

平成 21 年 6 月 1 日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2008

課題番号：19540461

研究課題名（和文）成層圏における水蒸気収支の定量化

研究課題名（英文）Quantification of water vapor budget in the stratosphere

研究代表者

塩谷 雅人（SHIOTANI MASATO）

京都大学・生存圏研究所・教授

研究者番号：50192604

研究成果の概要：成層圏における熱バランスやオゾン化学に対して決定的な影響を与える水蒸気の変動について調べた。特に熱帯域に注目して、いくつかの衛星観測データと定点観測ながら精度の高い水蒸気ゾンデデータとの比較・検討をおこない、衛星観測のデータ質についての知見を得た。さらに、熱帯下部成層圏における水蒸気混合比の過去約 15 年にわたる年々変動について見たところ、さまざまな変動要因は存在するものの、全体としては増加傾向を示すことがわかった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2008 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：大気科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学，気象・海洋物理・陸水学

キーワード：成層圏，水蒸気，大気微量成分，衛星観測，熱帯対流圏界面

## 1. 研究開始当初の背景

水蒸気はその相(気相・液相・固相)を変えながら、地球大気システムの熱エネルギーバランス、さらには化学過程にさまざまな影響を及ぼしている。特に、成層圏においてその混合比は地表付近の 1 万分の 1 程度の低濃度となるが、そこでの放射収支あるいはオゾン破壊化学サイクルに重要な効果を持っているばかりか、冬季の極域下部成層圏における極低温の条件下で極成層圏雲を生成し、オゾン層破壊化学サイクルの鍵となる役割を果たすことが知られている。

近年、下部成層圏における水蒸気量が増加しているという報告がなされ(Oltmans and

Hofmann, 1995)、そこでの水蒸気収支に関して研究者の興味が集まっている。成層圏における水蒸気量は、対流圏から成層圏に流入する空気塊が極低温である熱帯対流圏界面付近を通過する際に脱水され、非常に低濃度となって成層圏に入っていくことと、上部成層圏におけるメタンの酸化によって水蒸気が生成されることとのバランスで決まっていると考えられている。対流圏界面付近の脱水過程については、近年、観測・理論・モデルそれぞれの観点から活発に研究が進められているが、いまだに決定的なアイデアは提示されていない。

さらに、2000 年代に入ってから、ある衛星観測データでは熱帯域における水蒸気の減

少傾向が見られること、さらには衛星観測データとゾンデデータが必ずしもよい一致を示さないこと (Randel et al., 2004) など、いくつかの重要な問題点が指摘されている。しかしながら、信頼できるデータがきわめて少ないこともあって、定量的な論議をおこなうための材料がいまだに欠乏しているというのが現状である。

## 2. 研究の目的

上記したような背景の中で、この研究では主としていくつかの衛星観測およびゾンデ観測による水蒸気データにもとづき、成層圏における水蒸気の長期的トレンドあるいは短期的な変動性の要因について明らかにする。この研究で対象とする成層圏の水蒸気は、微量ながら大気放射収支、オゾン化学に決定的な影響を与えることが知られている大気微量成分であり、その変動の特性を定量的に議論することは、地球気候システムにおける大気質変動を把握する上で重要な試みであるといえる。特に、対流圏の空気塊が成層圏に入り込む熱帯対流圏界面付近においては、衛星データの検証の観点からも、本研究課題の研究代表者を含む日米独の研究者が、過去数年にわたって精力的に水蒸気ゾンデ観測を実施してきた。そこで得られた高精度の水蒸気データとの比較・検討をおこなうことで論議の厳密さを追及する。

具体的には、過去 10 年近くの衛星観測(おもに米国で打ち上げられた UARS, EOS/AURA など)から得られた水蒸気およびその収支に関連する大気微量成分データにもとづき、成層圏における水蒸気の生成・消滅の効果を定量的に特定し、さらに力学場の解析から微量成分の輸送過程を明らかにすることによって、成層圏における水蒸気収支を定量化する。特に、消滅源と考えられている熱帯対流圏界面付近においては、これまで蓄積されてきた水蒸気ゾンデ観測データと衛星観測データとの比較検証をおこなう。これらの作業を通して、成層圏で観測される水蒸気トレンドを含む変動要因がどのようなメカニズムを反映しているのかについて明らかにし、オゾン層変動を含む成層圏大気質変動の将来予測に貢献する。

この研究を実施することによって結果的に得られる水蒸気を中心とした大気微量成分に関する知見は、今後打ち上げが予想される衛星計画における基礎データとして有効に利用されることが期待される。さらに、オゾン層変動を含む成層圏大気質変動の将来予測に貢献すると同時に、力学、化学、放射過程に関わるさまざまな研究領域の新たな開拓につながる試みであるといえる。

## 3. 研究の方法

大きく分けて次の 3 つの作業を通して研究を実施することを計画した。1. 衛星観測からの大気微量成分全球データの収集とその整理、2. オゾン・水蒸気ゾンデなどのデータとの比較・検証、3. 大気化学モデル結果との比較・検討。

特にこの研究では、水蒸気を中心とした衛星からの大気微量成分データの収集とその整理に十分な時間をかける。さらに衛星測器間のデータ質の継続性に注意を払いつつ、水蒸気ゾンデデータ等との比較・検討をおこなう。上記したそれぞれの部分について具体的な研究計画・方法は以下のとおり。

1. 衛星観測からの大気微量成分全球データの収集とその整理：現時点でもっとも最新の観測期間(2004-)をカバーする EOS/AURA 衛星に搭載された測器群、あるいはやや期間は古い(1991-)が AURA 同様に成層圏領域の観測をおこなった UARS 衛星に搭載された測器群から得られている水蒸気データを収集して、時間・空間データセットを作成する。また、輸送過程・脱水過程を明らかにする上で重要となる大規模な温度場・流れの場の解析を、全球気象解析データにもとづき並行しておこなう。

2. オゾン・水蒸気ゾンデなどのデータとの比較・検証：近年精力的におこなわれている高精度の水蒸気ゾンデデータと衛星データとの比較をおこない、データ質の検討をおこなう。また、成層圏-対流圏交換の観点からオゾンゾンデデータも補助的に用いる。特に、2000 年代に入って指摘されている熱帯対流圏界面領域の温度減少と関連して、水蒸気ゾンデデータに見られる経年変動性について明らかにする。

3. 大気化学モデル結果との比較・検討：衛星観測あるいはゾンデ観測データの解析から明らかになった水蒸気収支に関する時空間変動の特徴が、大気化学モデルの中でどのように表現されているのかについて確認し、水蒸気の変動過程のメカニズムを明らかにする。

なお、上記した作業のうち、研究代表者である塩谷は、これまでの衛星観測データ解析の実績および熱帯域におけるオゾン・水蒸気ゾンデ観測の経験を生かしておもに 1, 2 を担当した。研究分担者の河本は、衛星観測データ解析の実績を生かしておもに 1 を担当し、さらに今後の新しい研究展開を狙って 3 を担当する予定であったが、平成 20 年度以降、転出先の所属機関が科研費の登録機関となれず分担者から外れたため、3 に関する作業は断片的なものにとどまった。

#### 4. 研究成果

先に述べた3つの観点(1. 衛星観測からの大気微量成分全球データの収集とその整理, 2. オゾン・水蒸気ゾンデなどのデータとの比較・検証, 3. 大気化学モデル結果との比較・検討)からの作業をおこない, 以下のような成果を得た.

