

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 9 月 16 日現在

機関番号：16401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540455

研究課題名(和文) 磁化率周波数スペクトル解析法の開発と応用

研究課題名(英文) Spectroscopy of magnetic susceptibility: Development and application

研究代表者

小玉 一人 (Kodama, Kazuto)

高知大学・自然科学系・教授

研究者番号：00153560

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：磁性ナノ粒子の動的磁化過程を明らかにするための機器開発と基礎実験を行った。その結果、ヒステリシスに相当するM-H曲線が得られ、従来の振動磁力計による方法よりもはるかに短時間で自然試料の飽和磁化や保磁力を測定することが可能となった。これら一連の研究成果をもとに、中国黄土層を対象に磁化率周波数スペクトル研究をすすめ、最終氷期以降の全球気候変動の解明に役立つ高分解能の気候変動指標を提案した

研究成果の概要(英文)：Broad-band magnetic susceptibility (MS) measurement, a novel magnetic method capable of quantifying a narrow grain size distribution (GSD) of superparamagnetic (SP) particles by measuring low-field MS at a number of frequency steps spanning four orders of magnitude, has been developed and tested in a loess/palaeosol section at Luochuan in the Chinese Loess Plateau. The studied succession consists of sequences from the latest palaeosol unit (S0) to the upper part of the loess unit (L2), spanning the last glacial-interglacial cycle. Results indicate that the mean volume of SP particles in this loess/palaeosol sequence tends to increase during the transition from loess weak palaeosol palaeosol, an indication of grain growth as pedogenesis progresses.

研究分野：岩石磁気学

キーワード：岩石磁気 環境磁気 ナノ粒子 気候変動

1. 研究開始当初の背景

物質に外部磁場を加えると磁化を生ずる。その誘導磁化を外部磁場で割った値が磁化率である。外部磁場も誘導磁化もベクトルなので、その物質が磁氣的異方性をもつなら、磁化率は一般にテンソルになる。しかし自然の岩石や堆積物の多くはこの異方性がごく小さいので、一般に磁化率はスカラーとして扱う。ただし、外部磁場が一定の周波数で振動する交流磁場なら、誘導磁化と外部磁場との間に位相差を生ずるため、磁化率は複素数になる。この位相差は、磁性粒子のサイズや分布、磁区構造などの関数である。しかし市販磁化率計の多くは測定原理上の制約から、複素磁化率の実数成分だけしか測定できず、また一部の可変周波数機能をもつ機器でも、ごく限定された周波数範囲の測定しかできなかった。その結果、磁化率といえば単に磁気ヒステリシス曲線の原点付近の勾配である初期磁化率を指し、試料の磁氣的固さや磁性粒子の多寡をあらわす指標として利用する場合がほとんどであった。そのため、実数成分・虚数成分双方の広帯域周波数スペクトル解析から、複素磁化率が本来もつ多くの情報を抽出可能な新たな分析手法の開発が急務であった。

2. 研究の目的

今日の磁化率測定の普及は、多量の試料を非破壊で短時間に測定できる簡便性によるところが大きい。数百個の個別試料測定から、長寸の堆積物コア試料の連続自動測定まで、多様な測定装置が市販され実用に供されている。しかし上に述べたように、それらは厳密には、磁化率の実数成分のうち特に弱磁場で測定される初期磁化率にすぎない。本研究の目的は、1) 磁化率実数成分と虚数成分双方を広帯域 ($10^2 \sim 10^5$ Hz) で測定できる新磁化率計の開発、2) これによって得られる広帯域周波数磁化率スペクトルから、磁化率に寄与する微細磁性粒子のサイズ分布や磁化構造を推定する手法の開発、3) この新手法を種々の自然試料に適用、4) これらを組み合わせて環境変動研究のための新たな環境磁気指標・古地磁気強度研究に有用な岩石磁性評価方法を提案することにある。

3. 研究の方法

非平衡ブリッジ法を採用した。この方法により、40 Hz～2 kHz の磁化率連続周波数測定が可能となったが、粒子サイズの実用的評価のため、既存磁化率計 (ZH instrument 製, SM100/105) を特に再調整し、多様な磁性をもつ自然試料の磁化率実数成分の広帯域測定を行った。帯域は 125 Hz～512 kHz

と広い。それらは、例えば、a) 従来の方法では単磁区粒子 (SD 粒子) のみからなると推定されるガラス質火山岩の粒子サイズ分布が、ナノサイズの超常磁性粒子 (SP 粒子) に及ぶほど広いこと、b) 中国古土壌 (Paleosol) の SP 粒子サイズには、多くの場合に下限があり、そのサイズは 10 nm 程度であるらしいこと、c) 多磁区粒子 (MD 粒子) のみの花崗岩では、500 kHz 程度までスペクトルが全く平坦で周波数依存性がないこと、d) ある種の火山岩では特定の帯域に磁化率の極大がみられ、それは粒子サイズ分布や磁区構造に起因する磁気共鳴現象をあらわしている可能性が高いこと、などの解明が期待される。

4. 研究成果

磁性ナノ粒子の交流磁化率周波数依存性に関する理論的考察と実験を継続しつつ、時間領域での動的磁化過程を明らかにするための機器開発と基礎実験を行った。その結果、パルス磁場による短時間 (~ 10 ms) の磁化過程と同時に、磁場遮断直後の磁気緩和を計測することに成功した。このパルス磁場中の測定によって、ヒステリシスに相当する M-H 曲線が得られ、従来の振動磁力計による方法よりもはるかに短時間で自然試料の飽和磁化や保磁力を測定することが可能となった。一方、付随する磁気緩和測定から求められる緩和時間は、広帯域交流磁化率測定から推定される特徴的周波数に対応することが分かった。これらの結果は、一部の火山岩の 10kHz 帯にみられる磁化率のピークが、多磁区粒子の磁壁移動に起因する磁気共鳴現象であることを強く示唆する。これら基礎研究の一方、中国黄土層を対象に磁化率周波数スペクトル研究をすすめて、最終氷期以降の全球気候変動の解明に役立つ高分解能の気候変動指標を提案した。さらに、これらの結果をもとに、パルス磁場を利用した時間領域の磁気緩和測定法を提案するに至り、その試作器を製作した。現段階では十分な感度を得られていないが、比較的強磁化の火山岩試料を対象として、M-H 曲線や磁化緩和過程を測定することに成功した。これら一連の結果と機器試作経験は、時間領域測定データの離散フーリエ変換による周波数スペクトル構築という新たな研究方法の発案とその基礎理論の構築という展開に至った。

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 7 件)

Kodama, K., Measurement of dynamic magnetization induced by a pulsed field: Proposal for a new rock magnetic method. *Frontiers in Earth Science*, 3, 1-9,

2015.

Kodama, K., Z. An, H. Chang, and X. Qiang, Quantification of magnetic nanoparticles with broad-band-frequency magnetic susceptibility measurements: a case study of an upper loess/palaeosol succession at Luochuan, Chinese Loess Plateau. *Geophysical Journal International*, 199, 767-783, 2014.

Abrajevitch, A., A.P. Roberts, and K. Kodama, Volcanic iron fertilization of primary productivity at Kerguelen Plateau, Southern Ocean, through the Middle Miocene Climate Transition. *Palaeoceanography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 410, 1-13, 2014

Kodama, K., Application of broadband alternating current magnetic susceptibility to the characterization of magnetic nanoparticles in natural materials. *Journal of Geophysical Research*, 118, 1-12, 2013.

Abrajevitch, A., R. S. Hori, and K. Kodama, Rock magnetic record of the Triassic-Jurassic transition in pelagic bedded chert of the Inuyama section, Japan. *Geology*, 41, 803-806, 2013

Chang, L., Winkhofer, M., Roberts, A. P., Heslop, D., Florindo, F., Dekkers, M. J., Krijgsman, W., Kodama, K., and Yamamoto, Y., Low-temperature magnetic properties of pelagic carbonates: Oxidation of biogenic magnetite and identification of magnetosome chains. *Journal of Geophysical Research*, 118, 1-17, 2013.

Bolton, C., L. Chang, S. Clemens, K. Kodama, M. Ikehara, M. Medina-Elizalde, G. A. Paterson, A. P. Roberts, E. J. Rohling, Y. Yamamoto, and X. Zhao, A 500,000 year record of Indian summer monsoon dynamics recorded by eastern equatorial Indian Ocean upper water-column structure. *Quaternary Science Reviews*, 77, 167-180, 2013.

〔学会発表〕(計 9 件)

小玉一人, パルス強磁場中の磁化過程高速測定システムとその岩石磁気への応用, 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, パシフィコ横浜

小玉一人, Measurements of the dynamic magnetization in the time domain: A rapid and sensitive tool to characterize magnetic particles in natural materials, AOGS 11th Annual Meeting, ロイトン札幌ホテル

Kodama, K., Frequency spectrum of magnetic susceptibility for quantifying magnetic nanoparticles: a case study of the upper loess-paleosol sequence in Chinese Loess Plateau, Celebes International Conference on Earth Sciences 2014, Kendari (Indonesia)

Kodama, K., Z. An, H. Chang, and X. Qiang, Quantification of magnetic nanoparticles with broadband measurements of magnetic susceptibility in the frequency domain, EGU 2015 Annual Meeting, Vienna (Austria)

小玉一人, Z. An, H. Chang, X. Qiang, 中国黄土中の磁性ナノ粒子に記録された最終氷期・間氷期の高解像度気候変動, 日本地球惑星科学連合2013年大会, 幕張メッセ(千葉市)

Kodama, K., Z. An, H. Chang, X. Qiang, High-resolution climatic variations over the last glacial-interglacial cycle recorded in concentration of magnetic nanoparticles in Chinese loess-paleosol succession, AOGS-AGU (WPGM) Joint Assembly, Brisbane (Australia)

Kodama, K., Z. An, H. Chang, and X. Qiang, Quantification of magnetic nanoparticles with broadband-frequency magnetic susceptibility measurements: High-resolution climatic records from an upper loess/paleosol succession at Luochuan, Chinese Loess Plateau, 2013 American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco (USA)

Kars, M. and K. Kodama, Rock magnetism of gas hydrate-bearing rocks in the Nankai Trough, offshore SW Japan, 2013 American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco (USA)

小玉一人, 交流磁化率の周波数スペクトルとその温度変化にみられる磁気緩和と磁区構造の関係, 第132回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 札幌

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小玉 一人 (KODAMA, Kazuto)

研究者番号 : 00153560

(2) 研究分担者

山本 裕二 (YAMOTO, Yuhji)

研究者番号 : 00452699

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :