

塩淡水二成層を形成している網走湖の塩水の流出入に関する研究

Long and Short Term Behavior of Lake Abashiri with Two Layers of Fresh and Salt Water

桑嶋知哉* 高橋克人* 宮島滋近** 平野道夫*** 山田 正****

By Tomoya KUWAJIMA, Katsuhito TAKAHASHI, Shigechika MIYAJIMA, Michio HIRANO, Tadashi YAMADA

In this paper, some results of field observation concerning the annual and short-term behavior of salt intrusion in Lake Abashiri is reported. From the data analysis, we found that this lake has two layers of salt and fresh water vertically and that the lower layer of salt water is gradually ascending in this decade and it has no dissolved oxygen. In the field observation in the river, we found that the salt water intruded into the lake in the form of salt wedge. Because of the occurrence of record breaking heavy rainfall in this catchment area just before the observation, the thickness of the upper layer became from about 5 to 7 meter.

In order to make clear the mechanism of long-term trends of the lake, we proposed the model of tank-model type. In the final section of this paper, we compared the numerical results with the field data and we found the good agreement.

Keywords: Two layer flow, Salt Wedge, Annual trend of a lake, Entrainment

1. まえがき

北海道東部に位置する網走湖は、網走川の河口より約6kmに位置する海跡湖であり、河口にある網走港との水位差が小さいために、現在も網走港の潮位の変動により網走川を海水が逆流し網走湖に流入することがある。そのため網走湖は、上層が淡水、下層が塩水という二成層を成しており下層への酸素の供給がきわめて少ないため、既存のあるいは著者らの観測のデータによれば、下層塩水層の溶存酸素量はほぼ0である。近年、その塩水と上部の淡水との境界面が上昇してきており、一定方向の風が吹き続けた場合に下層の塩水が湧昇し、魚貝類を死滅させるなどの被害が出ている。このような現実を顧みて、本研究においては、1)網走湖への塩水の流出入量、2)湖内の塩淡水境界面の季節変動や長期変動の傾向を明らかにすることを目的としている。

* 学生員	中央大学大学院 土木工学科 修士課程	(〒112 文京区春日1-13-27)
**	北海道開発局 網走開発建設部	(〒093 網走市新町2-6)
***	北海道開発局 旭川開発建設部	(〒070 旭川市8条12丁目)
**** 正会員 工博	中央大学教授 理工学部 土木工学科	(〒112 文京区春日1-13-27)

2. 観測の概要

2・1 網走川観測の内容

日 時：1992年 8月10日 pm. 5:00～ 8月12日 pm. 4:00(観測前日に66mm/day降雨あり)

10月17日 pm. 3:00～10月19日 am. 4:00(9月中旬に216mm/day降雨あり)

観測場所：網走湖と網走川河口間に架かる5本の橋のうち、網走橋、新橋、大曲橋の3カ所(図-1参照)

観測内容：流速、水位、水温、塩分濃度(以上1時間間隔)、溶存酸素量(1日1回)

2・2 網走湖内観測内容

日 時：1992年8月11日、12日午後、10月18日午後

観測場所：網走湖の網走川流入口、流出口、湖心、呼人半島内側付近等(図-1参照)

観測内容：水温、溶存酸素量、塩分濃度

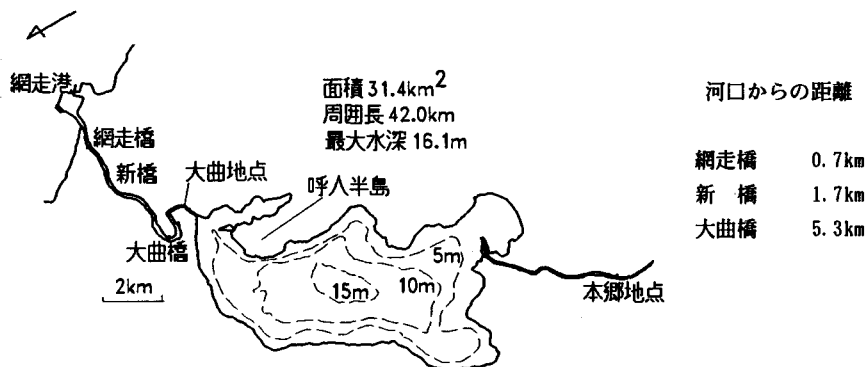


図-1 網走湖付近概略図

3. 観測の結果

3・1 3橋での水位、流速の変化

観測場所が河口に近いので、観測を行った3橋での水位、流速は潮汐に大きな影響を受けている。図-2、図-3より最下流の網走橋地点での水位変動は一潮汐あたり90cm程度、上流部の大曲橋地点では40cm程度みられる。また大曲橋では10月の観測期間のほうが水位が低い。図-4は8月、図-7は10月の網走橋の流速であり10月の方が遅くなっている。他の橋でも同様であった。

