

台風の数値実験

北出 武夫*

1. 数値実験とは何か

物理学は常に実験と理論が車の両輪の様に、相補関係を保ちつつ進んで来た。実験とは現象の中に含まれる様々な要素を出来るだけ単純化し、現象を支配する物理要素を少数にすることによって、その物理要素と現象との関係を支配する法則を見出すことを目的とする。さらに見出された法則を他の諸法則との総合化、理論的な統一化の後、そのより一般化された理論の検証のために実験が試みられる。実験と理論とのこの様な積重ねの上に物理学は進歩して来たと言える。

実験には、室内実験、野外実験、数値実験等がある。室内実験においては人工的にある現象のエッセンスが室内において再現される。気象学においては大気大循環、台風、対流、境界層、雲物理等の研究においてこの方法が採用されている。これらの方法が有効であるためには大気と室内実験で再現される現象との相似則が成り立つことが不可欠である。力学的な相似則が成り立っても、大気が成層を持つこと、又水蒸気が凝結した時に熱を出すこと等を室内で再現することはかなり困難であるため、この方法で研究出来る分野は限られている。野外実験とは自然界そのものを一つの実験室と見たてて、起っている現象の一断面を取り出し実験する。この場合大きく見れば気象観測も一つの野外実験とみなせるかも知れない。しかし起っている気象現象を支配している法則を見出すために、自然界に人工的な手を加え、その変化を見るといった場合により実験と言われるのにふさわしい。この種の実験には人工降雨の実験とか、アメリカで試みられた台風制御実験などがある。上記の室内実験にしろ野外実験にしろ、気象学の場合実験の試行が非常に困難な場合が多い。その大きな原因は大気が圧縮性を持つこと、地球の表面が非常に複雑な形と特性を持つこと、

水の相変化が熱力学的に大気の振舞に大きくかかわっていること、多くの物理過程が大気の振舞に競合して現われ、しかも様々な時間空間スケールの現象が重なって現われ、それらがそれぞれ非線形的に相互作用をしている事等がある。従って気象現象に対して、その現象を支配する法則を見出すための実験を実行することが非常に困難な場合が多い。数値実験とは一種の思考実験とも言えるものであるが、これを最近発達してきた電子計算機を使って行うものである。物理学の法則は何らかの形で現象を定量化し、その量の間の関係を定式化する。気象現象を支配する最も基本的な物理法則は流体の運動方程式と熱力学の第一法則である。この外に連続の式、状態方程式、水の保存則等を加えると、あらゆる大気の振舞について原理的には正確に理解出来るはずである。しかし実際問題として大気現象が必ずしも充分理解出来ないのは、観測の不充分性もさることながら、支配方程式系や水の相変化の非線形性、大気の境界としての地球の形の不規則性等のため、必ずしも常に解析的に解けないためである。しかし最近の電子計算機の発達によって、上に述べた方程式系を数値計算法によって近似的に解くことが出来るようになった。そして実際にこの方法によって現在の観測値から未来の状態をある程度予報出来る様になった。これが数値予報である。数値予報の場合には未来の状態を知ると言うのが第1の目的であるが、この手法を気象現象を支配する物理要素の探求に使う方法が数値実験と呼ばれている。すなわちある気象状態は一定の数値の集合として表現される。例えば空間的に格子を取り格子上で気象要素の値の集合としてその場は表現される。その場が時間的にどの様になるかを数値計算法によって求める事が出来るので、ある現象過程を電子計算機によって再現することが出来る。その再現された現象は実験者の意図によって、室内実験の場合以上に自由に制御されうる。例えばある物理作用を含め

* Takeo Kitade, 気象庁電子計算室。

た実験と含めない実験を比較することにより、その物理作用の現象への表われ方を知ることが出来る。このような実験の積重ねによって、現象の本質を理解することが出来る。この数値実験という手法は気象現象の様な複雑な現象を理解するための有力な方法であり、台風の数値実験も台風の振舞や構造の理解に対して有力な情報を与えている。

2. 数値実験の方法

数値実験を行うためには気象場を定量的に表現する必要がある。これには空間を格子でおおい、その格子上に気象要素の値を与える方法と、気象場を直交函数で展開し、その展開係数によってその場を表現する方法がある。それぞれの方法に一長一短があるが台風の数値実験では格子を使う方法が主に使われているので、それについて説明しよう。まず流体の運動方程式は(1)式の様な時間に関する微分方程式である。

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} = f(x_i) \quad (1)$$

ここで、 (t, x) は時間と空間を表わす。 i は i 番目の格子での値を表わし、 u_i は風速、 f_i は気圧傾度力等の外力項である。風の場合は集合 $\{u_i\}$ で表わされ、外力場は集合 $\{f(x_i)\}$ で表現される。(1)式の時間微分を差分に直すと、

$$\frac{u_i^1 - u_i^0}{\Delta t} = f^0(x_i) \quad (2)$$

添字 $(0, 1)$ は時間ステップを表わし、 0 という時間の状態量 $\{u_i^0\}$ とその時の外力 $\{f^0(x_i)\}$ を知れば、 Δt 時間後の状態 $\{u_i^1\}$ を知ることが出来る。外力 $f(x_i)$ の中に空間に関する微分量を含む時は、これも空間的な差分で近似すればよい。例えば、

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_i = \frac{u_{i+1} - u_{i-1}}{2\Delta x} \quad (3)$$

以上の手続きを n 回繰り返せば $n\Delta t$ 時間後の状態を知ることが出来る。この時格子の間隔 Δx と時間ステップ Δt は小さければ小さいほどよいが、その場合同一の時間・空間の子報に要する計算時間が増えることになる。

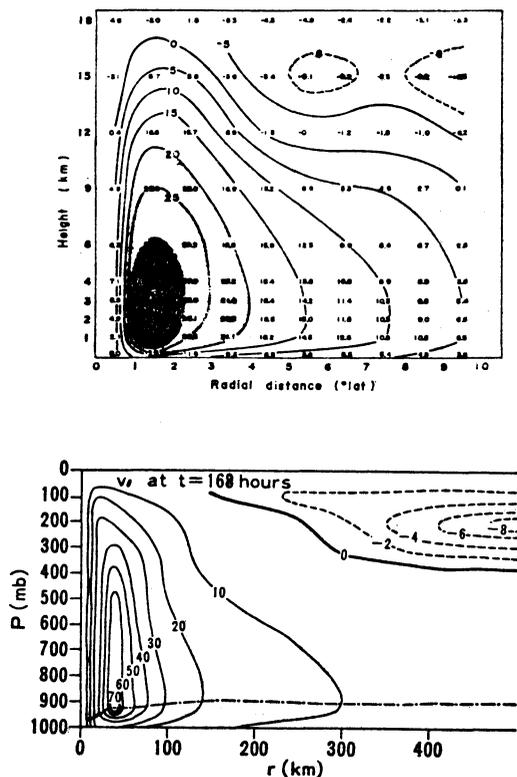
台風の場合には半径数百 km の空間スケールを持ち、数日で変化するので $\Delta x = 10$ km, $\Delta t = 2$ 分等の値を使うとかなりよく台風の振舞を再現出来る。台風の空間的な広がりやを 1,000 km と考えると、一水平面の格子の数は 100×100 個いる。垂直方向にも 10 個の層を取れば約 10^5 個の格子を取るようになる。格子上の気象要素の値

として風、気圧、温度、湿度等の値を与える必要がある。前記の格子の個数の数倍の値によって台風の場が表現されることになる。1週間の台風の振舞の変化を知るためには、(2)式から u_i^1 等を求める操作を各格子点について 5,040 回繰返すことが必要である。 5×10^8 の数倍の計算回数となり、人力ではとうてい不可能であり電子計算機を用いてはじめて可能になる。

3. 積雲対流のパラメタリゼーション

台風の理論の部でも述べられた様に、台風の発達や維持のエネルギー源は台風の中の積雲対流によって放出される凝結の潜熱である。台風は強い渦巻であると同時に、下層で風は収束し上層で発散する大きな循環を伴っている。この下層での収束する風の流れによって海面上の広い領域から水蒸気が集められ積雲対流に補給される。そして雲の中で凝結した水蒸気が放出する熱によって、台風自身の循環が強められ、収束による積雲対流への水蒸気の補給が増大する。この様に台風と積雲対流はお互いに助け合う形で維持されている。

従って積雲対流の振舞を正しく表現してやらないと台風の振舞も正しく表現出来ないことになる。ところで個々の積雲対流は数 km の空間スケールを持ち、数十分でその生涯を終えるので、この積雲対流の振舞を正しく表現するためには数百 m の間隔の格子と数十秒の時間ステップを取ってやる必要がある。このような細かい間隔を持つ格子で台風を表現してやろうとすると前節で述べたよりも飛躍的に多くの計算時間が必要になる。しかし我々にとつての興味の対称が台風自身の振舞であって個々の積雲の振舞ではない場合には、積雲が台風に与える効果のみを簡略化して数値モデルに導入し、積雲の細かい振舞は取り扱わない方法が行われている。これは積雲対流のパラメタリゼーションと呼ばれている。具体的にはある格子点上で気象要素の値はその格子を中心とした空間的・時間的平均値と解釈することにする。この時も 10 km の間隔の格子を取れば、格子上の値は 10 km の空間平均量だと解釈されるので、積雲対流自身はこの平均操作によって消えることになり、格子上の値は大規模な台風の循環を表現することになる。台風を記述する平均量に関する基礎方程式の中では、積雲対流の効果は外力項として表現されることになる。その最も重要な効果は積雲によって放出される凝結の潜熱の効果である。この放出熱の量とその水平垂直分布が台風を表わす場とどう関係にあるかという事について、様々の形の仮説



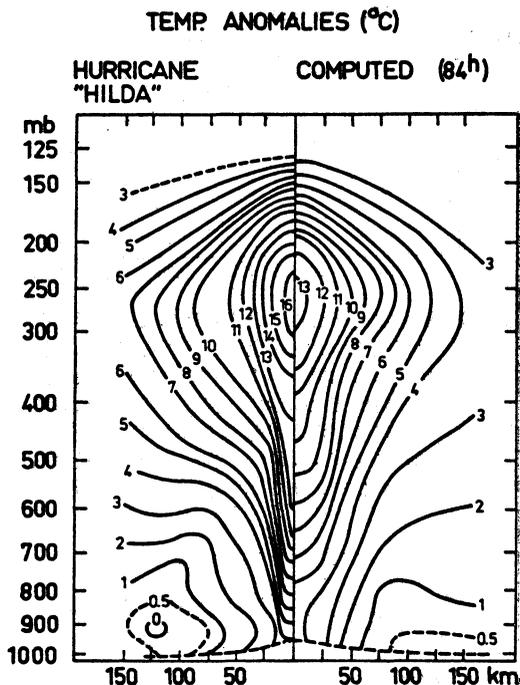
第1図 (上図) いくつかの台風における観測値の接線風速を合成した垂直断面図 (単位は $m \cdot sec^{-1}$)。横軸の単位は約 100 km (Izawa, 1964)。

(下図) 数値実験によって得られた接線風速の垂直断面図 (単位は $m \cdot sec^{-1}$) (Yamasaki, 1968)。

が提出されている。その代表的な考え方というのは、「台風循環による水蒸気の収束量と積雲対流の集団としての活動度は比例する。」というものである。積雲群による熱放出の水平分布は台風循環による水蒸気の水平収束量によって規定し、熱放出の垂直分布はどの高さの積雲対流がどれだけ出現するかを、対流に関する知識を利用して決め導出する。これらの理論は現在でも必ずしも完全なものではないが、それらを使った数値実験において自然界での台風とよく似たものが再現されている。

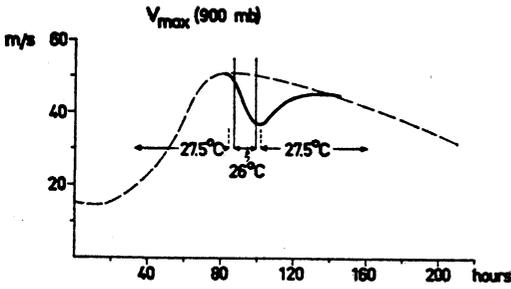
4. 台風の数値実験の結果

台風の振舞いの中で、その発達の方については数多くの数値実験が行われ数多くの情報がそれらの数値実験から得られている。これは初期に弱い渦を与え、これらが数日間で強い台風発達する様子を数値的に再現するも

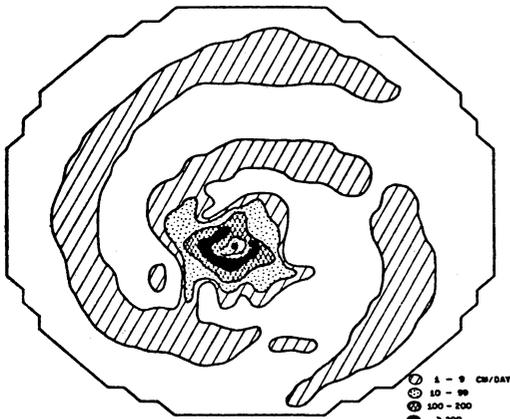


第2図 温度の水平平均量からのずれの垂直断面図。右側は数値実験によって得られた値 (Sundqvist, 1970a)。左側は Hilda というハリケーンの観測値から得られた垂直断面図 (Hawkins・Rubsam, 1968)。

のである。1960年代には計算機の制約から台風を円形の渦と考え、あらかじめ軸対称を仮定したモデルで数値実験が行われた。軸対称を仮定すると第2節で述べた例では計算量は100分の1になる。これらのモデルでも台風の日や、上層の暖気の生成や、風の場を現実的に再現出来た。第1図は観測から得られた接線風速の垂直断面図と、数値実験によって得られたものを示す。第2図は温度場について両者を比較したものである。この様に実際の台風とよく似た台風を数値的に再現出来る様になった。この段階になると逆に数値実験で再現された台風の細かい様相が、実際に自然界の台風においても存在するだろうかといった発想で台風の観測を行うこともありうる。さらに観測で得られる以上の豊富な数値実験によるデータを使って台風域内でのエネルギーの収支を計算し、台風の発達や維持のメカニズムをよりよく理解することが出来る様になった。そしてこの数値モデルで制御実験を行ない、地球の回転、地面摩擦、海面温度、等がどの様に台風の発達にかかわっているかを理解することが出来た。第3図は海面温度が台風の発達とどの様に

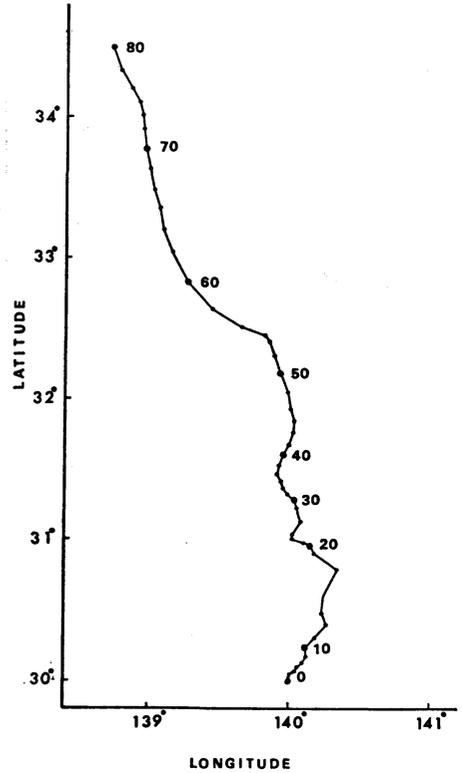


第3図 海面温度が台風の最大風速に及ぼす影響を数値実験によって調べた結果を示す。点線は常に海面温度が 27.5°C の場合の最大風速の時間変化を示す。実線の場合には84時間後に海面温度が急に 26°C に下がり99時間後に再び 27.5°C に復帰した時の最大風速の変化の様子を示す (Sundqvist, 1970b)。



第4図 数値実験によって得られた、スパイラル状の降雨強度 (cm/day) 分布。このようなレインバンドはレーダー等で観測されるものと似ている (Anthes, 1972)。

係するかを調べた結果である。点線は海面温度が、27.5°C に固定された場合であり、実線は84時間後に海面温度を 26°C に急に下げ、再び99時間後に 27.5°C にもどした場合である。この場合明らかに海面温度が下がると台風は弱まっている。この様な実験は台風が海上を移動し、冷たい海上へ移動した場合台風が弱まることを想定したものと考えられる。この外実際の台風の制御実験を行う前に、その効果を数値実験によって確かめる等が行われている。70年代になると計算機の進歩にともない台風の3次元モデルが開発され、台風の非対称的な振舞、例えばレインバンドや上層風の非対称性など



第5図 数値実験 (一般流のない場合) において得られた台風の移動経路を示す。横軸は経度、縦軸は緯度を示し、経路に付けられた数字は数値積分を始めてからの時間を示す (Kitade, 1980)。

が、かなりよく再現出来る様になった。第4図は数値実験によって得られたレインバンドの様子を示す。このようなレインバンドは非常に複雑な振舞をするが、これを数値実験で詳しく調べその性質を知ることが出来る。又台風の上層で風は、軸対称から大きくはずれるが、この原因が何かといった事が数値実験を使えば容易に調べることが出来る。以上に述べたのは台風についての数値実験から得られた知識のほんの一部であって、数値実験は台風の振舞や構造の理解に大きく役立っている。

5. これからの台風の数値実験

台風の数値実験が成功する様になったのは第3節で述べた積雲対流のパラメタリゼーションの有効な方式が開発されたためである。そしてこの方式のより一層の改善が今後の台風の数値実験の改善にとって不可欠である。一見この問題は計算機の能力さえ進歩すれば、積雲対流

自身も表現出来る細かい格子を取ることによって解消する様に思われるかも知れない。実際積雲対流自身をも表現出来る細かい格子を取り、積雲対流と台風の相互作用を数値実験によって調べる仕事も最近行なわれている。しかし細かい格子を取り積雲対流を含めた細かい台風の構造を詳しく調べたいという要求の外に、台風ともっとスケールの大きい現象、例えば小笠原高気圧や偏東風等との相互作用を調べたいという要求もある。この場合計算領域を出来るだけ広く取る必要がある、格子間隔についてはある程度大きなもので妥協せざるを得ない。この時にはある程度計算機が進歩しても、積雲対流はパラメタライズして取り扱う必要がある。

台風の移動とか進路予報ということを考えると、台風の中心付近の細かい構造と、台風のまわりの大きな場の流れを同時に表現しうる様な格子を取る必要がある。この時格子の数は非常に多くなり、歴大な計算時間を要するため、この分野での数値実験は充分行われていない。しかし数値実験によって台風の移動を規定している物理要素を求めることは、有力な方法でありその方向での仕事も行われつつある。第5図は数値実験における台風の中心の移動を示したものである。一般に台風はより大きな場の風に流されると考えられるが、この実験においては一般流のない所に渦を置いて、その渦を追跡したものであるが、この台風は北北西に移動している。これは地球が球面であり地軸の回りに回転しているためであると考えられる。一般流がある場合や、海面温度が場所によって変っている場合に、台風がどの様に移動するかといった問題に対しても、数値実験は有力な情報を与えてくれることが期待される。

その外に、台風の発生の問題も興味深い。台風の発生と赤道収束帯や偏東風波動との相関が観測的事実として知られているが、これらのメカニズムを数値実験によって詳しく調べるといった問題も将来行われることになると思われる。この場合も水平方向に充分広い領域での台風の振舞を調べる必要がある、歴大な計算量が必要になる。従って数値実験による研究の発展は電子計算機の進歩と平行しているといった事実はやむをえない事と思われる。

6. おわりに

この短文は数値実験についてほとんど知識がない読者を想定して、台風の数値実験とは何か、何をめざしているのか、といった事を概念的に把握していただくために書いた。従って数値実験の具体的な方法や、台風の数値実験によって得られた具体的な知識を期待されたむきには失望を与えたものと思われる。この方面の適切な参考文献をあげることによってお詫びとしたい。

参考文献

台風の数値実験によって得られた台風についての知識については、
山岬正紀, 1970: 台風の発達 の力学, 天気, 17, 207-227.
山岬正紀, 1976: 台風特集, 第1章台風の構造と発達 の力学, 気象研究ノート, 129, 1-63.

気象力学全般の分野での数値実験を総ざらえして、その意味づけを求めたものとして、
新田 尚, 1970: 気象力学における数値シミュレーション, 気象研究ノート, 103, 1-128.

数値実験に使われる数値計算法の技術的側面については、
新田 尚他, 1972: 気象力学に用いられる数値計算法, 気象研究ノート, 110, 1-158.
等を参照されたい。

引用文献

Anthes, R.A., 1972: Development of asymmetries in a three-dimensional numerical model of the tropical cyclone, *Mon. Wea. Rev.*, 100, 461-476.
Izawa, T., 1964: On the mean wind structure of typhoon, *Tech. Note, No. 2, Meteorological Research Institute, JMA*, 19 pp.
Sundqvist, H., 1970a: Numerical simulation of the development of tropical cyclones with a ten-level model, Part I, *Tellus*, 22, 359-390.
———, 1970b: Numerical simulation of development of tropical cyclones with a ten-level model, Part II, *Tellus*, 22, 504-510.
Yamasaki, M., 1968: Detailed analysis of a tropical cyclone simulated with a 13-layer model, *Pap. Met. Geophys.*, 19, 559-585.