

台風に伴う竜巻をもたらす降雨帯の 雲解像モデルを用いた数値シミュレーション

坪木和久 (名古屋大学 地球水循環研究センター)

1. はじめに

台風はそれに伴うスパイラルレインバンド（降雨帯）や目の壁雲が形成される付近に強風と豪雨を伴い、これらによる災害が上陸地点にもたらされる。台風に伴う暴風は、それ以外にも発生することがある。その一つは台風に伴って発生した竜巻によるものである。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。このような竜巻は台風自体が持つ暴風とは別に暴風災害をもたらすので、注意が必要である。

1999 年 9 月 24 日、台風 9918 号の最外縁部の雲帯が東海地方にあったとき、豊橋市、蒲郡市、豊川市で竜巻が発生した。そのうち豊橋市のものは非常に強い竜巻で、大きな被害が出た（坪木他, 2000）。Saito (1992)は 1980 年 10 月 13 日、台風 8019 号の通過時に宮崎市で発生した 5 つの竜巻について解析し、降雨帯を構成するエコ一群の通過に伴って、竜巻が発生したことを示した。これらに共通することは、台風に伴う竜巻が降雨帯のところに発生していることである。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。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。

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

いう点で豊橋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、西側の遠くにあるときに、台風のもっと外側の雲帯（外域帯；outer rainband）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、次の点を明らかにするために、雲解像モデル CReSS を用いて予報実験を行った。

- 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か。
- その雲の中で発生した竜巻は、雲のどのような場所で発生したのか。
- 発生した竜巻はどのような構造（渦、気圧、風速など）をもってしているのか。

ここで「予報実験」とは、実際の地形や海面水温を与え、現象の発生する時刻より前の時刻の大気状態（温度、湿度、気圧、風向・風速）を実際の分布のように数値モデルに与え、実際の現象を予報するのと同じように数値モデルを実行することを云う。また、予報実験で竜巻が発生したかどうかは、竜巻の定義を「遠心力と気圧傾度力のバランス、すなわち旋衡風バランスが極めて高い精度で成立

している大気の渦」として、これを満たしているかどうかで判断する。

近年、大規模コンピューターは急速に進歩し、現在ではこれまで考えられなかったような大規模計算が可能になってきた。台風や竜巻のシミュレーションはこのような計算機の発展により可能になったものである。

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数値モデリングを行うために、雲解像数値気象モデル「Cloud Resolving Storm Simulator」(CReSS)を開発してきた。このモデルは大規模並列計算機で効率よく計算するように設計されており、大規模な計算領域でかつ雲を解像しつつ、災害をもたらすような激しい気象システム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。本研究ではこの雲解像モデルを用いてシミュレーションを行った。

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、雲解像の非静力学気象モデルである。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モデルである。

CReSS の基本方程式系は非静力学・圧縮系で、地形に沿う鉛直座標系を用いている。予報変数は 3 次元の速度成分、温位偏差、圧力偏差、乱流運動エネルギー、水蒸気混合比、および雲・降水に関する量である。空間の表現には格子法を、時間積分はモード別時間積分法を用いてい

る。

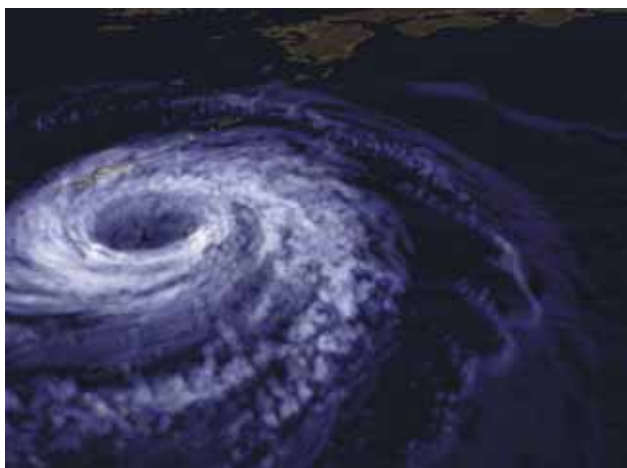
雲・降水過程は「冷たい雨」のバルク法を用いている。定式化は、Lin et al. (1983)、Cotton et al. (1986)、Murakami (1990)、Ikawa and Saito (1991)、Murakami et al. (1994) に基づいている。雲・降水の変数としては、雲水、雨水、雲氷、雪およびあられを考慮している。乱流については 1 次のクロージャー、または乱流運動エネルギーを用いた 1.5 次のクロージャーである。また、地表面摩擦や熱・水蒸気の地表面からのフラックスなどの地表面の過程が導入されている。地温は地中の多層モデルを用いて、熱伝導方程式を解くことで与えられる。

初期値・境界条件にはさまざまなものが可能である。理想条件を与える数値実験については、初期条件として高層観測や関数のプロファイルを水平一様に与え、境界条件には、放射境界や周期境界条件が用いられる。一方で、予報実験には格子点データから 3 次元的な非均一な初期値と、時空間的に変化する境界条件を与えることができる。広い領域の計算を行うときは、ランベルト図法、ポーラーステレオ図法およびメルカトル図法の地図投影が可能である。

大規模計算のための並列計算には、水平方向の領域の 2 次元分割を採用している。並列計算では、Message Passing Interface (MPI) を用いており、OpenMP を併用することができる。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図 1 に示す。この計算は 2004 年 9 月 5 日 0000UTC の RSM を初期値として、24 時間

の実験を行なった。水平解像度は 1km で計算を行った。図 1 は POV-Ray により台風に伴う雲を立体的に可視化したものである。モデルが雲そのものを計算するので、雲の立体的分布はたいへんリアルである。このように可視化すると、あたかも実際の台風を衛星などから眺めているように見えるほど現実的な結果を雲解像モデルは計算する。



第 1 図：台風 T0418 のシミュレーション実験の結果を雲について立体的に可視化したもの。POV-Ray (Persistence of Vision Ray Tracer) により可視化した。(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。)

3. 竜巻発生時の降雨帯

竜巻が発生したときの台風に伴う雲・降水システムはどのような特徴を持っていたかが、雲の特徴については衛星画像から、降水の特徴については気象庁レーダーからわかる。9月17日14JST(日本時間)には、台風0613号に伴う外域帯が延岡の真上にあった。図2からわかるように、外域帯(outer rainband)は発達した対流セル(積乱雲)で構成されており、竜巻発生時には強い降水をもたらす積乱雲が延岡上空を南から北に通過していた。このような積乱雲はしばしば竜巻をもたらすことがある。九州で起こった多数の

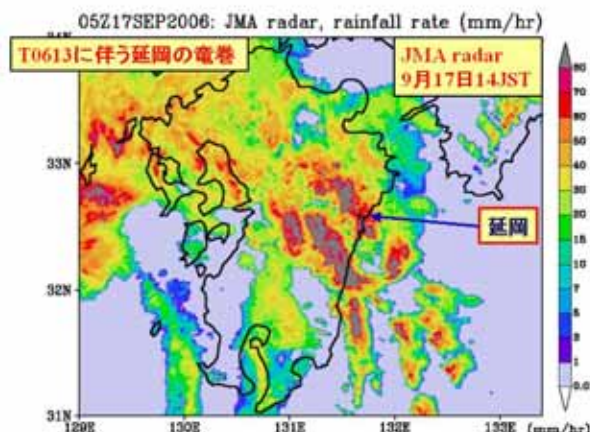


図 2：気象庁レーダーから得られた台風 0613 号に伴う降水分布(mm/hr)。図の時刻は 2006 年 9 月 17 日 14 時(日本時間)で、延岡市で竜巻が発生した時刻に近いものである。

竜巻は、この外域帯(レインバンド;降雨帯)が通過したときに発生した。

4. 降雨帯のシミュレーション

雲解像モデル CReSS を用いた予報実験は、気象庁領域モデル RSM(データ解像度 40km)を用いて初期値・境界値を与えて、水平解像度 500m 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た。図 3 はその結果得られた降水と速度場の分布である。台風が中心が、鹿児島県西方海上の東経 128.5 度付近にあり、九州から奄美大島の東側には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ている。表示の時刻は 17 日午後 2 時で、延岡(図中の赤色の十字)で竜巻が起こったときで、予報実験でも延岡を北西から南東に発達した降雨帯が延びている。

図 4 は 17 日、午後 1 時 40 分のシミュレーション結果の拡大である。カラーは雨の分布を、十字が延岡の位置を表す。

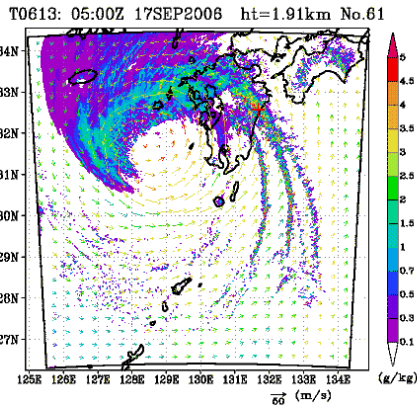


図3：雲解像モデル CReSS のシミュレーション（水平解像度 500m）から得られた台風 0613 号。カラーレベルは高度 1.9km の雨水の分布、矢印は風向・風速で、その色は湿度。暖色の矢印ほど湿度が高いことを表す。赤の十字は、延岡の位置。

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

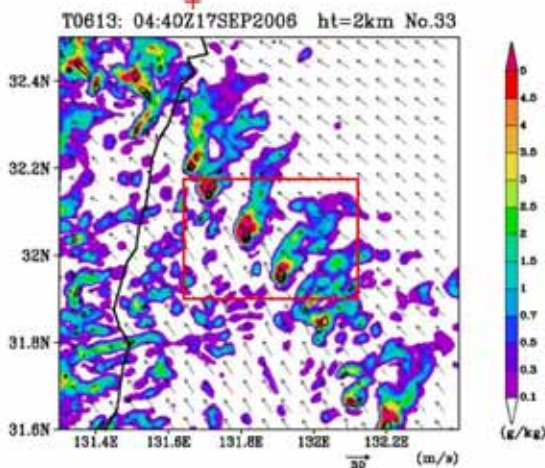


図4：雲解像モデル CReSS のシミュレーション（水平解像度 500m）から得られた、宮崎県東海上の台風 0613 号に伴う降雨帯。カラーレベルは高度 2km の雨水の分布、黒い等値線は渦度で、メソサイクロンを表す。矢印は地上の風向・風速。赤の四角形は、図5の表示領域。

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という）に沿って形成されている。この図中の赤四角の領域を拡大して図5に示す。

降雨帯を形成する積乱雲を拡大すると（図5）、積乱雲がその南端部に、スーパーセルの特徴であるフック状（釣り針状）構造を持つことがわかる。黒い等値線は、渦度を 0.01/s から 0.01/s 毎に描いたものである。積乱雲のフック状エコーのところに、最大渦度が 0.03/s 程度のものがあり、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 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

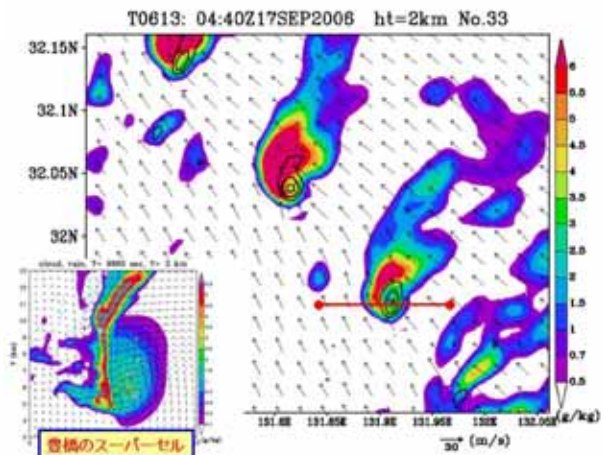


図5：図4の四角形の拡大図。表示内容は同じ。台風の降雨帯を構成する積乱雲内にメソサイクロン（黒い等値線）があり、その付近の降水分布にスーパーセルの特徴であるフック状（釣り針状）構造がみられる。比較のために豊橋の実験でみられたスーパーセルを左下に示した。形状とスケールがほぼ同じであることがわかる。図中の横線は図6の鉛直断面の位置を示している。

呼ばれる。この積乱雲と 1999 年の豊橋市のスーパーセルを比較すると（図中左下）降水の形状やメソサイクロンなどの特徴が共通していることがわかる。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といえる。

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を東西方向にきる鉛直断面を図 6 に示す。鉛直断面では 20m/s 以上の強い上昇流があり、そこに降水のポールト構造（丸天井構造）がみられる。上昇流の中心は高度 2.5km 付近にあり、降水の高さは 5km 程度で、比較的低い対流セルである。この上昇流と対応して、正の渦度がみられる。その最大値は 0.03/s である。その西側には負の渦度がある。東西断面内の対流セルに相対的な流れをみると、下層の 500m 以下に東からのインフローがあり、これが水蒸気を供給している。対流セルの上端には東に向かうアウトフ

ローがある。

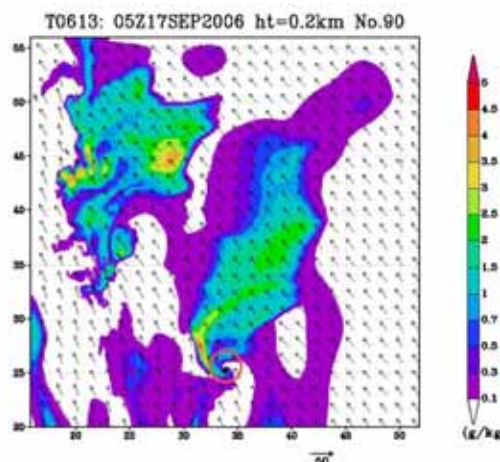


図 7：水平解像度 75m のシミュレーションで得られたスーパーセルと竜巻の高度 200m の水平表示。図の時刻は 2006 年 9 月 17 日 14:00JST（日本時間）で、図の表示領域は宮崎県東方海上である。カラーレベルは雨水混合比(g/kg)、図中の円内に竜巻がシミュレーションされている。

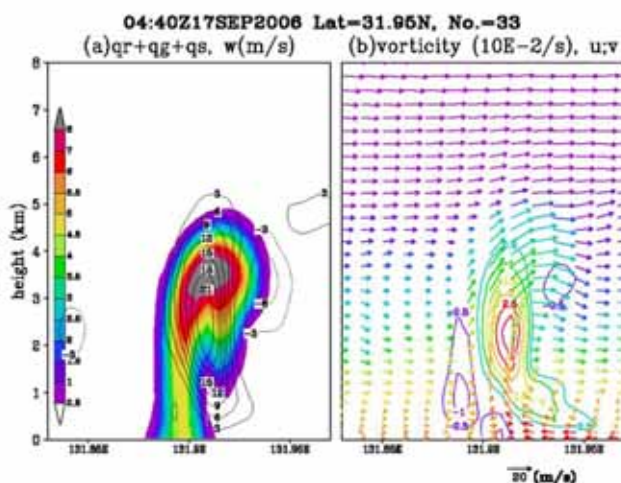


図 6：シミュレーションで得られたスーパーセルの東西鉛直断面。図の時刻は 2006 年 9 月 17 日 13:40JST（日本時間）で、断面の位置は図 5 に示した。(a)カラーレベルが降水（雨、雪、あられの総和）の混合比 (g/kg)、等値線が鉛直速度(m/s)、(b)渦度 (/s)とこの断面内のセルに相対的な速度ベクトル（矢印）。

5. 竜巻のシミュレーション

台風の降雨帯を構成するスーパーセルを水平解像度 75m でシミュレーションし、その中に竜巻が形成されるかどうか、形成されるならば、セルのどこに、どのような構造を持つものが形成されるのかを調べた。計算領域内にはいくつかのスーパーセルがシミュレーションされたが、そのうちのひとつが強い渦を伴っていた。図 7 はそのスーパーセルの高度 200m の水平断面で、雨の分布を表している。スーパーセル南部のフック状構造（釣り針状構造）がより明瞭である。図のひとつメモリは 5km なので、スーパーセルは東西方向に 10km、南北方向に 25km の大きさであることがわかる。このスケールの図ではわかりにくいですが、赤い円で示したフック構造のところに竜巻が発生している。

この部分を拡大したのが次の図 8 である。

スーパーセルの南端部のフック構造の部分の拡大図で、竜巻が形成されている。等値線で示した渦度が、円形に集中している。中心の渦度は $0.9/s$ 以上で、スーパーセルのメソサイクロンが 0.01 であるのと比べるとこの渦度は 2 桁近く大きい。渦度としては極めて大きな渦度となっている。降水分布から竜巻の渦はスーパーセルの南端部のフック構造の内側に形成していることがわかる。1000m のスケールと比べると、竜巻の渦の直径は 300m 程度であることがわかる。

はじめに述べたように、数値モデルで竜巻と判断されるためには、速度場（渦度場）と気圧場の間に旋衡風バランスが高い精度で成り立っている必要がある。図 9 は気圧場と渦度場を示したもので、

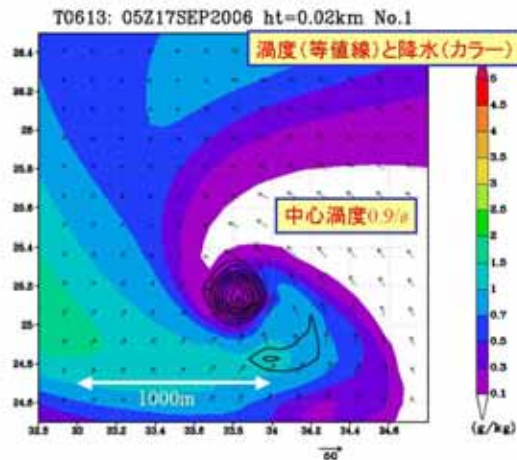


図 8：図 7 の円で示した付近の拡大図。カラーレベルは雨水混合比(g/kg)で、等値線が渦度を表しており、渦度の等値線が円形に集中しているところが竜巻に対応する。このときの渦度は中心で $0.9/s$ という非常に大きいものに達した。

等値線で示した渦度の集中するところと気圧が低下しているところがほとんど完全に対応している。気圧の低下は中心で 27hPa の低下がみられる。これは速度場と

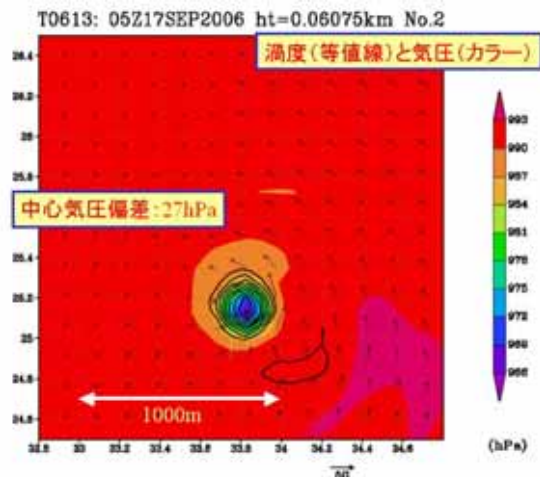


図 9：図 8 に同じ。ただしカラーレベルは高度 200m の気圧で分布。

気圧場が旋衡風バランスにあることを示しており、モデルが竜巻をよく表していることがわかる。

このシミュレーションされた竜巻に伴う風速を図 10 に示す。竜巻は一般風に流されながら北向きに移動するので、竜巻に伴う風速は竜巻の移動速度と、竜巻の周辺を回転する風の和になる。図から風速は竜巻の進行方向（北向き）の右側（東側）で極めてつよく、 $70m/s$ 以上に達している。一方で左側（西側）では相対的に弱いことがわかる。このような竜巻周辺の風速の非対称分布は、竜巻による被害分布を決める要因となる。延岡市の竜巻では竜巻の右側で被害が大きかったが、このシミュレーションで計算された竜巻の風速分布と符合するものである。

竜巻は渦の管が上空に延びるような構造をしている。この再現された竜巻の場合は、高さとともに渦管が北に向かって傾いている構造をしていた。そこでこの竜巻について、地上の渦の中心をとる南北断面を図 11 に示す。竜巻の渦管は地上から高度 2km 付近にかけて竜巻の渦管がのびている。高度 2km 付近で弱くなり、とぎれるように見えるのは、竜巻の渦度が弱まるだけではなく、この断面から渦

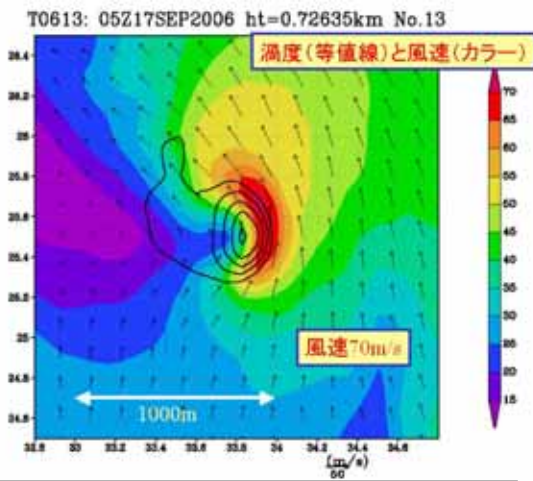


図 10 : 竜巻付近の高度 0.73km の風速分布。等値線は渦度で竜巻を表す。

管がはずれるからである。竜巻の渦は地上で最も強く、上空に行くほど弱くなる。この竜巻の場合は、高度 3km ぐらいで渦管が不明瞭になる。竜巻の付近では雲底が低く、その中心ではロート状に雲が垂れ下がり、地上に達している様子が再現されている。

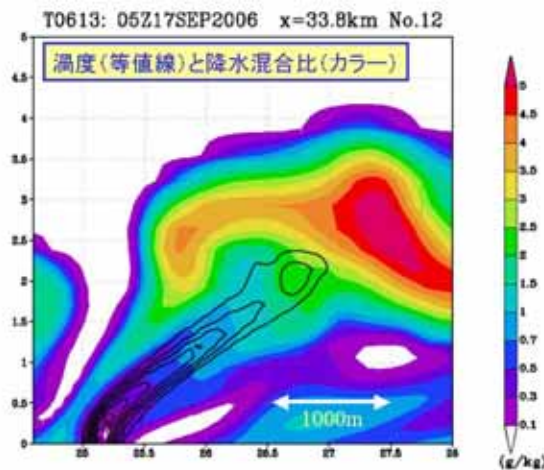


図 11 : 竜巻の南北鉛直断面。カラーレベルは降水(雨、雪、あられの総和)の混合比(g/kg)、等値線は渦度で竜巻を表す。

6. おわりに

2006 年 9 月 17 日に宮崎県で台風 13 号

に伴って発生した竜巻について、雲解像モデル用いて、水平解像度 75m で予報実験を行った。台風の東側の降雨帯にはスーパーセルが発生しており、その一つの南端部に見られたフック状構造付近に竜巻が再現された。その直径は 300 ~ 400m、中心の渦度は約 0.9/s、気圧偏差は 24hPa 以上であった。

大陸の東に位置する日本はさまざまな激しい気象にさらされている。本稿にあげたような台風や竜巻の他にも、梅雨前線に伴う豪雨、発達した積乱雲をもたらす豪雨や降雹、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。

本研究で用いた雲解像モデル 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の予報実験を、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、また商業利用も可能である。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。

我々は雲そのものを計算機で作ることができるようになってきた。その応用として災害をもたらす気象の高精度な量的予測は、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、台風やそれに伴う暴風雨、局地的な豪雨や積乱雲に伴う様々な危険な気象を、量的に精度よく予測できることが可能になると考えられる。

謝辞

この研究で利用している雲解像モデル CReSS (Cloud Resolving Storm Simulator) の開発には、多くの方からご支援をいただきました。特に東京大学気候システム研究センターの住明正教授、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。第 1 図の台風の可視化画像は東京工業大学学術国際情報センターの青木尊之教授と佐藤静香さんのご厚意により提供していただきました。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

Cotton, W. R., G. J. Tripoli, R. M. Rauber and E. A. Mulvihill, 1986: Numerical simulation of the effects of varying ice crystal nucleation rates and aggregation processes on orographic snowfall. *J. Climate Appl. Meteor.*, **25**, 1658-1680.

Ikawa, M. and K. Saito, 1991: Description of a nonhydrostatic model developed at the Forecast Research Department of the MRI. *Technical Report of the MRI*, **28**, 238pp.

Lin, Y. L., R. D. Farley and H. D. Orville, 1983: Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. *J. Climate Appl. Meteor.*, **22**, 1065-1092.

Murakami, M., 1990: Numerical modeling of dynamical and microphysical evolution of an isolated convective cloud - The 19 July 1981 CCOPE cloud. *J. Meteor. Soc. Japan*, **68**, 107-128.

Murakami, M., T. L. Clark and W. D. Hall 1994: Numerical simulations of convective snow clouds over the Sea of Japan; Two-dimensional simulations of mixed layer development and convective snow cloud formation. *J. Meteor. Soc. Japan*, **72**, 43-62.

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.

Saito, A., 1992: Mesoscale analysis of typhoon-associated tornado outbreaks in Kyushu island on 13 October 1980. *J. Meteor. Soc. Japan*, **70**, 43-55.

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. *High Performance Computing, Springer*, H. P. Zima et al. Eds, 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」, **Vol.47, No.12**, 777 - 783.