

令和元年6月15日現在

機関番号：82626

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K13876

研究課題名(和文) 樹木年輪に記録された地磁気・地球環境変動のSQUID顕微鏡による超高分解能復元

研究課題名(英文) Ultra high resolution reconstruction of geomagnetic and environmental variations recorded in tree rings with SQUID microscope

研究代表者

小田 啓邦(Oda, Hirokouni)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・地質調査総合センター・上級主任研究員

研究者番号：90356725

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、SQUID磁気顕微鏡を用いて、樹木試料断面の磁気特性の連続測定を行った。高感度分析のために装置の信号対雑音比の向上と埃粒子を排除した清浄環境で測定を行った。分析試料には、伐採した直径30cm程度の赤松樹木の樹幹を用い、樹皮表層から約4cm厚さ1mmを切り出して、両面を研磨した。自然状態の表面磁場は平均0.2nT程度以下であった。2Tの強磁場で試料に鉛直上向きの人孔磁場で着磁すると、年輪と平行な約数nTの表面磁場が確認された。磁場が強い部分は春目部分(成長が速く、密度が低く色が薄い部分)であることがわかった。春目部分には赤茶色の斑点も散見され、磁気信号との関連性が示唆される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、赤松の樹幹部分の年輪から年変動に対応する磁気特性の変動が確認された。都市部の樹木の葉に吸着された自動車のエンジンや工場などに起因する磁性微粒子の研究は多くされているが、樹幹の年輪に対応する磁気特性の年単位・季節単位変動の研究は初めてであり、SQUID磁気顕微鏡による高感度・高分解能分析で初めて明らかとなった。磁気シグナルが春目部分に見られること、赤茶色の斑点に対応することについて、赤松に特有の現象であるのか、自然現象であるのか、都市部の環境に関連するのか、そのメカニズムの解明が今後の課題である。

研究成果の概要(英文)：We conducted continuous magnetic imaging of a thin section of a tree using scanning SQUID microscope. For the purpose of high sensitivity measurements, we improved signal-to-noise ratio and measurements were performed in a clean environments without dust particles. We prepared 1mm thickness sample of a tree trunk of a red pine of 4 cm length from the bark and polished on both sides. Surface magnetic fields were less than about 0.2 nT as natural state. After exposing to a vertical magnetic field of 2T, surface magnetic fields of a few nT were observed as stripes parallel to the annual growth rings. Strong magnetic field corresponds to spring layers with high growth composed of less dense material. Spring layer has reddish brown spots, which might be related to the strong magnetic signals observed.

研究分野：地球惑星科学

キーワード：樹木年輪 赤松 SQUID磁気顕微鏡 春目 夏目 磁気イメージング 自然残留磁化 等温残留磁化

1. 研究開始当初の背景

本研究では、研究代表者・研究分担者が金沢工業大学と共同開発した国産初の地質試料用 SQUID 顕微鏡を用いて、樹木試料断面の磁気特性連続プロファイルを測定し、過去100年間の環境変動記録を年単位・季節単位での超高時間分解能で復元を行う。SQUID 顕微鏡は100 μm スケールで試料が発生する微弱な磁場（検出ノイズレベル \sim 10pT）を2次元マッピングすることが可能である。樹木試料を用いた環境変動研究として、大気中人工磁性微粒子による樹木の汚染状況の研究例はあるが、年輪が保持する磁気イメージを測定した研究例は無く、樹木の年輪と高分解能磁気イメージを対応させることは意義深い。

2. 研究の目的

年単位・季節単位における高分解能古環境記録の復元は、地球環境システム研究において極めて重要な研究課題である。樹木の年輪は年単位・季節単位で成長するため、樹木試料は長時間分解能の地磁気・地球環境変動復元研究に適している。そこで本研究では、申請者が開発したSQUID（超伝導量子干渉素子）顕微鏡を用いて、樹木試料断面の磁気特性連続プロファイルを測定する事で、過去100年間の環境変動記録を年単位・季節単位の超高時間分解能で復元を目指した。

