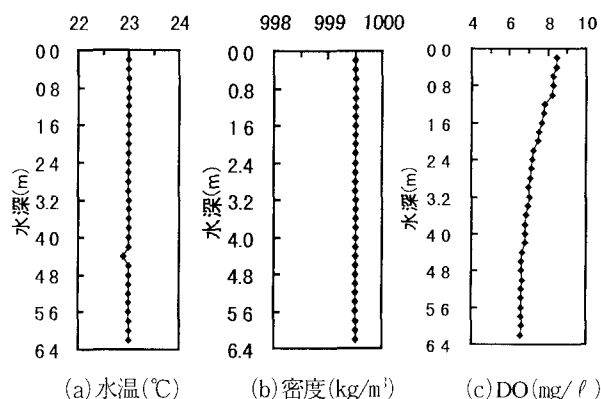


図-4 1997年9月16日の観測結果

表-1 湖山池最深部における水質の変化

| 日付       | 上 層  |      |       |      | 下 層  |      |       |      |
|----------|------|------|-------|------|------|------|-------|------|
|          | DIN  | T-N  | PO4-P | T-P  | DIN  | T-N  | PO4-P | T-P  |
| 9月4日     | 0.14 | 0.99 | 0.02  | 0.13 | 0.61 | 2.75 | 0.06  | 0.10 |
| 9月5日     | 0.18 | 0.87 | 0.09  | 0.14 | 1.03 | 2.13 | 0.08  | 0.13 |
| 9月6日     | 0.33 | 0.93 | 0.03  | 0.07 | 0.88 | 1.21 | 0.02  | 0.05 |
| 9月7日     | 0.12 | 0.63 | 0.05  | 0.14 | 0.82 | 1.40 | 0.07  | 0.13 |
| 9月8日     | 0.12 | 2.36 | 0.07  | 0.38 | 1.23 | 3.11 | 0.06  | 0.31 |
| 以上5日間の平均 | 0.18 | 1.16 | 0.05  | 0.17 | 0.91 | 2.12 | 0.06  | 0.14 |
| 10月22日   | 0.14 | 4.10 | 0.01  | 0.04 | 0.08 | 3.73 | 0.01  | 0.02 |

(単位: mg/l)

られているためだと思われる。このことから、湖山池において塩水の流入がなければ、水温成層が破壊される風況により、DOも混合されるが、塩水の流入があると、それ以上の塩分成層を破壊する風況でなければ、DOは完全混合しないと考えられる。

