

## 宍道湖・中海の鉛直クロロフィル *a* 濃度分布特性

中山大介<sup>1</sup>・作野裕司<sup>2</sup>・松永恒雄<sup>3</sup>・高安克己<sup>4</sup>・國井秀伸<sup>4</sup>

### Vertical profiles of chlorophyll-*a* concentration in Lake Shinji and Lake Nakaumi

Daisuke Nakayama<sup>1</sup>, Yuji Sakuno<sup>2</sup>, Tsuneo Matsunaga<sup>3</sup>, Katsumi Takayasu<sup>4</sup>  
and  
Hidenobu Kunii<sup>4</sup>

**Abstract:** Vertical profiles of chlorophyll-*a* in Lake Shinji and Lake Nakaumi were revealed using *in situ* vertical chlorophyll-*a* measurement apparatus. Measurements were taken place from Oct. 1997 to Oct. 1998. Vertical chlorophyll-*a* profiles were classified into four patterns; bottom-peaked type, surface-peaked type, subsurface-peaked type, and flat type. The profile was characterized subsurface-peaked type in Lake Nakaumi and bottom-peaked type in Lake Shinji. Relationship between standing stock of chlorophyll-*a* in the euphotic layer and surface chlorophyll-*a* concentration was well expressed as linear regression ( $r=0.82$ ) in Lake Nakaumi, but correlation was not good ( $r=0.32$ ) in Lake Shinji.

**Key words:** chlorophyll-*a*, Lake Nakaumi, Lake Shinji, standing stock, vertical profile

### はじめに

宍道湖・中海は、淡水と海水がまざる汽水湖である。両湖ともに水深は浅く、河川からの自然な栄養の供給に加え、陸域からの人間活動に基づく有機物や栄養塩などの流入が多く富栄養化している。そのため、宍道湖ではアオコが、中海では赤潮が発生することがあるが、湖の生産性は高く、シジミをはじめとする魚介類は重要な資源となっている(大谷, 1997)。一般に湖沼の環境調査項目に含まれるクロロフィル-*a*

濃度(以下 Chl-*a* 濃度と呼ぶ)は、魚介類の餌である植物プランクトン量の指標となるばかりでなく、アオコや赤潮の指標にもなる。従って、宍道湖・中海の水質を評価する上で、Chl-*a* 濃度は重要な測定項目となっている。

従来、両湖における Chl-*a* 濃度の測定は、採水試料を実験室に持ち帰って分析する方法(以下、室内法と呼ぶ)が主であった。しかしこの方法では採水と分析に時間がかかり、宍道湖・中海のような大規模湖沼の同時的なクロロフィル分布を知ることは困難であっ

1 島根大学大学院理学研究科

Department of Geoscience, Shimane University, Matsue, 690-8504, JAPAN

2 東京大学大学院工学系研究科

Graduate School of Engineering, The University of Tokyo, Bunkyo-ku 113-8654, JAPAN

3 東京工業大学大学院総合理工学研究科

Department of Environmental Science and Technology, Tokyo Institute of Technology, Yokohama, 226-8502, JAPAN

4 島根大学汽水域研究センター

Research Center for Coastal Lagoon Environments, Shimane University, Matsue 690-8504, JAPAN

た。そこで最近では衛星や航空機を使ったりリモートセンシングにより、湖全体のChl-*a*濃度分布を同時に、かつ広域的に推定する技術が検討されている(作野ほか, 1999; 松永ほか, 1998)。しかしリモートセンシングでは表層の情報しか検出できないため、水柱の植物プランクトンの総量を議論する場合には表層Chl-*a*濃度データだけでは不十分である。

以上のような背景から筆者らは、衛星データから推定される表層Chl-*a*濃度から植物プランクトン総量を推定する方法を検討する研究の一環として、宍道湖・中海において多くの鉛直Chl-*a*濃度分布の調査を行なった。本報告ではこれらの調査データを使って、宍道湖・中海におけるChl-*a*濃度の鉛直分布の特徴及び表層Chl-*a*濃度と鉛直のChl-*a*総量の関係について考察する。

## 宍道湖・中海における鉛直クロロフィル測定方法

### 測定装置

本報告で使用した水中投下式クロロフィル測定装置(アレック電子製, ACL1151-DK, 島根大学汽水域研究センター所有)の外観と性能をそれぞれ図1, 表1に示す。本装置には、水深、水温、電気伝導度及び光子センサーが装着されており、水深10cm毎の各種水質データを現場で素早くかつ容易に記録することができる。ACL1151-DKのクロロフィルセンサーは、発光部に400~800nmの励起フィルター、受光部に677nmをピークとする蛍光フィルターが装着され、植物プランクトン中に含まれるクロロフィル色素の蛍光強度を測定することができる。ただし、植物プランクトンの種類や成長段階、水中の溶存有機物及び植物プランクトン以外の懸濁物などによって、単位クロロフィル量あたりの蛍光強度が異なる場合もあるので、クロロフィルの絶対量に変換するためには、センサーに受信された蛍光強度(N値とよばれる相対値で出力される)とサンプル水をアセトン抽出・吸光度法により測定した値を使って検量線を作成する必要がある。

### 鉛直Chl-*a*濃度の測定方法

現地観測は1997年10月~1998年10月の期間中、図2に示した地点で行った。観測時刻は午前9時~午後3時の間である。各水域におけるデータ取得状況を表2に示す。現地での測定手順は以下の通りである。まず、測定装置を船の側方から手動で鉛直下向きに

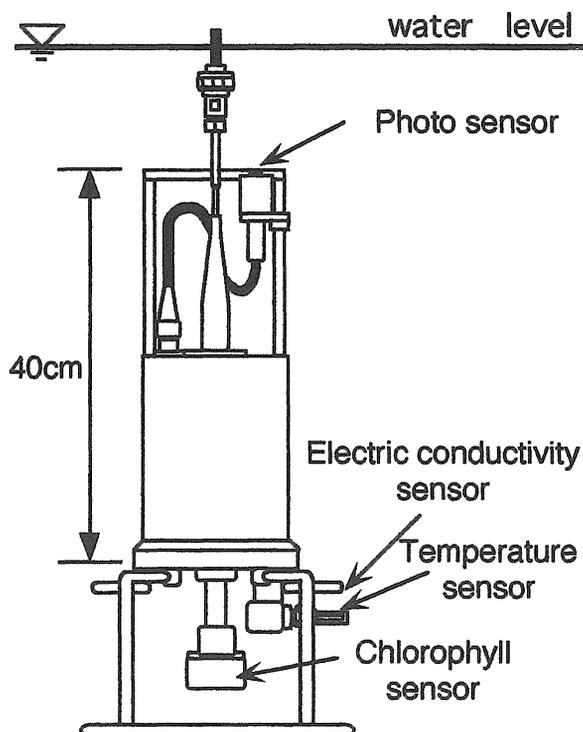


図1. 鉛直クロロフィル測定装置(ACL1151-DK)の外観。

Fig.1. Appearance of vertical chlorophyll-*a* measurement apparatus ACL1151-DK.

表1. ACL1151-DKの性能。

Table 1. Efficiency of ACL1151-DK.

Sensor name	Range	Accuracy	Resolution
Chlorophyll	0.1~200 $\mu$ g/l	-	0.1 $\mu$ g/l
Water temperature	5~40°C	$\pm 0.05^\circ\text{C}$	0.01°C
Electric conductivity	0~60mS	$\pm 0.05\text{mS}$	0.015mS
Photon	0~2000	$\pm 0.5\%$	1 $\mu$ EIN
Depth	0~30m	$\pm 0.06\text{m}$	0.01m

一定速度で湖底までおろし、クロロフィル、光子、水温及び塩分を同時計測した。船上で計ったデータを測定装置本体のメモリに記録させ、観測後陸上でデータを取り出した。またセンサーを引き上げた後、船上において表層水を測定装置付属の暗箱に浸し、底から20cm浮かした状態でN値(クロロフィル量に相当する)を読みとった。暗箱の中に入れた表層水をポリタンクの中に2 l 採水し、実験室に持ち帰る。持ち帰った表層水をアセトン抽出・吸光度法によってChl-*a*濃度を求めた。そしてこのChl-*a*濃度値と船上で記録したN値を使って検量線を作成した。図3に今回測定したN値とアセトン抽出法により求めたChl-*a*濃度の関係を示す。以後の議論で用いるChl-*a*データはこの検量線に従って求めた値とする。

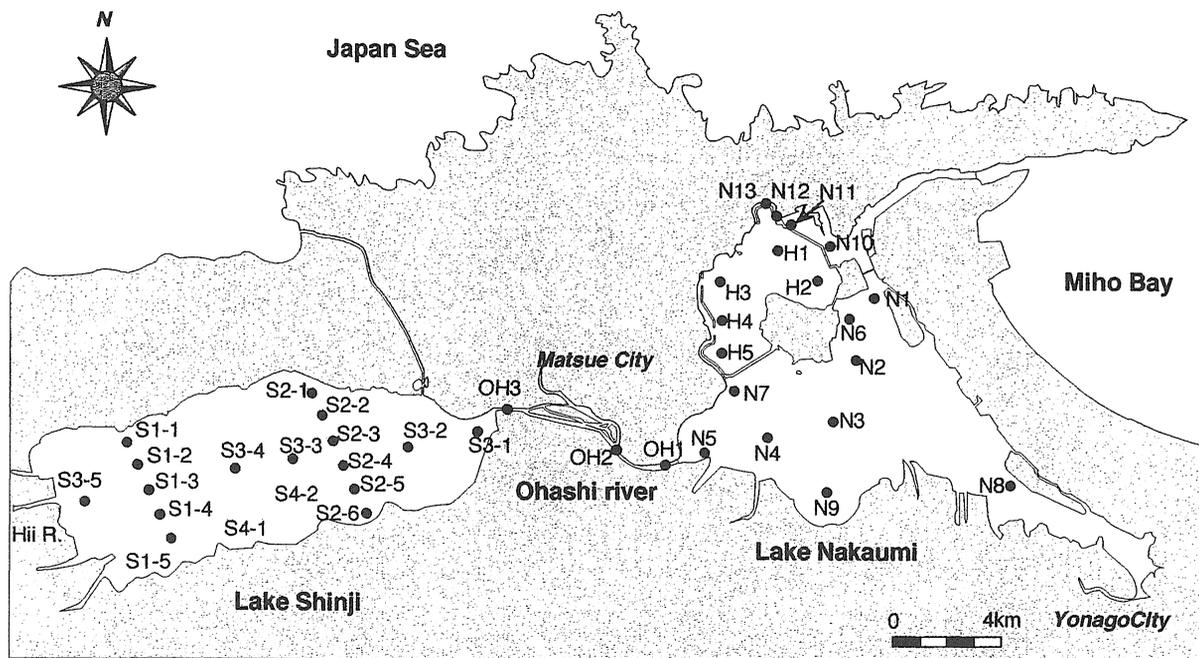


図2. 宍道湖・中海における調査地点 (1997～1998年).  
Fig.2. Survey points in Lake Shinji and Lake Nakaumi, 1997-1998.

表2. 宍道湖・中海における調査地点数と表層水質データレンジ.

Table 2. Number of survey points and ranges of surface water quality data.

Date	Time	Number of survey points*				Weather	W.Temp(°C)		Salinity(psu)		Chl-a(mg/m <sup>3</sup> )	
		SJ	OH	NU	HJ		Min	Max	Min	Max	Min	Max
1997/10/13	9:30-11:45	12				fine	17.0	18.6	0.5	1.2	15.5	33.9
1997/11/11	10:45-12:00		4			cloudy	13.6	15.7	17.5	18.5	3.3	7.6
1997/12/4	12:00-14:40		5	1		cloudy	8.9	11.6	2.3	16.2	7.0	27.8
1998/3/3	9:10-11:15	14				fine	6.8	9.2	0.1	1.8	2.9	7.6
1998/3/16	10:15-14:50			5		cloudy	9.0	9.2	14.4	14.9	9.7	22.8
1998/4/10	14:45-7			4		fine	13.4	14.6	11.5	14.3	4.6	7.7
1998/4/26	9:45-13:55	1	3	3		cloudy	17.6	19.3	1.8	13.1	8.2	35.0
1998/5/27	8:20-12:30			5		fine	21.9	22.3	13.9	14.2	4.8	10.2
1998/6/4	daytime			2		cloudy	21.0	21.2	16.3	18.5	8.9	13.9
1998/6/24	9:00-15:20	7	2	4		cloudy	22.1	23.7	2.3	17.5	7.2	15.7
1998/6/3	9:00-12:5			5		fine	28.8	29.1	17.2	17.3	7.0	9.4
1998/6/4	14:00-14:50			4		cloudy	29.9	31.0	18.2	18.7	4.9	7.2
1998/10/6	daytime			2		cloudy	23.4	23.9	11.1	13.6	16.2	34.0
1998/10/27	8:00-12:20	4	2	5		rainy	16.6	18.8	0.6	8.1	7.7	43.3
1998/10/29	7:30-14:30	3	1	4		fine	18.3	19.9	1.4	7.9	6.2	19.7
Total		41	8	37	16		6.8	31.0	0.1	18.7	2.9	43.3

\*SJ : Lake Shinji ; OH : Ohashi River ; NU : Lake Nakaumi ; HJ : Horjo area

### 宍道湖・中海における鉛直Chl-a濃度分布の特徴

#### 宍道湖・中海の鉛直Chl-a濃度分布形状

図4は宍道湖・中海で測定した鉛直のChl-a濃度の全データである。これより水域によって鉛直Chl-a濃度分布の形状は様々であるが、大局的に見ると4種類のパターンに分けることができることがわかった。即ち、1) 表層から湖底に向かって徐々にChl-a濃度が増加するパターン (以下、下層ピーク型と呼ぶ)、2) 表層から湖底に向かって徐々にChl-a濃度が減少するパターン (以下、上層ピーク型と呼ぶ)、3) 亜表層にChl-a濃度のピークが存在するパターン (以下、

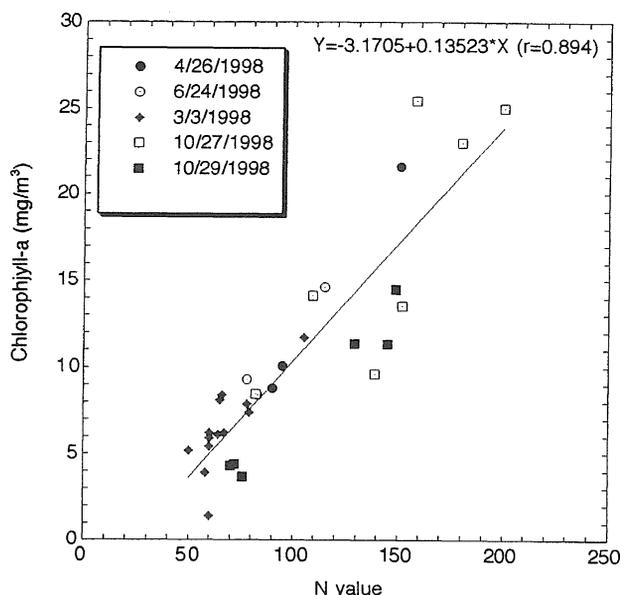


図3. N値とChl-a濃度の関係.

Fig.3. Relationship between N value and chlorophyll-a.

