

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24540475

研究課題名(和文)南大洋における混合拡散の直接観測

研究課題名(英文)Direct observation of mixing and diffusion in the Southern Ocean

研究代表者

勝又 勝郎 (KATSUMATA, Katsuro)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境観測研究開発センター・グループリーダー代理

研究者番号：80450774

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：海洋大循環の強度に影響を与える南大洋の鉛直・水平の混合拡散を観測した。投棄型流速微細構造プロファイラを用いた現場観測は通信用光ファイバの不調により限られたデータしか得られなかった。アルゴフロートを用いた水平拡散の観測は二つの物理量の空間分布を明らかにした。第一に上層 1000 m の渦による水平輸送、第二に南大洋上の強烈な西風により注入された運動量が渦により海洋中を鉛直に伝播し海底地形に伝えられる量である。前者では南インド洋の強い北向きの渦輸送(南極モード水・中層水の北上メカニズム)、後者では南極環海流が海底地形を乗り越える限られた数箇所で大きな運動量伝播があることが示された。

研究成果の概要(英文)：We observed vertical and horizontal mixing and diffusion in the Southern Ocean. Expendable Microstructure Profilers suffered from noise and premature termination possibly due to optical fibre and yielded limited data. Drift and hydrographic data from Argo floats demonstrated spatial distribution of two quantities; horizontal eddy transport in the upper 1000 m and vertical propagation of eastward momentum through the water column carried by eddy topography interaction. For the former, strong poleward transport (spreading of Sub-Antarctic Mode Water and Antarctic Intermediate Water) was found in the South Indian Ocean. For the latter, the momentum transfer is limited to several spots where the Antarctic Circumpolar Current negotiates topographic obstacles despite large spatial scales of momentum input by westerly wind.

研究分野：海洋物理学

キーワード：南大洋 渦

1. 研究開始当初の背景

海洋循環はおもに表層で風によって駆動されているとされる「風成循環」と、おもに深層で熱や塩分の違いによる海水の密度の差によって駆動されているとされる「熱塩循環」の二つがある、と説明されてきた。この単純なモデルは海洋の鉛直混合の観測と矛盾することを指摘したのは Munk and Wunsch (1998) で、以来さまざまな説明がなされてきた。筆者の知る限り「南大洋における深層水の風による湧昇」の重要性を初めて指摘したのは Webb and Sugimoto (2001) で、最新のレビュー (Marshall and Speer, 2012) や観測のまとめ (Waterhouse et al., 2014) に見られるように、どうやら議論はこちらの方向に収束しているようである。

南大洋には強烈な西風に対応して (諸説あるので敢えて「駆動されて」とは言わない) 南極環海流が流れている。鉛直成層の弱い南大洋ではこの海流は海底に達し地形と作用して鉛直・水平の混合を引き起こす。これらの混合は当然「南大洋における深層水の風による湧昇」に影響を及ぼしているはずで、全球の深層循環 (子午面循環) を知る際には南大洋の鉛直・水平の混合を定量的に知る必要があるといえる。

2. 研究の目的

前項に記したような問題意識は世界の海洋物理学者内で共有されていて、南大洋大西洋セクタでは英国・米国のグループ、南大洋インド洋セクタでは豪州・米国のグループが乱流の集中観測キャンペーンを行った。

(1) 本研究では未だ観測されていない南大洋太平洋セクタで乱流直接観測を行い鉛直拡散の定量化を試みる。その際に新型の観測機器 XMP を試用することで機器開発にも貢献を目指す。

(2) 水平拡散に関しては近年データ数が充実してきたアルゴフロートの航跡データと鉛直温度塩分プロファイルを用いた水平拡散の定量化を試みる。この方法はデータ数不足でいまままで試みられてこなかったが、ここ数年のとくに南半球のフロート数の充実からこのたび可能になった。深さはアルゴフロートの停留深度である 1000 m に限られるが、乱流統計量の全球分布を調べる事が出来る。

3. 研究の方法

(1) 鉛直混合の現場観測の為に、海洋地球研究船「みらい」が 2012/2013 年に南大洋太平洋セクタに向かう MR12-05 航海に、乱流観測機器である XMP を搭載して現場観測を行う。乱流観測は測器自身が乱流をつくらぬよう海中を自由落下する流速微細構造センサの観測する鉛直微細構造を理論的に当てはめることで推定する。深海を観測する為に

はどうしても高価な大型の筐体が必要で、観測終了後の待機と回収にある程度の時間を要する。また乱流構造が急激に変化する海底地形直上の乱流を観測すると測器先端のプロープが着底して破損してしまい最悪の場合プロープが泥質海底にささってしまうなどしてプロープ回収に失敗する可能性があった。

これに対して XMP こと投棄型微細構造プロファイラ Expendable Microstructure Profiler は自由落下しながら流速微細構造を観測する点は従来と変わらないが、海底に達するとそのまま投棄できるという利点がある。これにより「回収の為にシブタイムを要しない」「海底直上 (数メートル) の乱流境界層が観測出来る」という利点が生まれる。ただし従来型で内蔵メモリに保存されていたデータを船上に送る為、XMP は観測中の光ファイバ通信が必要となる。そのため筐体内に 12 km もの光ファイバを保持する。後述するがこの光ファイバが鬼門であった。

(2) 水平拡散はアルゴフロートの航跡データと温度塩分プロファイルを用いる。具体的には、アルゴフロートは浮上時に人工衛星により位置が特定されるから二回の浮上の際の移動距離を時間で割れば、海中での平均移動速度が分かる。また浮上時に温度・塩分プロファイルを観測するから二回のプロファイルを取れば二回の浮上時の中点における温度塩分が推定される。換言すれば、アルゴフロートを用いることで 1000 m 深の温度・塩分・流速の同時観測がほぼ全球で得られる。

この方法は線形補間や浮上時の流速の変化や表層での通信時の滞留時間などいろいろと誤差が入りうる恐れがあるので、誤差の見積もりは慎重に行う必要がある。Katsumata and Yoshinari (2010) のアルゴフロートの航跡を用いた全球流速マッピングによる先行研究から、なんとか渦統計量が誤差より大きくなるめどが立ち、本研究を行うに至った。

4. 研究成果

(1) 6 本の XMP をカナダ Rockland Scientific から購入した。相互比較のため 2 本ずつ 3 点にて投入した。3 本は着底が確認されたが 3 本は観測途中で光ケーブルが断線してしまった。断線の原因を探るべく観測時の「みらい」の挙動・海況や天候などをメーカの技術者と比較検討した。一般的に海況がメーカがテストを行った海況より悪く、使用船舶が大きいためうねりや風の影の影響で船速が変動してしまい投入装置が大きく動いてしまうなど、悪条件が重なったという点がある一方、断線した観測と海況のあいだに明白な相関が見られなかった事から光ファイバの品質が主因の一つと推定された。

実際、着底した 3 本の測器からの信号も光ファイバが原因と思われるノイズが混入しており、そのまま研究目的に使用できる信号品質ではなかった。さまざまなフィルタを試みたが現時点で満足のいく結果は得られていない。そのほか現場観測の詳細については MR12-05 航海のクルーズレポートを参照。

断線率が五割となってしまった点については、メーカーとさらに検討を重ねた結果、根本的なデザイン変更をして光ファイバを用いない新型を設計することとなった。この新型ではデータを内蔵メモリに記録し、観測終了後内蔵メモリを含む浮上部のみ自動で切り離し、海上で浮上部のみを回収するという形式となる。プローブは投棄型となる。この形式では、乱流系を投入後、浮上まで別の観測を行う事が可能で、しかも海底直上の乱流プロファイルを得る事が出来る。現在製品化をめざして各種のテストを行っている。

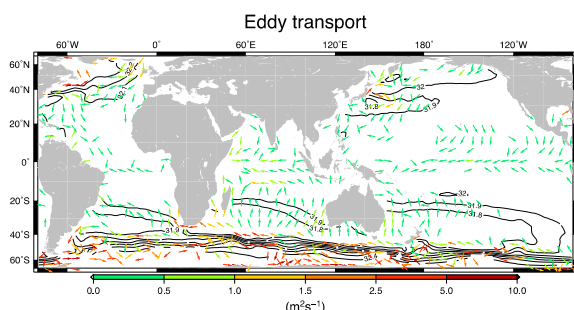


図 1 アルゴフロートにより推定した上層 1000 m の渦輸送。矢印で渦輸送の方向、色で渦輸送の大きさを表す。観測誤差より小さな渦輸送はプロットしていない。等値線は 1000 m 深のポテンシャル密度を略記した。例えば 31.8 はポテンシャル密度 1031.8 kg/m³ を表す。

(2)アルゴフロートを用いた水平拡散の推定では以下のような成果が得られた。渦による「水平拡散」はそもそもテンソル量であるが、そのうち対角成分である「渦拡散」と非対角成分である「渦輸送」が含まれる。前者は近年研究が進んできた(例えば Klocker *et al.*, 2012) のに対し後者の現場観測はほとんど存在しないので、後者の解析に着手した。結果を図 1 に示す。いわゆる西岸境界流(北半球太平洋の黒潮、北半球大西洋の湾流)と南極環海流にそって大きな渦輸送が見られる。また両極の中緯度では 1.0 m²/s 以下の赤道に向かう渦輸送が見られる。

前者は等密度線にそった成分を持つが、後者は等密度線に直交する成分が大きい。これは詳細な解析で前者が強い(非線形)渦が移流する効果、後者は線形傾圧不安定理論で予測される等密度面の傾きを解消してポテンシャルエネルギーを開放する効果で説明出

来る事が分かった。とくに後者は数値モデルで用いられる Gent-McWilliams パラメタリゼーションとの比較を想起させるが、渦輸送を等密度面の傾きで割ったいわゆる layer thickness diffusivity は等密度面の傾きが小さく誤差を増幅してしまい、南大洋の中緯度の一部を除いては誤差が大きすぎる結果となってしまった。

興味深いのは南半球インド洋で北向きの渦輸送が見られた事である。この海域で 1000 m はちょうど北上する南極中層水にあたり渦が南極中層水をインド洋低緯度へ輸送する様子と解釈出来る。従来の数値モデルによるシミュレーションではこの輸送があまり大きくでないものが多く、中層水の分布における渦輸送の重要性が観測で確かめられたといえる。残念ながら太平洋の南極中層水や北太平洋中層水は深度が異なりこの結果からは見えない。

以上の結果は Eddies observed by Argo floats. Part I: eddy transport in the upper 1000 dbar という題名の論文にまとめられ投稿中である。

(3)南大洋の渦に関しては上述の渦輸送あるいは前述の渦拡散に加えて、運動量を鉛直輸送する働きがある。

南大洋の運動量収支は昔からよく知られていた問題であった。日高孝二博士の論文(1953)で取り上げられている。「風で南極環海流に注入された運動量の行方はどこか」という問題である。これは Munk and Palmen (1951) で提唱されていた「海底地形を押し力」あるいは形状抵抗という説を支持する局所的な観測 (Johnson and Bryden, 1998; Phillips and Rintoul, 2001) や数値シミュレーション (Masich *et al.*, 2016) が出揃って後日一応の解決を見るのだが南大洋全体規模の現場観測は存在しなかった。

アルゴフロートから推定した 1000 m 面を横切る東向き運動量の空間分布を図 2 に示す。南極環海流が海底地形を乗り越える限られた場所で統計的に有意な大きさの下方への運動量輸送がある事が見て取れる。これらの運動量を足し合わせると南大洋上の風による運動量注入とほぼ同じバランスしていることが示される。すなわち形状抵抗説が観測からも支持されたことになる。また、風による運動量注入は空間スケールが大きくあまり変動が無い「のっぺり」とした空間パターンを持つのに対し、運動量鉛直輸送は極度に局所化した分布を持つ。この結果として風の変動に対する南極環海流の応答はこの局所化した数カ所に強く現れる事になる。具体的には蛇行の変化や渦強度の変化が観測されることになり、これは最近の観測結果とも合致する。以上の結果は Eddies observed by Argo floats. Part II: eddy form stress in the Southern Ocean という題名の論文にまとめられ近く投稿される。

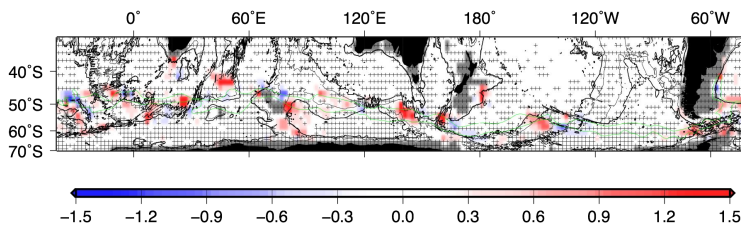


図 2 アルゴフロートによって推定された 1000 m を下層に通過する東向き運動量。単位は Pa。海底地形の等深線は 3500 m (細) と 4000 m (太)。環海流のおよその位置は緑線 (亜寒帯前線と南極前線)。統計的に零と区別出来ないグリップは + 記号で示した。

以上のように近年充実してきたアルゴフロートによって、従来観測がほぼ不可能であった中層の渦統計量が直接観測出来る事が示された。とくに現場観測の難しい南大洋が渦活動の大きく重要な点である状況から無人観測の意義が強調される。各国の予算が限られている中なんとかフロート観測を維持する努力が必要である。また現在のフロートでは観測出来ない季節海水下・大深度を観測するフロートが増えればこの重要な海域のさらなる理解が進むであろう。

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)

[学会発表](計 6 件)

勝又勝郎、アルゴフロートで観測された南大洋の渦、日本地球惑星科学連合 2016 年大会、幕張メッセ (千葉県千葉市)、2016 年 5 月 24 日。

勝又勝郎、アルゴフロートで観測された海洋上層 1000 m の渦輸送、日本地球惑星科学連合 2016 年大会、幕張メッセ (千葉県千葉市)、2016 年 5 月 22 日。

K. Katsumata, Eddy transport at 1000 m depth estimated by Argo floats, GAIC2015 - combined Global Ocean Ship-based Hydrographic Investigation Program/Argo/International Ocean Carbon Coordinate Project Conference on physics and biogeochemistry, Galway, Ireland, 25th Sep. 2015.

K. Katsumata, Eddy form stress in the Southern Ocean at 1000 dbar, 26th IUGG General Assembly 2015, Prague, Czech Republic, 30th Jun. 2015.

勝又勝郎、南大洋の数年から十年規模の変動、日本地球惑星科学連合 2015 年大会 (招待講演)、幕張メッセ (千葉県千葉市)、2015

年 5 月 27 日。

勝又勝郎、南大洋 1000 m 深の渦、日本海洋学会 2014 年春季大会、東京海洋大学 (東京都港区)、2014 年 3 月 27 日。

[その他](計 1 件)

K. Katsumata, Expendable Microstructure Profiler in *MR12-05 Cruise Report*, H. Uchida, K. Katsumata, T. Doi (Ed.), available online at http://www.godac.jamstec.go.jp/darwin/cruise/mirai/mr12-05_leg2/j

6. 研究組織

(1) 研究代表者

勝又 勝郎 (KATSUMATA, Katsuro)
国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境観測研究開発センター・グループリーダー代理
研究者番号：80450774