

# Study on extratropical Rossby waves in a high resolution ocean GCM simulation

(高解像度海洋大循環モデルシミュレーションにおける  
中緯度ロスビー波に関する研究)

## 学位論文内容の要旨

この論文では、ロスビー波に対する背景流および小スケール底地形の影響を明らかにし、ロスビー波理論を再考する。基本的な海洋ロスビー波理論では、平坦な底地形かつ背景流を無視し、惑星 $\beta$ を唯一の復元力としてロスビー波を記述している(古典理論)。この場合、波は順圧モードと傾圧モードに分離できる。順圧モードのロスビー波(以降、順圧ロスビー波)は、鉛直一様な構造で、大洋を一週間程度で伝播する。傾圧モードにおける卓越モードの波(以降、傾圧ロスビー波)は、主水温跳層を境に振幅が反転した構造で、大洋を数年から数十年で伝播する。

ところが、近年の人工衛星海面高度計観測により、傾圧ロスビー波が古典理論で予想される長波よりも速く伝播しており、その傾向は高緯度ほど顕著であるという報告が多数なされている。このことを受け、新たに背景場の傾圧流を含めた理論、さらに小スケール底地形による Bottom pressure decoupling (BPD) の理論が提示された。実際にはこれらの効果が相補的に位相速度を速めていると予想されるが、確証を得るには至っていない。そこで、本研究では、内部構造を詳細に解析できる高解像度海洋モデルシミュレーションの出力結果を解析し、ロスビー波に対するこれらの影響について論考した。

まず、特に明瞭な波が見られる  $32^{\circ}\text{S}$  に注目すると、モデル内のロスビー波の位相速度は、過去の観測結果同様に古典理論の予想よりも大きいことが確認された。次にその鉛直構造を調べたところ、この波は、底層における振幅が殆んど0となる BPD の構造を示していたが、BPD の解よりも強い上層捕捉傾向を持っていた。BPD にさらに傾圧流効果を加味すると、理論解の上層捕捉傾向は増し、モデル内の波に極めて近い構造を持つことが分かった。したがって、モデル内の傾圧ロスビー波は傾圧流と小スケール底地形の両効果を受けていると示唆された。

しかし、傾圧流と BPD を考慮して求めた長波の位相速度は、モデル内の波よりも過大評価であった。この相違は、波の分散性が無視されていたためであり、有限波数を考慮して理論解を求めると位相速度はモデル内の波に一致した。このようなモデル内の波と理論解の位相速度の関係は他の緯度でも確かめられ、位相速度の南北分布は、傾圧流と BPD さらに分散性を考慮することで十分に表現できることが示された。したがって、過去の観測研究で報告されている位相速度の古典理論の予想からの増幅は、傾圧流効果と BPD 効果に起因するものと考えられる。

また、傾圧ロスビー波に対する傾圧流効果と BPD 効果の相対的な寄与は場所に依存することが分かった。BPD 効果は南北太平洋共に高い寄与を示しており、無視することのできない効果である。一方、傾圧流効果の寄与は南太平洋では相対的に小さいが、北太平洋の  $30^{\circ}\text{N}$  以北において局所的に増大し、BPD 効果と同程度の大きさを持っていた。興味深いことに、当該緯度帯は、北太平洋亜熱帯モード水の形成域に位置しており、モード水が傾圧流効果を強めていることが示唆された。

以上より、シミュレーションにおけるロスビー波は BPD の構造を持ち、さらに BPD はロスビー波にとって重要な効果であることが明らかとなった。しかし、これまで扱ってきた小スケール底地形の効果を意味する BPD が、実際に海洋モデルの底地形の影響で引き起こされているかは不明である。そこで、波と小スケール底地形の相互作用を記述する理論モデルを用いて、BPD 構造が海洋モデルの底地形の小

ケール成分によって生じ得るか検証を行った。

これまでの結果と対応づけるため、 $32^{\circ}$  S 周辺の底地形に注目し、地形が東西および南北に変化する場  
合についてそれぞれ解析を行った。当該海域におけるロスビー波は、東西に 500km、南北に 1000km の波  
長を持っていた。そこで、波より十分小さい 100km 以下スケールの底地形を空間スペクトルより抽出し、  
その影響を調べた。その結果、東西地形効果が働くと、ロスビー波は底層において傾圧モードの 20% まで  
振幅が減衰し、十分 BPD の構造になり得ることが分かった。一方、南北地形効果の場合は、ロスビー波  
の底層の振幅は著しく 0 に近く、東西地形よりも影響が大きいことが分かった。南北地形変化の影響が  
卓越するのは、ロスビー波の東西波長が南北波長に比べて小さいことが要因と考えられる。この結果は、  
シミュレーションで見られた BPD 構造が実際に小スケール底地形で生じていることを示しており、また、  
先の理論解における BPD の仮定が妥当であることの裏付けとなっている。

小スケール底地形が働くと、最終的にロスビー波は上層捕捉波と下層捕捉波に分離される。もし、大  
洋を一週間程度で伝播する順圧ロスビー波が底地形の影響を強く受けるとすれば、海洋の順圧応答はこ  
れまで考えられていたものと異なることになり、海洋応答理論の再考が必要となる。そこで、順圧ロス  
ビー波によってもたらされると考えられてきた年変動スケールにおけるスベルドラップ平衡の成立とそ  
の時空間スケールでの流れの鉛直構造を、海嶺等の大規模地形が存在しない北太平洋東部において調べ  
た。その結果、地衡流量と海上風フォーシングから見積もられるスベルドラップ流量には、年変動の位  
相および振幅に十分な一致が見られ、スベルドラップ平衡が成立することが示めされた。また、スベル  
ドラップ平衡の成立する領域における南北流速の東西平均値は鉛直にほぼ一様に分布しており、流速場  
の年変動は順圧的であることが分かった。

この結果は、順圧ロスビー波が小スケール底地形の影響を殆んど受けずに存在していることを示唆す  
る。すなわち、順圧ロスビー波の大洋横断の時間スケールにおいては小スケール底地形の効果は無視で  
きる程度に過ぎない。このことから、小スケール底地形は傾圧ロスビー波にのみ影響し、上層捕捉波を  
生成するものと考えられる。

以上を総括すると、本研究の結果は、傾圧ロスビー波に対しては、傾圧流や小スケール底地形の影響  
が重要であり、現実海洋におけるロスビー波の理論的記述にはこれらの効果を含む必要のあることを指  
摘する。本研究で示された拡張理論を基に考えると、ロスビー波は励起された時点では、順圧モードと  
傾圧モードに近いが、小スケール底地形の影響を受けて傾圧モードの波は上層捕捉波になる。上層捕捉  
波はモード水の形成域などの特殊な海域を通過する際に傾圧流効果を受け、上層捕捉傾向が強まり、ま  
た位相速度も増加する。順圧モードの波は小スケール底地形の影響を受けずに海洋の順圧応答を導くも  
のと考えられる。また、本研究結果は、海洋モデルの改善にも示唆を与える。小スケール底地形に起因  
する BPD は、傾圧ロスビー波よりも十分小さい数 10km スケールの地形効果が重要であることから、ロス  
ビー波の応答機構をより正確に再現するには、それに相応な解像度を有する必要があると考えられる。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 久保川 厚  
副 査 教 授 池 田 元 美  
副 査 教 授 三 寺 史 夫  
副 査 助 教 水 田 元 太  
副 査 教 授 見 延 庄士郎 (大学院理学研究院)

## 学 位 論 文 題 名

### Study on extratropical Rossby waves in a high resolution ocean GCM simulation

(高解像度海洋大循環モデルシミュレーションにおける  
中緯度ロスビー波に関する研究)