亜表層ピーク型と呼ぶ)、4) 表層から湖底までChl-a濃度がほぼ均一な分布 (以下、均一型と呼ぶ) である。このうち宍道湖では下層ピーク型及び均一型が同程度の頻度、大橋川ではほぼすべてが均一型、中海では上層ピーク型と亜表層ピーク型が同程度、本庄では下層ピーク及び均一型が比較的多かった。

従来、宍道湖では表層に比べて下層の方がChl-a濃度が高く (橋谷ほか, 1991; 國井, 1996)、中海では

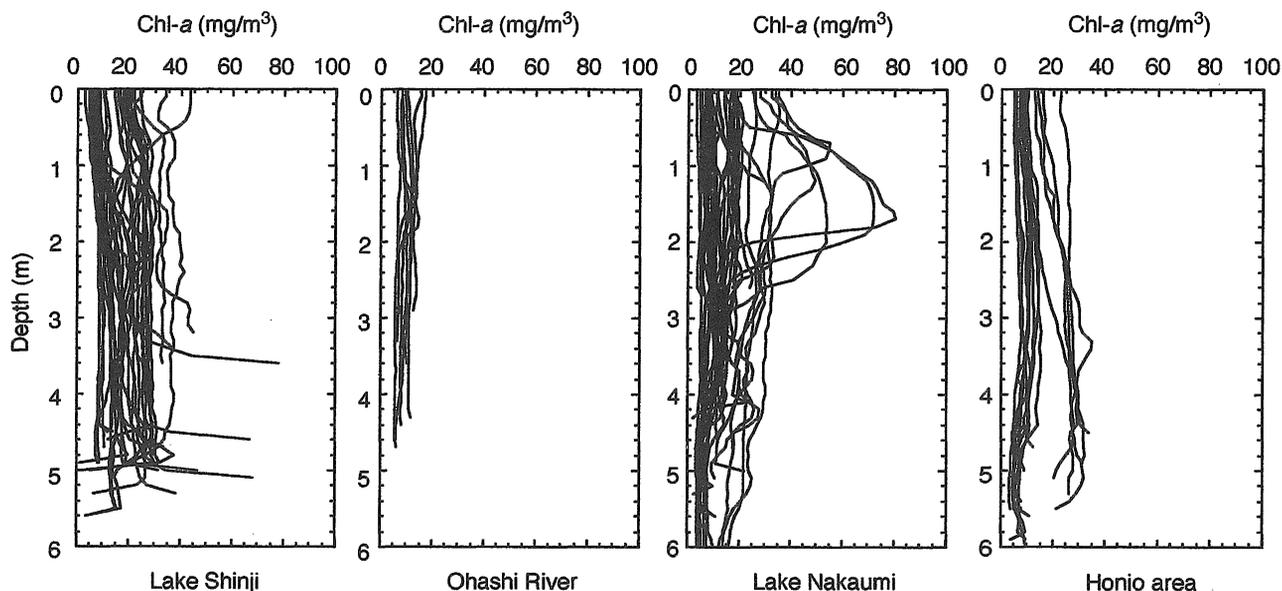


図4. 宍道湖、大橋川、中海及び本庄工区における鉛直 Chl-a 濃度分布。

Fig.4. Vertical chlorophyll-a profiles in Lake Shinji, Ohashi river, Lake Nakaumi and Honjo area.

上層に Chl-a 濃度ピークが見られる傾向が指摘されている (近藤ほか, 1994)。これらの研究ではいずれも水深 0.5 ~ 1m 間隔で採水した試料に基づく結果であったが、今回の水深 0.1m 間隔の細かい試料でも同様な結果が得られた。以上のことから宍道湖・中海における鉛直 Chl-a 濃度分布は数 10cm オーダーの微細な構造よりも 1m オーダーの比較的大きな構造の方が重要であると考えられた。

#### 鉛直の Chl-a 濃度と塩分及び水温の関係

図5は宍道湖・中海における典型的な Chl-a 濃度と塩分の鉛直分布を示している。また、図6は宍道湖・中海における各調査日の水深別の Chl-a 濃度と塩分及び水温の相関係数を示す。図5から塩分の分布は Chl-a 濃度の分布とよく対応しており、特に中海では水深 5m 付近の塩分躍層で Chl-a 濃度が急激に低くなっていることがよくわかる。図6でも中海はほとんどの日で塩分と Chl-a 濃度の相関が高い。中海における塩分と Chl-a 濃度の関係は近藤ほか (1994) がすでに指摘しており、今回もこれを支持する結果であった。

一方、宍道湖では中海のような顕著な塩分躍層は見られない。また鉛直の塩分及び水温と Chl-a 濃度の相関も中海と比較して悪い。従って今回の結果に限れば宍道湖においては塩分や水温が Chl-a 濃度の制限要因であるとは考えにくい。

以上のような宍道湖・中海における Chl-a 濃度と塩分及び水温の関係の違いは、宍道湖・中海の光環境や植物プランクトンの種類等に起因すると考えられ、

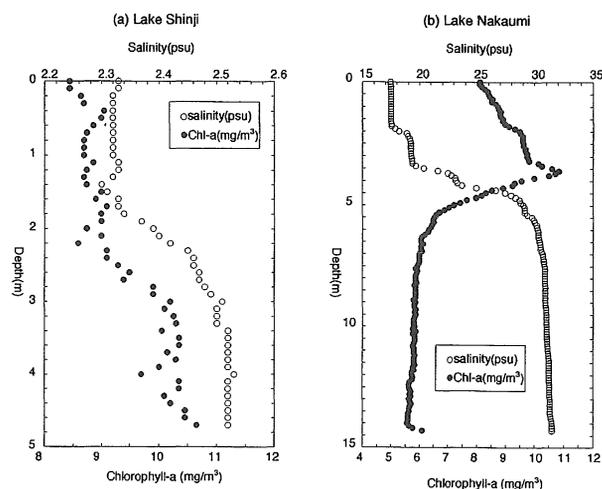


図5. 宍道湖・中海における典型的な Chl-a 濃度と塩分の鉛直分布。

Fig.5. Typical profiles of chlorophyll-a and salinity in Lake Shinji and Lake Nakaumi.

今後植物プランクトン組成調査も含めた鉛直 Chl-a 濃度調査が期待される。

#### 宍道湖・中海における表層 Chl-a 濃度と有光層内積算クロロフィル a 現存量の関係

図7は宍道湖・中海における表層 Chl-a 濃度と有光層内積算クロロフィル a 現存量 (以下有光層 Chl-a と呼ぶ) の関係を示している。ここでいう有光層とは「水中の植物プランクトンが光合成を行うために十分な光が届く範囲の層」のことである。有光層の下限に

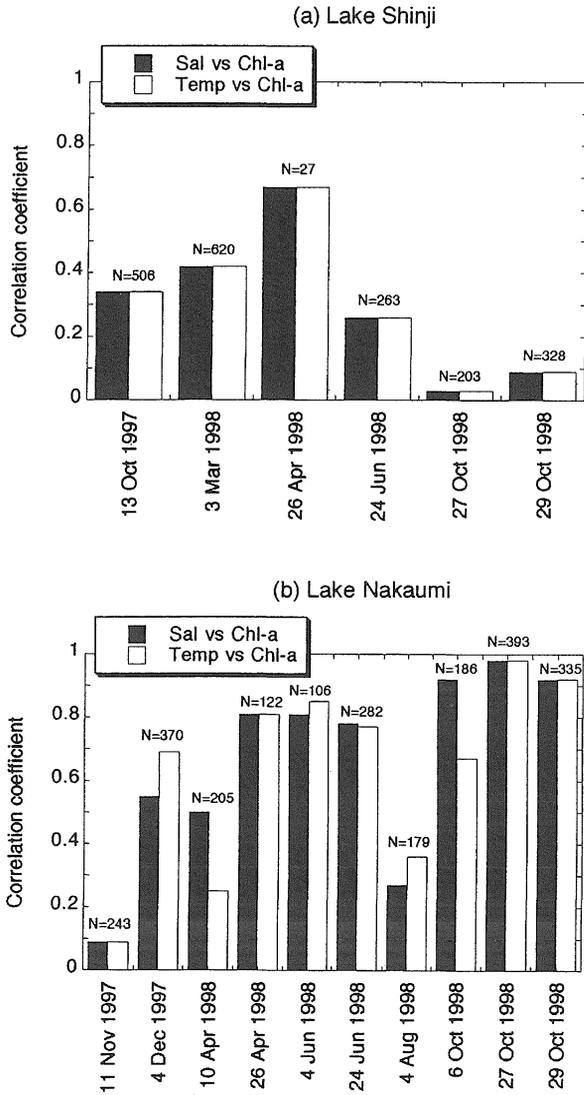


図6. 宍道湖・中海における鉛直の、塩分と水温及びChl-a濃度の相関係数。  
 Fig.6. Correlation coefficient between vertical salinity, temperature and chlorophyll-a in Lake Shinji and Lake Nakaumi.

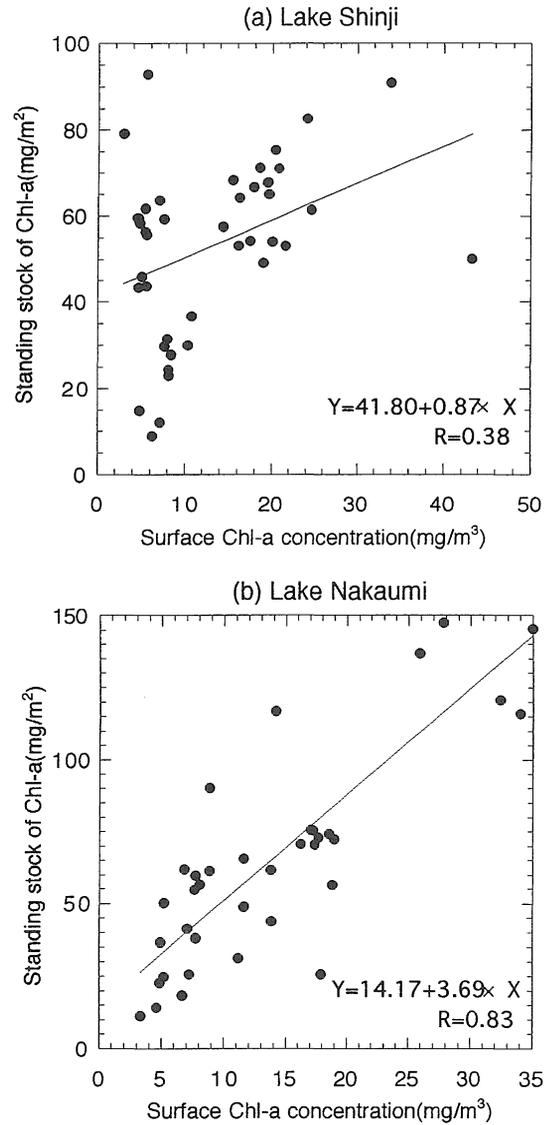


図7. 宍道湖・中海における表層Chl-a濃度と有光層Chl-a濃度の関係。  
 Fig.7. Relationship between surface chlorophyll-a and standing stock in Lake Shinji and Lake Nakaumi.

については、一般に「水面直下の照度を100%としたときの1%照度に達する深度」に相当すると言われていた。従ってここでは有光層の下限を相対照度1%の深度と仮定し、宍道湖・中海において実測した相対照度データ及び鉛直Chl-a濃度データを使って、有光層Chl-aを求めた。図7の縦軸はその積算値である。

図7 (b) によると中海における表層Chl-a濃度と有光層Chl-aの関係は、直線的であった。これは、前述したように中海の鉛直Chl-a濃度分布は塩分躍層の影響で上層にChl-a濃度ピークがあり、表層Chl-a濃度が高ければ塩分躍層ではほぼ区切られる有光層範囲の積算Chl-a量も多いという構造が崩れにくいためだと考えられる。一方図7 (a) によると宍道湖で

は、表層Chl-a濃度が高くなるほど有光層Chl-aが高くなる傾向があるのは中海と同様であるが、両者の相関( $r=0.38$ )は中海ほど良くなかった。宍道湖の鉛直Chl-a濃度分布は下層ピーク型が比較的多く、中海のように塩分躍層によって制限されないため、表面から湖底までChl-a濃度分布は比較的複雑な構造をしている。また湖岸と沖の湖底地形が大きく異なること等が宍道湖の表層Chl-a濃度と有光層Chl-aの関係を複雑にしている理由としてあげられ、宍道湖については今後さらに詳細に両者の関係を調べていく必要があると考えられた。

## ま と め

衛星が観測可能な表層 Chl-*a* 濃度と有光層 Chl-*a* の関係を求めることを目的として、宍道湖・中海において多くの鉛直 Chl-*a* 濃度データを取得した。本論文はこのデータを使用して、宍道湖・中海の鉛直 Chl-*a* 濃度分布の特性や表層 Chl-*a* 濃度と Chl-*a* の関係を調べた。その結果、以下のようなことがわかった。

- 1) 宍道湖中海での鉛直 Chl-*a* 濃度分布は以下のような、4つの典型的な分布パターン（下層ピーク型、上層ピーク型、亜表層ピーク型及び均一型）を示した。このうち宍道湖では下層ピーク型及び均一型、大橋川では均一型、中海では上層ピーク型と亜表層ピーク型、本庄では下層ピーク型及び均一型が比較的多かった。
- 2) 宍道湖・中海における表層 Chl-*a* 濃度と有光層 Chl-*a* の関係は、中海では高い直線相関があった。一方宍道湖では両者の関係は複雑で今回の結果だけではわからなかった。

今後はさらに鉛直 Chl-*a* 濃度データを蓄積し表層 Chl-*a* 濃度と有光層 Chl-*a* の関係を経験的に明らかにする予定である。また一方では中海・宍道湖における水中光学的なアルゴリズムの構築または外洋に用いられているアルゴリズムの検証を行う必要がある。

謝辞：本研究で使用した水中投下式クロロフィル測定装置は平成9年度文部省科学研究費補助金基盤研究(B)(2)「中海本庄工区の生物多様性と生態系調査」(課

題番号 09480112) により購入したものである。また現地調査にあたっては島根大学総合理工学部の大学院生や学部生をはじめ、多くの方々の手伝っていただいた。関係各位に深くお礼申し上げます。

## 引用文献

- 國井秀伸 (1996) 宍道湖湖心における水深別クロロフィル量と光合成速度の季節変化 (予報). LAGUNA (汽水域研究), 3:97-101.
- 近藤邦男・清家泰・橋谷博 (1994) 汽水湖中海における栄養塩類および植物プランクトンの鉛直分布を支配する塩分躍層の役割. 陸水学雑誌, 55:47-60.
- 大谷修司 (1997) 宍道湖・中海水系の植物プランクトンの種類組成と経年変化. 沿岸海洋研究, 35:35-47.
- 作野裕司・松永恒雄・中山大介・六川修一・高安克巳・國井秀伸・中村幹雄・山室真澄 (1999) SPOT/HRV データによるアオコ発生時の宍道湖表層クロロフィル濃度分布の推定. 日本リモートセンシング学会誌, 19:132-148.
- 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.
- 松永恒雄・作野裕司・中山大介・高安克巳・國井秀伸・中村幹雄・山室真澄 (1998) 宍道湖・中海の航空機 MSS 観測 - 平成9年8月と10月 -. 日本リモートセンシング学会第24回学術講演論文集: p131-132.