

— 論 文 —

春季黒潮続流域における黒潮水-親潮水二層構造の分布とクロロフィル a 濃度の経年変動*

西川 悠^{1**}, 碓水 典久², 蒲地 政文¹, 田中 裕介¹, 石川 洋一¹

要 旨

多くの魚にとっての索餌場である春季の黒潮続流域上流の餌環境は、主として基礎生産量によって決定されている。したがって、各年の漁業資源量の予測精度を向上させるためには、基礎生産量の経年変動メカニズムを解明する必要がある。最近、親潮水が黒潮続流フロント周辺で黒潮水の下に潜り込んで層構造が形成されている所は、光合成に好適な環境であって、黒潮続流域の中でも特に生産性が高いことが報告された。この結果は、黒潮水-親潮水二層構造が形成される海域の面積の多寡が黒潮続流域上流の基礎生産量と密接に関連している可能性を示唆している。このことを、高解像度の再解析データから計算した黒潮水-親潮水二層構造の分布面積と衛星によるクロロフィル a 濃度の各々の経年変動間の相関解析によって調べた。その結果、両者の間には有意な正の相関関係が存在し、黒潮水-親潮水二層構造の分布面積が大きな年ほどクロロフィル a 濃度が高いという関係が見出された。

キーワード：黒潮，親潮，黒潮続流域，混合比，クロロフィル a

1. はじめに

冬季に温暖な黒潮域で産卵し、夏季に餌の豊富な親潮域で索餌するという生活史は、日本近海の浮魚類に多く見られ、主要な水産魚種であるマイワシ、カタクチイワ

シ、サンマなども、これに該当する。これらの魚種は、遊泳能力の乏しい卵・仔魚期には、産卵場である日本南岸から黒潮によってその下流域に輸送され、遊泳能力が発達するにつれて、黒潮を離脱し、北上するようになる。このような理由から春季の黒潮続流域上流には多くの浮魚類の仔魚が出現し (Itoh *et al.*, 2009; Nishikawa *et al.*, 2013a), 同海域の基礎生産量の経年変動が餌となる動物プランクトン密度を通じてマイワシ、サンマ等に影響を与えることが指摘されている (Nishikawa *et al.*, 2013b; Ichii *et al.*, 2015)。しかし、海域全体の基礎生産量の経年変動を決定する要因については十分に明らかにはなっていない。

黒潮続流域の中でも、フロント周辺は特に生産性が高いことで知られている (Yamazaki *et al.*, 2009; Shiozaki

* 2016年4月1日受領; 2016年6月9日受理

著作権: 日本海洋学会, 2016

1 国立研究開発法人海洋研究開発機構

〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町 3173-25

2 気象庁気象研究所

〒305-0052 茨城県つくば市長峰 1-1

** 連絡著者: 西川 悠

TEL: 045-778-5283

e-mail: harukan@jamstec.go.jp

et al., 2014)。Nishibe *et al.*, (2015) は、黒潮統流フロント周辺にはしばしば低温の親潮水の上に高温の黒潮水が乗り上げる黒潮水-親潮水二層構造(以下、二層構造と呼ぶ)が存在し、このような場所は混合層が浅くなって光合成に好適な光環境となるために高生産となることを報告している。また、Kaneko *et al.*, (2012, 2013) が指摘している黒潮統流フロントでの下層からの多くの栄養塩供給も、黒潮統流フロント周辺における高生産の維持に寄与していると考えられる。

二層構造に付随する特異的な高生産に着目すると、黒潮統流域上流において、光合成に好適な二層構造が広く分布している時には、黒潮統流域上流全体の基礎生産も増加することが推測される。本研究では、この推測を検証するための第一歩として、親潮水と黒潮水の混合比を元に計算した二層構造の分布面積の経年変動とクロロフィル a (Chl-a) 濃度の経年変動の間の相関関係を調べた。なお、二層構造以外にも黒潮水や親潮水そのものの分布面積が Chl-a 濃度に影響する可能性がある。そのため、黒潮水と親潮水のそれぞれの分布面積と Chl-a 濃度間の相関係数と回帰式も求めた。その結果、Chl-a 濃度の観測値が黒潮水と親潮水のそれぞれの分布面積から求めた推定値よりも、二層構造の分布面積から求めた推定値とより高い相関を持つことが確認できれば、Chl-a 濃度経年変動には二層構造の広がりや影響する可能性が高いと言えることになる。

海洋における主要な基礎生産は、植物プランクトンに含まれる Chl-a の光合成過程における炭素同化であることから、本研究では動物プランクトンや魚を支える基礎生産量の指標として Chl-a 濃度を採用した。また、親潮や黒潮の分布は時空間的に細かいスケールで変動しているため、本研究では欠損がなく再現性の高い表層～亜表層のデータとして、渦解像レベルの海洋再解析データセット(4-dimensional variational Ocean ReAnalysis, FORA)を使用した。FORA では、最先端のデータ同化手法である 4次元変分法海洋データ同化システムによって、海洋観測船等による観測データや人工衛星リモートセンシングによる海面水温等のデータを統合している。この海洋データ同化システムは、国立研究開発法人海洋研究開発機構と気象庁気象研究所が 2016 年に開発したシステムである (Usui *et al.*, 2016)。

2. データと方法

2.1 Chl-a データ

解析には、NASA 提供の SeaWiFS (Sea-viewing Wide Field-of-View Sensor/NASA) の 1998 年から 2007 年までの月平均 Chl-a 濃度データ (9 km × 9 km のレベル 3) を用いた。各年の 4 月と 5 月の 30-40°N, 142-160°N の範囲のデータを平均して春季黒潮統流上流域の Chl-a 濃度時系列データを作成した。

