

東京大学海洋研究所附属国際沿岸海洋研究センター利用
研究集会

台風のライフサイクル：発生から温低化まで

メソモデルによる台風事例のアンサンブル予報ダウンスケール実験

齊藤和雄¹
山口宗彦²
経田正幸³

気象庁週間アンサンブル予報における台風事例をメソモデルでダウンスケールすることにより、メソモデルの台風進路予報における初期条件と境界条件の影響を調べた。1日予報では、境界条件の影響はそれほど大きくなかった。初期条件においては、風速場の摂動が台風進路予報を決める大きな要素だが、水蒸気や温度の摂動も進路予報に影響を与える。

1. はじめに

高解像度化と力学フレーム・物理過程の高度化、変分法など高度な同化手法の導入と新規データ利用の進展により、数値予報モデルの予報精度は近年大きく向上してきている。気象庁全球モデルによる北西太平洋での台風進路3日予報の平均誤差は、1990年台前半には600km近かったが、近年(2001年以降)は300km台前半にまで縮小してきている。1日予報の平均誤差は150kmを切る程度になってきており、前日の段階で日本のどの地方に台風が最も接近するか、ある程度の目安がつく様になりつつある。

現在の全球モデルの水平解像度は約60kmで、台風の強度予測や台風に伴う顕著な降水を表現するには分解能がまだ十分ではない。気象庁では、防災支援情報の高度化を主目的として、2001年3月からメソ数値予報モデル(以下、メソモデル)の運用を開始している。メソ数値予報モデルは、日本とその周辺域を対象とする水平解像度10km(2006年3月からは5km)の高解像度領域モデルで、側面境界条件は領域モデルから受け取っている。4次元変分法の導入(2002年3月)や新規データの利用(ウインドプロファイラ風データ、衛星マイクロ波放射計データや散乱計海上風データ、ドップラー動径風データなど)、非静力学モデルの導入(2004年9月)などにより、その精度や表現力は2001年の運用当初に比べ大きく向上してきている。台風による降水は、台風が日本に十分接近した場合には、地形による影響による要素が大きいため、メソモデルの高解像度という利点を生かしやすい現象であると言える。その一方で、僅かな進路予報のずれにより、甚大な災害に直結するような豪雨や強風の発生場所が大きく変わってしまうこともあるため、場所と時間を特定して被害域を正確に予測することは現在でも多くの困難を伴っている。

数値予報の不確実性を補う有力な手段として、アンサンブル予報の手法がある。予測可能性が低下する週間予報や季節予報では以前から取り入れられてきた手法であるが、近年アンサンブル予報の手法をメソ現象を対象とする数値予報にも適用する試みが行なわれるようになりつつある。防災情報を適切に出す上には、最悪の場合どの程度の現象が生じるかを想定しておくことは大変重要である。アンサンブル予報によ

¹ さいとうかずお 気象研究所予報研究部

² やまぐちむねひこ 気象庁予報部数値予報課

³ きょうだまさゆき 気象庁予報部数値予報課

って、予報の信頼度や予測誤差の範囲に関する情報が付け加われば、メソ数値予報の実用的な利用価値が大きく高まることが期待される。

台風の予報に関する興味ある問題として、何が台風の進路を決めているかということがある。次節に述べるように、筆者らは、2004年7月に発生した平成16年新潟・福島豪雨の事例を対象に、メソモデルを用いた全球アンサンブル予報のダウンスケール実験を行い、降水予測における初期値・境界値の影響について調査した。ここでは、それに加えて同様な実験を台風事例について適用し、全球アンサンブル予報をメソモデルでダウンスケールすることによって有効な情報が得られるか、台風進路予測における初期値・境界値の影響はどの程度なのかについて調査した。

2. 平成16年新潟・福島豪雨のダウンスケールアンサンブル予報実験

2004年7月12日18UTC-13日06UTCにかけて新潟県佐渡の南から福島県にかけてライン状降水域が停滞し、新潟を中心に両県で大きな被害が出た。当時の現業静力学メソモデル(静力学MSM)では降水域の表現は十分でなく、この傾向は当時試験運用中だった非静力学メソモデル(非静力学MSM; Saito et al. 2006)でも同様だった。この事例については、Kusaka (2006) が、WRFとMM5を用いた比較再現実験を行っており、NCEP 全球解析を初期値に用いた場合と気象庁領域解析を初期値に用いた場合の比較を行い、前者では予報時間にかなりのずれが生じるものの強い降水が表現されるが、後者では強い降水が表現されないことを述べている。

斉藤ほか(2006a)は、このケースを対象に、全球アンサンブル予報にメソモデルをネスティングして、初期値と境界値のどちらがメソモデルの予報に影響を与えていたか、全球アンサンブル予報の摂動をメソモデルに与えるとどのような結果が得られるかなどについて調べた。2004年7月12日12UTCを初期値とする気象庁週間アンサンブル予報(全球EPS; 経田、2006)のモデル面ファイル(1.125度、40層、6時間おき)を初期値・境界値に用い、10km解像度の気象庁非静力学メソモデルによる予報を行った。

図1左)は、7月12日12UTCを初期値とする全球EPSによる東北地方400×250kmの領域における全球EPSの6時間降水量の極大値(mm)である(横軸は予報時間FT=00-06、縦軸はFT=12-18)。コントロールランでの極大雨量はFT=00-06で約10mm、FT=12-18で約8mmである。図では、摂動を加えたメンバー(番号にpを付している)を四角形で、摂動を引いたメンバー(番号にmを付している)を三角形で示してある。メンバー'M03p'ではFT=12-18の極大雨量を15mmに増やしているが、10km格子平均で180mmに達する雨が見られたことと比較すると、

非常に小さな値に留まっている。極大値15mm程度の雨が予想されることは全球EPSでも特に珍しいことではないので、新潟・福島豪雨のような狭い場所に非常に強い雨が集中する現象を、全球EPSの予報結果から予期することは、困難である。図では、摂動を加えたメンバーでは予報初期の雨が少なく、摂動を引いたメンバーではコントロールに比べ予報初期の雨が多い傾向がある。斉藤ほか(2006a)で述べたが、全球EPSで用いているBGM法では、コントロールランからの差をBreedingにより残すため、水蒸気の摂動は、降水域においては湿らす側よりも乾かす方に入りやすいためによると考えられる。

図1右)は、全球EPSを初期値・境界値に用いた場合の10kmメソモデルによる極大雨量を示す。全球EPSの各メンバーに対応するメソモデルの各メンバー予報結果の相対的な位置関係は全球EPSのそれと良く似た傾向を示すが、メソモデルの予報では、多くのメンバーの極値が予報前半(FT=00-06)と予報後半(FT=12-18)のいずれかで20mmを超えており、'M03p'では、FT=12-18で70mmの降水を予測している(図の軸のスケールが左右で異なることに注意)。

斉藤ほか(2006a)では、メソモデルの予報が全球EPSのメンバーによって変わったのが初期条件の違いによるものか境界条件の違いによるものかをみるため、以下の2種類の実験を追加した。

- 1) 初期摂動なしで境界条件だけを'M03p'にかえたもの: 'M00M03p'
- 2) 初期条件のみ'M03p'で与え、境界条件はコントロールのままのもの: 'M03pM00'

これらの実験による降水量は、1図右に×印で示してある。FT=00-06では境界条件の影響は殆ど見られず、FT=12-18でも境界条件の違いによる雨量の違いは大きくない。図は省略するが、'M00M03p'(境界条件のみ変更)の予報でも、FT=18の気圧場は'M03p'に近くなっており、'M03pM00'(初期条件のみ変更)では、気圧場はコントロールランに近いが、降水パターンは'M03p'と類似していた。18時間予報程度での降水予測への影響は比較的小さいことが分かる。即ち、このケースでは、

1)メソモデルによるダウンスケールでは、全球EPSの各メンバーの特徴が引き継がれる。

2) 気圧場は比較的早く境界条件の影響を受けるが、降水予報の違いは1日予報までは小さい。

の2つが分かった。Du and Tracton (1999) は、1998年に行なわれたストームアンサンブル予報実験(SAMEX)において、領域アンサンブル予報における境界条件の影響を調べている。水平解像度32kmの静力学領域モデルによる36時間予報について、広領域モデル(9760km×6300km)と狭領域モデル(約4640km×3100km)を用いた結果を比較し、領域が狭い場合には、領域アンサンブル予報のスプレッドが小

さくなることを述べている。今回の結果が Du and Tracton (1999)の結果と異なるのは、予報時間が短いこと、領域全体のスプレッドではなく、領域中央付近の降水にのみ注目したことなどによると思われる。

齊藤ほか (2006a) では、全球 EPS の摂動を規格化してインクリメントとしてメソ解析に加えるメソアンサンブル予報実験を行い、メソ解析の特徴を残しながら摂動成長の傾向をダウンスケールする実験も行ったが、ここではその詳細は省略する。

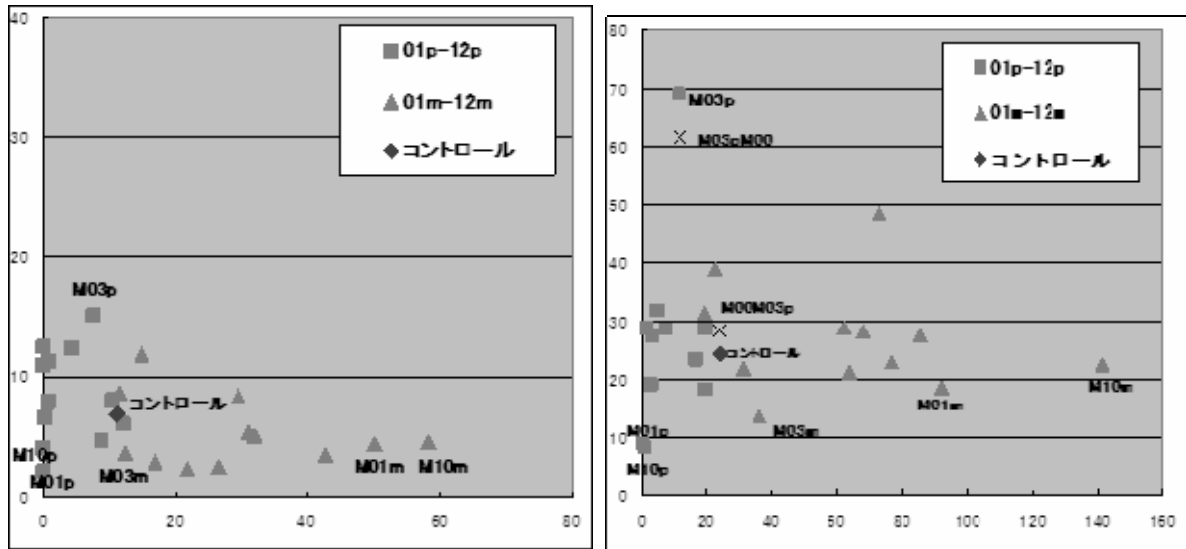


図 1 左) 7月12日12UTCを初期値とする全球 EPS による東北地方 400×250km の領域における全球 EPS の6時間降水量の極大値(mm)。横軸は FT=00-06、縦軸は FT=12-18。右) 同じく全球 EPS にネストした 10km メソモデルによる6時間降水量の極大値。左図とは軸スケールが異なることに注意。図中の×印は、境界条件を変えた実験 'M00M03p'、'M03pM00' による結果。

3. 2004年台風第22号のダウンスケール実験

前節では、水蒸気や降水の場比べ、気圧場や運動場は境界条件の影響を比較的早くから受けるという結果だった。その後、齊藤ほか (2006b) は、メソモデルにおける境界条件の影響が領域内部にどう伝播するかについて調べ、気圧場は音速で、温度場は重力波の速度で、水蒸気場は移流の速度で内部に影響が伝わることを報告している。気圧場や運動場が境界条件の影響を早く受けるのであれば、台風進路予報への境界条件の影響はかなり大きいことが予想される。この推論を確かめるために、前節で行ったのと同様のダウンスケール実験を 2004年10月8日12UTC 初期値のケースについて行った。このケースでは初期時刻に日本の南海上にあった台風第22号が関東に上陸したが、全球 EPS の24時間予報の台風位置は四国から房総沖までばらつき、コントロールランでは中部地方に台風を予想していた(図2)。

全球 EPS による、コントロール、最も西寄りに台風を予想したメンバー'M07p'、最も東寄りに台風を予想したメンバー'M07m'、についての24時間予報の平均海面気圧と降水量の分布を図3に示す。

全球 EPS を初期値・境界値に用いて 10km メソモデル(NHM)を動かした場合の、コントロールランの結果を図4に、メンバー'M07p'とメンバー'M07m'についての結果を図5に示す。24時間後の

台風の中心位置は、コントロールランでは中部地方に、メンバー'M07p'とメンバー'M07m'ではそれぞれ四国付近と関東の東海上に予想されており、メソモデルによる台風進路はほぼ全球 EPS のそれと同じであった。全球モデルと 10kmNHM では、解像度が12倍違い、物理過程や力学過程も異なるが、アンサンブル予報のメンバーにおける台風進路の特徴がメソモデルに引き継がれることが分かる。

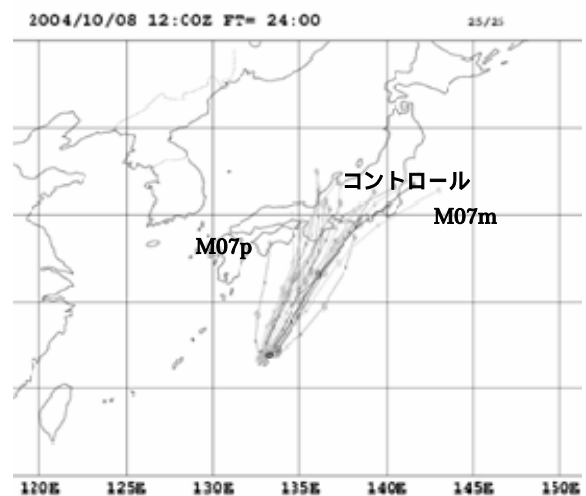


図2 2004年10月8日12UTCを初期値とする全球 EPS による台風進路予報。赤はコントロール、黒はベストトラック。

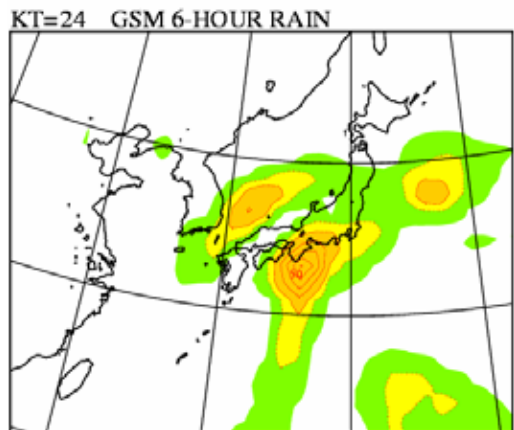
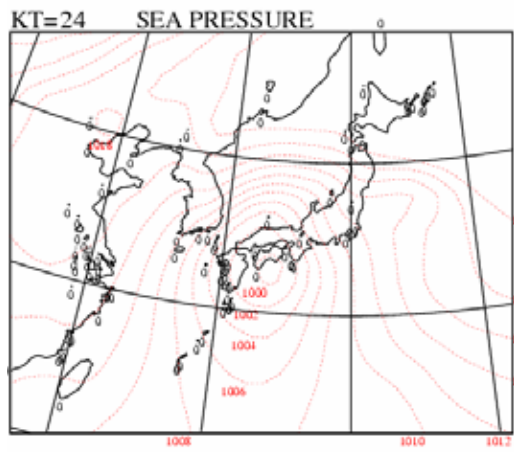
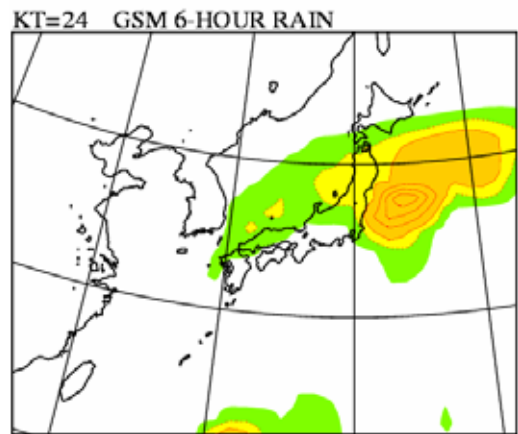
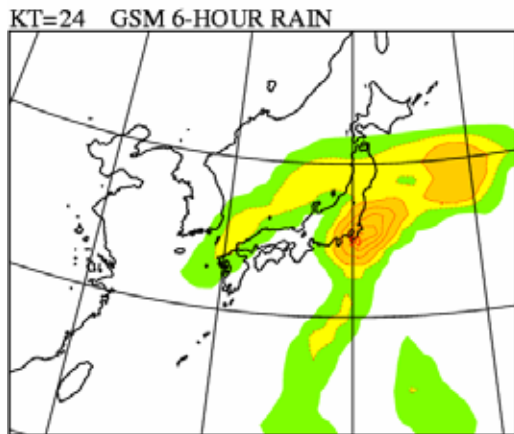
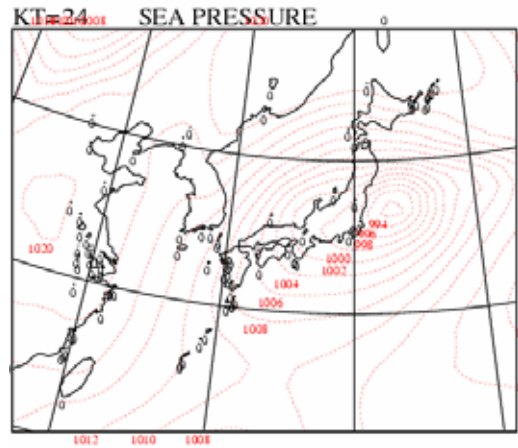
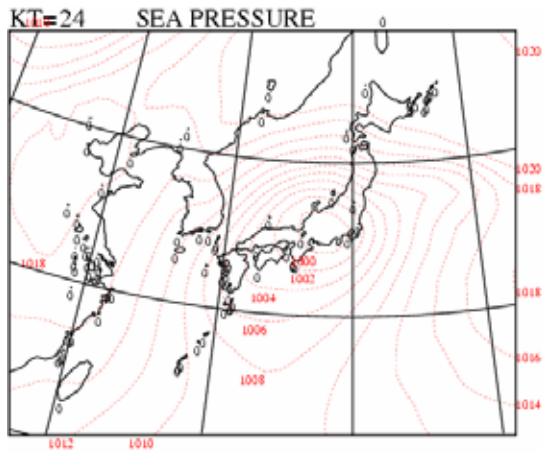


図3 2004年10月8日12UTCを初期値とする全球EPS24時間予報。海面気圧と前6時間降水量。降水量の濃淡分けは、1、5、10mm。左上)コントロールラン、左下)メンバー'M07p'、右下)メンバー'M07m'。

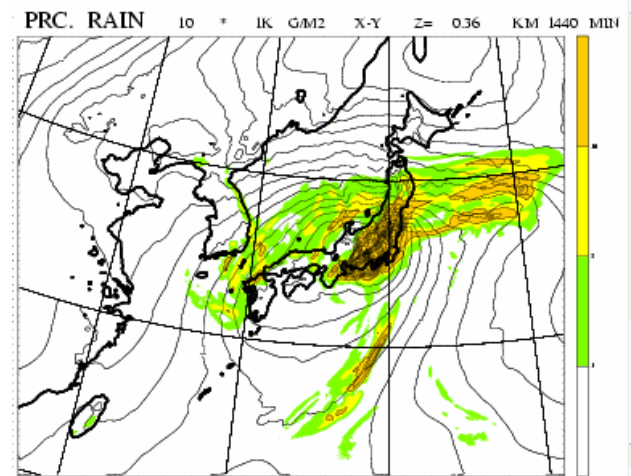


図4 2004年10月8日12UTCを初期値とする10kmメソモデルによる全球EPSのダウンスケール予報による24時間予報。コントロールランに対するもの。降水量の濃淡分けは、1、5、10mm。

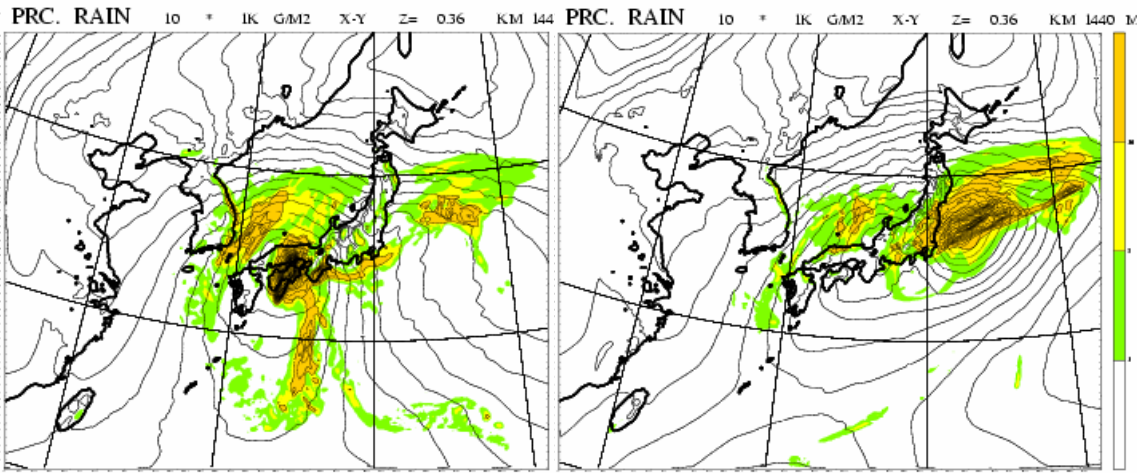


図5 図4に対応する2004年10月8日12UTCを初期値とする10kmメソモデルによる全球EPSのダウンスケール予報による24時間予報。左) 'M07p'、右) 'M07m'。

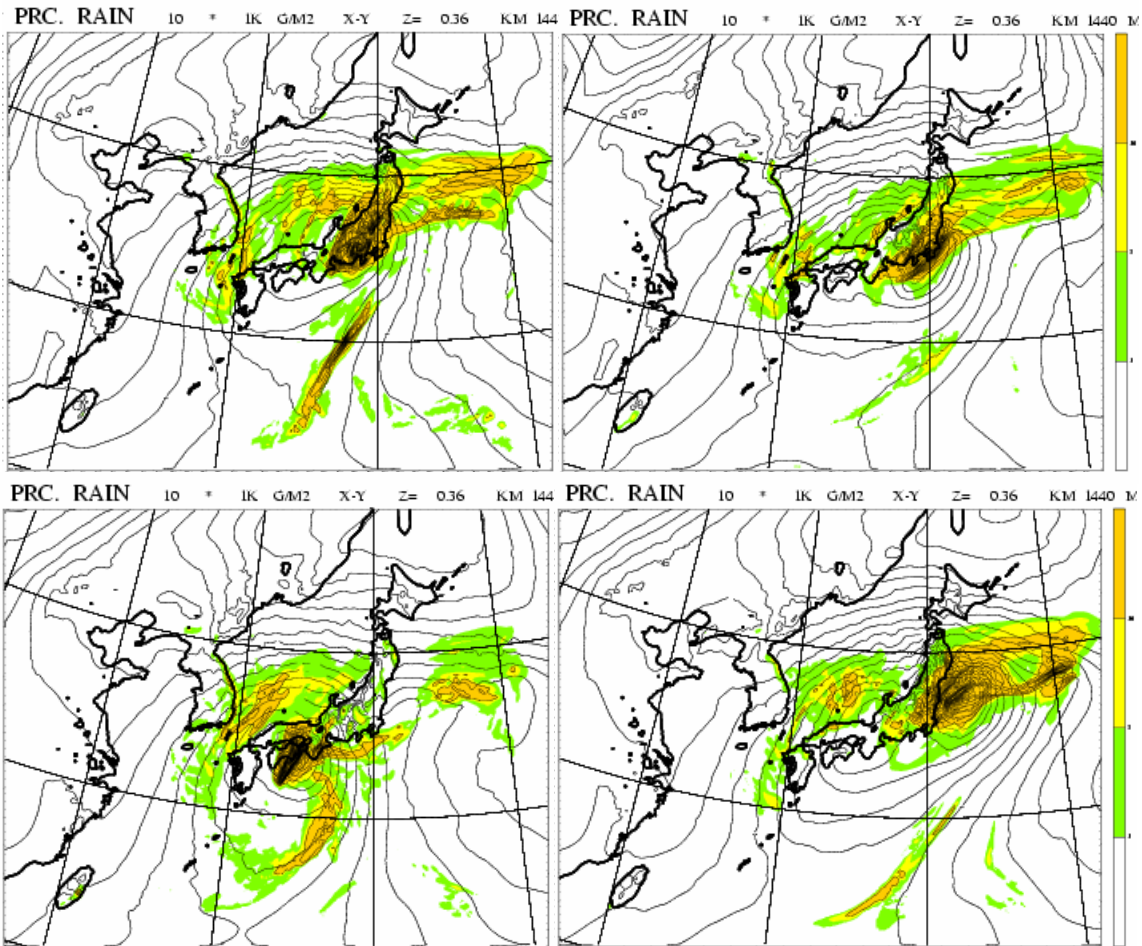


図6 図5と同様。ただし、上段は初期条件はコントロールで境界条件のみを変えた場合。左) 'M00M07p'、右) 'M00M07m'。下段は、境界条件はコントロールで初期条件のみを変えた場合。左) 'M07p M00'、右) 'M07m M00'。

メソモデルによる台風進路は、この実験での親モデルである全球予報の傾向を表すことが分かったので、進路予報を決めている要素が、初期値にあるのか、境界値にあるのかを見るために、前節と同様に以下の2種類の実験を追加した。

- 1) 初期摂動なしで境界条件だけを 'M07p', 'M07m' にかえたもの: 'M00M07p', 'M00M07m'
- 2) 初期条件のみ 'M07p', 'M07m' で与え、境界条件はコントロールのままのもの: 'M07pM00', 'M07mM00'。

図6上段は、初期条件をコントロールで境界条件のみを変えた場合の24時間予報の結果を示す。左図に示す境界条件をM07pで与えた場合('M00M07p')、台風は中部地方に予測されており、図4に示すコントロールランよりわずかに西に予測されている。右図の境界条件をM07mで与えた場合('M00M07m')には、台風は関東南部にありコントロールランよりわずかに東に予測されているが、両者の進路予報の違いはそれほど大きくない。

図6下段は、境界条件をコントロールで初期条件のみを変えた場合の24時間予報の結果を示す。左図に示す初期条件をM07pで与えた場合('M07pM00')、台風は四国東部に予測されており、図5左に示す実験'M07p'にかなり近い予測になっている。右図の初期条件をM07mで与えた場合('M07mM00')は、台風は関東海上に予測されており、実験'M07m'に近い予測になっている。

これらの実験結果からは、台風進路への境界条件の影響は、1日予報ではそれ程大きくはなく、進路予報の違いは主に初期値の違いによっていることが分かる。前節の結果では、水蒸気や降水の場に比べ、気圧場や運動場は境界条件の影響を早くから受けるという結果だったので、台風進路への境界条件の影響は非常に大きいのではないかと推測したが、結果はその予想に反するものだった。ただし、図6上段の左右を比べると、東海地方など、局地的な雨の量は台風進路の僅かな違いでかなり異なっている。新潟・福島豪雨のケースで気圧場が境界条件の影響を比較的早く受けたにもかかわらず、台風進路を決める要素としては1日予報までは境界条件の影響よりも初期条件が支配的であったのは、台風が水蒸気潜熱の解放によって維持される大きな鉛直渦度を持つシステムであることによるためであると考えられる。

台風進路予報への初期値の影響のうち、どのような摂動が進路予報を変えたのかをみてみることにする。図7は、全球EPSの中で、台風進路予報を大きく変えたメンバー'M07p'の摂動(初期値のコントロールとの差)を示す。初期時刻においては、台風は図8に2重丸で示す地点(27N,133E)付近にある。このメンバーの摂動では、風速場については台風付近の指向流を北西向きに変える偏差を、また水蒸気場については台風北東側の下層大気を乾燥化する一方、西ないし南西側を湿潤化させる偏差が与えられていることが分かる。当然のことながら、メンバー'M07m'の摂動はほぼこの逆の傾向であった(図は省略)。'M07p'のこれらの摂動は、運動場に関しては台風進路をより北西よりに変えることが予想される。また水蒸気の水平偏差は、台風の西ないし南西側の降水を強化し北東側の降水を抑制

することを通じて、台風進路を西ないし南西側に变化させる傾向を持つことが想像される。

これらの摂動のうち、進路予報に与える影響の寄与を見るために、以下の実験を追加した。なお境界条件の影響は今回のケースではそれほど大きくはなかったため、これらの実験において、境界条件は全てコントロールで与えた。

- 1) 比湿の摂動を0にして風と地表気圧、温位の摂動のみを与えたもの：'M07p_uvpt', 'M07m_uvpt'
- 2) 比湿と温位の摂動を0にして風と地表気圧の摂動のみを与えたもの：'M07p_uv', 'M07m_uv'
- 3) 風と地表気圧の摂動を0にして比湿と温位の摂動のみを与えたもの：'M07p_qvpt', 'M07m_qvpt'

図8に上記の実験結果を示す。比湿の摂動のみを0にした実験(上段)では、図6下段と比べて、雨域はコントロールにやや近づく。台風進路もコントロールに近づくが、違いはそれほど大きくない。比湿に加えて温位の摂動もゼロにした実験(中段)では、台風位置はさらにコントロールに近づくが、左右の違いはまだかなり大きい。風速場・地表気圧の摂動を0にして比湿と温位の摂動のみを与えた場合(下段)でも、M07m_qvptでは、コントロールに比べ、台風進路はかなり東寄りに変わっている。

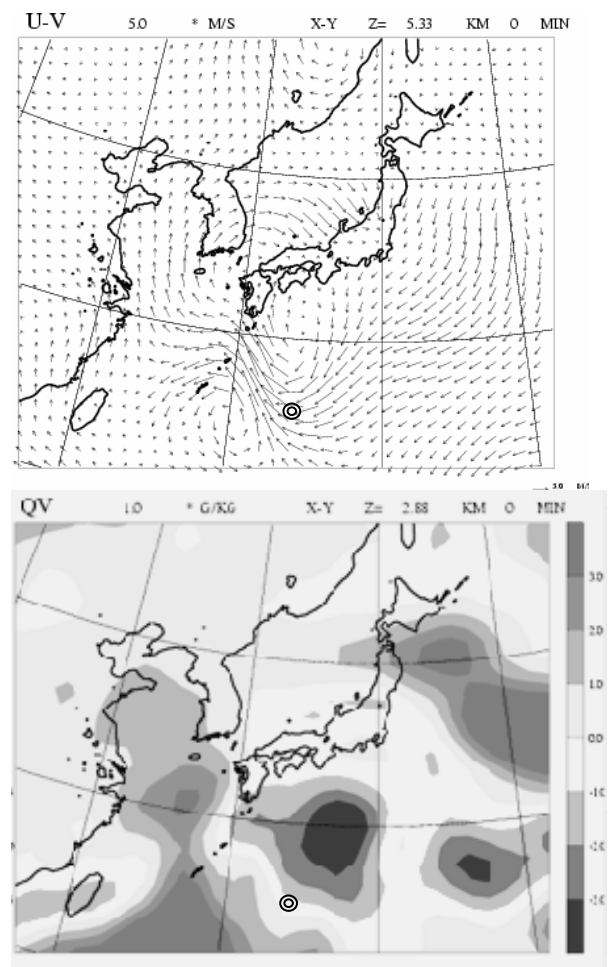


図7 M07pの摂動。 上)モデル面第20層(高度5.33

km)の風。 下)モデル面第15層(高度2.88 km)の水蒸気 (g/Kg)。

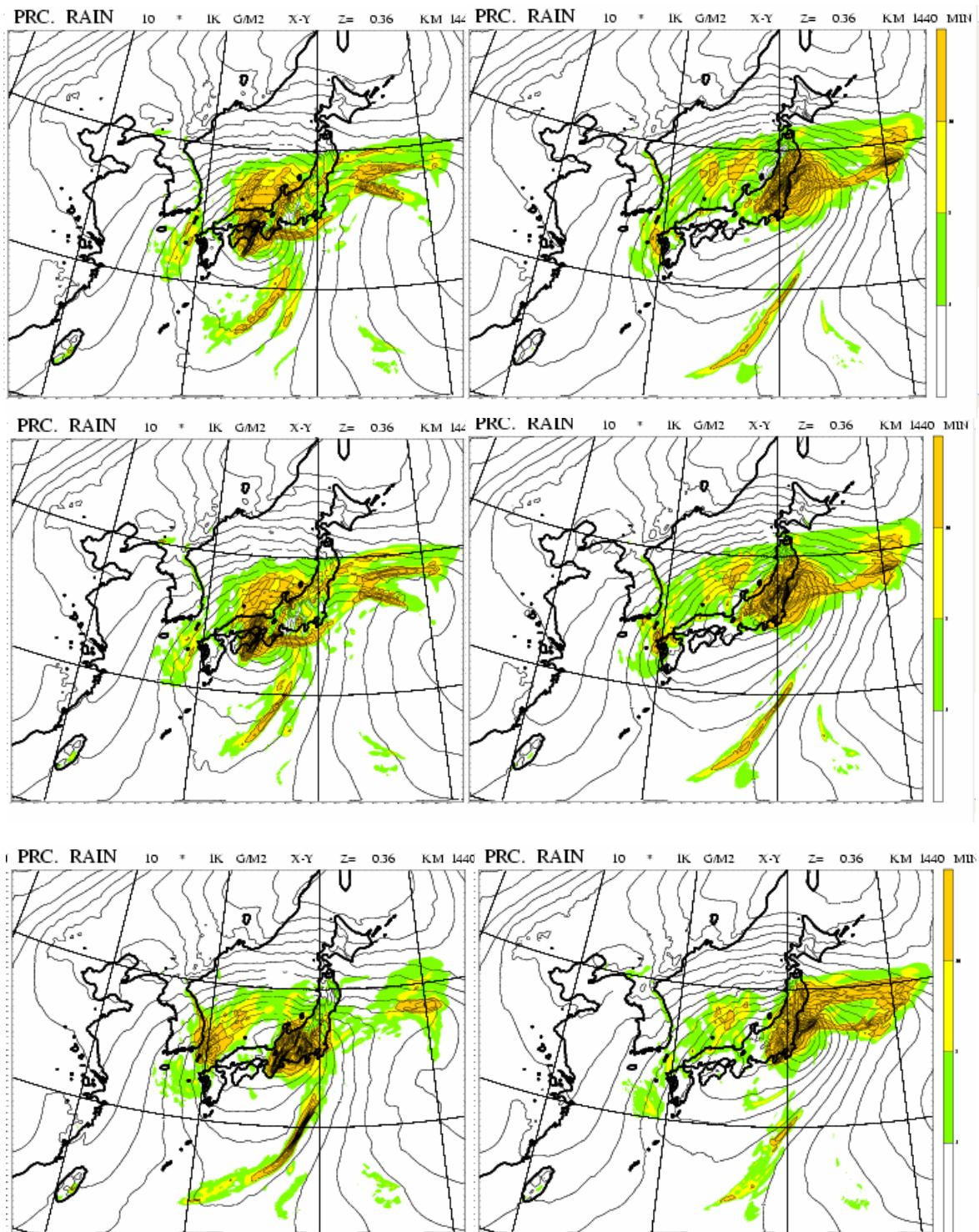


図8 図5下段と同様。ただし、上段は初期条件での比湿の摂動を0にして風と地表気圧、温位の摂動のみを与えたもの：左) 'M07p_uvpt', 右) 'M07m_uvpt'。中段は、比湿と温位の摂動を0にして風と地表気圧の摂動のみを与えたもの：左) 'M07p_uv', 右) 'M07m_uv'。下段は、風と地表気圧の摂動を0にして比湿と温位の摂動のみを与えたもの：'M07p_qvpt', 'M07m_qvpt'

4. まとめ

今回行った実験は、予備的なものであるが、いくつかの知見も得られた。これらの実験結果を総合すると、このケースでは、以下のようなことが言える。

- 1) メソモデルによる台風進路は、この実験での親モデルである全球 EPS の予報傾向を引き継ぐ。
- 2) 台風進路への境界条件の影響は、1日予報ではそれ程大きくはなく、進路予報の違いは主に初期値の違いによっている
- 3) 局地的な降水量は台風進路予報の僅かな違いを受けて大きく変わる場合がある。
- 4) 台風進路における初期場の影響としては、運動場の違いによる影響の方が水蒸気摂動や温位摂動よりもやや大きい。
- 5) 比湿と温位の摂動のみでも、降水予測は大きく変わり、台風進路もそれによりかなり影響を受ける。

進路予報に与える影響において運動場の影響の方が水蒸気摂動や温位摂動よりも大きかったのは、今回のケースが転向後の動きの早い台風についてのものであったことがあるかも知れない。それぞれの摂動がどのようなプロセスでメソモデルの台風進路予報に影響しているかについては、実験結果をより詳しく解析する必要がある。

著者はこれまで、メソモデルによる降水や台風の予報においては境界条件の影響が非常に大きいであろうというイメージを抱いていたが、2)の結果は、やや意外なものだった。当然のことだが、予報解析サイクルを通じて親モデルの精度はメソモデルの初期値にも大きな影響を与える。今回の実験はメソモデルの単発ランで行ったので、この結果が、全球モデルや領域モデルの精度がメソモデルの予報に重要でないことを意味するものではないことに注意が必要である。

気象庁では、現在の BGM 法を用いた週間アンサンブル予報に加えて、全球特異ベクトル法による台風アンサンブル予報を開発中で、早ければ 2007 年に現業化される可能性がある(山口、2006)。台風アンサンブル予報は台風進路予報を目的としており、台風強度予報や台風に伴う局地的な降水の集中の予報を目的とするものではない。3節で示したように、台風に伴う降水は、進路予報の僅かな違いにより振り方がかなり変わるため、台風進路に応じてどのような顕著現象が生じるかについての具体的なシナリオの提示はメソモデルなどより高解像度のモデルの活用が望ましい。メソモデルによるダウンスケールは簡便な方法ではあるが、防災対策やリスクマネジメントなど実用性に関して有力な手法であり、今後さらに調査を進める価値がある。WMO が進めている THORPEX (観測システム研究・予測可能性実験計画)における 2 週間先までの顕著現象

予測に関しても、ダウンスケール実験が貢献できると考えられる。

参考文献

- [1] Saito, K., T. Fujita, Y. Yamada, J. Ishida, Y. Kumagai, K. Aranami, S. Ohmori, R. Nagasawa, S. Kumagai, C. Muroi, T. Kato, H. Eito and Y. Yamazaki, 2006: The operational JMA nonhydrostatic model. *Mon. Wea. Rev.* 134, 1266-1298.
- [2] Kusaka, 2006: Importance of Moisture Analysis to Obtain Short-Range Prediction of Heavy Rainfall: 2004 Niigata-Fukushima Heavy Rainfall Event. *SOLA*. (in press)
- [3] 斉藤和雄, 経田正幸, 山口宗彦, 2006a: メソアンサンブル予報. 数値予報課報告別冊. 52, 66-79.
- [4] 経田正幸, 2006: 週間アンサンブル予報システム. 数値予報課報告・別冊第 52 号, 気象庁予報部, 23-33.
- [5] Du, J., and M. S. Tracton, 1999: Impact of lateral boundary conditions on regional-model ensemble prediction. *CAS/JSC WGNE Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling*, 28, WMO/TD-No. 942, 6.7-6.8.
- [5] 斉藤和雄, 経田正幸, 山口宗彦, 2006b: メソモデルによるダウンスケールアンサンブル予報実験(その 3 境界条件の影響の内部への伝播). 日本気象学会春季大会予稿集, D301.
- [6] 山口宗彦, 2006: 特異ベクトル法の開発. 数値予報課報告・別冊第 52 号, 気象庁予報部, 50-58.