#### (3) 水質変化

表-1に水質の分析結果を示す。観測期間中強固な密度成層が形成されており、下層において特にDINが高濃度であった。また、リンの濃度もやや高かった。しかしな

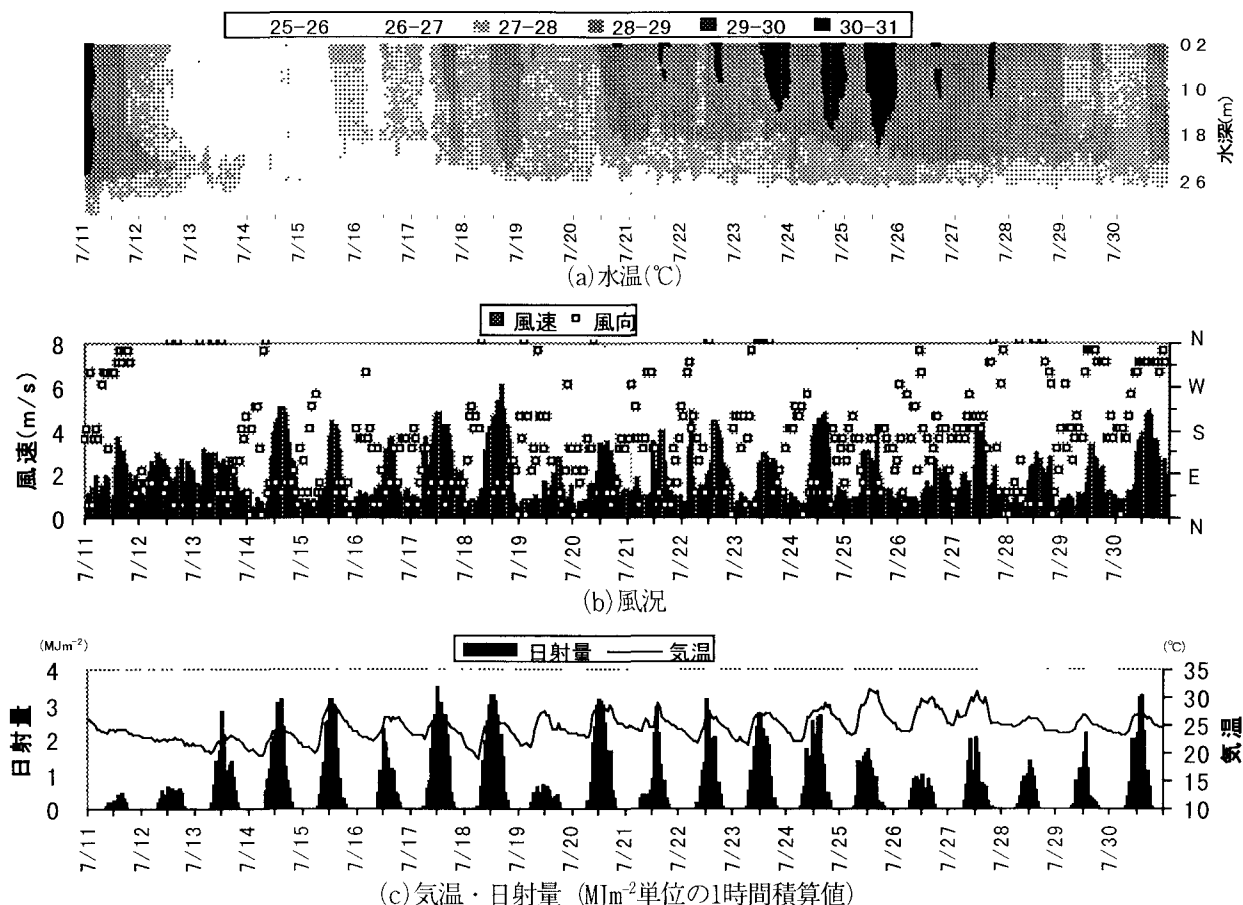


図-5 東郷池における観測結果および気象概況データ (1998年7月11日～7月30日)

がら、密度成層破壊後の10月22日の観測では、リンの濃度は著しく減少し、水質の改善がみられた。また、DINも上・下層において減少した。しかしながら、有機窒素(T-N値-DIN値)は増加していた。この理由については、今後詳細な調査が必要である。

#### 4. 東郷池における調査結果および検討

##### (1) 東郷池における観測結果

東郷池における観測結果を、橋津川沿いに設置されている農業用気象観測所から得られた気象データとともに図-5(a)～(c)に示す。これらの図より水温の変化は気温あるいは日射量の変化と同様な日変動を示しており、7月20日から25日のように日射量の多く、風速が弱い日が続くと、日中30℃まで上がった水温は夜間28℃程度まで下がる。この時、日中昇温する範囲は最大約2mまで達し、混合層が毎日発達しているのが確認できる。しかし、それ以深は比較的一定の水温を保っている。

図-5(b)に示すように、観測期間中風速(地上6m)は弱く、10m/sを超える日はなかったものの、風速5m/s前後の値を記録した7月18日、19日の水温変化をみると、約2.5mまで水温一定の層がみられ、混合層がかなり発達している

ことがわかる。しかし、この程度の風速では最下層まで水体が混合することはなかった。

7月11日には日雨量93mmを記録したが、東郷池に流入する河川の洪水到達時間は1～2時間であることから、7月13日からの水温の低下は、11日から13日かけての気温の低下にともなって生じたものと考えられる。ここで注目したいのは、7月13日からの最下層部での水温低下である。これは先に述べたように、橋津川設置の水門操作に伴い、日本海から低温で高密度の海水が流入してきた結果であると考えられる。

