

(別紙様式-4)

隕石観察による過去～現在の宇宙環境および太陽活動の変動の理解と暗黒物質の探索
Understanding of the past and present space environment and solar activity using observation of meteorites
and the search for dark matter.

橋口 未奈子、東海国立大学機構名古屋大学大学院・環境学研究所

本研究は、隕石試料中に記録された宇宙線の痕跡から、①太陽系進化および過去～現在の宇宙環境および太陽活動の変動を理解すること、②未知宇宙線事象の頻度と地球環境への影響を明らかにするため、隕石試料中の宇宙線の飛跡を利用し、過去数百万年間の宇宙線照射環境について、年代学的制約を与えることを試みる。

【研究手法】本研究では、フィッシュトラック年代法・宇宙線トラックの観察が主に行われてきた石鉄隕石 (パラサイト隕石)を購入し、次の(1)~(3)を進める。

(1) 宇宙線トラックの観察手順、試料前処理方法、さらに、得られるデータの精度・バックグラウンド、解釈法について検討する。

(2) 暗黒物質・未知粒子の探索に用いる隕石中の鉱物や観察法、試料前処理法の最適化を行う。

(3) (1)(2)を踏まえ、隕石試料の鉱物中に残る宇宙線の飛跡の長さ・密度から、過去数百万年間の宇宙線照射環境および太陽活動について、年代学的制約を与えることを試みる。また、太陽系の同位体三分性と年代学理解に向けてダストの熱進化および移動と微惑星形成の統一シミュレーションを行う。さらに、地質学的記録から太陽・銀河由来の宇宙線環境が地球環境に与える影響を明らかにする。

また、関連研究を進めている外部の研究者 (同位体地球惑星科学、鉱物学など)を招待した研究会を行い、本研究で得られた結果や今後の展望についてさらに吟味していく。

【研究成果】

今年度では、研究会・ワークショップの実施、隕石試料の宇宙線トラック観察・手法の検討により、(1)(2)を進めた。さらに、これらをとおして、融合研究として、異分野連携体制の構築および隕石試料を用いた宇宙線トラック研究の実施基盤を確立し、今後の具体的な研究展開、研究戦略の構築につながる成果を得ることができた。2025年度の成果の詳細は以下の通りである。

1. 隕石試料の宇宙線トラック観察・手法検討

東邦大 中氏、および東邦大、名古屋理学部の学部・修士学生と連携し、これまで、フィッシュトラック年代法・宇宙線トラックの観察が行われてきた石鉄隕石について、試料粉砕・内部のケイ酸塩粒子をピックアップし、研磨試料を作製した。試料は、日高洋氏保有のパラサイト隕石 (Imilac隕石)を使用した。まず、エッチング処理 (アルカリ溶液で鉱物の格子欠陥を溶解させトラックを可視化する化学処理)を行う前に、光学顕微鏡観察を行ったところ、エッチング未処理にも関わらずトラックに似た数10~100ミクロン長の構造が複数観察されることが分かった。先行研究論文 (e.g., Stevens et al. 2010, M APS)より、これらは、隕石母天体における衝撃変成・転移により形成されるインクルージョンの可能性はある。宇宙線トラックの観察・同定の精度に影響する可能性があるため、現在、東邦大中氏、加藤丈典氏によりエッチング処理・観察を進め、その影響を検証している。また、今後は、このようなインクルージョンを含まない別の隕石試料でも同様の作業を進める予定である。これにより、本現象が特定試料に依存するものかどうか、ひいては、本研究課題の目的: 宇宙線トラックの観察手順・試料前処理方法、暗黒物質・未知粒子の探索に適した隕石試料の検証も可能となることが期待される。

さらに、異なる年代の宇宙線照射・放射線環境の記録を得ることも目的とし、Imilac隕石 (宇宙線照射年代 65 Ma: Herzog et al., 2015)のほか、普通/炭素質コンドライト (宇宙線照射年代 数 Maの試料; Heck et al., 1994; Graf & Marti, 1995)を入手した。今後、各試料に含まれる鉱物について、Inclusionのようなトラック観察に影響する可能性のある構造の有無を調べたうえ、エッチング処理により鉱物に記録された宇宙線の電荷の情報を得る。将来的には、太古の宇宙線トラックの痕跡を残していると期待される月隕石 (照射年代 >100 Ma)のトラック観察を進め、試料の宇宙線照射年代、推測される母天体の特徴・変質過程などをもとに、太陽系進化および過去～現在の宇宙環境および太陽活動の変動、さらに、未知宇宙線事象の頻度についての理解へ繋げたい。

2. 研究会・ワークショップ

- 2025/5/12: キックオフミーティング@名大ISEE

本研究メンバー間で、今年度の研究計画、使用する隕石試料や試料の化学処理や観察手順などについて、先行研究内容をもとに議論した。

- 2025/7/18: 第一回研究会「宇宙線トラック分析を通じた太陽系年代学・太陽圏放射線環境・未知粒子の理解に向けて」@名大ISEE

本研究課題を進めるにあたり、鉱物試料の宇宙線トラック観察、パレオディテクター研究がご専門の、東邦大学 中竜大氏によるご講演（講演名：「鉱物に記録された億年スケールの宇宙線トラックの分析と未知粒子の探索」）をいただいた。名古屋大学、東邦大学、ペンシルベニア州立大などからの参加があり、隕石鉱物の宇宙線トラックを利用したダークマターの研究について、また、鉱物宇宙線トラックの化学処理や観察の問題点、精度について議論した。研究会において、研究課題の発展性を踏まえ、国内の関連研究者で組織的に研究を進めていくことが提案された。

- 2025/12/25-26: 第一回TAICOワークショップ (Tracking Ancient Imprints of Cosmic Origins) @名大ISEE (主催: ISEE, JAMSTEC, 世話人: 加藤丈典 (名大) 中竜大 (東邦大) 廣瀬重信 (JAMSTEC) 村瀬孔大 (ペンシルベニア大&京大) 橋口未奈子 (名古屋大学))

“地中や海底の深部にある鉱物、隕石や月の試料などに刻まれた「太古の粒子の痕跡」を読み解くことで、宇宙線や重元素合成の起源、地球を含めた惑星の歴史、そしてダークマターの手掛かりを統合的に探る学際型ワークショップ”として、国内外の地球科学、宇宙化学、材料科学、素粒子・宇宙線物理の研究者たちによるワークショップを実施した。講演者23名で、参加者現地38名、オンライン25名であった。本研究課題メンバーでは、日高洋氏（環境学）、渡邊誠一郎氏（環境学）の講演があった。元素合成、ダークマター、パレオディテクター、太陽風、地球外試料、地球試料、などについての幅広いテーマの講演をもとに、パレオディテクターとして候補となりそうな鉱物、地球外試料中の鉱物に残るトラックから引き出せる・引き出したい情報について、また、現状・今後の課題などについて議論を交わした。第一回ワークショップでは、異分野間のネットワークの形成や意見交換、目標とするサイエンスについての議論を目的とし、今後、参加者・講演者と今後も連携してより具体的な研究戦略を立てていくこととした。このワークショップにより、本研究課題を含め、国内外の研究者を横断した議論の場・研究発展の基盤を構築することができた。

- 2026/2/12: 第二回研究会@名大ISEE

融合研究戦略課題メンバー間で、今年度に進めた内容についての情報共有・議論、および、TAICOワークショップの内容もふまえて新たに入手する隕石試料などについての検討や、惑星形成、太陽風測定などの側面からどのような研究に繋がれそうか（例: 中性子捕獲による同位体変動、宇宙線トラック密度と隕石の化学的種類との比較をもとにした、隕石の軌道、惑星形成プロセスへの制約）など、今後の展望・計画について議論した。

3. 機関内外の研究者間ネットワーク、研究基盤の形成

上記、研究会、TAICOワークショップをもとに、東邦大 中氏、JAMSTEC 廣瀬重信氏、ペンシルベニア州立大 村瀬孔大氏との連携が生まれた。また、同ワークショップにおける講演者でもある東北大学 吉田純也氏とは、放射光分析を用いた石鉄隕石鉱物中のインクルージョンの組成分析、トラック観察について、検討を進めている。そのテストとして、名大環境学の道林克禎氏とも協力し、地球の鉱物試料を用いた放射光での化学組成分析の計画が進んでいる。

隕石鉱物のトラック観察、実際の作業は、東邦大 中竜大氏と東邦大の学部・修士学生、パレオディテクター研究・鉱物中のトラック自動検出ソフトウェア開発で、名大理学部物理学科の学生とも連携して進めた。

以上、名古屋大学内にとどまらず、外部の研究者とも連携し、計画段階の内容も含め、研究が進められた。さらに、第一回TAICOワークショップでは他分野における研究者間の意見交換、コミュニティ形成の基盤が作られた。今年度では、2023-2024年度 融合研究戦略課題「太陽系年代学の進展と放射線環境変動研究との融合」（課題代表: 渡邊誠一郎氏）において作られた、名古屋大学内の研究者間ネットワーク（本課題研究メンバー）をさらに発展させ、将来的な融合研究コミュニティの形成に大きく貢献した。