2.2 海洋データ

海洋再解析データセット FORA による再解析値を、水温・塩分データとして用いた。FORA は、水平解像度 1/10° (117-160°E, 15-50°N), 1/6° (160°E-160°W, 50-65°N) および鉛直解像度 1-600 m (54 層) を持つ海洋大循環モデル MRICOM (T sujino *et al.*, 2006) の結果に、船舶観測やアルゴフロートから得られた水温・塩分・衛星による海面高度を 4次元変分法 (Usui *et al.*, 2015) によって同化させた再解析データである。データ同化は、10 日のサイクルで実行され、1 か月以内の短周期中規模変動についても高い再現性を有している (Usui *et al.*, 2016)。再解析期間は 1982 年から 2014 年までの 33 年間である。本研究では SeaWiFS の Chl-a データ取得期間である 1998 年から 2007 年の期間のデータを使用した。

2.3 親潮混合比

Shimizu *et al.* (2001) を参考に、各密度面における純粋な親潮水と黒潮水のポテンシャル水温および塩分から水塊中の親潮水の比率(以下、親潮混合比)を算出した。一般に親潮域は 100 m 水温が 5°C 以下の海域、黒潮流軸位置は 200 m 水温が 14°C で定義されるため (川合, 1972), 1998 年から 2007 年に 142-150°E, 38-43°N に分布する 100 m 水温が 0-5°C の水塊を純粋な親潮水, 141-145°E, 33-38°N に分布する 200 m 水温が 13.5-14.5°C の水塊を純粋な黒潮水と見なし、深度 5-1,000 m におけるポテンシャル水温と塩分から、各密度における純粋な親潮水と黒潮水のプロファイルを作成した。得られたプロファイルは、26.65-27.45 ‰ の範囲で観測から得られた結

果 (Yasuda *et al.*, 2001) とほぼ一致した (Fig. 1)。26.0 σ_t 以下の密度の水塊に対しては, Hanawa and Mitsudera (1987) の定義に従い, 塩分が 34.2 psu 以上の場合には純粋な黒潮水と見なした。塩分が 34.2 psu 未満である場合は混合比を未定義とした。密度 26.0 σ_t 以上の水塊の混合

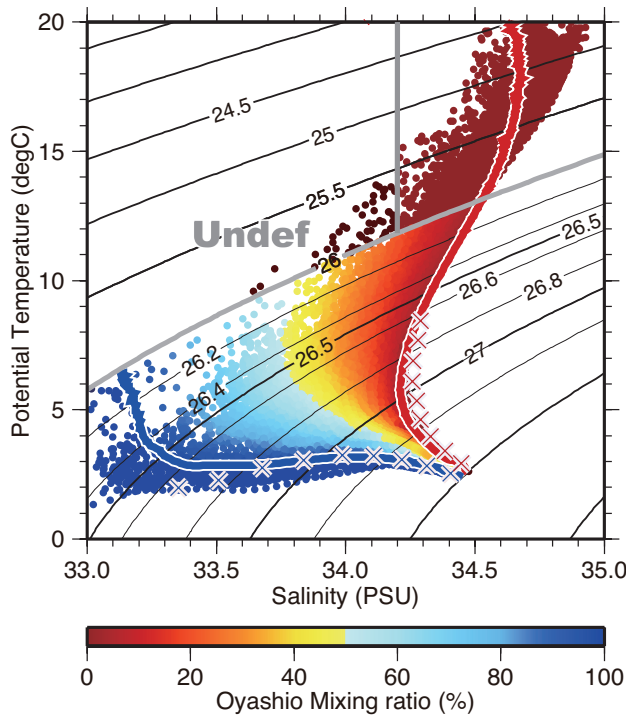


Fig. 1. Oyashio mixing ratio on the TS diagram together with thick curves of the pure Oyashio waters (blue) and Kuroshio waters (red) that were estimated by using FORA output. Blue (red) crosses denote the pure Oyashio (Kuroshio) waters profiles estimated by observation data (Yasuda *et al.*, 2001). We defined the mixing ratio below 26.0 σ_t as 0% or undefined by salinity.

比分布は Shimizu *et al.* (2001) が示した混合比のダイアグラムとよく一致する。密度 26.0 σ_t 以下の水塊はほぼ深度 30 m 以浅に分布するため, 深度 30 m 以深の水塊に対して混合比を計算するのが適切であると考えられる。

密度・栄養塩鉛直プロファイルから, 黒潮水と親潮水の鉛直的な境界は 25-100 m 深に位置すると推定される (Nishibe *et al.*, 2015)。また, 海面付近では水温・塩分が降水や蒸発の影響で変化することがある。これらを考慮して, 本研究では, 50 m に黒潮水が存在し, 100 m 以深に親潮水が存在することを二層構造の検出条件とした。具体的には, 水平解像度 1/10°の各小領域別に水温・塩分から得られた親潮混合比を元に, 140-160°E, 30-40°N の範囲で次のような条件に一致する水柱の分布面積を求めた。

- (1) 深度 50 m で親潮混合比が各々 10%, 20%, 30%, 40%以下となる小領域
- (2) 深度 50 m, 100 m, 200 m, 300 m の各層で, 親潮混合比が各々 50%, 70%, 90%以上となる小領域
- (3) 深度 50 m で親潮混合比が各々 10%, 20%, 30%, 40%以下, かつ深度 100, 200, 300m で親潮混合比が各々 50%, 70%, 90%以上となる小領域

(1) は主として黒潮水が占める小領域, (2) は主として親潮水が占める小領域, (3) は黒潮水と親潮水が二層構造を形成している小領域を示す。これらの小領域の 4 月と 5 月の面積を平均し, それぞれの春季黒潮続流上流域における分布面積の時系列を作成した。

3. 結果

深度 50 m での親潮混合比が 10%, 20%, 30%, 40%以

Table 1. Pearson correlation coefficients between the interannual variations of the area-averaged Chl-a concentration and the area of the Kuroshio water in April to May from 1998 to 2007. The area of the Kuroshio water was defined as the area of the Oyashio mixing ratio less than Max ratio at 50 m depth. The single asterisk (*) denotes 0.01 < P < 0.05.

| Max ratio | 10% | 20% | 30% | 40% |
|-----------|--------|-------|-------|-------|
| | -0.76* | -0.57 | -0.35 | -0.30 |

下と黒潮水が広がっている海域の各々の面積の経年変動と春季 Chl-a 濃度の経年変動との間の相関解析結果を Table 1 に示す。いずれも負の相関関係を有する。特に、親潮混合比が 10% 以下と黒潮水の比率の高い海域の面積の変動は Chl-a 濃度変動と有意な負の相関関係を持ち、黒潮水が広く分布する年ほど Chl-a 濃度が低い傾向となる。

次に、深度 50-300 m の各層で親潮混合比が 50%, 70%, 90% 以上と親潮水の広がっている海域の各々の面積の経年変動と春季 Chl-a 濃度の経年変動の間の相関係数を Table 2 に示す。深度 200 m 以浅では親潮水域面積と Chl-a 濃度の間に有意な相関関係がない。しかし、深度 300 m では親潮混合比が 50% 以上となる海域の面積の経年変動と春季 Chl-a 濃度の経年変動との間に有意な正

の相関関係がある。深度 300 m の場合、相関係数は 0.79 -0.84 であり、親潮水分布面積の Chl-a 濃度経年変動への寄与率は 60-70% となった。深度 300 m における親潮混合比が 50% 以上となる海域面積の中で春季 Chl-a 濃度との相関係数が最も大きいのは親潮混合比が 90% 以上の海域面積であり、この面積の増減と Chl-a 濃度の 1998 年から 2004 年にかけての増加傾向、2004 年から 2006 年にかけての緩やかな減少傾向、2006 年から 2007 年にかけての急減、はよく対応している (Fig. 2 の (a))。黒潮水とは逆に、親潮水が広く分布する年に、Chl-a 濃度は高い傾向を示す。

深度 50 m で親潮混合比が 10%, 20%, 30%, 40% 以下であって、かつ深度 100-300 m で親潮混合比が 50%, 70%, 90% 以上という、黒潮水の下層に親潮水が分布す

Table 2. Same as Table 1 except for the Pearson correlation coefficients between the interannual variations of the area-averaged Chl-a concentration and the areas of the Oyashio water defined as the areas of the Oyashio mixing ratio more than Min ratio at 50, 100, 200 and 300 m depths. The double asterisk (**) denotes $0.001 < P < 0.01$.

| Min ratio | Depth | | | |
|-----------|-------|-------|-------|--------|
| | 50 m | 100 m | 200 m | 300 m |
| 50% | 0.31 | 0.30 | 0.58 | 0.81** |
| 70% | 0.31 | 0.20 | 0.47 | 0.79** |
| 90% | 0.13 | 0.20 | 0.46 | 0.84** |

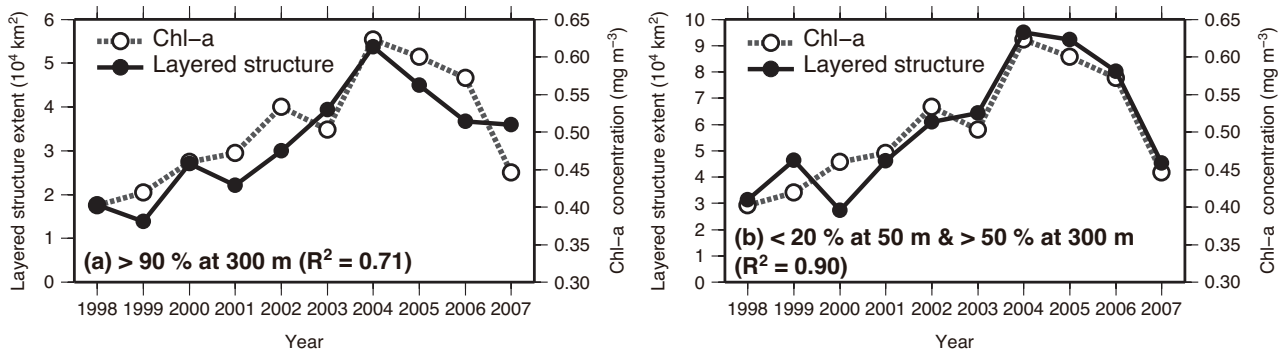


Fig. 2. Time-series of the Chl-a concentration (broken line with open circles) and the areal extent of the Oyashio water where mixing ratio at 300 m is above 90 % (a), and the areal extent of the Kuroshio-Oyashio layered structure where mixing ratio is below 20% at 50 m depth and above 50% at 300 m depth (b). R^2 denotes the coefficients of determination.

Table 3. Same as Table 1 except for the Pearson correlation coefficients between the interannual variations of the area-averaged Chl-a concentration and the areas of the Kuroshio-Oyashio layered structure defined as the areas of the Oyashio mixing ratio less than Max ratio at 50 m depth and more than Min ratio at 100, 200 and 300 m depths. The triple asterisk (***) denotes $P < 0.001$.

| Max ratio | Min ratio | Depth | | |
|-----------|-----------|-------|-------|---------|
| | | 100 m | 200 m | 300 m |
| 10% | 50% | -0.05 | 0.44 | 0.93*** |
| 10% | 70% | 0.01 | 0.34 | 0.86** |
| 10% | 90% | 0.21 | 0.44 | 0.85** |
| 20% | 50% | -0.06 | 0.57 | 0.95*** |
| 20% | 70% | 0.00 | 0.43 | 0.90*** |
| 20% | 90% | 0.19 | 0.39 | 0.86** |
| 30% | 50% | -0.15 | 0.64* | 0.91*** |
| 30% | 70% | 0.00 | 0.29 | 0.92*** |
| 30% | 90% | 0.12 | 0.16 | 0.88*** |
| 40% | 50% | -0.46 | 0.64* | 0.87*** |
| 40% | 70% | -0.07 | 0.22 | 0.89*** |
| 40% | 90% | 0.03 | -0.02 | 0.89*** |

る二層構造が形成されている海域の各々の面積と春季 Chl-a 濃度の経年変動との間の各々の相関係数を Table 3 に示す。Chl-a 濃度の経年変動は、下層の深度 100 m におけるすべての海域面積の経年変動と有意な相関関係を持たないが、深度 200 m では、親潮混合比が 50% 以上であって、かつ深度 50 m での親潮混合比が 30-40% 以下の海域面積の経年変動と有意な正の相関関係を有している。下層の深度 300 m では、全ての組み合わせ条件の海域面積と Chl-a 濃度の間に関係数 0.85-0.95 の有意な正の相関関係があり、親潮混合比が 50% 以上であって、かつ深度 50 m での親潮混合比が 40% 以下となる海域の面積の経年変動の Chl-a 濃度の経年変動への寄与率は 70-90% となった。特に、深度 50 m の親潮混合比が 20% 以下である海域面積の経年変動は Chl-a 濃度の経年変動との間で 0.95 と非常に高い相関係数を持ち、Chl-a 濃度の経年変動への寄与率は 90% となった。この条件の下で計算された二層構造海域面積の経年変動は、Chl-a 濃度の 2004 年以前の増加傾向と 2004 年以降の減少傾向と対応するだけでなく、2004-2006 年の Chl-a 濃度が他の年に比

べ特に高い点や 2006 年から 2007 年にかけての Chl-a 濃度の急減とも非常によく対応している (Fig. 2 の (b))。この条件の下での 4-5 月の二層構造の 1998 年から 2007 年の各年の分布を Fig. 3 に示す。分布面積が大きい 2004-2006 年と他の年の顕著な差は、150°E 以東での二層構造海域の分布の違いに対応している。150°E 以西では、どの年でも二層構造海域が出現している。それに対し、150°E 以東では、2004-2006 年の分布域は広いものの、1998 年にはほとんど出現していない。例えば 4 月の 151.5°E における鉛直断面では、2005 年には 36-37°N で、深度 300 m に親潮混合比が 50% 以上である親潮系の水が、その上層に黒潮系の水が広がっている (Fig. 4 の (a)) のに対し、1998 年にはこのような二層構造は存在せず (Fig. 4 の (b))、両年の違いは明瞭である。また 150°E 以西においても、2004-2006 年は他の年に比べ南北方向に分布域が広がっており (Fig. 3)、結果として黒潮続流上流域全体 (140-160°E, 30-40°N) での分布面積が広くなっている。

衛星から取得した Chl-a 濃度の空間分布にも、二層構造

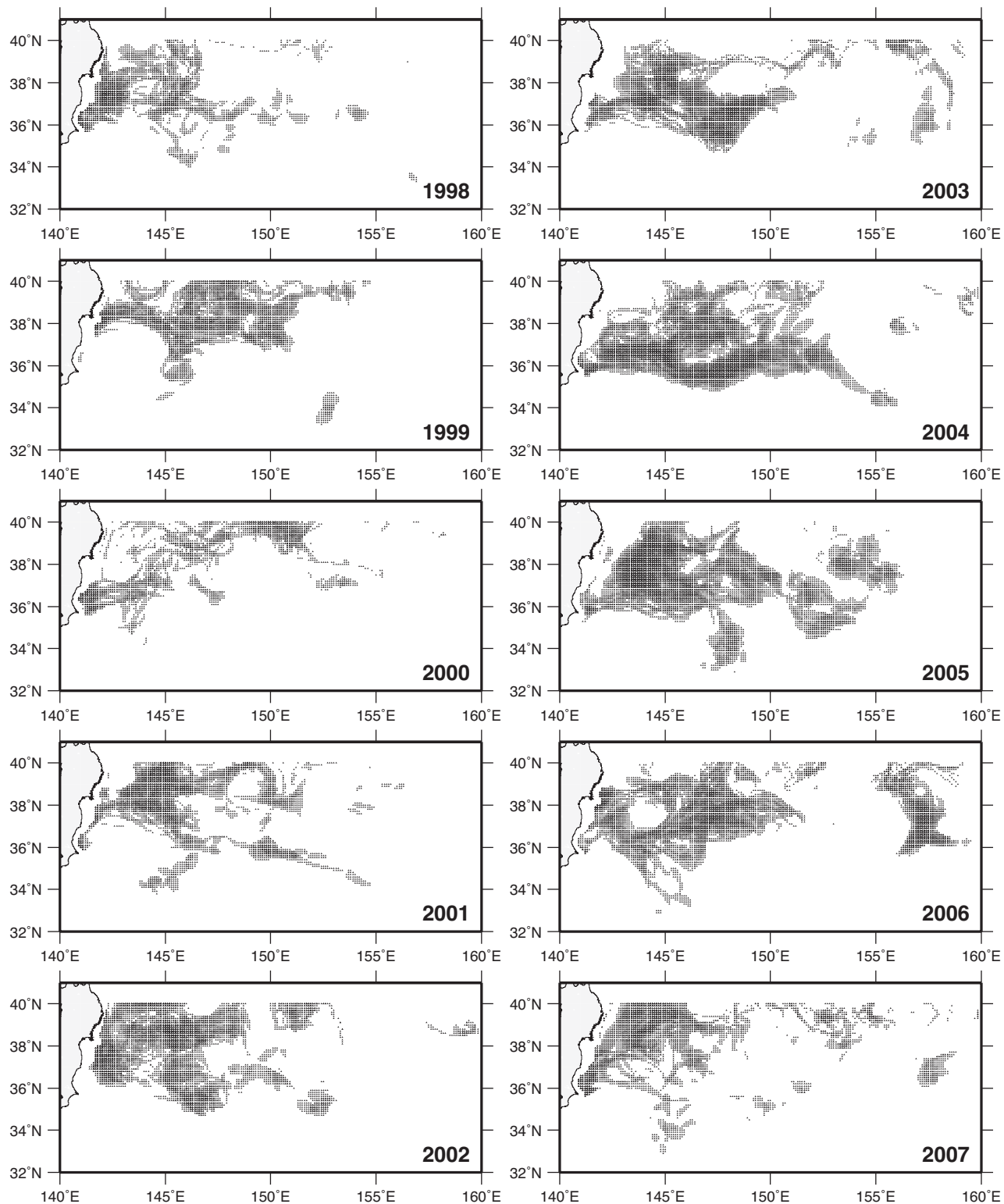


Fig. 3. Map showing the locations of grid points where April-May averaged mixing ratio is below 20% at 50 m depth and over 50% at 300 m depth in 1998-2007.

