

沿岸域水質環境モニタリングのための Terra・Aqua/MODIS データ解析システムの構築

A Proposal of New Analysis System with Terra AQUA / MODIS Data for Monitoring Coastal Water Environments

日大生産工 ○岩下 圭之、大木宜章、朝香智仁
Univ. of California, Santa Barbara J.C. Dozier

ABSTRACT

MODIS has specific feature particularly view for the entire Earth's surface every 1 to 2 days. This multispectral hyper sensor in 36 spectral bands, which has been established for evaluating and monitoring ocean environment, is a key instrument aboard the Terra-Aqua/MODIS Satellite. This study aims mainly to establish appropriate evaluation method & system for Terra/MODIS and AQUA/MODIS data to monitor corresponding macroscopic ocean environment. To obtain accurate results of ocean color or water quality, especially Chlorophyll-a, using these satellite data, establishment and install of specific radiometric correctional algorithm and a proven empirical algorithm into our system. As results; 1) two algorithms to convert or correct satellite original set radiometrically and geographically were created and proven, 2) a new image processing system that can effectively cope with archiving large quantities of time-series chlorophyll-a concentration data using Terra-Aqua/MODIS data for monitoring adjacent water area surrounding this country has been established successfully.

1. はじめに

近年、日本の排他的経済水域では、海洋不法投棄によって著しい水質の悪化が懸念されている⁹⁾。海洋法条約によって、沿岸国は経済水域において生物資源の保存や海洋環境の保全などを義務づけられており、マクロ的かつタイムリーな水質環境をモニタリングするシステムは非常に重要である。

これまで、本プロジェクトの一環として、Landsat/TM および Terra/ASTER などの高分解能衛星データによる局地的な内水評価を行うための chlorophyll-a 推定アルゴリズムの構築を行い、成果を上げてきた。以降、実験室ベースで水質環境項目同士の相互関係についてハイパースペクトル計測器を用いて新たなアルゴリズムの開発に取り組んでいる。本プロジェ

クトにおける最終目標の一つである「MODIS データによる水質定量評価を最終ゴールとした沿岸域をモニタリング」の実用化にむけて、これまで高解像度衛星を利用しながらアルゴリズムの MODIS へのアレンジならびにその解析システムの構築を行ってきた。

MODIS データを受信・処理するシステムは、NASA²⁾をはじめ国内の研究機関^{3),4),5)}でも構築されており、FTP を通じて一般のユーザでも利用できるようになってきたが、これらのデータは直接受信した生データではなく、低次もしくは高次処理を施した補正済みデータであり、導入済みのアルゴリズムの更新や独自に開発したアルゴリズムを MODIS データへ反映させるためには、生データを受信するシステムを自前で用意しなければならない。また、MODIS データを高次処理した chlorophyll-a データからの任意の地域における実利用に供せる水質環境 GIS を構築するためには、時系列の chlorophyll-a データをアーカイブしておくシステムも必要になる。これらを統合したシステムを構築することができれば、衛星データをこれまで適用されてこなかった分野へ導入することも可能であり、萌芽性・発展性のある研究を実施することができると思われる。

そこで本研究では、日本近海（北緯 50 度～25 度、東経 125 度～155 度）を観測した MODIS の生データをリアルタイムで受信し、高次処理した chlorophyll-a データをアーカイブできる解析システムを構築することを目的とした。本論では、本研究で構築した解析システムの概要およびシステムに導入したアルゴリズムについて述べる。そして、実際に受信した MODIS データから高次処理したデータについてその妥当性を検討し、今後の運用方法や他分野と連携した利用方法について述べる。

2. 研究の方法

2.1 解析システムの構成

本解析システムは、米国 SeaSpace 社の TeraScan システムを基に構成されており、認

証サーバーを介して自動的に1日6~8パスのTerra/MODIS および Aqua/MODIS の生データをリアルタイムで受信し、全ての生データと高次処理済みのデータをアーカイブしている。さらに、初期受信が良好に行えなかったデータに対しては、時間を遡ってデータを再受信し、同様な処理を行えるシステムとした。また、生データおよび高次処理済みのデータは2TBのファイルサーバーに一定期間格納し、生データに関しては解析が終了し次第オフライン上の媒体に保存する運用形態とした。ファイルサーバーに格納しているデータは、解析システム内部に配置されたPCのみからアクセスできるようにし、PC上から高次処理済みのデータを利用して様々な解析が実行できる環境とした。

2.2 解析システムに導入したアルゴリズム

Fig. 1は、解析システムに導入したアルゴリズムの処理フローである。本システムでは、上方から順に処理が始まり、生データを処理する低次処理からchlorophyll-aデータを生成する高次処理までを実行する。図中のLevel 0 fileが生データにあたり、まず生データから表1に示したバンドを含みこれ以降の処理に必要なバンドを選定してLevel 1A fileが生成される。Level 1A fileからは衛星の軌道情報を加えて、データの位置情報を格納しているGEO fileとそれらのデータから幾何学的な補正を施したLevel 1B fileが生成される。Level 1B fileからは衛星の軌道情報と観測時の大気の状態および風向・風速などのアンシラリデータを加えて大気補正を施し、最終的な成果物であるchlorophyll-aデータが生成される。次節では、Level 1B fileからLevel 2 fileが生成されるまでに用いており、解析システムに導入したアルゴリズムのコアについて述べる。

1) 正規化射出放射輝度

Terra/MODIS および Aqua/MODIS は地表から705km上空を周回しているが、MODIS センサに到達する海面から全放射輝度は、Hooker and McCain(2000)によると(1)式で表される。

$$LT(\lambda) = tD(\lambda)LW(\lambda) + tD(\lambda)LF(\lambda) + tD(\lambda)LG(\lambda) + LR(\lambda) + LA(\lambda) + LRA(\lambda) \quad (1)$$

ここで、 $tD(\lambda)$ は拡散透過率、 $LW(\lambda)$ は海面からの射出放射輝度、 $LF(\lambda)$ は白波の反射による放射輝度、 $LG(\lambda)$ はサングリントによる放射輝度、 $LR(\lambda)$ はレイリー散乱による間接放射輝度、 $LA(\lambda)$ はエアロゾル散乱による間接放射輝度、 $LRA(\lambda)$ はレイリー散乱とエアロゾル散乱

が混合した間接放射輝度、 λ は波長である。(1)式を解き、 $LW(\lambda)$ 項だけを算出すれば海面からの射出放射輝度を求めることができるが、MODISはスキャンミラーを左右に±55度動かして観測しているために、そのままでは衛星直下と観測幅の端とは同等な値として扱うことができない。そのため、さらに太陽天頂角

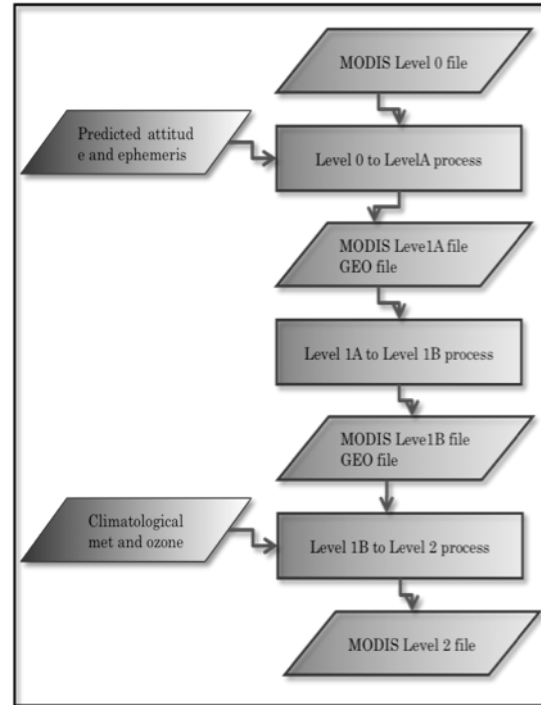


Fig. 1 Logical form of newly algorithm for Terra/Aqua data for evaluating Ch-a.

を考慮して正規化処理をし、海面が太陽に対してフラットになるように補正する必要がある。Gordon, H.R., and Wang, M.(1994)によると正規化射出放射輝度は、(2)式で表すことができる。

$$nLW(\lambda) = \frac{L_w(\lambda)}{(t_{oz} \cdot t_{sol} \cdot \cos(\theta) \cdot f_{sol}) \times f_{oob} \times b(\lambda)} \quad (2)$$

ここで、 $nLW(\lambda)$ は正規化射出放射輝度、 t_{oz} は太陽から地上方向のオゾン層を通過する太陽放射の透過率、 t_{sol} は太陽から地上方向の拡散性天空光の透過率、 $\cos(\theta)$ は太陽天頂角の余弦、 f_{sol} は太陽-地心距離、 f_{oob} は帯域外反射の補正項、 $b(\lambda)$ は双方向性反射の補正項である。

本研究では、(1)式および(2)式の変換を行ってデータの一次処理を行い、大気上端で観測された衛星データを海表面からの射出放射輝度へ変換した。なお、観測時の大気の状態などのアンシラリデータは、衛星データ受信時に入手する準リアルタイムデータを用いることにした。

2) chlorophyll-a 濃度

衛星データから定量的な数値として chlorophyll-a 濃度を推定する方法は、大別して 2 つ存在する。ひとつは、経験的アルゴリズムによるものであり、もう一方は海面の後方散乱理論と経験的に導かれた海面における光の吸収を等式化したものを一体化させた半解析的アルゴリズムである。本研究では、(3)および(4)式の OceanColor3M と呼ばれる NASA ベースの 3 次式である経験的アルゴリズムを利用して chlorophyll-a 濃度を推定することにした。

$$\text{Log}_{10}(C_a) = 0.2830 - 2.753 R_{3M} + 1.457 R_{3M}^2 + 0.659 R_{3M}^3 - 1.403 R_{3M}^4 \quad \text{-----(3)}$$

$$R_{3M} = \text{Log}_{10} \left(\text{Maximum of } \left[\frac{R_{443}}{R_{551}}, \frac{R_{488}}{R_{551}} \right] \right) \quad \text{-----(4)}$$

ここで、 C_a は chlorophyll-a 濃度(mg/m^3)、 R_{3M} は R_{443} 、 R_{488} 、 R_{551} の下付き数字は波長帯(λ)を表しており、それぞれ $n\text{LW}(\lambda)/f_0(\lambda)$ を計算して求めた反射率、 $f_0(\lambda)$ は波長帯ごとにことなる日射照度である。

NASA では、1997 年から SeaBAM (SeaWiFS Bio-optical Algorithm Mini-Workshop) と呼ばれるプロジェクトにおいて、全世界に設置した観測点における海面からの射出放射輝度と chlorophyll-a データセットを収集し、Ocean Color4(以降、OC) と呼ばれる経験的アルゴリズムを構築している。OC4 の最新バージョンは 4.0 であり、2,853 の観測地点で得られてデータセットからアルゴリズムを構築し、その決定係数は $R^2=0.892$ であることが報告されている。ここでこれらを基礎として、本プロジェクトの一つの目的である「OC4 を MODIS センサ用に改良ならびにアップグレード」を行い、『OceanColor3Modis』を同解析システムに導入した。以降更に、SeaBAM によるアルゴリズムの改良は進める予定であるが、現段階では OC3M が最良のアルゴリズムと考えられるため、本研究では、(3)および(4)式によって chlorophyll-a 濃度を推定することにした。

3. 結果と考察

2007 年 8 月 24 日 04 時 44 分(UTC)に Aqua/MODIS が観測したデータから生成した 443nm, 488nm, 551nm 波長帯域の正規化射出放射輝度データを利用して生成した chlorophyll-a 濃度推定画像を Fig. 2 に示した。画像の黒い部分は被雲がある部分か、この時間帯では観測できない領域である。本解析システムでは、これらのデ

ータを準リアルタイムで生成し、ファイルサーバーにアーカイブしている。

本研究では 2007 年度(2007 年 4 月～2008 年 3 月)に本解析システムで受信・処理した MODIS データを合成した chlorophyll-a 濃度の平均値画像を作成した。Fig. 3 は、2007 年 8 月における Chl-a 濃度の平均値画像である。MODIS データは光学センサのため、画像中に被雲があるとデータは欠損値として扱われるが、本研究で構築した手法により任意の期間ごとにデータを合成することでマクロ的な chlorophyll-a の時系列の流動を判読することができる。なお、カラースケールは、chlorophyll-a 濃度 $0.01 \sim 100.0 \text{mg}/\text{m}^3$ までを対数で分割したものを当てはめている。

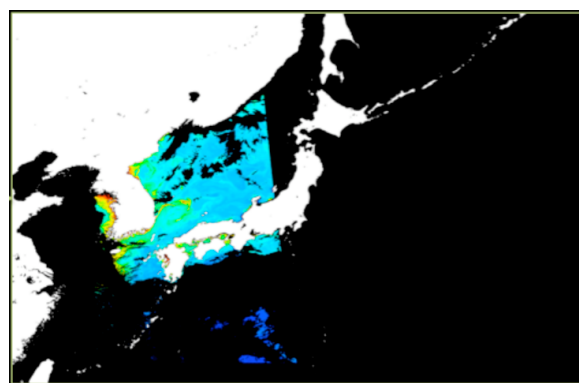


Fig. 2 Chlorophyll-a imagery by MODIS
(Through a year)

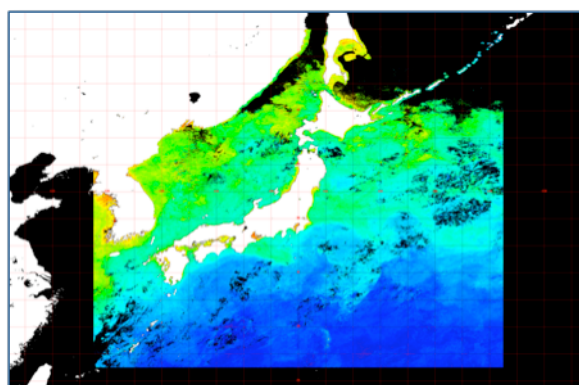


Fig. 3 Chlorophyll-a imagery by MODIS
(monthly mean of Aug.)

東京都環境局によると、東京湾における赤潮の発生基準は、次のとおりである

- ・海水が、茶褐、黄褐、緑色などの色を呈している
- ・透明度が、おおむね 1.5m 以下に低下していること
- ・顕微鏡下で赤潮プランクトンが多量に存在している
- ・クロロフィル濃度が $50.0 \text{mg}/\text{m}^3$ 以上あること

そこで、東京湾付近を 2007 年 8 月中に本解析システムで受信・処理した MODIS データを利用し、解析した結果、chlorophyll-a 濃度が 50mg/m³ すなわち高濃度と判読された地点は最も多いところで 12 回と判読された(Fig. 3)。行政側の平成 19 年度調査速報から 8 月の赤潮観測は 7 回と報告されており、赤潮の兆候と分布を、この海域では概ね正確に推定できていると考えられる

このように、MODIS はマクロ的な観測に優位であるだけでなく、高い時間分解能を有していることから、ほぼリアルタイムで特定の海域における水質環境を判読することができる。よって、本解析システムからは日本近海の水質環境モニタリングに有用なデータを得ることができ、時系列のアーカイブデータから様々な海域における水質環境 GIS を構築するための基礎ができたといえる。しかしながら、本研究で適用した chlorophyll-a 濃度を推定するアルゴリズムは、100.0(mg/m³)以上の海域では精度の低下が報告されていることから、内湾や沿岸域など赤潮が多発する水域における RVI 法を基調としたアルゴリズムについても更に検討する必要がある。

4. おわりに

本研究でこれまで構築しシステムへ導入してきた OC3M アルゴリズムは、NASA 最新の OC4 と比較して、chlorophyll-a 濃度が 0.05 ~ 0.5(mg/m³)の間で最大 8%程度、1.0~10.0(mg/m³)の間で最大 18%程度の誤差が生じることが報告されている。また、両アルゴリズムは、chlorophyll-a 濃度が 100.0(mg/m³)等の超高濃度水域では推定精度が落ちることがこれまでの研究で明らかとなった。この低解像度衛星データにおける精度向上が本年度の大きな課題として見いだすことが出来た。

また、本解析システムは、Terra/MODIS, Aqua/MODIS から水質環境を計る指標の一つである chlorophyll-a 濃度を推定するアルゴリズムを導入しているが、他のアルゴリズムの導入も可能である。例えば、海洋の生物資源の保存に対しては、生物化学などミクロな部分を研究する分野との連携によって新たなアルゴリズムを開発し、マクロ的な評価につなげることも可能である。

<<参考文献>>

- 1) NASA (05/30/2008 updated) MODIS website, <<http://modis.gsfc.nasa.gov/index.php>>, 05/30/2008 referred.
- 2) NASA (05/30/2008 updated) Ocean Color Web, <<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/browse.pl?sen=am>>, 05/30/2008 refereed.
- 3) JAXA/EORC (2006. 12. 20 更新) MODIS 準リアルタイム処理,

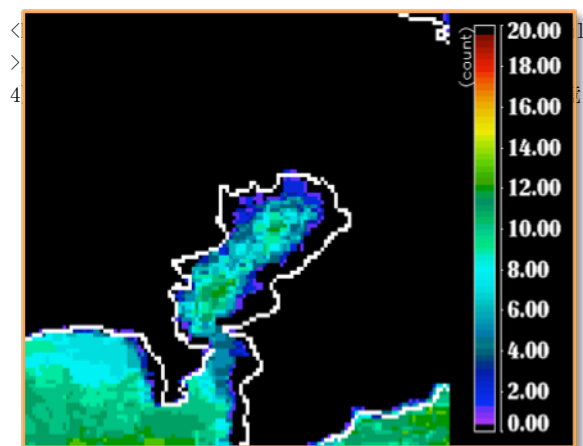


Fig. 4 Individual color pattern shows days with Chl-a > 50mg/m³ around Tokyo Bay.

- リモートセンシング研究施設, <<http://www.coesat.ip.is.saga-u.ac.jp/>>, 2008 年 5 月 30 日参照.
- 5) 東京大学生産技術研究所 (2008. 4. 28 更新) オンライン処理システム <http://webmodis.iis.u-tokyo.ac.jp/index_j.php>, 2008 年 5 月 30 日参照.
 - 6) NASA (05/30/2008 updated) SeaWiFS Project Post launch TechnicalReportSeriesNo. 22 <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/SeaWiFS/TECH_REPORTS/PLVol22.pdf>, 05/30/2008 refereed.
 - 7) NASA (05/30/2008 updated) OceanColorEmpirical Chlorophyll,Analyses<<http://seabass.gsfc.nasa.gov/eval/oc.cgi>>, 05/30/2008 refereed.
 - 8) 東京都環境局 (2008 更新) 東京都内湾赤潮発生状況 Top<<http://www2.kankyo.metro.tokyo.jp/kansi/mizu/akasio/download/download%20data.htm>>, 2008 年 5 月 30 日参照.
 - 9) 浅沼 市男・松本 和彦・河野 健 (2004) 衛星データを利用した全球一次生産の推定：海洋の一次生産量モデルと分布, 地球環境, Voi. 9 (No. 2), 239-244.
 - 10) Hu, C. M., Muller-Karger, F. E., Taylor, C., Carder, K. L., Kelble, C., Johns, E., Heil, C. A. (2005) Red tide detection and tracing using MODIS fluorescence data: a regional example in SW Florida coastal waters, Remote Sensing of Environment, Vol. 97 (No. 3) 311-321.
 - 11) Hooker, S. B., and McClain, C. R. (2000) The calibration and validation of SeaWiFS data, Progress in Oceanography, 45, 427-465.
 - 12) Gordon, H. R. and Wang, M. (1994) Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS: a preliminary algorithm, Applied Optics, 33, 443-452.

