

D-3 衛星可視域データのグローバルマッピングによる広域環境変動に関する研究
(2) 衛星可視域データと生物物理モデルによる大陸棚海域の生物過程・物質循環の研究

研究代表者 資源環境技術総合研究所 石坂丞二

通商産業省 工業技術院 資源環境技術総合研究所

環境影響予測部

北林興二

海洋環境予測研究室

石川公敏・中田喜三郎・石坂丞二

研究期間 平成2-4年度合計予算額 34,617千円

【要旨】 この研究では衛星データ、特に海洋の一次生産者として重要な植物プランクトンの濃度を測定できる衛星可視域データを海洋観測データとともに総合的に解析するシステムを構築し、またそれらのデータを生物物理モデルによって統合して、大陸棚近辺での一次生産を見積る手法を開発することを目的とした。初年度は、1978年から1986年に稼働していた衛星可視域センサーであるCoastal Zone Color Scanner (CZCS) のデータのうち日本周辺のデータ量を、NASAで開発したブラウザシステム¹⁾を利用して検索し、この観測期間に日本周辺でとられた海洋観測データでHarashima and Kikuchi²⁾のデータベースに収録されたものについて検索を行なった。その結果、20-50°N、120-180°Eの範囲に1978年から1986年までで4089シーンのCZCSデータが存在するものの、それに対応した海洋観測データは64データほどで、まれであることを明かにした。二年度には引き続き可視域衛星データとの比較、および生物物理モデルの構築のために必要な海洋観測データの収集を行なったとともに、データの解析システムのハード面を完成し、ソフト面の開発を行なった。そして海洋観測データの中でCZCSと対応した伊豆沖湧昇域での観測に関して、日本周辺域としては始めて船舶と衛星によって観測されたデータの直接比較を行い、今後さらに日本近海に適したアルゴリズムを開発する必要性を明らかにした。最終年度では、開発を行ってきた鉛直一次元の生物物理モデルについて、特に伊豆沖湧昇域での海洋観測データとの比較を試みた。この研究では光と一次生産のモデルと、栄養塩と植物の生長、拡散を結合したモデルの2つを検討した。また、モデルを衛星データによって、向上するためのデータ同化法についても簡単な生態系モデルを利用して検討した。

【キーワード】 水色リモートセンシング、フラックス、植物プランクトン、生物物理モデル、データ解析システム

1. 序

近年、人間活動の影響は大陸棚などの海洋の広域な範囲にまで拡大しており、このような環境での人為的影響を評価する必要性が増大している。しかし海洋は広大であり、かつ時空間変動が顕著なために、従来の海洋観測では観測頻度が不十分である。従って、人工衛星のデータを海洋環境の評価指標として利用するための研究開発が必要である。

NIMBUS-7に搭載された衛星可視域センサーであるCZCS (Coastal Zone Color Scanner) は、1978

年11月から1986年6月までデータを取り続け、海域の一次生産力の指標となる植物プランクトン色素濃度を地球規模で測定できることが明らかになってきた。現在、地球規模で海色を測定できるセンサーは存在しないが、1994年にアメリカのSeaWiFSが打ち上げられ、1996年には日本の打ち上げるADEOSにコアセンサーとしてOCTSがのることが決定されている。したがって、これらの新しいセンサーが打ち上げられる前に、既存のCZCSのデータをできるかぎり利用、解析しておくことは、新しいセンサーが上がって高頻度にデータを受け取り、船舶や他の衛星センサーのデータと同時に利用できる機会をより有効に使うためにも重要である。

この研究では衛星データ、特に海洋の一次生産者として重要な植物プランクトンの濃度を測定できる衛星可視域データを海洋観測データとともに総合的に解析するシステムを構築し、またこれらのデータを生物物理モデルによって統合して、大陸棚近辺での一次生産を見積る手法を開発することを目的とした。

初年度は日本周辺のCZCSのデータ量について検索しカタログを作成した。またその観測期間に日本周辺でとられた海洋観測データの検索も行なった。二年度には引き続き可視域衛星データとの比較、および生物物理モデルの構築のために必要な海洋観測データの収集を行なったとともに、データの解析システムのハード面を完成し、ソフト面の開発を行なった。そして海洋観測データの中でCZCSと対応した伊豆沖湧昇域での観測に関して、日本周辺域としては始めて船舶と衛星によって同時に観測されたデータの直接比較を行った。最終年度では、開発を行なってきた鉛直一次元の生物物理モデルについて、特に伊豆沖湧昇域での海洋観測データとの比較を試みた。この研究では光と一次生産のモデルと、栄養塩と植物の生長、拡散を結合したモデルの2つを検討した。また、モデルを衛星データによって、向上するためのデータ同化法についても簡単な生態系モデルを利用して検討した。

2. 日本周辺のCZCSデータ数と同時観測データ

1978年から1986年に稼働していた衛星可視域センサーであるCoastal Zone Color Scanner (CZCS)の7年8ヶ月間のデータは、NASA Goddard Space Flight Center (GSFC) に67,789シーンが保管されており¹⁾、ブラウズシステムと呼ばれる検索用のシステムにまとめられている²⁾。本プロジェクトの他のサブテーマでは、北西太平洋 (20-50°N、120-180°E) の全CZCSシーンを集め、日本向けの大気補正と水中アルゴリズムによる変換を施し (レベル2)、複合画像 (レベル3) を作成した。本サブテーマではそのための前段階として、GSFCの日本周辺の全データをブラウズシステムによって検索し、そのデータの状況を13海域にわけて記述し、データカタログを作成した³⁾。

(1) 日本周辺海域のデータ数

上記の日本周辺海域をブラウズシステムによって検索したところ、4089シーンのCZCSデータが存在することがわかった。このうち1229シーンは1980年に取られたものであり、1979年の863シーンと1981年の718シーンと合わせて69%をしめ、1982年を含めると80%となり、ほとんどのデータが1982年までに取られたことがわかる。これらのデータの存在している日数を見ると、7年8ヶ月の間に1228日であり、一日に平均3.3シーン存在していることになる。データ数の多い1980年は、288日で一日平均4.3シーン

