

全球非静力学大気モデル (NICAM) を用いた対流圏界面領域の解析 (2)

久保川陽呂鎮、藤原正智 (北大院 環境)、那須野智江 (FRCGC)、佐藤正樹 (東大 CCSR/FRCGC)

1. はじめに

熱帯対流圏界面領域 (Tropical Tropopause Layer, TTL) は対流圏の空気塊 (水蒸気を含む) が成層圏に入る前に通過する領域である。成層圏オゾンに影響を与える水蒸気量は、TTL 内の力学場・輸送場によって支配されている (水蒸気量は減少、つまり脱水されている)。TTL から成層圏にかけての水蒸気量の変動は、上述した成層圏オゾン変動だけでなく、雲形成、放射の観点からも気候学的に重要であり、その本質的理解が本研究の目標である。TTL 領域とは、対流圏と成層圏の間にある層で、熱力学的に不安定な対流圏から安定な成層圏への遷移層である。ここでは、対流活動 (鉛直流) は弱く、対流雲も滅多に到達しない、と考えられている。現在、TTL 内の脱水メカニズムの主流と考えられている準水平輸送も、この TTL 内では対流活動は弱い、という考えに基づいている。しかし、この準水平輸送だけが脱水メカニズムの全てではない。熱帯では圏界面を overshoot して成層圏まで到達するような雲が存在することは古くから知られている。このような雲は、水物質の代表であるため、TTL 内/下部成層圏の水蒸気収支に影響を与えていると考えられて来た。また、その影響は航空機観測等で実際に示されている。しかし、この手の観測は領域が限られてしまい、小さなスケールの雲の効果の議論に制限されてしまう。現実大気では、水平に 10000km スケールの巨大な組織化した雲の群れが存在するし、そこから励起される小規模/大規模波動が TTL 内/下部成層圏で脱水を誘起するメカニズムも提唱されている。このような、問題にはモデルを用いての議論が最適である。しかし、熱帯にあまねく存在する小規模スケールの影響だけでなく大規模スケールの影響も同時に評価するようなモデルはこれまで見当たらなかった。しかし、近年このような状況を打破する新たなモデルが生まれた。それが NICAM (Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model) である。地球シミュレーター上で動く NICAM は、水平解像度を細かくとることができ、かつ非静力学方程式を用いて、積雲パラメタリゼーションを使用していないため、陽に流体力学的に誘起された雲を表現している。また、全球にデータがあるため、小規模擾乱だけでなく大規模擾乱も同時に扱える。本研究の目的は、NICAM の出力データを解析することで、(1) 熱帯に存在する雲の雲頂高度の頻度分布、(2) TTL 内で卓越する擾乱、(3) TTL 内で水蒸気値に影響をもたらしているメカニズム、を調べることである。

2. NICAM について

- ・非静力学方程式系を使用し、積雲パラメタリゼーションは使用しない。
- ・格子モデルであり、高次の正 20 面体格子を使用。
- ・水平解像度は地球シミュレーター上で計算する場合、14km, 7km, 3.5km ととれる。
- ・モデルのトップは高度 40km (全 54 層)。鉛直解像度は上部対流圏で約 700m。
- ・雲微物理過程としては、非降水物質である雲水、雲氷、そして降水物質である雨、雪を凝結物として扱っている (Grabowski, 1998)。

今回は水惑星実験のアウトプットデータの解析結果を示す。水惑星実験の SST 分布は帯状一様で、赤道で最大 27°C 、緯度と共に減少する分布である。太陽放射は常に春分/秋分を仮定している。

