研究成果

2026 年 11 月 20 日

分野：自然科学系

キーワード：太陽系、衛星、ガニメデ、内部構造、磁場、形成材料、熱進化

木星衛星ガニメデの磁場から内部構造と形成材料を探る

―約 46 億年の熱進化モデル計算で金属核と材料の候補を絞り込む―

【研究成果のポイント】

- 木星の氷衛星ガニメデの現在の磁場の強さを説明するには、半径約 800 km の金属核を持つ構造が有力であることを示した。さらに、核の硫黄含有量（核に含まれる硫黄の割合）も含め、ガニメデを作った材料の候補を絞り込んだ。
- 質量や重力の観測だけでは、核の大きさや組成の違いを区別することが困難だったが、形成材料の組成（成分の種類や割合）に応じた約 46 億年の熱進化と磁場の強さをモデル計算し、観測と比較することで、候補をさらに絞り込むことが可能に。
- 2031 年に木星系へ到着する JUICE 探査機による磁場や重力の観測、氷・地下海の層の調査と組み合わせることで、ガニメデの内部構造と形成材料をさらに絞り込み、その誕生と進化の解明につながることに期待。

❖ 概要

大阪大学大学院理学研究科の木村淳助教と川上稜平さん（研究当時：博士前期課程）を中心とする研究グループは、木星の氷衛星ガニメデについて、現在観測されている磁場の強さと約 46 億年にわたる熱進化モデル計算※1 を組み合わせ、金属核の大きさや硫黄含有量、ガニメデを作った材料の候補を絞り込みました。

ガニメデは、太陽系の衛星で唯一、中心部の金属核から現在も自ら磁場を生み出しています。しかし、厚い氷や岩石に覆われた内部を直接見ることはできず、核の大きさや組成、形成材料は定まっていませんでした。たとえば重力測定だけにもとづく従来の推定には、核の成分の仮定によって半径が約 600～1,150 km にわたる例もありました。

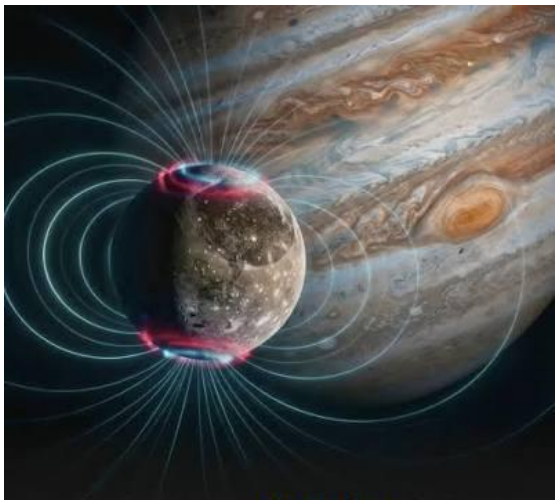


図 1. 木星を背景にした衛星ガニメデとその磁場の模式図（原画像：Courtesy NASA/JPL-Caltech を合成加筆）。

今回、研究グループがこれまでに開発してきた熱進化モデルをガニメデ向けに改良し、研究室の計算機を用いて、さまざまな材料から想定されるガニメデの約 46 億年の歴史を比較しました。内部の温度変化や金属核の冷却と固化、それに伴う磁場の強さを計算した結果、観測された磁場を説明できる内部構造は、半径 800 km 程度の金属核を持つものに絞られまし

た。さらに、核に含まれる硫黄の割合にも条件があることや、ガニメデを作った材料の候補が外側の氷と地下海の層の平均密度をどの程度と考えるかによって変わることを示しました。本研究は、現在の磁場から、直接見ることのできない内部の構造と歴史、そして誕生時の材料に迫るものです。これにより、今後の木星氷衛星探査機 JUICE(ジュース)※2による観測とモデル計算とを組み合わせて、ガニメデの内部構造と形成材料をさらに絞り込み、その誕生と進化への理解が深まることが期待されます。

本研究成果は、米国科学誌「Icarus」に、11 月 11 日(水)(日本時間)に公開されました。

【木村淳助教のコメント】
地球より小さく、厚い氷に覆われたガニメデが今も磁場を生み出していることに、内部の歴史を読み解く手がかりがあります。核の大きさや材料、周囲の岩石を通した熱の逃げ方をひとつずつ結び付け、現在の磁場に至る道筋と、それを可能にする内部構造を絞り込みました。2023 年に打ち上げられ、2031 年の木星系到着に向け今も旅をしている JUICE 探査機が、今回の研究の答え合わせをしてくれることを楽しみにしています。

❖ 研究の背景

ガニメデの内部は、外側の氷・地下海の層、岩石層(岩石マントル)、中心部の金属核に分かれていると考えられています。これまでの質量や重力の観測は、こうした内部構造を調べる重要な手がかりとなってきました。しかし、同じ観測結果を満たす構造は一つではなく、核の大きさや各層の密度に異なる候補が残されています。

もう一つの手がかりが、ガニメデ自身の磁場です。磁場を生み出すには、核の一部が融けているだけでなく、その液体金属が動くことが必要です。核が外側から冷やされると、温度差によって液体金属の流れが生じます。また、その一部が固まると、残った液体に含まれる鉄や硫黄の割合が場所によって変わり、密度の違いも液体を動かす力になります。核に含まれる硫黄の割合は、溶ける温度や固まり方を変えるため、磁場の強さや磁場が生じる時期にも関わります。

そこで本研究では、形成材料の違いが核の大きさや組成、その後の熱進化にどう結び付くかを調べ、現在の磁場の強さを説明できるかどうかによって、内部構造と材料の候補を評価しました。

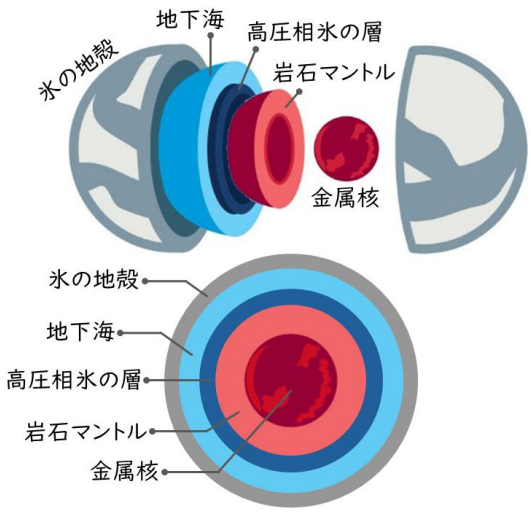


図 2. ガニメデの内部構造の模式図。
上は各層を分離して示した図、下は断面図。表面から順に、氷の地殻、地下海、高圧相氷(高い圧力でできる氷)の層、岩石マントル、金属核からなる構造が考えられています。中心部の金属核では、液体金属の流れによって磁場が生み出されます。各層の厚さや核の大きさは模式的に示しており、実際の比率を表すものではありません(ESA「Understanding Ganymede」を日本語化・一部改変)。

❖ 研究の内容

研究グループは、惑星の材料となる小さな天体「微惑星」から地球ほどの大きさの惑星までを対象に、内部の温度や物質の状態の変化を調べられる熱進化モデルを開発・改良してきました。内部の複雑な流れを詳細に計算するのではなく、深さごとの温度と熱の運ばれ方に着目して計算量を抑えています。この工夫により、スーパーコンピューターなどを使わず、研究室レベルの計算機で、天体の大きさや材料などの条件をさまざまに変えながら、数十億年にわたる進化の違いを比較することができます。

研究グループでは、隕石の一種であるコンドライト※3のさまざまな組成を、ガニメデの形成材料の候補として用いました。隕石に含まれる鉄や硫黄の割合を手がかりに、ガニメデの核にどのような成分が含まれるかを想定しました。その上で、質量や重力の観測結果を説明できる内部構造を選び、内部の温度や核の固まり方が約 46 億年の間にどう変わるのかを計算しました。計算では、金属核を鉄と硫黄からなるものと仮定し、周囲の岩石マントルで発生する熱や熱の移動、核の冷却・固化を扱いました。

その結果、磁場そのものが生じる内部構造は多くありましたが、観測された強さまで説明できる候補は限られていました。これらの候補はいずれも、半径 800 km 程度の金属核を持っていました(図 3)。核全体の組成については、硫黄が比較的少ない組成と、硫化鉄※4に近いほど硫黄を多く含む組成が候補として残りました。核の大きさだけでなく、硫黄の割合との組み合わせを絞り込めたことが成果です。

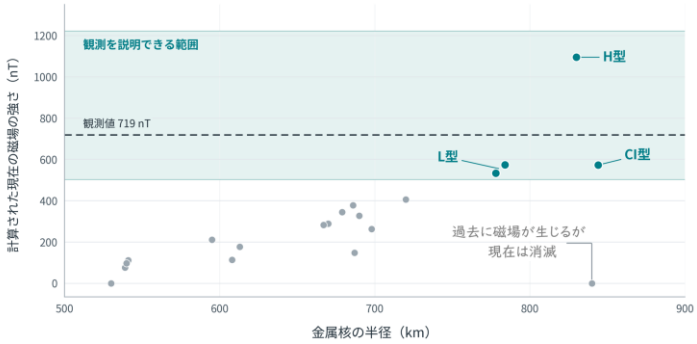


図 3. 金属核の大きさと, 計算で求めた現在の磁場の強さ。
各点は, 核の組成や内部構造を様々に変えて約 46 億年の熱進化を計算した結果です。青緑色は現在の磁場を説明できる候補, 灰色はそれ以外の候補、アルファベットはガニメデを作った材料(コンドライト型)を示します。破線は観測された磁場強度、薄い青緑色の帯は磁場の計算の不確かさを考慮して観測を説明できる範囲です。今回調べた候補では、観測を説明できるものはいずれも半径 800 km 程度の核を持っています。

今回検討した候補の中で大きな核が有力となった理由には、周囲の岩石マントルの働きがあります。岩石マントルは核の熱を外へ運ぶ一方、内部に含まれる放射性元素が少しずつ別の元素へと変わる際に、熱を生み出します。今回の計算では、大きな核のまわりの岩石マントルが薄いほど、岩石マントル全体の発熱が少なくなり、核が冷えやすくなりました。この冷却が、磁場を生み出す液体金属の流れを支えます。

また、現在の磁場の強さを説明できる計算例の一つでは、核の一部が固まり始めて磁場がさらに強くなったのは、現在からわずか約 1 億年前のことでした(図 4)。本研究では、初めの核の温度を金属が融ける温度に近いと仮定しています。岩石マントルの放射性元素が出す熱によって核はいったん温められますが、長い時間がたって発熱が弱まると、岩石マントルに続いて核も冷え始めます。すると核から熱が逃げることで液体金属の流れが生じ、磁場が生まれます。さらに、核の上部で固まった鉄の粒が沈み、深い場所で再び融けるようになると、鉄や硫黄の分布が変わり、流れが強まります。この結果は、ガニメデの磁場を理解するためには、核だけでなく周囲の岩石が温まり、その後に冷える歴史も重要であることを示しています。

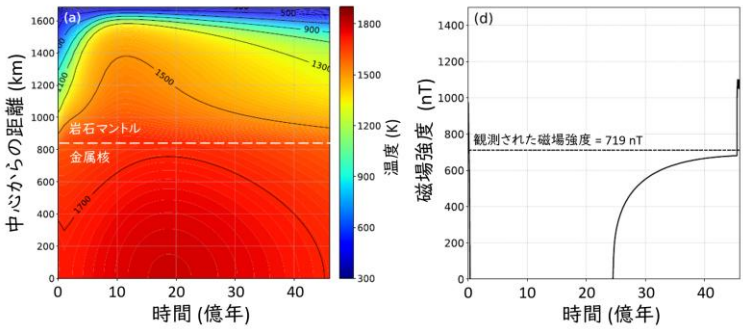


図 4. 金属核・岩石マントルの温度と磁場の時間変化を示す計算例。
左図は内部の温度分布(赤いほど高温)で、縦軸は中心からの距離を表します。右図は表面での磁場の強さです。横軸はいずれも経過時間です。核はいったん温められた後に冷え、磁場を生む活動が始まります。この例では、融けていた核が約 25 億年前に流動を始めて磁場が発生し、約1億年前には核の一部が固まり始め、磁場がさらに強まりました。右の破線は現在の観測値で、磁場の計算の不確かさを考慮すると、現在の観測を説明できる計算例の一つです(原論文の図を引用・改変)。

さらに、氷と地下海を合わせた層の平均密度によって、候補となる形成材料が変わることも分かりました（図 5）。この層の密度を低く考えるか高く考えるかによって、同じ質量や重力の観測結果を説明するために必要な、核や岩石マントルの大きさと成分の組み合わせが変わります。その違いが核の冷え方や磁場の強さにも影響するためです。今回の計算では、低密度の想定では L 型と CI 型、高密度の想定では H 型のコンドライトに近い材料が候補となりました。氷や海の層を調べることが、ガニメデを作った材料を見分ける手がかりになります。

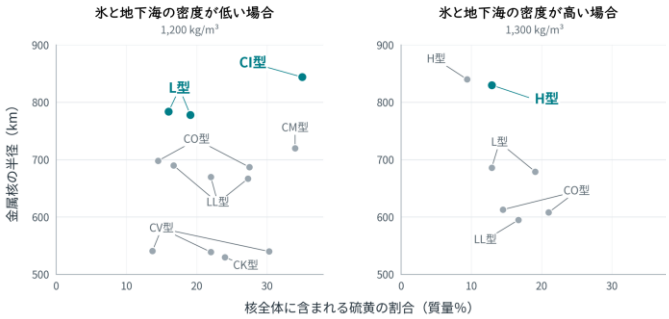


図 5. 氷・地下海の層の平均密度によって変わる、金属核と形成材料の候補。
各点は、核の組成や内部構造を様々に変えて約 46 億年の熱進化を計算した結果です。アルファベットはガニメデを作った材料（コンドライト）のタイプ、青緑色は現在の磁場を説明できる候補、灰色はそれ以外の候補を示します。

❖ 本研究成果が社会に与える影響（本研究成果の意義）

本研究成果は、天体の大きさだけでなく、材料の成分や熱の逃げ方が、磁場を生み出す活動の続く期間をどう左右するかを探る手がかりになります。本研究は、形成材料から内部構造、熱進化、現在の磁場までを結び付けて考えるための枠組みを示しました。地球や水星は現在も核で磁場を生み出している一方、月や火星ではその活動が止まり、岩石には過去の磁場の記録が残っています。天体の材料や核の冷え方が、磁場の強さや活動の続く期間をどう左右するかは、これらの天体にも共通する研究課題です。ガニメデで磁場が続く条件を調べる本研究は、これらの天体との比較を通じて、なぜ磁場を生み出す活動が続く天体と、その活動を終えた天体があるのか、天体ごとの磁場の歴史の違いを理解する手がかりになると期待されます。

ガニメデについては今後、木星氷衛星探査機 JUICE（ジュース）によって、ガニメデの磁場や重力、氷・地下海の層に関する情報が得られます。これらを本研究の予測と照らし合わせることで、残された内部構造と形成材料の候補をさらに絞り込み、ガニメデの誕生と進化への理解が進むと期待されます。

❖ 特記事項

本研究成果は、2026 年 11 月 11 日（水）（日本時間）に米国科学誌「Icarus」（オンライン）に掲載されました。

タイトル：“Constraining Ganymede’s interior structure and bulk composition from its present-day magnetic field strength”

著者名：Jun Kimura, Ryohei Kawakami, Taro Matsuo, and Sho Sasaki

DOI：https://doi.org/10.1016/j.icarus.2026.117381

なお、本研究は、日本学術振興会科学研究費助成事業（JP22K03700）の支援を受けて行われました。

❖ 用語説明

※1　熱進化モデル計算

天体内部の温度や熱の流れが、時間とともにどのように変化するかを計算する方法。本研究では、岩石マントルに含まれる放射性元素による発熱や熱の移動、金属核の冷却・固化などを扱う。

※2 JUICE(ジュース)

木星とその氷衛星を調べる欧州宇宙機関の探査機。日本も複数の観測機器の開発を行っており、多くの研究者が参加している。木星到着後には、衛星エウロパ、ガニメデ、カリストの近くを繰り返し通過して観測したのちにガニメデの周回軌道に入り、磁場や重力などを詳細に観測して内部構造や氷・地下海の層を調べる。

※3 コンドライト

惑星や衛星の形成材料を考える手がかりとなる隕石の一種。元素の割合や鉱物の特徴などによって、H 型、L 型、CI 型などに分類される。本研究では、種類ごとに異なる鉄や硫黄の割合などを、内部構造の推定に用いた。

※4 硫化鉄

鉄と硫黄が結び付いた化合物。本研究では、化学式 FeS で表される硫化鉄を扱う。観測された磁場を説明する核の候補には、これに近いほど硫黄に富む組成が含まれる。

❖ **参考 URL**

木村淳助教 研究者総覧 URL https://rd.iai.osaka-u.ac.jp/ja/d2381c68e7bfdcb8.html

❖ **本件に関する問い合わせ先**

＜研究に関するお問い合わせ＞
大阪大学 大学院理学研究科 助教 木村淳(きむらじゅん)
TEL: 06-6850-5540 FAX: 06-6850-5480
E-mail: junkim@ess.sci.osaka-u.ac.jp

＜広報に関するお問い合わせ＞
大阪大学 理学研究科 庶務係
TEL: 06-6850-5280 FAX: 06-6850-5288
E-mail: ri-syomu@office.osaka-u.ac.jp

❖ **発信先 報道機関**

大阪大学から 大阪科学・大学記者クラブ、文部科学記者会、科学記者会