

LCI法を応用したASTERデータによる 中海本庄水域のクロロフィルa分布推定

ESTIMATION OF THE CHLOROPHYLL-A DISTRIBUTION USING ASTER DATA APPLIED LCI METHOD IN HONJO AREA OF LAKE NAKAUMI

作野裕司¹・立川智基²・西信昭²
Yuji SAKUNO, Tomoki TACHIKAWA, Nobuaki NISHI

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 広島大学 工学部 第四類 (〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)

The objective of this study is to examine the feasibility for the estimation of chlorophyll-a (Chl-a) distribution applying the LCI (Linear Combination Index) method to the ASTER data in Honjo water area of Lake Nakaumi, which is located in Shimane Prefecture. To examine the relationship between ASTER LCI and observed Chl-a, simple regression analysis were first performed. Seven data sets of ASTER / MODIS Chl-a offered by JAXA from August 2006 to October 2009 were used. As a result, significant correlation was not observed between ASTER LCI using Band1 (visible green), Band2 (visible red), and Band3 (NIR). On the other hand, strong negative correlation was found between modified ASTER LCI using the ASTER 3 bands and ASTER synthetic blue-band generated from MODIS blue band with 500m resolution. In addition, modified ASTER LCI was validated by the data set in October 28, 2009 using simultaneous Chl-a data with ASTER observation.

Key Words : ASTER, LCI method, chlorophyll-a, Lake Nakaumi, synthetic blue-band

1. はじめに

島根県と鳥取県の県境付近に位置する中海北部の本庄水域は、2009年5月に干拓堤防が60mにわたり開削され、約40年ぶりに日本海側から直接海水が同水域に流れ込むようになった。その影響で今後数年間は、同水域の水質が劇的に変化することが予想されている。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。

このような背景から水質の面的把握のため、筆者らは1995年から継続的に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きた。その間、SPOTやLandsat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に成功している¹⁾²⁾。しかし、このような高解像度衛星センサでは大気補正が難しく、かつ観測周期は数週間に1回程度であるため、定期的なモニタリングが難しかった。一方、大気補正に関しては、最近のMODISデータではLCI法³⁾⁴⁾と呼ばれる簡易大気補正法が採用されており、この方法を応用して筆者らは250m解像度のADEOS2/GLIデータを使った中海の赤潮モニタリングに成功している⁵⁾。ただし、GLIは現在稼働しておらず、かつ本庄水域のような比較的小規模な水域に

おいては、ALOS AVNIR-2やTerra ASTER等複数の高解像度衛星センサを使って観測周期を短くする方法が実用的である。

そこで筆者らはLCI法を高解像度の衛星データに適用して、本庄水域の周期的な水質（特にクロロフィルa、以下Chl-aと略す）分布推定の可能性を検討する目的で、当水域で蓄積年数の多いASTERデータおよび実測データを使ってその有効性を検証した。

2. 方法およびデータ

(1) 研究地域およびデータ処理方法

図-1は中海本庄水域（約6km四方）の位置を示しており、図上部の森山堤防のA地点が2009年5月に開削された場所である。一方、本研究で対象となるASTERの可視近赤外センサは我が国と米国NASAが共同開発した放射計で、全3バンド、量子化8ビット、解像度が15mで表-1に示すような観測波長を持つ。今回使用したASTERデータは表-2に示す全7シーンあり、堤防開削後の画像は、2009年9月と10月の2シーンである。データ処理の流れとしては、まずASTERデータを前述したLCIモデルを

使って、レーリー散乱分を除いた反射率から3バンドの LCI (線形結合) を計算する (以後、計算値を ASTER LCI と呼ぶ)。次に計算された ASTER LCI と実測 Chl-a を比較する。ただし、今回 ASTER 観測日に実測 Chl-a データはない。そこで、500m 解像度の MODIS データを国土交通省が宍道湖・中海湖心で定期観測している実測 Chl-a⁶⁾ との関係 (16 データセット) から実測値相当 Chl-a に換算して、ASTER 観測日の実測相当値とした。このようにして求めた ASTER LCI と実測相当 Chl-a を比較する。なお比較の際には、最初に ASTER データを 500m 解像度相当にリサンプリングしたデータを使用した。

このようにして、実測相当の MODIS データから検証された LCI 法を、筆者らが ASTER 飛来日時 (2009 年 10 月 28 日午後 1 時頃) に行った船上調査で得られた実測 Chl-a データを使って再度検証する。なお、当日の Chl-a 測定には、ポータブルクロロフィル計「Aquafluor (Turner Design 製)」を使用した。

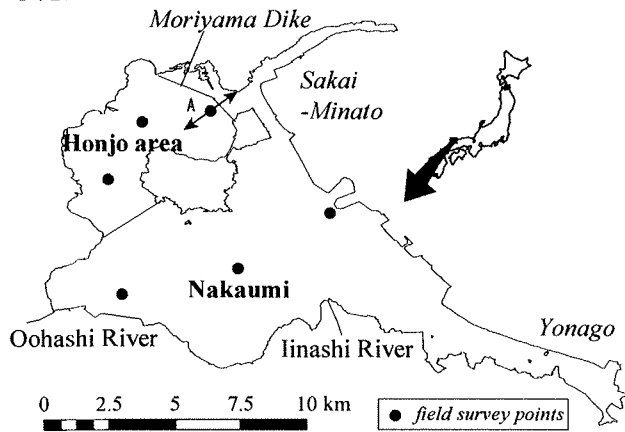


図-1 中海の位置と実測点

表-1 Terra/ASTER の観測波長

Band	wavelength (nm)	central wavelength (nm)
1	520-600	560
2	630-690	660
3	760-860	810

表-2 使用した ASTER データの観測日と主要大気補正パラメータ (P: 現地気圧 θ_0 : 太陽天頂角; θ_z : 衛星観測角)

No.	Date	P(hPa)	θ_0 (deg.)	θ_z (deg.)
1	2006/8/24	1009.9	19.7	8.6
2	2007/4/30	1014.5	28.2	2.9
3	2007/5/23	1010.3	52.6	5.7
4	2007/10/7	1011.6	25.3	5.7
5	2008/11/26	1023.1	20.0	2.8
6	2009/9/17	1012.8	42.7	2.8
7	2009/10/28	1021.8	57.8	5.7

(2) LCI 法

本研究における ASTER データによる Chl. a 推定には、Frouin ら³⁾ が提唱した LCI (Linear Combination Index, 線形結合指標) 法を応用したものである。LCI 法については、すでに筆者ら⁵⁾ が報告しているので、ここでは簡単に説明する。

衛星が観測する大気上端部における反射率 R_i は、以下のような近似式で表わされる。

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

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。

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

ここで $[R_i(\lambda) - R_r(\lambda)]$ を $R_{ir}(\lambda)$ とおき、 $R_{ir}(\lambda)$ 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。

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

ここで k (バンド) は通常 3 または 4、 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)中 a_i 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「使用バンド数-1」以下の数値となる。Frouin ら³⁾ の係数「 $n_j=0, -1, -2$ 」を使って MODIS (500m) および ASTER 用に計算した LCI は以下のような式となる。

$$LCI_{MODIS(3band)} = R_{ir}(469) - 1.96R_{ir}(545) + 0.96R_{ir}(865) \quad (6)$$

$$LCI_{ASTER(3band)} = R_{ir}(560) - 1.96R_{ir}(660) + 0.96R_{ir}(810) \quad (7)$$

一般に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。

$$Chl-a = 10^{m \times LCI + n} \quad (8)$$

ここで、 m 、 n は定数である。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、ASTER データから式(1)～式(8)の手順で Chl-a と LCI の関係式を導くためには、まず R_{ir} の計算が必要である。そこで、以下に具体的に R_{ir} 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各バンドの反射率 R は以下のような式で求められる。

$$R = \pi L / (F_0 \cos \theta_0) \quad (9)$$

ここで L は放射輝度、 F_0 は大気圏外放射輝度、 θ_0 は太陽天頂角である。また、ASTER 各バンドの L は次式で放射輝度に変換される。

$$L = (DN - 1) \times RCC \quad (10)$$

ここで、 DN はデジタル値、 RCC は放射輝度変換係数である。本研究で使用した、 F_0 と RCC は表-3 に示す。なお、 RCC は ASTER データのヘッダーに記載されている。さらに、式(2)の R_{ir} の計算は、Turner の線形式⁷⁾⁸⁾を使用してパスラジアンズ(L_p)を求めた後、式(9)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_p 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。

