

びわ湖の種々の界面部における物質動態に関する 物理、化学、生物学的研究 (1)

— 南湖と北湖の境界水域における物理学的調査結果 —

遠藤修一・岡本 嶽・川嶋宗継・鈴木紀雄・
北村静一・板倉安正・寺田知巳*・加藤正代**

Physical, Chemical and Biological Dynamics of Substances at Boundaries in Lake Biwa (1)

— Some Results of Physical Observation in the Boundary
Area between the North Basin and the South Basin —

Shuichi ENDOH, Iwao OKAMOTO, Munetsugu KAWASHIMA,
Norio SUZUKI, Seiichi KITAMURA, Yasumasa ITAKURA,
Tomomi TERADA and Masayo KATO

ABSTRACT

In summers and winters of 1986-1988, we carried out a number of observations of the spatial distribution of water temperature, electric conductivity, turbidity and so on in the boundary area between the north basin and the south basin of Lake Biwa. We also made a continuous current measurements by using the current meters in winter of 1987. The LANDSAT TM imageries are used for the estimation of the horizontal distributions of surface water temperature and transparency.

The turbidity front exists in the area about 3 km south of Biwako Ohashi (Bridge) both in summer and winter. The thermal front is very clear in winter especially after the cold wave, and the cold water of the east part of the south basin flow continuously into the bottom layer of the north basin for several days.

Key words : Lake Biwa, water temperature, turbidity, front

1. はじめに

びわ湖の南湖と北湖とでは、水質において顕著な差がみられる。したがって、びわ湖における南北湖水の交流は、南湖にとっては“浄化”であるが、北湖に対しては“汚濁”である。とくに、汚染の進んだ南湖水が北湖に逆流する現象は、びわ湖の汚濁機構としてきわめて重要である。

従来の研究によれば、南湖水の北湖への流入現象として、冬期においては「密度流」が、夏期においては「内部波」や「鉛直循環流」が知られている (OKAMOTO, 1985; 岡本, 1987)。これらの流系によって両湖水は交流するのであるが、それに伴って水質や生態系も変化するものと考えられる。そこで、本研究では南湖と北湖の境界水域における水温や濁度の分布を観測し、さらには流れを実測することにより、両湖水の交流の実態を捉えることを目的とした。以下に述べるように、数多くの観測により膨大なデータが得られた。本研究の究極の目的は、単に物理現象の解明にとどまらず、化学、生物学的研究との連携により南北湖水の交流の機構と実態を明らかにすることである。そのためには、観測資料の総合的な解析が必要であり、ここで

はとりあえず、物理的調査によって得られた結果を公表し、今後の総合的解析の1ステップとしたい。

2. 観測

南北両湖の境界水域における湖況を捉るために、図1に示す各測点において艇による移動観測を、1986年12月9～10日、1987年8月23～24日、11月18日、12月13日、1988年7月27日～8月8日、および12月19日に実施した。観測項目は、水温・電気伝導度・濁度の鉛直分布、風向・風速、気温、透明度、および表面水温の水平分布などである。また1987年の冬期には3台の自記流向流速計による連続測流・測温を約1ヶ月間実施した。これらの観測の大部分は、生物・化学班による表層と底層の採水、プランクトンの採取、および赤外線による表面水温の連続観測などと併行して行われた。また、11月18日の観測は、人工衛星ランドサットの通過に合わせて実施された。

物理調査において使用した測器は、水温と電気伝導度については東邦電探㈱の電気水質計(EST-3)、濁度と水深についてはアレック電子㈱のポータブル濁度計(PT-1型)と深度計(ADM-II型)である。調査艇は、滋賀大学教育学部附属湖沼実習施設所有の「清流」と「湖精II」(いずれも4.9トン)である。

3. 夏季の観測結果

図2と3は、湖を縦断する2つの測線(西側が測線I、東側が測線II)における観測によって得られた水温・電気伝導度・濁度の鉛直断面を示したものである。また、図4～7は、表面および湖底直上の水平分布であり、さらに図8は琵琶湖大橋断面における分布を示したものである。これらの図から以下の点を指摘することができよう。

水温の分布を見ると、北湖では水温の成層がみられるものの、表層においては両湖で顕著な差は認められない。これは、電導度についても同様であり、一見夏季にはフロントが存在しないような分布となっている。一方、1987年の濁度の観測結果からは、明らかに南湖で高く、北湖で低いという分布が読み取れる。しかもその

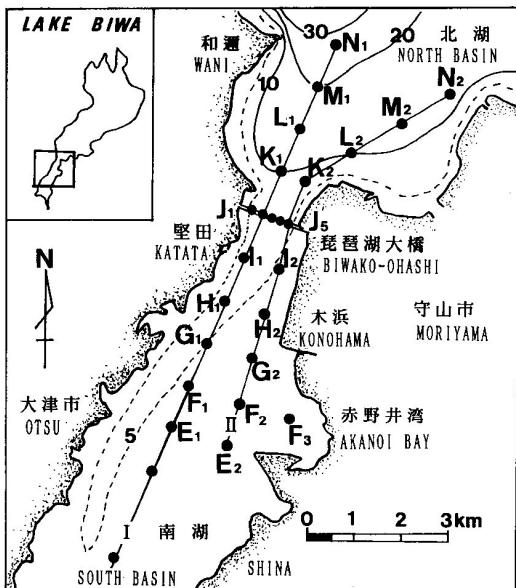
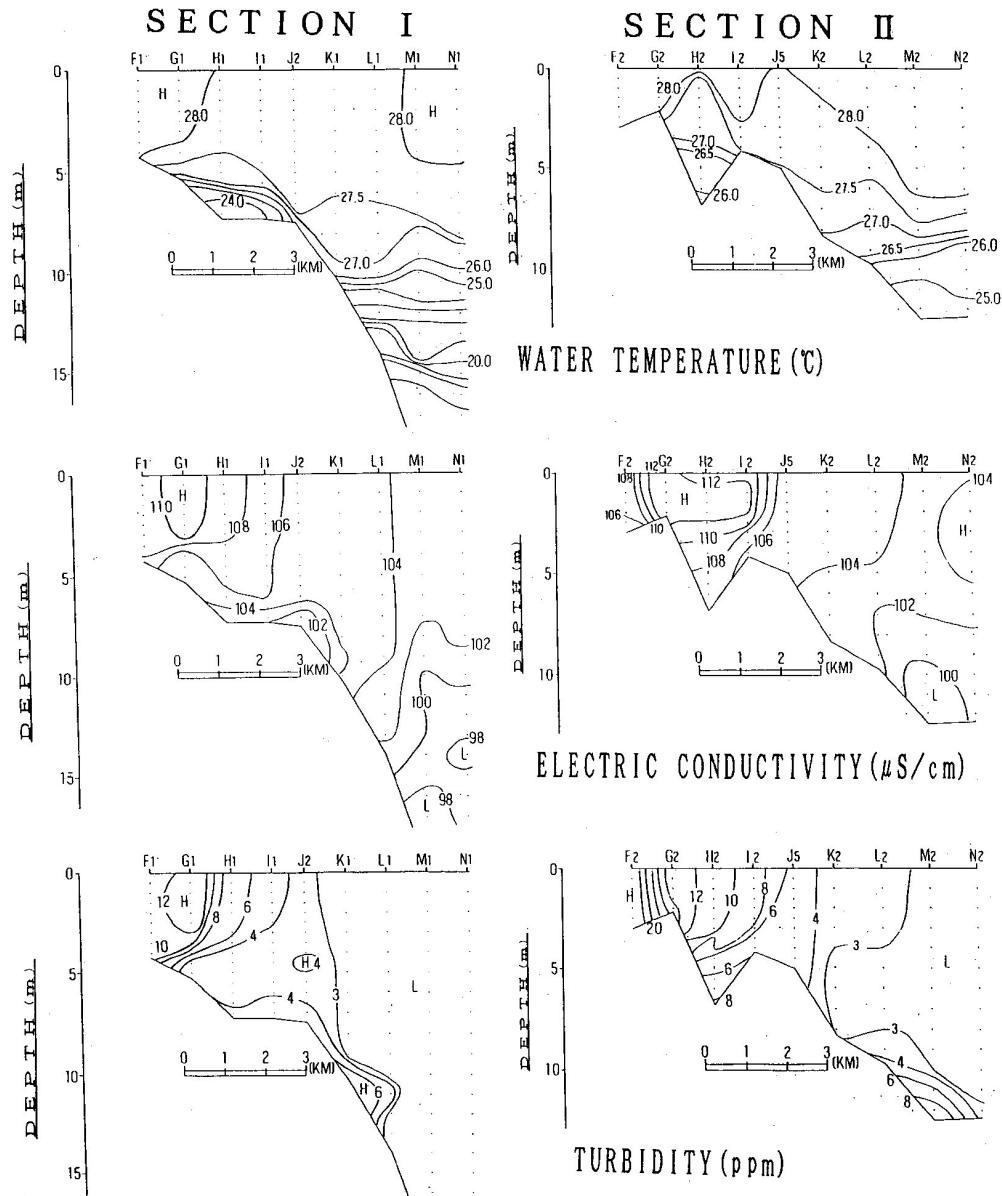


