

台風予報と数値モデル*

—1994年度日本気象学会藤原賞受賞記念講演—

栗原 宜夫**

1. はじめに

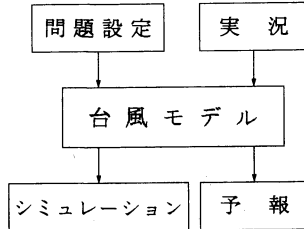
この度は、おもいがけなく藤原賞をいただき、たいへん光栄に思っております。受賞の対象となりました研究は、今まで私と一緒に仕事を進めてきました同僚達の協力に負うところが少なくありません。また、この研究を行うに当たっては、たくさんの方々から貴重な助言や心温まる励ましを戴いて来ました。ここに、厚くお礼を申し上げます。なお、私がこの仕事を続けていく上で、家族の支援も欠かすことができなかつたと思っております。

今日は、「台風予報と数値モデル」という題のもとに、台風の進路予報ということに話題をしばり、私がGFDLにおいて進めて参りました台風モデリングをふりかえってみたいと思います。

2. 数値シミュレーション

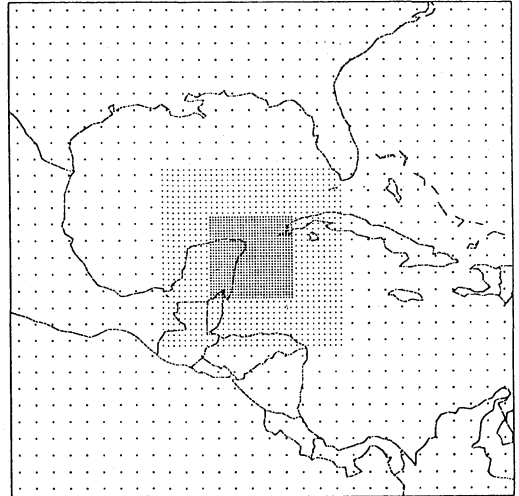
一般に、数値モデルには、2種類の使い方があります。すなわち、数値シミュレーションと数値予報です(第1図)。

シミュレーションでは、問題を設定し、それを数値モデルにかけて答えを出します。それでは、ひとつ問題を設定してみましょう。いま、広い平面上に台風規模の円い渦があって風向風速が一定の基本流に乗っているとします。すると、この場合、渦は形を変えずに基本流で流されて行きます。この答えを格子(グリッド)モデルで数値シミュレーションする(3日間位にわたり適当な誤差の範囲での話ですが)には、グリッドの間隔が10 kmとか20 km程度でなければなりません。これが、台風モデルに望まれる条件の一つです。ところで、このような細かいグリッドで広い領域を全部覆うということは、計算機経済の点で難しいので、



第1図 台風モデルの利用。

GFDL MMM MODEL



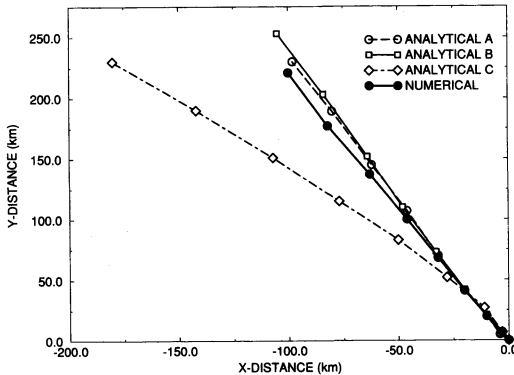
第2図 多重移動格子系。この図のものは、格子点間隔が1度、1/3度、1/6度の三重構造になっている。

多重移動格子系とよばれるものが利用されています(Kurihara and Bender, 1980)。例えば、台風中心に近付くにつれて、格子間隔は1度、1/3度、1/6度と細かくなります(第2図)。以前、大河内さんがこのような格子系を使って台風モデルを作られました(Ookochi, 1972)。

以上のように、数値シミュレーションの役割の一つは、答えの分かっている問題を利用して、数値モデル

* Typhoon Prediction and a Numerical Model.

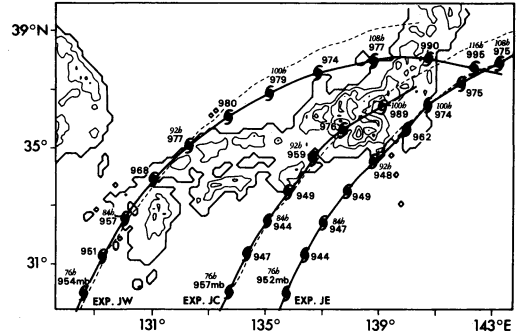
** Yoshio Kurihara, 米国海洋大気庁地球流体力学研究所。



第3図 ベータ効果による渦の移動。三つの解析的あるいは準解析的方法で計算した渦の中心の48時間経路(細い実線, 破線, 破点線の三本の線)と, 数値モデルで求めた48時間経路(黒丸をつなぐ太い実線)を示す。

の検証とか開発とかをすることだといえます。多重移動格子系の開発はこの良い例です。

シミュレーションの第二の役割は、正確な答えが分からない問題の近似解を求めることです。ここで、ふたたび台風規模の円い渦を考え、それをコリオリパラメータの緯度変化をなぞらえたベータ面の上に置いてみましょう。今回は、渦を運ぶ基本流は無いことにし、絶対渦度が保存されるという条件のもとで渦の振り舞いを調べます。そうしますと、ベータ効果によって円い渦の中に双極(ダイポール)渦が誘起され、渦が動き出すことが分かります。この問題は、いろいろなやり方で、解析的に(あるいは準解析的に)取り扱われています(Smith and Ulrich, 1990; Ross and Kurihara, 1992)。一方、この同じ問題を高い解像力を持った数値モデルで扱うことも行われています(Smith *et al.*, 1990)。いずれの場合も得られる答えは近似解です。それは、この問題が非線形であるためです。そこで、いろいろな方法で求められた答えを比べてみて、問題を解析的に取り扱う為に導入した仮定や近似の妥当性をチェックしたり、数値計算の精度を検査することが出来ます。第3図に、三つの異なった解析的方法で求めたある渦の移動(48時間後まで)を示してあります。また、数値モデルで計算した48時間の経路も描き入れてあります。この例では、一つの解析解が他のやり方で得られた解から外れています。詳しく調べたところ、この解析解の場合は近似の仕方に問題があったことが判明しました(Smith and Weber, 1993)。このような比較をして選んだ一つの方法が、GFDLの台



第4図 台風進路に及ぼす山の効果。台風が、西日本、中部日本、東日本にそれぞれ上陸するように設定して、数値実験を行った。台風進路(実線)の上に4時間毎の位置と中心気圧(hPa)を書き添えてある。破線は、山を取り除いた場合の経路。

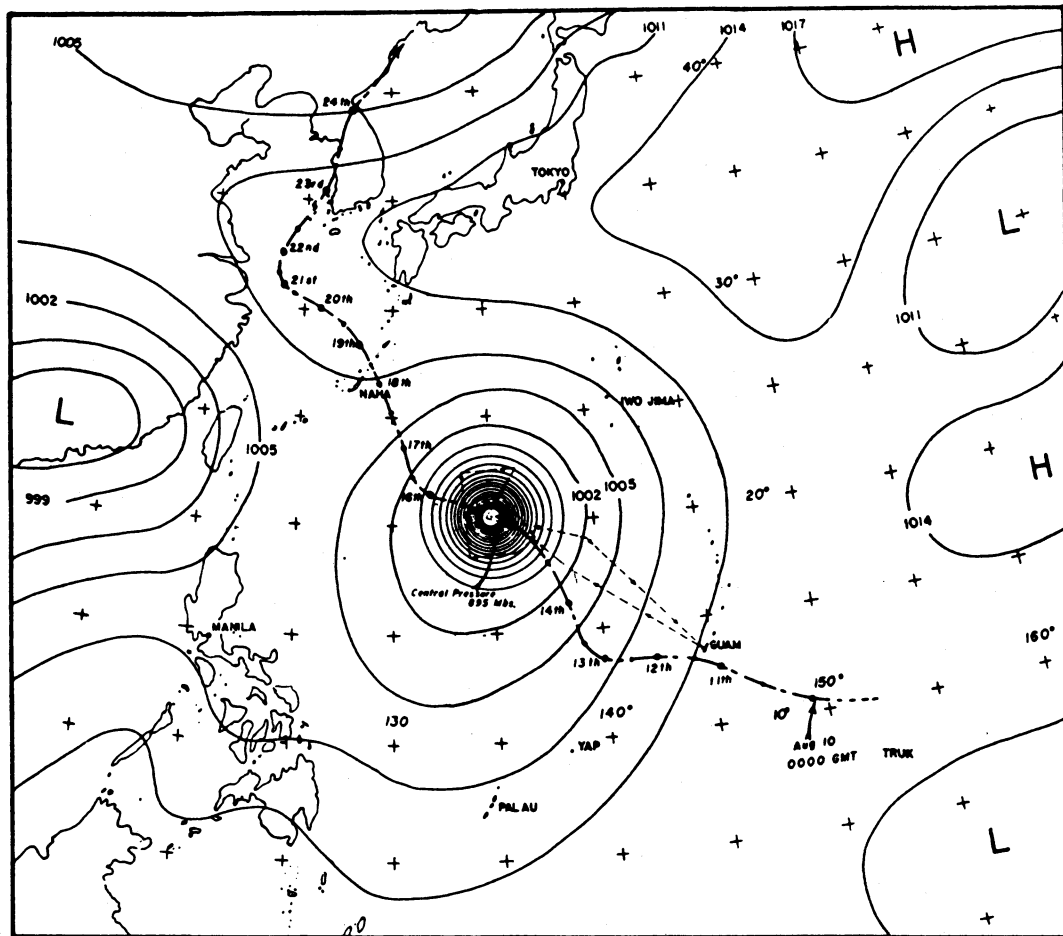
風モデルで双極渦の初期状態を決めるのに使われています。

シミュレーションの利用の三つ目は、それを通じて現象の診断をするということです。これには、数値モデルの能力の限界とか結果の有効性の問題などがからんできますが、まさにモデル作りの魅力と言えます。例えば、日本列島が台風の進路にどのような影響を与えるかを調べる事が出来ます(Bender and Kurihara, 1986)。第4図に、台風がある経路で日本の西部、中部および東部に接近したとき、山岳が有るか無いかでそれぞれの進路がどう違うかを示しました。これは理想化した実験の結果ですが、日本列島の高い山々が台風の動きに与える影響を示唆しています。台風モデルには、なるべく実際に近い地形を入れてやるのが望ましいです。

このようにして、GFDLの台風モデルは次第に形を整え、いろいろな数値実験が行われました(例えば Kurihara and Bender, 1982; Tuleya *et al.*, 1984)。

3. 台風モデルの初期条件

ここで、話を、第1図の右の路線、すなわち台風モデルの予報への利用に移しましょう。一般に、数値シミュレーションが出来たからと言って、必ずしも予報が出来るわけではありません。台風モデルは、この二つがうまく結び付いたケースです。台風モデルを予報に使う場合には、大気の実況をどのようにしてモデルに取り入れるかという課題を解決しなければなりません。大気の実況は、天気図で近似的に表されます。第

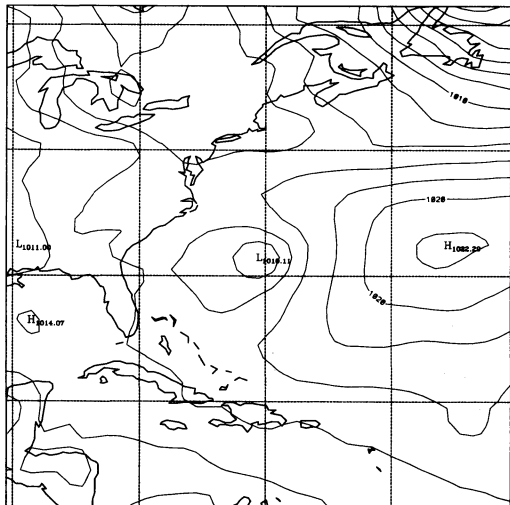


第5図 台風マージを表す手描きの地上天気図(1951年8月15日06 UTC)。台風の経路(太破線)と台風観測機の飛行経路(細破線)が描き加えられている。

5図は、1951年8月15日、強い台風マージが太平洋上にあった時の地上気圧分布図です(Simpson, 1952)。この手描きの天気図には、中心気圧 895 mb と記されていて、同心円状の等圧線が細かく描かれています。次に示します天気図(第6図)は、1993年8月30日、西大西洋にハリケーン・エミリーがいた時の地上気圧分布図で、米国の NMC の全球数値解析で得られたものです。以前は、天気図は、予報官が気象状態の時間的連続性を考慮しながら実測値に即して描いていました。それが、昨今では、数値予報の進歩と統計的手法の利用によって観測データの四次元同化システムが定式化し、気象解析はそれによって行われるようになりました。そのために、モデルの優劣が解析の精度に影響を与えます。それはともかく、全球解析の天気図に

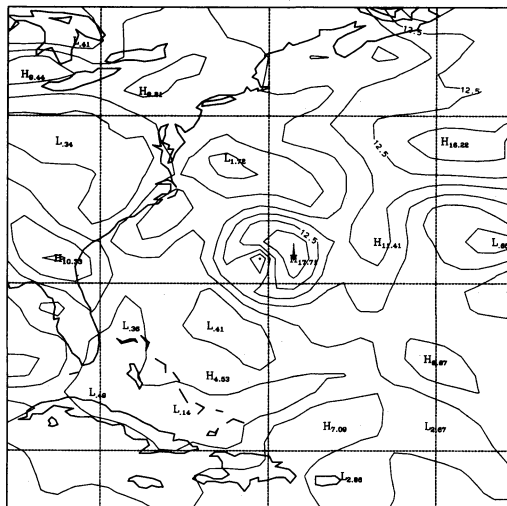
みられる台風は、全球モデルの解像度の制約の為に実際よりも弱くまた大きくなりがちです。第6図では、ハリケーン・エミリーの中心気圧は 1010 hPa となっていて、実際の値 976 hPa よりもかなり浅くなっています。また第7図に 850 hPa 面上の風速分布を示してありますが、この図では 17.5 m/s 以上の強風域は局所的にしか存在していません。

ところで、台風モデルは全球モデルに比べてグリッド間隔が小さいですから、予報を始める時刻の台風を全球モデルによるよりもよく表せる筈です。そのようにする作業が台風モデルの初期値化であります。GFDL の台風モデルでは、はじめに全球解析の結果を台風モデルによびこみます。そして、台風領域の初期値化は、[全球解析] から [全球解析の台風] を抜き去



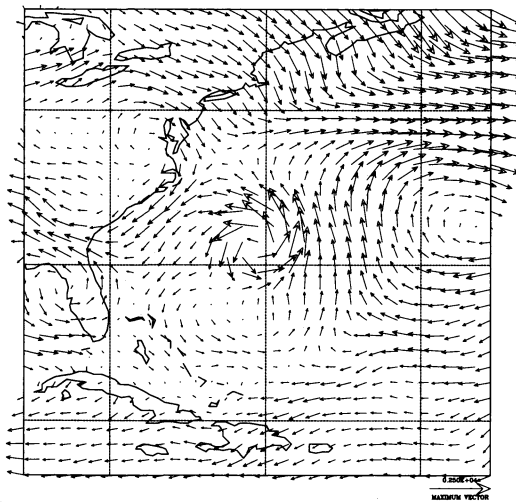
CONTOUR FROM 998 TO 1022 BY 2

第 6 図 ハリケーン・エミリーを表す全球モデル地上解析 (1993 年 8 月 30 日 00 UTC).



CONTOUR FROM 2.5 TO 17.5 BY 2.5

第 7 図 全球モデルで解析されたシグマ・レベル 0.85 (ほぼ 850 hPa 面にあたる) 上の風速分布 (1993 年 8 月 30 日 00 UTC). ハリケーン・エミリーの最大風速が 17.7 m/s と表されている.



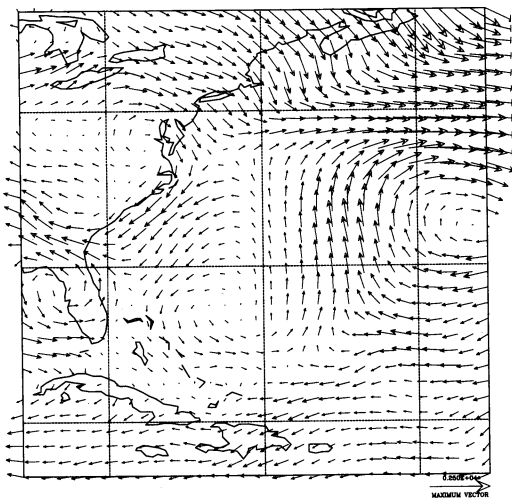
第 8 図 全球モデルで解析されたシグマ・レベル 0.85 (ほぼ 850 hPa 面にあたる) における風ベクトルの分布 (1993 年 8 月 30 日 00 UTC). 図の中央付近にハリケーン・エミリーがある.

り、そこに [台風モデルの台風] を重ね込むという方式で行うことにしました (Kurihara et al., 1993 ; Bender et al., 1993 ; Kurihara et al., 投稿中).

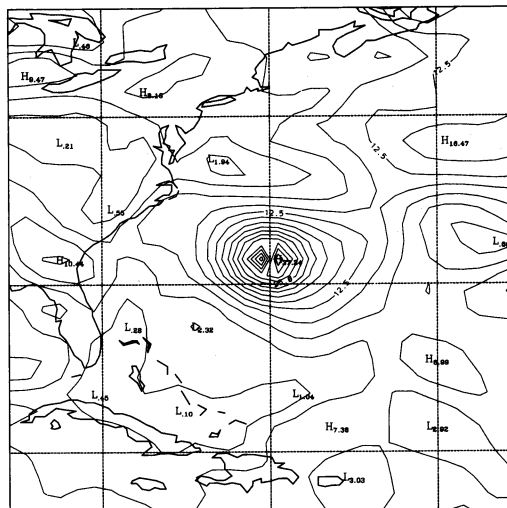
台風を抜き去る段階では、そのことによって台風を囲む大気の状態が影響を受けないように、そして台風

を抜いた後に残る台風領域内の状態が周辺の場合へ滑らかに接続するように気を付けます. GFDL の方式では、全球モデルで解析された風を検査して台風の領域を決定し、最適内挿法を利用することによって、台風を抜いた一般場を求めています. ハリケーン・エミリーの場合、全球解析で得られた 850 hPa 面の風の分布を第 8 図に、また同図から台風を抜き去った場を第 9 図に示します.

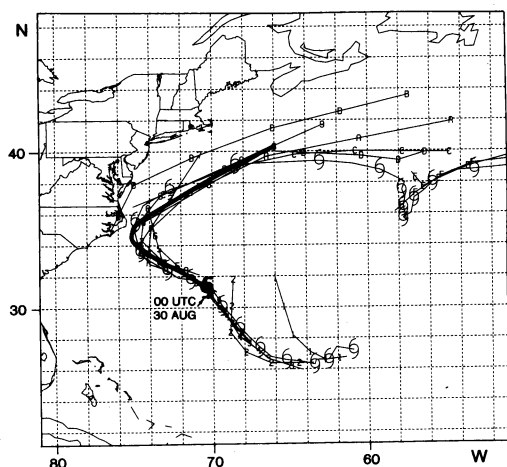
次は、台風モデルに入れる台風をつくる作業ですが、一番大切なことは、台風モデルになじんだ渦をつくることです. そうしないと、モデルの時間積分をはじめた時に、渦の強さや構造が急に変わって、それが原因で台風の進路予報に誤差を生むことがあるのです. GFDL では、3次元台風モデルを軸対称化したものを時間積分して、台風モデルになじんだ円い渦をつくっています. その際、モデルの時間積分を続けながら、観測あるいは推定にもとづいてあらかじめ定めた風 (回転成分) の分布が得られるように、モデルの風をうまく誘導してやると、モデルになじみかつ実際のものに似た円い渦が出来ます. また、渦の非対称成分 (先に述べたベータ効果による双極渦) は、この円い渦を用いて計算しています. このようにして出来上がった台風を観測された位置に置き、一般場に重ね合わせた



第9図 第8図から全球モデルのハリケーン・エミリーを抜き去った後の風ベクトルの分布。



第10図 第9図に数値モデルで作ったハリケーン・エミリーを重ね合わせた後の風速分布図。ハリケーンの最大風速は37.24 m/sとなっている。



第11図 ハリケーン・エミリーの実際の経路 (1993年8月26日12 UTCより12時間毎の位置を台風シンボルで示して)と、予報された経路 (12時間毎に72時間予報を行った)の合成図。特に8月30日00 UTCからの予報を太線で示した。

ものが台風モデルの風の初期条件です。ハリケーン・エミリーの場合、台風モデルの850 hPa面の上の風速分布は第10図のようになり、第7図の全球解析の分布と比べると、風速17.5 m/s以上の強風域が広がり、ハリケーンを中心付近には風速35 m/s以上の暴風域が現れました。

4. 台風予報

モデルの初期条件が整うと、境界条件を適当に与えながら台風モデルの時間積分が進められます。この一連の作業、すなわち、全球解析の資料や台風情報の取り寄せに始まって、モデルへの数値の取り込み、台風モデルの初期値化、モデルの時間積分、そして予報結果の送り出しまでの全過程を一貫して自動化し、GFDL 台風予報システムが出来上がりました。人間が関与するところは唯一つ、どの台風を予報するのか、台風の名前と予報時刻を計算機に指示するのみです。

ここで上に述べたシステムを使ってハリケーン・エミリーの72時間予報をした例を第11図に合成して示します。このハリケーンは、アメリカの東海岸に向かって進みましたが、上陸直前に急に転向して陸地から遠ざかりました。GFDLのシステムは、このことを転向の二日前から予測していましたが、実際のハリケーンが予報の通りに動いた時には胸をなでおろしました。

以上述べましたのは数値モデルによる台風予報の一つの成功例であります。しかし、たくさんのケースの中には満足出来なかったものもあります。今から60年程前に、藤原博士が予報官の心がけとして挙げられた項目の中に、予報が当たらなかった場合にはその原因を探求することというのがあります。まさにその通りで、そうすることによって台風モデルの一層の改良、

予報精度の向上を図るよう目指しております。また、藤原博士は、「必ず空模様を見ること。空と親しんでいなければ良い予報は出せない」とも言われました。これは、数値モデルが発達した昨今でも通用することだろうと思っております。

参 考 文 献

- Bender, M. A., and Y. Kurihara, 1986 : A numerical study of the effect of the mountainous terrain of Japan on tropical cyclones, Short- and Medium-Range Numerical Weather Prediction, (Matsuno, ed.), Met. Soc. Japan, 651-663.
- 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.
- Kurihara, Y., and M. A. Bender, 1980 : Use of a movable nested mesh model for tracking a small vortex, *Mon. Wea. Rev.* **108**, 1792-1809.
- Kurihara, Y., and M. A. Bender, 1982 : Structure and analysis of the eye of a numerically simulated tropical cyclone, *J. Met. Soc. Japan*, **60**, 381-395.
- 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.
- Kurihara, Y., M. A. Bender, R. E. Tuleya, and R. J. Ross : Improvements in the GFDL hurricane prediction system (Submitted).
- Ookochi, Y., 1972 : A computational scheme for the nesting fine mesh in the primitive equation model, *J. Met. Soc. Japan*, **50**, 37-47.
- Ross, R. J., and Y. Kurihara, 1992 : A simplified scheme to simulate asymmetries due to the beta effect in barotropic vortices, *J. Atmos. Sci.*, **49**, 1620-1628.
- Simpson, R. H., 1952 : Exploring eye of Typhoon "Merge" 1951, *Bull. Amer. Met. Soc.*, **33**, 286-298.
- Smith, R. K., and W. Ulrich, 1990 : An analytic theory of tropical-cyclone motion using a barotropic model, *J. Atmos. Sci.*, **47**, 1973-1986.
- Smith, R. K., and H. C. Weber, 1993 : An extended analytic theory of tropical-cyclone motion in a barotropic shear flow, *Q. J. Roy. Met. Soc.*, **119**, 1149-1166.
- Smith, R. K., W. Ulrich, and G. Dietachmayer, 1990 : A numerical study of tropical-cyclone motion using a barotropic model. I : The role of vortex asymmetries, *Q. J. Roy. Met. Soc.*, **116**, 337-362.
- Tuleya, R. E., M. A. Bender, and Y. Kurihara, 1984 : A simulation study of the landfall of tropical cyclones using a movable nested-mesh model, *Mon. Wea. Rev.*, **112**, 124-136.