

— 論文 —

## 海色衛星によって観測された富山湾における 1998年と1999年のクロロフィル *a* 濃度分布 \*

大西 美奈<sup>†</sup>・石坂 丞二<sup>‡</sup>・笠原 一世<sup>\*\*</sup>  
長田 宏<sup>††</sup>・白山 肇<sup>‡‡</sup>・内山 勇<sup>\*\*\*</sup>・寺内 元基<sup>†††</sup>

### 要 旨

沿岸域での海色衛星データの有効性を示すために、1998年と1999年の富山湾での海色衛星 SeaWiFS のクロロフィル *a* データを解析した。富山湾の湾外と湾中央では春季と秋季に二回の季節的なブルームが見られ、これは日本海全般に見られる季節的な温度成層の変化に対応した現象である。一方、湾奥では夏季に衛星のクロロフィル *a* 濃度が減少せず、その分布は表面塩分と比較的よく対応していたことから、河川水などからの栄養塩の供給によってクロロフィル *a* が増加していることが示唆された。また、衛星で観測されたクロロフィル *a* 分布の短期変動によって、反時計回りの流動が存在することと、間欠的な対馬暖流の流入によって湾奥の水が湾外に運び出されることが示された。しかし、定量的には、衛星で観測されたクロロフィル *a* 濃度と比較可能な現場データが少なく、今後しっかりと検証をする必要がある。

キーワード：富山湾，日本海，海色衛星，SeaWiFS，クロロフィル，植物プランクトン

### 1. はじめに

富山湾は、本州日本海側のほぼ中央、能登半島の東側に位置し、日本海側では若狭湾に次ぐ大きな湾である (Fig. 1)。湾口は北東に開け、沖合いを流れる対馬暖流水が湾内へ流入するとともに、湾奥部には5本の一級河川を含む多数の河川からの淡水流入があり、外洋的な性質と内湾的な性質を併せ持っている (奈倉・若林, 1984)。湾内での平均的な流動パターンは、湾外からの海水が能登半島東岸に沿って入り込み、反時計回りの流動を示すことが知られている (今村ら, 1985; 内山, 1993; 山田・木谷, 1994)。一方、湾奥には河川水の影響を受ける低塩分域が広がる事が多く (今村ら, 1985)、永原 (1984) は富山湾の栄養塩の供給に湾内に流入する

\* 2005年9月9日受領；2006年9月20日受理

著作権：日本海洋学会，2007

<sup>†</sup> 長崎大学水産学部

(現在) NPO 法人オーシャンファミリー海洋自然体験センター  
〒240-0111 神奈川県三浦郡葉山町一色 683

<sup>‡</sup> 長崎大学水産学部

〒852-8521 長崎県長崎市文教町 1-14

連絡先 e-mail address : ishizaka@nagasaki-u.ac.jp

<sup>\*\*</sup> 富山大学理学部

〒930-8555 富山県富山市五福 3190

<sup>††</sup> (独) 水産総合研究センター西海区水産研究所

〒851-2213 長崎県長崎市多良良町 1551-8

<sup>‡‡</sup> (財) 環日本海環境協力センター

(現在) 大東文化大学環境創造学部

〒175-0082 東京都板橋区高島平 1-9-1

<sup>\*\*\*</sup> (財) 環日本海環境協力センター

(現在) 富山県水産試験場

〒936-8536 富山県滑川市高塚 364

<sup>†††</sup> (財) 環日本海環境協力センター

〒930-0856 富山県富山市牛島新町 5-5 タワー 111

5 河川が大きく寄与する事を示している。

長田・奈倉(1993)は、河川水の影響の強い湾奥域で4月以降に密度躍層の形成と栄養塩の供給によって植物プランクトンが増加する事を指摘した。また、河川水の影響の少ない湾北・西部沿岸では、4月以前に春季ブルームが起こっている可能性を指摘した。また、Taniguchi *et al.*(1997)は、2~4週ごとの高頻度のサンプリングで、湾中央部での植物プランクトン群集の変動を明らかにし、数種の珪藻が1月から3月にブルームを起こすことを指摘した。

河川水による栄養塩供給によって起こる植物プランクトンの増加や季節的なブルーム現象は、1か月以下の短い時間スケールで起こっている可能性もある。したがって、これまで行われてきた1~数か月に一回程度の定点観測の他に、多測点・連続的な観測の実施が望まれるが、そのような観測を船舶で行なうことは容易ではない。

近年、海色衛星を用いてクロロフィル *a* 濃度を測定し、植物プランクトンの分布を明らかにすることができるようになってきている。衛星によって測定されたクロロフィル *a* 濃度は、外洋では推定精度も高く頻繁に利用されるようになってきているが、内湾での精度はそれほど高いものではない(石坂ら, 2002)。衛星で光学的に測定されるクロロフィル *a* 濃度は、懸濁物質や有色溶存有機物質の影響を受けており、また、大気補正も完全ではないためと考えられている(石坂, 2001)。そのため、衛星で測定されたクロロフィル *a* 濃度は、現場のクロロフィル *a* と区別して衛星クロロフィル(satellite chlorophyll)と呼ばれることも多い。しかし衛星では、個々の値の精度は高くなくとも、広範囲で同時に、また高頻度にその分布を把握することが可能であるために、その意義は大きいと考えられる。国内では有明海での赤潮の研究に衛星クロロフィルが利用されている(石坂, 2004; Ishizaka *et al.*, 2006)。本報は、富山湾での衛星クロロフィルの変動とその河川水や流動との関係を把握し、これまでの富山湾での知見と比較することによって、沿岸環境の研究の上での衛星クロロフィルの有用性を示した。

## 2. データ及び方法

衛星クロロフィルデータは、宇宙航空研究開発機構(JAXA)がホームページ(<http://kuroshio.eorc.jaxa.jp/ADEOS/SeaWiFS/index.j.html>)上で提供しているSeaWiFSの高解像度(I-LAC, 約1.1 km)データを用いた。SeaWiFSは1997年から稼動しているアメリカ航空宇宙局(NASA)の海色センサーであり、JAXAはこの日本周辺のデータをNASAの海色データ処理ソフトSeaDAS 3.2(<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/seadas/>)で処理して提供している。ここでは、1998年と1999年の衛星データから、北緯3°30'~38°00', 東経136°30'~138°30'の富山湾全体を含むデータを利用した(Fig. 1)。

水温および塩分データは、富山県水産試験場による富山湾海域26定点における定期海洋観測結果のうち、湾内16定点、湾外1点のデータを用いた(Fig. 1)。水産試験場による観測は、月一回行なわれており、CTDおよび表面採水により水温・塩分が測定されている。

湾外、湾中央、湾奥の3地点について、衛星クロロフィル濃度を抽出した。これらの点は、水温や塩分の時間変化とも比較することを考え、水産試験場の観測定点を基準にした。ただし、一点(約1 km<sup>2</sup>)のみの衛星データを用いると、雲等の影響で画像が得られずデータ数が少なくなったり、その海域の特徴を捉えるデータとしては信頼性が低くなったりする可能性がある。そこで、水産試験場の観測定点のうち3地点を中心にして、湾外(Fig. 1, outside)では5×5個のデータの平均値、湾中央(Fig. 1, inside)では3×3個のデータの平均値を求め、各海域の代表的な衛星クロロフィル濃度として扱った。また、湾奥については、富山県環境科学センターの観測点(神通川河口沖約2 km, Fig. 1, head (Chl))を基準に3×3個のデータを平均した。ここでの比較のための水温・塩分は、近接する水産試験場の定点(Fig. 1, head (T-S))データを用いた。

現場クロロフィル *a* 濃度のデータは、環境科学センターによる富山湾内および湾外の全12測点における、1997年度及び1998年度富山湾海域補完調査結果(Fig. 1)を使用した。また、富山湾に河口を持つ5本の一級河川(黒部, 常願寺, 神通, 小矢部, 庄川)の流量

は、1998年度流量年表によるデータ及び国土交通省富山工事事務所の1999年度河川流量暫定値を用いた。

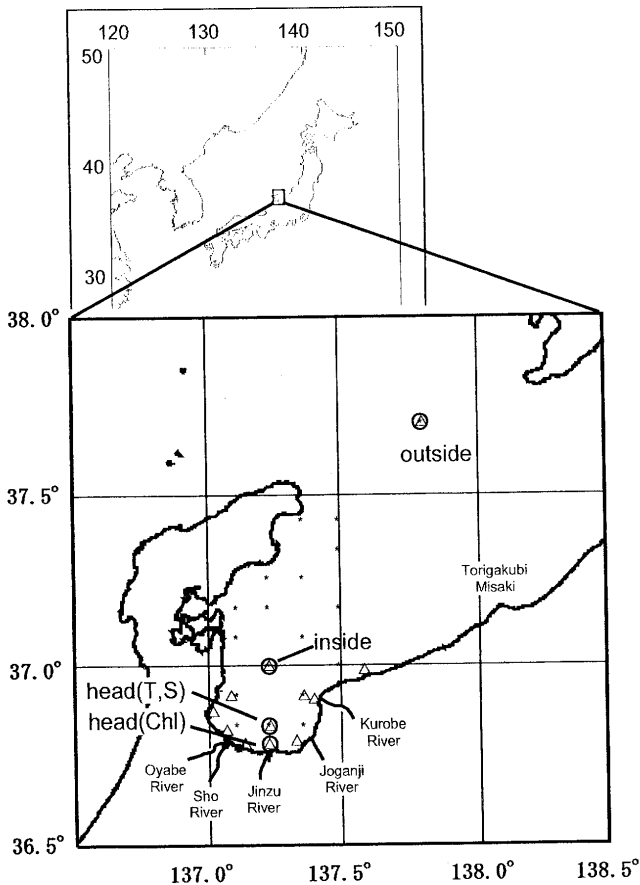


Fig. 1. Location of the research area showing observation stations. Dots, squares and circles indicate the locations of the stations of Toyama Prefectural Fisheries Experimental Station, the stations of Toyama Prefectural Environmental Science Research Center, and the time series analysis of this study, respectively.

