

網走湖における吹送流の発生と成層界面の挙動に関する研究

Study on generation of wind-driven current and behavior of the density interface
between salt and fresh waters in Lake Abashiri

池永均¹, 山田正², 内島邦秀³,
向山公人⁴, 平野道夫⁵, 井出康朗⁶

By Hitoshi IKENAGA, Tadashi YAMADA, Kunihide UCHIJIMA,
Kimihiro MUKOUYAMA, Michio HIRANO and Yasuro IDE

In recent years, Lake Abashiri has been confronted with serious problems due to water accidents induced by aoshio and eutrophication. By using a fish detector and ADCP, we could make clear the spatial and temporal structure of density stratified flow, the short-term behaviors of salinocline(halocline) just after the occurrence of aoshio, and the overall characteristics of the flow in this lake. Based on the results of the observation, we carried out the numerical analysis regarding to the time-varying behaviors of the density interface and the wind-driven flow. Comparing the calculation results with field data, we could evaluate the influence of wind, the horizontal and vertical structure of the lake on the flow and the behaviors of salinocline.

keywords: stratification, salinocline, internal seiche, aoshio, eutrophication

1. はじめに

網走湖は、北海道東部を流れる網走川の河口付近に位置する汽水湖であり、満潮時には海水が網走川を遡上し湖内に流入することから上層が淡水、下層が塩水の強固な密度二成層を形成している。近年、網走湖では成層構造に起因する「水の華（アオコ）」や陸水面では極めて稀な青潮の発生が顕在化しており、湖の生態系の破壊や漁業関係者および周辺住民の生活環境を損なうなどの社会問題を引き起こしている。著者らは湖水の浄化対策を念頭に過去7年間にわたり14回もの網走湖内および網走川下流部の現地観測を行い、網走湖の成層界面（塩淡水境界面）の形成過程と変動特性について実測データに基づく解析を行ってきた。その結果、(1) 湖下層の塩水層厚は1920年以降の網走地方の降水量の減少に連動して年々増加傾向にあることや(2) 融雪期や台風時期の大出水に起因する下層塩水の流出機構を考慮した塩淡水境界の長期変動モデル¹⁾による湖の塩水層厚に関する長期的な変動予測、さらには(3) 二成層水域における連成振動型の簡便な一次元モデル^{2), 3)}を用いた青潮の発生予測が実用上十分可能であることを明らかにしている。しかしながら、網走湖は

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 千代田区霞が関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)

全季成層型に類する国内でも数少ないタイプの湖であるため、その成層界面の詳細な挙動や流動特性については未だ十分な研究が行われていない。このことが網走湖の青潮対策や水質改善を考える上で大きな阻害要因ともなっている。そこで本研究では網走湖の吹送流の発生機構と塩淡水界面の挙動を明らかにするため湖全域の流動と界面挙動に関する数値解析を行い、実測結果との比較検証を行った。

2. 網走湖内の観測概要

現地観測では季節（春期、夏期、秋期、冬期）ごとに湖最深部（湖心）および湖の流出入口付近における塩分濃度（‰）、水温（℃）、溶存酸素飽和度（％）の鉛直分布を測定し、湖の成層状態について季節変動特性を明らかにしている。また、1993年からは市販の魚群探知機（超音波：（株）本多電子製 HE570-2F 出力周波数：107kHz、400kHz）を導入した湖全域の界面挙動に関する観測を、1995年からは ADCP（ACOUSTIC DOPPLER CURRENT PROFILE R, RD 社製、周波数：1200kHz）を用いた湖内における流動観測を行い、湖の成層構造との関連性を明らかにしている。湖内観測においては、北海道開発局網走開発建設部所有の調査船「あおさき号」（長さ15m、総重量13トン）と小型の船外機船1～2隻を用いて図-1に示す観測点（①～⑳）および経路上（点線）で船上から定点観測と移動観測（船速1～5ノット）を併用して行った。

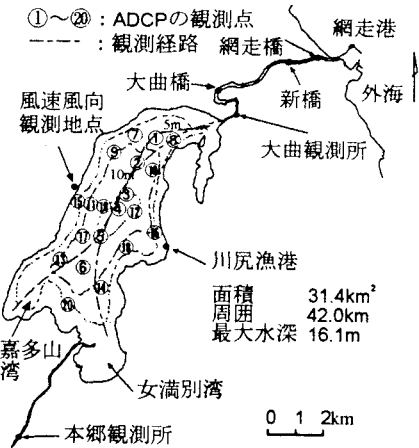


図-1 網走湖内の観測地点と概要

3. 観測結果と考察

3.1 網走湖の密度成層の観測結果：図-2は1996年に行った網走湖の湖心における季節ごとの塩分濃度、溶存酸素飽和度、水温ならびに塩分濃度、水温及び水深データから算出⁵⁾した密度の鉛直分布の測定結果を表している。なお図中の縦軸は水面からの距離を表している。この図から、いずれの観測結果においても水面下5～6mの位置に明瞭な塩淡水界面が存在し、1年間を通して成層構造が非常に安定していることがわかる。なお、冬期（1995/2）の密度分布において塩淡水界面が多少不明瞭となっているが、これは湖面が厚さ約1mの水に覆われるため、上層の水温が0℃近くまで冷却されて、上下層間の水温躍層が消失することによるものと考えられる。なお、上層に比べ、下層の塩水層（水深6m以深）では水温変化がほとんどなく、結氷時には上層と下層で温度逆転が生じていることが確認できる。このような傾向は、融雪前や強風の多い秋期観測の実測結果にも少なからず現れていることから、融雪前および秋期は夏期に比べ青潮が発生しやすいといえる⁴⁾。密度成層が最も緩やかになる結氷期においては水面が凍結し風による外力が湖水に伝わらないため青潮は発生しない。溶存酸素飽和度の鉛直分布から、下層における溶存酸素飽和度は1年を通して0%であることがわかる。これは湖

