

学 位 論 文 題 名

Analyses of Kuroshio Extension variability explored
through assimilation of TOPEX/POSEIDON altimeter
data into quasi-geostrophic models using both nudging
and adjoint methods

(ナッジング法と随伴方程式法を用いた準地衡流モデルへの
TOPEX/POSEIDON 高度計データの同化による黒潮続流域の変動現象解明)

学位論文内容の要旨

要旨

黒潮続流域にはメソスケール現象 (中規模渦や蛇行など) と大スケール現象 (拡張状態と収縮状態およびその間の遷移) があり、これらはそれぞれ先行研究において衛星高度計データなどを用いて研究されている。本研究で用いたTOPEX/POSEIDON (T/P) データによると南方再循環流は1993年から1995年には拡張状態、1996年から1997年には収縮状態を示しており、収縮状態期では再循環流に3つの明確な低気圧性渦が存在した。衛星高度計データは表層のみの情報をあたえるものであり、海洋内部の情報を直接得ることはできない。また完全なモデルを用いるとしても海洋メソスケール現象の場合、個々の表層の渦/蛇行現象に影響を与える下層の完全な初期場を得ることは不可能であるため、表層の情報を含む観測データをモデルに取り込み下層場の情報を得ることができるデータ同化が有効である。

本研究では2層および3層準地衡流モデルへのT/Pデータのナッジング法と随伴法を用いた同化によって、黒潮続流域におけるメソスケール現象と大スケール変動現象について調べた。一般に随伴解はモデルとデータの差を最小化する方法でありナッジング解よりも連続的であり物理的に整合性が高い。まずナッジング解を求めたところ、10日ごとの同化によるモデル解の修正幅からみてほぼ妥当と推定される場が形成された。しかしナッジング解では (1) 上流側において渦同士の相互作用による西向き移動速度が大きくなる、(2) 表層にできた渦が下層に順圧成分を引き起こし、その順圧性渦がShatsky Riseの周辺を海底地形勾配にそって時計回りに回転することによって、同化の修正幅が大きくなる欠点があることがわかった。随伴法を用いるとこれらの問題を解消してナッジング解よりも連続的な解を得た。

また同化解の解析については、表層と下層の位相のずれによって傾圧不安定インデ

ックスを定義し、メソスケール変動の原因と考えられる傾圧不安定について調べたところ、Shatsky Rise西側の黒潮流速の大きい領域において傾圧不安定が顕著であった。またその領域における傾圧不安定インデックスの時間変化を調べると1993年から1996年まではナッジング、随伴解はともに減少しており、傾圧不安定による平均場から擾乱場へのエネルギー輸送によって下流に渦が形成されたことを示唆しており、この期間ではナッジング法が信頼できることがわかった。しかし1996年から1997年後半にかけてはまったくナッジング解と随伴解が逆の変化、すなわち随伴解では1996年から1997年前半にかけて急速に減少し、1997年前半から後半にかけて急速に増加した。1996年から1997年前半にかけての変化は平均場から渦場にエネルギーを供給する傾圧不安定がなくなった結果として渦活動が減衰し平均場が強められたものと解釈できる。また1997年前半から後半にかけては強化された平均場が傾圧不安定を引き起こしたものと解釈できる。この短い期間中においてはナッジング法の結果が力学的解析に適していないと判断できる。すなわち黒潮続流域における大スケール変動とメソスケール変動が傾圧不安定によって互に関連していることが示唆された。また同化解の解析においては各層における緯度平均からのずれと緯度平均場の運動エネルギー、各層間のポテンシャルエネルギーおよびそれらの間のエネルギー輸送計算をあわせて行った。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 池 田 元 美

副 査 教 授 久保川 厚

副 査 教 授 三 寺 史 夫

副 査 助 教 水 田 元 太

副 査 教 授 淡 路 敏 之 (京都大学大学院理学

研究科)

学 位 論 文 題 名

Analyses of Kuroshio Extension variability explored through assimilation of TOPEX/POSEIDON altimeter data into quasi-geostrophic models using both nudging and adjoint methods

(ナッジング法と随伴方程式法を用いた準地衡流モデルへの
TOPEX/POSEIDON 高度計データの同化による黒潮続流域の変動現象解明)

海洋には気象の総観規模現象とよく似た中規模現象があるが、気象の再解析データと異なり、海洋にはそれを記述するものがほとんど存在しない。その第一の理由はデータが決定的に少ないことである。もし海洋の再解析データを作ることが可能になれば、現実には起きつつある海洋中規模現象を力学的に記述し、海の天気予報とも言える予報業務を展開することも夢ではない。しかし、海洋のデータ、特に亜表層以深のデータが少ない状況においては、いわゆるnudging法でデータを内挿・外挿することは難しく、どうしてもより高度な手法を用いることが求められる。

中規模現象の活発な海域である黒潮続流域には、中規模現象（中規模渦や黒潮蛇行など）と大規模場（黒潮南方再循環の拡張状態と収縮状態およびその間の遷移に代表される）がある。これらは初期の先行研究においては観測船や係留による観測、近年は衛星データなどを用いて研究されてきた。本研究で用いたTOPEX/POSEIDON (TP) データによると、南方再循環は1993年から1995年には拡張状態、1996年から1997年には収縮状態を示しており、収縮状態期ではShatsky Riseと呼ばれる海底地形付近で、黒潮続流が2つ流れに分岐していることがわかった。

衛星高度計データは表層の力学場を与えるものであり、主温度躍層以深（中層と下層）の情報を直接得ることはできない。また完全なモデルを用いるとしても、完全

な初期条件はないので、中規模現象である個別の渦や蛇行の構造、さらに中層・下層まで現実の場を再現することは不可能である。そこで衛星データをモデルに取り込み、中下層場を再構築するデータ同化を試みた。データ同化手法として2層および3層準地衡流モデルへのT/Pデータのnudging法とadjoint法を用い、そこで得られた黒潮続流域における中規模現象と大規模場の力学について調べた。まずnudging解を求めたところ、10日ごとの同化によるモデル解の修正幅から見て、ほとんどの期間で妥当な場が形成された。しかしモデル領域の上流側において、渦同士の相互作用による西向き移動速度が大きくなる場合に、同化の修正幅が大きくなる欠点があることがわかった。

一般的に、adjoint法を用いると、モデルとデータの差を最小化し、さらに時間方向にも連続な解を求めることが可能である。本研究で開発した方法は次のとおりである。まず数年に渡る長期間のデータを10日ずつずらした30日長の期間に分割し、それぞれの30日期間について、初期条件を制御変数として解を最適化する。さらに10日差で隣り合う同化期間の間で、解の連続性を上げるための繰り返し計算を行った。この方法を用いることによって、nudging解よりも連続であり物理的に整合性が高い解を得た。海洋データ同化手法としては最も有望であるadjoint法を開発し、中規模現象の代表である黒潮続流域に応用することによって、使用可能なレベルにまで到達したことは高く評価される。

さらにデータ同化解の力学解析を行って、従来の知見と比較・検討した。個別の渦を追跡すること、大規模場と中規模現象の間のエネルギー変換、さらに傾圧不安定の指標となる表層と下層間の渦位相のずれを調べた。その結果、黒潮が日本を離岸した直後よりも、Shatsky Rise周辺の領域において傾圧不安定が顕著であった。また黒潮南方再循環のような大規模場の変化に伴って、黒潮続流が長いほど傾圧不安定が強く、大規模場が中規模現象の活動度を決めていることを見出した。ただし中規模場からのフィードバックとしては、傾圧不安定によって黒潮続流が弱められる傾向にある。これは既存の知見を現実の海洋場で確認したことであり、堅実な成果として評価できる。

以上により、申請者は、中規模現象が活発な黒潮続流域の力学解明と海洋予報技術の向上に新たな手段を提起したものであり、海洋物理学とその発展である海洋データ同化研究について貢献するところ大なるものがある。

よって、申請者は博士（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。