

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 16 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400445

研究課題名(和文) 月磁気異常に基づく月地殻古応力場の復元

研究課題名(英文) Paleostress in the lunar crust estimated from the lunar magnetic anomalies

研究代表者

綱川 秀夫 (TSUNAKAWA, Hideo)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：40163852

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：月磁気異常の特徴を用いた月地殻古応力場の研究を行った。本研究で新たに開発したSVM法を適用し、月面上の全球磁気異常図を作成・公開した。多くの磁気異常は伸長した形状であり、伸長方位は表面の地形、地質と相関していない。したがって、伸長磁気異常は月地殻内の貫入岩に起因するものであり、かつ、伸長方位は約40億年前の月地殻応力場を記録していると考えられる。磁気異常伸長方位の全球的分布から、月の自転速度減少と自転軸移動に関連した応力場を推定可能なことを示した。

研究成果の概要(英文)：We have studied restoration of ancient stress field in the lunar crust on the basis of the lunar magnetic anomalies. Using the Surface Vector Mapping (SVM) method newly developed in this study, global maps of the lunar magnetic anomalies have been provided as the open access. The mapping results show many elongated anomalies, directions of which are not correlated with the surface topography and geology. Thus these elongated magnetic anomalies may be carried by intrusive rocks beneath the surface, recording ~4 Ga paleostress of the early Moon. The global pattern of the elongation directions suggests a systematic paleostress related to the de-spinning and/or polar wander of the Moon.

研究分野：地球惑星電磁気学

キーワード：月 磁気異常 応力場 かぐや

1. 研究開始当初の背景

現在の月はグローバル磁場を持たないものの、地殻岩石に由来する磁気異常を示す。磁気異常生成には、磁場の存在と磁化獲得メカニズムとの両方が必要である。近年まで、巨大インパクトで強められた惑星間空間磁場のもとで衝突残留磁化を獲得したという説 (Lin et al., 1983) が有力であった。しかし、Lunar Prospector 衛星観測 (1998-1999) の詳細解析 (Hood, 2010)、Kaguya 衛星観測 (2008-2009) の解析 (Tsunakawa et al., 2010) により、古月ダイナモの存在が認められるようになってきた。特徴的なこととして、推定される磁気異常ソースの磁化強度は月表面岩石の残留磁化よりも 2-4 桁大きく、磁化キャリアとしてインパクト物質を含む衝突放出物の熱残留磁化 (Wieczorek et al., 2010)、あるいは地殻に貫入した岩脈 (Purucker et al., 2011) の熱残留磁化などの考えがある。

申請者が進めてきた高空間分解能の磁気異常 3 成分月面マッピング (例、図 1 参照) では、発達した線状磁気異常が明瞭に見られ、地表下でシート状につながった磁化ソース (岩脈など) が妥当である (Tsunakawa et al., SGEPS 2011, AGU 2012, JpGU 2013)。

岩脈の走向は応力場を反映することから (Nakamura, 1977; Tsunakawa, 1983)、線状磁気異常は月地殻の古応力場をも記録していたことになる。したがって、磁気異常の線状構造から古応力場を復元しよう。

2. 研究の目的

40 億年前の月は現在よりも地球に近い軌道にあり、20-30Re (Re=地球半径、現在 60Re) の公転半径とも推定されている (Abe and Ooe, 2009)。月誕生時の軌道は半径約 3Re のロシュ限界にあり、その後急速に離れたと考えられ、地球潮汐力、自転遠心力は大きく減衰したであろう。地殻の応力緩和が十分でないならば、月地殻に発生したグローバル応力場が発生し、その応力場のもとに岩脈が貫入したであろう。

さらに、月の極が移動したこと、つまり自転軸と月地殻の相対運動があった可能性が高いこともわかってきた。申請者を含む Kaguya 月磁場観測班は、月磁気異常の磁化方位を求める解析を進めてきた。最新の結果では、磁極は 2 つ、あるいは 3 つの地域にまとめ、月には約 40 億年前にダイナモ双極子磁場が存在し、かつ、自転軸と月地殻の相対運動 (極移動) が少なくとも 3 回あったことが強く示唆される。極移動は 90 度近いものであり、比較的短期間でスイッチするように起き、月地殻の応力場は複雑に変化したであろう。

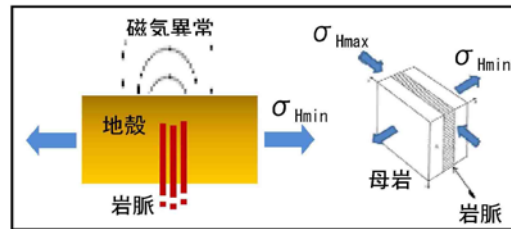
これらの応力場発生要因がどのように作用していたのかを、線状磁気異常の詳細解析から検討できる可能性がある。これまで月古

応力場を観測データに基づきグローバルに解析した研究はなく、地球・月システム進化の新たな情報を得ることを目的とした。

3. 研究の方法

予察研究から、ほとんどの伸長磁気異常は地形と相関はないことが示唆されている。このことから、磁気異常ソースは地下にある貫入岩と考えられ、磁気異常による言わば月地殻構造探査が可能になる。

岩脈などのマグマは、地殻に作用する水平最小応力方向に母岩を押し広げ、水平最大応力方向に伸長する。伸長構造を持つ岩脈などが一様に磁化すると 2 次元的構造となるため、上空での磁場は伸長方向に垂直な成分が卓越する。結果的に、端を除き、磁場方位の偏角は岩脈方位と垂直になる。磁気異常磁場の偏角分布から岩脈方位を推定するためには、高分解能の磁気異常図が必要である。本研究



では、最も高分解能となる月面マッピングを行い、線状構造を確認し、偏角方位の分布を統計的に解析する。

このように、月古応力場の物証として磁気異常の線状構造を用いる。

4. 研究成果

磁気異常の詳細構造が必要であり、様々な高度で観測した人工衛星磁場データから月面上の磁気異常を作成する理論と方法 (SVM 法) を開発した。その Kaguya (KG) 及び Lunar Prospector (LP) の磁場観測データを用いた磁気異常 3 成分の月面マッピングを行った。まず、磁気異常の強い地域と弱い地域の広域マッピングを行って方法を検討し、次の成果を得た (Tsunakawa et al., 2014)。

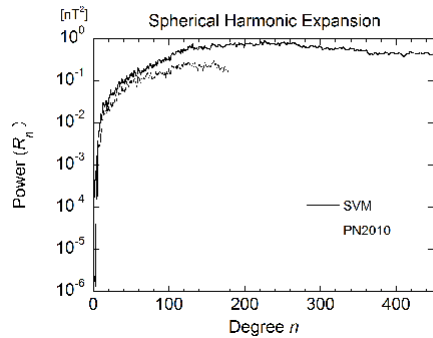
(1) 月面上の 3 成分を推定するインバージョンコードのチューニングを行った。予察時コードからの主な改良点は、動径成分から水平 2 成分を求めるプロセスにおいて、動径成分の水平勾配分布を考慮して精度を上げたことである。

(2) KG 及び LP 各々の観測データにつき、強い磁気異常地域 (月裏側 South Pole-Aitken Basin 北西部) と弱い磁気異常地域 (月表側南半球南東部) を解析し、比較検討した。その結果、1 度角程度まで両者が一致するパターンが得られ、解析法の信頼性を確認した。

(3) 強い磁気異常地域 (South Pole-Aitken Basin 北西部) につき、KG および LP データセットの高度分布に相補性があることから、両方のデータセットを合わせて解析した。そ