まず, これまでの衛星観測データに関して, 提供されるデータの高度範囲, 分解能, 提供期間などの調査をおこなった. 特に2の課題との関係で, 比較的新しい期間のデータ検証を優先して, 最新の観測期間(2004-)をカバーするEOS/AURA衛星搭載のMLSから得られた水蒸気データを収集した. 同時に, 熱帯域において近年精力的におこなわれている高精度の水蒸気ゾンデデータを整理して, 衛星データとの比較をおこない, データ質の検討をおこなった. その結果, 成層圏領域においてMLSの水蒸気データと高精度水蒸気ゾンデデータは, 基本的によい一致を示すものの, 上部対流圏ではMLSがドライバイアスを持っていることがわかった. また, 北半球の冬季には, おそらく積雲活動や波動活動性を反映して背景場の変動度が大きいため, MLSデータとゾンデ観測データはあまりよい一致を示さないことがわかった. これらの結果は, 上部対流圏から成層圏にかけて, 衛星観測から得られるグローバルな水蒸気分布についての標準データと見なされているMLSデータに対し, 今後のアルゴリズム改良につながる成果となった.

先行して解析をおこなったEOS/AURA衛星搭載のMLSデータは, データの品質は比較的良好と考えられているが, 提供期間がまだ長いとはいえ, 長期変化傾向を調べるには不十分である. そこでさらに, 1991-2005年にかけての観測があるUARS衛星搭載のHALOEデータを手直し解析した. これは太陽掩蔽法を用いているため, 観測プロファイル数は必ずしも多くなく空間的な代表性に欠けることもあるが, 観測精度あるいは鉛直分解能は比較的高いと考えられている. 同時に, 対流圏-成層圏交換の観点から, ちょうど水蒸気と逆の高度分布を持つ微量成分であるオゾンに注目し, 熱帯域のオゾンゾンデデータも収集・整理して補助的な解析に用いた. これらの作業を通し, 熱帯上部対流圏から下部成層圏にいたる領域における水蒸気混合比の年々変動やそれと関連したオゾン変動について調べた.

ゾンデデータと衛星データとの比較から, ゾンデデータが衛星データでは表現できないような高度方向に薄く鋭敏な鉛直構造を示すことが明らかになった. 時間経過を保持した最大・最小値を含む水蒸気分布は, いわ

ゆる”テープレコーダシグナル”としてこれまででもよく知られているが, このゾンデ観測にもとづく水蒸気プロファイルからは, 熱帯下部成層圏で卓越する準2年周期振動と同期した明瞭な年々変動のシグナルを見て取れることが分かった. また, 定点ではあるが, オゾン・水蒸気ゾンデ観測データから, 対流圏界面直下のオゾンと水蒸気が, 大気擾乱の影響を反映しながら変動していることが分かった.

さらに, HALOE衛星観測データとゾンデ観測データにもとづき, それらを相互に比較しながら熱帯下部成層圏における水蒸気混合比の過去約15年にわたる長期変動について調べた. HALOEデータではしばしば指摘される2000年代に入ってからの水蒸気量の急減は, 断片的ではあるもののゾンデ観測からはそのような減少傾向を明瞭なシグナルとしては捉えにくい. ゾンデデータにはさまざまな変動要因は存在するものの, 全体としては長期的に見て増加傾向を示すと判断される. 今後は, 観測する時期や場所をうまく戦略的に選択した上で, 長期間のゾンデ観測をおこなうことを通し, こういった減少傾向が継続しているのかどうかを検証しつつ, 成層圏における水蒸気収支の定量化に向けた研究がさらに必要である.

これらに加えて, 衛星相互の比較検証の観点から, UARS/HALOEとAura/MLSをつなぐ観測期間を持っているサブミリ波大気観測衛星Odinの水蒸気データも利用して熱帯対流圏界面領域の水蒸気について調べた. HALOEとMSLデータとの比較, さらに高精度水蒸気ゾンデによる観測データも用いて, 下部成層圏のOdinによる水蒸気観測が妥当性であることを確認した. Odinデータが2001-2009年と衛星データとしては比較的長い期間存在するという長所を生かして水蒸気の長期変動について調べ, 2001-2004年頃のゆっくりとした減少傾向と2006年以降の明瞭な増加を明らかにした. さらに, 水蒸気の年変動と関連してよく知られる”テープレコーダシグナル”から, 熱帯下部成層圏領域における上昇流の見積もりをおこない, それがこれまでの研究と整合性を持った結果を示すことを明らかにした.

なお, 3の作業について, 試験的にいくつかのモデルデータ結果を参照したが, 本格的な解析作業にまでは至らなかった. さらに補助的に全球気象データも利用して, 対流圏界面付近における脱水過程を考える上で重要となる気温変動に注目して, そういった変動要因を作り出す大気波動成分についても調べ, 熱帯域に特有なケルビン波の時空間活動性に関する知見も得た.

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

1) Takashima, H., M. Shiotani, M. Fujiwara, N. Nishi, and F. Hasebe, 2008: Ozonesonde observations at Christmas Island (2°N, 157°W) in the equatorial central Pacific. *J. Geophys. Res.*, 113, D10112, doi:10.1029/2007JD009374. 査読有

2) Suzuki, J. and M. Shiotani, 2008: Space-time variability of equatorial Kelvin waves and intraseasonal oscillations around the tropical tropopause. *J. Geophys. Res.*, 113, D16110, doi: 10.1029/2007JD009456. 査読有

3) Vömel, H., J. E. Barnes, R. N. Forno, M. Fujiwara, F. Hasebe, S. Iwasaki, R. Kivi, N. Komala, E. Kyro, T. Leblanc, B. Morel, S.-Y. Ogino, W. G. Read, S. C. Ryan, S. Saraspriya, H. Selkirk, M. Shiotani, J. Valverde Canossa, and D. N. Whiteman, 2007: Validation of Aura/MLS water vapor by balloon borne cryogenic frostpoint hygrometer measurements. *J. Geophys. Res.*, 112, D24S37, doi:10.1029/2007JD008698. 査読有

4) 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. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7, 803–813. <http://www.atmos-chem-phys.net/7/803/2007/acp-7-803-2007.pdf> 査読有

[学会発表] (計4件)

1) Shiotani, M.: Water vapor sonde observations in the equatorial Pacific, 1st Author Meeting, SPARC Water Vapour Assessment, SPARC Water Vapour Initiative, Tronto, Canada, March 17– 19, 2009.

2) Shiotani, M.: Ozone and water vapor observations in the equatorial Pacific, The second international workshop on prevention and mitigation of meteorological disasters in southeast Asia, Bandung, Indonesia, March 2– 5,

2009.

3) Vömel, H., H. Selkirk, J. Valverde-Canossa, F. Hasebe, M. Fujiwara, M. Shiotani, T. Shibata, and F. Wienhold: A Review of Balloon Borne Observations of Supersaturation in the Tropical Tropopause Transition Layer, AGU Chapman conference on atmospheric water vapor and its role in climate, Kailua-Kona, Hawaii, USA, October 20– 24, 2008.

4) Shiotani, M.: Ozone and water vapor sonde observations in the equatorial Pacific, 4th KAGI21 International Summer School, Kyoto University Active Geosphere Investigations for the 21st Century COE Program, Kyoto University and Institute Teknologi Bandung 2007, Bandung, Indonesia, July 26– 28, 2007.

[その他] (計1件)

MACS - Multi-disciplinarily Atmospheric Chemistry School, 大気化学勉強会—人工衛星からの大気微量成分観測, 1993/3~2004/1 講義集. 発行: 2008年8月. 発行者: 大気化学勉強会事務局. (塩谷はMACSの代表)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

塩谷 雅人 (SHIOTANI MASATO)  
京都大学・生存圏研究所・教授  
研究者番号: 50192604

### (2) 研究分担者

河本 望 (KAWAMOTO NOZOMI)  
(独)宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部・研究員  
研究者番号: 50344263  
(上記は、本研究を開始した当時の情報; 平成20年度以降、転出先の所属機関が科研費の登録機関となれないため、分担者から外れた。)

### (3) 連携研究者

藤原 正智 (FUJIWARA MASATOMO)  
北海道大学・地球環境科学研究科・准教授  
研究者番号: 00360941

### (4) 研究協力者

Joachim URBAN  
チャルマース工科大学・電波宇宙科学部・研究員