

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：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25800242

研究課題名(和文)巨大氷衛星の作り分け～ガニメデ、カリスト、タイタン～

研究課題名(英文)Origin and diversity among the large icy moons: Ganymede, Callisto and Titan

研究代表者

木村 淳(Kimura, Jun)

東京工業大学・地球生命研究所・EON研究員

研究者番号：00536138

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：3つの巨大氷衛星の異なる内部および表層の特徴を説明するために、含水シリケート始原核(以後、含水核)を導入したモデルを構築した。半径・密度ともに最大のガニメデでは、岩石中の放射性核種が含水核を加熱して深部が脱水すると、脱水に伴う高粘性率化からさらなる昇温が起こり、含水核深部温度はやがて金属成分の融点を超え、金属核が形成する。脱水したH₂Oは上昇して衛星全体が膨張し、表面の伸張性テクトニクスを作り出す。半径と平均密度がガニメデよりやや小さいカリストでは脱水が不十分で金属核は形成しない。2衛星の中間的な半径と密度を持つタイタンは、ガニメデより規模は小さいものの脱水と衛星膨張が生じることが分かった。

研究成果の概要(英文)：To explain diverse characteristics of surface and interior among three large icy moons, we constructed a new evolutionary model considering the primordial hydrous core. In Ganymede, having largest radius and bulk density, decay energy of the long-lived radioactive elements heats the hydrous core, then deeper part of the core should be dehydrated and its viscosity became larger. Eventually the temperature of deeper core exceeds the eutectic of the metallic components, which means the metallic core can be formed. Dehydrated water would be risen up and large expansion and extensional tectonics must be occurred. In Callisto, having little smaller radius and density than Ganymede, dehydration of the hydrous core would be insufficient and large metallic core could not be formed. Titan has an intermediate radius and density between Ganymede and Callisto, and dehydration of the hydrous core and metallic core formation can be occurred though its amount would be smaller than Ganymede.

研究分野：惑星科学

キーワード：氷衛星

1. 研究開始当初の背景

太陽系天体の主構成成分は、ガス、岩石(ケイ酸塩と金属)、そして氷の3つである。惑星では太陽からの距離に対応して成分含有比が変わり、地球型(岩石)、木星型(巨大ガス)、天王星型(巨大氷)となる。そして巨大惑星は多くの衛星を従えており、氷を多く持つという組成上の共通性を持つ。中でも木星系のガニメデ、カリスト、土星系のタイタンの3衛星はいずれも半径2500 km級の惑星サイズの巨大衛星であり、かつ岩石と氷をほぼ1:1の体積比で持つという類似性を持つ。しかしながらその表層と内部構造には極めて対照的な特徴が見られる。ガニメデ(半径2634 km, 平均密度1.94 g/cc)は衛星で唯一の固有磁場を持ち、慣性能率因子の小ささ(~ 0.311)と相まって、中心には金属核の存在が強く示唆される。また表層には全球規模の断層地形が広がり、過去の全球膨張に伴う伸張性テクトニクスの痕跡と考えられている。

一方で、ガニメデの外側を周回するカリスト(半径2410 km, 平均密度1.83 g/cc)には固有磁場がなく、慣性能率因子もガニメデより有意に大きい(~ 0.359)ことから、金属核はなく内部分化が不完全と思われる。その表層は衝突クレータに埋め尽くされ極めて古い地層年代を持つことから、ガニメデとは極めて異なる状態にある。両衛星はともに周木星円盤内で形成したと考えられているが、なぜこれほど極端に異なる内部および表層状態に至ったのかという問題について40年来にわたり様々な研究が行われたが、金属核の有無と地形の有無をともに整合的に説明するモデルは未だ示されていない。

加えて土星系衛星のタイタン(半径2576 km, 平均密度1.88 g/cc)も、類似したサイズと平均密度を持ちながらガニメデやカリストともまた異なる構造と状態を持つ。タイタンは衛星で唯一の厚い(表面で1.5気圧の窒素主体)大気を持ち、表面には液体メタンの流動痕と思われる河川状地形や液体炭化水素の湖が存在する。その内部は比較的大きい慣性能率因子(~ 0.341)を持ち、ガニメデ様の固有磁場を持たないことから、内部分化は不十分であろうと解釈されている。

類似した大きさと平均密度を持ちながら、なぜ衛星間でかくも大きな差異が生じたのか。進化の分岐に寄与したものはおそらく集積過程や内部の組成・熱構造、それらの進化の複雑さであるが、従来の研究では、内部熱史から示唆される全球膨張イベント(地形形成)の時期と、クレータ密度から推定されるガニメデ地形年代との不整合や、金属成分をそもそも考慮していない等の本質的な不備がある。これを解決し整合的な仮説を提示することは、単に衛星の進化を解明するだけに留まらない。巨大氷衛星のカテゴリ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、岩石主体の地球型天体との比較を通して固体天体全般の進化の理解にとっても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。また、ほぼ等量の氷と岩石からなる惑星サイズの固体天体という姿は、近年発見が相次ぐ系外惑星の多彩なバリエーションの中でも普遍的に存在し得る形態であることから、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おける大きな波及性を持つ。

2. 研究の目的

巨大氷衛星の進化の違いという観点では、Schubert et al., 1981が端緒となって以来様々な仮説が出されたが、1990年代後半までの研究はいずれもH₂Oと岩石との分離だけを議論しており、構成物質として金属鉄をそもそも考えていない。これは内部進化に関する議論の主眼が衛星を覆うH₂O(氷)の“状態”，すなわち氷層内の融解領域(地下海)の有無やその寿命に置かれていたためである。1996年のGalileo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では初めからガニメデに金属核ありきの内部構造を仮定し、その後の熱進化を調べている。

しかしながら、ガニメデが集積エネルギーのみで金属核を分化させることは理論的に困難である。これは氷衛星が地球型惑星と決定的に異なる点であり、現在のガニメデ内部が長期進化の途上で分化した可能性が示唆される。本研究では「含水シリケート核の脱水モデル」(図3)を新たに構築・導入することでこの問題に切り込み、ガニメデ内部で金属核や断層地形が形成した時期や規模、そしてカリストやタイタンでは形成しなかった理由についての説明を得る。また脱水過程に伴う表面への脱ガス量も見出し、衛星大気(特にタイタン大気)の起源についても考察する。以上のアウトプット(核の大きさや地形の形成時期と規模、大気成分や厚さ)は観測量との照合が可能のため、モデルへのフィードバックを行いながら妥当性を評価する。

3. 研究の方法

本研究では、3つの巨大氷衛星の進化の違い(金属核分化の有無、表層テクトニクスの有無)を説明するために「含水シリケート始原核の脱水モデル」(図1)を構築し、数値解析的考察を行う。解析には、天体中心から表面までの非定常熱拡散方程式を一次元球対称系にて記述した数値モデル(Kimura et al., 2007 EPS; Kimura et al., 2009 Icarus)をベースとし、本課題への改良を行う。具体的には、含水シリケートの脱水過程を表現す

るためのレオロジーほか物性変化、反応熱、放出水の上昇による移流熱輸送、水の分離やその後の金属分化がもたらす体積変化や層厚の変化といった空間発展系としての取り扱い、などを本課題で新たに導入する。巨大氷衛星の内部環境は圧力が最大 10 GPa、温度が 300~2000 K であり、この環境下での含水シリケートの脱水過程については地球におけるスラブの沈み込みに焦点を当てた実験結果が多く存在するため、これらを参照し本課題の数値モデルへと組み込む。

数値解析のアウトプットとして得られる、特にガニメデにおける金属核サイズや体積増加量（伸張性地形の規模）に対しては、観測量との比較とモデルへのフィードバック（パラメタ範囲の高精度化など）が可能である。従来のガリレオ探査による（低解像度かつ低表面被覆率な）実測値との照合だけでなく、将来探査（JUICE ミッション）における実証的観測（高精度地形・重力場データ取得）に向けた具体的な指針や予察を与える視点でのモデル構築を行い、現在進行中の機器開発にも反映させる。以上のために、次のような 3 段階の戦略で研究を実施する。

(1) 含水シリケートと金属の混合物として形成した原始氷衛星の熱構造進化を、数値シミュレーションの手法によって解析する。はじめに木星衛星のガニメデをモデルケースとし、脱水領域の規模やそれに伴う体積増加量の評価、金属核形成の時期や核サイズなどについて新たな知見を得る。

(2) ガニメデと質量やサイズの類似した、しかし表面地形や内部分化度が異なるカリストとタイタンに対しても、衛星サイズと平均密度を主なパラメタとした同様の分析を行い、3 衛星の進化の違いについて説明を与える。

(3) 次期木星系探査計画 JUICE でのガニメデ周回観測に向け、表面の伸張性地形（体積増加量）の大きさや金属核サイズに関する観測的情報と照合するための具体的な指針作りや予察を行い、機器開発に反映させる。

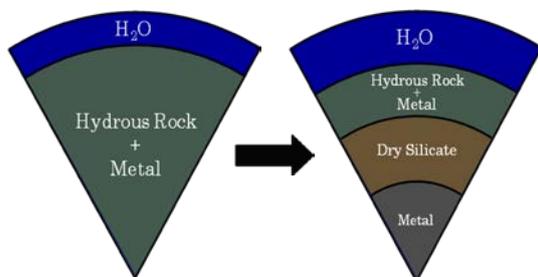


図 1：本課題で構築する含水核モデルの概念図。水・岩石・金属の混合物として形成した衛星（左）がその後の内部発熱によって脱水、成分分離を経て分化構造を持つ（右）。

4. 研究成果

4.1. ガニメデにおける金属核形成と表層テ

クトニクス

3 衛星のうち最大の半径と質量を持つ木星衛星ガニメデと、最小の半径と質量を持つ木星衛星カリストを対象とした解析を実施した。初期の内部層構造およびその温度状態を以下のように設定する。中心に CI コンドライトの元素比を持った岩石を含水化させた含水核を仮定し、それを H₂O 層が覆う 2 層構造を考える。状態方程式を用い、衛星の全質量が現在値になるように各層の厚さを計算する。これらの層厚は計算の進行とともに可変とする。H₂O 層は、その表面で 1 気圧での融点にある断熱温度勾配を持つ。含水核は圧力に依存した H₂O の融点を持つ。これを初期温度構造とし、含水核に含まれる長寿命放射性核種の壊変熱のみを熱源として、その後 45 億年間の温度構造変化を追跡する。

含水核温度構造の時間変化を図 2 に示す。含水核は長寿命放射性核種の壊変熱を受けてその温度が上昇し、計算開始後約 5 億年で含水核深部の温度が脱水温度を超え、脱水が発生する。脱水した領域は無水橄欖岩様の組成へと変化し、特に粘性率の急増が熱輸送効率の低下を引き起こすことでさらなるさらなる温度上昇と脱水をもたらす。このような正のフィードバックによって、ついには深部温度が金属成分（ここでは Fe-FeS-Fe₃O₄）の共融点を超え、金属核の形成が示唆される。

図 3 は密度構造の時間変化を示す。初期の含水核は、高圧領域において Phase-A と呼ばれる高圧含水層が出現する。温度の上昇とともに含水核の一部は脱水して高密度化するとともに、脱水した H₂O が上昇し H₂O 層に加わる。含水核は脱水とともにその半径が減少し、H₂O 層厚の増加とともに衛星全体の半径が増加する（図 4）。これは衛星表面に伸張性のテクトニクスが発生することを示しており、ガニメデ表面に見られる地質学的特徴と調和的である。また、衛星の膨張が計算開始後 10 億年~25 億年にかけて発生する。これはガニメデの視聴性地形において推定されている地質年代を極めて調和的である。

含水核深部温度の上昇に伴い形成が示唆される金属核の半径は最大で約 300km に達する。また、含水核の脱水と合わせ、衛星内部での質量集中度を示す慣性能率因子は 0.325 となる（図 5）。現在のガニメデに対しては、金属核半径が 500~1000 km、慣性能率因子が 0.311 と推定されていることと比較すると、本モデルで形成する金属核はそのサイズが小さく、慣性能率がやや大きい（質量集中が足りない）。これは、本モデルでは潮汐加熱を考慮しておらず、内部発熱量が小さい前提によって説明可能と考える。

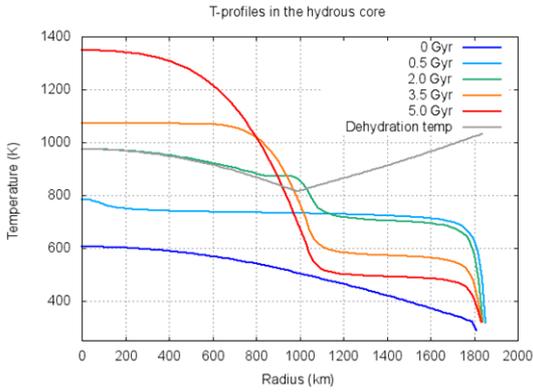


図 2：含水核温度構造の時間変化. 色線は各 s 時間における温度構造, 灰色線は含水鉱物の脱水温度を示す.

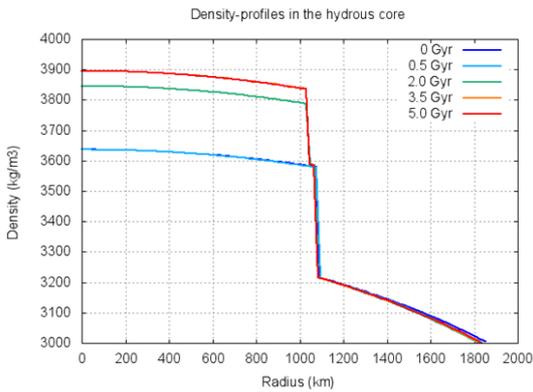


図 3：含水核密度構造の時間変化. 色線は各時間における密度構造を示す.

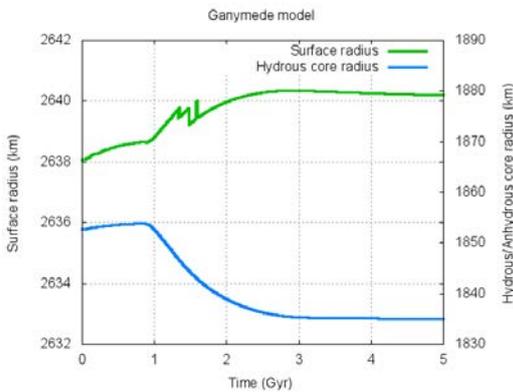


図 4：ガニメデ表面半径（緑）と含水核半径（青）の時間変化.

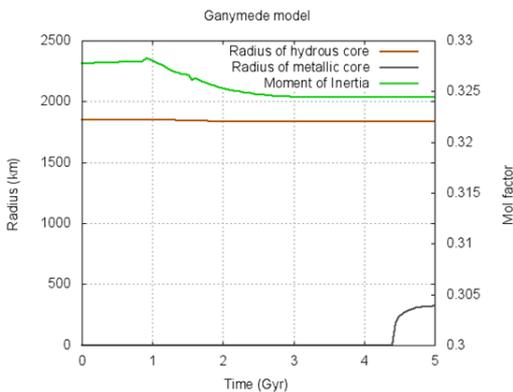


図 5：含水核温度構造の時間変化. 色線は各 s 時間における温度構造, 灰色線は含水鉱物の脱水温度を示す.

4.2. カリストとタイタンにおける金属核形成と表層テクトニクス

カリストはガニメデと比較して表面半径と平均密度ともに小さい. 前者は主に天体全体の冷却を促進することに寄与し, 後者は岩石成分の含有率, すなわち放射性熱源量が小さく発熱を抑えることに寄与する. これらの効果によって, カリスト含水核の加熱や脱水度はガニメデと比較して小さい. 金属成分の融点を超える領域の体積も有意に小さく, また脱水量も小さいために衛星全体の膨張も起こらないことが分かった (図 6, 7). これは, カリストの表面に一切の地質学的活動の痕跡が見られないことと調和的である.

タイタンはガニメデとカリストのほぼ中間的な表面半径と平均密度を持つ. 同様の計算の結果, タイタンでは半径 100 km 程度の金属核が形成し, 数百 m 程度の膨張が発生する. 現在のタイタンではガニメデのような金属核起源の固有磁場は観測されておらず, 慣性率因子に基づく質量集中度の推定においても, 大きな金属核の存在は否定されている. 表面での伸張性地形は認められていないが, タイタンは表面で 1.5 気圧に達する厚い窒素大気を持ち, メタン循環に伴う降雨や河川様現象が確認されていることから, 内因性の地形は侵食されていると考えられる.

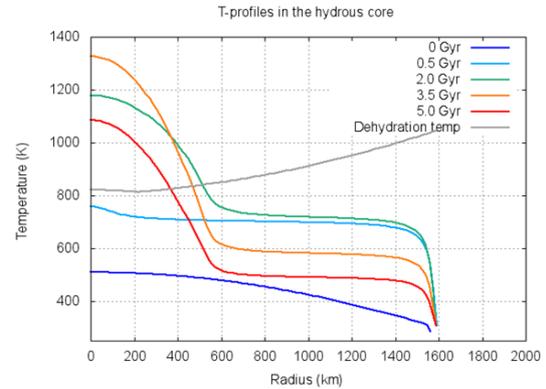


図 6：含水核温度構造の時間変化. 色線は各 s 時間における温度構造, 灰色線は含水鉱物の脱水温度を示す.

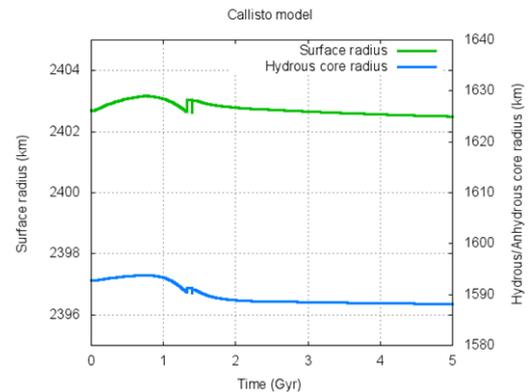


図7：カリスト表面半径（緑）と含水核半径（青）の時間変化。

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 8 件）

1. **Jun Kimura**, and Norio Kitadai, Polymerization of building blocks of life on Europa and other icy moons, *Astrobiology* (査読有) **15**, 430-441, doi:10.1089/ast.2015.1306, 2015.
2. Caleb Scharf, **Jun Kimura**, et al., A Strategy for Origins of Life Research, *Astrobiology* (査読無) **15**, 1031-1042, doi:10.1089/ast.2015.1113, 2016.
3. **Jun Kimura**, Icy moon and water ocean: Explorations of the Jovian system, *Transactions of the Institute of Natural Science, Senshu University* (in Japanese) (査読無) **94**, 14-18, 2014.
4. Yuka Fujii, **Jun Kimura**, James Dohm, and Makiko Ohtake, Geology and photometric variation of Solar System bodies with minor atmospheres: Implications for solid exoplanets, *Astrobiology* (査読有) **14**, 753-768, doi:10.1089/ast.2014.1165, 2014.
5. Noriyuki Namiki, **Jun Kimura**, et al., Scientific use of LIDAR data of Hayabusa-2 Mission, *New Results in the Observations and Space Exploration of Asteroids: Proc. Intl. CJMT-1 WS on Asteroidal Sci.* (査読有), 74-96, 2014.
6. Yasuhito Sekine, **Jun Kimura**, et al., Exploration of Enceladus' water-rich plumes toward understanding of chemistry and biology of the interior ocean, *Trans. Japan Society for Aeronautical and Space Sci., Aerospace Tech. Japan* (査読有) **12**, No. ists29, p. Tk 7 - Tk 11, doi:10.2322/tastj.12.Tk_7, 2014.
7. Koji Tsumura, **Jun Kimura** et al., Near-infrared Brightness of the Galilean Satellites Eclipsed in Jovian Shadow: A

New Technique to Investigate Jovian Upper Atmosphere, *The Astrophysical Journal* (査読有) **789**, 122, doi:10.1088/0004-637X/789/2/122, 2014.

8. **Jun Kimura**, Sho Sasaki, and Masdaki Fujimoto, Back to Jupiter, with renovated interest in the system and fresh focus on the icy moons (1) - Jupiter system exploration mission "JUICE" as the mission by mankind -, *Planetary People* (in Japanese) (査読無) **22**, 146-151, 2013.

〔学会発表〕（計 15 件）

1. **Jun Kimura**, Toward understanding of the extra-terrestrial habitability, Upstairs Downstairs: Consequences of Internal Planet Evolution for the Habitability and Detectability of Life on Extrasolar Planets, Tempe, AZ, US, Feb 17-19, 2016 (invited talk).
2. **Jun Kimura**, Shunichi Kamata, Steve Vance and Hauke Hussmann, Long-term stability of an subsurface ocean in Ganymede and its effect to tidal response, toward future altimetry measurement, AGU Fall Meeting 2015, SanFrancisco, US, Dec 14-18, 2015.
3. **Jun Kimura** and Shunichi Kamata, Toward characterization of extra-terrestrial deep water world and its habitability using computational approach and spacecraft exploration, 8th Japan Astrobiology Network Workshop, Tokyo, Nov 27 - 28, 2015.
4. **Jun Kimura** and Kiyoshi Kuramoto, Primordial hydrous model for Ganymede might explain a formation of extensional groove and metallic core, JUICE/GALA meeting 2015, DLR Berlin, Germany, Nov 11-12, 2015.

5. **Jun Kimura**, Shunichi Kamata, Koji Matsumoto, Francis Nimmo and Kiyoshi Kuramoto, Tidal deformation of Ganymede and effects of a subsurface ocean: a model calculation in preparation for JUICE-GALA measurements, AOGS 2015 Annual Meeting, Singapore, Aug 3 - 7, 2015.
 6. **Jun Kimura**, Steve Vance, Hauke Hussmann and Kei Kurita, Stability of an internal ocean in Ganymede, Astrobiology Science Conference 2015, Chicago, US, June 15 – 19, 2015.
 7. **Jun Kimura** and Kiyoshi Kuramoto, Interior evolution of Ganymede and its surface manifestation: toward JUICE measurements, JpGU Meeting 2015, Chiba, Japan, May 24 - 28, 2015.
 8. **Jun Kimura** and Norio Kitadai, Polymerization of building blocks of life on Europa and other icy moons, European Planetary Science Congress 2014, Cascais, Spain, Sep 7-12, 2014.
 9. **Jun Kimura** and Kiyoshi Kuramoto, Divergent evolutionary model among the large icy moons: Metallic core formation, AOGS 2014 Annual Meeting, Sapporo, Japan, Jul 28 - Aug 1, 2014.
 10. **Jun Kimura** and Norio Kitadai, Polymerization of building blocks of life on Europa and other icy moons, Origins 2014, Nara, Japan, Jul 6-11, 2014.
 11. **Jun Kimura**, Topographic measurements of grooves and insights into the interior differentiation, JUICE/GALA Meeting, Tokyo, Japan, May 7-8, 2014.
 12. **Jun Kimura**, Steve Vance, Hauke Hussmann, and Kei Kurita, Longevity of an internal ocean in Ganymede, JpGU Meeting 2014, Yokohama, Japan, Apr 28 - May 2, 2014.
 13. **Jun Kimura**, “Deep Habitat” in the icy moons: structure and evolution of the internal ocean, International Astrobiology Workshop 2013, Sagamihara, Japan, Nov 28-30, 2013.
 14. **Jun Kimura**, Research activities on icy and rocky satellites in Japan: Theory, experiments, and explorations, JUICE/GALA meeting 2013, DLR Berlin, Germany, Aug 29-30, 2013.
 15. **Jun Kimura** and Kiyoshi Kuramoto, Evolution and diversity of the large icy moons, JpGU Meeting 2013, Chiba, Japan, May 19-24, 2013.
- 〔図書〕（計 1 件）
1. **木村淳**, 東大出版会, 宇宙生命論 (分担), (2015), 128-130.
6. 研究組織
 (1) 研究代表者
 木村 淳 (KIMURA JUN)
 東京工業大学地球生命研究所・EON 研究員
 研究者番号 : 00536138