

オホーツク海沿岸に点在する海跡湖の湖沼環境 — 藻琴湖の場合 —

LAKE ENVIRONMENT OF THE SEA-ORIGINATED LAKES LOCATED IN COASTAL REGION IN HOKKAIDO WHERE IT FACED THE SEA OF OKHOTSK : LAKE MOKOTO

早川 博¹・本島 翼²・内島 邦秀³

Hiroshi HAYAKAWA, Tsubasa MOTOJIMA and Kunihide UCHIJIMA

¹正会員 博(工) 北見工業大学助教授 工学部土木開発工学科 (〒090-8507 北見市公園町165番地)

²非会員 修(工) (株) 豊水設計 設計部 (〒001-0035 札幌市北区北35条西4丁目2-18)

³正会員 博(工) 北見工業大学教授 工学部土木開発工学科 (〒090-8507 北見市公園町165番地)

There are many sea-originated lakes located in coastal region in Hokkaido where it faces the Sea of Okhotsk. For example, Lake Mokoto is the small brackish lakes where salt water exists together to the fresh water, and the fishery of *pond smelt* and the *corbicula japonica*, etc. is active. The ecosystem of various flora and fauna is seen, and moreover, the sea-originated lake in the coastal region becomes valuable resources for tourism. In this research, the field investigation has been begun aiming to clarify the impact that the washload from the upper river basin gives to the water environment of Lake Mokoto. This paper reports on the water environment of Lake Mokoto in the current state from the field investigation in snow-melt flood period, and in September, 2005. The interface between a freshwater and a saline-water layer in snow-melt period disappeared as seawater flowed in, and as a result, the lake almost became the Salina in summer. It is verified by the numerical simulation that salt water intrusion to a sea-originated lake is promoted by the rise in the surface of the sea caused by the global warming in the future.

Key Words : sea-originated lake, brackish lakes, lake environmental, sea level rise, salt water intrusion

1. はじめに

オホーツク海沿岸には網走湖、サロマ湖に代表される海跡湖が数多くみられる。その多くは塩水と淡水が混在する汽水湖であり、ワカサギ、シジミなどの漁業が盛んである。また、沿岸域にある海跡湖は多様な動・植物の生態系がみられ、風光明媚な景観と相まって観光資源にもなっている。オホーツク海沿岸の海跡湖では道北のクッチャロ湖について網走市近郊の濤沸湖が2005年11月にラムサール条約湿地に登録されたところである。

近年、地球温暖化の影響が色々なところで顕在化してきている。海面水位の上昇もその一つであり、オホーツク海においても図-1に示すように、網走ではここ30年間で年平均潮位¹⁾が約15cm上昇している。更に最近10年間は最大潮位と最小潮位の差が広がる傾向もみられ、海跡湖への海水の流入・流出を活発化させている。本研究の調査対象とした網走市近郊に位置する海跡湖の一つである藻琴湖では、夏季の8月末において湖水は全層が海水にほぼ等しい約30‰の塩分濃度を観測している²⁾。地元漁業者への聞き取り調査によると、この塩分濃度の上昇に

伴って、汽水湖特有のシジミやワカサギの漁獲量が激減し、そのため、漁業者は塩水に強い牡蠣の養殖に転換せざるを得なかった、と聞いている。

このように汽水湖の塩水化は生態系を変化させ、湖沼環境にとって大きなインパクトファクターとなる。藻琴湖では以前から流入河川である藻琴川流域からの土砂流入による堆積が活発で、沈砂池などの土砂抑止対策がとられている。しかしながら、湖の塩水化が進むと、流入してきた微細な浮遊土砂の凝集沈降・沈殿によって、湖底の堆積が進むことになる。現況においても、藻琴湖は

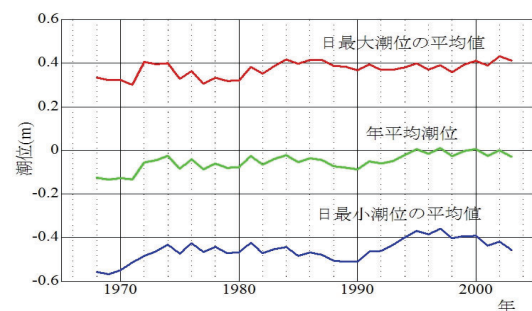


図-1 潮位の経年変化(網走)

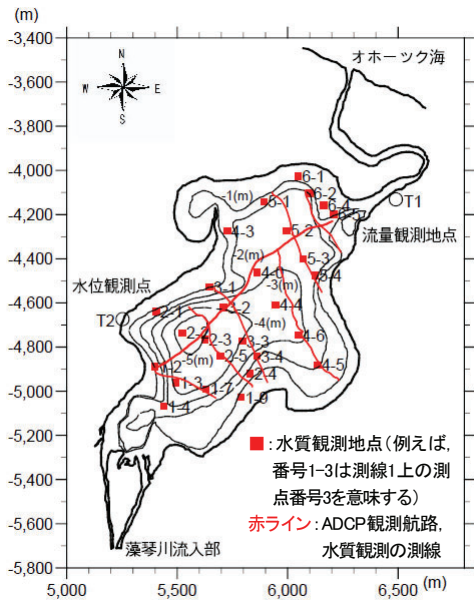


図-2 藻琴湖の観測地点とADCP航路

湖底がヘドロ状の底泥に覆われ²⁾、湖沼環境にとっても好ましい状況ではない。したがって本研究は、海面上昇に伴うオホーツク海沿岸に位置する海跡湖の塩水化の現状と、それに伴って促進される浮遊土砂の堆砂機構並びに湖沼環境への影響の解明を目的とし、本報告では藻琴湖における2005年4月の融雪出水期と9月の調査結果を報告する。

2. 藻琴湖の概要と観測方法

藻琴湖はオホーツク海沿岸域に多く見られる海跡湖の一つで、網走市近郊の藻琴山に源を発しオホーツク海に注ぐ流域面積184.1km²、流路延長29.8kmの南北に細長い二級河川、藻琴川流域の河口部に位置している。湖は湖沼面積が1.12km²、最大水深が5.8m、平均水深が1.8mの全体的に浅い小湖で、図-2に示す狭水路を通しての海水の出入りが盛んな汽水性の腐植栄養湖に分類される³⁾。透明度は1.4mと富栄養湖、腐植栄養湖の平均的な値をとり、湖水の色は有機質の茶褐色を帯びている。湖底の大部分は黒色の底泥（平均粒径 $d_m = 0.11\text{mm}$ 、密度 $\rho_s = 2.46\text{g/cm}^3$ ）から成り、一部に砂質土がみられる²⁾。

(1) 2005年融雪出水期の観測

融雪出水は北海道の湖沼環境にとって毎年繰り返される重要なイベントであり、今回の調査は融雪出水が流入してきた場合の藻琴湖の流況把握とそれに伴う水質変動の解明を目的としている。しかし、観測期間の2005年4月21日～23日は季節外れの大雪に見舞われ、網走⁴⁾で約20(cm)の降雪を記録した状況での観測であった。

流況観測（4月22日）はRD-Instruments社製Work Horse ADCP 1200kHz（ボトムトラックオプション）を専用小型ボートに載せ、船外機付ゴムボートで曳航しながら図-2に示す縦・横断測線（測線1～測線6）沿いに計測した。

次に、湖出口部（T1地点）の流量観測（4月23日）は、

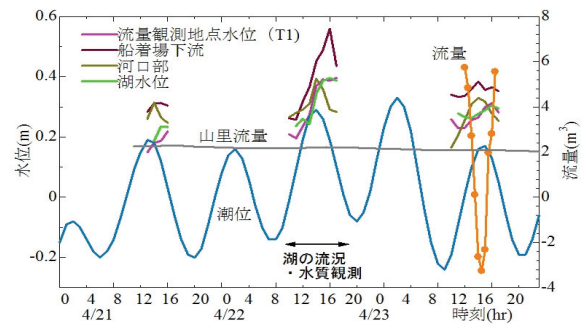


図-3 融雪出水観測期間中の流出入流量、水位の経時変化

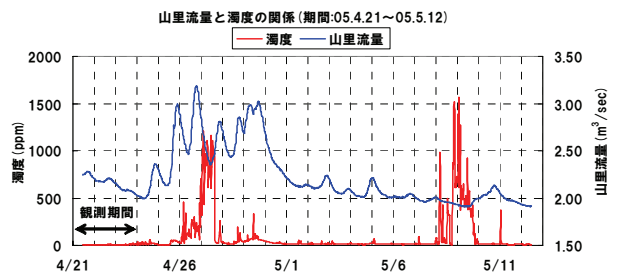


図-4 藻琴川流入流量と濁度（山里観測所）

Stream Pro – ADCP(RD - Instruments社製)を使用した。このADCPは測定範囲が水深2mまでの小型ADCPで、水面下12cmから計測可能であり、湖出口河道部の河床高、横断流速分布、流量観測が同時に行うことができる。

一方、水質観測(4月21, 22日)は図-2に示す観測地点で測定予定であったが、悪天候のため各測線の中央6地点について水深10cm間隔で濁度、塩分濃度、水温を、DOのみ湖底部で計測した。なお、計測機器はアレック電子の多項目水質計AAQ1180とTOAの多項目水質チェッカーWQC-22Aである。

(2) 2005年9月期の観測

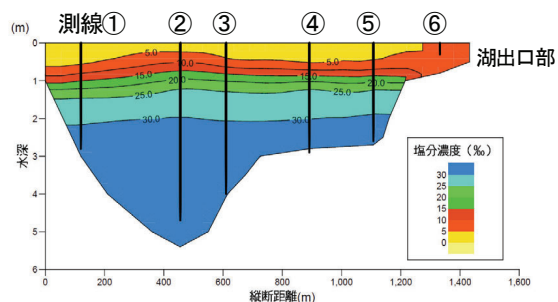
前年2004年8月の大潮時の状況²⁾と、それより低い平常時の潮位変動による海水流入の状況を比較するために、9月期の観測は2005年9月20日～22日に実施し、湖出口部では流量・水質項目の24時間観測（9月21日～22日）、湖内の各観測地点(計27地点)では水深10cm間隔で水質観測（9月20日）を行った。水質項目は融雪出水期と同様で、クロロフィル濃度を追加した。また、湖出口河道部の流速測定にはアレック電子の2次元電磁流速計ACM-210を使用した。

3. 藻琴湖観測の結果と考察

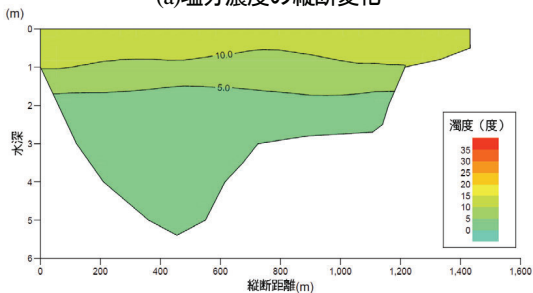
(1) 融雪出水期の湖面水位・潮位と流出入流量

図-3は観測期間中の湖面水位と潮位の関係、湖と海とを出入りする流出入流量の経時変化である。図において流量を表示している期間が湖出口部での流量・水質の観測期間であり、湖内の流況・水質調査期間も図中に表記してある。

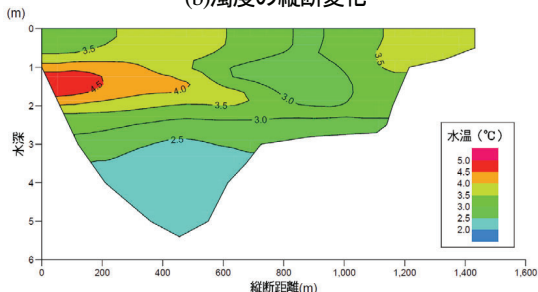
観測期間中の藻琴川流域からの流入融雪流量は図-4のように融雪最盛期を迎える前で約2m³/sと少なく、湖出口部を流出入する流量の約1/3程度であった。その後



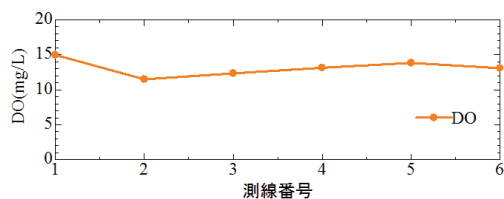
(a) 塩分濃度の縦断変化



(b) 濁度の縦断変化



(c) 水温の縦断変化



(d) 湖底部のDOの縦断変化

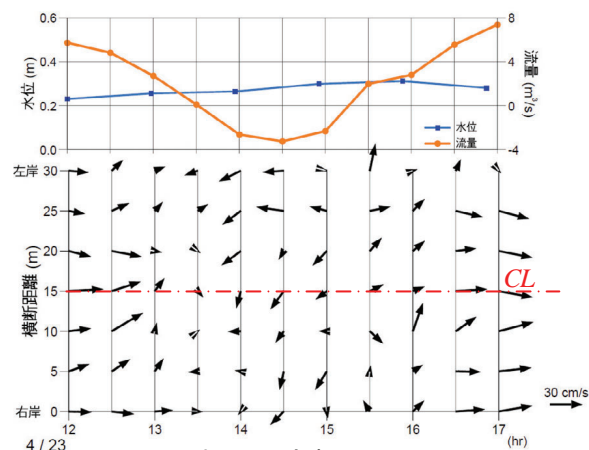
図-5 融雪出水期の湖の水質 (2005年4月22日)

観測された融雪流量の最大値は $3.2\text{m}^3/\text{s}$ (4月27日)であった。

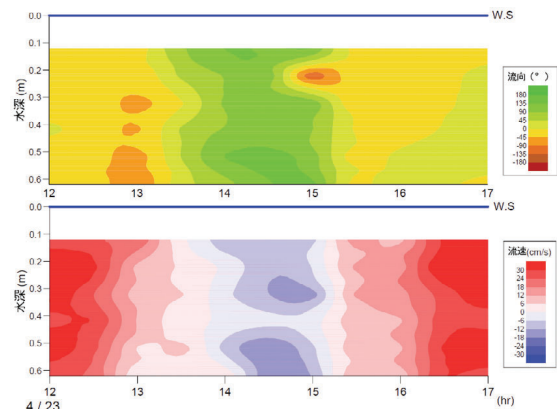
(2) 融雪出水期の湖内の流況と水質

藻琴湖のように海水の出入りが活発な非常な流況を短時間で観測するには、ADCPによる移動観測が必要である。しかし、観測日は風が強く北西の風速 10m/s の風が観測されていた⁴⁾。湖内の流速は出口部を除けば約 5cm/s と微流速であり、牽引したADCP用小型ボート自体の風波によるローリング等の影響が観測値に作用し、湖内の定量的な流況を明確にすることができなかった。

一方、図-5(a)~(c)は図-2に示す湖の中央部を縦断する測点における観測結果をバイリニア(双線形)補間して作成した水質項目各々の縦断面分布図である。また、(d)は各測線湖底部のDOである。ここで、図の左端が湖流入部の上流、右端が湖出口部の下流で、図中の実線が縦断測線上の測点の位置である。



(a) 水深平均流速ベクトル



(b) 横断距離15m地点の流下方向流速と流向の鉛直分布

図-6 T1地点における流速ベクトルの経時変化

塩分濃度は水面がほぼ淡水で、水深 1m 付近から 15% と急激に増加し、湖底では海水に近い 30% になっている。塩淡水境界はこの急変する 1m 付近であると考えられる。このとき水面の淡水層は濁度が高く、水深が深くなるほど濁度は低い。また、水温分布は水の密度が最も大きくなる 4°C の水塊が水深 $1\sim 2\text{m}$ 付近に見られる。河川からの流入水は塩分濃度と濁度の図から表層約 50cm の淡水部分を構成しており、この水塊は流入水によるものではない。これは水深 1m より下の湖底に塩分濃度の大きな塩水があるため、水温による密度の違いより塩分濃度による密度の違いが卓越し、 4°C の水塊がその位置で停滞していると考えられる。なお、この現象は、観測日のように日平均気温が 0°C と低く⁴⁾、流入水の水温も低い場合にこのように表層の水温が 4°C より低くなる。逆に外気温や流入水の水温が高くなると、水温分布は水面から水深方向へ徐々に水温が低下する分布形になる。

(3) 融雪出水期の湖出口部の流況と水質

図-6は融雪出水期における湖出口部T1地点の河道区間の流況を示した図で、(a)が水深平均流速ベクトル、(b)が横断距離 15m 地点(ほぼ河道中央部)の流下方向流速・流向の鉛直分布の経時変化を示している。ここで、流向は下流向きを 0 度にして、右回りを正とした。なお、図の上部には水位と流量の経時変化も併記されている。

これらの図から、流量の経時変化に対応し、まず 12 時

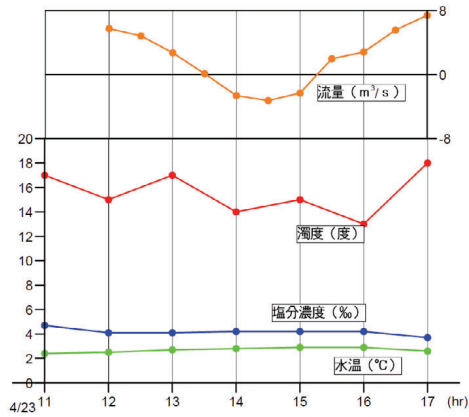


図-7 融雪出水期の湖出口部の水質(2005年4月23日)

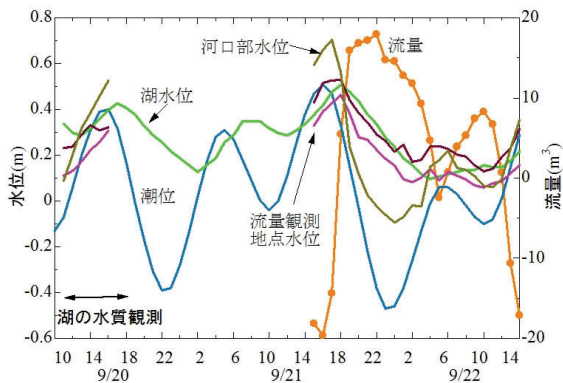


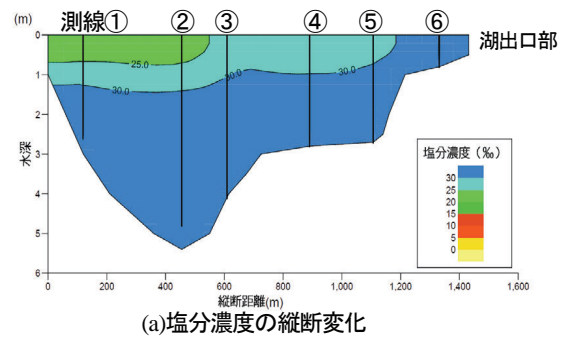
図-8 9月の観測期間中の流出入流量, 水位の経時変化

の強い流下方向の流れが左岸方向へ向きを変えながら減少し、13時30分に流れがなくなる。その後は右岸方向に流れを変えながら上流に逆流し、16時以降には再び左岸方向に向きながら流下方向への流れを強めていく様相を呈している。順流時には左岸側、逆流時には右岸側の流向を示すのは、図-2に示すようにT1地点のすぐ下流側で左岸側に蛇行する河道平面形状による影響であると考えられる。

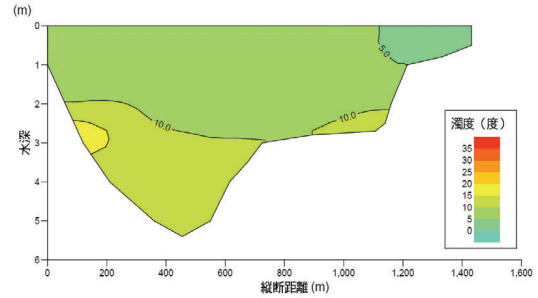
一方、融雪出水期に流域から流入する融雪水は湖水面に淡水層を形成し、その淡水層が湖水位と潮位との関係によって入・退出を繰り返している。図-7は4月23日の11時から17時までの6時間の流量と水質の経時変化である。ここで、水質は事前の予備観測結果からほぼ水深一様な鉛直分布をしていたので、河道中央部の水深の約5割である深さ75cmの地点の観測値を水質の代表値とした。一般に湖へ流量が逆流するときは海水が流入してくると考えられるが、この観測期間中の塩分濃度に変化がほとんどなく、ほぼ淡水となっている。この理由として、逆流の期間が2時間と短いために、観測地点を流下した淡水が海に到達する前に押し戻されてきたものと考えられる。

(4) 9月期の湖面水位・潮位と流出入流量

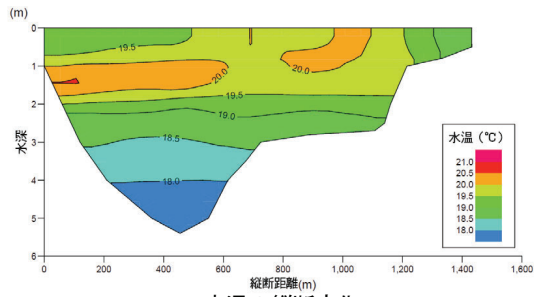
図-8は観測期間中の湖面水位と潮位の関係、湖と海とを出入りする流出入流量の経時変化である。この時期の流域からの流入流量は図-8に記載していないが約 $1\text{m}^3/\text{s}$ 程度であり、湖出口部を流出入する流量と比較す



