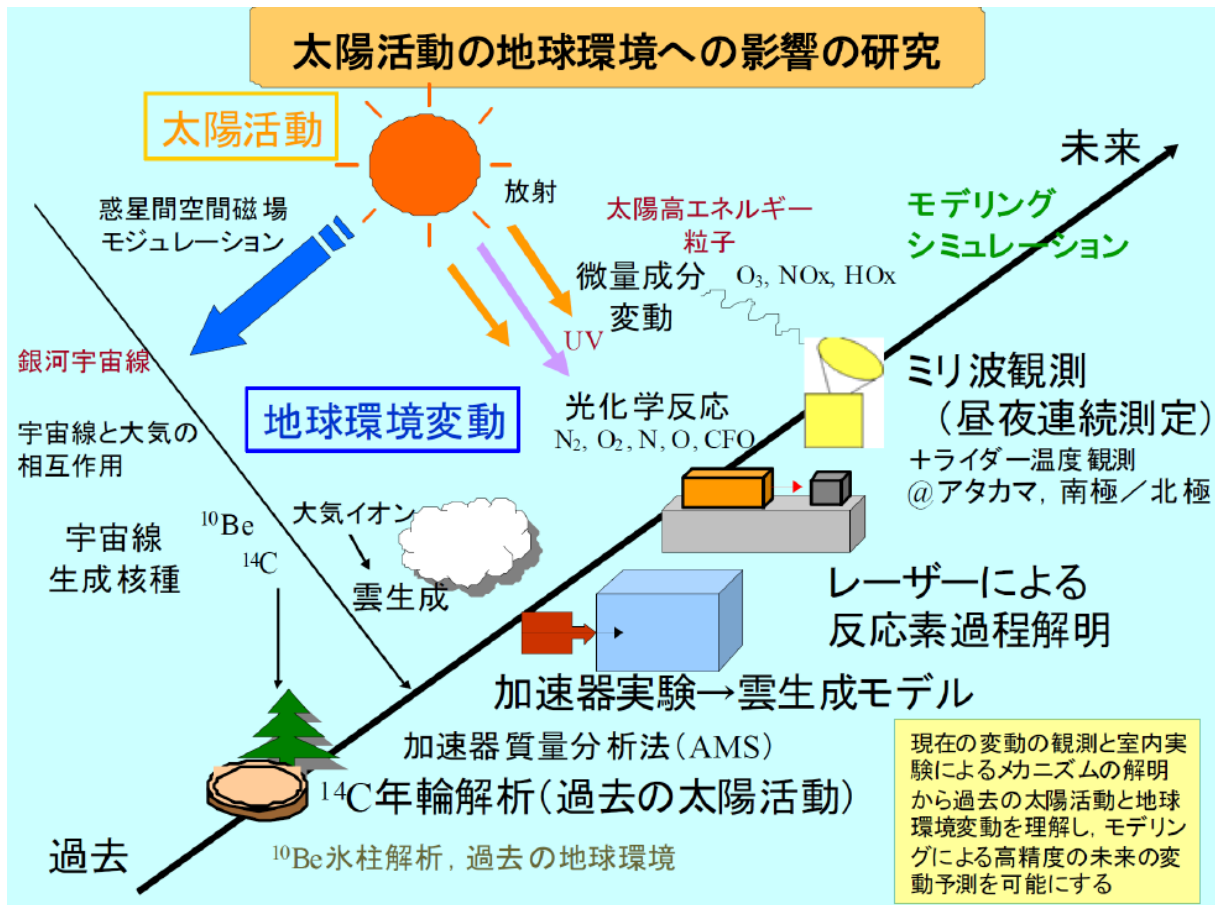


「太陽活動の地球環境への影響に関する研究」

平成26年2月28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・発展させていく。

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との関係性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, 長濱智生, 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2013年7月には「宇宙線による雲核生成機構の解明ーラボ実験とフィールド観測からのアプローチ」と題した研究集会を開催した。

### (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には、名古屋大学年代測定総合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AD8-11世紀のような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。特に紀元前4世紀極小期における結果は最古のシュワーベ・サイクルの発見である。また詳細なデータ解析を通して、放射性炭素濃度測定における太陽活動11年基本周期及びその変動検出の統計的有意性の検証や、繰り返し測定による炭素14濃度の測定精度の向上などの技術的進展を得た。

また2012年度に発見した西暦775年の宇宙線急増事象（通常シュワーベ・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、2013年度に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いて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開始した。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的として、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ベリリウム7（Be-7）の観測を行っている。平成25年度の地上ネットワーク観測大型共同研究（重点研究）経費でボリビアやタイの設備を整備して、山形（38.25°N, ~10GV : cut-off rigidity）のほか、北半球高緯度のアイスランド（64.67°N, 0.5GV）や南半球の高山であるボリビア・チャカルタヤ山（5200m, 16.35°S, ~13GV）、ケニア・ナイロビ（0°S, 15GV）、最高の宇宙線カットオフ地域でありITCZの移動帯に位置するタイ・バンコク（13°S, 18GV）での観測を行なっている。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。チャカルタヤ山では特有のBe-7の突発現象が観測されており、今年度整備されたアンダーセン・エアロゾル粒径分布計、オゾンモニター、自動気象計等のデータから、Be-7濃度とエアロゾル粒径分布の関係を高高度での大気環境と太陽活動の関連させて系統的に観測することができる。初期解析から、Be-7のエアロゾル粒径分布では明らかに0.4μm以下が多く地上起源のPb-210の粒径分布と異なることが分かってきた。このことから、Be-7を使って高高度での宇宙線生成核種の挙動を調べることが期待でき季節変動の観測を継続している。太陽活動がピークに達したとも思われる中、今後もこれらの測定、観測を継続する。このように多地点でのBe-7サンプリングにより特異なフェーズにある第24期太陽活動の地球への影響を宇宙線の太陽モジュレーションと大気運動の視点から明らかにしてしていく。

## (2) 大気中微量成分への太陽活動の影響

南極昭和基地の小型ミリ波観測装置による NO モニタリング, アルゼンチンのリオ・ガジェゴスでのミリ波オゾン観測, チリ・アタカマ高地のモニター観測の準備, 北海道・母子里観測所の FTIR による温室効果気体モニタリング観測の準備を行なっている。

### (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 189 日分, 2013 年は 172 日分 (9 月 30 日までの解析済データ) のデータを取得した。過去の観測データは観測期間が数十日間や夏期などに限定されており, 悪天候に伴う欠損はあるものの年間を通して 1 日以下の分解能で高度 75km から 100km 程度の NO の時間変動の様子を初めて明らかにすることができた。(a)極渦が顕著になる冬期に NO 強度が高く夏期に低くなるという季節変化が見られ, この季節変動は大気循環だけでなく日照の影響も受けていると解釈されること, (b)数日間の短期的な変動も見られ, これらは太陽陽子よりも大きな磁気嵐発生時に降りこむ放射線帯の相対論的電子の影響を受けやすいこと, 等が明らかになった。

### (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) の観測所 (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, 2013 年度からは 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を受け, CEILAP に加えてチリ共和国のマゼラン大の協力も得てオゾンライダー, オゾンゾンデ等との比較観測等を行なっている。2013 年の観測では, オゾンホールの到来に伴うオゾンの減少 (9 月 17 日) が検出された。

### (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 (23° S, 68° W, 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, 本格的なモニター観測を開始するために観測装置の整備を進めたが, 現地の天候不順により必要な試験観測を行うことができなかった。来年度も引き続き, 観測装置の整備及び試験観測を行う。

### (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に不具合発生以降, 観測を中断し修理を行っている。装置の寒冷地対策に時間を要しているが, 来年度夏までに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, 試験観測を開始した。今後, OSA と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 (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 25 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開発し, エアロゾルの成分と光学特性を調べた。名古屋における夏季と冬季に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。

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、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

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、今年度は放射線源の違いによるイオン生成及び粒子生成への影響の解明を目指して、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（窒素及び酸素イオン）である。今回は加速器環境における実験方法を確立するための予備実験と位置付けられ、イオン密度や粒子密度の測定が可能であることを確認した。さらに予備的な結果として、重イオンが紫外線とともにエアロゾル形成に影響を与えることが観測された。今後はイオン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、2013 年 7 月に「宇宙線による雲核生成機構の解明 ーラボ実験とフィールド観測からのアプローチー」と題した研究集会を開催し、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, K. Masuda and T. Nakamura, Another rapid event in the carbon-14 content of tree rings, *Nature Communications* **4**:1748, doi:10.1038/ncomms2783 (2013); Corrigendum; *Nature Communications* **4**:2747, doi:10.1038/ncomms3747 (2013).
- 2) F. Miyake, K. Masuda and T. Nakamura, Lengths of Schwabe cycles in the seventh and eighth centuries indicated by precise measurement of carbon-14 content in tree rings, *J. Geophys. Res. -Space Phys.* **118**, doi:10.1002/2012JA018320 (2013).
- 3) T. Nakamura, K. Masuda, F. Miyake, K. Nagaya and T. Yoshimitsu, Radiocarbon ages of annual rings from Japanese wood: evident age offset based on INTCAL09, *Radiocarbon* **55**, 763–770 (2013).
- 4) H. Sakurai, F. Tokanai, K. Kato, Y. Takahashi, T. Sato, S. Kikuchi, E. Inui, Y. Arai, K. Masuda, H. Miyahara, C. Mundia and W. Tavera, Latest  $^{14}\text{C}$  concentrations of plant leaves at high altitudes in the northern and southern hemispheres: vertical stability of local Suess effect, *Radiocarbon* **55**, 1573–1579 (2013).
- 5) H. Sakurai, S. Namai, E. Inui, F. Tokanai, K. Kato, Y. Takahashi, T. Sato, S. Kikuchi, Y. Arai, K. Masuda, K. Shibata and Y. Kuriyama, Measuring  $^{14}\text{C}$  concentration in wine

to monitor global distribution of  $^{14}\text{C}$ , *Radiocarbon* **55**, 1827–1833 (2013).

- 6) Y. Isono, A. Mizuno, T. Nagahama, Y. Miyoshi, T. Nakamura, R. Kataoka, M. Tsutsumi, M. K. Ejiri, H. Fujiwara and H. Maezawa, Variations of nitric oxide in the mesosphere and lower thermosphere over Antarctica associated with a magnetic storm in April 2012, *Geophys. Res. Lett.*, submitted.
- 7) 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, *J. Geophys. Res. -Space Phys.*, submitted.
- 8) 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. -Atmosphere*, **119**, doi:10.1002/2013JD020390 (in press).
- 9) N. Kaneyasu, K. Sato, A. Takami, T. Hidemori, Y. Matsumi, S. Yamamoto, PM<sub>2.5</sub> and particulate substances concerned to human health at upwind areas of Japan, *Eaorozoru Kenkyu*, **29**, (in press) (Abstract only in English).
- 10) T. Nakayama, K. Sato, Y. Matsumi, T. Imamura, A. Yamasaki, A. Uchiyama, Wavelength and NO<sub>x</sub> dependent complex refractive index of SOAs generated from the photooxidation of toluene, *Atmos. Chem. Phys.*, **13**, 531-545, 2013.
- 11) Y. Han, Y. Iwamoto, T. Nakayama, K. Kawamura, T. Hussein, M. Mochida, Observation of new particle formation over a mid-latitude forest facing the North Pacific, *Atmos. Environ.*, **64**, 77-84, 2013.
- 12) N. Kurita, Y. Fujiyoshi, R. Wada, T. Nakayama, Y. Matsumi, T. Hiyama, K. Muramoto, Isotopic Variations Associated with North-South Displacement of the Baiu Front, *SOLA*, **9**, 187-190 (2013).

受賞 (1 件)

- ・ 三宅英沙 (名大 STE 研) 第 4 回日本学術振興会育志賞

以上