3・2 海水の網走湖への遡上

図-4、図-7に示す網走橋での流速変化を見ると、満潮の前後では河床近くの流速が極めて遅くなっている。この時刻での塩分濃度(図-5、図-8)、水温(図-6、図-9)を見てみると、流速が遅くなっている時には河床近くでは塩分濃度は上昇し、水温は低下している。さらに、上昇した塩分濃度の値と低下した水温の値を河口にある網走港の塩分濃度、水温(図-10)とを比較すると港内の下層での値と一致し

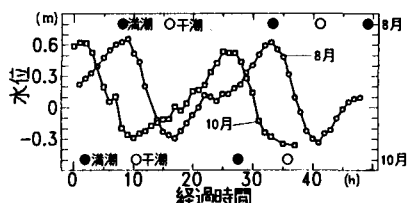


図-2 2回の観測の水位の比較(網走橋)

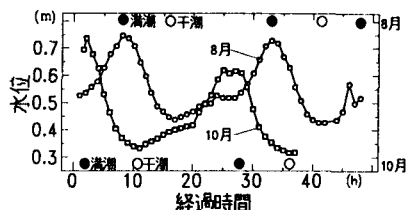


図-3 2回の観測の水位の比較(大曲橋)

ている。これよりこの変化は海水の外海からの逆流により生じたことがわかる。また図-5、図-8より河床近くで最も長時間塩分濃度が上昇している。そこで図-11(8月)、図-12(10月)に3橋での河床近くの塩分濃度の変化を示す。これより満潮前に海水が遡上をはじめ、満潮後に再び海に戻る様子がわかる。ただし、網走湖に最も近い大曲橋で海水の遡上を観測したのは10月の観測開始直後の満潮時のみであった。

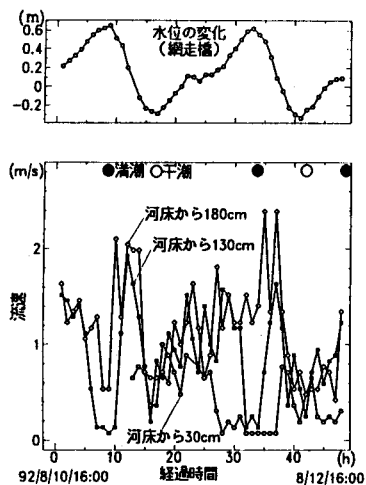


図-4 流速の変化（網走橋：8月）

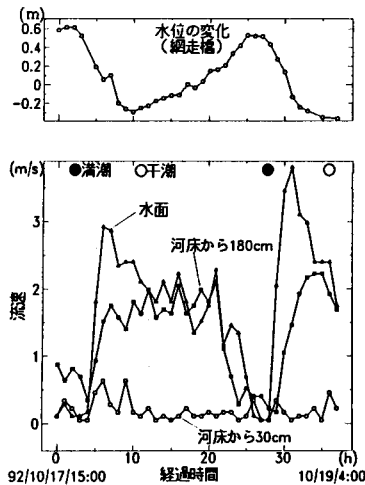


図-7 流速の変化（網走橋：10月）

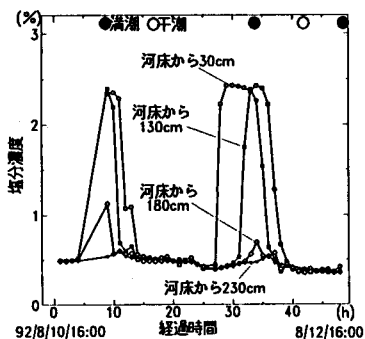


図-5 塩分濃度の変化（網走橋：8月）

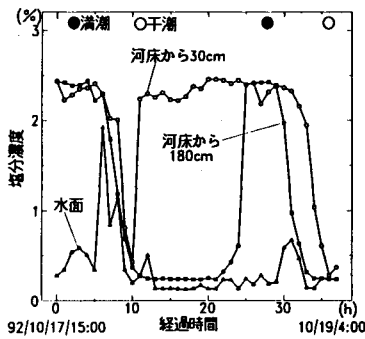


図-8 塩分濃度の変化（網走橋：10月）

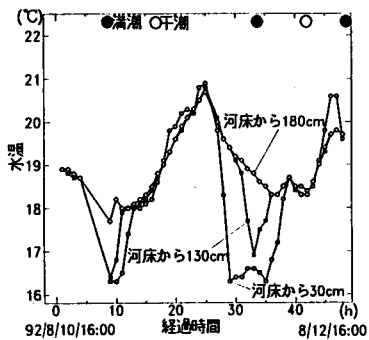


図-6 水温の変化（網走橋：8月）

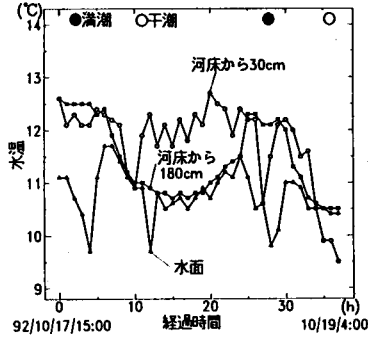


図-9 水温の変化（網走橋：10月）

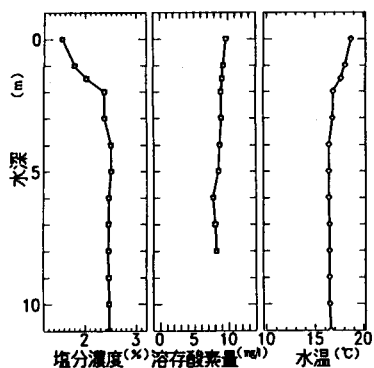


図-10 網走港の観測結果 ('92/8/12)

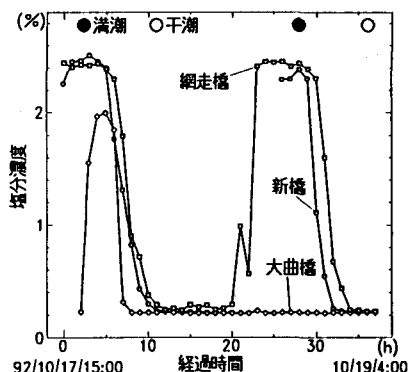


図-11 各橋河床付近の塩分濃度の変化 (8月)

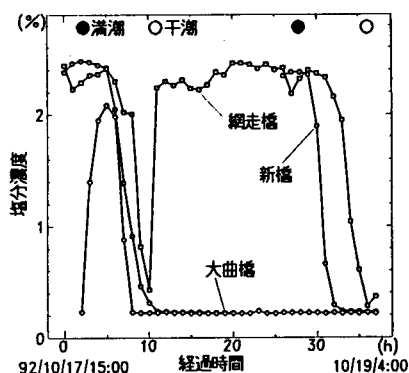


図-12 各橋河床付近の塩分濃度の変化 (10月)

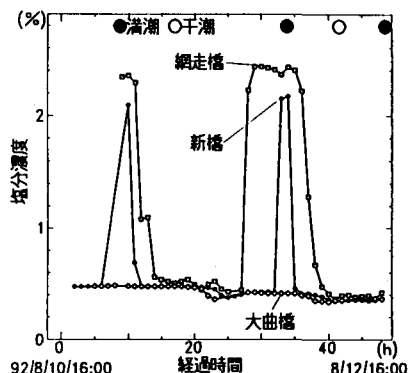


図-13 各橋の河床から180cm付近の塩分濃度の変化 (10月)

3.3 逆流時の塩分濃度の鉛直分布

逆流時の塩分濃度の鉛直分布を例として、網走橋の10月18日11:00～18日18:00を図-14、18日18:00～19日1:00を図-15に示す。図-14は海水が遡上中の塩分濃度の鉛直分布であり、図-15は遡上した海水が再び下流に流れている間の鉛直分布である。これより海水は塩水くさびの形で遡上して行くのが読み取れる。

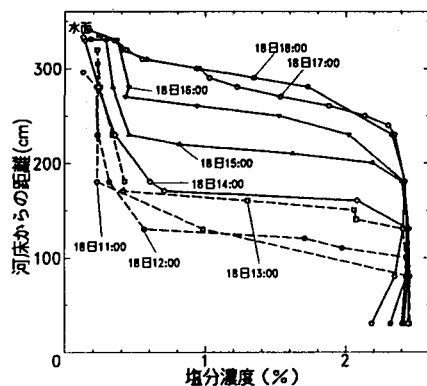


図-14 塩分濃度の鉛直分布 (網走橋: その1)

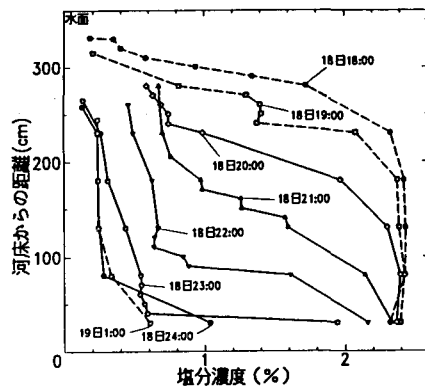


図-15 塩分濃度の鉛直分布 (網走橋: その2)

3・4 網走湖の塩淡水境界について

図-16は湖心付近での塩分濃度、溶存酸素量、水温の鉛直分布である。これよりこの時期の塩分濃度、溶存酸素量は非常に明確な躍層を形成しており、その位置は8/12には水深5m、10/18には水深6.5mである。また躍層下の溶存酸素量は0であり、水温は上記の2つに比べて変化が緩やかである。そして8/12は10/18より湖水位25cmは高いこと（8/12前日の降雨の影響）を考慮しても、躍層の位置は約1.2m低下している。これは約 $2.2 \times 10^7 \text{ m}^3$ の下層の塩水が2回の観測の間に湖外へ吐き出されたことを意味している。この原因としては9月10～12日の大雨が考えられる。このときこの地域に台風の影響で200mmを越える降雨があり、各地に洪水をもたらしており網走湖へ大量の淡水流入があったことによる水位上昇が観測されたものである。

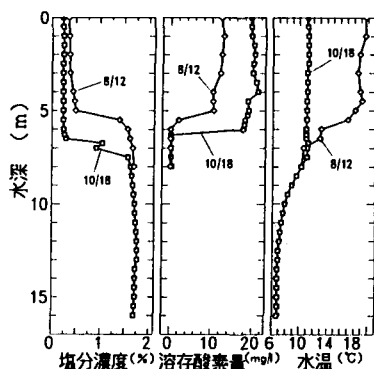


図-16 網走湖の観測結果

3・5 網走湖からの塩水の流出

大曲橋、大曲地点の塩分濃度を網走湖の上層、下層の塩分濃度と比較することで、網走湖から流出された水に占める下層塩水の量、割合を考察する。

Q_1 : 網走湖上層からの流出流量 Q_2 : 網走湖下層からの流出流量 Q_3 : 網走川の流量（大曲橋、大曲地点）

c_1 : 網走湖上層の塩分濃度 c_2 : 網走湖下層の塩分濃度 c_3 : 大曲橋での塩分濃度

以上のように Q 、 c をおくと次の式が成り立つ。

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 \quad \text{----- (1)}$$

$$Q_1 \cdot c_1 + Q_2 \cdot c_2 = Q_3 \cdot c_3 \quad \text{----- (2)}$$

この2式より Q_1/Q_3 、 Q_2/Q_3 を求める。本研究では、 Q_2/Q_3 を“連行率”と定義する。

図17は降雨による大曲地点の流量、塩分濃度の変化を示している。また、図18は実際に現地観測で得られた網走湖上層、下層のそれぞれの塩分濃度より上の式で連行率を求め、降雨により下層の塩水の湖外への流出量を求めたものである。これより9月12日から15日の5日間で約 $3.8 \times 10^6 \text{ m}^3$ の下層塩水が湖外へ流出している。この量は先に述べた塩淡水境界水深の低下の約20cm分に相当する。

