

MODIS データを用いた中海の赤潮モニタリング—2004 年

作野裕司¹・江原 亮²・國井秀伸²

Monitoring red tide blooms in Lake Nakaumi, using MODIS data 2004

Yuji Sakuno¹, Ryo Ehara² and Hidenobu Kunii²

Abstract: The MODIS satellite ocean-color sensor, launched in 1999 and again in 2002, has observed the ocean color twice a day. Originally designed to examine plankton and terrestrial vegetation, this sensor is highly sensitive (Quantization: 12 bits). In addition, the sensor has a maximum resolution of 250 m, exceeding the resolution of other, conventional, ocean-color sensors. For Lake Nakaumi, it was assumed that outlines of a red tide would be discernable with a maximum resolution of 250 m. The research incorporated daily MODIS data from April to June 2004, mainly acquired from the Institute of Industrial Science, the University of Tokyo. The red-tide distribution within the lake was determined by comparing the image data with *in-situ* data. As a result, the radiance of MODIS Band 1 (620-670 nm) and surface concentration of chlorophyll-a (Chl-a) during the red tide in the lake were strongly correlated ($r^2=0.84$). Moreover, the area of water where MODIS Chl-a was very high (more than $40 \mu\text{g/l}$), overlapped the area of red tide as observed from a research vessel. We suggest that MODIS data (250 m resolution mode) are effective to investigate the distribution of future red tides in the lake.

Key words: Red tide bloom; Lake Nakaumi; MODIS

はじめに

中海は島根県東部に位置する汽水湖である。2002 年 12 月に中海北部の本庄工区の干拓中止が決定され、現在今後の同水域のあり方について様々な議論がなされている。このような状況にある中海だが、近年赤潮の発生が頻繁となり、富栄養化の進行が懸念されている。赤潮の対策には赤潮分布の把握が重要であることはいうまでもないが、中海の赤潮把握には岸から又は調査船からの目視に頼っているのが現状である。このような広域的・瞬時的な現象の把握は一般にリモートセンシング手法が有効である。筆者らは、これまで SPOT, Landsat, Terra 等の衛星

可視センサデータを用いて宍道湖・中海の水質モニタリング手法を検討してきた(作野ほか, 1996; 作野ほか, 1999; 作野ほか, 2004)。しかし、このような高解像度衛星データはコストがかかり、観測周期が2週間程度で、雲や大気の影響を受けやすく、赤潮の即時把握は現実的ではない等問題があった。従って行政などが赤潮の対策を練るためには赤潮分布をより素早く、広域的に、かつ正確に把握する方法が求められている。そこで、我々は毎日の観測データが無料で入手でき、かつ解像度が比較的高い衛星 Terra 又は Aqua に搭載される MODIS センサの 250 m 解像度データと実測のクロロフィル a 濃度(以下 Chl-a と略す)データを用いて中海の赤潮分布推定

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

² 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

表 1. MODIS の性能.

Table 1. MODIS technical specifications.

Band	Bandwidth (nm)	Spatial resolution
1	620 - 670	250 m
2	841 - 876	
3	459 - 479	500 m
4	545 - 565	
5	1230 - 1250	
6	1628 - 1652	
7	2105 - 2155	
8	405 - 420	
9	438 - 448	1000 m
10	483 - 493	
11	526 - 536	
12	546 - 556	
13	662 - 672	
14	673 - 683	
15	743 - 753	
16	862 - 877	

を試みた。

方 法

1. MODIS センサについて

MODIS は Terra 及び Aqua (1999 年 12 月 と 2002 年 5 月にそれぞれ打ち上げ) と呼ばれる衛星に搭載された中分解能分光放射計である。このセンサは 2330 km の観測幅を持ち、観測周期は 1 日に 1~2 回程度 (Terra/Aqua を合わせて 2~4 回程度) で午前 11 時頃 (Terra) と午後 1 時頃 (Aqua) に観測する。MODIS の観測波長は、解像度の異なる 36 バンドにより構成されている。このうち、海色の指標であるクロロフィル a 濃度 (以下「Chl-a」と略す) の推定に使用されるのは 1 km 解像度のデータである。しかし中海のような狭い水域において 1 km 解像度のデータでは水域内の Chl-a 分布を把握することは困難である。そこで本研究では MODIS センサで最も解像度の良い 250 m 解像度の MODIS データを対象とする。同センサの観測バンドと量子化レベルは表 1 に示すとおりである。

2. MODIS データの大気補正法

海色センサデータを使って Chl-a 推定を行う場合の最近の大気補正法については、岸野ほか(2002)の方法を参考とする。一般に可視・近赤外域では、海

色センサに入射した全放射輝度の 90% 以上が大気散乱光で占められている。センサが受光した放射輝度、 L_T は一般に以下の式で表される。

$$L_T(\lambda) = L_M(\lambda) + L_{AS}(\lambda) + tL_w(\lambda) \quad (1)$$

ここで、 L_M は分子散乱光成分、 L_{AS} はエアロゾル散乱光成分である。 t は「海面-センサ間の大気の拡散透過率」であり、さらに以下の式で求められる。

$$\begin{aligned} t(\lambda) &= t_M(\lambda)t_{oz}(\lambda)t_A(\lambda) \\ &= \exp \left[- \left(\frac{\tau_M(\lambda)}{2} + \tau_{oz}(\lambda) \right) \left(\frac{1}{\cos \theta} \right) \right] \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 t_M はレーリー散乱による透過率、 t_{oz} は大気上層(高度 20 km 付近)のオゾン層の吸収を考慮した透過率、 t_A はエアロゾルの透過率、 τ_M 、 τ_{oz} はそれぞれ大気分子及びオゾンの光学的厚さ、 θ は衛星天頂角である。実際の大気補正を行う場合、 τ_M は経験式等による比較的簡単な計算で、 τ_{oz} は観測値等の参照テーブル等で与えられる。

また式(1)のうち、Chl-a 等の水質と関係がある L_w について解くと、以下の式となる。

$$L_w(\lambda) = \frac{L_T(\lambda) - [L_{AS}(\lambda) + L_M(\lambda)]}{t(\lambda)} \quad (1')$$

海色センサにおける式(1')中の $[L_{AS}(\lambda) + L_M(\lambda)]$ は、通常「 L_M は放射伝達計算により算出し、 L_{AS} は近赤外の L_w を 0 と仮定して、他の波長の L_{AS} を次々に求める」という方法が用いられている。また、簡便な方法としては「1 シーン内の大気状態を一様」と仮定して、清浄な水域の輝度値を差し引く暗画素法 (MacFarlane, 1984) がある。

式(1')で計算される L_w は、水中の情報だけではなく太陽高度や大気の状態によっても変化するので、海色センサの水質推定アルゴリズムには、以下のような正規化海水射出輝度 (normalized water-leaving radiance) nL_w が使われる。

$$nL_w(\lambda) = \frac{L_w(\lambda)}{t_0(\lambda) \cos \theta_0} \quad (3)$$

ここで、 t_0 は「太陽-海面間の透過率」、 θ_0 は「太陽天頂角」である。このうち、 t_0 は式(2)の θ を θ_0 に置き換えれば求めることができる。

式(3)で示した海水射出輝度は、外洋では主に植物プランクトンの持つ Chl-a や懸濁物濃度によって

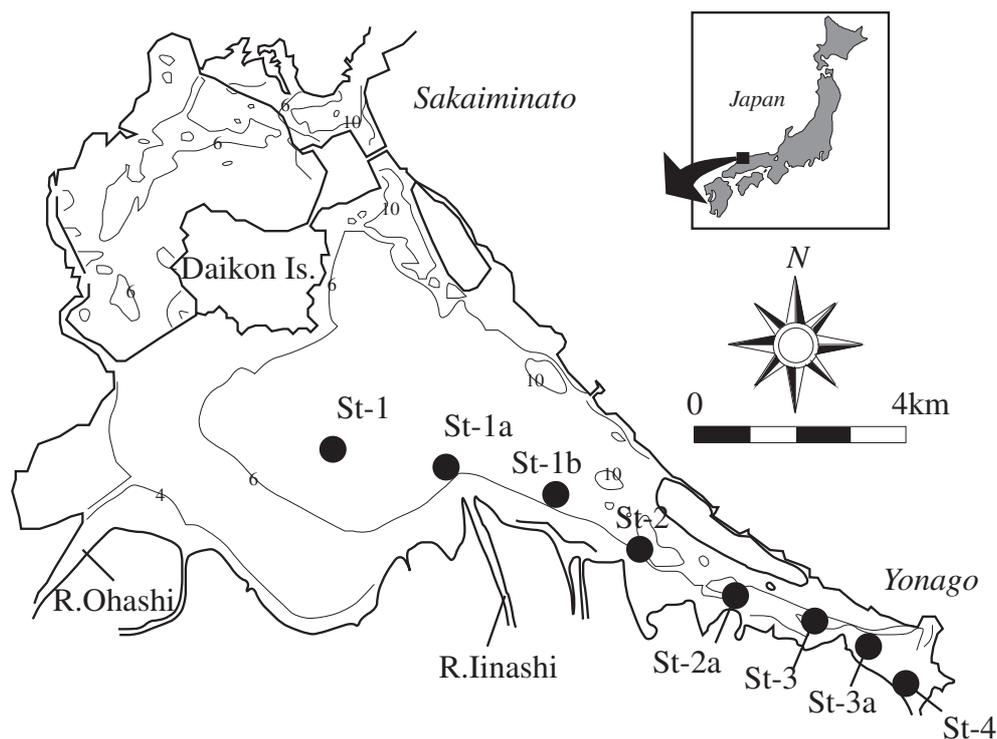


図 1. 中海における実測調査測点.

Fig. 1. Field survey points in Lake Nakaumi, Shimane Prefecture, Japan.

分光反射率特性が大きく変る. この分光反射率特性を利用して, Chl-a や懸濁物の濃度を推定する.

3. Chl-a 推定アルゴリズム

一般に外洋において海色センサによる Chl-a 推定を行う場合には, Chl-a の強い吸収帯である可視の青バンド (443 nm 付近) と植物プランクトン体の反射が大きい緑バンド (560 nm 付近) の放射輝度比又は反射率比が有効であることが知られている (岡見ほか, 1982).

一方, 沿岸水のように植物プランクトンだけでなく無機懸濁物質や溶存有機物によっても海色が大きく変えられる場合は, Chl-a の推定が難しいと言われ, 以下のような形の経験的な Chl-a 推定式が作成される場合が多い.

$$Chl-a = \alpha [d_i] + \beta \quad (4)$$

ここで α , β は定数である. また d_i には式 (3) で定義される単バンドの「 nLw 」の他, 複数バンドによる加算, 減算, 比演算, 植生指数等が用いられる場合が多い (岡見ほか, 1982; 沖・安岡, 1996; 牧ほか, 2004). 本研究でも式 (4) のモデルを適用し, $[d_i]$ には, MODIS 各バンドの「 nLw 」値を使用する. また式 (4) の定数の決定には, 衛星/実測データセットによ

る回帰分析法を適用する. ただし, $[Chl-a]$ は外洋で一般的に用いられる対数型も試した.

使用データ

筆者らは 2004 年 4 月～6 月にかけて中海で赤潮が発生する時期に船舶による水質調査 (Chl-a の鉛直分布) を図 1 に示す測点で行った. 鉛直 Chl-a の測定には, 水中投下式クロロフィル測定装置 (アレック電子製, 島根大学汽水域センター所有) を用いて, 水深 0.1 m 毎の Chl-a を測定した. ただし, Chl-a 測定装置により観測された N 値 (Chl-a の値に比例する) から Chl-a の値への変換は中山ほか (1999) の方法に従った. また, 本研究で衛星データとの比較として用いる表層 Chl-a は, 本来透明度相当とされているが, 今回は透明度の値が得られなかったので便宜的に水深 0.1 m の値と定義した. 現地観測は計 7 回行われ, そのうち比較的良好な MODIS データが得られた 2004 年 4 月 29 日, 5 月 8 日, 6 月 3 日における, 衛星/実測データセット 21 点 (7 点×3 日) を使って相関解析が行われた.

研究に使用した MODIS データは東京大学生産技術研究所が提供しているレベル 1 b の Radiance データである. データが取得された期間は 2004 年 4 月 1

表 2. 相関解析に使用した MODIS/実測 Chl-a データセットの概要.

Table 2. Satellite/Chl-a data set in Lake Nakaumi.

