

## 1 km メッシュの気象学\*

坪 木 和 久\*\*

### 1. はじめに

「1 km メッシュの気象学」というのは、名古屋大学旧大気水圏科学研究所の故武田喬男教授の言葉である。積乱雲やその群、あるいは様々な降水システムを、1 km 格子で解像する数値シミュレーションができれば、気象学が飛躍的に進歩するであろう。それにより雲や降水システムについて新しい知見が次々と得られるようになるというのがこの言葉に込められた気持ちであったと思う。1 km のような高解像度で気象の研究を行うところに、新しい世界が開けることを期待されたのである。

武田先生が退官された2000年ごろ、わが国には一般に公開された雲解像モデルはなかった。武田先生が退官記念講演で話された数値実験が米国のモデルを使って出した結果であったことが残念でならなかった。そのころ私と榊原篤志氏は、その3年後に稼働を始める地球シミュレータで実行できる雲解像モデル CReSS (Cloud Resolving Storm Simulator) の開発を行っていた<sup>1,2)</sup>。

CReSS は非静力学・圧縮系を基本方程式とするモデルで、大規模並列計算機で効率よく計算できるように設計されており、豪雨や強風をもたらす激しい気象のシミュレーションを、雲を解像しつつ行うことができる。このモデルは地球水循環研究センター計画研究「1 km メッシュの領域水循環モデリング」でさらに発展し、数百 m メッシュ、さらに数十 m メッシュの計算さえも行われるようになった。この発展とともに、1 km の解像度はもはや達成するべき目標ではなくなった。それでもここでは武田先生の言葉を借りて、高解像度モデリングを象徴するものとして、「1 km メッシュ」という言葉を用いたい。

本稿では雲解像モデル CReSS を用いた高解像度の気象のシミュレーションを紹介し、1 km メッシュ、

さらにはそれ以上の高解像度の計算により、どのような結果が得られてきているのかを示したい。なお、ここで紹介する計算の多くは、地球シミュレータを用いて行ったものである。

### 2. 現象の理解のための利用

格子解像度 1 km 以下の雲解像モデルは個々の積乱雲を解像するので、豪雨雪や突風など、積乱雲に関係するさまざまな現象の研究に用いることができる。現象の構造、プロセス、メカニズム、さらにそれを発生させる外力などの理解は、観測だけでは困難なことが多い。モデルを用いることで、観測が困難、あるいは観測できない量をすべての格子点で得ることができる。さらにそれらの物理量は、モデルに定式化されている物理の範囲では一貫性のある量となっており、現象の理解において有力なデータとなる。

雲が重要な要素となっている台風は雲解像モデルの主要課題の1つである。台風全体の大きさは1000 km 以上に及ぶものであるが、それを駆動しているのはただか10 km 程度の積乱雲であることが、台風のシミュレーションを難しいものにしてきた。ところが近年の並列計算機の発達により、雲を解像しつつ台風全体をシミュレーションすることが可能になってきた。

台風の計算例として、水平解像度 1 km で行った台風0418号のシミュレーション結果を示す。計算領域は台風全体が24時間にわたって移動する領域を含むように広くとった。台風全体の移動は、位置についても時間についても観測とよく対応しており、また、中心気圧もほぼ観測に近いものであった。第1図は立体的に雲を可視化したものである。モデルが雲そのものを解像するので、雲の分布と構造はたいへんリアルで、あたかも実際の台風を衛星から眺めているように見える。

台風は積乱雲に比べて、2 桁以上の大きな渦である。一方、竜巻は2 桁以上小さな渦である。このため竜巻のシミュレーションには、数十 m 程度の水平解像度が必要で、その計算もまた非常に大規模なものとなる。竜巻の例として、1999年9月24日に台風9918号の外域降雨帯で発生した豊橋市の竜巻のシミュレー

\* Meteorology in 1 km-mesh simulations.

\*\* Kazuhisa TSUBOKI, 名古屋大学地球水循環研究センター。

© 2007 日本気象学会

シミュレーション結果を示す。

名古屋大学のドップラーレーダーはその外域降雨帯を観測し、そのなかにメソサイクロンを内含するスーパーセルを検出した<sup>3)</sup>。この観測から竜巻はこのメソサイクロンの下に発生したことが示された。このスーパーセルについて水平解像度75 m でシミュレーションを行った。

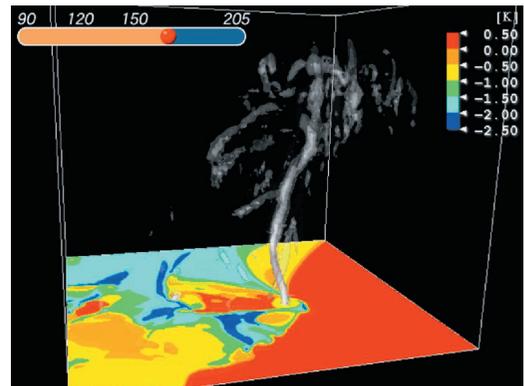
実験では竜巻の親となるスーパーセルが形成され、初期値から1時間以降には準定常となった。このスーパーセルは南端部にガストフロントを形成し、その上に強い上昇流が形成された。竜巻はその上昇流内で次々と発生・発達した。第2図はスーパーセル南端部の渦度を立体的に表示したもので、煙状にみえるものが竜巻に対応している。カラーレベルは地上の温度偏差を表し、ガストフロント付近から上空に竜巻が伸びているようすが立体的に表現されている。アニメーションでみると竜巻はガストフロント付近の上昇流が強いところで次々と発生・発達し、そこから離れると衰弱し消滅する。竜巻の渦は直径が300~400 m で、観測されたものにほぼ対応している。渦の中心付近には負の気圧偏差があり、遠心力と気圧傾度力が(旋衡風) バランスしている。

積乱雲が大規模な現象の要素となっているもう1つの例として、冬季の寒気流中の筋状雲があげられる。これは日本海だけでなく、高緯度の海上では普遍的に観られる現象である。北米の五大湖周辺ではlake effect snowstormとして知られている<sup>4,5)</sup>。このような筋状雲では、長さが数百 km にもおよぶひとつのバンドが直径数 km の積乱雲で構成されている。

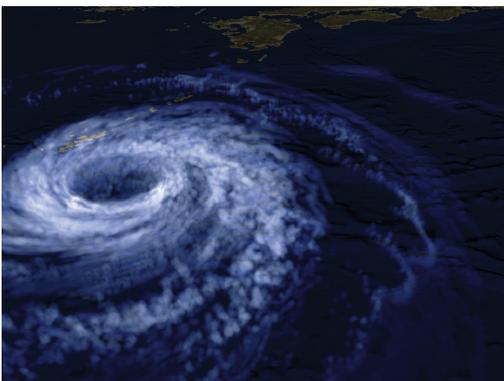
第3図は五大湖を覆う広い領域を、水平解像度500

mで行ったシミュレーションの結果である<sup>6)</sup>。湖上の筋状雲を構成する個々の積乱雲が解像されており、一方、陸上では刷毛ではいたように層状になる。さらに風下の湖上では再び対流が活発になるなど、あたかも衛星画像を見ているかのような結果が得られている。

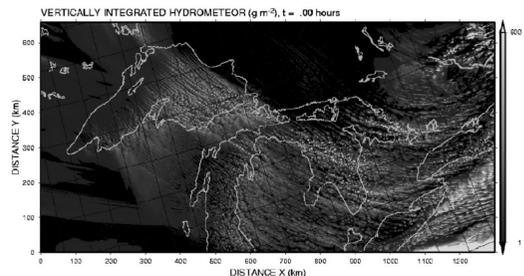
現象の理解における数値モデルの利点の1つとして、数値実験ができることがあげられる。これは現象の本質を抽出したり、地形などの外力の役割を調べたりするときに行われる。地形についての実験では、地形を変形させたり、山などを取り除いたりすることがある。その一例として、梅雨前線に沿う線状降水システムが台湾を通過するとき、台湾の地形によりどのような影響を受けるのかについて、台湾の山の高さを変えて行った実験がある<sup>7)</sup>。その結果から台湾の山脈が、降水の位置や強度、さらには前線の進む速度に強く影響していることが示された。



第2図 1999年9月24日、東海地方で発生した竜巻の実験結果を立体表示したものの、白からグレーの濃淡が渦度を、下面のカラーが地表の温位偏差を表す。



第1図 台風T0418のシミュレーション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。(東京工業大学青木尊之教授と佐藤静香さんのご厚意による。)



第3図 北米五大湖の寒気吹き出しのときにみられる筋状雲のシミュレーション。図中右端のグレースケールは凝結水の鉛直積分値 ( $\text{g m}^{-2}$ )<sup>6)</sup>。

### 3. 予測への応用

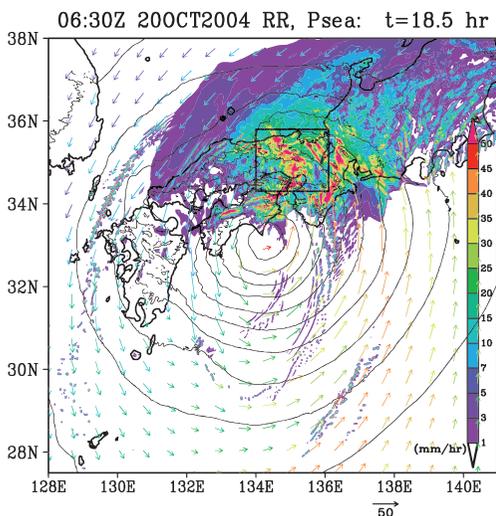
雲解像モデル CRESS は、防災のための気象予測に利用することができる。防災のためには、量的に精度の高い予測が必要である。高解像度でかつ雲のプロセスを正しく計算することにより、降水や風速などについて量的高精度の計算を行うことができる。

その例として台風0423号に伴う豪雨について紹介する<sup>8)</sup>。2004年は10個の台風が上陸したが、そのうちの1つ、台風0423号は最も多くの死者を出した台風である。この台風は多くの降水をもたらし、近畿地方北部でも大規模な洪水を起こした。この洪水のなかバスの屋根で救助を待つ乗客の報道は、この台風による豪雨災害の甚大さを印象づけた。台風0423号の予報実験は水平解像度 1 km で、2004年10月19日12 UTC を初期値として30時間の計算を行った。計算の結果は、台風中心の経路、中心気圧および降水の分布などを非常によく再現した。近畿地方北部の豪雨が発生した時刻では、台風の北から東側の降雨域と近畿地方の豪雨がよく再現された（第4図）。観測ではこの台風に伴い西日本の多くの地点で、 $50 \text{ mm hr}^{-1}$  を超えるような激しい降水が観測された。この予報実験ではそのような激しい降水についても、降水強度とその時間変化の両方を精度よく予測した<sup>8)</sup>。多くの地点で急激な降水強度の増大が観測されたが、実験でもこのような急激な降水強度の増大がよく再現され、これが上空の降雨帯

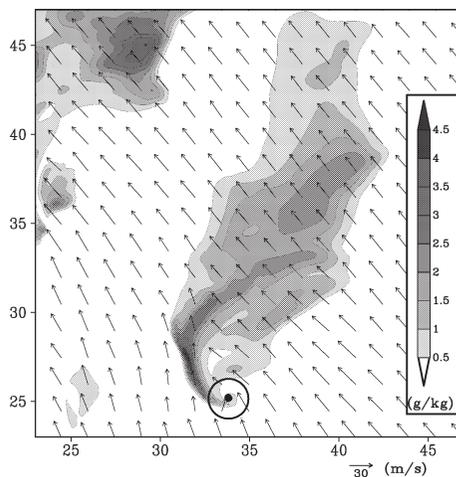
の侵入と対応していることが示された。

もう1つの例として、2006年9月17日に宮崎県延岡市で発生した竜巻のシミュレーションの結果を示す。この実験では、まず台風全体を含む領域で、水平解像度 500 m の予報実験を行った。次にこの結果を初期値・境界値として、水平解像度 75 m の予報実験を行った<sup>9)</sup>。500 m 解像度の実験では、鹿児島県西方海上にある台風中心の東側に、顕著な降雨帯が形成され、延岡市で竜巻が発生した1400 JST には、延岡を発達した降雨帯が通過した。この降雨帯を構成する積乱雲は、スーパーセルの特徴を持っていた。

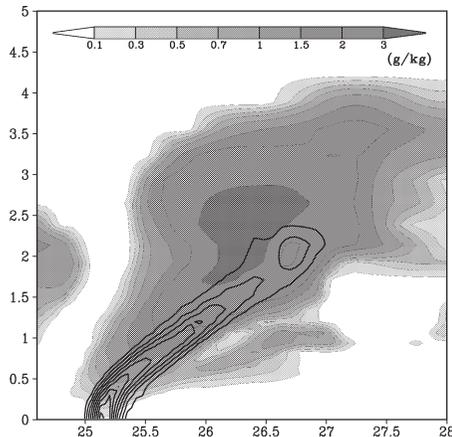
75 m 解像度でも計算領域内にいくつかのスーパーセルがシミュレーションされ、そのうちのひとつが強い渦を伴っていた。第5図はこのスーパーセルの高度 200 m の水平断面を示したもので、スーパーセル南端のフック状構造が明瞭である。この図中の円で示したフック状構造のところに竜巻が発生している。渦度は、円形に集中しており、中心で  $0.9 \text{ s}^{-1}$  以上の極めて大きな渦度となっている。気圧偏差と比較すると、旋衡風バランスが極めて高い精度で成立している。この竜巻の直径は 300 m 程度で、観測されたものとよく対応していた。地上の渦の中心をとる南北鉛直断面（第6図）では、竜巻は地上から高度 2 km 付近まで北向きに傾きながらのびている。竜巻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。竜巻の予測は、そ



第4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分の2004年10月20日0630 UTCの高度1965 mにおける雨水混合比 ( $\text{g kg}^{-1}$ ; カラーレベル)、水平速度ベクトル (矢印)、及び気圧分布。図中の四角形の領域は近畿地方の豪雨の領域を示す<sup>8)</sup>。



第5図 CRESSが再現したスーパーセルの2006年9月17日1400 JSTにおける高度200 mの水平表示。横軸と縦軸の単位は km。グレースケールは雨水混合比。表示領域は宮崎県東方海上。図中の円内に竜巻が発生している<sup>9)</sup>。



第6図 第5図に示した竜巻の中心付近を切る南北鉛直断面。等値線は渦度で、 $0.1 \text{ s}^{-1}$ から $0.1 \text{ s}^{-1}$ 毎に描いてある。グレースケールは雲水混合比<sup>9)</sup>。

れをもたらす雲を予測することで実現すると考えられるので、この結果はそれに向けた重要な一歩といえる。

#### 4. モデルによる現象の発見

気象のシミュレーションは実際の現象を計算機で再現するものなので、新しい現象の発見はないと思われがちであるが、決してそのようなことはない。1 km メッシュのような高解像度の計算は、雲・降水システムをリアルにシミュレーションするので、その結果からこれまで知られていない現象の発見があり得る。その例として東シナ海上の小低気圧をあげる<sup>10)</sup>。

梅雨前線に沿って1000 km スケールの中間規模低気圧(メソスケール低気圧)が豪雨に関係していることが知られているが、データの少ない東シナ海上では豪雨システムの詳細構造に未解明な点が多い。2003年の梅雨期に宮古島で観測を実施するとともに、東シナ海域を対象として予報実験を行った。この期間に強い降水が宮古島付近で観測され、CRESSは宮古島の北に小低気圧の発生を予測した。その小低気圧は前線を伴い、スケールは200~300 km 程度で、より大規模な中間規模低気圧のなかに埋め込まれていた。宮古島の地上観測ではこの小低気圧に伴う気圧変化と豪雨が観測されたが、梅雨期の東シナ海ではこのような小低気圧が豪雨を伴って発生していることをモデルは示した。東シナ海では島での観測しかなく、小低気圧の全体像を知ることは困難である。シミュレーションではこのような観測にかかりにくい現象を捉えることができた。これはモデルによる現象の発見の一例といえる。

#### 5. おわりに

故武田教授が「1 km メッシュの気象学」ということを言われたのは90年代の終わりのころだったと思う。本稿にまとめたように、それは実現されつつあり、さらに高解像度の計算も可能になってきた。ここで我々はもう一度、雲・降水系のシミュレーションには1 km 格子で十分かどうかを考えてみなければならない。梅雨期の沖縄や中国大陸のレーダー観測から得られたおよそ25,000個の対流セルについて、大きさ毎の出現頻度を調べると、1 km 格子では大きい方から30~40%程度の対流セルしか表現できず、90%以上の対流セルを表現するためには水平解像度500 mが必要であることが示された<sup>11)</sup>。対流セルを含む雲・降水システムのシミュレーションをより現実的なものにするためには、数百 m 格子の世界に踏み込まなければならないといえる。

地球シミュレータの登場でこれまでにない大規模な計算が可能になり、その上で雲解像モデルを実行することで、雲・降水のシミュレーションに新しい世界が開かれた。現在、次世代計算機が計画されている。我々はそれに対応したモデルを開発し、次世代の雲・降水系についての計算を目指すべきである。次世代の計算機とモデルではさらに高解像度・高精度の計算が行えるようになり、雲・降水についての研究の新しい扉が開かれることが期待される。

#### 参考文献

- 1) Tsuboki, K. and A. Sakakibara, 2001: Cloud resolving storm simulator, User's guide, 210pp.
- 2) Tsuboki, K. and A. Sakakibara, 2002: High performance computing, Springer, 243-259.
- 3) 坪木和久ほか, 2000: 天気, 47, 777-783.
- 4) Liu, A. Q. *et al.*, 2004: Geophys. Res. Lett., 31, L03101.
- 5) Liu, A. Q. *et al.*, 2006: Bound. -Layer Meteor., 118, 557-581.
- 6) Maesaka, T. *et al.*, 2006: Geophys. Res. Lett., 33, L20813.
- 7) Wang, C. C. *et al.*, 2005: Mon. Wea. Rev., 133, 3217-3242.
- 8) 坪木和久, 榊原篤志, 2006: 自然災害科学, 25, 351-373.
- 9) 坪木和久, 2007: 日本気象学会2007年度春季大会講演集, (91), 91.
- 10) 坪木和久, 2003: 日本気象学会2003年度秋季大会講演集, (84), 181.
- 11) 篠田太郎ほか, 2007: 日本気象学会2007年度春季大会講演集, (91), 99.