

令和 2 年 6 月 1 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05635

研究課題名(和文) 氷天体地下海の安定性と進化のモデルの構築

研究課題名(英文) Constructing the model for a stability and evolution of the subsurface ocean in icy bodies

研究代表者

木村 淳 (Kimura, Jun)

大阪大学・理学研究科・助教

研究者番号：00536138

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：氷天体における地下海の長期進化を説明するための数値モデルを構築した。本モデルは、天体の岩石とH₂Oの質量比に応じた内部層構造と、初期温度分布(H₂O殻の固液状態)および岩石核中の長寿命放射性同位体の濃集度を与えることで、46億年間の温度変化と地下海の生成・消滅を含めた厚さの変化を追跡でき、高圧氷も含めた氷天体の多様な内部構造に適用可能である。冥王星を対象とした計算では、現在の冥王星が地下海を持つためには、氷の融点粘性率が1E15 Pas以上でなくてはならないことや、初期に1質量%のアンモニアが存在する場合は、地下海が存在期間が10億年以上延びることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

海という大規模な液体水圏の有無とその進化の描像に迫ることは、「生命の起源」という究極の問題への直接的なアプローチのひとつである。特に氷天体という、地球外天体での生命発生環境の候補地としての科学的重要性は、日本惑星科学会が「太陽系における前生命環境の進化・生命圏の誕生・持続に至る条件の解明」として将来目標に掲げているなど、国内外で共通した認識にある。本課題は、太陽系の生命存在可能領域が地球近傍だけではないことを、理論的解析と実証的調査への示唆によって提示する。これは太陽系内天体における宇宙生命論のみならず、系外惑星観測も含めた宇宙の普遍的な生命居住可能性の理解に繋がり、波及効果は大きい。

研究成果の概要(英文)：A numerical model is constructed to explain the long-term evolution of the subsurface ocean in icy bodies. The model is applicable to various internal structures of icy objects, including high-pressure ice, by providing the internal layer structure and initial temperature distribution (solid-liquid state of H₂O shell) and the enrichment of long-lived radioisotopes in the rock core. The calculations for Pluto show that the melting viscosity of ice must be greater than 1E15 Pas for the present-day Pluto to have a subsurface ocean, and the initial presence of 1 mass% ammonia extends the subsurface ocean's duration by more than 1 billion years.

研究分野：惑星科学

キーワード：氷天体 内部構造 進化 生命 アストロバイオロジー

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

木星や土星の衛星では、地形観察や周辺電磁環境計測、回転変動計測、噴泉現象観察などを通して、氷地殻下の液体水圏、いわゆる地下海の存在が予想されている。冥王星やセレスなどの準惑星でも一部の兆候が見られる。さらに液体水に溶存する物質学的情報と合わせて、氷天体の地下海は天体自身の地熱エネルギーによって表層下に維持され得る生命居住可能領域(ハビタブルゾーン)として「深部生命圏(deep habitat)」と位置付けられ、太陽エネルギーによって表層に液体水を長期間保持可能な地球型の「表層生命圏(surface habitat)」と対比しつつ、化学進化や生命発生の可能性が活発に議論されている。深部生命圏を擁する氷天体は、太陽(主星)と独立に駆動される生命圏として宇宙に普遍的に存在し得ると想像され、生命起源の解明という自然科学の大問題へ実証的に迫る場となっている。

生命発生場を本質的に支配する要素は、「環境」とその「安定性(変動性)」である。現状では、ハビタブルゾーンと言えばそれは表層生命圏を指し、系外惑星系も含めた環境と安定性の考察が盛んに行われている。一方で、深部生命圏に対する興味は「現在の状態の把握」にとどまる。つまり先述の観測結果にもとづき、現在の地下海の存否やその深さ・厚さを推定した研究はある[例えば 1]が、地下海がいつから存在し、どう進化して現在の環境へ至ったのか、という描像は大きな謎として残っている。

ここでの進化とは、特に構造と組成の観点である。地下海の構造は、主に天体のサイズと H_2O 含有率に依存して2つの様式に分けられる。いずれかが小さい場合に表層の低圧相の氷(氷地殻)のみが現れる「エウロパ型地下海」と、両者が大きい場合に高圧相の氷が深部に出現する「ガニメデ型地下海」である。特にガニメデ型では、岩石マントルでの放射性発熱を地下海へと運ぶ高圧氷層が地下海の進化に本質的な役割を担う。組成とは、地下海の凝固点に強く作用する塩類水和物などの溶存物質を指し、物質種と初期濃度の違いが海の長期進化に大きな影響を与え得る(観測された地下海起源の誘導磁場には、溶存物質の存在が必要)。