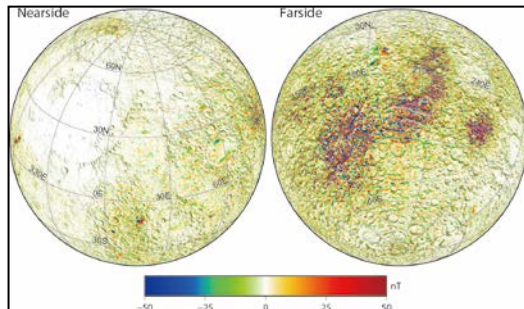
の結果、より詳細な月面磁気異常図を得られた。

(4) 15度×15度の領域で区分した月全球に対し、0.2°グリッドの広域マッピングを行った。次にそれらの広域図を接続し、月全球の月面磁気異常図を作成した。さらに、月面動径成分を用いて、磁気異常の球関数展開(最大450次)を行い、SVM法の結果と比較した。主成分分析の結果、両者とも全体とし



てはほぼ等しいパターンになるものの、球関数展開法では高次項打ち切りによる Gibbs 現象が現れていて、人工的なパターンが付加されてしまうことがわかった。この Gibbs 現象は、月磁気異常が1-3度の幅を持つ細かな構造でピークが立っていることに由来しており、球関数展開法よりも SVM 法が適していることがわかった。

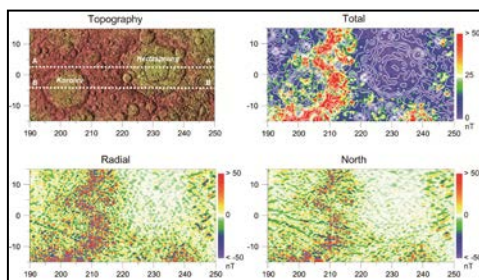
次に、月磁気異常のグローバルマッピングから、以下の成果を得た(Tsunakawa et al., 2015)。



(1) 全磁力最大値は CA 地域の磁気異常にあり、700nT 以上である。一方、雨の海、東の海地域ではゼロに近い。

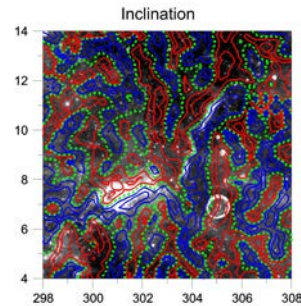
(2) 月磁気異常の全体的な特徴として、細長く伸びていることがあり、幅は約2度である。

(3) 従来の研究で指摘されたクレータにおける消磁効果が、SVM 磁気異常図ではより明瞭に見え、クレータ半径の1-2倍程度の範囲である。



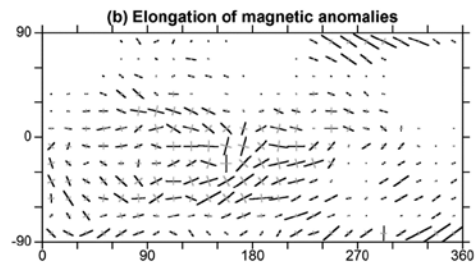
(4) 33-35 億年前の年代が推定されているクレータを SVM 法で解析した結果、いくつかのクレータには中央磁気異常がある。磁気双極子近似で磁化を推定し、月磁極を計算すると3つの地域にまとまる。

(5) 従来の研究で指摘されているように、顕著な高アルベド地域と磁気異常は月表面磁気異常図でもよく対応する。ライナーガンマ磁気異常の詳細検討と他地域の磁気異常から、表面磁場の伏角が水平に近い場所に、高アルベド地域が分布することがわかった。



(6) 伸長磁気異常は、ばらばらに分布しているのではなく、系統的な方向性を持っている。このことは、岩脈など貫入岩が磁気異常ソースとして考えられ、約40億年前の月古応力場を記録していることが示唆される。

(7) SVM 磁気異常図から、磁気双極子近似が妥当と考えられる孤立した微小磁気異常を全球分布から数十個検出し、磁化方位および磁極を推定した。結果として、3つの地域に磁極が集まることがわかり(Takahashi et al.,



2014; 池内他、JpGU2016)、線状磁気異常から推測される古応力場モデルにとって重要な要因となる。

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18件)

- ① Tsunakawa, Hideo; Takahashi, Futoshi; Shimizu, Hisayoshi; Shibuya, Hidetoshi; Matsushima, Masaki, Surface vector mapping of magnetic anomalies over the Moon using Kaguya and Lunar

- Prospector observations, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH-PLANETS, 2015, 120, 1160-1185, 10.1002/2014JE004785
- ② Nakagawa, Tomoko; Nakashima, Tatsuya; Wada, Takuya; Tsunakawa, Hideo; Takahashi, Futoshi; Shibuya, Hidetoshi; Shimizu, Hisayoshi; Matsushima, Masaki; Saito, Yoshifumi, ELF magnetic fluctuations detected by Kaguya in deepest lunar wake associated with type-II protons, EARTH PLANETS AND SPACE, 2015, 67, 50, 10.1186/s40623-015-0196-0
- ③ Nishino, Masaki N.; Saito, Yoshifumi; Tsunakawa, Hideo; Takahashi, Futoshi; Fujimoto, Masaki; Harada, Yuki; Yokota, Shoichiro; Matsushima, Masaki; Shibuya, Hidetoshi; Shimizu, Hisayoshi, Electrons on closed field lines of lunar crustal fields in the solar wind wake, ICARUS, 2015, 250, 238-248, 10.1016/j.icarus.2014.12.007
- ④ Tsugawa, Yasunori; Katoh, Yuto; Terada, Naoki; Tsunakawa, Hideo; Takahashi, Futoshi; Shibuya, Hidetoshi; Shimizu, Hisayoshi; Matsushima, Masaki, Harmonics of whistler-mode waves near the Moon, EARTH PLANETS AND SPACE, 2015, 67, 36, 10.1186/s40623-015-0203-5
- ⑤ Y. Saito, M.N. Nishino, S. Yokota, H. Tsunakawa, M. Matsushima, F. Takahashi, H. Shibuya, H. Shimizu, Night side lunar surface potential in the Earth's magnetosphere, Advances in Space Research, 2014, 54, 1985-1992, doi:10.1016/j.asr.2013.05.011
- ⑥ Takahashi, Futoshi; Tsunakawa, Hideo; Shimizu, Hisayoshi; Shibuya, Hidetoshi; Matsushima, Masaki, Reorientation of the early lunar pole, NATURE GEOSCIENCE, 2014, 7, 409-412, 10.1038/NGE02150
- ⑦ Harada, Yuki; Futaana, Yoshifumi; Barabash, Stas; Wieser, Martin; Wurz, Peter; Bhardwaj, Anil; Asamura, Kazushi; Saito, Yoshifumi; Yokota, Shoichiro; Tsunakawa, Hideo; Machida, Shinobu, Backscattered energetic neutral atoms from the Moon in the Earth's plasma sheet observed by Chandrayaan-1/Sub-keV Atom Reflecting Analyzer instrument, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH-SPACE PHYSICS, 2014, 119, 3573-3584, 10.1002/2013JA019682
- ⑧ Yokota, Shoichiro; Tanaka, Takaaki; Saito, Yoshifumi; Asamura, Kazushi; Nishino, Masaki N.; Fujimoto, Masaki; Tsunakawa, Hideo; Shibuya, Hidetoshi; Matsushima, Masaki; Shimizu, Hisayoshi; Takahashi, Futoshi, Structure of the ionized lunar sodium and potassium exosphere: Dawn-dusk asymmetry, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH-PLANETS, 2014, 119, 798-809, 10.1002/2013JE004529
- ⑨ Tsugawa, Y.; Katoh, Y.; Terada, N.; Ono, T.; Tsunakawa, H.; Takahashi, F.; Shibuya, H.; Shimizu, H.; Matsushima, M., Group-standing of whistler mode waves near the Moon, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH-SPACE PHYSICS, 2014, 119, 2634-2648, 10.1002/2013JA019585
- ⑩ Yokota, Shoichiro; Saito, Yoshifumi; Asamura, Kazushi; Nishino, Masaki N.; Yamamoto, Tadateru I.; Tsunakawa, Hideo; Shibuya, Hidetoshi; Matsushima, Masaki; Shimizu, Hisayoshi; Takahashi, Futoshi; Fujimoto, Masaki; Terasawa,

