

ADEOS-II GLIによる赤潮発生時の 中海のクロロフィルa分布推定

ESTIMATION OF CHLOROPHYLL-A DISTRIBUTION USING ADEOS-II GLI UNDER RED TIDE BLOOM CONDITION IN LAKE NAKAUMI

作野裕司¹・古津年章²・下舞豊志³・松永恒雄⁴・國井秀伸⁵
Yuji SAKUNO, Toshiaki KOZU, Toyoshi SHIMOMAI,
Tsuneo MATSUNAGA, and Hidenobu KUNII

¹正会員 博(工) 広島大学助教 大学院工学研究科 (〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)

²博(工) 島根大学教授 総合理工学部 (〒690-8504 松江市西川津町1060)

³博(工) 島根大学助教 総合理工学部 (〒690-8504 松江市西川津町1060)

⁴博(工) 国立環境研究所 (〒305-8506 つくば市小野川16-2)

⁵理博 島根大学教授 汽水域研究センター (〒690-8504 松江市西川津町1060)

In order to estimate the red tide distribution in Lake Nakaumi which is located in Shimane Prefecture, Japan using the new ocean color atmospheric correction algorithm, LCI (Linear Combination Index) technique was applied to the ADEOS-II GLI data of 250m resolution (250m GLI). The GLI / Chl.a (chlorophyll-a concentration) data set in Lake Nakaumi from April to October, 2003 was used. As a result, the following matters were cleared. 1) The correlation between DN's of 250m GLI at each band and Chl.a was not observed. 2) A statistically significant correlation was observed between LCI of 250mGLI and in-situ Chl.a. The position and the scale of the red tide in Lake Nakaumi, 2003 using the Chl.a distribution map derived from 250m GLI data was estimated generally.

Key Words : ADEOS-II GLI, red tide bloom, chlorophyll-a, Lake Nakaumi, LCI model

1. はじめに

島根県と鳥取県の県境付近に位置する中海は、近年赤潮が多発しており、赤潮分布の把握が求められている。また、中海の北部水域である本庄水域では1963年から約40年継続した国の干拓事業中止が決定され、2009年中に境水道から本格的な潮通しが開始される予定となっている。この潮通しが始まれば、近い将来、中海全体の水質が激変する可能性があり、多分野による継続的かつ詳細なモニタリングが急務となっている。しかし、船舶による測点調査には限界があり、面的把握が難しいという問題点があった。

一方、こうした水質の面的把握のため、筆者らは1995年から継続的に宍道湖・中海の衛星リモートセンシングによる水質マッピング研究を行っている。その間、LandsatやALOS等高解像度衛星センサを搭載した衛星による水質マッピングは成功しているが¹⁾²⁾、これらの衛星データは1年間に数回のデータが得られるにすぎない。そのため汽水域の水質把握に必要な数日に1度程度の頻度での衛星モニタリングは現状では非常に難しい。従って、中海等の富栄養

化水域では沿岸用の衛星水質センサの登場が望まれている。このような要求に対して、2013年に我が国が打ち上げ予定のSGLI³⁾という沿岸用の海色センサが期待されているが、高濃度クロロフィルa (Chl. a) 推定手法開発が遅れている。

そこで本研究では、SGLI開発の元となったセンサであるADEOS-II GLIのうち、水質推定アルゴリズムが確立されていない250m解像度のデータを使って、赤潮発生時の中海における赤潮（高濃度Chl. a状態）分布推定を試みた。本論文では特に衛星海色センサ用の最新の簡易大気補正アルゴリズムであり、MODIS等のChl. aプロダクトに一部採用されているLCI手法を赤潮発生時の中海のGLI画像に応用し、その適用可能性を検討することを最大の目的とする。

2. 方法およびデータ

(1) 研究地域およびGLIについて

図-1は中海の位置を示している。中海の大きさは東西約20km、南北約15kmで、250m解像度のGLI

データでは 80×60 画素程度のサイズである。中海では、1974 年以降ほぼ毎年珪藻類 (*Skeletonema costatum*) や渦鞭毛藻類 (*Prorocentrum minimum*) 等の赤潮⁴⁾が大規模に発生しているが、その分布はあまり知られていない。

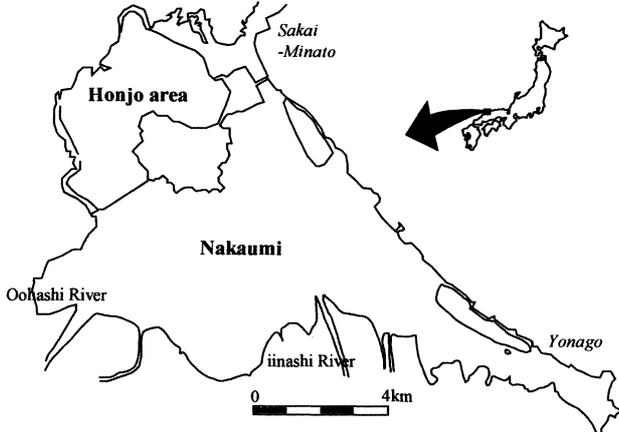


図-1 中海の位置

一方、本研究で対象となる GLI センサは我が国が開発した ADEOS-II (みどり II, 2002 年 12 月に打ち上げられ、2003 年 10 月に稼働停止した) に搭載されたコアセンサである⁵⁾。観測波長帯は可視～熱赤外 (0.38-12.00μm) の全 36 バンド、量子化 12 ビットで、1km 解像度と 250m 解像度のバンドを持つ。ただし通常海色用に使われているのは、波長分解能のより優れている 1km 解像度のデータである。今回は、外洋と比べて非常に狭い領域の水質を検出する必要があるため、表-1 に示すような観測波長を持つ 250m 解像度の GLI (以下 250mGLI と略す) データを扱うこととする。

表-1 ADEOS-II/GLI の観測波長

Band	wavelength (nm)	band width (nm)
20	460	70
21	545	50
22	660	60
23	825	110

(2) LCI 手法

本研究における 250mGLI の Chl. a 推定には、1km 解像度 GLI 用に Frouin ら⁶⁾が提唱し、JAXA の 500m 解像度 MODIS Chl. a プロダクトのアルゴリズムとしても採用されている、LCI (Linear Combination Index, 線形結合指標) 手法を応用したものである。

ここではまず LCI 手法について簡単に説明する。衛星が観測する大気上端部における反射率 R_t は、以下のような近似式で表わされる。

$$R_t(\lambda) = R_r(\lambda) + R_a(\lambda) + R_w(\lambda) \quad (1)$$

ここで、 λ は波長、 R_r 、 R_a はそれぞれ大気分子とエアロゾルによる反射率、 R_w は水中光の反射率である。式(1)で Chl. a と関係するのは R_w のみであり、残りの成分はノイズとなる。さらに、式(1)の R_r は気圧等から比較的簡単に計算することができるため、式(1)を以下のように変形する。

$$R_t(\lambda) - R_r(\lambda) = R_a(\lambda) + R_w(\lambda) \quad (2)$$

ここで $[R_t(\lambda) - R_r(\lambda)]$ を $R_{tr}(\lambda)$ とおき、 $R_{tr}(\lambda)$ の複数バンド間の線形結合を考え、これを LCI と定義すると、LCI は以下のような式で表わされる。

$$\begin{aligned} LCI &= \sum_{i=1}^k a_i R_{tr}(\lambda_i) \\ &= \sum_{i=1}^k a_i R_a(\lambda_i) + \sum_{i=1}^k a_i R_w(\lambda_i) \end{aligned} \quad (3)$$

ここで k (バンド) は通常 3 または 4⁷⁾、 a_i は大気の影響を除去する意味で各バンド $a_i R_a(\lambda_i)$ の累積がちょうど 0 となるように求めた係数である。このとき、LCI の値は選択された 3~4 バンドの海水反射率成分の一次結合になるので、大気の情報を含まず、水の情報のみを含むことになる。

式(3) a_i の累積の実際の求め方としては、まず式(3)の右辺第 1 項を以下のような式で表す。

$$\sum_{i=1}^k a_i R_a(\lambda_i) = 0 \quad (4)$$

さらに式(4)は以下のような多項式で近似できる。

$$\sum_{i=1}^k a_i \lambda_i^{n_j} = 0 \quad (5)$$

ここで n_j はエアロゾルタイプから決定され (整数である必要はない)、「使用バンド数-1」以下の数値となる。例えば 4 波長を使用する場合は、Frouin ら⁶⁾の係数「 $n_j=0, -1, -2$ 」を使用すると、以下のような式の連立方程式を解くことで、式(5)の係数 a_i を決定できる。ただし右辺が 0 なので、 a_1 は 1 とし計算する。

$$a_1 \lambda_1^0 + a_2 \lambda_2^0 + a_3 \lambda_3^0 + a_4 \lambda_4^0 = 0 \quad (6a)$$

$$a_1 \lambda_1^{-1} + a_2 \lambda_2^{-1} + a_3 \lambda_3^{-1} + a_4 \lambda_4^{-1} = 0 \quad (6b)$$

$$a_1 \lambda_1^{-2} + a_2 \lambda_2^{-2} + a_3 \lambda_3^{-2} + a_4 \lambda_4^{-2} = 0 \quad (6c)$$

例えば Frouin ら⁶⁾が 1km 解像度の GLI 用に計算した LCI は以下のような式となる。

$$LCI = R_r(443) - 5.020R_r(565) + 5.764R_r(667) - 1.743R_r(866) \quad (7)$$

このようにして求めた LCI と Chl. a は高い相関があり、最終的に以下のような式で表わされる。

$$Chl.a = f(LCI) \quad (8)$$

例えば、JAXA 500mMODIS Chl. a プロダクトの場合は、以下のような式で計算されている (Flouin ら⁶⁾の文献には Chl. a と LCI の関係式は書かれていない)。

$$Chl.a = 10^{-57.34 \times LCI - 0.08} \quad (9)$$

以上のような手順で、LCI から Chl. a を求める関数を作成することができる。

ところで、実際、式(1)~式(9)の手順で 250mGLI データから Chl. a と LCI の関係式を導くためには、まず R_r の計算が必要である。そこで、以下に具体的に R_r の計算手順を説明する。まず(2)で示した衛星から求められる反射率 R は以下のような式で求められる。

$$R = \pi L / (F_0 \cos \theta_0) \quad (10)$$

ここで L は放射輝度、 F_0 は大気圏外放射輝度 (Band20 : 1963.41 ; Band21 : 1840.93 ; Band22 : 1532.73 ; Band23 : 1062.34 を使用、単位は $W/m^2/sr$) θ_0 は太陽天頂角である。また、式(2)の R_r の計算は、Turner (1973, 新井⁸⁾の引用による) を使用してパスラジアンズ (L_r) を求めたあと、式(10)に入力して、反射率を求めた。ただし、計算式は非常に複雑な式の組み合わせであるため、ここでは概要のみを述べる。まず L_r は次式のような P (気圧)、 λ (波長)、 θ_0 (太陽天頂角)、 θ_r (センサ観測角)、 τ^{03} (オゾンの光学的厚さ)、 ϕ (太陽とセンサの間の方位角) の関数で表わすことができる。

$$L_r = f(P, \lambda, \theta_0, \theta_r, \tau^{03}, \phi) \quad (11)$$

このうち、 P は現地に近い気象台の気圧 (ここでは松江地方気象台の午前 11 時値)、 λ は GLI 波長、 θ_0 、 θ_r 、 ϕ は GLI のヘッダー情報から得られる値、 τ^{03} は観測値 (ここでは土屋 (1990) を参考に、波長にかかわらず一率 0.02 とした) を入力すれば、計算可能となる。

(3) 使用データ

表-2 は ADEOS-II GLI 撮影時における宍道湖・中海湖心の実測 Chl. a データである。この実測データ

は国土交通省が設置している水質観測タワーの 11 時の値を示している。GLI データは少なくとも 4 日に 1 回は得られるが、実際品質の良好な Cloud-free (雲なし) データが得られたのは、この 6 シーンであった。このうち、中海が赤潮状態であったのは、4 月と 5 月のデータ (表-2 中太字) の期間である。また、式(11)中のパラメータのうち本論文で実際に計算に使用した P 、 θ_0 、 ϕ の値を表-3 に示す (なお今回 θ_r は直下観測ですべて 0 とした)。

