

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 18 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2013～2015

課題番号：25707036

研究課題名(和文) 3次元微細流動構造観測システムの開発：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) Development of the observation system of three-dimensional small-scale flow structures: Fill the observation gap between sub-mesoscale and turbulence

## 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) 20,800,000円

研究成果の概要(和文)：海洋中の熱や溶存物質は全て、海水混合から海洋循環を介して海全体に輸送される。この海洋学における基本要素であ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、観測方法がなく実態が不明であった。その解決に向けた世界初のチャレンジとして、本研究は「3次元微細流動構造 観測システム」を考案し構築した。構築したシステムを用いて、内部波の大規模砕波およびサブメソスケール渦とそれらから乱流に至る遷移過程の構造を千島列島域や親潮域などで観測することに成功した。

研究成果の概要(英文)：Mixing is a fundamental factor in oceanography, as it controls the transport of heat and dissolved materials in the ocean together with ocean circulation. However, the actual state and nature of small-scale three-dimensional structures (horizontal scales < 0 (1 km)), which drives mixing, have been obscured by the lack of means of observation. This study is the first achievement of observing such small-scale structures. For this end, we devised and developed an observation system of small-scale three-dimensional flow structures. With this system, we observed small-scale structures of transitional processes toward turbulence from the breaking of large-amplitude internal waves or sub-mesoscale eddies in the Kuril Straits and Oyashio region.

研究分野：海洋物理

キーワード：海洋物理 乱流 サブメソスケール 内部波 微細流動構造

1. 研究開始当初の背景

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」により駆動されている。

しかしながら、この微細構造の実態は未だに不明である。海洋内部の観測は各測点で鉛直1次元構造を精確に測るよう発達してきた。このため図1aのように、水平構造の観測には船の移動を要する。この移動時間と測定時間が制約となり、時空間分解能が粗くなる。水平高分解能観測のため開発された測器を用いても、水平1方向ですら測点間隔は数百mが限界である(Nakamura et al., 2010; 中村ほか, 2012)。したがって図1cに示すように、水平スケール数十 cm ~ 数 km の微細構造は、観測が困難でその実態は未知のまま残されている。

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。実際、空間スケールで見ると、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内、3分の1強の範囲( $10^{-1}\text{m} \sim 10^3\text{m}$ )が、実は実態不明のままであり、それが海水混合の理解と評価を遅らせている。

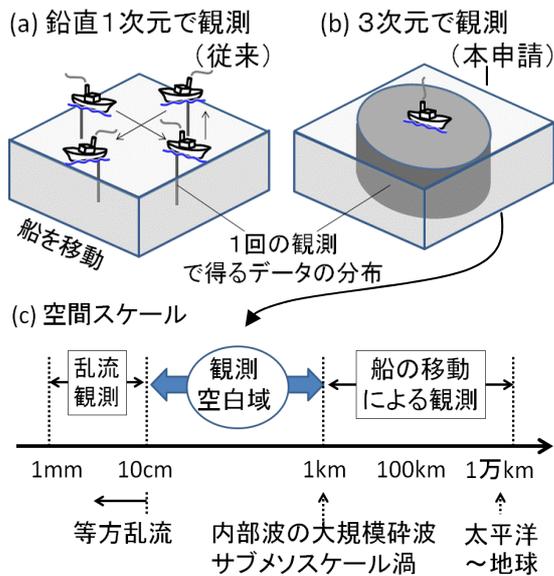


図1:(上)観測法、(下)空間スケールの模式図。(a)従来では船を移動し鉛直1次元観測を繰り返す。本研究では、(b)3次元観測により、(c)の観測空白域を測る。

2. 研究の目的

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、図2bのように船の移動なしに3次元的に流速場の微細構造を測定するシステムを開発することを本研究の第一の目的とする。

次に、開発した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。観測の対象は、微細構造の中でも特に興味深い「内部波の大規模砕波」および「サブメソスケール渦」から乱流混合に至る遷移過程とする。前者は、高さ数百m長さ1kmを超す大規模な密度逆転で、外洋平均値の10万倍と見積られる激しい混合を世界各地で引き起こし(Nakamura et al., 2010a;b)、全球の海洋熱塩・物質循環に大きく影響している(Nakamura et al., 2004;2006a;b; Uchimoto, Nakamura et al., 2011)。しかし、大規模砕波から乱流に至る遷移過程もそれによる混合の強さも良く分かっていない。一方、サブメソスケール渦は直径10km程度の小さい渦で、非静水圧過程が強く、表層~亜表層で激しい擾乱と鉛直輸送・混合をもたらす(中村ほか, 2012)。栄養物質を表層へ輸送し、親潮域をはじめ世界中の生物基礎生産に寄与していることから、近年注目を集めている。

