

小惑星サンプルリターン計画 (MUSES-C)

藤原 顕 Akira Fujiwara

1. はじめに

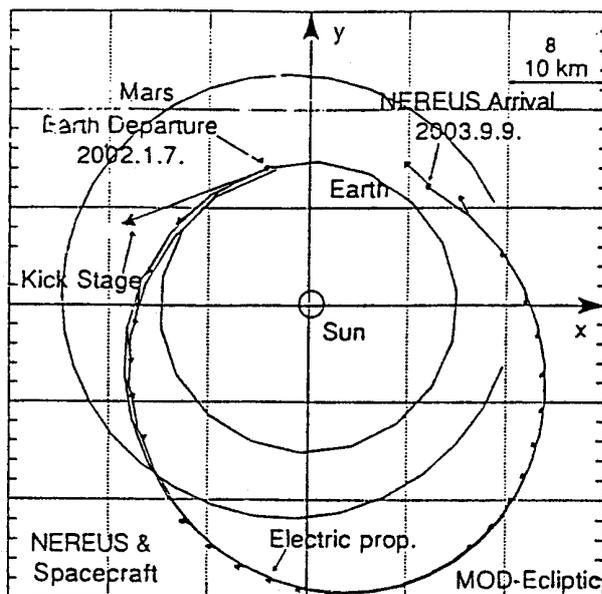
小惑星は惑星形成史の研究において、惑星形成初期の始源性を残した天体として、重要な位置を占めている。その物質がどのようなものであるかは、惑星初期の状態を探る手がかりになると考えられており、惑星系の進化の研究において小惑星からの試料の採取、分析は、もっとも重要なものの一つである。

文部省宇宙科学研究所では、近地球型小惑星から試料を採取してくるミュージーズ-C (MUSES-C) 計画があり、全国の理・工学者の協力のもとに準備が進められている。サンプルを採取して持ち還るには新しい技術が必要で、今回のミッションは、今後の本格的なサンプルリターンで必要となる諸技術を習得、確立するための工学試験探査機という位置づけとなっている。

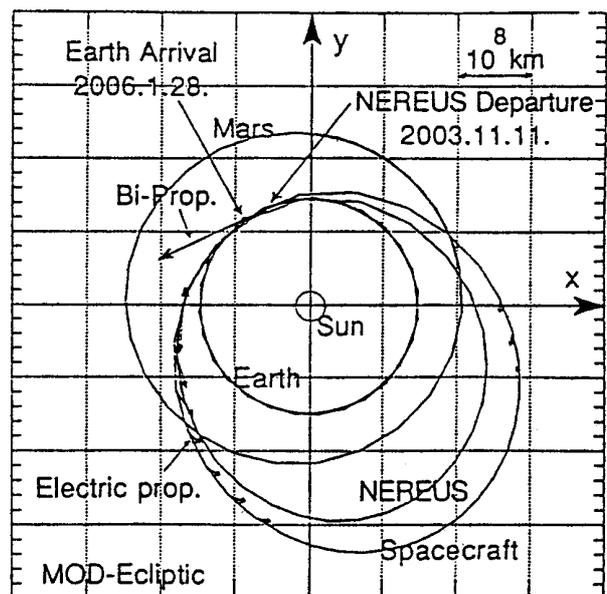
しかしながら、地球以外の天体からのサンプルリターンは、アポロ計画以降なかったものであり、その科学的意義はきわめて大きく、内外から大きな関心が寄せられている。無事にサンプルが持ち還られれば、日本の惑星科学研究者のみならず、世界の研究者にとって大きなインパクトをあたえることは間違いない。

2. 探査対象…近地球型小惑星

探査対象となっている近地球型小惑星は 4660 番ネレウス (Nereus) である。軌道長半径 1.49



トランスファー軌道 (黄道面内)



地球帰還軌道 (黄道面内)

図 1 ネレウスへの往復軌道 小惑星の軌道と探査機の軌道はほとんど一致していることに注意。

AU、離心率 0.36、軌道傾斜角 1.425° 、公転周期 1.82 年である。近日点は 0.953AU で地球軌道のすぐ内側にあり、遠日点は 2.026AU で火星軌道より外にある。

ハワイ大学のソレン (Tholen) が観測した可視波長域での 6 色のデータによると、全体に平坦なスペクトルを持っている。今夏の観測によってさらに詳細なデータが得られ、C、F タイプなどの始源的な小惑星の可能性が指摘されている。大きさは約 1 km 前後であろうと考えられている。自転周期も今夏の観測によって 15 時間程度であることがわかった。またバックアップ天体として、1989 ML という近地球型小惑星が考えられている。

3. ミッションシナリオと必要技術

ミューゼス-C 探査機は 2002 年初め、宇宙科学研究所の MV 型ロケットで鹿児島県の内之浦から打ち上げられる。2003 年に目標天体に到着、周囲に約 2 か月滞在し、観測をおこなうとともに、小惑星表面の異なる 3 か所からサンプルを採取した後、地球帰還軌道に入り、2006 年に地球付近に達する (図 1)。地球帰還の際には、サンプルを封入したカプセルのみが探査機から切り離され、惑星間軌道から地球大気に直接投入され、最終的にパラシュートを開いて地上 (陸地) に回収される。このミッションで鍵となる重要な技術は、つぎの 4 つである。

