

春採湖における死水の挙動について

知 北 和 久*・坂 本 博 明**・福 山 龍 次***・鈴 木 正 裕**・
関 根 純 平**・中 路 晃 平****・合 川 千 晴*・濱 口 憲 二**

Dynamic Behaviors of “Dead Water” in a Coastal Lagoon,
Lake Harutori, Kushiro, Hokkaido

Kazuhisa CHIKITA*, Hiroaki SAKAMOTO**, Ryuji FUKUYAMA***,
Masahiro SUZUKI**, Junpei SEKINE**, Kohei NAKAMICHI****,
Chiharu AIKAWA* and Kenji HAMAGUCHI**

ABSTRACT

A coastal lagoon, Lake Harutori consistently has the lower anoxic saline water (salinity~18 ‰, dissolved oxygen< 0.5 mg/l) with dissolved hydrogen sulfide (65-100 mg/l in April 1996 - March 1997). The anoxic water, here called “dead water”, is produced through rapid deoxidization of inflowing sea water (salinity~33 ‰) under long-term strong density stratification. In order to examine the dynamics of anoxic water in the ice-covered period, continuous measurements of lake currents, water properties, lake level, river level and meteorology were carried out in November 1996 - April 1997. The sea water inflow, generated during the high spring tide and/or the mouth closure of a usually effluent creek, occurred several times over the ice-covered period by the ascent of sea water along the creek channel connected to the Pacific Ocean. The thick ice cover (24.0 - 40.7 cm thick) tends to prevent any DO exchange between lake water and open air. The thin or no snow cover, however, caused the transmission of solar radiation below the lake ice, which produced the oversaturation of DO in the upper freshwater layer, due to the phytoplankton's photosynthesis. The frequent sea water inflow generated horizontal distributions of salinity or water density. One-directional or circular lake currents of 1 - 2 cm/s recorded in the lower layer could be driven by the consequent horizontal pressure gradient. A temporal variation of flow speed with short periods of less than 20 hr, however, corresponds to that of water temperature generated by heat conduction in ice and heat diffusion in water or by transmission of solar radiation.

1. はじめに

閉鎖性汽水湖の一つ春採湖では、高位の大潮時に海水が流出河川の沼尻川河道を遡上し、その潮位が湖の流出口底面を越えると海水が湖へ流入する。このとき、海水塩分が湖下層塩分の約2倍あることから、相対的に高密度の海水が底層密度流(density underflow)として湖底部へ進入し、その結果、下層には常に高密度の塩水無酸素層(溶存酸素量DO<0.5mg/l)(死水層)が形成される。この層は還元状態が強く、硫酸還元菌による海水中的硫酸イオンの還元から生じた硫化水素を含む。死水層の形成過程として、上記の底層密度流が短時間で還元状態の強い底質や底部水体に接触・混合し速やかにDOを失う

ことが考えられる(底層密度流の挙動については、例えばChikita et al.,1996、清水ら、1997を参照)。こうした状況は冬季結氷期にも起こりうるが、陸水供給の乏しいこの時期は、海水流入後の湖上層水流出によって、死水層上界面(interface)が相対的に上昇する現象が起こる。釧路市はこの海水流入をある程度制御する目的で、1992年以来遡上河道内(湖の流出口下流)に高さ38cmの潮止堰(堰頂標高、0.70m)を設けている。1996年12月中旬～1997年4月上旬の結氷期間には、大潮時や沼尻川の河口閉塞に伴う海水進入を抑えるため、この堰高を52cmにしている。ここで「河口閉塞」とは、潮位上昇に伴い沼尻川河道先端のボックス・カルバートへ海藻が進入し、その河口部を閉塞することをいう。河口閉塞時には、しば

* 北海道大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻(Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University, Sapporo, Hokkaido)
** 環境コンサルタント株式会社(Environmental Assessment Co., Ltd., Kushiro, Hokkaido)
*** 北海道環境科学研究センター(Hokkaido Institute of Environmental Sciences, Sapporo, Hokkaido)
**** (財)日本気象協会北海道本部(Kushiro Branch, Hokkaido Head Office, Japan Weather Association, Kushiro, Hokkaido)

しば沼尻川河道水が湖へ逆流し、河道に残存した海水が進入することが起こる。

この潮止堰の設置により、大気との酸素交換がなく無酸素層の拡大が一方的に起こりうる結氷期において、ヒブナ(*Carassius auratus langsdorffii*; Temminck et Schlegel)をはじめとする生態系に与える深刻な状況はある程度回避できることが予想される。しかし、ヒブナの発生条件や無酸素層形成に至る湖の物理的・化学的過程が定量的に明らかになっていない現段階では、こうした死水層のみの拡大制御という単純な対策だけでは抜本的解決にならないのは当然である。知北ら(1997)は、結氷期における春採湖の熱的・化学的条件が、海水流入の量や頻度のほか湖水上の積雪条件の違いによって大きく支配されることを示した。今回は、さらに観測点と観測項目を増やし1996年11月～1997年4月の結氷期に実施した結果について、春採湖の熱環境と湖水密度分布の変動特性、及びこれに伴う死水層内の流動に対する物理機構を中心に議論する。

2. 観測方法

春採湖(北緯42°58′、東経144°24.5′:湖を含まない流域面積4.25km²)における結氷期観測は、今回1996年11月～1997年4月に実施した。その観測点の位置を図-1に示す。死水層が存在するMD点(最深点;水深5.8～6.0m)、A点、F点及びA2点の特定的水深に、係留系によって計測器を固定し、10分または15分間隔で流速・水温・電導度・水中光度の連続測定を行った。またそのほかHP点で気象要素、KWP点で湖水位、流出口のO点で電導度・水温、N点で沼尻川水位を1時間間隔で測定した。これらの観測期間・測定水深・測定項目・測定間隔について、表-1にまとめて示す。

なお、図-1の等深線(m)は、湖水位標高0.6mに対応する水深を表し、この時のMD点水深は5.1mである。塩分躍層(halocline:深さ方向の塩分増加率が最大となる点で、死水層上界面とほぼ一致)は、観測期間中水深2.7～3.1mに位置した。ここでは、この境界面の鉛直変動と死水層の挙動を調べることに重点を置き、計測器の

表1 湖内各観測点の連続測定項目

測定期間	観測点	設置水深(m)	測定項目	測定間隔(分)	
1996年11月18・19日 ～1997年1月20・21日	MD (最深点)	1.5	水温	15	
		3.0	電導度・水温	10	
		4.5	流速・水温	10	
	A	1.5	水温	15	
		3.0	水温・電導度	10	
		4.5	流速・水温	10	
	F	3.0	電導度・水温	10	
	1997年1月20・21日 ～4月23日	MD	0.8	水中光度	15
			2.9	電導度・水温	10
4.4			電導度・水温	10	
4.4			流速・水温	15	
5.6			水温	15	
A2		2.9	水温	15	
		4.55	水温	15	
1997年1月20・21日 ～3月11日・12日		A	0.8	水中光度	15
			2.9	水温	15
	4.4		電導度・水温	15	
	F	2.9	水温	15	
		4.3	水温	15	
1997年3月11・12日 ～4月23日	A	0.8	水中光度	15	
		3.1	水温	15	
		4.2	流速・水温	15	
		4.6	電導度・水温	10	
	F	3.2	水温	15	
4.4		水温	15		
1996年11月1日～ 1997年4月21日	HP	—	日射・気温・ 風向・風速	60	
1996年11月1日～ 1997年4月30日	KWP	—	湖水位	60	
1996年12月7日～ 1997年4月30日	O	0.5	電導度・水温	60	
1996年11月1日～ 1997年4月7日	N	—	河川水位	60	

設置水深を決定した。計測器の設置について、期間1997年1月20・21日～3月11・12日の最深点(MD点)での係留法を図-2に示す。

ここで用いた計測器は、流速・水温については自記式水温計付電磁流速計(横河ナビテックKK製,model EMC300;精度、水平流速 $\pm 0.5\text{cm/s}$ 及び水温 $\pm 0.1^\circ\text{C}$)、電導度・水温については自記式電導度・水温計(アレック電子KK製,model MDS-CT;精度、電導度 $\pm 0.01\text{S/m}$ 及び水温 $\pm 0.1^\circ\text{C}$)、水温については自記式水温計(米国オンセット・コンピューターKK製,model StowAway TidBit;精度 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 、およびアイスランド国Hugrun KK製,model Seamon mini;精度 $\pm 0.03^\circ\text{C}$)、水中光度について自記式水中光度計(米国オンセット・コンピューターKK製,model StowAway LI:測定範囲、 $0.01\sim 10,000\text{lumens/m}^2$)である。なお水中光度については、光度 600lumens/m^2 以下の範囲で全日

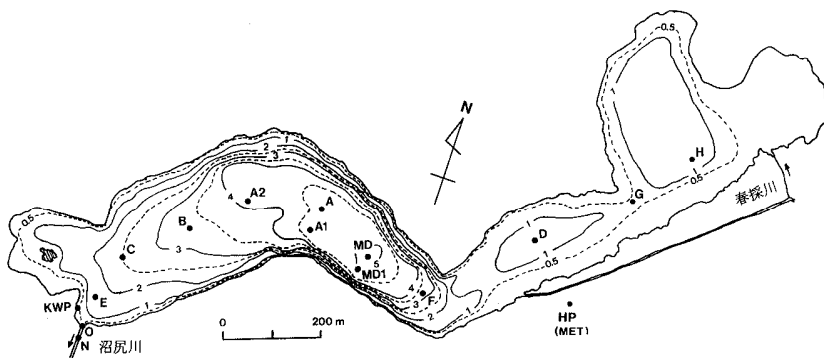


図1 春採湖の湖盆図と観測地点の位置

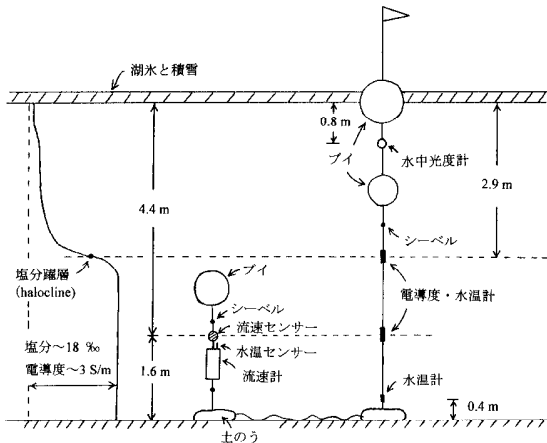


図2 最深点(MD点)での計測器の係留法(1997年1月20日～4月23日)

射計の値との相関($r=0.843$)から水中日射量 (W/m^2) として求めた。

他方、MD点では毎週1回、水温・電導度・溶存酸素濃度(DO)の鉛直プロファイル(0.2m深ごと)を電導度計・DO計で求め、1月20～21日にはMD点、MD1点、A点、A1点、A2点、F点およびD点で、3月11～12日にはMD点、A点、A2点、B点、C点、F点、E点、H点およびG点で、それぞれ0.2m深ごとの水温・電導度・DOの鉛直プロファイルを得た。さらにこの時、A、MD、F点で積雪深、ゆき氷、透明氷の厚さを計った。

