

衛星データを使った内湾の鉛直クロロフィル推定のための ガウスモデルの適用可能性評価

正員 作野 裕 司*

津 島 邦 之**

Application of Gaussian model for the estimation of vertical chlorophyll-a in inner bay using satellite data

by Yuji Sakuno, Member

Kuniyuki Tsushima

Summary

An objective of this research is to evaluate the feasibility of the Gaussian distribution model's application for the vertical Chlorophyll-a (Chl-a) estimation in inner bay by the satellite remote sensing. The in-situ Chl-a (N=15) observed as data for a basic Gaussian model verification in Hiroshima Bay between 2004 and 2005 was used. Consequently, the vertical Chl-a in the bay is to approximate by the Gaussian model using six parameters. However, if the equation for the estimation of Gaussian model parameter is not adjusted every time, the vertical Chl-a estimation only from surface Chl-a data obtained from the satellite data is difficult. The most difficult Gaussian model parameter to estimate from the surface Chl-a was Z_{max} (the depth of the Chl-a maximum).

1. 緒 言

近年、地球温暖化に伴い、地球上の二酸化炭素吸収量モニタリングが求められている。二酸化炭素吸収源として一般によく知られるのは陸上の植物であるが、海洋においては植物プランクトンがその役割を担っている。しかし、沿岸海域の植物プランクトン分布の時間・空間変動は大きく、一般に現場観測のみによってその実態を捉えることは容易ではない¹⁾。

このような要求に対して、近年人工衛星センサで海の色（波長別海表面射出輝度）を測定することにより、海表面のクロロフィル a（以下、Chl-a と略す）を求めることができるようになってきている²⁾。リモートセンシングによる Chl-a 推定の歴史は 1978 年打ち上げの CZCS (Coastal Zone Color Scanner, 沿岸海色計) から始まり、ADEOS/OCST (日本)、SeaWiFS (アメリカ) 等を経て、現在 Terra・AQUA/MODIS 等の海色センサに引き継がれている。このような海色センサは現在海の二酸化炭素吸収量推定には欠かせないツールとなっている。現時点の主要な海色センサの解像度は約 1km、量子化 12bit である。このような海色センサデータの需要は

地球温暖化問題がクローズアップされている今日にあって、益々増加している。

最新の内湾における海色データ公開状況としては、海上保安庁が MODIS データを使って東京湾（2004 年 9 月開始）、大阪湾（2005 年 4 月開始）、広島湾（2007 年 4 月開始）等の内湾の表層 Chl-a 画像を公開している³⁾。解像度の観点からは従来主流であった 1km 解像度の Chl-a 分布図から、最近では 500m 解像度の Chl-a 分布図⁴⁾も公開されるようになっており（2006 年 4 月から JAXA が公開）、より複雑な地形に囲まれた内湾でもその面的な表層分布は把握できるようになってきた。また、筆者らはこれまで MODIS データを使って独自に平常時（500m 解像度）や赤潮時（1km 解像度）における広島湾の表層 Chl-a の推定モデル⁵⁾⁶⁾を考案している。さらに我が国が 2013 年度の打ち上げを目指している GCOM-C1/SGLI (Second-generation Global Imager) 計画⁷⁾では、250m 解像度の表層 Chl-a マッピングが行われることになっている。

一方、衛星海色センサの弱点の一つに、衛星からは直接的に水中の鉛直 Chl-a を推定することが不可能であるという点があげられる。このような問題点を解決するために、一般に外洋では衛星から得られた表層 Chl-a は Platt and Sathyebdranath⁸⁾が見出したガウス分布モデルにより、鉛直の Chl-a に変換される。わが国では、松村・塩本⁹⁾、Kameda and Matsumura¹⁰⁾らによって三陸沖等においてこの方法が応用されている。しかしながら、これらはいずれも外洋あるい

* 広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻

** いすゞ自動車株式会社

は外洋に面した沿岸の研究例であり、より閉鎖性の強い内湾に適用された例はほとんどない。これはこれまで内湾に適用できるような解像度の海色センサがなかった、あるいは内湾に適した衛星の表層 Chl-a 推定アルゴリズムの研究が非常に遅れていたためと考えられる。前述したように地球温暖化に伴い、陸に近い沿岸の二酸化炭素吸収量推定の機運も高まり、次々と新しい表層 Chl-a 推定アルゴリズムあるいは新しい解像度のよい海色センサの打ち上げが計画されている今日、内湾における鉛直 Chl-a 推定モデルの適用可能性を検討しておくことは非常に重要であると考えられる。

以上のような背景から、本研究では、衛星データを使った内湾の二酸化炭素吸収量モニタリング研究の一環として、広島湾をテストサイトとして前述した鉛直 Chl-a 推定(ガウス分布)モデルの適用性を評価することを目的とした。なお、外洋の鉛直クロロフィルにガウスモデルを最初に適用した Platt and Sathyendranath¹¹⁾は、このモデルによる一次生産量推定の誤差として、40~60%というオーダーの数値を算出している。このことから、本研究では鉛直 Chl-a の推定目標精度を同程度の 50%以内と設定する。

