

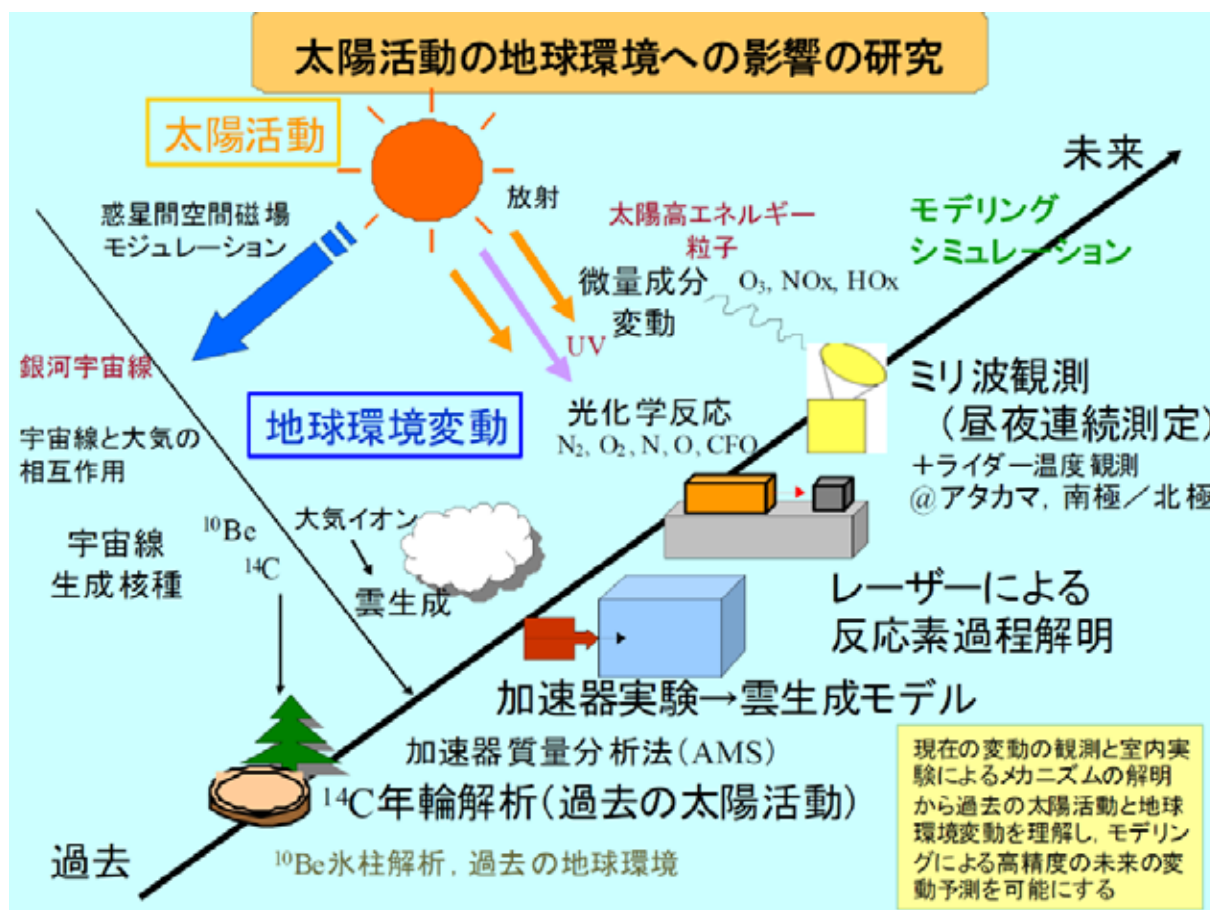
「太陽活動の地球環境への影響に関する研究」

平成24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。第I期に引き続いて昨年度から開始された第II期中期計画においても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進めている。図は本プロジェクトの概念図である。



所内メンバー

増田公明, 水野亮, 長濱智夫, 松見豊, 中山智喜, 埜隆志, 伊藤好孝, 草野完也

## 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)太陽活動が大気微量成分の変動及び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。また2012年1月には第2回「太陽活動と気候変動の関係」に関する名古屋国際ワークショップを開催した。

### (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23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を使用した。詳細な解析の結果、紀元前4世紀の太陽活動極小期において12サイクルの太陽活動周期を見いだした。これは最古のシュワーベサイクルの発見である。またこの11年基本周期の統計的有意性を示した。マウンダー極小期と同様に、11年から16年程度に伸びていたことが確実となり、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世紀の極小期等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。また繰り返し測定により炭素14濃度の測定精度を上げ、AD7-8世紀の太陽活動周期の変化を測定した。

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で、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、世界のいくつかの地点でのベリリウム7の観測を行っている。南半球の高山であるポリビア・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、今後も機器を整備しながらこれらの測定、観測を継続するとともに観測地点を増やすことを計画している。

### (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<sub>x</sub>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<sub>x</sub>やNO<sub>x</sub>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、中層大気の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CO<sub>2</sub>及びCH<sub>4</sub>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・消滅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

南極域における太陽活動に伴う高エネルギー粒子の降り込みが地球大気へ与える影響を明らかにするため、高感度超伝導受信機を用いた小型ミリ波観測装置を2011年1月に南極昭和基地に設置し、同3月より定常観測を開始した。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。

まず248 GHz帯での試験観測を行い、オゾンからの放射スペクトルを検出し、高度分布を導出することができることを確認した。3月に電波強度校正用の冷却黒体に使用している液体窒素ガラスデュワーが破損し、発泡スチロール容器に交換したため、液体窒素の蒸発量が増加し、当初計画していた24時間連続観測が困難になり、断続的な定時観測を中心とし、イベント発生時やオゾンゾンデ放球時のみ連続観測を行うといった形態で観測を行った。高エネルギー粒子の降り込みにより、中間圏から上部成層圏のNO<sub>x</sub>、HO<sub>x</sub>の増加とオゾンの減少が予想される。NO<sub>x</sub>は太陽紫外線のため、昼間時は主にNO、夜間時は主にNO<sub>2</sub>の形で存在するため、観測ターゲットは昼間時はオゾンとNO、夜間時はオゾンとNO<sub>2</sub>として観測を進めた。8月に陽子フラックス(>10MeV)が~100pfu程度の太陽陽子イベントが発生したが、この時は20mK(1σ)の上限で有為なNO<sub>2</sub>の増加は見られなかった。2012年1月には陽子フラックス(>10MeV)が~6,300pfu程度の比較的大規模の太陽陽子イベントが発生し、60mK程度の顕著なNOのスペクトルが観測された。線幅1MHz程度で高度~60km以上のNOの増加を反映したものと考えられる。なお、この研究は国立極地研が進める第VIII期重点プロジェクト「南極域中層・超高層大気を通して探る地球環境変動」の一環としても位置づけられている。

#### (ii) アルゼンチン・リオガジェゴスでのミリ波オゾン観測

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2010年9月に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。同移設は、相手国機関CEILAP(レーザー応用技術研究センター)の協力の下、JICA-JSPSの科学研員派遣事業の援助を受けて行われた。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、その後、2011年1月よりオゾンの連続観測を開始した。データは順調に取得できているが、予想以上に200GHz帯での大気透過度が悪く、今年度は観測周波数を200GHz帯からより大気透過度が低い100GHz帯に変更するための改良の準備を名古屋の実験室で進めた。今年度末から来年度初めにかけて、受信機の載せ換えを行う予定である。データ解析については、現地のネットワーク通信事情の問題のため、観測データをネットワークで日本に転送する体制がまだ確立できていない。そのため全データを転送することができず断片的に解析を進めている状態である。ネットワーク状況の改善と現地研究者がデータ解析できるような環境作りが課題である。

このプロジェクトは、JICAの広域協力プロジェクト「パタゴニア南部地域におけるオゾン層および紫外線観測能力強化と住民への伝達活動プロジェクト」からも支援を受け、CEILAPに加えてチリ共和国のプンタアレナス大の協力も得てオゾンゾンデとの比較観測実験等を行ない、2011年8月にリオガジェゴスにおいて開催された同プロジェクトの最終セミナーで同

地でのミリ波観測に関する招待講演を行った。

### (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) のデータ解析を進め、誤差解析および AURA/MLS や JEM/SMILES 等の衛星データとの比較・検証を進めた。1日を3時間毎のゾーンにわけ 12 日間積分したスペクトルデータから ClO の日変化を南半球の地上観測としては初めて導出した。高度 40km における日変化の振幅は北半球の中緯度帯における先行研究の結果と誤差の範囲内で一致しているが変化のパターンで日の出後の立ち上がりが 3 時間あまり遅れていることが明らかになった。ClO は線スペクトル強度が非常に弱く、地上・衛星観測を通して中緯度帯の日変化を観測しているデータは極めて少なく、中緯度帯の地上観測としてはフランスの Plateau de Bure とハワイの Mauna Kea でしかこれまで観測が行われていない。これらと独立した新たな観測データを元に ClO の日変化を示した点で重要な結果である。

### (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・対流圏の大気組成観測を 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<sub>2</sub>) 及びメタン (CH<sub>4</sub>) 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。

2010 年 11 月に新型太陽追尾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後、2011 年 7 月に追尾精度向上のための調整を行った。また、新たに光スペクトラムアナライザ (OSA) による可搬型温室効果気体観測装置を導入した。今年度、名古屋において装置の基本特性を測定し、観測精度等の解析を進めた。今後も、温室効果気体の定常モニタリングを高分解能 FTIR 及び OSA を用いて継続して行う。

### (3) 太陽活動が大気微量成分の変動及び地球環境に与える影響の素過程の解明

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し、ならびに大気中の二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) の濃度、CO<sub>2</sub> 安定同位体比およびエアロゾルの光学特性を計測して、地球環境に与える影響を解析することを目的としている。

平成 23 年度は、引き続き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 Cl (<sup>2</sup>P<sub>3/2</sub>) 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で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、森林における二酸化炭素の動態の解明を行った。

### (4) 宇宙線による雲生成の検証

平成 20 年度から JAMSTEC との共同研究として、太陽活動と地球気候の関係を調べるために、宇宙線による雲生成仮説の検証実験を継続して進めている。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るために、今年度は容積 75L の金属チェンバーを用いた実験を開始した。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確認されたが、一方でイオン密度が大きいとエアロゾル生成が飽和する可能性が示された。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。

(5) 第2回「太陽活動と気候変動の関係」に関する名古屋ワークショップ

平成24年1月に標記のワークショップを国際集会として開催した。J. Lean 博士をはじめとして国外からも参加者を得て、2日間にわたって議論を行った。詳細はSTE研ニュースレター及びホームページを参照のこと。

発表論文（査読あり）

- 1) K. Nagaya, K. Kitazawa, F. Miyake, K. Masuda, Y. Muraki, T. Nakamura, H. Miyahara and H. Matsuzaki, Variation of the Schwabe cycle length during the grand solar minimum in the 4<sup>th</sup> century BC deduced from radiocarbon content in tree rings, *Solar Phys.* to be published.
- 2) Jiahua, Xing; Takahashi, Kenshi; Yabushita, Akihiro; Kinugawa, Takashi; Nakayama, T.; Matsumi, Yutaka; Tonokura, Kenichi; Takami, Akinori; Imamura, Takashi; Sato, Kei; Kawasaki, Masahiro; Hikida, Toshihide; Shimono, Akio, Characterization of aerosol particles in the Tokyo metropolitan area using two different particle mass spectrometers. *Aerosol Science and Technology*, 45:315–326, (2011).
- 3) R. Wada, J. K. Pearce, T. Nakayama, Y. Matsumi, T. Hiyama, G. Inoue, T. Shibata, Observation of carbon and oxygen isotopic compositions of CO<sub>2</sub> at an urban site in Nagoya using Mid-IR laser absorption spectroscopy, *Atmospheric Environment*, 45, 1168-1174 (2011).
- 4) Akihiro Yabushita, Takashi Kinugawa, Masahiro Narukawa, Kenshi Takahashi, Masahiro Kawasaki, and Yutaka Matsumi, Ion formation processes in laser ablation of multicomponent inorganic particles relevant to single particle laser analysis of atmospheric aerosols, *Chemistry Letters*, 40(5) 446-448 (2011).
- 5) H. Suzuki, Y. Miyao, T. Nakayama, J. K. Pearce, Y. Matsumi, K. Takahashi, K. Kita, and K. Tonokura, Comparison of laser-induced fluorescence and chemiluminescence measurements of NO<sub>2</sub> at an urban site, *Atmos. Environ.*, 45, 6233-6240, (2011).