Date	2004/4/29			2004/5/8			2004/6/3		
Stations	B 1	B 2	Chl.a ($\mu\text{g/l}$)	B 1	B 2	Chl.a ($\mu\text{g/l}$)	B 1	B 2	Chl.a ($\mu\text{g/l}$)
St 1	3833	1737	14.5	4316	2364	14.5	2134	710	24.4
St 1 a	3946	1808	22.3	4237	2275	17.4	2238	673	44.6
St 1 b	3952	1932	24.4	4168	2250	13.0	2219	708	39.7
St 2	4047	2144	24.0	4518	2657	64.3	2222	775	44.4
St 2 a	4086	2355	33.5	4139	2304	13.8	2259	846	65.1
St 3	4332	3106	342.8	4221	2372	26.8	2384	1352	94.6
St 3 a	4400	5075	209.3	4256	2494	49.4	2408	1079	97.3

表 3. 大気補正入出力パラメータ.

Table 3. I/O parameters of atmospheric correction.

Input	2004/4/29		2004/5/8		2004/6/3	
	645 nm	859 nm	645 nm	859 nm	645 nm	859 nm
τ_m	0.057	0.018	0.056	0.018	0.056	0.018
τ_{oz}	0.014	0.000	0.014	0.000	0.014	0.000
θ	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
θ_0 ($^\circ$)	33.214	33.214	18.873	18.873	22.689	22.689
Output	2004/4/29		2004/5/8		2004/6/3	
	645 nm	859 nm	645 nm	859 nm	645 nm	859 nm
$1/\cos \theta$	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
$1/\cos \theta_0$	1.195	1.195	1.057	1.057	1.084	1.084
t	0.958	0.991	0.959	0.991	0.959	0.991
t_0	0.950	0.989	0.957	0.991	0.955	0.990

日～6月30日である。MODIS データの大気補正は、まず「620 nm 以上の長波長における清浄な海域の L_w (水中放射輝度)は 0」と仮定して、島根半島北部の日本海の最暗値を各バンドの放射輝度値から差し引く、前述した「暗画素法」で行った。これにより式(1')の $[L_{AS}(\lambda) + L_M(\lambda)]$ を求めた。次に式(2)より、観測日当日の t 及び t_0 を算出した。そしてこれらの値を式(3)に入力することにより、バンド 1、バンド 2 の $[nL_w]$ を求めた。相関解析に使用した MODIS/実測 Chl-a データセットの概要を表 2 に示す。

結果及び考察

1. 中海の赤潮発生状況と赤潮種

現地調査中における中海の赤潮発生状況は採水による顕微鏡観察と目視観察から判断して以下のものであったと考えられる。即ち 4 月 18 日に中海南東部の安来港において高濃度で発生し、St-2 付近(図 1 参照)まで発生した。それ以降は、St-3 付近で非常に

高濃度 ($3.6 \times 10^8 \text{ Cell/L}$) の赤潮が発生し、1 週間後には赤潮が消失した。さらに 6 月 1 日に再び赤潮が St-2 付近で発生し、6 月 7 日に湖心まで拡大したが、1 週間後には消失した。このように今回発生した中海の赤潮は 1 週間程度のサイクルで消沈を繰り返した。赤潮発生時の優占種は図 2 に示すような渦鞭毛藻 *Prorocentrum minimum* であった。4～5 月は、ほぼ *P. minimum* 単一種による赤潮であり、6 月の St-3, 4 に関しては珪藻 *Cylindrotheca closterium* との混合赤潮であった。

2. MODIS データと実測 Chl-a の関係

表 3 は、今回の大気補正(大気透過率の推定)に使った入出力パラメータの例である。いずれの日・バンドとも大気透過率は 0.95 以上と非常に高かった。また、表 4 は、大気補正前後(大気透過率、パストラジアンズ両方の補正前後)の MODIS データと Chl-a の相関係数を表している。これより、大気補正前に比べて、大気補正後の各バンドと実測 Chl-a の相



図 2. 地中海の赤潮優占種 *Prorocentrum minimum* の顕微鏡写真.

Fig. 2. Photomicrograph of the red tide dominant species *Prorocentrum minimum* in Lake Nakaumi.

関が高くなることがわかった. さらに, バンド 2 よりもバンド 1 の方が, 実測 Ch-a との相関が良かった. これは, 赤潮発生により「赤潮プランクトン自身の散乱やそれに付随するデトリタスの散乱の効果」(小林ほか, 1999) がバンド 1 (620~670 nm) の放射輝度に反映されたためと考えられる. だが, 岡見ほか(1982)は, 霞ヶ浦において MODIS バンド 1 の波長帯に近い 626 nm, 656 nm, 672 nm の水面直上上向き分光反射率と Chl-a の関係を調べ, いずれも弱い正方向のトレンドはあるものの, 有意な相関は得られなかったとしている. このような MODIS データと現場実測データとの結果の違いは, 250 m 解像度の MODIS のバンド幅が 50 nm と, 数 nm 範囲で計測可能な現場型の分光計とは波長幅が異なること, 大気補正が簡易的なものである(画素ごとの補正をし

表 4. 大気補正前後の MODIS データと Chl-a の相関係数.

