衛星による海水色データとフェリーによるクロロフィル蛍光データの比較および相互検証

原島 省*, 福島 甫**, 野中 智幸**

* 国立環境研究所
**東海大学開発工学部

要旨：衛星で得られる海水色データと、フェリーで得られる海水の蛍光度は、ともに海洋表層の植物プランクトンの色素濃度あるいはバイオマス濃度の指標となる。本報告では、瀬戸内海から太平洋への物質勾配を横切るラインについて、ADEOS-OCTS データから導出された色素濃度（クロロフィル＋フェオ色素）と、ほぼ同日にフェリーくろしお（大阪～沖縄間）で計測された蛍光度の相互比較・検証を行った。両者は概ねよい相関を示したが、次の２点によると考えられるバイアスも明かになった。１点は、蛍光度→クロロフィル a の変換において、瀬戸内海のフェリーで同時計測した色素濃度と蛍光度の回帰式を用いたが、この関係が、陸域影響の強い瀬戸内海域と外洋域では異なることによると考えられる。もう１点は、フェリー計測においては、蛍光センサー内部の汚れによる信号ドリフトが日時に対して線形であるとして校正を行ったが、汚れが非線形的に進行する点にあると考えられる。このようなバイアスが存在するとしても、面的データが得られる衛星観測と、雲に影響されず現場海水の実測ができるフェリー計測を相互補完的に併用して海洋をモニタリングする意義は大きいと考えられる。

キーワード: 植物プランクトン色素, 衛星海水色データ, OCTS, フェリー, 蛍光度

１．はじめに

近年、衛星により取得できるデータが非常に多様化している。その中でも特に海水色センサー（ocean color sensor）で取得される可視域の情報からは、主に緑のスペクトル成分と青のスペクトル成分の比によってクロロフィル-a などの植物プランクトン色素濃度が導出される。しかもこれが面的に表現されるため、海洋の生物過程および湧昇などの地球物理過程がよく表現される。これまでに NASA の Nimbus7 に搭載された CZCS センサー（Barale *et al.*,1993[1]）や、NASA との契約に基づき OrbImage 社 OrbView-II 衛星に搭載された SeaWiFS センサー、NASDA の ADEOS 衛星に搭載された OCTS センサーが稼動している。

ただし、雲の存在によってすべての日時についてデータが取得できるものではないし、海面から上がってくる光の輝度よりも、むしろ、衛星と海面の間のエアロゾルから放射される散乱光の輝度のほうが大きいため、導出にあたっては、大気補正アルゴリズムの正否が鍵となる。また、雲の存在を除去するために、１週間や１ヶ月の期間内に取得された個別画像データを集積して、品質チェックおよび平均などの操作を経て、それぞれ weekly composite や monthly composite などの複合画像を作成し、瞬時値でなくある程度の幅をもった時期ごとの時系列を作成して利用することが多い（Fukushima *et al.*, 1997[2]）。

このため、衛星データを利用する場合には、値のチェックのために海域での実測データ（sea truth）を用意することが好ましい。Harashima and Kikuchi(1990) [3]は、CZCS データのチェック

のため、既存の海洋観測データを収集してデータベース化した。また石坂・原島(1991)[4]は、そのデータベース中のデータと CZCS 画像が共存する場合の数を調べたが、共存する率は比較的少なかった。この理由は、船舶による海洋観測の時空間での存在確率は非常に低いことによる。特に、地球環境変動の評価のための時系列を形成するためには、計測が不十分といえる。

フェリーによるモニタリングの目的の１つは、衛星観測と同様に、ある程度の空間をカバーしながら、時系列の希薄さを解決することにあった。ただし、フェリーがカバーできるのは航路という線上に限られるので、フェリーと衛星がそれぞれ相互補完しながら海域のモニタリングを行うことが望ましい。先述の、クロロフィル-a などの植物プランクトン色素濃度は、フェリーではサンプリングしたろ紙を分析にかけることにより、その絶対的濃度が求められるが、時空間について不続的なデータを得ることはできない。一方、蛍光度（*in vivo* fluorescence）は色素濃度そのものではないが、色素濃度と相関をもちセンサーで連続計測ができる（木下ほか, 1988[5]）。

本報告では、衛星の海水色データとフェリーの蛍光度データを相互補完することによって海洋モニタリングの方策を確立するため、以下のような方法で両者の比較と相互検証を行う。

2．方法

2.1 衛星データとフェリーデータの選出

フェリーによる計測データは、国立環境研究所地球環境研究センター（以下 NIES-CGER と略称する）より CDROM で公開されている[6]。その中で、「さんふらわああいぼり」（瀬戸内海航路）では、サンプリングと蛍光度センサー計測の双方が行われ、「フェリーくろしお」（大阪～沖縄航路）では蛍光度センサー計測のみが行われた。衛星データは広域を対象とするため、本報告では、比較対象として「フェリーくろしお」のデータを用い、その蛍光度データをクロロフィル-a に換算するために、「さんふらわああいぼり」で取得された分析によるクロロフィル-a と蛍光度の回帰式を用いた。

使用する衛星データは、前節で紹介した ADEOS（地球観測プラットフォーム技術衛星「みどり」）に搭載され 1996/11/01～1997/6/29 の間稼動した OCTS（海色海温走査放射計）のデータである。大気補正処理を行って１週ごとに複合画像化されたもの（weekly composite）のうち、沖縄～大阪間でデータの欠損がないこと、「フェリーくろしお」のデータと比較可能であるという条件を満たしたものを選出したところ、(1)1996/12/22-12/28、(2)1996/12/29-1997/1/4、(3)1997/3/2-3/8、(4)1997/5/4-5/10 の４シーンとなった。これらの数値データの内容のサンプルを Table 1.として以下に記した。

Pixel	Line	Lat	Lon	Raw data	Geo data	Distance	Chl-a
1767	631	34.585	135.259	206	1.09	0	12.30269
1766	632	34.497	135.171	181	0.715	12.651	5.188
:	:	:	:	:	:	:	:
1711	678	30.454	130.337	135	0.025	685.36	1.059253
:	:	:	:	:	:	:	:
1681	724	26.411	127.7	88	-0.68	1216.8	0.20893
1680	725	26.323	127.612	84	-0.74	1229.8	0.18197

Table 1. A sample of numerical data from weekly composite data of OCTS.

上記の衛星データと同期間のフェリーのデータを上記 CD-ROM より選出したところ、北上航路が、(1n) 1996/12/24-12/26, (2n) 1996/12/28-12/30, (3n) 1997/3/-3/6, (4n)1997/5/6-5/8, 南下航路が, (1s) 1996/12/26-12/28, (2s)1996/12/30-1997/1/1, (3s) 1997/3/6-3/8, (4s) 1997/5/8-5/10 の計８個となった。

これらの船舶データのサンプルを Table 2.として以下に記す。

年月日	LMT	積算時間	経度	緯度	pH	塩分濃度	蛍光値	取水口水温
1997/7/15	17:30:40	35626.73	127.6246	26.36077	8.8	34.48	0.74	28.9
1997/7/15	17:30:50	35626.73	127.6245	26.3616	8.8	34.48	0.74	28.93
:	:	:	:	:	:	:	:	:
1997/7/16	14:57:50	35627.623	131.4992	30.48222	8.75	33.76	0.26	28.27
:	:	:	:	:	:	:	:	:
1997/7/17	7:49:50	35628.326	135.2711	34.60285	9.01	26.18	85.7	25.16
1997/7/17	7:50:00	35628.326	135.2717	34.60348	9.01	26.23	86.25	25.26

Table 2. A sample of numerical data from ferry.

また、これらのデータから作成した画像を、それぞれ、「フェリーくろしお」の北上航路、南下航路とともに、Fig.1～8 として以下に記した。

2.2 色素分析値と蛍光度の関係式

衛星とフェリーデータを比較する前に、センサー計測による蛍光値をクロロフィル-a に換算するための関係式が必要になる。このため、瀬戸内海航路（大阪～別府間）のフェリーの東行き航路時のセンサー計測データと分析値データを用いる。分析値データは年間２４回、各２０～３０地点で得られている。これと同日同時刻のデータをセンサー計測データから選んだ。すると年間で４４６組の分析値とセンサー計測値の組ができた。なお、蛍光度の単位はターナー蛍光度計を校正するときの、校正用フルオレッセイン溶液の濃度（$\mu g/l$）である。これを log スケールでグラフ化すると、Fig.9 のような結果になった。

このように全データの組からはかなりのばらつきが見られるため、年間ではなく航海単位で、同じようにグラフ化を試みた。それでも、多少ばらつく日が１８日分あったが、それら以外の６日分はばらつきも少なく、きれいに散布している。この中で、1996 年 3 月 26-27 日と 1996 年 11 月 17-18 日の２航海のデータをグラフ化し Fig.10、Fig.11 として示す。このように、航海ごとの散布図では、格段に相関がよく相関係数 R が 0.9 以上になる。両者の関係が比例関係であると仮定すると、大まかな比としては、（クロロフィル a＋フェオフィチン）1 が、6.3～6.8 の蛍光度に対応することになる。さらに、クロロフィル a とフェオフィチンの組成比をほぼ 3:1 で一定であると仮定すると、蛍光度値の 8～9 がクロロフィル a の 1（$\mu g/l$）に対応することになる。

ただし、計測間の中で、植物プランクトン細胞同士の重なり合い（self shading）があるため、実際には両者の関係はリニアではない。このため、Fig.11 をさらに、両対数に変換してグラフ化を行った。これを Fig.12 として以下に記す。

本研究では、Fig.11 のデータが最も R が高かったため、次の回帰式

$$\log(\text{Chl-a} + \text{Pheo}) = -1.174 + 1.3588 \times \log(\text{Fluorescence})$$

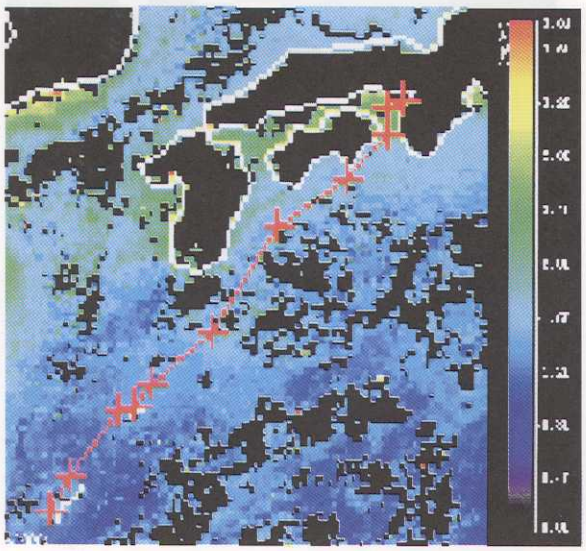


Fig. 1 OCTS data
(22/Dec/1996 – 28/Dec/1996)
with the northbound track of Ferry.

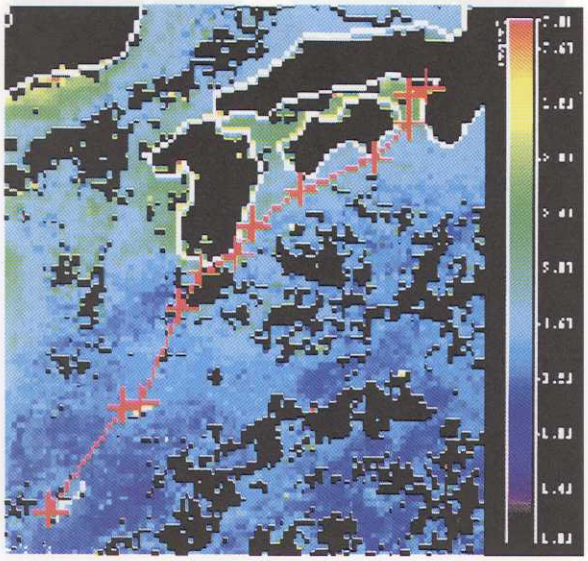


Fig. 2 OCTS data
(22/Dec/1996 – 28/Dec/1996)
with the southbound track of Ferry.

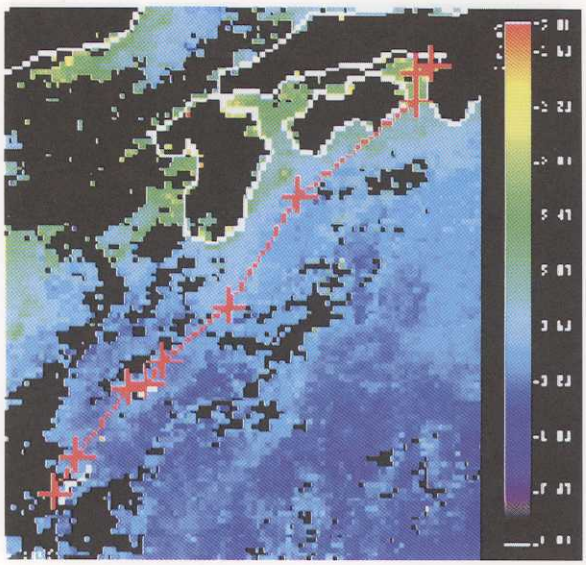


Fig. 3 OCTS data
(29/Dec/1996 – 4/Jan/1997)
with the northbound track of Ferry.

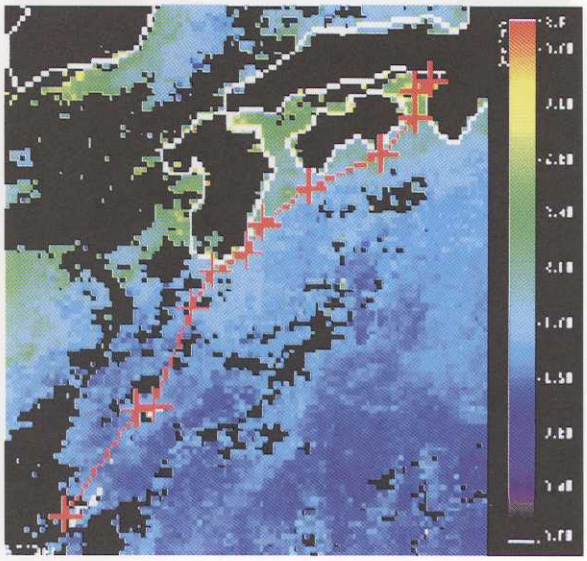


Fig. 4 OCTS data
(29/Dec/1996 – 4/Jan/1997)
with the southbound track of Ferry.

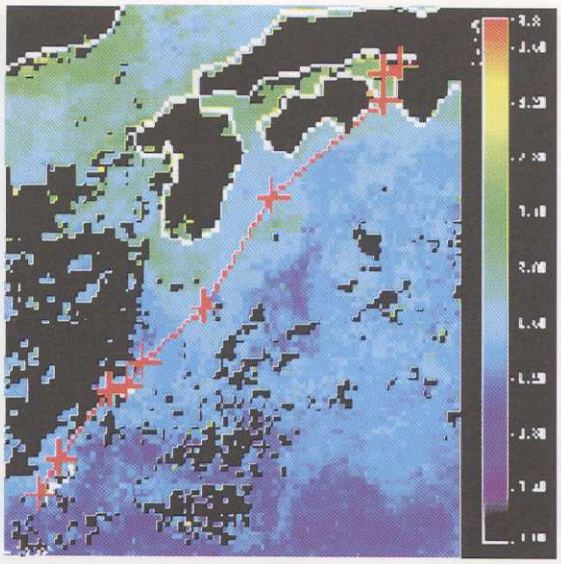


Fig. 5 OCTS data
(2/Mar/1997 – 8/Mar/1997)
with the northbound track of Ferry.

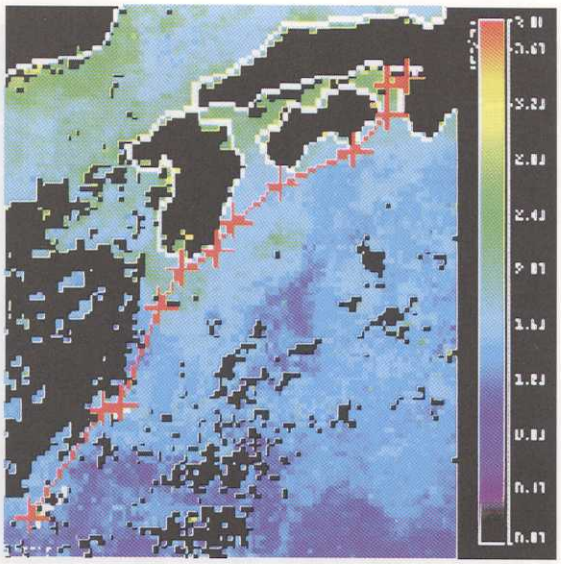


Fig. 6 OCTS data
(2/Mar/1997 – 8/Mar/1997)
with the southbound track of Ferry.

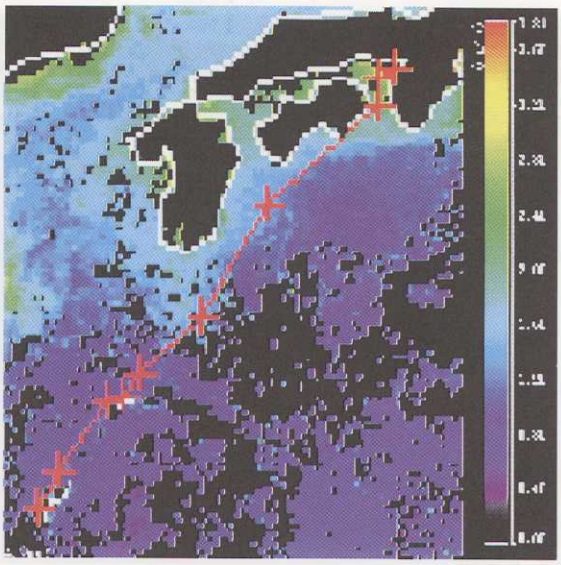


Fig. 7 OCTS data
(4/May/1997 – 10/May/1997)
with the northbound track of Ferry.

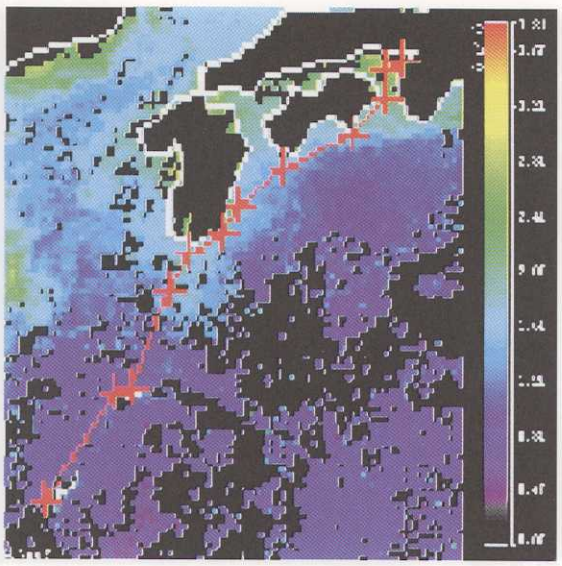


Fig. 8 OCTS data
(4/May/1997 – 10/May/1997)
with the southbound track of Ferry.

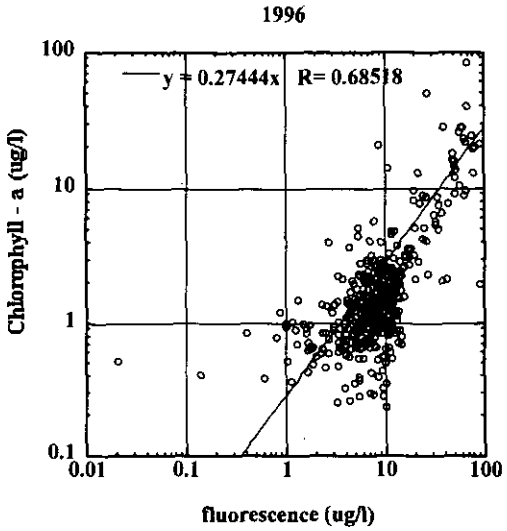


Fig. 9 Pigment concentration vs. fluorescence (log scale) from all the data pairs obtained by Sunflower – 2 (Seto Inland Sea) In 1996.

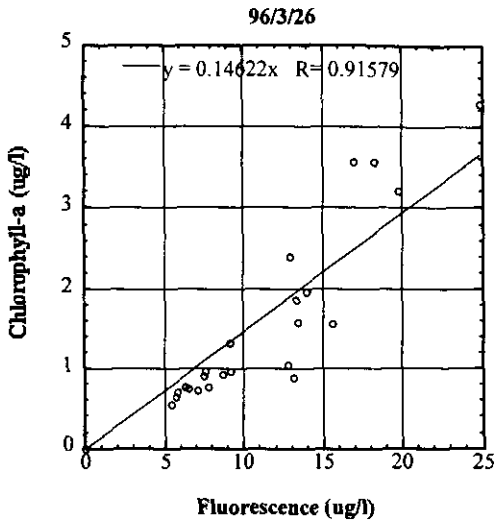


Fig. 10 Pigment concentration vs. fluorescence (linear scale) from all the data of 26/Mar/1996.

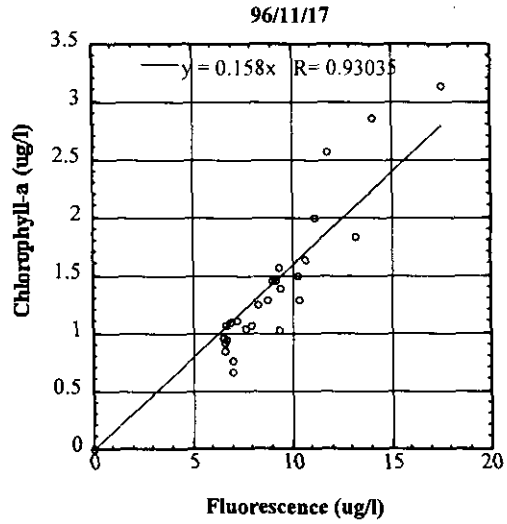


Fig. 11 Pigment concentration vs. fluorescence (linear scale) from all the data of 17/Nov/1996.

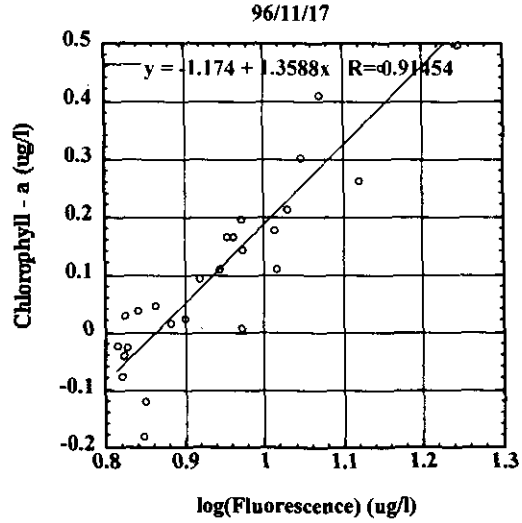


Fig. 12 Pigment concentration vs. fluorescence (log scale) from all the data of 17/Nov/1996.

から得られた

$$(\text{Chl-a+Pheo}) = 0.0670 \times \text{Fluorescence}^{1.3588} \quad (1)$$

を変換公式として用いた。

2.3 衛星データと船舶データの比較

前節 2.2 で導き出された変換式を用いて、フェリーによる蛍光値を色素濃度（クロロフィル a ＋フェオフィチン）濃度に変換し、同期の衛星データと相互比較するためのダブルプロットグラフを作成した（Fig.13～Fig.20）。x 軸が緯度（° N）、y 軸がクロロフィル濃度（μ g/l）を、また、細線が船舶データを太線が衛星データを表わしている。グラフ中の衛星データの色素濃度がゼロを示す値があるが、これは雲などのエアロゾルが原因でデータを得ることが出来なかったためである。色素濃度は低いときはおよそ 0.01 μ g/l、高いときは 10 μ g/l を超えるほど変化レンジが非常に大きい。

これらの図からは、空間分布については両データに明らかに相関があることがわかる。すなわち、高い値の大阪湾・紀伊水道側から太平洋側に下り勾配が現れている。しかも、この勾配が滑らかなものではなく、階段状、すなわち内湾側と太平洋側が海洋前線（フロント）で区切られていることも見て取れる。

ただし、絶対値の点でみると、フェリーデータが系統的に衛星データより低くでていることがわかり、その原因として以下のような可能性が考えられる。

i) フェリーデータがが蛍光度、衛星データが緑スペクトル強度／青スペクトル強度の比というように、本来別の物理量に基づいている。

ii) 衛星データによる色素量の算出値に本来的に 30%程度の誤差が含まれている。

iii) 両データの比較において、衛星データは 1 週間の複合値であるのに対し、フェリーのデータは 1 日 ＋2 夜にわたって個々の海域を移動計測した値なので、時空間代表性が完全には一致していない。

iv) 蛍光度→色素値の回帰式の導出の際には瀬戸内海のフェリーによる同期データを用いた。後述のように瀬戸内海の海水と太平洋の海水で、それぞれ蛍光度と海水色輝度スペクトルに対する光学的特性が異るため、差異が生じる可能性がある。

iv)フェリーの蛍光度センサーのガラス壁面がバクテリア等の付着物等で徐々に汚れ、ブランク値が高くなる。センサーのメンテナンスでは、1 週間の継続計測の前後で標準溶液によりブランク値の変化を計測し、この変化を時間の経過に対してリニアであると仮定して校正している。ただし、この変化がリニアでない場合には、補正された蛍光値にこのノンリニア成分が誤差として含まれる。具体的には、付着の進行が内海で速く、また付着物の存在自身が付着率を速める傾向がある。このため、フェリーの往復航海の前に大阪港で清浄な状態でブランク値を記録してから、太平洋を往復し再度大阪湾に入った辞典以降に特に付着が顕著になると予測される。このため、ブランク値は時間に対して下に凸の指数関数に近い曲線となり、これをリニアと仮定して補正すると、特に太平洋を北上中のデータを強く押し下げる結果になる。瀬戸内海域では本来的にクロロフィル濃度が高いので、このノンリニア成分が目立たないが、濃度レベルの低い太平洋では無視できず、北行き航路の蛍光値が系統的に低くなったと考えられる。

次項では、これらの系統的な誤差を除去し、地域的な分布に関して有益な情報を抽出する方

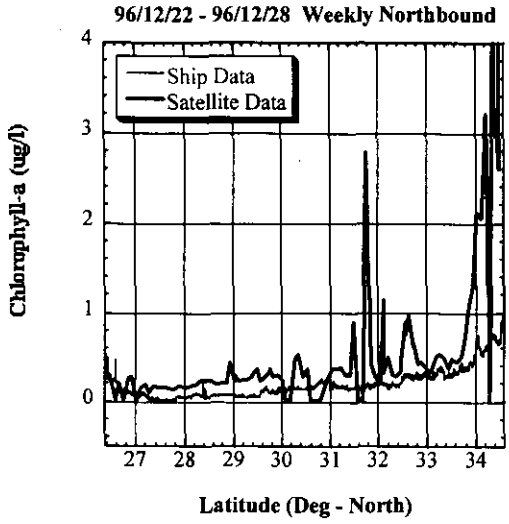


Fig. 13 Satellite data vs.
Ferry data (linear scale)
22/Dec/1996 – 28/Dec/1996.

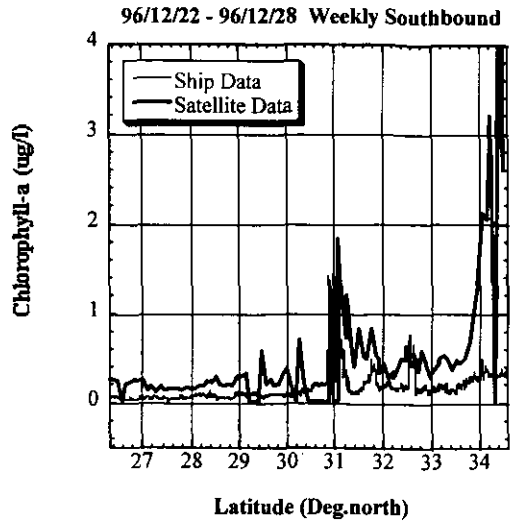


Fig. 14 Satellite data vs.
Ferry data (linear scale)
22/Dec/1996 – 28/Dec/1996.

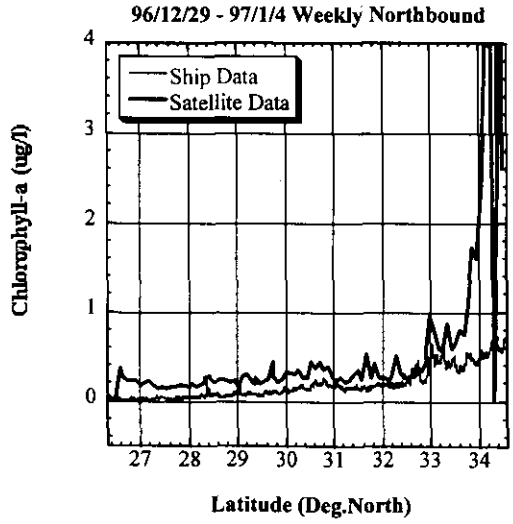


Fig. 15 Satellite data vs.
Ferry data (linear scale)
29/Dec/1996 – 04/Jan/1997.

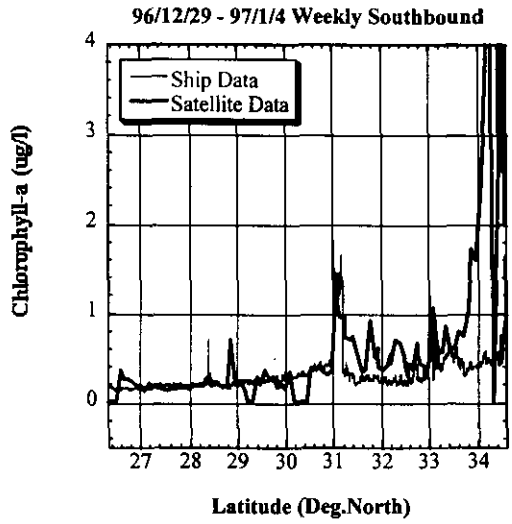


Fig. 16 Satellite data vs.
Ferry data (linear scale)
29/Dec/1996 – 04/Jan/1997.

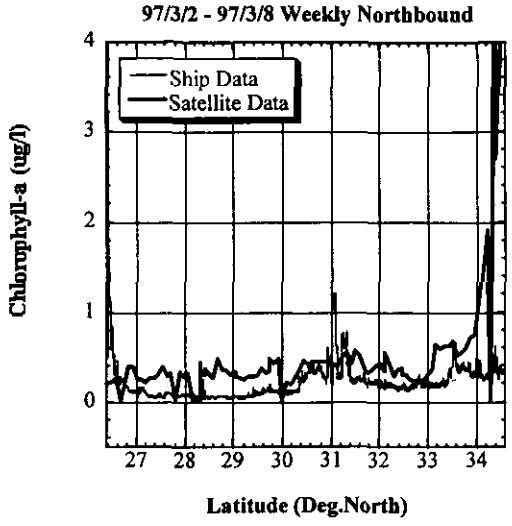


Fig.17 Satellite data vs.
Ferry data (linear scale).
02/Mar/1997– 08/May/1997.

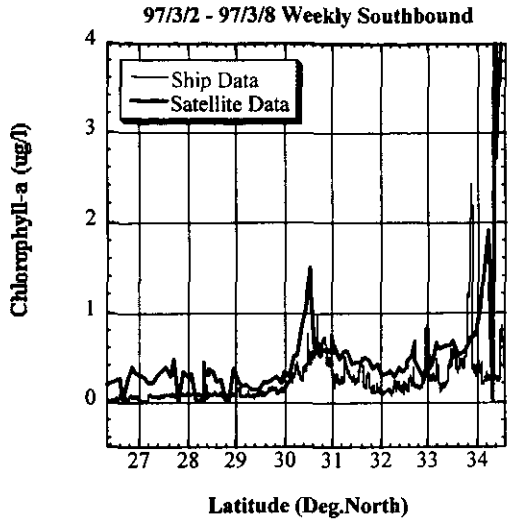


Fig.18 Satellite data vs.
Ferry data (linear scale).
02/Mar/1997 – 08/Mar/1997.

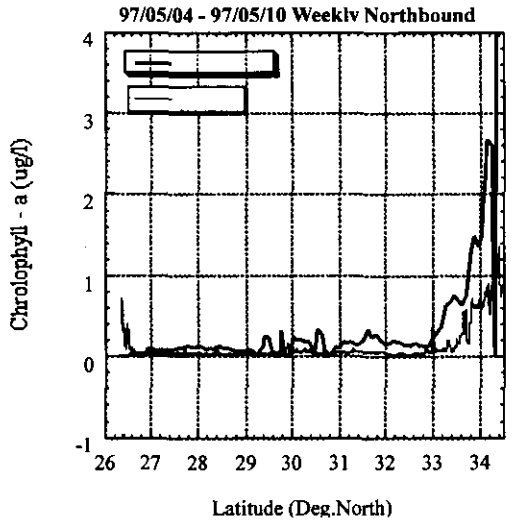


Fig.19 Satellite data vs.
Ferry data (linear scale).
04/May/1997–10/May/1997.

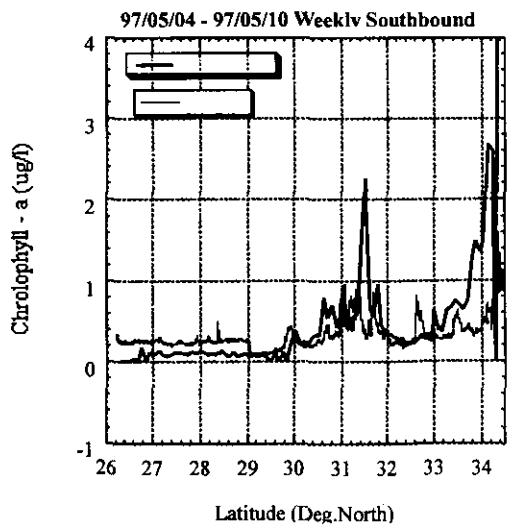


Fig.20 Satellite data vs.
Ferry data (linear scale).
04/May/1997 – 10/May/1997.

法を考える。

2.4 修正回帰式を用いての再比較

96/12/22～96/12/28 南下航路分のフェリーデータと衛星データの 20 点の組み合わせを抽出し、log スケールで散布図（Fig.21）に表わした。この図より、回帰式は

$$\log(\mathrm{Pigments_{Sat}}) = 0.80622 \times \mathrm{Log}(\mathrm{Pigments_{Ferry}}) + 0.29239 \qquad (2)$$

で表される。この(2)式の $\mathrm{Pigments_{Ferry}}$ を、前述 (1)式の Chl-a + Pheo で置き換えると、

$$\log(\mathrm{Pigments_{Sat}}) = 1.0955 \times \log(\mathrm{Fluorescence_{Ferry}}) - 0.6541 \qquad (3)$$

が得られ、これが修正回帰式である。この(3)式を用いて再度、96/12/22～96/12/28 南下航路分のフェリーデータと衛星データの双方をプロットした (Fig.22)。

このグラフでは、前述の系統的な差異がかなり除去され、有益な情報がとりだされる。すなわち、大阪湾・紀伊水道（北緯 33～34 度）で色素値が高くなっているだけでなく、日向灘（北緯 31 度付近）でも高くなっており（1 μg/l 以上）、外洋に面した沿岸域でも生物生産量が高くなることが判読できる。

また、紀伊水道以北では、修正回帰を行ってもなお衛星データがフェリーデータよりも高くなる。したがって、この海域では、蛍光度には反映されないが、海水色には反映される成分が太平洋よりも高い可能性がある。

3．考察

海水色衛星の研究分野では、外洋域が Case I Water、内湾・沿岸域など Case II Water と分類され、光学特性が異なることが指摘されてきた。具体的には、Case I Water が、現場の植物プランクトン由来の物質による光学的特性のみを反映させているのに対し、Case II Water では、陸域由来の溶存有機物（DOM）の寄与が加わる。また、プランクトンの種類にしても、内湾ではケイ藻の寄与が大きく、また、比較的サイズの大きなプランクトンの組成比率が高い。

DOM は単一の物質ではなく多種の有機酸などの総称であるが、海水色スペクトルのうち短波長側ほどよく吸収するという特性を持つ。すべての DOM ではないが、特に有色溶存有機物（CDOM）と総称される物質群は輝度スペクトルの上では、黄色領域の寄与を持つとされる。一方、DOM は蛍光度にも正の寄与を及ぼすが、この過程については定量的な把握が十分されてはいない。

衛星による海水色においても、CDOM の導出は重要な事柄であり、その試みはすでに行われているが（地球環境研究総合推進費 D3 課題終了研究報告書, 1996[7], および同報告書, 1999[8])、まだ標準的な方式が確立されてはいない。植物プランクトンの色素量に比べて不確定性が高いものの、CDOM の環境指標としての役割は決して劣る物ではない。それは、前者が海域独自の湧昇などの海洋物理学的現象を多く反映しており、季節変動が大きいのに対し、CDOM は陸から流入した物質に起因することが多く、陸域影響の指標として機能するからである。

本研究では、蛍光度とクロロフィルの回帰には瀬戸内海のデータを使い、衛星との比較では太平洋部分のフェリーデータを用いたために、系統的な差が出たものと推定されるが、その他にも、両データが完全に同一の時空間を捉えてはいないこと、また双方で性格のことなる誤差

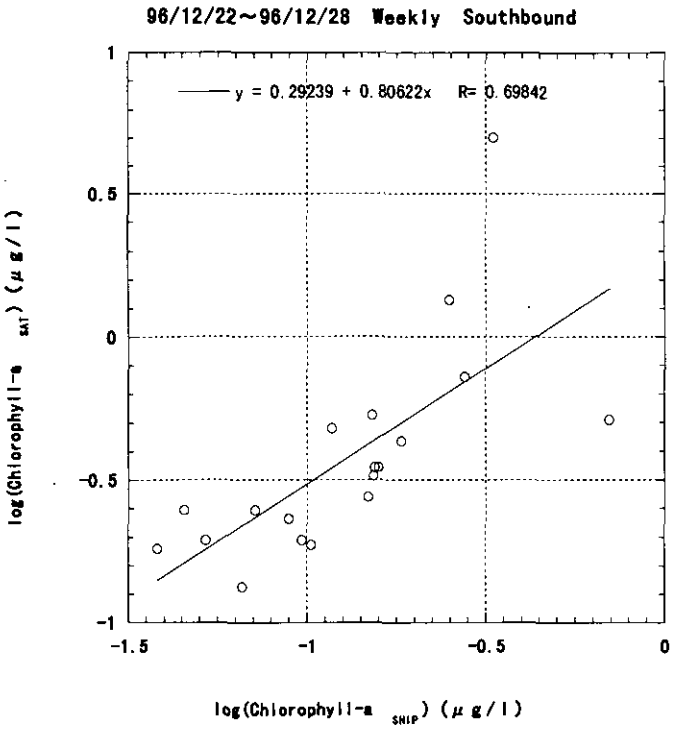


Fig.21 Correlation between the satellite data and the selected ferry data (Osaka – Okinawa) to deduce the corrected equation between the two data sets.

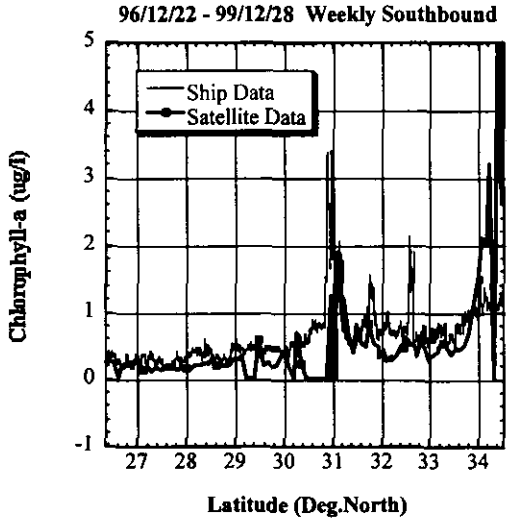


Fig. 22 Satellite data vs.Ferry data (linear scale). 22/Dec/1996 – 28/Dec/1996.

がはいってくる可能性があることが推測される。

以上のように、絶対値の比較という点では衛星、フェリー双方間に相違が現れたが、ともに時空間変動が得られるという点で、海洋のダイナミックスの理解のために貴重な情報をもたらす。特に前者からは面的な把握ができ、後者からは航路上に限られるが、雲の存在下でも時系列がとぎれず、海水の実測データが得られるなど、相互補完的に運用することが環境変動の把握に有益な情報をもたらすと考えられる。

謝辞

本研究にあたり協力をいただいた東海大学大学院情報通信工学専攻の三浦理洋氏に感謝する。なお、衛星データは宇宙開発事業団より提供を受けたものであり、関係者に深謝する。

参考文献

1) Barale, V. and Schlittenhardt, P. M. (eds.) (1993): Ocean Colour: Theory and Applications in a decade of CZCS experience, Kluwer Academic Publishers, 367pp.
2) Fukushima, H., Toratani, M., Matsumura, S. and Harashima, A. (eds.) (1997): Time Series of Phytoplankton Biomass Distribution over the Northwestern Pacific Area by Monthly Composite Images from Nimbus7-CZCS Data (CDROM) , CGER-D015(CD)-'97, NIES-CGER.
3) Harashima, A. and Kikuchi, Y. (1990): EOS (Trans. Am. Geophys. Uni.), 71, 314-315.
4) 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, 空と海, 13, 1-8.
5) 木下一彦、御橋亮介(1988): 蛍光測定 –生物化学への応用.
6) Harashima, A. (ed.) (1999): Collected data of high temporal-spatial resolution marine biogeochemical monitoring from ferry tracks: Seto Inland Sea (Jan. 1996 – Nov. 1997) and Osaka-Okinawa (Jan. 1996 – Mar. 1998) (CDROM) , CGER-D021(CD)-'99, NIES-CGER.
7) 国立環境研究所, 遠洋水産研究所, 日本海区水産研究所, 資源環境技術総合研究所, 気象研究所, 近畿大学, 東海大学, 千葉大学(1996): 衛星可視域データのグローバルマッピングによる広域海洋環境変動に関する研究(平成 5-7 年度), 環境庁地球環境研究総合推進費終了研究報告書, 147 ページ.
8) 国立環境研究所, 遠洋水産研究所,日本海区水産研究所, 東海大学 (1999): アジア大陸隣接海域帯の生態系変動の検知と陸域影響抽出に関する研究(平成 8-10 年度), 環境庁地球環境研究総合推進費終了研究報告書, 138 ページ.

Intercomparison between the ocean color from satellite mapping and the *in vivo* fluorescence from ferry monitoring

Akira HARASHIMA*, Hajime FUKUSHIMA and Tomoyuki NONAKA****

* National Institute for Environmental Studies
** Tokai University

Abstract: We compared the pigments' concentration derived from the ocean color data from OCTS and the *in vivo* fluorescence measured on the ferry between Osaka and Okinawa. Values of *in vivo* fluorescence were transformed to the concentration of equivalent chlorophyll-a using the regression curve obtained from the simultaneous measurements of chlorophyll-a and fluorescence on the ferry in the Seto Inland Sea. Relatively good correlation was obtained between the satellite-borne and the ferry-borne values except for the biases ascribed for the following two factors. One is the correlation between the fluorescence and the pigments' concentration is different between the Seto Inland Sea (Case I water) and the Pacific Ocean (Case II water). Another is the signal drift due to the gradual fouling of fluorometer is not perfectly corrected because of it is not linear with respect to time during each cruise. In spite of such biases to use the satellite and ferry will be feasible in that the former provides spatial map and the latter provides directly measured data free from cloud coverage.

Keywords: phytoplankton pigments, chlorophyll-a, satellite ocean color data, OCTS, ferry data, *in vivo* fluorescence