湖水の塩分 $S(‰)$ は、試水の定量分析で得た塩素量 $Cl(mg/l)$ から、硫化水素濃度が低いと海水の化学組成比と同じとして関係式 $S=0.030+1.8050 \cdot Cl$ で求め、さらにこの S 値と同時の $25^\circ C$ 電導度 $EC25(S/m)$ 値から回帰直線 $S=6.0675 \cdot EC25-0.515(r=0.990)$ の関係を得た。この式を用いて現場測定した $EC25$ は S に変換し、湖水密度 ρ

$s(kg/m^3)$ をPond and Pickard(1986)からの経験式で求め、これより最終的に現場密度 σ_t を $\sigma_t = \rho_{st} - 1000$ と定義して計算した。

なお、紙面の関係で、表-1の測定項目全ての結果を紹介・議論することはできないが、今回得られた重要な知見について、次の「3.」で簡潔に述べることにする。

3. 結果と討論

(1)湖水位と海水進入

図-3は1996年12月1日～1997年4月30日間の1時間ごとのKWP点での湖水位、N点での河川水位及び釧路港の潮位(釧路地方気象台資料、1997)、O点での水温と電導度(25℃換算値)(釧路市道路河川課資料、1997)を示す。ここで、湖水位・河川水位・潮位はいずれも海拔高度(m asl)で表し、あわせて同期間の沼尻川河口の閉塞開始日と終了日(海藻除去日)を矢印(それぞれ→と⇒)で示した(釧路市道路河川課資料、1997; 河口閉塞については、知北ら,1997を参照)。今回の結氷期間は目視により、全面結氷は1996年12月11日～1997年3月29日の期間で、全面開氷は1997年4月8日と判断された。

図-3の期間の海水進入は、O点電導度の急激な上昇から判断できる。1996年12月中旬～1997年4月上旬の期間は沼尻川の潮止堰頂部標高が0.84mで、これは春採湖流出口底面の標高0.43mより0.41m高い。このため、電導度の急激な上昇から示されるように、沼尻川水位が潮位との応答が顕著(つまり沼尻川河道で海水遡上が起こっている状態)かまたはその後の河口閉塞(河川水位が高位のままわずかに上昇する状態)で海水が河道に残存する時には、潮位(または河川水位)が堰頂0.84mを越えると海水が湖に進入する可能性がある。1996年12月1日～20日の期間、河口閉塞でN点水位が湖水位より異常

に高くなり、河道水が湖に逆流してこれによる湖水位の上昇が認められる。このとき、潮位が高い状態で河口閉塞の解除(海藻の除去作業)を行うと、海水が遡上し海水進入が起こる。その後1996年12月21日～1997年3月28日まで、湖水位は0.90～1.02m aslで高位に安定した。この間の海水進入は、12月24日、12月26～27日、12月29～30日、1月2日、1月22～27日、1月30日～2月5日、2月17～18日、2月24日、2月27日、3月2日、3月8日、3月15～16日に起こっている。このうち、電導度増加が顕著な1月22～27日は、大潮により大きな海水進入があったことが予想される。但し、釧路市道路河川課資料では、このときは河口閉塞の状態にあったと報告されているが、1月9日

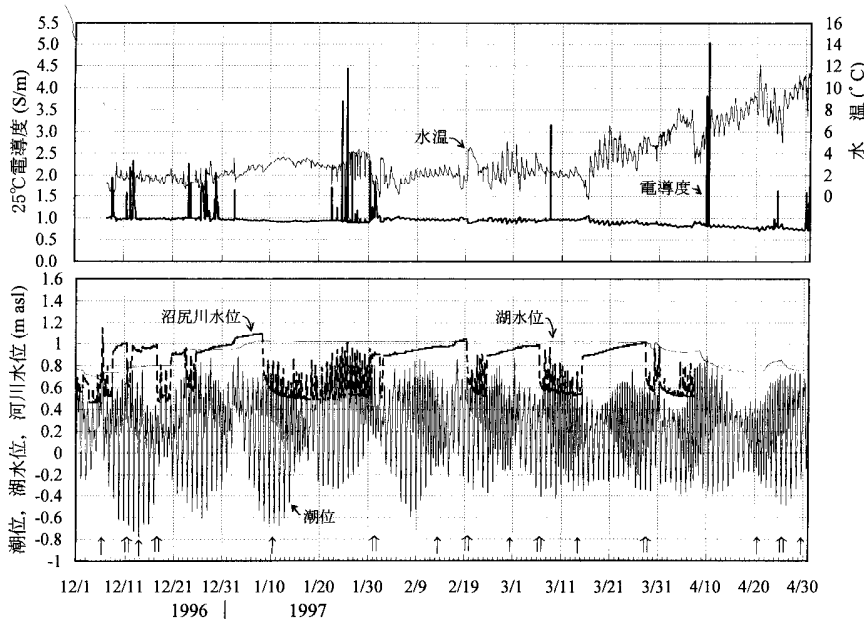


図3 1996年12月1日～1997年4月30日間の潮位・湖水位・沼尻川水位(いずれも標高:m asl)および湖流出口での電導度(25℃換算値)・水温。矢印は河口閉塞開始日(→印)とその解除日(⇒印)を示す。

