

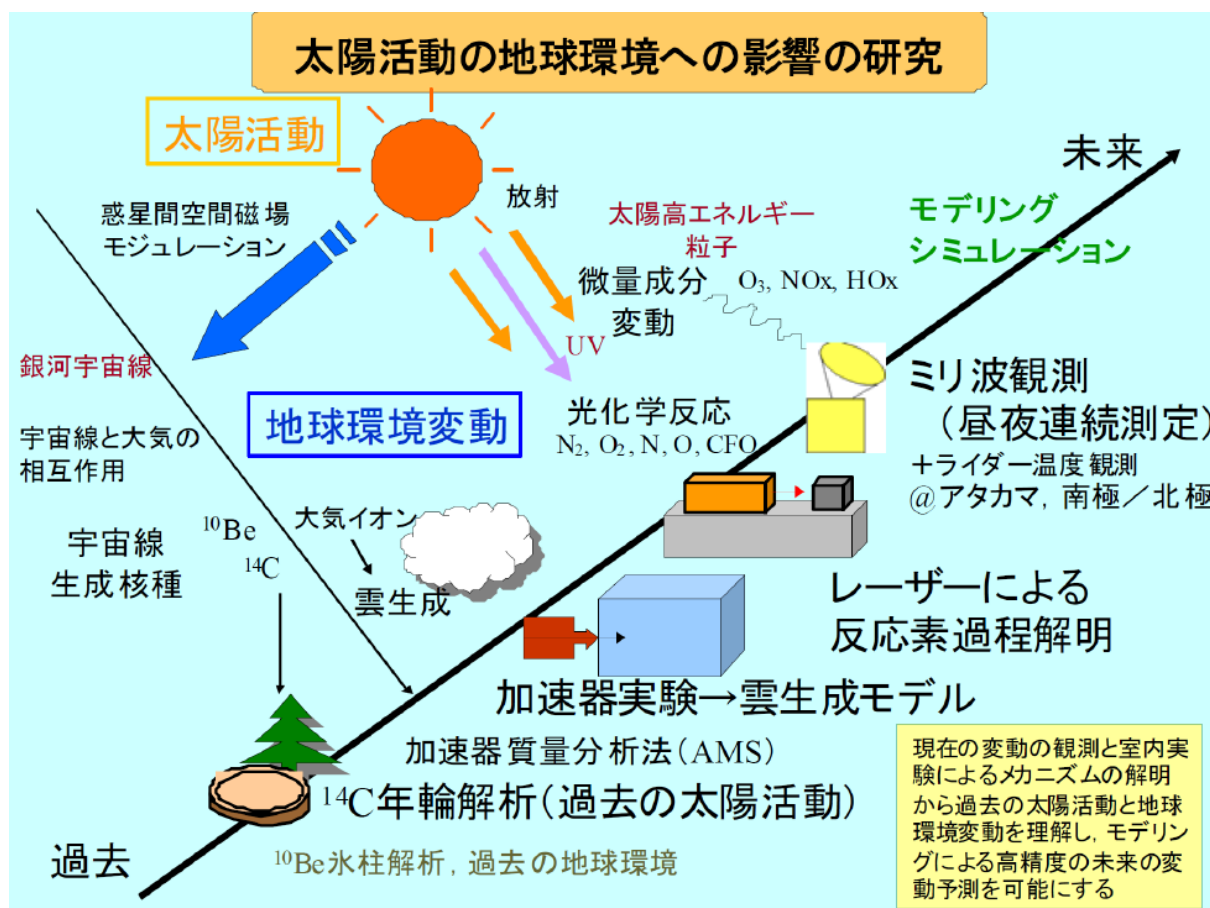
「太陽活動の地球環境への影響に関する研究」

平成27年2月27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・発展させてきた。

数十年以上の太陽活動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しようとしている。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てきた。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過程の検証、の4つの分担課題を実施した。また2014年4月には「宇宙気候学に関する研究会」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、過去の大気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、これまで過去三千年の間の主な太陽活動大極小期（マウンダー、シュペーラー、紀元前4世紀極小期）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ってきた。放射性炭素濃度の測定は、主に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ている。その結果、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、マウンダー、AD7-8世紀、紀元前4世紀の極小期では、その極小期の規模に応じて13-16年であったことを見いだした。

また一昨年度発見した西暦775年の宇宙線急増事象（通常のシュワーベサイクルによる変動の20倍にあたる、1年で12%の顕著な炭素14の短期増加）に続き、昨年度はやや規模が小さいながら2例目となる西暦994年の宇宙線増加事象を発見した。これは地球近傍の宇宙空間における高エネルギー現象があったことを示しており、統計的には太陽の特大フレアに起因するものと考えられる。しかし、銀河系内のガンマ線バーストなどの可能性もあり、その原因や地球環境への影響を調べている。その一手段として極域のアイスコアから得られる宇宙線生成核種であるベリリウム10の1年分解能測定を、極地研究所、弘前大学、東京大学などとの共同研究として実施した。その結果、ベリリウム10に関しても該当年代に顕著な増加が見られ、高エネルギー事象の存在を確認した。今後、精度よくベリリウム10の生成率を求め、この事象の原因解明を目指す。また今後も過去3千年間の太陽活動周期と宇宙線異常増加事象を調べることを目標として、炭素14濃度測定を継続する。

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、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。北半球高緯度のアイスランドや南半球の高山であるボリビア・チャカルタヤ山にエアサンプラーを設置し、現地の協力も得て観測を継続している。これまでの結果の解析やシミュレーション計算との比較から、高緯度地域で生成された核種が日本などの中緯度地域へ移動している可能性を見いだした。昨年度から新たな観測地としてタイを加え、今年度はさらに観測装置を強化した。タイは宇宙線の限界リジディティが高く、太陽活動がピークに達したとも思われる中、今後これらの結果が期待される。

(2) 大気中微量成分への太陽活動の影響

(i) 南極昭和基地での太陽活動の中層大気に与える影響の観測的研究

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に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南極昭和基地に設置し、平成24年1月よりNOのモニタリング観測を行っている。2012年中に197日分、2013年は228日分、2014年は163日分（10月31日分まで）のデータを取得し、年間を通して1日以下の分解能で高度75kmから100km程度間のNOカラム量の時間変動の様子を明らかにすることができた。データから、極域冬期にNOカラム量が大きくなり夏期に小さくなるという季節変化が見られ、さらに2014年にはこの冬季増大が他の年に比べて顕著に小さくなったことを見出した。放射線帯の相対論的電子のフラックスの季節変化との比較から、NOカラム量の年々変化は電子の降込み総量と良い関連があることが明らかになった。

(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、2010年に南米大陸の南端部に位置するリオ・ガジェゴスにミリ波観測装置を設置した。設置場所はアルゼンチンの CEILAP（レーザー応用技術研究センター）の南部パタゴニア大気観測所（OAPA）（51.6° S, 69.3° E）である。2012年6月より110GHz帯のオゾンスペクトルの定常観測を開始した。2014年度は JICA-JST の SATREPS「地球規模の環境課題の解決に資する研究」プログラムからの支援の下、CEILAP にチリ共和国のマゼラン大学の協力も得てオゾンライダー、オゾンゾンデ、ミリ波分光計の3測器による合同キャンペーン観測を10月と11月に実施した。特に11月のキャンペーン観測時には極渦が崩壊する直前のオゾンホールが南米側に大きく移動し、リオ・ガジェゴスにおいてオゾンホール起因と考えられるオゾンの減少イベントを観測した。今後国立環境研究所の研究者らと連携し、モデルとの比較を通してこの原因を解明していきたいと考えている。

(iii) チリ共和国における太陽活動の中層大気に与える影響の観測的研究

ブラジル磁気異常帯に隣接する南米チリ・アタカマ高地(23S, 68W, 4800 m a.s.l.)は、大規模な磁気嵐による放射線帯の相対論的電子が中緯度帯の中層大気に与える影響を定量的に観測する上で世界的にもユニークな観測サイトである。今年度は PC の更新等、観測装置の整備を進め VNC による遠隔観測制御を可能にした。太陽活動に伴い降り込む高エネルギー粒子の影響を受けやすい NO を中心に観測を進めたが、スペクトル線の線幅が異常に太く観測装置に何らかの問題が発生していたと考えられる。現時点ではその原因が解明できておらず、もっとも疑わしいデジタル分光計を日本に返送し状況を確認しようとしている。来年度は装置の問題点を解明し、しかるべき対処を行ったのちに観測を再開したいと考えている。

(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、温室効果気体等の成層圏・対流圏大気組成モニタリングは、2012年10月に太陽追尾装置の追尾機構、2014年9月に真空装置に不具合が発生し、その修理と対策を行っている。来年度5月より試験観測を再開できる予定である。2014年1月には光スペクトラムアナライザー（OSA）による温室効果気体観測装置を陸別観測所に設置して試験観測を開始し、2014年中に約80日分のスペクトルを取得した。今後、OSA装置の最適化を行い、さらに国立環境研究所が陸別観測所に設置した高分解能 FTIR との比較観測を継続して行う。

(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（CO₂）の濃度、CO₂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26年度は、大気中のエアロゾルの光学特性をリアルタイムで計測する装置を改良し、エアロゾルの成分と光学特性を調べた。名古屋の都市域および和歌山の森林における多波長光音響分光装置を用いてエアロゾルの吸収及び散乱係数を測定したデータを解析した。大気エアロゾルを加熱処理した場合の吸収係数およびその波長依存性の変化から、ブラックカーボンの被覆や光吸収性有機エアロゾルによる光吸収への寄与を推定した。また、同時に気相成分やエアロゾル中の化学成分を計測することで、エアロゾルの光吸収の決定に影響を及ぼしている要因について調べた。

エアロゾルの密度は、重量と体積を結び付ける物理量でありエアロゾルの性質を理解する上で不可欠なパラメータである。しかし、大気エアロゾルには、様々な成分が内部・外部混合して存在し、その密度が複雑に変化するため、大気エアロゾルの密度分布については、未解明な点が多い。大気エアロゾルの密度分布のその場計測を実施し、化学成分と比較した。また、得られた密度分布の面積比から粒子の外部混合状態について考察した。レーザー蒸発イオン化質量分析計を用いた長崎県福江島でのエアロゾルの個別粒子観測で、中国から飛来するエアロゾル粒子に鉛の重金属成分が含まれていることを見出した。

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

一分光を用いた計測装置で行い、名古屋の都市大気および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

JAMSTEC の協力を得て、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、今年度は放射線源の違いによるイオン生成及び粒子生成への効果を調べるために、容積 75L の金属チェンバーを用いた加速器実験を行った。使用した線源は放射線医学総合研究所 HIMAC 加速器の重イオンで、昨年度の窒素及び酸素イオンに加えて今年度はキセノンイオンを用いた。2 回目の実験で加速器環境における実験方法を確立しようとしている。キセノンイオンは原子番号が大きく、気体分子へのエネルギー付与が高いため、イオン密度が大きくなることが期待されたが、実際には窒素イオンとほとんど変わらなかった。入射粒子の飛跡上の再結合が誤っていると考えられる。しかし、粒子密度はイオン密度に対応して増加し、入射イオンの違いにはあまり依存しない可能性がある。今後は再結合や壁への付着を考慮したより精密な考察を行いつつ、実験を進める予定である。

なお、2014 年 4 月に、H. Svensmark 氏を交えて、「宇宙気候学に関する研究会」を開催し、これまでに行われてきた室内実験を評価し、今後の展望を議論した。

発表論文（査読あり）

- 1) F. Miyake, A. Suzuki, K. Masuda, K. Horiuchi, H. Motoyama, H. Matsuzaki, Y. Motizuki, K. Takahashi and Y. Nakai, Cosmic ray event of A.D. 774–775 shown in quasi-annual ^{10}Be data from the Antarctic Dome Fuji ice core, *Geophys. Res. Lett.* 42 (2015) 84–89. (16 January 2015)
- 2) F. Miyake, K. Masuda, M. Hakozaiki, T. Nakamura, F. Tokanai, K. Kato, K. Kimura, T. Mitsutani, Verification of the cosmic-ray event in AD 993-994 by using a Japanese Hinoki tree, *Radiocarbon* 56 (2014) 1189–1194.
- 3) Y. Isono, A. Mizuno, T. Nagahama, Y. Miyoshi, T. Nakamura, R. Kataoka, M. Tsutsumi, M.K. Ejiri, H. Fujiwara & H. Maezawa, “Variations of nitric oxide in the mesosphere and lower thermosphere over Antarctica associated with a magnetic storm in April 2012”, *GRL*, 41, 7, 2568-2574, doi: 10.1002/2014GL059360, 2014.
- 4) Y. Isono, A. Mizuno, T. Nagahama, Y. Miyoshi, T. Nakamura, R. Kataoka, M. Tsutsumi, M.K. Ejiri, H. Fujiwara, H. Maezawa & M. Uemura, “Ground-based observations of Nitric oxide in the mesosphere and lower thermosphere over Antarctica in 2012-2013”, *JGR-Space Physics*, 119, 9, 7745-7761, doi: 10.1002/2014JA019881, 2014.
- 5) Y. Han, Y. Iwamoto, T. Nakayama, K. Kawamura, M. Mochida, Formation and evolution of biogenic secondary organic aerosol over a forest site in Japan, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119, 259-273, doi:10.1002/2013JD020390, 2014.
- 6) N. Kaneyasu, K. Sato, A. Takami, T. Hidemori, Y. Matsumi, S. Yamamoto, PM2.5 and particulate substances concerned to human health at upwind areas of Japan, *Earozoru Kenkyu*, 29, 82-94, 2014 (Abstract only in English).

- 7) X. Guo, T. Nakayama, H. Yamada, S. Inomata, K. Tonokura, Y. Matsumi, Measurement of the light absorbing properties of diesel exhaust particles using a three-wavelength photoacoustic spectrometer, *Atmos. Environ.*, 94, 428-437, 2014.
- 8) T. Hidemori, T. Nakayama, Y. Matsumi, T. Kinugawa, A. Yabushita, M. Ohashi, T. Miyoshi, S. Irei, A. Takami, N. Kaneyasu, A. Yoshino, R. Suzuki, Y. Yumoto, S. Hatakeyama, Characteristics of atmospheric aerosols containing heavy metals measured on Fukue Island, Japan, *Atmos. Environ.* 97, 447-455, 2014.
- 9) T. Nakayama, Y. Ikeda, Y. Sawada, Y. Setoguchi, S. Ogawa, K. Kawana, M. Mochida, F. Ikemori, K. Matsumoto, Y. Matsumi, Properties of light-absorbing aerosols in the Nagoya urban area, Japan, in August 2011 and January 2012: Contributions of brown carbon and lensing effect, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119, 12721-12739, doi:10.1002/2014JD021744, 2014.