

学位論文題名

Observational and modeling studies
on the three dimensional structure of the tropical
tropopause and its interannual variation.

（熱帯対流圏界面の3次元的な構造とその年々変動についての
観測およびモデルによる研究）

学位論文内容の要旨

熱帯域で対流圏から成層圏に流入した大気は子午面循環において、Rosenlof and Holton (1993) や Holton et al. (1995)で明瞭に表された Downward Control の原理に基づき中高緯度に運ばれ、さらに対流圏に還流している。この交換過程は大気の熱バランスを考える上で重要なオゾンとその生成メカニズムに密接に関係した水蒸気等の微量成分の分布を決めるうえで重要な役割を果たしている。成層圏からの吸い上げに関しては衛星観測により帯状平均ながら「大気のテープレコーダー」と呼ばれる水蒸気の上方輸送がはっきり確認されている。圏界面付近で得られた水蒸気量の情報をほぼ保ちながら輸送されていることから、圏界面付近の脱水効果を調べる重要性が示唆される。Newell and Gould-Stewart (1981) は、対流圏から入り込む入り口を成層圏の水蒸気量と熱帯域の 100hPa の気温から、冬期のインドネシア上空と西太平洋上空、夏季のインドモンスーン領域に限定し、「成層圏の泉」と定義した。しかし、Dessler (1998)は近年のゾンデデータを解析し「成層圏の泉」を不要とした。逆に、Voemel and Oltmans (1999)では、全域からは入り込んでおらず、入り口は限られた領域であろうことを水蒸気データと飽和水蒸気量から推定するなど、成層圏への入り口の問題は未だ解明されていない。

また Sherwood (2000)は冬期インドネシア上空の対流圏界面付近が下降流であることを示した。彼はその原因を水平寒気移流の少なさから積雲上のオーバーシュートによる冷却であると仮説を述べたが、熱帯域における西太平洋上の観測地点が少ないため、水平移流の効果が十分に精度良く表せているか疑問が残る。

したがって本研究ではまず、熱帯域の対流圏界面空間パターンの変動について研究した。圏界面自体の研究としてはゾンデ観測を解析した Reid and Gage (1981,1985,1996)や東西平均場で客観解析データから求めた Appenzeller et al. (1996)などがあり、特に Highwood and Hoskins (1998)は客観解析データから圏界面の空間パターンを再現し、

熱源を与えたドライモデルでその構造を表している。Highwood and Hoskins (1998)に見られるように、圏界面は Newell and Gould-Stewart (1981)の 100hPa における温度分布と類似した構造と年変動をしており、上部対流圏の構造は Matsuno-Gill pattern と呼ばれる馬蹄形の構造を説明することに成功した。しかし、彼女らが客観解析データで求めた空間パターンは 4 年平均場で年々変動を考慮に入れておらず、シミュレーションはドライモデルであり、また鉛直に粗いモデルであった。

客観解析データを用いた年々変動に関しては本研究とは独立に Randel et al.(2000)によって調べられている。

本研究ではまず NCEP/NCAR の客観解析データ (1956 年-1999 年) を用い、年々変動を調べた。年々変動の要因として対流圏側からの ENSO と成層圏側からの QBO による寄与を示す。また対流圏からの ENSO による効果を 1956 年から 1999 年の客観解析データと同時期の海面水温 (SST) を与えたシミュレーションから得られたデータをもとに解析した。シミュレーションは CCSR/NIES の AGCM を用い、圏界面付近の変動を詳しく調べるため水平三角切断 42、鉛直 50 層の高解像度モデルで、SST 変動実験の解析を行なった。

客観解析データを用いた解析では、圏界面の高度 (温度) の変動は 50 hPa の風が西風のときに低く (高く)、El Nino の時に高い (低い) こと、南北の広がりには QBO の方が小さいことが示された。QBO による変動は Plumb and Bell (1982)の理論と良く一致している。また ENSO により圏界面の東西パターンが変動することがわかった。この 2 つの説明変量により冬期では最大 50 % 以上、夏季では最大 30 % 以上も圏界面温度の年々変動を説明できることが判明した。

また、SST 変動実験においても ENSO に関する変動パターンを示した。よって、このモデル実験結果を用いて圏界面付近の構造を詳しく調べてみたところ、冬期のインドネシア上空は Sherwood (2000)の推定と同様、下降流が存在することがわかった。このモデルではオーバーシュootingは存在せず、他の要因を調べる必要が出てきた。圏界面付近では積雲域の東方に上昇域 (でありさらに冷たい領域) がシフトすることがわかった。また Matsuno-Gill pattern が作り出す東風により寒気移流が積雲上空の圏界面付近に起こり、さらに積雲域上空で放射加熱が弱まることで下降流による昇温とバランスしていることがわかった。熱帯域の一部に高海面水温領域を作り、春分に季節を固定した水惑星実験と、次元放射モデルにより上記の結果がさらに確かめられた。

上部対流圏で上昇流の強い領域が圏界面付近で下降流が強いという構造を明確に示すことができた為、ENSO による変動への応答も同時に調べた結果、構造を保ったまま東西にシフトする鉛直流の年々変動が確かめられた。

また等温位解析においてもインドネシア上空は泉とはいえず、対流圏から成層圏へ積雲対流の強い領域上で直接に入り込むのではないことが示唆された。

本研究は Sherwood (2000)の解析を一部支持しながら独自の空間構造を示すことに成功しており、圏界面構造を知る手助けになるのみならず、成層圏変動を対流圏界面の変動から見積もるためには不可欠な研究である。

さらに詳しい解析と詳細な現場や衛星からのデータを用いることにより圏界面の時間空間的変動による気候変動への影響を解明できると期待される。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 山 崎 孝 治

副 査 教 授 藤 吉 康 志

副 査 助 教 授 向 川 均

副 査 教 授 岩 崎 俊 樹 (東北大学大学院理学研究科)

学 位 論 文 題 名

Observational and modeling studies on the three dimensional structure of the tropical tropopause and its interannual variation.

(熱帯対流圏界面の3次元的な構造とその年々変動についての
観測およびモデルによる研究)

熱帯域の対流圏界面は対流圏から成層圏への空気の流入域であり、成層圏の水蒸気や微量気体の変動にとって重要な場所である。圏界面気温や高度が対流活発域の上で馬蹄系の形をとることが Highwood and Hoskins (1998) の最近の研究で明らかにされた。しかし3次元的に詳細な構造はまだ明らかになっていなかった。また成層圏の極端な乾燥を説明するために冬季非常に低温になるインドネシア～西部熱帯太平洋域からのみ成層圏へ空気が噴き出しているという「成層圏の泉」仮説が信じられてきたが、最近、それに対する反論が提出されている。特に、Sherwood (2000) は長期のゾンデ観測の解析からインドネシア域の圏界面およびその直上では上昇流ではなく下降流であることを示し、さらに下降流のメカニズムを探るため、熱収支解析を行なった結果、移流と放射ではバランスしていないので積雲対流の氷粒や空気のオーバーシュートによる冷却が下降流を引き起こしているであろうと推測した。

申請者は熱帯対流圏界面の温度・高度の変動を1956～1999年の客観解析データの解析と圏界面付近で鉛直に高分解能の大気大循環モデル (AGCM) による数値実験で明らかにし、さらに AGCM 実験により、客観解析データでは解析が難しい圏界面付近の構造及び下降流のメカニズムを明らかにした。

まず、熱帯圏界面温度・高度は対流活動の変動に伴って変動することが期待されるので、データ解析によりエルニーニョ・南方振動 (ENSO) に伴う圏界面の変動を調べた。圏界面での冬季の気温極小値はエルニーニョの時、高くな

り、低温域の馬蹄形は東にシフトし南北幅は狭くなり、より帯状になることがわかった。エルニーニョのときとラニーニャのときの差は赤道対称な鉄垂鈴型となる。この変動は海面水温を観測値で駆動した AGCM 実験でも再現され、AGCM の結果の解析により圏界面付近の構造を調べることの妥当性を確認した。観測データには ENSO による変動だけでなく、赤道成層圏準 2 年振動 (QBO) に伴う変動も検出され、これは理論的に得られる QBO 変動に伴う子午面循環の変動で説明できる。即ち、QBO が 50hPa で西風位相の時は赤道で下降流偏差となり、圏界面高度が下がり気温は上昇する。またこれらの偏差パターンは、東西にほぼ一様である。

次に AGCM による数値実験の結果を詳細に解析した。海面水温で駆動した AGCM 実験ではインドネシア域の圏界面とその直上で下降流であり、下降流の形状や大きさも Sherwood (2000) とほぼ一致する結果となった。この下降流生成メカニズムを探るため、理想化した水惑星の条件で赤道対称な暖水領域を与えた実験を行い、圏界面付近の構造を調べた。暖水域では対流活動が活発となり対流圏上部では上昇流が強いが、圏界面付近で上昇流域は東に傾き、それに伴い低温域も東に傾く。暖水域上層の赤道圏界面付近では東風であり、この東風による寒気移流とバランスするように暖水域の西半分では下降流が生じていると考えられる。さらに長波放射による加熱量が積雲活動が不活発な周辺領域に比べて極端に小さくなっていることも暖水域の西半分での下降流を強めている。この小さな長波放射加熱は積雲対流の高さが高いために生じることを 1 次元放射計算により示した。当研究の結果は Sherwood (2000) の推測とは異なり、オーバーシューティングがなくともインドネシア域の圏界面付近で下降流になることを示した。

これらの結果に基づき、申請者は、対流加熱に応答する圏界面の構造に関する新しい概念モデルを提出した。これにより ENSO に伴う圏界面の変動もよく理解できる。また熱帯圏界面を通して成層圏へ輸送される水蒸気や微量気体の振る舞いについても、この成果を基礎として、理解が進むと期待される。

審査員一同は、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、大学院課程における研鑽や取得単位なども併せ申請者が博士 (地球環境科学) 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。