

十三湖遡上塩水の挙動特性

Characteristics of Salt Water Movement in Jyusan Lake

佐々木 幹夫*・田村 保憲**・藤田豊***

By Mikio SASAKI, Yasunori TAMURA and Yutaka FUJITA

Observations for the movement of salt water were carried out in Jyusan Lake for two years from 1995. From this observations, we show the correlation between the flow velocity of stratified fluid and the generation and the disappear of salt wedge, and the motion of salt and fresh water in the lake. Then, we discuss the dynamics of salt water motion and the diffusion process of salt.

Keywords: estuary, stratified flow, diffusion coefficient, river mouth

1. はじめに

十三湖は岩木川河口に位置しており、湖沼面積が 20.6 km^2 、水面標高が0mで日本海につながっている汽水湖である。十三湖の水戸口が岩木川の河口となっており、この水戸口は過去に幾度となく閉塞し、これによる湛水災害は時には想像を絶する甚大なものとなり、岩木川の流域住民を苦しめてきた経過がある。十三湖水戸口の改修工事は1925年に始まり、22年間この工事が続き、1946年に現在の突堤導流堤が完成した。完成以来、閉塞は1度も起こっていない¹⁾。この水戸口の改修工事の成功により、岩木川河口、十三湖の水質は遡上塩水量によって支配されるようになった。

十三湖の水質予測には、水戸口を通り、十三湖へ

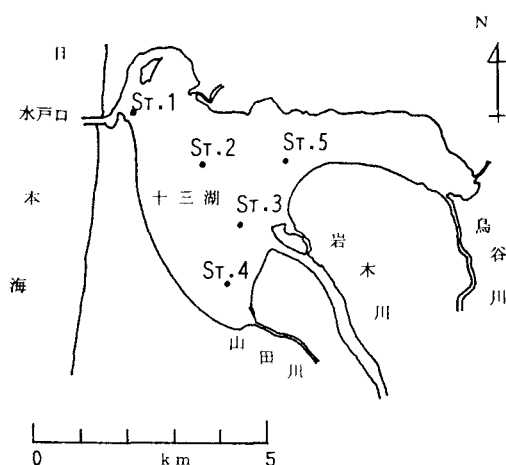


図2. 1 現地観測位置

* 正会員 工博 八戸工業大学教授 工学部土木工学科 (〒031 八戸市妙大開88-1)

** 正会員 建設省青森工事事務所調査第一課長 (〒030 青森市中央3丁目20-38)

*** 正会員 工修 日本大学助教授 工学部土木工学科 (〒963 郡山市田村町徳定中河原1)

浸入する塩水の挙動を把握することが必要不可欠であり、水戸口の入退潮量すなわち、順流・逆流の流速、流量、塩分流入量は交番流速特性および十三湖水位の応答特性の解明により明らかとなる²⁾。湖内における遡上塩水の挙動については未だに不明な点が多く、ここに、遡上塩水の挙動を把握するために現地観測を行った。岩木川下流部十三湖の水質変動特性の検討は、岩木川下流部の自然環境保全に関係する種々の計画に役立ち、本調査の意義は大きい。

2. 現地観測の方法および気象条件

湖は遠浅となっており、最深部で1.5mの深さであり、湖中央（St. 2）部が北側湖岸から伸びた浅瀬になっており、平均で0.8mの深さで、浅い汽水湖である。流入河川は7河川あり、年平均気温は9.4℃、年間1,113mmの降水量がある。現地観測は1994年11月と1995年11月の2回に渡り実施した。最初の観測は、湖全体の塩水挙動を把握するために行い、2回目の観測は水戸口およびその周辺の流況および水質を測り、湖に出入りする塩水塊の挙動をさらに詳細に調べるために実施したものである。これらの観測方法はそれぞれ次のようになる。

（1）第1回目の現地観測：図2.1に示す5つの測点において船上にて、定時に同時観測を行った。測定は①流速・流向、②水温・塩分濃度、③水深、④水質、⑤風速・風向、気温について実施した。水質は、透明度、TB、665、EC、DO、pH、ORP等を計測した。665値より植物プランクトンの現存量を把握できるが今回の観測ではそれが現れずに、濁度を示すTB値と類似の定性的な水質傾向を示した。すなわち、4日および8日にはTB値が20～30、665値が0.05～0.1となり、5日と6日のTBが1～10に対し、665が0.01～0.03Absであった。本論文では塩水の挙動に着目しているので、前述の水質の測定結果³⁾については割愛する。

観測時の気象（気温・風・天候）：4日は晴れで、13:29に気温が8.7℃、風はWSW方向、風速7.8m/s、5日も晴れで、8:51に7.2℃、ESE方向の風、風速4.5m/s、6日は晴れで、気温が18.9℃（11:30）と高く、SWの風、風速8.0m/s、7日は曇で、1日中W方向の強風、風速15m/s、8日は晴れで、気温が9.3℃（9:07）、風はWNW方向、風速7.0m/sであった。気圧：4日から7日の午後9時の気圧で、それぞれ1029、1024、1012、1024hPaであった。

（2）第2回目の現地観測：前述のように、十三湖水戸口近くの流れの特性を把握するために、主として、流向、流速、塩分濃度、水温について測定を実施した。現地観測はST.1における連続観測とST.1～水戸口河道部の測点における定期的な測定との2つに分けて行った。これにより十三湖水戸口における順流および逆流の時空間特性が得られた。測定に用いた機器は、①流向・流速計3台、塩分水温計1台、②連続観測（水温、流向、流速）自記式電磁流向流速計1台を使用した。定点船上観測では流向、流速の測定に電磁流向流速計（ACM-200PC）1台を使用し、水温、塩分の測定には塩分水温計UC-77を使用した。自記式流速計ACM-200-8MはST.1に、2点支持のアンカーを付けた浮子に下げて、センサー部が水面より1.6m下の位置になるように設置した。これによる観測は11月24日9時より11月27日12時までの4日間続け、1分間隔で流向、流速、水温の測定を行った。

気象条件：24日は晴れてはいたが風が強く、湖も波浪が高かった。観測は24日からであり、期間中の風は強く、27日には早朝から強風・暴浪状態であったが、幸いにしてSt.1では測定が可能だったので、この日の朝まで4日間の連続観測ができた。この期間の気象は単純なものでなく冬型の気圧配置も出現した、厳しいものであった。11月24、25日には降雪があり、この天候の中で行われている。気圧：4日から7日の午後9時の気圧で、それぞれ1029、1024、1012、1024hPaであった。この期間中の水位を図2.2に示した。

3. 水戸口付近の塩水流動特性

2回目の観測時の湖水位と外海潮位を図2.2に示したが、この時の流向・流速、水温および塩分濃度の測

定結果の1例が図3. 1に示されている。流向・流速と水質を同時に測ることにより、空間の一点における流れがどこから来ているのが明確となる。図において、流速はW-E方向の成分で示されており、E方向が正となるように表されている。図3. 1はST. 1において、自記式流速計により連続観測した結果を示したもので、上段がW-E方向の流速、そして、下段が水温の変化である。ST. 1ではW方向が順流、E方向が逆流となる。図の上段の測定結果より、逆流があったのは次の時間帯となっている。24日：午前中、15時～17時、25日：1時～5時、14時～19時、26日：0時～7時、14時～20時、26日：22時～27日1時、27日：4時～7時。

水温の変化より、この逆流に対応するように水温が高くなっている場合がある。これは塩水が淡水より水温が高くなっているからである。しかし、逆流があっても水温が変わらない場合も見られる。これは、河口前面海域の淡水が戻ってきたためである。流向・流速および水温の変化と塩素イオン濃度の変化を対応させるとより一層明確に移動履歴がわかる。

図3. 2は1995年11月24日に行った流速の測定結果の1例であり、各時刻における流速と流向を各水深毎に示したものである。図の速度ベクトルは真上が北の方向を示し、順流がW方向、逆流がE方向を指している。図より、午前中は順流であるが午後になると流れは弱まり、14時になると上層で逆流が生じていることが分かる。図3. 1より判断するとこの逆流は長く続かない結果になっている。このような流れの変化で水質はどのように変わるかを示したのが図3. 3である。ここに、図3. 3のCは塩分濃度を示し、C_oは海水の塩分濃度である。図より、順流時には、僅かに下層で塩分の濃い湖水が流出しているが、これが流れが弱まると塩分濃度の高い層が次第に厚さを増していく様子が分かる。この塩水は湖に入ったものが順流に乗って流出してきたものであり、層厚が増しているのは塩水が流入しているためではなく、海水位が上昇して、水戸口

からの流出が不可能になったために、塩分の濃い湖水（塩水）が水戸口周辺に溜まったからである。湖内に侵入した塩水塊の層厚がその移動に伴い増えたり、減ったりしていることになる。以上、24日の流れと塩水の挙動特性をまとめると次のようになる。①全体として、順流時の流れであるが、下層の水質はCl⁻濃度が高く、湖に入った塩水が湖から水戸口へ向けて下層を移動している。午後になると、上層が逆流となっているが、転流後間もないために水質の変化は見られず淡水の逆流となっている。②10時の流れは順流であるが、上層は北西、下層は南西方向へ向かう流れとなっており、鉛直方向にねじれた流れの構造となっている。流速は1

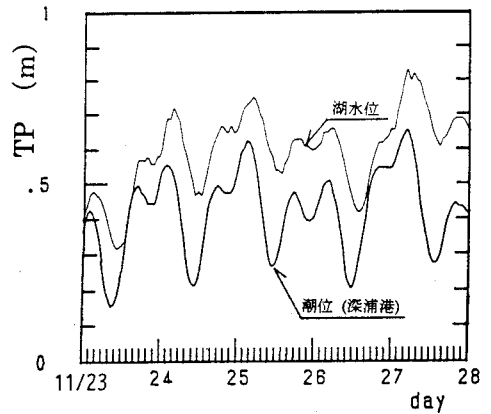


図2. 2 観測期間中の水位 (1995.11)

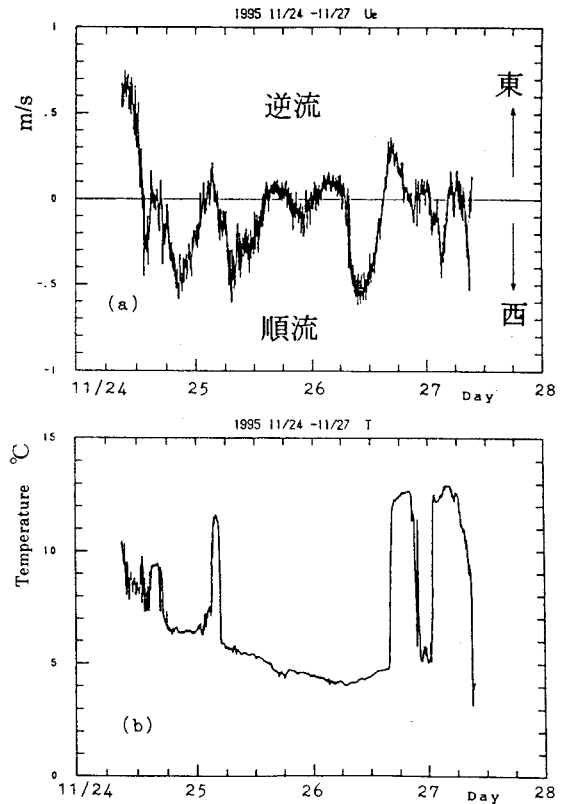


図3. 1 連続観測による流速測定結果 (1995/11)

m/s（上層）となっている。このねじれの構造は順流が弱まると方向の違いが極端になっている。③順流が強い時には、W方向の安定した流れとなる。④順流や逆流が弱まる時には南北方向の流れの成分も現れている。

水戸口周辺の遡上塩水の挙動について現地観測から得られた結果をまとめると以下のようになる。（１）２５日の流れと水質特性：１４時までは安定した順流であり、鉛直方向に極端にねじれた流れの構造とはなっていない。１４時以降は転流時のために、流れの方向が上層と下層で逆になっている。水質測定の結果は水温が低く、塩分濃度も低いために、淡水の流出であることを示している。（２）２６日の流れと水質特性：前日の観測値よりもさらに一様な流向となっており、これが午前中続いている。２５日の流れと同じく、順流であり、淡水が水戸口から出ていることを示している。南北の流れの成分はほとんどなく、W方向の強い順流となっている。（３）２７日の流れと水質特性：早朝は順流ではあるが、鉛直方向には流向、流速が一様でない流れとなっている。流れは順流であるが、下層は塩水となっている。８時台になると上層を淡水が流れるようになっている。（４）水戸口河道部の流れと水質特性：上流部では、順流時には下層を塩水が流れているのに対し、河道口では鉛直方向の混合が進み、鉛直方向にほぼ一様な塩素イオン濃度分布となっている。

