

〔 竜門賞受賞記念解説 〕

地中海水レンズ渦の連続形成に関する数値的研究

*海洋研究開発機構・地球環境フロンティア研究センター 相木 秀 則†

A Numerical Study on the Successive Formation of Meddy-like Lenses¹⁾

Hidenori AIKI

Frontier Research Center for Global Change, JAMSTEC

(Received 8 April, 2005)

(KEY WORDS) : Mediterranean water outflow, anticyclonic lenses, coherent vortices, eddy shedding

1 地中海水渦 (Meddies)

ジブラルタル海峡からこぼれ落ちた塩分に富む重い地中海水は、イベリア半島の大陸棚に沿って中層 (水深約 1000m) に沈み込み (図 1), レンズ状渦の孤立渦 (直径 40km-100km) となって岸から離れます。ポルトガル沿岸で次々と生み出された中層渦はいずれも強い高気圧性 (時計回り) の回転を示し、2-3 年かけて北大西洋中央に移動します。これら地中海水渦 (Mediterranean Water Eddies あるいは Meddies) は 1980 年代からイベリア半島沖合で頻繁に観測されてきましたが、常時 30 個ほどが漂い、北大西洋中層循環における物質輸送の役割を担っていると考えられています。このような亜表層のレンズ状渦は、世界各地の重い水の沈み込み域でしばしば観測されています。レンズ水塊の分布・性質・形成過程などは未解明な部分が多く今でも海洋物理学の分野で盛んに研究されています。

北大西洋の中層に高塩分水が舌状になって広がっているという話は、英国チャレンジャー号による世界初の海洋観測航海 (1872-1876) の頃から早くも知られていました²⁾。この高塩分水は蒸発が盛んな地中海に溜め込まれた重い水がジブ

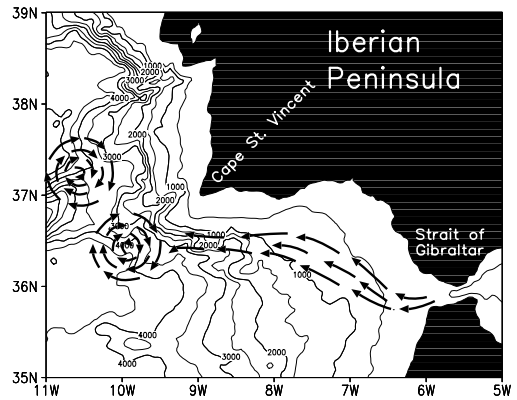


図 1 ジブラルタル海峡からイベリア半島にかけての海底地形。矢印は地中海水の流出，地中海水渦 (Meddy) のイラスト。

ラルタル海峡から流れ出たものです。1955 年の Defant³⁾ による記述では興味深いことに、中層の高塩分水の分布は (ジブラルタル海峡ではなく) ポルトガルの南西端のサンビセント岬 (図 1) に水源があるかのような広がり方をしていると指摘しています。

イベリア半島沖合に広がる地中海水が再び脚光を浴びようになったのは、1970 年代に北大西洋の反対側、メキシコ湾流周辺で行われた大規模観測と関係があります。意外なことに、この観測で直径 40km 程度の高塩分水塊からなる中層レンズ渦がいくつか発見され、もちろん海洋が

* 〒 236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町 3173-25

† E-mail: aiki@jamstec.go.jp

そのような微細構造を持つことは当時の海洋物理学の予想を越えるものであったのですが、この水塊の起源の一つとして対岸の大西洋東岸に確認されている地中海起源水ではないかという仮説が持ち上がりました。高塩分のレンズ状渦を Meddy と命名した McDowell and Rossby⁴⁾ の題目「地中海水：パハマ沖で発見された強い中規模渦」からも、当時の海洋物理学者の驚きぶりが伝わってきます。亜熱帯の風成循環に流されれば北大西洋の東から西に 6000km もの横断をすることは不可能ではありませんが、それには 10 年あまりの歳月がかかります。また雲の塊のような小さな水塊が広大な大西洋を孤立したまま横断することは海洋循環の常識を覆しかねない非常にロマンのある仮説でした。

