

1. はじめに

現代の数値天気予報は、大気の運動を記述する時間発展方程式をコンピュータ上で積分（シミュレーション）することによって実現される。積分に必要な初期値（現実的な大気状態）は、観測データをもとに「データ同化」と呼ばれる統計論に基づく手法を用いて推定される。精度のよい（すなわち、現実的な）大気状態の推定には、その大気状態の観測データが必要となる。多様な観測が実施される陸上とは異なり、海上における観測は主に気象衛星に限られる。熱帯海洋上で発生、発達する台風の強度（最大風速、中心気圧）は、近年の精緻なシミュレーション技術の進展にも関わらず、予報精度の改善がみられない。これは観測の少ない海上において、台風中心付近の大気状態（特に風速）の推定が困難であることが原因の一つと考えられる。一方、近年気象衛星ひまわり 8 号の高頻度観測から、台風中心付近の風速を定量的に推定する手法が開発されている（例えば、Tsukada and Horinouchi 2020, GRL）。このような台風中心付近の風速は、初期値の推定を改善し、台風強度予報にインパクトを与えることが期待される。

本研究では、2018 年日本に上陸した台風 Trami を対象に、衛星観測による風速をデータ同化することで、台風中心付近の高精度な大気状態の推定を試みる。データ同化手法には、近年盛んに研究されているアンサンブルカルマンフィルタ（EnKF）が用いられる。

2. 手法

本研究では、理化学研究所で開発されている EnKF ベースの数値予報同化システム SCALE-LETKF を用いた観測システムシミュレーション実験（OSSE）を実施する。OSSE は数値シミュレーションから作成された擬似観測データを用いて同化解析を行う手法である。まず EnKF データ同化手法を簡単に述べる。時間発展方程式の予報変数を状態ベクトル \mathbf{x} で表現する。このとき、初期値 \mathbf{x}^a は、第一推定値の大気状態ベクトル \mathbf{x}^b に、任意の観測データをベクトルにした \mathbf{y}^o を取り込むことで作成される：

$$\mathbf{x}^a = \mathbf{x}^b + \mathbf{B}\mathbf{H}^t (\mathbf{H}\mathbf{B}\mathbf{H}^t + \mathbf{R})^{-1} [\mathbf{y}^o - H(\mathbf{x}^b)].$$

\mathbf{B} , \mathbf{R} はそれぞれ第一推定値と観測の誤差共分散行列を表す。 H は \mathbf{x} を観測と同じ変数に変換する関数、 \mathbf{H} は H の接線形演算子である。観測をどの程度取り込むかは、 \mathbf{B} , \mathbf{R} を重みとして統計的に決まる。EnKF では、 \mathbf{B} を求めるために、多数メンバーによるアンサンブルシミュレーションを用いる。

擬似観測の作成には、同化システムと独立の数値モデル CReSS による水平解像度 2 km のシミュレーションを用いる。擬似観測は実際の衛星観測風速データを想定し、以下のように作成される。台風中心から半径 32 km（最大風速半径より内側）まで半径 4 km ごとに、高度 0.5 km から 1.5 km（台風の最大風速高度）に渡って鉛直平均した水平風を方位角平均接線風に変換する。さらに観測誤差標準偏差をランダムに加える（SCALE-LETKF の観測演算子も同様に実装）。

\mathbf{B} の計算に必要なアンサンブルは 30 メンバーを用意する。SCALE によるシミュレーションは水平解像度 3 km、水平格子数 320×360、鉛直 36 層、積分時間 12 時間に渡って実施される。1 実験の実行には Type-I システム 62 ノードを用いる。同化解析では経験的パラメータが複数あり、最適なパラメータを決めるための感度実験を実施する。同化解析の影響を評価するために、同化解析なしの、全く同じ初期値、境界値による 30 メンバーのアンサンブルシミュレーション（フリーラン）を実施する。

3. 結果

図1は1時間ごとに擬似観測を同化した実験における、積分時間12時間後での東西風分布を示している。30メンバー間での東西風標準偏差は、台風壁雲内の最大風速半径付近で 10 m s^{-1} 以上である。同化解析を実施した前後の東西風標準偏差の差は、最大風速半径付近で大きくなっている。これは観測データを同化することで、第一推定値の誤差標準偏差が減少していることを意味する。非常に興味深い点は、擬似観測が半径32 km以内、高度0.5 kmから1.5 kmの鉛直平均の接線平均風であるにも関わらず、観測範囲を越えた広い半径、高度の第一推定値まで同化解析によって修正されている。特に鉛直断面を見ると、斜めに傾いたアンサンブル平均東西風の等値線に沿って、同化解析による大きな修正が見られる。これは壁雲上昇流に沿って下層の擬似観測の修正が上空にも伝播していることを示唆する。

感度実験の結果から、同化解析による修正は観測頻度が多いほど大きいことがわかった(図略)。また、アンサンブルメンバー間での台風中心位置のばらつきは、フリーランと比較すると狭い(図略)。これは接線風擬似観測の同化による水平風の標準偏差の減少によって、台風渦中心のばらつきも減少することを示唆する。OSSEの結果は、衛星観測風速データの同化解析が、数値シミュレーションにおける台風中心付近の渦構造の初期値推定に有効であり、それは衛星観測で得られない壁雲内の最大風速半径付近の渦も修正しうることを示唆している。

関連研究成果(論文発表全1件)

Tsujino, S., T. Horinouchi, T. Tsukada, H.-C. Kuo, H. Yamada, and K. Tsuboki, 2021: Inner-core wind field in a concentric eyewall replacement of Typhoon Trami (2018): A quantitative analysis based on the Himawari-8 satellite. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, **126**, e2020JD034434, doi:10.1029/2020JD034434.

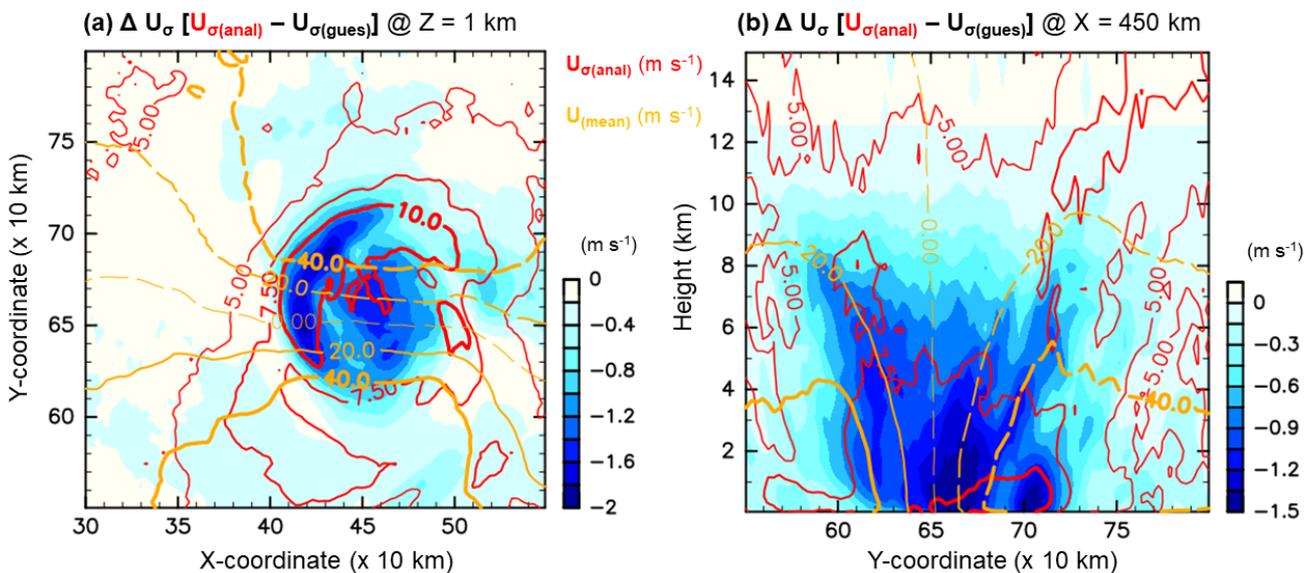


図1：同化開始12時間後のアンサンブル30メンバーから見積もった東西風のアンサンブル平均(橙線, 間隔 20 m s^{-1}), 同化解析された東西風標準偏差(赤線, 間隔 2.5 m s^{-1}), 同化解析前後でのアンサンブルメンバー間の標準偏差の差(カラー, m s^{-1})。 (a)は高度1 kmでの水平分布, (b)は台風中心をとる水平高度断面での分布。アンサンブル平均台風中心は $X = 450\text{ km}$, $Y = 660\text{ km}$ 付近である。