

Preliminary report on shock remanent magnetization measurement

佐藤雅彦¹, 黒澤耕介², 潮田雅司¹, 長谷川直³

¹産業技術総合研究所, ²千葉工業大学, ³宇宙航空研究開発機構

1 はじめに

天体衝突イベントに伴って地殻岩石が獲得した磁化は衝突残留磁化として知られている [1]. 探査機による惑星磁場観測から, 月・火星においてクレーターと磁気異常の位置に良い相関があることが示され, 衝突残留磁化の重要性が指摘されている [2] [3].

衝突残留磁化に関する過去の研究では, 主にターゲットバルクでの磁化測定が行われ, 衝突残留磁化の評価が行われている [1]. 近年 Gattacceca らにより, 磁場中でレーザーショックを与えた玄武岩試料の Superconducting Quantum Interference Device Microscope (SQUID 顕微鏡) 観察実験が報告されている [4]. 彼らの測定では玄武岩試料内部での磁化は一樣で, 衝突残留磁化は試料内部で一樣であると結論しているが, これは mm スケールでの議論であることには注意が必要である. ターゲットの内部では, 衝突現象の際に経験した温度・圧力変化に 3 次元的な構造が存在する事は明らかであり, それに伴い獲得した衝突残留磁化にも 3 次元的な構造が存在していると予想される. そこで本研究では, 衝突残留磁化の cm スケールの構造を明らかにする事を目的として, (1) 磁場環境を制御した状態で衝突実験, (2) 実験後に回収したターゲットの衝突残留磁化測定, (3) iSALE を用いた温度・圧力構造の計算を実施する計画である. 今回の発表では, 衝突磁化実験に関する予察的測定結果について報告する.

2 実験

2.1 実験試料

直径 10 cm, 長さ 10 cm の円柱形玄武岩試料及び直径 8 cm, 長さ 8 cm の円柱形玄武岩試料を衝突実験に用いた. 玄武岩試料の磁気的性質を調べることを目的として, 衝突実験に用いた試料と同じ岩石から切り出した玄武岩試料を用いて各種の磁気測定を行った.

直径 1 インチの円柱形試料を用いて玄武岩試料の保持する自然残留磁化の測定を行った. 残留磁化の測定にはスピナー磁力計 (夏原技研) を交流消磁には D-SPIN (夏原技研) をそれぞれ用いた. 図 1 に自然残留磁化の段階交流消磁の結果を示す. 80 mT で 80%, 160mT で 90% の自然残留磁化が消磁された. 特に 80 mT における自然残留磁化の強度は $1.36 \times 10^{-4} \text{Am}^2/\text{kg}$ であった.

約 70 mg の玄武岩岩片を用いて低温磁気測定を行った. 低温磁気測定には磁気特性測定装置 (カンタム・デザイン) を用いた. 図 2a に低温磁気測定の結果を示す. ZFC remanence 及び FC remanence 曲では約 35 K と約 60 K の低温変態温度が確認されたが, 一方で, 約 120 K の低温変態温度は検出されなかった. また, 等温残留磁化の低温消磁サイクル曲線においても残留磁化の減少はほとんど見られなかった. これらの結果は, 玄武岩試料に含まれる磁性鉱物がピロータイト (Fe_7S_8), イルメナイト (FeTiO_3) - ヘマタイト (Fe_2O_3) の固溶体, マグネタイト (Fe_3O_4) - ウルボスピネル (Fe_2TiO_4) の固

溶体であることを示唆する。

約 10 mg の玄武岩岩片を用いて磁気ヒステリシス測定、 B_{cr} 測定、FORC 測定を行った (図 2b-d)。これらの磁気測定には交番磁場勾配磁力計 (Princeton Measurements Corporation) を用いた。図 2b, 2c に磁気ヒステリシス曲線、Day plot [5] をそれぞれを示す。保磁力は、19 mT 程度で、Day plot 上では単磁区粒子的な振る舞いを示している。図 2d に FORC diagram [6] を示す。FORC diagram の計算には FORCinel software [7] を用いた。FORC diagram 上では H_u 軸方向に広がった分布を示し、上記磁気ヒステリシス測定の結果を踏まえると、玄武岩試料に含まれる磁性鉱物は磁氣的相互作用がある単磁区粒子であると推定される。

衝突実験に先立ち、円柱形玄武岩試料の保持する自然残留磁化を消磁するために、80 mT での交流消磁処理を行った。

2.2 衝突実験

衝突残留磁化の着磁実験は、宇宙科学研究所スペースプラズマ実験施設に導入されている二段式軽ガス銃を用いて行った。衝突磁化実験の概略図を図 3 に示す。

チャンバー内に外径 32 cm、内径 28 cm、長さ 100 cm のパーマロイ製 3 層磁気シールドを入れて外部磁場を遮蔽した。チャンバー内部の磁場強度は $50 \mu\text{T}$ 程度であったが、チャンバー内に設置後に測定した磁気シールド内部の磁場強度は 300 nT 以下であった。磁気シールド内に直径約 26 cm のソレノイドコイルを設置し、コイルに電流を流す事で試料周辺磁場の制御を行った。コイル中央に円柱形玄武岩試料を置いて衝突実験を行った。図 4 に試料周辺の磁場強度分布を示す。弾丸に対して円柱上面を -4 cm の位置に設置した。コイルの軸方向のプロファイルをコイル中心から 0 cm, 2 cm, 4 cm の位置で測定した。ソレノイドコイルは試料に対して十分長く、試料周辺の磁場強度の変化は 4 % 以内であることを確認している。

衝突実験の条件一覧を表 1 に示す。合計 13 回の衝突実験を行い、弾丸は直径 2mm の Al 球及び直径 7mm のポリカーボネイト球を使用した。弾丸速度は約 1.3–7.0 km/s、外部磁場強度は 0–100 μT と設定した。今回の実験では、円柱上面に垂直に弾丸を衝突させ、外部磁場は円柱上面外向き及び円柱上面内向きに垂直に印可した。

2.3 磁気測定

衝突磁化着磁実験後の試料を回収し予察的な磁気測定を行った。図 5 に回収試料及びその断面図を示す。クレーター中心と試料中心を通る断面で円柱試料を半割した後、厚さ約 2 mm のスラブを切り出し、スラブから約 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ の立方体を切り出した。今回は試料作成手法及び磁気測定手法の開発を主な目的として、Shot 3107 試料のクレーター中心から円柱軸向き方向に 35 個の立方体試料を切り出し磁気測定を行った。残留磁化の測定には超電導磁力計 (2G Enterprise) を交流消磁には交流消磁装置 (夏原技研) をそれぞれ使い、50 mT までの段階交流消磁処理を行った。

3 結果・考察

図 6 に衝突残留磁化の測定結果を示すが、今回は交流消磁前の残留磁化ベクトルと 50 mT 段階での残留磁化ベクトルの差分を計算して考察を行っている。Line A における残留磁化 3 成分のプロファイルを図 6a に示す。超電導磁力計を用いて約 10–30 mg 程度の微小な立方体試料の残留磁化が測定できていることが確認出来る。Shot 3107 では概ね試料の+z 方向に $100 \mu\text{T}$ の磁場を印加したが、 J_z 成分に系統的な変化が見えている。一方で J_x 成分が J_z 成分と同等の残留磁化強度を示しており、立方体試料作成前や立方体試料作成時に人工的な残留磁化が着磁されてしまった可能性を示唆している。Line A と B における J_z 成分のプロファイルを図 6b に示す。両プロファイルにおいて J_z 成分に系統的な変化が見え、

その平均値はクレーター直下から遠ざかるにつれ減少傾向が見える。しかし前述のように試料作成段階での人工磁化の着磁が疑われ、今後は試料作成方法の改良や系統的な測定を行うことで衝突残留磁化の構造決定を行っていく必要がある。

4 おわりに

今後は玄武岩試料から立方体試料を切り出し、超電導磁力計を用いて残留磁化測定を行う事で、試料内部の衝突残留磁化強度分布を求める。また、iSALE shock physics code を用いて玄武岩試料の内部が経験した温度・圧力構造を計算し、衝突残留磁化強度分布と比較を行う。この比較から衝撃圧・温度と衝突残留磁化強度の対応関係を求める事が出来ると期待される。

本研究の目的が達成され、衝撃圧・温度と衝突残留磁化強度の対応関係が明らかになれば、衝突現象により形成されたクレーター周辺の衝突残留磁化値モデリングが可能となる。月・火星などの地球型惑星において、探査により得られているクレーター上空の磁場観測値と、衝突残留磁化値モデリングから得られるクレーター上空の磁場強度を比較する事で、クレーター形成当時の”古”惑星磁場強度を復元する事が出来る可能性がある。惑星磁場強度の進化と惑星内部ダイナミクス状態の進化は密接に関係しているため [8][9]、地球型惑星の磁場進化・内部ダイナミクス進化の理解が大きく進展すると期待される。しかし上述の”古”惑星磁場強度復元には、ターゲット天体の地殻内部構造の情報や観測磁場データの解析手法開発など多くの基礎研究を今後行う必要がある。

参考文献

- [1] Nagata, T (1971), Introductory notes on shock remanent magnetization and shock demagnetization of igneous rocks, *Pure Appl. Geophys.*, 89, 159-177.
- [2] Mitchell, D. L., R. J. Lillis, R. P. Lin, J. E. P. Connerney, and M. H. Acuna (2007), A global map of Mars ' crustal magnetic field based on electron reflectometry, *J. Geophys. Res.*, 112, E01002.
- [3] Mitchell, D. L., J.S. Halekas, R.P. Lin, S. Frey, L.L. Hood, M.H. Acuna, and A. Binder (2008), Global mapping of lunar crustal magnetic fields by Lunar Prospector, *Icarus*, 194, 401-409.
- [4] J. Gattacceca, M. Boustie, E. Lima, B.P. Weiss, T. de Resseguier, and J.P. Cuq-Lelandais (2010), Unraveling the simultaneous shock magnetization and demagnetization of rocks, *Phys. Earth Planet. Interiors*, 182, 42-49.
- [5] Day, R., M. Fuller, and V. Schmidt (1971), Hysteresis properties of titanomagnetites: grain-size and compositional dependence, *Phys. Earth planet. Inter.*, 13, 260-267.
- [6] Roberts, A.P., C. R. Pike, and K. L. Verosob (2000), FORC diagrams: a new tool for characterizing the magnetic properties of natural samples, *J. Geophys. Res.*, 105, 28461-28475.
- [7] Harrison, R.J. and J. M. Feinberg (2008), FORCinel: an improved algorithm for calculating first-order reversal curve distributions using locally weighted regression smoothing, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 9, Q05016.
- [8] Stevenson, D. J., T. Spohn, and G. Schubert (1983), Magnetism and thermal evolution of the terrestrial planets, *Icarus*, 54, 466-489.
- [9] Aubert, J., S. Labrosse, and C. Poitou (2009), Modelling the palaeo-evolution of the geodynamo, *Geophys. J. Int.*, 179, 1414-1428.

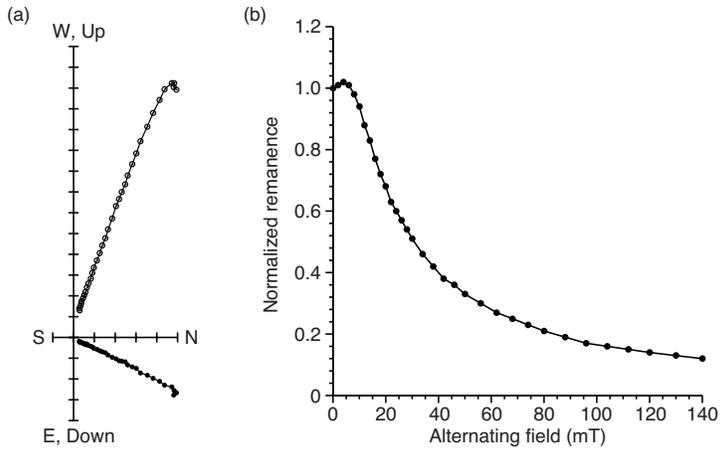


Figure 1. Orthogonal vector plots for stepwise AFD of NRM. Closed and open symbols denote horizontal and vertical projections, respectively.

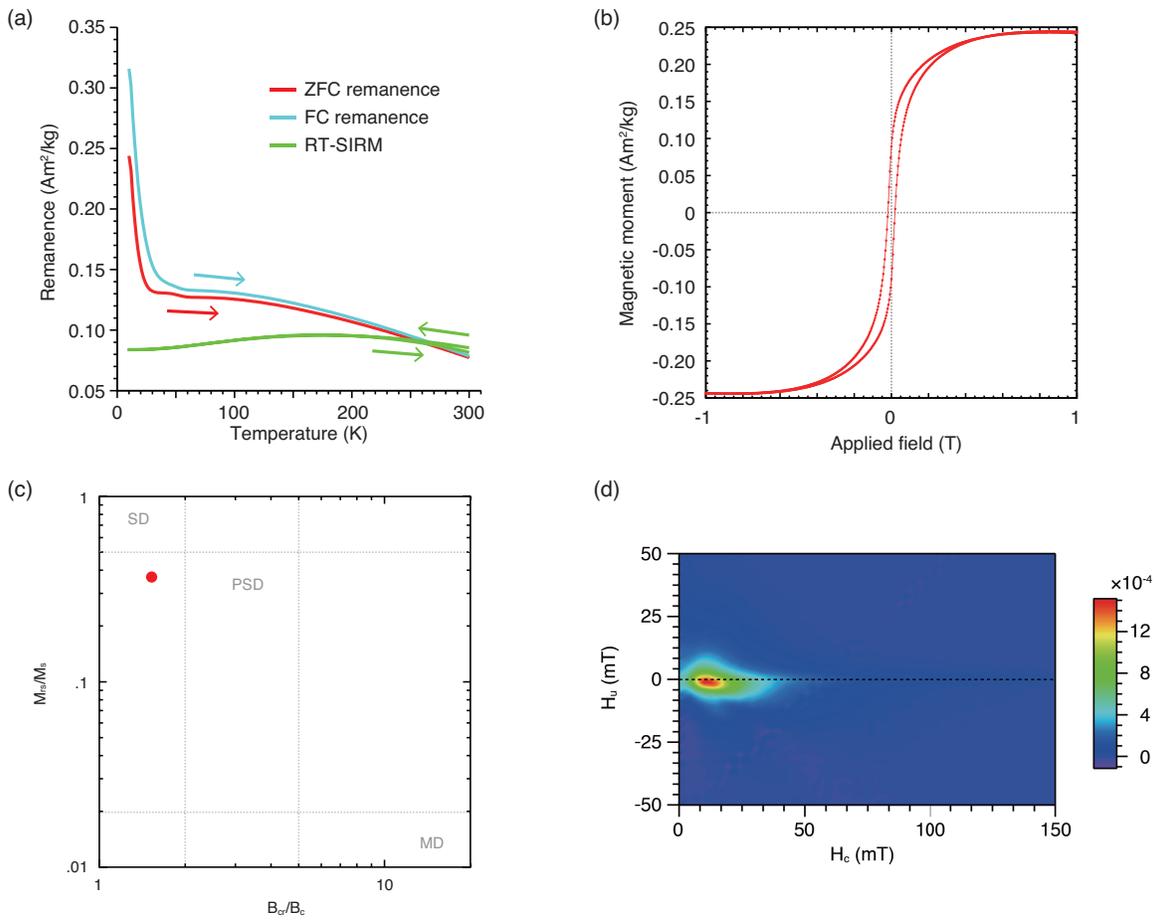


Figure 2. Rock-magnetic properties of the basalt sample. (a) Hysteresis loop. (b) Day plot. (c) Low-temperature remanence curves. (d) FORC diagram.

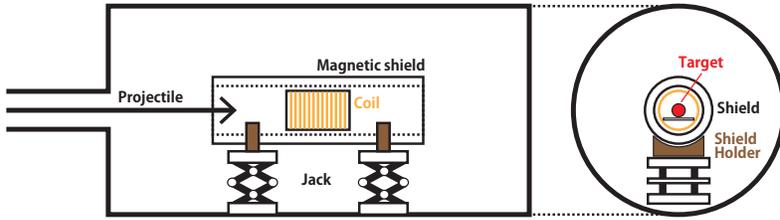


Figure 3. Schematic diagram of the experimental system.

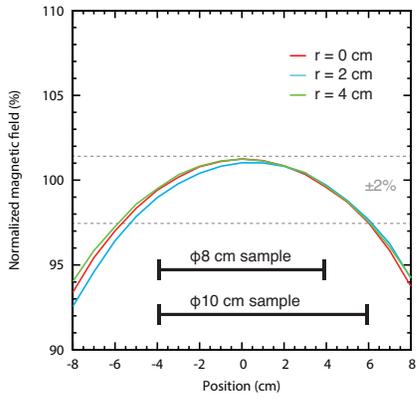


Figure 4. Intensity profile of magnetic field.

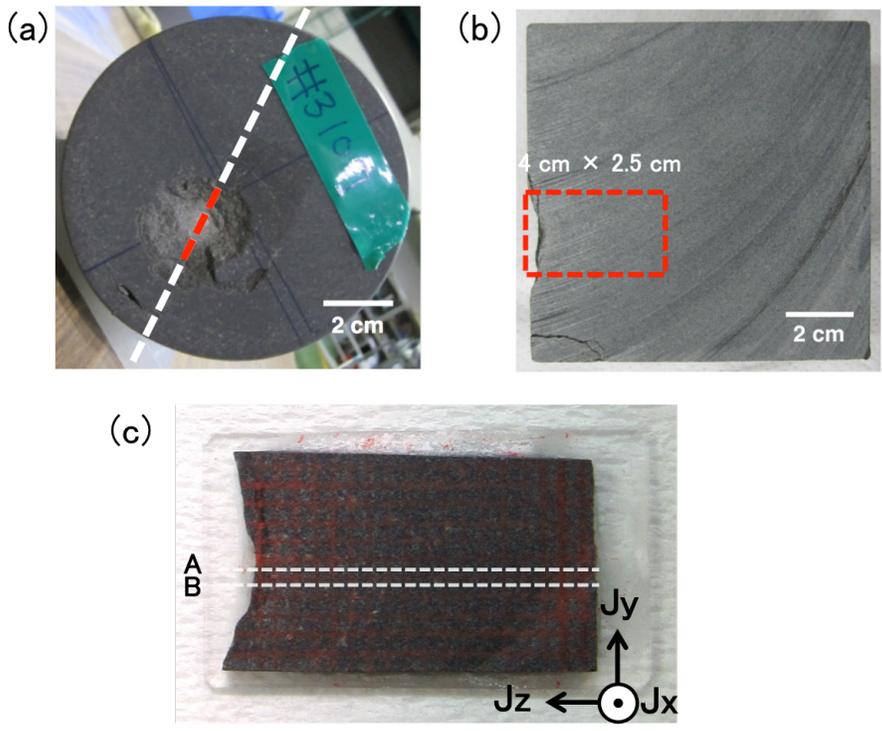


Figure 5. Photo images of basalt sample.

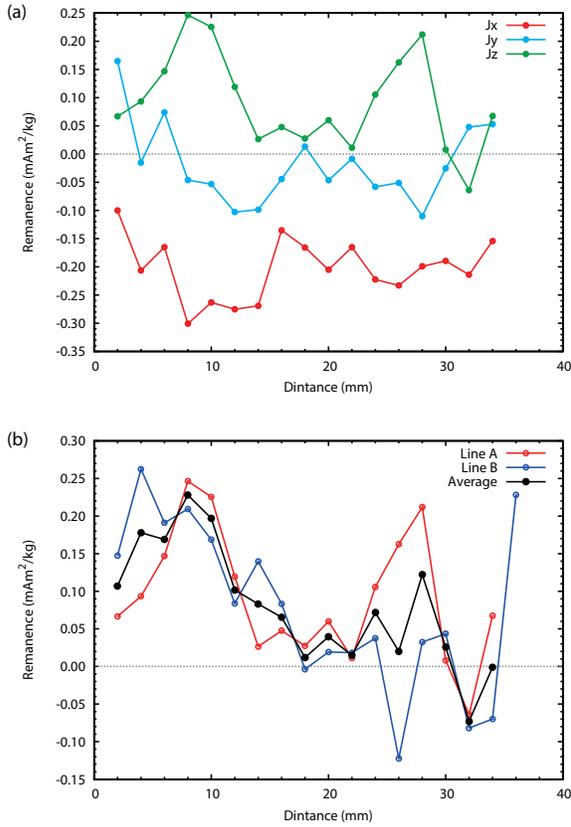


Figure 6. SRM intensity profiles. (a) Line A. (b) Jz components of lines A and B.

Table 1. Summary of the SRM acquisition experiments

Shot #	Projectile	Velocity (km/s)	Target	Applied field (μ T)
3107	ϕ 2 mm Al	7.001	ϕ 10 cm \times L10 cm basalt	100
3108	ϕ 2 mm Al	6.759	ϕ 10 cm \times L10 cm basalt	100
3109	ϕ 2 mm Al	6.765	ϕ 10 cm \times L10 cm basalt	100
3110	ϕ 2 mm Al	6.787	ϕ 10 cm \times L10 cm basalt	0
3111	ϕ 2 mm Al	6.755	ϕ 10 cm \times L10 cm basalt	50
3112	ϕ 2 mm Al	6.783	ϕ 10 cm \times L10 cm basalt	0
3767	ϕ 2 mm Al	7.029	ϕ 8 cm \times L8 cm basalt	100
3768	ϕ 2 mm Al	7.009	ϕ 8 cm \times L8 cm basalt	100
3769	ϕ 2 mm Al	6.994	ϕ 8 cm \times L8 cm basalt	0
3770	ϕ 2 mm Al	6.917	ϕ 8 cm \times L8 cm basalt	0
3771	ϕ 7 mm PC	3.228	ϕ 8 cm \times L8 cm basalt	100
3772	ϕ 7 mm PC	1.339	ϕ 8 cm \times L8 cm basalt	100
3773	ϕ 7 mm PC	1.282	ϕ 8 cm \times L8 cm basalt	100