

機関番号：12614

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20710002

研究課題名 (和文) サブメソスケールで起こる黒潮続流域の栄養塩供給メカニズムの
解明と定量

研究課題名 (英文)

Interaction between submesoscale flows and microscale turbulent mixing, and their
impacts on nutrients supply near the Kuroshio Front

研究代表者

長井 健容 (NAGAI TAKEYOSHI)

東京海洋大学・海洋科学部・助教

研究者番号：90452044

研究成果の概要 (和文)：

本研究課題における現場観測は、2009年秋期に東京海洋大学、マサチューセッツ大学、ウッズホール海洋研究所、マサチューセッツ工科大学と共同で実施した。観測の結果、黒潮フロントは、暖水側の混合層域と黒潮主流直下の躍層付近で、乱流混合が比較的強いことが明らかとなり、黒潮フロント域が混合層から躍層以深まで、乱流混合・散逸が卓越して発生する海域であることを示す。また、本観測結果を初期条件とした高解像度モデルを用いた黒潮フロントの数値実験を実施した結果、黒潮フロントが強い内部波が励起している可能性が明らかとなった。また、本観測で取得した栄養塩の観測の結果、高栄養塩の舌状構造が表層からサブダクションしている様子を示した。この結果は、高栄養塩水である親潮水がサブダクションによって黒潮フロント域へ供給される可能性を示唆するもので、非常に興味深い。

研究成果の概要 (英文)：

A series of oceanographic field campaigns has been conducted to elucidate whether the Kuroshio Front is a site of enhanced microscale turbulent dissipation, and to investigate the impacts of submesoscale phenomena on watermass formations and nutrient supply. We found that the Kuroshio Front is the site of turbulent dissipation and mixing not only in the surface mixed layer front, but also in the thermocline under the Kuroshio main stream. The results from the numerical simulations of the Kuroshio with initial conditions taken from the observations suggest that the Kuroshio Front is also a major internal wave generator. The results of nutrient sample shows that the nutrient-rich Oyashio water can be penetrated into the nutrient-poor Kuroshio water, possibly fertilizing the Kuroshio by submesoscale subduction in the surface mixed layer front of the Kuroshio.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|---------|----------|
| 2008年度 | 1,300,000 | 390,000 | 1690,000 |
| 2009年度 | 1,800,000 | 540,000 | 2340,000 |
| 2010年度 | 100,000 | 30,000 | 130,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,200,000 | 960,000 | 4160,000 |

研究分野：環境動態解析

科研費の分科・細目：物質循環

キーワード：サブメソスケール、フロント、黒潮、乱流混合、セカンダリーフ、舌状分布、サブダクション、湧昇

1. 研究開始当初の背景

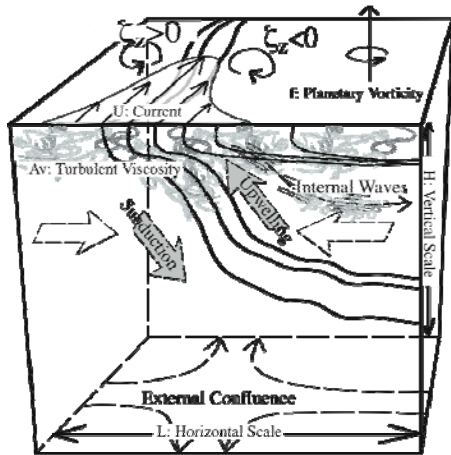


図1：フロントにおける合流に伴う鉛直流と種々の鉛直混合現象の模式図

海洋には渦、或はフロントが遍在している。この中でも、北太平洋亜熱帯循環の西岸境界流である黒潮フロントは最大規模のフロントである(本流流速 >2 ms、水平 $>O(100$ km)・鉛直規模 $>O(500$ m)規模)。このため著しい鉛直的な輸送現象が黒潮フロント域でしばしば報告されている(例 Koketsu et al. 2005)。フロントでの鉛直輸送は、表層の低塩分、高酸素水をサブダクションさせる。また湧昇によって下層に多く分布する栄養塩類を表層へ供給し得る為、フロント域は高生産域であり(Allen et al. 2005)、好漁場である(Uda 1936)。黒潮フロント域は、浮魚類の卵稚仔が輸送される海域でもある為、海洋物理、生物、化学、水産海洋学的に非常に重要な海域である。

しかしながら、予想される鉛直流は、大きくても直接観測するには至らないため、小ロスビー数、乱流摩擦の無い仮定のもと、 Q -Vector(地衡流が傾斜密度面を横切る成分)を ω 方程式の強制項として用い、鉛直流を逆算する研究が大気、海洋で70年代から盛んに行われた。しかしながら、フロント域も例外無く表層に混合層を持つ。Nagai et al. (2006)は、混合層での鉛直混合項を考慮した新しいSemi-Geostrophic Omega方程式を開発し、乱流摩擦によるフロントの再成層化は、風応力無しでも相対渦度によるエクマンサクション、パンピングを伴い、これらが従来の合流による鉛直循環と相乗する為フロントで著しい一次生産の増加が起こる事を示した(Nagai et al. 2008)。しかしフロントで如何に乱流混合が発生するかはその直接観測が少ないため不明な点が多い。従来、フロントは表層ジェットによる鉛直シアを有す

るものの、常に強い成層を伴うため乱流混合は弱いと考えられてきた(Olson 2002)。しかし最近のガルフストリーム躍層における直接観測では、海底地形や風の影響に伴う遠隔からの近慣性波が、帯状のシア流および乱流層をつくり、躍層の混合は一般的外洋の10倍程度と見積もられた(Winkell et al. 2002, Inoue et al. 2010)。

一方、近年の理論的研究によって、合流に伴うFrontogenesisが必然的にサブメソスケール不安定を生じ、乱流がフロント域で卓越して起こる事が指摘された(McWilliams et al. 2009, Molemaker et al. 2011)。

フロントでの表層混合層は混合層フロントとして振る舞い、サブメソスケール混合層不安定によって地衡流調節(Tandon and Garrett 1994)よりも著しく早いフロントの再成層化を促す(Fox-Kemper and Ferrari 2008)。早い成層強化は、栄養塩供給を妨げるため一次生産を抑制する可能性もある。しかしMahadevan and Archer (2000)らが示す様にサブメソスケール不安定は再成層化と共に著しい鉛直的营养塩供給を伴い、一次生産を促進させるとも考えられる。

2. 研究の目的

以上の事から、本研究は以下の目的を達成する為に実施した。

- ・フロントでの乱流は必然か偶然か。Frontogenesisによる内的要因か、外的要因が卓越するのか。
- ・フロントで発生する乱流混合が鉛直流と栄養塩輸送にどのような影響を及ぼすか。
- ・栄養塩を深層から有光層へ供給するフラックスの水平規模はメソスケールかサブメソスケールか。

3. 研究の方法

本研究では、上記の目的を達成する為に、2008, 2009年に現場観測を実施し、黒潮フロント域の高解像度断面観測を行った。観測では、乱流混合の程度を直接測定することができる、海洋微細構造観測装置や、自由落下曳航型のCTD、XBT、従来のCTDを用いた密度構造の観測を行った。また、海水を各深度で採取し、栄養塩の分布をマサチューセッツ工科大学(MIT)と共同で行った。

4. 研究成果

解析の結果Nagai et al. (2009 Geophysical Research Letters)で報告した非常にシャープな黒潮本流直下の躍層(250 m)における $O(10^{-7}$ W/kg)の乱流はFrontogenesisに関連したSymmetric Instability起因と考える事が出来るという結論に至った(図2)。

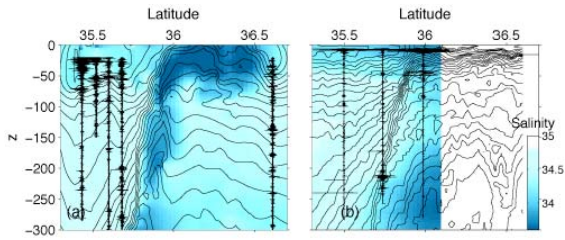


図 2 : 黒潮フロント鉛直断面。(a) 2009, (b) 2008 データ。色は塩分、等値線は 1 度毎の水 温、黒縦線は乱流シア。

これは、強い乱流を観測した黒潮の躍層が負渦位をもつ海水を含んでいた為である。また、その翌年行った 2009 年の観測では、表層と下層から夫々伸びる低塩分水と冷水の舌状分布を同時にサブメソスケール (20km 以内) の範囲内で観測し、近傍のフロント躍層で比較的強い散逸率 $0(10^{-8} \text{ W/kg})$ を観測した (図 2a)。フロント南北両側では内部波の影響と考えられる比較的強い散逸率 $0(10^{-8} \text{ W/kg})$ も観測された。Rainvill and Pinkel (2004) が指摘したように、これらの内部波起因と考えられるシアは、黒潮自体が励起した内部波による可能性も否めない。観測した黒潮の密度断面を初期条件として行った 3 次元非静水圧数値実験の結果、黒潮自体が内部波を励起する様子を再現する事が出来た (図 3)。

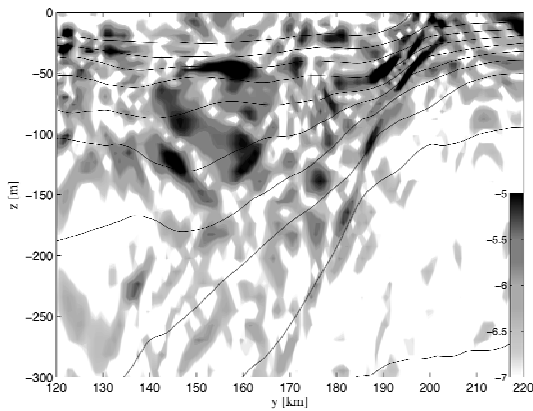


図 3 : PSOM で得られた黒潮前線の非地衡流シアの 2 乗 (対数)。実線は密度。

今後はこの黒潮と内部波、および乱流混合について焦点を絞り、遠隔からの内部波と黒潮が励起した非地衡流成分および内部波が引き起こす乱流混合の大きさについて比較し、黒潮フロント域で比較的強い乱流混合が、黒潮自体に内在する特性によるものか、或は遠隔からの内部波による外部要因が卓越するかを更に調査したい。

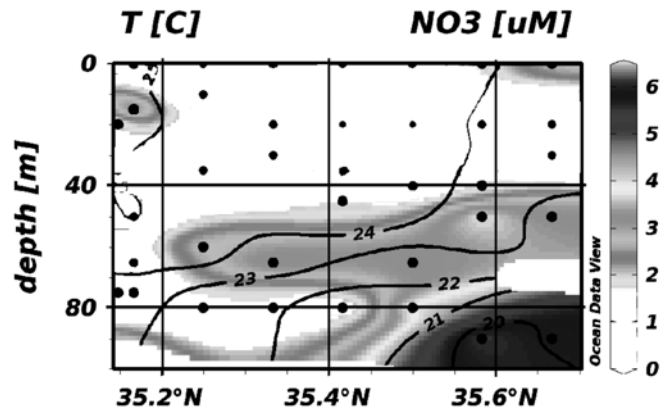


図 4 : 2009 年に観測された硝酸塩舌状分布 (Clayton et al. in prep)。

2009 年に実施した黒潮フロント観測時には栄養塩の観測も行った。分析は、MIT (マサチューセッツ工科大学) の Sophie Clayton 氏が行った。分析の結果、黒潮流域における栄養塩の高解像度の分布は、非常に複雑で、観測した断面のうち一つの断面では高栄養塩水が混合層フロント躍層に沿って下層に向かって舌状分布している様子が捉えられた (図 4)。この事は、黒潮フロントにおいて、光合成に重要な有光層では、栄養塩がサブメソスケールで分布している事を示唆する。また、観測された舌状分布は、親潮側の表層から黒潮の混合層下部に伸びるものである為、混合層フロントに伴う下降流が、栄養塩を供給する可能性を直接示すものである。本結果は、Clayton 氏が中心となって分析を進める予定であるが、派遣者である長井も数値モデル等を使ってその影響を見積もる等して今後研究を MIT と共同で進める予定である。

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 9 件)

① Nagai, T., A. Tandon, H. Yamazaki, M. J. Doubell, S. Gallager, Direct Observations of Microscale Turbulence, Subduction and Upwelling in the Kuroshio Front, Submitted to Journal of Geophysical Research

② Nagai, T., N. Gruber, H. Frenzel, J. C. McWilliams, G-K Platner, Z. Lachkar, D. Lohar, Dominant Role of Eddies in Offshore Transports in the California Current System, to be submitted to Journal of Geophysical Research

③Gruber, Lachkar, Frenzel, Marchesiello, Munnich, McWilliams, Nagai, Plattner, Mesoscale eddy-induced reduction of biological production in eastern boundary upwelling systems, submitted to Nature Geoscience

④Ziarek, Nihongi, Nagai, Uttieri, Strickler, Seasonal adaptations of Daphnia pulex swimming behaviour: the effect of water temperature, Hydrobiologia, 661, 317-327, 2011,

⑤ Yamazaki, Honma, Nagai, Doubell, Amakasu, Kumagai, Multilayer biological structure and mixing in the upper water column of Lake Biwa during summer 2008, Limnology, 11 63-70, 2010

⑥Nagai, T., A. Tandon, H. Yamazaki, M. J. Doubell, Evidence of enhanced turbulent dissipation in the frontogenetic Kuroshio Front thermocline, Geophysical Research Letters, 36, 2009

⑦Yamazaki, Iwamatsu, Hasegawa, Nagai, Chlorophyll patches observed during summer in the main stream of the Kuroshio, Atmosphere-Ocean, 47, 2009, 299-307

⑧ Takano, Yamazaki, Nagai, Honda, A Method to Estimate Three-Dimensional Thermal Structure from Satellite Altimetry Data. J. Atmos. Oceanic Technol., 26 2009, 2655-2664

⑨Nagai, T., A. Tandon, N. Gruber, J. C. McWilliams, Biological and physical impacts of ageostrophic frontal circulations driven by confluent flow and vertical mixing, Dynamics of Atmospheres and Oceans, 45, Issue 3-4, Pages 229-251, 2008.

[学会発表] (計 3件)

① Nagai, Tandon, Yamazaki, Doubell, Kokubu, Gallager, York, Clayton, Holmes, Observations of Microscale Turbulent Dissipation and Submesoscale Physical and Biological Structures in the Kuroshio Front, Ocean Sciences Meeting 2010 Portland

② Nagai, Yamazaki, Tandon, Katagiri, Takano, Kokubu FIELD OBSERVATIONS OF MICROSTRUCTURES AND

PHYSICAL-BIOLOGICAL SUBMESOSCALE STRUCTURES AT THE KUROSHIO FRONT, Aquatic Sciences Meeting 2009 Nice France

③ Nagai, Yamazaki, Katagiri, Takano Submesoscale subduction and enhancement of chlorophyll pigments in the Kuroshio Front, Ocean Sciences Meeting 2008 Orland U.S.A.

[図書] (計 1件)

①Nihongi, Ziarek, Nagai, Uttieri Strickler, Daphnia pulex hijacked by Vibrio cholera: altered swimming behaviour and predation risk implications, (Ed) Giri Kattel Zooplankton and Phytoplankton: Types, Characteristics and Ecology, NOVA Publications, Inc, 2011

[その他]

ホームページ等

<http://www2.kaiyodai.ac.jp/~tnagai/LOCEANED/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長井健容 (東京海洋大学・海洋科学部・助教)

研究者番号: 90452044

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

山崎秀勝 (東京海洋大学・海洋科学部・教授)

研究者番号: 80260537

Amit Tandon (マサチューセッツ大学ダートマス校・物理学科・教授)