

## 網走湖における流動と成層界面の 挙動に関する観測

Field Observations of Internal Seiche in Lake Abashiri

平野道夫\*・山田 正\*\*・井出康郎\*\*\*

By Michio HIRANO, Tadashi YAMADA and Yasuro IDE

The purpose of this study is to make an improvement plan of water hazards caused by AOSHIO, the ascending of the anoxic water from the bottom to the surface, at the Lake Abashiri in Hokkaidou. The field observation shows the following results;

- 1) The lake is vertically divided into two layers, the lower layer with salt waters and the upper with fresh waters.
- 2) The interface between two layers shows the regular oscillation of internal waves on gentle wind.
- 3) The interface shows the uniform decline toward the wind direction on strong wind.

### 1. はじめに

近年、琵琶湖の南湖や霞ヶ浦など、都市部近郊に位置する多くの湖沼においては、湖水の富栄養化に伴う様々な水質障害の問題が生じて来ている。その多くはアオコや淡水赤潮さらには異臭を発するフォルミディウムの発生など植物プランクトンの異常増殖がもたらすものであり、一般に青潮と呼ばれる現象の発生報告は希である。

青潮とは水域の底層部に形成された無酸素水塊が、表層に上昇することにより引き起こされる現象であり、その弊害は赤潮と同様に、発生した水域全体を短時間で貧酸素状態にし、その水域に生息する生物を死滅せしめることにあり、とりわけ漁業関係者には甚大な被害をもたらすこととなる。青潮発生の報告は東京湾などの内湾域で多く認められるが、前述したように、湖沼における発生は希である。しかし、陸水面に発生した場合、その閉鎖性ゆえに生物に与える影響は大であるといわざるを得ない。

本研究は、陸水面において希な青潮現象が頻繁に発生している北海道の網走湖を対象として、青潮発生機構の解明とその水質障害の克服の検討を目的として行ったものであり、本論文は現地調査により明らかにされた湖内環境の概要について報告するものである。

\* 北海道開発局 旭川開発建設部 次長  
(〒070 旭川市8条12丁目)

\*\*正会員 工博 北海道大学助教授 工学部 土木工学科  
(〒060 札幌市北区北13条西8丁目)

\*\*\* 北海道開発局 留萌開発建設部 治水課長  
(〒077 留萌市寿町1丁目68)

2. 湖環境の概況

網走湖は北海道東部の網走川下流部に位置する湖である。主な諸元と位置を表-1 および図-1 に示した。本湖の特徴は、元は海であった海跡湖であり、さらに、現在でも海水の供給があることから汽水湖となっているところにある。また、“ワカサギ・シラウオ・シジミ”等の年間漁獲高が4億円近く<sup>(1)</sup>あり日本の湖の中では数少ない付加価値を持つ湖でもある。しかしこれまでに、たびたび水質災害が発生し、とりわけ昭和62年の青潮発生時には、水産資源に多大な被害をもたらしている。

表-1 網走湖の諸元<sup>(2)</sup>

| 項 目   | 諸 元                  |
|-------|----------------------|
| 成 因   | 海 跡 湖                |
| 水 質   | 汽 水                  |
| 面 積   | 31.4 km <sup>2</sup> |
| 標 高   | 0.0 m                |
| 周 囲 長 | 42.0 km              |
| 最大水深  | 16.1 m               |
| 平均水深  | 6.1 m                |
| 湖 沼 型 | 富 栄 養                |
| 透 明 度 | 2.0 m                |
| 備 考   | 冬 期 に は 全 面 結 氷      |

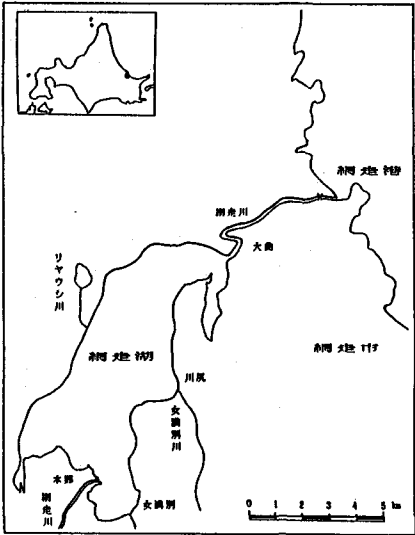


図-1 網走湖の位置

3. 調査結果

3.1 観測方法

観測は1987年 9月29日から10月23日にかけて行った。観測点・観測水深は湖内3点、河口1点の計4点である。また、それぞれの測点における測定項目についても併記した。計測機器の設置は波などの水位変化の影響を受けないように、湖底面からパイにより立ち上げる方法を採用した。

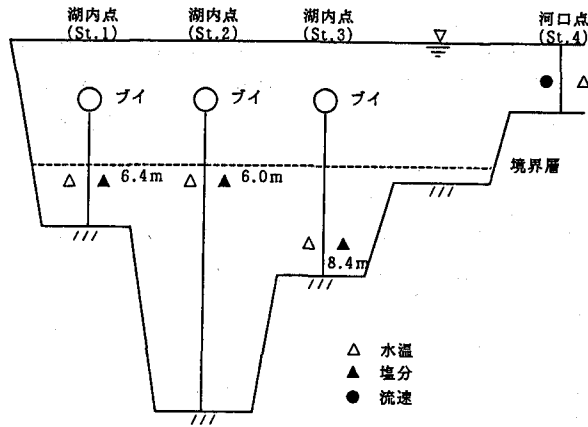


図-2 a 観測水深

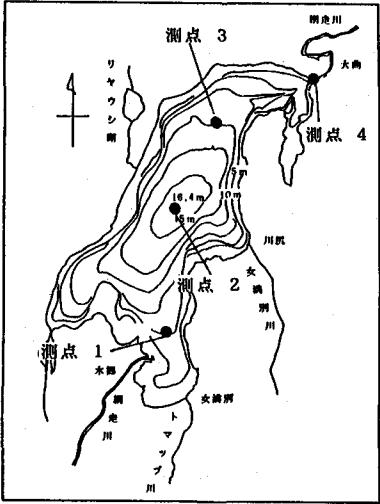


図-2 b 観測点

### 3. 2 水温・塩分・溶存酸素量の鉛直分布と密度成層

網走湖の特徴は、図-3に示すように明瞭かつ強固な密度成層を形成していることである。

1987年10月1日に行った水温・塩分・D Oの鉛直観測記録(図-4)によれば水温・塩分とも水深6m付近で大きく変化しており、低濃度塩水層と高濃度塩水層の2つに明瞭に分離・成層している。なお、本論文においては、以後、この低濃度塩水層を淡水層、高濃度塩水層を塩水層と記述する。

淡水層(水深0~6m)における水温は、表層部で最も高く17.5℃、徐々に低下して2m層で15.9℃となり、ここに小さな躍層が見られる、それ以深はほぼ一定で2~6m層では15.7~15.8℃となっている。塩分は、表層部で6.85、5.5m層で6.97と若干深層のほうが高くなっているが、その差は約0.12とほぼ一様である。

塩水層(水深6~16m)では水温、塩分とも大きく変化している。水温は6m層で15.8℃、10m層で7.3℃、15m層で6.3℃と急激に低下、一方、塩分は5.5m層で6.97であったものが6m層で13.62と急激に上昇し、さらに、10m層で21.25、15m層で23.06と深部へ向かうほど大きくなっている。

これらの水温・塩分値から淡水層と塩水層の密度を海水の状態方程式<sup>(3)</sup>を用いて求めると、淡水層では1003.5kg/m<sup>3</sup>、塩水層では1014~1017kg/m<sup>3</sup>となり、その密度差は10~15kg/m<sup>3</sup>となる。すなわち、淡水の湖沼などでみられるような水温差による密度成層(4℃と25℃の淡水の密度差は約2.9kg/m<sup>3</sup>)の状態と比較すると網走湖の成層状態は極めて明瞭かつ強固であるといえる。

