

3. 台風のための双方向予報システムの構築に向けて

中 澤 哲 夫*

1. はじめに

ちょうど1年前の2005年日本気象学会秋季大会のシンポジウム「大規模観測プロジェクトは気象学に何をもちたらすか」で、京都大学の余田成男会員が、「THORPEX (観測システム研究・予測可能性実験計画)」と題して発表をされている(余田 2007)。THORPEXとは、世界気象機関(WMO)が推進している、社会・経済的に影響の大きい天気現象について、1日～2週間先までの数値予報の精度向上を加速させることを目的とした国際研究プログラムである。国際的な取組みについては、WMOのホームページ(<http://www.wmo.ch/pages/prog/arep/thorpex/>)

を参照していただければよいが、日本気象学会の研究連絡会の1つである「THORPEX 研究連絡会」のホームページ(<http://www3.es.jamstec.go.jp/thorpex/>)で、日本における活動(これまでのさまざまな会議での発表資料、今後の活動予定など)を見ることができるようになっているので、参考にしていきたい。

今回の発表では、アジア域でのTHORPEX活動として積極的に取組まれている、2008年の台風特別観測(THORPEX太平洋アジア地域観測計画; THORPEX Pacific Asian Regional Campaign; T-PARC)に向けて、わたしたちが何をめざしているのか、台風の予報をどのように改善しようとしているのか、その成果がわたしたちの社会の安全にどう貢献し得るのかについて議論したい。

* 気象研究所台風研究部。

© 2008 日本気象学会

2. 双方向予報システムとは？

THORPEX は、これまでの天気予報とは画期的に異なる、まったく新しい予報システムである『双方向予報システム』の構築に依拠したプログラムである。このシステムは、最新のさまざまな研究成果に立脚している。それらは、アンサンブル予報、4次元データ同化、誤差成長理論、最適観測法などである。『双方向予報システム』とは、一言で言えば、観測とモデルがこれまでとは比べものにならないほど分かちがたく結びついているシステムである。これまでであれば、観測は予報のための初期値を提供するだけであった。すなわち《観測→予報》という1方向のみの流れである。しかし、『双方向予報システム』においては、『観測→予報』で終わらずに、『観測→予報→観測→予報→観測』というように、予報結果が再び観測に跳ね返るシステムとなっている。どういうことかと言うと、後で述べるように、アンサンブル予報の結果から、予報を良くするために重要な領域、変数、高さなどの情報をあらかじめ得ることができるようになってきているからで、その情報をもとにして、航空機などにより機動的観測を行えば予報を改善できる、というわけである。このような観測は、Targeting Observation もしくは Adaptive Observation と呼ばれている。日本語の適訳はまだないが、ここではこのような観測手法を「最適観測法」と呼ぶことにする。すでに欧米では、実際にアンサンブル予報と最適観測法を結びつけた大掛かりな研究観測がこれまでに何回か実施されてきているが、それらは冬季の中緯度において急発達する低気圧を対象としたものであり、台風に対してはまだ行われていない。

3. アンサンブル予報

天気予報の誤差は、大きく分けて、数値予報モデルが持つ誤差と、観測に起因する初期値の誤差の2つがある。数値予報モデルそれ自身の急速な進展や、地球観測衛星からのさまざまなデータにより、天気予報の精度は格段に向上している。今後とも数値予報モデルの改良は、物理過程などを中心に課題は多い。しかし、仮に数値予報モデルが完璧なものになったとしても、初期値が実際の気象状態を十分に表現できていない場合には予報結果の精度は上がらない。そこで、ただ1つの初期値からただ1つの予報結果を出す（決定論的予測）のではなく、観測精度内で初期値を変換することによっていくつかの初期値を作り、それらのわず

かずつ違う初期値からいくつもの予報を行う「アンサンブル予報（確率論的予測）」が提案され、気象庁をはじめ世界の多くの気象予報センターで現実化されている（気象庁予報部 2006）。

日々の天候予測の中で、特に台風や集中豪雨などの顕著現象の発現可能性を長いリードタイムで示すために、アンサンブル予報は不可欠の技術である。現在、特異ベクトル法や成長モード育成法など、初期値を変化させる方式（初期摂動作成法）が用いられているが、最近ではアンサンブル・カルマンフィルタなども提案されてきており、今後さらなる精緻化が求められる。

4. 台風のアンサンブル予報

気象庁では、1999年3月に週間アンサンブル予報の試験運用が開始され、2001年3月から本運用に移行した。当初異なる初期値は25種類（25メンバー）だったが、2006年3月からは、51メンバーに増加した。

1例として、2006年台風第12号（Ioke）の例を示す。この台風は、中部太平洋でハリケーンとなり、日付変更線を越えてきたためずらしい台風である。太平洋上を西進し、日本には上陸せずに三陸沖を北上していった。この台風の週間アンサンブル予報結果を第1図に示す。この図は、台風接近確率図と呼ばれるもので、初期時刻から120時間以内に、各格子点で台風が120 km 以内に接近する確率を示している。この4枚の図は、1日ずつ予報の初期時刻が異なる。左上の新しい時刻からの予報によると、暖色系のはっきりした帯状の領域が見えるが、これはアンサンブルの各メンバー間のばらつきが少ないことを示している。この経路は、それより3日前のアンサンブル予報（右下）でも、ほぼ同じラインに沿って確率が高くなっていることがわかる。

しかし、いつもこのようにきれいな予報が行えるわけではない。第2図は、2004年の台風第23号の例である。この台風は、10月20日に日本に上陸し、大きな被害をもたらした。上陸8日前のアンサンブル予報（第2図a）では、西進しつつ南シナ海に向かう経路と、転向して日本に向かう経路とに大きく二分されている。

何がこのようなメンバー間の違いをもたらすのだろうか。台風それ自身の強度変化や、亜熱帯高気圧と関連する背景指向流の変化、そして中緯度の気圧の谷の移動速度のメンバー間の違いなどと密接な関連がある

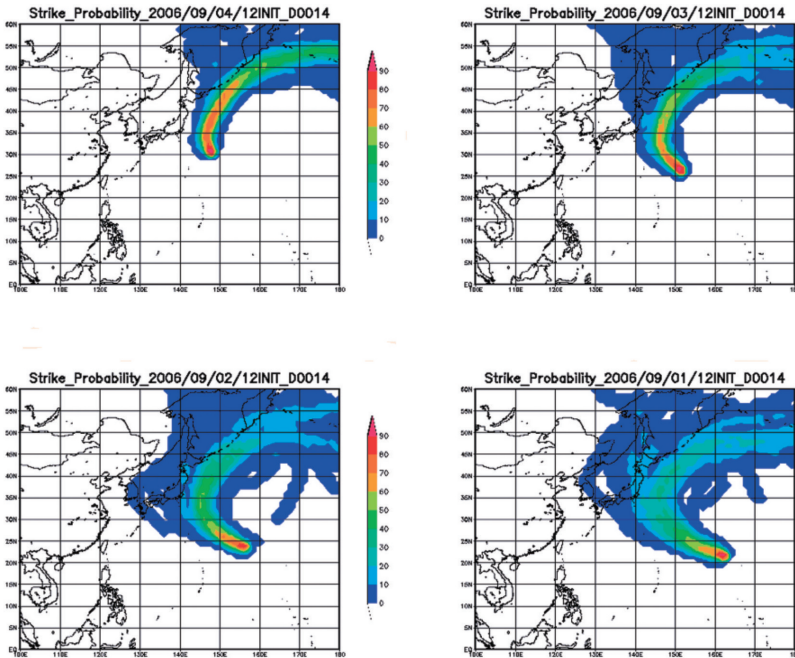
と考えられる。これらを調べることも THORPEX の重要な研究課題の1つである。

5. 台風に対する最適観測法

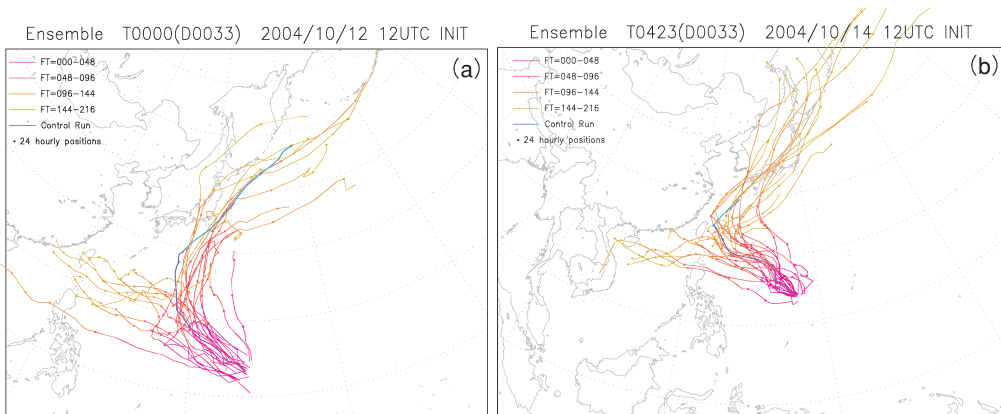
アンサンブル予報から、どこで機動的観測を行えば良いかのガイダンスを得ることができることは先に述べた。この最適観測法に基づいて指定された領域

(ターゲット域)を対象として観測を行い、その結果を予報に反映させた結果、予報が改善され、その有効性が示された事例を紹介する。台風を取り巻く周辺で行われていた観測すべてを取込んで予報を行った場合には、入れない場合と比較して大きな改善が見られた。それでは、この全観測点の中から、ターゲット域周辺のみに限った観測のみを取り入れた場合に、予報が改善されたのだろうか。

もし、ターゲット域の同定が正しければ、ターゲット域での観測が行われたデータのみを取込んだ予報結果が改善されるはずである。第3図は、2004年台風第4号が台湾の南海上にあった時に、気象庁が現在開発中の湿潤特異ベクトル法で得られたターゲット域(台風中心の北東側の点彩域)とDOTSTAR (Dropsonde Observations for Typhoon Surveillance near the Taiwan Region : http://typhoon.as.ntu.edu.tw/DOTSTAR/English/home2_english.htm)によって行われた台風周辺でのドロップゾンデ観測の位置を示



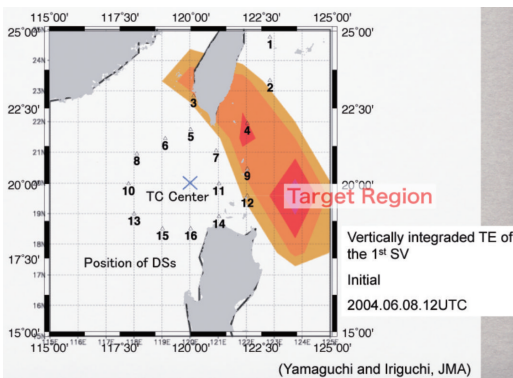
第1図 2006年台風第12号の台風接近確率図。初期値が異なる4枚の図を示す。それぞれ初期値は9月4日12 UTC (左上), 9月3日12 UTC (右上), 9月2日12 UTC (左下), 9月1日12 UTC (右下)の結果を示す。



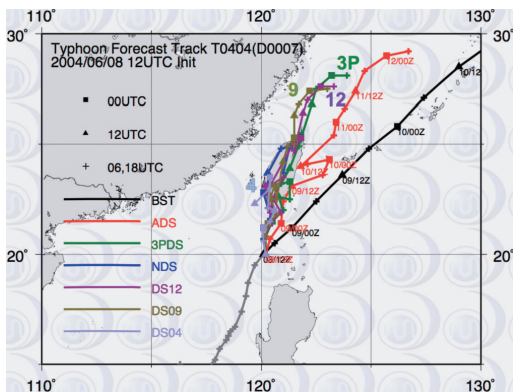
第2図 2004年台風第23号のアンサンブル予報結果。(a) 2004年10月12日12 UTCを初期値とした予報結果。(b) 2004年10月14日12 UTCを初期値とした予報結果。

す。番号は投下されたドロップゾンデ番号を示す。ここでは、4番、9番、12番の各々のドロップゾンデのみを取込んだ場合と、これら3つのドロップゾンデを全て取込んだ場合について、合計4つのケースの予報実験を行った。

その結果を第4図に示す。もっとも東側の線(黒い実線)が、実際の台風経路(BST)を示す。その西側の線はすべてのドロップゾンデデータを取込んだ予報経路(ADS)を示す。さらにその西側の線のうち、3Pは第3図の4、9、12番の3つのドロップゾンデデータを取込んだ予報経路(3PDS)である。また、4、9、12の数字は、それぞれのポイントのみのド



第3図 2004年台風第4号に対して、DOT-STARによって行われた台風周辺でのドロップゾンデ観測の位置と、気象庁が現在開発中の湿潤特異ベクトル法で得られたターゲット域(台風中心の北東側の点彩域)を示す。

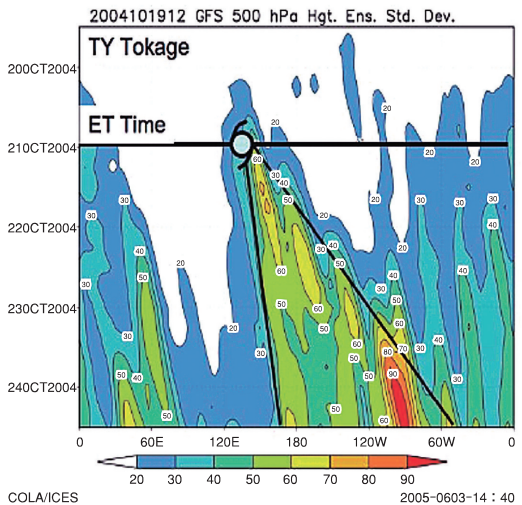


第4図 2004年台風第4号の実際の経路(BST)と、さまざまなドロップゾンデデータの組み合わせを予報モデルに取込んだ場合の台風の経路予報結果。詳しくは本文参照。

ロップゾンデデータを取込んだ予報経路を示す。もっとも西側の線は、ドロップゾンデデータを全く取込まなかった予報経路(NDS)である。NDSでは台風の北東進が予想されず、台湾の南海上にほぼ停滞しているが、3点を取込んだ場合や、9、12番だけのドロップゾンデを取込んだ予報は、全てのドロップゾンデを取込んだ予報に近くなっている。中層の南風が弱かったことが原因であることはわかったが、それではなぜ弱かったのかは不明である。

6. 2008年の T-PARC 台風特別観測実験計画

T-PARCは、2008年の夏から2009年初春にかけて北西太平洋で予定されている THORPEX の地域観測実験計画であり、THORPEXのアジア地域委員会と北米地域委員会が中心となって進めている計画である。アジア地域委員会では、台風の発生、転向、温帯低気圧化などに焦点を絞った研究を行う予定であるが、北米地域委員会は、台風や冬の低気圧が、北米など風下側に与える影響について研究を行うこととしている。すでに米国では、国家科学基金(National Science Foundation, NSF)の資金確保に成功し、2008年に向けて順調に計画の具体化が進んでいる。このような動きと比較すると、日本では競争的資金の確



第5図 米国環境予測センター(NCEP)の全球予報モデルのアンサンプル予報の全メンバーの500 hPa高度の標準偏差(北緯40度から50度間を平均)の時間—経度断面図。2004年台風第23号の温帯低気圧化(ET)後、メンバーのばらつきが増大しながら東に伝搬し、北米に達している(Anwender *et al.* 2008)。

保ができていないこともあって具体化が遅れており、現時点では最適観測法のための台風観測を実施できる目処が立っていない。しかしながら、日本としては、飛行機による台風のターゲット観測などのほかにも、気象庁の数値予報課を中心に、アンサンブル予測技術の高度化や湿潤特異ベクトル法の改良などに取組むとともに、アンサンブル予報情報やターゲット域情報などの THORPEX 研究者への資料提供、静止気象衛星データの高度利用、海洋観測船や自動放球装置による高層気象観測の実施など、大学や他の研究機関の研究者とともに、T-PARC への貢献を前向きに検討している。特に、静止気象衛星データについては、台風周辺域に限っての高時間分解能（1分間隔）の「ラピッドスキャンデータ」（<http://www.data.kishou.go.jp/satellite/rapid.html>）に期待したい。このデータを用いることにより、台風の眼の内部の克明な様子や、台風をとりまく雨雲の微細な構造とその時間変化、台風周辺の対流圏中・下層の雲の流れなどを知らることができるだけでなく、衛星データによる最適観測法とも言えるべき手法を実施することができ、台風の予報改善に寄与すると期待される。

一方、北西太平洋熱帯域での対流活動や台風などの予報誤差が下流側の天気予報に大きな影響があることから、北米やヨーロッパの研究者は北西太平洋熱帯域での観測に大きな関心を寄せている。これまでも、北西太平洋における活発な対流活動が中緯度における運動エネルギーへの変換に寄与していること、その結果、下流側で予報誤差が大きくなっていることが報告されている（Chang and Yu 1999；Danielson *et al.* 2004；Hakim 2003；Chang 2005）。第5図は、米国環境予測センター（National Center for Environmental Prediction, NCEP）の全球予報モデル（GFS）のアンサンブル予報の全メンバーの500 hPa 高度の標準偏差の時間変化を示したものである。このケースは、2004年台風第23号が温帯低気圧化した10月20日前後からの予報結果を示している。温帯低気圧化以後、標準偏差が時間とともに増大して、東に伝搬し、北アメリカに達している様子が示されている。下流側でのロスビー波の伝搬特性は、大気の循環場と同時に熱帯の対流活動域における熱源の強さ・広さとその位置に左右されるので、北西太平洋での観測は重要な役割を持っている。

7. まとめ

本稿では、日本が THORPEX で進めてきている研究計画の内容について紹介するとともに、2008年の台風特別観測実施計画 T-PARC についても紹介した。この研究計画により、進路予測については改善が期待できるものの、強度変化については、まだ多くの研究課題が残されていると思う。海面からの熱輸送量の推定や、メソ対流系と台風との相互作用についての研究が必要であろう。T-PARC により台風研究が飛躍的に進展するとともに、日本のみならず東アジア域での台風被害の軽減に資するよう微力ながら尽力したい。

謝 辞

本稿をまとめるにあたり、2004年台風第4号に対する感度実験関連の結果（第3図、第4図）を、気象庁数値予報課の山口宗彦氏からいただきました。この場を借りてお礼いたします。

参 考 文 献

- Anwender, D., P. A. Harr and S. C. Jones, 2008 : Predictability associated with the downstream impacts of the extratropical transition of tropical cyclones : Case studies. *Mon. Wea. Rev.*, in press.
- Chang, E. K. M., 2005 : The impact of wave packets propagating across Asia on Pacific cyclone development. *Mon. Wea. Rev.*, **133**, 1998-2015.
- Chang, E. K. M. and D. B. Yu, 1999 : Characteristics of wave packets in the upper troposphere. Part I : Northern Hemisphere winter. *J. Atmos. Sci.*, **56**, 1708-1728.
- Danielson, R. E., J. R. Gyakum and D. N. Straub, 2004 : Downstream baroclinic development among forty-one cold-season eastern North Pacific cyclones. *Atmosphere-Ocean*, **42**, 235-250.
- Hakim, G. J., 2003 : Developing wave packets in the North Pacific storm track. *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 2824-2837.
- 気象庁予報部, 2006 : アンサンブル技術の短期・中期予報への利用～激しい気象現象の予測向上を目指して～. 数値予報課報告・別冊, (52), 130pp.
- 余田成男, 2007 : THORPEX (観測システム研究・予測可能性実験計画). *天気*, **54**, 156-162.