

太陽系氷衛星内部海におけるハビタビリティ (生命存在条件)

高井 研

はじめに

かつて人々は「地球は海をいだけ宇宙でも例外的な惑星であり、それゆえ多様な生命を育む奇跡的な存在である」と考えていたかもしれない。しかし、近年の太陽系内外の探査・観測の成果によって、宇宙には「海をいだけ天体」(十分な広がりと量を有する液体の水について本稿では便宜的に海と呼ぶ)が遍在することがわかりつつある。太陽系に限ってみても、火星には過去に地球と同じような表面海が存在したことはほぼ確実であり¹⁾、水で覆われた木星の水で覆われた衛星(氷衛星)であるエウロパ、ガニメデ、カリスト、土星の氷衛星エンケラドス、タイタンには、現在でもその氷の地下に大量の液体の水、つまり内部海が存在すると考えられている²⁾。未だ有力な証拠は得られていないものの、その他の太陽系内外の天体にも表面海あるいは内部海が存在する可能性が示されている²⁾。

地球生命の誕生の場が深海熱水域のような海洋環境であったかどうかについては未だ議論が続いているが³⁾、最後の共通祖先の出現以降の生命の進化史において、海や暗黒の地下世界が地球でもっとも重要な生命圏の一つであったことは間違いない^{4,5)}。この事実は、惑星・衛星環境における海の存在はその環境に生命が存在・持続しうる巨視的な必要条件となることを意味するかもしれない。そのような観点に基づくと、太陽系内外の普遍的に存在する「海をいだけ天体」に「生命が存在している」可能性は、決して荒唐無稽な想像や答えの出ない机上の空論の産物ではなく、もはや人類が直接的に証拠を得ることが可能な太陽系内地球外生命探査によって解明しうる「今ここにある」第一級の科学研究対象といえる。

本稿では、近年の太陽系内氷天体に対する惑星科学的研究の成果や探査に向けた取組みを紹介しながら、人類が長年問い続けてきた「生命とはなにか」や「生命の起源」へ決定的な答えを導くことが期待できる将来の氷天体地球外生命探査の基盤となる氷天体内部海のハビタビリティ(生命存在条件)の概念や具体的指標について解説したい。

内部海を持つ太陽系内氷天体

現時点において、太陽系内で海を保持する可能性が高い天体として、木星の衛星であるエウロパ、ガニメデ、カリスト、土星の衛星であるエンケラドス、タイタンが知られる(表1)。いずれも表面が氷で覆われている氷衛星である。ガリレオやカッシーニといった探査機による近接惑星物理観測によって、これらの氷衛星の氷の下に広がる内部海や岩石核、あるいは岩石層と金属核の存在が予想されるようになった。しかし一言に内部海と言っても、5つの氷衛星は大きさや形成プロセス、進化史が異なるため、その内部海の構造や組成は大きく異なると考えられている(図1)。特に内部海が岩石と直接的に相互作用するかということは、そこでの生命存在条件を考

表1. 内部海を保持する可能性が高い木星あるいは土星の衛星エウロパ、ガニメデ、カリスト、エンケラドス、タイタンの概要比較

衛星	太陽からの距離 (AU)	半径 (km)	密度 (kg/m ³)	表面温度 (K)
エウロパ	5.2	1,570	2,990	50-125
ガニメデ	5.2	2,630	1,940	70-152
カリスト	5.2	2,410	1,830	80-165
エンケラドス	9.5	252	1,610	33-145
タイタン	9.5	2,570	1,880	94

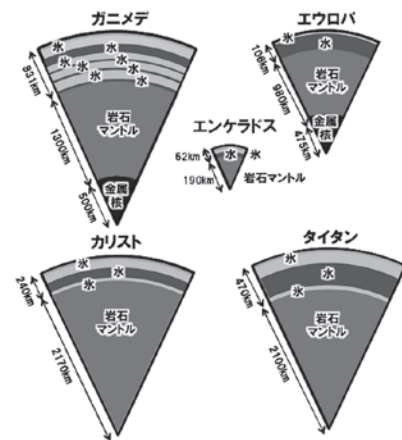


図1. エウロパ、ガニメデ、カリスト、エンケラドス、タイタンの内部構造の概略図。文献14)より改変。

えるうえでもっとも重要な要因となる。後述するように、生命が存続するための条件として、液体の水という「溶媒の存在」に加えて、「自由エネルギーの持続的な供給」を満たす必要がある。しかし、岩石と相互作用しない氷中の内部海では長期にわたって熱力学的非平衡状態を維持することが難しいと考えられる。このような観点から本稿では、水-岩石相互作用による内部海を持つと考えられるエウロパ、ガニメデおよびエンケラドスにおけるハビタビリティについて考える。

宇宙におけるハビタビリティ

地球生命と共通の材料やシステムによって必ずしも構成・維持されるとは限らない地球外生命のハビタビリティを議論するためには、「普遍的生命の必要条件」を考える必要がある。たとえば、米国航空宇宙局 (NASA) から委任された米国科学アカデミー宇宙科学委員会における「宇宙における有機物生命の限界」についての議論報告書では、「普遍的生命の必要条件」として「熱力学的非平衡状態の持続」「溶媒の存在」および「ダーウィン型性質 (Darwinism)」が言及されている⁶⁾。

「生命の定義」に迫る科学的議論の歴史において、Schrödinger⁷⁾、Prigogine⁸⁾、Bernal⁹⁾あるいはde Duve¹⁰⁾が「生命の本質の定義」を「エネルギー的非平衡状態の持続するシステム」とあると言及したように、地球外生命のハビタビリティを考える場合においても、もっとも重要な必要条件は熱力学的非平衡状態の持続であろう⁶⁾。また、生命と生命を取り巻く環境の関係性は不可分で連続的である。つまり、いかなる生命の存続にも熱力学的非平衡状態を持続させる場が必要であることは間違いない。

普遍的生命の存続に必要な熱力学的非平衡状態から得られる自由エネルギーの量論については、現存する地球の生物や生態系の増殖・生存・生理の理論・実験・観察に基づく定量的考察がある^{3,11)}。Hoehlerは、生命が利用可能なエネルギー勾配 (電圧) と時間当たりのエネルギー消費量 (電力) によって規定されるエネルギー量論状態を宇宙共通の生命存在条件とする概念を提示した¹¹⁾。TakaiはこのHoehlerの概念に対して、地球の微生物の増殖や生存における限界条件を外挿することによって、生命の存在を許容し得る最小および最大エネルギー勾配や、生命の存在を許容し得る最小および最大エネルギー利用量を概算的に推定した (図2)³⁾。この普遍的生命の存続に必要な自由エネルギー量論の概算は、宇宙におけるより具体的な「生命存続の場の条件」を提示する。

一方、生命の存続に不可欠な自由エネルギーの変換や

授受を可能とする触媒による複雑な化学反応システムの持続には、溶媒の存在が重要である⁶⁾。固相の化学反応では液相に比べ反応速度論的制約が大きく、逆に、気相中では多様な化学反応ネットワークをある系内 (たとえば細胞内) に維持・制御することが難しい。よって液相、さらに言えば、なんらかの区切り (たとえば細胞膜様構造) で制御された液相-液相系、での化学反応相互作用を可能とする溶媒の存在が必要となる。宇宙には液体の水以外にもいくつかの溶媒 (たとえばアンモニアやメタン、ホルムアルデヒド) の存在を想定することが可能であるが、複雑な化学反応システムを支える多様な元素や分子を溶存させることができるもっとも普遍的かつ豊富な溶媒が水であることは疑いがない⁶⁾。よって液体の水の存在は、地球外生命のハビタビリティを決定づけるもう一つの必要条件といえよう。