##### (2) DO、密度の状況

7月10日、14日、31日に現地調査を行った際の、DO、塩分濃度、密度の鉛直分布を図-6に示す。

図-6(a)に示すように、DOは7月10日は下層まではほぼ一定であった。しかし、強い成層が発達してきた7月13日以降である7月14日は2m以深で嫌気状態となっている。7月18日と19日には5m/s以上の少し強い風が吹き鉛直混合が進み密度成層が弱まったこともあり、7月31日の時点では、2.6mより浅い上層ではDOが改善したが、それより深い層ではさらにDOが低下し、強い貧酸素状態となっている。このように浅い湖といえども、いったん強い成層が形成されると水塊が容易には混合せず、水質

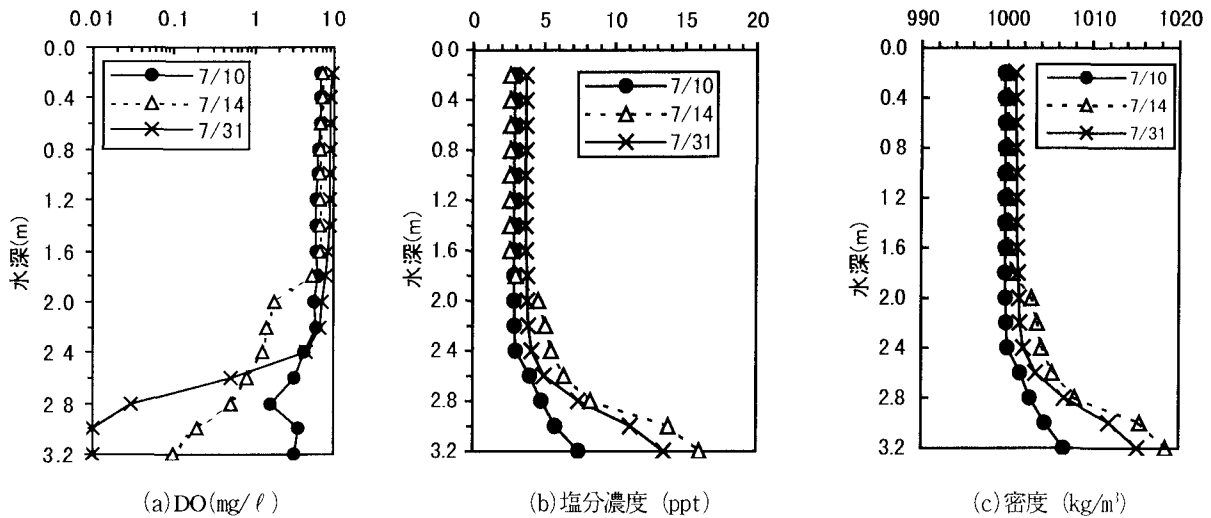


図-6 東郷池での現地観測による鉛直分布

の悪化につながる事がわかる。

### (3) 水質の変化

7月10日と31日に採水して測定した栄養塩類の値を表-2に示す。この表からわかるように、強い密度成層が形成された期間が長くなるにつれて、上・下層ともリンの濃度が上昇している。特に下層でのリンの濃度上昇が大きいことから、下層からのリンの溶出が推測される。

## 5. 成層破壊に関する検討

### (1) 成層破壊の評価パラメータ

2成層湖の風応力に対する応答特性をみるために、成層度を示す指標であるRichardson数と界面の挙動特性を示す指標であるWedderburn数の2つのパラメータに着目して検討を行った。これら2つのパラメータの定義はそれぞれ次式のとおりである。

$$\cdot \text{リチャードソン数 (Ri)} : Ri = \frac{\Delta \rho g h}{\rho_u u_*^2} \quad (1)$$

$$\cdot \text{Wedderburn数 (We)} : We = Ri \times 2 \frac{h}{L} \quad (2)$$

ここで、 $\Delta \rho$ は上層と下層との密度差、 $g$ は重力加速度、 $h$ は上層の水深、 $\rho_u$ は上層の密度、 $u_* = \sqrt{C_D \rho_a U_{10}^2 / \rho}$ 、 $C_D$ は水面の抵抗係数（ここでは、従来の研究で一般的に用いられている値 $1.3 \times 10^{-3}$ とした）、 $\rho_a$ は空気密度、 $U_{10}$ は10m高度での風速（ここでは、先に示した、湖山池では鳥取空港、東郷池では農業用気象観測所のデータを用いた）、 $\rho$ は上層の密度、 $h$ は上層の水深、 $L$ は湖の長さ（直径に相当する長さ、湖山池の場合： $L=2.94\text{km}$ 、東郷湖の場合： $L=2.28\text{km}$ を用いた。）

