

## サロマ湖の流況特性について

## Characteristics of Lake Saroma Current Patterns

宮本義憲\* 武内智行\*\* 坂田年隆\*\*\*

増田 亨\*\*\* 早瀬吉雄\*\*\*\*

Yoshinori MIYAMOTO, Tomoyuki TAKEUCHI, Toshitaka SAKATA  
Tohru MASUDA and Yoshio HAYASE

サロマ湖の流況特性について現地観測（昭和60年7月および11月）を行って検討した結果、湖内の潮位差はほとんどなく、湖西域では反時計まわりの恒流の存在していることがほぼ明らかになった。また、三層レベルモデルによる流況シミュレーションの検討を行ったところ、十分な再現性の得られることがわかった。

《海跡湖；サロマ湖；シミュレーション；流況；環境》

Physical conditions in Lake Saroma from Jul. to Nov. 1985 were investigated. The results were as follows:

(1) Differences in water level in different parts of Lake Saroma were very small.

(2) There is a counterclockwise current in the western part of the Lake.

An analysis of current models of Lake Saroma was made with the data.

Keywords: lagoons, lake Saroma, simulation, current pattern, environment.

## 1. はじめに

北海道の海跡湖は地質学的年代を経て形成されており、サロマ湖や能取湖などは最深部が20 m以上あって比較的若い湖といえるが、1~5 m程度の水深しかない老令の湖沼は河川からの流出上砂の堆積作用により、浅い沼から湿原を経て陸化する運命をたどるといわれている。そのため、湖沼の機能の維持には多角的な検討が望まれている。

海跡湖はその形成過程から海水と淡水の混合する汽水性の湖であるので、湖の自然特性、物理特性、富栄養化問題は、淡水域と海域での研究成果を敷衍して解明できるほど単純ではないし、さらに北海道に特有の積雪寒冷、凍結などの条件が付加されるため一層複雑なものになっており、解明すべき基礎的研究課題の多いのが実情

といえる。

このような自然の経過に加え、近年では湖および周辺地域の開発利用が急速に進みつつある。特に漁場としてのポテンシャルの高いサロマ湖などの海跡湖では、ホタテ貝養殖などの集約的栽培漁業も大規模になっている。

水産土木研究室では、このような漁場開発および陸域開発との調和ある環境を維持していくための基礎研究として、昭和60年度より「寒冷地圏域の海跡湖における環境保全に関する研究」を行っている。この研究は、海跡湖における物質の移流拡散、循環のメカニズムの解明を行い、海跡湖の環境評価指針の確立を目的とするものである。ここでは、そのための基礎資料を得る目的で、サロマ湖の流況調査およびシミュレーションを行ったので、その結果を報告する。

\*水産土木研究室長 \*\*同室副室長 \*\*\*同室員 \*\*\*\*前水産土木研究室長 現農林水産省農業土木試験場水利部水利第1研究室長

## 2. サロマ湖と周辺の概要

### 2.1 オホーツク海の特性

#### 2.1.1 海 流

一般にオホーツク海の海流としては4～11月の間、宗谷海峡をとおってオホーツク海へ入った対馬暖流が名を宗谷暖流と改め、北海道の北東岸に沿って南東流する。その幅は距岸約15海里以内で、流速は強いところで2kt程度である。この水は、オホーツク海で33.6～34.3‰と最も高い塩分濃度をもっている。また12～4月の間は東サハリン寒流が急増強し、南樺太の東方沖から南下して雄武、紋別地区に達している。初冬に急増強する東サハリン寒流は、厳冬期に北海道沖へ多量の流水を運び、盛んな結氷現象を誘起している。

サロマ湖に直接関係のある海流水は、滝沢、青田によれば、宗谷暖流水、宗谷暖流前駆水、オホーツク海表層低塩分水および東サハリン寒流水の4つであって、宗谷暖流前駆水とは、宗谷暖流がその流れの弱くなる冬期間に北海道西方海域において冷却された水で、宗谷暖流水より低温である。またオホーツク海表層低塩分水は、オホーツク海表層の水が融氷水によって希釈された塩分の低い水である。

また、サロマ湖第1湖口周辺で観測したこれまでの結果では、海流、沿岸流とも1年を通じていずれも東南東方向へ向かい、海流は夏期で0.5～1.0 m/sec、冬期で0.15～0.25 m/secである。湖口部では潮流が流出入を繰返し、その周辺では潮流の影響を受けた流れが存在するようである。

#### 2.1.2 波 浪 特 性

サロマ湖周辺では波浪観測をしていないので、ここでは海岸地形の類似した紋別港で昭和50、51年に観測した波浪について述べる。

波浪の来襲方向は、春季に東が、夏季に東と北が、秋季に東と北西(特に波高3m以上では北)、冬季に北西から北方向が多い。全年をとおすと東が最も多く、次に北方向となっている。

#### 2.1.3 流水とサロマ湖内の結氷

オホーツク海沿岸沖は、北半球での流水海域の南限にあたっているため、氷の厚さはあまり厚くなく、流水の密度度もしばしば変化するなど流水状況の変動が著しい。網走周辺の沿岸では、1月下旬に流水が現われて一進一退を繰返し、2月中旬には本格的に接岸し沿岸一帯をうずめつくす。これに伴って、サロマ湖も12月下旬から1月中旬ごろには湖面結氷し、4月に解氷している。

### 2.2 サロマ湖の現況

サロマ湖はオホーツク海岸に位置する潟湖で、周囲

91.1 km、面積151.7 km<sup>2</sup>、最大深度19.6 mの中栄養湖であり、面積は琵琶湖、霞ヶ浦に次いで全国で第3位である。オホーツク海とは長さ25 kmの狭長な砂嘴によって境され、砂嘴中央部の三里浜と常呂町ワッカの間が幅350 mにわたり海と通じている。このため、湖口からの海水交換量が大きく、湖内の塩分濃度が30‰以上であって海域に近い性質をもち、海面に区分されている。湖内は比較的深く、静穏度が高いため、ホタテ、カキなど集約的栽培漁業を行うには最適な環境を備えていて、北海道における栽培漁業の先導的役割を果たしており、湖でのホタテ貝、カキ、ノリなどの漁業生産額は、昭和46年で7億円、54年にはホタテ貝を主体に34億円に達したが、現在では養殖量の規制を行っているため、27億円となっている。

この間、昭和40年ごろからサロマベツ川の流入する東部海域の環境に老化が見られたため、昭和48年から54年までに第1湖口とは別に常呂寄りに幅50 m、水深5 mの第2湖口が開削された。また、昭和49年1月に湖口結氷前に流水群が湖内に流入して養殖施設などに甚大な被害が生じたため、北海道開発庁により、流水流入防止の構造物設置の検討が、環境に影響を及ぼさない条件で進められ現在その工事が進められている。

## 3. サロマ湖の水理学的特性

### 3.1 潮 位 特 性

#### 3.1.1 潮 位 観 測

図-1に示すように、サロマ湖は第1湖口と第2湖口を通じてオホーツク海と海水交流を行っている。ここではサロマ湖の湖内、湖外の潮位変動特性を把握するため、昭和60年7月と11月に潮位観測を行った。観測地点は図-1に示すとおりで、湖内では登栄楽漁港、富武漁港、外海では現湖口より20 km西側の湧別川河口内にある湧別漁港である。これら3地点の潮位計は、河川で用いられている内外エンジニアリング社製の水圧式水位計NHS-W04で、計測値はサンプルタイム0.5秒で16個の平均値を計器内蔵の32 KRAMに記憶される。この水位計は淡水用であるため、海水中で計測値と潮位のキャリブレーションを行ったところ、海水密度で補正すれば高精度で潮位観測が可能であることがわかった。

また水晶時計を内蔵し、時間も高精度であるため、5分間隔で計測を行っても十分観測地点間の潮位の位相差を検討できると思われる。さらに観測地点間の潮位差の検討もできるように、観測地点の潮位計原点の測量を国土地理院の1等水準点を利用して行った。栄浦、佐呂間別漁港内には、リチャール式検潮儀を設置して補足す

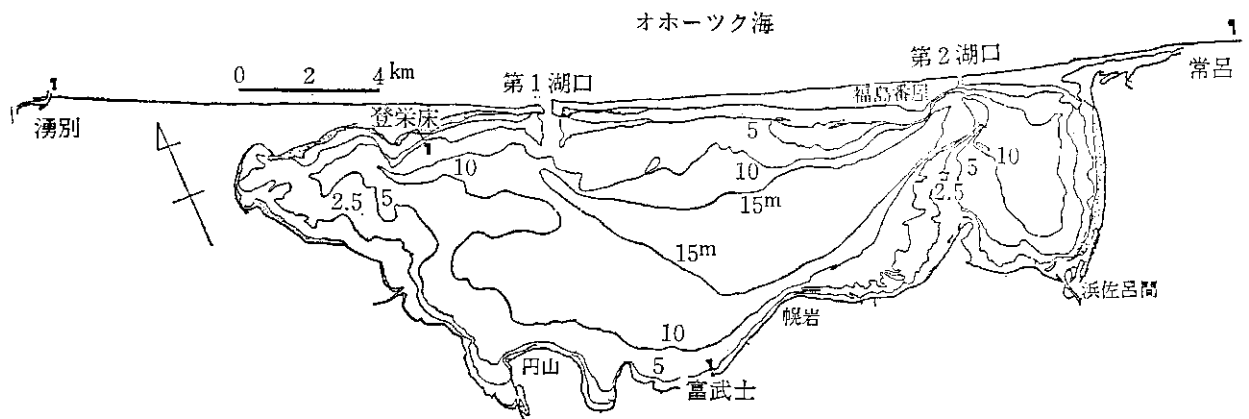


図-1 潮位観測点

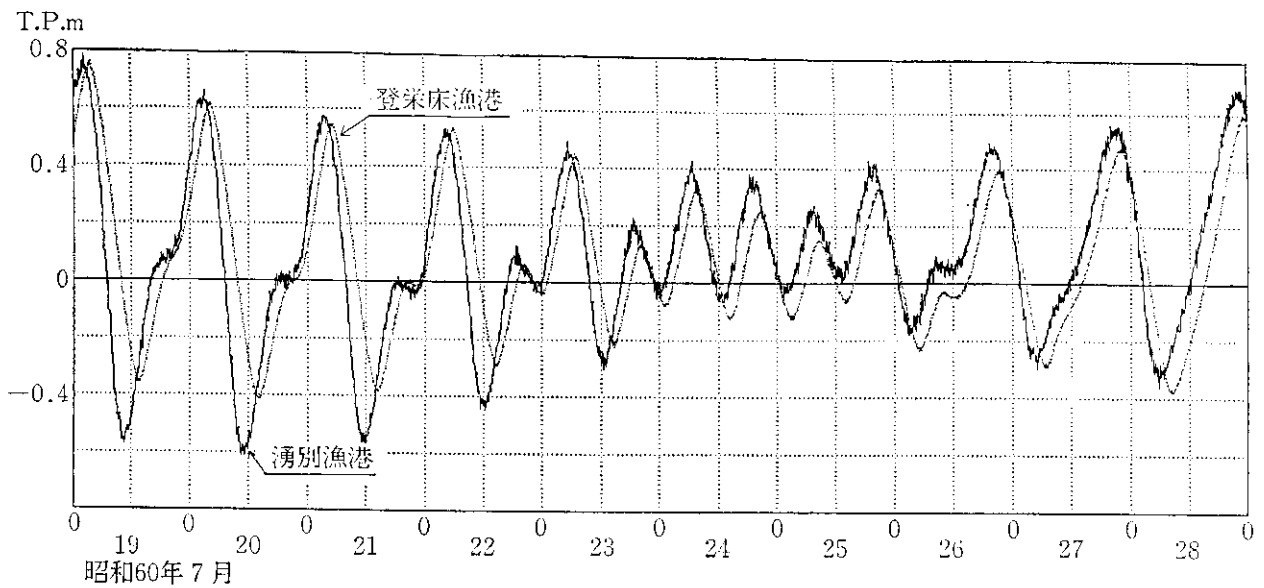


図-2 サロマ湖の内外潮位観測結果 (昭和60年7月19日~28日)

ることとした。

なお、外海潮位として昭和60年7月は、湧別川河口に位置する湧別漁港内での観測値を採用し、11月はサロマ湖より東側20km地点の常呂漁港内で観測した値を採用した。

### 3.1.2 潮位特性の検討

#### (1) サロマ湖の内外潮位の比較

##### 昭和60年7月の観測結果

サロマ湖内の登栄床漁港と湧別漁港の7月19日から28日までの潮位を示すと、図-2のとおりである。同図の潮位は、いずれも5分間隔で8秒間の平均値をプロットしたものであるが、外海の湧別漁港では、長周期の港内波を観測していると考えられるので、以下では1時間の移動平均をかけた潮位値をもとに検討する。同図から大潮時の湖内外の潮位を比較すると、登栄床は湧別より7月19日2時10分の満潮時では1時間15分遅く、潮位

も0.1cm低く、10時20分の干潮時では3時間10分遅く、潮位は20.1cm高い。一方、小潮時の潮位は7月24日19時10分の満潮時では1時間35分遅れ潮位が8.9cm低く、25日2時25分の干潮時では1時間遅いが、潮位は逆に湧別が9.6cm高い。このように、干潮時に湖内の水位が外海より低い傾向は、7月24日以降続いている。この理由として、湧別漁港が湧別川の河口部内にあるため、山地降雨による河川水増加が考えられるので、湧別川の中湧別で網走開発建設部が観測している河川水位記録を検討したところ、若干の水位上昇が見られたが、大きく変化しているとはいえない。また、前述のように水圧式水位計を用いているため、リシャル式換潮儀のように記録計の原点が突然変化するとは考えられないので、原因は今のところ不明である。

図-2より大潮時の潮汐は日潮不等が顕著で、1日1回潮となっているが、小潮時の潮汐は1日2回潮で日潮不

表-1 サロマ湖の内外潮位の調和分解表

調査地点	湧別漁港(外海)		登栄床漁港(湖内)		富武士漁港(湖内)	
	昭和60年7月11日~7月26日		昭和60年7月28日~8月28日			
観測期間						
分潮名	振幅(cm)	遅角(度)	振幅(cm)	遅角(度)	振幅(cm)	遅角(度)
Q <sub>1</sub> 主太陰精率潮	3.17	137.4	3.73	182.0	3.63	183.9
O <sub>1</sub> 主太陰日周潮	21.75	154.8	21.14	185.4	21.25	185.1
K <sub>1</sub> 日月合成日周潮	25.24	188.2	18.27	223.6	17.96	222.5
N <sub>2</sub> 主太陰精率潮	1.07	61.1	1.34	135.2	1.27	137.8
M <sub>2</sub> 主太陰半日周潮	17.23	66.2	11.04	112.1	11.08	112.5
S <sub>2</sub> 主太陽半日周潮	6.07	127.9	6.39	191.9	6.34	193.1
M <sub>4</sub> 太陰 1/4 日周潮	0.42	338.6	0.74	167.8	0.74	164.3
MS <sub>4</sub> 複合潮 (M <sub>2</sub> +S <sub>2</sub> )	0.31	272.0	0.40	260.8	0.41	266.0

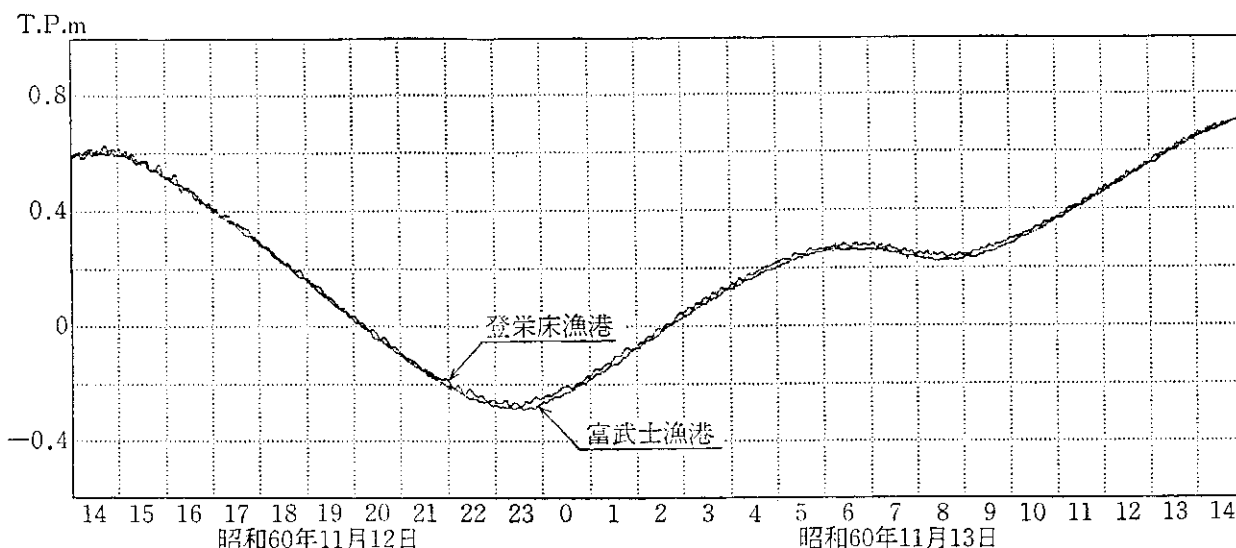


図-3 湖内潮位の比較(昭和60年11月12日~13日)

等はほとんどみられない。

サロマ湖内の内外観測点の潮汐を調和分解し、その定数を求めると表-1となる。同表から湧別、登栄床、富武士とも O<sub>1</sub>、K<sub>1</sub>、M<sub>2</sub> 分潮が卓越している。湖内の登栄床、富武士の定数は、振幅、遅角ともほぼ同じであることがわかる。また、湧別と登栄床の位相の遅れを比べると、日周潮で約 2.4 時間、半日周潮で約 1.5 時間である。また、主要 4 分潮の日周潮に対する半日周潮の比 (K<sub>1</sub>+O<sub>1</sub>)/(M<sub>2</sub>+S<sub>2</sub>) は、登栄床で 2.26、湧別で 2.02 となり、湖内外とも日周潮型の潮汐が卓越することがわかる。

(2) サロマ湖内の潮位比較

サロマ湖内で潮位差、位相差がどの程度あるかを詳細に検討するため、11月12日14時から13日14時までの1日間、登栄床と11km離れた対岸の富武士において、

前述の水圧式水位計の計測時間間隔を30秒と短かくして観測した。観測結果を図-3に示す。同図から両者の差はほとんどなく、最大でも2~3cmとなっているが、これは風による吹送流や港内副振動あるいは水位計の量水管(φ=30mm)を取付けた岸壁への吹き寄せなどを考えれば、同一値とみなしてよいといえる。また両者には位相差もない。

前述の表-1に示した調和分解表の登栄床、富武士の定数を比較すると、K<sub>1</sub>(日月合成日周潮)分潮の振幅に3mm程度の差がみられるが、有意とするほどでなく、位相の遅れもほとんどないと考えてよい。

これらの検討から、湖内の水面はほぼ一様に上下するとみなしてよい。道東の風蓮湖の場合には、湖内で若干の水面勾配があるが、サロマ湖では第1湖口、第2湖口

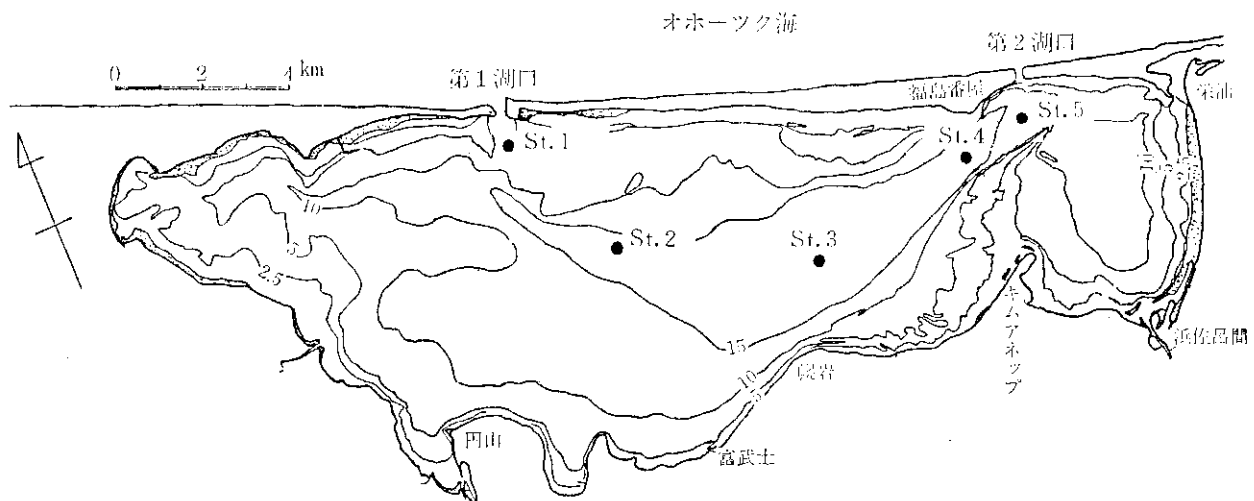


図-4 流速計設置位置

表-2 サロマ湖の流速データ測得状況 (昭和60年)

位置番号	データ測得期間		流速計型式	測得日数	データ間隔	データ数	設置水深 (m)	センサーの設置位置 (m)	備考
	(始)	(終)							
St. 1	7/12 10:45	7/27 15:20	MTCM-6	15日	5分	5847	15	3	現湖口, 東経 143.788°
St. 2	7/12 11:23	7/27 15:05	RCM-4	15日	5分	5181	17	3	東経 143.805°
St. 3	7/11 15:30	7/27 14:42	MTCM-5	16日	5分	4677	20	3	東経 143.857°
St. 4	7/11 15:06	7/27 14:28	MTCM-5	16日	5分	4693	17	3	東経 143.909°
St. 5	7/11 14:40	7/27 14:10	RCM-4	15日	5分	5181	13	3	第2湖口, 東経 143.945°
St. 1	11/13 11:17	11/28 10:00	RCM-4	15日	5分	5671	15	3	現湖口
St. 2	11/13 12:06	11/28 9:51	MTCM-5	15日	5分	4268	17	3	
St. 3	11/13 10:24	11/28 9:30	MTCM-6	16日	5分	—	20	3	計器不良
St. 4	11/13 9:54	11/28 8:29	MTCM-5	16日	5分	4328	17	3	
St. 5	11/13 9:20	11/28 8:10	RCM-4	15日	5分	5671	13	3	第2湖口

の湖口が大きいことと湖内の水深が大きいため、湖内に流入した海水の伝播速度が非常に速くて、湖面が水平に上昇、下降すると考えられる。

### 3.2 流況特性

#### 3.2.1 流況観測

サロマ湖内の流況を観測するため、図-4に示す位置に自記式流向流速計を設置した。流況観測は表-2に示すように、昭和60年7月12日から27日までの15昼夜と、昭和60年11月13日から11月28日までの15昼夜連続して行った。図表中の流速計型式で、MTCM-6型は鶴見精機の電磁式であるが、MTCM-5型は鶴見精機、RCM-4型はアンデラー社のロータ式を示している。流

速計の設置位置は、各地点とも水面下3mとした。各流速計は水温、塩分とも同時に計測できるようになっている。なお、利用できる流速計の台数に制限があったため、外海の流速観測はできなかったが、これまで、図-4に示すようなサロマ湖全体の流況を把握するような観測は行われていなかった。