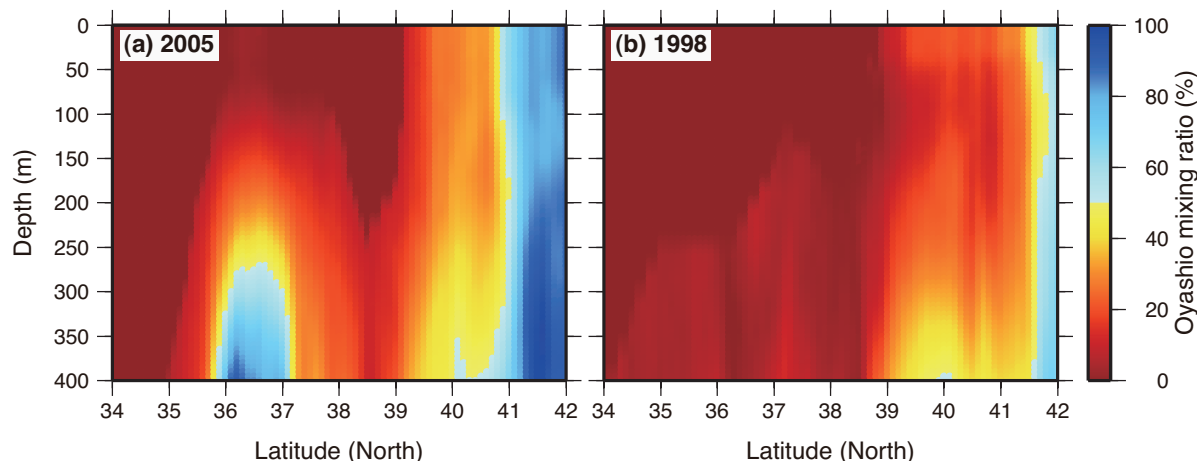


Fig. 4. Vertical sections of the Oyashio mixing ratio along 151.5°E in April 2005 (a) and in April 1998 (b).

海域分布と同様に、黒潮統流上流域平均 Chl-a 濃度が高い年には 150°E 以東でも Chl-a 濃度が高いという傾向がある (Fig. 5)。どの年も 0.8 mg m^{-3} 以上の高濃度 Chl-a が 36°N 以北および 150°E 以西に分布するが、流域平均 Chl-a 濃度が最も低い 1998 年には 150°E 以東にはほとんど分布していない。しかし流域平均 Chl-a 濃度が増加し始めた 2002 年以降は、高濃度 Chl-a が 150°E 以東にも分布し始め、2004-2006 年にかけて分布頻度が高まり、2007 年には再び 150°E 以東での分布頻度は少なくなっている。

4. 考察

春季の黒潮統流域上流において、深度 50 m に黒潮系の水、深度 300 m に親潮系の水が存在する水柱の分布面積の経年変動と Chl-a 濃度経年変動の間には、非常に強い正の相関関係が存在することが明らかになった。深度 300 m における親潮系の水の分布面積自体も Chl-a 濃度経年変動の 70% 程度を説明することが可能であり、これは黒潮統流域への親潮流入量が基礎生産に影響するという既往の研究 (海老沢・木下, 1998) を支持する。しかし、さらに上層が黒潮系の水であるという条件を付け加えることによって Chl-a 濃度経年変動の 90% を説明できるようになった。このことは、黒潮統流域に親潮水が存在するだけでなく、その親潮水が黒潮水の下に潜り込んでいる二層構造の分布が基礎生産に強い影響を与えていること

を示している。なお、黒潮水の分布面積変動と Chl-a 濃度経年変動とは逆相関の関係にある。これは、黒潮統流フロントの南側で Chl-a 濃度が非常に低く (Fig. 5)、本研究の解析対象海域内での黒潮水域面積の増加は Chl-a 濃度の減少につながるためである。

黒潮統流上流域で Chl-a 濃度が経年変動をする直接の原因の 1 つは、150°E 以東での Chl-a 濃度が経年変動するためであると考えられる。二層構造の分布頻度は東に向かうほど減少するものの、黒潮統流上流域全体での二層構造の面積が広い 2004-2006 年には 150°E 以東で分布頻度が高かった (Fig. 3)。そしてそのような年には、150°E 以東でも高濃度 Chl-a 分布が高い頻度で見られた (Fig. 5)。この空間分布の類似性も、二層構造分布が Chl-a 濃度の経年変動に影響を及ぼすという解析結果と整合的である。衛星から取得した Chl-a 濃度データには雲による欠損があり、特に 1999 年、2003 年、2005 年は解析対象海域で 25% 程度のデータが欠損している (Fig. 5)。このため、高濃度または低濃度の Chl-a データが取得できず、解析対象海域での平均値が過小または過大評価されている可能性がある。しかし雲周辺の Chl-a 濃度分布は、1999 年には 150°E 以東で高濃度分布海域が少ないことを、2005 年には 150°E 以東で高濃度分布海域が多いという傾向があったことを示唆しており、領域平均値が大きく変化する可能性は低いと考えられる。

亜表層の海洋構造を高解像度で再現する海洋再解析

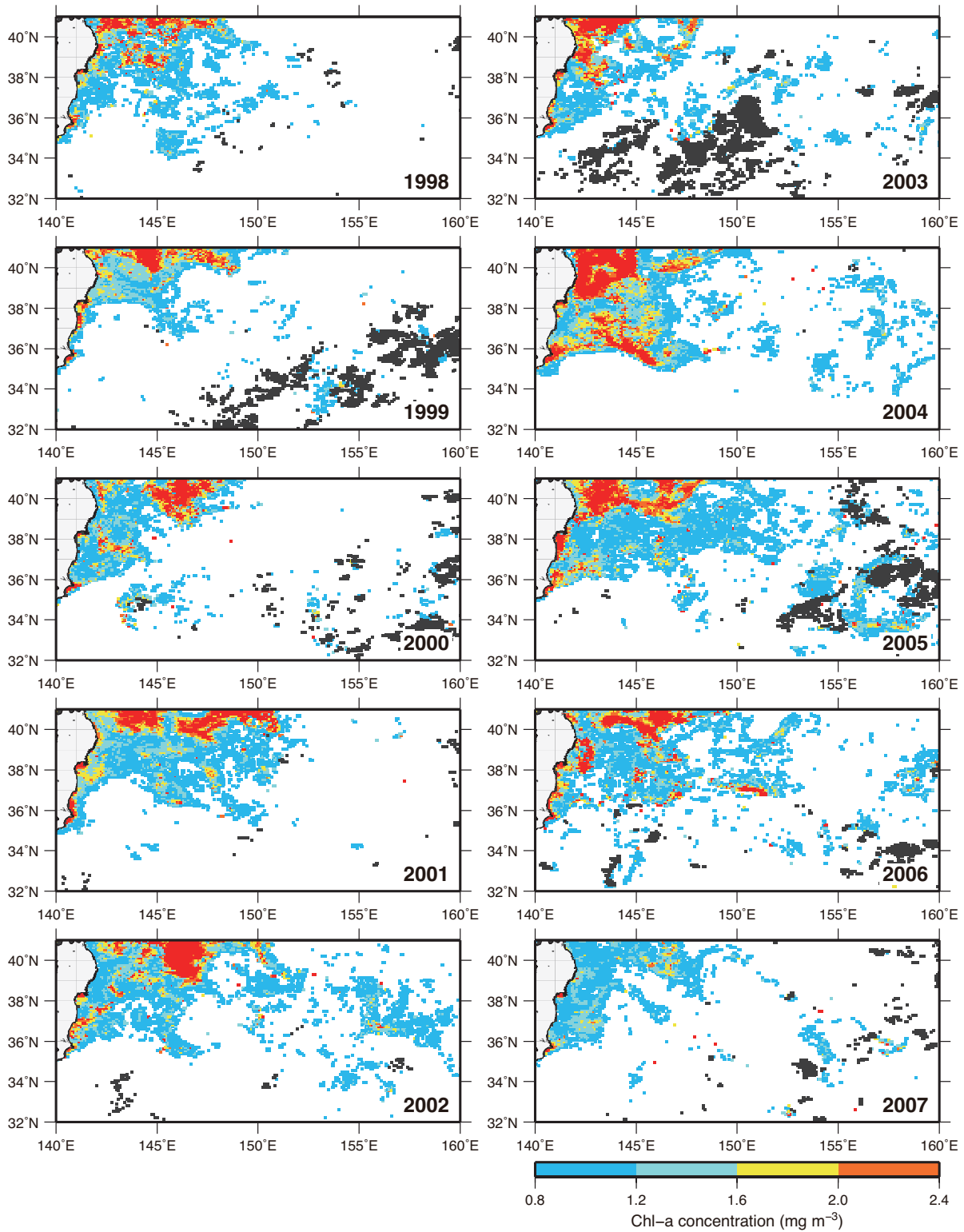


Fig. 5. Distributions of April-May averaged Chl-a concentration over 0.8 mg m^{-3} in 1998-2007. Black shade represents no observations due to cloud.

データセットの解析によって、二層構造の分布面積が広いほど春季黒潮統流域上流の Chl-a 濃度が高くなることが、初めて確認できた。この関係は、二層構造が光合成に好適であることによると考えられる。そう考えられる理由は2つある。1つは Nishibe *et al.* (2015) が報告しているように、親潮水の上に薄く黒潮水が乗り上げると、密度成層により表層の植物プランクトンは薄く光の届きやすい黒潮層に留まり続け、光合成しやすくなることである。もう1つは、二層構造が形成される黒潮統流フロント周辺では、黒潮の蛇行に伴って密度面を横切る湧昇 (Bower, 1991; 伊藤ら, 2000), 鉛直シアに起因する対称不安定やフロントにトラップされた内部波の碎破による強い乱流混合 (Nagai *et al.*, 2012; D'Asaro *et al.*, 2011) がしばしば観測されることである。黒潮水と親潮水の境界面を横切る鉛直流が存在すれば、下層の親潮水から栄養塩濃度の高い水が光環境の良い上層の黒潮水側に供給され、光合成に最適な条件となる。実際に乱流混合によって亜表層から表層へ供給される栄養塩量は、春季の植物プランクトンによる消費量に匹敵することが観測によって確かめられている (Kaneko *et al.*, 2012; 2013)。

しかしながら、二層構造の分布が黒潮統流域上流における Chl-a 濃度の経年変動にどの程度の影響を与えるかについては、慎重な議論が必要である。他の現象も春季黒潮統流域における Chl-a 濃度の経年変動の要因として考えられるためである。Lin *et al.* (2014) は、黒潮統流域南部 (32-35°N, 138-153°E) における Chl-a 濃度の経年変動が黒潮統流の安定性と密接に関わっていることを示唆した。黒潮統流が不安定な時期には、表層の流れは発散傾向にあり、下層の栄養塩濃度の高い水が上層に供給されやすいためである。また生態系モデルを使った解析から、黒潮統流域の南部では冷水塊の出現頻度が Chl-a 濃度に大きく影響すること (Sasai *et al.*, 2010) や、黒潮統流フロント周辺では4月上旬の Chl-a 濃度の経年変動が栄養塩の取り込み量を通じて冬季混合層深度に依存していること (Nishikawa *et al.*, 2013b) が示されている。

親潮と黒潮が接し、異なる性質を持つ水塊が分布する黒潮統流域では、どの場所、どの季節に注目するかで、Chl-a 濃度の経年変動の要因が変わる可能性がある。黒潮統流の安定性は十年スケールで変動を繰り返し、黒潮流軸の経路長や黒潮統流フロントの緯度などの変動幅が

大きく変化する (Qiu *et al.*, 2014)。このため、Lin *et al.* (2014) が指摘するように、黒潮統流の安定性が黒潮統流域での Chl-a 濃度の経年変動に影響する可能性は高い。黒潮統流域上流において Chl-a 濃度が高水準であった 2002-2005 年 (Fig. 3) は、黒潮統流の安定期に相当している。ところが Lin *et al.* (2014) の研究では、黒潮統流域南部における Chl-a 濃度が 2002 年から 2005 年にかけての黒潮統流安定期に減少していたことが報告されている。Lin *et al.* (2014) の研究と本研究では同じ Chl-a データセットを使っているため、この経年変動傾向の差は解析対象海域の場所の違いによるものであると考えられる。本研究の解析対象海域は、Lin *et al.* (2014) の解析対象海域を部分的にしか含んでおらず、南北の幅がより広く、東方に位置している。前述のように Lin *et al.* (2014) は黒潮統流の安定性と Chl-a 濃度変動の関係を収束発散と関連づけて説明しているが、黒潮統流安定期には黒潮統流フロントが北上していたこと (Qiu *et al.*, 2014) も影響している可能性がある。黒潮統流域におけるフロント緯度は 35°N を中心として南北移動するため、Lin *et al.* (2014) の解析対象海域では、黒潮統流フロントが 35°N 以南に南下する黒潮統流不安定期に Chl-a 濃度のより高い親潮水が多く含まれることになるからである。このように、黒潮統流域といっても南部か北部か、また緯度で区分するか黒潮統流フロント位置で区分するかで Chl-a 濃度経年変動傾向が変わり得る。

Nishikawa *et al.* (2013b) は黒潮によって日本南岸から黒潮統流域へ輸送される水塊中の栄養塩の供給量と消費量を 2月15日から4月15日まで調べ、3月までに冬季混合層の深化を通じて混合層内に供給された栄養塩のすべてが4月15日までにほぼ消費されていることを示した。黒潮統流域では春季ブルームのピークは4月上旬であり、ブルームの開始からピークまでに消費される栄養塩の多くは冬季に供給された栄養塩であった。このような理由から4月上旬時点の光合成量は冬季に供給された栄養塩量に依存するといえる。一方で、黒潮統流域ではブルームのピークを過ぎた後も5月頃まで Chl-a 濃度は高い水準にある。このことは、ブルームの前半と後半では消費される栄養塩の供給メカニズムが異なり、ブルーム後半の光合成は、春季の混合層浅化後に乱流混合などによって下層から供給される栄養塩に支えられていることを示

唆する。

本研究では、サンマ等の沖合に広く分布する魚類の仔魚が黒潮統流域の春季ブルームを利用して成育するという知見 (Ichii *et al.*, 2015) を元に、親潮水、黒潮水を含む広い海域で平均した4-5月のChl-a濃度経年変動に注目した。相関解析結果から黒潮水-親潮水二層構造が形成される海域の面積の変動が基礎生産の経年変動を引き起こす要因の有望な候補の1つであることが示された。今後は生態系モデルや観測データを元に、栄養塩がいつどこでどれほど供給され消費されたかを定量的に示し、二層構造が形成される海域面積の増減および冬季混合層の発達などの複数の要因が黒潮統流上流域全体の経年変動へ寄与する割合を比較することで、同海域の春季基礎生産経年変動に最も影響を及ぼす要因を明らかにする必要がある。

謝辞

本研究は日本学術振興会の科研費(若手研究(B)26850119)の助成を受けたものである。

References

- Bower, A.S. (1991): A Simple Kinematic Mechanism for Mixing Fluid Parcels across a Meandering Jet. *Journal of Physical Oceanography*, **21**, 173–180.
- D'Asaro, E., Lee, C., Rainville, L., Harcourt, R. and Thomas, L. (2011) Enhanced turbulence and energy dissipation at ocean fronts. *Science*, **332**, 318–322.
- 海老沢良忠・木下貴博 (1998): 三陸海域の水温環境とマイワシの再生産指数について. 茨城水試研報, **39**, 49–55.
- Hanawa, K. and Mitsudera, H. (1987): Variation of water system distribution in the Sanriku coastal area. *Journal of Oceanographic Society of Japan*, **42**, 435–446.
- Ichii, T., Nishikawa, H., Igarashi, H., Okamura, H., Mahapatra, K., Sakai, M., Wakabayashi, T., Inagake, D. and Okada, Y. (2015): Impacts of extensive driftnet fishery and late 1990s regime shift on dominant epipelagic nekton in the Transition Region and Subtropical Frontal Zone of the central North Pacific: Implication for their fishery managements. *Progress in Oceanography* (印刷中, Available online 20 April 2015)
- 伊藤進一, 松尾豊, 横内克巳, 稲掛伝三 (2000): 黒潮統流の蛇行による cross frontal flow とクロロフィル a 分布. 東北水研研報, **63**, 125–134.
- Itoh, S., Yasuda, I., Nishikawa, H., Sasaki, H. and Sasai, Y. (2009): Transport and environmental temperature variability of eggs and larvae of the Japanese anchovy (*Engraulis japonicus*) and Japanese sardine (*Sardinops melanostictus*) in the western North Pacific estimated via numerical particle-tracking experiments. *Fisheries Oceanography*, **18**, 118–133.
- Kaneko, H., Yasuda, I., Komatsu, K. and Itoh, S. (2012) Observations of the structure of turbulent mixing across the Kuroshio, *Geophysical Research Letters*, **39**.
- Kaneko, H., Yasuda, I., Komatsu, K. and Itoh, S. (2013) Observations of vertical turbulent nitrate flux across the Kuroshio, *Geophysical Research Letters*, **40**, 3123–3127.
- 川合英夫 (1972): 黒潮と親潮の海況学. 「海洋物理 II」 岩下光男・小牧勇蔵・星野通平・堀部純男・増沢譲太郎編, 東海大学出版会, 秦野, 129–320.
- Lin, P., Chai, F., Xue, H. and Xiu, P. (2014) Modulation of decadal oscillation on surface chlorophyll in the Kuroshio Extension. *Journal of Geophysical Research*, **119**, 187–199.
- Nagai, T., Tandon, A., Yamazaki, H., Doubell, M.J. and Gallager, S. (2012) Direct observations of microscale turbulence and thermohaline structure in the Kuroshio Front. *Journal of Geophysical Research*, **117**.
- Nishibe, Y., Takahashi, K., Shiozaki, T., Kakehi, S., Saito, H. and Furuya, K. (2015): Size-fractionated primary production in the Kuroshio Extension and adjacent regions in spring. *Journal Oceanography*, **71**, 27–40.
- Nishikawa, H., Yasuda, I., Itoh, S., Komatsu, K., Sasaki, H., Sasai, Y. and Ooseki, Y. (2013a): Transport and survival of Japanese sardine (*Sardinops melanostictus*) eggs and larvae via particle-tracking experiments. *Fisheries Oceanography*, **22**, 509–522.
- Nishikawa, H., Yasuda, I., Komatsu, K., Sasaki, H., Sasai, Y., Setou, T. and Shimizu, M. (2013b): Winter mixed layer depth and spring bloom along the Kuroshio front: implications for the Japanese sardine stock. *Marine Ecology Progress Series*, **487**, 217–229.
- Qiu, B., Hacker, P., Chen, S.M. and Schneider, N. (2014): A Coupled Decadal Prediction of the Dynamic State of the Kuroshio Extension System. *Journal of Climate*, **77**, 1751–1764.
- Sasai, Y., Richards, K.J., Ishida, A. and Sasaki, H. (2010) Effects of cyclonic mesoscale eddies on the marine ecosystem in the Kuroshio Extension region using an eddy-resolving coupled physical-biological model. *Ocean Dynamics*, **60** (3), 693–704.
- Shimizu, Y., Yasuda, I., and Ito, S. (2001): Distribution and circulation of the coastal Oyashio intrusion. *Journal of Physical Oceanography*, **31**, 1561–1578.
- Shiozaki, T., Ito, S., Takahashi, K., Saito, H., Nagata, T. and Furuya, K. (2014) Regional variability of factors controlling the onset timing and magnitude of spring algal blooms in the northwestern North Pacific. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, **119**, 253–265.
- Tsujino, H., Usui, N. and Nakano, H. (2006): Dynamics of kuroshio path variations in a high-resolution gcm. *Journal of Geophysical Research*, **111**, C11001
- Usui, N., Y. Fujii, K. Sakamoto and M. Kamachi (2015): Development of a Four-Dimensional Variational Assimilation System for Coastal Data Assimilation around Japan. *Monthly Weather Review*, **143**, 3874–3892.
- Usui, N., T. Wakamatsu, Y. Tanaka, N. Hirose, T. Toyoda, S. Nishikawa, Y. Fujii, Y. Takatsuki, H. Igarashi, H. Nishikawa, Y. Ishikawa, T. Kuragano and M. Kamachi (2016): Four-dimensional Variational Ocean Reanalysis: A 30-year high-resolution dataset in the western North Pacific (FORA-WNP30), *Journal of Oceanography* (submitted)
- Yamazaki, H., Iwamatsu, I., Hasegawa, D. and Nagai, T. (2009) Chlorophyll

patches observed during summer in the main stream of the Kuroshio, *Atmosphere-Ocean*, **47**:4, 299–307.

Yasuda, I., Hiroe, Y., Komatsu, K., Kawasaki, K., Joyce, T. M., Bahr, F. and Kawasaki, Y. (2001): Hydrographic structure and transport of the Oyashio south of Hokkaido and the formation of North Pacific Intermediate Water. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, **106**, 6931–6942.

Link between the interannual variability in the Kuroshio-Oyashio layered structure and the chlorophyll-a concentrations in the Kuroshio Extension during spring

Haruka Nishikawa^{1*}, Norihisa Usui², Masafumi Kamachi¹,
Yusuke Tanaka¹ and Yoichi Ishikawa¹

Abstract

Interannual variations in spring primary production in the upstream part of the Kuroshio Extension (KE) are known to affect many types of fish. A recent study demonstrated that the layered structure caused by the subduction of Oyashio water below Kuroshio water gives rise to favorable conditions for photosynthesis conditions, causing high productivity. Here, we hypothesize that the areal extent of the Kuroshio-Oyashio layered structure varies from year to year and that this interannual variability affects primary production in the KE. To investigate this link, we conducted a correlation analysis using high-resolution reanalysis temperature and salinity data and satellite chlorophyll-a data. The results show that there is a significant positive correlation between the interannual variability in the area of the Kuroshio-Oyashio layered structure and the chlorophyll-a concentration. Specifically, the spring chlorophyll-a concentration tends to be high during years in which the Kuroshio-Oyashio layered structure has a large areal extent in the KE.

Key words : Kuroshio, Oyashio, Kuroshio Extension, mixing ratio, Chl-a

(Corresponding author's e-mail address : harukan@jamstec.go.jp)

(Received 1 April 2016 ; accepted 9 June 2016)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2016)

¹ Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3173-25 Showa-machi, Kanazawa-ku, Yokohama, 236-0001, Japan.

² Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, 1-1 Nagamine, Tsukuba, Ibaraki 305-0052, Japan

* Corresponding author : Haruka Nishikawa

TEL : +81457785283

e-mail : harukan@jamstec.go.jp