4. 十三湖における遡上塩水の流動特性

前述のように、湖内に入った塩水塊の挙動を把握するために湖内に５測点を設け、船上より同時観測したが、この期間中の水戸口における流況を示したのが図４．１である。ここに、図４．１において、 η は湖の水位、 A_s は湖面積、 Q_1 および Q_2 はそれぞれ岩木川および水戸口の流量である。 Q_2 の算定において η と Q_1 は実測値を用いている。図より、水戸口ではおおそ $200 \text{ m}^3/\text{s}$ の交番流があり、岩木川流量よりもこの交番流による流れはるかに大きいことが分かる。図では岩木川流量が $20 \sim 30 \text{ m}^3/\text{s}$ となっているが、この年は比較的少ない年であった。岩木川は、この時期には、多い場合で $60 \text{ m}^3/\text{s}$ 程度である。水戸口河道は幅が約 160 m 、水深が約 3 m 、流積が 500 m^2 強であるので、流速にするとおおそ 0.6 m/s の順流、逆流となる。図４．２は観測期間中のST．１における流速と水温の連続記録であり、 1.5 m の深さにセンサーが設置されている。この付近の水深は 3 m 弱である。図4.1より、水戸口を離れると逆流の方が大きくなる流

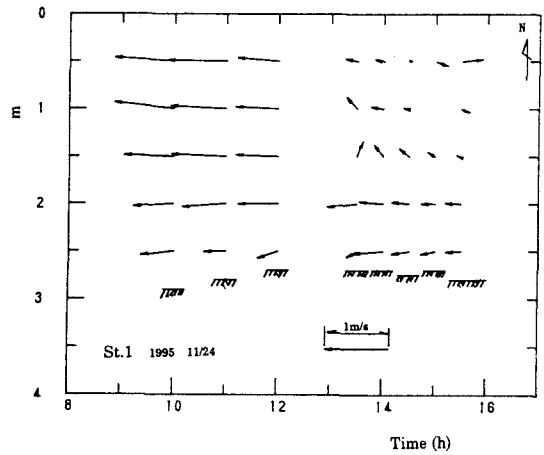


図3．２ 流れの鉛直分布の時間変動
(順流＝西向き、逆流＝東向き)

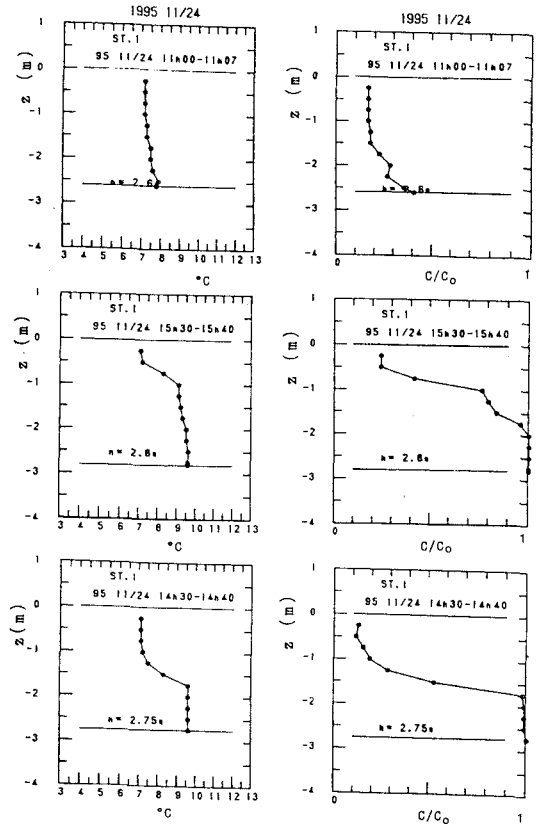


図3．３ 水温と塩分濃度の鉛直分布

れとなっている。これは、順流時、逆流時の滞筋が異なるからであろう。図4. 2より、この観測では逆流が頻繁におきていることがわかる。逆流が長く続いているので水温分布からだけでは、塩水塊が転流時にどちらの流れから来ているのか判断がつかない。また、流れ（流向・流速）からだけではどの水塊の流動なのか履歴がわからないことになる。

図4. 3に各測点における塩分の鉛直分布の時間変化を示した。図に示した観測日は、午前中には順流であったが、午後には強い逆流に転じている。図の St.1 の塩分は流れに対応した分布を良く示している。しかし、St.2～5においては、分布形はほとんど変わらず、遡上した塩水塊が底層に滞留している。鉛直分布の変化が大きいので Richardson 数は大きく、成層流の安定条件をはるかに超えている。この観測期間は大潮期に相当しており、図4. 3と図4. 2、並びに各ステーションにおける流れの測定結果(図示省略)より、順流から逆流に変わったときの特徴をまとめると次のようになる。

<水戸口付近=St. 1>順流時には、水温8～9℃、塩素イオン濃度が4000～5000mg/lの湖水が流出しており、海水の浸入時には、水温が9℃から17.3℃まで上昇する。塩分濃度の高い完全な海水が流入する。この塩水の流動方向は、逆流の東南東であり、その逆流の強さは0.6m/sにも達する。

<湖の中央=St. 2>流れは水戸口へ向かう北西の方向から徐々に南東の方向へと変わり、順流から逆流に転じる。水戸口の逆流の影響は湖の中央にも及ぶが、流れの強さは大きい時で20 cm/s程度となる。転流時には下層に塩水層が存在するが、順流時には流下のため下層の塩水層は消失する。しかし、逆流の到達により再び塩水層が底層を占めるようになる。

<岩木川前面=St. 3>流れはほとんどなく最大で10 cm/s程度の速度となり、水戸口、湖央の逆流の影響により南西方向へ向かう流れが一時的に見られる。塩分濃度の分布から判断すると逆流の時間帯が短い場合には、湖水の流動はほとんど見られない。

<山田川前面=St. 4>水温は9～10℃にあり、淡水の水温を示しており、この付近では一定の方向へ向かう流れは存在しない。塩分は6000～11000 mg/lにあり、水質は塩水となっており、下層ほど濃い塩分の分布となる。

<湖東部川=St. 5>特定の方向へ向かう明確な流動は見られない。塩分は下層ほど濃くなっており、底面付近では15000 mg/lとなっている。これは、山田川前面域におけるC1より高い濃度であり、この湖域では塩水の浸入の影響が長く続く。これは、湖の中央部が浅くなっており、湖奥底層の塩水が順流になっても

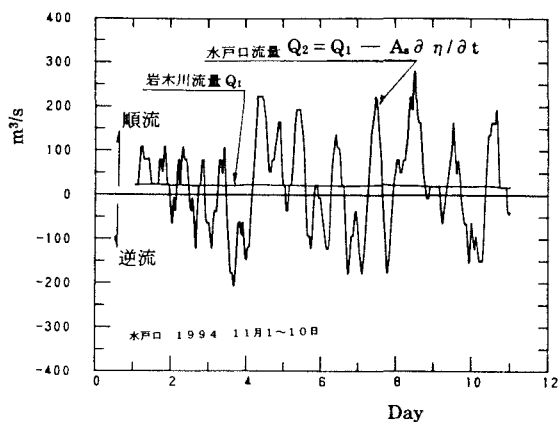


図4. 1 水戸口の交番流の推定値

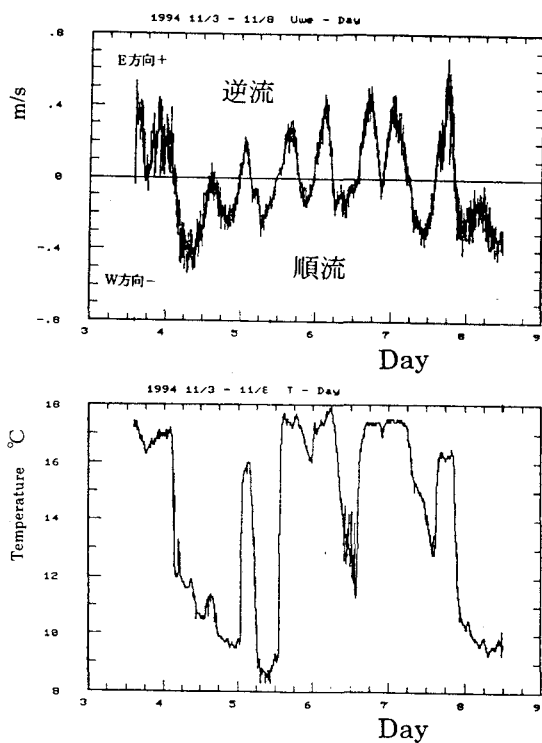


図4. 2 水戸口付近の流れと水温の現地観測

なかなか流出しないような底地形になっているからである。水温は上層で7℃弱、下層で10℃強となっており、下層の水温が山田川前面域よりも高いのは塩水浸入の影響が続くためである。

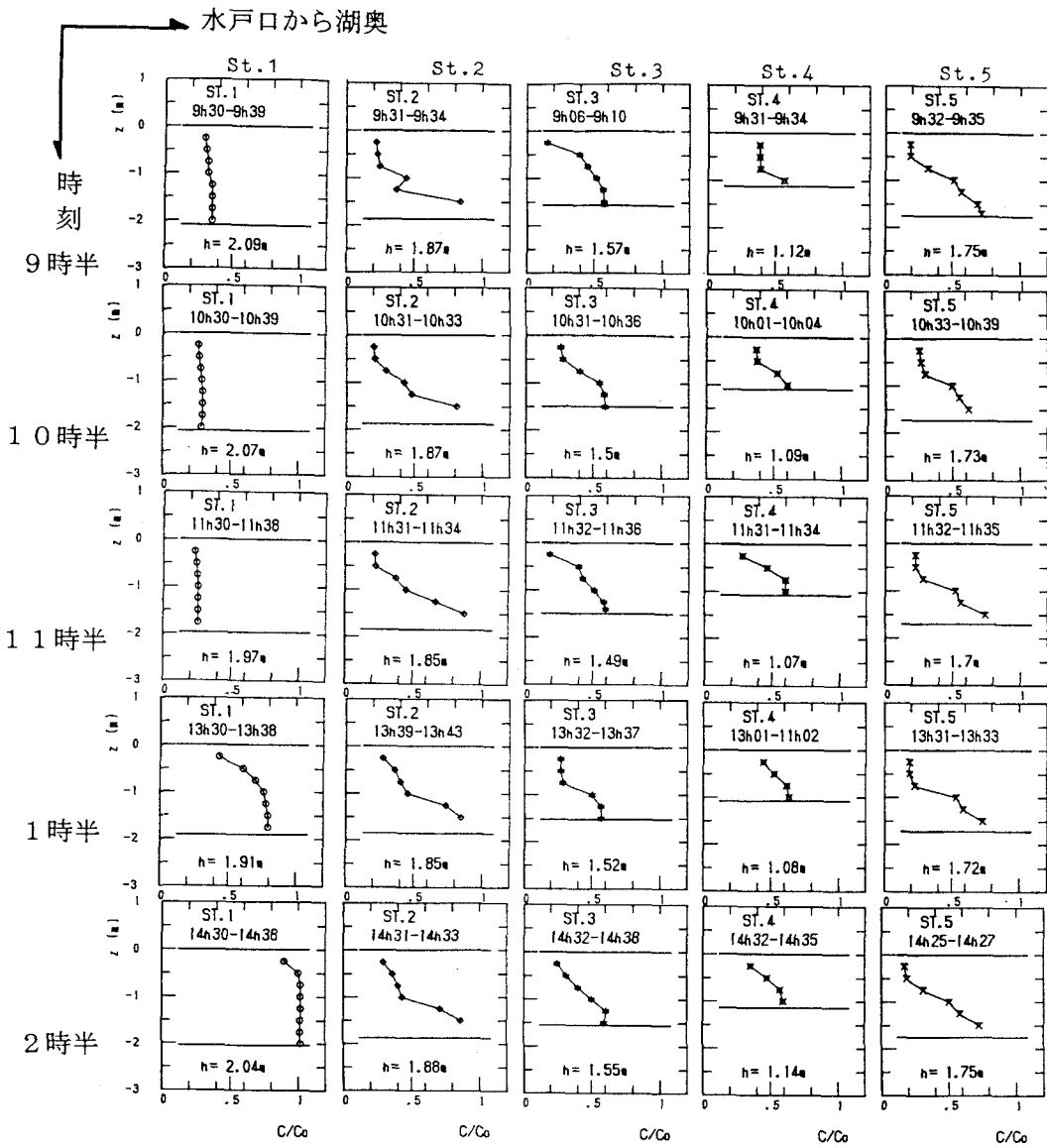


図4. 3 湖内の遡上塩水塊の塩分鉛直分布の変動 C0：海水の塩分濃度＝19,200mg/l

一方、この観測により得られた逆流後の順流時の特徴をまとめると以下ようになる（1部図示省略）。水戸口付近では、4日の午後は順流の流れであり、水温は10℃と低いが塩分濃度は10000mg/lもある。この湖水は塩水であり、順流ではあるが十三湖に浸入した海水が岩木川の流出水と混じり、十三湖水戸口から出ていく様子を示している。このとき、湖の中央では、流れは上層が東向きの流れで、下層が西寄りの水戸口へ向かう流れとなる。