～29日の間河川水位は潮位に対し鋭敏に反応しており、海水遡上があったことを示す。このことから、海藻の進入程度に応じ、河口閉塞状態は完全閉塞（大潮時でも海水遡上がなく、沼尻川河道水が停滞または春採湖へ逆流）の場合と部分閉塞（大潮時に海水の遡上がある）の場合とがあるようである。図-3より、矢印で示す目視による閉塞の期間は、必ずしも河川水位と潮位の未対応の期間とは一致していない。河口閉塞と海水遡上状態の客観的判断は、沼尻川河道内での水位と電導度の連続観測を通してはじめて可能となる。

全面結氷が終了する1997年3月29日以降は、3月28日に河口閉塞を解除したため湖上層水の排出で湖水位が低下している。この期間も、大潮時の海水進入（4月9～10日）と河口閉塞による逆流からの海水進入（4月24日、4月30日）が起こっている。これは、このとき既に潮止堰の高さを38cmに下げていることによる。この場合は、潮位または河川水位が堰頂標高0.70mを越えると海水進入の可能性が出てくる。今後、死水層の上昇に直接係わる海水進入の量を定常的に知るには、N点で水位・電導度の観測を常時実施し、他方で海水進入時の流量・電導度観測から海水上界面の位置と進入量との関係を求めなければならない。この関係は、河口閉塞のない場合比較的容易に求められると考える。

(2) 水質構造の時間変化

図-4は、MD点で得た代表的な水温・電導度（25℃換算値）・溶存酸素濃度(DO)の鉛直分布を示す。1996年11月18日～1997年3月12日の電導度プロファイルから、結氷期に入り1月9日で塩分躍層の位置は2.9m深から3.1m深へわずかに低下しているが、その後は結氷期間中2.9m深まで上昇したのみで、塩分分布は全体的に安定した状態にあったことがわかる。なお、1月9日から3月12日にかけて、電導度の比較的大きな増加が2.6m～3.2m深に限られることから、図-3で示した海水進入の量はわずかであったと判断される。

結氷期間中、電導度に比べ水温分布は大きな変動が見られる。特に水深1m～2.8mの範囲で、1月9日から3月12日にかけて水温はむしろ増大傾向にある。これは前年の結氷期（1995年12月～1996年4月）と逆傾向で、この原因として、今回の結氷期は湖水上の積雪が小さく、このため日射の湖水下への透過による昇温があったことが考えられる（知北ほか、1997のFig.3参照）。この積雪の様子は、図-5に示す積雪深（釧路地方気象台による毎日午前9時の値；釧路地方気象台資料、1997）を参照されたい。なお、知北ら(1997)による

と、湖水上の積雪深は必ずしも水平的に様な値はとらず、降雪時の風の影響で内陸方向（A点→MD点→F点）に増大の傾向がある。1995年12月～1996年4月結氷期も、5回（1996年1月3日～12日、1月21日～3月5日、3月13日～18日、3月24日～28日及び3月30日～4月9日）にわたって河口閉塞は起こっており、このため今回の水温上昇が、河口閉塞によって生活排水を含む沼尻川の河道水が湖上層へ逆流したことによる、とは考えられない。

図-3に示す海水進入のうち、1月24日と1月25日の16時には電導度3.7～4.4S/m（結氷期間中最大の値）、水温0.0～0.7℃となった。これは、図-4の死水層に比べ低温高塩分の重い海水が、湖底部へ底層密度流(density underflow)として進入したことをうかがわせる。図-4に示されていないが、この進入直後に対応する1月27日の電導度プロファイルは死水層で大きな変化はなかった。このことは、河口近くで進入直後に海水が湖水と速やかに混合したことをうかがわせる。1997年2月24日の水温分布では、4.6m以深に4.6～5.2℃の低温層が存在する。これは、低温な海水の底層進入によると考えられるが、これが何時の海水進入に対応するかは不明である。

なお、今回の小積雪による湖内への日射透過は、湖水下の植物プランクトンによる光合成を促進し、このため溶存酸素量(DO)は、0m～1.8m深の範囲でほぼ常に過飽和の状態にあった（岩瀬、1988参照）。これは積雪が多く、このため好気性細菌によるDOの消費がさかんであった1995年12月～1996年4月結氷期とは対照的な分布となった。このように湖水上の積雪深が、上部淡水層の水温・DO分布を大きく支配していることがわかる。実際、図-6に示す湖水下の水中日射量（水深0.8m）は、図-5の積雪深の変動に応じ大きく変化していることがわかる。両者の関係は、顕著な積雪と融解があった2月16日9時～2月20日9時と2月26日9時～3月8日9時の2つの

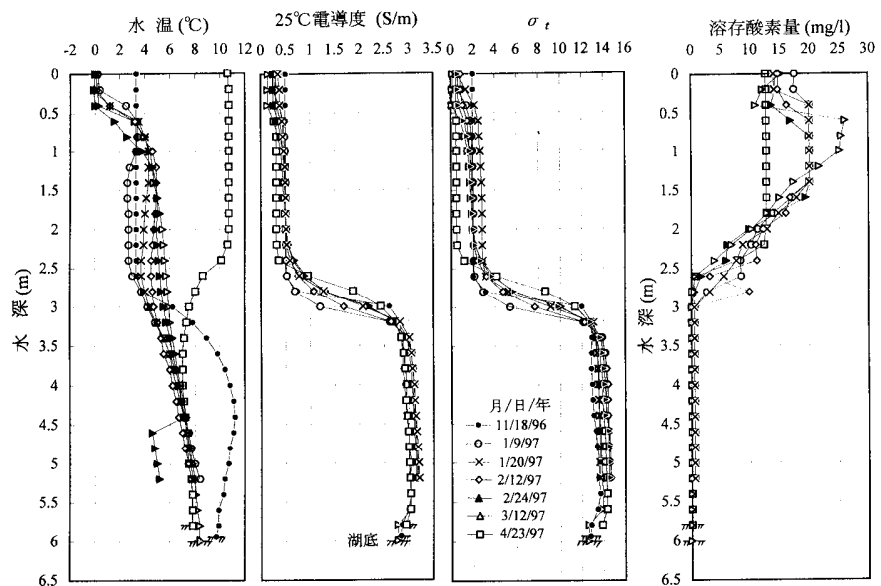


図4 最深点(MD点)における水温・電導度・現場密度 σ_t ・溶存酸素量の鉛直分布の時間変化

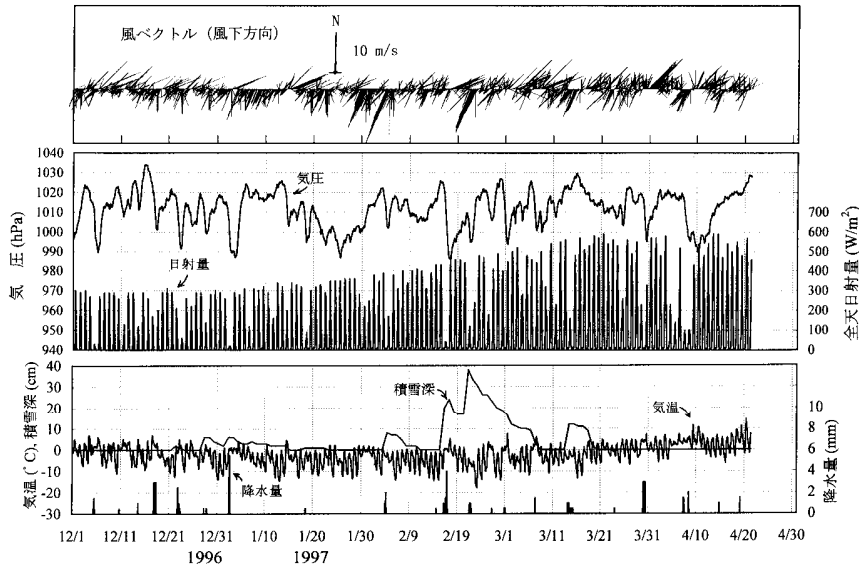


図5 1996年12月1日～1997年4月20日間の気象条件（毎時）。気圧・降水量（毎時）と積雪深（毎日9時）は釧路地方気象台資料(1997)による。

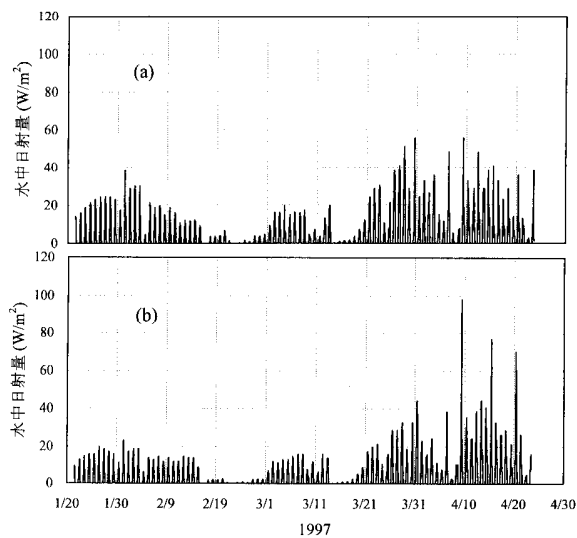


図6 (a)MD点と(b)A点の0.8m深における水中日射量の変化

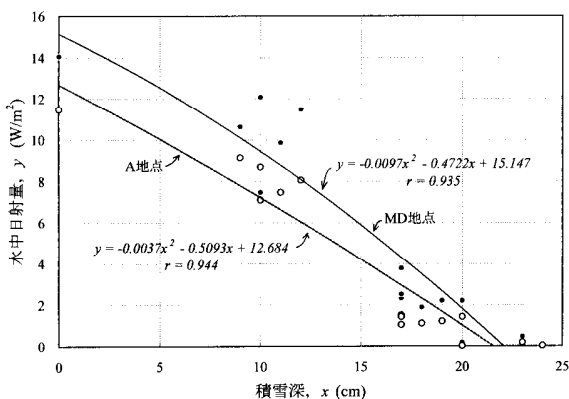


図7 積雪深と水中日射量(0.8m深)との関係（白丸がA点）

期間（図－5 参照）に着目すると図－7で示される。これから、MD点とA点の両点で水中日射が、積雪深と共に放物線状に減少することがわかる。そして両点で、積雪深約22 cm以上のとき0.8m深での水中日射量はほぼゼロになる。なお、図－7のMD点とA点の回帰曲線の違いは両点での「湖水の質の違い」を表し、各点でのバラツキは、この期間の顕熱放出による「湖水成長」の影響があることが考えられる。図－4から、0.8m深は結氷期にはDOが過飽和になり、植物プランクトンによる光合成が盛んな水深に対応する。このことから、春採湖淡水層のDO分布に湖水上積雪が大きく影響しているこ

