

網走湖における塩淡水二成層の形成と挙動に関する研究

Formation and Behavior of the Two-Layers Structure
of Salt and Fresh Water in Lake Abashiri

池永均¹, 山田正², 内島邦秀³, 大島伸介⁴,
向山公人⁴, 平野道夫⁵, 井出康郎⁶, 田村圭司⁷

By Hitoshi IKENAGA, Tadashi YAMADA, Kunihide UCHIJIMA, Shinsuke OSHIMA,
Kimihiro MUKOUYAMA, Michio HIRANO, Yasuro IDE and Keiji TAMURA

Lake Abashiri is a brackish lake located at Abashiri river mouth and forms two-layer structure of salt and fresh water. Here, we analyze the long-term behaviors of the halocline, defined as boundary of the two layers, from time series of annual precipitation and discharge in Abashiri river basin. Using a echo sounder for taking photographs of the halocline, we could show short-term behavior of the halocline caused by snow melt flood, strong wind and the intrusion of salt water to this lake from the sea during flood tide. We carried out numerical analysis regarding the short-term behaviors of the two layers in Lake Abashiri when the wind is blowing hard.

Keywords: brackish lake, eutrophication, aoshio, internal seiche, Lake Abashiri

1. はじめに

北海道東部の網走湖は、網走川の下流部の感潮域に位置している(図1-1参照)。湖内は上層が淡水、下層が塩水という強固な二成層を形成しており、下層の塩水に含まれる溶存酸素量は極めて少ない^{1)~4)}。近年、一定方向の風が強く吹き続けた場合、風上側に下層の塩水が湧昇して青潮が発生し、漁業等への損害が出ている。本論文では、網走湖の塩淡水境界の長期及び短期変動に着目し、特に網走湖の青潮発生原因の一つである風の吹き寄せに対する塩淡水境界の挙動に関して観測結果と数値解析結果の比較、検討を行った。

2. 網走湖の塩淡水境界の長期変動

2.1 網走湖の塩淡水境界と降水量の関係：図2-1-1は1910年～1993年の網走市の年降水量について過去5年の移動平均をかけた年平均降水量の変化と湖心部(湖最深部)の塩淡水境界水深の1925年以降近年までの変動を示

¹正会員 中央大学助手 理工学部土木工学科 (〒112 文京区春日1-13-27)

²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)

³正会員 工博 北見工業大学助教授 工学部土木開発工学科 (〒090 北見市公園町165)

⁴学生員 中央大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (〒112 文京区春日1-13-27)

⁵正会員 北海道開発庁 (〒100 千代田区霞ヶ関3-1-1)

⁶正会員 北海道開発局開発土木研究所 (〒062 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

⁷正会員 北海道開発局網走開発建設部 (〒093 網走市新町2-6-1)

すものである⁵⁾。この図から1910年～1990年の期間で年平均降水量は約900mmから約700mmに低下しており、この降水量の変化に連動して、1925年当時には全く見られなかった塩水が近年徐々に湖底部に流入し、塩淡水境界が上昇している。特に1980年以降の塩淡水境界水深の上昇は非常に顕著であり、1987年に網走湖で汽水湖が初めて観測された。しかしながら1990年以降は急激な塩淡水境界の上昇傾向はみられない。

3. 網走湖の塩淡水境界の短期変動

3.1 観測概要：観測は主に網走湖湖心を中心として、湖長軸上で行われた。計測機器は導電率計、溶存酸素計(ともにセントラル科学(株)製)である。計測項目は導電率、溶存酸素量、水温であり、水面から鉛直方向に0.5m間隔(塩淡水境界付近では0.25m間隔)で測定がなされた。なお塩分濃度の値は導電率と水温から25℃に温度補正を行って得られた値である。また1993/11の観測以降ではさらに超音波(魚群探知機、(株)本田電子製 HE 570-2F)による塩淡水境界の観測がなされた。

3.2 融雪期における湖内塩水の湖外への流出：図3-2-1は1994/4/29の大潮時における湖出口付近(図1-1観測経路①参照)での魚群探知機による塩淡水境界の観測結果を示したものである。このときの映像は周波数107kHzの状態で得られたものである。湖出口からの距離が2.75km地点(図の右端)では、水深4.5～5.5m付近にみられた塩淡水境界による反応が、幾つもの層に分かれて湖底に沿って這い上がっており、湖出口に近づくにつれ不明瞭となっている。図3-2-2は湖出口付近の図3-2-1の映像と同方向の塩分濃度と溶存酸素量の鉛直分布を示したものである。この図の③(湖出

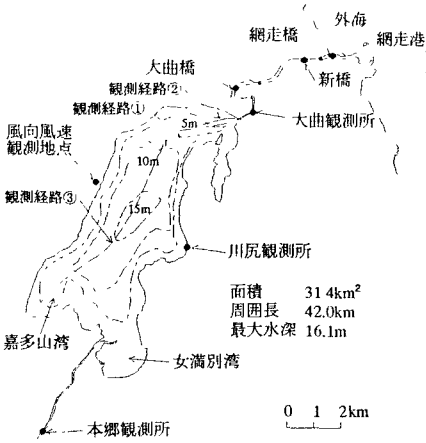


図1-1 網走湖の位置と観測経路

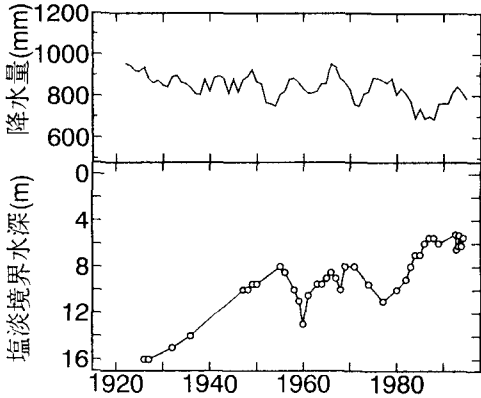
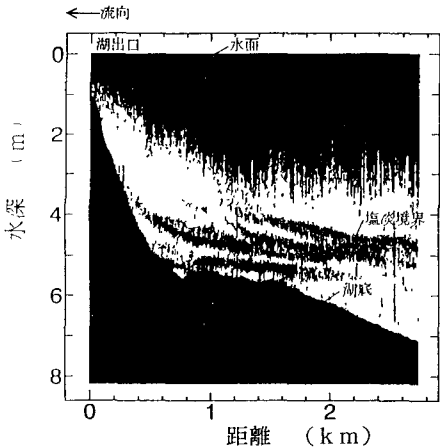


図2-1-1 網走地方の降水量と湖心部の塩淡水境界水深の経年変化(降水量は過去5年間の移動平均)



1994/4/29 (14.00～14.20) Threshold 2

図3-2-1 融雪期における網走湖の塩水流出時の超音波による映像

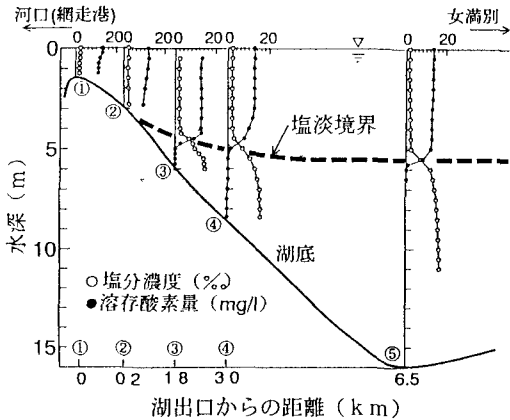
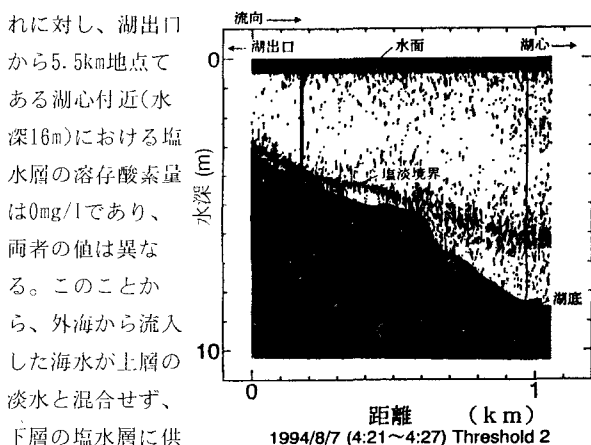


図3-2-2 融雪期における網走湖縦断方向の塩分濃度、溶存酸素量鉛直分布

(塩淡水境界は②～③の位置まで上昇し塩水が湖外に連行される)

11から1.8km地点)と⑤(湖心)の塩分濃度の鉛直分布を比較すると、塩淡水境界は湖出口側では湖心部より約1m上昇している。②(湖出口から0.2km地点)では塩分濃度が水面から湖底まで一定であり、塩淡水境界の端はこの図の②、③間にあることがわかる。これは図3-2-1とほぼ同様の傾向にある。また水面付近の塩分濃度は湖心のほうが湖出口付近より0.5‰低く、水面付近の溶存酸素量は湖心のほうが湖出口より多い。すなわち湖出口では湖心よりも無酸素で塩分濃度の高い下層の塩水が多く含まれている。これより湖内の塩水は、湖出口付近で淡水と混合し湖外へ流出していることがわかる。

3.3 網走湖への塩水流入：図3-3-1は1994/8/7の上げ潮時における湖出口付近(図1-1視測経路2参照)での魚群探知機による塩淡水境界の観測結果を示したものである。湖に流入した塩水は湖底に沿って流下しており、湖内の塩水層まで達している。図3-3-2は同時刻の網走湖出口付近での塩分濃度と溶存酸素の鉛直分布を示したものである。湖出口から1.5km地点(水深8.5m)では湖内の塩水層内でも溶存酸素量は10mg/lほどである。これに対し、湖出口



から5.5km地点である湖心付近(水深16m)における塩水層の溶存酸素量は0mg/lであり、両者の値は異なる。このことから、外海から流入した海水が上層の淡水と混合せず、下層の塩水層に供給されることがわ

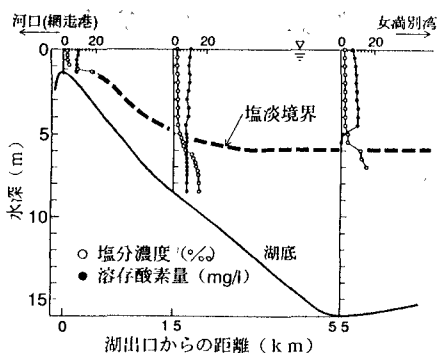


図3-3-2 網走湖縦断方向の塩分濃度鉛直分布変化

かった。図3-3-1 満潮時における網走湖内への海水（湖出口の底面付近において急激に塩分濃度）流入を示す超音波による映像（が増加しており海水が湖内に流入している）

3.4 青潮発生直後の塩淡水境界の挙動 著者らが1995/11/8～10に行った11回日の網走湖視測において、期間内(11/8)に網走湖で青潮が発生した。図3-4-1は1995/11/7 0:00～11/10 13:00までの網走湖湖畔(図1参照)の風速と風向を示したものである。11/8 0:00～11/8 9:00まで南及び南南西(網走湖の長軸方向とほぼ平行)の風が吹いており、同時間内の風速は5.9m/s～16.7m/sの強風(瞬間最大風速は26.5m/s)が9時間にわたって吹き続けている。図3-4-2は1995/11/9(青潮発生の翌日)の湖長軸方向(図1-1視測経路③参照)の魚群探知機による塩淡水境界の観測結果を示したものであり、図3-4-3は11/9 10:30～12:00の湖出口～嘉多山湾の縦断方向の塩分濃度の鉛直分布を示したものである。図3-4-2の中の灰色部分、

黒色部分はそれぞれ11/9 11:00～11:40、11/9 17:00～18:00の視測結果であり、図の右側の灰色の点線(①)は図3-4-3から推測される塩淡水境界である。これらの図から嘉多山湾側において11:40に水深約3mの位置に存在していた塩淡水境界が18:00には水深約5.5mまで下降していることがわかる。このことから、一度水面まで達した塩淡水境界が風速の減少に伴い、約6時間かけて2.5m下降している過程であると考えられ、特に青潮時の界面の可視化は著者らが知る限りにおいては世界に先駆けたものである。

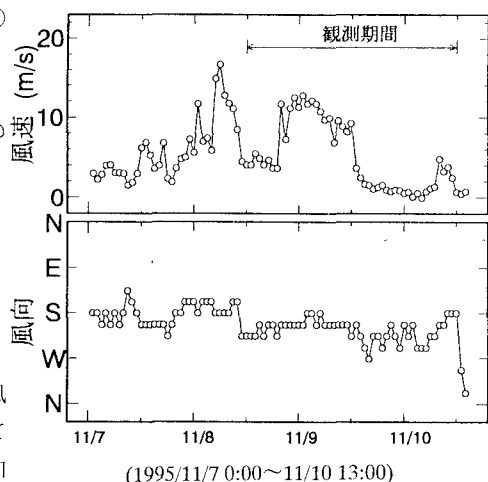
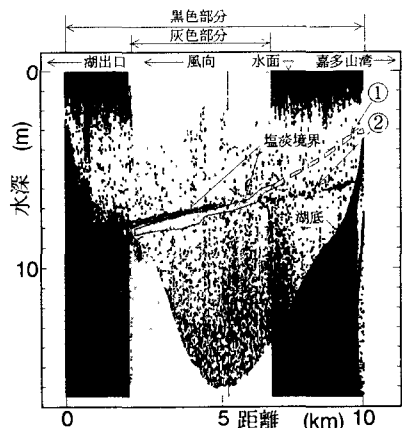


図3-4-1 網走湖湖畔の風速・風向



①1995/11/9(11:00~11:40)②(17:00~18:00)

図3-4-2 青潮発生直後の網走湖内の超音波の映像

4. 塩淡水境界の風に対する応答

4.1 基礎式の導出: 密度二成層を形成している水域に風が吹いた場合の塩淡水境界の挙動を把握するために理論解析を行った。本論文では風に対する二成層流体の一次元の連成振動を対象とする。座標は図4-1-1のように定義する。基本式は非粘性で長波近似のもとで運動方程式を線形化すると(1)、(2)式になる。(3)、(4)式はそれぞれ上層、下層に関する連続式である。ここで上下層間、壁面との摩擦は無視した。(1)、(3)式を用いて u_1 を消去すると、(5)式が求まる。同様に(2)、(4)式を用いて u_2 を消去すると、(6)式が求まる。(5)、(6)式は τ という強制外力の項をもつ波動方程式であり、かつ ξ 、 η に関しては連成振動を示す方程式となっている。

定常の場合(5)、(6)式はそれぞれ(7)、(8)式となる。ここで x の両端 ($x=0, L$) での境界条件(9)式を用いると(10)、(11)式の定常解が得られる。この定常解は強制外力と吹送距離に比例し、界面の水深に反比例する。同一外力に対しては界面の水深を低下させることにより、水面及び界面変動量は小さくなり、例えば網走湖においては青潮が発生しにくくなるといえる。