#### 3.2.2 湖内の流況特性の検討

##### (1) 昭和60年7月の観測結果

St.1からSt.5までの各地点の絶対流速、流速の東方向成分、北方向成分、水温、塩分の最大、最小、平均値を表-3に示す。また、図-5は、昭和60年7月12日から27日までの観測期間中の流速ベクトル値を積算し、

表-3 サロマ湖の流況観測記録 (昭和60年)

位置番号	観測期間	絶対流速 (cm/sec)			流速東方成分 (cm/sec)			流速北方成分 (cm/sec)			水温 (°C)			塩分 (‰)		
		最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均
St. 1	1985. 7.12- 7.27	79.89	2.50	55.1	59.90	-66.66	-19.	59.98	-66.32	-3.9	21.14	11.20	15.4	33.93	27.93	32.8
St. 2	1985. 7.12- 7.27	46.30	0.00	14.0	52.63	-90.23	-1.7	36.08	-78.69	6.85	22.93	14.78	16.6	33.47	28.89	32.3
St. 3	1985. 7.11- 7.27	13.75	0.00	0.48	7.20	-12.40	0.06	10.46	-5.60	0.09	16.10	14.50	15.2	33.16	32.44	32.9
St. 4	1985. 7.11- 7.27	13.84	0.00	2.19	10.30	-13.80	0.25	8.10	-8.30	0.18	17.17	13.97	15.0	33.54	32.64	33.2
St. 5	1985. 7.11- 7.27	42.95	0.00	11.2	18.86	-31.92	-0.7	23.04	-38.21	-3.1	17.68	13.94	15.5	33.01	31.57	32.3
St. 1	1985.11.13-11.28	84.94	0.00	23.7	25.54	-46.52	-2.8	24.98	-86.06	-14.	10.18	3.56	5.88	32.89	30.34	31.5
St. 2	1985.11.13-11.28	35.80	0.00	8.42	32.90	-23.40	3.37	27.20	-33.40	0.74	9.77	4.50	6.85	33.00	31.25	32.2
St. 3	1985.11.13-11.28															
St. 4	1985.11.13-11.28	17.88	0.00	2.45	8.20	-14.80	-1.9	11.30	-8.10	0.32	9.20	3.60	6.14	33.23	32.12	32.6
St. 5	1985.11.13-11.28	56.94	0.00	16.1	22.55	-42.28	-8.3	27.03	-51.76	-7.5	8.80	3.54	5.98	32.17	26.61	31.4

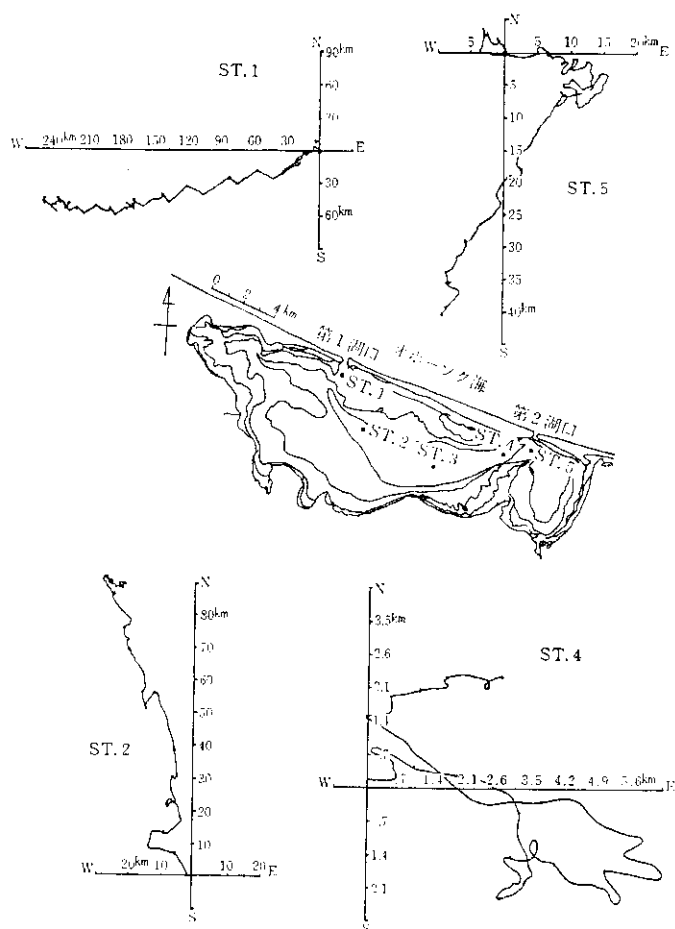


図-5 積算距離ベクトル (昭和60年7月12日~27日)

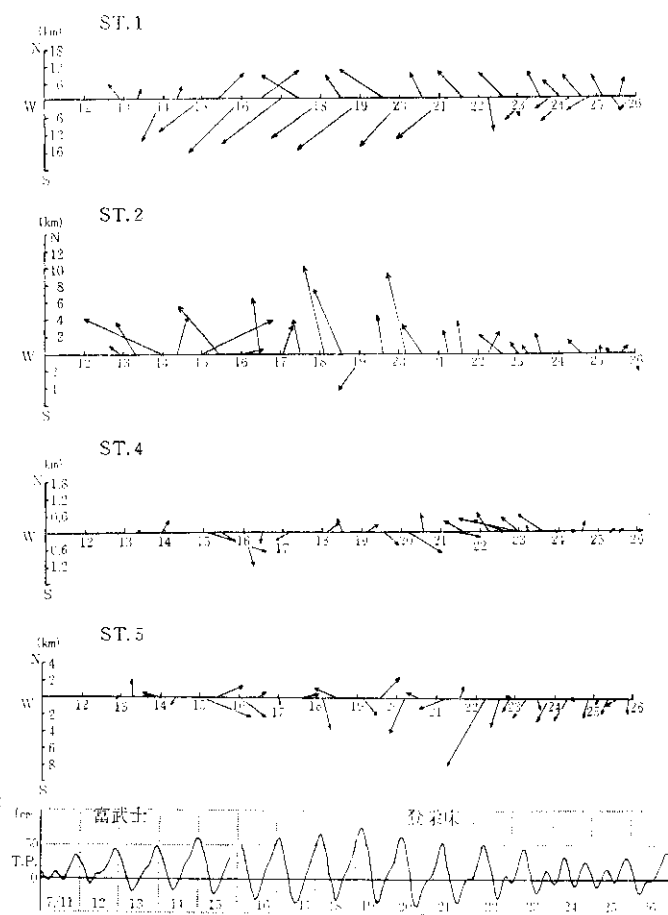


図-6 上げ潮, 下げ潮時の積算距離ベクトル (昭和60年7月12日~27日)

SAROMA ST1 CURRENT N-S  
 1985 7 12 12-12  
 UNIT TIME = 900.0 SEC

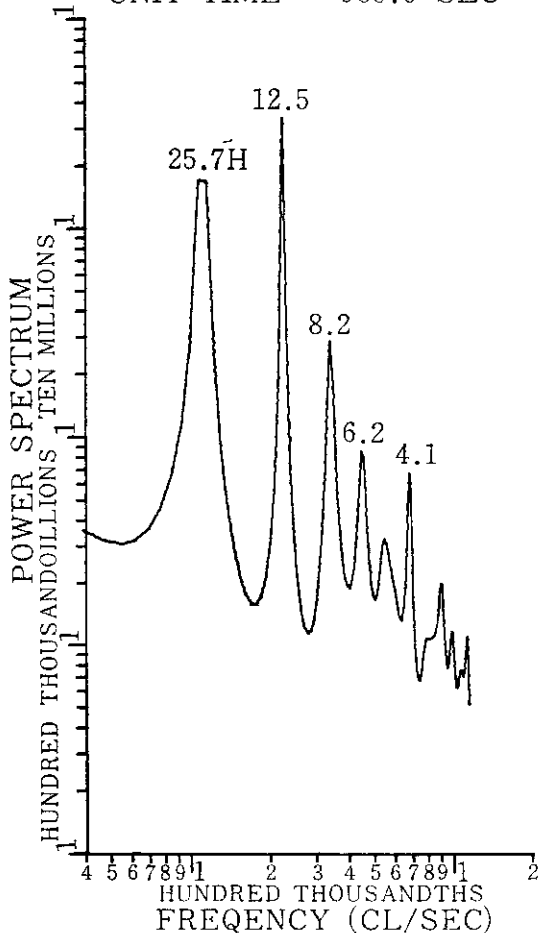


図-7 流速のスペクトル解析結果の一例

その軌跡を描いたものである (St. 3 については流速が小さいので省略した。以下同様)。図-6 は上潮時、下潮時の流速ベクトルを積算した積算距離ベクトルの時系列変化である。

St. 1 では上潮時には南西方向に流入し、その最大流速は 80 cm/s、下潮時には大潮時が北東方向、中小潮時が北西方向に流出する。また、流入時時の平均流速は流入時の方が流出時よりも大きい。なお、流速のパワースペクトルを計算すると、湖口からの流出に対応する南北成分では 25.7 時間と 12.5 時間の周期が卓越し、それぞれ潮汐の日周潮、半日周潮に対応している (図-7)。

St. 2 は第 1 湖口より東側の水深 17 m 地点で、湖内のミオ筋に設置されている。流向は北北西方向の頻度がほとんどで、15 日、18 日の一時的に南方向がある程度で潮位変動との相関はないと思われる。St. 2 の平均流速は 7 cm/s、絶対流速の平均は 14 cm/s である。スペクトルをみると水温では日周期が、塩分では半日周期がそれ

ぞれ卓越している。

St. 3 は幌岩沖で湖内の最深部 20 m 地点である。流速が検出されたのは、流速計の設置した 7 月 11 日から 12 日、大潮時の 7 月 18 日から 20 日までで、流速値 10 cm/s 以下と小さい。しかし、塩分濃度をみると他の地点より変動幅は小さいが、変動がみられるので本地点においても水塊の移動が起きていると解釈される。

St. 4 は第 2 湖口の西側、福島番屋の沖合 1.5 km の水深 17 m 地点である。潮位変動との明確な対応はなく、南東方向、北西方向と比較的流向が時的に一定していることがわかる。表-3 にも示すように、絶対流速の平均値が 2.2 cm/s、恒流成分も 0.3 cm/s と非常に弱い。水温、塩分とも変動が小さく、22 日、23 日に若干大きい。スペクトルより、流速では東西方向で日周期が、南北方向では半日周期が、水温では日周期がそれぞれ卓越しているが、塩分は 29 時間周期に弱いピークがみられる。

St. 5 は第 2 湖口より南南西 1 km の水深 13 m 地点である。上げ潮時の流入水の流向は南西方向であり、ミオ筋に沿って湖内の最深部へ向かっている。下げ潮の流出水の流向は、北西から北東方向に分布しているが、流入時の流速に対し、流出時のそれは遅い。スペクトルより、流速では南北成分に日周期、半日周期、水温、塩分とも日周期がそれぞれ卓越している。

湖内の平均的な流況をみると、図-5 より St. 1 では西南西方向、芭露方向に流れていることがわかる。また St. 2 では北北西方向、第 1 湖口方向に流れ、St. 4 では東方向に流れた後、西方向になって元の位置より北側となる。St. 5 では湖西方向に流されるものの、湖東の最深部に移ることになる。

また、潮位変動と流速ベクトルとの関係をみると、図-6 より St. 1、St. 5 では明らかに上潮時の距離ベクトルが下潮時の距離ベクトルより長く、上潮時と下潮時の流況パターンに違いのあることを示している。St. 2、4 では上潮、下潮と距離ベクトルの方向との相関はないが、大潮時には小潮時に比べて距離ベクトル長が大きいことがわかる。

以上の検討結果から湖西地区では潮汐の変動を受けるものの、平均的にみると反時計まわりの左回転の流れが存在し、第 2 湖口より流入した水も湖東の最深部へ移動するが、福島番屋とキムアネップを結ぶ線が第 1 湖口、第 2 湖口の影響圏の境界と考えられる。

#### 4. 流況シミュレーション

サロマ湖のように湖内が湖口部より深く、かつ閉鎖性の内湖は、湖内外の海水交流、交換が狭い湖口部を通じ

て行われているため、それらが不十分で、湾内の水質悪化となって赤潮、生物のへい死など問題となることが多い。またこのような内湾では春季から秋季に密度成層が形成されるが、河川の流入、潮汐の変化、風の条件などによって三次元空間的にも時間的にも大きく変動し、海水交換、湖内の流況に重要な役割を果たしていることが指摘されている。このため、湖内外でこのような流動の現象の解明が必要であるとともに、三次元非定常のシミュレーションモデルが不可欠となってくる。ここでは利用できる電子計算機の能力から、密度一定とした三層レベルモデルについて検討する。

#### 4.1 三層レベルモデル

海域の流動を三次元的に計算するための数理モデルとその計算手法、条件の扱い方などについては、いまだ確立されてはいない。これまでの提案された手法は、鉛直方向の流速分布を関数近似して二次元問題に帰着させる方法と、鉛直方向を多層に分割して解析する方法がある。後者の方法は、解析対象とする海域の空間のスケールと運動のスケールが水平方向と鉛直方向では異なることに注目し、水平方向に対して格子網を用いて分解し、鉛直方向には層に分割して解析する層モデルであって、layered model, leveled model とがある。layered model は鉛直方向をいくつかの層に分割して各層内では密度を一定とし、各層の流速、層厚の変化を計算する方法である。一方、leveled model は鉛直方向に対し

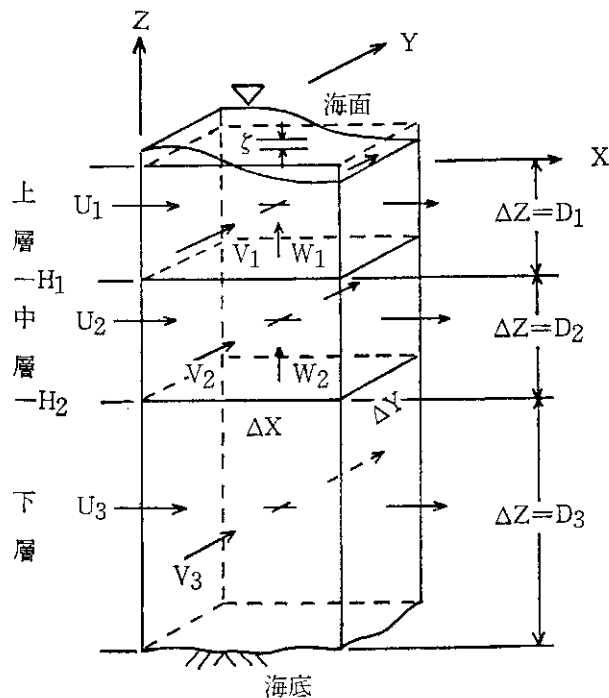


図-8 三層レベルモデル

て層で分割し、海表面の層厚の変化は考えるが、それ以外の層の層厚変化は考えない。鉛直方向には層厚の変化ではなく、鉛直流速成分の変化として求められることになる。また、密度の空間方向の変化の取り扱いも容易であり、潮汐の卓越するような閉鎖性の湖の三次元流動を解析するには適したモデルといえる。

##### a. 基礎方程式

ここでは計算機の制約から上、中、下層の三層とし、密度も一定とする。このように仮定した場合の三次元流動を記述する基礎式は次式となる。また三層レベルモデルの模式図を図-8に示す。

[上 層]

$$\begin{aligned} & \frac{\partial M_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (M_1 U_1) + \frac{\partial}{\partial y} (N_1 U_1) \\ & = f_0 N_1 - g D_1 \frac{\partial \zeta}{\partial x} - r_1^2 (U_1 - U_2) \sqrt{(U_1 - U_2)^2 + (V_1 - V_2)^2} \\ & \quad + (UW)|_{z=-H_1} \dots \dots \dots (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial N_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (M_1 V_1) + \frac{\partial}{\partial y} (N_1 V_1) \\ & = -f_0 M_1 - g D_1 \frac{\partial \zeta}{\partial y} - r_1^2 (V_1 - V_2) \sqrt{(U_1 - U_2)^2 + (V_1 - V_2)^2} \\ & \quad + (VW)|_{z=-H_1} \dots \dots \dots (2) \end{aligned}$$

[中 層]

$$\begin{aligned} & \frac{\partial M_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (M_2 U_2) + \frac{\partial}{\partial y} (N_2 U_2) \\ & = f_0 N_2 - g D_2 \frac{\partial \zeta}{\partial x} + r_2^2 (U_1 - U_2) \sqrt{(U_1 - U_2)^2 + (V_1 - V_2)^2} \\ & \quad - r_2^2 (U_2 - U_3) \sqrt{(U_2 - U_3)^2 + (V_2 - V_3)^2} \\ & \quad - (UW)|_{z=-H_1} + (UW)|_{z=-H_2} \dots \dots \dots (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial N_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (M_2 V_2) + \frac{\partial}{\partial y} (N_2 V_2) \\ & = -f_0 M_2 - g D_2 \frac{\partial \zeta}{\partial y} + r_2^2 (V_1 - V_2) \sqrt{(U_1 - U_2)^2 + (V_1 - V_2)^2} \\ & \quad - r_2^2 (V_2 - V_3) \sqrt{(U_2 - U_3)^2 + (V_2 - V_3)^2} \\ & \quad - (VW)|_{z=-H_1} + (VW)|_{z=-H_2} \dots \dots \dots (4) \end{aligned}$$

[下 層]

$$\begin{aligned} & \frac{\partial M_3}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (M_3 U_3) + \frac{\partial}{\partial y} (N_3 U_3) \\ & = f_0 N_3 - g D_3 \frac{\partial \zeta}{\partial x} + r_3^2 (U_2 - U_3) \sqrt{(U_2 - U_3)^2 + (V_2 - V_3)^2} \\ & \quad - r_3^2 U_3 \sqrt{U_3^2 + V_3^2} - (UW)|_{z=-H_2} \dots \dots \dots (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial N_3}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (M_3 V_3) + \frac{\partial}{\partial y} (N_3 V_3) \\ & = -f_0 M_3 - g D_3 \frac{\partial \zeta}{\partial y} + r_3^2 (V_2 - V_3) \sqrt{(U_2 - U_3)^2 + (V_2 - V_3)^2} \\ & \quad - r_3^2 V_3 \sqrt{U_3^2 + V_3^2} - (VW)|_{z=-H_2} \dots \dots \dots (6) \end{aligned}$$



[連続式]

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = W_1 - \frac{\partial M_1}{\partial x} - \frac{\partial N_1}{\partial y} \dots\dots\dots (7)$$

$$W_1 = W_2 - \frac{\partial M_2}{\partial x} - \frac{\partial N_2}{\partial y} \dots\dots\dots (8)$$

$$W_2 = - \frac{\partial M_3}{\partial x} - \frac{\partial N_3}{\partial y} \dots\dots\dots (9)$$

ここに,  $M_1, M_2, M_3$ :  $x$ 方向の上層, 中層, 下層の線流量

$N_1, N_2, N_3$ :  $y$ 方向の上層, 中層, 下層の線流量

$U_1, U_2, U_3$ :  $x$ 方向の上層, 中層, 下層の流速成分

$V_1, V_2, V_3$ :  $y$ 方向の上層, 中層, 下層の流速成分

$W_1, W_2$ : 上層, 中層間, 中層, 下層間の  $x$ 方向の流速成分

$r_1^2, r_2^2$ : 上層, 中層間の摩擦係数

$r_3^2$ : 海底面の摩擦係数

サロマ湖内の水深は 図-1 にも示したように, 15 m 以浅の領域が多いので, ここでは摩擦係数を河川で用いられている一次元流の Manning の粗度係数を二次元流に拡大した式で表現することにする。

摩擦係数は次式で表わされることになる。

$$r_1^2 = \frac{n_1^2 g}{D_1^{4/3}} \dots\dots\dots (10)$$

$$r_2^2 = \frac{n_2^2 g}{D_2^{4/3}} \dots\dots\dots (11)$$

$$r_3^2 = \frac{n_3^2 g}{D_3^{4/3}} \dots\dots\dots (12)$$

上式の  $n_1, n_2, n_3$  はそれぞれ上層, 中層, 下層の粗度係数である。

式(1)~式(6)は, 渦動粘性項を省略した式であるが, 数ステップごとに次式で計算することで考慮することにした。

$$\frac{\partial M_i}{\partial t} = L \frac{\partial^2 M_i}{\partial x^2} + L \frac{\partial^2 M_i}{\partial y^2} \dots\dots\dots (13)$$

$i = 1, 2, 3$

$$\frac{\partial N_i}{\partial t} = L \frac{\partial^2 N_i}{\partial x^2} + L \frac{\partial^2 N_i}{\partial y^2} \dots\dots\dots (14)$$

$i = 1, 2, 3$

上式中の  $L$  は渦動粘性係数で, 通常計算の距離刻みを  $\Delta S$  とすると次式で表わされる。

$$L = 0.02 \times (\Delta S)^{4/3} \dots\dots\dots (15)$$

### b. 境界条件

開境界での取扱いは解析すべき現象に応じて種々異なり複雑であるが, ここでは, オホーツク海の沖合で潮位の実測値を与えることとした(詳細は後述)。サロマ湖, 海岸線などの固定境界では流出入がないものとして扱う。また, 河川流量は湖口流量に比べてオーダ的に小さいので無視する。後述するように, 式(1)~式(14)の基礎式を差分法を用いて計算するが, 距離刻み  $\Delta S$  に対して第1湖口, 第2湖口の湖口幅が極端に小さいので, 湖口の流れの運動式中に断面急縮による損失を考慮するため, 次式で表わされる損失水頭  $h_i$  を入れることにした。

$$h_i = f \frac{U_i^2}{2g} \quad i = 1 \sim 3 \dots\dots\dots (16)$$

### c. 数値計算法

式(1)~式(16)の基礎式を差分近似によって数値計算する。差分スキームは時間, 空間ともに中央差分スキームを採用している。

差分方程式を書き下すと長くなるので省略する。

## 4.2 流況シミュレーション結果と考察

### 4.2.1 計算領域と計算条件

計算領域を図-9に示す。計算機の制約から距離刻み  $\Delta S$  は 1 km とした。また外海の範囲は, 沖合 6 km までとした。

同図の境界 AB に水位条件を与えることとし, 外海の観測潮位である湧別の値 (AB 上で同一値) を採用した。また境界 AD, BC には水位かあるいは実測流速値を与えるべきであるが, 外海の流速条件は観測されていないので, 境界 AD, BC からの流出入がないものとした。

第1湖口の幅は 350 m, 底標高を -13 m の矩形断面とした。第2湖口も同様に幅 60 m, 底標高を -10 m の矩形断面とした。

3層の層厚は, サロマ湖内のホテタ養殖カゴが海面下

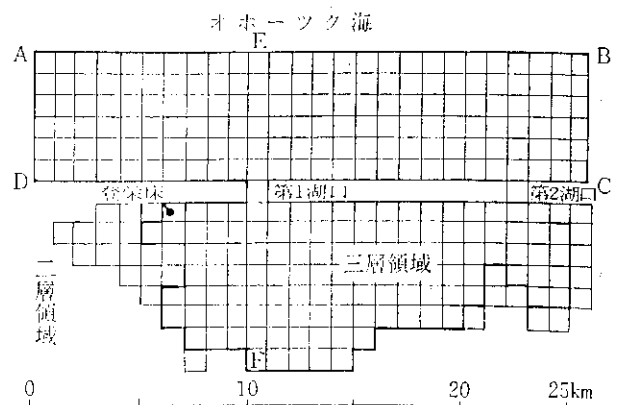


図-9 計算領域

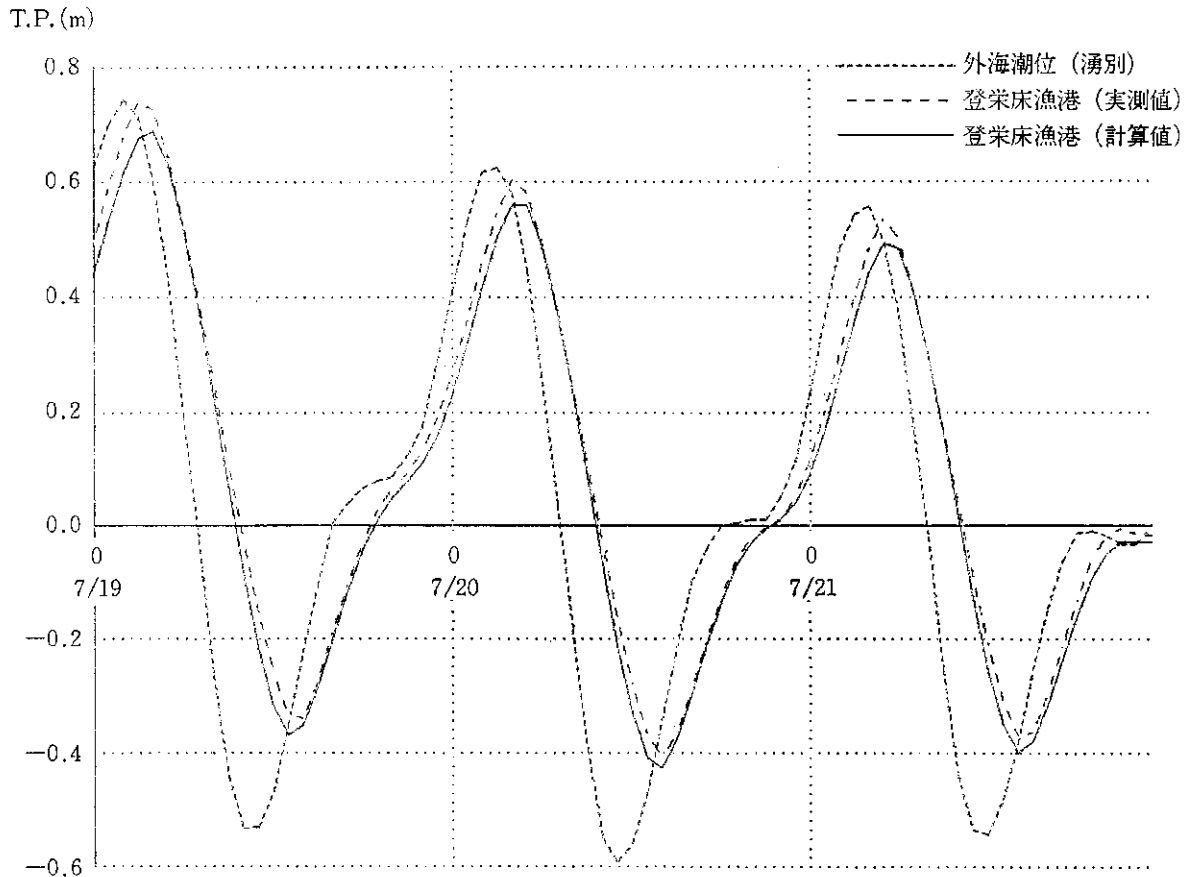


図-10 湖内潮位の計算結果の比較 (昭和60年7月)

2.5 mより垂下されているので、上層を2.5 m、中層を3.0 m、下層を湖底までとした。外海も同様である。粗度係数は外海では上層、中層とも0.020、下層を0.025、湖口では上層、中層、下層とも0.020、湖内では湖口周辺および航路筋など養殖施設の入っていないところの上層、中層を0.025、下層を0.030とし、ホタテ養殖施設のあるところの上層、中層を0.030、下層を0.035とした。また渦動粘性係数は、式(15)より求めると $9 \text{ m}^2/\text{s}$ となるが、湖口で縮流された水がジェット流として外海に放出されて渦巻状態が生じ、計算が不安定になったので試行錯誤から $200 \text{ m}^2/\text{s}$ とした。

#### 4.2.2 計算結果

3.1で観測した昭和60年7月18日18時から7月21日までの期間を対象とする。湖内外の初期条件は、湧別と登栄床の潮位がほぼ平衡したとみなされる7月18日18時から計算を始めることとし、湖内外の潮位をT.P. 0.19 m、流速をすべての点で0とした。湧別の観測潮位を図-8の境界ABに与えて、登栄床地点に相当する格子点の潮位を示すと、図-10となる。

同図に破線で示した登栄床の観測値に比べ、実線で示した計算値は満潮時では19日に3.8 cm、20日に4.3 cm、

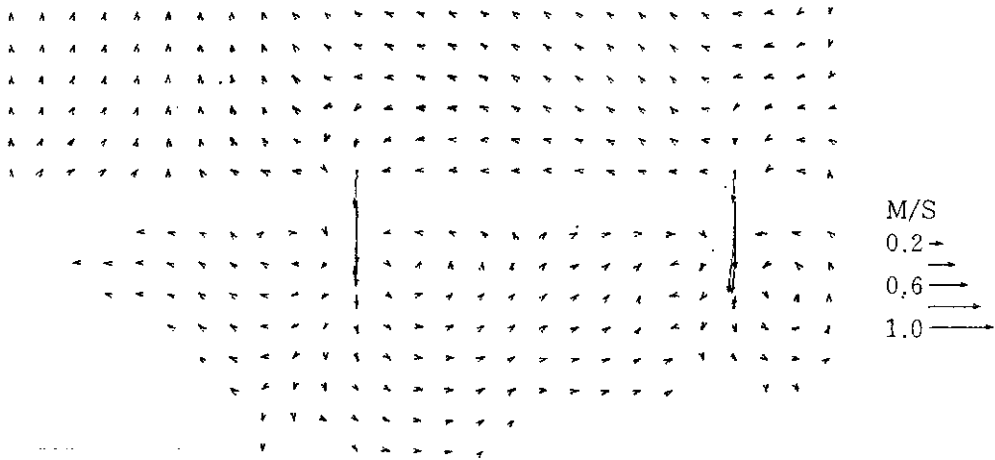
21日に4.1 cmといずれも低い。また、干潮時では19日に3.1 cm、20日に1.9 cm、21日に2.9 cmと低い。これは、計算に用いた湖口断面が実際のものと若干異なるためと思われるが、水位の変動に位相差もほとんどなく、十分な再現性が得られたものと考えてよいであろう。

図-11, 12に流況シミュレーション結果の一例として、7月21日2時(上潮時)の結果を示す。図-11は上層、中層、下層の流速ベクトルであり、湖内への流入状況を見ると上層、中層、下層とも湖口での通過流速が大きい。第1湖口の上層では99 cm/s、中層では97 cm/s、下層では82 cm/s、第2湖口では上層で107 cm/s、中層で86 cm/s、下層で45 cm/sである。また湖内側では、第1湖口から流入した水は湖口の東側で反時計まわりの渦を巻きつつ、一部はキムアネップ岬方向に流れている。第2湖口から流入した水は湖東域の水盆で、反時計まわりの渦を巻いている。

図-12は、第1湖口線上(図-9のEF線上)における鉛直断面内の計算流速分布を示している。湖口の湖外側では若干の湧昇、湖内側では若干の下降流がみられるが、その大きさは $0.5 \text{ mm/s}$ と小さい。なお、鉛直流速は今回の計算期間内では他の時点を含めても高々 $2 \text{ mm/s}$

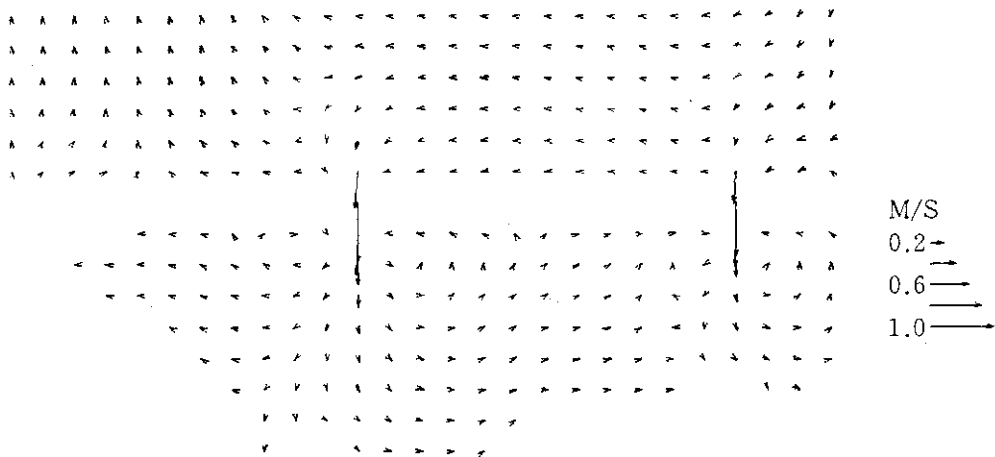
\*\*\* RUN05/CONTRACTION EQCON,FD1=1.65,FD2=2.10,3-LEVEL/ \*\*\*

サロマ湖の流況 7月21日 2時 LEVEL 1



\*\*\* RUN05/CONTRACTION EQCON,FD1=1.65,FD2=2.10,3-LEVEL/ \*\*\*

サロマ湖の流況 7月21日 2時 LEVEL 2



\*\*\* RUN05/CONTRACTION EQCON,FD1=1.65,FD2=2.10,3-LEVEL/ \*\*\*

サロマ湖の流況 7月21日 2時 LEVEL 3

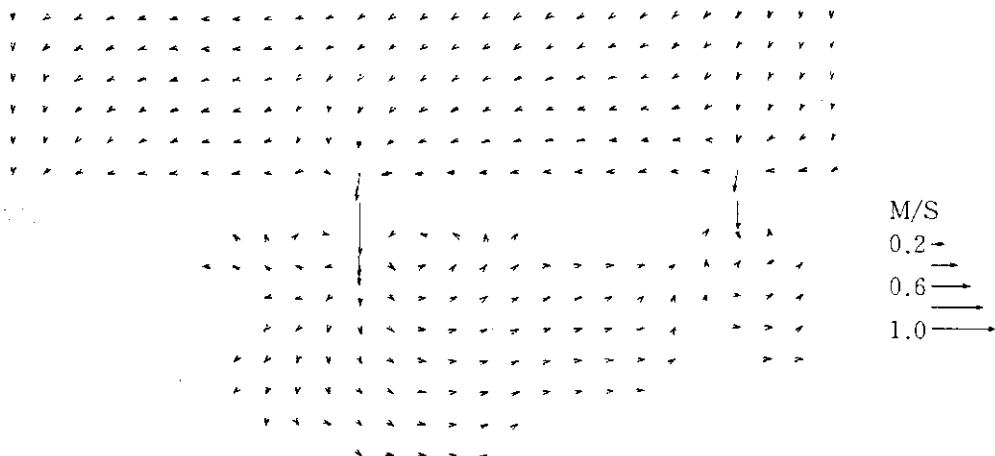


図-11 流況シミュレーション結果 (昭和60年7月21日2時)

RUN05 7.21.2:00

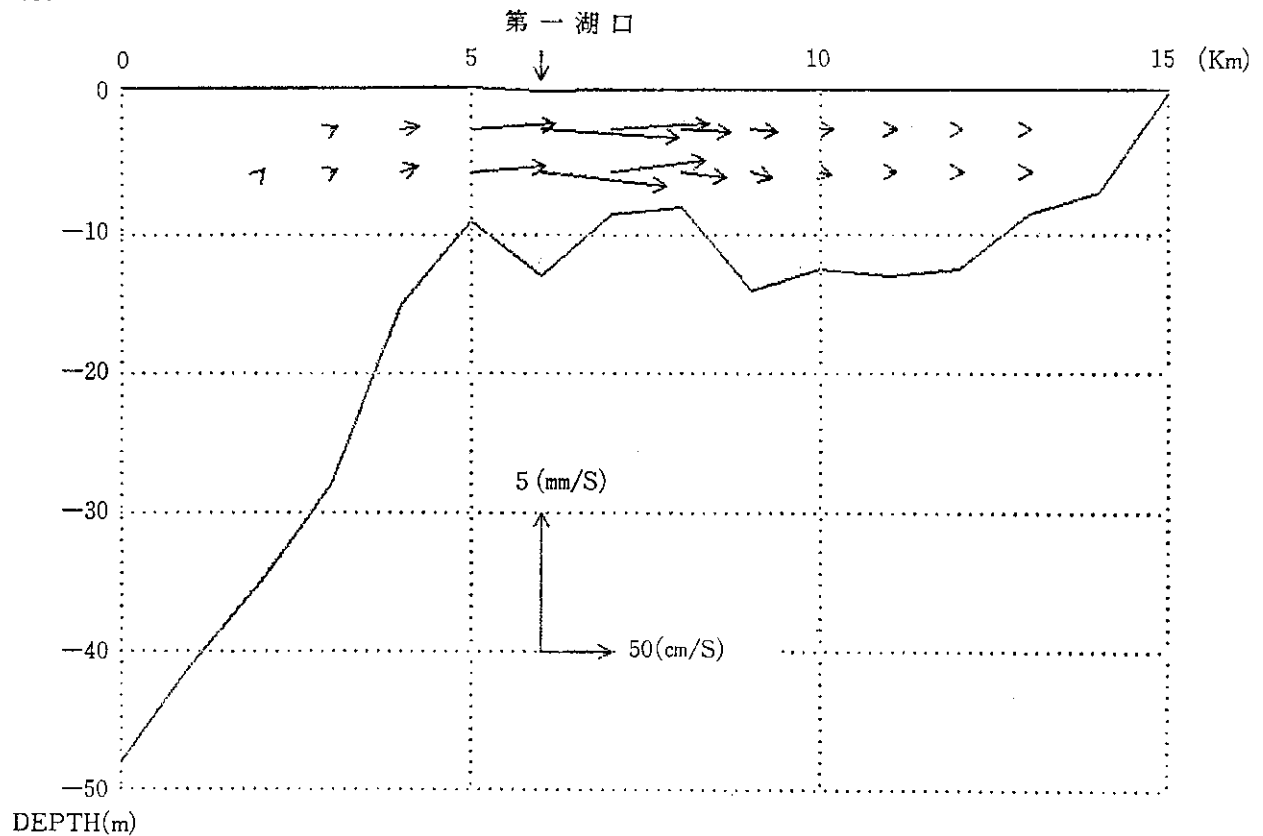


図-12 第1湖口線上における鉛直断面内の計算流速分布 (昭和60年7月21日2時)

(局所的には1 cm/s) 程度であった。

ところで、今回のシミュレーションでは差分間隔が1 km と粗いため、湖口部の局所的な流況の取扱いなどに若干の問題が残されている。大略の流況は計算値と実測値とでほぼ同様な傾向であったが、直接の比較は不適當と思われるので、これについては省略する。

## 5. あとがき

サロマ湖の流況特性について検討を行った結果、湖内の潮位差はほとんどなく、湖西域では反時計まわりの流れが存在していることが明らかにされた。

また、3層レベルモデルによる流況シミュレーションの検討を行った結果、十分な再現性の得られることがわかった。

なお、調査観測にはサロマ湖養殖漁業組合の協力を得

たことを付記し、深謝する次第である。また、本調査研究は環境庁国立公害防止等試験研究費「寒冷地圏域の海跡湖における環境保全に関する研究」の一部であることを付記する。

## 参考文献

- 1) 科学技術庁研究調整局； オホーツク海に関する総合研究報告書，1981.
- 2) 北海道栽培漁業振興公社； サロマ湖におけるホタテガイの養殖許容量概査報告書，1983.
- 3) 北海道開発局； 特定海域沿岸漁場開発事業推進調査報告書（流水流入防止対策調査），1980.
- 4) 北海道栽培漁業振興公社； サロマ湖環境調査報告書，1982，1984.