

PRIMITIVE BODY EXPLORATION IN THE SOLAR SYSTEM AND ASTROBIOLOGY

Hajime YANO

Planetary Science Division, Institute of Space and Astronautical Science
3-1-1 Yoshinodai, Sagamihara, Kanagawa 229-8510 JAPAN
Fax: 042-759-8457 E-mail: yano@planeta.sci.isas.ac.jp
(Received 20 August 2002, Accepted 21 August 2002)

Key Words: Asteroids, Astrobiology, Comets, Leonids, Meteors, Meteorites, Micrometeoroids, MUSES-C, Solar System Minor Bodies, Planetary Exploration,

Abstract

Origins of planetary systems and life are common goals among astronomers, biologists and planetary scientists. In the context of planetary exploration, astrobiology can be defined an interdisciplinary subject which answers fp, ne and fl parameters for the Drake-Sagan equation. The new concept of habitable zones also demands better understanding of primitive bodies of the solar system while “cosmic dust” is one of the key components that relates all the evolutionary stages (from the birth to the death) of the planetary systems and terrestrial life, for both the panspermia theory and the Urey-Miller paradigm. In particular, it is essential for us to properly conduct optical and spectroscopic observations of meteor showers such as the Leonid MAC and in-situ measurement and sample return missions to minor bodies such as MUSES-C, in order to connect between ground observation data of asteroids and comets and analytical data of cosmic dust and meteorite samples. For the latter, organic and prebiotic material analyses are important for both scientific outputs and space quarantine issues. Thus the primitive body exploration program should seek more collaboration with the astrobiology community not only within the current program but also for new missions in the coming decade.

太陽系始原天体探査と宇宙生物学

矢野創

文部科学省宇宙科学研究所・惑星研究系
〒229-8510 神奈川県相模原市由野台 3-1-1
Fax: 042-759-8457 E-mail: yano@planeta.sci.isas.ac.jp

キーワード：小惑星、宇宙生物学、彗星、しし座流星群、流星、隕石、宇宙塵、MUSES-C 探査機、太陽系始原天体、惑星探査

1. Drake-Sagan方程式とRare Earth仮説から見た「宇宙生物学」

約10年前にNASA前長官が、今後NASAの宇宙科学ミッションは全て、唯一のキーワード”Origin”の追求を目的とする宣言して以来、宇宙、銀河、太陽系、地球、生命それぞれの起源と現在の姿へ進化するための条件を研究する潮流が、世界各地で台頭してきた。その好例が「宇宙生物学（AstrobiologyないしExobiology）」である。現在まさに形成されつつある、この新しい学問体系をここでは、いわゆる「Drake-Sagan方程式」の f_p （恒星が惑星系を持つ確率）、 n_e （生命が生存可能な環境を持つ惑星が誕生する確率）、 f_l （そこに生命が誕生する確率）の三つのパラメータに関わる学際領域だと定義してみよう。なお「Drake-Sagan方程式」とは、現在銀河系内に存在する、地球人類と電磁波を使って交信可能な知的文明の数(N)を求める式で、次のように表される [1]。

$$N = R^* \cdot f_p \cdot n_e \cdot f_l \cdot f_i \cdot f_c \cdot L \quad (1)$$

ただし、 R^* =銀河系内で一年間に誕生する恒星の個数、 $f_i=f_l$ の生命体が知的文明を形成する確率、 f_c =その知的文明が電磁波を使った星間通信技術を獲得する確率、 L =その知的文明が星間通信技術を維持できる年数、である。「宇宙生物学」に関わるパラメータ f_p 、 n_e 、 f_l のうち、近年の観測天文学は、太陽系外惑星系の発見とガスないし固体惑星の探索を担って f_p と n_e に制約を与えつつある。一方、惑星科学では太陽系をモデルケースとしてその n_e と f_l を求めるべく、ナノバクテリアが生存できた火星古環境の条件や、木星のガリレオ衛星内部の水マントル、土星衛星タイタンの大気などの探査が計画されている。ここで天文観測における n_e への制約は、主に固体惑星が、液相の水を安定的に保持できる表面温度

を持つ距離に中心星から離れているかどうかである。これを「周星ハビタブルゾーン・CHZ(Circumstellar Habitable Zone)」と呼び、現在の太陽系では日心距離（半径）0.9-1.5 AUほどのリング状の領域である。

なお、ハビタブルゾーンの成立条件について詳説した「Rare Earth 仮説」(Fig. 1)では、 n_e を制約するCHZを規定する項目には中心星からの日心距離以外にも、「木星型惑星の存在」、「惑星軌道移動の難易度」、「双子衛星（月）の存在」、「プレートテクトニクスの有無」、「小天体の衝突頻度」などが指摘されている[2, 3]。さらに同仮説には、「銀河系ハビタブルゾーン・GHZ(Galactic Habitable Zone)」という概念も提唱されており、それを規定するのは中心星が「渦巻き銀河thin disk内のらせん腕の中間」や「活発な星生成領域（太陽系は銀河中心から約8.5kpc）」に位置することである。なぜなら、それらによって「G型星の形成確率」、「Type II 超新星爆発の発生頻度」、「ローカルな中心星の軌道安定度」、「重力擾乱の頻度」、「固体惑星を形成するための金属存在度（Metal/H）」、「中心星の世代」などの諸条件が規定されるからである。

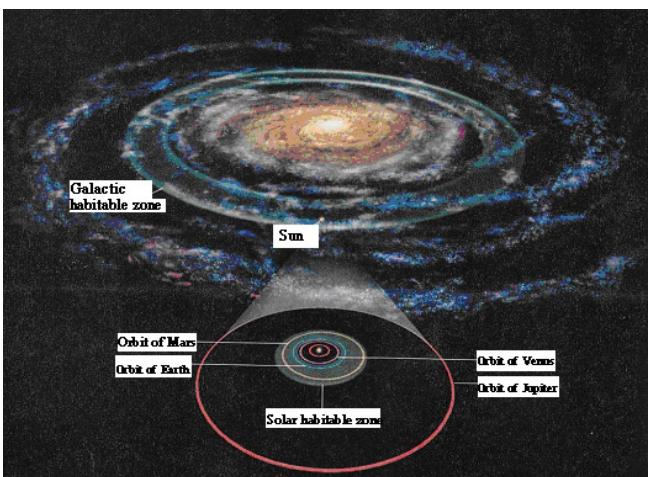


Fig. 1. Concept of circumstellar and galactic habitable zones proposed by the “Rare Earth Hypothesis”. (Courtesy: Scientific American) [3]

2. 宇宙塵から惑星系へ

ハッブル宇宙望遠鏡(HST)が写したFig. 2には、死を迎える星と、生まれつつある星が同一画面にある。その境界線に煙のように写っているものが、宇宙塵である。宇宙塵は宇宙の始まりからそこにあるのではなく、前の世代の星が爆発する際に放出された元素の中から生まれ、現世代の星たちに原材料として取り込まれていく。過去10年間に、太陽系以外の惑星系、あるいは将来惑星系に成長するだろう原始惑星系円盤が相次いで発見されるようになり、すでに百個以上が確認されている。多くは宇宙塵の円盤として発見されており、中心星の誕生、円盤の生成から惑星系の成長、主系列星としての進化、そして物質を放出する爆発まで、恒星の一生における各ステージに、宇宙塵が様々な形で関与していることが改めて分かってきた。

原始太陽系の場合、まず約46億前に星間ガスと塵の雲の中から誕生し、やがて塵が集積して直径数km程度の「微惑星」に成長してから、現在の惑星や衛星のように大きな天体を形成していった。その結果、現在の太陽系には、太陽とその周りを巡る9つの惑星、それらの周りを巡る90以上の衛星、さらに多くの小天体が存在している(Fig. 3)。特に太陽系の外縁にある「オールト雲」や「エッジワース・カイパーベルト天体(EKBO)」、そこから内惑星領域へ運ばれる「彗星」、そして火星軌道と木星軌道の間の、メインベルトと呼ばれる空間を中心に、現在十万個以上発見されている「小惑星」は、「原始太陽系の化石」だと考えられている。地球には大陸移動や大気・海中の風化作用があり、表面の様子は刻々と変化する。そのため、現在発見された最も古い地表の岩石でも39.6億歳ほどである。それよりさらに昔、太陽系や生命の源ができた時代を調べるには、より早い時期に進化を終えた彗星、小惑星、EKBOなどを探査する必要がある。これら「始原天体」は、巨大なサイズのいくつかの例外を除けば、地球や月ほど大きく成長しなかったために重力や内部圧力が弱く、あまり熱が蓄えられずに、中心核やマントルや地殻に「分化」する間もなく冷えてしまったのである。

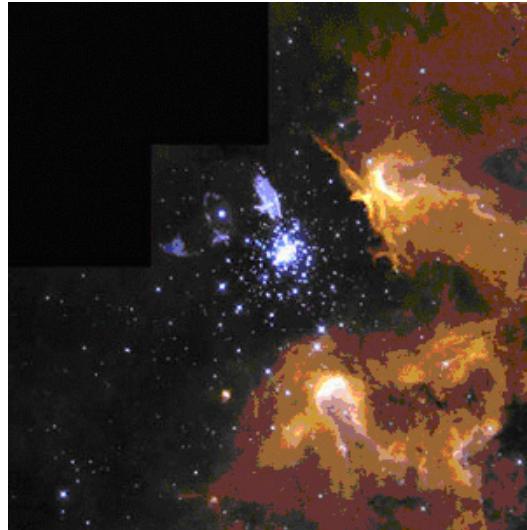


Fig. 2. Star birth, disk formation and death of old stars within one image by the Hubble space telescope. (Courtesy: NASA/STScI)

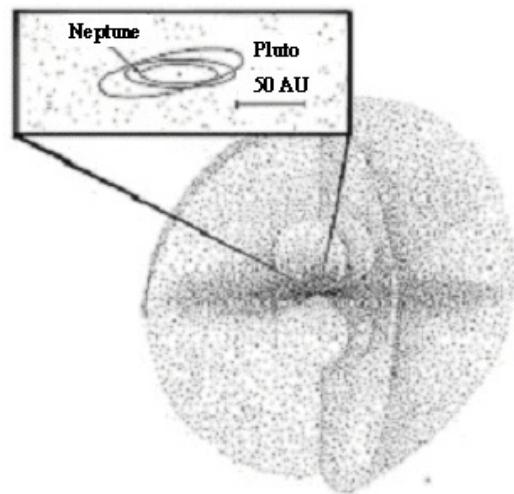


Fig. 3. Idea of the current state of the solar system. (Modified from D. Yeomans (JPL))

3. 宇宙塵研究

そうした始原天体のかけらである宇宙塵は、天体観測と宇宙物質分析の研究を橋渡しする物質である。現在でも毎年2-6万トンもの宇宙物質が地球に降下していると推定されているが、その99.9%は1mmより小さい宇宙塵で占められている(Fig. 4)[4]。つまり、隕石と同様に宇宙塵も綿密に調べることで初めて、我々は太陽系全体の物質進化の姿を理解できる。特に、隕石サイズでは「普通コンドライト」が最も主要な分類であるが、宇宙塵サイズになるとむしろCM, CI炭素質コンドライトのように、はるかに豊富に有機物を含むタイプが主要な分類となる。地球上に

降下している絶対量では後者が前者を卓越しており、「宇宙生物学」の観点からも、この事実は注目に値する。

宇宙塵の研究は、観測分野では17世紀のCassiniによる「黄道光」の起源の解明、採集分析の分野では19世紀の英国の海洋探査船HMS Challenger号による深海底の泥からの宇宙起源球粒「コズミックスフェリュール」の発見にまで遡る[5]。20世紀後半には成層圏や極地氷床からの採集も始まった。国立極地研究所は、1997年と1999年に派遣された南極観測隊によって、南極の氷を溶かして宇宙塵を大量に採集した。一方、宇宙空間では、1957年のスプートニク1号の打ち上げ直後から、微粒子の超高速衝突が人類の宇宙活動に与える危険性を評価するため、微粒子のその場計測や採集も開始された。1980年代にス

ペースシャトルの運用が始まると、大気に突入する前の宇宙塵を地球低軌道で捕まえて、地上に持ち帰れるようになった。また長期間の運用が終わった人工衛星を回収して、その表面にできた宇宙塵による衝突痕の精密検査も盛んに行われるようになった。衛星に超高速で衝突する宇宙塵は、その衝突痕から、地上の試料にはない軌道情報（速度、飛来方向、衝突時刻）や物性、形も求められる可能性がある。日本でも1996年、10ヶ月間宇宙に曝露されたSFU衛星がシャトルで回収され、表面上の微小クレーターが詳細に調査された。また現在、国際宇宙ステーション上に、日本独自の「ダスト捕集器」が搭載されている。さらに、日本の火星探査機「のぞみ」を含む、世界中の星探査機の多くに、「ダスト計測器」が標準装備されている。

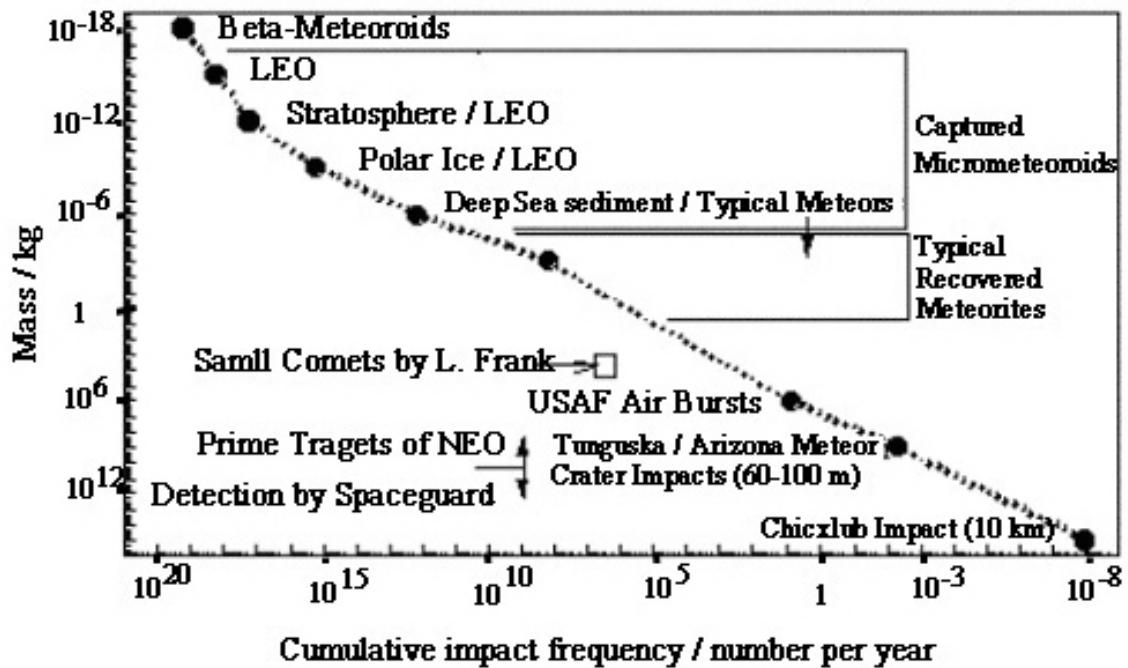


Fig. 4. Extraterrestrial material influx to the Earth

4. 生命の起源：星間塵から生命前駆物質まで

生命の定義を「自らと同じ遺伝情報を再生産できる機械」とすると、DNAとRNAを持つまでに進化すれば、生命と呼んで良いだろう。地球型生命の誕生・進化には、適切な温度下で水と有機物が安定的に存在しなくてはならない。そこで、それらは原始地球の上で合成されたのであり、「地球がなければ生命はない」とするUrey & Miller以来の仮説が、以前より支持されていた。

一方、1980年代のハレー彗星探査により、短周期

彗星の核にはCHON粒子が10質量%以上も含まれることが判明した(Fig. 5)[6]。そこで、彗星が原始地球に衝突したときに水や有機物の一部がもたらされたとする説が提唱された[7]。ところがChyba & Saganらは、巨大な彗星が地球に時折まばらに衝突するよりも、小さいが頻繁かつ大量に地球に降り注ぐ宇宙塵に含まれている有機成分の方が、地球にとってはより効果的な運搬手段だと反論している[8]。実際、地球表面で採集される宇宙塵試料の鉱物組成は、普通コンドライトよりも、炭素が豊富なCM, CI炭素

質コンドライトに似ているものが多い[9]。さらに Murchison隕石では地球生命同様に L体光学活性アミノ酸がD体よりも18%も卓越していることや、太陽系誕生以前に形成された「星間物質（ダイヤモンドを含む）」も、Allende隕石中に発見された(Fig. 6)[10]。また、メインベルト小惑星の外縁より飛来した軌道を持ち、2000年1月にカナダのターギッシュ湖上空で爆発したTagish Lake隕石の破片には、有機物が6質量%も含まれていた（通常の炭素質コンドライトは2%ほど）(Fig. 7)[11]。

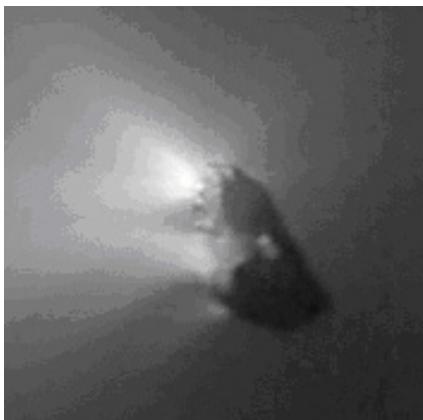


Fig. 5. Nuclei of comet Halley imaged by Giotto spacecraft.
(Courtesy: ESA) [6]



Fig. 6. Murchison meteorite. [10]

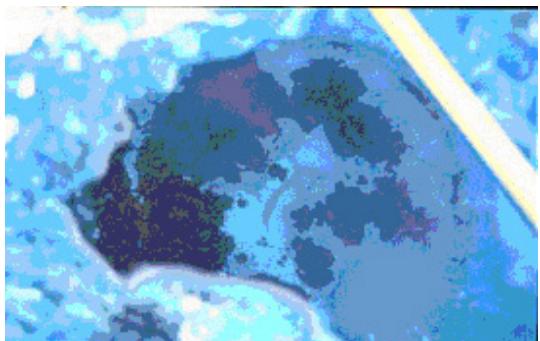


Fig. 7. Tagish Lake meteorite. [11]

1998年には、米国テキサス州とモロッコで落下が目撃・回収された普通コンドライト（モナハン、ザグ隕石）を割ると、岩塩結晶の中に閉じ込められた「液相の水」が発見された(Fig. 8)[12]。これは、両隕石の母天体である小惑星の形成当初1000万年ほどには、母天体内部に、短期間でも「液相の水」が存在したことを示唆している。そして2001年に筆者らのグループは、独自に開発した可視・紫外波長域の分光ハイビジョンシステムを使って、標高約4100mのハワイ島マウナケア山頂や日本の野辺山からのしし座流星雨の分光観測を行い、流星起源と思われる水酸基(OH)を、世界で初めて発見した(Fig. 9)[13]。このように、液相の水や岩塩、糖類、そして「生命前駆物質」としてのアミノ酸を含む数十種類の有機物は、今でも宇宙空間から地球表面にもたらされている(Fig. 10)。

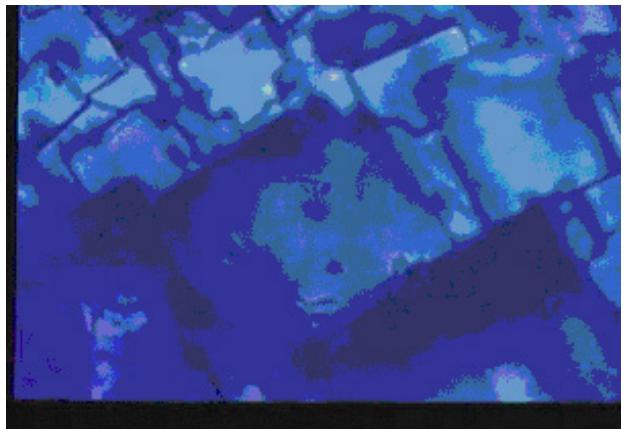


Fig. 8. Extraterrestrial liquid water in halite found inside the Monahan H5 ordinary chondrite. (Courtesy: M. Zolensky (NASA/JSC)) [12]

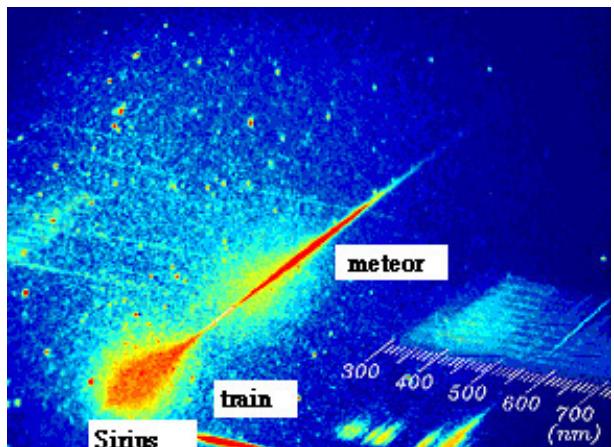


Fig. 9. Visible-UV spectroscopy of the Leonid fireball in 2001 imaged at the Subaru site, Mauna Kea, Hawaii. (Courtesy: S. Abe, H. Yano, et al.,) [13]

こうした事実は、「パンスペルミア説」と原始地球での生命発生説共に、少なからぬ制約を与えるだろう。つまり、地球生命を料理に例えると、昔は食材も地球の「家庭菜園」で作られたと思っていたのに、実は食材や調味料はほとんど宇宙から運ばれており、原始地球はそれを調理する「台所」に過ぎないという、新しいパラダイムである。

この場合、有機物は宇宙空間でどのようにしてできただろうか？成層圏で採集される宇宙塵の一部(CP-IDP; Chondritic Porous Interplanetary Dust Particles)は、0.1ミクロンオーダーの構成粒子がフラクタル構造をして結合している(Fig. 11)。Greenberg

のモデルによると、さらに各構成粒子の中心には岩石質のコアがあり、有機物が周りを取り囲み、その外側に氷が覆っているという、多層のシェル構造になっている[14]。この構造によって、紫外線が当たると氷中のCHON無機物が化合されて(=化学進化)有機物となり、さらに有機物同士での反応が進み、アミノ酸のような大きな分子ができていくと考えられる(Fig. 12)。一方では、水蒸気大気とマグマの海に覆われていた原始地球と似た環境(弱還元大気)に、微惑星の超高速衝突が起こると、やはり前駆物質が形成されるという実験的研究も進められている[8]。

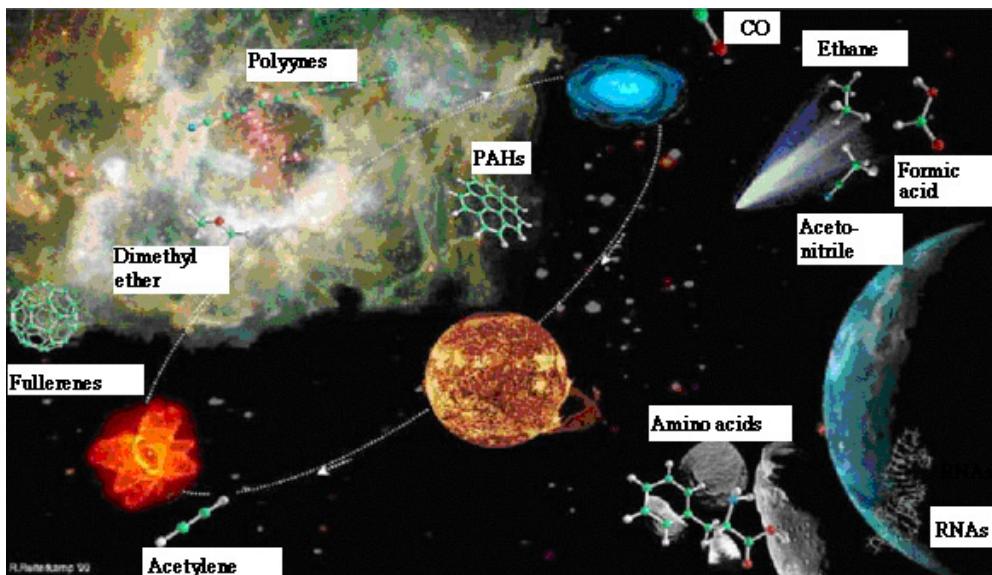


Fig. 10. Examples for precursor organics of life. (Courtesy: ESA)

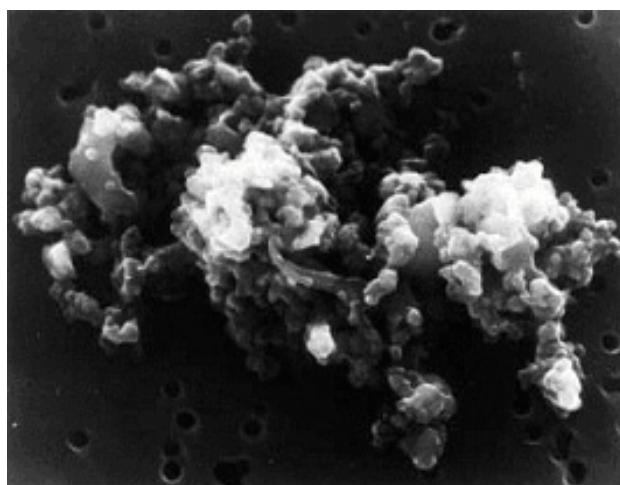


Fig. 11. A 10-micron chondritic porous interplanetary dust particle captured in the stratosphere. (Courtesy: NASA/JSC)

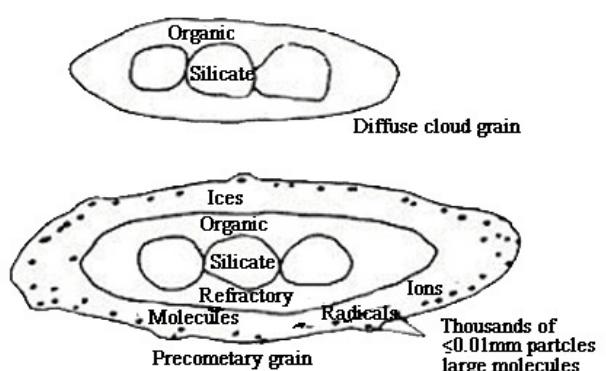


Fig. 12. Greenberg model of the shell structure of cosmic dust monomer grains. (Courtesy: M. Greenberg (Leiden University)) [14]

5. 彗星探査としての流星科学：しし座流星雨

流星群とは、特定の彗星を母天体とする宇宙塵が、地球軌道と交差して大気圏を通過するときに起こる発光現象である。その一瞬の光を測光・分光することによって、母天体核の過去の活動レベルや組成、放出粒子のサイズ分布などに制約を与えることができる。「流星群」の観測は、いわば地球大気を巨大な微粒子検出器に見立てた「宇宙に出ない彗星探査」と言えるだろう。

「しし座流星群」は、1998年2月末のように33.2年毎に太陽に最接近する短周期彗星、テンペル・タットル彗星から放出された塵が密集した「ダストチューブ」の中を、毎年11月半ばに地球が通過する際に、発生する定常流星群である。普段は活動の低い群として知られているが、母彗星が回帰する前後数年間に限り、ZHR数千以上流れる「流星雨」を、歴史上たびたび発生させてきた。最近では2001年11月18-19日に、日本を含む東アジアで、ほぼ予報時刻通りに、今世紀最初にして最大規模のしし座流星雨が出現した。

1998, 1999, 2001年にNASAやISASを中心として実施された「しし座流星群国際航空機観測ミッション (Leonid MAC)」の科学目的は、ピークの出現が予報されている地域上空に観測飛行機を飛ばし、天気に左右されることなく、出現数計測、サイズ分布、立体観測による軌道決定、複数の波長域での分光、大気光観測など、あらゆる角度から一つの流星群を徹底的に解剖することであった[15]。日本からは、CCDカメラの1万倍以上の感度を持つ撮像倍増管をつけた、可視紫外線対応型超高感度ビデオカメラ(HDTV-II)を搭載した。Fig. 13は、1999年に地中海上空から撮影したしし座流星雨である。高度約100kmの上層大気にひっきりなしに降り注ぐ彗星塵の様子は、まるで原始地球に毎日大量の生命前駆物質を降らせていた太古にタイムスリップしたかのような錯覚を、見る者に抱かせるほどだった。

ここで定量的な議論が必要になるのは、水酸基や有機物が可視・紫外・赤外分光などで検出された場合、それぞれの到達温度によってどこまで破壊、あるいは保存されるかについてである。果たして、地球上の生命を育んだ前駆物質の何割が宇宙起源なのか？あるいはそれが生命に進化する過程のどこからを原始地球環境が担ったのか？こうした生命誕生における「宇宙物質」と「地球環境」の役割分担を

論じる段階での、宇宙生物学と惑星探査の連携の強化が望まれる。流星群分光以外の一例としては、今後国際宇宙ステーションなどで捕獲される宇宙塵中に有機物を探す努力があげられるだろう。それには、「ngサイズの有機化学・分光学」という分析技術の革新が望まれる。



Fig. 13. The 1999 Leonid meteor storm filmed with the HDTV-II over the Mediterranean. (Courtesy: NHK, H. Yano (ISAS), A. Nakanishi (Tenmon Guide))

6. 小惑星と人類の関係、探査の意義

彗星と小惑星のうち、特に地球軌道に近づくものを「近地球型小天体 (NEO)」と呼ぶ。一部は地球と互いの軌道が交差するため、過去に何度も地表に衝突している。「K-T境界」と呼ばれる6500万年前の地層には世界中で、地球表面にはほとんどない微量元素の濃縮が見られる。そこで、恐竜を含む当時の生物種の95%が短期間に絶滅したのは、大きさ10km程度のNEOの衝突を引き金とした、全地球規模での環境の激変を原因とする説が、近年有力になっている(Fig. 14)[16]。つまり始原天体は、地球生命の起源と生物種の終焉の両方に関わる天体である[17]。そのため始原天体探査は、原始太陽系の物質的化石という意義だけでなく、「宇宙生物学」の中でも、火星やエウロパと並んで重要な位置を占めている。



Fig. 14. An artist's impression of a 10-km sized asteroid impacting on the Earth. (Courtesy: NASA/ARC)

太陽系に広く分布する小惑星は、いまや十数万個見つかっている。その全てに探査機を送ることはできないし、また送る必要もない。小惑星の分類と統計は本来、何万個も観測された望遠鏡によるデータと、隕石や宇宙塵を分析した顕微鏡データによって達成される。小惑星は地上分光観測から、最低3つのスーパークラス(Primitive, Metamorphic, Igneous)、あるいは1ダース程の主要なスペクトル型(D, P, C/K, T, B+G+F, Q, V, R, S, A, M, Eなど)に分けられ、

各存在頻度は太陽からの距離によって異なる(Fig. 15)[18]。

小惑星帯の一番内側にはS型やE型、その外側にはM型、次にC型、さらに外側にはP, D型がそれぞれ多い割合で分布しており、小惑星帯内では原始太陽系の形成後も、日心距離方向には構成物質があまり混ざれなかつたことが予想される。現在何らかのスペクトル型が判明している小惑星は、軌道が確定しているものの約1割に当たる1200個程度であり、その絶対数はS型とC型が多く、M型がそれらに続く。

一方で、小惑星の分光パターンは、天体表面の組成、地形、サイズ分布、粒形、宇宙風化などに影響されることも判明している。さらに母天体が明らかな隕石試料は現時点では月、火星、小惑星ベスタ起源しかない。つまり起源の明らかな試料を持ち帰り、分析データと観測データを「橋渡し」することこそが、小天体探査ならではの役割である。その成果に基づいて、今まで蓄積された膨大な「宇宙塵・隕石」試料を、彗星起源か小惑星起源かそれ以外に分類できれば、各々が地球へ降る割合を直接求められるようになる。そこで異なるスペクトル型それぞれの代表例を訪れてサンプルを持ち帰り、隕石・宇宙塵試料や地上観測との対応をつけ、「小惑星の博物学」を早期に決着させることが、小天体探査の最重要課題の一つとなる。MUSES-Cは世界に先駆けて、その先陣を切る。

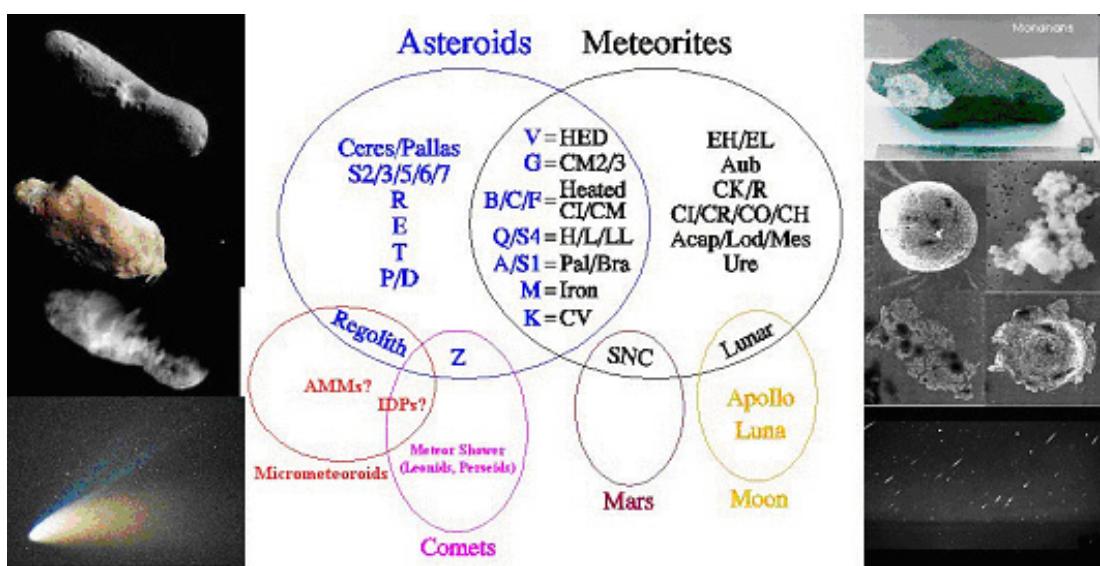


Fig. 15. Connecting between spectroscopy of minor bodies and analyses of meteorite and cosmic dust samples.

7. 世界初の小惑星サンプルリターン・MUSES-C計画

2001年に宇宙科学研究所が掲げた「日本の宇宙科学の将来構想」における「宇宙科学の現在の目標」として、太陽系探査では「太陽系の起源」、「惑星の進化と多様性」、「生命の発生・進化の環境」、「太陽系プラズマ現象の解明」が掲げられた。MUSES-Cに代表される小天体探査において、始原天体の分化・未分化状態の理解、隕石・宇宙塵試料との相関、生命前駆物質の生成・進化を探ることは、上記目標の前三項目と直接関わる[19]。

世界初の小惑星サンプルリターン計画、宇宙科学研究所のMUSES-Cは、原稿の執筆時点で2002年の11月か12月ごろ、鹿児島県の内之浦からM-V型ロケットによって打ち上げられる予定である[20]。探査機は $1.6 \times 1.1 \times 1.0$ mの直方体で、重量は燃料を充填しても約500 kgとコンパクトである。工学試験宇宙機としてのMUSES-Cは、(1)電気推進エンジン、(2)自律航法、(3)微小重力下での試料採集、(4)惑星間軌道からの直接大気再突入、の四つの新技術を検証する (Fig. 16)。

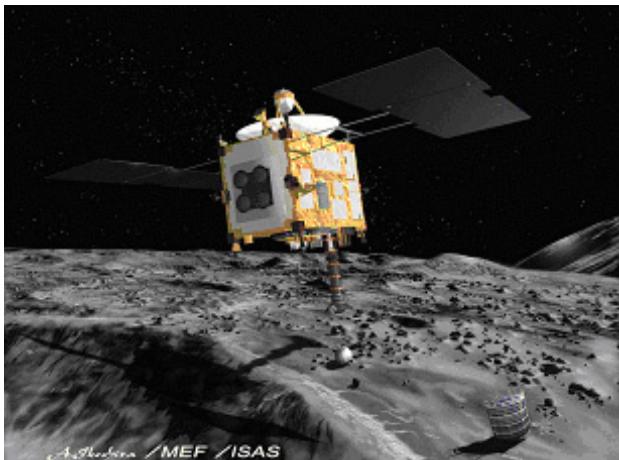


Fig. 16. An artist's impression of the MUSES-C spacecraft descending the asteroid surface for sampling. (Courtesy: A. Ikeshita, MEF, ISAS)

MUSES-Cが訪ねる小惑星は、「1998SF36」と呼ばれるNEOである。地上からの光学およびレーダー観測の結果、およそ $300\text{m} \times 600\text{m}$ の楕円球状であることが分かった。その可視・赤外スペクトル型は、米国のNEARシューメイカー探査機が訪問した、何十倍も大きなNEO「エロス」と同じ、S(IV)型であった[21, 22]。S型は小惑星の中で最も多いタイプであり、熱的分化をした天体の破片ではなく、始原的な微惑星の生き残りだと考えられている。一方、地

上の隕石に最も多い「普通コンドライト」の分光パターンとS型のそれが完全には一致しないことが、長い間「小惑星と隕石のパラドックス」として未解決であった。近年、宇宙塵の衝突などの「宇宙風化作用」によって普通コンドライトの一部が赤く変成すると、その分光パターンがS(IV)型に似てくることが実験的に示された[23]。MUSES-Cで追認できれば、この長年の問題にも終止符が打てよう。

2005年夏に1998SF36に到着したMUSES-Cは、小惑星とほぼ同じ軌道に入って、小惑星と伴走する。1998SF36は約12時間で一回自転するため、MUSES-Cは3ヶ月伴走することで、小惑星の全表面の地形を撮影したり、X線や赤外線の分光によって主要な元素や鉱物を調べたり、レーザー高度計によって凹凸を測る。また、小惑星表面の摩擦を反力として利用し、微小重力環境でも移動できる小型のホッピングロボット「MINERVA」を投下し、地形の立体画像の取得や表面の温度測定も試みる。その後、表面物質のサンプル採集を最高3ヶ所で行い、同年末に現地を後にする。地球に帰ってきて、帰還カプセルに納められたサンプルが地上研究者の手元に届くのは、2007年夏の予定である。

8. 重力のない世界でのサンプル採取

NEO・1998SF36の重力は、わずか地球の数万分の1である。しかも小惑星は、実際その場に行くまで採集箇所の表面が、レゴリスで覆われているのか、岩盤が露出しているのか分からぬ。そこで、MUSES-Cの重要な開発要素の一つは、微小重力環境下のどのような表面状態からでも確実に試料採集できる、単一の装置を製作することであった。数々のアイディアが試された後、小惑星表面に弾丸を発射して吹き飛ばされた破片を採集する方法が採用された。小惑星に降下した探査機はホーンと呼ばれる筒状の装置を表面に接触させて、弾丸を発射する。弾丸が当たって砕けた表面の破片は、ホーンの中を反射しながら探査機内部に集められる。

この実証試験は、地上実験は勿論のこと、弾道飛行実験や、深さ約140 mの坑道跡地に作られたMGLAB落下塔（岐阜県土岐市）で何度も繰り返された[24]。MGLABでは落下ごとに4.5秒間、小惑星の表面と同じレベルの微小重力が再現できる。直径約1 cmの弾丸を秒速300 mで、様々な標的（耐火煉瓦、月面レゴリスの模擬砂、ガラスビーズなど）に

撃ち込む実験を繰り返した。Fig. 17は、表面が模擬岩盤(耐火煉瓦)と軟らかい模擬レゴリスについて、1Gおよび微小重力下で、弾丸衝突によって碎かれた破片や舞い上がった砂の総量のうち何割が探査機に採集されたかを、まとめたものである。その結果、岩盤では地上と微小重力共に10~20%ぐらい採集できるが、レゴリスでは両者に大きな違いが生じる。

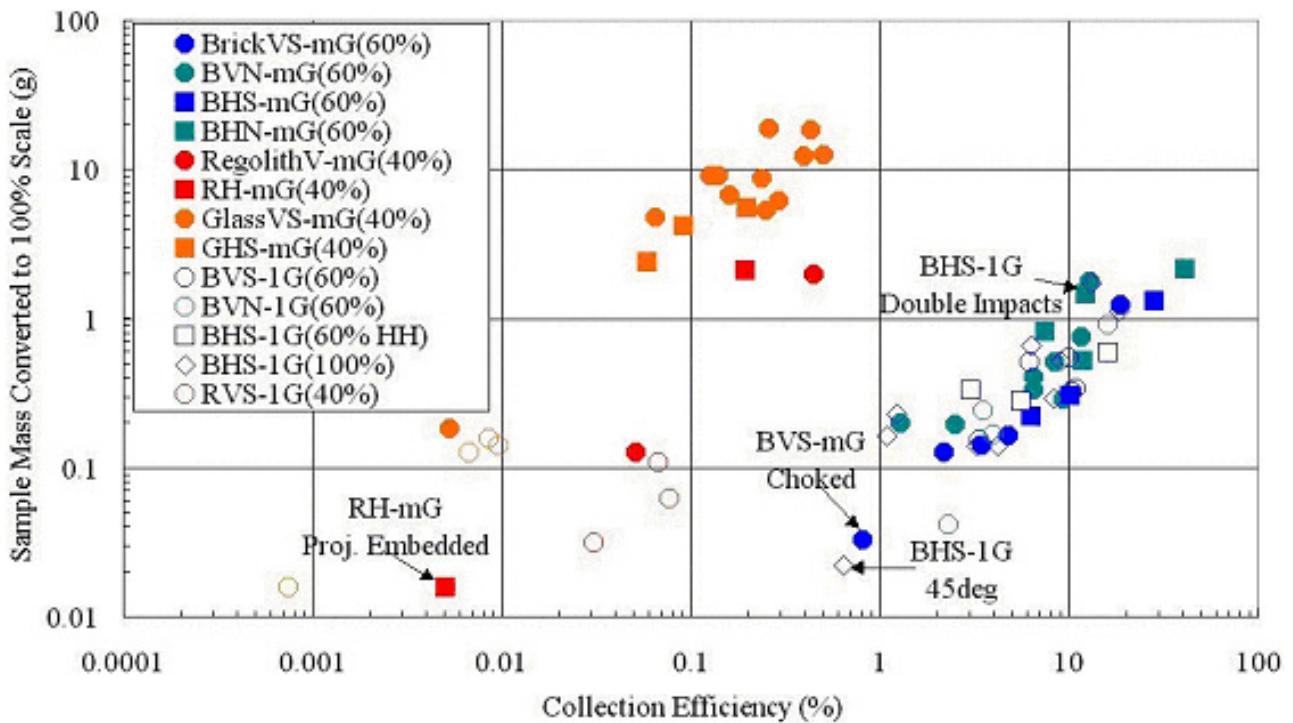


Fig. 17. Summary of the MUSES-C sampler collection efficiency and collected mass in 1G and micro-G [24]. Signs: B = brick, R = regolith, G = glass beads, H = horizontal horn, V = vertical horn, S = with shoulder of the funnel, N = without shoulder, mG = micro-G.

9. 探査対象ごとの宇宙検疫への要求

サンプルリターンミッションにおけるより実利的な「宇宙生物学」との連携分野に、「宇宙検疫」がある。これは、(1)地球起源の生物や有機物で探査天体を汚染しないこと(Forward Contamination)と、(2)探査天体からの未知の生命関連物質によって地球上の生態系に危害を及ぼさないこと(Receiving Contamination)の両方を保証するための検疫作業のことである。後者については、StardustおよびMUSES-Cがアポロ計画以来、真剣に検討された初の探査計画である。現在は米国National Research Council(NRC)の宇宙検疫関連部会が取りまとめた勧告書に準じる形で、Committee of Space Research(COSPAR)がこの課題の国際的な合意形成の場となっている。Table 1は探査天体毎に勧告をま

レゴリスでは、地上では収率にして0.1%、重さにして0.1gほどしか採集されていない。ところが微小重力下では標的に再落下することなく、長い時間漂い続けるため、クレーターから放出された物質の総量は数百gにも上り、収率が0.1~1%程度であっても数百mgから数gもの量を採れることが確認された。

とめたものである[25]。1998SF36はS型小惑星として、Ibのカテゴリーに入り、科学目的に要求されるレベルを超えた汚染防止や取り扱い上の注意は求められていない。しかし、地球上でまだアナログ隕石が発見されていないP, D型小惑星や、深海生命の可能性が議論されているエウロパやガニメデ、そして火星土壌などの場合は、検疫によって安全性が確認されるまでは、エボラウィルスなど、最高のバイオハザードレベルを持つ細菌類と同等のケアが試料に要求される。あるいは探査天体上で生命の痕跡をその場探索する場合は、Forward Contaminationの防止対策が、探査機の製作・各種試験のしかるべき段階で正しく実施される必要がある。惑星科学者にはこうした経験が不足しているので、ミッションの遂行には宇宙生物学者や検疫学者との協力が不可欠である。

Table 1. Space quarantine recommendations for sample return mission from minor bodies by the NRC-USA [25].

I No special containment and handling warranted beyond what is needed for scientific purposes		II Strict containment and handling warranted
Ia High degree of confidence	Ib Lesser degree of confidence	
The Moon	Phobos	Europa
Io	Deimos	Ganymede
Dynamically new comets	Callisto	P-type asteroids
Interplanetary dust particles	C-type asteroids	D-type asteroids
	Undifferentiated metamorphosed asteroids	Interplanetary dust particles
	Differentiated asteroids	
	All other comets	
	Interplanetary dust particles	

10. 採集サンプルのキュレーションと初期分析

サンプルリターンによる科学研究の成否は、サンプルが地球に帰還してからの注意深い分析にかかっている。約30年前のアポロ計画では、6回の有人月面着陸によって380 kgもの月面物質が採集された。一方、MUSES-Cの小惑星試料は、ほとんどが岩石の破片や微小な塵粒で、試料全体の重さは最高でも数gである。その取扱い方法や分析技術などは、隕石試料よりも宇宙塵に近い。幸い微小分析技術の進歩によって、現在では物性、分光、主要・微量元素、鉱物、希ガス、同位体、有機物など多角的な分析を行うのに必要な試料の総量は、1 gの数分の一で済むようになった。

NASAジョンソン宇宙センター(JSC)は、宇宙物質の「キュレーション」(=試料の初期分析、記載、保管、分配を行うこと)施設・組織として過去30年間、月面試料、南極隕石、宇宙塵、地球低軌道衛星上の微粒子衝突痕などを、一手に扱ってきた。また2003年にGenesis探査機が回収する太陽風粒子、2006年にStardust探査機が回収する彗星塵、日本から一部譲渡されるMUSES-C試料、さらに将来の火星の土壤試料など、今後NASAが受け取る宇宙物質は全てそこに集められる方針である。一方、日本ではMUSES-Cが初の「サンプルリターン」であり、続く次期小天体探査でもこの戦略を日本の惑星探査の柱に育て上げるには、拡張性を持った独自のキュレーション施設を宇宙科学研究所に新設する必要がある。

とはいっても、新キュレーション施設一箇所ですべての初期分析を完結させることはできない。そこで例えば有機分析、同位体分析、鉱物分析などの分析手

法ごとに、開かれた競争によって日本全国からトップの研究者を選び、「オールジャパン体制」を作つて、世界初の小惑星試料の初期分析に挑む予定である。また初期分析の後1年以内をめどに、採取試料をより詳細に分析したい研究者を世界中から公募する。実際のところ、生命前駆物質の探索としての有機物分析の観点からは、C, P, D型小惑星や彗星核のサンプルリターンの方が興味深いだろう。しかし1998SF36がS(IV)型であり、その試料がH, L, LLといった普通コンドライトに似たものであっても、宇宙起源有機物の進化程度を論じることや、前述のモナハン、ザグ隕石のような「液相の水(fluide inclusion)」の探索などは、「宇宙生物学」コミュニティの十分な関心をMUSES-Cに集め得るだろう。このようにMUSES-Cは、打ち上げ前には探査天体の様子を知るために天文観測の研究者と協力し、サンプルが帰還してからは隕石・宇宙塵の分析研究者との協力が必要な、「広く開かれた」ミッションである。

11. ポストMUSES-C時代の小天体探査案

2000年代終わり頃の打ち上げを目指して、MUSES-Cに続く次世代の小天体探査計画の検討も、すでに一般市民の方も多数参加するインターネット・グループ「小天体探査フォーラム(<http://www.minorbody.com>)」の中で進んでいる。過去2年間で7つの探査計画が提案され、現時点では以下の3案が、軌道計画や探査機重量や搭載機器候補まで検討が進んでいる[26]。

- (1) スペクトル型既知NEOマルチランデブー&サンプルリターン[26]

2000年代後半あるいは2010年初頭に、1~2機の探

査機を近地球型小惑星でスペクトル型既知の天体複数個にランデブーさせ、軌道上グローバルマッピングマッピング、および着陸機または微小重力ローバによる表層・内部構造のその場計測をした後、表面物質を地球に持ち帰る。探査対象は、MUSES-Cや米国のNEOマルチランデブー&サンプルリターン計画「Hera」ミッション[27]などと調整して、それぞれ異なるスペクトル型を選び、全体として多種のスペクトル型小惑星のサンプルリターンを短期間で可能にする。

(2) ファミリーミッション：メインベルト小惑星族マルチフライバイ&サンプルリターン[26, 28]

原始惑星の破壊から生れた小惑星族を訪ね、母天体の内部構造、衝突破壊の復元、隕石の相関を解明する。MUSES-C技術を継承した探査機は、3-6年間にS型サブクラスの異なるコロニス族3-5個、あるいは2-3年間に同一族でもスペクトル型の異なるナイス・ポラーナ族2個へ接近する軌道から、撮像、分光、重力測定、ダスト帯の組成分析を行う。フライバイする各天体表面には、自律航行機能を持って親機と編隊飛行を行う「弾丸」用子機を放出し、近接撮像を行いながら超高速衝突させる。それにより、地下数mオーダーの深さから放出する試料をエアロジェルのような非破壊捕集物質で採集して、MUSES-Cと同様の方法で地球に回収する。

(3) CAT天体シングルランデブー&サンプルリターン[26, 29]

NEOの一種であり、枯渇した彗星核と思われるCAT天体(Comet-Asteroid Transition Objects)の中でも、最も軌道計画的に行きやすいP/Wilson-Harrington彗星に、MUSES-C型探査機を大型電気推進とEDVEGA航法を駆使して、2010年に送る。ランデブーした後に活動していない表面に接触して試料採集を行い、2018年に地球に持ち帰る。太陽系外縁で取り込まれた有機物が、彗星中でどこまで進化するかを調査する。ただし揮発性成分の保管方法、地球帰還後の「宇宙検疫」、分析手法などには、新規技術の導入が不可欠である。

宇宙生物学の観点は、特に(1)と(3)のミッション案で重要となる。また、ISASでは現在、電気推進、ソーラーセイル、磁場セイルなど、新しい非化学・低推力推進機関の開発が進められており、これらの技術実証ミッションの行き先には、小天体が候補に上がる可能性が高い。特に木星以遠の探査が可能に

なる場合、ガリレオ衛星やタイタン以外に宇宙生物学の関心が集まる探査対象としては、氷衛星やEKBO、あるいはそこから派生したと思われるセンタウルス天体や木星外縁逆行衛星などが挙げられる。

12. まとめ

宇宙生物学における「惑星探査」の意義は、一面ではDrake & Sagan方程式のパラメータ f_p 、 n_e 、 f_i への実証的な制約を与えることと言えよう。特に太陽系の始原天体の探査は、「系外惑星系の探索」と「宇宙塵から生命前駆物質への進化」を橋渡しする役割を荷っている。その中でも近地球型小天体は歴史上、地球生命の誕生と大量絶滅の双方に関わってきた可能性があり、宇宙生物学の観点からも、火星やエウロパと並んで興味深い太陽系天体である。特に、近年の物質分析の成果から、地上には今も宇宙塵や隕石、あるいは流星分光の形で水、塩、糖類、アミノ酸を含む多数の有機物がもたらされていることが分かつてき。このことは、「パンスペルミア説」と「Urey & Miller」パラダイムの関係について、具体的な制約を与えるだろう。

「宇宙に出ない彗星探査」としてのしし座流星雨観測は、有機物や水酸基の地球へのキャリアとしての流星群、宇宙塵の可能性を強く示唆した。一方、小惑星博物学の早期決着への第一歩として、世界初の小惑星サンプルリターン計画「MUSES-C」がISASによって近く打ち上げられる。2007年夏に地球にもたらされる予定の採集試料は、生命前駆物質とS型小惑星の関係についてground truthを与える可能性がある。その初期分析や詳細分析においては、有機分析研究者の活躍が期待される。ポストMUSES-C時代の小天体探査案についても、スペクトル型既知NEOの複数ランデブー&サンプルリターンが、国内外共に検討されている。地上でアナログ隕石が発見されていないタイプの小惑星や、枯渇した彗星核・CAT天体のランデブー&サンプルリターンについては、厳密な「宇宙検疫」の実施が勧告されており、ここでも宇宙生物学者と惑星探査の連携は不可欠となる。

恒星・銀河系ハビタブルゾーンや、生命前駆物質運搬に限定されたパンスペルミア説、そして小天体衝突による種の大量絶滅など、近年惑星探査によって見つかった状況証拠は全て、地球とそこに住む生命が、宇宙と切り離された存在ではなく、主に小天

体からの宇宙物質の影響を受けながらその歴史を刻んできたことを示唆している。それゆえに、宇宙生物学と始原天体探査は、今後も互いに共通する科学目標に向かって協力しあうことが、さらに重要になっていくだろう。

謝辞

本稿は2002年「生命の起源および進化学会」の特別セッションで講演した内容を元に、書き下ろしたものである。学会にご招待頂くとともに、本編執筆の機会を与えて頂いた同セッション幹事・三田肇博士に厚く御礼を申し上げる。

References

1. Dick, S. J. *Life on Other Worlds: The 20th-Century Extraterrestrial Life Debate.* pp. 290, Cambridge University Press, Cambridge, UK (1998)
2. Ward, P. D. and Brownlee, D. E. *Rare Earth: Why Complex Life is Uncommon in the Universe.* pp. 333, Copernicus, NY, USA (2000)
3. Gonzalez, G., Brownlee, D. E. and Ward, P. D. *Refuge for life in a hostile universe.* *Scientific American* 10, 54-59 (2001)
4. Love S. G. and Brownlee, D. E. A direct measurement of the terrestrial mass accretion rate of cosmic dust. *Science*, 262, 550-553 (1993)
5. Yano, H., Japanese contribution to in-situ meteoroid and debris measurement in the near Earth space. *Earth Planets Space*, 51, 1233-1246 (1999)
6. Huebner, W. F. (Ed.) *Physics and Chemistry of Comets.* pp. 376, Springer-Verlag, Heidelberg, Germany (1990)
7. Delsemme, A. H. *Cometary origin of the biosphere.* *Icarus*, 146, 313-325 (2000)
8. Chyba C. F. and Sagan C. Comets as a source of prebiotic organic molecules for the early Earth. In *Comets and the Origin and Evolution of Life* (Eds. Thomas P. J., Chyba C. F. and McKay C. P.) pp. 147-173, Springer-Verlag, NY, USA (1997)
9. Brearley, A. J. and Jones, R. H. Chondritic meteorites. In *Planetary Materials* (Ed. Papike, J. J.) pp. 3.01-3.398 Mineralogical Society of America, Washington, D.C., USA (1998)
10. Hiroi, T., Zolensky, M. E. and Pieters, C. M. The Tagish Lake meteorite: A possible sample from a D-type asteroid. *Science*, 293, 2234-2236 (2001)
11. Zolensky, M. E., Bodnar, R. J., Gibson Jr, E. K. et al. Asteroidal water within fluid inclusion-bearing halite in an H5 chondrite Monahans. *Science*, 285, 1377 (1998)
12. Abe, S., Yano, H., Ebizuka, N., Kasuga, T., Sugimoto, M., and Watanabe, J. Ultra-violet spectroscopy of hydroxyl features in the 2001 Leonid meteor storm. *Astrobiology*, submitted.
13. Greenberg, M. The core-mantle model of interstellar grains and the cosmic dust connection. In *Interstellar Dust* (Eds., Allamandola L. J. and Tielens, A. G. G. M.) pp. 345-355, Dordrecht: Kluwer Academic Publ. (1989)
14. Jenniskens, P., Butow, S. J. and Fonda, M. The 1999 Leonid Multi-Instrument Aircraft Campaign – An early review. *Earth, Moon & Planets*, 82-83, 1-26 (2000)
15. Alvarez, L. W., Alvarez, W., Asaro, F. and Michel, H. V. Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction. *Science*, 208, 1095-1108 (1980)
16. Rampino, M. R. and Haggerty, B. M. Extraterrestrial impacts and mass extinctions of life. In *Hazards due to Comets & Asteroids* (Ed. Gehrels, T.) pp. 827-857 The University of Arizona Press, AZ, USA (1994)
17. Tholen, D. J. and Barucci, M. A., Asteroid taxonomy. In *Asteroids II* (Eds. Binzel, R. P., Gehrels, T. and Matthews, M. S.) pp. 298-315, The University of Arizona Press, AZ, USA (1989)
18. 宇宙科学研究所編、日本の宇宙科学の将来構想、pp. 30, 文部科学省宇宙科学研究所 (2001)
19. Kawaguchi, J., Uesugi, K. and Fujiwara, A. Readiness of the MUSES-C project and the spacecraft flight model status. *Proc. 22nd ISTS*, 2000-o-3-06v (2000)
20. Binzel, R. P., et al., MUSES-C target asteroid 1998SF36: A reddened ordinary chondrite. *Meteoritics & Planet. Sci.* 36 (2001)
21. Clark, B. E., Lucey, P., Helfenstein, P., Bell III, J. F., Peterson, C., Veverka, J., McConnochie, T., Robinson, M., Bussey, B., Murchie, S., Izenberg, N., and Chapman, C. *Meteoritics & Planet. Sci.*, 36, 1617-1638 (2001)
22. Sasaki, S., Nakamura, K., Hamabe, Y., Kurahashi, E., and Hiroi, T. Production of iron nanoparticles by laser irradiation in a simulation of lunar-like space weathering. *Nature*, 410, 555-557 (2001)
23. Yano, H., Hasegawa, S., Abe, M., and Fujiwara, A., Asteroidal surface sampling by the MUSES-C spacecraft. *Proc. Asteroids, Comets, Meteors 2002*, ESA-CP, in press.
24. Space Studies Board-National Research Council, Evaluating the Biological Potential in Samples Returned from Planetary Satellites and Small Solar System Bodies. pp. 100, National Academy Press, Washington, D.C., USA (1998)
25. 矢野創、川口淳一郎、秋山演亮、小天体探査フォーラム、次期太陽系始原天体探査ミッション検討例、第2回宇宙科学シンポジウム収録 pp. 335-344, 文部科学省宇宙科学研究所 (2001)
26. Sears, D. W. G., Allen, C., Britt, D., Yano, H. et al., The case for near-Earth asteroid sample return. *Amer. Inst. Aeronauticas & Astronautics*, submitted (2001)
27. Yano, H., Abe, M., Yamakawa, H., Yoshikawa, M., and Fujiwara, A. The Family Mission: Multiple flybys and sample returns to the main belt asteroid families. *Abst. Asteroids 2001*, 131 (2001)
28. Kawaguchi, J., A comet nucleus sample return mission using solar electric Earth gravity assist. *Adv. Space Res.*, 29, 1215-1220 (2002)