

# 数値モデルによる台風予測

\* 上野充（気象研究所）

## 1. はじめに

台風（一般的な英語表記は tropical cyclone）の予測と言えば昔も今も移動の予測が最も基本的で重要なものである。しかしその予測手法は昔と今では大きく異なり今はほぼ全面的に数値予報モデルに依存している。数値予報は大気の現在の状態（初期値）を出発点として流体の運動方程式や熱力学方程式に基づいて将来の状態を予測するものである。したがって初期値を作成するための広範囲高密度の観測データと大気のマクロな運動や熱的变化を広範囲にわたって時々刻々計算するための高速大容量の計算機が必要である。

将来の台風の予測位置は数値予報モデルの中に表現された台風に相当する強い渦や海面気圧の極小域を追跡することで得られる。現実には台風が存在していても台風近辺に十分な観測データが無ければ（熱帯海洋上はそれが常態）モデルの初期値に台風に相当する渦循環が生成されない（生成されても場所が実際とは大きくずれたりする）。したがって台風予報成功の第一要件は実況に合致した位置に台風の渦循環が存在する初期値を作成することである。ちなみに同じモデル予測でも地球温暖化に伴う台風活動度の変化を調べるような場合には台風の初期値は問題とはならない。

数値モデルが提供できるのは勿論移動予測だけではない。実際に台風が発生する前の初期値が台風発生に必要な情報を含んでおり、同時にモデルが台風の発生や強度変化に関わる過程を再現できるものであれば、それらを予測することも可能である。実際、現在の数値予報モデルは台風発生の数日前の段階から（数日先の）台風発生を予測できる場合が多い。ただ強度変化に関しては、以下の節でも紹介するように台風初期値をはじめとして数多くの不確定要素が関与しており、現在でも実用に足る十分な精度を獲得するには至っていない。

## 2. 台風数値予測の変遷

現在では非常に精巧な数値モデルが台風（ハリケーン）の予報やシミュレーションに利用されるようになってきたが、一足飛びにそういった段階に達した

わけではない。

気象庁では1963年に数値モデルを用いた台風進路予報を開始した。この時点でのモデルは絶対渦度保存をベースにした水平2次元のモデル（BBモデル、格子間隔381km）で、台風移動が第一近似としては指向流（台風の移動に寄与する台風を取り巻く環境場の風で典型的には500hPa高度などの対流圏中層の風）とベータ効果（コリオリ力の緯度変化が台風を北向きに移動させようとする効果）によって決まることをその拠り所にしていた。台風の強い循環は潜熱解放による中心部の加熱によって維持されるが、2次元でしかも解像度の粗いBBモデルではその効果を適正に取り込みようもなく、渦が維持されにくいという問題点があった。

1982年には移動多重格子法を採用した3次元モデル（MNGモデル、鉛直3層、最内側格子間隔95.25km）による進路予報が開始された。MNGモデルでは積雲対流による台風中心部の加熱の効果を台風中心まわりに軸対称な熱関数を用いて与えた。熱関数の使用は台風の維持という点では大いに威力を発揮したが、水蒸気を予報しないため台風に伴う降水や台風強度の予報は対象外であり、温低化の過程をうまく表現できないという難点もあった。また最近の知見では、例え十分に発達した台風についてさえも軸対称加熱は台風中心部の加熱を適正に近似したものとは言えず、場合によっては台風の移動予測にも悪影響を与えることが知られている。

水蒸気や降水まで予測する現在のタイプの台風予測モデル（TYM、鉛直8層のちに15層を経て25層、格子間隔50kmのちに40kmを経て24km）が登場したのは1988年である。現在では、モデル本体や初期値の改善により、台風予測用に特別な手だてを施していない全球モデル（GSM）など一般の数値予報モデルも台風予測専用モデルと比べて遜色のない予測結果を提供する。図1にはTYMが現業化されてからこれまでの進路予報の精度の変遷を示す。図中72時間予報については検証期間全体を通じて予報結果が手に入るGSMの結果を示す。図を見ると、年ごとのばらつきはあるものの着実に進路予報誤差が小さくなってきているのがわかる。強度予報についても検証が行われているが、進路予報とは対照的に改善はあまりはかばかしくない。これは

20km程度の格子間隔では台風中心部のシャープな構造を解像するには依然不十分であること（例えばTYMの場合940hPa以下の中心気圧はほとんど再現されない）や、次節で紹介するように台風強度は数値予報モデルの構成要素の中でも最も不確定性の大きい台風初期値、海面での大気海洋間の熱や運動量のやり取り、積雲対流による加熱などに大きく影響されることによる。

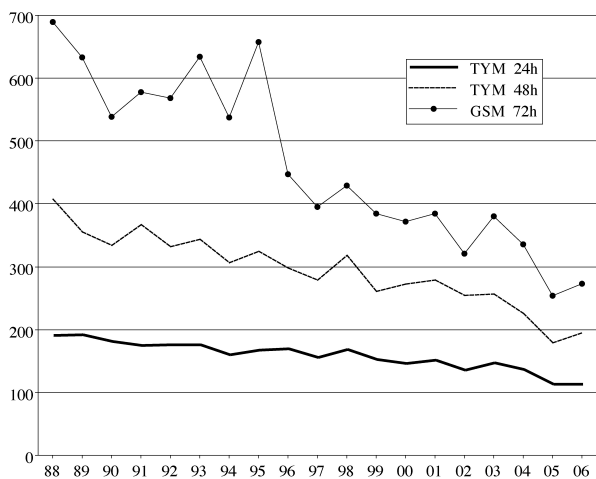


図1：台風進路予報誤差の経年変化。縦軸はモデルで予想された台風の中心位置（海面気圧最小の位置）とベストトラックとして解析された実際の中心位置との差（km）を、また横軸は西暦年の下2桁を表す。太い実線と破線はそれぞれTYMの24時間、48時間予報に対するもので、印付きの細い実線はGSMの72時間予報に対するもの。

### 3. 今後の展開

TYMの場合、海面からの水蒸気の蒸発、その水蒸気の大気境界層内のインフローによる台風中心部への輸送（海面から高度1~2kmにかけての大気境界層と呼ばれる領域では乱流が発達しており運動量や熱の輸送に重要な役割を果たす）、眼の壁雲内での積雲対流を通じての加熱、といった台風を維持するために必要な過程を一通り含んでいる。しかし、静力学近似を採用しているため、積雲対流のもたらす効果を直接表現するには自ずと限界がある。TYMをはじめ世界のほとんどの数値予報モデルでは積雲対流の効果はパラメタリゼーションと呼ばれる手法を通じて間接的診断的に取り込まれる。一部の現業モデルや研究ベースでは静力学近似を行わないモデル（非静力学モデル）を用いた台風のシミュレーションも実施されている。

台風の強風に晒され続けると海面は烈しく波立つとともに砕波により海洋飛沫が大量に生成されるようになる。しかし高波や海洋飛沫が海洋から大気への熱や運動量の輸送に及ぼす効果はTYMでは考慮されていない。台風の強風はまた、海洋混合層を攪拌し海面水温を低下させる。海面水温が低下すると水蒸気の蒸発量が減少し、それに呼応して眼の壁雲内での対流による加熱量も減少する。加熱量の減少は台風の発達を抑制する方向に作用する。つまり、大気（台風）の影響を受けて生じた海洋の変化が翻って大気（台風）に影響を及ぼすわけである。こういった大気と海洋間の相互作用の効果を予報結果に的確に反映させるには、大気だけでなく海洋上部の状態をも同時進行的に予想する大気海洋結合モデルが必要である。米国海洋大気庁では2007年に海洋モデルおよび波浪モデルを結合した非静力学ハリケーンモデル（HWRF）の運用が開始される予定である。

大気モデルを高解像度化し海洋モデルを結合しさえすれば後は手放して高精度の台風強度予報が実現するわけではない。台風自体を含む大気や海洋の初期値をどのように作成するかという大きな問題が残っている。多くの数値実験の結果は台風の予測結果が台風や環境場の初期値に敏感であることを示す。例えば、台風のまわりで航空機から投下されたGPSゾンデの観測データを同化する（初期値に取り込む）と、同化しない場合に比べ台風進路予報が大幅に改善されることが報告されている。強度予報も対象とする高解像度モデルの場合、その解像度に見合った稠密な観測データが要請されるが、熱帯海洋上では観測データが乏しく精度向上を目指す上でのボトルネックである。また従来の同化手法では第一推定値（通常は前回の予報結果）が実際からそれほどずれていないことを前提にしているが、これは台風については明らかに不適切である。次善の策として気象庁では台風ポーガスと呼ばれる擬似的な観測データを使用している。台風ポーガスは初期値に台風の気候学的平均的な軸対称構造を構築するためのデータで、台風の中心位置、中心気圧、強風半径などの情報に基づいて作成される（もし台風域内に海面気圧の観測値があればそれを利用して構造を修正する）。このように擬似的な観測データを使用したりする点でも台風は特異な予測対象である。

このように強度予報の精度向上のためには解決すべきいくつかの関門があるが、経路のわずかな違いで中心部の強風の向きが逆になり高潮の状況が全く異なったものになることを考えれば、防災の観点からは進路予報の精度も未だ十分とは言えない。初期

値やモデルに誤差や不確実性がつきまとう限り予測結果の誤差も避けられない。モデルや同化手法の改善が続けられる一方で、予測の不確実性を定量化し予測情報を高度化する試みも行われている。

#### 4. 台風の微細構造や台風に伴う諸現象

台風を予報対象として見るときは進路や強度といったパラメータに目が向いてしまうが、勿論それだけで台風のすべてが捉えられるわけではない。近年観測技術の進展によりこれまではあまり知られていなかった台風の微細構造や台風に伴う諸現象の存在が明らかになってきた。

そういったものの1つがアイウォールメソ渦と呼ばれるものである。台風の眼の壁雲（アイウォール）には非常に強い風が存在するのに対し眼の中では風は極端に弱い。この風速の大きなコントラストは大気に不安定をもたらす時として眼と眼の壁雲の間に強い渦を生成する。ハリケーンHugo (1989)の中心部を横切る航空機観測では、アイウォールメソ渦に伴う30m/sの風速変動と15hPaの気圧変動が捉えられた。またハリケーンIsabel (2003)の事例では、眼と眼の壁雲の間に複数のアイウォールメソ渦が生じているのが可視画像で鮮明に捉えられた（図2）。

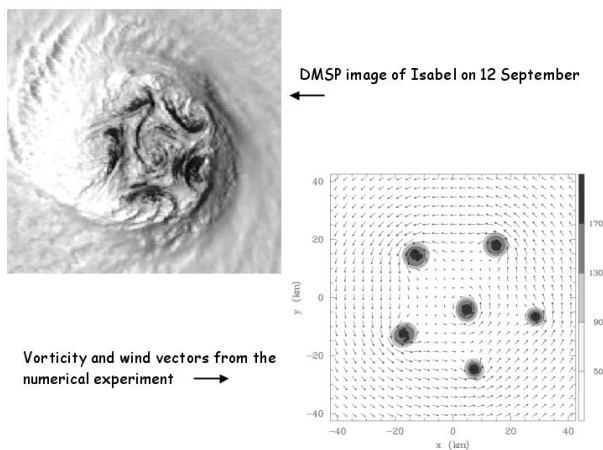


図2：米国の防衛気象衛星によって捉えられたハリケーンIsabel (2003)の眼付近の可視画像（左上）とアイウォールメソ渦の再現を試みた数値実験の結果（右下）。右下の図で矢印は風向風速、陰影は渦度を表す。Kossin and Schubert (2004)より。

ひまわりなどの静止気象衛星に搭載された可視・赤外センサーは地球上の広い範囲の雲の様子を常時提供するとともに、発達した台風を中心に眼を持つ

丸っこい雲域として描き出す。これに対し、近年極軌道衛星に搭載されたマイクロ波放射計は台風の上空を通過した際に雲の下に隠された降雨の微細構造を垣間見せてくれる。可視・赤外センサーで見るとほぼ軸対称に見えた台風も、マイクロ波放射計で見ると強い降水が眼の壁雲域の一部に偏って存在し強い非対称構造を呈していることも珍しくない。また、十分に発達した台風では眼の壁雲がしばしば代替わりをすること、代替わりをする過程で二重眼になったりすることも知られている。

台風の新たな姿を提供してくれるのは衛星観測だけではない。航空機から投下されたGPSゾンデは、例えば眼の壁雲近くの強風が吹き荒れている所であっても、飛行高度から海面近くまでの風や気温などの詳細なデータを提供してくれる。その結果、台風の境界層内には典型的には高度数100m付近にピークを持つジェット型の風構造が存在することが明らかになった。台風境界層内にはこの他ロール状の風構造が存在し地上風に風の強弱をもたらすことも知られている。

近年はここで述べたような台風の微細構造や台風に伴う諸現象を標的とした台風のシミュレーションも活発に行われている。そういった微細構造の再現は台風の予測を目的とした数値モデルの試金石ともなり得る。特に、アイウォールメソ渦の生成や眼の壁雲の代替わりは台風の強度変化とも連動していることが指摘されており、強度予測に資するための数値モデルはある程度の再現能力を有することが要請される。

#### 参考文献

岩崎俊樹、1993：数値予報、情報フロンティアシリーズ2（共立出版）、pp115。  
上野充、2000：数値モデルによる台風予報、気象研究ノート第197号（日本気象学会）、131-286。  
上野充、2003：台風最前線、子供の科学（誠文堂新光社）、第66巻第10号、8-23。  
大西晴夫、1992：台風の科学、NHKブックス（日本放送出版協会）、pp190。  
山岬正紀、1993：台風のシミュレーション、気象の教室5（東京大学出版会）、183-220。