

日本における顕著現象の予測可能性研究

余田成男^{*1}・中澤哲夫^{*2}・山口宗彦^{*3}・竹内義明^{*3}
木本昌秀^{*4}・榎本剛^{*5}・岩崎俊樹^{*6}・向川均^{*7}
松枝未遠^{*8}・茂木耕作^{*9}・三好建正^{*3}・新野宏^{*10}
齊藤和雄^{*11}・瀬古弘^{*11}・小司禎教^{*11}

1. はじめに

数値天気予報は、20世紀において、科学的技術的社会的に成功した最も重要な事業の1つである。日々の天気予報から週間、1か月、3か月、暖候期・寒候期予報まで、数値モデルが用いられるようになり、それぞれの平均的な予報スキルは目に見えて良くなっている。しかし、洪水や土砂崩れを起こすような豪雨、台風や竜巻に伴う暴風、あるいは、異常高温・低温の持続、少雨早魃(かんばつ)など、発生頻度こそ低いが人間の社会経済活動にとって影響の高い現象(extreme eventの訳として顕著現象という)の予報精度向上は、現在も依然重要な課題である。

この難問題への挑戦として、1日から2週間先の顕著現象の予報精度向上をめざす国際研究計画 THORPEX(観測システム研究・予測可能性実験計画)がレディング大学教授(当時)のAlan Thorpe博士と、温帯低気圧論で有名な米国海洋大気庁のMelvyn Shapiro博士らを中心として計画され、世界気象機関(WMO)の下、世界天候研究計画(WWRP)の10年プログラムとして2003年から始まった(余田 2007)。

この記事では、顕著現象の予測可能性研究に関する国際動向を紹介するとともに、我が国における気象庁や大学・研究機関での取り組み、及び、気象学会での活動状況を紹介する。また、最近の予測可能性研究の具体的な研究例について、大規模変動、台風、メソスケール現象の3つに分けて概観する。(余田成男)

*1 Shigeo YODEN, 京都大学大学院理学研究科。

*2 Tetsuo NAKAZAWA, 気象庁気象研究所台風研究部。

*3 Munehiko YAMAGUCHI, Yoshiaki TAKEUCHI, Takemasa MIYOSHI, 気象庁数値予報課。

*4 Masahide KIMOTO, 東京大学気候システム研究センター。

*5 Takeshi ENOMOTO, 海洋研究開発機構地球シミュレーションセンター。

*6 Toshiki IWASAKI, 東北大学大学院理学研究科。

*7 Hitoshi MUKOUGAWA, 京都大学防災研究所。

*8 Mio MATSUEDA, 筑波大学生命環境科学研究科, 現: 地球科学技術総合推進機構/気象庁気象研究所。

*9 Qoosaku MOTTEKI, 海洋研究開発機構地球環境観測研究センター。

*10 Hiroshi NIINO, 東京大学海洋研究所。

*11 Kazuo SAITO, Hiromu SEKO, Yoshinori SHOJI, 気象庁気象研究所予報研究部。

© 2008 日本気象学会

2. 内外の動向

2.1 国際的な動向

2.1.1 T-PARC

THORPEXのアジア地域委員会(ARC)は、ARCの準備会合(2003年2月東京)を経て、故中村一気象庁数値予報課長(当時)のご尽力で2003年夏に中国、インド、日本、韓国、ロシアの5カ国で発足した。ARCでの議論の結果、台風、梅雨、季節内振動(第1回ARC会合、2004年3月ソウル)及び黄砂(第2回ARC会合、2004年11月北京)を対象とすることを決めた。これらのうち、まず「台風」を対象として2008年に北西太平洋で地域観測実験を実施することとなった(第3回ARC会合、2005年8月北京)。

その後、この地域観測実験に北米地域委員会も加わり、汎太平洋域における地域観測実験計画 THOR-

PEX-Pacific Asian Regional Campaign (T-PARC) が行われることとなった。この観測計画は、台風の発生、転向、温帯低気圧化とその下流側への影響や冬の低気圧の急発達などの予測精度向上を図ることを目的としている。

実は、台風を対象とすることには紆余曲折があった。THORPEX 打合せ会合(1999年7月バーミンガム)で、日本から「台風を対象としたい」と提案したところ、米国大気研究センター(NCAR)のRichard Carbone 博士から、「この計画に台風は含まない」とはっきり言われた。その後、最適観測法で台風の進路予測を大きく改善できる可能性があることや台風の温帯低気圧化が下流の北米や欧州の予報に影響があることが認識された結果、アジアにとっても欧米にとっても重要な顕著現象である台風を対象とした最適観測法がT-PARCとして実現することとなった。

T-PARCでは、最適観測法を試すことにしている。最適観測法では、感度解析と呼ばれる手法を用いて、予報精度の改善幅が大きくなるように特定された観測領域を観測する。T-PARCで予定されている特別観測は、航空機からのドロップゾンデ観測、静止気象衛星のラピッドスキャン観測、3隻の海洋観測船による高層観測である。気象庁は、アンサンブル予報データに基づく台風の感度解析を実施してドロップゾンデ観測の支援を行う。さらに、海洋研究開発機構(JAMSTEC)が独自に計画している大規模観測プロジェクトPALAU2008とも協調して観測調整が図られることになっている。この観測実験により、台風内部、または周辺域の観測データが台風の予報にどのように寄与するのか、台風の発達や進路決定のメカニズムは何かということに関する新たな知見が期待される。

