

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：32681

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2017

課題番号：25287051

研究課題名(和文) 過去4万年間の宇宙線強度変動・太陽圏構造と地球環境変動

研究課題名(英文) Galactic cosmic rays, heliospheric environment, and the terrestrial climate for the past 40,000 years

研究代表者

宮原 ひろ子 (Miyahara, Hiroko)

武蔵野美術大学・造形学部・准教授

研究者番号：00532681

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、樹木年輪および氷床コアに含まれる宇宙線生成核種の分析を行い、太陽活動と銀河宇宙線の変動特性を明らかにするとともに、太陽圏磁場構造の長期的変化について検証を行った。また、太陽活動が気候変動に及ぼす影響を明らかにするため、樹木年輪中の酸素同位体比を分析し、古気候の復元を行った。研究の結果、太陽活動が気温に加えて降水にも重大な影響を及ぼしていることが判明した。併せて、太陽の自転周期に着目し、太陽活動の気象への影響についても解析を行った。その結果、気象レベルでも太陽活動が重大な影響を及ぼしていることが示唆された。また、太陽活動が気候システムに影響するプロセスについても示唆が得られた。

研究成果の概要(英文)：In this study, we analyzed the cosmogenic nuclides in tree rings and ice cores to investigate the periodic variations of solar activity and the galactic cosmic rays in the past. Based on the time profile, we also examined the long-term variations of large-scale structure of heliospheric magnetic field. In addition, we conducted measurements of oxygen isotopes in tree rings to understand the solar influence on climate. As a result, it turned out that solar activity plays important role in the variations of precipitation in addition to the temperatures. We also examined the possible solar influence on meteorological phenomena focusing on the solar rotational period. As a result, it was suggested that solar activity shows a significant impact even at a meteorological time scale.

研究分野：宇宙線物理学, 太陽物理学, 宇宙気候学

キーワード：太陽活動 宇宙線 太陽圏 気候変動 宇宙線生成核種 宇宙気候学 小氷期 雷

### 1. 研究開始当初の背景

太陽活動には、約 11 年の周期性の他に、数十～数千年におよぶ長周期的な変動が見られる。古気候学的な研究により、それらの太陽活動の変動が、地球の気候変動に重大な影響を及ぼしていることが明らかになってきた。しかし、そのメカニズムは未解明である。太陽活動の変動に伴う太陽総放射量の変動は約 0.1%程度であり、表層気温に換算して約 0.05 程度の変動にしか相当しないため、古気候学的に観測されている気候応答を充分には説明できない。そのため、太陽紫外線や銀河宇宙線の影響についての研究が進められている。銀河宇宙線は、雲核の生成率や雲粒の成長に作用することにより気候変動に影響している可能性が示唆されている。

銀河宇宙線は太陽磁場の遮蔽を受けるため、地球での線量は太陽活動に対して逆相関の変動を示す。加えて、太陽の双極子磁場の反転周期である 22 年周期の影響も見られる。これは、主に陽子から成る銀河宇宙線が、太陽圏磁場のスパイラル構造の影響を受けて子午面方向に循環しているためである。研究代表者らの研究により、宇宙線の 22 年周期変動の振幅や変動パターンは、長期的な太陽活動の度合いに応じて変化することが示された。また、11 年周期自体の長さが約 7～14 年程度の幅で変動するため、22 年周期の長さも変化する。

以上のことは、気候変動における太陽活動や宇宙線変動の影響を見極めていく上で、太陽活動の周期的変動特性を理解し、また太陽圏の長期的な変化とその宇宙線のモジュレーションに関する理解を深めることが非常に重要であることを意味している。

### 2. 研究の目的

本研究では、樹木や氷床コアの年層に含まれる宇宙線生成核種を 1 年分解能で分析することで、太陽活動と宇宙線変動の“11 年”/“22 年”周期の変動特性とその長期的変化を明らかにすることを目的とした。また、古気候学的なデータと気象データを用いることで、太陽活動や宇宙線の変動が気候/気象に及ぼす影響についても検証を行うことを目的とした。

### 3. 研究の方法

本研究では、太陽活動極小期や地磁気反転期の樹木年輪中の炭素 14 濃度を高精度かつ 1 年分解能で分析し、宇宙線変動の時系列データを取得した。測定には、山形大学高感度加速器質量分析センターが所有する加速器質量分析計を用いた。併せて、南極氷床コアに含まれるベリリウム 10 の分析及び解析を行った。測定には、東京大学博物館が所有する加速器質量分析計を用いた。