表-2 ADEOS-II/GLI 撮影時における宍道湖・中海湖心の実測 Chl. a データ (国土交通省観測タワー、午前 11 時データ)

Date	Chl.a ($\mu g/l$)	
	L. Shinji	L. Nakaumi
2003/4/17	8.3	71.0
2003/5/2	14.5	195.0
2003/5/3	8.1	65.0
2003/5/11	10.1	72.0
2003/9/7	4.8	10.0
2003/10/17	5.8	8.0

表-3 計算に使用した P 、 θ_0 、 ϕ の値

Date	Parameters		
	P (hPa)	θ_0 ($^\circ$)	ϕ ($^\circ$)
2003/4/17	1020.5	26.3	237.0
2003/5/2	1015.2	21.8	230.0
2003/5/3	1012.4	21.8	226.0
2003/5/11	1019.4	20.4	226.0
2003/9/7	1010.3	28.6	245.0
2003/10/17	1016.4	41.1	262.0

3. 結果

(1) LCI 係数の決定

式(5)の方法に従って、250m 解像度 GLI の LCI 係数を計算する。今回は LCI の元となった 4 バンドすべてを使った Frouin の係数 ($n_j = -2, -1, 0$) と JAXA の 500m MODIS Chl. a アルゴリズムに使われている 660nm を除く 3 バンドを使った係数 ($n_j = -1, 0, 3$) との 2 種類を計算した。その結果、以下のような数式が得られた。

$$LCI = R_r(460) - 3.182R_r(545) + 3.366R_r(660) - 1.184R_r(825) \quad (12)$$

$$LCI = R_r(460) - 1.513R_r(545) + 0.497R_r(825) \quad (13)$$

(2) LCI と Chl. a の関係

LCI と Chl. a の関係を調べるのに先立ち、250mGLI 各バンドのデジタル値 (未補正 DN) と Chl. a の相関を調べた。その結果図-2 のようになり、

いずれのバンドともそれぞれの湖におけるChl. aと無相関 (t 検定において $\alpha=0.05$ で「相関あり」の仮説が棄却される)であった。また、宍道湖、中海の全データを入れた解析ではバンド22とバンド23でChl. aと相関があった。しかし、図-2のグラフを見ると明らかに両者の傾きが異なるため、両水域を区別して解析する方がより効果的であると考えられる。以上の結果から少なくとも、単バンドの未補正DNからChl. aを推定するのは非常に難しいことがわかった。

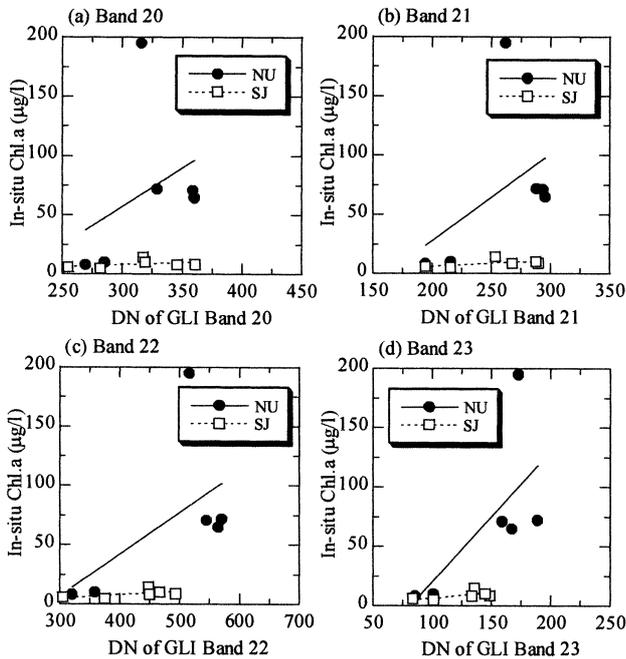


図-2 250m GLI の DN と Chl. a の関係, NU : 中海, SJ : 宍道湖.

