

画像解析をした結果、堆積物を上位から Unit I と II と 2 つの層に区分できた。この区分は硫黄濃度による区分と一致した。

2. CT画像、堆積物および C・N・S 元素分析データの特徴より、Unit I は生物活動の著しい酸化的な淡水環境を示すことから、湖水の成層構造が未発達で、湖水に含まれる溶存酸素量も多かったと考えられる。同様に、Unit II では生物活動のできない還元的な汽水環境で、湖水の成層構造の発達が可能であったと考えられる。さらに、Unit 境界深度から推定した Unit II 堆積時の宍道湖における最深部は現在の斐伊川河口付近の東側に存在し、塩分躍層による湖水の成層構造が発達していたと考えられる。この成層構造の発達した環境下で、縞状堆積物が形成されたと考えられる。

3. Unit 境界面は斐伊川河口から宍道湖の東部に向けて連続し、またこの境界面は同一の時間面であることが示唆された。宍道湖が汽水環境から淡水環境へ変化した時期としては、斐伊川の東流に加えて小氷期における降水量の増加あるいは海水面の低下の可能性を考えれば、17 世紀初頭ごろであると推定される。

4. 今回 SJ93-A, B, C の柱状試料の断面記載において、CT画像による解析をおこなった。その結果、Unit I で見られる含砂率の高い砂層は軟 X 線写真と同様に認めることができた。しかし、Unit II において軟 X 線写真では確認することができなかった縞状堆積物を CT 画像で確認することができた。今回確認できた縞状堆積物のラミナ毎の組成差は少ないが、そのような場合であっても CT スキャマによる画像解析で認識できるという点で、今後柱状試料分析をする上で非常に有効的な手段であるといえる。

謝 辞

本研究において、調査船の手配および操船にあたっては、島根県水産試験所三刀屋分場の中村幹雄分場長をはじめ、同分場の方々に協力していただいた。1993 年および 1994 年の柱状試料採取は地質調査所の研究の一貫としておこなったものである。CT スキャナによる画像処理では地質調査所情報地質部の中野 司博士にその処理および解析方法について御協力、御助言をいただいた。C・N・S 分析に関しては島根大学総合理工学部の三瓶良和先生の御助言をいただき、また論文作成にあたって御指導をいただいた。同教室の瀬戸浩二博士には船の操船、柱状試料の採取および試料分割に御協力していた

だき、また御助言をいただいた。硫黄分析に関しては島根大学汽水域研究センターの高安克己教授にお世話になった。以上の方々にお礼を申し上げます。

文 献

- Boygle, J. (1993) The Swedish varve chronology-a review. *Progress in Physical Geography*, **17**, 1-19.
- Berner, R. A. (1984) Sedimentary pyrite formation: An update. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **48**, 605-615.
- 福沢仁之・小泉 格・岡村 真・安田喜憲 (1995) 水月湖細粒堆積物に認められる過去 2,000 年間の風成塵・海水準・降水変動の記録. 地学雑誌, **104**, 52-64.
- 池谷仙之・和田秀樹・阿久津浩・高橋 実 (1990) 浜名湖の起源と地史的変遷. 地質学論集, (36), 129-150.
- 井内美郎 (1993) 湖底・湖底堆積物の新しい調査法. アーバンクボタ, **32**, 30-37.
- 建設省出雲工事事務所 (1977) 地域社会と河川の歴史 (II), 92p.
- 鹿島 薫・中海宍道湖自然史研究会 (1990) 中海の自然史研究—その 14. 宍道湖から得られた柱状試料の珪藻分析—. 島根大学地質学研究報告, **9**, 159-161.
- 前島郁夫 (1984) 歴史時代の気候復元—特に小氷期の気候について—. 地学雑誌, **93**, 413-419.
- 碎屑性堆積物研究会編 (1983) 堆積物の研究法—礫岩・砂岩・泥岩—. 地学双書 24, 地学団体研究会, 377p.
- 斉藤文紀・井内美郎・横田節也 (1990) 霞ヶ浦の地史: 海水準変動に影響された沿岸湖沼環境変遷史. 地質学論集, (36), 103-118.
- Sampei, Y., Yomura, H., Otsuka, M., Yoshida, K. and Suzuki, N. (1994) Decomposition of organic matter and the organic carbon content of sediments in Lake Shinji, southwest Japan. *Earth Science (Chikyū Kagaku)*, **48**, 317-332.
- Saarnisto, M. (1986) Annually laminated sediments. Handbook of *In Holocene Paleohydrology* B.E.Berglund (ed.): 343-370, *Jhon Wiley & Sons*.
- 徳岡隆夫・大西郁夫・高安克己・三梨 昂 (1990) 中海・宍道湖の地史と環境変化. 地質学論集, **36**, 15-34.
- 徳岡隆夫・大西郁夫・三瓶良和・瀬戸浩二・田村嘉之・高安克己・安間 恵・松田滋 夫・井内美郎・西村清和 (1994) 音波探査による中海・宍道湖の塩分躍層の検討とその意義. LAGUNA(汽水域研究), (1), 11-26.

LAGUNA (汽水域研究) 3, 57~72 頁 (1996 年 3 月)
LAGUNA 3, p. 57-72 (1996)

宍道湖における衛星同期水質調査 (その 1)

作野裕司¹⁾・高安克己²⁾・松永恒雄³⁾・中村幹雄⁴⁾・國井秀伸²⁾

Simultaneous water quality survey with satellite observation in Lake Shinji (Part. 1)

Yuji Sakuno¹⁾, Katsumi Takayasu²⁾, Tsuneo Matsunaga³⁾,
Mikio Nakamura⁴⁾ and Hidenobu Kunii²⁾

Abstract: Simultaneous water quality surveys with satellite observation were carried out in Lake Shinji from July to November 1995. As a result, the technique of field survey in the lake was made clear. The field data were obtained in 8 out of the 12 surveys and instantaneous horizontal distributions of suspended substance (SS) and chlorophyll-a(chl-a) data in Lake Shinji were grasped. Horizontal distribution of SS and Chl-a in Lake Shinji generally tend to show low concentration on the coast of lake and high concentration in the center of Lake. On the contrary, transparency shows symmetrical trend.

Key word: satellite remote sensing, suspended substance, chlorophyll-a, Lake Shinji, horizontal distribution

1. は じ め に

日本各地の多くの湖沼では、都市化や工業化に伴う富栄養化が問題となっており、広域的な水質把握のため様々な方法で水質モニタリングが試みられている。湖沼の水理に関するモニタリングの方法は、a) リモートセンシング (人工衛星・航空機などによる空中写真・映像利用)、b) 船上観測、c) 浮子・漂流板・電波ブイなどによる観測、d) 定点連続観測に大別される (岩佐, 1990)。従来宍道湖では船上観測による水質調査は数多くなされており、各種水質項目 (水温、塩分、DO など) の地点間変動 (橋谷ほか, 1991)

や季節変動的、経年的変化 (伊達ほか, 1989) が報告されている。また宍道湖湖心では水質の定点観測が行われており、継続的な点データは取得されている。しかしこのような船上観測を中心とした従来からの方法では、宍道湖、中海、日本海といった広範囲の水域の現象を同時に把握するのは容易ではない。航空機、人工衛星などを利用したリモートセンシングは、広い範囲を同時的に観測することが可能なため、広域環境監視への利用が期待されている (安岡, 1983)。鳥井ほか (1980) は航空機 MSS (Multi Spectral Scanner) データを用いて宍道湖・中海の流れのパターンを推定した。また伊岡ほか (1980) は航空機 MSS を用いて中海の一部を対象にクロロフィル a、塩分濃度、Total-P、SS の分布を推定した。しかしいづれも 1 回の調査によるもので、それ以後リモートセンシングによる宍道湖水質の観測は行われていない。鳥井ほか、伊岡ほかが行った解析から約 15 年経過した現在、衛星センサ技術の飛躍的向上で日本各地の湖沼においても衛星データによる湖の水質定量が可能になりつつある (たとえば水尾ほか, 1991; 宮崎ほか 1991)。最近、宍道湖では 1992~1993 年のランドサット TM データを用いて作野・高安 (1995) が湖面温度分布の推定を行った。

- 1) 島根大学理学部地質学教室
Department of Geology, Faculty of Science, Shimane University, Matsue 690, Japan
- 2) 島根大学汽水域研究センター
Center for Coastal Lagoon Environments, Shimane University, Matsue 690, Japan
- 3) 工業技術院地質調査所
Geological Survey of Japan, 1-1-3 Higashi, Tsukuba 305, Japan
- 4) 島根県水産試験場三刀屋内水面分場
Mitoya Branch of Shimane Prefectural Fisheries Experimental Station, Mitoya, 690-24, Japan

筆者らは衛星データによる汽水域の水質環境モニタリングを行うための基礎資料作成の一環として1995年7月から同年11月まで衛星が宍道湖を撮影する日時と同期して行う水質調査(以下衛星同期水質調査と呼ぶ)を実施した(図1)。その結果、宍道湖における透明度、懸濁物質(SS)、クロロフィルaの瞬時的かつ面的な分布状況の把握ができたのでここに報告する。

2. 方 法

2-1 現地調査(グランドトゥース: ground truth)

2-1-1 調査概要

宍道湖上空に衛星が飛来する日のうち天候や調査器具の有無、調査人員が確保できる日に同期して湖面水質調査を実施した。宍道湖を観測する衛星(衛星名/センサ名)はLANDSAT-5/TM(米)、SPOT-2/HRV(仏)、MOS-1・MOS-1b/MESSR(日本)およびJERS-1/OPS(日本)である。1995年度は衛星同期調査の初年度として、7月10、17日、8月11、13日、

9月3、6日、10月2日、11月5、6、7、8、9日の計12回を計画した。

2-1-2 調査方法

衛星同期水質調査は広域的かつ瞬時的なデータ取得を特徴としているため、調査は宍道湖全域を衛星観測時刻に素早く行われなければならない。そのため図2に示した南北5点×2測線、東西5点×1測線、東西2点×1測線の計17測点を設定して各測線に調査船を配置することによって衛星が宍道湖を観測する午前10時前後の2時間程度ですべての調査を終えるように工夫した。湖上での位置決定はGPSで行った。調査器具や調査人員の不足の場合は測点を減らして調査船1隻または2隻で調査を行った。

調査項目は光の波長に関係がある水質項目のうち透明度、表層(水面下0.5m)のSSおよびクロロフィル-aとした。そのほか一般的な水質項目である水温、pH、DOおよび塩分濃度を参考資料として現地で測定した。参考資料とする水質項目の測定深度は表面を0.5mとみなし測定すると共に、光の到達限界

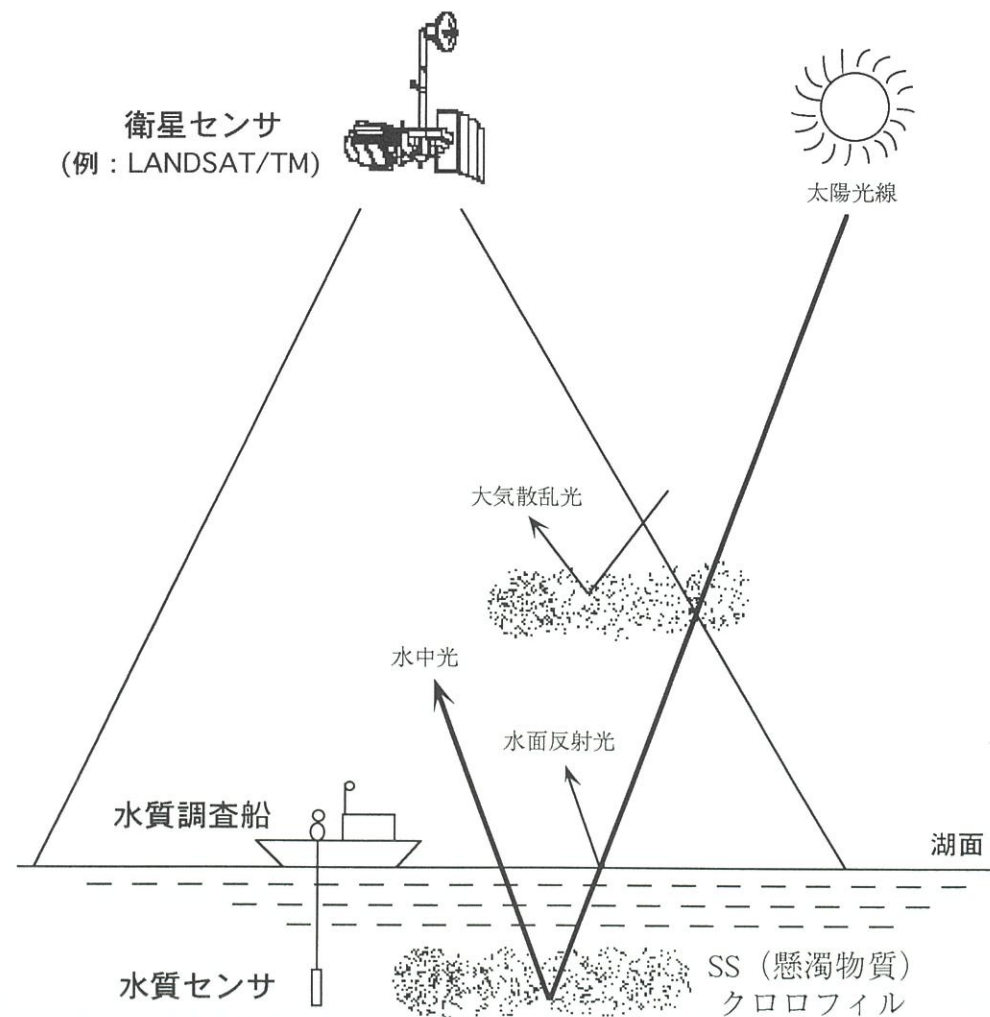


図1 衛星同期調査概念図

Fig. 1. Concept of simultaneous water quality survey with satellite observation

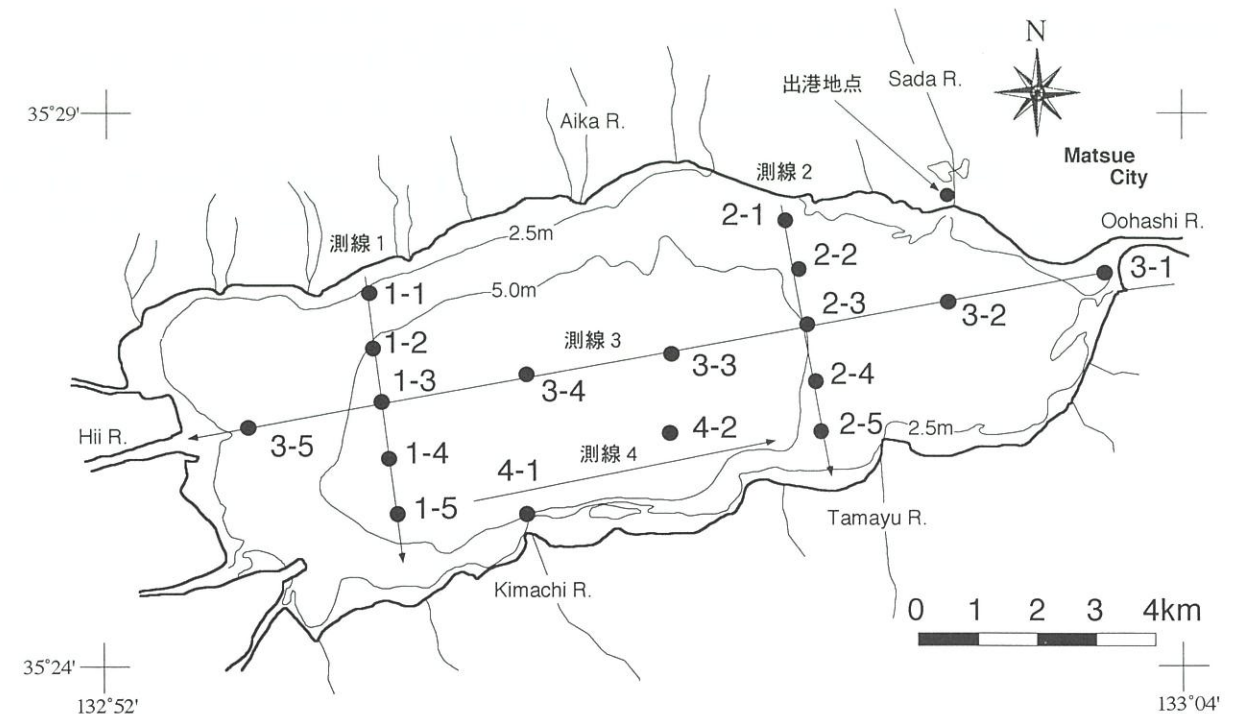


図2 調査測点
Fig. 2. Research Point

表1 調査機器と解析法
Table 1. Implement of water quality research and analysis method

項 目	観測器具の仕様および分析方法
位置	日本無線 GPS (島根県水産試験場所有, 島根大学汽水域研究センター所有)
深度	手用測鉛・魚群探知機 (島根大学汽水域研究センター所有)
水質	水温 (参考資料) YSI3800 (島根県水産試験場所有, 島根県環境保健公社所有) pH (参考資料) YSI610-D (島根大学総合理工学部物質科学教室所有) DO (参考資料) WTW OXI-196, pH-196T, LF-196 (島根大学汽水域研究センター所有) 塩分 (参考資料)
透明度	透明度板 (島根県水産試験場所有, 島根大学汽水域研究センター所有)
懸濁物質 (SS) クロロフィル	GFP (ガラス繊維ろ紙) 法 アセトン抽出・吸光法 (計算式: SCORE/UNESCO, Rorenzen)
分光反射率測定	ANALYTICAL SPECTRAL DEVICES, INC. Personal spectrometer II (地質調査所所有)

の指標である透明度(宍道湖の平均的な透明度は1.5m)の上下を測定する意味で1.0m、2.0mの深度で水質を測定した。測定器具の仕様一覧を表1に示す。透明度は透明度板で測定し、SSおよびクロロフィル-aは採水した試料を実験室に持ち帰り、分析を行った。クロロフィル量測定用試料を採水する際にゴミや大型の動物プランクトンを除去する意味で60meshのガーゼを使用して船上でろ過を行った。水温、pH、DOおよび塩分は水質計を用いて現地測定を行った。

2-2 室内分析

2-2-1 懸濁物質(SS: Suspended Substance)

SSとは、一般に孔径0.5~1.0 μm のフィルターを通

過せず、フィルター上に残存する成分と定義される。天然水の懸濁物は河川においては主として粘土などの無機物が多く、湖沼や海洋ではプランクトンやその分解残査がかなりの量を占めることがある。

SS定量の流れを図3に示す。すなわち80℃で乾燥し恒量としたADVANTEC社製ガラスフィルターGS25(孔径:1 μm)により一定量(1 l)の試料水をろ過し、再び80℃で24時間乾燥後、恒量にする。ろ過前後のフィルターの重量差を0.1mg単位で懸濁物質質量として求めた。

2-2-2 クロロフィル(Chlorophyll)

クロロフィル(葉緑素)は、光合成に不可欠の緑色素で、a、b、c、dの4種類ある。aはすべての藻

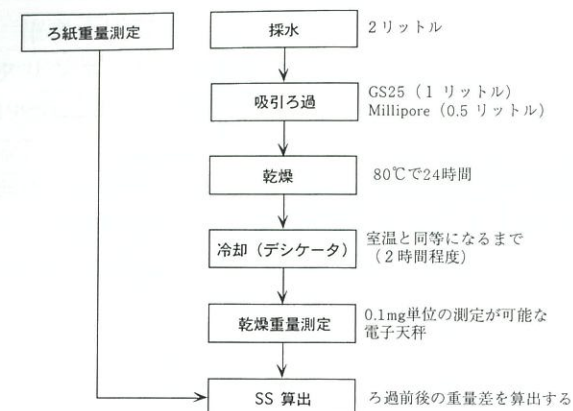


図3 SS観測の流れ

Fig. 3. Flow chart of measuring suspended substance concentration

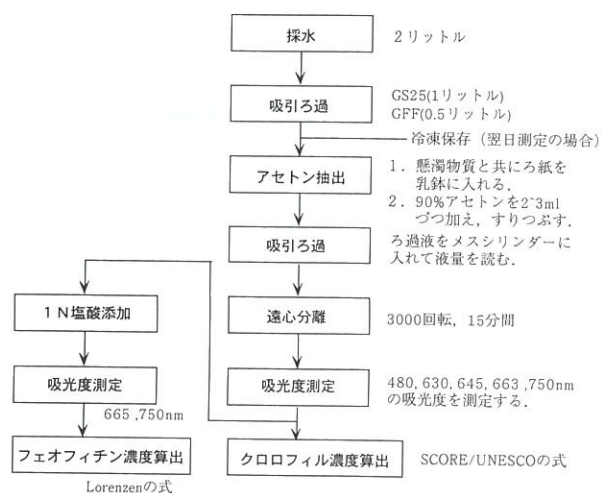


図4 クロロフィル測定の流れ

Fig. 4. Flow chart of measuring chlorophyll concentration

類(植物プランクトン)に含まれ、bは緑藻類に、cは珪藻、渦鞭毛藻類に含まれる。dは紅藻類などに含まれている。通常の光合成では各種のクロロフィルやカロチノイドさらにフィコビルンなどの色素は光エネルギー(可視光線)を吸収するが、これらのエネルギーは最終的にaに伝達されて光合成に用いられるので、一般に植物プランクトン量の指標としてクロロフィル-a(Chl-a)が用いられる。

クロロフィル測定の流れを図4に示す。測定の概要を説明すると以下ようになる。すなわち試料水をガラス繊維ろ紙でろ過し、植物プランクトンを集める。これを90%アセトンで抽出し、抽出液を遠心分離にかけた後、分光光度計(日立製、島根大学理学部生物学教室所有)を用いて750、663、645、630nmの波長の光に対する吸光度を測定する。植物カロチノイドを同時に定量するために480nmの吸光度も測定する。抽出液にわずかに残る濁りを補正するため、750nmにおける吸光度をほかの3波長にお

ける吸光度からそれぞれ引いたものを663、645、630nmにおける真の吸光度(それぞれ E_{663} 、 E_{645} 、 E_{630})を求める。ただし480nmの場合には、750nmの吸光度の3倍の値を差し引く。これら補正済みの吸光度をEとすると、検液中のクロロフィルa、b、cおよびカロチノイドの濃度は次式で示される。

<クロロフィル>

$$\text{クロロフィル a } (\mu\text{g/ml}) = 11.64E_{663} - 2.16E_{645} + 0.10E_{630} \text{ (式1)}$$

$$\text{クロロフィル b } (\mu\text{g/ml}) = 20.97E_{645} - 3.94E_{663} - 3.66E_{630} \text{ (式2)}$$

$$\text{クロロフィル c } (\mu\text{g/ml}) = 54.22E_{630} - 14.81E_{645} - 5.53E_{663} \text{ (式3)}$$

<カロチノイド>

(緑藻・藍藻類が優占する場合)

$$\text{カロチノイド } (\mu\text{g/ml}) = 4.0E_{480} \text{ (式4)}$$

(珪藻・黄色鞭毛藻類・渦鞭毛藻類が優占する場合)

$$\text{カロチノイド } (\mu\text{g/ml}) = 10.0E_{480} \text{ (式5)}$$

試料水中のクロロフィル濃度 $C(\mu\text{g/l})$ は、検液中の濃度を $x\mu\text{g/l}$ とすると

$$C(\mu\text{g/l}) = (x \times v)/V \text{ (式6)}$$

ただし v は検液の量(ml)、 V は試料水の量(l)を示す。カロチノイドについても同様に計算する。

今回の調査による測定では光エネルギー(可視光線)を吸収する色素クロロフィルa、クロロフィルb(Chl-b)、クロロフィルc(Chl-c)カロチノイドのほか、クロロフィルの分解産物であるフェオフィチンもLorenzen (1967)の方法で測定した。Lorenzenの方法は、アセトン抽出液に酸を加え、クロロフィルaとフェオフィチンaを分離定量する方法である。すなわち前述したクロロフィル、カロチノイドの吸光度測定後の検液に1N塩酸を5mlにつき2滴の割合で添加する。3分間放置後、750nmと665nmの吸光度を測定する。計算式は次式で表される。

<Lorenzenの式>

$$\text{クロロフィル a } (\mu\text{g/l}) = 26.7(E_{665} - E_{665a}) \times v/V \text{ (式7)}$$

$$\text{フェオフィチン a } (\mu\text{g/l}) = 26.7(1.7 \times E_{665a} - E_{665}) \times v/V \text{ (式8)}$$

ただし、 E_{665} は検液の665nmの吸光度から750nmの吸光度を差し引いた値で、 E_{665a} は1N塩酸添加後の検液について、650nmの吸光度から、750nmの吸光度を差し引いた値である。また v は検液の量(ml)で、 V は試料水の量(l)である。

2-2-3 ろ紙検定

海洋リモートセンシングの分野でSS定量の際一

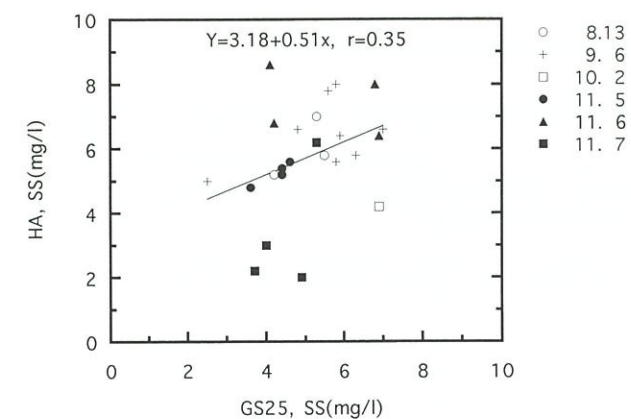


図5 SS測定に用いられるGS25フィルターとHAフィルターの比較

Fig. 5. Comparison between GS25 filter and HA filter used measurement of suspended substance concentration

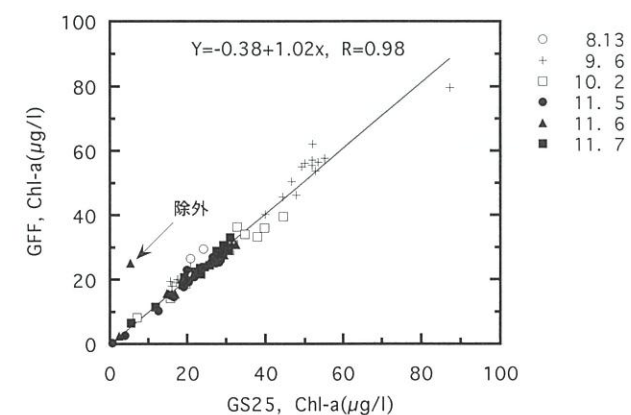


図6 クロロフィル測定に用いられるGS25フィルターとGFFフィルターの比較

Fig. 6. Comparison between GS25 filter and GFF filter used measurement of chlorophyll concentration

般的に使用されるろ紙はMillipore HA(孔径: 0.45 μm , 以下HAあるいは単にMilliporeとする)であり、今回は数箇所の試料水についてHA(試料水は0.5 lでSSは1 lあたりに換算)とAdvantec GS25(試料水1 l, 以下GS25とする)の両方のSSを算出し、両ろ紙の収量を比較した(図5)。その結果平均するとHAの方がGS25に比べて2割程度(17%)高い値となる。これはHAのほうがGS25と比べ孔径が約1/2であり、より細かい懸濁物質を捕収するからである。しかし、図5に示したように両者の値にばらつきが大きい(相関係数: $r=0.35$)この原因として(1)試料水の量が違うため、(2)Milliporeフィルターは海洋のSS(一般に1mg/l以下)を測定できるほどの精度を持つのにに対し、GS25はHAほどの精度を持っていないため、(3)SS量が多く、HAでは目づまりをおこすため、などが考えられた。このことから、宍道湖のようにSSが1mg/lを越える水域でのSSの定量は、GS25のような孔径が1 μm 程度のろ紙が有効だと考えられた。神谷(1992)はW社製の孔径1 μm のガラ

ス繊維ろ紙Aを用いてSSの測定精度と問題点を検討し、SSの測定では測定精度よりも塩分の残留の方が大きな問題であることを指摘している。今回ろ紙の検定に使った試料は24サンプルと少なく、さらに多くの試料で厳密な測定条件の下、ろ紙間の差の検定を行う必要がある。以下の議論に用いるSSは、相対的な濃度分布にろ紙の種類は依存しないと考え、GS25を使用したものである。

一方、Chl-a定量の際、海洋リモートセンシングの分野で一般的に使用されるろ紙は高価なWhatman社製グラスフィルターGFF(孔径0.7 μm , 以下GFF)である。安価なフィルターで代用できればと考え、数箇所の試料水についてGFFとGS25の両方のChl-aを算出し、両者の収量を比較し、GS25の精度を検討した。その結果両ろ紙で測定したChl-aの相関はよく(相関係数0.99)、平均するとGFFとGS25の値に差は全くなかった(図6)。これは宍道湖において採取された水中に含まれるChl-a色素を持つ藻類の大部分が両ろ紙の孔径より大きいためであると考えられる。以下の議論に用いるChl-aは、GS25を使用したものである。

3. 結果および考察

3-1 調査実施状況

衛星同期水質調査は予定した12回の調査のうち、天候や湖の状況が極めて悪く、観測船が出港できない日を除いて8回の現地調査を行うことができた。調査の概要を表2に示す。表に示す通り、観測船による観測を8回行ったのに対して、使用可能と判断される衛星画像は1995年12月現在では8/11のSPOT/HRV画像およびLANDSAT/TM画像、8/13のJERS-1/OPS画像、11/7のSPOT/HRVの3日、4画像であり、真の同期調査は3回である。調査日当日の気象を表3に示す。

3-2 宍道湖水質の基礎統計量

今回調査した宍道湖における水質項目の基礎統計量を表4に示す。計算に使用したのは衛星データとの相関解析を行う透明度、SS、クロロフィルaの他、参考資料として水温および塩分を加えた5つの水質項目である。なお参考資料として用いた水温、塩分を計測した水質計は複数であり、これらの水質計のキャリブレーションを十分行えなかったため、衛星データとの相関解析には使用しない。

実測した水質項目の変動係数は(平均値に対する標準偏差の比、以下CV)各水質項目の地点間のばらつき(分散)を示しており、衛星データとの相関解析

表2 調査実績

Table 2. Result of simultaneous water quality survey with satellite observation in Lake Shinji

注1) PN: パンクロモード, XS: マルチスペクトルモード

注2) “天候”は宍道湖において調査日の衛星通過時刻(10時頃)に筆者が判断した宍道湖上空の天候を示す。

注3) “衛星画像”はクイックルック画像(QL)で解析可能と判断される画像を○、一部解析可能を△、不可能を×で表した。?はQLが取得できないことを示す。“取得”は島根大学汽水水域研究センターがすでに購入した画像を示す。(1995年12月現在)

回数	観測日	観測衛星	解像度	天候	衛星画像	湖上観測
1	95.7.10	LANDSAT-5(TM)/MOS-1(MESSR)	30m/50m	曇	×/×	○
2	95.7.17	LANDSAT-5(TM)	30m	雨	×	×
3	95.8.11	SPOT-2(HRV)/LANDSAT-5(TM)	PN:10m,MS:20m /30m	曇	△(取得) / △	○
4	95.8.13	JERS-1(OPS)	18m×24m	晴	△	○
5	95.9.3	LANDSAT-5(TM)	30m	雨	×	×
6	95.9.6	SPOT-2(HRV)	PN:10m,MS:20m	曇	?	○
7	95.10.2	SPOT-2(HRV)	PN:10m,MS:20m	曇	?	○
8	95.11.5	MOS-1(MESSR)	50m	晴	?	○
9	95.11.6	LANDSAT-5(TM)	30m	晴	?	○
10	95.11.7	SPOT-2(HRV)	PN:10m,MS:20m	晴	○	○
11	95.11.8	SPOT-2(HRV)	PN:10m,MS:20m	雨	?	×
12	95.11.9	JERS-1(OPS)	18m×24m	晴	?	×

表3 調査日当日の気象(松江气象台, 1995)

Table 3. Weather data of the day carried out water quality surveys in Lake Shinji

観測点 松江		観測機関 松江地方気象台				
観測日	気温 (°C)	気圧 (hPa)	風向 (16方位)	風速 (m/s)	降水量 (mm)	天気 (午前9時)
95.7.10	28.8	1006.0	W	6.2	0	晴
95.8.11	29.8	1007.4	W	6.2	0	薄曇
95.8.13	32.1	1006.4	WNW	3.0	0	薄曇
95.9.6	22.6	1005.2	-	0.0	0	曇
95.10.2	20.4	1013.6	WSW	4.4	2	雨
95.11.5	15.2	1021.1	W	0.9	0	快晴
95.11.6	12.8	1020.3	NW	0.7	0	晴
95.11.7	16.5	1009.2	NNW	1.1	0	快晴

を行う際にはこのCVが大きいほど精度の高い解析ができると考えられる。調査日の中で変動係数が最も高い値を示しているのはクロロフィルa(CVの平均値29.87%)で、続いて透明度(CVの平均値23.01%)、SS(CVの平均値19.88%)である。表面水温、塩分の標準偏差は5%以下と低い。以上のことから、水質データと衛星データとの相関解析を行った場合、宍道湖ではクロロフィルa、透明度、SSの順で比較的精度良く解析ができると推定される。

3-3 宍道湖の透明度、SS、クロロフィルaの水平分布
宍道湖において実測した水質項目のうち、衛星データとの相関解析を行う透明度、SS、クロロフィルaについて8回の調査の平均値との特徴標準偏差の水平分布を以下に示す。

(a) 透明度の平面分布(図7)

透明度の各地点の平均値分布は全体に1.1~2.0mの範囲にある。平面的な分布の特徴は、湖岸付近で透明度が1.4~2.0mと比較的高い分布を示し、それ以外は1.1~1.3mの平均的な分布である。一般に透明度は水の濁り方、即ちSSとの関係が強く、湖水にSSが増えれば、透明度は次第に低下すると言われている。

る。斐伊川河口付近の測点3-5で1.1mと低い値を示すのは、土砂の搬出量が比較的多い斐伊川河口付近であるためと考えられる。しかし、後述するように、斐伊川河口付近の測点のSSは比較的少ない。このことは透明度がSSとしてとらえられる物質だけに依存しないことを示していると考えられる。また湖岸沿いは斐伊川ほどの搬出量を持つ河川はなく、底質が砂質で比較的湖水が澄んでいるため透明度が高いと考えられる。一方透明度の標準偏差分布は宍道湖南岸の測点で高く、季節変化が大きいことを示している。その他の地点の標準偏差は0.3m以下で小さく、季節変化が少ないことを示している。

(b) SSの平面分布(図8)

SSの平均値は全体に3~6mg/lの範囲で分布している。SSの平面的な分布の特徴は、湖岸域で低く、湖心域で高い。一般にSSと透明度は逆相関があるといわれているが、宍道湖でもこの特徴があてはまる。SSの起源として考えられるものは、(1)河川から運ばれた粒状および溶解物質によるもの、(2)降雨とともに大気中からもたらされるもの、(3)湖岸

表4 水質測定結果の統計

Table 4. Statistical result of measuring water quality

観測日	時間帯	実測項目	地点数	平均値	標準偏差	最大値	最小値	CV(%)
1995.7.10.	9:45 ~ 10:43 (1h58')	透明度(m)	9	1.21	0.28	1.80	0.95	22.87
		SS (mg/l)	12	3.73	1.03	6.00	2.20	27.60
		Chl-a (μg/l)	12	15.11	4.76	19.67	6.80	31.50
		水温 (°C)	9	24.61	0.39	25.50	24.30	1.57
1995.8.11.	9:07 ~ 11:51 (2h44')	塩分 (‰)	9	2.93	0.25	3.40	2.70	8.35
		透明度(m)	9	0.90	0.27	1.45	0.40	30.55
		SS (mg/l)	15	6.12	1.87	9.80	3.20	30.47
		Chl-a (μg/l)	14	36.36	13.84	58.69	3.92	38.07
1995.8.13.	9:21 ~ 11:20 (1h59')	水温 (°C)	10	28.82	0.24	29.20	28.40	0.83
		塩分 (‰)	10	2.76	0.31	3.10	2.00	11.09
		透明度(m)	12	1.25	0.24	1.65	0.95	19.52
		SS (mg/l)	12	4.68	0.68	5.50	3.30	14.48
1995.9.6.	9:55 ~ 11:37 (1h44')	Chl-a (μg/l)	12	25.04	5.34	38.10	20.14	21.34
		水温 (°C)	12	29.88	0.47	30.60	29.30	1.56
		塩分 (‰)	12	2.56	0.13	2.80	2.40	5.12
		透明度(m)	16	1.13	0.19	1.60	0.90	16.71
1995.10.2.	9:34 ~ 11:48 (2h14')	SS (mg/l)	17	5.45	1.30	7.00	2.50	23.90
		Chl-a (μg/l)	17	44.24	18.15	87.24	16.65	41.04
		水温 (°C)	17	26.68	0.25	27.00	26.10	0.95
		塩分 (‰)	17	3.41	0.05	3.80	2.80	1.53
1995.11.5.	9:05 ~ 11:30 (2h25')	透明度(m)	12	1.10	0.17	1.50	1.00	15.55
		SS (mg/l)	12	6.63	1.68	8.90	3.20	25.39
		Chl-a (μg/l)	12	28.55	11.47	44.48	7.05	40.17
		水温 (°C)	12	21.48	0.10	21.60	21.30	0.48
1995.11.6.	9:03 ~ 10:54 (1h51')	塩分 (‰)	12	3.57	0.07	3.60	3.40	1.82
		透明度(m)	15	1.43	0.72	4.00	1.00	50.38
		SS (mg/l)	17	4.24	1.42	6.30	0.50	33.44
		Chl-a (μg/l)	17	20.53	8.68	30.33	0.68	42.26
1995.11.7.	8:48 ~ 10:50 (2h02')	水温 (°C)	12	14.18	0.20	14.50	13.90	1.42
		塩分 (‰)	12	5.13	0.14	5.30	4.90	2.63
		透明度(m)	16	1.46	0.40	2.40	1.10	27.35
		SS (mg/l)	17	4.98	1.76	7.70	1.10	35.27
1995.11.7.	8:48 ~ 10:50 (2h02')	Chl-a (μg/l)	16	23.00	8.41	32.48	2.40	36.57
		水温 (°C)	17	14.18	0.28	14.60	13.70	2.00
		塩分 (‰)	17	5.12	0.16	5.30	4.60	3.12
		透明度(m)	16	1.49	0.27	2.30	1.00	17.89
1995.11.7.	8:48 ~ 10:50 (2h02')	SS (mg/l)	17	4.64	0.73	5.70	3.70	15.82
		Chl-a (μg/l)	17	23.24	6.75	31.04	5.55	29.04
		水温 (°C)	17	14.25	0.31	14.80	13.80	2.16
		塩分 (‰)	17	5.12	0.20	5.30	4.40	3.94

注 SS, Chl-aの測定値はGS25(ろ紙)使用のもの

透明度が湖底までである場合は除く

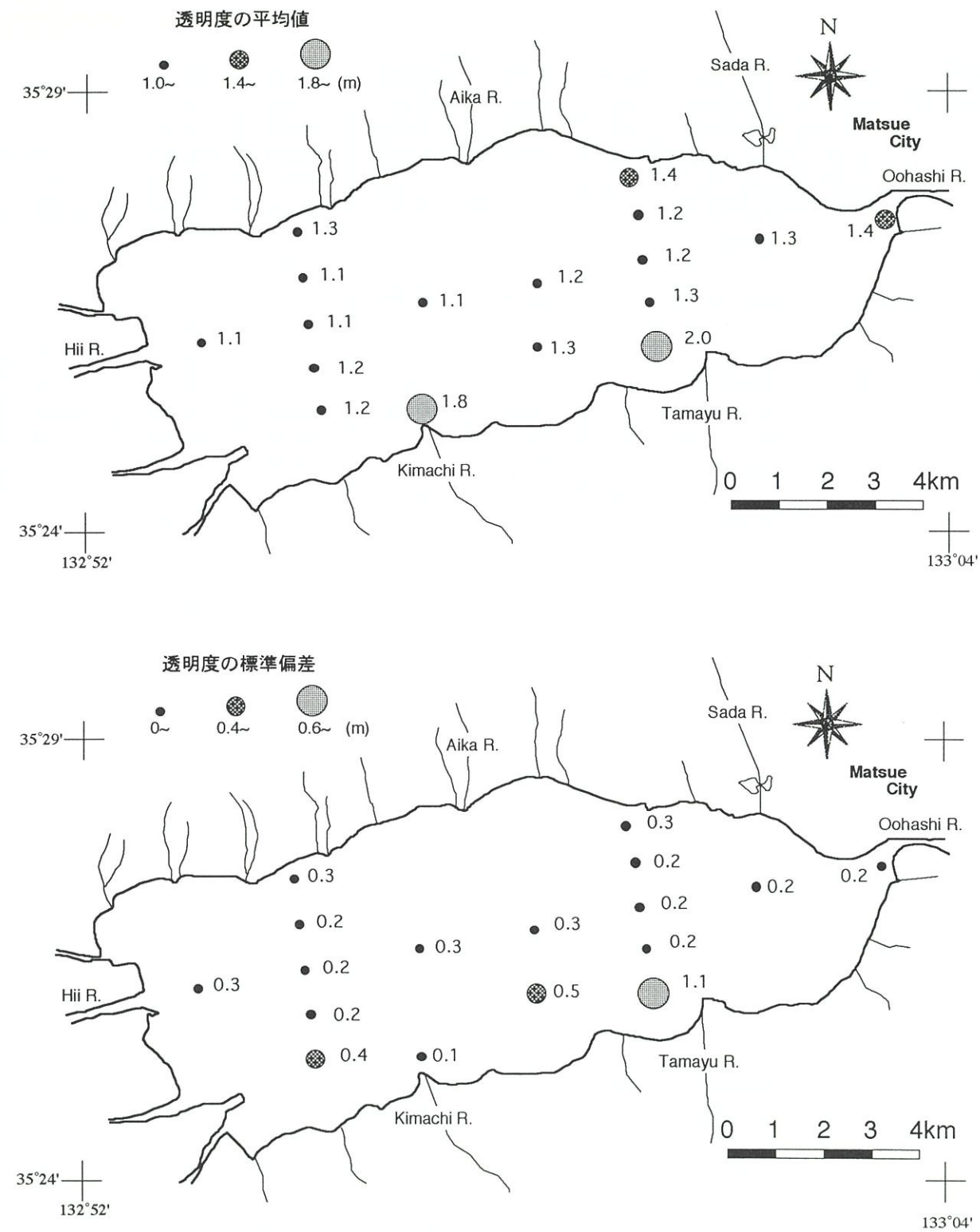


図7 宍道湖における透明度の平均値分布(上図)と標準偏差分布(下図)(1995年7月~11月)

調査日: 7/10, 8/11, 8/13, 9/6, 10/2, 11/5, 11/6, 11/7

調査時刻: 午前9時前後~午前11時前後

Fig. 7. Distribution of transparency in Lake Shinji(July. 1995~Nov. 1995)

Date of survey: July 7, Aug. 11, Aug. 13, Sep. 6, Oct. 2, Nov. 5, Nov. 6, Nov. 7,

Time of survey: From about 9 to 11

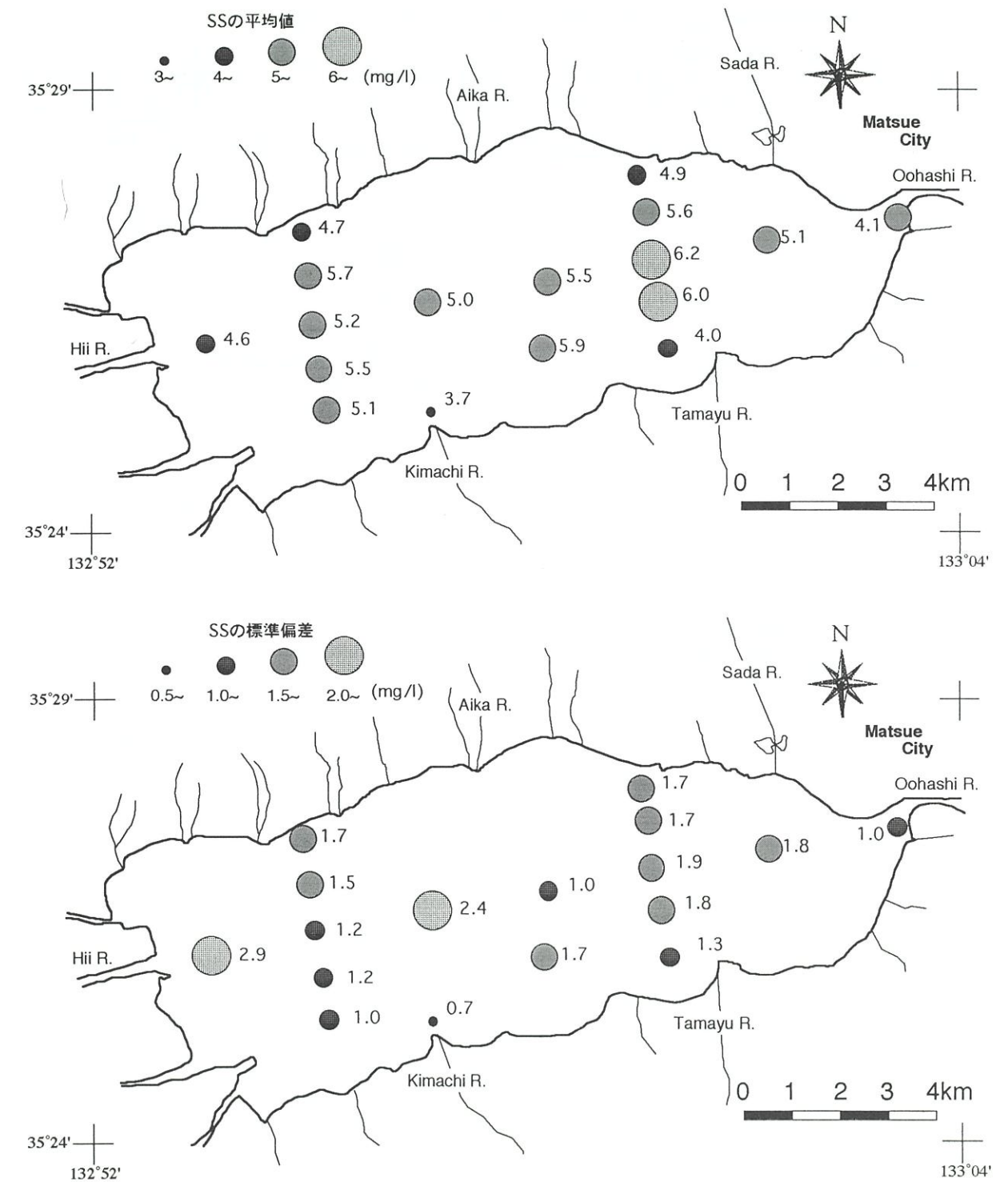


図8 宍道湖におけるSSの平均値分布(上図)と標準偏差分布(下図)(1995年7月~11月)

調査日: 7/10, 8/11, 8/13, 9/6, 10/2, 11/5, 11/6, 11/7

調査時刻: 午前9時前後~午前11時前後

Fig. 8. Distribution of suspended sediment in Lake Shinji(July. 1995~Nov. 1995)

Date of survey: July 7, Aug. 11, Aug. 13, Sep. 6, Oct. 2, Nov. 5, Nov. 6, Nov. 7,

Time of survey: From about 9 to 11

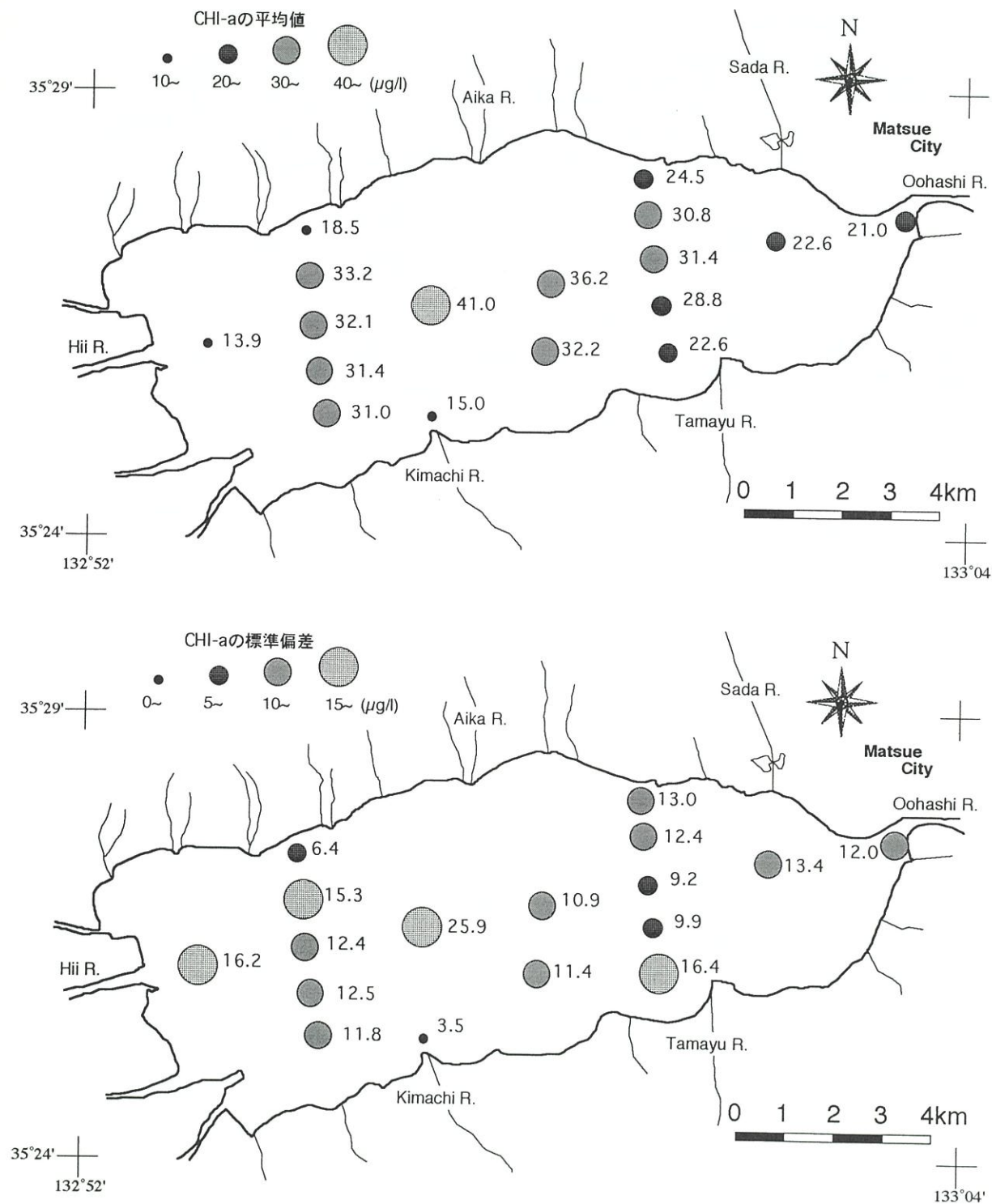


図9 宍道湖における Chl-a の平均値分布 (上図) と標準偏差分布 (下図) (1995 年 7 月 ~ 11 月)

調査日: 7/10, 8/11, 8/13, 9/6, 10/2, 11/5, 11/6, 11/7

調査時刻: 午前 9 時前後 ~ 午前 11 時前後

Fig. 9. Distribution of chlorophyll-a in Lake Shinji (July, 1995 ~ Nov. 1995)

Date of research: July 7, Aug. 11, Aug. 13, Sep. 6, Oct. 2, Nov. 5, Nov. 6, Nov. 7,

Time of research: From about 9 to 11

の侵食作用によって起こるもの、(4)湖の生物生産によるもの、(5)風によって陸上から運ばれるものなどである。このうち(1)に関して、斐伊川は多量な土砂を搬出することが知られているが、斐伊川河口部の SS は比較的小さい。一方標準偏差は湖内で最も大きい値を示す。このことは斐伊川の土砂の搬出に伴う懸濁物の濃度は季節的に大きく変化するが、湖表面が懸濁している期間は比較的小さいことを示していると考えられる。

(c) クロロフィルの平面分布 (図 9)

Chl-a の平均値は全体に透明度、SS と比べ、地点間のばらつきが大きい。平面的な特徴は湖岸域が低く、湖心域が高くなっている。この特徴は SS と同様である。Chl-a は一般に藍藻、珪藻、緑藻、黄金色藻類、渦鞭毛藻類などの藻類量の目安として利用される。宍道湖における藻類量の調査で神谷 (1991) は、珪藻の *Cyclotella* sp. が年間を通じて優先し、藍藻類の *Coelosphaerium kuetzingianum*, *Merismopedia* などの出現頻度が高かったと報告している。また江角 (1992) は、宍道湖は通年 *Cyclotella* spp. が優占種として見られ、春先から秋にかけて緑藻が見られたと報告している。このことは宍道湖の藻類は年間を通じて珪藻類が優占しており、藍藻類、緑藻類の出現頻度が高い時期があることを示しており、クロロフィル a に加え b, c の検討が有効であると考えられる。しかし採水試料による藻類の種の同定を行っていないため本報告ではクロロフィル b, c の計算値を掲載するに留めた。近年霞ヶ浦や諏訪湖などの富栄養湖で問題となっている「アオコ」の正体の大部分は藍藻類の「ミクロキスティス」や「アナベナ」であり、宍道湖でもアオコの発生が報告されている (例えば川上ほか, 1988)。従来の調査船による調査では把握の難しいアオコの分布域を広域的で非接触の特徴を持つリモートセンシングによって Chl-a の平面的分布を把握することは重要な意味を持つ。また湖岸域はヤマトシジミの生息域であり、湖岸域で Chl-a の値が低いのはシジミによる栄養塩の取得との関係が強いとの見方がある (山室, 私信), 興味深い現象の一つだと考える。

3-4 衛星同期水質調査の諸問題と対策

宍道湖において衛星と同期して水質調査を行ったのは今回が初めての試みであり、多くの課題が浮かび上がった。以下に衛星同期調査の諸問題とその対策について列挙する。

(1) 調査の日程

衛星同期調査の実施は調査日当日の天候に大きく

左右されるため、調査回数を増やし衛星データが得られる確率を高くしなければならない。しかし、調査には多くの人員を動員し複数の調査機器を使用するため、常に今回のような大規模の調査ができるとは限らない。今後このような調査を継続していく上では、複数の機関が共同して調査を行う組織的な体制をとる必要がある。現在宍道湖の水質は複数の公共団体がそれぞれ個別に定期調査を行っている。東京湾では近年複数の公共団体がランドサットの飛行日に合わせた定期的な水質調査を実施しているという。各機関の水質データの有効利用の観点から、宍道湖においても複数の公共機関による衛星の観測日と同期した水質調査の実施が期待される。

(2) 水質測点の選定

水質測点の選定は斐伊川からの湖水と大橋川からの湖水の動態を把握する意味で、南北 2 測線を設けた。また宍道湖全域を把握する意味で東西 2 測線を設けた。その結果、南北測線では水質項目全般において大きな変化はなく、むしろ 3 回目 (8/13) の調査から実施した東西測線 4 で水質項目の値に大きな変化が見られた。水質データと衛星データとの相関解析をする際、精度の高い解析を行うためには水質データに大きな幅のあることが求められる。調査時間短縮と調査能率向上のためにこのような水質項目の値の変化が比較的大きい水域における調査測点の選定と測点数を検討する必要がある。

(3) 水質測定の方法

今回の調査では衛星データの広域性、同時性という特徴を重視するために複数の調査船を用い、水質観測を行った。その結果、複数の水質計を用いることになり、機種間のキャリブレーションが難しく、十分行えなかった。今後複数の水質計を使用する際には出港前に機種間で同質の水による測定を行い、測定値に基づいて検量線を引き、測定した値を校正する必要がある。

また SS、クロロフィル測定用試料の採水は今回表面水をバケツでくみあげてポリ容器に入れた。この方法では表面水に浮遊するゴミが混入しやすく、SS やクロロフィルの値に影響すると考えられる。特に SS はこのような混入物が値に大きく反映すると考えられ、事実 SS の値はフィルターにより大きなばらつきが生じた。今後の調査では採水器による慎重な採水を行う必要がある。

(4) 気象データの取得

水質は周囲の環境、気象および季節などによって変化することが知られている。特に気象は水質に大きな影響を与える要因として重要である。今回観測日当日の気象は気象台で観測された松江の気象デー

タを参考にしたが、湖上の気象は地上の気象と若干異なる。観測日当日の宍道湖の気象(特に気温、風向、風速)を現地で計測することが望まれる。しかし、宍道湖の気象データを一定の条件で観測することは容易ではなく、観測日の気象データを取得するための方法を今後検討する必要がある。

以上のような宍道湖における衛星同期水質調査の諸問題についてさらに詳細な検討を行い、より効率のよい組織的かつ精度の高い水質の面的把握のための調査を継続していく必要がある。

4. ま と め

1995年度は宍道湖衛星同期調査の初年度であり、本報告は調査技術と水質の現状および問題点を述べてきた。今後この調査結果をもとに水質データと衛星データとの相関解析を行い、得られた回帰式を用いて宍道湖水質を水質項目ごとに画像化する。現在地球観測衛星はランドサット、スポットに代表されるように数多く打ち上げられ、ランドサットに限定すると宍道湖上空を1か月に2回の割合で観測している。このような衛星を複数対象にすれば常に宍道湖は衛星によって監視されていることになり、衛星データを用いた広域的かつ瞬間的な湖水のモニタリングが可能となる。衛星同期調査は将来期待されている衛星データによる宍道湖水質のモニタリングをより高い精度で行うために、長期間にわたり継続的に行われることが期待される。

謝 辞

今回の調査は多くの方々の協力のもと行われた。島根県衛生環境公社の小西努氏、島根大学総合理工学部物質科学教室の清家泰助教授および学生の方々、島根県水産試験場の職員の方々には水質計をお借りする際大変お世話になった。松江市西浜佐陀町の上田幸一氏、門脇幹男氏、島根県水産試験場の山根恭道氏、島根大学総合理工学部地球資源環境学教室の瀬戸浩二博士には悪天候の中調査船を操縦していただくと共に多くの助言をいただいた。そして島根大学理学部地質学科の大学院生および学部生の方々には調査を手伝っていただいた。その他にも今回の調査に関して多くの機関の方々に協力していただき、助言をいただいた。協力の関係各位に深く感謝致します。

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—、山陰地域研究(自然環境), **5**: 89-102.
- 江角比出朗(1992)宍道湖・中海の植物プランクトンの調査結果(1992年度), 島根県衛生公害研究所報, **34**: 99p
- 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—、山陰地域研究(自然環境), **7**: 93-104.
- 井岡幹博・鳥井清司・福間順・伊達善夫(1980)航空機MSSによる宍道湖・中海の観測(2)—回帰分析による中海の水質量分布の推定—、第6回リモートセンシングシンポジウム予稿集, 69-72
- 岩佐義朗編(1990)湖沼工学. 山海堂, 東京, 33p.
- 神谷宏(1991)宍道湖・中海の植物プランクトン調査結果について, 島根県衛生公害研究所報, **33**: 98-100
- 神谷宏(1992)浮遊物質及び栄養塩類の測定精度と問題点, 島根県衛生公害研究所報, **34**: 58-62
- Lorenzen(1967) Deyermation of Chlorophyll and phaeo-pigments: Spectrophotometric equations, Limnology Oceanography, **12**, 343p
- 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.
- 水尾寛己・二宮勝幸・雫石雅美・多賀保志・安岡善文(1991)TMデータによる東京湾のクロロフィルa量の観測の検討—中間赤外域における水質情報抽出の可能性—, 日本リモートセンシング学会誌, **11**(3): 135-139
- 作野裕司・高安克己(1995)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, 島根大学地質学研究報告, **14**: 55-63
- 鳥井清司・井岡幹博, 福間順・伊達善夫(1980)航空機MSSによる宍道湖・中海の観測(1)—流れのパターンの推定—, 第6回リモートセンシングシンポジウム予稿集, 69-72
- 安岡善文(1983)リモートセンシングの湖沼汚濁監視への応用, 環境技術, **12**(5): 47-52

付 表 説 明

以下の付表は1995年7月~11月に行った8回の衛星同期水質調査の結果である。この付表を掲載するにあたりいくつかの注釈が必要なのでここに説明する。

水質データのうち水温、DO、pH、塩分は複数の水質計で計測しており、機種間のキャリブレーションは行っていない。また、付表中の空欄は測定器具の不良または不足あるいは記載の欠損によるものである。SS、クロロフィル、カロチノイドおよびフェオフィチンはGS25フィルター使用の値である。クロロフィル、カロチノイドの計算式はUNESCOの式を用いた。ただし、付表中の点線より下のクロロフィルa、フェオフィチンはRorenzenの式を用いた値である。クロロフィル、カロチノイドおよびフェオフィチンの値にマイナスが生じるのは計算式の特性だと考えられたが、今回は十分な検討ができなかったため今後検討する必要がある。ここではマイナスの値をそのまま掲載する。

付表の略記号は本文に準ずる。ただし、Carot. はカロチノイドを示し、4Eは $4 \times E_{480}$ 、10Eは E_{480} を示す。またPhaeo. はフェオフィチンaを示す。

付表1 宍道湖における水質調査結果(1995年7月10日)

Appendix 1. Raw data of water quality research in Lake Shinji
(July 10, 1995)

付表2 宍道湖における水質調査結果(1995年8月11日)

3-2のデータの欠損は室内作業における誤作動によるものである。
Appendix 2. Raw data of water quality research in Lake Shinji
(Aug. 11, 1995)

付表3 宍道湖における水質調査結果(1995年8月13日)

Appendix 3. Raw data of water quality research in Lake Shinji
(Aug. 13, 1995)

付表4 宍道湖における水質調査結果(1995年9月6日)

Appendix 4. Raw data of water quality research in Lake Shinji
(Sep. 6, 1995)

付表5 宍道湖における水質調査結果(1995年10月2日)

Appendix 5. Raw data of water quality research in Lake Shinji
(Oct. 10, 1995)

付表6 宍道湖における水質調査結果(1995年11月5日)

Appendix 6. Raw data of water quality research in Lake Shinji
(Nov. 5, 1995)

付表7 宍道湖における水質調査結果(1995年11月6日)

Appendix 7. Raw data of water quality research in Lake Shinji
(Nov. 6, 1995)

付表8 宍道湖における水質調査結果(1995年11月7日)

Appendix 8. Raw data of water quality research in Lake Shinji
(Nov. 7, 1995)