

令和 6 年 6 月 28 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H01952

研究課題名（和文）新氷床コアレーザー融合法で探る巨大太陽プロトン現象の超高時間分解能検証

研究課題名（英文）Diagnosing a huge solar proton event in an ice core with highly-resolved
RIKEN-LMS (A Novel Laser Melting Sampler)

研究代表者

望月 優子 (Motizuki, Yuko)

国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器科学研究センター・室長

研究者番号：90332246

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,400,000円

研究成果の概要（和文）：研究代表者らが新開発したレーザー融解サンプラー（RIKEN-LMS）によって、南極氷床コアについて、巨大太陽プロトン現象を識別し得るだけの超高時間分解能分析が達成可能な見通しとなった。このLMS装置を用い、氷床コア中の硝酸イオン濃度変動及び水同位体比変動を分析し、巨大太陽プロトン現象の痕跡を調べる目的で、よく知られている1859年、774年、994年イベントについて検討を進めた。イオン分析部を含めた装置全体は、特許申請準備が進行中であり、LMSによる水同位体比分析については、2023年発表の成果論文が、Altmetric attention score 150（全分野でトップ5%）を達成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

「Laser Melting Sampler (LMS)」法の発明により、従来不可能だった、氷床コアを用いた約100万年前までの1年刻みの気温変動や突発的な気温変化、また突発的な天体現象について、超高解像度（深度分解能で、2、3ミリメートル）の研究が、初めて可能になった。近い将来、LMS法が、氷床コア分析において、世界標準的な手法となる可能性も期待されている。イオン分析部を含めたLMS装置全体は、特許申請準備が進行中であり、今後、過去72万年の南極ドームふじ氷床コアにLMSを適用すれば、突発的なイベントのみならず、未解明の気候変動と太陽活動の関係等の理解が飛躍的に進むと期待される。

研究成果の概要（英文）：The newly developed laser melting Sampler ("RIKEN-LMS") is expected to achieve ultra-high-temporal resolution (i.e., a few mill-meter depth resolution) analysis of Antarctic ice cores that can distinguish giant solar proton events which may be recorded in variations in nitrate ion concentrations and water isotope ratios. To apply this LMS device, we examined the well-known huge solar proton events that occurred in 1859 CE, 774 CE, and 994 CE. The entire LMS instrument, including the ionic analyzing part, is in the process of applying for a patent, and the paper for water isotope analysis with LMS was published in 2023 and achieved an Altmetric attention score of 150 (top 5% in all fields).

研究分野：宇宙物理学、天文学、雪氷学

キーワード：太陽活動 太陽プロトン現象 氷床コア 装置開発 レーザー融解 超高解像度分析

1. 研究開始当初の背景

太陽フレアとは、太陽表面でしばしば起きている爆発現象である。巨大な太陽フレアに伴って、10メガ電子ボルト(MeV)程度から500MeVを越える高エネルギー陽子が地球の大気に激突する。これを太陽プロトン現象(Solar Proton Event; SPE)と呼ぶ。巨大なSPEに引き続いて、磁気嵐が発生する。1859年に人類が最初に見た太陽フレア(「キャリントン・フレア」)は、過去200年間で最大の磁気嵐を引き起こしたことが知られている。もしキャリントンクラスの巨大SPEが現在、再び発生すれば、巨大磁気嵐により電力システムが破壊され、損害は、最大160兆円以上にのぼり、修復には長くて10年を要するとの全米科学アカデミーの試算がでている。

氷床コアは、直径10cm程度の円柱の氷試料で、コアの深度と(過去の)年代とが一对一に対応している。グリーンランドや、南極大陸で掘削される。ZellerとDrecchhoffは、1988年から1992年にかけてグリーンランドと南極大陸で長短3本の雪氷コアを取得し、それらの硝酸イオン(NO_3^-)濃度を1ヶ月以下の時間分解能で分析した。彼らは、グリーンランドコア(125メートル)について、1561年から1950年までの約400年間に相当する深度で現れた NO_3^- スパイクと、7つの比較的大きなSPEが観測された時期とが同期していると報告した[McCracken et al. 2001]。図1にこのグリーンランドコア中の NO_3^- 濃度変動の一例を示す。年変動をしているベースライン上に突発的にスパイクが立ち上がり、研究グループは、この NO_3^- 濃度スパイクが、1859年9月に起きたキャリントン・フレアに相当していると主張した。ここで、図1における NO_3^- 濃度分析は、紫外線領域における吸光分光分析法に依っている。一方、最近の氷床コアのイオン分析は、電気透析型のオートサプレッサーを有するイオンクロマトグラフィー装置により、ppb(10億分の一)レベルの高精度分析が可能になっている。