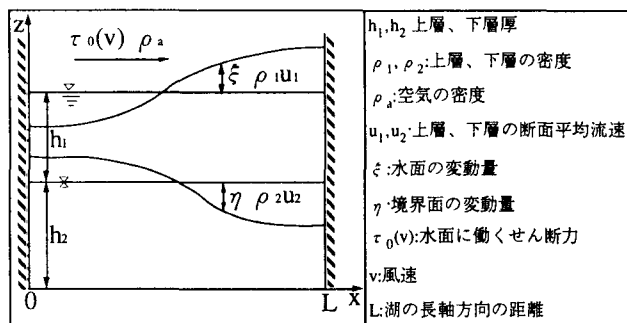


図4-1-1 座標の設定

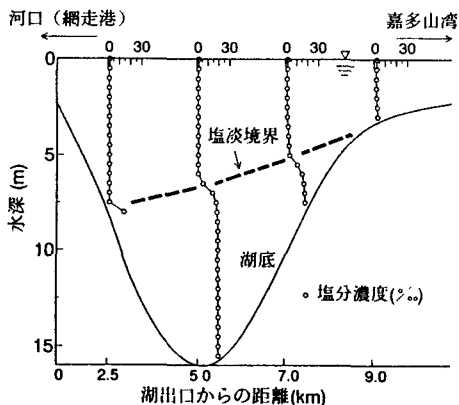


図3-4-3 青潮発生直後の網走湖縦断方向の塩分濃度鉛直分布

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} = -g \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{1}{\rho_1 h_1} \tau_0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial t} = -g \left[\frac{\rho_1}{\rho_2} \frac{\partial \xi}{\partial x} + \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2} \right) \frac{\partial \eta}{\partial x} \right] \quad (2)$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + h_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} = \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + h_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} - h_1 g \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} - \frac{1}{\rho_1} \frac{\partial \tau_0}{\partial x} \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} = g h_2 \frac{\rho_1}{\rho_2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2} \right) g h_2 \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} \quad (6)$$

$$-g h_1 \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = -\frac{1}{\rho_1} \frac{\partial \tau_0}{\partial x} \quad (7)$$

$$g h_2 \frac{\rho_1}{\rho_2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \varepsilon g h_2 \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} \quad (8)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial \xi}{\partial x} = 0 \quad (9)$$

$$\xi = \frac{\tau_0}{\rho_1 g h_1} \left(x - \frac{L}{2} \right) \quad (10)$$

$$\eta = \frac{\rho_2}{\rho_1 - \rho_2} \xi \quad (11)$$

$$\tau_0 = C_D \rho_a V_{10}^2 \quad (12)$$

$$l = \frac{2L}{\sqrt{gh}} \quad (13)$$

$$T = \frac{2L}{n} \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_2 - \rho_1} \frac{h_1 + h_2}{h_1 h_2}} \quad (14)$$

4.2 解析結果と考察：ここでは主流風速の風向をx軸にとり、一次元計算を行った。計算手法は差分法を用い、初期条件は水面変動量、界面変動量のいずれも0で、境界条件は反射条件とした。また風による水面へのせん断応力は(12)式を用いた⁸⁾。ここで C_D 、 ρ_a 、 V_{10} はそれぞれ抵抗係数(1.6×10^{-3})、空気密度、地上10mの風速である。図4-2-1、4-2-2はそれぞれフェッチを1000m、界面水深を6m、地上10mの風速を10m/sとしたときの水面変動、界面変動量を示したものである。界面変動量は、水面変動量に比べ50倍程度大きく、変動方向が水面変動と逆で、風上側で上昇することがわかる。