取れていることになる。CZCSの1シーンは約1600 km x 800 kmであるため、CZCSの稼働していた日には、平均でこの範囲の約25%ほどが一日に取れていた計算となる。

データ数を月別に見るとデータの多い年でも少ない年でも毎月同じように存在するわけではなく、1979年と1981年には10月から12月に多いが、1980年には4月から8月と10月に多い。また、1981年の1月、2月と1982年の6月、7月にはほとんどデータが存在しない。この傾向はデータの存在する日数でも全く同じである。従って、NASAの月平均画像など統計的な処理をした際には、このデータ量の変化を考慮しておく必要がある。

この4089シーンのデータの中には、雲に覆われていたりしてデータが存在しないものが含まれているうえに、広い範囲のどこに位置しているかはわからない。そこで今回作成したデータカタログでは、この全てのシーンについてブラウズシステムの画像を見ながら、ファイル番号と最高最低の緯度経度を控え、シーン内で海の観測されている部分の割合やその条件を記載した。さらに上述の海域をオホーツク海、日本海、黄海、東支那海、黒潮、三陸沖、瀬戸内海、黒潮続流域、マリアナ諸島、南鳥島、ウェーク島、ミッドウェイ島、天皇海山の13海域に分け、そのそれぞれについて、画像に含まれているかどうか、含まれているとすれば、その状態を良、可、不可の3段階の状態にわけて記載した。

13海域それぞれの海域でのデータ数を見ると、ウェーク島、マリアナ諸島、南鳥島周辺、東支那海がもっとも多く約1100から1500シーン、黒潮続流域、日本海、ミッドウェイ島周辺が約800シーン、黒潮域、三陸沖、オホーツク海、天皇海山が約500シーン、黄海が約400シーン、瀬戸内海が約300シーンであった。このデータ数の中には、海域のほんの一部分しか含まれていなかったり、ほとんどが雲で覆われており海洋学的にはほとんど使用できないシーンも含まれており、それらを除くと有効なデータ数はこの上述シーン数の約75%であった。もちろん、実際には全海域が完全に晴れたデータは非常にまれであり、特定海域や全海域についての有効なデータはさらに少ない。データの存在する日数はほぼデータ数と同じ分布を示しており、また有効なデータ日数の割合もほぼ同じである。データの存在する日の各海域のシーン数は海域の広さによるが、1シーンから2シーン程度である。基本的には、各海域での時間変化は先に示した全海域での時間変化にほぼ等しく、海域ごとのデータ数と日数の分布は7年8ヶ月間の合計値に似ている。

(2) 同時観測データ

衛星でとられたデータを実際の海域のクロロフィル濃度に換算するには、特定のアルゴリズムが必要である。日本近海のデータに、GSFCで行なわれた大量処理の様に海洋性の大気を仮定したり、一般的なClear Water Algorithm⁴⁾を利用することの問題点はすでに論じられている⁵⁻⁶⁾。しかし、これらのアルゴリズムによる推定値が実際のクロロフィル濃度とどの程度異なっているのかを知り、さらに新しいアルゴリズムを開発するためには、衛星のデータと同時にその海域でとられた海洋観測のデータが必要である。日本近海のクロロフィルについては、気象庁の観測船が定期的に観測しているほか、各種の観測船が観測しており、その一部のデータは水路部の日本海洋データセンターで収集されている。またHarashima and Kikuchi⁷⁾はこの一部のデータをパソコンに移し、パソコンでデータを検索し、視覚化するシステムを構築している。本研究ではそのデータベースから表面のクロロフィルデータを選び出し、CZCSデータの同時にとられたものだ

けを抜き出した。

Harashima and Kikuchi⁷⁾ のデータベースに収録されているものは、ほとんどが気象庁の定期観測と環境庁の一部の観測によるものであり、毎年約115日分、500データを含み、1978年11月から1986年6月までには、862日分、3763データであった。このうち、CZCSのデータが存在する海域で同時観測されたものは、70日分263データであった。しかし、ブラウズシステムによって、個々の画像を見て雲に覆われていない同時観測を選ぶと、19日分64データしかなかった。この多くは、CZCSシーンの多い1980年、1981年に限られている。また、多くは一日に数個のデータしか存在せず、CZCSのデータがとられた午前11時前後のデータは非常に少なく、一日のデータで回帰分析などを行なうには不十分なものである。

(3) 考察

CZCSは実験的に上げられたためにセンサーをいつも稼働状態にしておくことができず、当時データの要求が少なかった日本周辺ではあまり稼働していなかったため、ここに上げたように日本周辺のデータは比較的数量が少ない。それでも1シーンあたりのデータ量を考えると、船を利用した観測では到底考えられない量である。1980年以降減少しているのは、バッテリーを節約したり、センサーの状態がよくなかったためである。従って、ここに見られるデータ数の変化は自然現象とは一切関係のない人為的な影響である。

ここで作成したデータカタログは希望者にプリントアウト又はコンピュータファイルの形で配付する。今回報告したデータカタログにのせたデータ数はあくまでも不特定の目的で選んであるために極端に貧弱なデータでないかぎりには数にいられている。しかし実際的には、全海域が晴れていることはほとんどありえないことで、全海域を利用したり、ある特定の海域を利用する際には、データカタログの海域別に選んだとしても、本当に利用できるデータ数はさらに少なくなる。いずれにしても、衛星のデータは利用者の用途によってその判断基準が大きく異なるため、ブラウズシステムの様に実際の画像を見ながらそれを選択することは必須と考えられる。日本周辺のCZCSのレベル2を作るに当たって、磁気光ディスクに記録した低解像度のデジタルデータを使うなど、GSFCのブラウズシステムとは別の形の検索システムを作成することも考えられよう。

今後、衛星のデータはどんどん増加する傾向にあり、ブラウズシステムの様に単純に検索できるシステムを開発しておくことは必須である。この場合、その検索のための情報として、各海域別にどの程度雲に覆われているかなどをあらかじめ検索システムにしておくことが必要と考えられる。今回行なった程度の雲域と陸域の判別は、本来はレベル2を作る段階で自動的行なうことができるはずである。今後打ち上げられる衛星センサーでは、これらの情報はレベル2を作った段階で記録しておき、検索システムに組み込んでおくことが望ましい。

今回の同時観測データの検索には、Harashima and Kikuchi⁷⁾ のデータベースに含まれた気象庁、環境庁のデータしか用いていない。これ以外にもクロロフィルのデータは存在しており、第3章で述べるように東京大学海洋研究所の白鳳丸、淡青丸で取られたデータなども収集したが、CZCSと同時に観測されたのは、第4章で述べる伊豆沖海域の一例だけであった。CZCSの飛んでいた頃と比較すれば、現在はさらにクロロフィルの観測は増加していると推測されるが、これから別の水色センサーが上がったときにそのデータをより正確なものとするためには、さらに観測データが必要とされる。CZCSのデータ量は少ないとしても今回検索した同時観測データでは、

あきらかに合計の観測日数も、一日あたりのデータ数も、衛星データの正確な検証には不足している。今後さらに、測定数を増加させ、それが有効に衛星データの検証に使えるべく、データベース化を行なう必要がある。

3. データシステムと海洋観測データ

この研究の一つの目標は、衛星データと海洋観測データを総合的に解析するシステムを構築することである。衛星データおよび観測データのの一つの問題点は、それらがいろいろな方法で処理されるために多様なフォーマットで存在し、また多様なメディアでやり取りされることである。従ってこれらのデータを総合的に解析するためには、コンピュータのネットワーク機能を生かし、既存の様々なメディアの読み取り装置やデータ処理システム、データ解析システムを最大限に利用して行くことが必要不可欠である。本システムは、本研究予算で購入した画像解析装置とそれに付属する大容量データ収納システム (MO Disk, 8mm Drive) とカラープリンターを中心としそれを、イーサネットを通じて各種のコンピューターと接続してある。特に多様なデータをやり取りするために、直接接続してある機器だけではなくMT、1/4" Tape、CD-ROMなど様々な方法でデータをやり取りできる。また、上述のHarashima and Kikuchi⁷⁾のデータベース用のNEC PC-98や、NASAで開発したブラウズシステムともネットワークで接続してある。さらに可視域衛星データ専用NASAで開発された解析システムのPC-SEAPAKとは直接データを共有することが可能である。また画像やその他のデータの解析のための多くの市販ソフトを利用するために、Macintoshともデータを直接共有することが可能である。さらに将来、より複雑な生物物理モデルを開発したときに、そのモデルを走らせるスーパーコンピューターともネットワークでデータのやり取りを行なえる。

上述したようにPC-SEAPAKやMacintoshの市販ソフトを十分に活用できるように構築しているため、画像解析装置上で構築しているデータ解析システムは、特にそれら既存のソフトではできないような、統計処理や3次元表示などを中心にFORTRANとNCARグラフィックスパッケージを利用して開発を行なっている。このシステムを用いてNASAで作成した全海洋のCZCS月平均クロロフィルマップを、統計情報をもとに7年半分の月平均クロロフィルマップに変換するプログラムを作成したほか、その月平均クロロフィルマップから最大、最小値を抜き出し、またその最大最小値の起きた月を表示するプログラムも作成した⁸⁾。またこれらの月平均クロロフィルマップや、NOAAの週平均温度画像等と、船舶で取られたクロロフィルや水温の鉛直断面と共に3次元的に表示するプログラムも作成した⁹⁾。またデータベースはHarashima and Kikuchi⁷⁾のデータベースと互換性をもたせている。

第2章で検討したHarashima and Kikuchi⁷⁾のデータベースに含まれているデータは主に、気象庁のルーチン観測データと環境庁の内湾での観測データに限られている。日本近海での生物化学データ (クロロフィル、栄養塩等) に関しては、東京大学海洋研究所の観測船、白鳳丸、淡青丸で観測を行なっているものが考えられる。そこで二年度には白鳳丸、淡青丸のうちCZCSの稼働していた時期に近い生物化学データを含む航海に関して収集した。残念ながら全てのデータが公表されているわけではないが、13航海分のデータを収集した。

これらのデータについて、第2章と同様にNASAのブラウズファイルを用いて、同時観測を行なったものがあるかを検索したが、第4章で述べる1航海以外は、CZCSと同時観測は行なわれ

ていなかった。今後はさらに未公開のデータを収集する必要があるが、新しい衛星センサーが上がった場合に備えて、本研究の他のサブテーマにあるような定常的に海洋観測を行なうプラットフォームを確立し、また衛星のキャリブレーションを目的とした観測計画を立てて行く必要がある。

また衛星データとの比較や、モデルの構築のためには、データの質が問題となる。栄養塩類について近海から外洋域ではそれぞれの比が比較的一定となることが知られているため、収集したいくつかの航海の結果でテストを行なった。一般には、磷酸塩と硝酸塩の比は一定に保たれ、ケイ酸塩との比も海域を限ると一定になると言われている。しかし、航海によってはこれらの比がかなりの幅でバラつき、明かに測定または転記時のミスが多く存在すると考えられる。今後モデルや衛星データの検証のためにデータベースとして利用するうえで、これらのデータの精度の問題は重要となり、さらに検討を行なう必要がある。特に、衛星の検証に必要なクロロフィルのデータについては、データを取った後でその質を調べるのが難しいため、データを収集する前にその方法についてよく検討しておく必要がある。

4. 船舶データと衛星データの比較

今回収集したデータの中で、1982年5月に伊豆沖で行われた東大海洋研究所のKT82-5次航海中一日の観測が、晴天時のCZCSによる観測と同時に進行されており、日本周辺としては初めてCZCSのデータを海洋観測したクロロフィル濃度と比較することができた¹⁰⁾。KT82-5航海は伊豆半島沖に起こる湧昇の観測を行なったが、1982年5月22日から26日の間、表層での水温、クロロフィル、栄養塩を連続に観測したほか、いくつかの測点で鉛直方向の水温、塩分、クロロフィル、栄養塩などを測定してあった。その結果、22日に伊豆半島東側に観測された若い湧昇の中で栄養塩を利用して植物プランクトンが増殖し、24日に栄養塩が枯渇するまで増殖し、その後26日に別の湧昇が起こったことが観測されている。23日に同観測域は晴れており、CZCSのデータが取られた。そこで23日に船舶で取られた表面クロロフィルデータを、アメリカで開発された一般的な大気補正と水中アルゴリズムで補正したCZCSのクロロフィル濃度と比較したところ、CZCSの値は船舶で観測したものよりも約1/5と非常に少なかった(図1)。CZCSのクロロフィル分布は、パターンとしては船舶で観測したものと同様に、湧昇域での比較的高いクロロフィルを観測しており、船で観測した一点のクロロフィルデータをもとに大気補正のパラメーターを推定してやることによって、他の観測点での観測値も合わせることができた。同観測では水中での分光測定も行なっており、その結果水中アルゴリズムはクロロフィルの推定にほとんど誤差を生まないことがわかった。従ってこの比較からも、本研究のサブテーマのひとつにある日本近海に適した大気補正アルゴリズムを開発の必要性が明かとなった。またこのCZCSデータはこの湧昇域のほか日本近海の植物プランクトンの様々な分布を明かし、今後日本近海での生物過程を理解する上での可視域衛星データの有効性が明かとなった。

本研究での船舶データの収集で明かとなったように、日本近海はCZCSのデータと直接比較のできるデータは非常に少ない。そこで、Harashima and Kikuchi⁷⁾のデータベースで集められた気象庁の観測データのCZCSの稼働していた1978年から1986年の月平均値と、解析システムで作成したCZCS月平均クロロフィルデータの比較も行なった。その結果、春の三陸沖など一部の特殊な海域を除き、船舶観測データとCZCSデータの間には比較的よい相関があった¹¹⁾。またその

絶対値は上述の1982年5月の伊豆沖と同様に過小評価されていたが、約1/2とその誤差は比較的小さかった。これはCZCSのデータが平均的には、上述の伊豆沖のケースよりも正確であることを表し、その有効性を示唆した。

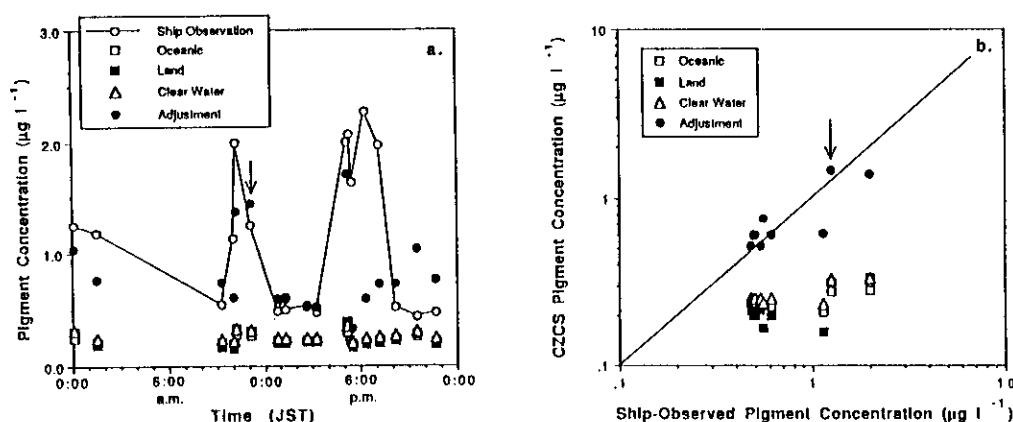


図1. 1982年伊豆沖での船舶とCZCSで推定したクロロフィル濃度。aは時間に対するプロット、bは相関関係、Oceanic, Land, Clear Waterは3つの代表的な大気補正方法、Adjustmentは矢印のデータが一致するように大気補正パラメーターを調節した。

5. 生物-物理モデル

本研究の最も重要な目的は、可視域衛星データを海洋観測データと統合するために、生物-物理モデルを構築し、大陸棚域での一次生産を見積る方法を開発することである。一次生産の見積には、植物の現存量がわかってから、その場での光、温度、栄養塩環境などを考慮にいて、その一次生産量を推定するモデルと、ある時間の植物の現存量と一次生産量から、次の時間の植物の現存量を推定するモデルの二つの部分が必要である。この研究では、この光と一次生産のモデルと、栄養塩と植物の生長、拡散を結合したモデルの2つを別々に伊豆沖の湧昇域を例として検討した^{1,2)}。この二つのモデルは最終的には結合させる必要があるが、日本近海でそれぞれの部分が同時に観測されているケースがないため、ここではそれぞれを現場で測定したデータと比較検討した。伊豆沖の湧昇海域は二年度に報告した衛星と船舶の同時観測が行なわれている¹⁰⁾ほか、モデルの構築および検証に必要な海洋観測データが充実しているため、代表海域として選択した。また、モデルを衛星データによって、向上するためのデータ同化法についても空間的に均一な簡単な生態系モデルを利用して検討した。

(1) 光と一次生産モデル

植物プランクトンが光を利用して行なう一次生産は、物質循環の上で重要であると同時に、植物プランクトンの生長を決めるため重要な過程である。人工衛星のデータから一次生産を見積ることが最近試みられている¹³⁾。一般には可視域のデータから表層、亜表層の植物プランクトン濃度（クロロフィル量）を推定し、これに日射量などから推定した単位クロロフィル辺りの生産速度をかけることによって、単位面積辺りの生産量を見積る。この際には、光-光合成曲線とよばれる生産速度と日射量の関係を利用するのが一般的であり、この光-光合成曲線を海域や時期

の特性としてあたえられるとする。しかし、光-光合成曲線は大きく変動し、その変動要因は余りはっきりしていないため、今回は光-光合成曲線を与えるのではなく、より生理学的に進んだモデルと考えられる光量子収律モデルを利用した。さらに光と光合成のモデルには、日射を総エネルギー量として与えるのではなく、波長別にスペクトルとして与えるモデルを選んだ。また衛星からクロロフィル量を推定するにしても、一日（もしくはデータの取れる数日）以内ではクロロフィルを一定とせざるをえないが、植物プランクトンは生物であり、植物プランクトンの現存量をその間一定と考えるには無理がある場合もある。そこで単純に生産を積算するのではなく、ここでは一日以内の植物の生長を考慮したモデルを検討した。

このモデルはMorel (1991)^{1,4)} に準じているが、一部を改良してある。まず一日あたりの日射量は、八丈島で全天日射量として観測されたものを利用し、これがサインの形で日射時間の間変化したと仮定する。このときの光エネルギーのスペクトル分布は現場での実測のものを利用した（岸野、私信）。このうち一定の割合の光が海表面で反射され、残った光が可視域の下向き光（400-700nm）として水中に入る。そしてこの下向き光は、水中で波長別に異なる消散係数で減衰する。この消散係数は海水本来のものとクロロフィルで表される植物態（もしくはそれと共に増減するもの）によるもので表される。ここで計算される下向き光の他に、実際に植物の利用できる光としては下方を含めた周辺からの光があり、この分の補正を行なって光合成有効光（PAR）を計算する。次に植物態はこのPARの一部分だけを吸収するため、光合成に利用するため植物の吸収スペクトルをかけ、光合成利用光（PUR）を計算する。これを可視域全体で積算し、各深度で植物が光合成に利用する光量子数がでる。これを光量子収律を用いた関数系で光合成速度と関係付け、日射量から各深度別のクロロフィル辺りの光合成速度が計算できる。光合成速度と光量子量の間の関数は、Kiefer and Mitchell^{1,5)} に基づき、最大光合成速度は温度の関数系として与えられる。さらにこの光合成によって固定された炭素量を、C/Chl比で植物の生長として表すことができ、これを一日あたりで積算することで一日あたりの光合成量が計算できる。

伊豆湧昇域で観測に基づいたクロロフィルの鉛直分布を与えたときの、モデルで計算した下向き光の鉛直分布を観測の比較によると、モデルの結果はかなり観測値と近い値を出し、モデルの妥当性が示された。この海域ではスペクトルを利用しないRileyのモデルより、よい結果が得られた。また波長分布も実際に測定したものと、かなり近いパターンが見られた。一方、一次生産については、現場のクロロフィルの鉛直分布を与えたときに、光を推定したうえで、生産も計算されるものの、現場の一次生産と光環境が同一水塊で正確に押さえられているデータがなく、対比するのが難しい。ある湧昇水塊中のシミュレーションでは（図2）、10m以深の生産に関して、モデルがかなり過小評価した。しかしこの場合は現場での一次生産の測定で、ブイが湧昇外に出てしまい、採水した湧昇水塊中で測定していなかったことが判明した。そこで、ブイの光環境にあわせてシミュレーションを行うと、比較的よく観測値と適合した。

また植物プランクトンの生長を考慮する場合としない場合では、一日あたりの生産量がかなり異なることがあきらかとなった。動物による接食や栄養塩の不足などによって、生長が阻害されるかどうかで、一日あたりの生産速度が大きく異なることは、今まで現場で測定した一次生産速度が水温や光だけで説明できなかった一つの大きな原因とも考えられる。

残念ながら日本近海での生産量の測定は非常に少なく、今後の測定でモデルの検証を続けていかなければならない。特にモデルのパラメーターがこれらの海域に適当なのかを確かめて行かな

ければならない。また生産量測定の際に、培養前後のクロロフィル量や、栄養塩量、また培養中の光、温度環境を、正確にモニタリングしておかないと、モデルの検証がかなり難しいことも判明した。

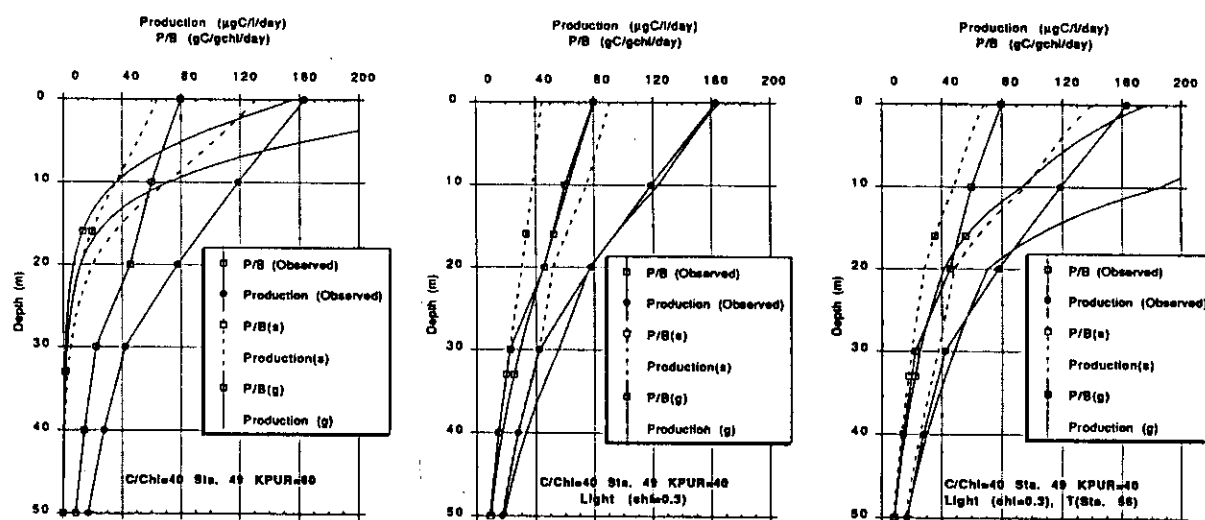


図2. 伊豆沖湧昇水塊中での一次生産速度の観測値とモデル計算結果。左) 現場のクロロフィル濃度から光環境を推定したケース。中) プイが湧昇水塊中になかったことを推定し、クロロフィルを湧昇外の $0.3\mu\text{g l}^{-1}$ として、光環境を推定したケース。右) 中)と同様で、さらに水温も湧昇外の水温を利用したケース。

(2) 拡散モデルとの結合

次に植物プランクトンの生長の光、栄養塩依存性がある程度モデル化された時に、植物プランクトンの生長への鉛直一次元の混合の影響を、観測された海洋の密度場から鉛直拡散係数を推定して、植物プランクトンと栄養塩の鉛直濃度分布の時間変動をモデル化して検討した。ここでは前述した植物プランクトンと光のモデルよりも単純な形で生長を温度、栄養塩、光の関数として与えている。拡散係数は鉛直方向の安定度から経験式¹⁶⁾を用いて推定している。

伊豆沖の結果では、2日間の観測をシミュレーションと比較すると、1日目には下層のクロロフィルが、大きく増加し、2日目には反対に大きく減少している(図3)。この現場での変化はその速度から、いずれも生物活動によるものとは考えにくい。1日目には水温の変化を伴わず、2日目には水温も減少している。このことから、1日目のクロロフィルの増加は、等密度面にそった沿岸の水の移動、2日目には鉛直方向の湧昇によって、クロロフィルが変化したと考えられる。伊豆海域では動的に海洋構造が変化しており、そのため一次元モデルで説明ができることには、限りがあると考えられる。

一方、もう少し長い期間続く春期ブルームについて、月平均CZCSデータと比較しながら、北海道沖海域のシミュレーションを行った¹⁷⁾。海洋観測で得られたいくつかの密度の鉛直分布から計算した拡散係数で一次元の生態系モデルを動かすと、北海道沿岸で低塩分水のために植物のブルームが早まることが明かとなった。伊豆の局地性湧昇のように短期間で海洋構造が大きく変

化するのではなく、ゆっくりと広い範囲でおこる変化において、一次元モデルは適していると言えよう。

これらのモデルでは植物プランクトンの生長のモデルは単純なものを利用し、5.1章で述べたような複雑なモデルは利用していない。前の章で述べたような一次生産のモデルを生物-物理モデルに利用する場合には、栄養塩のモデルとの組み合わせが必須である。一次生産と栄養塩のモデルを組み合わせるには、環境によるC/N比などの変化のモデル化が必要であり今後の課題である¹⁸⁾。また、今回は海洋の密度場と言う物理的な構造がわかっているときのシミュレーションを行ったが、現実にはこの物理場の情報を定常的に求めることは難しい。今後はこの物理場自体を風や日射など比較的定常的に測定できるパラメーターから計算できる物理モデルを構築し、それと生物モデルを組合せ必要がある。また現場環境を再現し人為的汚染の影響を評価予測するためのモデルには、生物モデルにおいても一次生産と栄養塩生長のモデルの統合、動物プランクトンなど捕食者のモデル化などが必要である。さらに、今後はこれらのモデルをいろいろな海域での観測結果と比較し、モデルがどのような環境でどれぐらいの誤差を出すのかを検討していく必要がある。

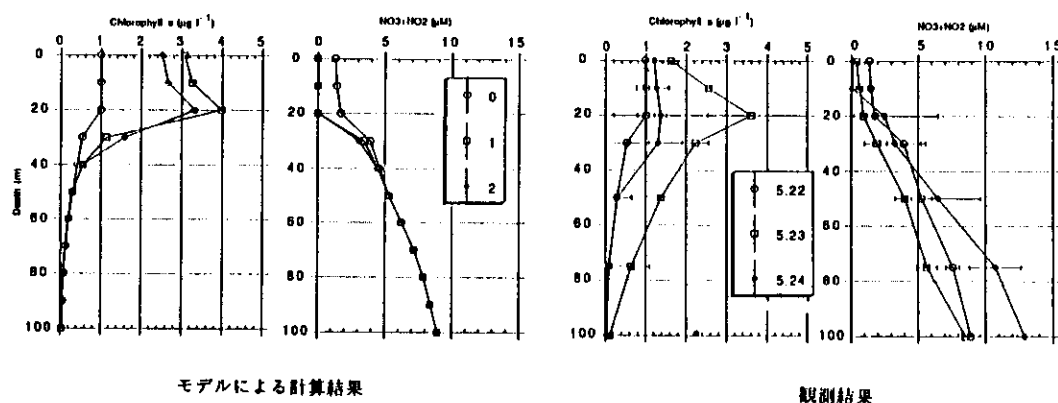


図3. 伊豆沖湧昇水塊中でのクロロフィルと、栄養塩の変化の観測値とモデル計算結果。

(3) データアシミレーション

可視域衛星データが頻繁にある場合には、生物-物理モデルの結果を、衛星のデータで向上することが考えられる。これがデータアシミレーションである。ここではもっとも単純な空間的に均一な生態系モデルの時間変動にデータアシミレーションで既知のデータで修正を加えることによって、生態系モデルが向上できるかどうかを検討した。結果は他¹⁹⁾に詳しく述べてあるが、一概には植物プランクトンのデータだけを生態系モデルに入れることによって、モデル全体の誤差を小さくできるとは限らないことが明らかになった。しかしモデル中での普遍的な関係を見つけ、それを利用すれば生態系モデルが向上できることもあり、今後生態系モデルに最適なデータアシミレーションの方法を考え出す必要性が示唆された。

6. まとめ

地球規模で進む海洋汚染の汚染を監視するには、可視域衛星データと生物-物理モデルを利用して、現場を理解しまた将来を予測できるモデルを開発する必要がある。この研究ではその第一歩としてまず、過去の可視域衛星センサーであるCZCSの日本近海のデータについてそのデータ量を確認し、海洋観測のデータとの同時観測性を調べた。その結果、日本近海でCZCSと船舶による観測が同時に行われたことは、非常に少ないことが明かとなった。今後、日本近海で可視域衛星センサーが利用できるようになるには、その検証のためにもっと頻繁に船舶による観測を行い、それをデータベース化して検証を定常的に行っていかなければならない。次に1982年5月の伊豆沖湧昇域のデータを利用して、日本近海で始めてCZCSと海洋観測のデータを直接比較した。その結果このデータに関しては船で取った観測データよりもかなり過小評価されており、定量的に衛星可視域リモートセンシングのデータを利用するには日本周辺向けの新しい大気補正の開発が必要であることが明かになった。さらにモデルにおいては、鉛直一次元モデルを利用して一次生産とクロロフィルの変動を再現することを試みた。その結果一次生産は現場の環境条件がよくわかっていれば、ある程度の正確さで推測できることがわかった。また一次元モデルでは伊豆沖湧昇域のように動的な環境での短期の予測をすることはかなり難しいが、春季ブルームの様な広い範囲での長期間の変動にはうまく利用できることが明らかになった。衛星データの検証のためにも、生物-物理モデルの検証のためにも、日本近海での定常的な海洋観測の不足が明かであり、今後、2次元的に海洋面を観測できる衛星、比較的多くのパラメーターを測定できる船による海洋観測に加えて、一点での定常的な観測を行えるブイでの観測を利用し、それらのデータを3次元的な生物-物理モデルと組み合わせることによって、海洋の環境を把握してゆくことが必要である²⁰⁾。

引用文献

- 1) Feldman, G., et al. (1989): EOS, 70, 634-641.
- 2) 石坂丞二、福島甫 (1990): 月刊海洋, 22, 686-691.
- 3) 石坂丞二、原島省 (1991): 航水研ノート、空と海, 13, 1-8.
- 4) Gordon, H., et al. (1983): Appl. Opt., 22, 20-36.
- 5) 平松一彦ら (1987): 航水研ノート、空と海, 9, 1-7.
- 6) 萩島隆ら (1986): 航水研ノート、空と海, 8, 53-63.
- 7) Harashima, A., and Y. Kikuchi (1990): EOS, 71, 314-315.
- 8) 石坂丞二、才野敏郎 (1992): 日本海洋学会春季大会、石坂丞二と高橋正征 (1993): 海洋, 4, 185-191., Ishizaka, J. (1993): "Remote Sensing of the Oceans", In Press.
- 9) 石坂丞二 (1993): 資源と環境, 2, 103-108.
- 10) 石坂丞二ら (1991): 日本海洋学会春季大会、Ishizaka, J. et al. (1992) J. Oceanography, 48: 305-327.
- 11) 才野敏郎、石坂丞二 (1992): 日本海洋学会春季大会
- 12) 石坂丞二 (1993): 日本海洋学会春季大会
- 13) Platt, T. and S. Sathyendranath (1988) Science, 241: 1613-1620.
- 14) Morel, A. (1991) Prog. Oceanogr. 26: 263-306.

- 1 5) Kiefer, D.A. and B.G. Mitchell (1983) *Limnol. Oceanogr.* 28: 770-775.
- 1 6) Garrett, A.E. (1983) *J. Mar. Res.* 42: 359-393.
- 1 7) 吉森明、石坂丞二他(1993) 日本海洋学会春季大会、Yoshimori, A., J. Ishizaka et al. (1994) 準備中.
- 1 8) Cullen, J., J. Ishizaka et al. (1993), "Towards a model of biogeochemical ocean processes", pp. 153-176.
- 1 9) 石坂丞二 (1993): 海洋工学コンフェレンス論文集, 8, 77-84、Ishizaka, J. and E. E. Hofmann (1993): "Ocean colour: Theory and applications in a decade of CZCS experience", pp. 271-288、Ishizaka, J. (1993), "Towards a model of biogeochemical ocean processes", pp. 295-316.
- 2 0) 石坂丞二 (1993): 沿岸海洋研究ノート, (30周年記念特集号), 79-88.

国際共同研究などの状況

- 1991年 5月 7-10日 ハワイ大学で開かれた第2回日米海色ワークショップに参加講演
- 1991年10月21-25日 国際宇宙年1992 地球規模海洋の基礎生産の一環としてECのJoint Research Centreで開かれたEurocourses "Ocean Colour: Theory and Applications in a Decade of CZCS Experience"に参加講演
- 1992年 5月 3-9日 NATO JGOFS 主催の Advanced Research Workshop "Towards a Model of Biogeochemical Ocean Processes" にキーノートスピーカーとして招待講演
- 1992年11月 - NASA SeaWiFS Global Ocean Primary Productionプロジェクトに "Evaluation of temporal and spatial variabilities of phytoplankton pigment and primary production in the Japan Sea" の研究で、理化学研究所の岸野元彰、北海道大学の斉藤誠一両博士らとともに参加
- 1992年11月9-12日 Bedford Institute of Oceanography (カナダ) で開かれたコース、"Estimation of Primary Production from Remotely-Sensed Data on Ocean Colour" に参加
- 1993年 9月27日-10月1日 NASA Goddard Space Flight Centerで開かれた第4回日米海色ワークショップに参加講演、また引き続いて開かれたMODIS Science Team Meeting に参加
- 1993年12月8-9日 科学技術庁主催「地球環境と地球観測衛星センサーに関する国際ワークショップ」に参加講演

研究発表の状況

口頭発表

- 石坂丞二 (1991): NASAのCZCS 複合画像で見た日本周辺の月平均クロロフィル分布 日本海洋学会春季大会
- Ishizaka, J. (1991): Comparison of ship-measured and satellite derived pigments around Japan. 2nd Annual Japan-US Workshop on Ocean Color.
- 石坂丞二、福島甫、岸野元彰、才野敏郎、高橋正征 (1991): Coastal Zone Color Scanner による 1982年5月伊豆沖湧昇のクロロフィル観測 日本海洋学会秋季大会
- Fukushima, H. and J. Ishizaka (1991): Special features and applications for CZCS data in Asian waters.

Workshop on "Ocean Colour: Theory and applications in a decade of CZCS experience" of ISY '92
"Productivity of the Global Ocean"

Ishizaka, J. and E.E. Hofmann (1991): Coupling of ocean colour data to physical/biological models.

Workshop on "Ocean Colour: Theory and applications in a decade of CZCS experience" of ISY '92
"Productivity of the Global Ocean"

石坂丞二、才野敏郎 (1992): 太平洋におけるクロロフィルの季節変動 - ブルームはいつどこで起こっているか? - 日本海洋学会春季大会

才野敏郎、石坂丞二 (1992): CZCS月別合成画像から見た日本周辺海域の植物色素濃度分布とその季節変動 日本海洋学会春季大会

Ishizaka, J. (1992): Data assimilation for biogeochemical models. "Towards a Model of Biogeochemical Ocean Processes", NATO Advanced Research Workshop.

石坂丞二 (1992): 人工衛星と基礎生産 水圏科学研究所シンポジウム 「大気水圏における物質輸送のマルチスケールアナリシス」

石坂丞二 (1992): 衛星データとCG - CZCSと観測データの統合 (1) - 東京大学海洋研究所共同利用シンポジウム 「海洋学へのCG・GIS技術の効果的利用」

石坂丞二 (1992): 今後の沿岸海洋研究への提言 - 生物 日本海洋学会沿岸海洋研究部会設立 30 周年記念シンポジウム

石坂丞二 (1993): 鉛直一次元モデルと衛星データを利用したクロロフィル時空間変動の解析 - 1982年 5 月伊豆沖湧昇によるテストスタディー 日本海洋学会春季大会

吉森明、石坂丞二、葛西広海、田口哲、斉藤宏明、岸道郎 (1993): 春季ブルームモデルの北太平洋亜寒帯水域への応用 日本海洋学会春季大会

Ishizaka, J. (1993): Modeling-coupled physical-biological modelling. 4th Annual Japan-US Workshop on Ocean Color.

Ishizaka, J. (1993): Central Pacific Cruise for JGOFS: NOPACCS (Northwest Pacific Carbon Cycle Study and Satellite Data. International Workshop on Global Environment and Earth Observing Satellite Sensors.

石坂丞二 (1993): 水色情報の基礎生産研究への利用 航空宇宙利用水産海洋研究会、水産海洋学会共催シンポジウム 「日本周辺海域の低次生産環境のモニタリングシステム」

誌上発表

石坂丞二、原島省 (1991): 日本周辺海域のCZCSデータ数と同時観測表面クロロフィルデータ数 航水研ノート、空と海 13: 1-8.

Ishizaka, J., H. Fukushima, M. Kishino, T. Saino, and M. Takahashi (1992): Phytoplankton pigment distributions in regional upwelling around the Izu Peninsula detected by Coastal Zone Color Scanner on May 1982. J. Oceanography 48: 305-327.

石坂丞二 (1993): 衛星と船舶データによる北太平洋の水温とクロロフィルの 3 次元表示、資源と環境、2, 103-108.

- 石坂丞二、高橋正征 (1993): 大循環研究と海洋生物研究. 海洋, 4, 185-191.
- 石坂丞二 (1993): 生態系モデルのデータアシミレーション、海洋工学コンフェレンス論文集, 8, 77-84.
- Fukushima, H. and J. Ishizaka (1993): Special features and applications for CZCS data in Asian waters. "Ocean Colour: Theory and Applications in a Decade of CZCS Experience", Eds., V. Barale and P.M. Schlittenhardt, Kluwer Academic, pp. 213-236.
- Ishizaka, J. and E.E. Hofmann (1993): Coupling of ocean colour data to physical/biological models. "Ocean Colour: Theory and Applications in a Decade of CZCS Experience", Eds., V. Barale and P.M. Schlittenhardt, Kluwer Academic, pp. 271-288.
- Cullen, J.J., R.J. Geider, J. Ishizaka, D.A. Kiefer, J. Marra, E. Sakshaug, and J.A. Raven (1993): Towards a general description of phytoplankton growth for biogeochemical models, "Towards a Model of Biogeochemical Ocean Processes", Eds., G.T. Evans and M.J.R. Fasham, Springer-Verlag, pp. 153-176.
- Ishizaka, J. (1993): Data assimilation for biogeochemical models. "Towards a Model of Biogeochemical Ocean Processes", Eds., G.T. Evans and M.J.R. Fasham, Springer-Verlag, pp. 295-316.
- 石坂丞二 (1993): 生物海洋学の今後10年：生態系の時空間・複雑性次元での把握 沿岸海洋研究ノート, 30周年記念特別号, 79-88.
- Ishizaka, J. (1993): Seasonal changes of phytoplankton distributions in the Pacific detected by Coastal Zone Color Scanner. Satellite Remote Sensing of the Oceanic Environment, Seibutsu Kenkyusha, 印刷中.
- Yoshimori, A., J. Ishizaka, T. Kono, S. Taguchi, H. Kasai, H. Saito, and M.J. Kishi (1994): Spring bloom model using vertical density structure. J. Oceanography, 準備中.

その他

- 石坂丞二 (1991): 生態系としての海 衛星をプランクトンからみる 岩波ジュニア新書195 「海に何が起きているか」 関文威、小池勲夫編 2-7.
- 石坂丞二 (1993): 人工衛星から見た海洋の植物プランクトンの分布、外洋、動物達の地球、朝日新聞出版、116, 外洋, 10-240 - 10-241.
- Fukushima, H., J. Ishizaka, I. Asanuma, and M. Takagi (1993): Northwestern Pacific Coastal Zone Color Scanner Monthly Composite (1978-1986). ISY PGO Japan, CD-ROM Publication.