

令和 3 年 4 月 24 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K18807

研究課題名(和文)月レゴリス粒子に残された太陽スーパーフレアの痕跡の探索

研究課題名(英文) Search for the signatures of solar super-flare in lunar regolith grains

研究代表者

野口 高明 (Noguchi, Takaaki)

九州大学・基幹教育院・教授

研究者番号：40222195

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,800,000円

研究成果の概要(和文)：月レゴリス粒子を研究対象として、ソーラーフレアトラックの長さ分布を求める計画で研究を始めた。トラック沿いに選択的な酸化を起こさせて、光学顕微鏡での観察を可能にする計画であったが不調であった。次に、超高圧電子顕微鏡(HVEM)を用いて厚さ2ミクロンの月レゴリス試料中のトラックの長さ分布を求めることを試みたが、トラックが全長入っているものはごくわずかで長さ分布を求められなかった。これらの研究を行っていく中で、新たな太陽風活動の長期モニタを可能にする組織を月レゴリス粒子から見いだした。この組織の研究を行った。この結果はGeochimica et Cosmochimica Actaに掲載された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

月試料は長期に渡る太陽活動の記録をとどめている。太陽フレアトラックの長さ分布を求めることから、長期間の太陽活動を調べることができると考えて、本研究を始めた。しかし、研究期間内に太陽フレアトラック長を使って太陽活動を調べることは成功しなかった。しかし、太陽活動の長期記録を保持している新たな組織を発見した。それは硫化鉄表面に成長している金属鉄ウィスカである。このウィスカは、1万年程かけて成長していた可能性が高く、新たな太陽活動の指標となると考えられる。硫化鉄は小惑星リュウグウにも存在するため、この試料からも金属鉄ウィスカを見いだして太陽活動について議論できるものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：We tried to obtain distribution of length of solar flare tracks in lunar regolith samples using mild heating in the atmosphere. However, visualization of solar flare tracks did not occur by mild heating (300 oC) in the atmosphere. Next, we tried to obtain distribution of length of solar flare tracks in lunar regolith samples by high-voltage transmission electron (HVEM) observation of thick (~2 microns) sections. But the distribution of length of solar flare tracks were not obtained even by using such thick sections.

During the course of these studies, we found Fe sulfide grains with very strange texture and morphology. The sulfide grains have Tafoni-like porous surfaces. There were sinuous striated object that seemed to have grown from the surfaces of the Fe sulfide grains. We investigated them with Dr. Toru Matsumoto, PD in my laboratory. The lunar iron whiskers grew to be much larger than those on the Itokawa grains, which reflected the different exposure to the solar activity.

研究分野：鉱物学, 隕石学

キーワード：ソーラーフレアトラック 太陽風 鉄ウィスカ

1. 研究開始当初の背景

太陽では、時折太陽黒点周辺の磁場に蓄積されたエネルギーが爆発的に開放される太陽フレアやそれに伴うコロナ質量放出(CME)が起きる。巨大な太陽フレアが起きると人類社会の基盤である電力系や電子回路に大きな被害が及ぶと言われており、太陽フレア活動をモニタすることが行われている。大気のない天体表面の物質は長期に渡り太陽活動に曝露されていることから、そうした物質を分析することで過去の太陽活動について検討することができるはずである。それが可能になれば、巨大な太陽フレアがどのくらいの頻度で起きるものかについて情報を得られる可能性がある。

我々は小惑星イトカワから回収された試料に含まれる太陽風起源希ガス濃度と太陽風及び太陽フレアによって形成される鉱物中の組織(宇宙風化層とソーラーフレアトラック)を比較することで、500年間程度の太陽活動を見ることができた。ただ、この場合はトラックの数密度測定しかできていない。より長い期間太陽活動に曝露されている試料を使って、トラックの長さ分布を求めることで太陽活動の長期モニタを行いたいと考え、本研究では、より長期間太陽活動に曝露されていたと考えられる月レゴリス粒子を使っていることにした。

2. 研究の目的

過去の太陽活動の積算が月レゴリス粒子に残っているはずである。月レゴリス粒子の表面付近断面の透過電子顕微鏡(TEM)による明視野像を図1に示す。この試料は、アポロ15号が回収したものである。ここに写っている鉱物は斜長石である。その表面50-100nm程度は完全に非晶質化しており、その直下は結晶構造が部分的に乱されており、歪みが溜まることで暗い帯状に写っている。そのさらに内部にたくさん見える線がソーラーフレアトラックである。

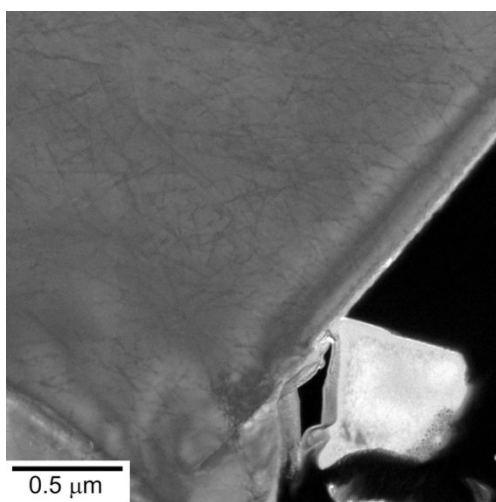


図1 アポロ15号が回収した月レゴリス粒子中に観察されるソーラーフレアトラック。透過電子顕微鏡(TEM)による観察。明視野像。

ソーラーフレアやCMEに伴って放出される高エネルギー粒子のほとんどはMeV程度のエネルギーを持つ H^+ や He^+ イオンである。原子核乾板に残ったトラックの長さ分布からイオンの運動エネルギーの違いが分かりトラックを作った原子核の種類を推定できるように、トラックの長さ分布から入射 He^+ のエネルギー分布が推定できると考えられる。そこで、月レゴリス粒子に残された太陽フレアトラックの長さ分布を測定して、ソーラーフレア粒子のエネルギースペクトルを推定し、その解析からスーパーフレアが起きていたかどうかを判断したいというのが研究の目的であった。

3. 研究の方法

3.1 ソーラーフレアの可視化実験

通常のTEM観察用試料の厚さは100nm程度であり、その薄板にほぼ並行に太陽高エネルギー粒子が侵入してくる可能性は低いいため、その数密度解析は可能ではあるが、トラックの長さを測定するのは難しい(図1)。そこで、何らかの方法でもっと大きな試料に含まれるソーラーフ

レアトラックを解析する方法を開発することを考えた。

大きな試料におけるトラックの可視化ということでは、エッチング法が昔からよく知られている。隕石や月試料に残っている宇宙線によって作られたトラックは、試料の研磨面をアルカリ液でエッチングし、トラックを選択的に腐食させて可視化し、光学顕微鏡あるいはSEMで計測する。本研究では、エッチング法のように新たな研磨面を作成してその面をアルカリ液でエッチングするのではなくて、月レゴリス粒子の表面を生かしたままで太陽高エネルギー粒子が作ったトラックを可視化しようと考えた。そこで、Kohlstedt et al. (1976)が開発したカンラン石中の転位の酸化デコレーション法を参考にして、 Fe^{2+} イオンを含む鉱物中のトラック沿いに酸化鉄微粒子を析出させる方法を検討した。三宅島産のFeに比較的富むカンラン石を鏡面研磨し、さらにコロイダル研磨を行って機械研磨によって形成された非晶質層を除去した。そしてこの試料を量子科学技術研究開発機構高崎応用量子研究所の山本博士によって、1 MeVの $^4He^+$ イオンの照射を行っていただいた。照射フラックス量は、 10^{10} から 10^{11} トラック/cm² の数密度でイオンが照射されるように調節していただいた。この数密度は月で数千年間太陽活動に曝露されたことに相当する。

照射後の試料の表面は、低加速電圧でFE-SEM観察を行った。未処理の状態では照射部位とそれ以外ではっきりとした違いが見られなかった。このカンラン石を電気炉中で、大気中300で加熱した。時間を変えて3通り(30分, 1時間, 2時間)行ったが、トラックの選択的な酸化を示唆するような照射部位に顕著な違いがFE-SEMでも光学顕微鏡でも見いだせなかった。当初計画ではここで可視化条件が分かり、月試料中の輝石やカンラン石を加熱する予定であったが、実験産物でうまくいかなかった状態で貴重な月試料を無駄にすることはできないため、光学顕微鏡でソーラーフレアトラックを計測するという方法は断念せざるを得なかった。

3.2 超高压電子顕微鏡を用いたソーラーフレアトラックの計測

次に、ソーラーフレアトラックの長さ分布を月レゴリス試料のHVEM観察から直接求める研究を行った。加速電圧200 kVのTEMでの観察に用いる試料の厚さ約100 nmでは、図1を見ると分かるように、ソーラーフレアトラックは短い線分として現れている。すなわち、試料面にほぼ垂直なもの以外はみな線分になってしまう。このため、より厚い試料を使って、試料全体を通り抜けているトラック数を増やすことを考えた。厚さ2 μm の試料を作成し、加速電圧1250 kVの超高压電子顕微鏡(HVEM)でトラックの観察を行った。その結果、試料全体を通り抜けているトラックは増えたのだが、意外にも、トラックの全長が観察できたものは少なかった。その上、技術的な問題として、HVEMの像撮影用のCCDの面積が非常に小さく、 $10 \times 10 \mu m$ の領域を撮影するために数百枚の画像が必要であった。ステージのXYを水平垂直に正確に動かすことができず、撮った画像に大きなすきまがあちこちでできてしまい貼り合わせた画像からの計測が困難だった。トラックの立体的な方位関係を推定するためHVEMを使ったトモグラフィも試みた。しかし、ソーラーフレアトラックは、ある条件下ではよく見えてもわずか10度ほど回転させるとコントラストが失われてしまうため、 $\pm 70^\circ$ の傾斜を行う必要があるトモグラフィはうまくいかなかった。このように、二通りの手段で、月レゴリスのソーラーフレアトラックの長さ分布を求めようとしたが、どちらも手詰まりになった。

3.3 月レゴリス粒子表面の特異な物体の研究

このような状態の中で、月レゴリス粒子をFE-SEMで観察中に、月レゴリス粒子表面の特異な組織と不思議な形状を持つ物体を発見した。そこで、最終年度と繰越による延長期間にこの物

体を研究した。

4. 研究成果

月レゴリス粒子表面には、太陽風の低エネルギープラズマ流の照射によって形成されるブリスター（気体になる元素のイオンが撃ち込まれた際に生じる火ぶくれ状の膨らみ）、微小な隕石の衝突によって生じた微小なメルトが付着して形成されるスパッター、マイクロクレーター、微小金属鉄粒子などが1970年代初めよりよく知られていた。そのようなよく知られている組織ではなく、図3に示したように、まるでタフオニが形成された岩石のような見かけを持つ物体を見いだした。凹みのサイズは数百 nm 程度である。そして、それらからは、霜柱状の湾曲した条線の発達した物体が成長している。

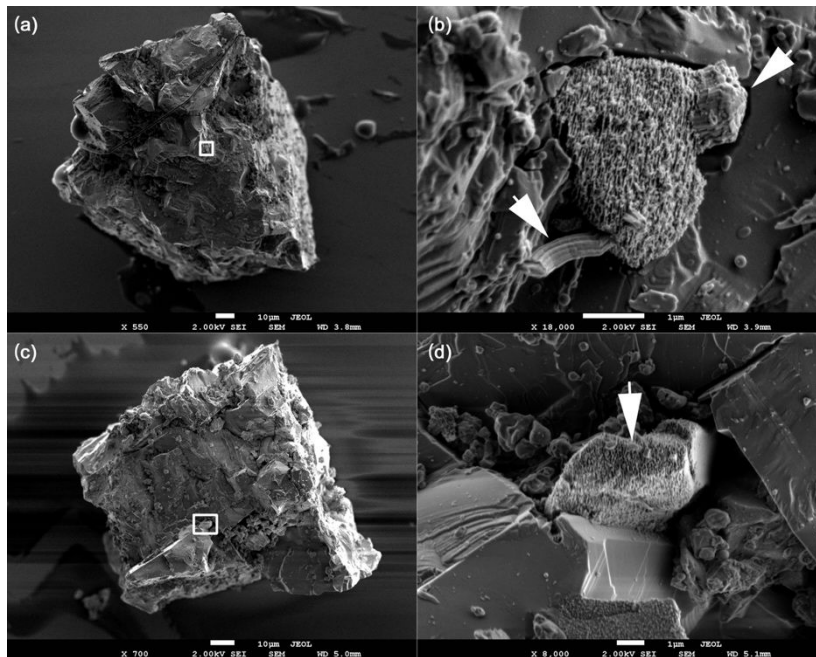


Fig. 3 月レゴリス粒子表面に観察される特異な構造を持つ粒子とそれから成長しているように見える条線の発達した物体（矢印で示した）。アポロ11号回収試料。

月レゴリス試料は低加速電圧でFE-SEMで観察していただけであったので、これらの奇妙

な物体がどのような相からできているかは分かっていなかった。これらの奇妙な物体のFE-SEM画像を研究代表者の研究室でPDを勤めていた松本博士に見せたところ、彼が小惑星イトカワ粒子の表面から発見しNature Communicationsに掲載された金属鉄ウイスカと同等のものが、さらに大きく成長したものではないかという話になった。それで、彼も本研究に加わっていただき、イトカワ試料と比較しながら研究を行うことになった。

イトカワ粒子の場合と同様に、タフオニ状の表面組織を持つ相は鉄の硫化物であるトロイライト FeS であった。また、霜柱状の結晶は金属鉄ウイスカであった。イトカワ試料の場合、Matsumoto et al. (2020)によると金属鉄ウイスカの典型的サイズは0.3 µm程度であったが、月レゴリス試料の場合は典型的な大きさが1 µm程度はあり、2 µmを超える長さのものまで見られた。アポロ11号と17号回収試料を詳しく観察したところ、どちらの試料にも多孔質になったトロイライトから大きな金属鉄ウイスカが成長していることが分かった。湾曲の程度も著しく、180°近くまで湾曲しているものすらあった。イトカワ試料の金属鉄ウイスカと基本的な構造は全く同じであることから、月の金属鉄ウイスカも太陽風照射によって形成されたものと考えられる。

金属鉄ウイスカが成長している試料中の高Ca輝石には、 $\sim 5 \times 10^{10}$ tracks/cm²の数密度でソーラーフレアトラックが存在していた。小惑星イトカワの場合は、カンラン石中のソーラーフレアトラック数密度は高くとも 10^9 tracks/cm²程度であることを考慮すると、太陽活動への暴露時間の違いは、およそ50倍あると考えられる。先に述べたように、月とイトカワの典型的な金

属鉄ウイスカの長さは3.3倍程度の差である。両者は長さだけではなく、太さの差もあり、その違いは5倍程度である。これらを考慮すると、月とイトカワの典型的な金属鉄ウイスカの体積はおよそ80倍異なる。小惑星イトカワの太陽からの平均距離は1.3天文単位であるので、太陽風の単位面積あたりの流束は、イトカワは月の0.6倍である。このことを考慮すると、月試料が受け取った太陽風粒子のドーズ量はイトカワ試料の場合のおおよそ80倍になり、両者における金属鉄ウイスカの体積の差とほぼ同じである。このことは、硫化鉄から太陽風照射によって形成される金属鉄の量は、太陽風粒子のドーズ量に比例する可能性を示唆している。

太陽風によって珪酸塩鉱物に形成される風化損傷層(いわゆる宇宙風化層)の厚さは太陽風粒子のエネルギーによって決まる侵入深さに依存するため、50 nm程度よりも厚くなることができず、照射損傷による非晶質化とスパッタリングの兼ね合いで最終的な厚さが決まってしまう。それに対して、金属鉄ウイスカは一旦形成が始まれば珪酸塩鉱物よりも太陽風照射にスパッタリングを受けにくく、恐らく 10^4 年近くにわたって成長を続けている可能性がある。すなわち、大気のない天体表面において長期間の太陽風に曝露されているかどうかのモニタリングに金属鉄ウイスカを使うことができると考えられる。本研究結果は Matsumoto et al. (2021)として *Geochimica et Cosmochimica Acta* に掲載された。

イトカワと月では硫化鉄の化学組成が異なるという違いはあるが、どちらの場合でも硫化鉄が太陽風照射を受けて、硫化鉄からSが失われると共に硫化鉄表面から金属鉄ウイスカが形成されていた。このような硫化鉄からのSの欠乏と金属鉄ウイスカの形成は大気のない太陽系天体表面においては普遍的な現象であると考えられる。我々は同様の組織をはやぶさ2探査機が持ち帰った小惑星リュウグウ試料からも発見したいと考えている。リュウグウ試料にも多くの硫化鉄が含まれていることがすでに分かっている。リュウグウ試料の宇宙風化のインディケータとして金属鉄ウイスカを用いることができると我々は予想している。スーパーフレアの痕跡を探するという当初目的の副産物として、50年以上も研究されてきた月試料から、誰にも報告されていなかった普遍的な組織を発見することができたことになる。我々は、新たな太陽活動の長期モニタに使うことのできる金属鉄ウイスカを見いだすことができた。

研究代表者はこの春から京都大学大学院理学研究科に異動した。異動先にはフィッシュントラックの研究を長年行ってこられた方が居られる。本研究ではアルカリ液によるエッチングを使ったトラック可視化は試みなかった。本研究の研究期間は終了したが、こちらではフィッシュントラックの専門家の協力を仰ぎ、エッチングを使ったトラック可視化の試みを引き続き行っていきたいと考えている。

<引用文献>

Kohlstedt, D. L., Goetze, C., Durham, W. B., and Vander Sande, J. (1976) New Technique for Decorating Dislocations in Olivine. *Science* 191, 1045-1046.

Matsumoto, T., Harries, D., Langenhorst, F., Miyake, A., Noguchi, T. (2020) Iron whiskers on asteroid Itokawa indicate sulfide destruction by space weathering. *Nature Comm.* 11, 1117. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-14758-3>.

Matsumoto, T., Noguchi, T., Tobimatsu, Y., Harries, D., Langenhorst, F., Miyake, A., and Hidaka, H. (2021) Space weathering of iron sulfides in the lunar surface environment. *Geochim. Cosmochim. Acta* 299, 69-84. doi: 10.1016/j.gca.2021.02.013.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Matsumoto Toru, Noguchi Takaaki, Tobimatsu Yu, Harries Dennis, Langenhorst Falko, Miyake Akira, Hidaka Hiroshi	4. 巻 299
2. 論文標題 Space weathering of iron sulfides in the lunar surface environment	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geochimica et Cosmochimica Acta	6. 最初と最後の頁 69 ~ 84
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.gca.2021.02.013	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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	日高 洋 (Hidaka Hiroshi) (10208770)	名古屋大学・環境学研究科・教授 (13901)	
研究分担者	岡崎 隆司 (Okazaki Ryuji) (40372750)	九州大学・理学研究院・准教授 (17102)	

	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
連携研究者	松本 徹 (Matsumoto Toru) (80750455)	九州大学・基幹教育院・特別研究員 (17102)	

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
---------	---------