ところが、このような重要性にもかかわらず、地下海に対する高圧氷層や溶存物質の影響を正しく考慮した進化モデルは存在していない。溶存物質の寄与は現在の熱平衡状態を仮定した考察のみで[1]、長期進化の考察(しかし溶存物質を考慮せず、固体氷層と地下海の境界での熱収支のみで H_2O の融解固化を評価し、初期の H_2O 層は全融解状態のみを仮定)は、我々の2例を含めて3つだけである[2-4]。ガニメデに対する先行研究[3,4]は、初期の H_2O 層が全融解状態であっても現在までに全て固化し地下海は消滅すると結論づけているが、ガニメデオーロラの観測[5]は現在も地下海の存在を支持しており、理論モデルとの不整合が明らかとなっている。一方で、高解像度の数値流体計算や実験的研究の進展により、高圧氷の物性やダイナミクス、地下海溶存物質の状態方程式などの知見が揃いつつあり、地下海進化モデル構築の機は熟していると言える。

2. 研究の目的

これまで手つかずの「氷天体地下海の安定性と進化のモデルの構築」を目標にする。

これまで、簡略化した進化モデルしか存在していないのは、地下海の初期状態の不定性や、固体氷層内部での H_2O の固化融解を数値的に取り扱うことの複雑さ、そして地下海溶存種の状態方程式が不明であることに原因があった。しかしそれらの支障が解決されつつある今、「地下海の初期状態」「高圧氷層の熱輸送と固化融解」「地下海溶存物質」を新たに考慮した、現実的な進化モデルを構築する。エウロパ型とガニメデ型いずれの様式も取り扱うが、計算の対象は太陽系内天体に限定せず、太陽系外で予想される多様な天体サイズや H_2O 岩石比(各層の厚さ)も汎用的に扱えるよう、モデルを組み上げる。具体的には以下の手順を踏む。

a. 固体氷層(氷地殻と高圧氷層)に対する簡略化された従来モデルに取って代わる、詳細な熱輸送モデルを構築する。これは、半径方向の格子化を行い圧力と温度による物性の変化と、層内部での H_2O の固化融解も考慮することで可能になる。初期状態は、2つの極端例として H_2O 層全融解と全固化状態を考える(先行研究は全融解のみ)。

b. 先行研究では H_2O のみを仮定していた地下海組成を、溶存物質を考慮することで現実的なモデルへと刷新する。物質の種類($MgSO_4$ や NH_3 など)とその全体量を仮定し、地下海の厚さの変化に応じて溶存濃度と凝固点に変化する効果をモデルへ組み込む。

c. 天体の半径や質量(H_2O 岩石比)などを変えたパラメタ・サーチを行い、木星・土星の衛星や冥王星などの準惑星といった太陽系内の具体的な氷天体だけでなく、系外氷天体も考慮した多様なサイズと組成の氷天体に対する計算を実行する。

従来のモデルは氷層-地下海境界での熱の授受にもとづく固化融解のみを扱っているのに対し、本研究は半径方向の格子化に基づく丹念な評価を行うことで、特に固体氷層内部での固化融解過程が地下海進化に与える影響を初めて正しく評価できる。本モデルは1次元だが、氷天体では3次元解析を検証するに足る観測データは無く、また少ないパラメタ空間しかカバーできない高コストのモデルを構築するよりも、低コストの1次元計算で多くのパラメタ・サーチを行い、物性の不定性や天体サイズ・組成の多様さを網羅することが現実的に必要である。

3. 研究の方法

氷天体の中心から表面までを半径方向に格子化した一次元熱拡散方程式をベースとして本研究へ発展させ、a) 固体 H_2O 氷層中の熱輸送と固化融解過程、および b) 地下海溶存物質による

凝固点変化, を新たに導入し, 氷天体地下海の構造と組成に関する長期進化の描像を得る。そして, c) 天体のサイズ, 質量 (H_2O 岩石比), H_2O 層の初期固液状態, 岩石中の放射性熱源量などをパラメタとした網羅的な計算を行い, エウロパやガニメデなどの具体的な系内天体モデルに対しては, 現在の表層地形や内部構造の制約と整合的な解を探索し, 現実的な進化シナリオと将来探査への理論予測を得る。さらに系外天体が持ち得る多様な氷天体像を想定し, 深部生命圏の環境とその安定性に関する考察を系統的に行う。