Toshio, Kaguya observation of the ion acceleration around a lunar crustal magnetic anomaly, PLANETARY AND SPACE SCIENCE, 2014, 93-94, 87-95, 10.1016/j.pss.2014.02.007

- ① Tsunakawa, Hideo; Takahashi, Futoshi; Shimizu, Hisayoshi; Shibuya, Hidetoshi; Matsushima, Masaki, Regional mapping of the lunar magnetic anomalies at the surface: Method and its application to strong and weak magnetic anomaly regions, ICARUS, 2014, 228, 35-53, 10.1016/j.icarus.2013.09.026
- ② Nishino, Masaki N.; Fujimoto, Masaki; Saito, Yoshifumi; Tsunakawa, Hideo; Kasahara, Yoshiya; Kawamura, Mariko; Matsushima, Masaki; Takahashi, Futoshi; Shibuya, Hidetoshi; Shimizu, Hisayoshi; Goto, Yoshitaka; Hashimoto, Kozo; Omura, Yoshiharu; Kumamoto, Atsushi; Ono, Takayuki; Yokota, Shoichiro, Type-II entry of solar wind protons into the lunar wake: Effects of magnetic connection to the night-side surface, PLANETARY AND SPACE SCIENCE, 2013, 87, 106-114, 10.1016/j.pss.2013.08.017
- ③ Harada, Yuki; Machida, Shinobu; Saito, Yoshifumi; Yokota, Shoichiro; Asamura, Kazushi; Nishino, Masaki N.; Tsunakawa, Hideo; Shibuya, Hidetoshi; Takahashi, Futoshi; Matsushima, Masaki; Shimizu, Hisayoshi, Small-scale magnetic fields on the lunar surface inferred from plasma sheet electrons, GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, 2013, 40, 3362-3366, 10.1002/grl.50662
- ④ Shimizu, Hisayoshi; Matsushima, Masaki; Takahashi, Futoshi; Shibuya, Hidetoshi; Tsunakawa, Hideo, Constraint on the

lunar core size from electromagnetic sounding based on magnetic field observations by an orbiting satellite, ICARUS, 2013, 222, 32-43, 10.1016/j.icarus.2012.10.029

[学会発表] (計 30 件)

- ① 高橋 太, 綱川 秀夫, 清水 久芳, 渋谷 秀敏, 松島 政貴: 月の磁気異常とダイナモ, 極移動, 日本地球惑星科学連合大会 (招待講演), 2015 年 05 月 26 日, 幕張メッセ国際会議場 (千葉市美浜区中瀬 2-1)
- ② 中川 朋子, 綱川 秀夫: かぐや衛星による地球磁気圏ローブ中の月周辺のイオンサイクロトロン波の観測, 日本地球惑星科学連合大会, 2015 年 05 月 26 日, 幕張メッセ国際会議場 (千葉市美浜区中瀬 2-1)
- ③ 横山 貴史, 高橋 太, 綱川 秀夫: ライナーガンマ, リマシルサリスでの月磁気異常における表面下の磁化ソース, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 2013 年 05 月 23 日, 幕張メッセ国際会議場 (千葉市美浜区中瀬 2-1)
- ④ 河村 麻梨子, 斎藤 義文, 西野 真木, 上村 洸太, 横田 勝一郎, 綱川 秀夫: 月起源イオンに対する磁気異常の影響, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 2013 年 05 月 23 日, 幕張メッセ国際会議場 (千葉市美浜区中瀬 2-1)
- ⑤ 津川 靖基, 加藤 雄人, 寺田 直樹, 小野 高幸, 綱川 秀夫, 高橋 太, 渋谷 秀敏, 清水 久芳, 松島 政貴: 太陽風中で観測される上流伝搬ホイッスラーモード波動の類似性, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 2013 年 05 月 23 日, 幕張メッセ国際会議場 (千葉市美浜区中瀬 2-1)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

http://www.geo.titech.ac.jp/lab/tsunakawa/Kaguya_LMAG.dir/

<http://www.geo.titech.ac.jp/lab/tsunakawa/LabPPM.pdf>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

綱川 秀夫 (TSUNAKAWA, Hideo)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号: 40163852

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし