

氏名	石川 洋一
学位(専攻分野)	博士(理学)
学位記番号	理博第2040号
学位授与の日付	平成11年3月23日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科・専攻	理学研究科地球惑星科学専攻
学位論文題目	Study of the Data Assimilation System for Ocean Surface Circulations and Its Application to the Numerical Forecasting (海洋表層循環のデータ同化システムの構築とその数値予測への応用に関する研究)
	(主査)
論文調査委員	教授 淡路敏之 教授 廣田 勇 助教授 秋友和典

論 文 内 容 の 要 旨

海面に到達した太陽放射エネルギーの大部分は、海洋表層で吸収され、鉛直に混合しながら、移流によって他の海域へ運ばれ、そして大気へと放出される。このように、海洋表層循環による熱・運動量・物質の輸送は、大気海洋相互作用に重要な役割を果たしており、その実態把握は人類が直面する緊急課題である気候変動予測を行う上で鍵となっている。しかしながら、観測は未だ時空間的に十分とは言えず、また、数値予報モデル結果にはサブグリッドスケールの現象に対するパラメタリゼーションなどに起因した問題が存在し、解決すべき点が多い。このような事情から、貴重な観測データを数値モデルに組み込み、力学的に整合性のある表層循環の時系列データセットの作成とそれによる表層循環の変動過程の理解が可能なデータ同化システムの構築が期待されている。本研究では、互いに独立な表層流速場の観測データである漂流ブイデータと海面高度計データの複合同時同化を1.5層プリミティブモデルを用いて初めて行い、両データの利点を統合した時系列データセットを作成できる新たな同化システムを構築した。その結果、得られたデータセットの質は従来の同化システムの結果に比べ大きく向上しただけでなく、海面高度計を利用する際の難題であった平均海面高度場の効果的な修正も可能にした。さらに、変分法を応用して、統計的な情報にもとづく従来の最適内挿法を力学情報をも加味できるように発展させ、数値短期予測の初期値として十分使用できる解析場を得ることに成功した。

まず、漂流ブイデータによって海洋表層循環の実況がどの程度把握可能であるのか、それが表層循環のデータ同化に有益な情報であるのかどうかを検討するために、カナダ海洋データサービスセンター(MEDS)にアーカイブされている全球漂流ブイデータセットを解析し、表層循環場の気候学的平均場と季節変動場を求めた。その結果、得られた表層循環場は幅の狭い西岸境界流や赤道海流の構造も分解できるものであり、漂流ブイデータは表層循環のデータ同化に極めて有効なデータであることがわかった。これは、人工衛星を通じて時々刻々のブイの位置がわかるため、広範囲の現場表層流速値が得られるという漂流ブイデータの利点によるところが大きい。さらに、表層循環の変動観測に優れた海面高度計による結果と比較したところ、定性的には非常によい一致がみられたが、定量的には、ブイデータから得られた変動エネルギーは海面高度計のものよりもやや大きな値を示した。これは、漂流ブイデータによる変動エネルギーには、海面高度計データからの評価には含まれない非地衡成分が含まれているためであり、漂流ブイデータの長所を示すものと理解できる。

このような利点を持つ漂流ブイデータを海面高度計データとともに同時に数値モデルに同化できるシステムの構築を最適内挿法を用いて初めて試み、その有効性を調べた。まず、漂流ブイデータのみを同化した双子実験(identical twin実験)を行い、数度四方に1個という現実的な数の漂流ブイ配置によって、数値モデルの予報誤差を効果的に削減できることを示した。さらに、観測データの同化を直接行った流速場だけでなく、モデルの力学を通して、同化されない圧力場も同時に修正できることが明らかになった。この結果をもとに、漂流ブイデータと海面高度計データの複合データ同化実験を行った。

実施にあたっては、数値モデルの予報変数である流速場とinterface depth場（海面高度場に相当）の修正だけでなく、同化手法の一般的な基礎である線形不偏最適推定理論をバイアス誤差が存在する場合にも適用可能なように改良して、海面高度データの平均場も同時に修正できるよう従来の同化スキームを大幅に発展させた。その結果、海面高度計データを同化する際の大きな問題であった平均海面高度場の推定を精度良く行うことが可能となり、この問題に関して、海面高度計データに加えそれとは独立な流速場の観測データである漂流ブイデータの同時同化がきわめて有効であることを明らかにした。これによって、繰り返し観測ができるという海面高度計の利点が一層活かされるようになり、それぞれ単独で用いた場合の積算効果よりも精度の高い優れた解析場の取得が可能となった。

上記の最適内挿法を用いたデータ同化システムの結果を予報モデルの初期値に用いると、重力波が発生し予報精度を低下させるという問題がある。検討の結果、最適内挿法では、統計的な情報や地衡流バランスといった簡単な力学を用いて予報誤差共分散行列が決定されているために、得られた解析場に力学的不整合が存在し、それを解消する調節過程が作用するためであることが明らかとなった。この問題を解決するために、変分法を応用してモデルの力学をより厳密に再現するように同化手法を発展させた結果、得られた解析場は非線形項等の非地衡的な成分についてもバランスし、最適内挿法の場合に顕著であった高周波ノイズは見られず、絶対的な予報精度も向上した。この成果は、これまでの同化モデル研究において成功していない黒潮や湾流といった非地衡成分の無視できない西岸境界流域での数値予測に大きく貢献するものである。

論文審査の結果の要旨

大気海洋相互作用によって発生するエルニーニョと南方振動）や地球温暖化に関連して最近注目を集めている十年から数十年スケールの変動等の気候変動のメカニズムを理解し、その予測可能性について検討するには、地球表面の熱・物質のプールである海洋の循環過程、とりわけ大気と直接相互作用する海洋表層における循環過程の実態把握が重要である。それには各種物理量の時系列データセットが必要であるが、現状の海洋観測システムでは、そのようなデータセットの作成は困難である。そこで、貴重な観測データを海洋大循環モデルに取り込むことによって、観測のない場所・期間の物理量や観測されていない量についても力学的に整合性のある時系列データセットを作成できる「データ同化解析」という新たなアプローチが国際的に注目されている。

この問題に関して、申請者は表層循環に焦点を当て、最適内挿法と呼ばれる同化手法を用いて、人工衛星海面高度計データと漂流ブイデータを1.5層プリミティブ方程式モデルに同時に同化できる新たなシステムを構築し、その有効性を双子実験によって調べた。これまでの研究では、海面高度計データを同化する場合、ジオイド面の不正確性からその時間変動成分のみしか用いることができず、平均海面高度場の決定に大きな問題を抱えていたが、申請者は、漂流ブイデータという海面高度計データとは独立なデータを同時にモデルに同化することによって、平均海面高度場の効果的な推定を初めて可能とし、それぞれの利点を統合した表層循環解析値データセットの作成に成功した。この成果は、衛星海面高度計データを用いた海洋循環場の解析に新たな道を開いたものとして、国内外の関係者に大きなインパクトを与えた。なお、申請者は、カナダ海洋データセンターにアーカイブされている全球漂流ブイデータセットを用いて表層循環の気候学的平均場と季節変動場を求め、幅の狭い西岸境界流や赤道海流の構造をも分解可能であることを示すなど、現実の漂流ブイデータの海洋表層循環の観測に対する有効性を定量的に明らかにしている。

上記の最適内挿法を用いたデータ同化システムにおいては、観測データを同化した結果を予報モデルの初期値に用いると重力波が発生し、予測精度を著しく低下させるという問題がある。申請者は、この原因は、最適内挿法で仮定された地衡流バランスの不十分性にあることを突き止め、変分法を応用してモデルの力学をより厳密に再現する同化手法を新たに開発した。その結果、得られた解析場は非線形項などの非地衡的な成分についてもバランスしたものとなり、最適内挿法を用いた場合に発生した重力波による高周波ノイズは消失しただけでなく、短期予測を行った場合の予測精度も向上した。これらは、黒潮や湾流などの非地衡成分を無視することができない西岸境界流域において特に顕著であり、これまでの同化モデル研究において成功していない黒潮や湾流といった西岸境界流域での数値予測研究に大きく貢献したものとして国際的に高い評価を得ている。

以上のように、本研究は、データ同化解析という海洋物理における比較的新しい研究分野に極めて重要な知見を与え、こ

の方面の今後の研究に大きな貢献をしたものと高く評価できる。

よって、本申請論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。

なお、平成11年2月3日に論文内容とそれに関連した口頭試問を行った結果、合格と認めた。