

## オホーツク海における春季ブルームの動態把握と海氷との関係について

### Effect of Sea ice on spatial and temporal variation of spring bloom

#### in the Sea of Okhotsk

学籍番号 47-126663 榎野 誠

指導教員 山口 一 教授

(2014 年 2 月 3 日発表)

Keywords: 春季ブルーム, 海氷, 植物プランクトン, 気象, リモートセンシング

Keywords: spring bloom, sea ice, phytoplankton, weather, remote sensing

## 1. 序論

オホーツク海は北半球で最南端に位置する季節海氷域である。また、オホーツク海は生物生産性が非常に高い海として知られており、豊かな生態系が育まれている。その生産力を支えるために海氷は重要な役割を果たしていると考えられている。しかし近年の地球温暖化により海氷は減少傾向にあり、オホーツク海において海氷の減少が生態系に悪影響を与えるのではないかと危惧されている。

海洋中の植物プランクトン量には大きな季節変化が見られる。春から夏にかけて海面表層への日射量が増加すると、春季ブルームと呼ばれる植物プランクトンの大増殖が起こる (Fig. 1) (松本ほか, 2002[1])。オホーツク海の豊富な水産資源を維持するためには、春季ブルームが重要な役割を果たしていると考えられる。

海氷と春季ブルームの関係については、ベーリング海や極域において多く研究がなされている。海氷融解による塩分成層が発達し、栄養塩が表層に留まる事によりブルームが発生し、日射量が大きいとブルームが時空間的に大きくなる (Niebauer et al., 1990[2])。また、日射量増加に伴う温度成層によってもブルームは発生する。さらにブルーム前の風が強いとブルームが遅れて発生する事等が観測されている (M. A. Musatapha and S. Saitoh, 2008[3])。しかしオホーツク海を対象とした春季ブルームの研究は少なく、加えて、春季ブルームに対する海氷の役割は明確にはなっていない。

本研究では 2003 年から 2011 年までの 9 年間の植物プランクトン量データを用い、海氷、気象・海洋要素との関係について解析を行う。生態系の下位に属する植物プランクトン量の変動に着目する事により、春季ブルームの特徴を明らかにし、海氷や気象等との関係について究明する。

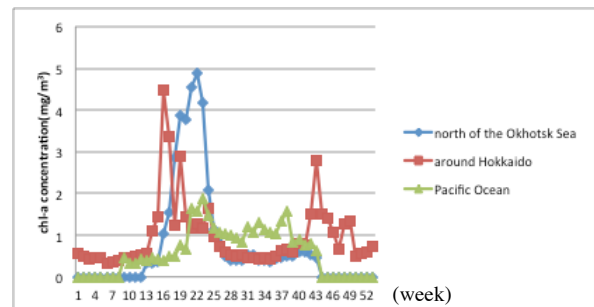


Fig. 1 Seasonal variability of Chl-a concentration

## 2. 使用データ

### 2.1 植物プランクトン濃度の人工衛星観測

人工衛星による観測は、広範囲での時空間変化の観測のために有用である。植物プランクトン量のデータとしては、光合成を行う全ての植物プランクトンに含まれる色素クロロフィル a(以下: Chl-a)の濃度を用いるのが一般的であり、現在までに様々な衛星が観測を行い、データを蓄積してきた。本研究では、現在も運用中であり、データ量の豊富な MODIS(中分解能撮像分光放射計: 1999 年から現在まで運用中)の衛星観測データを用いた(2125×2783 グリッド, 解像度: 約 0.012° × 0.009°)。また、同じスケールで比較するために、全てのデータセットを 85×111 グリッド(解像度: 約 0.29° × 0.22°)の緯度経度座標系に変換して解析を行った (Fig. 2)。

検証のための現場観測データとしては 2003 年から 2008 年にかけての日本海洋データセンター (JODC) [4] と北海道区水産研究所 (北水研) [5] のデータを用いた。

