

機関番号：12614
 研究種目：基盤研究 (B)・一般
 研究期間：2008～2010
 課題番号：20340127
 研究課題名 (和文) 微細構造観測グライダーを用いたフロントの動態とサブメゾスケール過程
 研究課題名 (英文) A tethered free fall glider to measure microstructures associated with submesoscale processes at front
 研究代表者
 山崎 秀勝 (YAMAZAKI HIDEKATSU)
 東京海洋大学・海洋科学部・教授
 研究者番号：80260537

研究成果の概要 (和文)：

沿岸域などに発生するフロントの混合にはさまざまなスケールの現象が関わっているが、密度勾配が水平的に変化することやフロントの正確な位置を同定することが困難であるため、未だ十分な知見が得られていない。そこで、フロント域の乱流微細構造を準水平的に測定するために TurboMAP-Glider を開発した。また、本測器の投入・回収を容易にするランチャーも合わせて製作した。さらに、フロントの位置を同定する為に、曳航式自由落下型 CTD (Sailing Boat Profiler) を開発した。

研究成果の概要 (英文)：

In order to measure turbulent microstructures at a coastal front, we have developed a tethered free fall microstructure profiler (TurboMAP-Glider). This is a quasi-horizontal profiler, thus it is suited to measure mixing events around front and layered structures. We also designed a launching system to protect the instrument during launching and recovering. In addition to TurboMAP-Glider, we also developed a towed free-fall CTD system (Sailing Boat Profiler, SBPro) so that we can identify the location of front.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	10,000,000	3,000,000	13,000,000
2009 年度	3,000,000	900,000	3,900,000
2010 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
総計	14,200,000	4,260,000	18,460,000

研究分野：海洋物理

科研費の分科・細目：地球惑星科学、気象・海洋物理・陸水学

キーワード：フロント、乱流、混合、微細構造、グライダー、測器開発

1. 研究開始当初の背景

海洋のフロントとは異水塊が隣り合わせに存在する状態である。一般に、フロント域そのものの空間スケールはメゾスケールと呼ばれ、数キロから数100キロであるため表面水温や海面高度に関する衛星データから、その存在を確認することができる。メゾスケールはほぼ地衡流バランスしているため、小さなスケールへの運動エネルギーのカスケードダウンが発生しにくい。近年の研究(Mahadevan, 2006, Capet et al., 2006)によればこのようなカスケードダウンに係る過程はサブメゾスケールと呼ばれる数100mから数キロ程度の鉛直流を伴う現象であることが分かってきており国際的に関心が高まっている。しかしながらサブメゾスケールは密度構造が水平方向に対して急激に変化する現象であるため、一般的な観測から捉えることが困難である。このため現象を捉えたパラメータ化がなされておらず、数値実験による究明もあまりすすんでいない。

大洋には多くのメゾスケールの渦が存在し、栄養塩を有効層に供給している。この栄養塩の添加は植物プランクトンの増殖を発生させ、食物連鎖網及び物質の輸送に寄与している。しかしながら、メゾスケールのメカニズムがもたらす添加量は亜熱帯における植物プランクトンの生産には不十分であることが分かってきた。このためメゾスケールの渦の周辺においても、サブメゾスケールの現象が全球レベルの物質輸送に重要な役割を果たしていることが予測されている(Oschlies, 2002, Martin and Pondaven, 2003)。

過去20年間、メゾスケールおよび乱流・混合に関する微細構造の研究は目覚ましい発展を遂げてきた。このような中、研究代表者は海洋における乱流・混合過程を究明するため、JFEアドバンテックおよび海外研究協力者のLueck教授(University of Victoria)と共同で乱流微細構造観測プロファイラー(Turbulence Ocean Microstructure

Profiler, TurboMAP)の開発を行なった。TurboMAPは全長が約2mの自由落下式の鉛直プロファイラーで、落下開始後水深5mからほぼ2mm間隔で微細構造のデータをとることが出来る。我々はTurboMAPを用いて乱流・混合状態を定量的に把握することに成功し、さまざまな研究成果を上げきた(Wolk et al., 2002, Hasegawa et al., 2004, Nagai et al., 2005, Yamazaki et al., 2006, Sato and Yamazaki, 2007)。さらに、TurboMAPを市販化することに成功し、国内外の研究者に微細構造の観測技術を提供している。

