

論文内容の要旨

論文題目：太陽 11 年周期変動に伴う成層圏大気の応答に関する研究
(Studies on stratospheric responses to solar 11-year variation)

氏名：山下陽介

11 年周期の太陽変動は、成層圏のオゾン、気温変動にとって重要な役割を果たしている。これまでの研究により、1980~2000 年の期間に、上部成層圏では太陽変動の 11 年周期に伴って、約 2%のオゾン変動、及び約 1 K の気温変動が観測され、下部成層圏では約 4%のオゾン変動、約 0.5 K の気温変動があるとされてきた。なお、客観解析データ等は厳密には「観測」ではないが、ここでは客観解析データ等も観測と呼ぶことにする。これらのオゾン、気温変動は重回帰解析により太陽変動との回帰係数として得られたものであるが、太陽変動周期に比べてデータ長が十分でないために、これらの変動が全て太陽活動による影響を有意に表しているとは限らない。具体的には、オゾンや気温の変動には太陽 11 年周期変動の他、火山噴火や赤道下部成層圏準 2 年周期振動(quasi-biennial oscillation; QBO)、海表面温度(Sea Surface Temperature; SST)変動の影響が含まれる。例えば、火山噴火が偶然に太陽 11 年周期と似たタイミングで生じていれば、期間が短い観測データの解析によってこれらの寄与を分離することは非常に困難である。そこで本研究では、3 次元化学気候モデル(Chemistry Climate Model; CCM)を用いて、成層圏のオゾン、気温変動に対する 11 年周期の太陽変動と火山噴火などの影響を個別に見積もり、その影響のメカニズムを力学的、化学的に考察した。

使用したモデルは、東京大学気候システム研究センター/国立環境研究所(CCSR/NIES) CCM で、解像度は T42L34、モデルの上端は約 80 km である。この CCM では、大気によるオゾン輸送、紫外線(ultraviolet; UV)放射によるオゾン生成、火山噴火で放出される硫酸エアロゾル上での不均一反応によるオゾン破壊も計算している。本研究では、CCM の標準実験(コントロール実験)として、化学気候モデル検証(CCMVal)国際プロジェクトで行われた近過去気候再現実験(REF1 シナリオ実験)のデータを用いた。データ期間は 1980~2000 年である。コントロール実験には、太陽定数の変動の他にも、火山噴火や QBO、SST 変動

の影響も含まれる。

まず、コントロール実験の出力に対し、これまでの研究で行われていたように線形トレンド、太陽 11 年周期、火山噴火、QBO、SST 変動の各項を含めた重回帰解析を行い太陽変動成分を取り出した。こうして取り出した太陽変動に対する回帰係数は、必ずしも有意に推定されるものではないが、本研究では、この回帰係数を便宜的に「太陽変動成分」と呼ぶ。オゾンの太陽変動成分のピークは上部成層圏 5 hPa、下部成層圏 80 hPa の 2 ヶ所に分離して現れており、それぞれ約 2%、約 14%の値を示していた。これらの領域では、太陽活動とオゾンが正の相関を持つことを意味する。気温の太陽変動成分でもほぼ同じ 2 ヶ所の高度にピークが見られ、1 hPa で約 0.6 K、70 hPa で約 0.9 K の値を示した。

次に各項の成層圏の太陽変動成分に対する影響を評価するため、コントロール実験からいくつかの項を除いた 7 種類の実験を行った。これらの実験を感度実験と呼ぶ。3 つの太陽 11 年変動を含まない感度実験では、上部成層圏におけるオゾン、気温偏差のピークが不明瞭という系統的な特徴があることが分かった。4 つの太陽 11 年変動を含む実験では、明瞭なピークが見られる。これは、上部成層圏のオゾン、気温の太陽変動成分は太陽放射の変動に伴うものである可能性が高いことを意味する。一方、下部成層圏に見られる太陽変動成分は、火山噴火を含んだ実験では大きく除去した実験では小さくなることから、火山噴火に伴う化学プロセスの影響を大きく受けていることが分かった。しかし、火山噴火の影響を除去した実験においても、太陽 11 年周期を含む実験では下部成層圏に弱い偏差が現れていた。その大きさはオゾンで約 1%、気温で約 0.2 K であり、観測結果(オゾンで約 4%、気温で約 0.5 K)と比較して無視できない。すなわち太陽変動成分の一部は、太陽 11 年変動の影響で説明できると示唆される。

さらに、赤道下部成層圏の太陽変動成分のメカニズムを詳しく理解するため、太陽活動極大期の太陽定数に固定した実験(SMAX)と極小期に固定した実験(SMIN)をそれぞれ 42 年の期間について行い、その差を解析した。SMAX と SMIN のそれぞれの 42 年間のコンポジット平均の差(SMAX と SMIN の差と表記) は正味の太陽変動成分であり重回帰解析で検出されるべき「太陽変動成分」に対応するものである。赤道下部成層圏における SMAX と SMIN の差は、オゾンで約 1%、気温で約 0.2 K であった。これは、火山噴火を除去し太陽変動を含む感度実験の「太陽変動成分」と同程度であった。

太陽活動の活発化に伴うシグナルは冬半球側、特に北半球では成層圏突然昇温の起こりにくい初冬の中緯度成層圏に現れやすいことが知られている。このことから、両半球初冬における成層圏大気の構造は力学よりも放射の影響を強く受け、この時期のプロセスが上記の年平均場の結果に反映されていると考えられる。そこで両半球初冬の 12 月と 7 月における赤道下部成層圏の太陽変動成分の形成過程を詳細に解析した。SMAX、SMIN 実験の加熱率の評価では、この時期には太陽活動極大期と極小期の間の UV 放射加熱の違いが、極大期に上部成層圏、下部中間圏の中高緯度域で気温の南北勾配を強化し、それに伴って西風の場合は中緯度域で南北方向の曲率が大きくなるような変形を受けることを示していた。

これまでの研究においては、太陽活動極大期と極小期の間の西風強度の違いが中緯度域における波の伝播特性を変えるとされてきたが、波の伝播特性を詳細に調べると、それとは異なり極大期に西風の南北方向の曲率が大きくなることで波の伝播特性が変わる傾向があることが分かった。惑星波の伝播と大気循環場の指標として Eliassen and Palm flux (E-P flux) と残差平均子午面循環(残差循環)を見積もった結果、極大期に中緯度域で惑星波の伝播が抑制されることで下向き・極向き偏差の E-P flux が見られた。これと対応し、中緯度域で E-P flux が発散偏差つまり惑星波による西風加速偏差となり、それに伴って赤道向き偏差の残差循環が見られた。循環偏差は赤道下部成層圏で断熱加熱を伴う下降流を示し、これが高温偏差形成に大きく寄与していると考えられる。また加熱率の各項について SMAX と SMIN の差を評価した結果、UV 放射加熱も高温偏差形成に無視できない程度に影響した可能性があることが示された。

最後に、太陽活動に伴う変動の季節変化に着目した。SMAX と SMIN の差を見積もると、北半球冬季では 11 月において中高緯度の成層圏界面付近にある西風偏差が、1 月にかけて対流圏に下降する特徴がみられ、それに伴って赤道下部成層圏の残差循環や気温偏差が 1 ヶ月程度の時間スケールの変動を示した。他方南半球では、西風偏差は冬季を通じて中高緯度域で下降しており、北半球よりも内部変動の時間スケールが長い特徴がある。これによって、南半球では冬季を通じて中緯度域から赤道域に向かう循環偏差が見られた。なお、春季・秋季には、逆に赤道域から中緯度域に向かう残差循環偏差が見られた。年平均した残差循環は、結果として両半球初冬季の循環場の特徴を大きく反映し中緯度域で赤道向き偏差、赤道域で下降流偏差を示した。これは、年平均した場においても、下降流による断熱加熱が赤道域下部成層圏の高温偏差形成の主因となることを意味する。

CCM 実験によって、赤道上部成層圏の太陽変動成分は、ほぼ太陽 11 年周期に伴うものであることが分かった。それに対して下部成層圏で見られる太陽変動成分は、火山噴火に伴う化学プロセスの影響を大きく受けていたことが分かった。これは、火山噴火イベントの間隔が太陽活動の周期と近く、これを太陽活動のシグナルとして検出していたことに起因する。また、下部成層圏の太陽変動成分の一部は、太陽活動に伴う中高緯度域の西風の場の変形が、惑星波の伝播や循環場の変調を介して力学的に影響した効果で主に説明される。

今後のモデル改善やさらなるアンサンブル実験、長期間の観測データ蓄積により定量的にも信頼性の高い結果を得ることが期待される。