### 3. 結果

#### 3.1. 衛星クロロフィル濃度の時間変化

2年間の衛星画像のうち、富山湾が観測されている画像は、1998年に43枚、1999年に63枚の計106枚であった(Fig. 2)。このうち雲の影響がほとんどなく、ほぼ湾全域の衛星クロロフィル分布が表示されている画像は約半数の50枚であり、両年とも冬季(12月、1

月)と夏季(1998年8月、1999年7月)は、雲で利用可能なデータが少なかった。

衛星クロロフィルは、1998年、1999年ともに12月から1月、2月前半に湾外から湾奥にいたるまで低濃度であったが、2月後半から4月にかけてその濃度が急激に高くなり、5月まではやや高い状態が続いた(Fig. 2)。特に1998年2月25日、1999年3月24日、4月16日では、湾周辺全域で $5 \mu\text{g L}^{-1}$ を超える高濃度であった。湾中央から湾外では、5月下旬から10月初めにかけて顕著に濃度が低下した後、10月および11月には再び濃度が高くなった。一方、湾奥を中心に夏季から秋季にかけて、湾中央や湾外よりも高い濃度が観測された。

各地点の衛星クロロフィル濃度は、湾外では $0.1 \sim 1.5 \mu\text{g L}^{-1}$ (1999年4月16日のみ $>10 \mu\text{g L}^{-1}$ )と相対的に低濃度で推移し、最も高い値は春(1998年3月と1999年4月、 $>1 \mu\text{g L}^{-1}$ )、最も低い値は夏(6月～8月、 $0.1 \sim 0.3 \mu\text{g L}^{-1}$ )に観測された(Fig. 3)。また、10・11月になると、その濃度は徐々に高くなり約 $0.5 \mu\text{g L}^{-1}$ と夏季の2～5倍となった。湾中央では、 $0.1 \sim 6.4 \mu\text{g L}^{-1}$ (1998年2月25日と1999年4月16日のみ $>10 \mu\text{g L}^{-1}$ )と湾外よりもやや広い変動幅を持って推移し、湾外と同様に、春季(1998年は2月～3月、1999年は2月～5月)と秋季(1999年は9月～11月)に $1 \mu\text{g L}^{-1}$ 以上と他の季節より高濃度となった。また、夏季は雲が多くデータの信頼性がうすい1998年7月30日をのぞき、両年ともほぼ $0.3 \mu\text{g L}^{-1}$ 以下の低濃度であった。湾奥部では、衛星クロロフィルは3海域中で最も高い濃度で推移していた。1999年6月12日～14日の3日間以外は、全て $0.5 \mu\text{g L}^{-1}$ 以上の値であり、SeaWiFSの飽和濃度 $64.4 \mu\text{g L}^{-1}$ に近い値もあった。特に夏季は、湾外や湾中央では見られなかったような急激な濃度の増加が頻繁にあり、変動幅は $10 \mu\text{g L}^{-1}$ 以上のことが多かった。

#### 3.2. 湾内外3海域における水温・塩分と衛星クロロフィル濃度の時間変化

Fig. 4に海域別の現場観測水温の時間変化及び衛星クロロフィルの時間変化を示した。湾外(Fig. 4-a)では、1998年3月の観測で表面水温は最低 $9.8^\circ\text{C}$ であり、

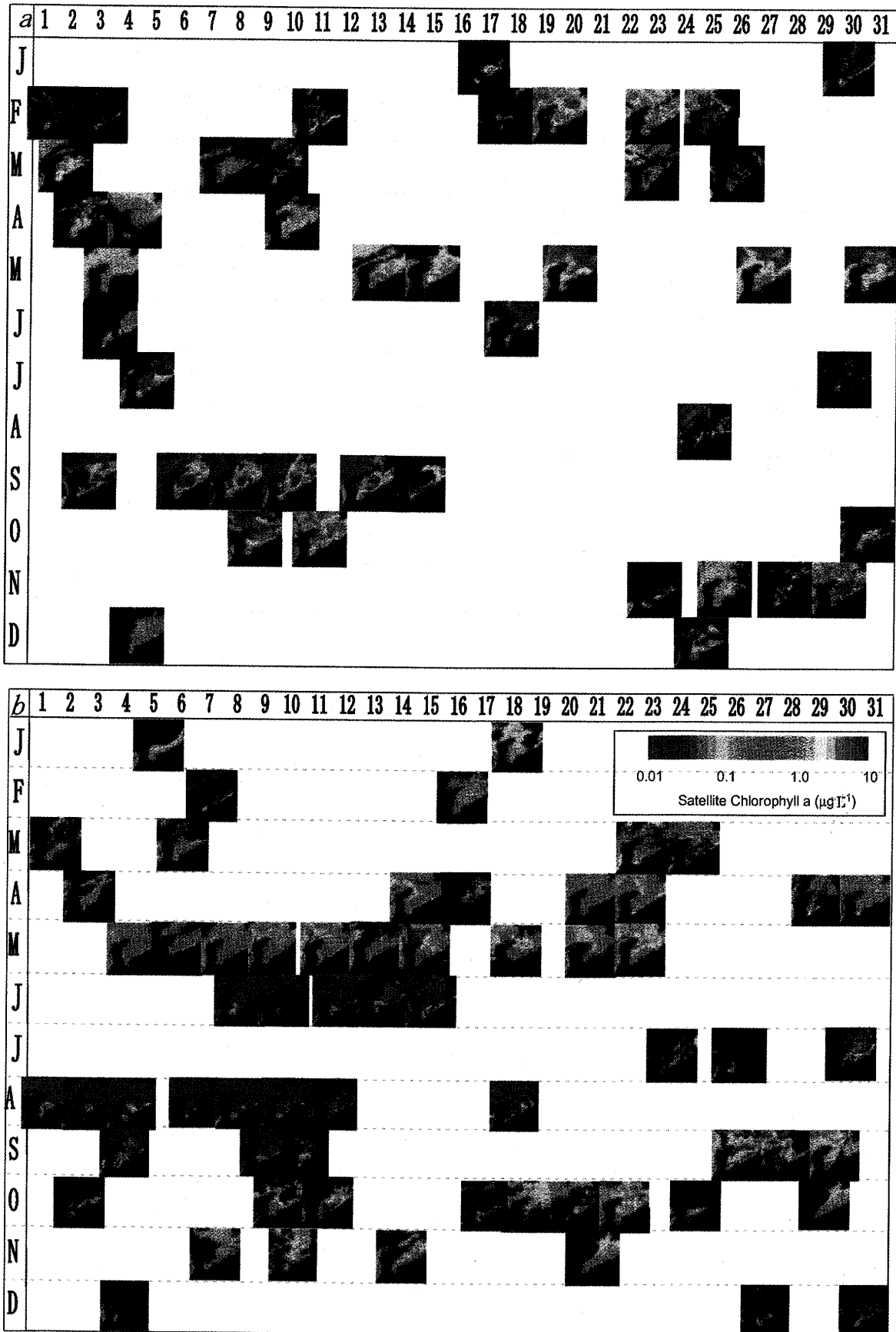


Fig. 2. Daily SeaWiFS images of 1998 (a) and 1999 (b). Letters and numbers indicate month and date, respectively.

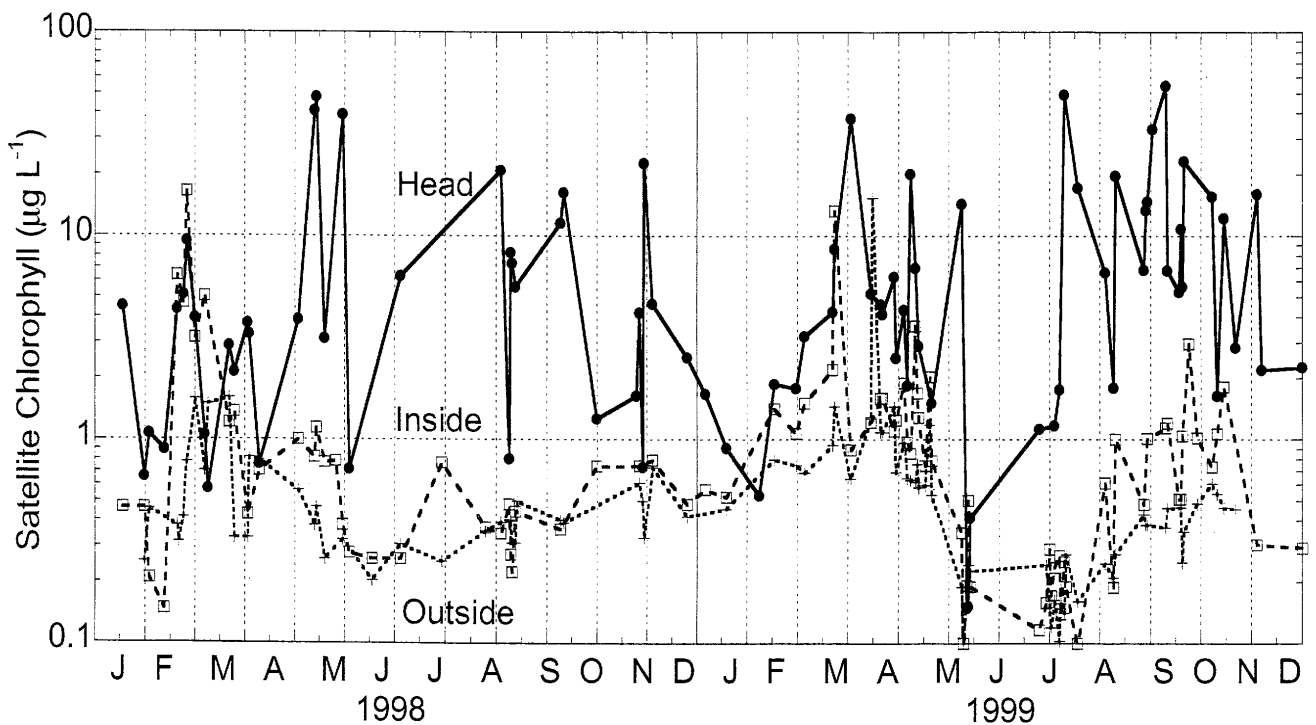


Fig. 3. Time-series of satellite chlorophyll concentration at the outside (+), inside (□), and head (●) of Toyama Bay.

その後昇温して8月の最高値  $25.7^{\circ}\text{C}$  となった。表面水温の上昇と同時に下層 100 m までも昇温し、5月の観測では各層の水温差がはっきりして成層構造を示した。衛星クロロフィルは、表面水温が最低値を示した後昇温が始まる2月から3月に濃度が急激に高くなり、成層構造がはっきりする4月から夏季にかけて、徐々に低濃度となった。8月の水温のピーク時には成層構造が顕著であり、0 m と 10 m の水温は等しいものの、それ以深では各層毎に約  $1^{\circ}\text{C}$  の水温差があった。9月になると、表面水温は下がり始め、11月に等水温層が水深 50 m に達した。成層している夏季には衛星クロロフィルは低濃度であったが、表面水温が下がり始める9月以降、衛星クロロフィルは徐々に増加を始めた。

1998年12月及び1999年1月は欠測のため水温は不明であったが、1999年の表面最低水温は3月の  $9.4^{\circ}\text{C}$  であり、この時水深 100 m までが等水温になっていた。1999年の衛星クロロフィルは表面水温が最低となる2月から3月に高くなり、成層の発達した4月に最高濃度  $1.5 \mu\text{g L}^{-1}$  にまで増加し減少した。その後、水温上

昇と成層の発達が見られる6月～8月には、衛星クロロフィルは  $0.3 \mu\text{g L}^{-1}$  以下の低濃度であった。9月以降には表面水温が下がり、10月には水深 30 m まで、11月には水深 50 m まで等水温になるにつれて、再び衛星クロロフィル濃度は徐々に上昇した。

湾中央 (Fig. 4-b) では、1998年の表面水温最低値は3月の  $10.4^{\circ}\text{C}$ 、最高値は8月の  $26.5^{\circ}\text{C}$ 、1999年の最低水温は3月の  $10.8^{\circ}\text{C}$  で最高値は9月の  $26.9^{\circ}\text{C}$  と、全体的に湾外よりも約  $1^{\circ}\text{C}$  高い値が観測されているが、最低値および最高値は湾外と同じ月に見られ、2年間の変動も同様の傾向となった。衛星クロロフィルも湾外と同様、両年の最低水温が観測され昇温が始まる季節に急激に増加しており、表面水温が上昇を続けて成層構造がはっきりする6月から8月には低濃度となった。さらに、表面水温が下がり始め水深 50 m までが等水温になる10月に再び高濃度となった。

湾奥部 (Fig. 4-c) では、1998年は表面水温が2月に  $9.6^{\circ}\text{C}$  の最低値となり、水深 150 m の水温を下回った他、1999年の最低水温も2月に  $10.9^{\circ}\text{C}$  となって水深

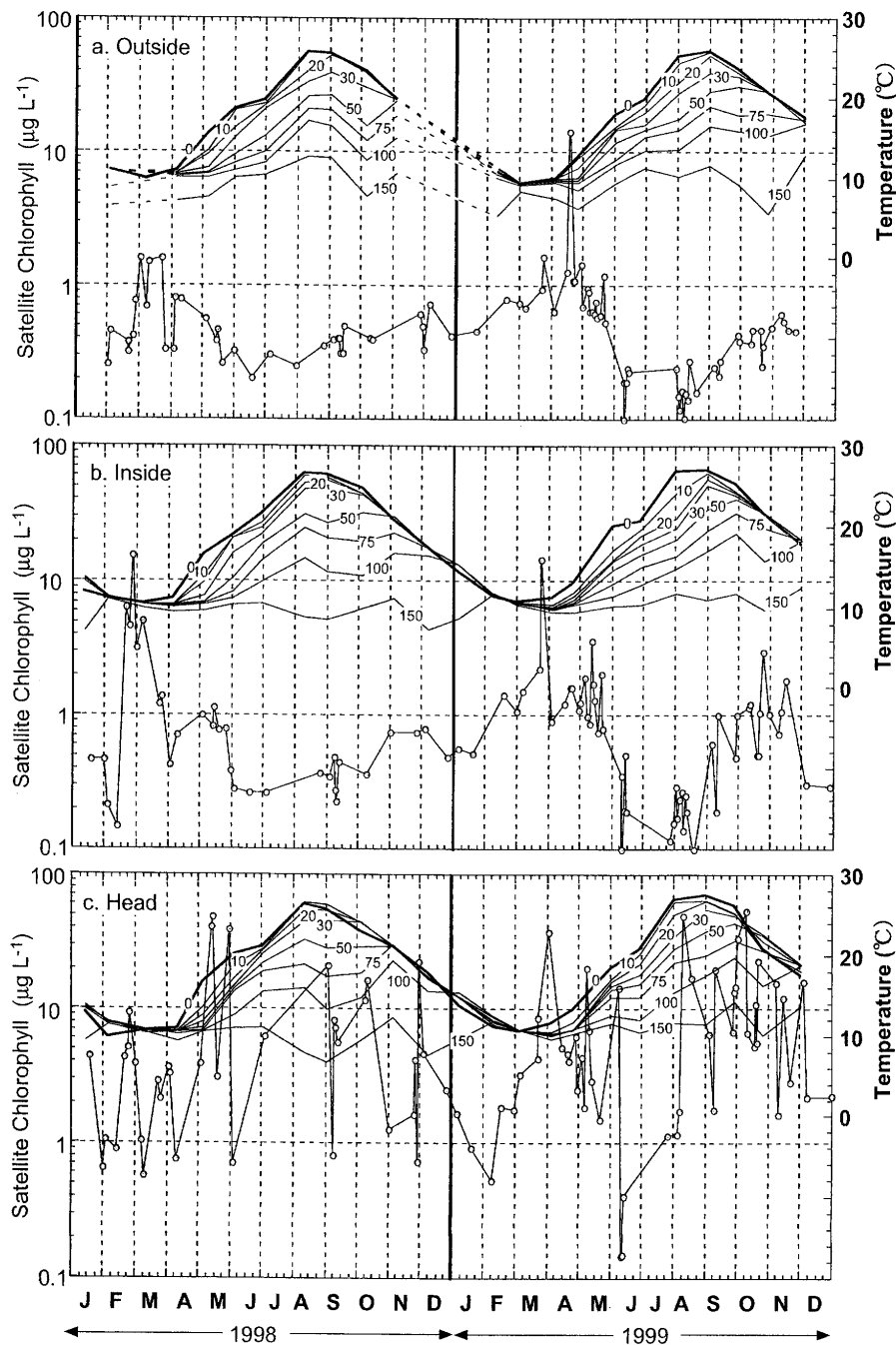


Fig. 4. Time-series of satellite chlorophyll concentration and temperature from surface to 150 m (0, 10, 20, 30, 50, 75, 100, 150 m) at the outside (upper), inside (middle), and head (T-S) (bottom) of the bay.

150 m の水温よりも低くなった。このような冬季の水温の逆転は、湾奥部でのみ見られた。ただし、全体的な時間変化は湾外とほぼ同様で、1998 年の表面最高水温は 8 月に  $26.1^{\circ}\text{C}$  であり、1999 年の最高値は 9 月に  $27.3^{\circ}\text{C}$  であった。湾奥での衛星クロロフィルは、他の海域と同様春水温が最低値から上昇する時、及び秋に冷却が始まり等水温層の厚さが増大する時期に濃度の

急激な増加があった。また、この海域では他の海域と比較すると変動が激しく、春以外の季節でも  $10 \mu\text{g L}^{-1}$  を超えるような増加が頻繁に見られた。

一方、湾外における表面塩分は、最も高い値で 34.4 (1999 年 6 月)、最も低い値で 32.3 (1998 年 9 月) であった (Fig. 5-a)。湾中央では、表面塩分の最高値は 34.2 (1999 年 6 月)、最低値は 31.7 (1998 年 9 月) と、湾外

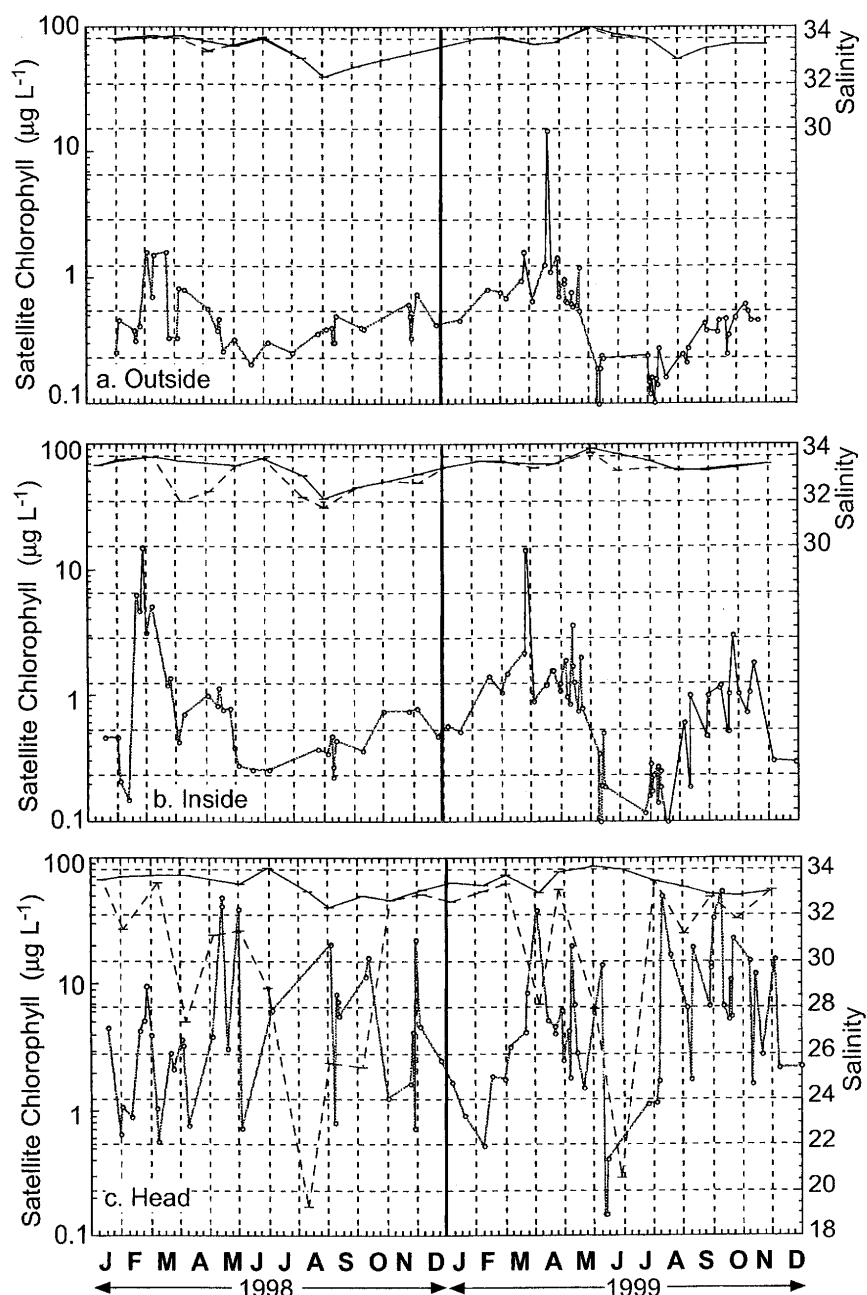
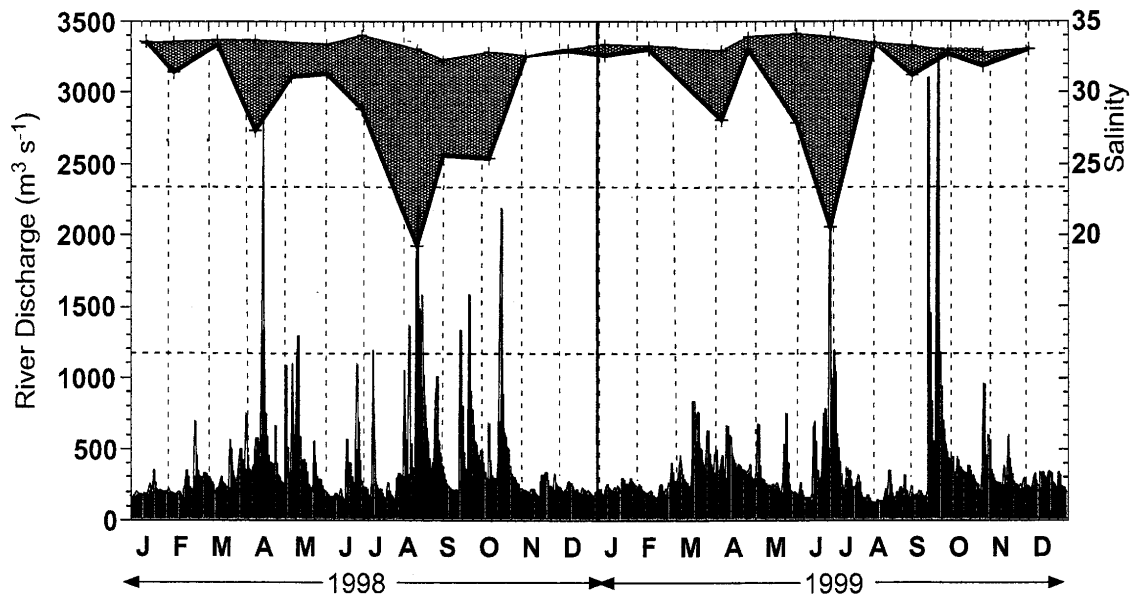


Fig. 5. Time-series of satellite chlorophyll concentration and salinity, at the surface (broken line) and depth of 10m (solid line), of the outside (upper), inside (middle), and head (T-S) (bottom) of the bay.

と比べ最高値にほぼ変わりはないが、最低値がやや低くなっていた (Fig. 5-b)。湾奥では、他の2海域よりも顕著な表面塩分の低下が見られ、最高値は 33.6 (1998年1月)、最低値は 19.3 (1998年8月) となっていた (Fig. 5-c)。さらに、冬季を含む数か月間を除いて、ほとんどの月 (2年間のうち8割程度) で表面塩分は 33.0 を下回っていた (Fig. 5-c)。水深 10 m の塩分は、3海域共に表層とほぼ同様の時間変化を示したが、表面と水

深 10 m の塩分差に海域による大きな差異が見られた。湾外および湾中央における表面と水深 10 m の間の塩分差は、大きい時で湾外では 0.4 (1998年5月)、湾中央では 1.8 (1998年4月) となっており、塩分成層が見られることはほとんどなかった。これらに対し、湾奥では表面と水深 10 m の塩分差は最大で 13.7 (1998年8月) で、11月から1月にかけての季節以外は塩分成層が見られることが多く、特に夏季 (1998年8月、1999



**Fig. 6.** Time-series of total river discharge of five large rivers (the Oyabe, Sho, Jinzu, Joganji, and Kurobe) and salinity at surface and 10 m of the head (T-S) of the bay. The shaded area indicates the difference between high (10 m) and low (surface) salinity.

年6月)には塩分差が極めて大きく、顕著な塩分成層が見られた。

海域毎の塩分の時間変化の比較から、湾奥部では他の2海域では見られなかった塩分成層が頻りに形成された。そこで、湾奥部での塩分の時間変化と河川水との関係を解明するため、湾内に流入する5大河川(小矢部川, 庄川, 神通川, 常願寺川, 黒部川; Fig. 1)の1日の総流量の時間変化と現場観測塩分の時間変化を比較した(Fig. 6)。

河川総流量は、日々変動が激しく、また季節によっても変動が大きかった。また各河川によっても、日毎または季節的な流量の変動の仕方が大きく異なったが、総流量に占める神通川の割合が高く、両年とも年間を通して流量の5~7割を占めていた。観測期間中の5大河川の1日平均流量は $347 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ であったが、1998年は、4月と8月、10月に急激な流量増加のピークを持ち、3月から10月にかけては全体的に流量が多く、平均流量の2倍から3倍になることが頻りに起きた。

1998年11月から1999年2月までの冬季は、流量は少なく変動は安定し、この期間は平均流量に満たない日が大半であった。1999年は2月末になると流量が増加し始め、3月中はそれまでの冬季の2倍近い流量となり、6月と9月には平均流量の5倍以上となる顕著な

ピークが見られた。ただし、7月から8月にかけては、流量は冬季と同程度に落ち込み、変動も安定していた。

表面と水深10mの塩分差から見た塩分成層は、1998年には2月から10月まで形成され、特に、4月及び8月~10月に顕著であった。これは、河川流量が増加する時期に対応していた。1999年は4月から7月に塩分成層が形成され、最も顕著であったのは6月末の観測時であった。この年も塩分成層の形成は、河川流量の増大した時期に対応していた。しかし、河川流量の増大のピークがあった9月の観測においては、塩分成層は見られなかった。

### 3.3. 衛星クロロフィル分布と塩分水平分布の比較

現場観測と同日もしくは前後1日に衛星画像が得られている場合の、表面塩分分布と衛星クロロフィル分布との比較を行なった(Fig. 7)。比較は、1998年4月、9月、1999年1月、8月、9月初め、9月末の6回行なうことができた。

まず、湾奥部で高衛星クロロフィルとなった夏季に注目し、8月~9月にかけての比較結果から述べる。1998年9月には、湾奥から能登半島の先端近くまで、ほぼ湾の全域が32.0以下の低塩分域におおわれており、そ



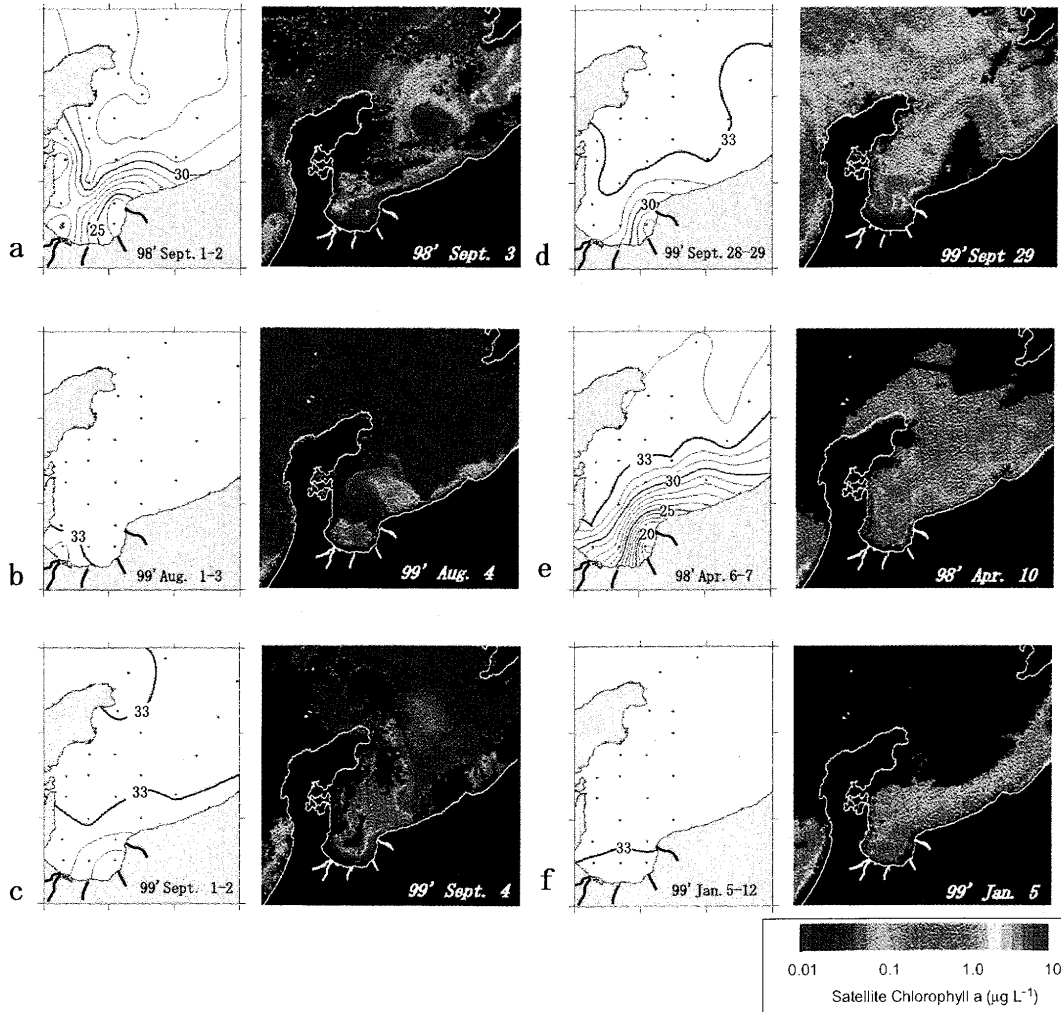


Fig. 7. Horizontal distribution of salinity (left) and satellite chlorophyll (right).

の中でも湾奥部東岸で特に低く塩分 22.9 となっていた (Fig. 7-a)。この時、湾奥部全体で  $10 \mu\text{g L}^{-1}$  以上の衛星クロロフィル分布が見られ、特に湾奥等部では塩分 25 以下の水域内で高衛星クロロフィルであった。(Fig. 7-a)。1999 年 8 月には、塩分は湾奥部西側で最も低く 31.6 であった。この時の衛星クロロフィル濃度が約  $3 \mu\text{g L}^{-1}$  と高い海域は湾奥西側に見られ、33 以下の低塩分域の分布とほぼ一致していた (Fig. 7-b)。1999 年 9 月初めの観測では、表面塩分が最も低いのは湾奥部東岸で、約  $8 \mu\text{g L}^{-1}$  の高衛星クロロフィルは湾奥に分布し、塩分が 32 以下の海域にほぼ対応していた (Fig. 7-c)。

1999 年 9 月末は、33 以下の低塩分域が湾奥から湾東側の沖合いおよび湾西側で能登半島の東側にそって分布していた。最も低塩分だったのは湾奥東側で 27.3、

湾奥部は全体的に 32 以下であった。この時の衛星クロロフィル分布は、湾奥部沿岸にそって高く約  $9 \mu\text{g L}^{-1}$  となり、また湾奥東側で 30 以下の低塩分域と一致していた (Fig. 7-d)。これらの比較から、夏季には低衛星クロロフィルとなる沖合とは対照的に、湾奥部で低塩分域を中心に高衛星クロロフィルとなっていたことが明らかとなった。

次に、湾内外一様に衛星クロロフィル濃度が  $0.5 \mu\text{g L}^{-1}$  前後とやや低くなるが多かった冬季～春季の画像について、塩分分布と比較した。春季に該当する 1998 年 4 月には、33 以下の低塩分域は湾奥から湾中央東まで広がり湾奥東岸で最も塩分が低く 16.3 となっており、この湾奥東岸の塩分 20.0 以下となる水域で衛星クロロフィルは  $5 \mu\text{g L}^{-1}$  以上と高かった (Fig. 7-e)。1999 年 1 月、湾中央では他の季節に比べて塩分約

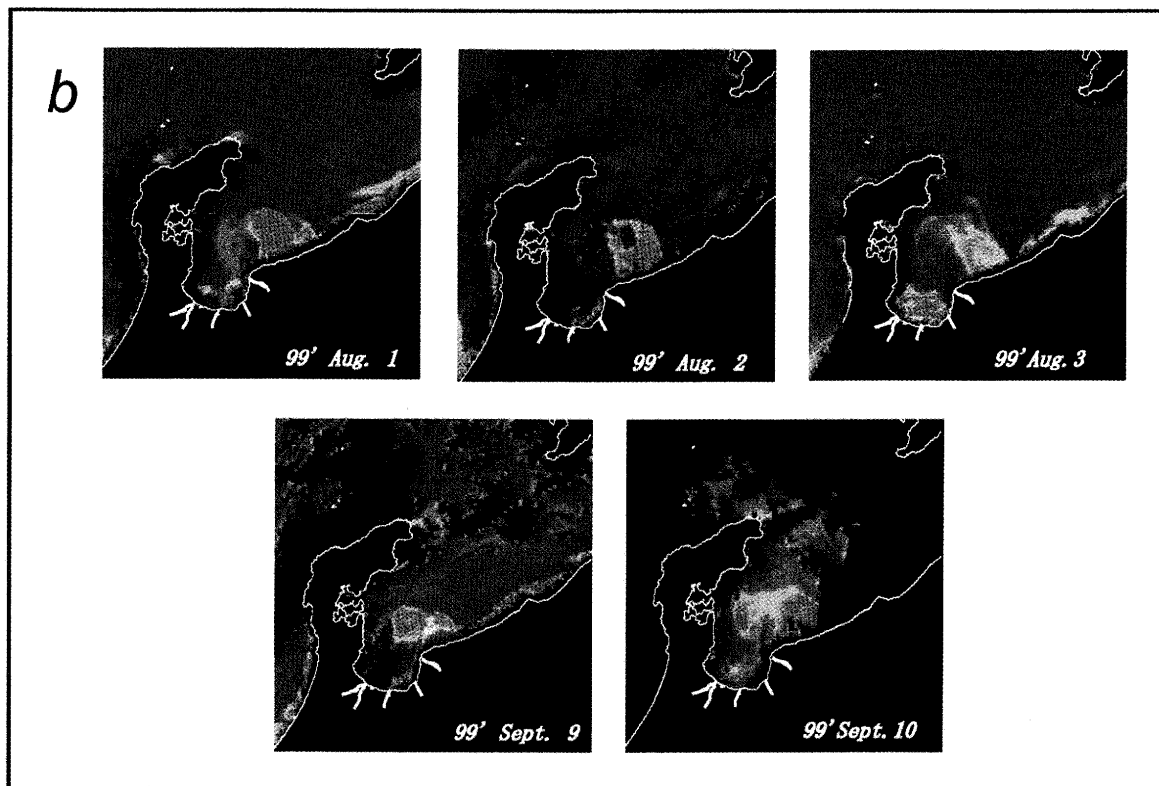
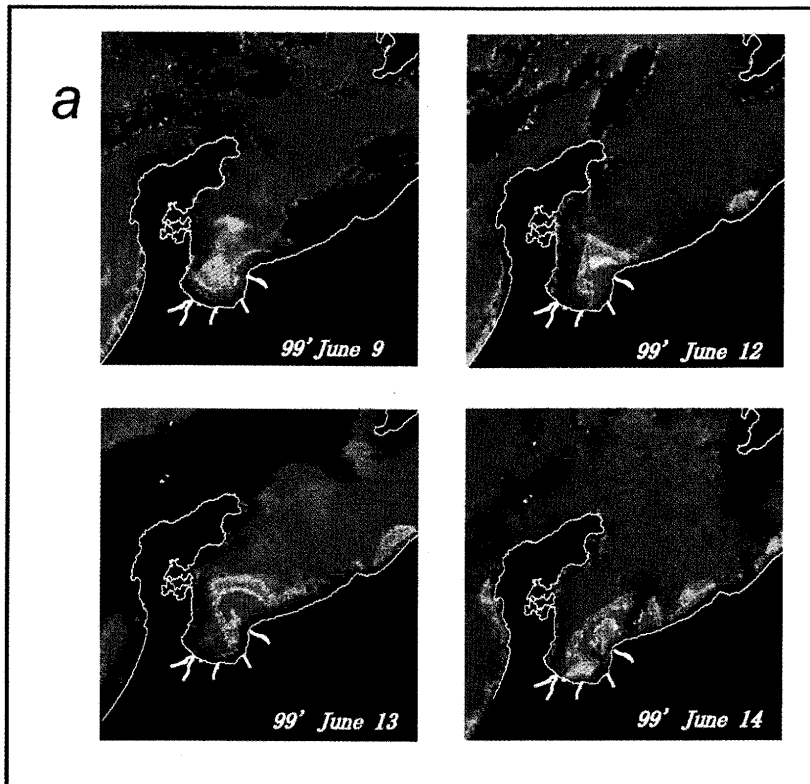


Fig. 8. Daily SeaWiFS images of Toyama Bay. a) June 9~14, 1999 and b) August 1~October 10, 1999

33.5 と一様に高かった中で、湾奥部では塩分 33.0 以下となり、最も低い値は 32.4 であった (Fig. 7-f)。衛星

クロロフィルは、低塩分となっていた湾奥部では約  $1.5 \mu\text{g L}^{-1}$  とやや高かった。これらのように、冬や春にお

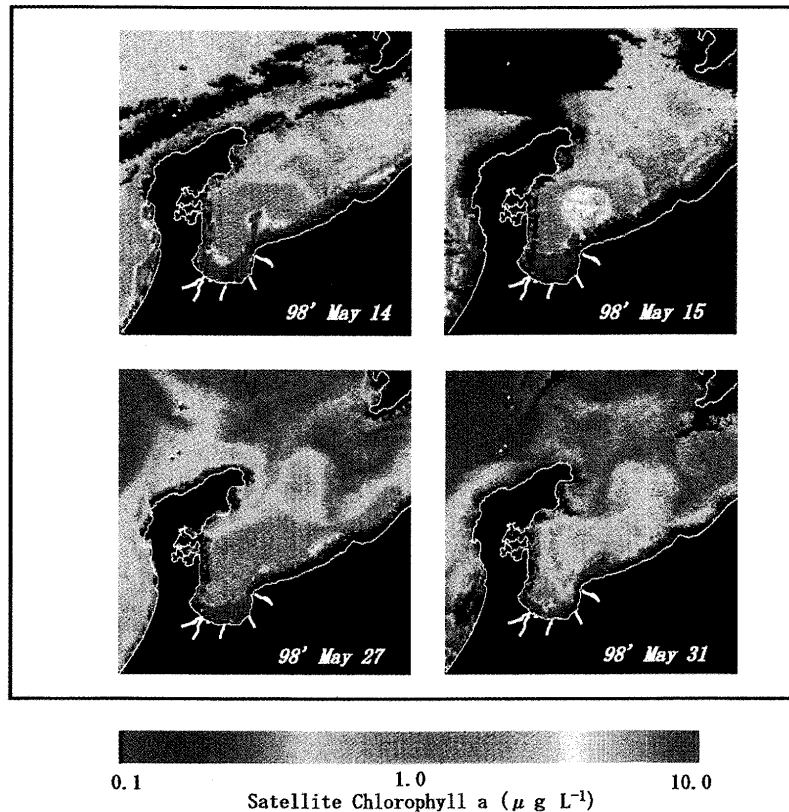


Fig. 9. The same as Fig. 8 but for May 14~31, 1998.

いても、夏季と同様に周囲よりも低塩分の水塊と対応して周囲よりも高い衛星クロロフィルの分布が見られた。

### 3.4. 衛星クロロフィル分布の短期変動

衛星では、ほぼ瞬時に広範囲の衛星クロロフィル分布のパターンが捉えられるが、この分布パターンの時間変化から、湾内の海水流動を推測することができる。本研究では、5月から9月にかけて、高衛星クロロフィル濃度の分布パターンから数日スケールの反時計周りに見える渦状分布が、1998年・1999年それぞれ少なくとも3回程度観察できた。これらの渦状分布の形成の過程は、次に述べるような3つの異なるパターンが区別された (Fig. 8, 9)。

#### 【パターン1 (Fig. 8-a)】

1999年6月9日には湾奥では約  $5 \mu\text{g L}^{-1}$  以上の高衛星クロロフィル水が分布し、湾北部から湾西部にかけては  $0.1 \mu\text{g L}^{-1}$  以下の低衛星クロロフィル水が分布していた。3日後の12日には、低衛星クロロフィル水は湾奥部に到達し、湾奥部に見られた衛星クロロフィ

ル水は東側に移動した。13日には湾奥部は低衛星クロロフィル水におおわれ、高衛星クロロフィル水はさらに東に進み、黒部川河口付近から沖合いに向かって舌状に分布した。さらに14日には、高衛星クロロフィル水は湾中央部で反時計周りの渦を描くように分布を変えた。この時、湾奥の高衛星クロロフィル水はその場に留まらず、湾奥海域は低衛星クロロフィル水に置き換わっていた。

#### 【パターン2 (Fig. 8-b)】

1999年8月1日には、湾の東側沿岸から沖に向かって高衛星クロロフィル水が舌状に伸びて分布し、この時湾奥部には低衛星クロロフィル水が分布していた。翌2日には、高衛星クロロフィル水の分布は放射状にやや広がり、さらに翌3日、反時計周りに見える渦状の分布に変わった。また、1999年9月9日には黒部川河口付近の沿岸からのびる渦状の分布が翌10日にやや東に移動し、9日よりやや大きな渦状分布に発達したが、湾最奥部では前日より湾最奥部の衛星クロロフィル濃度は高くなっていた。これらの画像では、パターン1とは異なり渦状分布が発達していく段階で同時に湾奥

では衛星クロロフィル濃度が高くなっていた。

【パターン 3 (Fig. 9)】

1998年5月14日の黒部川河口付近に突出部をもつ高衛星クロロフィル水の分布は、翌15日には放射状に広がっていた。この時、パターン1と同様に能登半島東岸に沿った低衛星クロロフィル水の分布が見られたが、湾奥部での衛星クロロフィル濃度は両日高いままであった。また5月27日、同じく湾奥部には高衛星クロロフィル水が残っていたが、この時黒部川河口から鳥ヶ首岬の間に、湾奥に向かうような衛星クロロフィル分布の渦状の分布が存在した。4日後には、渦状分布は消失し、湾最奥部には到達しないものの湾奥近くまで入り込む低衛星クロロフィル水が見られた。これらの場合では、湾内に入り込むような低衛星クロロフィル水が見られたのはパターン1と同様であったが、渦状分布の形成の間も湾奥部の高衛星クロロフィル水は継続して分布していた。

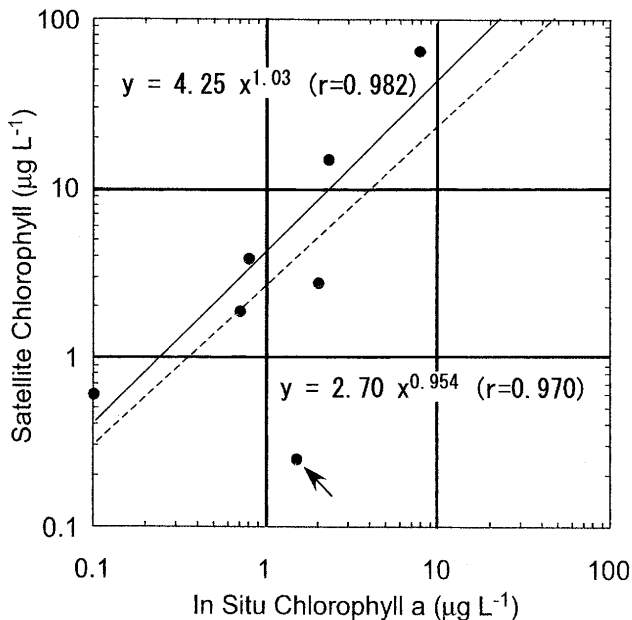


Fig. 10. Correlation between *in situ* chlorophylla and satellite chlorophyll concentrations. Solid and broken lines are regression lines with all the data and except the data with arrow, respectively.

### 3.5. 衛星クロロフィル濃度と現場クロロフィル a 濃度

これまで扱ってきた衛星クロロフィル濃度が、現場クロロフィル a 濃度とどのような関係を持つか比較した。ただし、植物プランクトンは数日スケールで指数関数的に増減すると知られている事や、前章でも示したように富山湾上層(水深 100 m 以浅)では通年で流速が  $4.3 \sim 32 \text{ km d}^{-1}$  の流動が存在することが知られているため(山田ら, 1994), 絶対値の比較では現場観測日と衛星観測日が 3 日間以上離れた場合は信頼性に欠けるものと考えて除き、同緯度経度における同日もしくは一日違いの濃度を用いた。比較に用いる事ができる衛星クロロフィルデータは、2 年間の観測中で 7 点しかなかった。このうち過小評価した 1 点を除いた 6 点で、衛星クロロフィル濃度は現場クロロフィル a 濃度を過大評価しており、また正の相関を示した (Fig. 10)。衛星による過大評価は、最も大きいもので 8.8 倍、最も小さいもので 1.5 倍、平均 5.2 倍であった。

## 4. 考察

### 4.1. 衛星クロロフィル濃度の季節変動

2 年間で得られた画像数は雲の影響があり 106 枚で、平均すると 1 週間に一回程度の観測頻度であった。月によってはデータが著しく少ない場合もあるが、船舶での観測と比較して、広範囲のデータが頻繁かつ継続して取得されており、衛星クロロフィル濃度の季節変動と短期的な変動が共に確認された。

湾外と湾中央の衛星クロロフィル濃度は、春と秋に高くなる季節変動が見られ、夏季に顕著に低下した。これを湾内外の各層水温の時間変化と比較すると、春の高い衛星クロロフィル濃度は 2 月から 3 月に表面水温が最低値となった後、全層が昇温を始める頃に対応していた。また、秋の高い衛星クロロフィル濃度は表面からの冷却により等水温層の厚さが増す 9 月から 11 月頃に対応していた。

長田・奈倉(1993)はこの海域で 1982 年は 5 月、1983 年には 3 月~4 月にクロロフィルの増加が見られたことを報告し、栄養塩の減少から実際には春季ブルームのピークがそれよりも早く起きているだろうと予想し

た。Taniguchi *et al.* (1997) は、1990年2月から1991年1月にかけて湾中央部で植物プランクトンの変動を調べ、1月から3月にかけて数種の珪藻がブルームを形成することを指摘している。衛星クロロフィル濃度では1998年には湾外で3月、湾中央で2月から3月、1999年には湾外で4月、湾中央で3月から5月にかけて春季ブルームのピークが見られ、長田・奈倉 (1993) や Taniguchi *et al.* (1997) の観測や推測とほぼ同時期ではあるが、湾口湾中央でその時期も規模も異なっており、また短期的な変動が大きいことが示された。

一般に温帯の沿岸域においては、春と秋に植物プランクトンが大増殖する春季ブルーム及び秋季ブルームの出現がある事が知られている。Kim *et al.* (2000) や Yamada *et al.* (2004) は、海色衛星で日本海での春季ブルームと秋季ブルームを観測し、春のブルームを起こす一つの要因として成層構造の発達を挙げている。また Ishizaka *et al.* (1997) は、島根沖に設置された光学ブイで秋季ブルームを観測し、鉛直混合による栄養塩の供給が影響している可能性を指摘した。

富山湾でも、春季の高い衛星クロロフィル濃度は、冬季混合で深層から供給された栄養塩をもとに、温度成層が始まることで植物プランクトンが増加する春季ブルームであったことが考えられた。また、秋季には鉛直混合による下層からの栄養塩供給が始まることによって、植物プランクトンが増殖する秋季ブルームが起こったと考えられた。1998年の春には、最低水温が観測される数日前から衛星クロロフィル濃度が急激に増加したように見える。しかし、水温の観測間隔は約30日であるため、これ以上短い時間スケールでの成層の発達状況とクロロフィルの増加の関係はつきりしない。Yamada and Ishizaka (2006) は、日本海の春季ブルーム時の水温と衛星クロロフィル変動を衛星の週複合データで示しているが、風速などの影響で春季ブルーム時の衛星クロロフィル濃度の変動が大きいことも示されている。また、春季ブルームの時期がエルニーニョなどの気候変動に影響されることも指摘しており、日本海では1998年の春季ブルームが早かったことを報告している。今回の観測でも少なくとも湾外では1999年と比較して1998年の春季ブルームが早く、これは Yamada and Ishizaka (2006) の指摘した広い範囲の気候変動と対応している

可能性がある。

夏季には湾奥を除いて顕著な衛星クロロフィル濃度の低下が見られたが、この時期の水温構造を見ると、どの海域においても5月もしくは6月以降、表面から水深150 mまで顕著な温度成層が形成され続けており、下層からの栄養塩供給が少ないことで植物プランクトンの増殖が制限されていたことが示された。ただし、湾奥に限っては、成層中も衛星クロロフィル濃度が高くなっており、他の要因によって栄養塩の供給が続くと考えられた。湾奥では、他の海域では見られない顕著な塩分成層が頻繁に形成された。春季から夏季に5河川流量が増加する時、これに対応するように塩分成層が形成され、さらに夏季、塩分成層が顕著である時に衛星クロロフィルの増大があった。これらの関係から、夏季の温度成層中にも見られた湾奥の衛星クロロフィルの増大が、永原 (1984) や長田・奈倉 (1993) も指摘したように、河川水流量の増大に影響を受けていることが示唆された。

表面塩分分布からは、湾内には湾最奥部から広がる周辺よりも低塩分の水塊があることがわかり、さらに衛星画像との比較によって、夏季および秋季には周囲よりも塩分が低いところに衛星クロロフィル濃度の高い水が分布していたこともわかった。これらのことから、湾奥のみで見られた高衛星クロロフィル水の分布は河川水流入に依存したものであると考えられた。実際に、永原 (1984) は湾奥で夏季にも高いアンモニアやリン酸塩濃度を観測している。また一方で、河川からの淡水の流入は、単に栄養塩の供給のみに寄与するわけではなく、海水との塩分差により密度躍層を強める働きがあるとも考えられる (長田ら, 1988)。このことで、栄養塩豊富な水が躍層以浅に保たれるため、植物プランクトンの発生が促進され、衛星クロロフィルの増加として捉えられたと考えられた。

低塩分水は、1998年の9月のように河川流量の増大が続いた後には能登半島先端あたりまで広がり、1999年8月のように河川流量が比較的少ない日が続いた後は湾奥に留まっていた。しかし、黒田・平井 (2000) の報告によると、1998年には6月から8月にかけて長江で発生した大洪水の影響で、日本海では広範囲において塩分33.0以下となる低塩分化がすすみ、9月には能登

半島の沖合あたりまでその影響が観測されていた。したがって、1998年9月の湾全体の低塩分域の分布については、その全てが河川水の影響であるという断定はできない。また、最近、八田ら(2005)は富山湾では湧水による淡水と栄養塩の供給が重要であることを報告しており、湧水の影響も無視できない可能性がある。

本研究では衛星クロロフィルと現場クロロフィル  $a$  の比較から、衛星クロロフィル濃度は現場クロロフィル  $a$  の値を過大評価していることが確認されている。沿岸域の衛星クロロフィル濃度は懸濁物質や有色溶存有機物の影響を受けていることが知られており (Robinson, 2004)、今回の過大評価はそれらを含んだものとして濃度を推定していたと考えられる。少数ではあるが、今回正の相関が見られたことから、衛星でもクロロフィル  $a$  の分布が捉えられていると考えられる。しかし、本研究では、まだ詳細な比較が出来ておらず、今後さらに衛星と同時観測の点を増やすなどの検証が必要である。

#### 4.2. 湾内の海水流動

夏季の画像 (Fig. 8, 9) で、高衛星クロロフィル水塊の挙動からいくつかの海水流動パターンが観察され、反時計周りの渦状の分布が特に多く見られた。内山 (1993) は、34年分の水温塩分観測値から、300 db 面基準で 20 db 面の力学的高低面図を作成し、湾内表層で反時計周りの流動が見られることを明らかにした。Nakata *et al.* (2005) はほぼ同様の手法で、これが沿岸補足密度流として流入したとした。山田・木谷 (1994) は、1986年4月から8月に湾内3点に繫留系を設置し、120 m ~ 140 m の上層で平均的には岸に沿った反時計周りの流れが存在することを明らかにしている。今回の衛星観測でも、この反時計周りの流動を表層でも起こる数日スケールの現象として捉えることができたと考えられる。また、反時計周りの渦状の分布が見られる時期 (5月~9月) は、萩原 (1993) が水温・塩分観測値から計算した、湾内に入り込む対馬暖流の流量が多くなる時期とも一致するものであり、夏季の対馬暖流系の水の流入が海水流動パターンに大きく影響することが考えられた。

湾奥部の衛星クロロフィル濃度の時間変化においては、夏季に  $0.1 \mu\text{g L}^{-1}$  以下の低濃度となることが本

観測中一度だけ観測されているが、これは、パターン 1 (Fig. 8-a) として示した湾奥部の高衛星クロロフィルの河川水を根こそぎかき出すような反時計周りの流動が見られた時であった。このように、対馬暖流の入り込みは湾奥の衛星クロロフィル濃度の急激な低下に大きく関与することが示唆された。これらのことから、湾奥の高衛星クロロフィルの河川水を沖合へ運び出し、湾奥では急激に低衛星クロロフィルになるなど、対馬暖流の挙動は、富山湾の海水交換に重要な役割を果たしていることも考えられる。ただし、パターン 2 に示したように、暖流系水の流入が起きていると考えられる渦状の分布が見える時でも、湾奥は高衛星クロロフィルとなっていく場合もあり、河川水の流入が続くことによって、再び濃度は数日で高くなることも示唆された。

山田・木谷 (1994) が行なった直接測流では、7月に湾外から流入した海水が湾奥部に達することなく湾外に流出し、湾奥部では流動が著しく弱まる「よどみ現象」が報告されている。本研究においても、渦状の分布のできる時、対馬暖流系の低衛星クロロフィル水が湾奥部にまで到達する場合 (Fig. 8-a) と、湾最奥部の高衛星クロロフィル水は残されている場合 (Fig. 9) が見られており、後者は「よどみ現象」に対応する挙動である可能性も考えられた。過去の調査では、この「よどみ現象」が1994年の4月~8月という短い観測期間中にとらえられた現象であったので、その頻度や季節性についての把握は今後の課題とされていた。本研究では、2年間で2回、いずれも5月によどみ現象と考えられるような挙動がみられた。このような湾奥部の海水交換に関わる流動が海色衛星の画像からもとらえられることは、観測手法としての高い利用性のひとつである。

#### 5. 結論

本研究ではまだ内湾域での利用が確立されていない衛星海色リモートセンシングデータを用いて、富山湾の1998年、1999年の衛星クロロフィルの変化を現場のデータとともに解析した。これらのデータによって湾外、湾中央部で、日本海でも見られ、これまでも富山湾で報告されている春季ブルームと秋季ブルーム

に関して、その短い時間スケールでの変化を明らかにすることができた。また湾奥では、特に夏季に低塩分水に対応して衛星クロロフィルが増加し、河川水による栄養塩供給が重要と考えられることが示された。さらに、湾内の衛星クロロフィル分布の数日スケールでの変動が、湾内の流動の把握にも利用できることも示された。しかし、衛星クロロフィルデータは本来のクロロフィル *a* 濃度としてはまだその精度が十分とはいえ、沿岸での利用についてはその問題点を十分に考慮した上で進める必要がある。

## 謝 辞

河川流量データを提供、助言下さいました、国土交通省富山工事事務所の山崎 憲人氏に深く御礼申し上げます。助言をいただいた松岡 数充教授、中田 英昭教授、鈴木 利一助教授、岡崎 雄二氏に、心から感謝いたします。本研究は環境省委託事業「北西太平洋地域海行動計画活動推進事業」の一部です。

## References

- Ishizaka, J., I. Asanuma, N. Ebuchi, H. Fukushima, H. Kawamura, K. Kawasaki, M. Kishino, M. Kubota, H. Masuko, S. Matsumura, S. Saitoh, Y. Senga, M. Shimanuki, N. Tomii, and M. Utashima (1997) Time Series of Physical and Biological Parameters off Shimanu, Japan, during Fall of 1993: First Observation by Moored Optical Buoy System for ADEOS Data Verification. *J. Oceanogr.*, **53**, 245–258.
- 石坂 丞二 (2001): 沿岸域での海色リモートセンシングの現状と将来. 沿岸海洋研究ノート, **39**, 21–26.
- 石坂 丞二, 田島 清史, 岸野 元彰 (2002): 海色データから推定した大村湾のクロロフィル *a* 濃度の検証. 海の研究, **11**, 235–240.
- 石坂 丞二 (2004): サテライトから有明海の赤潮動態. 沿岸海洋研究, **42**, 43–46.
- Ishizaka, J., Y. Kitaura, Y. Touke, H. Sasaki, A. Tanaka, H. Murakami, T. Suzuki, K. Matsuoka, and H. Nakata (2006): Satellite Detection of Red Tide in Ariake Sound, 1998–2001. *J. Oceanogr.*, **62**, 37–45.
- 今村 明, 石森 繁樹, 川崎 賢 (1985): 富山湾 II 物理, p. 990–1,000. 日本海洋学会沿岸海洋研究部会編, 日本全国沿岸海洋誌, 東海大学出版会.
- Kim, S.-W., S. Saitoh, J. Ishizaka, Y. Isoda, and M. Kishino (2000): Temporal and spatial variability of phytoplankton pigment concentrations in the Japan Sea derived from CZCS images. *J. Oceanogr.*, **56**, 527–538.
- 黒田 一紀, 平井 光行 (2000): 1998 年の日本海に発生した異常低塩分現象, p. 54. 海洋水産資源開発センター.
- 奈倉 昇, 若林 洋 (1984): II-2-1 富山湾の概況, 海洋生物資源の生産能力と海洋環境に関する研究, p. 169–182. 北陸沿岸地域調査成果報告, 日水研.
- 永原 正信 (1984): II-2-2 富山湾の栄養塩類とクロロフィル *a* の季節変動, p. 183–204. 海洋生物資源の生産能力と海洋環境に関する研究, 北陸沿岸地域調査成果報告, 日水研.
- 長田 宏, 奈倉 昇 (1993): 富山湾における河川水の流入とクロロフィル *a* 濃度の季節変動. 日水研報告, **43**, 55–68.
- 長田 宏, 木谷 浩三, 広田 祐一 (1988): 富山湾奥部における表層水連続測定結果. 日水研報告, **38**, 1–8.
- Nakata, K., Y. Isoda, and I. Uchiyama (2005): Seasonal variations of water properties and the baroclinic flow pattern in Toyama Bay under the influence of the Tsushima warm current. *J. Oceanogr.*, **61**, 943–952.
- 萩原 祥信 (1993): 対馬暖流の富山湾の流入の季節変化について, p. 9–14. 平成 4 年度富山県水産試験場研究発表会要旨集.
- 八田 真理子, 張 勁, 佐竹 洋, 石坂 丞二, 中口 譲 (2005): 富山湾の水塊構造と河川水及び沿岸海底湧水による淡水フラックス. 地球化学会誌, **39**, 157–164.
- Robinson, I. S. (2004): Measuring the Oceans from Space: The Principles and Methods of Satellite Oceanography. Springer Praxis Books/Geophysical Sciences, 669 pp.
- Taniguchi, A., Y. Nakashima, T. Suzuki, K. Hirakawa, A. Imamura, and T. Ikeda (1997) Seasonal variations in the phytoplankton assembly in Toyama Bay, southern Japan Sea. *Bull. Japan Sea Natl. Fish. Res. Inst.*, **47**, 33–55.
- 内山 勇 (1993): 富山湾及び周辺海域の平均的流動パターン. 富山県水産試験場研究報告, **4**, 11–30.
- 山田 東也, 木谷 浩三 (1994): 直接測流による富山湾の流動. 日水研報告, **44**, 19–30.
- Yamada, K., J. Ishizaka, S. Yoo, H.-C. Kim, and S. Chiba (2004): Seasonal and interannual variability of sea surface chlorophyll *a* concentration in the Japan/East Sea (JES). *Prog. Oceanogr.*, **61**, 193–211.
- Yamada, K. and J. Ishizaka (2006): Estimation of Interdecadal Change of Spring Bloom Timing; in the Case of the Japan Sea, *Geophysic. Res. Lett.*, **33**, L02608, doi:10.1029/2005GL024792.

## Chlorophylla Distribution in Toyama Bay, Japan, during 1998 and 1999 as observed by Ocean Color Satellite

Mina Onishi <sup>†</sup>, Joji Ishizaka <sup>‡</sup>, Issei Kasahara <sup>\*\*</sup>, Hiroshi Nagata <sup>††</sup>  
Hajime Shirayama <sup>‡‡</sup>, Isamu Uchiyama <sup>\*\*\*</sup>, and Genki Terauchi <sup>†††</sup>

### Abstract

In order to show the usefulness of ocean color satellite data, chlorophylla concentrations in Toyama Bay, Japan, during 1998 and 1999 were observed by an ocean color satellite sensor, SeaWiFS, and were analyzed. Spring and fall blooms were observed at the outside and inside of the bay, and it is expected that these blooms were related to the thermal stratification as observed in the Japan Sea. On the other hand, satellite-measured chlorophylla (satellite chlorophyll) concentration at the head of the bay did not decrease during summer, and the distribution pattern was similar to that of low salinity water. This indicates that the high satellite chlorophyll during summer was related to the input of nutrients by freshwater, such as river flow. Anti-cyclonic flow patterns were observed with the short-term changes of the satellite chlorophyll distribution, and inflow of the Tsushima warm current could have sporadically carried out the high satellite chlorophyll water from the head of the bay to its outside. However, comparable *in situ* chlorophylla data for quantitative analysis were not abundant, and must be carefully used for further verification of the concentration.

**Key words:** Toyama Bay, Japan Sea, ocean color satellite, SeaWiFS, chlorophyll, phytoplankton, remote sensing

(Corresponding author's e-mail address: ishizaka@nagasaki-u.ac.jp)

(Received 9 September 2005; accepted 20 September 2006)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2007)

<sup>†</sup> Faculty of Fisheries, Nagasaki University. Present address: Ocean Family Marine and Nature Activity Center. 683 Isshiki, Hayama, Miura, Kanagawa 240-0111, Japan

<sup>‡</sup> Faculty of Fisheries, Nagasaki University, 1-14 Bunkyo, Nagasaki 852-8521, Japan

<sup>\*\*</sup> Faculty of Science, Toyama University, 3190 Gofuku, Toyama 930-8555, Japan

<sup>††</sup> Seikai National Fisheries Research Institute, 1551-8 Taira, Nagasaki 851-2213 Japan

<sup>‡‡</sup> Northwest Pacific Region Environmental Cooperation Center. Present address: Faculty of Social-Human Environmentology, Daito Bunka University, 1-9-1 Takashimadaira, Itabashi, Tokyo 175-0082, Japan

<sup>\*\*\*</sup> Northwest Pacific Region Environmental Cooperation Center. Present address: Toyama Prefectural Fisheries Research Institute, 364 Takatsuka, Namerikawa, Toyama 936-8536, Japan

<sup>†††</sup> Northwest Pacific Region Environmental Cooperation Center, 5-5 Ushijimashin-machi, Toyama 930-0856, Japan