# 微小鉱物の磁気記録から太陽系の進化を 読み解く

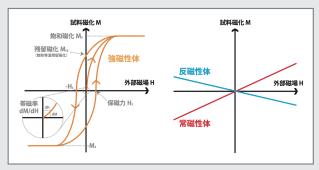
東京理科大学 理学部第一部 物理学科 准教授 佐藤 雅彦

## ■はじめに

岩石や堆積物などの天然物質の中には磁鉄鉱 (magnetite,  $Fe_3O_4$ ) などの微小な強磁性鉱物が含まれています。それらの強磁性鉱物が記録している「地球や惑星で過去に起こった物理現象」を読み解く研究に私たち研究室は取り組んでいます。幅広い物理現象が磁気的な情報として記録されるため、地球や惑星の進化、原始太陽系円盤(惑星ができる前の塵やガスが集まった状態)の進化、地球表層で起こる各種の動的現象、など様々な時間・空間スケールの現象を研究対象としています。

私たちは天然物質を測定対象とするため、研究のはじめに、フィールドワークで岩石や堆積物を採取、実験により惑星模擬物質を作成、隕石や人工衛星が採取した地球外物質を入手、などすることで試料を準備します。そして磁力計を使ってそれら試料の磁気記録や磁気特性を測定・評価することで、過去の物理現象を解読していきます。「研究対象とする現象×試料×手法」の組み合わせで、様々な研究トピックを扱える点が地球惑星物理学の醍醐味です。

本稿では、天然試料の磁気記録測定に関する基礎知識の紹介と私たちの研究成果の一部を紹介させて頂きます。スペースの問題で簡略化して記述を行いますが、詳細な説明については、各種の専門書などを参照して頂けますと幸いです。

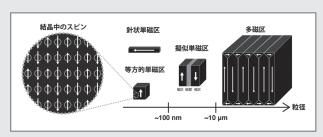


【図1】磁場変化に対する磁化の応答. (左)強磁性体,(右)常磁性体と反磁性体

## ■ 強磁性鉱物と磁気記録

物質の磁性は、強磁性体、常磁性体、反磁性体に大別することができます。これらの磁性の違いは、物質に磁場を印加すると顕著に現れます【図1】。常磁性体では磁場を印加するとその方向に物質が磁化し、反磁性体では磁場と逆方向に磁化します。常磁性体と反磁性体では印加する磁場をゼロにすると磁化はゼロに戻ってしまいます。一方で、強磁性体では磁場がゼロの状態でも有限の大きさの磁化を示します(残留磁化)、強磁性体では、印加する磁場の強さやその履歴によって磁化の状態が様々に変化します(磁気ヒステリシス)。

強磁性鉱物の粒径や形状の変化に伴って、磁気ヒス テリシスの形などの磁気的性質が変化します。強磁性 鉱物をミクロに見た場合、結晶中の Fe イオン等が持 つスピンが規則的に配列して磁区を形成しています 【図 2】 細粒な鉱物では粒子内で磁区が一つの単磁区 状態、粗粒な鉱物では粒子内で磁区が複数に分かれて いる多磁区状態となっています【図2】 粒径・形状 の変化に伴う磁気的性質の変化は、磁区構造の変化に 由来しています. 結晶中のFeイオン等が持つスピン が規則的に配列して磁区を形成していると上述しまし たが、組成が異なる鉱物では含まれるイオンの位置関 係や量が異なるため、磁気的性質も大きく変化します 【表1】特に、本稿で重要となる「残留磁化の安定 性」の観点では、キュリー温度が高く単磁区状態の強 磁性鉱物が最も安定であり、単磁区状態の磁鉄鉱や金 属鉄 (iron) であれば過去に獲得した磁気記録を現在 まで安定に保持している可能性があるため、私たちに とって重要な研究対象となります。



【図2】強磁性鉱物の粒径・形状と磁区構造

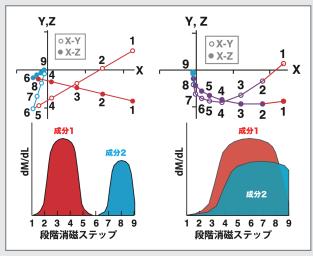
【表 1】天然物質中に含まれる主要な強磁性鉱物

Mineral	Composition	M <sub>s</sub> [kA/m]	<i>T</i> <sub>C</sub> [°C]
Magnetite	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	480	580
Hematite	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	~2.5	675
Pyrrhotite	Fe <sub>7</sub> S <sub>8</sub>	~80	320
Titanomagnetite	Fe <sub>3-x</sub> Ti <sub>x</sub> O <sub>4</sub>	125 ( $x = 0.6$ )	150 ( $x = 0.6$ )
Titanohematite	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /FeTiO <sub>3</sub>	~55	530-650
Iron	Fe	1715	770
Iron		1715 たりの飽和磁化, <i>T</i> c	

天然物質中に含まれている強磁性鉱物の磁気記録= 残留磁化を実験室で測定することで過去に起こった物 理現象の解読を行っています. 残留磁化にも様々な種 類があります。上述の磁気ヒステリシスの説明では、 物理的な状態として磁場のみを変化させた場合に強磁 性鉱物が獲得する残留磁化である等温残留磁化を紹介 しました。 強磁性鉱物は、 等温残留磁化のほか、 物理 化学的な状態変化に伴って残留磁化を獲得することが できます。天然試料の磁気記録研究でとりわけ重要と なる残留磁化として, 熱残留磁化, 化学残留磁化, 堆 積残留磁化が挙げられます。 熱残留磁化は、外部磁場 は一定で、強磁性鉱物が高温から室温に冷却される際 に獲得する残留磁化で、火山噴火の際などにマグマか ら冷え固まってできた岩石などが記録しています。化 学残留磁化は、外部磁場は一定で、強磁性鉱物が粒成 長した際に獲得する残留磁化で、水と岩石が化学反応 を起こして強磁性鉱物が生成された岩石などが記録し ています。 堆積残留磁化は、外部磁場は一定で、 泥や 砂などが堆積した際にそれらに含まれる強磁性鉱物が 獲得する残留磁化で、湖沼や海洋底の堆積物が記録し ています. 天然試料では, 熱残留磁化・化学残留磁 化・堆積残留磁化の磁化獲得時の外部磁場が、地球・ 惑星・原始太陽系円盤の作る磁場に対応しており、残 留磁化を測定することで、過去の磁場情報を知ること ができます.

#### ■磁気記録の測定

強磁性鉱物の磁気的な性質は、それらの粒径・形状・組成によって変化することを前項で紹介しました。 天然物質では、磁気的な性質が異なる複数種類の強磁性鉱物が含まれている場合がほとんどです。また、過去に形成された古い岩石を使って研究を行うため、岩石形成後から現在に至るまでの間に、様々な物理化学的変化を被っており、天然試料では異なる時期に獲得した複数種類の残留磁化を記録している場合がほとん



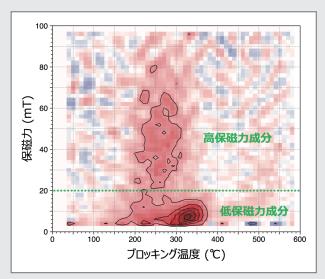
【図3】 残留磁化ベクトルの段階消磁測定、ベクトル3成分を2次元投 影した図と消磁ステップごとの磁化変化を示している。

- (左) 2 成分が異なるステップで消磁されている場合.
- (右) 2成分が同時に消磁されている場合.

どです. 本項では, どのようにして天然試料が記録している複雑な磁気記録を測定しているのか, について説明をしていきます.

磁力計を用いて試料の磁化ベクトルを測定すること で、試料中に含まれる強磁性鉱物の残留磁化ベクトル の総和を知ることができます。その後に、消磁装置を 用いて磁気記録の一部の成分を消し去り(消磁)、再 度その試料の磁化ベクトルを測定します。さらに、先 ほどと違う条件で消磁して磁化を測定する…という段 階消磁測定を行うことで、試料の残留磁化を少しずつ 消磁しながら磁化測定していくことで磁気記録を読み 解いていきます【図3左】 段階消磁測定によって複 数の残留磁化成分を分離することができた場合、研究 対象とする時期に記録された残留磁化ベクトル成分に ついて詳細な解析を進めていくことで, 過去の磁場情 報を得ることができます。一方で、複数成分の残留磁 化が同じステップで消磁されてしまうこともしばしば 起こります【図3右】。このように段階消磁測定によ って残留磁化ベクトルの成分が分離できなかった場合 には、重要な磁気記録を保持している試料が手元にあ っても、その情報を読み解くことができない、という 困った状態になってしまうわけです。

適切な磁気記録を得るためには、段階消磁測定によって複数種類の磁化ベクトル成分を分離することが重要になります。消磁処理には様々な種類があり、消磁処理を工夫することで、適切な磁気記録を得ることが可能になります。一般的な消磁処理としては、熱消磁、交流消磁、低温消磁が挙げられます。熱消磁は、無磁場中で試料を100~800℃程度に加熱・室温まで冷



【図4】伊豆大島 1986 年溶岩試料中に含まれる強磁性鉱物の保磁力と ブロッキング温度に関する分布図

却することで、残留磁化のブロッキング温度という性 質に対応する消磁処理を行います。交流消磁は、数 mT~数 100 mT の振幅の交流磁場を印加してその振 幅をゼロまで徐々に減衰させることで、残留磁化の保 磁力という性質に対応する消磁処理を行います。低温 消磁は、無磁場中で試料を77 Kまで冷却(液体窒素 に浸ける)・室温まで昇温することで、磁気転移という 性質に対応する消磁処理を行います。伊豆大島で採取 した溶岩試料に含まれる強磁性鉱物のブロッキング温 度と保磁力の分布を【**図 4**】に示しています<sup>1)</sup>. この 例では、主に2種類の強磁性鉱物が含まれており、 保磁力 20 mT を境にして 2 種類の強磁性鉱物を分け ることができますが、一方で 200~300℃ 程度の範 囲で2種類の強磁性鉱物のブロッキング温度が重複 していることが分かります。この試料では、交流消磁 を行うことで、2成分を分離することが可能となりま す。このように異なる磁気特性に対応する消磁処理を 適切に使うことで、複数種類の残留磁化記録を分離し て、適切な磁気記録を読み解くことが可能となります.

#### ■ 微小試料の磁気記録研究

段階消磁測定による残留磁化ベクトル成分の分離に ついては前項で紹介しましたが、段階消磁処理を用い ても適切な磁気記録を得ることができない場合がしば しばあります。本項では、通常の磁化測定研究の問題 点およびその解決策として私たちが取り組んでいる研 究について紹介をしていきます.

ここでは火山噴火に伴って冷え固まった溶岩を例に して、天然試料中に複数種類含まれている強磁性鉱物

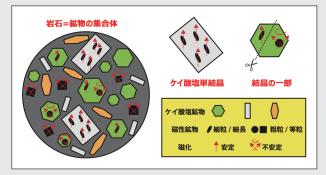
の実態について説明をしていきます。火山噴火の際に マグマは、(1) 噴火前は火山の地下深くにあるマグ マ溜まりという部分に溜まっていて、(2)マグマ溜 まりから出て火道という細い経路を上昇し、(3)火 口から噴出して冷え固まる、という過程を経ています。 マグマというと完全に液体というイメージがあるかも しれませんが、実はそれぞれの過程に伴ってマグマ中 では結晶が晶出しています。過程 1~3 でマグマの温 度・圧力・組成といった熱力学的な状態は変化してい るので、各過程ごとに晶出・粒成長する鉱物の種類や 状態も異なってきます。 強磁性鉱物についても同様で、 異なる過程で異なる強磁性鉱物が晶出・粒成長した結 果として、冷え固まった溶岩中には性質の異なる複数 種類の強磁性鉱物が含まれることになります. 【図 4】 の伊豆大島の溶岩の例では、主に2種類の強磁性鉱 物が検出されていますが、例えば、過程1のマグマ 溜まりで形成された保磁力が小さい成分とその後の過 程2や3で形成された保磁力が大きい成分、などと 対応付けされることになります。ここでは溶岩を例に 説明しましたが、天然試料は強磁性鉱物を晶出・粒成 長する(あるいは取り込む)イベントを複数経験してい るため、その結果として複数種類の強磁性鉱物を含ん でいることになります.

岩石の残留磁化ベクトルを測定する最も一般的な装 置としてスピナー磁力計が挙げられます。スピナー磁 力計を用いた残留磁化測定では、直径1インチ×長 さ2cm程度の円柱形試料(1インチコア)を試料ホル ダーにセットして測定を行います. 岩石は典型的には 0.1-1 mm 程度の粒径の鉱物が集まってできていま す. この場合、1インチコア試料の中には、大量の鉱 物粒子が含まれていることになります。溶岩の1イ ンチコア試料の断面についての模式図を【図5左】 に示しています. 上述の噴火過程を経た結果として, 性質の異なる複数種類の強磁性鉱物を含んでいます. それら強磁性鉱物の中には、粗粒/等粒状で多磁区状 態(=残留磁化が不安定)の強磁性鉱物や細粒/針状で 単磁区状態(=残留磁化が安定)の強磁性鉱物の両方を 含んでいる場合がしばしばあります。単磁区状態の強 磁性鉱物は溶岩が冷え固まった際の外部磁場情報を安 定に保持していますが、多磁区状態の強磁性鉱物は溶 岩冷却後に短期間で磁気記録が上書きされてしまい初 生的な情報を失ってしまいます。過去に噴出した溶岩 から1インチコア試料を採取して実験室で測定した 場合、段階消磁測定によって単磁区状態の強磁性鉱物 の残留磁化ベクトル成分を単離できた場合のみ、過去

の磁場情報を復元できることになります。

磁化ベクトルの強度という観点では、粗粒な多磁区 状態の強磁性鉱物はその総量が多いため磁化ベクトル が強く、一方で、細粒な単磁区状態の強磁性鉱物はそ の総量が少ないための磁化ベクトルが弱く、安定な細 粒強磁性鉱物の磁化ベクトルが不安定な粗粒強磁性鉱 物の磁化ベクトルの変化に埋もれて検出できない場合 がしばしばあります。また、天然試料では、長い年月 をかけて岩石中に含まれる強磁性鉱物が化学的な変化 を被り別の鉱物に変化してしまう場合があります(風 化). 強磁性鉱物の化学的変化に伴って磁気記録も乱 されるもしくは消えてしまうため、過去の磁場情報を 読み取れないことになります。さらに、消磁処理とし て熱消磁を選択した場合に、実験室での加熱に伴って 試料中に含まれる強磁性鉱物が化学反応を起こして別 の鉱物に変化してしまう場合もあります(熱変質). こ の場合も過去の磁場情報を読み取れないことになりま す。このように細粒かつ少量の強磁性鉱物が安定に保 持している磁気記録は、多くの場合で測定することが 出来ないというのが実情となっています.

上述の問題を解決するために、私たちの研究室では 超伝導量子干涉素子 (Superconducting QUantum Interference Device, SQUID) を用いた、微小試料の 磁気測定研究に取り組んでいます。 SQUID は高感度 での磁場計測が可能な素子で、SQUID 素子を使った 磁力計は、物理学をはじめとする幅広い分野の研究に 用いられています。一般的にSQUIDというと、 SQUID 磁力計に加えて温度制御ユニットや磁場制御 ユニットを備えており、温度変化や磁場変化に対する 試料磁化の変化を測定する装置を呼称する場合が多い ですが、私たちの研究分野では、外部磁場を遮蔽する 磁気シールドの内側に SQUID 磁力計のみを備えた 「試料の残留磁化を高精度で測定する装置」を使って 研究を行っています。測定プログラムや試料ホルダー などに改良を加えることで、一般的な岩石用 SQUID 磁力計よりも一桁程度の高感度化にも成功しており、 現在では 10<sup>-12</sup>Am<sup>2</sup> 程度の微弱磁化を 1 試料 1 分程 度で高速測定することが可能になっています。磁化の 測定装置・技術に加えて、私たちの研究室では、従来 の1インチ程度の大きさの測定試料から微小試料に 加工する技術開発にも取り組んでおり、現在では 100 μm 程度の微小試料を SQUID 磁力計での測定 用に加工することが可能になっています。岩石試料の 大きさと典型的な磁化強度の関係を【図6】に示して います。従来研究では1インチコア試料を使って鉱



【図 5】天然試料に含まれる強磁性鉱物. (左)岩石試料.(右)ケイ酸塩試料.

物集合体である岩石の磁化測定研究を行っていること に対して、私たちの研究室では大きさ  $100~\mu$ m程度・磁化  $10^{-12}$ Am²程度の加工・測定技術を用いることで鉱物 1 粒子の磁化測定研究を行っています.

鉱物 1 粒子の磁化測定をすることで一体どんな利 点があるのでしょうか? 溶岩の1インチコア試料 の断面【図5左】を再度使って説明していきます. この模式図では、等粒状かつ粗粒(正方形)、等粒状か つ細粒 (円形), 針状かつ細粒 (楕円形) の3種類の強 磁性鉱物を図示しています。例えば、楕円形で示した 針状かつ細粒な粒子のみ単磁区状態で安定な磁気記録 を保持していますが、その他2種類は多磁区状態で 2次的な磁化を獲得している、という状況だとします (実際によくある状況です). 1インチコア試料を測定す ると3種類の強磁性鉱物の磁化ベクトルの総和が測 定されることになります。この試料では、段階消磁ス テップごとの多磁区状態の強磁性鉱物の磁化ベクトル の変化が卓越するなどの影響で、単磁区状態の強磁性 鉱物の磁化は検出できない場合があります.しかし、 単磁区状態の強磁性鉱物を含んでいる長方形状のケイ 酸塩鉱物や緑色の六角形状のケイ酸塩鉱物の一部を分 離して測定することで【図5右】、安定な残留磁化を 保持している部分のみを使って段階消磁測定をするこ とが可能となり、高確度で磁気記録を読み取ることが 出来ます. 微小な試料を準備+その微弱磁化を測定す る技術を用いることで、従来研究では磁気記録を読み 取ることが出来なかった多くの岩石試料からデータを 得られるようになったわけです.

特定の鉱物を分離して測定することには様々な利点がありますが、特筆すべき点として、風化や実験室での熱変質の影響を回避することが挙げられます。ケイ酸塩鉱物の中に強磁性鉱物が含まれていることで、強磁性鉱物が化学的な変化を起こす原因となる大気や流体などから保護されているため、風化に強いケイ酸塩

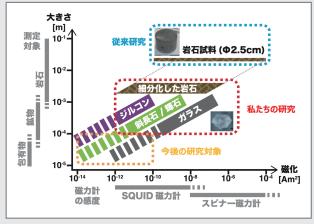
鉱物を選択的に分離することで古い岩石試料からも正確に磁気記録を読み取れるようになりました。また、同様な理由で、実験室における熱消磁処理でも、加熱中における大気や周囲の鉱物との化学反応が抑制され、正確に磁気記録を読み取れるようになりました。

微小試料の微弱磁化測定というのはまだまだ萌芽的な技術であり、同様な測定を実施できる研究室は世界的にも多くはありません。同様な研究に取り組んでいる研究室と比較すると、磁化の検出限界という観点では、当研究室の SQUID 磁力計よりも一桁程度の高感度の磁力計を運用している研究室もありますが、私たちは測定の高速化にも取り組んでおり 1 試料 1 分程度で測定可能という点が特筆すべき特徴となります。 $10^{-12}Am^2$  程度の感度かつ 1 試料 1 分程度の速度で測定できるというのは世界的にもユニークな特徴を持った磁力計で、その特徴を最大限に活かして私たちにしかできない研究の開拓に日々取り組んでいます。

### ■ 地球の磁場記録研究

本項では、上述の微小試料の測定技術を用いて近年 取り組んでいる研究の一つである、ケイ酸塩単結晶を 用いた地球磁場研究について研究の経過なども含めて 紹介していきます。

現在の地球磁場は、地球中心に小さな棒磁石(磁気 双極子)を置いた場合と同様な空間分布をしています。 この磁場は、地球中心に存在する液体の金属核が対流 することにより生成・維持されています。地球の内部 を直接見ることはできませんが、磁場の状態を知るこ とで地球内部における物質輸送・熱輸送の状態を知る ことができます。過去における地球内部での動的現象 の痕跡は残りませんが、岩石試料が記録している磁場



【図 6】測定試料の大きさと磁化強度の関係.

情報を調べることで地球内部状態の変遷を知ることができます。また、地球磁場によって太陽風や宇宙線から地球表層は保護されており、表層状態・生命居住環境は磁場に伴って劇的に変化するため、地球磁場の変遷に関する知見は地球システム進化および生命進化を理解するために必要不可欠な情報となります。

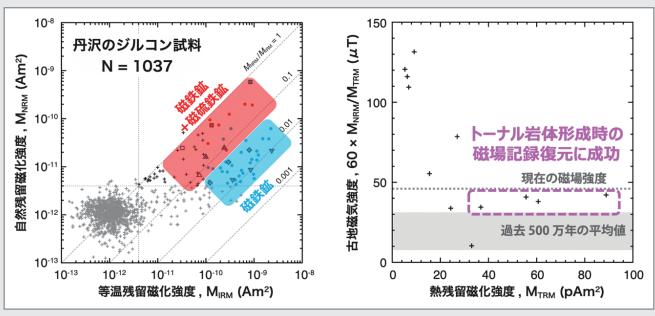
地球は誕生から 46 億年が経過していますが、そのような長い時間スケールでの磁場進化を議論する十分なデータが得られていないことが、地球科学分野における大きな課題となっています。これは、磁場情報を記録する岩石試料の物理化学的変化や磁気記録の上書きの影響で、古い岩石試料では適切な磁気記録の解読が困難となることに由来しています。この課題を解決するために私たち研究室では、物理化学変化・記録上書きの影響から逃れたケイ酸塩単結晶を岩石中から分離して磁気測定することで適切な磁場情報を復元する研究に取り組んでいます。

神奈川県丹沢山地に分布するトーナル岩を対象とした研究では、風化に強いジルコン( $ZrSiO_4$ )という鉱物に着目し、トーナル岩中に微量に含まれるジルコンの磁気測定に取り組みました $^2$ )

まず初めに含有量として少ないジルコンを効率的に 採取することから研究が始まりました。後述するよう に、ジルコンを数粒子測定すれば研究完了となるよう な状況ではなく、1000 粒程度のジルコン粒子から磁 気記録の復元に適した粒子を選別して詳細測定を実施 する必要がありました。そこで私たちは、トーナル岩 の岩体を流れる中川の下流で河岸の砂を調査し、その 中から重鉱物が濃集している部分を採取しました【図 71. 採取した川砂を実験室に持ち帰り、さらに重鉱 物を濃集する作業を行うことで、岩石中に 100 ppm オーダーしか含まれていないジルコンを大量に含む砂 を準備しました. 実体顕微鏡下でジルコンを鑑定して 拾い集めることで、数  $100 \mu m$  サイズのジルコンを 1000 粒オーダーで簡単に準備できるようになりまし た、フィールドワークでの工夫が、その後の研究の良 し悪しを決めることがしばしばあり、そこが地球惑星



【図7】(左) 丹沢トーナル岩体の地質図, (右) 川砂採取の写真.



【図8】 丹沢トーナル岩中のジルコンの磁気測定結果 (左) 磁気的性質による分類 (右) 磁場強度測定

科学研究の醍醐味とも言えます.

続いて、準備した 1000 粒程度のジルコン粒子を 1 粒ずつ磁気測定する作業に取り掛かりました。研究 当時は、ジルコン単粒子の残留磁化測定に成功したという研究報告は無く、どの程度の磁化強度であるのかについても皆目見当がつかない状態でした。そのような状況で、既存の SQUID 磁力計を使って 10 粒程度のジルコンを測定しても、データの解釈が難しい状態でした。この時に、多様な天然試料を相手にするためには大量の高精度分析データが必要であるとの着想に至り、前述の SQUID 磁力計の高感度化および高速度化に取り組みました。

1000 粒子程度のジルコン単結晶の高感度磁気測定を行った結果、丹沢のトーナル岩中のジルコンは、磁鉄鉱のみを含む場合と磁鉄鉱に加えて磁硫鉄鉱(pyrrhotite、Fe<sub>7</sub>S<sub>8</sub>)を含む場合に分けられることが分かりました【図8左】 キュリー温度が高い磁鉄鉱のみを含んでいるジルコンが磁気記録の復元に適しており、それらの粒子を選別して詳細測定を行うことで約500万年前の丹沢トーナル岩体形成時における地球磁場強度値を復元することに成功しました【図8右】 得られた地球磁場強度値は過去500万年間の地球磁場強度の平均値と調和的な数値であり、ジルコン単結晶から地球磁場情報を適切に復元できることを示しました.

この研究で開拓した微小試料の準備手法および磁気 測定手法は様々な研究に応用が可能であり、約1億 年前に形成された阿武隈の花崗岩から分離した斜長石 の磁場記録研究<sup>3</sup>, はやぶさ2探査機によって小惑星 リュウグウから持ち帰られた微小粒子の磁気記録研 究<sup>4</sup>), など幅広い研究対象の開拓に役立っています.

#### おわりに

本稿では、天然試料中に含まれる強磁性鉱物が獲得する残留磁化に関する基礎的な説明と私たちの取り組んでいる研究の一部について紹介させて頂きました。 当研究室はこれまでに開発した微小試料の磁気測定の技術や設備を使って、「磁気記録に基づいて太陽系の成り立ちを解明する」という大きな目標を掲げ、いるいるな場所・時間における地球惑星物理現象の解読に日々取り組んでいます。今後は、測定装置や技術の高度化【図6左下】、そして、東京理科大学の研究者の皆様と協力して、さらなる研究対象の開拓に励んでいきたいと考えています。

## 参考文献

- M. Sato., et al. (2019), Geochem. Geophys. Geosyst. 20, 5177–5191, doi: 10.1029/2019GC008534.
- M. Sato., et al. (2015), Earth Planets Space 67, 150, doi: 10.1186/ s40623-015-0317-9.
- C. Kato., et al. (2018), Earth Planets Space 70, 176, doi: 10.1186/ s40623-018-0945-v.
- 4) M. Sato., *et al.* (2022), J. Geophys. Res. 127, e2022JE007405, doi: 10.1029/2022JE007405.