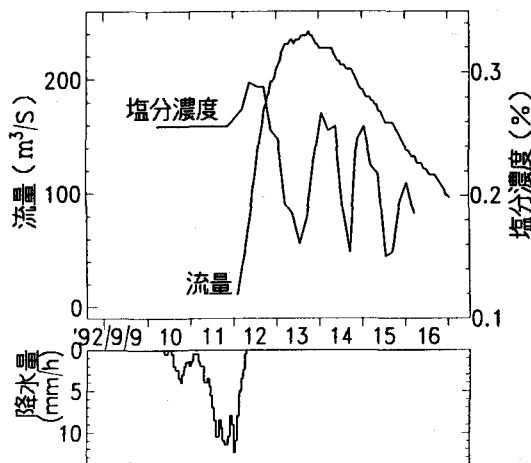


図-17 降雨による流量、塩分濃度の変化

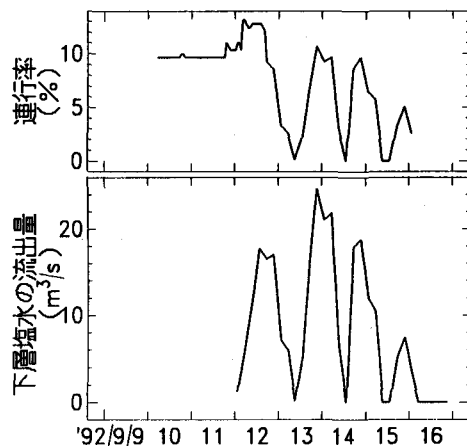


図-18 降雨による湖下層塩水の流出

図19は2回の観測時の連行率であり、10月の観測中はほとんど下層の塩水は連行されていないが、8月の観測中ではかなり連行率が高い。ただし、観測結果で示したように河口の網走港の満潮時には流速は0に近い値であり、流量は極めて少ないので湖下層塩水の流出量も9月の大雨に比べると、ごくわずかにすぎないと考えられる。

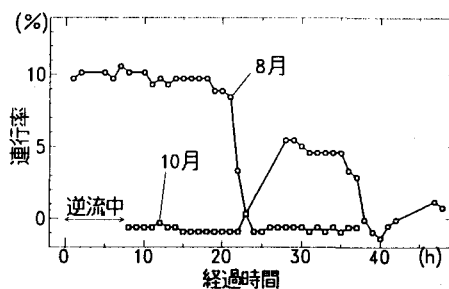


図-19 2回の観測時の連行率の比較

4. 網走湖の塩淡水層厚の長期変化を予測する簡易モデル

ここでは網走湖の塩淡水層厚の経年的な長期変化を予測するモデルをつくり、これにもとづき検討を行った。

4.1 モデルの構成

モデルの概要は図-20に示されている。ここで、外的に与えるデータは湖の上流から湖内に入る淡水流入量と外海の潮位の時系列である、以下にモデルに用いた基本式と記号の定義を示す。

A_1 湖の面積 ($h_s + h_f$, h_a の関数)

Q_{fin} 網走川から湖への流入量 (淡水)

Q_{fout} 湖から海への流出量 (淡水)

Q_{sin} 海から湖への流入量 (塩水)

Q_{sout} 湖から海への流出量 (塩水)

h_f 淡水層厚

h_s 塩水層厚

入力データ: 本郷日平均流量 = Q_{fin} (m^3/s)

網走港潮位変化 = h_a (m)

