

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 4 月 23 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2014～2016

課題番号：26707024

研究課題名(和文) 太陽系氷天体の熱水反応実験と物質進化モデル：太陽系形成過程とハビタビリティの解明

研究課題名(英文) Hydrothermal experiments and chemical evolution model for icy bodies in the Solar system: Implications for formation of the Solar system and habitability

研究代表者

関根 康人 (Sekine, Yasuhito)

東京大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：60431897

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、太陽系に存在する氷天体の内部海の環境(酸化還元状態、pH、温度)やその形成条件、そこでの生命生存可能性を、探査機による観測データを室内実験に基づいて解釈することで明らかにすることを目的とする。

土星衛星エンセラダスでは、内部海の海底に、始原的な岩石成分で水素など、生命利用可能エネルギーが豊富に存在する熱水環境が存在することを示した。また、準惑星セレスや冥王星の表面物質から、太陽系初期に広範囲に渡って、天体がダイナミックに移動・衝突合体するステージが存在したことを実証的に明らかにした。このように、氷天体内部海の化学的多様性や生命存在可能性の理解に迫る研究を世界に先駆けて展開した。

研究成果の概要(英文)：The present study aims at understanding water environments (redox, pH, temperature) and habitability within interior oceans of geologically-active icy bodies in the Solar system, based on laboratory experiments and spacecraft observations. We have constrained chemical conditions and rock compositions of hydrothermal environments within Enceladus. We further suggest the occurrence of large-scale planetary migrations at the early stage of the Solar system from the interpretations of surface materials on Ceres and Pluto.

研究分野：惑星科学

キーワード：氷天体 化学進化 熱水環境 原始太陽系円盤

1. 研究開始当初の背景

近年の太陽系探査により、1) 初期太陽系の物理条件や惑星移動の検証、2) 生命につながる化学進化や太陽系におけるハビタビリティの理解のために、ガス惑星の氷衛星や揮発性分子に富む氷天体の形成・進化過程の理解が重要であることがわかってきた。

1)については、系外惑星観測を基にした「惑星移動」という概念が、従来の太陽系形成論を根底から揺るがしている。巨大ガス惑星や巨大氷惑星の惑星移動の可能性を考えれば、現在の木星や土星が現在の位置で形成したという保証はない。なぜ太陽系が今の姿になったのか、惑星移動が初期太陽系においても起きていたのか、といった根本的な謎を実証的に明らかにするためには、実際の惑星上に存在する物質科学的証拠から制約を得るほかない。

ガス惑星を周る氷衛星は、原始太陽性円盤内の氷微惑星を材料物質に形成した。したがって、氷衛星の化学組成から、ガス惑星が形成した原始太陽系円盤の温度やその位置を制約できる可能性がある。さらに、小惑星帯の準惑星セレスの内部やC型小惑星の表面にも氷水が存在していることが、近年の望遠鏡観測から明らかになっている。最近の「惑星移動説」によると、セレスを初めとするC型・D型小惑星は、初期太陽系における惑星移動に伴い、外側太陽系の氷微惑星が小惑星帯に移動してきたとも言われている。

これら氷天体に対する探査は、今後精力的に行なわれる予定である。探査機カッシーニは現在も土星系探査を継続して行っており、2015年にはドーンがセレスへと到着する。しかしながら、カッシーニの観測により、土星系形成時の円盤温度や形成位置を直接的に制約できたかという必ずしもそうではない。氷衛星やセレスのように比較的大きな天体では、形成後の熱進化によって材料物質が変成してしまう。したがって、材料物質という軸だけでなく、熱進化による温度という軸も加わるため解釈が非常に複雑となる。どのような生成物になるのかという「氷天体における熱水反応のレシピ」さえ得られれば、氷衛星の探査結果から円盤の温度条件や形成位置を制約したり、惑星移動の有無を検証したりすることも可能になる。

2)の太陽系における化学進化・ハビタビリティの理解については、氷衛星の液体の内部海の化学反応に関する情報が得られるようになったことが重要なブレイクスルーとなっている。

木星の衛星エウロパ、ガニメデ、カリスト、土星系の衛星エンセラダスの氷地殻の下には、液体の水が内部海として存在している。特に、カッシーニによる衝撃的な発見は、エンセラダスの南極付近から噴き出している間欠泉プリームである。これによって、直接サンプリングが困難であった衛星内部海の化学組成の詳細が、近年急速に明らかになりつつある。しかし、現状では、氷天体でおきる熱水反応自体が不明なため、上記項目も理解が進んでいない。