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

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} は観測値を入力すれば、計算可能となる。ただし、オゾンの波長別観測値を得ることは難しく、一般にその影響も極めて小さいと考えられることからここでは一率 0 とした。なお、今回使用した主要大気補正パラメータは表-2 に記述されている。

表-3 本研究で使用された Terra/ASTER の大気圏外放射輝度(F_0) (Iqbal⁹⁾) と輝度変換係数(RCC)

Band	F_0 (W/m ² /sr/μm)	RCC
1	1840	0.676
2	1555	0.708
3	1113	0.862

3. 結果

(1) MODIS Chl-a と実測 Chl-a の関係

図-2 は、MODIS Chl-a データと実測 Chl-a の関係を示している。これより、両者には高い相関 ($R=0.94$) があった。ただし、両者の関係は Chl-a が低いレンジでかたまっており、実測 Chl-a が 50μg/l を超える 2 点で相関を高めているのは事実である。また、今回の検証点では中海のみの点では相関は高くはない。しかしながら、現状ではこれ以上の衛星/現場データセットを得ることは難しいこと、ASTER データを使った LCI 解析にはまず JAXA が提供している MODIS Chl-a 相当の Chl-a が得られる可能性を検討することが重要であること、最終的には実測 Chl-a で検証する等の観点から、今回は両者の関係を示す単回帰式を使って、実測相当 Chl-a 変換式とした。

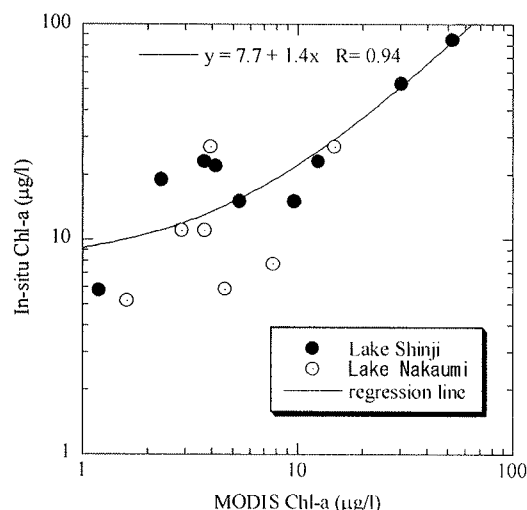


図-2 MODIS Chl-a と実測 Chl-a の関係

(2) ASTER LCI と MODIS Chl-a の関係

図-3 は、式(7)の ASTER LCI と実測相当 Chl-a の関係を示している。両者は比較的高い相関 ($R=0.70$) があるが、LCI が 0.022-0.026 の狭い範囲で、 $\log_{10}$ Chl-a は 1.1-1.4 までばらついており、この領域では推定が難しいと考えられた。ASTER LCI による Chl-a の推定が難しい理由としては、ASTER が MODIS や GLI のセンサと異なり、クロロフィル吸収と深い関係のある青バンドがないためと

考えられた。

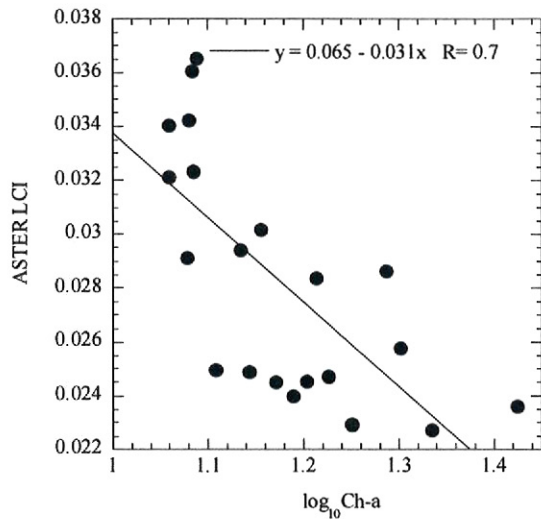


図-3 式(7)を使用した ASTER LCI と実測相当 Chl-a の関係

(3) ASTER LCI の改良

前述したように ASTER は青バンドがないため、Chl-a 推定精度は上がらないと考えられる。そのため、なんらかの方法で青バンド相当の情報が得られれば、Chl-a 推定精度の向上が見込まれる可能性がある。そこで、本研究では異なる解像度のバンド画像を合成する Price⁹⁾の回帰変数変換法に基づく外岡ら⁹⁾による ASTER 疑似青バンド画像生成法を応用して、青バンド相当の情報を得ることとした。ここでいう ASTER 疑似青バンド画像生成法とは、ASTER と同じ衛星に搭載されている 500m 解像度の MODIS 青バンド (Band3: 459-479nm) を ASTER 青バンドとして合成する方法である。この方法は青バンドの実質の解像度が 500m となり湖岸の情報が陸域の情報と混合する (ミクセルと呼ばれる) 欠点はあるが、Chl-a 吸収と深い関係を持つ青バンドの情報を得ることができ、その他のバンドの解像度は保持されるため水域における応用が期待されている。そこで本研究ではこの考え方を応用して、「各ピクセルにおいて MODIS 青バンドと緑バンド (Band4: 545-565nm) の各反射率の傾きは ASTER 緑バンドと疑似青バンドの反射率比の傾きと等しい」と仮定して、次式より ASTER 疑似青バンド (ASTER_Blue) 画像を作成した。

$$R(\text{ASTER_blue}) = R(\text{ASTER_Band1}) \times \frac{R(\text{MODIS_Band3})}{R(\text{MODIS_Band4})} \quad (12)$$

ここで、 R はレーリー散乱補正済反射率で、MODIS の場合は、JAXA EORC が処理したバイナリーデータ¹²⁾を用いた。また、このようにして得られた ASTER 青バンドを利用した LCI は式(3)と式(5)から、以下のように 3 バンド (青, 緑, 近赤外) と 4 バンド

(青, 緑, 赤, 近赤外) の LCI (疑似青バンドを使わない方法と区別して、以後記号は LCI' とする) 式が導かれる。

$$LCI'_{\text{ASTER}(3\text{band})} = R_{ir}(469) - 1.54R_{ir}(560) + 0.54R_{ir}(810) \quad (13a)$$

$$LCI'_{\text{ASTER}(4\text{band})} = R_{ir}(469) - 3.71R_{ir}(560) + 4.10R_{ir}(660) - 1.38R_{ir}(810) \quad (13b)$$

以上の方法で作成された ASTER 疑似青バンド画像 (a) と疑似青バンド画像を使ったトゥルーカラー画像 (b) の例 (2009/9/7 撮影) を、図-4 に示す。これより、湖岸部では MODIS の解像度が低いため、明らかに陸域とのミクセルが見受けられるが、湖岸部以外の水域や陸域では視覚的に良い (Landsat 等青バンドを有する衛星センサのトゥルーカラーと同等) 画像が得られることが定性的に確かめられた。また他の期日の衛星画像でも、同様の結果 (視覚的に良い画像) が得られた。

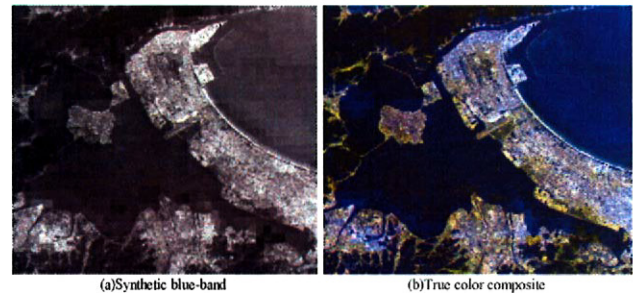


図-4 本研究で作成された ASTER 疑似青バンド画像 (a) と疑似青バンド画像を使ったトゥルーカラー画像 (b) の例 (2009/9/7 撮影)

このようにして得られた疑似青バンドを利用して計算された ASTER LCI (以降「改良 ASTER LCI」と呼ぶ) と実測相当 Chl-a の関係を図-5 に示す。これより、2009 年 9 月 17 日のデータを除いた 6 時期で非常に高い相関 ($R=0.92$) が得られ、各時期も概ね負の相関を示している。また、改良 ASTER の青, 緑, 近赤外の 3 波長を使った式(13a)の場合では高い相関が得られたが、改良 ASTER の青, 緑, 赤, 近赤外の 4 バンドを使った場合では全体的には無相関であった。これは、実測相当 Chl-a を計算した MODIS LCI が元々赤バンドを使っていないこと、赤バンドを入れた場合、無機懸濁物質の影響を受けやすく地点による量比が異なる場合 Chl-a 推定の誤差要因となる等が理由として考えられる。2009 年 9 月 17 日のデータが他の日の直線関係から大きく外れた原因については現時点で不明だが、同日の 3 点で高い負の相関があることから、センサ劣化の影響で 2009 年以降の輝度変換係数の誤差が大きくなった (2009 年 9 月と 10 月のデータのみのプロットは

比較的高い相関があるため)、無機懸濁物質の影響が他の時期より大きかった(無機懸濁物質との相関が大きいと言われる赤バンドを使った4波長の場合もこの日は高い相関があるため)等の問題である可能性が考えられた。いずれにしても、改良 ASTER LCI は改良前の ASTER LCI と比べて、高い精度で実測 Chl-a を推定できる可能性が高いことが示された。

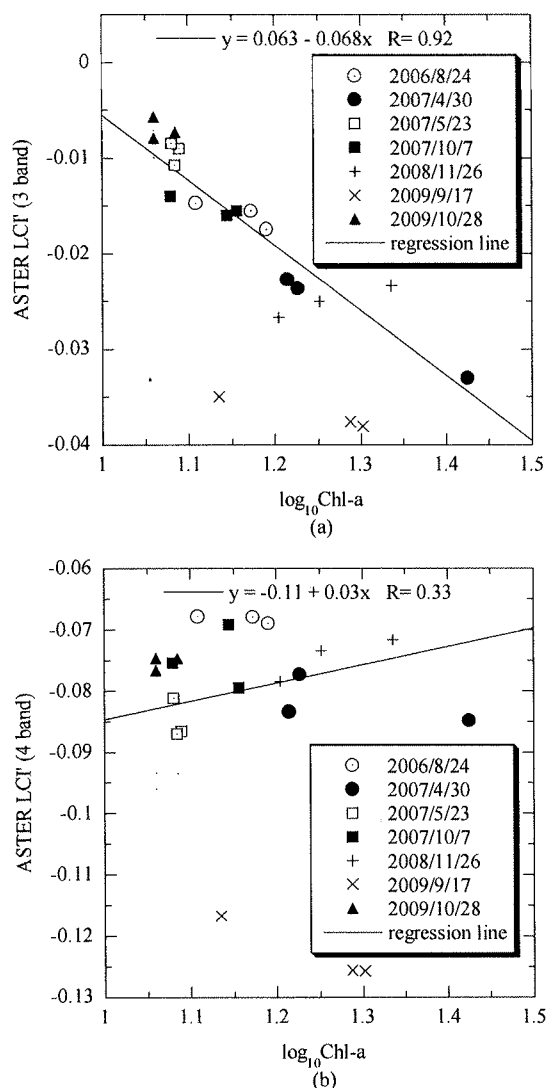


図-5 改良 ASTER LCI と実測相当 Chl-a の関係。(a)式(13a)を使用した場合、(b)式(13b)を使用した場合。

(4) 改良 ASTER LCI の現地データによる検証

前項までに改良 ASTER LCI から、実測 Chl-a を求めることができる可能性が高いことが示された。しかし、ここまで検証してきた実測 Chl-a は MODIS Chl-a から換算された「実測相当 Chl-a」であったため、実測 Chl-a による検証が必要である。そこで、1 日だけであるが、2009 年 10 月 28 日に筆者らが ASTER 飛来日時と同期して船上で取得した Chl-a データを使って改良 ASTER LCI の検証を行った。図-6 は、改良前 ASTER LCI を使った場合(a)と、改良 ASTER LCI を使った場合(b)の実測 Chl-a との関係を示している。ただし、前述の「実測相当 Chl-a」

と「実測 Chl-a」との間のキャリブレーションは行っておらず、また実測 Chl-a データ取得測点と実測 Chl-a 取得測点とは異なるため、図-5 上の横軸、縦軸のスケールと一致しないことを注意されたい。これより、実測 Chl-a 相当の場合と同様、改良 ASTER LCI と Chl-a は高い相関($R=0.90-0.91$)があった。また、この日は改良 ASTER LCI で使用するバンドは、3 バンドでも 4 バンドでもいずれも高い相関を示した。以上の結果から、少なくとも改良 ASTER LCI を使えば、実測 Chl-a を高い精度で推定できる可能性が高いことが示された。

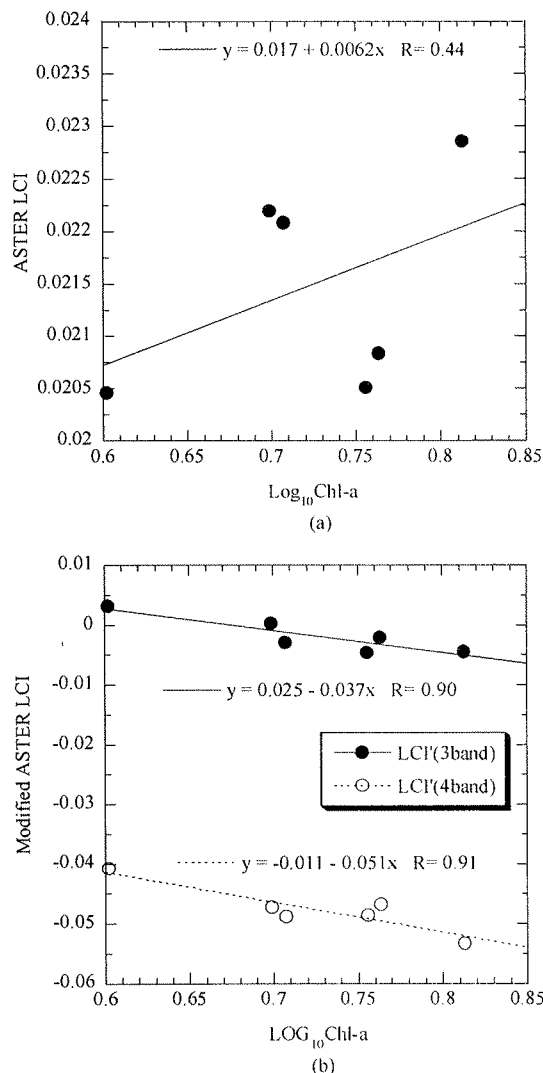


図-6 ASTER LCI と実測 Chl-a の関係 (2009 年 10 月 28 日)。(a)改良前 ASTER LCI を使用した場合。(b)改良 ASTER LCI を使用した場合

(5) ASTER データによる本庄水域の Chl-a 分布推定

図-7は、実測データによっても高い推定精度であることが検証された改良 ASTER LCI (3band) から推定した堤防開削後の2009年10月28日の中海本庄水域周辺の表層 Chl-a 分布である。これより、改良 ASTER LCI は青バンドの影響を強く受けていると考えられ、一見すると500m解像度と同様に見られる。

しかしながら、詳細にみると、同色の500m四方のピクセル内でも複雑なパターンが確認できる。そのため、多時期のデータを解析する場合はMODISデータを使ったChl-a推定よりも、改良ASTER LCIを使った方がより複雑な水塊構造が見える可能性があると考えられた。また図-7からは、中海本庄水域はその南の中海本体の水域と比べ相対的に高いChl-a分布であったことが推定された。

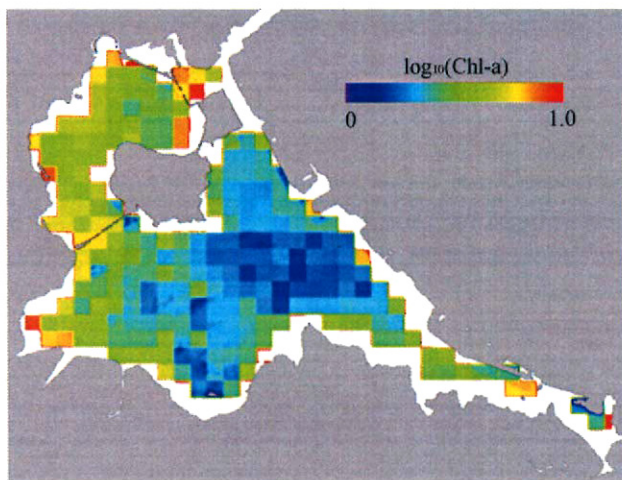


図-7 改良ASTER LCIを使用した2009年10月28日（堤防開削後）における中海の推定Chl-a分布図。図-6の3bandの推定式を使った場合。

4. まとめ

本研究では、海色センサの最新の大気補正法であるLCI法をASTERデータに応用して、中海本庄水域の周期的なChl-a分布推定の可能性を検討した。その結果、ASTERの3バンド（緑、赤、近赤外）を使ったLCIでは、実測相当Chl-a（MODISデータによる推定値）との相関が低かった。一方、ASTER疑似青バンド画像生成法を応用して計算されたLCI（改良ASTER LCI）では、実測相当Chl-aとの相関が高かった。また、2009年10月28日には、ASTERと同期したChl-aデータで改良ASTER LCIを検証した結果、両者に高い相関があった。これらのことから、LCIは青バンドが非常に重要であること、赤バンドはChl-a推定精度に悪影響を与える可能性が高いこと、現状では「青、緑、近赤外」バンドの組み合わせが最も有効であること等が検証された。

しかし、今回は多くのChl-aデータがMODISデータによる間接的なものであり、実測Chl-aによる検証は1日のデータにとどまった。また、改良ASTER LCIは図-7に見られるように湖岸部や狭い領域の詳細なChl-a情報を見ることができないという欠点もある。従って、今後は衛星データと同期した実測Chl-aデータのある過去のLandsat画像やALOS画像、また

将来的にはSGLI（2013年度に打ち上げ予定の250m沿岸海色センサ）によりさらに本法の改良を行うとともに、実測Chl-aを使った検証を続けていく必要がある。

謝辞：本研究の一部は、「平成 21 年度(財)中国電力技術研究財団 試験研究(B)助成、助成テーマ：気球搭載サーモカメラによる干拓堤防開削直後の中海の水環境モニタリング、研究代表：作野裕司」をうけて実施された。関係機関に深く感謝する。

参考文献

- 1) 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: SPOT/HRV データによるアオコ発生時の穴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(2), pp.20-36, 1999.
- 2) 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 データを用いた穴道湖・中海のクロロフィル a 濃度分布推定, 海岸工学論文集, 50, pp.1011-1015, 2003.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 作野裕司, 古津年章, 下舞豊志, 松永恒雄, 國井秀伸: 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, 海洋開発論文集, 25, pp. 509-514, 2009.
- 6) 国土交通省出雲河川事務所水質保全課: 斐伊川水域水環境ニュース.
<http://www.cgr.mlit.go.jp/izumokasen/04mizube/mizukankyou/index.html>
- 7) Turner, R. E. and Spencer, M. N.: Atmospheric model for correction of spacecraft data. In Proc. English Int. Symp. on Remote Sensing of Environment, Univ. of Michigan, Ann Arbor, Mich., pp. 895934, 1972.
- 8) 新井康平: 独習リモートセンシング, 森北出版, 175p, 2004.
- 9) Iqbal, M.: An introduction to solar radiation, Academic Press, 390p, 1983.
- 10) Price, J. C.: Combining multispectral data of differing spatial resolution, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 37(3), pp.1199-1203, 1999.
- 11) 外岡秀行, 篠田崇, 林彰二: MODIS データを用いた回帰変数置換法による ASTER 疑似青バンド画像の生成, 日本リモートセンシング学会, 第 37 回学術講演会論文集, pp. 241-242, 2004.
- 12) JAXA EORC: MODIS 準リアルタイムデータ.
http://kuroshio.eorc.jaxa.jp/ADEOS/mod_nrt_new/index.html