また、太陽活動が気候に及ぼす影響を定量的に明らかにするため、樹木年輪中の安定同位体比の分析も行った。樹木年輪中の酸素同

位体比は、相対湿度の代替指標となることが知られている。

併せて、太陽活動が気候システムに影響するプロセスを検証するため、太陽自転周期に着目し、気象データの解析を行った。太陽の自転により黒点や白斑が太陽表面を移動することにより、太陽総放射や紫外線の量に 24～31 日程度の準周期的な変動が現れるほか、コロナ質量放出や太陽風の磁場構造が地球を通過し銀河宇宙線を遮蔽することにより、地球に到来する宇宙線量の変動にも同程度の準周期的な変動が見られる。数日～1 か月程度の変動に着目することで、太陽活動の影響が気候システム内を伝搬する様子をトレースすることができるほか、太陽活動が気象自体に及ぼす影響の理解にもつながる。

### 4. 研究成果

炭素 14 の高精度測定により、太陽活動が低下した際の 11 年周期変動の変動特性について重要な示唆が得られたほか、炭素 14 とベリリウム 10 を併用することにより、正確な年代軸でより詳細な変動プロファイルを捉えることができることが示された。約 4 万年前の地磁気エクスカージョン期の樹木年輪についても 1 年分解能で炭素 14 の分析を行った。半減期が 5730 年と短く濃度が大幅に低下しているため、11 年周期変動のプロファイルを詳細に明らかにするためには、今後もさらに分析を重ねていく必要がある。約 20 万年前の地磁気エクスカージョン期についてのベリリウム 10 の分析からは、太陽活動の 1000～2000 年周期にともなう宇宙線量の変動が、地磁気強度の低下とともに増幅する様子も捉えられた。

また、樹木年輪の酸素同位体比を 1 年値で分析することにより、17 世紀以降の中部日本の相対湿度を詳細に明らかにした。測定した年代は、小氷期の後半に該当する。太陽活動の低下に伴って、相対湿度が約 8%増加していたことが示され、5～7 月頃の降水量が増加していたことが示唆された。また、気温の低下が太陽活動の低下に対して顕著な遅れを示さないのに対して、相対湿度は大幅に遅れて応答していたことが示唆された。

太陽の自転周期に着目した雷データの解析からは、太陽活動が気象のレベルでも重大な影響を及ぼしていることが示された。影響は九州地方から中部日本/北日本へと移動しており、太陽活動が低緯度地域に強い作用を及ぼし、それが中高緯度に伝搬している可能性があることが示唆された。

### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 56 件)

H. Miyahara, et al., Solar rotational cycle in lightning activity in Japan during the 18-19th centuries, *Annales Geophysicae*, 査読有, 36, 633-640, 2018,

doi: 10.5194/angeo-36-633-2018.

H. Miyahara, et al., Searching for the 27-day solar rotational cycle in lightning events recorded in old diaries in Kyoto from the 17th to 18th century, *Annales Geophysicae*, 査読有, 35, 1195-1200, 2017, doi: 10.5194/angeo-35-1195-2017.

H. Miyahara, et al., Solar 27-day rotational period detected in wide-area lightning activity in Japan, *Annales Geophysicae*, 査読有, 35, 583-588, 2017, doi: 10.5194/angeo-35-583-2017.

W. Sakashita, H. Miyahara, Y. Yokoyama, et al., Relationship between the Northern Pacific Gyre Oscillation and tree-ring cellulose oxygen isotopes in northeastern Japan, *Geoscience Letters*, 査読有, 4, 29, 2017, doi:10.1186/s40562-017-0095-2.

W. Sakashita, H. Miyahara, Y. Yokoyama, et al., Hydroclimate reconstruction in central Japan over the past four centuries from tree-ring cellulose 180, *Quaternary International*, 査読有, 455, 1-7, 2017, doi:10.1016/j.quaint.2017.

R. Kataoka, H. Isobe, H. Hayakawa, H. Tamazawa, A. D. Kawamura, H. Miyahara, et al., Historical space weather monitoring of prolonged aurora activities in Japan and in China, *Space Weather*, 査読有, 15, 392-402, 2017, doi:10.1002/2016SW001493.