3. 研究の方法

本研究では、研究代表者・研究分担者が金沢工業大学（河合淳 研究協力者）と共同開発したSQUID（超伝導量子干渉素子）顕微鏡（Kawai et al., 2016; Oda et al., 2016）を用いて、樹木試料断面の磁気特性連続プロファイルを測定する事で、過去の環境変動記録を年単位・季節単位の超高時間分解能で復元を試みた。樹木年輪の高感度分析のために SQUID 顕微鏡の改善を行い、サファイアウィンドウの窓を大きくすること、サファイアロッド周辺の断熱の最適化を行った。SQUID チップと試料の距離を最短で約 190 μm に縮めること、および感度を高めることができた。また、ノイズカットトランスや電磁シールドを導入してノイズ低減し、さらに参照センサにより外部擾乱ノイズやドリフトを差し引き感度の向上を図った。空気中のダスト粒子による磁性物質のコンタミを避けるために試料準備のためにクリーンブースの導入も行った。

分析試料としては、産業技術総合研究所構内において、2017年2月頃に伐採された樹齢45年程度で年輪の直径30cm程度の赤松樹木を用いた。樹皮近傍の表層試料（厚さ1mm）について4cmほど切り出したブロック試料（試料27-4-2；年輪約25年分）の両面をサンドペーパーで研磨し、スライドガラスにアルコワックスを用いて60 $^{\circ}\text{C}$ で溶着し、自然残留磁化および10mTで交流消磁後のSQUID顕微鏡による分析を行った。また、非履歴性残留磁化の着磁を直流磁場50 μT 、交流磁場80mTの条件で行い、走査型SQUID顕微鏡による分析を行った。さらに、2Tの磁場で等温残留磁化の着磁を行い、SQUID顕微鏡による分析を行った。

4. 研究成果

自然残留磁化そのまま、自然残留磁化を10mTで消磁した後、さらに非履歴性残留磁化を着磁後の3種類の測定結果、いずれの分析においても樹木年輪が速く生長する時期につくられた春目の部分に選択的に磁気ダイポールが見られた。しかしながら、全体的に信号が弱く（平均的磁場値は \pm 0.2nT程度以下）、上記春目部分の磁気ダイポールは空気中ダスト粒子によるコンタミの可能性が疑われたため、サンドペーパーと耐水研磨紙で試料表面を再度研磨し、試料溶着面側

方にはみ出たアルコワックスをセラミックナイフで削り落とし、等温残留磁化を強く着磁させることで S/N 比を向上させた。

等温残留磁化（試料上向きに着磁）の磁気マップ（200 μ m グリッド測定）を図 1 に示す。一部コンタミと思われる試料切断部（上端）の強いダイポール状磁場 2 か所を除いて、発生磁場は概ね \pm 数 nT の範囲に収まる。上向きの磁場（赤色年輪に沿って強い磁場を示す）は年輪に沿ってストライプ状に分布する。年輪の春目と夏目の境界がわかるように黒実線（夏目 春目）と紫破線（春目 夏目）でなぞって磁気マップに重ね合わせると、右側が黒実線、左側が紫破線となる領域が特に赤くなっていることがわかる。すなわち、樹木の生長が速い春目部分が選択的に強く磁化していることになる。光学画像を拡大してみると、春目部分には赤茶色～赤黒色の斑点が散見され、これら斑点のいくつかはダイポールの磁気異常の中心となっていることが確認できる。赤松の春目が成長する部分に選択的に鉄分（磁性物質）が濃集している可能性が示唆されるが、そのメカニズムについては今後の検討が必要である。

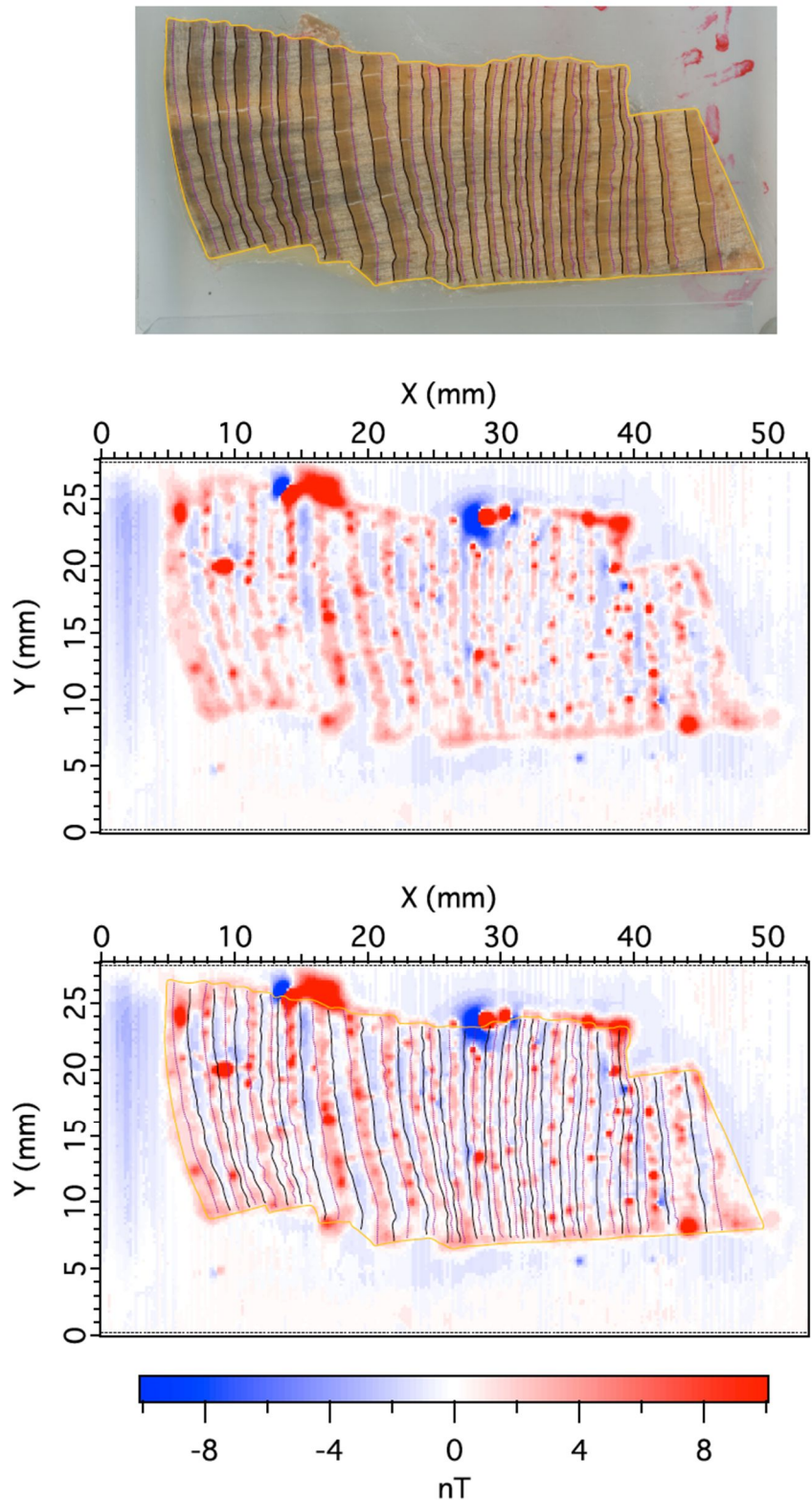


図 1 . 等温残留磁化着磁後の赤松試料。(上)光学画像、黄実線は輪郭、左が樹木の表皮部分、黒実線は右側の夏目（色が濃い部分）から左の春目（色が薄い部分）に移り変わる境界、紫破線は春目から夏目に移り変わる境界を示す。(中)磁気画像、赤が上向き、青が下向きの磁場を示す。(下)磁気画像に輪郭と春目-夏目の境界線を重ね合わせたもの。

