

平成 30 年 5 月 16 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2017

課題番号：26610148

研究課題名(和文) 広域におけるサブメソスケール擾乱同定手法の開発と北太平洋への適用

研究課題名(英文) Development of method to identify submesoscale disturbances in a wide area and its application to the North Pacific

研究代表者

須賀 利雄 (Suga, Toshio)

東北大学・理学研究科・教授

研究者番号：70211977

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)： 海洋における力学的エネルギーの流れや物質輸送に重要な役割を果たしているサブメソスケール(数km～数十 km)の擾乱の広域分布を調べるための基礎として、世界の海に展開されているArgo(アルゴ)フロートによる水温・塩分の鉛直プロファイルデータから、水温・塩分の貫入構造を利用して、サブメソスケール擾乱を検出する手法を開発した。

サブメソスケール現象の発達に伴い高鉛直波数構造が形成される過程を理解するために、本州東方海域で、船舶による独自の集中観測を実施して、この過程を直接的かつ詳細に捉えることに成功した。これにより、上記の同定手法を定量的かつ理論的に裏づけた。

研究成果の概要(英文)： Submesoscale disturbances on the scale of several kilometers to several tens of kilometers play an important role in the energy cascade and the material transport in the ocean. As a foundation for investigating the wide-area distribution of submesoscale disturbances, a method to detect submesoscale disturbance by using temperature/salinity intrusion structure from the vertical profile data of Argo profiling float array deployed over the global ocean.

In order to understand the process to form a high vertical wave number structure associated with the development of submesoscale phenomena, unique intensive shipboard observation was carried out in the east coast of Honshu, enabling us to grasp this process directly and in detail. This observation quantitatively and theoretically supported the above identification method.

研究分野：海洋物理学

キーワード：サブメソスケール擾乱 中規模渦 Argoフロート スパイシネス 渦度場・歪場 3次元カスケード 高鉛直波数構造 船舶集中観測

1. 研究開始当初の背景

(1) サブメソスケール (数 km~数十 km) 擾乱が海洋表層の力学やベンチレーション、物質輸送、生態系に大きな影響を及ぼしている可能性が指摘されていた (文献①、②など)。SM 擾乱は数十 m/day に及ぶ大きな鉛直流速を伴い、混合層と内部領域の間、あるいは有光層とそれより深い層の間に急速な海水交換をもたらすためである。

(2) 今世紀に入り、衛星による海面高度場データの整備、および、水平解像度 10 km 程度の渦解像大循環モデルの普及によって、観測とモデルの両面から、全球海洋に遍在中規模 (数十 km~数百 km) 擾乱の時空間分布の実態とその役割の解明が進んだ。一方、サブメソスケール擾乱は、衛星による海面水温・海色データにより存在は確認されているものの、海面高度場データの解像度 (約 100 km) では捉えることができなかった。このため、その力学的な研究はおもに数値実験によっており、超高解像度 (水平解像度 3 km 程度) シミュレーション結果は、サブメソスケール擾乱が従来注目されていた強い海流を伴う前線域だけでなく、平均構造として前線を持っていない海域にも、中規模渦間の相互作用などに伴い広く分布することを示していた (文献③など)。すなわち、サブメソスケール擾乱は全球海洋の広範囲で鉛直輸送に重要な役割を果たしていることが示唆されていた。しかし、これを現場観測から検証する手段はなかった。

(3) プロファイリングフロートの観測データから、中規模渦の周囲にサブメソスケール擾乱の痕跡と考えられる水塊貫入構造が頻繁に見出されていた。この事実に着目すると、国際 Argo 計画によって全球海洋に展開されているフロートによる鉛直プロファイルデータから同様の貫入構造を抽出できれば、広域におけるサブメソスケール擾乱の分布特性を現場観測によって解明する突破口になり得ると考えられた。

2. 研究の目的

(1) サブメソスケール擾乱を解像する超高解像度海洋大循環モデルによる知見、および、中規模擾乱を解像する衛星海面高度場データから得られる情報、水平構造と鉛直構造を結びつける理論的研究の成果などを活用して、水温・塩分の鉛直プロファイルに見られる貫入構造からサブメソスケール擾乱分布を推定する手法を開発する。

