

地球外有機物と生命

小林 憲正

はじめに

地球型生命が誕生するには、アミノ酸などの有機物が必要である。有機物は現在、炭素を含む化合物（二酸化炭素などを除く）として定義されているが、もともとは「生物にしか作りだせないもの」として無機物と区別されていた。そのような有機物、特にアミノ酸などの生命に直結する有機物が生物の誕生前の環境でどのようにできたのだろうか。

1953年、Millerはメタン・アンモニア・水素・水蒸気の混合気体中で火花放電を行い、アミノ酸の生成を確認した¹⁾。この報告を契機に、原始地球上での有機物生成を検証する実験が多数行われた。メタン・アンモニアを含む「強還元型」大気からは種々のエネルギーでアミノ酸や核酸塩基のアデニンなどが容易に生成することがわかった²⁾。しかし、1980年頃からは、原始地球大気は二酸化炭素や窒素を主とする、より還元性の低いものと考えられるようになった³⁾。このような大気からの有機物生成は限定的なものとなる可能性が生じた⁴⁾。

一方、地球外にはさまざまな有機物が存在することが20世紀後半に知られるようになった。本稿では、地球外有機物と生命との関わりについて解説する。

地球外有機物の検出

隕石 地球外から飛来する岩石を総称して隕石というが、その中に炭素を比較的多く含むものが含まれ、炭素質コンドライトとよばれる。炭素質コンドライト中にさまざまな有機物が含まれ、その多くは溶媒に溶けないような高分子態の「不溶性有機物」である。水で抽出可能な有機物も多数含まれ、その中にアミノ酸が含まれることは早くから報告されてきた。しかし、アミノ酸に関しては、地球上での汚染の可能性が議論されてきた。

1969年にオーストラリアに炭素質コンドライト「マーチソン隕石」が落下し、汚染が最小になるように注意深く分析したところ、隕石固有のアミノ酸が存在することがわかった⁵⁾。決め手となったのは、地球由来のアミノ酸の多くは生物起源で、D/L比が低いのにに対し、隕石に含まれていたアミノ酸のD/L比がほぼ1であったことである。その後、このマーチソン隕石や、南極雪原で収集された「南極隕石」中の炭素質コンドライトなどから、

70種類を越すアミノ酸（そのうちタンパク質アミノ酸は10種程度で、残りは非タンパク質アミノ酸）が同定されてきた⁶⁾。

生命の誕生にはL-アミノ酸が必要と考えられるが、Millerの実験などで無生物的に生成したアミノ酸や、隕石中のアミノ酸はラセミ体であるため、いかにL-アミノ酸のみが選別されたかが大きな問題である。多くの仮説が出されているものの、どれも決め手を欠いていた。

Croninら⁷⁾は、マーチソン隕石中のアミノ酸のD/L分析を精密に行ったところ、一部のアミノ酸に数%のL-アミノ酸のエナンチオ過剰 (ee) が見つかった。タンパク質アミノ酸のように α 炭素に水素がついたアミノ酸 (図1a) には有意のeeは見つからず、イソバリン (図1b) などの α 炭素に水素の代わりにメチル基がついたアミノ酸にのみ、このee過剰が見いだされたことから、地上での汚染の影響ではなく、隕石アミノ酸固有のものと考えられた。

このことは、宇宙から届けられたアミノ酸にL体過剰 (L-ee) があり、これが増幅されて地球生物がL-アミノ酸を使うようになった可能性を示唆する。

彗星 彗星は、氷と塵からなる小天体で、通常は海王星以遠に存在するのが、何らかの理由により太陽に近づいて来ると考えられている。1986年に太陽に接近して来たハリー彗星を4機の探査機が観測した。欧州のジョットと、ロシア (ソ連) のヴェガ1号には質量分析計が搭載され、その分析により、彗星から噴出した塵の中に多様で複雑な有機物が含まれることがわかった⁸⁾。

その後、米国の探査機スターダストは、ヴィルト第2彗星を探査し、その塵を採取して地球に持ち帰ったところ、捕集容器からグリシンが検出された⁹⁾。また、欧州の探査機ロゼッタは、チュリュモフ・ゲラシメンコ彗星を探査し、その周囲からのグリシン検出が報告された¹⁰⁾。

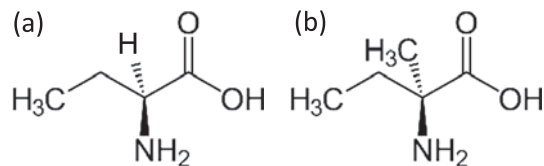


図1. α -水素を持つアミノ酸 (a) と持たないアミノ酸 (b). (a) L- α -アミノ酪酸, (b) L-イソバリン

これらのことは、彗星によっても有機物が地球に運ばれた可能性を示唆する。

宇宙塵 宇宙には微小な塵（宇宙塵）が多数存在しており、その多くは彗星や小惑星起源と考えられている。1 mm くらいの塵は地球大気圏に突入時に燃えて流星として観測されるが、より小さい塵はあまり変化を受けずに落下する。海底や南極の水から回収されたものは微隕石、航空機などにより大気中で捕集されたものは惑星間塵とよばれることが多い。これらには有機物が多く含まれていることが知られているが、炭素質コンドライトと同様、その多くは不溶性の複雑有機物である。

ChybaとSagan¹¹⁾は、宇宙から飛来する有機炭素の総量を見積もった。40億年前には、年間 10^8 kgの有機炭素が地球に届けられたと試算され、これは隕石や彗星による持ち込みをはるかに上回る。もし、原始地球大気の還元性（メタン、水素などの分圧）が低い場合、原始大気中での有機物生成は限定的なので、宇宙塵による有機物持ち込みがもっとも多かった可能性が高いと考えられる。

地球外での有機物生成

隕石、彗星、宇宙塵に含まれる有機物はどこでどのようにして生成したのだろうか。これに関してもいくつかの説がある。ここではその中で、分子雲と太陽系小天体について述べよう。

分子雲中の星間塵 宇宙空間にも非常に低密度ではあるが、分子や塵（星間塵）が存在する。特に分子雲（暗黒星雲）とよばれる領域には比較的高密度で分子や塵が存在するため、外部から星の光が入らず、内部は10 K程度のきわめて低温である。そのため、多くの分子はケイ酸塩の塵の表面に氷結し、「アイスマントル」を形成している（図2）¹²⁾。アイスマントル中に存在する主な分子には、地上からの観測により、水、一酸化炭素、二酸化炭素、メタノール、アンモニアなどが含まれていることが知られている¹³⁾。

このような氷に宇宙線や紫外線（星からの紫外線は分子雲中には入らないが、宇宙線と分子の相互作用で紫外線が生じる）が照射された時に化学反応が起きることが期待できる。実際に星間塵アイスマントルを模した氷に陽子線（宇宙線の主成分）や紫外線を照射する実験が行われ、生成物を加水分解するとアミノ酸が生成することが報告された^{14,15)}。つまり、星間環境でも「アミノ酸前駆体」（加水分解によりアミノ酸を生じる物質）が生成しうるのである。

小天体内部 分子雲中の塵やガスが重力収縮により集まって原始太陽ができ、その周囲に原始太陽系円盤が

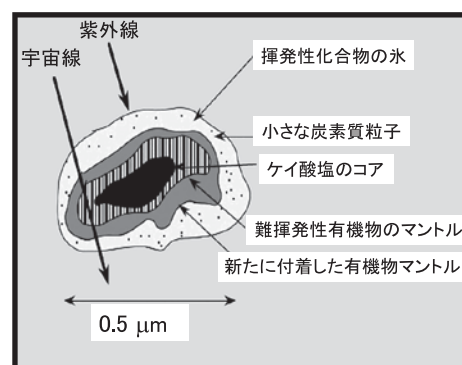


図2. 星間塵アイスマントルモデル

できる。この円盤中で直径10 km程度の微惑星が生成し、それらが衝突合体しながら原始惑星が誕生する、というのが今日の基本的な太陽系形成説である。原始惑星になりそこなった天体は小惑星や彗星という「太陽系小天体」として残された。隕石が小惑星のかけらであることは、探査機はやぶさのサンプルリターンによってより明確になった。

小惑星中には水（氷）やホルムアルデヒド、アンモニアなどの分子が含まれていたが、これらが小惑星中に存在する放射性核種²⁶Alの崩壊熱により水溶液となり、その中で水質変成によりさまざまな化学反応が起きたとされる。Kebukawaら¹⁶⁾はホルムアルデヒド・グリコールアルデヒド（ホルムアルデヒドの二量体）とアンモニアの水溶液に触媒量の水酸化カルシウムを加えて加熱することにより、隕石中に多くみられる不溶性有機物とアミノ酸前駆体が同時に生成することを見いだした。つまり、小惑星（隕石母天体）内部での水質変成反応は隕石中のアミノ酸生成機構の有力候補といえる。

