

研究種目：若手研究（A）

研究期間： 2007 ~ 2009

課題番号：19684017

研究課題名（和文） 局所段階レーザー加熱による惑星磁場研究の地質学的アプローチ

研究課題名（英文） Development of stepwise laser spot demagnetization system and its application to planetary geology

研究代表者 中村 教博（NORIHITO NAKAMURA）

東北大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号：80302248

研究成果の概要（和文）：

先カンブリア代の岩体や衝撃を被ったクレーター・隕石から信頼ある古地磁気情報を得るため、変質・風化・変成部を可能な限り避け、古地磁気情報を保持している部位を選択的にピンポイントで測定することを目的として、スポット段階レーザー加熱消磁装置の開発を行った。この装置では金属への吸収が比較的高い YAG 第2高調波レーザーを使用し、非磁性レーザー照射ユニットによって局所加熱部を光学的に選択した後、2色型放射温度計によって加熱温度をモニターできるようにした。さらに、無磁場・低真空環境下での加熱のため、ビューポート付き試料室をケイ素鋼板で12重覆うことで、25nT で  $10^{-2}$ Torr の加熱環境を作り出すところまで開発が進んだ。

研究成果の概要（英文）：

I have been developing a stepwise laser spot demagnetization system for the application to the micro-paleomagnetic study of pre-Cambrian rocks, shocked crater rocks and meteorites. I employed a Q-switched 30W second harmonic generation Nd:YAG green laser, a digital 2-color pyrometer (300-1000°C) with quartz fiber optics of 600 micrometer and a two-way laser irradiation unit with CCD camera. This laser demagnetization system allows us to stepwisely heat the individual spot area in oriented thin sections. As a sample holder, I developed a X-Y stage controlled vacuum chamber with quartz glass viewport embedded into horizontally-lying 12-folded cylindrical silicon steel. The target sample is hold in a very weak ambient magnetic field of 25nT with  $10^{-2}$ Torr vacuum condition. In addition to laser demagnetization system, I have conducted a micro-paleomagnetic study of shock melt veins in Tenham chondrite and fault gouge samples of Chelungpu fault and Nojima fault, by using a supersonic cutter blade. Through these studies, I found that shock melt veins are a reliable magnetic recorder of ambient field during ancient parent-body collisions, and fault gouge are also a reliable recorder for the earthquake faulting. Although these new techniques of laser demagnetization and micro-paleomagnetic study are powerful, the Pre-Cambrian rocks and meteorites have still suffered metamorphism for a long time scale. Traditional Neel theory of magnetization tells us that single domain magnetic particles relax its remanent magnetization to energetically stable condition in an exponential function of temperature and time. However, it is often that natural magnetization data is not consistent with the theory, being due to metamorphism. To interpret the natural data, I have extended the Neel theory to a stretched exponential function, and derived a new non-linear time-temperature relation for metamorphosed rocks and meteorites.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	13,400,000円	4,020,000円	17,420,000円
2008年度	5,700,000円	1,710,000円	7,410,000円
2009年度	500,000円	150,000円	650,000円
年度			
年度			
総計	19,600,000円	5,880,000円	25,480,000円

研究分野:数物系化学

科研費の分科・細目:地球惑星科学・地質学

キーワード:古地磁気、局所レーザー消磁、隕石、先カンブリア代、衝撃、クレーター

1. 研究開始当初の背景

ダイナモ作用による自発的な磁場を持たない小惑星ガスプラの磁気圏や月面の局所的な磁場異常域(レイナーガンマ)の成因を説明する仮説として、衝突プラズマ磁場生成仮説が有力視されている[Hood et al. 2001]。一方、地震時に断層から雷に似た発光現象が報告されていて、この現象を説明するために地震電流仮説が提案されている[Enomoto and Zheng 1998]。これらの仮説はどちらも岩石が高速摩擦する際に電子が飛び出し、周りの気体や衝突ダストを電離させ、低温プラズマ磁場が発生するという実験結果に基づいている。しかしながら、実験室スケールの現象が自然界のスケールまで外挿できるのかについてスケーリング則も確立されていない。これらの仮説を検証することで、プラズマ磁場生成のスケーリング則を確立でき、月ダイナモや地震電磁気現象の有無のなぞに制約を加えることが期待される。

小天体の衝突や地震時の摩擦溶融によって、シュードタキライトと呼ばれる岩石が隕石クレーター近傍や断層面に形成されることが知られている。このことは、隕石衝突時や地震時の瞬間的な磁場環境を熱残留磁化として保存していることを予想させる。したがって、岩石の磁化から当時の磁場を復元(古磁場強度推定実験)することで、上記仮説の地質学的かつ定量的な検証が可能になる。これまでの標準的な古地磁気学の測定試料では、微小なシュードタキライト脈が入り混じってしまったり、地震断層ガウジ中に1~2mm間隔でシュードタキライトが発達したりするため、形成時期の異なる磁化がすべて平均化されてし

まう問題点があった。そこで、より幅の狭いシュードタキライトの磁化を用いて仮説を検証する必要があるため、これまでに超音波振動カッターを用いて母岩とシュードタキライト部を切り分け、超伝導磁力計(SQUID)で磁化を測定したり、走査型磁化ベクトル顕微鏡をもちいて鉱物ひとつひとつの磁化を測定することを試みてきている。

岩石や隕石の磁化は熱活性化過程によって獲得され、熱活性に強い磁化は岩石が形成された当時の磁場環境を保存するため、岩石が形成されてから磁化を担う鉱物に変質や新規成長をこうむっていないならば、原始太陽系形成時の磁場強度すら段階的に隕石を加熱することで復元できる。そこで、今回スポットレーザー段階加熱装置の開発を試み、走査型磁化ベクトル顕微鏡と電子顕微鏡によって特定した数ミリ程度の磁性鉱物の集合体のみをスポット加熱することで不必要な熱変質を防ぎつつ、過去の磁場環境を復元することを試みる。

2. 研究の目的

この研究の目的は、隕石衝突や断層運動に伴って生成される衝突熔融脈やシュードタキライトをもちいて、衝撃時・地震時に生成すると考えられているプラズマ磁場の存在を地質学的に検証することである。しかし、この存在仮説が研究によって否定されたとしても、衝撃熔融脈やシュードタキライトの持つ微細磁化情報は隕石母天体がダイナモ運動をしていたのか? [研究業績1]や、初期地球のダイナモ運動の変遷を解明する大変重要なデータを提供してくれる点で、効果的に研究を進めることができる。また、現在開

発中の走査型磁化顕微鏡と申請の局所段階レーザー加熱装置の併用によってこの微細磁化情報を読み解くアイデアは、国内外でいまだ実施されていないばかりでなく、同位体顕微鏡や赤外顕微鏡からも分かるとおり、地球惑星科学にとって非常にパワフルな分析方法である[研究業績 3,4]。この分析方法によって、初期地球や隕石と言ったシビアな変質を被っている、変質を偶然免れた部分だけをピックアップして磁化測定できる。このように本研究を遂行する上での具体的な工夫によって、仮説の検証に必要な局所段階レーザー加熱装置と走査型磁化顕微鏡の技術開発をおこなってゆく。

### 3. 研究の方法

#### (1) グリーンレーザーの集光加熱装置と測定位置あわせシステムの組み上げ

グリーンレーザーと非磁性レーザー加工同軸ユニットを非磁性のアルミ合板製の本体に組み上げ、走査型磁化顕微鏡の磁気異常位置をレーザー照射により、スポット加熱できるようにする。

#### (2) 衝撃雲堆積物・シュードタキライト試料の採取とその古地磁気解析

このシステムを天然岩石・隕石に応用し、本格的にデータ計測を行いつつ、システム調整を行い、1)無磁場空間の位置と強度の設定、2)均質な温度制御、3)加熱用標準試料の作成と4)原生代岩脈の試料採集調査を実施する。均質な温度制御に際し、PDI 制御型温度調整器と赤外放射温度計を組み合わせ、 $\pm 10^{\circ}\text{C}$  (可能なら $\pm 5^{\circ}\text{C}$ )以内で加熱温度制御するプログラムを記述する。

### 4. 研究成果

(1) スポット段階レーザー加熱消磁装置の開発: これまでに岩石薄片がもつ残留磁化の表面分布を測定するための走査型MI磁場顕微鏡を開発してきたが、得られた表面磁化分布の各ポイントを段階的にレーザー加熱するために、YAG 第二高調波レーザーと2色型放射温度計を組み合わせた消磁装置を開発した。これは世界初の試みである。

(2) ヴェデフォートクレーター花崗岩の異常磁化: 予察的に実施したレーザー加熱部の残留磁化鉱物を同定するために薄片の化学分析を行った結果、一般的な花崗岩より1ケタ以上強い磁化を有する鉱物が黒雲母の衝撃による細粒

磁鉄鉱への変態であることが判明した。この結果は、これまで強い磁化の原因として衝撃石英中の針状磁鉄鉱が考えられてきたことを覆すもので、この異常な磁化の成因として考えられている衝突プラズマ磁場仮説の再検討を示唆する。