さらに、「宇宙における有機物生命の限界」についての議論報告書⁶⁾では、「普遍的生命の必要条件」として上記の条件に加えて、「ダーウィン型性質 (Darwinism)」を担う物質の重要性が指摘されている。Benner¹²⁾は「ダーウィン型性質」は、必ずしも「生命の定義」に関する議論で取り上げられてきた「ダーウィン型進化 (Darwinian evolution)」やその能力 (たとえばJoyce¹³⁾) と同義ではないと主張する。「ダーウィン型進化」が物質やシステムが「複製」「受け継ぐ性質の多様化」「自然選択」という3つのステップを繰り返しながら進化する (機能が維持または向上する) 現象と捉えられていることに対して、「ダーウィン型性質」とは「複製」「受け継ぐ性質の多様化」「自然選択」という3つのステップを繰り返しながら機能劣化 (進化に対する退化あるいは制御の効かない多様化) に抗う性質と考えるべきであると指摘する¹²⁾。つまり「普遍的生命の必要条件」として、たとえばRNAのような「ダーウィン型進化」を可能と

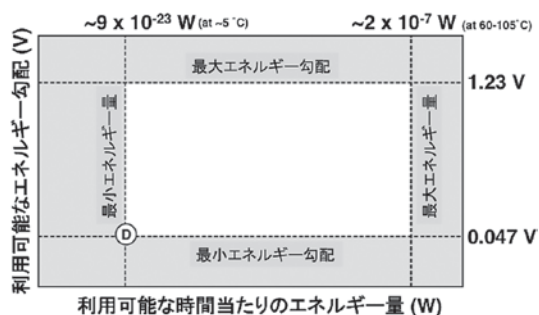


図2. 宇宙における「生命が存在し得るエネルギー条件」の概念図。この図ではHoehlerの概念¹¹⁾に対して、現存する地球の生物の実験・観察に基づいた限界値を外挿することにより、生命の存在するための最小・最大エネルギー勾配や最小・最大エネルギー量を数値化している。

する優れた触媒・遺伝有機高分子、あるいは少なくともそのような有機物重合体を生成する特定の材料物質や化学反応を想定するのではなく、溶媒中でエラーを伴う複製が可能で溶解度や構造安定性によって性質が維持されるような「ダーウィン型進化」の前駆的作用である「ダーウィン型性質」を担う有機多価電解質やその材料物質や生成化学反応の存在を、「普遍的生命の必要条件」として想定することを提案した¹²⁾。現存する地球生物の本質的機能として「ダーウィン型進化」能は絶対的な必要条件であると考えられるものの、「普遍的生命の必要条件」としてより可能性が広がる「ダーウィン型性質」に着目することは、地球外生命のハビタビリティを考えるうえでより現実的かつ新しい視点となろう。

エウロパ、ガニメデの内部海におけるハビタビリティ

太陽系内で水-岩石相互作用による内部海を持つと考えられるエウロパ、ガニメデおよびエンケラドスでは、放射性元素の壊変や潮汐作用による固体の摩擦が熱源となって水を融解し内部海が形成されると考えられている。しかし、それぞれの氷衛星の形成プロセスや進化史の違いによって、内部海の物理・化学的性質は大きく異なると予想されている(図1)。たとえば、エウロパやガニメデはエンケラドスに比べかなり大きな衛星であり、そのため内部海および岩石地殻のさらに深部に金属核を持つ¹⁴⁾。また、エウロパやガニメデは木星磁気圏の影響下にあり、衛星表面はエンケラドスに比べ、遙かに強い放射線や宇宙線の照射や粒子の衝突に曝されるため、水の分解やさまざまな物質の供給あるいは表層物質の風化などの大きな化学的影響を受ける¹⁵⁾。一方、エウロパとガニメデの比較においても、エウロパが表面の氷層の下に広がる一層の内部海を持つのに対し、ガニメデでは水-岩石相互作用を受ける内部海の他に、物性の異なる氷層に挟まれた複数の内部海層が存在する¹⁴⁾。さらに、衛星の水で覆われた表面構造の解析から、エウロパの水のテクトニック活動はガニメデよりも活発であり、より活発な氷対流をもたらす内部海の熱対流が予想されている¹⁶⁾。しかし、どちらの衛星においても、現在までに断続的に続く水-岩石相互作用（深海熱水活動）が、「普遍的生命の必要条件」としての「熱力学的非平衡状態の持続」と「溶媒の存在」を支えていることはほぼ間違いない。

しかし実際には、宇宙空間への噴出プルームの観測によって物理・化学的性質の分析が進んでいるエンケラドスの内部海に比べ、エウロパ、ガニメデの内部海の性質はよく分かっていない。エウロパの内部海は化学的性質については、初期形成物質や岩石地殻構造の推定、表面化学分析結果および他のガリレオ衛星の観測結果に

基づいて、岩石地殻からの $MgSO_4$ を主成分とする熱水性塩水の影響と表層の化学的変性に伴う強酸性水（塩濃度の低い水）の影響を強く受けた、地球やエンケラドスの海水とは大きく異なる海水の存在が推測されている¹⁷⁻¹⁹⁾。おそらくガニメデの内部海においても、深海熱水活動に由来する $MgSO_4$ を主成分とする熱水性塩水と表層水から供給される強酸性水を端成分とする混合による海水形成が起きていると考えられる¹⁴⁾。

不確定要素が大きいためハビタビリティに関する具体的な指標を描出することは困難であるが¹⁶⁾、予想されるエウロパ・ガニメデの内部海環境にもっともよく似た地球のアナログ環境として、地中海や紅海の深海に存在する熱水性塩水溜まりと酸化的海水の混合域^{20,21)}や陸上火山や海底火山の地下深くに起きる超臨界マグマ流体の相分離によって生じた塩水（あるいは塩析沈殿物）と浸透する酸化的な海水や天水（降雨などを起源とする淡水）との混合域^{22,23)}といった環境をあげることができるかもしれない。地球におけるそのような極限環境における微生物生態系の探査例は未だ少なく、アナログ環境の物理・化学条件と微生物代謝・機能の相互作用に基づくエウロパ・ガニメデの内部海環境ハビタビリティに関する詳細な研究が今後重点的に進められるべきであろう。しかしながら、そのような環境においても一定量のバイオマスをも有した現地性の微生物生態系が存在することがすでに明らかになっており^{24,25)}、それらの研究例はエウロパ・ガニメデの内部海環境が地球外生命の存在条件を十分に満たしていることを示す有力な証拠と見なすことができるかもしれない。

エンケラドスの内部海におけるハビタビリティ

2005年にNASAの探査機カッシーニの近接フライバイ調査において、エンケラドスの南極付近からガスや粒子が噴出している様子（プルーム）が観察された(図3)^{26,27)}。また、全球観測による表面構造の調査や物理観測によって、南極付近の水の生成年代が顕著に新しいこと^{28,29)}、南極付近にタイガーストライプと呼ばれるリッジ状の構造が多く観察されること(図3)²⁶⁾、周辺温度に比べてタイガーストライプ近傍表層環境に100 K近い高温異常域が観察されること²⁷⁾、タイガーストライプの割れ目に沿って多数のプルームサイトが観察されること(図3)³⁰⁾、などが次々と明らかとなった。これらの観測事実は、エンケラドスの南極付近の水の下に内部海が存在し、それが氷の割れ目に沿って宇宙空間に噴出していることを強く示すものであった。さらに、プルームの近接フライバイ調査の際、カッシーニに装備された二つの質量分析計によって、噴出するガスや水中に含まれる

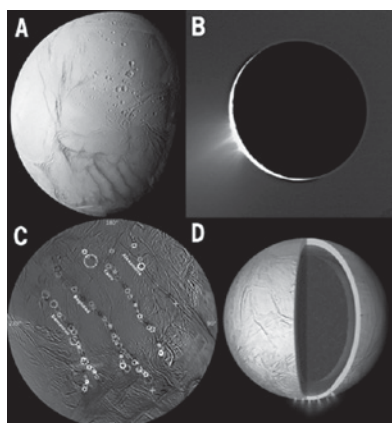


図3. エンケラドスの表面構造、プルームおよび内部海. (A) エンケラドスの全景写真 (PIA06254). (B) 南極付近から宇宙空間に噴き出すプルーム写真 (PIA07758). (C) タイガーストライプ上に見ついているプルームサイト (PIA17188). (D) エンケラドスの内部海の想像図 (PIA19656).

化学成分が分析された³¹⁻³⁴⁾. その結果, エンケラドス内部海が地球の海と似たようなNaClを主成分とする化学組成, つまり, コンドライト質の岩石核との熱水反応を通じて生成された海水, を保持し, さらに水素や硫化水素, メタンやアンモニアといった還元化学物質だけでなく質量数が50以下の比較的単純ではあるものの多様な有機物に富んだ環境であることが示された.

当初, エンケラドスは南極付近にのみ約30-40 kmの厚さの氷の下に10 kmほどの深さを有した局所的な内部海を持つと予想されたが, 長期間のエンケラドスの重力ふらつき観測から, 最大35 km (南極近辺) かつ平均25 kmほどの深さを持つ全球的な内部海が存在すると考えられるようになった (図3)³⁵⁾. また, プルームの物理・化学観測から内部海の形成と存続に対する深海熱水活動の寄与は十分予想されていたが, その影響が過去あるいは現在進行形の熱水活動に依存するかについては定かではなかった. 土星のEリング構成物質の分析によりエンケラドス由来のナノシリカ粒子が見つかったことやプルーム中に高濃度水素の存在が確認されたことから, 内部海において今なお活発な熱水活動が続いていることが明らかになった³⁶⁻³⁸⁾. さらに, 最近の質量分析の再解析によって, プルーム中に質量数200を超えるような高分子有機物が存在することが明らかとなった³⁹⁾. 加えて想定されるエンケラドスの内部海や深海熱水活動の物理・化学環境でのシミュレーションから, 内部海には非生物学的に生成されるアミノ酸が最大0.05 μM を上回る高濃度で溶存している可能性が示唆されている⁴⁰⁾.

これら観測結果やシミュレーションを統合して考えた場合, 地球での超マフィック岩に支えられた深海熱水環

境に生育する化学合成微生物生態系と類似した生産力の大きい化学合成地球外生命生態系がエンケラドスの深海熱水環境で優占的に生育し, さらにその一次生産や非生物学的反応による有機物生産に支えられた全内部海での混合栄養地球外生命生態系が存在する可能性を想定することができる. 実際に, カッシーニの観測データから, かなり正確に再現された内部海や深海熱水環境での物理・化学条件において, 地球の化学合成微生物生態系が生育可能であることはシミュレーション^{38,40)}および実験⁴¹⁾によって示されている. つまり現時点では, エンケラドスの内部海や深海熱水域が生命 (少なくとも地球生命) にとって生存可能な環境であることを否定する科学的根拠はほとんどない, と言える.

しかしながら, 以下に述べる二つの視点から, エンケラドスの内部海や深海熱水域に地球外生命が存在しない可能性も否定できないことを指摘しておく. 一つはエンケラドスの内部海や深海熱水域において生命が誕生し得たかどうかという点である. エンケラドスの内部海や深海熱水域が生命にとって生存可能であることと, 実際に生命が存在しているかどうかは異なる次元の問題である. エンケラドスの内部海や深海熱水域で生命が誕生する, あるいはそこに生命が移植されることがない限り, 生存可能であっても生命は存在できないと考えられる. 現時点ではハビタビリティに比べ生命が誕生する条件はほとんどまったく分かっていないため, エンケラドスの内部海や深海熱水域において生命が誕生し得たかどうかを科学的に検証することはきわめて難しい. もう一つの視点は, ハビタビリティに対する溶媒のpH条件の影響についてである. エンケラドスの内部海あるいは深海熱水のpH条件については, カッシーニの観測データに基づいていくつかの試算が行われている⁴²⁾. もっとも確からしい試算では, 内部海のpHは10.8から13.5の範囲を取り得ることが予想されている⁴²⁾. 一方, 地球における極限環境微生物の増殖限界はpH 12.4 (37°C) であり⁴³⁾, エンケラドスの内部海ときわめて類似した物理・化学条件を有する深海底の蛇紋岩流体環境はpH 12.5 (25°C)を示し, その環境では現地性の微生物細胞や代謝活動がほとんどまったく検出されない⁴⁴⁾. これらの地球の極限環境微生物の生存限界条件を考慮すると, エンケラドスの内部海あるいは深海熱水のpHがきわめて高い場合, 利用可能な自由エネルギーの供給が十分であっても生命が存在できない可能性も十分考えられる. しかしながら, 高pH条件下における地球生命の生存限界についてはその決定的要因や作用がよくわかっていないため, 普遍的生命のハビタビリティに対する高pH条件の影響を定量的に評価・議論することは未だ困難である.

おわりに

本稿では、地球外生命が存在する可能性が高いと考えられている太陽系内氷衛星に対する近年の惑星科学的研究の成果や、その成果を基にしたハビタビリティについての議論や考察を紹介してきた。もちろん太陽系内氷衛星における地球外生命の存在を実証するためには、探査機による詳細なその場観測や、サンプルリターンを通じた多面的な検証が必須となる。実際に将来の太陽系内氷衛星、特にエウロパ、ガニメデおよびエンケラドスにおける地球外生命探査に向けた探査対象環境の選定や、探査工学的的方法論や運用に関する提案、あるいはその場分析や地上研究の方法論や技術開発の議論が広く展開されつつある⁴⁵⁻⁴⁷。また、エウロパや同じく氷で覆われた準惑星であるケレスにおいて、エンケラドスで確認されている内部海に由来するプルーム活動が起きている可能性も示唆されている^{48,49}。プルームのフライバイ探査は技術的およびコスト的な制約が小さい、きわめて現実的な地球外生命探査の機会を提供することができ、近い将来に国際的な共同研究や枠組みの中で技術面やコスト面だけでなく科学的にも効率的かつ野心的な探査が実現されることを強く期待する。しかし、たとえ近未来の地球外生命探査を通じて生命が存在する決定的な証拠が得られなかったとしても、我々はその結果に悲観する必要はない。惑星科学的な観測や分析を通じて、それぞれの氷衛星におけるハビタビリティの理解が大きく前進することが期待できるからである。カッシーニによるエンケラドスの探査は、プルームの発見から内部海の存在を明らかにしただけでなく、そこがほぼ確実に生命にとって生存可能であることまで我々に理解せしめるに至った。近未来の地球外生命探査が、人類が長年問い続けてきた「生命とはなにか」や「生命の起源」へ決定的な答えを導くロードマップとなることは間違いない。

文 献

- 1) Villanueva, G. L. *et al.*: *Science*, **348**, 218 (2015).
- 2) NASA ocean world: <https://www.nasa.gov/specials/ocean-worlds/> (2018/09/03).
- 3) 高井 研: 生命に起源はどこまで分かったか—深海と宇宙から迫る, 岩波書店 (2018).
- 4) Nakamura, K. and Takai, K.: *Subseafloor Biosphere Linked to Hydrothermal Systems: TAIGA Concept*, p. 11, Springer (2015).
- 5) Bar-On, Y. M., *et al.*: *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **115**, 6506 (2018).
- 6) Baross, J. A.: *Bull. Am. Astron. Soc.*, **38**, 1070 (2006).
- 7) Schrödinger, E.: *What is Life? and Other Scientific Essays*, Double Day Anchor (1944).
- 8) Prigogine, I.: *Etude Thermodynamique des Phenomenes irreversibles*, Dunod (1947).
- 9) Bernal, J. D.: *Proc. Phys. Soc.*, **62**, 358B (1949).
- 10) De Duve, C.: *Blueprint for a Cell: The Nature and Origin of Life*, Neil Patterson (1991).
- 11) Hoehler, T. M.: *Astrobiology*, **7**, 824 (2007).
- 12) Benner, S. A.: *Astrobiology*, **17**, 840 (2017).
- 13) Joyce, G. F.: *Origins of Life: the Central Concepts*, Jones and Bartlet, xi (1994).
- 14) Vance, S. D. *et al.*: *J. Geophys. Res.*, **123**, 180 (2018).
- 15) Pasek, M. A. and Greenberg, R.: *Astrobiology*, **12**, 151 (2012).
- 16) Cockell, C. S. *et al.*: *Astrobiology*, **16**, 89 (2016).
- 17) Kargel, J. S. *et al.*: *Icarus*, **148**, 226 (2000).
- 18) Zolotov, M. Y. and Shock, E. L.: *J. Geophys. Res.*, **106**, 32815 (2001).
- 19) McKinnon, W. B. and Zolensky, M. E.: *Astrobiology*, **3**, 879 (2003).
- 20) Swallow, J. C. and Crease, J.: *Nature*, **205**, 165 (1965).
- 21) Krijgsman, W. *et al.*: *Nature*, **400**, 652 (1999).
- 22) Hedenquist, J. W. and Lowenstern, J. B.: *Nature*, **370**, 519 (1994).
- 23) Bischoff, J. L. and Pitzer, K. S.: *American J. Sci.*, **289**, 217 (1989).
- 24) Daffonchio, D. *et al.*: *Nature*, **440**, 203 (2006).
- 25) Qian, P. Y. *et al.*: *ISME J.*, **5**, 507 (2011).
- 26) Porco, C. C. *et al.*: *Science*, **311**, 1393 (2006).
- 27) Spencer, J. R. *et al.*: *Science*, **311**, 1401 (2006).
- 28) Kirchoff, M. R. and Schenk, P.: *Icarus*, **202**, 656 (2009).
- 29) Spencer, J. R. *et al.*: *Saturn from Cassini-Huygens*, p. 683, Springer (2009).
- 30) Porco, C. *et al.*: *Astron. J.*, **148**, 45 (2014).
- 31) Waite, J. H. *et al.*: *Science*, **311**, 1419 (2006).
- 32) Hansen, C. J. *et al.*: *Science*, **311**, 1422 (2006).
- 33) Postberg, F. *et al.*: *Nature*, **459**, 1098 (2009).
- 34) Postberg, F. *et al.*: *Nature*, **474**, 620 (2011).
- 35) Thomas, P. C. *et al.*: *Icarus*, **264**, 37 (2016).
- 36) Hsu, H. W. *et al.*: *Nature*, **519**, 207 (2015).
- 37) Sekine, Y. *et al.*: *Nat. Comm.*, **6**, 8604 (2015).
- 38) Waite, J. H. *et al.*: *Science*, **356**, 155 (2017).
- 39) Postberg, F. *et al.*: *Nature*, **558**, 564 (2018).
- 40) Steel, E. L. *et al.*: *Astrobiology*, **17**, 862 (2017).
- 41) Taubner, R. S. *et al.*: *Nat. Comm.*, **9**, 748 (2018).
- 42) Glein, C. R. *et al.*: *Geochim. Cosmochim. Acta*, **162**, 202 (2015).
- 43) Takai, K.: *Origins and Evolution of Life: An Astrobiological Perspective*, p. 469, Cambridge University Press (2011).
- 44) Takai, K. *et al.*: *Dev. Mar. Geol.*, **7**, 149 (2014).
- 45) Tsou, P. *et al.*: *Astrobiology*, **12**, 730 (2012).
- 46) Konstantinidis, K. *et al.*: *Acta Astronaut.*, **106**, 63 (2015).
- 47) Chela-Flores, J.: *Int. J. Astrobiol.*, **9**, 101 (2010).
- 48) Roth, L. *et al.*: *Science*, **343**, 171 (2014).
- 49) Nathues, A. *et al.*: *Nature*, **528**, 237 (2015).