

平成 22 年 5 月 31 日現在

研究種目：若手研究(B)  
研究期間：2007 ～ 2009  
課題番号：19740292  
研究課題名(和文) モンテカルロ法と4次元変分法を組み合わせた新しいデータ同化手法の開発  
研究課題名(英文) Development of new 4-dimensional variational data assimilation technique using Monte-Carlo method.  
研究代表者  
石川洋一 (ISHIKAWA YOICHI)  
京都大学・大学院理学研究科・助教  
研究者番号：70335298

## 研究成果の概要(和文)：

モンテカルロ法を応用し、アンサンブル4次元変分法と名付けた新しいデータ同化手法を開発した。従来のアジョイント法では微視的な評価関数の勾配を求め最適化を行っていたのに対し、新しく開発した手法では平滑化された巨視的な勾配を求めることができるため、非線形性が強いシステムに対しても適用可能である。本研究では海洋生態系モデルにこの手法を適用し性能評価を行うとともに、2種類の大気海洋結合モデルへの適用についても試みた。

## 研究成果の概要(英文)：

The new data assimilation scheme is developed called as "ensemble 4-dimensional variational method". This method can obtain the macroscopic gradients of cost function, while the classical adjoint method obtains microscopic gradients. As a result, this new scheme can apply for strong nonlinear system. In this study, the efficiency of the new scheme is confirmed by the assimilation system for marine ecosystem model. In addition, the new method is applied for atmosphere-ocean coupled models.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,200,000	0	1,200,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	600,000	3,800,000

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：海洋物理、データ同化

## 科学研究費補助金研究成果報告書

## 1. 研究開始当初の背景

数値モデルと観測データを統合するデータ同化手法は古くは数値天気予報のために発達してきたが、最近では統合データセットの作成や物理過程の解析など海洋分野の様々な研究に利用されるようになってきている。そして、用いられるデータ同化手法も当初は最適内挿法などの簡略化された統計的な手法がほとんどだったが、数値モデルの力学を利用した物理的な補間を行うことができる四次元変分法やカルマンフィルタといった高度な同化手法を使って現実的な海洋循環を再現するための研究がいくつも行われるようになってきていた。

なかでも4次元変分法(アジョイント法ともよばれる)を用いたデータ同化システムは、観測データを統合した時系列データセットの作成に非常に有効なツールであるが、現実的な問題に適用したことによって新たに改善すべき点も明らかになってきた。なかでも中規模渦を分解できる高分解能モデルを用いて非線形性の強いジェットなどが再現可能になったことにより、アジョイントモデルを導出する際の線形化によって生じる問題は重要である。この問題は、例えば傾圧不安定などの不安定現象によって蛇行などが成長する際に、数値モデルでは蛇行が有限振幅まで成長したときには非線形性が働いて蛇行の成長が抑えられるのに対し、線形化されたアジョイントモデルでは成長を抑える要因が無いため計算が発散してしまうというものである。そのため、最適化を行う同化期間は海洋の場合には長くても数ヶ月程度にする必要があり、最新のシステムでも1ヶ月毎にデータ同化を行っている。このとき、それぞれの同化期間をまたがった時系列の連続性は成り立たなくなってしまうので、物理過程に従った時系列データセットが得られるというアジョイント法の利点が失われてしまう。

非線形性に起因する同様の問題は拡張カルマンフィルタ・スモーカーにおいて予報誤差共分散行列の時間発展を求めるリカッチ方程式においても線形化によって擾乱に関連した誤差成分が無限大まで成長してしまう問題として存在している。Evensen(1994)はこの問題を解決するために、モンテカルロ法を応用して非線形の予報モデルを多数計算することにより予報誤差共分散の時間発展を求めるといったアンサンブルカルマンフィルタを提案した。このアンサンブルカルマンフィルタは線形化の問題を解決できるというだけでなく、リカッチ方程式を作成すること無く既存の数値モデルをそのまま利用できるという利点もあるため、最近では

海洋大循環モデルを用いた大規模システムなどにも応用されるようになってきた。このアンサンブルカルマンフィルタ・スモーカーの計算量はどれだけの数の予報モデルの積分が必要になるかは、観測データを取り込む際の予報誤差共分散行列をモンテカルロ法によって再構築できるかによって決定されるので少なくとも同化される観測データと同程度の数、実際にはそれ以上の予報モデルの計算をしなければいけないことになる。この数は現実には数千となり、現在のコンピュータの能力で高分解能海洋大循環モデルに対して適用できるものではない。そのため、多くのデータ同化システムでは大胆な近似を用いることによりせいぜい10から数10個程度のアンサンブルから予報誤差共分散行列を求めるといったことが行われており、アンサンブルカルマンフィルタ・スモーカーの能力を十分に活かしているとはいえない。

## 2. 研究の目的

アンサンブル法の基礎理論であるモンテカルロ法と4次元変分法をくみあわせて黒潮のようなジェットや、中規模変動についても高分解能で再現するデータセット作成に、新しい同化手法を開発する。さらに、数値予報という観点からは、データ同化によって数値モデルの初期、境界条件が改善されることに加え、アンサンブル計算の結果は数値予報にもそのまま応用可能であるので、予報精度の向上も非常に期待ができる。また、アジョイントモデルは観測システムの設計のための情報を提供するための感度実験にも有効なツールであるが、新しい同化手法を感度実験に適用することにより、このような用途においてもより詳細かつ高精度の情報を提供できるであろう。

強非線形の問題としては、海氷モデルにおける融解、凝固現象や大気における雲物理過程のように、あるしきい値を超えると異なった物理過程に支配されるようなスイッチング現象や海洋中のプランクトンの振る舞いを再現する海洋生態系モデルなどにみられ、これらのそもそも線形化されたアジョイントモデルを適用すること自体が非常に難しい問題に適応可能な新しいデータ同化手法の開発が望まれる。

## 3. 研究の方法

まず、新しい同化手法を開発するための準備としてローレンツモデルを用いてIshikawa et al. (2000)にならったアジョイントモデルの改良を行う。このとき、実際の観測データを用いる代わりに、人工的に作られた疑似観測データを同化するアイデンテ

イカルツイン実験を行い、数値モデルの不完全性、観測データの誤差など要素をできる限り排除してデータ同化手法の有効性を正確に評価できるような実験を行う。

これらの結果をもとにして、次にモンテカルロ法を応用したアンサンブル計算の実装を行う。このアンサンブル計算についてもはじめは上述のシンプルで計算負荷の低いローレンツモデルを用いたデータ同化システムをもとに開発を行うことにより、十分なアンサンブル数を確保した実験を容易に行うことができるようにする。また、この実験においても、アイデンティカルツイン実験の長所を活かしながら必要な修正、改良を行い、モンテカルロ法と4次元変分法を組み合わせた新しいデータ同化手法のプロトタイプを理論的に確立する。

次にこの新しいデータ同化手法のプロトタイプをもとに、より現実的な状況に適用しながら、更なる改良を行っていく。まず、比較的シンプルな1ボックス海洋生態系モデルを用いたデータ同化システムに適用し、より複雑な問題への適用可能性を調べる。特に、制御変数の自由度が大きくなった場合にどの程度の計算量が必要化というのは大きな問題である。また、実際の観測データを同化する場合には、外力やパラメータの不確実性に起因した数値モデルの誤差や、観測データの誤差、およびそれぞれの誤差の見積もりをもとにした同化パラメータにおける不確実性などが存在しているため、アイデンティカルツイン実験においてこれらの問題について考察を加える。

以上の結果をもとに、より複雑かつ現実的なモデルへの適用を行う。ターゲットとするモデルは、非線形性が強く、様々なスケールの変動が混在しており、従来の4次元変分法では多くの近似を導入しないと適用困難であった大気海洋結合モデルとする。ただし、簡単なモデルによる実験において見積もられた必要なアンサンブルの数が多い場合には完全な同化実験を行うことが不可能となる場合もあるので、その場合にはいわゆるアジョイントモデルを用いた感度実験と同様な結果が得られるアンサンブル実験を行い、新しく開発された手法の有効性を調べる。

#### 4. 研究成果

アンサンブル法を応用した新しいデータ同化手法を開発するために、まず既存のデータ同化手法の特徴と問題点についての調査をおこない、新しいデータ同化手法に求められる性能について検討を行った。海洋大循環モデルなどの現実的かつ大きな規模のモデルに対して用いられているデータ同化手法ではアンサンブルカルマンフィルターが数値モデルを直接的に用いて非線形モデルの

線形化が必要ないため、線形化による問題がおきない。しかしながら、このアンサンブルカルマンフィルターでは誤差がガウス分布をしているという仮定を用いているが、実際のデータ同化ではこの仮定が成り立たない場合が多いということがわかった。代表的な例として大気中の水蒸気量、海洋生態系モデルにおける栄養塩、プランクトン量など負の値をとらない濃度のような変数があげられる。このような非ガウス型の誤差について扱うことが出来るデータ同化手法としては粒子フィルターがあげられるが、非常に多くのアンサンブルをとる必要があるなど現実的な大規模モデルに適用することは現状の計算機環境では不可能である。

そこで、非線形性、非ガウス型の誤差分布などといった問題が存在する海洋生態系モデルをターゲットにデータ同化システムを構築し、新しいデータ同化手法の開発を行うこととした。まず、本年度はその準備としてまず4次元変分法を用いてデータ同化システムを構築し、生態系データ同化システムの特徴について調べた。その結果、この手法を用いた状態推定はある程度可能だったものの、線形化の問題としてアジョイントモデルが長期積分には耐えられないこと、繰り返しの途中で負の濃度が現れる場合があることが確認され、高精度の推定には改良が必要であることがわかった。

そこで、観測データなどをこのデータ同化システムと同じ設定としてモンテカルロ法を応用した新しいデータ同化システムを構築した。この手法は評価関数の定義などは従来の4次元変分法と同じであり、過去の様々な知見を活かしながら、いわゆるアジョイント法では難しかった強非線形モデルに適用した場合でも、正確な勾配から最適解を求めることが可能であることを示すことができた。

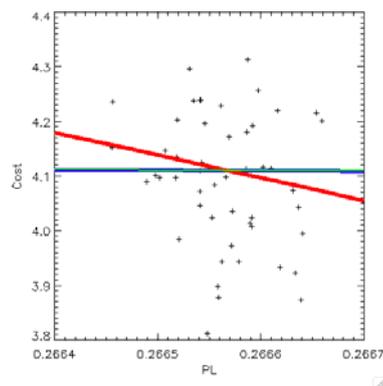


図1: 変数 PL に対する評価関数とその勾配。直接法による正解(青線)、アンサンブル法(緑線)およびアジョイント法(赤線)による推定。+印は各アンサンブルメンバーを表す。

図1はアンサンブル法による結果の一例である。正確な勾配を求められる直接法の結果と、アンサンブル法では100メンバー以上で推定した場合、ほぼ同じ評価関数の傾きを表しているが、アジョイント法ではかなり大きな傾きを示している。アジョイント法の場合には期間が長くなるほどこの値が大きくなって最終的には発散してしましたが、アンサンブル法の場合にはそのようなことがおこらず、安定して勾配を求めることが可能であった。

表1: 直接法で求めた勾配とアジョイント法、アンサンブル法で推定された勾配。括弧内は直接法の値で規格化したもの。

	PS	PL	ZS	ZP
Direct	-2.35	-1.28	1.13	0.10
Adjoint	-2.32(0.99)	-41.5(-32.5)	3.03(2.6)	40.0(394)
Ensemble	-2.31(0.98)	-0.87(0.69)	4.88(4.3)	0.07(0.74)

	NO3	NH4	PON	DON
Direct	-0.723	-1.72	-0.82	1.07
Adjoint	-4.55(6.29)	-8.51(4.93)	2.68(-3.25)	-3.30(-3.0)
Ensemble	-1.15(1.59)	-1.70(0.98)	-0.93(1.12)	-0.99(-0.99)

表1は海洋低次生態系モデルの全変数についての推定された勾配の値を示したものである。アジョイント法では特に非線形性の影響を受けやすいPL, ZP, NO3, PONなどで大きな誤差が出ており、最大で400倍近い値となったり(ZP)、逆符号となってしまう(PON)しており、このままではデータ同化システムとしての性能がでないことがわかる。一方アンサンブル法で求めた勾配は変動の小さいZSで4.3倍の過大評価が見られるものの、それ以外の変数についてはおおむねよい推定値を与えている。

また、これらの実験からアンサンブル法では単に強い非線形モデルに対して線形化の問題がなくなるというだけでなく、非線形性にとまなう評価関数の多峰性についても有利な点があることがわかった。すなわちアジョイント法では解析的に勾配を求めているためその値は微視的もとめられた値となっているため、評価関数の小さな凹凸に対して敏感に反応し、場合によっては局所的に存在する極小値に捉えられて観測値との差が小さくならないことがあるが、アンサンブル法ではある程度の範囲においた散らばりから評価関数の勾配を求めるために巨視的な勾配に相当するものを求めることが可能となっており、局所的に存在する評価関数の極小値にとらわれにくくなっているという利点がある。

また、新しいデータ同化手法の計算量についても見積もりを行った。計算時間については多数の独立なモデル計算が必要となるため、アンサンブルの数に比例して計算量が増加する。実際に必要なアンサンブルの数はお

よそモデルの自由度で決まると考えられ、今回のモデル自由度11に対してその5-10倍程度のアンサンブル数をとれば十分に推定可能であった。この計算量はアジョイント法とくらべ、10倍程度となるため、現状では繰返しによる評価関数の最小化まで行うことは難しい。ただし、アンサンブル計算は完全に独立な計算であるため、超並列計算機を用いることにより、平行して計算することが可能なため、将来的には実際の計算時間はアジョイント法と遜色なくなることが期待できる。また、アジョイントモデルの計算のために、前方積分の計算結果を保存しておく必要があるため、メモリが必要であったり、ディスクアクセスが発生したりするための計算機負荷がかかっているが、今回の手法では評価関数の計算に必要な分だけ保存すればよいので、この点においてはアジョイント法より有利である。

以上の結果をふまえ、新しいアンサンブル4次元変分法の現実的な応用として2種類の大気海洋結合モデルに適用した。ただし、計算量を考えて、データ同化実験ではなく勾配を求めるだけの感度実験を行った。データ同化実験はこのような感度実験を繰り返す行うことに相当するので、感度実験のみでも新しい同化手法を評価はある程度可能である。ターゲットする現象として1つ目はエルニーニョの発生に関連した大気海洋結合系での不安定結合ケルビン波をあつかった。その結果、アジョイントモデルを用いた解析の場合には大気モデルで発生する小さなスケールの擾乱が不安定を引き起こし1週間程度で発散したのに対し、新しい手法では1ヶ月以上時間を遡って結合ケルビン波のシグナルを追跡することができた。アジョイント法発散した時間スケールはおそらく大気の傾圧不安定に関連したもので、大気海洋結合系の予測可能性と比べると非常に短い。一方アンサンブル法で逆追跡できた1ヶ月という時間スケールは結合ケルビン波が太平洋を横切る様子がある程度捉えられ、エルニーニョの発生を捉えた再解析データを作成することが可能となることを意味している。

もう一つの応用は大気海洋結合系で台風シミュレーションを目的とした2次元非静力モデルを用いた。その結果、従来のアジョイントモデルでは安定に計算することが難しかった雲などの物理過程についても、アンサンブル法では感度を見積もりことが可能となり、特に水蒸気量についての勾配の推定が非常に改善された。

以上のように新たにモンテカルロ法を応用し、アンサンブル4次元変分法と名付けたデータ同化手法を開発した。この手法は計算量が非常に多く、この手法の利点がより有効となる高分解能モデルへの適用は現状で

は難しい場合が多い。しかしながら、この手法は多数の独立なモデル計算の結果から評価関数の勾配を求めているため、粒度の粗い並列化が可能なので今後主流となると予想される超並列コンピュータと相性が良く、またアジョイント法を導入する際の大きなハードルであるアジョイントモデルを作成する必要がないという利点がある。現在の計算手法では従来のアジョイント法の最低でも数倍から10倍程度、現状では100倍以上の計算量が必要であるが、この計算は平行して行うことが可能なので、計算時間はアジョイント法よりも短くなる可能性もある。超並列コンピュータへの対応を含めて計算スキームの効率化は今後の重要な課題である。さらに今回の手法では得られた勾配の精度はアンサンブル数に強く依存しているため、計算の効率化は精度向上とも強く結びついている。今回の実験では従来のアジョイント法をふまえた改良を行っていたが、例えば勾配だけでなく評価関数の2階微分であるヘッシアン行列を求めて最適化を行うなど、より高度な改良を行うことも今後の課題である。

#### 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4件)

- (1) Ito, K., Y. Ishikawa, and T. Awaji, Specifying Air-Sea Exchange Coefficients in the High-Wind Regime of a Mature Tropical Cyclone by an Adjoint Data Assimilation Method. SOLA, 査読有、2010, Vol.6, 13-16.
- (2) Ishikawa, Y., T. Awaji, T. Toyoda, T. In, K. Nishina, T. Nakayama, S. Shima, S. Masuda. High-resolution synthetic monitoring by a 4-dimensional variational data assimilation system in the northwestern North Pacific. J. Marine System. 査読有、2009, 10.1016/j.jmarsys.2009.02.016.
- (3) Masuda, S., Y. Shikama, T. Awaji, Y. Ishikawa, and T. Toyoda. The role of westerly wind bursts in the ENSO recharge paradigm. 査読有、2009, 10.1029/2008JC004953.
- (4) De Mey., P., P. Craig, F. Davidson, C. A. Edwards, Y. Ishikawa, J. C. Kindle, R. Proctor, K. R. Thompson, and J. Zhu. Applications in Coastal Modeling and Forecasting. Oceanography. 査読有、2009, 198-205.

[学会発表] (計5件)

- (1) Ishikawa, Y., T. Awaji, T. Toyoda, H.

Igarashi, IMPACT OF 4D-VAR ASSIMILATION PRODUCTS ON BIO-GEOCHEMICAL SIMULATION, The 5th WMO International Symposium on Data Assimilation, 2009.10.9, Melbourne, Australia.

(2) Ishikawa, Y., T. Awaji, T. Toyoda, H. Igarashi, IMPACT OF 4D-VAR ASSIMILATION PRODUCTS ON BIO-GEOCHEMICAL SIMULATION, Final GODAE Symposium 2008, 2008.11.14, Nice, France.

(3) 石川洋一、淡路敏之、アンサンブルベースの4次元変分法、日本海洋学会秋季大会、2008.9.26、広島県呉市。

(4) 石川洋一、淡路敏之、岸道郎、才野敏郎、海洋生態系データ同化システムを用いた生物化学過程の状態推定、2008年度日本海洋学会春季大会、2008.3.28、東京海洋大学。

(5) Ishikawa, Y., T. Awaji, T. In, S. Shima, K. Nishina, T. Toyoda, Assessing the validity of GODAE products in coastal and shelf seas, GODAE Coastal and Shelf Seas Workshop, 2007.10.10, Liverpool, U.K. 招待講演。

[図書] (計1件)

淡路敏之、蒲地政文、池田元美、石川洋一、京都大学出版会、データ同化 観測・実験とモデルを融合するイノベーション、2009, 284.

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況 (計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石川洋一 (ISHIKAWA YOICHI)  
京都大学・大学院理学研究科・助教  
研究者番号：70335298

(2) 研究分担者

( )

研究者番号：

(3) 連携研究者

( )

研究者番号：