紀伊水道のクロロフィル分布に関する現地観測と衛星画像*

柳 哲雄[†] 石丸 隆・佐藤博雄[‡] 塚本秀史^{**}

Field Observation and Satellite Image on Chlorophyll-*a* Distribution in the Kii Channel, Japan

Tetsuo Yanagi^{††} Takashi Ishimaru, Hiroo Satoh^{‡‡} and Hideshi Tsukamoto^{***}

Abstract

Horizontal and vertical chlorophyll-*a* distributions in the Kii Channel, Japan were revealed using field observational data and the averaged chlorophyll-*a* concentration in the euphotic layer was estimated. The ocean color image by OCTS taken at nearly the same time reproduces well the surface distribution of chlorophyll-*a* concentration in the Kii Channel. Such a fact suggests that we can clarify the temporal and spatial variations in chlorophyll-*a* distribution in the coastal sea from ocean color images by satellites if we have an empirical relationships between the chlorophyll-*a* concentration at the sea surface and that in the euphotic layer.

1. はじめに

海域の有機物生産の基礎をなす植物プランクトンの水平・鉛直分布特性を定量的に明らかにすることが海洋学において重要な位置を占めることは言を待たない。しかし、沿岸海域の植物プランクトン分布の時間・空間変動は大きく、現場観測のみによってその実態を捉えることは容易ではない。

人工衛星からの海色画像は広範囲の海面の色素分布を同時に、繰り返し計測することが可能であり、海色画像を用いれば、時間・空間変動の大きい沿岸海域の植物プランクトン分布を定量的に明らかにできることが期待される。しかし、人工衛星からの海色画像により得られる情報は海面付近の光学的深さ(海面直下の光強度が $1/e$ になる深さ; 光学的深さ=有光層厚さの約 $1/5$ =透明度の約 $1/2$) 以浅のものなので、人工衛星からの海色画像により、基礎生産の見積に必要な有光層全体の植物プランクトン濃度を明らかにするためには、海色画像の色素濃度と表層植物プランクトン濃度の関連、さらに表層植物プランクト

ン濃度と有光層全体のプランクトン濃度にどのような関係があるかを、海域毎にあらかじめ明らかにしておく必要がある(才野, 1993)。

そこで今回、瀬戸内海東部紀伊水道において、ADEOS (Advanced Earth Observing Satellite, 地球観測プラットフォーム技術衛星“みどり”) の OCTS (Ocean Color Temperature Scanner, 海色海温走査放射計) 画像に対応させて現場観測を行い、海面の実測クロロフィル *a* 濃度と OCTS 海色画像との対応、海面のクロロフィル *a* 濃度と有光層内の積算クロロフィル *a* 濃度との対応関係を明らかにすることを試みた。以下にその結果を報告する。

2. 観測

瀬戸内海東部の紀伊水道における現地観測は1997年6月13日~6月15日、東京水産大学の青鷹丸を用いて、Fig. 1に示す紀伊水道内の26点において行った。各観測点ではセッキ板を用いて透明度を計測し、CTD (Neil Brown Mark III B) により、水温、塩分の鉛直分布、蛍光光度計 (Sea-Tech Ltd) により、蛍光光度の鉛直分布を観測すると同時に、表層水を採水して、クロロフィル *a* 濃度、フェオ色素濃度、懸濁物質濃度 (SS, Suspended Solid) の分析を行った。また Stns. 7~11 の各点では5m, 10m, 20m, 50m, 海底上1mの各層から採水を行って、クロロフィル *a* 濃度、フェオ色素濃度を測定した。クロロフィ

* 1998年3月25日受領; 1998年6月10日受理

[†] 九州大学応用力学研究所, 〒816-8580 春日市春日公園6

[‡] 東京水産大学, 〒108-0075 東京都港南区港南4-5-7

^{**} 弓削商船高等専門学校, 〒794-2506 愛媛県越智郡弓削町下弓削1000

^{††} Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Kasuga, 816-8580 Japan

^{‡‡} Tokyo University of Fisheries, Konan 4-5-7, Tokyo, 108-0075 Japan

^{***} Yuge National College of Maritime Technology, Simo-Yuge, Yuge, 794-2506 Japan

Fig. 1. Observation stations in the Kii Channel.

ル a 濃度の分析はジメチルフォルムアミド抽出による蛍光法 (Suzuki and Ishimaru, 1990) により行った。そして、対応する蛍光光度計の値とクロロフィル a 濃度の分析値から紀伊水道全域でのキャリブレーション直線を作成し、蛍光光度計の読みとり値をクロロフィル a 濃度値に換算した (クロロフィル a 値 $= 6.76 \times \text{蛍光光度計の読みとり値} - 0.088$; $r^2 = 0.807$)。

Stns. O-U の観測を 6 月 13 日, Stns. A-N を 6 月 14 日, Stns. 7-11 を 6 月 15 日に行った。

3. 観測結果

観測の結果得られた表層の水温、塩分、密度 (σ_t)、クロロフィル a , SS, 透明度の分布を Fig. 2 に示す。水道西部に高温、低塩分、低密度、高クロロフィル a , 高 SS, 低透明度の水塊が存在する。これは吉野川からの流出河川水の影響を受けた水塊と考えられる。また水道南東部に高温、高塩分、低クロロフィル a , 高透明度の水塊が存在している。クロロフィル a 分布と SS 分布は水道南西部を除いては対応せず、紀伊水道表層にはクロロフィル a 濃度と対応しない無機質な粒子が多く存在していることが伺われる。

紀伊水道の南北断面 (Stns. 7~11) に沿った水温、塩分、密度、クロロフィル a の鉛直分布を Fig. 3 に示す。紀淡海峡の Stn. 7 付近の海水は水温に関してはよく鉛直混合しているが、塩分成分層が存在していて、そのため、表層には密度成分層が見られる。これに対して、Stn. 8 以南の紀伊水道内の海水は主に水温により成分層化していて、上層に $\sigma_t < 23.5$ の軽い水塊、底層に $\sigma_t > 24.5$ の重い水塊、中層に中間密度の水塊が存在するという 3 層構造になっている。クロロフィル a 濃度の鉛直分布は Fig. 4 に示すように単純ではなく、例えば、Stns. 8, 10 では 10m 深付近、Stn. 9 では 15m 深付近にクロロフィル a 濃度極大が存在して

Fig. 2. Horizontal distributions of water temperature, salinity, density, chl a , SS at the sea surface and transparency in the Kii Channel on 13-15 June 1997.

いるが、大まかに見ると、上層で $1.0 \mu\text{g l}^{-1}$ 以上と高く、底層で $0.5 \mu\text{g l}^{-1}$ 以下と低い。

クロロフィル a の分解物であるフェオ色素濃度 (phaeopigment=Phaeo.) とフェオ色素濃度のクロロフィル a 濃度に対する比 r ($r = \text{Phaeo.} / (\text{Chl } a + \text{Phaeo.})$) の表層分布を Fig. 5 に示す。フェオ色素濃度は Fig. 2 に示したクロロフィル a 分布と同様に紀淡海峡付近と紀伊水道南西部で高い。しかし、比 r は紀伊水道南西部で低く、鳴門海峡付近と紀伊水道南東部で高い。水道南西部の低い比 r は、この海域で植物プランクトンの活性が高く、クロロフィル a の生産が盛んなことを示唆している。同じくフェオ色素濃度と比 r の Stns. 7~11 に沿った鉛直分布を Fig. 6 に示す。フェオ色素濃度はクロロフィル a 濃度と同じく、表層で高く、底層で低い。また比 r は表層で低く、底層で高い値を示し、底層ではクロロフィル a の新たな生産がなく、分解が進んでフェオ色素の割合が大きくなることを示している。図中に白丸で示した有光層厚さ (定義は後述する) と比 r の値を比較すると、有光層の底は $r=0.4$ の等値線とほぼ一致していることがわかる。

Fig. 3. Vertical distributions of water temperature, salinity, density and chl *a* along the north-south section in the Kii Channel on 15 June 1997.

Fig. 4. Vertical distributions of chl *a* at Stns. 7 to 11 in the Kii Channel on 15 June 1997.

4. 海色海温画像

現地観測の行われた 6 月 13~15 日は紀伊水道上空に薄雲がかかり、OCTS の良好な画像は得られなかった。現地観測期間に最も近い時期で紀伊水道全域の良好な OCTS 画像が得られた 1997 年 6 月 5 日午前 11 時 42 分 (JMT) の紀伊水道の表面水

Fig. 5. Horizontal distributions of phaeopigment concentration and its ratio to chl *a* at the surface in the Kii Channel on 13-15 June 1997.

温、クロロフィル *a* 分布を Fig. 7 に示す。この画像は NASDA (NAtional Space Development Agency, Japan: 宇宙開発事業団) のホームページに公開されているもので、Ver.2 のアルゴリズムで処理されたものである。人工衛星で観測された各波長域の放射強度から海水中のクロロフィル *a* 濃度を推定するためには、まず大気補正により海から出ている光だけを求め、さらにその光から水中アルゴリズムを用いて海表面付近のクロロフィル *a* 濃度を推定するという二段階の操作が必要であるが、OCTS の大気補正アルゴリズムについては Fukushima *et al.* (1998)、水中アルゴリズムについては Kishino *et al.* (1998) に述べられているので、ここでは触れない。Fig. 7 の OCTS 画像の空間分解能は約 700m である。

Fig. 7 の紀伊水道南東部に高温水、北西部に低温水が分布するという表層水温水平分布パターンは Fig. 2 に示した現地観測結果とよく対応している。定量的には 6 月 5 日の OCTS 画

Fig. 6. Vertical distributions of phaeopigment concentration and its ratio to chl *a* along the north-south section in the Kii Channel on 15 June 1997.

像の表層水温の方が、現地観測結果より、2~3°C 程度低い。これは6月5日から6月13~15日までの海面加熱のためと思われる。吉野川からの流出河川水に影響されたと考えられる水道西部の表層高温水塊は衛星画像には吉野川河口付近にわずかに見られるのみである。これは OCTS 画像が海岸から5~10km 程度の範囲が観測不能のためである。

OCTS 画像のクロロフィル *a* 濃度分布によれば、水道北西部は $2.0 \mu\text{g l}^{-1}$ 以上の濃度、水道南東部は $1.0 \mu\text{g l}^{-1}$ 以下の濃度となっているが、このクロロフィル *a* 濃度水平分布パターンは定量的にも Fig. 2 の現地観測結果とよく対応している。

Fig. 7 のクロロフィル *a* 濃度推算アルゴリズムは主に外洋におけるクロロフィル *a* 濃度の実測値と OCTS により得られた海色との対応関係から求められたもので、紀伊水道のような沿

Fig. 7. OCTS image at 11:42 AM on 5 June 1997 (JMT) in the Kii Channel.

岸海域に適応出来るかどうかは現在検討されているところであるが、Fig. 2 と Fig. 7 をみるかぎり、OCTS 画像により、紀伊水道のような沿岸海域の表層クロロフィル *a* 濃度分布を観測することはかなり有望であると考えられる。

5. 有光層内鉛直積算値の推定

人工衛星からの海色画像を用いて、基礎生産に関わる有光層全層の積算クロロフィル *a* 濃度を推定するためには、予めその海域の表層クロロフィル *a* 濃度と有光層全層の積算クロロフィル *a* 濃度との関係を明らかにしておく必要がある。そのような目的意識のもと、今回の観測結果をもとに、紀伊水道の表層クロロフィル *a* 濃度と有光層の積算クロロフィル *a* 濃度との関係を明らかにすることを試みた。まず有光層の厚さに関しては、瀬戸内海の広島湾で透明度の2.8倍がほぼ有光層の厚さになることがすでに明らかにされているので(橋本・多田, 1997), そ

Fig. 8. Standing stock of chl *a* in the euphotic layer of the Kii Channel on 13-15 June 1997.

Fig. 9. Standing stock of chl *a* in the euphotic layer of each areas in the Seto Inland Sea.

の関係が紀伊水道でも成り立つと仮定し、Fig. 2 に示した透明度の値を 2.8 倍して有光層の厚さとした。そして、蛍光光度計による蛍光光度鉛直連続データから有光層内の積算クロロフィル *a* 濃度を求めた (Fig. 8)。有光層の積算クロロフィル *a* 濃度は水道西部で 40 mg m^{-2} 以上、紀淡海峡近傍で 30 mg m^{-2} 以上と高く、鳴門海峡近傍で 20 mg m^{-2} 以下と低い。この分布は基本的には Fig. 2 に示した表層のクロロフィル *a* 分布と類似している。鳴門海峡南の Stn. A はクロロフィル *a* 濃度も低く、透明度も悪いので、有光層の積算クロロフィル *a* 濃度が特に低くなっている。

今回求めた紀伊水道の有光層内積算クロロフィル *a* 濃度の全域平均値は 29.0 mg m^{-2} で、この値は橋本ら (1997) が求めた瀬戸内海全域における 1994 年 6 月の有光層内積算クロロフィル *a* 濃度平均値 (43.7 mg m^{-2}) と比較すると Fig. 9 に示すように、少し小さめの値となっている。両者の観測年が異なるため、この図だけから瀬戸内海における紀伊水道の特徴を述べることは出来ない。今後瀬戸内海全域で同時に同様な観測を行っ

Fig. 10. Relation between the surface chl *a* concentration and the standing stock of chl *a* in the euphotic layer in the Kii Channel on 13 - 15 June 1997.

て、各海域の特性を明らかにしていきたいと考えている。

今回の紀伊水道の現地観測結果からミハエリス-メンテン式の関係を保定して (Kasai *et al.*, 1998) 得られた表層クロロフィル *a* 濃度と有光層内積算クロロフィル *a* 濃度の相関関係を Fig. 10 に示す。データ全体の相関係数は 0.83 と良好で、表層クロロフィル *a* 濃度と有光層内積算クロロフィル *a* 濃度はよく対応している。このことは人工衛星の海色画像から測定される表層クロロフィル *a* 濃度の値から有光層積算クロロフィル *a* 濃度を推定することが可能であることを示唆している。

6. おわりに

ADEOS は 1997 年 6 月に太陽電池パネルの故障により、残念ながらその運行を停止したが、1997 年 8 月にアメリカが打ち上げた Orb-View 衛星に搭載された SeaWiFS (Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor) が現在世界全域の海色画像をとり続けている。この衛星は今後少なくとも 5 年間は海色画像を連続的に得ることが期待出来る。

今回の結果をもとに、瀬戸内海全域で、地域別、季節別の表層クロロフィル *a* 濃度と有光層内積算クロロフィル *a* 濃度の関係を明らかにするとともに、今後 SeaWiFS 画像を解析して、瀬戸内海の植物プランクトン水平分布の空間・時間変動特性を明

らかにしていきたいと考えている。

クロロフィル *a* と SS の測定にご協力頂いた東京水産大学の松村 剛氏と平澤 亨氏 (現: 国立極地研究所), 現地観測にご協力頂いた東京水産大学小池義夫船長を初め, 青鷹丸の乗組員諸氏と東京水産大学浮遊生物学研究室の大学院生諸氏, 貴重なコメントを頂いたレビューアの方々に感謝の意を表する。また本研究は九州大学応用力学研究所と宇宙開発事業団の共同研究の一部であることを付記する。

References

- Fukushima, H., A. Higurashi, Y. Mitomi, T. Nakajima, T. Noguchi, T. Tanaka and M. Toratani (1998): Correction of atmospheric effect of ADEOS/OCTS ocean color data: Algorithm description and evaluation of its performance. *J. Oceanogr.*, (in press).
- 橋本俊也・多田邦尚 (1997): 広島湾における海水の光学特性. *海の研究*, **6**, 151-155.
- 橋本俊也・山本民次・多田邦尚・松田 治・永末寿宏 (1997): 瀬戸内海の一次生産と海洋構造. *沿岸海洋研究*, **35**, 109-114.
- Kasai, H., H. Saito and A. Tsuda (1998): Standing stock of chlorophyll *a* and primary production in the Oyashio region, the western subarctic Pacific, during the spring bloom in 1997. *J. Oceanogr.*, (in press).
- Kishino, M., T. Ishimaru, K. Furuya, T. Oishi and K. Kawasaki (1998): Inwater algorithms for ADEOS/OCTS. *J. Oceanogr.*, (in press).
- 才野敏郎 (1993): 水色リモートセンシングと海洋の基礎生産. *沿岸海洋研究ノート*, **31**, 129-152.
- Suzuki, R and T. Ishimaru (1990): An improved method for the determination of phytoplankton chlorophyll using N, N-dimethyl formid. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **46**, 190-194.