

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月31日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22540435

研究課題名（和文） 月磁気異常の詳細解析に基づく古月ダイナモ検証

研究課題名（英文） Examination of the lunar dynamo based on the 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

研究成果の概要（和文）：

本研究の主な成果は、2つである。（1）月磁気異常3成分を月面上（高度0km）にマッピングする方法（SVM法）の確立した。SVM法をいくつかの代表的地域に適用し、広域磁気異常図を作成した。さらに月面全球マッピングを実施した。（2）月で観測されるスポット状磁気異常のソース磁化方位を、磁気双極子近似により推定した。磁気双極子の磁化方位から仮想磁極を計算した結果、古月ダイナモの存在と月自転軸の再配置が示唆された。

研究成果の概要（英文）：

We have obtained two major results in the present study.

(1) We have developed a new method for mapping of three surface components of the magnetic field due to the lunar magnetic anomalies (Surface Vector Mapping; SVM). The SVM method has been applied to several regions and provided regional maps. Subsequently the SVM method has been used for global mapping of the lunar magnetic anomalies at the surface.

(2) Using dipole approximation, we have analyzed spot-like magnetic anomalies of the Moon to estimate magnetization direction of the magnetic anomaly source. Virtual magnetic poles calculated from the magnetization direction suggest existence of the lunar core dynamo and reorientation of the lunar rotation axis.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			0
年度			0
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：固体惑星、衛星、小惑星、磁気異常

1. 研究開始当初の背景

従来の月磁気異常観測には、1970年代初頭のアポロ15、16号による低中緯度観測と

1998～1999年のルナプロスペクタによる全球マッピングがある。アポロでは推進エンジンを持たない孫衛星を使ったため、母衛星軌

道に準じた $\pm 30^\circ$ の範囲を数週間しか観測できなかったが、スポット状磁気異常を発見した。ルナプロスペクタは極軌道の全球観測を行い、約1年間の100km高度観測と約半年間の20-40km高度観測を行った。大きな問題点として、観測期間中の太陽活動が活発だったため月周辺の磁場擾乱が大きく、月磁気異常検出が難しかったことがある。その結果、100km高度の3成分磁場観測データは磁気異常解析に使用せず、10年近く経って低高度観測に基づいたPreliminary Global Mapが発表された(Richmond & Hood, 2008)。

上記のように制約された観測結果のため、これまでの月磁気異常成因の研究は相対的に強い磁気異常の地理的分布という半定量的解析に終わっている。具体的には、いくつかの強い磁気異常は月海盆(ベースン)の月中心反対側(対蹠点)にあり、大インパクトによりベースンが形成された時、発生したプラズマが惑星間空間磁場を対蹠点に収束させて強い磁場を生み出し、そこに飛来・集積したインパクト放出物が衝撃残留磁化を獲得して磁気異常ができたというモデルである(Basin-Forming Impact Model; Hood & Vickery, 1984; Lin et al., 1988)。しかし、対蹠点以外の磁気異常も多くあること、磁気異常が存在しえないベースン自体にも磁気異常を見いだすケースがあることから、Basin-Forming Impact Modelの主張に慎重になってきている(Mitchell et al., 2008)。

2. 研究の目的

月磁気異常は約40億年前の月ダイナモ存在の検証にとって最重要の情報である。これまでのアポロ・ルナプロスペクタ観測結果では、狭い観測地域あるいは大きな外部磁場擾乱という制約により、相対的に強い磁気異常を研究対象にせざるを得なかった。しかし、2008年11月~2009年6月に実施された「かぐや」月磁場観測ではそれらの欠点を克服し、極めて良質の高々度および低高度磁気異常データを取得した。本研究では、月全体の精細な月磁気異常マッピングを完成させて古月ダイナモ存在を検証すること、さらには地球、月という個々の枠を超えて地球・月システム進化を念頭に置いた古地球・月システム電磁気学のキックオフを目的とする。

3. 研究の方法

「かぐや」月磁場データおよびルナプロスペクタ月磁場データについて以下の処理・解析を積み上げて、月磁気異常ソースの解明と古月ダイナモの検証を行う。

- (1) 「かぐや」の磁場3成分観測データを処理し、基本データベースをバージョンアップする。
- (2) 磁気異常起源磁場と外部磁場をより正確

に分離し、月磁気異常データの精度向上をはかる。

(3) 観測高度の異なるデータから高度一定の磁気異常図を作成し、空間分解能と磁場分解能の向上をはかる。

(4) インバージョン解析により、磁気異常ソースのソース深度、磁化強度、磁化方位を推定する。

(5) 磁気異常の水平分布、ソース深度、ソース磁化強度と月地形、月重力異常、月面鉱物分布との比較検討を行い、ソース物質、磁気異常成因の解明を目指す。

(6) 磁気異常ソース方位から月磁極を求め、磁極分布、年代等から古月ダイナモを検証する。

4. 研究成果

(1) 基本データベースの作成

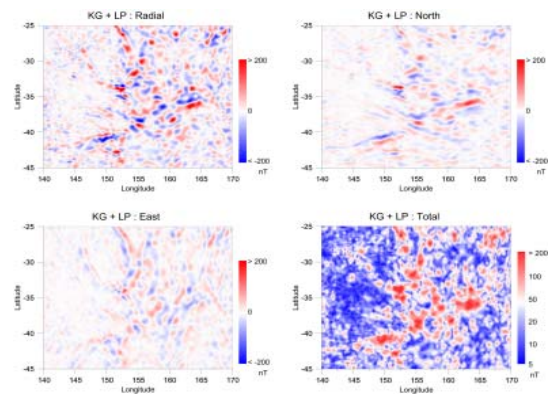
月磁場のKaguya (KG) 低高度観測データ、Lunar Prospector (LP) 低高度観測データ(LP)を全て処理した。特に、KGデータの位置確度を上げたバージョンを作成した。

(2) 磁気異常磁場・外部磁場の効果的分離

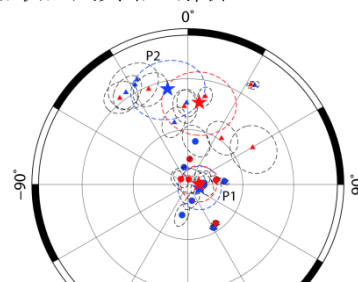
磁気異常磁場と外部磁場との分離を効果的に行うため、パス沿いの磁場微分値を解析することとし、KG及びLPデータについて、3成分磁場の微分値データベースを作成した。

(3) 広域磁気異常図の作成

あらたにSurface Vector Mapping (SVM)法を開発し、月面上の3成分磁気異常図作成を行った(submitted)。下図に、South Pole-Aitken basinの北西部を示す。ここでKGデータとLPデータを併せて解析し、磁気異常図の精度を上げている。



(4) 点状磁気異常の解析



磁気異常の中から、点状のものを選択し、磁気双極子近似でソース磁化方位・強度の推定を行った。結果として、仮想磁極は2つの地点に集中し(上図、P1, P2)、それぞれにおいて正逆方向の磁極を示すことがわかった。このことは、かつて月ダイナモが存在し、少なくとも1回は自転軸の再配置があったことを示唆している。

(5) 磁気異常と他情報との比較

SVMを適用して得られた月面磁気異常図を、地形、地質、重力異常と比較した。結果として、相関は小さく、磁気異常は月地殻内部の上部構造を反映しているのではないかと推測された。

(6) 月ダイナモの時間変動

月磁気異常のグローバルマッピングを行い、月で最も若い年代の「雨の海」、「東の海」では磁気異常が極端に小さく、その形成年代には月ダイナモが消滅していた可能性を示唆している。

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 15 件)

(1) 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, doi:10.1016/j.icarus.2012.10.029 (査読有).

(2) Nakagawa, Tomoko; Nakayama, Akihito; Takahashi, Futoshi; Tsunakawa, Hideo; Shibuya, Hidetoshi; Shimizu, Hisayoshi; Matsushima, Masaki, Large-amplitude monochromatic ULF waves detected by Kaguya at the Moon, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH - SPACE PHYSICS, 2012, 117, A04101, doi:10.1029/2011JA017249 (査読有).

(3) Tsugawa, Y.; Katoh, Y.; Terada, N.; Ono, T.; Tsunakawa, H.; Takahashi, F.; Shibuya, H.; Shimizu, H.; Matsushima, M.; Saito, Y.; Yokota, S.; Nishino, M. N., Statistical study of broad band whistler-mode waves detected by Kaguya near the Moon, GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, 2012, 39, L16101, doi:10.1029/2012GL052818 (査読有).

(4) Nishino, Masaki N.; Fujimoto, Masaki; Tsunakawa, Hideo; Matsushima, Masaki; Shibuya, Hidetoshi; Shimizu, Hisayoshi; Takahashi, Futoshi; Saito, Yoshifumi; Yokota, Shoichiro, Control of lunar external magnetic enhancements by IMF

polarity: A case study, PLANETARY AND SPACE SCIENCE, 2012, 73, 161-167, doi:10.1016/j.pss.2012.09.011 (査読有).

(5) Harada, Yuki; Machida, Shinobu; Saito, Yoshifumi; Yokota, Shoichiro; Asamura, Kazushi; Nishino, Masaki N.; Tsunakawa, Hideo; Shibuya, Hidetoshi; Takahashi, Futoshi; Matsushima, Masaki; Shimizu, Hisayoshi, Nongyrotopic electron velocity distribution functions near the lunar surface, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH - SPACE PHYSICS, 2012, 117, A07220, doi:10.1029/2012JA017642 (査読有).

(6) Saito, Yoshifumi; Nishino, Masaki N.; Fujimoto, Masaki; Yamamoto, Tadateru; Yokota, Shoichiro; Tsunakawa, Hideo; Shibuya, Hidetoshi; Matsushima, Masaki; Shimizu, Hisayoshi; Takahashi, Futoshi, Simultaneous observation of the electron acceleration and ion deceleration over lunar magnetic anomalies, EARTH PLANETS AND SPACE, 2012, 64, 83-92, doi:10.5047/eps.2011.07.011 (査読有).

(7) Nishino, Masaki N.; Wang, Xiao-Dong; Fujimoto, Masaki; Tsunakawa, Hideo; Saito, Yoshifumi; Yokota, Shoichiro; Bian, Wei; Li, Chun-Lai; Matsushima, Masaki; Shibuya, Hidetoshi; Shimizu, Hisayoshi; Takahashi, Futoshi; Terasawa, Toshio, Anomalous deformation of the Earth's bow shock in the lunar wake: Joint measurement by Chang'E-1 and SELENE, PLANETARY AND SPACE SCIENCE, 2011, 59, 378-386, doi:10.1016/j.pss.2011.01.002 (査読有).

(8) Nakagawa, Tomoko; Takahashi, Futoshi; Tsunakawa, Hideo; Shibuya, Hidetoshi; Shimizu, Hisayoshi; Matsushima, Masaki, Non-monochromatic whistler waves detected by Kaguya on the dayside surface of the moon, EARTH PLANETS AND SPACE, 2011, 63, 37-46, doi:10.5047/eps.2010.01.005 (査読有).

(9) Tsugawa, Y.; Terada, N.; Katoh, Y.; Ono, T.; Tsunakawa, H.; Takahashi, F.; Shibuya, H.; Shimizu, H.; Matsushima, M., Statistical analysis of monochromatic whistler waves near the Moon detected by Kaguya, ANNALES GEOPHYSICAE, 2011, 29, 889-893, doi:10.5194/angeo-29-889-2011 (査読有).

(10) Harada, Yuki; Machida, Shinobu; Saito, Yoshifumi; Yokota, Shoichiro; Asamura, Kazushi; Nishino, Masaki N.; Tanaka, Takaaki; Tsunakawa, Hideo; Shibuya, Hidetoshi; Takahashi, Futoshi; Matsushima, Masaki; Shimizu, Hisayoshi,

Interaction between terrestrial plasma sheet electrons and the lunar surface: SELENE (Kaguya) observations, GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, 2010, 37, L19202, doi:10.1029/2010GL044574 (査読有).

(11) Nishino, M. N.; Fujimoto, M.; Saito, Y.; Yokota, S.; Kasahara, Y.; Omura, Y.; Goto, Y.; Hashimoto, K.; Kumamoto, A.; Ono, T.; Tsunakawa, H.; Matsushima, M.; Takahashi, F.; Shibuya, H.; Shimizu, H.; Terasawa, T., Effect of the solar wind proton entry into the deepest lunar wake, GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, 2010, 37, L12106, doi:10.1029/2010GL043948 (査読有).

(12) Matsushima, Masaki; Tsunakawa, Hideo; Iijima, Yu-ichi; Nakazawa, Satoru; Matsuoka, Ayako; Ikegami, Shingo; Ishikawa, Tomoaki; Shibuya, Hidetoshi; Shimizu, Hisayoshi; Takahashi, Futoshi, Magnetic Cleanliness Program Under Control of Electromagnetic Compatibility for the SELENE (Kaguya) Spacecraft, SPACE SCIENCE REVIEWS, 2010, 154, 253-264, doi:10.1007/s11214-010-9655-x (査読有).

(13) Hashimoto, K.; Hashitani, M.; Kasahara, Y.; Omura, Y.; Nishino, M. N.; Saito, Y.; Yokota, S.; Ono, T.; Tsunakawa, H.; Shibuya, H.; Matsushima, M.; Shimizu, H.; Takahashi, F., Electrostatic solitary waves associated with magnetic anomalies and wake boundary of the Moon observed by KAGUYA, GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, 2010, 37, L19204, doi:10.1029/2010GL044529 (査読有).

(14) Saito, Yoshifumi; Yokota, Shoichiro; Asamura, Kazushi; Tanaka, Takaaki; Nishino, Masaki N.; Yamamoto, Tadateru; Terakawa, Yuta; Fujimoto, Masaki; Hasegawa, Hiroshi; Hayakawa, Hajime; Hirahara, Masafumi; Hoshino, Masahiro; Machida, Shinobu; Mukai, Toshifumi; Nagai, Tsugunobu; Nagatsuma, Tsutomu; Nakagawa, Tomoko; Nakamura, Masato; Oyama, Koh-ichiro; Sagawa, Eiichi; Sasaki, Susumu; Seki, Kanako; Shinohara, Iku; Terasawa, Toshio; Tsunakawa, Hideo; Shibuya, Hidetoshi; Matsushima, Masaki; Shimizu, Hisayoshi; Takahashi, Futoshi, In-flight Performance and Initial Results of Plasma Energy Angle and Composition Experiment (PACE) on SELENE (Kaguya), SPACE SCIENCE REVIEWS, 2010, 154, 265-303, doi:10.1007/s11214-010-9647-x (査読有).

(15) Tsunakawa, Hideo; Shibuya, Hidetoshi; Takahashi, Futoshi; Shimizu,

Hisayoshi; Matsushima, Masaki; Matsuoka, Ayako; Nakazawa, Satoru; Otake, Hisashi; Iijima, Yuichi, Lunar Magnetic Field Observation and Initial Global Mapping of Lunar Magnetic Anomalies by MAP-LMAG Onboard SELENE (Kaguya), SPACE SCIENCE REVIEWS, 2010, 154, 219-251, doi:10.1007/s11214-010-9652-0 (査読有).

[学会発表] (計 38 件)

(1) Masaki N Nishino, Masaki Fujimoto, Hideo Tsunakawa, Hidetoshi Shibuya, Futoshi Takahashi, Hisayoshi Shimizu, Masaki Matsushima, Yoshifumi Saito, Solar wind control of lunar external magnetic enhancement: A case study, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 2012 年 5 月 23 日, 幕張メッセ国際会議場 (千葉県).

(2) 片山 由美子, 小嶋 浩嗣, 斎藤 義文, 笠原 禎也, 大村 善治, 山本 忠輝, 横田 勝一郎, 西野 真木, 橋本 弘藏, 小野 高幸, 綱川 秀夫, 月周辺で観測される電子サイクロトロン高調波, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 2012 年 5 月 23 日, 幕張メッセ国際会議場 (千葉県).

(3) 綱川 秀夫, 高橋 太, 清水 久芳, 渋谷 秀敏, 松島 政貴, 月磁気異常のグローバル月面マッピング一月火成活動・月ダイナモ活動について, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 2012 年 5 月 23 日, 幕張メッセ国際会議場 (千葉県).

(4) 比嘉 哲也, 吉村 令慧, 大志万 直人, 松島 政貴, 清水 久芳, 高橋 太, 渋谷 秀敏, 綱川 秀夫, かぐや衛星搭載磁力計で観測された階段状磁場変化解析から推定した月の電気伝導度, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 2012 年 5 月 23 日, 幕張メッセ国際会議場 (千葉県).

(5) 橋本 弘藏, 大村 善治, 笠原 禎也, 小嶋 浩嗣, 橋谷 真紀, 小野 高幸, 綱川 秀夫, かぐやで観測された月周辺静電孤立波 (ESW) の源の推定, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 2012 年 5 月 20 日, 幕張メッセ国際会議場 (千葉県).

(6) 原田 裕己, 町田 忍, 斎藤 義文, 横田 勝一郎, 浅村 和史, 西野 真木, 綱川 秀夫, 渋谷 秀敏, 高橋 太, 松島 政貴, 清水 久芳, プラズマシート電子を用いた月磁気異常の推定, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 2012 年 5 月 23 日, 幕張メッセ国際会議場 (千葉県).

(7) 津川 靖基, 寺田 直樹, 加藤 雄人, 小野 高幸, 綱川 秀夫, 高橋 太, 渋谷 秀敏, 清水 久芳, 松島 政貴, Kaguya 衛星によって月地殻磁気異常付近で観測された広帯域ホイッスラーモード波動, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 2012 年 5 月 23 日, 幕張メッセ国際会議場 (千葉県).

(8) 上村 洸太, 齋藤 義文, 西野 真木, 横田
勝一郎, 浅村 和史, 綱川 秀夫, 太陽風プロト
ン月面散乱における散乱角依存性の研究, 日
本地球惑星科学連合 2012 年大会, 2012 年 5 月,
23 日幕張メッセ国際会議場 (千葉県).
他 30 件

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