

琵琶湖全域一斉陸水調査 —日本陸水学 100 年記念行事—

成田 哲也¹⁾・遠藤 修一²⁾・三田村緒佐武³⁾・奥村 康昭⁴⁾
芳賀 裕樹⁵⁾・中島 拓男⁶⁾・上田 孝明¹⁾・小板橋忠俊¹⁾

Semisynchronous limnological observation over whole lake in Lake Biwa —Commemoration of the 100-year anniversary of the foundation of limnology in Japan—

Tetsuya NARITA¹⁾, Shuichi ENDOH²⁾, Osamu MUTAMURA³⁾, Yasuaki OKUMURA⁴⁾,
Hiroki HAGA⁵⁾, Takuo NAKAJIMA⁶⁾, Takaaki UEDA¹⁾ and Tadatoshi KOITABASHI¹⁾

(2002 年 8 月 27 日受付; 2002 年 11 月 14 日受理)

はじめに

一つの湖内の地域的な特徴を理解するために、湖全域の物理的・化学的・生物学的状況を同時に把握することは、湖沼学あるいは環境科学的な観点から必要とされている。しかしこれまで、小さな湖沼では少数の船による短時間内のセミ同時観測が行われてきたが、大きな湖沼では短時間内の同時観測は実際には実施されてこなかった。近年リモートセンシング技術の発達により、海洋や湖沼の水表面の物理的情報が飛行機や宇宙衛星などから得られるようになってきた。しかし、リモートセンシングで得られるデータはそれぞれの項目の実測された数値に基づいて換算される必要がある。また、リモートセンシングでは水中の化学的情報を得るのは未だ困難である場合が多い。琵琶湖のように大きな湖では、リモートセンシング以外の方法による同時観測は非常に困難であるため、これまでは三次元空間的な広がり観測はほとんどなく、少数地点での鉛直的時間的な広がり観測が行われてきた。

1999 年に、日本の陸水学発祥 100 年を記念して、日

本陸水学会が企画した日本全国での陸水観測調査の一環として、琵琶湖全域で同時観測を行った。真の意味での全域同時観測は不可能であるが、琵琶湖で研究調査を行っている複数の研究機関が所有する調査船および自動測器を、日中の短い時間帯に限り駆使し、同時的観測を実施することにした。琵琶湖全域をこれほどの細かい測点網で覆い、かつ短時間に観測が行われたのは、琵琶湖観測史上初めてのことである。

実際の観測は、日本陸水学会近畿地区の会員及び各研究機関に所属する研究員・職員・学生など多くの人々により実施された。個々にお名前を挙げないが、ご協力くださった方々に改めて深くお礼を申しあげる。

観測概要と方法

1999 年 6 月 12 日に、琵琶湖において複数の調査艇および CTD 測器を使用した一斉調査を行なった。琵琶湖の北湖では緯度・経度 2 分ごとの交点において計 60 測点、南湖では緯度・経度 1 分ごとの交点の計 18 測点で観測を行った。

¹⁾ 京都大学生態学研究センター 〒520-2113 大津市上田上平野町大塚 509. Center for Ecological Research, Kyoto University, 509 Ohtsuka, Kamitanakami-hirano, Otsu 520-2113, Japan (E-mail: narita@ecology.kyoto-u.ac.jp)

²⁾ 滋賀大学教育学部 〒520-0862 大津市平津 2-5-1. Faculty of Education, Shiga University, Hiratsu, Otsu 520-0862, Japan

³⁾ 滋賀県立大学環境科学部 〒522-0057 彦根市八坂町 3165. School of Environmental Sciences, The University of Shiga Prefecture, Hassaka, Hikone 522-0057, Japan

⁴⁾ 大阪電気通信大学工学部 〒575-0063 四条畷市清滝 1130-70. Faculty of Engineering, Osaka Electro-Communication University, 1130-70 Kiyotaki, Shijonawate 575-0063, Japan

⁵⁾ 滋賀県立琵琶湖博物館 〒525-0001 草津市下物町 1091. Lake Biwa Museum, 1091 Oroshimo-cho, Kusatsu 525-0001, Japan

⁶⁾ 滋賀県琵琶湖研究所 〒520-0806 大津市打出浜 1-10. Lake Biwa Research Institute, 1-10 Uchide-hama, Otsu 520-0806, Japan

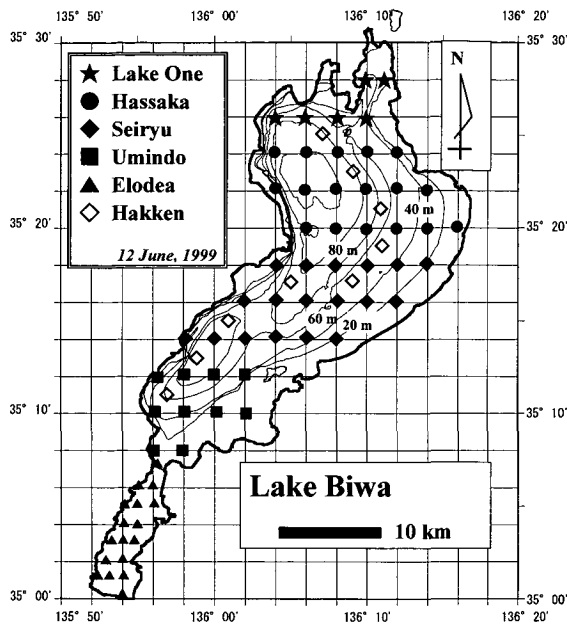


Fig. 1. Map of observation stations.
図 1. 観測地点図.

調査に参加した調査船は、「レークワン(レクリサーチ・大阪電気通信大学)」、「はっさか(滋賀県立大学)」、「清流(滋賀大学)」、「うみんど(琵琶湖博物館)」、「はっけん(滋賀県琵琶湖研究所)」、「エロディア(京都大学)」、「はす(京都大学)」の7艇である。観測項目は、CTD 測器による水温、電気伝導度、クロロフィル a の鉛直分布と、透明度(透明度板)、pH(比色法)、風向風速(携帯式風向風速計)である。さらに表面水(0.5 m 層)を採取して持ち帰り、濁度及び主要イオン、栄養塩類の化学分析を行った。Fig. 1 に測点の配置を示す。調査は 10 時頃より一斉に開始し、1 地点を除き、14 時まですべての測点での調査を終了した。調査開始前または終了後に、分担隣接域の調査船が 2 艇ごとに合流し、測器の相互検定を行なった。使用した CTD 測器は、「レークワン」はクロロテック ACL 1180-D(アレック電子)、「はっさか」はクロロテック ACL 220-DK(アレック電子)、「清流」は濁度付メモリー STD ATU 200-PK(アレック電子)、「うみんど」は多項目水質計 PUV-500 B (Biospherical Instruments 社)、「はっけん」は高精度多項目水質プロファイラー(F-Probe、西オーストラリア大学インバーガー研究室製)である。南湖の調査を行った「エロディア」は、水温をサーミスター(東邦電探)で測定した。「はす」は、南湖の表水温をセンサーを船底に取り付けたデジタル水温計 DSN-1011 型(村上電機製作所)で曳航観測し、風向風速をライトベーン MM-30(日本エレクトリック・インス

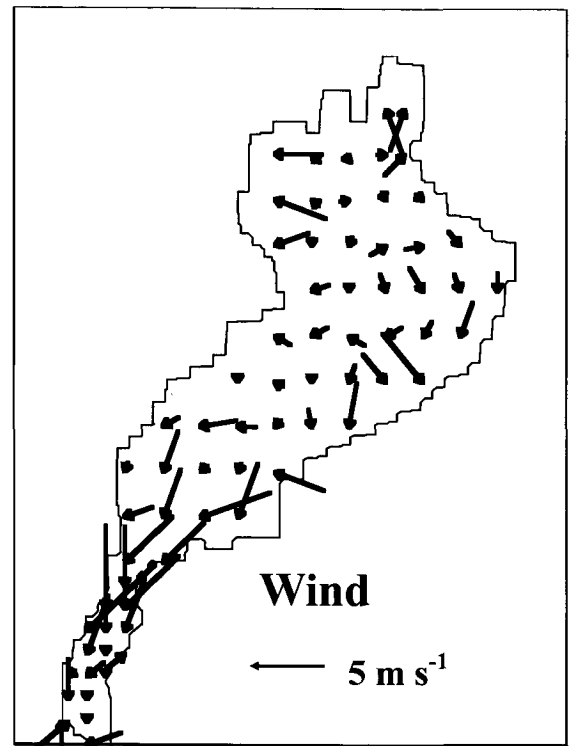


Fig. 2. Wind speed and direction over the lake.
図 2. 観測地点の風向と風速.

ルメント)で観測した。

主要イオン 6 成分(ナトリウム、カリウム、マグネシウム、カルシウム、塩化物、硫酸イオン)の分析はイオンクロマトグラフ(ダイオネックス社製 DX-120)を用いた。アンモニア態窒素は Sagi (1966)、亜硝酸態窒素は Bendschneider and Robinson (1952)、硝酸態窒素は Mitamura (1997)、リン酸態リンは Murphy and Riley (1962)、そして溶存試薬反応珪素は Mullin and Riley (1955)の方法にそれぞれ従った。

琵琶湖集水域における 6 月 12 日以前 10 日間の降雨量は 42.4 mm(集水域 12 地点の平均、地点間レンジ 32-54 mm)で、6 月 3 日に 4.6 mm、6 日 3.7 mm、7 日 34.1 mm の日降雨量(各日 12 地点の平均)があった以降、6 月 12 日まで降雨は観測されなかった(彦根地方気象台 1999)。なお、6 月 12 日の天候は晴れ、琵琶湖の水位はマイナス 12 cm(琵琶湖工事事務所資料)であった。

観測結果と考察

Fig. 2 は、観測時の湖上風の分布を示したものである。全体的に風は弱く、北湖では湖風が卓越していた。北湖の南部ではやや強い北-北東の風が観測された。

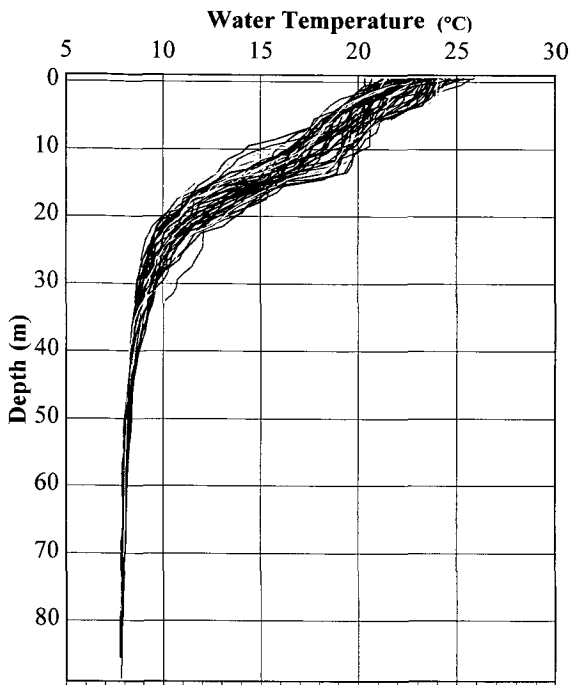


Fig. 3. Vertical distributions of water temperature at all observation stations.