2. 方法

2.1 研究海域の概要

研究対象水域である広島湾は Fig. 1 に示す通り、瀬戸内海の西部に位置し、東西約 30km、南北約 55km の楕円形の内湾である。海域の面積は約 1000km²、容積が約 27km³、平均水深 25.6m、で南側に開口部を持つ陸地に囲まれた内湾である。同湾は牡蠣の養殖が盛んであり、北部海域には牡蠣筏が多く存在しているが、近年赤潮や貧酸素化等が深刻である。

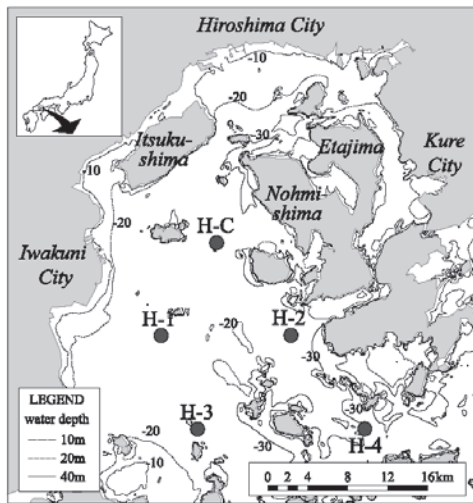


Fig.1 Study area

2.2 鉛直 Chl-a 分布推定のためのガウス分布モデル

一般に外洋における Chl-a の鉛直分布は、「ずらしを入れたガウス分布¹¹⁾」で表現できる。ただしそのパラメータは海域や季節によって大きく変化している。この曲線は Fig. 2 のような形状で、一般に次式¹⁰⁾で表される。

$$Chla(z) = B_0 + S \times z + \frac{h}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(z - Z_{max})^2}{2\sigma^2} \right] \quad (1)$$

ここで B_0 はバックグラウンド生物量 (ガウス分布の底面に相当する Chl-a 値) と呼ばれており、 S は鉛直方向に対するガウス分布の傾き、 z は水深を示している (Fig. 2 で傾きがない場合が (a)、ある場合は (b) となる)。また Z_{max} は Chl-a 極大の深さ、 σ は鉛直的な幅の尺度 (標準偏差)、 h はガウス曲線下の Chl-a 積分値である。ただし、この際に、 σ は次式で表わされる。

$$\sigma = \frac{h}{\sqrt{2\pi(C_{max} - B_0 - S \times Z_{max})}} \quad (2)$$

ここで C_{max} は鉛直 Chl-a の最大値を示す。式(1)、式(2)における 6 つの各パラメータ (B_0 , S , z , h , Z_{max} , C_{max}) の値を変えることにより、多様な分布パターンを再現できる⁴⁾。また、リモートセンシングの観点からは、海色センサで得られる表層 Chl-a と 6 つのパラメータの関係式を Fig. 3 のような手順¹⁰⁾であらかじめ求めおくことによって表層データのみから鉛直 Chl-a 分布を推定可能にしている。本論文でも基本的に本方法を使用する。

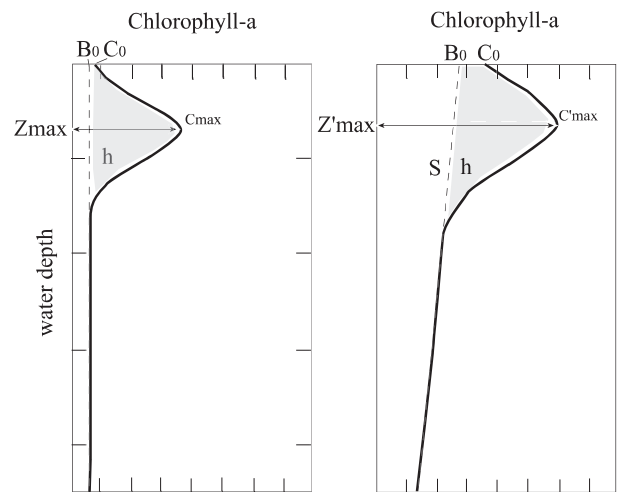


Fig.2 Vertical Chl-a distribution model

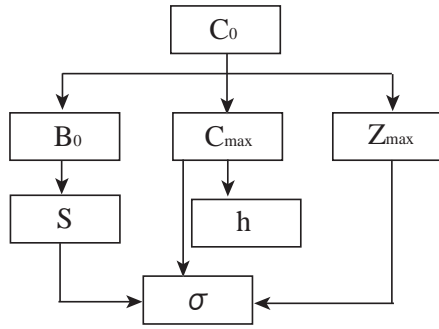


Fig.3 Vertical Chl-a estimation flow.

2.3 実測 Chl-a データ

広島湾における鉛直 Chl-a のガウスモデル適用可能性の検証に使用したデータは、第六管区海上保安部が実測した鉛直 Chl-a の値¹³⁾である。このデータは2004年と2005年における「1月、4月、7月、10月」の年4回、Fig.1に示す「H-1、H-2、H-3、H-4、H-C」の5地点において水深0.5m毎（ただし最表層は1m水深のデータとなる）のChl-aを測定したものである。また、モデルの検証には2006年に同じ機関が取得した同様のデータを用いた。ただし検証に用いた2006年のデータは水深1mごとのデータである。Table 1に使用した実測Chl-aデータと主な表層水質パラメータ（表層水温、透明度）の概要を示す。なお、表層の塩分はいずれも31程度であった。

Table 1 Summary of the average surface conditions

Average surface conditions				
Date	Chl-a (µg/l)	W. T.* (°)	SDD** (m)	N
2004/1/8-9	0.5-1.0	13.8-14.4	6.0-8.0	5
2004/4/21-22	0.6-0.8	14.7-16.6	5.0-8.5	5
2004/7/14-15	0.7-0.9	23.4-27.5	6.5-9.0	5
2004/10/27-28	0.8-1.1	21.4-22.4	7.0-10.0	5
2005/1/12-13	0.5-0.8	13.5-14.7	9.0-35.0	5
2005/4/19-20	0.9-2.3	14.3-14.6	5.0-6.0	5
2005/7/20-21	0.6-1.2	22.6-27.7	5.5-9.0	5
2005/10/12-13	0.9-2.6	14.6-24.1	5.5-6.5	5

*W.T.: water temperature; **SDD:Secchi Disk depth

3. 結果及び考察

3.1 実測データによる鉛直 Chl-a 分布パターン特性

Fig. 4 に2004年と2005年の広島湾における四季の鉛直 Chl-a 分布の全データを示す。これより、広島湾の鉛直 Chl-a 分布は地点ごとの差は非常に小さく、むしろ季節によりパターンが異なることがわかる。つまり、冬（1月）は鉛直的にほとんど値の変化がなく、春（4月）、夏（7月）、秋（10月）にChl-a極大層が生じている。ただし、Fig. 4(a)の冬に見られるスパイク上の高濃度（A, B）は異常値（なんらかの原因で非常に薄い層にプランクトンが濃集したか、観測機器

のエラー値の可能性が考えられる）で、本来モデル化できない値と考えられる。Fig. 4中の太線（2004年の7月と2005年の4月）と点線（2005年10月）はChl-a極大層が顕著で、いずれも、外観上はFig. 2の分布パターンによく似ている。また、Chl-a極大層は太線の時期（2004年7月、2005年4月）で水深15-20m前後、点線では水深5-10m前後（2005年10月）にある。このような結果から、以下のガウスモデルの定量的な解析にはFig. 2の分布パターンによく似ている春、夏、秋のデータのみを使用する。

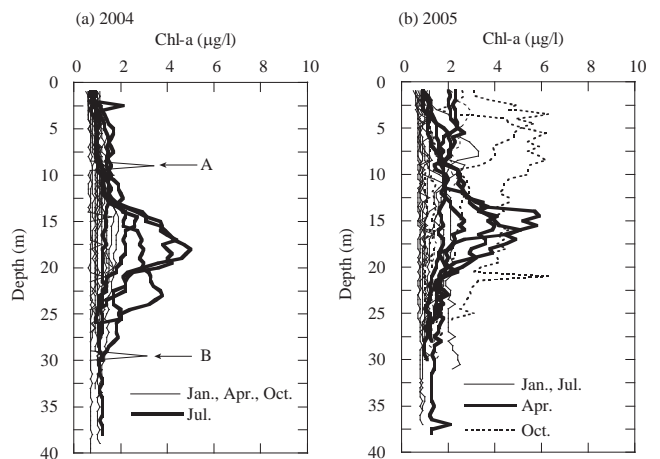


Fig.4 Vertical Chl-a distribution derived from in-situ data.

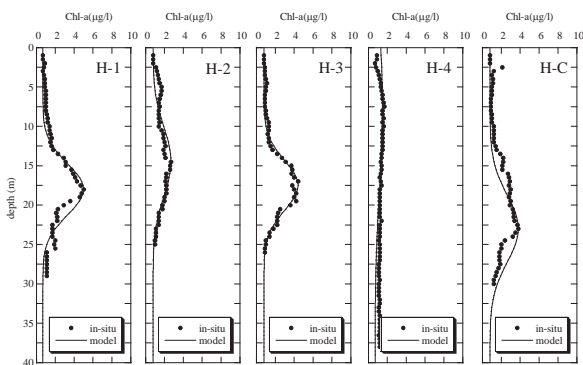
3.2 鉛直 Chl-a モデルの再現性

本節では実際に広島湾の鉛直 Chl-a がガウス分布曲線で表現可能であるか、定量的に評価する。Fig. 5は現場データから得られた値を基に実際にガウスモデルを適用した結果である。ただしFig. 4の鉛直分布形状特性及びパラメータ設定の難しさから今回は式(1)のパラメータSは一律0とした。Fig. 4より、いずれの日付、地点ともガウスモデルの値と実測Chl.aの値は極めてよく一致することが確認できた。精度としては、2005年10月のH-Cの1点を除く14地点で実測とモデルの差の相対平均（E_A）が0.8~14.8%、積算Chl-aの相対差（E_B）が0~14.4%の範囲であった。また、比較的誤差の大きかった2005年10月のH-Cの精度（E_A, E_B）もそれぞれ、71.6%、66.5%であり、全体で平均すると目標推定精度50%を大きくクリアしている。

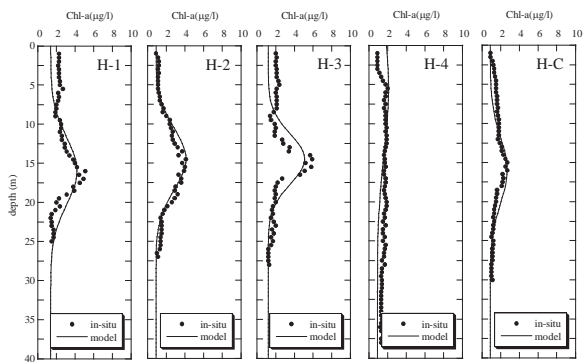
また、これらのパラメータの統計値（各時期5地点の平均と標準偏差）及び従来の研究結果と比較する意味で、松村・塩本⁹⁾が遠州灘（静岡県沖）で行った調査データを基に算出したパラメータの計算結果（ただしC_{max}の値は数値として公表されていないため空欄にしてある）の統計値（8地点の平均と標準偏差）をTable 2に示す。これより、3時期のパラ

メータの平均値には大差はないが、 Z_{max} のみは時期により若干値の差が大きくなっている。また地点間における各パラメータ変動（平均に対する標準偏差の値）概ね平均値の約30%より小さい値であることがわかる。ただし2005年10月の h の標準偏差が他の時期の値と比較して非常に値が大きい。これは遠州灘の結果も同様であり、また時期によって植物プランクトンの量が急激に増える時期があることは容易に想像できるため、異常値ではないと思われる。また遠州灘の平均値と比較すると広島湾の Z_{max} の値は1/2以上浅い。これは外洋と比較して、内湾の透明度が低いため、Chl-a極大層の深度がより上層になっているためと考えられる。

(a) Jul 2004



(b) Apr. 2005



(c) Oct. 2005

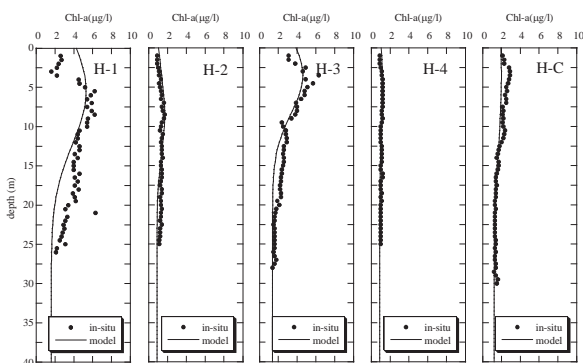


Fig.5 Comparison of the vertical Chl-a distribution pattern between the Gaussian model and the in-situ data in Hiroshima Bay, Jul.2004, Apr.2005, Oct.2005.

Table 2 Statistical summary (Average ± SD) derived from the in-situ data of parameter for vertical profile function of Chl-a in Hiroshima Bay, Jul 2004, Apr. and Oct. 2005 and the reference value¹⁾ off Enshunada to Kuroshio, SY87 Sep.1987.

Parameter	Jul. 2004	Apr. 2005	Oct. 2005	Enshunada
B ₀ (µg/l)	0.76±0.05	1.06±0.23	1.20±0.31	0.26±0.18
Z _{max} (m)	16.1±5.7	13.3±4.4	5.3±2.1	32.6±32.4
h(mg/m ²)	27.5±6.6	27.4±5.5	26.9±24.3	37.6±35.0
C _{max} (µg/l)	3.52±1.33	3.98±1.59	3.68±2.47	-
σ(m)	5.1±3.0	4.8±2.0	6.2±1.8	10.0±5.8

3.3 表層 Chl-a と鉛直 Chl-a モデルパラメータの関係

3.2節までに広島湾の鉛直Chl-aの分布がガウスモデルで非常によい近似を得ることができることを示したが、リモートセンシングに应用する場合、これらのパラメータを表層Chl-aのみから導かなければならない。従って次にFig.3の流れに従って、各パラメータと表層Chl-a (C₀)との回帰分析を行った。Fig.6はその分析結果を示している。分析の結果はいずれも有意な相関 (C_{max}, hは有意水準0.05で、Z_{max}は有意水準0.1でそれぞれC₀との相関が有意と認められた)であり、以下のような推定式が導かれた。

$$C_{max} = 1.45C_0 + 1.73 \quad (r=0.67, N=15) \quad (3)$$

$$Z_{max} = -3.50C_0 + 16.37 \quad (r=0.46, N=15) \quad (4)$$

$$h = 6.74C_{max} + 2.14 \quad (r=0.85, N=15) \quad (5)$$

このうち「Z_{max}」の相関は著しく低く、実際この回帰式を使って推定したH-3における3時期の鉛直Chl-aデータはFig.7に示すとおりだが、誤差E_A, E_Bはそれぞれ3.4-69.2%, 0-5.4%であり、平均すると、36.6%, 34.4%と目標精度50%をクリアしている。ただしZ_{max}の値が実測値と比較して大きくずれる。Z_{max}の推定誤差は水柱の全生物量には影響しないが、将来的に二酸化炭素吸収量を推定する場合にはこの鉛直Chl-aに「Chl-aあたりの一次生産速度」（鉛直水温や水中照度を関数とする）を掛け合わせた鉛直積分を行うため、Z_{max}の値の大きな誤差は二酸化炭素吸収量の過少又は過大評価の原因となる。従って、二酸化炭素吸収量計算においてZ_{max}の値の大きな誤差はできるだけ回避する必要がある。

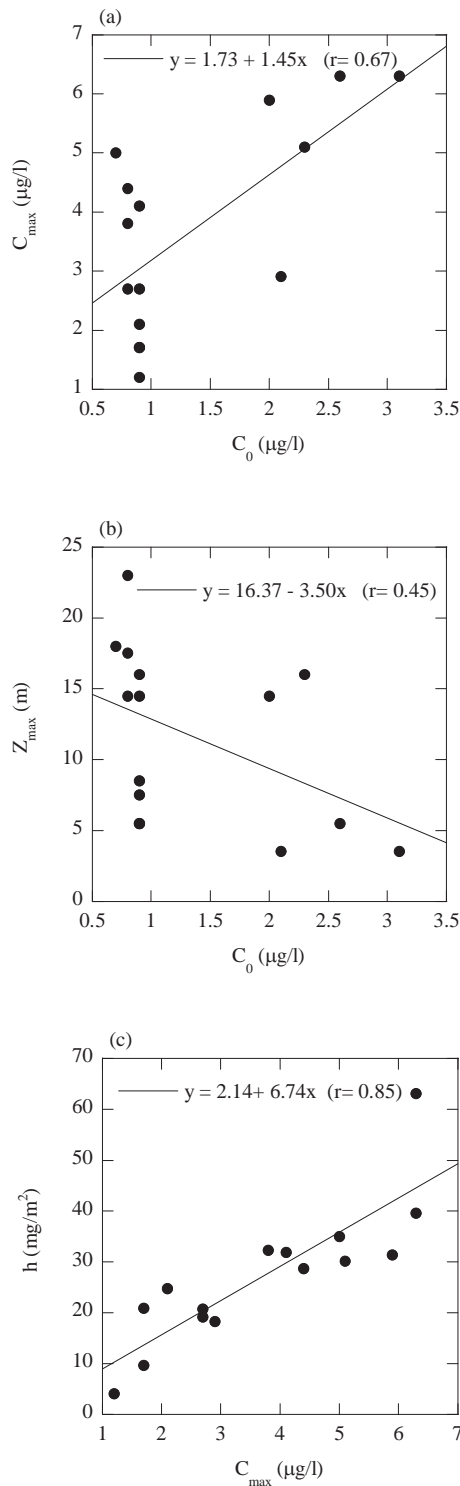


Fig.6 Relationship between the surface Chl-a and Gaussian model parameters

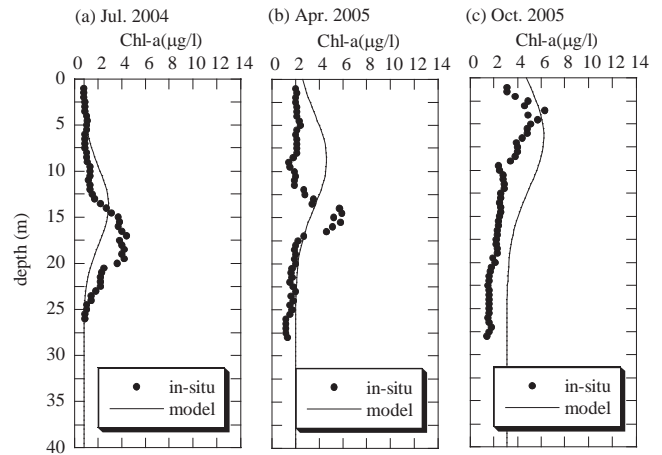


Fig.7 Comparison of the vertical Chl-a distribution pattern between the Gaussian model and the in-situ data using Equation (3), (4), (5) at H-3, Jul.2004, Apr.2005, Oct.2005.

そこで、式(4)の推定式を改良するために、観測時に入手可能な表層 Chl-a 以外の 2 次元パラメータを導入して、 Z_{max} の推定精度を上げる方法を検討した。一般に Chl-a の鉛直分布に影響を与える因子として、水温、塩分、光量、栄養塩類等が知られている¹⁴⁾。このうち、衛星が観測した日時に 2 次元データを取得できる可能性があるデータは、実質衛星から推定可能とされる表層水温と日射量データのみである。ただし衛星からの日射量データは外洋では使用されているが、内湾では利用できるデータプロダクトがない。また、地上日射量の実測値は水域の周辺 1 カ所（広島湾の場合は広島気象台）しかなく、水面直上の 2 次元の地上日射量データを得ることができない。従ってここでは、地上日射量と大気圏外日射量が比例すると仮定して、次式¹⁵⁾で表わされる大気圏外日射量 I [W/m^2] を地上日射量相当として利用した。

$$I = 1367 \left(\frac{r^*}{r} \right)^2 \sin(\alpha) \tag{6}$$

ここで、 r^* 、 r は太陽、地球間の平均距離と観測日の距離、1367 は太陽定数（単位は W/m^2 ）をそれぞれ示す。また α は太陽高度であり、緯度、経度、時刻の関数から計算される。

Table 3 は「 Z_{max} 」と「表面 Chl-a (C_0)、表面水温 (T_0)、表面塩分 (Sal_0)、日射量 (I_0)」（ I_0 以外は鉛直 Chl-a データと同期して取得されたデータを使用)の相関係数を示している。これより、 C_0 と比較して、「 Z_{max} 」との相関が高かったパラメータは、3 時期のデータを統合した場合「 I_0 」しかないことがわかる、ただし、その場合でも 4 月のデータは 7 月・10 月と異なり、負の相関を示している。また、「 Z_{max} 」と「 T_0 」は 7 月では高い相関 ($r=0.85$) を示すが、全季節では相関が

悪い。ただし Fig. 8 に示す通り、「 Z_{max} 」と「 T_0 」の関係は、「 T_0 」が 14-15°C 程度の 4 月以外の 7 月, 10 月 (T_0 が 22°C 以上) では正の高い相関がある (Fig. 9(a)) ことがわかる。一方, 4 月における「 Z_{max} 」と「 I_0 」は比較的高い負の相関 ($r=-0.67$) があることから, 季節の場合分けをすることにより, 「 Z_{max} 」の推定が可能であることが考えられる。そもそも「 Z_{max} 」は鉛直方向の栄養塩の増減などにより上下することが知られており¹⁶⁾, T_0 や I_0 のパラメータが栄養塩の増減に対してなんらかの影響を与えているため, 「 Z_{max} 」との相関が高まったと推測される。最終的な Z_{max} の推定式は以下の通りであり, この推定式を適用した場合の鉛直 Chl-a の実測とモデルとの関係を Fig. 10 に示す。なお, Z_{max} の推定式の変更により, E_A , E_B の精度に影響はない。

(7 月, 10 月)

$$Z_{max} = 4.03T_0 - 90.01 \quad (r=0.89, n=10) \quad (7)$$

(4 月)

$$Z_{max} = 0.04I_0 + 61.75 \quad (r=-0.67, n=5) \quad (8)$$

Table 3 Correlation matrix between Z_{max} and other parameters

Date	C_0	T_0	Sal_0	I_0
2004 Jul	-0.65	0.85	-0.61	0.51
2005 Apr	0.42	-0.42	-0.36	-0.67
2005 Oct	-0.71	-0.29	0.61	0.32
Total	-0.45	-0.01	0.12	0.67

N=15

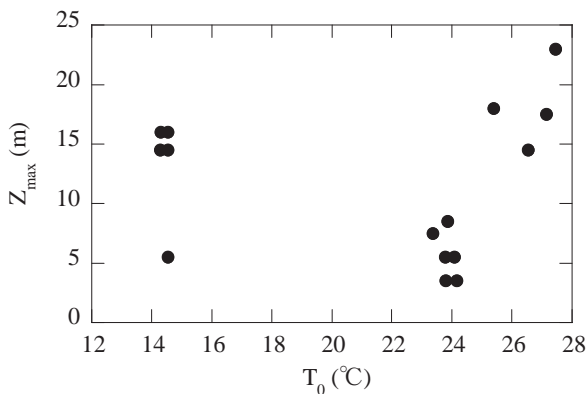


Fig.8 Relationship between Z_{max} and T_0 .

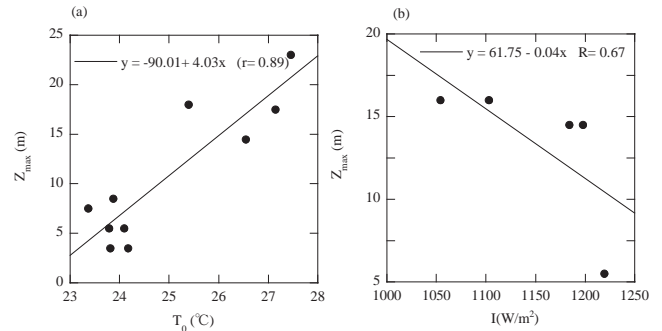


Fig.9 Relationship between T_0 , I_0 , and Z_{max} .

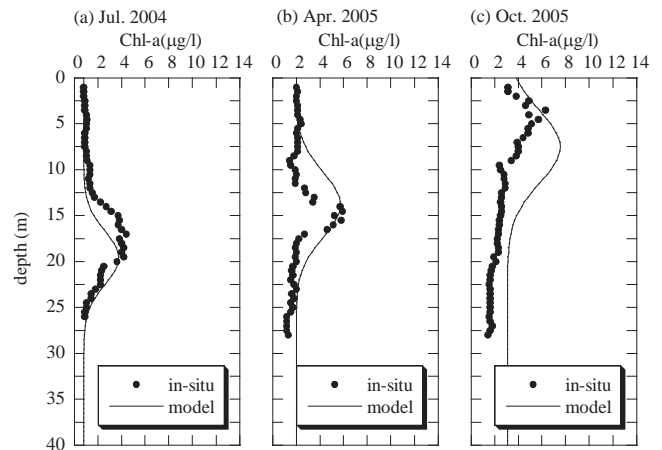


Fig.10 Comparison of the vertical Chl-a distribution pattern between the Gaussian model and the in-situ data using Equation (3), (5), (7), (8) at H-3, Jul.2004, Apr.2005, Oct.2005.

