

4DVARを用いた台風9918号の追算

Hindcasting Coastal Sea Surface Wind by 4DVAR at Typhoon 9918

中野俊夫¹・山城 賢²・橋本典明³・大西健二⁴

Toshio NAKANO, Masaru YAMASHIRO, Noriaki HASHIMOTO and Kenji OHNISHI

Accurate hindcasting of sea surface winds under typhoon conditions is great importance for various purposes. Recently several data assimilation technique and typhoon bogus scheme have been evolved to meet the increasing demand for accuracy improvement of typhoon intensity and track. Among them, however, previous data assimilation technique, nudging, is incomplete to deal with typhoons since it has detrimental effect of smoothing as well as inconsistent dynamic balance in the analyzed wind field. In this study, therefore, we apply the 4DVAR (four-dimensional variational data assimilation), one of the most advanced data assimilation techniques, to hindcast the coastal sea surface winds at Typhoon 9918. As a result, accuracy improvement is confirmed in both intensity and track of the typhoon.

1. はじめに

台風による沿岸の局地的な強風や波浪・高潮の再現は、防波堤や護岸の設計をする上で重要な問題である。近年では、気象モデルを用いて台風の強度と進路の追算精度を高め、強風を再現する研究が行われてきた。強度に関しては、例えば吉野ら(2008)は、台風ポーガスを用いて台風の構造を表現し、解析値に埋め込むことで一定の成果を挙げてきた。進路に関しては、簡易的な4次元同化手法であるNudgingを用いて精度向上が図られてきた(中野ら, 2006)。しかし、Nudgingには、①スミージングの影響があるため、台風の強度を過小評価する傾向がある、②解析値の時間変化に対して追算値の時間変化が遅れる、③強制項を与えているため、追算された計算値は、力学的にバランスした場とは言えないという問題があり、進路の追算精度は十分ではなかった。

一方で、近年ではデータ同化理論の進歩と計算機性能の著しい向上により、高度な同化手法である4DVAR (4-Dimensional Variational Data Assimilation) が利用可能になってきた。4DVARは、現在、行われている同化手法の中でもっとも高度な同化手法の一つであり、物理法則を拘束条件として、連続的に同化期間中の観測データを同化することができる(露木ら, 2008)。そのため、4DVARでは大気の流れに沿った修正を行うことができ、解析された場は力学的整合性を保ち、スミージングなど

の影響も生じない。

4DVARは、①世界各地の気象センターによる現業予報や、②様々なデータを同化することにより台風時の降水予報精度を向上させる研究(Huangら, 2009)など、さまざまな目的で利用され、短期の予報精度向上において顕著な成果を挙げてきている。

そこで、本研究では、4DVARを適用して台風ポーガスを同化することで、従来手法では再現が困難であった台風9918号(日本気象協会, 2005)を対象に海上風追算精度の向上を図った。

2. 計算手法

(1) 気象モデル

気象モデルには、メソ気象モデルWRF (Weather Research and Forecasting Model) を用いた。WRFは、米国大気研究センター (NCAR)、米国環境予測センター (NCEP)、米国海洋大気庁 (NOAA/FSL)、米国空軍気象局 (AFWA) などが中心となって開発した圧縮性の非静力学モデルで、物理過程、放射過程、境界層過程、地表面過程を含んでいる。

計算領域は、台風全体を覆う1000km×1000kmとし、水平格子間隔は、台風の構造を解像できる10kmとした。図-1に計算領域と、海上風の精度検証を行った観測地点を示す。

鉛直方向の気圧準拠座標 (σ 座標) については、地表から100hPaまでに32層を設定し、最下層を $\sigma = 0.997$ として、800hPaより下層の大気境界層内に12層を集中させた。気象場の初期・境界値には、気象庁から公表されている水平格子間隔20kmの領域客観解析値 (以下、RANALデータ) と、水平格子間隔0.25度の海面水温 (Near-goes) を与えた。

1	修(理)	一般財団法人日本気象協会事業本部防災事業部防災事業課
2	正会員	博(工) 九州大学大学院工学研究院環境都市部門助教
3	フェロー	博(工) 九州大学大学院工学研究院環境都市部門教授
4	修(理)	一般財団法人日本気象協会事業本部防災事業部海洋課

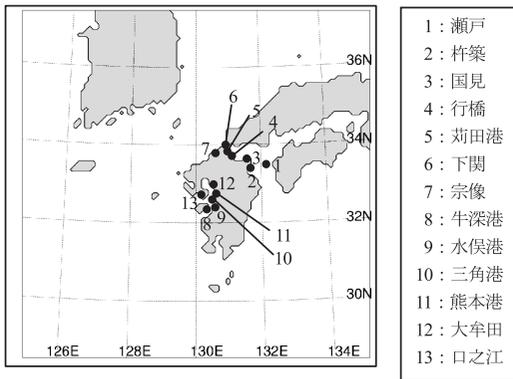


図-1 計算領域図 (●は検証に使用した観測地点)

(2) 従来の同化手法 (Nudging)

Nudgingは、式 (1) で示すように、タイムステップ毎に観測値の情報を外力として与える連続同化手法である (Guoら, 1994)。

$$\frac{\partial \alpha(x,t)}{\partial t} = F(\alpha, x, t) + G[\alpha_o(x,t) - \alpha(x,t)] \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 α は予報変数 (風, 気温, 比湿) で、 α_o は予報変数の解析値である。Fは予報変数に変化を与えるすべての物理過程を含む予報式で、時間・場所に依存して変化する。Gはナudging係数で、解析値への程度近づけるかを定める係数であり、解析値の精度と計算値の精度のバランス、解析値の時間密度に依存する。本計算では、 3.0×10^{-4} とした。

(3) 新たな同化手法 (4DVAR)

4DVARモデルには、メソ気象モデルWRFに対して開発された変分法に基づくデータ同化システムWRF-Var (Barkerら, 2005) を用いた。WRF-Varでは、以下の式 (2) ~ (5) で示されるコスト関数Jが最小値となる最適ベクトルを探索する。

$$J = J_b + J_o + J_c \dots\dots\dots (2)$$

$$J_b = \frac{1}{2} (X^n - X^b) B^{-1} (X^n - X^b) \dots\dots\dots (3)$$

$$J_o = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K [H_k [M_k (X^n)] - Y_k]^T R^{-1} [H_k [M_k (X^n)] - Y_k] \dots\dots\dots (4)$$

$$J_c = \frac{1}{2} \gamma_{df} \left[\sum_{i=0}^N g_i M_i (X^n - X^{n-1}) \right]^T C^{-1} \left[\sum_{i=0}^N g_i (X^n - X^{n-1}) \right] \dots\dots\dots (5)$$

J_b は第一推定値からの差を測る項で、 J_o は観測値からの差を測る項、 J_c は解析値に含まれる重力波の量を調整するペナルティ項である。 X^b は、モデル変数の第一推定値ベクトル、 Y_k は時刻kにおける観測値ベクトルである。Hは、観測演算子で、モデル変数Xを観測値の単位や量に変換する演算子 ($Y = H(x)$) である。R、Bはそれぞれ観測値の誤差共分散行列および背景誤差共分散行列である。 γ_{df} は J_c 項における係数、gはデジタルフィルタに関

する係数、Cは風や気温などの分散を含む対角行列である。ここで添え字Tは行列の転置を意味する。Mは気象モデルの時間推進演算子で、 M^n はアジョイントモデルの時間推進演算子である。

4DVARでは、この時間推進演算子を用いることで、物理法則にしたがって解析値の時間変化が観測値の時間変化に近づくように解析を行うため、解析された場は力学的整合性を保っており、その後の大気の流れに連続的につながる初期値を作成することができる。ただし、時間推進演算子は気象モデルを積分することに相当するため、最適ベクトルを求めるには通常の追算の数十倍から数百倍の計算時間を要する。本研究では、台風の進路 (台風中心の移動経路) の追算誤差が十分減少するまで計算を行い、収束させた。

背景誤差共分散行列は、NMC (National Meteorological Center) 法から推定した (Parrishら, 1992)。NMC法は、ある時刻に対する24時間予測値と12時間予測値の差を一定期間蓄積して、統計解析に用いる手法である。本研究では、計算対象時刻の前後1週間の解析から求めた。

(4) 観測値

観測値は、気象庁で現業的に使用されている台風ボーガス手法 (大澤ら, 2001) から得られる風・高度・気温を擬似観測値として与えた。このボーガスは、気圧分布をFujita (1952) の経験式を用いて表し、高度D値 (台風半径内の等圧面高度Zの周辺値からの偏差) の3次元構造を複数の台風のコンポジット解析から求められた解析関数を用いて記述するものである。4DVARに投入する観測値の密度は、水平方向は20km間隔とし、鉛直方向については、モデルの鉛直格子と同じ密度とした。

3. 従来手法と4DVARの比較

(1) 台風9918の概況

台風9918号は、強い勢力を持って1999年9月24日6時に八代海上陸し、周防灘に抜けた台風である。この台風の通過に伴い、八代海に面した熊本県不知火町では高潮によって死者12名の未曾有の被害が生じた。しかし、この台風は、RANALでは、台風を過小評価しており、気象モデルでの再現が困難な事例であった。

図-2に台風9918号の気象庁領域数値予報モデル (以下RSM) の予報結果とベストトラックの台風進路と中心気圧の時系列変化図を示す。RSMの初期時刻は、八代海上陸した1999年9月24日6時の直近である9月23日21時とした。これによると、RSMの予報結果は、ベストトラックと比較して台風の進行が遅れており、台風中心が八代海にもっとも接近した24日6時では、70.2kmの進路誤差であった。台風の中心気圧は、ベストトラックと比較して高く、台風強度を過小評価しており、24日6時では、

22.7hPaの誤差であった。

以上から、台風9918では、初期・境界条件を与える気象庁データの台風進路や強度の予測精度が十分でなかったことが分かる。したがって、本事例では台風ボーガスやデータ同化を用いて台風進路や強度を制御し、再現性を向上する必要があった。

(2) 各手法の計算結果

本研究では、データ同化手法による追算精度の比較を行うため、①データ同化なし、②従来手法 (Nudging)、③新手法 (4DVAR) について検討した。

追算期間については、台風が八代海や周防灘に接近した時刻に注目し、初期時刻を台風が八代海に上陸する3時間前の1999年9月24日3時、終了時間を台風が周防灘に上陸する9月24日8時の5時間とした。図-3に、各手法の追算結果とベストトラックの台風進路と進路誤差の時系列変化図を示す。

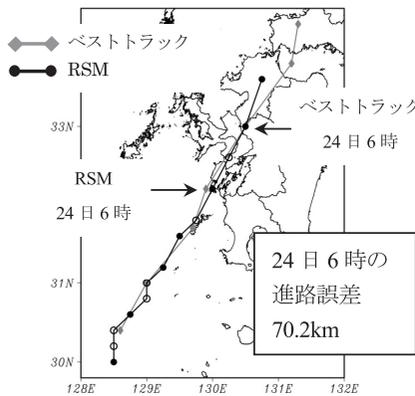
データ同化なしは、進路がベストトラックに対して南西側にずれており、24日6時にはベストトラックが台風中心を熊本県の北西部に解析しているのに対し、追算値は長崎県諫早市付近に解析していた。従来手法は、データ同化なしと比較して改善されているものの、進路が西側にずれており、24日6時には台風中心を福岡県の南西部に解析していた。一方、4DVARは、ベストトラック

とほぼ同じ進路をとっており、進路が改善されていた。

進路誤差の時系列変化では、同化なしや従来手法は時間とともに進路誤差が増加し、24日8時には、同化なし70.9km、従来手法45.4kmに達していたが、4DVARはほぼ一定で24日8時で15.9kmであった。

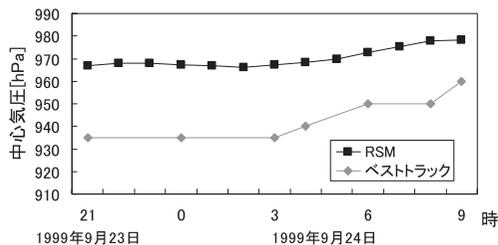
これは、従来手法では、観測値と追算値との誤差が生じた後、その誤差を解消するように強制力が働いて修正が行われるのに対し、4DVARでは、同化期間内のすべての観測値に近づくように連続的に解析して修正するため、追算期間内全体の台風進路の再現性が向上したと考える。以上から、進路追算精度は、4DVARがもっとも高いと考えられる。なお、各手法とも24日3時の初期時刻で台風中心がベストトラックと一致していない(誤差は3.6km)のは、格子間隔が10kmであるために生じた表現誤差である。この誤差は、数値計算では避けられないものであるが、4DVARでは初期時刻以降に進路誤差が大きく増加していないことから、追算精度には大きな影響を与えていないと考える。図-4に、各手法の追算結果とベストトラックの台風の中心気圧の時系列変化を示す。

同化なしは、ベストトラックと比較して24日4時は



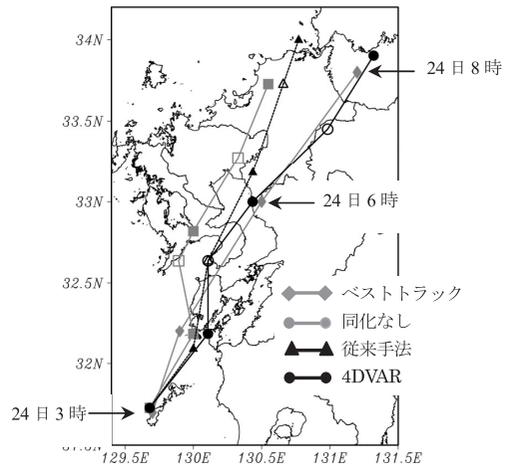
(a) 台風進路

(白抜きは、ベストトラック値のない時刻)



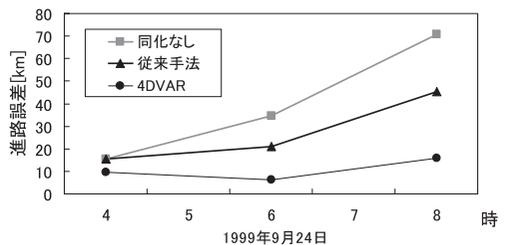
(b) 台風の中心気圧の時系列変化

図-2 気象庁RSMの予報結果とベストトラックの比較



(a) 台風進路

(白抜きはベストトラック値のない時刻)



(b) 進路誤差の時系列変化

図-3 各手法の追算結果とベストトラックの比較

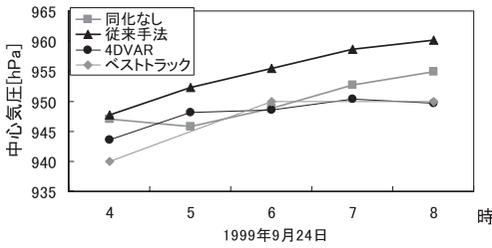


図-4 各手法とベストトラックの中心気圧の時系列変化

7.0hPa 気圧が高かった。24日6時には誤差は1.2hPaと減少したが、24日8時には誤差4.9hPaと再び増加していた。従来手法は、追算期間を通して、ベストトラックと比較して5hPa以上、高くなっていた。これは、Nudgingによるスムージングの影響で台風が衰弱し、強度が過小評価になったためと考える。4DVARは、24日4時に3.6hPaの誤差であったが、24日6時に1.8hPa、24日8時に0.4hPaの誤差と、台風の中心気圧の時系列変化をよく再現していた。以上から、強度追算精度についても、4DVARがもっとも精度が高いと考えられる。

24日6時の港湾関係省庁と、AMeDASの風向風速観測値を図-5に、各手法の10m高度風速、海面更正気圧分布を図-6に示す。当該時刻では台風の本中心は熊本県北西部に上陸しており、中心気圧は950hPaであった。同化なしでは、948.8hPaと強度誤差は小さかったが進路誤差は34.6kmであった。従来手法は、進路誤差は21.0kmと減少していたが、中心気圧は955.5hPaと強度を5.5hPa過小評価していた。4DVARは、進路誤差が6.2kmでもっとも小さく中心気圧が948.6hPaと強度誤差も小さかった。

観測された風の分布では、八代海・有明海を中心とした渦が観測され、周防灘には豊後水道を抜けてきた強風

が吹き込んでいた。同化なしは、台風中心が南西にずれているため佐賀では観測値は南向きの風であったのに対し、追算値では北向きの風であった。従来手法も、渦の中心が北にずれているため、台風中心に近い大牟田では観測値の風向が南南東に対し追算値は南南西、三角港では観測値の南西に対して追算値は南南西と風向に誤差が生じていた。一方、4DVARでは、台風の中心位置の追算精度が高く、大牟田や三角港においても、観測と同じ風向を追算していた。台風時においては、台風中心に対する相対的な位置によって、風向が大きく異なる。したがって、台風時の風を高精度に追算するためには、台風の中心位置を正確に追算することが重要であり、本時刻では、4DVARの精度がもっとも高かったと考えられる。

次に、各手法の海上風の追算精度の評価を行うため、東西風速、南北風速に分けて相関係数を算出した。東西風速・南北風速に分けることにより、風向も考慮した評価指標になる。観測地点は、比較的海上風を捉えている

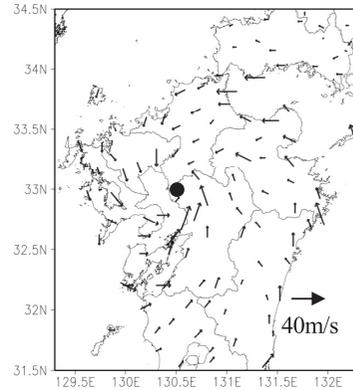


図-5 観測値の風向風速図 (1999年9月24日6時, ●は台風中心)

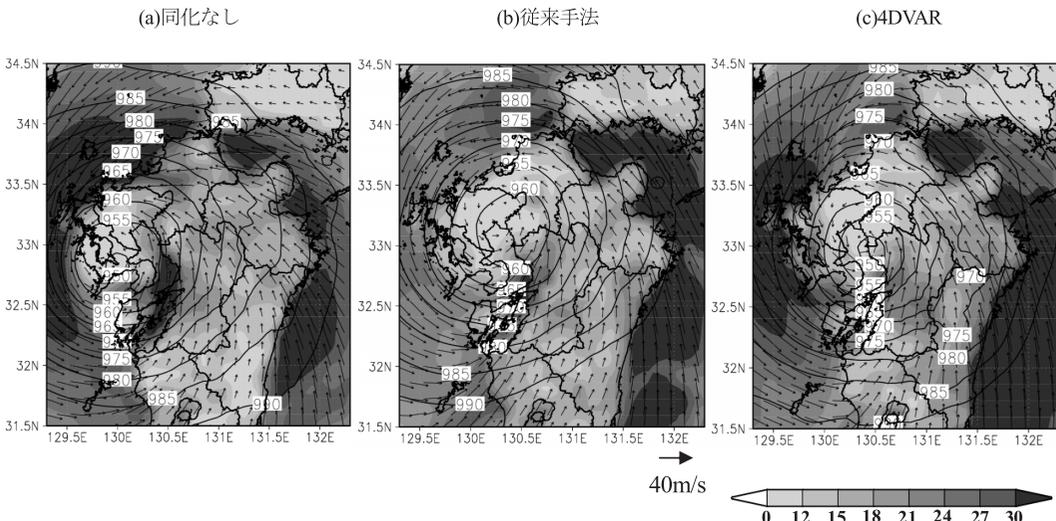


図-6 各手法の10m高度風速 (陰影部, 単位: m/s) と気圧 (実線, 単位: hPa) 分布 (1999年9月24日6時)

と考えられる地点として、八代海・周防灘近辺の港湾関係省庁の観測地点（三角港，熊本港，牛深港，水俣港，荻田港）と，海岸線からの距離が短いAMeDAS地点（大牟田，下関，口之江，国見，瀬戸，宗像，杵築，行橋）とした（図-1参照）．図-7に，各手法の観測値と追算値の相関係数の時系列変化図を示す．

1～2時間追算値については，4DVARがもっとも相関係数が高く，次いで同化なし，従来手法であった．台風中心が八代海に接近した24日6時においては，4DVARが相関係数0.90ともっとも高く，従来手法0.87，同化なし0.77であった．また，台風中心が周防灘に接近した24日8時においても，4DVARが相関係数0.88ともっとも高く，従来手法0.85，同化なし0.59であり，台風中心が観測地点に接近している時刻ほど，精度の差が大きかった．これは，台風中心が観測地点に接近するほど，進路や強度の追算精度が海上風の追算精度に大きく影響するためである．したがって，台風中心が日本近海に接近して災害などを引き起こした事例において，海上風の追算精度向上を図る場合には，4DVARなどの高度な同化手法を用いて台風の進路や強度の追算精度を向上させる必要があると考えられる．

4. 結語

本研究では，台風による内湾の局地的な強風の追算精度を向上させるため，新たな同化手法である4DVARを用いて，台風ボーガスの同化を行った．主な結果は，以下のものである．

(1) 台風の進路追算については，4DVARは，同化期間内のすべての観測値に近づくように連続的に解析して初期値を修正するため，従来手法と比較して精度が高

かった．

(2) 台風の強度追算については，4DVARは，従来手法のようにスムージングの影響で台風強度を過小評価する傾向がなく，従来手法と比較して精度が高かった．

(3) 海上風の追算については，東西風速・南北風速に分けて相関係数を算出したところ，4DVARは，従来手法や同化なしと比較して，精度が高かった．

ただし，本研究では，一事例のみの解析にとどまっていることから，今後は様々な事例で精度検証を行い，一般性のある手法の確立を目指す必要がある．また，本研究で開発した海上風を，波浪・高潮モデルに適用し，台風時の波浪・高潮の追算精度向上を図る予定である．

最後に，本研究の一部は，科学研究費補助金20360222の成果であり，ここに記して謝意を表す．

参考文献

- 大澤輝夫・竹山剛生・安田孝志（2001）：メソ気象モデルと台風ボーガスをを用いた伊勢湾台風時の風の場のシミュレーション，海岸工学論文集，第48巻，pp. 281-285.
- 露木 義・川畑拓矢（2008）：気象学におけるデータ同化，気象研究ノート，第217号，277p.
- 中野俊夫・大澤輝夫・吉野 純・益子 渉・河合弘泰・松浦邦明（2006）：台風ボーガスの高度化による数値予報モデルを用いた海上風推算手法の精度向上，海岸工学論文集，第53巻，pp. 1286-1290.
- (財) 日本気象協会（2005）：台風時の内湾海上風推算の研究（その1）報告書，日本財団助成，101p
- 吉野 純・児島弘展・安田孝志（2008）：台風予測精度向上のための渦位に基づく新しい台風ボーガス手法の構築，海岸工学論文集，第55巻，pp. 436-440.
- Barker, D.M., M.S. Lee, Y.-R. Guo, W.Huang, S.Rizvi, Q.-N.Xizo, Y.-H.Kuo, J.Gu, X.-Y.Huang, and M.-S. Lee (2005): WRF-Var-A unified 3/4D-Var variational data assimilation system for WRF. Sixth WRF/15th MM5 Users' Workshop, Boulder, CO, NCAR, 17pp.
- Fujita, T. (1952): Pressure distribution within typhoon, Geophys. Mag, vol23, pp. 437-451
- Guo, Y. R. and Y. H. Kuo (1994): Testing of Newtonian nudging technique in data assimilation on the meso-beta-scale, Proc. of the Fourth Atmospheric Radiation Measurement(ARM) Science Team Meeting, Charleston, South Carolina., pp. 167-171.
- Huang X.-Y. (2009): Four-Dimensional Variational Data Assimilation for WRF: Formulation and Preliminary Results. Monthly Weather Review 137. pp. 299-314
- Parrish,D.F., and J.C. Derber (1992): The National Meteorological Center's Spectral Statistical Interpolation analysis system. Monthly Weather Review 120, pp. 1747-1763.

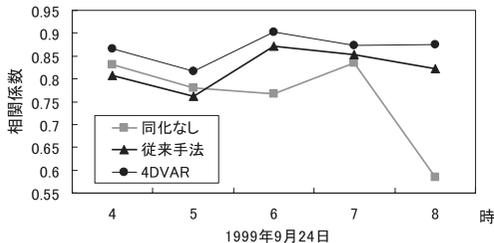


図-7 各手法による風速相関係数の経時変化