図3. 北湖の全観測地点における水温の鉛直分布。

すべての測点において得られた水温の鉛直分布をまとめて Fig. 3 に示す。深さ 30 m あたりまでは、場所による水温の違いがみられたが、40 m 以深ではほとんど一樣な水温であったことがわかる。Fig. 4 は、0 m, 10 m, 20 m, 30 m の各深さにおける水温の水平分布を示したものである。表面水温は 20°C から 26°C の範囲にあり、北湖の中央部や南湖において高い水温であった。深さ 10 m では、北湖の中央部に低温水域が存在し、北湖南部には比較的高温な水域がみられた。深さ 20 m では、西岸寄りに高温域が見られ、この傾向は深さ 30 m においても同様であった。図には示していないが、深さ 40 m 以深では水温は水平方向にほぼ一樣となっていた。

観測によって得られた水温の三次元分布から、力学計算によって湖面の力学的高度を求めた (Fig. 5 a)。これは、琵琶湖の湖流が地衡流に近い性質があるので、力学的高度の分布から湖流の分布を推定できることを意味する。北湖の中央部に力学的高度の低い部分があり、これは反時計回りの第一環流に相当する。地衡流成分を求めてみると、湖流の流速は 20 cm s⁻¹ 程度であったことがわかる (Fig. 5 b)。

北湖南部から南湖にかけて航走しながら表面水温の曳航観測と風の観測を実施した結果、南湖の南部水域にお

いて高温であることや、北湖においてやや複雑な水温分布が存在することなどがわかった (Fig. 6)。

Fig. 7 は、透明度と表面水中の濁度分布を示したものである。全体的に高い透明度を示し、北湖の今津沖において 16.5 m というきわめて高い透明度が観測された。南湖における透明度は低く、南湖東岸や中央部で濁度の大きな値がえられた。

Fig. 8 は、表面水における電気伝導度 (25°C 換算) の分布を示したものである。北湖では 122 $\mu\text{S cm}^{-1}$ 程度でほぼ一樣な分布であるが、流域に石灰岩地帯を有する北湖北東岸においてやや高い値を示した。南湖水の電気伝導度は 125 $\mu\text{S cm}^{-1}$ 程度であったが、赤野井湾においてはかなり高い値であった。

Fig. 9, Fig. 10 に見られるように、表面水における主要陽イオン成分 (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}) と主要陰イオン成分 (Cl^- , SO_4^{2-}) 現存量は、湖全域にわたって大きな変動は認められなかった。しかしながら、それぞれのイオン成分の分布特性を詳細に検討してみると、マグネシウム、カルシウム、硫酸イオンは、集水域における人間活動の影響が顕著である南湖に比して、北湖で高い傾向が認められた。これは、石灰岩地帯を流域とする河川が流入する琵琶湖東岸区で高い現存量が観測されることから、北湖への流入河川水系の地質的特性の影響を受けた結果と考えられる。一方、ナトリウム、カリウム、塩化物イオン現存量は南湖で高いので、南湖集水域の農業生産や地域住民の食生活など人間の生生活動による影響を受けた結果と考えられる。このことは、琵琶湖の代表的な富栄養閉鎖水域である南湖東岸区の赤野井湾でも高い現存量が観測されたことからいえる。なお、赤野井湾では、カルシウムイオンを除く他の主要成分の現存量が高く、流域の農地生態系の影響を強く受けていたことを示している。

Fig. 11 に見られるように、無機窒素栄養塩化合物の中のアンモニア態窒素は、北湖で高い透明度が観測された水域で比較的高い値が観測され、北湖の南部水域で低かった。しかし、その差は比較的小さいため現存量の差から水域の栄養度を判断できない。これは、亜硝酸態窒素現存量が、アンモニア態窒素の高い水域でむしろ低いことから想像される。なお、主要イオン成分の分布変動でも触れたが、南湖赤野井湾では、高い窒素栄養塩化合物現存量 (特に亜硝酸態窒素と硝酸態窒素) が観測された。したがって、赤野井湾はその集水域の人間活動の影響を強く受けている水域であると判断される。図 12 に溶存無機窒素 (DIN; アンモニア態窒素, 亜硝酸態窒素,