M. Polgari, S. Berczi, K. Horiuchi, et al., A global multiproxy database for temperature reconstructions of the Common Era, *Scientific Data*, 査読有, 4, 170088-170088, 2017, doi:10.1038/sdata.2017.88.

M. Polgari, S. Berczi, K. Horiuchi, et al., Characterization and 10 Be content of iron carbonate concretions for genetic aspects - Weathering, desert varnish or burning: Rim effects in iron carbonate concretions, *Journal of Environmental Radioactivity*, 査読有, 173, 58-69, 2017, doi:10.1016/j.jenvrad.2016.11.005.

S. Suzuki, H. Sakurai, F. Tokanai, Observation of cosmogenic nuclide Be-7 concentrations in the air at Bangkok and trajectory analysis of global air-mass motion, *Proceedings of Science (ICRC2017)*, 査読有, 70, 1-8, 2017.

H. Iijima, H. Hotta, S. Imada, K. Kusano,

et al., Improvement of solar-cycle prediction: Plateau of solar axial dipole moment, *Astronomy & Astrophysics*, 査読有, 607, L2, 2017, doi:10.1051/0004-6361/201731813.

R. Kataoka, H. Isobe, H. Hayakawa, H. Tamazawa, A. D. Kawamura, H. Miyahara, et al., Historical space weather monitoring of prolonged aurora activities in Japan and in China, *Space Weather*, 査読有, 15, 392-402, 2017.10, doi: 1002/2016SW001493.

D. Shukuya, and K. Kusano, Simulation Study of Hemispheric Phase-Asymmetry in the Solar Cycle, *The Astrophysical Journal*, 査読有, 835, 84, 2017, doi:10.3847/1538-4357/835/1/84.

W. Sakashita, Y. Yokoyama, H. Miyahara, et al., Relationship between early summer precipitation in Japan and the El Nino-Southern and Pacific Decadal Oscillations over the past 400 years, *Quaternary International*, 査読有, 397, 300-306, 2016, doi: 10.1016/j.quaint.2015.05.054.

K. Horiuchi, et al., Multiple 10Be records revealing the history of cosmic-ray variations across the Iceland Basin excursion, *Earth and Planetary Science Letters*, 査読有, 440, 105-114, 2016, doi: 10.1016/j.epsl.2016.01.034.

E. Kilpua, N. Olsper, A. Grigorievskiy, M. Kapyla, E. Tanskanen, H. Miyahara, et al., Statistical study of strong and extreme geomagnetic disturbances and solar cycle characteristics, *The Astrophysical Journal*, 査読有, 806, 272, 2015, doi: 10.1088/0004-637X/806/2/272.

K. Horiuchi, et al., Exploration of 10Be analysis using 10 µg of Be carrier, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 査読有, 361, 423-430, 2015. doi: 10.1016/j.nimb.2015.07.123.

F. Miyake, A. Suzuki, K. Masuda, K. Horiuchi, et al., The AD 775 cosmic ray event shown in Beryllium-10 data from Antarctic Dome Fuji ice core, *Proceedings of Science*, 査読有, 110, 1-7, 2015.

T. Shibayama, K. Kusano, et al., Fast magnetic reconnection supported by sporadic small-scale Petschek-type shocks, *Physics of Plasmas*, 査読有, 22, 100706, 2015, doi: DOI: 10.1063/1.4934652.

G. Vekstein, K. Kusano, Nonlinear regimes of forced magnetic reconnection, *Physics of Plasmas*, 査読有, 22, 90707, 2015, doi: 10.1063/1.4932079.

F. Miyake, A. Suzuki, K. Masuda, K. Horiuchi, et al., Cosmic ray event of AD 774-775 shown in quasi-annual  $^{10}\text{Be}$  data from the Antarctic Dome Fuji ice core, *Geophysical Research Letters*, 査読有, 42, 84-89, 2015, doi: 10.1002/2014GL062218.

㉑宮原ひろ子, 太陽活動に伴う宇宙線変動と気候変動, *プラズマ・核融合学会誌*, 査読有, 90, 122-127, 2014.

㉒F. W. Nara, T. Watanabe, T. Kakegawa, K. Minoura, A. Imai, N. Fagel, K. Horiuchi, et al., Biological nitrate utilization in south Siberian lakes (Baikal and Hovsgol) during the last glacial period: the influence of climate changes on primary productivity., *Quaternary Science Reviews*, 査読有, 90C, 69-79, 2014, doi: 10.1016/j.quascirev.2014.02.014.

㉓草野完也, 宇宙気候学の現状と課題, *プラズマ・核融合学会誌*, 査読有, 90, 107-111, 2014.

㉔草野完也, 太陽活動と地球環境変動, *プラズマ・核融合学会誌*, 査読有, 90, 112-115, 2014.

㉕草野完也, 宇宙気候学の将来展望, *プラズマ・核融合学会誌*, 査読有, 90, 146-147, 2014.

㉖R. Kataoka, T. Ebisuzaki, H. Miyahara, et al., The Nebula Winter: The united view of the snowball Earth, mass extinctions, and explosive evolution in the late Neoproterozoic and Cambrian periods, *Gondwana Research*, 査読有, 25, 1153-1163, 2014, doi: 10.1016/j.gr.2013.05.003.

㉗堀内一穂, 宇宙線層序学: 宇宙線変動に基づく異なる古環境アーカイブ間の高精度な同期法, *月刊地球号外*, 査読有, 63, 31-38, 2014.

㉘島伸一郎, 長谷川晃一, 草野完也, エアロゾル生成率の増加が引き起こす積雲-層雲転移に関する予備的数値実験, *低温科学*, 査読有, 72, 249-264, 2014.

㉙F. Tokanai, K. Kato, M. Anshita, H. Sakurai, A. Izumi, T. Toyoguchi, T. Kobayashi, H. Miyahara, et al., Present

status of YU-AMS system, *Radiocarbon*, 査読有, 55, 251-259, 2013, doi: 10.2458/azu\_js\_rc.55.16263.

㉚H. Sakurai, F. Tokanai, K. Kato, Y. Takahashi, T. Sato, S. Kikuchi, E. Inui, Y. Arai, K. Masuda, H. Miyahara, et al., Latest  $^{14}\text{C}$  concentrations of plant leaves at high altitudes in the Northern and Southern Hemisphere, *Radiocarbon*, 査読有, 55, 1573-1579, 2013, doi: 10.2458/azu\_js\_rc.55.16273.

㉛T. Suzuki, S. Imada, R. Kataoka, Y. Kato, T. Matsumoto, H. Miyahara, et al., Saturation of Stellar Winds from Young Suns, *PASJ*, 査読有, 65, 98-119, 2013, doi: 10.1093/pasj/65.5.98.

㉜H. Sakurai et al., Measuring  $^{14}\text{C}$  Concentration in wine to Monitor global distribution of  $^{14}\text{C}$ , *Radiocarbon*, 査読有, 55, 1827-1833, 2013, doi: 10.2458/azu\_js\_rc.55.16370.

㉝堀内一穂, 加速器質量分析における超高度核種分析のための試料前処理法, *ぶんせき*, 査読有, 10, 570-576, 2013.

[学会発表](計 86件)

堀内一穂, ドームふじアイスコアを対象にした高解像度  $^{10}\text{Be}$  分析の現状, 研究集会「南極ドームふじ氷床深層アイスコアの解析による気候・環境変動の研究の新展開」, 2018.

H. Miyahara, et al., 27-day solar rotational cycle in lightning activity in Kyoto from the 17th to 18th century, *地球電磁気・地球惑星圏学会(招待講演)*, 2017.

H. Miyahara, et al., Solar 27-day rotational period detected in a wide-area lightning activity in Japan, *日本地球惑星科学連合*, 2017.

H. Miyahara, K. Horiuchi, F. Tokanai, et al., Precise dating of cosmic ray events in the 17th century found by the analysis of beryllium-10 content in Antarctic ice core, *日本地球惑星科学連合*, 2017.

K. Horiuchi, et al., Measurements of beryllium isotopes in ice wedges in Alaska, *The Fourteenth International AMS Conference (国際学会)*, 2017.

堀内一穂, 他, 「最古の氷」に対する  $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$  放射年代決定の可能性: ドームふじ第二期深層コアからの洞察, *日本地球惑*

星科学連合, 2017.

K. Kusano, Challenge to Solar-Terrestrial Environmental Prediction, 22nd NEXT Workshop (招待講演) (国際学会), 2017.

H. Miyahara, et al., A humid climate at the last stage of the Little Ice Age in central Japan reconstructed using oxygen isotopes in tree rings, 日本地球惑星科学連合, 2016.

堀内一穂, 他, アイスコアと堆積物の<sup>10</sup>Beが示す地磁気極小期の宇宙線強度変動, 日本地質学会 東北支部総会, 2016.

堀内一穂, 他, アイスコアと堆積物の<sup>10</sup>Beが示す17~20万年前の長周期太陽変動, 日本地球惑星科学連合 連合大会 2016 年大会 (招待講演), 2016.

K. Kusano, et al., Hemispheric Asymmetry of Solar Cycle Activities, Space Climate Symposium 2016 (招待講演)(国際学会), 2016.

K. Kusano, MHD modelling study of solar eruptions, IPCC 2016 (招待講演)(国際学会), 2016.

K. Kusano, et al., The onset mechanism of solar and stellar eruptions, European Week of Astronomy and Space Science (招待講演)(国際学会), 2016.

H. Miyahara, Characteristic Variations of Cosmic Rays During the Maunder Minimum and Their Possible Influence on Climate, Asia Oceania Geosciences Society (招待講演)(国際学会), 2016.

H. Miyahara, Measurement of Carbon-14 Content in Tree Rings from the Last Glacier Maximum, Asia Oceania Geosciences Society (国際学会), 2016.

堀内一穂, ベリリウム同位体による地磁気低下期の宇宙線変動史の解明, 「両極域における第四紀の気候・環境変動史」研究集会, 2016.

櫻井敬久, 門叶冬樹, 森谷透, 三宅芙沙, 増田公明, 堀内一穂, 他, 鳥海神代杉年輪のC14増加現象, 日本物理学会第71回年次大会, 2016.

櫻井敬久, 鳥海神代杉年輪のC14増加現象, 本物理学会第71回年次大会, 2016.

宮原ひろ子, 太陽活動・太陽圏環境の長期

変動と小氷期の気候, 第63回気候影響・利用研究会(招待講演), 2015.

宮原ひろ子, マウンダー極小期の宇宙線変動詳細解析と年代決定, 研究集会「複数核種と複数原理に基づく宇宙線年代決定法の新展開」, 2015.

②坂下渉, 宮原ひろ子, 横山祐典, 他, A humid climate in central Japan at the end of the Little Ice Age, 地球電磁気・地球惑星圏学会(招待講演), 2015.

②堀内一穂, キャリア10 $\mu$ gでの<sup>10</sup>Be分析の可能性, 研究集会「複数核種と複数原理に基づく宇宙線年代決定法の新展開」, 2015.

③堀内一穂, アイスランドベイズン地磁気エクスカージョン期の宇宙線変動史を刻む海陸の高時間分解能<sup>10</sup>Be記録, 研究集会「複数核種と複数原理に基づく宇宙線年代決定法の新展開」, 2015.

④K. Horiuchi, et al., An attempt to reduce the sample size for cosmogenic <sup>10</sup>Be dating, XIX INQUA Congress (国際学会), 2015.

⑤K. Horiuchi, et al., Ice core record of <sup>10</sup>Be and <sup>26</sup>Al over the last 3 kyr from Dome Fuji, Antarctica: foundations for decadal-to-century-scale stratigraphic dating and future <sup>26</sup>Al/<sup>10</sup>Be dating, XIX INQUA Congress (国際学会), 2015.

⑥K. Kusano, et al., Hemispheric Asymmetry of Solar Cycle Activities, IUGG 2015 (招待講演)(国際学会), 2015.

⑦宮原ひろ子, 門叶冬樹, 加藤和浩, 横山祐典, 堀内一穂, 樹木年輪中炭素14濃度の高精度分析による宇宙線22年周期変動の検出について, 日本物理学会, 2015.

⑧宮原ひろ子, 片岡龍峰, 横山祐典, 年輪中炭素14濃度の高精度分析による宇宙線の22年周期変動および太陽圏環境の復元, 地球電磁気・地球惑星圏学会2014年秋学会, 2014.

⑨宮原ひろ子, マウンダー極小期における太陽圏環境と気候変動/最終氷期における太陽活動と気候変動, 宇宙気候学に関する研究会(招待講演), 2014.

⑩坂下渉, 横山祐典, 宮原ひろ子, 他, マウンダー極小期の太陽磁場サイクルに対する中部日本・台湾の気候応答, 地球惑星科学連合大会, 2014.

⑪堀内一穂, 宇宙線生成核種<sup>10</sup>Be:基礎と古

地磁気学への応用およびその限界, 研究集会「地磁気・古地磁気・岩石磁気学の最前線と応用」(招待講演), 2014.

③②奈良郁子, 渡邊隆広, 掛川武, 箕浦幸治, 堀内一穂, 宮原ひろ子, 他, 最終氷期最盛期におけるユーラシア大陸内部の1000年周期気候変動, 日本第四紀学会, 2014.

③③K. Horiuchi, et al., Development of ultrasensitive  $^{10}\text{Be}$  analysis at MALT, The 13th International Conference on Accelerator Mass Spectrometry, 2014.

③④堀内一穂, 須口翔太, 須田健介, 内田智子, 阿瀬貴博, 横山祐典, 他, ドームふじアイスコアから得られた長期  $^{10}\text{Be}$  記録と宇宙線層序学, 日本地球惑星科学連合(招待講演), 2014.

③⑤笹公和, 黒住和奈, 末木啓介, 高橋努, 松四雄騎, 戸崎裕貴・堀内一穂, 他, 最終氷期から完新世初期にかけての南極氷床コア中の宇宙線生成核種  $^{36}\text{Cl}/^{10}\text{Be}$  比, 日本地球惑星科学連合, 2014.

③⑥H. Sakurai, T. Fuyuki, et al.,  $^{14}\text{C}$  contents in early and late woods of annual tree rings after Carrington flare occurrence in September 1859, 第13回加速器質量分析国際会議, 2014.

③⑦T. Moriya, F. Tokanai, K. Kato, H. Sakurai, T. Toyoguchi, T. Kobayashi, N. Konno, T. Shiraishi, H. Miyahara, et al., New Ion Source and Graphitization Line of YU-AMS, 第13回加速器質量分析国際会議, 2014.

③⑧宮原ひろ子, マウンダー極小期における宇宙線の22年変動, 日本地球惑星科学連合, 2013.

③⑨H. Sakurai, Present Status of YU-AMS System, The 5th East Asia AMS Symposium, 2013.

④⑩草野完也, 核生成の積雲降水システムに対する影響について, 名古屋大学太陽地球環境研究所研究集会、宇宙線による雲核生成機構の解明(招待講演), 2013.

④⑪K. Horiuchi, et al., A decadal  $^{10}\text{Be}$  record of the past 3 kyr from the Dome Fuji (Antarctica) ice core: a possible tool for investigating the relation between solar activity and climate of the past, International CAWSES-II Symposium, 2013.

④⑫K. Horiuchi, et al., Multiscale

variations of cosmogenic nuclides over the last 3 kyr: the decadal  $^{10}\text{Be}$  record from the Dome Fuji 2001 shallow ice core revisited, The Fourth Symposium on Polar Science, 2013.

④⑬Y. Yokoyama, S. Takahashi, Y. Miyairi, T. Aze, R. Tsunekawa, P. S. Obrochta, K. Horiuchi, et al., Reconstruction of the Blake geomagnetic excursion using the cosmogenic nuclides in Dome Fuji ice core, The Fourth Symposium on Polar Science, 2013.

④⑭恒川綸大, 横山祐典, 高橋理美, 宮入陽介, 阿瀬貴博, 堀内一穂, 他, 南極ドームふじ氷床コア中の宇宙線生成核種  $^{10}\text{Be}$  を用いた Blake エクスカーションの復元, 日本地球惑星科学連合2013大会, 2013.

〔図書〕(計 3件)  
堀内一穂, 宮原ひろ子(分担), 加速器ハンドブック, 2018, 560.

宮原ひろ子(分担), 放射化学の事典, 朝倉書店, 2015, 376.

宮原ひろ子(分担), 気候変動の事典, 朝倉書店, 2015, 472.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

宮原 ひろ子 (MIYAHARA, Hiroko)  
武蔵野美術大学・造形学部・准教授  
研究者番号: 00532681

### (2) 研究分担者

堀内 一穂 (HORIUCHI, Kazuho)  
弘前大学・理工学研究科・助教  
研究者番号: 00344614

櫻井 敬久 (SAKURAI, Hirohisa)  
山形大学・理学部・教授  
研究者番号: 60150265

草野 完也 (KUSANO, Kanya)  
名古屋大学・宇宙地球環境研究所・教授  
研究者番号: 70183796

### (3) 連携研究者

横山 祐典 (YOKOYAMA, Yusuke)  
東京大学・大気海洋研究所・教授  
研究者番号: 10359648

門叶 冬樹 (TOKANAI, Fuyuki)  
山形大学・理学部・教授  
研究者番号: 80323161