

## 鉱物、有機物、微生物の高速衝突による変性の研究

横堀伸一、山岸明彦、河口優子、杉野朋弘、川尻成俊、白石啓祐（東京薬大・生命）、  
小林憲正、大林由美子、Palash Sarker Kumar、小野恵介、川本幸徳（横浜国大・院工）、  
山下雅道、橋本博文、矢野創、長谷川直、田端誠（JAXA/ISAS）、丸茂克美（産総研）、  
中嶋悟、藪田ひかる、緒方雄一朗（大阪大・院理）、河合秀幸（千葉大・理）、  
奥平恭子（会津大）、三田肇（福岡工大・工）、奈良岡 浩（九州大・院理）、  
今井栄一（長岡技大）

地球上の生命の起源に関して、生命が地球上で誕生したとする説の他に、地球外で誕生しその後地球に飛来したという説（panspermia、パンスペルミア）が古くから知られている。火星起源の隕石に生命の痕跡を見いだしたとする報告もあり、今日、地球外の太陽系天体（火星、そして木星や土星の衛星）において、生命の存在可能性が重要な科学的課題として検討されている。

しかし、パンスペルミア説もその内容を検討すると一つではなく、様々な論者による異なる考えを含む。例えば、私たちが現在地球上で見るような生命が天体間を移動したという考え方がある一方で、生命の出現に必要な有機物（アミノ酸や核酸塩基、糖などの生体高分子の構成成分またはそれらを構成成分として含む巨大分子）が天体間を移動したという説も唱えられている。これらの可能性を議論する上で最も直接的な検証実験は、実際に生物や生命の材料となり得る有機物が天体間で採取を試みることである。現在私たちがその存在を確認しているのは、地球上の生物のみである。まず、地球由来の生物の存在がどの高度まで確認できるのか、また、その生物が生きている（または蘇生可能）か否か、についての検討が必要かつ現実的なアプローチである。

1930年代から、大気球、飛行機あるいは観測用ロケットを用いた微生物採集実験が行われてきた<sup>[1-3]</sup>。我々も航空機や大気球を用いて25 kmまでの大気を採集し、その中の微生物の単離とその解析を行った。これまで最も高い紫外線耐性を持つとされている *Deinococcus radiodurans* と同等あるいはそれ以上の紫外線耐性を示した2株に関して微生物学的な解析を進め、*D. aerius* と *D. aetherius* と命名した<sup>[4-5]</sup>。また、*Bacillus* 属に代表される紫外線に対して高い耐性を示す胞子を形成する微生物の株を多数単離した<sup>[6-8]</sup>。


大気球では40～50kmの高度までは、同様の手法で微生物の直接採取が可能である。しかし、それ以上の高度における微生物の直接採取は、同様の手法で行うことは困難である。そこで、私たちは、国際宇宙ステーション(ISS)の日本実験棟「きぼう」の暴露部における微生物採取と微生物密度の推定のための実験の実現可能性を検討することと

した<sup>9-10)</sup>。高度50kmを超えた高々度で、長期間の曝露部での微粒子採集実験を行うことのできる研究装置としては、現在では「きぼう」を使用する以外に選択肢はない。しかし、この高度は既に真空であり、大気の吸引による微生物・有機物の採取はできない。そこで、私たちは、既に宇宙空間での運用実績のあるエアロゲルを微生物・有機物の採取に使用することを検討することとした。

地球由来の微生物・有機物が軌道高度に存在する想定すると、その速度はISS軌道速度と同程度であり、採集用エアロゲルに衝突する速度は微生物とISSの相対速度となる。従って、ISS進行方向前面では最高16km/s、側面で最高8km/s、背面で微生物の軌道に依存した軌道間差速度となる。このような高速で衝突する微粒子は、衝撃による蒸発、原形をとどめないほどの破壊、が予想される。

一方、そのような高度では、生物のゲノムDNAの切断など生物に致命的な影響を与える地球上には到達しない強度の紫外線や放射線の照射を受けることを想定しなければならないので、生存し得る微生物の存在形態として微生物単独で浮遊していることを考えるのは困難である。蘇生可能な微生物がISS高度ならびにより高々度で存在するには、① 微生物がある程度のサイズの細胞塊のような形で存在し、その内部の微生物細胞が蘇生可能な状態で保護されている場合と、② 微生物が粘土鉱物などの粒子内部に埋め込まれた形で存在、保護されている場合、の2つのケースを考えることができる。有機物も、直接紫外線などを照射されることで変成、分解することが考えられ、上記の2つのケースを考えることで、それらの変成、分解から保護されることが想定される。