とは明らかである。

今結氷期の湖水の厚さは、1月20日においてF点でゆき氷5.3cm・透明氷18.7cm、MD点でゆき氷3.5cm・透明氷22cm、A点でゆき氷5.5cm・透明氷20.3cmであり、積雪はどの点もゼロであった。これは昨年同時期（1996年1月22日）に比べ（積雪深8.0～9.0cm、ゆき氷11.0～13.5cm厚、透明氷17.5～20.5cm厚）、日射透過の物理条件が極めて良好であることを示す（知北ら、1997のTable2を参照）。

(3)水質構造の水平分布

図－8は、1997年1月20日・21日での水平7点における水温・電導度・現場密度(σ_t)・DOの鉛直分布を示す。電導度と σ_t の分布から、このときの塩分躍層または密度躍層は水深約2.9mに存在したことがわかる。図から、全ての測定値は湖内水平方向に一様でなく、特に水温は水平方向に最大2.5℃の差があると判断できる。これは、測点近傍での湖水の厚さ・質と積雪深に依存した日射透過・顕熱輸送の違い、および海水・沼尻川河道水の進入経路がこの分布を決定していることが考えられる。湖上層では沼尻川に近いA2点・A点で特に低温で、A点に近いA1点では既に1℃以上高温となる。これは相対的に低温の沼尻川河道水が、表層密度流(density overflow)として湖上層をO点からA2点→A点方向に拡散していることを示唆する。また死水層は、A点・A2点など最深点(MD点)より海側の点でより低温・高塩分となっている。これは、結氷期には海水の進入後風応力による熱・塩分の強い渦動拡散がなく、その進入経路に依存した底層密度流の連行(entrainment)に伴う弱い拡散が卓越するためと考える。この死水層における σ_t の空間的偏りは、層内部に圧力勾配を与え、層内の流れを引き起こす駆動力と成りうる。なおDO分布から、表層では海側ほどDOが増大し、A2点ではさらにその飽和度も増大している、これは湖水下の光合成に加え、沼尻川河道水の流入の影響によると考えられる。

図-9は、1997年3月11日・12日に得た各点の水温・電導度・現場密度(σ_t)・DOの鉛直分布を示す。なお、DOの20mg/l以上の値は、飽和度(%)から換算している。水温は図-8に比べ大きな差はなく、むしろ電導度と σ_t について、A2点の死水層で相対的に大きな値をとっている。また、表層0~0.4mのDOは、A2点で最大をとっている。他方、図-3から、3月6日には沼尻川の河口閉塞が解除され、3月8日には海水の進入があったことが推測される。このことから、A2点での高い電導度とDOは、これらの流入水の進入経路にA2点が位置していたことが考えられる。

水温分布は、1月20日・21日と比較し同水深での各点間の差は小さく、せいぜい1.6℃である。しかもMD点底部を除き、水深約1mより以深で1月20日・21日より昇温状態にある。これらの原因として、「3-(2)」で述べたよ

うに今結氷期は小積雪のため湖水での日射透過が卓越したためと考えられる。実際、3月11日・12日の湖水積雪はゼロで、湖水厚はA点で40.8cm、MD点で38.1cmで全て透明水、F点ではゆき氷9.5cm厚の下に透明氷24.0cm厚であった。但し、MD点底部のみ水温は1月20日・21日より低く、海水進入の影響を示唆する。また上層の水温が高いのは死水層のない陸側浅水域(G点とH点)で、この2点ではDO分布も類似し、1m深に過飽和の鋭いピークを持っている。このことから、湖水下の光合成に加え、DOに富んだ流入河川である春採川や湖岸付近の地下湧水が約1m深に中層密度流(density interflow)として貫入していることが考えられる。

(4)流速と水質の時間変化および死水の流動機構

図-10は、MD点の死水層中央部(水深4.4m)における1996年12月1日~1997年4月23日間の(a)25℃電導度・

水温とこれから得られる(b)現場密度(σ_t)、及び(c)水平流速と(d)水温の時間変化を示す。なお、(c)(d)については、流速計の不調で12月12日~1月20日と2月8日~3月11日の期間は欠測である。図-3で示した1月24日・25日の海水流入に対応し、1月25日1:00頃と26日0:00頃に一時的な電導度増加と水温上昇が認められる。しかし、その変動はわずかで、全体として3月11日頃まで水温は低下し、電導度は全結氷期間余り変化しない。4月9日からの全測定量の大きな変動は、全面開氷による風の影響で乱流拡散が卓越しはじめたことによる。死水の密度(σ_t)は、3月15日~17日の極大を境にその前後で増減傾向にある。

流速は1月24日・25日の海水進入による変動は現れず、この時期0.7~0.8cm/sの弱い南西~南南西に向かう流れがみとめられる。MD点4.4m深付近の湖盆形態を考慮すると、これは弱い時計回りの水平循環流があることを示唆する(図-1参照)。しかし、流速は流速計の測定精度 ± 0.5 cm/s程度であり、ここではむしろほとんど停滞していると考えた方がよい。他方、3月11日~4月8日の期間は、北北東~北東に向かう1.0~2.0cm/sの流れが卓越し、全体としてMD点の海側から陸側に向かう圧力勾配によって生じた反時計回りの水平循環流があることを強く示唆する。この流れの要因としては、

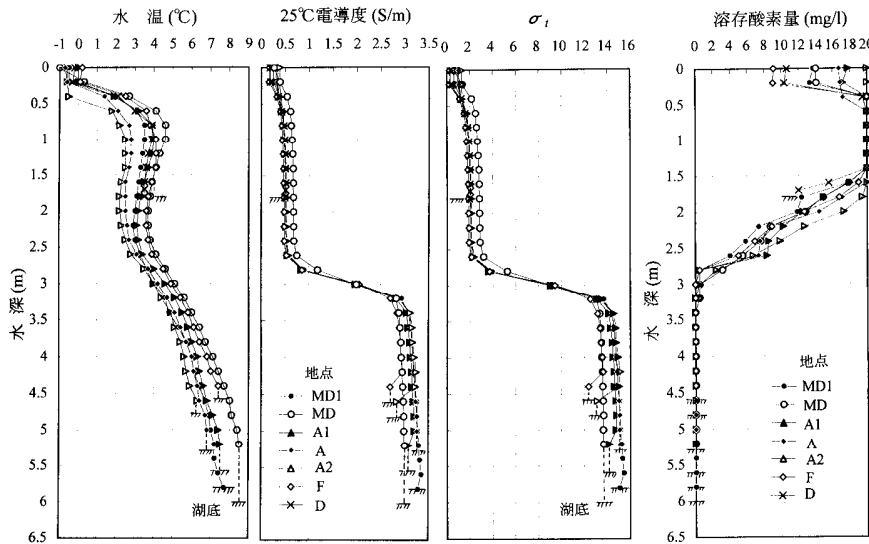


図8 1997年1月20・21日における各点の水温・電導度・現場密度 σ_t ・溶存酸素量の鉛直分布

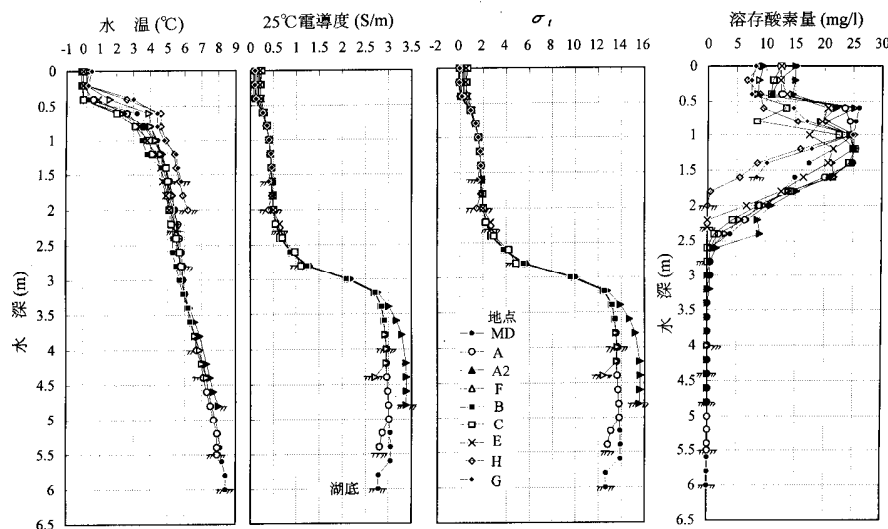


図9 1997年3月11・12日における各点の水温・電導度・現場密度 σ_t ・溶存酸素量の鉛直分布

図-9の電導度・ σ_t 分布にみられるように、海水進入によって死水層内でA2点からMD点に向かう圧力勾配が生じたこと、これが解消されるのに20~30日スケールの時間を要したことが上げられる。つまり死水層内の流れとしては、傾圧流(baroclinic current)が卓越していると考える。しかし、これを立証するには死水層領域での立体的な水質構造の時間変化を調べる必要がある。

ここで、図-10の湖流変動にどんな物理量が効いているかを調べるため、図-10の3月12日16:00~23日7:00間の時系列データに対しFFT(Fast Fourier Transform)法によるスペクトル解析を試みた(図-11)。この図のスペクトル・ピークより、流速変動は周期14~16時間と8.3時間が卓越しており、これに対して塩分・水温・ σ_t が周期14~16時間に、水温が周期8~9時間にスペクトル・ピークをもつことがわかる。つまり、一方向流以外の変動成分は、水温の変動が流速変動に影響していることがわかる。これは知北ら(1997)が示した結果と同様である。3月12日~23日の期間は3月14日に12cmの積雪があり、これは3月20日にはゼロとなった(図-5参照)。しかし図-7からわかるように、積雪12cm以下では湖水下への日射透過は十分考えられる。このことから、3月12日~23日の水温変動は主に日射によって支配されていることが考えられる。

4. 結 論

本研究では、結氷期における春採湖での水質構造や流動の時間変化について、特に死水の挙動に係わる熱的・化学的条件とその機構を明らかにすることを目的とした。ここでは、次のことが結論される。

- (1) 沼尻川河道に設置した潮止堰により海水進入が制御され、結果として前年結氷期(1995年12月~1996年4月)に比べ、死水層の上昇はかなり抑えられた。
- (2) 今結氷期の湖水は結氷開始時に降雪がなく(図-5参照)、結果としてゆき氷がほとんど発達しなかった。さらに結氷期全体として小雪で、これにより湖水が日射の透過に対し好条件を与える透明水が長期間存在した。これが湖水下の光合成を可能にし、湖上層のDO

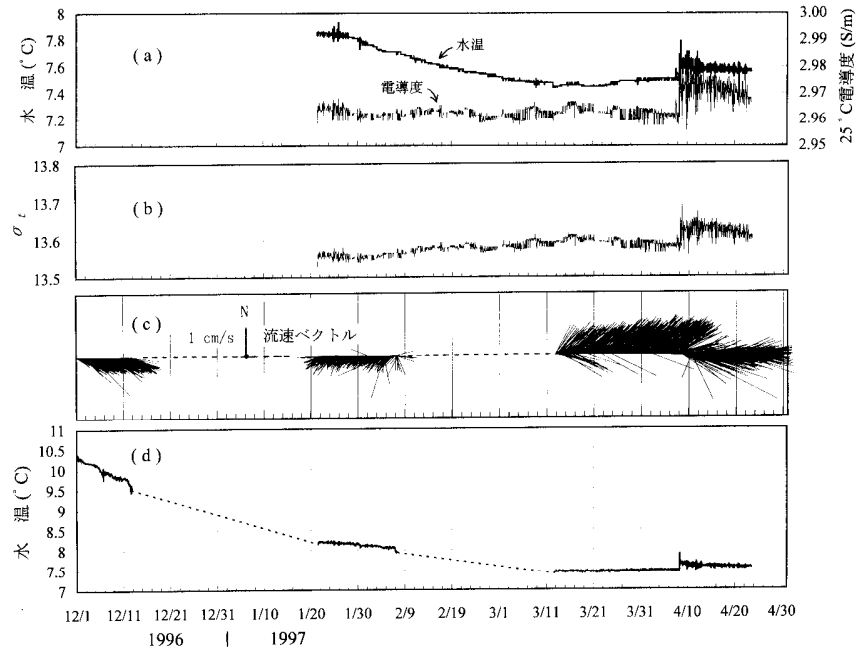


図10 MD点の4.4m深における(a)電導度・水温、(b)現場密度 σ_t 、(c)水平流速ベクトルおよび(d)水温の時間変化

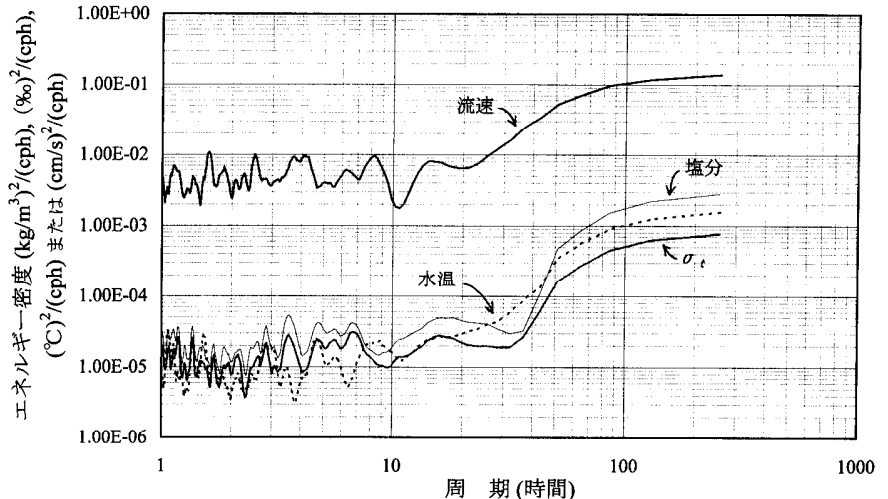


図11 図-10の3月12日16:00~23日7:00間の時系列に対するFFTスペクトル

を常に過飽和にする要因となった。

- (3) 湖水下の水中日射量は、湖水上積雪深と密接な関係があり、ある期間に区切ると積雪深に対し放物線状に減少することがわかった。
- (4) 最深点の死水層中央部(水深4.4m)で、北北東~北東に向かう1.0~2.0cm/sの流れが観測された。この流れの駆動力は、海水進入からの塩分の空間的偏りに基づく圧力勾配であり、流れは傾圧流(baroclinic current)と考えられる。
- (5) (4)の流動機構をさぐる目的で、流速・水温・電導度の時系列データをスペクトル解析により定常変動成分に分け、相互の因果関係を調べた。この結果、死水層内の流速の短周期変動は水温変動に対応することがわかった。

現段階では、死水層内の流動についてその物理機構を完全に解明するには至っていない。(4)で述べた塩分の空間的偏りの継続時間を調べるには、進入海水の動き（すなわち底層密度流）を対象にした観測が必要である。また、DOの豊富な海水が流入後どのような過程で無酸素状態になるか、流入海水と底層水・底質との相互作用を定量的に明らかにする必要がある。なお、本研究の一部は、1998年8月アイルランド・ダブリンで開催される国際湖沼学会で発表予定である。

謝辞 資料提供に関し、釧路市道路河川課の方々にご協力頂いた。深謝致します。また、調査にあたり北海道大学大学院工学研究科・岩竹 貴則氏と同理学研究科・長谷川浩氏にご助力頂いた。御礼申し上げます。

5. 引用文献

知北和久・福山龍次・坂本博明・中路晃平(1997). 閉鎖性汽水湖における死水の挙動特性－釧路市・春採湖

での結氷期観測から－. 北海道大学地球物理学研究報告、60号、13-28.

Chikita, K., N.D. Smith, N. Yonemitsu and M. Perez-Arlucea(1996). Dynamics of Sediment-Laden Underflows Passing over a Subaqueous Sill: Glacier-Fed Peyto Lake, Alberta, Canada. *Sedimentology*, 43(5):865-875.

岩瀬政吉(1988). 春採湖の水質の変化に関して. 水処理技術、29(10): 625-634.

釧路市道路河川課資料(1997).

釧路地方気象台資料(1997).

Pond, S. and G.L. Pickard(1986). *Introductory Dynamical Oceanography*. Pergamon Press, Oxford, 329pp.

清水康行・藤田睦博・平野道夫・山田 正(1997). 網走湖および網走川における塩分密度流の計算. 水文・水資源学会誌、10(1): 44-55.