

令和 2 年 5 月 21 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K17787

研究課題名(和文)大規模変形から迫る氷天体の進化：内部海存在の普遍性

研究課題名(英文)Evolution of icy planetary bodies inferred from large-scale deformation

研究代表者

鎌田 俊一 (Kamata, Shunichi)

北海道大学・理学研究院・准教授

研究者番号：40723474

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、外側太陽系に多数存在する氷衛星や氷準惑星といった氷天体の進化を、大規模な変形の観点から調べた。土星の氷衛星エンセラダスについては、氷の長期粘弾性変形(数百万～数十億年スケールの変形)に着目して同衛星の熱収支を調べた。木星の氷衛星ガニメデについては、内部構造と潮汐変形(木星を周回するたびに伸縮を繰り返す、数日周期の大規模変形)の関係を定量的に調べ、地形観測によってどれほど内部構造を調べられるかを評価した。冥王星については、氷の長期粘弾性変形に着目して同準惑星の熱・構造進化を調べた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

時代を超えて人類が挑んできた難問の一つに「地球以外に生命を宿す天体はあるのかわからないのか」がある。外側太陽系の氷天体の内部には、生命の誕生と生存に深く関わる液体の水でできた「海」の存在が明らかになってきている。しかし、これらの「内部海」がどの深さにあるのかや、なぜ凍結せずに維持されているのか不明である。本研究は、理論と探査データ解析の融合させてこれらの疑問を解き、氷天体における生命生存可能性に関する議論の土台を提供する。

研究成果の概要(英文)：In this study, I investigated the long-term evolution of icy planetary bodies such as icy satellites and icy dwarf planets in terms of large-scale deformation. For the Saturnian icy satellite Enceladus, I investigated long-term viscoelastic deformation of the ice shell and constrained the energy budget of the satellite. For the Jovian icy satellite Ganymede, I quantified the effect of the interior structure on tidal deformation (short-term large-scale deformation) to assess the possibility of interior structure exploration through geodetic observations. For the icy dwarf planet Pluto, I investigated long-term viscoelastic deformation of the ice shell and constrained the thermal and structural evolution of the dwarf planet.

研究分野：惑星科学

キーワード：氷天体 長期進化 内部海 熱進化

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

巨大惑星を回る衛星の多くは氷に覆われている。これら「氷衛星」は、惑星系の起源や外側太陽系の進化過程を解明する鍵となる天体である。特に、その内部に液体の水が存在するか否かは、衛星進化過程の解明に加え、宇宙生物学(アストロバイオロジー)の観点でも重要な情報である。近年の惑星探査により、いくつかの氷衛星の地下には広大な液体の領域、つまり「内部海」が存在する証拠が得られつつある。例えば、Galileo 探査による木星系氷衛星における誘導磁場の検出や、Cassini 探査による土星系氷衛星における間欠泉発見や大きな秤動・潮汐応答の検出などが挙げられる。しかし、氷(と水)と岩石でできた天体内部の温度変化を数値計算すると、これらの「内部海」は比較的短時間で凍り付いてしまうことが分かる。このことは、これらの天体は何らかの理由で熱を得ているか、あるいは何らかの理由で熱が逃げにくくなっていることを示している。特に、土星系氷衛星エンセラダスから放出されている熱は理論推定値を遙かに上回っており、従来の想定よりも潮汐による発熱が大きいことを示唆している。しかし、一体どれほどの熱が内部海維持に使われているのかなどは不明であった。

天体内部の熱構造を探る鍵となるのが、「粘弾性変形」という、非常にゆっくりとした、そして大規模な変形である。固体天体を構成する岩石や氷は粘弾性体として振る舞うため、非常にゆっくりとではあるが地形、つまり表面の凹凸は時間とともに消えてゆく。この変形の時間スケールは粘性率に依存しており、この粘性率は温度に強く依存する。そのため、地形の緩和度は内部熱構造を探る手がかりとなるのである。研究代表者は、本研究以前より粘弾性変形計算の高速・高精度計算法を独自開発し、巨大クレーター粘弾性変形という観点から、月や冥王星など様々な固体天体の長期熱進化を研究してきた。しかし既に述べたように、氷衛星では潮汐が重要であり、これはこれまで研究してきた月や冥王星とは対照的である。そこで、内部熱構造、粘弾性変形、潮汐を組み込んだモデルの開発が必要となった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、内部海を持つ氷天体の長期進化について、大規模変形の観点から制約することである。この目的のために、以下の3つの小目的を設定した。

- (1) エンセラダスの氷地殻の粘弾性緩和の時定数と融解の時定数が等しいという関係から、現在の内部熱構造(氷地殻下端での温度と熱流量)を明らかにする。
- (2) (1)で求めた内部熱構造が最終状態となる進化過程を明らかにする。より具体的には、様々な初期条件を与えてエンセラダス進化のフォワード計算を行い、最終状態を(1)と比較して初期条件に制約を与える。そのために、潮汐共鳴の効果を考慮し、1次元熱進化計算法を導入した氷衛星進化モデルを新たに構築する。得られた結果を基に、エンセラダスの内部海維持のメカニズムを考察する。
- (3) (2)の進化モデルを用いて、他の氷天体の条件下での進化過程の典型例を明らかにする。そしてエンセラダスの進化過程との共通点と相違点に着目することで、外側太陽系固体天体における内部海存在の普遍性や特異性を議論する。対象天体には、将来の探査対象となっている氷衛星(木星の氷衛星であるガニメデやエウロパ)や、New Horizons 探査機によりデータが得られつつある冥王星を優先的に採用する。

3. 研究の方法

本研究では、数値計算と探査データ解析を行う。前者は具体的には、(1)長期粘弾性変形計算、(2)潮汐変形計算、(3)長期熱進化計算を組み合わせた。いずれも、様々な計算条件(初期内部熱構造・初期温度条件、発熱量、など)を設定したパラメータスタディを行った。3種の計算プログラムについては、研究代表者は既に核となる部分は開発済みであったが、本研究向けにそれぞれ改修しつつ、統合する必要があった。また、探査データ解析にあたっては、Cassini 探査で得られた土星系衛星エンセラダスの測地データ(地形・重力場)を用いて、現在の氷地殻構造を推定する。手法については、研究代表者が過去に月などで行ってきた方法を用いた。

4. 研究成果

まず、氷地殻の長期粘弾性変形に着目して土星の氷衛星エンセラダスの熱収支を制約した。測地データ解析を行い、エンセラダス全球の氷地殻厚を算出した。先行研究により、既に南極付近の氷地殻が非常に薄くなっていることが知られていた。しかし、熱収支制約のためには、理論モデルと整合的な仮定のもと算出する必要があったため、独立にデータ解析も行った。得られた氷地殻構造から融解した部分の体積を算出し、必要な単位時間あたりの熱量を解析的に求めた。そして、独自

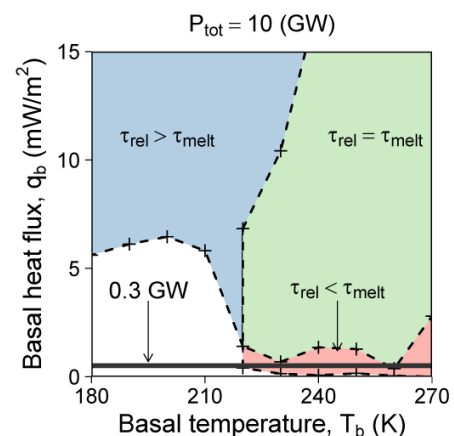


図1: エンセラダス氷地殻の粘弾性変形時定数のパラメータ依存性

開発・改修した粘弾性変形計算コードを用いて、同変形の時定数を算出した。これらの結果を比較することで、エンセラダス内部で消費されているのは >10GW であると推定された (図 1)。もしこれよりも少ないと粘性緩和が進行し、南極での薄い氷地殻を説明できないためである。このことから、巨大惑星系におけるエネルギー散逸メカニズムについての知見を得た。具体的には、従来考えられてきた「静的潮汐」ではなく「動的潮汐」が土星系衛星の発熱においては重要であるということが分かった。

次に、潮汐変形に着目し、木星の氷衛星ガニメデの内部構造推定に必要な観測精度の算出を行った。日本も参加する JUICE 計画ではガニメデの全球地形の継続的な観測から、潮汐変形を計測予定である。この計測から、内部構造のどのパラメータについて制約することができるのか (層の厚さ、粘性率、剛性率など) を定量的に評価した。その結果、潮汐変形の振幅と位相遅延の両方を観測することで、内部海の存否を調べることができることを明らかにした (図 2)。また、内部海がある場合でも、その下にあると思われる高圧氷層の影響が潮汐に現れる場合があることも示した。このことは、低応力下での高圧氷の流動則を調べる必要性を示している。

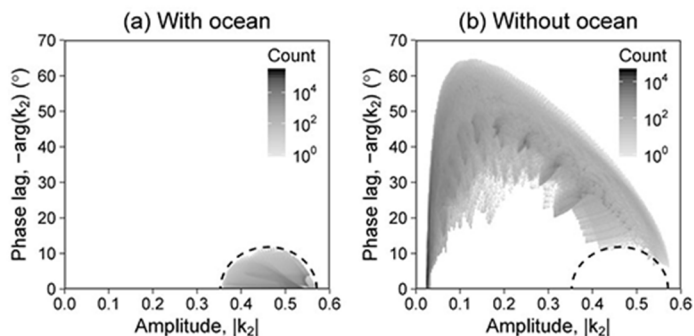


図 2: ガニメデ潮汐変形の振幅と位相遅延の関係

また、高速・高精度かつ汎用性の高い氷天体熱進化計算コードも開発し、それを用いて土星の氷衛星エンセラダスとディオネの進化を制約した。研究当初の計画では、軌道進化を計算し、そこからエンセラダスにおける発熱量を算出する予定であった。しかし、欧米の研究者による巨大ガス惑星系における潮汐研究が進み、発熱量があまり時間変化しない「動的潮汐」の重要性が明らかになったため、軌道要素計算プログラムの開発を中止し、発熱量を自由変数としてパラメータスタディを行う方針に切り替えた (図 3)。その結果、現在の厚い内部海を持つためにはエンセラダスでは >20 GW 必要であることが分かった。また、ディオネも海を持つためには、大きな凝固点降下が必要になり、高濃度のアンモニアが必要となることも分かった。

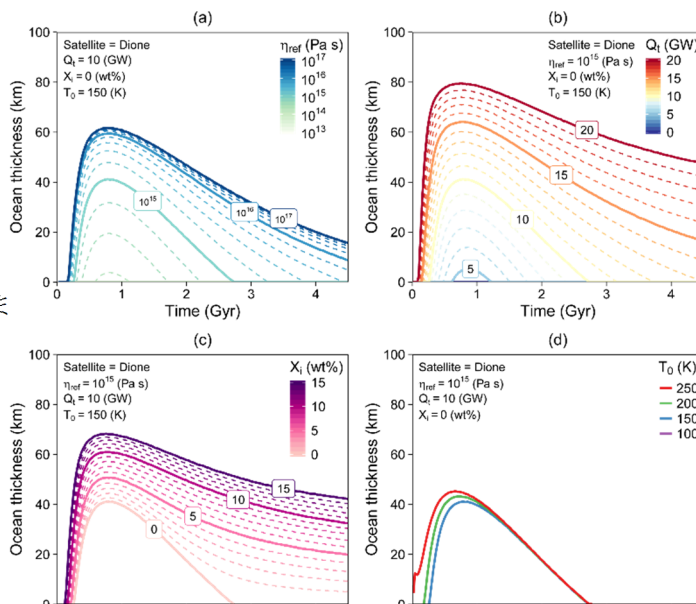


図 3: デイオネ内部海厚進化のパラメータ依存性

さらに、冥王星の氷地殻の粘弾性変形の時間スケールを算出した。冥王星はスプートニク平原で氷地殻が薄くなっていると考えられている。エンセラダス研究と同様の方法で、氷地殻の緩和時定数を算出した (図 4)。その結果に基づき、どのような内部構造なら粘弾性変形が進行しないかを議論した。本研究からは、新たな、かつ一般的な氷天体内部海の維持メカニズムの発見に至った。

これらの結果は、国内外での学会で発表されるとともに、国際学術誌「Journal of Geophysical Research」「Icarus」「Nature Geoscience」などに掲載された。

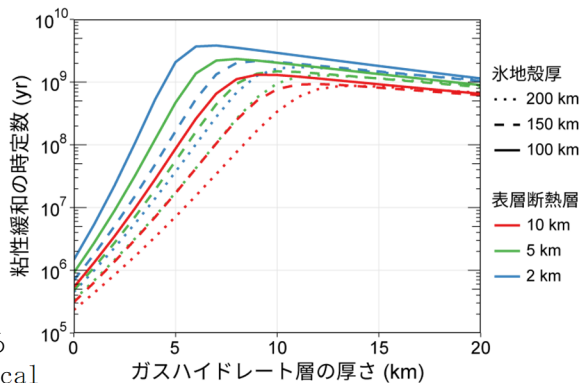


図 4: 冥王星氷地殻の緩和時定数の、内部構造パラメータ依存性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件／うち国際共著 6件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kamata Shunichi, Nimmo Francis, Sekine Yasuhito, Kuramoto Kiyoshi, Noguchi Naoki, Kimura Jun, Tani Atsushi	4. 巻 12
2. 論文標題 Pluto's ocean is capped and insulated by gas hydrates	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature Geoscience	6. 最初と最後の頁 407 ~ 410
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41561-019-0369-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Kimura Jun, Kamata Shunichi	4. 巻 181
2. 論文標題 Stability of the subsurface ocean of pluto	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Planetary and Space Science	6. 最初と最後の頁 104828 ~ 104828
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.pss.2019.104828	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Matsuyama Isamu, Beuthe Mikael, Hay Hamish C.F.C., Nimmo Francis, Kamata Shunichi	4. 巻 312
2. 論文標題 Ocean tidal heating in icy satellites with solid shells	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 208 ~ 230
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2018.04.013	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 鎌田俊一	4. 巻 27
2. 論文標題 固体惑星物理学における諸問題	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 遊・星・人 (日本惑星科学会誌)	6. 最初と最後の頁 286-295
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 KIMURA Jun, HUSSMANN Hauke, KAMATA Shunichi, MATSUMOTO Koji, OBERST Jurgen, STEINBRUGGE Gregor, STARK Alexander, GWINNER Klaus, OSHIGAMI Shoko, NAMIKI Noriyuki, LINGENAUER Kay, ENYA Keigo, KURAMOTO Kiyoshi, SASAKI Sho	4. 巻 17
2. 論文標題 Science Objectives of the Ganymede Laser Altimeter (GALA) for the JUICE Mission	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES, AEROSPACE TECHNOLOGY JAPAN	6. 最初と最後の頁 234 ~ 243
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2322/tastj.17.234	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Sekine Yasuhito, Shibuya Takazo, Kamata Shunichi	4. 巻 1
2. 論文標題 Enceladus: Evidence and Unsolved Questions for an Ice-Covered Habitable World	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Astrobiology: From the origins of life to the search for extraterrestrial intelligence	6. 最初と最後の頁 399 ~ 407
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-981-13-3639-3_25	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Vance, S. D., M. P. Panning, S. Stahler, F. Cammarano, B. G. Bills, G. Tobie, S. Kamata, S. Kedar, C. Sotin, W. T. Pike, R. Lorenz, H.-H. Huang, J. M. Jackson, and B. Banerdt	4. 巻 123
2. 論文標題 Geophysical investigations of habitability in ice-covered ocean worlds	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 J. Geophys. Res. Planets	6. 最初と最後の頁 180-205
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/2017JE005341	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kamata, S.	4. 巻 123
2. 論文標題 One-dimensional convective thermal evolution calculation using a modified mixing length theory: Application to Saturnian icy satellites	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 J. Geophys. Res. Planets	6. 最初と最後の頁 93-112
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/2017JE005404	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kamata, S. and F. Nimmo	4. 巻 284
2. 論文標題 Interior thermal state of Enceladus inferred from the viscoelastic state of the ice shell	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 387-393
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2016.11.034	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kamata, S., J. Kimura, K. Matsumoto, F. Nimmo, K. Kuramoto, and N. Namiki	4. 巻 121
2. 論文標題 Tidal deformation of Ganymede: Sensitivity of Love numbers on the interior structure	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 J. Geophys. Res. Planets	6. 最初と最後の頁 1362-1375
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/2016JE005071	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計19件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 13件)

1. 発表者名 Kamata, S., F. Nimmo, Y. Sekine, K. Kuramoto, N. Noguchi, J. Kimura, and A. Tani
2. 発表標題 An Interior Structure Model of Pluto that Solves its Geophysical and Geochemical Mysteries
3. 学会等名 Pluto System After New Horizons (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鎌田 俊一、Nimmo Francis、関根 康人、倉本 圭、野口 直樹、木村 淳、谷 篤史
2. 発表標題 冥王星の不思議を解く内部構造モデル
3. 学会等名 JpGU 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 塩谷圭吾, 並木則行, 小林正規, 木村淳, 荒木博志, 野田寛大, 田澤誠一, 押上祥子, 鹿島伸悟, 宇都宮真, 石橋高, 小林進悟, 山脇敏彦, 東原和行, 尾崎正伸, 水野貴秀, 斎藤義文, 鎌田俊一, 他
2. 発表標題 JUICE 搭載ガニメデレーザ高度計 (GALA) - 概要および日本チーム開発状況
3. 学会等名 日本惑星科学会2018年秋季講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鎌田俊一
2. 発表標題 固体惑星物理学における諸問題
3. 学会等名 日本惑星科学会2018年秋季講演会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 木村淳, 鎌田俊一
2. 発表標題 冥王星地下海の安定性と進化
3. 学会等名 日本惑星科学会2018年秋季講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kamata, S.
2. 発表標題 Classical but new geophysical problems of icy ocean worlds
3. 学会等名 The 2nd Asia-Pacific Workshop on Lithosphere and Mantle Dynamics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鎌田俊一, F. Nimmo
2. 発表標題 粘弾性緩和で探る冥王星の氷地殻の物性
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合 2018年大会 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kimura, J., S. Kamata
2. 発表標題 Evolution of subsurface ocean and constraint for the interior in Pluto
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合 2018年大会 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kamata, S.
2. 発表標題 Modeling thermal evolution of ocean worlds with convective ice shells
3. 学会等名 42nd COSPAR Scientific Assembly (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kamata, S.
2. 発表標題 One-dimensional thermal evolution calculation based on a mixing length theory: Application to Saturnian icy satellites
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Matsuyama, I., H. Hay, F. Nimmo, and S. Kamata
2. 発表標題 Tidal dissipation in the subsurface ocean of Enceladus
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kimura, J., S. Kamata
2. 発表標題 Thermal history and stability of subsurface ocean in Pluto
3. 学会等名 AOGS 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 鎌田 俊一
2. 発表標題 混合距離理論に基づく1次元熱進化計算法の改良
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 鎌田 俊一
2. 発表標題 ついに本格始動！冥王星の研究
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 木村 淳, 鎌田 俊一
2. 発表標題 Thermal evolution and stability of subsurface ocean in Pluto
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 鎌田 俊一
2. 発表標題 土星系氷衛星の熱進化：エンセラダスとディオネの内部海
3. 学会等名 日本惑星科学会2017年秋季講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kamata, S.
2. 発表標題 Tidal interaction of satellite systems
3. 学会等名 RESCEU Summer School 2016 (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Kamata, S., J. Kimura, K. Matsumoto, F. Nimmo, K. Kuramoto, and N. Namiki
2. 発表標題 Tidal deformation of Ganymede: A parameter study in anticipation of future geodetic measurements
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2016 (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 鎌田俊一, Francis Nimmo
2. 発表標題 エンセラダスの内部熱構造：氷地殻の緩和状態からの示唆
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2016年大会
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----