図1：観測地点



23 AUG. 1987

図2：縦断観測によって得られた水温・電気伝導度・

濁度の鉛直断面。1987年8月23日

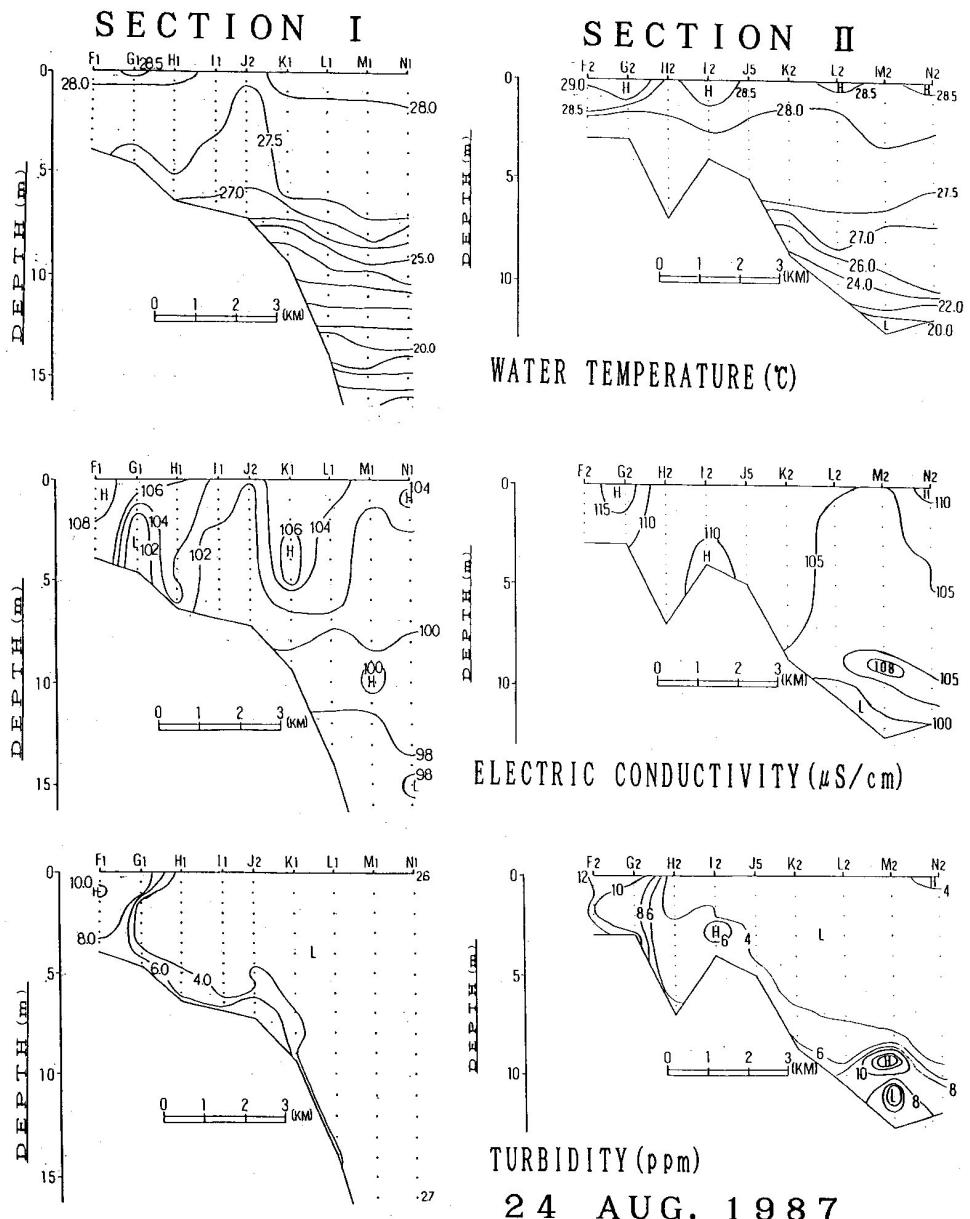


図3：縦断観測によって得られた水温・電気伝導度・

濁度の鉛直断面。1987年8月24日

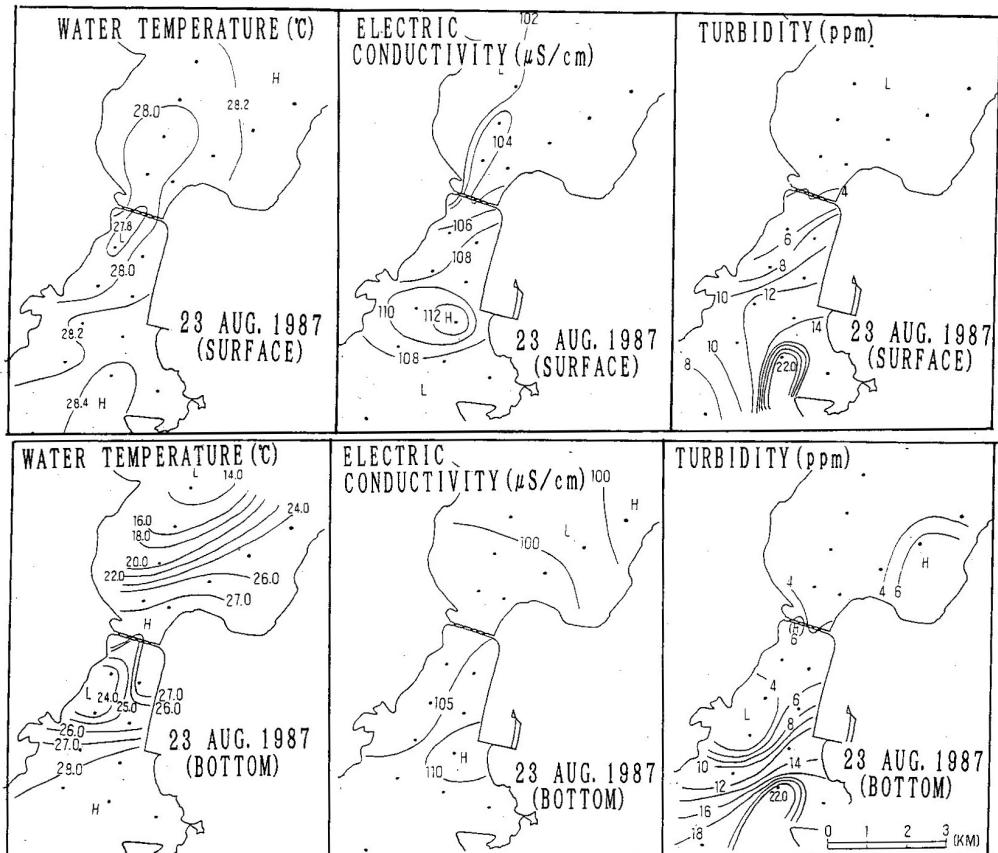


図4：表面と湖底直上における水温・電気伝導度・濁度の水平分布。1987年8月23日

境界はフロントと呼ぶにふさわしい不連続的なものであり、琵琶湖大橋の南約3kmに位置している。この高濁度水は、南湖東岸、すなわち赤野井湾や志那沖に源を発し、湖底沿いに北湖へと流入している様子が各図から読み取れる。

一方、1988年にも同様の観測を実施したが、この時期は、梅雨末期の集中豪雨の後に当り、びわ湖からの放流量が比較的多く、流況にも何らかの影響が見られることが期待された。図6と7に、7月27日と8月1日の観測結果として、表層における水温・電導度・濁度の水平分布を示す。水温については両湖で顕著な差は認められないが、電導度と濁度については、南湖東岸で高い値をとっているのがわかる。その結果、1987年の夏にみられた東西方向のフロントは存在せず、南北方向にフロントが形成されている。これは、1987年の夏にはびわ湖の水位が約-80

cmで、瀬田川洗堰からの放流量が5 m³/sであったのに対し、1988年は放流量が250m³/sという大きな値であったことが理由として考えられる。すなわち、放流に伴う北湖から南湖に向かう「恒流」により、比較的多量の北湖水が南湖に侵入したと考えられる(遠藤ら、1982)。これは、1987年に比べて1988年の方が電気伝導度の値がかなり低くなっていることからも容易に想像される。

このようなフロントは、南湖で供給される「濁り」と、南湖に流入する北湖水とのバランスにより形成・維持されるものと考えられる。さらに細かいメカニズムについては、今後の課題とした。

4. 冬季の観測結果

夏季観測同様、図9～12に2つの縦断測線での鉛直断面を、図13～15に表面と湖底直上の

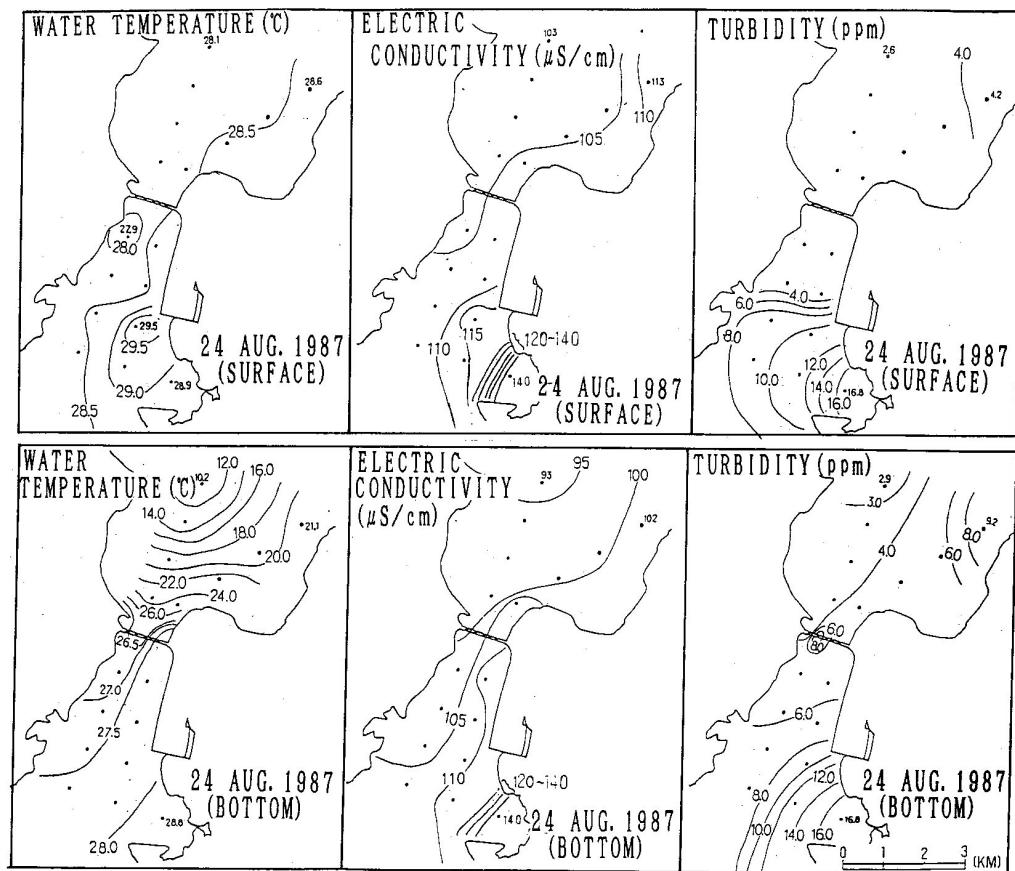


図5：表面と湖底直上における水温・電気伝導度・濁度の水平分布。1987年8月24日

27 JUL. 1988 (SURFACE)

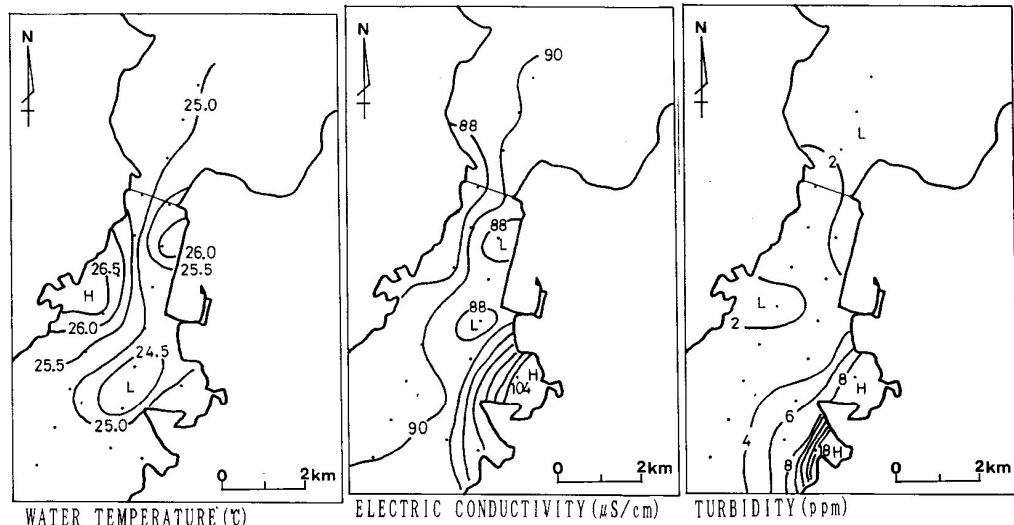


図6：表面における水温・電気伝導度・濁度の水平分布。

1988年7月27日

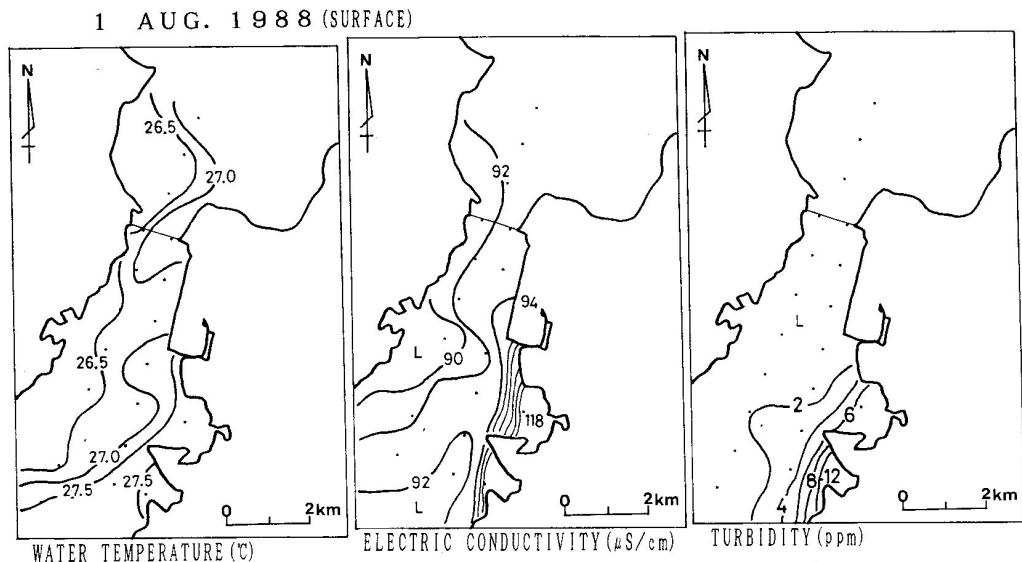


図7：表面における水温・電気伝導度・濁度の水平分布。

1987年8月1日

水平分布、図16～18に琵琶湖大橋鉛直断面、さらに図19には、調査艇による表面水温曳航観測結果を示した。

秋から冬にかけて湖水の冷却が進むと、水深の小さい南湖では急速に水温が低下し、北湖との間に水温の不連続線（フロント）を形成することが知られている。図19にみられるように、表面水温は明らかに北高南低の分布を示している。観測当時やそれ以前の気象条件によって多少の差はあるものの、南湖の表面水温は北湖よりも2～4°C低くなっている。このような水温（密度）分布により、重たい南湖水が北湖の湖底に沿って逆流する「密度流」が発生する。フロントの位置は、冷却量やその他の気象条件に左右されるものと思われるが、琵琶湖大橋の南2～4kmに存在することが多い。また、フロントは南湖の西側ではかなり南方に侵入した形状となっている。これは主として南湖の東岸側が浅いために水温の低下が著しいことにより、低温水が北上し、その補流として北湖水が西岸沿いに南下するためと考えられる。あるいは、その逆、すなわち、なんらかの機構により北湖水が西岸沿いに南湖に流入し、それによって南湖東岸水が北上するのかもしれない。

電気伝導度については、冬季においても両湖

で有意な差は認められず、このフィールドにおいては電導度は湖水の動きの指標にはなりにくいことがわかる。

濁度については、冬季においても両湖で明らかに異なっており、現場で迅速に測定できる水質指標としてきわめて有効であることがわかる。また、濁度の鉛直分布を見ると、南湖の高濁度水が湖底に沿って北湖に逆流している様子をみることができ、密度流の存在を示唆している。

水平分布（図13～14）からは、冬季においても赤野井湾の水が高濁度・高電導度であることや、その沖において浚渫（砂利採取）による濁水が存在していることがわかる。

1988年12月19日は、寒波到来後4日目に相当し、密度流発生時における流況観測となった。鉛直断面内での水温・電導度・濁度の分布（図12）をみると、明らかに、水温と濁度について南湖の底層水が密度流によって北湖に流入している様子がわかる。また、琵琶湖大橋の断面分布（図18）をみると、底層に南湖水と思われる低温・高濁度水が存在し、詳しくみると、南湖水は最深部よりもやや東側に分布しており、等温線（等濁度線）は右上がりになっている。このことは、密度流が地衡流的性格を有すること、コリオリ効果（大西ら、1984）の存在すること

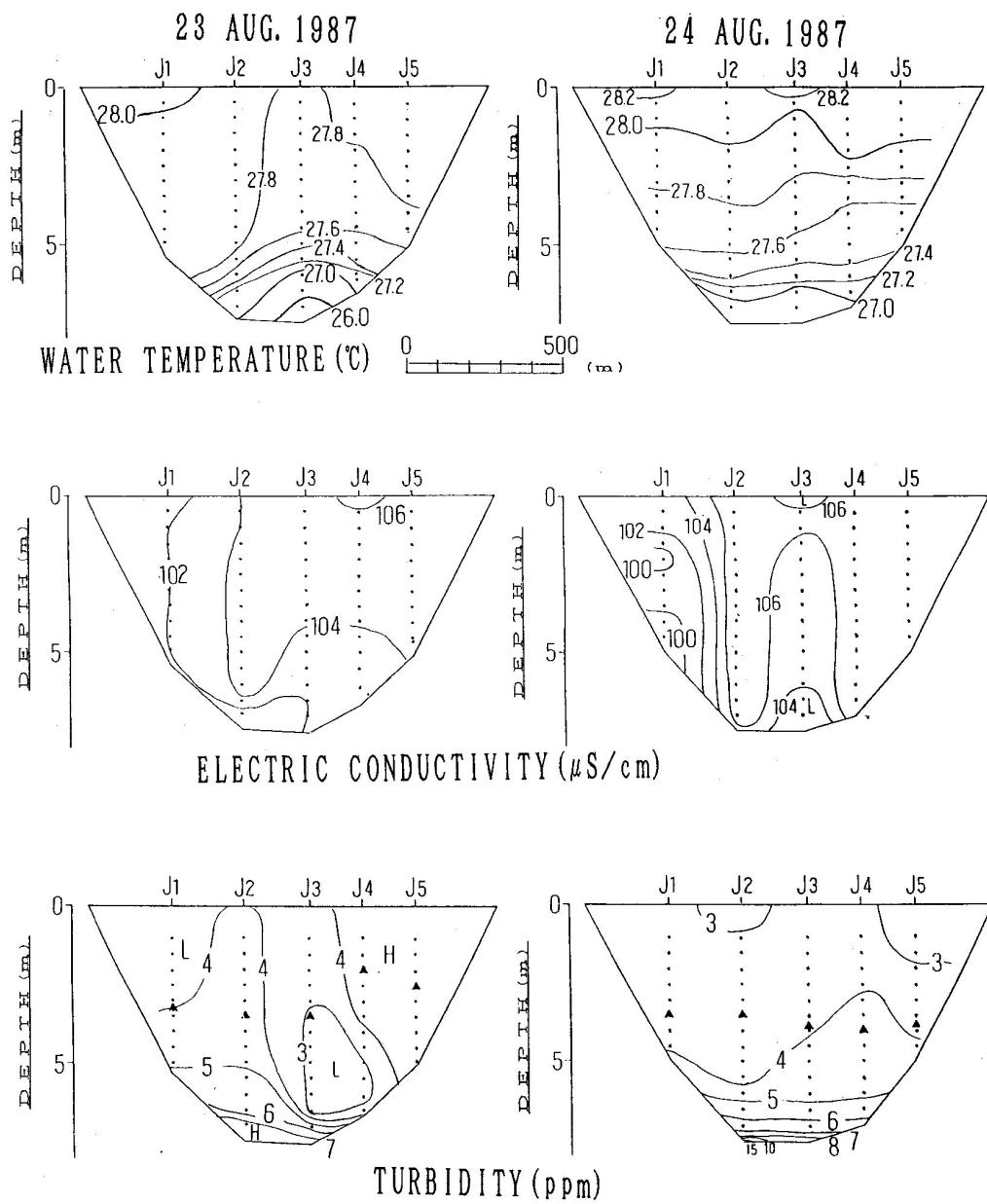


図8：琵琶湖大橋断面における水温・電気伝導度・濁度の分布。1987年8月23日と24日

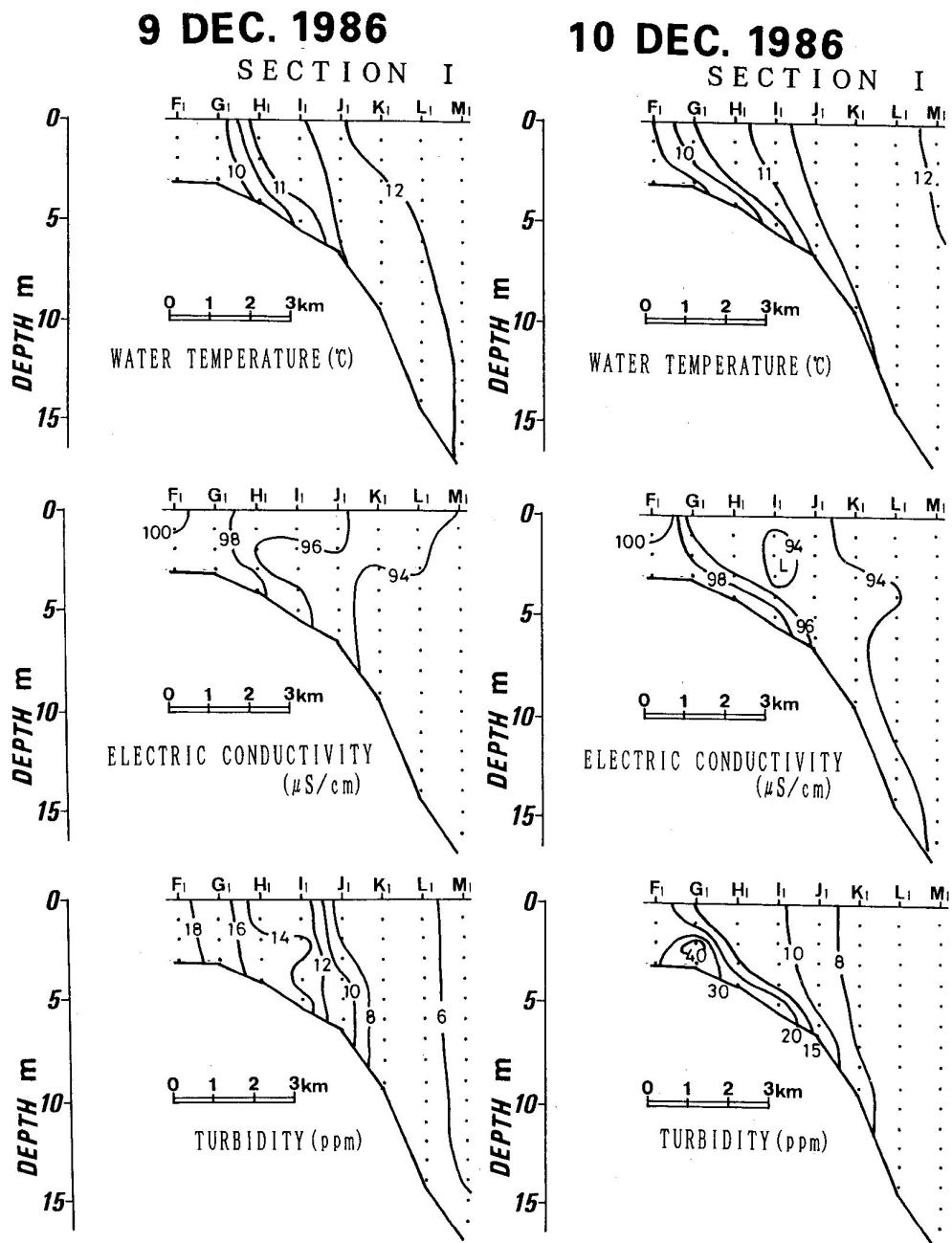
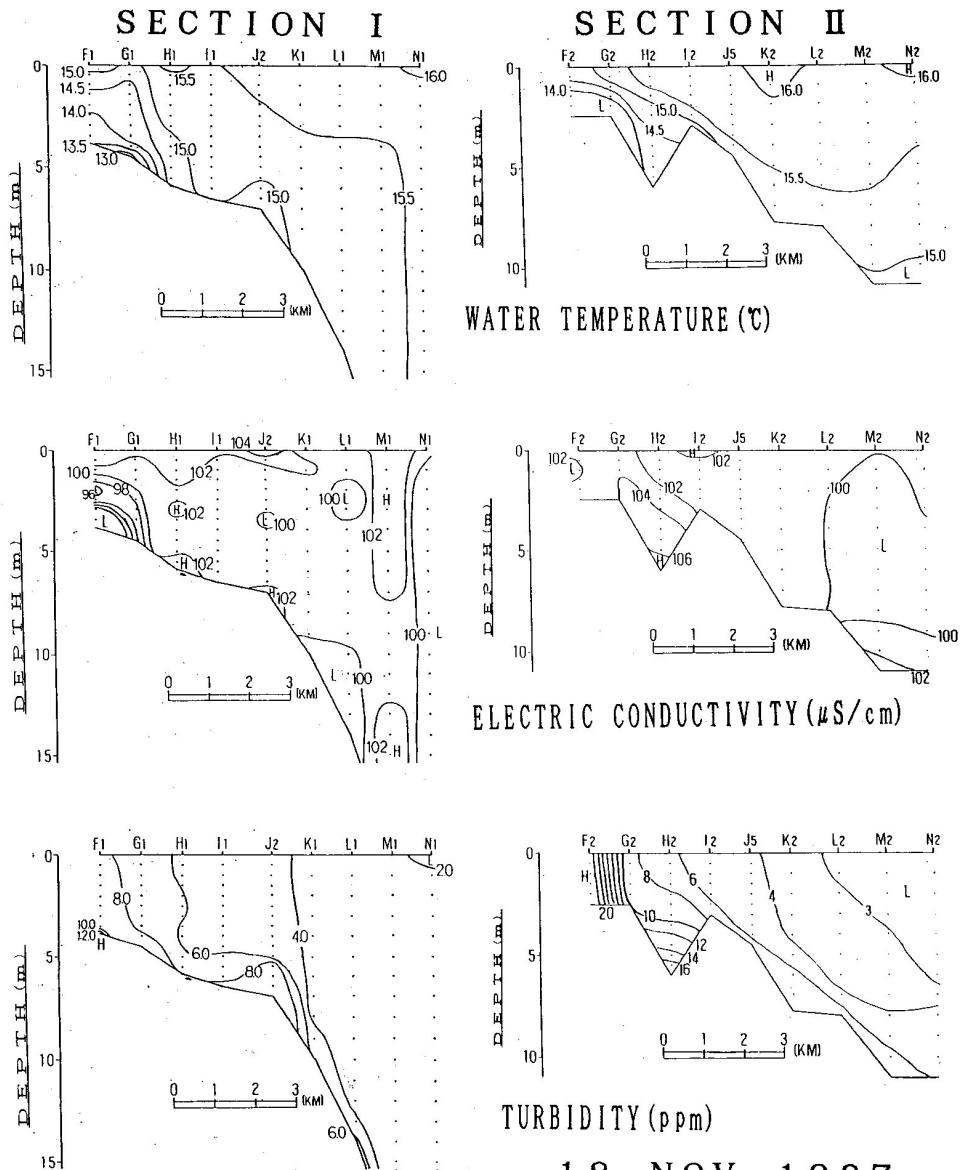


図9：縦断観測によって得られた水温・電気伝導度・

濁度の鉛直断面。1986年12月9日と10日



18 NOV. 1987

図10：縦断観測によって得られた水温・電気伝導度・
濁度の鉛直断面。1987年11月18日

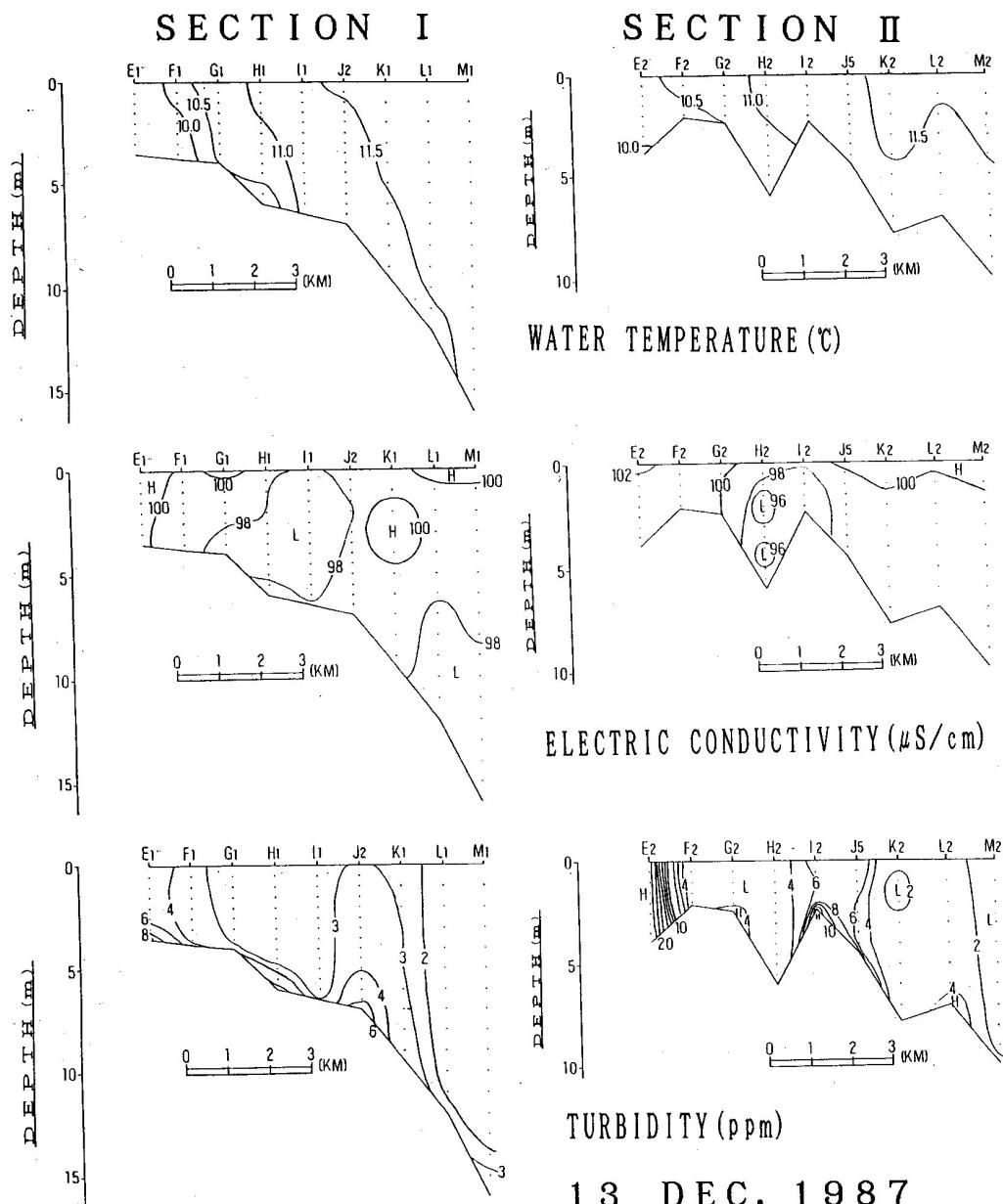


図11：縦断観測によって得られた水温・電気伝導度・
濁度の鉛直断面。1987年12月13日

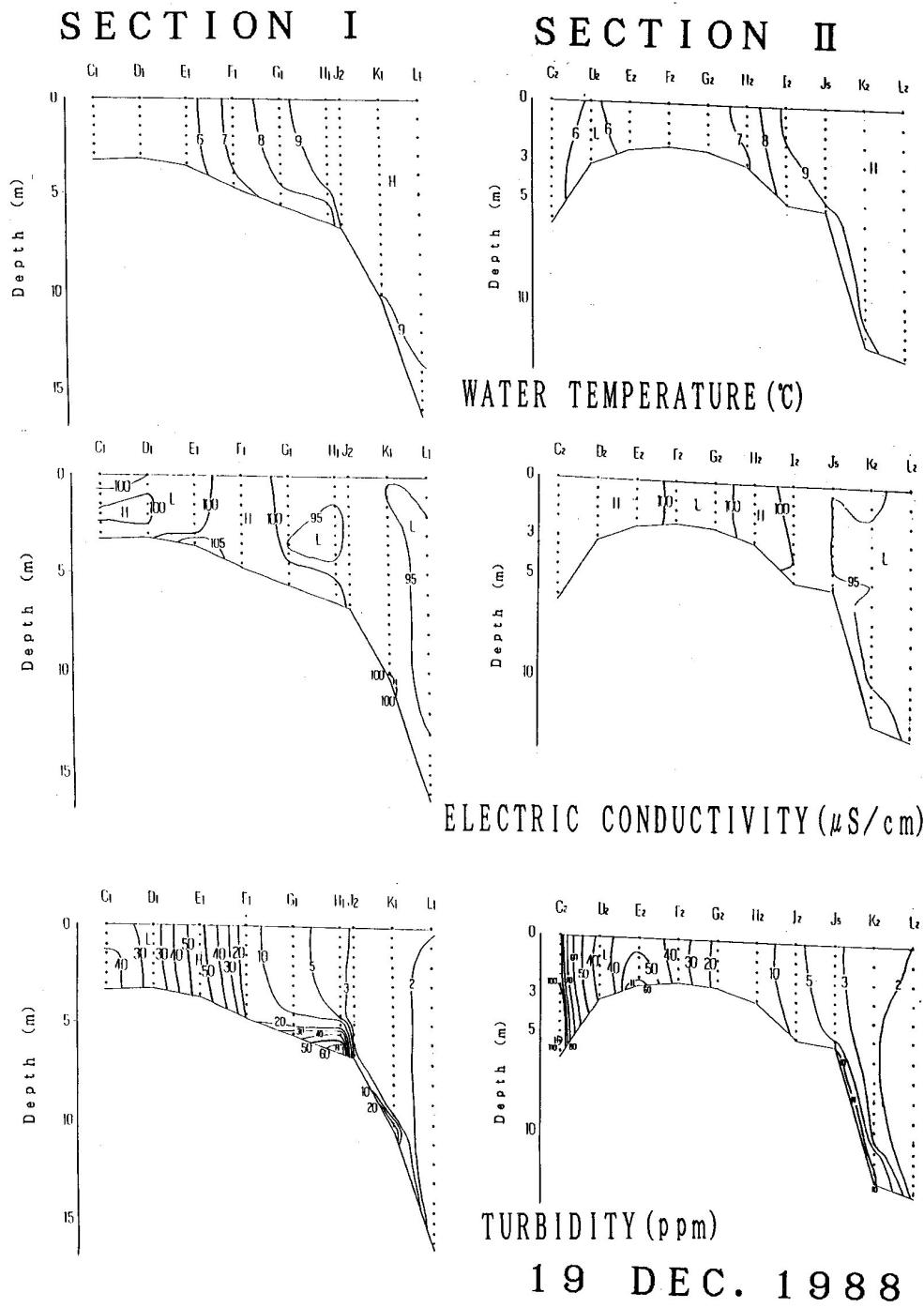


図12：縦断観測によって得られた水温・電気伝導度・
濁度の鉛直断面。1988年12月19日

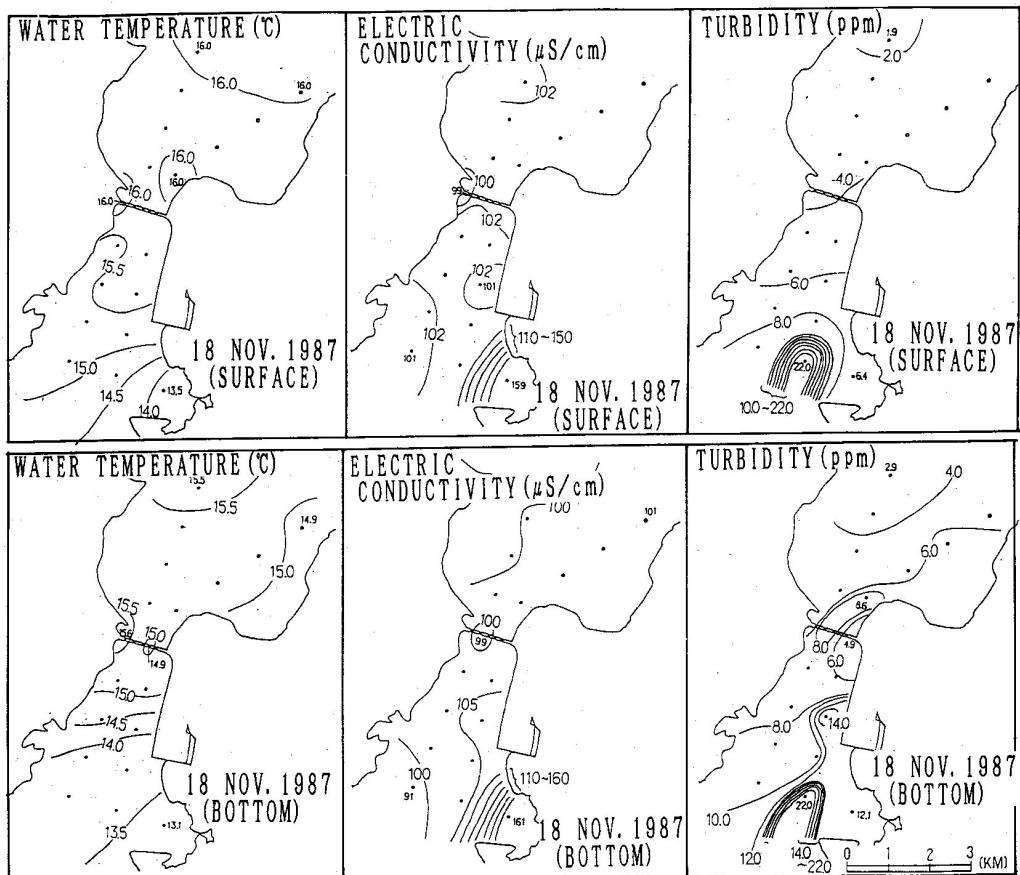


図13：表面と湖底直上における水温・電気伝導度・濁度の水平分布。1987年11月18日

などの推定を可能にするが、さらに詳しい調査が必要である。

5. 自記流向流速計による連続測流

艇による移動観測では、水の動きに関する情報が得られないため、1987年11月17日より12月15日までの約1ヶ月間、南湖の最深部に沿って3台の流向・流速計を設置し、流向・流速・水温の連続記録を得た。設置点は、琵琶湖大橋の北約200mの点を起点に、それから南南西(方位210°)に1.5km、および3.0kmの地点である。

図20は、その結果をまとめたものである。上から、堅田における風(滋賀県衛生環境センター所管)、北小松と大津における気温(AMeDASによる)、および流向流速計による水温と流れを示したものである。

