

3次元変分法による熱力学場の解析について

*本田 有機 (気象庁数値予報課) Ming Xue (Center for Analysis and Prediction Center/Oklahoma University)
Jidong Gao (Center for Analysis and Prediction Center)

1. はじめに

数値予報モデルの高解像度化・高性能化が進むにつれて、メソスケール・ストームスケールの現象を捉えた初期値が必要とされてきている。このスケールの現象を空間的・時間的に高密度に観測できる測器として、ドップラーレーダが挙げられる。ドップラーレーダにより得られた反射強度及び動径風を使うことで3次元の風速場を復元する方法が開発されてきた(例えば Shapiro et al. 1995)。数値予報の初期として利用するためには、風速場の他に熱力学場等が必要になる。熱力学場の解析手法については Gal-Chen(1978;以下、G78)や Hane and Scott(1978;以下 HS78)に報告があるが、地形を含むような現実的な場には適用できないこと等の問題が見られる。本研究では、これらの問題点を解消するために3次元変分法を用いた解析手法(以下、3DVAR)に拡張し、従来の手法との比較実験を行ったので、その結果を紹介する。

2. 3次元変分法による解析手法の定式化

評価関数は次のように定義される。

$$J = J_B + J_O + J_R + J_D$$

各項は第一推定値に関する背景項(J_B)、気温や気圧の直接観測に関する観測項(J_O)、レーダーデータから復元された風速場に関する項(J_R)そしてスムージングに関する項(J_D)である。

J_R では、力学的なバランスを考慮するために、非弾性運動方程式を利用している。風に関する項を右辺に置いた場合、運動方程式は次のようにかける。

$$\frac{\partial p'}{\partial x} = -\frac{\partial(-u)}{\partial t} - \bar{V} \cdot \nabla u + \bar{f}v + F_x (\equiv A)$$

$$\frac{\partial p'}{\partial y} = -\frac{\partial(-v)}{\partial t} - \bar{V} \cdot \nabla v - \bar{f}u + F_y (\equiv B)$$

$$\frac{\partial p'}{\partial z} - \frac{\bar{g}}{\bar{p}} \bar{p}' + \frac{\bar{g}}{\bar{p}} \bar{p}' = -\frac{\partial(-w)}{\partial t} - \bar{V} \cdot \nabla w + \bar{g}[-q_c - q_r + 0.608q'_v] + F_z (\equiv C)$$

ドップラーレーダにより時間的にも高密度で観測できるために、右辺第一項の風速場の時間変化率を含めた右辺の各項が得られる(微物理量もここでは与えられていると仮定する)。これから、 J_R は各運動方程式の両辺の差を取り、その2乗の和で表されることとする。しかし、レーダーデータはビームが降水粒子に反射することで得られる上、反射強度が弱い付近では復元された風速場の品質が保証さ

れないことも推測される。このため、 J_R は反射強度が閾値を超えた範囲のみで評価することとする。

$$J_R = \sum_m \left[\lambda_u \left(\frac{\partial p'}{\partial x} - A \right)^2 + \lambda_v \left(\frac{\partial p'}{\partial y} - B \right)^2 + \lambda_w \left(\frac{\partial p'}{\partial z} - \frac{\bar{g}}{\bar{p}} \bar{p}' + \frac{\bar{g}}{\bar{p}} \bar{p}' - C \right)^2 \right]$$

ここで $(\lambda_u, \lambda_v, \lambda_w)$ は各項の重みを表し、実行時に設定する。つまり弱い拘束条件(Sasaki, 1970)となる。

背景項(J_B)と観測項(J_O)については、一般的な形で与えることとするので、ここでは省略する。また J_D は2次の水平・鉛直拡散の2乗で定義する。

最小化アルゴリズムにはL-BFGS法を採用する。

3. 一般座標系への拡張

G78 や HS78 は次の評価関数を水平面内で最小化することで気圧場を復元している(以下 GHS 法とする)。実際には適当な境界条件を課すことで、2次元のポアソン方程

$$J_{GHS} = \iint \left[\left(\frac{\partial p'}{\partial x} - A \right)^2 + \left(\frac{\partial p'}{\partial y} - B \right)^2 \right] dx dy$$

式に変換して解を求めている。

しかし、水平方向の運動方程式をデカルト座標系から一般座標系に拡張した場合、気圧の鉛直微分も含まれる。地表に沿った座標系(ξ, η)を考慮した場合は、

$$\frac{\partial}{\partial \xi} (J_3 p') + \frac{\partial}{\partial \zeta} (J_1 p') = A, \quad \frac{\partial}{\partial \eta} (J_3 p') + \frac{\partial}{\partial \zeta} (J_2 p') = B$$

となる。但し、 J_1, J_2, J_3 は z の、微分である。

これから明らかのように、GHS法を地表に沿った座標系に適用した場合、2次元のポアソン方程式を導出することができない。

3DVAR では、一般座標系への拡張時に座標変換による制約はないため、より幅広く適用することが可能となる(式は省略)。

4. 理想実験: Big Thompson Storm

地形の効果に着目して、1976年7月31日から8月1日にかけて Big Thompson 溪谷で発生したストームについて取りあげ、鉛直2次元で理想的なシミュレーションを行った。予報モデルとしてはオクラホマ大学 CAPS で開発されている ARPS(The Advanced Regional Prediction System, Xue et al., 2001)を用いた。理想的な数値実験は

Yoshizaki and Ogura(1988)で行われているので、詳細についてはこちらを参照願いたい。

図1は予報1時間(FT=3600[s])後の熱力学場(グラディエーションが温位の擾乱、等値線が気圧の擾乱をあらわす)を示している。ストームが形成され、成長している様子が示されている。山頂付近には、降水の蒸発により形成されたコールドプールが見られる。

ここでは、FT=3600[s]とその前後のタイムステップ(FT=3594, 3606[s])の風速場を用いて GHS 法と 3DVAR による解析を試みた。精密な風速場とその時間変化率が与えられているので、データに含まれるノイズなどの影響は最小限に押さえられている。GHS 法ではストームに伴う温位の擾乱の極大付近の構造がかすかに表現されたのみで、ほとんど再現することはできなかった(図2)。これに対して 3DVAR では中層付近の構造を中心に非常に良くストームを再現することができた(図3)。しかし、地表面付近のコールドプールはほとんど再現することができなかった。

5. 結論と今後の課題

今回は、ドップラーレーダのデータから復元された3次元の風速場を使って、非弾性運動方程式を弱い拘束条件として用いる3次元変分法による熱力学場を復元する解析方法を開発した。G78やHS78による解析手法と比較してノイズに弱く、ストームスケールの解析において復元した場の精度が劣ることが分かったが、その差はわずかであり十分実用的である(予稿では結果を省略)。また、地形が重要になってくる事例においては、3DVARは非常に有効であることが示された。

今後の課題としては、ストームの維持・成長に重要であるコールドプールの解析を改善するために、下部境界条件

など地表付近での改良が必要である。また、今回は非弾性運動方程式を弱い拘束条件として用いていたが、強い拘束条件とした場合との比較も興味があるところである。

参考文献

- Gal-Chen, T., 1978: Mon. Wea. Rev., 106, 587-606.
 Hane, C. E., and B. C. Scott, 1978: Mon. Wea. Rev., 106, 654-661.
 Sasaki, Y., 1970: Mon. Wea. Rev., 98, 875-883.
 Shapiro, A., E. Ellis, and J. Shaw, 1995: J. Atmos. Sci., 52, 1265-1287.
 Yoshizaki, M., and Y. Ogura, 1988: J. Atmos. Sci., 45, 3700-3722.
 Xue, M. et al. 2001: Meteor. Atmos. Physics, 76, 143-165.

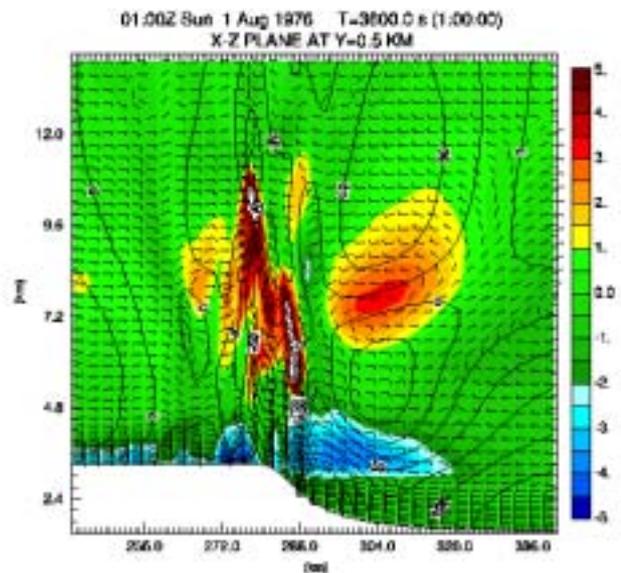


図1: Big Thompson Storm の鉛直 2 次元での理想シミュレーション。予報 1 時間での熱力学場。グラディエーションが温位の擾乱、等値線が気圧の擾乱を示す。ベクトルは(u,w)である。

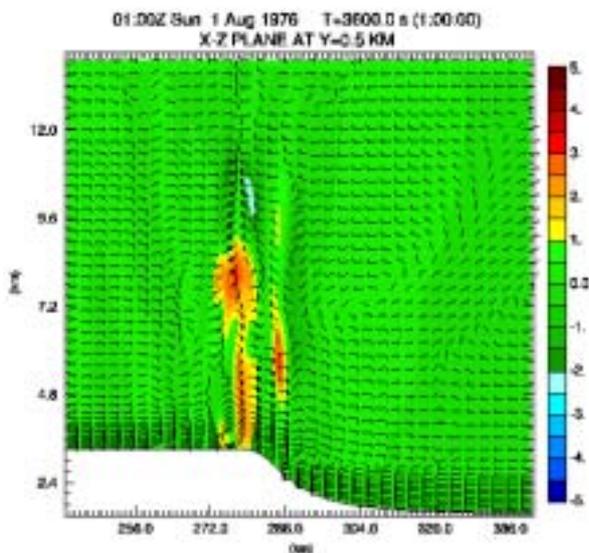


図2: GHS 法による熱力学場の解析結果。その他は図1と同じ。

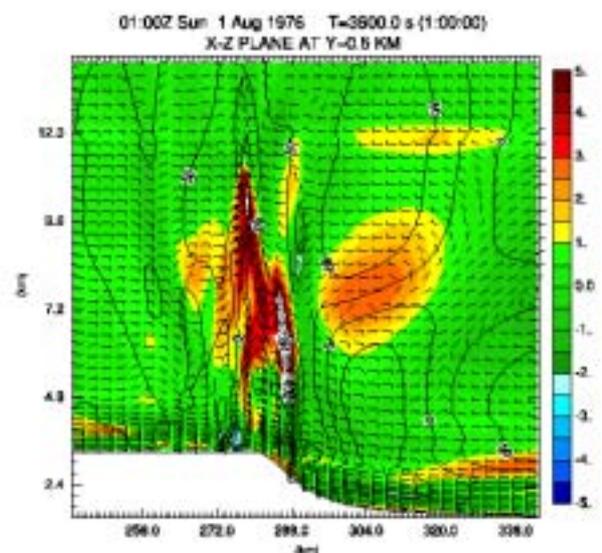


図3: 3DVAR による熱力学場の解析結果。その他は図1と同じ。