

## 多時期 ASTER データを用いた 宍道湖・中海の濁度・クロロフィル a 濃度推定

作野裕司<sup>1</sup>・山本正智<sup>1</sup>・吉田武史<sup>1</sup>・松永恒雄<sup>2</sup>  
古津年章<sup>3</sup>・下舞豊志<sup>3</sup>・高安克己<sup>5</sup>

### Estimation of turbidity and chlorophyll-a concentration in Lakes Shinji and Nakaumi using multi-date ASTER data

Yuji Sakuno<sup>1</sup>, Yamamoto Masatomo<sup>1</sup>, Yoshida Takeshi<sup>1</sup>, Tsuneo Matsunaga<sup>2</sup>  
Toshiaki Kozu<sup>3</sup>, Toyoshi Shimomai<sup>3</sup>, Katsumi Takayasu<sup>4</sup>

**Abstract:** The high-resolution satellite sensor “ASTER” should be a useful tool for the monitoring of water quality in Lake Shinji and Lake Nakaumi. However, the method for extracting water quality information from ASTER data has not been established. This study presents a model for estimating turbidity and chlorophyll-a concentration (Chl-a) in these lakes using ASTER/in-site data sets. The validity of the model was checked using data from water quality surveys conducted simultaneously with satellite observation in these lakes. Consequently, the feasibility of quantifying turbidity and Chl-a with sufficient accuracy was shown using data of bands 1, 2, and 3 of ASTER. However, an accurate result could not be obtained without field validation of the model.

**Key words:** ASTER, turbidity, chlorophyll-a, monitoring

### はじめに

宍道湖・中海は、海と陸の接点にある汽水湖で、水産資源が豊富な水域である。しかし、近年宍道湖ではアオコ、中海では赤潮に代表される富栄養化が深刻で、しばしば水産資源にも被害を与えている。このような富栄養化のメカニズムを解明するための第一歩として、植物プランクトンの分布を知ることが極めて重要なことである。しかし、宍道湖・中海のような広域で水質の時間変化が激しい汽水域では、従来の船舶調査のみでは、広域の瞬時的な分布

を知ることは難しかった。そこで、衛星や航空機を使ったリモートセンシング技術が、汽水域のモニタリングツールとして、期待されている。

以上のような背景から筆者らは、島根県東部に位置する宍道湖・中海をテストサイトとして、1995年から継続的に衛星リモートセンシングを用いた汽水域の水温・水質推定の可能性について検討を行ってきた(例えば作野ほか, 2001)。また、衛星センサ ASTER データを使った汽水域の水温・濁度推定についてもすでいくつかの報告を行っている(例えば山本ほか, 2002)。しかし、これらはデータ数も少

<sup>1</sup> 広島大学大学院工学研究科 Graduate school of Engineering, Hiroshima University, Higashihiroshima, 739-8527, Japan

<sup>2</sup> 国立環境研究所 National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, 305-0053, Japan

<sup>3</sup> 島根大学総合理工学部 Interdisciplinary Faculty of Science and Engineering, Shimane University, Shimane University, Matsue, 690-0823, Japan

<sup>4</sup> 島根大学汽水域研究センター Research Center for Coastal Lagoon Environments, Shimane University, Matsue, 690-0823, Japan

<sup>5</sup> 島根大学 Shimane University, Matsue, 690-8504, Japan

表 1. ASTER/VNIR センサの諸元  
Table 1. Characteristics of ASTER/VNIR sensor

Launch	Dec.1999
Resolution	15m
Swath	60km
Quantization	8bit
Band	Band1:0.52-0.60 $\mu$ m Band2:0.63-0.69 $\mu$ m Band3:0.76-0.86 $\mu$ m

なく、必ずしも ASTER データを使った水質推定法が確立したとはいえない。そこで本研究ではさらに多くの衛星/現場データセットを使って宍道湖・中海の濁度・クロロフィル a 濃度 (以下 Chl-a と略す) 推定を行い、さらに様々なデータ処理段階 (プロダクト) のデータを使って結果を比較した。

