

令和元年6月4日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05534

研究課題名(和文) 火星磁気異常の高分解能マッピングに基づく火星進化の研究

研究課題名(英文) Study of the Martian evolution based on high resolution mapping of the Martian magnetic anomaly

研究代表者

綱川 秀夫 (Tsunakawa, Hideo)

東京工業大学・理学院・教授

研究者番号：40163852

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、NASA火星探査機 Mars Global Surveyorによる火星磁場観測データを解析し、火星表面における磁気異常図を作成した。従来の400km高度磁気異常図では見られなかった短波長磁気異常が見られ、プレートテクトニクスを示唆した大規模な磁気異常帯は観測高度による見かけのものと考えられる。さらに、火星地殻の表面磁場強度と地殻標高に相関が見られ、強い磁気異常は低標高地域ではほとんど見られず、高標高地域に存在する。このことは、従来の火星地殻磁化構造モデルでは説明できず、新たなモデルの検討を要する。また、磁気異常パターンを他の岩石型惑星・衛星と比較し、共通点と相違点を検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の主な学術的意義は2つある。一つ目は、火星の強い磁気異常を産み出す磁化ソースが、従来の研究とは逆に火星地殻浅部(深さ10km程度以下)と推定できることである。二つ目は、月観測で開発された磁気異常解析法を、火星だけでなく、水星・地球についても適用し、従来よりも高い空間分解能の磁気異常図を得て、地形・地質との比較を容易にしたことである。また、社会的意義とも考えられることとして、日本の火星探査将来計画(MMX)において、火星地殻形成・進化と火星衛星形成との科学ミッションを検討する上で、磁化物質という新たな観点を与える。

研究成果の概要(英文)：We have analyzed Martian magnetic fields observed by Mars Global Surveyor (NASA). Applying the Surface Vector Mapping (SVM) method, we provided the magnetic anomaly maps on the Martian surface with high precision of spatial resolution. The results shows dominance of shorter wavelength components (about 5 degrees in latitude) than in previous studies. Strong magnetic anomalies are often seen at areas of high topography but not at low topography areas. This correlation suggests that main sources of the magnetic anomalies are contained in the Martian crust of <10 km depth. Such shallow magnetic carriers are not explained by the previous model. We also compared magnetic anomalies of Mars with those of Moon, Mercury and Earth on the basis of SVM maps. Similarities and differences of the crustal magnetic anomalies may reflect intrinsic and individual processes of the terrestrial planets and satellite.

研究分野：地球惑星電磁気学

キーワード：火星 磁気異常 地殻 進化 岩石型惑星 岩石磁気 月惑星探査

1. 研究開始当初の背景

現在の火星にグローバル磁場はないが、火星磁気異常の観測結果から、約 40 億年前に磁場が存在したことがわかっている。さらに、縞状の磁気異常パターンが見られ、火星ダイナモとその逆転、および火星にプレートテクトニクスが存在した可能性も示唆された。このように、火星磁気異常図は、火星の内部進化、熱史、表層環境にとって極めて重要な情報である。しかし、従来の磁気異常図の大部分は高度 400 km におけるマッピング (e.g., Connerney et al. 2005) であるため空間分解能が低く、地形・地質などとの比較には不十分であった。

2. 研究の目的

本研究では、月磁気異常観測・データ解析で開発した惑星・衛星表面の 3 成分磁気異常マッピング法 (Surface Vector Mapping method: SVM 法, Tsunakawa et al., 2014, 2015) を適用し、磁場観測データから高分解能の火星磁気異常図を作成し、火星地殻の磁化構造を推定する。さらに、地球のテクトニクスや月・水星の磁気異常との比較など、火星進化の基礎的研究を進めることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) データセレクション

SVM 法では観測点の密度が重要であるため、本研究では観測パス密度の大きな定常観測フェーズのデータを主に解析する。機器ノイズは、火星磁気異常の主なシグナルに比して小さくランダムである。太陽風の影響をできるだけ避けるために、従来の研究と同様に、基本的には夜側観測を使用する。最も考慮すべき影響は、火星プラズマシートに起因する外部からの磁場擾乱であるが、夜側でも火星プラズマシート擾乱の影響はあるため、広域マッピング解析のインバージョンにおいて、モデル値と観測値との差異が大きな観測データを除外し、再解析することを試みる。

(2) 広域磁気異常図の作成

観測点数、パス数、観測高度に基づき、また火星テクトニクスなどの科学的意義と照らし合わせつつ、広域マッピングの対象地域を決定する。解析のプログラムは、月磁気異常解析で作成したコードを使う予定であるが、必要に応じて新たな改良を施す。また、MGS 磁場観測データには複数年にわたるデータセット (高度 ~ 400 km) があり、異なる観測期間のデータによる磁気異常図を比較することで、解析結果の信頼性をチェックする。エアロブレーキングフェーズのデータ (高度 ~ 200 km) については観測地域が限定されており、一部の地域で比較し、磁気異常図の信頼性を検討する。

(3) 磁気異常図に基づく火星地殻磁化構造の検討および月・水星磁気異常との比較

得られた火星表面磁気異常図と地形等を比較し、衝突盆地の消磁効果、クレータ形成モデル、火星地殻の磁化構造を検討する。さらに、月・水星磁気異常と比較し、類似点・相違点を検討する。

4. 研究成果

(1) データセレクション

SVM 法の第 1 回解析において、 $|\text{モデル値} - \text{観測値}| > 4$ の観測点 (異常値とよぶことにする) を除外し、残ったデータに基づいて繰り返しながら再計算をするプログラムを作成した。数箇所の地域に適用したところ、除外した観測点は特定パスに集中していることが多く、火星プラズマシートあるいはターミネータ近傍における磁場擾乱の区間と推定される。これまでの結果では、擾乱を受けたと思われるパスの割合は数%以下である。SVM 法の解析に対する影響は小さく、異常値により複雑な短波長パターンが出てしまう。しかしながら、新たな方法により、トレードオフ・パラメータ (データフィッティング度合いと表面磁場ノルムとのトレードオフ) をより適切な値にすることができ、次に述べるように妥当なマッピングを行えた。

(2) 広域磁気異常図の作成

SVM 法を 10 以上の地域に適用し、広域磁気異常図を作成した。解析地域は、主としてクレータ地域とし、火星地殻構造に関する情報を得られる可能性を検討した。例として、キンメリア高原地域 (30-60 S, 150-180 E) の磁気異常起源の 400km 高度磁気異常図 (図 1) を示す。この地域に見られるように、火星では東西方向に伸長する磁気異常パターンが存在し、400 km 高度磁気異常図では南北方向波長が 20° 程度となる。

本研究によるキンメリア高原地域の表面磁気異常磁場分布を図 2 に示す。400 km 高度磁気異常図と同様に東西方向に伸長する磁気異常パターンが存在するが、表面磁気異常磁場分布では南北方向波長が 5° 程度 (緯度上の値) となり、東西方向の波長も 20° 以下 (経度上の値) のパターンが多い。したがって、従来の磁気異常図で見られた大規模な帯状構造は高度による見かけのものだったと考えられる。また、キンメリア高原地域では最大の表面磁気異常強度が 10000nT (10 μT) 以上であり、ダイナモ起源の地磁気 (赤道地域で 30 μT 前後) に匹敵する大きさとなっている。

キンメリア高原地域において、定常観測データの SVM 結果から、エアロブレーキングフェーズの低高度観測地点 (1997-1999、高度 100 - 400 km) における磁場を計算して観測値と比較したところ、約 5 度の短波長成分までよい一致が見られることを確認した。また、同地域におい

て、2001 年観測データと 2005 年観測データに基づいた火星表面の磁気異常磁場は、相関係数が 0.75-0.94 となり、観測期間に依らず信頼度の高いことも確認した。

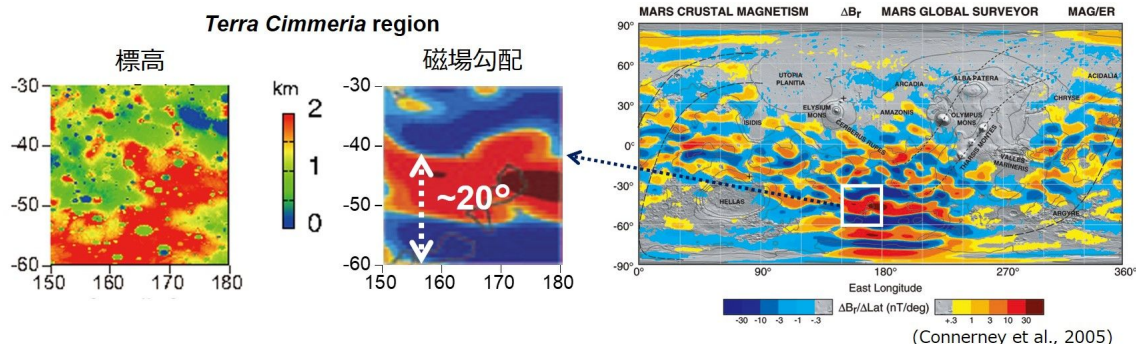


図 1 . 火星上空 400 kmにおける磁気異常起源の磁場勾配 (Connerney et al., 2005)

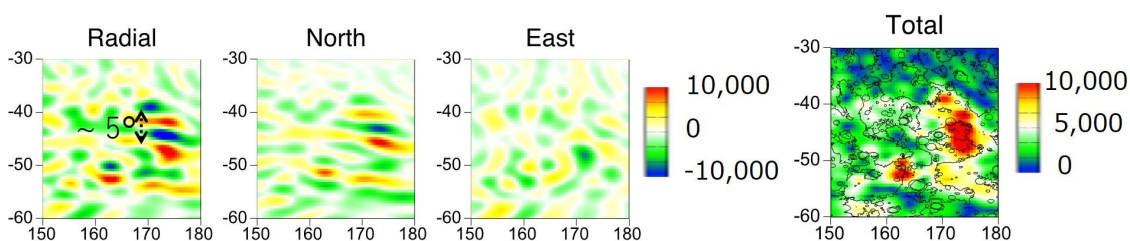


図 2 . キンメリア高原地域における磁気異常起源の表面磁場および全磁力 (単位: nT)。横軸: 経度 (°E)、縦軸: 緯度 (°N)。全磁力の図には、地形等高線も示す (黒実線)。

(3) 火星磁気異常キャリア物質の推定

本研究の解析により、火星地殻の表面磁場強度と地殻標高に相関が見られる。より具体的に記述すると、「強い磁気異常は低標高地域ではほとんど見られず、高標高地域で現れる」ということである。代表的な 10 地域の解析例を、図 3 に示す。

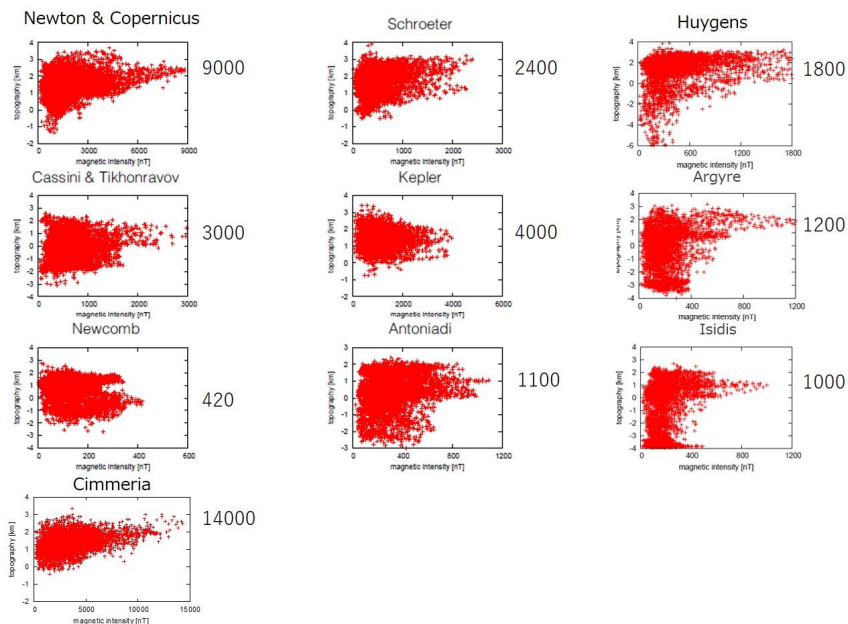


図 3 . 火星のクレータ地域における磁気異常の磁場強度 (横軸) と地形標高 (縦軸) の関係。各図右横の数値は、最大の磁気異常強度 (nT) を表す。

火星磁気異常は約 40 億年前に形成されたと考えられ、現在まで安定して存在しなくてはならない。一方、火星地殻内では深くなるほど徐々に温度が高くなり、キュリー点以上になるだろう。磁性粒子の磁化消失は、キュリー点以下のプロッキング温度に依存する。本研究代表者を含む研究グループは、磁鉄鉱粒子の飽和磁化、保磁力、キュリー温度などの磁性について、圧力・温度依存性を系統的に研究してきた。実験結果および理論的考察をもとに、火星磁気異常のキャリアとして、単磁区 (SD)・擬似単磁区 (PSD)・多磁区 (MD) 磁鉄鉱粒子の妥当性を検討した。従来の研究では磁気異常ソースは、近く 10 km 以深にあると考えられており (e.g. Dunlop

& Arkani-Hamed, 2005) そのモデルの磁化キャリアとなりうる磁鉄鉱粒子は1マイクロンより小さな細長い形状の磁鉄鉱であることを示唆した(図4; Sato et al., 2018)。

一方、本研究では、磁化ソースは火星表層部、高々10 kmの部分であることを示唆している。本モデルでは、単磁区・疑似単磁区磁鉄鉱粒子だけでなく、多磁区磁鉄鉱粒子も十分に磁化キャリアになりうるので、火星の強い磁気異常を作り出しやすいという利点がある。このことは、火星地殻磁化構造、さらに火星地殻形成・進化について重要な情報を与える。

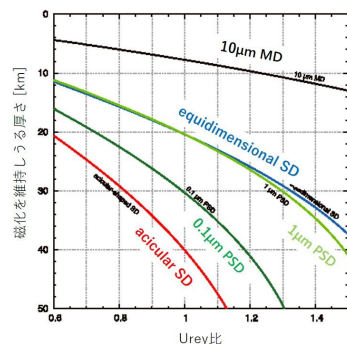


図4. 磁鉄鉱磁性粒子のサイズによる残留磁化安定度と火星地殻温度分布(Urey比を仮定:横軸)からみた磁化層の厚さ(縦軸)。火星内部熱史の代表的モデルによる。(Sato et al., 2018)

(4) 月・水星・地球の地殻起源磁気異常との比較

火星磁気異常の東西伸長性は、地球や月の磁気異常に見られる線状パターンに類似している(図5)。地球の線状磁気異常は、プレートテクトニクスによる海洋地殻生成と地磁気反転に原因がある。しかし、月の線状磁気異常はいろいろな方向にあり、表面の地形・岩石との相関が弱いことから、月地殻内の貫入岩が磁化ソースと考えられている(Tsunakawa et al., 2014, 2015)。今の時点で結論することは拙速となりうるが、火星では高標高地域に強い磁気異常が見られることが、プレートテクトニクスによる地球海洋地殻(低標高地域)とは大きく異なる点である。一方、水星のSVM法による予察的マッピングでは、観測条件から解析地域が狭いものの、線状磁気異常は少ない。岩石型惑星・衛星の地殻起源磁気異常は、各々の天体独自の形成・進化の重要な指標となりうる。