また水面は長波による周期((13)式参照)で変動するとともに境界面の変動の影響を受け、複雑に変動することがわかる。また風上境界における20分後の非定常解は定常解に比べ水面で1.5倍、境界面で1.4倍変動が大きくなっている。図4-2-3はフェッチを変化させ、他は図4-2-1と同様の条件での風上境界における界面変動量を示したものである。フェッチが増加すると界面の変動量とその変動の周期が増加し、この周期は(14)式で示した内部波の長波の周期を求める理論式とほぼ一致している。ここで(14)式中の L 、 n はそれぞれフェッチ、モードを表す。図4-2-4は境界水深を変化させ、他は図4-2-1と同様の条件での風上境界における界面変動量を示したものである。定常解と同様に全水深を一定とし上層厚を増加すると境界面の変動量は減少することがわかる。図4-2-5は地上10mの風速を20分間隔で10m/sと0m/sを交互に変化させ、他は図4-2-1と同様の条件での風上境界における界面変動量を示したものである。20分は図4-2-3より境界面変動周期の1/2の値とほぼ等しい値であり、この周期に合わせた風の場合、境界面の振動が共振され、変動が徐々に大きくなっていることがわかる。図4-2-6は、フェッチを網走湖の長軸方向のスケール($L=10\text{km}$)とし、青潮が発生した11/8の4:00~6:00の風速のデータ(図3-4-1)から地上10mの風速を20m/sと推測し計算を行った時の界面変動量を示したものである。風上境界において定常解では界面は水面まで到達しないが、非定常解では界面が3時間後に風上境界の水面に到達していることがわかる。すなわち界面変動量の非定常解は青潮が発生したことを意味するものであり、3.4で示した実現象を表すことができたといえる。

5. まとめ

- 1) 近年の網走地方の降水量の減少に起因して、増加傾向にあった網走湖内の塩水層厚は、1990年以降ほぼ一定値をとっている。
- 2) 魚群探知機を使用して塩淡水境界を捕らえることができ、網走湖内に流入する塩水は、上層の淡水と混

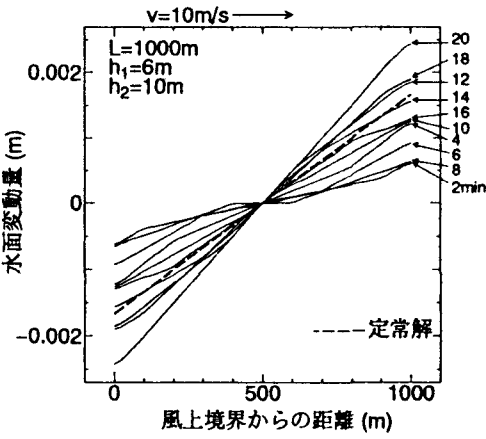


図4-2-1 水面の変動量

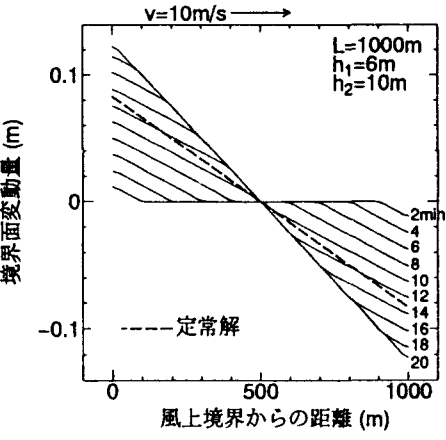


図4-2-2 境界面の変動量

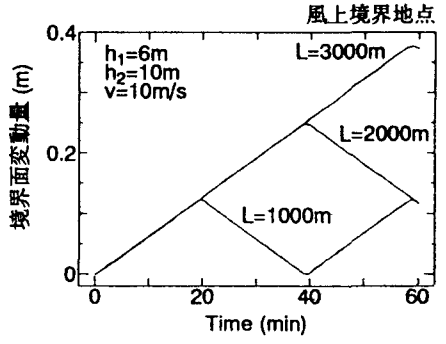


図4-2-3 フェッチを変化させたときの境界面の変動量

合せずに湖底に沿って流下し、流出する塩水は塩淡水境界が湖底に沿って湖出口方向に這い上がって流出する。

3) 著者らの知る範囲内においては、青潮直後の塩淡水境界の可視化に世界に先駆けて成功し、塩淡水境界は一次モードで風上側に上昇することがわかった。

4) τ という強制外力の項をもつ波動方程式から導いた一次元の連成振動方程式を数値解析した結果、水面に一定方向からの風が吹き続けた場合、境界は風上側に上昇し、水面及び境界の変動量は非定常解の方が定常解よりも1.4倍以上変動量が大きくなる。

5) 網走湖の長軸方向のスケールで連成振動の数値解析を行うと、地上10mの風速が20m/sのとき約3時間後に青潮が発生し、実現象とほぼ一致した傾向を示す。

謝 辞

本研究は文部省科学研究費(試験研究(b)研究代表者 山田正)の補助を受けて行われた。本論文に示した網走湖の現地観測は極めて厳しい気象条件の中、北見工業大学工学部早川博助手をはじめ、北見工業大学河川研究室、利水研究室、中央大学水理研究室の多くの学生の多大な努力により遂行された。ここに記し、本研究に携わったすべての方々に深甚なる感謝の意を表する。

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) 柴崎知哉・高橋克人・宮島滋近・平野道夫・山田正：塩淡水二成層を形成している網走湖の塩水の流入に関する研究，水工学論文集第37巻，pp. 305-312, 1993.
- 3) 大島伸介・日比野忠史・山田正・内島邦秀・早川博・井出康郎・宮島滋近・平野道夫：融雪期における網走湖の塩淡水境界の挙動に関する研究，1994年水文・水資源学会研究発表会要旨集，pp. 360-361, 1994.
- 4) 大島伸介・向山公人・井出康郎・宮島滋近・平野道夫・内島邦秀・早川博・池永均・山田正：網走湖における塩淡水境界の変動に関する研究，土木学会年次学術講演会講演概要集，pp. 520-521, 1995.
- 5) 北海道開発局網走開発建設部：昭和62年度網走湖水質保全検討協議会資料(別冊)。
- 6) Heaps, N. S. and A. E. Ramsbottom: Wind effects on the water in a narrow two-layered lake, Phil. Trans. Roy. Soc. London, Ser. A 259(1102), pp. 391~430, 1966.
- 7) 古本勝弘・武政剛弘・藤田広章・一ノ瀬和雄：風に対する密度成層閉鎖水域の内部静振応答，第32回海岸工学講演会論文集，pp. 722~726, 1985.
- 8) 宇野木早苗：沿岸の海洋物理学，東海大学出版会，1993.

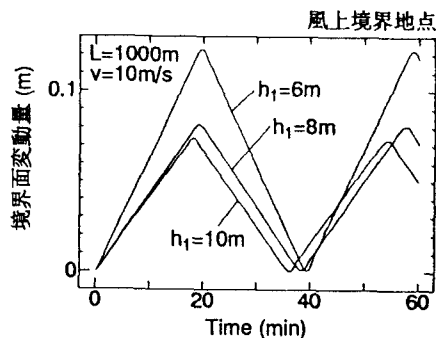


図4-2-4 上層水深の変化による境界面の変動量

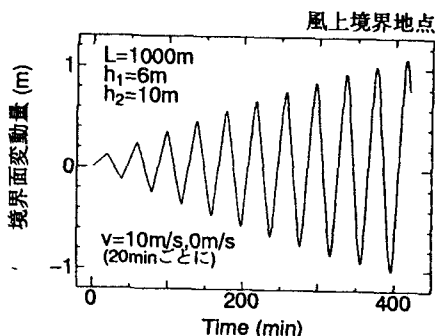


図4-2-5 風速の変化による境界面の変動量

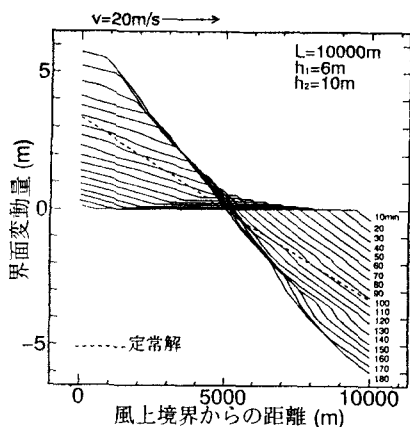


図4-2-6 フェッチを網走湖の長軸方向スケール(10km)としたときの境界面の変動量