図1でSPEと同定された NO_3^- スパイクは、2週間程度のタイムスケールで増減している。天文衛星による直接観測から、太陽からの高エネルギー陽子の放出は数日間続くことがわかっており、スパイクの継続時間は妥当と考えられる。但し、SPEによって上空で生じた窒素酸化物(後述)がすばやく重力的に沈降することが必要で、その物理機構はまだよくわかっていない。

NO_3^- スパイクとSPEとの同定には、正確な年代決定が必要である。図1でMcCrackenらは、コアの電気伝導度の変動(図1の薄い灰色の点線)から、北極域に影響した既知の過去の火山噴火を同定し、絶対年代を決めた。そして近傍の噴火タイムマーカ間の NO_3^- 濃度変動上に現れた年

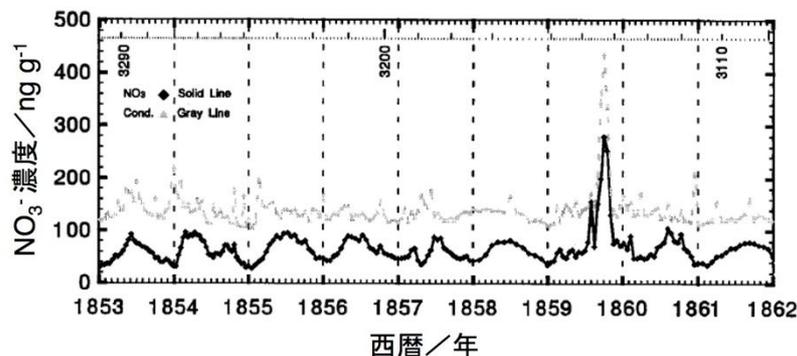


図1 グリーンランド氷床コア中の NO_3^- 濃度 vs. 年代(時間分解能は約2週間)。1859年のキャリントンイベントとされるスパイクが報告されている。薄い灰色の点線は電気伝導度。McCracken et al.(2001)より転載。

変動の山を数えて年代を構築した。その後、他の数本の氷床コアに同じ現象が現れなかったこともあり、一般的には、図1のキャリントンイベントの主張は、否定されたと考えられている。

しかし、研究代表者らのこれまでの研究から、地球上のどの場所の氷床コアでも天体現象に起源を持つ NO_3^- スパイクが記録されるわけではないことがわかっている。重要な点は、太陽高エネルギー粒子に起因する大気中の化学組成の変化は、成層圏（高度 10-50km）で起きるため、氷床コアが成層圏大気をいかに取り込んでいるかである。南極大陸の日本の基地「ドームふじ」周辺域は、東南極の内陸の高い標高に位置し、極域成層圏雲からの脱室と呼ばれる現象により、南極大陸の他の地域に比べて、成層圏大気が効果的に沈降してくることがわかっている。このことは、1960年代の冷戦時代に行われた、原子爆弾の成層圏内実験に由来するトリチウム濃度の測定から実証されている。ドームふじコアは、世界で最も成層圏の影響を取り込んでいる地球上のアーカイブであると言っても過言ではなく、過去の宇宙線変動の情報を解析するには、非常に有利な研究試料である。

SPE に特徴的な大気圏外で約 20MeV 以上の運動エネルギーを持つ高エネルギー陽子は、成層圏まで侵入し、地球磁場の磁力線のまわりをらせん状に運動しながら落ちて来るため、磁力線の集まる極域の大気に SPE の影響が強く現れる。大気中の主成分である安定な窒素分子 (N_2) に高エネルギー陽子が衝突すると、 N_2 を励起・解離させ、励起状態および基底状態の窒素原子が生じる。これらの窒素原子は酸素分子と反応して一酸化窒素 (NO) を生成し、二酸化窒素 (NO_2) を経て、最終的に硝酸 (HNO_3) へと行き着く。 HNO_3 を含めたこれらの窒素酸化物が氷床中の NO_3^- の前駆体であり、反応性窒素酸化物 (NO_y) と総称される。生成された NO_y が、効果的な脱室によって地表に沈降し、極域の氷床中に保存されると考えられる。

太陽ではまだ超巨大フレアは直接観測されていないが、数多くの太陽に似た星（太陽型星）では、超巨大フレアが起きていることがわかっている [Maehara et al. 2012]。屋久杉の年輪中の放射性炭素 (^{14}C) の加速器質量分析から、西暦 774 年から 775 年にかけて宇宙線の大変動が起きていたことがわかり、その原因として太陽で超巨大 SPE が起きた可能性が指摘されている [Miyake et al. 2012 など]。

研究開始当時までの南極氷床コアのイオンや水同位体比の分析は、代表者らによるドームふじ氷床コアの分析も含め、典型的に時間分解能で約 1 年（深度に依るが、過去 2000 年について深度方向分解能で 3cm 程度）であり、SPE イベントが 1 週間程度のスケールのスパイクとして、仮に記録され得るとしても、なまってしまうと発現しないと考えられた。しかしながら、代表者らが新規開発したばかりの「RIKEN-LMS」と名付けられた、氷床コア自動レーザー融解装置（図 2）は、深度方向分解能で 2mm 程度を達成でき、巨大プロトン現象を識別できると期待できる。

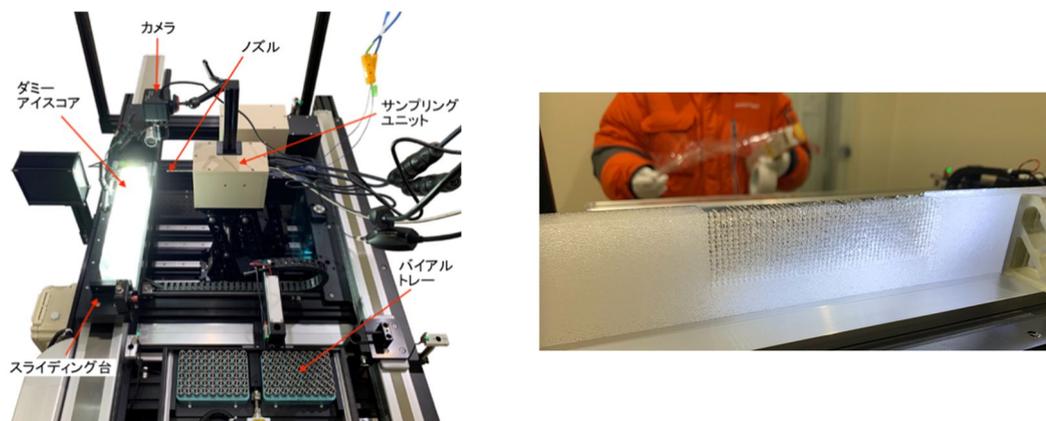


図 2 左：新開発の RIKEN-LMS。右：LMS によりレーザーサンプリングされた、南極ドームふじ氷床コア。理化学研究所の-20 の低温室に設置されている。

2．研究の目的

研究代表者らが新規に開発した氷床コアレーザー融解サンプラー（Laser Melting Sampler; “RIKEN-LMS”）によって、南極大陸のドームふじ基地で掘削された氷床コアについて、これまで手で分割された約 1 年の時間分解能では識別できなかった巨大太陽プロトン現象を識別し得るだけの超高時間分解能分析が達成できる見通しとなった。この LMS 装置と本課題予算で導入した高感度イオンクロマトグラフィー装置を組み合わせ、氷床コア中の硝酸イオン濃度変動及び水同位体比変動を指標として、巨大太陽プロトン現象の痕跡を検証することが本研究の目的である。

3．研究の方法

2020 年度は、高感度イオンクロマトグラフィー装置(ICS-6000、日本ダイオネクス社)を選定・導入した。又、LMS 装置をドームふじ浅層コアに初めて適用し、深度方向 3mm の超高分解能の自動サンプリングに成功した(図 2 右参照)。続いて 2021 年度に、採水された氷床コア試料の水同位体比分析及びイオン分析を行った結果、水同位体比分析については、実験室大気との接触により比較的容易に同位体交換が起こるため、分析にあたって留意が必要であることがわかった。イオン分析に関しては、予期せぬ微量な未知イオンの汚染が認められ、原因を詳細に検討した結果、LMS 装置に主に 2 カ所、大幅な改良を行った(“Advanced LMS”)。又、分析に必須の超純水製造装置が復旧不能の故障を起こし、本課題予算にて新規に導入した。

高感度イオンクロマトグラフィー装置の導入から 1 年を経てメンテナンスの必要性が生じたが、部品が米国からの輸入品のため、コロナ禍の影響で供給減少による納期遅延が発生し、年度内の調達が不可能な状況となった。そのため予算を 2022 年度に繰越し、当該装置の電子部品関係のスペアパーツの到着を待ち、装置の調整を行った。2022 年度は、導入した超純水製造装置を用い、「超純水氷」の製作工程を工夫したことによって、実験室空気からの汚染のより心配がない「超純水氷」が作れるようになり、その後の実験が質的に向上した。さらに、実験室のクリーン環境の整備に配慮し、大気汚染対策のための改良が施された LMS 装置を用いて、超高時間分解能のイオン分析を行い、試料間のクロスコンタミネーションや、実験室空気からの汚染等が、必要な精度では起きていないことが確かめられた。

4．研究成果

LMS装置の適用を前提に、巨大SPE現象について、1859年のキャリントンイベント、774年の巨大イベントに加え、994年巨大イベントについても検討を進めた。イベントを挟む近傍の火山噴火スパイクによる絶対年代タイムマーカーの最新の状況や、新しい年代の不定性、国立極地研究所に保存されている氷床コアの状況、キャリンイベントについては、先行研究の硝酸イオンスパイクの継続時間と時間分解能、LMSによる実際のコアに適用した場合の予想分解能等を詳細に検討した結果、分析の対象を、キャリントンイベントではなく、巨大SPEイベントとした。

LMS を適用した水同位体比分析については、LMS を適用した分析の結果と、手で分割した試料の結果とが不定性の範囲内で一致していることを示した成果論文が 2023 年に出版され、Altmetric attention score 150 (全分野でトップ 5%) を達成した。本研究の過程で、RIKEN-LMS 装置は、イオン分析用部と水同位体比分析用部の両方が工夫された、“Advanced LMS” 装置へと発展し、現在、理化学研究所にて特許申請が進行中である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Motizuki Yuko, Nakai Yoichi, Takahashi Kazuya, Hirose Junya, Sahoo Yu Vin, Yumoto Masaki, Maruyama Masayuki, Sakashita Michio, Kase Kiwamu, Wada Satoshi, Motoyama Hideaki, Yano Yasushige	4. 巻 -
2. 論文標題 A novel laser melting sampler for discrete, sub-centimeter depth-resolved analyses of stable water isotopes in ice cores	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Glaciology	6. 最初と最後の頁 1~7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jog.2023.52	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Thomas, E. R., Vladimirova, D. O., Tetzner, D. R., Hori, A., Motizuki, Y., Takahashi, K., Motoyama, H., Nakai, et al.	4. 巻 15
2. 論文標題 Ice core chemistry database: an Antarctic compilation of sodium and sulfate records spanning the past 2000 years	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Earth System Science Data	6. 最初と最後の頁 2517~2532
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5194/essd-15-2517-2023	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計16件（うち招待講演 10件/うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Yuko Motizuki, Yoichi Nakai, Kazuya Takahashi, Junya Hirose, Yu Vin Sahoo, Masaki Yumoto, Masayuki Maruyama, Michio Sakashita, Kiwamu Kase, Satoshi Wada, Hideaki Motoyama, and Yasushige Yano
2. 発表標題 First application of laser melting method to ice core sampling to study climate change
3. 学会等名 Int. Conference on Laser Solutions for Space and Earth (LSSE2024) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Yuko Motizuki, Yoichi Nakai, Kazuya Takahashi, Yu Vin Sahoo, Junya Hirose, Masaki Yumoto, Masayuki Maruyama, Michio Sakashita, Kiwamu Kase, Satoshi Wada, Hideaki Motoyama, and Yasushige Yano
2. 発表標題 A novel laser melting sampler for discrete, sub-centimeter depth-resolved analyses of stable water isotopes in ice cores
3. 学会等名 The 14th Symposium on Polar Science (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yuko Motizuki, Yoichi Nakai, Kazuya Takahashi, Takashi Imamura, and Hideaki Motoyama
2. 発表標題 Eleven-year, 22-year and ~90-year solar cycles discovered in nitrate concentrations in a Dome Fuji (Antarctica) ice core (A poster presentation)
3. 学会等名 The 5th ISEE International Symposium: Toward the Future of Space-Earth Environmental Research (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuko Motizuki
2. 発表標題 Verifying footprints of solar cycles and supernovae in polar ice cores
3. 学会等名 International conference on Astrophysics with Radioactive Isotopes (AwRI) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 望月優子
2. 発表標題 "Ice-Core Astro-Factory"計画：南極アイスコア中の超新星痕跡同定への取り組み
3. 学会等名 第10回超新星ニュートリノ研究会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 望月優子
2. 発表標題 科研費基盤A『新開発RIKEN-LMSで挑む南極深層アイスコアからの天文情報抽出』の紹介
3. 学会等名 ドームふじ研究集会 + 第3期ドーム深層掘削会合
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 望月優子
2. 発表標題 化学分析誤差を誤差伝播則から突き詰める - 南極アイスコアデータから抽出される太陽活動周期を例にして
3. 学会等名 お茶の水女子大学理学部物理学教室談話会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 望月優子
2. 発表標題 南極アイスコアからさぐる地球と宇宙の歴史
3. 学会等名 埼玉県高等学校中堅教諭等資質向上研修（理科）（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 望月優子
2. 発表標題 "RIKEN Ice Core Factory"計画と理論研究により目指すもの
3. 学会等名 宇宙物理と超高層大気物理の融合研究会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 望月優子
2. 発表標題 地質学的試料に残った超新星の痕跡について
3. 学会等名 新学術領域「地下から解き明かす宇宙の歴史と物質の進化」主催 第9回超新星ニュートリノ研究会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 望月優子
2. 発表標題 南極アイスコアから探る太陽活動と気候変動 太陽の鼓動 一星と私たちの繋がりを通して
3. 学会等名 お茶の水女子大学理学部主催 第10回宇宙講演会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 望月優子
2. 発表標題 Solar activity signatures embedded in ice cores
3. 学会等名 宇核連-RCNP研究会「宇宙核物理の展開」（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 望月優子
2. 発表標題 南極の氷からひもとく地球と宇宙の歴史
3. 学会等名 朝日カルチャーセンター新宿教室（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 望月優子
2. 発表標題 地球アーカイブからさぐる、宇宙と地球の歴史
3. 学会等名 朝日カルチャーセンター中之島教室 宇宙核物理研究連絡会「宇宙と地球と元素」シリーズ講座（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuko Motizuki, Yoichi Nakai, Kazuya Takahashi, Junya Hirose, Yu Vin Sahoo, Yasushige Yano, Masaki Yumoto, Masayuki Maruyama, Michio Sakashita, Kiwamu Kase, Satoshi Wada, and Hideaki Motoyama
2. 発表標題 A novel, ultra-high-resolution laser-melting sampler with resolution controllability for discrete analyses of ion concentrations and stable water isotopic compositions in ice cores
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Motizuki, Y. Nakai, K. Takahashi, J. Hirose, Y. V. Sahoo, Y. Yano, M. Yumoto, M. Maruyama, M. Sakashita, K. Kase, S. Wada, H. Motoyama
2. 発表標題 A novel high-resolution laser-melting sampler for discrete analyses of ion concentrations and stable water isotopic compositions in firn and ice cores
3. 学会等名 virtual EGU General Assembly 2021 (vEGU21) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 望月優子 (岡村定矩他編)	4. 発行年 2024年
2. 出版社 日本評論社	5. 総ページ数 3
3. 書名 シリーズ現代の天文学第1巻 人類の住む宇宙 (第2版第4刷 改訂) 「第4章 太陽系 4.1.2 節 太陽の現在」	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>理化学研究所雪氷宇宙科学研究室ウェブサイト https://ribf.riken.jp/ag/</p> <p>2023年9月19日報道発表「レーザー融解によるアイスコアの微細試料採取装置の開発 - アイスコア科学の超精密化に進展をもたらす技術革新 - 」 望月優子, 中井陽一, 和田智之, 矢野安重. https://www.riken.jp/press/2023/20230919_2/index.html</p> <p>Press Release, Sep. 20, 2023. "Laser-based ice-core sampling for studying climate change" Yuko Motizuki, Yoichi Nakai, Satoshi Wada, Yasushige Yano. https://www.riken.jp/en/news_pubs/research_news/pr/2023/20230919_2/index.html</p> <p>Yuko Motizuki, "Shining a light on climate change over a million years", RIKEN Research Winter 2023,16. https://www.riken.jp/medialibrary/riken/pr/publications/riken_research/2023/rr202312.pdf</p> <p>Asian Scientist Magazine, "Lasers Help Probe Past Climates In Ice Cores", Oct. 30, 2023, https://www.asianscientist.com/2023/10/general/lasers-help-probe-past-climates-in-ice-cores/</p> <p>日本経済新聞, 「理化学研究所、南極の氷分析新装置 20万年前の気候把握」, 2023年9月29日掲載. https://www.nikkei.com/article/DGXZQ0UC21D4Y0R20C23A900000/</p> <p>オプトロニクスオンライン, 「理研ら、アイスコアの微細試料採取装置を開発」, 2023年9月20日掲載. https://optronics-media.com/news/20230920/83456/</p>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	高橋 和也 (Takahashi Kazuya) (70221356)	国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器科学研究セン ター・特別嘱託研究員 (82401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------