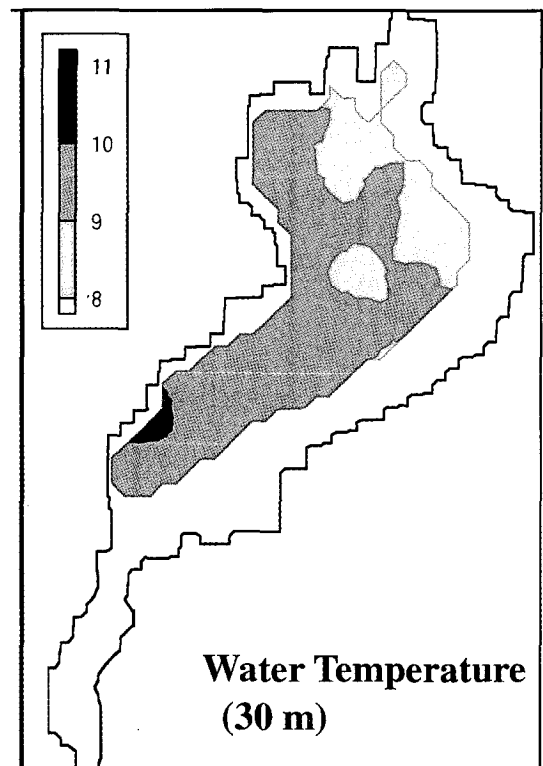
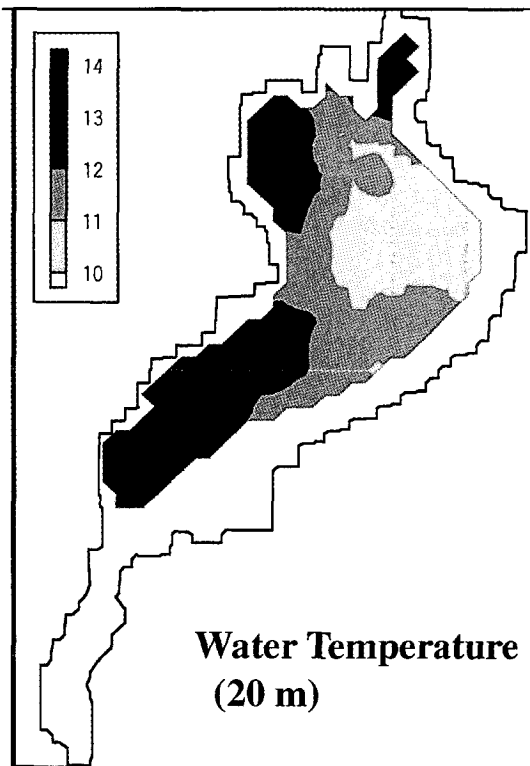
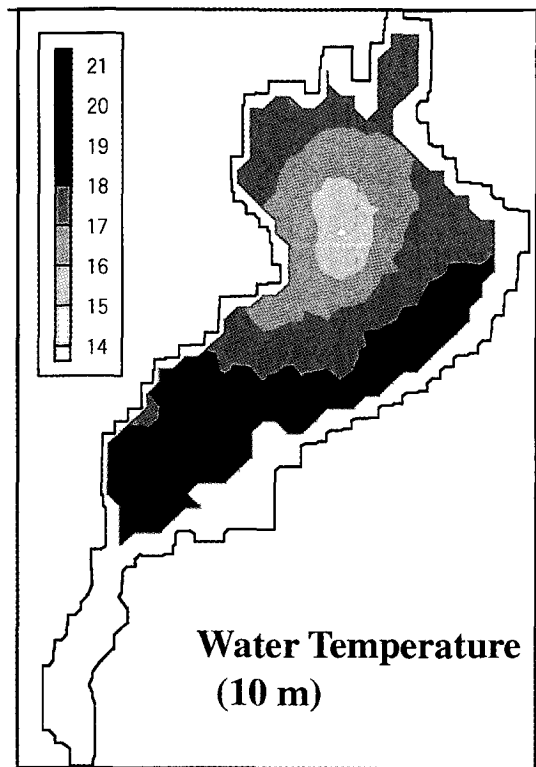
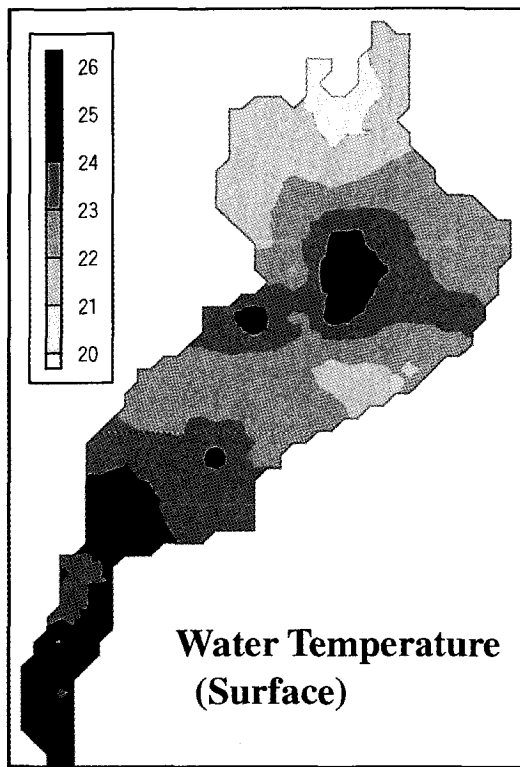


Fig. 4. Horizontal distribution of water temperature (°C) at 0, 10, 20 and 30 m depth layers.

図4. 0 m, 10 m, 20 m, 30 m層の水温(°C)の水平分布。

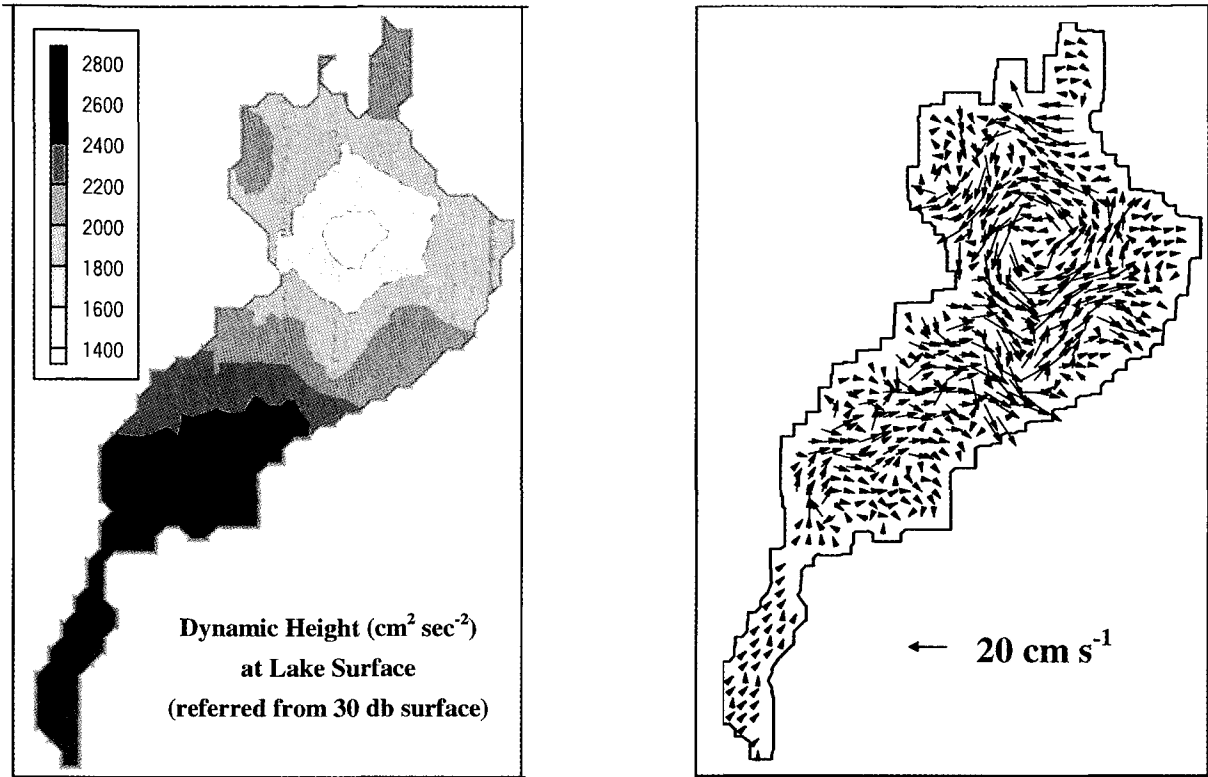


Fig. 5a. Dynamic height topography ($\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$) at lake surface referred from 30 db surface, and geostrophic current calculated from dynamic height.

図5 a. 湖面の力学的高度分布(30 db を基準とした)と各地点の地衡流成分(表面の力学的高度より計算).

硝酸態窒素の合計), リン酸態リン(DIP), 試薬反応溶存珪素(DRSi) 現存量の水平分布を示す。溶存無機窒素現存量の水平分布は, そのほとんどを硝酸態窒素が占めるため, 硝酸態窒素の分布変動と類似していて, 北湖の最深水域と南湖赤野井湾で高かった。一方, リン酸態リンの水平分布は, 溶存無機窒素のそれと異なり, 北湖の南部水域と南湖で高かった。なお, 赤野井湾では溶存無機窒素と同様にかなり高い値が観測された。珪酸態珪素は, 硝酸態窒素あるいは無機イオン成分のカルシウム, マグネシウムイオンと類似した分布変動を示したが, この成分が琵琶湖集水域からの供給の影響を強く受けた結果か, あるいは湖内で水生生物による生元素利用の結果を反映していたのかは今回の観測結果からは判断できない。

従来, 琵琶湖集水域から供給される主要無機イオン成分の河口域での不均一な分布を除くと, 北湖沖帯では湖水はよく混合され, 主要イオン成分と栄養塩化合物は均一分布を示すと考えられていた。今回の分布変動から判断すると, これらの濃度変化は比較的小さいものの, 水域による現存量の差が認められることが明らかになっ

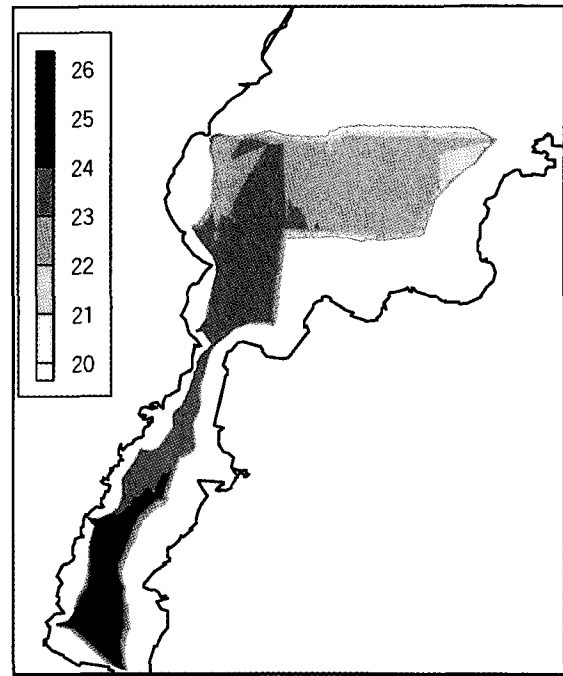


Fig. 6. Horizontal distribution of surface water temperature obtained by cruising boat.

図6. 曳航観測による南湖および北湖南部の表面水温分布.

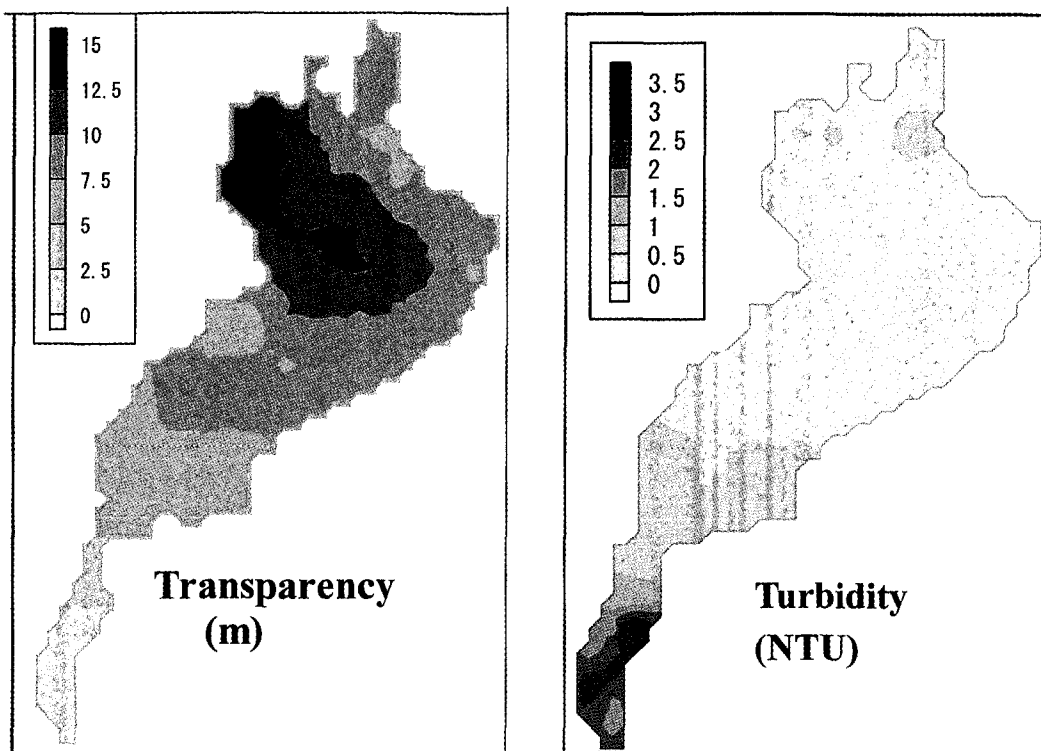


Fig. 7. Transparency and turbidity in surface water.
 図7. 透明度と表面水の濁度.

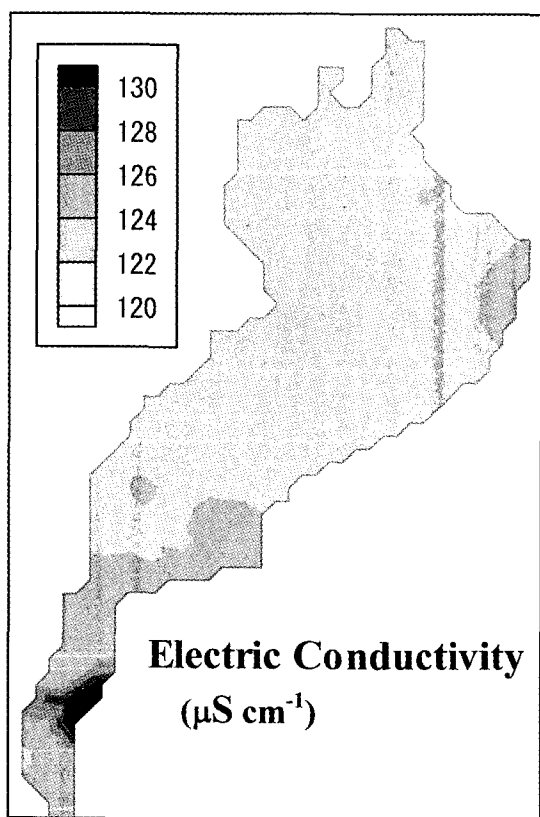


Fig. 8. Electric conductivity in surface water.
 図8. 表面水の電気伝導度..

た。このことは、琵琶湖北湖沖帯の表面水における窒素あるいはリン栄養塩化合物の分布変動は、湖内の生物活動による影響の結果を示唆するとともに、主要イオン成分の分布で示されるように水塊の違いによることも考慮する必要がある。

多くの調査船と CTD 測器を駆使して短時間内に観測し、その後実験室で長時間の化学分析を行うなど多大な労力をかけて、ある時間断面における琵琶湖の全体像を切り取ることにより、全域同時調査でしか見られないことがいくつか発見できた。しかし、このような労力的・経済的に困難をとまなう全域調査は繰り返し実施できるものではない。今回のデータがリモートセンシングをはじめ、これからの湖沼研究の基礎データとして活用されることを期待したい。

文 献

Bendschneider, K. and R. J. Robinson (1952): A new spectrophotometric method for the determination of nitrite in sea water. *Journal of Marine Research*, 11: 87-96.

彦根地方気象台(1999): 地域気象観測降雨量. 滋賀県気象月報 平成11年6月.