また、観測された微細構造の生因および混合が海洋循環や物質循環に与える影響についても検討する。

3. 研究の方法

- (1) 流速場の3次元構造を表層から海底まで測定するシステムを構築する。
- (2) 測器運動の補正や座標系変換を含むデータ解析手法を開発する。
- (3) 内部波の大規模砕波が生じている千島列島域や津軽海峡、ならびにサブメソスケール渦の多い親潮域で観測を実施する。

4. 研究成果

3次元微細流動構造を船の移動なしで測定できるシステムを構築するために、ADCP(音響ドップラー式流向流速計)を利用した。ADCPは図2aのように、複数の音波ビームを発信し微小粒子による反射波のドップラースhiftから、測定軸上の流向流速を求める。ADCPのうち吊下げ型ADCP(LADCP)と呼ばれる機種は、図2aのようにADCPの測定軸を鉛直下向きにして船から吊り降ろすことで、流速ベクトルの鉛直1次元分布を得る。今回開発するシステムでは図2bのように、LADCPを4台、測定軸を東西南北のように水平4方向に向けて吊り降ろすことで、流速ベクトルの3次元分布(円筒ないし十字型)を得られる。

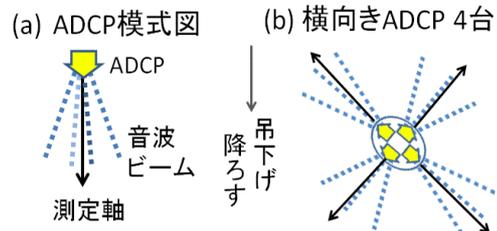


図2: ADCP 模式図。(a)ADCP 1台を横から見た図と(b)横向き ADCP を上から見た図。

直接測定されるのは測器に相対的な流速なのに対し、測器を取り付けるフレームは海中で動くため、フレーム運動の補正が課題となる。そこで、(1) フレームの並進運動を求めめるため、CTD 観測と通常の下向き LADCP 観測を同時に行う。鉛直並進運動は CTD 圧力計データで測定し、水平並進運動は船速 (GPS)・海底との相対速度・上下移動中のデータの整合性から推定する。加えて、(2) 測器の姿勢とその変動を測定するために、姿勢センサーで、ADCP が横向きになった状態で 3 軸 (鉛直軸と水平 2 軸) 回りの角度を測定できるように、特別仕様の「横向き専用 ADCP」を作成した。

システムの構成は以上より、横向き LADCP 4 台、下向き LADCP 1 台、CTD、およびバッテリーケースとなった。各 LADCP から発信される音波同士の干渉を防ぐため、LADCP 合計 5 台が同時に音波ビームを発信するための制御システムも作成した。加えて、各観測船に搭載されている CTD フレームに取り付けるための治具の設計と作成を行うとともに、船に搭載されている CTD フレームが使えないときのため、専用のフレームも作成した。専用フレームで観測する場合のシステムの写真を図 3 に示す。

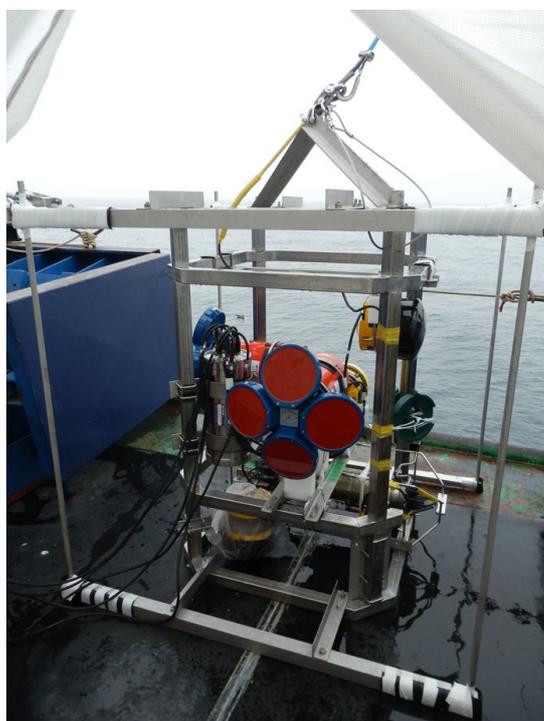


図 3：3次元微細流動構造観測システム

上述のように、得られるデータは測器運動の補正が必要となる。また、力学的解釈のためには地球座標系への変換や流速ベクトルの合成を行えると便利である。測器の運動が非常に激しい場合は、補正や変換の誤差が大きくなるので、そういう場合でも支障なく測れる各層のビーム方向流速の瞬間場を用いた水平構造の解析が有効となる。こうしたデ

