



天 気

1983年6月
Vol. 30, No. 6

1071: 401 (台風進路予報)

台風3次元モデルによる進路予報*

大河内芳雄**

1. まえがき

台風の移動を力学モデルによって予測しようとする試みは、数値予報が実用化された1950年代から盛んに行われてきた。

しかし、台風進路予報のルーチンモデルは計算機能力をはじめ各種制約のため、長い間バロトロピックモデルに頼らざるを得なかった。したがって予報精度にも限界があり、多くを望むことは無理であった。

そのため現業的立場では、総観的・統計的手法で見出された多くの予報技術や法則と云ったものが、実用面で広く一般に使われてきた(野本・岡村, 1976; 気象庁台風予報法開発ワーキング・グループ, 1977等)。

1970年代に入って計算機の大型・高速化が急速に進み、学術レベルの向上・計算技術の進歩等と相まって、台風3次元モデルの開発は大きく進展した。そして、台風進路予報のルーチンの運用も行われるようになった。

ここでは台風数値予報の簡単な歴史的経過を述べ、次いで1982年から気象庁でルーチン運用されることになった台風3次元モデルMNG (Moving Nested Grid model, 大河内, 1978; Ookochi, 1978) について解説し、その予報結果及び統計的に見たモデルの特性等について述べてみたい。

なお、アメリカではハリケーン予報の3次元モデルとしてNHC (National Hurricane Center) のMFM

* Typhoon track prediction using three-dimensional numerical model.

** Yoshio Ookochi, 気象庁電子計算室.

(Movable Fine mesh Model, Hovermale, 1976) 及びJTWC (Joint Typhoon Warning Center, Guam)の台風予報モデルNTCM (Navy's Nested Tropical Cyclone Model, Harrison, 1973; Harrison・Fiorino, 1982) がルーチン運用されている。これらのモデルについても簡単に紹介し、その予報結果の検証並びに比較についても少し言及する。

最後に、MNGモデルの予報結果から台風移動の一般的な考察を試みてみたい。

2. 歴史的経過

1959年気象庁に初めて大型電子計算機IBM 704が導入されるに際し、目玉のひとつに台風予報の改善が挙げられていた。

当時すでにSasaki・Miyakoda (1954), Sasaki (1955), Itoh・Masuda (1957), Masuda (1958) らによって、台風進路予報モデルが開発され、実際のデータでテストされていた。アメリカでもKasahara (1957)を初めとして、多くの研究が進められていた。

発足当初の電子計算室では、計算範囲、使用レベル或いは層数、計算スキーム等を異にする各種の台風予報モデルが開発され、それぞれのモデルでリアルタイムの進路予報が行われ、成果が競われてきた(Itoh・Nitta, 1962; Fujiwara, 1962; Masuda, 1962; Terauchi, 1962)。

しかし、当時の水準では基本的にスティアリング法によらざるを得なかった。これは一般場を力学モデルで予報し、その一般流(指向流)を使って台風の移動を予測

するもので、台風を含める場合と除いて予報する場合がある。

各種のステアリング法モデルがテストされたが、結果は大同小異であった。結局、一般場予報に安定性を示した BB (Balanced Barotropic) モデルで台風 (適当に浅めた) を含めて予報する方式に落ち着き、その後殆ど手を加えられることなく、1981年までルーチンモデルとして台風の進路予報に使われてきた (Itoh・Nitta, 1962)。

NHC では、SANBAR (Sander・Burpee, 1968; Sander *et al.*, 1975等) と称するハリケーン進路予報モデルが開発され、ルーチン化された。SANBAR は BB と同じバロトロピックモデルであるが、初期値に特定レベルの風を使わず、垂直方向に荷重平均した風を用いる点が違っている。

この他にも、バロトロピックモデルはインド (Singh・Saha, 1976)、台湾、フィリピン、中国等でも開発され、実際のデータを使った台風進路予報がテストされている。

このようにバロトロピックモデルは比較的簡単なため、長い間広く台風の進路予報に使われてきた。しかし、反面これは替わるべき予報モデルがなかなか開発されなかったことも理由の一つである。

1960年代に Ooyama (1964, 1969)、Charney・Eliassen (1964) らによって台風発達の数値シミュレーションが成功した。これには台風を発達・維持させるメカニズムとして、積雲対流群の集団効果をパラメタライズして導入したことが大きく効いている。Charney・Eliassen はこれを CISK (Conditional Instability of Second Kind) と名付けた。

その後、3次元モデルによる熱帯低気圧の数値シミュレーションが盛んに行われるようになり、CISK の取り扱いも次第に改善され、発生・発達を理解は非常に深められた。

一方、実用的立場から、実際のデータを使った台風進路予報のテストも行われてきた (Mathur, 1974; Ley・Elsberry, 1976等)。

しかし、台風3次元モデルのルーチン化には次のような困難な問題があって、その実用化を阻んでいた。

a) 計算量消化の問題

台風の物理過程を組み込み、なおかつ一般場予報も可能な程の広域・微格子網に対処し得る計算機又は計算技術の開発。

b) 台風メカニズムのモデル化

あまり複雑でなく、台風維持に効果的な物理過程のモデルへの組み込み手法の開発。

c) 初期値作成の問題

ルーチン観測データからリアルタイムに台風の3次元構造を適切に解析又は作成する手法の開発。

これらの問題が解決されるのに10年近い歳月が必要とされ、1970年代後半になって、ようやく台風3次元モデルのルーチン化が実現されるようになった。

3. 台風3次元モデル

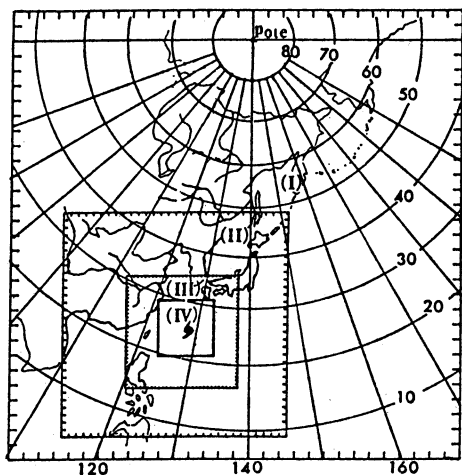
3.1. 計算時間短縮スキーム

3次元モデルによる台風進路予報では、台風の移動に影響を及ぼす一般場予報のため、計算領域はかなり広くとることが要請される。一方、台風の細構造を解像するためには、その格子間隔は数 10 km 以下にとることが望ましい。

一般に数値予報の計算量は格子間隔 (又は解像度) の3乗に逆比例して増加する。もし格子間隔を1/4にすると計算量は64倍以上にハネ上がってしまう。この問題を経済的に解決する手段として、台風付近を細かい格子 (高解像) で計算し、大規模一般場は粗い格子 (低解像) で計算する多重格子系 (multi-nested grid) が提案されてきた (格子網の中に別の細かい格子網をはめこむことを鳥の巣にたとえてネストすると云う)。なお内部の nested grid を台風の移動につれて動かすものを moving (又は movable) nested grid と云い、Madala・Piacsek (1975)、Ley・Elsberry (1976)、Hovermale (1976)、Jones (1977) 及び Kurihara・Bender (1980) らによって熱帯低気圧シミュレーションの研究やリアルデータの予報テストに使われてきた。

この他に格子間隔を連続的に変化させ、中央部を高解像で、周辺部を低解像で計算する可変格子も提案されている (Kurihara・Tuleya, 1974; Kitade, 1981)。この場合は格子の一部が長方形になるのが難点とされている。

台風3次元モデル MNG では、第1図に示すような多重格子系を用いている。内部の微格子域は台風の移動につれて動く moving nested grid になっている。粗・微格子系を結ぶ境界は両域の気象要素の変化が互いに影響し合う、いわゆる two-way 法で結合されている。two-way 法では境界付近が比較的滑らかに接続されるが、時間積分を同時に進めなければならないので大容量



第1図 4段ネスティング格子網の構成図.