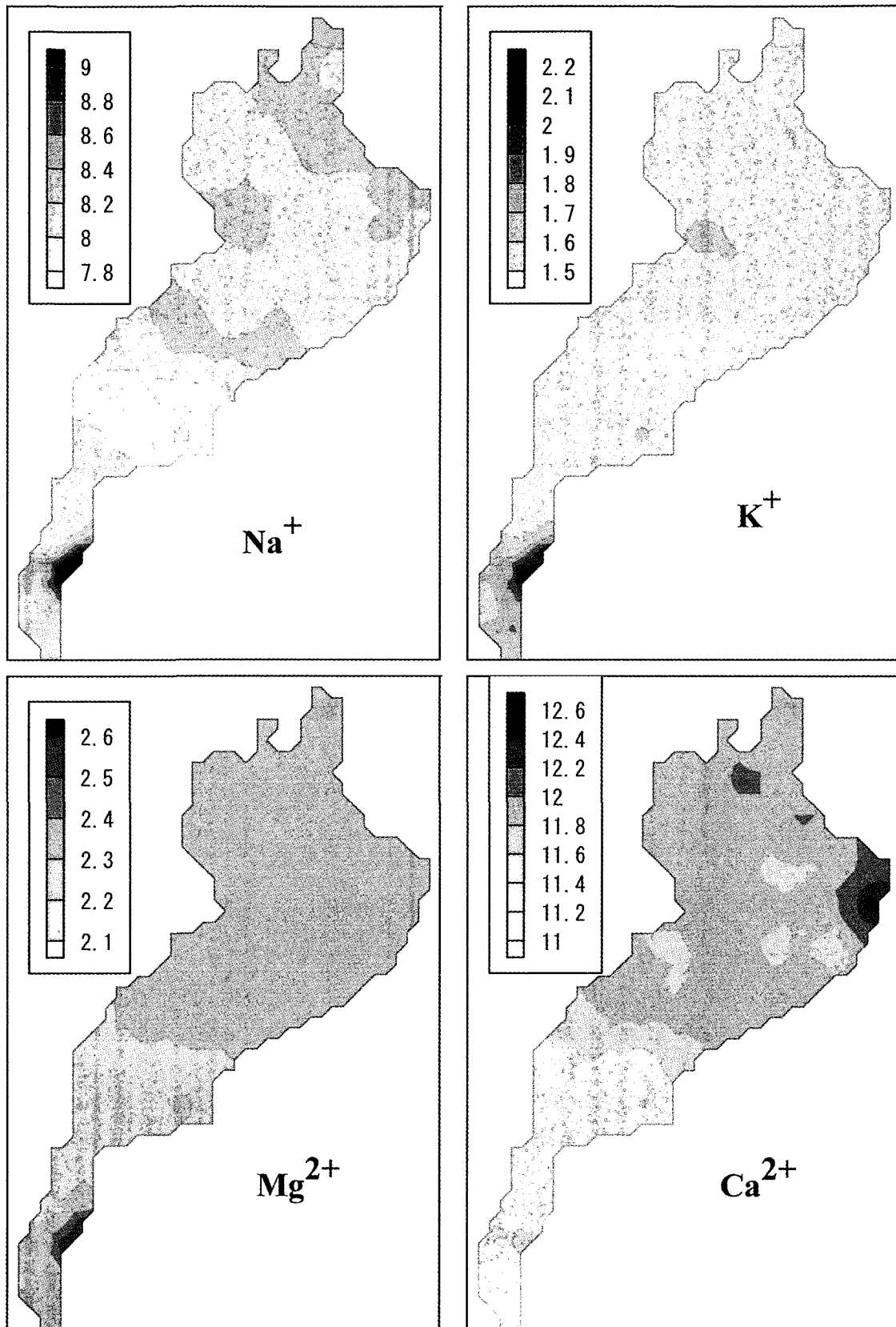


Fig. 9. Horizontal distributions of major cation concentrations (mg L⁻¹) in surface water.
図9. 表面水の主要陽イオン濃度 (mg L⁻¹).

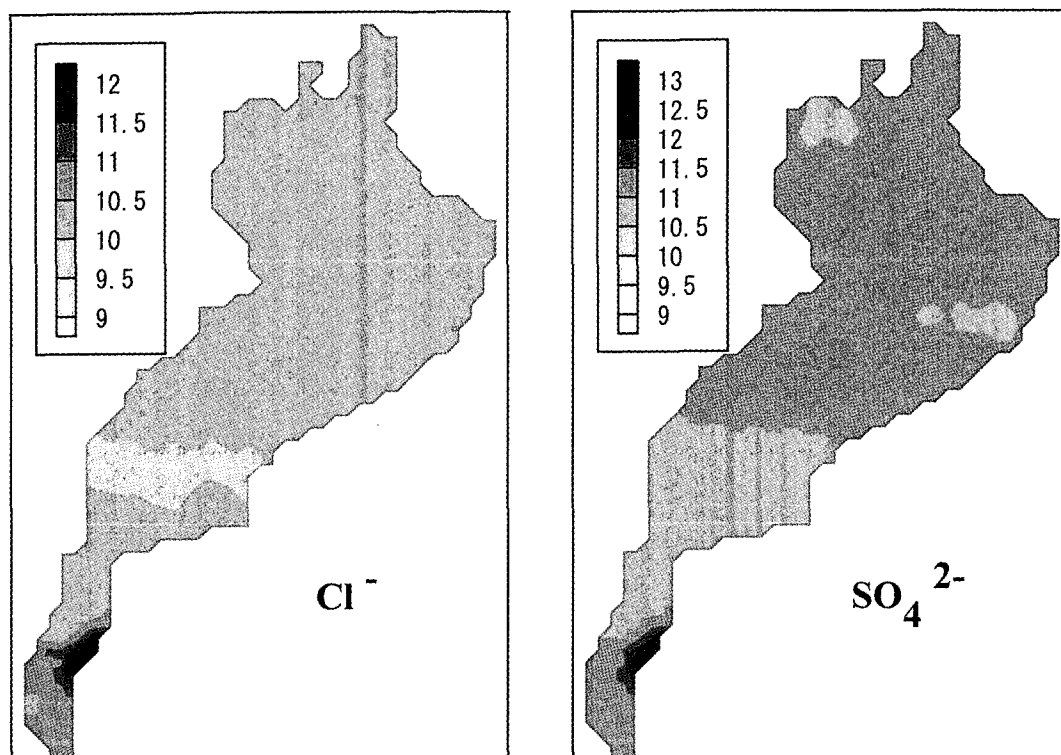


Fig. 10. Horizontal distributions of major anion concentrations (mg L^{-1}) in surface water.
 図 10. 表面水の主要陰イオン濃度 (mg L^{-1}).

