

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28日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22740285

研究課題名（和文） 衛星中心核—衛星の熱史と金属核形成，固有磁場起源の解明—

研究課題名（英文） Central core in satellites: Understanding thermal history, core formation, and origin of intrinsic magnetic field.

研究代表者

木村 淳（KIMURA JUN）

北海道大学・大学院理学研究院・研究員

研究者番号：00536138

研究成果の概要（和文）：木星衛星ガニメデは太陽系最大の衛星であり，地球のような金属核起源の固有磁場を持つ唯一の衛星である。しかし半径は地球の半分以下なため，集積時に獲得する熱エネルギーのみで金属成分を分離させることは難しい。そこで，ガニメデの初期内部進化に関する数値計算を行い，ガニメデが金属核を持ち得る時期や内部成分比のパラメタ範囲について調べた。結果，ガニメデ内部の温度が金属成分の融点を上回るのは，自身の形成から10～20億年後であることが分かった。これは，集積直後に核形成が完了した地球型惑星とは大きく異なり，固有磁場の発生もごく最近に始まった可能性が示唆される。

研究成果の概要（英文）：The Ganymede's interior appears to be clearly differentiated and has a metallic core from the gravitational observation and the existence of the intrinsic magnetic field. But because of its smaller size than the terrestrial planets, Ganymede is difficult to form the metallic core just after the end of accretion. This work proposes that dehydration of pristine hydrous rock-metal-mixed core would trigger complete differentiation in the larger moon during the thermal evolution. In a reasonable range of viscosity is assumed for hydrated rocky core, Ganymede experiences the dehydration of the pristine core and possibly the metallic component could segregates from the rocky materials around 2 Gyr after its accretion.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	2,400,000	720,000	3,120,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体惑星物理学

キーワード：惑星科学・衛星・内部構造・磁場・進化・熱史

1. 研究開始当初の背景

地球が有する大規模な活動のひとつに，固有磁場の形成がある。双極子磁場として良く近似できる地球磁場は，金属核内での対流現象がその起源と考えられている。水星にも弱

いながら地球に類似した磁場を持つことが分かっている一方で，金星や火星ではそのような磁場は存在していない。このように惑星間では多様な磁場環境の差異が存在しており，それに対する説明を与える研究が長年行

われている。

他方で衛星に目を向けると、地球の月では現在は大規模な磁場が存在していない。磁場の生成には金属核が溶融しかつ対流状態にあることが必要だが、衛星程度のサイズでは惑星に比べて天体の冷却が早くに進行し、金属核もるとも冷え切って磁場の生成とは無縁であるとの見方が占めていた。ところが1997年に木星系の調査を行っていたガリレオ探査機が、衛星ガニメデにおいて大規模な固有磁場の存在を発見する。これは衛星が磁場を持つことを初めて明らかにした観測であり、その磁場は地球と同様に磁気双極子で良く近似できるものであった。そして現在でも、磁場を持つ衛星はガニメデが唯一である。

しかしこの発見は同時に新たな謎を生んだ。ガニメデ程度の（地球の半分以下の）サイズでは、形成初期に地球のような大規模な溶融状態を達成し（十分な集積エネルギーを獲得し）早期に金属核の形成を完了することが困難である。これはすなわち、金属核形成をはじめとする内部熱進化の歴史が地球のそれとは大きく異なる可能性を示唆する。しかしながら従来の研究では金属核形成に着目した考察がほとんど行われていない。地球型惑星と同じく固体天体という組成上の共通項を持つ衛星について、上記のような問題意識での考察を行うことは、この分野の今後の発展に非常に重要であると考えられる。いわば比較磁場学とも言えるべき観点に立った時、衛星は残された重要な研究対象である。中でもガニメデは惑星と衛星の中間的な大きさを持ち、熱い惑星と冷たい衛星とをつなぐ境界領域の天体であることから、地球型天体全般の進化の理解にとって大きな鍵を握るという点で科学コミュニティの認識は一致している。

2. 研究の目的

ガニメデをはじめとする衛星の核形成（内部構造進化）に関する先行研究（木星系では Schubert et al., 1981, 土星系では Ellsworth and Schubert, 1983 が端緒）では、H₂O と岩石との分離を議論しているのみであり、構成物質として金属鉄をそもそも考慮に入れていない。この状況設定は1990年代後半の研究まで続いたが、これは内部進化に関する議論の主眼が衛星の表層を覆うH₂O（氷）の“状態”に置かれていたこと、すなわち氷層内の融解領域（地下海）の有無やその寿命といった点に興味に向いていたためである。

ガリレオ探査機によるガニメデ固有磁場の発見をもって初めて、衛星内部での金属鉄（金属核）の存在が考えられるようになったが、それ以降に行われた内部進化に関する研究（例えば Hauke et al., 2006, Kimura et al. 2009）では、初めから金属核ありきの内部構

造を平均密度と慣性能率を満たす範囲内で仮定的に与えてしまい、その後の熱進化を調べている。その結果によると、ガニメデにおける固有磁場の発生（金属核が溶融しかつ対流すること）は最近10億年以内に始まった可能性が示唆されている。これには先に述べた通り金属核形成が衛星の誕生直後に完了していたとする仮定に基づくが、衛星程度のサイズでは、その形成初期に地球のような大規模な溶融状態を達成し（十分な集積熱を獲得し）比較的早期に金属核の形成を完了することが困難と思われるため、上記のような状況設定は必ずしも適切でない。

これはすなわち、金属核形成過程が地球のそれとは大きく異なる可能性を浮き彫りにするものであり、本研究ではここに切り込むことによって、ガニメデ内部においていつどのように金属鉄の分離および金属核の形成が達成されたのかについて、理解を得ようとするものである。

3. 研究の方法

ガニメデの金属核形成に着目した内部熱進化の数値シミュレーションを行うため、1次元球対象の系における熱拡散方程式にもとづく数値モデルを構築した（図1）。

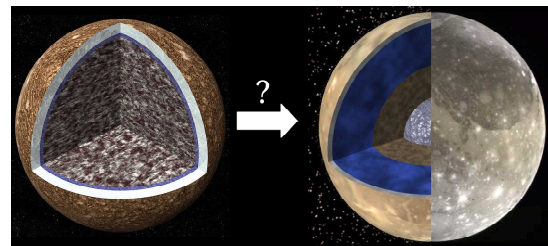


図1：本研究が想定する内部進化の想像図。含水鉱物と金属の混合核をH₂O層が覆う2層構造の原始ガニメデが、その後の内部加熱によって成分分離を起こし、金属核が形成する。

木星系形成領域は雪線の外側にあったと考えられるため、また、木星領域周辺の小惑星が含水鉱物に富む特徴を持っていることから、原始ガニメデは含水鉱物と金属の混合状態で集積し、含水鉱物と金属の混合核と外部のH₂O層という2層構造で誕生したと仮定し、衛星の中心から表面まで熱拡散方程式を解く。初期状態として水の融点に沿った温度構造を与え、主要な熱源として長寿命放射性核種（U, Th, K）の崩壊熱を考慮する。潮汐加熱は考慮しない。温度が約900 Kを超えた場合には含水鉱物が脱水するとし、それに伴うレオロジーや熱物性の変化と、反応熱の発生、脱水による移流熱輸送をモデルに組み込む。

平均密度と衛星の表面半径、そして内部の質量集中度の指標である慣性能率を満たす範囲で、混合核とH₂O層の体積比をさまざま

に変えた内部構造を設定し、数値シミュレーションによって 50 億年間にわたる内部温度構造の変化を追跡する。その間に中心温度が金属成分 Fe-FeS-Fe₃O₄ 系の共融点である 1250 K を超えた場合には、その構造は金属核を作ることができるかと判定し、その形成時期や金属核サイズを評価する。

4. 研究成果

(1) ガニメデ金属核の形成

ガニメデの平均密度と衛星の表面半径、そして内部の質量集中度の指標である慣性率を満たす範囲で内部構造（混合核と H₂O 層の量比）を帰る場合、シリケート含有率は約 42~55 質量%の範囲で変動し得る。以下はその典型値である 51 質量%の場合の結果を例に説明する。

まず、原始ガニメデの誕生から 10~15 億年後に、混合核の深部温度が含水鉱物の脱水温度に達する。脱水に伴う反応熱（吸熱反応）の発生により、脱水過程が完了するまでは一時的に温度上昇が抑えられるが、脱水完了後は急激なレオロジー変化（粘性率の急増）によって温度上昇が加速する。また含水鉱物から抜けた水の上昇に伴う移流熱輸送によって上部が暖められ、混合核浅部の脱水が進む。さらなる温度上昇によって、原始ガニメデの誕生から約 25~30 億年後には深部温度が金属成分の共融点に達し、金属核形成が行われることが分かった（図 2）。核形成温度への到達までにこれほどの時間がかかるのは、小さな天体サイズに対応する初期温度の低さと、含水鉱物をもつ柔らかなレオロジー（高い熱輸送効率）に原因がある。

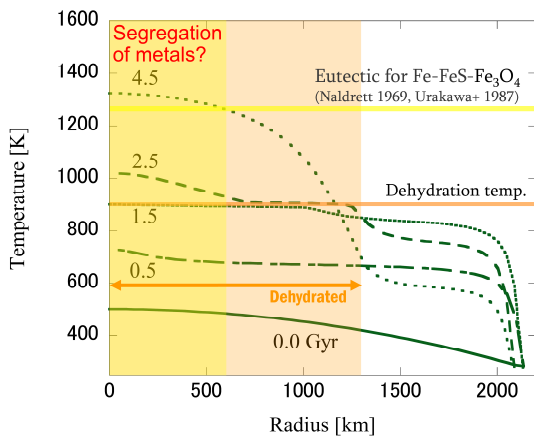


図 2：シリケート含有率 51 質量%の内部構造を設定した場合の、混合核内部の温度構造（計算開始時、15 億年後、25 億年後、45 億年後）。含水鉱物の脱水温度は 900 K、金属成分の共融点は 1250 である。橙色は脱水が起こった領域、黄色は金属成分が溶融し得る領域をあらわす。

同様の計算を様々なシリケート含有率に対して行ったところ、47 質量%以下の場合には中心温度をも金属成分の共融点に達しない、すなわち金属核を形成できないことが分かった（図 3）。

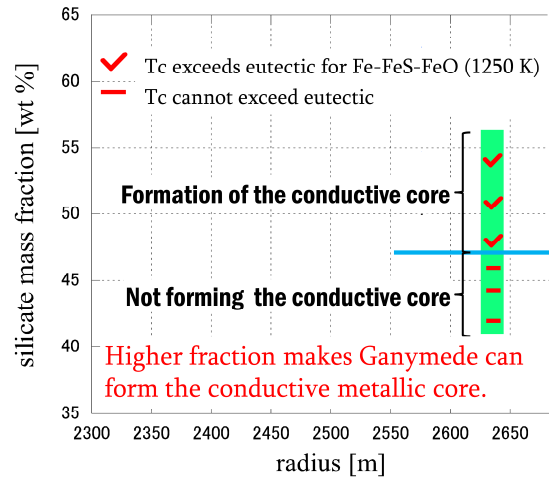


図 3：シリケート含有率を変化させた場合の、金属核形成の成否を示したダイアグラム。

(2) ガニメデ表面地形形成への寄与

また、含水鉱物の脱水は衛星全体の体積変化をもたらす。1 GPa (H₂O 層底部の圧力に相当) における蛇紋岩の脱水実験の結果に寄れば、脱水前と後とでは全体で約 10%の体積増加が生じるとの報告がある (Kono et al., 2007)。本研究ではこの結果を用いてガニメデの膨張量を評価したところ、3~15 km の半径増加（現在のガニメデ半径の 0.1~0.6%の増加）が生じることが見出された（図 4）。

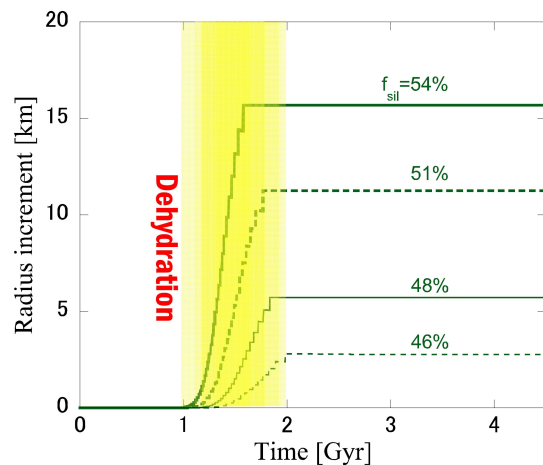


図 4：内部の脱水に伴う半径の増加量。

ガニメデ表面には全球的な正断層構造があり、伸張性応力すなわち全球的な膨張イベントによって形成したと考えられている。先行研究によると、それらの断層構造の画像解析から見積もられたガニメデ半径の増加量は 0.02~4 % であり、本研究で見出された増分はこの範囲にマッチする。また、脱水とそ

れに伴う体積変化イベントは衛星系正誤 10～20 億年後に生じる。これは正断層構造の地形年代が約 20 億年と見積もられていることとおおよそ調和的であることから、内部の脱水イベントはガニメデ表面に見られる表面伸張性地形の原因として有力であることが示唆される。ただしこの見積もりは鉱物脱水時の体積変化量が強い圧力依存性を持つことを無視し、1 GPa での変化量に押し付けているため、定量的評価には注意を要する。今後の研究において、含水鉱物の状態方程式に基づく丹念な見積もりが必要である。

(3) 衛星カリストとの違い

一方、ガニメデのひとつ外側を回る木星衛星カリストは、ガニメデとほぼ同サイズ、同平均密度だが固有磁場（金属核）を持たない。この違いに説明を与えるべく、衛星カリストについても同様の数値実験を行った。先にガニメデの例で示したものと同一、シリケート含有率 51 質量%の場合では、カリストは内部温度が金属成分の共融点に達せず、金属核形成が困難となった（図 5）。

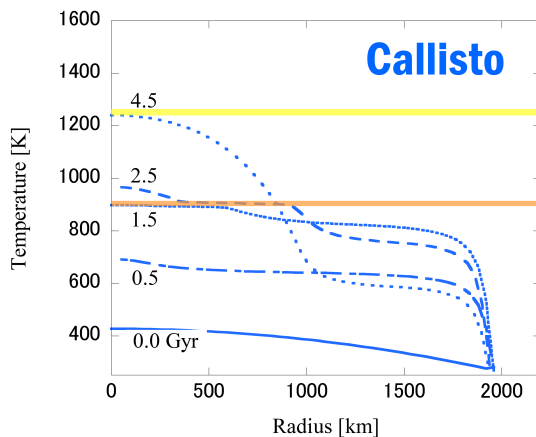


図 5：シリケート含有率 51 質量%の内部構造を設定した場合の、カリスト混合核内部の温度構造。

さらに、ガニメデに対して行ったのと同様に、カリストにおいてもさまざまなシリケート含有率を仮定して数値シミュレーションを実行したところ、カリストの内部温度が金属成分の共融点に達するためには、ガニメデ寄りも大きいシリケート含有率が必要であることが分かった（図 6）。これは、カリストのサイズと平均密度（すなわち放射性熱源量）がガニメデ寄りも小さいことが主な要因となり、天体サイズに対応する初期温度の低さと、含水鉱物がもつ柔らかなレオロジー（高い熱輸送効率）に打ち勝って金属成分の融点まで温度を上昇させることが難しいからである。

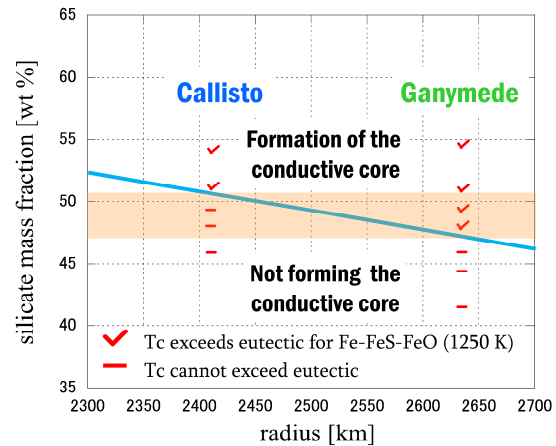


図 6：シリケート含有率を変化させた場合の、ガニメデとカリストにおける金属核形成の成否を示したダイアグラム。

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 9 件）

- ① Jun Kimura, Interior structure, generation of the magnetic field, and formation of the metallic core of giant icy moons, Planetary People, 査読有, 20, (2012), 10-15
- ② Jun Kimura, Taichi Kawamura, Hisataka Morito, Tomokatsu Morota, Chikatoshi Honda, Kiyoshi Kuramoto, and Tatsuaki Okada, Sublimation's impact on temporal change of albedo dichotomy on Iapetus, Icarus, 査読有, 214, (2011), 596-605
- ③ Tomokatsu Morota, Jun-ichi Haruyama, Makiko Ohtake, Tsuneo Matsunaga, Chikatoshi Honda, Yasuhiro Yokota, Jun Kimura, Yoshiko Ogawa, Naru Hirata, Hirohide Demura, Akira Iwasaki, Takamitsu Sugihara, Kazuto Saiki, Ryosuke Nakamura, Shingo Kobayashi, Yoshiaki Ishihara, Hiroshi Takeda, and Harald Hiesinger, Earth and Planetary Science Letters, 査読有, 302, (2011), 255-266

〔学会発表〕（計 15 件）

- ① Jun Kimura and Kiyoshi Kuramoto, Formation of a conductive core, grooved terrains, and strongly differentiated interior of Ganymede due to dehydration of primordial hydrous rock with implication for the dichotomy from Callisto, European Planetary Science Congress 2012, 2012.9.23-28, IFEMA-Feria (Spain)

- ② Jun Kimura and Kiyoshi Kuramoto, Formation of Ganymede conductive core and grooved terrain by dehydration of primordial hydrous rock, AOGS 9th Annual Meeting, 2012. 8. 13-17, Resorts World Convention Centre (Singapore)
- ③ 木村淳, 巨大氷衛星の内部構造 (地下海の存在可能性), 宇宙における生命の総合的考察とその研究戦略研究会, 2011. 12. 1, 国際高等研究所 (奈良県木津川市)
- ④ Jun Kimura and Kiyoshi Kuramoto, Dehydration of primordial hydrous rock in Ganymede: formation of the conductive core, the grooved terrain, and the contrasting interior from Callisto, AGU Fall Meeting 2011, 2011. 12. 1, Moscone Convention Center (サンフランシスコ)
- ⑤ Jun Kimura and Kiyoshi Kuramoto, Turning point in differentiation history between Ganymede and Callisto induced by dehydration of primitive hydrous rock, EPSC-DPS Joint Meeting 2011, 2011. 10. 1, La Cité Internationale des Congrès Nantes Métropole (ナント, フランス)

[図書] (計1件)

- ① 木村淳, 化学同人, アストロバイオロジー: 宇宙に生命の起源を求めて, (2013), 222-231

6. 研究組織

(1) 研究代表者

木村 淳 (KIMURA JUN)
北海道大学・大学院理学研究院・研究員
研究者番号: 00536138

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし