

台 風*

山 岬 正 紀**

1. はじめに

前々回の「気象学への手引き」(1)及び前回の「続・気象学への手引き」(2)においては、「台風」は「熱帯気象学」の中で述べられている。今回は「台風」が独立して取り上げられることとなった。前回、筆者が担当した2においては、台風の部分は、気象研究ノート「台風特集」(3)が出た直後であったことや、紙面の制約もあって、3以外にはいくつかの論文をあげたに過ぎなかった。したがって台風に関しては気象学への手引きの目的からみてかなり不十分であったかもしれない。今回の執筆依頼の中では、読者は気象官署等の職員や大学の学部学生を一応の目安とすること、しかし最先端の様子が手に取るようにわかるような手引きとしたい、ということであった。筆者の力不足からこのような目的にあまり沿えなかったのではないかと思う。また、上で述べたいきさつもあり、本稿である文献は1978年以降には限定していないことをお断りしたい。

2. 啓蒙書・教科書・解説書

大学の教養課程程度を対象として書かれた教科書である小倉：「一般気象学」(4)の中で台風についても述べられている。台風にあてられたページ数は少ないが、台風以外の部分(とくに3, 4, 6, 8章)は台風を理解するための基礎として是非とも知っておいてほしい内容を多く含んでいる。また大気科学講座の中で浅井ほか：「雲や降水を伴う大気」(5)にも台風の章がある。

気象学会が一般向けに夏季大学教室として企画したときのテキスト「新しい気象学」の中の「台風特集」

(6)も台風の概要を知るにはよいであろう。また同じ企画で年代をさかのぼると「台風特集」(7)もある。

一般向けの書であるNHKブックスの中で古くは小倉：「大気の科学」(8)の中に台風も取り上げられており、また最近では大西：「台風の科学」(9)が出されている。これらの書にも目を通してほしい。

気象学のプロムナードの中に「台風」(10)があり、1～3章は台風についての観測結果を中心に多少の力学的考察を含めて述べている。少しレベルが高くなるが海洋科学「熱帯低気圧」(11)も参考になる。これらに目を通した後で上述の3を読んだ方がわかりやすいかもしれない。

英文で書かれたものとしては、Anthes「Tropical cyclones: their evolution, structure and effects」(12)は熱帯低気圧の構造とライフサイクル、物理過程(対流、境界層、放射)、数値モデルによるシミュレーション、ハリケーンの制御、熱帯低気圧に対する海洋の応答、熱帯低気圧の予報などの章から成るもので、1980年頃までの台風の研究成果をまとめたものである。Kurihara「Numerical modeling of tropical cyclones」(13)は題名の通り数値モデリングを主とした内容のもので研究者向けのレビューである。Elsberryほか「A global view of tropical cyclones」(14)はWMOの第1回熱帯低気圧に関する国際ワークショップ(1985年)での資料に基づいてまとめたものである。内容は台風の観測と解析、成熟期の構造、発生、移動、台風のインパクトなどの章から成っている。台風の研究や業務に携わっている者向けの書ではあるが台風について詳しく学びたい者にも参考になるであろう。

再び和書に戻ると、今からもう40年近くも前になるが、気象学講座の中に、増田・笠原：「台風論」(15)がある。古い書であるから役に立つ部分の取捨選択が必要であるが、古い書から重要な示唆が得られることもある。最近の書では、「気象の教室」のシリーズの一

* Typhoon (Tropical cyclones).

** Masanori Yamasaki, 東京大学大学院理学系研究科.

© 1994 日本気象学会

つである時岡ほか：「気象の数値シミュレーション」(16)の中に台風の章がある。

以上の書を読めば台風についてある程度の知識が得られると思う。しかしこれらの書に書かれたことがすべて正しいわけでもないし、わかりにくい部分、必要のない部分などいろいろであるから、読者の興味や目的、台風にごう関わっていくつもりかによって、読み方は違うはずである。理解できないところは読みとばして最初は時間をかけずに通読する方がよいであろう。これらの書で台風についてある程度の知識をもった読者を想定して、以下では台風の研究の発展と現状を含めて筆者の考えていることを少し述べてみたい。

3. 台風の発生、発達、構造に関して

台風のエネルギー源は水蒸気の凝結の潜熱であるが、潜熱は直接的には積乱雲・積雲などの対流雲のエネルギー源となる。台風が発生・発達するためには熱帯の海洋上で対流活動がある領域に集中して起こることが必要である。熱帯にはいろいろな強さ、大きさ、形をもった雲の塊、クラウドクラスターが共存していることが多いが、どのクラスターが渦を巻き台風になるかは、重要なしかし未説明の問題である。実際の台風では観測データが不十分のため発生を理解や予測がうまくできないのはやむをえないが、場の状態や用いる方程式が(正しいかどうかは別として)完全にわかっている数値モデルにおいても、方程式を解かずにどのクラスターが台風になるかを予想するのは必ずしも容易ではない。単純に何らかの線形不安定からは論ずることのできない非線形性、複雑なクラスターの内部構造、クラスター間の相互作用などが台風の発生の問題を難しいものになっている。

台風の研究における初期の不安定論、すなわち1960年代に提出された CISK (Conditional Instability of the Second Kind, 第2種条件付不安定) の概念はこの30年の間に変遷をうけている。CISK という言葉は研究者によって用いられ方や意味するものが異なるので、論文を読んだり議論したりするときには注意を要する。ここでは、湿潤対流(積雲対流や組織化された対流)との相互作用によって水平スケール数百 km 以上の擾乱や渦が発達する不安定性を意味するものとする。したがってその適用範囲は広いし種々のメカニズムの複合したものであることが多い。

1960年代に CISK という言葉が用いられたときには、摩擦収束が本質的な役割を果たす不安定に対する

概念であった。当時の線形不安定論では、台風の水平スケールを説明するための卓越スケールの議論が注目を集めたが、その後の研究により、水平スケールに対しては非線形効果が非常に重要な役割を果たすことが明らかになった。また、摩擦収束が重要な役割を果たす現象は主として眼の壁雲であること、数値モデルにおいて眼の壁雲を扱うには、もともと対流のパラメタリゼーションで用いた基本的な仮定(数値モデルの格子領域の大きさに比べて雲の占める大きさが十分小さいこと)を用いるのは適当でないこと、摩擦収束が重要な CISK を、強くない渦や水平スケールの大きな偏東風波動、したがって台風の発生の問題などに適用するのは適当ではないこと、等が認識されるようになった。

台風の発生過程や発達した台風における眼の壁雲以外の対流系(スパイラルバンドなど)では、摩擦収束とは異なったメカニズムで対流の組織化が起こっていると考えられる。それは2つのメカニズムに大別される(2つのメカニズムにはっきりした境があるわけではなく連続的であるが)。一つは、風が強くないために地表摩擦が重要な役割を果たさないもの。もう一つは、地表摩擦は重要であるが、摩擦収束ではない流れ(摩擦による吹き込み)が対流活動に重要な寄与をするものである。いずれの場合も、雨滴の蒸発による冷却、ダウンドラフト、コールドプールなどが重要な役割を果たす。いうまでもなくコリオリ力や海面からの熱や水蒸気の供給の効果も重要である。ここでは詳しく述べることができないが、この面での論文として Yamasaki (17, 18) などがある。

近年、大気と海洋の相互作用による不安定が Emanuel (19) によって論じられ、CISK とは異なる不安定の概念であるとして関心をよんだ。ここで注意してほしいことは、従来の CISK の概念、台風の発生や発達においては、海面からの潜熱や顕熱の大気への供給は必要不可欠なものと考えられてきたことである。たとえば、摩擦収束が重要な CISK に対する線形論では大気が条件付不安定であれば十分であるが、非線形論では Ooyama (20) でも示されているように、海面からの潜熱や顕熱の供給なしには台風の発達は説明できない。というのは、対流活動域では水蒸気を多量に消耗し外からの補給がなければ対流活動を維持することはできないが、この場合、海面からの供給による相当温位の僅かな増加が、上昇する空気塊の温度や水蒸気量、したがって雲の温度を高め、対流活動の持

続に重要である。Emanuel の議論の意義は、台風の発生、発達過程における大気成層状態が、従来考えられてきたような大きな条件付不安定ではなく、むしろ中立に近いことを強調していることにある。この両者の差は定量的には重要であるが、不安定論という見地からは通常の CISK 論と対立する概念ではないと考えられる。すなわち、海面からの熱の供給のつくり出す条件付不安定を対流活動が常に抑えるように起こって、どの程度中立に近い状態を維持しているか、という点の違いにある。また、たとえば筆者の数値モデルにおける条件付不安定の分布をみると、不安定の領域、中立に近い領域、安定な領域が混在しているというのが最も普通に見られる状態である。いずれにしても、海面からの潜熱と顕熱の供給は必要不可欠であり、そのメカニズムを含む CISK の重要性に疑いはないであろう。また、ここでいう CISK とは、上で述べたような対流活動に伴うダウンドラフトや雨の蒸発の効果が重要な役割を果たす雲の組織化のメカニズムをも含むものである。

4. 台風の移動に関して

台風が第 1 近似として台風を取りまく周囲の大規模な風によって流されることは古くから知られ、台風の移動の数値予報も基本的にはこのメカニズムを表現したモデルによってなされている。移動の予報や予報の改善のための研究においては、大規模な風の変化のメカニズムを理解し、それを適切に表現できるようなモデルを開発することが重要であろう。この点で移動の問題は発生の問題と同様に、台風の固有の性質を理解することが中心となる発達や構造の問題とは異なった側面をもっている。台風の数値予報はこの十年の間に目ざましい進歩をしているが、これは主に大規模運動の力学や種々の物理過程の理解とそれによる数値モデルの精度向上に負っている。台風の移動を 3~5 日位先まである程度の精度で予測できるようになるのはそれほど先のことではないと思われるが、このような方向の研究は予報の問題から離れてみても、気象学的に興味ある問題であろう。上で述べたように、移動の問題は台風というより大規模運動の理解の問題の方が大きい。台風を流す大規模場をよくシミュレートできるモデルの開発が望まれる。

台風の移動は第 1 近似としては、大規模場の流れによるとしても、より精度を高める議論では、台風それ自身の構造や強さも重要な要因となってくる。当然の

ことながら、台風と大規模場との相互作用を含む。この方面の研究はとくに 1980 年代に入ってからさかんに行われるようになった。古くから研究はなされているが、我々の理解が急速に進んだのは近年のことである。しかし、どちらかという順圧渦の移動のメカニズムに重点がおかれ、大規模な流れのシアーや対流活動が移動に及ぼす効果などに関する研究は少ない。後者に関連して、対流のパラメタリゼーションの違いによる移動予測へのインパクトについての理解もむしろこれからであり、多くの興味ある問題が残されている。

移動についてのこれまでの研究の概要を知るには、上にあげた 3, 12, 14 のほかに、最近の論文では、GFDL における研究として Kurihara ほか (21) や Bender ほか (22)、FSU における研究として Krishnamurti ほか (23) がある。Naval Postgraduate School を中心とした特別実験 TCM-90 に関連した基礎的研究は Elsberry ほか (24) をもとに文献にあたることができる。また、Yamasaki (25) もある。我が国における移動の数値予報に関しては上野 (26) や岩崎・上野 (27) をみていただきたい。今年 1 月に気象庁で熱帯低気圧の数値予報に関する国際会議が開かれた。熱帯低気圧に関する国内で開催されたものとしては、参加者や規模などの点でこれまでになかったような意義の大きいものであった。そのときの Proceeding (28) は、熱帯低気圧の研究の現状を知り、またこれから研究を進めていく上でも貴重なものであろう。

5. おわりに

台風の研究や台風の予測において、数値モデルは今後も重要な役割を果たすであろう。一方、台風に関する観測データを用いた研究が古くから行われ非常に多くの論文や報告があるが、それらの成果を適切に数値モデルによる研究に活かしていくことが大切であろう。近年はデータ解析面の研究が少なくなっているように思われるが、とくに、台風のメソスケールの構造と、台風の発生過程における雲の組織化の問題、台風を発生させる条件（たとえば季節内変動のような大きなスケールを含む）などについて、データ解析と数値モデルの両面から取り組んでいく必要がある。

コンピュータの性能の向上もあって、最近では全球モデルによる台風の発生の研究も行えるようになった。従来のような統計的方法によって台風の年間発生数の動向を予測することから、将来は数値モデルによってある程度これが可能になるはずである。そのた

めには、大気の大規模な運動だけでなく、台風の発生のメカニズムを適切に取り入れたモデルの開発が望まれる。

台風に関する研究のためには、上で述べたモデルのほかに、3つのタイプのモデルを考えることができよう。格子間隔の小さい方からいえば、一つは、個々の対流雲（積雲対流）を表現できるような小さな水平格子間隔1~2 kmの非静力学モデルで、雲の組織化のメカニズムやより大きなスケールの運動との相互作用を理解し、あとの2つのモデルにおける対流のパラメタリゼーションの改善に資することを目的とする。将来はこの種のモデル自体が台風内のメソスケールの運動に伴う雨や風の予測に役立つ筈のものである。二つ目は、格子間隔5~20 kmのモデルで、個々の対流雲が組織化することによってできる「メソスケール対流」（レインバンドなどの構成要素であるエコーセル）を陽に扱うことができるモデルである。この場合、積雲対流スケールの運動はパラメター化して扱う。三つ目は、格子間隔30~100 kmのモデルで、上で述べた「メソスケール対流」はパラメター化し、メソスケール対流の集団（レインバンドや大きな雲の塊）を陽に扱うことのできるモデルである。（これらの格子間隔の大きさは十分とはいえないが、当面は定性的な理解を目的とし、コンピュータの性能の向上と共に改善していくべきものである。）

台風は温帯低気圧などと比べると、メソスケールに組織化した雲群がはるかに重要な役割を果たすようなシステムであり、したがって、メソスケールの運動をできるだけ陽に取り扱うことが望まれる。台風の発生過程においては特にそうであるし、台風の移動を扱う場合でも、台風域内での雲群の重要性はいうまでもないが、台風域外での雲群（たとえば太平洋高気圧の縁辺での雲群や、梅雨前線、秋雨前線に伴う雲群）の振舞いが大規模な流れの場を変えることを通して移動に影響を与えるので、メソスケールの雲の取り扱いも重要である。

台風の理解はますますそれ以外の大気現象の理解を必要としている。一方、台風以外の現象の予測にとっても台風の取り扱いは重要である。また、台風に伴う雲と他の現象に伴う雲とは理解を共有する部分が多い。いろいろな分野の研究者が協力しながら研究を進めていくことが大切である。1 km格子の非静力学モデルによる研究はその代表的なものの一つであろう。

参考文献

- 1) 柳井迪雄, 1970: 気象学への手引き, 熱帯気象学への招待, 天気, **17**, 441-444.
- 2) 山岬正紀, 新田 勅, 1978: 続・気象学への手引き, 熱帯気象学, 天気, **25**, 595-603.
- 3) 山岬正紀, 井沢竜夫, 門脇俊一郎, 野本真一, 岡村存, 奥田穰, 1976: 台風特集, 気象研究ノート, **129**号, 日本気象学会, 267pp.
- 4) 小倉義光, 1984: 一般気象学, 東京大学出版会, 314pp.
- 5) 浅井富雄, 武田喬男, 木村竜治, 1981: 雲や降水を伴う大気, 大気科学講座2, 東京大学出版会, 249pp.
- 6) 山岬正紀, 北出武夫, 上坂慶正, 山下洋, 平塚和夫, 奥田穰, 立平良三, 保科正男, 1980: 台風特集, 新しい気象学, 夏季大学教室, 日本気象学会, 52pp.
- 7) 竹永一雄, 門脇俊一郎, 山岬正紀, 杉浦茂, 奥田穰, 藤原美幸, 1973: 台風特集, 新しい気象学, 夏季大学教室, 日本気象学会, 59pp.
- 8) 小倉義光, 1968: 大気の科学, NHK ブックス, 日本放送出版協会, 221pp.
- 9) 大西晴夫, 1992: 台風の科学, NHK ブックス, 日本放送出版協会, 190pp.
- 10) 山岬正紀, 1982: 台風, 気象学のプロムナード10, 東京堂出版, 206pp.
- 11) 浅井富雄ほか, 1980: 熱帯低気圧, 海洋科学128.
- 12) Anthes, R., 1982: Tropical cyclones, Meteor. Monogr. Vol. **19**, No. 41, Amer. Meteor. Soc. 208pp.
- 13) Kurihara, Y., 1985: Numerical modeling of tropical cyclones, Adv. Geophys., **28B**, 255-281.
- 14) Elsberry, R. L., W. M. Frank, G. J. Holland, J. D. Jarell, and R. L. Southern, 1987: A Global View of Tropical Cyclones, Office of Naval Research, 185pp.
- 15) 増田善信, 笠原彰, 1956: 台風論, 気象学講座11, 地人書館, 138pp.
- 16) 時岡達志, 山岬正紀, 佐藤信夫, 1993: 気象の数値シミュレーション, 気象の教室5, 東京大学出版会, 247pp.
- 17) Yamasaki, M., 1983: A further study of the tropical cyclone without parameterizing the effects of cumulus convection, Papers Meteor. Geophys., **34**, 221-260.
- 18) Yamasaki, M., 1989: Numerical experiment of tropical cyclone formation in the intertropical convergence zone, J. Meteor. Soc. Japan, **67**, 529-540.
- 19) Emanuel, K. A., 1986: An air-sea interaction theory for tropical cyclones. Part I: steady state

- maintenance, *J. Atmos. Sci.*, **43**, 585-604.
- 20) Ooyama, K., 1969 : Numerical simulation of the life cycle of tropical cyclones, *J. Atmos. Sci.*, **26**, 3-40.
- 21) Kurihara, Y., M. A. Bender, and R. J. Ross, 1993 : An initialization scheme of hurricane models by vortex specification, *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 2030-2045.
- 22) Bender, M. A., R. J. Ross, R. E. Tuleya, and Y. Kurihara, 1993 : Improvements in tropical cyclone track and intensity forecasts using the GFDL initialization system, *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 2046-2061.
- 23) Krishnamurti, T. N., D. K. Oosterhof, and N. Dignon, 1989 : Hurricane prediction with a high resolution global model, *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 631-669.
- 24) Elsberry, R. L., and R. F. Abbey, Jr., 1991 : Recent advances in understanding tropical cyclone motion, Tech. Report NPS MR-91-003, Naval Postgraduate School, Monterey, 92pp.
- 25) Yamasaki, M., 1992 : A study of tropical cyclone motion with a nested-grid model including rain-water prediction, *Papers Meteor. Geophys.*, **43**, 61-77.
- 26) 上野充, 1988 : 台風モデルの検証, 数値予報解説資料 (21), 気象庁予報部, 77-90.
- 27) 岩崎俊樹, 上野充, 1991 : 台風予報. 数値予報解説資料 (24), 気象庁予報部, 1-9.
- 28) 気象庁ほか, 1994 : Proceedings of International Meeting on Numerical Prediction of Tropical Cyclones, 265pp.
-