

令和 2 年 4 月 7 日現在

機関番号：12614

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K05553

研究課題名(和文) 黒潮統流南方海域混合層長期変動の研究

研究課題名(英文) Inter-annual variations of the ocean mixed layer in the region south of the Kuroshio Extension

研究代表者

岩坂 直人 (Iwasaka, Naoto)

東京海洋大学・学術研究院・教授

研究者番号：60211760

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：黒潮統流南方海域冬季混合層深度変動をFORA-WNP30を用いて調べた。FORA-WNP30の品質はこの種の研究に耐えることを確認した上で、黒潮統流流路を海面水温前線を用いて定義し、その南方海域の混合層年々変動を明らかにした。また既存海洋観測データに基づく先行研究Iwamaru et al. (2010)で見いだされた結果について追試を行った。その結果、全体として、Iwamaru et al.の結果が再現され、冬季混合層深度に対する海面熱フラックスの寄与は1995年冬頃までは顕著、その後は相対的に寄与が小さくなること、前年12月の海洋上層成層度は1995年頃から寄与が大きくなることが確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

渦解像数値海洋モデルのプロダクトであるFORA-WNP30の解析から、1990年代半ばを境に黒潮統流南方海域冬季混合層深度変動に寄与する要因が海面熱フラックスから海洋上層の成層度が変わったことを確認したことは、亜熱帯循環系北西部の亜表層中層の10年規模変動現象のメカニズムを考える上で重要な手がかりを得たと言え、海洋物理学的な意義がある。また、FORA-WNP30は十分現実の海洋を再現し、様々な現象を明らかにする上で重要なプロダクトであることを示すことが出来たことは、再解析の意義を知らしめるものである。

研究成果の概要(英文)：We investigated inter-annual variations of the oceanic winter mixed layer in the region south of the Kuroshio Extension using FORA-WNP30, which is a reanalysis product of a eddy resolving ocean model. After quality evaluations of the reanalysis product, we revealed inter-annual variations of the depth, temperature and salinity of the mixed layer in the region. We confirmed the facts that the surface heat flux anomaly was a major controlling factor of the mixed layer variations in the region in winter before 1995, which had been pointed out by Iwamaru et al. (2010), which was conducted using hydrography data only. Our study indicated that strength of the stratification of the surface layer in the previous autumn had dominated the winter mixed layer depth After 1995 winter while the contribution of surface heat flux had become smaller.

研究分野：海洋物理学

キーワード：黒潮統流南方海域 冬季混合層 海面熱フラックス 海洋上層成層度 10年規模現象

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

黒潮続流南方海域は月平均で $300Wm^{-2}$ 以上の熱放出をすることで温帯低気圧の発達や経路、偏西風蛇行などを支配、他方冬の強い海面冷却により深い海洋混合層(300mに及ぶ)が発達、亜表層の温度構造、表層循環系や水塊構造を決めている。この海域の、特に冬季の年々変動を理解することは、中緯度大気海洋結合系そのものの理解にとって重要なばかりでなく、日々の天気予報の精度向上、漁海況予測などの海洋変動予測にも貢献するものである。

この海域について、Qiu and Chen(2006)は、黒潮続流流路の変動が黒潮続流南方海域の亜表層成層度変動を変えることで冬季海洋混合層深度 decadal 変動に深く関わっていることを指摘した。その後 Iwamaru et al. (2010)は、1971年～2007年のこの海域の混合層深度の変動を調べ、海面冷却と上層海洋成層度(以下成層度)の変動が支配的であること、1990年代半ばを境に混合層変動を支配する主要な要因が海面冷却から成層度が変わった可能性を示した。

しかし観測データのみに基づく手法では、観測そのものが乏しい1991年以前では、推定した黒潮続流の流路変動度の信頼性を確かめるすべがなく、時空間的にまばらに分布する観測を補って続流流路変動を調べるためには物理的根拠にもとづくモデル推定値が必要であった。2015年に海洋研究開発機構と気象研究所から北西太平洋海洋長期再解析プロジェクトのデータセット FORA-WNP30 が公開された。これは4次元同化手法による現在考え得る最高の品質の再解析データである。このデータが利用可能になることで、資料の制約を打破して研究を推進するための環境が整ったと考え研究に着手した。

