

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月11日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05549

研究課題名(和文) 3次元流速濁度観測システムによりサブメソスケール～乱流間の観測空白域を測る

研究課題名(英文) Observations of ocean fine structures with scales between submeso-scale and turbulence using the three-dimensional current and turbidity observation system

研究代表者

中村 知裕 (Nakamura, Tomohiro)

北海道大学・低温科学研究所・講師

研究者番号：60400008

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：海洋学における最も基本となる混合を引き起こす、海洋内部の3次元微細構造(水平スケール<0(1km))は、これまで観測方法がなく実態が不明であった。本研究では、代表者が考案・構築した「3次元微細流動構造 観測システム」を用いて、全球の海洋循環と物質循環ひいては生態系に多大な影響を与えている「内部波の大規模砕波」から乱流に至る遷移過程の3次元構造を津軽海峡、アリューシャン列島域、親潮域等で観測することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、最も基本的な海洋現象の一つでありながら、長い間手つかずであった3次元微細構造の実態解明に向けた取り組みである。微細構造は海洋中に広く存在し、海洋運動の空間スケールの範囲のうち1/3強を占める。この海洋物理に残る広大なブラックボックスの実態解明は、それ自体、海洋物理学への大きな貢献と言える。微細構造の実態解明は、海水混合の理解と正確な評価・パラメタ化を介し、海洋の循環・物質循環・生態系そして長期変動の理解と将来予測の向上へ繋がる。

研究成果の概要(英文)：Three-dimensional fine structures with scales smaller than 0 (1 km) are closely related to mixing, which is a fundamental process in the oceans. However, such structures are not well understood due to the lack of observation methods. In this study, we have made successful observations of three-dimensional structures of transitional processes from a breaking of large-amplitude internal waves to turbulence, using the three-dimensional current and turbidity observation system we developed.

研究分野：海洋物理学

キーワード：海洋物理 海洋科学 自然現象観測 乱流混合 内部波

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 海水混合は、海洋中の熱や物質の輸送をコントロールする基本的要素であり、水平スケール数十 cm ~ 数 km 程度の「微細構造」により引き起こされている。より正確に言うと微細構造は、海水の stirring (かき混ぜ) を引き起こすと同時に、さらに小さいスケールの等方乱流の主エネルギー源となり、等方乱流による海水の mixing (狭義の“混合”) を左右している。しかしながら、この微細構造の実態は未だに不明である。

(2) そのため海水混合は、微細構造をブラックボックスにしたまま、解像できる運動の情報から微細構造によるかき混ぜおよび等方乱流による混合が推定されてきた。しかし、解像された運動と等方乱流の間には空間スケールで千~10万倍の開きがあり、それが海水混合の理解と評価を遅らせている。別の観点からすると、12 桁 (1mm ~ 地球 1 周: $10^{-3}\text{m} \sim 10^8\text{m}$) におよぶ海洋力学の対象とする運動のうち、3分の1強の範囲 ($10^{-1}\text{m} \sim 10^3\text{m}$) が実態不明のままである。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、海洋学の基本的要素である海水混合をコントロールするにもかわらず観測空白域である微細構造、その実態解明への道を拓くために代表者が考案・開発した船の移動なしに3次的に微細構造を測定するシステムを用いて、世界で初めての微細構造3次元観測を行うことを目的とする。

(2) 第1段階として注目するのは、微細構造の中でも特に興味深い「内部波の大規模砕波」から乱流混合に至る遷移過程である。内部波の大規模砕波とは、高さ数百 m 長さ 1km を超す大規模な密度逆転で、急峻な地形上で潮汐により生じ、外洋平均値の 10 万倍と見積られる激しい混合を引き起こし、全球の海洋熱塩・物質循環に大きく影響していることが示唆されている (Nakamura et al., 2010; Abe and Nakamura, 2013; Matsuda et al., 2015)。

3. 研究の方法

(1) 代表者が考案・開発した3次元流動構造観測システムを用いて、内部波の大規模砕波から乱流へ至る遷移過程を観測し、遷移の力学過程と混合への影響の解明への糸口とする。そのために、これまでの内部波観測の知見に基づき観測を行うとともに、観測データから導出する流速以外の量を求める解析を行う。

(2) 観測は、大規模砕波を既に確認したアリューシャン列島域の他、大規模砕波が生じている可能性の高い津軽海峡域やルソン海峡、サブメソスケール渦の多い混合水域等で観測を実施し、サブメソスケール~乱流の空間スケールの3次元流動構造を測る。

(3) データ解析により、流動構造に加えて力学過程や混合の手がかりとなる濁度、流速シアーに基づく鉛直混合、乱流エネルギーのシアー生成項等を見積もり3次元分布を算出する。

4. 研究成果

(1) 2016 年度は、東北区水産研究所・若鷹丸の調査航海に乗船させて戴き、当初計画通り津軽海峡太平洋側において内部波の生成と砕波およびそれに伴う微細流動構造の観測を行い、それに加えて東北・北海道沖において渦やフロントに伴う微細流動構造の観測を行った。とりわけ前者では海峡の凸部における内部波の生成と砕波 (密度逆転) の空間構造と時間発展を投棄式水温計による観測で捉えると同時に、波と砕波の観測された時と場所において激しい流速擾乱と音響反射強度の顕著な空間分布が生じていることを3次元微細流動構造観測システムにより捉えることができた。図1の例では、水平が数十 m ~ 200m、鉛直が 10m ~ 数十 m の空間スケールを持つ強い擾乱が捉えられている。音響反射強度の分布と合わせると、内部波とそれに伴う微細な流速擾乱に伴って海水や懸濁物質が輸送・攪拌されていることを示唆している。このようなスケールにおいて、単純な密度不安定対流やシアー不安定以外にも、活発な擾乱が生成されていることはこれまで考えられておらず非常に興味深い。

(2) 2017 年度は、北海道大学水産学部練習船おしよる丸 60 日航海 (C040) レグ 2 および海洋研究開発機構東京大学大気海洋研究所学術研究船白鳳丸 KH17-5 航海レグ 2 に乗船させて戴き、前者ではアリューシャン列島域、後者ではルソン海峡において潮汐による内部波の生成とそれに伴う微細流動構造の観測を行った。両海域共に、大振幅の内部波が潮流により生成されることで知られており、本研究にとって望ましい観測場所である。前者の観測航海では海峡近くの水深が急変する所で内部波の生成と時間発展を投棄式水温計による観測で捉えると同時に、直接観測できなかったもの大規模な砕波を示唆する密度構造の観測、ならびに激しい流速と音響反射強度の擾乱を3次元微細流動構造観測システムにより捉えることができた。これらは内部波とそれに起因する微細な流速擾乱に伴って懸濁物質が輸送・攪拌されていることを示唆している。後者の航海ではあいにくの悪天候のため観測期間が大幅に縮小され潮汐周期の各位相を捉えることができなかった。

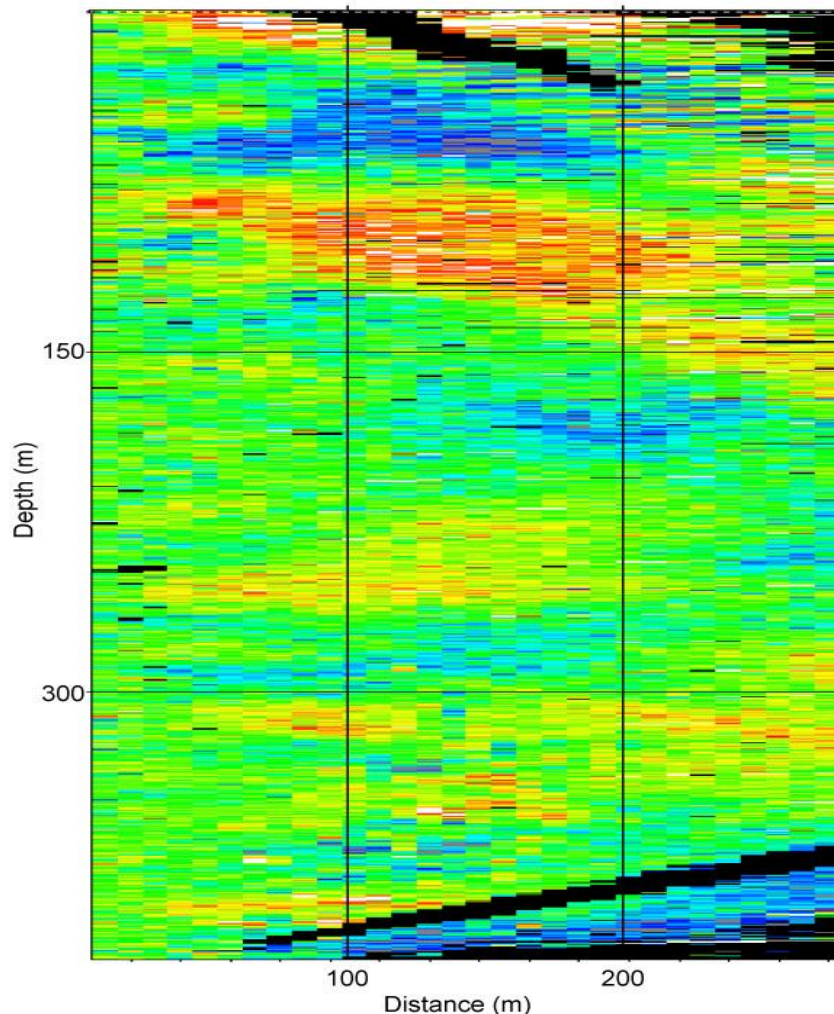


図1 観測された水平流の微細構造

(3) 2018年度は、観測システムを構成する流向流速計の故障とその修理のため予算が極めて少ない中、厚岸湖と厚岸湾の間の海峡で生成される渦の観測を行った。また、輸送・攪拌のメカニズム特定や定量的見積もりのため、本研究で得られた観測データを解析し濁度や鉛直混合・乱流エネルギー生成の3次元分布の推定を試みた。濁度はADCPの音響反射強度から推定した。ADCPは音波を発信し、海水中の懸濁物質により後方に散乱・反射された音波を測っている。したがって、光学式濁度計が光の後方散乱強度から濁度を求めるように、ADCPの音波の後方散乱強度からも濁度（超音波濁度）が求められる。その際、ソナー方程式と懸濁態濃度への換算式を用いた。鉛直混合の簡便な推定方法として、鉛直シアとCTDから求めた浮力振動数から、拡散係数をパラメタリゼーションを用いて計算するとともにリチャードソン数を算出して推定を試みた。ADCPのビーム方向の流速からレイノルズ応力とシアによる乱流エネルギー生成項の推定を試みた。

(4) 加えて、微細構造・混合の研究の発展としてそれらを引き起こす過程やそれらの影響について数値的に調べた。前者は中でもよく分かっていない内部波と渦の相互作用から乱流に至る過程の力学に注目した。後者はオホーツク海周辺に注目し、潮汐起源の内部波により微細構造を介して引き起こされる鉛直混合が海洋の循環・物質循環・生態系そして長期変動に与える影響について調べた。また混合層を介した大気海洋間の乱流熱フラックスについての研究も行った。

<引用文献>

Nakamura T., Y. Isoda, H. Mitsudera, S. Takagi, M. Nagasawa: Breaking of unsteady lee waves generated by diurnal tides. *Geophysical Research Letters*, 37, L04602, doi:10.1029/2009GL041456, 2010.

Abe, S. and T. Nakamura: Processes of breaking of large-amplitude unsteady lee waves leading to turbulence. *Journal of Geophysical Research*, 118, 316-331, doi:10.1029/2012JC008160, 2013.

Matsuda, J., H. Mitsudera, T. Nakamura, Y. Sasajima, H. Hasumi and M. Wakatsuchi:

Overturning circulation that ventilates the intermediate layer of the Sea of Okhotsk and the North Pacific: The role of salinity advection. *Journal of Geophysical Research*, 120 (3), 1462-1489, DOI: 10.1002/2014JC009995, 2015.

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

Mitsudera, H., T. Miyama, H. Nishigaki, T. Nakanowatari, H. Nishikawa, T. Nakamura, T. Wagawa, R. Furue, Y. Fujii, S. Ito (2018). Low ocean-floor rises regulate subpolar sea surface temperature by forming baroclinic jets. *Nature Communications*, 9:1190, DOI: 10.1038/s41467-018-03526-z. 査読有.

Nakanowatari, T., T. Nakamura, K. Uchimoto, J. Nishioka, H. Mitsudera, and M. Wakatsuchi (2017). Importance of Ekman transport and gyre circulation change on seasonal variation of surface dissolved iron in the western subarctic North Pacific. *Journal of Geophysical Research*, 122, 4364-4391, doi:10.1002/2016JC012354. 査読有.

中村知裕, 三寺史夫, 内本圭亮, 中野渡拓也 (2017). 環オホーツク圏の海洋シミュレーション, *化学工学*, 第 81 巻, 第 5 号, 246-249. 査読有.

<http://www.scej.org/publication/journal/backnumber/vol-81-05.html>

〔学会発表〕(計 17 件)

Ito, K. and T. Nakamura. Distribution, variation and statistics of the index of mixing due to interaction of a vortex and internal waves in the North Pacific. *Proceedings of The 34th International Symposium on Okhotsk Sea and Polar Oceans 2019*, 2019.

Ito, K. and T. Nakamura. Data analysis of mixing due to interaction of vortex and internal waves with OFES30. *JpGU 2018*, 2018.

Nakanowatari, T., T. Nakamura, H. Mitsudera, J. Nishioka. Seasonal to interannual variations in surface PO4 concentration in Oyashio region: Role of wind-induced coastally trapped currents. *JpGU 2018*, 2018

Nakamura, T., H. Mitsudera, H. Yoshinari, T. Nakanowatari, H. Nishikawa, K. Uchimoto. Effects of sedimentary supply on iron distribution in the North Pacific: Sensitivity experiments with a high-resolution model. *2018 Ocean Sciences Meeting*, 2018.

Ito, K. and T. Nakamura. Classification of interaction between a vortex and internal waves, and estimates of interaction-induced mixing in the North Pacific Ocean. *Proceedings of The 32nd International Symposium on Okhotsk Sea and Polar Oceans 2017*, 2017.

〔図書〕(計 1 件)

中村知裕: オホーツク海の下層雲・霧と大気海洋相互作用. *低温環境の科学事典*, 第 10 章, 第 2 節, 314-315, 朝倉書店, 2016, 411.

〔産業財産権〕

該当なし

〔その他〕

ホームページ等

6 . 研究組織

(1)研究分担者

該当なし

(2)研究協力者

研究協力者氏名: 大木 淳史

ローマ字氏名: (OOKI, Atsushi)

研究協力者氏名: 下田 力

ローマ字氏名: (SHIMODA, Chikara)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。