

## 衛星リモートセンシングによる宍道湖の湖面温度分布と季節変化の推定

作野 裕司\*・高安 克巳\*\*

### Estimation of the surface temperature pattern and its seasonal variation in Lake Shinji using satellite remote sensing data

Yuji Sakuno\* and Katsumi Takayasu\*\*

#### Abstract

Based on the satellite remote sensing data of LANDSAT 5-TM Band 6 the surface water temperature distribution and its seasonal variation pattern in Lake Shinji are shown. From the relation between satellite data and measured surface water temperature, the water temperature of each pixel is estimated. As a result, the characteristic patterns of four seasons suggest to be controlled mainly by the wind driven current.

Key words : satellite remote sensing, LANDSAT 5-TM, water temperature distribution, Lake Shinji

#### 1. はじめに

近年、海洋や湖沼の水質を人工衛星や航空機による遠隔計測(リモートセンシング)によって調査する方法が試みられている。三菱商事株式会社社会環境室・東京理科大学リモートセンシング研究所(1987)は航空機による MSS (Multi Spectral Scanner) データと現地調査データとの相関解析を行い、琵琶湖の表面水温分布や各種水質分布(透明度, pH, SS, BOD, COD)を画像化した。安岡・宮崎(1977)は航空機 MSS データによる霞ヶ浦の水質分布(透明度, COD, SS, クロロフィル a, 水温)の推定を行ない、宮崎ほか(1991)はランドサット TM データによる児島湖の水質分布(透明度, SS, クロロフィル a, 水温)の推定を行なうなど各地の湖沼でリモートセンシングによる水質分布の推定が行われてきた。宍道湖はこれまで調査船によって実測した値による水質の研究(たとえば伊達ほか, 1989; 橋谷ほか, 1991)は数多くあるが、リモートセンシングを利用した水質解析は鳥井ほか(1980)が航空機を利用して主に中海の水質を解析した一例があるのみである。これは中海において航空機 MSS データと現地調査のデータを相関解析により水質分布(クロロフィル a, 塩分濃度, 全リン, SS)を視覚化した

ものである。しかし連続的にデータを収集できる衛星データと比べ航空機 MSS データは時系列的な変化を追うことが困難であること、調査地域が中海の大橋川河口付近のみであることから広域的な水質分布への適用の可能性が未解決であることなど問題が残された。宍道湖と中海は我が国最大の汽水域を形成しており、このような広域の日々刻々と変化する水質を時系列的に解析するには現在のところ衛星データを用いるのが最適であると考えられる。

島根大学汽水域研究センターは汽水域環境監視システムの確立をめざし、1994年3月に衛星データ解析装置を導入した。筆者らはこの解析装置を用い、汽水域の水質環境モニタリングを目的とした基礎資料作成の一環として、宍道湖を対象地域とし、衛星データを用いて湖面温度分布の推定を行った。本報は宍道湖の湖面温度分布の特徴とその温度を変化させる要因および湖面温度分布の季節変化について若干の考察を行なったものである。

#### 2. 湖面温度分布解析の原理

リモートセンシングによる温度観測は、「すべての物体はそれ自身の温度と種類に応じた電磁波を放射している」(日本リモートセンシング研究会, 1994)ことにその基礎を置いている。熱赤外域の電磁波の強度を衛星のセンサーで検知することによって間接的に対象物の温度を観測することができる。

リモートセンシングによる温度測定の実理を示したのが図1である。理想的な物体(黒体)の場合、輝度温度(着

\* 島根大学理学部地質学教室  
Department of Geology, Faculty of Science, Shimane University,  
Matsue 690, Japan

\*\* 島根大学汽水域研究センター  
Center for Coastal Lagoon Environments, Shimane University,  
Matsue 690, Japan

