人工衛星による水色のリモートセンシング*

福島 甫**

Ocean Color Remote Sensing

Hajime FUKUSHIMA

1. まえがき

従来の海洋観測の主な手段は船舶であるが、船舶による海洋の観測は、時間的・空間的に大きな広がりを持つ海洋の一点ごとのデータを与えてくれるにすぎない。一方、人工衛星による観測は、広範囲にわたる海表面を、瞬時に、しかも繰り返し観測できるという特徴を持ち、海洋学の今後の研究手段として大きな期待が持たれている。海洋のリモートセンシングは、陸上や大気を対象としたものと同じく、対象物からの電磁波の放射あるいは反射を観測することによって行われる。使われる波長帯域としては熱赤外域、可視域、マイクロ波領域に大別される。これらのうち、熱赤外域による海表面水温のデータはすでに研究手段および漁業情報として実用されている。

海洋を対象とした可視域のリモートセンシングは、水色 (water color) または海色 (Ocean Color) のリモートセンシングと呼ばれる。現在のところ、水色リモートセンシングの主目的は植物プランクトンの分布状況を把握することであり、流れの可視化を直接目指したものではない。しかし、水色は異なる水塊を弁別する重要な指標の一つであり、したがって水色リモートセンシングは水塊の分布状況を描き出す手段の一つと考えることができる。

本稿では水色リモートセンシングにおけるデー

タ処理法を紹介し、ついで実験衛星 Nimbus-7 に搭載された Coastal Zone Color Scanner (CZCS) による水色画像の例を示す。

2. 水色リモートセンシングの原理

2.1 水色を決めるもの

水色は海域によってさまざまに変化する。例えば、外洋域では青く、沿岸域では緑がかった色となり、港の中では茶褐色を呈することもある。水色を決定する要因はいくつかあり、沿岸域では陸地起源の懸濁物質の影響も大きい。外洋域では植物プランクトンが支配的である。

植物プランクトンは海洋の生態系における食物連鎖の最下層を担うものであり、したがってその分布を知ることは漁業情報あるいは漁業資源管理情報として重要である。また、植物プランクトンは、陸上の植物と同様に光合成を行って大気中の炭酸ガスを固定しているが、大気中の炭酸ガスレベルの将来予測、ひいては長期の気候変動を予測する上で、海洋全体での植物プランクトンの量 (あるいは光合成色素量) およびその変動を知ることの重要性が叫ばれている。

図1に光合成色素 (クロロフィル) 量の変化が水色のスペクトルに与える影響を示した。図より、クロロフィル濃度が低い場合は海面直下の上向き光の成分として青域 (400~500nm) が強く、クロロフィル濃度が高くなるにつれて青域の成分が急激に減少することがわかる。図の上方の短形は CZCS の観測波長域を示すが、ここで例えばチャネ

*原稿受付 1989年1月23日

**東海大学海洋学部

図1 海面下の上向光とクロロフィル濃度の関係
(Hovis, 1980)

ル1とチャンネル3の比などから適切な予測式を用いてクロロフィル濃度を推定することができる。

2.2 CZCS の概要

Nimbus-7/CZCS は今までのところ衛星に搭載された唯一の水色センサである。1978年秋の打ち上げ以来、約8年間にわたって有用なデータを取得した。

CZCS の観測幅（地表面をスキャンする範囲）は LANDSAT/MSS あるいは TM, MOS-1/M ESSR 等に比べてかなり広く、約 1500~2300km 程度である。また、空間的な分解能は衛星直下点で 1 km 程度である。観測チャンネルは可視域に四つ（中心波長 443, 520, 550, 670nm）、近赤外に一つ（750nm）、熱赤外域に一つ設けられている。可視域の 4 チャンネルは、MSS や TM など陸域観測用のセンサに比べ観測波長帯域幅が約 1/5 (20 nm) と狭く、水色スペクトルや細かい特徴を捉えるのに適している。また感度（輝度分解能）も 10 倍～数 10 倍高い。

2.3 データ処理アルゴリズム

CZCS（あるいは一般に海洋の可視域センサ）で観測される光の強度（放射輝度）のうち（本来の情報を持っている）海中からの上向き光の成分は極くわずかであり、全体の 80~95% は大気散乱光成分である。このうち気体分子による散乱光の強度は計算して差し引くことができるが、エア

(a) CZCS 第1チャンネル (443nm) 原画像

(b) 第4チャンネル (670nm) エアロゾル散乱光成分

(c) 大気補正後の第1チャンネル画像

図2

ロゾルの効果は日によってまた場所によって一定せず、水色の影響の少ないチャンネル(670nm帯など)を用いて画素ごとに適応的に補正処理を行う必要がある。これらの大気効果の補正処理(大気補正と称する)のアルゴリズムについては、多くの研究が進められてきたが、今のところ Gordon ら(1983)によるものが単純ながらもっとも実績ある手法とされている。

この方法による大気補正処理の様子を巻頭口絵写真のデータを例に示す(図2)。(a)は第1チャンネル(443nm帯)の原画像である。海域の特徴らしいものはあまりはっきりとは現れていない。(b)は第4チャンネル(670nm)のデータから分子散乱光成分を差し引いたものである。これはエアロゾル成分のみを表していると考えてよい(この波長帯では海中からの光は十分に小さく無視できる)。Gordon らのエアロゾル補正手法をここで詳しく述べる紙幅はないが、一口で言えば次のように要約できる。

- 1) (その画像における)エアロゾル散乱光成分の波長依存性を表すパラメータをある方法で(画像から)得る。
- 2) 第1～3チャンネルの各画素について、分子散乱光成分を計算し、引いておく。
- 3) 第4チャンネルのエアロゾル散乱光成分に1)で求めたパラメータにより決まる係数をかけて他のチャンネルから画素ごとに引き去る。

このようにして、(c)図の補正画像が得られる。補正後の画像ではエアロゾルのパターンが著しく減少し、かわりに水色のパターンが明瞭に現れている。

こうして得られた各チャンネルの補正済みデータから、簡単な予測式(Gordon 他, 1983)を用いてクロロフィル濃度の画像を得る。最後に必要に応じ、衛星画像を地図座標系(例えばメルカトル図法)上に変換する幾何補正処理を行う。

3. 水色画像と熱赤外画像の比較

3.1 1981年4月14日の画像

以下では水色画像の処理例を、熱赤外画像との比較を交えて示す。熱赤外画像としては、気象衛星 NOAA のものが広く使われているが、ここで

は CZCS の第6チャンネルのデータを用いている。

一般に黒潮流域およびその沖合(高温である)では栄養物質に乏しく、植物プランクトンの量は少ない。一方、親潮系水(低温である)は一般に高栄養である。このことから一般に表面水温が高い水域ではクロロフィル濃度が低く、また、水温が低い水域ではクロロフィル濃度が高くなるという図式が成り立つ。口絵写真に示した画像にも見られるように、このことは大域的には成り立つが、次に示すように水色のパターンは表面水温場のそれとは細かい点で異なる。

図3(a), (b)は口絵写真の画像の右上部分に幾何

(a) CZCSによるクロロフィル濃度画像(1981年4月14日の銚子沖—仙台沖。白い部分ほど高クロロフィル濃度である)

(b) CZCSによる熱赤外画像(a)と同一シーン。雲以外の部分は白い部分ほど表面水温が高いことを表す。雲は真白に写っている)

図3

補正を施し、拡大したものである。(b)の熱赤外画像から「A」の部分は低温の(おそらくは親潮系の)水塊でありクロロフィル濃度が高いことが想像されるが、(a)の画像にみられるように、クロロフィル濃度が高いのはこの水塊の縁辺部のみに限られ、中心部では逆にクロロフィル濃度は低い。このように、水温と水色は次元の異なる情報である。また、両画像の他の部分を注意深く比較してみると、両者のパターンは微妙に異なることが分かる。このような違いは、水塊の状態およびその履歴を反映しているものであり、逆に言えば、この種のデータの時系列からその水塊あるいは水域での物理・化学・生物過程を議論できる可能性を示すものである。

犬吠崎では黒潮の急流帯が離岸して東進しており、その南側でクロロフィル濃度上に前線波動が見られる。

3.2 1980年6月5日の三陸沖画像

わが国の東北水域(いわゆる三陸沖)は黒潮水、親潮水、さらに津軽海峡へ抜けてくる津軽暖水の三つが複雑に混ざり合う水域として有名であり、海洋力学上興味深い場所である。図4は、同水域の画像の例である。これは大気補正後の第3チャンネル(550nm帯)の画像であり、クロロフィル濃度画像ではない。この画像には、さまざまな縞模様や渦模様が見られ、さながら「墨流し」の様相を呈している。模様の白い部分は、炭酸カルシウムの殻を持つ特殊な植物プランクトンである円石藻類(coccolithophores)によるものと推察される。この植物プランクトンのブルーミングがおきると、水色は「乳緑色」とでもいうべき色を呈することが知られており、CZCSではしばしば観測されている(Holligan, 1983)。また、その殻は植物プランクトン本体が枯死した後もある程度浮遊しつづけるので、その点ではいわば自然のトレーサとして都合の良い性質を備えている。

4. あとがき

植物プランクトンは条件さえ整えば急速に増殖(例えば2~3日で倍増)することもあり、上記の円石藻類などを除けば流れのトレーサとしては

図4 CZCS第3チャンネルに見る円石藻類のブルーミング
(1980年6月5日の三陸沖画像)

扱いにくい。海表面の流れを追跡する目的では熱赤外域による表面水温画像の方が向いているかも知れない。しかしながら、水色画像はそれとはまた違った視点を提供するものであり、熱赤外画像その他のデータと組み合わせることにより、海洋の生物・物理・化学過程を論じる上で重要な知見を与えるであろう。

CZCS自体はすでにその機能を停止したが、それに続くセンサとしてはNASA/EOSATのSeaWiFS(Sea Wide Field-of-view Spectrometer, 1991年に打ち上げ)や、わが国のOCTS(1994年打ち上げ予定)がある。さらに1990年代後半には、可視域を数十チャンネルで観測する分光スキャナを地球観測用宇宙ステーションに搭載する計画もあり、観測の対象は光合成色素以外の海中物質やエアロゾルにまで広がる見通しである。

参考文献

- 1) W. A. Hovis et al.: Nimbus-7 Coastal Zone Color Scanner: System Description and Initial Imagery, Science, 210, 3 (1980)
- 2) H. R. Gordon, D. K. Clark, J. W. Brown, O. B. Brown, R. H. Evans and W. W. Broenkow: Phytoplankton Pigment Concentrations of Ship Determinations and CZCS Estimates, Applied Optics, 22, 1 (1983)
- 3) P. M. Holligan et al.: Satellite and Ship Studies of Coccolithophore Production along a Continental Shelf Edge, Nature, 304, 28 (1983)