これらの検証のために、2段式軽ガス銃で4km/sに微生物や有機物粒子を加速し、エアロゲルをターゲットとして打ち込み、エアロゲルに作られたトラック中に微生物や有機物が検出できるか検討を行った。(シリカ)エアロゲルは、シリカから作られる非常に低密度の固体で、低い熱伝導率のために著しい断熱性を持っている。そのため、高速で衝突した微生物・有機物に対する衝撃を小さくして減速することが期待できる。上記の2つのケースを想定すると、衝突時に微生物の細胞塊や粘土鉱物の表層は衝撃に伴う高温に曝されると考えられるが、内部にはその高い温度が到達せず、微生物や有機物が原形を失わずに回収することができることが期待される。

実験方法は、微生物の衝突実験では、以下の通りである。① *D. radiodurans*細胞を粘土鉱物に吸着させ、乾燥してサンプルとした。また、粘土鉱物のみを乾燥したブランクも作製した。本実験では人工モンモリロナイト(商品名:ルーセントタイト)を模擬粘土鉱物として使用した。乾燥後、粒径を10~20、20~30、25~48、48~59、100~200 μmに揃えた。② 2段式軽ガス銃によって秒速4 kmまでサンプルを加速し、シリカエアロゲルで微生物を吸着させた微粒子を捕獲する。蛍光顕微鏡でエアロゲルを観察し、微生物

の存在を確認する。SYBR Green I (核酸と結合して緑色蛍光を発する：本実験ではアセトン／水溶液に溶解したもの) で衝突トラックと捕獲微粒子を含むエアロゲルサンプルを検鏡前に染色した後、観察を行った。

実際に行ったブランク実験では、エアロゲルにルーセントタイトを衝突させ、蛍光顕微鏡で観察した。微粒子表面がアモルファス化し、非特異的に幅広い波長域での蛍光が観察された。また、蛍光の減衰速度も遅い。

一方、微生物を染色して蛍光顕微鏡観察する場合、緑色蛍光のみを発し、減衰速度が早いことが非衝突サンプルによる予備実験で示唆され、上記の衝突粘土鉱物微粒子サンプルの蛍光観察結果との比較から、衝突サンプル内の微生物を、蛍光の波長域と減衰速度から、微生物以外のものと区別できることが示唆された。

実際に、非染色微生物を含む粘土鉱物の衝突サンプルを、衝突後取り出し、SYBR Green Iで染色して蛍光顕微鏡観察を行った。ところ、上記の2つの指標から見て微生物とそれ以外を区別可能であった(図1)。

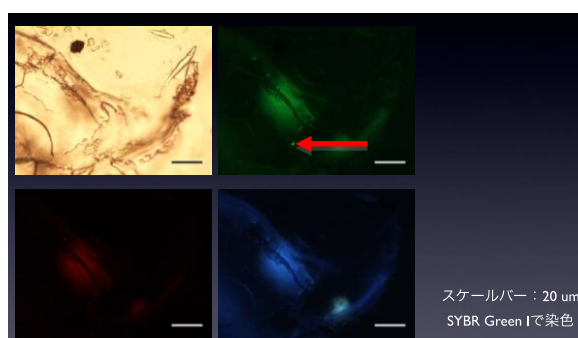


図1. 蛍光観察によるトラック内微生物の検出。赤色の矢印で示される緑色蛍光を呈する点は微生物由来と考えられる。

生命の誕生に必要な有機物が、宇宙塵によって地球に運び込まれた可能性を検証するため、宇宙ステーション上で宇宙塵を捕集することを計画している。その準備のための地上実験として、有機物(アミノ酸)を含む微粒子(粘土または多孔質シリカゲル)にしみこませたもの、および炭素質隕石(マーチソン隕石)粉末(30-100 μmφ)を二段式軽ガス銃で約4 km/sで射出した。アミノ酸を含む微粒子をエアロゲルで捕集したものの分析法を検討した。有機物はトラック末端で捕集された粒子のみならず、トラックにも含まれると考えられるため、微粒子を含むトラックをエアロゲルごと取り出し、フッ酸分解・酸加水分解し、MonoSpin SCXで固相抽出して脱塩した後、アミノ酸分析を行った。また、エアロゲル中に含まれるアミノ酸を低減するため、エアロゲル製造に用いるアルコールを高純度のものに切り替えた。現在、捕集したアミノ酸を解析中である。炭素質隕石粉末を用いた実験については、トラック末端まで貫入した隕石微粒子をタングステン針と細筆で取り出し、2枚のアルミ板でプレス後、顕微赤外分光・顕微ラマン分光分析を用いて測定を行った。

