

令和 3 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K14777

研究課題名（和文）離溶磁鉄鉱の磁氣的性質に基づく火星磁場強度の推定

研究課題名（英文）The Martian magnetic field intensity estimation based on the magnetic properties of exsolved magnetite

研究代表者

佐藤 雅彦（Sato, Masahiko）

東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・助教

研究者番号：50723277

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、複数の岩体から採取した岩石試料に含まれる斜長石単結晶を用いて、磁気ヒステリシス測定・電子線マイクロプローブアナライザ測定・X線吸収微細構造測定を行い、斜長石中の鉄価数と離溶磁鉄鉱量との関係を得ることに成功した。また斜長石試料の残留磁化獲得効率の計測を行った。実験から得られた結果と熱力学計算の結果を用いる事で、火星地殻中に含まれる離溶磁鉄鉱の含有量および残留磁化強度を求め、人工衛星によって観測された地殻岩石の残留磁化強度と比較する事で、過去における火星の磁場強度値を推定することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

過去の惑星磁場強度に関する情報は、惑星内部ダイナミクス状態を知る重要な指標であり、表層環境の進化を知る上でも必要不可欠である。しかし形成初期における火星の磁場強度に関する情報は、そのデータ量・質ともに不十分であり説明が急務となっていた。本研究では、斜長石中に含まれる離溶磁鉄鉱の磁氣的性質を用いた新手法により問題解決を試みた。実験・計算から火星地殻中に含まれる離溶磁鉄鉱の含有量および離溶磁鉄鉱の残留磁化強度を求め、得られた実験データを用いて人工衛星によって観測された離溶磁鉄鉱の磁場記録を読み解く事で、形成初期における火星の磁場強度の推定値を得ることに成功した。

研究成果の概要（英文）：This study prepared the plagioclase crystal samples from natural mafic-plutonic rocks, and the magnetic hysteresis loop measurement using an Alternating Gradient Magnetometer, the microscopic observation using electron microprobes, and the X-ray absorption near edge structure measurement at synchrotron radiation facilities were conducted for the single grain plagioclase crystals. It was confirmed that there was inverse relationship between the magnetite content and average valence states of Fe. In addition, the intensity of thermoremanent magnetization was measured for plagioclase crystals. The content of the exsolved magnetite in the Martian crustal rock and the intensity of crustal magnetization were calculated on the basis of the empirically obtained relationships and the thermodynamic calculations. Comparing the calculated and observed crustal magnetizations, the magnetic field intensity of Mars was estimated.

研究分野：岩石磁気学

キーワード：斜長石 磁鉄鉱 離溶 火星 惑星磁場

1. 研究開始当初の背景

火星や地球などの地球型惑星では、惑星中心の液体金属核の対流により磁場が生成・維持されている。過去における惑星磁場強度を知る事で、金属核対流状態や金属核-岩石マントル間の熱輸送進化などの内部ダイナミクスの状態を知る事ができる¹。また惑星磁場は太陽風や宇宙線から惑星表層を保護するため、磁場強度データは、惑星内部・表層環境の進化解明において必須の情報である。火星のダイナモ作用による磁場の生成・維持は約40億年前に停止した事が磁気異常観測の結果から知られている² (図1)。ダイナモ作用の存在期間が明らかになった一方で、ダイナモ磁場の強度に関する知見は現在までにほとんど得られていない。磁場強度研究では、岩石中に含まれる磁性鉱物が記録している残留磁化記録を読み解く事で、岩石形成時における磁場強度を推定する。火星ではダイナモ磁場が存在した40億年以前の結晶化年代を示す隕石は1つのみ (ALH84001) であり、ALH84001を用いた磁場強度研究が複数報告されているが、その結果は異なる手法間で一致していない^{3,4}。被熱・衝撃履歴の複雑さからALH84001を用いて信頼度の高い磁場強度データを得る事は難しく、データ量・質ともに十分な磁場強度データが得られていない事が大きな問題となっている。

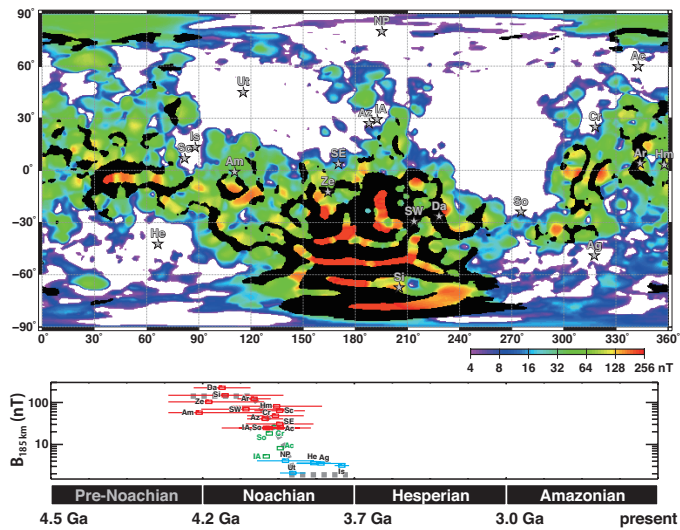


図1. 火星磁気異常マップ (上) と磁気異常強度の時間変化 (下)。

岩石中に含まれる磁性鉱物が記録している残留磁化記録を読み解く事で、岩石形成時における磁場強度を推定する。火星ではダイナモ磁場が存在した40億年以前の結晶化年代を示す隕石は1つのみ (ALH84001) であり、ALH84001を用いた磁場強度研究が複数報告されているが、その結果は異なる手法間で一致していない^{3,4}。被熱・衝撃履歴の複雑さからALH84001を用いて信頼度の高い磁場強度データを得る事は難しく、データ量・質ともに十分な磁場強度データが得られていない事が大きな問題となっている。

2. 研究の目的

火星磁気異常の空間分布から磁気異常のソースとなる地殻岩石の残留磁化は 1-10 A/m の強さで数 10 km 程度の深部に分布しており^{5,6,7} (図2)、また火星地殻深部における残留磁化安定性の評価から残留磁化の記録媒体はミクロンサイズ以下の細粒かつ針状の磁鉄鉱である事が明らかになった⁸。この細粒かつ針状の磁鉄鉱を地殻深部に形成・維持するための機構として、斜長石中の離溶磁鉄鉱現象が最有力な候補と考えられている⁸。火星の場合、地殻岩石の残留磁化強度は 1-10 A/m と既知であるため、地殻岩石の離溶磁鉄鉱含有量から残留磁化獲得効率を知る事が出来れば、火星地殻形成時における磁場強度を推定する事ができると期待される。そこで本研究では、実験により火星地殻中に含まれる離溶磁鉄鉱の含有量を求め、得られた実験データを用いて人工衛星によって観測された離溶磁鉄鉱の磁場記録を読み解く事で、火星地殻形成時における磁場強度の推定を行う。

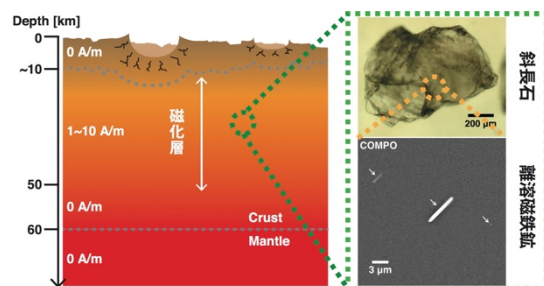


図2. 火星地殻磁化モデル (左) と斜長石中の離溶磁鉄鉱 (右)。

3. 研究の方法

予察研究において離溶磁鉄鉱を含む斜長石が見つかった道志ハンレイ岩体においてハンレイ岩および斜長岩質試料の採取を行なった。採取試料および採取済み試料として、道志ハンレイ岩体、室戸ハンレイ岩体、オマーンオフィオライト、ダルース複合斑レイ岩体の岩石試料を本研究に用いた。