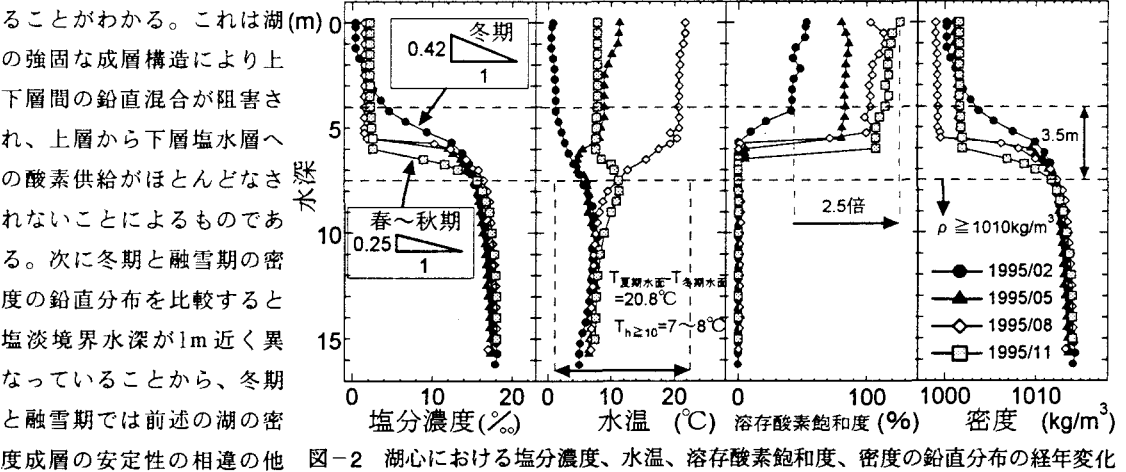


図-2 湖心における塩分濃度、水温、溶存酸素飽和度、密度の鉛直分布の経年変化

に上層の淡水層厚の増減について明確な季節変動が存在する。この季節変動の要因は次のように考えられる。冬期には網走地方の降雨量と網走川上流部からの河川流入量が減少することから湖水位は低下する。湖水位の低下は外海からの湖への海水の逆流入を容易にし、結果として湖の塩水層厚を増加させる。一方、融雪期や台風時期には網走川上流から多量の淡水が湖内に流入するため下層塩水が湖外へ吐き出され、塩淡水境界面が一時的に低下する。網走湖の密度境界面は、季節ごとの上下変動を繰り返しながら長期的に上昇傾向にあることが著者らの一連の研究¹⁾により確認されている。この淡水層厚の変動は、青潮の発生に重大な影響を及ぼすものでありこれを制御することは青潮対策の有力な手法の一つといえる。図-3は、魚群探知機による（周波数を107kHzに設定）網走湖の長軸方向の映像である。この図から水面下約6mの位置に明瞭な密度界面が存在することが認められる。この結果は上述の密度の鉛直分布の実測結果と合致していること（図-4a 下層部（水面下12m） 図-4b 中間層（水面下6m） 図-4c 上層部（水面下2m） 網走湖内の流速ベクトル（平面） 1995/8/26 6:30~10:40（塩淡水境界付近で左回り、上層部で右回りの水平環流が見られる）

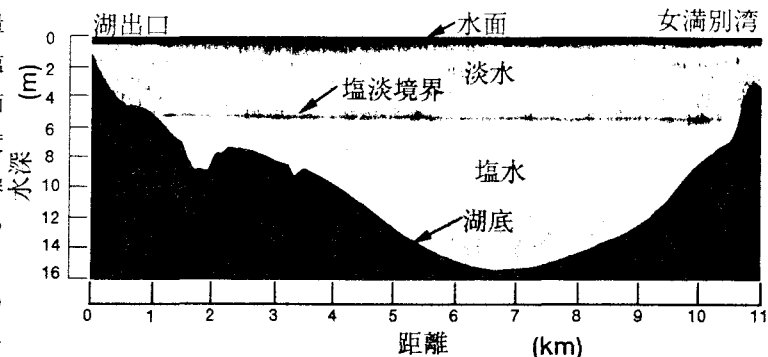
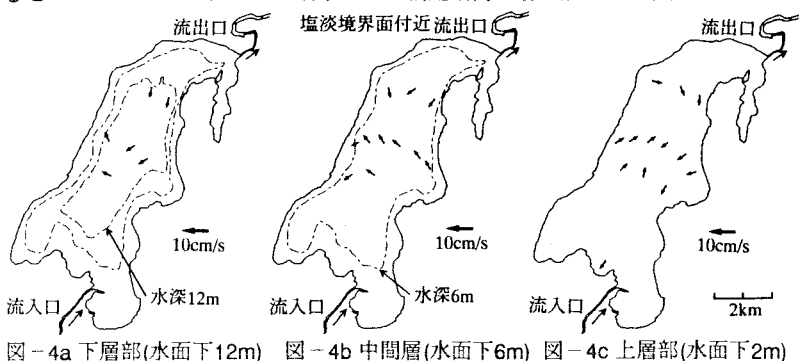


図-3 超音波による網走湖内の観測結果 1995/8/28



3. 2 網走湖の流動特性：図

-4a, b, cは1995年の夏期（8月26日）に行った ADCP による湖流観測から得られた流速ベクトルの各層ごとの水平分布（水面下12m、6m、2m）を、図-5a, bは湖の縦・横断面における各観測点（①～②⑩）ごとの鉛直分布（a: 湖縦断方向、b: 湖横断方向）を示している。同様に、図-6a, bは1995年の秋期（11月10日）における流速ベクトルの鉛直分布であり、図-7a, b, cおよび図-8a, bは1996年の夏期（8月28日）の観測から得られた流速ベクトルの各層ごとの水平分布と鉛直分布を示している。なお、ADCP による観測は

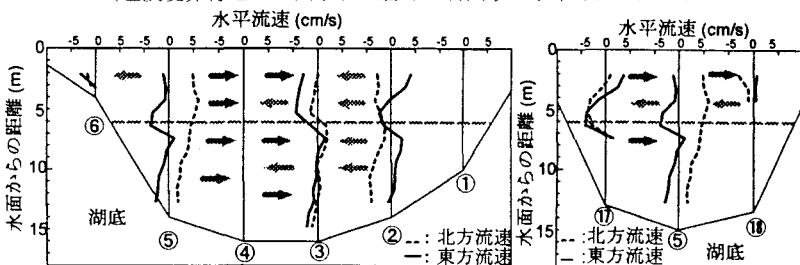


図-5a 湖縦断面

図-5b 湖横断面

網走湖内の鉛直方向流速分布 1995/8/26 6:30~10:40
（鉛直方向に4~5層にわたって流向・流速が変化している）

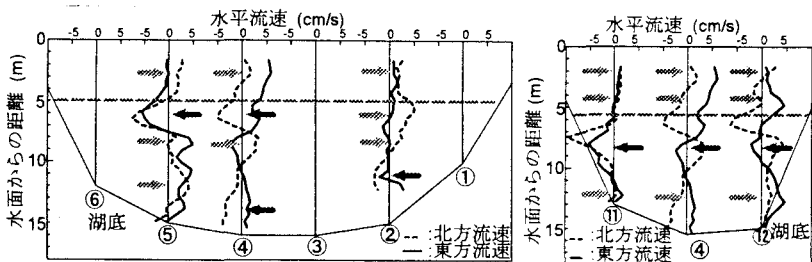


図-6a 湖縦断面

図-6b 湖横断面

網走湖内の鉛直方向流速分布 1995/11/10 9:30~12:30
（水面下6mにおいて南向きの流れが卓越している）

船を停止させた状態で行われ、測定時間は各観測点につき最低15分とし、図に示す流速データは計測時間内に得られたデータを時間平均した値である。図-9、10にそれぞれ1995/11および1996/8の観測期間中の風向風速データを流入口、図-7a下層部（水面下12m）図-7b中間部（水面下6m）図-7c上層部（水面下2m）網走湖内の流速ベクトル（平面）1996/8/28 9:30～15:00（水面下2mと12m層において長軸方向の流れが卓越している）示す。ADCPによる観測期間中（図-9、10中⇔印）の風は、夏期、秋期ともに0～5 m/sの弱風状態であった。網走湖内の流速は夏期と秋期の観測において非常に小さく（最大でも10cm/s）、湖心付近（④）の流れは鉛直方向に大きく3層に、界面付近の細かい変動を加えると4～5層にもわたって変化していることがわかる。また、1995年の夏期の観測では、水面付近と水面下6m付近の層に湖心を軸とした時計回りの水平環流の存在が認められる。なお、流速ベクトルの鉛直分布と水平分布がこの3回の観測それぞれを比較して異なっていることから、網走湖は時間的、空間的に複雑な流況を呈していることがわかる。

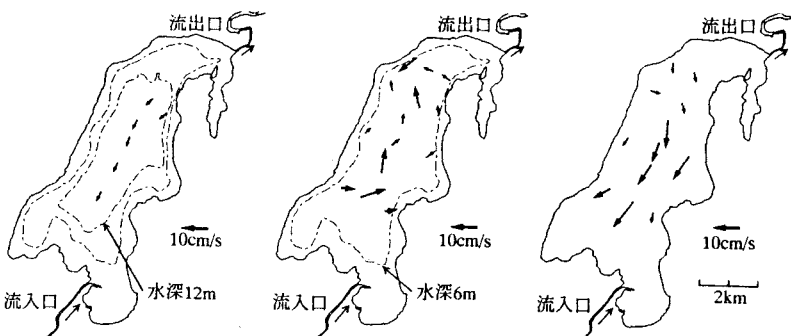


図-7a 下層部（水面下12m） 図-7b 中間部（水面下6m） 図-7c 上層部（水面下2m）
網走湖内の流速ベクトル（平面）1996/8/28 9:30～15:00
（水面下2mと12m層において長軸方向の流れが卓越している）

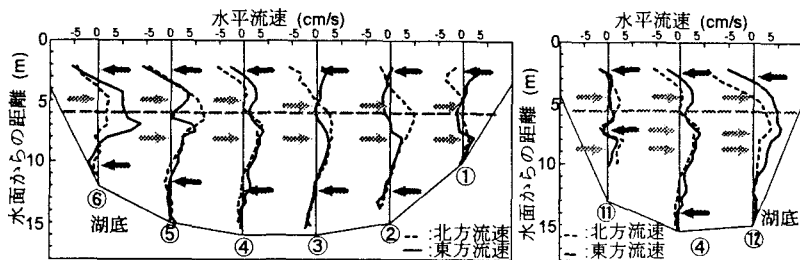


図-8a 湖縦断面 図-8b 湖横断面
網走湖内の鉛直方向流速分布 1996/8/28 9:30～15:00
（鉛直方向に4～5層にわたって流向・流速が変化している）

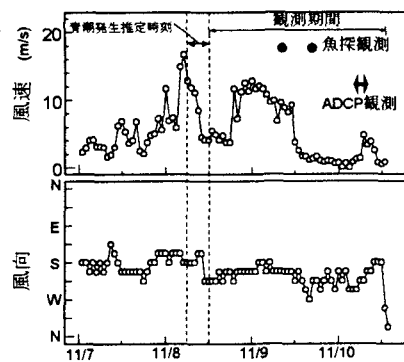


図-9 網走湖畔の風向・風速
1995/11/7 00:00～11/10 13:00

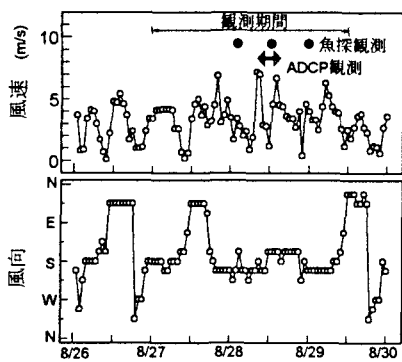


図-10 網走湖畔の風向・風速
1996/8/26 1:00～8/29 24:00

3. 3 網走湖の界面挙動

3. 3. 1 青潮発生直後の塩淡境界の挙動：秋期に行った現地観測（1995/11/8～10）において著者らは青潮の発生を確認しており、その直後の塩淡境界面の挙動を魚群探知機により映像化することに成功した。なお、青潮は、発生当日に風上側に位置する嘉多山湾で魚の死骸が水面に浮いているという住民の通報時間（16:00頃）と、青潮発生時の硫黄臭が13:00頃には既に風下側に位置する湖出口付近に漂っていたことから、11/8の午前中には発生していたものと推定できる。観測期間中の風向・風速（図-9参照）データより、11/8 5:00～11/8 9:00までの間に11.0m/s～16.7m/sの強風（期間内の瞬間最大風速は26.5m/s）が南及び南南西（網走湖の長軸方向とほぼ平行に嘉多山湾から湖出口方向の風）方向にほぼ4時間にわたって吹き続けており、その後、風向を時計回りに変えながら風速が小さくなっていることがわかる。以上より網走湖で確認された青潮は湖の長軸方向に連吹する強風により発生したものと推察できる。図-11は1995/11/9 11:00～11:40（青潮発生の約24時間後）の湖の長軸方向（図-1参照）の塩淡境界面の挙動を魚群探知機（出力周波数を107kHzに設定）を用いて映像化したものであり、図-12は、更にその4時間後の同じ観測経路上の映像で

ある（11/9 17:00～18:00）。なお、図-11において湖の上・下流端付近の白色部は観測時間の制約で魚群探知機により計測できなかった部位である。そこで図-11に示す映像とほぼ同時期（10:30～12:00）に湖心および湖流入口付近で塩分濃度を測定し、魚群探知機で測定できなかった上・下流端の塩淡境界面の補間を行った（図-13）。これらの図から湖の流入方向において11:40に水面下約3mの位置に上昇していた塩淡境界面が18:00には水面下約5.5mの位置まで下降していることがわかる。

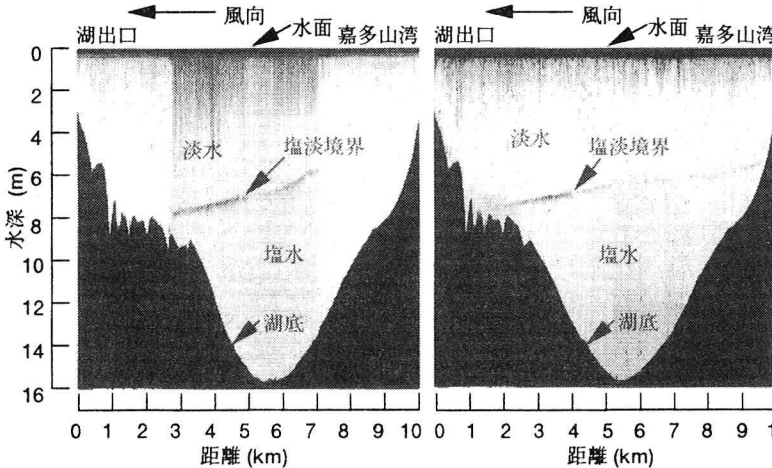


図-11 青潮発生直後の網走湖内の映像 図-12 青潮発生直後の網走湖内の映像
1995/11/9 11:00～11:40 1995/11/9 17:00～18:00

3. 3. 2 網走湖内の内部静振の挙動：図-14は、網走湖の長軸方向の塩淡境界面の挙動を約12時間ごとに魚群探知機を用いて映像化したものであり、左から1996/8/28 1:40～2:50、8/28 15:44～16:35、8/28 23:39～8/29 1:10の時間帯に観測されたものである。なお、映像は長軸方向の界面変動を明確に把握するため、長軸方向に短縮して表示されている。湖の塩淡境界面は青潮発生時の挙動と同様に基本モードの形態で長軸方向に小さく振動している。観測期間中の風速は（図-10参照）0～7m/sの範囲で短時間に変動を繰り返し、かつ3回の観測が満潮時と干潮時にちょうど重なっていることから（図-15参照）内部静振は風の吹き止まりか潮位変化に連動する湖の水位変化のどちらかに起因して発生したものと考えられる。

今回の調査では、この界面振動の原因を特定するまでには至らなかったが、網走湖の内部静振の存在とその実態を映像により実証することができた。なお、網走湖の長軸方向スケール（界面長約8km）を考慮して最も単純化された定常波に関する線形理論を用いて算出すると内部セイシュの周期は約8時間³⁾となるので、今回の12時間ごとの観測では、界面の時間変動の詳細については捉えることができなかった。

4. 網走湖の流動特性に関する数値解析

4. 1 計算概要：湖の流動は、風、潮汐、河川流量をはじめ地形、気圧、コリオリ力、降水現象などの外的な作用を受けて複雑な流況を呈することが多い。それらの要素を1つ1つ検証することは困難であるた

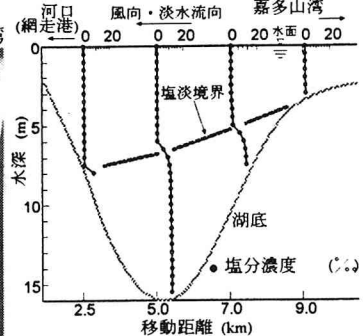


図-13 青潮発生直後の塩分濃度の鉛直分布 1995/11/9

水表面に強い風が一定方向（長軸方向）に吹くと風上側に下層の塩水層が湧昇し青潮が発生する。これらの図は青潮発生直後の映像であり一次モードで塩淡境界面が振動していることを示している。

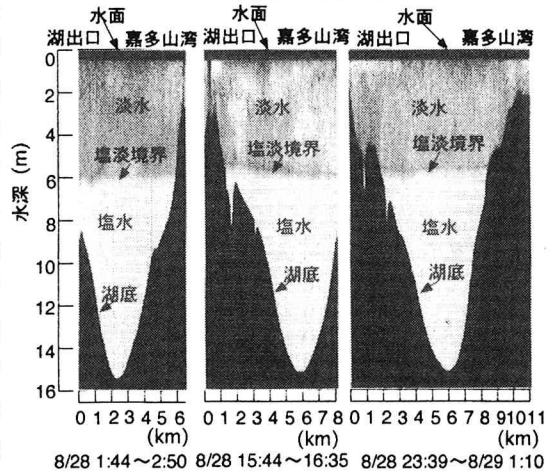


図-14 網走湖の塩淡境界面の変動

網走湖の塩淡境界面の振動の実体を魚群探知機を用いて超音波により映像化したものである。青潮発生時の塩淡境界面の挙動と同様に基本モードで振動している。

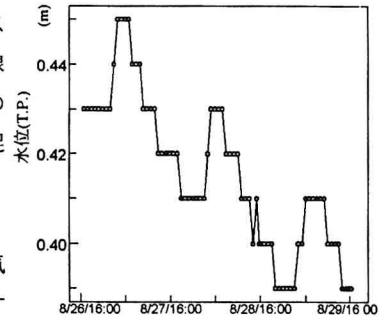


図-15 網走湖水位変化
1996/8/26 17:00～8/29 16:30

め、研究対象である網走湖の流動に支配的な要因の1つである風や湖特有の成層構造の影響を明らかにすることを目的に数値解析を行

運動方程式

$$\frac{\partial M_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(M_x U_x) + \frac{\partial}{\partial y}(N_x U_y) + [w u]_{k+1} - [w u]_k$$

$$= -\frac{g H_k}{\rho_k} \left(\rho_k \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \sum_{n=1}^{k-1} H_n \frac{\partial \rho_n}{\partial x} + \frac{H_k}{2} \frac{\partial \rho_k}{\partial x} \right) + A_{xy} \left(\frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} \right) + \frac{\tau_{x,k-1}}{\rho} - \frac{\tau_{x,k}}{\rho} + f N_x$$

$$\frac{\partial N_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(M_x V_x) + \frac{\partial}{\partial y}(N_x V_y) + [w v]_{k+1} - [w v]_k$$

$$= -\frac{g H_k}{\rho_k} \left(\rho_k \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \sum_{n=1}^{k-1} H_n \frac{\partial \rho_n}{\partial y} + \frac{H_k}{2} \frac{\partial \rho_k}{\partial y} \right) + A_{xy} \left(\frac{\partial^2 N_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N_y}{\partial y^2} \right) + \frac{\tau_{y,k-1}}{\rho} - \frac{\tau_{y,k}}{\rho} - f M_x$$