3.4 任意の時期による Chl-a 鉛直モデルの適用可能性

3.3 節までに広島湾の鉛直 Chl-a はガウスモデルに近似できることがわかり, 推定の難しい Z_{max} も水温や日射量の補助パラメータを使えば, 表層データから現場の鉛直 Chl-a をある程度精度よく推定できることが示された。しかし, これは現場のデータに合うようにして推定式を作成しているため, 任意のデータに適用できるとは限らない。そこで, 2006 年に同じ機関が同様に取得した実測 Chl-a データ (春, 夏, 秋における H-3 の値) を使って, 式(3), 式(5), 式(7), 式(8)を使った鉛直 Chl-a データの推定可能性を検証した。その結果は Fig. 11 に示すとおりで, 2004 年と 2005 年のデータで作成した推定式によるモデルデータはいずれも「 Z_{max} 」の位置は若干ずれるものの, 実測データと値が同程度の結果となった。誤差 E_A , E_B はそれぞれ 7.6-87.9%, 2.6-41.9% であり, 平均すると, 23.6%, 3.5% と目標精度 50% をクリアしている。

以上のように, 表層 Chl-a から鉛直 Chl-a の安定した推定

に 50% 程度の誤差は伴うが, Fig. 9, Fig. 10 で示したように Z_{max} の推定式の改良をすれば, 最小限の実測データを使った追算的な鉛直 Chl-a 推定は十分可能であると考えられた.

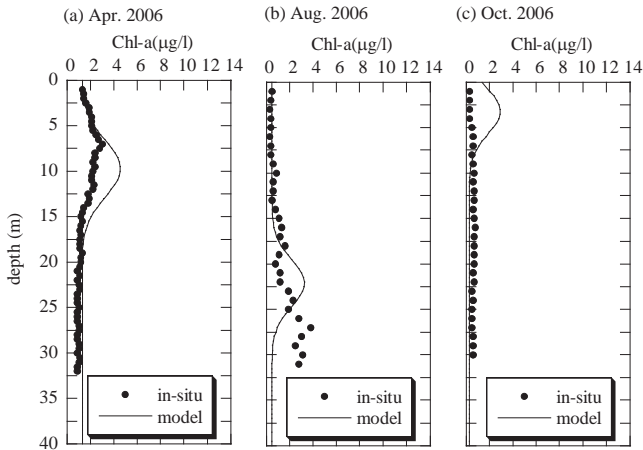


Fig.11 Comparison of the vertical Chl-a distribution pattern between the Gaussian model and the in-situ data using Equation (3), (5), (7), (8) at H-3, Apr., Aug., Oct., 2006.

3.5 衛星 Chl-a データを使った鉛直 Chl-a 分布推定

本節は実際に衛星から取得された Chl-a データ (Fig. 11 で使用した 2006 年 4 月 19 日のデータ) と前節までに導き出した推定式を用いて, 同日の広島湾の鉛直 Chl-a 分布の再現を試みた. 鉛直 Chl-a 分布の推定に先立ち, まず衛星 Chl-a の精度検証を行った. 今回使用した衛星 Chl-a は 2006 年 4 月から JAXA/EORC が公開している 500m 解像度 MODIS Chl-a バイナリープロダクト⁴⁾のデータである. 一方, 比較に使用した実測 Chl-a データは 3.4 節で使用した実測 Chl-a の最表層値 (1m 水深) 15 データである. ただし, 衛星と実測のマッチアップデータは湾上空に雲が覆っている箇所を除くと全 11 データセットとなった. Fig. 12 に MODIS Chl-a と実測 Chl-a の関係を示す. 両者の平均差は $0.10 \mu\text{g/l}$, 差の標準偏差は $0.31 \mu\text{g/l}$ と必ずしも推定精度はよくないが, 沿岸の Chl-a 推定アルゴリズムが開発途上であることを考慮すると, 現状では現場の Chl-a 分布情報を比較的正確に表している情報と考えられた. そこでこの MODIS Chl-a データを真の値と仮定して, 式 (3), (5), (8) の推定式を使って鉛直 Chl-a を計算した. Fig. 13 は水深 10m (Chl-a の極大付近) の鉛直 Chl-a 画像 (左図) と, 南北 (A-B) 断面と東西 (C-D) 断面における Chl-a の値 (右図) を示す. 右図中には同日 (H-C は翌日) の水深 10m 実測値も示している. これらの図から, 実測値と推定値が非常によく一致している点 (H-C, H-3) と実測と本モデルでかなり値が異なる点があることがわかる. これは Fig. 11 に示したようにそもそもモデルと実測値に誤

差があること, また Fig. 12 で示すように衛星表層 Chl-a と実測 Chl-a にも誤差があること等が原因だと考えられる. ただし, 値の大小についてはモデルと実測の傾向はよく一致している. このようにガウス分布モデルによる内湾の鉛直 Chl-a 推定には Z_{max} の推定精度の向上など, 問題を抱えているが, 比較的簡単なモデルを使って 50% 以下の推定誤差で鉛直 Chl-a 推定が可能であることが示された.

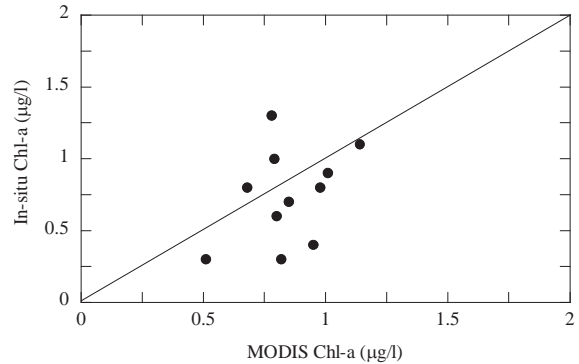


Fig.12 Relationship between MODIS Chl-a (500m resolution) from JAXA EORC and the in-situ Chl-a, 2006.

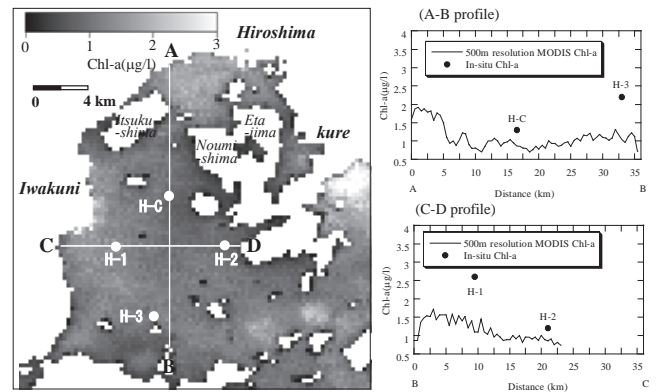


Fig.13 Chl-a map at the 10m depth in Hiroshima Bay, 18 Apr. 2006 derived from Gaussian model using MODIS data of 500m resolution and A-B and C-D profile of MODIS Chl-a.

4. まとめ

本研究では, 広島湾をテストサイトとしてリモートセンシングによる鉛直 Chl-a 推定のためのガウス分布モデルの適用性評価を目的とした. その結果, 広島湾の鉛直 Chl-a はガウス分布モデルで近似可能であることがわかった. またその際, 表層 Chl-a データのみからの推定は難しいが, 最も推定が困難なパラメータは Z_{max} であることが明らかになった. さらにその Z_{max} の推定において, 水温や日射量等の補助的なデータを使うことにより, 目標精度 50% 以内で鉛直 Chl-a の推

定が可能であることが示された。

謝 辞

本研究で使用した実測 Chl-a データは海上保安庁のホームページから取得したものである。また、使用した MODIS Chl-a のバイナリーデータは JAXA/EORC から提供を受けた。関係各位に対して、記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 柳哲雄, 石丸隆, 佐藤博雄, 塚本秀史: 紀伊水道のクロロフィル分布に関する現地調査と衛星画像, 海の研究, 7(6), pp. 369-374, 1998.
- 2) 石坂丞二, 田島清史, 岸野元彰: 海色データから推定した大村湾のクロロフィル a 濃度の検証, 海の研究, 11(2), pp. 235-241, 2002.
- 3) 海上保安庁: 地球観測衛星画像による海域のモニタリング, http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KANKYO/SAISEI2/saisei_html/top.htm
- 4) 宇宙航空研究開発機構 地球観測研究センター: MODIS 準リアルタイムデータ, 500m分解能のクロロフィル a 濃度画像, http://kuroshio.eorc.nasda.go.jp/ADEOS/mod_nrt/index.html
- 5) 作野裕司, 山口大輔: 海色センサ MODIS を用いた広島湾の赤潮分布推定, 海岸工学論文集, 51, pp. 956-960, 2004.
- 6) Sakuno, Y. and Yamaguchi, D.: Chlorophyll-a mapping using 500m resolution MODIS in Hiroshima Bay, Recent Advances in Marine Technology 2004, pp. 71-80, 2005.
- 7) 今岡啓治: 地球環境変動観測ミッション (GCOM) の概要, 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. 67-68, 2007.
- 8) Platt, T. and Sathyendranath, S.: Oceanic primary production, Estimation by remote sensing at local and regional scales, Science, 241, pp. 1613-1620, 1988.
- 9) 松村臯月, 塩本明弘: 基礎生産力関数 Φ の鉛直分布 (II) - 衛星リモートセンシングによる基礎生産力算定のために -, 遠洋水研報, 30, pp. 227-270, 1993.
- 10) Kameda, T. and Matsumura, S.: Chlorophyll biomass off Sanriku, Northwestern Pacific, estimated by Ocean Color Temperature Scanner (OCTS) and a vertical distribution model, Journal of Oceanography, 54, pp. 509-516, 1998.
- 11) Platt, T. and Sathyendranath, S.: 海洋における一次生産のモデル化(13), 海洋と生物, 120, 21(1), 1999.
- 12) Platt, T. and Sathyendranath, S.: 海洋における一次生産のモデル化(11), 海洋と生物, 118, 20(5), 1998.
- 13) 海上保安庁: 瀬戸内海・宇和島沖の水質情報, <http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KAN6/suishitu/suishitumenu.htm>
- 14) 秋山優, 有賀祐勝, 坂本充, 横浜康継編: 藻類の生態, 内田老鶴圃, 1986
- 15) 中川清隆: 太陽方位、高度、大気外日射量の計算, http://www.es.ris.ac.jp/~nakagawa/met_cal/solar.html
- 16) 關文威監訳: 生物海洋学入門, 講談社, 1996