Table 4. Correlation coefficients between MODIS [nL_w] at 250 m resolution data before and after atmospheric correction, and measured Chl-a data

	Before correction		After correction	
	L, B 1	L, B 2	nLw B 1	nLw B 2
Chl-a	0.11	0.47	0.75	0.71
LOG ₁₀ Chl-a	-0.15	0.28	0.84	0.64

n=21

ていない) こと等が原因として考えられる. ただし, 今回は検証データが不足しており, 原因の特定には至らなかった.

図 3 に大気補正前後の [MODIS バンド 1] と [Log₁₀ Chl-a] の関係を示す. これより, 大気補正前は各時期のデータの値が大きくずれていたのに対し, 大気補正後の 3 時期のデータはほぼ一直線上にプロットされた. これは前述した大気補正の効果があったためと思われるが, 大気補正過程で実測 Chl-a との相関向上に最も寄与したパラメータは [L_{AS}(λ) + L_M(λ)] 成分であり, 大気透過率の影響はほとんどなかった. これより地中海の赤潮分布が特にパスラジアン成分の大気補正を行った後の MODIS バンド 1 で常時マッピングできる可能性が高いことが示唆された.

3. MODIS Chl-a から見た地中海の赤潮分布特性

図 4 は図 3 で得られた回帰式を使って推定した 250 m 解像度 MODIS の Chl-a 分布図と目視データを比較したものである. これより MODIS の Chl-a 分布

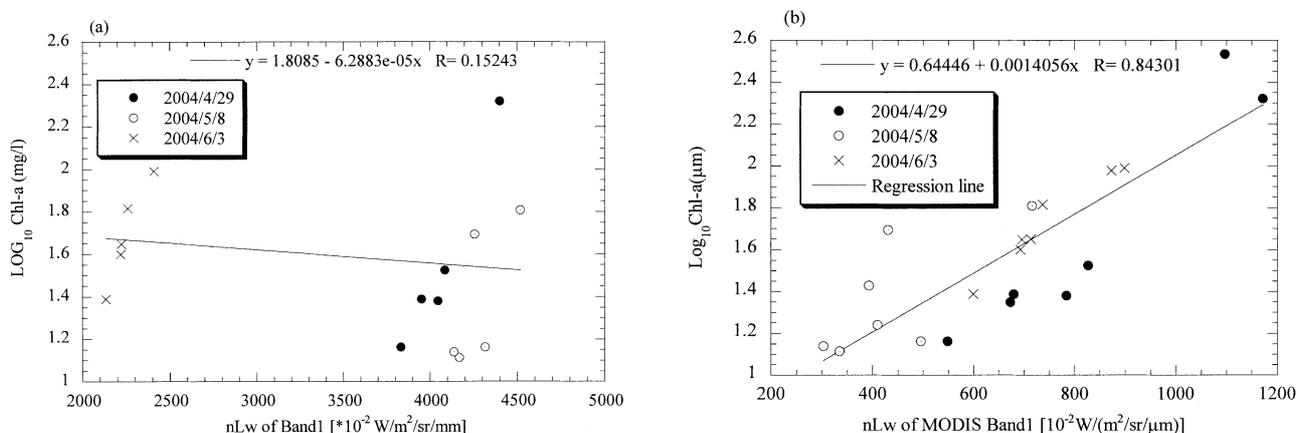


図 3. 大気補正前後の MODIS Band 1 nLw と実測 Chl-a の関係. (a) 補正前, (b) 補正後.

Fig. 3. Relationships between MODIS [nL_w] at 250 m resolution data before (a) and after (b) atmospheric correction, and measured Chl-a data.

