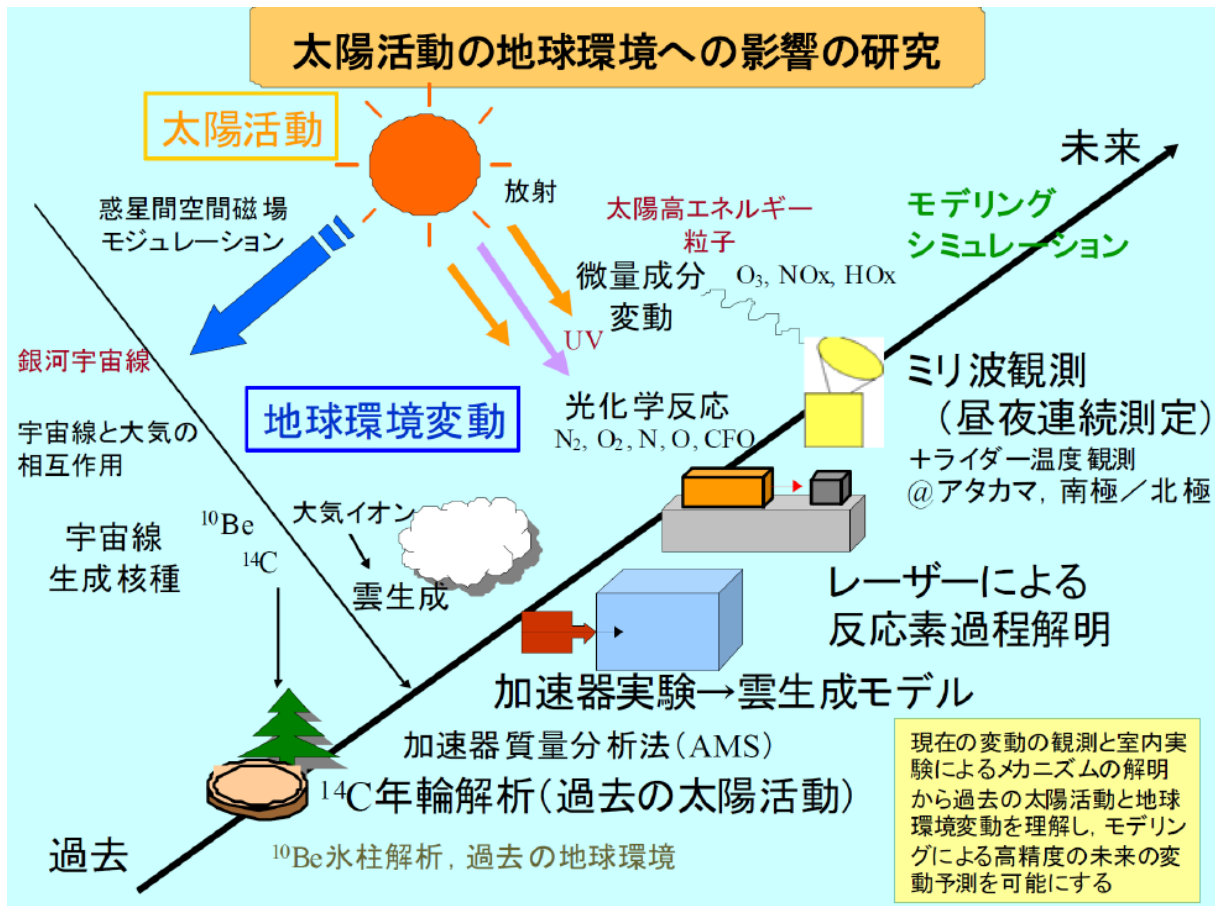


「太陽活動の地球環境への影響に関する研究」

平成23年3月1日
プロジェクトリーダー 増田公明

太陽活動はさまざまな形で地球環境に影響を与えている。我々は太陽活動の変動がどのように地球環境に影響を与えてきたのか、過去から現在にわたって検証し、その素過程を解明しようと考えている。今年度から開始された第Ⅱ期中期計画においても第Ⅰ期に引き続いて本プロジェクトを継続・発展させていく。

数十年以上の長期変動を理解するために、放射性同位体測定によって過去の太陽活動の変動を解明する。また太陽による地球環境への影響のメカニズム解明のために、現在の大气で起こっている変動を赤外線やミリ波電波により観測するとともに、レーザーを用いた室内実験によってその素過程を調べる。さらに太陽活動の影響を受ける宇宙線の大气電離と雲生成や地球気候の関係を調べる研究を開始した。図は本プロジェクトの概念図である。



実施状況

太陽活動がどのように地球環境へ影響するかを調べるために、(1)過去の太陽活動とその地球環境への影響、(2)大気中微量成分への太陽活動の影響、(3)太陽活動が地球環境に与える影響の素過程の解明、(4)宇宙線による雲生成の検証、の4つの分担課題を実施した。

(1) 過去の太陽活動とその地球環境への影響

地球大気中の放射性炭素（炭素 14）は、銀河宇宙線と大気原子核の核反応によってつくられる。地球に到達する銀河宇宙線強度は太陽活動による惑星間空間磁場によって変調を受けるので、過去の大气中放射性炭素濃度の測定から、その時代の宇宙線強度及び太陽活動等に関する知見を得ることができる。我々は特に過去の太陽活動の周期性を調べるために、これまでマウンダーやシュペーラー極小期及び太陽活動通常期における年輪中の放射性炭素濃度の高精度測定を行い、シュワーベサイクルの周期長が通常期には現在と同じ 11 年であったことやマウンダー極小期で太陽活動変動の周期が 11 年ではなく 14 年であったことを見いだした。今後は過去 3 千年間の太陽活動周期を調べることを目標とする。平成 22 年度は、紀元前 4 世紀の太陽活動極小期と見られる年代の樹木試料の年輪中の放射性炭素濃度の測定結果の解析と、さらに特徴的な年代である紀元前 7 世紀の樹木年輪試料中の放射性炭素濃度測定を行った。放射性炭素濃度の測定は、名古屋大学年代測定研究センターの加速器質量分析計と東京大学工学研究科の加速器質量分析計を併用した。詳細な解析の結果、紀元前 4 世紀の太陽活動極小期における活動周期が 14 年に延びていたことの統計的有意性を示した。マウンダー極小期と同様に、11 年ではなく 14 年程度に伸びていたことが事実となり、極小期に周期長が長くなるメカニズムの解明が必要である。紀元前 7 世紀の極小期についてはさらに測定を継続して、周期長の変化の有無を調べる予定である。一方 AD7-11 世紀の炭素 14 濃度を測定し、顕著な短期的変動を発見しその原因を調べている。また炭素 14 濃度の変化が小さい場合に周期性を見出すのが困難なことが明らかになり、濃度測定の精度や時間分解能をあげる必要がある。

一方、宇宙線生成核種の一つであるベリリウムの大気中での挙動を調べることと、現在の太陽活動に対して宇宙線生成核種がどのように振る舞うかを調べるために、山形大学と共同で、地球上のいくつかの地点でのベリリウム 7 の行っている。南半球の高山であるボリビア・チャカルタヤ山にエアースンプラーを設置し、現地の協力も得て観測を継続している。また北半球高緯度のアイスランドの設備を更新して、観測網を整備した。太陽活動が活発になりつつあり、今後もこれらの測定、観測を継続する。

(2) 大気中微量成分への太陽活動の影響

モニタリング観測を通して、大気組成の数年から十数年のタイムスケールでの変動から、太陽の 11 年周期に対応する変動を抽出し、太陽活動の大気組成変動に対する影響を調べるとともに高感度ミリ波大気観測装置の開発を行うことを目的とする。

チリ・アタカマ高地及びアルゼンチン・リオガジェゴスに移設したミリ波大気分子分光観測装置によって定常的に取得されるオゾン、水蒸気同位体、ClO の連続観測データは、長期にわたる成層圏微量分子の組成変動および経年変化の基礎データとなる。人為起源のフロン等を起源とした塩素や温暖化との関連が指摘される水蒸気を起源とする HO_x によるオゾン層破壊は、オゾン長期トレンドに大きな影響を与える要因であり、太陽活動との関連を調べる上でも重要なファクターである。今後も連続的に観測を継続して、微量分子の高度分布と時間変動及びオゾン長期変動との関連を調べるための時系列データを取得する。同時に、ブラジル磁気異常帯直下において、磁気嵐に伴う相対論的加速電子による解離・電離で生じる HO_x や NO_x が引き起こす中間圏大気組成変動を連続的に観測することで、太陽活動期に向い、太陽活動に伴う高エネルギー粒子の地球大気への影響を明らかにすることを目指す。

小型冷凍機を利用したミリ波装置は、大気微量分子組成が高エネルギー粒子の降下等の太陽活動の影響を最も受けやすい極域に装置を展開するための最も重要な技術であり、極域での正常動作を確認して観測が開始したことで、技術的には完成に至った。今後、連続観測を行うことで、中層大気組成変動と太陽活動との関連に関する新たな知見の獲得を目指す。

