

有機物・微生物の宇宙曝露と宇宙塵・微生物の捕集(たんぽぽ)

東京薬科大学生命科学部

宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

横浜国立大学大学院工学研究科

千葉大学理学部

大阪大学理学部

会津大学

福岡工業大学

放射線医学研究所

神戸大学

「たんぽぽ」ワーキンググループ

山岸明彦、河口優子、杉野朋弘、Yinjie Yang、横堀伸一

矢野創、橋本博文、田端誠、太刀川純孝、長谷川直

小林憲正

河合秀幸

中嶋悟、藪田ひかる

奥平恭子

三田肇

保田浩志

中川和道

Tanpopo: Astrobiology Exposure and Micrometeoroid Capture Experiments

Akihiko Yamagishi, Yuko Kawaguchi, Tomohiro Sugino, Yinjie Yang, Shin-ichi Yokobori

Tokyo University of Pharmacy and Life Sciences

Hajime Yano, Hirofumi Hashimoto, Makoto Tabata, Sumitaka Tachikawa, Sunao Hasegawa

ISAS/JAXA

Kensei Kobayashi

Yokohama National University

Hideyuki Kawai

Chiba University

Kyoko Okudaira

The University of Aizu

Satoru Nakajima Hikaru Yabuta

Osaka Univ.

Hajime Mita

Fukuoka Inst. Tech

Hiroshi Yasuda

National Institute of Radiological Sciences.

Kazumichi Nakagawa

Kobe Univ.

Tanpopo WG

Abstract: Terrestrial microbes may be ejected to outer space by natural events such as volcanic eruption, meteorite impact and electrostatic interactions. Microbes have been collected at high altitude up to several tens km using balloons and aircrafts. Some of the sampled microbes showed the high UV-resistance. To test the possible interplanetary migration of terrestrial life, we propose the microbe sampling experiments on International Space Station (ISS) at low Earth orbit (400 km). Ultra low-density aerogel will be exposed to space to capture micro-particles. After the curation of tracks and particles on the aerogel, the samples will be distributed to scientists to examine mineralogical, organo-chemical and microbiological characteristic of the particles. For the microbiological analysis, samples will be stained with DNA-specific fluorescence-pigment, and will be inspected with a fluorescence microscope. The fluorescent particles will be used for PCR amplification of the rRNA sequence followed by cloning and DNA sequencing. The sequence will be used to estimate the origin and properties of the captured microbes.

生命は地球と他の地球外天体との間を移動したという考え方、すなわち地球外に生命の起源を求める「パンスペルミア仮説、胚種広布仮説(panspermia)」は、生命の起源の議論のなかで古くから主張されてきた(Arrhenius (1908); Crick (1981))。火星由来の隕石中に微生物様の構造が見つけられたことで、この仮説が再び脚光を浴びた。またこのことが事実であれば、逆に、地球上に生まれた生物が隕石の衝突や火山の巨大噴火により地球の重力を振

り切り飛び出す可能性も否定できない。このような可能性を検討するため、我々はこれまで、高々度における航空機と気球を用いた微生物採集実験を行い、採集された微生物の解析を進めてきた(Yang *et al.* (2008a, 2008b, 2009, 2010))。ISS(国際宇宙ステーション)を用いることで、微生物採集高度を地球周回低軌道(約400km)にまで広げることができる。また、地球から脱出した微生物が存在するとして、それが他の天体までの移動の間、宇宙空間環境

で生存することができるのかをテストすることも重要な研究テーマである。そのため、我々は ISS 曝露部上で、微生物が宇宙空間で長期に生存するための条件の検討を行うことを、ISS曝露部上で微生物採集と合わせて提案する。

生命の起源に関して他の重要な問題として、有機化合物の前生物的生成がある。地上での汚染の無い惑星間微小粒子の直接採取実験を行うことで、この可能性を直接検証できる可能性がある。さらに、地球外で生成した有機化合物が宇宙空間の環境下でどの程度変成するのかを推定することも重要な研究課題である。この目的で、ISS上で模擬複雑有機化合物を直接宇宙空間に曝露し、その変成過程と変成によって生じる物質の解析を行うことも提案する。

我々は、これらのサブテーマを包含するミッションを「Tanpopo」と命名し、JEM/ISSの曝露部における実験ミッションとして提案した(Yamagishi *et al.* 2009, 山岸他2007, 山岸 2011)。これは、たんぽぽの綿毛のついた種子が風に乗って新天地に運ばれることを地球と地球以外の天体の間で生命や生命の材料物質が移動することに擬えて命名したものである。この提案は、ISS曝露部共用ポート第二期利用ミッション候補として採択された。その後、宇宙飛行士の船外活動の機会が極めて限定的であることから、エアロックとロボットアームを用いた計画に変更して準備が進んでいる。現在の計画では2013年HTV-4での打上を予定している。

1. 2層式エアロゲル開発

ISS上での微生物/微粒子捕集は、真空環境下で行うため、航空機/気球を使用した従来の捕集実験とは全く異なる採集方法を必要とする。ISS曝露部でのサンプリング実験では、超低密度エアロゲルを使う予定である。Tanpopoミッションの千葉大学グループは、超低密度エアロゲルを作成する技術を有する。同じ方法で作成した日本製のエアロゲルは既に、微粒子サンプリング実験のために ISS Russian Service モジュールで使われた。エアロゲルトレイの基本的なデザインは、JAXA によるMPAC-SEEDでもテストされた。

千葉大と宇宙研のチームは、2層構造とすることで、低密度と高機械強度を両立させる構造のエアロゲル開発に成功した。すなわち、 0.01mg/cm^3 という超低密度のエアロゲルを上層とし、それを機械的に支える 0.03mg/cm^3 のエアロゲルを下層とする2層構造のエアロゲルを開発した(Tabata *et al.* 2011)。

2. 宇宙空間での微生物捕集／微生物曝露実験

微生物が ISS 高度で存在するなら、それらは地球 周回軌道速度を持たなければならない。エアロゲルに対する微

生物の相対速度は、ISS の進行方向と微生物の進行方向に依存し、これらが正反対の場合に最高の値 16km/s となる。微生物を含んだ粒子を 2 段式軽ガス銃で 4km/s で加速し、エアロゲルに衝突させた。エアロゲル中の微粒子をDNAを特異的に染色する蛍光色素によって染色した。蛍光顕微鏡観察により、蛍光を発する微小粒子がエアロゲルの衝突トラック内に見いだされた(山岸他 2007; Yamagishi *et al.* 2008)。

宇宙空間での微生物の生存可能性を考える場合には強力な紫外線や放射線照射も重要なポイントである。単一の微生物の細胞が強い紫外線照射下で生存することは考えられない。しかし、微生物が鉱物内に包み込まれている場合、あるいは微生物が凝集体として固まりを形成している場合、微生物が生存する可能性は高いと考えられる。また、そのような条件下では、放射線の微生物生存に対する影響も変化することが期待される。現在、真空紫外線、紫外線Cによる影響を微生物の細胞層の厚さを変化させて生存率を評価する実験として実施している。さらに、その他の宇宙因子(γ 線、重粒子線、温度サイクル等)の生存率に対する評価を行い、宇宙実験に適切な生物種の選定を行う予定である。

また、地球由来の生物の存在を最も感度良く検出する手法は、PCRを用いたDNAの増幅である。すべての生物が持つ小サブユニットリボソーム遺伝子を増幅するプライマーを用いて、捕集した微粒子内の微生物に由来する小サブユニットリボソーム遺伝子の増幅を試みる計画である。いったん小サブユニットリボソーム遺伝子が増幅されれば、その塩基配列を解読することで、その生物の分類学的位置を推定することができる。そこから、どのような生物なのかその特徴を推測することができる可能性がある。予備的に、微生物が1から10細胞を含むような溶液中で16SrRNA 遺伝子のPCR増幅が確認された(Tabata *et al.* 2011)。

