

学 位 論 文 題 名

Studies on diurnal variations in dynamical fields and
ozone field in the stratosphere

（成層圏における力学場とオゾン場の日変動に関する研究）

学位論文内容の要旨

地球大気の日変動現象は、日周期で変動する太陽放射によって駆動される。元来力学場の日変動現象は、地表面付近で卓越する局地循環、あるいは、中間圏・下部熱圏で卓越する大気潮汐に主眼を置いて研究がなされてきたが、その中間領域である対流圏－成層圏領域の日変動の描像は、観測の制約からほとんど実態がわかっていない。一方、これら力学場の日変動は輸送過程を通して大気微量成分にも影響を及ぼすと考えられる。特にオゾンは光化学過程の寄与も無視できず、力学（輸送）・光化学の両過程によって日変動が生じていると予想される。しかしながら、成層圏においてはオゾンの日変動を実際に観測した例は皆無に等しく、日変動の実態すらわかっていないのが現状である。近年、上空の風を観測する大気レーダー網の発達や気温・大気微量成分を観測する衛星の台頭により、日変動現象を捉える観測データが揃いつつある。さらに、観測を予報モデルに同化して得られる全球様なデータセット（再解析データ）や複雑な化学過程も考慮した化学輸送モデルも複数整備され、力学場や物質場の日変動をグローバルにとらえる地盤が整備されてきた。

そこで本研究では、衛星データ、再解析データ、化学輸送モデルを統合的に解析することで、成層圏における力学場の日変動を支配する大気潮汐（特に、太陽に同期して西進する波数 1 成分）の全球構造と季節変化、および、それらがオゾン場に与える影響を明らかにすることを目的とする。

まず、Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics (TIMED) 衛星搭載の Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry (SABER) により得られた気温データ、および、6 種類の再解析データ（期間はいずれも 2002－2006 年の 5 年間）における、成層圏気温の大気潮汐を比較した。再解析データの潮汐の振幅はいずれも SABER のそれと比べて上部成層圏で 30-50% 程度小さかったが、潮汐の空間構造とその季節変化は定性的によく一致していた。

以上の結果を踏まえ、潮汐のうち、一日周期で太陽と同期して西進する波数 1 成分 (Diurnal westward wavenumber 1 component; 以下 DW1 と略す) について再解析データを用いてさらに詳しく調べた。気温 DW1 の緯度・

高度構造は以下のような特徴を持つことが明らかになった。まず熱帯域では、対流圏で振幅・位相ともにほぼ一定であるが、対流圏界面より上では振幅が指数関数的に増加し、位相は下方伝播を示す。一方、中・高緯度域においては、対流圏と上部成層圏において振幅が局所的に大きく、位相は鉛直方向にほぼ一定である。振幅の極大高度はそれぞれ、対流圏水蒸気および成層圏オゾンの放射加熱の極大高度に対応している。以上の緯度・高度構造は、古典潮汐論で導出される4つの低次ハフモードの重ね合わせでよく再現でき、各々のモードは古典潮汐論で予想される特徴的な鉛直伝播特性を保持していることがわかった。

続いてDW1の季節変化について調べたところ、中緯度成層圏では夏半球で振幅が極大をとるのに対し、熱帯成層圏では12-2月および6-8月ごろの二回振幅が極大をとることがわかった。背景風がない場合には、基本的に励起されたモードの大きさは非断熱加熱の各モードの大きさに対応するはずだが、熱帯において観測された気温DW1の季節変化は加熱の季節変化と対応しておらず、背景風の影響が重要であることを強く示唆する。そこで、2次元線形潮汐モデルを用いて背景場が熱帯のDW1に与える影響を調べたところ、成層圏においても背景東西風がDW1の振幅に影響を及ぼしていることが初めて明らかになった。さらに、これは背景東西風の運動量輸送により高次成分が新たに励起された結果だと解釈できることを新たに提示した。

最後に、国際宇宙ステーション搭載の超伝導サブミリ波リム放射サウンダ (SMILES; Superconducting Submillimeter-Wave Limb Emission Sounder) で得られたオゾン量のデータ (期間: 2009年10月-2010年4月、高度: 20-60 km) を用いて、成層圏オゾンの日変化のグローバルな描像を調べた。SMILESは従来の衛星に比べて精度が一桁高く、さらに、太陽非同期軌道をとるため日変動を観測できるという特徴を持つ。SMILESを用いて得られた成層圏オゾン日変動は、高度・緯度に依存した特徴を示し、その振幅は最大で日平均値の4%程度に達する。これらの変動はコラム量にして1 DU (0.5%) 程度の振幅を持つことも明らかになった。加えて、2種類の化学輸送モデルデータを解析したところ、SMILESの結果はモデルの結果と定量的に極めて良い一致を示していた。これらモデル結果の詳細な解析により、オゾン日変動には、大気潮汐の鉛直流による輸送過程 (高度20-30 km、40-50 km) と光化学過程 (高度30-50 km) の両者が寄与していることがわかった。以上の結果から、観測・理論 (モデル) の両者に裏打ちされたオゾン日変動の真の描像が初めて得られたと言える。

以上、本研究では成層圏における力学場とオゾン場の日変動の真の描像を初めて定量的に記述し、さらにそれらを支配するプロセスを力学・光化学の両視点から明らかにすることができた。