ロスビー波は大規模・長周期の大気海洋変動を理解する上で最も基礎的な波動であるが、現実の海洋中のロスビー波の伝播特性が定量的に示されたのは、人工衛星による海面高度の観測が可能となつてからのことである。Chelton and Schlax (1996) は、そのような観測により、傾圧ロスビー波と思われる西方に伝播する海面高度アノマリを見出し、さらに、その中緯度における伝播速度は底が平らな静止海洋を仮定した理論(古典理論)の予想よりも顕著に速いことを示した。この西方伝播シグナルの伝播速度に関して、背景傾圧流に伴う南北渦位分布の変化によるロスビー波の西方伝播速度の増大(Killworth et al., 1997等)と、底が凸凹していることにより下層での圧力変動が上層のものと分離する(Bottom pressure decoupling)ことによる速度増大(Tailleux and McWilliams, 2001)の理論が提出された。しかし、海洋データの不足により、それらのどちらが効いているのか、もしくは、それらで本当に説明できるのかは明らかではなかった。

申請者は、この問題に決着をつけるべく、鉛直構造まで分かる地球シミュレータで計算された高解像度海洋モデルシミュレーションデータ(OFESデータ)を解析し、それと、両効果を含む理論との比較を行った。まず、南太平洋南緯32度でのOFESデータのコンポジット解析から、このモデルの中の西方伝播シグナルが現実の海洋におけるものと同様に古典理論の予想よりも顕著に速いこと(長波速度の約1.5倍)を確認し、次に、その鉛直構造は上記の両効果を含む理論(拡張理論)と高い類似性を示し、伝播速度は有限波数の効果を含めることにより定量的に説明できることを示した。さ

らに、両半球太平洋の緯度25度から40度までの位相速度と理論の比較を行い、これらの緯度帯では、どの緯度でも古典理論よりも速く、かつ、有限波数の効果を含めれば、この拡張理論で定量的に説明できることを示した。また、大半の緯度では伝播速度の増大にはBottom pressure decoupling効果がより重要であるが、モード水らしき構造が見られる領域では、背景傾圧流の効果も同程度に重要となるということを示した。

次に、申請者は、OFESデータに見られたBottom pressure decouplingが、実際に、モデル内の小スケールの海底地形によって引き起こされているかどうかを明らかにするために、小スケールの底地形による流れと大規模な波の相互作用を、1次元地形を仮定する地形上ロスビー波の理論(Bobrovich and Reznik, 1999)に基づいて調べた。モデルの南緯32度近傍の小スケールの底地形の影響を、南北一様と東西一様な場合を仮定して、相互作用項を理論的に計算し、このモデルで解像される小スケールの底地形はBottom pressure decouplingを引き起こすのに十分であるという結論を得た。

最後に、申請者は、海洋の順圧応答に小スケールの底地形が影響するか否かを明確にするために、季節変動成分を用い、スベルドラップ流とモデルの南北流量およびその鉛直構造を比較した。その東方に大規模な底地形が存在しない領域では、1ヶ月平均のスベルドラップ流量とモデルの南北流量はよく一致し、東岸近くの傾圧変動を除けば、東西平均された南北流はほぼ順圧的であった。このことは、1ヶ月以内の現象である大規模な順圧応答、すなわち、大規模な順圧ロスビー波に対しては、Bottom pressure decouplingは効かないことを意味する。

この研究は、海洋変動を考える上において最も基礎となるロスビー波の伝播速度が理論的予想と一致しないという問題を中心に調べ、さらに、それに伴って生じた疑問に答えていったものである。特に、線形理論にBottom pressure decouplingと背景傾圧流効果の両方を含めることにより、鉛直構造と位相速度がともに説明できることを示したことは、シミュレーションモデル内の波動の解析ではあるものの、海洋学上の重要な結果であると考えられる。

審査委員一同は、これらの成果を高く評価し、また研究者として誠実かつ熱心であり、大学院博士課程における研鑽や修得単位などもあわせ、申請者が博士(地球環境科学)の学位を受けるのに十分な資格を有するものと判定した。