

研究会報告

1071:413:1052:4011:401 (雲解像台風モデル；
気象レーダー (屈折指数)；台風再現実験；雷ナウキャスト；
メソ数値予報モデル；降水量ガイダンス)

第7回天気予報研究会の報告

第7回天気予報研究会は、2010年2月5日(金)13時30分から17時30分まで、気象庁講堂で開催され、約90人が参加した。白木委員による開会の挨拶の後、特別講演および5題の講演があった。以下に講演要旨を記述する。(天気予報研究連絡会)

天気予報研究連絡会(所属は当時のもの)：

白木正規、高野 功(気象庁予報部)、登内道彦((財)気象業務支援センター)、富沢 勝((財)日本気象協会)、古川武彦(委員長、気象コンパス)、水野 量(気象庁観測部)、吉野勝美(全日本空輸株式会社)

【特別講演】

雲解像モデルを用いた High-impact weather systems の量的予測

一特に台風とそれに伴う豪雨について一

坪木和久(名古屋大学地球水循環研究センター)

本研究会は天気予報の研究会であるので、ここでは天気予報に関係する話題として、雲解像モデルを用いたシミュレーションについて報告をした。題名にある high-impact weather systems というのは、まだ、対応する適切な日本語がない。豪雨・豪雪や突風・暴風など人間社会に大きな影響を与える気象を指すもので、顕著現象や極端現象の一部もそれに含まれる。このような気象系(weather systems)には様々なものがあるが、そのなかでもここでは台風とそれに伴う豪雨に話題をしぼった。

1990年代後半ごろから、急速に並列計算機が普及した。それに伴い気象モデルも並列計算を行えるものが開発された。特に2002年に稼働を始めた地球シミュレータの登場は、並列計算による気象シミュレーションを飛躍的に進歩させた。この計算機の高速度化と大規

模化により、静力学近似のモデルが、非静力学になり、雲を解像しつつ実際の降水システムのシミュレーションが可能となってきた。水平スケールと鉛直スケールの比が1に近くなれば、静力学近似が成り立たなくなり、非静力学モデルが必要となる。「雲解像」の指す意味はあいまいで、どの解像度になれば雲を解像するといえるのかは明確ではないが、雲解像モデルは少なくとも非静力学モデルである。そのなかでも特に積乱雲一つ一つを解像するモデルをここでは雲解像モデルと呼ぶことにする。非静力学モデルの近年の状況については、Saito *et al.* (2007) に詳細なまとめがある。また、雲解像モデルの基本的原理については、坪木(2010)に解説がある。

名古屋大学地球水循環研究センターでは、旧大気水圏科学研究所の時代、1998年から並列計算機に最適化された雲解像モデル CReSS (Cloud Resolving Storm Simulator) の開発を行ってきている(Tsuboki and Sakakibara 2001, 2002)。2003年から地球シミュレータでそれに最適化した CReSS を実行できるようになり、現在、21世紀気候変動予測革新プログラムで開発が進められている。開発当初は積乱雲とその集団程度のスケールを対象としてシミュレーションを行ってきたが、地球シミュレータでは台風をシミュレーションできるようになり、台風は雲解像モデルの主要な対象となった。特に日本に上陸し暴風や豪雨災害をもたらした実際の台風の量的シミュレーションや、地球温暖化に伴う台風の量的変化などが現在の主要な課題となっている。

雲解像モデルが台風のもたらす豪雨を量的に予測できるかどうかを示すため、2004年10月20日に日本に上陸した台風23号(以下 T0423)を対象とし、特に近畿地方の豪雨に着目してシミュレーションを行った(坪木・榊原 2006)。このシミュレーションでは、台風を構成する積乱雲を解像しつつ、台風全体をシミュレーションできるように次のような設定をした。水平

格子間隔は1 km, 格子数は, x 方向に1539, y 方向に1411とした. 鉛直の格子間隔は最下層を200 mとし, 高度とともに間隔を大きくした. その平均格子間隔は約300 mで, 鉛直格子数は63である.

T0423は九州・四国から近畿・中部地方にかけての広域に多くの降水をもたらしたことで特徴づけられる. この台風による豪雨では, 死者・行方不明者は100人近くに達した. この数は2004年の10個の台風による死者・行方不明者の総数の40%にもおよび, 台風による豪雨がいかに大きな災害をもたらすかということを示している.

シミュレーションにおける T0423の移動は, 観測されたものとよく一致し, 奄美大島の南南西から九州, 四国の太平洋沖を北東進し, 四国の室戸岬付近を東北東に中心が通過している. 20日04UTCの台風が四国の南に達したとき, 近畿地方と紀伊半島東部で豪雨が始まった. シミュレーションでは台風の東側で北向き水蒸気フラックスが大きく, それが日本の地形に到達して太平洋側では豪雨が発生している. その豪雨域は台風の移動とともに九州から四国に移動した. シミュレーションされた顕著な降水域は, 九州東岸, 四国, 紀伊半島と近畿地方北部に見られる. これらの領域では, 総降水量が250 mmを越えており, 四国の南側では500 mmに達した. 四国の太平洋側や紀伊半島では山地の効果により降水が強化された. 近畿地方北部では兵庫県から京都府にかけて降水の多い地域が見られる. これが近畿地方北部の洪水をもたらした降水に対応しており, このシミュレーションは実際の降水分布をよく再現した.

台風の予測で重要な点は, 台風内での降水分布が正確に予測されることである. T0423の事例のように中緯度に近づいた台風は, 低緯度にあるときのような対称性のある降水分布から大きくずれて, 降水域が台風に対して非対称に偏って分布する. 台風の降水はその中に形成されるレインバンドに集中するが, 本事例のシミュレーションでは, 台風中心の北東側から東側に観測されたレインバンドが概ねよく再現されており, それによって降水の精度よい予測が得られている. 静力学モデルでは鉛直流は直接計算されるのではなく, 水平風の収束の結果として計算される. さらに雨は格子点スケールの凝結または対流のパラメタリゼーションにより, 水蒸気の飽和剰余として診断的に計算される. 一方, ここで用いた CReSS のような雲解像モデルでは, 雨が時間発展方程式により予報される. 特に

氷の過程が正確に計算されることで, あられや雪による水の集積などが直接計算されるので, 精度のよい量的な予測が可能となる. これが雲解像モデルを用いる大きな利点の一つである.

次に計算領域の設定方法について, 新しい方法を開発したのでその概要について述べる. 多くの領域モデルは矩形領域を計算領域としている. 一般に領域モデルでは, 矩形領域を1次元または2次元分割することで並列計算が実行される. 一方で計算の対象にあわせた領域は矩形でないことが多い. 効率よい計算を行うためには, 任意形状の計算領域を用いるほうがよいことが多い. ここで開発した方法は「タイリング領域法」と呼ばれ, 並列計算を2重化する(重並列化)ことで計算が行われる. この方法により, 雲解像モデルを用いたシミュレーションを任意形状の領域で実行できるようにした. この方法を用いることで, たとえば台風の経路に沿うような矩形でない領域の並列計算が可能となる.

計算の例として2004年の台風16号と18号の実験を示す. これらの2つの台風のシミュレーションの設定は以下の通りである. 計算領域は, 東西5120 km, 南北4480 kmで, 水平解像度4000 mである. 重並列化を用いた「タイリング領域法」により, 対象とした2004年の2つの台風のベストトラックに沿って, 計算領域を設定した. 初期時刻を2004年8月25日0000UTCとし, 1209600秒(14日)の時間積分を行った. 初期値・境界値は気象庁全球客観解析から与えた.

第1図にシミュレーションの初期値を示す. 初期値は実線で囲まれた計算領域にのみ与えられ, 折れ線の実線が境界になる. 初期時刻には台風16号は137E, 20 N付近にすでに存在しているが, 18号はまだ発生していない. 台風17号が計算領域の西側境界から計算領域の外に出つつある.

計算の初期時刻2004年8月25日00UTCには, 台風16号はすでに太平洋上で発達していたが, 18号は発生前であった. 14日間の計算で, 2つの台風とも概ね気象庁ベストトラックに沿って移動し, 九州付近を通過し, 日本海を北東方向に進み温帯低気圧化した.

台風16号は鹿児島県に上陸し, 一方, 18号は長崎県に上陸した. それらの上陸地点の位置はほぼ観測と同じであった. またこれらの台風に伴う九州山地の降水が観測とよく対応している. これらのように初期値からの時間が非常に長いにもかかわらず, 日本付近における降水分布と強度がよく再現された. 水平解像度が

4 km であるので、台風に伴う降水強度や風速について量的によく再現されている点が特長である。

中心気圧は初期値・境界値を与える全球客観解析と異なり、両台風ともベストトラックの気圧に近づくように変化し、最低中心気圧は観測されたものとほぼ同じまで低下した。これは台風の強度が雲解像モデルの物理過程によって決まり、ベストトラックが示すように中心気圧の低い台風でもその強度を量的にシミュレーションできることを示している。タイリング領域法を用いて、台風16・18号のベストトラックに沿う領域を設定して実行した長期間シミュレーションで、両台風ともに台風の移動経路、中心気圧、降水強度分布などがよく再現された。

本稿では、雲解像モデルを用いた台風の高解像度シミュレーションについて、最近の成果を基にまとめた。台風のエネルギーは海面からの潜熱で、雲がエンジンとなってそのエネルギーを運動のエネルギーに変換している。そのため積乱雲一つ一つを計算しつつ、台風をシミュレーションすることは、台風の全体の構造を量的に示すために不可欠である。このような大規模な計算は近年のコンピュータの高速化・大規模化に

よって初めて達成できたことである。

ここで示したように我々は雲そのものを計算機でやることができるようになってきた。その応用として台風に伴う豪雨や暴風の量的予測は、十分現実的な領域に入ったと考えられる。近い将来、計算機がさらに高速化し、雲解像モデルへの入力データの精度が十分上がれば、台風の暴風雨や積乱雲に伴う様々な危険な気象を、量的により精度よく予測できることが可能になるであろう。我々はそれに向けて、雲解像モデルの高度化を推進していきたいと考えている。

謝 辞

タイリング領域法は、文部科学省の実施している21世紀気候変動予測革新プログラムの研究により開発されました。CReSSの開発には東京大学と名古屋大学の情報基盤センターのコンピュータを利用させていただきました。また、計算には海洋研究開発機構の地球シミュレータを用いました。

参 考 文 献

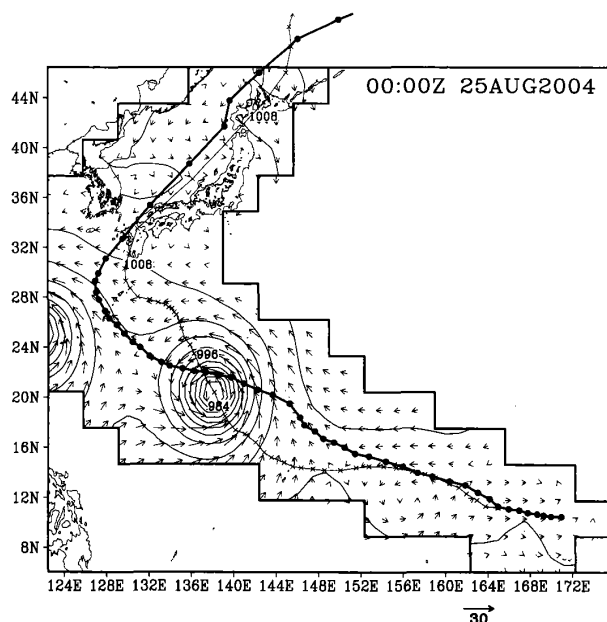
- Saito, K., J. Ishida, K. Aranami, T. Hara, T. Segawa, M. Narita and Y. Honda, 2007: Nonhydrostatic atmospheric models and operational development at JMA. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85B**, 271-304.
- 坪木和久, 2010: 気象のシミュレーション. 共立出版株式会社「計算科学講座10」超多自由度系の新しい科学, 金田行雄・笹井理生 [監修], 115-180.
- Tsuboki, K. and A. Sakakibara, 2001: CReSS User's Guide 2nd Edition.
- Tsuboki, K. and A. Sakakibara, 2002: Large-scale parallel computing of Cloud Resolving Storm Simulator. H. P. Zima *et al.* Eds., *High Performance Computing*, Springer, 243-259.
- 坪木和久, 榊原篤志, 2006: 雲解像モデルを用いた台風に伴う局地豪雨の量的予測実験—2004年10月20日の台風0423号に伴う近畿地方北部の豪雨を例として—. *自然災害科学*, **25**, 351-373.

【講演】

1. レーダー反射波の位相情報による屈折指数分布推定

瀬古 弘, 山内 洋, 鈴木 修,
斉藤和雄 (気象研究所)

ドップラーレーダーから発射された電波は、通過す



第1図 2004年台風16・18号のシミュレーションの初期値2004年8月25日00UTCの地上気圧分布(hPa)と地上風分布。細実線が台風16号の、太実線が18号の気象庁ベストトラック。CReSS Ver.3のタイリング領域法を用いた水平解像度4 kmのシミュレーション。実線の領域が計算領域。