

平成30年6月4日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26287042

研究課題名(和文) 過去三千年の宇宙線異常増加とその地球環境への影響

研究課題名(英文) Rapid increase events of cosmic-rays in the past three thousand years and there effects on the earth

研究代表者

増田 公明 (Masuda, Kimiaki)

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・准教授

研究者番号：40173744

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙線が太陽活動の影響を受けて地球へ飛来し大気と核反応して生成される炭素14が樹木に取り込まれ年輪に保存されることを利用して過去の宇宙線量の変動を1-2年分解能で測定した。その結果、AD 500-1350年について太陽活動極小期の特性を明らかにし、過去7千年の一部の測定から太陽活動の変動によると思われる宇宙線の異常増加を発見した。
また大気に入射した宇宙線粒子が電離作用によって分子イオンを作り雲凝結核の生成に寄与することを、加速器からの重イオン粒子を用いて検証した。生成イオン密度と生成粒子数密度の粒径分布の関係を測定した。入射イオンの違いに対するはっきりした生成粒子の特徴の変化は見られなかった。

研究成果の概要(英文)： Galactic cosmic rays come to the earth under the solar effect and produce ^{14}C nuclei in the atmosphere, being archived in tree rings. Measurement of past ^{14}C content with 1-2 year resolution tells us a detailed history of cosmic ray intensity. Here we obtained characteristics of the sun during AD500-1350. Also we surveyed cosmic ray intensity in a part of past 7000 years and found a rapid increase, being considered to be due to abnormal solar activities. We confirmed by accelerator experiments using heavy-ions that ion-induced cloud condensation nuclei can be produced from ionization by cosmic-ray particles in atmosphere. Produced ion density and size distributions of produced aerosol particles were measured and no clear change in characteristics of particle production was observed for kind of heavy ion.

研究分野：宇宙線物理学

キーワード：宇宙線 宇宙高エネルギー現象 放射性炭素 エアロゾル 雲凝縮核生成 太陽活動

1. 研究開始当初の背景

(1) 宇宙線の変動 太陽圏の外から地球へ到来する銀河宇宙線の主な組成は正の電荷をもつ陽子やそれより重い原子核である。銀河宇宙線の強度やエネルギー分布はその発生源、伝播過程の状態(特に太陽磁場)、地磁気などによって変化する。宇宙線の発生源は銀河系内外の高エネルギー現象と考えられ、特に 10^{15} eV 以下のエネルギーでは銀河系内の超新星爆発が最も有力である。 10^{10} eV 以下のエネルギーでは太陽フレアによる高エネルギー陽子の放出(太陽宇宙線)も寄与する。一方太陽はそのダイナモ活動により表面から放出する太陽風を介して太陽圏内に惑星間空間磁場を形成し、地球へ到来する銀河宇宙線強度に大きな影響を与えている。

最近数十年の地球近傍の宇宙線強度は種々の測定器による直接観測の記録があり、それより以前の過去の宇宙線強度は、宇宙線が大気との核反応で生成する放射性同位体である炭素 14 濃度の自然界に保存された記録から知ることができる。太陽活動は、そのダイナモ機構による磁場生成に関する平均 11 年の周期(シュワーベ・サイクル)と、その 1 周期ごとに起こる磁場極性の反転による平均 22 年の周期(ハール・サイクル)をもっており、その影響は最近数十年の宇宙線観測データにも現れている。一方炭素 14 のデータは 10 年ごとの値が 1 万年にわたって得られており、長期的な変動が見て取れる。そこで重要なのは数十年にわたる宇宙線の増加で、これは太陽活動の変動を反映している。特に 17 世紀後半の炭素 14 の増加は、マウンダー極小期と呼ばれる太陽黒点が消滅した太陽活動の大極小期と一致している。また黒点データに見られる太陽活動の周期長は一定ではなく、観測データのある過去 350 年間では 9 - 13 年程度の幅があり、その周期が太陽活動の強さと関係があるとも考えられている。黒点データからわかるもう一つの特徴は、数十年にわたって黒点が消滅する大極小期(grand minimum)と呼ばれる期間であり、その代表が 17 世紀後半のマウンダー極小期で、その数十年の間、黒点が太陽表面にほとんど現れず、太陽活動が極めて弱かったことを示している。これらに比べて宇宙線源自身の変動はもっと早い変化を与えると考えられる。特に地球近傍の宇宙線源である大きな太陽フレアや超新星爆発は目視の歴史記録が残っている。ただこれらが地球環境に影響を与えたかどうかははっきりしない。太陽は地球システムに対する唯一の外部エネルギー源であり、太陽活動の変動は地球の気候にも何らかの変化を与えると考えられ、最近の地球温暖化の議論とも関連して、将来の太陽がどのように変化するのは多くの関心を集めている。これまでに、西暦 1006 年に起こったとされる SN1006 などの歴史記録に残る超新星爆発による宇宙線増加が調べられてきたが、はっきりした確

