

第23回「メソ気象研究会」の報告

—台風とそれに伴うメソシステム—

第23回メソ気象研究会が、2004年5月15日、日本気象学会春季大会（東京）の前日に、気象庁講堂で開かれた。今回のテーマは「台風とそれに伴うメソシステム」と題して、最近、研究が活発になりつつある台風に関する話題を集めた。

台風は全体の水平スケールが1000 km を越える大規模な擾乱であるが、そのなかに形成されるメソシステムは数10 km オーダーの現象である。これらの水平スケールの異なる構造が相互に深く関係し合うことで、台風全体が発達し、一方で降水の集中などの局所的なシステムが形成される。この部分と全体の強いリンクが台風をユニークな現象としていると考えられる。この特徴に加え、海上で発生・発達することが観測を困難なものにし、この特徴、すなわち大規模と雲スケールの共存共生がその数値シミュレーションを困難にしてきた。近年、衛星やレーダーだけでなく、様々な新しい測器によってさらに踏み込んだ観測が行われつつある。また、モデリングにおいても大規模な並列計算による大規模数値実験により、台風の部分と全体を同時に計算することが可能になりつつある。これらの近年の発展が台風について多くの新しい知見をもたらしつつあるが、あらためて台風の研究において何がこれまで明らかにされてきて、今後、観測においてもモデリングにおいても何を明らかにしていかなければならないのかを明確にしておくべきときであるように思われる。そこでこれを目標として今回のメソ気象研究会では、台風とその部分であるメソシステムについての研究をテーマとして選んだ。

今回の研究会では、台風の観測に関わるものとして、新しい観測装置 WINDAS による観測の他、台風の2重眼、pressure dip、台風に伴うメソ前線など、台風の微細構造についての新しい知見が得られつつあることが示された。一方で、シミュレーションでも眼の構造や降雨帯の強化プロセスなどの細かい構造にまで踏み

込んだものが行われつつあることが示された。また、台風の発生からアンサンブル予報をしようという新しい試みが、THORPEX の枠組の中で行われようとしていることが報告された。

台風を発生・発達期と最盛期及び温帯低気圧化期に分けると、今回の講演では、THORPEX の話題に発生・発達期に関する研究が含まれている他は、ほとんど最盛期の台風についての話題であった。このことから、台風の最盛期についての研究は進みつつあるが、台風の発生についての研究は比較的少数であることが分かる。また、台風の微細な構造に注目した研究が活発であり、それは観測装置や計算機の発達によってそれが可能になりつつあることを示している。

今回のメソ研究会は名簿記載だけでも103名というたいへん盛況な研究会であった。このことは台風が高い感心を集めていることを示している。以下に各講演者による講演の要旨をまとめる。

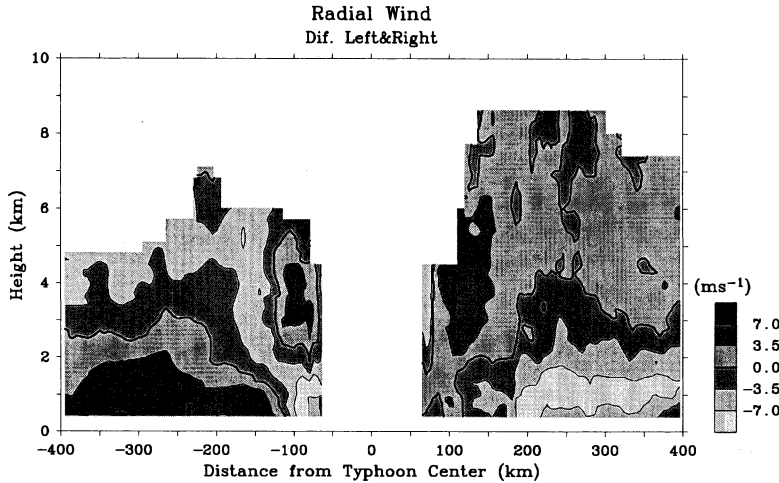
坪木和久（名古屋大学地球水循環研究センター）

1. 気象庁 WINDAS を用いた台風の立体構造に関する研究

手柴充博（京都大学生存圏研究所）

本研究では、気象庁 WINDAS を用いて、2002年10月1～2日に関東地方に上陸し北上した台風0221号に伴う風速変動を調べた。この解析ではまず、ウィンドプロファイラで観測された水平風の時間変化を、気象庁発表のベストトラックデータから計算した台風中心位置、及びそれから求めた台風の移動速度を基に台風中心に相対的な風に変換した。その後、台風の移動方向に対して左（西）側・右（東）側を定義し、それぞれに含まれる観測点での水平風を台風中心からの距離について平均した。なお、左側には熊谷・河口湖・静岡、右側には水戸・勝浦が位置した。

すべての地点データにより平均した結果（軸対称成分）、動径風では対流圏下層で吹き込み、中～上層で吹き出しの風が見られ、強い低気圧性回転の風が台風中心



第1図 気象庁 WINDAS で観測された動径風の台風左・右側の平均の差の台風中心からの距離・高度分布。横軸は台風中心からの距離（正・負がそれぞれ台風前面・後面）を表す。台風前・後面で符号が逆であるがほぼ対称な構造が見られる。

心からの距離150 km 付近で見られた。この構造は、過去に行われた MU レーダー及び境界層レーダーでの観測例とほぼ同様であった。

一方、左前方四分円と右前方四分円の差、および左後方四分円と右後方四分円の差をそれぞれ計算すると、動径風について台風前面と後面で対称な構造が見られた(第1図)。この構造は、降雨分布の対称性や地形の対称性によっても形成されたと考えられるが、これについて考察を行った。気象庁現業レーダーのエコー強度データを台風中心及びその移動速度に相対的な座標系で調べた結果、強エコー域は台風前面の左側に集中し、降雨エコーの水平分布からは対称構造は見られなかった。また、地形の効果については、台風左側が山岳地域に位置するのに対し、右側は平野ないし海上に位置し、さらに台風前・後面で地形は非対称構造をもっているため、左・右側の差が台風前・後面で対称構造を持つ理由にはならないと考えられ、今回見られた対称構造は、台風固有のそれであると考えられる。

2. 台風の2重眼について

林 泰一(京都大学防災研究所)

沖縄県を通過する台風の中には、大きなはっきりした眼のなかに小さな眼がある、いわゆる2重眼を持つものが時々見られる。これまでも1998年の台風18号

は、沖縄付近を通過中にはっきりした2重眼の構造をしていた。今回は昨年9月に沖縄県宮古島を通過した台風0314号の気象学的な特性、とくに2重眼の構造について報告した。宮古島では、これまでも、1959、1966、1968年に大きな台風に襲われていて、これらの台風には宮古島台風、第2宮古島台風、第3宮古島台風と命名されている。今回の台風0314号は、2003年9月10日から11日にかけて宮古島を通過した際の宮古島地方気象台の観測では、最低海面気圧912 hPa(観測史上4番目に低い気圧)お

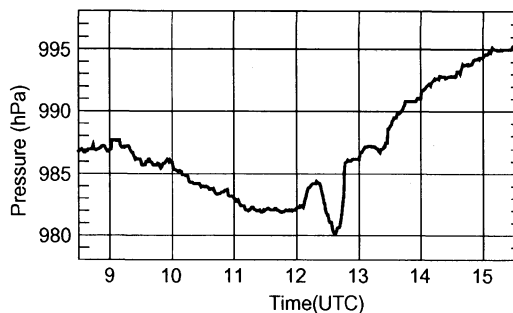
よび最大瞬間風速74.1 ms^{-1} (観測史上7番目に強い風速)を記録した。