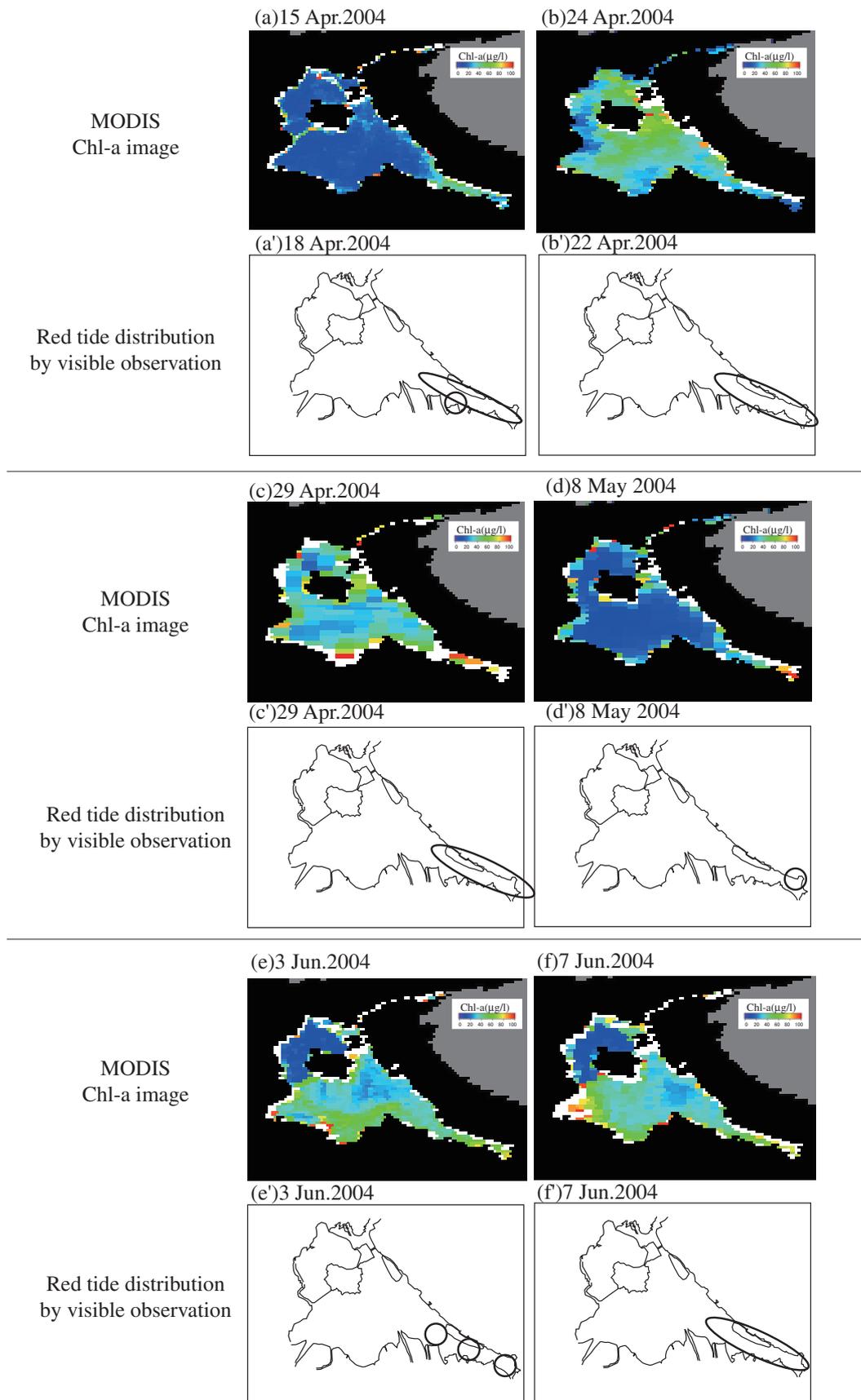


図 4. 中海において MODIS データから推定された Chl-a 分布と目視で観察された赤潮分布の関係。

Fig. 4. Maps of surface chlorophyll.a concentration estimated from MODIS at 250 m resolution and red tide bloom distribution observed by the naked eye from ship in Lake Nakaumi.

図から今回地中海で発生した赤潮の多くは、中海南東部の米子湾から中海南岸に沿って帯状に分布していることがわかり、船舶からの目視による赤潮推定分布水域と非常によく一致していた。6月3日や6月7日のデータは特にその分布パターンをよく表している。地中海の赤潮発生海域としては、古くは岸岡(1975)が「意東鼻(中海南岸)から大根島西端を結んだ線の東側の海域に発生し、最も多発するのは錦海湾(米子湾奥部)である」と、また最近では大谷(1997)が「中海主湖盆、境水道域に珪藻の赤潮が大量発生することが多い」等とそれぞれ報告している。さらに、島根県内水面水産試験場は2003年4月に「中海西部や本庄工区」において *P. minimum* の赤潮が発生したとホームページ上 (http://www2.pref.shimane.jp/naisuisi/topic/030415_akasio.html) で発表している。これらの過去の報告と今回の MODIS Chl-a 分布図から、地中海の赤潮分布域は、水域全体で大規模に変化し、その分布域の変化周期も早い(少なくとも今回の調査時では1週間以内で変化していた)ことがわかった。

ま と め

2004年の地中海の赤潮発生時(4月から6月)に観測された、250 m 解像度の MODIS データと実測水質データを使って、地中海の赤潮モニタリングを試みた。その結果、以下の事項が明らかになった。

- 1) 現地調査の結果、今回発生した地中海の赤潮の優先種は *Prorosentrum minimum* で、1週間程度のサイクルで消沈を繰り返した。
- 2) 暗画素法による大気補正後の MODIS バンド1の nLw と実測 Chl-a (対数型) は高い相関があった。
- 3) MODIS データから推定した高 Chl-a 分布域と目視観測による赤潮分布域の位置はほぼ一致していた。
- 4) MODIS データから推定した Chl-a 分布から、2004年4月から6月に発生した赤潮の多くは、中海南東部の米子湾から中海南岸に沿って帯状に分布していた。

謝 辞

本研究で使用した MODIS データは東京大学生産技術研究所安岡研究室から提供されたものである。関係機関に深く感謝する。

引用文献

- 1) Clark, D.K. (1997) MODIS algorithm theoretical basis document bio-optical algorithms-case 1 waters, NOAA.
- 2) 岸野元彰・福島甫・虎谷充浩・陳文忠・田中昭彦 (2002) 連載講義 海洋リモートセンシング, 第3回海色リモートセンシング, 日本リモートセンシング学会誌, 22 (3): 336–354.
- 3) 岸岡務(1975) 瀉湖の汚濁—地中海の生態学的長期研究—, 技研出版, 237.
- 4) 小林 拓・太田幸雄・村尾直人・橋治国(1999) 衛星リモートセンシングによる沿岸海域汚濁解析のための放射伝達モデルの開発, 日本リモートセンシング学会第26回学術講演会論文集, 697–700.
- 5) MacFarlane, N. and Robinson, I. S. (1984) Atmospheric correction of LANDSAT MSS data for a multirate suspended sediment algorithm. *International Journal of Remote Sensing*, 5: 561–576.
- 6) 牧雅康・沖一雄・椿広計・安岡善文(2004) 潜在要因の影響を考慮した水質計測の因果モデリング, 日本リモートセンシング学会誌, 24(2): 153–162.
- 7) 中山大介・作野裕司・松永恒雄・高安克己・國井秀伸 (1999) 宍道湖・中海の鉛直クロロフィル a 濃度分布特性, *LAGUNA (汽水域研究)*, 6: 217–222.
- 8) 岡見登・岸野元彰・宮崎忠国(1982) 霞ヶ浦湖水の分光反射率と水質, 日本リモートセンシング学会誌, 2 (1): 21–31.
- 9) 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 (1): 35–47.
- 10) 沖一雄・安岡善文 (1996) 高濃度水域における近赤外を含む二波長によるクロロフィル a 推定モデルの作成, 日本リモートセンシング学会誌, 16 (4): 1–9.
- 11) 作野裕司・松永恒雄・中山大介・六川修一・高安克己・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 a 濃度分布の推定. 日本リモートセンシング学会誌, 19: 20–36.
- 12) 作野裕司・吉田武史・松永恒雄・中山大介・高安克己 (2003) 多時期 Landsat/TM データを用いた宍道湖・中海のクロロフィル a 濃度分布推定, *海岸工学論文集*, 50: 1011–1015.
- 13) 作野裕司・山本正智・吉田武史・松永恒雄・高

安克己・古津年章・下舞豊志(2004)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, LAGUNA (汽水域研究), 11: 147-153.

14) Thiemann, S. and Kaufmann, H. (2002) Lake water

quality monitoring using hyperspectral airborne data - a semiempirical multisensor and multitemporal approach for the Mecklenburg Lake District, Germany, Remote Sensing of Environment, 81: 228-237.