証は得られなかった。太陽フレアについても歴史上最大と言われるカリントン・フレアなどに関して宇宙線増加の記録はない。

(2) 宇宙線と地球気候の関係 太陽活動を宇宙線強度の制御変数とみなして宇宙線が地球気候に直接関与しているという考えが提案されている。この考えは条件を明確にした室内実験により検証されるべきであるが、これまで行われた実験では確定的な結論が得られていない。もし太陽や近傍宇宙で宇宙線増加現象が起これば、地球気候への影響がみられる可能性がある。未来の太陽を予測するためにも、過去において太陽活動の強度やその周期がどのように変化してきたかを明らかにする必要がある。

2. 研究の目的

(1) これまでの研究成果 我々は、樹木年輪中の炭素 14 濃度の変動を 1 - 2 年という高時間分解能で測定することにより、10 年値では見えない短期の変動を検出してきた。ひとつは太陽活動の 11 年周期変動で、マウンダー極小期に代表される太陽活動極小期において周期長が長くなるという特性を見いだしたことである。もう一つは宇宙で起こる突発高エネルギー現象の検出である。超新星爆発や太陽フレアなどは 1 年以下の短期間に起こるので、10 年値では平均化されて速い変動は見えないが、1 年値であれば検出の可能性が高くなる。そこで 8 世紀から 10 世紀の年輪を 1 - 2 年分解能で測定したところ、西暦 775 年と 994 年にそれぞれ炭素 14 濃度の急増を発見した。これらの現象の原因は種々の考察の結果、特大の太陽フレアではないかと考えられる。またこれらの炭素 14 事象に同期して地球気候に変動がなかったかを調べたが、現在のところ異常な兆候は見つっていない。炭素 14 の増加が見えるほど宇宙線が増えた場合、その影響が地球気候に現れる可能性がある。そこで宇宙線が大気にどのような変化を与えるかを室内実験で調べている。

(2) 本研究の目的 年輪試料がすぐに入手可能な過去三千年間でまだ高時間分解能で炭素 14 濃度が測定されていない年代が多くあるため、この期間に生息した年輪中の炭素 14 濃度を測定し、突発的増加がないかを調べる。もし急激な増加が見つかれば、さらに炭素 14 事象の頻度推定の正確さが増す。さらに宇宙線と大気との反応により地球環境にどのような影響があるかを調べるために、宇宙線に見立てた放射性同位体や加速器からの放射線粒子を模擬大気に入射させ、どのような変動が起こるかを明らかにする。広い年代範囲で炭素 14 を高時間分解能で測定することは太陽活動の周期の変化を知る手掛かりを得ることである。太陽に起因する宇宙線の突発現象が新たに発見されれば、太陽活動のどのよ

うな状態の時に突発現象が起こるかを議論でき、将来の特大的太陽フレアの発生予想にもつながる。宇宙線の雲凝結核生成への関与については異なる種類の放射線を照射することによって、大気中のエアロゾル増加にどのような変化が現れるかを、その生成過程と同時に調べることによって明らかにする。以上より、太陽活動が地球気候にどのようなメカニズムで影響を与えるかを解明する。

3. 研究の方法

(1) 炭素 14 測定 炭素 14 は、宇宙から飛来する高エネルギー宇宙線が地球大気に入射し、大気原子核と反応することにより生成される。地球に到達する宇宙線粒子のほとんどはプラスの電荷を持つ陽子である。星間空間から太陽圏に入った荷電粒子はその経路に存在する磁場によって進路を曲げられるが、その惑星間空間磁場は太陽活動によって変化する。従って地球へ到達する宇宙線強度は太陽活動によって変動し、大気中に生成される炭素 14 の量も変動することになる。試料は当該年代に生息していた樹木年輪を用いた。1 年分ずつ切り分けられた年輪試料から化学洗浄でセルロースを抽出し、燃焼による二酸化炭素生成を経てグラファイトに調製し、加速器質量分析計により $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比を測定した。我々のグループではこれまでに、シュペラー極小期からマウンダー極小期までの 400 年分 (1350 - 1750 AD), 7 - 11 世紀の 500 年分 (600 - 1080 AD), 紀元前 4 世紀の 150 年分 (410 - 260 BC) 及び紀元前 8 世紀の一部について、1-2 年の時間分解能による測定を完了しており、未測定区間の測定を行った。

(2) 雲凝結核生成実験 雲核生成実験については、放射線照射に対する模擬大気中のイオン密度と粒子密度の測定の予備実験はほぼ終了しており、本研究で重イオン加速器による照射実験を、種々の改良を加えながら行った。本研究では、加速器による本格照射及び異なる環境の大気を用いた実験を行った。