岩木川前面域では、上層および中層の水温は9℃強、塩分濃度が9000mg/l強となっており、水戸口付近や湖中央の状況に比べ水温が低く、塩分は薄くなっており、岩木川からの流出量とそれによる浸入塩水の希

積が進んでいる。山田川前面域では北向きの流れであり、水温・塩分濃度は鉛直方向に緩やかに変化しており、水温や塩分分布には境界面が認められず、境界層が破壊されており、上下方向に混合が進んでいる。湖の東部では流れはほとんどなく、水温が9℃より低く、塩分濃度も8500mg/lと他の地点より希釈が進んでいる。

次に、現地観測に現れた流れの特徴をまとめると以下ようになる（図示省略）。

<水戸口付近>流速は順流時で50～60 cm/s 近く、逆流時で70 cm/s 近くに達する。そして、逆流時には海水の浸入により水温は高くなり、11月では中・下層でおおよそ16℃となる。このとき、塩分分布は、順流時には淡水だけが流れているのではなく、十三湖に浸入した海水が再び外界へ流出する現象があることを示している。

<湖中央>流れは速いときで20 cm/s となるが5 cm/s のときは一定の方向への明確な流動は見られない。11月には、水温の分布は淡水の10℃、海水の16.5℃を両極にして鉛直方向に下層ほど高く、塩分が濃くなる分布となっており、淡水と塩水層の境界面が存在する。その深さは1m付近にあり、塩水の流出とともに深くなる。

<岩木川前面>流れは5 cm/s 程度の速さとなっており、平常時には、一定の方向へ流動するような明確な流れはない。下層には塩水層が存在しており、これが水温の鉛直分布を支配している。11月では、水温は上層で10℃弱、下層では約16℃であり、塩分は上層で約6000mg/l、下層で約19000mg/lとなっている。しかし、境界層は存続しない。

<山田川前面>上層は北向き、下層は南向きの流れとなり、流速は5 cm/s 程度であり、弱い流れである。そして、下層には塩水層があり、これが水温分布を支配しており、水温は底層で15℃、上層で13℃となっており、塩水の鉛直方向の混合が進んでいる。塩分濃度は下層で約19000 mg/l、上層で約1200 mg/l となっている。

<湖東部>流れは南西方向へ向かっているが、それほど明確ではない。下層に塩水層、上層に淡水層が形成されており、境界面が見られる。その境界面の深さは約1mのところにある。それぞれの層において、上層の淡水層の水温はおおよそ10℃で、塩分は7000mg/l、下層の塩水層の水温はおおよそ15℃、Cl⁻濃度は19000 mg/l となっている。

5. 結論

流向・流速はその場所で水粒子がどの方向へ移動しているかがわかるだけである。しかし、水温と塩分を同時に測定することによって、全体としてどこからどの方向へ移動しているかがわかり、時空間の一点での動きだけでなくその時点までの動きの様子がわかる。十三湖が汽水湖であり、十三湖内の水質が塩水の侵入、拡散によって大きく変わる性質を利用し、流れの計測と同時に水質も測定して、遡上塩水塊の挙動を現地観測により明らかにすることができた。

最後に、この研究の1部は文部省科学研究費補助金(基盤研究 (A) ,(1))代表東北大学工学部澤本正樹、課題番号 07305019「全日本比較河口学の研究展開」により実施した。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- (1) 佐々木 幹夫・村岡憲司・渥美雅裕・小松洋亮：水戸口閉塞の歴史と河道安定条件、海岸工学論文集、pp. 344—348、1990.
- (2) 高橋迪夫・藤田豊・佐々木 幹夫・池田道政・川名慶紀：十三湖における出水後の水質の時・空間変動特性に関する現地観測、1994.
- (3) 藤田豊・高橋迪夫・佐々木幹夫：十三湖における水温・水質変動特性、東北地域災害科学研究、台32巻、pp. 183—191、1996.