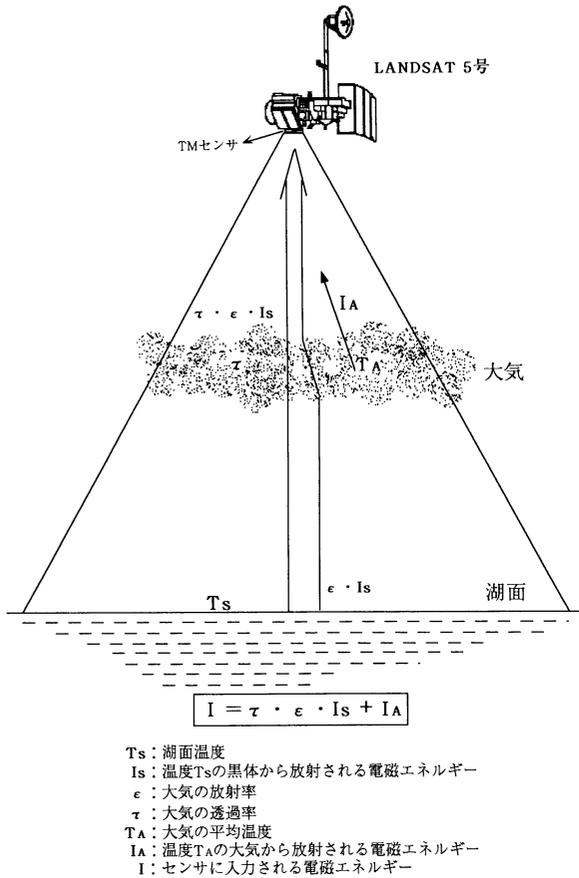


図1 リモートセンシングによる温度測定の原理

目している波長において、観測物体が放射している単位面積あたりの放射エネルギーと等量のエネルギーを放射する黒体の温度)はその物体の温度と等しくなるが、現実の物体は黒体が放射する電磁波の強さ I に放射率 ε を乗じた I · ε の強さの電磁波を放射している。そのため実際では、ε の値がわかってなければ正確な温度は復元できない。また衛星データから得られた輝度温度は途中大気中の水蒸気の影響を大きく受けているため、実際の湖面温度とは一致しない。そのため湖面温度を精度良く推定するためには大気補正が必要である。

今までの水表面温度を用いた解析では、ほとんどの場合 NOAA/AVHRR による海表面温度分布を用いている(岸野, 1995)。しかし AVHRR の空間分解能は 1 km で宍道湖のような比較的小さな湖を解析するには適さない。したがって本報告では空間分解能が 120 m と比較的優れている LANDSAT 5 号の熱赤外域センサである TM バンド 6 で温度解析を行なった。TM バンド 6 と輝度温度との関係は式 1 で示される(宇宙開発事業団地球観測センター: EOC, 1990)(図 2)が、本報告では後述するように EOC の温度換算式で求めた温度をさらに宍道湖での実測値により得られた独自の補正式で温度変換し

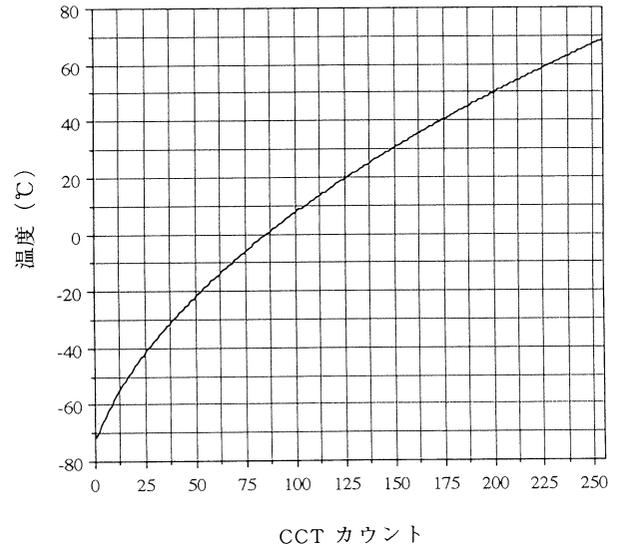


図2 TM バンド 6 の CCT カウントと温度との関係

た。TM バンド 6 の温度分解能は 1 カウントあたり約 0.5 °C である。

$$(1.40654/255)V_c = (5.1292 \times 10^{-5}T - 0.017651)T + 1.47852$$

$$T_c = T - 273.15 \dots (式 1)$$

ここで、Vc: CCT データの値, Tc: 摂氏温度(°C), T: 絶対温度(K)である。

### 3. 衛星データの解析

#### 3-1 衛星データ

本研究で用いた衛星データは 1992 年 4 月から 1993 年 2 月までの 4 時期の LANDSAT/TM データである(衛星データ所有; 米国政府, 衛星データ提供; EOSAT/宇宙開発事業団)。表 1 にデータの一覧を示す。宍道湖の湖面温度分布の解析が目的であるため主な解析は熱赤外バンドである TM バンド 6(波長 10.4~12.5 μm)のデータを用いた。実際に処理したデータは宍道湖全域が含まれる東西 588 画素×南北 326 画素(計 191688 画素)を切り出したものである。データの取得時期は、季節変化の解析を行うために四季(4 月, 7 月, 10 月および 2 月)のデータを用いた。

#### 3-2 解析装置

衛星データ解析には島根大学汽水域研究センター所有のワークステーション(富士通, S-4/10)に搭載された

表 1 衛星データの一覧

衛星/センサ	観測日	衛星パス・ロウ
LANDSAT / TM	1992. 4.28.	111-35
LANDSAT / TM	1992. 7.24.	112-35
LANDSAT / TM	1992.10.28.	112-35
LANDSAT / TM	1993. 2.26.	111-35

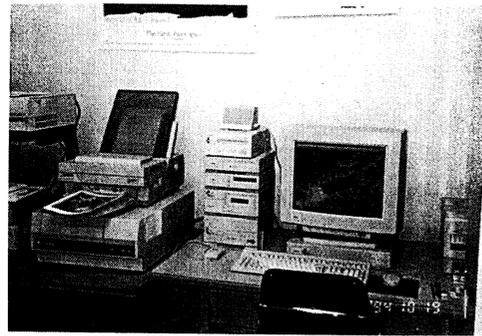
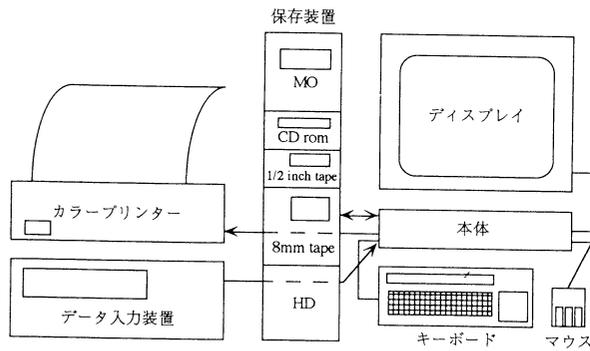


図3 衛星データ解析装置の外観

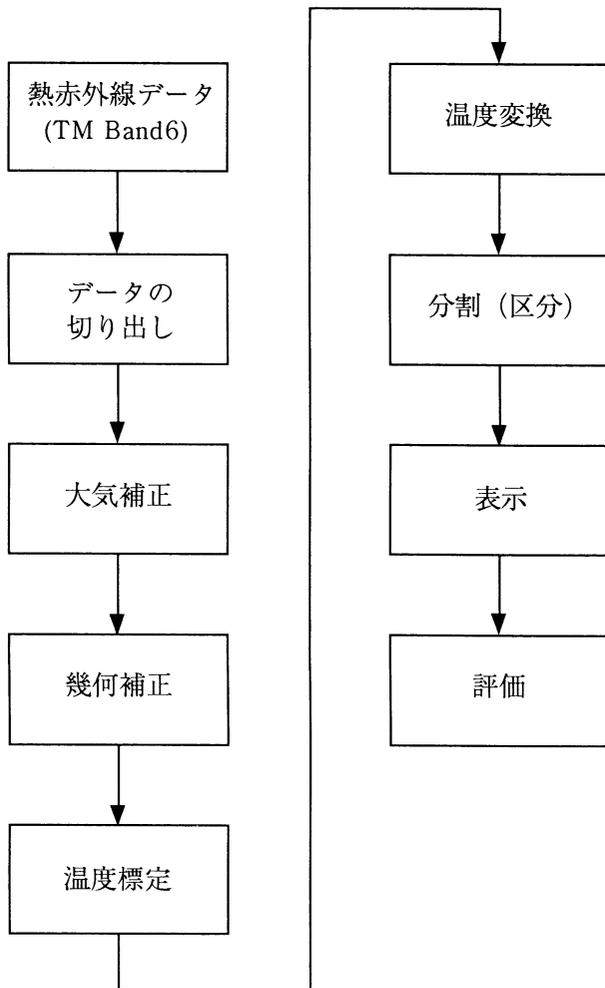


図4 温度解析のながれ

衛星データ解析ソフト“VI<sup>2</sup>STA”(Datron/Transco 社製)を用いた。解析装置の外観を図3に示す。

### 3-3 解析方法

解析の流れを図4に示す。衛星データではセンサの特性や地球の自転などの影響で幾何学的歪が生じるため、幾何補正をしなければ地図座標とは一致しない。しかし今回は対象域が湖で比較的小さいことから補正により本来の衛星データの特性を損なう可能性があることと、本

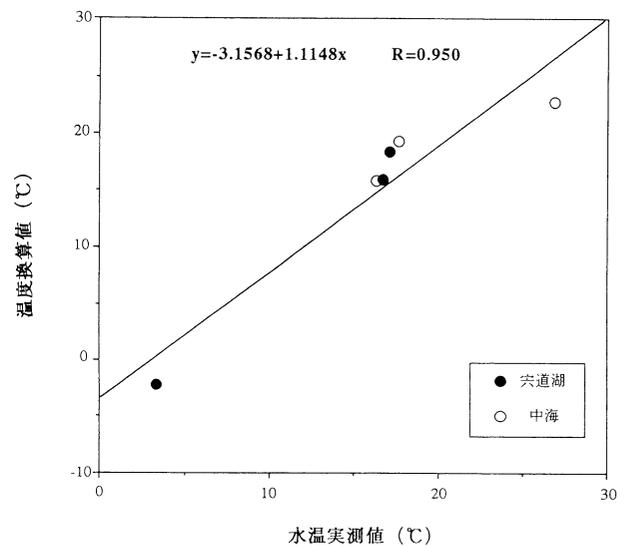


図5 水温実測値と衛星データから換算した温度値との相関

報の目的が湖面温度分布のパターンを推定することであり厳密な位置の把握は必要としないことから未補正のまま解析を行った。ただし位置決定については地上基準点(GCP)の地図座標(国土地理院発行5万分の1地形図から読み取る)と画像座標の変換式をアフィン変換によって求め、必要に応じて地図座標から画像座標を算出し両者の位置を合わせた。

本報告では衛星データ観測日当日の宍道湖におけるスペクトル強度を測定していないことから、放射率や大気補正のための値を得ることができなかったため大気補正を行わなかった。しかし実際の温度とCCT値を式1に代入して得られた温度との相関を検討することにより、CCT値から宍道湖湖面の実際の温度の復元を試みた。観測日の水温は建設省が定点観測を行っている宍道湖の湖心(N35°26'50", E132°57'45")と中海の湖心(N35°27'48", E133°11'38")における上層水温の値(6データ)を使用し、入手できた4時期の衛星データのCCT値を

式1に代入して得られた温度との相関を最小二乗法により解析した。その結果、両者は良い相関(相関係数:  $R=0.950$ )が認められ、図5に示した回帰式が得られた。中海のデータはこの回帰直線上から最大  $4.2^{\circ}\text{C}$  離れているが、宍道湖のデータはほぼ回帰直線上に存在する。データの数3点と少なく統計上十分とはいえないが、今回はこの回帰直線式を用いて宍道湖の湖面温度を推定した。以下の議論の際用いる温度は図5に示した回帰直線式から換算した温度である。

#### 4. 結果および考察

##### 4-1 宍道湖における湖面温度分布の特徴

宍道湖は、中海を介して、海域と淡水域を結ぶ塩分のうすい汽水域であり、東西にのびた底の浅くて平らな盆状地に西端から、流入水の大部分をしめる斐伊川が注いでいるため、湖水の動きは比較的単純で、水温分布の解析やモデル化に適している。

衛星データから計算した温度による宍道湖・大橋川・中海・境水道・日本海における地点間の温度の関係を図6に示す。これによると地点による湖面温度の差異は2月が大きく、4月と7月および10月は小さい。2月の湖面温度は宍道湖、中海では大きな差異は認められないが、境水道、日本海で宍道湖・中海より湖面温度が  $5^{\circ}\text{C}$  以上高くなっている。また本庄地区では中海や宍道湖より  $2\sim 3^{\circ}\text{C}$  低くなっている。2月のデータ観測日当日の気温は  $4.1^{\circ}\text{C}$  と低かった。このことは実際には表面積の小さな閉鎖水域ほど気温の影響は受けやすく、水温が低くなっていることを示しているように見える。ただし、中海・宍道湖両湖心の下層水の水温データがとれていないのでここでは表層水の温度分布にのみ言及する。

橋谷ほか(1991)は13年間(1976~1988)にわたって測

定した宍道湖(湖心のデータは1983~1988の6年間のもの)、大橋川、中海、境水道の水質データの中から宍道湖の水温について次のような結果を得ている。すなわち宍道湖全域における地点間の水温差は小さく、夏季(8月)には上層が、冬季(1月)には下層が高い。中海や日本海を含めた場合の地点間の水温差をみると、1月の下層の水温は宍道湖が最も低く、境水道に向かうにつれて高くなり、宍道湖と境水道の水温差は  $8.5^{\circ}\text{C}$  もある。橋谷ほか(1991)が指摘したものと、2月の衛星データは調和的である。

図7は宍道湖の湖面温度分布を濃淡で示した熱赤外面像をもとに作成した解析図である。画像の濃淡の分布は複雑であるが、比較的明瞭な温度分布域であると判断された地域に等温線を記入した。4月は北西部で湖面温度が  $18^{\circ}\text{C}$  前後と低く、南東方向ほど高い傾向にあり、大橋川河口では  $20^{\circ}\text{C}$  前後の湖面温度を示している。また斐伊川の河口から北東方向に向かって低温度域( $17.5\sim 18.5^{\circ}\text{C}$ )が伸びている。7月は湖心部が  $26^{\circ}\text{C}$  前後で最も高く、斐伊川河口、大橋川河口は  $24^{\circ}\text{C}$  前後と湖心部に比べ低温である。10月は全体に  $16.0\sim 18.0^{\circ}\text{C}$  の均一な温度である。しかし斐伊川河口部は塊状の低温部( $14.0\sim 15.5^{\circ}\text{C}$ )が見られる。2月のデータは斐伊川河口、湖心部に筋状の雲が分布しているため、宍道湖湖心から西域にかけての湖面温度分布は解析不可能であるが、全体に  $2.5\sim 5.0^{\circ}\text{C}$  の均一な湖面温度を示す。

##### 4-2 湖面温度分布を変化させる要因

湖面温度の分布を変化させる要因は一般に湖沼の形状(湖面積、容積・深度分布、長軸・短軸の長さなど)、気象条件(風速・風向、気温、日射量など)、河川の流出入などの環境条件が考えられる。宍道湖のような水深が数m程度の浅い湖では鉛直混合が卓越するために水温成

表2 衛星データ観測時の気象(松江地方気象台, 1992・1993)

観測日	気温 ( $^{\circ}\text{C}$ )	気圧 (hPa)	降水量 (mm)	風向(16方位)	風速 (m/s)
1992. 4.28.	22.4	1004.5	0	西	4.0
1992. 7.24.	29.8	1011.3	0	北西	2.2
1992.10.28.	15.9	1023.1	0	東南東	1.6
1993. 2.26.	4.1	1021.9	0	北北東	1.3

表3 衛星データ観測時の実測水温(建設省, 1992・1993)

— (記号) はデータが欠損していることを示す。数字の単位は  $^{\circ}\text{C}$  である。

	1992.4.28.	1992.7.24.	1992.10.28.	1993.2.26.
宍道湖湖心(上層)	17.1	—	16.7	3.3
中海湖心(上層)	18.4	26.8	16.3	—