連続式

$$\frac{\partial M_x}{\partial x} + \frac{\partial N_x}{\partial y} + w_{k+1} - w_k = 0, \quad \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\partial M_x}{\partial x} + \frac{\partial N_x}{\partial y} - w_k = 0$$

密度拡散の式

$$\frac{\partial}{\partial t}(H_k \rho_k) + \frac{\partial}{\partial x}(M_x \rho_k) + \frac{\partial}{\partial y}(N_x \rho_k) + [w \rho]_{k+1} - [w \rho]_k$$

$$= K_{xy} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(H_k \frac{\partial \rho_k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(H_k \frac{\partial \rho_k}{\partial y} \right) \right\} + \left[K_x \frac{\partial \rho_k}{\partial x} \right]_{k+1} - \left[K_x \frac{\partial \rho_k}{\partial x} \right]_k$$

$$\tau_x = \rho_k \gamma_s (\bar{w} - \bar{u}_s) \bar{w} - \bar{u}_s, \quad \tau_y = \rho_k \gamma_s (\bar{v} - \bar{u}_{s,y}) \bar{v} - \bar{u}_{s,y}, \quad \tau_s = \rho_k \gamma_s \bar{u}_{s,xy} \bar{v} - \bar{u}_{s,xy}$$

表-1 計算緒元と計算条件

格子数	7936.31×16×16層
格子間隔	Δx=400m, Δy=400m
層分割数	16層 (各層厚1m)
内部摩擦係数(γ _s ²)	0.001
底面摩擦係数(γ _b ²)	0.0025
水面摩擦係数(γ _s ²)	0.0016
水平渦動粘性係数(A _{xy})	1m ² /s
水平密度拡散係数(K _{xy})	1m ² /s
鉛直密度拡散係数(K _s)	8×10 ⁻⁴ m ² /s
河川流入量	0
タイムステップ	5秒
コリオリ係数(f)	0
初期密度	図-2参照
u,v,w : x,y,z方向の流速 M _x , N _x : k層の線流量 ξ : 水面変動量 ρ _k : k層の線流量 ρ _s : 空気密度 γ _s : 水面摩擦係数 γ _b : 底面摩擦係数 γ _s : 界面摩擦係数 w, v̄ : 流速、流速ベクトル	

った。計算に用いたモデルは流れの3次元構造を考慮した多層のレベルモデルであり、差分法を用いて吹送流に関する数値計算を行った。計算に用いた諸元および条件は表-1に示すとおりであり、モデル中の渦動粘性係数、密度拡散係数および摩擦係数には一般的な値を引用⁶⁾している。また、風向風速条件および初期の密度分布として観測データを用いることにより、流れに及ぼす風および密度成層の影響を考慮している。なお、湖流解析を行うには初期流速や水位変動量をいかに評価するかが問題となるが、本研究は汽水湖の流動特性に及ぼす成層構造や風の影響を基礎的に解明することを目的としているため、計算点における初期流速や水面変動量を全て0としている。また、同様に境界条件については陸海境界を反射条件とし、流入・流出河川の影響については煩雑さをさけるためここでは無視している。

4. 2網走湖の流動特性に及ぼす成層構造の影響：図-16、17は、網走湖の成層構造が淡水(ρ=1000kg/m³)のみの単層状態にある場合(Case1)と上層が淡水(ρ=1000kg/m³)、下層が塩水(ρ=1014kg/m³)の完全な二層状態にある場合(Case2)の流動の縦断面分布をそれぞれ示している。なお、両者とも湖面にて長軸方向に南から15m/sの一樣風を与え、後者(Case2)において密度界面を水面下6mの位置に設定している。風が吹き始めて1時間

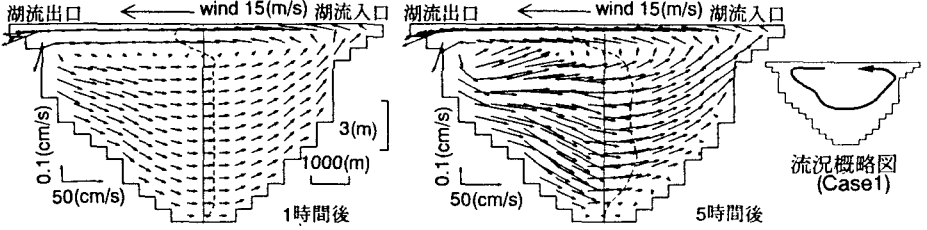


図-16 網走湖の流動の縦断面分布(Case1) (単層時: ρ=1000kg/m³)

のに対し、5時間後の流速分布では、二層時において上・下層別々に2つの鉛直循環流が存在することがわかる。このように二層時といえど

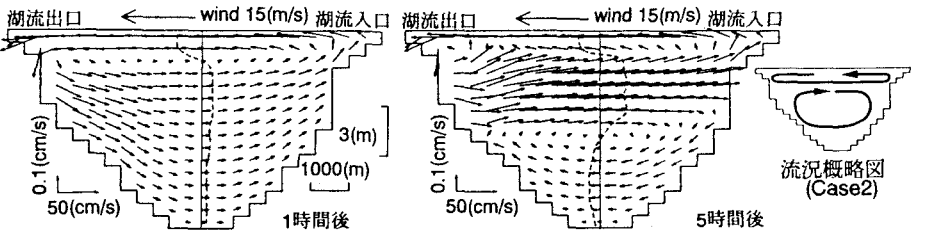


図-17 網走湖の流動の縦断面分布(Case2) (二成層時: ρ₁=1000kg/m³ ρ₂=1014kg/m³)

も一様風の吹き始めから1~2時間程度までは単層時とほぼ同じ挙動を示すことから、この間は単層流から二層流への過渡的な遷移期間であることがわかる。また、単層・二層時とも上層部に形成される鉛直循環流の流況が類似していることから、二層状態でも上層の流動は密度成層に影響されないものと推察できる。

4. 3網走湖の流動と塩淡水境界面の挙動に及ぼす風の影響：図-18、19は、秋期(Case3)と夏期(Case4)に行った現地観測期間中の網走湖の流動の各層(1、3、6、12層)ごとの平面分布と縦断面分布を示したものであり、それぞれ前述の秋期(図-6)と夏期(図-7、8)の ADCP による実測結果に対応している。同様に図-20、21は、このときの網走湖の塩淡水境界面の挙動を再現したものであり、前述の秋期(図-11、12)と夏期(図-14)の魚群探知機による実測結果に対応している。なお、計算では表-1に示すように(Case3, Case4)初期の密度分布に観測期間中の実測値(図-2)を、風向・風速データに湖畔にある風向・風速観測所(図-1参照)における観測値(図-9、10)をそれぞれ用いている。また、計算の開始時刻は秋期において1995/11/8 0:00とし、夏期において1996/8/27 12:00としている。湖流の計算結果において、網走湖の流れは風向・風速の変化に影響を受

け、図-17に示されるような閉鎖性水域における二層流の代表的な流況とかなり異なっていることがわかる。青潮の発生が確認された秋期観測時の流動において(図-18)流れは鉛直方向に3層(1層、2~6層、7~16層)にわたって変化し、かつ5~8層には3つの小規模な鉛直循環流が長軸方向に並列して形成されている。夏期の流動において(図-19)長軸方向の流れは鉛直方向に4層(1~2層、3~7層、8~9層、10~16層)にわたって変化し、かつ8~12層には湖心部に鉛直循環流を形成している。一方、密度分布は、時間経過に従い計算開始時点の明確な二層状態から次第に不明瞭な状態

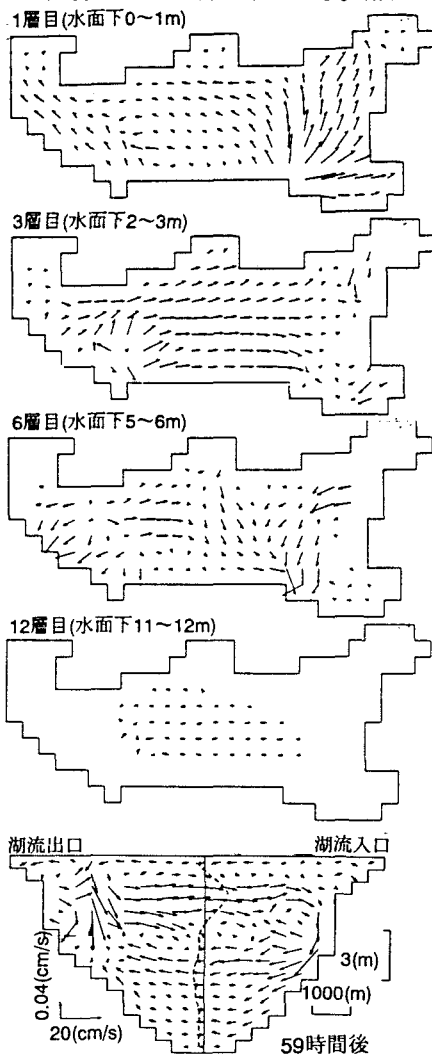


図-18 網走湖の流動(Case3)



流況概略図(Case3)

秋期観測結果(図-6a)に対応しており、計算開始から59時間後の流速ベクトルの縦断面分布

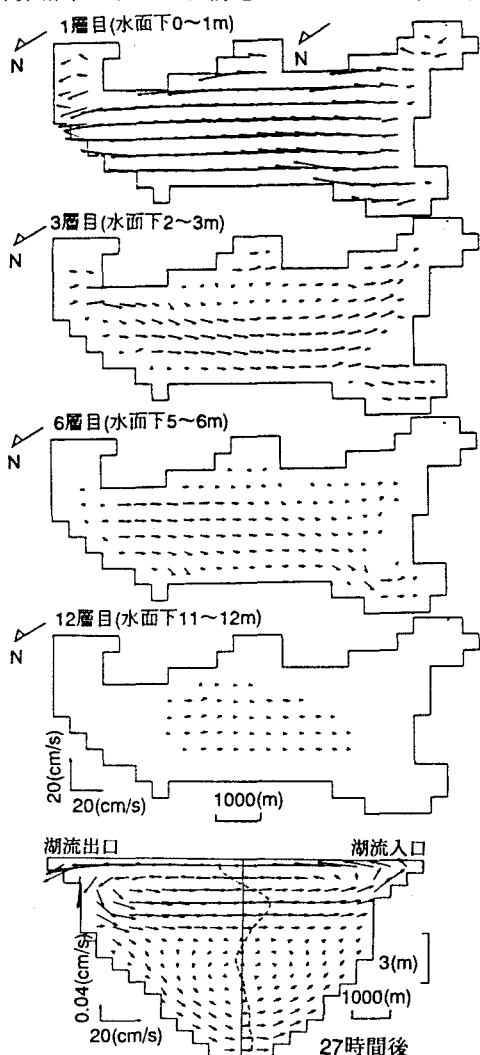


図-19 網走湖の流動(Case4)



流況概略図(Case4)

夏期観測結果(図-8a)に対応しており、計算開始から27時間後の流速ベクトルの縦断面分布

に変化していることがわかる。特に、強風時の挙動を再現した図-20においては青潮発生時の界面形状(基本モード)と発生時刻がかなり良好に再現されているものの、その後の挙動においては魚群探知機による観測結果(図-11、12)に見られるような明確な密度界面を保持することなくかなり不明瞭な状態で密度界面が変位していることがわかる。弱風時の挙動を再現した図-21においても同様に時間経過に従い、密度界面が鉛直方向に不明瞭となっている。このため、各密度レベルにおいて(界面長、水深および密度差が異なるため)振動周期に差が生じることから、密度レベルに応じた位相差が確認できる。なお、7~10層付近の界面挙動(図中白線)が実測値(図-14)を比較的良く再現している。

5. まとめ

本研究において得られた主要な成果は以下のようである。(1)網走湖の上層淡水層厚は、冬期と融雪期で1m近く変動する。また、密度成層は夏期に明瞭に、冬期に不明瞭になる。(2)網走湖の流動は、鉛直方向に4~5層にわたって変化し、流速は最大でも10cm/sと小さく湖心付近の上層付近には、一時的に水平環流が形成される場合がある。(3)網走湖では、長軸方向に11~15m/sの強風が4時間以上連吹すると青潮が発生する。そのときの塩淡水境界面の挙動は基本モードの形態で風上側に上昇する。(4)風の連吹による網走湖の密度界面の挙動を多層レベルモデルを用いた数値解析により明らかにした。その結果、青潮のように短時間の挙動は比較的精度良く再現されるが、内部静振のように長時間の挙動については混合により密度成層が実測よりもかなり不明瞭となる。

謝 辞：本研究は、文部省科学研究費試験研究(b)(1)(代表 山田 正)の補助を受けて行われたものである。本研究を遂行するにあたり、北見工業大学工学部早川博助手と国際航業(株)久保添氏に観測や数値計算について多くの助言を頂いた。ここに記し謝意を表する。

参考文献：1) 桑嶋知哉・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出入に関する研究, 水工学論文集第37巻, pp. 305-312, 1993. 2) 池永均・山田正・内島邦秀・大島伸介・向山公人・平野道夫・井出康郎・田村圭司：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, 水工学論文集, 第40巻, pp. 589-594, 1995. 3) 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. 4) 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) 5) 海洋観測指針, 気象庁編, 日本海洋学会, 1985. 6) 堀江毅・細川恭史：海域における物質循環数値モデルの水質支配要因について, 港湾技術研究所報告, 第22巻第3号, pp. 163-205, 1983.

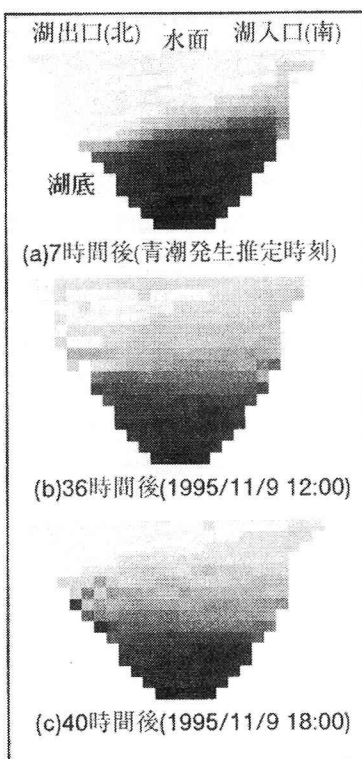


図-20 網走湖の密度分布(Case3)
秋期観測結果(図-11、12)に対応しており、青潮発生時及びその直後の界面挙動を再現している

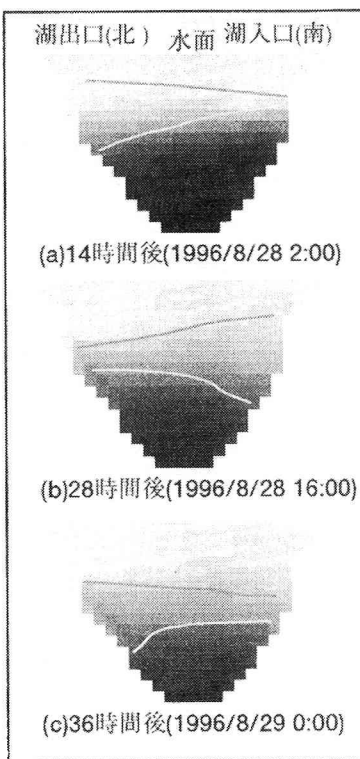


図-21 網走湖の密度分布(Case4)
夏期観測結果(図-14)に対応しており、内部静振による界面挙動を再現している