2. 研究の目的

本課題では、氷天体内部の水-鉱物反応、熱水反応、有機合成反応を室内実験により明らかにする。得られた実験結果を内部海物質進化モデルに組み込み、観測される表面や内部の物質から、天体の材料物質や熱進化、内部海の温度・組成を明らかにすることを目指す。

明らかにした氷天体の材料物質から、それらの天体がいつどこで形成したものを制約し、惑星移動の有無を実証的に示すことを目指す。また、内部海の熱水環境(pHや温度、岩石組成)を観測結果から特定することで、地球外天体における生命生存可能性の議論を行うことを目指す。これらは、次世代探査や望遠鏡観測と結びつき、太陽系の普遍性を明らかにするための重要な礎にもなる。

3. 研究の方法

初年度に熱水実験装置の作成・稼働を行い、実験を開始し、次年度には鉱物・揮発性分子量・温度条件をパラメタにして、氷天体において想定される様々な条件で実験を行う。そして得られた結果を熱水噴出孔での化学反応モデルに組み込み、数値シミュレーションによる熱水実験の再現を行う。氷天体の内部海物質進化は、地球の鉛直一次元海洋化学モデルを基礎として、この境界条件を修正することで、これを明らかにする。境界の下部からは数値シミュレーションで再現された熱水反応によるインプットを考え、境界の上部では圧力低下による発砲・プリーム、氷地殻の成長を考慮する。そして、熱進化・材料物質を変化させたときの、内部海の組成や岩石成分の組成、表面物質の組成の億年スケールでの時間変化を求めて、探査観測データと比較する。

4. 研究成果

本研究による成果は、主に1)土星衛星エンセラダス内部に熱水環境(90以上)が存在することを、探査機カッシーニの観測結果に基づき明らかにしたこと(Hsu, Postberg, Sekine et al., 2015, Nature)、2)その熱水環境がpH 9-11程度のアルカリ性で、岩石組成がコンドライト隕石に似ていることを明らか

にしたこと (Sekine et al., 2015, Nature Communications)、3) 氷準惑星である冥王星、セレスの表面物質の組成や分布から、初期天体の熱史や初期物質を制約し、太陽系初期の天体のダイナミックな移動が起きていたことを実証的に明らかにしたこと (Sekine et al., 2017, Nature Astronomy) が挙げられる。

1, 2) は、地球外に生命が生存できる環境が現存することを、初めて示したものであり、長い太陽系探査の歴史の中でも極めて重要なエポックメイキングな成果となり、様々なメディアで成果が紹介された。3) は太陽系初期における惑星形成過程を、物質に基づいた実証的証拠で制約するものであり、太陽系外惑星も含めた惑星形成理論に大きな影響を及ぼすものとなった。以下では、1~3 について、成果の詳細を述べる。

1) エンセラダスにおける熱水環境の発見 (Hsu, Postberg, Sekine et al., 2015, Nature): エンセラダスが、世界中の科学者の視線を集める理由は、南極付近の地表の割れ目から地下の海水が間欠泉のように宇宙に噴出していることにある。エンセラダスは海水を宇宙に放出することで、内部の様子を直接調べる機会を与えてくれる貴重な天体である。

2005 年のプリューム発見以降、エンセラダスに関する知見が得られるたびに、生命存在の期待も高まっていた。しかし、解決されていない重要な問題も残されていた。それは、地下海に生命が利用できるエネルギーは存在するのかという点である。地球上の生命は、太陽からの光エネルギーや地球からの熱エネルギーに依存して生命活動を行っている。特に、太陽光の届かない深海の海底熱水噴出孔では、地球の熱エネルギーを使って生きる原始的な微生物が存在する。このような海底熱水噴出孔は、初期の地球においても生命誕生の場の有力候補になっている。しかし、太陽光の届かないエンセラダスの地下海に、そのような熱水環境が存在するのかこれまで明らかではなかった。

本研究では、プリューム中に含まれる海底の温度の指標になる物質 “ナノメートルサイズの岩石の微粒子” に注目した。カッシーニ探査機に搭載されたダスト分析器は、探査機と衝突した微粒子の組成を調べる測定器であり、探査機が土星周回中にナノメートルサイズのシリカに富む謎の微粒子と何度か衝突していたことを明らかにしていた。ナノシリカ粒子は地球上では比較的ありふれた物質だが、宇宙においては稀である。なぜなら、地球上での主なシリカの生成過程が、高温の水が岩石と触れ合うことで岩石成分

が熱水に溶け、その熱水が急冷することでシリカが析出するものだからである。したがって、ナノシリカ粒子は水と岩石が反応を起こしている物的証拠となりうる。

本研究では、ダスト分析器の詳細なデータ解析を行い、これらナノ粒子がほぼ純粋なシリカからなること、そしてこれらが土星を回るエンセラダスの軌道周辺に存在していたことを明らかにした。つまり、ナノシリカ粒子はエンセラダスの地下海で形成され、プリュームと共に宇宙に放出されていたのである。しかし、ナノシリカ粒子の存在だけから、具体的な地下海の温度条件を推定することは難しい。なぜなら、ナノシリカ粒子の生成は、温度だけでなく、岩石や海水の組成、pH にも依存し、これらの条件は地球とエンセラダスでは大きく異なることが予想されるからである。

そこで、プリュームで観測される二酸化炭素やアンモニアを含む水溶液と、初期の太陽系に普遍的に存在していたかんらん石や輝石の粉末を用いた熱水反応実験を行い、エンセラダス地下海の環境を明らかにした。その結果、エンセラダス内部の反応でナノシリカ粒子が生成するためには、90 以上という熱水環境が必要であること、また熱水の pH は 8~10 のアルカリ性であることがわかった。さらに、ナノシリカ粒子は海水中で数年以内という短時間で大きな粒子まで成長してしまうことから、これらが熱水環境で生成してから宇宙に噴出するまでの時間は長くても数年であることを示した。関根准教授らは、これらの結果に基づき、エンセラダスの海底に地球の海底熱水噴出孔に似た熱水環境はおそらくエンセラダスに広範囲に存在し、それが現在でも活発に活動しているという内部モデルを構築した。

本成果は、エンセラダスに液体の水、有機物、エネルギーという、生命に必須の 3 大要素が、現在でも存在することを示すものである。35 億年前の火星地表面には、液体の水が存在していたことが確実視されている。しかし、現在の火星は極めて寒冷で、かつ乾燥しており、生命を育みうる環境が存続しているのかははっきりしない。地球以外で生命を育みうる環境が現存することが実証されたのはエンセラダスが初めてであり、今回の成果は “生きた地球外生命の発見” という自然科学における究極のゴールに迫る大きな飛躍である。これまで火星に集中していた太陽系生命探査は、エンセラダスという新たな候補天体を得て、今後大きな広がりを見せること

が期待される。

2) エンセラダスの熱水環境の特定 (Sekine et al., 2015, *Nature Communications*): 土星の水衛星の1つであるエンセラダスは、直径約500キロメートルの比較的小さな天体である。この衛星が、科学者のみならず広く一般からも注目を集める理由は、“液体の水、有機物、エネルギー”という生命を育む基本要素が現存するためである。エンセラダスの内部には広大な地下海が存在し、南極付近の地表の割れ目から海水が間欠泉のように噴出している。NASAのカッシーニ探査機は、噴出した海水の分析から、海水に塩分や二酸化炭素、有機物が含まれることを明らかにしている。

これらの知見は、これまで夢でしかなかった地球外生命発見の可能性を飛躍的に高めてくれるものである。しかし、エンセラダス熱水環境の具体的な姿(岩石組成や生成しているガス種など)は未だ明らかでない。エンセラダスの海底では、地球に似た岩石が海水と反応しているのだろうか。あるいは、化学的に地球と異なる独自の熱水環境が広がっているのだろうか。

この問いに答えることは、今後のエンセラダスの探査において重要である。なぜなら、地球から遠く離れた土星衛星探査では、あらかじめ観測対象となる生命の息可能環境や食料となりうる物質の具体的な予想をつけ、搭載機器を選定する必要があるからである。海底熱水噴出孔に生息する地球上の微生物は、熱水と岩石との反応で生成したガスなどを食料として生きている。したがって、エンセラダスの生命探査における探査項目を具体化する上でも、その岩石の組成を知ることが本質的に重要となる。さらに、岩石組成の理解は、エンセラダスが経てきた温度を明らかにすることにもつながる。太陽系初期において、原始地球は微惑星の集積による熱で溶融し、鉄に富むコアや岩石に富むマントルが形成した。エンセラダスの岩石が地球マントルに似た組成であれば、地球同様に岩石が融解する高温を経験していたことになる。

本研究では、この問題を解明するため、エンセラダス海水に含まれるナノシリカ粒子に注目した。これらナノシリカ粒子は、高温の海水が岩石と触れ合うことで岩石に含まれていたシリカが水に溶け、それが急冷することで析出したと考えられている。したがって、ナノシリカ粒子の生成条件を詳しく調べることで、元となる岩石の組成を制約できる可能性がある。そこで、地球の岩石の主成分

であるマントルに似た組成の岩石と、隕石に似た組成の岩石の2種類の岩石に対して熱水反応実験を行った。その結果、マントルに似た組成の岩石からはナノシリカ粒子を生成することはできず、隕石に似た組成の岩石からのみ生成しうることがわかった。つまり、エンセラダスには、隕石のような岩石と海水が反応する、地球と異なる独自の熱水環境が存在することになる。

エンセラダスの岩石が隕石に似ていることは2つの重要な意味がある。1つは、エンセラダスの岩石成分が形成から現在まで一度も溶融していないことである。エンセラダスのような小さな天体は、初期に高温になっていないと通常は現在まで熱水環境を維持することは難しいとされる。つまり、エンセラダスの岩石が溶融していないことは、現在見られる熱水環境は比較的最近起きた加熱イベントによって実現したことを示すのかもしれない。もう1つは、生命の食料となりうる物質についてである。岩石が溶融した原始地球で、鉄の多くは惑星中心に集まり金属コアを形成する。一方、岩石の溶融を経験していないエンセラダスでは、岩石成分にも鉄が多く存在し、熱水環境で水素を大量に生成する。水素は地球上の原始的な微生物にとって重要な食料である。つまりエンセラダスには、微生物にとっての食料が豊富に生成される環境が存在することを示唆し、このことは生命生存可能性にとって有利かもしれない。

これらの結果は、今後のエンセラダス探査における観測対象の具体化を可能にするだけでなく、我が国の小惑星探査「はやぶさ2」の価値も高める。はやぶさ2は、太陽系形成初期に熱水環境が存在していたとされるC型小惑星からサンプルを持ち帰る予定である。これらサンプルから明らかになるであろう隕石組成の岩石が存在する熱水環境での有機分子の化学進化は、そのままエンセラダスにも適応できる。つまり、はやぶさ2は当初の目標である地球の海や大気の起源だけでなく、エンセラダスにおける生体関連分子の生成にも実証的な制約を与えることになる。このように、今回の成果は探査計画を有機的に結びつけるという波及効果も持ち、今後の太陽系探査における重要なマイルストーンとなるだろう。

3) 冥王星で起きていたジャイアント・インパクト (Sekine et al., 2017, *Nature Astronomy*): 冥王星は太陽系外縁部カイパーベルトに存在する準惑星であり、直径2,400

キロメートル程度の天体である。その実態はほとんど謎に包まれた、太陽系に残された人類未到のフロンティアが冥王星であった。

2006年に打ち上げられたNASAの探査機ニューホライズズは、2015年8月に冥王星に近接接近してフライバイ観測を行った。人々を驚愕させたのは、探査機が明らかにした冥王星の姿に他ならない。研究者の多くは、冥王星をはじめとするカイパーベルト天体は、はるか昔に地質活動を終えた天体だと思っていた。しかし、実際の冥王星の表面を見ると、ハート形の氷河や氷の火山など、驚くほど多様な物質や地形に彩られていた。

そのような冥王星の多様な物質や地形の中で、目を引くのが赤道域に存在するクジラ模様、通称「クトゥルフ領域」である。クトゥルフ領域は赤道域を中心に、幅およそ300 km、長さおよそ3,000 kmに広がる、褐色に彩られた領域である。クトゥルフ領域は、水氷と褐色の高分子有機物の混合した物質でできていると考えられている。クトゥルフ領域は赤道全体のおよそ1/3を占めるため、この形成にはかつて冥王星でおきた大規模な物理・化学過程が関わっているはずであるが、その成因は謎であった。

本研究は、クトゥルフ領域の成因に関して、冥王星の巨大な月であるカロンの形成に注目した。カロンは冥王星の衛星であり、その直径は冥王星の約半分と非常に大きな衛星である。これほど惑星に対して大きな質量の衛星を持つものは、太陽系では冥王星・カロン系と地球・月系しかない。このカロンの起源としては、地球・月系と同様、原始惑星が冥王星に衝突したジャイアント・インパクト説が提唱されていたが、あくまで仮説の一つであり、実証的な証拠にかけていた。

本研究は、冥王星にジャイアント・インパクトが起きた場合、衝突地点付近の氷が加熱されて広大な温水の海ができ、そこで冥王星に元々存在していた単純な分子種が重合反応を起こして褐色の有機物が生成されるのではないかと考えた。これを確かめるため、まず、ホルムアルデヒドやアンモニアといった、カイパーベルト天体に普遍的に含まれる分子種を含む水溶液を、温度と反応時間を様々に変えて加熱した。反応後の水溶液や生成した有機物の色の変化を調べた結果、およそ50以上で数か月以上の加熱時間の場合、冥王星に元々含まれる物質から、クトゥルフ領域と同様の褐色の有機物が生成することが明らかになった。

さらに、このような温度条件がカロン形

成のジャイアント・インパクト時に達成されるのかを数値シミュレーションによって調べた。その結果、カロンのような大きさの衛星を形成する衝突条件の場合、ほぼすべてのケースでクトゥルフ領域と同程度の広さの加熱領域が赤道域を中心に形成されることが明らかになった。裏を返せば、クジラ模様のクトゥルフ領域が冥王星に存在することが物的証拠となり、ジャイアント・インパクトによって冥王星系が形成したことが強く示唆されたと言える。

本研究は、冥王星・カロン系が、地球・月系と同様、ジャイアント・インパクトでできたことを示すものである。さらに本研究の結果、衝突の速度や角度を変えると、全球が褐色になる場合やほとんど加熱されない場合が生じることなども明らかになった。カイパーベルトには、マケマケやセドナ、エリスといった大型の天体が存在するが、これら天体の表面の色には多様性があることも最近わかってきた。このようなカイパーベルト天体の多様性の起源について、これまで統一的な説明はなかったが、本研究はかつてカイパーベルトではジャイアント・インパクトが頻発し、その結果として上記の多様性が生じたという、統一的な説明を提示する。

最新の太陽系形成理論によると、太陽系初期において内側太陽系では、20個以上の原始惑星同士が数十回、ジャイアント・インパクトを繰り返して、現在ある地球型惑星を作り上げたと考えられる。これらジャイアント・インパクトの引き金となったのは、木星や土星という巨大ガス惑星の形成と移動だと考えられている。そのような巨大ガス惑星の形成と移動が起きれば、海王星以遠の領域も同様に影響を受けて、ジャイアント・インパクトが起きるだろう。本研究の結論は、巨大ガス惑星の形成と移動という最新理論とも調和的であり、地球形成領域から太陽系外縁部までにわたって、原始惑星のジャイアント・インパクトが頻発する大変動があり、これを経て太陽系は現在の姿になったと考えられる。

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)

Yamamoto, S., T. Matsunaga, R. Nakamura, Y. Sekine, N. Hirata, Y. Yamaguchi, "An automated method for crater counting using rotational pixel swapping method" *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 印刷中, 2017

Sekine, Y., H. Genda, S. Kamata, T. Funatsu “The Charon-forming giant impact as a source of Pluto’s equatorial dark regions” *Nature Astronomy*, 1, 0031, 1–6, 2017. Doi: 10.1038/s41550-016-0031

洪 鵬、関根 康人、杉田 精司 “還元的な惑星大気における有機物エアロゾルの成長過程に関する実験的研究” *エアロゾル研究、日本惑星科学会誌、遊星人*, 31, 3, 185-191, 2016. Doi: 10.11203/jar.31.185

Sekine, Y., T. Shibuya, F. Postberg, H.-W. Hsu, K. Suzuki, Y. Masaki, T. Kuwatani, M. Mori, P.K. Hong, M. Yoshizaki, S. Tachibana, S. Sirono “High-temperature water-rock interactions and hydrothermal environments in the chondrite-like core of Enceladus” *Nature Communications*, 6: 8604, 1–8, 2015. Doi: 10.1038/ncomms9604

Harada, M., E. Tajika, Y. Sekine “Transition to an oxygen-rich atmosphere with an extensive overshoot triggered by the Paleoproterozoic snowball Earth” *Earth and Planetary Science Letters*, 419, 178–186, 2015. Doi: 10.1016/j.epsl.2015.03.005

Hsu, H.-W., F. Postberg, Y. Sekine, T. Shibuya, S. Kempf, M. Horanyi, A. Juhasz, N. Altobelli, K. Suzuki, Y. Masaki, T. Kuwatani, S. Tachibana, S. Sirono, G. Moragas-Klostermeyer, R. Srama “Ongoing hydrothermal activities within Enceladus” *Nature*, 519, 207-210, 2015. Doi: 10.1038/nature14262

Yamamoto, S., T. Matsunaga, R. Nakamura, Y. Sekine, N. Hirata, Y. Yamaguchi “Rotational pixel swapping method for detection of circular features in binary images” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53, 2, 710 – 723, 2015. http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/index.html

山本 聡、松永 恒雄、中村 良介、関根 康人、平田 成、山口 靖 “回転ピクセルスワッピング法を使ったクレーター年代学” *日本惑星科学会誌 遊星人*, 24, 1, 20-32, 2015. https://www.wakusei.jp/book/pp/Contents_24.html

Sekine, Y.*, H. Genda, Y. Muto, S. Sugita, T. Kadono, T. Matsui “Impact chemistry of methanol: Implications for volatile evolution on icy satellites and dwarf planets, and cometary delivery to the Moon” *Icarus*, 243, 39–47, 2014. Doi: 10.1016/j.icarus.2.01.4.08.034

〔学会発表〕(計 1 1 件)

Sekine, Y., et al. “Ongoing hydrothermal activity in the chondritic core of Enceladus inferred from nano-silica particles and laboratory experiments” American Geophysical Union, San Francisco, CA, USA, 2014. 12. 16

Sekine, Y., et al. “Impact-induced alterations of planetary organic and ice simulants” Asian Oceanian Geoscience Conference, Singapore, 2015. 8. 5

Sekine, Y., et al. “Can a Charon-forming giant impact produce elongated dark areas on Pluto?” American Geophysical Union, San Francisco, CA, USA, 2015. 12. 17

Sekine, Y., et al. “Neutral pH of water on early Ceres” Goldschmidt Conference 2016, Yokohama, Japan, 2016. 7. 28

Sekine, Y., and H. Tabata “Runaway acidification of surface water on early Mars in response to atmospheric evolution” Asian Oceanian Geoscience Conference, Beijing, China, 2016. 8. 4

Sekine, Y., et al. “Neutral pH ocean on Ceres: Implications for formation temperature of Ceres in the protoplanetary disk” American Geophysical Union, San Francisco, CA, USA, 2016. 12. 15.

関根康人 “比較惑星海洋学とハビタビリティ” 日本地球化学会年会、横浜国立大学、横浜市、神奈川県、2015. 9. 16

関根康人他 “Exploration of carbonate and clay minerals on Mars: Clues for climate. Atmosphere, and deep hydrosphere of early Mars” 日本地球惑星科学連合、幕張市、千葉県、2015. 5. 22

関根康人 “生命を育む環境を太陽系に探す” 日本地球惑星科学連合、幕張市、千葉県、2015. 5. 23

関根康人他 “冥王星の黒いクジラ模様はカロン形成巨大衝突の痕跡か?” 日本惑星化学会秋季講演会、東京工業大学、目黒区、東京都、2015. 10. 14

関根康人他 “セレス内部海環境とその形成位置” 日本惑星化学会秋季講演会、岡山大学、岡山市、岡山県、2016. 9. 13

〔図書〕(計 2 件)

井田茂、田村元秀、生駒大洋、関根康人 編集、朝倉書店「系外惑星の事典」2016 年
関根康人他、共著、河出書房新社「科学者 18 人にお尋ねします。宇宙にはだれかいますか」2016 年

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

関根 康人 (SEKINE, Yasuhito)

東京大学・大学院理学系研究科・准教授

研究者番号 : 60431897