この図から、11月中旬は比較的温暖な天候であったために、水温や流れに顕著な特徴はみられないが、下旬には寒波の到来により水温は急激に低下し、北側の2地点(測点JとH)で12月6日頃から北向きの安定した流れがみられるようになる。これは、まさに密度流であり、寒波の到来に2~3日遅れて低温な南湖水が最深部を通って北湖に流入(逆流)していくことが明らかになった。流速の大きさは、5~10cm/sで、約5日間継続している。また、このとき、最南部の測点(測点G)では、弱い南東向きの流れが継続し、南湖西岸の水が東岸の水を補給するような形で東に向かうという結果が得られ、この現象は物質循環の観点からも興味深い。

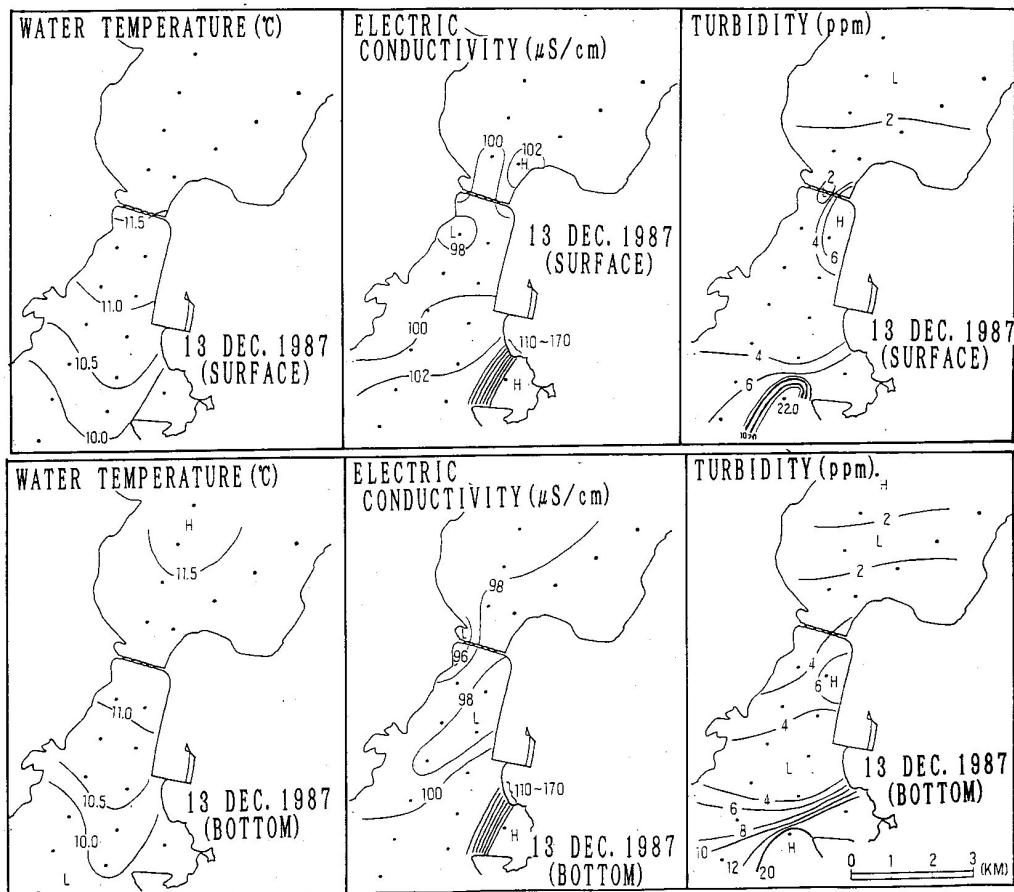


図14：表面と湖底直上における水温・電気伝導度・濁度の水平分布。1987年12月13日

6. 人工衛星ランドサットによる湖況の観測

1987年11月18日の午前9時50分に地球資源探査衛星ランドサットがびわ湖上空を通過した。幸いなことに、当日は雲一つない秋晴れであり、既に述べた艇による観測結果との対比が可能となつた。18日に1度しか巡ってこない衛星通過日が晴天であり、しかも湖上で同時に調査が行えると言うのはきわめて稀である。

よく知られているように、ランドサットにはTM（セマテックマッパ）とMSS（マルチスペクトルスキャナ）という遠隔探査装置が搭載されているが、今回は水温の情報を必要としたので、TMの記録を助リモート・センシング技術センターより磁気テープの形で入手した。写真1は、バンド6の遠赤外の画像であり、表面水

温分布に対応すると考えられる。ただし、この写真はバンド4を利用して陸域と水域とを区別し、水域のみのデータを取り出したものである。また、各色は相対的な温度分布を示すものであり、絶対値では表現していない。

既に述べたように、赤野井湾に低温水が存在し、それが南湖に張り出し明瞭なフロントを形成しているのを見ることができる。この分布は、衛星通過とほぼ同時に行つた艇による表面水温の曳航観測結果（図19）ときわめてよく対応した分布となっている。

写真2は、バンド2とバンド3とを用いて作成した水の濁りに対応する分布である。まだ十分な吟味はなされていないが、透明度や濁度に相当する分布とみることができよう。この写真には、志那沖の高濁度水が明瞭に捉えられてい

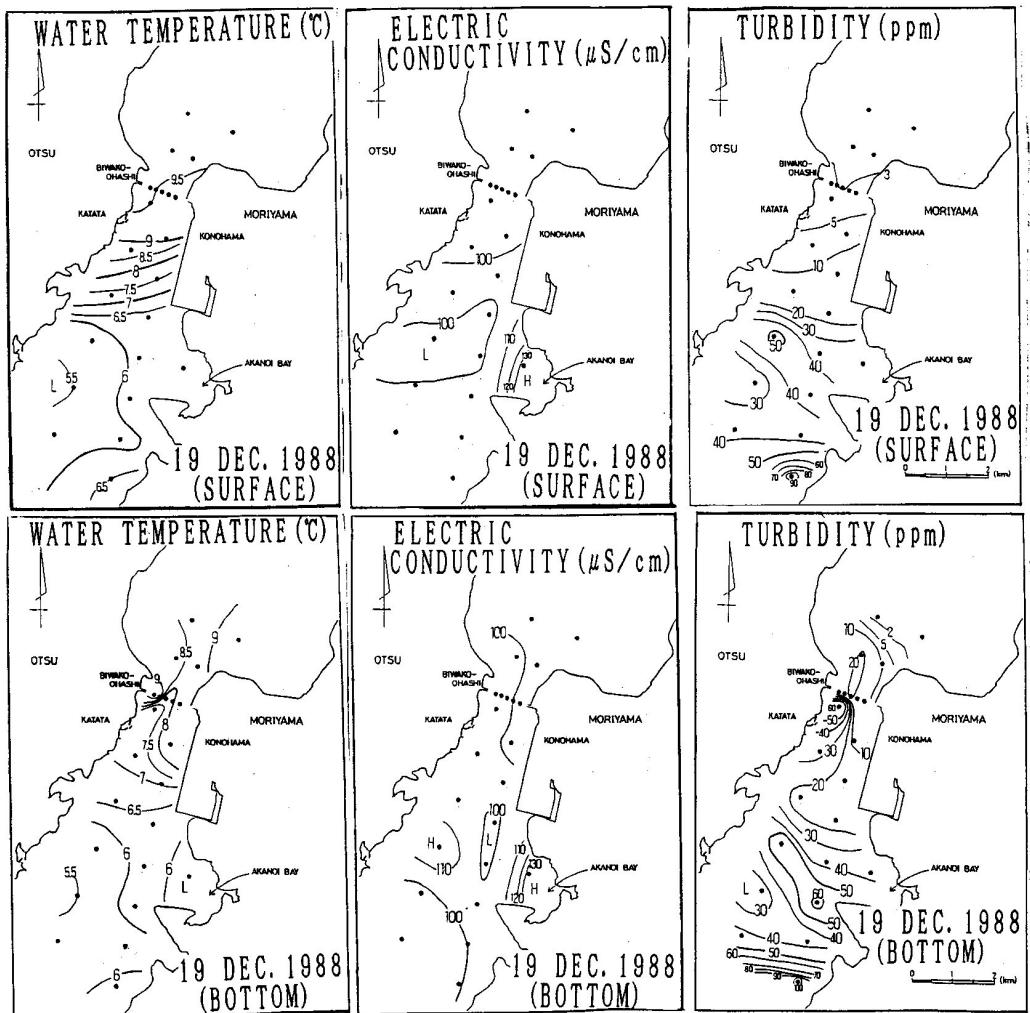


図15：表面と湖底直上における水温・電気伝導度・濁度の水平分布。1988年12月19日

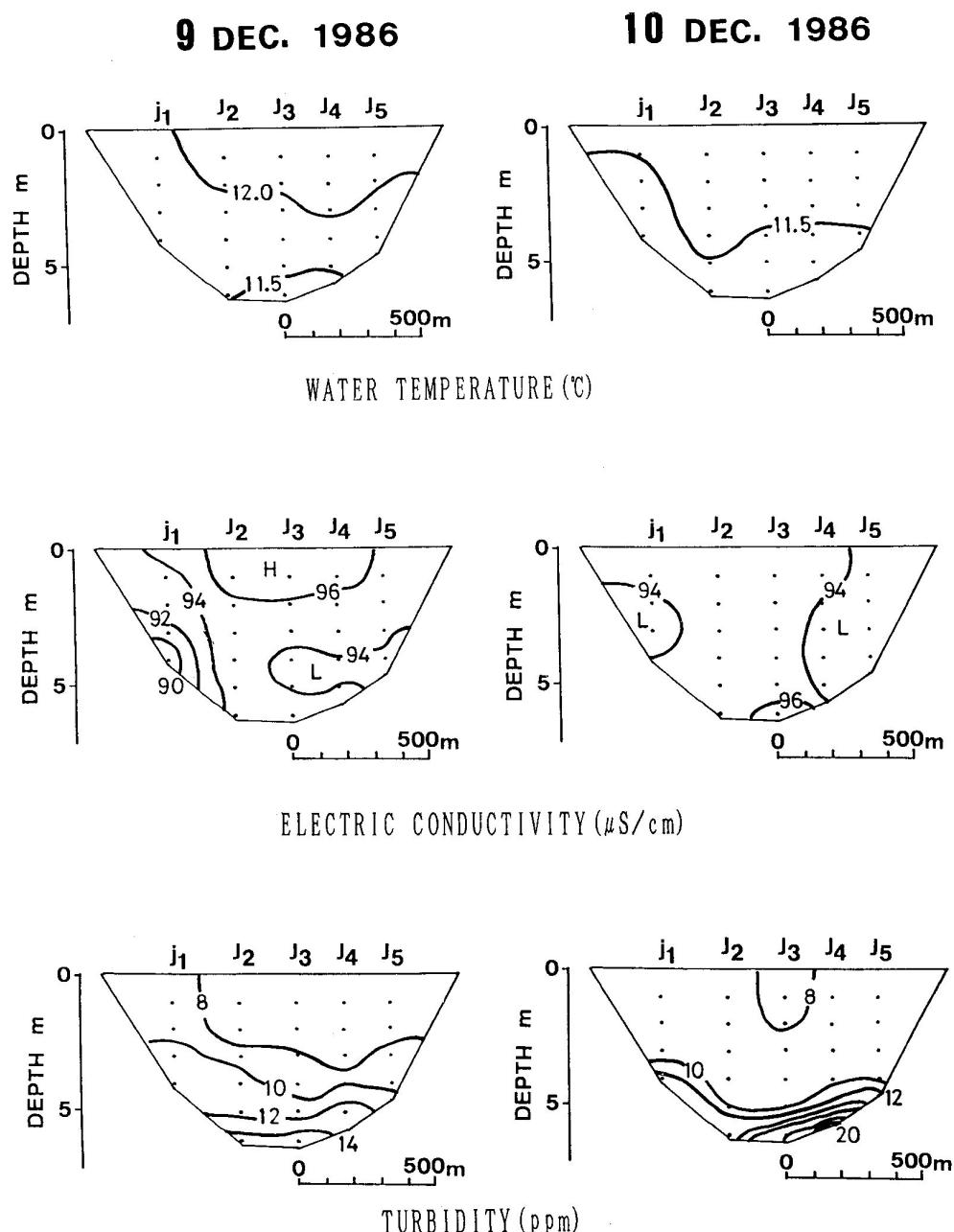


図16：琵琶湖大橋断面における水温・電気伝導度・濁度の分布。1986年12月9日と10日

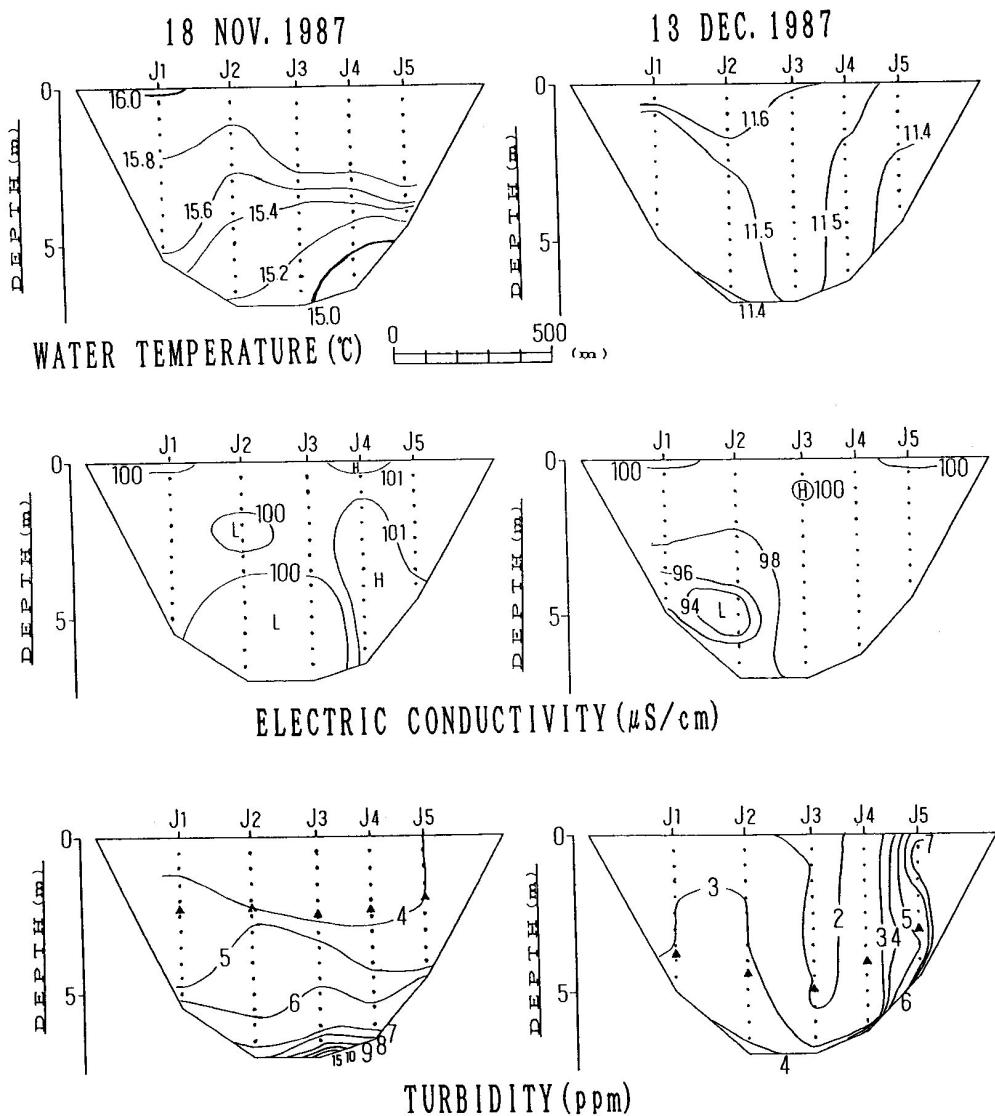


図17：琵琶湖大橋断面における水温・電気伝導度・濁度の分布。1987年11月18日と12月13日

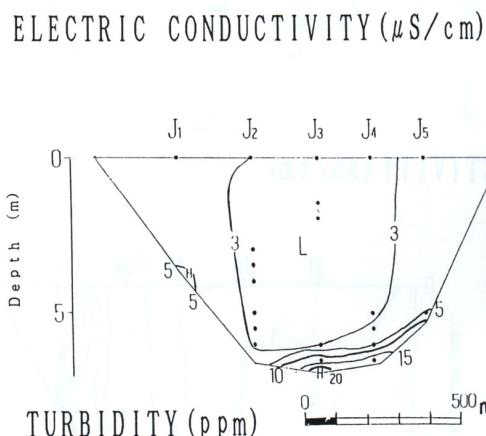
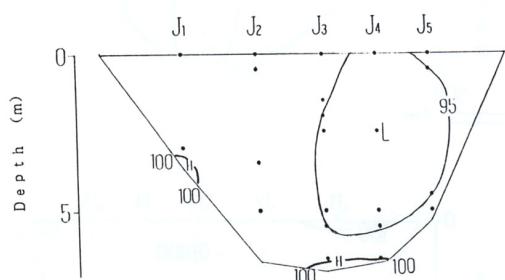
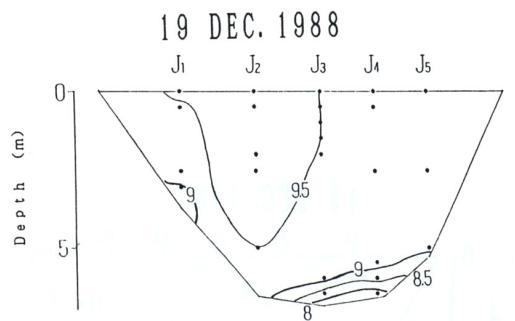