母子里観測所の高分解能 FTIR による温室効果気体のモニタリング観測は、今日の地球温暖化の主たる原因物質である大気中の CO₂ 及び CH₄ の長期変動を観測することで、他の地上観測データ及び「いぶき」衛星データとの組み合わせから、地域ごとの精度の高い温室効果気体の排出・削減量の推定を目指している。

(i) 小型ミリ波観測装置の開発と南極昭和基地への設置

これまで開発・評価を進めてきた高感度超伝導受信機を用いた小型ミリ波観測装置を南極昭和基地に設置した。この装置は、電力事情が十分でない場所で観測装置を稼働させることを想定して、観測装置の省電力化と小型化を目標に開発を進めてきたものである。昨年度までに光学系及び受信器系を完成させ、今年度は電波強度校正機構やデジタル分光計を組み込んで観測システムとして立ち上げ、実験室内にて N_2O ガスセルを用いた模擬観測試験により性能評価を行い、観測システムとして完成させた。

2010年9月から昭和基地への移設を進めた。実験室内の装置をいったん解体して、昭和基地へ輸送し、12月に昭和基地において再組み立てを開始して、1月末までに現地での組み立て・調整を完了した。その後、250 GHz 帯での試験観測を行い、オゾンからの放射スペクトルの検出することができ、正常に動作することを確認した。今後、中層大気のオゾンや窒素酸化物からのスペクトルを連続的に観測して、それらの高度分布と時間変動のデータを取得する予定である。

(ii) アルゼンチン・リオガジェゴスへのミリ波観測装置の移設

南極オゾンホールが中緯度地帯のオゾン層に与える影響とそのメカニズムの解明を目指し、チリ・アタカマで稼働中の 200 GHz 帯ミリ波観測装置を南米最南端に近いアルゼンチン共和国リオガジェゴス (52S, 69W, 40 m a.s.l.) へ移設した。アタカマにおいて解体したミリ波装置をリオガジェゴスに輸送し、コンテナハウス内で再組み立て及び調整を行った。2010年10月より 209 GHz のオゾンスペクトルのテスト観測を開始し、放射スペクトルが正常に観測できること確認した。また、オゾンの高度分布解析に必要となる、オゾン高度分布の初期推定値を過去の衛星観測データの気候値から作成し、高度分布解析を行う準備を行った。その後、2011年1月よりオゾンの連続観測を開始した。今後、成層圏オゾン高度分布の観測を継続するとともに、現地観測施設に併設されているオゾンレーザーレーダーやオゾンゾンデとの比較実験を行い、観測精度の検証を行う予定である。

(iii) チリ共和国における成層圏一酸化塩素の時間変動解析

南米チリ・アタカマ高地 (23S, 68W, 4800 m a.s.l.) において、観測された一酸化塩素 (ClO) について、成層圏上部の ClO に関する高度別日変化を地上観測から初めて得ることができた。また、観測された ClO 高度分布と AURA/MLS や JEM/SMILES 衛星によるアタカマ上空での ClO データとの比較・検証を進めた。今後、さらに季節変化等の様々な時間スケールの ClO 変動機構、オゾントレンドとの関連等の研究を進める。

(iv) 高分解能フーリエ変換型赤外分光器による温室効果気体の観測

母子里観測所に設置されている高分解能フーリエ変換型赤外分光器 (FTIR) を用い、温室効果気体のモニタリングを継続した。母子里観測所では高分解能 FTIR による成層圏・対流圏の大気組成を 1996 年より継続して行ってきたが、2009 年 8 月より温室効果気体である二酸化炭素 (CO_2) 及びメタン (CH_4) の近赤外領域での吸収スペクトルモニタリング観測を開始した。観測データは「いぶき」衛星の検証データとしても活用された。また、2010 年 8 月から 10 月まで、京都大学の近赤外光スペクトラムアナライザを併設して、長期同時観測を行い、両者の観測精度の比較を行った。

昨年度購入した太陽追尾装置は、追尾精度検証実験を名古屋において行い、30 秒角以内の追尾精度を持つことを確認した。2010 年 11 月に装置を母子里観測所に輸送し、既存の追尾装置との交換を行った。今後、温室効果気体の定常モニタリングを継続して行う予定である。

(3) 太陽活動変動と大気化学反応過程

太陽活動変動の顕著な現れである太陽紫外線の強度変動が大気組成に与える影響を解明するために、ラボ実験により反応素過程を明らかにし、モデル計算に反映させることを目的としている。

平成 22 年度は、真空紫外レーザーを用いた室内実験により高層大気中で太陽光変動により大きな影響を受ける反応過程について調べた。真空紫外レーザーシステムを用いて高感度に

塩素原子 $\text{Cl}(^2\text{P}_{3/2})$ を検出した。大気中における塩素原子と有機物の反応過程についてラボ実験で解明した。これらの過程は大気中の有機物の酸化過程に大きく関連している。不飽和炭化水素類の大気反応過程について研究を行った。大気中のエアロゾルの成分をリアルタイムで計測する装置を開発し、エアロゾルの成分と光学特性を調べることにより気候への影響を調べた。また、大気中の二酸化炭素の同位体の変動を速いレスポンスでリアルタイム計測が可能なレーザー分光を用いた計測装置で行い、大気中の二酸化炭素の起源について解明した。

(4) 宇宙線による雲生成の検証

太陽活動と地球気候の関係を調べるために JAMSTEC との共同研究として平成 20 年度に開始した、宇宙線による雲生成仮説の検証実験を進めている。放射線源による大気電離とエアロゾル生成の関係を明らかにすべく、今年度は小型の金属チェンバーを用いて準備実験を行った。その結果、放射線や紫外線がエアロゾル形成に影響を与えることが示され、今後放射線源と模擬大気の組み合わせにより雲核の元となるエアロゾルの生成率がどのように変化するかを調べる予定である。

発表論文（査読あり）

H. Miyahara, K. Kitazawa, K. Nagaya, Y. Yokoyama, H. Matsuzaki, K. Masuda, T. Nakamura, Y. Muraki., Is the Sun Heading for Another Maunder Minimum? Precursors

of the Grand Solar Minima, *J. Cosmology* 8, 1970-1982 (2010).

N. Kobayashi, G. Inoue, M. Kawasaki, H. Yoshioka, M. Minomura, I. Murata, T. Nagahama, Y. Matsumi, T. Tanaka, I. Morino, and T. Ibuki, Remotely operable compact instruments for measuring atmospheric CO₂ and CH₄ column densities at surface monitoring sites, *Atmos. Meas. Tech.* 3, 1103–1112 (2010).

T. Nakayama, Y. Kondo, N. Moteki, L. K. Sahu, T. Kinase, K. Kita, and Y. Matsumi, Size-dependent correction factors for absorption measurements using filter-based photometers: PSAP and COSMOS, *J. Aerosol Sci.* 41, 333-343 (2010).

N. Moteki, Y. Kondo, T. Nakayama, K. Kita, L.K. Sahu, T. Ishigai, T. Kinase, Y. Matsumi, Radiative transfer modeling of filter-based measurements of light absorption by particles: Importance of particle size, *J. Aerosol Sci.* 41, 401-412 (2010).

Y. Matsumi, F. Taketani, K. Takahashi, T. Nakayama, Fluorescence detection of atmospheric nitrogen dioxide using a blue light-emitting diode as an excitation source, *Appl. Optics*, 49, 3762-3767 (2010).

T. Nakayama, R. Hagino, Y. Matsumi, Y. Sakamoto, M. Kawasaki, A. Yamazaki, A. Uchiyama, R. Kudo, N. Moteki, Y. Kondo, K. Tonokura, Measurements of aerosol optical properties in the central Tokyo during summertime using cavity ring-down spectroscopy: Comparison with conventional techniques, *Atmos. Environ.* 44, 3034-3042 (2010).

E. Iwasaki, H. Chiba, T. Nakayama, Y. Matsumi, T. J. Wallington, PLP-LIF study of the reactions of chlorine atoms with C₂H₂, C₂H₄, and C₃H₆ in 2-100 Torr of N₂ diluent at 295 K, *Chem. Phys. Lett.* 494, 174–178 (2010).

T. Nakayama, Y. Matsumi, K. Sato, T. Imamura, A. Yamazaki, A. Uchiyama, Laboratory studies on optical properties of secondary organic aerosols generated during the photooxidation of toluene and the ozonolysis of α -pinene, *J. Geophys. Res. Atmospheres*, 115, D24204, doi:10.1029/2010JD014387 (2010).

J. Xing, K. Takahashi, A. Yabushita, T. Kinugawa, T. Nakayama, Y. Matsumi, K. Tonokura, A. Takami, T. Imamura, K. Sato, M. Kawasaki, T. Hikida, A. Shimono, Characterization of aerosol particles in the Tokyo metropolitan area using two different particle mass spectrometers. *Aerosol Sci. and Tech.* 45, 315–326, (2011).

R. Wada, J. K. Pearce, T. Nakayama, Y. Matsumi, T. Hiyama, G. Inoue, T. Shibata, Observation of carbon and oxygen isotopic compositions of CO₂ at an urban site in Nagoya using Mid-IR laser absorption spectroscopy, *Atmos. Environ.* 45, 1168-1174 (2011).