石垣島気象レーダーの観測から、台風が宮古島を通過中の9月11日4時から11時頃(日本時間)には、直径110 kmの大きな目の中に、直径約20 kmの小さな目が見られる。この2つの眼は同心円ではなく、外側の大きな目の中で内側の眼が回転している様子が見られた。この2重眼の構造を持つ台風の通過に対応して、宮古島地方気象台で観測された風速の記録には内側の眼の通過だけではなく、外側の眼の通過時にも風速の急増が見られた。内側の眼の通過時の3~6時頃には、眼の通過直前に最大瞬間風速を記録し、眼の中では風速が弱まった(平均風速で15 ms^{-1} まで)。この風速の変化のほかに、11時頃から約3時間にわたって、風速の増加が見られたが、これは外側の眼の外縁部の通過と一致している。さらに、内側の眼の形は楕円形をしていて、この楕円形の眼の回転に対応して地上気圧には周期が約15分の変動が見られた。このことは内側の眼は1時間に約2回転していると考えられる。

3. 台風通過時に観測されるメソβスケール“Pressure dip”の研究

筆保弘徳(防災科学技術研究所)

Pressure dip現象(以後PDと記す)とは、台風接近時に観測されるくぼみ状の気圧の急低下であり、台



第2図 1998年10月17日に宇和島で観測された Pressure dip.

風中心とは異なる場所で発生するメソ β スケールの低圧部である。第2図は、T9810通過時に宇和島測候所で観測された気圧日記録であり、台風最接近後、30分間で気圧が5 hPaも急低下してもとのトレンドにもどるといふPDが観測されている。この現象は、約50年前に“Pressure dip”と名付けられて以来、数例が確認されているが、その現象の発生メカニズムや内部構造は未だ分かっていない。PDが発生する台風通過時には、特にPD発生域周辺で大きな被害がでており、その現象の理解は防災の立場からも重要となる。本講演では、これまでに行ってきたPD現象に関する研究を紹介した。

統計的な調査により、過去19年間に日本へ接近した台風89個から8例のPDが検出された。発生頻度は約10%であり、9月と10月の秋台風にのみ発生していた。PD発生時の共通点は、傾圧性の強い総観場と衰弱過程の台風である。合成解析の結果によると、PDは台風北西象限で台風中心から50~200 km離れた場所に、長軸150~200 kmのバンド状で発生し、台風に伴って移動していた。さらに、台風に伴う降雨バンドの西縁で観測されていた。

非静力学領域モデル (PSU/NCAR-MM5v3) による数値シミュレーションを行い、PDの再現に成功した。シミュレーション結果では、PD上層では強い下降流域となっており、乾燥した高温位偏差領域が形成されていた。この局地的に発生した下降流は、台風循環場と偏西風における対流圏中層前線形成に伴った鉛直循環の下降流に対応していた。その下降流により上層から乾燥気塊が台風内部の下層へ運ばれて沈降昇温することで、周囲よりも高温位の領域が形成されていた。その高温位偏差気塊は低圧部をもたらし、台風とともにその低圧部が通過することで、地上気圧の急低下と

してPDが観測されたと考えられる。この定性的な考察は、観測、統計解析の結果と比較して定量的にも認められた。PDは、総観場の影響を受けて変化した台風の非対称構造の一部を観測した結果であった。

4. 関東地方における台風0221号とメソ前線の変化

北島尚子・田中恵信 (気象研究所台風研究部)

2002年10月1日に関東地方を通過した台風0221号について、主に関東地方の気象官署の現業観測、及び気象研究所の観測データを用いて、解析を行った。

この台風は1日1200 UTC すぎにはつくば市付近を通過したと見られる。つくば (ここでは高層気象台及び気象研究所を「つくば」と称する) のラジオゾンデ観測では700 hPa より上に暖気核の存在が確認された。衛星画像ではまだ円形の雲域が見られたが、眼はその南端に偏っていた。下層では前面の温暖前線のみ顕著でその寒気側である台風北東象限に降水が集中し、総観規模の寒冷前線は不明瞭だった。

ドップラーレーダー解析による高度3 km と0.5 km の渦中心を比較すると、前者が北に25 km 先行していた。高度3 km より上では渦のずれは小さいように見えるので、上層暖気核による中層渦が摩擦収束による下層渦に先行していると仮定できる。この仮説はさらに検討の必要があるが、つくばの地上観測で気圧極小が風向変化より先に発現していることは矛盾しない。下層渦中心と上層暖気核の位置が一致することはCISK等の台風の発達メカニズムの前提とされており、これらが一致しないことと、これらの渦中心の間の領域で東西風の鉛直シアが特に大きくなることは、台風の衰弱に関係することが考えられる。

下層の前線に関しては、まず関東地方のアメダスの解析を行った。台風前面の温暖前線沿いでは、台風中心周辺と同程度のオーダーの水平収束があり、総観規模の前線がメソ α スケールに強化されたことと関連すると考えられる。これに対して台風中心付近では収束は大きいものの frontogenesis が相対的に小さくなり、また寒気移流が卓越していた。これは、台風中心付近では台風前面よりも地上気温が低下していたことに対応する。さらに台風の後面では、数10 km の狭い幅で密度流的なメソ β スケール寒冷前線が見られた。これらのことは、台風中心自体が前線の暖気側を通過しているにもかかわらずその後には台風の南側で寒冷前線が発生して閉塞した温帯低気圧のパターンになることがしばしばあり (北島, 2003), この事例もそうであつ

たことと整合する。

前線付近のドップラーレーダー解析では、前面の温暖前線ではアナフロントの循環が見られたのに対して、台風接近時には高度3 kmより上でカタ型寒冷前線の循環が見られたのも、地上台風中心の周辺での低温化に関係すると思われる。台風中心付近でなぜ台風通過前から寒気移流となるのかは今後の課題である。

参 考 文 献

北島尚子, 2003: 温帯低気圧化する台風とその周辺の総観規模前線の特徴, 日本気象学会2003年春季大会講演予稿集, P148.

5. 台風のスパイラルバンドの降水強化過程

野村光春・坪本和久

(名古屋大学地球水循環研究センター)

発達した台風の特徴的なメソ β スケールの構造のひとつであるスパイラルバンドは、非常に強い降水を集中してもたらず。本研究では、スパイラルバンドの詳細な三次元構造やバンド下に強い降水をもたらず降水過程を明らかにするために、雲解像モデル(CReSS)を用い、水平格子間隔2 km という高解像度で数値シミュレーションを行い、解析を行った。

水平格子間隔2 km という高解像度で台風全体を表現した三次元シミュレーションを行うことにより、スパイラルバンド内の三次元構造を詳細に表現することができた。雲粒子は主にスパイラルバンドの軸より内側の部分に多く分布しており、降水粒子はスパイラルバンドの軸よりやや外側に多く存在していた。スパイラルバンド内の降水が強い部分の上層には霰が非常に多く存在しており、霰の量が少ない場所の降水は強くないことがわかった。このことより、スパイラルバンド下の強い降水は、融解層より上部で生成された霰が落下し融解することによりもたらされていることが分かった。これに対し、バンドとバンドの間の部分には、雪が多く存在していた。このような降水粒子の分布になることやスパイラルバンド下に強い降水をもたらず要因を明らかにするため、雲微物理過程に注目した。スパイラルバンド内では、多くの雪が雲粒子と衝突することにより霰へ成長しているのに対し、バンドとバンドの間では雪から霰への成長がほとんど起きていなかった。スパイラルバンド内の降水が強い場所での上層では、多くの雪が霰へ成長し、その霰に雲水がライミングすることにより霰がより大きく成長し、降水の

強化に効いていることがわかった。

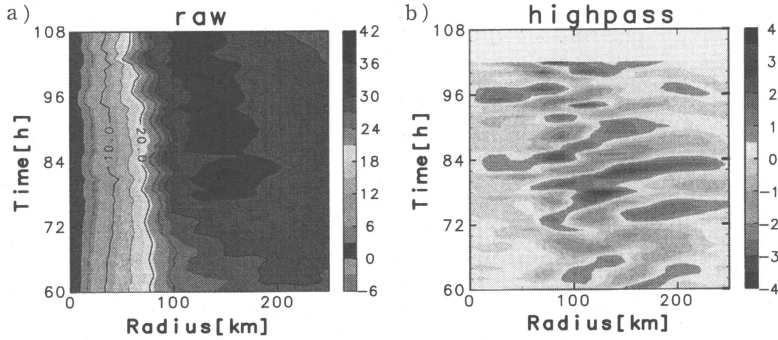
次に、中心に近い場所に位置するスパイラルバンドが数10 km ほどの間隔をおいて複数本近接することがあり、中心より外側に位置するスパイラルバンドの降水が強化されることがある。この現象に注目しバックトラジェクトリー解析を行うことにより、外側のバンドが強化される要因を調べた。強い降水がある部分へスパイラルバンドに沿って下層からは水蒸気や雲粒子が供給されていた。また、融解層より上部では降水が強化されたバンドの内側に位置するバンドから雪が輸送されていることがわかった。このように下層から輸送されたり、生成された雲粒子と内側のバンドやバンドとバンドの間で生成された雪とが衝突することにより外側のスパイラルバンド下の降水が強化された。台風のスパイラルバンドが近接するとき、外側にあるスパイラルバンドの降水が強化されるメカニズムが明らかになった。

6. 台風の軸対称構造・非軸対称構造に関する数値実験—2000年台風12号を例に—

余田成男・矢尾拓也・山下和也
(京都大学大学院理学研究科)

本研究の対象とする2000年台風12号は、宮古島の南東約600 km の海上で熱帯低気圧から台風へと発達し、複雑な動きをしながら西北西に進み、8月29日夕方から宵の内にかけて宮古島と石垣島の間を通過した。この間、石垣島レーダーエコー画像に、7つのメソ β スケールの渦(以下、メソ渦という)が確認された(詳細は、矢尾ほか2003)。本研究の目的は、まずレーダーエコーの画像解析をおこないメソ渦を含む力学的構造の変動をみることにし、そしてメソ気象モデル(MM5)を用いて台風の再現実験を行い、観測では得られない広範囲で高解像度の4次元データを取得して、台風の軸対称・非軸対称構造の解析を行うことである。これらの解析結果を成層圏周極渦の構造変動と対比することにより、地球流体力学の視点から強い渦の力学的な共通点・相違点を明らかにすることを目指す。

今回の発表では、MM5による数値実験結果を台風中心とともに動く移動座標系を用いて解析し、主に軸対称成分の力学的構造の変動をみた結果について述べた。台風が十分に発達した頃(数値実験の時間で84 h 頃)から、接線風速、動径風速、鉛直風速、レーダー反射強度の軸対称成分についての周期が約6時間の



第3図 z=0.90 km での接線風速の軸対称成分の半径—時間断面図. a: 生データ, b: 12時間移動平均を引いた高振動数成分. 等値線及びグレースケールの単位は ms^{-1} である.

「振動」がみられた. 第3図は接線風速の半径—時間断面図である. この振動の同位相面についてみると, 鉛直方向にはほぼ直立立っていて, 約 10 km h^{-1} ($\sim 2.8 \text{ m s}^{-1}$) の速度で動径方向に伝播していた. また, 諸物理量がこの振動に同期している様子がみられた.

今後は, 非軸対称成分の力学的構造の変動について波数分解を行うことによって, 各「波」の振舞いの半径・高度依存性について調べる予定である. また, 軸対称場(接線風など)とも関連させて, 今回みられた「振動」についての解析を進めていくつもりである.

参考文献

矢尾拓也, 余田成男, 林 泰一, 栽 吉信, 垣花和夫, 下地留吉, 2003: メソ渦を伴った台風のレーダーエコー解析と MM5シミュレーション—2000年台風12号—, 京都大学防災研究所年報, 46B, 411-421.

7. 雲解像非静力学 2 way 多重移動格子モデルを用いた台風の前報実験

益子 涉 (気象研究所台風研究部)

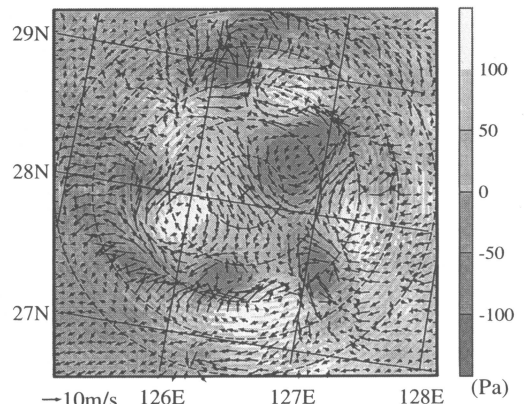
進路だけでなく強度や強雨, 強風の予測, 微細構造の解明を目指して, これまで気象庁非静力学モデル (NHM) の 2 way 多重移動格子化を行ってきた. 内側の細かい格子に対応した地形の取り込みなど未対応な部分はあるものの, モデルのフレームはほぼ完成し, 台風を対象にした高解像度の実シミュレーションが可能となった. まず T0215を対象にして, ネスト数を変えることによる高解像度化のインパクト実験を行った. 解析雨量との比較の結果, 3重ネストにして最内側の格子を水平解像度 2 km にすることで, 壁雲に対

応した降水域の再現性が高まることが示された.

次に, その 2 km 格子の結果を用いて, T0215の中心付近の非軸対称構造を解析した. レーダ合成図による解析では, T0215は半径約 100 km 付近に発達した壁雲を伴い, 多角形をした眼が特徴であった. モデルの結果においても, 5~7 角形の眼が再現され, 周期 4 h 40 m (観測 5 h) で反時計周りに回転し, 850 hPa

の最大風速は 45.0 ms^{-1} (観測 49.9 m s^{-1}) と実況に近いものを再現していた.

多角形をした眼に関する研究は, 初期に理想的な風のプロファイルを与え渦度方程式を線形化して解析的に解く方法や, 順圧モデルを用いた理想実験等で行われてきており, 成因として壁雲付近の渦位極大域での不安定波や中立波, 渦位傾度上を伝播する中立な渦ロスビー波によることなどが提案されている (Schubert *et al.*, 1999; Kossin and Schubert, 2001; Kuo *et al.*, 1999). 今回 2 way 3重移動格子モデルの結果を用いて実シミュレーションの立場から, 多角形の眼の構造, 壁雲付近において方位角方向に伝播する渦位波の解析, そして解析された波と多角形の眼の構造との関係



第4図 高度約620 m における気圧, 水平風の軸対称平均場からの偏差 (陰影: 気圧, ベクトル: 風). ×印は台風中心, 円はそれぞれ台風中心から 30, 60, 90, 120, 150 km.

について調査した。

高度約620 mにおいて、気圧、風の非軸対称成分を求めると、台風中心から約85 km離れた渦位極大域付近にメソ渦（多角形の頂点の位置に対応して低気圧性循環を伴った約30 kmスケールの低圧部、頂点と頂点の間には高気圧性循環を伴った高圧部）が解析された（第4図）。メソ渦によってつくられるアウトフロー域では、収束が強まって対流が強化されていた。アウトフローが強い場所では頂点の位置からインナーバンドが派生していた。

渦位を方位角方向で波数分解して、波数毎の方位-時間断面のホフメラー解析をすると、渦位極大域の外側では波数が大きくなるにつれて位相速度が速くなっていたが、その場の接線風速よりは遅くなっていた。内側では解析できた波数2の波は、その場の接線風速よりも速く伝播していた。また、波数2～4では渦位傾度の大きいところに振幅の最大があり、渦位極大域を境に位相がずれているなど渦位傾度上を伝播する渦ロスビー波の特徴を示していた。一方、波数5に関しては、渦位極大域で振幅が最大で、急速に振幅が増大するなど渦位極大域での不安定波の特徴を示していた。多角形の眼との関係については、波数5の正、負の偏差が低、高気圧性メソ渦の位相に対応していること、周期が4時間40分ではほぼ一致すること、また波数5が渦位極大域で平均場からの偏差の約40%を占めて他の波数に比べて突出していることなどから、渦位極大域で不安定化した波数5の波が多角形の眼の形成に寄与していたと思われる。

参 考 文 献

- Kossin, J. P. and W. H. Schubert, 2001: Mesovortices, polygonal flow patterns, and rapid pressure falls in hurricane-like vortices, *J. Atmos. Sci.*, **58**, 2196-2209.
- Kuo, H. C., R. T. Williams and J.-H. Chen, 1999: A possible mechanism for the eye rotation of Typhoon Herb, *J. Atmos. Sci.*, **56**, 1659-1673.
- Schubert, W. H., M. T. Montgomery, R. K. Taft, T. A. Guinn, S. R. Fulton, J. P. Kossin and J. P. Edwards, 1999: Polygonal eyewalls, asymmetric eye contraction, and potential vorticity mixing in hurricanes, *J. Atmos. Sci.*, **56**, 1197-1223.

8. THORPEX 計画における台風の観測と予報

中澤哲夫（気象研究所台風研究部）

現在世界気象機関(WMO)が進めている研究計画のひとつに、THORPEX と呼ばれるものがある(www.wmo.int/THORPEX)。これは、社会的・経済的に影響が大きい大気現象の予測精度向上をめざすもので、以下の4つのサブ課題からなりたっている。すなわち、力学過程と予報可能性、観測システム、データ同化と観測方法、そして社会や経済への応用である。

この計画の中で目新しいものの一つに、「双方向性予報システム(Interactive Forecast System)」と呼ばれるものがある。新しい数値予報は、観測システムとデータ同化、予報モデルの間が、一方向でなく、双方向になることを指している。予報モデルの結果から、予報誤差の源となる物理量や場所を特定して、そこでの観測を行うことで予報精度を上げる、いわゆる最適観測法がこのシステムで重要な役割を果たす。最適観測法の武器としては、もちろんマイクロ波センサーを搭載した衛星がその大きな部分を占めるが、それ以外にも、ドリフトゾンデ、ロケットゾンデ、エアゾンデ、スマートバルーンなど、さまざまなシステムが提案されている。

これらのうち、台風の観測では、どの測器でも予報改善に寄与するものと考えられるが、特に、スマートバルーンと呼ばれる定高度気球は、台風の周辺で放球して台風中心に吸い込まれて行く間、高度を上げ下げしながら、長時間にわたる観測が可能であるので威力が大きいであろう。また、洋上の島やブイから、小型ロケットを使って観測装置を打ち上げ、落下傘で降下しながら気温や湿度などを観測するロケットゾンデも有効だ。また、私たちが研究に取り組んでいる無人の小型気象観測飛行機も有効である。翼長3mほどのラジコン機で、GPSによる自律航行により、丸一日以上、3000 kmを飛行できるので、台風近くまで行って帰ってくるのが可能だ。

現在、台風や集中豪雨などで東アジア域の国々で共同してTHORPEX計画を具体化していこうと、議論が始まっている。予報改善は、気象庁の本来業務ではあるが、そのために必要とされるさまざまな仮説や技術は、気象庁だけですべてできるものではなく、大学や地球フロンティア研究システム、そして東アジアの国々との研究協力が不可欠である。