図18 琵琶湖大橋断面における水温・電気伝導度・濁度の分布。1988年12月19日

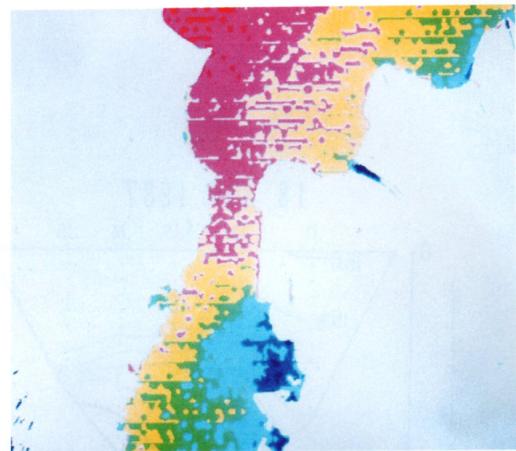


写真1 人工衛星 LANDSAT の TM バンド 6による表面水温分布。

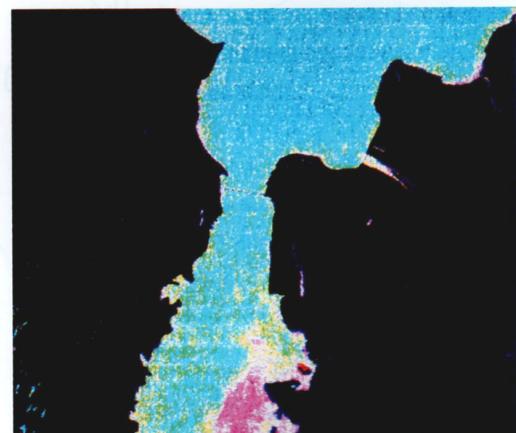


写真2 人工衛星 LANDSAT の TM バンド 2とバンド 3を用いた透明度の推定。

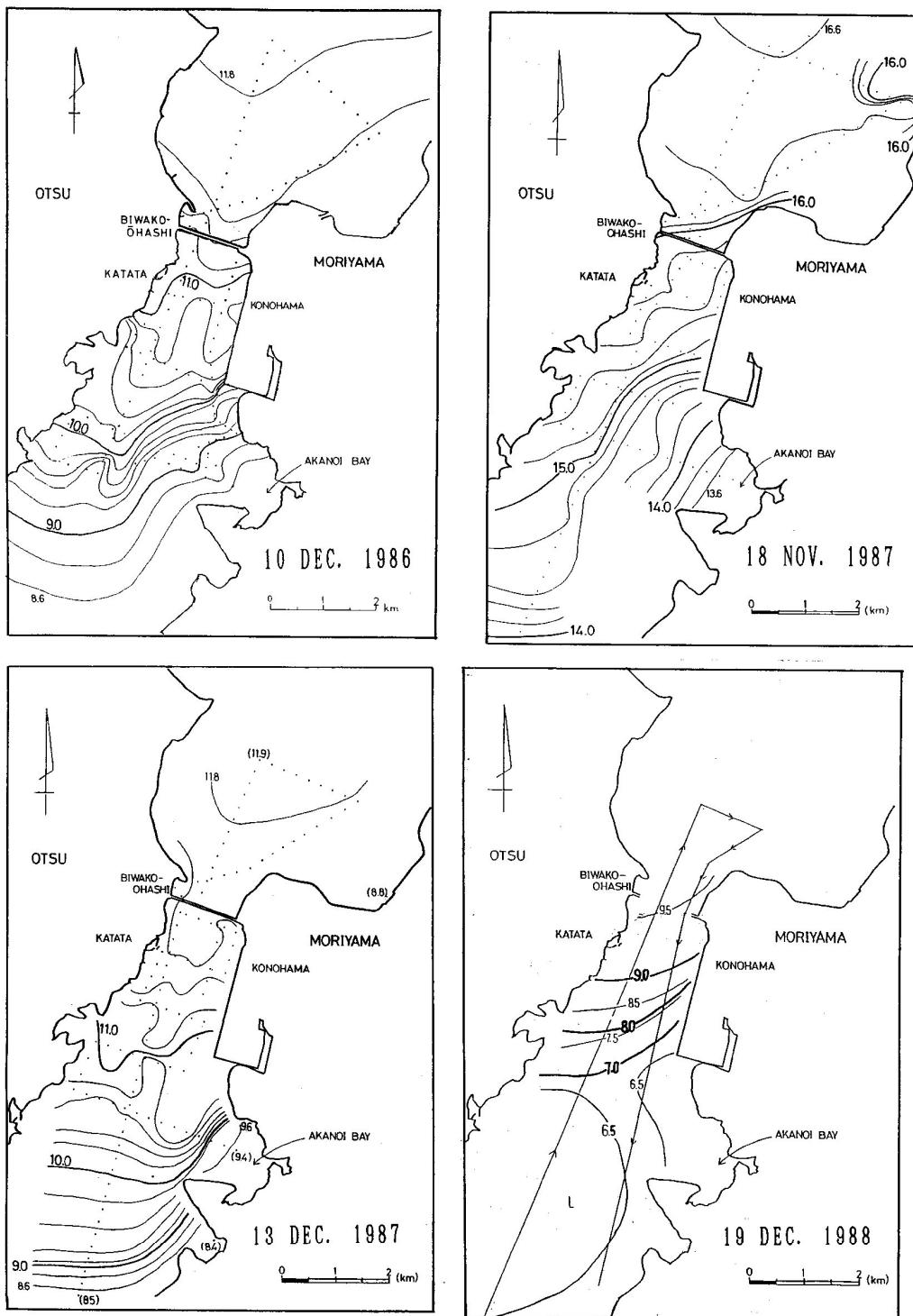


図19：曳航による表面水温分布。1986年12月10日、1987年11月18日、12月13日および1988年12月19日

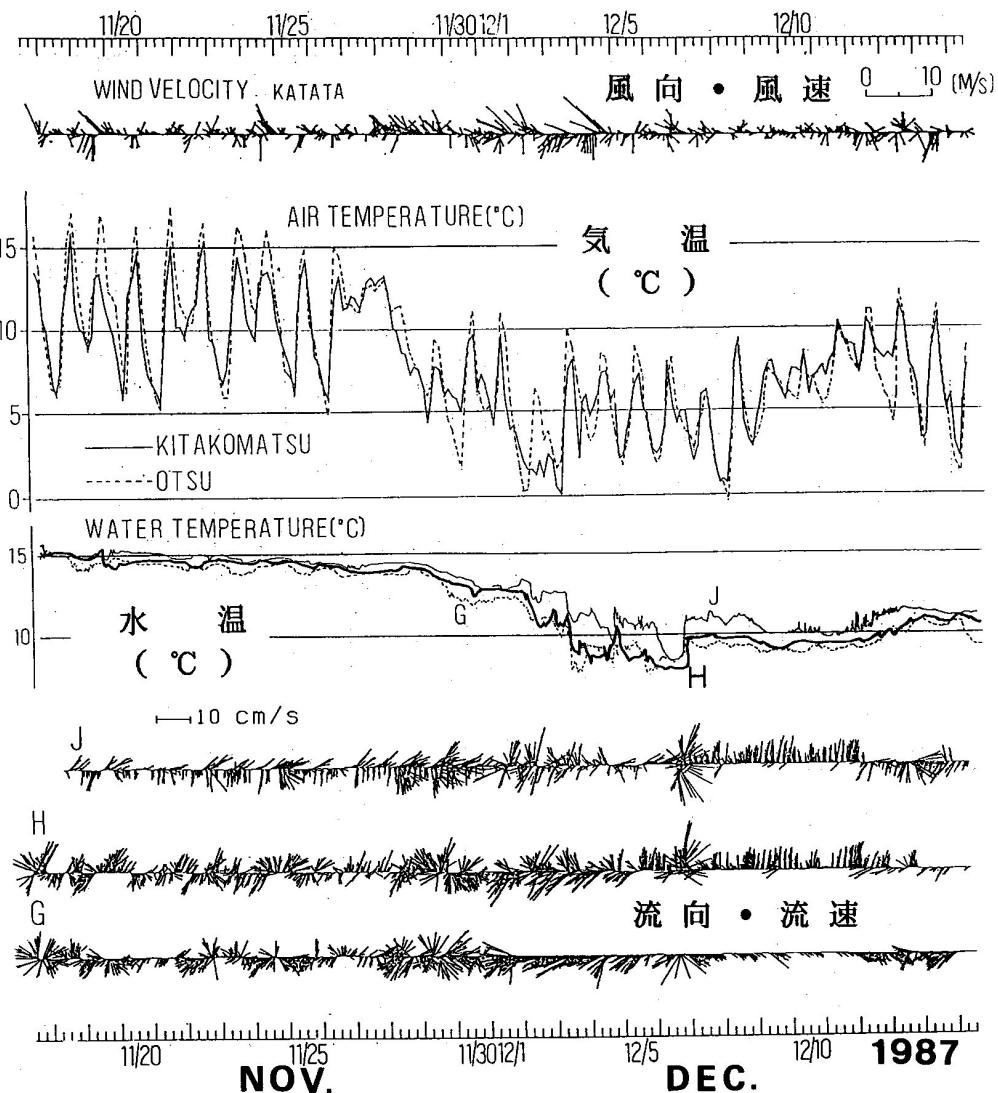


図20：自記流向・流速計による測流・測温結果と、気象要素の時間変化。1987年11月17日～12月15日

る。現段階においては、画像の一次処理にとどまっており、今後は艇による移動観測結果との定量的な関係について解析していく必要がある。また、ランドサットを利用した解析の例は多いが、水に対しては未だ十分な成果を挙げていないので実状であるので、今後も今回のような同時調査により面的な水質・流況の分布を把握するための有効な手段として発展させることが必要である。

7. おわりに

びわ湖の南湖と北湖との境界水域における水質の分布について、主として観測結果に基づき考察してきた。その結果、南北境界水域においては、特に濁度に関して明瞭なフロントが存在することが明らかになった。フロントは、琵琶湖大橋の約3kmに形成されることが多く、それを境にしていくつかの物理的機構により交流することが推定された。ただし、びわ湖からの放流量が多い場合にはフロントが東岸に押し寄せられたような形状を示す。冬季は、寒波の影響を受けた状況での観測結果が得られ、典型的なフロントの構造と密度流の存在が確認された。

フロントの位置や形状は、流況や気象条件によって変化するが、北東—南西方向に横たわる場合が多い。これは、おそらく北湖水が、西岸寄りに南湖に侵入し、逆に南湖水が東岸寄りに北上する場合の多いことを示唆している。したがって、両湖の湖水の交流は、水平循環に起因することを意味しており、これによって正味の交換が生じているものと考えられる。

また、夏期の風による湖水の動きや、冬季の密度流に見られる鉛直循環によっても両湖水は交流し、ここでも北湖に流入した南湖水は、容易には再び南湖に戻らないものと思われる。

さらに詳しい交流の機構や、定量的な評価をするためには、観測の積み重ねが必要であり、特に連続自記観測の必要性が痛感される。また、交流機構の解明の手段として、数値実験や模型実験も重要であろう。

最後に、観測に協力していただいた地学教室の学生諸君と、貴重な資料を提供して下さった滋賀県衛生環境センターおよび建設省琵琶湖工事事務所に深く感謝する次第である。なお、本研究は主として滋賀大学教育研究学内特別経費によっておこなわれた。

文 献

- 遠藤修一・岡本 巍・伴伊久夫・岡本拓夫 (1982) : びわ湖における流況の連続記録 (II) —南湖の流況特性—、滋賀大学教育学部紀要 (自然科学)、32 : 67—83.
- OKAMOTO, I. (1985) : Water movements as deduced from temperature distribution and its time-variation in Lake Biwa. Mem. Fac. Educ., Shiga Univ. (Nat. Sci.), 35 : 19—34.
- 岡本 巍(1987) : 湖盆間の交流、琵琶湖水の動態に関する実験的研究総合報告書(I)、滋賀県琵琶湖研究所研究報告 No. 86-A04 : 29—37.
- 大西行雄・大久保賢治・原島 省・村本嘉雄 (1980) : 密度流におけるコリオリ効果に関する研究、京都大学防災研究所年報、23B-2 : 351—371.