

非静力学変分法解析システム (JNoVA) 用の 制御変数の設計と物理過程を含む接線形/随伴モデルの開発について

*本田 有機, 小泉 耕, 西嶋 信 (気象庁予報部数値予報課)

1 はじめに

気象庁では、2002年4月より気象庁非静力学モデル(JMANHM)に基づく変分法解析システム(JNoVA, JMA Non-hydrostatic Model based Variational Data Assimilation System)の開発を行っている(本田他2003; 川畑他2004)。現在数値予報課では、現業利用を目的にメソスケールから総観スケールの解析を対象にシステムの開発を継続している。

一方、JMANHMは現業運用を目指して多くの改良が行われて来た(石田他2004)。JNoVAのJMANHMは、開発初期の2002年4月時点のrel-01-02版に基本的に基づいているため、これらの改良の多くを取り込めていない。そのため、湿潤過程等を含む物理過程全般の開発を行う前に、JNoVAのJMANHMの物理過程パッケージを現業化された版に近い2004年3月時点のrel-01-09及びrel-01-10版のものに更新した。

本講演では、新たに設計された制御変数と更新されたJNoVAのJMANHMのスペックの紹介、及び物理過程の接線形/随伴モデルの開発についての報告を行う。

2 制御変数の設計

2.1 JMANHMの予報特性

JMANHMの試験運用(石田他2004)中のデータを用いて予報特性の調査を行った。図1は4月上旬の6時間予報値から得られた対流圏上層の運動エネルギーのパワースペクトルである。波長の短い領域では波数の $-5/3$ 乗、波長が長い領域では -3 乗に沿った分布となっている。この結果は、ある特定の波長域にエネルギーが溜って予報の精度を落としていないことを示している。

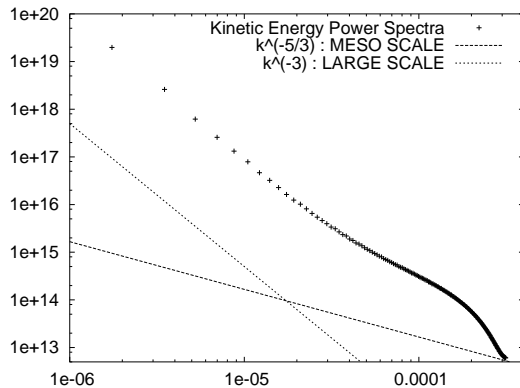


図1: 2004年4月上旬の6時間予報値のデータから計算された20~30層の鉛直平均の運動エネルギーのパワースペクトル。横軸は波数(k)、縦軸はパワースペクトル。直線は、 k^{-3} と $k^{-5/3}$ を表す。

2.2 low-path filter を利用した制御変数

初期時刻が6時間異なる12時間予報値と6時間予報値からNMC法を用いて予報誤差の調査を行った。統計期間は2004年4月15日~30日である。

メソ4次元変分法(MSM-4DVAR)の制御変数では、質量変数から計算したバランス風(U_B, V_B)を求め、式(1)で示されるように東西風と南北風との回帰係数によりその寄与を考慮している(石川・小泉2002)。MSM-4DVARでは回帰係数(C_{UU}, C_{VV})の最大値が0.4程

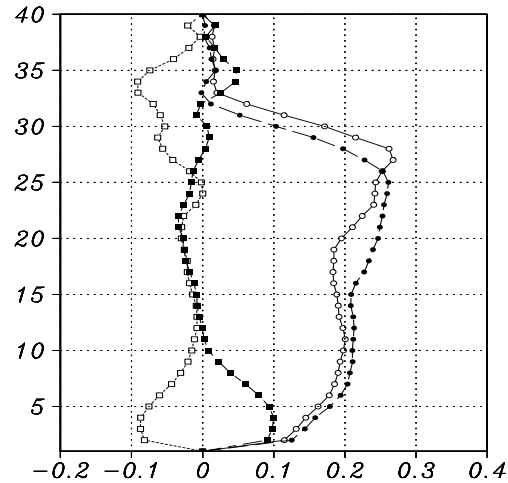


図2: 閾値300kmでlow-path filterを適用したバランス運動量成分の寄与を示す回帰係数。横軸は回帰係数の値、縦軸は鉛直層である。(○)は C_{UU} 、(●)は C_{VV} 、(□)は C_{UV} 、(■)は C_{VU} を表す。

度である。

JMANHMでは予報変数が風ではなくて運動量なので、制御変数でも変数変換を最小に抑えるために運動量で考える。温位と地上気圧から静水圧平衡を仮定し質量変数に相当する気圧を計算し、バランス風に相当する地衡風平衡した運動量を計算する。この場合回帰係数(C_{UU}, C_{VV})は0.1にもならない。これは温位や地上気圧に小さなスケールの誤差が含まれていることや、JMANHMで鉛直に z^* 座標を採用しているため地形の細かい構造の影響が上層にまで及ぶことが理由であると考えられる。

$$\begin{pmatrix} \Delta U \\ \Delta V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta U_U \\ \Delta V_U \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} C_{UU} & C_{UV} \\ C_{VU} & C_{VV} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta U_B \\ \Delta V_B \end{pmatrix} \quad (1)$$

式(1)でバランス風の寄与を考慮することは、静水圧平衡と地衡風平衡を満たす総観スケールに近い現象を解析することを意図している。つまりバランス風を計算するときにも総観スケール程度の成分のみ利用すれば良い。このため、low-path filterにより閾値以上の波長の成分のみを抽出しバランス成分と考える。実際には、温位と地上気圧と地形にlow-path filterを適用した。図2は、閾値を300kmとした時の回帰係数の鉛直分布である。 (C_{UU}, C_{VV}) の最大値は0.3と、MSM-4DVARと比較するとやや小さいが鉛直分布など特徴はほぼ一致することが確かめられた。

以上から、制御変数はバランス質量変数(θ_B, P_{SB})、非バランス温位(θ_U)、非バランス気圧(P_U)、非バランス水平運動量(U_U, V_U)、鉛直運動量(W)。また、湿りに関しては偽相対湿度($q_v/\overline{q_{vs}}$)を用いる。但し $\overline{q_{vs}}$ は第一推定値の温位から計算される飽和混合比のことである。

この制御変数を用いた3次元変分法による解析は西嶋他(2004)を参照願いたい。実験結果より風の解析インクリメントが大き過ぎることが指摘されている。運

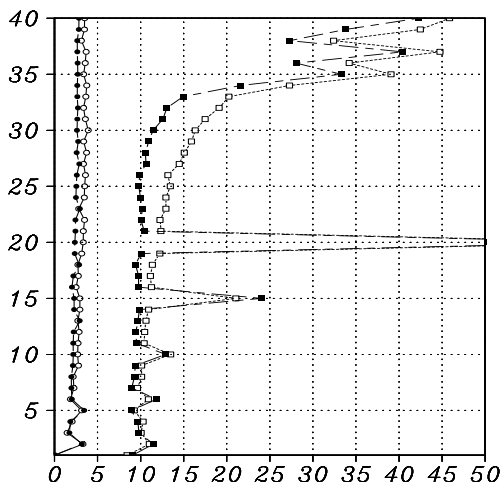


図 3: 閾値 300km で温位のバランス成分と非バランス成分の鉛直モード毎の水平相関距離 (格子数, 格子間隔 10km)。(○)と(●)は、 θ_U の東西方向と南北方向,(□)と(■)は θ_B の東西方向と南北方向の相関距離を表す。

動量には、風の他に密度を通して気圧と温位の誤差が含まれているため誤差分散が大きめに見積もられていることが推測される。制御変数を風に変更した場合の比較も行うことを予定している。

2.3 Recursive Filter の導入

温位に関する背景誤差のバランス成分と非バランス成分の鉛直モード毎の水平相関距離を図 3 に示す。low-path filter のためにバランス成分の相関距離は非常に大きなものになる。背景誤差共分散行列の計算に MSM-4DVAR と同じ手法を用いているが、相関距離が大きくなると計算の効率性が落ちる (石川・小泉 2004)。JNoVA は 3 次元変分法として速報解析などの利用方法も検討されているため、新たに recursive filter による手法を導入した (Purser 2003)。1 次から 4 次までの recursive filter に対応している。非等方的な相関距離の設定も扱うように変更はできるが、現在の背景誤差共分散行列は鉛直モードによって対角化しているため、その特性を活かすことは難しい。

2.4 予報誤差の季節性

2003 年度冬季の予報結果についても予報誤差調査を行い、誤差の季節性についての調査を行った。その結果、冬季には対流混合層が発達するために下層では鉛直誤差相関が一様になる (図略) など、季節毎に誤差の性質が異なることが確かめられた。このことは、データ同化実験を行う場合には適切な季節の予報誤差から計算された背景誤差共分散を用いることの重要性を示唆している。

3 物理過程を含む接線形/随伴モデル

3.1 JMANHM の更新

2002 年以降行われてきた JMANHM の改良を組み込むために、JNoVA の JMANHM の物理パッケージを 2004 年 3 月の JMANHM(rel-01-09 版及び rel-01-10 版)に更新した。適応水蒸気拡散も含めて、全ての物理過程を考慮している。

3.2 接線形/随伴モデルのスペック

更新されたモデルを基に物理過程の接線形/随伴コードの開発を行った。新たに雲水 (qc) と雲氷 (qci) の摂動を考慮するようにした。

乱流過程/拡散過程 (大気境界層)

これまでの JNoVA では乱流エネルギー (E) を予報していた。しかし E の初期値を与えることは難しいため初期値として 0 が与えられている。このため予報初

期に急速に成長する上、方程式の非線形性が強いこともあり摂動の変化は激しい。拡散係数は E の強い非線形関数となっているため、こちらにも悪影響が及ぶ。

今回は、新たに E の診断スキーム (熊谷・斉藤 2004) を導入した。鉛直拡散スキームを従来の陽解法から陰解法に変更した。この変更に伴い、混合距離決定に対流混合層での表現をよくするためのノンローカル効果も採り入れられた。

接地境界層/地表面温度予報

熊谷他 (2003) により地表面フラックスのパラメタリゼーションは豊富になった。接線形/随伴モデルでは、バルク係数を基本場の値に固定しているため、全てのオプションに対応している。

また地上観測データの同化をするためには、地表面温度と地表面での湿りの摂動を考慮することが大切である。このため地中 4 層モデルの接線形/随伴コードも開発した。

雲物理過程

雲水、雨水、雲氷、雪、あられの混合比を予報変数とするバルク法 (山田, 2003) を組み込んでいる。前述したが、水蒸気 (qv) 雲水 (qc) と雲氷 (qci) の摂動のみが考慮されている。現在、接線形/随伴モデルでは、微物理量間の相互作用において温位と気圧を基本場に固定することで、雲物理過程に関わる非線形性の問題に対処している。この仮定については今後調査が必要となる。

但し、凝結や蒸発に関わる部分では温位と気圧の摂動を考慮している。飽和調節は Ikawa and Saito(1991) の方法による。

積雲対流パラメタリゼーション

湿潤対流調節を導入している。

4 まとめと今後の課題

JNoVA 用の制御変数の設計と物理過程を含む接線形/随伴モデルの開発状況について報告した。

前者については、low-path filter を導入することで総観スケールとメソスケールの分離を行ない、バランス成分の寄与を表現するようにした。計算効率を上げるために recursive filter による背景誤差共分散行列の計算手法を追加した。現在は、変数変換を最小に抑えるために運動量をもとに設計しているが、今後は温位と気圧の影響を分離するために風を用いた制御変数とも比較する。また、low path filter の閾値以下のメソスケールのバランスについても調査を行う予定である。

後者については、水蒸気、雲水、雲氷の摂動を考慮して物理過程の接線形/随伴コードを開発した。物理過程の線形コードを作成する時に用いた仮定の有効性や接線形/随伴モデルの性質を調査するために、接線形モデルによる微小摂動の成長を調べる実験や随伴モデルを用いた感度実験を行なう予定である。

謝辞

石田純一氏 (気象庁数値予報課) には、予報誤差調査のため予報値の蓄積及び提供について御協力頂きましたことに感謝いたします。

参考文献

- [1] Ikawa and Saito, 1991: Technical Report, MRI, 28.
- [2] Purser et al., 2003: Mon. Wea. Rev. 131, 1524-1548.
- [3] 石川・小泉, 2002: 数値予報課報告・別冊 48 号, 37-59.
- [4] 石田 他, 2004: 第 6 回非静力学ワークショップ予稿集.
- [5] 川畑 他, 2004: 日本気象学会春季大会予稿集, C102.
- [6] 熊谷・斉藤, 2004: 日本気象学会春季大会予稿集, C104.
- [7] 熊谷 他, 2003: 日本気象学会秋季大会予稿集, A206.
- [8] 西嶋 他, 2004: 第 6 回非静力学ワークショップ予稿集.
- [9] 本田 他, 2003: 第 5 回非静力学ワークショップ予稿集.
- [10] 山田, 2003: 数値予報課報告・別冊 49 号, 52-76.