数値解析には, 氷天体の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[2,3]をベースとし, そこに, 高圧氷層内部や下面での融解・固化, および地下海溶存物質が凝固点変化に与える影響を新たに考慮することで, 本課題への改良を行う。具体的には, 高圧氷層内部や下面で生じた融解水の (高圧氷は液体水より高密度ゆえ) 上昇輸送過程のモデル化や, $MgSO_4$ や NH_3 といった地下海溶存物質の, H_2O との共融組成における状態方程式[6,7]を, 本課題で新たに導入する。以下は, 取り組む課題別に分けた具体的な研究計画である。

a. 固体 H_2O 氷層 (氷地殻と高圧氷層) 中の熱輸送および固化融解過程モデルの構築

氷天体の中心から表面まで半径方向に格子化した各層の中でも特に, 氷地殻 (エウロパ型とガニメデ型) と高圧氷層 (ガニメデ型のみ) では, 粘性率が持つ強い温度圧力依存性が固相対流の強弱を支配し, 天体全体の熱史と地下海進化へ本質的に寄与する。特に, H_2O の融点が圧力に対して正の依存性を持つ高圧氷層では, 温度構造が融点に近い構造を持ち得るため, 対流運動が強い場合や岩石マントルでの発熱が強い場合は, 高圧氷層の様々な領域で融解が生じ得る (図2右)。高圧氷は液体水より高密度なため, 高圧氷層内で生じた融解水は浮上し, 地下海の厚化に寄与する。高圧氷層内での融解の有無と程度は, 高圧氷層内の熱輸送効率と, 岩石マントルでの発熱率とのバランスで決まるため, 層を格子化した丹念な熱輸送の見積もりが必須である (従来, 層境界での熱収支だけでもとづく固化融解の見積もりでは, 原理的に不可能)。

まずは上記の方法を用いて, 木星系衛星エウロパ・ガニメデに対応したモデル計算を行う。一定の描像が得られた時点で, 異なる熱源として潮汐加熱も考慮した計算も行い, 地下海の進化に対する岩石中の放射性熱源の影響とを切り分けて評価する。

初年度は, 数値解析に必要な計算機環境の整備と, 数値モデルやツールの構築を行う。本研究の主力となる計算ワークステーションは, 基本的にネットワークハブを通じて利用することになるので, パソコン端末と高速なネットワークハブを備え, 本計画全体を通じての計算作業を効率よく行える環境を整える。

b. 地下海溶存物質と凝固点変化の効果の組み込み

地下海を構成する物質は H_2O だけではない。探査機がエウロパやガニメデの周辺で検出した地下海起源の誘導磁場は, 地下海に溶存した塩類などの電気伝導性物質が木星磁場の変化にตอบสนองしたものである。また, エウロパやガニメデの表面には, 地殻の亀裂周辺に $MgSO_4$ などの水和物が存在し, 土星衛星エンセラダスの噴泉からは, NH_3 や CH_4 などが溶存していることも判明している。これらの物質は地下海の凝固点を降下させ, 固化させにくくする[6,7]。その降下度は溶存濃度に従って大きくなる。溶存物質は基本的に固体氷へは入らないため, 地下海が薄くなるほど溶存物質の濃度は高くなる。こうした効果は地下海の進化に多大な影響を与えるため, 構造の変化と物質濃度の変化を同時に取り扱い, 内部熱史とカップリングさせた計算を行うことによって, 現実的な地下海の進化モデルを構築する。

c. 汎氷天体進化モデルへの拡張

a, b で構築した進化モデルを用いて, 計算のパラメタ・サーチを網羅的に行う。本申請で構築する数値モデルは1次元系であり, 単一の計算時間はさほどかからないため, 天体のサイズ, 質量 (H_2O 岩石比), H_2O 層の初期固液状態, 岩石中の放射性熱源量などの多様なパラメタ空間における様々なケーススタディを行うことを作業の主眼とする。太陽系内の氷天体だけでも, 半径は2500 km 超の水星級まで, 岩石含有率は0~90%におよぶ実に多様な幅を持っており (図3), 低コストで多数の計算, という本申請の理念がここに活かされる。木星・土星の衛星や冥王星などの準惑星といった, 太陽系内の具体的な氷天体に対して, 理論的観点からの地下海存否の予測とその進化史を提示し, 比較惑星海洋学ともいべき新たな描像を与える。さらに, 上記のパラメタ・サーチを系外惑星系で予想される氷天体にも拡張し, 氷天体の普遍的な進化シナリオの構築を行う。

参考文献 [1] Hussmann et al., (2006, Icarus 185, 258) [2] Kimura et al., (2007, EPS 59, 113), [3] Kimura et al., (2009, Icarus 202, 216), [4] Bland et al., (2009, Icarus 200, 207), [5] Saur et al., (2015, JGR 120, 1715). [6] Vance et al., (2016, P&SS 96, 62), [7] Choukroun et al., (2010, JCP 133, 144502), [8] 木村 (2008, 日本惑星科学会誌「遊星人」17, 29).

4. 研究成果

4.1. 数値モデル

本課題で構築した計算モデルの概要を述べる。天体の基本的な内部構造を, 中心の岩石核と外層の H_2O 殻の2層構造と仮定し, 対象とする天体の全体質量と平均密度の制約下において, 各層の密度と厚さを与える。熱源は岩石核内の放射性核種の崩壊熱とし, 仮定する鉱物種 (隕石タイプ) に従った核種の濃集度を与える (対象とする天体の軌道状態によっては, 潮汐加熱も加え

る) 初期温度分布, とくに H_2O 殻の初期状態は全溶融と全固化の 2 極端のケースを想定し(この初期状態は, 天体集積時に獲得するエネルギーの違いを模している), 表面は一定温度で固定するなどの条件を与える。中心から表面までに格子点を配置した熱輸送方程式の差分化を行い, 物性値も格子点ごとに評価することによって, 特に粘性率の温度依存性といった熱輸送を大きくコントロールする値を丹念に評価する。時間積分には 4 次のルンゲクッタ法を用い, 46 億年間の内部温度分布の進化と地下海の生成・消滅を含めた厚さの変化を追跡する。

4.2. 計算結果: 冥王星モデル

半径 1180 km, 平均密度 1.88 g/cc の冥王星は, 探査機 New Horizons による近接観測を通して, 氷の地殻下に海を持つ可能性が示唆されている。中心の岩石核と外側の H_2O 殻の二層構造を仮定すると, 岩石核の密度が 3.4 g/cc を超える場合は H_2O 殻の厚さが大きくなり, その底部では高圧氷(氷 III 相)が発生する。固体 H_2O として低圧氷(氷 Ih 相)のみが発生する場合と, 高圧氷も同時に発生する場合とでは, 天体全体の熱輸送, 特に地下海の進化が大きく異なる可能性があり, ひとつの天体で両者のケーススタディを行える冥王星は, モデル計算のテストとして最適である。なお, 冥王星は半径 606 km の衛星カロンを持つが, 軌道離心率が 0.0 であることから潮汐加熱は発生しない点で, 熱源を岩石中の放射性核種のみに限定したシンプルな形でのテストにも適していると言える。

天体の全体質量と平均密度を固定したとき, 岩石核はその密度が大きいほど半径は小さくなる。冥王星の場合, 岩石核密度を 3.0, 3.27, 3.5 g/cc の 3 通りとした内部構造を仮定した(図 1)。岩石核内の放射性核種には, 半減期の長い ^{232}U , ^{235}U , ^{237}Th , ^{40}K を考え, CI コンドライト隕石および普通コンドライト隕石中の 2 通りの濃集度を仮定した。氷の融点粘性率は $1 \times 10^{13} \sim 5 \times 10^{17}$ Pas の値を取るパラメタとし, 表面温度は 44.0 K で固定した。初期温度は, H_2O 層全固化の場合は全球均一で 250 K, 全溶融の場合は H_2O 層は表面を 273 K から断熱温度勾配を持つとし, 岩石核は核表面での温度で均一とした。

まず, 様々なパラメタスタディを行った結果に共通して現れる傾向を述べる。図 2 は岩石核密度を 3.0 g/cc とした場合の計算結果である。初期 H_2O 層が全溶融していると仮定した場合, 計算開始直後は表面の低温によって海は急速に固化していく。数億年経過すると, 岩石核内の長寿命放射性核種の改変が進んで加熱が強まり, 地下海の固化が止まって厚化に転じる。初期 H_2O 層が全固化の場合は, 同じタイミングで氷殻の溶融が起こって地下海が誕生する。その後, 計算開始から 15 億年後程度で岩石核内の加熱が弱まり始め, 地下海の厚さは減少し始める。氷の融点粘性率が小さいことは流動しやすいことを意味するために, 氷殻内での対流が起こりやすく, 内部の熱が輸送されやすい。そのため, 融点粘性率が小さいほど地下海が存在期間は小さくなる。また一連のパラメタスタディを経て, H_2O 層の初期状態は地下海最終状態に影響を与えないことも分かった。

岩石核密度が 3.5 g/cc のときは H_2O 殻の厚さが大きくなり, H_2O 殻下部の圧力が高圧氷のひとつである ice III の生成圧力に達する(図 3)。この場合, 岩石核からの熱流量が十分減少し岩石核表面の温度がその圧力での ice III の融点を下回った際に, ice III が出現する。地下海は ice III と ice Ih に挟まれた形態で存在し, 天体の冷却とともに次第に固化が進んで, 最終的には 2 つの氷層が接触する形で海が消滅する。なお, 岩石核内の温度とその時間変化は, 岩石核密度や氷の融点粘性率にかかわらずほぼ同じ結果を示し, 計算開始から約 15 億年後に岩石核中心がその最高温度である約 1400 K に達する。これは, 岩石の粘性率が固体氷や液体水のそれに比べて極めて大きい, すなわち熱輸送のタイムスケールが長いためである。

さまざまな岩石核密度や氷の融点粘性率, そして岩石核内の放射性核種の濃集度を変化させた場合における, 現在の地下海厚さの結果を図 4 に示す。現在の地下海厚さは, 氷の粘性率が

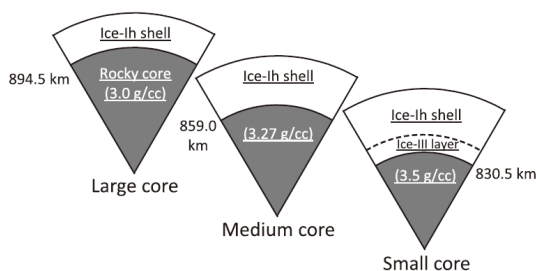


図 1: 本課題で採用した冥王星の内部構造モデル。

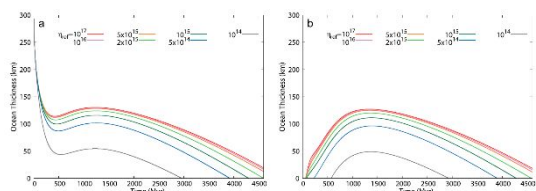


図 2: 岩石核密度 3.0 g/cc とした場合の, 初期 H_2O 全溶融の場合(左)と初期 H_2O 全固化の場合(右)における, 地下海厚さの時間変化。各線は氷の融点粘性率の違い。

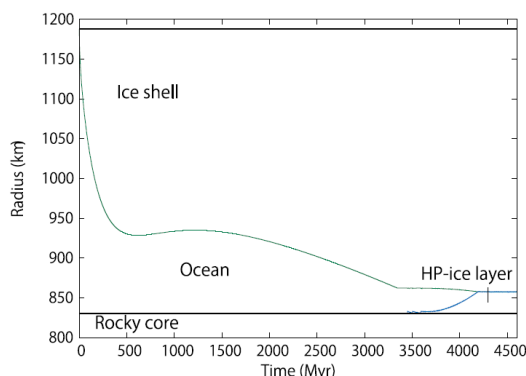


図 3: 岩石核密度を 3.5 g/cc, 氷の融点粘性率を 1×10^{14} Pas とした時の, H_2O 層の構造変化。

計算開始から約 15 億年後に岩石核中心がその最高温度である約 1400 K に達する。これは, 岩石の粘性率が固体氷や液体水のそれに比べて極めて大きい, すなわち熱輸送のタイムスケールが長いためである。

さまざまな岩石核密度や氷の融点粘性率, そして岩石核内の放射性核種の濃集度を変化させた場合における, 現在の地下海厚さの結果を図 4 に示す。現在の地下海厚さは, 氷の粘性率が

高い（氷地殻の熱輸送効率が低い）ほど大きくなり、CIコンドライト的な放射性同位体濃集度よりも普通コンドライト的なそれの方が50 kmほど厚くなること分かった。

さらに、地下海にアンモニアが溶存したケースも考慮したところ、アンモニアが溶存しない場合に46億年後には地下海が存在しない（ H_2O 殻が全固化している）ケースでも、1質量%でも溶存していればその融点降下の効果によって地下海が維持されることが分かった。

4.3. クラスレート・ハイドレートの寄与

H_2O と他の揮発性物質が高圧下で共存する場合、固体 H_2O 氷の結晶構造に揮発性物質が取り込まれることがある。このような物質をクラスレート・ハイドレートと呼ぶ。冥王星においては、表面の赤外線分光観測によって、 H_2O の氷だけでなく窒素やメタンが共存することが分かっている。このことから、内部で（氷殻の底部に）メタンクラスレートが生成する可能性を考慮し、それが地下海の進化に与える影響を同様の数値モデルで考察した。メタンクラスレートは純粋な H_2O 氷に比べて熱伝導率が1/10、粘性率が10倍大きいいため、熱を運びにくく、氷殻全体を硬化させる効果を持つ。その結果、地下海の存在期間は極めて長くなること分かった。

4.4. 成果のまとめ

以上、研究開始時の目的であった、「a. 固体 H_2O 氷層（氷地殻と高圧氷層）中の熱輸送および固化融解過程モデルの構築」は完了し、「b. 地下海溶存物質と凝固点変化の効果の組み込み」も、 NH_3 の溶存が与える進化への影響について考察を行った。「c. 汎氷天体進化モデルへの拡張」については、本課題の期間内に行ったパラメタスタディの範囲は十分ではないが、構築した衛星モデルは天体サイズや内部の層構造などを任意に与えることができるため、今後さまざまな天体を対象とした数値実験を実行できる体制が整ったと言える。

これらの結果は複数の査読付き欧文誌に出版したほか、国内外の学会にて発表した。また、衛星系形成の素過程を議論する場として、毎年2月ないしは3月に「衛星系研究会」を、また2018年3月26日から30日にかけては国際会議「Circumplanetary Disks and Satellite Formation Workshop」を開催した。

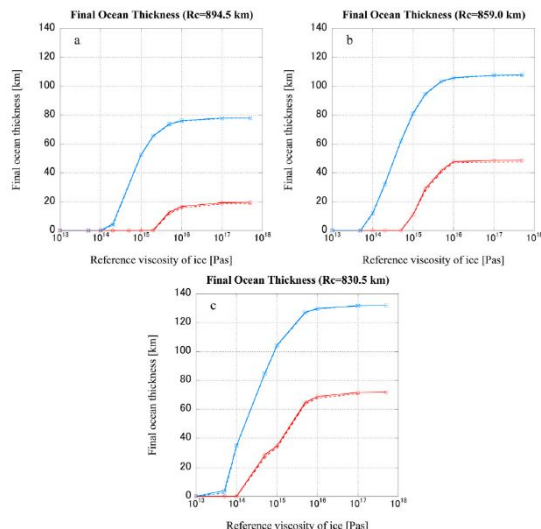


図4：現在（計算開始から46億年経過後）の地下海の厚さと、岩石核半径、氷の融点粘性率、および岩石核内の放射性核種の濃集度との関係。

その結果、地下海の存在期間は極めて長くなること分かった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件／うち国際共著 8件／うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 J. Kimura and S. Kamata	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 -
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 H. Hussmann, K. Lingenauber, R. Kallenbach, K. Enya, N. Thomas, L. M. Lara, C. Althaus, H. Araki, T. Behnke, J. M. Castro-Marin, H. Eisenmenger, T. Gerber, M. H. de la Revilla, C. Huttig, K. Ishibashi, J. Jimenez-Ortega, J. Kimura et al.	4. 巻 -
2. 論文標題 The Ganymede laser altimeter (GALA): key objectives, instrument design, and performance	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 CEAS Space Journal	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s12567-019-00282-8	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 C. Mariscal, A. Barahona, N. Aubert-Kato, A. U. Aydinoglu, S. Bartlett, M. L. Crdenas, K. Chandru, C. Cleland, B. T. Cocanougher, N. Comfort, A. Cornish-Bowden, T. Deacon, T. Froese, D. Giovannelli, J. Hernlund, P. Hut, J. Kimura	4. 巻 48
2. 論文標題 Hidden Concepts in the History and Philosophy of Origins-of-Life Studies: a Workshop Report	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Origins of Life and Evolution of Biospheres	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s11084-019-09580-x	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 Shunichi Kamata, Francis Nimmo, Yasuhito Sekine, Kkiyoshi Kuramoto, Naoki Noguchi, Jun Kimura and Atsushi Tani	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 -
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 Jun Kimura, H. Hussmann, S. Kamata, K. Matsumoto, J. Oberst, G. Steinbrugge, A. Stark, K. Gwinner, S. Oshigami, N. Namiki, K. Lingenauber, K. Enya, K. Kuramoto, and S. Sasaki	4. 巻 17
2. 論文標題 Science Objectives of the Ganymede Laser Altimeter (GALA) for the JUICE mission	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences	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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Atsushi Kumamoto, Y. Kasaba, F. Tsuchiya, H. Misawa, H. Kita, W. Pucciroy, J.-E. Wahlundy, J. Bergmany, B. Cecconi, Y. Gotox, Jun Kimura	4. 巻 -
2. 論文標題 Feasibility of the exploration of the subsurface structures of Jupiter's icy moons by interference of Jovian hectometric and decametric radiation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Planetary Radio Emissions VIII	6. 最初と最後の頁 127,136
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1553/PRE8s127	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 該当する

1. 著者名 Jun Kimura	4. 巻 -
2. 論文標題 Active Surface and Interior of Europa as a Potential Deep Habitat	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 in Astrobiology	6. 最初と最後の頁 383,397
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_24	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 Seiji Sugita, R. Honda, T. Morota, S. Kameda, H. Sawada, E. Tatsumi, M. Yamada, C. Honda, Y. Yokota, T. Kouyama, N. Sakatani, K. Ogawa, H. Suzuki, T. Okada, N. Namiki, S. Tanaka, Y. Iijima, K. Yoshioka, M. Hayakawa, Y. Cho, M. Matsuoka, N. Hirata, N. Hirata, H. Miyamoto, Jun Kimura	4. 巻 17
2. 論文標題 The geomorphology, color, and thermal properties of Ryugu: Implications for parent-body processes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.aaw0422	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 Makoto Hareyama, Y. Ishihara, H. Demura, N. Hirata, C. Honda, S. Kamata, Y. Karouji, Jun Kimura, T. Morota, H. Nagaoka, R. Nakamura, S. Yamamoto, Y. Yokota and M. Ohtake	4. 巻 321
2. 論文標題 Global classification of lunar reflectance spectra obtained by Kaguya (SELENE): Implication for hidden basaltic materials	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 407,425
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2018.11.016	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 Ayano Nakajima, S. Ida, Jun Kimura, and R. Brassier	4. 巻 317
2. 論文標題 Orbital evolution of Saturn's mid-sized moons and the tidal heating of Enceladus	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 570,582
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2018.08.030	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 Jun Kimura et al.	4. 巻 -
2. 論文標題 Science Objectives of the Ganymede Laser Altimeter (GALA) for the JUICE mission	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences	6. 最初と最後の頁 -
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 該当する

1. 著者名 Atsushi Kumamoto, Jun Kimura et al.	4. 巻 -
2. 論文標題 Feasibility of the exploration of the subsurface structures of Jupiter's icy moons by interference of Jovian hectometric and decametric radiation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Planetary Radio Emissions VIII	6. 最初と最後の頁 -
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 該当する

[学会発表] 計35件(うち招待講演 5件/うち国際学会 16件)

1. 発表者名 Jun Kimura
2. 発表標題 Tectonics on icy bodies: morphology and origin, Fracture and Geomorphology
3. 学会等名 Osaka workshop for nonequilibrium physics (招待講演)(国際学会)(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jun Kimura
2. 発表標題 Explorations and current understandings for subsurface ocean of icy bodies
3. 学会等名 JpGU Meeting 2019 (招待講演)(国際学会)(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shunichi Kamata, Francis Nimmo, Yasuhito Sekine, Kiyoshi Kuramoto, Naoki Noguchi, Jun Kimura, Atsushi Tani
2. 発表標題 An interior structure model of Pluto resolving its mysteries
3. 学会等名 JpGU Meeting 2019 (国際学会)(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryusuke Nishitani, Atsushi Tani, Sho Sasaki and Jun Kimura
2. 発表標題 Inclusion of brine into icy shell of Enceladus
3. 学会等名 JpGU Meeting 2019 (国際学会)(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jun Kimura, and Shunichi Kamata
2. 発表標題 Stability of the subsurface ocean of Pluto
3. 学会等名 AOGS2019 (国際学会) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 木村淳, 高木聖子, 松尾太郎
2. 発表標題 木星氷衛星に非H ₂ O氷を探す
3. 学会等名 第7回衛星系研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 木村 智樹, 木村 淳, 吉岡 和夫, 村上 豪, 寺田 直樹, 白井 英之, 西野 真木, 横田 勝一郎, 三宅 洋平
2. 発表標題 太陽系天体の宇宙風化再現実験に向けた汎用プラズマ照射装置の開発
3. 学会等名 第7回衛星系研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西谷隆介, 木村淳, 谷篤史, 佐々木晶
2. 発表標題 土星衛星EnceladusとMimasにおけるメタンハイドレーターの形成と熟進化
3. 学会等名 日本惑星科学会2019年秋季講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小島晋一郎, 木村淳, 鎌田俊一
2. 発表標題 潮汐変形と位相の遅れを考慮したGanymedeの強制秤動
3. 学会等名 日本惑星科学会2019年秋季講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松井弥志, 木村淳
2. 発表標題 冥王星の窒素水の昇華と凝結による反射率分布の変化
3. 学会等名 日本惑星科学会2019年秋季講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 木村 智樹, 木村 淳, 吉岡 和夫, 村上 豪, 寺田 直樹, 白井 英之, 西野 真木, 横田 勝一郎, 三宅 洋平
2. 発表標題 太陽系天体の宇宙風化再現実験に向けた汎用プラズマ照射装置の開発
3. 学会等名 第146回 SGPSS総会および講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 木村淳, 並木則行, 鎌田俊一, 松本晃治, 押上祥子, 塩谷圭吾, 倉本圭ほか
2. 発表標題 Science targets of the GAnymede Laser Altimeter (GALA) for the JUICE mission
3. 学会等名 JpGU Meeting 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小島晋一郎, 木村淳, 鎌田俊一
2. 発表標題 Forced libration of Ganymede including the visco-elastic tidal deformation
3. 学会等名 JpGU Meeting 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松井弥志, 木村淳
2. 発表標題 Evolution of Pluto's surface albedo due to sublimation and condensation of ice
3. 学会等名 JpGU Meeting 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shunichi Kamata and Jun Kimura
2. 発表標題 Interior evolution of Galilean satellites
3. 学会等名 Symposium on Planetary Sciences 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jun Kimura
2. 発表標題 Thermal evolution and stability of subsurface ocean in Pluto Metallic core and thermal evolution of icy bodies
3. 学会等名 JpGU Meeting 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 Catherine Walker, Jun Kimura, and Alex Gardner
2 . 発表標題 Clues from above: Topographic signatures of icy surface dynamics using laser altimetry and implications for the Ganymede laser altimeter (GALA)
3 . 学会等名 50th LPSC (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Hauke Hussmann, Kay Lingenauber, Reinald Kallenbach, Jurgen Oberst, Keigo Enya, Masanori Kobayashi, Noriyuki Namiki, Jun Kimura, N. Thomas, L. Lara, Gregor Steinbrugge, Alexander Stark, Fabian Luedicke, Thomas Behnke, Christian Althaus, Simone Del Togno, Belinda Borgs, Harald Michaelis, Judit Janchen
2 . 発表標題 The Ganymede Laser Altimeter (GALA) for ESA 's Jupiter Icy Moons Explorer (JUICE) Mission
3 . 学会等名 EPSC 2018 (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Jun Kimura, and Shunichi Kamata
2 . 発表標題 Evolution of Pluto ' s subsurface ocean and constraint on its interior
3 . 学会等名 AOGS2018 (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Yoda Masahiro, Jun Kimura, Yashito Sekine, Kei Kurita
2 . 発表標題 Volume Expansion of Ganymede due to Temperature Change and Phase Change of Ices
3 . 学会等名 Cryovolcanism in the Solar System Workshop (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 Jun Kimura and Shunichi Kamata
2. 発表標題 Evolution of subsurface ocean of Pluto and constraint on its interior
3. 学会等名 JpGU Meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ryusuke Nishitani, Jun Kimura, Atsushi Tani, Sho Sasaki
2. 発表標題 Inclusion of ammonium ion into clathrate hydrate in subsurface ocean of icy moon
3. 学会等名 14th International Conference on the Physics and Chemistry of Ice (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 塩谷圭吾, 並木則行, 小林正規, 木村淳
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 松井弥志, 木村淳
2. 発表標題 冥王星表面の水の昇華と凝結による反射率の変化
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 西谷隆介, 木村淳, 谷篤史, 佐々木晶
2. 発表標題 土星衛星エンセラダス熱進化におけるクラスレートハイドレートの役割
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 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 木村淳, 並木則行, 鎌田俊一, 松本晃治, 押上祥子, 塩谷圭吾, 倉本圭
2. 発表標題 木星圏探査機JUICE 搭載レーザ高度計 (GALA) の科学目標
3. 学会等名 第144回 SGPSS総会および講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 西谷隆介, 木村淳, 谷篤史, 佐々木晶
2. 発表標題 氷天体熱進化に対するクラスレートハイドレートの影響
3. 学会等名 第6回衛星系研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中島彩乃, 木村淳, 井田茂
2. 発表標題 土星中型衛星の軌道進化
3. 学会等名 第6回衛星系研究会
4. 発表年 2018年

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

1. 発表者名 Jun Kimura
2. 発表標題 Science Objectives of the Ganymede Laser Altimeter (GALA) for the JUICE mission
3. 学会等名 Joint Conference: 31st ISTS, 26th ISSFD and 8th NSAT (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Jun Kimura
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 木村淳
2. 発表標題 衛星研究の現状と将来展望
3. 学会等名 第19回惑星圏研究会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 木村淳
2. 発表標題 JUICE 搭載ガニメデレーザ高度計(GALA) で目指すサイエンス
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 木村淳
2. 発表標題 JUICE/GALA-J(2): JUICE搭載ガニメデレーザ高度計（GALA）が木星氷衛星で目指す科学
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2017
4. 発表年 2017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
---------	---------------------------	-----------------------	----