4. 研究成果

(1) 太陽活動 西暦 1080 年 - 1350 年の炭素 14 を 1-2 年分解能で測定した。初期解析結果によれば、Wolf 極小期に対応する西暦 1300 年-1350 年において宇宙線量は約 12 年の周期成分を見出ししており、これまでに得られた太陽活動と周期長の関係を確認した。

(2) 宇宙線イベント 西暦 500 年から 1350 年の間で、数年の範囲で宇宙線量が急増した年代があり、今後詳細な検討が必要である。また当初の予定にはなかったが、過去 7000 年までの年代の試料が得られたので、一部の年代の炭素 14 測定を行った。その結果、紀元前 55 世紀付近に不規則な宇宙線の変動が見つかった。太陽の異常活動が原因と考えられ、

これも今後詳細な検討が必要である。

(3) 雲核生成実験 金属反応容器に模擬空気を導入し、重イオン加速器ビームを照射して、生成イオン密度と生成粒子数密度の粒径分布を測定した。今回の実験では入射イオンの違いに対してははっきりとした生成粒子の特徴は見られなかった。

(4) 炭素 14 測定の自動化 本研究を進めるに当たり、多くの年輪試料を効率よくグラファイトに調製する必要があることがわかった。そこで宇宙地球環境研究所の技術部の協力を得て、加速器質量分析計における炭素 14 測定のターゲットであるグラファイト生成装置の自動化を試みた。これまでに 1 号機の設計・製作・組立を完了した。試運転の後、実用化を目指す。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 5 件)

M. Hakozaiki, F. Miyake, T. Nakamura, K. Kimura, K. Masuda and M. Okuno, Verification of the annual dating of the 10th century Baitoushan volcano eruption based on a 774-775 radiocarbon spike, Radiocarbon (査読有) Vol.60 (2018) 261-268, doi:10.1017/RDC.2017.75.

F. Miyake, A. J. T. Jull, I. P. Panyushkina, L. Wecker, M. Salzer, C. H. Baisan, T. Lange, R. Cruz, K. Masuda and T. Nakamura, Large ^{14}C excursion in 5480 BC indicates an abnormal sun in the mid-Holocene, Proc. Nat. Academy Soc. (査読有) Vol.114 (2017) 881-884, doi:10.1073/pnas.1613144114.

F. Miyake, K. Masuda, T. Nakamura, K. Kimura, M. Hakozaiki, A. J. T. Jull, T. E. Lange, R. Cruz, I. P. Panyushkina, Baisan and M. W. Salzer, Search for annual ^{14}C excursions in the past, Radiocarbon (査読有) Vol.59 (2016) 315-320, doi:10.1017/RDC.2016.54.

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. (査読有) Vol.42 (2015) 84-49, doi:10.1002/2014GL062218.

F. Miyake, K. Masuda, M. Hakozaiki, T. Nakamura, F. Tokanai, K. Kato, K. Kimura and T. Mitsutani, Verification of the cosmic ray event in AD 993-994 by using a Japanese Hinoki tree, Radiocarbon (査読有) Vol.56 (2014) 1189-1194, doi:10.2458/56.17769.

[学会発表](計 20 件)

森千尋, 増田公明, 三宅美沙, 中村俊夫, 木村勝彦, 門叶冬樹, 屋久杉年輪中放射性炭素を用いた Wolf 太陽極小期周辺の宇宙線強度変動, 日本物理学会第 72 回年次大会, 2017 年

鈴木麻未, 増田公明, 埜隆志, 伊藤好孝, 松見豊, 中山智喜, 上田紗也子, 三浦和彦, 草野完也, 宇宙線による雲凝結核生成について複数線源での検証実験(6), 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016 年

森千尋, 増田公明, 三宅美沙, 中村俊夫, 木村勝彦, 屋久杉年輪中放射性炭素を用いた 14 世紀の宇宙線強度変動の研究, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016 年

F. Miyake, K. Masuda, T. Nakamura, A. J. T. Jull, I. P. Panyushkina, L. Wachker, Large ^{14}C excursion in the BC 55th century, 2016 Goldschmidt Conference, 2016.

F. Miyake, K. Masuda, T. Nakamura, A. J. T. Jull, I. P. Panyushkina, L. Wachker, Annual cosmic ray events shown in ^{14}C data of tree-rings, First VarSITI General Symposium, 2016.

鈴木麻未, 増田公明, 埜隆志, 伊藤好孝, 松見豊, 中山智喜, 上田紗也子, 三浦和彦, 草野完也, 二次宇宙線の種類に着目したエアロゾル核生成の検証実験, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 2016 年

三宅美沙, 増田公明, 中村俊夫, A. J. T. Jull and I. P. Panyushkina, BC55 世紀の年輪中 ^{14}C 濃度大増加の痕跡, 日本物理学会第 71 回年次大会, 2016 年

櫻井敬久, 門叶冬樹, 森谷透, 三宅美沙, 増田公明, 堀内一穂, 坂本稔, 鳥海神代杉年輪の ^{14}C 増加現象, 日本物理学会第 71 回年次大会, 2016 年

F. Miyake, K. Masuda, T. Nakamura, K. Kimura, M. Hakozaiki, A. J. T. Jull, T. F.

Lange, R. Crutz, I. P. Panyushkina, C. Baisan, M. W. Salzer, Search for annual carbon-14 excursions in the past, 22nd Intern. Radiocarbon Conf., 2015.

三宅美沙, 増田公明, A. J. T. Jull, I. P. Panyushkina, 北米樹木サンプルを利用した過去 5000 年間の宇宙線イベント探索, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015

鈴木麻未, 増田公明, 埜隆志, 伊藤好孝, 松見豊, 中山智喜, 上田紗也子, 三浦和彦, 草野完也, 宇宙線による雲凝結核生成促進について複数線源での検証実験, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015 年

F. Miyake, A. Suzuki, K. Masuda, K. Horiuchi, H. Motoyama, H. Matsuzaki, Y. Motizuki, K. Takahashi and Y. Nakai, The AD775 cosmic ray event shown in beryllium-10 data from Antarctic Dome Fuji ice core, 34th Intern. Cosmic Ray conf., 2015.

鈴木麻未, 増田公明, 竹内雄也, 埜隆志, 伊藤好孝, 松見豊, 中山智喜, 上田紗也子, 三浦和彦, 草野完也, 宇宙線による雲凝結核生成について複数線源での検証実験(4), 日本物理学会第 70 回年次大会, 2015 年

A. Suzuki, K. Masuda, Y. Takeuchi, Y. Itow, T. Sako, Y. Matsumi, T. Nakayama, S. Ueda, K. Miura and K. Kusano, Verification of difference of ion-induced nucleation rate for kinds of ionizing radiation, 2014 AGU Fall Meeting, 2014.

F. Miyake, K. Masuda, M. Hakozaiki, T. Nakamura and K. Kimura, A searching of past large Solar Proton Event by measuring carbon-14 content in tree rings, 2014 AGU Fall Meeting, 2014.

鈴木麻未, 増田公明, 竹内雄也, 埜隆志, 伊藤好孝, 松見豊, 中山智喜, 上田紗也子, 三浦和彦, 草野完也, 宇宙線による雲凝結核生成について複数線源での検証実験(3), 日本物理学会 2014 年秋季大会, 2014 年

三宅美沙, 鈴木麻未, 増田公明, 堀内一穂, 本山秀明, 松崎浩之, 望月優子, 高橋和也, 中井陽一, 南極アイスコア中 ^{10}Be

濃度を用いた西暦 774-775 年宇宙線イベントの調査,日本物理学会 2014 年秋季大会, 2014 年

児島 康介 (KOJIMA, Yasusuke)
足立 匠 (ADACHI, Takumi)
藤森隆彰 (FUJIMORI, Ryuji)

A. Suzuki, K. Masuda, Y. Takeuchi, T. Sako, Y. Itow, Y. Matsumi, T. Nakayama, S. Ueda, K. Miura and K. Kusano, Chamber experiment with radiation sources for verification of sulfuric acid aerosol formation, 2014 Intern. Aerosol Conf., 2014.

A. Suzuki, K. Masuda, Y. Takeuchi, T. Sako, Y. Itow, Y. Matsumi, T. Nakayama, S. Ueda, K. Miura and K. Kusano, Laboratory experiment with various radiation sources for verification of cloud condensation nucleation by cosmic rays, Japan Geoscience Union 2014 Meeting, 2014.

F. Miyake, K. Masuda, M. Hakozaiki, T. Nakamura and K. Kimura, Plan of large SPE search by the ¹⁴C content measurement in Japanese trees for the past 5000 years, Japan Geoscience Union 2014 Meeting, 2014.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

増田 公明 (MASUDA, Kimiaki)

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・准教授

研究者番号: 40173744

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし

(4)研究協力者

三宅 芙沙 (MIYAKE, Fusa)

伊藤 好孝 (ITOW, Yoshitaka)

埴 隆志 (SAKO, Takashi)

松見 豊 (MATSUMI, Yutaka)

中山 智喜 (NAKAYAMA, Tomoki)

鈴木 麻未 (SUZUKI, Asami)

竹内 雄也 (TAKEUCHI, Yuya)

森 千尋 (MORI, Chihiro)