

平成22年 5月20日現在

研究種目：基盤研究 (C)
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18540429
 研究課題名 (和文) 不安定渦と波動による再循環セル形成の力学-プリミティブ方程式系モデルを用いて-
 研究課題名 (英文) Study on the formation mechanism of recirculation cells by eddies and waves by using a primitive equation model
 研究代表者
 水田 元太 (MIZUTA GENTA)
 北海道大学・大学院地球環境科学研究院・助教
 研究者番号：30301948

研究成果の概要：黒潮やメキシコ湾流の様な強い海流（以下、ジェット）の付近には再循環とよばれる強い循環が存在する。本研究では、再循環の出来るしくみを知るために、渦、ロスビー波および再循環の相互作用を数値実験によって調べた。ジェットの流れは不規則に変動するにも関わらず、そこから発生するロスビー波は常に同じ速さで伝わるという明瞭な規則がある。これはロスビー波の発生原因を知る鍵となる。さらに、ロスビー波が発生し、伝わることは再循環の維持形成に重要であることが示唆される。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,000,000	0	1,000,000
2007年度	700,000	210,000	910,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	2,600,000	480,000	3,080,000

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・陸水学

キーワード：ジェット、再循環、ロスビー波

1. 研究開始当初の背景

黒潮、メキシコ湾流など海洋の強い流れ（ジェット）の存在する海域では流れの不安定のために渦やロスビー波が発生し、それらが平均的な大規模循環と複雑に非線型相互作用をすることによって循環全体が形成維持されている。この様な海域では再循環（再循環セル）とよばれる顕著な循環が存在することが数値モデル(Holland and Rhines, 1980)、観測の両方で示されている。しかしその詳しい形成のしくみについては、中規模渦（以下、渦とよぶ）による渦位の一様化が

重要であるとする説 (Holland and Rhines, 1980; Jayne and Hogg, 1996)、ロスビー波による運動量等の輸送が重要であるとする説 (Spall, 1994; Malanotte-Rizzoli et al., 1995) など多くの議論がなされているものの、今尚十分には理解されていない。

一方、再循環の形成に重要であるという説がありながら、ジェット付近のロスビー波については、それ自体に多くの未解明な点がある。すなわちジェットからロスビー波が放射されるという事実そのものは数値モデル (Holland, 1978) と観測 (Luyten, 1977,

Hogg 1981)の両方でよく知られているが、その詳しい性質や発生のおきについては、線型安定解析(Talley, 1983)など幾つかの研究がなされているものの十分に理解されているとは言い難い。

2. 研究の目的

本研究では黒潮、メキシコ湾流に代表されるジェットにおける平均流と渦、ロスビー波の様々な相互作用の過程を明らかにすることを目的とする。そのために、まず最初にジェットから放射されるロスビー波の性質、すなわち平均流やその不安定によって発生する渦との関係を詳しく調べ、その放射のメカニズムを考察する。次に、ロスビー波、渦と平均流の相互作用について調べる。特に再循環の形成に対する、渦、ロスビー波それぞれの役割について着目する。

3. 研究の方法

前節で述べられた目的のために、3次元プリミティブ方程式系に基づくモデルであるRegional Ocean Modeling System (ROMS; Haidvogel et al., 2000)を用いた数値実験を行った。実験条件としては、ベータ平面上の矩形の海盆の西側境界から黒潮、メキシコ湾流に相当するジェット状の流入(東向き流)を与え、東側境界で海洋の内部領域の流れに相当する緩やかな流出を与えた。ジェットの空間構造と密度成層は黒潮続流に近いものを与えた。境界から与えられたジェットによる不安定が十分発達し、統計的定常に達した状態について解析を行った。解析手法には周波数空間上の経験的直交関数(FEOF)を用いた解析を導入した。この手法はロスビー波の様に位相が伝播する変動を検出することが出来る上、周波数帯ごとに卓越する運動を取り出すことが出来る点で、理論的な解釈に有用である。また渦位やエネルギーの収支解析も併せて行った。

4. 研究成果

(1) 平均流と渦、ロスビー波の空間特性

統計的平衡状態において東向きのジェットの南北両側に西向きの流れが生じ、2つの再循環セルが形成される(図1)。流れの擾乱は表層のジェットの流軸付近で最も強く、流軸から離れるに従い弱くなる。これらの擾乱の性質は西側境界から再循環の東の端にかけての西側領域と、それより東の東側領域の2つの領域で対照的な性質を示す。すなわち、西側領域の擾乱は比較的高周波数(数10日周期程度)であり、位相は東向きに伝播し、

表層ほど振幅が大きくなる様な傾圧的構造を持つ。この高周波数擾乱はジェットの流軸に捕捉され、後に述べる通りジェットの傾圧/順圧不安定による渦とみなすことが出来る。これに対し、東側領域の擾乱は比較的低周波数(100日周期程度以上)であり、位相は西向きに伝播し、順圧的構造を持つ。これらの擾乱は順圧ロスビー波であり、ジェットの流軸から遠方へ伝播する(図1, b)。

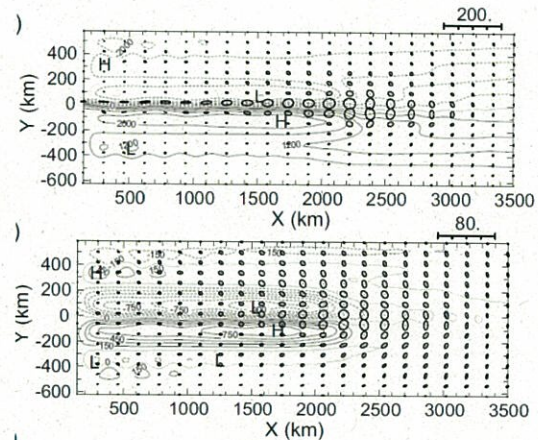


図1、時間平均された圧力の等値線と、流速の変動成分のvariance ellipse。上、下の図はそれぞれ表層と深層の代表的な流れの分布を表す。y=0付近に東向きジェット、y=±150 km付近に西向き再循環が見られる。

(2) ロスビー波の特性と放射過程の考察

FEOFの手法を用いて、ジェットから放射されるロスビー波の性質を周波数帯ごとに詳細に調べた所、以下の様な特徴が明らかとなった。

- ロスビー波の波数ベクトルは低周波数ほど南北成分が大きく、高周波数ほど西向きに近くなる。
- ロスビー波の周波数に上限があり、それ以上高周波数のものは存在しない。

さらに、これらの特徴はロスビー波の位相速度の東西成分(C_x)が再循環の最大流速(U_m)と非常に近い値をとるために、分散関係の制約上出てくるものであることが分かった。実験パラメータを変化させながらさらに実験を行った所、流入の最大値を U 、惑星ベータの大きさを β 、としたときに、ロスビー波の位相速度 C_x は U によって、波数(k, l)をいわゆるRhines scaleの一種である U/β の平方根によって規格化すると実験条件によらず常に一定となることが分かった。

次にこの様にジェットから放射されるロスビー波に顕著な規則性が見られる原因を説明するための仮説として、一つの解析モデルを提案した(図2)。再循環内部では渦位がほぼ一様であることから、渦位が一様な領域と、流れのない外部領域の2つの領域からなる平均場を考える。初期にジェットの不安定によって生じた渦にとまらう渦位のパッチが渦位一様化領域に入った場合の時間発展を解析的に調べると、再循環中によって移流される渦から外部領域へとロスビー波が放射されることが示される。また十分時間が経った極限においてロスビー波の東西位相速度は再循環の最大流速 U_m に一致する。これらの解の性質は数値実験で得られたロスビー波の性質をよく説明する。ここで示された解は、従来一般的な線型安定性解析とは異なり、基本場に対するノーマルモードだけではなく連続スペクトルを考慮することによって初めて得られる。物理的にはジェットの不安定によって擾乱が発達する初期の過程ではなく、擾乱が発達し中規模渦が発生した状態よりも以降の時間発展の方がロスビー波の発生に重要であることが、このモデルによって新たに示唆される。

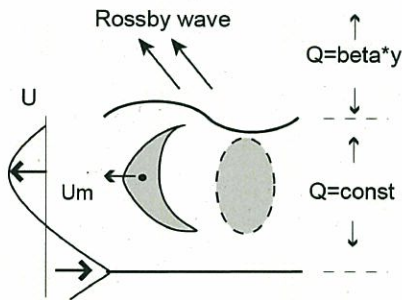


図2。ロスビー波の放射されるしくみを説明する解析モデルの見取り図。渦位 Q が一様な領域内に初期に与えられた渦位擾乱(楕円形影)が時間発展をする。

(3) 渦、波動と平均流の相互作用

すでに(1)節で述べられた通り、流れの擾乱の性質は、モデル領域の東部と西部で大きく異なり、それと対応して渦、波動と平均流の相互作用の仕方も、これら2つの領域によって大きく異なる。すなわちジェットが存在する西部領域では、高周波数の擾乱が卓越しているが、この擾乱は傾圧不安定と順圧不安定の混合されたものであることが分かった。そのため、この領域ではジェットから擾乱へと位置エネルギーと運動エネルギーが輸送され、擾乱が成長する。また擾乱は平均場の渦位勾配をならす方向に渦位を輸送す

(図3、 $x=2000$ km 付近より西側)。

これに対し、ロスビー波の放射される東側領域では、擾乱と平均流の間のエネルギーのやりとりは、総量としては小さい。さらに、擾乱による渦位輸送は再循環の東端の領域における平均場の渦位勾配を強める方向に働き、北部で収束、南部で発散となる様な顕著な双極子型の構造を形成する(図3、 $x=2100$ から 2400 km 付近)。この様な擾乱による渦位の収束発散は平均場の再循環を加速する方向に働き、再循環の形成維持に重要な役割を果たしていることが強く示唆される。

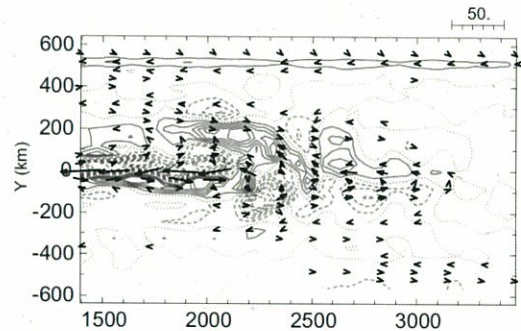


図3。擾乱による渦位輸送のベクトルとその収束発散の等値線。実線は収束、破線は発散をそれぞれ表す。

この様な擾乱による渦位輸送の双極子構造の形成には、ロスビー波と渦のどちらがより寄与しているかを確認するために FDEOF 解析による分析を行った。その結果、ジェットの不安定波動として特徴づけられる、比較的高周波数の擾乱は、この様な双極子構造に形成には寄与せず、むしろロスビー波として特徴づけられる、低周波数の擾乱の寄与がほとんどであることが示された。このことは波動が発生し伝播する過程が再循環の形成に重要であることを示唆する。実際、Haidvogel and Rhines (1983)により行われた、理想化された振動源によってロスビー波を起こす数値実験においても、図3と同様の擾乱による渦位輸送の収束発散構造が見られる。

(4) まとめと議論

本研究では、3次元プリミティブ系方程式系を用いた数値実験によって、ジェットと渦、ロスビー波および再循環の相互作用について調べた。境界からの流入に伴うジェットが存在する西部領域では、傾圧/順圧不安定が起り、擾乱が成長する。これに対し東部領

域ではロスビー波の放射が起きる。放射されたロスビー波の東西位相速度と再循環の最大流速は非常に近い値をとり、このことからロスビー波の発生する原因として、ジェット的不安定で出来た渦が再循環によって移流されることが重要であるということが強く示唆される。これらのロスビー波による渦位輸送は平均場の再循環を加速する方向に働き、ロスビー波の発生、伝播過程が再循環の維持形成に重要であることが示唆される。

先行研究ではジェットからロスビー波が放射されるしくみが、より簡略化された解析モデルや数値実験を用いて議論されて来たが (Talley, 1983; Hogg 1988)、これらの研究ではロスビー波の位相速度と再循環の流速が一致する様な傾向は見られない。これに対し、本研究では数値実験によって不安定なジェットを直接シミュレートすることによって、ロスビー波の放射に関する新たなモデルを提唱することが出来た。また、ロスビー波が再循環の維持形成に重要であることを支持する結果を、この様な数値実験の立場から得ることが出来た。これらの成果は今後、再循環の形成のしくみをさらに解明して行く上で重要な手掛りとなると期待される。

本研究では準地衡流方程式系ではなく、プリミティブ方程式系に基づく数値モデルを用いた。その結果、ジェットの北側に放射されるロスビー波が南側に放射されるものに比べて強くなることが分かった。同様のことは、メキシコ湾流域の観測でも示されている (Bower and Hogg, 1992)。本研究の実験結果は観測された現象のメカニズムについて興味深い示唆を与えるものであり、今後のさらなる解析の発展が期待される。

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)

Genta Mizuta, Rossby wave radiation from an eastward jet and its recirculations, Journal of Marine Research, 査読有, 67, 2009, 185-212

水田元太, 理想化された数値実験に見られるジェットに沿った層厚渦フラックスと「流軸移動モデル」の関係、九州大学応用力学研究所報、査読無、133、2007、91-98

[学会発表] (計 3 件)

水田元太, 再循環からのロスビー波の放射過程—平均流との関係、2009 年度日本海洋学会春季大会、2009 年 4 月 8 日、東京 (東京海洋大学)

水田元太, 東向ジェットと再循環からのロスビー波の放射 (2)-パラメータ依存性、2007 年度日本海洋学会秋季大会、2007 年 9 月 27-29 日、沖縄県 (琉球大学)

水田元太, 東向ジェットと再循環からのロスビー波の放射、2007 年度日本海洋学会春季大会、2007 年 3 月 24 日、東京 (東京海洋大学)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし