

学位論文題名

Roles of deep convection in the tropical tropopause
layer studied using the Nonhydrostatic ICosahedral
Atmospheric Model (NICAM)

(全球非静力学モデル NICAM を用いた対流圏界面領域における
深い対流の役割に関する研究)

学位論文内容の要旨

対流圏と成層圏の間には対流圏界面領域(Tropical Tropopause Layer:TTL)と呼ばれる遷移層がある。対流圏の空気はTTLを通過して成層圏に入り、オゾン層に影響を与える。地表から放出された大気物質のTTLへの輸送や、成層圏へ入る空気のTTL内での脱水メカニズム（気温低下による凝結メカニズム）について、深い対流による直接間接の役割が古くから議論されているが、特にTTL内での脱水メカニズムについて、未だ統一的な見解に達していない。それは、いくつか提案されているメカニズムの時空間スケールが大きく異なるため、それらを同時に評価できないためである。そこで、本研究では、地球シミュレーター上で動く、全球非静力学モデルNICAMの出力データを用いてTTLにおける深い対流と波の役割を調べた。水平分解能は14~3.5kmであるから、個々の積乱雲、組織化した積雲群、大規模スケールの波の間の相互作用を陽に表現している。解析には、2つの実験からの出力データを使用した。1つは、水惑星条件下で計算した実験、もう1つは、2006年12月15日~2007年1月15日の現実的な大気条件下・海陸分布で計算した実験である。

水惑星実験の結果では、積乱雲は対流圏界面高度とTTL下端境界高度をそれぞれ赤道領域の~0.1%、25%の面積頻度でオーバーシュートしていた。対流圏界面付近の気温と水蒸気量の変動は、主に組織化した雲群から励起された赤道ケルビン波によって支配されていた。1000 kmを越えるような大きな対流雲が圏界面高度の変動にもたらす影響は、ケルビン波に比べて小さかった。さらに、大きな対流雲の影響は雲自身が直接与えているわけではなく、雲から励起された重力波によるものであった。加えて、赤道ケルビン波の寒位相部上で、大振幅の重力波が観測された。ここはモデル内で最も低温な領域の1つとなっており、ケルビン波と重力波の重ねあわせがTTLにおける最も効果的な脱水プロセスの1つとなりうることを示唆していた。圏界面付近

の低い飽和水蒸気混合比は、主に赤道ケルビン波の暖位相部上で見られ、下部成層圏からの乾燥空気の輸送の効果と考えられた。

現実大気条件下で計算された実験結果は、惑星スケールで3~6 m/sでゆっくりと東進する積雲群である熱帯季節内振動、いわゆるMadden-Julian Oscillation (MJO)を実際の観測に近い形で再現していた。この結果では、積乱雲は対流圏界面高度とTTL下端境界高度をそれぞれ赤道領域の~0.5%、20%の面積頻度でオーバーシュートしていた。深い対流活動は、主に南アフリカ、インド洋、インドネシア海洋大陸、そして南アメリカで見られた。大陸上の深い対流活動は、地方時の夕方から夜間にかけて活発であった。海洋上では、活発な対流活動はインド洋やジャワ島近海に存在した2つの熱帯低気圧に伴って見られた。熱帯収束帯内では、昼と夜中の半日周期の深い対流活動が見られた。NICAMでシミュレートされた活発な対流活動の地方時依存性は、人工衛星による赤外線観測から得られた結果と整合的であった。圏界面付近の気温変動を各点における約30日間の標準偏差値にて調べた。その結果、アフリカ大陸東部、インドネシア海洋大陸、アンデス山脈東斜面上で大きな変動を示した。これらの領域では、気温が10 K以上も変化する日も見られた。インドネシア海洋大陸上では、大きな気温変動は対流活動に伴っており、日周期成分が顕著であった。アフリカ大陸東部とアンデス山脈東斜面上に関しては、深い対流活動の影響は見られなかった。一方、大規模擾乱にともなう気温変動を時間経度断面図により調べた。インド洋から日付変更線にかけては、MJOと結合した赤道ケルビン波によって、圏界面付近の気温は5 K以上変化していた。西半球においては、20日周期の赤道ケルビン波が圏界面付近で卓越しており、3K以上の気温の変動が見られた。さらに、6日周期の赤道ケルビン波が20日周期の赤道ケルビン波に重なっており、2 K以上の圏界面付近の気温が変化していた。これらの波動による圏界面気温変動は、インドネシア海洋大陸での日周期変動にくらべると振幅は小さいが、東西方向に半球あるいは全球にわたり影響を与えていた。

以上、ふたつの実験結果の解析により、次のことが分かった。水惑星実験では、積乱雲は組織化する傾向にあり、さらにTTLの気温変動を主としてもたらすものは積雲群から励起された大規模波動であること。一方、現実的な海陸分布を与えた実験では、大規模擾乱がやはり広範囲に圏界面気温変動を与えていたが、特にインドネシア海洋大陸上においては対流活動の日周期変動にともなう圏界面気温の顕著な日周期変動がみられ、この地域には主たる影響を与えていること。また、背の高い積乱雲は大陸上と熱帯低気圧内にて生じており、地表から放出された大気物質のTTLへの鉛直輸送量が地理的に大きく異なること。

学位論文審査の要旨

主 査	准教授	藤 原 正 智
副 査	教 授	山 崎 孝 治
副 査	教 授	長谷部 文 雄
副 査	准教授	堀之内 武
副 査	教 授	塩 谷 雅 人 (京都大学生存圏研究所)

学 位 論 文 題 名

Roles of deep convection in the tropical tropopause layer studied using the Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model (NICAM)

(全球非静力学モデル NICAM を用いた対流圏界面領域における
深い対流の役割に関する研究)

熱帯対流圏界面領域あるいは熱帯対流圏界層 (Tropical Tropopause Layer, TTL) は、対流圏と成層圏の間の遷移層であり、対流圏の空気が成層圏へ流入する際の主たる入口である。成層圏オゾンに影響を与える物質のうち水蒸気は、空気塊が TTL を通過する際、TTL 内の気温によってコントロールされている。TTL 内の気温を決定する要因として、背の高い対流雲や、組織化した積雲群が励起する各種大気波動が議論されてきている。しかし、特に対流雲については、雲の中の気温や鉛直流を直接測定することが容易でないため、その役割の重要度に関して諸説があり決着がつかない。また、背の高い対流雲は、オゾンを減少させる触媒となる境界層内の物質を短時間に直接 TTL や下部成層圏へ輸送する役割も担っているため、その地域性等を把握することは非常に重要である。

そこで本研究では、地球シミュレーター上で動く全球非静力学モデル Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model (NICAM) の出力データを用いて、TTL における深い対流と大気波動の気温変動に対する役割を調べた。NICAM は、全球モデルでありながら水平分解能が 14~3.5 km であるので、個々の積雲・積乱雲、組織化した積雲群、大規模スケールの大気波動等の間の相互作用が、現実的にシミュレートされていると期待される。解析には、ふたつの実験、全球が海で覆われた水惑星条件下で計算した実験（水惑星実験）と、現実的な海陸分布と初期条件を与え 2006 年 12 月 15 日 - 2007 年 1 月 15 日の期間を

シミュレートした実験（2006年12月実験）、からの出力データを使用した。

水惑星実験の結果では、積乱雲は対流圏界面高度とTTL下端境界高度をそれぞれ赤道領域の0.14%、～25%の面積頻度でオーバーシュートしていた。10 m/sを超えるような強い鉛直流の頻度は、高度16 kmで急激に減少しており、これより上層は対流活動の直接の影響は弱い領域であることが示唆された。対流圏界面付近の気温と水蒸気量の変動は、個々の積乱雲を現実的にシミュレートしたにも関わらず、組織化した積雲群から励起された赤道ケルビン波によっておおむね支配されていた。水平スケール1000 kmを越えるような大きな対流雲システムが見られたが、それがTTLの変動にもたらす影響は、ケルビン波に比べると小さかった。さらに、その影響は対流に直接よるものではなく、対流雲から励起された重力波によることがわかった。加えて、赤道ケルビン波の寒位相部上で、大振幅の重力波が観測され、これがモデル中で最も低温な領域のひとつとなっており、ケルビン波と重力波の重ねあわせがTTLにおける最も効果的な脱水プロセスのひとつとなりうることを示唆していた。

2006年12月実験においては、惑星スケールで3～6 m/sでゆっくりと東進する積雲群である熱帯季節内振動、いわゆるMadden-Julian Oscillation (MJO) を現実的に再現していた。こちらでは、積乱雲は対流圏界面高度とTTL下端境界高度をそれぞれ赤道領域の0.53%、～20%の面積頻度でオーバーシュートしていた。深い対流活動は、主に南アフリカ、インド洋、西部太平洋、南アメリカで見られた。大陸上の深い対流活動は、地方時の夕方から夜間にかけて活発であった。海洋上では、活発な対流活動はインド洋とジャワ島近海におけるふたつの熱帯低気圧に伴って見られた。NICAMでシミュレートされた対流活動の地域性と地方時依存性は、静止衛星による赤外観測から得られた結果と整合的であった。TTL内の気温変動について、領域的な特徴、熱帯低気圧に伴うもの、大規模東進擾乱に伴うものについて、それぞれ調べた。まず、領域的な特徴について、大きな変動は、東部赤道アフリカ、インドネシア海洋大陸、アンデス、チベットで見られ、特に、インドネシア海洋大陸では局所的な対流活動に伴い振幅10Kに達するような日変動がみられた。熱帯低気圧の雲頂部においては最大6K程度の降温がみられ、時間の経過と共に降温幅は小さくなったが、低温領域は2000 km程度にまで広がる様子が見られた。最後に、全球のTTL気温を大きく変動させていたのは、二種類の赤道ケルビン波であり、振幅は最大で～20 Kに達していた。つまり、水惑星実験の結果同様、赤道ケルビン波の影響が最も大きい、局所的な対流活動によるTTL気温の日変動や、熱帯低気圧に伴う気温変動の影響も存在することが新たに分かった。

審査委員一同は、これらの成果を高く評価し、また研究者として誠実かつ熱心であり、大学院博士課程における研鑽や修得単位などもあわせ、申請者が博士（環境科学）の学位を受けるのに十分な資格を有するものと判定した。