気象庁メソスケールモデルによる4次元変分法データ同化システムの開発

石川宜広（気象庁数値予報課）

1. はじめに

気象庁では、平成 13 年 3 月から防災気象情報の高度化を目的として水平分解能 10km 格子のメソスケールモデル(MSM)によるメソ数値予報が本運用となり、日本列島全体をカバーする予報領域で 18 時間先までの予報が 1 日に 4 回実施されている。こうした中でメソ数値予報の精度をより向上させることは気象業務において最優先課題であり、その目的で今年度中に 4 次元変分法によるデータ同化の導入が計画されている。4 次元変分法はメソスケール現象に適応した時間・空間解像度の高い観測データの利用を可能にし、これをモデルの力学を通して初期値に適切に反映させ、初期値の精度を飛躍的に向上させるものである。

4 次元変分法の業務化にとって最も障害となる点は数値予報の反復計算や評価関数の行列計算といった膨大な計算コストである。未だかつて世界の主要な数値予報センターでメソスケールを対象としたデータ同化に 4 次元変分法が使用されていない理由もこの点にある。現在、計算コストの節約を目的に並列・分散メモリ計算機での最適化やインクリメント法の開発を行なっており、実用的なシステムの構築を目指している。

発表では背景誤差共分散の設計や 4 次元変分法データ同化システムによる同化実験の結果について述べる。

2. 4 次元変分法

従来の最適内挿法による解析手法と比べて、4 次元変分法の優れた点は次のとおりである。

- 非定時観測データや、連続観測による時系列データをデータ同化に活かすことができる。
- 地衡風平衡が成立しない場合でもメソスケール現象のじょう乱の解析に適した、より高レベルの力学的バランスを初期値に反映させることができる。
- 客観解析の解析変数以外の観測データ（例えば、レーダ降水量、GPS 大気遅延量、ドップラー動径速度など）についても、変数変換せずにそのまま同化することが可能で、観測データの高度利用が柔軟に行える。

4 次元変分法では、数値予報モデルの予報変数そのものを解析変数としている。4 次元変分法で使われる一般的な評価関数は次のようになる。

$$J = \frac{1}{2}\left(x_0 - x_0^b\right)^{\mathrm{T}} \mathbf{B}^{-1}\left(x_0 - x_0^b\right) + \frac{1}{2}\left(H\begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ \vdots \\ x_N \end{pmatrix} - y^o\right)^{\mathrm{T}} \mathbf{R}^{-1}\left(H\begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ \vdots \\ x_N \end{pmatrix} - y^o\right) + J_c \qquad (1)$$

ここで、下付きの添字はタイムレベルを表し、$\{x_i\}$ は同化期間のすべてのタイムステップにおける予報変数、x_0 は同化期間の初めにおける予報変数、x_0^b はその第一推定値、y^o は同化期間内のすべての観測値、H は予報変数を観測と同じ物理量に変換する観測演算子、B と R は背景誤差共分散行列と観測誤差共分散行列である。(1)式の右辺第 1 項は第一推定値との差を測る項であり、数値予報モデル大気の時間発展が初期値によって一意的に定まる。右辺第 2 項は観測値との差を測る項で、観測演算子が複数のタイムレベルの予報変数を使うことで、任意の時刻の観測値や積算降水量の観測値などにも対応できる。右辺第 3 項はペナルティー項 J_c で、解析値に含まれる重力波ノイズの振幅を抑制させるために付け加えられている。4 次元変分法の開発では、数値モデルの力学過程及び、物理過程について接線形コードを作成し、さらにこれを評価関数の勾配を計算するアジョイント演算子に変換する。この手順をアジョイント法と呼ばれており、得られた評価関数の勾配をもとに、共役勾配法や準ニュートン法等の非線形最適化アルゴリズムを利用して、評価関数の最小値探索を行ない、最適な初期値 x_0 を求める。

3. 背景誤差共分散の設計

背景誤差共分散の対角化によって、計算機資源の節約を図るため、次のような仮定を行なう。

第一推定値の初期値と境界値での修正量の調整に使用する変数(制御変数)として、風ベクトルのアンバランス成分 u_u v_u 仮温度 Tv、地上気圧 Ps、比湿 q を使用している。風のアンバランス成分は(2)式のように予報変数から変数変換して求める。ただし、G は回帰係数、ϕ はジオポテンシャル高度、p はモデル面気圧である。

$$u_{\mathrm{U}},\ v_{\mathrm{U}},\ (T_v,\ p_s),\ q \quad \text{(grid space)}$$

$$\begin{pmatrix} \Delta u_{\mathrm{U}} \\ \Delta v_{\mathrm{U}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta u \\ \Delta v \end{pmatrix} - \mathbf{G}\nabla_h\left(\Delta\phi + \frac{R\overline{T_v}}{\overline{p}}\Delta p\right) \qquad (2)$$

異なる制御変数の間には誤差相関がないと仮定する。次に鉛直誤差相関行列の固有ベクトルによって展開し、(3)式により鉛直レベルからモードに変換する。

$$\begin{pmatrix} \Delta\tilde{\mathbf{x}}_1 \\ \vdots \\ \Delta\tilde{\mathbf{x}}_n \end{pmatrix} = \mathbf{U}^{\mathrm{T}}\begin{pmatrix} \sigma_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \sigma_n \end{pmatrix}^{-1}\begin{pmatrix} \Delta\mathbf{x}_1 \\ \vdots \\ \Delta\mathbf{x}_n \end{pmatrix}$$

$$(\mathbf{U}\ \text{: orthogonal}\quad ,\sigma_i\ \text{: s.d. of error}) \qquad (3)$$

異なる鉛直モード間には誤差相関がないと仮定する。

水平誤相関行列のパラメータ化のため、各鉛直モードの水平相関は(4)式のように、一様と仮定する。

$$
\mathbf{C} = \begin{pmatrix} \mathbf{C}_1 & \mathbf{C}_2 & \cdots & \mathbf{C}_{NY} \\ \mathbf{C}_2 & \mathbf{C}_1 & & \mathbf{C}_{NY-1} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ \mathbf{C}_{NY} & \mathbf{C}_{NY-1} & & \mathbf{C}_1 \end{pmatrix} \quad (4)
$$

ここで、水平相関係数はガウス型と仮定すると、(5)式により

$$
\mathbf{C}_{ij\,i'j'} = \exp\left(-\frac{1}{2}\frac{(x_{ij} - x_{i'j'})^2}{\xi^2} - \frac{1}{2}\frac{(y_{ij} - y_{i'j'})^2}{\eta^2} \right)
$$

$$
\rightarrow \quad \mathbf{C}_j = \varepsilon_j \mathbf{C}_1 \quad (j = 1, 2, \cdots, NY) \quad (5)
$$

となる。水平相関係数は東西(あるいは南北)方向のみの水平相関係数 C_1 と係数 ε_j の積となるため、メモリが節約できる。同様に、水平相関係数をコレスキー分解した場合も(6)式のように、C_1 をコレスキー分解した下三角行列 L_{11} と a_{ij} の積になる。

$$
\mathbf{C} = \mathbf{L}\,\mathbf{L}^{\mathrm{T}},\quad \mathbf{L} = \begin{pmatrix} \mathbf{L}_{11} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{L}_{NY} & \cdots & \mathbf{L}_{NY\,NY} \end{pmatrix}
$$

$$
\rightarrow \quad \mathbf{L}_{ij} = \mathrm{a}_{ij}\,\mathbf{L}_{11},\quad \mathbf{C}_1 = \mathbf{L}_{11}\mathbf{L}_{11}^{\mathrm{T}} \quad (6)
$$

これによって、L を前処理で使用することで、背景誤差共分散のスケーリングが完了する。

4. データ同化実験

データ同化実験に使用したシステムは、計算機資源を節約する目的でインクリメント法を採用した。この方法では評価関数の最小探索(反復計算)を行なうのに20km格子の低解像度モデルを使用する。求める解析結果は、同化期間の初めにおける第一推定値に、反復計算で得られる低解像度モデルによる修正量を加えて、それを初期値にしてMSMを同化期間の終わりまで時間積分することによって得られる。実験システムにはこれ以外にも同化する観測データの品質管理や、高・低解像度モデルの初期値と境界値を作成するためのモデル地形を考慮したデータ変換などが含まれている。次の表1に低解像度モデルの仕様を示す。

表 1 低解像度モデルの仕様

使用計算機	分散メモリ・並列計算機
観測同化期間	3時間／回
前方モデル	力学過程とすべての物理過程
随伴モデル	力学過程、水平拡散、鉛直拡散、湿潤過程、短波放射
格子数と間隔	181×145、20km
鉛直レベル	40層 (最上層 10hPa)

実験に使用できるデータとしては現業で利用されている観測データ(地上,高層,航空機,船舶など)やレーダー・アメダス解析雨量があり、観測データの中には平成13年6月から現業利用となった全国25カ所のウインドプロファイラも含まれている。

実験システムの同化方法として、観測要素には風、気温、相対湿度、地上気圧及び1時間積算雨量を使用し、予報の初期時刻の前3時間や、前6時間を4次元変分法の同化期間としている。また、正時±30分以内の観測を正時の観測とみなし、1時間間隔で全ての観測と数値予報モデルの大気との差(評価関数)が最小になるように20回程度の反復計算を行っている。最終的には得られた初期値で予報実験を行い、その結果について現業MSMと比較することで、4次元変分法のパフォーマンスを見ている。次に最近の実験例として四国松山の大雨について示す。

本事例は、平成13年6月19日から20日にかけて、停滞した梅雨前線の影響で、西日本を中心に局地的な大雨に見舞われたものである。松山市内では1人が死亡したほか、和歌山、奈良両県内で土砂崩れが相次いだ。図1は、2001年6月19日12UTC初期時刻の前6時間で4次元変分法によるデータ同化を行い、得られた初期値を用いた3時間予報での3時間積算降水量である。

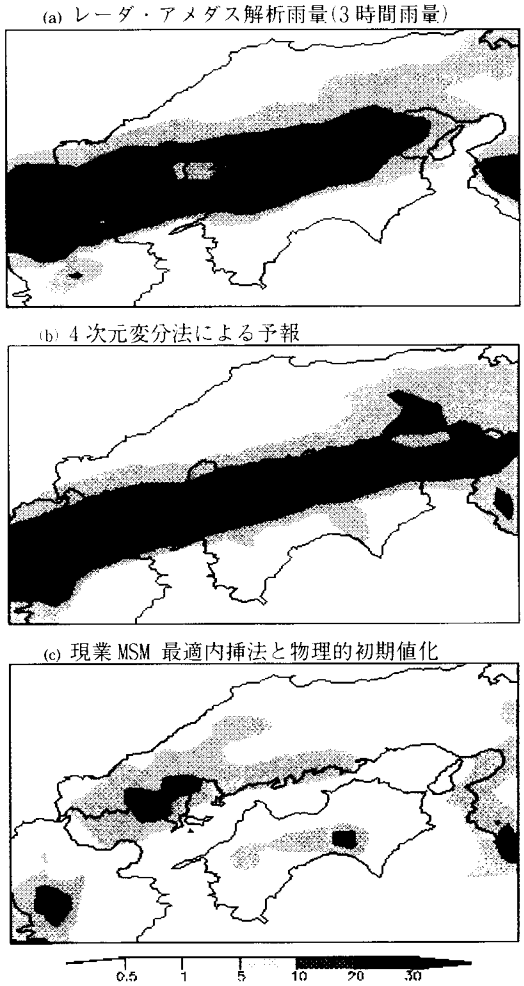

図 1. 3時間予報での3時間積算雨量[mm](2001年6月19日12UTC 初期値)

(a)は解析雨量、(b)は4次元変分法、(c)は現業MSMである。現業MSMの初期値作成には最適内挿法と物理的初期値化を組み合わせたプレランと呼ばれる解析手法が使用されている。(b)の4次元変分法による予報では、(a)の観測に対応する愛媛南部を中心とした3時間積算降水量30mm以上の強い降水域が正確に表現されている。これに対して現業MSMの3時間予報(c)では愛媛南部に強い降水の集中域が全く見られない。この結果から明らかなように、4次元変分法はプレランを用いた現業MSMに比べて降水域の位置や強度の予報を大きく向上させた。