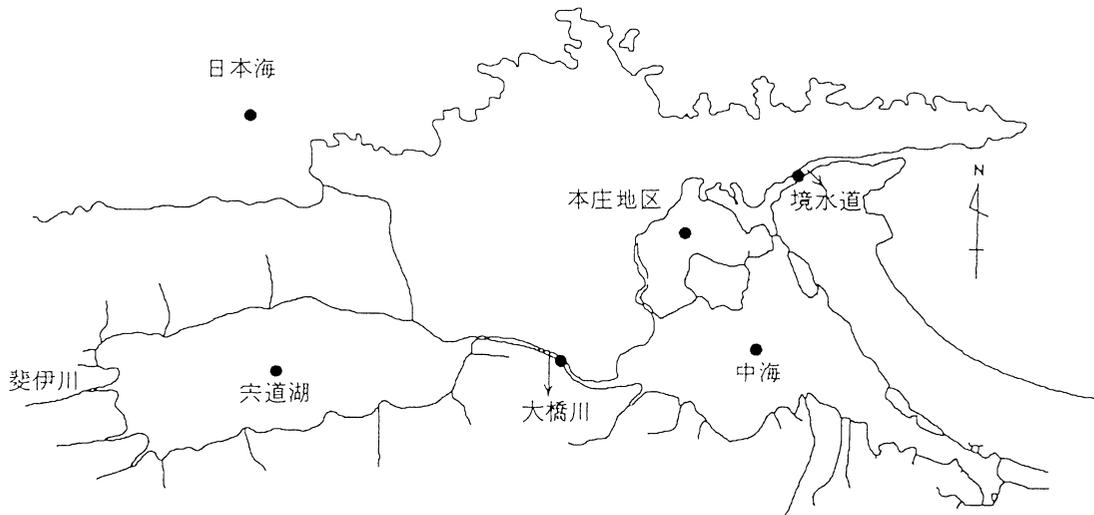
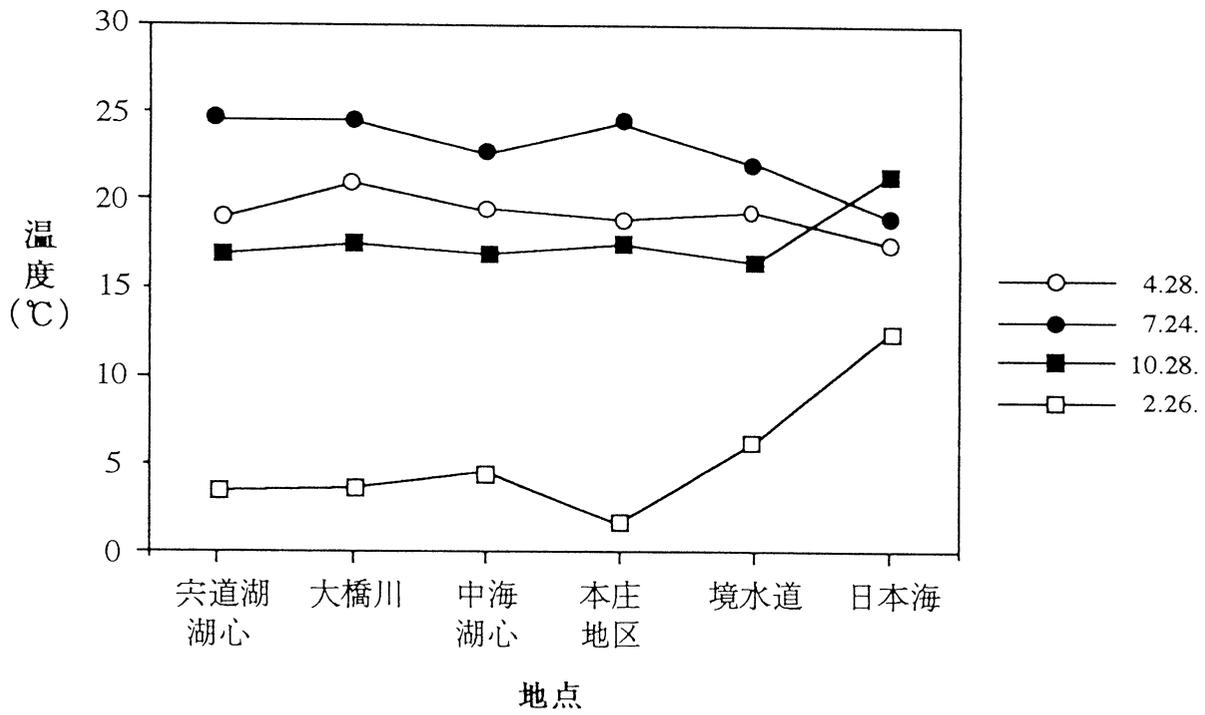


