

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 7 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2012

課題番号：21540447

研究課題名（和文） 西岸境界流の早期離岸と東向ジェット形成に関する研究

研究課題名（英文） Study on the premature separation of western boundary current and formation of eastward jet

研究代表者

久保川 厚（KUBOKAWA ATSUSHI）

北海道大学・大学院地球環境科学研究所・教授

研究者番号：00178039

研究成果の概要（和文）：海洋西岸境界流の離岸と東向き続流ジェットの形成の力学を研究するために、2層準地衡流モデルとプリミティブ方程式モデルを用いた数値実験を行った。海洋循環は亜熱帯・亜寒帯循環境界において離岸する解とそれよりも上流側で離岸する早期離岸の二つの解が存在する。早期離岸したときの続流ジェットの緯度は非線形性を含むモデルパラメータにはほとんど依存しないことが明らかになった。さらに、風の南北分布に対する依存性を調べ、ジェットの緯度の決定機構について議論した。

研究成果の概要（英文）：Numerical experiments using a 2-layer quasi-geostrophic mode and a primitive equation model were carried out to study the dynamics of oceanic western boundary current separation and formation of the eastward extension jet. There are two types of stable solutions; one of them is the solution in which the eastward jet is formed along the subtropical/subpolar gyre boundary and the other is the prematurely separated jet solution in which the western boundary current separation occurs far upstream of the gyre boundary. It was found that the latitude of the prematurely separated jet was almost independent of model parameters including nonlinearity. Dependence of the jet latitude on the meridional distribution of the wind forcing was investigated and the mechanism determining the jet latitude was discussed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：数物系科学

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：海洋循環、西岸境界流、離岸、東向ジェット

1. 研究開始当初の背景

黒潮やガルフストリームのような西岸境界流は線形論で予想されるよりも低緯度で西岸境界から離岸し、強い東向きジェッ

トを形成する。そのような構造が1990年代に至るまで海洋大循環の数値モデルで再現できなかったこともあり、離岸緯度の決定機構の究明は海洋物理学上の大きな

問題であった。その後、コンピューターの発達に伴い、より分解能の高い計算が行われるようになると、モデル内でのこれらの海流は現実的な緯度で離岸するようになった。しかし何故そのような緯度で離岸し、東向きの強いジェットを形成するのかは謎のままであった。この離岸緯度に関しては、陸岸地形の影響が大きいのではないかと考えられていたが、Nakano et al. (2008) は海洋循環モデルを用いて、陸岸地形がなくとも同じ緯度で離岸することを示した。地形も関係ないとするとながその緯度をコントロールするのか。さらに、このようなジェットが何故東に延び、どのようにしてスベルドラップ内部領域に接続するのかも明らかではなかった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、理想的な状況での風成海洋循環を考え、その中で、現実に見られるような循環境界より上流側での離岸(それを早期離岸と呼ぶ)を再現し、そこに現れる東向きジェットの特性の種々のパラメータへの依存性を明らかにすることを目的とする。さらにその結果に基づき、東向きジェットの緯度の決定機構を議論する。

3. 研究の方法

本研究では、2種類の数値モデルを用いた。一つは β 平面上での2層準地衡流モデルである。もう一つのモデルはプリミティブ方程式を用いた β 平面での3次元モデルである。前者は早期離岸が起きる最もシンプルなモデルであり、このモデルを使って詳細にパラメータ依存性を調べる。後者のモデルは前者のモデル実験の結果を受け、より現実的な場でも同様になるかを確認するためのものである。

本研究では、まず、準地衡流モデルを新たに作った。ここで行う数値実験は、結果を確実にするため、高解像度での長時間積分が必要である。ここでは、準地衡流モデルで通常使われる移流スキームではなく、グリッド積分した量の発展を追うことによって計算精度の高めるIDO-CF法(Imai et al. 2008)を用いた。

モデルは矩形海洋とし、蛇行する東向きジェットの緯度を正確に見積もるため、海洋の東半分だけにのみ風強制を加えて駆動した。

準地衡流実験では、モデルを無次元化し、無次元パラメータの値を、現実的と考えられる値を中心に变化させて、パラメータ依存性を調べた。变化させたパラメータとしては、変形半径で規格化した粘性境界層(ムンク層)幅、変形半径で規格化した慣性

境界層幅(非線形性の強さ)、パーシャルスリップ境界の係数、上層と下層の層厚比、底摩擦係数である。ここで、慣性境界層幅は非線形性の強さを表す。また、海洋の大きさも2種類用意し、変形半径に対してある程度以上大きければ、広さには依存しないことも確認した。また、風の南北分布も3種の異なる関数型を準備するとともに、それぞれの線形風成循環(スベルドラップ循環)の中心緯度もパラメータとした。

プリミティブ方程式モデル実験は、主に準地衡流実験の結果を、より現実的なモデル内で確認すること、また、準地衡流モデルには現れない亜熱帯循環と亜寒帯循環の非対称性などを調べる目的で行われた。それ以外に、エネルギー状態や東向きジェットがスベルドラップ内部領域に接続する際の混合等も調べた。

4. 研究成果

(1) 代表的な解

図1に、初期静止状態から出発して統計的定常状態に達した2種類の循環を示す。サイン型の南北反対称エクマンポンピング

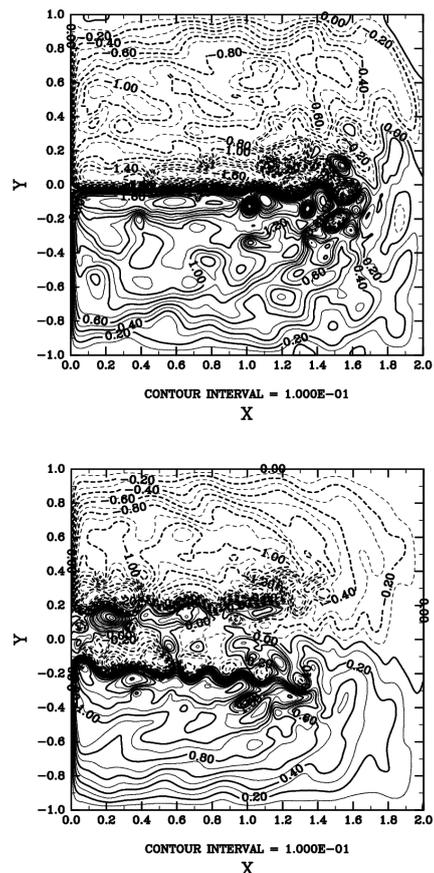


図1: 代表的な上層の流線関数分布。上図が循環境界ジェット、下図が早期離岸ジェット。

で駆動した時の上層の流線で、北半分が亜寒帯循環、南半分が亜熱帯循環に対応する。両者は若干粘性境界層幅が異なる。上の解は循環境界にジェットが存在する解である。他方、下に示す解は早期離岸の解である。これらの図はスナップショットであり、多数の渦が見られるものの、東向きのジェットは非常にしっかり存在していることがわかる。ジェットの南北には再循環領域が存在し、線形解とは大きく異なるが、循環の西向き領域は平均的には線形解であるスベルドラップ循環に一致している。図は示さないが、再循環領域での渦位はほぼ一様化しており、下層の渦位はジェットの下で一様化している。このような渦位分布とジェットの位置及びそこでの渦位ギャップを与えて、東西渦位フラックスに関する制約条件の下に渦位の式を解けば、海洋西部での東西流の南北分布はかなりの程度再現される。

(2) 非線形性と粘性に対する依存性

図2に横軸に粘性境界層幅を、縦軸に慣性境界層幅を取った時の、ジェットの y 座標を示す。ここでは亜熱帯循環を対象としている。南北座標は循環境界をゼロとし、亜熱帯循環の南端が -1 である。また、西岸境界には粘着条件を課している。*が計算点であるが、0か、 -0.2 辺りの何れかしか取れないことがわかる。すなわち、解は、循環境界に沿うものと、早期離岸の解の2種類で、早期離岸する解のジェットの緯度は非線形性にも粘性にもよらないということになる。また、解の初期値依存性を調べたところ、ほとんどの領域において、両方の解が存在しうることがわかった。そこで、

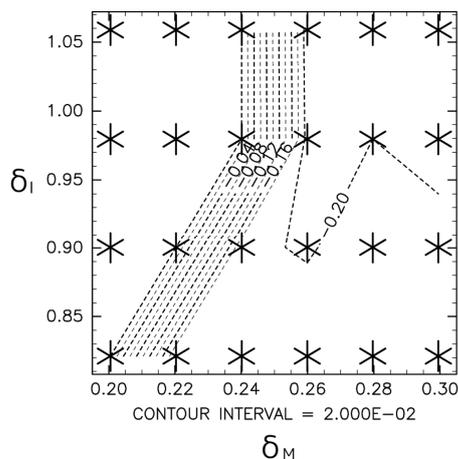


図2：初期静止から計算を始めたときの順定常状態でのジェットの y 座標。 $y=0$ が亜熱帯循環の北境界。横軸が粘性境界層の幅、縦軸が慣性境界層の幅。

亜寒帯域には強制を入れない等の非対称な強制を試してみた。その結果、早期離岸の解の方が構造的に安定であることが示唆された。

(3) その他のパラメータ依存性

次に、ジェットの緯度が境界で生じる渦度に依存する可能性を考え、パーシャルスリップ境界条件の実験を行った。パーシャルスリップ係数を変化させ、スリップ条件に近づけば、早期離岸の解は生じ得なくなるが、早期離岸が生じるときのジェットの緯度は粘着条件の場合と同じであった。

底摩擦に対する依存性は、非常に強い場合には、下層の渦位一様化が抑えられ、ジェット自体が弱くなる。そのような場合には、早期離岸したジェットの東への伸びが小さくなり、その緯度も標準実験に比べると循環境界に近づく。しかし、そうでない場合には、ほとんど標準実験と変わらない。

層厚比は、下層が上層に比べてある程度以上厚くなると、早期離岸は起きなくなる。早期離岸には、傾圧不安定による順圧再循環の形成が不可欠であることを示唆する。また、層厚比を $1:1$ にすると早期離岸は起きない。この場合には、不安定性が強すぎて、広い領域で渦位が一様になってしまうせいであると考えられる。現実的な層厚比を中心とする比較的広いパラメータ範囲で早期離岸の解が生じ、早期離岸が生じる場合には、ジェットの緯度は層厚比にはほとんど依存しない。

(4) 風分布に対する依存性

早期離岸が起きるかどうかは、内部パラメータに依存するが、早期離岸が起きるときの解の様子は、内部パラメータの詳細には依らないことが明らかになった。そこで、風の南北分布に対する依存性を調べた。南北分布に対する依存性は以下のようにまとめられる。

ジェットの緯度は線形風成循環の中心緯度を北に動かせば北に、南に動かせば南に移動する。このとき、ジェットの中心緯度はスベルドラップ循環の流線値が 0.5 (循環境界と循環中央での値の半分) の辺りに来る。スベルドラップ循環の南北構造がサイン型の場合 (流線関数の南北分布の曲率が負の場合) 0.5 より大きめになる傾向がある。他方、三角形型の場合 (曲率がゼロ) は、ジェット中心での流線値はサイン型の場合よりも少し小さくなり、 0.5 に近づく、また、楔型 (曲率が正) の場合には線形の場合よりもさらに小さくなるという結果が得られた。

ジェット中心の流線値が 0.5 近くになる

のは、ジェット自体がスベルドラップ領域の東向き流量の大半を担っているからであると解釈される。他方、曲率への依存性は、ジェットの南北の再循環が対称であろうとする傾向と、スベルドラップ流線の南北分布の兼ね合いによると考えられる。

(5) プリミティブ方程式モデルによる結果
3次元プリミティブ方程式モデルを行い、準地衡流モデルで得られた結果がより現実的世界にも適用できるかを、主に風分布依存性の観点から調べた。その結果、準地衡流モデルとほぼ同様の結果が得られた。ただし、プリミティブ方程式モデルでは、亜熱帯循環と亜寒帯循環で若干の違いがあり、それは今後の課題である。

また、ジェットの形成と内部領域への接続の仕方も調べた。ジェットの中では不安定性により渦位の一様化が生じ、その東端では、波動により必要な渦位が供給されスベルドラップ領域につながることも明らかになった。

ここに記した本研究成果の主要部分は現在学術誌に投稿中である。

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2件)

- ① 久保川厚、沿岸・陸棚スケールと大洋スケールの海洋前線の違い、沿岸海洋研究、査読有、50巻、87-94。
- ② Mizuta, G., Role of the Rossby waves in the Broadening of an Eastward Jet., Journal of Physical Oceanography, 査読有, Vol. 42, 2012, p476-494

[学会発表] (計8件)

- ① 陶泰典・久保川厚、西岸境界流の東向き続流ジェットの緯度について(続)、2013年度日本海洋学会春季大会、2013年3月22日、東京海洋大学品川キャンパス(東京都)
- ② 水田元太、増田章、表層に振動を与えた場合の波による深層平均流形成、2013年度日本海洋学会春季大会、2013年3月24日、東京海洋大学品川キャンパス(東京都)

- ③ 久保川厚、沿岸・陸棚スケールと大洋スケールの海洋前線の違い、2012年度日本海洋学会春季大会沿岸海洋シンポジウム、2012年3月26日、筑波大学(つくば市)
- ④ Sue, Y. and Kubokawa, A., Latitude of eastward jet prematurely separated from the western boundary in a two-layer QG model., 2012 AGU Ocean Science Meeting, Salt Palace Convention Center, Utah, USA, 20 Feb. 2012.
- ⑤ 陶泰典・久保川厚、西岸境界流の東向き続流ジェットの緯度について、2011年度日本海洋学会秋季大会、2011年9月29日、九州大学筑紫キャンパス(春日市)
- ⑥ 陶泰典・久保川厚、IDO-CF法の準地衡流モデルへの適用—高精度モデルにおける西岸境界流の離岸、2011年度日本海洋学会春季大会、2011年3月(震災のため大会は中止となり、要旨集のみでの発表)
- ⑦ 久保川厚、再循環を伴う東向きジェットの西岸域からの侵入、2010年度日本海洋学会秋季大会、2010年9月8日、東京農業大学オホーツクキャンパス(網走市)
- ⑧ Mizuta, G., Radiation processes of the Rossby waves from a recirculation gyre and their effects on mean flows., European Geosciences Union, General Assembly 2010, Austria Center Vienna, Austria, 04 May 2010

6. 研究組織

(1) 研究代表者

久保川 厚 (KUBOKAWA ATSUSHI)
北海道大学・大学院地球環境科学研究所・教授
研究者番号: 00178039

(2) 研究分担者

水田 元太 (MIZUTA GENTA)
北海道大学・大学院地球環境科学研究所・助教
研究者番号: 30301948