

特集「太陽系におけるアストロバイオロジー」 タイタンのアストロバイオロジー探査

小林 憲正¹

2011年4月14日受領, 2011年5月6日受理.

(要旨) 土星最大の衛星のタイタンは、窒素・メタンなどからなる濃厚な大気を有し、紫外線、土星磁気圏に捕捉された電子、宇宙線などのエネルギーにより多様な有機物ともやの生成が観測されている。カッシーニ＝ホイヘンス探査により、タイタン表面に液体エタンなどからなる湖沼の存在が明らかとなり、また地下にアンモニア水が存在することが示唆された。また、種々の地上模擬実験により、模擬タイタン大気から炭化水素、ニトリル等の有機物や、高分子態有機物「ソーリン」が生成すること、ソーリンの加水分解によりアミノ酸の生成が報告されている。これらの有機物と、液体メタン・エタンもしくはアンモニア水との相互作用により生命の誕生の可能性も議論されている。次期の土星系探査におけるタイタンの有機物・生命探査の可能性について議論する。

1. はじめに

地球上での生命の起源を探る上で、最も大きな障害は、生命が誕生した当時の地球の環境が保存されていないことである。様々な原始地球モデルが提案され、それに基づいた化学進化模擬実験が行われているが、実際の惑星環境で、どのようなことが起きたかを知することは困難である。

ここでクローズアップされるのが、土星最大の衛星・タイタンである。タイタンは、1655年、Huygensにより発見された。その直径は5150 km であり、地球の約40%、太陽系の衛星の中では、木星の衛星・ガニメデについて2番目に大きく、惑星の水星よりも大きい。その最大の特徴は、濃厚な大気を有していることである。1903年、Solaは、地上からの観測によりタイタンが大気を有することを発見した。さらに1944年、Kuiperが大気中にメタン(CH_4)を検出した[1]。

惑星探査によりタイタンを間近で観察したのは、1981年のVoyager 1号が最初である。この際の観測により、タイタン地表での気圧は1.5気圧と地球よりも

高いこと、そして大気の主成分が窒素(N_2)であることも判明した。メタンの混合比は高度により異なるが数%程度であることもわかった。

以上の知見から、タイタンと原始地球の類似点が浮かび上がってくる。原始地球大気の組成は、かつてはメタン・アンモニア(NH_3)を主とする強還元的なものとする説が有力であった。今日ではまず、窒素はアンモニアではなく窒素分子(N_2)が主成分と考えられている。窒素を主成分とする濃厚な大気を有するのは、太陽系では地球以外ではタイタンのみである。また、メタンは原始地球大気の主成分であった可能性は低く、二酸化炭素が主要な炭素化合物と考えられる。しかし、メタン、もしくは一酸化炭素という、より還元的な炭素化合物が大気の副成分として存在した可能性は考えられる[2,3]。つまり、窒素とメタン(還元型炭素)との濃厚な混合気体を有する点で、タイタンと原始地球は類似している可能性が高い。そのような大気に、太陽からの紫外線、宇宙線、放電などのエネルギーが加わった点も両者に共通している。惑星という大きい場で、どのような化学進化が起きるかを考える上で、タイタンこそ「天然の化学進化実験室」なのである。

1. 横浜国立大学大学院工学研究院
kkensei@ynu.ac.jp

2. VoyagerとCassini-Huygens

Voyager1号によるタイタン大気の赤外観測などから、多様な有機物－エタン(C_2H_4)、アセチレン(C_2H_2)、プロパン(C_3H_8)、シアン化水素(HCN)、アセトニトリル(CH_3CN)、シアノアセチレン($CHCCN$)などが検出された。また、大気は、もや(エアロゾル)でかすんでおり、地表のようすは見えない、このエアロゾルの正体も有機物ではないかと考えられた。また、タイタン地表の温度は95 Kと推定されたが、これはメタンの三重点 90.7 Kに近く、タイタン表面にメタンの「海」が存在する可能性が示唆された。

土星系のより詳細な探査をめざし、1995年にNASA, ESAは協力してCassini探査機を打ち上げた。Cassiniは、順調に飛行をつづけ、2004年に土星系に到達した。そして、2005年1月に、Huygens(ホイヘンス)とよばれるタイタン着陸プローブが本体から切り離され、パラシュートにより減速しつつ、タイタン大気中を降下した。Huygensには、カメラや大気およびタイタン表面の物理測定用機器の他、化学分析用に、GC/MSおよび、エアロゾル捕集熱分解装置(ACP)、赤外分光計等を含む降下カメラ・スペクトル放射計(DISR)が搭載された。一方、Cassiniの本体にもイオン中性分子質量分析計(INMS)が搭載されており、高層大気の実行を行った。

CassiniのINMSによる分析の結果、タイタニオン圏に分子量が数千のきわめて複雑な有機分子が存在することがわかった[4]。また、Huygensに搭載されたACPによるエアロゾルの分析は、高度135-30 kmの高層部(成層圏)と高度25-20 kmの低層部(対流圏)で行われた。捕集されたエアロゾルは、現地温度から250℃、600℃と段階的に加熱され、発生したガスを質量分析したところ、アンモニア(NH_3)とシアン化水素(HCN)が検出された[5]。

Huygensが降下中に撮影した写真には残念ながら海は写っていないかった。しかし、川が流れたような地形や、海岸線のようにみえる地形が見られた。また、着陸後に撮影した地表の写真に角がとれた岩のような物体が多数写っていた(図1)。これは水の氷であり、川で流されたために角が取れて丸くなったのではないかと考えられている。また、Huygensの着陸直後、



図1：Huygens着陸地点からみたタイタン地表(ESA/NASA/アリゾナ大学提供)。

周辺のメタン濃度が上昇した。一方、Cassini本体はタイタン上空から写真を撮り続け、北極近くに液体エタンを含む湖を発見した[6]。以上の結果、タイタンにおいて液体メタン・エタンの湖が存在し、メタンの循環があることが確認できた。

タイタン表面は、主として水の氷で覆われていると考えられるが、Cassiniに搭載された大気構造測定装置(HASI)により、内部海の存在が強く示唆された[7]。これは、タイタン表面の氷の氷の地殻の下に液体の水(おそらく10%程度のアンモニア水[8])が存在することを示唆するものである。

3. タイタン大気中での化学進化模擬実験

Voyagerの成果をもとに、タイタン類似の組成の混

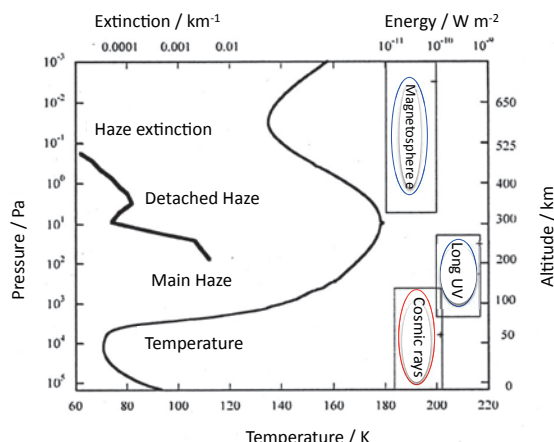


図2：タイタンの気圧、気温とエネルギー (Imanaka, 2004 [19] を一部改変)。高層大気では土星磁気圏電子が、中層では近紫外線が、低層では宇宙線が主要エネルギーと考えられる。本図には記載されていないが、さらに上層(イオン圏)では、極端紫外光が重要なエネルギー源となる。

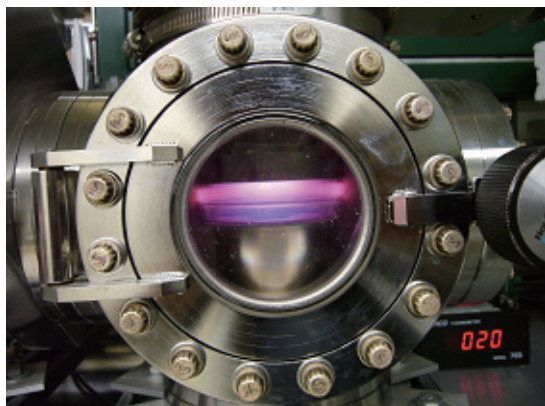


図3：プラズマ放電装置(NASA Ames研究所)。1 Torr のメタン(10%)と窒素(90%)の混合気体を容器内に導入し、プラズマ放電を行う。生成物(ソーリン)は、容器内の基板上に付着したものを回収する。

合気体(窒素+メタン)を用いた模擬実験が数多く行われるようになった。図2に、タイタンの気温・気圧と大気反応の主要なエネルギー源を示す。上空では、太陽からの紫外線に加え、土星磁気圏にトラップされた高エネルギー電子がタイタン大気に降り注いでいる。より高エネルギーの宇宙線は、タイタン地表まで到達して、下層の濃い大気中で反応を引き起こす。さらに、隕石衝突のエネルギーも下層大気中でのエネルギーとなりうる。

タイタン大気中での反応の模擬実験として、紫外線

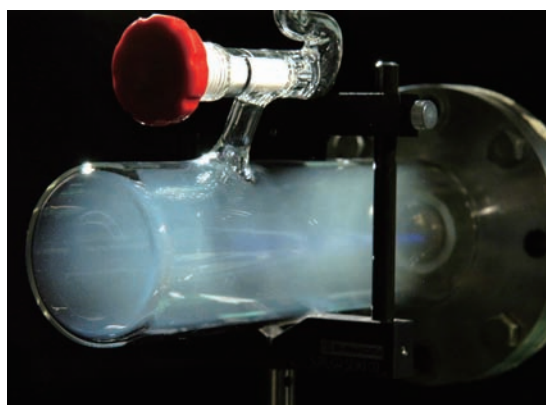


図4：陽子線照射実験(東京工業大学ヴァンデグラフ加速器)。700 Torr のメタン(5%)と窒素(95%)の混合気体に、3 MeV 陽子線を照射する。もや(ソーリン)が生成しているのかわかる。

照射とプラズマ放電が多数おこなわれた。前者の場合、窒素・メタンの混合気体に紫外線照射をすることにより、タイタン大気中に検出されたような多種類の炭化水素が検出された。一方、後者のプラズマ放電(図3)は、土星磁気圏電子の作用を模擬しようとしたものであり、これにより固体状の有機物が生成した。Sagan と Khare は宇宙環境に存在すると考えられる種々の混合ガスに紫外線や放電などのエネルギーを加えた時に生じる褐色の複雑な有機物のことをソーリン(tholins, ギリシャ語で泥のような、という意味)と名付けた[9]。模擬タイタン大気から放電により生じたソーリンは、加水分解することにより種々のアミノ酸を生じる[10]ことから、惑星・衛星環境での生体有機物の無生物的生成が現在も起きている可能性が示唆され、生命の起源との関連が議論されるようになった。

一方、タイタンの低層大気のように、上層大気中に存在するエアロゾルのため、これまで観測が困難であったが、Huygensにより下層大気中のエアロゾルの観測が初めて行われた。われわれは、これまであまり調べられていなかった、タイタンの低層(対流圏)における化学反応を調べるため、窒素・メタンの混合気体に高エネルギー陽子線の照射を行った[11]。窒素95%とメタン5%からなる混合気体(合計700 Torr)をPyrex製容器(ハーバー箔製の窓付き)に封入し、これに宇宙線の効果を模擬し、ヴァンデグラフ加速器(東京工業大学)からの3 MeV陽子線を照射した(図4)。透明だったフラスコ内部に、陽子線の照射後、もやが

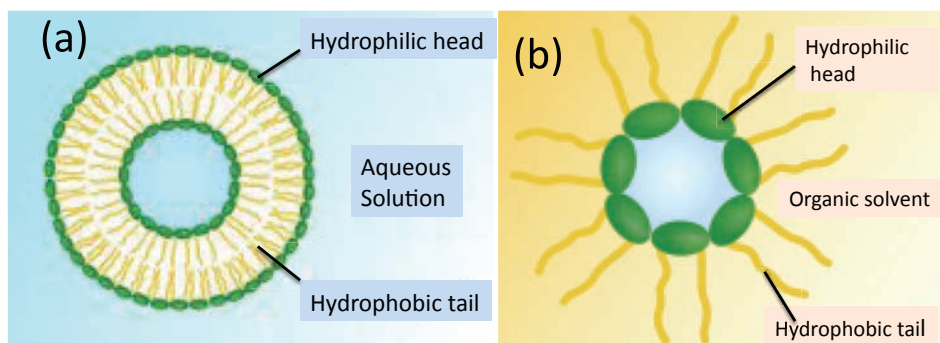


図5：リポソーム型生命と逆ミセル型生命。(a)水溶液中に水をベースとする生命が存在する場合、リポソーム型(二重膜型)細胞膜が必要。(b)液体メタンのような疎水的溶媒中に水をベースとする生命が存在する場合は、逆ミセルのような単分子膜細胞膜が使われる可能性がある。

生成し、固体生成物の生成が認められた。器壁に付着した生成物は、水、アセトニトリル(CH_3CN)、テトラヒドロフラン($\text{C}_4\text{H}_8\text{O}$)、トルエン($\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$)などの溶媒で一部は溶解した。これを熱分解GC/MSで分析すると、アンモニアとシアン化水素が検出されたが、これはHuygensに搭載されたエアロゾル捕集熱分解装置(ACP)のエアロゾルの熱分解分析の結果[7]とよい一致を示した。また回収された固相有機物を酸加水分解することにより、種々のアミノ酸が検出された。タイタン大気に降り注ぐ宇宙線エネルギーから試算すると、タイタン表面 1km^2 当たり年間 40 g のグリシン($\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$)に相当するアミノ酸前駆体が生成し続けている計算になる。タイタンの高層大気で土星磁気圏電子により生じるアミノ酸前駆体量をプラズマ放電実験結果に基づいて推定したものと比較すると、これよりもはるかに多くのアミノ酸前駆体が宇宙線的作用により地表付近で生成することになる。

4. タイタン表層・地下での有機物の変成

生命の存在には水が不可欠と考えられている。地球においては、地表で水がちょうど液体で存在でき、海や川を形成している。水は、蒸発して水蒸気となり、上空で冷却されて雲をつくり、やがて雨となって地表に戻る。この水のサイクルが地球上の生命の維持に不可欠であることから、惑星における液体の水の存在が生命の存在の必要条件と考えられてきた。

Huygensにより測定されたタイタンの表面温度は約 94 K であり、この温度はとても液体の水が存在できる温度ではない。しかし、大気中に含まれるメタン

にとっては、この温度がちょうど液体で存在しうる温度である(融点 91 K , 沸点 112 K)。このため、タイタンではメタンが地球表面における水の役割を担っているのではないかと予想された。実際に、Cassini-Huygens計画で、液体エタンを含む湖(メタンは、大気に多く含まれるため、直接観測できない)がみつかり、また、海岸線や川などの地形が撮影されている。では、液体メタンの中で生命は誕生しうるのだろうか。もし、存在すれば、地球型や、おそらくエウロパや火星に存在すると考えられる生命と全く異なるタイプとなる。液体メタンは、水と異なり、非極性溶媒である。地球の生物はリポソーム(図5a)のような二重膜構造をもつ「細胞膜」を有するが、これは、親水性溶媒の外界と、同じく親水性溶媒の細胞内液体とを隔てるためである。もしも、タイタンの液体メタンの湖の中に生物が存在する場合は、細胞内液体が親水性ならば、逆ミセル型(図5b)の単分子膜を用いる生命が想定される。あるいは、膜を使わず親水性分子の凝集体として液体メタン中を漂っている生命の可能性も考えられる。

一方、タイタンの地下にアンモニア水の地下海が存在すること[8]や、低温火山の存在[12]が強く示唆されている。また隕石衝突によりタイタンの表面の水が溶けた場合、その池は $10^2\text{--}10^4$ 年ほど液体を維持できるという試算もある[13]。そうなると、火口・衝突孔付近もしくは内部海に、われわれになじみ深い地球型生命も期待できる。後者の場合、表面のソーリンをいかに内部海に持ち込むかが課題となる。

タイタン大気中で生じた有機物のさらなる化学進化を調べるためには、気体(窒素+メタン)から合成したソーリンが、タイタン地表、液体メタンの湖沼中、ア

ンモニア水の地下海中で、どのような化学進化を遂げるかを調べる必要がある。一例として、Neishら[14]は、放電実験で合成したソーリンを253 K, 293 Kの13 % アンモニア水に1年間浸しておくことにより、アミノ酸が生成したことを報告している。つまり、酸加水分解をしなくてもタイタン地下海でアミノ酸が生成することが期待できるわけである。このような実験をわれわれも計画中である。

5. 今後のタイタンのアストロバイロジーク探査

これまでの地上実験の結果はタイタン大気から土星磁気圏電子、紫外線、宇宙線などの作用により生じた固相有機物ソーリンが、「アミノ酸の前駆体」(加水分解によりアミノ酸を生じる化合物)でもあることを示す。Cassini-Huygensの探査結果から、タイタンの対流圏には、メタンの雲が存在し、メタンの雨を降らせることや、メタンの川の存在が示唆され、また、液体メタン・エタンからなる湖沼の存在が確認された。さらに、タイタンの低温火山活動により地下海からのアンモニア水が噴出する可能性もいわれている。以上のことから、タイタン大気中で生成したエアロゾル(ソーリン)は、メタンの雨により地表に集められている可能性が高いと思われる。これが、タイタン表面もしくは地下に存在する水(氷)、アンモニア水、液体メタン等と反応して、アミノ酸や有機物凝集体を形成している可能性が高い。

次期タイタン探査は、ESAとNASAを中心に議論されており、かつては、Tandem計画、次いでタイタン・土星系計画(TSSM: Titan Saturn System Mission)という名で検討されてきた。大成功を収めたCassini-Huygensでできなかったことを、ということで熱気球(montgolfiere)を用いた大気の観測や、湖への着水機投入が候補に挙がっているが、エウロパ・木星系計画(EJSM)との競合もあり、まだ具体的なプランとなっていない。

ここでは、大気中、特に対流圏で大量に生成したソーリンが地表に集まり、さらに液体メタンの流れによって低地に集められた場所を狙った有機物探査と、液体メタンの湖沼中および低温火山から吹き出したアンモニア水をねらった有機物・生命探査を提案したい。方法としては、日本の火星の生命・有機物探査

(MELOS-JAMP) [15]で提案されている手法(本特集・山岸明彦「火星での生命探査計画」[16]参照)をより低温で働くように改良して用いる方法が考えられる。想定される有機物は、生物起源、非生物起源のいずれも高分子態有機物と考えられ、遊離のアミノ酸などはあまり存在しないと考えられる。そこで、加水分解過程を含むアミノ酸分析が不可欠になる。

6. おわりに

アストロバイロジークの観点から惑星探査の目的を考えると、地球上には残されていない生命誕生の痕跡を探すことと、地球外生命を探すことがメインと考えられる。前者は、さらに生命の素材となった始原有機物の探査と、惑星環境下での生命誕生にいたる化学進化の痕跡の探査に分けられる。タイタン探査は、この3つのカテゴリーのすべてを含む、極めて魅力的なものとなりうる。

近年、原始地球大気は強還元型ではないが、さりとて完全な非還元型でもなく、主成分の窒素・二酸化炭素に加え、ある程度の水素、メタン、一酸化炭素などの還元型気体を含む可能性が示唆されるようになった。この場合、窒素に数%のメタンを含むタイタン大気は、従来考えられていた以上に「模擬原始地球大気」と考えてよいことになる。つまりタイタン大気中での生成物を詳細に調べることで、原始地球大気中での反応を類推できるわけである。とりわけ、大気中で生成した高分子態の有機物からの化学進化は、小林の「がらくたワールド」[17, 18]の検証に最適である。

また、始原有機物の化学進化の次のステップは、原始海洋中と考えられ、これまで、エウロパの地下海が最も適したターゲットと考えられてきた。しかし、タイタンにも内部海があり、その一部が低温火山活動により地表に噴き出し、火口付近に氷となって存在していることが示唆されている。これらを総合的に考えると、タイタンは探査の容易さなどの点を含め、エウロパよりも有望なターゲットと考えられる。さらに、液体メタンという疎水性溶媒中での化学進化を惑星衛星環境で実証するとすれば、現在のところ、タイタンが唯一のターゲットである。

さらに異種生命の検出の点でも、太陽系内ではタイタンは火星・エウロパ・エンセラドスとならぶ重要な

ターゲットとして認識されるようになった。探査の容易さは、火星には劣るが、厚い氷の層の掘削が必要なエウロパやエンセラドスよりは可能性が高いと考えられるからである。

生命の起源にいたる化学進化の痕跡や、コモノート以前の始原生物は、現在の地球上に残されていない。タイムマシンがない現在、私たちができるのは、タイタンソーリンや星間複雑有機物(星間ソーリン)の構造や機能、生成機構を地道に調べ上げていくことである。そのような研究の積み重ねにより、生命の起源の謎を解くミッシングリンクが見つかっていくものと期待される。つまり、タイタン上には、生命の誕生の過程を凍結した、「化学進化の化石」が遺されていると考えられるため、その探査は科学的に極めて重要である。

[19] Imanaka, H. et al., 2004, *Icarus* 168, 344.

引用文献

- [1] Kuiper, G. P., 1944, *Astrophys. J.* 100, 378.
- [2] Kasting, J., 1990, *Orig. Life Evol. Biosph.* 20, 199.
- [3] Zahnle, K. et al., 2010, *Cold Spring Harbor Perspect. Biol.* 2010; 2:a004895.
- [4] Waite, J. H., et al., 2007, *Science* 316, 870.
- [5] Israel, G. et al., 2005, *Nature* 438, 796.
- [6] Stofan, E. R. et al., 2007, *Nature* 445, 61.
- [7] Beghin, C. et al., 2009, *Planet. Space Sci.* 57, 1872.
- [8] Coustenis, A. and Raulin, F., 2011, Titan, in *Encyclopedia of Astrobiology*, ed by Gargaud, M., Springer, in press.
- [9] Sagan, C. and Khare, B. N., 1979, *Nature* 277, 102.
- [10] Khare, B. N. et al., 1986, *Icarus* 68, 176.
- [11] 谷内俊範, 小林憲正, 2007, *エアロゾル研究* 22, 113.
- [12] Sotin, C., 2005, *Nature* 435, 786.
- [13] O'Brien, D. P. et al., 2005, *Icarus* 173, 243.
- [14] Neish, C. et al., 2010, *Astrobiology* 10, 337.
- [15] Yamagishi, A. et al., 2010, *Biol. Sci. Space* 24, 67.
- [16] 山岸明彦, 2011, 遊星人(本特集号).
- [17] 小林憲正, 2008, アストロバイオロジー 宇宙が語る生命の起源(岩波科学ライブラリー).
- [18] Kobayashi, K. et al., 2010, *Astrobiology: Emergence, Search and Detection of Life*, ed. by Basiuk, V. A., American Science Publishers, 175-186.