

雲の数値モデルにおける大規模並列計算

The Cloud Resolving Storm Simulator: Large-scale Parallel Computations

坪木和久 (名古屋大学 地球水循環研究センター 気象学研究室)

Kazuhiya Tsuboki

Hydrospheric Atmospheric Research Center

Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya

Key Words: CReSS, numerical simulation, cloud model, parallel computations

1. はじめに

地球大気が発生する雲は地球水循環の主役であり、さまざまな気象現象をもたらす。特に積乱雲は、豪雨、雷雨、突風などの激しい気象をもたらす、ときには災害の原因となることもある。雲の形成や発達、大気の力学過程とそこで起こる雲物理過程との複雑な非線形相互作用によって決まる。このため雲・降水の研究及びその応用としての局地気象予報には雲の数値モデルが不可欠である。しかしながら細かい計算格子と多くの従属変数を必要とする雲のモデリングは、非常に大規模なものであり、並列計算が不可欠である。これまで榊原篤志氏 (高度情報科学技術研究機構) と共同で、大規模並列計算機で効率よく実行できる雲解像モデルを開発してきた。このモデルは雲からメソスケール (中規模) 現象のシミュレーションを行うことを目的としており、CReSS (Cloud Resolving Storm Simulator) とよばれる。ここでは CReSS の概要と大規模並列計算の例について紹介する。

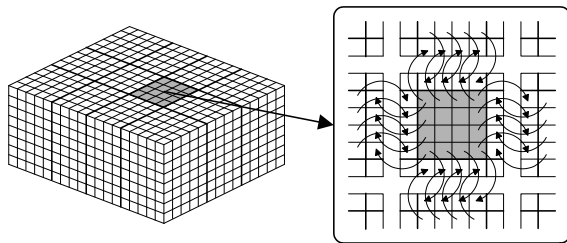


Figure 1: Schematic representation of the two-dimensional domain decomposition and the communication strategy for the parallel computation.

2. 数値モデルの概要

まず CReSS の主要な特徴をまとめる。並列計算には MPI (Message Passing Interface) を使い、領域分割は矩形領域の 2次元分割を用いている (Fig.1)。ここで開発している雲解像モデルは、積雲、積乱雲を詳細に解像するモデルを目標としているので、計算領域としては最大で 500 km × 500 km 程度を考えている。

モデルの力学過程の基礎方程式系は非静力学・圧縮系、計算は 3次元領域で地形を含むことができる。従属変数は、速度、温位偏差、気圧偏差、乱流運動エネルギー及び水蒸気・雲・降水に関する物理量である。雲物理学過程として、固相を含む (冷たい雨の) バルク法のパラメタリゼーションを用いている (Fig.2)。空間微分の表現には差分法を用い、

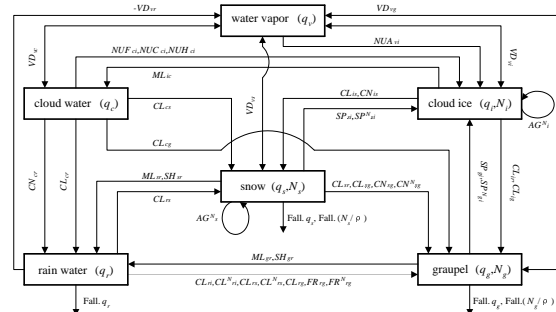


Figure 2: Diagram describing of water substances and cloud microphysical processes in the bulk model.

鉛直・水平とも陽解法または水平陽解法、鉛直陰解法を用いることができる。時間積分はモード分離時間積分法を用いており、音波以外の積分には leap-frog 法を Asselin の時間フィルターを併用して用いている。サブグリッドの乱流は乱流運動エネルギーを用いた 1.5 次のクロージャによるパラメタリゼーションを導入している。下部境界条件として、地表面過程が導入されており、地温は予報される。初期条件には高層観測などから 1次元プロファイルを水平一様に与えるか、格子点値を内挿した 3次元の非均一データを与えることができる。側面境界条件には、放射境界条件を含むさまざまな境界条件の他に、予報では時間変化する境界条件を用いることができる。

3. 竜巻のシミュレーション実験

これまでさまざまな現象について CReSS を用いてシミュレーション実験を行ってきたが、ここでは雲の大規模並列計算の一例としてスーパーセル内に形成された竜巻の実験を示す。対象としたのは 1999 年 9 月 24 日に東海地方で発生したスーパーセルとそれに伴う竜巻である。竜巻の親雲は 10km オーダーの水平スケールであるが、一方、竜巻は数 100m のスケールを持つ。そこでこれらを同時に同じ格子系でシミュレーションするために次のような設定を用いた。格子数は水平に 603 × 603、鉛直に 63、格子間隔は水平 75m、鉛直は 25m ~ 約 200m である。積分時間は 4 時間である。

初期場に温度擾乱を与えて初期の雲を作るが、約 90 分後にはスーパーセルとよばれる一対の上昇・下降流をもつ準定常的な雲が形成された。スーパーセルは非常に強い上昇流をもち (Fig.3a)、下層の収束線の西側にフック状の降水域を形成した (Fig.3b)。この実験ではこの強力な上昇流

の中心部付近に竜巻が形成された。

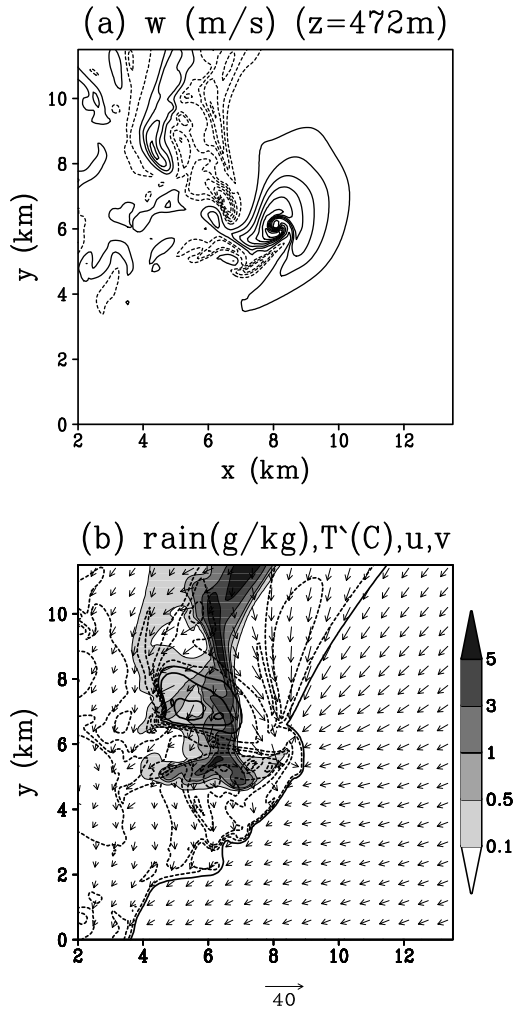


Figure 3: Horizontal display of the simulated supercell at a height of 472 m at 9960 seconds from the initial: (a) vertical velocity (m s^{-1}) with a counter interval of 2 m s^{-1} and (b) mixing ratio of rain at 472 m in height (gray scales, g kg^{-1}), surface temperature perturbation (contour lines, K), and horizontal velocity vectors at a height of 48 m.

竜巻の中心部を拡大すると (Fig.4a)、その直径は 500 m 以下であり、中心の渦度は 0.5 s^{-1} を越える非常に強いものとなっている。この強い渦に対応して -12 hPa の気圧偏差があり、気圧傾度力と遠心力がつりあう旋衡風バランスにある。この竜巻は上昇流の中心部で維持されており、そこからはなれると衰退するが、上昇流中心部ではそれに代わって新しい竜巻が形成され、結果として、スーパーセルの中心部付近では竜巻がほとんど常に存在していた。

4. 局地予報モデルへの応用

先に述べたように、CReSS は実際の気象現象のシミュレーションを、現実的な初期値と時間変化する境界値を与えて行なうことができる。その応用として局地予報モデルとして利用することができる。計算領域はたとえば中部地方程度の領域で、予報時間は 12~24 時間程度が想定される。近年の急速な CPU の発達により、格子間隔が数キロメートルの予報が可能になりつつある。

これまで我々は、台風、梅雨、雷雨、降雪などについて

の予報実験を行ってきた。たとえば台風の実験では計算領域外にある台風が、境界から計算領域に入り込み、計算領域内では実際に観測された降雨帯が形成され、さらに領域から境界を通して台風が出ていく様子がよく再現された。これは CReSS が現実の現象をよくシミュレートし、予報モデルとしても利用できることを示している。

5. おわりに

ここで開発したモデル CReSS は、研究利用に限りソースコードレベルで公開されている。また、共同研究等により十分な実験を行えば、商業利用も可能であるとしている。詳細は <http://www.tokyo.rist.or.jp> にあるが、最新バージョンの情報や利用についての質問などについては直接、tsuboki@rain.ihas.nagoya-u.ac.jp にコンタクトしていただきたい。CReSS には MPI を用いた並列版と単一 CPU 用の逐次版が用意されており、PC-UNIX から大規模計算機までほとんどの計算機で実行を確認している。雲のシミュレーションだけでなく、環境流体の数値計算など幅の広い利用が可能である。

謝辞：本研究は科学技術振興調整費「ダウンバースト現象の高度シミュレーションに関する研究」(研究代表者:神谷信彦教授)により支援されています。ここに記して感謝申し上げます。

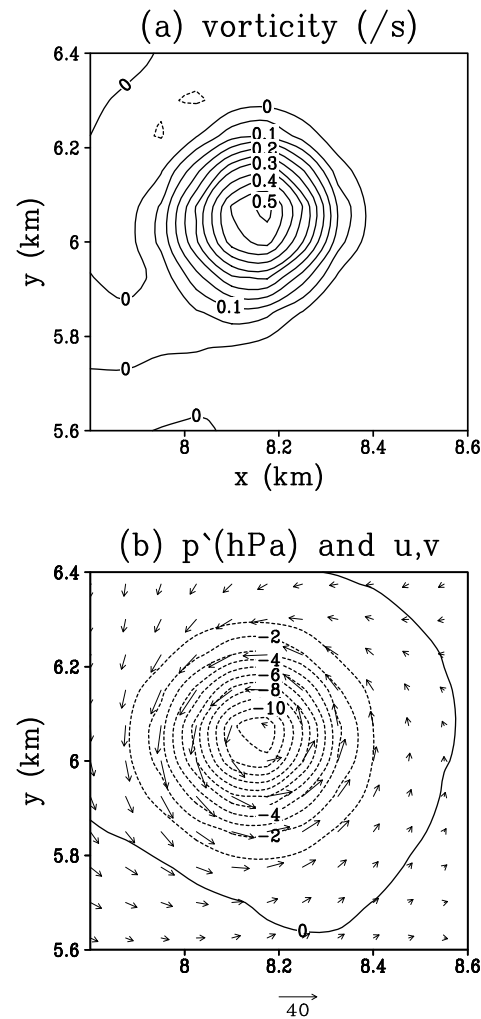


Figure 4: Close view of the simulated tornado within the supercell at a height of 262 m at 9960 seconds: (a) vorticity (s^{-1}) and (b) pressure perturbation (hPa). The arrow scale is shown at the bottom of the figure.