(3) 台湾地震断層コア試料の異常磁化と電流仮説: 1999 年台湾・集集地震の起震断層を貫く掘削コアの古地磁気分析を行った結果、過去の地震で熔融したと考えられるBMディスクが逆帯磁していることを見出し、BMディスク形成年代が78 万年より古いこと示した。さらに、地震時に変位した断層ガウジ帯近傍で摩擦熱では説明できない強い残留磁化を発見し、断層運動時に地下深部で高電流が生成したとする仮説を提唱した。

(4) 衝撃溶融脈の磁化: 隕石母天体相互衝突時に生成する衝突溶融脈はその当時の磁場情報を安定に保持している可能性がある。そこで、テンハム隕石中に発達する高圧鉱物相有する衝突溶融脈だけを選択的に取り出し、高圧鉱物相の保存と古地磁気消磁実験から制約される金属鉄の再磁化の温度-時間関係(再磁化に関する温度と時間の相互換算関係)から、衝突溶融脈形成後に大規模な熱履歴を被っていないことを提示した。

(5) ナノサイズ磁鉄鉱の非線形温度-時間関係: 隕石や先カンブリア代の岩石はどれだけ選り分けても少なからず変成作用を被っている。古典的にNeelの磁性理論は、単磁区粒子の残留磁化の緩和が温度と時間の指数関数に依存すると教える。しかし、天然の磁性鉱物は理想的な単磁区粒子ではないため、磁化の緩和がストレッチ指数関数にしたがう。そこで、このストレッチ指数関数的な磁化緩和理論を応用し、変成作用を被った磁化の非線形な温度・時間関係を定式化し、これまで理論から逸脱するとされてきた天然試料のデータを説明した。

(6) 花崗岩の単結晶古地磁気強度測定と白亜紀スーパーカロン: 北上山地五葉山花崗岩中の極微小離溶磁鉄鉱を含む斜長石単結晶は、斜長石自身が変質から極微細離溶磁鉄鉱を守るため、過去の地球磁場強度を復元するための好材料であるが、これまで強度を復元した例はない。そこで、分離した単結晶を超電導量子干渉型磁力計によって、白亜紀スーパーカロン時の地球磁場強度を推定し、その強度が現在の地球磁場強度と変わらず、ダイナモ活動が活発であったことを示した。

(7) インド産シュードタキライトの微細鉱物組織と岩石磁気: 北インドで発見された先カンブリア紀のシュードタキライト様の岩石について、光学顕微鏡と電子顕微鏡による結晶微細組織観察を実施し、源岩である花崗岩と同様な化学組成を持ち、針状の角閃石・斜長石の微結晶からなることを見出した。これは、本岩体が摩擦発熱により源岩が溶融し、急冷することで形成されたシュードタキライトであることを意味している。溶融急冷した岩石は、岩石形成時の地球磁場を記録することをこれまでに示してきている。そこで、本岩体の岩石磁気情報を計測し、非常に強く磁化している試料と非常に弱く磁化している試料を見出し、これらの違いが結晶微細組織に強く関係していることを示した。

(8) 火星の地殻磁気異常と地下熱水系の研究: 日本の次期火星探査計画では、着陸機と周回機の2機編成での探査が予定されている。着陸機でのサイエンスミッションを提案するべく、大学院生の臼井氏とともに、火星の磁気異常、地下熱水系と変質作用との関連性についての研究レビューを行った。火星地殻には地球の10倍以上もの強い磁気異常帯が存在することが知られている。その磁気異常の原因として、鉄炭酸塩の熱分解による磁鉄鉱生成を提案する。最近、マーズリコネッサンスの赤外分光探査により、磁気異常を示しているNili Fossae地域で、炭酸塩岩が火星表層に分布していることが確認された。(Ehlmann2008)また、熱力学的には、水が存在し、高い二酸化炭素分圧を示す環境下において、鉄炭酸塩であるシデライト( $\text{FeCO}_3$ )が析出することが知られている(Catling1999)。さらに、シデライトは熱分解することでナノサイズの磁鉄鉱を生成することが、これまでの再現実験で知られている。しかし、これまでの再現実験において、生成物の電磁気特性は調べられていなかった。一方、Nili Fossae地域の磁気異常は地下10kmまでの地殻が10~20A/m以上の残留磁化を持てば説明できる。そこで、シデライトの熱分解実験を実施し、シデライト( $\text{FeCO}_3$ )の熱変成作用によって生成された磁鉄鉱が、10A/m以上の強い磁化を獲得、長期保持できるかどうかを再現実験によって実証した。

##### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計11件)

<ISI登録誌の査読付き学術論文>

- 1) N. Nakamura, Okuno, K., Uehara, M., Ozawa, T., Tatsumi-Petrocholis, L. and Fuller, M. (2010), Coarse-grained magnetites in biotite as a possible stable remanence-carrying phase in Vredefort granites, *GSA Special Paper "Large Meteorite Impacts and Planetary Evolution IV"*. ,in press
- 2) Y. Sato and N. Nakamura (2010), Shock melt veins of Tenham chondrite as a possible paleomagnetic recorder: rock magnetism and high-pressure minerals, *Geochemistry, Geophysics, and Geosystems.*, v. 11, Q04Z16, 1-15, doi:10.1029/2009GC002937.
- 3) Y. Usui and N. Nakamura (2009), Nonlinear thermoremanence corrections for Thellier paleointensity experiments on single plagioclase crystals with exsolved magnetites: a case study for the Cretaceous Normal Superchron, *Earth, Planets and Space.*, 61, 1327-1337.
- 4) Mishima, T., Hirono, T., Nakamura, N., Tanikawa, W., Soh, W. and Song, S. R., (2009), Changes to magnetic minerals caused by frictional heating during the 1999 Taiwan Chi-Chi earthquake, *Earth Planets Space*, 61, 797-801.
- 5) Uehara, M. and Nakamura, N. (2008), Identification of stable remanence carrier through a magneto-impedance (MI) scanning magnetic microscope. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 52, 211-223, 2008.
- 6) Y. Hashimoto, O. Tadaï, M. Tanimizu, W. Tanikawa, T. Hirono, W. Lin, T. Mishima, M. Sakaguchi, W. Soh, S. R. Song, K. Aoike, T. Ishikawa, M. Murayama, K. Fujimoto, T. Fukuchi, M. Ikehara, H. Ito, H. Kikuta, M. Kinoshita, K. Masuda, T. Matsubara, O. Matsubayashi, K. Mizoguchi, N. Nakamura, K. Otsuki, T. Shimamoto, H. Sone, and M. Takahashi (2008), Characteristics of chlorites in seismogenic fault zones: The Taiwan Chelungpu fault Drilling Project (TCDP) core sample, *eEarth*, v. 3, 1-6.
- 7) Kawada, K., Nagahama, H. and Nakamura, N. (2007), Time-scale invariance in preseismic electromagnetic radiation,

magnetization and damage evolution of rocks. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 7, 599-606.

- 8) M. Ikehara, T. Hirono, O. Tadai, M., Sakaguchi, H. Kikuta, T. Fukuchi, T. Mishima, N. Nakamura, K. Aoike, K. Fujimoto, Y. Hashimoto, T. Ishikawa, H. Ito, M. Kinoshita, W. Lin, K., Masuda, T. Matsubara, O. Matsubayashi, K. Mizoguchi, M. Murayama, K. Otsuki, H. Sone, M. Takahashi, W. Tanikawa, M. Tanimizu, W. Soh and S. R. Song (2007), Low total and inorganic carbon contents within the Chelungpu fault system. *Geochemical Journal*, v. 41, 391-396.
- 9) M. Uehara, and N. Nakamura (2007), Scanning magnetic microscope system utilizing magneto-impedance (MI) sensor for non-destructive diagnostic tool of geological samples. *Review of Scientific Instruments*, v. 78, 043708-1~6, doi:10.1063/1.2722402.

<ISI 登録誌以外の査読付き学術論文>

- 1). 徐 垣・谷川 亘・廣瀬丈洋・林 為人・谷水雅治・石川剛志・廣野哲朗・中村教博・三島稔明・En-Chao Yeh・Sheng-Rong Song・Kuo-Fong Ma, (2009), 1999 年台湾集集地震を引き起こしたチェルンブ断層の深部掘削の成果概要-明らかになってきた断層岩の物質科学と今後の課題-, *地質学雑誌*, v. 115, pp. 488-500.

(ISI 登録誌以外の査読付き論文)

- 1) 須藤彰三, 長谷川琢哉, 本堂毅, 中村教博, 田嶋玄一, (2007), 理科実験の文科系学部開講, *大学の物理教育*, v. 13, 151-155.

