

2025年度 05) 奨励共同研究 目次詳細

9 件

*所属・学年は2026年3月現在

*Affiliation and Year of graduate school displayed are current as of March 2026.

研究代表者 Principal Investigator	所属機関* Affiliation	所属部局* Department	学年* Year of graduate school	研究課題名 Project Title	頁 Page	備考 Remarks
吉田 慎之助	北海道大学	環境科学院	博士前期課程2年	チャネルモデルを用いた地球温暖化条件下における亜南極前線の感度解明	214	
鳶田 遼太	京都大学	理学研究科	博士後期課程3年	太陽対流層内での磁場強度飽和機構に関する解析	216	
北島 慎之典	防衛大学校	理工学研究科	博士後期課程3年	太陽フレア放射による地球電離圏への影響評価と地球大気電離モデルの構築	218	
大窪 遼介	防衛大学校	理工学研究科	博士後期課程1年	太陽水素ライマン線と地球電離圏反応の包括的評価	220	
中園 仁	神戸大学	システム情報学研究科	博士後期課程3年	地形的特徴を考慮した変動宇宙放射線環境下での月面帯電解析	222	
北山 結彩	弘前大学	保健学研究科	博士前期課程2年	福島県浪江町における降水のトリチウム濃度と水素酸素安定同位体比	224	
芥川 慧大	東京大学	理学系研究科地球惑星科学専攻	博士後期課程1年	連結階層シミュレーションによる磁気リコネクションのマルチスケール性に関する研究	226	
伊藤 ゆり	総合研究大学院大学・国立極地研究所	先端学術院極域科学コース(総研大)・先端研究推進系宇宙空間研究グループ(極地研)	博士後期課程2年	あらせ衛星 - 地上連携観測に基づく脈動オーロラとコーラス波高緯度伝搬に関する統計的研究	228	
益木 悠馬	岐阜大学	連合農学研究科	博士後期課程2年	湖沼堆積物を用いたモンゴル高原永久凍土地帯におけるヒ素の環境動態解析	230	

チャンネルモデルを用いた地球温暖化条件下における亜南極前線の感度解明
Investigation of Subantarctic Front Sensitivity under Global Warming Conditions Using a Channel Model

吉田慎之助、北海道大学環境科学院地球圏科学専攻、博士前期課程2年
松田拓朗、北海道大学地球環境科学研究所地球圏科学専攻、助教

研究目的

南極周極流の北端を形成する亜南極前線は、高緯度への温暖な水塊の侵入を抑制する「障壁」として機能する[1]。一方、近年の研究では、地球温暖化の進行に伴ってその強度や位置が変化する可能性が指摘されている。また、南大洋の海洋前線構造は海底地形に強く拘束されることが示されており、亜南極前線についても、海底地形の起伏や粗さ（ラフネス）の違いに応じて、その位置や力学的特性が変化する可能性がある。さらに、地球温暖化に伴う大気からの熱強制の変化は、前線の維持機構や応答特性に影響を及ぼすと考えられる。したがって、海底地形および熱強制の違いに対して亜南極前線がどのように応答するかを明らかにすることは、温暖化条件下における前線変動の理解に向けた基礎として重要である。そこで本研究では、数値シミュレーションを用いて、亜南極前線の感度を規定するメカニズムを明らかにすることを目的とする。

実施内容

本研究では、チャンネルモデルを用いて、ラフネスの有無と表層熱強制の有無を組み合わせた4通りの実験を実施した。チャンネルモデルは、東西に周期的境界条件を課し、偏西風を理想化した風応力で流れを駆動することで、南極周極流を理想化して表現したものである。ラフネスおよび表層熱強制の設定には、先行研究[2]と同様のものを用いた(図1)。各実験は100年間積分し、最後の10年間を平均した結果を解析に用いた。

まず、前線の傾圧性を表す指標として、南北等密度面勾配を評価した(図2)。その結果、表層熱強制の有無にかかわらず、南北等密度面勾配はラフネスを与えた場合に大きくなり、先行研究[2]と同様の結果が得られた。次に、その要因を検討するため、エネルギーダイアグラム[3]を用いたエネルギー収支解析を行い、先行研究で等密度面勾配の増加要因として指摘されている傾圧エネルギー変換を評価した(図3)。先行研究では、ラフネスが傾圧エネルギー変換を減少させ、その結果として中規模渦が等密度面勾配を緩和する能力が低下し、等密度面勾配が増加すると解釈されている[2]。表層熱強制を導入した場合には、ラフネスを与えない場合の方が、ラフネスを与えた場合に比べて傾圧エネルギー変換は小さく(図3c,d)、先行研究と整合的な結果が得られた。一方、表層熱強制を導入しない場合には、この大小関係が逆転した(図3a,b)。この結果は、表層

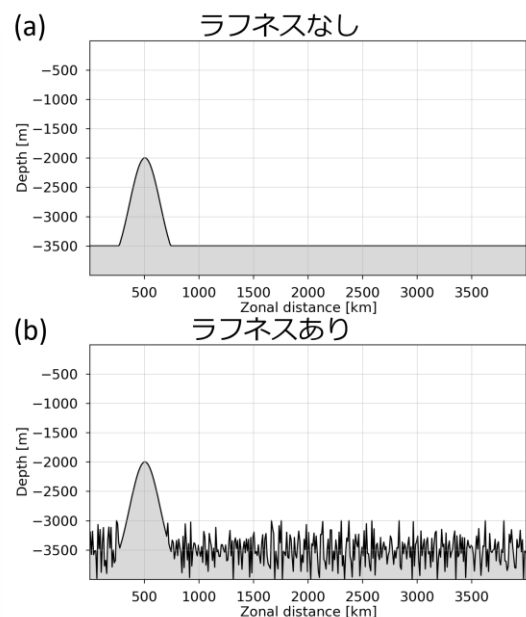


図1 モデルに与えた海底地形の東西断面図。(a)ラフネスなしの場合と(b)ラフネスありの場合を示している。

熱強制に伴う非断熱的なエネルギー供給の差異が傾圧エネルギー変換に影響を及ぼすこと、ならびにラフネスによる等密度面勾配の増加が傾圧エネルギー変換の減少では説明できないことを示唆している。

各実験結果の解釈については相木秀則教授と議論を行い、得られた成果については、2025年11月に開催された2025年度名古屋大学宇宙地球環境研究所共同利用研究集会インド洋/太平洋域における海洋循環/環境応用に関する研究集会で口頭発表を実施した。

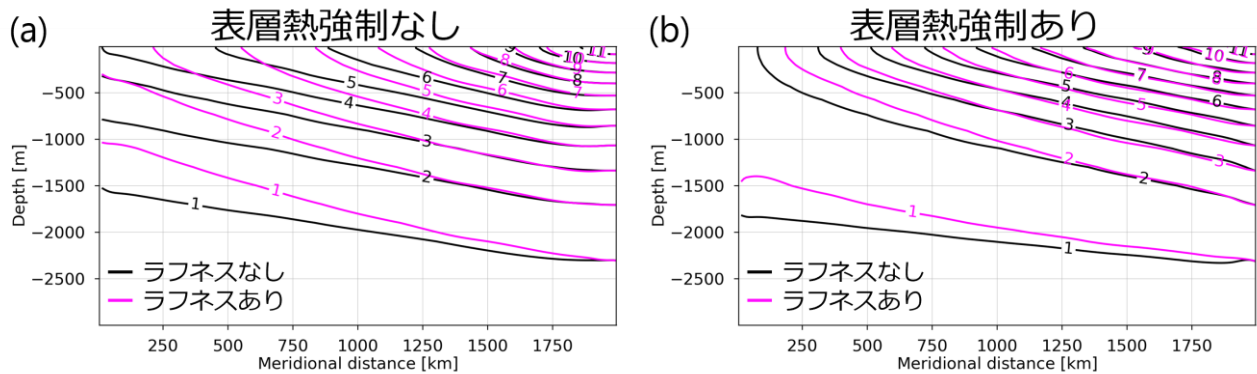


図 3 東西平均したポテンシャル温度の南北鉛直プロファイル [°C]。塩分変化無視・線形の状態方程式を用いているため、等温位面は等密度面に対応する。(a)が表層熱強制なし、(b)が表層熱強制ありの結果を表している。

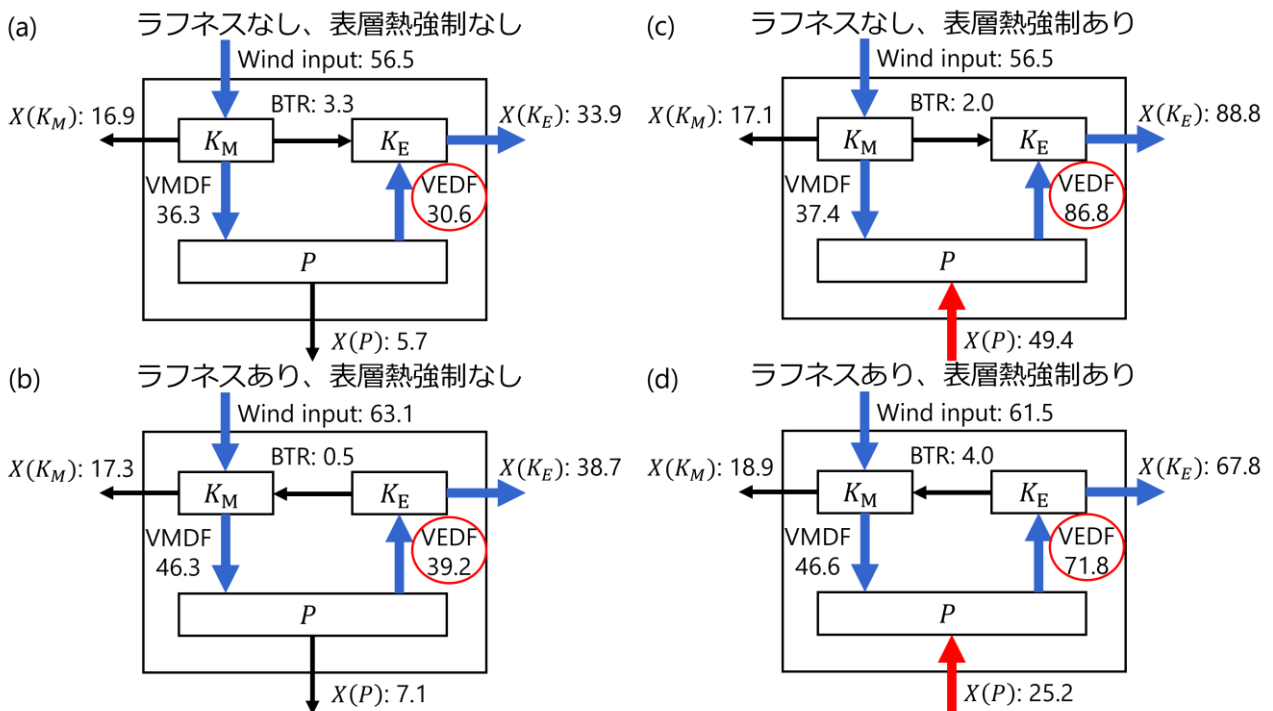


図 2 各実験におけるエネルギーダイアグラム [GW]。青矢印は南大洋における主なエネルギーの経路、赤矢印は表層熱強制を導入した実験における非断熱的なポテンシャルエネルギー供給を表している。傾圧エネルギー変換は VEDF (図中赤丸) に対応する。

参考文献

- [1] Ferrari & Nikurashin (2010), *Journal of Physical Oceanography*, 40, 1501-1519
- [2] Jouanno & Capet (2020), *Ocean Science*, 16, 1207-1223
- [3] Lorenz (1955), *Tellus*, 7, 157-167

太陽対流層内での磁場強度飽和機構に関する解析

Analysis of the saturation mechanism of magnetic fields in the solar convection zone

畠田 遼太、京都大学・理学研究科・博士課程3年

指導教員：横山 央明、京都大学・理学研究科・教授

研究目的

黒点の11年周期に代表される太陽磁気活動周期は、太陽対流層内で働く磁場生成機構であるダイナモ機構によって駆動されると考えられている。しかし、ダイナモ機構によって太陽対流層内での磁場強度がどのように決められているかは未解決の課題となっている。このようなダイナモ機構を陽的に解く手法として、太陽対流層を模した全球電磁流体力学計算が挙げられる。近年の高解像度全球計算[1]では、先行研究[2]とは異なる乱流磁場と大規模な磁場、流れ場に含まれるエネルギーの間の比率が得られている。このため、これまでの先行研究と異なる磁場強度決定機構が働くことが考えられる。太陽対流層での磁場強度決定機構を理解する上で、このように解像度が高くレイノルズ数の高い計算内での磁場強度決定機構を特定することは重要であり、本研究の目的とする。

研究方法

高レイノルズ数かつ大規模磁場が実現している全球計算[1]の結果を用いた。また、解像度が異なりレイノルズ数の小さいケースを含め3ケースの解析を行なった。大規模磁場強度を決める機構を特定するため、大規模磁場の誘導方程式を素過程に注目して分解しそれぞれの寄与を見積もった。これにより、乱流場、大規模場それぞれからの剪断、圧縮、移流による磁場誘導の計6項が解析された。さらに、本研究の特色として計算を安定化するために取り入れられていた人工粘性による散逸量の見積もりも行なった。

結果

いずれのケースにおいても、乱流場による圧縮、大規模場による剪断、大規模場による圧縮が大規模磁場の生成に寄与することが分かった。特に、これまでの全球計算[2]においては大規模場による剪断が主要な寄与を持っていたが、今回の計算では乱流場による圧縮が主要な寄与を持つという新たな結果が得られた。一方、大規模磁場の生成の散逸については、乱流場による剪断、乱流場による移流、人工粘性による散逸が寄与を持っていた(図1)。

さらに、どの項によって磁場強度が決まるのかを議論するため、大規模磁場の生成、散逸に寄与をもつ項の大規模磁場に対する依存性を解析した。結果として散逸

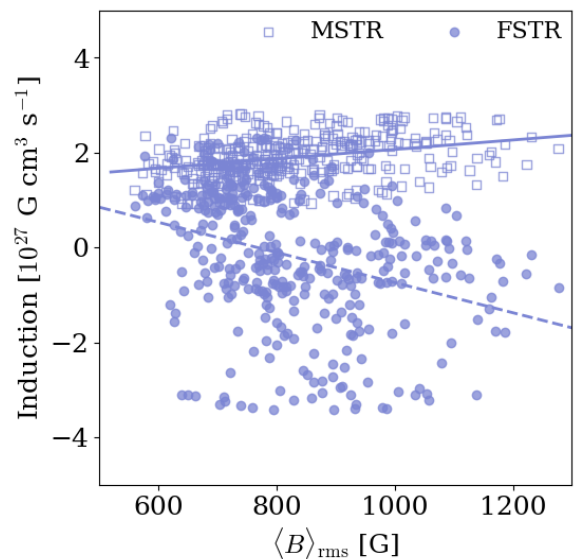


図 1 大規模磁場の強度($\langle B \rangle_{rms}$)に対する大規模場による剪断(MSTR)と乱流場による剪断(FSTR)による誘導量

に働く乱流による剪断、生成に働く大規模場による剪断が大規模磁場に対して相関を示した。この他の項は大規模磁場に対する依存性が弱いことが分かった。

議論

今回の解析によって明らかとなった大規模磁場の誘導機構とその大規模磁場に対する依存性を利用して、大規模磁場強度を決める物理を議論した。生成においては、主要な寄与を持つ乱流場圧縮の磁場強度依存性が弱いため、どのような大規模磁場においても大規模磁場の生成量をおよそ一定に保たれると考えられる。一方、散逸においては主要な寄与をもつ乱流場による剪断が大規模磁場に対して依存性を示していた。このため、大規模磁場強度の増加とともに、大規模磁場の散逸量は増加していく。これらを考慮すると、乱流剪断による散逸量の増加により生成と散逸が釣り合う場所で大規模磁場強度が決まると考えられる(図2)。これは、先行研究[2]で指摘されていた磁場強度決定機構と異なる新たな機構となっている。

さらに、今回解析に含んでいた人工粘性による大規模磁場の散逸は、レイノルズ数の増加とともに減少する。このため、今回明らかにした散逸量の中から、人工粘性による散逸量を差し引くことで、非常に高いレイノルズ数の太陽対流層での大規模磁場強度の推定が可能であると考えた。これによって推定された対流層の底での大規模磁場強度は、今回の高レイノルズ数での全球計算のおよそ2倍である2.3 kGとなった(図2)。推定された対流層の底での磁場強度と、太陽表面で観測されている大規模磁場強度との間の関係を説明することは今後の課題となる。

引用文献

- [1] Hotta, Rempel, and Yokoyama., 2016, Science, 351(6280), p. 1427
- [2] Augustson, Brun, Miesch, and Toomre, 2015, The Astrophysical Journal, 809(2), p. 149.

成果発表 学会発表

- 1. 寫田遼太、堀田英之、横山央明、“対流層全球計算内の大規模磁場飽和をもたらす物理”、日本天文学会2025年秋季年会、海峡メッセ下関、2025年9月11日
- 2. 寫田遼太、“太陽型星ダイナモのロスビー数依存性”、2025年度太陽研究者連絡会シンポジウム、京都大学、2026年2月18日

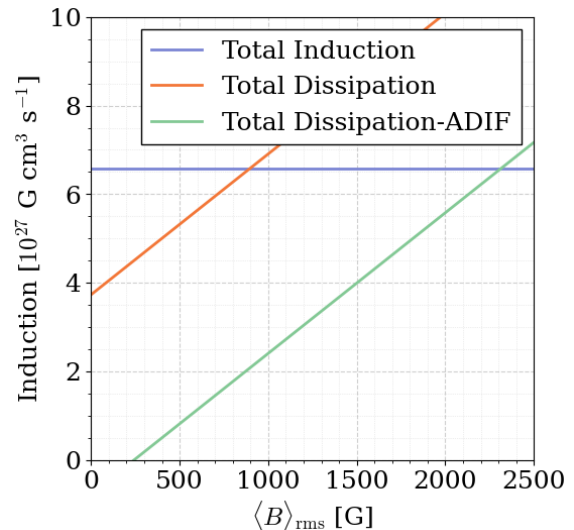


図 2 今回の解析から抽出された大規模磁場強度に対する、全誘導量(青線)と全散逸量(オレンジ線)の依存性。太陽対流層での大規模磁場強度を推定するため、人工粘性による寄与を差し引いた散逸量(緑線)も示している。

太陽フレア放射による地球電離圏への影響評価と地球大気電離モデルの構築
The evaluation of the response in the Earth's ionosphere during the solar flares
and development of a model of Earth's atmospheric ionization

北島慎之典、防衛大学校・理工学研究科・後期課程3年
指導教員：渡邊恭子、防衛大学校・理工学研究科・教授

研究目的

宇宙領域を利用した現在のインフラシステム社会において、安全かつ安定した通信環境は必要不可欠である。航空機無線や船舶無線は短波を使用しているため、太陽フレア放射、その中でも X 線放射が原因とされている短波通信障害 (SWF; Short-wave fadeout) の影響を受ける。しかし、現在開発されている世界各国の全地球大気シミュレーションモデル (e.g. WAM-IPA, WACCM) には、通信障害の原因である太陽フレア中の電離圏下部の電離を計算するモデルが含まれていない。これは、本研究で用いている大気圏・電離圏結合モデル GAIA^①についても同様である。そこで、高エネルギーの放射や粒子の地球大気内の伝播を計算できる PHITS^②を導入することで、太陽フレア放射による電離圏下部の電離について計算可能なモデルの構築を行った。そして、SWF の予測精度を向上させることを目指した。

研究方法

本研究では、フレア時の電離圏変動について数値計算を用いて再現した。PHITS では高度 100 km 以下の電子密度変動、それ以外の電離圏変動を GAIA による数値計算結果を用いてイオノゾンの最小反射周波数 (f_{min}) 及びブラックアウトを再現し、観測値と比較することで PHITS が電離圏下部の電子密度をどの程度再現できるかを評価した。PHITS では、GOES/XRS から得られる X 線スペクトルを入力値として地球大気中の電離率を計算し、フレア時の電子密度変動を再現した。まず、2010 年から 2014 年にかけて発生した M3 クラス以上の太陽フレアおよび 2024 年 5 月に発生した X クラスフレアの際に観測されたイオノゾンの f_{min} 値を再現し、観測値との比較を行った。また、2024 年 5 月 11 日に発生した「負相嵐」はブラックアウトの継続時間に影響することがわかった。そこで、フレア発生直前のイオノグラム (F2 層臨界周波数 f_oF2 と f_{min}) から、「ブラックアウトになりやすい電離圏の状態」を表す新指標 $f_B = f_oF2_0 / (f_oF2_0 - f_{min0})$ を定義し、 f_B の有無による SWF のブラックアウトの予測精度について AUC を用いて比較し、評価した。

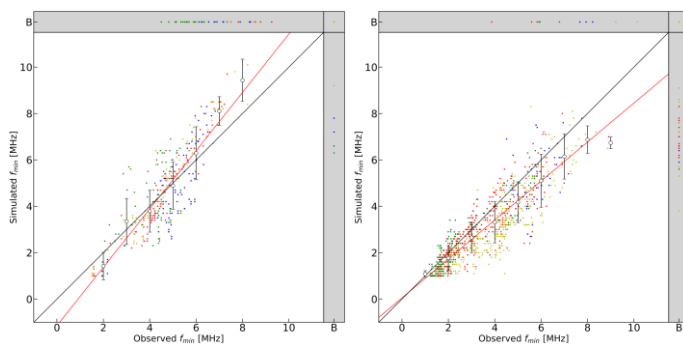


図1 f_{min} 値の予測値と実測値の比較。赤実線は最小二乗法による近似直線。図中の“B”はブラックアウトを示す。左図は2024年5月、右図は2010-2014年の f_{min} 値。

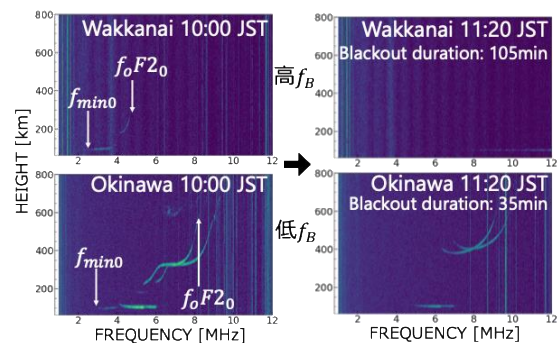


図2 高 f_B と低 f_B によるブラックアウトの継続時間への影響。左図は2024年5月11日フレア発生前のイオノグラム、右図はフレアピーク1時間後のイオノグラム。

研究結果

PHITS と GAIA の電子密度を用いてイオノゾンの f_{min} 値を再現し、比較検証した (図1)。線形回帰分析の結果、2024年5月の相関係数は0.87であり、2010年から2014年では0.88の精度で f_{min} 値を再現でき、2値分類を用いたブラックアウトの TSS は2024年5月では0.82の精度でブラックアウトを再現できた。これらの結果より、PHITS はフレア発生時の電離圏下部の電子密度変動を再現でき、モデルへの適応が可能であることがわかった。次に、フレア発生前の電離圏のブラックアウトの起こりやすさを表すパラメータである f_B を新たに定義し、ブラックアウトの関係を調べた (図2)。高 f_B の時、ブラックアウトが発生しやすく、 f_B を用いることで AUC は0.81から0.96に向上し、 f_B を SWF 予測に組み込むことで、ブラックアウト発生の予測精度が向上することを実証した。

引用文献

- (1) Jin, H., Miyoshi, Y., Fujiwara, H., et al., 2011, JGR, 116, A01316
- (2) Sato, T., Iwamoto, Y., Hashimoto, S., et al., 2024, J. Nucl. Sci. Technol. 61, 127-135

成果発表

成果論文

1. Kitajima, S., K. Watanabe, H. Jin, C. Tao and M. Nishioka, Estimation of the impact of solar flare spectra on the Earth's ionosphere using the GAIA model, J. Space Weather Space Clim., <https://doi.org/10.1051/swsc/2025008>, 2025
2. Kitajima, S., K. Watanabe, H. Jin, C. Tao, S. Masuda, M. Nishioka and K. Murase, Reproduction and evaluation of the SWF magnitude observed by ionosonde in Japan during May 2024 using the PHITS code and GAIA model, Submitted to Earth, Planets and Space.
3. Kitajima, S., K. Watanabe, H. Jin, C. Tao, S. Masuda, and M. Nishioka, Long-term statistical analysis of ionospheric parameters for forecasting blackouts, Submitted to J. Space Weather Space Clim.

学会発表

1. Kitajima, S., et al., "Electron Density Variations the Short-wave Fadeout During X-Class Solar Flares in May 2024 Using PHITS", JpGU2025, May 27, 2025
2. Kitajima, S., et al., "Reproduction of Electron Density in the Ionospheric D Region During Solar Flares in May 2024 Using PHITS and GAIA Models", AOGS2025, July 30, 2025
3. Kitajima, S., et al., "Evaluation of Electron Density Variations and Short-wave Fadeout during X-class Solar Flares in May 2024 Using Ionosonde", PIERS2025, November 6, 2025
4. Kitajima, S., et al., "Statistical analysis of blackout prediction parameters using ionosondes", SGEPPS2025, November 25, 2025
5. Kitajima, S., et al., "Reproduction of Shortwave Fadeout that occurred in May 2024 using GAIA with PHITS and evaluation of blackout detection based on ionospheric parameters", AGU25, December 18, 2025
6. 北島慎之典, "Evaluation of the Impact of Solar Flare Radiation on the Lower Ionosphere Using Numerical Simulations: Improvement of Dellinger Phenomenon Forecasting", 太陽研連シンポジウム, 2026年2月18日

太陽水素ライマン線と地球電離圏反応の包括的評価

Comprehensive Assessment of Solar Hydrogen Lyman Line Effects on Earth's Ionospheric Response

大窪遼介、防衛大学校・理工学研究科・後期課程1年

指導教員：渡邊恭子、防衛大学校・理工学研究科・教授

研究目的

太陽からの放射のうち X 線と極紫外線 (EUV) は地球電離圏の形成に寄与しており、これらの放射の変動は宇宙天気環境に大きな影響を与えている。特に水素ライマン線は放射量が大きいため地球電離圏への影響も大きいと考えられている。Lemaire et al. (2012)⁽¹⁾では、第23太陽活動周期におけるライマン α 線と β 線の比について議論されており、太陽活動極大期の方が極少期に比べてライマン β 線の割合が大きくなることが報告されている。Milligan et al. (2020)⁽²⁾は、2011年9月7日のX1.8クラスフレアにおける軟X線とLy α 線、そして柿岡磁力計の時間変動とこれらの関係を調べ、ライマン α 線が電離圏E領域の電離に影響を及ぼしているとした。これらの先行研究をもとに、本研究では「宇宙天気への影響が考えられるLy α 線とLy β 線の関係を明らかにする」ことと、「これらのライマン線の地球電離圏への影響を明らかにする」ことを目的として、観測データと理論モデルを用いた包括的な評価・研究を行っている。現在は、太陽フレア時に電離圏E領域を流れる電流が変動することによって地磁気変動が現れる SFE (Solar Flare Effect) と呼ばれる現象を用いて本研究を進めている。SFEは主に軟X線とEUV放射によって引き起こされていると考えられているが、これらの放射の影響を時間的・空間的に切り分けることにより、放射と電離圏E領域の反応の対応関係をより明確にすることを目指している。

研究方法

フレア時の軟X線・Ly α のデータはGOES衛星に搭載されているX-ray Sensor (XRS) 及び Extreme Ultraviolet Sensors (EUVS) のEチャンネルを用い、Ly β 等のその他のEUVライン放射はSolar Dynamics Observatory (SDO) に搭載されているExtreme ultraviolet Variability Experiment (EVE) のデータを用いた。太陽フレア放射の地球電離圏への影響については、柿岡磁力計⁽³⁾を含む地磁気観測所のデータや、INTERMAGNET⁽⁴⁾、SuperMAG⁽⁵⁾などの地磁気ネットワークの地磁気データを観測値として用いた。また、太陽フレアイベントを同定するために、CIDASシステムのひのでフレアカタログを用いた。

研究結果

今年度は、主にSFEの統計解析を行い、その統計的な性質を調べた。一般的に、ライマン線を含む彩層起源のEUV放射は軟X線よりも早くピークに達し、軟X線はEUV放射よりも遅くにピークとなることより、SFEに見られる時間変動も、軟X線起源のものとEUV起源のもの2パターンが見られる。Xクラスフレアに伴ったSFEイベントを多数解析したところ、SFEのピークが軟X線のピークよりも早く到達するイベントがいくつか見られ、これらのSFEイベントにおいては軟X線よりもEUVの方が地磁気の変動に寄与していたことが示唆された。SFEにおいては地磁気のH(水平)成分の強度を見るだけでなく、X(南北)、Y(東西)、Z(鉛直)、D(磁気偏角)、I(伏角)などの各成分を詳細に解析することで、フレアによって

生じる電流の空間構造が分析できることが分かった。この研究については、Earth, Planets and Space (EPS) 誌と Journal of Space Weather and Space Climate (JSWSC) 誌に論文を投稿中である。

引用文献

- (1) Lemaire et al., 2012, A&A, 542, L25.
- (2) Milligan et al., 2020, Space Weather, 18(8).
- (3) Kakioka Magnetic Observatory. (2013). Kakioka, Chichijima, Kanoya and Memanbetsu geomagnetic field 1-second. digital data in IAGA-2002 format [dataset]. Kakioka Magnetic Observatory Digital Data Service.
- (4) Love, J. J., & Chulliat, A. (2013). An International Network of Magnetic Observatories. Eos, Transactions AGU, 94(42),
- (5) Gjerloev, J. W. (2012). The SuperMAG data processing technique. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 117(A9).

成果発表

1. Ryosuke Okubo, Kyoko Watanabe, Shinnosuke Kitajima, Satoshi Masuda, Akimasa Ieda, Hidekatsu Jin, Chihiro Tao, Michi Nishioka, “Geomagnetic Response to Lyman Lines and EUV Emission during Solar Flares”, JpGU Meeting 2025, 幕張メッセ, 2025年5月29日
2. Ryosuke Okubo, Kyoko Watanabe, Shinnosuke Kitajima, Satoshi Masuda, Akimasa Ieda, Hidekatsu Jin, Chihiro Tao, Michi Nishioka, “Earth Coordinate Dependence of Geomagnetic Response to Solar EUV Radiation During Solar Flares”, AOGS2025, シンガポール・マリーナベイサンズ, 2025年7月30日
3. 大窪遼介、渡邊恭子、北島慎之典、増田智、家田章正、陣英克、埜千尋、西岡未知、「2024年5月および10月のXクラスフレアに伴ったEUV放射による地磁気変動」、日本天文学会2025年秋季年会、下関海峡メッセ、2025年9月10日
4. 大窪遼介、渡邊恭子、北島慎之典、増田智、家田章正、陣英克、埜千尋、西岡未知、「Geomagnetic Response to Solar X-ray and EUV Emissions during Major Flares from 2010 to 2014」、第158回SGEPSS総会および講演会、神戸大学、2025年11月26日
5. Ryosuke Okubo, Kyoko Watanabe, Shinnosuke Kitajima, Satoshi Masuda, Akimasa Ieda, Hidekatsu Jin, Chihiro Tao, Michi Nishioka, “Characteristics of the Solar Flare Effects (SFE) during Major Flares in various Geomagnetic Components”, AGU25, アメリカ合衆国・New Orleans, 2025年12月18日

地形的特徴を考慮した変動宇宙放射線環境下での月面帯電解析

Lunar Surface Charging Analysis Under a Variable Space Radiation Environment Considering Topographical Features

中園 仁 神戸大学大学院システム情報学研究科・D3

指導教員：三宅 洋平 神戸大学大学院システム情報学研究科・准教授

1. 研究目的

本共同研究では、月面近傍のプラズマ・電子環境を観測と数値計算の両面から解析し、地形的特徴を考慮した月面帯電の理解を高度化することを目的とした。特に 2025 年度は、KAGUYA 衛星の電子エネルギースペクトルを機械学習で自動分類し、地殻磁場異常との全球的対応関係を整理することを主成果とした。加えて、太陽風の熱速度と流速の相対関係が深い空洞内帯電をどのように制御するかについて、3次元 PIC シミュレーションによる整理も進めた。

2. 研究方法（使用データ・解析手法）

観測解析では、KAGUYA/MAP に搭載された PACE-ESA および LMAG のデータを用いた。ESA-S1 と ESA-S2 の電子エネルギーフラックス $E1, E2$ から比率指標 $RE = E1/(E1+E2)$ を構成し、StandardScaler および PCA による前処理の後、MiniBatch k-means 法を適用した。これにより、従来は手作業で扱われていた電子スペクトル形状を客観的かつ大規模に分類できる枠組みを整備した。

数値計算では、月面空洞を模擬した矩形キャビティに対して 3次元 PIC 解析を実施し、流速 v_{flow} と電子・イオン熱速度 v_{te}, v_{ti} の大小関係を系統的に走査した。あわせて、空洞底部への到達粒子束を記述する半解析的 free-fall モデルを用い、シミュレーション結果の物理的解釈を補強した。研究の方向性や観測環境との接続については、名古屋大学宇宙地球環境研究所との議論を通じて整理した。

3. 研究結果

KAGUYA 電子スペクトルの解析では、6つの代表的クラスタが抽出され、Halekas らの None/Conic/Beam に対応する主要なスペクトル型を概ね再現した。得られたクラスタの空間分布には、強い地殻磁場異常域との対応が見られ、反射電子スペクトル形状が月面近傍環境を整理するうえで有用な指標となり得ることが示唆された。一方で、磁場以外の要因に対応する明瞭な分類構造の抽出は現時点では限定的であり、k-means 法の初期値依存性や、PCA 空間において分布が連続的に変化する傾向も確認された。このことから、対象データは単純な離散クラスタとして一意に分離されるよりも、連続的な変動構造として把握すべき可能性が示された。

一方、空洞帯電の PIC 解析では、空洞底部電位が流速と熱速度の比に強く依存し、(i) 低流速領域では電子流入優勢による負帯電、(ii) 中間領域 ($v_{ti} < v_{flow} < v_{te}$) ではイオン駆動の正帯電、(iii) 高流速領域では電子・イオン流入の再均衡によるゼロ近傍への収束、という三つのレジームが確認された。特に中間領域では、深い空洞ほど正帯電が顕著になり、空洞底部電位がイオンの流れの運動エネルギーに対応するスケールまで上昇し得ることが分かった。

4. 考察・まとめ

本研究では、観測データ解析と第一原理シミュレーションを併用することで、月面近傍環境の空間的不均一性と地形依存的な帯電応答を、それぞれ異なる側面から整理した。KAGUYA 電子スペクトルのクラスタリング解析により、地殻磁場異常と対応する主要なスペクトル型を抽出できたことは、月面近傍プラズマ環境の広域的把握に向けた基礎的成果である。一方で、現時点では磁場以外の要因に対応する明瞭な分類構造の抽出は限定的であり、対象データの構造をより適切に表現するためには、離散分類に加えて連続

的指標に基づく解析が必要であることが明らかとなった。今後は、より頑健な特徴抽出手法の導入と、地形・磁場・照明条件との関係の再評価を進める予定である。

また、空洞帯電の流速依存性に関する整理は、変動する太陽風条件の下で、どのような地形が強い帯電リスクを持ち得るかを評価するうえで有用な知見を与える。以上より、本共同研究の枠組みは、将来の月面環境計測および探査機設計に資する基礎的知見を提供するものと考えられる。

5. 成果発表

- ・中園仁, 原田裕己, 加藤正久, 三宅洋平, 「KAGUYA 電子エネルギースペクトルの k-means 分類と地殻磁場との相関」, 研究集会「宇宙地球環境の理解に向けての統計数理的アプローチ」, 名古屋大学宇宙地球環境研究所, 2026 年 2 月 27 日.

6. 引用文献

Nakazono, J., Miyake, Y., and Miloch, W. J., “Electrostatic Charging of Lunar Cavities Governed by the Flow-to-Thermal Speed Ratio: 3D PIC Simulations and a Free-Fall Model,” manuscript submitted to JGR: Space Physics, 2026.

Nakazono, J. and Miyake, Y., “Unconventional Surface Charging within Deep Cavities on Airless Planetary Bodies: Particle-in-Cell Plasma Simulations,” JGR: Planets, 128(2), 2023.

(別紙様式05-2)

福島県浪江町における降水のトリチウム濃度と水素酸素安定同位体比
Tritium concentration and stable hydrogen and oxygen isotope composition in monthly precipitation
in Namie Town, Fukushima Prefecture

北山結彩、弘前大学・保健学研究科・博士前期課程2年
赤田尚史、弘前大学・被ばく医療総合研究所・教授

2023年8月に福島第一原子力発電所からトリチウムを含む処理水の海洋放出が開始された。原子力関連施設や核燃料再処理施設の稼働が自然環境に及ぼす影響を評価するためには、環境中におけるトリチウム濃度レベルおよびその挙動を把握することが重要である。しかしながら、トリチウムは降水・河川水・海水・水蒸気などの陸水に存在し、水循環とともに環境中を移動するため、地域の陸水の特徴を明らかにする必要がある。そして、陸水の挙動を明らかにするには水素酸素安定同位体比の利用が有用である。本研究では、福島第一原子力発電所周辺に位置する福島県浪江町において、トリチウムだけでなく水素酸素安定同位体比をあわせて解析し、トリチウム濃度と水安定同位体比の変動傾向とその要因、水の循環過程や滞留時間を明らかにすることを目的とした。

測定試料として、福島県浪江町の山間部の津島地区および沿岸部の幾世橋地区で月間降水を採取した。採取した試料は弘前大学で蒸留し、固体高分子膜を用いた電解濃縮装置 (XZ001、De Nora Permelec Ltd.) により濃縮した。濃縮試料を再度蒸留し、試料 50 mL と同量の液体シンチレータを混合した後、低バックグラウンド液体シンチレーションカウンタ (LSC-LB5、ALOKA) でトリチウム濃度測定を行った。また、蒸留前の試料の一部を孔径 0.45 μm のメンブレンフィルタ (DISMIC 25CS045AS、ADVANTEC) でろ過し、名古屋大学宇宙地球環境研究所が所有する酸素水素安定同位体比分析装置 (L2130-i、PICARRO) を用いて水素酸素安定同位体比 (δD 、 $\delta^{18}\text{O}$) を測定した。

降水中トリチウム濃度は津島で 0.06-0.91 Bq L^{-1} 、幾世橋で 0.08-0.90 Bq L^{-1} の範囲で推移し、2022年から2024年の算術平均値 \pm 標準偏差は、それぞれ $0.46 \pm 0.22 \text{ Bq L}^{-1}$ 、 $0.47 \pm 0.21 \text{ Bq L}^{-1}$ であった (図 1)。春に濃度が高くなり、夏から秋にかけて低くなる季節変動が認められた。2023年8月24日から開始されたALPS処理水の海洋放出前後で明らかな違いは確認されなかった ($p < 0.05$)。したがって、本研究で得たデータにおいては海洋放出の影響は生じていないと考えられる。水素酸素安定同位体比測定の結果、津島の δD は -102.89 から -19.65‰、 $\delta^{18}\text{O}$ は -15.30 から -0.48‰、幾世橋の δD は -129.03 から -18.79‰、 $\delta^{18}\text{O}$ は -15.72 から -2.01‰ の範囲であった。暖候期 (4月から9月) と寒候期 (10月から翌3月) に分けてプロットしたところ、両地点とも暖候期が右側、寒候期が左側に位置し、暖候期はおおよそ世界天水線上に位置するのに対し、寒候期は天水線の左側に位置することが分かった (図 2、図 3)。これは切片である $d\text{-excess}$ が冬季に高くなるためであると考えられる。また、今回測定した降水中トリチウム濃度と、弘前大学で降水と併せて測定を行った河川水・地下水中トリチウム濃度を用いて平均滞留時間を推定した。その結果、上流域で約 4.3 年、中流域で約 3.8 年、下流域で約 4.0 年となり、流域の地形特性を反映した値が得られた。さらに、降水および河川水・地下水の水素酸素安定同位体比の解析から、河川水と地下水はいずれも降水起源であり、下流域の河川水は上流域の河川水と中流域の地下水の混合により形成されていることが示唆された。

以上より、本研究は陸水のトリチウム濃度および水素酸素安定同位体比の変動特性、ならびに滞留時間と水循環過程の一端を明らかにした。本研究で得られた知見は、環境影響評価および地域の水循環の

理解に有用な情報を提供するものである。

【成果の公表】

研究の成果は、以下に記載する学会での口頭発表および論文で公表した。

(1) 学会発表

- Y. Kitayama et al.: Assessment of Water Quality and Tritium Levels in the Ukedo River Basin, Fukushima, Japan., Bangkok, Thailand, 2025.11.10.
- Y. Kitayama et al.: Study of Water Quality and Tritium Concentration in the Ukedo River Catchment, Fukushima Prefecture, Japan. The 8th Japan-Thailand Bilateral Workshop, Bangkok, Thailand, 2025.11.11-13.
- 北山結彩他: トリチウムをトレーサーに用いた福島県請戸川の平均滞留時間推定. 日本保健物理学会第 58 回研究発表会, 水戸, 2025.12.18-20.

(2) 論文

- 北山結彩他: 福島県浜通り地域における ALPS 処理水海洋放出前後の月間降水中トリチウム濃度. 東北の雪と生活, 40, 21-25 (2025).

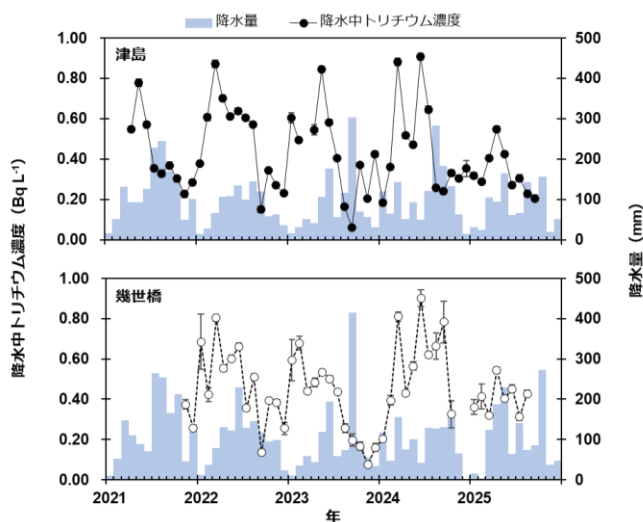


図 1 津島と幾世橋における降水中トリチウム濃度と月間降水量の推移

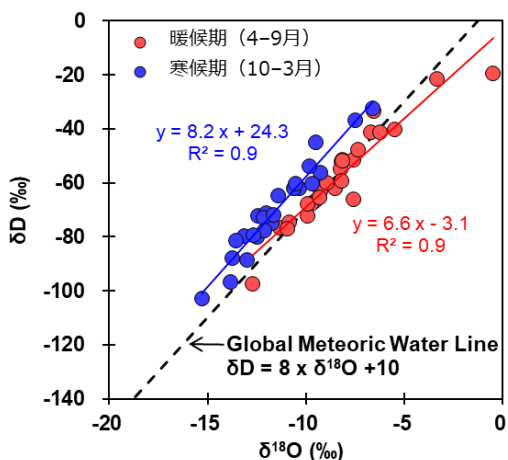


図 2 津島における月間降水の時期別の δ ダイアグラム

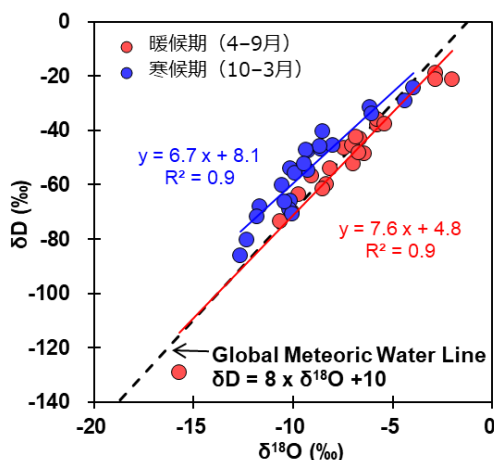


図 3 幾世橋における月間降水の時期別の δ ダイアグラム

連結階層シミュレーションによる磁気リコネクションのマルチスケール性に関する研究
Studies on Multiscale Magnetic Reconnection by Multi-hierarchy Simulation

芥川慧大、東京大学・大学院理学系研究科地球惑星科学専攻・博士課程1年
今田晋亮、東京大学・大学院理学系研究科地球惑星科学専攻・教授

研究目的

磁気リコネクションは流体スケールと粒子スケールが相互作用するマルチスケール性を持つ現象であり、サブストームや太陽フレアにとって重要なプラズマ素過程である。磁気流体(MHD)リコネクションモデルの代表であるPetschek型リコネクションモデルは、アウトフロー領域に形成されるスロー衝撃波によって効率的なエネルギー変換を起こすものである[1]。Resistive MHDシミュレーションによってPetschek解が存在することは明らかになっている[2]が、一方でプラズマ運動論を記述するparticle-in-cell (PIC)シミュレーションでPetschek解が存在することを報告した例は殆ど無い。原因として、温度異方性がスロー衝撃波解の存在に影響を与えることが知られている[3]。温度異方性によるスロー衝撃波解の消失はMHDスケールで解消されるか、もしくはMHDスケールに到達してもスロー衝撃波は形成されずPetschek型リコネクションモデルは成立しなくなるのかを明らかにすることが研究目的である。この問題の解決によって、Petschek型リコネクションモデルのマルチスケールな性質の解明が期待される。

研究方法

MHDとPICシミュレーションを同時に解く連結階層シミュレーションを用いる。図1は連結階層モデルの概念図である。[4]によって提案された連結階層モデルは、系全体をPICで扱わないことにより大幅な計算コスト削減を達成する手法であるが、PIC領域のサイズを変えた数値実験を通して、プラズマ運動論が系全体にどの程度影響するかを評価することにも使うことができる。我々は新たにGPU並列化に対応した連結階層シミュレーションコードKAMMUYを開発し、様々なテストシミュレーションを通してその有効性を検証してきた[5]。本研究では、KAMMUYを用いて、アウトフロー領域を模擬した2次元Riemann問題の連結階層シミュレーションを、PIC領域のサイズを変えて実行した。PIC領域とMHD領域にできる構造の詳細な解析を通して、磁気リコネクションのアウトフロー領域のマルチスケール相互作用を調査した。

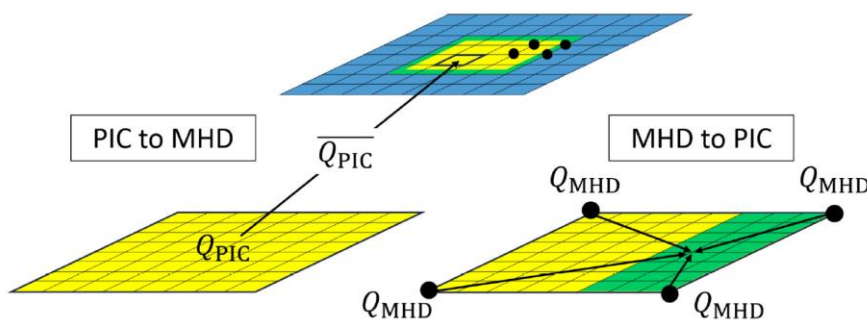


図1 連結階層シミュレーションの概念図。接続領域(緑色)を通して、MHD領域(青色)とPIC領域(黄色)が物理量をやり取りする。

研究結果

図2は、異なるPIC領域サイズを用いた連結階層シミュレーションの結果における、 $\nabla \cdot \mathbf{v}$ の時間発展の図である。この結果から、PIC領域のサイズに依らず、MHD領域でスロー衝撃波が形成されることが分かる。図3は、MHD領域でスロー衝撃波が形成された後の、PIC領域におけるプラズマの異方性を表すパラメータ $\epsilon := 1 - \mu_0(P_{\parallel} - P_{\perp})/B^2$ の時間発展の図である。この結果から、MHD領域でスロー衝撃波が形成されると、PIC領域のプラズマは等方化されることが分かる。温度異方性は複数のイオンの軌道によって生じることが知られているが、スロー衝撃波の形成によってx方向にプラズマが流れるだけになったことで温度異方性は解消されたと考えられる。図4は、スロー衝撃波が形成される前の ϵ 、異方性MHDの衝撃波解、スロー衝撃波形成後のマッハ数の図である。この結果から、下流の ϵ は0.5程度でありPIC領域ではスロー衝撃波は形成されないが、MHD領域では形成されることが理論的に確認された。

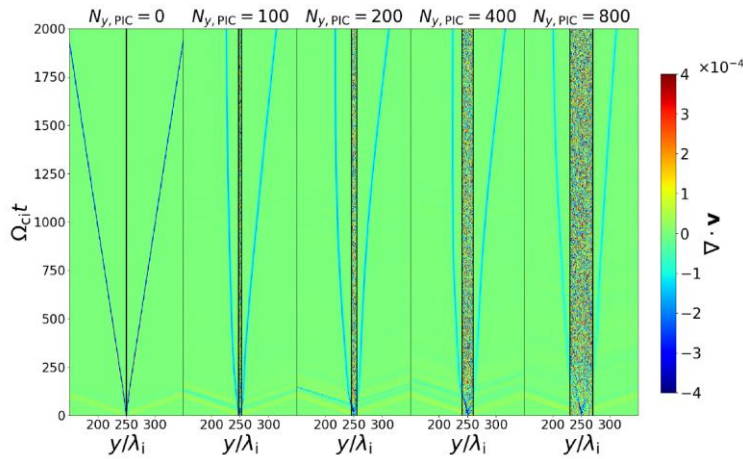


図2 $\nabla \cdot \mathbf{v}$ の時間発展の様子。

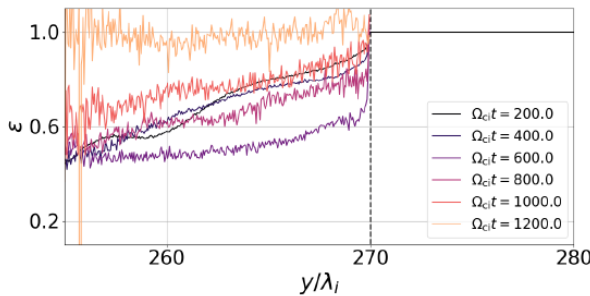


図3 スロー衝撃波形成後の ϵ の時間発展の様子。

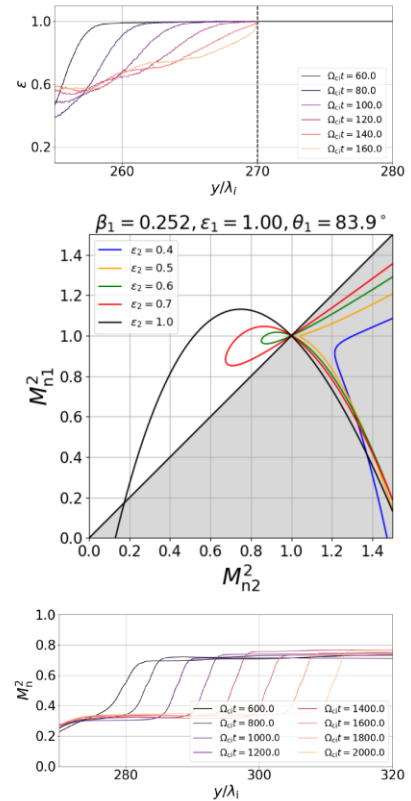


図4 衝撃波解の理論解析とシミュレーション結果の比較。

まとめと展望

2次元Riemann問題の連結階層シミュレーションを通して、磁気リコネクションのアウトフロー領域のマルチスケール相互作用に注目した。MHD領域でスロー衝撃波が形成されること、及びスロー衝撃波の形成がPIC領域のプラズマを等方化させ、Petschek型リコネクションモデルに近づくことが明らかになった。局所化したPIC領域を用いた磁気リコネクションの連結階層シミュレーションを通して、Petschek型リコネクションがマルチスケールな系で成立するかを明らかにすることが今後の課題である。

引用文献

- [1] Petschek, H. E. 1965 in Proc. AAS-NASA Symp. NASA-SP 50. The physics of Solar Flares, edited W. N. Ness, 425
- [2] Ugai, M. 1995 Physics of Plasmas, 2, 3320
- [3] Liu, Y.-H., Drake, J. F., & Swisdak, M. 2011 Physics of Plasmas, 18, 062110
- [4] Sugiyama, T., & Kusano, K. 2007 Journal of Computational Physics, 227, 1340
- [5] Akutagawa, K., Imada, S., & Shoda, M. 2026, Publications of the Astronomical Society of Japan, psaf123

成果発表

- [1] 芥川他、Development of Multi-Hierarchy Simulation Code KAMMUY and its Application to Understanding Cross-Scale Coupling in Magnetic Reconnection、JpGU、幕張メッセ、2025年5月
- [2] 芥川他、連結階層シミュレーションによる磁気リコネクションの衝撃波構造の解析、日本天文学会、下関、2025年9月
- [3] 芥川他、連結階層シミュレーションによるHall効果とリコネクションレートの関係、SGEPSS、神戸大学、2025年11月
- [4] 芥川他、宇宙プラズマのマルチスケール性の理解に向けたMHD-PIC連結階層シミュレーションコードKAMMUYの開発、CfCAユーザーズミーティング、国立天文台、2026年1月
- [5] 芥川他、連結階層シミュレーションによるHall効果のリコネクションレートへの影響、太陽研連シンポジウム、京都大学、2026年2月
- [6] 芥川他、磁気リコネクションのアウトフロー領域におけるマルチスケール相互作用、STEシミュレーション研究会、東京大学、2026年3月"

(別紙様式05-2)

あらせ衛星-地上連携観測に基づく脈動オーロラとコーラス波高緯度伝搬に関する統計解析
Statistical study on pulsating auroras and high-latitude propagation of chorus waves
based on Arase-ground joint observations

伊藤 ゆり、総合研究大学院大学・先端学術専攻 極域科学コース・D2
小川 泰信、国立極地研究所・先端研究推進系宇宙空間研究グループ・教授

【研究目的】

「脈動オーロラ」は、真夜中から朝側にかけて頻繁に発生する普遍的なオーロラである。脈動オーロラの発光に寄与する約 10 keV のエネルギーを持った電子は、磁気圏赤道域で自然発生するコーラス波と波動-粒子相互作用を起こすことによって散乱されて電離圏まで降下してくる。近年の研究では、脈動オーロラ発生中に、放射線対電子と呼ばれるより高いエネルギーを持った電子(数十 keV~数 MeV)が同時に降下し、中間圏および上部成層圏におけるオゾン減少を誘発していることが示唆されている [Miyoshi et al., 2021, Tesema et al., 2022]。そのため、脈動オーロラは放射線帯電子の分布や生成・損失過程などの磁気圏環境を理解する手がかりとして重要である。より高エネルギーな電子が散乱されるためにはコーラス波がより高い磁気緯度まで伝搬する必要があるが、一般的に波は次第に磁力線から外れ、磁気緯度 10°-20° で減衰してしまう。しかし、磁気圏における「密度ダクト(電子密度のチューブ構造)」は、波の高緯度伝搬を促す重要な役割を持っていると考えられている [Katoh, 2014]。Ito et al., (2024) では密度ダクトが「波の高緯度伝搬>高エネルギー電子の散乱・降下>脈動オーロラのパッチ構造(ダクト断面の反映)」の関係“ダクトモデル”(図1)を観測的に提唱した。そこで、本研究では、衛星-地上連携観測に基づく統計解析からダクトモデルの定量的評価、および、密度ダクトの MLT (Magnetic Local Time: 磁気地方時) 分布を明らかにすることを目的とする。

【研究方法】

磁気圏の観測を行う「あらせ」衛星と、スカンジナビア半島の 6 地点に設置された Watec 全天カメラを用いた。解析対象期間はあらせ衛星が観測を開始した 2017 年 3 月から 2024 年 3 月までである。次の 3 つの条件のもとイベントを選定した: 1) あらせ衛星のフットプリントがカメラの視野に入ること, 2) あらせ衛星が磁気緯度 10° より高緯度に位置していたこと, 3) 脈動オーロラとディフューズオーロラ(波動-粒子相互作用で発生していると考えられる明滅しない不明瞭なオーロラ)が発生していたこと。まず、選定されたイベントに対してコーラス波の分類を行った。Case 1 をコーラス波が観測された場合, Case 2 をコーラス波が観測されなかった場合とし、それぞれの MLT 分布、および、発生頻度分布を導出した。さらに、Case 1 と Case 2 に対してオーロラのタイプ(パッチあり/パッチなし/ディフューズ)を分類した。

【研究結果・考察】

コーラス波が観測された Case 1 のイベントは合計約 20 時間存在した。その多くは 0 MLT (磁気的な真夜中) 以降に分布した。同時観測が成立した観測全体に占める MLT 発生頻度 (%) は磁気的な朝方にかけて上昇し、7 MLT で 70% のピークを示した(図 2)。先行研究にある衛星観測に基づく電子密度変動の統計 [Li et al., 2011]、コーラス波の伝搬緯度の統計 [Meredith et al., 2020] や、地上光学観測に基づく脈動オーロラパッチの統計 [Tesema et al., 2020] それぞれの MLT 分布は朝側から昼側に多く分布しているが、この結果はそれに整合的であると言える。また、観測された合計時間に対して、約 84% の割合でパッチあり脈動オーロラが観測されていた。これはダクトモデルが高い確率で成立していることを意味する。

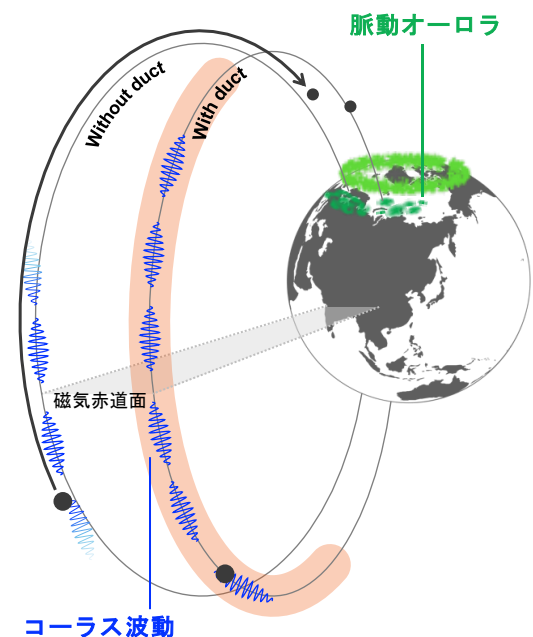


図 1: コーラス波の伝搬と脈動オーロラの形状の関係をつなぐダクトモデルの模式図

一方、コーラス波が観測されなかった Case 2 のイベントは合計約 10 時間存在した。これらのイベントは真夜中前の 19 MLT から朝方の 6 MLT の間で広く分布し、1 MLT で 34% のピークとなった (図 2)。また、朝方にかけては発生頻度が減少する傾向が見られた (図 2b)。観測された合計時間に対する脈動オーロラタイプの割合は、ディフューズとパッチなし脈動オーロラが 84% を占めた。これについても、ダクトモデルを支持する結果となった。

【活動報告】

- 2025 年 7 月 22–25 日
三好由純博士 (ISEE, 名古屋大学) や Anton Artemyev 博士 (UCLA) とダクトの形成メカニズムに関する議論を行った。また、新堀淳樹博士 (ISEE, 名古屋大学) から電子密度導出のための UHR 周波数読み取り方法を学び、本研究を大きく進展させることができた。
- 2026 年 1 月 20–23 日
三好由純博士や細川敬祐博士 (電気通信大学) と投稿論文の原稿を確認し、内容について議論・修正を行った。また、Energetic Particle Chain (EPC) 研究会に参加し、本研究内容について発表を行った。

【成果発表】

伊藤ゆり, 小川泰信, 田中良昌, 門倉昭, 吹澤瑞貴, 三好由純, 新堀淳樹, 細川敬祐, 堀智昭, 笠原禎也, 松田昇也, 土屋史紀, 熊本篤志, 松岡彩子, 寺本万里子, 山本和弘, 篠原育, 地上-衛星同時観測に基づく脈動オーロラとコーラス波高緯度伝搬に関する統計的研究, Energetic Particle Chain (EPC) 研究会, 名古屋大学, 2026 年 1 月 22 日

伊藤ゆり, 小川泰信, 吹澤瑞貴, 田中良昌, 門倉昭, 三好由純, 新堀淳樹, 細川敬祐, 堀智昭, 笠原禎也, 松田昇也, 土屋史紀, 熊本篤志, 松岡彩子, 寺本万里子, 山本和弘, 篠原育, あらせ-地上同時観測に基づく脈動オーロラタイプとコーラス波高緯度伝搬に関する統計的研究, 脈動オーロラ研究集会, 名古屋大学, 2026 年 2 月 16 日

なお、本研究内容は投稿論文にまとめ、学術雑誌 *Journal of Geophysical Research: Space Physics* に投稿中である。

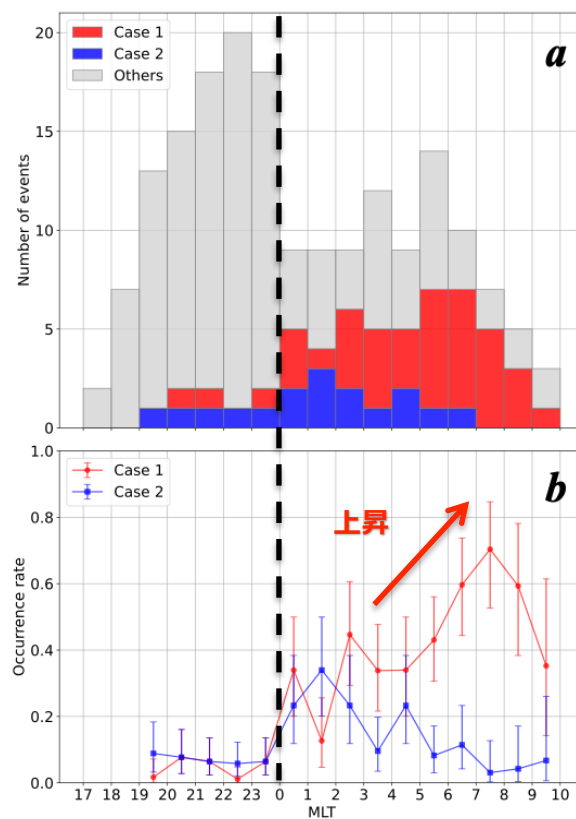


図 2: コーラス波がある場合 (赤) とない場合 (青) の (a) MLT 分布と (b) 発生頻度分布

【引用文献】

[1] Miyoshi, Y., Hosokawa, K., Kurita, S., Oyama, S.-I., Ogawa, Y., Saito, S., . . . Nakamura, S. (2021, 1). Penetration of MeV electrons into the mesosphere accompanying pulsating aurorae. *Scientific Reports*, 11, 13724.

[2] Tesema, F., Partamies, N., Tyssy, H. N., Kero, A., & Smith-Johnsen, C. (2020, 6). Observations of electron precipitation during pulsating aurora and its chemical impact. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 125.

[3] Katoh, Y. (2014, 12). A simulation study of the propagation of whistler-mode chorus in the earth's inner magnetosphere. *Earth, Planets and Space*, 66, 6.

[4] Ito, Y., Hosokawa, K., Ogawa, Y., Miyoshi, Y., Tsuchiya, F., Fukuzawa, M., . . . Shinohara, I. (2024, 7). On the factors controlling the relationship between type of pulsating aurora and energy of pulsating auroral electrons: Simultaneous observations by Arase satellite, ground-based all-sky imagers and EISCAT radar. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 129.

[5] Li, W., Bortnik, J., Thorne, R. M., Nishimura, Y., Angelopoulos, V., & Chen, L. (2011, 6). Modulation of whistler mode chorus waves: 2. role of density variations. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 116.

[6] Meredith, N. P., Horne, R. B., Shen, X., Li, W., & Bortnik, J. (2020, 6). Global model of whistler mode chorus in the near-equatorial region ($|\lambda_m| < 18^\circ$). *Geophysical Research Letters*, 47.

[7] Tesema, F., Partamies, N., Tyssy, H. N., & McKay, D. (2020, 11). Observations of precipitation energies during different types of pulsating aurora. *Annales Geophysicae*, 38, 1191-1202.

(別紙様式05-2)

湖沼堆積物を用いたモンゴル高原永久凍土地帯におけるヒ素の環境動態解析

Environmental change of Arsenic in permafrost zone of the Mongolian Plateau using the lacustrine sediments

益木悠馬、岐阜大学・連合農学研究科・博士後期課程2年

勝田長貴、岐阜大学・教育学部・教授

【研究目的】

近年の温暖化に伴う永久凍土の融解は、温室効果ガスの放出による温暖化の加速（正のフィードバック）のみならず、高濃度の溶存有機物やイオンの溶出に伴う水質汚濁（高塩分化、富栄養化）を引き起こす。さらに近年、永久凍土地帯の湖水や地下水における高濃度のヒ素（As）検出が報告されており、凍土融解との関連が指摘されている。シベリア永久凍土の南限に位置し、温暖化の影響を顕著に受けるモンゴル高原においても、西部の湖沼群や南西部のオログ湖などで高濃度ヒ素が報告されてきた。しかし、これらヒ素の濃集が鉱業等の人間活動に起因するものか、あるいは凍土融解に伴う自然由来の放出によるものかについては未解明な点が多く、その変動メカニズムの解明は喫緊の課題である。そこで本研究では、湖水にヒ素濃集が顕著に観測されたモンゴル高原・南西部のオルゴイ湖を対象に、湖底堆積物の全有機炭素（TOC）、全窒素（TN）及び全硫黄（TS）含有量の定量分析から、永久凍土地帯におけるヒ素の起源と溶出機構に関する環境動態解析を目的とした。

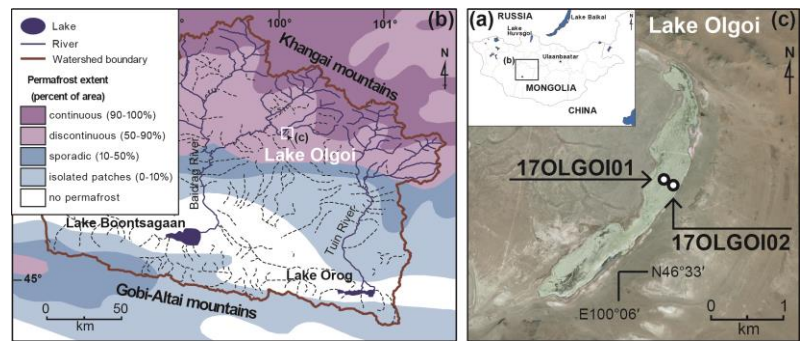


図 1. (a) モンゴル、(b) オルゴイ湖流域の永久凍土分布、(c) オルゴイ湖の衛星写真と湖底堆積物の掘削地点

【研究方法】

名古屋大学宇宙地球環境研究所のCHNS元素分析計（vario micro cube, elemental）を使用し、湖底堆積物試料のTOC、TN、TS含有量測定を実施した。研究試料は、2017年にオルゴイ湖で採取した全長8 mの湖底堆積物（17OLGOI02）である。測定前処理は、堆積物の分取および凍結乾燥、1M塩酸を用いた脱炭酸塩処理（TOCのみ）、試料の秤量とスズカップへの封入である。これらの作業は、名古屋大学での測定前に岐阜大学ですべて行った。堆積物の年代は、TOCと植物遺体を用いた放射線炭素年代測定に基づいて決定した。それと並行して、元素分析から得られたCNS含有量データを用いて、総合地球環境学研究所でTOC、TN、TSの安定同位体比（ $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ 、 $\delta^{15}\text{N}_{\text{TN}}$ 、 $\delta^{34}\text{S}_{\text{TS}}$ ）を測定すると共に、混酸を用いた堆積物の熱分解とICP-AESによるヒ素の定量分析を進めた。得られたヒ素含有量と古環境指標データの対比から、オルゴイ湖とその流域における環境動態の復元を含む、堆積と続成過程を含む湖底堆積物へのヒ素固定メカニズムとその固定量の変動要因を検討した。

【研究結果・考察】

堆積物中のヒ素は平均 $18.2 \pm 16.6 \mu\text{g/g}$ であり、大陸地殻の平均値と比べて約9倍の濃縮を示した。この変動は全球的な気候変動に対応し、Dansgaard-Oeschger (D-O) イベントや完新世に増加傾向、最終氷期極大期とYounger Dryas寒冷期に減少傾向を示した。さらにヒ素含有量は、TOC（平均 $1.1 \pm 1.4\%$ ）やTN含有量（平均 $0.1 \pm 0.1\%$ ）に対して、高い正相関（TOC : $R = 0.91$ 、TN : $R = 0.87$ ）を示した。この相関性は、ヒ素の堆積が有機物によって強く制御されていることを示唆する。 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ は $-17.5 \pm 2.7\text{‰}$ であり、堆積物の有機物は、温暖期では植物プランクトン、寒冷期ではC4植物で構成されることが示唆される。さらに、ヒ素含有量は、TS含有量と正の相関（ $R = 0.78$ ）を示し、温暖期に上昇傾向を示す。また、湖水中の硫酸イオン（ $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4} = 16.2\text{‰}$ ）と表層堆積物（ $\delta^{34}\text{S}_{\text{TS}} = 2.8\text{‰}$ ）の間に $\delta^{34}\text{S}$ の約13%の差が見られた。これらの結果は、湖底堆積物中の有機物が硫酸還元剤として作用し、間隙水中の硫酸イオンが還元された後、ヒ素は硫化物として沈殿したことを示唆する（Galloway et al., 2018）。湖底堆積物の $\delta^{34}\text{S}_{\text{TS}}$ は、寒冷期と比較して温暖期に高い傾向を示すが、TOC含有量と顕著な相関性は認

められなかった ($R = 0.36$)。これは、堆積物の $\delta^{34}\text{S}_{\text{TS}}$ 変動が、堆積物中の有機物分解に伴う硫酸還元のみで生じるのではなく、湖水 $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ 変動の影響を強く受けていることを示唆する。集水域の永久凍土が融解すると、活動層が発達する。それに伴い、間隙水（地下水）の硫酸還元によって、硫酸イオン濃度の低下と $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ の上昇が生じる (Jones et al., 2020)。よって、湖底堆積物の $\delta^{34}\text{S}_{\text{TS}}$ の上昇は、集水域の永久凍土融解に伴うヒ素と有機物の湖への流入が上昇したことを反映していると考えられる。

【引用文献】

- Galloway, J.M., Swindles, G.T., Jamieson, H.E., Palmer, M., Parsons, M.B., Sanei, H., Macumber, A.L., Timothy Patterson, R., Falck, H., 2018. Organic matter control on the distribution of arsenic in lake sediments impacted by ~65 years of gold ore processing in subarctic Canada. *Sci. Total Environ.* 622–623, 1668–1679.
- Jones, E.L., Hodson, A.J., Thornton, S.F., Redeker, K.R., Rogers, J., Wynn, P.M., Dixon, T.J., Bottrell, S.H., O'Neill, H.B., 2020. Biogeochemical Processes in the Active Layer and Permafrost of a High Arctic Fjord Valley. *Front. Earth Sci.* 8. 342.

【成果発表】

- 益木 悠馬, 長瀬 美羽, ダヴァスレン ダヴァドルジ, 板山 由依, 南 雅代, 由水 千景, 陀安 一郎, 勝田 長貴, オルゴイ湖湖底堆積物の安定同位体組成に基づく最終氷期以降のモンゴル高原南西部の古環境復元、JpGU2025、幕張メッセ、2025年5月27日
- 益木 悠馬, 長瀬 美羽, Davaadoji Davaasuren, 板山 由依, 南 雅代, 由水 千景, 陀安 一郎, 勝田 長貴, 湖底堆積物の安定同位体組成に基づくモンゴル南西部・オルゴイ湖のヒ素の堆積過程と古環境変動、第15回同位体環境学シンポジウム、総合地球環境学研究所、2025年12月19日
- 益木 悠馬, 長瀬 美羽, Davaadoji Davaasuren, 板山 由依, 南 雅代, 由水 千景, 陀安 一郎, 勝田 長貴, 最終氷期以降の湖沼堆積物に記録されるモンゴル高原南西部・オルゴイ盆地におけるヒ素の環境動態、第26回AMSシンポジウム、名古屋大学、2025年3月26日

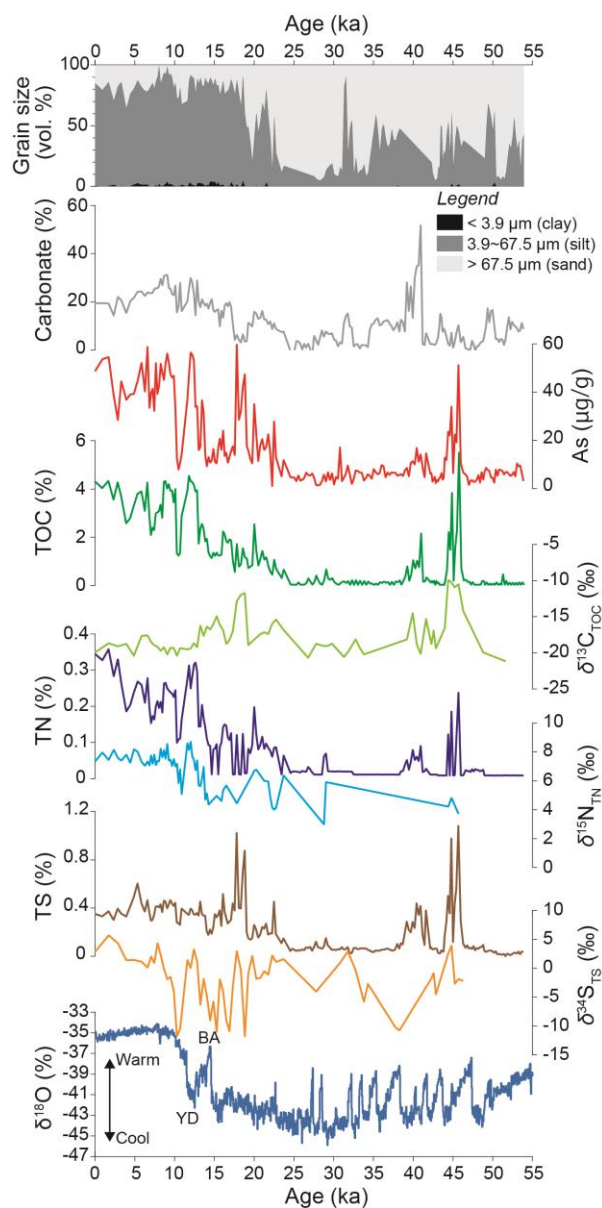


図2. 17OLGOI02の鉱物粒径割合、炭酸塩含有量、ヒ素含有量、TOC含有量、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ 、TN含有量、 $\delta^{15}\text{N}_{\text{TN}}$ 、TS含有量、 $\delta^{34}\text{S}_{\text{TS}}$ の時系列記録とグリーンランド氷床コア $\delta^{18}\text{O}$ の比較。