

熱帯のスコールラインの3次元数値実験

那須野智江(地球フロンティア)・斉藤和雄(気象庁・数値予報課)

1 はじめに

非静力学モデルを改善・開発していく上で、各種物理過程(雲の微物理過程、乱流過程など)の検討や分解能依存性の調査は重要なプロセスである。本研究では、熱帯のスコールライン(TOGA COARE,1993/2/22)を対象として様々な数値実験を行ない、これらの課題に取り組んでいる。このスコールラインは、GCSS(GEWEX Cloud System Studies)のモデル比較実験で採用され、観測や他のモデルからの結果も充実しており(Redelsperger et al.,2000 他)、このような目的には格好の事例といえる。

今回はスコールラインの発達における氷の微物理過程の効果を中心に報告する。実験の結果、氷の微物理過程は(この事例のように3次元的な風速シアがある場合)南北非対称性の形成にも深く関わることが示唆された。水平分解能依存性についても簡単に報告したい。

2 実験の設定

気象研究所/気象庁非静力学モデルを用い、 $\Delta x=1\text{km}$ を取った。計算領域は $300\text{km} \times 300\text{km}$ とし、側面境界条件は開放(Orlanski型の放射条件)を用いた(9hまで積分)。初期場(中程度のCAPE、 $z=2\text{km}$ に 12m/s の西風ジェット、南北風は南風シアを持つ)や初期擾乱(下層冷却)はGCSSの設定(<http://www.cnrm.meteo.fr:8000/gcss/>)と同様である。なお、地表摩擦と海面からのフラックス(バルク法)は考慮し、放射の効果はなし、コリオリパラメータは0と仮定した。氷の微物理過程(Ikawa et al. 1991)の効果を調べるため、雲氷、雪、雹を数濃度も含めて予報量としたケース(ICE)と氷の微物理過程を扱わないケース(NO ICE)について比較する。

3 氷の微物理過程の効果

図1に領域平均鉛直流を示す。よく知られているように、氷を扱うことにより上昇流のピーク高度が上がり(6kmから9km)、4h以降は絶対値も大きくなる。初期(4h位まで)の水平分布を見ると(図略)、氷を入れない方がコールドプールの強まりや $z=1\text{km}$ 付近での吹き出し流(西風)の形成が早く、位相速度が大きくなった。これは雲氷が氷となって空中に滞留せずに速やかに雨水に変換されて落下するためである。また、氷を入れた場合には初期の気圧分布に著しい南北非対称性が現れ、南側で気圧が低くなる傾向が見られた。これは雪や氷として滞留する水が環境風により北側に流されるためと思われる。

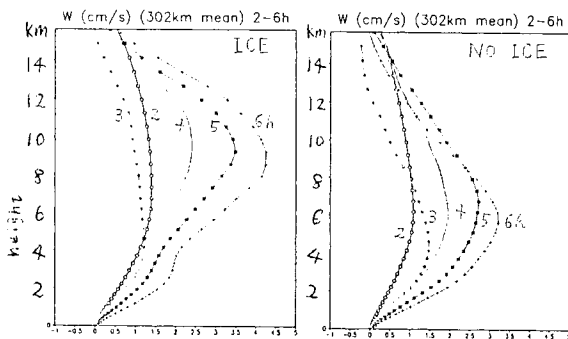


図1. 領域平均鉛直流(左)ICE(右)NO ICE

図2に6hにおける中央付近の東西鉛直断面を示す。氷を入れたケースではより多くの水が雲氷・雪の形で存在し($z=6 \sim 14\text{km}$)、対流性の雲域の後方に層状性の雨域を形成している。氷を入れない場合にも雲氷によって層状性の雨は表現され、地表に達する雨水の領域平均値は6hまではほぼ同程度だが9hには氷を入れた方が多くなった。温位偏差(ICE)には $z=10\text{km}$ 付近の上昇流のピークに対応した昇温のピーク(NO ICEでは $z=5\text{km}$ 付近)が、対流性・層状性の両方の雲域に見られ、氷の昇華・凝結成長による熱放出の効果も明瞭である。また、 $z=5\text{km}$ 付近では雪や雹の融解による冷却が見られる。

気圧偏差には興味深い違いが見られる。氷を入れることにより熱放出による低気圧偏差はより深くまで達し($z=6\text{km}$ 付近にピーク,NO ICEでは $z=1.5\text{km}$ 付近)、leading edgeに沿う狭い領域に集中する。そのすぐ後方では(融解冷却により)気圧が高い。これに対応して、前面からの強い吹き込みがleading edgeに集中し、その後方 $z=4 \sim 6\text{km}$ では(逆向きの気圧傾度のため)弱風域が形成される。

氷を入れないケースでは強い低気圧偏差が下層 $z=2\text{km}$ 以下に集中し、このため下層の後方からの吹き込み(西風)はより西側の領域にまで及んでいる。前述の $z=1\text{km}$ 付近の吹き出し流の早期形成はこのような気圧場の特徴と関連づけられる。また、 $z=4 \sim 6\text{km}$ では東西方向の気圧変化が小さく、東西風速もほぼ一様に東風となっている。このような風速分布の違いは雪・雲氷を通して雨水の分布に影響する(後述)。

また、強い対流の上端にできる高気圧偏差は、氷を入れない場合により低い高度でより大きな値をとる。このことは、鉛直気圧傾度を通じて上昇流の発達を妨げる効果を持つほか、水平風の分布(東風ピークがleading edgeより風下側に存在)にも影響する。

4 南北非対称の形成

図3に6hにおける雨水量($z=4\text{km}$)と気圧偏差($z=5.5\text{km}$)の水平分布を示す。いずれのケースでも対流は北側でより活発であるが、これは主に(スコールラインに相対的な)下層風が北側ではラインに垂直に吹き込むが、南側ではほぼ平行となる(吹き込み角が小さい)ことによる。また、上層では氷、雪、雲氷は北西側に流されるため、雨水量($z=4\text{km}$)も北に偏った分布を示す。

氷を入れた場合、(図2から予想されるように)雨水量や低気圧偏差の極大域はよりleading edge付近に集中し、南北非対称もより明瞭に現れる。例えば、弓形の中央付近では後方に弱い降雨域をもつ典型的なスコールラインの構造が見られるが、北側では強く幅の狭い降雨域が特徴的である。このような違いは風速の分布と密接に関係する。 $z=4 \sim 6\text{km}$ (特に北側)では、ライン上に北東風(おそらく下層からの運動量輸送による)、ライン後方に弱風域(図2)が形成されており、このため雪や雨水が(北西に抜けずに)たまって多量の雨水をもたらすものと思われる。一方氷を入れないケースでは、風速分布の東西偏差が小さいことから、北と中央付近の違いも小さい。このように氷や雪の分布を変える風速分布自体が、氷や雪の熱的な効果の下に形成されている点は興味深い。

また、下層($z=1 \sim 2\text{km}$)では弓形の形成に伴って(先端の南北に)渦の発生が再現されたが、渦の発達過程にも氷の扱いの有無による違いが見られた。発達端はいずれのケースでも渦管のtiltingが主要因となっていたが、

水を入れない場合には コールドプールおよび下層の吹き出し流が速やかに形成され、ラインの南北の端で東西風の南北シアーが強まってほぼ南北対称に渦が発達していくのに対し、水を入れたケースでは上昇流に沿って鉛直に立ったシャープな渦度分布が目立ち、渦管のtiltingやstretchingが重要であることが示唆された。後者では、初期の気圧分布に顕著な南北傾度ができることに対応して、渦の発達にも南北非対称が見られた。

5 分解能依存性

雲の振る舞いの水平分解能依存性を調べるため、 $\Delta x = 1.25, 2, 4, 6, 8$ km について、より広い領域 ($880\text{km} \times 880\text{km}$) を取り、より長い時間 (18h) までの数値実験を行った (図略)。その結果、よく知られているように分解能が粗くなるほどスコールラインの発達が遅れ (4km 以上では 6h までライン状にならない)、逆に成熟期には過剰に発達した。18h までには 6km 以下ではライン状の対流が発達するが、弓型への変形や後方の広い層状性雨域は $\Delta x = 4\text{km}, 6\text{km}$ では再現されなかった (南北非対称は分解能が粗いほど不明瞭)。 $\Delta x = 2\text{km}$ では $\Delta x = 1.25\text{km}$ の結果が定性的にはよく再現されるが、発達が数時間遅れ、下層の渦の発達がより不明瞭化するなど、subgrid-scale の効果も明らかに見られた。

6 まとめと今後の課題

気象研究所/気象庁非静力学モデルを用い、熱帯のスコールラインの 3 次元数値実験を行った。氷の微物理過程の効果として、(昇華・凝固) 熱の放出による (領域平均) 上昇流や昇温のピーク高度の上昇、大気中に存在する水の総量の増加などが見られた。また、leading edge で対流 (低圧部) がより深くまで達し、後方 $z = 5\text{km}$ 付近に (雪・雹の融解による) 冷却域 (高圧部) が形成されるなど、気圧や温度、風速の水平分布にも大きな影響が見られた。風の分布は雪や氷の分布を通して熱の場や降水の分布に影響を及ぼし、水を扱うことにより (3 次元的な風速分布に起因する) 南北非対称がより明瞭に表現された。分解能依存性についても調べ、分解能が粗くなるほどスコールラインの発達が遅れ、逆に成熟期には過剰に発達すること、 $\Delta x = 2\text{km}$ でも subgrid-scale の効果が明らかに存在することを確認した。今後は、氷の微物理過程のうち特に氷晶の核化の定式化や氷のクラスの選定に着目し、いくつかの方法について比較実験を行なってモデルの検討につなげたい。

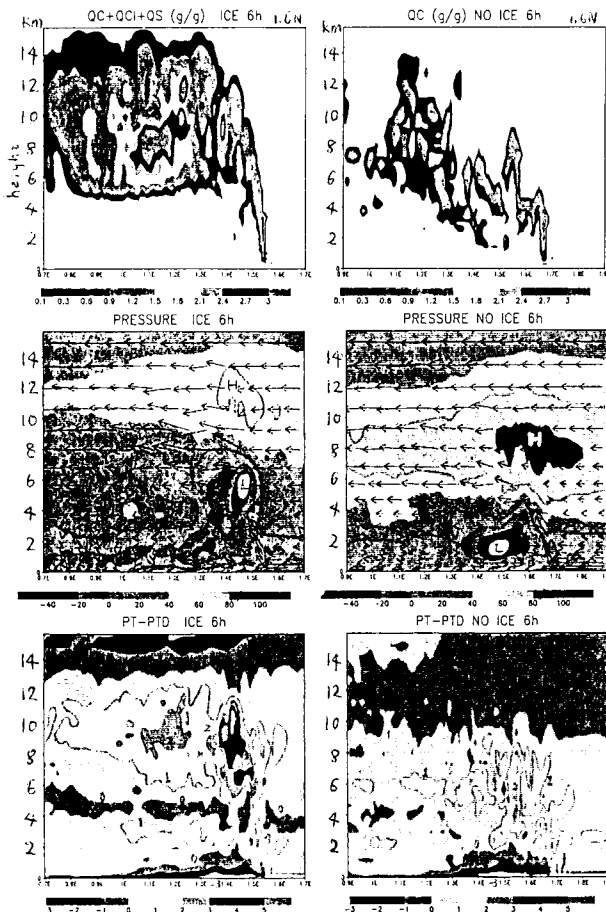


図2. 中央付近の鉛直断面図 (6h) (上) 雲氷+雲+雪 (雲) (中) 温位偏差 (下) 気圧偏差 (左列) ICE (右列) NO ICE (ベクトルはシステムに相対的な風)

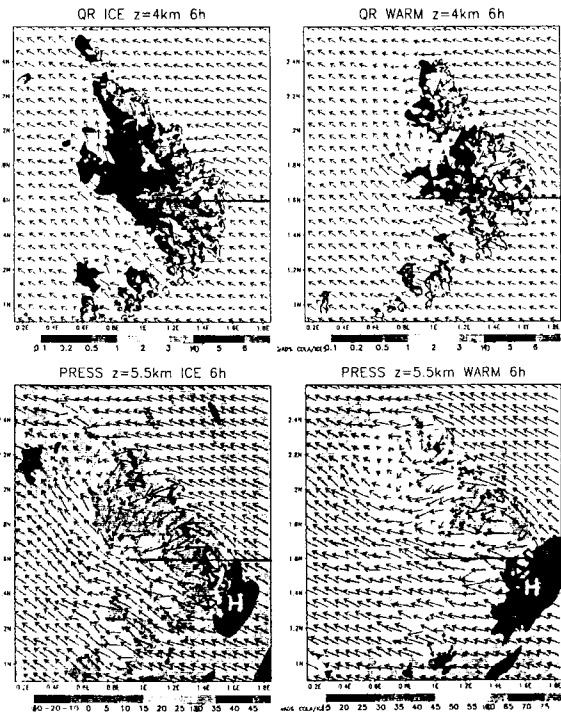


図3. (上) 雨水量 ($z = 4\text{km}$) (下) 気圧偏差 ($z = 5.5\text{km}$) (左列) ICE (右列) NO ICE (ベクトルはシステムに相対的な風、太線は図2の断面を示す)