また、溶存酸素量(D O)をみると、淡水層の10~12mg/lに対して、塩水層では0mg/lと完全な無酸素状態となっている。通常、湖沼等における酸素の供給は、湖水面での波浪による擾乱、流入河川水、植物プランクトンの光合成などが担っており、深層においても湖水の循環により常時供給が認められ、網走湖においても淡水層では先に述べた種々の酸素供給により、塩淡水境界付近では表層とあまり変わらないD Oが認められる。しかし、塩水層においては強固な密度成層のために淡水層からのD Oの供給が期待できず、生化学的な作用により酸素が消費され、結果として無酸素状態が形成されたものと考えられる。さらに、網走湖において頻繁にみられる青潮現象は、この塩水層水が湖水面に上昇することによって発生するものであると推論できる。

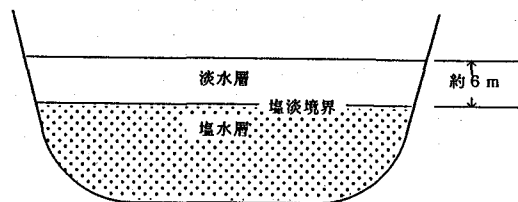


図-3 網走湖の2層構造

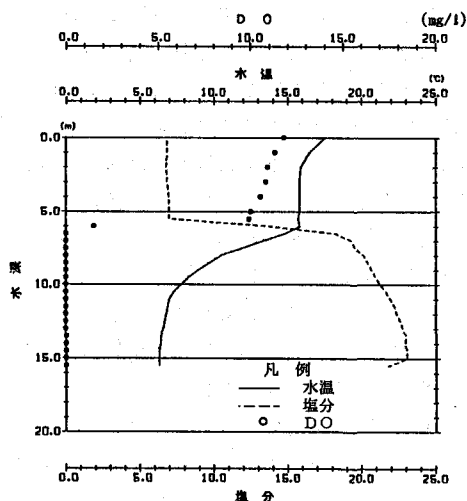


図-4 水温・塩分・D O鉛直分布  
(1987年10月1日・測点2:湖心部)

### 3. 3 水温・塩分の時間変化と境界層の挙動

湖沼の水塊に作用する物理的な外力としては、流入の流量および風が考えられる。このうち、風は、一般に青潮発生との間に深い関わりがあるとされている。このため、淡水層と塩水層の間の境界層付近の塩分・水温の連続観測を行い、その時間変化と風況との関係について解析を行った。

風が湖面に及ぼす影響は周知のごとく風速の強弱および吹送距離により決定される。網走湖の場合、南北

に長い湖であるので、南もしくは北風の時にほぼ最大吹送距離となる。そこで、観測記録の中で、このような風向において、風速が小さく風が湖内に与える影響が少ない場合、ならびに、風速が速く影響が大きいと考えられる場合の2時期を選んで、それらの観測結果について以下に示す。なお、風況の記録は網走湖の南に位置する女満別空港のものである。

#### (a) 弱風時の湖内状況と内部セイシュ

##### ① 境界層付近の水温・塩分の時間変化

図-5は9月30日16時から10月2日6時までの風況および水温・塩分の記録であり、風速は0~2 m/sと弱風である。ここで特徴的なのは、測点1(水深6.4 m)と測点3(水深8.4 m)の塩分が6.5~17.0の間で周期変動しているのに対して測点2(水深6.0 m)では17.5前後でほぼ一定の値となっているところである。

水温は塩分ほど変動幅が大きくなく、その変化が明瞭ではないが、全測点で塩分が高い場合に低く、低い場合に高くなる。これは、前節で述べた水温・塩分鉛直分布に整合するものである。

測点1と3の塩分の経時変化の関係をみると、測点1で高いときに、測点3では逆に低くなっており、8~9時間の周期で両測点とも振動している。このような周期的な塩分の変動は、境界層の位置が変化することによって生じる内部セイシュによるものと考えられる。すなわち、淡水層と塩水層の間に位置する境界層が図-6に示すように、湖心部を節点として振動することにより生じ、振動の腹に近い測点1、3では周期的に塩分や水温が変化し、節点に近い測点2においてはほとんど変化がないという現象である。

##### ② 内部セイシュの検証

内部セイシュは、密度の異なる2層からなる水域において通常のセイシュと同様に境界面にできる自由定常波である。図-6は第1モードによるものであり、網走湖に生じている現象はこれと同様のものであると考えられる。そこで解析的に内部セイシュの周期を計算することにより検証を試みた。

内部セイシュの周期計算は、境界面の長さ上・下層の密度および層厚を与えることにより次式にて求めることができる<sup>(4)</sup>。

$$T = \frac{2 \cdot L}{n} \sqrt{\frac{\rho}{g(\rho - \rho')}} \times \frac{(h + h')}{h \cdot h'} \quad \text{----- (1)}$$

ここで、

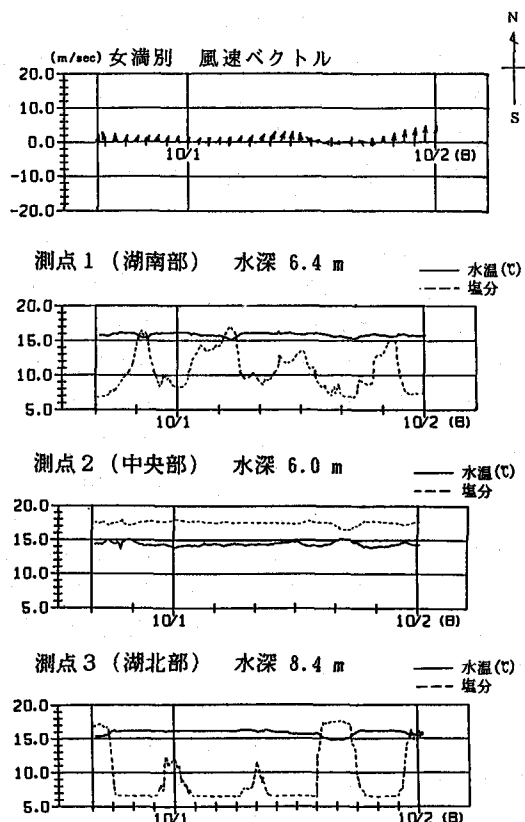


図-5 塩淡水境界層における弱風時の水温・塩分時間変化

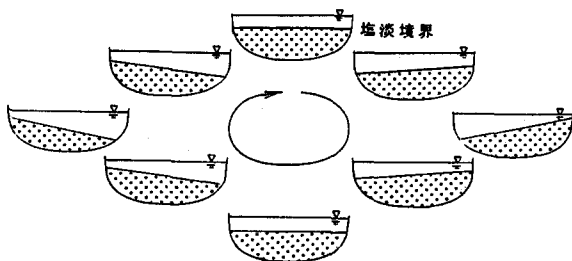


図-6 内部セイシュによる塩淡水境界層の挙動

(第1モードの場合)

T : 周期(sec)

L : 境界面の長さ(m)

g : 重力加速度 (9.8m/sec<sup>2</sup>)

h ,  $\rho$  : 下層の層厚(m)と密度(kg/m<sup>3</sup>)

h' ,  $\rho'$  : 上層の層厚(m)と密度(kg/m<sup>3</sup>)

n : モード

塩水と淡水の境界層は水深 6 m に位置しており、この場合、振動の方向を湖の長軸に取ると境界面の長さ L は約 8,000m となり、また、この軸上の平均水深は 11.7m となる。鉛直観測記録よれば、上層の層厚と平均密度は 6.0 m, 1004.4kg/m<sup>3</sup>、下層のそれは 5.7 m, 1015.0kg/m<sup>3</sup>であり、これを式(1)に代入すると周期は 29,252秒(≒8.1時間)となり、観測記録の時間変化から得られた周期 8~9時間とほぼ一致する。

#### (b) 強風速時の湖内状況と境界面の傾斜

図-7は、10月1日の18時から3日6時までの風況および塩淡水境界層付近の水温・塩分の観測記録であり、前節の弱風時の記録に連続するものである。この間、風向は南南西または南で、網走湖の長軸方向にほぼ平行に吹いており、風速は2日の6時頃までは2 m/sと比較的弱い風であるが、7時以降、徐々に強まり8~16時の8時間以上にわたって5~9 m/sの強風が連吹している。

測点2(湖中央)における水温・塩分の経時変化は、弱風時と同様、ほぼ一定で塩分は17.5、水温は14.5℃前後の値であり、測点1と3においては、塩分が大きく変化し、2日6時頃までは前項で述べた内部セイシュと考えられる周期性を有した変動を示している。しかし、6時以降はこの周期性が認められなくなり、風上側の測点1では常時塩分が高く、風下側の測点3では、それとは逆に常に低い状態となっている。風速がピークを過ぎる2日の14時以降は、風上側の測点1において徐々に塩分は低下してくるが、測点3については3日の6時頃まで一貫して低い塩分を記録している。これを境界層の動きとして捉え、風速が上昇するに従って、風下側の境界は低下し、逆に、風上側のそれは上昇するという状態を呈しているものと考えられる。

この現象は、図-8に模式的に示すように、水面が風の吹き寄せによって上昇することにより、それに応じて密度境界面が低下するために起こったと考えられる<sup>(5)(6)</sup>。この境界面の低下は密度差により増幅され、長い吹送距離を持つような状況では、相当量に達するものと推定される。風の吹き寄せによる境界面上昇・降下は、青潮の発生と密接に関わってくる問題であり、今後、詳細な検討を要する課題である。

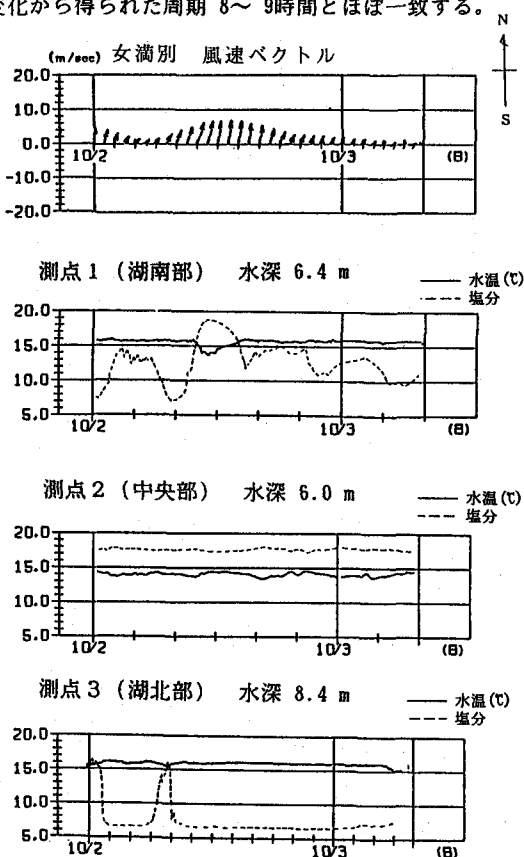


図-7 塩淡水境界層における  
強風時の水温・塩分時間変化

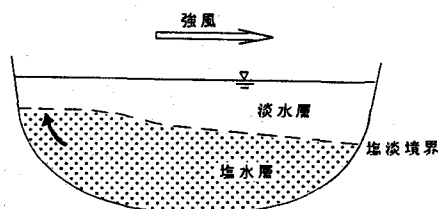


図-8 風による水面の上昇と密度境界面の低下

### 3. 4 海水の流入と塩水層の形成

海水は湖の北端にあたる網走川を流入路として、湖内に浸入する。通常は湖水面の方が海水面よりも高くなっているが、大潮の前後には高潮時に海水の湖内への流入が認められる。図-9に湖内への海水流入が認められた10月1日～3日までの測点4における塩分、流速および湖内と海域の水位の経時変化を示した。

測点4は海域から約7 km、湖からは約50 mのポイントにある。この記録によれば、逆流は海水面が湖水面よりも高くなった時点で即刻起こっている。しかし、しばらくの間は低塩分水、即ち、湖から流出したと考えられる湖水が逆流し、その後、海水面がピークを迎える時点で塩分は徐々に上昇し始め、湖水面が海水面よりも低くなり、流れが逆流から順流となる時点で約25となっている。その後、塩分は直ちに湖の上層水と同じ値となっている。

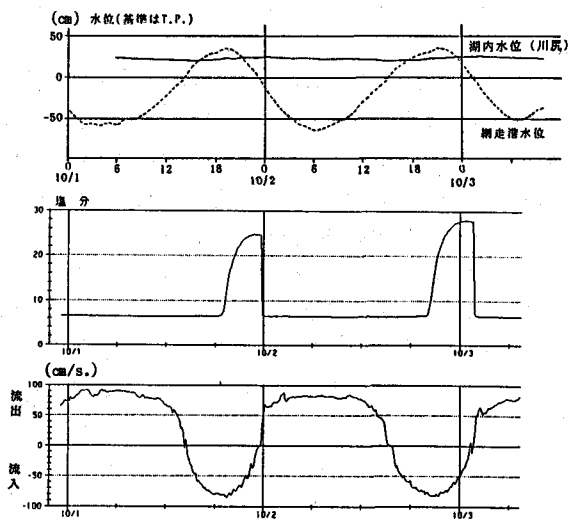


図-9 海水流入観測(測点4)

### 4 おわりに

本研究において網走湖における湖内の物理的現象のうち以下の観測事実が認められた。

- ① 水温・塩分の鉛直分布観測結果から、明瞭な密度成層をなしている。
- ② 上層と下層の境界面において弱風時には内部セイシュと考えられる周期性のある変動が観測された。
- ③ 強風時における挙動において、風下側での境界面の降下と風上側での上昇が観測された。
- ④ 湖口における塩分・流速観測記録から海水の流入が認められた。

このなかで、特に青潮発生に深く関わる問題として、強風時の境界面上昇・降下が挙げられる。今後はこの、強風時の湖内物理現象について詳細に検討を行っていくつもりである。

なお、本論文の資料の取りまとめにおいては 北海道開発局 網走開発建設部 治水課、(財)河川環境管理財団 北海道事務所、国際航業(株)海洋エンジニアリング事業部の協力を得ている。

### [参考文献]

- 1) 網走市：網走市統計書 昭和63年版、網走市企画調整部企画課、昭和63年1月25日
- 2) 国立天文台編：理科年表 1990年、丸善株式会社
- 3) 海洋資料センター：実用塩分と国際海水状態方程式、1983.3
- 4) 岩下 光男他：海洋物理Ⅲ 海洋科学基礎講座 3、東海大学出版会、1971.
- 5) 和田 明：水温躍層面に及ぼす風の影響、第12回海岸工学講演会講演集、1965.
- 6) 玉井 信之：密度流の水理、土木学会編 新体系土木工学 22、技報堂出版、1980.
- 7) A.Lerman編、奥田節夫・半田暢彦監訳：湖沼の科学、古今書院、1984.
- 8) 網走開発建設部：進行する網走湖の水質汚濁について、1987.
- 9) 国土地理院：網走湖 湖沼図