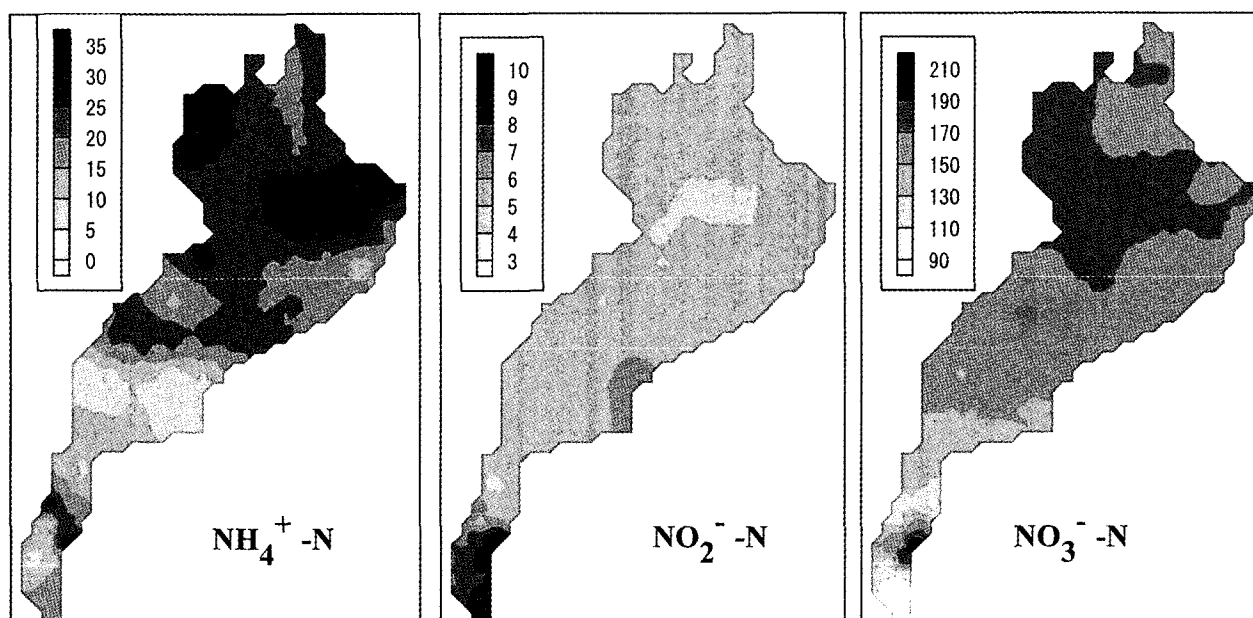


Fig. 11. Horizontal distributions of ammonia, nitrite and nitrate nitrogen ($\mu\text{gN L}^{-1}$) in surface water.
 図 11. 表面水のアンモニア態，亜硝酸態，および硝酸態窒素の水平分布 ($\mu\text{gN L}^{-1}$).

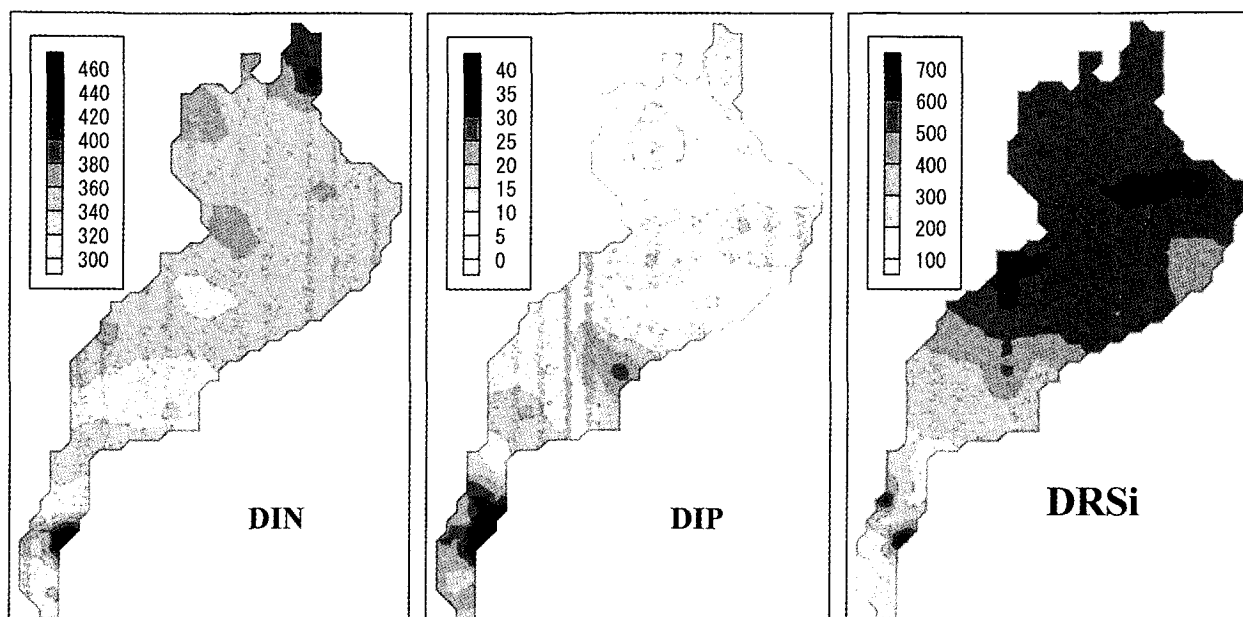


Fig. 12. Horizontal distributions of dissolved inorganic nitrogen (DIN), phosphate (DIP) and reactive silica (DRSi) concentration ($\mu\text{g L}^{-1}$) in surface water.

図 12. 溶存無機窒素(DIN), リン酸態リン(DIP), 珪酸態珪素(DRSi)の濃度($\mu\text{g L}^{-1}$)の水平分布.

Mitamura, O. (1997): An improved method for the determination of nitrate in freshwaters based on hydrazinium reduction. *Memoirs Osaka Kyoiku University, Series III*, 45: 297-303.

Mullin, J. B. and J. P. Riley (1955): The colorimetric determination of silicate with special reference to sea and natural waters. *Analytica Chimica Acta*, 12: 162-176.

Murphy, J. and J. P. Riley (1962): A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta*, 27: 31-36.

Sagi, T. (1966): Determination of ammonia in sea water by the indophenol method and its application to the coastal and off-shore waters. *Oceanographical Magazine*, 18: 43-51.