ータ解析を行うためのプログラムを開発した。

構築した観測システムを用いた、内部波の大規模砕波の観測は、津軽海峡で 2 回と千島列島で 1 回実施できた。津軽海峡での観測は、北海道大学水産学部練習船うしお丸に乗船させて戴き、日本海側の竜飛岬沖合と海峡中央部において行った。津軽海峡は潮流が速く鉛直混合が強いことが過去の観測より示されている。千島列島での観測は、ロシア研究船マルタノフスキーを用いた日露協同観測に参加し、列島北東部のスレドネワ海峡 (摺手海峡または摺手岩海峡) で実施させて戴いた。千島列島域は潮流とそれによる鉛直混合が強く、周辺海域のみならずオホーツク海から北太平洋全域に影響を与えている。スレドネワ海峡でも、衛星観測から判断すると、非常に激しい鉛直混合が生じている。

いずれの観測でも、潮汐により生成された大振幅内部波とそれに伴う激しい微細流動構造が観測された。その一例を図 4 に示す。水深 40m ~ 100m、水深 120m ~ 260m、水深 280m ~ 380m 付近の 3 カ所で、高さ数十 m ~ 100m 以上におよぶ大規模な密度逆転が生じている (図 4b, c)。各密度逆転層の中央付近の深さを中心に、流速の微細擾乱が見られる (図 4a)。空間スケールは水平鉛直ともに数十 m ~ 100m 程度と小さいが、流速は数十 cm/s に達している。従来の砕波の概念からは考えにくいほど激しい微細擾乱であることから、微細流動構造観測システムの開発により、新たな現象の発見に繋がる可能性がある。

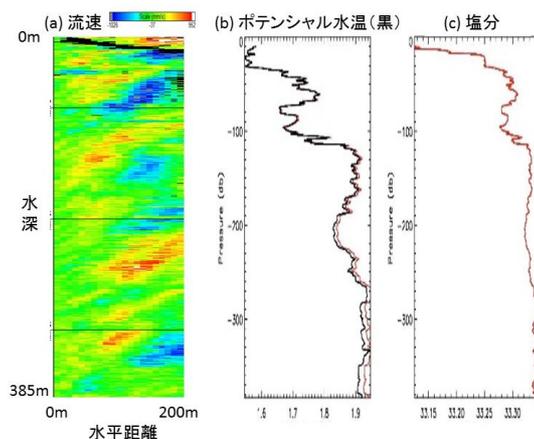


図 4：大振幅内部波の砕波とそれに伴う微細流動構造。(a)流速の鉛直断面、および(b)ポテンシャル水温と(c)塩分の鉛直分布。

サブメソスケール渦の観測は親潮域で北海道区水産研究所北光丸にて実施させて戴いた。渦の観測が 1 度しか行えなかったように、船と代表者のスケジュールの関係や船に搭載された機器・設備の関係で、当初計画より観測回数が減っている。とはいえ、計画にはそのような状況も想定して多めに観測航

海を入れていたので対応することができた。また、観測された現象の生因と影響を調べる一環として、内部波や渦から乱流に至る過程の力学や千島列島域の潮汐混合が海洋循環や海洋中の物質循環に与える影響についての研究も行った。

以上の成果は、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第一歩である。今後さらに、開発したシステムを用いた観測、その結果得られたデータの力学的解釈、そして観測された現象の数値シミュレーションを進めて行くことで海水混合を引き起こす海洋力学過程に対する理解が深まり、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と期待される。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 9 件)(全て査読有)

Nakamura, T., Y. Takeuchi, K. Uchimoto, and H. Mitsudera. Effects of temporal variation in tide-induced vertical mixing in the Kuril Straits on the thermohaline circulation originating in the Okhotsk Sea. *Progress in Oceanography*, 126, 135-145, 2014. doi:10.1016/j.pocean.2014.05.007.

〔学会発表〕(計 19 件)

(以下2つは招待講演)

Nakamura, T. Observations of submesoscale eddies in Oyashio and Kuril regions. 2015 Fall Meeting of the Oceanographic Society of Japan, Symposium A: Submesoscale Oceanography ---Prospect for a new world---, 26-29, Sep. 2015, 愛媛大学城北キャンパス(愛媛県・松山市).

中村知裕. 内部波の許容から解像へ、そして碎波過程の解像へ. 2013 年度日本海洋学会 秋季大会, 2012 年 9 月 17-21 日, 北海道大学(北海道・札幌市).

〔図書〕(計 1 件)

中村知裕: 環オホーツク海域における海洋循環. 低温科学便覧(北海道大学低温科学研究所編), 第 8 章, 第 2 節, 丸善出版株式会社, 2015, 161-166.

〔その他〕

<http://wwwoc.lowtem.hokudai.ac.jp/~nakamura/>

## 6. 研究組織

(1)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

(4)研究協力者

下田力(SHIMODA, Chikara)

黒田寛(KURODA, Hiroshi)

藤田和之(FUJITA, Kazuyuki)