

東京大学 大学院  
新領域創成科学研究科  
海洋技術環境学専攻

## 修士論文

# 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

平成 26 年 1 月 27 日提出

47-126663 榎野 誠

指導教員 山口 一

# 目次

|                                     |           |
|-------------------------------------|-----------|
| <b>第1章 序論</b> .....                 | <b>5</b>  |
| 1.1. 研究背景.....                      | 5         |
| 1.2. 先行研究.....                      | 7         |
| 1.3. 研究目的.....                      | 9         |
| <br>                                |           |
| <b>第2章 使用データ</b> .....              | <b>10</b> |
| 2.1. 植物プランクトン濃度の人工衛星観測 .....        | 10        |
| 2.2. MODIS .....                    | 10        |
| 2.3. 海氷・気象・海洋データ .....              | 13        |
| <br>                                |           |
| <b>第3章 衛星観測データの評価</b> .....         | <b>18</b> |
| 3.1. JODC 現場観測データとの比較 .....         | 18        |
| 3.2. 北水研の現場観測データとの比較 .....          | 30        |
| 3.3. 植物プランクトン濃度のデータセット .....        | 33        |
| <br>                                |           |
| <b>第4章 春季ブルームと海氷・気象要素との関係</b> ..... | <b>35</b> |
| 4.1. 春季ブルームの空間分布と経年変化 .....         | 35        |
| 4.2. 海氷と春季ブルームの関係 .....             | 39        |
| 4.3. 気温と春季ブルームの関係 .....             | 48        |
| 4.4. 海面水温と春季ブルームの関係.....            | 56        |
| 4.5. 光と春季ブルームの関係 .....              | 65        |
| 4.6. 風と春季ブルームの関係 .....              | 73        |
| <br>                                |           |
| <b>第5章 結論</b> .....                 | <b>89</b> |
| 5.1. まとめと考察 .....                   | 89        |
| 5.2. 今後の課題 .....                    | 91        |
| <br>                                |           |
| <b>参考文献</b> .....                   | <b>92</b> |
| <br>                                |           |
| <b>謝辞</b> .....                     | <b>95</b> |

# 図表目次

|   |    |
|---|----|
| 図 1-1. 2006/2007 年冬の海氷分布の推移   | 5  |
| 図 1-2. 紋別沿岸の海氷の様子 (2013/02/20 撮影)   | 6  |
| 図 1-3. オホーツク海における海氷域面積の経年変化 (出典: 気象庁 HP)  | 6  |
| 図 1-4. クロロフィル a 濃度の月平均値<br>(2000-2013 年平均値/MODIS・Terra) (出典: OceanColor WEB HP) | 7  |
| 図 1-5. Chl-a 濃度の 7 日間平均値の季節変化 (2003-2011 年平均値)                                  | 7  |
| 図 1-6. Ice edge bloom と open water bloom の違い (出典: 松本ほか, 2002)                   | 9  |
|   |    |
| 図 2-1. 人工衛星 Terra・Aqua (出典: JAXA HP)  | 12 |
| 図 2-2. ポーラーステレオ座標系で表された海氷密接度分布  | 13 |
| 図 2-3. 海氷密接度の座標変換   | 14 |
| 図 2-4. 海氷消滅量の座標変換   | 14 |
| 図 2-5. 解像度 $0.25^\circ$ から解像度約 $0.29^\circ \times 0.22^\circ$ への変換 (SST)        | 15 |
| 図 2-6. SST の座標変換  | 16 |
|   |    |
| 図 3-1. 2003 年 5 月 10 日における Chl-a 濃度の空間分布の違い                                     | 19 |
| 図 3-2. JODC による観測地点一覧   | 20 |
| 図 3-3-1. 現場観測データと衛星観測データの関係 (JODC・JAXA/Aqua)                                    | 21 |
| 図 3-3-2. 現場観測データと衛星観測データの関係 (JODC・JAXA/Terra)                                   | 21 |
| 図 3-4. 2007 年 10 月 15 日における Chl-a 濃度 (JAXA/Terra)                               | 22 |
| 図 3-5-1. 現場観測データと衛星観測データの関係 (JODC・JAXA/Terra) (異常値除去)                           | 23 |
| 図 3-5-1. 現場観測データと衛星観測データの関係 (JODC・JAXA/Terra) (異常値除去)                           | 23 |
| 図 3-6-1. 現場観測データと衛星観測データの関係 (JODC・NASA/Aqua)                                    | 25 |
| 図 3-6-2. 現場観測データと衛星観測データの関係 (JODC・NASA/Terra)                                   | 25 |
| 図 3-7. 2008 年 11 月 4 日における Chl-a 濃度の空間分布  | 26 |
| 図 3-8. 2008 年 11 月 5 日における Chl-a 濃度の空間分布  | 27 |
| 図 3-9-1. 現場観測データと衛星観測データの関係 (JODC・NASA/Aqua) (異常値除去)                            | 28 |
| 図 3-9-2. 現場観測データと衛星観測データの関係 (JODC・NASA/Terra) (異常値除去)                           | 28 |
| 図 3-10-1. 現場観測データと衛星観測データの関係 (JODC・NASA/Terra)                                  | 29 |
| 図 3-10-2. 現場観測データと衛星観測データの関係 (JODC・JAXA/Terra)                                  | 29 |
| 図 3-11. 北水研による観測地点一覧 (出典: 北水研 HP)   | 30 |
| 図 3-12-1. 現場観測データと衛星観測データの関係 (北水研・NASA/Aqua)                                    | 31 |
| 図 3-12-2. 現場観測データと衛星観測データの関係 (北水研・NASA/Terra)                                   | 31 |

|   |    |
|---|----|
| 図 3-13-1. 現場観測データと衛星観測データの関係 (北水研・ JAXA/Aqua).....  | 32 |
| 図 3-13-2. 現場観測データと衛星観測データの関係 (北水研・ JAXA/Terra).....   | 32 |
| 図 3-14. 現場観測データと衛星観測データの関係<br>(北水研・解像度約 $0.012^{\circ} \times 0.009^{\circ}$ ).....                                   | 33 |
| 図 3-15. 2004 年 5 月 27 日における Chl-a 濃度.....   | 34 |
| 図 4-1. 春季ブルーム時の Chl-a 濃度の 9 年間平均値(2003~2011 年).....   | 35 |
| 図 4-2. 春季ブルーム発生日の 9 年間平均値(2003~2011 年).....   | 36 |
| 図 4-3. 春季ブルームの強さの偏差(a:2003 年, b:2004 年, c:2005 年, d:2006 年,<br>e:2007 年, f:2008 年, g:2009 年, h:2010 年, i:2011 年)..... | 37 |
| 図 4-4. 春季ブルーム発生日の偏差(a:2003 年, b:2004 年, c:2005 年, d:2006 年,<br>e:2007 年, f:2008 年, g:2009 年, h:2010 年, i:2011 年)..... | 38 |
| 図 4-5. 海氷密接度と漂流速度を用いた海氷生成量の計算方法(出典:中野(2013))....  | 39 |
| 図 4-6. 海氷融解量と春季ブルームの強さの相関.....  | 40 |
| 図 4-7. 海氷融解量と春季ブルーム発生日の相関.....  | 41 |
| 図 4-8. 海氷密接度と Chl-a 濃度の日変化.....   | 42 |
| 図 4-9. 海氷後退日と春季ブルームの強さの相関.....  | 43 |
| 図 4-10. 海氷後退日と春季ブルーム発生日の相関.....   | 44 |
| 図 4-11. 春季ブルームの強さと発生日の相関.....   | 45 |
| 図 4-12. エリア A2 と C2.....  | 46 |
| 図 4-13. 春季ブルームの強さと発生日の関係.....   | 47 |
| 図 4-14. 春季ブルームの強さの経年変化.....   | 47 |
| 図 4-15. 春季ブルーム発生日の経年変化.....   | 48 |
| 図 4-16. 気温の偏差と春季ブルームの強さの関係(下段:ブルームが強い海域のみ)...   | 49 |
| 図 4-17. 気温の偏差と春季ブルーム発生日の関係(下段:ブルームが強い海域のみ)...   | 50 |
| 図 4-18-1. 月平均気温と春季ブルームの強さの関係.....   | 51 |
| 図 4-18-2. 月平均気温と春季ブルームの強さの関係(ブルームが強い海域のみ).....  | 52 |
| 図 4-19-1. 月平均気温と春季ブルーム発生日の関係.....   | 54 |
| 図 4-19-2. 月平均気温と春季ブルーム発生日の関係(ブルームが強い海域のみ).....  | 55 |
| 図 4-20. SST の偏差と春季ブルームの強さの関係(下段:ブルームが強い海域のみ)...   | 57 |
| 図 4-21. SST の偏差と春季ブルーム発生日の関係(下段:ブルームが強い海域のみ)...   | 58 |
| 図 4-22. SST の偏差と春季ブルーム発生日の関係(有意水準:5%).....  | 59 |
| 図 4-23-1. 月平均 SST と春季ブルームの強さの関係.....  | 60 |
| 図 4-23-2. 月平均 SST と春季ブルームの強さの関係(ブルームが強い海域のみ).....   | 61 |
| 図 4-24-1. 月平均 SST と春季ブルーム発生日の関係.....  | 62 |
| 図 4-24-2. 月平均 SST と春季ブルーム発生日の関係(ブルームが強い海域のみ).....   | 63 |

|  |    |
|--|----|
| 図 4-25. 月平均 SST と春季ブルーム発生日の関係(有意水準：5%).....                | 64 |
| 図 4-26. PAR の偏差と春季ブルームの強さの関係(下段：ブルームが強い海域のみ) ...           | 66 |
| 図 4-27. PAR の偏差と春季ブルーム発生日の関係(下段：ブルームが強い海域のみ) ...           | 67 |
| 図 4-28-1. 月平均 PAR と春季ブルームの強さの関係.....                       | 68 |
| 図 4-28-2. 月平均 PAR と春季ブルームの強さの関係(ブルームが強い海域のみ).....          | 69 |
| 図 4-29-1. 月平均 PAR と春季ブルーム発生日の関係.....                       | 70 |
| 図 4-29-2. 月平均 PAR と春季ブルーム発生日の関係(ブルームが強い海域のみ).....          | 71 |
| 図 4-30. 月平均 PAR と春季ブルーム発生日の関係(有意水準：5%).....                | 72 |
| 図 4-31. 風速の偏差と春季ブルームの強さの関係(下段：ブルームが強い海域のみ) ...             | 74 |
| 図 4-32. 風速の偏差と春季ブルーム発生日の関係(下段：ブルームが強い海域のみ) ...             | 75 |
| 図 4-33. 風速の偏差と春季ブルーム発生日の関係(有意水準：5%).....                   | 76 |
| 図 4-34-1. 月平均風速と春季ブルームの強さの関係.....                          | 77 |
| 図 4-34-2. 月平均風速と春季ブルームの強さの関係(ブルームが強い海域のみ).....             | 78 |
| 図 4-35-1. 月平均風速と春季ブルーム発生日の関係.....                          | 79 |
| 図 4-35-2. 月平均風速と春季ブルーム発生日の関係(ブルームが強い海域のみ).....             | 80 |
| 図 4-36. 月平均風速と春季ブルーム発生日の関係(有意水準：5%).....                   | 81 |
| 図 4-37. 気温と風速の相関.....                                      | 83 |
| 図 4-38. 風速と海氷密接度の平年値の季節変化.....                             | 84 |
| 図 4-39. 海氷密接度と風速の相関.....                                   | 84 |
| 図 4-40. 風速の月平年値.....                                       | 85 |
| 図 4-41-1. 月平均風速(850hPa)と春季ブルーム発生日の関係.....                  | 86 |
| 図 4-41-2. 月平均風速(850hPa)と春季ブルーム発生日の関係<br>(ブルームが強い海域のみ)..... | 87 |
| 図 4-42. 月平均風速(850hPa)と春季ブルーム発生日の関係(有意水準：5%).....           | 88 |
| 表 2-1. MODIS の諸元.....                                      | 11 |
| 表 2-2. OC3M の係数.....                                       | 12 |
| 表 3-1. 現場観測データと衛星観測データの相関係数.....                           | 30 |
| 表 4-1. 相関係数検定表.....  | 40 |
| 表 5-1. 春季ブルーム発生日との関係.....                                  | 90 |

# 第1章 序論

## 1.1. 研究背景

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。オホーツク海では冬になると北部大陸棚域において海氷が形成され始める。海氷は徐々にその分布範囲を広げながら北海道周辺まで達し、春になると逆に分布範囲が狭まっていく(図1-1, 1-2)。さらにオホーツク海の家氷域面積は年々変動が大きいのが特徴である。

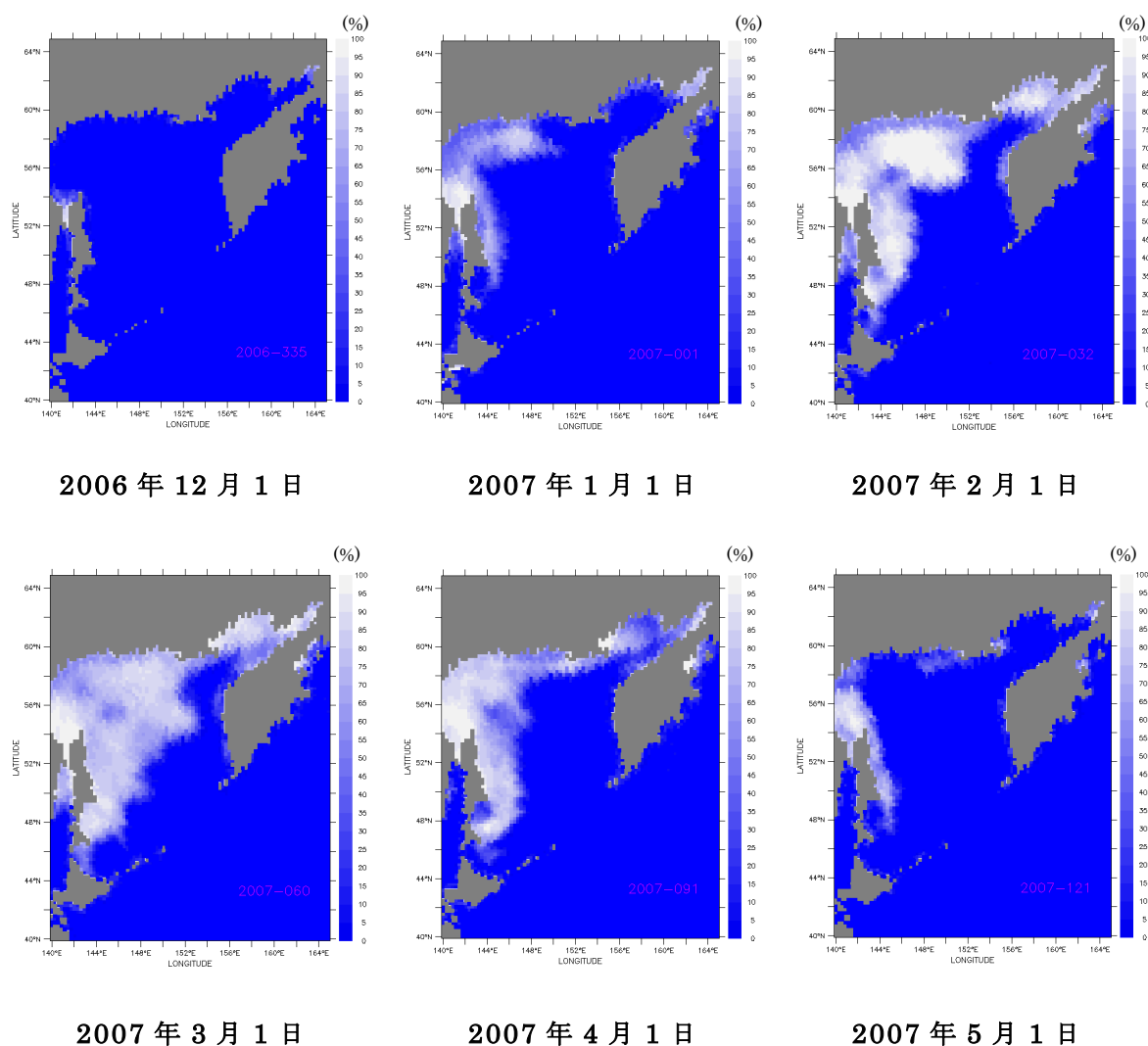


図 1-1. 2006/2007 年冬の海氷分布の推移



図 1-2. 紋別沿岸の海氷の様子 (2013/02/20 撮影)

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。海氷が形成される際、真水の部分だけが氷となるため、残された高塩分の海水(ブライン)が排出される。そのため海氷下では対流が盛んになり、海底の栄養塩が巻き上げられる。一般的に光がよく届く表層付近では植物プランクトンの光合成が活発になり栄養塩が不足しがちであるが、海氷生成による対流のおかげで表層付近では栄養塩が不足せず、植物プランクトンが豊富になる。これにより動物プランクトンや魚類も集まりやすく、豊富な水産資源を生み出している。しかし近年の地球温暖化により海氷は減少傾向にあり(図 1-3[1])、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。

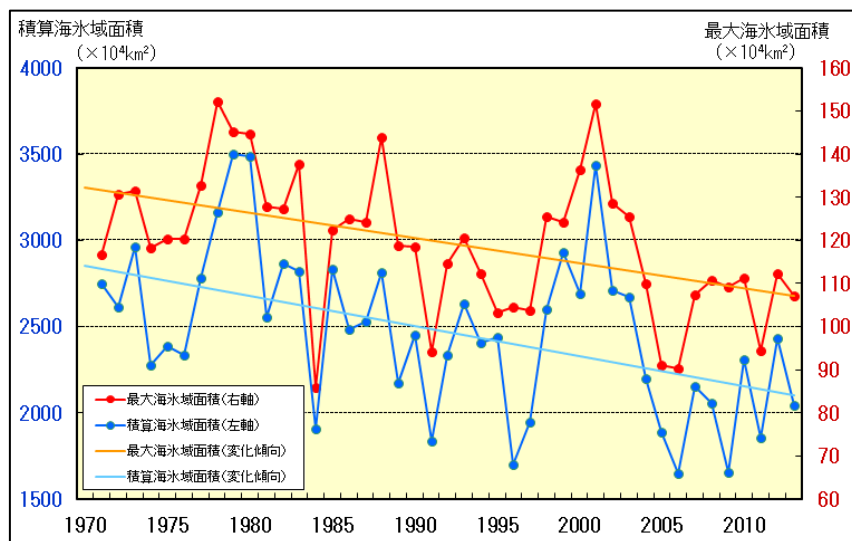


図 1-3. オホーツク海における海氷域面積の経年変化 (出典：気象庁 HP)

## 1.2. 先行研究

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。特に、春から夏にかけて海面表層への日射量が増加すると、植物プランクトンが大増殖する(図 1-4, 1-5) (松本ほか, 2002[3])。これを春季ブルームという。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。

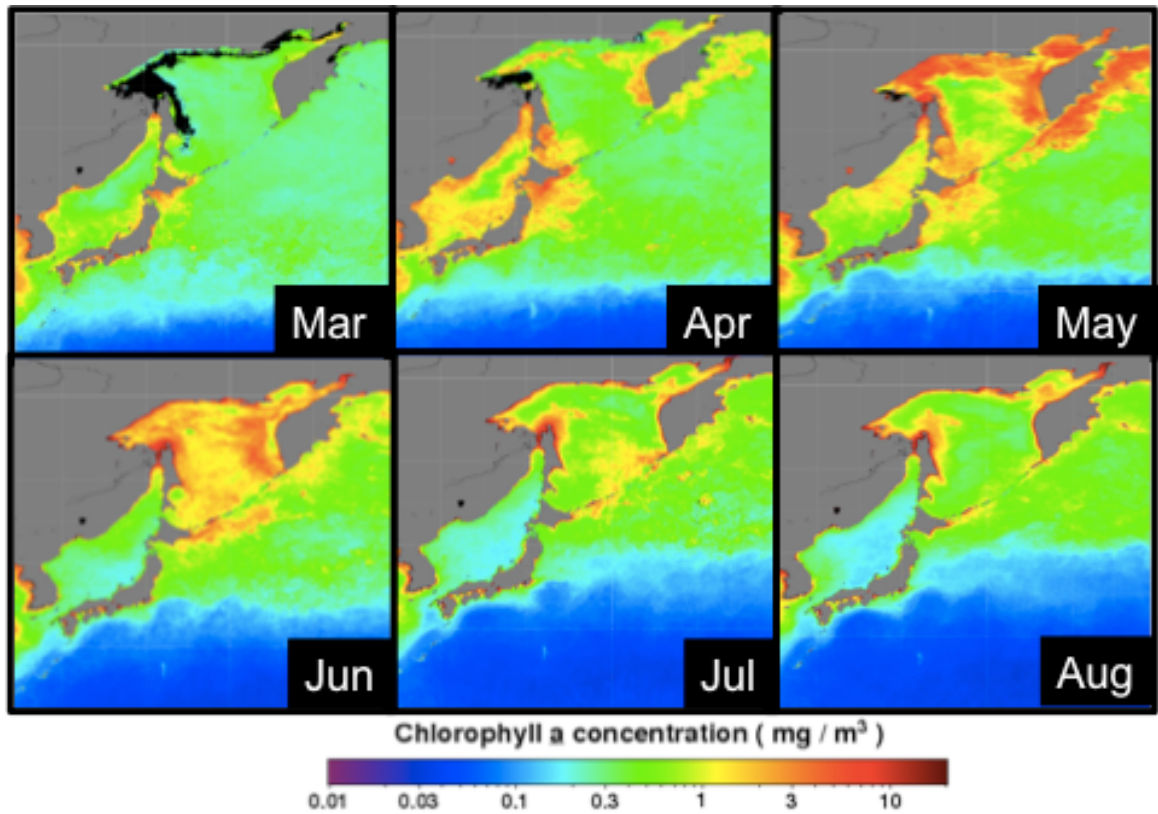


図 1-4. クロロフィル a 濃度の月平均値(2000-2013 年平均値/MODIS・Terra)  
(出典 : OceanColor WEB HP)

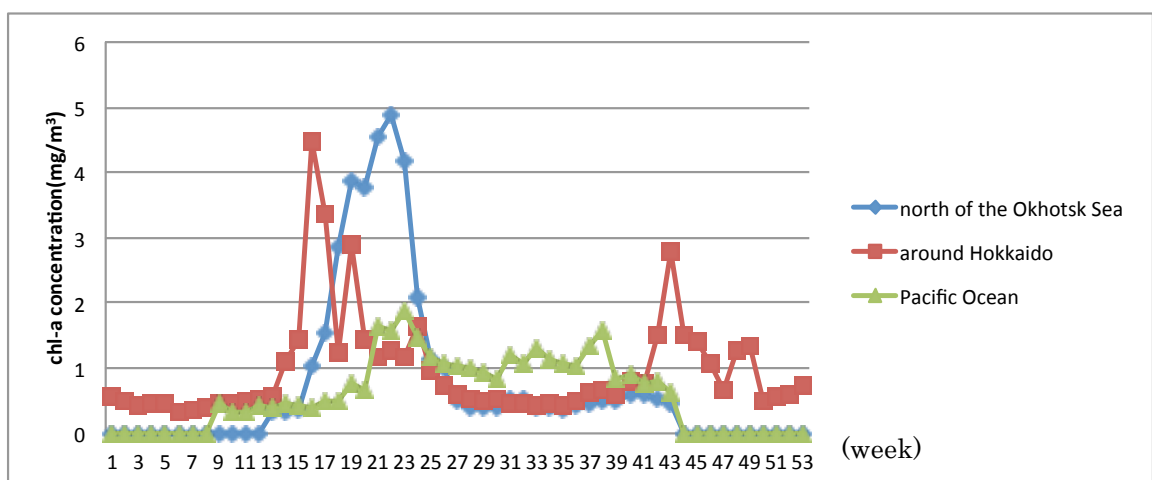


図 1-5. Chl-a 濃度の 7 日間平均値の季節変化 (2003-2011 年平均値)



植物プランクトンは一般的に温度と塩分によって種の変遷パターンが異なると言われてい  
る。また、温度環境によって光合成の適温範囲も変化する。オホーツク海のような低温状態  
でブルームが発生する海域では低温性の植物プランクトンが優占しており、低温下でも増殖  
が盛んになり得る。平野ほか(2003) [4]では 1.7°Cの低温下においても珪藻の増殖速度が高い  
事を示している。これらの珪藻の中には好冷性 (Psychrophilic)の性質を持ち、水温 15°C以  
上では全く増殖する事が出来ない種もいる (Ikeya et al., 2000[5])。このように水温が植物  
プランクトンの増殖速度に影響を与えるのは確かであるが、同じエリアであれば、それ以上  
に重要なのは光環境である。

海氷にはアイスアルジーと呼ばれる植物プランクトンが多く含まれており、それは海氷融  
解と同時に放出される。McRoy et al. (1972) [6]やMcRoy and Goering(1974) [7]はベーリン  
グ海で、Grainger(1979) [8]はフロビッシャー湾で、海氷が解けアイスアルジーが海水中へ放  
出されるとすぐにブルームが起こることを発見した。さらに Saito and Taniguchi(1978) [9]  
はベーリング海およびチャクチ海で早春の海氷の中の藻類が海水中でも優占種である事を報  
告した。しかしながら Horner and Alexander(1972) [10]やAlexander(1980) [11]ではバロー  
岬において海氷中と海水中での藻類種の相違に加えて、アイスアルジーの放出とブルームの  
時期に差がある事から両者の関係は密でないとして述べた。このようにアイスアルジーが春季ブ  
ルームに与える影響については海域によって異なる可能性もあり、オホーツク海においても  
調べる必要がある。また、アイスアルジーが氷海生態系の起源として無視できないのは確か  
である [12]。

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お  
り、ice edge bloom と open water bloom の 2 種類にわけられる (図 1-6, Niebauer et  
al., 1995[13])。前者は海氷融解による塩分成層が発達し、下層から供給された栄養塩が表層  
に留まる事により発生し、後者は日射量増加に伴う温度成層により発生する。ice edge bloom  
は日射量が大きいと時空間的に大きくなる事がわかっている (Niebauer et al., 1990[14])。  
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い。M. A. Musatapha and  
S. Saitoh(2008) [15]は海氷融解が遅れるほど強い ice edge bloom が起こると述べており、松  
本ほか(2002) [3]は日射量が少ないと ice edge bloom が発生しにくいと述べている。しかし  
ながらこれらは観測エリアが局所的であり、さらには春季ブルームに対する海氷の役割が明  
確にはなっていない。

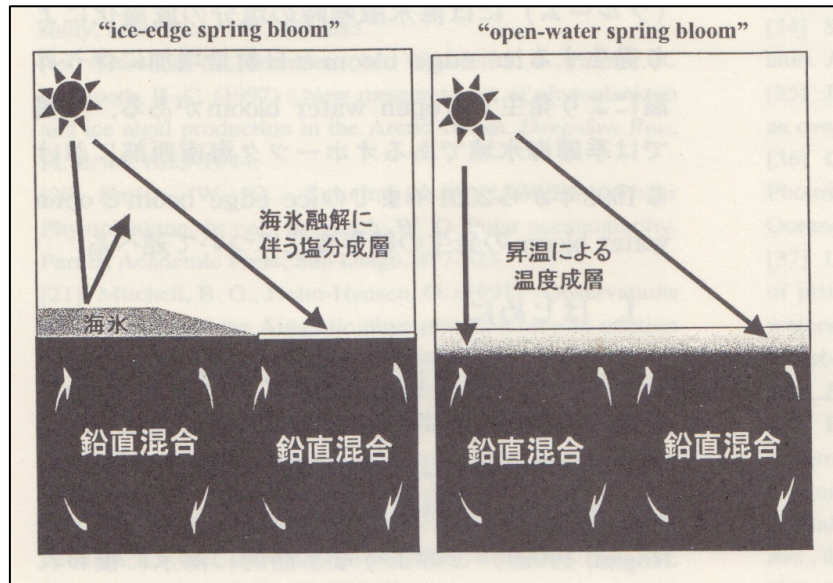


図 1-6. Ice edge bloom と open water bloom の違い (出典:松本ほか,2002)

### 1.3. 研究目的

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と海氷の人工衛星データを用い、気象・海洋データとともに解析を行う。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。

## 第2章 使用データ

### 2.1. 植物プランクトン濃度の人工衛星観測

海に浮遊する植物プランクトンを観測する方法としては、海水を採取したり計測器を海中に投入して直接観測する方法と、人工衛星を使って海の色で間接的に観測する方法の二種類がある。衛星観測によって得られるデータは海から放射される波長を元に算出される推定値に過ぎない。しかしながら船舶観測ではカバーしきれない一日単位での全球のデータをまかなう事が出来るので広範囲での時空間変化の観測のために有用である。

全ての植物プランクトンには光合成に必要な色素であるクロロフィル a(以下: Chl-a)が含まれており、これを観測する事によって海の植物プランクトンの量を把握する事が出来る。Chl-a は緑色よりも青色や赤色の波長を吸収する事が知られており、植物プランクトンが増えると海の色が実際に青色から緑色に変わる。この特徴を利用して、人工衛星に可視域センサーを搭載し、海洋表層の Chl-a 濃度の観測が始まった。

1978年から1986年に CZCS(沿岸域海色走査計)が運用され、海色リモートセンシングの基礎が築かれた。その後、OCTS(海色水温走査計:1996年から1997年)、SeaWiFS(海洋広域観測走査計:1997年から2010年)、MODIS(中分解能撮像分光放射計:1999年から現在)と連続して運用され、全球で Chl-a 濃度が継続的に観測されるようになった。

本研究では、現在までデータが蓄積され続けており量も豊富な MODIS の衛星観測データを用いる(2125×2783 グリッド・解像度:約 0.012° ×0.009°)。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)[16]と北海道区水産研究所(北水研)[17]のデータを用いる。

### 2.2. MODIS

MODIS は NASA[18]の衛星 Aqua と Terra にそれぞれ搭載されている(図 2-1[19])。Aqua は毎日午後 01:30 頃通過し、Terra は日本上空を毎日午前 10:30 頃通過し、観測している。これにより毎日同じ地点の観測が可能であるので、解析にも使いやすい。MODIS の観測波長帯は 0.4 μm から 14.4 μm の範囲に 36 チャンネルを有し、直下における空間分解能は、1~2 チャンネルが 250m, 3~7 チャンネルの 5 チャンネルが 500m, 残り 8~36 チャンネルの 29 チャンネルが 1km である。また、観測幅は約 2300km である。表 2-1 に MODIS の観測波長帯等をまとめた。

表 2-1. MODIS の諸元

| バンド | 波長域[ $\mu\text{m}$ ] | おもな観測対象                  | 分解能[m] |
|-----|----------------------|--------------------------|--------|
| 1   | 0.620 ~ 0.670        | 陸域、雲、エア<br>ロゾル (境界)      | 250    |
| 2   | 0.841 ~ 0.876        |                          |        |
| 3   | 0.459 ~ 0.479        | 陸域、雲、エア<br>ロゾル (特性)      | 500    |
| 4   | 0.545 ~ 0.565        |                          |        |
| 5   | 1.230 ~ 1.250        |                          |        |
| 6   | 1.628 ~ 1.652        |                          |        |
| 7   | 2.105 ~ 2.155        |                          |        |
| 8   | 0.405 ~ 0.420        | 海面、プランク<br>トン、生物地球<br>科学 |        |
| 9   | 0.438 ~ 0.448        |                          |        |
| 10  | 0.483 ~ 0.493        |                          |        |
| 11  | 0.526 ~ 0.536        |                          |        |
| 12  | 0.546 ~ 0.556        |                          |        |
| 13  | 0.662 ~ 0.672        |                          |        |
| 14  | 0.673 ~ 0.683        |                          |        |
| 15  | 0.743 ~ 0.753        |                          |        |
| 16  | 0.862 ~ 0.877        |                          |        |
| 17  | 0.890 ~ 0.920        |                          |        |
| 18  | 0.931 ~ 0.941        |                          |        |
| 19  | 0.915 ~ 0.965        |                          |        |
| 20  | 3.660 ~ 3.840        | 表面、雲、温度                  | 1000   |
| 21  | 3.929 ~ 3.989        |                          |        |
| 22  | 3.929 ~ 3.989        |                          |        |
| 23  | 4.020 ~ 4.080        |                          |        |
| 24  | 4.433 ~ 4.498        | 大気温度                     |        |
| 25  | 4.482 ~ 4.549        | 水蒸気 (雲)                  |        |
| 26  | 1.360 ~ 1.390        |                          |        |
| 27  | 6.535 ~ 6.895        | 水蒸気 (雲)<br>雲 (特性)        |        |
| 28  | 7.175 ~ 7.475        |                          |        |
| 29  | 8.400 ~ 8.700        |                          |        |
| 30  | 9.580 ~ 9.880        | オゾン                      |        |
| 31  | 10.780 ~ 11.280      | 表面、雲温度                   |        |
| 32  | 11.770 ~ 12.270      | 表面、雲温度<br>雲高度            |        |
| 33  | 13.185 ~ 13.485      |                          |        |
| 34  | 13.485 ~ 13.785      | 雲高度                      |        |
| 35  | 13.785 ~ 14.085      |                          |        |
| 36  | 14.085 ~ 14.385      |                          |        |

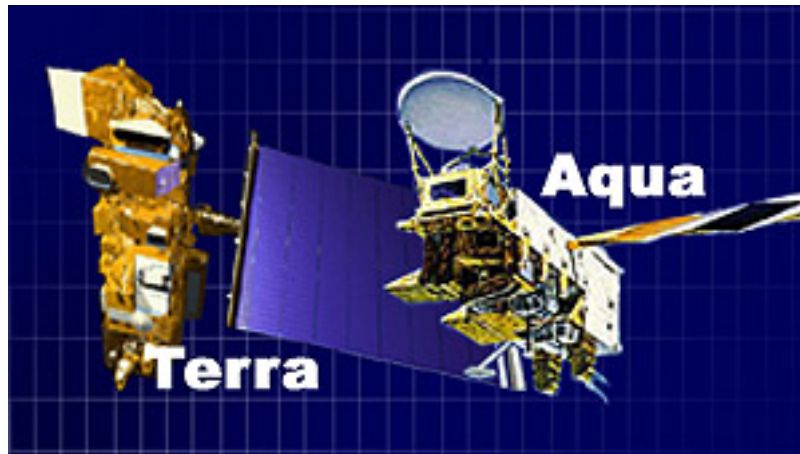


図 2-1. 人工衛星 Terra・Aqua (出典：JAXA HP)

MODIS による Chl-a 濃度の観測ではバンド 9・10・12 の三つの波長帯を用いる。バンド 9・10 は海水等の青色域の光を、バンド 12 は Chl-a の緑色域の波長を観測する。また Chl-a 濃度の推定アルゴリズム (OC3M) は以下の式を用いる。

$$Chl - a = 10(a_0 + a_1X + a_2X^2 + a_3X^3 + a_4X^4)$$

$$* X = \log_{10}(Rrs443 > Rrs488/Rrs551)$$

$a_0 \sim a_4$  の値を表 2-2 に示す。また X は人工衛星で使用されている青色域と緑色域のバンド比を対数に変換したものである。それぞれの波長域の波長は 435～520nm の間で、反射率の最大値を与えるようになっている (比嘉, 2012[20])。

表 2-2. OC3M の係数

|      | $a_0$  | $a_1$   | $a_2$  | $a_3$   | $a_4$   |
|------|--------|---------|--------|---------|---------|
| NASA | 0.2424 | -2.5828 | 1.7057 | -0.3415 | -0.8818 |
| JAXA | 0.283  | -2.753  | 1.457  | 0.659   | -1.403  |

Aqua と Terra は同じ仕様のセンサーを用いているが、経年劣化や、各センサー固有の観測波長帯の応答特性により観測値が異なる。このような問題による物理量推定への影響を軽減するためにアルゴリズムで使用する各種係数を各センサー固有の応答特性に合わせて計算するなどして補正を行っている。しかしながら、完全に補正しきれない場合もあり、その誤差が両センサーのデータの差に表れる [21]。

## 2.3. 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) [22] が配布する Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I) のデータを用いる (解像度: 25km). 海氷生成/消滅量は, 中野 (2013) [23] 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).

図 2-2 はポーラーステレオ座標系で表された海氷密接度分布である. 赤い枠内が本研究の対象エリア (北緯  $40^{\circ}$  ~  $65^{\circ}$  / 東経  $140^{\circ}$  ~  $165^{\circ}$ ) である.

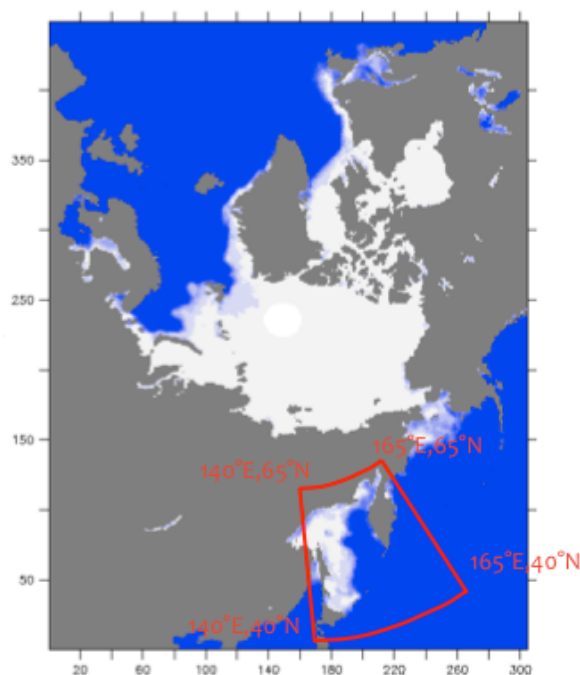


図 2-2. ポーラーステレオ座標系で表された海氷密接度分布

気象・海洋データとして, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) [24] 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) [25] 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.

本研究では, 同じスケールでデータを比較するために, 全てのデータセットを  $85 \times 111$  グリッド (解像度: 約  $0.29^{\circ} \times 0.22^{\circ}$ ) の緯度経度座標系に変換して解析を行った. 海氷密接度データは解像度 25km のポーラーステレオ座標系で表されている. また, 海氷生成量・消滅量は解像度 37.5km のポーラーステレオ座標系で計算されている. ポーラー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。図 2-3 は 2003 年 2 月 26 日の海氷密接度に関して、図 2-4 は 2003 年の海氷消滅量に関して、変換前後の様子を示したものである。両者とも変換後もほぼ同じ様子が捉えられているといえる。

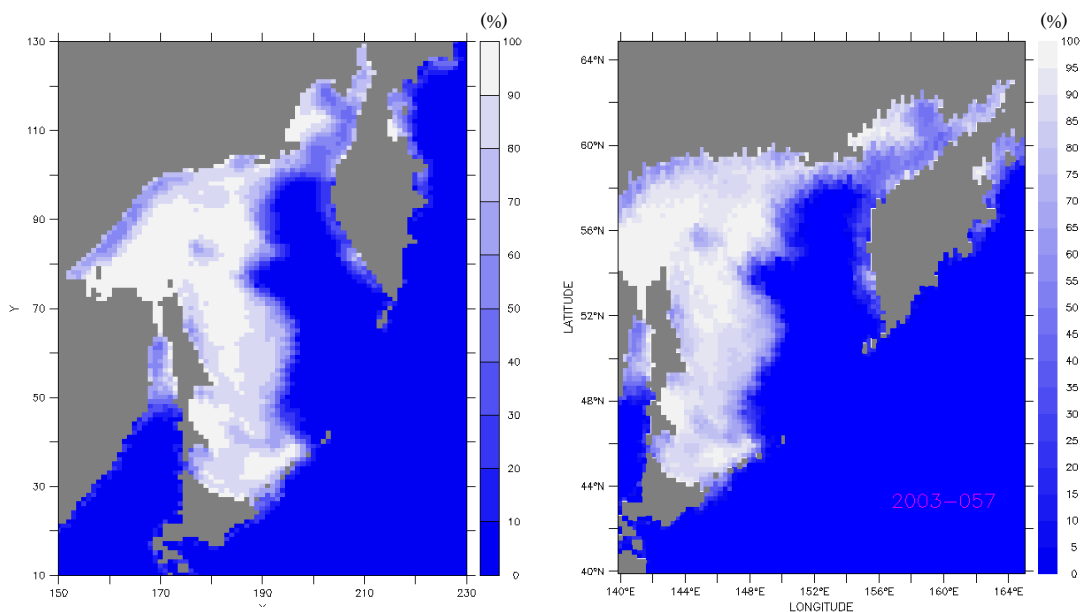


図 2-3. 海氷密接度の座標変換

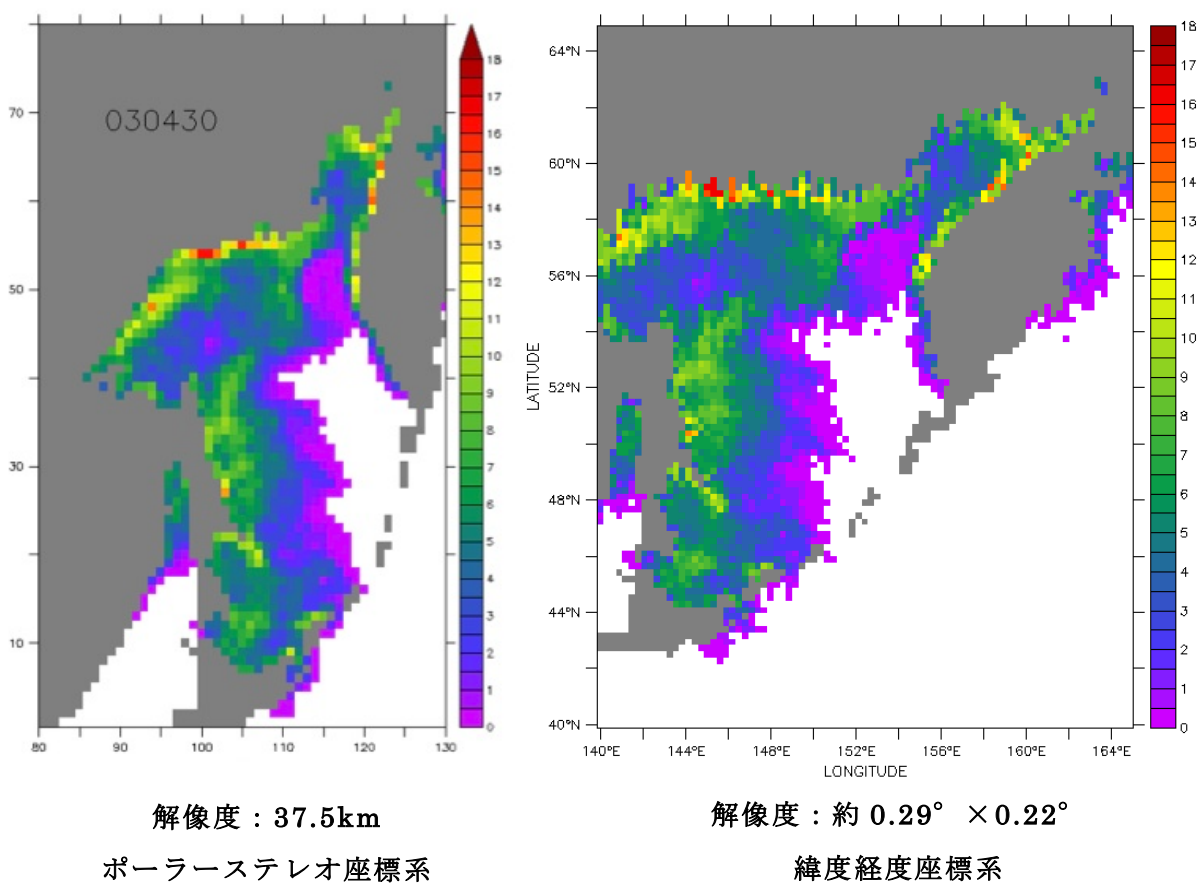


図 2-4. 海氷消滅量の座標変換

気象データと海洋データについて、解像度  $0.25^\circ$  ( $100 \times 100$  グリッド) のデータセットを解像度約  $0.29^\circ \times 0.22^\circ$  ( $85 \times 111$  グリッド) のデータセットに変換した。変換の方法を図 2-5 に示した。変換後の各グリッドには変換前のグリッドが 2 つ入る場合と 4 つ入る場合、6 つ入る場合の三通りがあり、図 2-5 は 4 つ入る場合の計算例を示している。同様に 2 つの場合、6 つの場合も面積比重で計算した。図 2-6 は変換前後の 2003 年 3 月 1 日における SST の空間分布であるが、変換前後でほぼ変わりはないと言える。解像度  $0.25^\circ$  の他の要素のデータも同様に計算した。

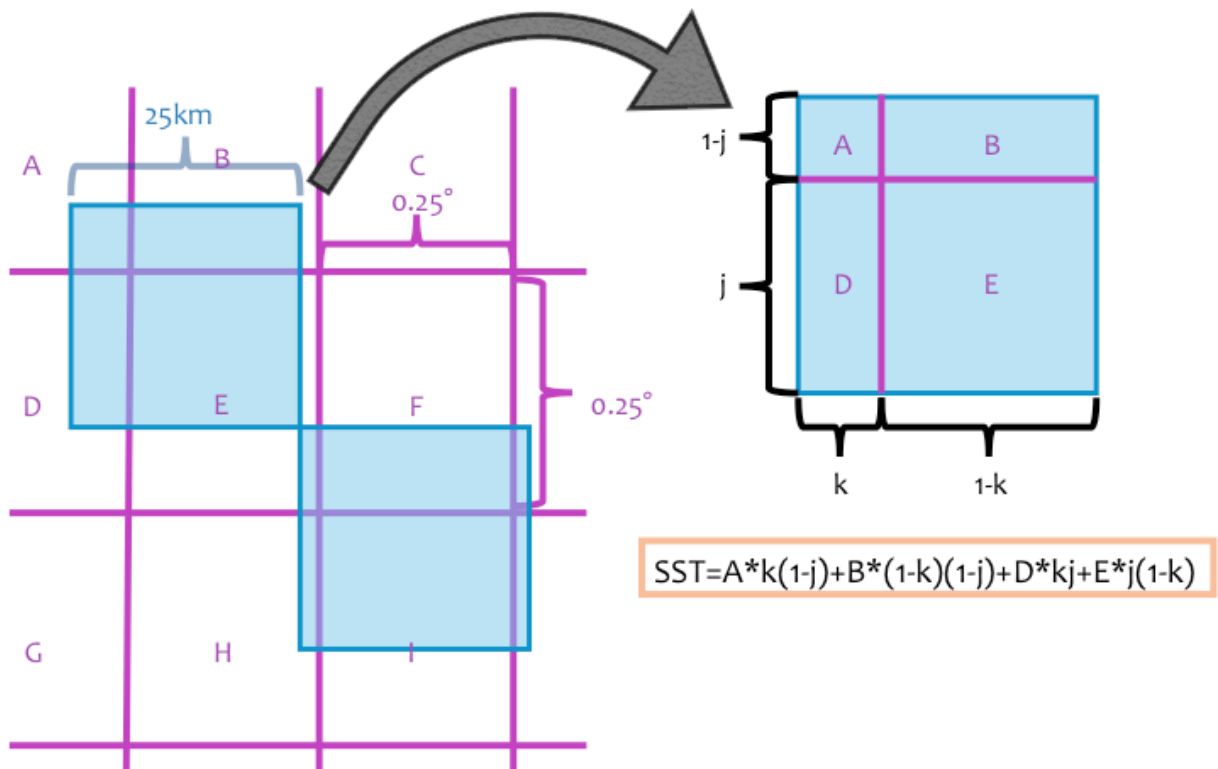


図 2-5. 解像度  $0.25^\circ$  から解像度約  $0.29^\circ \times 0.22^\circ$  への変換 (SST)



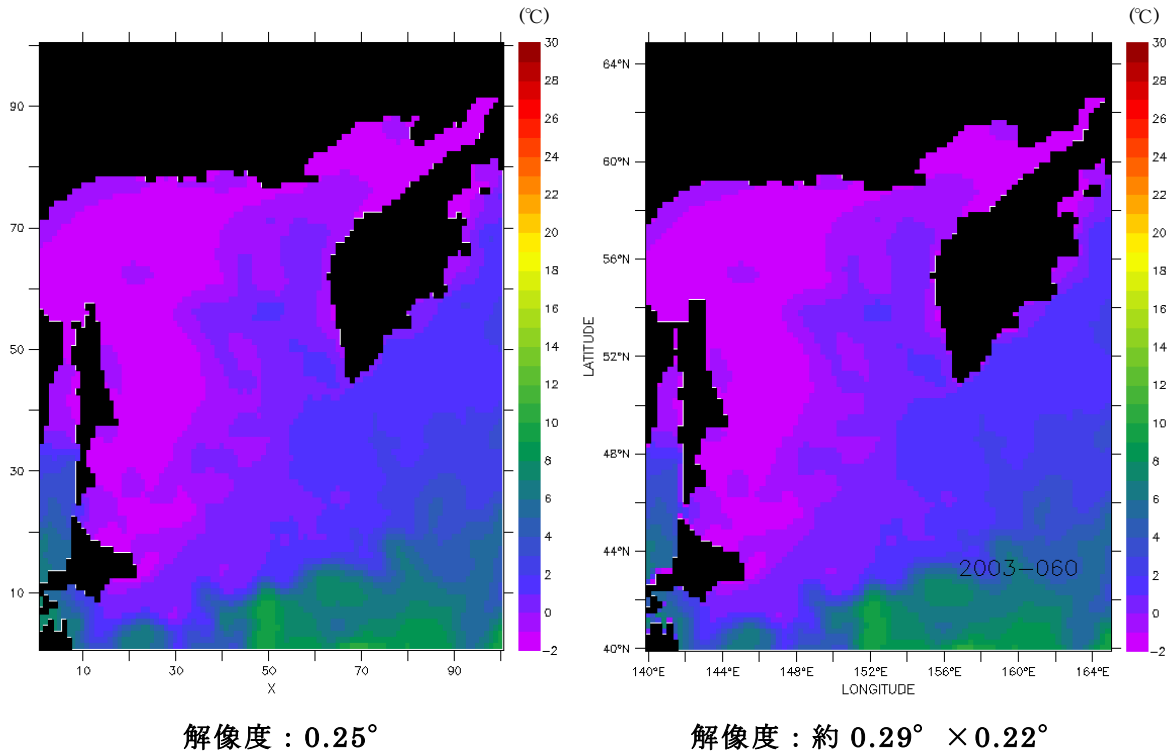


図 2-6. SST の座標変換

解像度約  $0.29^\circ \times 0.22^\circ$  の SST データ・気象データを元に、気象庁の日別平滑平年値の算出方法[26]に基づき、9年間の平年値のデータセットを作成した。この方法は9日間移動平均を三回繰り返す事で平年値を算出するものである。計算の方法を以下にまとめた。

- ① 1月1日から12月31日までの日別平均値( $d_1 \sim d_{365}$ )を算出する。
- ② 1月1日から12月31日までの9日間移動平均値( $d_{1,1} \sim d_{365,1}$ )を求める。例えば1月7日の9日間移動平均値は以下のようになる。

$$d_{7,1} = \frac{d_3 + d_4 + d_5 + d_6 + d_7 + d_8 + d_9 + d_{10} + d_{11}}{9}$$

ただし1月1日～4日と12月28日～31日は以下のようになる。

$$d_{1,1} = \frac{d_{362} + d_{363} + d_{364} + d_{365} + d_1 + d_2 + d_3 + d_4 + d_5}{9}$$

$$d_{2_1} = \frac{d_{363} + d_{364} + d_{365} + d_1 + d_2 + d_3 + d_4 + d_5 + d_6}{9}$$

...

$$d_{364_1} = \frac{d_{360} + d_{361} + d_{362} + d_{363} + d_{364} + d_{365} + d_1 + d_2 + d_3}{9}$$

$$d_{365_1} = \frac{d_{361} + d_{362} + d_{363} + d_{364} + d_{365} + d_1 + d_2 + d_3 + d_4}{9}$$

③ ②で算出された移動平均値を用いて二回目の9日間移動平均値( $d_{1_2} \sim d_{365_2}$ )を求める。例えば1月7日の場合以下のようなになる。

$$d_{7_2} = \frac{d_{3_1} + d_{4_1} + d_{5_1} + d_{6_1} + d_{7_1} + d_{8_1} + d_{9_1} + d_{10_1} + d_{11_1}}{9}$$

④ ③で算出された移動平均値を用いて三回目の9日間移動平均値( $d_{1_3} \sim d_{365_3}$ )を求める。例えば1月7日の場合以下のようなになる。

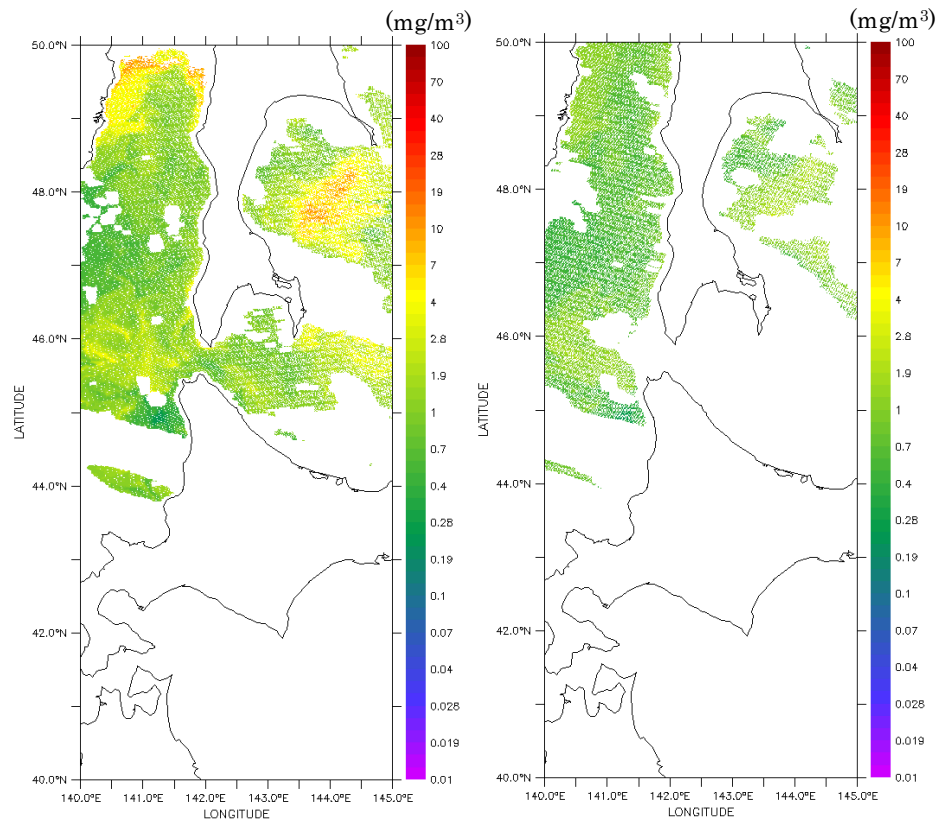
$$d_{7_3} = \frac{d_{3_2} + d_{4_2} + d_{5_2} + d_{6_2} + d_{7_2} + d_{8_2} + d_{9_2} + d_{10_2} + d_{11_2}}{9}$$

## 第 3 章 衛星観測データの評価

### 3-1. JODC 現場観測データとの比較

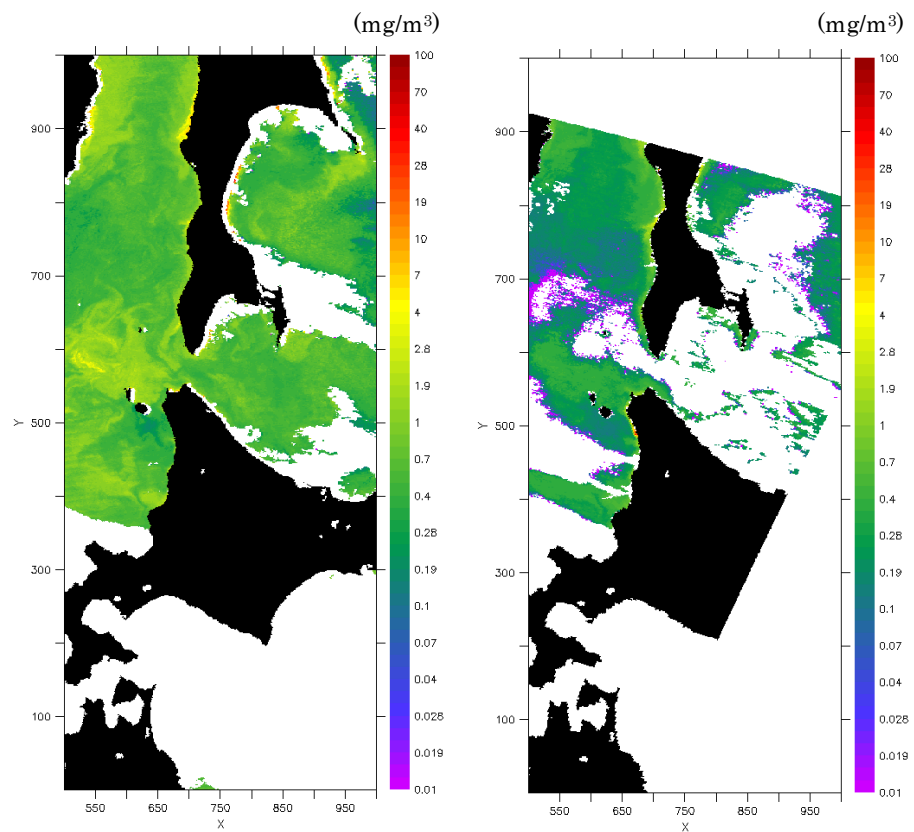
Chl-a 濃度の衛星観測データは NASA が処理しているものと JAXA が処理しているものがあり、それぞれの処理により算出される値が異なる。さらに衛星 Aqua と Terra では推定アルゴリズムがそれぞれ少し異なり、衛星の違いによっても値が変わってくる(図 3-1)。まずこれらのデータの精度を検証する。そこで Chl-a 濃度の現場観測データと衛星観測データを比較した。比較の際、衛星観測データは現場観測データの緯度経度と合致するグリッドを選び、そのグリッドとその周りの 8 グリッドの計 9 グリッドの平均値を現場観測データと比較した。

まず JODC による観測データを用いた比較を行った。JODC による観測は今回 2003～2008 年までの間で観測データ 2263 個のうち、表層における観測データ 1582 個を用いた。観測地点のデータを図 3-2 に示す。



NASA/Aqua

NASA/Terra



JAXA/Aqua

JAXA/Terra

図 3-1. 2003 年 5 月 10 日における Chl-a 濃度の空間分布の違い

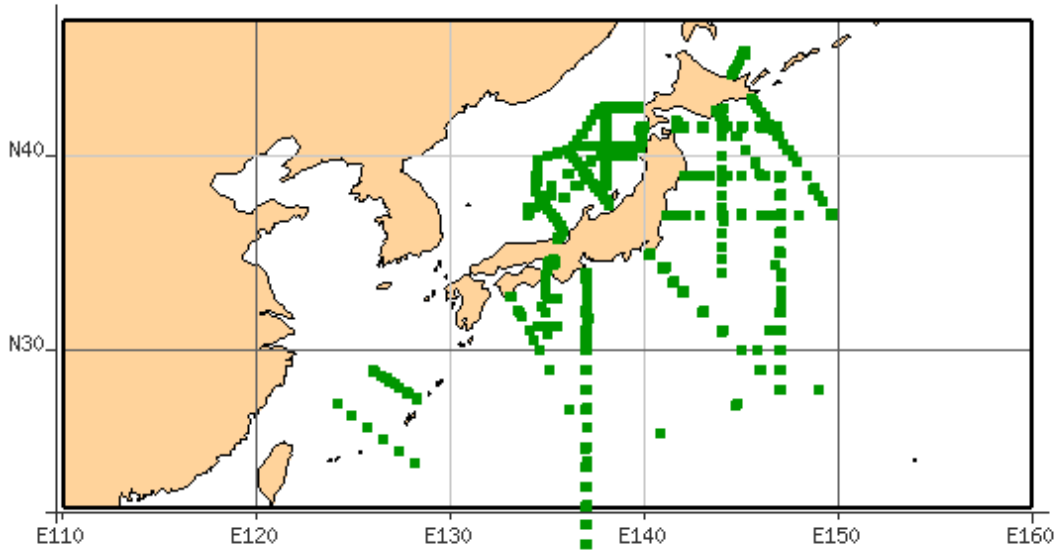


図 3-2. JODC による観測地点一覧

最初に JAXA が処理した衛星観測データと比較した。現場観測データと JAXA のデータとの相関はあまり高くなく、相関係数は Aqua で 0.42 (データ数(以下 : N)=360), Terra で 0.36 (N=387) であった。図 3-3 は JAXA の衛星観測データと現場観測データの散布図である。JAXA のデータには  $100\text{mg}/\text{m}^3$  近くになるような異常値が多く含まれている事がわかる。これらの異常値は、人工衛星のセンサー観測視野の端付近や雲の切れ間付近で多く見られた。MODIS センサーによる観測値は波長の入射角に依存している部分があるので、視野の端では測定誤差が現れる事がある。さらに、Ch1-a を推定するために想定している一般的な大気中のエアロゾルタイプから外れてしまっているような吸収散乱をするエアロゾルもあり、誤差が生じてしまう事がある。例えば、図 3-4 は 2007 年 10 月 15 日の Ch1-a 濃度の空間分布であるが、全体的に異常に高い値が見られる。現場観測データとの比較ではこのような異常値を拾ってしまっている。しかし、これらの異常値を取り除いて、現場観測データと比較しても相関はあまり高くなり、Aqua で 0.42 (N=317), Terra で 0.33 (N=275) であった(図 3-5)。

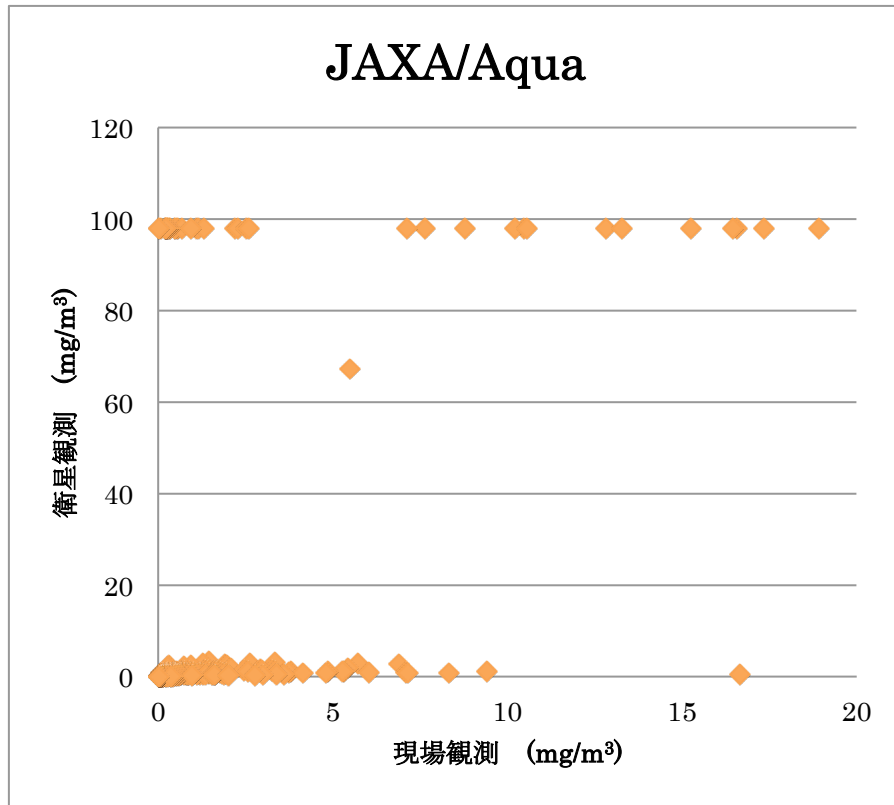


図 3-3-1. 現場観測データと衛星観測データの関係 (JODC・JAXA/Aqua)

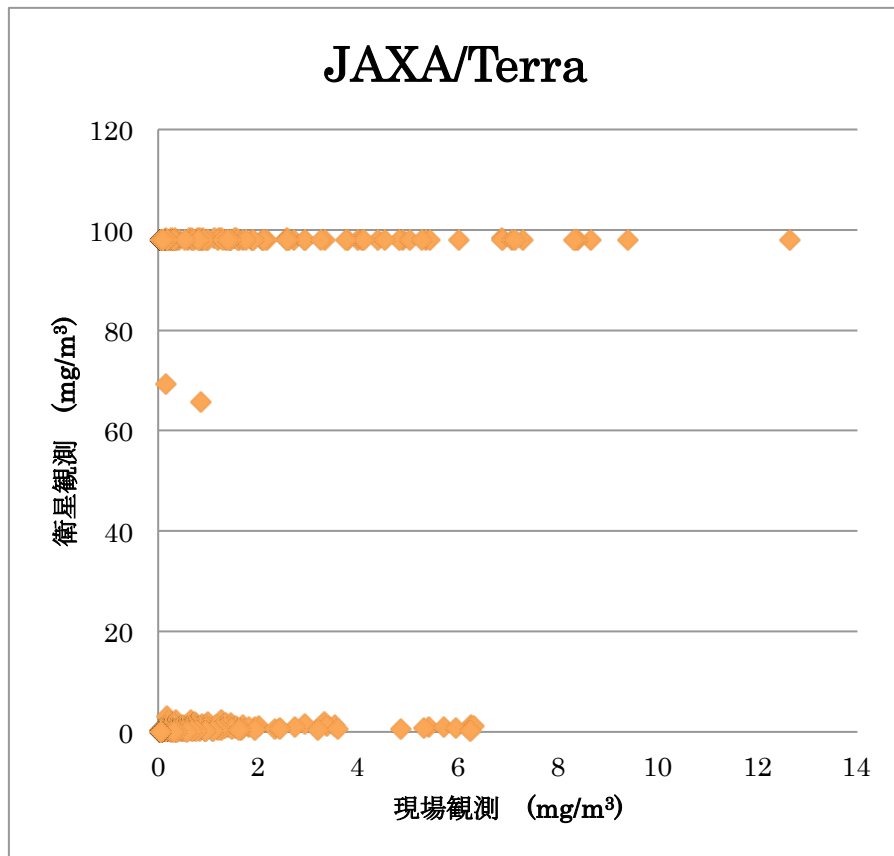


図 3-3-2. 現場観測データと衛星観測データの関係 (JODC・JAXA/Terra)

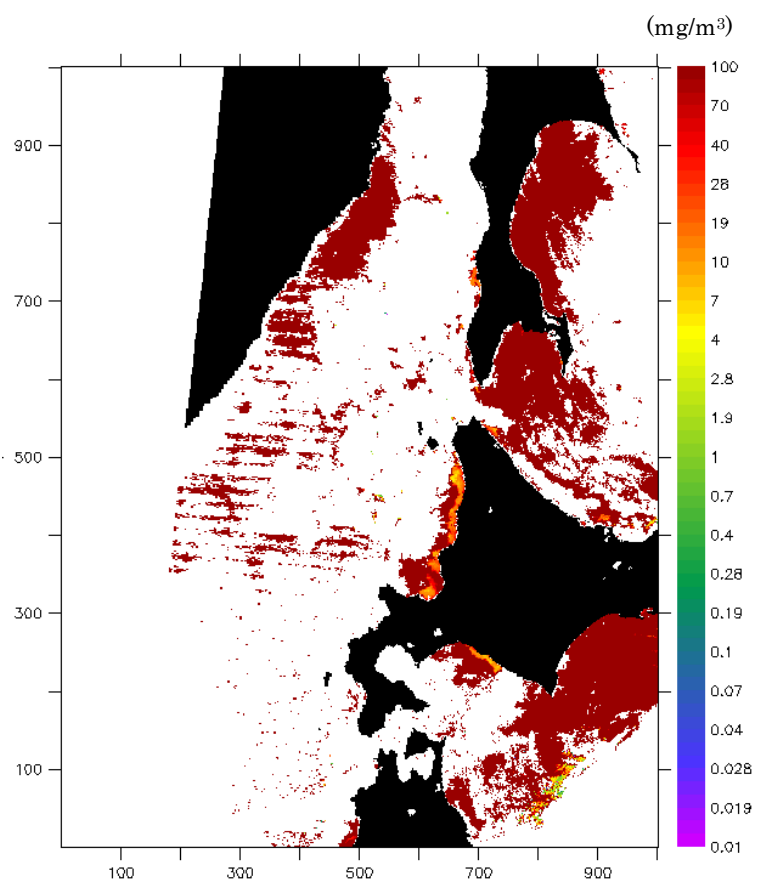


図 3-4. 2007 年 10 月 15 日の Chl-a 濃度 (JAXA/Terra)

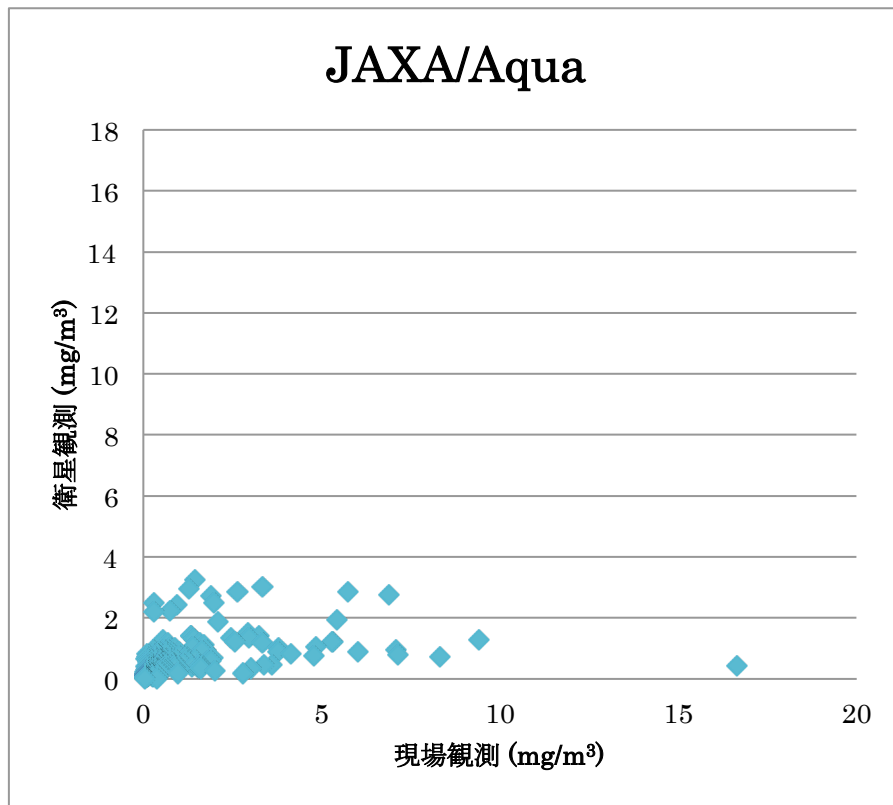


図 3-5-1. 現場観測データと衛星観測データの関係 (JODC・JAXA/Terra)  
(異常値除去)

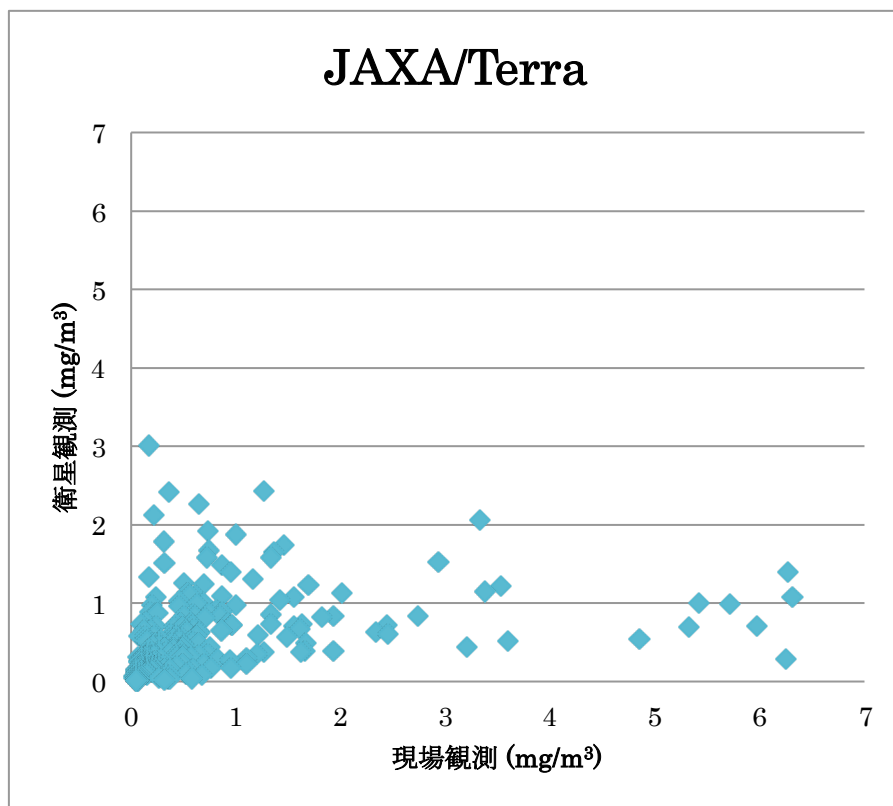


図 3-5-2. 現場観測データと衛星観測データの関係 (JODC・JAXA/Terra)  
(異常値除去)



続いて JODC による観測データと NASA が処理した衛星観測のデータと比較した。現場観測データと衛星観測データの関係を図 3-6 に示す。JAXA のデータと比べると明らかな異常値は見られない。JAXA の処理した衛星観測データとの比較に比べて、Aqua の観測においては相関が高く、相関係数は 0.61 (N=182) だった。

ここで明らかに過大評価してしまっている衛星観測データについて見てみる。図 3-7 は 2008 年 11 月 4 日における Aqua の Chl-a 濃度の空間分布である。図 3-6-1 で明らかに過大評価となっている「24.23mg/m<sup>3</sup>」の値を取っているのは、図 3-7 の青枠で囲われたエリアの衛星観測データである。現場観測データとの相関を調べるために衛星観測データは 9 個のグリッドの平均値を取って比較しているが、このとき 9 個のうち 8 個が値の存在しないグリッドとなっている。つまり 1 個のグリッドの値が高い値に導いている。周辺のグリッドを見るとすぐ近くに 3mg/m<sup>3</sup> 以下等の低い値のグリッドもあるが、異常値かどうかの判断はできない。同様に Terra に関しても過大評価している「14.49 mg/m<sup>3</sup>」と「13.06mg/m<sup>3</sup>」についても調べた。図 3-8 は 2008 年 11 月 5 日における Aqua の Chl-a 濃度の空間分布である。図 3-6-2 で明らかに過大評価となっている「14.49 mg/m<sup>3</sup>」と「13.06mg/m<sup>3</sup>」の値を取っているのは図 3-8 のそれぞれ紫枠と緑枠で囲われたエリアの衛星観測データである。これらの衛星観測データの周辺のグリッドと値が近い。Chl-a 濃度は沿岸付近で過大評価する事があり、これらの例もその一つと考えられる。これらの異常値を除去すると Aqua・Terra とともに相関は高くなり、相関係数はそれぞれ 0.71 (N=181), 0.71 (N=175) となった(図 3-9)。

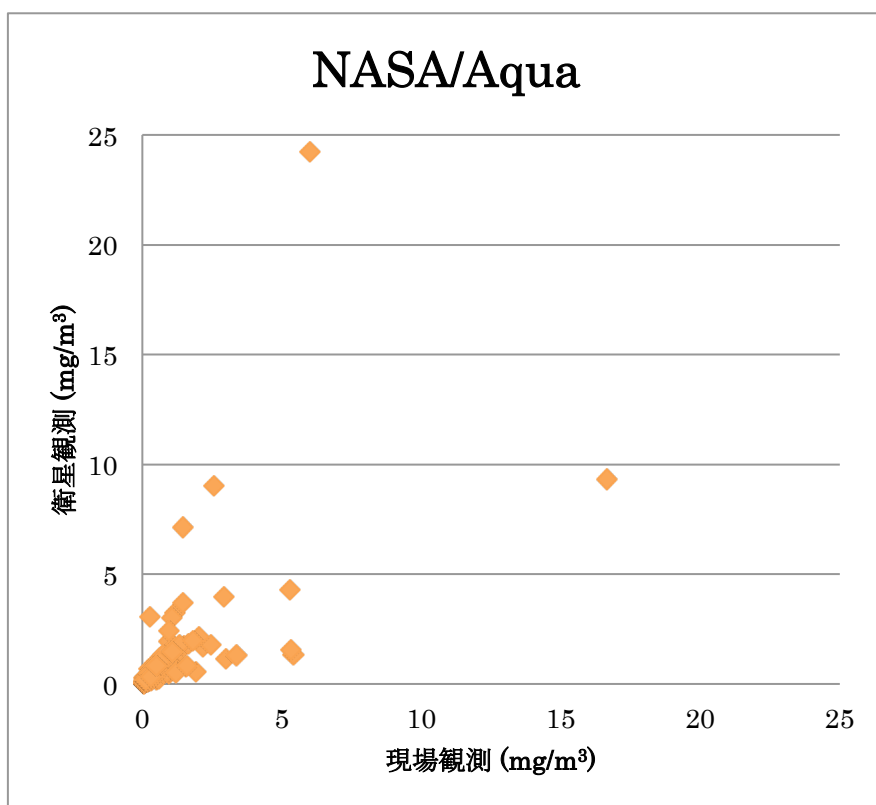


図 3-6-1. 現場観測データと衛星観測データの関係 (JODC・NASA/Aqua)

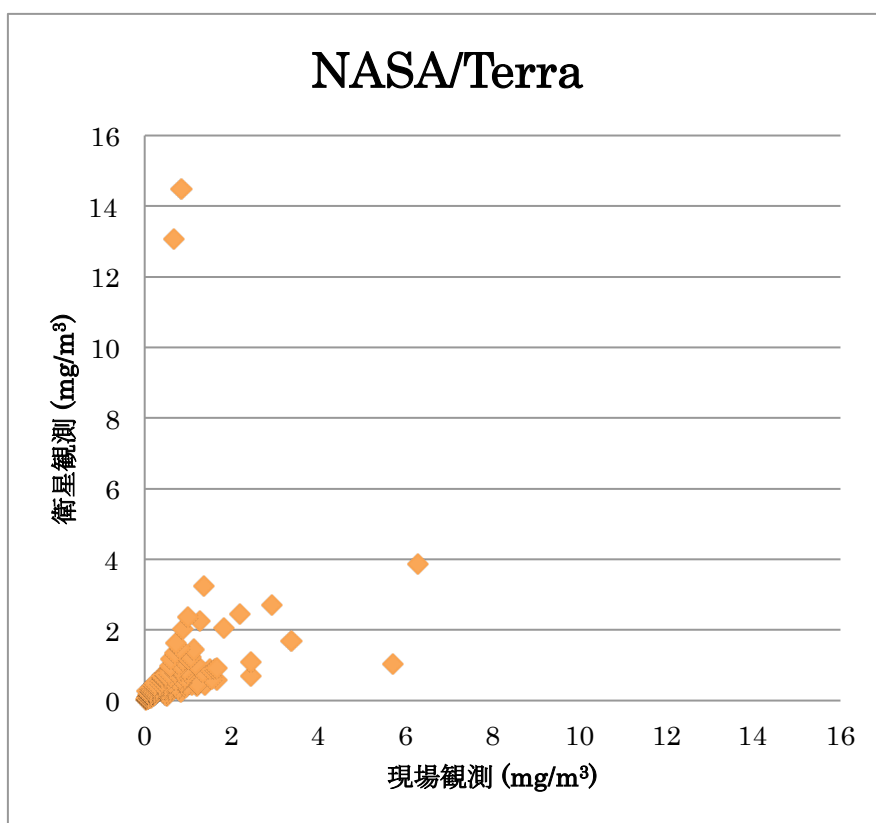


図 3-6-2. 現場観測データと衛星観測データの関係 (JODC・NASA/Terra)

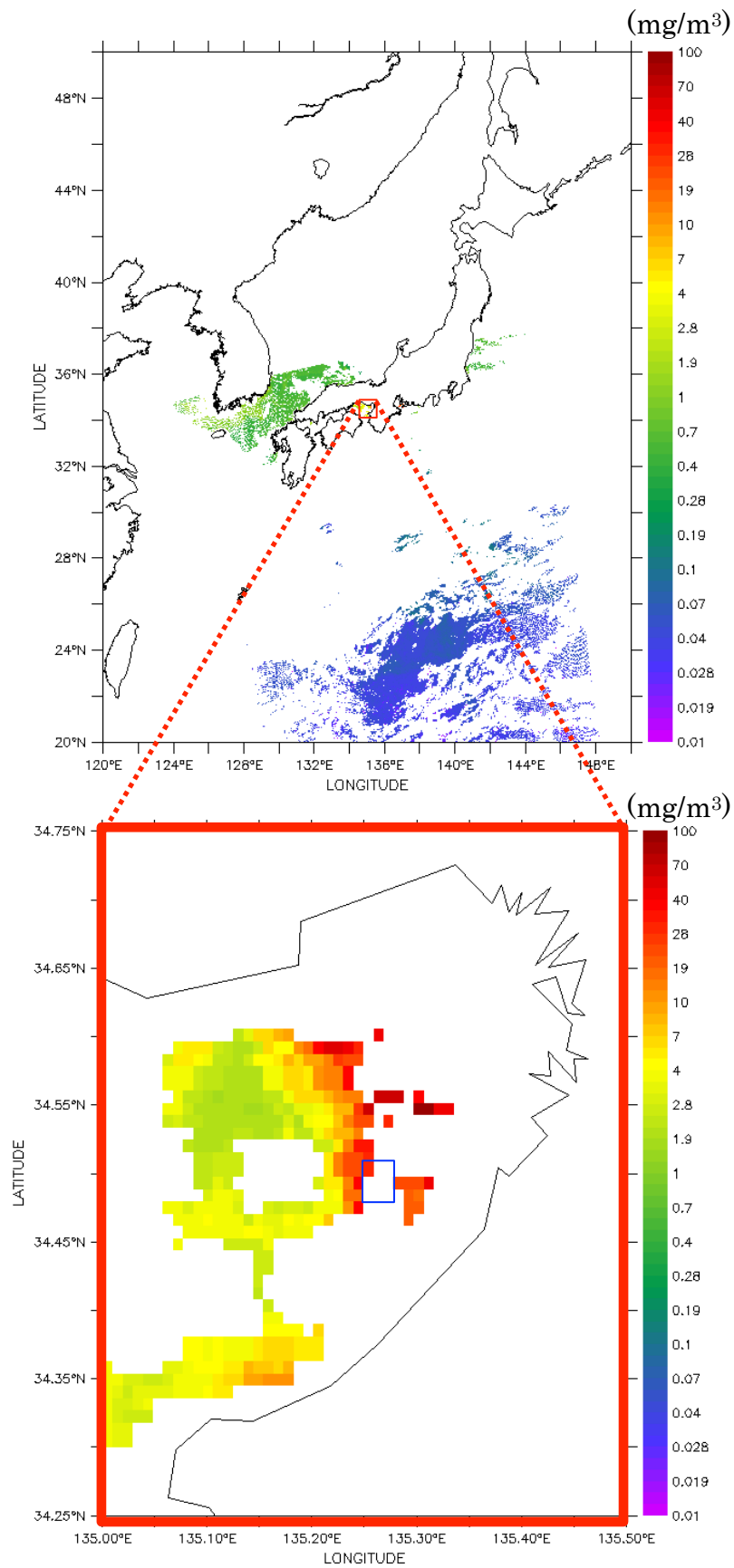


図 3-7. 2008年11月4日における Chl-a 濃度の空間分布

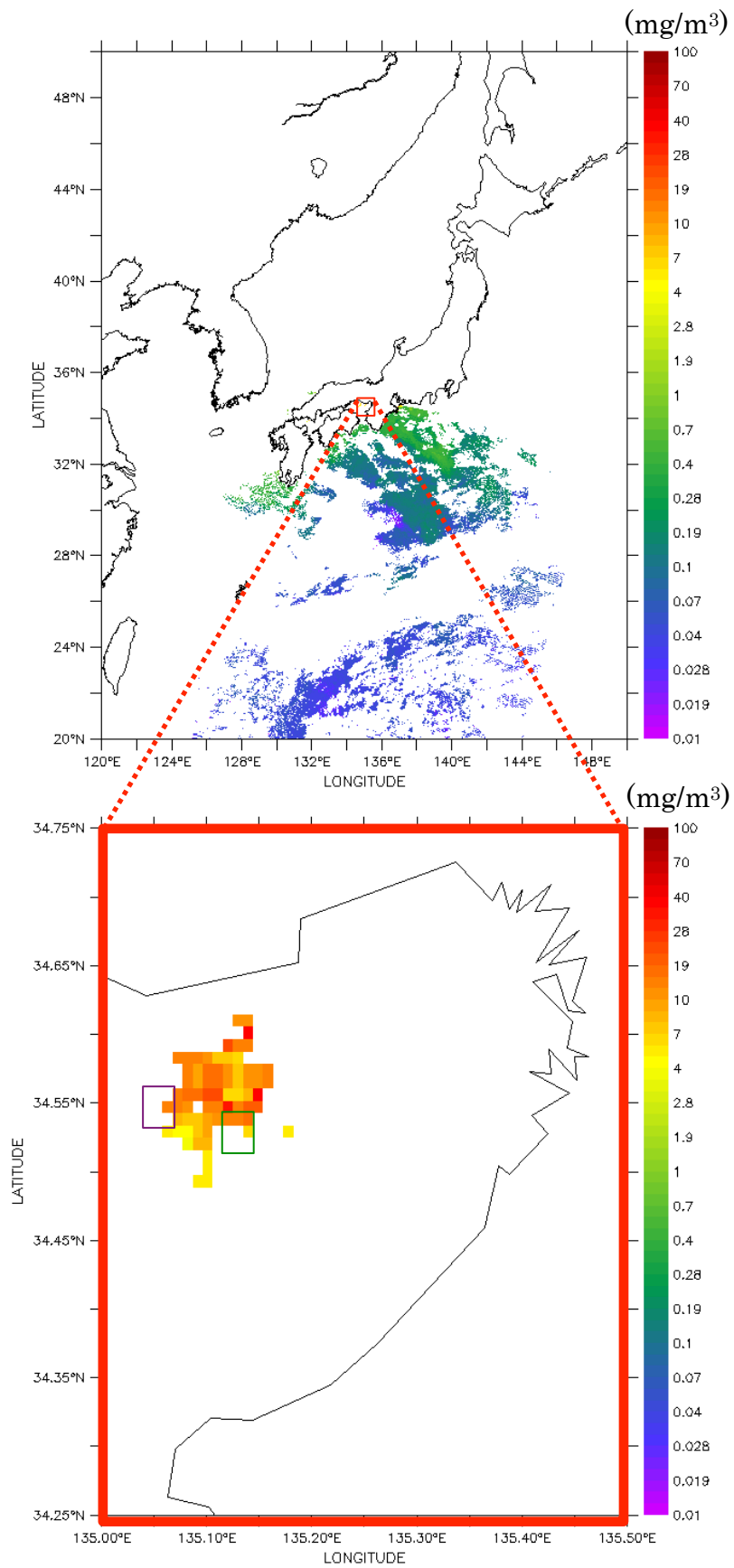


図 3-8. 2008 年 11 月 5 日における Chl-a 濃度の空間分布

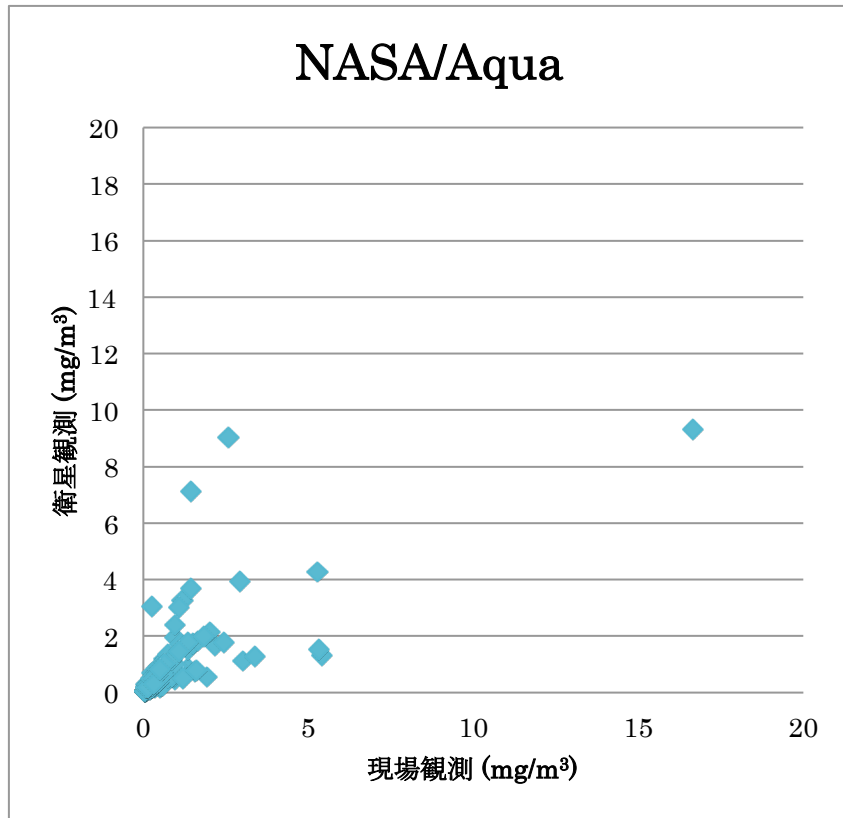


図 3-9-1. 現場観測データと衛星観測データの関係 (JODC・NASA/Aqua)  
(異常値除去)

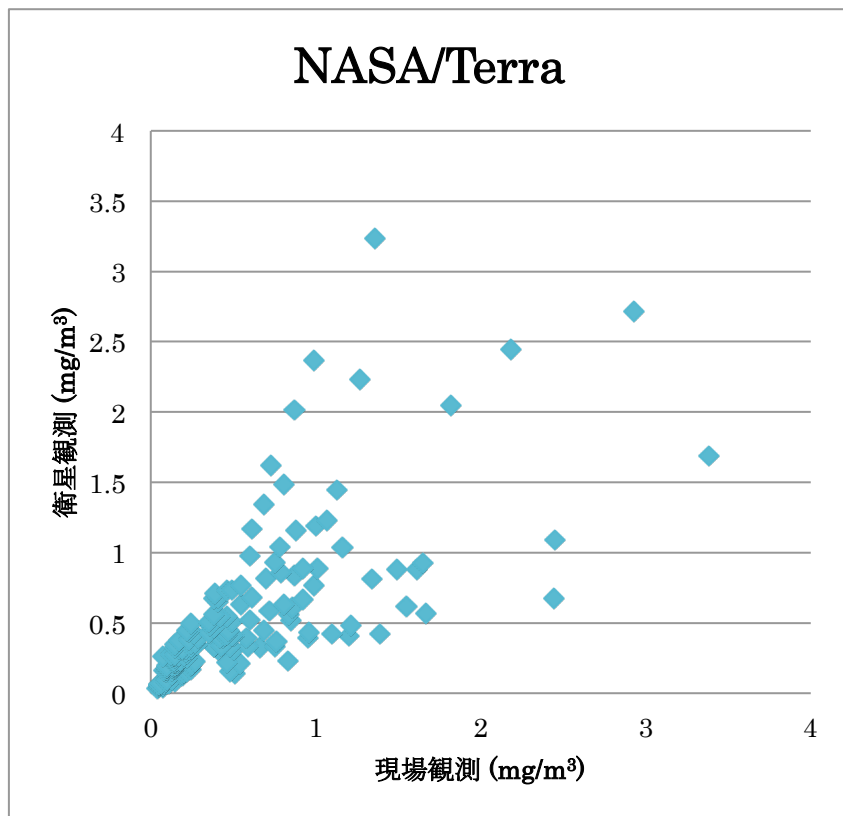


図 3-9-2. 現場観測データと衛星観測データの関係 (JODC・NASA/Terra)  
(異常値除去)

また、今回の対象領域であるオホーツク海のみでの現場観測データを抽出し比較したが、データ数が少なすぎて Aqua に関しては出来ず、Terra に関してもデータ数が NASA のもので 7 つ、JAXA のもので 4 つとかなり少なかった(図 3-10).

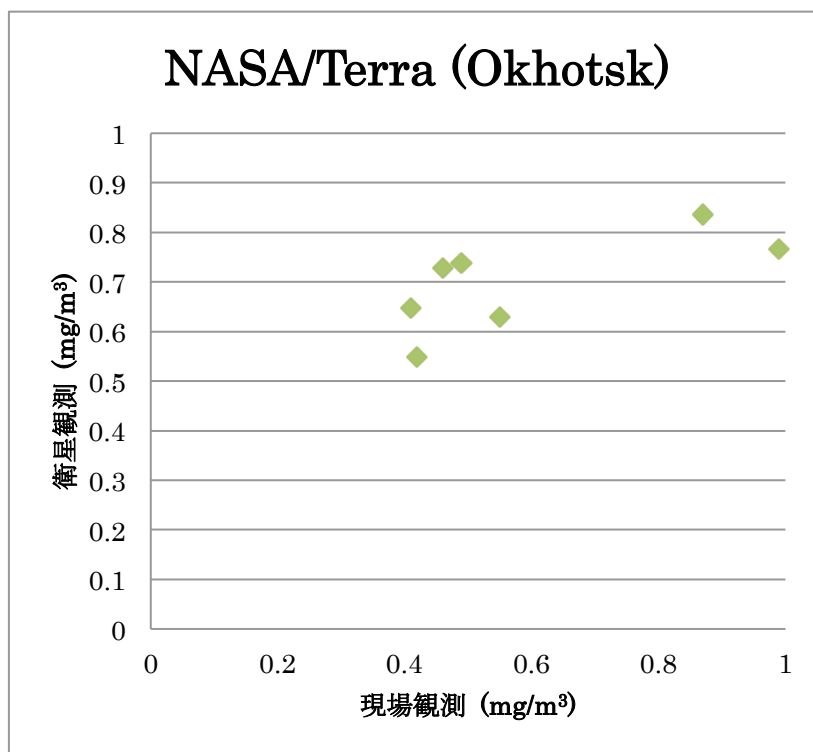


図 3-10-1. 現場観測データと衛星観測データの関係 (JODC・NASA/Terra)

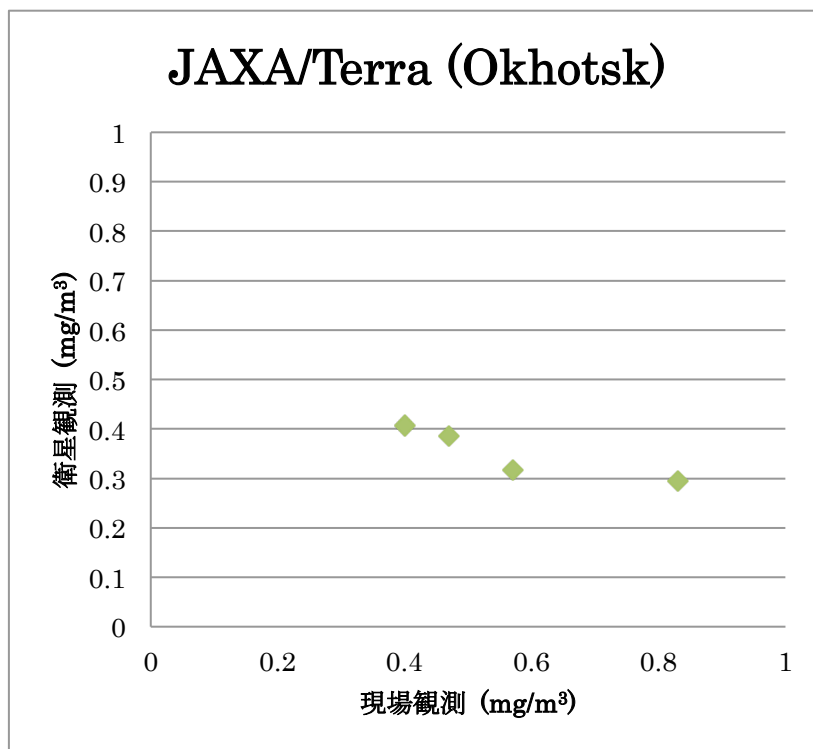


図 3-10-2. 現場観測データと衛星観測データの関係 (JODC・JAXA/Terra)

### 3.2. 北水研の現場観測データとの比較

オホーツク海における衛星観測データの検証には、北海道区水産研究所(北水研)による2003～2007年までの現場観測データを用いた。観測地点を図3-11に示す。観測データ数は133個である。北水研の現場観測データと衛星観測との比較ではデータ数がやや少ないもの、NASAが処理したTerraの衛星観測データと非常に高い相関を示し、相関係数は0.86(N=28, RMSE=0.354)でバラツキも小さい。図3-12, 3-13は現場観測データと衛星観測データの散布図である。JAXA処理よりもNASA処理の方が相関は高かった。表3-1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。

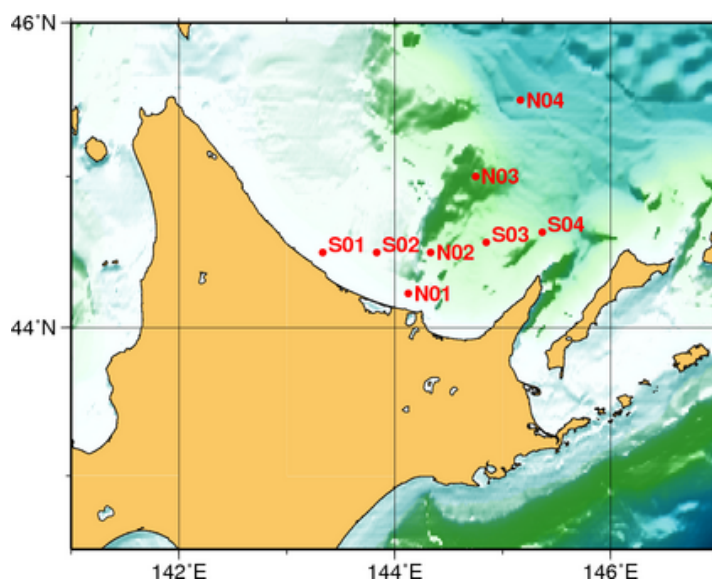


図 3-11. 北水研による観測地点一覧 (出典：北水研 HP)

表 3-1. 現場観測データと衛星観測データの相関係数

|               | NASA<br>/Aqua | NASA<br>/Terra | JAXA<br>/Aqua | JAXA<br>/Terra |
|---------------|---------------|----------------|---------------|----------------|
| JODC          | 0.71          | 0.71           | 0.42          | 0.33           |
| JODC(Okhotsk) | -             | 0.70           | -             | -0.91          |
| 北水研           | 0.48          | 0.86           | 0.37          | 0.36           |

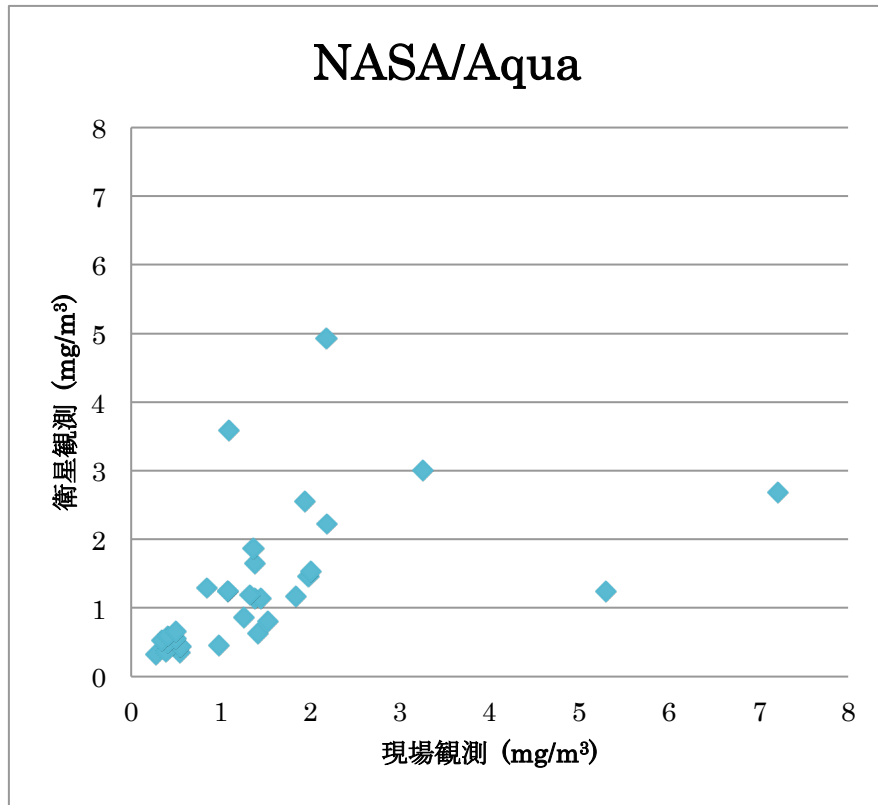


図 3-12-1. 現場観測データと衛星観測データの関係 (北水研・ NASA/Aqua)

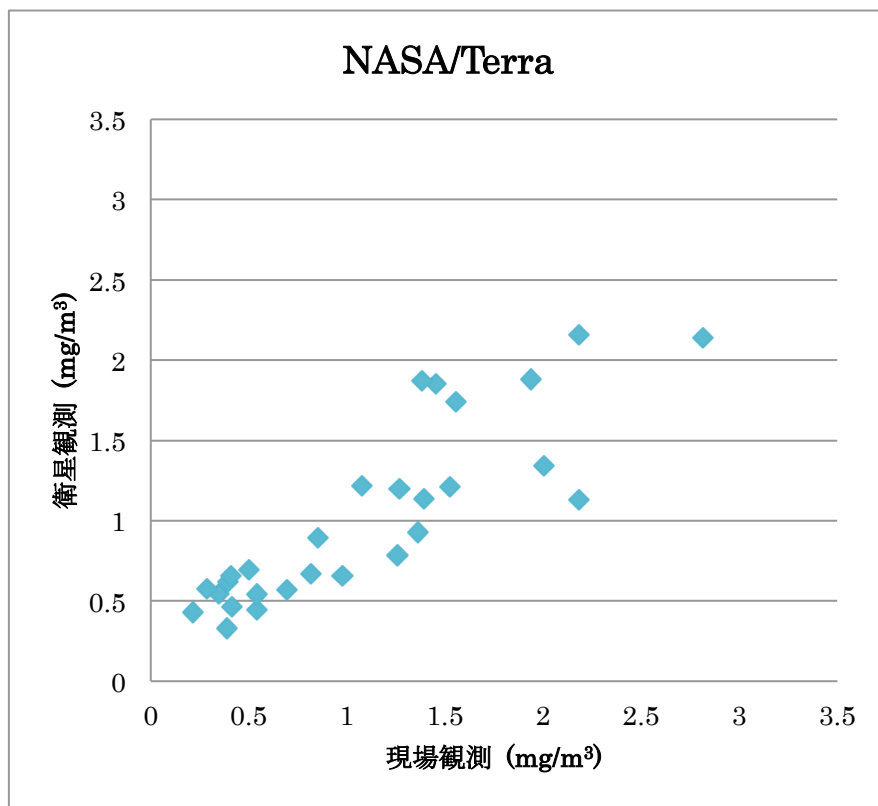


図 3-12-2. 現場観測データと衛星観測データの関係 (北水研・ NASA/Terra)



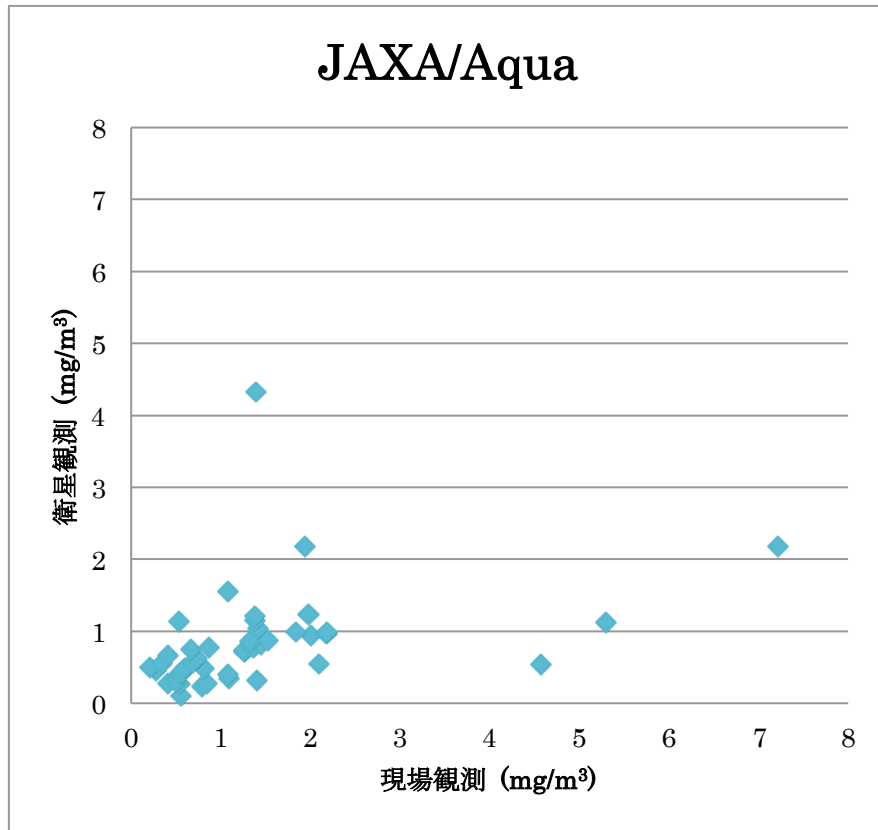


図 3-13-1. 現場観測データと衛星観測データの関係 (北水研・ JAXA/Aqua)

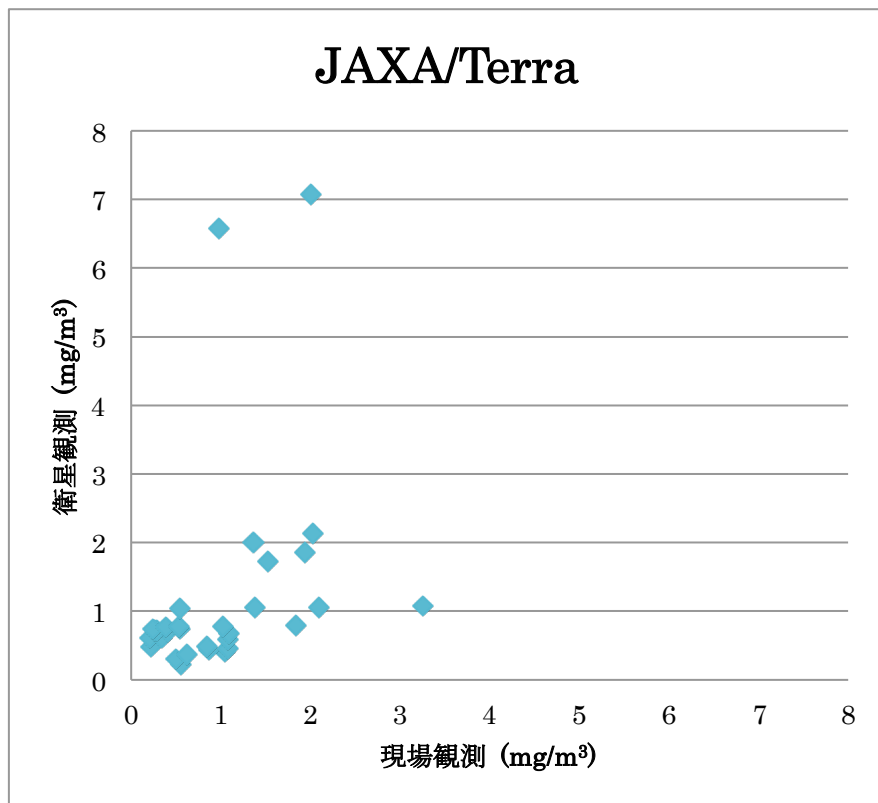


図 3-13-2. 現場観測データと衛星観測データの関係 (北水研・ JAXA/Terra)

### 3.3. 植物プランクトン濃度のデータセット

衛星観測データと JODC, 北水研の現場観測データとの比較では, NASA が処理した衛星観測データの方が JAXA のデータに比べて異常値が少なく, 相関が高い事がわかった. これは Chl-a 推定アルゴリズムの中での大気補正の際, 雲の判別に関して, JAXA の方が甘いからだと考えられる.

オホーツク海だけに限って見れば, NASA/Terra のデータとの相関が一番高かった. 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考えた. 今回の研究対象エリアは北緯 40~65°, 東経 140~165° であり, それに対応する 2125×2783 グリッド(解像度: 約 0.012° × 0.009°) の Chl-a 濃度データセットを作成した. このデータセットと現場観測データの関係を図 3-14 に示す. 相関係数は 0.62 (N=41, RMSE=1.082) だった.

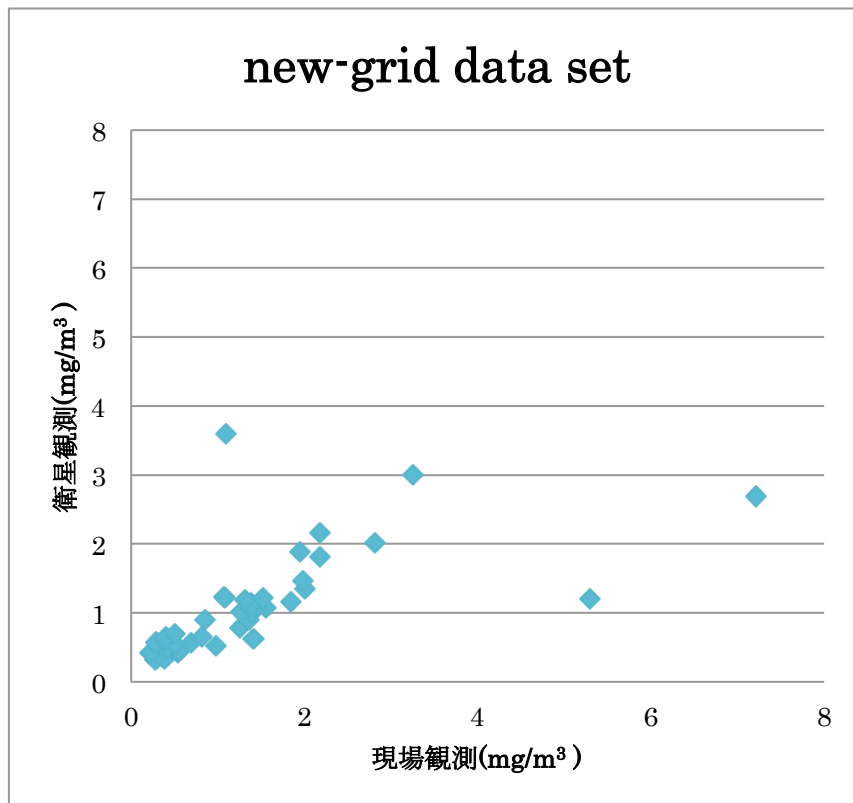


図 3-14. 現場観測データと衛星観測データの関係  
(北水研・解像度約 0.012° × 0.009°)

また、気象・海洋データとの比較のために、解像度約  $0.29^{\circ} \times 0.22^{\circ}$  ( $85 \times 111$  グリッド) のデータセットを作成もした。このデータセットはより広い範囲をカバー出来る点でも有用である。

解像度約  $0.29^{\circ} \times 0.22^{\circ}$  の Chl-a 濃度データセットは、Terra のデータを元に足りない部分を Aqua のデータで補完した、解像度約  $0.012^{\circ} \times 0.009^{\circ}$  のデータセットを元に作成した。解像度約  $0.29^{\circ} \times 0.22^{\circ}$  の各グリッドの中には、対応する解像度約  $0.012^{\circ} \times 0.009^{\circ}$  のグリッドが 625 グリッド ( $25 \times 25$  グリッド) 存在する。欠損値以外をピックアップし、平均する事でオホーツク海をカバーする解像度約  $0.29^{\circ} \times 0.22^{\circ}$  のデータセットを作成した。図 3-15 は 2004 年 5 月 27 日における Chl-a 濃度の空間分布である。解像度が 25 倍荒くなったデータでも、Chl-a 濃度の分布はよく表現できている事がわかる。

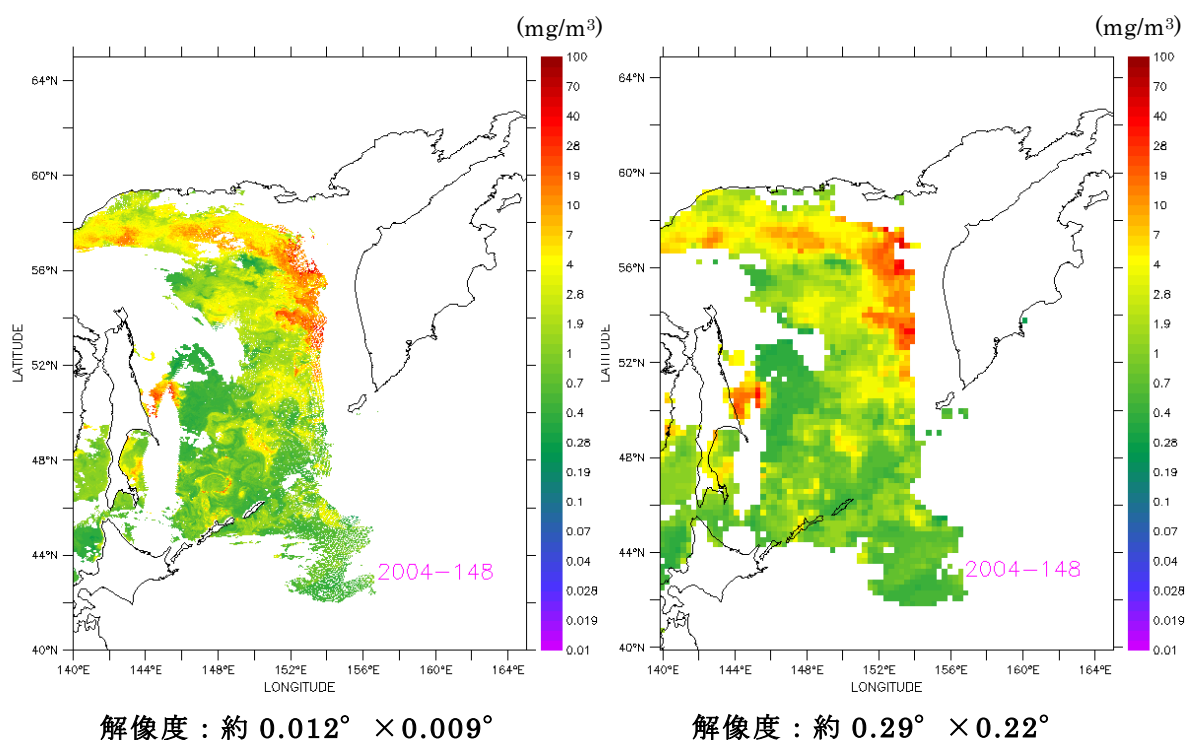


図 3-15. 2004 年 5 月 27 日における Chl-a 濃度

## 第4章 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

はじめに、オホーツク海における春季ブルームの特徴を調べた。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。図4-1は2003年から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。

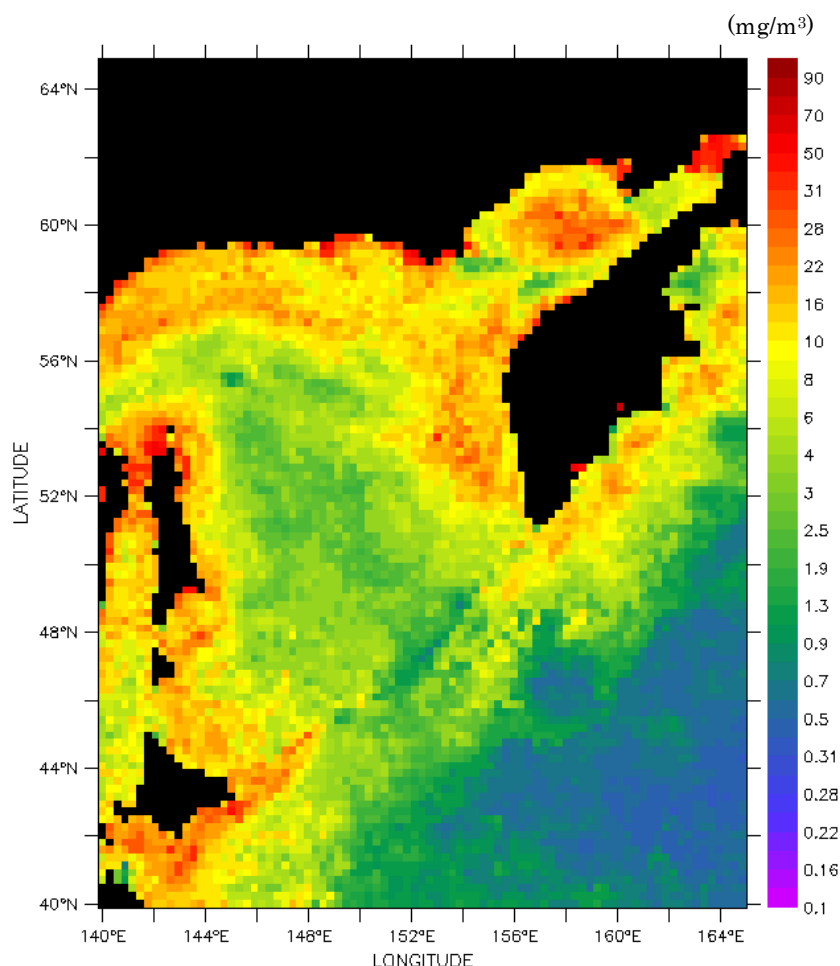


図 4-1. 春季ブルーム時の Chl-a 濃度の 9 年間平均値  
(2003～2011 年)

図 4-2 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 月の終わり頃から太平洋や北海道周辺でブルームが発生し始める。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 月から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。

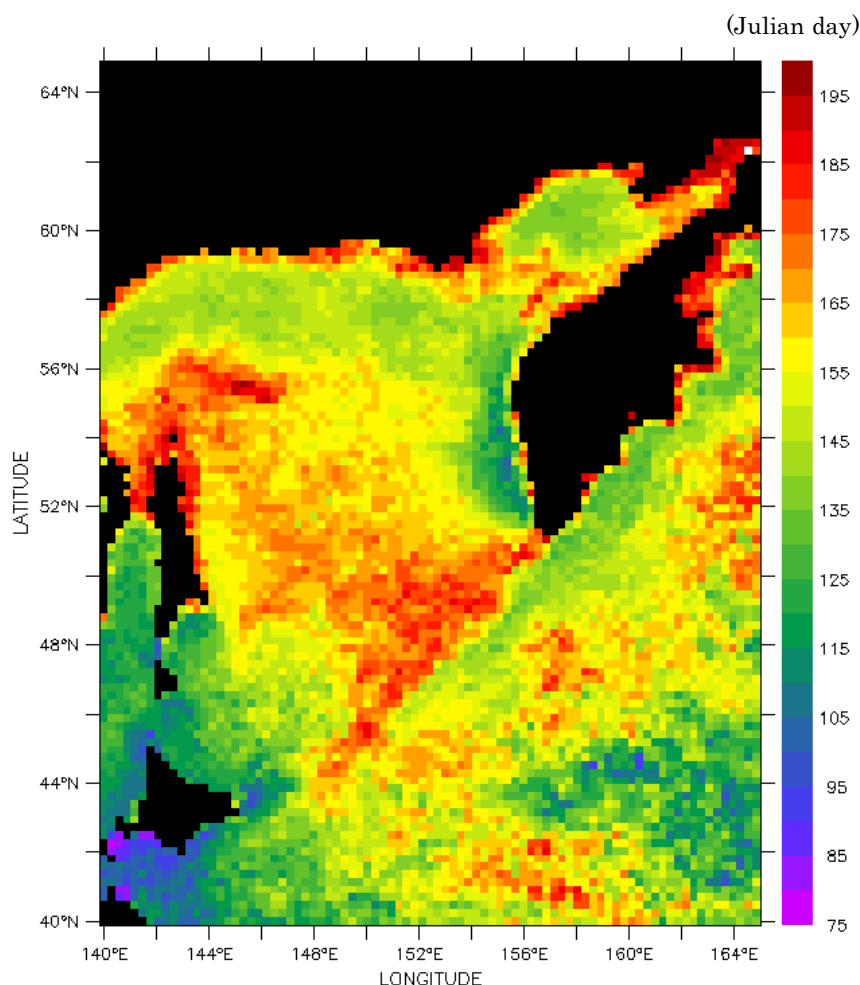


図 4-2. 春季ブルーム発生日の 9 年間平均値  
(2003～2011 年)

また、春季ブルーム時の Chl-a 濃度最大値とその発生日は年によって大きく異なる。図 4-3, 4-4 は春季ブルーム時の Chl-a 濃度、春季ブルーム発生日に関して、それぞれ平年値からの偏差を示したものである。まず、Chl-a 濃度の最大値に注目すると、オホーツク海において春季ブルームが全体で強い年や弱い年があるわけではなく、数百 km のスケールで年々変動している事がわかる。一方、ブルーム発生日に関しては、もっと大きい 1000km のスケールで変動が見られる。例えば 2005 年はほぼ全域でブルームが遅いのに対し、2008 年はブルームが早く起こった。

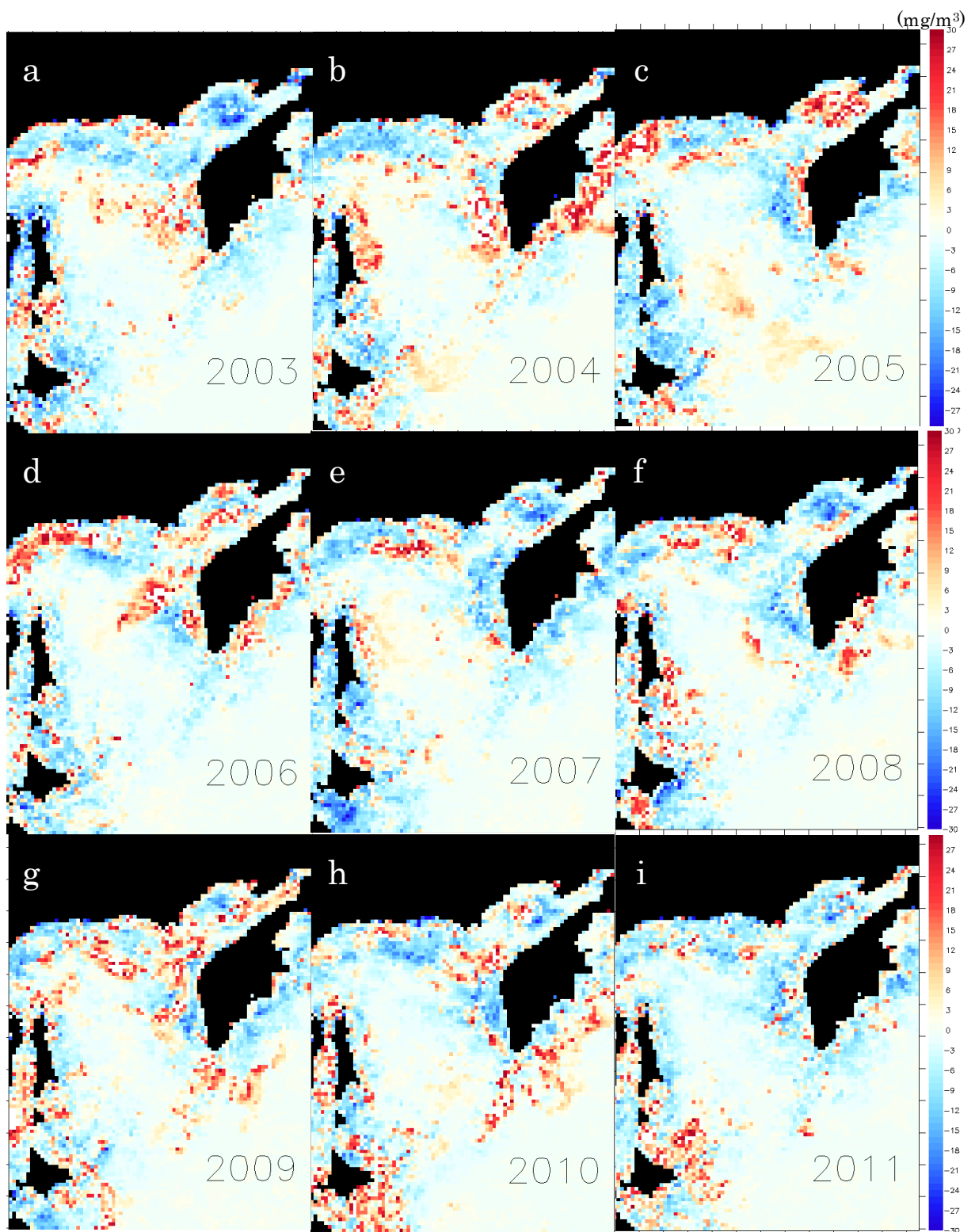


図 4-3. 春季ブルームの強さの偏差  
 (a:2003 年, b:2004 年, c:2005 年, d:2006 年,  
 e:2007 年, f:2008 年, g:2009 年, h:2010 年, i:2011 年)

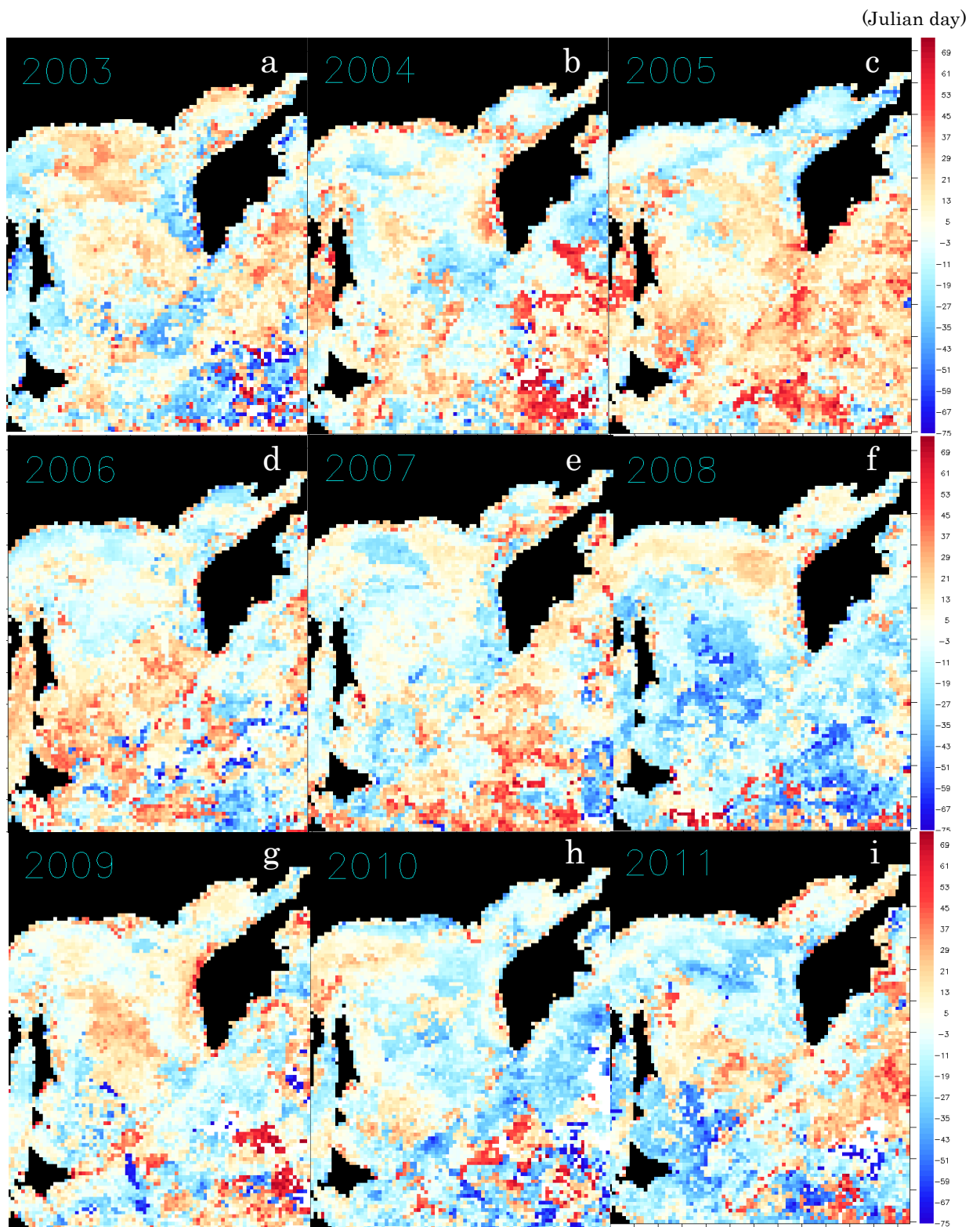


図 4-4. 春季ブルーム発生日の偏差  
 (a:2003 年, b:2004 年, c:2005 年, d:2006 年,  
 e:2007 年, f:2008 年, g:2009 年, h:2010 年, i:2011 年)

## 4.2. 春季ブルームと海氷の関係

オホーツク海は季節海氷域でありその氷縁部は生物生産性が高いと言われているが、植物プランクトンと海氷との関わり合いは未だ不明な点が多い。そこでオホーツク海において海氷と春季ブルームの関係について解析した。

まず、植物プランクトンの増殖には海氷の融解に伴うアイスアルジーの放出が関係していると言われている。そこで、人工衛星データから計算された冬から春にかけての海氷融解量と春季ブルームの関係を調べた。海氷融解量は中野(2013) [21]で「海氷消滅量」として計算されている。各グリッドでの海氷の生成量・消滅量は海氷面積の時間的変化と周囲8グリッドからの海氷の流入量から計算される(図 4-5)。

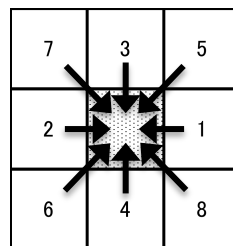


図 4-5. 海氷密接度と漂流速度を用いた海氷生成量の計算方法

(出典：中野(2013))

$$P(t) = \{A(t+1) - A(t)\} - \sum_{i=1}^8 F_i(t)$$

$t$  日目の着目グリッドにおける生成量  $P(t)$  は上式で求められる。ここで、 $A$  は海氷面積を、 $F_i(t)$  はグリッド  $i$  からの海氷流入量を表す。 $P(t)$  が負の場合は消滅量を表す。



図 4-6 は 2003～2011 年の 9 年間における海氷融解量と春季ブルーム発生時の Chl-a 濃度最大値の相関係数である。また、相関係数は各グリッドについて最大 9 組のデータから計算している。相関係数の有意性について表 4-1 にまとめた。オホーツク海中央部から南部にかけて負の相関が見られた。しかし有意水準 5% で有意なグリッドのみ抽出すると (図 4-6: 右図), 有意な相関関係はほとんど見られなかった。つまり、海氷融解量はブルームの強さにあまり影響を与えないといえる。

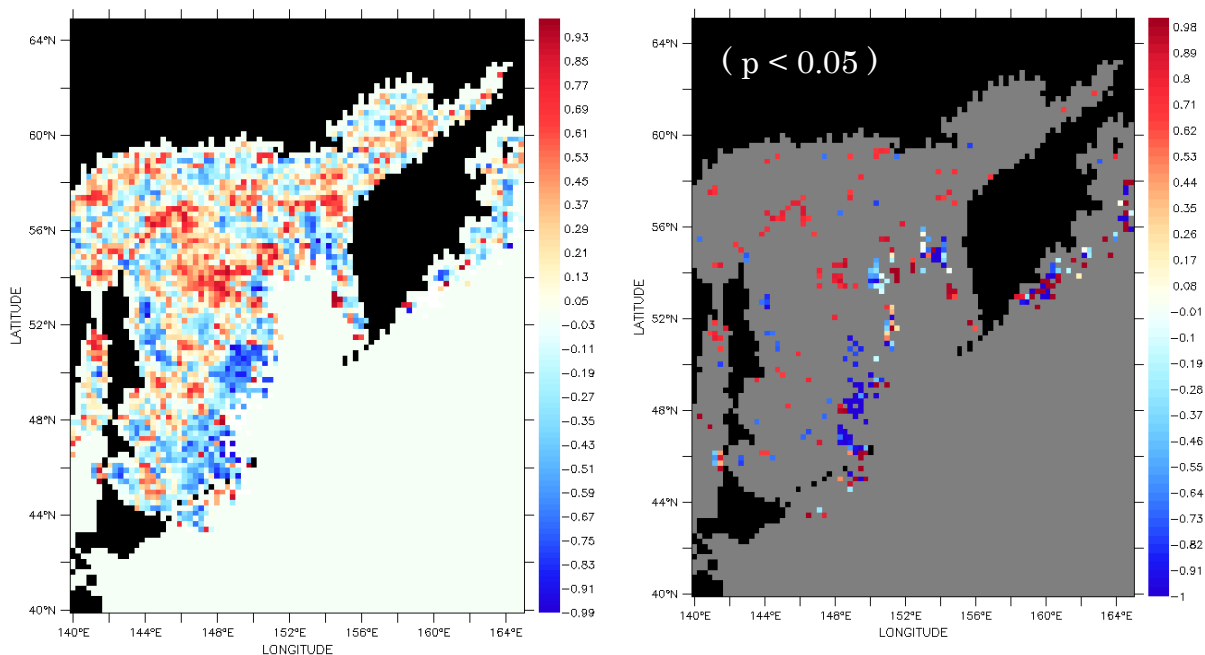


図 4-6. 海氷融解量と春季ブルームの強さの相関

表 4-1. 相関係数検定表

| サンプル数 | 有意水準 5%  |
|-------|----------|
| 3     | 0.996917 |
| 4     | 0.950000 |
| 5     | 0.878339 |
| 6     | 0.811401 |
| 7     | 0.754492 |
| 8     | 0.706734 |
| 9     | 0.666384 |

図 4-7 では海氷融解量と春季ブルームの発生日の相関係数の分布を示す。沿岸部では正の相関が見られた。しかし有意水準 5% で有意な相関係数のみ抽出すると(図 4-7: 右図), 有意な相関関係はほとんど見られなかった。つまり, 海氷融解量はブルーム発生日にあまり影響を与えないといえる。

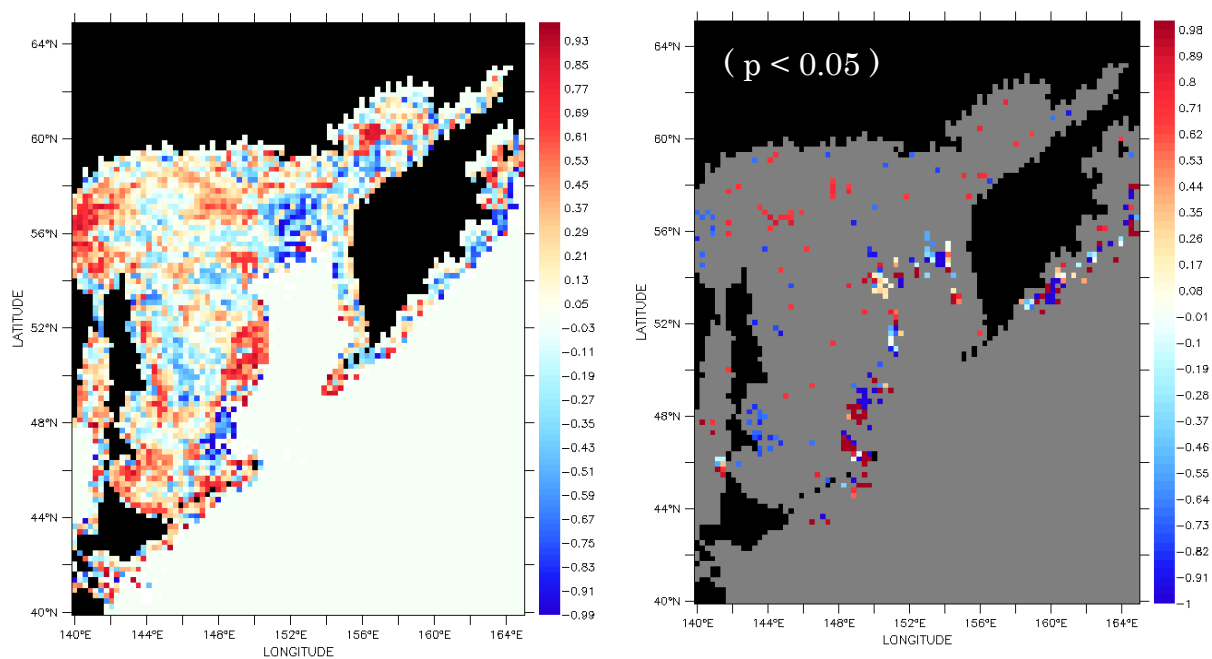


図 4-7. 海氷融解量と春季ブルーム発生日の相関

次に海氷後退日と春季ブルームの関係について調べた。海氷後退日は2月から6月までの間で最後に海氷密接度が15%を下回った日と定義した。図4-8はサハリン東岸沖における2004年の海氷密接度とChl-a濃度の日変化を示したものである。例えばこの場合、125日目で海氷密接度が15%以下になっているが、その後127日目に再び15%を超え、128日目に15%を下回ったので、海氷後退日は128日目となる。

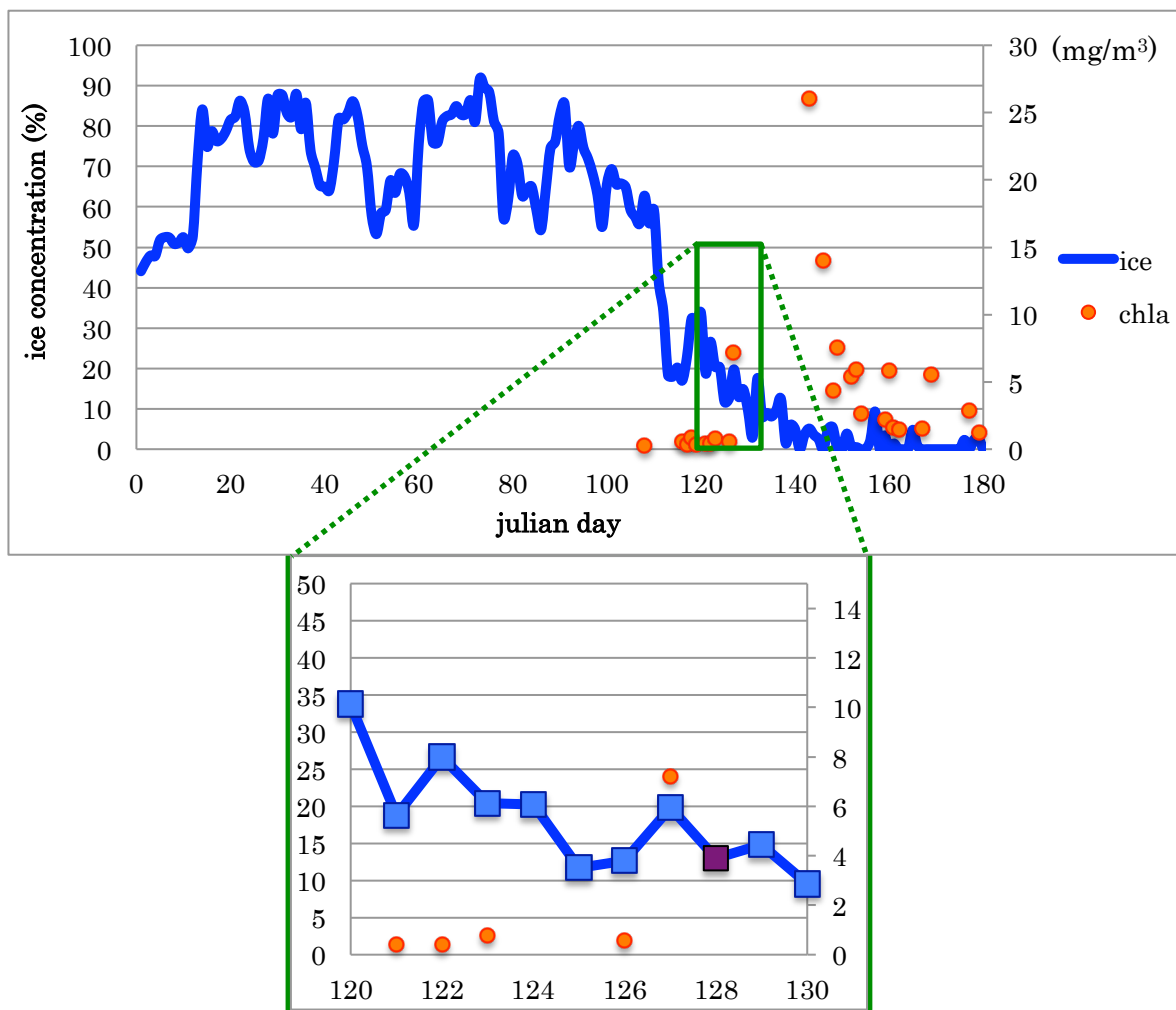


図 4-8. 海氷密接度と Chl-a 濃度の日変化

図 4-9 は、2003～2011 年の 9 年間における海氷後退日と春季ブルーム発生時の Chl-a 濃度最大値との相関係数である。海氷後退日と春季ブルームの強さの間には負の相関が卓越している。これは海氷融解が遅かった年は春季ブルームが弱かった事を示している。しかし、有意水準 5% で有意な相関係数のみを抽出すると (図 4-9 : 右図), あまり明瞭な関係は見られなかった。つまり、海氷がどれだけ遅くまで残っているかはブルームの強さにあまり影響を与えないといえる。

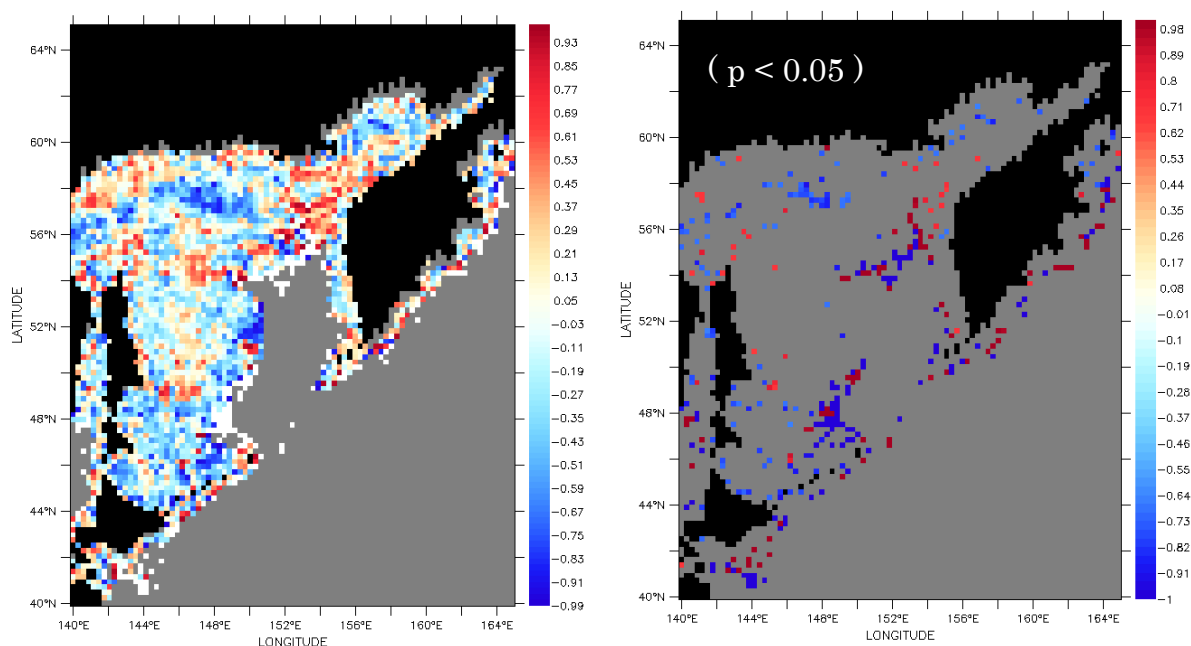


図 4-9. 海氷後退日と春季ブルームの強さの相関

図 4-10 は海氷後退日と春季ブルームの発生日の相関係数を計算したものである。春季ブルームの発生日と海氷後退日の間には正の相関がやや卓越している。これは海氷が遅くまで残っていた年は春季ブルームが遅かった事を示している。しかし、有意水準 5%で有意な相関係数のみを抽出すると(図 4-10：右図)，あまり明瞭な関係は見られなかった。つまり、海氷がどれだけ遅くまで残っているかはブルーム発生日にあまり影響を与えないといえる。

以上の事から海氷の融解量や滞在期間は春季ブルームにあまり影響を与えていないと考えられる。

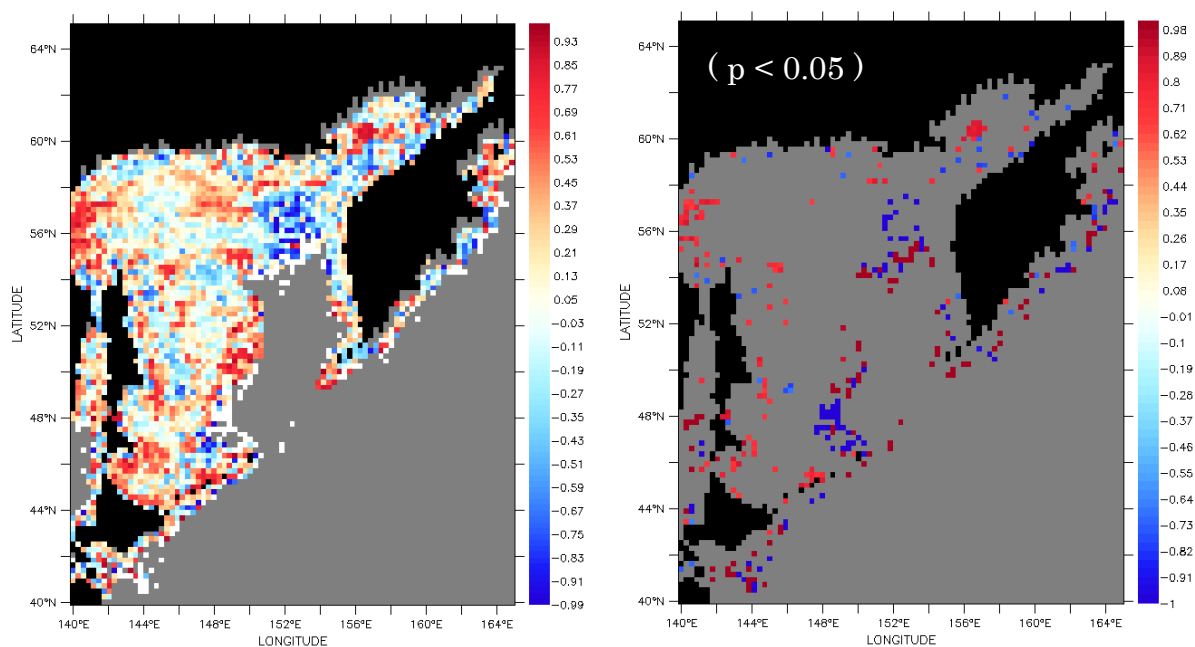


図 4-10. 海氷後退日と春季ブルーム発生日の相関

図 4-11 は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相関係数である。太平洋では正の相関が強く、ブルームが強い沿岸域では負の相関が卓越している。つまり、太平洋では春季ブルームの発生が遅い年ほど強く、逆に沿岸部では発生が早い年ほど強いという事になる。オホーツク海の沿岸部は負の相関が卓越しているが、海氷の存在しないカムチャツカ半島南部周辺・東岸でも同様の傾向が見られる。そこで、オホーツク海の中で同緯度に位置し、春季ブルームの強さがほぼ同じで、水深の浅い沿岸の中から、一方は毎年海氷に覆われ、もう一方はほぼ海氷が形成されない二つのエリアを選び出し、春季ブルームと海氷の関係について比較し検討した。

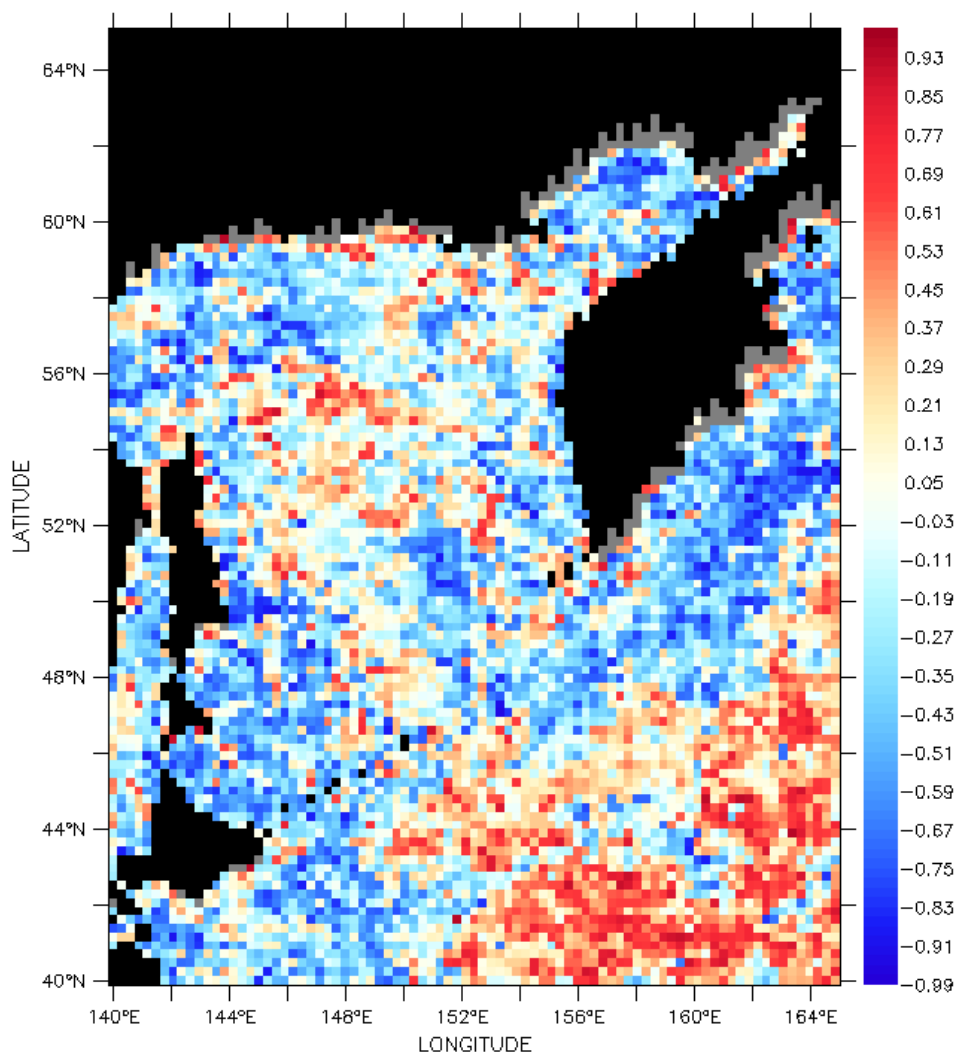


図 4-11. 春季ブルームの強さと発生日の相関

図 4-12 のように樺太東岸沖を A2 エリア、カムチャツカ半島西岸沖を C2 エリアとした。図 4-13 はそれぞれのエリアにおける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散布図である。海氷に覆われるエリアの A2 は、海氷がのらない C2 エリアに比べて春季ブルームの発生が遅く、バラツキも少ない。一方春季ブルームの強さに関しては A2 エリアの方が強い年の最大値がやや高い。図 4-14 は春季ブルーム発生時の Chl-a 濃度の最大値の経年変化を示し、図 4-15 は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・発生日共に海氷に覆われる A2 と覆われない C2 は似た経年変化をしている。つまり、春季ブルームの年変化は海氷状況に影響を受けていないと考えられる。そこで、春季ブルームに対してより大きなスケールで影響を与える気象要素等との関係を調べる必要がある。

また、図 4-15 では、海氷に覆われる A2 のブルーム発生日が C2 に比べて遅い事がわかる。A2 では 4 月下旬から 5 月中旬まで海氷に覆われている事が多いため、海氷の存在により早期のブルームの発生が妨げられていると考えられる。

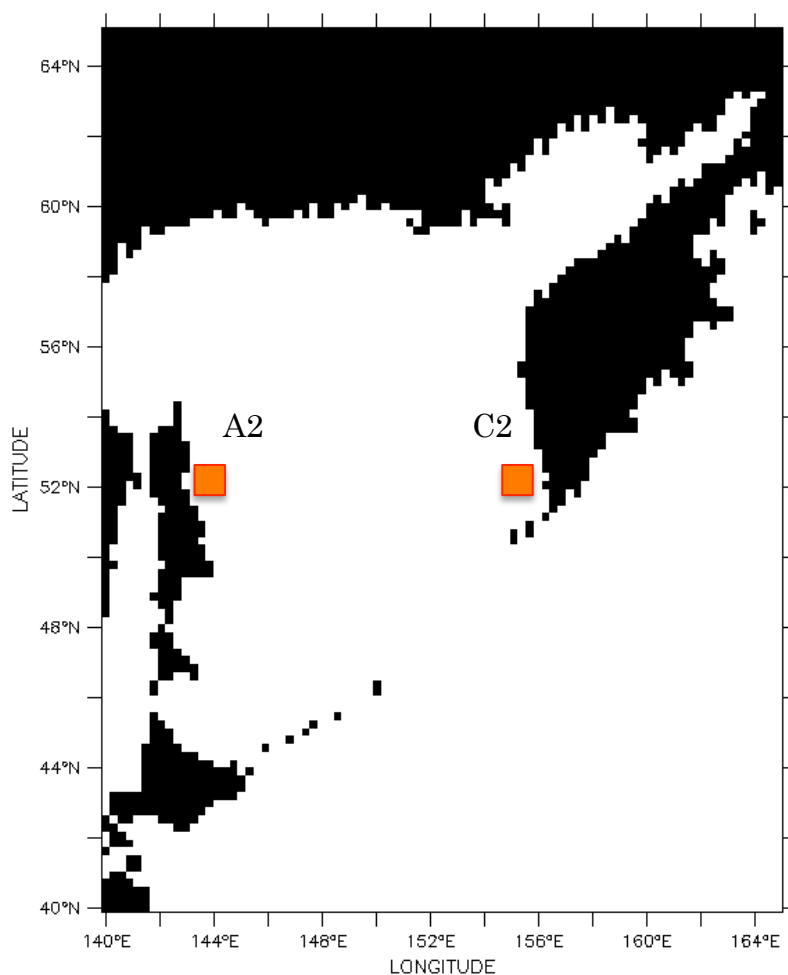


図 4-12. エリア A2 と C2

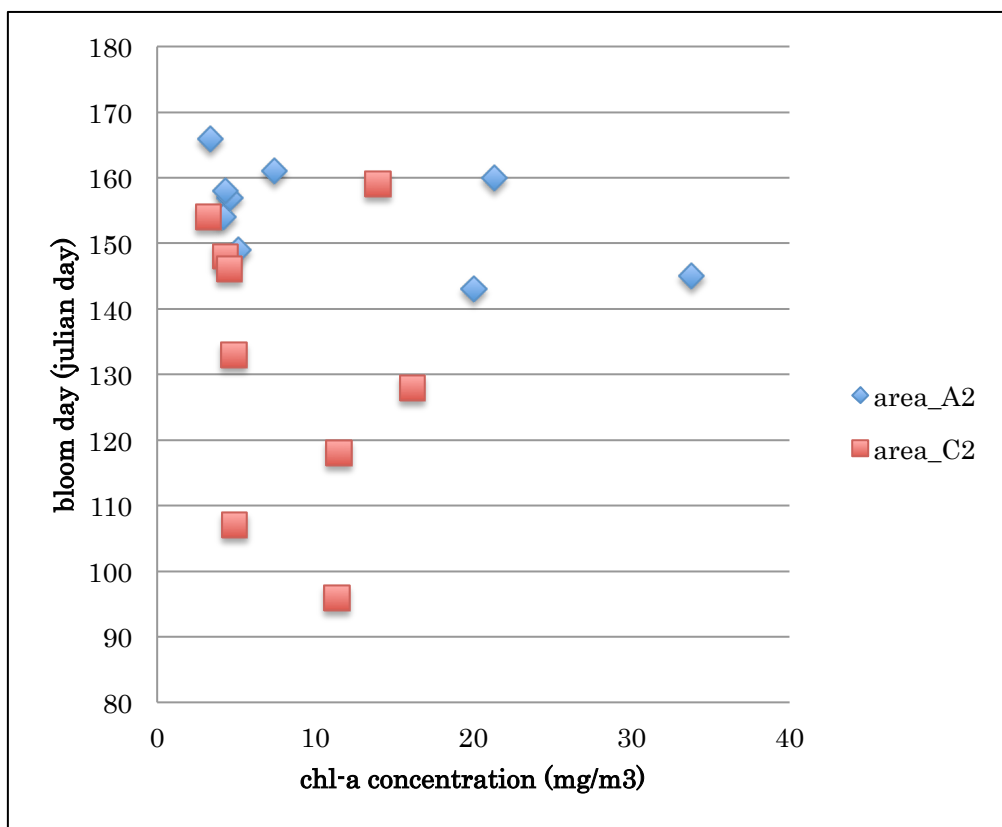


図 4-13. 春季ブルームの強さと発生日の関係

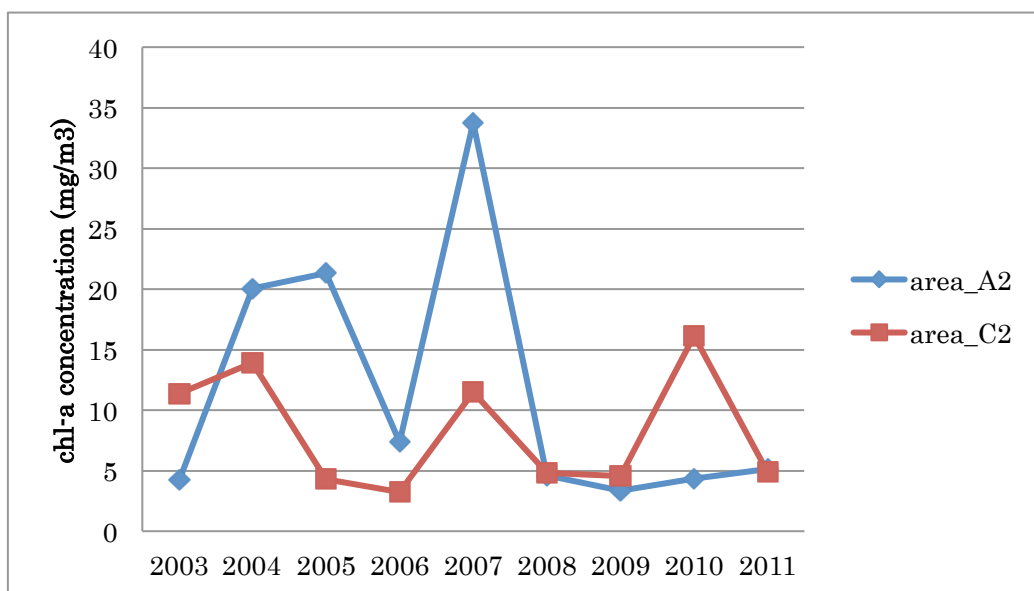


図 4-14. 春季ブルームの強さの経年変化





図 4-15. 春季ブルーム発生日の経年変化

### 4. 3. 気温と春季ブルームの関係

まずは気温と春季ブルームの関係を調べた。気温は植物プランクトンの増殖速度に影響を与える。また、大気は海洋との相互作用があり、気温は海洋に様々な影響を与えたり受けたりする。図 4-16 は各グリッドにおける春季ブルーム発生前の気温の偏差と春季ブルーム時の Chl-a 濃度の最大値の相関を計算したものである。ブルーム発生前の気温の偏差とは、ブルームが起こった日から数えて前 1 週間と前 2 週間それぞれにおける、気温の平年値からの差の平均である。また、それぞれブルームの強い海域(春季ブルーム時の Chl-a 濃度の 9 年間平均が  $5\text{mg}/\text{m}^3$  以上の海域)のみを抽出した。ブルームが強いエリアに限らず、オホーツク海を中心に、全体的にやや正の相関が見られた。つまり、春季ブルーム発直前の気温が平年よりも高いとブルームは強くなる傾向がある。

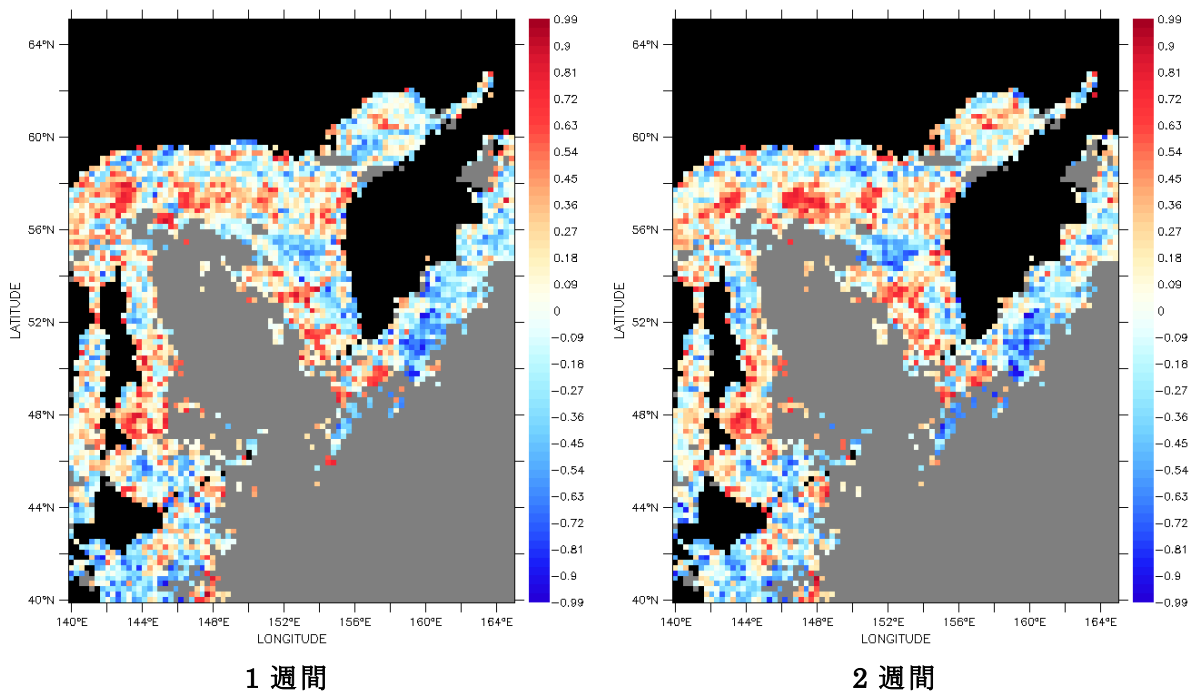
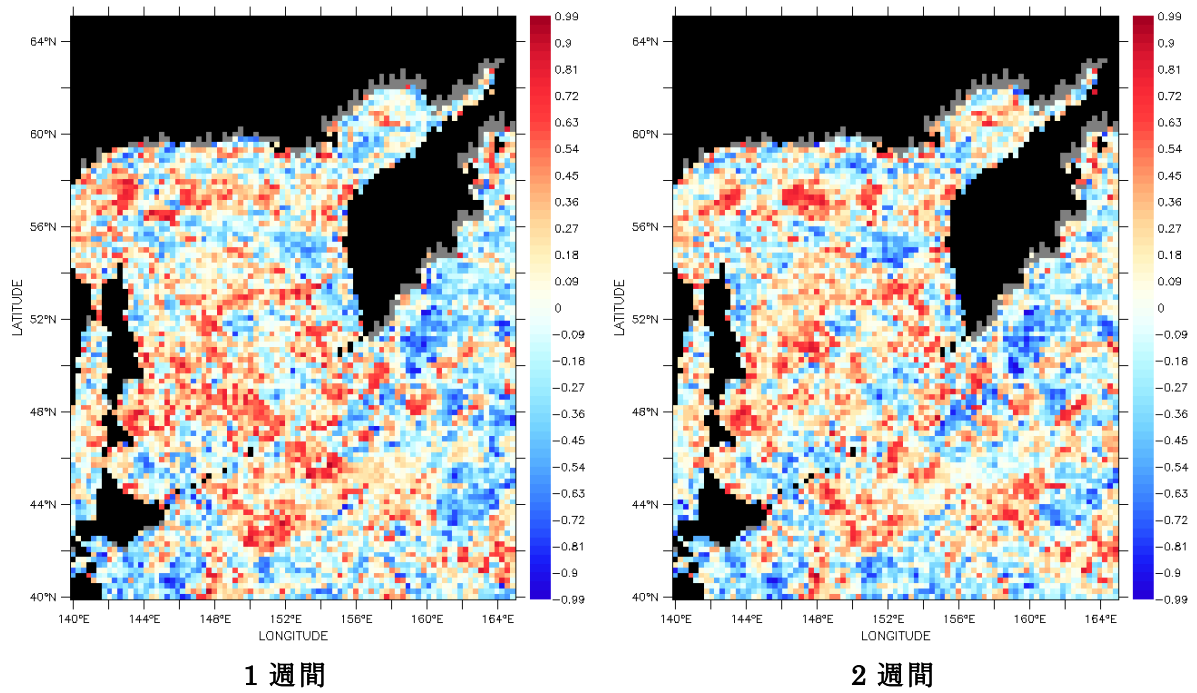


図 4-16. 気温の偏差と春季ブルームの強さの関係  
(下段：ブルームが強い海域のみ)

図 4-17 はブルーム直前の気温の偏差と春季ブルーム発生日の相関を計算したものである。オホーツク海と太平洋で関係に違いが見られた。特に、ブルームが強いエリアにおいては、オホーツク海でブルーム直前の気温が平年より高いと早まり、太平洋では逆に遅くなる。以上より、相関分布にややバラツキがあるものの、ブルームの強いエリアでは、ブルーム直前の気温が平年より高いと、ブルームが早く起こり、強さは強い傾向がある事がわかった。これは気温が高くなる事によって植物プランクトンの増殖速度が上がるためだと考えられる。

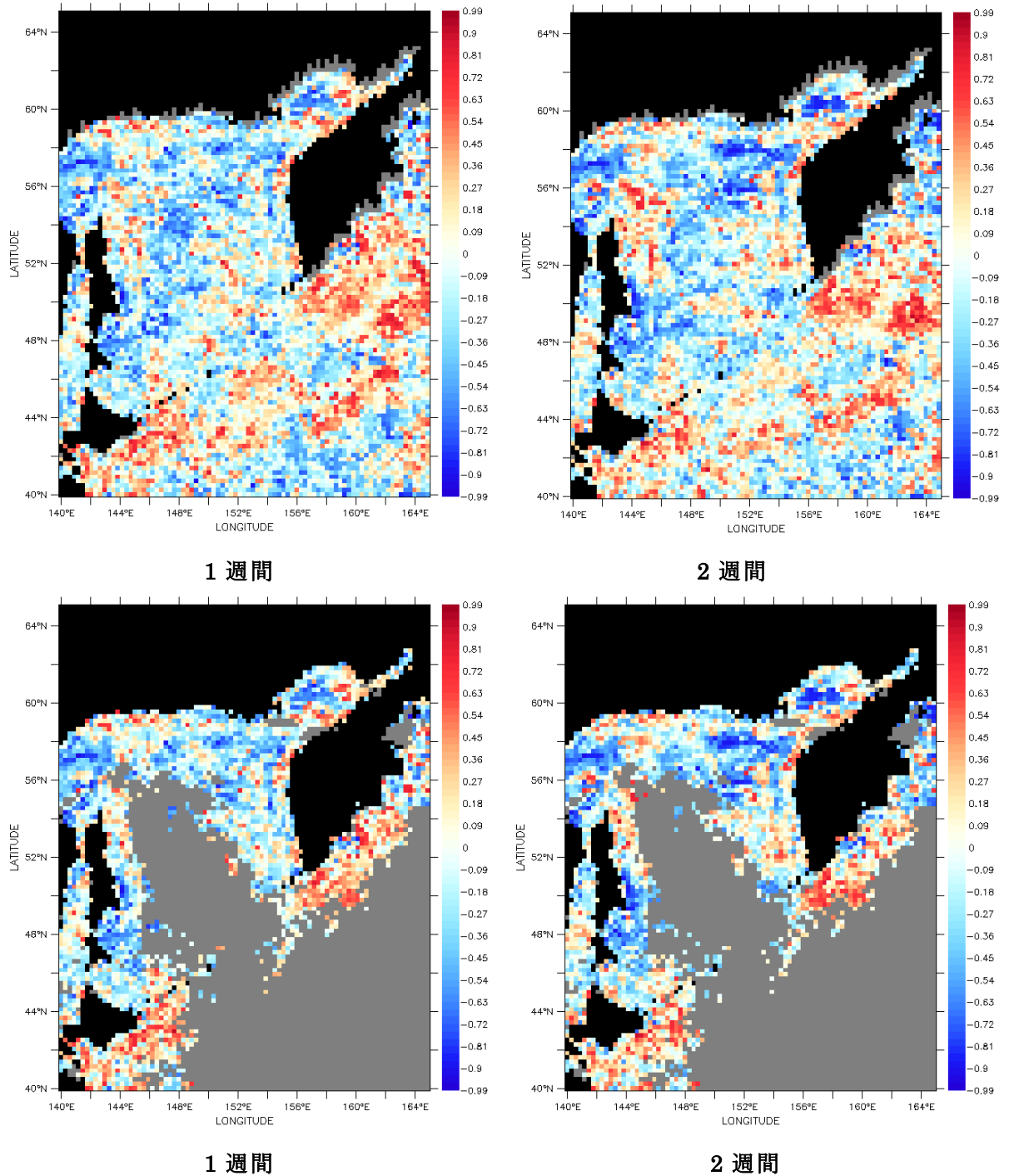


図 4-17. 気温の偏差と春季ブルーム発生日の関係  
(下段：ブルームが強い海域のみ)

図 4-18 は 3 月から 6 月の月平均気温と、春季ブルーム時の Ch1-a 濃度の最大値の相関を計算したものである。4 月以降はそれ以前の月で起こったブルームを除いて計算した。また、それぞれブルームの強い海域のみを抽出した。ブルームが強い海域の中でも、オホーツク海の南部と北部で 3・4 月に平均気温とブルームの強さの間に正の相関が見られた。北部では 5・6 月も正の相関を示した。しかし、全体的にはバラツキが大きく、明瞭な関係は見られなかった。

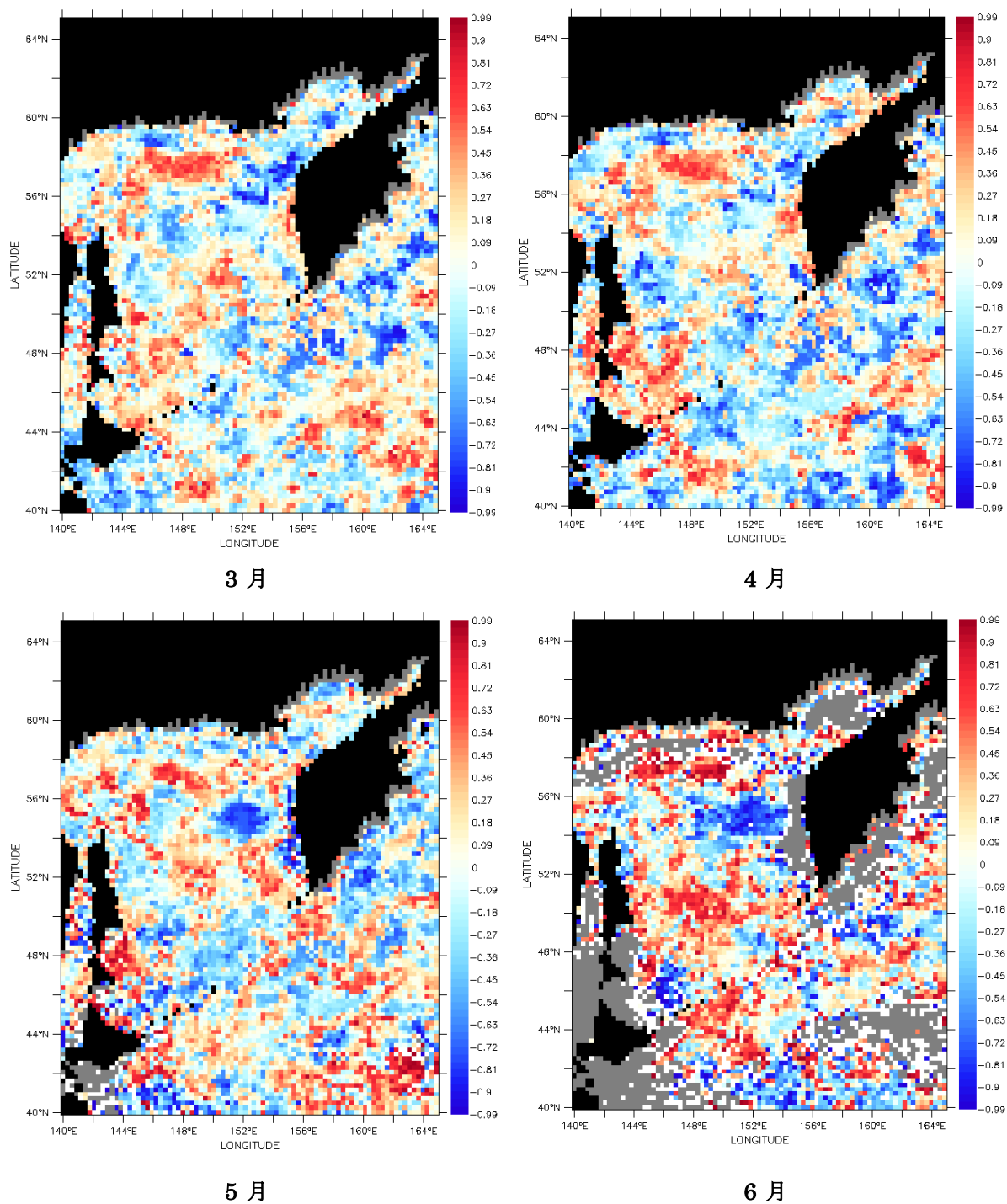
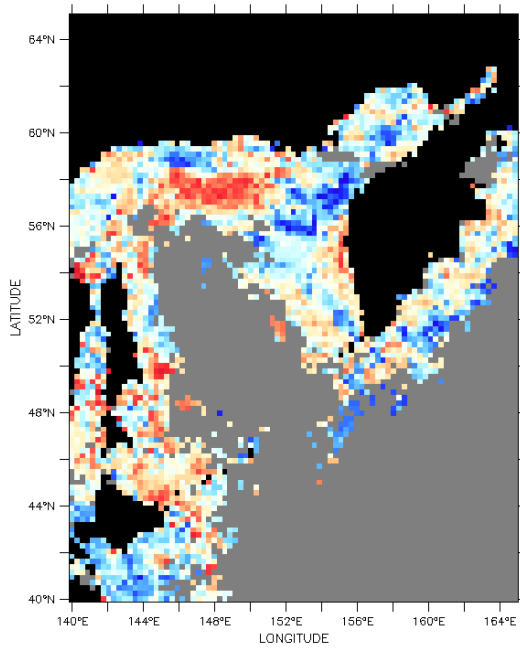
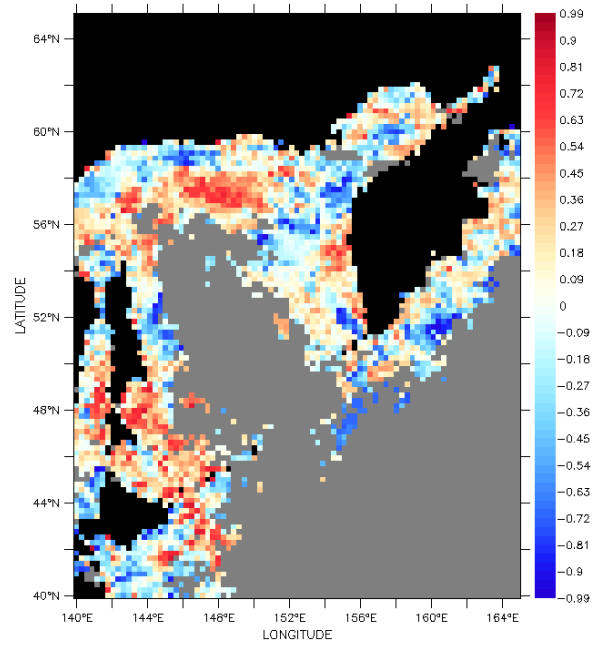


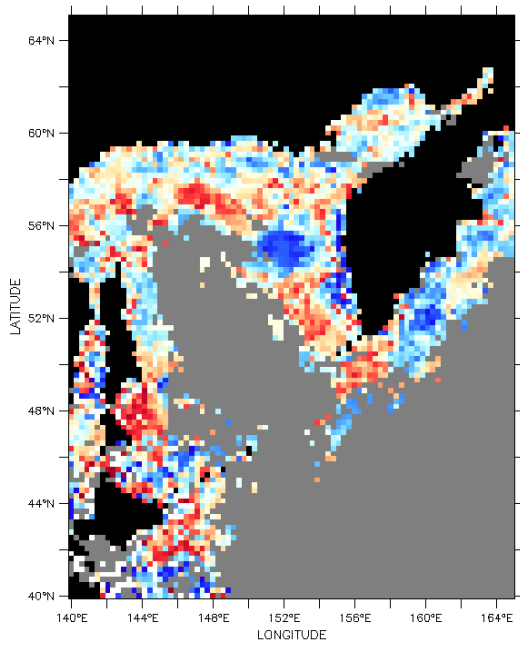
図 4-18-1. 月平均気温と春季ブルームの強さの関係



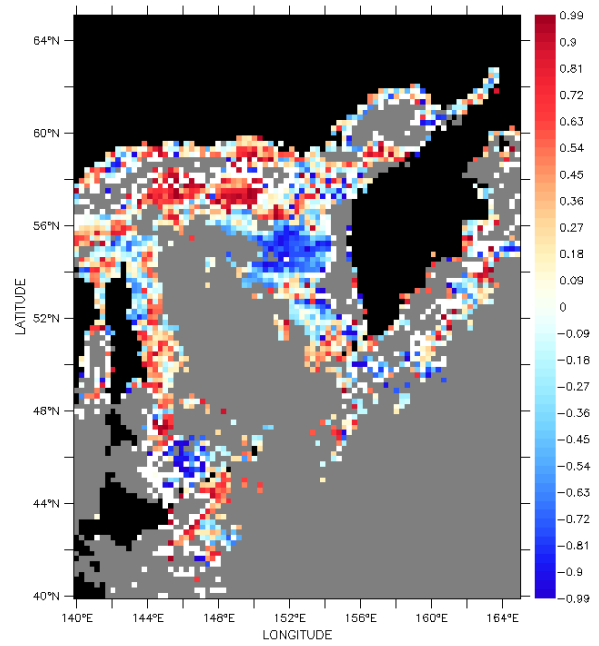
3 月



4 月



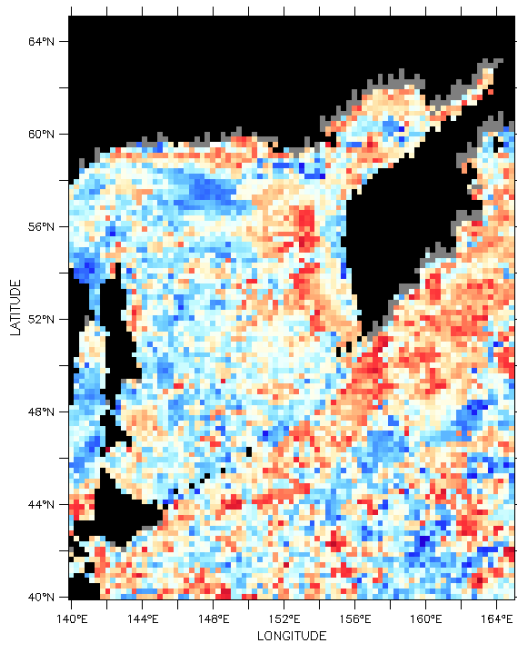
5 月



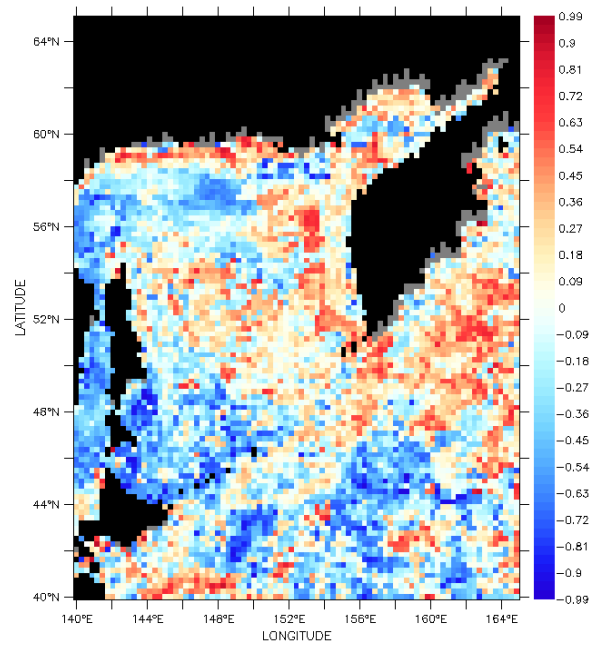
6 月

図 4-18-2. 月平均気温と春季ブルームの強さの関係  
(ブルームが強い海域のみ)

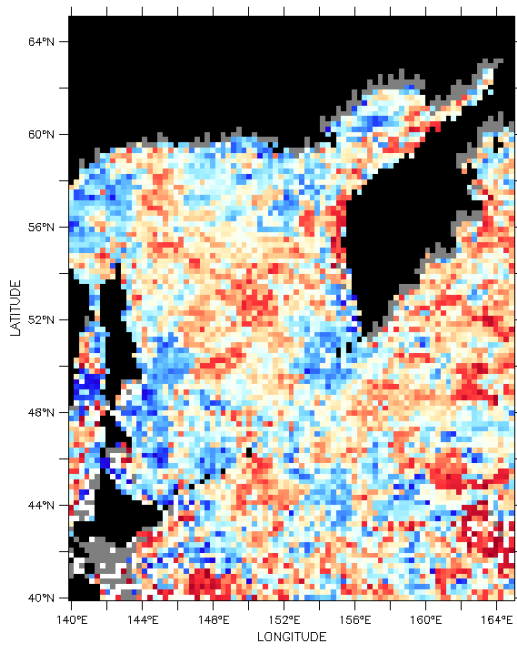
図 4-19 は月平均気温と春季ブルーム発生日の相関を計算したものである。カムチャツカ半島周辺を除いたブルームが強いエリアに注目すると、4月頃から平均気温とブルーム発生日の間に負の相関が見られた。つまり、ブルーム発生日直前の平均気温が高いほどブルームの発生が早まる傾向が見られた。これは、直前の気温が高い事によって植物プランクトンの増殖速度が上がる事に起因すると考えられ、1・2週間スケールでの比較の際と同じである。また、海氷があるエリアでは海氷が発達するほど気温が下がり、植物プランクトンの増殖が抑えられ、ブルームが遅れた可能性がある。一方、海氷がほとんどないカムチャツカ半島周辺では、月平均気温とブルーム発生日の間に正の相関が見られた。



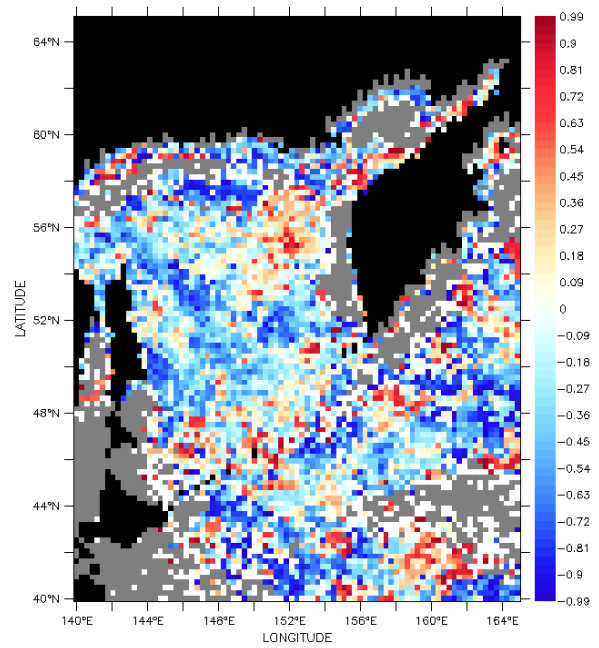
3 月



4 月

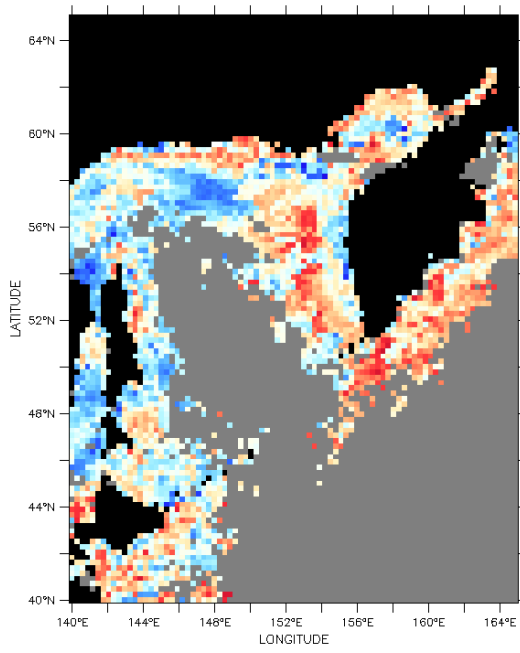


5 月

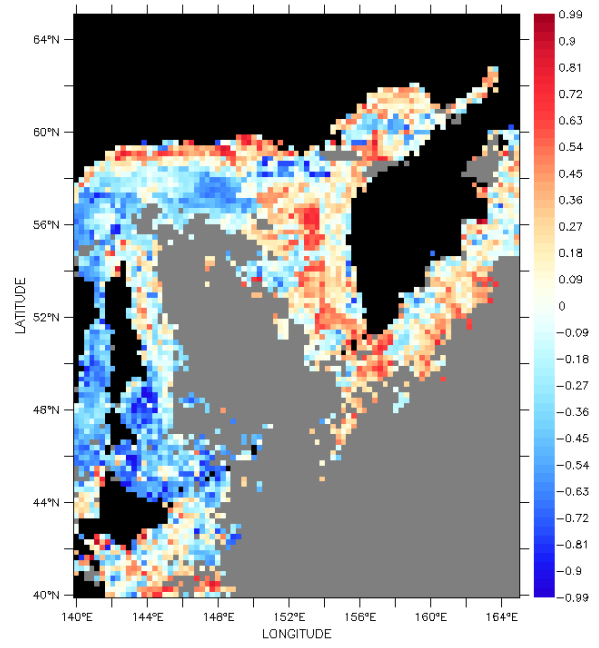


6 月

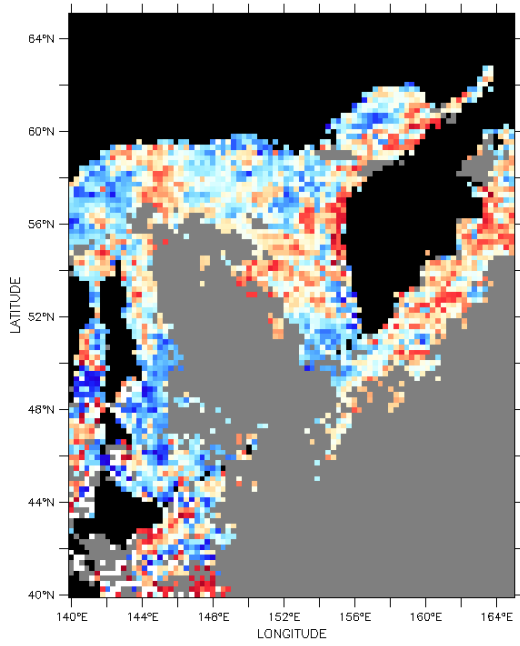
図 4-19-1. 月平均気温と春季ブルーム発生日の関係



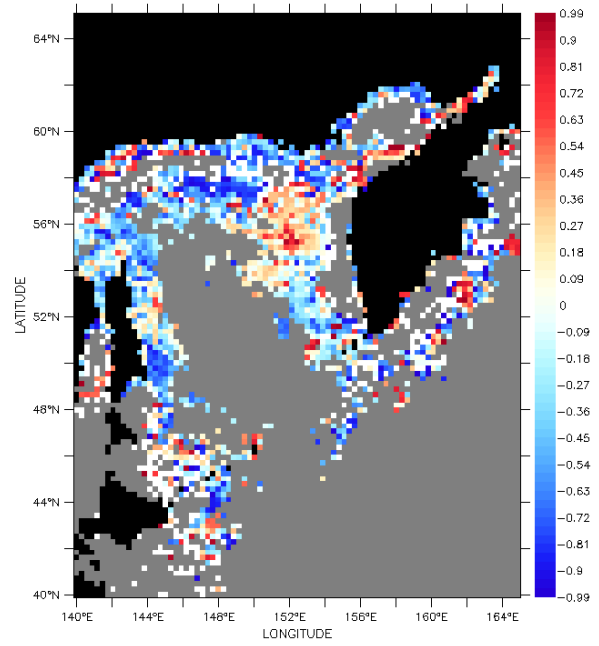
3月



4月



5月



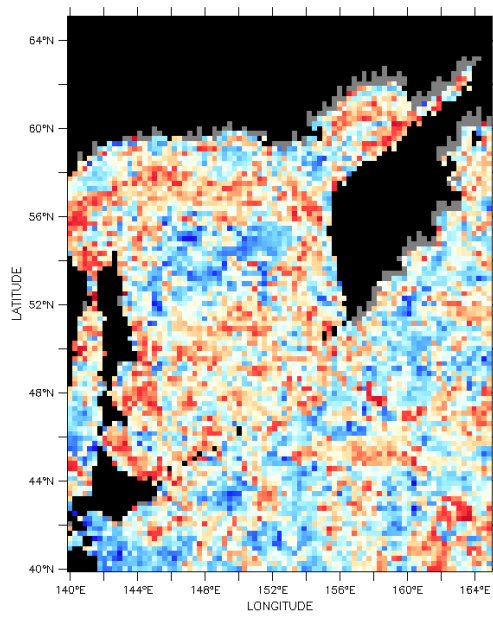
6月

図 4-19-2. 月平均気温と春季ブルーム発生日の関係  
(ブルームが強い海域のみ)

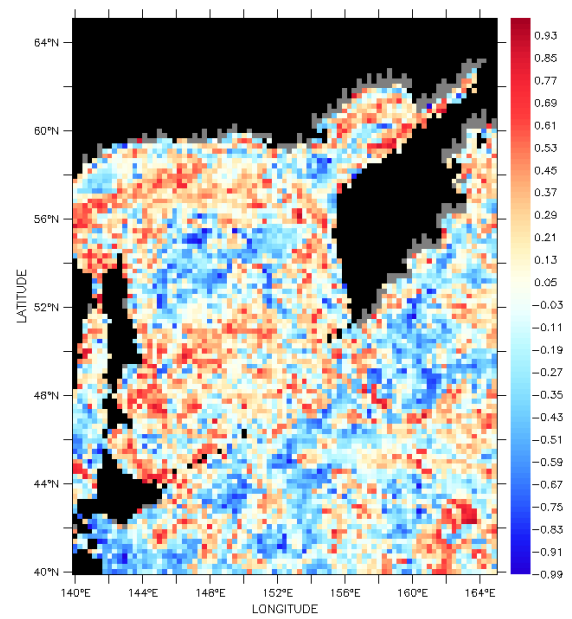


#### 4.4. 海面水温と春季ブルームの関係

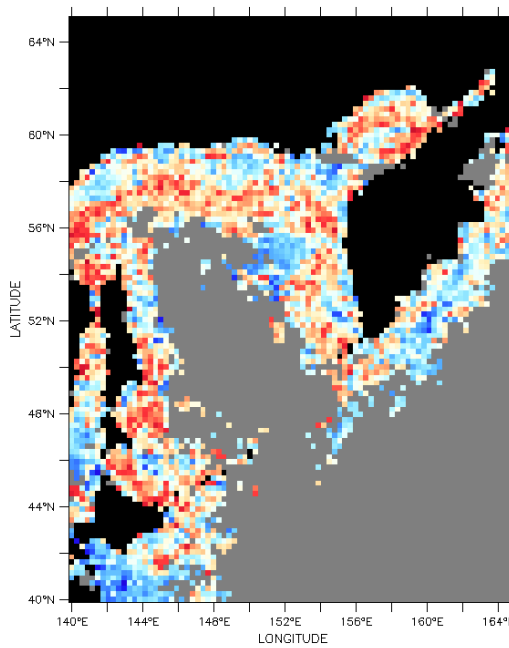
植物プランクトンは温度によって増殖速度が変化するが、植物プランクトンが存在するのは海中である。より直接的に温度と春季ブルームの関係を調べるためには、海水温との関係を調べなければならない。本研究では植物プランクトンを衛星から表層を観測しているので、水温も同じく表層のものを利用し、関係を調べた。図 4-20 は各グリッドにおける春季ブルーム発生前の SST の偏差と春季ブルーム時の Chl-a 濃度の最大値の相関を計算したものである。まず、1 週間の場合と 2 週間の場合でほぼ同じ相関の分布を示している事がわかる。ブルームの強いオホーツク海沿岸域においては、正の相関が見られたが、全域ではバラツキが大きい。



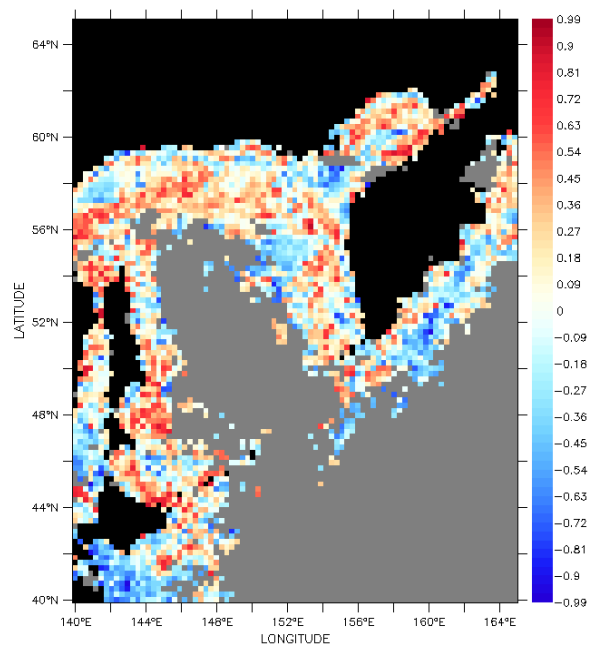
1 週間



2 週間



1 週間



2 週間

図 4-20. SST の偏差と春季ブルームの強さの関係  
(下段：ブルームが強い海域のみ)

図 4-21 はブルーム発生前の SST の偏差とブルーム発生日の相関を計算したものである。ほとんどの海域で負の相関が見られ、特にブルームの強いエリアでは顕著だった。以上より、全体的にブルーム直前の SST が平年より高いとブルームの発生が早まる傾向がある。ブルームが強い海域では、ブルーム直前の SST が平年より高いほどブルームは早まると同時に強くなる傾向が見られた。これは気温の場合と同様に、温度が高い事によって植物プランクトンの増殖速度が上がるためだと考えられる。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。

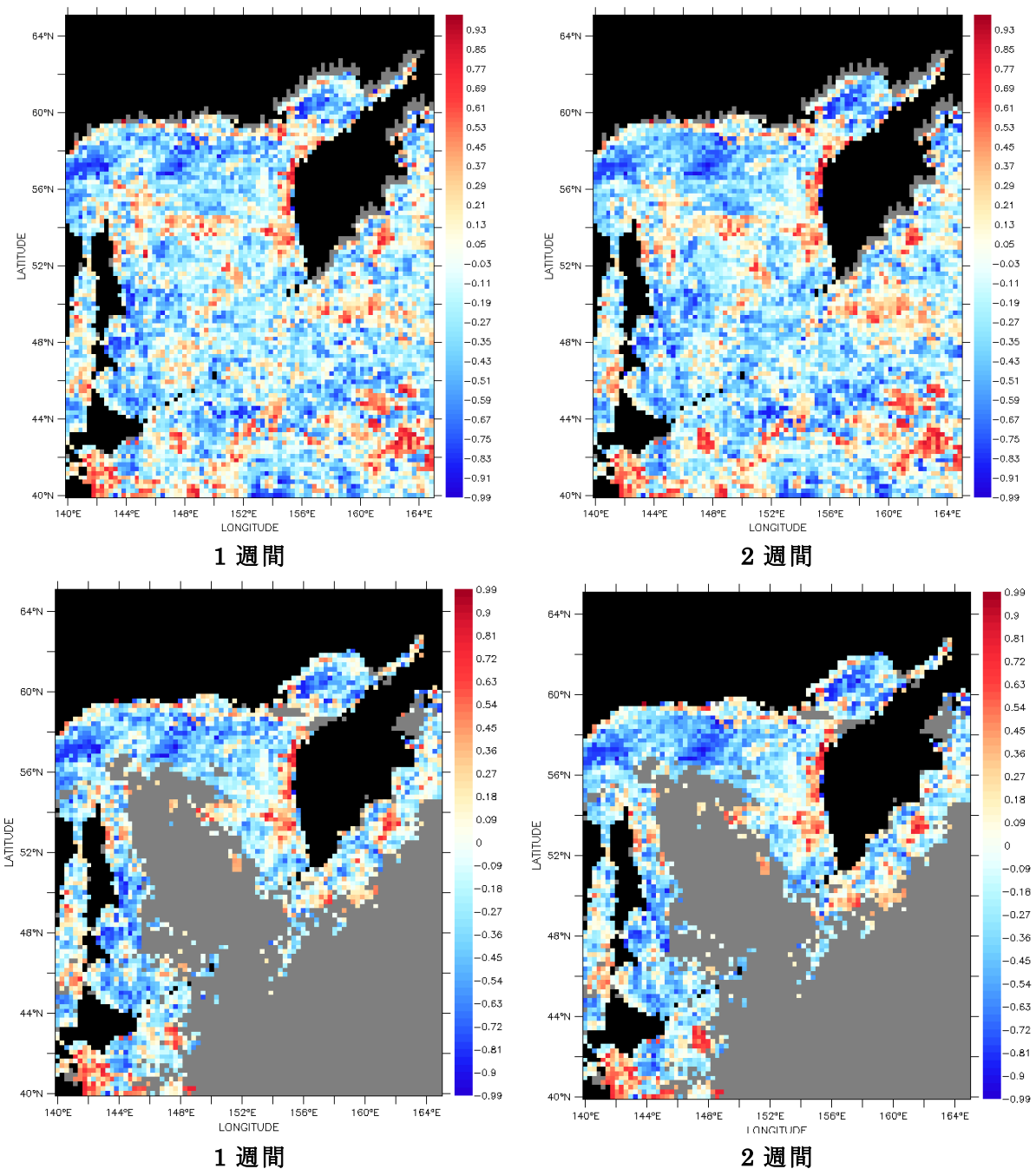
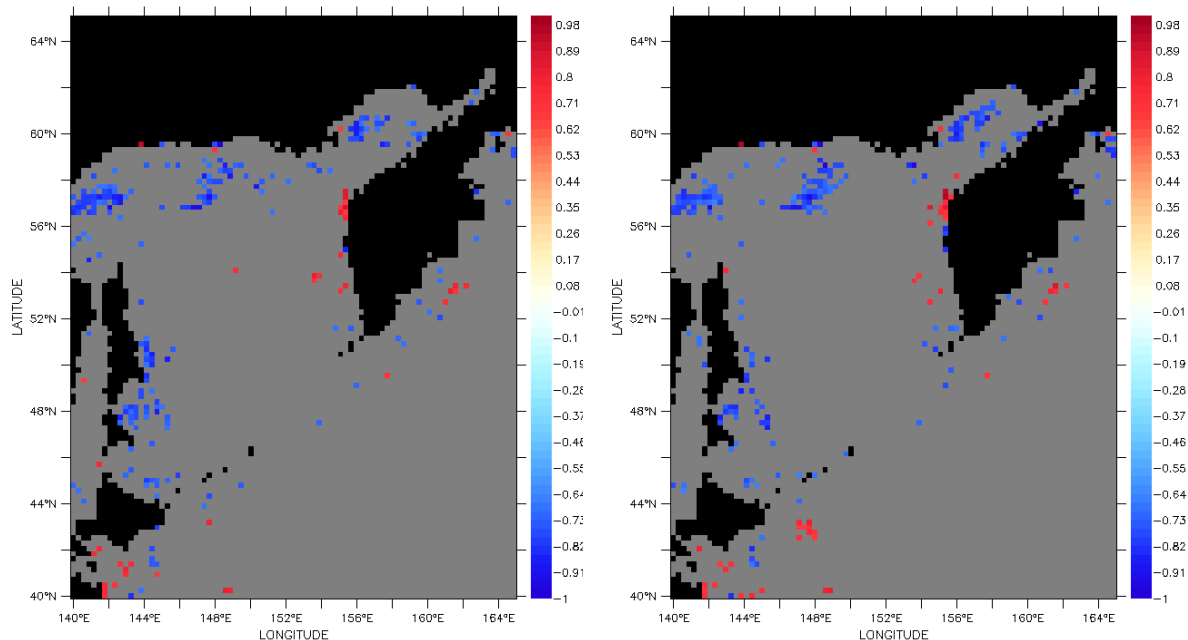


図 4-21. SST の偏差と春季ブルーム発生日の関係  
(下段：ブルームが強い海域のみ)

図 4-22 はブルームが強い海域における SST の偏差と春季ブルーム発生日の相関を示しており、有意水準 5% で有意な相関係数のみを抽出した。ブルームの強い海域では、SST の偏差と春季ブルーム発生日の間に有意な負の相関が卓越していると言って良い。



1 週間

2 週間

図 4-22. SST の偏差と春季ブルーム発生日の関係  
(有意水準 : 5%)

図 4-23 は 3 月から 6 月における SST の月平均値と、春季ブルーム時の Chl-a 濃度の最大値の相関を計算したものである。ブルームの強さに関してはあまり相関が見られなかった。

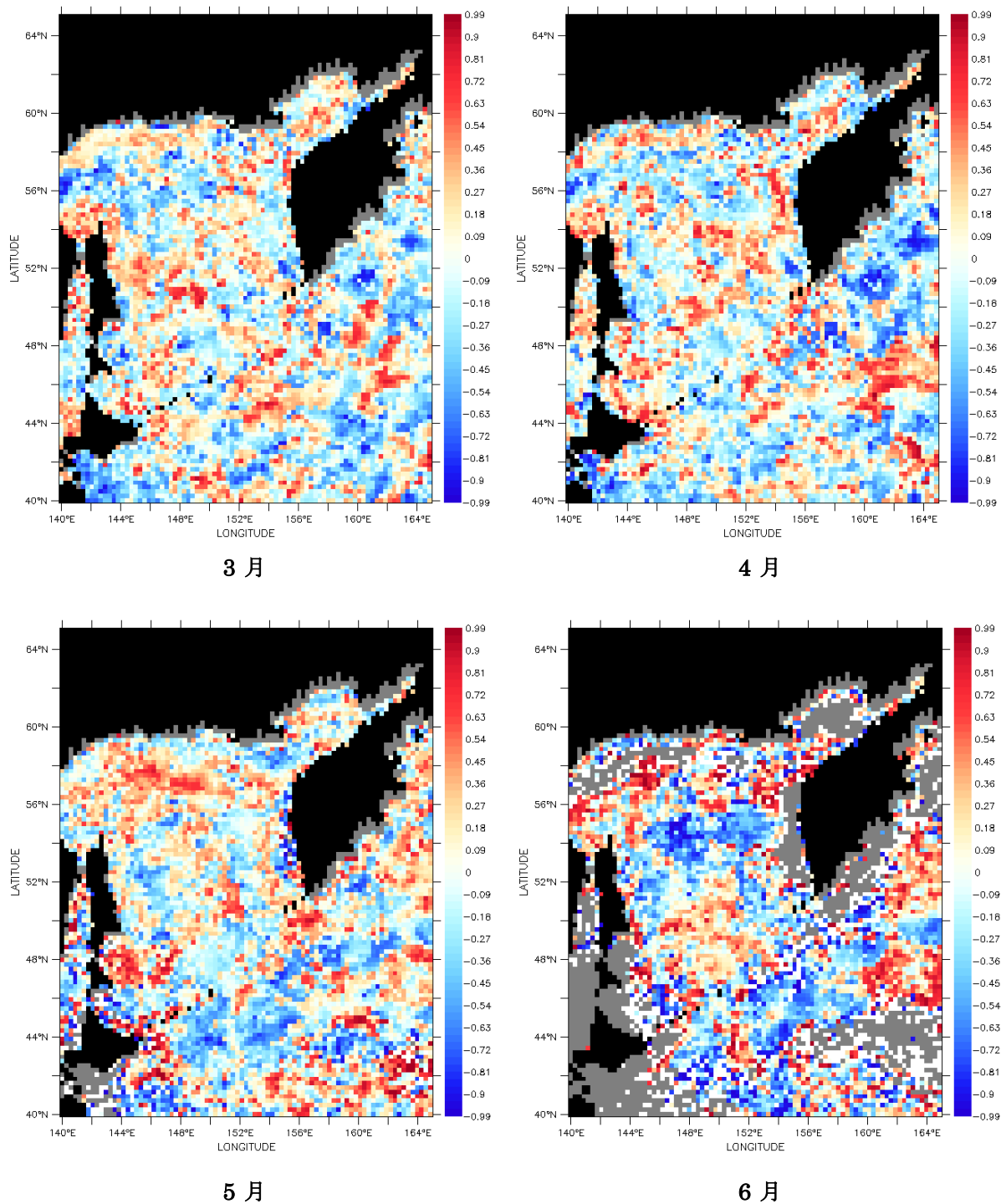
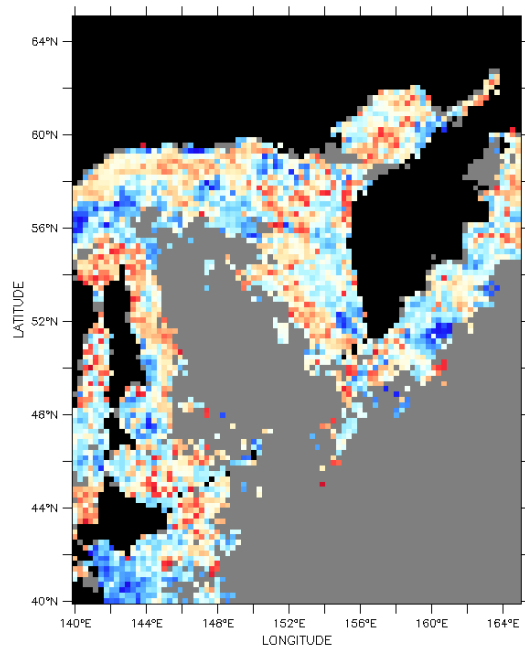
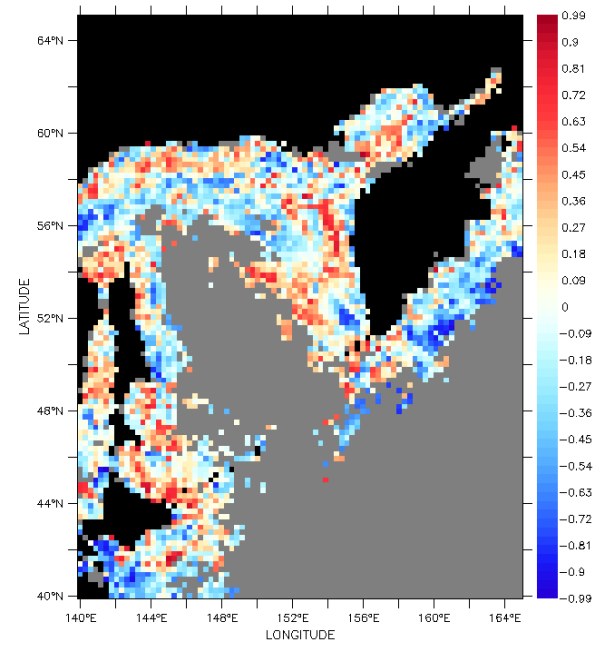


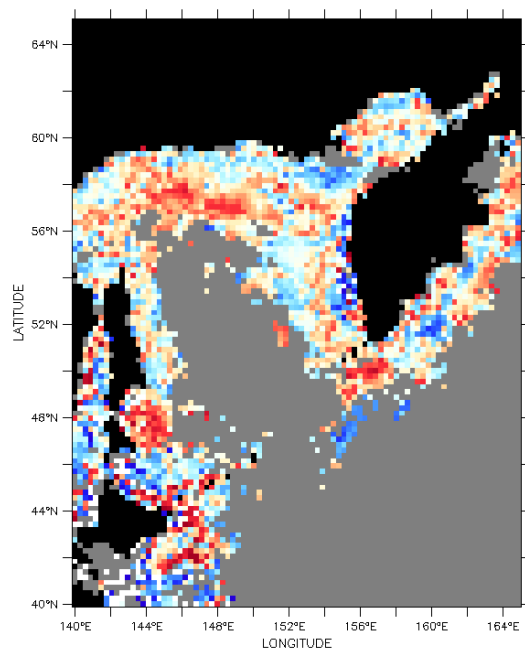
図 4-23-1. 月平均 SST と春季ブルームの強さの関係



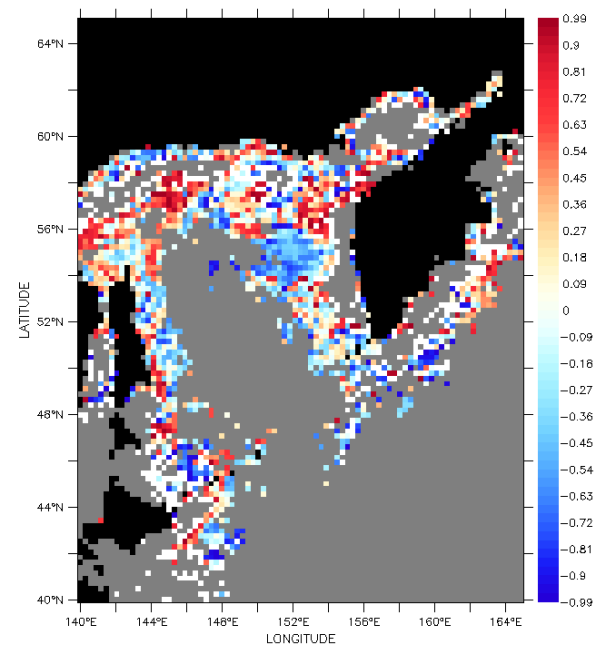
3 月



4 月



5 月



6 月

図 4-23-2. 月平均 SST と春季ブルームの強さの関係  
(ブルームが強い海域のみ)

図 4-24 は 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である。3・4 月はバラツキが大きいものの、5 月以降は負の相関が卓越していた。以上より、1 ヶ月のタイムスケールでは、SST とブルームの強さの間には明瞭な関係が見られないが、ブルーム発生前の SST が高いほどブルームは早まる傾向が見られた。

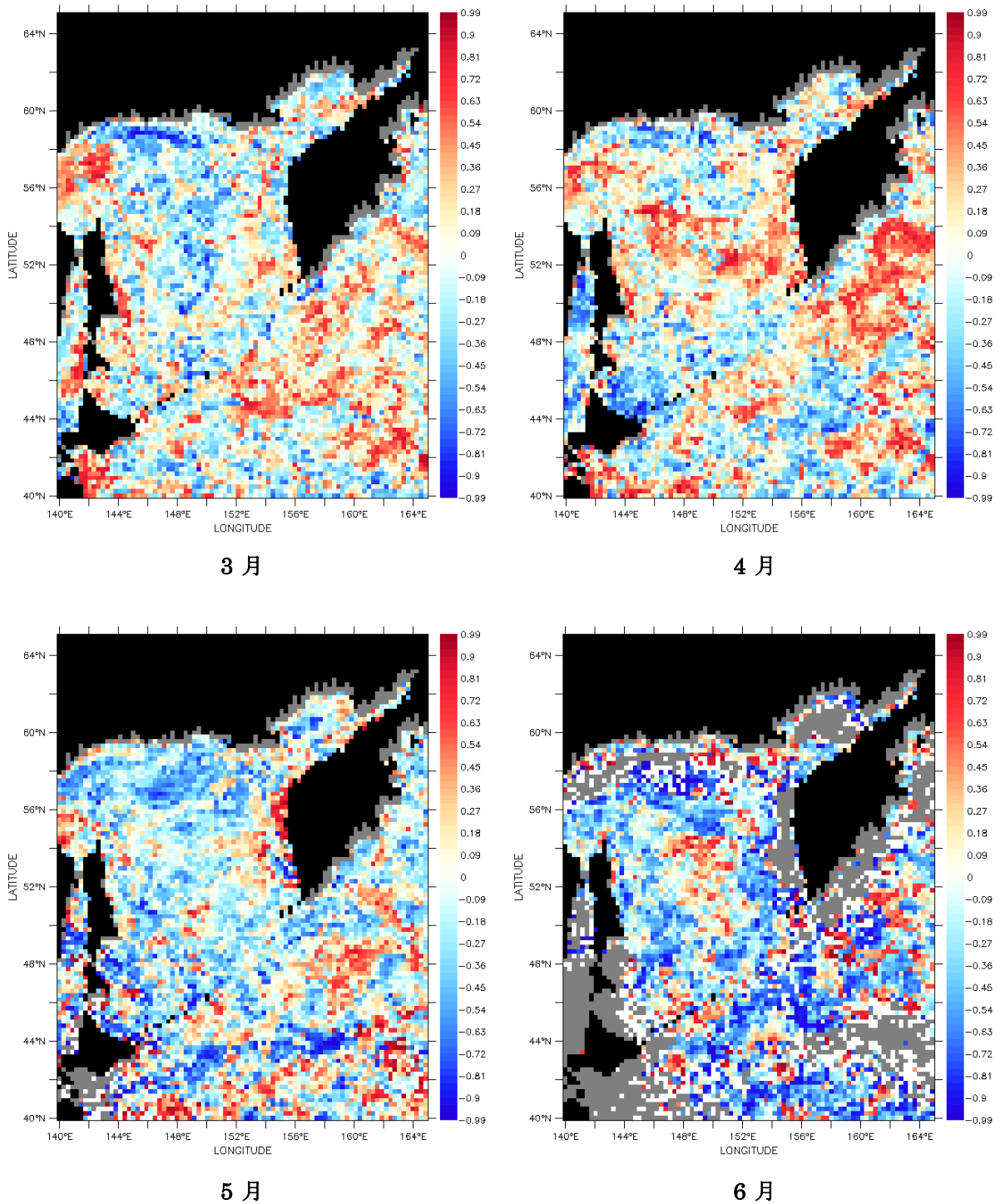
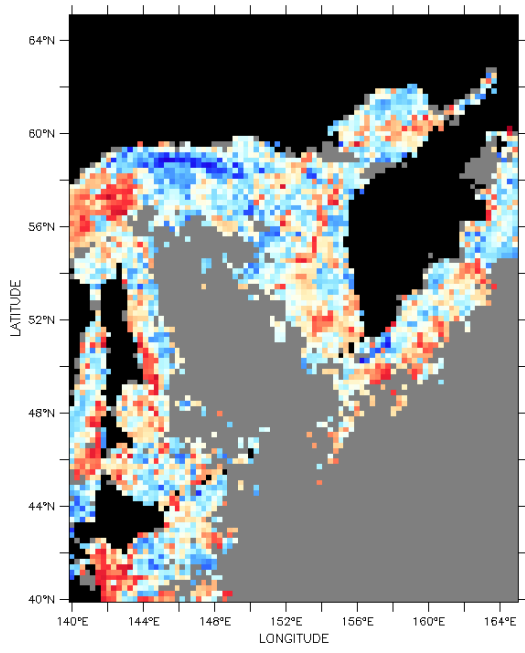
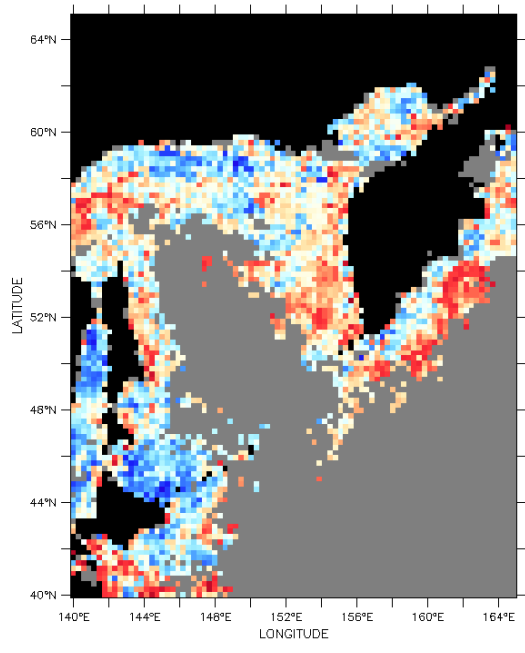


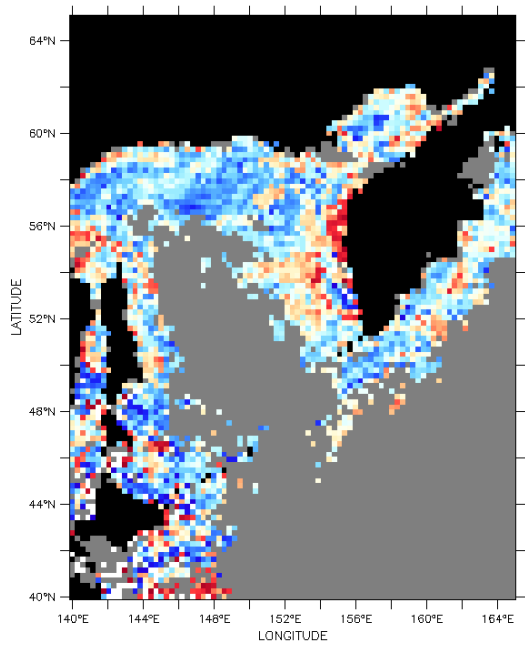
図 4-24-1. 月平均 SST と春季ブルーム発生日の関係



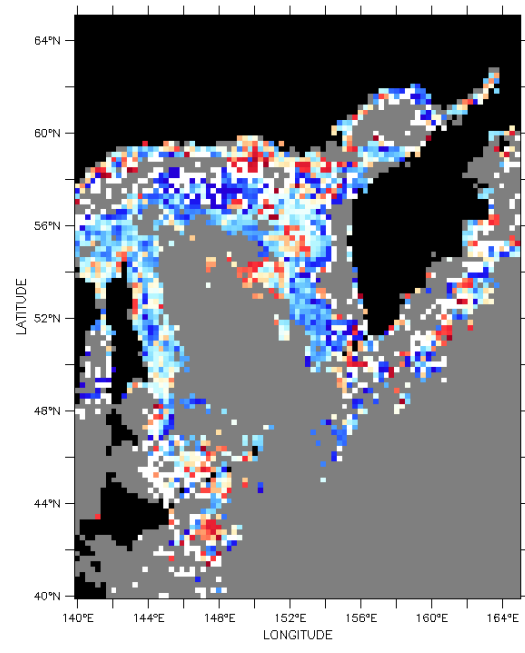
3月



4月



5月



6月

図 4-24-2. 月平均 SST と春季ブルーム発生日の関係  
(ブルームが強い海域のみ)



図 4-25 はブルームが強い海域での、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示したものであり、有意水準 5%で有意な相関係数のみを抽出したものである。5・6月は有意な負の相関が卓越している事がわかる。5月以降の遅いブルームに関しては、ブルーム前の長い期間で SST が高いほど、ブルームの発生日が早まると言える。しかし、月平均よりも1・2週間といった短いタイムスケールで負の相関は顕著であった。気温と SST を比べると、高いほどブルームが早まる傾向がより顕著なのは SST である。気温に関してもブルーム前の変動がブルーム発生日に影響を与えているのは確かであるが、SST に関しては、気温よりもさらに直前の変動がブルームの発生日を前後させるといえる。つまり、気温よりも SST の方が直接的に植物プランクトンの増殖速度に影響を与えている事が確かめられた。

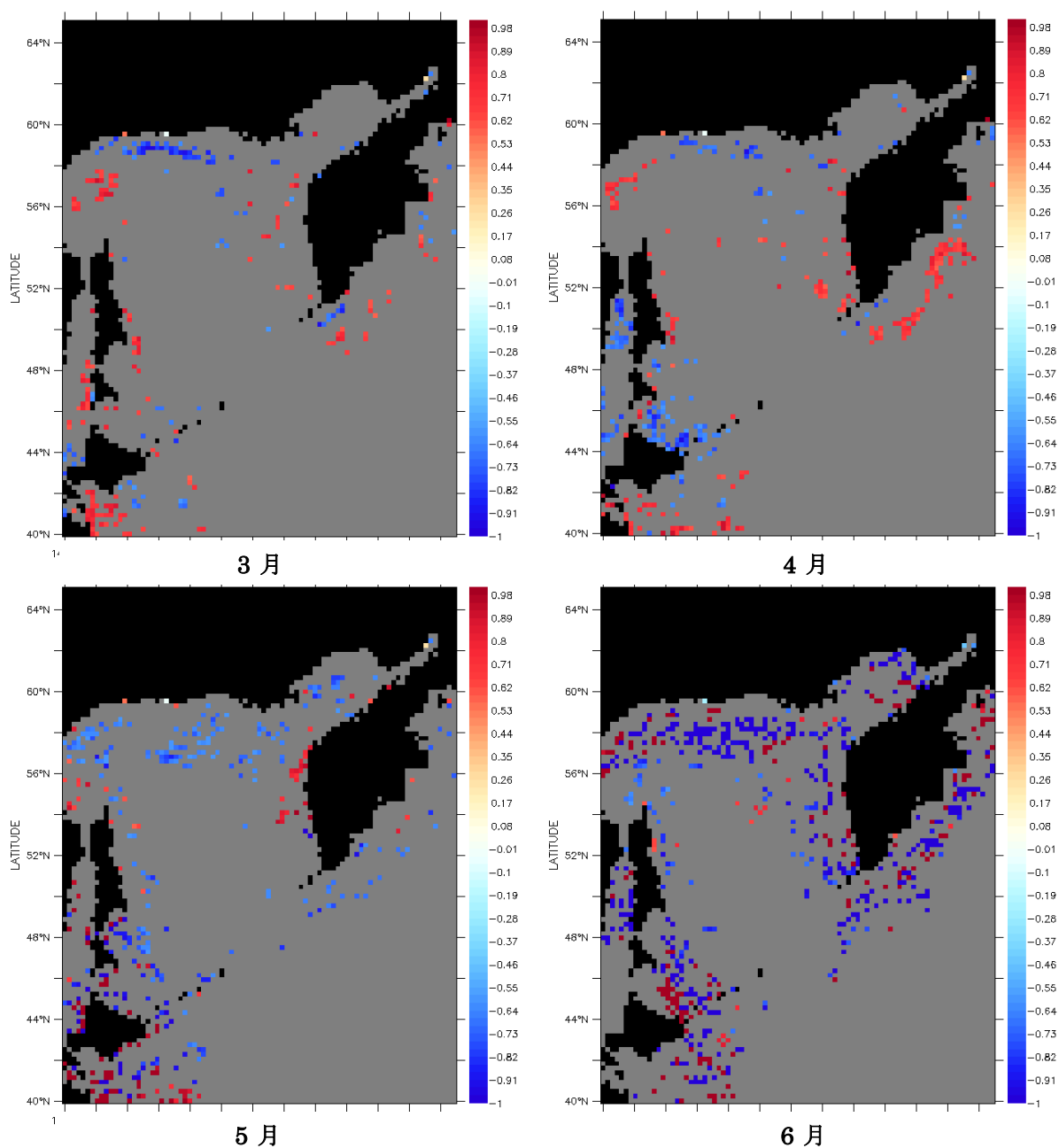
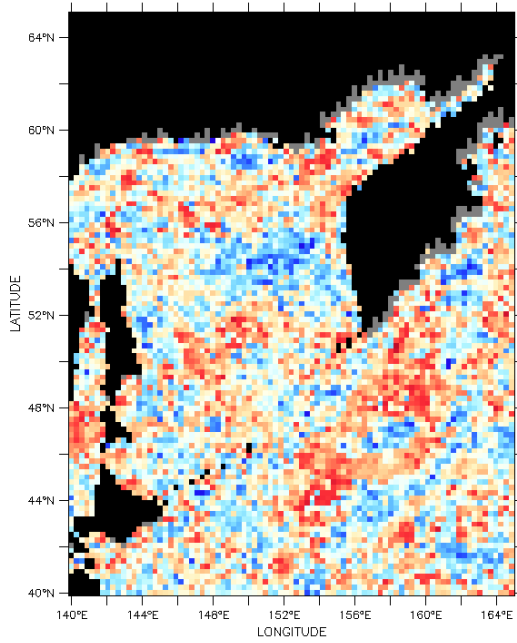


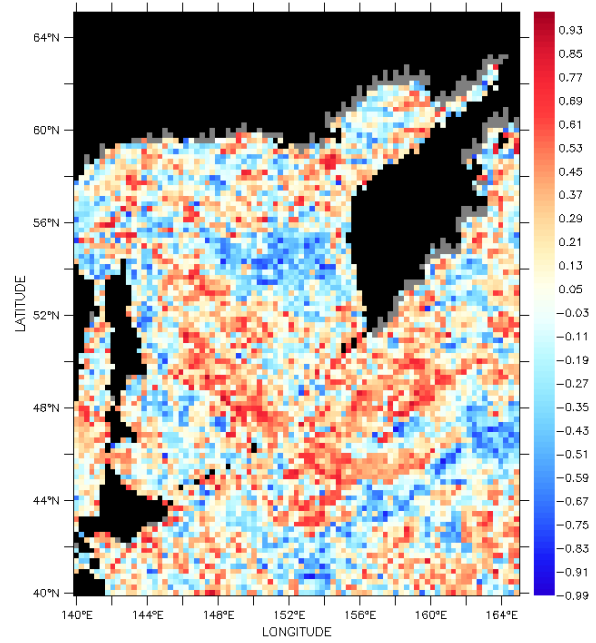
図 4-25. 月平均 SST と春季ブルーム発生日の関係  
(有意水準：5%)

#### 4.5. 光と春季ブルームの関係

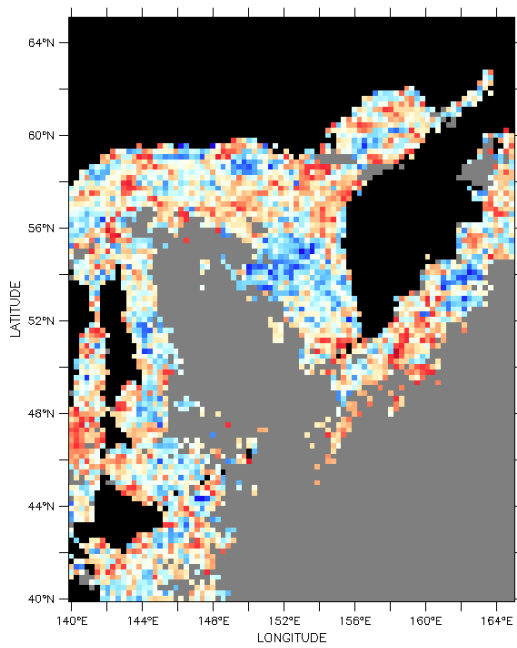
植物プランクトンが光合成し、増殖するためには、光が必ず必要である。光の量の変化は水温の変化以上に植物プランクトンの増殖スピードに対して敏感である。そこで植物が光合成に必要な光の量の指標である PAR を用いて、Chl-a 濃度との関係を調べた。図 4-26 は各グリッドにおける春季ブルーム発生前の PAR の偏差と春季ブルーム時の Chl-a 濃度の最大値の相関を計算したものである。オホーツク海中央部やカムチャツカ半島周辺、千島列島の南で正の相関が見られるものの、相関係数の分布のバラツキは大きい。



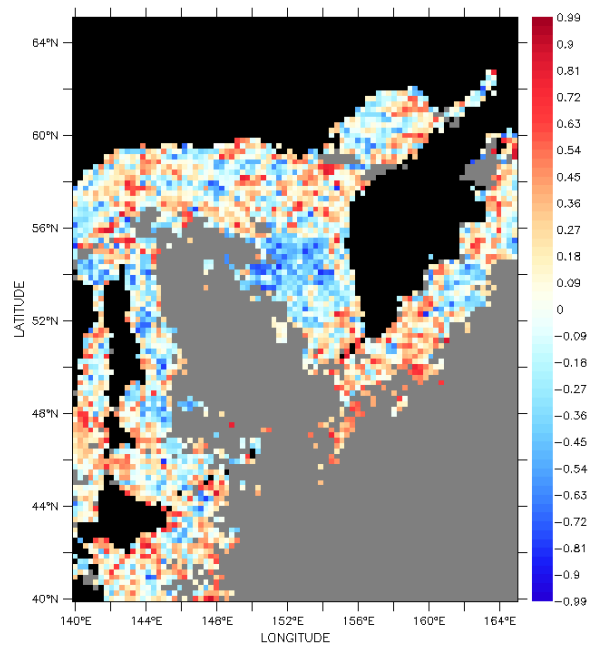
1 週間



2 週間



1 週間



2 週間

図 4-26. PAR の偏差と春季ブルームの強さの関係

(下段：ブルームが強い海域のみ)

図 4-27 はブルーム発生前の PAR の偏差と春季ブルーム発生日の相関を計算したものである。相関係数の分布のバラツキは大きく、ブルーム発生直前の PAR の大きさは春季ブルーム発生日にあまり影響を与えていないといえる。

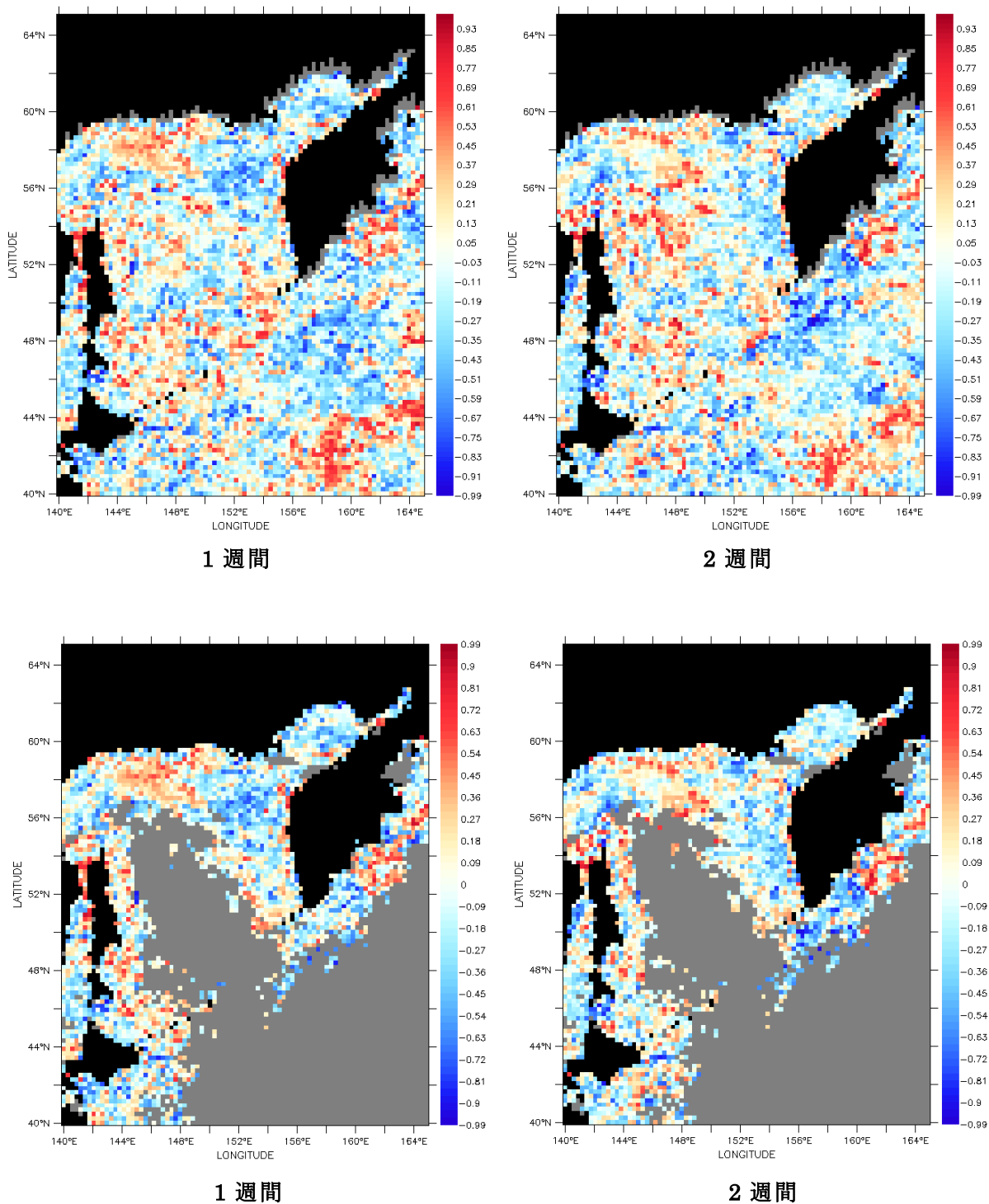


図 4-27. PAR の偏差と春季ブルーム発生日の関係  
(下段：ブルームが強い海域のみ)

図 4-28 は 3 月から 6 月における PAR の月平均値と、春季ブルーム時の Chl-a 濃度の最大値の相関を計算したものである。6 月以降のブルームに関しては正の相関が卓越しているが、相関係数のバラツキは大きい。

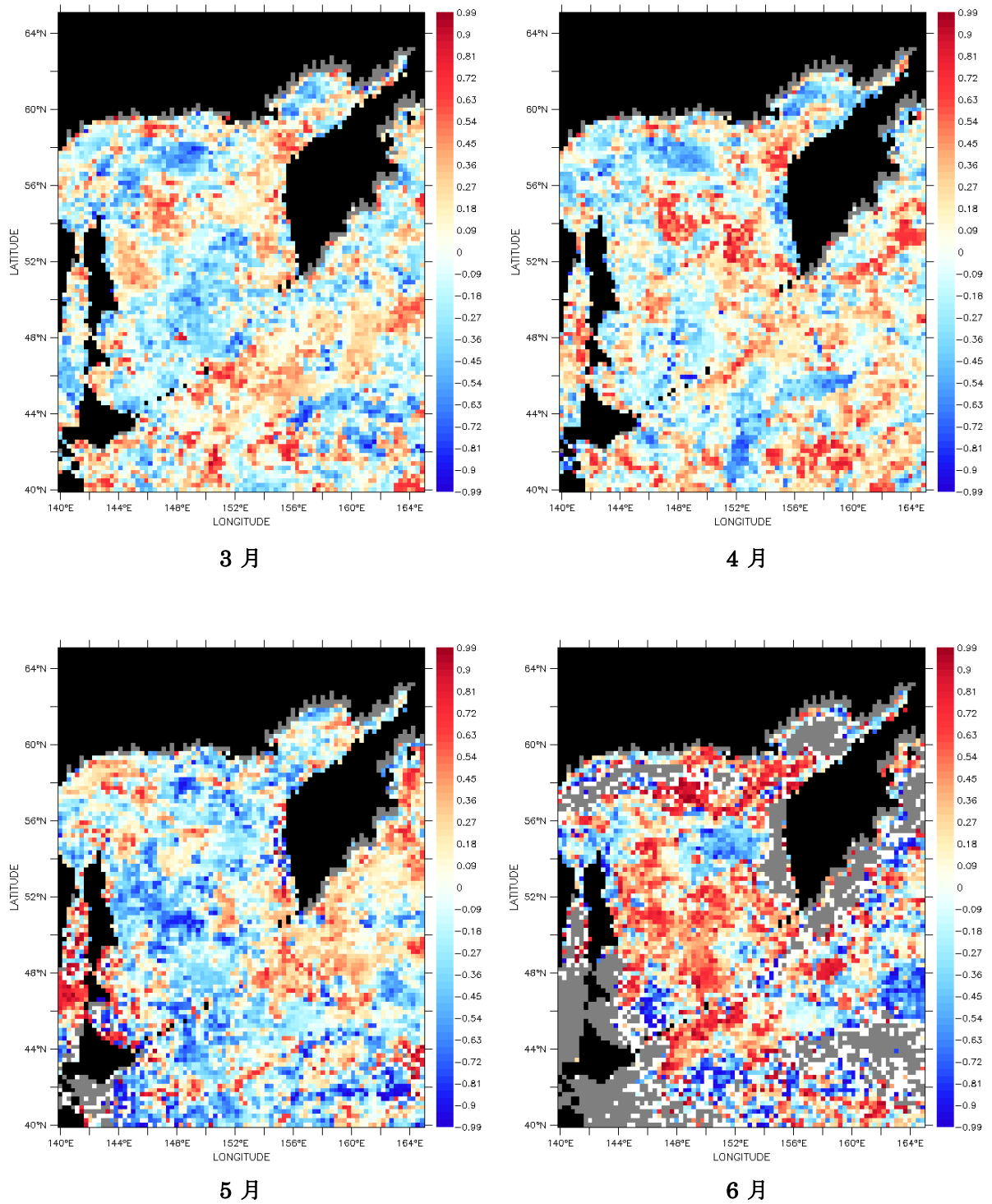
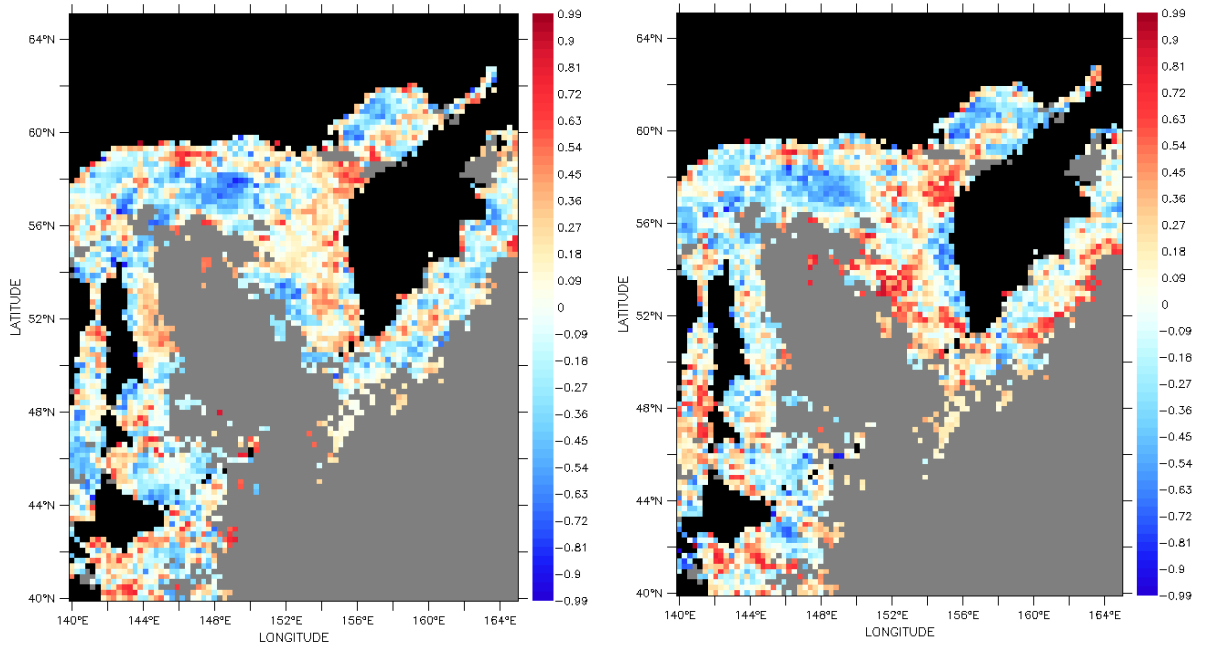
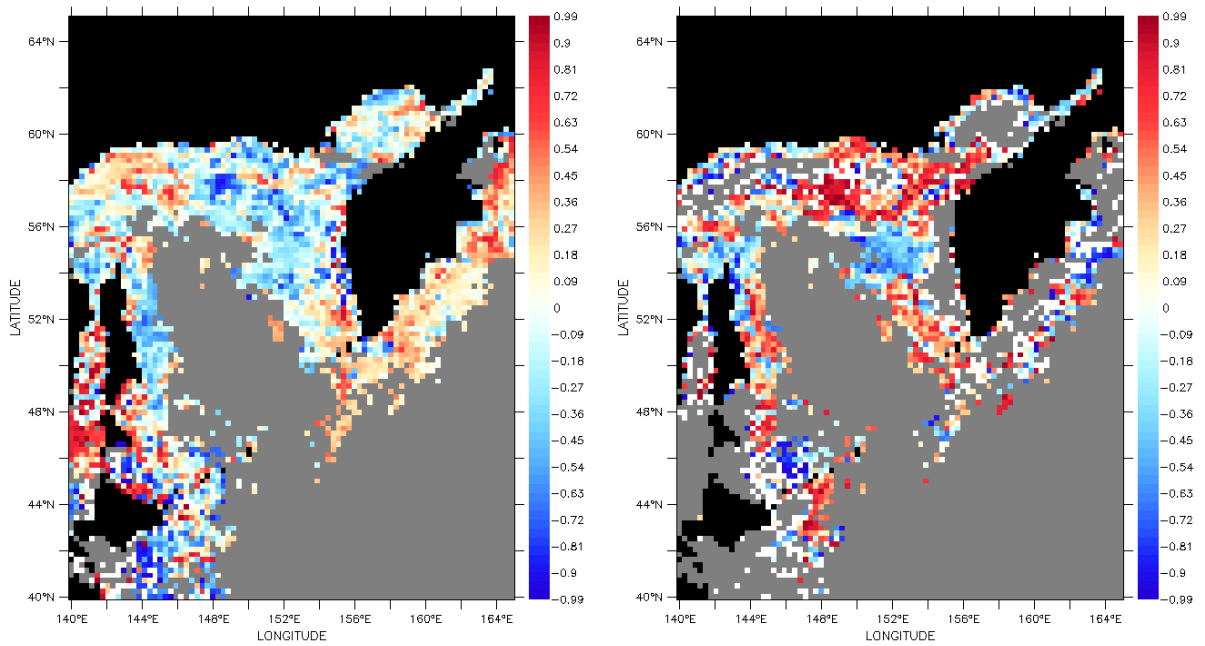


図 4-28-1. 月平均 PAR と春季ブルームの強さの関係



3 月

4 月



5 月

6 月

図 4-28-2. 月平均 PAR と春季ブルームの強さの関係  
(ブルームが強い海域のみ)

図 4-29 は 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である。3 月から 5 月にかけてのオホーツク海中央部から北部では、正の相関が卓越していた。しかしこの海域のブルームは 5 月頃に発生する。ブルームが強い海域に注目すると、特にカムチャツカ半島周辺や樺太・北海道周辺では、負の相関が見られた。以上より、月単位のより大きなスケールでは PAR が大きいほどブルームが遅れる傾向が見られた。また、6 月以降に発生する遅いブルームに関しては、PAR が大きいほどブルームが強くなる。PAR は SST や気温よりも長いタイムスケールで春季ブルームに影響を与えていると考えられる。

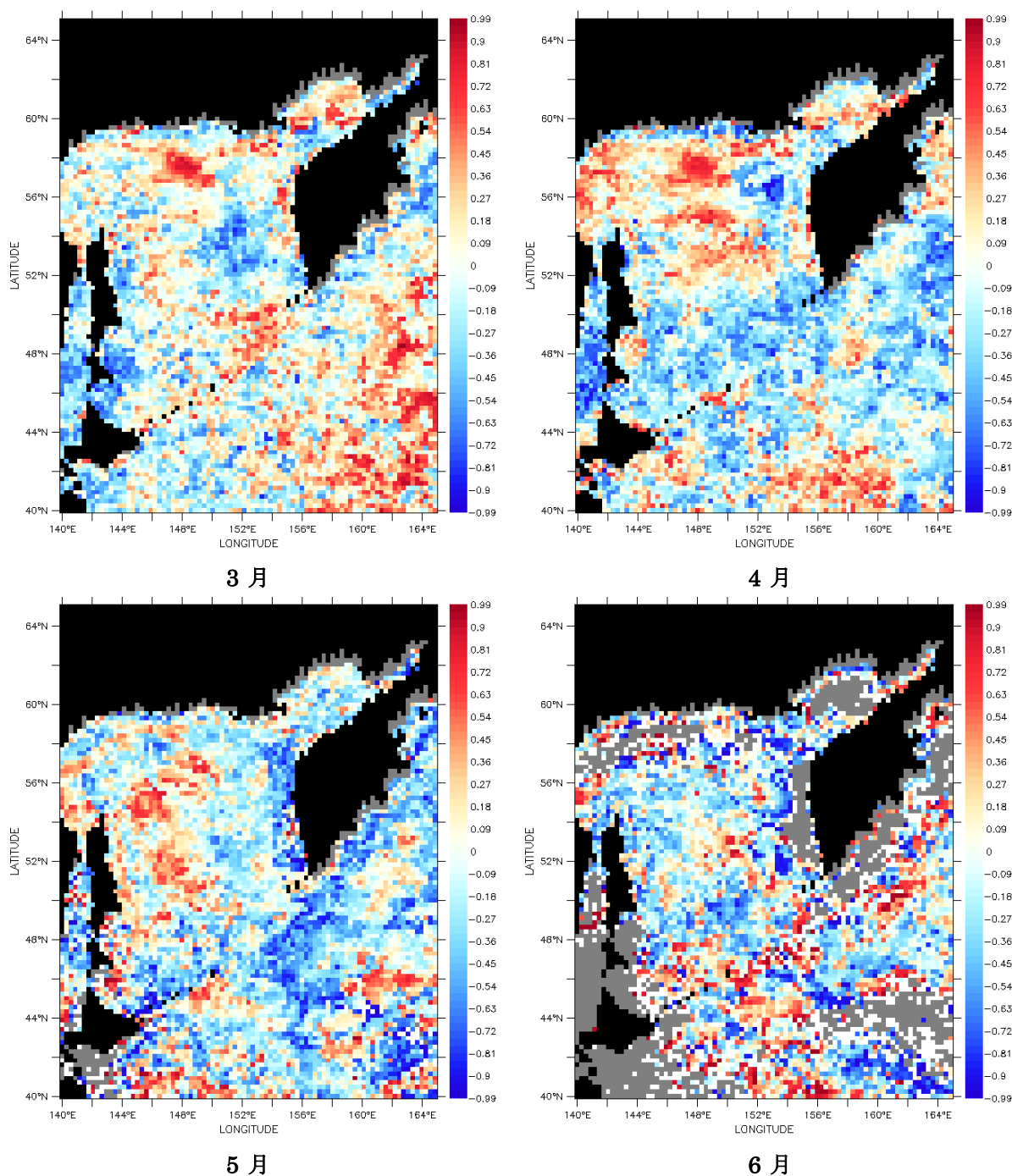


図 4-29-1. 月平均 PAR と春季ブルーム発生日の関係

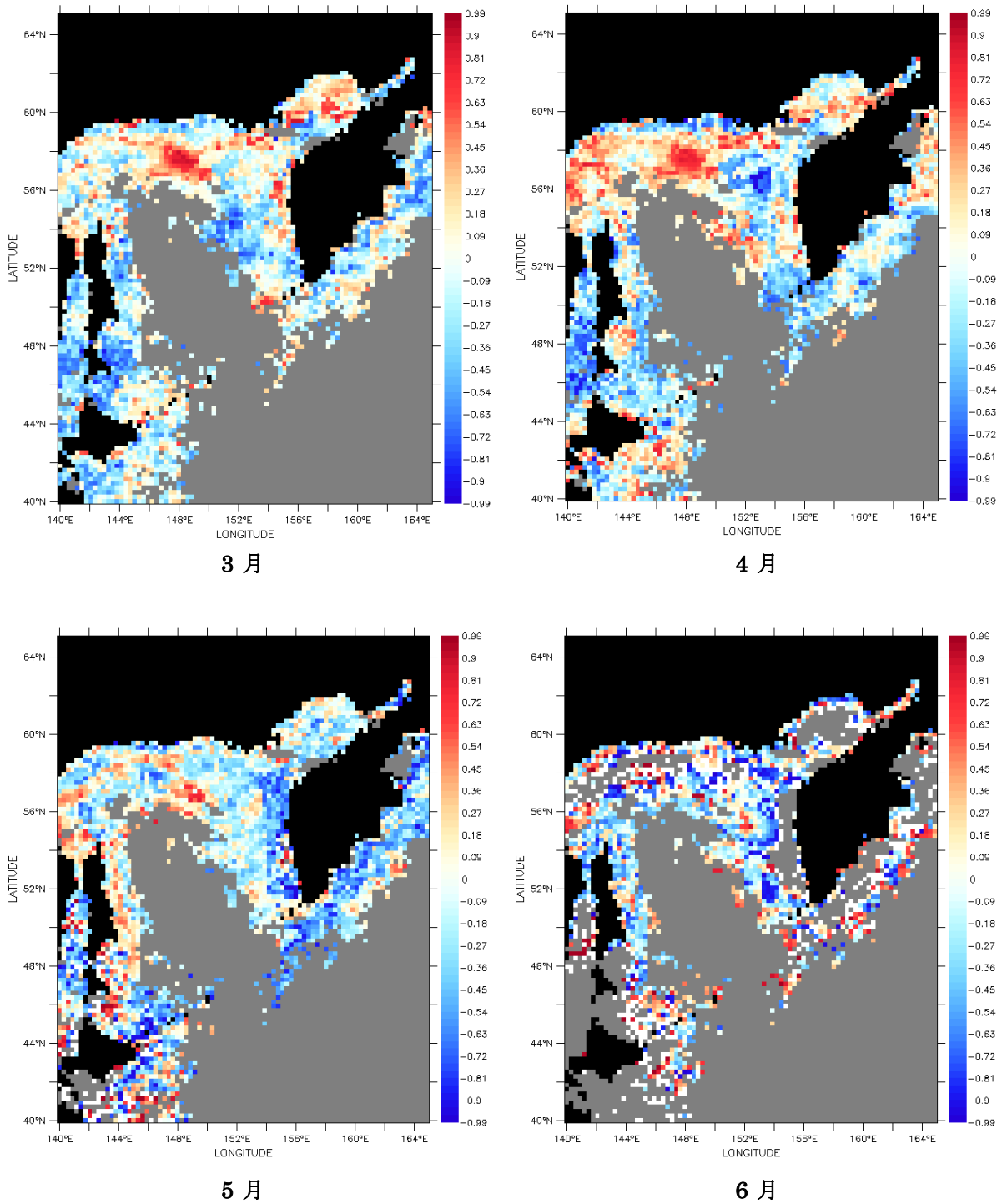


図 4-29-2. 月平均 PAR と春季ブルーム発生日の関係  
(ブルームが強い海域のみ)



図 4-30 はブルームが強い海域における，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を示しており，有意水準 5%で有意な相関係数のみを抽出した．図 4-29 では PAR の月平均値とブルーム発生日が負の相関関係にある事を示したが，実際には有意水準 5%で検定を行うと，そのような関係は顕著ではない．つまり，今回の結果からは PAR と春季ブルームの関係性はあまり見出せなかったと言える．

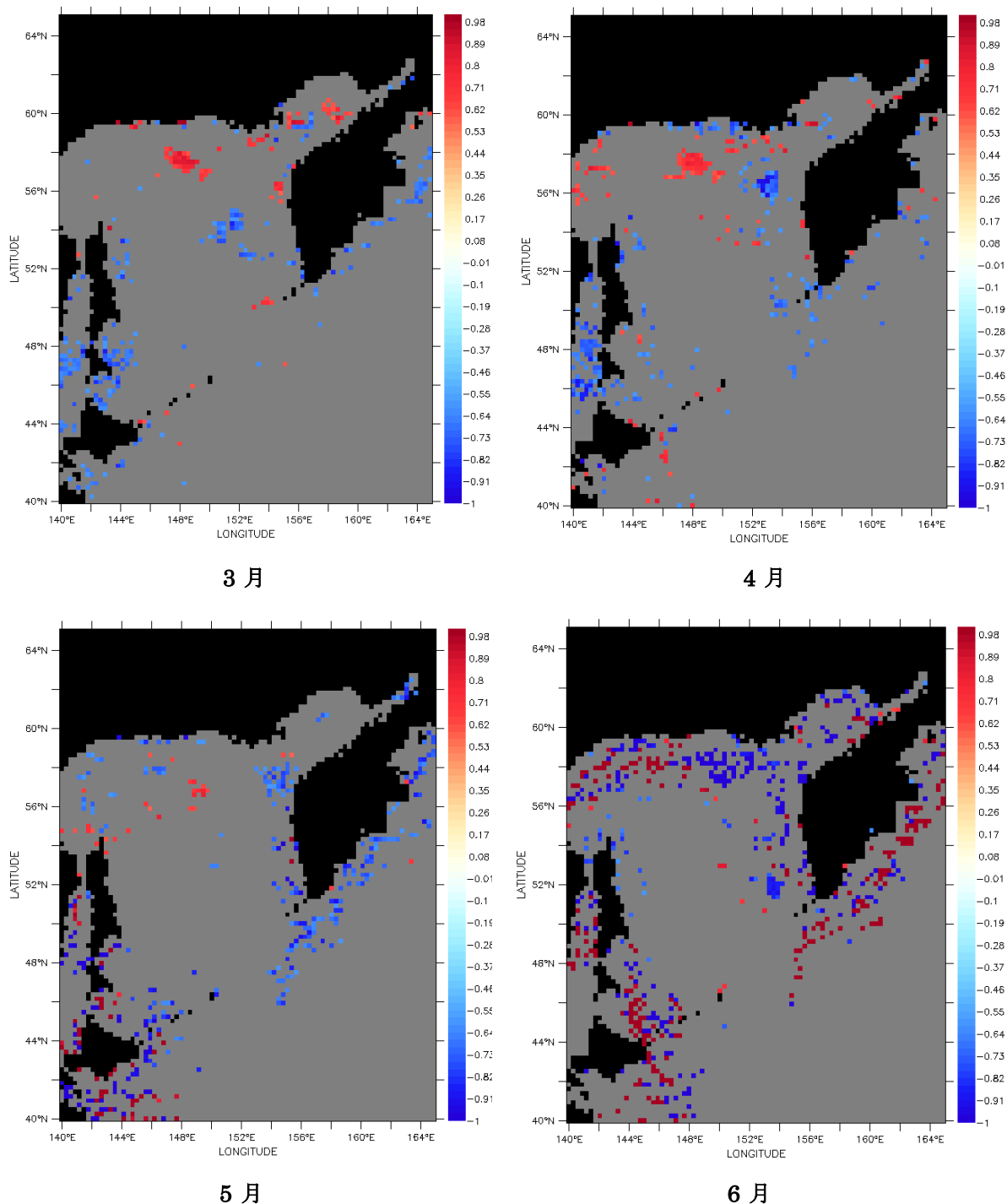
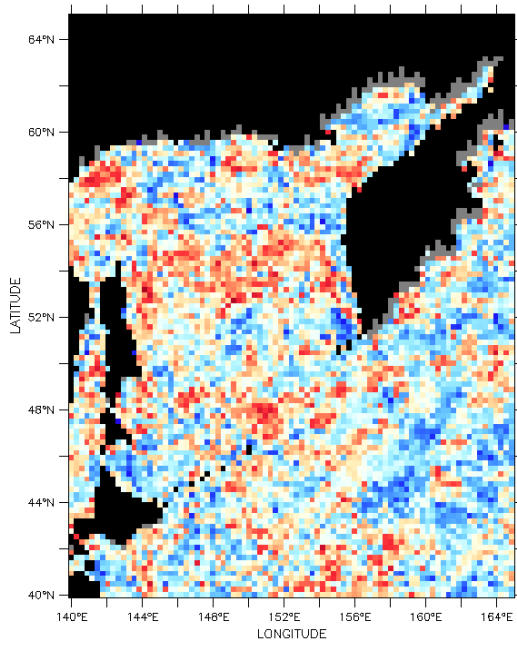


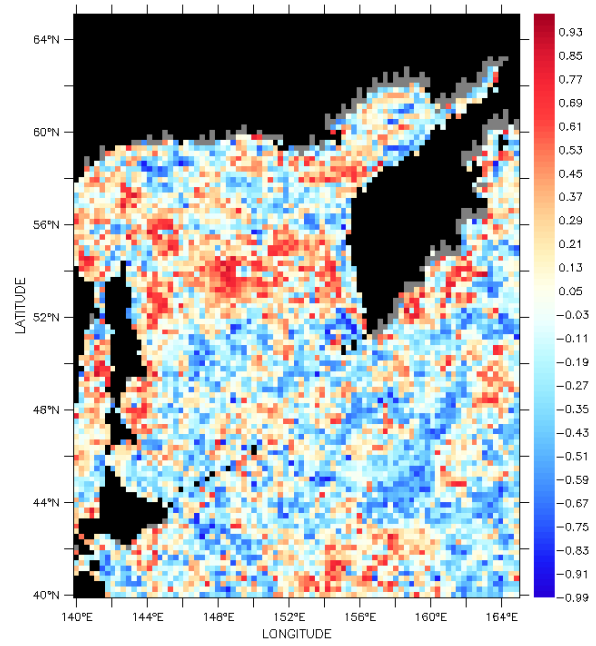
図 4-30. 月平均 PAR と春季ブルーム発生日の関係  
(有意水準：5%)

#### 4.6. 風と春季ブルームの関係

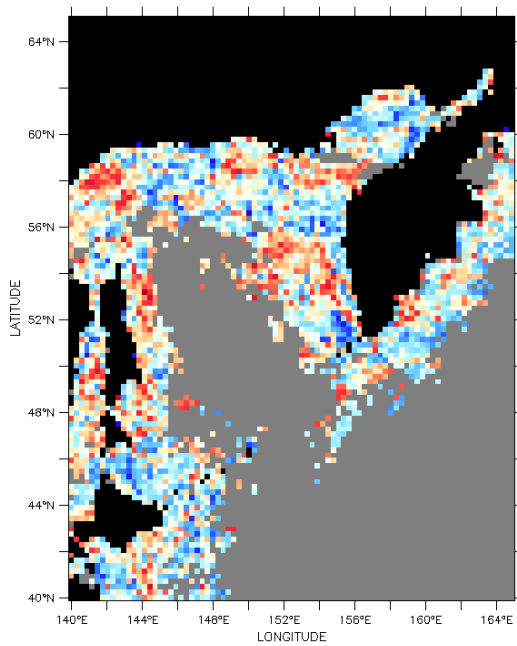
春季ブルームの発生要因として海の成層化が挙げられる。成層化が強まる事によって、表層付近の植物プランクトンが効率的に太陽光を受け、光合成する事が出来るので春季ブルームが発生する。しかし、風が強く吹くと海面表層が攪拌され、成層化を遅らせたり弱めたりするので春季ブルームに何かしらの影響を与えらる。図 4-31 は各グリッドにおける春季ブルーム発生前の風速の偏差と春季ブルーム時の Ch1-a 濃度の最大値の相関を計算したものである。樺太北部東岸沖からカムチャツカ半島西岸沖にかけてのオホーツク海中央部では、正の相関が見られるが、全体的に相関係数の分布はバラツキが大きい。



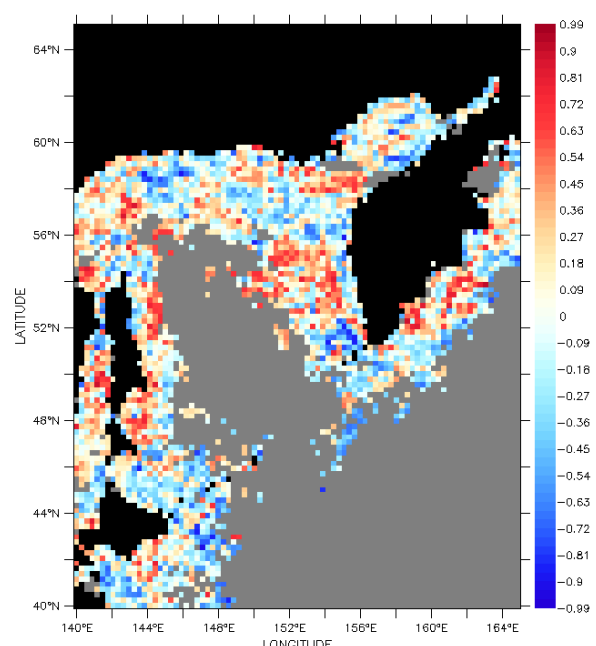
1 週間



2 週間



1 週間



2 週間

図 4-31. 風速の偏差と春季ブルームの強さの関係  
(下段：ブルームが強い海域のみ)

図 4-32 はブルーム発生前の風速の偏差と春季ブルーム発生日の相関である。全体的に正の相関が卓越しているもののバラツキは大きい。ブルームの強いエリアに注目すると、樺太周辺を除いて正の相関が卓越している。また、1週間偏差よりも2週間偏差の方が正の相関が広範囲に渡っており、尚且つ強い。

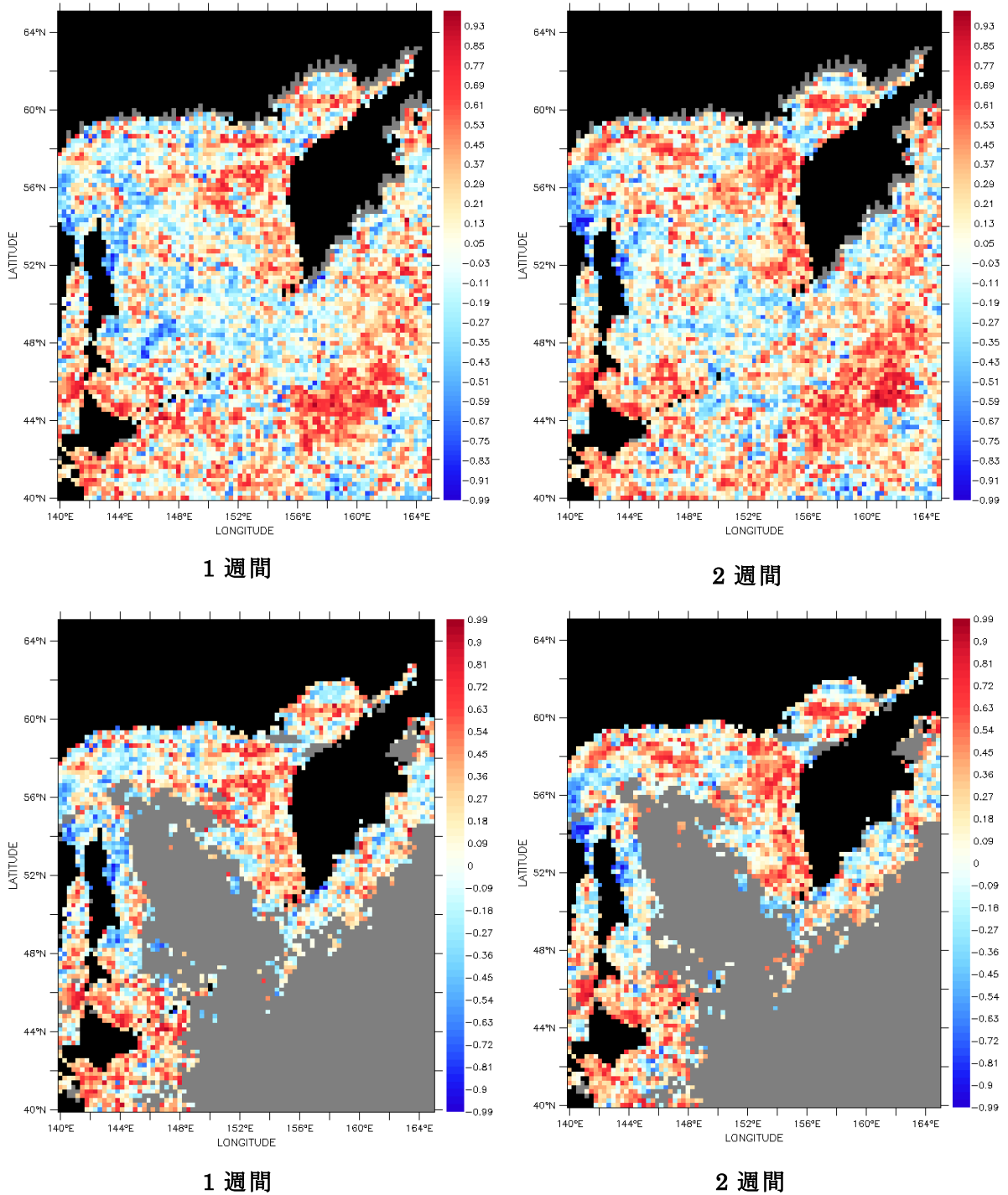


図 4-32. 風速の偏差と春季ブルーム発生日の関係  
(下段：ブルームが強い海域のみ)

図 4-33 はブルームが強い海域における風速の偏差と春季ブルーム発生日の相関を示しており、有意水準 5%で有意な相関係数のみを抽出した。北海道周辺やオホーツク海北部で有意な相関係数が少し見られるが、多くはない。ブルーム直前の風速と春季ブルーム発生日の間には関係があるとは言い切れない。

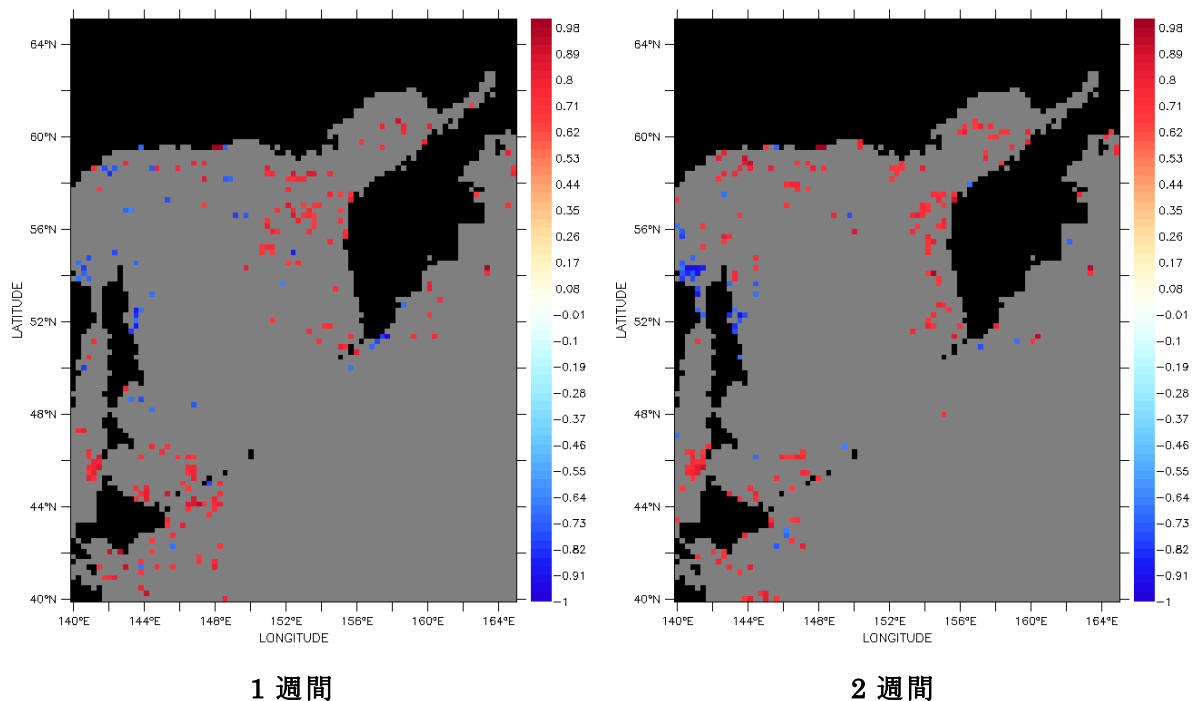


図 4-33. 風速の偏差と春季ブルーム発生日の関係  
(有意水準：5%)

図 4-34 は 3 月から 6 月における風速の月平均値と、春季ブルーム時の Chl-a 濃度の最大値の相関を計算したものである。全体的に相関の分布にはバラツキがある。ブルームの強い海域に注目すると、4 月は正相関が卓越し、6 月は負の相関が見られる。

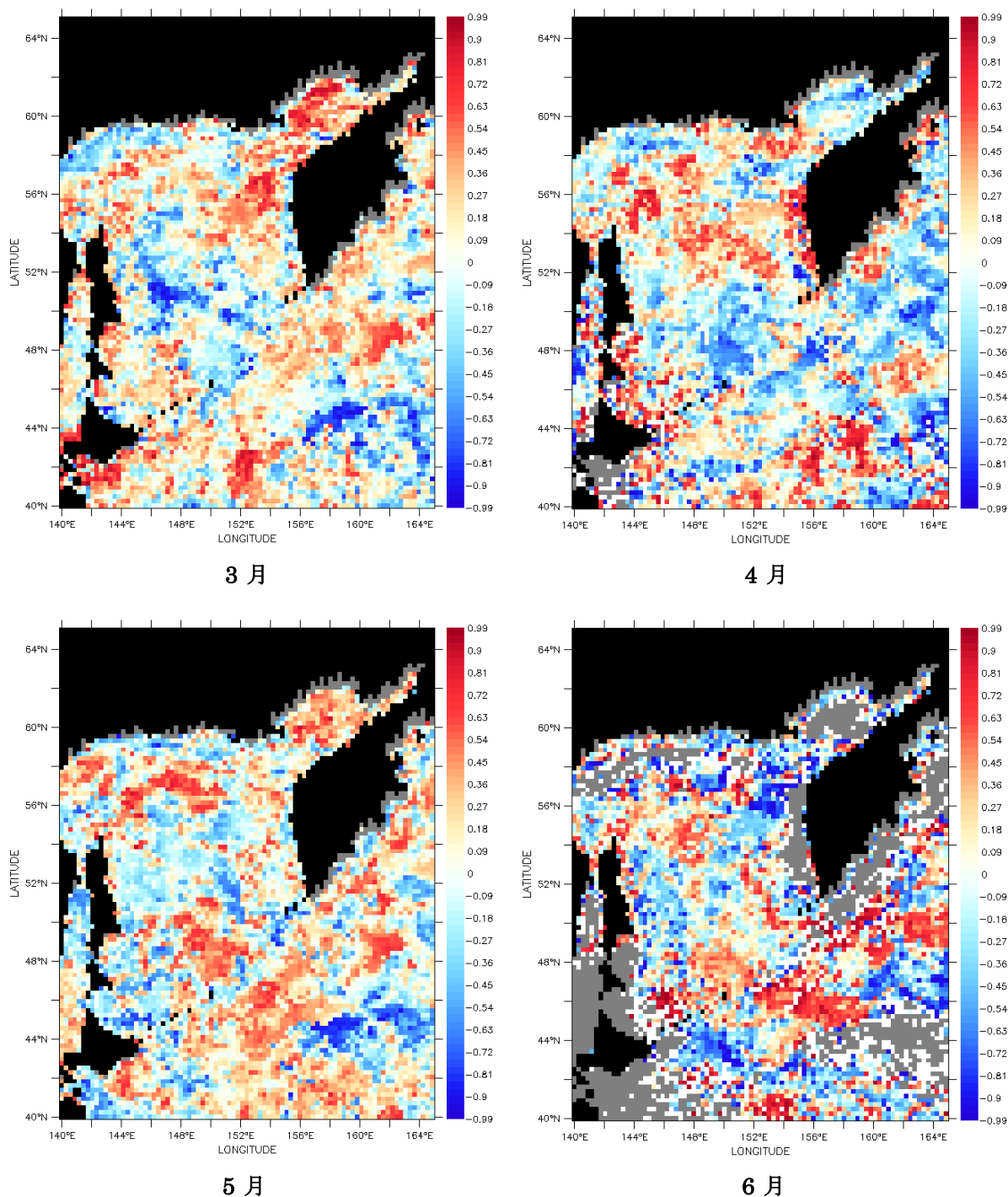


図 4-34-1. 月平均風速と春季ブルームの強さの関係

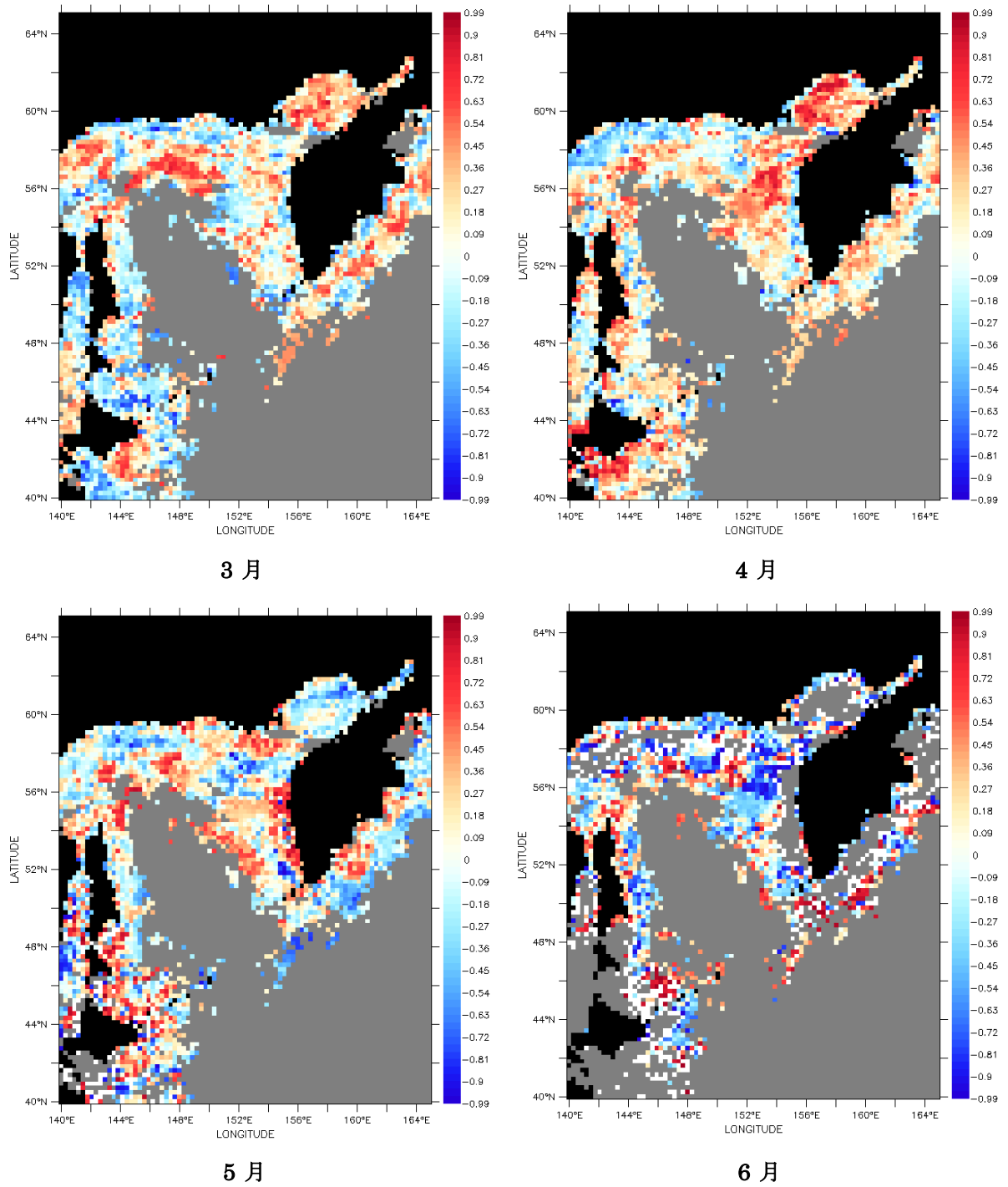


図 4-34-2. 月平均風速と春季ブルームの強さの関係  
(ブルームが強い海域のみ)

図 4-35 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。全体的に 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絞って見ると、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 1 ヶ月以上前の風が強いほどブルームが遅れる傾向が見られた。つまり、風速は長いタイムスケールでもブルーム発生日に影響を与えると考えられる。

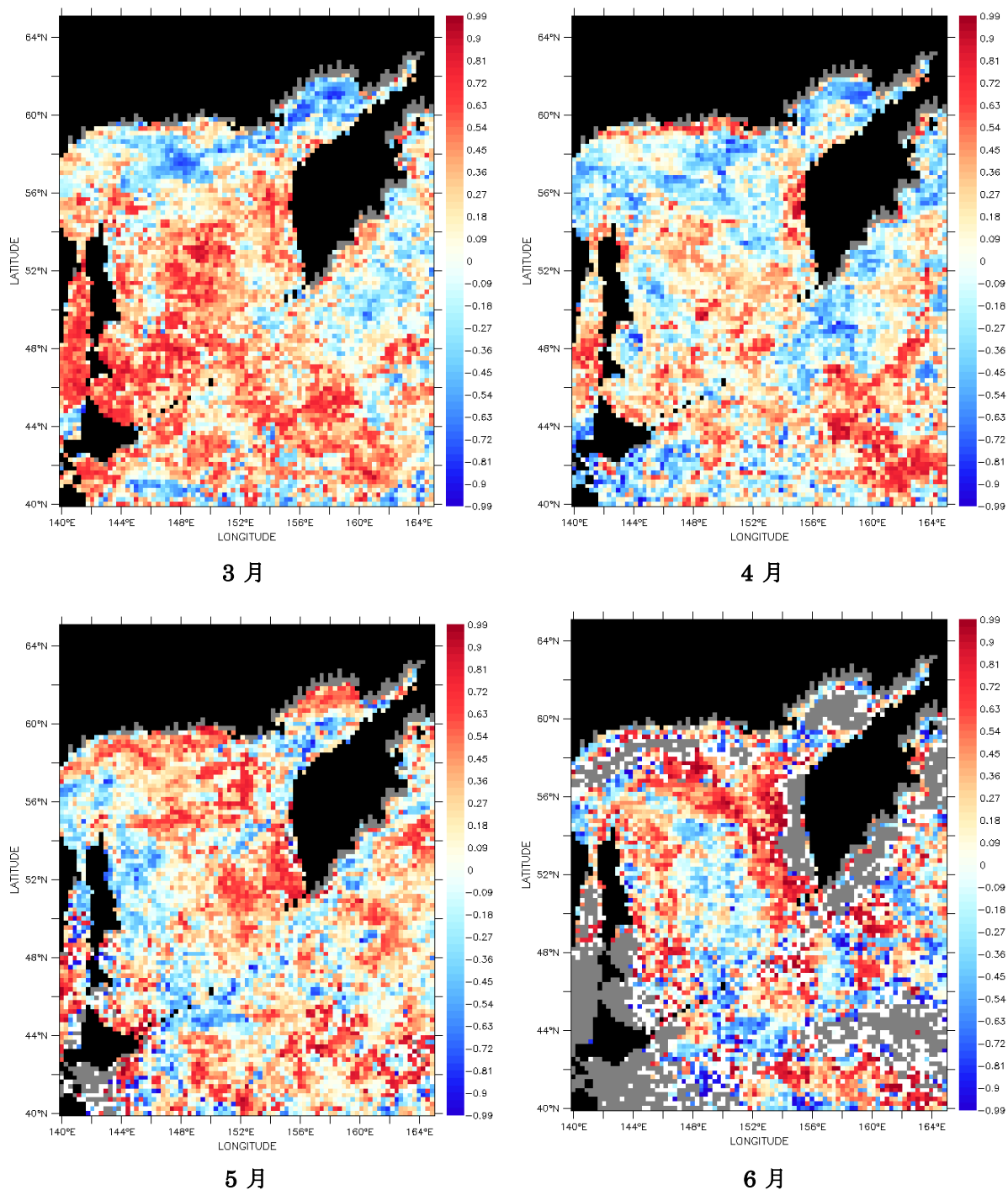


図 4-35-1. 月平均風速と春季ブルーム発生日の関係



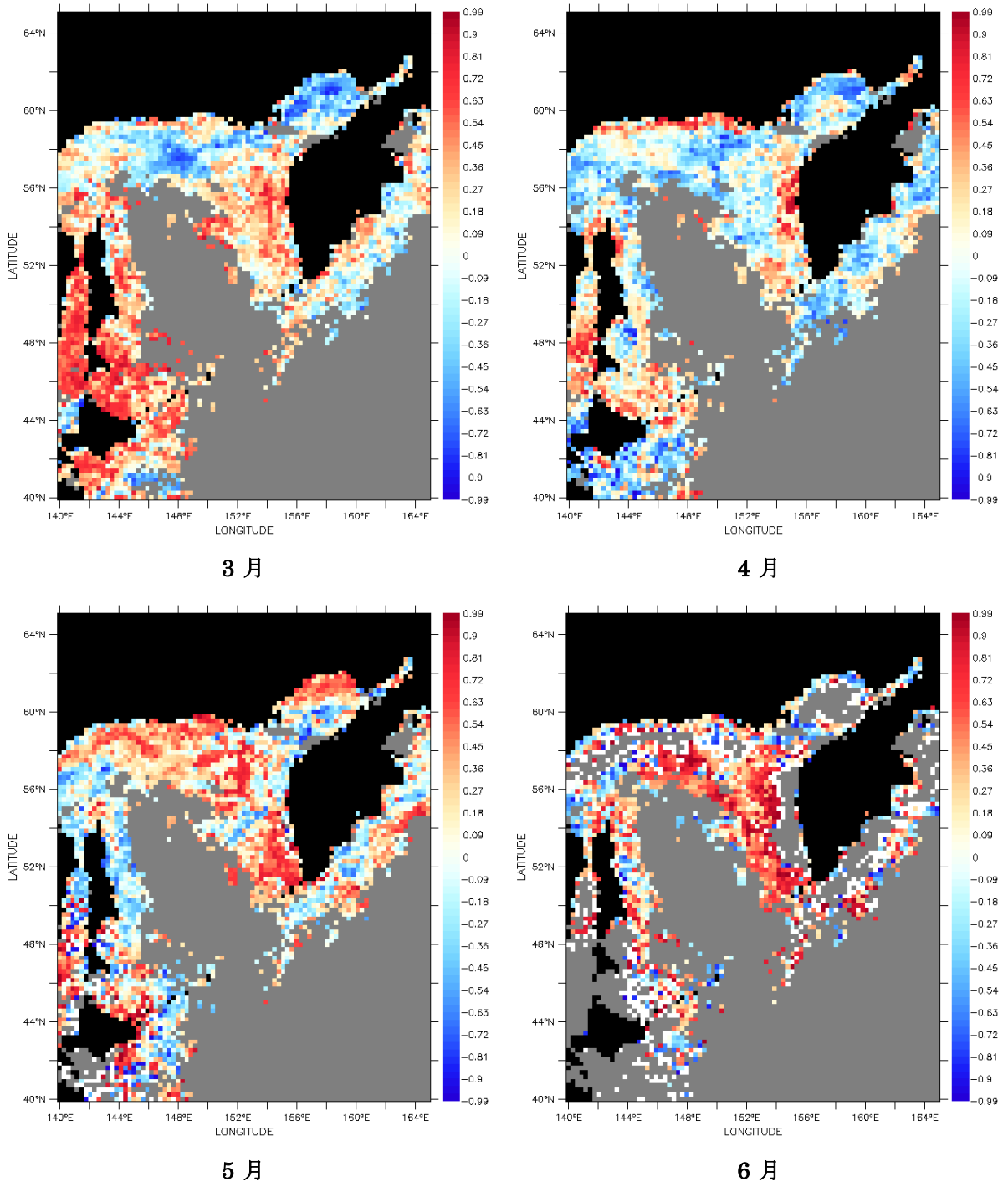


図 4-35-2. 月平均風速と春季ブルーム発生日の関係  
(ブルームが強い海域のみ)

図 4-36 はブルームが強い海域における 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を示したものであり、有意水準 5% で有意な相関係数のみを抽出している。まず、3 月における北海道・樺太周辺で強い正の相関が有意である事がわかる。また、5・6 月はオホーツク海北部を中心に、正の相関が有意である。つまり、風速が長いタイムスケールでブルーム発生日に影響を与えていると言える。

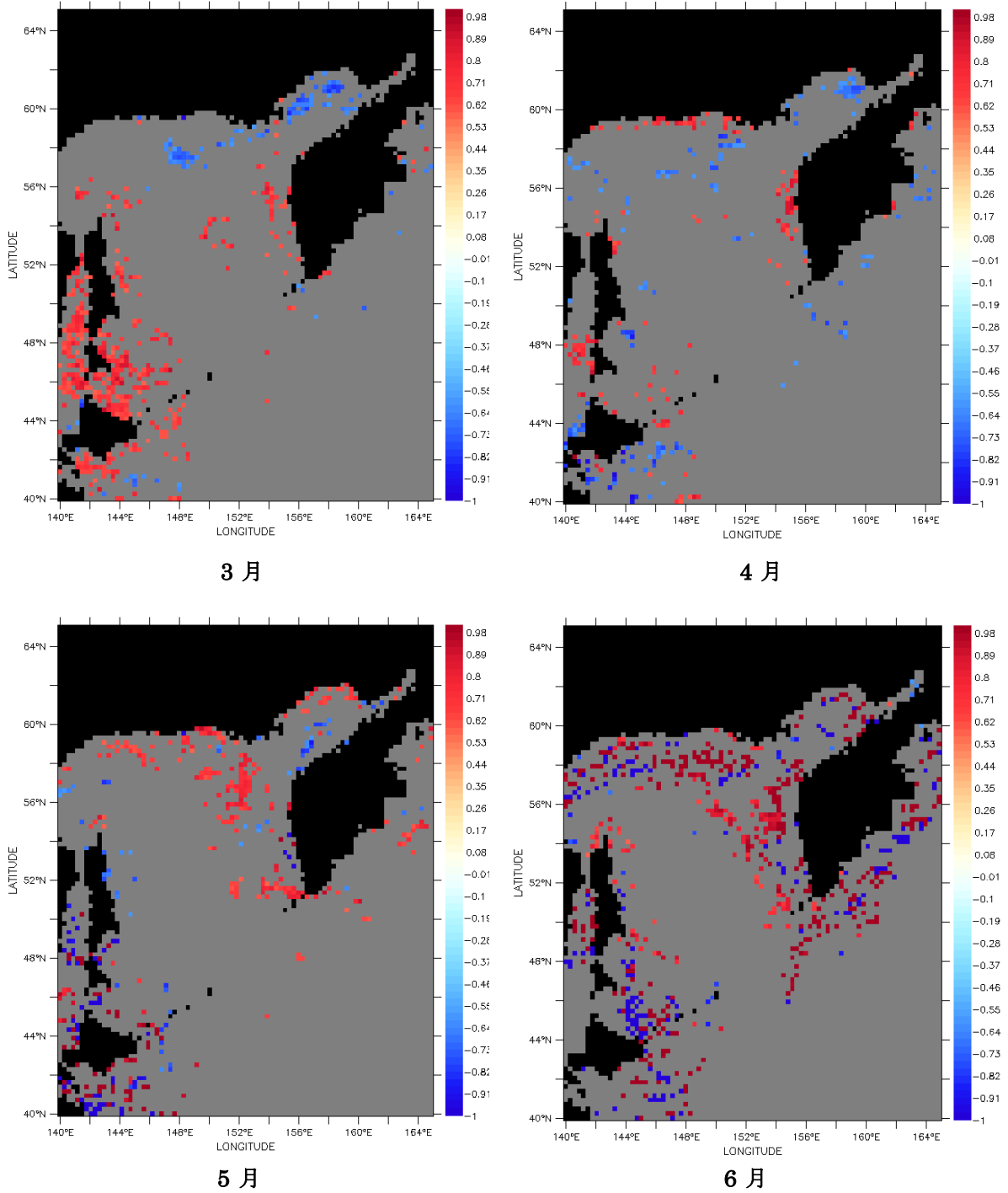
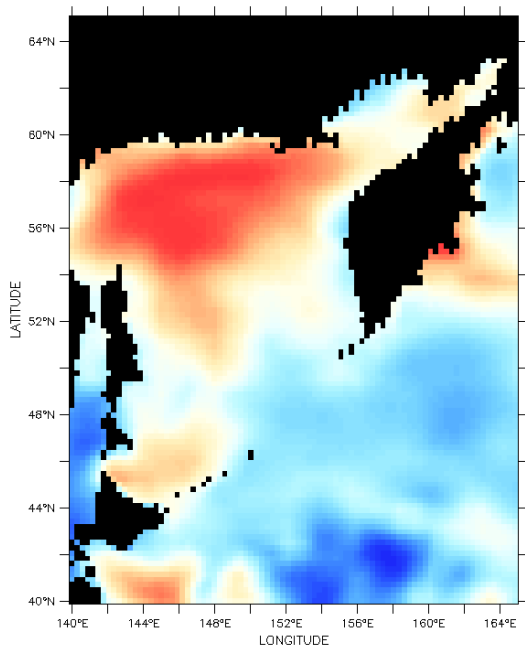


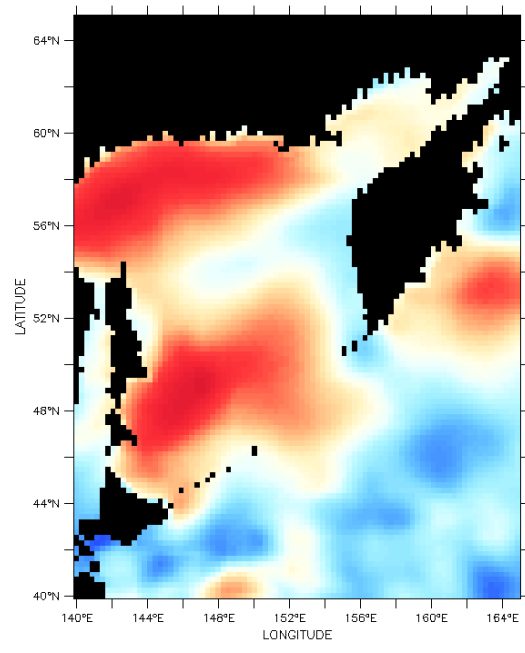
図 4-36. 月平均風速と春季ブルーム発生日の関係

(有意水準 : 5%)

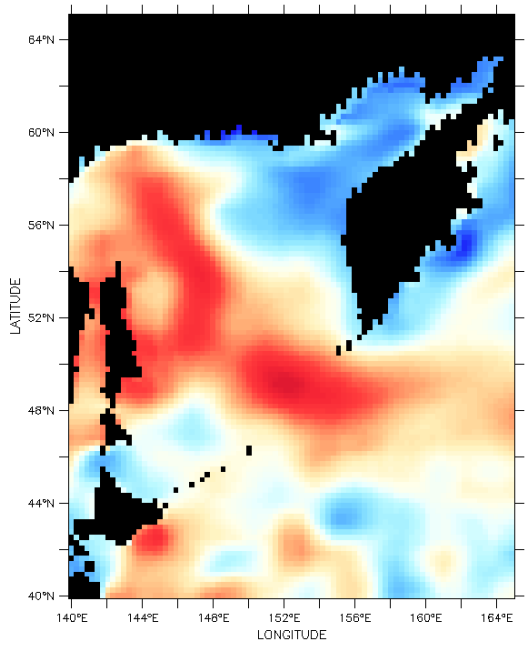
風は、風向や季節によって暖気と寒気になり得る。図 4-37 は 3 月から 6 月における、気温と風速の月平均値の相関を計算したものである。3 月から 4 月にかけての海氷がまだ残っている期間は、オホーツク海においては気温が高いほど風速が大きい傾向が見られる。一方、太平洋では気温が高いほど風速が小さい。3 月から 4 月にかけては冬が終わり、暖かくなり始めるので気温が徐々に上昇していく。逆に、風速は徐々に減少していく。太平洋においてはこの様子が相関分布に表れている。また、図 4-38 は太平洋のある地点(北緯 45° / 東経 160° 付近)と季節海氷域である北海道沖の地点(北緯 45° / 東経 145° 付近)における風速の平年値を比較したものである。海氷域では海氷が発達し始めると風速の上昇が抑えられ、海氷がないエリアに比べて早い段階で減少に転じる。海氷が発達すると、風速がより弱まるようになるが、海氷が減少し始めると、風速が一定になる。3 月から 6 月辺りまで、海氷域での風速はあまり変化がない。そして 7 月以降、海氷が発達を始める時期までは、両エリアで同じように風速は大きくなっていく。このように海氷の発達には風速を押さえる効果がある(図 4-39)。3 月から 6 月における風速の月平年値を図 4-40 に示す。夏が近づくにつれて、太平洋では風速が急激に小さくなっていくが、オホーツク海の、特に海氷に覆われる海域においては風速の変動がほとんどない事がわかる。



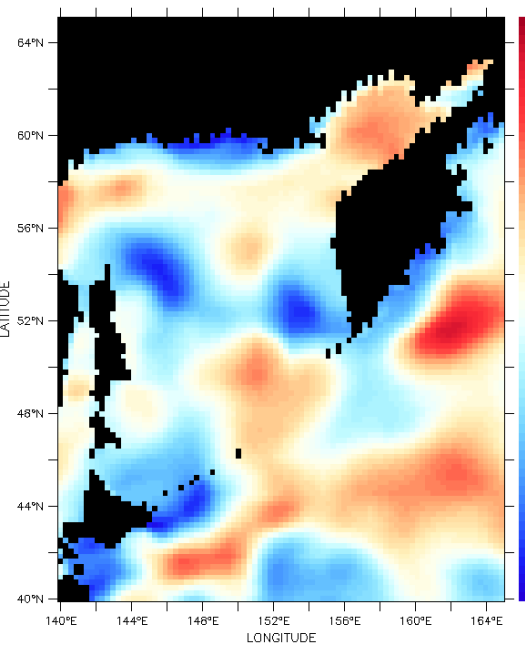
3月



4月



5月



6月

図 4-37. 気温と風速の相関

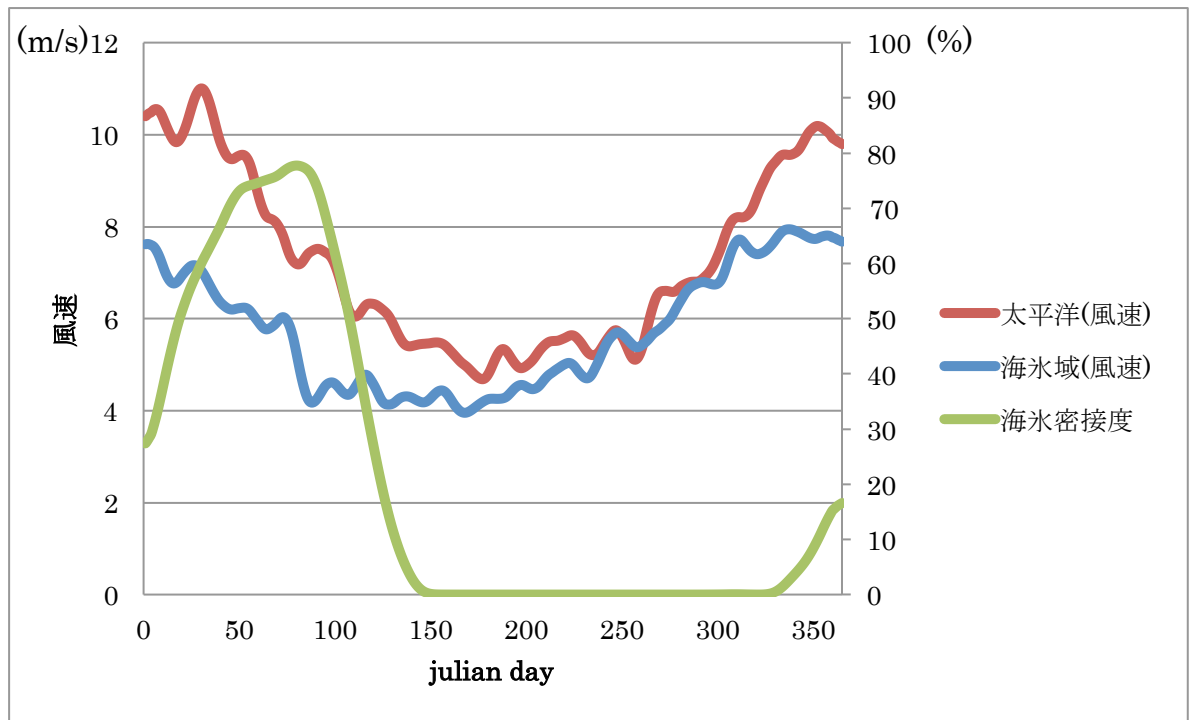


図 4-38. 風速と海氷密接度の平年値の季節変化

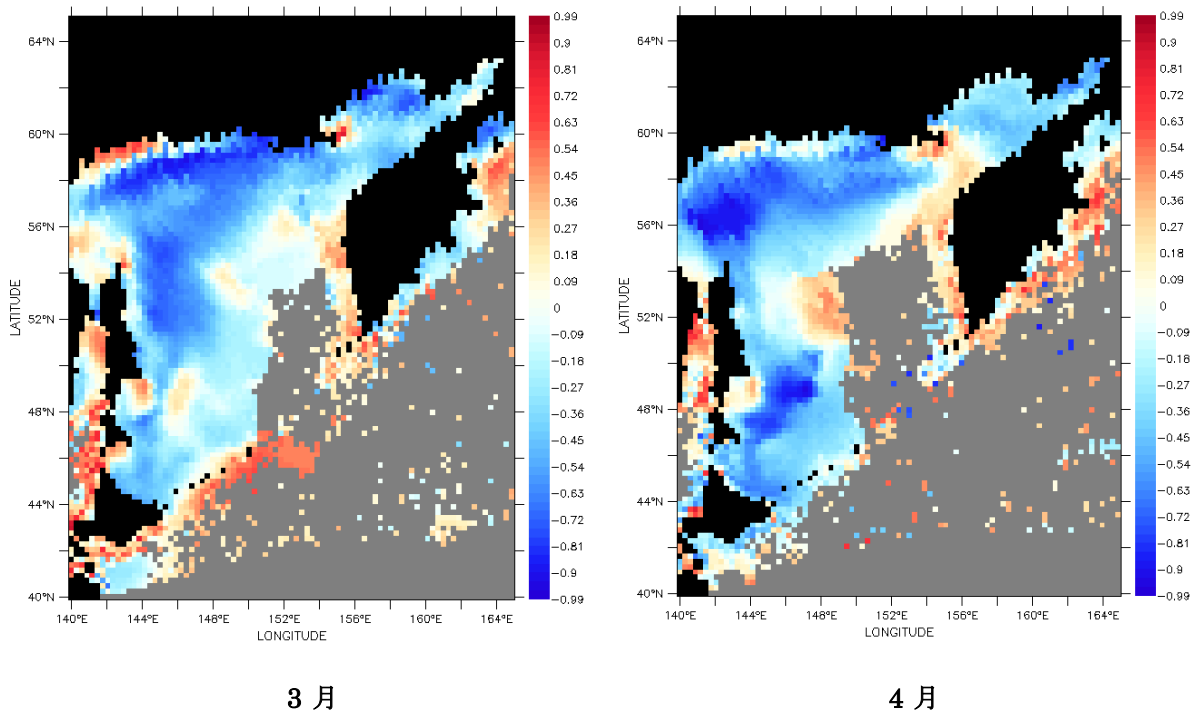


図 4-39. 海氷密接度と風速の相関

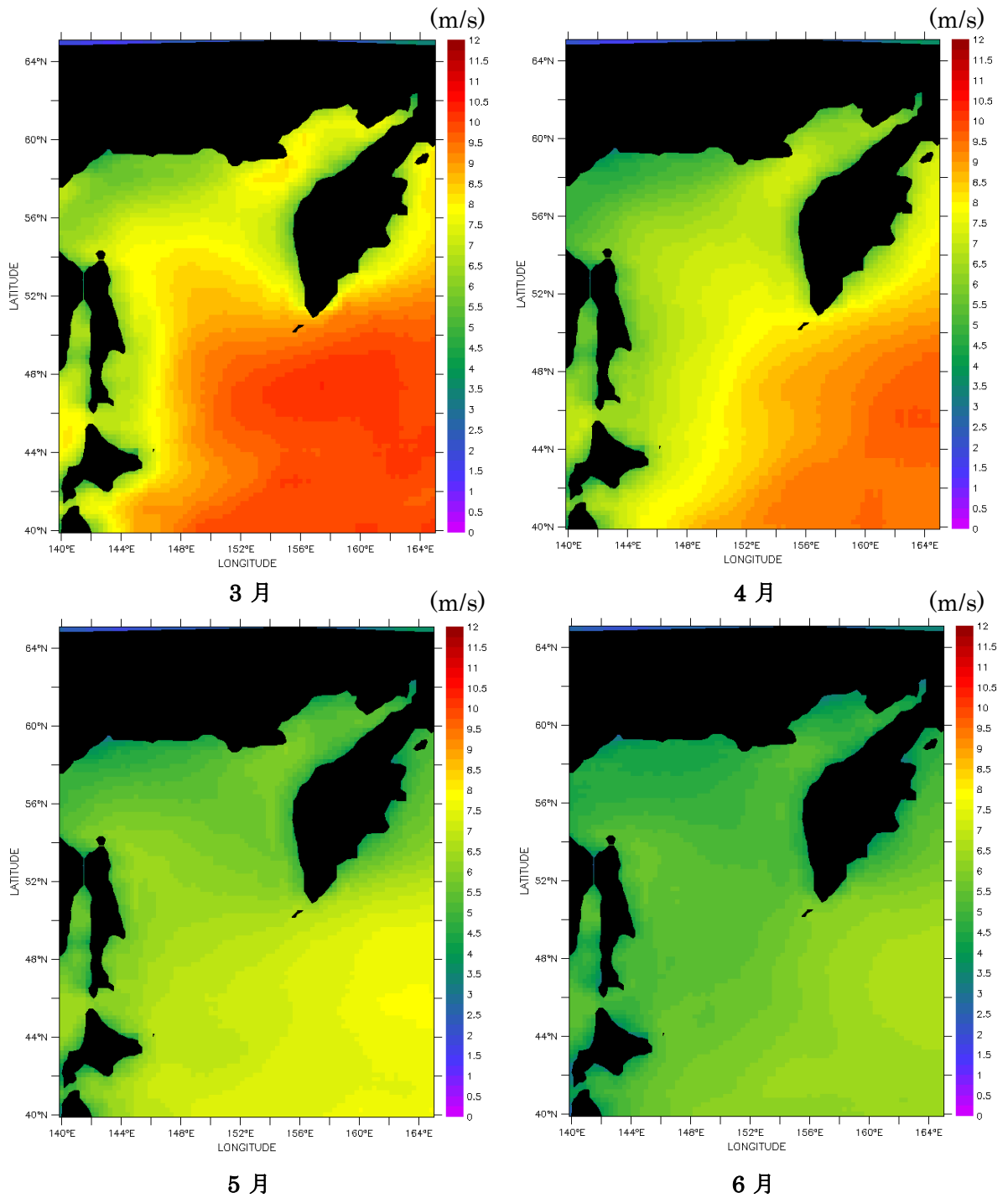


図 4-40. 風速の月平年値

春季ブルーム発生日、風、海氷密接度、この三つの関係をまとめると、風が強いとブルームの発生が遅れ、その年の海氷密接度は小さかった事になる。しかし実際には、第4章の4.2で述べた通り、海氷勢力と春季ブルームの発生日はあまり関係がないので、海氷密接度とも関係がないと考えられる。それでは風速のみが純粋にブルームの発生日に影響を与えているのか。

海上では海氷や SST・気温，また，それらの相互作用が風速に影響を与えている．風速とブルーム発生日の相関に関して，風速のみの影響を考える一つの方法として高層の風速を用いた．図 4-41 は 3 月から 6 月における 850hPa 高度の風速の月平均値とブルーム発生日の相関である．これは図 4-34 で示した地上付近の風速とブルーム発生日の関係とほぼ一致している．ブルーム発生日に対して風速の強さだけでも十分に影響を与えると考えられる．

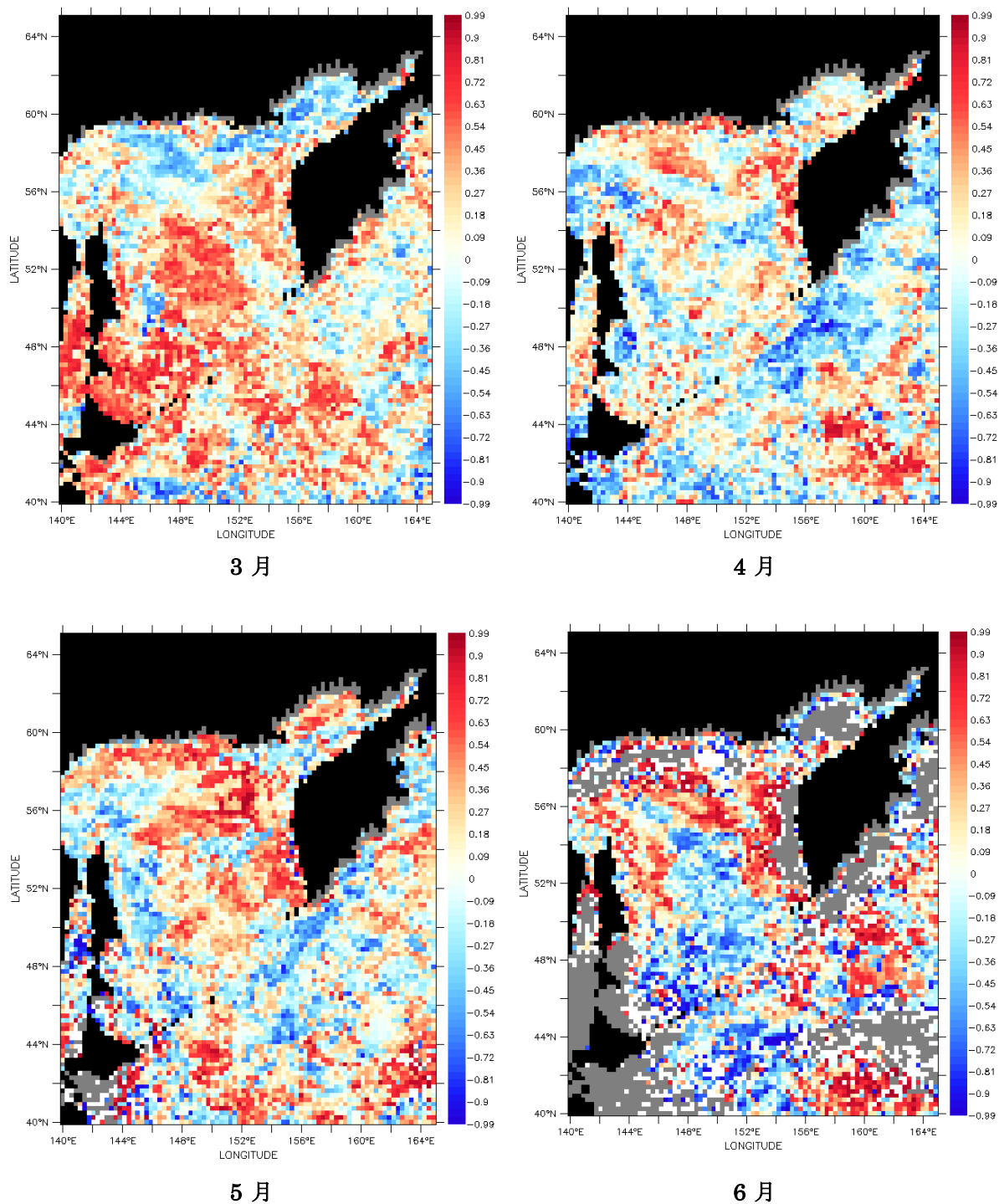
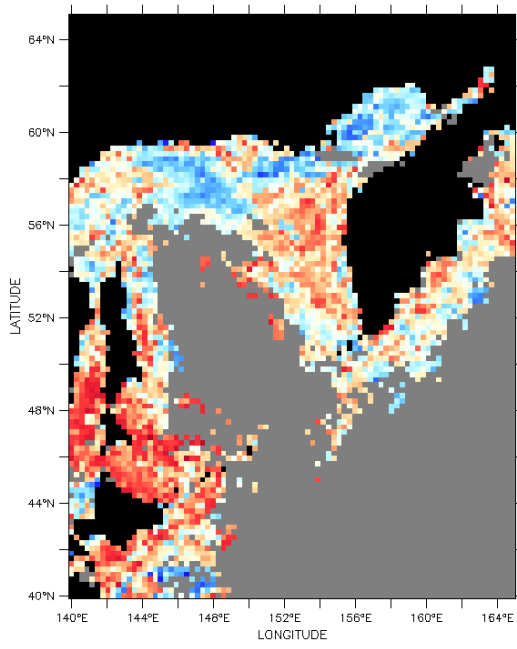
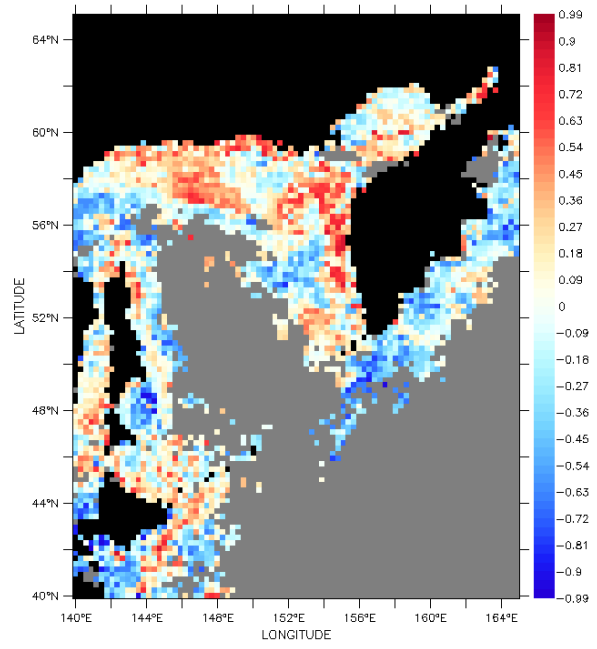


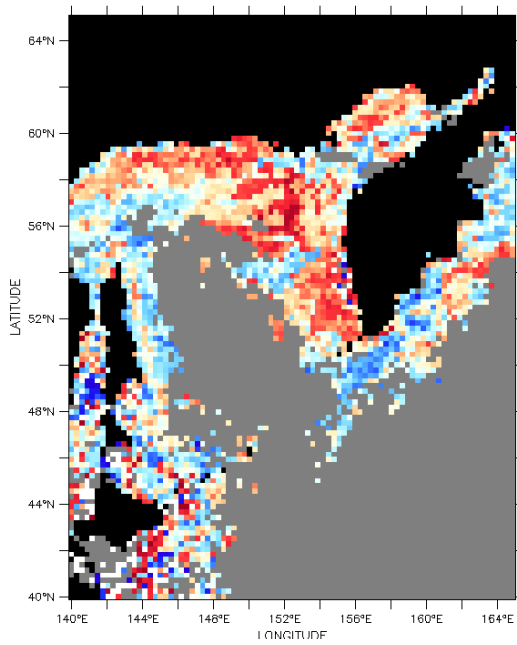
図 4-41-1. 月平均風速(850hPa)と春季ブルーム発生日の関係



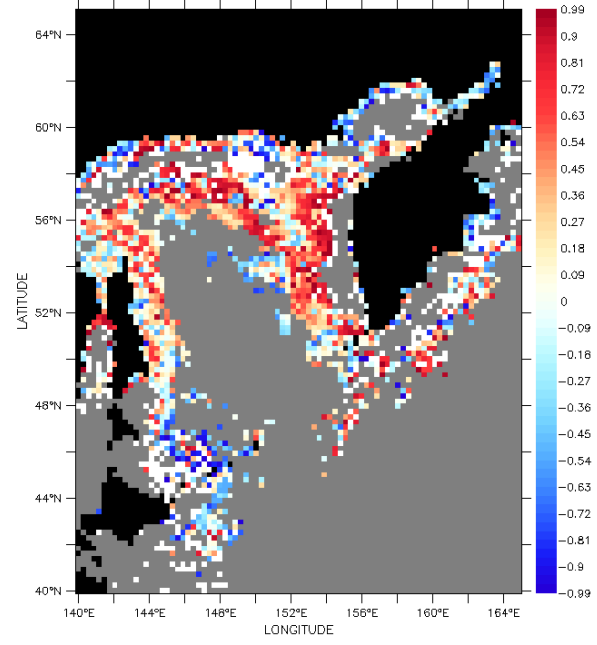
3月



4月



5月



6月

図 4-41-2. 月平均風速(850hPa)と春季ブルーム発生日の関係  
(ブルームが強い海域のみ)



図 4-42 はブルームが強い海域における 3 月から 6 月における 850hPa 高度の風速の月平均値とブルーム発生日の相関を示したものであり、有意水準 5% で有意な相関係数のみを抽出している。地上付近の風と同様に 3 月は北海道・樺太周辺で、また、5 月になるとオホーツク海北部で正の相関が有意であった。地上付近の風との関係よりも有意な正の相関の範囲は狭かったが、同様の傾向を示している事は確かである。つまり、風速とブルーム発生日の関係が、他の気象要素等の影響を除いたとしても有意であると言える。

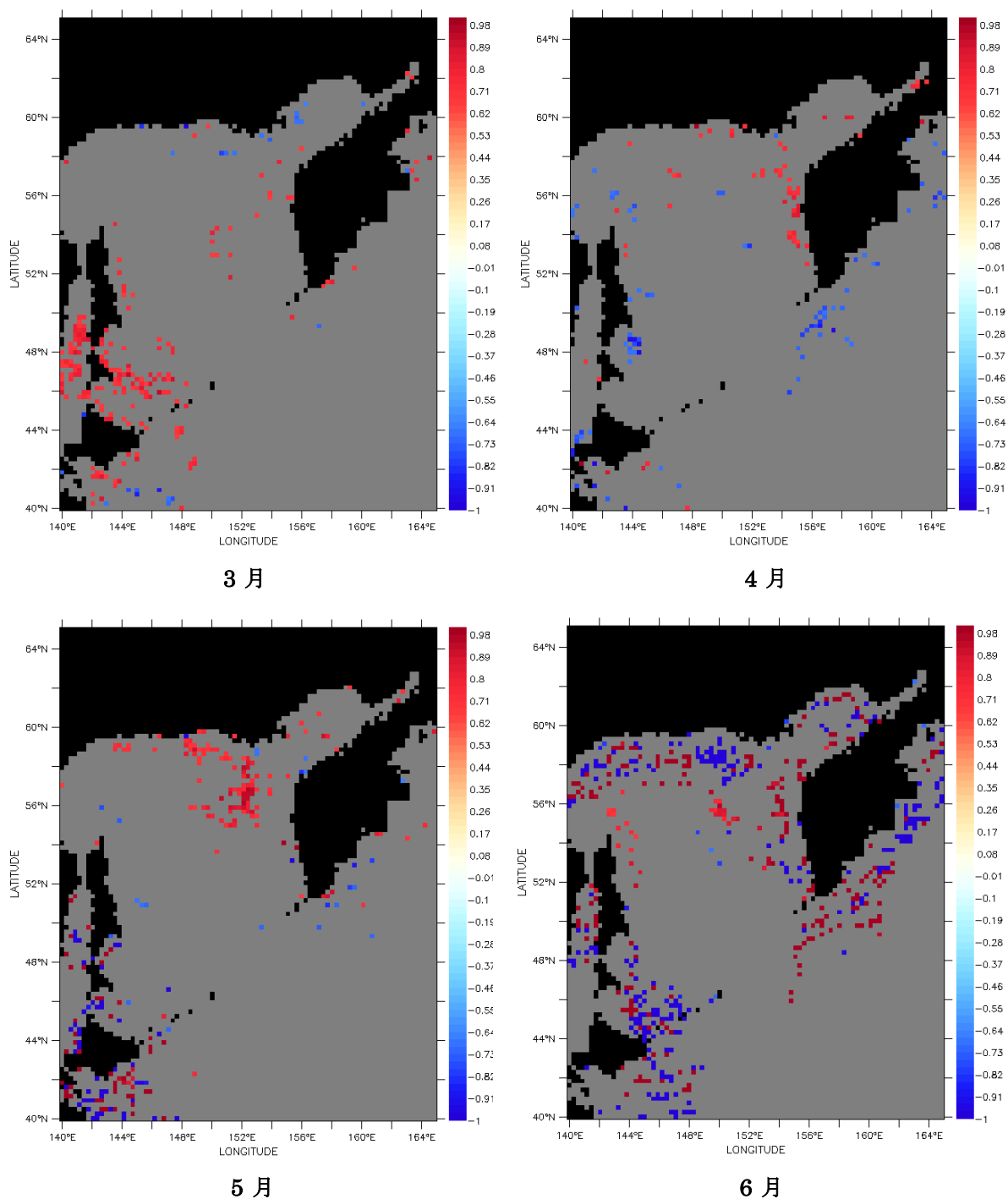


図 4-42. 月平均風速(850hPa)と春季ブルーム発生日の関係  
(有意水準 : 5%)

# 第5章 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植物プランクトン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った。そして、海氷・気象要素等との関係について解析を行った。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、海氷の存在はブルームの発生を遅らせる。一般的に海氷融解によって低塩分の海水が生成され、塩分成層が強まり、海氷に含まれる植物プランクトンであるアイスアルジーが放出されるため、海氷の存在は植物プランクトンの増殖に影響を及ぼすと考えられている。しかし、海氷の有無によるブルームの違いは見られなかった。また、海氷に覆われる海域でもそうでない海域でも、ブルームの経年変化はほぼ同じ動きを見せた。つまり、ブルームの発生には塩分成層の強まりやアイスアルジーの存在よりも、他の要素が効いている可能性が高い。

### 3. ブルーム直前の SST がブルームの発生に影響を与える

春季ブルーム発生直前1~2週間の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りやすくなると考えられる。また、1ヶ月単位でのSSTに関しても、ブルーム前のSSTが高いほど、ブルームの発生が早まる。

### 4. PAR は春季ブルームに対してあまり影響を与えない

春季ブルーム発生前の長い期間でPARの量が多いとブルームは早まり、オホーツク海北部を除いたブルームが強い海域に注目するとその傾向は顕著であるように見えた。しかし、有意水準5%ではそれらの関係は有意ではなかった。

### 5. 風速が大きいとブルームの発生が制限される

春季ブルーム発生直前1~2週間の風速が平年よりも大きいとブルームが遅れる傾向があるが、有意水準5%ではそれらの関係はあまり有意ではなかった。一方、より長いタイムスケールでは、3月における北海道・樺太周辺で、また、5・6月はオホーツク海北部を中心に、強い正の相関が見られた。つまり、風速が長いタイムスケールでブルーム発生日に影響を与えていると言える。Mustapha and Saitoh(2008) [15]では北海道のオホーツク海沿岸域において、ブルーム前や、ブルーム初期段階で風が強まると、ブルームは遅れたり、長続きせず、弱いものとなるとされていたが、本研究では風速の増加によるブルームの遅れについてのみ確かめられた。また、オホーツク海の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う。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ず、ブルームが遅れると考えられる。

以上が本研究の得られた知見である。春季ブルーム発生日に対して海氷・気象要素等がもたらす影響について表5-1にまとめた。

表 5-1. 春季ブルーム発生日との関係

|       | SST           | PAR                | 風速                  | 海氷        |
|-------|---------------|--------------------|---------------------|-----------|
| 1~2週間 | 大きいほどブルームを早める | 影響しない              | 大きいほどブルームを遅らせる傾向がある | ブルームを遅らせる |
| 1ヶ月~  | 大きいほどブルームを早める | 大きいほどブルームを早める傾向がある | 大きいほどブルームを遅らせる      |           |

現在、オホーツク海の海氷は減少傾向にある。仮に、今後オホーツク海で海氷が減少を続けるとしたら何が起こるのか。本研究では、オホーツク海の海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. 今後の課題

今回 2003～2011 年の 9 年間における衛星観測データを用いて解析を行ったが、解析対象期間が短いという問題点がある。同じセンサーを用いて解析を行うには、今後も継続的な衛星観測が必要である。加えて、Chl-a 濃度のデータの欠損が多く、異常値も含まれる。異常値を少なくするためには、現場観測データを増やし、それを元に Chl-a 濃度の推定アルゴリズムを改良する必要がある。さらに、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の発生を前後させるメカニズムに関して裏付けを行う事が出来ると考えられる。

## 参考文献

- [1] 気象庁ホームページ 海氷面積の長期変化傾向(オホーツク海)  
[http://www.data.kishou.go.jp/kaiyou/shindan/a\\_1/series\\_okhotsk/series\\_okhotsk.html](http://www.data.kishou.go.jp/kaiyou/shindan/a_1/series_okhotsk/series_okhotsk.html)
- [2] OceanColor WEB ホームページ  
<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>
- [3] 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
- [4] 平野伴明, 笠松伸江, 工藤栄: サロマ湖から単離した珪藻 7 株の携帯と増殖特性, 南極資料, Vol.47, No.2, 111-118, 2003
- [5] Ikeya, T., Kashino, Y., Kudoh, S., Imura, S., Watanabe, K. and Fukuchi, M. : Acclimation of photosynthetic properties in psychrophilic diatom isolates under different light intensities, Polar Biosci., Vol.13, 43-54, 2000
- [6] McRoy, C.P., J.J. Goering and W.E. Shiels : Studies of primary production in the eastern Bering Sea, 1972, p.199-216, In A.Y. Takenouti (ed.) : Biological Oceanography of the Northern North Pacific Ocean. Idemitsu Shoten
- [7] McRoy, C.P. and J.J. Goering : The influence of ice on the primary productivity of the Bering Sea, 1974, p.403-421, In D.W. Hood & E.J. Kelly (eds.) : Oceanography of the Bering Sea. Inst. Mar. Sci., Univ. Alaska
- [8] Grainger, E.H. : Primary production in Frobisher Bay, Arctic Canada, 1979, p.9-30, In M.J. Dunbar (ed.) : Marine Production Mechanisms. Cambridge Univ. Press.
- [9] Saito, K. and A. Taniguchi : Phytoplankton communities in the Bering Sea and adjustment seas. II. Spring and summer communities in seasonally ice-covered areas, Astarte, Vol.11, 27-35, 1978

- [10] Horner, R. A. and V. Alexander : Ecology and metabolism of sea ice organisms, 1972, Progress Rep, to NSF No.R72-6. Inst. Mar. Sci., Univ. Alaska, p.1-23
- [11] Alexander, V. : Interrelationships between the seasonal sea ice and biological regimes, Cold Reg. Sci. Technol., Vol.2, 157-178, 1980
- [12] 秋山優, 有賀祐勝, 坂本充, 横浜康継, 藻類の生態, (内田老鶴圃, 東京都, 1986年), 第12章
- [13] Niebauer, H. J., V. Alexander and S.M. Henrichs : A-time-series study of the spring bloom at the Bering Sea ice edge I. Physical processes, chlorophyll and nutrient chemistry, Continental Shelf Research, Vol.15, 1859-1877, 1995
- [14] 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
- [15] 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
- [16] 日本海洋データセンター  
<http://www.jodc.go.jp>
- [17] 北海道区水産研究所  
<http://hnf.fra.affrc.go.jp/n-line/index.html>
- [18] National Aeronautics and Space Administration (NASA)  
<http://www.nasa.gov>
- [19] 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)  
<http://www.jaxa.jp>
- [20] 比嘉紘士 : 沿岸域における衛星リモートセンシングのためのクロロフィル a・SS 同時推定手法の開発, 東京大学大学院 新領域創成科学研究科, 修士論文, 2012

[21] 環日本海海洋環境ウォッチ ホームページ

<http://www.nowpap3.go.jp/jpn/callender/chl-help.php>

[22] National Snow and Ice Data Center (NSIDC)

<http://nsidc.org>

[23] 中野佑哉：オホーツク海における海氷の生成・消滅挙動の解析，東京大学大学院 新領域創成科学研究科，卒業論文，2013

[24] European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)

<http://www.ecmwf.int>

[25] National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)

<http://www.noaa.gov>

[26] 気象庁 気象観測統計指針 第1部

[http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/kaisetu/shishin/shishin\\_5.pdf](http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/kaisetu/shishin/shishin_5.pdf)

# 謝辞

本研究を進めるにあたり、本当に多くの方々のご指導、ご支援を受け、修士論文を完成させる事が出来ました。この場をお借りし、厚く御礼申し上げます。

まず始めに、海氷密接度データは NSIDC、気象データは ECMWF、SST データは NOAA のものを利用しました。Chl-a 濃度のデータは NASA の OceanColor WEB と JAXA の地球観測研究センター (EORC) が公開しているものを利用させていただきました。そのおかげで、大量のデータを利用し、研究を進める事が出来ました。ありがとうございました。

指導教員である山口先生には二年間本当にお世話になりました。修士研究を始める際、テーマを自由に決めて、自分のやりたい研究をやらせていただいた事は、研究を進める上でのモチベーションの維持に繋がりました。また、ゼミにおける客観的なご指摘は大変ためになりました。研究が中々進まない中で、山口先生から言われた「修士は毎週成果が出て当たり前」という言葉を受けた事で気持ちを入れ替え、9月からは研究をより一層進める事が出来ました。さらに、成果が出なくて精神的に苦しい時期や発表前等にも全面的にサポートしてくださり、大変感謝しております。時に厳しいと感じる事もありますが、敢えてそのような環境を作り、私を鼓舞してくださっていたと、今では思っています。そんな中で自分は成長する事ができたと感じております。自分は勉学において、さらに他の面でも大変未熟者で、迷惑ばかりかけていて、本当に世話の焼ける学生だったかと思えます。しかし、最後まで見捨てずに指導していただき本当にありがとうございました。また、体調には十分御気をつけてください。

特任研究員の木村先生には山口研究室に移る前の、入試説明会からお世話になりました。木村先生が以前行っていた研究とほんの少しテーマが似ていると言う事もあり、研究を進めるにあたって多くの有益なご指導・ご指摘をいただきました。木村先生なしにはこの修士論文を完成させる事が出来なかったといっても過言ではありません。さらに自分のやりたい研究をするという木村先生の研究に対する姿勢には大変影響を受け、研究を進めるための大きな原動力となりました。また、研究以外の面では昼食の時間に「長八」や「太郎食堂」等、とてもおいしくてインパクトの強いお店に連れて行っていただいたのは良い思い出です。オンとオフの切り替えがしっかりできている木村先生は自分の見習うべき存在でした。そして40歳とは思えない、若さ溢れる雰囲気がとても好きです。これからも若いまままでいてください。



特任研究員の小野さんにはデータをいただいたり、プログラミングについて教えていただいたりと、研究の基礎となる部分で大変お世話になりました。初歩的な質問でも嫌な顔一つせず親身になって対応してくださり、そのおかげで研究をより進める事が出来ました。小野さんは本当にいつも優しく、最高のジェントルマンでした。「日本酒は三杯目までは水」、忘れません。いつかまた飲みに行きましょう。

秘書の亀井さんには入学当初から様々な手続き等で大変お世話になりました。亀井さんが支えてくださっているからこそ、研究に集中できたとつくづく感じております。また、「食べ物の恨みは怖い」ということも亀井さんから学びました。

特任研究員の Waruna さん、研究室 0B の金さんには描画ソフトの使い方等を教えていただいたおかげで今ではそれなりに「ferret」を使いこなせるようになりました。また、2年生の秋頃、Waruna さんが思った以上に日本語を喋る事が出来る事を知った時の衝撃は計り知れません。金さんには1年生の頃、夜ご飯に誘っていただいたり、研究の合間の雑談等の思い出も多くあります。

博士課程の Yasara さん、後輩の中野君、永川君とは一緒にご飯を食べて楽しく過ごしたり、時には研究に対するアドバイスをいただいたりしました。彼らのような優秀な方々と一緒に研究生活を送る事ができ大変刺激になり、感謝しております。

また、副指導教員を担当してくださった林先生との二回の面談では、普段のゼミ等とは異なる視点からのご指摘をいただき、研究を客観的に見直す良い機会となりました。二回目の面談の際には、「残り約一ヶ月、さらに頑張ろう！」という気持ちにさせていただき、ラストスパートをかける事が出来ました。

そして研究室に同期がいない自分にとって、いつも仲良くしてくれて、時には相談に乗ってくれた専攻の同期と KAIST の Choi 君、柏門庭球部の仲間達は、心の支えとなりました。彼らがいたからこそ修士課程の二年間をより充実させる事が出来ました。

最後になりましたが25年間に渡って、支えてくれた家族に感謝申し上げます。大学院まで進み、一人暮らしで不自由なく過ごす事が出来たのは特に両親のおかげです。これから社会人になるので恩返しをしていきたいです。