Spigel・Imberger<sup>1)</sup>は、 $Ri$ とアスペクト比 ( $L/2h$ ) の関

表-2 東郷池最深部における水質の変化

|       | 上 層  |      |       |      | 下 層  |      |       |      |
|-------|------|------|-------|------|------|------|-------|------|
| 日付    | DIN  | T-N  | PO4-P | T-P  | DIN  | T-N  | PO4-P | T-P  |
| 7月10日 | 0.48 | 1.03 | 0.03  | 0.09 | 0.51 | 0.90 | 0.04  | 0.12 |
| 7月31日 | 0.16 | 0.60 | 0.12  | 0.22 | 0.32 | 0.65 | 0.16  | 0.32 |

(単位：mg/l)

係から流動形態の分類を行い、レジームAからDの4つに区分している。これによると、全層で混合がおこるのは  $Ri$  数がアスペクト比以下（湖山池の場合約850、東郷池の場合約450）のレジームAあるいはBであることが条件である。また、Thompson・Imberger<sup>2)</sup>によると界面が風上側の水表面に達する限界の  $We$  値は  $We=3 \sim 4$  であると示されている。ただし、 $Ri$  数がアスペクト比以下 ( $Ri < L/(2h)$ ) という条件は、これを変形すると、 $Ri \times 2h/L (= We) < 1$  となるので、 $We$  数が1より小さい条件と等しくなる。

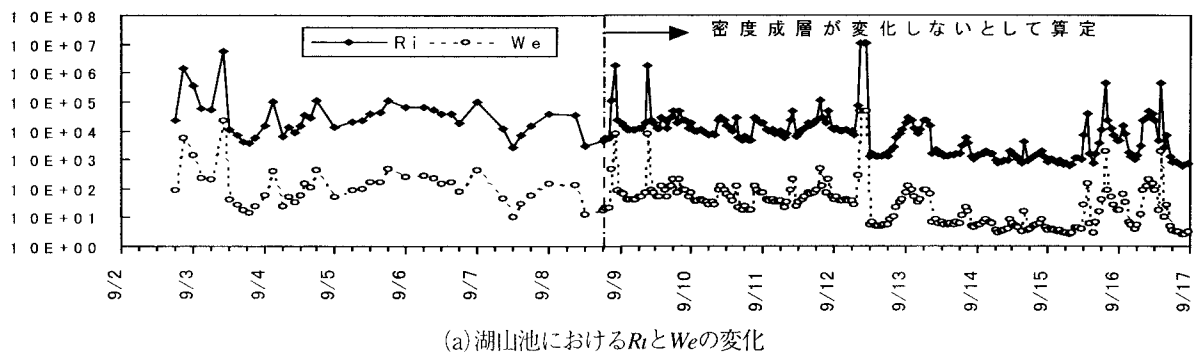
### (2) 湖山池におけるパラメータの変化

湖山池におけるパラメータの変化を図-7(a)に示す。ただし、9月8日18:00以降の密度成層のデータがないので、それ以降同じ成層状態が維持されたとして推定した値を示している。

