



気象庁台風アンサンブル予報システム*

山口 宗彦**

1. はじめに

気象庁は、台風災害の防止・軽減に資するため、2008年の台風シーズンから台風アンサンブル予報システム(以下、台風EPS)の運用を開始する。台風EPSの運用で期待される効果は、①進路予報の誤差がアンサンブル平均等の統計的な手法を用いることで減少する、②進路予報の信頼度がアンサンブル予報のスプレッドの大きさから推定できることである。気象庁は、平成21年度に、台風の5日先までの予報(現在は3日予報)を実現するなど、台風情報の拡充を目指している。台風EPSがこれらの防災情報の改善に大いに貢献することが期待されている。

本稿では、台風EPSの仕様、台風EPSの予報例、また2007年度に試験的に運用した台風EPSの予報精度を紹介する。アンサンブル予報システムの一般的な説明は、酒井(2008)、経田(2006)、高野(2002)等を適宜参照していただきたい。

2. 台風アンサンブル予報システムの仕様

第1表に台風EPSの仕様を示す。比較のために、2007年11月に運用を開始した高解像度全球モデル(以下、20 kmGSM)の仕様も示す。台風モデル(TYM)が2007年11月に運用を終了し、今後は、台風EPSと20 kmGSMが気象庁の台風進路予報を支援する数値予報システムとなる。

台風EPSは1日4回、00, 06, 12, 18 UTCを初

期時刻として予報を行う。予報時間は132時間で、5日予報をカバーしている。アンサンブルメンバー数は11で、初期摂動を加えないコントロール予報と10個の摂動予報からなる。使用する予報モデルは20 kmGSMの低解像度版で、水平解像度はおよそ60 km、鉛直層数は60層である。

3. 初期摂動作成手法

台風EPSにおける初期摂動作成手法は特異ベクトル(Singular Vector, 以下、SV)法(山口 2006; 山根 2002)である。使用する接線形モデルの水平解像度はおよそ200 km、鉛直層数は40層である。この接線形モデルには、初期値化、力学過程、水平拡散、鉛直拡散、重力波抵抗、長波放射、雲水過程、積雲対流過程が組み込まれており、これら全てをとり扱う、全物理過程によるSV(湿潤SVまたは非断熱SVと呼ぶ。以下、湿潤SVと呼ぶ)計算と、初期値化、力学過程、水平拡散、鉛直拡散のみを扱う、簡略化された物理過程によるSV(乾燥SVまたは断熱SVと呼ぶ。以下、乾燥SVと呼ぶ)計算が可能である。台風EPSでは、熱帯擾乱周辺域と中緯度帯とで独立にSVを算出しており、熱帯擾乱周辺域のように湿潤過程の卓越する領域では湿潤SVを、中緯度帯の総観スケールの高低気圧の振舞を摂動計算の対象とする領域では乾燥SVを算出している。熱帯擾乱周辺域のSV計算では、予報初期時刻から24時間後の熱帯擾乱の推定位置を中心に、緯度方向に10度、経度方向に20度をターゲット域としている。SV計算の対象となる熱帯擾乱は北西太平洋領域内の熱帯擾乱で、1つの初期時刻で同時にターゲットできる熱帯擾乱の数は計算機資源の制約から3つとしている。中緯度帯のSV計算では、

* Typhoon ensemble prediction system developed at Japan Meteorological Agency.

** Munehiko YAMAGUCHI, 気象庁予報部数値予報課.

第1表 台風アンサンブル予報システムの仕様と高解像度全球モデルの仕様。

	台風アンサンブル予報システム	高解像度全球モデル (20 kmGSM)
予報モデル	全球モデル (20 kmGSM の低解像度版)	全球モデル
予報モデルの空間解像度	水平約60 km 鉛直60層 (TL319L60)	水平約20 km 鉛直60層 (TL959L60)
予報初期時刻	00, 06, 12, 18 UTC	00, 06, 12, 18 UTC
予報時間	132時間	84時間 (00, 06, 18 UTC) 216時間 (12 UTC)
メンバー数	11 (コントロールラン+10個の摂動ラン)	—
初期摂動作成手法	特異ベクトル法	—

北緯20度～60度，東経100度～180度をターゲット域としている。また，SV の成長率の評価時間は湿潤SV，乾燥SV とともに24時間である。

SV 計算における成長率の評価は Ehrendorfer *et al.* (1999) の湿潤トータルエネルギーノルムに基づいている。

$$\begin{aligned}
 TE &= (x, Ex) \\
 &= \frac{1}{2} \int_1^{26} \int_S dS d\eta \\
 &\quad (\nabla\Delta^{-1}\xi \cdot \nabla\Delta^{-1}\xi) \quad (a) \\
 &\quad + \nabla\Delta^{-1}D \cdot \nabla\Delta^{-1}D \quad (b) \\
 &\quad + g(\Gamma_d - \Gamma)^{-1} \frac{TT}{T_r} \quad (c) \\
 &\quad + \frac{1}{2} \int_1^{15} \int_S w_q \frac{L_c^2}{c_p T_r} qq dS d\eta \quad (d) \\
 &\quad + \frac{1}{2} \int_S \frac{R_d T_r}{P_r} PP dS \quad (e)
 \end{aligned}$$

トータルエネルギーTE は，初期摂動 x ，対角行列 E を用いて上式のように書ける。 ξ は渦度 (s^{-1})， D は発散 (s^{-1})， T は気温 (K)， q は比湿 ($kg\ kg^{-1}$)， P は地上気圧 (Pa) を表す。 c_p ， L_c ， R_d ， Γ_d はそれぞれ乾燥空気の定圧比熱，水の蒸発熱，乾燥空気の気体定数，乾燥断熱減率を表す。また Γ は大気気温減率で，ここでは $\Gamma = 2/3 \Gamma_d$ とした。 $\int_S dS$ ， $\int d\eta$ は，トータルエネルギーを計算する領域の面積積分と鉛直積分を表す。(a)，(b) 項は運動エネルギー，(c) 項は位置エネルギー，(d) 項は比湿の効果，(e) 項は地表面気圧による位置エネルギーの効果に対応している。定数 T_r ， P_r は，欧州中期予報センター (ECMWF) で採用されている値を参考に $T_r = 300$ (K)， $P_r = 80000$ (Pa) とした。また水蒸気の効果

の重みを決める w_q は 1 とした。

各ターゲット域を対象として算出された複数の SV を集め，互いに似た構造を持つ SV を除いた後，各 SV を線形結合することにより，適切な空間分布を持つ初期摂動を 5 つ作成する。この際，風の摂動の振幅が $6\ (m\ s^{-1})$ を超えないように初期摂動の振幅の大きさを調整する。これらの初期摂動を予報モデルの初期値に加えたメンバーと引いたメンバーを作成することにより 10 個の初期値を作成し，摂動を加えない初期値と合わせて合計 11 個のアンサンブルメンバーを作成する。

4. 台風アンサンブル予報の例

第1図に台風 EPS の予報例を示す。上段の図は，2006年8月6日12 UTC 初期時刻の予報で，2006年台風第7号 (0607) の事例である。下段の図は，2004年8月28日12 UTC 事例の予報で，2004年台風第16号 (0416) の事例である。左側の図は，それぞれの初期時刻における気象庁全球モデル (GSM) の予報結果 (実線) と実際の台風進路 (点線) である。右側の図は，台風 EPS の予報実験の結果である。上段右の図を見ると，台風 EPS は予報メンバー間の進路予報のばらつきが大きく，GSM のような，西日本に向かって北西進を続ける可能性 (シナリオ) に加え，転向して関東地方に接近するという可能性 (シナリオ) が存在することを表している。上段左の図が示す通り，実際台風は転向し関東地方に接近した。ここで注目すべきことは台風 EPS はその可能性 (シナリオ) を捕捉していたということである。防災の観点から，様々な可能性 (シナリオ) を想定して事前の対策を取っておくことが極めて重要で，台風 EPS はそういったシナリオ情報の抽出に貢献することが期待される。一方，

下段右の図を見ると、この事例では台風 EPS の進路予報のばらつきが非常に小さいことがわかる。これは予報の信頼度が高いことを意味し、実際下段左の図が示す通り、GSM による決定論的進路予報の精度が良かった。このように台風 EPS は、台風毎、また初期値毎に異なる予報の不確かさを進路予報のばらつき具合から推定することで、予報の信頼度情報を得ることができる。

5. 予報精度

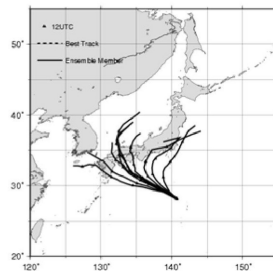
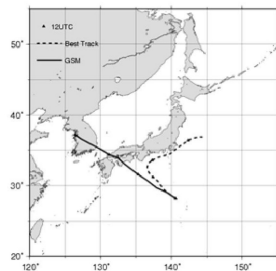
ここでは、2007年度に試験的に運用された台風 EPS の予報精度を示す。試験運用期間中の台風 EPS の仕様は本運用の仕様と若干異なるが、予報精度を大きく変えるものではない。第2図に決定論的進路予報の検証結果を示す。

横軸は予報時間（時間）、第1縦軸（左）は進路予報誤差（km）、第2縦軸（右）は検証事例数を表す。細線はコントロールラン、太線はアンサンブル平均（各アンサンブルメンバーの予報位置の平均）の予報誤差を表し、黒丸は検証の事例数を表す。検証期間は2007年5月から12月で、解析値としては太平洋台風センターが提供するベストトラックデータを使用した。検証対象とした熱帯擾乱はベストトラックで解析されている Tropical Storm 以上の階級の熱帯低気圧である。第2図から明らかな通り、予報後半でアンサンブル平均予報がコントロールランによる予報よりも精度がよく、120時間（5日）予報においておよそ40 km 精度がよい。これはおよそ0.5日分の予報精度の改善に相当し、平成21年度に予定されている台風5日予報の実現に貢献することが期待される。次に、進路予報の信頼度情報に関する検証結果を示す。第3図は、アンサンブルスプレッドの大きさによって個々の予報を階級分けしたときの、各階級別の進路予報誤差の平均

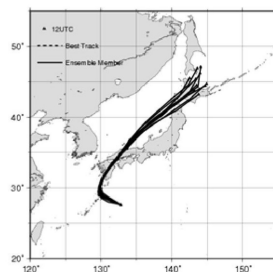
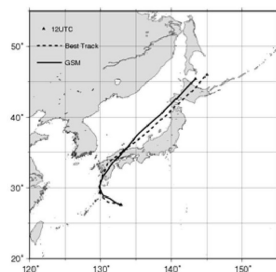
GSMの予報とベストトラック

台風アンサンブル予報

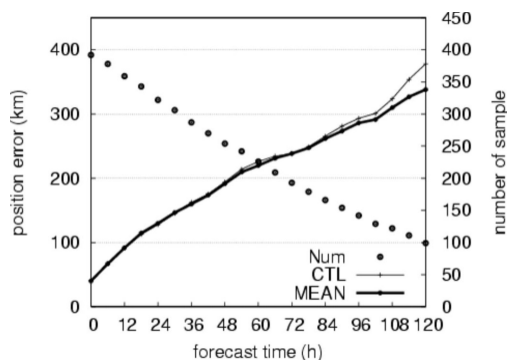
2006年8月6日12UTC
初期時刻の予報
(2006年台風第7号の事例)



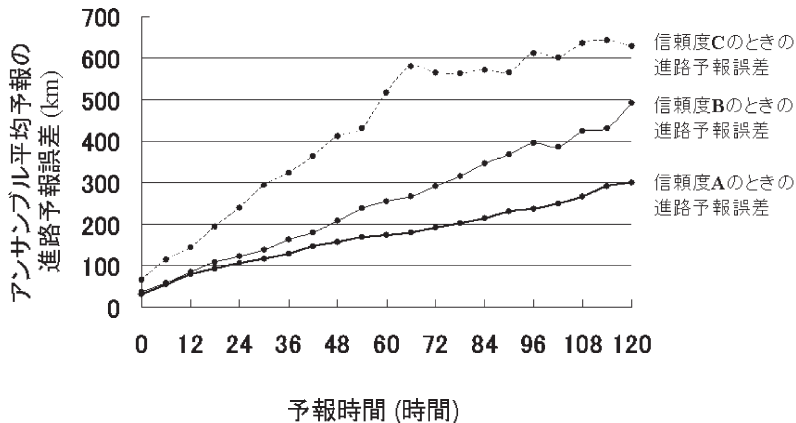
2004年8月28日12UTC
初期時刻の予報
(2004年台風第16号の事例)



第1図 台風アンサンブル予報の予報例。上段の図は、2006年8月6日12 UTC 初期時刻の予報で、2006年台風第7号（0607）の事例である。下段の図は、2004年8月28日12 UTC 事例の予報で、2004年台風第16号（0416）の事例である。左側の図には、それぞれの初期時刻における気象庁全球モデル（GSM）の予報結果（実線）と実際の台風進路（点線）が、右側の図は、台風アンサンブル予報による全11メンバーの進路予報結果が描かれている。



第2図 決定論的進路予報の検証結果。横軸は予報時間（時間）、第1縦軸は進路予報誤差（km）、第2縦軸は検証の事例数を表す。細線はコントロールラン、太線はアンサンブル平均（各アンサンブルメンバーの予報位置の平均）の予報誤差を表し、黒丸は検証の事例数を表す。検証期間は2007年5月から12月。



第3図 進路予報の信頼度情報に関する検証結果。アンサンブルスプレッドの階級によって予報の信頼度を3段階（アンサンブルスプレッドが小さいときは信頼度A、大きいときは信頼度C、その中間のときは信頼度Bとした）に分類し、決定論的進路予報の精度を検証した。横軸は予報時間（時間）、縦軸は進路予報誤差（km）である。太実線が信頼度A、細実線が信頼度B、点線が信頼度Cのときの検証結果である。検証期間は2007年5月から12月。

である。アンサンブルスプレッドが小さいときは信頼度A（総事例数の40%）、大きいときは信頼度C（総事例数の20%）、その中間のときは信頼度B（総事例数の40%）とした。分類する際のアンサンブルスプレッドの閾値は、試験運用期間中の予報結果に基づいて予報時間毎に設定した。検証対象とした熱帯擾乱はベストトラックで解析されているL以上の階級の熱帯低気圧である。図が示す通り、スプレッドの大きさに階級分けした信頼度の大きさに応じて、適切に予報誤差が分離することが分かった（この結果は、スプレッドと予報精度に強い相関がある、つまり、台風EPSによる進路予報にスプレッドスキルの関係があることを反映している）。

6. おわりに

気象庁は2008年の台風シーズンより台風アンサンブル

予報システムの運用を開始する。これにより、①進路予報の改善、②進路予報に関する信頼度がアンサンブルスプレッドから推定できること、が期待される。気象庁ではこれらの効果を最大限に活かし、平成21年度に実現する台風5日予報等、今後の台風情報の拡充を図る計画である。一方、予報モデルの持つ不確実性を考慮したアンサンブル予報システムの導入や、アンサンブルメンバー数の増強等、台風EPSの改良を進め、さらに予報精度を向上させ、よりよい気象サービスの提供を目指す計画であ

る。

参考文献

- Ehrendorfer, M., R. M. Errico and K. D. Raeder, 1999: Singular-vector perturbation growth in a primitive equation model with moist physics. *J. Atmos. Sci.*, **56**, 1627-1648.
- 経田正幸, 2006: アンサンブル予報概論. 数値予報課報告・別冊, (52), 気象庁予報部, 1-12.
- 酒井亮太, 2008: 気象庁の新しい週間アンサンブル予報システム. *天気*, **55**, 515-520.
- 高野清治, 2002: アンサンブル予報の利用技術. 気象研究ノート, (201), 73-103.
- 山口宗彦, 2006: 特異ベクトル法の開発. 数値予報課報告・別冊, (52), 気象庁予報部, 50-58.
- 山根省三, 2002: 摂動の線形発展の理論. 気象研究ノート, (201), 21-71.