

平成21年 6月 1日現在

研究種目：若手研究（スタートアップ）  
 研究期間：2007-2008  
 課題番号：19810029  
 研究課題名（和文）：極域海洋における衛星と船舶観測を組み合わせた植物プランクトン群集分類手法の開発  
 研究課題名（英文）：Development of phytoplankton functional group classification technique using remote sensing and *in situ* optical observation in the polar ocean  
 研究代表者  
 飯田 高大（IIDA TAKAHIRO）  
 国立極地研究所・研究教育系・助教  
 研究者番号：90455189

## 研究成果の概要：

本研究は地球温暖化の鍵を握る大気中の二酸化炭素濃度上昇を予測する上で重要となる海洋二酸化炭素吸収量を推定する基礎研究として、時空間的な海洋植物プランクトン群集の変動を人工衛星データから推定する研究を行った。その結果、ベーリング海ではこの10年で、円石藻類の増加から減少へ転じたことが認められ、その要因は主として底層水が温まったことによる表層への栄養塩供給が原因であったことが明らかになった。また、両極域で得られた植物プランクトン色素及び顕微鏡観察データを解析し、氷縁と沖合域での植物プランクトン種組成が空間的に異なっていることが示された。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,370,000	0	1,370,000
2008年度	1,340,000	402,000	1,742,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,710,000	402,000	3,112,000

研究分野：衛星海洋学

科研費の分科・細目：環境学・環境動態解析

キーワード：海色リモートセンシング・極域海洋・植物プランクトン機能種

## 1. 研究開始当初の背景

産業革命以来増え続け、地球温暖化の地球温暖化の鍵を握る大気中の二酸化炭素の濃度は上昇を続けている。この二酸化炭素の上昇を予測する上で現在最も重要とされているのは、大気から海洋・海洋から大気への炭素循環である。この大気・海洋における炭素循環は、海洋表層の光合成による基礎生産と、炭酸カルシウム形成を形成する植物プランクトン群衆による炭素固定により左右される。特に円石藻類による炭酸カルシウムの形

成は、表層海水中的アルカリ度を低下させ、海面における二酸化炭素分圧の増加を引き起こし、今までケイ藻類による高い基礎生産力のため二酸化炭素の吸収域とされてきた極域海洋が放出域に変化する可能性がある。このため、ケイ酸塩殻をもつ植物プランクトン群集と炭酸塩殻をもつ植物プランクトン群衆の量と比を時空間的に定量化することは、炭素循環を把握するために非常に重要である。近年の研究では植物プランクトン群集の変動により、大西洋では  $Opal/CaCO_3$  比の減少が報告されている (Deuser et al., 1995;

Antia et al., 2001)。

世界の海洋表層における基礎生産変動や物質循環に関する研究は GLOBEC (Global ocean Ecosystems dynamics) や、近年では海洋表層における大気と海洋の相互作用に関連して SOLAS (Surface Ocean - Lower Atmosphere Study) を初めとした国際共同プロジェクトにより活発に研究されている。しかしながら、植物プランクトン群集の時空間変動の違いによる炭素固定作用の変動については未解明である。特に円石藻類は突発的な大発生が確認されており、ベーリング海やバレンツ海、北海などの極域海洋でしばしば 10 万 km<sup>2</sup> にも及ぶため、その炭素循環への影響は無視できないと考えられる。

以上のような背景から、申請者はベーリング海において発生した大規模な円石藻類ブルームの範囲とその発生要因を解明するために人工衛星画像データを中心に解析を行い、その経年変動などを明らかにした (Iida et al., 2002)。しかしながら、その後の研究により検出したブルームには珪藻などの他の藻類が混在していることが明らかとなり、より精度の高いアルゴリズムの開発が課題として残されている (Broerse et al., 2003)。

## 2. 研究の目的

植物プランクトン群衆の違いによる炭素循環への影響を評価することは非常に重要である。特に高緯度海域で特異的かつ頻繁に大発生が報告されている円石藻類の増殖は、今までケイ藻類の高い基礎生産力により、二酸化炭素の吸収域であった海洋が放出域に変わることになり、近年大きな問題となっている大気中の二酸化炭素濃度の上昇にさらなる大きなインパクトを与える。加えて、円石藻類は大気の温室効果を促す DMS(P) が多量に放出されることから温暖化を促進する可能性がある。