<引用文献>

H. Oda, J. Kawai, M. Miyamoto, I. Miyagi, M. Sato, A. Noguchi, Y. Yamamoto, J. Fujihira, N. Natsuhara, Y. Aramaki, T. Masuda and C. Xuan, Scanning SQUID microscope system for geological samples: system integration and initial evaluation, *Earth Planet. Space*, **68**, 2016. DOI: 10.1186/s40623-016-0549-3
J. Kawai, H. Oda, J. Fujihira, M. Miyamoto, I. Miyagi and M. Sato, SQUID Microscope with Hollow-Structured Cryostat for Magnetic Field Imaging of Room Temperature Samples, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **26**, 2016, DOI: 10.1109/TASC.2016.2536751

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計6件)

H. Oda, Y. Nakasato and A. Usui, Characterization of marine ferromanganese crust from the Pacific using residues of selective chemical leaching: Identification of fossil magnetotactic bacteria with FE-SEM and rock magnetic methods, *Earth Planet. Space*, **70**, 165, 2018, 査読有, DOI: 10.1186/s40623-018-0924-3
N. Noguchi, Y. Yamamoto, K. Nishi, A. Usui and H. Oda, Paleomagnetic study of ferromanganese crusts recovered from the northwest Pacific - testing the applicability of the magnetostratigraphic method to estimate growth rate, *Ore Geology. Rev.*, **87**, 16-24, 2017, 査読有, DOI: 10.1016/j.oregeorev.2016.07.018
N. Noguchi, H. Oda, Y. Yamamoto, A. Usui, M. Sato and A. Kawai, Scanning SQUID microscopy of a ferromanganese crust from the northwestern Pacific: Submillimeter scale magnetostratigraphy as a new tool for age determination and mapping of environmental magnetic parameters, *Geophys. Res. Lett.*, **44**, 5360-5367, , 2017, 査読有, DOI: 10.1002/2017GL073201
T. Fukuzawa, N. Nakamura, H. Oda, M. Uehara and H. Nagahama, Generation of billow-like wavy folds by fluidization at high temperature in nojima fault gouge: microscopic and rock magnetic perspectives, *Earth Planet. Space*, **69**, 1-10, 2017, 査読有, DOI: 10.1186/s40623-017-0638-y
H. Oda, J. Kawai, M. Miyamoto, I. Miyagi, M. Sato, A. Noguchi, Y. Yamamoto, J. Fujihira, N. Natsuhara, Y. Aramaki, T. Masuda and C. Xuan, Scanning SQUID microscope system for geological samples: system integration and initial evaluation, *Earth Planet. Space*, **68**, 2016. 査読有, DOI: 10.1186/s40623-016-0549-3
J. Kawai, H. Oda, J. Fujihira, M. Miyamoto, I. Miyagi and M. Sato, SQUID Microscope with Hollow-Structured Cryostat for Magnetic Field Imaging of Room Temperature Samples, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **26**, 2016, 査読有, DOI: 10.1109/TASC.2016.2536751

[学会発表](計22件)

小田 啓邦 (他2名), Magnetic Moment Measurements using Scanning SQUID microscope: Noise Reduction and Calibration, 日本地球惑星科学連合2018年大会, 2018年.

小田 啓邦 (他5名), Scanning SQUID Microscopy and Its Application to Geological Samples, Asia Oceania Geosciences Society 15th Annual Meeting (招待講演) (国際学会), 2018年.

小田 啓邦, 走査型SQUID顕微鏡による磁気イメージングの地質学への応用, ピカイチ展, 2018年

小田 啓邦 (他5名), 太古から続く地球の鼓動を読み解く 過去の地球磁場を用いた地層の年代推定技術, テクノブリッジフェア2017 in つくば, 2017年.

小田 啓邦 (他1名), SQUID顕微鏡による磁気ダイポールモーメントの測定, 第49回 SGEPSS地磁気・古地磁気・岩石磁気分科会 夏の学校, 2017年.

小田 啓邦 (他6名), Sub-millimeter scale magnetostratigraphy and environmental magnetism of ferromanganese crusts using a scanning SQUID Microscope, 米国地球物理学連合2017年秋季大会 (国際学会), 2017年.

JOHN A. TARDUNO, 小田 啓邦 (他5名), Earth's Paleomagnetosphere and Planetary Habitability, 米国地球物理学連合2017年秋季大会 (国際学会), 2017年.

Zeudia Pastore, 小田 啓邦 (他3名), Geophysical Modelling and Multi-Scale Studies in the Arctic Seiland Igneous Province: Millimeter to Micrometer Scale Mapping of the Magnetic Sources by High Resolution Magnetic Microscopy, 米国地球物理学連合2017年秋季大会 (国際学会), 2017年.

小田 啓邦, Superconducting magnetometer as a tool for mapping magnetic anomalies, International Conference on Rock Magnetism 2017 (招待講演) (国際学会), 2017年.

福沢友彦, 小田 啓邦 (他4名), Characterizations of fault slip zones in Nojima fault gouge by scanning magnetic microscopes, JpGU-AGU Joint Meeting 2017 (国際学会), 2017年.

野口 敦史, 小田 啓邦 (他4名), 走査型SQUID顕微鏡を用いた鉄マンガンクラストの測定: 微細磁気層序による年代モデルの検討, JpGU-AGU Joint Meeting 2017 (国際学会), 2017年.

高橋浩規, 小田 啓邦 (他2名), 北西太平洋域のマンガンクラストの成長速度と微細層序, JpGU-AGU Joint Meeting 2017 (国際学会), 2017年.

John A. Tarduno, 小田 啓邦 (他3名), The first billion years of the geodynamo, JpGU-AGU Joint Meeting 2017 (招待講演) (国際学会), 2017年.

Zeudia Pastore, 小田 啓邦 (他6名), The Ultramafic Complex of Reinfjord: from the Magnetic Petrology to the Interpretation of the Magnetic Anomalies, 欧州地球科学連合2017年大会 (国際学会), 2017年.

Geertje W. ter Maat, 小田 啓邦 (他4名), Rock magnetic properties and magnetic carriers of a deep crustal magmatic system, the Reinfjord Ultramafic Complex, Seiland Igneous Province, Northern Norway, Nordic Geological Winter Meeting 2018 (国際学会), 2017年.

小田 啓邦 (他7名), Scanning SQUID microscope: Current status and future developments, International Workshop on Paleomagnetism (国際学会), 2017年.

小田 啓邦, Scanning SQUID microscope and its application to geological samples, Symposium: Magnetism from Space to Atom (国際学会), 2017年.

小田 啓邦 (他5名), Scanning SQUID microscopy as a new tool for sub-millimeter scale magnetostratigraphy: An application to unveil the growth process of marine ferromanganese crusts and its future, 米国地球物理学連合2016年秋期大会 (国際学会), 2016年.

小田 啓邦 (他5名), 走査型SQUID顕微鏡が拓く古地磁気層序と環境岩石磁気学の新たな可能性, 第2回地球環境史学会年会, 2016年.

河合 淳, 小田 啓邦 (他4名), SQUID顕微鏡における参照SQUIDを用いた環境ノイズ除去の検討, 第77回応用物理学会秋季学術講演会, 2016年.

②1 小田 啓邦 (他5名), SQUID顕微鏡のS/N向上に向けて, 日本地球惑星科学連合2016年大会, 2016年.

②1 Xuan Chuang, 小田 啓邦 (他4名), SQUID顕微鏡による高分解能古地磁気・環境岩石磁気記録の復元, 日本地球惑星科学連合2016年大会 (招待講演), 2016年.

〔その他〕

ホームページ等

<https://unit.aist.go.jp/igg/pgd-rg/SQUID/index.html>

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：佐藤 雅彦

ローマ字氏名：Sato Masahiko

所属研究機関名：国立研究開発法人 産業技術総合研究所

部局名：地質情報研究部門

職名：研究員

研究者番号 (8桁): 50723277

(2)研究協力者

研究協力者氏名：宮原 ひろ子

ローマ字氏名： Miyahara Hiroko

研究協力者氏名：河合 淳

ローマ字氏名： Kawai Jun

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。