(中澤哲夫・山口宗彦)

2.1.2 TIGGE

アンサンブル予報データは、顕著現象の予測可能性研究や、動的な最適観測法の実証実験に欠かせない。そこで、気象庁(JMA)を含む世界の主要数値予報センターの全球アンサンブル予報データを中国気象局(CMA)、欧州中期予報センター(ECMWF)、米国大気研究センター(NCAR)が収集してTHORPEX研究者に提供するTHORPEX双方向マルチセンター全球アンサンブル(TIGGE)データベースが構築され、データの提供が始まっている。TIGGEデータベース構築のほか、T-PARCに対するアンサンブル

台風予測データの提供、現業・研究用の領域アンサンブル予報データの属性情報のとりまとめなどTIGGE関連の活動はTHORPEXの下に設けられたTIGGE作業部会で調整されている。(竹内義明)

2.2 気象庁の取り組み

THORPEXで得られる知見は、台風など顕著現象予測の改善、アンサンブル予測システムを用いた新プロダクトの開発、新しい気象情報システムの構築、観測システムの有効運用という形で将来の気象業務に資するものである。そのため、気象庁は、THORPEX運営委員会、アジア地域委員会、各専門作業部会といったTHORPEX関連の国際会合に専門家を参画させ、THORPEX計画に積極的に取り組んでいる。特に、台風を主要ターゲットとするT-PARCの実施に向け、中核となる航空機によるドロップゾンデ観測だけでなく、衛星・地上ゾンデ観測、船による観測、感度領域解析資料等の提供およびインパクト試験などを実施するために、庁内横断的な体制を組む予定にしており、内外の気象機関・研究機関とも密接に協力している。また、TIGGEデータベース構築ではデータ提供機関としての役割を担っており、その利用に係る調査についても大学等と協力しつつ進めている。

(竹内義明)

2.3 大学・研究機関における取り組み

2.3.1 実験的予測可能性研究進展のために

気象現象のメカニズムを解き明かし、予測の精度を上げ、さらに高度な観測により自然の新たな不思議に出会うためには、データとモデルの融合が大きな鍵を握っている。より高度な研究には高度な道具が必要である。大学で気象庁の真似事をする必要があるか、とのご意見もあろうが、やはり研究の道具は自分達で作って行かねばならないだろう。顕著現象のメカニズム研究といっても、予測、再現ができなければ立ち行かない。新しい衛星データが予報にどのようにインパクトを与えるのか、といった研究を進めていくためにも、自由に、縦横無尽に使い倒せる実験的データ同化、予測システムを研究コミュニティが持つべきだと考えている。特に、並列計算機の進歩により、随伴モデルのプログラミングの必要のないアンサンブルカルマンフィルタが現実味を帯びつつある。再解析データなど、現業予報システムの恩恵を受け続けてきた研究コミュニティが大いに貢献できるチャンスではないか

と考えている。

(木本昌秀)

2.3.2 実験的アンサンブル再解析データ ALERA

平成18年度に実施された気象庁予報部、海洋研究開発機構、千葉科学大学の共同研究「アンサンブル・カルマンフィルタによるデータ同化手法及び予測可能性に関する共同研究」の成果のひとつとして、地球シミュレータを利用して、アンサンブル全球大気再解析データ ALERA (AFES-LETKF experimental ensemble reanalysis) が試験的に作成された (Miyoshi *et al.* 2007)。このデータは1年半と短期間であるが、アンサンブル・カルマンフィルタを用い、現実的な大気大循環モデルに実際の大気観測データを同化したユニークなデータセットである。データは、地球シミュレータセンターから公開されており (<http://www3.es.jamstec.go.jp/alera/>)、研究目的に限り誰でも無償で利用できる。データ同化手法、予測可能性の研究だけでなく、アンサンブル予報実験の初期値としても多に活用されることを期待している。

(榎本 剛)

2.3.3 アジア技術協力

パソコンなど一般的な計算機の性能が飛躍的に向上し、インターネットにより通信事情も一変した今日、メソモデルを用いた数値天気予報システムを世界の国々に技術移転できる状況になりつつある。2007年度より、京都大学、気象研究所、バンドン工科大学が中心となり、東南アジア各国の若手研究者と協同して、気象災害の軽減に向けた国際共同研究が展開中である (<http://www-mete.kugi.kyoto-u.ac.jp/project/MEXT/>)。高分解能の領域気象モデルを用いた熱帯域気象のダウンスケール予報実験と機動的観測データのインパクト評価実験を行うとともに、データ同化システムの高度化、統合データベースの構築、確率予報情報の高度利用による気象災害軽減のための判断支援システムの試作を行う計画である。国際研究集会を定期的に開催して、不断に最新技術情報を交換できる「東南アジア地域気象災害軽減国際共同研究推進ネットワーク」を構築する。高温多湿な熱帯域特有の現象に関する新知見と予報モデル化技術は、梅雨期や台風時の我が国の減災にも寄与し、また、気候予測モデルの精緻化にも直結するものである。(余田成男)

2.4 日本気象学会における取り組み

2.4.1 THORPEX 研究連絡会

THORPEX 研究連絡会 (<http://www3.es.jamstec.go.jp/thorpex/>) は、2005年7月に日本気象学会の研究連絡会として承認された。スペシャル・セッションの提案、設立の経緯は、大淵・榎本 (2005) に述べられている。研究連絡会になる前の1回を含め、これまで研究集会を3回、スペシャルセッションを1回主催し、アンサンブル手法や予測可能性研究、社会的な応用について議論してきた。2005年度には、科学研究費の補助を受けて THORPEX 国内研究実施計画について検討することができた。このような活動がようやく実を結んで、2007年度に相次いで採択された研究プロジェクトにつなげることができた。今後は複数のプロジェクトを横につなげていくために活動していきたいと考えている。(榎本 剛)

2.4.2 気象研究コンソーシアム

最適観測法やアンサンブル手法を用いた同化手法の開発や予測可能性研究で世界をリードしていくためには、気象庁の持つ大量のデータと高度にシステム化された研究基盤が必要である。これまでも、いくつかの大学や研究機関では、気象庁と個別に共同研究を実施してきた。しかし、個別の共同研究は、気象業務に直接役立つ研究成果が条件で、かなりハードルが高く、かつ、契約にこぎつけるまでに時間を要することが多かった。気象庁側でも個々の共同研究に大きな資源を割くことは難しかった。このため、気象学会は、学会員ならば比較的簡単な手続きで気象庁の大量のデータに対するアクセス権限を得られることを目的として、気象庁との間に包括的な共同研究「気象庁データを利用した気象に関する研究」を締結した。

もちろん、この包括的な共同研究は締結したばかりで課題も多い。気象学会と気象庁の両者で運営会議を定期的に行い、新システムの改善を図る。また、研究の一層の活性化のため、本共同研究の対象を、気象データからデータ同化や予報システムに広げることも検討する。(岩崎俊樹)

3. 最近の予測可能性研究

3.1 大規模場変動

3.1.1 成層圏突然昇温現象 (SSW) の予測可能性

2001年5月頃より、気象庁現業モデルにおける成層圏循環の予測精度を調査する目的で、廣岡 (九大・

理)と向川(京大・防災研)が共同研究を開始した。まず、気象庁気候情報課から提供された、1998/99年冬季の気象庁1か月アンサンブル予報のコントロールランの結果を用いて、1998年12月に発生したSSWの予測可能性について解析を行った。その結果、このSSWは約1か月程度以前から予測可能であることが示唆された(Mukougawa and Hirooka 2004)。その後、提供されることとなった気象庁1か月アンサンブル予報の全13メンバーの予測結果を用いて、メンバー間のスプレッドを解析することにより、2001年12月に発生したSSWの予測可能性や対流圏での前兆現象について、より詳細な議論が可能となった(Mukougawa *et al.* 2005)。さらに最近では、SSWの生起パターンと予測可能性との関係(Hirooka *et al.* 2008)や、SSWの前駆現象(Mukougawa *et al.* 2007)、SSWが対流圏循環に及ぼす影響と予測可能性(Mukougawa and Hirooka 2007)についても研究を進めている。(向川 均)

3.1.2 熱帯域季節内振動(MJO)の予測可能性

2005年1月より、気象庁1か月アンサンブル予報において熱帯域の大気循環場に適合した初期摂動を作成し、MJOの予測可能性を評価する目的で、気象庁地球環境・海洋部(気候情報課)と京都大学防災研究所(災害気候研究分野)との共同研究「熱帯域における季節内振動の予測可能性評価」を開始した。まず、1か月予報で採用されている初期摂動作成法であるBGM(Breeding of Growing Mode)法を改良することにより、初期摂動の特徴が、BGM法で規定する摂動のノルムの大きさにどのように依存するかについて解析を行った。その結果、ノルムの大きさがある程度以上に規定した場合、熱帯域で、東西波数1および周期約15日で東進するKelvin波に良く似た構造を持ち、時間的に成長する摂動を得ることに成功した(Chikamoto *et al.* 2007)。得られた熱帯域摂動は、2007年3月8日以降、気象庁の現業1か月予報の初期摂動として利用されている。さらに、この共同研究では、2008年3月までの予定で、得られた初期摂動を用いて、MJOの予測可能性に関する研究を進めている。(向川 均)

3.1.3 定常ロスビー波の伝播・砕波に伴う顕著現象

中緯度帯では、時に偏西風帯上を定常ロスビー波が伝播し、各地で連鎖的に顕著現象を引き起こすことが

ある。それぞれの現象は、メソ〜総観規模の現象であるが定常ロスビー波の伝播や砕波により引き起こされるので、同時に半球スケールの現象でもある。

地球シミュレータを用いて、メソスケールの一部まで表現できる数十km格子での全球大気シミュレーションが可能となったことから、定常ロスビー波の伝播・砕波に伴う顕著現象の事例研究を実施した。

2004年中欧で洪水をもたらした切離低気圧の事例について、初期時刻を変えた全球20km格子での数値実験を行った。切離低気圧がうまく発生しなくなる5日前からの再現実験では、フロリダ半島沖の弱い熱帯低気圧の進路の予測精度も急に悪化していた。この2つの局地的な現象につながりがあることは、気象庁の週間アンサンブル予報を用いた簡易感度解析でも確認された。地中海上空で切離低気圧が発生した3日前からの実験と英国・アイルランド上空の低気圧が強化されてしまう6日前からの実験を比較したところ、定常ロスビー波の伝播の経路が異なっていた。前者は、亜熱帯に一度収束してから再射出されるのに対し、後者では偏西風帯上を速く伝播していた(Enomoto *et al.* 2007)。

中緯度で発生する顕著現象の理解と予測のためには、事例研究を重ね、熱帯の対流活動との相互作用や定常ロスビー波の砕波に伴う顕著現象発生メカニズムについての知見を深める必要がある。(榎本 剛)

3.1.4 ブロッキングの予測可能性

本節では、2005年12月中旬に北アメリカ西岸に発生したブロッキング現象の予測可能性について、現業中期アンサンブル予報データを用いて解析した結果について紹介する。

12月15日12 UTCのブロッキングに対する5日予報は、JMA(気象庁)の全メンバー(25メンバー)がブロッキングのリッジの位置を正確に予測していたにもかかわらず、NCEP(米国環境予測センター)の全メンバー(11メンバー)は実況よりも上流にリッジの位置を予測した(Matsueda *et al.* 2007のFig. 2参照)。このように特定の数値予報センターの予報のみが「集団暴走」するのは非常に珍しい。このNCEPの集団暴走の原因を探るために、まず始めに、NCEPの全メンバーの解析値を予報初期値として用い、気象庁の全球予報モデルJMA-GSM(TL159L40)による数値実験を行った。その結果、リッジの位置がわずかながら実況に近づいたものの、依然として全メン

パーとも実況を捉えることができず、NCEPのモデルではなく初期値に主に問題があったことが分かった。次に、初期値のどこに問題があったのかを具体的に探るために、このブロッキングを対象として、乾燥全エネルギーノルムを用い、Enomoto *et al.* (2007)による簡易感度解析を行った。その結果、日本の東の海上が初期時刻における高感度領域として検出され、この領域ではJMAとNCEPのコントロールランの初期値の差が周囲に比べ大きく、低気圧が存在していることが分かった。NCEPはこの低気圧周辺の解析値を(少なくともJMAよりは)うまく作成できなかったようだが、適切な初期摂動を与えられていれば、集団暴走を回避できた可能性がある。そこで、NCEPの初期摂動の大きさが一般に他の数値予報センターのものよりも小さいことを踏まえ、初期摂動を高感度領域のみで1.5倍にした数値実験を行った。すると、JMAほど正確にリッジの位置を捉えられなかったものの、ブロッキング領域での予報誤差を大幅に減らすことができた。

この研究では、集団暴走の原因の特定だけでなく、流れの場に依り特定の領域の初期摂動を意図的に大きくすることで予報誤差を大幅に軽減できる可能性も示唆された(NCEPではこの手法を現在考案中とのこと)。第1図に示されたTIGGEにより蓄積されるアンサンブル予報データの利用により、予測可能性研究及び、アンサンブル予報技術が今後ますます発展してゆくことを期待する。(松枝未遠)

3.2 台風

3.2.1 特異ベクトル法による感度解析

特異ベクトル法は、数値予報において予報誤差の原因となる誤差成長の大きい初期摂動を算出する手法である。特異ベクトル法による感度解析では、大きな初期摂動が算出された領域は、不確実性が大きいと見なし、集中的に観測すべき感度領域と考える。

T-PARCでは、この手法を用いてドロップゾンデ観測を支援する予定である。ここで、感度解析に基づいて、フライトプランを検討してみよう(第2図)。図中彩色部が推定された感度領域で、暖色系がより感度が高いことを表し、観測の数値予報へのインパクトが大きいと期待される。航空機の離着陸ポイントを沖縄(赤三角)と仮定し、飛行時間を5時間に設定した。図中黒三角がドロップゾンデの投下位置を表す。台風の3次元構造を把握するためにまず台風を取り囲

むように観測し、その後飛行時間の許す限り感度領域を観測する。この際高感度領域を優先的に観測する。図中緑三角は名瀬と南大東島でゾンデの定常観測があるためこの付近へはドロップゾンデは投下しない。

(山口宗彦)

3.2.2 ドロップゾンデ観測の影響評価

追加観測データの同化は、すでに発生している台風の進路や強度そのものに対してはもちろんであるが、台風の発生領域における解析精度の向上においても非常に大きなインパクトを与える。一例として、西部熱帯太平洋上におけるドロップゾンデ観測データの影響を調べた事例を紹介する(Moteki *et al.* 2007)。この解析では、2005年6月に大規模観測プロジェクトPALAU2005で実施されたドロップゾンデ観測(およそ5-15°N, 130-140°Nの領域内で合計4回の飛行で30地点に投下)のデータについて、それを含む場合と含まない場合の解析場の違いをALERAにおいて評価した(それぞれALERA_CTL, ALERA_DSと呼ぶ)。

まず、ALERAにおいて提供される解析誤差に注目する。ALERA_CTLでは、西部熱帯太平洋上の活発な対流域に対応して、特に下層風の解析誤差が非常に大きかった。ALERA_DSでは、ALERA_CTLに比べて解析誤差は小さくなり、ドロップゾンデを投下した周辺領域の解析精度は、日本付近と同程度となった。

このようなドロップゾンデの同化によるインパクトは、時間とともに周辺域にも伝播する。代表的な高度として700 hPa面で同化インパクトの時間変化を見ると、インパクトシグナルは、太平洋高気圧の縁辺に沿って北進しており、日本付近で停滞していた梅雨前線帯において非常に顕著に現れていた。下・中層におけるシグナル北進の位相速度と群速度は、それぞれ約 3 ms^{-1} と約 12 ms^{-1} であった。前者は、ゾンデ投下地点の気塊の移流の速度と概ね一致、後者は、南北波長3500-4000 km, 東西波長6000-8000 kmのロスビー波の北向き群速度に概ね対応した。

このように熱帯域における追加観測データのインパクトは、様々な意味で非常に大きく、予測可能性研究の一環としてさらに理解を深めていくべき重要なテーマの一つである。今後、様々な状況下で追加データの影響とその伝播の性質を明らかにする研究が期待される。(茂木耕作)

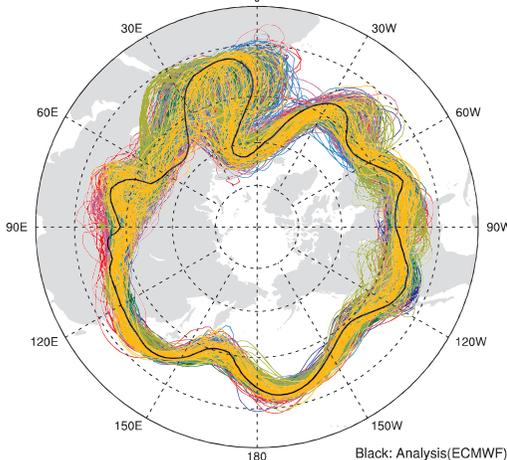
Medium-Range Ensemble Forecasts

Z500 Spaghetti Diagram (5700m)

Initial Time: 20071016

Valid Time: 20071021 00UTC

BOM CMA CMC ECMWF JMA NCEP UKMO

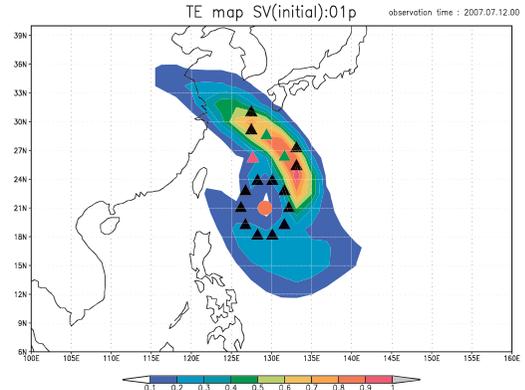


第1図 2007年10月16日を初期値とする5日予報のスパゲティ図(500 hPa 高度場の5700 m)。BOM (オーストラリア気象局, 黄緑, 33×2メンバー), CMA (中国気象局, 水色, 15×2メンバー), CMC (カナダ気象局, 黄, 21×2メンバー), ECMWF (欧州中期予報センター, 青, 51×2メンバー), JMA (気象庁, 赤, 51メンバー), NCEP (米国環境予測センター, 緑, 21×4メンバー), UKMO (英国気象局, 紫, 24×2メンバー) の合計423メンバー。各センターで初期値, モデルが異なるため, 領域によってはセンターごとに異なった振る舞いをしているのが分かる (http://www.mri-jma.go.jp/Dep/cl/cl4/member/matsueda_tigge.html より)。

3.2.3 台風進路のアンサンブル予報実験

気象庁では, 先進的な取り組みとして, データ同化とアンサンブル摂動生成法を融合したアンサンブル・カルマンフィルタ (EnKF) の開発にも着手している (Miyoshi and Sato 2007)。EnKFは全球モデルに適用しているが, これまでの開発成果から, 4D-Varと比べて, 熱帯で高い性能を示し, 特に風の場の予報に優れていることが分かっているため, ここで紹介する。

EnKFは, アンサンブル予報で得られる誤差情報を用いることで, 日々変動する予報誤差を考慮した高度なデータ同化を行う。また, 観測の情報をアンサンブ



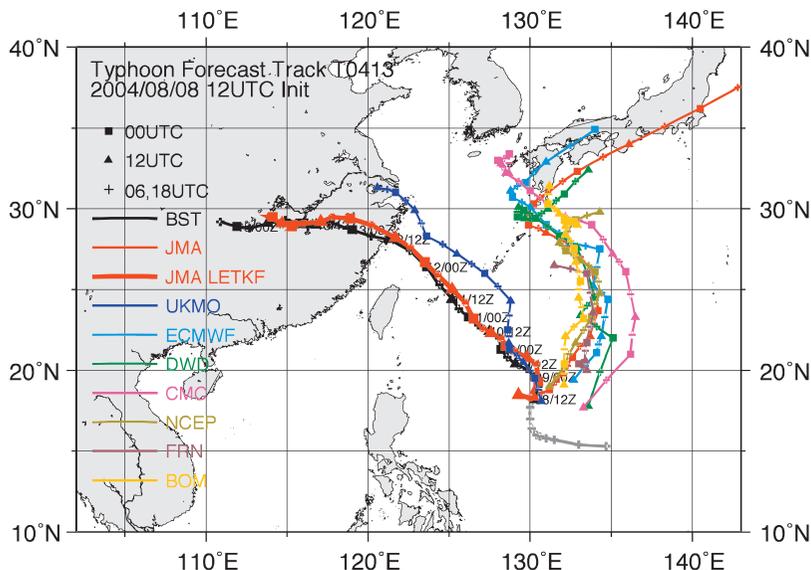
第2図 感度解析結果とそれに対応する航空機のフライトプランの例。彩色部は2007年7月12日00 UTCの台風第4号(台風中心位置は赤丸)を対象に感度解析を行った結果で, 暖色系がより感度が高いことを表している。赤三角は沖縄でフライトプランを設計する際に想定した航空機の離着陸ポイントである。黒三角がドロップゾンデの投下位置を表す。緑三角は名瀬と南大東島でゾンデの定常観測地点を表している。

ルに取り込むことで, 解析誤差を最適に反映するアンサンブル摂動を得る。風の場に影響を受けやすい台風進路予報の例(2004年8月の台風第13号)を第3図に示す。英国気象局を除く各数値予報センターは台風の北上, 日本への接近を予想したが, 実際は西進し, 中国大陆に上陸した。LETKFはこれをほぼ完全に予想しており, 今後の開発に期待を与える結果となっている。(三好建正)

3.3 メソスケール現象

3.3.1 竜巻の予測可能性の研究

スーパーセルの特徴やその発生に必要な環境条件はかなり良く理解されている。そこで, スーパーセルに伴う竜巻の予測は, 当面は2つの段階で行うべきと考えられる。まず, メソスケールの数値モデルの予報から, スーパーセルを起こしやすい環境場を, Energy Helicity Index (EHI)などの環境場の風の鉛直分布や大気の安定度から決まるパラメータに基づいて把握する(ポテンシャル予報)。この段階で, 数百km四方程度の領域に警戒を呼びかける。その後は, ドップラーレーダーによる監視を行い, スーパーセルの特徴(フックエコーやメソサイクロンと呼ばれる直径数kmの雲内の循環)を示すストームが見つかったら警戒



第3図 2004年8月8日12UTCを初期時刻とした台風第13号の進路予報。各線は、左に示す各数値予報センターやシステムに対応する。名称は次の通り：BST（ベストトラック）、JMA（気象庁）、JMALETKF（気象庁で開発中のLETKF）、UKMO（英国気象局）、ECMWF（欧州中期予報センター）、DWD（ドイツ気象局）、CMC（カナダ気象局）、NCEP（米国環境予測センター）、FRN（フランス気象局）、BOM（オーストラリア気象局）。外国の数値予報センターの進路予報データは、WGNE熱帯低気圧進路予報国際比較の結果による。

を発令する。この2段階方式は、竜巻の被害が大きい米国では実用化されている。しかしながら、最近の米国での統計ではメソサイクロンが観測されても、20%程度しか竜巻が発生しないという数字もある。メソサイクロンと竜巻の発生との関係については、まだまだ数値シミュレーションや観測による基礎的な研究が必要である。

わが国では台風による竜巻の発生が全発生数の20%と大きい、これは台風の進行方向右前方象限の風や大気安定度がスーパーセルの発生に向いているためと考えられている。2006年9月17日の宮崎県延岡市の竜巻では、メソスケールモデルで表現された台風の中に、段階的に50 m格子までの微細格子モデルを埋め込んで、スーパーセルと竜巻を再現することに成功している（益子 2007；坪木 2007）。このような再現がどの程度初期値依存性を持つものか、また台風の中になぜ竜巻を起こしやすいものと起こさないものがあるかという台風の構造の違いの成因を調べることは重要である。発生ポテンシャルについては、メソアンサンブル（第3.3.2節）が有効との報告もある（瀬古ほ

か 2007) ので、今後事例を重ね検証が進むことが期待される。

2006年の延岡市と北海道佐呂間町の竜巻を契機として、科学技術振興調整費で気象学会と風工学会が力を合わせて社会的影響までを考慮した竜巻対策の研究を行うことになった。また、気象庁は2010年春までに、突風予測情報の発表を検討している。竜巻の予測可能性が社会にどのようなインパクトを与えるか、十分な検討が求められる時期来ている。（新野 宏）

3.3.2 メソアンサンブル

近年、アンサンブル予報をメソ予報の分野にも適用しようとする試みが、各方面で始まっている。アンサンブル予報のメリットとし

ては、アンサンブル平均が単独予報よりも統計的に精度が良いことと、顕著現象の見逃しが減り予測に信頼度情報が付け加わることの2つがある。斉藤ほか（2006）は2004年7月の新潟豪雨のケースについて全球週間アンサンブル予報の摂動を規格化してメソ解析に加えて非静力学メソ数値予報モデル（MSM）を実行する実験を行い、いくつかのメンバーでコントロールで予測されなかったライン状の強い降水が予報されたことを報告している。また Seko *et al.* (2007) は2006年8月の2週間の期間について、同様の手法で実験を行い、アンサンブル平均の降水予測精度が3時間雨量で1-20 mmの範囲で単独予報よりも向上することを報告している。

メソアンサンブル予報についての国際的な研究開発プロジェクトとして、WWRP北京2008研究開発プロジェクトがある (<http://www.b08rdp.org/>)。2008年の北京オリンピックに合わせて、各国気象機関が水平解像度15 kmのメソモデルによるアンサンブル予報の比較実験を行い、技術情報を共有しようというもので、気象研究所では気象庁数値予報課と協力してこの

プロジェクトに参加している(齊藤ほか 2007a, b)。メソ顕著現象を対象とするアンサンブル予報は、初期摂動の与え方や境界条件の扱いなど、手法が確立していない分野であり、このプロジェクトへの参加を通じて、さまざまな手法をテストして行きたいと考えている。(齊藤和雄)

3.3.3 GPSによる水蒸気観測

第3.3.2節で述べられているように、メソ顕著現象の予測精度向上には初期値の精度向上が不可欠である。気象庁では2001年3月のメソ数値予報の運用開始以来、4次元変分法の導入などデータ同化手法の高度化と様々な新規観測データの利用拡大を精力的に行い、降水現象の予報高度化を図っている(齊藤・牧原2007)。近年、時・空間的な変動が大きく動態把握が困難な水蒸気の観測手法として、GPS(Global Positioning System: 全球測位システム)が注目されている。GPSは高度約2万kmを周回する約30機のGPS衛星群や受信機などで構成される測位・航法支援システムであるが、GPS衛星から送信されるL波帯の電波の位相をカウントすることで、天候に左右されない大気計測を可能とする。

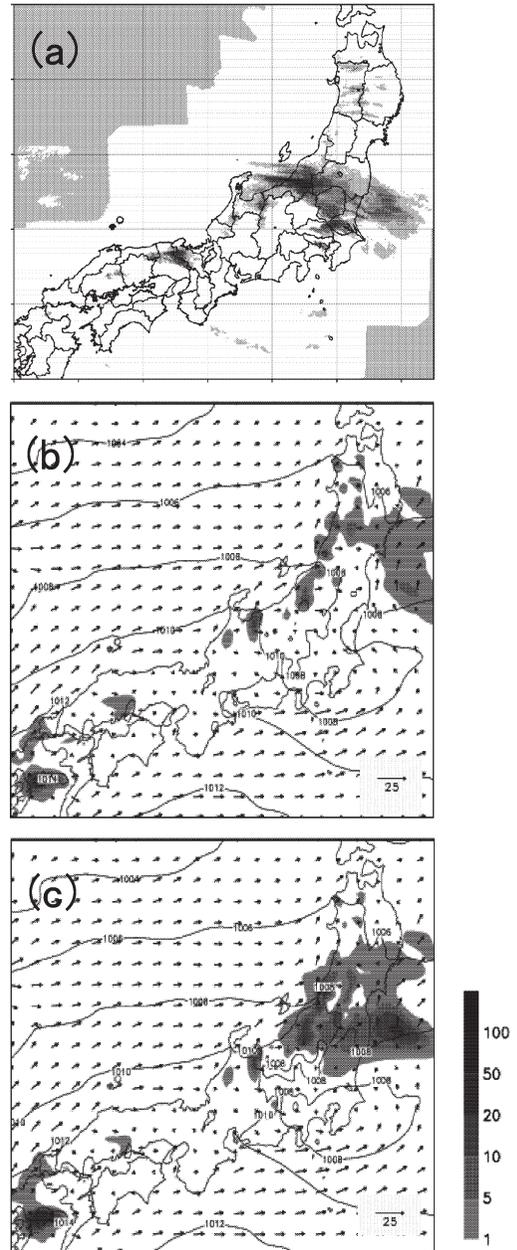
GPS大気計測は、大きく地上基地型とGPS掩蔽(えんぺい)法の2種類に分けられる。前者では地上受信機上空の鉛直積算水蒸気量(可降水量)等を推定する。日本では国土地理院が既に全国1,200点以上のGPS受信機からなる観測網(GEONET: GPS Earth Observation Network)を運用しており、空間的にも微細な水蒸気変動が解析できる。小司ほか(2005)は、2004年6月30日の静岡豪雨にGEONETの可降水量を同化し、豪雨に供給される気流の水蒸気量が観測に近づき、大雨の予測が大幅に改善されることを確認した。

一方GPS掩蔽法では低軌道衛星搭載の受信機で、大気を水平方向に貫いて到達する電波を連続観測し、大気屈折率の鉛直プロファイル等を推定する。全球で空間的に偏り無くプロファイルが得られ、観測の希薄な海洋上の有望なデータとして期待される。瀬古・小司(2007)は、2004年7月の北陸地方の大雨の事例にGPS掩蔽観測から得られた屈折率を同化することで、GPSを同化しない場合予測できなかった降水帯の再現に成功した(第4図)。

GPSデータをメソ数値予報モデルに利用する研究・開発を進め、降水予報の改善と災害の軽減に寄与

したい。

(小司禎教・瀬古 弘)



第4図 (a) 2004年7月16日15時から18時の解析雨量, (b) 通常の観測データを同化した解析結果を初期値にしてMSMを用いて予測した同期間の降水分布. (c) は、さらにGPS掩蔽データを同化した場合の降水分布。

4. おわりに

THORPEX で台風の進路予測の改善をめざす観測研究計画が今年2008年に実施されることとなった(T-PARC)。THORPEX は、多くの研究成果の上に立脚している研究計画であるが、その最も大きなものは何かと言えば、アンサンブル予報であろう。「アンサンブル予報による確率論的予報よりも、高い精度のモデルで決定論的予報を」との声もあるが、それは誤解である。初期値の誤差から逃れることはできないからである。決定論的予報では、その誤差の時間発展の全体像を見ることができない。予測精度の高いモデルをこれからも追求していくことは当然であるが、それとともに、データ同化法、最適観測法、アンサンブル予報の高度化など、やるべき課題は山積している。気象研究コンソーシアムも、もうすぐ動き出そうとしている。気象庁のアンサンブル予報データだけでなく、世界中のアンサンブル予報データも自由に使えるような時代がもうそこまでやってきている。これらのデータを使って、これまでではできなかった挑戦的な研究がすでに始まってきている。

気象学会員の諸氏、とりわけ大学院生など若手研究者の人々が、このような研究に意欲的に取組まれることを祈念してやまない。
(中澤哲夫)

参 考 文 献

- Chikamoto, Y., H. Mukougawa, T. Kubota, H. Sato, A. Ito and S. Maeda, 2007 : Evidence of growing bred vector associated with the tropical intraseasonal oscillation. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L04806, doi : 10.1029/2006GL028450.
- Enomoto, T., W. Ohfuchi, H. Nakamura and M. A. Shapiro, 2007 : Remote effects of tropical storm Cristobal upon a cut-off cyclone over Europe in August 2002. *Meteor. Atmos. Phys.*, **96**, 29-42.
- Hirooka, H., T. Ichimaru and H. Mukougawa, 2008 : Predictability of stratospheric sudden warmings as inferred from ensemble forecast data. submitted to *J. Meteor. Soc. Japan*.
- 益子 涉, 2007 : 雲解像モデルによる T0613号に伴う竜巻の再現実験. 日本気象学会2007年度春季大会予稿集, B201.
- Matsueda, M., M. Kyouda, H. L. Tanaka and T. Tsuyuki, 2007 : Daily forecast skill of multi-center grand ensemble. *SOLA*, **3**, 29-32.
- Miyoshi, T. and Y. Sato, 2007 : Assimilating satellite radiances with a local ensemble transform Kalman filter (LETKF) applied to the JMA global model (GSM). *SOLA*, **3**, 37-40.
- Miyoshi, T., S. Yamane and T. Enomoto, 2007 : The AFES-LETKF experimental ensemble reanalysis : ALERA. *SOLA*, **3**, 45-48.
- Moteki, Q., R. Shirooka, K. Yoneyama, B. Geng, M. Katsumata, T. Ushiyama, H. Yamada, K. Yasunaga, N. Sato, H. Kubota, K. K. Reddy, H. Tokinaga, A. Seiki, M. Fujita, Y. N. Takayabu, M. Yoshizaki, H. Uyeda and T. Chuda, 2007 : The impact of the assimilation of dropsonde observation during PALAU2005 in ALERA. *SOLA*, **3**, 97-100.
- Mukougawa, H. and T. Hirooka, 2004 : Predictability of stratospheric sudden warming : A case study for 1998/99 winter. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 1764-1776.
- Mukougawa, H., H. Sakai and T. Hirooka, 2005 : High sensitivity to the initial condition for the prediction of stratospheric sudden warming. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L17806, doi : 10.1029/2005GL022909.
- Mukougawa, H. and T. Hirooka, 2007 : Predictability of the downward migration of the Northern Annular Mode : A case study for January 2003. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**, 861-870.
- Mukougawa, H., T. Hirooka, T. Ichimaru and Y. Kuroda, 2007 : Hindcast AGCM experiments on the predictability of stratospheric sudden warming. *Non-linear Dynamics in Geosciences*, Springer-Verlag, 221-234.
- 大淵 濟, 榎本 剛, 2005 : 「第1回 THORPEX 研究会」報告—中期予報の精度向上にはどのような知見が必要か。また、何ができるのか—。 *天気*, **52**, 885-889.
- 斉藤和雄, 牧原康隆, 2007 : 降水現象の予報高度化の技術。 *天気*, **54**, 622-631.
- 斉藤和雄, 経田正幸, 山口宗彦, 2006 : 平成16年7月新潟・福島豪雨のダウンスケール実験。数値予報課報告別冊, (52), 68-79.
- 斉藤和雄, 瀬古 弘, 國井 勝, 原 旅人, 経田正幸, 山口宗彦, 2007a : WWRP 北京2008予報実証/研究開発プロジェクトについて (その1 2006年夏予備実験)。日本気象学会春季大会予稿集, A204.
- 斉藤和雄, 瀬古 弘, 國井 勝, 原 昌弘, 原 旅人, 山口宗彦, 2007b : WWRP 北京2008予報実証/研究開発プロジェクトについて (その2 2007年予備実験概要)。日本気象学会秋季大会予稿集, B205.
- 瀬古 弘, 小司禎教, 2007 : メソ解析に対する屈折率の同化。数値予報課報告別冊, (53), 140-146.
- Seko, H., K. Saito, M. Kunii, T. Hara, M. Kyouda and M. Yamaguchi, 2007 : Japan Area Mesoscale Ensemble Experiments using JMANHM. *CAS/JSC WGNE*

- Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling, (37), 5.31-5.32.
- 瀬古 弘, 齊藤和雄, 原 旅人, 経田正幸, 山口宗彦, 2007: 気象庁非静力学モデルを用いた日本域メソアンサンブル予報. 第9回非静力学モデルに関するワークショップ予稿集.
- 小司禎教, 國井 勝, 小泉 耕, 川畑拓矢, 瀬古 弘, 2005: 2004年6月30日, 静岡で発生した豪雨のGPSデータ同化・予測実験. 日本気象学会2005年度春季大会予稿集, C256.
- 坪木和久, 2007: 台風0613号の外域降水帯に発生したスーパーセルに伴う竜巻のシミュレーション. 日本気象学会2007年度春季大会予稿集, B202.
- 余田成男, 2007: 5. THORPEX (観測システム研究・予測可能性実験計画), 2005年度秋季大会シンポジウム「大規模観測プロジェクトは気象学に何をもたらすか」の報告. 天気, 54, 156-162.
-