### 2. 研究の目的

本研究計画の目的は、黒潮続流南方海域の冬季海洋混合層年々変動について、その存在を確認すると共に、水平構造を明らかにし、大気場の変動との関係を調べる。具体的には、

(1)Iwamaru et al.(2010)などが指摘した混合層深度、水温、塩分変動の10年およびそれ以上の時間スケールの変動が再解析データで再現されていることを検証すると共に、これらの長周期変動の空間構造を明らかにする。

(2)同海域の混合層深度の年々変動が1990年代半ばまでは海面冷却で支配されていたのが成層度に替わったと見られること(Iwamaru et al., 2010)が再解析データ上に現れているか検証し、さらに他の海域でも整合する変動が見られるかを確認する。

(3)成層度変動が黒潮続流流路変動によってもたらされることが Qiu and Chen(2006)で示されているが、これを検証し、同海域の混合層深度年々変動と続流流路変動が成層度の変動を介して結びつくことを確認する。

(4)黒潮続流流路変動をもたらずと考えられている北太平洋中央部の風応力場の変動との関係、および海面冷却について、(1)で追求する時間スケールでの変動の存在、海洋混合層変動との関係を調べる。

### 3. 研究の方法

北西太平洋海洋長期再解析プロジェクト(FORA-WNP30)のデータについて、衛星観測などとの比較でその信頼性を確認した後、黒潮続流流路を特定し流路長変動指標を作成、また黒潮続流南方海域混合層年々変動時系列を作成し、Iwamaru et al. (2010), Qiu and Chen(2006)の結果を検証する。また、海洋混合層変動の空間構造を調べるため、再解析データを用いた主成分解析など統計的手法による解析を行う。さらに大気再解析データ JRA-55 等を用いて北太平洋における海面風応力、海面熱フラックスなどを求め、混合層変動や続流流路変動との関係を調べる。

再解析データを主に用いるが、適宜衛星観測、定線観測などの観測データとの比較も行い、再解析データに過度に依存した研究にならないように進める。

研究は研究代表者が連携研究者小橋史明博士(東京海洋大学)、研究協力者細田滋樹博士(JAMSTEC)、岡英太郎博士(東京大学大気海洋研究所)の協力の下進められた。

用いた主なデータは、北西太平洋海洋長期再解析プロジェクト(FORA-WNP30)再解析データ、気象庁55年長期再解析データ(以下 JRA-55)、AVISO 海面高度データ、NOAA OISST データ、MOAA GPV データ、黒潮続流域冬季水温前線データ(東北大学杉本周作博士作成)、北西太平洋300m深水温場、12℃等温線データ(研究代表者作成済み)、黒潮続流南方海域水温、塩分、密度プロファイル時系列(0m～400m)(連携研究者(小橋)作成済み)、MIRC 黒潮流軸データセットである。

### 4. 研究成果

#### (1)FORA-WNP30 の特性の確認

FORA-WNP30 の特性を調べるため、MOAA-GPV、WOA13、OISST、NGSST-0 との比較を行った。既に Usui et al. (2017)で指摘されている事項、即ち衛星海面高度計データ同化の前後で渦活動に差があること以外では、表層亜表層水温について WOA、MOAA-GPV と比較すると北緯30度～40度の緯度帯で FORA の方が最大1K程度のバイアスを持つこと(図1)、MOAA-GPV との比較では北緯35度～37度、東経140度～150度の水温16℃～20℃の水塊で塩分が MOAA-GPV に比べておよそ0.1大きい値を示すこと、などが挙げられる。

Iwamaru et al. (2010)との比較のため、彼らが使用した水温プロファイルデータの取得日時場所に最も近い格子点の値だけを使い、彼らと同じ手法で黒潮続流南方海域の水温プロファイ

ル時系列を再現してみた。その結果、彼らの水温プロファイルの年々変動の方がノイズは大きいものの平均的には良い一致を示した。

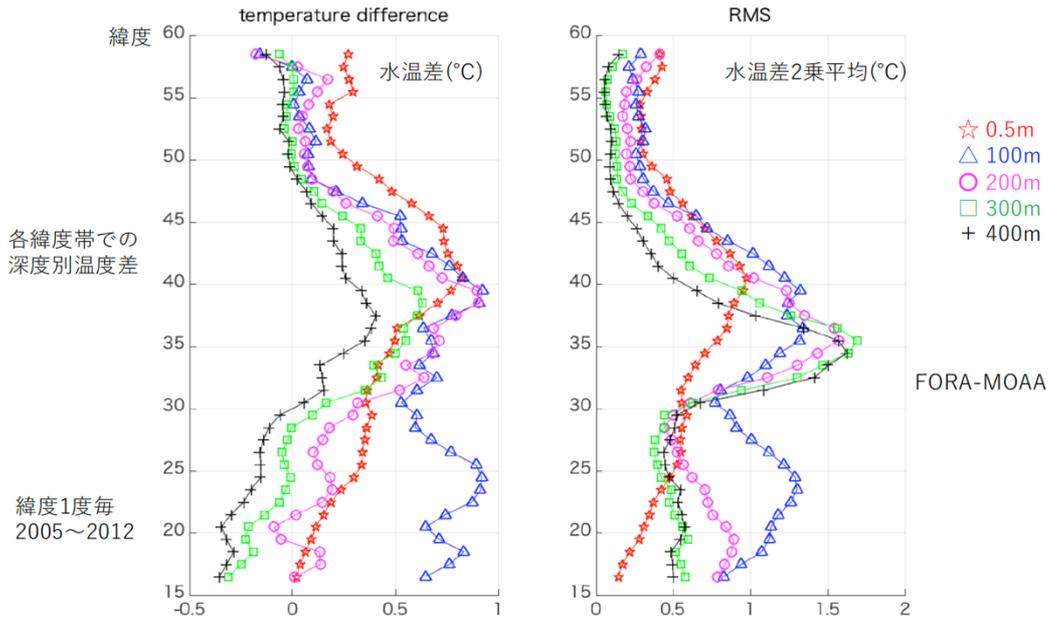


図 1：各緯度、各水深での FORA-WNP30 と MOAA-GPV の水温差(左)と水温差二乗平均(右)

(2)FORA-WNP30 にみる黒潮続流南方海域の変動

Iwamaru et al. (2010)と同じ北緯 31 度以北、東経 141 度～150 度、黒潮続流以南の海域で水温、塩分プロファイルから密度プロファイルを求め、海域平均の混合層深度(MLD)変動、鉛直勾配の変動などを調べ、JRA55 海面熱フラックス、FORA-WNP30 海面高度から求めた黒潮続流流路長(KEL)などと比較した。

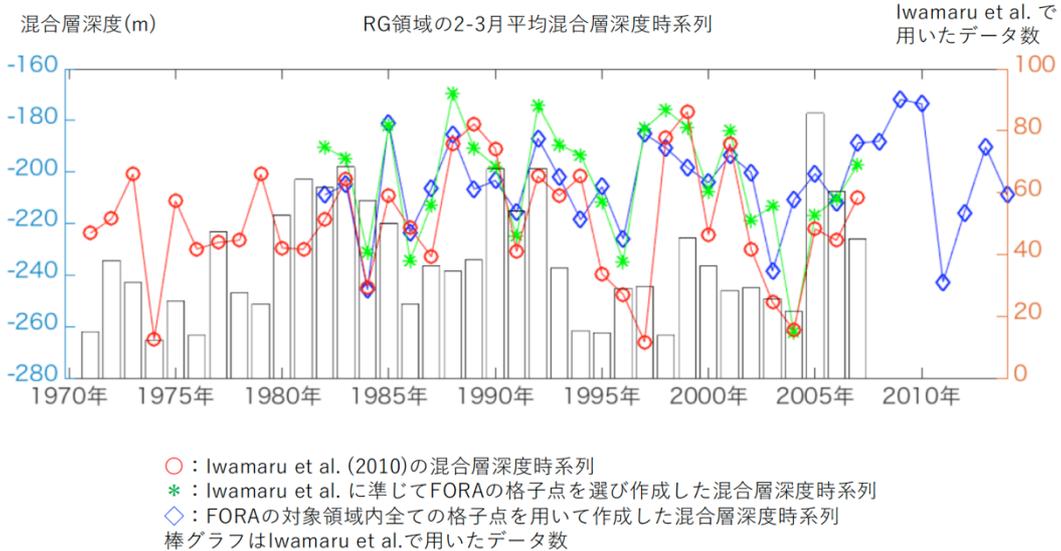


図 2：黒潮続流南方海域の冬季混合層深度の年々変化

東経 141 度～150 度、北緯 31 度～38 度で 300m 深水温 13℃以上の領域での混合層深度時系列 Iwamaru et al. (2010) との比較