岩石試料を単結晶まで破碎し、実体顕微鏡を用いて斜長石単結晶を採取、塩酸処理をして結晶表面に付着する鉱物片等を取り除いた後に各種の測定を行なった。交番磁場勾配磁力計を用いた斜長石単結晶試料の磁気ヒステリシス測定を行い、斜長石単結晶中に含まれる磁鉄鉱量を計算した。また磁気特性測定装置を用いて斜長石試料の低温磁気測定を行い、斜長石単結晶中に含まれる磁性鉱物の低温変態温度を求める事で、磁性鉱物の組成を調べた。磁気測定を行なった後、測定に用いた斜長石試料を樹脂埋め・研磨して、電子線マイクロプローブアナライザを用いて斜長石中の鉄含有量を測定した。さらに、高エネルギー加速器研究機構および SPring-8 において樹脂埋めした斜長石試料の X 線吸収微細構造測定を行い、斜長石中の鉄価数や配位環境について調べた。磁気測定、電子顕微鏡測定、放射光測定の結果を比較・検討する事で、Fe 価数と離溶磁鉄鉱量の関係を調べた。また磁気測定として、斜長石試料の残留磁化着磁・段階消磁測定を行い、斜長石中の離溶磁鉄鉱の残留磁化獲得効率の計測を行なった。

Rhyolite-MELTS ソフトウェア⁹を用いて、火星地殻組成¹⁰と酸素分圧¹¹のデータから火星地殻中に含まれる斜長石の量と組成を計算した。岩石メルト中の酸素分圧-Fe 価数の関係¹²および岩石メルト-斜長石間の鉄分配関係¹³を用い、Rhyolite-MELTS ソフトウェアで計算した火星地殻中に含まれる斜長石中の Fe 価数を計算した。これらと上記実験で求めた斜長石中に含まれる鉄価数と離溶磁鉄鉱量の関係から、火星地殻中に含まれる離溶磁鉄鉱量を求めた。最後に、離溶磁鉄鉱量から火星地殻の残留磁化獲得効率を求め、人工衛星の観測値から得られている残留磁化強度の情報を用いて火星の磁場強度を推定した。

4. 研究成果

(1) 室戸ハンレイ岩体、オマーンオフィオライト、ダルース複合斑レイ岩体の岩石試料に含まれる斜長石単結晶に対して磁気ヒステリシス測定、電子顕微鏡測定、X線吸収微細構造測定を行なった事で、それらの試料に対して斜長石中に含まれる鉄の状態に関する各種の関係をj得ることに成功した。鉄の価数、鉄の含有量、離溶磁鉄鉱の含有量、斜長石のカルシウム含有量について相関関係を調べたところ、鉄の価数と離溶磁鉄鉱の含有量の間j負の相関関係が確認された。斜長石中に含まれる鉄の含有量の違jを踏まえて離溶磁鉄鉱の含有量を評価するために、(磁鉄鉱が離溶した割合) = (離溶磁鉄鉱の含有量)/(鉄の含有量)と規格化を行い、鉄の価数と磁鉄鉱が離溶した割合の関係を調べたところ、より強い負の相関関係が得られた(図3)。過去の研究においては、斜長石中に離溶起源と考えられる包有物が含まれることや、その包有物が磁鉄鉱である事などが報告されていた程度であったが、本研究により、斜長石中の鉄の価数が磁鉄鉱の離溶量を決める重要な要素である事が確認された(Nakada, Sato et al., 2019; Sato et al. in prep.).

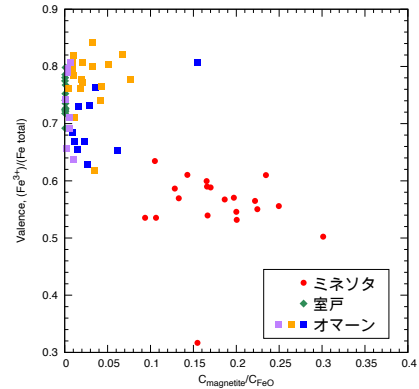


図3.斜長石中の鉄価数 vs. 磁鉄鉱含有量プロット

(2) 東京大学において超電導磁力計、熱消磁装置、交流消磁装置の設置・立上げ作業を行うことで、各種の磁気測定が可能な状態とした。設置・立上げを行なった装置を用いて斜長石試料の熱残留磁化の着磁・消磁測定を行ない、斜長石中の離溶磁鉄鉱の残留磁化獲得効率の計測を行なった。COVID-19の影響で立ち上げ作業などに遅れが生じ、残留磁化獲得効率の計測についてはデータ数が少なく予察的な結果を得るに留まったが、道志ハンレイ岩体の斜長岩質試料から分離した斜長石試料について残留磁化獲得効率の値を得ることに成功した。今回測定を行なった斜長岩質試料に含まれる斜長石では、外部磁場 50 μT における熱残留磁化の強度は 3 mAm^2/kg 程度であった。斜長岩質試料については離溶磁鉄鉱の含有量が未計測のため、その他の試料からの類推で 1000 ppmと仮定すると斜長石中の離溶磁鉄鉱では、熱残留磁化の強度は 3 Am^2/kg となり、熱残留磁化と飽和磁化の比は 1/30程度と計算される。微小な単磁区磁鉄鉱の場合は同比は 1/100程度と報告されており¹⁴、斜長石中の離溶磁鉄鉱では単磁区磁鉄鉱と同程度の残留磁化獲得効率であると考えられる。今回は先述の理由で予察的な結果であり、測定試料を増やしてより多くのデータによる検証が必要である。

(3) Rhyolite-MELTS ソフトウェアによる計算では、岩石の全岩組成、酸素分圧、水含有量を変えて斜長石の量と組成を計算した。斜長石の量と組成のデータに、岩石メルト中の酸素分圧-鉄価数の関係、岩石メルト-斜長石間の鉄分配関係、項目1で得られた鉄価数と離溶磁鉄鉱量の関係を適用する事で、各種の全岩組成、酸素分圧、水含有量における地殻岩石中の磁鉄鉱量の推定値を得た。図4は計算結果の一例で、QFMの酸素分圧について、各種の岩石組成で含水量を0, 0.5, 1 wt%と変えた結果を示している。火星岩石組成については、QFM-3の酸素分圧の場合についても図示している。同じ全岩組成と酸素分圧の場合、含水量が増加する事で離溶磁鉄鉱量は減少する傾向が見られた。全岩組成としては、火星地殻組成では、中程度の離溶磁鉄鉱量であった。火星地殻組成の場合、酸素分圧が下がる事で離溶磁鉄鉱量は増加する傾向がみられ、QFM-3で無水の条件では、100 ppm以上の離溶磁鉄鉱が地殻岩石全体として含まれるという結果が得られた(Sato et al. in prep.).

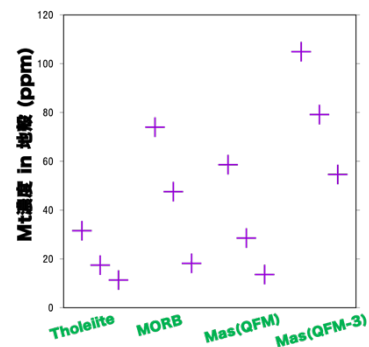


図4.地殻岩石中の離溶磁鉄鉱濃度

(4) 項目2で得られた残留磁化獲得効率は予察的な結果のため単磁区磁鉄鉱の文献値を使用し、項目3で得られた火星地殻中の離溶磁鉄鉱含有量および人工衛星の観測値から得られている残留磁化強度の情報を用いて形成初期における火星の磁場強度の推定を行なった。その結果、火星

の磁場強度として 150 μ T という推定値が得られた。この値は、現在の地球表層での磁場強度と同程度から若干強い値であり、火星隕石 ALH84001 を用いた磁場強度研究の報告値よりも強い値となった。現状では、離溶磁鉄鉱の残留磁化獲得効率の不定性が大きいため、今後は追加実験により残留磁化獲得効率の確定値を求める事で、より確かな火星の磁場強度値を得られると期待される。

<引用文献>

[1] Tauxe & Yamazaki (2007), pp. 509-563, Elsevier. [2] Lillis et al. (2008), Geophys. Res. Lett. 35, L14203. [3] Collinson (1997), Meteorit. Planet. Sci. 32, 803-811. [4] Weiss et al. (2008), Geophys. Res. Lett. 35, L23207. [5] Nimmo & Gilmore (2001), J. Geophys. Res. 106, 12315-12323. [6] Voorhies (2008), J. Geophys. Res. 113, E04004. [7] Langlais et al. (2004), J. Geophys. Res. 109, E02008. [8] Sato et al. (2018), Geophys. Res. Lett. 45, 6417-6427. [9] Gualda et al. (2012), J. Petrol. 53, 875-890. [10] Taylor & McLennan (2009), Cambridge University Press, pp. 141-180. [11] Herd (2003), Meteor. Planet. Sci. 38, 1793-1805. [12] Kress & Carmichael (1991), Contrib. Mineral Petrol. 108, 82-92. [13] Lundgaard & Tegner (2004), Contrib. Mineral Petrol. 147, 470-483. [14] Dunlop & Ozdemir (1997), 573 pp., Cambridge university press.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Sato Masahiko, Terada Takuma, Mochizuki Nobutatsu, Tsunakawa Hideo	4. 巻 20
2. 論文標題 Experimental Evaluation of Remanence Carriers Using the Microcoercivity Unblocking Temperature Diagram	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geochemistry, Geophysics, Geosystems	6. 最初と最後の頁 5177 ~ 5191
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2019GC008534	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

1. 著者名 Nakada Ryoichi, Sato Masahiko, Ushioda Masashi, Tamura Yujiro, Yamamoto Shinji	4. 巻 20
2. 論文標題 Variation of Iron Species in Plagioclase Crystals by X ray Absorption Fine Structure Analysis	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geochemistry, Geophysics, Geosystems	6. 最初と最後の頁 5319 ~ 5333
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2018GC008131	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12件（うち招待講演 1件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 加藤千恵、佐藤雅彦、山本伸次、田村裕二郎、山本裕二
2. 発表標題 Paleo- and rock-magnetic study on single plagioclase grains separated from the Doshi gabbro in the Tanzawa plutonic complex
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田村裕二郎、佐藤雅彦、中田亮一、加藤千恵、山本伸次
2. 発表標題 Evaluation of the magnetite exsolution abundance and valence state of iron in single plagioclase crystal separated from Doshi gabbro
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 永井はるか、佐藤雅彦、加藤千恵、小澤一仁
2. 発表標題 Preliminary paleomagnetic study on single plagioclase crystals separated from the anorthositic dike in the Doshi gabbroic body
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M. Sato, Y. Yamamoto, T. Nishioka, K. Kodama, N. Mochizuki, M. Ushioda, R. Nakada, H. Tsunakawa
2. 発表標題 Constraints on the Source of the Martian Magnetic Anomalies Inferred From Relaxation Time of Remanent Magnetization
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 R. Sugaya, M. Sato, T. Kogure
2. 発表標題 Mineralogical characterization on acicular magnetite exsolved in plagioclase
3. 学会等名 International Conference on Textures of Materials (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤雅、寺田卓馬、望月伸竜、伊藤理子、網川秀夫
2. 発表標題 Experimental evaluation of remanence carriers in coercivity-blocking temperature diagram
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田村裕二郎、中田亮一、佐藤雅彦、山本伸次
2. 発表標題 Mineralogical study on magnetite exsolution and host plagioclase crystal
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nakada Ryoichi、Sato Masahiko、Ushioda Masashi、Tamura Yujiro、Yamamoto Shinji
2. 発表標題 Iron Species in Plagioclase: Towards the Understanding on Magnetite Exsolution in Plagioclase
3. 学会等名 Goldschmidt Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 菅谷峻、佐藤雅彦、小暮敏博
2. 発表標題 Mineralogical study on acicular magnetite exsolution in plagioclase
3. 学会等名 日本鉱物科学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中田亮一、佐藤雅彦、潮田雅司、田村裕二郎、山本伸次
2. 発表標題 Variation of iron species in plagioclase crystals by X-ray absorption fine structure analysis
3. 学会等名 日本鉱物科学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤雅彦、潮田雅司、中田亮一、田村裕二郎、山本伸次
2. 発表標題 Preliminary estimations of the exsolved magnetite content in crustal rock and its contribution to the crustal magnetization
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 加藤千恵、佐藤雅彦、山本裕二
2. 発表標題 Rock-magnetic study on single plagioclase grains separated from the Doshi gabbro in the Tanzawa plutonic complex
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会
4. 発表年 2019年

〔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
---------------------------	-----------------------	----

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