2. 研究の目的

フロントの動態に係るサブメゾスケール過程を解明するためには、どのような現象が存在するのか観測により見出さなければならぬ。このためには、現在利用が可能な一般的なCTDや自由落下式微細構造観測プロファイラー(TurboMAP)では対象とする構造を測定することは困難である。フロントは水平的に密度構造が急激な変化をするため、乱流・混合状態の水平プロファイルを取ることで評価することが望ましい。この目的のため以下の二つの新技術を開発する。

- 1) 微細構造を準水平的に観測する方法
- 2) フロントの位置およびその構造を詳細に捉える方法

微細構造を水平的に測定する方法はこれまでに曳航式測器や自立型水中ロボット(AUV)を用いた先行事例は存在するが、どれも開発費用と運用費用が高額であるためごく限られた研究にしか応用例がない。特に、AUVは億単位の予算がなければできない。また、乱流を計測するプローブは振動によるノイズに対して極めて敏感であるため、これまでの方法は曳航ケーブルやスクリーなどから発生する振動に悩まされていた。本研究では、研究代表者の開発したTurboMAPと共同研究者(有馬)が開発した水中グライダーの技術を融合することにより、より安価で

高精度の乱流・混合状態をフロント域で観測することを実現した。本研究は、これらの先攻技術をもとに準水平的に乱流・混合現象を計測することが出来る新たな微細構造観測装置 (TurboMAP-Glider) を開発することが目的である。TurboMAP-Glider を用いることにより、これまで明らかにされていないフロント周辺の混合に関わるサブメソスケールの過程を現場観測から捉えることが可能になる。

次に、フロントの詳細な位置とその周辺の構造を明らかにするため、新たな曳航式自由落下型CTD装置を開発する計画である。フロント周辺で密に鉛直プロファイルを取るため、曳航しながら自由落下しながら測定できる測器 (Sailing Boat Profiler, SBPro) を設計・開発する。また、SBPro を用いることにより、フロントの詳細な位置と構造を確認することを目的としている。

3. 研究の方法

TurboMAP-Gliderの設計および製作を行うために、すでに開発されている自由落下式鉛直プロファイラー (TurboMAP2) に連携研究者 (有馬) が設計した主翼と尾翼を取り付け TurboMAP-Gliderのプロトタイプを作成し、実海域および大型深層水槽 (九州大学) でその水中飛行の挙動に関する実験を行った。この結果から水中飛行中の本体角度と進行角を算出する方法を考案した。その算出方法の妥当性は、水槽実験において水中飛行の様子をビデオ撮影することにより確認した。また、実海域における計測データより本体に取り付けられているシアープローブのノイズレベルは 10^{-10} ($W kg^{-1}$) のオーダーで、鉛直落下式のものと同程度であることが分かった。

これらのプロトタイプの実験結果をもとに、新型の TurboMAP-Glider を設計し、制作を行った。新たに制作した TurboMAP-Glider パイロット実験を大型深層水槽 (九州大学) 及び琵琶湖 (北湖) においてを行い、そのパフォーマンスをテストした。水中飛行中の本体の振動の問題や飛行角を出来るだけ小さくすることなど様々な技術的な問題をひとつひとつ解決し、当初計画したパフォーマンスを達成することが出来た。

パイロット実験の結果、TurboMAP-Glider の投入と回収をスムーズに行う為には本体

を保護することと発射台及び回収機能を備えたランチャーが必要であることが分かった。試行錯誤を繰り返し、現場で使えるランチャーの設計・製作を行った。

フロント構造を的確にとらえるため、曳航式自由落下型CTD装置 (Sailing Boat Profiler, SBPro) のプロトタイプを開発した。この装置は既存の小型CTDと小型のケーブル巻き取り装置で構成されており、観測船を走行させながらフロントの構造を捉えることができる。小型CTDには特殊なブラシと浮体を取り付け、低速で自由落下するように設計した。

4. 研究成果

TurboMAP-Glider

TurboMAP-Glider プロトタイプの実験結果を解析することにより、プロファイラーには重力と浮力の和 ($W-F$)、揚力 (L) 及び抗力 (D) が作用しており、これらの力のバランスは body angle (θ) と迎え角 (α) により以下の式で表される (図1)。

すなわちグライディング角 $\theta + \alpha$ は揚力と抗力の比で与えられる。

$$\theta + \alpha = \tan^{-1} \frac{L}{D}$$

body angle (θ) はプロファイラーの内部に取り付けた3軸の加速度計をもとに測定することができる。また軸方向の流速 v と単位時間あたりの沈降距離 dz を利用すれば α は以下の式により求めることができる。

