

## 2. データ同化と初期値敏感性

露 木 義\*

### 要 旨

数値予報における数値モデルは、現在の初期値から時間積分して未来を予測するためだけでなく、過去の観測データの持つ情報を現在に伝えて、初期値の精度を上げるためにも使われる。後者のプロセスはデータ同化と呼ばれるが、それによる初期値の推定には大気運動の力学が反映される。本講演では、時間軸を含むインバージョン（逆問題）としてのデータ同化と、それと力学との関わりを紹介し、アンサンブル予報へのヒントを示す。

#### 1. 数値予報の初期値敏感性

数値予報はさまざまな問題点をかかえつつも、天気予報のための欠かせない道具になっている。その問題点の1つに、いわゆる「日替わり予報」がある。数値予報の初期値が新しくなるたびに予測結果が大きく変化することがあり、そのとき新しい初期値からの予測のほう必ずしも精度が高いとは限らないため、予報官の悩みの種になる。その主な原因が、少なくとも中緯度の中期予報（1～2週間先までの予報）に関する限り、数値モデルの不完全性よりも、大気運動の不安定性と初期値の精度にあることが広く認識されてきた。

その認識を広める1つの契機ともなった研究を紹介する。1994年1月3日を初期値とするヨーロッパ中期予報センター（ECMWF）の5日予報が、ヨーロッパ付近でドイツ気象局の5日予報よりもかなり悪かった。この2つの数値予報センターでは初期値も数値モデルも異なるが、試みにドイツ気象局の初期値を使ってECMWFの数値モデルを走らせたところ、ドイツ気象局と同じような予測になった。第1図aとbに、このときの500hPa高度の初期値と5日予報における差を示す。等値線の間隔が初期値の図では5mであるのに対して、5日予報の図では60mであることに注意していただきたい。ラジオゾンデの500hPa高度の観

測誤差は10m程度だが、この2つの初期値の差は、観測データがあまりない北太平洋上などを除いて、ほぼこの範囲に取まっている。

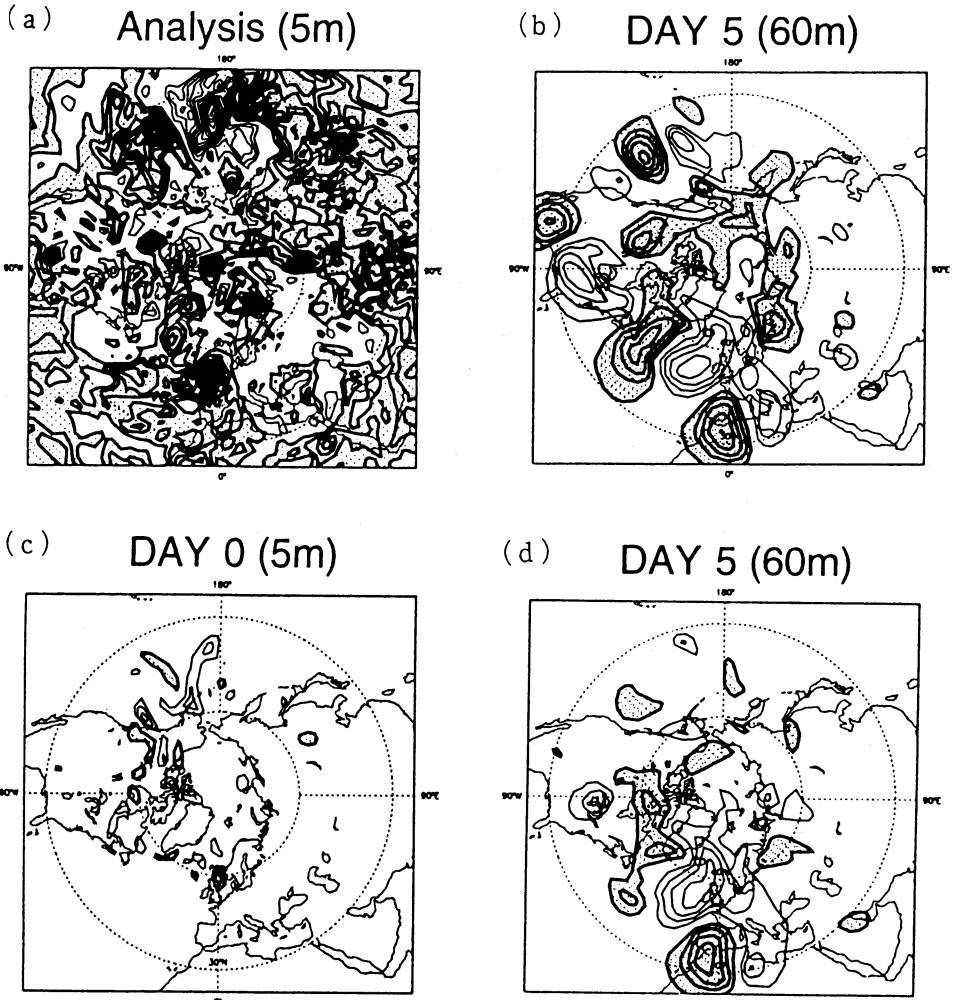
ここで注目すべきことは、この初期値の違いのほとんどが、5日後のヨーロッパの予測の違いには関係ないことである。ECMWFの初期値を第1図cに示した分だけ修正してやると、第1図dのように、ドイツ気象局の初期値を使ったのとほぼ同じ結果がヨーロッパ付近で得られるからである。この初期値の修正量は10m程度で、観測誤差の範囲内である。その違いが、5日後には200mを超える差をもたらしたことになる。

この修正量は、次のようにして計算されたものである。まず、ある初期値から出発した2日予報の誤差の大きさを1つの数で表す。具体的には、予報変数の2乗誤差を、北半球のすべての格子点にわたって適当な重みをつけて平均したものを考えればよい。数値予報の予測値は初期値に応じて変わるから、この数は各格子点における初期値の関数になる。そこで、ECMWFの初期値から出発した2日予報に対して、各格子点の初期値をどの方向に変化させたらこの数が一番大きく減少するか見積もる。このようにして第1図cの修正量の分布が得られた。したがって、2日予報の誤差が小さくなるように初期値を観測誤差の程度だけ変えてやったら、5日予報が大きく改善されたということになる。

1994年4月の1か月間について、この方法によって初期値を修正した5日予報の成績を、もとの初期値か

\* 気象庁予報部数値予報課。

© 1999 日本気象学会



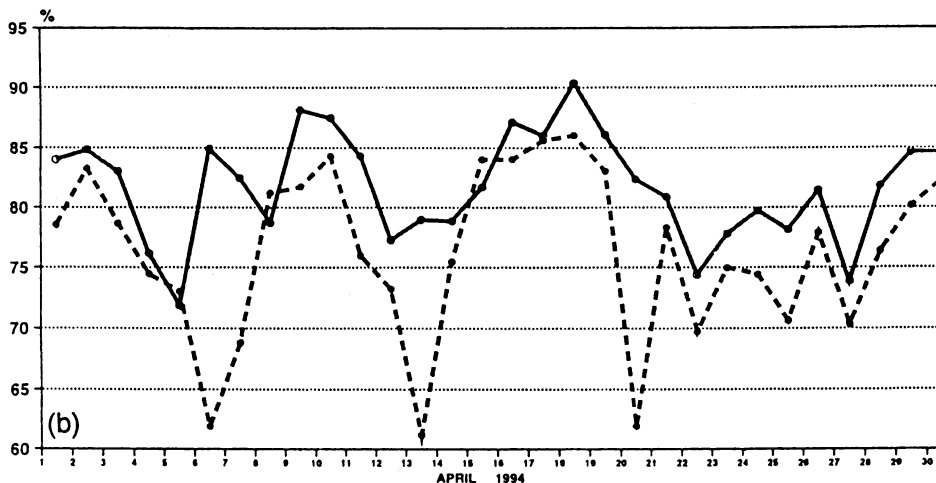
第1図 (a) 1994年1月3日におけるECMWFとドイツ気象局の500 hPa高度の初期値の差。(b) それらからの5日予報の差。(c) ECMWFの初期値の修正量。(d) そのときの5日予報の差。かっこ内は等値線の間隔で、(a)を除いて0線は省略、負の等値線で囲まれた領域に陰 (Rabier *et al.*, 1996)。

ら出発した5日予報の成績と比べたものが第2図である。修正するとほとんどの場合で成績が向上するうえ、予測精度の日々の変動もかなり解消することがわかる。この方法は、2日後の実況を使うので実際の予報には役立たないが、初期値の改善によって予測精度が向上する余地がまだ多くあることを示し、数値予報における初期値推定法であるデータ同化の精密化の必要性を、数値予報関係者に強く印象づけた。

## 2. データ同化による初期値の推定

数値予報では、初期値として使われるある時刻の大

気の状態を推定するために、その時刻の観測データだけでなく、それより過去の観測データも利用する。大気の運動は物理法則にしたがって時間発展しているから、過去の観測データは現在の状態を推定するための有効な情報を含んでいる、という考えに基づく。こうすることによって、現在の観測データだけを用いるよりも精度の高い初期値の推定が可能になる。この過去の観測データが持つ情報を現在に伝えるために数値モデルが使われることから、このような初期値の推定法は「データ同化」と呼ばれている。観測データを数値モデルに取り込む(同化する)という意味合いが込め

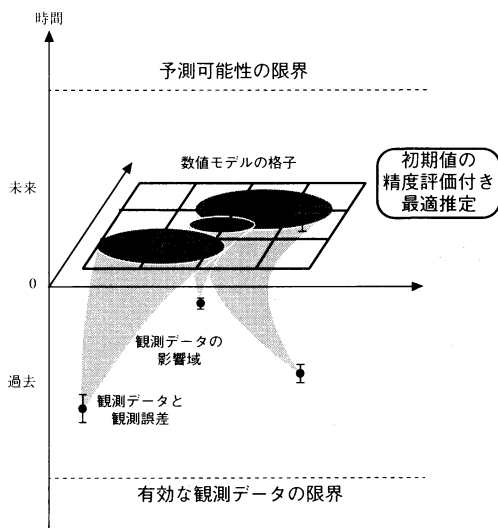


第2図 1994年4月の北半球500 hPa 高度の5日予報のアノマリー相関の比較. 破線はもとの予報, 実線は初期値を修正した予報 (Rabier *et al.*, 1996).

られている.

第3図にデータ同化の概念図を示す. データ同化の目的は, 時空内に不均一に分布する多種多様な観測データから, 数値モデルの格子点上におけるある時刻の大気の状態を, 精度評価を付けて最適推定することである. 一般に, 観測される物理量 (観測変数) は数値モデルの予報変数とは異なるため, 問題は簡単ではない. 例えば, 大気の温度の初期値を求めるときに, 人工衛星による多チャンネルの赤外放射データを使う場合などがそれに該当する. なお当然のことながら, 過去の観測データが持つ情報の時空内の伝わり方は, 大気運動の力学に従う. それが移流であれば, 図に示した観測データの影響域は1本の曲線になり, 拡散であれば時間とともにじわっと広がる. 波動であれば, それは最大群速度で進む範囲内に伝播する. 実際には, 数値モデルが非線形なために異なる観測データの影響域同士が相互作用するので, 影響域の形はもっと複雑になる.

ここで注意しなければならないことは, 過去の観測データを使うとはいっても, あまりに昔の観測データは現在の初期値を推定するためには役立たないため, 有効な観測データの個数には限りがあることである. これは, 大気運動には予測可能性の限界があり, それより先では初期値の情報がほとんど失われてしまう事情と同じである. また, 過去の観測データほど有効な情報が少なくなるから, 現在の観測データが持つ情報に換算したときの観測データの有効な個数は, 第3



第3図 データ同化の概念図.

図の有効な限界内に属する観測データの数より少なくなる. これはおおまかには, 観測誤差の精度で推定できる格子点上の予報変数の個数とみなせるが, それが数値モデルの自由度 (全格子点上の予報変数の個数) よりあまりに小さいと, 推定としての意味がほとんどなくなってしまう. ただし, 現実の大気は本来の自由度よりも小さな自由度の範囲内で運動していると考えられるので, 観測データの個数が数値モデルの自由度よりある程度少なくても, 高い精度の推定は可能であ

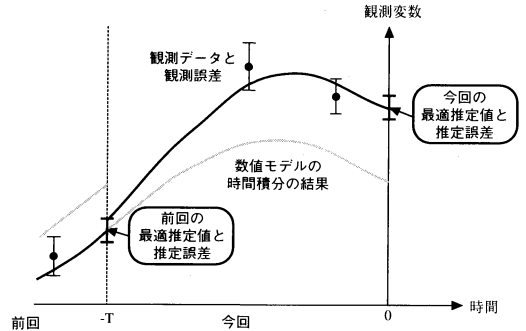
る。

さて問題は、第3図の初期値の最適推定をどのようにして実現するか、である。今でもよく使われるデータ同化の方法に、直接挿入法やナッジング法がある。直接挿入法は、過去のある初期値から数値モデルを時間積分しながら、予報変数などを観測データと置き換えていく方法で、降水量データから非断熱加熱率を適当な方法で推定して、それを数値モデルの非断熱加熱率として用いることなども含まれる。一方、ナッジング法では、予報変数を観測データに近づけるための強制項を数値モデルに加えて、同様の時間積分を行う。これらはデータ同化という名前がぴったりの方法であるが、観測誤差が考慮されないばかりでなく、そもそも推定の方法論としての体裁をなしていない。また、一部の例外を除いて、予報変数と異なる物理量の観測データをそのまま利用することができない。

最近までオーソドックスだった方法は最適内挿法で、数値モデルによる短時間予報値を第1推定値として、予報誤差と観測誤差を考慮しながら第1推定値と観測データとの重み付き平均をとる。短時間予報値に過去の観測データの情報が含まれている訳だが、それ以外の観測データはすべて初期時刻の観測データとみなすため、極軌道衛星などによる非定時の観測データに十分対応できない。また、予報変数でない観測データの利用にも困難がある。後者の困難を解決するのが3次元変分法、前者の問題も除くのが4次元変分法である。別にカルマンフィルタという名前で総称される範疇の方法があるが、数値モデルが線形ですべての誤差がガウス分布に従う場合には、4次元変分法と等価になる。

翻って考えてみると、データ同化とは結局、時空内に分布するすべての観測データと矛盾しない大気の時間発展を推定する、という問題に帰着できる。これは一種の逆問題、いわゆるインバージョンである。リモートセンシングや固体地球で行われるインバージョンと異なるのは、時間軸を含むことである。この時間軸を含むインバージョンとしてのデータ同化の特徴がはっきりと現れるのは4次元変分法なので、この方法について第4図を用いて説明する。

4次元変分法では、ある期間内で数値モデルを時間積分した結果のうち、その期間内のすべての観測データと観測誤差の範囲内でもっとも一致するものを探し出し、期間の終わりにおけるその時間積分の結果を求める推定値とする。ただし、数値モデルは完全ではな

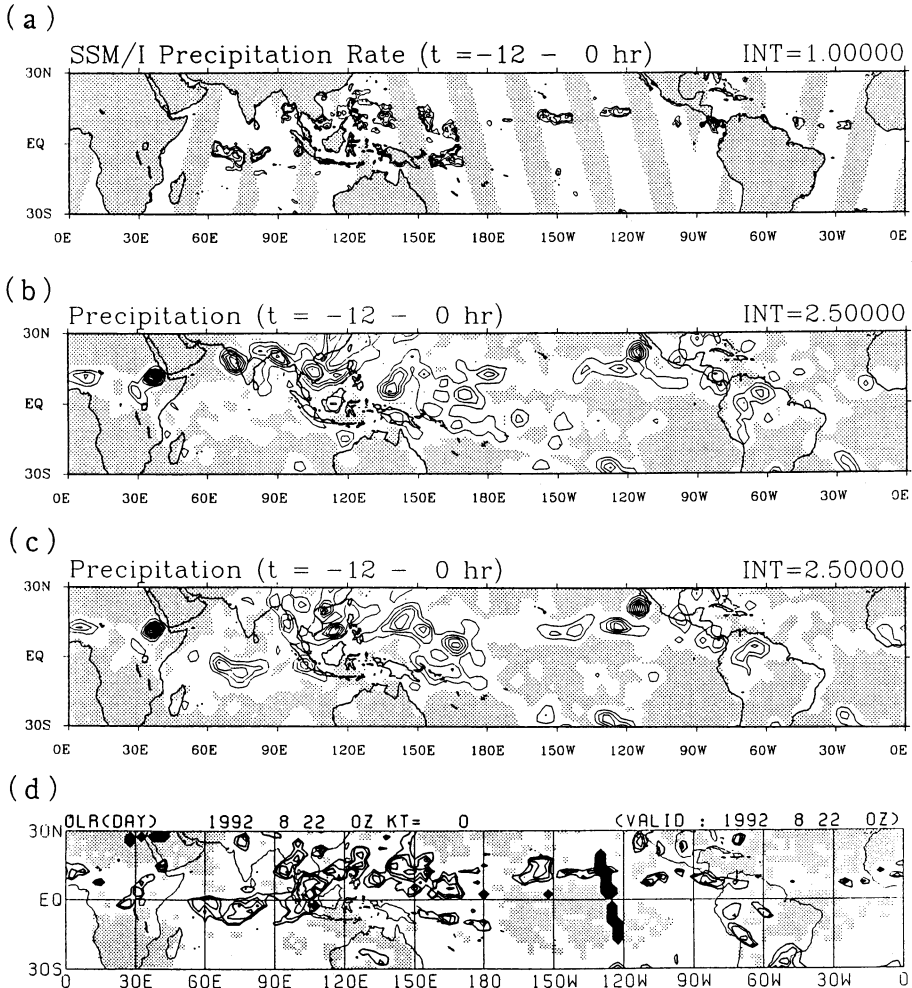


第4図 4次元変分法の説明図。

いので、時間積分の期間を第3図の有効な観測データの限界まで広げることにはできない。そこで、数値予報モデルの不完全性の影響が十分小さいとみなせる程度に期間の長さを短くして、第4図に示したように、期間をずらしながら上の操作を繰り返すことになる。その場合には、前回のデータ同化による推定値とその誤差も、観測データと同じように扱われる。

他のデータ同化法と異なって、4次元変分法では数値モデルによって表現される物理法則そのものを用いるので、観測データから多くの情報を引き出せる。また、多チャンネルの赤外放射データから大気温度を求めるためのインバージョンなども、この方法の一部として含まれる。4次元変分法がリモートセンシングのインバージョンより一般的なのは、異なる時刻のインバージョンの結果が物理的に首尾一貫していなければならないという条件が課せられるだけでなく、他のすべての観測データとも矛盾してはならないという強い条件がつくことである。4次元変分法の詳細については、露木(1997)などを参照していただきたい。

4次元変分法がさまざまな観測データを容易に扱える例として、極軌道衛星による熱帯海上の降水量データを、全球のラジオゾンデデータとともに同化して、熱帯全域の12時間積算降水量を推定した結果を第5図に示す。非定時に観測された降水量データが自然に同化されているだけでなく、降水量データがない地域では、ラジオゾンデデータが降水量の推定に有効に使われている。第5図dに示した別の極軌道衛星による外向き長波放射データと比較することにより、西太平洋付近の降水量の推定値が定性的にもっとも一致することがわかる。なお、予測精度に対する4次元変分法の効果としては、極軌道衛星による海上風データをこの方法によって同化すると、北半球の予測精度が大きく向



第5図 4次元変分法による1992年8月22日0~12 UTCの積算降水量の推定。(a)衛星観測による降水量データの合成図。等値線の間隔は0.25, 0.5, 1, 2, 4 mm/hで、陰はデータの無い領域。(b)観測データを同化しないときの数値モデルの時間積分の結果。等値線の間隔は2.5 mmで、陰は0.25 mm以下の領域。(c)4次元変分法による推定値。等値線の間隔などは(b)と同じ。(d)地方時に基づく外向き長波放射量の合成図。200 W/m<sup>2</sup>以下の等値線を25 W/m<sup>2</sup>間隔で示し、275 W/m<sup>2</sup>以上の領域には薄い陰、欠測には濃い陰。他の図と比較できるのは110°E~180°の領域に限られる(Tsuyuki, 1997)。

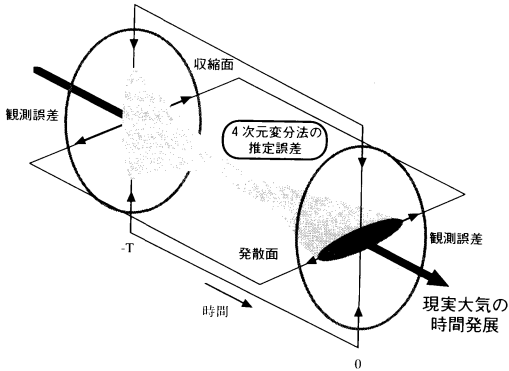
上するなどの結果が得られている(Isaksen, 1998)。4次元変分法は、1997年秋にECMWFで初めて実用化された。

### 3. 推定誤差とアンサンブル予報

データ同化では過去の観測データも利用するので、それによって推定される初期値の精度には、大気運動の力学が強く反映される。この初期値の推定誤差は、アンサンブル予報において初期値の摂動を構成するう

えで必要になる。そこで、4次元変分法の推定誤差の振舞を調べてみる。

第6図の模式図は、現実の大気の時間発展を1本の太矢印で表し、それを同化期間の両端で観測したときの観測誤差の範囲を薄い閉曲線で、4次元変分法によるその推定誤差を陰をつけた領域で描いたものである。すでに述べたように、現実の大気は本来の自由度より小さな自由度の範囲内で運動していると考えられる。それから少しずれたときの時間発展の様子を調べ



第6図 4次元変分法の推定誤差の模式図。

ると、図に示したように、一般にもとの時間発展に近づく方向（収縮面）とそれから離れる方向（発散面）とが共存している。この発散面の存在が、数値予報の初期値敏感性の原因になっている。収縮面に沿った運動としては、散逸による減衰や地衡風調節などが挙げられる。

推定誤差が図のようになることは、4次元変分法の方法から察しがつくであろう。それは期間の中間で小さく、期間の両端で大きい。数値予報の初期値として使う期間の終わりの推定誤差は、発散面の方向にのびた扁平な分布になる。言い換えれば、初期値の誤差に

は時間と共に成長するような成分が多く含まれることになる。カルマンフィルタは4次元変分法とおおまかには等価であり、最適内挿法はカルマンフィルタの粗い近似、3次元変分法は最適内挿法の拡張とみなせるから、この結論は他のデータ同化法についてもおおよそ当てはまると考えてよい。したがって第6図は、アンサンブル予報において成長しやすい摂動を使うことの1つの根拠になる。

#### 参考文献

- Isaksen, L., 1998 : Impact of ERS scatterometer winds in ECMWF's four dimensional variational assimilation system, Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modeling, No. 27, 1.29-1.30.
- Rabier, F., E. Klinker, P. Courtier and A. Hollingsworth, 1996 : Sensitivity of forecast errors to initial conditions, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 122, 121-150.
- Tsuyuki, T., 1997 : Variational data assimilation in the tropics using precipitation data. Part III : Assimilation of SSM/I precipitation rates, Mon. Wea. Rev., 125, 1447-1464.
- 露木 義, 1997 : 変分法によるデータ同化, 数値予報課報告・別冊第43号「データ同化の現状と展望」, 気象庁予報部, 102-165.

4011 : 101 (予測可能性 ; アンサンブル予報)

### 3. 予測可能性とアンサンブル予報

高野 清 治\*

#### 1. はじめに

地球大気はカオスの性質を持ち、初期値に含まれる微小な誤差が成長するため、初期値問題としては原理

的に限界がある。このことは数値予報の発展の初期の段階から認識されていた（例えば Lorenz, 1965 ; Epstein, 1969など）。一方数値予報の誤差をもたらすものはそれだけではなく、数値予報モデルや客観解析の不完全性に起因するものもある。

実際の数値予報開発の現場ではこれまで、モデル

\* 気象庁気候・海洋気象部気候情報課。

© 1999 日本気象学会