

oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 1297-1300.
Thompson, D. W. J., J. C. Furtado and T. G. Shepherd,

2006: On the tropospheric response to anomalous stratospheric wave drag and radiative heating. *J. Atmos. Sci.*, **63**, 2616-2629.

103 : 107 : 108 : 201 : 202 : 204 : 306 (熱帯対流圏界層 ;
脱水過程 ; 成層圏オゾン)

4. 熱帯対流圏界面を通じた物質交換

長谷部 文 雄*

1. 熱帯対流圏界面に関する理解の深化

地球大気鉛直温度構造を特徴づける成層圏・中間圏の存在は、地球大気が主要成分の一つとして酸素を有し、酸素分子の光解離によって生じた酸素原子がオゾン形成し、オゾンが太陽紫外線を吸収しながら光化学平衡を維持する過程で大気分子を加熱することによりもたらされる。対流圏とは異なり鉛直安定度の高い成層圏では鉛直混合が抑制され、対流圏との間に比較的明瞭な境界が形成される。とりわけ熱帯域では、中高緯度より容易に鉛直温度分布上の極小点を特定することができ、対流圏と成層圏とは区別して論じられることが多かった。

熱帯域では、高温の海面水温に規定されて対流圏下層が高温・湿潤であるのに対し、対流圏界面はその高度が高いため中高緯度よりはるかに低温である。Brewer (1949) は英国上空の成層圏の乾燥状態を解明する過程でこの特徴に注目し、対流圏大気は低温の熱帯対流圏界面を選択的に通過して成層圏に進入し、その後、両半球に広がると推定した。地球規模で循環する大気が、熱帯対流圏界面付近で経験する温度履歴により規定される飽和水蒸気圧にまで脱水されて成層

圏に到達するという考え方は、ゾンデ観測により鉛直温度分布に関する気候学的データが全球規模で集積された後も維持され、Newell and Gould-Stewart (1981) の「成層圏の泉」仮説として発展させられた。相当温位が地表付近と等しくなる高度を超えて成層圏へオーバーシュートする現象に注目し、そのような深い対流に伴って生じる混合過程に注目する考え方 (Danielsen 1982) も提起されたが、「成層圏の泉」仮説は、Sherwood (2000) が「泉」の位置する熱帯西部太平洋の圏界面付近で鉛直流が下向きであることを示すまで、一貫して支持されてきた。この下降流は Gettelman *et al.* (2000) や Hatsushika and Yamazaki (2001) による数値シミュレーションでも確認されている。熱帯対流圏界面温度が北半球冬季に最小となる季節変動を示すため、圏界面を通過する大気に作用する脱水にも強弱が現れ、脱水の証拠は大気の水蒸気混合比に記録されて熱帯成層圏をゆっくり上昇してゆく (「大気のテープレコード」; Mote *et al.* 1996)。

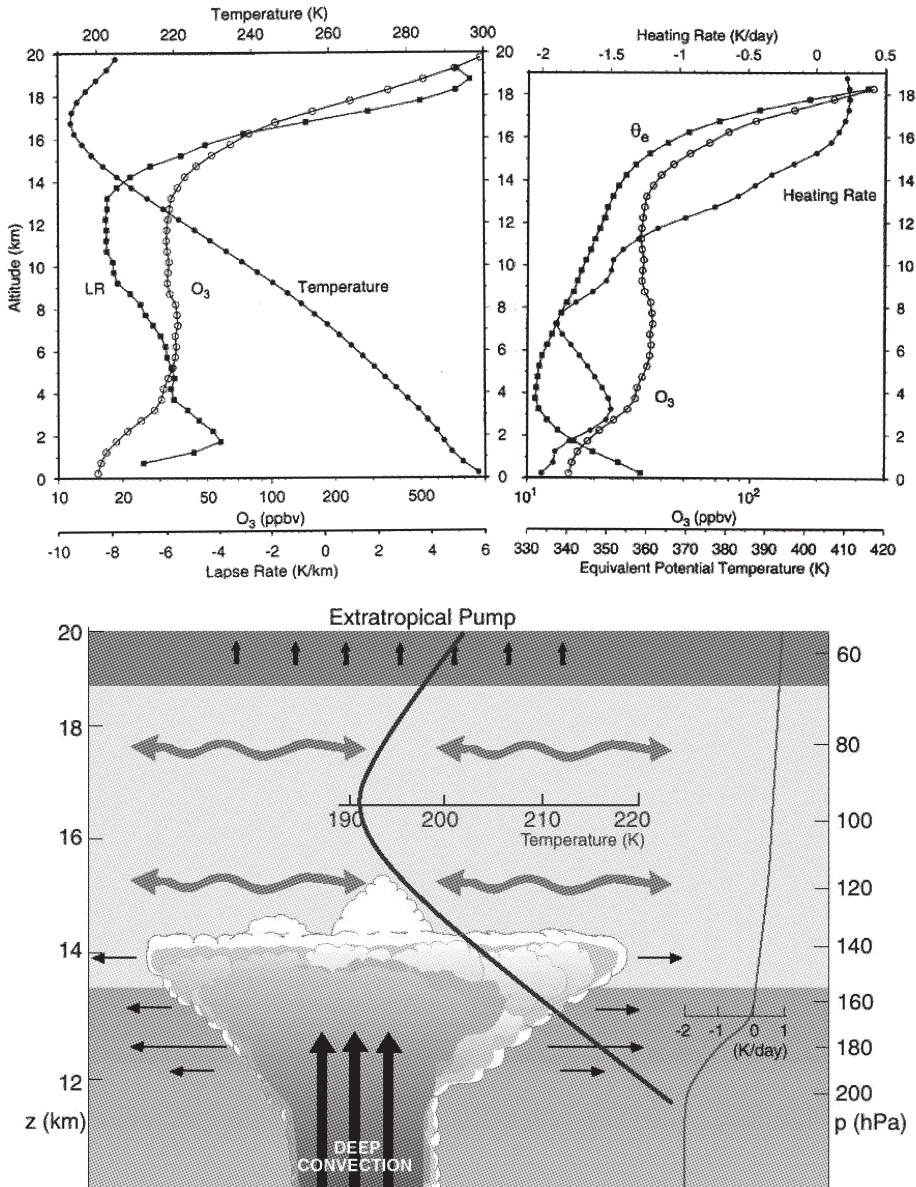
一方、1990年代には成層圏を含む大循環に関する理解に根本的な変革が起こった。海面水温変動による下からの熱的強制に対する応答として理解されてきた熱帯対流圏界面気温の季節変動 (Reid and Gage 1981) や熱帯下部成層圏の上昇流は、中緯度成層圏におけるプラネタリー波の碎波により駆動されているものと解

* 北海道大学大学院地球環境科学研究院。

© 2012 日本気象学会

積されるに至った (Haynes *et al.* 1991; Yulaeva *et al.* 1994; Holton *et al.* 1995; Plumb and Eluszkiewicz 1999; 最近の議論については Kerr-Munslow and

Norton 2006; Norton 2006; Yoshida and Yamazaki 2010を参照). さらに, Highwood and Hoskins (1998) は Atticks and Robinson (1983) の提唱した



第1図 (左上) 熱帯域における標準的な温度 (K), オゾン混合比 (ppbv), 鉛直温度勾配 ($K\ km^{-1}$) と (右上) 相当温位 (K), オゾン (ppbv), 加熱率 ($K\ day^{-1}$) の鉛直分布 (Folkins *et al.* 1999). オゾン混合比や鉛直温度勾配の増大は温度極小 (cold point) よりも下から始まり, 相当温位が地表面と等しい値をもつ高度も温度極小より下に位置する. (下) 熱帯対流圏境界層 (TTL) の概念図 (Holton による). 深い対流からの主要な吹き出し高度は12-14km にあり, 中緯度からの吸い上げの効く高度 (約19km) との間に TTL が広がる. TTL では水平移流が卓越し, 正味の放射加熱が正のため大気はゆっくりと上昇する.

熱帯対流圏界面層 (tropical transition layer; もしくは tropical tropopause layer; TTL) を再評価し、熱帯の対流圏界面は対流圏と成層圏を明瞭に区分する面ではなく、200hPa 付近から80hPa 付近までの高度域に広がる厚みをもった層として理解されるべきであると示した。この TTL は、対流圏の主要な対流の吹き出し高度より上に位置しながら、中緯度の碎波により駆動される吸い上げ効果の十分に及ばない高度にある (第1図)。

TTL 概念の導入は熱帯の対流圏界面近傍における脱水過程の理解に全く新しい仮説を導くこととなった。Holton and Gettelman (2001) は、水平移流している大気が低温域に遭遇すると水蒸気が凝結し、その空間スケールが十分大きければ、生成された氷晶が落下することにより、大気に脱水が生じることをメカニスティックモデルにより示した。この新しい仮説は、脱水を引き起こす大気の冷却を上昇運動に伴う断熱過程に求める従来の考え方と鋭い対照をなすものである。この仮説は、流跡線モデル (Gettelman *et al.* 2002) や大気大循環モデル (Hatsushika and Yamazaki 2003) による検討を経て、次第に多くの研究者の支持を集めるようになった。Fueglistaler *et al.* (2005) は熱帯下部成層圏を起点とする後方流跡線を計算し、それに沿って対流圏大気が輸送されてくる間に温度履歴により推定される飽和水蒸気圧にまで脱水されると仮定することにより、観測される下部成層圏水蒸気変動の主要な特徴が再現されることを示した。

しかし、TTL は水平流のみの卓越する静穏な領域ではなく、大気波動に充ちた変動性の高い領域である (Tsuda *et al.* 1994; Fujiwara *et al.* 1998)。現場観測により見いだされた大気波動は、乾燥した成層圏大気を上部対流圏に引き下ろすとともに、対流圏大気が湿潤なまま成層圏に侵入するのを防ぎ、脱水作用をもつ「ポンプ」として機能すると考えられる (Fujiwara *et al.* 2001)。また、季節内振動に伴う変動性も TTL における脱水効率に大きな影響を与えている。Eguchi and Shiotani (2004) は、水平移流に伴う脱水が連続的に生じるのではなく、下部境界における熱的強制に対する応答として生じる Kelvin 波と Rossby 波からなる組織化された系 (いわゆる Matsuno-Gill パターン) により間欠的に生じることを示した。一方、TTL は北半球夏季モンスーンに伴う湿潤化の影響下にもあると考えられる (Chen 1995; Postel and Hitchman 1999; Dethof *et al.* 1999)。チベット域の高気圧

は成層圏にまで広がっているため、このような変動は、中緯度下部成層圏と熱帯対流圏との間の物質交換にも寄与すると考えられる (Horinouchi *et al.* 2000; Gettelman *et al.* 2004)。

2. 成層圏大気微量成分に対する TTL の役割

TTL における脱水過程は、水蒸気を通して成層圏オゾンに影響を与える。まず、水蒸気はオゾンの光解離により生じる励起状態の酸素原子 O(¹D) との反応により水酸基ラジカル OH を生成し、触媒的オゾン消失反応系の一つである HO_x サイクルの駆動源となる。また、オゾンホール内における一連のオゾン消失反応の起点となる異相反応を進行させる場としての極成層圏雲 (Polar Stratospheric Clouds) やエアロゾルの核形成に関与する。さらに、水蒸気は強力な温室効果ガスであるため成層圏の放射熱収支に関与し、温度依存性のある光化学反応係数を通してオゾンをはじめとする各種大気微量成分の分布に影響を与えるだけでなく、地表面の温暖化にも強く関わっている可能性がある (Solomon *et al.* 2010)。

気候変動は、輸送過程・大気組成・温度場を通して成層圏オゾンに影響を与え、逆に成層圏オゾンは、放射過程とそれに続く化学過程を通して温度場に影響を与え、温度場の変動は輸送過程を変調する。温室効果ガスの蓄積により生じた地球環境変動は、対流圏から成層圏へ TTL を横切って流入する大気質量を増加させていると言われている (Rind *et al.* 2001; Butchart and Scaife 2001)。成層圏へ流入した大気は中緯度成層圏における碎波により吸い上げられるが、その速さは「大気の年齢」(mean age of air) により表現されるようになってきた。この「年齢」は、特定の時刻に成層圏内のある位置を占める大気塊が対流圏との接触を断たれてからの経過時間の平均値として定義される。その値を精度良く見積もるのは容易でないが、化学気候モデル (CCM) を用いた見積もりによれば、上部成層圏 (1.3hPa) におけるその値は1975年以降2000年までの間に15%ほど減少しており、この期間がオゾン層破壊の進行した期間と対応するとされている (Austin *et al.* 2007)。

地球上の炭素収支に大きく貢献している海洋生物の活動は、揮発性有機化合物 (VOC) の生成や循環にも深く関わっている。VOC は海洋性エアロゾルの起源となって負の放射強制をもたらすだけでなく、海洋や海洋大気の組成変動を引き起こす。特に海洋生物活

動が活発な東太平洋熱帯域では VOC 生成が盛ん (Yokouchi *et al.* 2008) な上、水温が高いため大気への放出量も多いことが予想される。これらの化合物やその分解生成物は対流活動により TTL まで持ち上げられ、やがて Brewer-Dobson 循環に乗って成層圏内を輸送される。これらの内、短寿命 (τ 化学過程 < 半年) の組成、とりわけ臭素 Br を含む組成は下部成層圏のオゾン収支に対して重要である (Salawitch 2006) が、成層圏へ輸送されるまでの間、TTL 内で様々な化学過程・力学過程にさらされる。特に、氷に取り込まれる性質のある組成 (例えば HCl, HBr, HI など) やエアロゾルの場合、TTL 内脱水過程の時間スケール (τ 滞留時間) と τ 化学過程との大小により、成層圏への輸送効率は大きく異なる。すなわち、主要な脱水過程が水平移流なら、上記の組成の成層圏オゾン化学に対する役割は、対流過程が主役を演ずる場合と比較して限定的となる。

なお、Fueglistaler *et al.* (2009) に TTL に関するレビューがある。

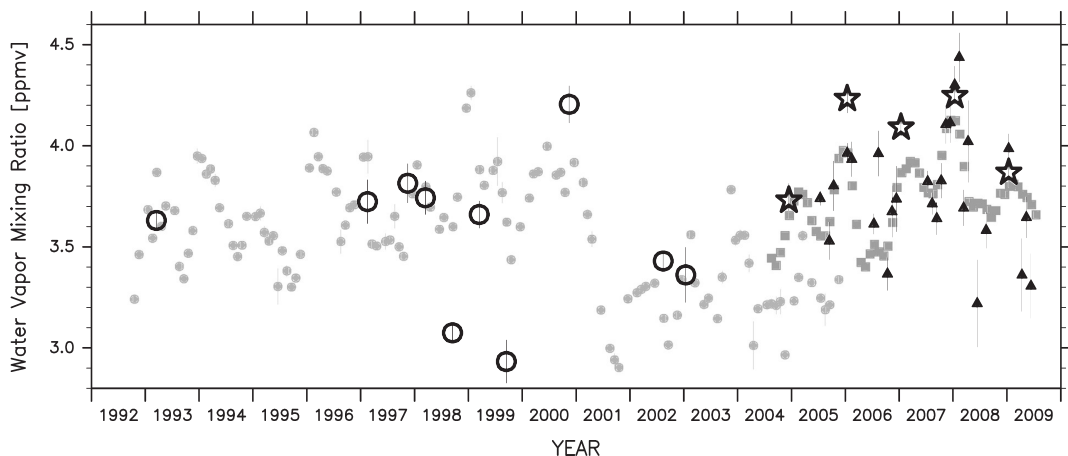
3. TTL の長期変動

TTL における脱水効率を直接反映するのが熱帯下部成層圏における水蒸気量である。しかし、通常の高層気象観測に用いられる湿度計は、薄膜に浸透する水蒸気分子による静電容量変化に基づいて相対湿度を測定するため、乾燥した成層圏において十分な精度をもたない。これに対して、冷却した鏡面上に霜の膜を維

持し、その温度から決定される大気の霜点温度を水蒸気量に換算する鏡面冷却式水蒸気ゾンデ (Vömel *et al.* 1995; Vömel *et al.* 2007) は、水の霜点温度という基本的物性に基づいて水蒸気圧を測定するため、絶対精度が高く乾燥した成層圏でも高精度のデータを得ることができる。残念ながら、この方式による長期間の観測は米国海洋大気庁 (NOAA) が 1980 年から北半球中緯度 (Boulder) で実施してきた観測しか例がないが、この観測データに基づき、Oltmans and Hofmann (1995) は、1981 年から 1994 年までの期間中、下部成層圏水蒸気が増加傾向にあることを示し、その湿潤化は成層圏で酸化されて水蒸気を生成する対流圏起源のメタンの増加では説明できないとした。このデータは、様々な誤差を含むため、何回かの再解析がなされているが、最近の結果によると、中緯度下部成層圏における長期的な増加率は $0.3 \sim 0.7\% \text{ year}^{-1}$ 程度であるが、2001 年頃に急激な減少を示し、その後、低い値のまま推移しているとされている (Scherer *et al.* 2008)。

一方、1991 年に打ち上げられた人工衛星 UARS に搭載された HALOE は、2005 年まで水蒸気を含む各種大気微量成分の全球観測を実施してきた。その結果によると、ゾンデ観測に見いだされる 2001 年頃の急激な水蒸気の減少は同様に認められるが、Boulder におけるゾンデ観測とは必ずしも整合的な結果に到っていない (Randel *et al.* 2006)。

熱帯下部成層圏における現場観測に基づいた水蒸気



第2図 鏡面冷却式水蒸気ゾンデ (白丸, 星印, 三角形) と人工衛星 HALOE (淡い色の点) と MLS (淡い色の四角形) により緯度10度以内の赤道域で観測された水蒸気混合比を68-37hPa 高度で平均した値の時系列 (Fujiwara *et al.* 2010)。

の長期変動は、最近になってその描像がようやく明らかになってきた。Fujiwara *et al.* (2010) は、1993年から2009年にかけて断片的に実施されてきた熱帯域における水蒸気ゾンデデータを整理することにより、熱帯下部成層圏における長期変動を含む様々な変動の様子を明らかにした。それによれば、中緯度と同様に熱帯域でも1990年代に増加傾向が認められ、2000年代初頭に水蒸気量は低下しているが、2004年以降は回復傾向が認められるようである（第2図）。

4. SOWER プロジェクト

熱帯域におけるオゾン・水蒸気のゾンデ観測は、1990年代半ばに計画され、1998年の熱帯東部太平洋 Galapagos 諸島における観測を手始めに、Soundings of Ozone and Water in the Equatorial Region (SOWER) プロジェクトとして、集中観測の形で継続されてきた (Hasebe *et al.* 1998)。当初の目的は太平洋を横断する規模でのオゾン分布の経度構造の解明にあったが、その後、前述の鏡面冷却式水蒸気ゾンデを使用して成層圏高度まで高精度の水蒸気観測値を得ることにより、TTLにおける脱水過程の解明に焦点を移してきた。初期の解析結果によれば、TTL内を水平移流している大気塊は、過去数日の温度履歴に基づいて評価される最小飽和水蒸気混合比と比較して、概ね2倍程度の水蒸気を含んでいる (Hasebe *et al.* 2007)。この解析を発展させるため、SOWERでは、同一大気塊を複数回観測してその変化を直接計量する「水蒸気 match」を試みてきた。この手法による最新の解析 (Inai *et al.* 2012) によれば、次のような結果が得られている。すなわち、大気塊が全球客観解析値で表現される場を移流すると考えるとき、① TTLでは水に対する相対湿度が180%に達するまでに氷晶形成が開始される、②脱水の時間スケールは2～3時間程度である、③氷晶形成が一度始まると、大気塊が移流中に経験する最低飽和水蒸気混合比の約80%相当にまで脱水が進む。これらの結果は、水平移流に伴う脱水がかなり効率的に進むことを示しているが、この解析で脱水を示す match 対として抽出された大気塊の大部分が下部 TTL (350-360K 温位面) にあり、成層圏に流入する水蒸気量を決定づける高度域の描像の記述は、今後の課題として残されている。

TTLにおける水蒸気と氷晶の同時観測は、脱水の進行過程の理解に対して有益である。SOWERでは、ゾンデ観測点にライダーを設置し、可能な限りゾ

ンデとの同時観測を実施している。その結果、水蒸気ゾンデにより水過飽和状態であることが確認された高度域にライダーで巻雲が観測された。興味深いことに、巻雲の存在する高度域に対応して相対湿度が極小を示しており、水平移流に伴う脱水がまさに進行中の大気塊を捉えたことが推定される。ここで観測された過飽和は対水相対湿度152%と見積もられ、Koop *et al.* (2000) により熱力学的に評価された、氷晶形成の開始される臨界相対湿度と概ね一致するとされている (Shibata *et al.* 2007)。また、Fujiwara *et al.* (2009) は、観測船「みらい」搭載のライダーで観測された TTLの巻雲を解析し、水平移流と並んで赤道 Kelvin 波が TTLにおける巻雲形成に対する一つの重要な過程であることを示した。

地上に設置したライダーは、観測点上空の巻雲を連続的に観測するのに好都合であるが、対流圏中層・下層に対流性の雲が存在すると TTLの観測は不可能である。それに対して、Winker and Trepte (1998) により始められた衛星搭載ライダーによる巻雲観測は、固定点の連続観測ができず水蒸気ゾンデとの同時観測の機会が多くないという弱点はあるものの、天候に左右されず広域にわたって TTLの巻雲を観測できる。衛星ライダーによる熱帯全域をカバーする観測は、固定点における観測と相補的であり、巻雲の形成とその脱水過程における役割を統計的に明らかにする手段として有用である。同一軌道上を連隊飛行する複数の衛星 (A-train) を利用することにより、熱帯域の深い対流をライダー CALIOP やレーダー CloudSat など同時観測し、成層圏へ注入される水蒸気量を評価する試みもなされている (Iwasaki *et al.* 2010)。

5. 結論と提案

Brewer や Dobson による大気微量成分の観測とその全球分布に関する考察を端緒とする、成層圏を含む全球規模の物質輸送に関する研究は、1990年代以降、質的な転換をとげ、熱帯対流圏境界層 (TTL) 内の水平移流に伴う脱水という新しいメカニズムが提起されるに至った。TTLを通じた物質交換は、力学・化学・放射の相互作用が本質的に重要な成層圏の特性と相まって、人間活動により破壊されたオゾン層の回復を占う上でも、地球温暖化の将来予測の精密化という観点からも、重要な研究課題である。飽和水蒸気圧の顕著な温度依存性故に、成層圏水蒸気量は TTLにおける循環場の変動を映し出すよい指標であるが、我々

の理解は、その変動の原因を特定するほどにまでは進んでいない。TTLおよび熱帯下部成層圏の水蒸気変動を、精密な現場観測に基づき定量的に記述することは、依然として重要な科学的課題である。

このような認識に基づき、我々は今まで積み上げてきた研究をさらに発展させることにより、TTLを通じた物質交換に関する理解を深めたいと考えている。具体的課題は次のように整理できるだろう。

① SOWERの継続と発展。SOWERは、NOAAの研究者の技術協力の下、エクアドル (INAMHI)、キリバス (気象局)、インドネシア (LAPAN)、ベトナム (気象局) 現地協力者の献身的な努力により実施されてきた国際共同研究である。熱帯太平洋を横断する広大な領域を観測対象としながら、衛星では観測できない高分解能鉛直分布データを必要とするTTL脱水過程の研究は、現場観測に頼らざるを得ない。水蒸気matchには更なる精密化が求められるが、流跡線解析をベースにした物質輸送・組成変動に関するラグランジュ的記述は有用である。NASAやNCARをバックに持つ米国研究者が航空機観測を武器に取り組んでいるのに対し、我々は遙かに小さい予算規模のゾンデ観測で独自の研究を進めてきた。航空機観測は様々な物理量を広域同時観測できるという長所があるが、脱水の進行する現場である熱帯西部太平洋は、米国本土をベースとして航空機観測を実施するには遠すぎ、手軽に動ける気球観測に立脚し地の利を持つ日本人研究者が世界の研究をリードすべき領域である。

② 過飽和限界に関する観測事実の集積。SOWERによるゾンデ観測のみならず、航空機観測においても極度の過飽和が観測されているが、その雲物理学的理解には越えるべき大きな壁がある (Peter *et al.* 2006)。現場観測の立場からは、鏡面冷却式水蒸気ゾンデに不可避な応答遅延の問題に取り組む必要があると考える。すなわち、鏡面冷却式水蒸気ゾンデにおいては鏡面の霜膜がそれに接する大気中の水蒸気と平衡状態を維持していることが前提となるが、低温で乾燥したTTLにおいては、平衡の時定数が長くなり、飛行中のゾンデが経験する環境変化に素早く追従することは原理的に不可能である。相対湿度を算出する際に必要な飽和水蒸気圧は、十分に早い応答特性を持つ温度センサーにより算出されるため、鏡面冷却式水蒸気ゾンデにより観測される相対湿度には、気温測定に対する霜点温度測定有位相遅延効果を適切に取り込むことが必要である。Lyman α 照射による発光を利用す

る水蒸気ゾンデ (Yushkov *et al.* 1998) は、水蒸気混合比の絶対値において任意性を免れないが、応答時間は十分短いため、鏡面冷却式水蒸気ゾンデとの併用により、過飽和度の測定精度を向上させる上で有用である。

③ 大気球を用いた大気サンプリング。海洋生物活動が活発で、対流圏大気の成層圏への流入域でもある熱帯における大気サンプリングは極めて興味深い。日本の得意分野であり、実現の期待が高まっているが、これにより様々な大気微量成分の他、オゾンや水蒸気の同位体に関する情報も得られ、TTL内の移流・混合に関する新たな知見が得られると期待される。

④ 4次元同化を活用した現場観測の支援と取得データの有効利用。移流する大気塊のラグランジュ的記述は脱水過程を含む大気質変動の記述において有用であるが、利用する全球客観解析場の現実性は根元的な前提条件である。可能な限り高度な同化手法を高分解能モデルに適用することにより、通常の全球客観解析データを用いた解析では記述できない、サブグリッドスケールの現象の寄与や非断熱加熱の影響を評価し、より高い時空間分解能で脱水場の気象学的記述を行うことで、精度を高めることができる。また、アンサンブル実験を行うことにより、気象場に含まれる誤差が移流経路や温度場にもたらす不確実性を評価し、解析結果の信頼性を向上させることができると考えている。

謝 辞

SOWERの開始にあたり推薦状を執筆し、オゾンに加えて水蒸気の観測を勧めて下さった故J. R. Holton氏に感謝します。SOWERは塩谷雅人氏、藤原正智氏、H. Vömel氏をはじめとする多くの研究者との共同研究として推進されてきました。現場観測では、エクアドル国立気象水文研究所 (INAMHI)、キリバス気象局、インドネシア航空宇宙庁 (LAPAN)、ベトナム気象局、および「照洋丸」「みらい」の観測支援スタッフのお世話になりました。ここに謝意を記しお礼に代えさせていただきます。また、オゾンに対する揮発性有機化合物の影響についてコメント下さった国立環境研究所の白井知子氏と横内陽子氏に感謝します。

参 考 文 献

Atticks, M. G. and G. D. Robinson, 1983: Some features of the structure of the tropical tropopause. *Quart. J.*

- Roy. Meteor. Soc., 109, 295-308.
- Austin, J., J. Wilson, F. Li and H. Vömel, 2007: Evolution of water vapor concentrations and stratospheric age of air in coupled chemistry-climate model simulations. *J. Atmos. Sci.*, 64, 905-921.
- Brewer, A. W., 1949: Evidence for a world circulation provided by the measurements of helium and water vapour distribution in the stratosphere. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 75, 351-363.
- Butchart, N. and A. A. Scaife, 2001: Removal of chlorofluorocarbons by increased mass exchange between the stratosphere and troposphere in a changing climate. *Nature*, 410, 799-802.
- Chen, P., 1995: Isentropic cross-tropopause mass exchange in the extratropics. *J. Geophys. Res.*, 100, 16661-16673.
- Danielsen, E. F., 1982: A dehydration mechanism for the stratosphere. *Geophys. Res. Lett.*, 9, 605-608.
- Dethof, A., A. O'Neill, J. M. Slingo and H. G. J. Smit, 1999: A mechanism for moistening the lower stratosphere involving the Asian summer monsoon. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 125, 1079-1106.
- Eguchi, N. and M. Shiotani, 2004: Intraseasonal variations of water vapor and cirrus clouds in the tropical upper troposphere. *J. Geophys. Res.*, 109, D12106, doi:10.1029/2003JD004314.
- Folkens, I., M. Loewenstein, J. Podolske, S. J. Oltmans and M. Proffitt, 1999: A barrier to vertical mixing at 14 km in the tropics: Evidence from ozonesondes and aircraft measurements. *J. Geophys. Res.*, 104, 22095-22102.
- Fueglistaler, S., M. Bonazzola, P. H. Haynes and T. Peter, 2005: Stratospheric water vapor predicted from the Lagrangian temperature history of air entering the stratosphere in the tropics. *J. Geophys. Res.*, 110, D08107, doi:10.1029/2004JD005516.
- Fueglistaler, S., A. E. Dessler, T. J. Dunkerton, I. Folkins, Q. Fu and P. W. Mote, 2009: Tropical tropopause layer. *Rev. Geophys.*, 47, RG1004, doi:10.1029/2008RG000267.
- Fujiwara, M., K. Kita and T. Ogawa, 1998: Stratosphere-troposphere exchange of ozone associated with the equatorial Kelvin wave as observed with ozonesondes and rawinsondes. *J. Geophys. Res.*, 103, 19173-19182.
- Fujiwara, M., F. Hasebe, M. Shiotani, N. Nishi, H. Vömel and S. J. Oltmans, 2001: Water vapor control at the tropopause by equatorial Kelvin waves observed over the Galápagos. *Geophys. Res. Lett.*, 28, 3143-3146.
- Fujiwara, M., S. Iwasaki, A. Shimizu, Y. Inai, M. Shiotani, F. Hasebe, I. Matsui, N. Sugimoto, H. Okamoto, N. Nishi, A. Hamada, T. Sakazaki and K. Yoneyama, 2009: Cirrus observations in the tropical tropopause layer over the western Pacific. *J. Geophys. Res.*, 114, D09304, doi:10.1029/2008JD011040.
- Fujiwara, M., H. Vömel, F. Hasebe, M. Shiotani, S.-Y. Ogino, S. Iwasaki, N. Nishi, T. Shibata, K. Shimizu, E. Nishimoto, J. M. Valverde Canossa, H. B. Selkirk and S. J. Oltmans, 2010: Seasonal to decadal variations of water vapor in the tropical lower stratosphere observed with balloon-borne cryogenic frost point hygrometers. *J. Geophys. Res.*, 115, D18304, doi:10.1029/2010JD014179.
- Gettelman, A., J. R. Holton and A. R. Douglass, 2000: Simulations of water vapor in the lower stratosphere and upper troposphere. *J. Geophys. Res.*, 105, 9003-9023.
- Gettelman, A., W. J. Randel, F. Wu and S. T. Massie, 2002: Transport of water vapor in the tropical tropopause layer. *Geophys. Res. Lett.*, 29, 1009, doi:10.1029/2001GL013818.
- Gettelman, A., D. E. Kinnison, T. J. Dunkerton and G. P. Brasseur, 2004: Impact of monsoon circulations on the upper troposphere and lower stratosphere. *J. Geophys. Res.*, 109, D22101, doi:10.1029/2004JD004878.
- Hasebe, F., M. Shiotani, T. Ogawa, S. Oltmans, K. Gage and H. Voemel, 1998: SOWER/Pacific is to be started on a campaign basis. *SPARC Newsl.*, (10), 32.
- Hasebe, F., M. Fujiwara, N. Nishi, M. Shiotani, H. Vömel, S. Oltmans, H. Takashima, S. Saraspriya, N. Komala and Y. Inai, 2007: In situ observations of dehydrated air parcels advected horizontally in the tropical tropopause layer of the western Pacific. *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 803-813.
- Hatsushika, H. and K. Yamazaki, 2001: Interannual variations of temperature and vertical motion at the tropical tropopause associated with ENSO. *Geophys. Res. Lett.*, 28, 2891-2894.
- Hatsushika, H. and K. Yamazaki, 2003: Stratospheric drain over Indonesia and dehydration within the tropical tropopause layer diagnosed by air parcel trajectories. *J. Geophys. Res.*, 108, 4610, doi:10.1029/2002JD002986.
- Haynes, P. H., C. J. Marks, M. E. McIntyre, T. G. Shepherd and K. P. Shine, 1991: On the "downward control" of extratropical diabatic circulations by eddy-induced mean zonal forces. *J. Atmos. Sci.*, 48, 651-678.
- Highwood, E. J. and B. J. Hoskins, 1998: The tropical tropopause. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 124, 1579-

- 1604.
- Holton, J. R. and A. Gettelman, 2001: Horizontal transport and the dehydration of the stratosphere. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 2799-2802.
- Holton, J. R., P. H. Haynes, M. E. McIntyre, A. R. Douglass, R. B. Rood and L. Pfister, 1995: Stratosphere-troposphere exchange. *Rev. Geophys.*, **33**, 403-439.
- Horinouchi, T., F. Sassi and B. A. Boville, 2000: Synoptic-scale Rossby waves and the geographic distribution of lateral transport routes between the tropics and the extratropics in the lower stratosphere. *J. Geophys. Res.*, **105**, 26579-26592.
- Inai, Y., F. Hasebe, M. Fujiwara, M. Shiotani, N. Nishi, S.-Y. Ogino, H. Vömel and T. Shibata, 2012: Dehydration in the tropical tropopause layer estimated from the water vapor match. in preparation.
- Iwasaki, S., T. Shibata, J. Nakamoto, H. Okamoto, H. Ishimoto and H. Kubota, 2010: Characteristics of deep convection measured by using the A-train constellation. *J. Geophys. Res.*, **115**, D06207, doi:10.1029/2009JD013000.
- Kerr-Munslow, A. M. and W. A. Norton, 2006: Tropical wave driving of the annual cycle in tropical tropopause temperatures. Part I: ECMWF analyses. *J. Atmos. Sci.*, **63**, 1410-1419.
- Koop, T., B. Luo, A. Tsias and T. Peter, 2000: Water activity as the determinant for homogeneous ice nucleation in aqueous solutions. *Nature*, **406**, 611-614.
- Mote, P. W., K. H. Rosenlof, M. E. McIntyre, E. S. Carr, J. C. Gille, J. R. Holton, J. S. Kinnersley, H. C. Pumphrey, J. M. Russell III and J. W. Waters, 1996: An atmospheric tape recorder: The imprint of tropical tropopause temperatures on stratospheric water vapor. *J. Geophys. Res.*, **101**, 3989-4006.
- Newell, R. E. and S. Gould-Stewart, 1981: A stratospheric fountain? *J. Atmos. Sci.*, **38**, 2789-2796.
- Norton, W. A., 2006: Tropical wave driving of the annual cycle in tropical tropopause temperatures. Part II: Model results. *J. Atmos. Sci.*, **63**, 1420-1431.
- Oltmans, S. J. and D. J. Hofmann, 1995: Increase in lower-stratospheric water vapour at a mid-latitude Northern Hemisphere site from 1981 to 1994. *Nature*, **374**, 146-149.
- Peter, T., C. Marcolli, P. Spichtinger, T. Corti, M. B. Baker and T. Koop, 2006: When dry air is too humid. *Science*, **314**, 1399-1402.
- Plumb, R. A. and J. Eluszkiewicz, 1999: The Brewer-Dobson circulation: Dynamics of the tropical upwelling. *J. Atmos. Sci.*, **56**, 868-890.
- Postel, G. A. and M. H. Hitchman, 1999: A climatology of Rossby wave breaking along the subtropical tropopause. *J. Atmos. Sci.*, **56**, 359-373.
- Randel, W. J., F. Wu, H. Vömel, G. E. Nedoluha and P. Forster, 2006: Decreases in stratospheric water vapor after 2001: Links to changes in the tropical tropopause and the Brewer-Dobson circulation. *J. Geophys. Res.*, **111**, D12312, doi:10.1029/2005JD006744.
- Reid, G. C. and K. S. Gage, 1981: On the annual variation in height of the tropical tropopause. *J. Atmos. Sci.*, **38**, 1928-1938.
- Rind, D., J. Lerner and C. McLinden, 2001: Changes of tracer distributions in the doubled CO₂ climate. *J. Geophys. Res.*, **106**, 28061-28079.
- Salawitch, R. J., 2006: Biogenic bromine. *Nature*, **439**, 275-277.
- Scherer, M., H. Vömel, S. Fueglistaler, S. J. Oltmans and J. Staehelin, 2008: Trends and variability of mid-latitude stratospheric water vapour deduced from the re-evaluated Boulder balloon series and HALOE. *Atmos. Chem. Phys.*, **8**, 1391-1402.
- Sherwood, S. C., 2000: A stratospheric "drain" over the maritime continent. *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 677-680.
- Shibata, T., H. Vömel, S. Hamdi, S. Kaloka, F. Hasebe, M. Fujiwara and M. Shiotani, 2007: Tropical cirrus clouds near cold point tropopause under ice supersaturated conditions observed by lidar and balloon-borne cryogenic frost point hygrometer. *J. Geophys. Res.*, **112**, D03210, doi:10.1029/2006JD007361.
- Solomon, S., K. H. Rosenlof, R. W. Portmann, J. S. Daniel, S. M. Davis, T. J. Sanford and G.-K. Plattner, 2010: Contributions of stratospheric water vapor to decadal changes in the rate of global warming. *Science*, **327**, 1219-1223.
- Tsuda, T., Y. Murayama, H. Wiryosumarto, S. W. B. Harijono and S. Kato, 1994: Radiosonde observations of equatorial atmosphere dynamics over Indonesia. I. Equatorial waves and diurnal tides. *J. Geophys. Res.*, **99**, 10491-10505.
- Vömel, H., S. J. Oltmans, D. J. Hofmann, T. Deshler and J. M. Rosen, 1995: The evolution of the dehydration in the Antarctic stratospheric vortex. *J. Geophys. Res.*, **100**, 13919-13926.
- Vömel, H., D. E. David and K. Smith, 2007: Accuracy of tropospheric and stratospheric water vapor measurements by the cryogenic frost point hygrometer: Instrumental details and observations. *J. Geophys. Res.*, **112**, D08305, doi:10.1029/2006JD007224.

- Winker, D. M. and C. R. Trepte, 1998: Laminar cirrus observed near the tropical tropopause by LITE. *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 3351-3354.
- Yokouchi, Y., K. Osada, M. Wada, F. Hasebe, M. Agama, R. Murakami, H. Mukai, Y. Nojiri, Y. Inuzuka, D. Toom-Saunty and P. Fraser, 2008: Global distribution and seasonal concentration change of methyl iodide in the atmosphere. *J. Geophys. Res.*, **113**, D18311, doi:10.1029/2008JD009861.
- Yoshida, K. and K. Yamazaki, 2010: Role of vertical eddy heat flux in the response of tropical tropopause temperature to changes in tropical sea surface temperature. *J. Geophys. Res.*, **115**, D01108, doi:10.1029/2009JD012783.
- Yulaeva, E., J. R. Holton and J. M. Wallace, 1994: On the cause of the annual cycle in tropical lower-stratospheric temperatures. *J. Atmos. Sci.*, **51**, 169-174.
- Yushkov, V., V. Astakhov and S. Merkulov, 1998: Optical balloon hygrometer for upper-troposphere and stratosphere water vapor measurements. Wang, J. *et al.*, ed.: *Optical Remote Sensing of the Atmosphere and Clouds*. 3501, SPIE Proceedings, The International Society for Optical Engineering, 439-445.
-