

気象庁における非静力学モデル用変分法データ同化システム(JNoVA)の開発 三好建正(気象庁数値予報課)

1. はじめに

局地的な大雨等防災に直結するメソ気象現象を予測することは気象業務の重要な課題のひとつである。このため、現在気象庁では、静力メソスケールモデル(MSM)及び世界初の現業化に成功した4次元変分法によるメソスケールのデータ同化システムを運用している。さらに、よりきめ細かく高度なメソ気象現象の予測を行うため、気象庁では非静力学モデル(JMA-NHM)を現業化に向けて開発してきており、2002年4月からは、専用の高度な初期値解析システムとして、変分法データ同化システム(JNoVA: JMA Non-hydrostatic model Variational data Assimilation system)の開発を開始した。

数値予報モデルは初期値による影響が大きく、予報精度は初期値の精度に大きく依存する。現在主流となってきた変分法データ同化は、第一推定値と観測値から最尤推定による最適解を得るものであり、今後増加が予想されるリモートセンシングによる観測を有効に活用できるなど、観測の情報を最大限に生かすことのできる現在最も優れた方法のひとつである。一方、現在運用している4次元変分法では、静力学平衡の仮定という制約、微物理量の解析がないなどの点で、非静力学モデルの初期値解析法としては不十分である。このため、高精度の非静力学モデルの実現には専用の高度なデータ同化が不可欠である。

変分法データ同化では、評価関数に含まれる行列の次元が大きすぎるため、これを陽に計算することは現実的に不可能である。このため、様々な仮定を置くことにより計算量を減らす。この際、モデルの特性により適切な制御変数を設計することが必要であり、これがデータ同化モデルの骨格を決める。

本発表では、非静力学モデル用に開発しているJNoVAの背景誤差共分散の設計を含めた現在の開発状況と、今後の展望や課題についての概要を述べる。

2. 変分法によるデータ同化

数値予報モデルの精度が向上して予報誤差が小さくなり、予報値の信頼度が観測データと比較できるほど向上した現状において、データ同化は予報値を第一推定値とし、これに観測データが加わった情報から最適

な状態を推定することを意味する。変分法では、これを、真の状態のまわりに第一推定値 x^b と観測値 y^o がそれぞれ背景誤差共分散 B と観測誤差共分散 R のガウス分布に従い出現すると仮定し、最尤推定により最適解を求めるという手続きで行う。すなわち、次式で表される評価関数 J が最小となる x を最適解とする。

$$J = \frac{1}{2}(x - x^b)^T B^{-1}(x - x^b) + \frac{1}{2}(HMx - y^o)^T R^{-1}(HMx - y^o) \quad (1)$$

第1項を背景項、第2項を観測項という。ここで、 H は観測演算子、 M はモデルである。異なる時刻における観測値が、モデル M により時刻を写された真の値のまわりにガウス分布で出現することを意味しており、モデルが完全であることが仮定されている。なお、3次元変分法では1時刻の観測のみを扱い、(1)式の M は使われない。

3. JNoVAの背景誤差共分散の設計

B は x の次元の2乗の次元をもつ。 x は状態を表すベクトルであり、各格子点上の各予報変数すべてを成分にもつため、現業モデルに相当するモデルの場合、少なく見積もっても B を保持するには数十T(テラ)バイトの情報量が必要である。これをメモリ上に展開することは現在の計算機では事実上不可能であり、(1)式を直接計算することはできない。このため、 x を次のように変数変換する。

互いに独立な中間変数 u に変数変換

鉛直共分散が独立になるよう固有モードに変換

水平相関行列をCholesky分解した行列で変換

以上の変数変換を行い、(1)式を変形すると分かるように、 B は単位行列になる。この手続きでは、水平一様性や変数間相関の無視などの近似が行われ、 B の情報量を減らしている。

及びの手続きは機械的に行われるが、の変数変換については、変換後の中間変数 u の変数間相関を無視するという大胆な近似を行うため、モデルの特性を考慮した慎重な設計が必要である。このため、2002年5月頃の31日間62例についてJMA-NHMの予報実験を行い、この結果を統計処理して背景誤差共分散を推定した。予報誤差の推定法にはNMC法を用いた。この際、適当な変数変換を行い、変数間相関を無視しても

影響が少ない中間変数 u を設計した。この結果、予報変数 U (東西風), V (南北風), W (鉛直風), P (気圧), (温位), q_v (水蒸気量) に対応する中間変数として、表 1 に示す 6 変数を選んだ。ここで、 ψ は流線関数、 ϕ は速度ポテンシャル、 D は水平風の発散、 χ は Exner 関数、 β は静力学平衡を仮定して地表から温位により計算されたバランス気圧の Exner 関数、 q_{vs0} はある時刻における温度から決まる飽和水蒸気量、 r_1 から r_4 は同じ点での変数間相関をなくすために統計的に決まる回帰係数である。

第 1 表 JNoVA の制御変数

制御変数名	定義式
非バランス流線関数	$\psi_U = \psi - r_1 \phi_B$
非バランス速度ポテンシャル	$\phi_U = \phi - r_2 \psi - r_3 \phi_B$
非バランス鉛直風	$W_U = W - r_4 \int D dz$
非バランス気圧	$P_U = P - P_B$
温位	q
水蒸気量	$q_{v_U} = \frac{q_v}{q_{vs0}}$

4. 3次元変分法(JNoVAO)の動作結果

3次元変分法(JNoVAO)は、予報変数 - 制御変数間の変数変換が主要部分を成し、これにデータの入出力部分、主に空間内挿から成る観測演算子を加えたものから成る。これは、今後開発を進めるより高度な3次元変分法や4次元変分法でも用いられる中核部分である。

初期動作テストとして、格子点上の1点に観測インクリメントを与え、JNoVAOによる解析を行った。領域の中心に 1m/s の東風を与えた場合の解析インクリメントを図 1 (a) に示す。風は南北に渦をつくり、渦の中心に気圧の極値が解析されている。ここには示していないが、温位も気圧と同様となる。この結果は、前節で述べた中間変数 u の設計の際に考慮したバランスを示している。形状がゆがんで見えるのは、 ψ と ϕ 間の相関を考慮した回帰係数 r_2 の影響である。次に、この場合の中心における東西風速の鉛直断面図を図 1 (b) に示す。これは、統計的に求められた鉛直相関を表しており、鉛直固有モードの変数変換を通じて現れているものである。

5. 今後の展望及び課題

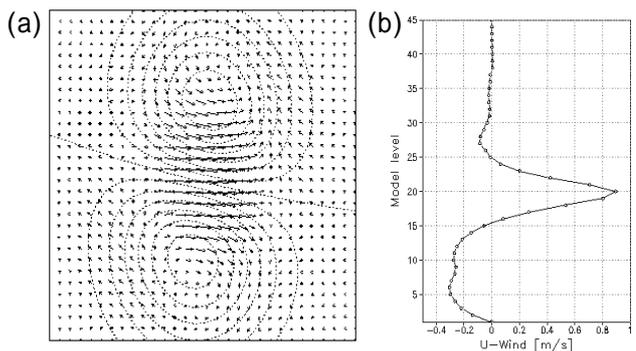
今年 4 月から開発をはじめた JNoVA は、制御変数が設計され、3次元変分法のプロトタイプ(JNoVAO)が動

き始めたところであり、開発の黎明期にある。今後開発が進み、より高度な初期値を作成できるようになれば、非静力学モデル本体の改良ともあわせ、さらに高精度できめ細かいメソスケール現象の予測及び再現が可能になることが期待される。このための当面の方向性として、高度な3次元変分法システムの構築、4次元変分法システムの開発に取り組むこととしている。

3次元変分法の高度化には、次のような課題がある。第一に、(1)式に適切なペナルティ項を加えることで新たなバランスを考慮することができるため、この設計について検討の必要がある。第二に、適切な微物理量を初期値に与えることは目先の予報で特に重要であり、地上の降水やレーダー反射強度、衛星などの観測を用いて、雲のプロファイルなども含めた最適な微物理量を解析することは、困難だが解決すべき問題である。

また、3次元変分法はモデル本体を用いないため比較的少ない計算資源で実現できるというメリットがある。このため、PC 上でも動作可能なものや、時空間的に密なドップラーレーダー等の観測データを用いて頻繁にデータ同化を行う RUC(Rapid Update Cycle)を実現することが可能である。

4次元変分法では、微物理量の適切な解析、その日の場に応じた最適な背景誤差共分散による解析をある程度実現することができる。現在は、湿潤・放射過程を除いた JMA-NHM をベースに接線形モデル及びアジョイントモデルのコーディングを行っている。



第 1 図 領域の中心に 1m/s の東風を与えた場合の JNoVAO の解析結果。(a)は東風を与えたモデル面における断面図。矢印は風ベクトル、等値線は気圧を表す。温位は気圧と同様の等値線を描く。渦を見やすくするため南北風を 2 倍の大きさにして表示している。(b)は領域の中心における東西風速の鉛直断面図。横軸は風速 [m/s]、縦軸は鉛直モデル層番号を表す。東風が観測のある層の上下にも広がっているのは、統計的に求められた鉛直相関を反映している。