図6 地点による湖面温度の特性

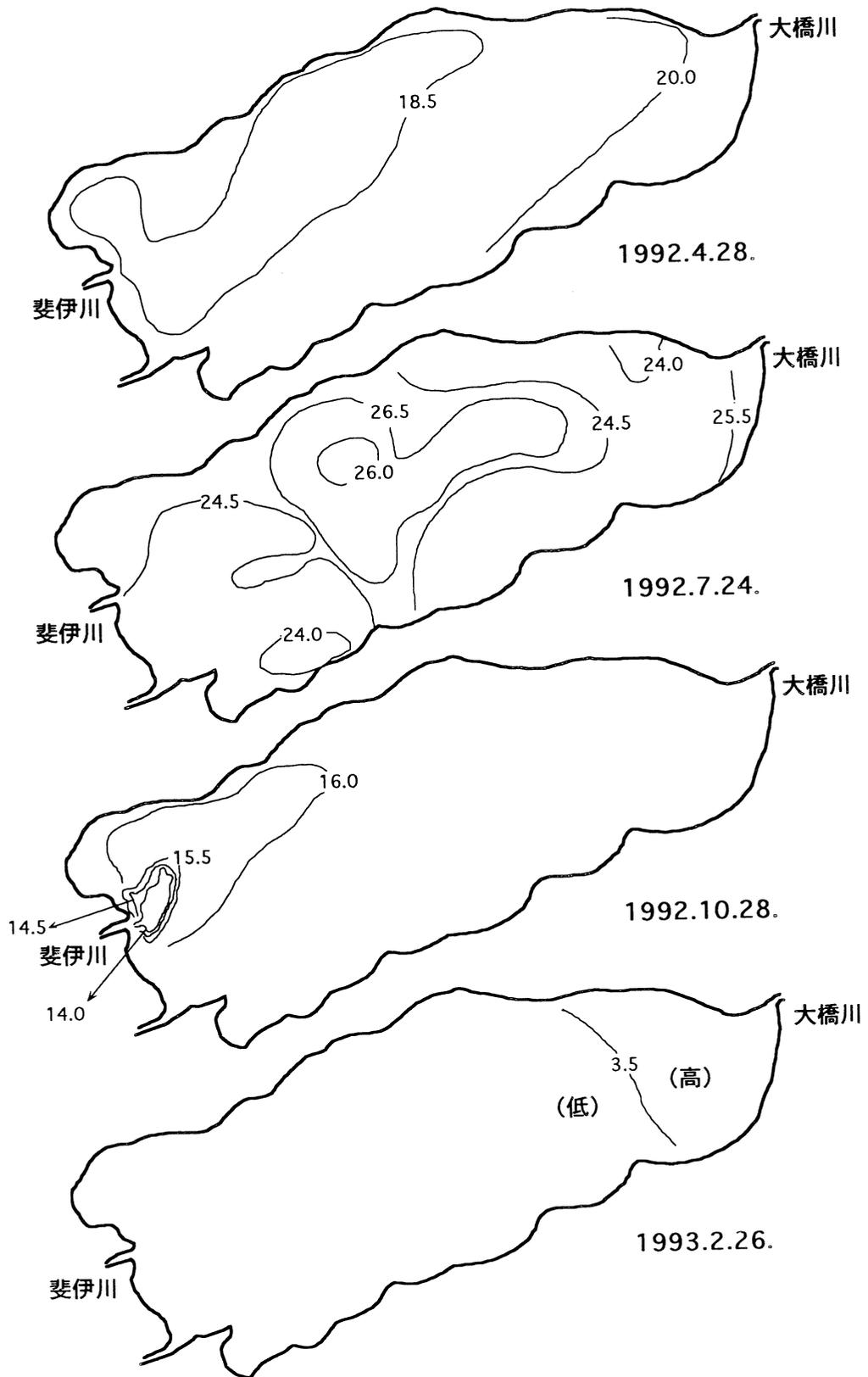


図7 宍道湖湖面温度分布の解析図  
数字の単位は℃である。

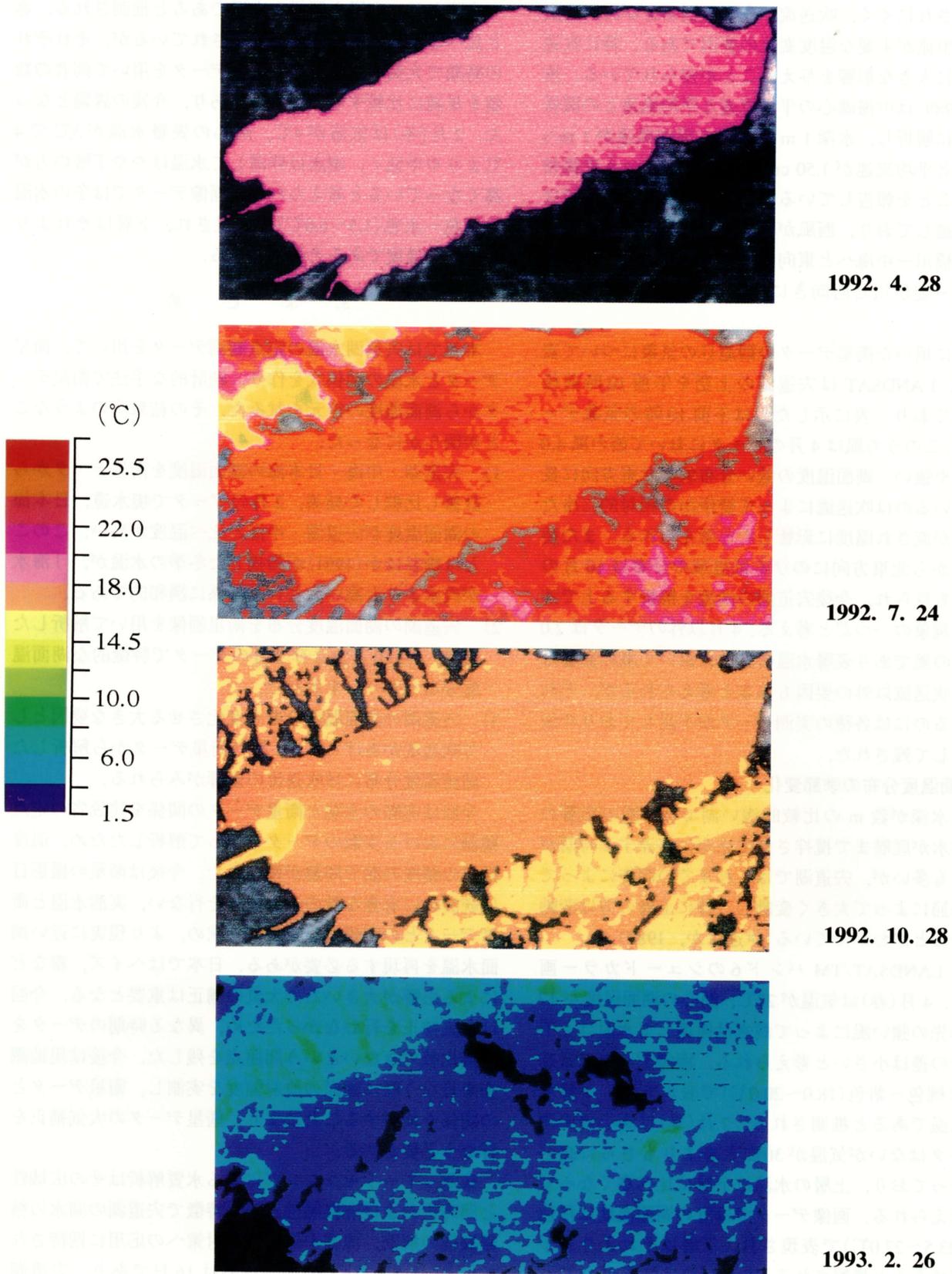


図8 宍道湖湖面温度分布の季節変化 (TM バンド6のシュードカラー画像)

層が形成されにくく、吹送流、表面静振および河川流入による恒流が主要な温度変化の要因である。特に吹送流は水温に大きな影響を与えることが知られている。清家ほか(1989)は中海湖心の平均流速と平均風速との関係を統計的に解析し、水深1 mにおいて平均風速が1 m/s増加すると平均流速が1.50 cm/s増加するという直線相関があることを報告している。また宍道湖・中海周辺は西風が卓越しており、西風が吹くと湖水表面の流れは斐伊川→大橋川→中海へと東向きに流れ、下層は逆に中海→大橋川→斐伊川と西向きに流れることが知られている。

本研究に用いた衛星データの観測日の気象について表2に示す。LANDSATは宍道湖の上空を午前10時前後に飛行しており、表に示したのは午前10時の気象データである。このうち風は4月のデータにおいて西の風4.0 m/sとやや強い。湖面温度の低い分布域が北東方向に長く伸びているのは吹送流によって斐伊川の相対的に冷たい河川水が流され温度に影響したと考えられる。また斐伊川河口から北東方向にのびる低温域の分布は10月のデータでも見られ、今後宍道湖の湖流を解析する上で注目される現象の一つだと考える。4月以外のデータは2.0 m/s前後の風であり表層水温の分布において風の影響は少なく、吹送流以外の要因もあると考えられるが、それを検討するには各種の実測データが不足しており今後の課題として残された。

#### 4-3 湖面温度分布の季節変化

一般に水深が数 m の比較的浅い湖では、風の影響のために湖水が底層まで攪拌されて完全に停滞する時期がないことも多いが、宍道湖ではこれまでの調査によって水温は季節によって大きく変動し、特に上層の方は変動が大きいことがわかっている(伊達ほか, 1989)。

図9はLANDSAT/TMバンド6のシュードカラー画像である。4月(春)は気温が22℃、湖心の湖面温度が17℃で、春先の強い風によって湖水は循環して水温は上下の層でその差は小さいと考えられる。画像データでは春の水温は桃色～紫色(18.0～20.0℃)で表現され、下層も同様な水温であると推測される。7月(夏)は湖心の実測水温データはないが気温が30℃と春よりもさらに高い気温となっており、上層の水温は下層に比べ高くなっていると考えられる。画像データでは夏の湖面温度は橙色～赤色(23.5～27.0℃)で表現され、下層はそれより若干低い温度であると推察される。10月(秋)は気温が16℃、湖心の表層水温が17℃と、春のデータと比べると気温はやや低い水温は同様であり、湖水は再び循環して水温は上下の層で差がなくなっていると考えられる。画像データでは秋の湖面温度は黄色～黄土色(12.5～18.0℃)

で表現され、下層も同様な水温であると推測される。春と比べると若干低い温度で表現されているが、それぞれの時期で大気の状態が違う画像データを用いて両者の数値を単純に比較するのは危険であり、今後の課題となった。2月(冬)は気温が4℃、湖心の表層水温が3℃で4℃よりやや低く、湖水は停滞して水温はやや下層の方が高くなっていると考えられる。画像データでは冬の水温は青色～水色(1.5～6.0℃)で表現され、下層はそれより若干低い温度であると推察される。

## 5. ま と め

本報では宍道湖水温の定点観測データを用いて、衛星データと水温の関係式を作り、統計的な手法で衛星データから湖面温度の復元を試みた。その結果次のようなことが明らかになった。

- 1) 宍道湖・中海・日本海の湖面温度を衛星データから計算し比較した結果、2月のデータで境水道、日本海の湖面温度が宍道湖・中海と比べ温度が高い。このことは橋谷ほか(1991)が指摘した冬季の水温が、「海水が汽水よりも高い」という関係に調和的である。
- 2) 宍道湖の湖面温度分布を衛星画像を用いて解析した結果、4,7,10月および2月のデータで特徴的な湖面温度分布パターンを示した。
- 3) 宍道湖の湖面温度分布を変化させる大きな要因として吹送流があげられ、4月の衛星データから解析した湖面温度分布には吹送流の影響がみられる。

今回は実際の水温と衛星データの関係を確認する建設省の定点観測における少数のデータを使って解析したため、温度推定の精度の面で問題が残された。今後は衛星の撮影日に統計的に有意な数の水温調査を行ない、実測水温と衛星データとの関係式を精度よく求め、より現実に近い湖面水温を再現する必要がある。日本ではヘイズ、霧などによる影響が大きいため大気の補正は重要となる。今回は大気補正を行わなかったため、異なる時期のデータを直接比較できないという問題点を残した。今後は現地調査を行なう際に湖面の放射強度を実測し、衛星データとの関係を検討することにより、衛星データの大気補正を行なう必要がある。

衛星リモートセンシングによる水質解析はその広域性と同時性および非接触性という特徴で宍道湖の湖水の循環機構の解明、漁業や環境保全対策への応用に期待されている。LANDSATの観測周期は16日であり、宍道湖における衛星データと水温との関係が明確になれば、衛星データを用いて毎月約2回、宍道湖の表面水温を観測船による水温観測をすることなしに表面水温を把握することが可能である。したがってこのような衛星データを

長期にわたり蓄積することが湖水の水塊動態の把握に役立つものと期待される。

### 謝 辞

本報をまとめるにあたって通産省工業技術院地質調査所地殻物理部の松永恒雄氏には本報を読んでいただき、リモートセンシング全般について有益なご教示をいただいた。また建設省中国地方建設局出雲工事事務所からは宍道湖の水温データを提供していただいた。松江地方気象台からは松江地方の気象データを提供していただいた。松永恒雄氏と両機関の関係者の方々に心からお礼申し上げます。

### 引用文献

- 伊達善夫・橋谷博・清家泰・近藤邦男・奥村稔・藤永薫, 1989: 12年間の定期調査からみた中海・宍道湖の水質-季節変化, 経年変化, 平年値一, 山陰地域研究(自然環境), 第5号, 89-102.
- 橋谷博・清家泰・近藤邦男・奥村稔・藤永薫・伊達善夫, 1991: 月1回の定期調査からみた中海・宍道湖の水質-地点間変動一, 山陰地域研究(自然環境), 第7号, 93-104.
- 岸野元彰, 1995: ASTERの海洋・陸水への応用, 日本リモートセンシング学会誌, 15(2), 72-77.
- 三菱商事株式会社社会環境室・東京理科大学リモートセンシング研究所, 1987: リモートセンシングによる琵琶湖の水域環境調査, 1-174.
- 宮崎清・鷹野洋・安岡善文, 1991: ランドサットTMデータによる児島湖および周辺水域の水質分布推定, 日本リモートセンシング学会誌, 11(2), 191-193.
- 日本リモートセンシング研究会, 1994: 図解リモートセンシング, 日本測量協会, 230.
- 清家泰・橋谷博・近藤邦男・奥村稔・藤永薫・伊達善夫, 1989: 冬季3週間にわたる観測からみた中海の水流と風との関係, 山陰地域研究(自然環境), 第5号, 103-108.
- 鳥井清司・井岡幹博・福岡順・伊達善夫, 1980: 航空機MSSによる宍道湖・中海の観測(1), 第6回リモートセンシングシンポジウム予稿集, 65-68.
- 宇宙開発事業団地球観測センター, 1990: 地球観測データ利用ハンドブック-ランドサット編・改訂版一, リモートセンシング技術センター, 6-1 - 6-2.
- 安岡善文・宮崎忠国, 1977: 遠隔計測による霞ヶ浦地域の現況解析, 国立公害研究所特別研究成果報告書R-1, 48-66.