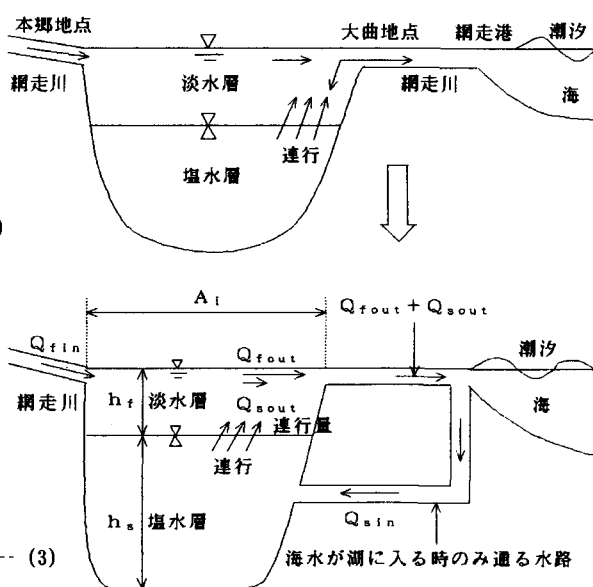


図-20 モデルの概要

$$A_1 \frac{dh_f}{dt} = Q_{fin} - Q_{fout} \quad (3)$$

$$A_2 \frac{dh_s}{dt} = Q_{sin} - Q_{sout} \quad (4)$$

$$G = h_s + h_f - 1.5 \quad (\text{網走湖水位}) \quad (5)$$

$$\Delta H = G - h_a \quad (6)$$

$$Q = 8.96 \cdot (G + 1.38)^3 \tanh(5.21 \Delta H - 0.03) \quad (7)$$

$$Q \geq 0 \text{ のとき } Q_{sout} + Q_{fout} = Q \quad (8)$$

$$Q_{sout} = r \cdot Q \quad (9)$$

$$Q_{fout} = (1 - r) \cdot Q \quad (10)$$

$$Q_{sin} = 0$$

$$r = \text{GAMMA} \cdot \exp(-CE \cdot h_f) \quad (\text{連行率})$$

$$Q < 0 \text{ (逆流時) のとき } Q_{sin} = Q$$

$$Q_{sout} = 0, Q_{fout} = 0$$

(3), (4) 式は淡水と塩水の連続式である。(5) 式中の G は網走湖水位を表す。(6) 式中の ΔH は網走湖水位と網走港潮位との差である。(7) 式は湖側の流出口である大曲地点における水位流量関係である。(7) 式が正である時 $Q = Q_{sout} + Q_{fout}$ を表し負であるときは逆流時であり $Q = Q_{sin}$ を表している。また塩水の淡水層による連行量を決定する連行率は上層の水深の増加とともに流速が小さくなり連行量が減少するものと考え(10)式のように与えた。(3) 式(4) 式を連立常微分方程式としてRUNGE-KUTTA-GILL法より淡水層厚と塩水層厚の13年間の経年変化を計算した。

4.2 計算結果

図-21は入力データである本郷地点の13年間の日平均流量(m^3/s) (1976~1988)である。この図からこの期間では1979年以降、近年まで流入流量は減少の傾向をたどっているといえる。これは図-22に示す網走地方の日降水量(mm/day)においても同じ傾向にあるといえる。次に図-21は前述したデータにより淡水層厚と塩水層厚の経年変化を計算した結果である。係数 $\text{GAMMA}=0.7$ $\text{CE}=0.1$ で初期値を淡水10m塩水5mとして計算を行った結果、境界変化は実測値に近い値を示すことができた。すなわち1976年時に-10mに位置していた塩淡水境界は13年間で5m近くの上昇を見せている。この主な原因は湖への淡水流入量の減少によるものと考えられる。図-24と図-25は湖面水位の計算値と実測値を示している。両図とも春先の4月、5月には融雪出水による湖面水位上昇が見られる等、その傾向は大略一致している。

図-23において塩水が連行されるとき連行率の経年変化はこの場合30%~40%近くの値がでており既述の3.5で述べた実測値である10%前後と比べると大きめの値がでる結果となった。連行率を実測値に近づけるため、さらに係数 GAMMA を変化させて検討を行ったが、係数 GAMMA は ± 0.1 でかなり塩淡水境界位置の経年変化に影響を与え、このことから係数 GAMMA に大きく依存している事がわかった。今後はさらにこの連行係数についての検討を進めていく予定である。

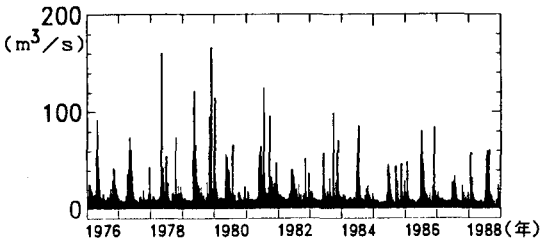


図-21 日平均流量 (本郷地点)

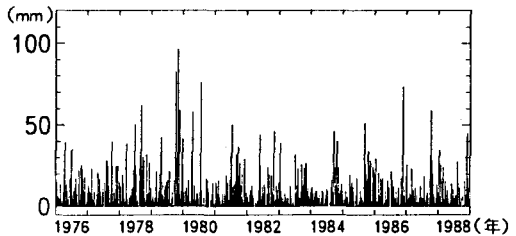


図-22 日降水量 (網走)

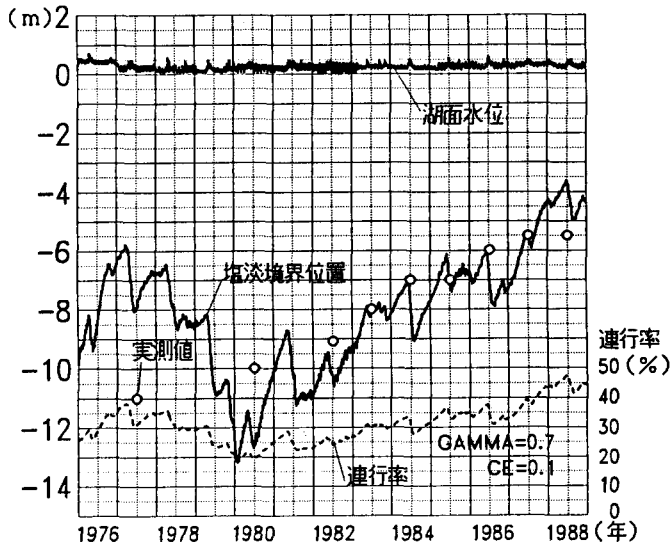


図-23 塩淡水境界・湖面水位の経年変化の計算

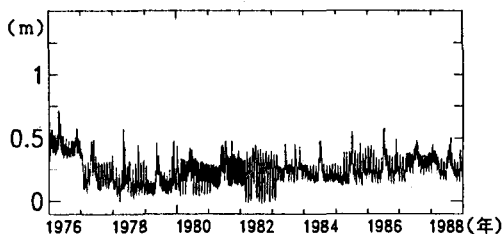


図-24 湖面水位 (計算値)

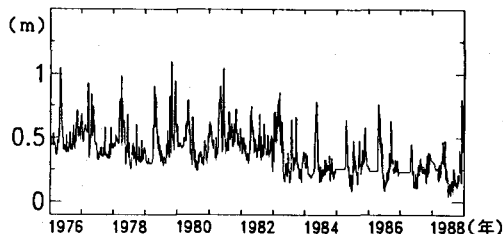


図-25 湖面水位 (実測値)

5. まとめ

本研究において得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 湖内、及び湖から流出する河川において水位、流速は潮汐に大きく影響を受けている。
- 2) 満潮時には外海から海水の逆流が観測され、今回においてはその遡上形状はくさび形であることがわかった。
- 3) 大出水の後湖の塩淡水境界は約 1.2m 低下した。
- 4) 網走湖において観測期間中非常に明確な躍層が形成されている事が確認できた。また、洪水により湖からの多量な塩水の連行が生じた結果、躍層の低下を確認する事が出来た。
- 5) 網走湖の塩淡水層厚の長期変化を予測するモデルは実測値を概略再現した。

6. おわりに

我々はこれからも現地観測を続け、データを集めることで連行係数や網走湖の塩分濃度の鉛直分布等の季節変化を探索していきたい。今後も冬期の状態、融雪期の状態と観測をする予定である。それとともに数値計算モデルについても網走湖への海水の流入の条件、網走湖の塩分濃度の季節変動による連行係数の変化を再検討し、より良いモデルの構築をする予定である。

謝 辞

本研究を行うにあたり北見工業大学工学部内島邦秀助教授、早川 博助手には、観測にあたっては多大なる援助をしていただいた。ここに記して深甚なる感謝の意を表する。さらに、今回使用した流速計の検定には、三井造船(株)昭島研究所所有の簡易型回流水槽を使用させていただいた。ここに記して謝意を表する。また、本現地調査は厳しい気象条件の中、北見工業大学、中央大学の学生の多大な努力によって遂行されたことを記し、ここに感謝を表する。

参考文献

- 1) 平野道夫・山田正・井出康郎：網走湖における流動と成層界面の挙動に関する観測、土木学会水工学論文集、第35巻、pp. 609-614、1991。
- 2) 平野道夫・高橋克人・糸嶋知哉・山田正：網走湖の長期変動傾向に関する研究、水文・水資源学会研究発表会要旨集、pp. 50-53、1992。