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{dz}{v \cos \theta}$$

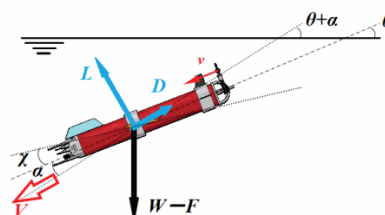


図1 グライダーに作用する力とグライディング角の関係

以上のプロトタイプの実験を基に図2に示す TurboMAP-Glider を設計した。小型の和船であれば図3に示すような投入も可能であるが、大型の観測船などから投入・回収を容易にするランチャーの開発が必要であることが分かった。



図2 設計した TurboMAP-Glider



図3 TurboMAP-Glider の投入例

TurboMAP-Glider は投入後約15秒ほどで body angle (θ) 10度、迎え角(α)3度で安定して水中飛行することが確認できた(図4)。搭載されたシアープローブにより乱流も自由落下式鉛直プロファイラと同程度のノイズレベルで測定することが確認できた(図5)。

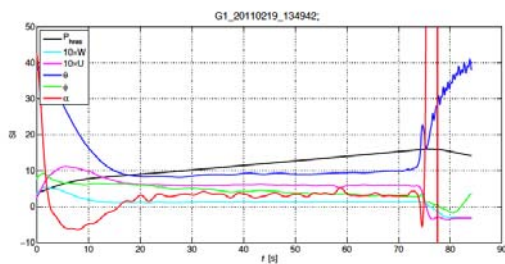


図4 水中飛行時におけるそれぞれの角度と鉛直及び水平移動速度の変化

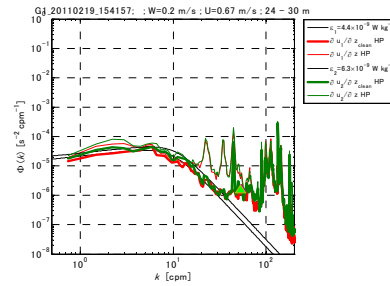


図5 乱流スペクトルの例

Launcher

吃水の高い観測船からでも投入・回収を容易にするためにランディングシステムを開発した。翼を衝撃から守るためのプロテクト機構を持たせ、ランチャーが水面に浮くように浮体を取り付けた(図6)。尾翼端はフックで固定されており、フックを解放するまでは本体はランチャーに固定されている。



図6 ランチャーに TurboMAP-Glider を搭載した状態

Sailing Boat Profiler (SBPro)

SBProの本体はCompact-CTD(JFEアドバンテック)に特殊なブラシを取り付け、小型の浮体により全体の浮力を調整し、約0.2 m/sで自由落下する(図7)。船舶を約2ノットで走らせながら目的水深まで、回収用ケーブルに負荷がかからないよう投入し本体を自由落下させる。次に、目的水深まで達した時点で本体を回収する。この一連の操作により船舶を止めることなく水温・塩分等の鉛直プロファイルを計測することができる。

荒川の河口域において、上げ潮時と下げ潮時の断面観測を行った結果、河川プルームの先端フロント部分の詳細な構造を捉えることに成功した(図8)。プルームの先端はクロフィル量が大幅に違うことから、先端部分を形成していた水塊が異なることがわかる(図9)。SBProを用いることによりサブメゾスケールのフロントの位置やその構造を

的確に捉えることが可能である。

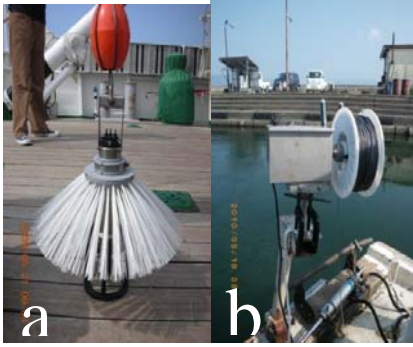


図7 SBProの本体(a)と回収用ウインチ(b)

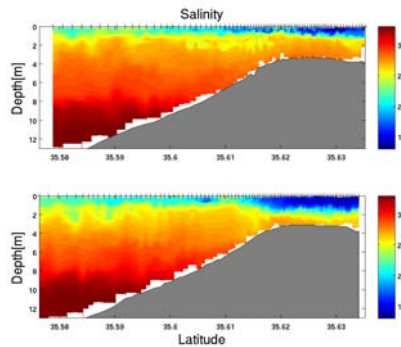


図8 塩分の断面(上段:上げ潮時、下段:下げ潮時)

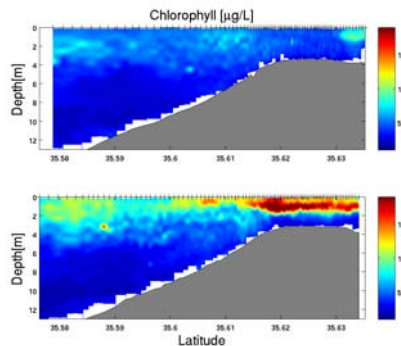


図9 クロロフィルの断面(上段:上げ潮時、下段:下げ潮時)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計9件)

- ① Prairie J.C., P.J.S. Franks, J.S. Jaffe, M.J. Doubell and H. Yamazaki 2011: Physical and biological controls of vertical gradients in phytoplankton. *Limnology and Oceanography: Fluids and Environments*, in press (査読あり)
- ② Arima, M., H. Nakamura and H. Yamazaki 2010: Development of the Glider-type

Turbulence Ocean microstructures Acquisition Profiler, TurboMAP-G, *Proc. of the twentieth, International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE-2010)*, CD-ROM, (2010.06). (査読あり)

- ③ DeYoung, B., F. Werner, H. Batchelder, F. Carlotti, Ø. Fiksen, E. Hofmann, S. Kim and H. Yamazaki 2010: Dynamics of marine ecosystems: integration through models of physical-biological interactions. In *Marine Ecosystems and Climate Change*, (eds) M. Barange, J. Field, R. Harris, E. Hofmann, R. Perry, and F. Werner, Oxford University Press, 89-128. (査読あり)
- ④ Nagai, T., A. Tandon, H. Yamazaki and M. Doubell 2009: Evidence of enhanced turbulent dissipation in the frontogenic Kuroshio front thermocline, *Geophysical Res. Lett* 36, L12609, doi:10.1029/2009GL08832. (査読あり)
- ⑤ Doubell, M. J., H. Yamazaki, H. Li and Y. Kokubu 2009: An advanced laser based fluorescence microstructure profiler (TurboMAP-L) for measuring bio-physical coupling in aquatic systems, *J. Plank. Res.* 31(12), 1441-1452. (査読あり)
- ⑥ Yamazaki, H., I. Iwamatsu, D. Hasegawa and T. Nagai 2009: Chlorophyll patches observed during summer in the main stream of the Kuroshio, *Atmosphere-Ocean* 47(4), 299-307. (査読あり)
- ⑦ Takano, A., H. Yamazaki, T. Nagai and O. Honda 2009: A method to estimate three-dimensional thermal structure from satellite altimetry data, *J. Atmos. Oceanic Tech.* 26(12), 2655-2664. (査読あり)
- ⑧ Yamazaki, H., H. Honma, T. Nagai, M. Doubell, K. Amakasu and M. Kumagai 2010: Multilayer biological structure and mixing in the upper water column of Lake Biwa during summer 2008, *Limnol.* 11(1), doi:10.1007/S10201-009-0288-2, 63-70. (査読あり)

- ① Yamazaki, H., H. Burchard, K. Denman, T. Nagai 2008: One-dimensional mixed layer models, Encyclopedia of Ocean Sciences, Second Edition, (eds) J.H. Steel, K.K. Turekian and S.A. Thorpe, Elsevier, 4171-4180. (査読あり)

[学会発表] (計3件)

- ① Yamazaki, H., H. Honma, T. Nagai, M. Doubell, K. Amakasu and M. Kumagai: Multiple thin layer structures and mixing in a thermally stratified water column of Lake Biwa, 2010 Ocean Science Meeting, Portland, Oregon (Invited).
- ② 中村久人・山崎秀勝・長井健容・有馬正和: TurboMAP-Gliderプロトタイプによる海洋観測およびその挙動解析. 2009年度日本海洋学会春季大会、東京大学、2009年4月6日
- ③ Yamazaki, H., T. Nagai, M. Doubell and C. Locke : Oceanic turbulence and phytoplankton dynamics. GEOHAB Modeling workshop, June 15-19, 2009, Galway, Ireland (Invited)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山崎 秀勝 (YAMAZAKI HIDEKATSU)
東京海洋大学・海洋科学部・教授
研究者番号: 80260537

(2) 研究分担者

近藤 逸人 (KONDO HAYATO)
東京海洋大学・海洋工学部・准教授
研究者番号: 40361802

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
(2010年度は連携研究者)