

第3章 地球周回軌道におけるアストロバイオロジー実験 —宇宙環境下での有機物の生成・変成実験を中心に—

横浜国立大学大学院工学研究院
機能の創生部門 小林 憲正

Astrobiology Experiments in Earth Orbit

Yokohama National University
Graduate School of Engineering Kensei Kobayashi

ABSTRACT Astrobiology is a novel interdisciplinary scientific field that treats origins, evolution, distribution and destiny of life in space. Recent findings of wide variety of organics in extraterrestrial environments suggest that life's origin and evolution is cosmic imperative. A great number of experiments on astrobiological themes - chemical evolution, survivability of microorganisms in space, etc. - have been done on ground. Only a limited number of parameters were usually considered. It is of important to test astrobiological concepts in actual space environments. Here I review the astrobiology experiments performed in satellites or space stations, and propose some new space experiments in astrobiology.

1. はじめに：アストロバイオロジーとは

地球外生命の存否と地球生命の起源の問題は密接な関連を有する。1960年、J. Lederberg はこれらの問題、すなわち、宇宙における生命の起源・進化・分布を扱う学問分野を、圏外生物学 (Exobiology) と名付けた[1]。NASA や ESA における惑星探査や基礎研究プログラムで、このテーマに関するものは Exobiology Program とよばれてきた。

1996年8月、NASA Johnson Space Center の David McKay らのグループは、南極で収拾された火星隕石 ALH84001 を分析し、そこに「生命活動の痕跡」が認められるとの論文を Science 誌に発表した[2]。この論文の結論に関しては賛否両論があるものの、これを契機として NASA は新たな宇宙開発のテーマとして、宇宙・太陽系・地球・生命の起源をターゲットとした the Origins Program を発表する。さらに、新たな試みとして、1997年10月、NASA アストロバイオロジー研究所 (NASA Astrobiology Institute; NAI) の創設を発表した。

ここではじめて「アストロバイオロジー」という用語が用いられる。アストロバイオロジーは、地球および地球外における生命の起源・進化・分布と未来を研究する学問領域と定義されている [3] (図1)。極めて圏外生物学に近いものであるが、惑星(地球)と生命の共進化や、生命の未来 (destiny) を加えるなど、圏外生物学の範疇をより拡大したものとなっている。

アストロバイオロジーの諸テーマに関する実験的研究は、20世紀後半以来、盛んにおこなわれてきた。特に、生命の起源に関しては、地球外物質に様々な有機物が見いだされ、それらと生命との関連が議論されるようになったため、地球外環境で有機物がどのようにして生成するかを確かめる実験が多くなされるようになった。また、地球の様々な極限的な環境下にも生息する生物が見つかり、生物圏のひろが

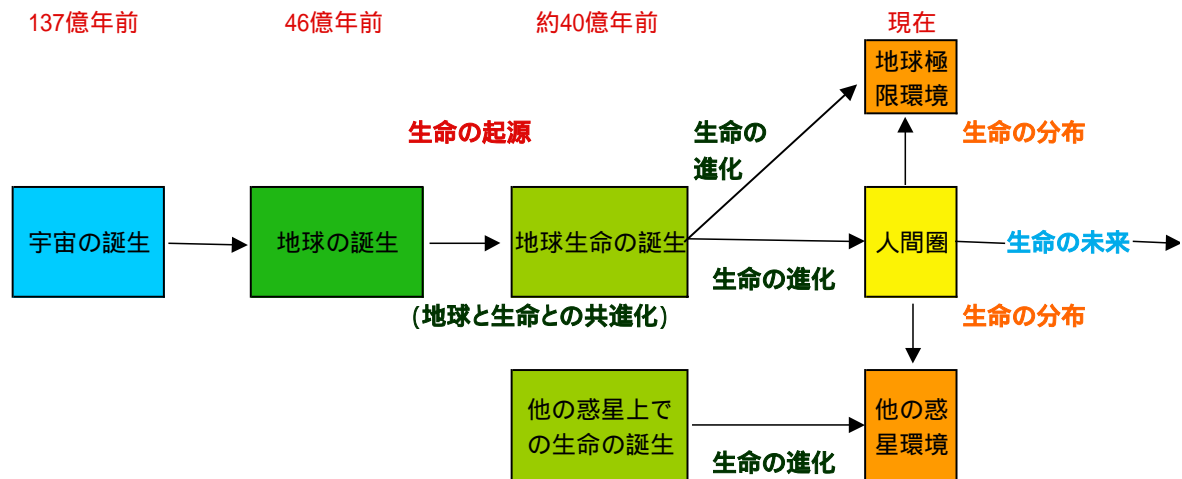


図1 アストロバイオロジーの課題

りが従来考えられていた以上に広いことがわかってくると、生物（特に微生物）の宇宙環境下での生存可能性への興味から、種々の微生物を擬似宇宙環境（低温、真空下、高放射線環境、高紫外線環境など）に曝露し、宇宙での生存可能性を調べる実験も行われるようになった。また、惑星探査の進展とともに、太陽系や地球の生成と進化の概要が徐々に明らかになる一方、地球の先カンブリア時代の古岩石中の化石・微化石・分子化石が次々に見つかり、地球と生命とが共に影響を与えながら進化してきたという「共進化」の研究が進んできた。さらに、地球環境問題の解決や、人類の宇宙への進出といったわれわれの未来に関する諸テーマの解決にもアストロバイオロジー的な研究が必要になっている。

2. これまでのアストロバイオロジー宇宙実験（1）有機物・微生物の曝露実験

宇宙開発の進展とともに、人工衛星、スペースシャトル、宇宙ステーションなどを用いた宇宙実験が可能になると、アストロバイオロジー実験を実際の宇宙環境で行うところもなされるようになった。その多くは(i) 宇宙紫外線・放射線による有機物の変成、(ii) 宇宙紫外線・放射線による微生物や生体高分子の安定性、(iii) 宇宙環境下での閉鎖生態系の挙動に関連するテーマである。

上記のうちの(i)に関するものとしては、Greenberg らによるもの[4,5]が挙げられる。Greenberg らは、まず、室内実験で、模擬星間物質（水・一酸化炭素・アンモニア・アセチレンの混合物）に紫外線を照射して「模擬星間有機物」を合成した。これは分子雲内での反応を模したものである。これを EURECA 衛星を用いて実際の宇宙環境において6ヶ月間、宇宙紫外線に曝露することにより、星間塵に特徴的な波長 3.4 μm に吸収極大を有する赤外スペクトルを示すようになったことを報告している。

これまで最も数多くなされてきたのは、(ii)に関するものである。1972年のアポロ16号で枯草菌胞子を曝露したのを皮切りに、スペースラブ1、D2、LEDF、EURECA、BIOPANなどのミッションが利用され、最長6年間(LEDFの場合)の曝露実験が行われた[6,7]。これらの実験では枯草菌の胞子、放射線耐性菌 (*Deinococcus radiodurans*) DNAなどを宇宙空間に曝露して、その生存可能性、変異、誘導などが調べられてきた。胞子等が用いられているのは、他の惑星で誕生した生命の胚種が宇宙空間を漂った後、地球にたどりついて地球生命のもとになった、とする「パンスペルミア説」の検証を目的としているた

めである。1903年にS. Arrheniusがこのパンスペルミア説を提唱した頃には、微生物が長時間宇宙で生存できるはずがない、という批判が多かった。これらの実験により、隕石粉末など適当なもので覆われていれば、微生物が長時間、真空の宇宙環境で生存可能であることが示された。また、BIOPAN ミッションはFOTON 衛星を用いたもので、1994年のBIOPAN Iを皮切りに、2005年のBIOPAN Vまで行われ、各2週間程度、種々の微生物や有機物（多環芳香族炭化水素など）の曝露が行われている。

宇宙ステーションを用いたものとしては、ESAによってColumbus モジュール上に建設された曝露施設EXPOSE [8]を用いた、より長期の曝露実験が計画されている。第一次の実験テーマとしては、枯草菌孢子やファージDNA、藻類マットなどを曝露する実験が選定されており、微生物の宇宙での生存可能性や、オゾン層の生物圏に対する役割などが研究される予定である。

3. これまでのアストロバイオロジー宇宙実験（2）閉鎖生態系実験[9]

閉鎖生態系に関する実験地球上において、個々の生物は単独で生きているのではなく、動物・植物・微生物などが互いに相互作用しあい、物質やエネルギーを定常的に循環させながら、「生態系」を維持してきた。この生態系は1Gという重力下、放射線や紫外線から防護された地球独自の環境中ではぐくまれてきた。このような生態系が、それ以外の環境でも維持できるかどうかを知ることは、生態学の基本的な課題であるとともに、人類が月や火星など、宇宙に進出した時に新たな生態系を築くためにも不可欠と考えられる。

前述のアストロバイオロジー宇宙実験(iii)に関するものとしては、MacCallumらによるものがある。彼らは、1996年から淡水閉鎖生態系をSTS-77やMIRに搭載する実験を行い、地上対照実験や数値解析と組み合わせることにより、宇宙空間（0G）における小規模閉鎖生態系（魚類水槽、バイオリアクター等）を長期安定化する手法の獲得を試みた。この時、生物種間のバランスの崩れ、個体形態の変形などの影響が現れたことが確認されている(Fig. 2) [10]。

この実験は、米国製の小型生態系モデルを用いた、米国主導のものであり、厳密な物質循環が解析できるものではなかった。日本においては、光源と熱環境制御装置を持ち、宇宙用にも改良された小規模淡水閉鎖生態系がAutonomous Biological System (ABS)として製作されている。これは小さな生物種を用いた生態系であり、生態系の維持にはより微妙なバランスが要求される。これを用いて、バイオマスの把握や、マスバランス、気相系の計測など、精密な計測計画をたてるとともに、数値モデルによる物質循環ダイナミクス解析手法を併用することにより、世界でも類を見ない宇宙実験が可能となり、宇宙でのバイオリアクター等の構築に必須なデータや、地球上での生態系のダイナミクスの解明が期待できる。

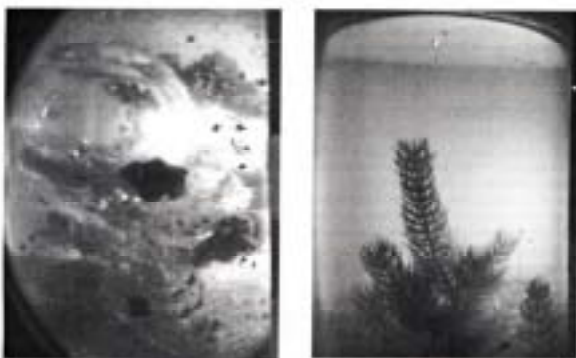


図2 宇宙実験後(左)および地上対照(右)のABS

必須なデータや、地球上での生態系のダイナミクスの解明が期待できる。

4. 宇宙における有機物の生成・変成のシナリオ

地球外物質にも種々の有機物が検出され、それらと地球生命との関連が議論されてきた。炭素質コンドライトからは、アミノ酸・核酸塩基・カルボン酸など多様な有機物が抽

出されている。特に最近では、Murchison隕石から抽出したアミノ酸の一部には地球生物が用いているL型がD型よりも多いこと[11]、Tagish Lake隕石中に、有機物からなる細胞状構造体が見いだされたこと[12]、Wild 2彗星からサンプルリターンされたダストの分析から、彗星中にも様々な有機物が存在すること[13]などが報告されている。これらの新たな知見と、星間での有機物創生に関するGreenbergモデルから、星間での有機物生成から地上での生命誕生までのシナリオを以下のように描くことができる(図3)。

(1)極低温(10~20K)の分子雲中の星間塵上に凍り付いた種々の分子に宇宙線や二次的に生成した紫外線があたり、まず有機物ができる。(2)これがより高温の散光星雲に漂い出し、氷のマントルが昇華してしまうと、この生成した有機物層に紫外線等があたり、変成が起きる。(3)このようなことが繰り返された後、原始惑星系が生成するときこの星間塵が集まり、隕石母天体や彗星となった。この段階でも宇宙線や紫外線による変成は進む。(4)彗星や小惑星(隕石母天体)中では、表面では主として紫外線により、中心部では宇宙線により変成が進む。小惑星の内部では水質変成または水熱変成の影響も考えられる。(5)彗星や小惑星からは多数の惑星間塵が生じる。惑星間塵は小さいため、特に宇宙環境で紫外線等の影響を大きく受ける。(6)小惑星や彗星の地球への衝突や、惑星間塵により、地球に地球外有機物が運び込まれる。(7)これらの有機物をもとに生命が誕生する。

Chyba and Sagan [14]は、地球外有機物の供給量は原始地球上で生成した有機物よりも遙かに多いこと、特に炭素量として、惑星間塵により運びこまれたものが最も多いとした。しかし、彗星や小惑星(隕石)中の有機物に関しては、その詳細が徐々に明らかになりつつあるのに対し、地球上で捕集された惑星間塵中の有機物は地球環境でのコンタミの影響が無視できず、その詳細は不明なままである。ここでは、彗星や小惑星から生じた惑星間塵中の有機物が宇宙環境でどのような変成を受けるかを実際の宇宙環境で検証することを目的とする。もし、惑星間塵環境でも彗星や隕石に含まれるような複雑有機物、特にアミノ酸などとの関連を有する有機物が壊れてしまわないのなら、Chybaらの考えるように、惑星間塵により原始地球に供給される有機物が、生命の誕生に最も有効と考えられる。一方、惑星間塵環境での有機物が紫外線等で完全に分解してしまうようであれば、炭素量として多くても惑星間塵の生命誕生への寄与は小さく見積もる必要が生じる。

従来、有機物の紫外線(電磁波)や放射線に対する安定性をみる実験は、種々のランプや加速器を用



図3 宇宙での有機物の生成と変成

いた地上実験が行われてきた。しかし、これらの実験では、個々の放射線や特定の波長の電磁波(紫外線、X線)や放射線(重粒子線、線など)のみを照射する実験しか行われておらず、それらが複合して照射された場合の効果は確かめられていなかった。また、宇宙空間での変成に重要と考えられる極端紫外光を用いた実験は、適当な窓材がないため、

地上実験は極めて困難であった。

一方、前述したように、ESAを中心に、衛星や宇宙ステーションを用いて、種々の微生物や有機物を宇宙環境に曝露しようとする試みもされてきた。しかし、用いられた有機物の多くは、核酸やタンパク質などの生体有機物であった。Greenbergら[15]は星間有機物アナログに照射したが、これも紫外線を用いて合成した有機物にさらに宇宙紫外線を照射したものであった。また、従来の実験では、窓を用いて試料を封じ込めているため、肝心の極端紫外光が試料に照射されないという問題があった。さらに、国際宇宙ステーション(ISS)の曝露部(EXPOSE)を用いた微生物曝露実験[6,16]も計画されているが、状況は同じである。

われわれは、星間有機物の生成や変成を、実際の宇宙環境で見ることに、すなわち、分子雲中での有機物生成や、その変成、隕石や彗星から生じた惑星間塵中の有機物の変成過程を調べる宇宙実験を計画してきた。以下にこれまでの、あるいは今後の計画について述べる。

5. 宇宙における有機物の生成・変成検証のための宇宙実験 (1) 宇宙極端紫外光を用いた有機物合成

星間での有機物生成モデル (Greenbergモデル) においては、まず、分子雲 (暗黒星雲) 中で有機物が作られる。分子雲中には、微小なケイ酸塩ダストや種々の分子が、他の星間環境と比べると高濃度に存在するため、恒星からの光が内部まで到達できず、内部は極めて低温 (10 ~ 20 K) である。このため、分子雲中の多くの分子は、冷たいケイ酸塩ダストの表面に凍り付き、「アイスマントル」を形成している。星間塵アイスマントル中の分子としては、水その他、一酸化炭素、メタノール、メタン、アンモニアなどが主とされてきたが、これらに加えて、窒素の存在も明らかとなり[17]、星間化学反応の重要な材料であることが示唆された。

星間環境を模した種々の室内模擬実験が行われてきた。そして星間塵を模した極低温環境下で陽子線 [18,19] もしくは紫外線 [20,21] 照射によりアミノ酸の前駆体が生成することが報告されてきた。また、メタノール・アンモニア・水の凍結混合物に重粒子線を照射した場合にも、アミノ酸前駆体が生成することがわかった [22]。これらの実験では、出発材料に対して宇宙環境で得られる多くのエネルギー (光子粒子) のうちの特定のエネルギー (範囲) のもののみを使った実験である。

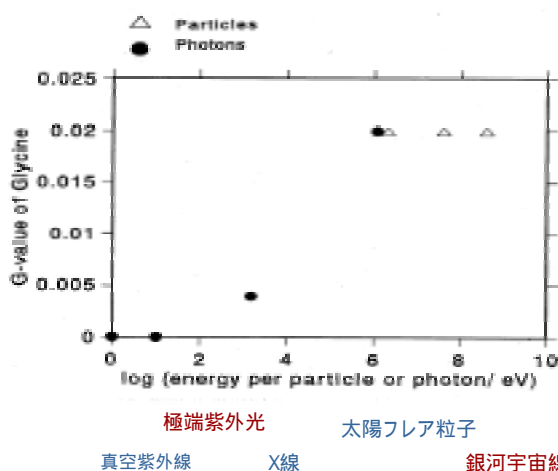


図4 一酸化炭素・窒素・水の混合気体に種々の粒子線・光子を照射した時に生成するグリシンのG値 (加水分解後)

図4に、一酸化炭素・窒素・水の混合気体に種々の光 (近紫外線 ~ 線) や粒子線を照射した時のグリシンのエネルギー収率を示す。MeV以上の粒子線や線でのグリシンのエネルギー収率 (G値; 100eV当たりのグリシン生成個数) は0.2と大きい値を示すのに対し、近紫外線・真空紫外線 (光子エネルギー 10 eV以下) ではグリシンは生成しない (G=0)。X線 (~1 keV) ではその間の値を示す。X線と真空紫

外線間の極端紫外光を用いた実験は困難であり、まだ行われていない。これは適当な窓材がないためである。さらに、分子雲中で生成した有機物は、星間塵が散光星雲中に移動すると、アイスマントルが昇華し、恒星からの光に直接暴露される。この場合も極端紫外光の影響が考えられるが、そのような実験もまだ行われたことがない。

宇宙空間では太陽放射のフルスペクトルが利用可能であり、これを用いた極端紫外光の化学進化実験（有機物の生成と変成）が期待される。われわれは、窓材を用いないで回折鏡により太陽からの極端紫外光を増幅して試料に照射できる「スペースフォトンラブ」により、実際の宇宙環境下での有機物の合成と変成を調べる実験を提案してきた[23]。図5に、その概念設計図を示す。この装置により、窓材を通さず、太陽からの極端紫外光のみを回折鏡により集光して試料に照射することが可能になる。試料は、冷凍機により低温に保たれるため、一酸化炭素などの分子雲中での化学反応をシミュレートすることが可能となる。ただし本提案装置は、比較的大型で消費電力が大きいという問題があった。より宇宙実験に適した小型の暴露装置の設計を検討している。

6. 宇宙における有機物の生成・変成検証のための宇宙実験（2）惑星間塵の捕捉と有機物の曝露

地球外物質の地球への搬入を考える時、衝突による有機物の破壊の問題が生じる。特に、小惑星や彗星などの比較的大きい天体の場合は、高速で深い角度から地球に衝突した場合、巨大な衝突エネルギーにより有機物は完全に分解してしまうと考えられる。一方、小さい惑星間塵の場合は、大気中をゆっくりと下降して地球表面に到達可能と考えられる。この点からは、地球外物質の地球への搬入媒体として惑星間塵の方が彗星等よりも優れている。しかし、宇宙空間においては、彗星や小惑星の内部には紫外線が届かないのに対し、惑星間塵は太陽紫外線に直接曝露される。この環境下で、有機物が安定かどうかは、まだ確認されていない。惑星間塵を直接分析する試みもあるが、地球上（海洋底や南極）で採集

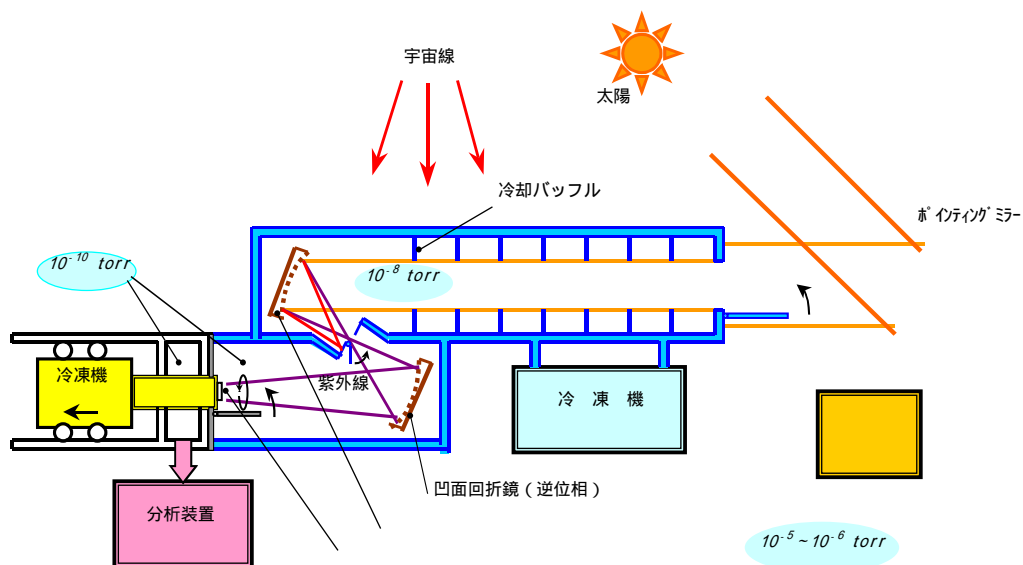


図5 “スペースフォトンラブ” の概念図

された惑星間塵は地上での有機物のコンタミを受けていること、含まれる有機物が極めて微量であることなどから、彗星や隕石中の有機物との比較も十分に行われていない。

これらの問題を解決するために、山岸明彦を中心とするグループは、国際宇宙ステーションの曝露部を用いた、ダストの捕捉と有機物等の曝露を行うための装置の開発を目指している。惑星間塵を含むダストの捕捉には低密度シリカゲル（エアロゲル）を用い、高速で飛来するダストを減速、捕捉する。この方法によりダストを捕捉した場合、ダストに含まれる有機物や微生物がどのような影響を受けるかについては、現在、JAXA宇宙化学研究本部にある二段式軽ガス銃を用い、試料（「サボ」と呼ばれるポリカーボネート製の容器中に入れる）を4 km/sで飛翔させた後、エアロゲルで捕捉する実験を行っている（図6）。

宇宙環境での太陽紫外線などによる有機物の分解は、ダスト捕捉装置の一部を用い、試料を基板に塗布し、乾燥させた上で窓材なしで宇宙環境に曝露させる方法を検討中である。窓材を用いなければ、有機物の変成に大きく寄与すると考えられる太陽からの極端紫外光を試料に直接照射することが可能となる。曝露に用いる有機物としては、惑星間塵のもとになったと考えられる炭素質コンドライト中の有機物のほか、彗星中に保存されていると考えられる、星間有機物のアナログ（模擬星間物質：一酸化炭素、メタノール、アンモニア、水などの混合物に放射線を照射して合成したもの）も試料として用いる。試料を塗布した有機物曝露パネルを曝露部に展開し、1年～3年（可能ならばそれ以上）放置のあと、与圧部に回収する。なお、用いる有機物は、安定同位体（ ^{13}C など）でラベルしておくことにより、曝露や分析過程におけるコンタミネーションとの区別が可能となる。

7. おわりに

アストロバイオロジーの究極的な目的は、生命科学をローカルな地球のみのものではなく、真にユニヴァーサルな学問とし、そこから地球生命を見つめなおすところにある。このような観点から、アストロバイオロジーの実験的研究のためには、宇宙環境下での検証実験は不可欠である。宇宙の種々の特性（微小重力、種々の放射線および広い波長範囲の光）を有効に利用する実験のためには、現在のところ国際宇宙ステーション、とりわけ JEM 曝露部が最も適した場所と考えられる。また、アストロバイオロジー関連分野は次世代宇宙利用研究の夢の部分の保障としても重要である。

2004 年度に宇宙環境利用科学委員会「地球周回軌道におけるアストロバイオロジー実験研究班WG」が組織され、国際宇宙ステーションなどを用いたアストロバイオロジー実験の検討が行われてきた。この議論の中で、多くのテーマの中から宇宙ステーション等を用いた宇宙実験に適したテーマとして選定

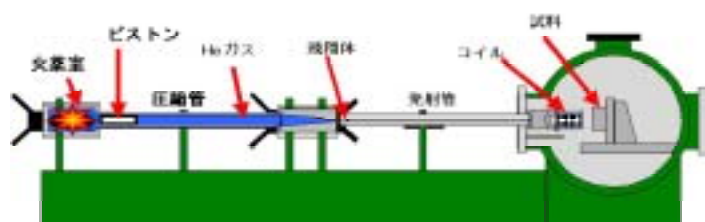


図5 二段式軽ガス銃による高速衝突実験装置の概略図

されたのが (1) 太陽からの極端紫外光や宇宙線などの宇宙環境を利用した化学進化実験、(2) 宇宙ステーション上での微粒子の採取と微生物・有機物・鉱物探査、(3) 宇宙空間での微生物の生存可能性、(4) 宇宙における小規模閉鎖生態系の挙動、(5) 宇宙

ステーションを用いた宇宙検疫の可能性、の5つである。これらのテーマは、アストロバイオロジーの4つのキーワード、すなわち宇宙における生命の「起源」「進化」「分布」「未来」のすべてに関連するものである。2006年度より本WGにおいて、これらの課題についてさらに検討するとともに、(1)(2)(3)については地上予備実験を開始した。これらのテーマは、宇宙ステーションの曝露部を利用するテーマであり、「『きぼう』日本実験棟船外実験プラットフォーム第2期利用に向けた候補ミッション募集」などに応募していく予定である。

謝辞 本稿で紹介した研究の一部は、平成16~18年度JAXA宇宙環境利用科学委員会・研究班WG経費、平成9~11年度日本宇宙フォーラム宇宙環境利用に関する公募地上研究、文部科学省科学研究費(No.14340170, No.17204050)の補助により行ったものである。また、本稿で述べたアイデアの一部は、平成16~18年度JAXA宇宙環境利用科学委員会で議論されたものである。委員会メンバーに感謝する。

引用文献

- [1] Lederberg, J., 1960: Exobiology: Approaches to Life Beyond the Earth. *Science* **132**, 393-400.
- [2] McKay, D. S., Gibson, E. K., Jr., et al., 1996: Search for Past Life on Mars: Possible Relic Biogenic Activity in Martian Meteorite ALH84001. *Science* **273**, 924-930.
- [3] Soffen, G. A., 1999: Astrobiology. *Adv. Space Res.* **23**, 283-288.
- [4] Greenberg, J. M., Li, A., Medoza-Gomez, C. X., Schutte, W. A., Gerakines, P. A., de Groot, M., 1995: *Astrophys. J. Lett.* **455**, L177-180.
- [5] Greenberg, J. M., Shalabiea, O. M., Mendoza-Gomez, C. X., Schutte, W., Gerakines, P. A., 1995: Origin of Organic Matter in the Protosolar Nebula and in Comets. *Adv. Space Res.*, **16**, 9-16.
- [6] Horneck, G., 1999: European Activities in Exobiology in Earth Orbit: Results and Perspectives. *Adv. Space Res.*, **23**, 381-386.
- [7] Horneck, G., 1998: Exobiological Experiments in Earth Orbit, *Adv. Space Res.*, **22**, 317-326.
- [8] <http://www.spaceflight.esa.int/users/index.cfm?act=default.page&level=11&page=fac-iss-ef-eef-exp>
- [9] 小林憲正, 石川洋二ほか, 2006: 地球周回軌道におけるアストロバイオロジー実験: 極端紫外光利用実験を中心に. *Space Util. Res.*, **22**, 329-332.
- [10] MacCallum, T., Anderson, G. A., Poynter, J. E., Ishikawa, Y., Kobayashi, K., Mizutani, H., Kawasaki, Y., Koike, J., Ijiri, K., Yamashita, M., Sugiura, K., Leigh, L. S., 2000: The ABS (Autonomous Biological System): Spaceflight Results from a Bioregenerative Closed Life Support System, *SAE Paper*, 2000-01-2340 (2000).
- [11] Cronin, J. R., Pizzarello, S., 1997: Enantiomeric Excesses in Meteoritic Amino Acids. *Science*, **275**, 951-955.
- [12] Nakamura-Messenger, K., Messenger, S., Keller, L. P., Clemett, S. J., Zolensky, M. E., 2006: Organic Globules in the Tagish Lake Meteorite: Remnants of the Protosolar Disk. *Science*, **314**, 1439-1442.
- [13] S. A. Standford, et al., 2006: Organic Captured from Comet 81P/Wild 2 by the Stardust Spacecraft. *Science*, **314**, 1720-1704.

- [14] Chyba, C., Sagan, C., 1992: Endogenous Production, Exogenous Delivery and Impact-shock Synthesis of Organic Molecules: An Inventory for the Origins of Life. *Nature*, **355**, 125-132.
- [15] Greenberg, J. M., Li, A., 1997: Silicate Core-Organic Refractory Mantle Particles as Interstellar Dust and as Aggregated in Comets and Stellar Disks. *Adv. Space Res.*, **19**, 981-990.
- [16] Hegedűsa, M., Kovácsb, G., Módosa, K., Rontóbb, G., Lammerc, H., Panitzd C., Feketea, A., 2006: Exposure of phage T7 to simulated space environment: the effect of vacuum and UV-C radiation. *J. Photochem. Photobiol. B*, **82**, 94-104.
- [17] Knauth, D. C., Anderson, B.-G., McCandliss, S. R., Moos, H. W., 2004: The Interstellar N₂ Abundance toward HD124314 from Far-ultraviolet Observation. *Nature* **429**, 636-638.
- [18] Kobayashi, K., Kasamatsu, T., Kaneko, T., Koike, J., Oshima, T., Saito, T., Yamamoto, T., Yanagawa, H., 1995: Formation of Amino Acid Precursors in Cometary Ice Environments by Cosmic Radiation. *Adv. Space Res.*, **16**, 21-26.
- [19] Kasamatsu, T., Kaneko, T., Saito, T., Kobayashi, K. 1997: Formation of Organic Compounds in Simulated Interstellar Media with High Energy Particles, *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, **70**, 1021-1026.
- [20] Bernstein, M. P., Dorkin, J. P., Sandford, S. A. Cooper, G. W., Allamandola, L. J., 2002: Racemic Amino Acids from the Ultraviolet Photolysis of Interstellar Ice Analogues. *Nature*, **416**, 401-403.
- [21] Munoz Caro, G. M., Meierhenrich, U. J., Schutte, W. A., Barbier, B., Segavia, A. A., Rosenbauer, H., Thiemann, W. H. P., Brack, A., Greenberg, J. M., 2002: Amino Acids from Ultraviolet Irradiation of Interstellar Ice Analogs. *Nature*, **416**, 403-406.
- [22] 小林憲正, 小川智也, 増田仁美, 遠西寿子, 金子竹男, 高野淑識, 高橋淳一, 斉藤威, 村松康行, 吉田聡 2007: 高エネルギー粒子線および光子による模擬星間物質からのアミノ酸前駆体の合成. 電気学会誌, in press.
- [23] Hashimoto, H., Brack, A., Colangeli, L., Greenberg, J. M., Horneck, G., Kobayashi, K., Kouchi, A., Navarro-Gonzalez, R., Raulin, F., Saito, T., Yamashita, M., 1998: Conceptual design of apparatus for cosmo-biology experiment on international space station, *Biol. Sci. Space*, **12**, 106-111 .