[学会発表](計 15 件)

(国内会議)

- 1) 宮崎敏哉, 中村教博, Pati J. (2009), 北インドJhansi地域の巨大シェードタキライトの微細鉱物組織と岩石磁気, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 2009年9月26日-29日金沢, ポスター
- 2) 中村教博・臼井洋一 (2009), Subsurface hydrothermal system and the origin of Martian magnetic anomaly, 地球惑星連合大会, 2009年9月26日-29日, 幕張, ポスター
- 3) 佐藤雄伍・中村教博 (2009), 鉄ニッケル合

金と高圧鉱物の温度-時間関係とショックベインの古地磁気記録, 地球惑星連合大会, 2009年9月26日-29日, 幕張, ポスター

- 4) 中村教博・大槻憲四郎・鹿島雄介・遠藤溪・中里翔・石山達也・今泉俊文・越谷信, 岩手・宮城内陸地震の変動地形と餅転-細倉構造帯 (2008) 日本地質学会第 115 年学術大会, 2008年9月20日-22日, 秋田市, ポスター
- 5) 中村教博, 岩石磁気とJahn-Teller効果 (2008) 岩石磁気・古地磁気夏の学校, 2008年9月15日-17日, 東松島市, 口頭
- 6) 中村教博, ナノ磁性体のフラクタル温度-時間関係式とそのカマサイト磁化への応用 (2008) 地球惑星科学関連学会, 2008年5月26日-30日, 幕張, ポスター
- 7) 中村教博 (2008) 台湾チェルンブ断層掘削試料中の磁性鉱物組成とEBSD解析: 古地磁気学との複合研究, 全国共同利用研究成果報告会, 高知コアセンター, 1/26.
- 8) 植原 稔, 中村教博 (2007) (招待講演) 磁気顕微鏡による太陽系最古の残留磁化への新たなアプローチ, 地球電磁気・地球惑星圏学会第 121 回総会・講演会, 9/30, 名古屋大学・野依記念学術交流館

(国際会議)

- 1) Tachibana, S., Nakamura, N., Mishima, T., Hirono, T., Soh, W., Song, S. and TCDP team (2009) High remanence intensity of breccia samples: Taiwan Chelungpu-fault Drilling Project (TCDP), 2009 AGU fall meeting, 14-18, December, San Francisco, USA, Poster
- 2) Tachibana, S., Nakamura, N., Mishima, T., Hirono, T., Soh, W., Song, S. and TCDP team (2009) Anomalous Magnetization of Brecciated Samples from the Taiwan Chelungpu-fault Drilling Project (TCDP), 2009 AGU Joint Assembly 24-27, June, Toronto, Canada, Poster
- 3) Nakamura, N. and Koseki, Y., (2008) Fractal Time-Temperature relations in magnetite nanoparticles, International Conference on Rock Magnetism, June 1-9, Corsica, France, Poster
- 4) Uehara, M. and Nakamura, N., (2008) Development of an adjustable bias field MI magnetic microscope and observation of NWA 1756 (LL3.10) primitive ordinary chondrite, European Geoscience Union General Assembly, April 13-18, Vienna, Austria, Poster

- 5) Nakamura, N., Uehara, M., Mishima, T., Hirono, T., and TCDP team (2008), Anomalous magnetization of fault gouges recovered from Taiwan Chelungpu-fault Drilling Project (TCDP), European Geoscience Union General Assembly, April 13-18, Vienna, Austria, Oral
- 6) Nakamura, N., Uehara, M., Mishima, T., Hirono, T., and TCDP hole B group (2007), Paleomagnetism of the TCDP core samples and its implication to underground geocurrent, International symposium on "Dynamic Earth: its origin and future", Sendai, 9/18-9/21.
- 7) Sato, Y. & Nakamura, N. (2007), Shocked melt veins as recorders of paleomagnetic field on an asteroidal parent-body, International symposium on "Dynamic Earth: its origin and future", Sendai, 9/18-9/21.

[図書] (計 2 件)

- 1) 東北大学自然科学総合実験テキスト編集委員会 編, (2008), 2008年自然科学総合実験テキスト「課題3, 重力加速度の測定を通してみた地球」, p.45-59, 著者: 中村 教博, 長谷川琢哉, 東北大学出版会.
- 2) 東北大学自然科学総合実験テキスト編集委員会 編, (2008), 文科系のための自然科学総合実験「課題1, 温暖な地球と温室効果」, p.9-20, 著者: 中村教博, 関根勉, 長濱裕幸, 東北大学出版会.

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

中村 教博 (NAKAMURA NORIHIRO)  
東北大学・大学院理学研究科・助教  
研究者番号:80302248

### (2)研究分担者

( )

研究者番号:

### (3)連携研究者

( )

研究者番号: