

衛星データを用いた海洋一次生産見積もりのための 日本近海Sea-truthデータの集積

津田 敦¹・横内 克己²・桑田 晃³・浅沼 市男⁴・足立 久美子⁵
市川 忠史⁶・廣田 裕一⁶・葛西 広海⁷・石田 洋⁸

(¹東京大学海洋研究所・²西海区水産研究所・³東北区水産研究所

⁴海洋科学技術センター・⁵水産工学研究所・⁶中央水産研究所黒潮研究部

⁷北海道区水産研究所・⁸関西総合環境センター)

摘 要

放射性同位体の使用制限から一次生産測定の空白域であった日本周辺海域において、衛星データの検証に資するため、安定同位体を用い、統一した方法で水柱の一次生産を測定し、データベース化した。従来、衛星データから一次生産を推定するアルゴリズムを検証するデータベースは、Falkowski博士が公開している1,700件のデータであるが、本研究により日本周辺海域から200件以上の測定がなされた。集中観測海域(親潮域、親潮 黒潮混合水域、黒潮域、土佐湾、東シナ海陸棚域)においては、一次生産速度の季節変化が明らかになり、115~339 gCm⁻²y⁻¹が見積もられた。また、現場法と擬似現場法の比較および¹³C法と¹⁴C法との比較を行い、本研究で得られた一次生産データベースは十分な質と量を備えていることが確認された。

キーワード：衛星、海洋一次生産、データベース、日本周辺海域

1. はじめに

1978年から1986年に運用したCZCS(沿岸域海色走査計)を初めとして、海洋の水色を観測する衛星が実用段階に至り、OCTS(海色水温走査計：1996年から1997年)、SeaWiFS(海洋広域観測走査計：1997年から現在)と連続して運用、全球レベルでクロロフィル濃度が継続的に観測されるようになった。衛星から観測されるのは上空から見た海の色(上向き輝度)であり、水柱全体の植物存在量を反映するわけではない。しかし、海域に特徴的な植物プランクトンの鉛直分布を仮定することなどによって、植物プランクトンの水柱全現存量を求めることが出来る。水面に達する光量、水温は別の衛星で観測が可能であるため、水色衛星から求めたクロロフィル濃度、水温、光量を関数として水柱の一次生産速度を求め、全球レベルで1週間以下の時間スケールでマッピングすることが実質的に可能な時代となった。

船舶観測は数々の面で未だに優れた観測手法であるが、移動速度が通常20~30 km/hで、例えば太平洋を横断するのに10日以上かかる。現在、地球は人類の活動によって放出した温暖化ガスの増加によって、人類が誕生して以来、経験したことのない速さで温暖化している。これに伴い、海

洋の生態系、物質循環はここ数十年で大きく変わることが考えられるが、現在、その変化を正確に予測することは難しい。地球環境変化の時代に生きる我々の義務は、少しでも破滅的ではない状況にコントロールする努力を行うことと、地球環境変化を正確に観測記述し、それを方策に反映させることにある。衛星観測はこのような意味において、有効な観測手段である。

しかし、衛星で得られるのはごく限られた情報である。従って、限られた情報から必要な情報(クロロフィル濃度や一次生産速度)を求めるには、理論や換算式が必要なのは言うまでもなく、それら推定値を検証するための実測データが重要になってくる。海洋のクロロフィル濃度は蛍光法測定¹⁾が普及しており、少量の試水と簡単な操作で測定が可能である。そのため、かなりのデータ量が蓄積しており、データベースとしてWEB上で公開されているものも多い。しかし、一次生産に関してはデータ量が極端に少ないのが現状である。その理由はいくつかあるが、一次生産の測定には光条件をコントロールした条件下での培養実験が必要であり、作業量も多く、時間も要するためと考えられる。また日本には独自の事情がある。一般的には一次生産の測定は、試水に放射性同位体である¹⁴Cを含む炭酸塩を加え、植物が炭

素を取り込む速度を測定した²⁾。日本でも沿岸を中心に、1960年代までは¹⁴Cを用いて、ある程度組織的な一次生産の測定が行われていた^{3),4)}。しかし、放射性物質の取り扱いに関する規制で、限られた実験室以外では放射性同位体を用いた培養実験はできなくなり、海洋での測定は実質的に困難になった。1980年代に入って炭素の安定同位体である¹³Cを用いた測定方法⁵⁾が確立したが、¹³Cの測定に高額な質量分析計を用いること、¹⁴Cに比べると大量の試水を必要とし、培養時間も長いことなどで多くの調査研究機関で用いられるには至らなかった。

衛星データから海洋一次生産を求めるアルゴリズムの構築や検証には、広くFalkowski博士が提供しているデータセットが用いられている (<http://marine.rutgers.edu/opp/>)。このデータセットは約1,700点の実測結果を含むが、全球をくまなく網羅しているとは言いがたい(図1)。特に日本周辺海域である西部北太平洋域は、上記のような理由で完全な空白域であった。科学技術庁のプロジェクトであるGCMAPS(Global Carbon Cycle and the Related Global Mapping based on Satellite Imagery)は、衛星の利用による全球の炭素循環解明を目的として立ち上げられた(1998年～2002年)。このプロジェクトの中で一次生産測定の空白域であった西部北太平洋での測定を組織立って行い、アルゴリズムの構築や検証に役立てるため、「海洋一次生産分科会」が設けられた。参加した水産総合研究センターは各海域に研究施設と船舶を保有

し、プロジェクトに先駆けて定線または定点観測を実施しており⁶⁾、これらをプラットフォームとして一次生産測定を行った。本稿ではその結果の概要について述べる。

2. 方法と材料

一次生産の測定を行った海域は、親潮域、親潮黒潮混合水域、黒潮域、土佐湾、東シナ海。季節的な網羅はないものの測定があるのは、北海道周辺沿岸域、鹿島灘および赤道域である。本稿では、GCMAPSプロジェクトで収集された測定結果のうち、24時間の培養時間により季節を網羅して行った親潮域、親潮黒潮混合水域、黒潮域、土佐湾、東シナ海の日本周辺5海域(図2)について述べる。なお、北海道周辺沿岸域、鹿島灘および赤道域では季節的に網羅されていないか、または短時間培養で測定されたため除いた。親潮域は主に、北海道区水産研究所が調査船探海丸および北光丸を用い、混合水域は東北区水産研究所が若鷹丸を用いた。黒潮域は水産工学研究所が蒼鷹丸、俊鷹丸および北光丸を、土佐湾は中央水産研究所がこたか丸を用いた。東シナ海は西海区水産研究所と関西総合研究センターが陽光丸、開洋丸および第三開洋丸を用いて観測・測定を行った。観測の頻度は海域によって異なり、年4～12回である。一次生産測定法は、基本的にはJGOFSプロトコルに準じた⁷⁾。しかし、JGOFSプロトコルでは¹⁴C法を用い、現場法を基本としていること

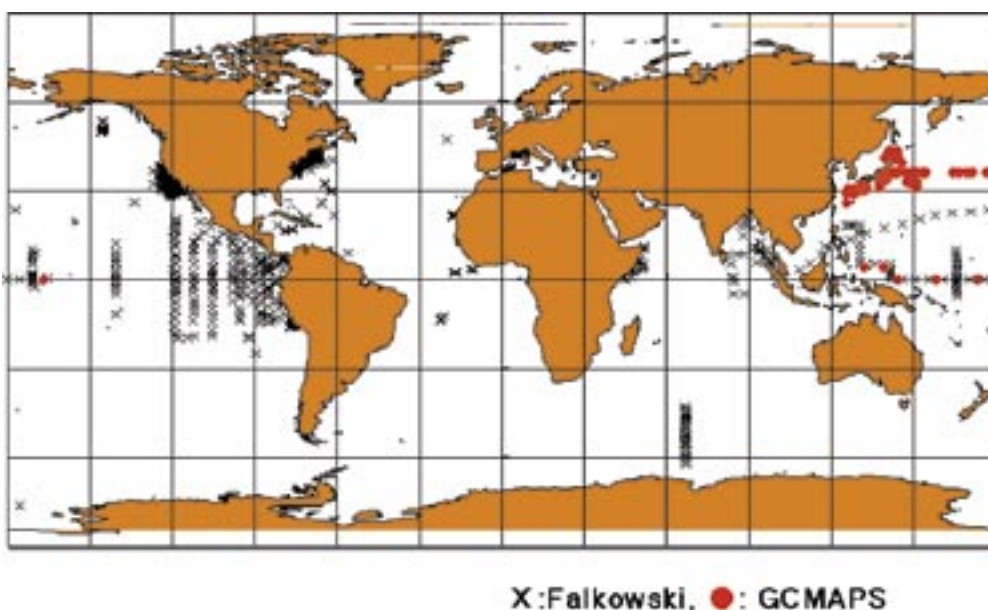


図1 海洋一次生産測定の全球分布。
X: Falkowski博士が公開する一次生産測定地点 (<http://marine.rutgers.edu/opp/>),
および赤丸: GCMAPSで測定された地点。

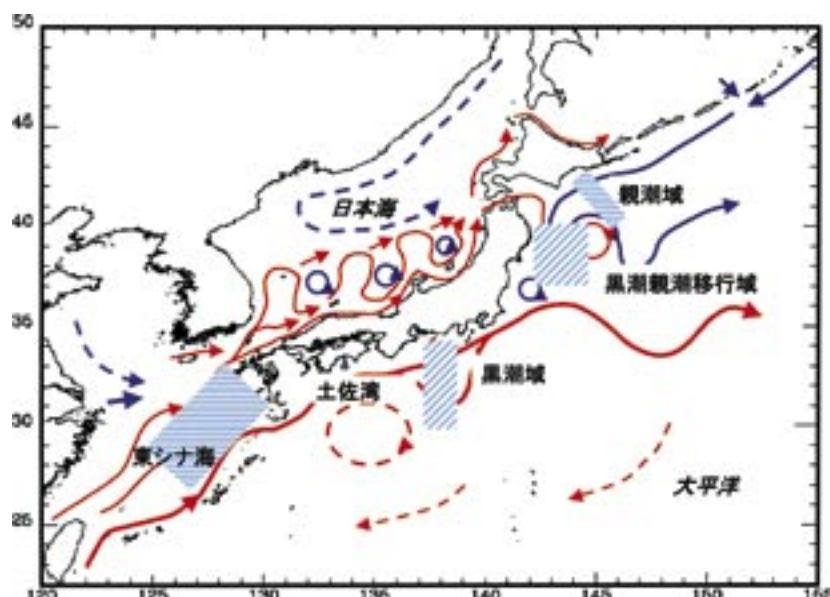


図2 日本周辺海域の主な海流(青線：寒流，赤線：暖流)と本研究における主要観測海域(斜線部分)。

が、我々の採用した方法とは異なる。日本における法的規制から ^{14}C は使えないため、 ^{13}C 法を採用した。また、現場法は同位体を添加した培養瓶を採水した深度に吊りし培養する方法であるが、24時間の培養となると観測点の数が限定され、他の観測にも支障が出るため、擬似現場法を採用した。延べ12観測点においては現場法と擬似現場法を併用し、擬似現場法の検証とした。また土佐湾においては、すべて現場法で培養を行った。擬似現場法とは、各深度から採水した試水を、光の波長を変えないフィルター、および青色に調光するフィルターを用いて採水した深度の光環境を再現し、天然光下で培養する方法である。培養水温の調整は表層水をかけ流しにすることで行ったが、海域によっては表層と下層の水温が大きく異なるため、下層の培養は調温装置をつけた培養槽を用いた。採水した光深度は多くの場合、相対照度1%~100%の5~8層である。光深度は光合成有効放射の鉛直分布から決めるか、測器を持たない場合はセッキ盤深度から求めた透明度から見積もった。採水は酸洗浄した採水器(ゴーフロー採水器、またはニスキン採水器)を用いて行った。採水は夜明け前または早朝に行い、培養開始が午前中となるよう実験を行った。さらに、採水が日出後になる場合には植物プランクトンに強光が当たりダメージを受けることがないように、遮光下で分注などの作業を行った。1Lポリカーボネイト瓶に分注後(メッシュサイズ100~330 μm のプランクトンネット地により試水中の大型動物プランクトンを除去)、試水中の無機炭酸の5%~10%となるよう ^{13}C 重炭酸塩を加え培養を開始した。

培養の開始から24時間後に試水をグラスファイバー濾紙(GF/F)でろ過し、粒状物を濾紙上に集め凍結保存した。 ^{13}C の測定は質量分析計(ANKA-MASS, ANKA-SL, DELTAplus)または ^{13}C アナライザー(JASCO CX130S)を用いた。取り込み速度の計算はHama *et al.*⁵⁾によった。

一次生産の測定とともに、測定された項目は水温、クロロフィル量の鉛直分布、培養中の光合成有効放射である。水温はCTD(SeaBird社)により測定し、クロロフィルは採水した海水(50~300 ml)をGF/F濾紙でろ過し、濾紙上の色素をN, N, ジメチルフォルムアミド、または90%アセトンで溶出した後、蛍光光度計で測定した⁸⁾。光合成有効放射は甲板上に設置した光量子センサー(Li-Cor社)によって測定した。

3. 各海域における一次生産の季節変動

観測海域で最も北に位置する親潮域では1月~3月に一次生産は非常に低く($<200 \text{ mgC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)、4月に非常に高くなる(図3、 $>1500 \text{ mgC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)。これは当海域で、この時期に塩分成層が形成されることに伴う珪藻類による春季大増殖と一致する^{6), 9)}。その後、6月~7月は一次生産が低下するが、この時期、硝酸などのマクロ栄養塩は枯渇していない場合が多く、鉄などの微量栄養塩が枯渇している可能性が指摘されている¹⁰⁾。一般的には9月~10月にかけては、成層が崩れ下層から硝酸や鉄といった栄養塩が供給されるために秋期のブルームが観察されるが、今回の結果からは明らかではない。年間の一次生産は $219 \text{ gC m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ と

見積もられる。なお、親潮域では年間一次生産の30%~40%が春季大増殖に依存しており、春季大増殖は空間的にも時間的にも変動が大きい¹⁰⁾。

親潮域に引き続く三陸沖混合水域では、4月~7月に高い一次生産が観察され、秋季のブルーム、盛夏の低下も顕著ではない(図3)。冬期は低下するが、親潮域に比べると若干高い。年間の一次生産は $142 \text{ gC m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ と見積もられる。

御前崎沖の黒潮域は、親潮域、混合水域に比べると一次生産は年間を通じて低く、 $500 \text{ mgC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ を超えることは稀で、安定している。これは、上記2海域に比べると冬期の鉛直混合による栄養塩供給が小さいためである。また、海域の一次生産が高まるのは3月~4月にかけてと予想されるが、この時期の観測が稀なことも付記する必要がある。年間の一次生産は $115 \text{ gC m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ と見積もられる。

土佐湾の観測点は、緯度的には黒潮域と同程度であるが、陸棚上の黒潮内側域に位置している。黒潮域に比べると栄養塩供給が大きいため高い一次生産を示し、年間を通じて $500 \text{ mgC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ を下回することは稀である。一次生産は5月~8月にかけて高く12月~4月は低くなっている。年間の一次生産は $267 \text{ gC m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ と見積もられる。しかし、5月~8月に見られる一次生産の増加は黒潮の流軸変動で土佐湾内に左遷環流が生じ、それに伴う湧昇の影響で基礎生産が高くなっていることが示唆されており、年による変動があると考えら

れる¹¹⁾。

東シナ海陸棚域は長江からの淡水供給(栄養塩など陸起源物質も)が大きい海域であるとともに、水深が浅く、冬期には季節風によって海底堆積物が巻き上がり植物プランクトン以外の懸濁物が多いため、衛星データからのクロロフィル量や一次生産の見積もりが比較的難しい海域(Case II water)である。この海域における一次生産は5月と8月~10月に2回のピークが観察された。また、観測した5海域の中では最も高い年間一次生産である $339 \text{ gC m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ を示し、春季の一次生産は $4 \text{ gC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ を越すことも観察された。高い一次生産の要因として、黒潮前線と連動した陸棚斜面での湧昇による栄養塩供給が考えられる¹²⁾。

4. 現場法と擬似現場法、¹³C法と¹⁴C法の比較

測定された一次生産値は、他海域で測定された値と比較できて初めてデータベースとしての意義を持つ。我々の選択した方法は、基本的にはJGOFSプロトコルに準じているが、擬似現場法を用いている点と、¹³C法を用いている点が異なっている。方法論としては両方法とも広く認められている方法であり、擬似現場法はJGOFSプロトコルにおいても容認できる方法と記されている⁷⁾。本研究においては、三陸沖の親潮水塊と混合水域および東シナ海において、現場法と擬似現場法を

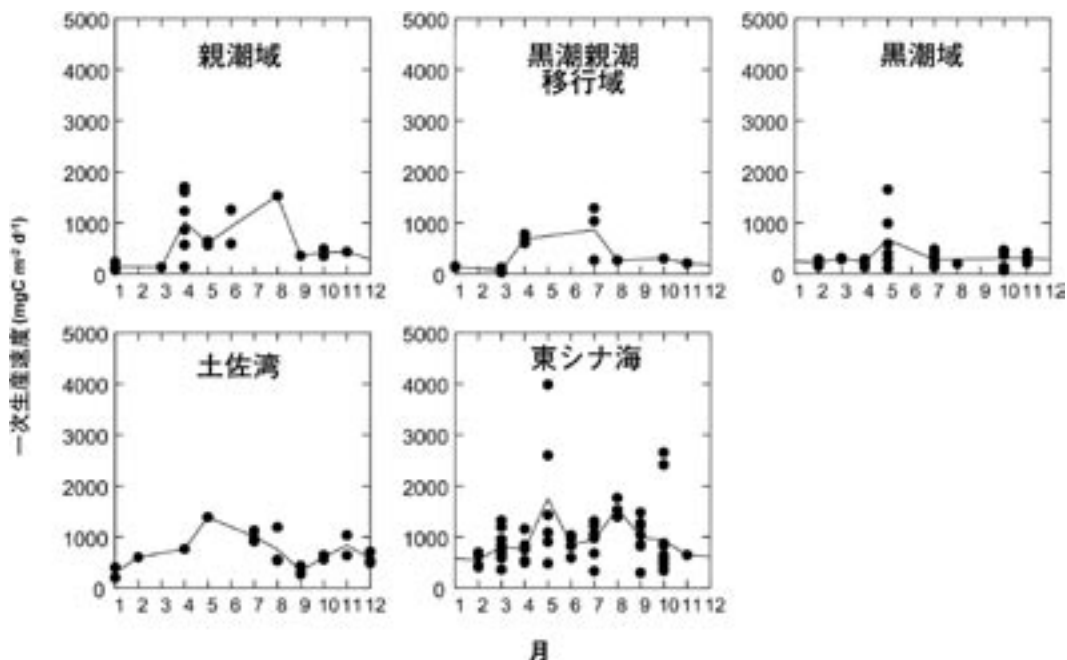


図3 日本周辺5海域(親潮域, 三陸沖移行水域, 黒潮域, 高知湾, 東シナ海)で得られた海洋一次生産の季節変化。

併用し、検定を行った。両方法は、親潮水塊 (St. 29/27) においても混合水域 (St. 17) においても、よく一致し、季節的変動も差異が認められなかった (図 4)。同様の結果は東シナ海でも得られており、擬似現場法で測定された有光層積算一次生産量は現場法の 65%~212% の範囲にあり、平均は 128% であった。擬似現場法の値が高いのは、ほとんどの場合に培養水温が表面水温に維持されたため、下層では現場より水温が高く活性が促進された可能性がある。Imai *et al.*¹³⁾ は平均 97% を報告しており、本研究結果とあわせると、擬似現場法で得られた一次生産値は現場法一次生産測定データと十分比較できる値であることが示された。

次に¹⁴C法と¹³C法の比較は、船舶観測 (実験) において放射性同位体を扱うことで、RI実験室を持つ東大海洋研究所白鳳丸 (2004年 4 月以降は海洋研究開発機構所属) 以外では出来ず、直接的には困難である。そこで、¹³C法で得られた測定値から Pb_{opt} を比較することを考えた。海洋の一次生産速度は一般にごく浅い表層では強すぎる光によって一次生産速度が低下し、ある層で最大値を示し、それより深い層では光不足によって低下する (図 5)。従って、最大値を示した一次生産速度は光強度に依存しない一次生産速度とみなすことができる¹⁴⁾。この一次生産速度鉛直分布の最大値を Pb_{opt} と呼び、衛星データから水柱の一次生産を

見積もるアルゴリズムではしばしば使用されている。Behrenfeld and Falkowski¹⁴⁾ では、 Pb_{opt} は表層水温 (T) の 7 次式として下記のように表されている。

$$Pb_{opt} = -3.27 \times 10^{-8} T^7 + 3.413 \times 10^{-6} T^6 - 1.348 \times 10^{-4} T^5 + 2.462 \times 10^{-3} T^4 - 0.0205 T^3 + 0.0617 T^2 + 0.2749 T + 1.2956 \quad (1)$$

そこで、本研究で得られた Pb_{opt} (本研究で得られた一次生産速度は 24 時間培養であるため、比較のため日照時間で割った一時間あたりの生産速度に換算した) と表層水温の関係性を式 (1) とともに表したのが図 6 である。もともとの近似式も大きな偏差を含む式であるから、今回測定された日本近海での一次生産測定値もほとんどが 1 SD の中に入り、有意な差はない。全体としても表層水温 20°C 付近で最大値を示し、高温域で低下する傾向はよく一致している。しかし、黒潮域の測定値はいくつかの測定はよく一致しているものの、全体としては¹⁴C法から求められた予測値よりかなり低くなっている。本研究で用いた測定方法は、基本的には JGOFS プロトコルで推奨されているクリーンテクニック (光合成を阻害する重金属の混入を防ぐ) であるが、微量元素の測定に用いられるウルトラクリーンテクニックではない。黒潮域など貧栄養海域では、微量の重金属の混入が光合成活性を阻害した可能性は否定できない。しかし、前述したように全体の傾向としてはよく一致しており、日本周辺という狭い範囲で測定された値であるが、温度範囲や一次生産の変動範囲も大きく有用なデータベースと考えられる。

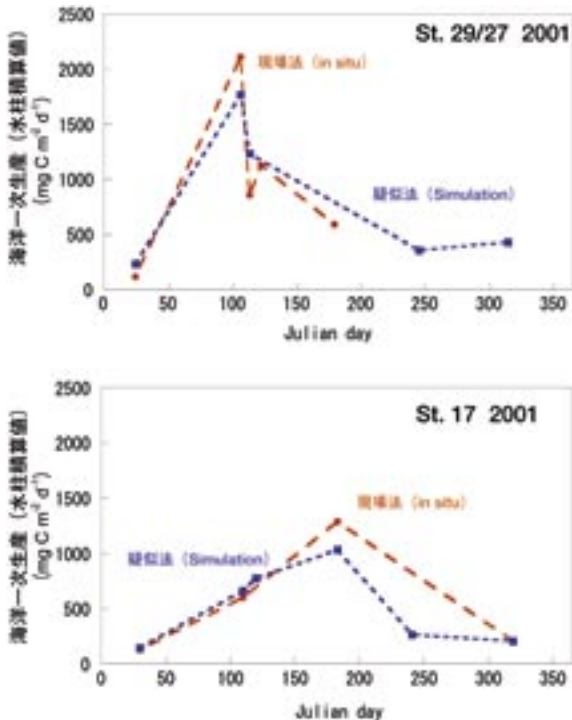


図 4 親潮域 (Stn. 27/28) と三陸沖移行水域 (Stn. 17) で測定された現場法 (赤線) 現場および擬似法 (青線) による海洋一次生産 (水柱積算値) の比較。

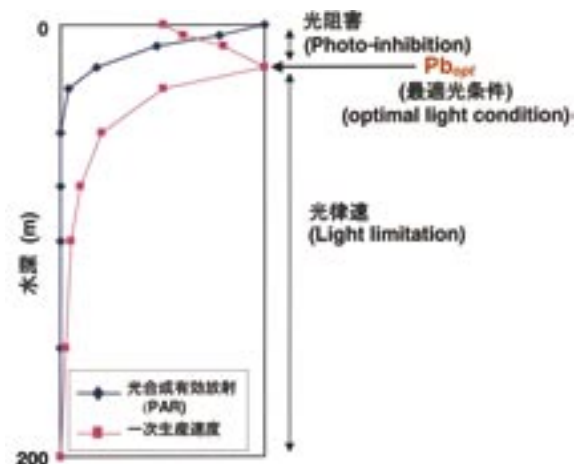


図 5 水柱における光合成有効放射 (青線) と一次生産速度 (赤線) の鉛直分布模式図。 Pb_{opt} は一次生産速度の最大値として求められる。

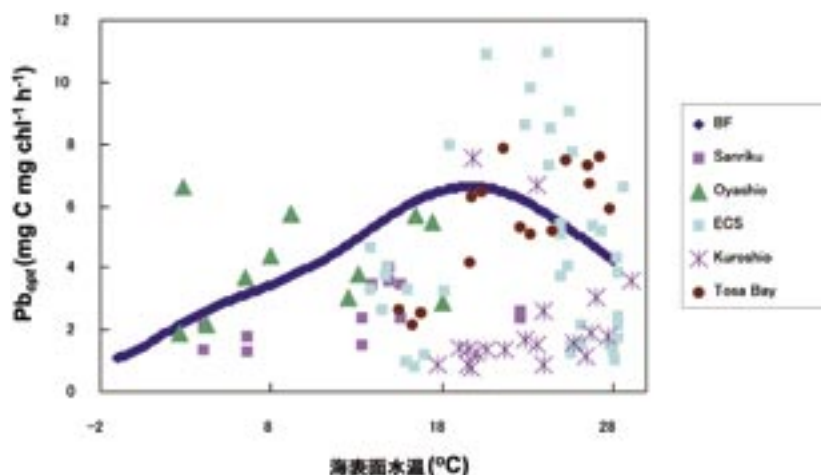


図6 Behrenfeld and Falkowski¹⁴⁾による経験式(BF:青線)とGCMAPSで得られた各海域における一次生産速度。
赤：三陸沖移行域，緑：親潮域，水色：東シナ海，紫：黒潮域，茶：高知湾。

5. 衛星データから見積もられた日本周辺海域の一次生産

Asanuma *et al.*¹⁵⁾のアルゴリズムを用い、本プロジェクトで得られたsea-truthデータによってパラメータを調節して求められた、年間一次生産の日本周辺海域におけるマッピング結果を図7に示す。渤海から長江河口域の沿岸部や三陸沖移行域における高い一次生産域に年変動が認められるが、全体的には1999年～2002年の4年間は比較的安定した一次生産分布を示している。年間一次生産が高い海域は、渤海、東シナ海陸棚域、日本海朝鮮半島周辺、太平洋黒潮内側域、三陸沖移行域、北海道南岸親潮域であり、およそ $200 \text{ gC m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ 以上を示している。特に渤海、東シナ海沿岸部では $400 \text{ gC m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ 以上の高い一次生産を示している。沿岸海域では植物プランクトン以外の懸濁粒子を多く含むため、見積もりの誤差は大きいですが、東シナ海陸棚域で行った船舶観測においても $300 \text{ gC m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ 以上の高い値が見積もられており、一次生産の高い海域であることは確かである。

一般的に親潮域や亜寒帯太平洋は生物生産の高い海域として考えられてきたが、図5で見える限り北緯40度以北、東経145度以東(船舶観測域の東側)に一次生産の高い海域はない。この海域は夏季においても、植物プランクトン濃度が低く、栄養塩(硝酸)が余っている海域である。また、微量元素である鉄が不足した海域であることが報告されており^{16),17)}、今回の結果もこのような海洋条件を反映している。カムチャッカ半島南岸からクリル諸島に沿って流れる親潮(東カムチャッカ海流)沿いに見ても、一次生産が高いのは北海道南岸の一部のみである。これらの結果は、親潮の定

線観測^{6),8)}およびその上流部での定点観測結果¹³⁾に一致している。

北緯40度以南、黒潮前線より北側の海域(移行域)は比較的高い一次生産を示し、この海域は東経160度以東にまで延びている。この海域は黒潮続流の蛇行、暖水塊など中規模物理現象が卓越する海域で、空間的な異質性が高く、高い一次生産を一つの要因に求めることは難しいかもしれない。Goes *et al.*¹⁸⁾は、北に位置する親潮域より冬期の混合層深度が深くなり、栄養塩供給が大きいことが新生産(硝酸を用いた一次生産)が高い要因としている。またKishi¹⁹⁾は、暖水塊周辺部において黒潮系水が高い水温を、親潮系水が高い栄養塩を与えることによって一次生産が高くなることを数値実験において示した。このようにいくつかの要因が重なって、移行域での一次生産が高くなっていると考えられるが、今後は亜寒帯と同様に鉄の供給のメカニズムも含め解明していく必要がある。

以上、比較的研究例の多い海域に注目したが、その他にも、一次生産の高い海域として、日本海南部、本州南方黒潮内側域は有用水産資源の産卵場としても重要なだけでなく、比較的長い時系列資料の解析から生物生産のメカニズムが論じられている海域であり^{20),21)}、船舶観測に衛星観測による時空間的な情報が加わることによって研究が大きく進展することが期待される。また一次生産の低い海域としてはオホーツク海、日本海北部が挙げられ、今後これらの特徴的な海域を集中的に観測することによって、海洋一次生産、ひいては海洋生態系の理解は大きく進むことが期待される。

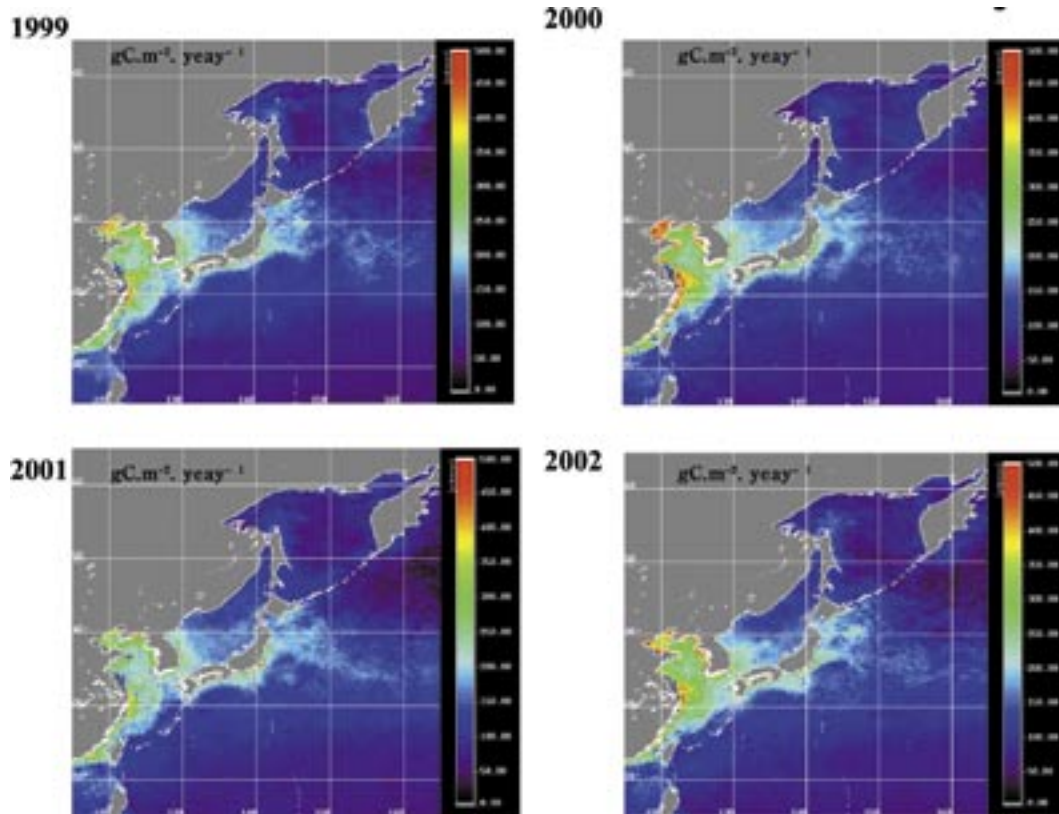


図7 Asanuma *et al.*¹⁵⁾のアルゴリズムを用いて衛星水色データから見積もられた1999年~2002年における日本周辺海域の年間一次生産速度($\text{gCm}^{-2} \text{y}^{-1}$)。

謝辞

一次生産測定法の技術的な指導をいただいた才野敏郎教授、田口哲教授、太田秀和氏、データフォーマットに関してご指導いただいた石坂丞二教授、亀田卓彦博士に御礼申し上げます。また、研究の進行管理に関して常に適切なお助言を頂いた川幡穂高博士に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Holm-Hansen, O., C.J. Lorenzen, R.N. Holmes and J.D.H. Strickland (1965) Fluorometric determination of chlorophyll. *J. Cons. Perm. Int. Explor. Mer.*, 30, 3-15.
- 2) Steeman Nielsen, E. (1952) The use of radio-active carbon (C^{14}) for measuring organic production in the sea. *J. Cons. Perm. Int. Explor. Mer.*, 18, 117-121.
- 3) Matsudaira, Y. (1964) Cooperative studies on primary productivities in the coastal waters of Japan. 日本プランクトン研究連絡会報, 11, 24-73.
- 4) Aruga, Y. and M. Monsi (1962) Primary production in the northwestern part of the Pacific off Honshu, Japan. *J. Oceanogr Soc. Japan*, 18, 37-46.
- 5) Hama, T., T. Miyazaki, Y. Ogawa, T. Iwakuma, M. Takahashi, A. Otsuki and S. Ichimura (1983) Measurement of photosynthetic production of a marine phytoplankton population using a stable C^{13} isotope. *Mar. Biol.*, 73, 31-36.
- 6) Saito, H., H. Kasai, M. Kashiwai, Y. Kawasaki, T. Kono, S. Taguchi and A. Tsuda (1998) General description of seasonal variations of nutrients, chlorophyll-a, and netplankton biomass along A-line transect, Oyashio region western subarctic Pacific, from 1990 to 1994. *Bull. Hokkaido. Natl. Fish. Res. Inst.*, 62, 1-62.
- 7) Knap, A., A. Michaels, A. Close, H. Ducklow and A. Dickson (1996) Protocols for the Joint Global Ocean Flux Study (JGOFS) Core Measurements. IOC Manuals and Guides No29 UNESCO 1994, 170p.
- 8) Suzuki, R. and T. Ishimaru (1990) An improved method for the determination of phytoplankton chlorophyll using N, N-dimethylformamide. *J. Oceanogr Soc. Japan*, 46, 190-194.
- 9) Kasai, H., H. Saito, M. Kashiwai, T. Taneda, A. Kusaka, Y. Kawasaki, T. Kono, S. Taguchi and A. Tsuda (2001) Seasonal and interannual variations in nutrients and plankton in the Oyashio region: A

- summary of a 10-years observation along the A-line. *Bull. Hokkaido Natl. Fish. Res. Inst.*, 65, 55-134.
- 10) Saito, H, A. Tsuda and H. Kasai (2002) Nutrient and plankton dynamics in the Oyashio region of the western subarctic Pacific Ocean. *Deep-Sea Res. Part II*, 49, 5463-5486.
 - 11) Ichikawa, T. and Y. Hirota (2004) Seasonal changes of primary productivity in Tosa Bay, Japan. *Oceanography in Japan*, 13, 259-269.
 - 12) Yanagi, T., T. Shimizu and H.J. Lie (1998) Detailed structure of the Kuroshio frontal eddy along the shelf edge of the East China Sea. *Cont. Shelf Res.*, 18, 1039-1056.
 - 13) Imai, K., Y. Nojiri, N. Tsurushima and T. Saino (2002) Time series of seasonal variation of primary productivity at station KNOT (44°N, 155°E) in the sub-arctic western North Pacific. *Deep-Sea Research II*, 49, 5395-5408.
 - 14) Behrenfeld, M.J. and P.G. Falkowski (1997) Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration. *Limnol. Oceanogr.*, 42, 1-20.
 - 15) Asanuma, I., J. Nieke, K.Sasaoka, K. Matsumoto and T. Kawano (2003) Optical properties control primary productivity model on the East China Sea, *Ocean Remote Sensing and Applications*, R.J.Frouin; Ed., SPIE 4892, 312-319.
 - 16) Martin, J.H. and S.E. Fitzwater (1988) Iron deficiency limits phytoplankton growth in the north-east Pacific subarctic. *Nature*, 331, 341-343.
 - 17) Tsuda, A., S. Takeda, H. Saito, J. Nishioka, Y. Nojiri, I. Kudo, H. Kiyosawa, A. Shiimoto, K. Imai, T. Ono, A. Shimamoto, D. Tsumune, T. Yoshimura, T. Aono, A. Hinuma, M. Kinugasa, K. Suzuki, Y. Sohrin, Y. Noiri, H. Tani, Y. Deguchi, N. Tsurushima, H. Ogawa, K. Fukami, K. Kuma and T. Saino (2003) A mesoscale iron enrichment in the western subarctic Pacific induces large centric diatom bloom. *Science*, 300, 958-961.
 - 18) Goes, J.I., T. Saino, H. Oaku, J. Ishizaka, C.S. Wong and Y. Nojiri (2000) Basin scale estimate of sea surface nitrate and new production from remotely sensed sea surface temperature and chlorophyll. *Geophys. Res. Lett.*, C27 (9), 1263-1266.
 - 19) Kishi, M.J. (1994) Prediction of phytoplankton growth in a Warm-Core Ring using three dimensional ecosystem model. *J. Oceanogr.*, 50, 489-498.
 - 20) Nakata, K., S. Koyama and Y. Matsukawa (2001) Interannual variation in spring biomass and gut content composition of copepods in the Kuroshio current, 1971-89. *Fish. Oceanogr.*, 10, 329-341.
 - 21) Chiba, S. and T. Saino (2002) Interdecadal change in upper water environment altered spring diatom community structure in the Japan Sea: an early summer hypothesis. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 231, 23-35.

(受付2004年 3月22日、 受理2004年 6月16日)