

学 位 論 文 題 名

Seasonal and QBO variations of the mean meridional
circulation in the equatorial lower stratosphere as
inferred from UARS HALOE trace gas data

（上層大気観測衛星（UARS）搭載のハロゲン掩蔽観測装置（HALOE）
による大気微量成分データから推測された赤道下部成層圏における
平均子午面循環の季節変動および準2年周期振動（QBO））

学位論文内容の要旨

赤道下部成層圏の平均子午面循環は、オゾン破壊に影響を及ぼすフロンガスや温室効果に寄与する水蒸気・メタンなど、対流圏から成層圏へ流入してきた大気微量成分の輸送を考える上で非常に重要である。しかし、同領域の鉛直流は 10^{-1} mm/s のオーダーと非常に小さいため直接観測することが困難であり、その観測的な特徴はあまりよく知られていない。最近、成層圏で光化学的に寿命の長い水蒸気をトレーサーとして用いることで、熱帯域における下部成層圏の子午面循環を定性的に見積ることが可能になったが、その季節変動・経年変動を緯度-高度の断面で明らかにした研究はほとんどない。

そこで本研究は、物質輸送の観点から熱帯下部成層圏における子午面循環の季節変動・経年変動を明らかにすることを目的に解析を行なった。解析には、人工衛星 Upper Atmosphere Research Satellite (UARS) 搭載の測器 Halogen Occultation Experiment (HALOE) によって 1991-2000 年に観測された水蒸気、メタン、そしてオゾンの混合比データを使用した。また、赤道域における力学場の特徴を調べるため、シンガポールのゾンデ観測で得られた東西風・温度データも用いた。子午面循環の見積りには、対流圏界面温度の季節変動にともなって生成された水蒸気の季節変動成分が熱帯下部成層圏で時間とともに上昇するという特徴を利用し、実際の解析には成層圏でほぼ保存されるという利点をもつ『水蒸気に2倍のメタンを加えた量 ($\hat{H}$)』を用いた。

まず、低緯度下部成層圏における水蒸気と $\hat{H}$ の季節変動成分を調べた。水蒸気の季節変動は、成層圏に流入する量が対流圏界面の温度変動にともなって変動する寄与と、平均分布が循環の季節変動によって変動する寄与からなっており、前者は約 20°S - 20°N 内、10-100 hPa で卓越、後者はそれ以外の領域で卓越していることがわかった。いっぽう $\hat{H}$ の季節変動は、対流圏界面起源の季節変動が下部成層圏で卓越しており、100 hPa から 4 hPa まであまり減衰せずに約2年かけて上昇していた。また、位相の上方伝播にともなって、季節変動の大きい緯度帯が高度とともに南北に蛇行しているという特徴が明らかになった。この $\hat{H}$ に見られた『振幅の南北蛇行』は、(1) 春-夏半球側の成層圏全体で ~ 0.3 ppmv 増加する鉛直方向に深い偏差成分と、(2) 南北両半球の亜熱帯混合障壁間に捕らわれた上昇する季節変動成分、の2つの成分からなっていることがわかった。(1) の変動成分は、春半球中緯度に存在する $\hat{H}$ の多い空気が熱帯の空気と混ざる効果と、夏半球低緯度で

CH_4 から H_2O への酸化が効率的に行なわれる効果で説明できるかもしれない。(2)の変動成分から求めた南北両半球緯度 10° - 20° , 15-60 hPa における $\hat{H}$ 上昇成分の上昇速度は、冬半球側よりも夏半球側で速いという南北非対称的な季節変動 (~ 0.08 mm/s の振幅) と、熱帯全体で 5-9 月よりも 12-2 月に速いという南北対称的な季節変動 (~ 0.15 mm/s の振幅) を示していた。この結果から、熱帯域に見られる上昇流の季節変動は南北対称的な変動に支配されていることが示唆される。

次に、赤道下部成層圏で卓越する準 2 年周期振動 (QBO) にともなう $\hat{H}$ 上昇シグナルの変動を調べた。今回は、QBO の振幅が一番大きい赤道上に着目し、 $\hat{H}$ 偏差の上昇速度に見られる QBO 変動について解析を行なった。水蒸気の季節変動成分が上昇する速度は、 $\hat{H}$ 時間偏差の鉛直微分が 0、または、鉛直時間微分が 0 になる点の上昇速度であるとする。得られた値は、鉛直拡散効果による影響の少ない領域では実際の鉛直速度とほぼ等しいと仮定できるため、拡散の効果が無視できる 20-60 hPa に注目し解析を行なった。赤道上で求められた鉛直流には、平均値 (0.2-0.35 mm/s) に対して約 50% の振幅 (~ 0.15 mm/s) を持つ約 2 年周期の変動が 20-40 hPa で卓越しており、QBO と関係した鉛直流変動を物質輸送の観点から抽出することに初めて成功した。また、この変動は今回見積もられた上昇速度の季節変動とだいたい同じ振幅を示していた。鉛直流の QBO 変動は温度変動とほぼ逆位相であるが、実際は 30-60 hPa で温度変動の位相に対して逆位相よりも 2-3 ヶ月ほど先行していることが確認された。温度とオゾンの観測値を用いて熱力学の式のバランスを計算した結果から、今回得られた位相関係の生成には温度 QBO の時間変化項が重要な役割を果たしていることが示唆される。また、オゾン変動にともなう非断熱加熱が温度偏差の放射冷却を弱めるため、結果として温度偏差の緩和時間が長くなり、鉛直流と温度の変動が数ヶ月の位相差を持つようになったと考えられる。最後に、平均値と QBO 成分を加えた正味の鉛直流が引き起こす東西風加速は加速を妨げる働きがあり、その効果は QBO が東風加速している時の方が約 2 倍ほど大きいことがわかった。この非対称性は、QBO 成分による鉛直移流項の非線形性で説明できる。このことから、西風加速の方がすみやかに行なわれるというよく知られた東西風加速の非対称性は、鉛直流変動による移流だけでも説明し得ることが観測データから初めて示された。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 山 崎 孝 治

副 査 教 授 久 保 川 厚

副 査 助 教 授 向 川 均

副 査 教 授 藤 吉 康 志

副 査 教 授 乗 木 新 一 郎

副 査 教 授 塩 谷 雅 人

(京都大学宙空電波科学研究センター)

学 位 論 文 題 名

Seasonal and QBO variations of the mean meridional circulation in the equatorial lower stratosphere as inferred from UARS HALOE trace gas data

(上層大気観測衛星 (UARS) 搭載のハロゲン掩蔽観測装置 (HALOE) による大気微量成分データから推測された赤道下部成層圏における平均子午面循環の季節変動および準 2 年周期振動 (QBO))

赤道下部成層圏の平均子午面循環は、オゾン破壊に影響を及ぼすフロンガスや温室効果気体である水蒸気・メタンなど、対流圏起源の大気微量成分の輸送を考える上で非常に重要である。しかし、同領域の鉛直流は 10^{-1} mm/s のオーダーと非常に小さいため直接観測することが困難であり、その観測的な特徴はあまりよく知られていない。最近、成層圏で光化学的に寿命の長い水蒸気をトレーサーとして用いることで、熱帯域の下部成層圏における子午面循環を見積ることが可能になった。そこで本研究は、まだあまり調べられていない季節変動・経年変動に着目して、物質輸送の観点から熱帯下部成層圏における子午面循環の特徴を明らかにすることを目的に解析を行なった。

解析には、人工衛星 Upper Atmosphere Research Satellite (UARS) 搭載の測器 Halogen Occultation Experiment (HALOE) によって 1991-2000 年に観測された水蒸気、メタン、オゾンデータを使用した。また、赤道域の東西風と温度の特徴を調べるため、シンガポールで行なわれたゾンデ観測の東西風・温度データを用いた。子午面循環の見積りには、対流圏界面温度の季節変動にともなって生成された水蒸気の季節変動成分が熱帯下部成層圏で時間とともに上昇するという特徴を利用し、実際の解析には中層大気[△]ほぼ全域で保存されるという利点をもつ「水蒸気に 2 倍のメタン[△]を加えた量 (H)」を用いた。

まず、下部成層圏における水蒸気と H[△]の季節変動成分を調べた。低緯度成層圏に見られる水蒸気の季節変動は対流圏界面で生成された水蒸気の季節変動と循環の季節変動によ

て決定されており、前者は約南北 20 度以内、100-5 hPa で卓越、後者はそれ以外の領域で支配的であることがわかった。

対流圏界面の季節変動にともなう季節変動成分を $\hat{H}$ で調べたところ、 $\hat{H}$ の季節変動成分は 100hPa から 4 hPa までに約 2 年かけて上昇しており、50-30hPa では他の高度に比べて振幅の減衰が小さかった。また、位相の上方伝播にともなう季節変動成分の振幅が「南北に揺らぐ」という特徴の存在が明らかになった。この $\hat{H}$ に見られた「振幅の南北蛇行」は、(1) 春-夏半球側の 50-0.5 hPa 全体で $\hat{H}$ 量が ~ 0.4 ppmv 増加する鉛直方向に深い構造、と (2) 両半球の亜熱帯混合障壁に捕らわれた $\hat{H}$ の上昇する季節変動成分、の 2 つの要因からなっていることがわかった。鉛直に深い (1) の変動は、春半球中緯度で $\hat{H}$ の多い空気が上方から下方移流されること、夏半球低緯度で CH_4 の酸化にともない H_2O が効率的に生成されること、で説明できるかもしれない。

緯度 10-20 度で $\hat{H}$ 偏差上昇の南北非対称性を調べたところ、70-15 hPa では夏半球側の方が冬半球側よりも大きく、熱帯全体では 5-9 月よりも 12-2 月に $\hat{H}$ 偏差の上昇が早かった。この赤道全体に見られる上昇流の季節変動は南北非対称性よりも卓越していることを示唆している。

次に、赤道下部成層圏で卓越する準 2 年周期振動 (QBO) が $\hat{H}$ 上昇シグナルに及ぼす影響を調べた。上昇する $\hat{H}$ 偏差の QBO 成分は、(1) 南北流・水平混合にともなう $\hat{H}$ 偏差の南北方向への揺らぎ、(2) 上昇流の変動にともなう偏差、(3) 対流圏界面で生成された変動成分、で主に決まっている。そのうち、(1) と (2) の輸送過程の変動にともなう成分は、10-30 hPa で振幅 ~ 0.2 ppmv の QBO 変動を生み出す。一方、(3) の変動は 10 hPa 以下 40° N-S で全層に影響を及ぼし、特に 50hPa 以下では ~ 0.2 -0.3 ppmv の $\hat{H}$ 変動をもたらす。

また、 $\hat{H}$ 偏差の上昇から QBO にともなう QBO 変動を赤道上で詳しく調べた。水蒸気の季節変動成分が上昇する速度は、 $\hat{H}$ 時間偏差データの鉛直微分が 0、または、鉛直時間微分が 0 になる点の上昇する速度であるとする。得られた値は、鉛直拡散効果による影響の少ない領域では実際の鉛直速度とほぼ等しいと仮定することができるため、拡散による影響が小さいと考えられる亜熱帯混合障壁の内側に相当する 20-60 hPa に注目し解析を行なった。

求められた鉛直流は平均値に対して約 50% (~ 0.1 -0.15 mm/s) の振幅を持つ約 2 年周期の変動が卓越しており、物質輸送の観点から QBO と関係した鉛直流変動の抽出することに初めて成功した。また、鉛直流変動は温度変動とほぼ逆位相であるが、実際は 25-60 hPa で逆相関よりも 2 $\sim$ 3 ヶ月ほど鉛直流変動の位相が先行していることが確認された。観測の温度とオゾンを用いて熱力学の式のバランスを計算した結果から、今回得られた位相関係の生成には温度 QBO の時間変化項が重要な役割を果たしていることが示唆される。

最後に、平均値と変動成分を加えた正味の鉛直流が引き起こす東西風加速は加速を妨げる働きがあり、その効果は東風加速時の方が約 2 倍ほど大きいことがわかった。この非対称性は、QBO 成分による鉛直移流項の非線形性によって説明できる。このことから、西風加速の方がすみやかに行なわれるという良く知られた東西風加速の非対称は、鉛直流変動による移流だけでも説明し得ることが観測データから初めて示された。

これらの成果は、熱帯成層圏循環の解明や地球温暖化・オゾン層破壊に関与する微量物質の動態解明に寄与すると期待される。

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。