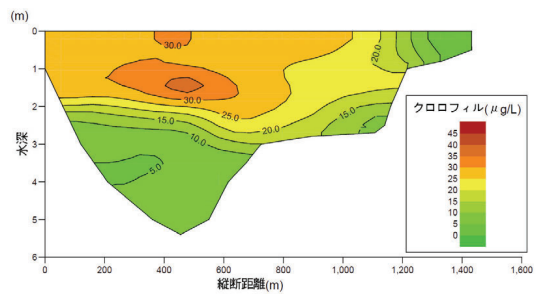
(a)塩分濃度の縦断変化



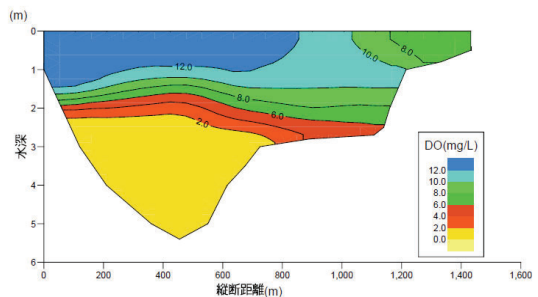
(b)濁度の縦断変化



(c)水温の縦断変化



(d)クロロフィル濃度の縦断変化



(e)DOの縦断変化

図-9 9月期の湖の水質(2005年9月20日)

ると1/20程度であり、湖内の流動にほとんど寄与していないと考えられる。

(5) 9月期の湖の水質

9月期は湖内の流況観測を実施していないので、水質だけの観測結果を示す。塩淡水境界が明確に形成されてい

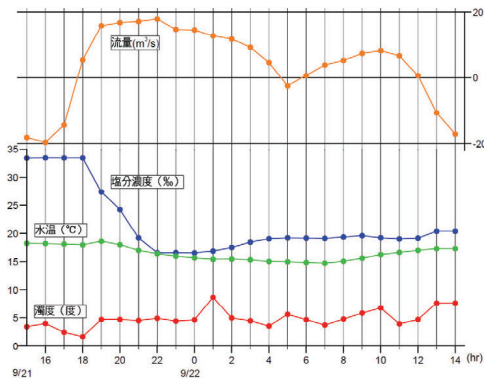


図-10 9月期の湖出口部の流況と水質

た融雪出水期から約4ヶ月を経た湖の状況は、図-9(a)～(e)に示す通りである。なお、図-5と同じく図中の実線が縦断測線上の測点の位置である。塩分濃度は湖全層にわたって高く、海水に近い値を示している。濁度もほぼ一様に分布している。また、水温分布は湖底が低く表層ほど高くなっているが、途中の水深1～2(m)付近に水温の高い水塊が見られる。

一方、クロロフィルの濃度は湖の最深部の水深1.5m付近が最大で、日射の届かない湖底部や海水が入り出す湖の出口部は低い値を示している。溶存酸素

(DO)は水温分布と同様に表層ほど高くなっており、水深2.5m以下ではほとんど酸素がない状態である。ただし、図-5(d)に示す融雪出水期の湖底部のDOは各点ともに10mg/L以上あり、常時、酸素が少ない訳ではない。

この観測結果は図-8に示す潮位の経時変化から判断すると、海水が流入しているときで、かつ、流域からの流入流量も少ない時期である。このように、2004年8月の観測結果²⁾と同じく大きな出水イベントがない年の夏季において、湖は塩水湖の様相を呈していることがわかる。

(6) 9月期の湖出口部の流況と水質

湖が塩水湖の様相を呈している時期の湖出口部における流況と水質を図-10に示す。観測は図-8に示すように潮位が満潮の海水流入が卓越している時期から始め、干潮を経て小さな満・干潮を繰り返して満潮に向かう期間までの24時間観測である。なお、水質は融雪出水期と同じく理由で河道中央部の水深の6割地点の計測結果を水質の代表値とした。

9月22日16時からの急激な潮位低下に伴い、湖出口部の流況も逆流のピークから約3時間で順流のピークへ一気に移行する。この影響により、図-9(a)に示す湖上流の表層部分の比較的塩分濃度の低い水塊が、流入してきた河川水とともに湖下流側の塩分濃度の高い湖水と混合しながら湖出口部へ流れ出すことで、18時からの塩分濃度の低下を引き起こしていると考えられる。しかしこの現象は、一時的な現象であると考えられ、9月23日13時からの逆流の影響により塩分濃度は再び上昇することが予想される。濁度は融雪出水期と比較すると低い値を示しており、観測期間中に目立った変化は見られない。ま

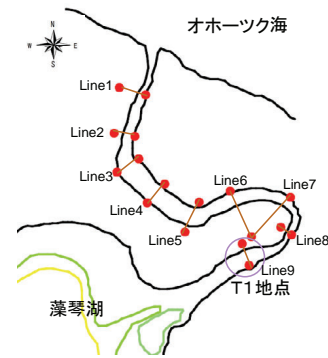


図-11 藻琴湖とオホーツク海を繋ぐ狭水路区間

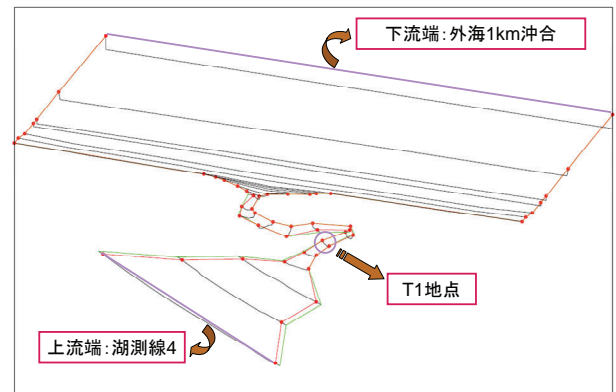


図-12 モデル化した解析対象区間

た、水温は外気温の変化に伴って変化していると考えられる。

4. 海面上昇が藻琴湖に与える影響の検討

オホーツク海沿岸に位置する海跡湖は地球温暖化に伴う海面上昇によって海水の流入が促進され、汽水湖が塩水湖に変化しつつあることが、上記の藻琴湖における現地調査結果から推測できる。ここでは図-11に示す藻琴湖とオホーツク海とを繋ぐ感潮狭水路区間を対象に1次元不定流解析を行い、将来の海面上昇に伴う湖出口部における流出入流量の変動を検討する。

(1) 狭水路区間のモデル化

図-12は狭水路区間での測量結果を基にモデル化したもので、解析範囲は図-2に示す湖内の測線4から外海1km沖合までとした。また、Line 1から外海1km沖合までの区間は、沿岸深淺図が入手できなかったため、藻琴湖と同じくオホーツク海沿岸に位置する能取湖の湖口周辺深淺図⁹⁾を参考にモデル化し、外海においては横断方向に2kmの範囲として、能取湖と同じく海底勾配は0.01と設定した。なお、河道断面が急拡、急縮する場合には、計算時にその断面間に適宜補間した横断面を追加して計算を実行している。

(2) モデルパラメータの設定

計算に与えた上流端の境界条件は観測期間中に測定した湖の水位を与え、下流端の境界条件は網走の潮位と測定した河口部の水位差を考慮して、網走の潮位に

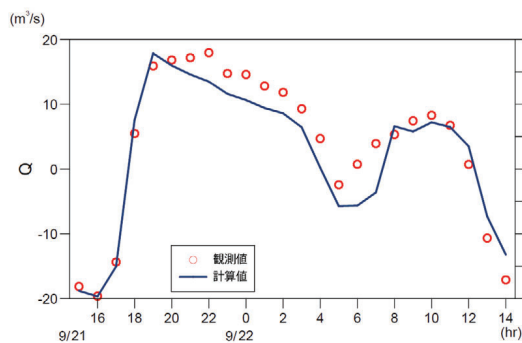


図-13 T1地点の流量の観測値と計算値

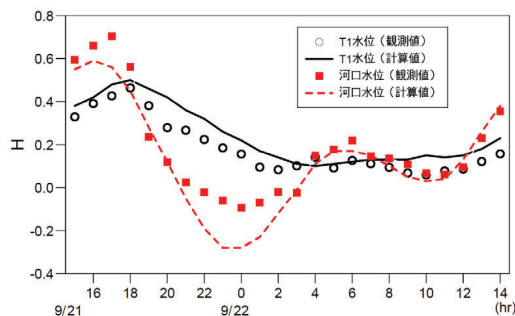


図-14 T1地点と河口部水位の観測値と計算値

12cm)加えた値を外海 1km 沖合の潮位と設定した。また、初期条件は9月期における24時間連続観測開始時のT1地点の流量を解析対象区間の全断面に与え、上・下流端の境界条件を固定して不定流計算し、各断面の流量が定常状態に落ち着いた3時間後の流量とした。なお、粗度係数は事前の予備計算結果を参考にして、狭水路区間に $n=0.03$ 、湖・外海区間に $n=0.01$ を与えた。

この計算条件で計算したT1地点(Line 9)の計算流量と実測流量を比較・検証したのが図-13であり、そのときの水位が図-14である。まずT1地点の流量を比較すると、9月21日19時～9月22日3時の海への流出流量が最大となる時間帯においてやや誤差が見られる。しかし、誤差の値が $2\sim 3\text{m}^3/\text{s}$ と小さく許容範囲内であると考えられ、全体的な流量の変動傾向を再現出来ている。次にT1地点と河口部における水位の観測値と計算値を見ると、T1地点の計算値はほぼ観測値を再現できている。しかし河口部では水位上昇時と下降時において、誤差が大きくなる傾向にある。これは河口部地点の水位は、波と河道流が衝突する区間にあって流況が複雑であることと、今回の不定流計算において、下流端の境界条件として平均潮位を与え、波の影響を考慮していないことが原因と考えられる。

(3) 海面上昇に伴う流出入流量の予測

ここ30年間で外海面が約15cm上昇している¹⁾事実を踏まえ、将来的に現在より外海面が10cm、あるいは15cm上昇すると想定した場合の流出入流量の変動を計算した。具体的には、下流端の境界条件である潮位に海面上昇分の10cm、あるいは15cmを加えてT1地点(Line 9)の断面流量を計算した。その計算結果を図-15に示す。

この図を見て分かるように、海面上昇に伴い海水の湖への流入量は増大するものの、湖から外海へ流出する流

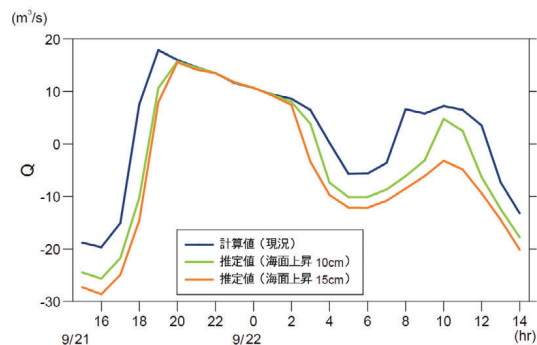


図-15 海面上昇に伴うT1地点の流量の推定値

量はほぼ変化が見られないという結果が得られた。これより地球温暖化に伴う海面上昇が藻琴湖に与える影響として、海水の流入量増加により、湖の塩水化が現在よりも進行することが予想される。しかし、今回のシミュレーションでは海水の流入量増加に伴う湖の水位上昇を上流端境界条件に反映していないため、湖から外海への流出量は、実際の流出量より多少少なく算出されていることが考えられる。

5. おわりに

2005年度の現地観測によって、藻琴湖の融雪出水期と平常時の流況と水質、湖面水位と流出入量との関係を明らかにすることができた。藻琴川からの流入流量が増加する融雪出水期においても、潮位変動に伴う影響が湖出口部の流動に顕著に現れているため、藻琴湖の水位、流動は湖と海を繋ぐ河川部を通過する潮流流量に支配されているといえる。

また、9月の平常時においても湖内の塩分濃度が海水と同じ値を示していることから、融雪出水期に形成された塩淡水境界が海水の流入により徐々に上昇し、ある時期において藻琴湖がほぼ塩水湖となることが明らかとなった。また、近年の地球温暖化に伴う海面上昇傾向は、海水の流入が促進されることが数値シミュレーションからも示唆される。

謝辞: 本研究は(財)北海道河川防災研究センター平成16年度～18年度の研究助成を受けた。また、流況観測に用いたADCPIは(株)SEAから、その他の観測機器等も(株)アルファ水工コンサルタンツ、(株)北開水工コンサルタントから借用したものである。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 日本海洋データセンター (J-DOSS) : 潮汐データ
URL: http://www.jodc.go.jp/service_j.htm.
- 2) 早川博・本島翼・内島邦秀: 海跡湖に注ぐ河川流域の土砂動態と湖沼環境に関する研究, 土木学会北海道支部論文報告集(CD-ROM版), 第61号, II-58, 2005.
- 3) 環境庁自然保護局: 第4回自然環境保全基礎調査一湖沼調査報告書(全国版), 1993.
- 4) 気象庁: 気象観測(電子閲覧室).
- 5) 近藤俊郎: 海面上昇に伴う感潮狭口の流積変化予測, 海岸工学論文集, 第37巻, pp.868-872, 1990.

(2006.9.30受付)