

## 気象学におけるデータ同化\*

三好建正\*\*・本田有機\*\*

### 1. はじめに

データ同化は、気象学において近年発展が目覚ましい研究分野の1つである。気象学の研究では、観測と数値モデルが重要な役割を果たしているが、データ同化はその間を相補的につなぎ、より高度な情報を作り出す。気象学の研究で、今以上に幅広く応用できる可能性があるといえよう。

本稿では、気象学、特に数値天気予報におけるデータ同化について、そのエッセンスを抽出し、今どこにいて、これからどこへ向かうのか、最先端の動向を解説する。データ同化には様々な捉え方があるが、本稿では数値天気予報における高精度な初期値作成手法を扱う。幅広い読者を想定し、厳密で詳しい記述は避け、読み物風に話題提供したい。興味のある読者は、より詳しい解説を行っている文献<sup>1,2,3,4)</sup>を参照いただきたい。

### 2. データ同化概論

気象学は観測とともに発展してきた。通報される観測値を白地図上に書き込み、等値線を引く。このようにして作成される天気図は、総観規模現象の理解に重要な役割を果たした。天気図解析は、手動で行うデータ同化の身近な例であり、「主観解析」と呼ばれる。一方、スーパーコンピュータで計算する数値天気予報が将来の大気状態の予測を行う昨今、この数値計算のための初期値が必要である。天気図の等値線により、地図上の任意の地点での解析値が得られるため、主観解析を初期値に用いることもできる。しかし、主観解

析は変数間の力学的なバランスを十分考慮することが困難なため、偽の重力波などが発生するなど初期値には適さない。また、予報精度が向上してきた今日重要なのが、数値天気予報モデルはカオスの挙動を示す、すなわち、初期値の微小な誤差が時間の経過とともに大きく発展し、予測に大きな影響を与えうることである。このため、解析担当者によって微妙に異なってしまう主観解析をモデル初期値に使うことは望ましくない。予報が悪いのが初期値のせいだとしても、これを修正する客観的手立が得られないからである。したがって、あるアルゴリズムによって客観的に計算する「客観解析」が望まれる。客観解析の品質が解析手法によるため、アルゴリズム自体が研究開発の対象となる。

データ同化アルゴリズムは、ある第一推定値(モデル格子点値)と観測データ<sup>†</sup>を入力情報とし、解析値(モデル格子点値)を出力する。データ同化の計算を大雑把に言えば、第一推定値、観測値、及びそれらの確からしさの情報(誤差共分散)が与えられ、その双方よりも確からしい解析値を得る。高精度の第一推定値に、高精度の観測がたくさんあればあるほど、精度よい解析値が得られる。観測はデータ同化にとってはア prioriに与えられるが、第一推定値に何をとりかは自由である。たとえば、気候平均的な場を取ってくることも可能だが、これでは精度が低い。最も精度が高い第一推定値は、直近の解析値から始めた予報値である。精度の高い第一推定値を用いることで解析値の精度が上がり、高精度の解析値を初期値にすることで予報の確からしさも向上する。データ同化(解析)と予報とのサイクルプロセスは、このような相補的に好

\* Data assimilation in meteorology.

\*\* Takemasa MIYOSHI, Yuki HONDA, 気象庁予報部数値予報課.

© 2007 日本気象学会

<sup>†</sup> 観測データの品質制御は重要だが、本稿ではデータ同化自体のアルゴリズムに集中するため、観測データ品質には問題がないものとする。

影響を及ぼしあう正の循環を実現する。この「解析予報サイクル」は、気象庁を含む世界の現業数値天気予報センターで採用されており、予報により過去の情報が未来に伝えられることから、「4次元データ同化」と呼ばれる。予報モデルの精度が向上してきた近年、データ同化が予報精度に与える影響が目立つようになっており、データ同化手法の高度化が予報精度の向上に大きな影響を与えている。データ同化が注目され盛んに研究が行われているのには、このような背景がある。

概説はこのくらいにして、次節以降、「データ同化の今」を見るため、最先端のデータ同化手法である「変分法」と「アンサンブル・カルマンフィルタ」について紹介する。

### 3. 変分法

変分法では、誤差共分散行列で重み付けした第一推定値と観測値のそれぞれからの「距離」の和を表す評価関数を導入し、この関数の最小値を反復計算により探索することで最も確からしい解析値を求める。変分法が広く利用され始める前のデータ同化手法は、最適内挿法である。前述されているように、解析予報サイクルで第一推定値と観測の精度を誤差情報として考慮した最初の手法であり、1970年代から世界の数値予報センターで広く利用されてきた。1980年代には気象衛星・地球観測衛星が次々に打ち上げられはじめ、解析の品質向上のために、衛星データを有効に利用することが求められてきた。しかしながら、最適内挿法では、解析変数と線形関係にある観測量しか同化できないという制約があり、衛星に搭載されたセンサーで観測される物理量は直接同化することができなかった。

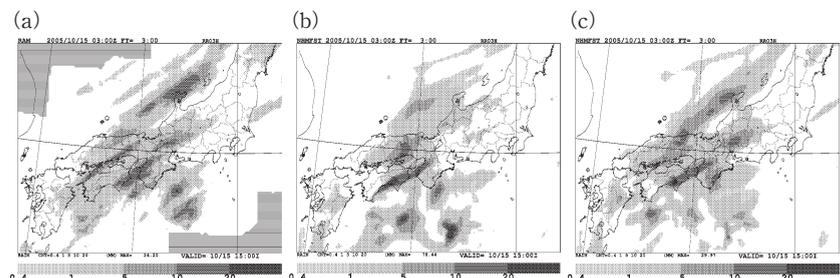
そのため、衛星データからあらかじめ同化できる物理量に変換したものを間接的に同化することしかできなかった。間接同化では物理量変換の途中で観測が持つ情報が失われてしまうために、せっかくの観測を十分活用できていない懸念があった。

変分法では、解析変数と観測物理量の間上記の制約がないため、例えば放射

伝達方程式を用いて衛星で観測する放射輝度温度を直接同化することが可能になる。このため、1990年代には最適内挿法に代わって変分法がデータ同化手法の主流となってきた。最初は、統計的な力学バランスのみを考慮した3次元変分法が利用された。3次元変分法でも最適内挿法でも、統計的な誤差情報を基に観測による修正量の重みを決めるという点では同じであるが、後者は局所的に力学バランスを考慮しているのに対して、前者は解析領域全体でそのバランスを評価する。このため、3次元変分法の方がより全体的にバランスした解析値が得られる。

3次元変分法を更に発展させたものが4次元変分法である。4次元変分法では、数値予報モデルの時間積分値がデータ同化期間中の観測データに最も合うように初期値を修正していく。これにより、単に統計的なバランスを考慮するのではなく、日々変動する流れに依存したバランス成分を考慮できるようになる。例えば、統計的には等方的なバランス成分が、4次元変分法ではその時の状態に応じて変形する。さらに、4次元変分法は、観測データの扱いの観点からも2つの利点がある。1つは、観測データの同化時刻の扱いである。3次元変分法ではすべての観測データを解析時刻のデータとして同化していたが、4次元変分法ではデータ同化期間中の任意の時刻のものとして同化することが出来るので、実際の観測時刻のデータとして観測を同化することが出来る。2つめは観測データの種類である。数値予報モデルを時間積分するため、降水量のように時間積算した量を、他の観測データと同時に同化することが可能となる（第1図、本田<sup>5)</sup>）。

気象庁の現業解析システムに見られる変分法の歴史を振り返ると、2000年に衛星の輝度温度データから気



第1図 非静力学モデルを採用した4次元変分法による解析の3時間降水量。(a) レーダー・アメダス解析雨量 (R/A), (b) R/Aを同化しない解析, (c) R/Aを同化した解析。解析手法は非静力学モデル用の4次元変分法 (本田<sup>5)</sup>)。

温と湿度を導出するため鉛直1次元変分法を導入したのが最初である。2001年には全球解析システムを最適内挿法から3次元変分法に変更し、輝度温度も間接同化から直接同化へと変更した。2005年には4次元変分法へと更新され、モデルの改良の効果もあり、全球の予報精度が欧州中期予報センター（ECMWF）に次いで世界2位を争うまでに向上した。一方メソスケールの解析システムとしては、2002年には世界に先駆けて4次元変分法を導入し、レーダー・アメダス解析雨量のデータ同化に成功している。2007年には現在のメソ解析の4次元変分法で採用しているモデルを静力学モデルから非静力学モデルへと変更し、解析で使っている予報モデルの精度向上を計画している。

変分法の詳細については、露木<sup>6,7)</sup>に詳しい解説があるので、興味のある方は参照願いたい。

#### 4. アンサンブル・カルマンフィルタ

アンサンブル・カルマンフィルタ（EnKF）は、解析値だけでなく、その誤差についても、観測により最適に制御しようとするものである。カルマンフィルタ（KF）は、モデルが線形で誤差がガウス分布するという仮定下で最適なデータ同化を行うアルゴリズムで、解析とその誤差の両方について解析予報サイクルを行う。誤差は解析変数の2乗の自由度を持ち、KFはこれを陽に扱うから、もともと自由度が高い数値予報モデルでKFを実現することは計算上困難である。このため、少数のサンプルで誤差を表現する「アンサンブル予報」を応用したのがEnKFであり、1994年に Evensen により始められた。

アンサンブル予報にとって、各アンサンブルメンバーは、状態の確率分布を具現化したサンプルである。KFは抽象的な確率分布の解析予報サイクルを直接行うが、EnKFは確率分布を具現化したアンサンブルメンバーの解析予報サイクルを行う。アンサンブル予報は確率分布の時間発展を与える。データ同化のプロセスでは、アンサンブルで表現される予報の確率分布と観測の確率分布を合成して得られる解析の確率分布を具現化する解析アンサンブルメンバーを得る。

EnKFの利点は、変分法を含む従来の手法では非常に単純化されている予報誤差共分散を、アンサンブル予報により見積もることで、場所及び時間に依存するものとして扱う点である。日々変動する大気の中で、予報誤差共分散も時間空間的に大きな変動があるはずで、EnKFではこれを表現するための制約が少ない。

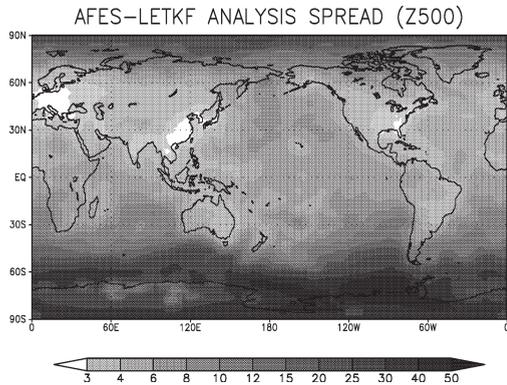
EnKFにおける主な制約はアンサンブルメンバー数であるが、限られた計算資源で実用レベルの解析精度が得られるのは、このような時空間依存する予報誤差をより忠実に考慮しているためである。

EnKFはプログラムコードのモデル依存性が小さく、容易に幅広く適用できる特徴がある。たとえば、Miyoshi<sup>8)</sup>は、Lorenzの40変数モデルに適用したEnKFの中核部分のソースコードをそのまま低解像度全球モデルに適用した。そのソースコードはそのまま高解像度全球モデルや気象庁非静力学モデルにも適用されている。

さらに、4次元EnKFやアンサンブル・スムーザと呼ばれる技術があり、異なる時刻の観測を同時に扱うことが可能となる。これは変分法の4次元拡張と似ているが、背景誤差共分散がもともと動的に変動するEnKFでは、変分法における4次元拡張ほどの効果を期待したものではない。しかし、EnKFは基本的に観測が得られるたびに逐次的に行うものであり、非定時観測が増加の一途をたどる昨今、これは実用上大きな制約となる。EnKFの4次元拡張により、4次元変分法と同様、1度の解析で非定時の観測を正しく扱える。さらに、前節でも述べられた解析変数と線形関係にない衛星輝度温度といった観測量の同化に関しても、変分法と遜色ない。そればかりか、変分法では扱うことが困難な台風中心座標や最大風速といった観測量も、直接同化することができ、扱える観測の幅広さという点でも優れている。

EnKFによるデータ同化の実例として、4次元EnKFを使った全球データ同化について紹介する。最初気候平均的な場から始めた解析予報サイクルが、わずか5日後には小さな誤差に落ち着き、気象庁の現業サイクル解析場とよく似た解析場となる。アンサンブルメンバーにより表現される500 hPaの解析誤差分散の時間平均場は第2図（三好・山根<sup>9)</sup>）のようになり、概ね観測密度に応じた分布となる。日々の変動を見ると、流れに依存した成分が見られる。このような解析の誤差情報は従来法では得られなかったものであり、その利用価値を探る研究も始まっている。

EnKFで実際の観測を同化するようになったのはここ数年のことである。今のEnKFの手法に関する研究では、実観測データを同化してより高精度な解析を得るため、いかに手法を高度化するかというところにいる。また、EnKFを使ったデータ同化の応用研究も、ごく最近盛んになってきている。



第2図 4次元EnKFで2004年8月の実観測データを同化した際に得られたアンサンブルによる500 hPa等圧面高度場の解析誤差分散 (m) の2004年8月11日から31日までの21日間平均 (三好・山根<sup>9)</sup>).

## 5. どこへ向かうのか

現在のデータ同化手法は、以上で紹介した2大手法(変分法, EnKF)が主流である。最近の研究では、手法の新しさ、実装の簡略さや、モデル依存性の少なさ等から、EnKFに関する研究が盛んだ。一方、気象庁を含む世界の現業数値天気予報センターでは、変分法が主に用いられている。EnKFをデータ同化手法として現業的に用いているのは、カナダのアンサンブル予報システムがある。イギリス気象局では、EnKFをデータ同化手法としてではなく、アンサンブル摂動生成法として現業利用している。将来の現業数値天気予報で、4次元変分法を高度化していくのか、EnKFへ移行していくのかは、大きな分かれ道となる。このことは、データ同化関連の研究コミュニティでも議論を呼んでおり、今後の研究開発で解決されるべき課題と言える。

4次元変分法やEnKFなど、データ同化が高度になり、モデルを利用して時間依存した誤差の情報を考慮するようになると、モデルに起因する誤差の影響が大きくなる。このモデル誤差への取り組みは、データ同化にとって大きな課題であり、研究も盛んである。また、線形モデルに基づいた4次元変分法やEnKFにとって、モデルの非線形性の影響も定かでない。これらは今後のデータ同化関連研究における1つの方向となるだろう。

以上のようなデータ同化手法そのものの高度化に向

けた研究に限らず、モデル開発と観測という気象学の主要な研究領域の間をつなぐ研究ツールとしてもデータ同化は注目されている。モデル開発者はモデルの正しさを確かめるため観測と比較するが、よいモデルは観測をうまく同化し現実をより忠実に再現できるため、モデルの精度評価にデータ同化は有効である。また、観測者にとっては、観測点・観測時刻における大気状態だけでなく、周囲の4次元的大気場の変動状態を得て現象の理解を深めるのに、データ同化が有効な手段となる。さらに、もし衛星観測により大気中のある物質の分布が得られたとして、この物質の分布を予測するモデルがあれば、4次元変分法や4次元EnKFといったスモージの技術を使って、発生源に関する高精度の解析が得られるかもしれない。専門化が進む昨今、専門領域をつなぐデータ同化への期待は高く、今後もますます応用研究が盛んになるだろう。

## 6. おわりに

本稿では、近年発展が目覚ましいデータ同化について、その役割、エッセンスから最新の動向まで解説した。気象学で重要な役割を果たす観測と数値モデルの間をつなぐものとして、今後も様々な研究に応用されるよう、読者の興味を少しでも惹くことができたのなら、著者らの望外の喜びである。

## 参考文献

- 1) Daley, R., 1994: Atmospheric Data Analysis, Cambridge, 457pp.
- 2) Bouvier, F. and P. Courtier, 1999: Meteorological Training Course Lecture Series, ECMWF, 75pp.
- 3) Kalnay, E., 2003: Atmospheric modeling, data assimilation and predictability, Cambridge, 341pp.
- 4) 三好建正, 2005: 天気, 52, 93-104.
- 5) 本田有機, 2006: 日本気象学会2006年度春季大会予稿集, D305.
- 6) 露木 義, 1995: 数値予報課報告・別冊第43号, 気象庁予報部, 102-165.
- 7) 露木 義, 2002: 数値予報課報告・別冊第48号, 気象庁予報部, 1-16.
- 8) Miyoshi, T., 2005: Ensemble Kalman filter experiments with a primitive-equation global model, doctoral dissertation, University of Maryland, 197pp.
- 9) 三好建正, 山根省三, 2006: 日本気象学会2006年度春季大会予稿集, B463.