アミノ酸とアミノ酸前駆体

化学進化の古典的シナリオ Millerの実験以降、多数の化学進化模擬実験が行われた。その中でアミノ酸の生成機構としてはStrecker合成が注目されてきた。Strecker合成は、シアン化水素HCN、アルデヒドRCHO、アンモニアからアミノニトリルができ、これを加水分解してアミノ酸を得る、という有機化学合成法である（図3a）。MillerとUrey¹⁷⁾は、Millerの実験の生成物中にシアン化物とアルデヒドが生成していることから、アミノ酸はStrecker合成により生成したと推定した。

また、アミノ酸が生成した次のステップとしてアミノ酸同士をつなげてペプチドを作る実験、核酸塩基と糖（リボース）からヌクレオシド、ヌクレオシドとリン酸からヌクレオチド、ヌクレオチドからオリゴヌクレオチドを作ろうとする実験も行われ、そのような反応（脱水縮合

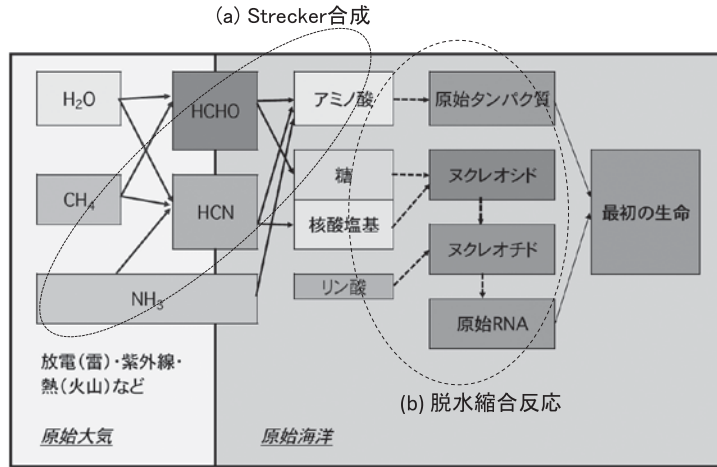


図3. 化学進化の古典的シナリオ.

- (a) Strecker 合成 (グリシンの場合) : $\text{HCN} + \text{HCHO} + \text{NH}_3 \rightarrow \text{NH}_2\text{CH}_2\text{CN}$,
 $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CN} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH} + \text{NH}_3$
 (b) 脱水縮合反応 : $\text{R}_1\text{OH} + \text{HR}_2 \rightarrow \text{R}_1\text{-R}_2 + \text{H}_2\text{O}$

反応；図3b) も条件によっては可能であることが示された¹⁸⁾。以上のような反応経路をここでは「化学進化の古典的シナリオ」(図3)と呼ぶことにする。

古典的シナリオの問題点 古典的シナリオでは化学進化が通常の化学反応と同様に、熱力学的平衡反応の組み合わせで進行することが想定されている。そのため、各反応は、十分に高濃度の出発材料が存在し、なおかつ、反応を阻害するような物質が存在してはならない。たとえば、アミノ酸のみが存在すればペプチドが生成するが、アミノ酸以外にカルボン酸やアミンが共存すれば、それらが結合した時点でペプチド鎖はそれ以上伸びられなくなる。また、ペプチドやヌクレオチドには構造異性体が存在するが、「正しい」縮合体は1種類のみである。

生命とは非平衡状態のものであるのに対し、生命を平衡反応だけで作ろうとするのは無理があるのではないだろうか。

宇宙のアミノ酸前駆体 隕石中のアミノ酸を分析するとき、通常は熱水で24時間ほど抽出した後分析する。抽出液中のアミノ酸濃度は、酸加水分解することにより増加するので、少なくとも一部はアミノ酸前駆体の形で存在していることになる。加水分解前の抽出液からもアミノ酸が検出されるが、これが遊離のアミノ酸か、熱水抽出中に加水分解されたものかの区別はつかない。

隕石から抽出されるアミノ酸がどのようにしてできたかについては、Millerの実験との類推から、Strecker合成で生成したのではないかと先験的に考える研究者が欧米に多い。その場合、隕石中にはアミノニトリルが多く含まれていることになる。しかし、隕石中にはアミノニトリルは同定されていない。他のアミノ酸前駆体として

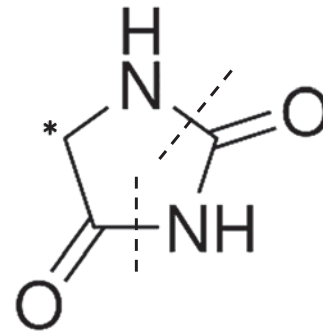


図4. ヒダントイン。破線のところで加水分解されるとグリシンになる。*に官能基が結合していれば、加水分解後にアミノ酸の側鎖となる。

は、ヒダントイン(図4)が考えられる。ヒダントインは隕石中に同定されているが、アミノ酸前駆体のすべてがヒダントインだとは考えにくい。

模擬実験から考える宇宙のアミノ酸前駆体 筆者らは星間に多く存在する分子である、一酸化炭素、アンモニア、水の混合物に宇宙線を模して、ヴァンデグラフ加速器(東京工業大学)からの高エネルギー(3.0 MeV)陽子線を照射した。この生成物をCAWとよぶことにする。CAWをそのまま分析してもアミノ酸はごく微量しか検出されないが、これを加水分解するとグリシン、DL-アラニンをはじめとする種々のアミノ酸が検出された。つまり、CAWは遊離アミノ酸ではなく、アミノ酸前駆体を含むことになる。

加水分解前のCAWを種々の方法で分析した¹⁹⁾。ゲルろ過HPLCで分子量を推定すると、数百~3000程度であった。熱分解GC/MS法で分析すると、ホルムアミド、

アセトアミド、イミダゾールなどが多く発生した他、ナフタレン、フェナントレンなどの芳香族化合物も生成した。これらのことから、CAWはアミド結合を含む複雑な構造をした高分子態化合物が主であることが示唆された。図5は、そのイメージである。

加水分解し、生成したグリシン量で安定性を評価したが、CAWはグリシンやヒダントインよりも高い安定性を示した。このことは、星間で生成した複雑な高分子態アミノ酸前駆体は、遊離アミノ酸や単純なアミノ酸前駆体よりも分解されにくく、安全に地球まで運ばれる可能性があることを示唆する²⁰⁾。

従来、化学進化過程は、小さい分子から大きい分子への段階的な進化と考えられてきた(図3)。アミノ酸の前段階も、アミノニトリルやヒダントインという小分子が想定されてきた。しかし、隕石有機物をはじめ、宇宙には分子量の大きい複雑な分子が多く存在し、それらが化学進化に重要な働きをした可能性が浮上してきた。その場合、従来の古典的な化学進化シナリオの大幅な見直しが必要となる。

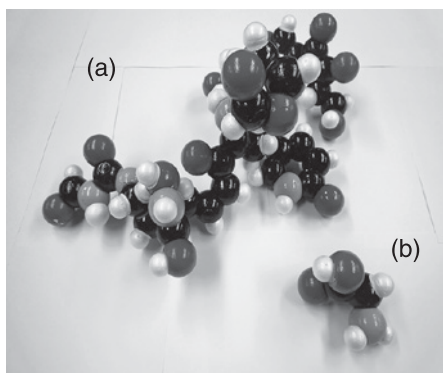


図5. 模擬星間実験で生じた複雑有機物CAWのイメージ。(a) CAW (分子量約1000), (b) グリシン (分子量75)。

宇宙で無生物的に生成した高分子態有機物を「がらくた分子」と呼ぶことにする。がらくた分子は単純な分子が宇宙線エネルギーなどにより急加熱された後に急冷されて生じる。これはタンパク質や核酸などのように洗練された分子ではないが、アミノ酸前駆体としても働くなど、微弱な機能を有する²¹⁾。がらくた分子は宇宙のさまざまな環境(原始太陽系星雲、彗星内部など)で変成を受けるが、アミノ酸前駆体という性質は維持される。個々のがらくた分子はそれぞれ異なるもので、なかには微弱な生化学的機能(触媒作用など)を有するものも含まれる。それらが地球(熱水環境など)に供給された後、さらなる変異を受け、環境に適合し、かつより大きな生化学機能を有するものが選択される。

単なる有機物は非生命であり、これを L (生命指数) = 0とする。現在の地球上にはさまざまな生物が生息するが、原核生物からヒトまで、すべて同じ生化学的原理に従っており、共通の祖先から進化したとされている。これらはすべて $L = 1$ とする。現在の地球上には $L < 1$ の生命は存在しない。もし、海底熱水系などで $L < 1$ の生命が新たに誕生したとしても、 $L = 1$ の生命に満ちた地球では生存していくことはできない。しかし、共通の祖先誕生前の地球では、 $L < 1$ の生命は存在する。膨大ながらくた分子ライブラリーの中からほんの微弱な生化学的機能を有する分子(集団)を利用した「がらくた生命」($L \ll 1$)がまず生じた。がらくた生命集団(がらくたワールド)の中から変異と環境による選択の結果、より L 値の高い生命形態が誕生し、その中から「代謝ワールド」(タンパク質ワールド)や「自己複製分子ワールド」(RNAワールド)が生じ、それらが合体してさらに進化して共通の祖先誕生に至った、というようなシナリオが考えられる(図6)。このシナリオは、地球以外の天体にもあてはめることができる。ただし、その場合、自己複

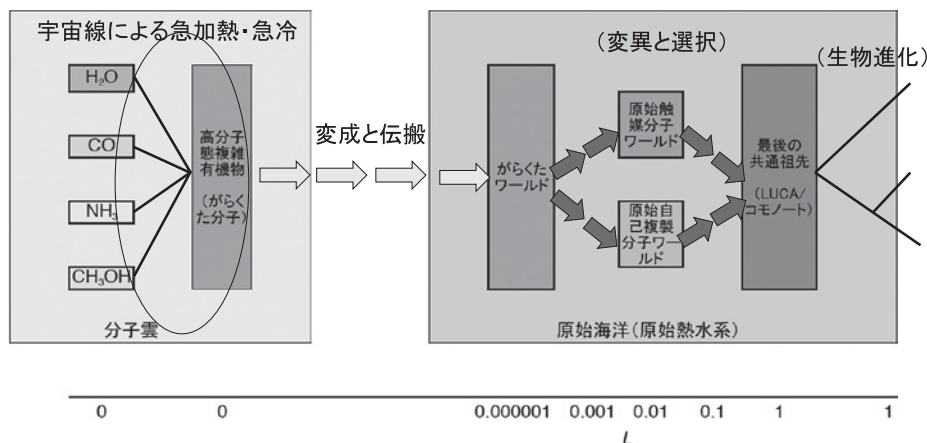


図6. がらくた分子を経由する化学進化シナリオ

製分子ワールドはRNAを用いないものであるかもしれない。

生命起源を解く鍵：惑星探査と宇宙実験

太陽系に化学進化の痕跡を探す 生命の起源研究における最大の問題は、生命誕生当時の地球環境や、用いられた有機物が現在の地球上にまったく残っていないことである。生命の起源に関する仮説は多数発表されているが、どの仮説も模擬実験や地球上での探査のみでは完全には証明できない。

しかし、これまでの太陽系惑星探査において、生命存在の可能性が議論される天体が複数見つかった²²⁾。たとえば、これまでの探査により火星は過去に生命が誕生しうる環境があったこと、現在の火星上にも有機物が存在していること²³⁾が報告されている。今後の探査により、火星の過去の生命の痕跡、あるいは現存する生命が発見される可能性が十分に考えられる。

一方、土星最大の衛星タイタンには窒素・メタンを主とする濃厚(約1.5気圧)の大気が存在する。過去の探査により、タイタン大気から生成した複雑有機物が大量に存在していること、また、極地方には液体メタン・エタンからなる湖が存在することなどがわかった²⁴⁾。大気中で生成した有機物が湖中でさらに進化している可能性も考えられる。

これらの天体に地球とは異なる生命形態 ($L < 1$, $L > 1$) や、化学進化の痕跡 ($L \ll 1$) が見つければ、生命誕生に向けた化学進化過程の研究に大きな影響を与えるであろう。

宇宙実験：生命起源研究の新たなツール これまでに数多くの化学進化実験が行われてきたが、それらは原始地球や宇宙環境の一部のパラメータのみを模擬したものであった。しかし、宇宙開発の進展とともに、実際の宇宙環境を利用した実験が可能になった。

これまで、スペースシャトル、ロシアの宇宙ステーションMIR、国際宇宙ステーション (ISS) などを用いた宇宙実験が行われてきたが、その中でも生命の起源やアストロバイオロジーに関連するものも含まれる²⁵⁾。たとえば、欧州の研究グループは、ISSのロシア曝露実験モジュールZvezdaを利用し、有機物や微生物などを宇宙曝露し、それらの反応や生存可能性を調べる実験BIOPAN-R2を行った²⁶⁾。これらの実験では、太陽からの紫外線や宇宙線などの複数の宇宙環境パラメータを利用した実験が可能となる。

日本では、2015年からISSの日本実験モジュールきぼうの曝露部を利用した宇宙実験「たんぼぼ」が行われ

ている²⁷⁾。この中では、地球に降り注ぐ宇宙塵を地球生物圏に突入する前に捕集する実験や微生物の宇宙環境耐性を調べる実験とともに、アミノ酸やアミノ酸前駆体の宇宙での安定性を比較する実験も含まれている²⁸⁾。

これらの宇宙実験の結果は、惑星探査と相補いあい、生命起源に関する新たな洞察を与えてくれることが期待される。

謝 辞

本稿で紹介した研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金(17H02991, 16H04283)および大学共同利用機関法人自然科学研究機構アストロバイオロジーセンターのプロジェクト(AB292002)の助成を受けたものである。

文 献

- 1) Miller, S. L.: *Science*, **118**, 528 (1953).
- 2) Ponnamperna, C. *et al.*: *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **49**, 737 (1963).
- 3) Catling, D. C. and Kasting, J. F.: *Atmospheric Evolution on Inhabited and Lifeless Worlds*, Cambridge University Press, Cambridge, UK (2017).
- 4) Schlesinger, G. and Miller, S. L.: *J. Mol. Evol.*, **19**, 376 (1983).
- 5) Kvenvolden, K. *et al.*: *Nature*, **228**, 923 (1970).
- 6) Elsil, J. E. *et al.*: *ACS Cent. Sci.*, **2**, 370 (2016).
- 7) Cronin, C. R. and Pizzarello, S.: *Science*, **275**, 951 (1997).
- 8) Kissel, J. and Krueger, F. R.: *Nature*, **326**, 755 (1986).
- 9) Elsil, J. E. *et al.*: *Meteorit. Planet. Sci.*, **44**, 1323 (2009).
- 10) Altwegg, K. *et al.*: *Sci. Adv.*, **2**, e1600285 (2016).
- 11) Chyba, C. and Sagan, C.: *Nature*, **355**, 125 (1992).
- 12) Greenberg, J. M. and Li, A.: *Adv. Space Res.*, **19**, 981 (1997).
- 13) Allamandola, L. J. *et al.*: *Space Sci. Rev.*, **90**, 219 (1999).
- 14) Kasamatsu, T. *et al.*: *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, **70**, 1021 (1997).
- 15) Munos Caro, G. M. *et al.*: *Nature*, **416**, 403 (2002).
- 16) Kebukawa, Y. *et al.*: *Sci. Adv.*, **3**, e1602093 (2017).
- 17) Miller, S. L. and Urey, H. C.: *Science*, **130**, 245 (1959).
- 18) 日本化学会編：物質の進化，学会出版センター (1980).
- 19) Takano, Y. *et al.*: *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, **77**, 779 (2004).
- 20) Kobayashi, K. *et al.*: *Astrobiology: Emergence, Search and Detection of Life* (Ed.: Basiuk, V. A.), p. 175, American Scientific Publishers, Stevenson Ranch, CA, USA (2010).
- 21) 小林憲正：宇宙からみた生命史，筑摩書房 (2016).
- 22) 海部宣男他編：宇宙生命論，東京大学出版会 (2015).
- 23) Eigenbrode, J. L. *et al.*: *Science*, **360**, 1096 (2018).
- 24) 小林憲正：遊・星・人 (日本惑星科学会誌)，**20**, 94 (2011).
- 25) 小林憲正：Viva Origino, **36**, 77 (2008).
- 26) Rabbow, E. *et al.*: *Front. Microbiol.*, **8**, 1533 (2017).
- 27) 山岸明彦ら：日本航空宇宙学会誌，**66**, 9 (2018).
- 28) 三田 肇・癸生川陽子：生物工学，**96(12)** (印刷中).