図 2 に示す冬季 MLD 変動を見ると、FORA-WNP30 でもとめた混合層深度の年々変動は Iwamaru et al. (2010) の結果を概ね再現していることが分かる。但し定量的な差が認められる。これについては原因ははっきりしないが、Iwamaru et al. (2010) では水温プロファイルを混合層深度推定に用いたのに対して本研究では密度プロファイルを使ったことも一因かと考えられる。

図 3 には黒潮続流南方海域の 2 月の混合層深度と前年 12 月の密度鉛直勾配、前年 12 月から 2 月の 3 ヶ月平均の海面熱フラックス時系列を比較した結果を示す。図から分かるように、混合層深度時系列は 1995 年頃までは年々変動が目立ち、その後は decadal 変動が目立つようになっていた。また、1998 年頃までは 2 月の MLD 変動は冬季平均海面熱フラックス変動と有意な相関が認められる。他方 1996 年以降は 2 月の MLD と 12 月の亜表層成層度変動に decadal 変動

が強く表れ、両者は有意な相関を示した。Iwamaru et al. (2010)の結果と異なり、前年夏の亜表層成層度と冬季 MLD の相関はほとんど認められず、また KEL と亜表層成層度には共に decadal 変動が認められるものの両者の明瞭な関係は見いだせなかった。混合層より深い部分での鉛直密度勾配、温位勾配の変曲点を求め、それらの深度を主密度躍層 (MPC)、主温度躍層 (MTC) の深度と定義した。MPC と MTC の年々変動は亜表層成層度の変動と良い相関を持ち、また 1996 年以降は 2 月の MLD 変動と相関を持つ。これは Sugimoto and Hanawa (2010) と一致している。しかし KEL との相関は弱い。これらの結果から、少なくとも FORA-WNP30 においては 1996 年以降、黒潮続流の流路変動よりは主密度躍層の変動が黒潮続流南方海域の冬季混合層深度年々変動に強い影響を与えていること、またそれ以前は熱フラックス変動の影響が強いようである。

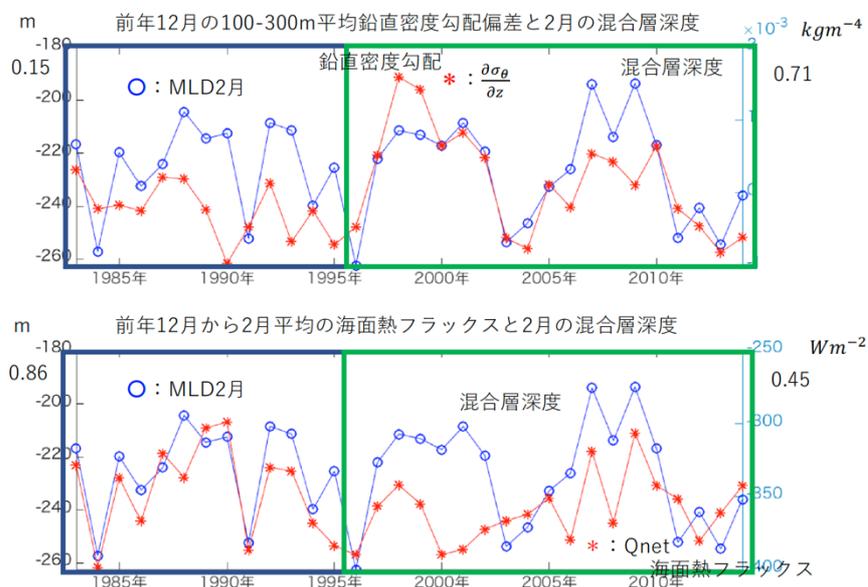


図 3: 黒潮続流南方海域の 2 月の混合層深度年々変動と鉛直密度勾配の関係(上)および海面熱フラックスとの関係(下)

青枠で囲った時期は混合層深度の年々変動が目立つ時期で海面熱フラックスとの関係が強く、緑枠で囲った時期は混合層深度の 10 年スケール変動が目立ち、鉛直成層度との関係が強い。

### (3)最後に

FORA-WNP30 データを用いての解析から、Iwamaru et al. (2010)で指摘されたように、黒潮続流南方海域の冬季混合層深度変化は 1990 年代半ばを境にそれ以前は年々変動が卓越して海面熱フラックス変動との関係が強い事が分かった。またそれ以降は 10 年規模変動が卓越することが分かったが、前年夏の成層度ではなく直近晩秋初冬の鉛直密度勾配との関係が強いことが分かった。他方、Qiu and Chen (2006)が示した黒潮続流流路長との関係については必ずしも明瞭ではない。これらの要因についてはさらに検討する必要がある。風応力場との関係については、風応力場の 10 年規模現象と混合層深度変動に見られる 10 年規模現象の間に数年の時間差のあることがこれまでの研究で指摘されているが、同様の結果を得ている。これについてはさらに海洋内部領域の変動を詳細に検討する必要がある。

これまでの結果から、FORA-WNP30 のような渦解像海洋大循環モデルを使った再解析プロダクトは、万能ではないものの、その限界を理解して活用すれば様々な大気海洋相互作用研究、海洋亜表層変動の研究にとって非常に有益であることが示された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

|   |                           |
|---|---------------------------|
| 1. 著者名<br>Kobashi Fumiaki, Onikata Yukino, Iwasaka Naoto, Kawai Yoshimi, Oka Eitarou, Uehara Kazuyuki, Ito Shin-ichi, Odamaki Minoru, Sasaki Hideharu                                     | 4. 巻<br>121               |
| 2. 論文標題<br>Small meanders of the Kuroshio Extension and associated northward spreading of warm water: Three vessel simultaneous observations and an eddy-resolving ocean model simulation | 5. 発行年<br>2016年           |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Geophysical Research: Oceans   | 6. 最初と最後の頁<br>5315 ~ 5337 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1002/2016JC011969   | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている（また、その予定である）   | 国際共著<br>-                 |

|  |                         |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名<br>Fumiaki Kobashi, Haruki Doi and Naoto Iwasaka  | 4. 巻<br>124             |
| 2. 論文標題<br>Sea surface cooling induced by extratropical cyclones in the subtropical North Pacific: Mechanism and interannual variability | 5. 発行年<br>2019年         |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Geophysical Research, Oceans  | 6. 最初と最後の頁<br>2179-2195 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1029/2018JC014632  | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている（また、その予定である）  | 国際共著<br>-               |

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>岩坂直人、小橋史明                   |
| 2. 発表標題<br>FORA-WNP30 でみた黒潮統流南方海域の長期変動 |
| 3. 学会等名<br>日本海洋学会2018年秋季大会             |
| 4. 発表年<br>2018年                        |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>岩坂直人、小橋史明                   |
| 2. 発表標題<br>FORA-WNP30 でみた黒潮統流南方海域の長期変動 |
| 3. 学会等名<br>大気海洋相互作用研究会                 |
| 4. 発表年<br>2018年                        |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Fumiaki KOBASHI, Haruki DOI, Naoto IWASAKA  |
| 2. 発表標題<br>Effects of Extratropical Cyclones on Surface Mixed Layer in the Western Subtropical North Pacific |
| 3. 学会等名<br>Asia-Oceania Geosciences Society 2018 (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2018年  |

|                                    |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>土井晴貴・小橋史明・岩坂直人          |
| 2. 発表標題<br>春季の温帯低気圧が海洋表層に及ぼす影響について |
| 3. 学会等名<br>日本海洋学会2017年秋季大会         |
| 4. 発表年<br>2017年                    |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

|       | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                        | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)                       | 備考 |
|-------|--|---|----|
| 連携研究者 | 小橋 史明<br><br>(Kobashi Fumiaki)<br><br>(80377077) | 東京海洋大学・海洋科学技術研究科・准教授<br><br><br><br>(12614) |    |