(2) 船舶による集中観測によって、上記(1)で開発した手法の妥当性を、サブメソスケール擾乱の発達過程の理解を通して検証する。

(3) 上記(1)で開発した手法を、中規模以上のスケールの流れの場の特徴が異なる北太

平洋の複数の海域の Argo データに適用して、サブメソスケール擾乱の広域分布特性の違いを例示する。

3. 研究の方法

(1) 海洋研究開発機構が北太平洋について実施した水平解像度 1/30 度 (約 3 km)、鉛直 100 層の超高解像度海洋循環シミュレーションの結果 (文献③) から、黒潮親潮混合水域の高気圧性渦内外のサブメソスケール擾乱の時空間発展を記述し、それら擾乱に伴う貫入構造を検出する。

(2) 海洋研究開発機構が黒潮親潮混合水域の高気圧性渦とその周囲の約 100 km 四方の海域に集中展開した 18 台プロファイリングフロート (文献④) と同期 (2012 年 6 月~2013 年 4 月) 中の 5 回の船舶観測による水温・塩分の鉛直プロファイルデータから周囲と異なる水温・塩分特性の水が貫入した構造を検出する手法を開発する。

(3) 上記(2)で開発した、黒潮親潮混合水域の単一の高気圧性渦の集中観測時の鉛直プロファイルデータからサブメソスケール擾乱に伴う貫入構造を検出する手法を、Klein et al. (1998) の 3 次元カスケードの理論 (文献⑤) に基づき改良して、黒潮・親潮およびその周辺海域の Argo フロートデータへの展開に適した手法に改良する。

(4) 黒潮続流近傍において高気圧性中規模渦の船舶による集中観測を実施し、中規模渦に伴うサブメソスケール現象を解像する水温/塩分および水平流速の 3 次元データを得て、中規模渦の内外における高鉛直波数構造の発達メカニズムを明らかにする。また、それによって、本研究で開発したサブメソスケール擾乱検出手法の妥当性について検討する。

4. 研究成果

(1) 3(2)の船舶観測による水温・塩分の鉛直プロファイルデータから、等密度面上での水温・塩分特性を統一的に扱うことができる

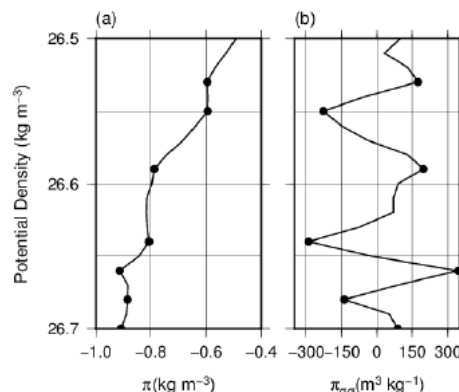


図1 ポテンシャル密度に対するスパイシネス (左) とその二階微分 (右) のプロファイル

熱力学変数であるスパイシネスのポテンシャル密度による二階微分の極値として貫入構造を検出する手法を開発した(図1)。検出した貫入構造の渦に相対的な空間分を調べ、強い貫入構造が渦の中心付近に比べて渦の縁で多く観測されることを示した。さらに、渦の減衰に伴って強い貫入は減少し、渦が周囲の海水と相互作用する時期に貫入が増加することを示した。

(2) 3(1)のシミュレーション結果から、黒潮親潮混合水域の高気圧性渦に着目し、渦の内外で貫入構造を検出して、その形成過程を吟味して、サブメソスケール擾乱に伴う貫入が渦の縁付近に形成されることを確認した。さらに、上記(1)の観測データとモデルアウトプットによる結果の対応から、観測によって検出した貫入構造の多くがサブメソスケール擾乱に伴うものであると推察され、広域のサブメソスケール擾乱の時空間分布が、貫入構造を利用することにより把握できる可能性を示した。

(3) 中規模渦の周囲などの歪場で発達するフィラメント構造は、3次元カスケードにより水平的だけでなく鉛直的にも小さな構造をもつという Klein et al. の理論的な研究結果(文献⑤)を踏まえ、鋭い貫入を多数含むプロファイルをもつ鉛直的に高波数の構造を伴うサブメソスケール擾乱を捉えたプロファイルとして検出する手法を開発した。

(4) 上記(3)の手法を親潮周辺域(140°-160° E, 38°-45° N; 全 6167 プロファイル)、黒潮統流北方海域(140°-160° E, 35°-38° N; 全 4110 プロファイル)、黒潮統流南方海域(135°-160° E, 30°-35° N; 全 10340 プロファイル)における 2001~2011 年の全ての Argo プロファイルデータに適用し、サブメソスケール擾乱の空間分布特性を調べた。

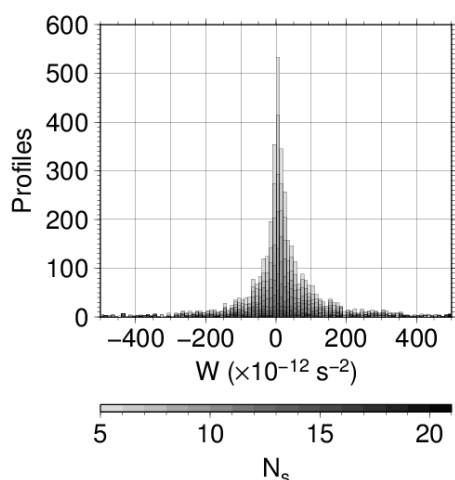


図2 Okubo-Weiss パラメータ  $W$  に対する高鉛直波数をもつプロファイル数のヒストグラム。 $W$  の平均値は  $16.7 \times 10^{-12} \text{s}^{-2}$ 、歪度は 0.13。  $W > 0$  が歪場、  $W < 0$  が渦度場を表す。

とくに、既往の数値実験研究が示しているサブメソスケール擾乱に分布と渦度場・歪場との関係を、本研究で検出した高鉛直波数構造をもつプロファイルの分布を用いて検証した。その結果、解析海域全体で、高鉛直波数をもつプロファイルとして検出されたサブメソスケール擾乱は渦度場に比べて歪場に多く分布することが確認された(図2)。さらに、高鉛直波数構造をもつプロファイルを定義する際の閾値パラメータ(スパイシネスの密度による二階微分、および、その極値の個数)に対する、高鉛直波数プロファイルの分布特性が海域によって異なることを示した。この特徴は、サブメソスケール擾乱の空間分布の背景場への依存性を表していると推定される。また、ここで得られたサブメソスケール擾乱の空間分布とその背景場依存性について、渦度場・歪場と擾乱分布の関係など、擾乱の3次元カスケード理論との比較を詳細に行った。その結果、Klein et al. (1998)が理論化した3次元カスケード(文献⑤)が、実海域で生じていることが支持された。

(5) 白鳳丸 KH-16-3 航海において、中規模以下擾乱の3次元カスケードの痕跡を捉えることを目的に、本州東方の中規模渦周辺の約 100km 四方の海域で、XCTD(投下式水温塩分計)および ADCP(音響ドップラー流速プロファイラ)などを用いた直接観測を実施した。具体的には、定速 12 ノットで航走しながら、背景に卓越する地衡流を横断する 5 つの測線を上流から下流に向かって取り、約 100 点の XCTD 観測と ADCP 連続観測を実施した。この観測によりサブメソスケールのストリーマ擾乱を複数捉えることができた。得られたデータを、渦内外の高鉛直波数構造の特性と発達メカニズムに着目して解析し、渦縁の歪場と渦の中心により近い渦度場の両方で捉えられたサブメソスケールの低温/低塩水のフィラメント構造を起源として、水平流速の鉛直シアによる高波数化が歪場と渦度場の両方で起こっていることを示した。すなわち、高鉛直波数構造が、サブメソスケール現象の起こる歪場だけでなく、渦内部に発達後の痕跡が入り込むことで渦度場でも形成されうること示した。さらに、発達直後と発達から時間が経過した高鉛直波数構造を、貫入構造の鋭さで区別できることを示した。

(6) 上記(1)~(5)により、鉛直プロファイルから検出可能な高鉛直波数構造とサブメソスケール擾乱との関係を、理論的な裏づけとともに示すことができた。本研究で開発した、鉛直高波数構造に着目したサブメソスケール擾乱の検出手法と、独自の集中観測によって確立した、この手法の理論的・観測的裏づけは、Argo フロートデータから、全球的なサブメソスケール擾乱の時空間分布に関する情報を抽出するための、重要な基礎となる

と期待される。

<引用文献>

- ① Klein, P., and B. L. Hua, Upper ocean turbulence from high-resolution #D simulation, *Journal of Physical Oceanography*, 38 巻, 2008, 1748-1763.
- ② Perruche, C., P. Riviere, G. Lapeyre, X. Carton, and P. Pondaven, Effects of surface quasi-geostrophic turbulence on phytoplankton competition and coexistence, *Journal of Marine Research*, 69 巻, 2011, 105-135.
- ③ Sasaki, H., and P. Klein, SSH wavenumber spectra in the North Pacific from high-resolution realistic simulation, *Journal of Physical Oceanography*, 42 巻, 2012, 1233-1241.
- ④ Inoue, R., V. Faure and S. Kouketsu, 2016, Float observations of an anticyclonic eddy off Hokkaido, *Journal of Geophysical Research*, 121 巻, 2016, 6103-6120.
- ⑤ Klein, P., A. Treguier, and B. L. Hua, Three-dimensional stirring of thermohaline fronts, *Journal of Marine Research*, 56 巻, 1998, 589-612.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① 伊藤大樹、須賀利雄、細田滋毅、本多牧生、黒田寛、岡英太郎、中規模変動に伴うサブメソスケール擾乱—黒潮親潮混合水域における事例研究—、月刊海洋、査読無、47 巻、2015、152-161

[学会発表] (計 8 件)

- ①伊藤大樹、須賀利雄、岡英太郎、瀬瀬慎也、中規模渦集中観測データを用いた高鉛直波数構造の分布特性の解明、日本海洋学会 2017 年度秋季大会、2017 年
- ② 伊藤大樹、須賀利雄、Argo フロートを用いて検出したサブメソスケール擾乱の分布特性とその要因、日本海洋学会 2016 年度秋季大会、2016 年
- ③ Daiki Ito and Toshio Suga, Detection of submesoscale disturbances by the Argo floats, CLIVAR Open Science Conference, 2016 年
- ④ 伊藤大樹、須賀利雄、Argo フロートを用いたサブメソスケール擾乱の検出—検出結果の閾値依存性とその意味—、2016 年度日本海洋学会春季大会、2016 年
- ⑤ Toshio Suga, Daiki Ito, A step toward understanding of broadscale distribution of submeoscale disturbances: Analysis of data from the

intensive observation in/near a mesoscale eddy in the Kuroshio-Oyashio mixed water region, 日本海洋学会 2015 年度秋季大会シンポジウム「サブメソスケール海洋学 —新たな世界への展望—」(招待講演), 2015 年

- ⑥ Daiki Ito, Toshio Suga, shigeki Hosoda, Shinya Kouketsu, Makio Honda, Hideharu Sasaki, Hiroshi Kuroda, Eitarou Oka, Submesoscale disturbances associated with mesoscale phenomena: A case study in the Kuroshio-Oyashio mixed water region, 26th International union of geodesy and geophysics (IUGG), 2015 年
- ⑦ 伊藤大樹、須賀利雄、井上龍一郎、細田滋毅、小林大洋、瀬瀬慎也、本多牧生・佐々木英治・黒田寛・岡英太郎、中規模変動に伴うサブメソスケール擾乱—黒潮親潮混合水域における事例研究—、2015 年度日本海洋学会春季大会、2015 年
- ⑧ 伊藤大樹、須賀利雄、井上龍一郎、細田滋毅、小林大洋、瀬瀬慎也、本多牧生、黒田寛、岡英太郎、中規模変動に伴うサブメソスケール擾乱—混合水域における渦集中観測データの解析—、2014 年度日本海洋学会秋季大会、2014 年

[その他]

アウトリーチ活動

- ①ぶらりがく「海をはかる～ロボット観測網アルゴ(Argo)～」

日時: 2016 年 6 月 25 日 (土) 13:00-14:30

場所: 東北大学大学院理学研究科・理学部

対象: 一般

6. 研究組織

(1) 研究代表者

須賀 利雄 (SUGA, Toshio)

東北大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号: 7 0 2 1 1 9 7 7

(2) 研究協力者

伊藤 大樹 (ITO, Daiki)