3. 微小隕石様粒子のISS上での捕集

隕石の観察と収集は惑星科学の研究の中で、その母天体の研究を行うために進められてきた。黄道帯のダスト雲は地球表面からも観察できる。宇宙塵は南極で採取されたアイスコアに見いだされている。惑星間ダスト粒子は航空機を使って成層圏で採取されている。また、地球周回低軌道上の人工天体の表面への微隕石衝突が報告されている。これらの粒子の解析から、それらの起源とそれらの母天体についての情報を得ることができる。しかし、これまでの微隕石解析では地球由来の汚染の可能性が完全に除外できない。そこで、汚染のないかつ、できる限り破壊されていない微小隕石の捕集が望まれる。そのもっとも有望な採取法は、すでにスターダストミッション等で用いられているエアロゲルによる直接捕集であり、それにより捕

集による破壊、変成の少ない微粒子の獲得が期待できる。

4. 宇宙空間での有機化合物の捕集

多種多様な有機化合物が隕石(炭素質のコンドライト)と彗星のような地球外天体で見いだされてきた。ChybaとSaganは地球外天体に由来する100kt以上の炭素が地球に届けられたと推定している(Chyba & Sagan (1992))。実際に、アミノ酸や核酸塩基のような生物関連有機化合物が炭素質コンドライトの熱水抽出物内に見いだされている。複雑有機化合物は、ハレー彗星探索のための宇宙観測機に搭載された質量分析装置による直接的な分析でも見いだされた(Kissel & Krueger (1987))。スターダストミッションにより回収された彗星のちりの予備的な有機分析でもまた、Wild2 彗星コア(Standford *et al.* (2006))で複雑な有機化合物の存在が示された。我々は、Tanpopo プロジェクトの一部として、有機化合物の分析のために、IDPの捕集を提案する。

採集された微粒子を取り出して、地球上の生物には含まれないアミノ酸の定量を行う事、微粒子の微小ビームX線蛍光測定によって有機物を解析する予定である。

5. 今年度の発表では

今回の発表では、採集された微粒子を蛍光顕微鏡で観察して微生物を同定するための方法の検討結果と、微生物遺伝子を増幅してその遺伝子を解析する方法の検討結果を報告する。

まず、微生物と鉱物からの蛍光の波長依存性を比較した。微生物をDNA特異的色素で染色した場合、緑色、赤色、青色で観察した場合明確な波長依存性が認められる。鉱物からの蛍光は、どの波長でも観察されることから、両者は蛍光の波長依存性で区別可能であることがわかった。

次いで蛍光の消光過程を解析した。微生物からの蛍光は急速に消光するのに対し、鉱物からの蛍光はほとんど消光しなかった。従って両者は、その消光速度でも区別できる事が明らかとなった。

さらに、採集された微生物の遺伝子の増幅とその解析可能性の検討を行った。予め培養した微生物を希釈して極少数の細胞(10細胞以下)になるように希釈した溶液を作製し、その細胞を元にリボソームRNA遺伝子の試験管内増幅を行った。遺伝子の増幅に成功し、その塩基配列を解析したところ、培養した菌の塩基配列であることが確認できた。

5. 終わりに

ISS 上で生命の痕跡を直接検証しようという試みは、これまで無かった。この点で、Tanpopo はユニークな提案である。Tanpopo のコアグループは、エアロゲルの作製、細菌の分析、有機化合物分析と微小隕石分析においてすでに長い経験を有している。その上で国内外の研究グループと広く連携し、研究を推進する予定である。

参考文献

- Arrhenius, S. (1908) *Worlds in the Making-the Evolution of the Universe* (translation to English by H. Borns). Harper and Brothers Publishers, New York.
- Chyba, C. and C. Sagan (1992) Endogenous production, exogenous delivery and impact-shock synthesis of organic molecules: an inventory for the origins of life. *Nature* 355, 125-132.
- Crick, F. (1981) *Life Itself*. Simon & Schuster, New York.
- Kissel, J. and F. R. Krueger (1987) The organic component in dust from comet Halley as measured by the PUMA mass spectrometer on board Vega 1. *Nature* 326, 755-760.
- Sandford, S. A., Aléon J., Alexander, C. M. O'D., Araki, T., Bajt, S., Baratta, G. A., Borg, J., Bradley, J. P., Brownlee, D. E., Brucato, J. R., Burchell, M. J., Busemann, H., Butterworth, A., Clemett, S. J., Cody, G., Colangeli, L., Cooper, G., D'Hendecourt, L., Djouadi, Z., Dworkin, J. P., Ferrini, G., Fleckenstein, H., Flynn, G. J., Franchi, I. A., Fries, M., Gilles, M. K., Glavin, D. P., Gounelle, M., Grosse, F., Jacobsen, C., Keller, L. P., Kilcoyne, A. L. D., Leitner, J., Matrajt, G., Meibom, A., Mennella, V., Mostefaoui, S., Nittler, L. R., Palumbo, M. E., Papanastassiou, D. A., Robert, F., Rotundi, A., Snead, C. J., Spencer, M. K., Stadermann, F. J., Steele, A., Stephan, T., Tsou, P., Tylliszczak, T., Westphal, A. J., Wirick, S., Wopenka, B., Yabuta, H., Zare, R. N., and Zolensky, M. E. (2006) Organics captured from comet 81P/Wild 2 by the stardust spacecraft. *Science* 314, 1720-1724.
- Tabata, M., Y. Kawaguchi, S. Yokobori, H. Kawai, J. Takahashi, H. Yano and A. Yamagishi (2011) Tanpopo Cosmic Dust Collector: Silica Aerogel Production and Bacterial DNA Contamination Analysis. *Biol. Scie. Space* 25, 7-12
- 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

- 山岸明彦(2011)たんぽぽ計画:有機物・微生物の宇宙曝露と宇宙塵・微生物の捕集。日本惑星科学会誌「遊星人」20: 117-124
- Yamagishi, A., H. Yano, K. Kobayashi, K. Kobayashi, S. Yokobori, M. Tabata, H. Kawai, M. Yamashita, H. Hashimoto, H. Naraoka, & H. Mita (2009) TANPOPO: astrobiology exposure and micrometeoroid capture experiments. Transactions of Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Space Technology Japan, Vol. 7, pp. Tk49-55.
- Yang, Y., S. Itahashi, S. Yokobori and A. Yamagishi (2008a) UV-resistant Bacteria isolated at high altitude. Biol. Scie. Space. 22:18-25.
- Yang, Y., S. Yokobori, J. Kawaguchi, T. Yamagami, I. Iijima, N. Izutsu, H. Fuke, Y. Saitoh, S. Matsuzaka, M. Namiki, S. Ohta, M. Toriumi, K. Yamada, M. Seo, & A. Yamagishi (2008b) Investigation of cultivable microorganisms in the stratosphere collected by using a balloon in 2005. JAXA-RR-08-001: 34-42
- Yang, Y., T. Itoh, S. Yokobori, S. Itahashi, H. Shimada, K. Satoh, H. Ohba, I. Narumi, & A. Yamagishi (2009) *Deinococcus aerius* sp. nov., isolated from the high atmosphere. Internatl. J. Syst. Evol. Bacteriol. 59: 1862-1866
- Yang, Y., T. Itoh, S. Yokobori, S. Itahashi, H. Shimada, K. Satoh, H. Ohba, I. Narumi, & A. Yamagishi (2010) *Deinococcus aetherius* sp. nov., isolated from the stratosphere. Internatl. J. Syst. Evol. Bacteriol. 60: 776-779