### 2.2 海氷・気象・海洋データ

海氷密接度はアメリカの National Snow and Ice Data Center (NSIDC) [6] が配布する Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I) のデータを用い (解像度: 25km), 海氷生成/消滅量は中野 (2013) [7] において、海氷密接度と海氷漂流速度から計算されたものをを用いる (解像度: 37.5km)。海氷密接度と

海氷生成量・消滅量はポーラステレオ座標系で表されている．ポーラステレオ座標系から緯度経度座標系への変換には NSIDC が公開するプログラムを用いて，変換後の各グリッドが変換前のどのグリッドに当たるかを計算して対応させた．そして，海氷生成量・消滅量に関しては変換後のグリッドの中には複数の変換前のグリッドが入る事があるので面積比重で計算した．

気象・海洋データとして，European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) [8] が公開する ERA-interim 再解析データの光合成有効放射量 (PAR)，気温，風速を用いる．解像度は  $0.25^\circ$  である．海面水温 (SST) に関しては改良型高性能マイクロ波放射計 (AMSR-E) による観測データから National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) [9] が最適内挿法により計算した，解像度  $0.25^\circ$  のデータを用いる．また，解像度約  $0.29^\circ \times 0.22^\circ$  の緯度経度座標系への変換でも，海氷の場合と同様に面積比重で計算した．

### 3. 衛星観測データの評価

MODIS による Chl-a 濃度の衛星観測データには NASA が処理しているものと JAXA が処理しているものがあり，それぞれの処理により算出される値が異なる．さらに MODIS が搭載されている Aqua と Terra の違いによってもセンサーの劣化状況や観測波長の入射角等の差から値が変わる．これらのデータの精度を検証するために，Chl-a 濃度の現場観測データと衛星観測データを比較した．まず，JODC による 2003～2008 年における日本近海の表層観測データ 1582 個を用いて比較を行った．

JAXA が処理した衛星観測データは  $100\text{mg}/\text{m}^3$  近くになるような異常値が多く含まれている．一方，NASA が処理した衛星観測データは異常値が少ない．これらの異常値を除去し，現場観測データと比較した結果，NASA が処理した衛星観測データは Aqua, Terra それぞれ  $0.71$  ( $N=181$ ),  $0.71$  ( $N=175$ ) と，相関係数は JAXA の場合に比べて高くなった．これは JAXA の衛星観測データが NASA に比べて，大気補正の際の雲判別が甘い事に起因すると考えられる．

次に北水研の現場観測データと比較した．北水研ではオホーツク海において 2003～2008 年にかけて表層観測データ 133 個の現場観測データがある．現場観測データと比較した結果，NASA が処理した Terra の衛星観測データと現場観測データが非常に高い相関を示し，相関係数は  $0.86$  ( $N=28$ ,  $\text{RMSE}=0.354$ ) でバラツキも小さい．Table 1 に現場観測データと衛星観測データの相関係数をまとめた．

Table 1 Correlations between Satellite data and observed data

	NASA /Aqua	NASA /Terra	JAXA /Aqua	JAXA /Terra
JODC	0.71	0.71	0.42	0.33
北水研	0.48	0.86	0.37	0.36

衛星観測データは雲がかかると見えなくなるなど欠損値が非常に多く，全てのエリアをカバーする事が難しい．そこで，JODC の現場観測データとの相関の高さも考慮すると，本研究では NASA/Terra のデータを元に，NASA/Aqua のデータで足りないグリッドを補うという方法で Chl-a 濃度のデータセットとするのが望ましいと判断した．今回の研究対象エリアは北緯  $40^\circ \sim 65^\circ$ ，東経  $140^\circ \sim 165^\circ$  であり，それに対応する解像度約  $0.012^\circ \times 0.009^\circ$  の Chl-a 濃度データセットを作成した．現場観測データとの相関係数は  $0.62$  ( $N=41$ ,  $\text{RMSE}=1.082$ ) だった．