炭素質隕石粉末の高速衝突実験の結果、衝突後の隕石粉末の顕微赤外分光スペクトルにおいて脂肪族炭素の吸収(CH<sub>3</sub>の伸縮振動(2960 cm<sup>-1</sup>), CH<sub>2</sub>の伸縮振動(2920, 2820

cm<sup>-1</sup>)) が観測されたことから、隕石中の有機物が高速衝突後も残存することが確認された。ただし、それらのピーク強度は衝突前に比べて低かった。衝突後の隕石粉末の顕微赤外マッピングを行ったところ、脂肪族炭素と層状ケイ酸塩の分布がほぼ同じであった。この結果は、衝突前の隕石中の有機物と鉱物の化学状態 (Kebukawa et al. 2010) と類似しており、衝突による成分分別は起こっていないことを示すものである。さらに、衝突前のCH<sub>2</sub>/CH<sub>3</sub>比は1.3~2であったのに対し、衝突後のCH<sub>2</sub>/CH<sub>3</sub>比は0.3~3であった。以上から、隕石有機物の脂肪族炭素の一部は衝撃によって消失または変化した可能性が考えられる。また、衝突後の隕石粉末のラマンスペクトルでは、炭素質物質に由来するD, Gバンド (それぞれ~1350, 1580 cm<sup>-1</sup>) が検出され、それらのピーク位置と半値幅は衝突前のものの不均一性の範囲に収まったことから、4 km/sの衝突では、隕石有機物の芳香族炭素構造および結晶状態はほとんど変成していないことが考えられる。

#### 参考文献

- [1] Rogers, L. A., and Meier, F. C. (1936) The collection of microorganisms above 36,000 feet. Natio. Geographic Soc. Stratosphere Series. 2, 146.
- [2] Bruch, C. W. (1967) Microbes in the upper atmosphere and beyond. In: Airborne microbes: symposium of the society of general microbiology (Gregory, P. A. and Monteith, J. L. Eds.), Vol. 17, pp. 385. Cambridge University Press.
- [3] Imshenetsky, A. A., Lysenko, S. V., Kazakov, G. A. and Ramkova, N. V. (1976) On microorganisms of the stratosphere. Life Scie. Space Res. 14, 359-362.
- [4] Yang, Y., Itoh, T., Yokobori, S., Itahashi, S., Shimada, H., Satoh, K., Ohba, H., Narumi, I., and Yamagishi, A. (2009) *Deinococcus aerius* sp. nov., isolated from the high atmosphere. Internatl. J. Syst. Evol. Microbiol. 59, 1862-1866
- [5] Yang, Y., Itoh, T., Yokobori, S., Itahashi, S., Shimada, H., Satoh, K., Ohba, H., Narumi, I., and Yamagishi, A. (2010) *Deinococcus aetherius* sp. nov., isolated from the stratosphere. Internatl. J. Syst. Evol. Microbiol. 60: 776-779
- [6] 飯嶋一征、井筒直樹、福家英之、斉藤芳隆、川崎朋実、松坂幸彦、並木道義、太田茂雄、鳥海道彦、山上隆正、山田和彦、瀬尾基治、山岸明彦、横堀伸一. 微生物採集装置の開発. 宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA RR-05-012、117-128 (2006)
- [7] 山岸明彦、横堀伸一、南川純一、清水久美子、山上隆正、飯嶋一征、井筒直樹、福家英之、斉藤芳隆、川崎朋実、松坂幸彦、並木道義、太田茂雄、鳥海道彦、山田和彦、瀬尾基治. 成層圏における微生物採集 宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-07-009, 75-79 (2007)
- [8] Yang, Y., Itahashi, S., Yokobori, S., and Yamagishi, A. (2008) UV-resistant Bacteria isolated at high altitude. Biol. Sci. Space 22, 18-25
- [9] 山岸明彦、矢野創、奥平恭子、小林憲正、横堀伸一、田端誠、河合秀幸 (2007) TANPOPO : 有機物と微生物の宇宙空間曝露と微隕石及び微生物の捕集実験. Biol. Sci. Space 21: 67-75
- [10] Yamagishi, A., H. Yano, K. Kobayashi, S. Yokobori, M. Yamashita, H. Hashimoto, M. Tabata, & H. Kawai (2008) Tanpopo: Astrobiology exposure and micrometeoroid-capture experiments. Viva Origino 36: 72-76. (和文)