1980 年代には次々とプロジェクトが立ち上げられ、イベリア半島沖の高塩分水塊 (Meddy) に中層フロート (漂流ブイ) を放り込み追跡する観測が行われました。興味深いことにそれらの軌跡はいずれも時計回り (高気圧性) の回転を示し 2-3 年かけて南西方向に移動する様子が確認されました。中には大西洋中央海嶺あたりまで移動する水塊もあり、アメリカ沿岸への漂流仮説を支持しているようにも見えます。また Meddy の断面構造も繰り返し計測され、水深 1000m に浮かぶレンズ状の高塩分水塊が円盤のように回転している姿が一般的に知られるようになりました。1990 年代に入ると Meddy の大まかな分布が明らかになり、北大西洋東部には常時 30 個ほどが漂い、それらはイベリア半島南西端のサンピンセント岬 (図 1) から 1 年におよそ 10 個の頻度で切離すると見積もられています。

Meddy の形成・移動過程を考察した論文は数多く提出されていますが、レンズ状の中層水塊そのものに焦点をあてたものが殆んどで、渦の周りの流れ場の 3 次元的構造などに対する理解は不十分でありました。本稿の第 2 節に解説する受賞論文¹⁾ は、レンズ渦が次々とちぎれる現象を数値実験からとらえ渦形成を包括的に考察しま

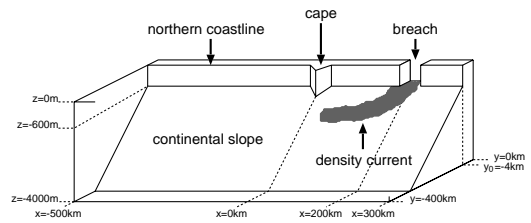


図 2 モデル地形の模式図。3 次元数値モデルの格子幅は水平 4km、鉛直 40m。東西は周期境界、南北の開境界は圧力場を設定。回転系。積分期間は 100 日。

した。本稿の途中で〔回想〕と題して苦労話などを記載させていただきます。第 3 節では、これまでお世話になった先生方への謝辞をもって締めくくりたいと思います。

2 受賞論文の解説

回転系の三次元数値モデルを用いて海底斜面上の密度流を再現し解析しました。さらに同じ地形で簡略化した 5 層モデルを構築し実験と再考察を行いました。

2.1 実験設定

本研究で使用したモデル海洋 (図 2) はジブラルタル海峡からポルトガル沖にかけての大陸棚を (図 1) を理想化したもので、Meddy の形成に関わる周辺海流の力学要素を最も洗練された形で含み入れた実験構成といえます。イベリア半島沖合の海域には地中海水の流出によって相互作用する様々な海流が存在するため、それらから重要なものを選び出すまでにかかなり迷いました。ジブラルタル海峡から海底斜面をたどってイベリア半島の南岸を西に抜ける「地中海水潜流」、サンピンセント岬から切離を繰り返す「Meddy」、ポルトガル沿岸を南向きに流れる「ポルトガル海流」、地中海流出水の沈み込みに伴う上層水の吸い込みとそのロスビー波伝搬によって発達する「アゾレス海流」らを選びだし、理想化してモデルに組み込むことによって初めて Meddy によく似た渦が形成されました。

また Meddy が生まれる様子的本質をつかむた

めに様々な工夫をこらしました．例えば，実験で再現された Meddy を可視化するには力学場だけでなく地中海水に対応するトレーサー場が必要な事を示しました．これは Meddy が北大西洋でどのようにして観測されているかに関係します．Meddy は（高温高塩の）水塊アノマリの分布からみればレンズ状の高気圧渦であり観測結果と一致します．しかし速度や渦度の分布から見れば Meddy は傾圧双極渦の片側にすぎないのです（次節参照）．また密度流の発達を考察するにあたっては地中海水トレーサーの鉛直積分を使用しました．興味深い事に，地中海水が海底斜面上で周りの水と激しく混合するにも関わらずこの鉛直積分量はラグランジュ的に保存しているように振る舞いました．

実験で再現された流れ場は全般的に密度流の周りや離岸渦の領域では静水圧で済みます．しかし斜面上部の切れ目（モデル海峡）から重い水を注ぎ込むには非静水圧が必要でした．これは開境界条件として（モデル海峡を出入りする流速の代わりに）外部の仮想圧力だけを規定するという独自の方法を採用したからです．この開放境界条件によって海底斜面上の密度流や切離した中層渦を覆う上層の流れ場を整合的に制御することができます．これとは対照的に従来の実験研究では上層の流れ場や地中海水を取り囲む周囲の水の動きに対する配慮や議論が殆どなされていませんでした．

2.2 3次元モデルの実験結果

数値実験で再現された密度流は海岸線上の岬の有無によって全く異なる広がり方を示しました．海岸線がまっすぐな場合には渦形成は生じませんが，岬を取り付けて同じ実験を行うと海底斜面上を流れる重い水がちぎれて沖合に移動します．観測から指摘されてきたように，ポルトガル南西端の尖った岬が Meddy が生まれる要因の一つであることが確かめられました．そして期待していたとおり一定の条件下でレンズ状の渦が次々と形成される現象をとらえることができました

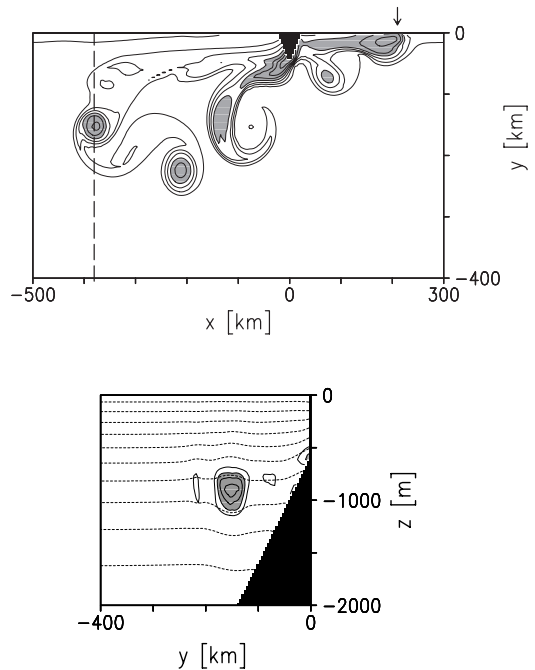


図3 3次元モデルで再現された100日後の地中海水の水平分布(上图)と破線に沿う鉛直断面(下图)．実線と影はモデル海峡(矢印)から注ぎ込まれた地中海水．下图の点線は等密度線．

(図3)．本実験では100日間の積分で3個の水塊が放出されましたが，これは Meddy の観測で指摘されている形成頻度(1ヶ月に1個程度)とよく一致します．

興味深いことに実験で再現された渦は，レンズ状の水質アノマリや時計回りの回転といった Meddy と共通する特性を示す一方で，これまでの観測では明らかにされていない3次元的な力学構造を持っていました．渦が離岸し沖合への移動する際には，高気圧渦である Meddy の傍らに低気圧性渦が寄り添うことで相互誘導が働きます(図4)．切離した渦対は背の高い低気圧渦を中心に回旋しながら沖合の平均流に運ばれますが，地中海水からなる中層のレンズ状塊は常に高気圧性の回転を帯びていました．従来の北大西洋の観測では中層には高気圧渦ばかりが存在するように考えられていましたが，これは地中海水の塩分アノマリに中層フロートが埋め込まれてきた

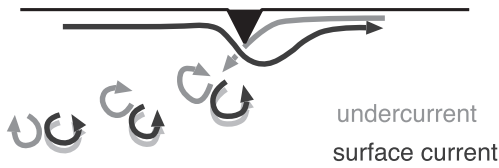


図4 実験で再現された中層と上層の流れ場の模式図。中層の渦が Meddy に対応する。

ためであります。本実験によると実際には低気圧性の渦も同程度に存在することが示唆されます。

以上の結果は、Serra ら⁵⁾の室内水槽実験の結果を部分的に支持するものであります。本実験では特に、下流に流されたレンズ水塊が十分な孤立性を保つことなどにより、渦の切離が安定して繰り返される事を示すことができました。

2.3 双極渦の形成要因

双極渦の高気圧渦部と低気圧渦部それぞれの発生起源をそれぞれ解析したところ、どちらも海底斜面上での密度流の混合の影響を強く受けることが示唆されました。斜面上部から注ぎ込まれた重い水が海底に沿って沈み込む際に、周囲の水を取り込みます。その結果、海底近くには低渦位（成層が弱い）水、上層には高渦位（成層が強い）水が分布します。

渦位の鉛直断面をプロットすると傾圧不安定の必要条件を満たしていました。とはいっても、岬なし実験（2.2 節）で再現された密度流もこの条件を満たしていましたから、岬から切離する渦を（従来の研究のように）傾圧不安定だけで説明する事はできません。不安定の議論は岬のような局所的な地形変化と合わせて議論する必要があります。地中海水の相対渦度は海底斜面上で正だったものが岬の下流で沖合に出されて背景の成層に挟まれると渦糸が縮んで負の渦度を帯びていました。一方、上層の低気圧渦が岬の東側で発達する理由については、上層水がその下の密度流の混合によって絶えず下方に取り込まれ渦糸が伸ばされる効果が効いていることが感度実験からわかりました。

また、周期的な渦形成が成立するための一つの

必要条件として、沖合の平均的な流れ場が岬付近で発達した渦を次々と下流に運び去ることに着目しました。平均流を加速させると完全に孤立した渦が十分な間隔をおいて形成され、平均流を減速させると地中海水は岬の周りに滞留して完全にはちぎれませんでした。

〔回想〕

以上の実験結果は観測と照らし合わせてみると大変興味深いものでした。しかし流体力学に寄与するものとしてどうまとめあげるかが最大の課題でした。複雑な 3 次元構造を伴った渦なので解析解を導くことはまずできません。私が最初に考えたのが実験結果を統計的に分類することでした。

これは受賞論文に記載するには至らなかったのですが、沖合の平均流速 U 、岬の大きさ L そして海底近くの密度拡散 κ を用いてレイリー数 UL/κ を定義することを考えました。こうするとカルマン渦列の記述に使われるレイノルズ数 $U'L'/\nu$ (U' は平均流、 L' は円柱の大きさで ν は粘性) と対応ができて面白いと思ったのですが、実際の現象はそれほど簡単ではありませんでした。

統計的な手法を断念した頃、私はふと昔読んだ論文 Özgökmen, Chassignet & Rooth⁶⁾ のことを思い出しました。この論文は地中海流出水の密度混合にともなって上層の水が下方に吸い込まれる効果を調べたもので、それによってイベリア半島南西沖にアゾレス海流という上層の流れが生まれることを示しています。Özgökmen ら⁶⁾ は海洋の上層だけからなる 1 層モデルに局所的な水の抜き取りを与えて数値実験を行っていました。私は彼らの「現象のモデル化」という行為に強い意味を感じました。2.2 節の 3 次元モデル実験の結果に対しても、岬のまわりの複雑な流れを層モデルにおける理想化した外力に置き換えることが出来るとすれば、その外力の与え方をもって現象を理解した証にしようと考えました。

2.4 節で結果をご紹介しますが、海底斜面上の密度流を省略して岬のそばに局所的な水の注入

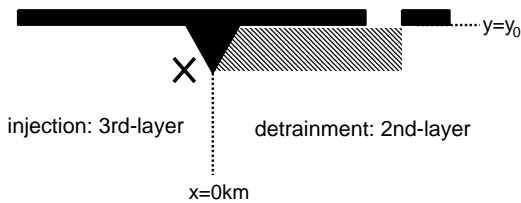


図5 5層モデル(2.4節)で使用された中層への水の注入と上層の水の抜き取りの模式図。海底地形は図2と同じ。

を行うことにしました(図5)。これは Defant³⁾ の地中海水の移動水源の記述(1節)を参考にしました。私は以前の研究 Aiki & Yamagata⁷⁾ で、地形の効果が無い状態で、局所的な水の注入実験を行い単極渦が規則的に形成される現象を得ていました。今回も面白い結果がでるだろう期待して図2の海底地形を用いて5層モデルを構築しました。上層の水の抜き方はÖzgökmenら⁶⁾に倣いました。

2.4 水の注入/抜き取りによる再実験

中層への水の注入と上層水の抜き取りによって駆動される5層モデル(図5)を用いてより詳細な解析を行い、(i) 双極渦の形成メカニズム、(ii) 海底斜面上の密度混合が上層の水を吸い込む影響、(iii) 背景流の成因と渦形成における役割などを再検討することにしました。

まず興味深いことに、いくつかの実験から上層水が吸い込まれる効果を入れなくても傾圧双極渦が形成されることがわかりました。私は2.2節のパラメータ実験の結果から海底斜面上の地中海水が周囲の水を取り込む効果によって上層の低気圧渦が生まれるとばかり思っていましたから、この5層モデルの結果は全く予想外で解釈に悩みました。

上層低気圧渦のタネを他に求めたところ、沿岸境界流と岬の非線形作用によって双極渦が形成されたと考えられました。過去の文献を色々調べてみると我々と同じような双極渦が壁から飛び出す現象を Stern & Chassignet⁸⁾ が壁に沿う傾圧流に局所的な有限振幅擾乱を与えて詳しく調べてい

ました。比較検討した結果、我々が再現した双極渦の形成も Stern & Chassignet⁸⁾ が呼ぶねじ切り効果にあてはまると結論づけました。また海底斜面上の密度混合が上層低気圧渦をやや増幅するように働き、中層のレンズが岸から離れるように促します。以上の効果が合わさって傾圧双極渦が連続的に形成されると考えられます。

沿岸境界流と岬が作用して渦が励起されることがわかりましたから(海底の密度流とは逆方向に流れる)上層の沿岸境界流(図4)の生い立ちを調べる必要がありました。中層への水の注入強度をいろいろ変えて応答を調べると上層の流れは順圧の地形波が西に伝搬した結果であることがわかりました。また海岸に沿う上層の流れを北大西洋の観測結果と照らし合わせてみると、イベリア半島の西岸に沿ってポルトガル海流という南向きの流れが報告されていて、実験と現実の流れは好ましく対応していました。

本研究の数値実験では背景流は沖合でも重要な役割を果たします。沖合で下流に流されるレンズ状中層渦の運動量を積分してみると、渦は局所的にはいろんな動きをしますが統計的には順圧流によって移流されている事がわかりました。平均流が新しく切離した渦を運び去る事によって岬から渦が次々とちぎれる現象が維持されます。

2.5 まとめ

以上の連続成層モデルと5層モデルによる解析結果によってレンズ状水塊が持続的に形成されるのに必要な条件が絞られました。この条件は3つあり、まず有限振幅擾乱を励起するための海岸線の局所的な突起の存在、地中海水渦の高気圧性回転や海面近くに低気圧渦を導くのに必要な海底斜面上の地中海水の密度混合、岬から切離した渦を運び去る背景流の存在です。

本受賞論文の成果は次のようにまとめられます。まず、数値実験からレンズ水塊形成初期の3次元な流れ場の構造を明らかにし、レンズ状渦は傾圧双極渦の一部として形成される事を示した事であり、これにより、従来の地中海水塊

に深海フロートを投入して追跡する観測では渦の力学的特性(高気圧渦)を偏って抽出していたことが分かりました。次に、海底斜面上の密度流の役割の本質をとらえ、実験構成を簡単化することに成功したことです。水の注入と抜き取りという理想化した外力を導入したことにより、(i)沿岸流と地形との相互作用、(ii)傾圧流の不安定の効果、(iii)沈み込みによる密度混合の効果等を切り離して議論することが初めて可能になり、一つ一つの役割が明確にされました。

〔回想〕

この実験を始めてから受賞論文が受理されるまでに3年あまりかかりました。その間、進ちょく状況に応じて国内学会では3件、国際学会では4件の研究発表を行い、数々のご助言を賜りました。それでもやっぱり感慨深かったのが一番最後に行った Ocean Science Meeting 2004 (米国・ポートランド)でした。8ヶ月にわたるレフリーとの折衝も佳境が過ぎ、もうすぐ論文の受理が決まる頃でした。大陸棚の密度流に関するセッションに参加しました。マイアミ大学のÖzgökmen 博士を見つけて「水の抜き取りのアイデアをお借りしました」と話しかけたら何と彼は好意的なコメントをくれた方のレフリーでした。自分の発表と質疑を済ませ席に着きました。セッションの終わり際にある見知らぬ年配の方が「君の発表は良かった」と声をかけてくれて万感の思いでした。

3 おわりに

この度は名誉ある竜門賞にご採択いただきまして大変嬉しく存じます。受賞論文は私の学位論文「海洋のレンズ状渦の形成過程の数値的研究—地中海水渦への適用—」を抜粋して投稿したものです。学部の際は KdV 方程式やソリトンの本ばかり読みふけていた私が、惑星流体力学に志したのは東京大学理学系研究科の山形俊男教授を訪ねたのがきっかけでした。教授のご専門の一部である海洋の非線形渦や中間地衡流力学のお話の中で、ジブラルタル海峡からあふれた地中海

海水が空を滑るフリスビーのように回転しながら北大西洋の深海を漂っている現象のことを教えていただきました。この不思議な現象に興味を抱いて地球惑星物理学専攻の門を叩いたのは1996年春のことになります。研究生活の始まりは今ではとても懐かしくなりますが、まだ大気海洋力学講座が文京区弥生の理学部三号館にあった時代でした。ペンキを塗り重ねた教室や図書室のたたずまいに、吉田耕三先生、松野太郎先生をはじめとする戦後の大気海洋分野を開拓した大先輩達の気概をどことなく感じたものです。

それから現在に至るまでの9年間、数値実験を中心に海洋の中層渦の形成過程の研究をしてまいりました。その醍醐味は海洋物理学の現象の豊かさに触れ、実験科学としての創意工夫に挑み、流体力学の美しさを探求することでした。とはいっても自分の研究スタイルがなかなか定まらず数々の紆余曲折がありました。指導教官であった山形俊男教授は数式やモデル開発に没頭していた私に対して現象にもっと目を向けるようにアドバイスをくださいました。本論文の執筆中は実験結果に対しての自信はあったものの自分なりの創意工夫や結論への裏付けが第一線の専門家に認めもらえるかとても不安で孤独な日々を送りました。論文が上手く書けない時には、山形教授のアドバイスを思い出し、海洋物理、数値実験、流体力学の各方面に広がりを持たせるように努めました。結果として竜門賞という最高のスポットライトをあてていただけたのは身に余る光栄でありとても勇気づけられました。

最後になりましたが、お世話になった諸先生方には心より御礼申し上げます。恩師山形俊男教授には海洋や流体の豊かさや面白さについて教えて頂きました。世界の最先端でご活躍されている山形教授から学ぶことができたのは大変幸運でした。安田一郎教授(東京大学)には博士論文の主査を努めて頂きとても感謝しています。日比谷紀之教授・升本順夫助教授・中村尚助教授(東京大学)には研究上の相談や励ましを頂きました。新

野宏教授(東京大学)・和方吉信教授(九州大学)・松田佳久教授(東京学芸大学)には東京大学海洋研究所で年末に開かれる渦の動態研究会にてお世話になりました。ここまで研究を進められたのはその他にも先輩・同僚・家族を含む多くの方々のおかげです。どうもありがとうございました。

引用文献

- 1) H. Aiki & T. Yamagata : A numerical study on the successive formation of Meddy-like lenses, *J. Geophys. Res.* **109** (2004) C06020
- 2) A. Buchan : Report on oceanic circulation, based on the observations made on board HMS "Challenger", and other observations. Report on the Voyage of Challenger, Summary of the scientific results. Vol 2 (1895)
- 3) A. Defant : Die Ausbreitung des Mittelmeerswassers im Nordatlantischen Ozean, *Pap. Mar. Biol. Oceanogr.* (1955) pp. 465-470, Pergamon, New York
- 4) S. E. McDowell & H. T. Rossby : Mediterranean water: an intense mesoscale eddy off the Bahamas, *Science* **202** (1978) 1085-1087
- 5) N. Serra, S. Sadoux, I. Ambar & D. Renouard : Observations and laboratory modeling of Meddy generation at Cape St. Vincent, *J. Phys. Oceanogr.* **32** (2002) 3-25
- 6) T. M. Özgökmen, E. P. Chassignet & C. G. H. Rooth : On the connection between the Mediterranean outflow and the Azores current. *J. Phys. Oceanogr.* **31** (2001) 461-480
- 7) H. Aiki & T. Yamagata : Successive formation of planetary lenses in an intermediate layer, *Geophys. Astrophys. Fluid Dynam.* **92** (2000) 1-29
- 8) M. E. Stern & E. P. Chassignet : Mechanism of eddy separation from coastal currents, *J. Mar. Res.* **58** (2000) 269-295