### 4. 春季ブルームと海氷・気象要素との関係

#### 4.1 春季ブルームの空間分布と経年変化

本研究では，春季ブルームの強さと発生日に着目し，解析を行った．Fig. 2 は 2003～2011 年までの 9 年間における春季ブルーム時の Chl-a 濃度の平均値を示したものである．春季ブルーム時に Chl-a 濃度が比較的高い海域は沿岸部や湾内などのオホーツク海周縁部で，Chl-a 濃度が  $5\text{mg}/\text{m}^3$  以上である．太平洋におけるブルームはかなり弱く，Chl-a 濃度が  $2\text{mg}/\text{m}^3$  以下．オホーツク海中央部は比較的弱く  $5\text{mg}/\text{m}^3$  以下である．一方，Fig. 2 右図は春季ブルーム発生日の 9 年間の平均値を示したものである．ここでは 2 月から 7 月の間で各グリッドにおいて Chl-a 濃度が最大値を記録した日を春季ブルーム発生日とした．3 月の終わり頃から早い場所ではブルームが発

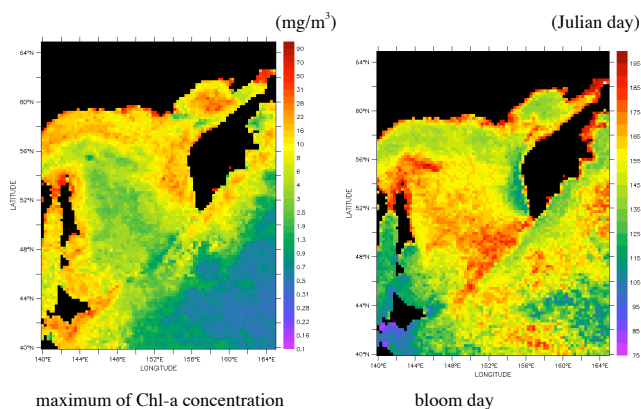


Fig. 2 Spring bloom

生し始める．4 月になるとオホーツク海南部やカムチャツカ半島西岸沖でブルームが発生し，5 月になるとオホーツク海北部に広がっていく．6 月には樺太北部周辺やオホーツク海中央部でもブルームが発生する．また，春季ブルームの強さとその発生日は年によって大きく異なるが，春季ブルームがオホーツク海全体で強い年や弱い年があるわけではなく，数百 km スケールで年々変動している．一方で，ブルーム発生日に関しては，もっと大きい 1000km スケールで変動している．

#### 4.2 海氷と春季ブルームの関係

海氷に覆われる樺太東岸沖を A2 エリア，覆われない海域のカムチャツカ半島西岸沖を C2 エリアとした．Fig. 3 はこの二つのエリアでの春季ブルーム発生時の Chl-a 濃度最大値と春季ブルームの発生日の経年変化を示したものである．春季ブルームの強さ・発生日共に A2・C2 エリアの経年変化が類似している．つまり，海氷状況の年変化は春季ブルームに影響していないと考えられる．Fig. 3 下図では，海氷はブルームの発生を遅らせている事も見られた．

#### 4.3 SST と春季ブルームの関係

2003～2011 年における，3 月から 6 月における SST の月平均値とブルーム発生日の相関を計算すると，ほとんどの海域で負の相関が卓越しており，特にブルームの強いエリアでは顕著である．つまりブルーム直前の SST が高いとブルームは早まる．しかしながら，海氷に覆われる海域とそれ以外の海域との間には目立った違いは見受けられなかった．

#### 4.4 光と春季ブルームの関係

3 月から 6 月における PAR の月平均値と春季ブルーム発生日の相関係数を計算した．ブルームが強い海域に絞ると，カムチャツカ半島周辺や樺太・北海道周辺で，負の相関が見られた．しかし，有意水準 5% で検定を行った結果，ほとんどの海域でこの相関は有意ではなかった．

#### 4.5 風と春季ブルームの関係

Fig. 4 は 3 月から 6 月における風速の月平均値とブルーム発生日の相関である．3 月の風速との間には強い正の相関が見られる．4 月になると相関係数自体が小さくなるが，5 月から 6 月にかけては強い正の相関が北部にも広がる．ブルームが強い海域に着目すると，3 月は南部から中部を中心に，5・6 月は北部を中心に強い正の相関が卓越している．以上より，ブルーム発生の前 1 ヶ月以上という長いタイムスケールで風が強いほどブルームが遅れる傾向が見られた．つまり，風速はブルーム発生日に大きな影響を及ぼしている．

3 月の強い相関係数に着目すると，ブルーム発生が早い北海道沖では風速が 1m/s 速くなるとブルーム発生日は約 20 日遅くなる事がわかった．さらに，ブルーム発生が遅いオホーツク海中央部でも同様の関係が見られた．つまり 3 月の風速は，春季ブルームの発生日に強い影響を与えていると考えられる．しかしながら，ブルーム発生が遅いエリアでも 3 月の風速がブルーム発生日に影響を与えるメカニズムについては不明である．

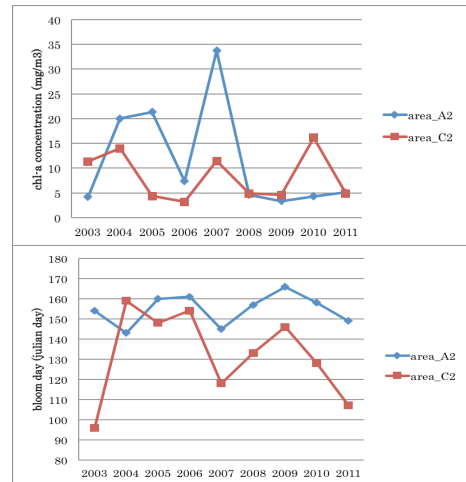


Fig. 3 Interannual variability of spring bloom

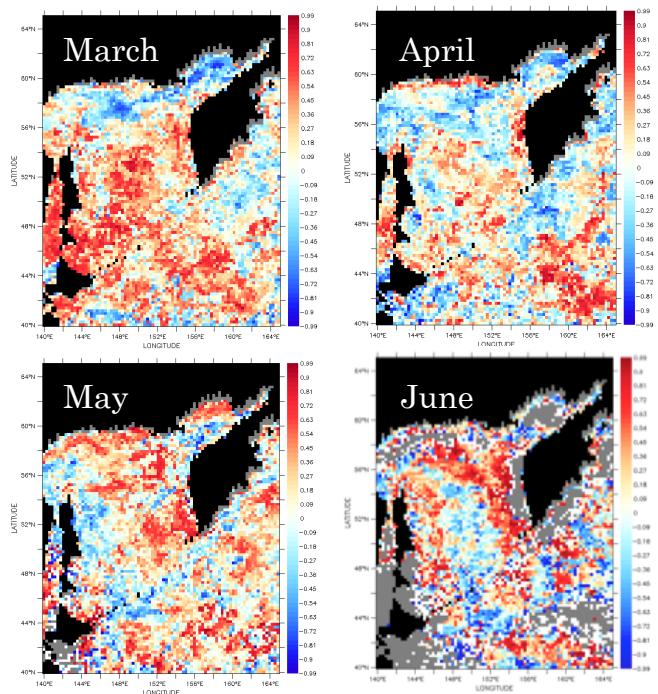


Fig. 4 Correlation between wind and bloom day

## 5. 結論

### 5.1 まとめと考察

本研究では、人工衛星によって観測される Chl-a 濃度のデータを用いて、春季ブルームの時空間分布の把握を行い、海氷・気象要素等との関係についても解析を行った。以下、結果をまとめる。

#### 1. 春季ブルームの強さと発生日の経年変化

オホーツク海では沿岸域での春季ブルームが 9 年間平均で  $5\text{mg}/\text{m}^3$  以上であった。ブルームの強さに関しては、数百 km のスケールで経年変化が見られた。一方、ブルームの発生日に関しては、オホーツク海全体スケールの 1000km という大きなスケールでの経年変化が見られた。

#### 2. 海氷は春季ブルームの発生を制限する

海氷状況の年変化は春季ブルームに影響を与えないが、海氷の存在がブルームの発生を遅らせる。

#### 3. ブルーム直前の SST はブルームの発生に影響を与える

春季ブルーム発生前の 1 ヶ月以内の SST が平年より高いとブルームが早まる。SST が高くなると、植物プランクトンの増殖速度が上がり、さらに温度成層が発達するのでブルームが起こりやすくなると考えられる。一方で光に関しては、春季ブルームとの間にあまり有意な関係が見られなかった。

#### 4. 風速が大きいとブルームの発生が制限される

春季ブルーム発生前の 1 ヶ月以上の長いタイムスケールでは風速が大きいとブルームが遅れる。海氷に覆われる海域では、3 月から 6 月にかけて風速がほとんど変動しない。その中で風が強まる事は、表層付近を攪拌し、成層化を弱める働きを担っている。成層化が弱まれば、植物プランクトンが表層付近で光や栄養塩を効率的に受け取る事が出来なくなるので、増殖スピードが上がらない。このような理由でブルームが遅れると考えられる。

本研究では、オホーツク海の家氷に覆われた海域と覆われていない海域の比較から、海氷の存在が春季ブルームを遅らせている事がわかった。一方で、春季ブルームの強さに対しては影響が見られなかった。つまり、地球温暖化による海氷の減少が生態系に与える影響は、植物プランクトン量の観点から言えば、小さいと考えられる。

### 5.2 課題と提言

継続的な衛星観測と現場観測データの充実が必要である。それを元に Chl-a 濃度の推定アルゴリズムを改良し、欠損値を補えるような新たな手法の開発が望まれる。また、栄養塩データや海洋鉛直構造のデータを用いる事で、本研究で明らかになった春季ブルーム発生を前後させるメカニズムの裏付けを行う事が出来ると考えられる。

### 謝辞

本研究では、NASA の OceanColor WEB[10]と JAXA の地球観測研究センター(EORC)[11], NSIDC[6], ECMWF[8], NOAA[9]の公開データを利用しました。ありがとうございました。

### 参考文献

- [1] 松本千鶴, 齊藤誠一, 若土正暁: オホーツク海南西部における春季ブルームの経年変化 -衛星マルチセンサーリモートセンシングによるアプローチ-, 月刊海洋, 号外 No.30, 145-151, 2002
- [2] Niebauer, H.J. V.Alexander and S.Henrichs : Physical and Biological Oceanographic Interaction in the Spring Bloom at the Bering Sea Marginal Ice Edge Zone, Journal of Geophysical Research, Vol.95, 22229-22241, 1990
- [3] M.A. Mustapha and S.-I. Saitoh : Observations of sea ice interannual variations and spring bloom occurrences at the Japanese scallop farming area in the Okhotsk Sea using satellite imageries, Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol. 77, 577-588, 2008
- [4] <http://www.jodc.go.jp>
- [5] <http://hnf.fra.affrc.go.jp/n-line/index.html>
- [6] <http://nsidc.org>
- [7] 中野佑哉 : 卒業論文, 東京大学大学院 (2013 年)
- [8] <http://www.ecmwf.int>
- [9] <http://www.noaa.gov>
- [10] <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>
- [11] [http://kuroshio.eorc.jaxa.jp/ADEOS/mod\\_nrt/](http://kuroshio.eorc.jaxa.jp/ADEOS/mod_nrt/)