表-4 250m GLI の DN と Chl. a の相関係数

Station	GLI Band				N
	20	21	22	23	
L. Shinji	0.42	0.51	0.58	0.63	6
L. Nakumi	0.36	0.46	0.57	0.69	6
All	0.26	0.35	0.57*	0.65*	12

*denotes significance at 0.05

次にGLI (バンド20-23)から得られるLCIとChl. aの関係を調べる。図-3(a), 図-3(b)はそれぞれ式(12), 式(13)を使った場合のLCIとChl. aの関係を示している。図-3(a)はGLIの4バンドを用いて求めた結果であるが、宍道湖・中海とも有意な相関は得られなかった。一方、図-3(b)はGLIの3バンドを用いて求めた結果であり、宍道湖の方では有意な相関はないものの、中海の方で有意な相関 ($R=0.74$) が得られた。式(13)のLCIがChl. aと相関がよかったのは、我が国沿岸用に設定されたエアロゾルに対応した n_j およびバンド選択であったためと考えられる。また、宍道湖で有意な相関が得られなかったのは、中海と比べ、大規模河川の斐伊川から流出する無機懸濁物

質の影響がより受けやすい環境にあり、GLIではChl. aの吸収を検出しにくかったため等の理由が考えられる。

最終的にLCIと中海のChl. aの関係式は次式で表わされる。

$$Chl.a = 10^{-31.6 \times LCI + 1.07} \quad (14)$$

この式を入力して求められた推定Chl. aと実測Chl. aの関係は図-4に示す通りであり、Chl. a推定誤差 (RMSE)は0.37 (Chl. a換算で $2.3 \mu\text{g/l}$)と計算された。

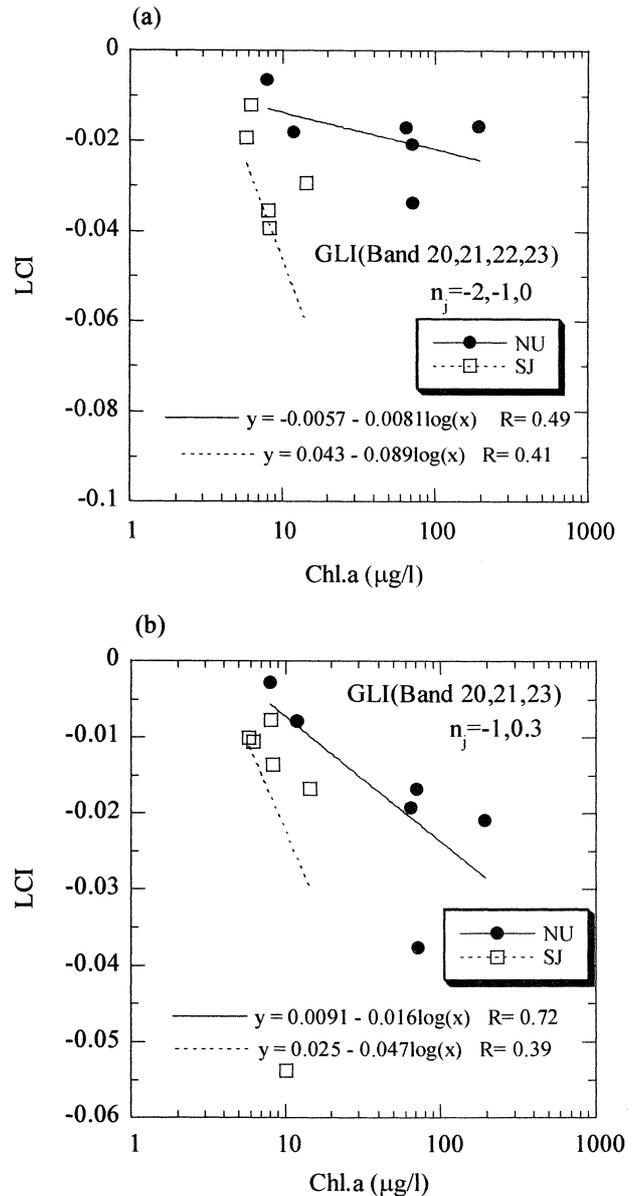


図-3 250mGLI を使った LCI と Chl. a の関係, NU : 中海, SJ : 宍道湖.

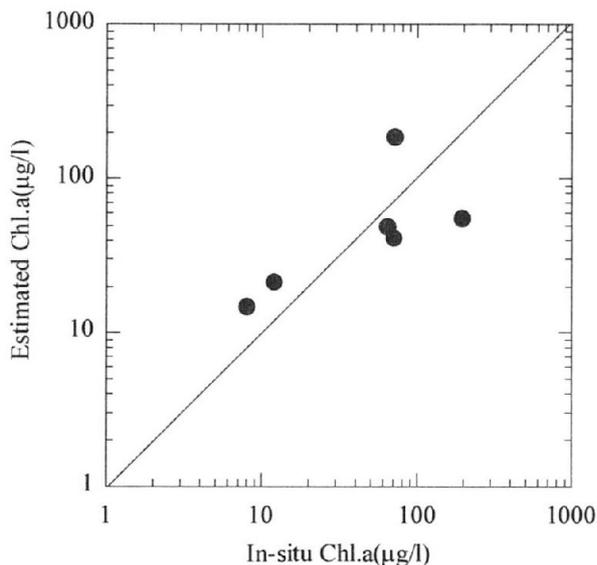


図-4 250mGLI を使った LCI から推定された Chl. a と実測 Chl. a の関係

(3) 地中海の赤潮分布推定

図-5 は、250mGLI から推定した地中海赤潮発生前後の表層 Chl. a 分布である。地中海では概ね Chl. a が $60 \mu\text{g/l}$ を超えるような場合、赤潮が発生している場合が多いが¹⁰⁾¹¹⁾、その定義からすると、少なくとも 2003 年 5 月 2 日、5 月 3 日、5 月 11 日は大根島～地中海南部にかけて（図中 A, B, C 地点）、東西約 4km、南北約 2km 以上の赤潮が水表面を覆っていたと推定された。このような赤潮分布傾向は、島根県が現地調査してホームページに公表している 4 月～5 月の赤潮分布資料¹²⁾の記述とも概ねよく一致していた。

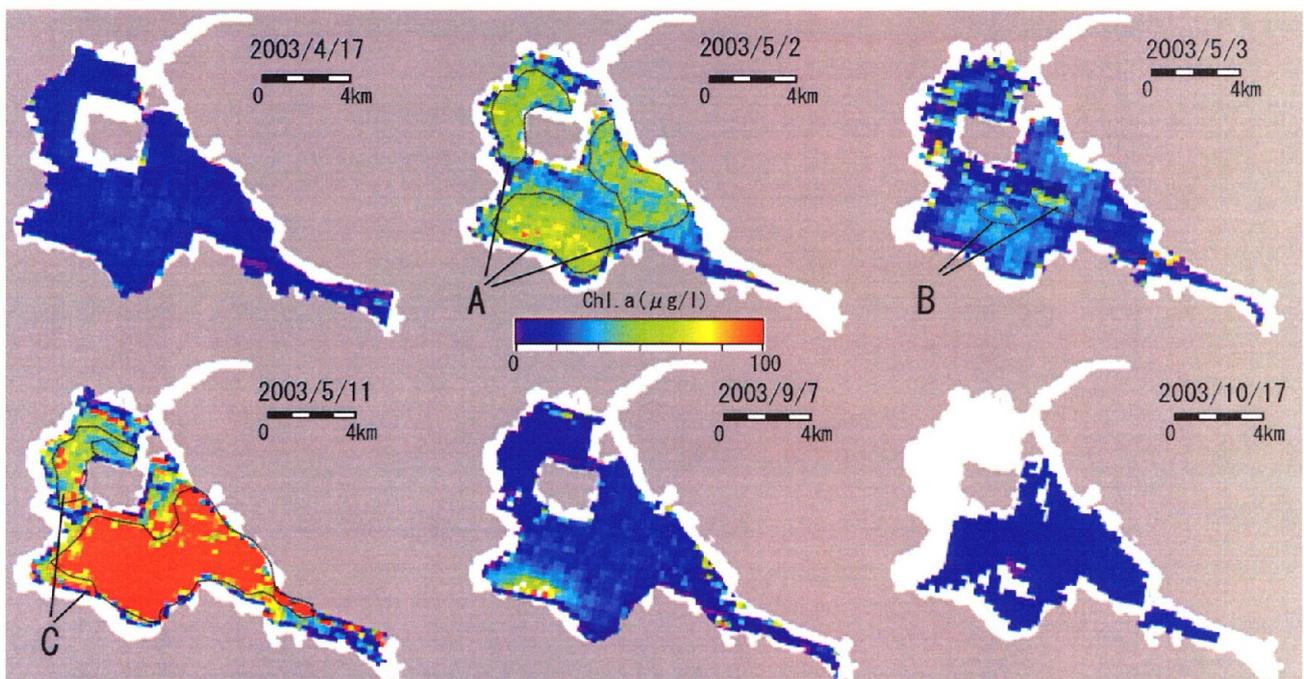


図-5 250m GLI から推定した地中海赤潮発生前後の表層 Chl. a 分布

4. まとめ

本研究では、水質推定アルゴリズムが確立されていない 250m GLI データに LCI 手法を適用して、赤潮発生時の地中海における赤潮分布推定を試みた。その結果、以下のような事項が明らかになった。

- 1) 250mGLI の各バンドの DN と Chl. a の関係は無相関であった。
- 2) LCI 手法を使って求めた 250mGLI の LCI と実測 Chl. a には有意な相関があった。
- 3) GLI から推定された Chl. a 分布から、2003 年 4 月～5 月にかけて発生した地中海の赤潮分布の位置、規模を概略推定することができた。

このような結果は、将来 SGLI を使った地中海の赤潮分布把握の可能性が高いことを示唆している。今後（SGLI の打ち上げ前まで）は、地中海以外の富栄養化海域（瀬戸内海、東京湾、伊勢湾等）においても同様な研究を行い、LCI 手法の検証、改良を行う予定である。

謝辞：本研究で使用した衛星データは、JAXA と筆者らの共同研究「ALOS データ利用公募型研究（第 2 回公募）」（PI: 作野裕司）の一環として行われ、JAXA から GLI データの提供をうけた。また、研究で使用した Chl. a データは国土交通省出雲工事事務

所から提供をうけた。さらに、LCI 手法について、JAXA/EORC の村上浩博士、東海大学開発工学部の虎谷充浩准教授に有益な御助言をいただいた。関係各位に記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 作野裕司, 吉田武史, 松永恒雄, 中山大介, 高安克己: 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 濃度推定, 海岸工学論文集, 50, pp.1101-1015, 2003.
- 2) 作野裕司: 衛星「だいち」データによる中海本庄水域の濁度分布特性評価, 海洋開発論文集, 24, pp.1063-1068, 2008.
- 3) 今岡啓治, 村上浩, 堀雅裕, 田中一広, 川西登音夫, 中川敬三: GLI・AMSR の概要と将来展望, 日本リモートセンシング学会誌, 29(1), pp. 2-10, 2009.
- 4) 大谷修司: 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, pp. 35-47, 1997.
- 5) 佐野到, 村松加奈子, 今岡啓治, 村上浩: GLI・AMSR 特集号の編集にあたって, 日本リモートセンシング学会誌, 29(1), p. 1, 2009.
- 6) Frouin, R., Deschamps, P., Gross-Colzy, L., Murakami, H., and Nakajima, T.: Retrieval of chlorophyll-a concentration via linear combination of ADEOS-II Global Imager data, *Journal of Oceanography*, Vol.62, pp.331-337, 2006.
- 7) 松尾貴, 河野幸恵, 福島甫: LCI 法による海色大気補正-吸収性エアロゾルに対する有効性-, 日本リモートセンシング学会第 43 回学術講演会論文集, pp. 203-204, 2007.
- 8) 新井康平: 独習リモートセンシング, 森北出版, 175p, 2004.
- 9) 土屋清: リモートセンシング概論, 朝倉書店, 328p, 1990.
- 10) 神門利之, 神谷宏, 生田美紗抄夫, 高橋順一, 石飛裕, 江角比出郎: 宍道湖・中海水質調査結果について (平成 4 年度), 島根県衛生公害研究所報告, pp. 96-98, 1992.
- 11) 江角比出郎: 宍道湖・中海の植物プランクトンの調査結果 (1993 年度), 島根県衛生公害研究所報告, pp. 76-83, 1993.
- 12) 島根県: トピック: 中海における赤潮の発生について. <http://www2.pref.shimane.jp/naisuisi/topic/030415akasio.html>