

学 位 論 文 題 名

Cold Trap Dehydration in the Tropical Tropopause Layer Estimated from the Water Vapor Match

(水蒸気 match により評価された熱帯対流圏界層における
水平移流に伴う脱水)

学位論文内容の要旨

成層圏水蒸気は地球の放射収支や大気化学、極域におけるオゾン層破壊過程に深く関与する重要な大気組成である。その存在量および変動は、主に熱帯対流圏界層(TTL)における大気の水平移流に伴う脱水過程により支配される(Holton and Gettelman, 2001)と考えられている。この脱水過程は北半球冬季西太平洋領域において最も効率的に駆動されていると考えられている(Hatsushika and Yamazaki, 2003)。簡略化された脱水過程を用いてラグランジュ的に見積もられた下部成層圏における水蒸気量は衛星観測された水蒸気量をよく再現するものであった(Fueglistaler et al., 2005)が、近年の多くの研究によってTTLにおける極度の過飽和が頻繁に報告されており(例えばPeter et al., 2006など)、TTLにおける脱水過程については多くの謎が残されている。本研究は、過去5年にわたり蓄積されてきた北半球冬季西部熱帯太平洋領域における鏡面冷却型水蒸気ゾンデ・オゾンゾンデ観測(SOWER)データに対して同一大気塊が複数回観測された事例(match)を同定する事により、観測データに基づいて水平移流に伴う脱水量および脱水効率を定量化することを目的とする。

TTLを水平移流する大気塊には断熱近似が有効であるため、脱水過程の記述には温位座標系が便利であるが、ゾンデ観測に含まれる気圧・気温の測定誤差が温位の値に誤差をもたらす。そこで、ゾンデ搭載の全球測位システムによる高度(GPS高度)と測高公式の積分から得られる高度(PTU高度)とを比較することにより、ゾンデ観測値に含まれる温位バイアスを評価する方法を提案した。この解析の結果、SOWERで用いられているRS80ラジオゾンデに有意な気圧バイアスが見い出され、その値は、高度15 km、16 km、17 kmでそれぞれ0.28 K、0.38 K、0.49 Kの温位バイアスに相当することが明らかにされた。この結果を用いてmatch解析に用いるゾンデデータが補正された。

match解析において、ゾンデ観測された大気塊は等温位条件の下で客観解析場から計算された流跡線を用いて追跡される。この際、ゾンデ観測値が十分な空間的代表性を持っている必要がある。また、matchの精度を低下させる要因である、移流時間の長期化に伴う流跡線誤差の蓄積、客観解析場と現実場の差異、対流に伴う大気混合による影響の少ない事例の抽出

など、いくつかの注意すべき点がある。そこで、観測された大気塊について高い空間代表性を保持しているものを抽出した上で、TTLにおけるオゾン混合比の保存性を利用することで、等温位条件が有効とみなされる移流時間、match温位高度におけるゾンデと客観解析との気温差、そして移流する大気塊直下の対流雲頂温度と大気塊気温との差についてそれぞれ臨界値を決定した。得られた臨界値に基づき抽出された事例のみを対象に解析を行うことにより、脱水量の評価における精度を高めることに成功した。こうして特定されたmatchのうち、いくつかの事例はTTLにおける水平移流に伴う脱水の証拠を初めて直接的に示すものであった。

同定されたmatchについて、ゾンデ観測された水蒸気混合比と流跡線計算により評価された移流中の飽和水蒸気混合比を対応させた解析の結果、温位370 K付近で相対湿度約135%に相当する過飽和を経験しても有効な脱水が生じなかった事例が見出された。一方、温位350 - 360 Kでは相対湿度が約130%に達するまでに氷晶形成が開始され、最終的に100%以下にまで脱水されたと解釈し得る事例が見出された。また、原因の特定は困難であるものの、水蒸気量の増加が示された事例も数例含まれていた。

脱水が示された温位高度において、match事例から脱水過程に関する統計的解析を行った。大気塊が保持していた水蒸気混合比と移流中に経験した最低飽和水蒸気混合比とを比較した結果、気温約195 - 210 Kである下部TTLの大気塊は相対湿度 $167 \pm 54\%$ (1σ)までに氷晶形成が開始されることが示された。この値は過飽和に関する過去の研究結果(例えば、Kraemer et al., 2009)と整合的である。一方、移流後に観測された水蒸気混合比と移流中の最低飽和水蒸気混合比との比較によれば、大気塊は相対湿度 $84 \pm 27\%$ (1σ)にまで脱水されていることになる。この値は、相対湿度100%より小さい値にまで脱水されることを統計的有意性を持って示すものではないが、客観解析場で表現されていない温度変動など、現在のmatch解析では考慮されていない過程の寄与を示唆している。

水平移流に伴う脱水効率を、氷晶形成の開始される臨界相対湿度(臨界値 [%])と過飽和状態から飽和相対湿度に漸近するのに要する時間(過飽和緩和時間 [h])の値として見積もった。これらは、仮定された様々な臨界値に対し、match大気塊として観測された水蒸気量および移流中に経験した飽和水蒸気混合比の履歴から、最適な過飽和緩和時間を数値的に定めることにより評価された。この結果、見積もられた温位高度350 - 360 Kにおける過飽和緩和時間の値は最大でも8時間以下であり、多くの研究で報告されている過飽和の値(相対湿度130 - 200%)を臨界値とした場合、1 - 1.5時間程度であることが示された。この値は大気の水平移流の時間スケールに比べて十分短いものであり、下部TTLにおける水平移流に伴う脱水効率がかなり高いことを示唆している。

今回の解析では、残念ながら温位高度370 - 380 Kで脱水を示す事例は見い出されなかったが、今後の観測データの蓄積と本研究で確立されたTTL水蒸気matchの適用により、成層圏に流入する水蒸気量を決定している高度域においても脱水効率の定量化が可能となるであろう。

学位論文審査の要旨

主 査	教 授	長谷部 文 雄
副 査	教 授	山 崎 孝 治
副 査	教 授	藤 吉 康 志
副 査	准教授	藤 原 正 智
副 査	領域長	今 村 隆 史 (国立環境研究所 大気圏環境研究領域)

学 位 論 文 題 名

Cold Trap Dehydration in the Tropical Tropopause Layer Estimated from the Water Vapor Match

(水蒸気 match により評価された熱帯対流圏界層における
水平移流に伴う脱水)

水蒸気は強力な温室効果ガスであるだけでなく、極域オゾン破壊の鍵になる極成層圏雲の生成や水素酸化物による触媒的オゾン消失反応を通して、地球環境に様々な影響を与える。その成層圏混合比は、対流圏大気が成層圏へ流入する際に経験する温度により第一義的に決定されるため、その変動は大気大循環の変調を映し出す指標ともなっている。1940年代のBrewerによる先駆的研究以来、対流圏大気が熱帯対流圏界面を通過する際に曝される低温により成層圏水蒸気量が決まるという考え方は一貫して支持されてきたものの、「成層圏の泉」仮説と矛盾する観測事実が見出され、また、熱帯対流圏界層 (TTL) 概念の導入を契機として、上昇流に伴う冷却にではなく、TTL内を水平移流する際に遭遇する低温条件に注目するHolton-GottelmanのCold Trap仮説が提示されるに至った。本論文は、この仮説を観測的に検証し、この過程による脱水効率を定量化する試みの報告である。その特徴は、過去数年間にわたり熱帯西部太平洋域で実施されてきたSoundings of Ozone and Water in the Equatorial Region (SOWER) プロジェクトによる高精度の水蒸気・オゾンゾンデデータの中から、同一大気塊が複数回観測された事例 (match) を抽出し、その大気塊に含まれる水蒸気量の変化により脱水量を直接的に評価しようとする点にある。

近年の全球測位システム (GPS) の発達により、ゾンデ観測された気圧・温度とは独立で高精度の高度情報が同時に得られるようになってきた。そこで、ゾンデデータの解析を始める前に、測高公式の積分により算出される高度とGPS高度との比較を行い、ゾンデ観測値に含まれる気圧と温度の誤差について検討した。その結果、日射補正の不要な夜間データから系

統的な誤差を見出した。これを気圧バイアスとして同定するとともに、鏡面冷却型水蒸気ゾンデに不可避な応答遅延の効果も考慮して、観測データに補正を加えた。

特定の大気塊に注目したmatchを探索するために、観測点の周囲 (match円内) に多数の点 (大気素片) を配置し、全球客観解析場に基づく流跡線計算の手法により、観測時刻を起点とする大気素片の移動を追跡する。その結果、別の時刻に観測点上空に達してゾンデ観測されたと判断される大気素片をmatch大気塊候補とする。これらの中には、全球客観解析場に表現されない対流の影響を受けて移流中に変質したものなど解析に適さない例が含まれている。そこで、match円内における温度分布と大気素片配置を参照しながら統計的手法に基づいてmatch大気塊の代表性を検討した。さらに、TTLにおけるオゾン混合比の保存性に注目し、等温位条件の仮定が許される移流時間、match温位高度におけるゾンデ観測値と客観解析値との温度差、移流中の大気塊温度と直下の雲頂温度との差についてそれぞれ許容可能な臨界値を決定した。これら臨界値に基づくスクリーニングを全て満足する事例を抽出することにより、理想的なmatch大気塊に対して脱水量の定量化を行った。

同定されたmatch大気塊について、ゾンデ観測された移流前後の水蒸気混合比と流跡線計算により評価された移流中の飽和水蒸気混合比とを対応させた解析の結果、温位350-360 Kの高度域で脱水の観測された事例からは、氷晶が形成されず過飽和状態で存在可能な大気 (氷に対する) 相対湿度 (RH_{ice}) の上限、脱水後の水蒸気混合比の最小飽和水蒸気混合比 (SMR_{min}) に対する比などが評価された。その結果、温位高度350-360 Kでは RH_{ice} が $167\pm 54\%$ に達するまでに氷晶形成が開始され、 SMR_{min} に対して $84\pm 27\%$ にまで脱水されるという結果を得た。

続いて、観測された初期水蒸気混合比と流跡線に沿った温度履歴に基づき、氷晶形成の開始される臨界相対湿度 (RH_{cri}) と過飽和緩和時間 (τ) による脱水効率の定量化を試みた。その結果、130%以下の RH_{cri} を仮定すると τ が数時間となる例が見出されたが、140%以上の RH_{cri} に対して τ は2時間以下と求まった。この結果は、臨界値を越えて脱水が開始されると移流時間に比べて十分短い時間内に脱水が進行することを示している。

観測事実に基づくこのような脱水過程の記述は、match大気塊を用いた今回の解析により初めて可能になったものである。現在の所、温位高度370-380 Kで脱水を示す事例は見出されていないが、観測データの蓄積によりこれを見出すことができれば、今回開発した手法を適用することにより、成層圏へ流入する水蒸気量を最終的に決定している高度域においても脱水効率の議論が可能になると期待できる。

審査委員一同は、これらの成果を高く評価し、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。