①電気推進技術：探査機のネレウス往復には電気推進機を連続的に使用する。電気推進機はイオンを電界で加速して推力を得るもので、瞬間的な推力は小さいが長時間連続的に作動させることによって、効率よく軌道を変えていくことができる。なによりも長時間の稼働に耐えることが要求される。②自律航法制御：対象とする天体にはレーザーによる測距、およびカメラによる画像を利用して接近し、目標地点に向かって誘導していく技術の開発が行われている。小惑星への最終降下は、小惑星表面に投下された人工標的物を目印として行う。探査機が小惑星付近に滞在する時期には、地球から約 1 AU の位置にあり、地球からの指令が伝わるのに 8 分かかる。そのため探査機側の自律判断機能が要求される。③小惑星表面からのサンプルの採取方法 (図 2)：小惑星表面に接近し弾丸を発射し、小惑星表面からの破片をキャッチすると同時に離脱する。詳しくはあとで述べる。④惑星間軌道から直接投入によるカプセル地上回収：探査機が地球に接近するとサンプルを載せた再突入カプセルのみが切り離され、大気圏内に突入する。突入速度は 12 km/s もの高速である。大気によって減速された後、最終的にパラシュートを開いて地上に落下する。現在、カプセル材料の耐熱テストなどの地上実験が行われている。

4. 小惑星周辺での科学観測

今回の探査ではサンプルリターンという言葉で代表されるように、小惑星からサンプルを採取し、小惑星の物質に関する情報を得ることを中心的テーマとする。またサンプルから得られるであろう物質データをより深く理解するために必要となる小惑星の物理的情報を、できるだけ多く得ることが試みられる。探査機に搭載されるサンプラー (試料採取装置) 以外の科学機器であるカメラ、およびライダー、近赤外分光器、蛍光 X 線 CCD スペクトロメーターは、サンプリング場所の選定、サンプリング場所の記載、および 3 か所からのサンプリングでは得られない広い地域にわたる物質情報の取得に役立てられる。

カメラとライダーは、探査機がネレウスへ向けて航行、接近するために必須の工学機器であるが、科学の目的のためにも使われる。カメラは多色フィルターを付けて用いられ、表面の色、地



図2 ネレウス表面での試料採取の想像図 サンプル収集器のホーンが小惑星表面に接地し弾丸が発射され、探査機は上昇を始めた瞬間を示している。探査機の左側面には電気推進機の噴射口が4つ見える。またこれと反対側面（右向き）には収集したサンプルを収納して地球に帰還するカプセルの一部が見える。左下小惑星表面には探査機の降下目標となる人工標的物とマイクロローバーが見える。

形情報、小惑星の形状、自転、衛星の有無などが調べられる。ライダーはレーザー光の反射によって表面までの距離を計る装置であるが、ネレウスへの降下、または上昇中の各時刻での位置変化を正確に知ることによって、重力に関する情報を得ることができる。これによって小惑星の質量が、また形状データと併せて小惑星の密度が得られる。反射光の強度からは、小惑星の表面状態に関する情報が得られるだろう。近赤外線分光器は波長域約 $1\sim 2\mu\text{m}$ で分光し、可視で得られるスペクトルとともに鉱物組成の推定に利用される。蛍光X線検出器はCCD検出器を用いて表面からの蛍光X線を $0.7\sim 10\text{keV}$ 域で測定し、Mg、Al、Si他の主要元素の分布を調べる。

これらの探査機からの観測機器に加えて、米国ジェット推進研究所が、探査機から小惑星表面にカメラ（可視、近赤外波長域）を搭載したマイクロローバーを投下することが予定されている。投下後、ローバーは表面上を移動してマイクロスケールでの観察を行う。このローバーは火星探査機マーズパスファインダーで搭載されたローバー（ソジャーナ）に似たものだが、はるかに小型で軽量化されたものである。

探査機本体に積まれた機器による小惑星の広領域にわたる可視、近赤域でのスペクトル観測や

地形観測や元素組成データ、実際に地球に持って還られるサンプルから得られるデータ、そしてマイクロローバーの搭載機器から得られるマイクロスケールでの表面物質の観測データ、重力計測による密度のデータ、さらには地球からの望遠鏡による表面スペクトル観測データを相互に比較・検討することによって、表面物質の空間的に異なったスケールでの物質同定と物質分布が得られ、このような分布を生むに至った小惑星の物質的進化のシナリオが、現実味をもって描けるようになると考えられている。

5. 試料採取法

試料採取装置（サンプラー）は、このミッションにおいて中心的な科学機器である。一般に固体表面を持つ天体に外部から隕石などが衝突してまきあげられた破片のうち、脱出速度以下のものが表面に降り積もってレゴリスが形成される。脱出速度が数10cm/sという小さな小惑星上にレゴリスが十分な厚さで存在できるとは考えにくい、まったくないとも言い切れない。岩盤が露出している場合も予想される。探査機の重量などの制約も考えて決められた手法は、次のようなものである。5g程度の小弾丸を小惑星表面に約300m/sの速度で発射し、小惑星表面から跳ね上がる破片を筒状のホーンで覆うことによって捕集する（図2）。小惑星とはホーン先端が一瞬接触するのみである。低重力下（ 10^{-4} Gのオーダー）なので破片はホーン内部を効率よく上昇し、上端に取り付けられた小さなサンプルキャッチャーの中に入る。サンプルキャッチャーは探査機側面に取り付けられた再突入カプセル内に収納され、しっかりとシールされる。

6. おわりに

小惑星の天文学的手法を用いた研究の中で、今日もっとも重要な分野の1つは表面反射スペクトルの観測である。今日ではきわめて多くの小惑星でスペクトルの分類が進んでおり、スペクトルで表現される小惑星の表面物質の推定、対応する隕石を探す研究がさかんになされている。しかし、隕石から得られる鉱物、同位体組成をはじめとする詳細な物質情報知識と、望遠鏡による小惑星の知識の間には依然として大きなギャップがある。探査機による小惑星探査、とくにサンプルリターンによって、小惑星物質を隕石と同様な手法で分析して得られるデータは、過去に蓄積されている隕石の大量のデータと比較・検討することができる。すなわち隕石の知識と天文学的知識の間に大きなリンクができることになる。

今回探査する天体はたった一つであっても、スペクトル型と物質知識の間につながりができることは大きな進歩であり、単に小惑星を理解するために重要なベースとなるだけでなく、従来の隕石の研究に頼った太陽系進化のシナリオを、あらためて見直す契機となるであろう。

もちろん1つの小惑星を探査するだけで十分とはいえない。今後各スペクトルタイプの中から代表的な小惑星を選んで、探査やサンプルリターンが進められることが望ましい。代表的なスペクトルの種類はそんなに多くはない。この探査が今回限りの単発的な研究として終わるのではなく、今後長期的な展望をもって小天体の探査による研究を推進していくことが必要である。今回の探査はそのシリーズの第一歩として、技術的基盤を得るためのものと位置付けている。

言うまでもないが、サンプルリターンでは、サンプルの分析が十分に行われて初めて科学的に意味がある。したがって、わが国におけるサンプルの分析体制を最高レベルのものへと整えていくことが重要な課題であり、準備を急いでいる。 （文部省宇宙科学研究所惑星研究系）

論文紹介

模擬火星土壌をつくる

Allen, C.C., Jager, K.M., Morris, R.V., Lindstrom, D.J., Lindstrom, M.M., and Lockwood, J.P., 1998, Martian soil simulant available for scientific, educational study. *Eos*, Vol.79, No.34 (Aug. 25, 1998), 405-409.

火星表面の土壌がどのような性質のものであるかは、バイキング1、2号とマーズパスファインダーの探査によってかなり明らかにされてきたが、まだ土壌の実物を手にして直接調べるにはいたっていない。そこで、いろいろな分野の研究と教育に役立てるために、火星の模擬土壌をつくる試みがなされている。本論文で紹介されているのは、地球上の火山灰からつくられた「JSC Mars-1」と名づけられた物質で、これは現在の知識の範囲で、反射スペクトル、鉱物特性、化学組成、粒度、密度、磁氣的性質などが、実際の火星土壌にたいへん近いものである。

模擬火星土壌 JSC Mars-1 の作製

地球上で火星の模擬土壌をつくるのにもっとも適した物質は、ハワイのマウナケア火山にある、更新世後期にできた砕屑丘を構成する、火山灰とスコリアの風化物であると考えられる。このことから、JSC Mars-1 の材料物質は、マウナケアの南斜面の標高 1850 m に位置する砕屑丘 Puu Nene から採取された。

まず Puu Nene 斜面の 180m² の地域から厚さ 30~40cm の表面土壌を除去し、40~60cm の深さの層準から変質した火山灰が集められた。そのさい、表層部の土壌と、60cm よりも下の変質していないガラス質火山灰などの混入を防ぐため、採取は手作業でていねいに行われた。こうして掘り出した火山灰は、ひとまず野外で乾燥したあと、ステンレス製のふるいを通して、1 mm 以下の成分が分離された。これはさらに、太陽熱とプロパンヒーターによって 80°C 以下の温度で乾燥し、ふたたび 1 mm のふるいにかけてあと、しっかりした容器に収められた。

JSC Mars-1 の諸特性

以上のようにしてつくられた JSC Mars-1 に対して、可視域と近赤外域での反射スペクトル、X線蛍光 (XRF)、X線回折 (XRD)、走査電顕 (SEM)、エレクトロンマイクロプローブなどの諸分析が実施され、いろいろな特性が明らかになった。

反射スペクトル Puu Nene から得られた物質の反射スペクトルが、火星の明るい地域のそれと比べて似ていることは、すでに H.J. Morris ら (1993) 以来たびたび指摘されており、今回もそのことが証明された。

図1は、可視域と近赤外域における JSC Mars-1 の反射スペクトルを、火星の明るいオリンパス-アマゾニス地域のスペクトルと比較したものである。JSC Mars-1 では、可視域 (400~700nm) にあまり特徴のない第二鉄 (Fe³⁺) の吸収エッジがあり、800~1000nm にも第二鉄の吸収帯がある。近赤外域 (700~2100nm) での吸収は比較的フラットであるが、1400nm と 1900nm に目立つ吸収帯は OH と H₂O によるものである。

一方、火星の明るい地域のスペクトルでは、600、750、860nm 近くに第二鉄の存在を示す特

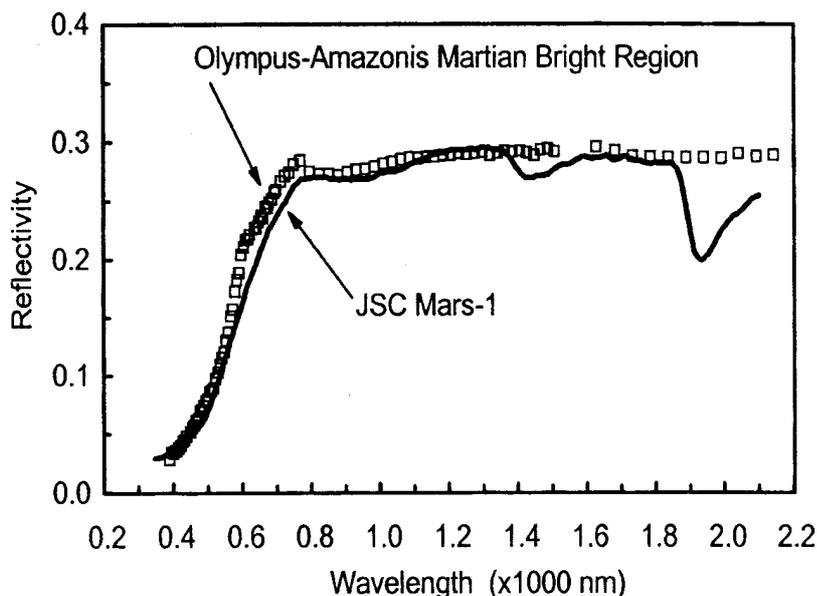


図1 JSC Mars-1 と火星の明るい地域の反射スペクトルの比較

徴がみられる。このことは、火星土壌では模擬土壌よりも、赤いヘマタイト結晶の量が多いことをしめすものと考えられる。また火星のスペクトル中に1400nmと1900nmでのOHとH₂Oの吸収帯がほとんど認められないのは、火星土壌が極度に乾燥していることの証拠である。

鉱物学的特性 JSC Mars-1は、さまざまな厚さに変質した外皮をもつ粒子と、全体が変質した粒子の混合物で、こ

の火山灰はハワイアイト (hawaiite) として知られる火山岩の粒子に由来する。XRD分析によると、少量のマグネタイトとカルシウム長石が存在するが、粘土鉱物は認められない。このことは、粘土鉱物の量が1重量%以下であるというMorrisら(1993)の結果とほぼ一致する。エレクトロンマイクロプローブ分析では、模擬土壌中の斜長石はアノーサイト (Ca₇₃Na₂₁K₆)、かんらん石の組成はMg₆₅Fe₃₅、輝石はオージャイト (Ca₃₂Mg₅₁Fe₁₇) にぞくする。チタンマグネタイトは15~22重量%のTiO₂を含む。

化学組成 表1に、模擬土壌の化学組成と、バイキングならびにパスファインダー着陸地点のレゴリス組成との比較を示す。探査機の着陸地点のデータは、3つとも本質的に同じといってよく、これはおそらく風によって物質が均一化されているためであろう。ただSO₃とClの量に差異がみられるのは、局地的な塩類形成などの作用があるためだと考えられる。

表1 火星の土壌の化学組成

	VL-1	VL-2	Pathfinder	JSC Mars-1	
Oxide	Wt%*	Wt%*	Wt%**	Wt%***	Wt%****
SiO ₂	43	43	44.0	34.5	43.5
Al ₂ O ₃	7.3	7	7.5	18.5	23.3
TiO ₂	0.66	0.56	1.1	3.0	3.8
Fe ₂ O ₃	18.5	17.8	16.5	12.4	15.6
MnO	n.a.	n.a.	n.a.	0.2	0.3
CaO	5.9	5.7	5.6	4.9	6.2
MgO	6	6	7.0	2.7	3.4
K ₂ O	<0.15	<0.15	0.3	0.5	0.6
Na ₂ O	n.a.	n.a.	2.1	1.9	2.4
P ₂ O ₅	n.a.	n.a.	n.a.	0.7	0.9
SO ₃	6.6	8.1	4.9	n.a.	n.a.
Cl	0.7	0.5	0.5	n.a.	n.a.
LOI	n.a.	n.a.	n.a.	21.8	n.a.
Total	89	89	89.5	101.1	100.0

n.a. Not analyzed; all iron calculated as Fe₂O₃.
 LOI (loss on ignition) weight loss after 2 hours at 900°C; includes H₂O and SO₂.
 * Viking landers 1 and 2 XRF (mean of 3; *Banin et al.* [1992]).
 ** Pathfinder APXS (mean of 5, normal to 44 wt% SiO₂; *Rieder et al.* [1997]).
 *** XRF.
 **** XRF (volatile-free, normalized)

表2 JSC Mars-1の粒径分布

Size (μm)	Wt%
1000-450	21
449-250	30
249-150	24
149-53	19
52-5	5
<5	1

表1には、模擬土壌の分析データから揮発成分 (H_2O , SO_3 , Cl) を除いて、合計値を100重量%)に計算し直したのも示してある。これをみると、 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 CaO については火星の土壌とよく一致するが、 Al_2O_3 、 TiO_2 、 MgO などについてはかなり異なっている。どうやら模擬土壌は、化学組成よりは反射スペクトルからみたほうが、火星土壌にずっとよく似ているようである。

揮発成分 JSC Mars-1 はかなりの量の水を含んでいる。アルゴンガス中の加熱実験では、1時間後に 100°C では7.8重量%、 600°C では21.1重量%の重量損失がおこった。失われた成分の大部分は H_2O と思われるが、 SO_2 もあるかもしれない。一方バイキングの実験では、 500°C に加熱した火星土壌からは0.1~1.0重量%の水が放出されたにすぎなかった (K. Biemann ほか, 1977)。

粒度分布 Puu Nene 火山灰の1mm以下の粒径成分からなる模擬土壌の粒度分布を表2に示す。大部分 (75重量%) は $149\ \mu\text{m}$ よりも大きく、 $5\ \mu\text{m}$ 以下の小さい粒子は1重量%にすぎない。バイキングのサンプルアームマグネットにくっついた土壌粒子からの判断では、細粒物質の大きさは $10\sim 100\ \mu\text{m}$ 、また風で吹き流されるダストの平均粒径は $2\ \mu\text{m}$ とみられている。

密度と間隙率 模擬土壌の粒子の平均密度は $1.91\pm 0.02\text{g/cm}^3$ である。 $149\ \mu\text{m}$ 以下の変質していない磁性粒子の密度は $2.15\pm 0.09\text{g/cm}^3$ で、非磁性粒子の密度 $1.76\pm 0.03\text{g/cm}^3$ よりも高い。土壌の平均バルク密度は $0.87\pm 0.02\text{g/cm}^3$ であるが、振動をあたえてしめつけると $1.07\pm 0.02\text{g/cm}^3$ に増大する。このことから、バルク土壌で54%、しめつけた土壌では44%の間隙率をもつと推定される。ちなみに、バイキング1号着陸地点の土壌のバルク密度は $1.2\pm 0.02\text{g/cm}^3$ 、固結した土壌の密度は $1.6\pm 0.4\text{g/cm}^3$ (H.J. Moore ほか, 1987)、マーズパスファインダー着陸地点の土壌の平均バルク密度は 1.52g/cm^3 (S.F. Haviid ほか, 1997) と求められている。

磁氣的性質 模擬土壌には磁性の高い成分が多く、サンプルのほぼ25重量%がハンドマグネットですり分けられる。そのなかには、大小のあまり変質していない磁性粒子と、それに付着した細粒物質が含まれる。XRDと電子マイクロプローブ分析によると、磁性粒子はチタンマグネタイトである。バイキングとパスファインダーのマグネットアレイにくっついた粒子の観察から、火星土壌には1~7%の磁性物質 (おそらくマグヘマイトとチタンマグネタイト) が存在すると考えられている。

模擬火星土壌の入手方法

JSC Mars-1 は、研究と教育のために一定の量が無料で配布されている (ただし送料は実費)。この機会に入手して、研究や教育に活用されてはいかがだろうか。問い合わせ先は下記のとおりである。

The Office of the Curator, NASA Johnson Space Center
Houston, Texas 77058, USA

(小森長生)

シバ仮説：衝突・大量絶滅・銀河系

Rampino, M.R., 1998, The Shiva Hypothesis: Impacts, Mass Extinctions, and the Galaxy. The Planetary Report, Vol.18, No.1 (Jan/Feb.), 6-11.

地球の歴史上何度もおこった生物の大量絶滅は小惑星（または彗星）の衝突によって引きおこされ、このような衝突による絶滅は周期的にくり返されたこと、そしてこの周期性は太陽系が銀河系内を公転することによって生まれた、とする著者の主張「シバ仮説」を概論的にのべたものである。表題のもとになったシバ（Shiva）はヒンズー教の神の1つで、宇宙の破壊と再生をつかさどる神である。

Jack Sepkoski（シカゴ大学）は、過去5.4億年間の海洋生物絶滅史をまとめた（図1）が、この中で主要な大絶滅（図1中の一番高いピーク）は、白亜紀末（6500万年前）、三畳紀末（2億3000万年前）、二畳紀末（2億5000万年前）、デボン紀末（3億6500万年前）、オルドビス紀末（4億3800万年前）におこっている。とくに最大の絶滅といわれる二畳紀末の事件では、海洋生物種の約96%が消滅した。その他約20の小規模な絶滅事件（図1の低いピーク）でも20～50%の海洋生物種が消滅している。

著者はこのような絶滅史を、クレーター形成と対比して考える。Gene Shoemakerらの見積もりによると、K-T境界（白亜紀末）の大絶滅をおこした証拠とされるチクシュルーブクレーター（直径約200km、衝突天体の大きさは直径10kmと推定）をつくったような大衝突は、1億年に1回程度の割合でおこる。すると、過去6億年間にこれほどの衝突は5～6回はおこっただろうから、これはその間の5つの主要な大量絶滅の記録と一致するにちがいない。また、より小さな天体（直径5～6kmで衝突の力は10分の1）の衝突は2000万～3000万年ごとにおこったとすると、記録にみられる約20の小規模な絶滅事件を説明できると説く。

これら大小の多くの絶滅事件のすべてに、対応するクレーターや衝突の証拠が見つかるわけではないが、著者はたくさんの事例を引いて絶滅と衝突のかかわりを考察していく。そして、地球上への大衝突は約3000万年の周期でくり返されたこと、クレーターの年代がよく似た一群があることから衝突は彗星シャワーのような形でおこったものが多いだろうこと、その結果とし

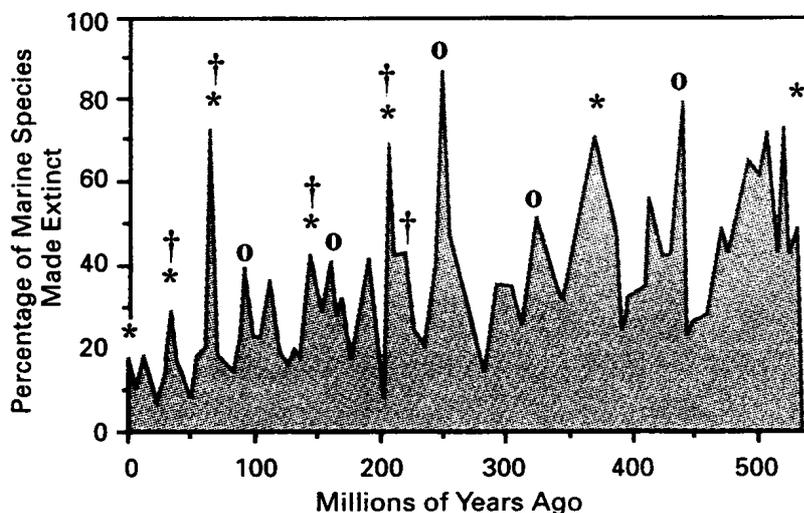


図1 過去5億4000万年間におこった海洋生物種の大量絶滅 +印は年代のよくわかった大衝突クレーターに対応するもの、*印は関連すると思われる衝突記録があるもの、O印はイリジウムが検出されているが量が少ないもの。

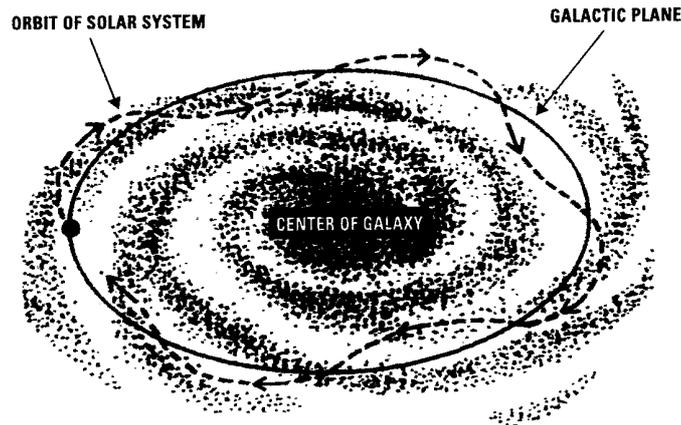


図2 銀河面を上下しながら銀河系をまわる太陽系

て、大量絶滅の周期的パルスが生みだされたのだと結論する。そのうえでこの考えに立って、大量絶滅と衝突の3000万年周期の原因を、太陽系が銀河面の星や星間雲の密なところを通過することに求める。太陽系は銀河系の中心から3万光年くらい離れたところを2億年の周期で回転している。このとき太陽系は銀河面に対して回転木馬のように上下にふれながら動く(図2)。それによって、銀河系の腕の星間物質の密なところを3000万年の周期で通り抜けることになる。すると、オ尔特雲をつくる何兆個もの彗星の軌道に重力的なゆらぎがおこり、彗星の群れが太陽系内部に向かって降ってくる。こうして、破壊者シバ神のように、衝突は地球の生物に何度も破滅をもたらしながらも、そのたびに再生して新しい世界が開けてきたというのである。

全体を通して著者は、証拠の不十分なところは推理を働かせて、衝突と大量絶滅の関係を熱心に説いているが、私見を許していただくならば、いささかひいきのひき倒しの感がないわけではないように思える。たとえば二畳紀末の最大の絶滅事件など、地球内部の活動にもとづく海洋の酸欠が原因だとする考えもあり、単純に衝突だけで片づけられない気がする。とはいえ、絶滅の問題を宇宙的な視野で考えていこうとする論点には興味をそそられる(ただしこの点についても、星間雲との遭遇の問題は藪下信氏らが前から唱えてきたことなので、著者の全くの独創とはいいがたいようだが)。

なおこの論文は、2年前に発表された下記の論文を一般向けに書き直したものである。ランピーノたちの考えをくわしく知りたい方は、この原論文も参照していただければ幸いである。

Rampino, M.R., and Haggerty, B.M., 1996, The "Shiva Hypothesis": Impacts, Mass Extinctions, and the Galaxy. *Earth, Moon, and Planets*, 72, 441-460.

(小森長生)

論文抄録

金星のコロナの進化についての新しい考察

Copp, D.L., Guest, J.E., and Stofan, E.R., 1998, New insights into Coronae evolution: Mapping on Venus. *Jour. Geophys. Res.*, 103, E8, 19401-19417.

金星のコロナはグローバルな熱損失に寄与していると考えられ、金星の進化における時間的、空間的役割を知るうえで重要な地形である。グイネベレ平原とセドナ平原の5つのコロナをくわしく解析した結果、コロナの地形は複雑で、以前に考えられていたような、初期の隆起運動にはじまる三段階の形成

モデルでは、必ずしもすべてのコロナの成因をうまく説明できないことがわかった。個々のコロナでは、火山活動の規模やスタイル、活動時期は必ずしも同一ではない。すなわち、金星の歴史のある一時期にだけできたわけではなく、長期間の複雑な形成の歴史をもっていると考えられる。(K)

地下からの熱水の流出によってできた火星の谷地形

Gulick, V.C., 1998, Magmatic intrusions and a hydrothermal origin for fluvial valleys on Mars. *Jour. Geophys. Res.*, 103, E8, 19365-19387.

火星の熱水システムは地下における大量のマグマの貫入によって生成し、地下の透水率が約 1.0 ダルシー (darcy、流体が多孔質の物質中を流れるときの程度を表す単位) をこえる場合には、十分な地下水が地上に流出して谷地形を形成する。熱水に由来する流水は、数千年間で 1~2 km の厚さの永久凍土層をとく。このため谷地形の形成には、降雨よりも熱水システムのほうが効果的である。このメカニズムは、初期の温暖湿潤な気候の時代のみならず、その後の乾燥した低温の気候下でも、火星表面に谷地形をつくることができた。(K)

火星のエリシウム平原にみられる長い溶岩流

Mouginis-Mark, P., and Yoshioka, M.T., 1998, The long lava flows of Elysium Planitia, Mars. *Jour. Geophys. Res.*, 103, E8, 19389-19400.

バイキングオービターの画像から、火星のエリシウム平原には 59 の溶岩流が知られている。それらの平均幅は 3~16km、長さは 100km をこえるものが多い。アスペクト比 (平均幅に対する全長) は $>40:1$ から $<5:1$ と変化にとむ。エリシウム山の頂上から 200km 以内で噴出した溶岩流はすべて短い (70km 以下) が、294km 以上の距離で流出した溶岩流はどれもずっと長い。適当と考えられる噴出率 ($10^1 \sim 10^4 \text{m}^3/\text{s}$) からみると、個々の噴火は数か月から数 10 年つづいたと考えられる。(K)

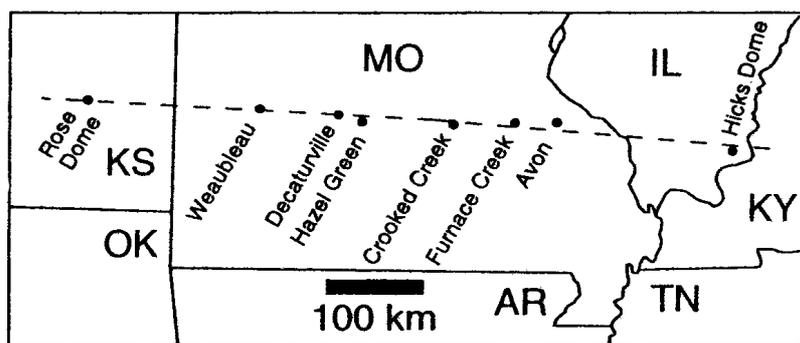
フィンランドの 14 億年前の砂岩からの非変質の宇宙塵

Deutch, A., Greshake, A., Pesonen, L.T., and Pihlaja, P., 1998, Unaltered cosmic spherules in a 1.4-Gyr-old sandstone from Finland. *Nature*, 395, 146-148.

フィンランドの南西部に分布する 14 億年前の Satakunta 砂岩層 (赤色砂岩) の 5 kg のサンプルから、18 個の変質していない微小球粒を発見した。斑状またはかんらん石の棒状結晶組織を示す溶融した微粒子で、地球外起源のものと判断される。これらの粒子は、大気突入時に結晶化し酸化したニッケルに富むスピネルを含むので、突入時の上層大気の酸素含有量を知ることができる。年代の古い赤色砂岩は他の地域にも分布しているので、同様の非変質球粒が含まれている可能性があり、これらを系統的に調べれば、大気中の酸素量の歴史的变化を解明できるだろう。(K)

爆発的な火成活動でできた潜噴火構造

Luczaj, J., 1998, Argument supporting explosive igneous activity for the origin of "cryptoexplosion" structures in the midcontinent, United States. *Geology*, 26, 295-298.



カンザス州からイリノイ州にかけて直線上に並ぶ潜噴火構造

アメリカ合衆国のカンザス州東部からミズーリ州、イリノイ州にかけて、約 700km を直線上に並ぶ 8 つのクレーター状地形がある。その成因について、分裂してじゅずつなぎになった小天体が衝突したという説と、地殻の弱線にそう火山活動がつくったという説の間で

論争がつづいてきた。著者は、これらの地形の生成年代が多岐にわたること、局地的構造線の交点に位置することなどの証拠をあげて、深部からの爆発的超苦鉄質火山活動でできた地形だという。ただ、衝突変成作用のみられる地形があることは問題だが、これも爆発的火山活動に原因していると考えられるとのべている。(K)

タイタンの下層大気にメタンの雲を観測

Griffith, C.A., Owen, T., Miller, G.A., and Geballe, T., 1998, Transient clouds in Titan's lower atmosphere. *Nature*, 395, 575-578.

土星最大の衛星タイタンの大気は、1980年のボイジャー1号の観測によって1.4barの窒素と0.05barのメタンからなることがわかった。このことから、メタンは地球大気中の水蒸気と似た循環をしていることが期待された。著者らは1993年から97年にかけて、英国赤外望遠鏡(UKIRT)による近赤外分光観測をおこない、タイタン大気中にメタンの凝結によってできた雲があることを探知した。この雲は低緯度地帯の比較的低高度(15±10km)に浮かび、タイタン表面の9%程度をおおっているようにみえる。2004年に到着するカッシーニ探査機のさらなる観測が期待される。(K)

ガリレオの観測から推定したエウロパの分化した内部構造

Anderson, J.D., Schubert, G., Jacobson, R.A., Lau, E.L., Moore, W.B., and Sjogren, W.L., 1998, Europa's differentiated internal structure: Inferences from four Galileo encounters. *Science*, 281, 2019-2022.

ガリレオ探査機は木星の衛星エウロパにこれまで4回接近し、このときの電波のドプラー偏移の観測から、従来の内部構造モデルが改訂されてきた。それによると、エウロパ内部は分化がすすんでおり、金属核とそれを取りまく岩石質マントル、さらに一番外側の氷と液体の水の外殻にはっきり分かれる。しかし、氷と水の殻のすぐ下に密度のたかい珪酸塩と金属の混合層がある可能性を、現状ではまだ否定できない。中心の金属核の大きさは未確定であるが、エウロパ半径の50%はあるだろう。氷と水の外殻の厚さは80~170km程度であろう。(K)

エウロパとカリストの地下の海存在を物語る誘導磁場

Khurana, K.K., Kivelson, M.G., Stevenson, D.J., Schubert, G., Russell, C.T., Walker, R.J., and Polansky, C., 1998, Induced magnetic fields as evidence for subsurface oceans in Europa and Callisto. *Nature*, 395, 777-780.

ガリレオ探査機が1995年12月以来観測してきた木星の四大衛星のうち、エウロパとカリストには自身もつ目立った磁場はないことがわかった。ところが、エウロパとカリストが木星磁気圏内を通るとき、その磁気圏自身に乱れがおこる。両衛星は自身の磁場をもたないから、この乱れは両衛星の表面直下に電気伝導性の層があり、誘導電流が生じるためと考える他ない。つまり両衛星の地下に塩分にとむ液体の水(海)があるとすれば一番好都合である。このような地下海の存在は、すでにエウロパでは地質学的にも考えられている。(K)

月の地域的な暗い被覆堆積物

Wietz, C.M., Head III, J.W., and Pieter, C.M., 1998, Lunar regional dark mantle deposits: Geologic, multispectral, and modeling studies. *Jour. Geophys. Res.*, 103, E10, 22725-22759.

クレメンタイン探査機の5チャンネルの紫外-可視データを用いて、月の7地域の暗い被覆堆積物(DMDs: dark mantle deposits)を調べた。各地域のスペクトルデータからガラス粒の結晶度を求め、それから火山噴火の噴煙中での冷却率を推定した。熱の入江のDMDが最も青みをおびてガラスの吸収帯が弱く、アリストアルコス台地のDMDが最も赤みをおびてガラスの吸収帯が強く、残りの5地域はその中間である。DMD7地域のうち、オリエンタレベイスン南部のリング状DMDで、9×20kmの楕円形凹地が給源であることがわかった。ここから360m/sで傘状に噴煙が広がり、半径80kmのDMDが堆積したらしい。他の6地域で給源が見つからないのは、あとからの溶岩に埋められたためだと推定される。(S)

スミス海と縁の海の堆積物の特徴

Yingst, R.A. and Head, III. J.W., 1998, Characteristics of lunar mare deposits in Smythii and Marginis basins: Implications for magma transport mechanisms. Jour. Geophys. Res., 103, E5, 11135-11158.

スミス海と縁の海にある34の溶岩流と溶岩湖を分析し、海の火成活動のようすを調べた。1回の噴火期の平均面積と体積は大きく、それぞれ約950-1000km²、約200km³と見積もられる。この噴出量は地球で知られる最大の噴火（洪水玄武岩）に匹敵するものである。浅いマグマ溜まりを示すカルデラのような地形がないことから、給源は深く、マントルであることが推定できる。噴出年代はインブrium代～エラトステネス代にわたるが、特に38～36億年前に集中する。付近の暗いハロをもつクレーターからは、この地域にさらに古い火山活動があったらしい。(S)

INFORMATION

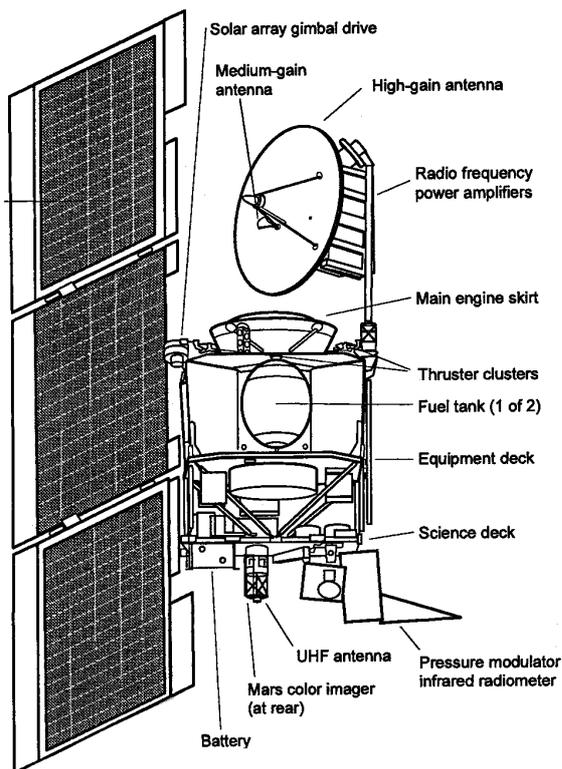
マーズサーバイヤー98 はじまる

マーズサーバイヤー98は、NASAのMars Climate OrbiterとMars Polar Landerの2つの探査機（いずれも総重量約600kg）による火星探査計画で、Climate Orbiterはすでに12月10日に打ち上げられ、Polar Landerは来年1月3～27日、デルタIIロケットによってケープカナベラルから打ち上げられる。

Mars Polar Lander（左図）の科学目標は極地域の地表調査で、予定では1999年12月3日、南緯75度の層状堆積物上に着陸する。長さ2mのアームによって溝を掘り、層状構造の地質など約3か月

間の観測をおこなう。Polar Landerの降下途中ではバスケットボール大の2台のミニ観測機を放出し、Polar Landerからそれぞれ100km離れた地点に衝突させて地下2mまでの状態を調べる。また降下中の本体からもカメラによって接近する地表面を撮影するなど野心的な観測が計画されている。

Climate Orbiterは高度400kmの極軌道周回機で、初期の目的はPolar Landerとのデータ通信である。Landerの観測終了後はその名が示すように、火星大気を観測する。搭載されるPressure Modulator Infrared Radiometer（重量42kg）では、可視光と6～50μmのスペクトルによって大気の温度、ダスト量、水蒸気量、雲量を測り、火星大気の水平・垂直構造を明らかにする。もう1つの搭載機器Mars Color Imager（重量2kg）は、超広角（地表分解能1m）と標準視野カメラ（40m）によって日変化や季節変化を調べる。観測期間は火星の1年にあたる約2年3か月で、役割はこの頃到着するマーズサーバイヤー2001の周回機に引き継がれる。



編集後記：本号では宇宙科学研究所の藤原顕さんに小惑星探査機 ミューゼス-Cを紹介していただきました。この探査機についてはまだ知らない方が多く、解説を読んで日本の惑星探査もいよいよ本格的になってきたと感じる方が多いのではと思います。いっぽうアメリカでも2機の火星探査機が打ち上げられ、1980年代から続いた惑星探査機の不況や不運はようやく脱した感があります。来年も惑星地質学にとって実り多き年であるように期待したいものです。(S)