Nimbus-7/CZCS データによる北西太平洋の海色複合画像

Monthly Average Ocean Color Images composed from Nimbus-7 CZCS Data Set covering the Northwest Pacific

福島 甫*, 虎谷 充浩*, 中島登志男**

Hajime Fukushima, Mitsuhiro Toratani and Toshio Nakajima

1. はじめに

海色 (Ocean Color) リモートセンシングとは、衛星または航空機から「海の色」を計測することによって植物プランクトンや懸濁物質の分布状況を知ろうとするものである。特に近年は、気候の温暖化の問題に関連して大気-海洋間の炭酸ガスの収支の問題がクローズアップされ、その関係で植物プランクトンの光合成の時間的・空間的分布とその変動を衛星海色リモートセンシングでモニタリングすることの重要性が叫ばれている。

Coastal Zone Color Scanner (CZCS, 沿岸域海色走査計)は、Nimbus-7に搭載された初の衛星搭載型海色専用のセンサーであり、実験目的ではあったが1978年11月~1986年7月までの間、多くの有用なデータを収集した。

NASA ゴダード宇宙飛行センター (GSFC) の G. Feldman らは、数年を費やして CZCS データによる全球の植物プランクトン色素濃度期間別平均画像などを作成し、1989年に発表した (Feldman et al., 1989)。これは、CZCS の全運用期間にわたるすべてのデータ約68000シーンに標準的な大気補正処理 (Gordon et al., 1988) を施し、地表面 (等緯度・経度) 上の仮想的な箱 (bin) ごとの5日間、1ヶ月間、1年間の平均および分散を求めたものである。bin のサイズは赤道上で18km×18kmであり、目的物理量として、植物プランクトン色素、大気補正後の1~3チャンネル輝度および第4チャンネル (670nm 帯) のエアロソル散乱光輝度がとられている。標準的な配布データは上述の各

期間ごとのいわゆる binned data と呼ばれる一種の圧縮データであり、画像化には専用のソフトウェアが必要であるが、逆に言えばユーザーが任意の水域を任意の図法で画像化できるのが一つの特徴となっている。

この「全球複合 CZCS データ」は大きな反響を呼び、研究者の間でもその利用が進んでいるが、あえて言えば次の2つの問題点があった。

- (1) Gordon らの大気補正アルゴリズムが用いられているが、黄砂性粒子 (Asian dust) を含むエアロソルのもとでは同アルゴリズムは信頼性に欠ける (Fukushima and Ishizaka, 1993)。
- (2) 日本近海域などの水域レベルの現象をみるには18km×18kmの解像度は粗すぎる。

そこで我々は、北西太平洋の全 CZCS データを対象に、黄砂性エアロソルに対応した新しい大気補正アルゴリズムを適用して、同域のより高解像度の CZCS 複合画像を作成することを計画した。本稿では我々の行った作業および結果の概要を紹介するとともに、作業を通じて明らかになった問題点について議論する。

2. 入力および出力データセット

対象海域である北緯20度~50度、東経120度~180度の北西太平洋域の何れかの部分を含む CZCS データは、全部で4129シーンあり、これを NASA/GSFC から光ディスク (約10枚) の形で供給してもらった。ちなみに、CZCS の1シーンのサイズは1968画素×970ライン (最大) ×6チャンネルであり、トータルのデータ量は約40GBである。この光ディスクはマイアミ大学の開発した衛星データ処理・解析ソフトウェアシステム DSP に付属する、Juke Manager なるソフトウェアで読み出すようになっている。

最終的な成果物の仕様は次のように定めた。まず海域に関しては、次の5海域のそれぞれについて画像を

* 東海大学開発工学部

** (株) システムブレイン

「写真測量とリモートセンシング」Vol. 32.No. 3, 1993

図1 出力画像（5 海域）の範囲
A. 北西太平洋域全体 B. 日本海 C. 親潮域および
オホーツク海域 D. 東シナ海および黄海 E. 黒潮域

作成することとした（図1 参照）。

- A. 北西太平洋域全体（画像サイズ512×256）
- B. 日本海（画像サイズ512×512）
- C. 親潮域およびオホーツク海域（同）
- D. 東シナ海および黄海（同）
- E. 黒潮域（同）

これらの画像の空間的な解像度は、北西太平洋域のものが約12km、他の4 海域については約4 km である。出力画像としてはG.Feldman らの行った処理とほぼ同様の、次の10パラメータを作成することにした。

- (1) 443nm 正規化海水射出放射輝度（平均および標準偏差の2 種）
- (2) 550nm 正規化海水射出放射輝度（同）
- (3) 植物プランクトン色素濃度（同）
- (4) エアロソル散乱光輝度（同）
- (5) 有効観測回数（雲に覆れていない観測）
- (6) 全観測回数（雲も含む観測回数）

ここで「443nm（または550nm）正規化海水射出放射輝度」とは、CZCS 第1チャンネル（443nm 帯）または第3チャンネル（550nm 帯）の原データに大気効果の補正を施したものである。「植物プランクトン色素濃度」は、大気補正後のデータから推定した海表面付近のクロロフィル濃度（正確にはクロロフィル-a + フェオフィチン濃度）である。また「エアロソル散乱光輝度」とは、CZCS 第4バンド（670nm 帯）のトータルの放射輝度値からレーリー散乱光成分を引いたもの（Gordon らの言う $L_A(670)$ ）である。

これらの各画像を、CZCS が運用された1978年11月から1986年7月までのすべての月ごとに作成することとした。実際の処理に当たっては、各月ごとのデータ

の他、全運用期間にわたっての月別通算の平均画像や、季節ごとの画像も製作した。

3. データ処理

3.1 処理の概要

処理の全体の流れを図2に示した。原データの読み出しと切り出しはmicro VAX3400上で行った。データ処理にはMiami DSPを用いた。大気補正、幾何補正、平均化処理は2 台のSUN ワークステーション（sparcstation-2）で行った。

ここで、切り出しから幾何補正（およびクオリティーチェック）までは各個別画像の処理である。幾何補正までの1 画像あたりの平均処理時間は約10分であり、連続かつ自動的にデータ処理が行われるように工夫した結果、一日あたり100～150シーン程度の画像を処理することができた。

CZCS データには、ゲイン設定等によって一部信頼のおけないデータがあることが知られている。そこで、

図2 複合画像作成の流れ

原データの段階で、GSFCの作ったCZCS Video Browse System (Feldman et al., 1989)を参照し、同システム上で「品質不良」とされているデータを除去した。このようなデータは約1000シーン（全体の1/4程度）にのぼっている。「切り出し」では大気補正の精度を保証するために原データのスキャン両端の200ピクセルを取り除くとともに、合わせて 3×3 の間引きを行っている。大気補正アルゴリズムについては後述する。原データの段階でのスクリーニングに加え、幾何補正後の画像を全数表示の上チェックし、対象海域外の画像や、サングリッタの影響を残している画像、あるいは雲域の何らかの影響を受けていると考えられる画像等については以後の処理から除外することとした。この段階で除外されたデータは全体のデータの約1/4である。

各年各月ごとの複合成画は、対応する各月の個別画像データを一括して処理し、作成する。本研究では更に各月のデータを3ヶ月分積算することにより各季節画像を、また、12ヶ月分を積算することにより各年平均画像を得ている。

3.2 大気補正アルゴリズム

GordonらのCZCS大気補正アルゴリズムは、比較的簡単でありながら概ね良好な結果をもたらすことから、「標準的なアルゴリズム」としてNASA/GSFCでのデータ処理をはじめとして広く用いられているが、日本近海では特に春先の「黄砂」発生時などのデータの処理がうまく行かず、異常に高い色素濃度値が現れることが知られている (Fukushima and Ishizaka, 1993)。我々は、黄砂性エアロソルに対処するため、エアロソル吸収の波長依存性を仮定した放射収支モデルを考え、衛星データ上でパラメータのチューニングを行って来た (Toratani and Fukushima, submitted)。紙面の都合で詳細は割愛するが、今回はこのアルゴリズムとGordonらのアルゴリズムとを次のように組合せて大気補正を行うこととした。

【各画素ごとの大気補正処理】

- (1) 670nm帯および550nm帯のエアロソル散乱光輝度 (L_A) からエアロソルのスペクトル依存性パラメータ ϵ (Gordon et al., 1988) を計算する。 ϵ 値の算出にあたっては、550nmにおける正規化海水射出輝度の $nL_w(550)$ を一定値と仮定する。
- (2) $\epsilon \geq 1.0$ の場合はエアロソルの吸収係数を零とし

て処理を行う。(処理結果はGordonらの補正法によるものに一致する。)

- (3) $\epsilon < 1.0$ の場合、 ϵ の1.0からの偏移に応じて443nm, 520nm, 550nm帯の吸収パラメータの値をセッ

トし、各波長帯のエアロソルの光学的厚さを独立パラメータとして大気補正を行う。

3.3 平均化の手法

Janet Campbell (personal comm.) は、この種のレベル3データ (binned data) 作成時の平均化操作として、次式で表されるようなやり方を提言している。

$$X_{mie} = \exp(m + s^2/2)$$

ここで、 m は対象とする物理量 X の対数スケール上での平均値、 s^2 は同じく X の対数スケール上での不偏分散である。このようにする根拠は以下のようなものである。

- (1) 植物プランクトン色素濃度等の物理量は偏りの強い分布に従い、対数正規 (log-normal) 分布で近似できる。
- (2) レベル3データ作成の際には、空間的にも時間的にも平均をとることになるが、平均化の対象となるデータ数が比較的少ない。このようなケースでは単純な平均値は母平均からの偏りを生じやすく、上記の対数尺度上での最尤推定子 (Most likelihood estimator) による平均を用いるのがよい。

これを受けて、本研究でも上記の方法により平均値を算出している。

4. 処理画像の例

図3に処理済み個別画像および最終的な複合成画の例を示す。(a)の個別画像は、1981年4月26日の日本海を中心とする植物プランクトン色素濃度画像を、北西太平洋域に幾何変換・投影して得られたものである。図3(b)の複合成画は(a)の画像を含む1981年4月分の複合平均画像である。ちなみに、この画像は25シーン分のデータから作られている。(c)は同じく1981年の「春」の画像、すなわち3月から5月までのデータによる複合成画である。

図4にはすべてのデータを積算して作った季節ごとの平均色素濃度画像を示した。ここで、春、夏、秋、冬は、それぞれ3～5月、6～8月、9～11月、12～2月の3ヶ月分のデータの平均である。各画像はそれぞれ約500～700シーンのデータの重ね合わせになっ

(a) 1981年4月26日の画像

(b) 1981年4月分複合画像

(c) 1981年春（3月～5月）の複合画像

図3 個別画像と複合画像の例（平均植物プランクトン色素濃度）
（元のカラー画像は小特集のカラー頁に掲載）

る。

5. 処理上の問題点

我々の体験からこの種の処理で将来とも問題となり
 そうな点を以下にあげる。

図4 北西太平洋の四季別平均植物プランクトン色素濃度画像（上から春夏秋冬）
 （元のカラー画像は小特集の口絵カラー頁に掲載）

(1) 雲識別（cloud screening）

本研究では $L_A(670)$ を太陽高度で正規化した量を計算し、それが一定値を越える場合を雲として識別した。この方法は中・高緯度帯では極めて有効であったが、低緯度帯では若干不都合な面も見られた。雲の性質は海域によって異なっており、その結果雲識別のアルゴリズムがうまく働かなかった可能性が高い。複合画像の作成に関しては雲を正しく取り除くことが重要であ

り、今後も検討が必要である。

(2) 雲の影響の除去

雲の部分に対応するピクセル以外でも雲の影響を受けることがある。CZCS では明るい目標物をスキャンしたあと（すなわち雲の左側に）数十ピクセルにわたり影響が残る現象（cloud ringing effect）が知られている。これを除去するため、本研究では J. Muller (1988) のマスキングアルゴリズムを適用した。海色のセンサーでは要求される輝度分解能が高く、この種の影響は将来のセンサーでも避け難いので注意が必要である。また、これとは別に、雲の付近（間引き率 4 の画像で 1 ～ 2 ピクセル）で観測輝度が上昇する傾向が認められた。この原因としては雲からの散乱光の影響あるいは 1 画素サイズ以下の雲（sub-pixel cloud）が考えられる。

(3) クオリティーチェック

現段階のアルゴリズムもまだ完全無欠なものではなく、時折異常な画像データが得られることがある。このような以上データが複合画像に混入することは好ましくないで、十分な識見のある者による全データのチェックが望ましい。しかしこの作業は主観に左右されるきらいがある。また、将来の SeaWiFS や OCTS データではデータ量が極めて大きくなることも考えられるが、そうなると何れ全数検査は困難となり、何等かの自動スクリーニングを考えねばならないであろう。

(4) 統計値算出アルゴリズムの問題

本研究では、J. Campbell の勧告に基づいた平均値算出アルゴリズムを用いた。この勧告の論拠は植物プランクトン色素濃度だけでなく、他のあらゆる地球物理適パラメータに適用できるはずであるが、これを採用すべきか否かに関し、引き続き検討が必要である。

5. おわりに

本研究で使用した CZCS データセットは NASA ゴダード宇宙飛行センターの G. Feldman 博士他の好意

により提供されたものである。また、データ処理作業に卒業研究生として参加した、土屋善弘君に感謝する。

本研究は、環境庁地球環境研究総合推進費（平成 2 ～ 4 年度）による「衛星可視域センサーによるマッピングと基礎生産力モニタリング手法に関する研究」（中央水産研究所委託）の一部として実施された。また、大気補正アルゴリズムの原型は文部省科研費重点領域研究「衛星による地球環境の解明」の補助により開発されたものである。成果物のデータは同重点領域研究成果刊行物として CD-ROM の形で配布に供されている。最後に本プロジェクトは ISY (International Space Year) の Productivity of the Global Ocean Project として計画されたものであることを記し、同プロジェクト国内専門家委員の高木幹雄（東大生産技術研究所）、浅沼市男（海洋科学技術センター）、石坂丞二（資源環境技術総合研究所）およびそのほかの関係者に深く感謝する。

参 考 文 献

- Campbell, J. (Personal comm.): Spatial and temporal binning algorithms for deriving Level 3 SeaWiFS data.
- Feldman, G., N. Kuring, C. Ng, W. Esaias, C. McClain, J. Elrod, N. Maynard, D. Endres, R. Evans, J. Brown, S. Walsh, M. Carle and G. Podesta (1989): Ocean color: Availability of the global data set, EOS, 70, 634-641.
- Fukushima, H. and J. Ishizaka (1993): Special features and application of CZCS data in Asian waters, Ocean color: Theory and applications in a decade of CZCS experiences, KLUWER.
- Gordon, H.R., J. W. Brown and R. H. Evans (1988): Exact Rayleigh scattering calculations for use with the Nimbus-7 Coastal Zone Color Scanner, Appl. Opt., 27, 862-871.
- Muller, J.L. (1988): Nimbus-7 CZCS: electronic overshoot due to cloud reflectance, Appl. Opt., 27, 3, 438-440.
- Toratani, M. and H. Fukushima (submitted): Atmospheric correction scheme for ocean color remote sensing, Proc. IEEE IGARSS '93.