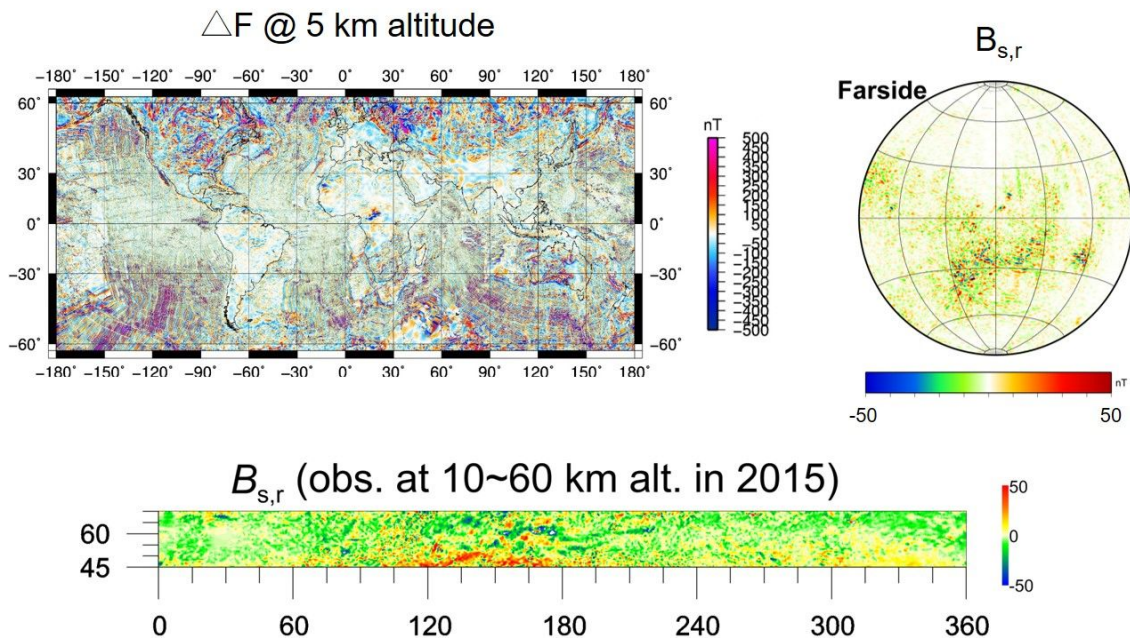


図5. 岩石型惑星・衛星の地殻起源磁気異常の比較。地球の5 km上空における全磁力磁気異常 F (左上; Mause et al., 2005)、月裏側表面における動径方向成分 $B_{s,r}$ (右上; Tsunakawa et al., 2015)、水星表面における動径方向成分 $B_{s,r}$ (下; Messenger 観測データに基づく本研究の解析)。単位はいずれも nT。

(5) 表面地形に応じた磁気異常マッピング法の開発

火星磁気異常の起源は火星地殻にあると考えられ、本研究では火星上部地殻に磁化物質があると推測している。火星表面の地形は数千メートルの起伏があり、結果として、磁気異常分布には地形の影響が少なからずあると思われる。これまでの SVM 法では、天体中心から等距離の球面上において磁気異常をマッピングしていたが、新たに地形起伏の影響をより直接的に評価できるマッピング法を開発した。新手法の有効性のチェックとして、地球上の海洋磁気異常に対して試行し、日本海溝から沈み込む太平洋プレートスラブ上の磁気異常を復元することが

できた(図6)。この方法により火星地形に合わせた磁気異常マッピングをおこなうことで、より精度の高い磁気異常図作成が可能になった。

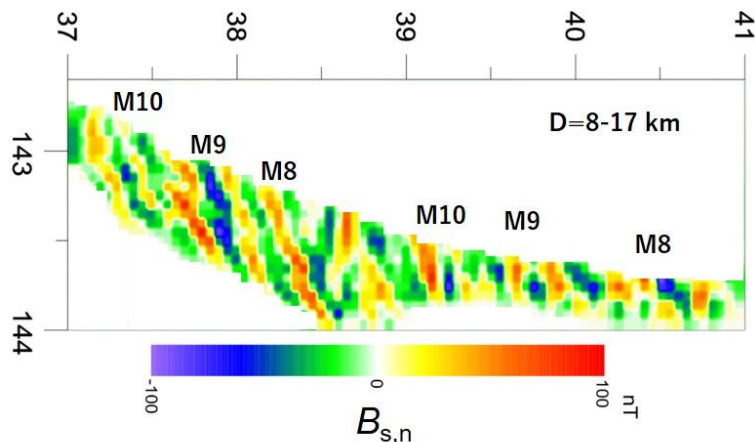


図6.起伏のある地形表面への磁気異常マッピングの例:東北日本沖日本海溝から沈み込んだ太平洋プレート上面における海洋磁気異常磁場の南北成分($B_{s,n}$)。1.5km上空の磁気異常観測データ(中塚・大熊, 2005)により、深さ8-17kmのスラブ面上に新SVM法でマッピングした。M8-M10の記号は、中生代海洋磁気異常名(約120-130Ma)を示す。太平洋プレートは、図の下側から東北日本に下に沈み込んでいる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計8件)

- (1)Takahashi, Futoshi; Shimizu, Hisayoshi; Tsunakawa, Hideo, Mercury's anomalous magnetic field caused by a symmetry-breaking self-regulating dynamo, Nature Commun., 10, 208, 2019, doi:10.1038/s41467-018-08213-7 (査読有)
- (2)Kato, Chie; Sato, Masahiko; Yamamoto, Yuhji; Tsunakawa, Hideo; Kirschvink, Joseph L., Paleomagnetic studies on single crystals separated from the middle Cretaceous Iritono granite, Earth Planets Space, 2018, doi:10.1186/s40623-018-0945-y (査読有)
- (3)Sato, Masahiko; Yamamoto, Yuhji; Nishioka, Takashi; Kodama, Kazuto; Mochizuki, Nobutatsu; Ushioda, Masashi; Nakada, Ryoichi; Tsunakawa, Hideo, Constraints on the source of the Martian magnetic anomalies inferred from relaxation time of remanent magnetization, Geophys. Res. Lett., 2018, doi:10.1029/2018GL077498 (査読有)
- (4)Nakagawa, Tomoko; Nishino, Masaki N.; Tsunakawa, Hideo; Takahashi, Futoshi; Shibuya, Hidetoshi; Shimizu, Hisayoshi; Matsushima, Masaki, and Saito, Yoshifumi, Electromagnetic Ion Cyclotron Waves Detected by Kaguya and Geotail in the Earth's Magnetotail, J. Geophys. Res.: Space Phys., 2018, doi:10.1002/2017JA024505 (査読有)
- (5)Tsunakawa, Hideo; Yamamoto, Yuhji, Magnetism, In: W.M. White (ed.), Encyclopedia of Geochemistry, Springer International Publishing AG, 2017, doi:10.1007/978-3-319-39193-9_330-1 (査読有)
- (6)Nishino, Masaki N.; Harada, Yuki; Saito, Yoshifumi; Tsunakawa, Hideo; Takahashi, Futoshi; Yokota, Shoichiro; Matsushima, Masaki; Shibuya, Hidetoshi; Shimizu, Hisayoshi, Kaguya observations of the lunar wake in the terrestrial foreshock: Surface potential change by bow-shock reflected ions, Icarus, 2017, 293, 45-51, doi:10.1016/j.icarus.2017.04.005 (査読有)
- (7)Sato, Masahiko; Mochizuki, Nobutatsu; Watanabe, Minako; Tsunakawa, Hideo; Composition law of oblique anhysteretic remanent magnetization and its relation to the magnetostatic interaction, Geochem. Geophys. Geosyst., 2017, 18, doi:10.1002/2016GC006671 (査読有)
- (8)Sato, Masahiko; Yamamoto, Yuhji; Nishioka, Takashi; Kodama, Kazuto; Mochizuki, Nobutatsu; Tsunakawa, Hideo; Hydrostatic pressure effect on magnetic hysteresis parameters of pseudo-single-domain magnetite, Geochem. Geophys. Geosyst., 2016, 17, 2825-2834, doi:10.1002/2016GC006406 (査読有)

[学会発表](計13件)

- (1)網川秀夫、SVM法による月・火星・水星・地球の磁気異常マッピング、地球電磁気・地球惑星圏学会、2018年11月24日、名古屋大学東山キャンパス(招待講演)
- (2)高寺寿門、中川朋子、網川秀夫、かぐやが観測した磁場と月面の磁場を3D表示するソフトの開発、日本地球惑星科学連合大会、2017年5月24日、千葉市幕張メッセ国際会議場
- (3)中川朋子、網川秀夫、齋藤 義文、IMF-Byの卓越した太陽風中の月のウェイク境界における

磁場擾乱の偏波非対称について、日本地球惑星科学連合大会、2017年5月24日、千葉市幕張メッセ国際会議場

- (4)佐藤雅彦、望月伸竜、渡辺美奈子、綱川秀夫、Composition law of oblique anhysteretic remanent magnetization and its relation to the magnetostatic interaction、日本地球惑星科学連合大会、2017年5月21日、千葉市幕張メッセ国際会議場
- (5)元山舞、綱川秀夫、火星古海洋における潮汐共振の可能性、日本地球惑星科学連合大会、2017年5月20日、千葉市幕張メッセ国際会議場
- (6)池内悠哉、綱川秀夫、高橋太、Lunar magnetic poles estimated from small isolated magnetic anomalies on the SVM map、地球電磁気・地球惑星圏学会、2016年11月22日、九州大学伊都キャンパス
- (7)山口雅央、綱川秀夫、高橋太、SVM法による火星磁気異常の表面磁場マッピング、日本地球惑星科学連合大会、2016年5月24日、千葉市幕張メッセ国際会議場（招待講演）
- (8)池内悠哉、綱川秀夫、高橋太、微小磁気異常の解析に基づく古月磁極の推定、日本地球惑星科学連合大会、2016年5月22日、千葉市幕張メッセ国際会議場

〔図書〕(計1件)

- (1)佐藤文衛、綱川秀夫、「宇宙地球科学」、講談社、2018、pp.350

6. 研究組織

- (1)研究分担者
なし
- (2)研究協力者
なし

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。