

4. 雲解像モデルで見た台風の構造

坪木 和久*

1. はじめに

台風の大きさは、数百 km 程度から大きなものでは 1000 km 以上に及ぶ。このような大規模な渦を駆動するエネルギー源が、台風比べて非常に小さな雲、特に積乱雲であるということが、台風のシミュレーションにおいて大きな問題となる。すなわち台風という大規模なものをシミュレーションすることが目的であるが、そのためには本質的に重要な積乱雲という小規模なものを考慮しなければならない。それには大きく分けて 2 通りの方法がある。1 つは積乱雲そのものの構造は表現せずその効果だけを考慮する方法（対流のパラメタリゼーション）で、もう 1 つは積乱雲も台風も同時に陽に表現するという方法である。

Ooyama (1969) により台風規模の渦巻きが再現されてから、前者の方法を用いて熱帯低気圧に関する多くの研究が行われてきている。この方法では計算量を節約することができるが、積乱雲の効果を取り入れる方法に任意性があり、また台風を構成する雲そのものの構造や台風に伴う微細な現象を表現することはできない。

一方、後者の方法では台風もその内部の積乱雲も正確に表現することができるが、それには高速の演算装置と大規模なメモリーが必要になる。台風の降水や強風は眼の壁雲や降雨帯に集中しているため、台風に伴う豪雨や強風を精度よく再現するためには、雲を解像するモデルによるシミュレーションが不可欠である。Nasuno and Yamasaki (1997, 2001) は 2 次元軸対称モデルを用いて、降雨帯を実験的に調べている。Mashiko (2005) は非静力学モデルを 3 重に双方向ネスティングして、台風の眼の構造を 2 km の解像度でシ

ミュレーションし、その詳細な構造を調べた。これにより高解像度のシミュレーションで台風の眼の詳細な構造を調べられることが示された。

台風に伴う暴風は、中心付近以外にも発生することがある。その 1 つは台風に伴って発生する竜巻である。Saito (1992) は台風 8019 号に伴い 1980 年 10 月 13 日に宮崎市で発生した 5 つの竜巻について解析した。坪木ほか (2000) は、1999 年 9 月 24 日に東海地方で発生した竜巻が台風 9918 号の外域降雨帯内のスーパーセルによりもたらされたことを示した。また、Suzuki *et al.* (2000) は、台風 9019 号の通過時に関東平野で発生した竜巻をもたらした積乱雲について調べ、それらは背の低いスーパーセル型の積乱雲であることを示し、“ミニスーパーセル”と呼んだ。Niino *et al.* (1997) は国内で発生する竜巻の約 20% が台風に伴うことを示した。このように台風に伴って竜巻がしばしば発生するが、どのような雲がそれを発生させるかについては未解明な点が多い。

一方で、台風に伴う豪雨はしばしば災害をもたらすので、その量的予測は重要である。Peng and Chang (2002) は水平解像度が 9 km, 27 km, 81 km の 3 重ネスティングにより、台風 Herb による台湾の降水のシミュレーションを行い、複雑地形における高精度量の予測に高解像度の数値モデルが有効であることを示した。台風に伴う豪雨を量的に予測するためには、より高解像度のシミュレーションが不可欠である。しかしながら大規模な領域で個々の積乱雲を直接解像し、かつ台風全体をシミュレーションすることはこれまでほとんど行われていない。このような計算は地球シミュレータのような大規模並列計算機なしには行うことができなかったからである。

名古屋大学地球水循環研究センターでは、これまで雲と降水システムのモデリングを行うために、雲解像

* 名古屋大学地球水循環研究センター。

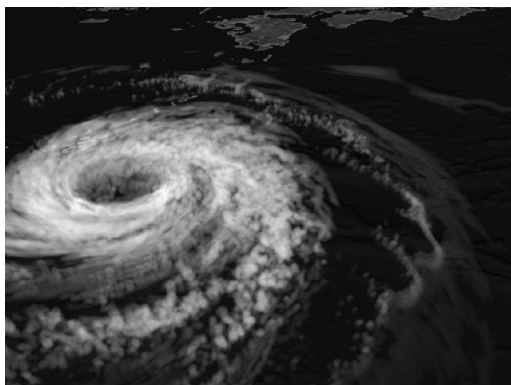
© 2008 日本気象学会

モデル Cloud Resolving Storm Simulator (CReSS) を開発してきた。このモデルは雲を解像し、かつ大規模な計算領域で、災害をもたらすような激しい気象現象のシミュレーションを行うことを目的に開発されたものである。シンポジウムでは、この雲解像モデルを用いて台風の高解像度実験を行った結果、台風の構造やそれに伴う暴風及び豪雨について何がみえるのか、また台風に伴う大雨がどの程度量的に精度よく予測されるのかということについて例を示しつつまとめた。

2. 雲解像モデルの概要

雲解像モデル CReSS は雲スケールからメソスケールの現象の高精度シミュレーションを行うことを目的として開発された、非静力学・圧縮系のモデルである。CReSS は大規模な並列計算機で効率よく実行できるように設計され、その並列計算により雲の詳細な時間発展のシミュレーションを行うことができる。CReSS についての詳細については、Tsuboki and Sakakibara (2001, 2002) を参照していただきたい。

台風のシミュレーションの例として、台風 T0418 のシミュレーション結果を第 1 図に示す。この計算は 2004 年 9 月 5 日 00 UTC の水平解像度 40 km の気象庁領域予報モデル (RSM) の出力値を初期値として、24 時間の計算を水平解像度 1 km で行った。モデルが雲そのものを計算するので、雲の立体表示はたいへんリアルなイメージとなっている。このように可視化する



第 1 図 水平格子解像度 1 km で行った台風 T0418 のシミュレーション実験の結果を、雲について POV-Ray (Persistence of Vision Ray Tracer) により立体的に可視化したもの。(東京工業大学学術国際情報センター青木尊之教授と佐藤静香さんのご厚意による。)

ると、あたかも実際の台風を衛星から眺めているかのように現実的な結果を雲解像モデルは計算する。

3. 豪雨をもたらした台風 0423 号

2004 年の台風 23 号 (T0423) は、九州から中部地方にかけて多くの降水をもたらしたことで特徴づけられる。T0423 に伴う豪雨は、台風の北東進とともに、九州の東側で始まり、四国南部、四国東部、そして紀伊半島東部および近畿地方へと移動した。特に近畿地方の日本海側では激しい豪雨となり、洪水を発生させた。この台風による豪雨では、死者・行方不明者が 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半分近くにもおよび、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。特に、豪雨による洪水で乗客がバスの屋根で救助を待つ様子の報道は、この台風による豪雨災害の甚大さを印象づけた。

T0423 は 2004 年 10 月 13 日に発生し、10 月 18 日に台湾の東で北東方向に進路を転向した後、沖縄から奄美大島、種子島に沿って北東に進み、10 月 20 日に四国に上陸した。上陸前までの中心海面気圧は 950 hPa 程度であったが、上陸後、急速に中心気圧が上昇した。これは台風の衰弱を表しており、急速に温帯低気圧に変化した。2004 年 10 月 20 日 03 UTC の気象庁の地上天気図では既に台風の北東側に前線があり、温帯低気圧の特徴を持ちつつあることがわかる。重要な点は温帯低気圧に変わりつつも、豪雨をもたらしたという点である。このことは台風が上陸して衰弱しつつあるときも、降水については豪雨となり得る場合があることを示している。

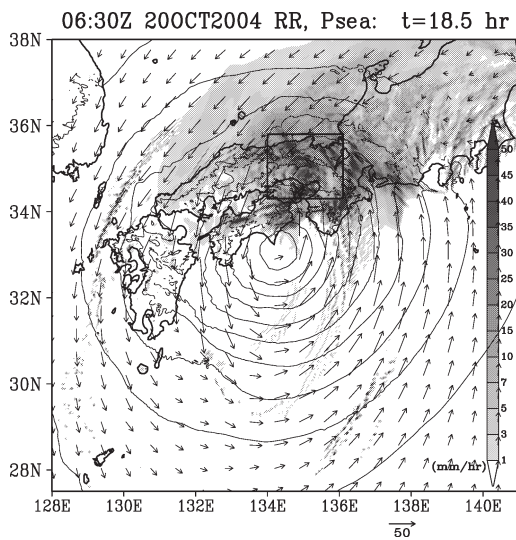
T0423 のシミュレーションの目的は、このような豪雨の形成過程を調べることで、豪雨がどの程度量的に精度よくシミュレーションされるかを検証することである。この実験では水平格子間隔 1 km の高い解像度を用い、台風全体を含むような広い領域で計算を行った。初期値は 2004 年 10 月 19 日 12 UTC で、この時刻に台風の中心は計算領域内の奄美大島の南南西にあった。

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進みながら中心が通過している。台風が四国の南に達した 20 日 04 UTC に、近畿地方と紀伊半島東部で豪雨が始まった。第 2 図はシミュレーションから得られた降水分布である。このとき徳島県と紀伊半島で降

水が強く、紀伊半島から南に降雨帯が伸びている。この時刻には近畿地方に降雨帯が北西から南東に伸びている。台風の中心は室戸岬付近にあり、東北東に進んでいる。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。豪雨域は台風の移動とともに九州から四国、紀伊半島へと移動した。

雲解像モデルを用いた高解像度シミュレーションが、降水について量的にどの程度観測と対応しているのかを検証するために、降水の地上観測データと比較し、その精度評価を行った。九州東岸の豪雨域の例として宮崎県の延岡の降水量を第3図aに示した。延岡の観測では、19日18 UTCから1時間降水量が10 mmを超え、同日23 UTCに最大の54 mmに達している。CRESSの予測(図中の実線)は1時間降水量の時間変化パターンと量についてほぼ観測と対応している。23 UTCで最大1時間降水量60 mmを予測しており、一方で20日02 UTC以降の急激な降水の弱まりも観測とよく対応している。気象庁領域モデルRSM(図中の破線)では最大の1時間降水量が23 UTCの30 mmで観測値の半分程度となっている。

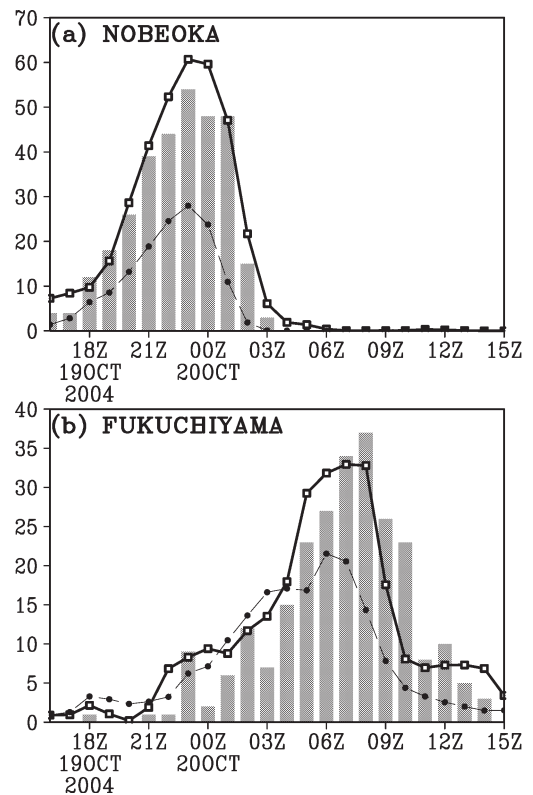
京都府の福知山(第3図b)における19日15 UTC



第2図 T0423のシミュレーション実験で得られた初期値から18時間30分後の2004年10月20日0630 UTCの地上降水強度 (mm hr^{-1} ; グレースケール)、水平速度ベクトル(矢印)、および気圧分布(コンター)。図中の四角形の領域は近畿地方の豪雨域を示す。

からの24時間降水量の観測値は、250 mmであった。この地点でのCRESSの予測は、非常に観測に近いものとなっている。観測と同様にこの地点でのCRESSの予測では19日21 UTC頃から降水が強まりはじめ、20日04 UTCまで少しずつ増加し、05 UTCには1時間降水量が20 mmを超える強い雨になっている。観測と対応してCRESSの予測は20日06~08 UTCには30 mm程度にまで達している。一方でこの強い降水は、観測では09~10 UTCまで持続するが、これらの時刻では過少の予測となっている。その後は観測においても、予測においても、10 mm以下の弱い降水が15 UTC前まで持続し、概ねこの時刻で降水は終了している。このように雲解像モデルでは 50 mm hr^{-1} を超えるような強い雨についても量的に精度よくシミュレーションできることがわかる。

近畿地方(第2図の四角で示した領域)では最大で、1時間降水量が50 mmを超える激しい降水が起



第3図 T0423に伴う(a)延岡と(b)福知山における降水について観測とモデルを比較したもの。地上観測点(棒グラフ)とCRESS(実線)およびRSM(破線)の1時間降水量(mm)。

こっている。シミュレーションは19日21 UTC から降水が強化しはじめ、20日04 UTC まで徐々に増加し、05 UTC に20 mm を超える強い降水となっている。この降水はシミュレーションでは09 UTC に急激に弱まる。これらの降水強度の時間変化は、上空の降水帯の通過に対応している。強い降水が長時間持続したのは、複数の降水帯が連続して近畿地方上空を通過したためである。

この近畿地方の豪雨をもたらした降水システムの南北方向の鉛直断面を、あられ（第4図a）、雪（第4図b）および雨（第4図c）のようにそれぞれの降水粒子の混合比に分けて示す。このように降水粒子のタイプごとの分布を知ることができるのが、雲解像モデルの利点である。高度5 km 付近の融解層より上層では、あられと雪が多量にあり、特に雪の混合比が非常に大きい。あられは融解層上1000~2000 m の層に主に存在している。激しく発達した積乱雲やその群では、強力な上昇流であられが多量に生成される。ところがこの場合は、あられより雪のほうがはるかに多く

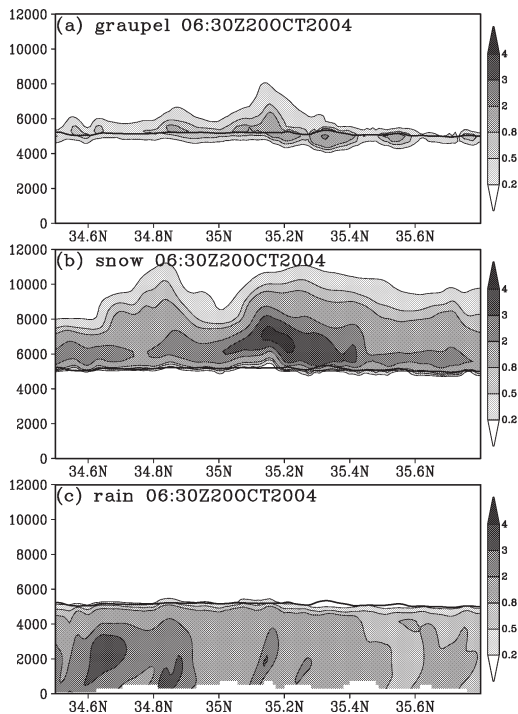
存在している。これは上昇流があまり強くなく、むしろ上空の緩やかな上昇流の中で雪が形成されたことを示している。このように、激しく発達した積乱雲の集団により豪雨がもたらされるのではなく、融解層より上部における主に雪による水の集積とその下層での融解による雨の形成が、このときの降水の特徴である。特に、雪が降水の形成に重要な役割を果たしている点は、他の豪雨と異なり特徴的である。

台風は暴風雨をもたらすと同時に重要な水資源でもある。その強い降水は台風のどこにでもあるわけではなく、眼の壁雲と降雨帯に集中して起こっている。これらを解像し、かつ台風全体を雲解像モデルでシミュレーションすることは、最近になってやっと可能になりつつあるものである。今後このような計算はさらに大規模になり、これらについて詳細な構造がわかってくるであろう。それによって台風とそれに伴う降水のより正確な予測が可能になることが期待される。

4. 竜巻をもたらした台風0613号

2006年9月17日に宮崎県延岡市で発生した竜巻は、台風の接近時に発生したという点で1999年の東海地方の竜巻と共通する点が多い。これらの竜巻発生時の台風を気象衛星の雲画像から比較すると、どちらの竜巻も、台風の中心が西側遠方にあるときに、台風の最も外側の雲帯（外域降雨帯）で発生したことがわかる。台風の東側では、低気圧性循環に伴って、南側からの水蒸気の供給が多く竜巻が発生しやすい。これらの例はその典型的なものと考えられる。また、このとき台風に伴って発生した竜巻は、延岡市の竜巻だけではなく、九州から四国にかけて多数の竜巻が目撃されている。これらの竜巻について、台風に伴う雲・降水システムの特徴とどのような特徴を持つ雲が竜巻を発生させたのを明らかにするために、雲解像モデル CReSS を用いてシミュレーションを行った。

シミュレーションは、気象庁領域モデル RSM（水平解像度40 km）を用いて初期値・境界値を与えて、水平解像度500 m で行った。計算領域は台風全体が含まれる程度に広い領域で、計算は地球シミュレータを用いて行った。結果は台風全体の降水分布や流れの場の特徴をよく表現しており、台風の中心が鹿児島県西方海上の東経128.5度付近にあるとき、九州から奄美大島の東側に南北に弧状にのびる複数の降雨帯がシミュレーションされた。延岡（第5図中の十字印）で竜巻が発生した時刻に、シミュレーション結果におい

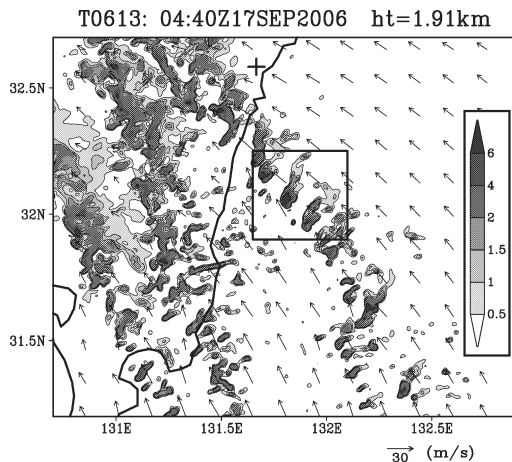


第4図 2004年10月20日0630 UTC の (a) あられの混合比 (g kg^{-1}), (b) 雪の混合比 (g kg^{-1}), (c) 雨の混合比 (g kg^{-1}) の東経135.1度に沿う南北方向の鉛直断面。図中の線は気温0°Cの高度。

て延岡付近を北西から南東に発達した降雨帯が延びている。

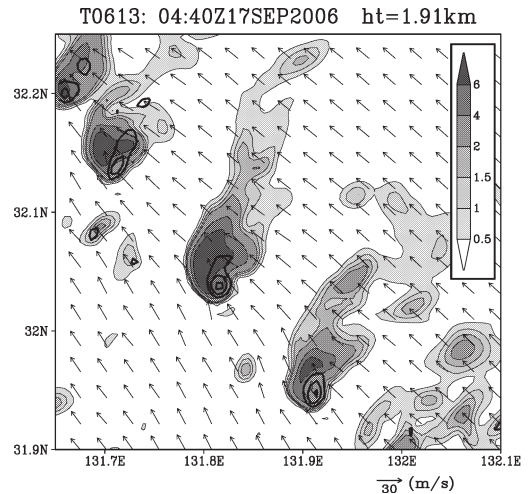
第5図は17日0440 UTCのシミュレーション結果の拡大である。宮崎県沖に発達した積乱雲が列をなして降雨帯を形成している様子がわかる。図中の矢印は地上の風の分布で、積乱雲の列を境にして、北側では南東風、南側ではそれよりも南風成分が強くなっている。降雨帯を形成する積乱雲の列は、風の変化するライン（収束線あるいはシアライン）に沿って形成されている。

降雨帯を形成する積乱雲を拡大すると（第6図）、積乱雲の南端部に、スーパーセルの特徴であるフック状（釣り針状）構造がみられることがわかる。黒い等値線は、渦度を 0.01 s^{-1} から 0.01 s^{-1} 毎に描いたものである。積乱雲のフック状エコーの領域に対応して、 0.03 s^{-1} 程度の最大渦度をもつ領域があり、ここには上昇流がある。スーパーセルは「上昇流のあるところに渦度 0.01 s^{-1} 以上の渦度を持つ積乱雲」と定義されるので、これらの積乱雲はスーパーセルで、その南端部に渦をもっていることがわかる。この渦はメソサイクロンと呼ばれる。この図から宮崎県沖に形成されている降雨帯は、スーパーセルの列で構成されていたことがわかる。

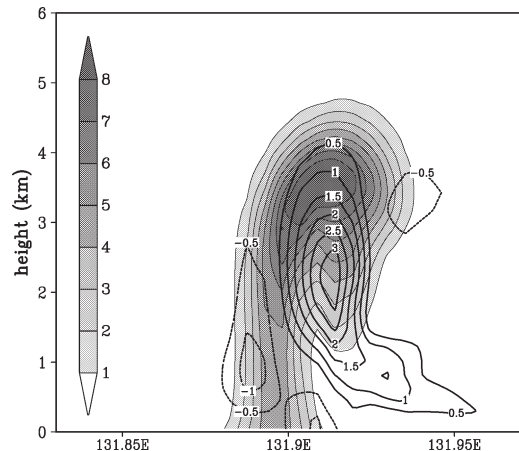


第5図 水平解像度500 mのシミュレーション実験から得られたT0613に伴う宮崎県東方海上の降雨帯。2006年9月17日0440 UTCの、グレースケールは高度1.91 kmの雨水混合比 (g kg^{-1})、矢印は地上の水平風ベクトルである。十字印は竜巻が観測された延岡市の位置、図中の矩形は第6図の表示領域を示す。

スーパーセルの特徴をみるために、スーパーセルの南部にあるメソサイクロンの中心における東西方向の鉛直断面を第7図に示す。鉛直断面では最大 0.03 s^{-1} の渦度があり、そこに降水のボルト構造（丸天井構造）がみられる。20 ms^{-1} 以上の上昇流の中心は、渦



第6図 第5図の矩形領域を拡大した表示。2006年9月17日0440 UTCについて、グレースケールは高度1.91 kmの雨水混合比 (g kg^{-1}) を、等値線は渦度を 0.01 s^{-1} から 0.01 s^{-1} 毎に示す。矢印は地上の水平風ベクトルである。



第7図 第6図に示した2006年9月17日0440 UTCのスーパーセルの北緯31.95度に沿う東西鉛直断面。グレースケールは降水粒子（雨、雪、あられの総和）の混合比 (g kg^{-1})、等値線は鉛直渦度 ($\times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$)。

度と対応して高度2.5 km付近にあり、降水の高さは5 km程度と比較的低い対流セルである。

5. おわりに

大陸の東に位置する日本ではさまざまな激しい気象現象がみられる。本稿にあげたような台風に伴う豪雨や竜巻をもたらす降雨帯の他にも、発達した積乱雲をもたらす竜巻や降雹、冬季の季節風に伴う大雪や低気圧に伴う強風や大雨もある。例えば寒気流中の降雪雲などは比較的小規模の積乱雲によって構成されている。ここでは詳細を示さないが、これらも雲解像モデルの対象である。

本稿で示したように雲解像モデル CReSS は、さまざまな雲・降水システムや気象、水循環の研究に利用することができる。また、これを用いて災害をもたらすような気象の予測などの防災に役立てることも可能である。名古屋大学地球水循環研究センターの気象学研究室では、雲解像モデル CReSS を用いて毎日の気象シミュレーション実験を、2004年12月から継続して行っている (http://www.rain.hyarc.nagoya-u.ac.jp/CReSS/fcst_exp.html)。また CReSS はソースコードレベルで公開しており、誰でも利用することができ、これを用いて実用的な高解像度の気象予測を行うことも可能である。

気象の予測として明日や1週間後の天気予報はもちろん重要である。一方で、洪水や土砂崩れといった災害をもたらすような豪雨については、数時間先にそれが起こるのかどうかを予測することも重要である。実際の生活の上では、数時間(6~12時間程度)先に雨が降るのかどうかということ、また降っている雨がいつ止むのかということが非常に重要な問題である。さらにそれが豪雨となれば、財産や生命に関わる問題である。

我々は雲そのものを計算機内で作ることができるようになってきた。その応用として豪雨や強風の高精度量的予測は十分現実的となっている。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、豪雨をはじめとする積乱雲に伴う様々な危険な気象現象を、量的に精度よく予測することが可能になると考えられる。

謝 辞

雲解像モデル CReSS の開発には、多くの方からご支援をいただきました。特に東京大学の住 明正教

授、愛知学泉大学の神谷信彦教授、高度情報科学技術研究機構の中村 壽氏には、このモデルの開発の機会を与えていただいたばかりでなく、1998年の開発当初以来、絶えざるご支援をいただきました。ここに記して感謝いたします。CReSS の開発には東京大学情報基盤センターのコンピューターを利用させていただきました。本稿に掲載したシミュレーションは東京大学情報基盤センターのスーパーコンピューターと地球シミュレータを用いて計算したものです。それらの利用につきまして、各位のお取りはからいに深く感謝申し上げます。

参 考 文 献

- Mashiko, W., 2005: Polygonal eyewall and mesovortex structure in a numerically simulated Typhoon Rusa. SOLA, 1, 29-32.
- Nasuno, T. and M. Yamasaki, 1997: The effect of surface friction on the mesoscale organization of cumulus convection in tropical cyclones. J. Meteor. Soc. Japan, 75, 907-923.
- Nasuno, T. and M. Yamasaki, 2001: A representation of cumulus-scale effects in a mesoscale-convection-resolving model for tropical cyclones. J. Meteor. Soc. Japan, 79, 1035-1057.
- Niino, H., T. Fujitani and N. Watanabe, 1997: A statistical study of tornadoes and waterspouts in Japan from 1961 to 1993. J. Climate, 10, 1730-1752.
- Ooyama, K., 1969: Numerical simulation of the life cycle of tropical cyclones. J. Atmos. Sci., 26, 3-40.
- Peng, M. S. and S. W. Chang, 2002: Numerical forecasting experiments on Typhoon Herb (1996). J. Meteor. Soc. Japan, 80, 1325-1338.
- Saito, A., 1992: Mesoscale analysis of typhoon-associated tornado outbreaks in Kyushu island on 13 October 1980. J. Meteor. Soc. Japan, 70, 43-55.
- Suzuki, O., H. Niino, H. Ohno and H. Nirasawa, 2000: Tornado-producing mini supercells associated with Typhoon 9019. Mon. Wea. Rev., 128, 1868-1882.
- Tsuboki, K. and A. Sakakibara, 2001: CReSS User's Guide. 2nd Edition, 210pp.
- Tsuboki, K. and A. Sakakibara, 2002: Large-scale parallel computing of Cloud Resolving Storm Simulator. Zima, H. P. et al. Eds.: High Performance Computing. Springer, 243-259.
- 坪木和久, 耿 驃, 武田喬男, 2000: 台風9918号外縁部で発生した1999年9月24日の東海地方の竜巻とメソサイクロン. 天気, 47, 777-783.