## 方 法

### 1. 使用衛星データ

研究に使用した衛星データは、日本とアメリカが共同開発した衛星 Terra (2000 年 2 月 24 日より観測開始) に搭載された ASTER と呼ばれるセンサーの可視・近赤外 (Visible and Infrared, 以下 VNIR と呼ぶ) データである。ASTER センサの諸元は表 1 に示されるとおりである。同センサーの VNIR データの最も大きな特徴の一つは、Landast/TM (解像度: 30 m), SPOT/HRV (解像度: 20 m) に比べて高解像度 (解像度 15 m) であることである。

### 2. ASTER データによる濁度及び Chl-a 推定法

ASTER データによる濁度及び Chl-a 推定法はまだ確立されていない。ただし濁度については、山本ほか (2002) はすでに宍道湖・中海において統計的な方法を用いて ASTER/VNIR の単バンドデータと現場観測した濁度との単回帰分析を行い、それらの相関を調べている。今回は、このような単バンドによる単回帰分析だけでなく、ASTER データの特徴を生かした複数バンドによる重回帰分析による濁度及び Chl-a 推定も試みた。また、衛星データから濁度や Chl-a を推定する際には、前処理として大気補正が重要であるが、補正計算が複雑なため、一般に簡易的な大気補正法 (暗画素法) (山本ほか, 2002) が使われる。今回は、この「暗画素法により大気成分を簡易除去したレベル 1b データ、及びすでに大気補正済みの ASTER プロダクトであるレベル 2b01 (放射輝

度), レベル 2b05 (反射率)」と「現場データ」との相関解析により宍道湖・中海の Chl-a 推定モデルを作成し、筆者らが船舶で取得した衛星/現場データセットを使ってそのモデルを検証する。

### 3. モデル作成に使用した衛星/現場データセット

濁度・Chl-a 推定モデル作成に使用した ASTER センサデータは同センサーが 2000 年 8 月～2003 年 8 月の期間に宍道湖・中海を撮影した 6 日分である。一方、現場データは同日の午前 11 時に国土交通省が宍道湖湖心 (N 35° 26' 50", E 132° 57' 46"), 中海湖心 (N 35° 27' 46", E 133° 11' 38"), 米子湾 (N 35° 25' 51", E 133° 18' 12") でタワー観測している上層 (水面下 1 m) の濁度及び Chl-a データを用いた (図 1, 表 2)。このうち、濁度の観測は宍道湖で水没型積分球法 (W95 型), 中海・米子湾では水没型積分球法 (KW-2) で行われている。また、Chl-a は現場蛍光光度法が使われる。宍道湖・中海における国土交通省タワーデータの精度や特徴については、野中ほか (2003) を参照されたい。

### 4. モデルの検証に使用した現場データ

前述した濁度・Chl-a 推定モデルの妥当性を検証するために、筆者らが ASTER 撮影日と同期して宍道湖・中海で行った現場データを使用した。具体的には図 1 に●で示した測点において濁度 Chl-a の計測は 2002 年 5 月 2 日 (4 地点), 2002 年 9 月 14 日 (6 地点) に調査が行われた。小型船舶から水質計 (濁度測定: Horiba 社製, U-20, 広島大学工学部所有; Chl-a 測定: アレック電子社製, ACL 1151-DK, 島根大学汽水域研究センター所有) を使って測定した。このようにして得られた現場データは表 3 に示されるとおりである。ただし、濁度データの単位は NTU であり、モデル作成に使用したデータの単位 (度 = mg/l) と異なるため、NTU の値に 0.7 を掛けて両者の単位を合わせた。ただし、モデル作成に使用したタワーデータと検証に使用したデータとは厳密には水質測定時刻、測定水深に若干の違いがあったが、今回は両者をほぼ同じ値であると仮定して特別なキャリブレーション処理を行わなかった。

## 結果及び考察

### 1. ASTER データと現場濁度・Chl-a の関係

まず、ASTER 単バンドデータと現場データとの単回帰分析結果を述べる。表 4 は「処理プロダクト別

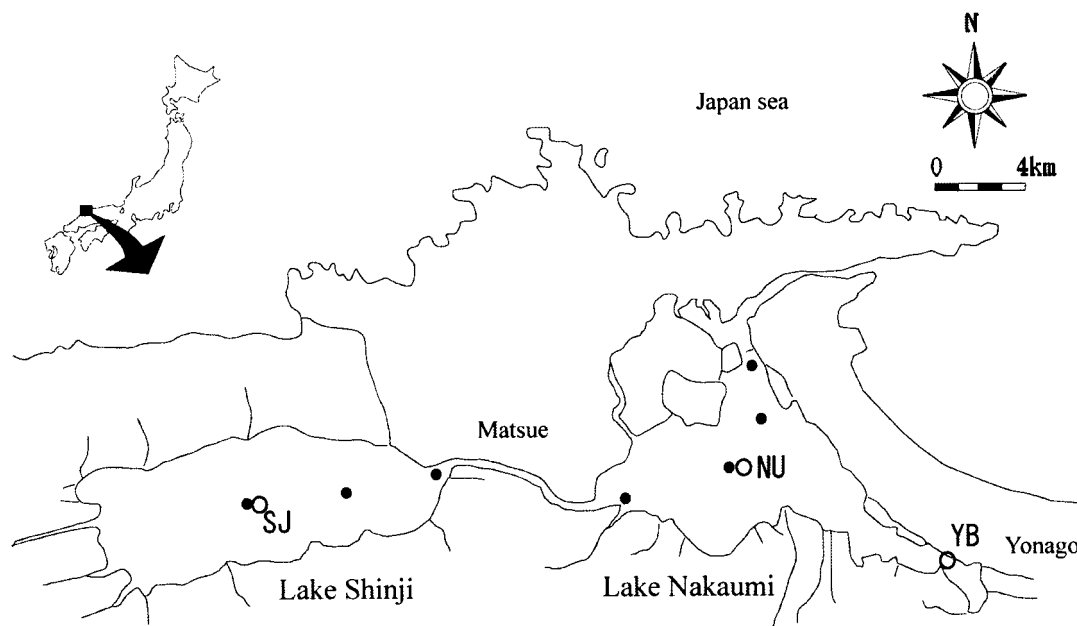


図 1. 宍道湖・中海の現場データ測点.

○がモデル作成, ●がモデルの検証に使用したデータの測点.

Fig. 1. Sampling points of in-situ data in Lake Shinji and Lake Nakaumi.

○: Points of the data used for model creation, ●: Points of the data used for validation of the model

表 2. モデル作成に使用した宍道湖・中海の濁度及び Chl-a データ. データは国土交通省のタワー観測値 (午前 11 時) を使用

**Table 2.** In-situ turbidity and Chl-a data used for model creation in Lake Shinji and Lake Nakaumi. The data is the tower observation value of the Ministry of Land, Infrastructure and Transport.

Date	Station	Turb.(mg/l)	Chl-a (µg/l)
2000/8/7	NU	8.0	9.0
2002/5/2	NU	13.0	14.0
	YB	18.0	10.0
2002/8/22	NU	6.0	12.0
2002/9/14	NU	6.0	31.0
2002/10/9	SJ	1.0	4.3
	NU	4.0	8.0
2003/8/23	SJ	9.0	6.6
	NU	4.0	4.0
	YB	10.0	8.0
Ave.		7.9	10.7
	SD	4.9	7.8

NU: L. Nakaumi; SJ: L. Shinji; YB: Yonago Bay

の ASTER 単バンドデータ」と「現場濁度及び現場 Chl-a」の相関関係を示している. これより, 濁度は「レベル 1b のバンド 3 (近赤外)」と最も相関が高く ( $R=0.88$ ), この関係を図 2 に示す. また「レベル 2 の各バンド」と濁度の関係も, 相関係数が 0.5~0.6 程度の

表 3. モデルの検証に使用した宍道湖・中海の濁度及び Chl-a データ

**Table 3.** Turbidity and Chl-a data in Lake Shinji and Lake Nakaumi which were used for verification of a model

Date	Station	Turb. (mg/l)	Chl.a (µg/l)
2002/5/2	St1	18.2	7.3
	St2	5.6	13.4
	St3	6.3	10.7
	St4'	5.6	13.8
2002/9/14	SJ01-3	7.7	8.3
	SJ01-2	8.4	14.0
	SJ01-1	5.6	2.2
	NU3	6.3	11.8
	NU2	8.4	6.6
	NU1	6.3	8.8

正の相関が認められる. 一方, Chl-a はどのレベルの ASTER データも相関がほとんどないが, 他のデータと比べ比較的相関の高いレベル 2B05 のバンド 1 では, 相関係数が 0.44 と弱い負の相関がある. これは, 440 nm 付近にある Chl-a による光吸収の影響だと思われる.

次に, ASTER 複数バンドデータと現場データとの重回帰分析結果が行われた. その結果, 「重回帰分析によって推定された ASTER の複数バンドによる

表4. ASTER 単バンドデータと現場濁度・Chl-a の相関係数

Table 4. Correlation coefficient between ASTER single band data, and turbidity and Chl-a

	Level 1b			Level 2B01			Level 2B05		
	Band1	Band2	Band3	Band1	Band2	Band3	Band1	Band2	Band3
Turbidity	0.55	0.24	0.88	0.56	0.63	0.64	0.49	0.61	0.58
Chl-a	0.05	0.04	0.31	-0.28	-0.18	0.03	-0.44	-0.21	-0.16

N=10

表5. 重回帰モデルにより推定された ASTER 濁度と現場濁度の相関係数

Table 5. Correlation coefficient between ASTER turbidity estimated by multi regression model, and in-situ turbidity

Bands	Level 1b				Level 2B01				Level 2B05			
	1,2	1,3	2,3	1,2,3	1,2	1,3	2,3	1,2,3	1,2	1,3	2,3	1,2,3
Turbidity	0.94	0.89	0.91	<b>0.96</b>	0.74	0.64	0.66	0.74	0.68	0.58	0.61	0.68
Chl-a	0.06	0.39	0.34	0.53	0.72	0.64	0.43	0.73	0.88	0.73	0.25	0.89

N=10

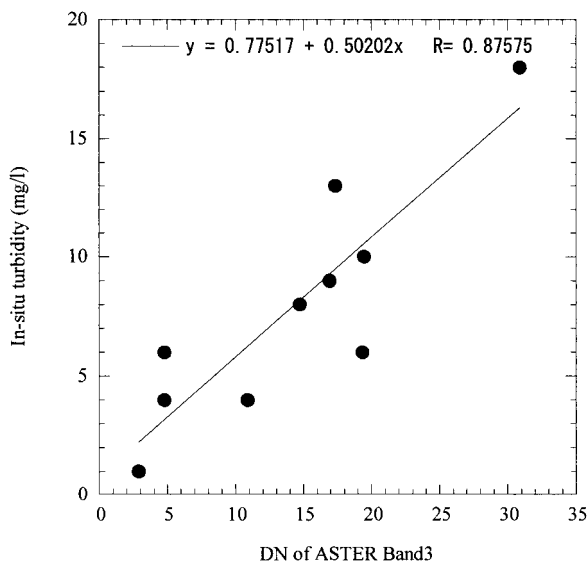


図2. ASTER Band 3 と濁度の関係

Fig. 2. Relationship between ASTER Band 3 and in-situ turbidity

濁度・Chl-a データ」と「現場濁度及び現場 Chl-a」の相関は表5に表されるとおりであった。これより、濁度は「レベル1bのバンド1, 2, 3の3バンドを使って推定した濁度」と最も相関が高く( $R=0.96$ )、単バンド推定と比べ推定精度は高い。また表5より、ASTER/VNIRのいずれのバンド組み合わせでも濁度との相関係数が0.9以上と同様に高いことがわかる。最も現場濁度との相関がよかった関係は、「レベル1bのバンド1, 2, 3の3バンドを使って推定した濁度」である(図3)。これより、全体としての推定濁度と現場濁度の相関が高く、かつ各日ごとでも相関が高いことがわかる。一方、Chl-aは、「レベル2B05のバンド1, 2及びバンド1, 2, 3」の組み合わせで

相関係数0.9と単バンドの推定と比べかなり高い相関が得られた。しかし、濁度推定で最も相関が高かったレベル1bでは、どのバンド組み合わせでも高い相関は得られなかった。Chl-a推定結果のうち、最も相関が高かった結果は図4に示される。

以上の結果を総合すると、ASTERによる濁度、Chl-a推定式としては、以下の式が最も現場に近い値を得ることが可能であると考えられる。

&lt;濁度推定式&gt;

$$\text{Turbidity}_{12(L1B)} = 2.38 + 1.53 \text{ Band 1} - 1.74 \text{ Band 2} \quad (1)$$

$$\text{Turbidity}_{123(L1B)} = 1.98 + 1.00 \text{ Band 1} - 1.24 \text{ Band 2} + 0.2513 \text{ Band 3} \quad (2)$$

&lt;Chl-a推定式&gt;

$$\text{Chl-a}_{12(L2B05)} = 93.57 - 1.65 \text{ Band 1} + 1.63 \text{ Band 2} \quad (3)$$

$$\text{Chl-a}_{123(L2B05)} = 90.45 - 1.65 \text{ Band 1} + 1.42 \text{ Band 2} + 0.17 \text{ Band 3} \quad (4)$$

ここで、TurbidityとChl-aはそれぞれ濁度とChl-a、BandiはASTER/VNIR各バンドのデジタル値、L1B、L2B05はそれぞれ、ASTERレベル1B、レベル2B05プロダクトのデータであること示している。ただし、濁度推定式のBandの値は暗画素を差し引いた後のデジタル値である。

## 2. ASTER データによる濁度・Chl-a推定モデルの検証

図5に、式(2)から推定された濁度データ(推定濁度データ)と、モデル作成時とは別の地点で得られた現場濁度データの関係を示す。両者の残差誤差(差の標準偏差)は5.4 mg/lとかなり大きい、全体

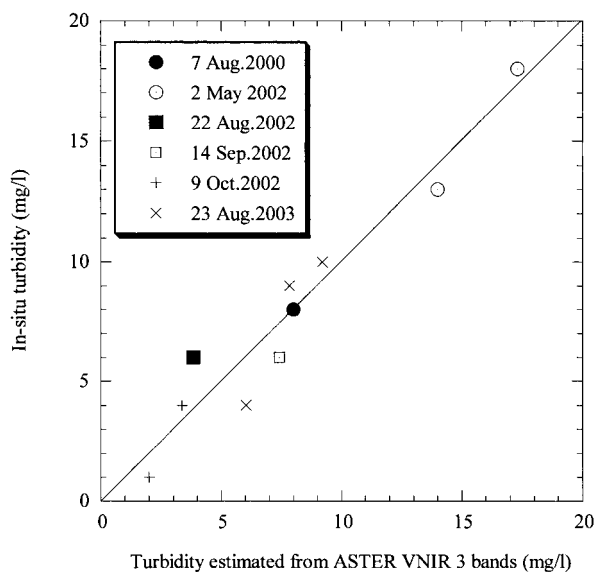


図 3. ASTER 3 バンドを使った重回帰モデルにより推定された ASTER 濁度と現場濁度の関係  
**Fig. 3.** Relationship between ASTER turbidity estimated by multi regression model using ASTER 3 bands, and in-situ turbidity

