

特集「将来木星圏・土星圏探査計画へのサイエンス：その2」

巨大氷衛星の内部構造，固有磁場発生，金属核形成

木村 淳^{1,2}

2011年9月25日受領，2012年1月10日受理。

(要旨) 太陽系最大の衛星である木星系のガニメデは，金属核起源の双極子磁場を持つ唯一の衛星である。一方でその内部構造の推定には観測量が不足しており，金属核や岩石マントルの量比には大きな不確定性が残されている。本稿では，ガニメデ内部熱史に関する数値シミュレーションを行い，磁場の発生に必要な金属核の熱的状态を制約条件に用いて内部層構造の量比を制約した研究をレビューするとともに，衛星エウロパやカリスト，タイタンといった磁場を持たない(しかし大きさ等でガニメデと類似性を持つ)衛星との進化史の違いについても議論を広げる。

1. 衛星唯一の固有磁場を持つガニメデ

地球が有する大規模な活動のひとつに，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主因と考えられている。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(ダイナモ運動が存在する)ことが必要だが，衛星程度のサイズでは天体の冷却が早くに進行し，金属核もろとも冷え切って磁場の生成とは無縁であるとの見方が従来は一般的であった。衛星の中でも木星系のガニメデは水星を超える 2634 km の半径を持った太陽系最大の衛星だが，平均密度は水星が約 5427 kg/m³ であるのに対してガニメデは 1936 kg/m³ しかなく，1990年代半ばまでは金属核の存在自体が内部構造の議論において考慮されていなかった。ところが1997年に，当時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 [1]。赤道表面で約 750 nT の強度(地球の約 1/80 ~ 1/40，周辺の木星磁場強度は約 100 nT)を持ち，磁気軸が自転軸から約 10 度傾いた双極

子磁場を考えることで良く説明できるガニメデの磁場は，地球と同様に金属核内での流体運動が最も有力な起源と考えられている [1, 2]。これは衛星において固有磁場の存在を初めて明らかにした観測であり，現在でも金属核起源の磁場を持つことが確認されている衛星はガニメデが唯一である。

磁場の存在が明らかになったことで，ガニメデの中心には(少なくとも一部が)溶融した金属核の存在が示唆されるが，金属核の有無やその状態を含めたガニメデの内部構造を理解するために我々が現状で持ち得る情報は，衛星近傍を通過する探査機の航路を追跡して得られる重力場データ(衛星の慣性率)と衛星の平均密度(衛星の大きさと質量)だけであり [3]，それらを用いても内部の密度成層構造をユニークに決めることはできない。つまり現状のガニメデに対する理解では，核内で起きている現象の詳細はおろか内部層構造の量比に関しても不明確であり，特に金属核はその存在の有無さえ決定できていない(慣性率と平均密度からの制約では，岩石との混合状態も許される) [3]。言い換えれば，ガニメデは固有磁場を持つことから内部には金属核が存在する，という程度の理解にとどまっている。明瞭に分化した金属核が存在するにしても，その大きさは核の構成成分として Fe(鉄) - FeS(硫化鉄)組成系を仮定した場合に半径 600 ~ 1200 km とい

1. 惑星科学研究センター(CPS)

2. 北海道大学

junkim@ep.sci.hokudai.ac.jp

う非常に粗い制約しかできていない(核が高密度の場合は小半径, 低密度の場合は大半径)[3, 4].

ガニメデの内部が金属核, 岩石マントル, そしてH₂O殻の3層に分化しており, 衛星が持つ熱源は岩石マントル中に含まれる長寿命放射性核種の壊変熱のみだと仮定すると, 衛星の平均密度と慣性能率による制約の中で核の密度に依存して決まる核とマントルの量比は内部の熱源量や熱輸送効率に強く影響し, ガニメデの内部熱史を大きく変え得る. 磁場の発生という視点に立った場合, 金属核は(少なくとも一部は)融解し, かつ対流している必要がある. すなわち核を融解させておくために必要な熱源と, 核の対流に必要な冷却率を賄うための熱輸送過程という, 相反する2要素の競合の上で磁場発生環境が維持されている. 核サイズの違いは仮定する構成物質の違い(Fe-FeS系での組成比)に従うため, 融点などの熱物性が大きく変化する. 例えば核マントル境界圧力付近での融点は, Fe-FeS系の組成範囲において約800 Kも変化する[5-7]. また核のサイズに従って核全体の熱容量も大きく変化するとともに, 相対的に岩石マントルの体積すなわち衛星内部の放射性熱源の量も変わるため, 核の熱史は内部構造の不確定性の中で大きく異なってしまう. つまりいかなる内部構造でも核が対流運動を起こし磁場を生じ得る熱的状态にあるかは自明ではない.

ガニメデにおける核の熱史と磁場発生について議論した先行研究として, Haukeら[8]はガニメデは形成直後に金属核, 岩石マントル, H₂O層の3層に分化すると仮定し, 初期に2000 Kの高温状態にある金属核がその後の冷却に伴い組成対流を起こして磁場を生み出し得ることを示した. またBlandら[9]は核とマントルがともに2000 K以上の温度を持つ高温の初期状態を仮定し, 他衛星との軌道共鳴に伴う潮汐加熱が核の冷却史に与える影響を調べた. しかし想定し得る軌道進化のパラメタ範囲においては, 現在のガニメデが磁場を持ち得るために必要な核の冷却率を生み出すことはできないと結論づけている.

しかしながら, 初期に金属核温度が2000 Kかそれを上回るとした先行研究の仮定は, ガニメデサイズの天体の集積エネルギーを考えると高すぎるように思われる[10]. また先に述べたように, 推定される内部構造が広い不確定性を持つことと, それに伴い内部熱史が大きく変わり得ることは取り扱われていない. そこ

で本研究では, 内部構造を慣性能率と平均密度から制約される範囲でパラメタとし, かつ内部の初期温度を比較的低温に仮定した場合での内部熱史の違いと磁場発生の可能性を数値シミュレーションによって調べ, 現在のガニメデの金属核が(熱)対流を生み出すに十分な状態にあるかどうかを評価することとした. さらに, ガニメデと同じ木星系の衛星であるエウロパが金属核起源の磁場を現在持っていないことについても考察する.

2. 内部構造をパラメタとした熱史シミュレーション

初期のガニメデは金属核, 岩石マントル, そしてH₂O殻の3層に分化していると仮定し, 各層の量比は慣性能率と平均密度から内部密度構造を推定した先行研究[3, 4]の範囲で様々な組み合わせを与える(進化の過程で各層の量比は変化しない). 熱輸送は伝導と対流によって行われるとし(放射は無視する), 熱源は岩石マントルに含まれる長寿命放射性核種の壊変熱のみを考慮する(潮汐発熱は考慮しない). 核マントル境界から衛星表面までの1次元熱輸送方程式を解き, 45億年間にわたる内部温度構造の時間変化を追跡する. 数値モデルの詳細やパラメタ設定に関してはKimuraらの論文[11]を参照されたい.

初期のH₂O層は全て液体状態にあるとし, 表面は圧力ゼロの融点(273.15 K)とする. H₂O層底部(岩石マントルとの境界面)温度はその圧力におけるH₂Oの融点, 岩石マントルの底部(金属核との境界面)温度はFe-FeS系の共融点(1250 K [7])に設定し, それらの境界温度を持った定常状態の温度分布を岩石マントルの初期温度分布として与える. H₂O層は内部熱収支に伴った固液相変化をし, それによる熱輸送率の変化が核の熱史を支配する可能性があるため, 固液境界面の移動問題を複合して考えた空間発展系で数値シミュレーションを行う. 計算開始後の衛星表面温度は100 Kに固定する.

金属核の熱史を調べるにあたって本研究では金属核を熱浴として扱い(金属核は初めから溶融しており, 岩石に比べて非常に高い熱伝導率と低い粘性率によって熱的に良く攪拌されているとし, 核マントル境界での温度と熱流量が核内状態を代表すると考える), 核内における熱対流発生の有無を評価するために先行研

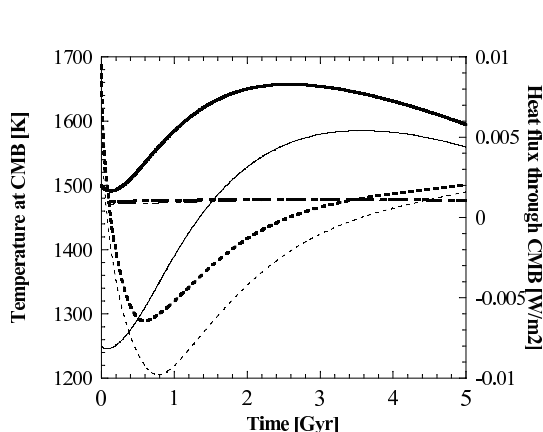


図1: 核半径990 km(硫黄含有率~33重量%), H₂O層厚さ1070 kmの構造を仮定した場合における, ガニメデ核マントル境界における温度(実線・左軸)と熱流量(点線・右軸)の時間変化。太線は, 初期の金属核-岩石マントル境界温度を1500 Kとしてその後の時間発展を示したもの。細線は1250 Kとした場合である。横軸にほぼ平行な一点鎖線は核マントル境界での温度で規定される断熱温度勾配での熱流量を示す。ここで仮定した核組成における融点は約1520 Kである。これによると, ガニメデの磁場は最近10億年以内の期間で溶融および冷却の2条件を満たし, 核内での対流が発生した可能性が示唆される。Kimura et al. (2009) [11] より転載。

究[12, 13]に倣った2つの簡単な対流発生条件を置く。ひとつは金属核表面の温度が仮定した核成分(Fe-FeS系)での融点を上回っていること(溶融条件), もうひとつは核表面での熱流量が断熱温度勾配で規定される熱流量を上回っていること(冷却条件)である。ある層構造を仮定したシミュレーションにおいて上記の2条件が現在において満たされる場合, その内部層構造の組み合わせを“現実の構造”と見なし, 従来推定されてきた内部構造が持つ幅広い不確定性を狭めることを試みる。

3. 結果

3.1 ガニメデ金属核の熱史

図1は, 核半径990 km, H₂O層厚さ1070 kmの構造を仮定した場合における, 核マントル境界の温度と熱流量の時間変化である。初期の核マントル境界の温度を1250 Kおよび1500 Kに与えた場合の結果を示しており, いずれの場合も計算開始後の20~30億年は長寿命放射性核種の壊変熱によって温度が上昇し, その後は熱源の枯渇とともに冷却段階に入り核マントル

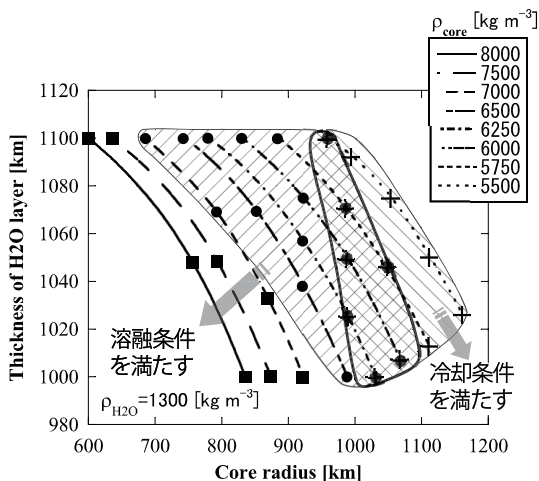


図2: ガニメデの平均密度と慣性率を満たす範囲で取り得る金属核半径とH₂O層厚さの組み合わせを核の密度(Fe組成の場合8000 kg/m³, FeS組成の場合5500 kg/m³)に従って表したもの。H₂O層の密度は1300 kg/m³とした。核マントル境界の初期温度を1250 Kとし熱史シミュレーションを行った結果, ●は金属核内対流に対する溶融条件を満たす構造, +は冷却条件を満たす構造, ■はいずれも満たさない構造を示す。2つの条件を満たす太実線に囲まれた領域が, 現在のガニメデ核内で対流(磁場)を生じ得る構造と考えることができる。Kimura et al. (2009) [11] を修正。

境界での熱流量が上昇することが分かる。結果として30~40億年以降において溶融と冷却の両条件が満たされることになり, ガニメデの金属核が熱対流を発生させ磁場を生じ得ることが理論的に確認される。それに加えて強調すべきは, 磁場の発生が衛星の形成直後ではなくむしろ比較的最近になってから始まった可能性が示唆される点である。

岩石マントルを取り巻くH₂O層は初期の全液体状態から時間とともに固化が進み, 表層での氷地殻と下部の高圧氷層の2つが同時に成長して行く。液体領域は次第に薄くなり, 最終的に計算開始後約10億年で完全に固化する。しかしながらこのH₂O層の状態変化は核の熱史にはほとんど影響しない。H₂O層が全て固体だったとしてもその粘性率は岩石マントルのそれよりも有意に小さく熱輸送効率が大きいためである。図1で示した核マントル境界での温度や熱流量を見てもH₂O層が完全に固化する約10億年の時点では特段の変化が何ら見られないことがそれを表している。

3.2 磁場発生条件に基づく内部構造への制約

ガニメデ内部各層の量比を慣性率と平均密度による制約の範囲で様々に与え, 上と同様のアプローチで

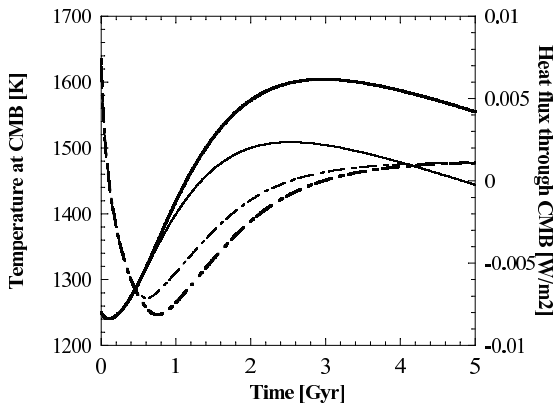


図3: 核半径675 km, 岩石マントル厚さ770 kmの内部構造をガニメデ(太線)とエウロパ(細線)に対し共通に与えた(H₂O層の厚さだけが異なる)場合における, 核マントル境界における温度(実線・左軸)と熱流量(点線・右軸)の時間変化. 初期の核マントル境界温度は1250 Kとした.

磁場発生の可否を評価し現実の構造を見出していく. 全体の傾向として, 核のサイズが小さい場合は相対的に岩石マントルの量すなわち放射性熱源の量が大きくなるために溶融条件を満たしやすく, 反対に核サイズが大きい場合は冷却条件を満たしやすい. 図2は, ガニメデの内部構造を平均密度と慣性能率による制約の範囲内で様々に与えた熱史シミュレーションの結果として, 現在における核内熱対流(磁場)の発生に関する2つの条件の可否を示したものである. これによると金属核の組成がFe-FeS系の端成分かそれに近い場合(Fe組成の場合は密度8000 kg/m³, FeS組成の場合は密度5500 kg/m³)は, 溶融温度が高い(5 GPaでFeは約1900 K, FeSは約1600 K, Fe-FeS共融組成では約1200 K)ために溶融条件を満たしにくい. 核サイズが小さい場合は相対的に岩石マントル量(熱源量)が多くなるため冷却条件を満たしにくくなる. これらを総合すると, ガニメデの核がFe-FeS系の共融組成に近い成分で構成される場合に2つの条件が満たされることになり, 内部構造に関する従来の推定が持っていた広い不確定性が狭められ, 現在のガニメデが磁場を持つために必要な内部層構造の量比に関して特定の範囲が見出される.

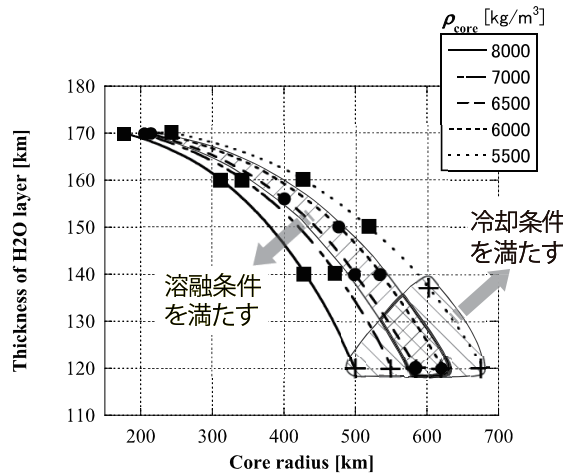


図4: エウロパの平均密度と慣性能率 [14] を満たす範囲で金属核半径とH₂O層厚さが取り得る組み合わせを核の密度に従って表したもの. H₂O層の密度は1300 kg/m³とした. 核マントル境界の初期温度を1250 Kとし熱史シミュレーションを行った結果, ●は金属核内対流に対する溶融条件を満たす構造, +は冷却条件を満たす構造, ■はいずれも満たさない構造を示す. 2つの条件を満たす太実線に囲まれた領域が, 現在のエウロパ核内で対流(磁場)を生じ得る構造と考えることができる(ただし現在のエウロパにおいて金属核起源の磁場の存在は確認されていない).

4. 議論: 比較衛星学

4.1 エウロパとの違い

ガニメデのひとつ内側を回る衛星エウロパは, ガニメデよりも半径が約700 kmも小さいにもかかわらず, それぞれの衛星からH₂O層を取り除いた部分(岩石マントル+金属核)の大きさにはほとんど違いがない[14]. 衛星が持つ岩石量はそこに含まれる放射性核種の量, すなわち核の熱史を支配する熱源の量に相当するため, ここに大きな差異がない天体同士は同じような熱史や磁場(核ダイナモ)の発生履歴をたどると直感的には予想される. しかし探査機ガリレオによる観測の結果, エウロパでは金属核を起源とする固有磁場の存在は確認されなかった[15, 16]. こうした2衛星間の磁気的環境の違いは, 両衛星を構成する物質やその熱力学的性質が同じだと仮定すれば, 予想される原因のひとつとして衛星の外側を覆うH₂O層の厚さの違い(エウロパは約150 km, ガニメデは約1,000 km)を考慮することができる. すなわち内部の岩石マントルと金属核を外側のH₂Oの層が毛布のように覆う役割を

担っており、 H_2O 層の薄いエウロパの方が核の冷却(固化)が速く進み現在までに完全に固結してしまったために、エウロパでは核起源の磁場が生じていないと言えそうである。しかし H_2O 層はたとえそれが全て固体氷だとしても下層の岩石マントルに比べて粘性が小さく熱輸送効率が大きいため核の熱史にほとんど影響を与えないとも考えられるのは、前章で述べた解釈の通りである。

そこで、前章までにガニメデに対して行った熱史の評価をエウロパに対しても同様に行ったところ、両衛星の核熱史の違いには大きく2つの要因があることが分かった。第一の要因は、表層を覆う H_2O 量の違いがもたらす岩石マントル粘性率の違いである。エウロパはガニメデより H_2O 層が薄いために岩石マントルの圧力(すなわち融点)がガニメデよりも低くなる。本研究の熱輸送方程式に用いた粘性率は融点で規格化した温度依存性を持つために、岩石マントルの粘性率が小さくなって熱輸送効率が上がり、すなわち冷えやすくなる効果を持つ(図3)。

第二の要因は、両衛星の核マントル量比の違いである。図4は、エウロパの平均密度と慣性能率の制約から予想される内部構造の範囲と、熱シミュレーションの結果として得られた核内対流発生条件の可否を示したものである。これによると、エウロパで予想される金属核のサイズはガニメデより小さい(エウロパで予想される最大の核サイズがガニメデにおける最小サイズに近い)ため、エウロパの核の方が暖まりやすく冷えやすい。また、エウロパの岩石マントル量はガニメデより小さいため、エウロパの核の方が暖まりにくく冷えやすい。結果として、エウロパの核はガニメデよりも冷えやすいことになる。すなわち、第一の要因と合わせてエウロパの金属核はガニメデのそれよりも冷えやすい環境にあり、エウロパに金属核があるとしても現在はすでに全て固化してしまったと考えられる。

4.2 カリストやタイタンとの違い

ガニメデの外側の軌道で木星を周回するカリストは、ガニメデと同程度の半径を持ちながら大きく異なる特徴を数多く持っており、長年にわたって注目を集めている天体である。異なる特徴とはすなわち、ガニメデ表面に見られる数多くの断層地形がカリストでは全く見られないこと、カリストでは固有磁場の存在が確認

されていないこと、そしてガニメデが太陽系の固体天体の中で最も小さい慣性能率(~ 0.311)を持ち内部の明瞭な分化状態が予想されるのに対し、カリストの慣性能率は約0.358とガニメデよりも有意に大きく内部分化の不十分さが示唆されること、などである。

この二衛星間の違いを説明するべく数多くの研究が行われてきた。従来は H_2O と岩石の分離の有無を評価して内部分化と表層地形形成とを結びつけたシナリオが議論されてきた(言い換えると、金属成分の存在や金属核形成については考慮すらされていない)が、ガニメデで固有磁場が発見されたことで金属核形成の有無という視点で両衛星の進化を論じる必要が生じた。金属核の熱史を議論した従来の研究[8, 9, 11]では、金属核形成が約45億年前に完了したと仮定しその後の熱進化を調べている。しかし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)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可能性がある。そしてカリストが固有磁場を持たないことは、金属核の熱的状态の違いではなく金属核の有無が本質的な原因であると考えられる。

これはすなわち内部分化の歴史が地球とは大きく異なる可能性を示唆し、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、そしてなぜカリストではそれが起こらなかったのかを理解する必要がある。この問題意識に立った最近の研究として木村ら[17]は、初期の衛星を構成した鉱物が含水状態にある考えに立ち、衛星間のサイズと平均密度(岩石含有率)のわずかな違いが鉱物脱水作用の規模に大きな違いを生み、内部熱史の違いすなわち金属核形成の有無の違いを生み出した可能性を提示している。

またガニメデとカリストの間のサイズと平均密度を持つ土星衛星タイタンは、慣性能率がカリスト並に大きく(~ 0.341)内部分化が不十分であることが示唆されるとともに、固有磁場の存在は確認されていない。しかし厚い大気存在をはじめ、ある程度の地質活動の痕跡も確認されていることなど、カリストともまた大きく異なる表層状態を示すことについては十分な説明がまだ与えられていないのが現状である。

4.3 惑星との違いの理解に向けて

探査機ガリレオによるガニメデでの固有磁場の発見は、衛星間の形成過程や進化史の違いだけでなく、惑星との比較において新たな謎をもたらした。現在の火星には磁場がないにもかかわらず、それよりも直径で1500 kmも小さいガニメデは大規模な双極子磁場を持つ。一方で同程度のサイズをもつカリストやタイタンには磁場がない。またこれらの衛星よりも同等ないしはやや小さい水星(カリストより半径で20 km程度大きい)は磁場を持つ、というように、磁場の有無は天体のサイズに一意に依存しない傾向を持つことが浮き彫りとなった。そこに寄与するものはおそらく内部の組成構造や熱構造、およびそれらの進化の多様性や複雑さであるが、従来の研究では衛星-衛星間および衛星-惑星間での磁場環境の違いの原因についてはほとんど議論されていない。惑星も含めた比較磁場学とも言うべき観点に立った時、ガニメデやカリスト、タイタンといった巨大水衛星は、地球型惑星と同様の固体天体という組成上の共通項を持ちつつも惑星と衛星の中間的な大きさを持った、熱い惑星と冷たい小衛星とをつなぐ境界領域の天体であると見ることができ、地球型天体全般の進化の理解にとって大きな鍵を握ることになるだろう。

5. 観測による検証：将来木星土星圏探査計画に向けて

前章までに、ガニメデとカリストでの表層および磁場環境の違いは、初期の両衛星を構成していた含水鉱物が受ける脱水作用の規模の差によって生み出されたというシナリオについて触れた。そしてこのイベントはガニメデにおいて大規模な鉱物脱水と衛星全体の体積膨脹をもたらし、表面の巨大な断層地形を生み出した可能性も指摘されている[17]。この断層地形はガニメデ表面の4割を占め、クレータ年代学により約20億年前に形成したものと見積もられているが[18]、従来の観測では表面の撮像率と解像度がともに低いために、断層形成に必要とされる表面拡大(体積膨脹)の大きさや地形のクレータ年代の見積もり等に極めて大きな不確定性が存在する。将来の木星圏探査計画では高解像度でのグローバルマッピングを行うことでこの不確定性を狭めることが衛星進化史の解明に大きな寄与を果

たすことは間違いない。

謝辞

匿名の査読者には本稿に対して多くの建設的なコメントを頂きました。御礼申し上げます。本研究の数値計算には、東京大学地震研究所地震予知情報センターの計算機システムを利用しました。また本研究は、グローバルCOEプログラム「惑星科学国際教育研究拠点の構築」により運営されている惑星科学研究センター(CPS)、および日本学術振興会科学研究費補助金(22740285)の支援を受けて行われました。

参考文献

- [1] Kivelson, M. G. et al., 1996, *Science* 384, 537.
- [2] Kivelson, M. G. et al., 2002, *Icarus* 157, 507.
- [3] Anderson, J. D. et al., 1996, *Nature* 384, 541.
- [4] Sohl, F. et al., 2002, *Icarus* 157, 104.
- [5] Fei, Y. et al., 1995, *Science* 268, 1892.
- [6] Fei, Y. et al., 1997, *Science* 275, 1621.
- [7] Fei, Y. et al., 2000, *A. Mineral.* 85, 1830.
- [8] Hauck, S. A. et al., *J. Geophys. Res.* 111, doi :10.1029/2005JE002557.
- [9] Bland, M. T. et al., 2008, *Icarus* 198, 384.
- [10] Schubert, G. et al., 1986, in *Satellites*, 224.
- [11] Kimura, J. et al., 2009, *Icarus* 202, 216.
- [12] Stevenson, D. J. et al., 1983, *Icarus* 54, 466.
- [13] Stevenson, D. J., 2003, *Earth Planet. Sci. Lett.* 208, 1.
- [14] Anderson, J. D. et al., 1998, *Science* 281, 2019.
- [15] Kivelson, M. G. et al., 1999, *J. Geophys. Res.* 104, 4609.
- [16] Kivelson, M. G. et al., 2000, *Science* 289, 1340.
- [17] Kimura, J. and Kuramoto, K., 2011, EPSC-DPS Joint Meeting abstract #358.
- [18] Zahnle, et al., 2003, *Icarus* 163, 263.