解析には 7.0km 格子 (3 時間平均値で 30 日分) と 3.5km 格子 (snapshot) で計算された出力データを使用した。3.5km 格子データは、7.0km データの 20 日目のデータを初期値として与え、10 日積分したデータの真ん中の日 (DAY25) に対応している。また、3.5km 格子データを 3 次元データとして出力するにはデータ容量が大き過ぎる為、DAY25 の 00UTC に対応する瞬間の snapshot しかない。2 つのデータは異なるものとして扱う。図 1 は 3.5km 格子データの OLR の水平分布図 (左) と 7.0km 格子データの OLR の時間経度断面図 (右) を示している。3.5km 格子データの OLR の水平分布図では、赤道近辺に水平スケールの大きな組織化した雲群が見られる (図中の SCC-A と SCC-B)。これらは、同データを使用した先行研究 Nasuno et al. [2006] によると、17m/s で東進するスーパークラウドクラスター (SCC; Super Cloud Cluster) であることがわかっている。その東に見られる SCS (Super Convective System) は大きな 2 つの積乱雲で構成された背の高い対流雲である。この対流雲は 7.0km 格子の時系列で見ると、 90°E 付近に見られ、3.5km 格子データに比べ 10° 程西側に位置している。3.5km 格子データと 7.0km 格子データの雲分布の大きな違いはこの点のみである。次に 3.5km 格子データを用いて雲頂高度に関して調べる。

3. 結果

雲頂高度の頻度分布

図は示さないが、SCC-A の雲頂は主に高度 8km に達しており、場所によっては高度 14km にも達する。SCC-B も同様に雲頂が高度 8km 以上であり、場所によっては高度 16km にも達する。雲群の西側よりも東側の方が特に雲頂が高い。これは、新しく活発な雲が雲群の東側に作られている特徴をよく表している。SCS は高度 14km 以上の積乱雲で、場所によっては高度 18km にも達し、局所的な対流圏界面をオーバーシュートしている。ここで、対流圏界面高度は WMO の定義に従って決めた。また、TTL の下端境界高度はよく使用される定義である最小気温減率 (LRM; Lapse Rate Minimum) を使用した。対流活動が活発な領域 (5°S – 5°N , -180° – 180°) 内で平均した気温の鉛直プロファイル (図 2 左) を見ると、最小気温は高度 18.2km にあり、現実大気に比べ 1km 程高い。気温減率のプロファイルより TTL 下端境界高度は 11.2km、対流圏界面高度は高度 18.2km であることがわかる。雲頂高度の頻度分布は、高度 2km 付近と 12–14km 付近の 2 つのピーク (bimodal 構造) を示している。前者は貿易風逆転層に対応し、後者は TTL 下端境界高度の安定相の存在に対応している。ここで、雲は全凝結物 (雲 (水+氷)+雪+雨) $\geq 0.01\text{g/kg}$ で定義した。図は示さないが、7.0km 時系列データでは、5km 付近に 3 つめのピークが現れ (約 2% の頻度)、trimodal 構造を示す日もある。これらの結果は、雲頂高度の分布が現実的な大気をよく再現していることを示している。高度 11.2km を越える雲頂高度は 25.3%、そして高度 18.2km を越える頻度は 0.14% である。高い頻度で平均的な TTL 内に雲が侵入していることがわかる。これらの雲の多くは対流圏中/下層に雲底をもつ対流雲であった。これは、図 2 (中) の雲と TTL/対流圏界面高度の高度分布からも明

確である。図 2 (右) は対流活発域内の鉛直流の絶対値 $|w|$ の高度に対する頻度分布図である。10m/s 越える強い鉛直流 (上昇流に対応) は 0.001 % の頻度で高度 16km、そして 1m/s を越える鉛直流は 0.1 % の頻度で高度 16km に見られる。この結果は、高度 16km 以上では強い鉛直流はほとんど存在しないことを示しており、本来の強い鉛直流が存在しない領域という意味で TTL を捉えるならば、この高度 16km が TTL 下端境界高度に対応すると考えられる。これは、気温減率で定義した TTL 下端境界高度より 4-5km 高い。これらの結果は、対流雲が TTL 内の脱水に影響する可能性を示している。次に TTL 内で卓越する擾乱を調べる。ただし、これ以降は紙面の都合上、7.0km 格子データから得られた結果のみを記述する。

TTL 内で卓越する擾乱

図 3 (左) は対流圏界面高度付近である高度 18.2km の帯状平均からの気温偏差を示したものである。図中の太線は図 1 (右) で示した SCC-A、SCC-B、そして SCS の軌跡を示している。気温の暖/寒偏差はそれぞれ SCC-A と共に東進しているが、わずかに位相が速い。図では示さないが、気温と風の位相分布から赤道ケルビン波であることがわかった。図 3 (右) では、顕著な低水蒸気混合比領域は明確に東進していることがわかる。気温の分布と同様に SCC-A 領域と共に東進をしているが、完全に対応しているわけではない。特に、DAY6 以前においては SCC-A のはるか西側に位置している。また、図 3 (左) の double Kelvin waves 領域という名目づけた領域では、2 つの低水蒸気混合比領域の東進が見られる。この 2 つの東進擾乱は、図 3 (左) の高温偏差の東進と明確に対応している。この高温偏差の東進は赤道ケルビン波の暖位相部に対応していた。つまり、圏界面付近の低水蒸気混合比、および気温場は、組織化した雲群単独による影響よりも、組織化した雲群とカップリングした赤道ケルビン波により大きく影響を受けていた。

TTL 内で水蒸気値に影響をもたらしているメカニズム

図 4 (a)(b) はそれぞれ図 3 (左) で示した、double/single Kelvin waves 領域において、ケルビン波の高温偏差に伴い変動する水蒸気を平均的に調べるために、double Kelvin waves 領域 (65° E-130° E; 462 地点) と single Kelvin waves 領域 (-180° -50° W; 925 地点) において、各経度で帯状平均からの気温偏差が +2K の高温偏差を示した時間から前後 6 日づつコンボジットした結果である。水蒸気混合比の最小値は double/single Kelvin waves 領域で、それぞれ lag +12 時間、lag day +1 に生じていることがわかる。特に、前者では lag day +5 でも再び極小の水蒸気混合比が生じている。しかし、両領域とも最小に達した後、すぐに水蒸気混合比の増加が見られる。しかし、lag day-4 頃と比較して両領域ともわずかに水蒸気混合比が減少していることがわかる。それぞれの最小の水蒸気混合比が生じている時、図 4 (c)(d) を見ると、成層圏から乾燥空気が移流していることがわかる。これは、ケルビン波の下方変位の位相に伴い成層圏から観測空気が移流した結果を示している。図 5 の水蒸気混合比の鉛直分布を見ると、成層圏からの乾燥空気の移流を顕著に表しているが、最小の水蒸気混合比は成層圏から来ているわけではなく、高度 17km-18km に位置している。この時期、この高度では極めて強い西風が生じている。これは、今後すぐに調べるべき問題だが、この最小の水蒸気混合比の生成には、この強い西風に伴う移流の効果も影響しているのではないかと考えられる。成層圏からの乾燥空気の移流と強い西風の影響の 2 つの効果の兼ね合いが最小の水蒸気混合比を生成していると考えられる。ただし、最小の水蒸気混合比を迎えた後、再び水蒸気混合比が増加していることを考えるとケルビン波はブレーキングして不可逆な乾燥空気の輸送を行なったわけではなく、大きな鉛直変位を生じさせただけだと考えられる。しかし、上述したように lag day-4 に比べケルビン波の通過後水蒸気量は減っているため、もしかしたらケルビン波に伴う強い西風の影響により、ブレーキングによる不可逆輸送なしでも水蒸気量を減少 (どこか別の領域へ輸送するだけだが) させる可能性を持っているのかも知れない。

4. まとめ

NICAM の水惑星実験、3.5km 格子データと 7.0km 格子データを解析し、以下の結果を得た。

- 赤道領域には、組織化した雲群 (SCC) や圏界面を overshoot するような背の高い雲 (SCS) が見られた。
- 平均的な TTL に侵入する対流雲は対流活発領域の 25.3 %、そして高度 18.2km を越える頻度は 0.14 % であった。
- TTL 内では赤道ケルビン波が卓越しており、TTL 内の気温場や水蒸気場に対して支配的であった。
- 最小の水蒸気混合比は、ケルビン波の下方変位の位相に伴い、成層圏から観測空気が流入することでもたらされていた。また、ここでは極めて強い西風が生じており、これが移流の効果で水蒸気量に影響している可能性がある。

References:

- Grabowski W. W. (1998), Toward Cloud Resolving Modeling of Large-Scale Tropical Circulations: A Simple Cloud Microphysics Parameterization, J. Atmos. Sci., 55, 3283-3298.
- Nasuno, T., Tomita, H., Iga, S., Miura, H., Satoh, M. (2007), Multi-scale organization of convection simulated with explicit cloud processes on an aquaplanet, J. Atmos. Sci., 64, 1902-1921.

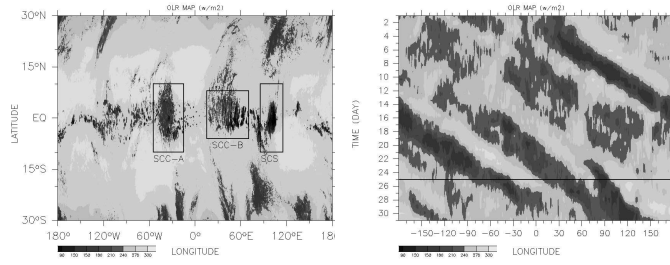


図 1 : (左) 3.5km 格子データを使用した OLR の水平分布図。図中の SCC-A、SCC-B、SCS については本文参照。(右) 7.0km 格子データを用いて 5°S - 5°N 平均した OLR の時間経度断面図。DAY25 に線を引いている。

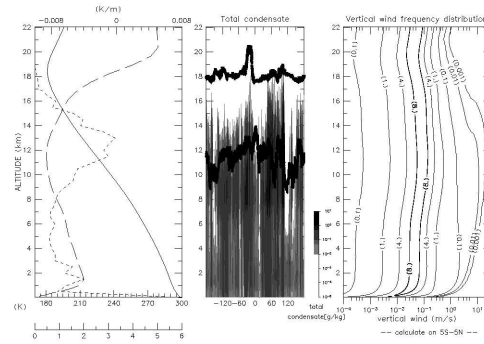


図 2 : (左) 対流活発域 (文中参照) で平均した気温 (実線; 下軸に対応)、気温減率 (短い破線; 上軸に対応) と、対流活発域での雲頂高度の頻度 (長い破線; 2 番目の下軸に対応)。(中) 5°S - 5°N 平均した全凝結物 (文中参照) の経度高度断面図 (色付)。高度 18km 付近の線は WMO の定義に従って決めた対流圏界面高度、そして高度 11km 付近の線は最小気温減率で定義した TTL 下端境界高度。(右) 対流活発域内での鉛直流の絶対値の高度に対する頻度分布。

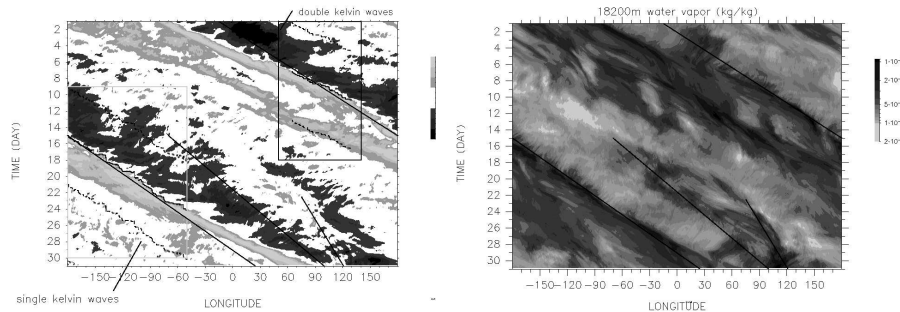


図 3 : (左) 高度 18200m の 5°S - 5°N 平均した気温から帯状平均を引いた偏差の経度時間断面図 (色付)。太い実線は、図 1 (右) で示した SCC-A、SCC-B、そして SCS の軌跡に対応。細い実線と点線は図 4 で示すコンボジット解析の中心を表したもの (右) 高度 18200m の 5°S - 5°N 平均した水蒸気混合比の経度時間断面図 (色付)。太い実線は (左) と同じ。

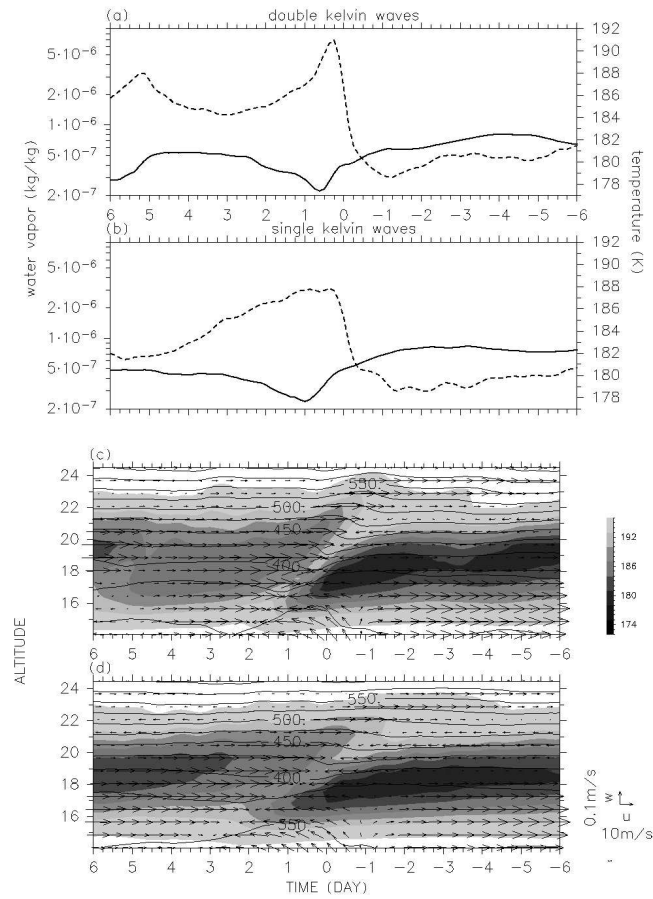


図 4 : (a) 高度 18200m における水蒸気 (実線 ; 縦軸 (左)), 気温 (点線 ; 縦軸 (右)) の時間変化。double Kelvin waves 領域。 (b) (a) と同じ。ただし、single Kelvin waves 領域。 (c) 気温 (色付)、温位 (等値線)、風 (u;w、矢羽) の時間高度断面図。double Kelvin waves 領域。 (d) (c) と同じ。ただし、single Kelvin waves 領域

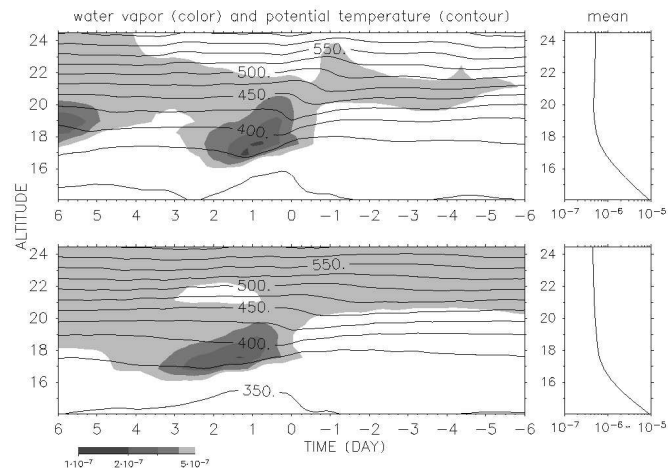


図 5 : (上左) 図 4 (c) と同じ。ただし、水蒸気混合比値 ($5 \cdot 10^{-7}$ kg/kg 以下の領域を色付)。 double Kelvin waves 領域に対応。 (上右) 左図の水蒸気混合比値を lag day-6 - lag day+6 まで時間平均した高度分布図。 (下左) と (下右) はそれぞれ上と同じ。ただし、single Kelvin waves 領域に対応。