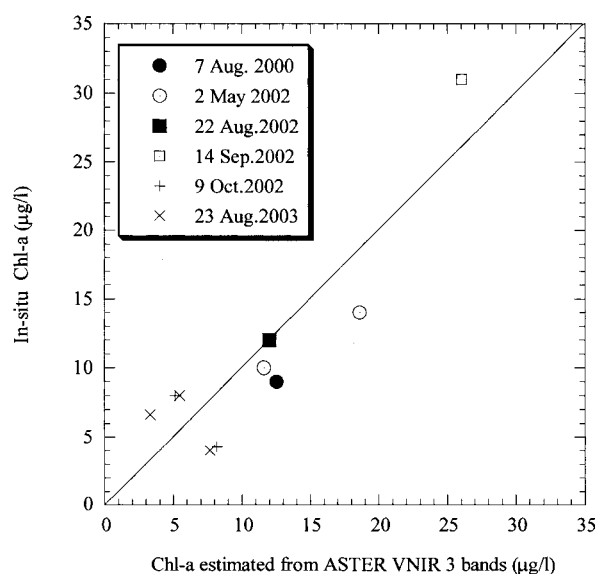


図 4. ASTER 3 バンドを使った重回帰モデルにより推定された ASTER Chl-a と現場 Chl-a の関係  
**Fig. 4.** Relationship between ASTER Chl-a estimated by multi regression model using ASTER 3 bands, and in-situ Chl-a

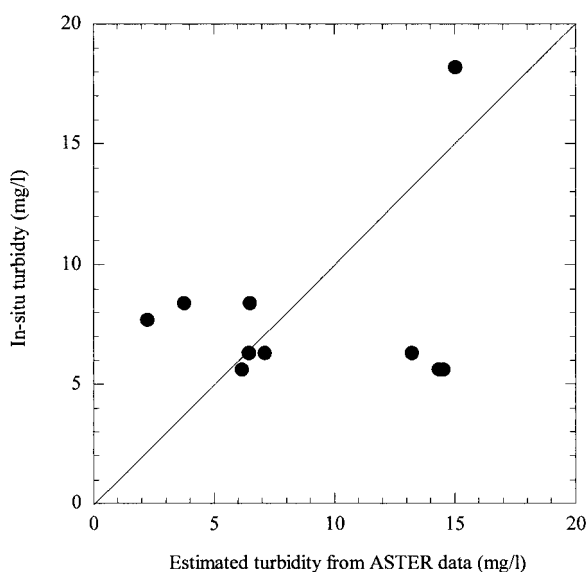


図 5. 式(2)により推定された ASTER 濁度と現場濁度 (船舶データ) の関係  
**Fig. 5.** Relationship between ASTER turbidity estimated from equation (2), and in-situ turbidity (ship data)

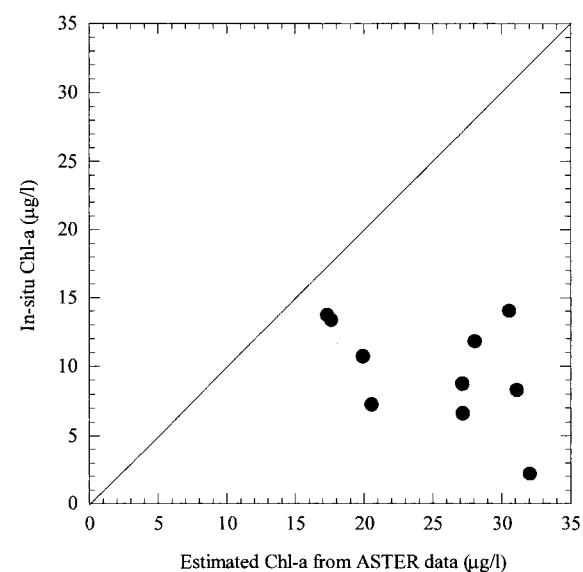


図 6. 式(4)により推定された ASTER Chl-a と現場 Chl-a (船舶データ) の関係  
**Fig. 6.** Relationship between ASTER Chl-a estimated from equation (4), and in-situ Chl-a (ship data)

的に検証濁度データは推定濁度データの絶対値に近い値であることがわかる。

一方、図 6 に、式(4)から推定された Chl-a データ (推定 Chl-a データ) と、モデル作成時とは別の地点で得られた現場 Chl-a データの関係を示す。両者の残差誤差 (差の標準偏差) は  $8.2 \mu\text{g/l}$  とかなり大きく、推定 Chl-a データと現場濁度データの絶対値も

大きく異なっている。

濁度、Chl-a 推定モデルの検証において、モデルで得られた推定データと現場データの値が大きくばらつく理由は、1) 検証データがモデルに使用したデータとキャリブレーションがうまく行われていなかった (データの質が異なる)、2) モデル作成に使用したデータは主に湖心部であり、湖全体のモデルとして

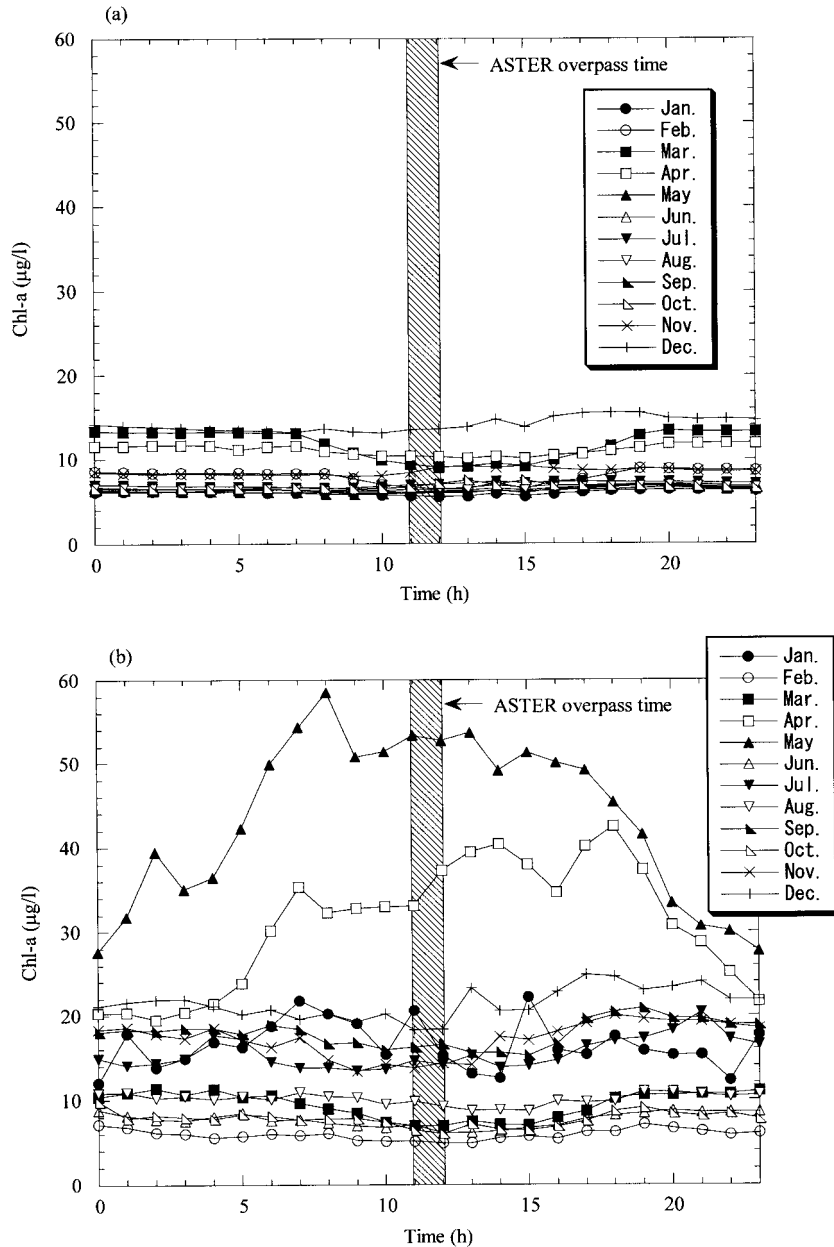


図7. 宍道湖 (a)・中海 (b) の湖心における各月の Chl-a の平均時間変化  
**Fig. 7.** Average time change of Chl-a in every month at the center of Lake Shinji (a) and Lake Nakaumi (b)

は適さなかった, 3)現場データが取得された時間が衛星通過時とは異なること等があげられる. このうち, 1)については, 両者のデータセットを蓄積し, キャリブレーションの検討を行い, 再度検証を行いたい. 2)については, 常時得られるデータが湖心と米子湾のデータしかないことから, 現時点で説明は難しいと思われる. 3)については, 以下に若干の検討を行った.

図7は国土交通省がタワーで観測している宍道湖湖心 (a), 中海湖心 (b) の Chl-a の時間変化 (それぞれの時間における毎月の平均) を示している.

ASTER 通過は 11 時前後である. これらの図から, まず宍道湖はどの月においても中海に比べ Chl-a の時間変化が極めて小さいことがわかる. これに対し中海は 4 月, 5 月における Chl-a の時間変化が大きく, 5 月では夜間と昼間で 2 倍程度 (約  $30 \mu\text{g/l}$ ) の差があることがわかる. 中海と宍道湖の違い, あるいは中海の季節による時間変化の違いは植物プランクトンの種の違いに起因していると思われるが, その詳細については資料が少ないため, 今回は議論することができなかった. ただし, 日中のみに限定すると, どの季節においても両湖とも Chl-a の時間変動

は比較的小さく、検証データの取得時間の問題は小さいと考えられた。

## ま と め

今回は ASTER/現場データセットを使って、宍道湖・中海における表層の濁度・Chl-a 分布推定を行うためのモデルを提案し、それを筆者らが行った衛星同期調査のデータを使って検証した。その結果、ASTER(レベル 1b)のバンド 1, 2, 3 のデータを使用することにより、宍道湖の濁度・Chl-a を比較的精度よく推定できる可能性が示された。しかし、検証データとモデルで使用したデータの質を合わせることが出来なかったため、引き続き衛星/現場データセットを蓄積し、このモデルの妥当性を検証していく必要がある。

## 謝 辞

本研究は、本研究で使用した ASTER データの一

部は「ASTER データ利用に関する共同研究」により提供されたものである。また現場の水温・濁度データは国土交通省出雲工事事務所から提供していただいた。関係機関に深く感謝する。

## 引 用 文 献

- 1) 野中崇志, 松永恒雄, 梅干野晃, 中山大輔, 瀬戸浩二(2003)宍道湖・中海における国土交通省自動観測水質データの検証, LAGUNA, pp.101-107.
- 2) 作野裕司, 松永恒雄, 六川修一, 高安克己, 國井秀伸, 中村幹雄(2001a)多時期 SPOT/HRV データによる宍道湖表層の一次生産量モニタリング, 日本リモートセンシング学会誌, Vol.21, No.2, pp.141-149.
- 3) 山本正智, 吉田武史, 作野裕司, 松永恒雄(2002) ASTER データを用いた宍道湖・中海の水温・濁度推定(2000~2002年), 日本リモートセンシング学会第 33 回学術講演会論文集, pp.181-182.