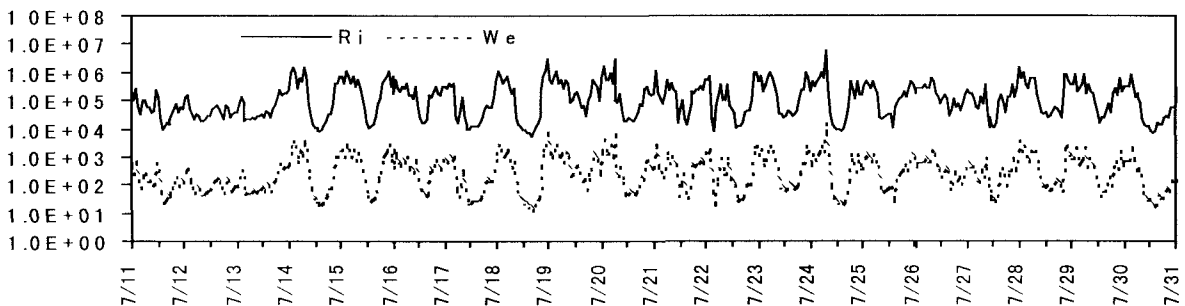
この図から、9月12日の昼頃までは  $Ri$  は約10,000を越え、 $We$  も10を超えており、容易には混合しない状態であることがわかり、観測の結果を裏付けている。また、それ以降風速の増大とともに、2つのパラメータの値は減少し、9月15日の2:00ごろから  $Ri < 850$ 、 $We < 3$  となっている。すなわち、このときに成層は完全に破壊されたのではないかと推定される。

### (3) 東郷池におけるパラメータの変化

図-7(b)に結果を示す。この図からわかるように全期間で  $Ri$  は10,000を超えており、 $We$  も10を下回ることがな



(a)湖山池における $Ri$ と $We$ の変化



(b)東郷池における $Ri$ と $We$ の変化

図-7 湖山池と東郷池における $Ri$ と $We$ の変化

く、成層の破壊の条件に達していないことがわかる。また、このとき、成層を破壊する風速を算定してみると、 $Ri$ 数の条件では約18m/sの風速が、 $We$ 数の条件では約13m/sの風速がそれぞれ必要であった。この風速は夏期の通常の風況で得ることは難しく、台風などに伴う強風がない限り成層が破壊されないことが明らかとなった。

## 6. おわりに

本研究は、浅い汽水湖における密度成層場の破壊について、現地観測を行い、その特性について検討を行った。また、成層場が存在するときの水質の変化についても検討を加えた。

本論文で得られた成果をまとめると次のようになる。

- (1) 湖山池では、夏期の成層を破壊する条件として、水温成層は風速約5m/s以上、塩分成層は風速約10m/s以上であることが明確になった。
- (2) 湖山池・東郷池においても成層が形成されると、DOが減少し水質の悪化が生じ、リンなどの栄養塩類の濃度が増加する。しかし、この水質悪化は成層の破壊とともに容易に回復することが湖山池で確認できた。
- (3)  $Ri$ 数と $We$ 数を用いて、成層場の風応力による破壊条件を調べた結果、今回の観測において、湖山池では破壊条件が発生する可能性が確認されたが、東郷池では確認されなかった。この結果は観測結果と一致するものであり、これら両パラメータは、浅い汽水湖において成層の破壊を予測するのに適していることが確認できた。

ただし、アスペクト比を考慮していない $Ri$ 数と考慮している $We$ 数のどちらがより適しているかを判断するためには、今後、多くの湖を対象にした観測結果が必要である。

本研究においては、現地観測で得られたデータをもとに検討を加えたが、今後も観測を継続し、異なった時期における成層状態の変動特性を検討するとともに、水質変化のデータもさらに蓄積し、リン・窒素の増減についても詳細な検討を加えていきたいと考えている。また、3次元の数値計算も行い、成層の破壊についてシミュレーションを用いた検討も行いたい。

謝辞：本研究は、岡山大学環境理工学部大久保賢治助教授との共同研究で行われ、一部データの提供などしていただいた。また、現地観測およびデータ整理は、やまこう建設山本真一氏（当時大学院生）、学部学生宇田康弘君らをはじめとする研究室諸君の協力を得た。さらに、気象データについては、鳥取地方気象台およびケーブルビジョン東ほうきより提供いただいた。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) Spiegel, R.H. and Imberger, J.: The classification of mixed-layer dynamics in lakes of small to medium size, *J Phys. Oceanogr.*, Vol.10, pp.1104-1121, 1980.
- 2) Tomson, R.O.R.Y. and Imberger, J.: Proc. Int. Symp. Stratified Flows, 2nd, pp.562-570, 1980.

(1998.9.30受付)