学位論文審査の要旨

主 査	准教授	藤 原 正 智
副 査	特任教授	山 崎 孝 治
副 査	教 授	長谷部 文 雄
副 査	准教授	堀之内 武
副 査	教 授	廣 岡 俊 彦 (九州大学大学院理学研究院)

学 位 論 文 題 名

Studies on diurnal variations in dynamical fields and ozone field in the stratosphere

(成層圏における力学場とオゾン場の日変動に関する研究)

地球大気の日変動現象は、日周期で変動する太陽放射によって駆動される。元来力学場の日変動現象は、地表面付近で卓越する局地循環、あるいは、中間圏・下部熱圏で卓越する大気潮汐に主眼を置いて研究がなされてきたが、その中間領域である対流圏－成層圏領域の日変動の描像は、観測の制約からほとんど実態がわかっていなかった。一方、これら力学場の日変動は輸送過程を通して大気微量成分にも影響を及ぼすと考えられる。特にオゾンは光化学過程の寄与も無視できず、力学（輸送）・光化学の両過程によって日変動が生じていると予想される。しかしながら、成層圏においてはオゾンの日変動を実際に観測した例は皆無に等しく、日変動の実態すらわかっていなかった。近年、上空の風を観測する大気レーダー網の発達や気温・大気微量成分を観測する衛星の台頭により、日変動現象を捉える観測データが揃いつつある。さらに、観測を予報モデルに同化して得られる全球一様なデータセット（再解析データ）や複雑な化学過程も考慮した化学輸送モデルも複数整備され、力学場や物質場の日変動をグローバルにとらえる地盤が整備されてきた。

そこで本研究では、衛星データ、再解析データ、化学輸送モデルを統合的に解析することで、成層圏における力学場の日変動を支配する大気潮汐（特に、太陽に同期して西進する波数1成分）の全球構造と季節変化、および、それらがオゾン場に与える影響を明らかにすることを目的とした。

まず、Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics (TIMED) 衛星搭載のSounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry (SABER) により得られた気温データ、および、6種類の再解析データ（期間はいずれも2002－2006年の5年間）における、成層圏気温の大気潮汐を比較した。再解析データの潮汐の振幅はいずれもSABERのそれと比べて上部成層圏で30-50%程度小さかったが、潮汐の空間構造とその季節変化は定性的によく一致していた。

以上の結果を踏まえ、潮汐のうち、一日周期で太陽と同期して西進する波数1成分 (Diurnal westward wavenumber 1 component; 以下DW1と略す) について再解析データを用いてさらに詳しく調べた。気温DW1の緯度・高度構造は以下のような特徴を持つことが明らかになった。まず熱帯域では、対流圏で振幅・位相ともにほぼ一定であるが、対流圏界面より上では振幅が指数関数的に増加し、位相は下方伝播を示す。一方、中・高緯度域においては、対流圏と上部成層圏において振幅が局所的に大きく、位相は鉛直方向にほぼ一定である。振幅の極大高度はそれぞれ、対流圏水蒸気および成層圏オゾンの放射加熱の極大高度に対応している。以上の緯度・高度構造は、古典潮汐論で導出される4つの低次ハフモードの重ね合わせでよく再現でき、各々のモードは古典潮汐論で予想される特徴的な鉛直伝播特性を保持していることがわかった。

続いてDW1の季節変化について調べたところ、中緯度成層圏では夏半球で振幅が極大をとるのに対し、熱帯成層圏では12-2月および6-8月ごろの二回振幅が極大をとることがわかった。背景風がない場合には、基本的に励起されたモードの大きさは非断熱加熱の各モードの大きさに対応するはずだが、熱帯において観測された気温DW1の季節変化は加熱の季節変化と対応しておらず、背景風の影響が重要であることを強く示唆する。そこで、2次元線形潮汐モデルを用いて背景場が熱帯のDW1に与える影響を調べたところ、成層圏においても背景東西風がDW1の振幅に影響を及ぼしていることが初めて明らかになった。さらに、これは背景東西風の運動量輸送により高次成分が新たに励起された結果だと解釈できることを新たに提示した。

最後に、国際宇宙ステーション搭載の超伝導サブミリ波リム放射サウンダ (SMILES; Superconducting Submillimeter-Wave Limb Emission Sounder) で得られたオゾン量のデータ (期間: 2009年10月-2010年4月、高度: 20-60 km) を用いて、成層圏オゾンの日変化のグローバルな描像を調べた。SMILESは従来の衛星に比べて精度が一桁高く、さらに、太陽非同期軌道をとるため日変動を観測できるという特徴を持つ。SMILESを用いて得られた成層圏オゾン日変動は、高度・緯度に依存した特徴を示し、その振幅は最大で日平均値の4%程度に達する。これらの変動はコラム量にして1 DU (0.5%) 程度の振幅を持つことも明らかになった。加えて、2種類の化学輸送モデルデータを解析したところ、SMILESの結果はモデルの結果と定量的に極めて良い一致を示していた。これらモデル結果の詳細な解析により、オゾン日変動には、大気潮汐の鉛直流による輸送過程 (高度20-30 km、40-50 km) と光化学過程 (高度30-50 km) の両者が寄与していることがわかった。以上の結果から、観測・理論 (モデル) の両者に裏打ちされたオゾン日変動の真の描像が初めて得られたと言える。

以上、本研究では成層圏における力学場とオゾン場の日変動の真の描像を初めて定量的に記述し、さらにそれらを支配するプロセスを力学・光化学の両視点から明らかにした。

審査委員一同は、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。