

誤差共分散行列の最適化と観測データのインパクト評価について

気象庁数値予報課 石橋俊之

E-mail: ishibasi@met.kishou.go.jp

1. 導入

最尤推定に基礎を置く 4D-Var などのデータ同化理論は、理論の外部パラメータとして誤差共分散行列 (Error Covariance Matrix: ECM) を持っている。したがって、これらの理論に基づくデータ同化システム (Data Assimilation System: DAS) には何らかの方法でこの膨大な自由度をもつ ECM を与える必要がある。ECM は観測や背景場が解析場に与える影響を強く規定するため、適切な ECM を DAS に与えられるか否かは解析精度を大きく左右する。

ECM の最適化スキームとしては、2 つの方法が知られている。第一の方法は Desrozier and Ivanov (2001 QJRM) や Chapnik (2006 QJRM) らの手法 (以下 DIC) である。DIC は、DAS が ECM と変分法の評価関数の間の理論的な関係式を満たすように ECM を調整する。同手法は観測や背景場が解析精度に与える影響を評価する量である DFS (Degrees of Freedom for Signals, Rabier 2002 QJRM) の計算を内包しているため、観測データのインパクト (Observation Data Impact: ODI) 評価を内包している。第 2 の方法は Daescu (2008 MWR, 以下 D08) である。D08 は ECM 最適化手法自体ではないが、予報誤差の ECM への依存性を計算するため、ECM の修正されるべき方向を知ることができる。D08 は観測データが予報精度に与える影響を評価する手法である Langland and Baker (2004 TELLUS, 以下 LB04) を拡張した手法と見ることができ、LB04 を内包している。したがって、これら 2 つの ECM の最適化手法は ODI の評価を内包しているといえる。

以下では JMA での ECM 最適化開発とその過程で得られた ODI の評価結果について簡単に述べる。

2. DIC に基づく最適化と ODI 評価

DIC は ECM と変分法の評価関数との間の理論的な関係式を利用して DAS の最適化を行うスキームである。具体的には次式を DAS に要求する。

$$2J = N - \text{TR}(HK) = N - \text{DFS} \quad (1)$$

ここで、J は 4D-Var のコスト、H は観測演算子、K はカルマンゲイン、N は観測数。上式は、ECM のブロック対角部分ごとに成り立つので、特に観測誤差についてはデータセットごとの最適化が可能である。気象庁 (JMA) の全球 4D-Var にこのスキームを実装した。計算の結果、衛星輝度温度データについては現在設定している観測誤差標準偏差の 30% 程度の値が最適であることが示された。この結果は、最適化によって D 値統計との整合性やコスト関数と観測数の間の理論的な関係が回復することから、妥当と考えられる。また、式 (1) は DFS を含んでいるので、最適化計算は同時に ODI 評価でもあるが、DFS は DAS が理論的な関係を満たすことを前提としているので、DFS として意味のある計算は DIC による最適化後に限られる。最適化後の各データの DFS を見ると (図省略)、輝度温度データは従来型観測と同程度に寄与することになる。

しかし、最適化された誤差設定では解析、予報精度が現ルーチンに比べて悪化することが分かっている。原因としては、最適化の過程では無視している観測誤差の相関や数値予報モデルのバイアスの影響が考えられる。これらを考慮するスキームについても検討、開発している。

3. D08 に基づく最適化と ODI 評価

D08 は予報誤差の ECM への依存性を計算する手法であり、3 つの部分から構成される。はじめに予報誤差の初期場への感度 (感度場) を計算し、次に感度場の観測や背景場への依存性を計算し、最後に感度場の ECM への依存性を計算する。はじめの 2 つの部分は LB04 であり、最後の部分が D08 で追加される部分である。したがって、D08 は LB04 を内包する。

LB04 は、予報誤差の観測データへの依存性を予報モデルと DAS の随伴演算子を利用して計算する。DAS の随伴演算子の実装は開発コストが大きい。実装方法はいくつかあるが、JMA では DAS の随伴演算を 2 段階の線形問題に分割して解く Tremolet (2008 TELLUS) の方法を使用する。この方法では修正した 4D-Var をこの線形問題を解くために流用する。

JMA での D08 の計算結果を示す。はじめに、15 時間積分を評価時間として計算した感度場の妥当性を確かめるために、感度場に適当なスカラー係数

をかけて近似的な解析誤差場を作成した。この解析誤差場を初期値から引いて、“最適な初期値”を作成し、予報精度をオリジナル初期値と比較した。結果は、“最適な初期値”による予報誤差減少が確認され (図省略)、計算された感度場の妥当性を示している。次に、この感度場から計算した LB04 の結果を図 1 に示す。図から、予報精度に最も貢献しているのは、AMSU-A、次はラジオゾンデ観測であることがわかる。輝度温度データ全体 (図中の *TBB) とそれ以外の観測全体 (*CNV) は同程度の寄与をしている。また、特定の観測データの誤差設定を不適切に小さく与えた場合には、LB04 はこのデータによる予報精度悪化を適切に検出することが確認された (図省略)。最後に D08 に拡張して観測誤差への依存性を計算した結果、多くの衛星データでは観測誤差を小さく修正すべきであることが示された。この結果は DIC による結果と整合するものである。図 2 に AMSU-A/METOP2 の例を示す。実際に、衛星輝度温度データの誤差を 20% 小さく与えた場合に予報精度が向上することが確かめられている (図省略)。

4. 結論

ここでは、気象庁全球 4D-Var において、ECM の最適化とそれに内包される ODI 評価に関する開発状況を報告した。これらの手法は、ECM を最適化し、解析、予報精度の向上につながると期待される。観測誤差関連の導入などを含めた開発を継続して行く。

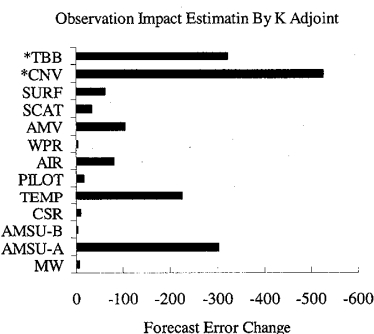


Figure 1. Result of LB04 ODI estimation in JMA global 4D-Var calculated for the initial time, 00UTC of July 20 in 2007.

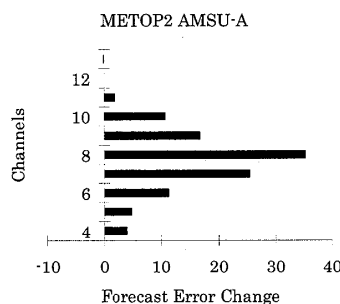


Figure 2. Result of D08. Forecast error, measured in total energy, changes caused by perturbing 1 (K) of observation error standard deviation in JMA global 4D-Var. for AMSU-A/METOP2.