の計算機が必要である.

なお, NTCM も two-way の nesting grid を用い, 微格子の間隔は粗格子の 1/5 ($d=40\text{ km}$) にとっている. 一方, MFM は微格子の境界値をルーチン運用の北半球モデル (現在は全球スペクトルモデル) から貰う one-way 法を用いている. 境界からのノイズを軽減するため微格子域はかなり広くとっている. 格子間隔の減少率は 1/3 ($d=60\text{ km}$) となっている.

他に計算時間を大きく節減する手段として時間積分法の改良がある. 現在最も経済的と云われているのは split explicit 法である. これは予報方程式の中の重力波に関する項のみ短い時間間隔で数回計算し, その結果を用いて残りの波長の長い波を前の数倍の時間間隔で一挙に先に進める時間積分法で, Euler-Backward スキームのような繰り返し法の数分の 1, semi-implicit 法の 1/2 ~ 1/3 の所要時間で同一の予報計算が可能とされている.

MNG では split explicit 法を採用することによって, その計算時間を約 1/4 に縮めることができた.

MFM では, 気圧傾度力を時間平均することで, 積分の時間間隔を 2 倍近くとれる経済的中央差分法を用い, 計算量の節減を計っている.

なお, MNG のテスト及びルーチン計算では, 計算時間短縮のためネスティングの 3 段目まで使う MNG 3 を用いている. MNG ではネストを 1 段増す毎に計算時間

		(σ)	Stan. Atmos.	(P)mb	(Z)m
k	$\sigma=0$	0	100	16180	
1	σ, T	1/12	176		
2	v, ϕ	2/12	252	10260	
3	σ, T	4/12	403	7180	
4	v, ϕ	6/12	556	4800	
5	σ, T	8/12	708	2930	
6	v, ϕ	10/12	860	1330	
7	σ, T	11/12	936		
8	$\sigma=0$	1.000	1013	0	

第2図 MNG 予報モデルの鉛直構造.

は約 2 倍に増加する. 現モデルは物理過程の扱いが比較的簡単なためか, 4 段まで使った MNG 4 と MNG 3 との予報差は僅かである.

この他, 中国では粗い格子 ($d=300\text{ km}$) の 3 層モデルの結果を境界値として, one way ネスティングの一層モデル ($d=150\text{ km}$) で台風の進路予報を行っている (TOPEX* report No. 4, 1982).

3.2. 予報モデル

MNG は σ 系 3 層の PE (Primitive Equation) モデルで, その鉛直構造は第 2 図に示すようにとっている. 簡単のため水蒸気予報, 地形効果等を省略したドライモデルである.

台風域には, 積雲対流群の加熱効果として最も簡単なハリソン型熱関数 (Harrison, 1973)

$$Q = Q_0(p, \varphi) \cdot \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2}{\alpha}\right] \cdot \exp\left[-\frac{(y-y_0)^2}{\beta}\right]$$

が組み込まれている. ここで x_0, y_0 は加熱中心, α, β は加熱範囲を決める係数である. $Q_0(p, \varphi)$ は熱の鉛直配分及び緯度効果を与える関数で, 中層を大きくまた高緯度程小さくなるようにしてある.

この方式は台風うずを維持するメカニズムの第 1 近似としては有効であるが, 加熱量を決める物理過程が省略され, まわりの場からのフィードバックがないため台風の発達・衰弱を予測するのは困難である.

これに引きかえ, MFM はもともと NMC (National Meteorological Center, NOAA) でシビアストームの降雨予報のため開発されたもので, σ 系 10 層 PE モデルである. 水蒸気予報, 海面からの顕熱・水蒸気輸送, 地形効果も含まれ, 積雲効果として CISK (Kuo, 1965) を用いた, かなり精密なモデルである. したがってハリケーン予報ばかりでなく, NMC では低気圧のメソスケ

* Typhoon operational experiment (台風業務実験).

ール予報にも用いている。

一方、JTWCのNTCMは初めから台風の進路予報用にデザインされたもので、MNGと同じドライモデルでハリソン型熱関数が用いられている。850、550及び250 mb面で温度・風・高度を計算し、その中間で上昇流を求めるP系3層PEモデルである。

予報領域は、メルカトル投影面上に、南北は赤道から42°Nまで壁境界がおかれ、東西は80°E-145°Eを循環式(cyclic)につないでいる。微格子域は1200×1200 km²の範囲である。

3.3. 初期値

台風3次元モデルの進路予報では、台風の強いうず構造をなるべく忠実に表現し、なおかつ台風の移動に大きな影響を及ぼす一般場の解析も適切でなければならない。現在ルーチン的に入手できる観測データから、客観解析によって実際の台風うずの3次元構造を得ることは殆ど不可能と思われる。

MFMでは2次元モデル(r, z)に観測値を入れて解き、得られた円対称うずを平滑化した一般場に積み重ねてハリケーン場を作っている。一般場はNMCのルーチン全球解析データから求めている。

一方、NTCMでは一般場をFNOC(Fleet Numerical Oceanography Center, Monterey)ルーチン熱帯解析から求め、台風付近は人工的データを入れて標準的な暴風場を作る。風場からバランス方程式を逆に解いて、高度場を決めている。粗・微格子間の調整のためバランス調節を2~3回繰り返す。

MNGの一般場は、電子計算室のルーチン北半球モデル8L-NHM(電子計算室報告, 1983)の初期値から内挿して作っている。この初期値では、風場を流線関数(バランス方程式を解いて得る)と速度ポテンシャル(準地衡風近似の上昇流オメガ ω を使って計算)から作成している。この場合、低緯度ではコリオリ係数の補正、境界の影響等により実際の風と多少違ってくる。

台風場は実測の台風半径、中心示度等をパラメータとし、平均的な台風構造に見合う円対称うずを作り、これを平滑化した一般場に重ねている。

具体的には、原口(1976)の提案した台風モデルを簡略化した

$$P_s = \bar{P}_s - \frac{(1000 - P_{min})}{1 + C \cdot (r/R)} \cdot e^{-\left(\frac{r}{R}\right)^2}$$

を用いて地上気圧場を決めている。ここで \bar{P}_s は平滑化した一般場の気圧、 P_{min} は台風の中心気圧、 R は台風

半径(ほぼ1000 mb等圧線で囲まれた円)、 C は低気圧示数(漏斗状の傾度を示す)、 r は中心からの距離である。中心気圧のあまり低いもの(950 mb以下)は適当に浅めている。

次に上層の温度場であるが、成熟期の台風温度場は周辺より高温で、特に対流圏中・上層に強い暖気核を持つ一般的プロフィールが解析的に得られている。そこで各レベルにおける標準的な温度偏差 ΔT_K を用い、水平方向には中心から距離の2乗で減少する円対称分布を考え、

$$T_K = \bar{T}_K + \frac{R_K^2 - r^2}{R_K^2} \cdot \Delta T_K$$

で近似させる。 \bar{T}_K は平滑化された一般場の気温、添字 K はレベルを示し、 r は中心からの距離、 R_K は台風半径で上層程大きくなるようにとってある。

温度場と力学的にバランスした風場を作るのはなかなか大変で、NTCMのようにバランス方程式を使う方法、或いは4次元解析(Anthes, 1974等)や力学的調節法(Hoke・Anthes, 1976, 1977等)が提案されている。

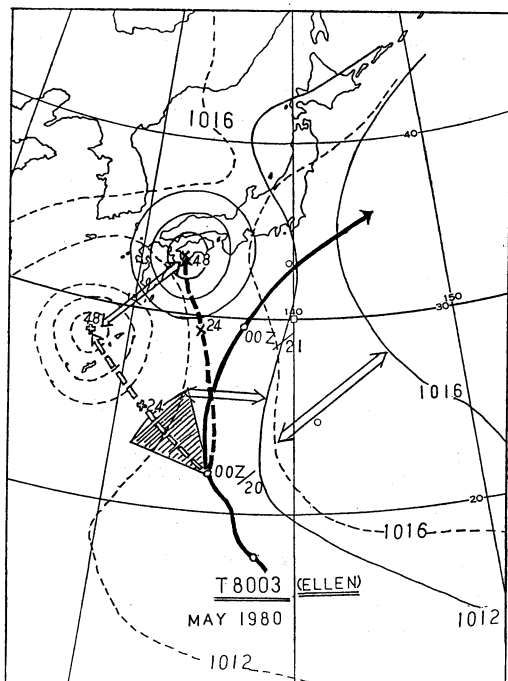
MNGでは簡単のため σ 面上で地衡風を求め、これに係数をかけ台風の切線成分を近似させている(傾度風を使ったテストも行われたが予報進路は殆ど同じであった)。動径成分は最高10 m/sの風を考え、中心から一様に減少して R_K で零となり、下層で収束、上層で発散、中層で非発散にしてある。

このようにして作られた台風場は、一般場との力学的調節が省略されているため、予報ステップの初期に重力波によるノイズがかなり大きくなる。次に述べる初期値修正の場合にも同じことがおこっている。ノイズの拡大を防ぐため、MNG予報モデルの中で時間積分の際、高周波ノイズを選択的に大きく減衰させるスキームを使っている。このため、重力波ノイズの影響は2~3時間のタイムステップで解消され、以後の計算には障害となっていない。

3.4. 初期値修正について

台風進路予報に及ぼす初期値の影響については、後に実例テストの項で詳しくふれるとして、ここでは6時間予報値を使った初期値修正について述べる。この手法はJTWCのShewchuk・Elsberry(1978)によって提案されたもので、初期値の不適合によって生じたと思われる予報エラーを大幅に減少させることができる。

この方式を導入することによって、MNG3の予報は初めから大きく外れて行くケースが大幅に改善されてき



第3図 台風8003号の径路と予報進路(MNG3: 白抜破線, MNGA: 太破線)及び地上気圧(48時予報). 扇形は24時間予想(予報課).

た. 1例として1980年の台風3号の例を第3図に示す.

この台風は蛇行しながら北西進していたが、20日00Z頃より急に向きを北に変え、大きく転向して八丈島付近を抜けて三陸沖に達した. 20日00ZのMNG3の予報は白抜矢印で示すように北西進を予測した. 予報課の24時間予想(扇形)も北西進を示していた.

一方、初期値修正したMNG3の予報は太破線の径路を示した(以後区別のためMNGAと略称). MNGAによる予想進路は12時間まではほぼ実況に近く、その後次第に外れて行くが、24時間以後のエラーは予報モデルの不完全によるものと思われる.

48時間予報の地上気圧場が示すように、初期値修正によって台風付近は勿論だが、一般場もかなり広範に改善されてくる.

MNGAの初期値修正法は、まず6時間予報を行い中心位置を求める(地上気圧場から2次曲面を仮定して決める). 実況位置と比較して、両者のベクトル差に相当する風 ΔV を計算する. この ΔV を使って台風域の風場を補正する. そして、この新初期値を使って初めから予報しなおす方式である.

風の修正量、範囲は多分にモデルに依存するので、実例テストの結果、現在は Δu を2.5倍、 Δv を1.5倍した風を用いている. 台風域内($\leq R$: 台風半径)の風を一樣に修正し、 $2R$ で修正値が零になるよう漸減させている.

1976-79年間にMNG3でテストされ、比較的誤差の大きかった8台風の14例についてみると、その平均位置誤差は12, 24, 48時間予報でそれぞれ、123, 223, 329 kmとなっていた. ところがMNGAで予報した結果、14例の平均誤差はそれぞれ、64, 149, 222 kmと大幅に減少した.

方向誤差は、MNG3の平均が12, 24, 48時間予報でそれぞれ 32.9° , 32.6° , 21.6° なのに対し、MNGAでは 13.3° , 12.4° , 12.2° に改善された.

これは初期場の指向流が実際に近くなったため、台風を含む初期値の解析が良くなれば、勿論修正の必要はないわけである.

NTCMでは、南北境界に壁をおき、東西を循環的にしているため、初期値修正のバイアスは Δu より Δv の方を大きくとり、北上成分を強めている.

以上、現在ルーチン的に使われている3つの熱帯低気圧(以下熱低と略す)3次元モデルを簡単に述べてきた. 第1表にその概要をまとめて示しておく.

4. 予報結果

4.1. 各種予報モデルの比較-1

MNGAが準ルーチン運用された1980-81年間にBBと同じデータを用いた予報が40例ほど行われた. これらの例でMNGAの予報は大幅な改善を示し、その平均位置誤差はBBの平均誤差の1/2近くに減少した.

第4図に台風7609号に対する各種予報モデルの結果を示す. 4L-NHM(4層北半球PEモデル)及び6L-FLM(6層ファインメッシュ・リミテッド・エリアPEモデル)は当時のルーチンモデルである. 一応台風を含めて予報しており、台風うず度を追跡して進路予報も行われてきた.

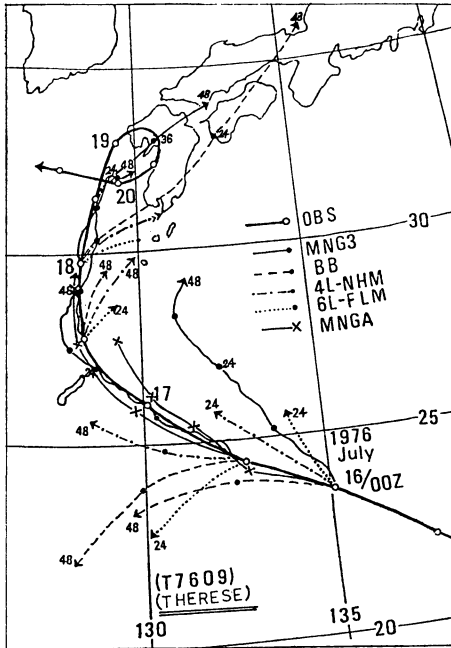
16日00Z及び12Zの予報は、BBを始めルーチンモデルは何れも転向が予測できず大きく外れている. 一方、MNG3の00Zでは北上成分が強過ぎたが、12Zではほぼ完全に転向を予測した. MNGAになると、00Zの予報もかなり改善されており、12Zでは殆ど実況と同じ径路を予測した.

17日12Zの予報では、ルーチンモデルは何れも北東進

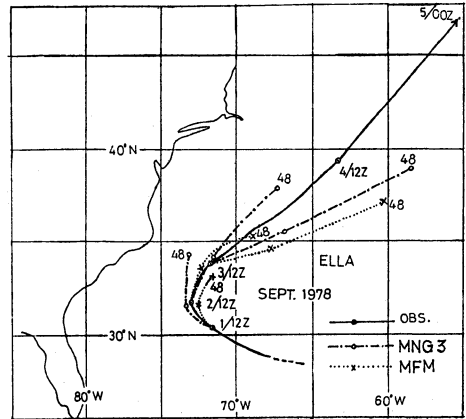
第1表 熱帯低気圧予報ルーチン・モデルの比較

予報モデル (官署)	MNGA (JMA ECC)	NTCM (JTWC)	MFM (NHC, NMC)
格子系	可動3段ネスト(1/2, TW)	可動2段ネスト(1/5, TW)	可動2段ネスト(1/3, OW)
水平解像	① 31×31 ($\Delta x=291$ km) ② 31×31 ($\Delta x=145$ km) ③ 31×31 ($\Delta x=73$ km) (25°N)	① 32×24 ($\Delta x=205$ km) ② 31×31 ($\Delta x=41$ km) (22.5°N)	① 全球 ($\Delta x=180$ km) ② 50×50 ($\Delta x=60$ km) (60°N)
鉛直解像	σ 系, 3層, スタッガー	P系, 3層, non スタッガー	σ 系, 10層, non スタッガー
物理過程	① ドライモデル, 山なし	① ドライモデル, 山なし	① ウェットモデル, 山あり
(① 一般場, ② 台風場)	② 熱関数	② 熱関数	② CISK (Kuo 方式)
時間積分法	split explicit	leap frog	economical leapfrog (気圧傾度力の平均値を使う)
初期値	ECC 北半球解析 バランス ($\phi \rightarrow V$)	FNOC 熱帯解析 逆バランス ($V \rightarrow \phi$)	NMC 全球解析 逆バランス ($V \rightarrow \phi$)
中心位置決定	標準的モデル台風を一般場に重ねる	標準的台風をボースで作り, バランス調節する	2次元モデルの暴風うずを一般場に重ねる
計算時間 (48時間予報)	6時間予報値で修正 地上気圧の min. 10分 (M-200H, 17 MIPS)	6時間予報値で修正 下層流線関数の min. 14分 (CYBER 175, 6 MIPS)	no 下層うず度の max. 90分 (IBM 360/195, 10 MIPS)

TW: Two Way, OW: One Way, MIPS: Million Instruction Per Second (1秒間に実行できる命令数で100万単位; 各機種の数値はおおよその値である).



第4図 台風7609号の径路と各種モデルの予報進路。



第5図 ハリケーン ELLA の径路と予報進路。

を示したが、MNG3は実況に近い北上径路を予測した。18日00Zの予報は何れも24時間以後のループ状の動きを予測することができなかった。

4L-NHM, 6L-FLMは共にパロクリニックモデルであるが、格子が粗い上に台風の取り扱いが不十分なため、台風の進路予報はBBと同程度の結果に終わっている。かつて気象庁とNMCとでは、それぞれの解析データを交換し、両者の熱低予報モデルMNGとMFMを同一データで比較するテストが行われた。

そのときの1例としてハリケーン ELLA の予報結果を第5図に示す。ELLA は大西洋中央部の前線上に発生し、発達しながら高圧帯の縁に沿って西北西に進み、9月1日12Zには最低気圧959 mbを記録した。その後北に向きをかえ、転向して次第に加速しながら北東に去って行った。

MNG3 のテストは9月1日、2日、3日の各12Zについて行われた。1日の例は両モデル共良く転向を予測している。しかし、MNG3 の予報は東向き成分が弱く、大回りの北上径路を示した。MFM の予報は少し内回りながら、かなり実況に近くなっている。

2日の予報は転向点から出発して、両モデル共24時間まではほぼ実況に近い径路を示した。その後の進路及び加速はMNG3 がやや良い傾向を示した。

3日のケースは転向後の急激な加速の予報が焦点だが、両者共不十分で似たような径路を示している。

この他に1978年のハリケーン Norman, Kendra 及び Fico について、MNG3 によるテストが10数例行われた。その集約として、北上する例ではMFM がやや良く、北西又は北東に進むケースは同程度か、MNG3 がやや良い傾向を示した(電計室テクニカルノート, No. 30; 1980)。

4.2. 各種予報モデルの比較-2

アメリカでは予報モデルの性能を平均誤差を使って評価するのが一般のようで、多くの比較例が報告されている。

台風やハリケーンの進路予報では、個々のケースによって誤差はかなり違ってくる。したがって、モデルの性能比較は多数の同一サンプルを用いて行う必要がある。ここでは代表的な2組の比較例を挙げておく。

最初に NTCM の予報と JTWC の公式予報の比較について述べる (Harrison *et al.*, 1982)。1975-80 年間に於いた 220 例の平均位置誤差は、24, 48, 72 時間の JTWC 予報が、241, 496, 754 km なのに対し、NTCM 予報は 215, 396, 598 km である。即ち、NTCM の進路予報は24時間で10%、72時間で20%程度の改善となっている。

また、方向エラーの目安を示す直角誤差(進路に垂直

な成分)は、JTWC 及び NTCM の24, 48, 72 時間予報の平均がそれぞれ156, 324, 515 km 及び122, 222, 363 km となっている。この点でも NTCM は48-72 時間予報で約30% JTWC の予報を上回っている。

これは力学モデルの優位を示すもので、特に外挿の効かなくなる36時間以上の延長予報で差ははっきりしてくる。

次に1978-80年の7ハリケーン40例の比較テストの結果について述べる (Fiorino *et al.*, 1982)。

MFM と FNOC データを使った NTCM の MVE* は、24 (34例)、48 (16例) 時間予報がそれぞれ143, 194 km 及び133, 176 km である。この例から見る限り両モデルの性能差は小さいようである。

しかし、NTCM の予報は初期値によって大きく違ってくる。FNOC 解析を使った場合は MFM と同程度の誤差だが、MFM と同じ NMC 解析を使った場合は10~30%程度 MVE が大きくなって来る。

これは解析と予報モデルの一体化を示すもので、NTCM は FNOC データに最適化されているためだと述べている。FNOC 解析では統計的気候値が大幅にとり入れられ、データの少ない低緯度解析を補っている。

なお、MFM, CLIPER** 及び NHC 公式予報の MVE は、24時間予報 (32例) ではそれぞれ148, 159, 150 km と、ほぼ同程度の誤差を示している。しかし、48時間予報 (16例) になると、それぞれの MVE は172, 350, 274 km となってくる。ここでも3次元力学モデルの MFM は、延長予報において統計法や総観法より勝れた結果を示すようになる。

4.3. MNGA の統計的特性

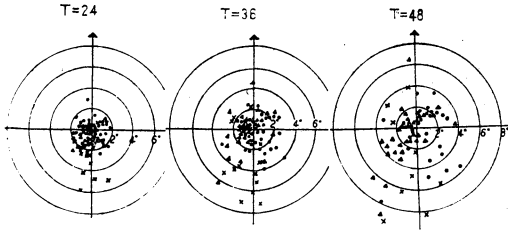
MNGA のルーチン化を前に、1981年までに行われた100例近いテスト結果について統計的検証を行った。

第6図は予想位置の誤差分布を示すもので、実況位置を原点にとり、対応する時刻の予報位置を転向前(●)、転向中(▲)及び転向後(×)の台風についてプロットしてある。矢印は台風の進行方向を示し、円弧は2° (222 km) 毎に描いてある。転向後の台風を除く殆どが24時間予報では2°以内、36時間予報では3°以内に入っている。48時間予報になるとかなり分散するが、約80%は4°以内に入っている。

第7図に36時間予報のエラーベクトルを示してある。始め原点にあった台風は36時間後矢印の先端まで動いてくる。一方、MNGA の予想位置は黒丸で示された点である。両者を結ぶ線分が、即ち予報誤差を示すエラーベ

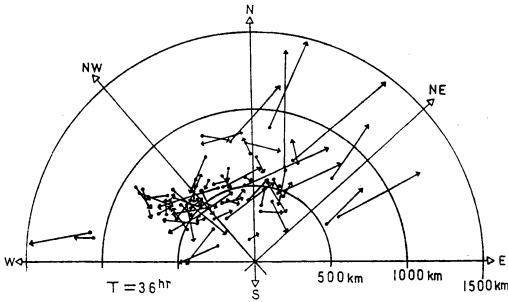
* MVE (Median Vector Error): 極端に大きなエラーを排除して集計した平均位置誤差。

** CLIPER: 気候値 (climatology) と持続性 (persistence) を組み合わせた統計的予報法、NHC で使われている。



第6図 MNGA の予報位置の誤差分布.

● 転向前, ▲ 転向中, × 転向後.



第7図 MNGA 36時間予報のエラーベクトル.

クトルである.

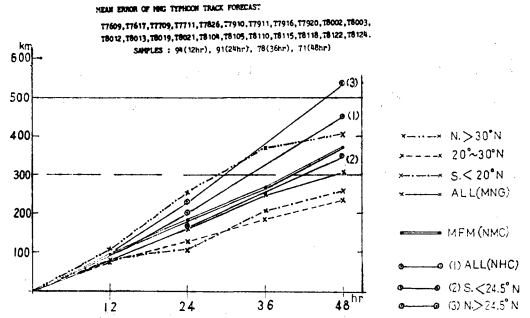
北西象限に向かうケースは主として転向前か転向中の台風で、移動距離が比較的小さく、したがってエラーも小さいものが多い。例外的にエラーの大きいのは主に低緯度を西進するケースである。

一方、北ないし北東象限に進む例は転向後の台風で、移動速度が大きく誤差も相対的に大きくなっている。しかし、進行方向はかなり良く合っているものが多い。

一般に転向後の台風は強い偏西風の影響を受けて急激に加速する場合が多い。モデルの中でこれを十分予測することができず、予報誤差を大きくしている。第5図で見てきたように、MFM も同じ傾向を持つようである。

第8図は12時間毎の平均位置誤差を10°、20°及び30°N台の台風に分類して示したものである。30°N以北では平均誤差はかなり大きく、30°N以南の2倍近くになっている。すでに第6、7図で見てきたように、30°N以北に進むのは主として転向後の台風で、移動距離も大きく予報誤差も平均的に大きくなっている。

なお、20°N以南が良いのは、平均的に移動距離が小さく全体の誤差を小さくしているためとみられる。一般に低緯度は境界の影響や力学的調節がおそい点など3次元モデルでも進路予報はかなり難しい問題を含んでお



第8図 各種台風進路予報の平均位置誤差.

り、大きく外れる場合がある。

集計サンプルが違うため、直ちにその予報性能を云々することはできないが、参考のため MFM と NHC 公式予報の平均位置誤差を一緒に示しておく。

NHC 予報は1970-79年間にわたって行われた1000例以上(975(24 h), 675(48 h))を24.5°Nの南と北に分けて集計してある(Neumann・Pelissier, 1981)。NHCのハリケーン予報も平均誤差は高緯度の方が低緯度のものより大きくなっている。

MFMの結果は1976-78年に行われた78例(48時間は66例)の集計である。MNGの結果と同程度の値を示している。

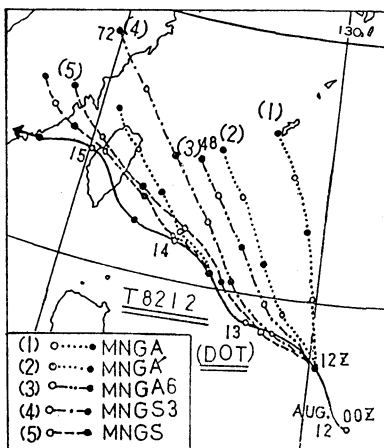
4.4. ケース・スタディ

電子計算室では、1983年3月から従来の北半球8層PEモデルに代わって、北半球12層PEスペクトルモデル(12 L-HSM, 電子計算室報告; 1982)が一般のルーチン予報モデルとして運用されるようになった。

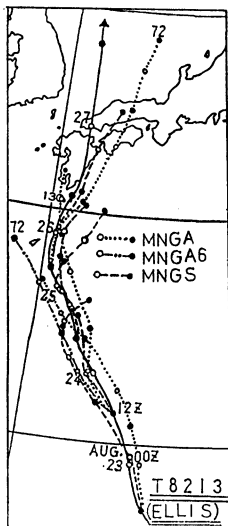
新モデルの初期値は、ノーマル・モード・イニシャリゼーションにより解析された風と高度場の両方を使って作られている。これは従来の初期値に比べ30°N以南、とりわけ低緯度の風の場合が大きく改善されている。この新しい初期値を使ったMNGAのテストで、台風の進路予報も大幅に改良されることが示された。

第9~12図に1982年の主な台風について行われたテスト結果を示す。データの関係で12Zのみがテストされた。

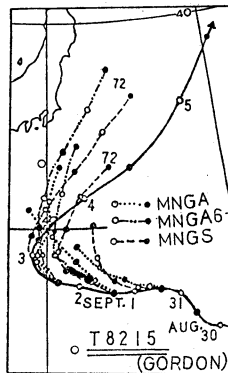
第9図は12号の例を示す。この台風は大きく張り出した小笠原高気圧の縁を西北西に進み、台湾を横切り中国大陸に上陸し消滅した。TOPEXのため進路予報が実施された。8月12日のケースは990 mbの弱い熱低で、予報モデルの中で中心がうまく決まらず、加えて低緯度



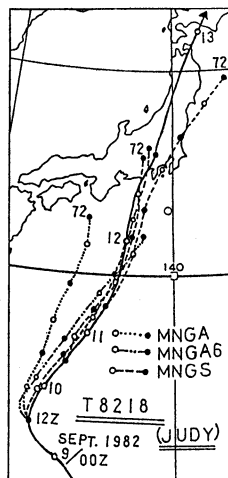
第9図 台風8212号の径路と予報進路。



第10図 台風8213号の径路と予報進路。



第11図 台風8215号の径路と予報進路。



第12図 台風8218号の径路と予報進路。

の風解析が不十分なためもある。ルーチン時 MNGA の予報 (1) は大きく北に外れた。

この外れを改善するため、熱関数を改良し、加熱間隔は1時間毎を15分毎にした。その結果、予報初期の中心位置が修正され、予報進路は (2) の径路を示すようになった。

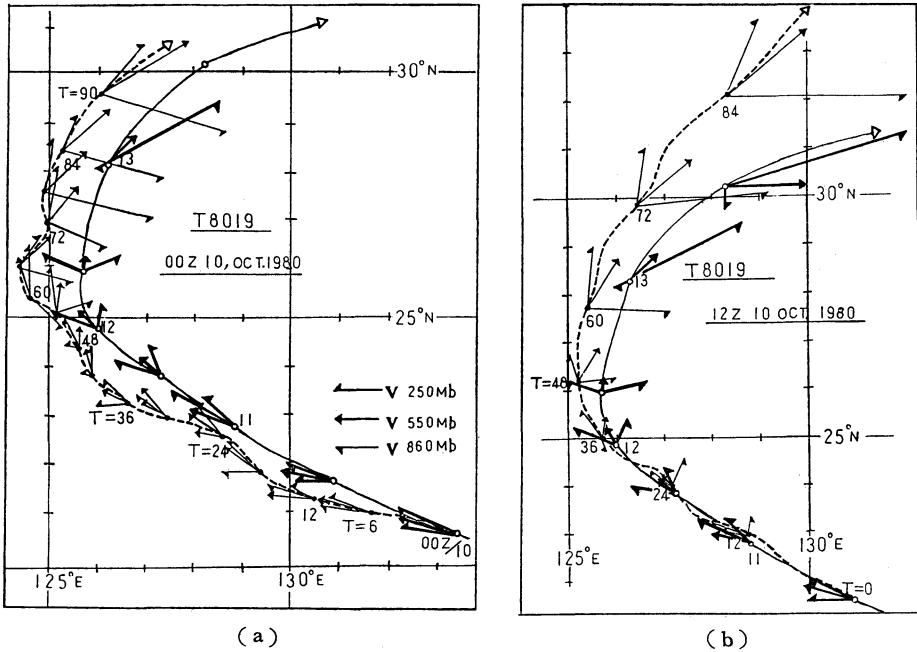
次に、横境界の影響を除くため最大領域を北半球 (65 × 65) に拡げてテストした。その結果、(3) で示す径路まで改善されてきた (MNGA 6)。

新モデルの初期値を使った予報径路を (4)、(5) で

示し、それぞれ (2) と (3) の領域に対応する。新初期値を用いることによって、台風の進路予報も大幅に改善されてきた。特に最大領域を北半球に拡げた (5) の径路はかなり実況に近くなっている (以後 MNGS と略称)。

第10図は13号の例を示す。13号は8月23日00Zには915mbまで発達した大型の強い台風である。ほぼ北上のコースをとり宮崎県に上陸、九州を縦断して日本海に抜けた。MNGA (点線) はルーチン予報で、30°Nまでほぼこのコースを予測した。MNGS (破線) では更に実況に近い径路を示したが、48時間以後転向を示すなど、まだ延長予報には不十分な面もある。

次に、顕著な転向を示した台風15号の例を第11図に示す。MNGA では1日12Zまで、この転向が予測され



第13図 台風8019号の径路と予報進路及びスティアリングベクトル。

ず、2日になって漸く予測されるようになった。一方、MNGS では1日からこの転向が予測され、2日の予報と共にその転向緯度、時刻はほぼ実況と同じになった。しかし、転向曲率は1日のケースでは過大に、2日の例では過小に予測されている。また、転向後の加速は1日の例はとにかく、2日のケースでは不十分である。

第12図に18号の例を示す。この台風は本州南方洋上を北上し、御前崎付近に上陸、関東・東北地方を縦断し、北海道を経てオーック海に抜けた。この間、日本各地に大きな被害をもたらした台風である。

MNGA (点線)の9日12Zの予報はかなり西寄りコースを示し、紀伊半島に向かっていった。その後の予報では、ほぼ実況に近い上陸コースを予測した。一方、MNGSでは9日の例が非常に改善され、途中スピード誤差はあるが、コースは殆ど実況と同じになってきた。10日以後の予報では、30°N以北に入って遅れが目立ち、35°N以北では進路も少し外れてくる。これは偏西風波動を含む一般場予報が不十分なためで、モデルを精密化する以外に方法はない。

なお、一般予報モデルの12L-HSM, 12L-FLMも台風を含めて予報している。昨年のテスト例ではかなり有望な結果を示しており、特に30°N以北では一般場予報

が勝れているため MNGS より良い結果を示した。

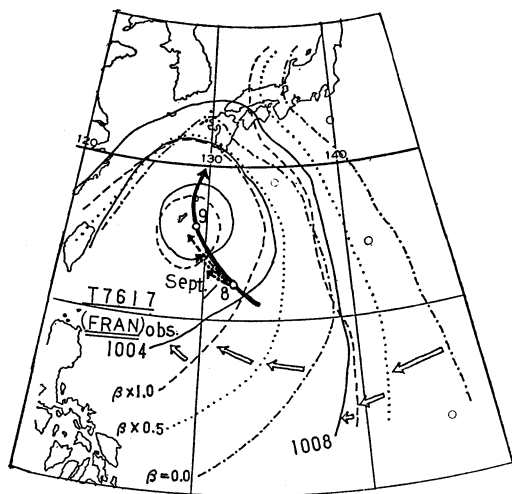
5. 台風の移動について

3次元モデルによって台風の進路予報、特に転向の予報がかなり改善されるようになった。そこで3次元モデルの結果から台風移動のメカニズムを推論してみたい。

台風の移動はよく川の流れに浮かぶうず巻の動きに対比される。川の流れに相当する一般場の流れは指向流と呼ばれ、台風移動の最大要因とされている。進路を指向流で予測するのをスティアリング法と云い、総観法やバロトロピック予報の主要な基盤となっている。

しかし、ひとくちにスティアリングと云っても、どのレベルの流れを使うのが良いかは議論の分かれる所で、George・Gray (1976)は統計結果から進行方向は500mb面の風向、移動速度は700mb面の風速が一番良い相関を持つと述べている。この他にも、いろいろな説があるが、ここでは省略する。SANBARが鉛直方向に荷重平均した風を使うのも、こうした論拠によるものである。

3次元モデルでは、各層の一般流は台風うずと相互作用しながら、台風の動きを支配しているものと思われる。次に、典型的な転向コースをとった台風8019号にお



第14図 β 効果を変えた台風進路予報 (台風 7617 号)。実線は実況、破線、点線及び一点破線はそれぞれ $\beta \times 1.0$, $\beta \times 0.5$ 及び $\beta = 0.0$ で 24 時間予報した台風進路と地上気圧。

ける指向流のふるまいを、MNGA の結果を使って調べてみる。

第13図は9月10日00Z (a) 及び12Z (b) を初期値とした予報 (点線) と実況 (実線) の径路図及び指向流を示す。ここで、指向流は台風域内の風を平均して円対称成分を除いたもので、上・中・下層の領域代表ベクトルで示してある。

初期値から計算された指向流は太線で示され、台風が北西進中は各層共ほぼ同じ北西方向を示している。転向が始まると上下のシアが段々大きくなり、最盛期の12日12Zには上下の風向は180°近く開いてくる。その後は次第に上層の南西風が強まり、転向は終了する。転向後の台風はほぼ上層の流れに乗って移動するものようである。

一方、細線で示す予報の指向流も非常によく似たふるまいを示している。これは転向を含む予報進路がほぼ実況に近い点から見て、指向流の上下シアは台風の動き、特に転向に大きく関与しているものと思われる。

BB モデルでも転向予報を除けばかなりの成績を挙げ得たのは、直進中の台風の動きがほぼ大気中層の流れに沿っているためである。反面、転向は各層の流れが合成されて効くため、単層モデルでの予測は困難である。

次いで台風の動きに大きく影響するのは、コリオリカ

の緯度変化 $\beta (= \partial f / \partial y)$ 効果である。円形気圧場に働く β 効果としては、ビャクネス・ホロンボの理論から導かれる西向き加速とロスビー効果 (Rossby, 1948) と呼ばれる北向き加速が知られている。

Madala・Piacsek (1975) は、3次元モデルのシミュレーション実験において、一般流のない β 面上のモデル台風が190時間で西方へ825 km, 北方へ625 km 移動することを示し、これを β 効果によるとしている。

また β 効果は基本流との非線型相互作用によって、トロコイダル径路を示すことがある (Yeh, 1950)。Jones は数値実験でこれを実証した。また実際の台風やハリケーン径路で観測例が報告されている。

この他、一般場予報に及ぼす β 効果は超長波の西進にかかわる項として知られ、初期の数値予報モデルでは重視されてきた。小笠原高気圧のような大規模スケールの予報では当然問題となってくる。

第14図は MNG 3 による台風 7617 号の24時間予報を示す。実線は実況、破線、点線及び一点破線はそれぞれ β 効果を1倍、0.5倍及び零として計算した結果である。

β 効果を小さくすると一般場の西への張り出しが弱まり、台風の動きも非常に遅くなってくる。実は第4図で見た BB, 4L-NHM, 及び6L-FLM では、モデルの制約から30°N以南の β 効果が0.5倍程度に弱めてある。この面からも進路予報を不十分にしていたようである。

6. あとがき

主として電計室の台風3次元モデル MNG について述べ、併せてアメリカのルーチンモデル MFM, NTCM について見てきた。

3次元力学モデルによって台風の進路予報はかなり改善され、特に転向の予測や延長予報に勝れた性能を持つことが示された。

これら3つのモデルの構成、物理過程等はかなり違っているが、進路予報に限ってみればその性能に大きな差のないことが示された。これは台風の移動について、次のような解釈を推定させるものであろう。

大規模場に対して一定規模の台風うずは準水平的に相互作用しながら動いて行くもので、うずの細かい構造や非対称性などは2次の要因とみられる。台風の発達を予報するには非常に精密な物理過程が必要だが、移動の予報にはうずの3次元の構造を維持するに必要な簡単な熱関数でもかなり有効である。また、うず表現のため高解像 nesting grid の効果は大きいものと思われる。

一般場及び台風場の3次元のふるまいを解像するには使用レベルは多い程良いが、MNGやNTCMのように最小レベル(下層の収束, 中層の上昇, 上層の発散を表現する3層)のモデルでも、台風進路予報はかなり改善されることが示された。

初期値の問題は非常に大切で、時に予報モデルの性能より大きな要因となつて予報進路を左右する場合がある。今後観測データの充実、解析法の改良等によって一般場は一層改善されるであろう。しかし、台風付近の解析は容易でないで、当分何らかの補足手段が必要と思われる。

なお、研究段階の台風モデルにはふれなかったが、最近の3次元シミュレーションモデルの開発は目ざましく、計算機の急速な進歩と相まって、やがてルーチン化されてくるであろう。そして台風数値予報は今後益々発展・向上して行くものと思われる。

文 献

- Anthes, R.A., 1974: Data assimilation and initialization of hurricane prediction models, *J. Atmos. Sci.*, **31**, 702-719.
- Charney, J. and A. Eliassen, 1964: On the growth of the hurricane depression, *J. Atmos. Sci.*, **21**, 68-75.
- Fiorino, M., E.J. Harrison, Jr., and D.G. Marks, 1932: A comparison of the performance of two operational dynamic tropical cyclone models, *Mon. Wea. Rev.*, **110**, 651-656.
- Fujiwara, S., 1962: A method of automatic analysis of the initial typhoon field, *Proc. Int'l Symp. Num. Wea. Pred.*, Tokyo, 71-76.
- George, J.E. and W.M. Gray, 1976: Tropical cyclone motion and surrounding parameter relationship, *J. Appl. Met.*, **15**, 1252-1264.
- 原口勘助, 1976: 多くの擾乱に適合する気圧分布モデル, *天気*, **23**, 615-623.
- Harrison, E.J. Jr., 1973: Three-dimensional numerical simulations of tropical systems utilizing nested finite grids, *J. Atmos. Sci.*, **30**, 1528-1543.
- and M. Fiorino, 1982: A comprehensive test of the navy nested tropical cyclone model, *Mon. Wea. Rev.*, **110**, 645-650.
- Hoke, J.E. and R.A. Anthes, 1976: Initialization of numerical models by a dynamic-initialization technique, *Mon. Wea. Rev.*, **104**, 1551-1556.
- and ———, 1977: Dynamic initialization of a three-dimensional primitive-equation model of hurricane Alma of 1962, *Mon. Wea. Rev.*, **105**, 1266-1280.
- Hovermale, J.B., 1976: The movable fine mesh (MFM)-a new operational forecast model, *Tech. Proc. Bull. No. 160*, Tech. Serv. Br. Meteorological Services Division, National Weather Service Rockville, Md. 5 pp.
- Itoh, H. and Y. Masuda, 1957: The numerical prediction of the typhoon movement by the relay computer, *Pap. Met. Geophys.*, **7**, 377-389.
- and T. Nitta, 1962: Typhoon movement in the balanced barotropic forecast over the northern hemisphere, *Proceeding of the International Symposium on Numerical Weather Prediction in Tokyo*. 309-327.
- Jones, R.W., 1977: A nested grid for a three dimensional model of a tropical cyclone, *J. Atmos. Sci.*, **34**, 1528-1553.
- Kasahara, A., 1957: The numerical prediction of hurricane movement with the barotropic model, *J. Met.*, **14**, 386-402.
- Kitade, T., 1931: A numerical study of the vortex motion with barotropic models, *J. Met. Soc. Japan*, **59**, 801-807.
- Kuo, H.L., 1965: On formation and intensification of tropical cyclones through latent heat release by cumulus convection, *J. Atmos. Sci.*, **22**, 40-63.
- Kurihara, Y. and R.E. Tuleya, 1974: Structure of a tropical cyclone developed in a three-dimensional numerical simulation model, *J. Atmos. Sci.*, **31**, 893-919.
- and ———, 1978: A scheme of dynamic initialization of the boundary layer in a primitive equation model, *Mon. Wea. Rev.*, **106**, 114-123.
- , M.A. Bender, and G.I. Tripoli, 1977: A movable nested mesh primitive equation model, *Preprints. 11th Technical Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology (Miami Beach)*, AMS, Boston, 99-100.
- Ley, G.W. and R.L. Elsberry, 1976: Forecasts of Typhoon Irma using a nested-grid model, *Mon. Wea. Rev.*, **104**, 1154-1161.
- Madala, R.V. and S.A. Piacsek, 1975: Numerical simulation of asymmetric hurricanes on a β -plane with vertical shear, *Tellus*, **27**, 453-468.
- Mathur, M.B., 1974: A multiple-grid primitive equation model to simulate the development of an asymmetric hurricane (Isbell, 1964), *J. Atmos. Sci.*, **31**, 371-393.
- Masuda, Y., 1958: The barotropic forecast of typhoon movement by making use of stream function, *J. Met. Soc. Japan*, **36**, 15-18.

Masuda, Y., 1962: On the general concept about the steering current in the baroclinic atmosphere and its application to the numerical prediction of typhoon movement, Proc. Int'l Symp. Num. Wea. Pred., Tokyo, 341-348.

Neumann, C.J. and J.M. Pelissier, 1981: Models for the prediction of tropical cyclone motion over the North Atlantic: an operational evaluation, Mon. Wea. Rev., 109, 522-538.

野本真一, 岡村 存, 1976: 台風の進路とその予報. 気象研究ノート, 129, 503-548.

大河内芳雄, 1978: 移動式多重格子系を用いた台風予報, 研究時報, 30, 173-198.

Ookochi, Y., 1978: Preliminary test of typhoon forecast with a moving multi-nested grid (MNG), J. Met. Soc. Japan, 56, 571-583.

Ooyama, K., 1964: A dynamical model for the study of tropical cyclone development, Geofisica International (Mexico), 4, 187-198.

———, 1969: Numerical simulation of the life cycle of tropical cyclones, J. Atmos. Sci., 26, 3-40.

Rossby, C.G., 1948: On displacement and intensity changes of atmospheric vortices, J. Mar. Res., 7, 175.

Sandar F. and R.W. Burpee, 1968: Experiments in barotropic hurricane track forecasting, J. Appl. Met., 7, 313-322.

Sasaki, Y. and K. Miyakoda, 1954: Prediction of typhoon tracks on the basis of numerical weather forecasting method, Proceedings of Unesco Symposium on Typhoons, 221-234.

Sasaki, Y. 1955: A fundamental study of the numerical prediction based on the variational principle, J. Met. Soc. Japan, 33, 30-43.

Shewchuk, J.D. and R.L. Elsberry, 1978: Improvement of short-term dynamical tropical cyclone motion prediction by initial field adjustments, Mon. Wea. Rev., 106, 713-718.

Singh, S.S. and K. Saha, 1976: Numerical experiments with a primitive equation barotropic model for the prediction of movement of monsoon depressions and tropical cyclones, J. Appl. Met., 15, 805-810.

Terauchi, E., 1962: Numerical prediction of the movement of hurricane Audrey 1957 with a two-parameter model, Proc. Int'l Symp. Num. Wea. Pred., Tokyo, 335-340.

Yamasaki, M., 1968 a: Numerical simulation of tropical cyclone development with the use of primitive equations, J. Met. Soc. Japan, 46, 178-201.

———, 1968 b: A tropical cyclone model with parameterized vertical partition of released latent heat, J. Met. Soc. Japan, 46, 202-214.

Yeh, T. C., 1950: The motion of tropical storms under the influence of superimposed southerly current, J. Met., 7, 108-113.

気象研究ノート147号「日本とその周辺の古気候復元」(1983年3月)

目次

1. 序	吉野正敏
2. 世界と日本の古気候	吉野正敏
3. 古環境による日本とその周辺の古気候復元	小野有五・堀 信行・遠藤邦彦・安田喜憲
4. 堆積物の各種分析からみた最終氷期以降の気候変動	安田喜憲
5. A. D. 1~1600年の日本の気候変化	山本武夫
6. 歴史時代における日本の地方別の異常気象発生回数の変化	吉野正敏・黒坂裕之
7. 日本の小氷期の気候について ——特に1661~1867年の弘前の天候史料を中心に——	前島郁雄・田上善夫
8. 1780年代の天候分布	三上岳彦
9. 18世紀後半における伊勢平野南部の天気と気候	水越允治
10. 日本の古気候復元の諸問題	吉野正敏

配布価格

通常会員	1,200円	定期購読会員	1,100円
団体会員	1,800円	会員外	2,000円