海色衛星データの解析により、クロロフィル *a* 濃度や基礎生産量の地球規模の時空間変動は明らかにされつつあるが、植物プランクトンの群集レベルでの時空間変動を追跡した研究は少なく、その変動の過程など十分に明らかになっていない。

近年では、円石藻類の大発生はその特異的な光学特性により人工衛星から比較的容易に識別することができ、様々な海域で報告されているが、濃度レベルでの分類アルゴリズムは開発されていない。本研究では、種が比較的単一であり植物プランクトン群集を類型しやすい極域海洋を例に、主に炭酸カルシウム殻を形成する円石藻類濃度と、珪藻類及びその他の小型植物プランクトン濃度を海色衛星による観測から分類するアルゴリズム

を開発することを目的とする。

## 3. 研究の方法

### (1) 海色衛星による円石藻類の変動解析

米国 NASA により受信され蓄積されている MODIS/AQUA のデータ検索及びクロロフィル *a* 濃度等の解析を行い、Iida et al. (2002) によるアルゴリズムによる円石藻類分布の検出を行い、円石藻類ブルームの次空間変動解析と、過去の海洋観測モニタリングデータを元に、ブルーム時空間変動とその要因に関する解析を実施した。本研究は特に顕著な円石藻類の大増殖が認められているベーリング海を例に解析を実施した。

### (2) 海洋観測による現場光学観測及び植物プランクトン分布調査

日本南極地域観測隊による第 49 次、第 50 次南極地域観測、東京海洋大学海鷹丸、海洋研究開発機構学術研究船白鳳丸における南極海航海、北海道大学練習船「おしよる丸」によるベーリング海及び北極海において、水中分光光度計 (Satlantic SMPR, Biosphere PRR-800) により水中光学観測を実施した。南極観測隊には申請者が乗船し、海鷹丸、白鳳丸、おしよる丸には共同研究者が乗船し、海洋環境、光学観測、植物プランクトン群集の各種データを得た。同航海において、多波長輝度計 (TriOS 社 RAMSES 放射照度/輝度計) を用いて海面光学観測を実施した。RAMSES 放射輝度計は船上に設置して上向き放射輝度と下向き放射照度を観測する測器であるが、この場合海面反射の影響を強く受けるため、植物プランクトン群集の違いによる微妙なスペクトルの違いは測定困難である。そのため、RAMSES 放射輝度計を設置できる海面漂流ブイを製作し、海面反射を無視できる設計とし、上向き海面輝度を可視光 1 nm 間隔の多波長で直接測定した。同時に植物プランクトンサンプルを CTD に設置されたニスキン採水器により取得した。植物プランクトンサンプルはクロロフィル *a* 濃度、植物プランクトン色素濃度、顕微鏡観察用サンプルの 3 種類の採集を行った。荒天等により CTD による採水が不可能な場合においても、表面海水は連続で採集した。また船上設置型の多波長輝度計も同時に設置し、漂流ブイによる観測が不能な場合においても連続観測を実施した。

### (3) 高速液体クロマトグラフ (HPLC) 及び顕微鏡観察による植物プランクトン群集の同定

植物プランクトン分類群の各種アンテナ

色素について HPLC を用いて解析を行った。研究期間中に実施した航海において、約 400 サンプルの植物プランクトン色素データを得た。さらに、植物プランクトン種を同定し検定を行うために、植物プランクトン顕微鏡サンプルについても採集し、100 サンプルの種同定を実施し、200 サンプルの採集を行った。植物プランクトン機能種の分類については CHEMTAX 法(Mackey et al., 1996)により解析を行った。

#### (4) 植物プランクトン群集分類アルゴリズムの開発と時空間変動解析

光学観測によって得られた多波長の観測データから MODIS において観測される波長の輝度から植物プランクトン群集推定のためのアルゴリズム開発を試みた。

### 4. 研究成果

#### (1) 海色衛星による円石藻類ブルームの時空間変動

はじめに、ベーリング海を例に解析を実施した。同海域における晴天データを検索し、海色衛星データベースの構築を実施した。その結果、解析期間の 2008 年秋季までにおいて、約 1000 シーンの解析を実施することができた。ベーリング海における円石藻類の光学特性は過去の研究 (Iida et al., 2002) によって明らかになっており、本研究では光学特性から、円石藻類ブルームの時空間変動を解析し、その変動要因を調べた。

円石藻類ブルームはベーリング海の Middle shelf と呼ばれる水深 40m から 100m の海域に一致して分布していた。またその分布は、近年は 1990 年代に比べ北側の海域に分布が拡大している傾向がみられた。時間的変動に注目し、各月における円石藻ブルームの面積変動を解析した結果を図 1 に示した。円石藻類ブルームは 1998 年や 2000 年のように約 20 万  $\text{km}^2$  にも及ぶような大規模に発生する年と、1999 年や 2001 年、2002 年のように 4 万  $\text{km}^2$  程度と小規模にとどまる年があり、季節変動に加え経年変動が存在する。特に近年、1998 年や 2000 年のような大規模なブルームはあまり見られなくなってきたことが明らかになった。

次に、1997 年から 2008 年における東部ベーリング海 166 度ラインの塩分、硝酸塩濃度断面図を調べた。円石藻類ブルームの発生は水深 40m から 100m の Middle shelf であったことは前述したが、Middle shelf は海底に冬の冷却と風による混合に伴う非常に冷たい ( $3^{\circ}\text{C}$  以下) 水が分布し、顕著な温度躍層が

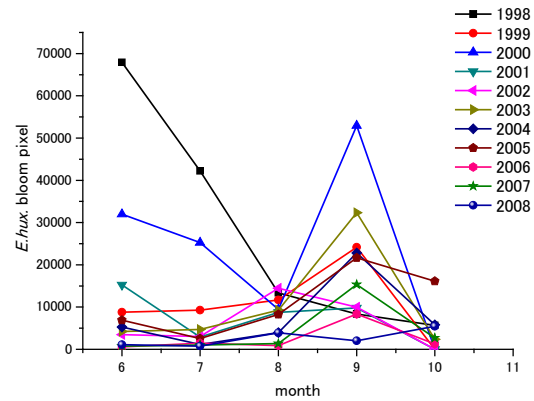


図 1 ベーリング海における円石藻類ブルームの面積変動

発達することが知られている。この温度躍層は春から夏にかけて発達し、下層からの栄養塩の供給を極度に制限している。そのため、表層に存在する栄養塩は植物プランクトンにより消費され、硝酸  $1.0 \mu\text{M}$  以下、リン酸  $0.7 \mu\text{M}$  以下、ケイ酸  $10 \mu\text{M}$  以下と非常に低濃度となっている (田中, 2003)。円石藻類はこのような貧栄養下でも増殖に強いことが過去の研究より明らかとなっている (Egge and Heimdahl, 1994)。したがって、この貧栄養塩環境もブルームの一つの重要な条件と考えられる。また、この温度躍層の発達に伴う円石藻ブルームの発生は黒海などの研究でも知られている (Cokacar et al., 2001)。特に 1997 年は春から夏にかけて表面水温が  $10^{\circ}\text{C}$  を超えており、円石藻類ブルーム発生のきっかけとなった可能性がある。

また、1997 年以降の暖かい年 (表層水温が  $10^{\circ}\text{C}$  以上) では、水温・密度躍層が水深約 20m 付近と浅くなっていた。1997 年以降、亜表層にある 32psu の等塩分線が Inner Shelf の方へと北上していることがわかる。また  $55^{\circ} \sim 56^{\circ}\text{N}$  付近に着目すると、33psu を超える高塩分水が 1998 年以降観測されていた。この高塩分水は北太平洋に由来しており、栄養塩濃度が高い。最近、冷水塊の北上が報告されており、さらに  $57^{\circ} \sim 57.5^{\circ}\text{N}$  付近では上に凸の形で 32psu の等塩分線が観測される傾向にある。このことは、近年は嵐イベントなど、なんらかの要因による鉛直方向の水塊移動が起こりやすくなっていることが予想される。一方、硝酸・亜硝酸塩濃度分布を見ると、1998 年以降では 2003 年を除いて Inner shelf の密度躍層直下で  $2.5 \mu\text{M}$  以上の値が見られるようになった。

以上まとめると、円石藻類のブルーム発生のきっかけはエルニーニョ現象により水温が突発的に上昇し、躍層が非常に発達したことにより発生と推測される (Iida et al. 2002)。6 月のブルーム維持機構としては、早

い時期に珪藻ブルームが発生し、その後成層化が発達して、表層の栄養塩が特に枯渇環境になる場合に起こる。また、近年は円石藻類ブルーム面積が減少傾向にあるが、このことは冷水塊の北上に伴って、南東ベーリング海の成層化が弱まりつつあり、storm イベントによって栄養塩が表層に供給されやすい環境にあるため、円石藻類よりもケイ藻類が増殖しやすい環境になったことが推察される。

## (2) 海洋観測による植物プランクトン分布と海洋環境

植物プランクトンサンプルの HPLC 色素分析及び顕微鏡観察を行い、植物プランクトン機能種の地理的分布を調べた。本研究中に得た南極リュッツホルム湾海域における植物プランクトン資料が得られた観測点を図2に示した。

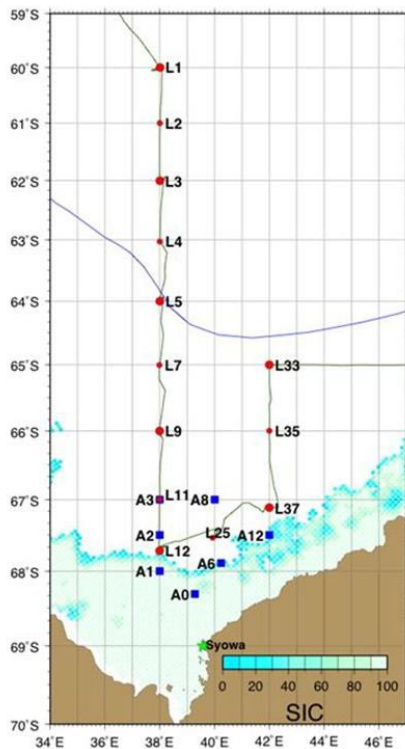


図2 海鷹丸及びオーロラオーストラリス号によるリュッツホルム湾域観測点

上記観測点における色素分析及び CHEMTAX 法による機能種分類の結果、夏季の南大洋ではハプト藻類とケイ藻類が優占しており、一部ではクリプト藻類が見られた。海水縁辺でも同様に、ハプト藻類優占海域とケイ藻類優占海域に分類された。種を同定するために顕微鏡観察を行った結果、ハプト藻類は円石藻類ではなく、主として *Phaeocystis sp.* であることが明らかになった。ケイ藻類は様々な種が存在していたが、*Thalassiosira sp.* や

*Fragilariopsis sp.* の存在量が大きかった。本種は過去の知見からアイスアルジー由来と考えられ、氷縁付近では植物プランクトン群集が空間的に異なる分布をしていることが明らかになった。

## (3) 光学観測による光学特性解析

第49次日本南極地域観測隊による「しらせ」航海では、海面反射を無視できるような海面漂流ブイを考案、制作し、1nmごとの海面上向き放射輝度スペクトルを南極海の20観測点で得た。また北極海でも同様に表層光学観測を実施した。

漂流ブイに設置したマルチスペクトルセンサーデータの解析を行った結果、氷縁付近と沖合域で440nmと510nm付近の正規化海面放射輝度(nLw)に海域による差が認められた(図3)。しかしながら、20点の観測結果のみではファジーによる分類には十分ではなく、定性的な分類に留まった。今後は本研究で習得した観測手法を他の海域でも観測を重ねることにより、より正確な濃度推定アルゴリズムを開発できるものとする。

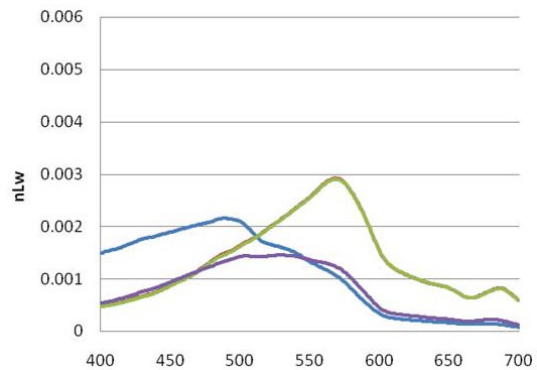


図3 漂流型多波長輝度計によって得られた正規化海面放射輝度値

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① Tukimat, L. S.-I. Saitoh, T. Iida, H. Hirawake and K. Iida, Satellite-measured temporal and spatial variability of the Tokachi River plume, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 78, 2, 237-456 (2008) 査読有
- ② 飯田高大、溝端浩平、齊藤誠一, ベーリング海における植物プランクトンの時空間変動-春季ケイ藻ブルームと夏季から

- 秋季の円石藻類ブルーム-, 月刊海洋, No. 50, 127-137, (2008) 査読無
- ③ 鈴木光次, 伊佐田智規, Hongbin Liu, 飯田高大, 夏季のオホーツク海および千島列島海域における基礎生産過程の特徴, 月刊海洋, No. 50, 99-106, (2008) 査読無
  - ④ 工藤栄, 田邊優貴子, 飯田高大, 辻本恵, 小川麻里, 伊村智, 第49次南極地域夏隊における湖沼観測, 南極資料, Vol. 52, No. 3, 421-436 (2008) 査読無
  - ⑤ Iida T. and S. Saitoh, Temporal and spatial variability of chlorophyll concentration in the Bering Sea using Empirical Orthogonal Function (EOF) analysis of remote sensing data, Deep Sea Research II, 54, 2657-2671 (2007) 査読有
  - ⑥ Jin M., C. Deal, J. Wang, V. Alexander, R. Gradinger, S. Saitoh, T. Iida, Z. Wan and P. Stabenon, Ice-associated phytoplankton blooms in the southeastern Bering Sea, Geophys. Res. Lett., 34, L06612 (2007) 査読有

[学会発表] (計 7 件)

- ① Iida T., N. Kasamatsu, T. Odate, M. Fukuchi, T. Hirawake, Long term variability of Chl-*a* and nutrient concentrations in the Southern Ocean using JARE monitoring datasets, Gordon Research Conference, March 2009, Lucca, Italy
- ② Iida T., N. Kasamatsu, T. Odate, M. Fukuchi, T. Hirawake, Long term variability of Chl-*a* and nutrient concentrations in the Southern Ocean using JARE monitoring datasets., XXXI Symposium on Polar Biology, December 2008, Tokyo, Japan
- ③ Iida T., K. Mizobata, M. Toratani, S. I. Saitoh, The relationship between the climate variability and development mechanisms of spatio-temporal *Emiliana huxleyi* blooms in the eastern Bering Sea shelf, First International Symposium on the Arctic Research (ISAR-1), November 2008, Tokyo, Japan
- ④ 飯田高大, 溝端浩平, 齊藤誠一, 南東ベーリング海陸棚域における円石藻類ブルームの時空間変動とその要因, 2008年度日本海洋学会秋季大会, 2008年9月, 広島
- ⑤ 飯田高大, ベーリング海における植物プランクトンの時空間変動, 東京大学海洋研究所共同利用研究集会, 2008年5月,

東京

- ⑥ Iida T., S.-I. Saitoh, T. Hirawake, Comparative study on temporal and spatial variability of chlorophyll-*a* concentration in the Okhotsk Sea and Bering Sea, XXX symposium on Polar Biology, November 2007, Tokyo Japan
- ⑦ Iida T., Comparative study on temporal and spatial variability of chlorophyll-*a* concentration in the Okhotsk and Bering Seas, Ecosystem Study of Subarctic Sea (ESSAS) Workshop, June 2007, Hakodate Japan

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

飯田 高大 (IIDA TAKAHIRO)  
国立極地研究所・研究教育系・助教  
研究者番号: 90455189

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし