



天 気

1991年3月
Vol. 38, No. 3

〔解説〕

4011 (台風モデル・北上バイアス)

我国の数値予報システムの現状 (4)*

上野 充**

1. はじめに

概論, 全球モデル, 狭領域モデルと続いてきたこのシリーズの第4弾として台風モデルを中心とした台風の進路予想の現状について紹介する。台風は気象災害をもたらすものの代表としてよく知られている。発達した温帯低気圧の場合その中心からかなり離れた所で雨や風が強かったりするのに対し, 台風の場合は激しい風雨が中心付近に集中しているのが特徴である。したがって台風の中心が自分のところにどれだけ近づくかとか西側を通るか東側を通るかで雨の降り方や風向風速ひいては高潮の状況までががらりと変わってくる。つまり台風の場合防災という観点から見たとき中心位置というのが特別な意味を持っている。こういったことから数値予報モデルによる台風予報では進路予報に重点が置かれており, ここでも進路予報に焦点を絞って紹介する。

台風の数値予報を行なう上で現在最も問題になっているのが海洋上での観測データの乏しさである。気象衛星などを利用したリモートセンシングの技術の向上により, 台風の発生や発達程度およびその位置についてはほぼ的確に把握できるようになったものの, 数値予報の初期値作成に使える観測データはまだ非常に不十分である。現在台風近辺の観測データの乏しさを補うために人為的なデータが使われているが, それについては第3節で述べる。

現在気象庁には台風モデル (TYM, Typhoon Model) と称する台風予報専用の数値予報モデルがある。台風モデルは現に台風があるときや台風になりそうな弱い熱帯

低気圧があるときに実行される。気象庁には台風モデル以外にアジアモデルや全球モデルがあり毎日予報が行われている。アジアモデルは領域が日本を中心としたアジア太平洋域に固定されているためすべての台風を予報することこそできないが, その高分解能と精緻な物理過程のゆえに台風の進路予報に対しても好成績を収めている。一方全球モデルも分解能の向上に伴い台風を維持できるようになり, 台風があるときはその都度台風の進路予報にも利用されている。全球モデルはまた側面境界を持たないため長期ランが容易で, 台風の発生発達から衰弱までの総合的な台風予報の可能性を秘めており, 将来が期待されている。これら3つのモデルの概要については既に当シリーズで紹介されているが, 台風モデルについては読者の便を考慮して他のモデルとの違いを中心に第2節および3節で改めて簡単な解説を試みる。上記の3つのモデルによる進路予報の検証結果については第4節で紹介する。また検証の結果明らかになったモデル台風の持つ北上バイアス (西進中の台風を実際より北に上げてしまうという欠点) の改善の見通しについて第5節で言及する。

2. 台風モデルの特徴

台風モデル (TYM) は1988年の3月に台風の進路予想のためのルーチンモデルとして運用を開始された。モデルは台風が北緯0~60度, 東経100~180度で囲まれた領域に影響を及ぼしそうな時に実行され, 午前9時や午後9時の初期値に基づいて60時間予報が行なわれる。台風モデルは予報領域の限られた狭領域モデルであるため, お互いに遠く離れた複数の台風を同時に取り扱うことはできない。そこで同一初期時に上記の事項に該当する台

* The current status of numerical weather prediction systems in Japan (4).

** Mitsuru Ueno, 気象庁数値予報課.

風が2つ以上ある場合は最大2個の台風までをターゲットとして予想できる体制になっている。

台風モデルの数値予報モデルとしての概要については既にこのシリーズの(1)で解説されているが、ここでもごく簡単に台風モデルの特徴について紹介する。台風モデルはアジアモデルや日本域モデルと同様に局地スペクトル法を用いた狭領域モデルの一つである。現在予報領域の広さはおよそ5400 km四方で、領域の地理的な位置は、ターゲットとなる台風が予報期間中できるだけ領域の中央部に位置するように、観測された初期時での台風の位置と移動速度に応じて自動的に設定され予報期間中固定されたままである。地図投影法としては初期時で台風が北緯20度以南にあるときはメルカトル図法、それ以外はランベルト図法が使われている(このように図法を使い分けた場合実質的な水平分解能が予報領域内ではほぼ一様となる)。

移流や物理過程の計算には109×109個の格子が使われ、その格子間隔は初期の台風中心の位置で50 kmである。また鉛直の層数は、傾圧性の小さいとされる低緯度での使用に主眼を置いていることから他のモデルに比べずっと少ない8層となっている。

台風予報への影響の大きさという点からすれば台風モデルと他のルーチンモデルとの最も大きな違いは台風の初期場にあるが、それについては次節で言及する。

3. 台風の初期値化

3.1 客観解析の場合

数値予報モデルの初期値は基本的には客観解析(時間的空間的に不規則に分布した種々の観測データの持つ情報を統一的に格子点上の値として得る手法)を通して得られる。現在台風モデルの場合全球解析の結果を用いている。全球解析は6時間サイクルで実行され、全球モデルの6時間予報値を第一推定値とした最適内挿法が使われている(柏木, 1990)。ところで台風は主として観測データの少ない海洋上に存するため、通常の解析法では第一推定値が台風の初期場を大方決めてしまうことになる。ところが第一推定値を与える全球モデルは台風のシャープな構造を再現し中心位置を正確に予報できるほどの解像度や性能を持たないので、そのままでは台風についての適正な解析結果が得られない。この様な事態を避けるためにボーガスデータと呼ばれる人為的なデータを与え客観解析場に台風らしい構造を作成している。ボーガスデータは、過去の台風の観測データから得られた標準的な台風の軸対称構造を表現するもので、台風の中心

位置、中心示度、強風半径などの観測パラメータに応じて作成され、現在地上から400 hpa面までの各指定気圧面についての風や高度(海面気圧)のデータから成っている。

3.2 台風モデルの場合

上記のボーガスデータは予報モデルの如何によらず一定の方法で作成されるため、必ずしも各モデルにとっての最適初期値を与えるとは限らない。そこで台風モデルではモデルの解像度や物理過程を考慮した独自の台風初期値化を行ない、より観測パラメータに忠実に台風を作成している。ただし台風以外のところについては他のモデル同様客観解析の結果をそのまま初期値として用いている。予報領域内に予報対象(ターゲット台風)以外の台風がある場合は、それが側面境界から700 km以内にある場合を除いてターゲット台風と同様の方法で台風の初期値化を行なっている。以下に台風モデルで採用している台風初期化の方法について簡単に述べる。

<海面気圧>

台風に伴う軸対称な海面気圧場 p_s は藤田の式

$$p_s(r) = p_E - \Delta p \{1 + (r/R_0)^2\}^{-1/2}$$

$$\Delta p = p_E - p_{cm}$$

で与えられる。ここで p_E は台風周辺部での海面気圧の平均値であり客観解析値から得られる。一方 p_{cm} は観測から得られた台風の中心示度である。 R_0 は海面気圧のプロフィールを決めるパラメータであり、台風中心からの距離 r が強風半径に等しいところで15 m/sの風が吹くという条件から値を決める。

<高度偏差>

雲頂(台風周辺部の平均気温 $T_E(p)$ が海面水温から立ち上げた湿潤断熱値 $T_C(p)$ と等しくなるレベル p_i)での等圧面高度の偏差 $D(r, p_i)$ は r の2次式で定義される。 $D(r, p_i)$ は台風中心で最も大きな正の値をとり、その大きさは上記の Δp に比例させる。つまり中心示度が深い発達した台風ほど上層のウォームコア(暖気核)の温度が高く雲頂での高度偏差が大きくなるように決めてやる。海面から雲頂までの台風中心での気温の鉛直プロフィールは次の式で与えられる。

$$T(p) = C(T_C(p) - T_E(p)) + T_E(p)$$

ここで定数 C は $T(p)$ で決まる層厚を p_{cm} から p_i まで積み上げた値が雲頂での高度偏差を与えるように静力学の関係から求める。上式の右辺第1項は台風モデルの対流スキーム(クオ方式)で対流加熱の鉛直配分を決めるのに使われている式と同じ形をしており、このようにして生成されたモデル台風の温度場はモデルの対流スキ-

第1表 台風モデルによる進路予報の誤差 (km), () の中は事例数.

予報時間	モデル	転 向 前	転 向 中	転 向 後	合 計
12	TYM	109.5 (125)	89.8 (85)	91.0 (77)	98.7 (287)
	PER	73.8 (125)	57.2 (85)	59.3 (77)	65.0 (287)
24	TYM	191.9 (125)	174.7 (85)	155.9 (77)	177.2 (287)
	PER	185.1 (125)	159.6 (85)	210.9 (77)	184.5 (287)
36	TYM	276.0 (118)	246.8 (83)	236.3 (74)	256.5 (275)
	PER	307.5 (118)	296.2 (83)	437.3 (74)	339.0 (275)
48	TYM	348.8 (111)	320.7 (82)	348.7 (67)	339.9 (260)
	PER	438.1 (111)	474.5 (82)	706.6 (67)	518.8 (260)
60	TYM	402.8 (106)	404.9 (76)	467.7 (59)	419.3 (241)
	PER	597.6 (106)	652.4 (76)	1012.1 (59)	716.3 (241)

第2表 TYM, ASM, GSM の予報誤差 (km) の比較.

モデル	予 報 時 間			
	12	24	36	48
TYM	92.4 (183)	165.8 (183)	237.4 (183)	317.9 (183)
ASM	125.5 (183)	185.0 (183)	235.9 (183)	302.8 (183)
GSM	141.2 (183)	217.9 (183)	293.5 (183)	372.6 (183)
PER	58.6 (183)	166.4 (183)	309.5 (183)	486.5 (183)

ムになじんだものになっている。台風中心での温度場から台風中心でのD値が求まる。中心以外でのD値は中心でのD値および雲頂と地表面でのD値から適当な内挿公式を使って計算される。

<風の軸対称成分>

接線風速は上記のD値から傾度風の関係を通して導かれる。最下層での吹き込みは、摩擦を考慮した定常状態に対する運動方程式から移流項を省略した形の式を用いて計算する。境界層内の他のレベルの吹き込みはエクマン螺旋の仮定と最下層での吹き込みを使って決定する。境界層より上の自由気では境界層内の吹き込みとバランスするように吹き出しを与える。

<モデル台風の客観解析場への埋め込み>

以上のようにして得られたモデル台風は客観解析場の中に埋め込まれる。その際台風の中心近くでは客観解析値が上述のモデル台風でそっくり置き換わり、台風から十分遠く離れたところでは客観解析値がそのまま残るように重みを変えながら両者をつないでいく。

<風の非対称成分>

現在台風の初期場には客観解析で得られた風の非対称成分も含めている。しかし現在客観解析で使われているポーガスデータは軸対称成分しか含んでいない。これは非対称成分がないものとして解析を行なっていることに相当し、その結果得られる台風はポーガスを投入する中・下層については実際に比べて非対称成分の小さいものになっていよう。そこで現在は以下に述べるような方法で台風の初期の移動速度が実況と合うように風の補正を行なっている。補正前の初期場から出発して3時間だけ仮予報を行なう。その間のモデル台風の移動が実際の移動と食い違う場合はその速度差に相当する風を補正前の風の初期場に加えてやる。その際新たに付加する風の場は発散成分を含まないように台風中心のまわりに双極子型をした流線関数から算出する。

4. 予報の実例と検証 (進路予報の精度)

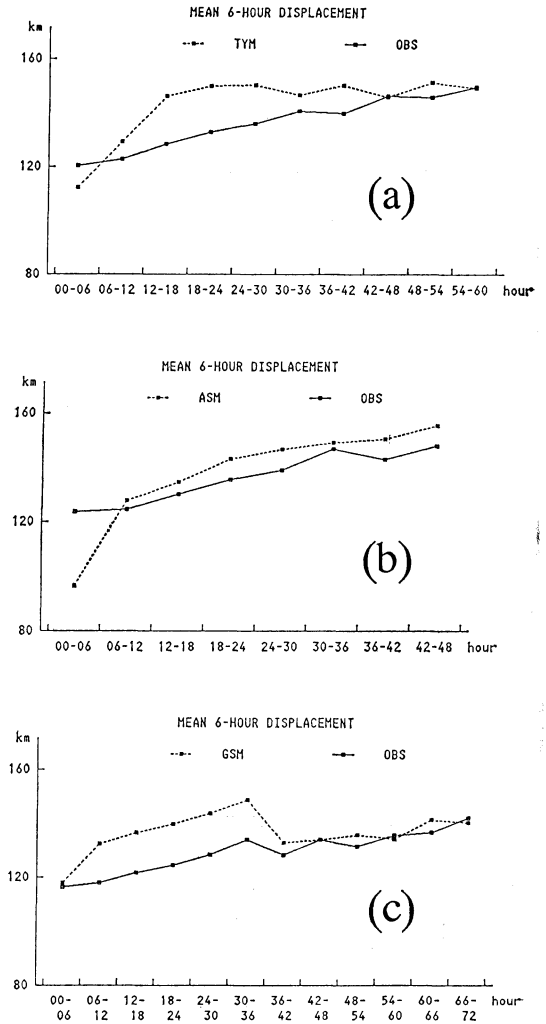
第1表は1990年の台風 (28号までの台風のうち初期時で弱い熱帯低気圧だったものを除く) に対して行なわれ

台風モデル (TYM) による進路予報の誤差 (予報位置と実況位置間の大圏に沿った距離) を転向前・中・後の各々のグループ毎に平均したものである。表では比較のため初期6時間の移動実況を基にした単純外挿による予報 (PER) の結果を併記した。表を見ると TYM の誤差は転向後についてはすでに24時間目から明らかに PER より小さく48時間目では PER の半分程度になっている。それに対し転向前や転向中については転向後に比べ移動距離が小さい割には誤差が大きく PER に対する改善率も小さい。この転向前・中の精度があまり良くないのは後述するモデル台風の持つ北上バイアスによるところが大きい。

第2表では TYM, ASM (アジアモデル), GSM (全球モデル) の予報精度を比較した。TYM と ASM を比べると24時間目までこそ台風の初速を補正した効果が効いて若干 TYM の方が良いがあとはほぼ同等か ASM の方がやや良い。両者に比べ GSM の精度がやや落ちるのは水平分解能の差によるものであろう。この表では3つのモデルすべてで台風が表現され追跡できた場合だけを比較したが、ちなみに予報領域内に含まれなかったか12時間目までに追跡不能となったケースの数は TYM, ASM, GSM で、1990年の台風予報288例中それぞれ1, 56, 15例であった。

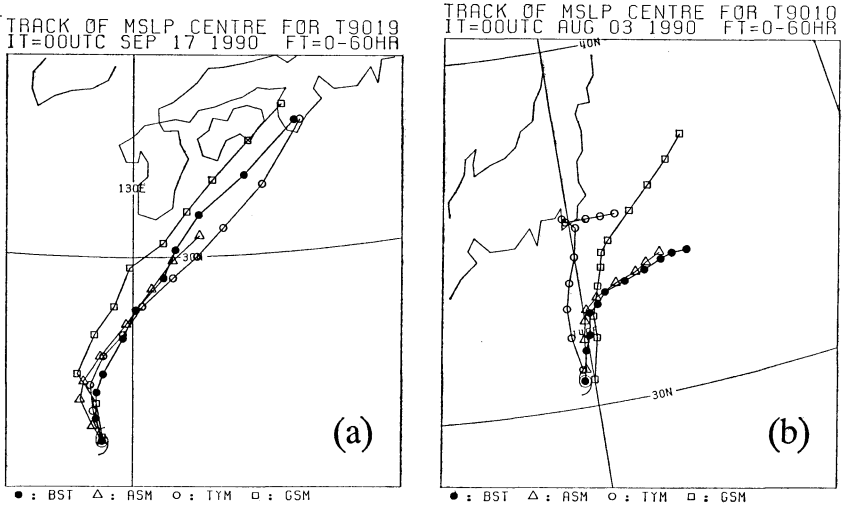
第1図には予報時間6時間毎のモデル台風の移動距離を実況と比較して示した。どのモデルでも予報開始直後は速度が小さくその後加速する傾向がみられる。この予報初期のスローバイアスは客観解析のボガスデータが軸対称成分しか含まないことに起因していると思われる。予報初期を除けばむしろ全体的には進み過ぎの傾向があるが、モデル台風が北上バイアスを持つために実際より早めに偏西風に乗って加速されてしまうこともその一因だろう。

次に1990年の台風について予報の実例を示す。第2図 (a) は初期時刻 (9月17日午前9時) 直後には中心示度が900ミリバールまで深まった台風9019号の例である。実況では初期時で台風は北ないし北北西に動いていたが、3つのモデルはどれも次第に北東に向きを変える予想を出しており、60時間後には四国南部か紀伊半島に上陸する線を出している。実際この台風は強い勢力を保ったまま60時間後には紀伊半島の白浜付近に上陸した。この例はかなりうまく的中した例の一つである。第2図 (b) は台風9010号の例である。台風は初期時の時点では真北に進んでおり、台風モデルではそのまま北上を続け36時間後には関東南部に上陸する予想を出している。全



第1図 予報各6時間の台風の平均的な移動距離 (破線)を実況(実線)と比較したもの。(a), (b), (c)はそれぞれ TYM, ASM, GSM についてのもの。事例数は予報時間やモデルによって異なるが、図には1990年の台風についての200から300例の予報あるいは実況の平均値を示してある。

球モデルでもやや東にそれる傾向はあるもののやはり北上成分が大きい。それに対しアジアモデルでは12時間後にはやや減速し、東に向きを変えて進む傾向を示している。実況では台風はこのアジアモデルにかなり近いコースを進んだ。その後の調査で台風モデルによるこのにせの北上は初速の補正を行なっていることや物理過程 (対流スキーム) にその一因があることがわかった。

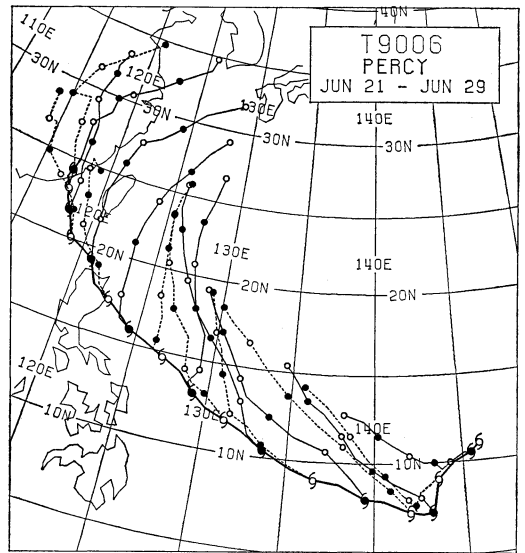


第2図 進路予報の検証図。●, △, ○, □印は6時間毎の台風的位置を表わし, それぞれ実況および ASM, TYM, GSM による予想。ASM は48時間まで, 他は60時間まで。台風記号(9)は初期位置を表わす。(a)は9月17日午前9時を初期値とした台風9019号の例。(b)は8月3日午前9時を初期値とした台風9010号の例。

第3図は台風9006号に対する台風モデルによる進路予想の事後の検証図である。この台風についてはモデルは顕著な北上バイアスを示しており、一時は九州にかなり接近する予想も出しているが、実際は台風は西北西進を続け大陸南部に上陸した。このケースについては台風モデルによる平均予報誤差は60時間目で712 km と PER の誤差 557 km より明らかに大きい。このように北上バイアスは低緯度における台風進路予想の最大の問題点であるが、もしこれが解決すれば低緯度での予報精度が飛躍的に向上する可能性がある。北上バイアスの原因については次節で考察する。

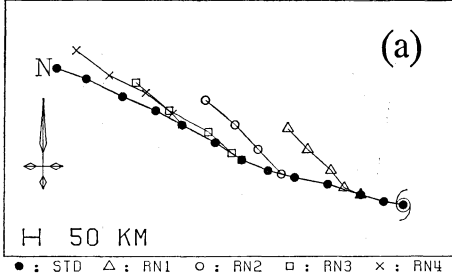
5. 北上バイアスに関する数値実験と原因の考察

実は北上バイアス(らしきもの)は台風モデルを使った簡単な予報解析サイクルの模擬実験でも再現することができるので、ここでそれを簡単に紹介する。(実際に予報解析サイクルを実行するのは、多少手間がかかるので、単に北上バイアスの原因についての見通しを得るという目的で、簡単な実験が手軽に実行出来る台風モデルを用いた。ここで得られた結果については最終的には、実際に予報解析サイクルを行なうことによって確認していく必要がある。なお、客観解析の第一推定値は予報値であり、北上バイアスは低緯度の観測データが乏しいと

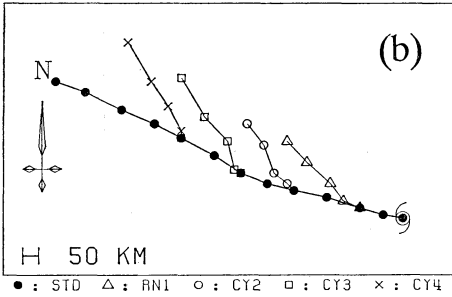


第3図 台風9006号の実況および予想経路。太い実線は実況で12時間毎に台風記号を付してある。細い実線と破線はそれぞれ午後9時, 午前9時を初期値とする予想で12時間毎に丸印を付してある。台風記号。丸印とも黒塗りは午後9時, 白抜きは午前9時の位置を表わす。

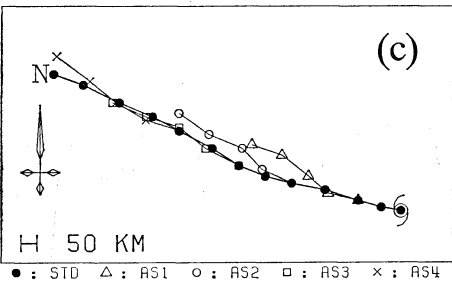
IMPACT OF BOGUS TYPH FT=0-72HR



IMPACT OF BOGUS TYPH FT=0-72HR



IMPACT OF BOGUS TYPH FT=0-72HR



第4図 ●印を付した線は2.5 m/sの一樣な東風を一般流として与えた場合の台風モデルによる72時間までの台風の移動経路 (STD と称する)。図形記号は何れも6時間毎の位置を表す。(a)△, ○, □, ×印はそれぞれ STD の12, 24, 36, 48時間目の積分結果を初期値として台風だけを新たに該当する時刻の●印の位置に埋め込んだ場合の24時間までの台風の移動経路。(b)○, □, ×印はそれぞれ△, ○, □印の12時間目の積分結果を初期値とし、台風だけを該当する時刻の●印の位置に埋め込んだ場合の24時間までの台風の移動経路。埋め込みの際は非対称成分は考慮せず。(c) (b)と同様。ただし埋め込みの際に非対称成分を考慮したもの。あとは本文参照。

ところで発現するので、このように予報モデルだけを使ったアプローチが可能であることを強調しておきたい。)ここでの台風モデルを使った予報解析サイクルの模擬実験の概要は次のようなものである。時間積分の領域は現在の台風モデルの領域で地図の投影法としてはメルカトル図法を用いる。ただし陸地はなくすべて海である。数値実験の初期値は風速2.5 m/sの鉛直水平に一樣な東風の一般場の中にすでに紹介した方法で台風を作成し埋め込んだものである。

第4図で黒丸を付した実線は、中心示度970 hpa、強風半径500 kmの台風を上記の一般場の北緯18度の位置に埋め込んだ場合の、台風モデルによる72時間までの台風進路の計算結果である。以後本文ではこれを「実況」と称することがある。なおこの場合の初期値は台風の中心付近でも風の非対称成分(一般流)を含んでいる。

第4図(a)で黒丸以外の記号を付した線も台風モデルによる計算結果であるが、いずれも初期値は「実況」値をバックグラウンド(実際の解析システムで言えば第一推定値に相当)としそれに「実況」の台風パラメータ(中心示度、強風半径)から第3節の方法で作成されたモデル台風を埋め込んだものである(以後実験Aと称する)。ただしこの場合台風初期場は客観解析のボガス同様軸対称成分しか含まない。図から、そのまま数値計算を続けた場合(「実況」)に比べ、新たにモデル台風を埋め込む操作を行なうことによって台風が北偏してしまうことがわかる。結果は示さないがこういった傾向は台風のサイズや強さ、モデルの分解能等によらず一般的に見られる。

上記の実験をさらに一歩進め台風モデルを使った予報解析サイクルの模擬実験を行なったので次に示す(以後実験Bと称する)。この実験でも「実況」の台風パラメータを用いてモデル台風を作成する点では先の実験と同じであるが、バックグラウンドとして、先行する「予報」の12時間予報値を用いる点で異なっている。第4図(b)にその結果を示すが「予報」進路は実際の北上バイアスに類似した北上傾向を示している。実験Aおよび実験Bからわかることは、一旦モデルで進路の北偏が生じると、それをそのまま次の「予報」のバックグラウンドとして用いる限り、その北偏傾向が残ってしまうということである。

ところで実験Aで、台風を埋め込む前の台風場(すなわち「実況」)と台風を埋め込んだ後の台風場(すなわち「初期値」)との間では、台風中心まわりの風の非対称成分の表現が大きく異なっている。「実況」の方は中

心付近でも一般流やベータ効果などによって生じた非対称流がそのまま表現されているのに対し、初期値の方は台風の中心付近では軸対称成分しか表現されていない。台風の中心付近で非対称流が弱ければ、その間台風の移動は遅くなり（このことはモデル台風が予報開始直後はスローバイアスを持っていることとも符合する）、ベータ効果による北ないし北西向きの非対称流が生成されてくる。

こういった考え方に立てば、埋め込みに用いるモデル台風について風の軸対称成分のみならず非対称成分も考慮してやれば北上バイアスを防げるはずである。しかし台風に伴う非対称流の3次元構造についてはまだよくわかっていないし、軸対称構造について得られているようなモデル的なものも得られていない。したがってここでは進路予報における非対称成分の重要性を簡単に示すために、非対称成分についてはバックグラウンドの値をそのまま用いた予報解析サイクルの模擬実験を行なった（以後実験Cと称する）。ただし通常「実況」の台風の位置とバックグラウンド（先行する予報の12時間予報）の台風の位置は異なるので、台風近辺ではバックグラウンドの台風を実況の位置にあらかじめシフトさせておく。その後、風については軸対称成分と非対称成分を分離し、非対称成分はモデル台風を埋め込んだ後もそのまま残るようにしておく。こういった手法を用いて初期値を作成した場合の台風進路の計算結果を第4図(c)に示す。図からわかるようにモデル台風に風の非対称成分を導入することによって北上傾向が抑えられ「実況」に近い進路が得られている。実験Cでは簡単のため風の非対称成分しか考慮しなかったが、実際は温度場（あるいは高度場）にも非対称があるのでそこまで考慮するのが望ましいのは言うまでもない。

以上の実験結果を基に実際の北上バイアスの原因や改善の方法について大胆にまとめると次のようなことになろうか。

- (1) 北上バイアスは客観解析で用いる台風ポーガスが非対称成分を含まない事が一つの大きな要因である。

- (2) 実験Bからわかるように、一旦北偏が生じるとそれがバイアスとなって残ることから、予報解析サイクルに用いている全球モデル自身に西進中の台風を北偏させる要素があると、それもまた北上バイアスの要因と成り得る。その要因として考えられるのが全球モデルの水平分解能が台風を表現するにはまだ不十分であること、および対流スキームに問題点があることの2点である。これらを示唆する実験結果があるがここではこれ以上言及しない。

- (3) 実験Cからわかるように、あらかじめ台風近辺の第一推定値を修正し何等かの方法で台風に伴う非対称成分を導入することによって北上バイアスを軽減できる。非対称成分については、第一推定値として得られたものに加え、衛星観測などから得られた台風の移動に関する情報を利用する方法が考えられる。

上記のうち(1)については質の高い観測データが十分な密度で得られれば問題ではなくなるが、それは今のところ望むべくもない。(2)は北上バイアスの改善には予報解析サイクル用のモデルの改善も欠かせないことを示唆しているが、同時に北上バイアスの履歴現象のメカニズムについても調査を進める必要がある。また現在(3)に沿った線で台風ポーガスの改善が進められているが、軸対称構造の違いも台風の移動に大きな影響を与えることから、それについても乏しい観測データをできるだけ有効に利用すべく改善が進められている。なお、ここでは詳しく触れなかったベータ効果による台風北上の原理や、対流スキームの台風移動に及ぼす影響については近々「気象研究ノート」に掲載される予定なのでそちらを参照して頂きたい。

参考文献

- 柏木啓一, 1990: 客観解析概論, 数値予報課報告・別冊第36号, 「気象データと客観解析」, 気象庁予報部, 2-30.