特集「小惑星レゴリスの起源と進化」 小惑星レゴリスの科学と探査手法

秋山演亮1, 矢野創2, 吉田二美3,4, 安部正真2, 藤原顕2

小惑星を探査機で直接調査することにより、地上 観測ではわからなかった様々なことが判明する、現 在日本ではMUSES-C計画が打上を目前に控えてお り、ポスト MUSES-C時代の探査計画に関しても議 論が始まっている。MUSES-Cまでの小惑星探査は 初期的な段階であり、どの小惑星に行っても新規の 知見が期待されたため、"工学的に行きやすい天体 の探査"の時代であった。しかし無数の小惑星の全 貌を解明するには、そのすべてに探査機を送ること は不可能なので、既に得られている膨大な量の地上 観測や宇宙塵・隕石試料の分析によるデータを統計 的に活用しなくてはいけない、その為、ポスト MUSES-C時代には、地上観測と宇宙物質の分析を 橋渡しする"ground truth(遠隔観測データの,直 接試料観測した現地データによる校正・論拠)を与 える地点観測としての小惑星探査"の時代になるだ ろう.

その際,地上観測や宇宙塵、カクレキ岩隕石試料 から得られるデータの多くは小惑星表面のレゴリス に由来すると考えられる.また,探査の中でも周回 機による観測だけでは得られなかった微細な表面構 造や物性,組成,絶対年代等を知るためには,着陸 探査やサンブルリターンによる表面物質の調査が必 要不可欠になる.本稿ではこのような観点から,小 惑星レゴリスの科学と探査手法に関して検討を行っ た.

1. 小惑星レゴリスの探査手法・ 計測機器

1.1 探查手法

探査機を直接小惑星に送り込むと,地上観測より もはるかに詳細な調査ができる.また,場合によっ ては探査機でしか観測できない観測項目もある.表 1に小惑星の探査手法毎に計測可能な項目をまとめ た.地上観測や宇宙塵・隕石試料の分析では既に膨 大なデータが収集されているが,探査機からはまだ 数例のデータがあるにすぎない.

今後さらに多くの小惑星への探査が望まれるが, 膨大な数の小惑星の全てに探査機を送ることは非現 実的である.そこでこれからは,既に得られている 膨大な地上観測や宇宙物質の分析データを橋渡しし て,有効に活用するために必要な項目を厳選した探 査が求められる.現在と未来に関する小天体の探査 計画を,原始太陽系において解明すべき重要なイベ ントに応じてロードマップ(図1,表2)にまとめ た.実際の探査にあたっては,各々の科学目的に応 じた手法や計測項目を検討する必要がある.そこで まず探査手法に関してまとめた.[10]

3 国立天文台光学赤外線天文学研究系

4. 神戸大学大学院自然科学研究科

¹ 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

² 文部省宇宙科学研究所惑星研究系

表1	小天体探査の手法毎の計測可能項目	(観測機器の詳細に関しては各論文参照)

探査手法	計測可能項目	実例
地上・軌道上	スペクトル型(表面元素、宇宙風化の有無)	・すばる望遠鏡
光学望遠鏡	アルベド	[1]
	光度曲線(形状,自転軸の傾きの有無)	・ハッブル宇宙
	サイズ	望遠鏡[2]
	軌道要素	
	自転周期	
	掩蔽時に外縁シルエット,など.	
地上電波望遠鏡	十分近い場合,3次元形状	・アレシボ雷波
		望遠鏡[3]
フライバイ	自律航法用軌道要素データベースの漸次向上	・ガリレオ[4]
	遠隔観測より明るい信号、高い空間分解能による光度変化	
	観測面だけの形状・表面地形	
	より精密なサイズ	
	重力場・質量(接近時の探査機軌道のずれ)	
	バルク密度(質量と体積から)	
	残留磁場	
	観測面だけの粗い表面物質(赤外・X線分光による鉱物、元素)	
	付随衛星やダストバンドの発見。など	
オービター	全球形状・表面批形	• NFAR
(ランデブー)	より詳細な重力場、質量、体積	SHOFMAKERISI
	ローカルな平均密度	• MUSES-CIA
	高分解能表面スペクトル	MODES-C[0]
	レゴリス層の右無	
	全市風化作用の有無	
	黄差運動の有無・程度	
	白転軸の傾き	
	おおキかた会球的表面物質 (赤外・X 編分光)による鉱物 示素)	
ペネトレータ	内部構造 (Rubble Pile など) の解明	A TINAD AI71
+人丁批震源	表面付近の教蔵性	LUNAK-A[7]
着陸楼	定占固定観測	· [2] \$ \$
	表面物質(鉱物 岩石組成 元表など)	
	次回初員(弘初,石石盈成,元末なこ) 微小構造(レイリスの対度分布 形状など)	
ローバー	限学範囲の設動観測	MUCECC
	政定範囲の特別説例 	· MUSES-C
	30回初員(弘初,石石祖成,元糸なこ) 急小塔浩(レゴリフの封由兵士 形状たい)	
	素面付近の地質層度	
サンプルリターン		. MUSES C
	「休禾初員の租政(弘初,石石,ル糸なこ)、租職(和田,回さ寺/, 一 懲小構造(封乳の封由公本 形状わじ)	· MUSES-C
	吸力)特理(既行)2位反力4月, 形仏なこ)。 四方、空宝庵計判しの4月月	
	1914 丁田歴矾村C 1911 別, 小王はてペクトル刑トの相関	[9]
	す田四山FF用の住皮, 小玉仕トの大阪本式曲	
	小八谷上り小貝変成長。	
	171次100711米・進化度, 動的ムルの出産	
	母大神生成・衝突破壊の絶对年代の決定,など.	1

.

est offer in an other sing of

الهورا المحارب والمنهو والم الممتر والتار المحاب المحافي متراك والمراكب

NII-Electronic Library Service

(1) フライバイ探査

探査機が小惑星近傍を通過し,比較的短期間に様々 な計測を行う探査手法.

- 長所:打ち上げ時期,軌道をうまく設定すれば途 中で軌道修正をほとんど行わずに,一つの 探査機で複数小惑星を観測可能.
- 短所:探査機と小惑星の会合速度がかなり速いた め、全球探査には不向き.
- 観測:光学(測光・分光・偏光)観測,電波観 測,放射線観測,蛍光X線観測,探査機軌 道のずれによる重力場・質量の推定など.
- (2) ランデブー探査

探査機を小惑星の周回軌道に投入する,あるいは小 惑星と同期させた公転軌道を周回させる探査手法.

- 長所:小惑星全球に渡って広範囲で探査が出来 る.
- 短所:小惑星の構成物質を直接分析できない.
- 観測:光学(測光・分光・偏光)観測,電波観 測,放射線観測,蛍光X線観測,探査機軌 道のずれによる重力場・質量の推定など.
- (3) ランダー探査

上記(1),(2)により接近した探査機から着陸機を小 惑星に降下させる探査手法.

長所:小惑星の表面付近を直接探査が可能.

- 短所:安全な場所を選んで自律的に着陸し,微小 重力環境下で機体を小惑星表面に固定する 技術開発が必要.
- 観測:電磁波を利用した微視的な観察,質量分 析,弾性波速度構造解析など.

(4) ローバー探査

上記(3)をさらに発展させ、自走車(ローバー・表面 移動ロボット)を用いる探査手法.

長所:(3)よりも広範囲の地質構造探査が可能.

- 短所:移動機構や通信機能等,探査機の構造が複 雑になる、微小重力下でも目標地点までの 表面を移動できる技術開発が必要.
- 観測:電磁波を利用した微視的な観察,質量分 析,弾性波速度構造解析など.ローバーに はサンプリング機構のみを搭載し,分析は 着陸機に戻って行う方法も考えられる.

(5) サンブルリターン

探査対象から採集した物質を地球に持ち帰る探査手 法.

- 長所:制御された環境下で、機器の重量を気にす ることなく、その時代における最高レベル の分析装置を使って、様々な方面から研究 者が直接分析できる。
- 短所:レゴリスを分析するにあたって必要不可欠 な情報である層序関係や土壌の空隙率を維 持したままのサンプリング技術(詳細は後 述)はまだ確立していない.往路のみなら ず復路の燃料や軌道制御,リスクに関する 検討,科学的に要求される試料の性質に応 じた採集機構(後述)の開発,航行中およ び地球再突入時に試料を汚染・変質させな い対策,地上での初期分析・試料保管施設 の設置、運用などが必要.
- 観測:地上で行えるすべての分析手法.サンプル 採集方法としては軌道上,あるいは小惑星 近傍でプロジェクターを打ち込み,それに よって発生するイジェクターを回収する方 法(2章参照)や,ランダーやローバーに より試料を選別して,あるいは多点から採 集する方法なども考えられる.

小惑星レゴリスの科学と探査手法/秋山演亮・矢野創・吉田二美・安部正真・藤原顕



時間 (logT) (過去<=>現在): サイズ (LogD) (小<=>大): 進化・分化レベル (原始<=>変成)

図1 始原天体探査のロードマップ、日本についてはMUSES-CおよびMEFで提案された計画を記してある、探査機の記号は表2 に対応

1.2 計測機器

フライバイやランデブー探査機による計測と地上 観測や宇宙物質分析データを関連付けるためには, 表層レゴリスの調査が不可欠である.そこで,探査 機の科学目的によって搭載機器は異なるが,一般的 な機器についてそれぞれの特徴と,具体的に何が明 らかになるかを以下にまとめた.

(1) 光学撮像器・分光器・偏光計・測光計

探査機からの光学撮像では,地上よりもはるかに 高分解能で表面地形の詳細な形状を計測できる.こ の画像からクレーターの大きさとその数を計測し, 表層年代を推定することが出来る(クレーター年代 学)[11].測光や偏光観測により,表面の凹凸やレ ゴリスの粒度等に関しても情報が得られる.一方, 紫外・可視・近赤域での反射スペクトルからは,表 面物質の鉱物とその割合が推定できる.スペクトル 勾配変化や吸収帯の半値幅変化・中心波長変化か ら,宇宙風化の程度や粒径や空隙率,温度などの情 報を得ることが出来る.また,クレーター内外での スペクトルの違いから天体表面近くの地下の層序構 造を推定できる.

(2) LIDAR

LIDARとは10nsec程度の短いスパンでレーザー パルスを小惑星表面に照射して、反射してきたパル ス光の伝搬時間、エネルギー、波形から、表面まで の距離、表面物質、すなわちレゴリスの粒径や形状 や反射能などの物性、およびローカルな地形の傾き に関する情報を得る装置である[6].

(3) 蛍光X線·回折分析器

蛍光X線・回折分析器は主要な元素組成・鉱物組成 を、太陽光もしくは放射線を励起源とした各元素固 有のX線輻射を利用し、それぞれ蛍光X線分析法・ X線回折法によって調べる装置である[6].主要元素 の定量分析機器としては他に、火星探査でも活躍を 220

記号	探査機 (打ち上げ年,国)	目標天体	小天体科学に関する主な目的
	Ulysses (1990, 米・ESA)	太陽系ハロー部	星間慮の検出
(2)	Genesis (2001, 米)	太陽・地球し1点	太陽風粒子サンプルリターン
(3)	Pluto-Kuiper Express (2004*, 米)		写王星・ EKBOフライバイ(* =本夏延期が決定).
4	Galileo (1989,米・ESA)	木星とその衛星,ガス	木星外縁衛星フライバイ.木星衛星起源微粒子ス
		プラ,イダ&ダクティル,	トリームの検出。小惑星ガスプラ,イダ&ダクティ
		シューメイカー・レビー	ルのフライバイ。シューメイカー・レビー第9彗星
		第9彗星	破斤の不星衝突を直接観測.
5	Deep Space-1 (1998, 米)	小惑星プレイユ ボレリー彗星	小惑星,彗星核フライバイ(燃料があればW―H 彗星(後述)も)
6	Stardust (1999, 米)	ヴィルド第2彗星	彗星塵・星間塵サンプルリターン
	CONTOUR(2002, 米)	エンケ彗星,シュワス	三つの短周期彗星にフライバイ
		マン・ワッハマン第3彗星, ダレスト彗星	
8	Rosetta(2003, ESA)	ウィルターネン彗星	彗星核ランデブー・着陸による全球探査
9	Deep Impact(2004, 米)	テンプル第一彗星	彗星核フライバイ、人工クレーターの生成による 衛空登光と核の内部構造網察
10	NEAR-Shoemaker (1996	マティルド、エロス	C.利小或星フライバイ&S.利小或星ランデブー
	米)		
1	Hera (2006, 米)	1999AO10, 2000AG6	三つの近地球型小惑星へのマルチランデブー&
		1989UQ	サンプルリターン
12	Aladdin (2003*,米)	フォボス,ダイモス	火星衛星ダブルフライバイ&サンプルリターン (*= 前回のディスカバリー環抜時の予定)
13	New World Ex-plorer	ベスタ	○ NB(3) (分化玉休) ランデブー
	(2005, 米)		
14	MASTER (200?*, ESA)	火星,ベスタ	V型小惑星(分化天体)ランデブー
			(*=今秋のFlexi選抜では不採用))
15	Comet Nucleus Sample	ウィルソン・ハリント	彗星核(CAT天体?)着陸・サンプルリターン
	Return (2005, 米)	ン彗星?	
(A)	黄道面脱出ミッション	太陽系ハロー部	太陽系ダスト環境をF-コロナからEKBO空間まで
	(2010年代半ば、日)		見下ろす.星間塵の組成計測.
(B)	EKBO フライバイ/ラン デブー (2010 年代末 ? , 日)	EKBO	EKBO フライバイまたはランデブー.EKBO 起源 微粒子の検出・組成計測.
(C)	MUSES-C(2002, 日)	1998SF36	近地球型小惑星一個へのランデブー&サンプルリ
			ターン、宇宙塵・隕石試料と小惑星物質の世界初の
			直接比較.
(D)	スペクトル既知 NEO	例:ネレウス,オルフ	二つの異なるスペクトル型の近地球型小惑星への
	マルチランデブー&サンプル	ェウス,1982XBなど.	ダブルランデブー&サンプルリターン.MUSES-C,
	リターン(2011?, 日)		Heraなどと協力して小惑星博物学の決着を目指す.
(E)	M型小惑星探查(日)	例:1986DA	M型小惑星ランデブー&着陸. 隕鉄の起源究明. 分化玉体の中心核探査
(F)	ファミリーミッション	例:フロニス族小或星	メインベルト小或見体マルチフライバイ&サンプ
(-)	(2008 or 2013? E)	(イダ、バイコヌール、	ルリターン、母天体である盾始或足の衝空層歴・内
		ミモーサ. モールトナ)	部構造の解明、小惑星族起源微粒子の組成計測
(G)	ベスタランデブー(日)	ベスタ	V型小惑星ランデブー、分化天体の内部構造観察
			HED隕石の起源究明.
(H)	フォボス&ダイモス	フォボス&ダイモス	火星衛星の内部構造探査. 巨大クレータを持つ小
	着陸探査(日)		天体内の空隙の原因究明.
(I)	NEO フライバイ&火星 衛星サンプルリターン(日)	NEO?&フォボス	複数機の編隊飛行による小惑星のフライバイ全球 撮像.火星衛星表面サンプルリターン.
(J)	CAT (彗星·小惑星遷移)	ウィルソン・ハリント	CAT 天体ランデブー&着陸探査. 彗星から小惑星
	天体探査(2010?,日)	ン彗星	への変遷過程の解明.サンプルリターンはオプション.

表2 小天体探査ロードマップ(図1)中で、現在運用または予算がついて準備中のミッション、および将来探査案(斜字)の一覧

小惑星レゴリスの科学と探査手法/秋山演亮・矢野創・吉田二美・安部正真・藤原顕

した APXS (Alpha-Proton X-ray spectrometer) など もある.しかしそれに比べて蛍光X線・回折分析器 は、省電力・軽量であること、放射性元素の搭載が 不要であることなどの利点がある.

(4) y 線分光器

y線分光器は蛍光X線分析機と同様の励起源を用い、主要元素の組成(Fe, Ti, Si, Mg, Al, O等)を定量 化できるばかりでなく、天然放射性元素(K, U, Th)の存在度も計測できる機器である.これらの元 素の存在度から、小惑星の母天体の熱源が推定できる.

(5) 地震(弾性波)計・地中データ

地中レーダーは電波を照射し, その反射波の往復 伝播時間から天体内部の誘電率の変化面深度を、減 衰率から空間分布を計測する装置で、地震計と同 様、天体の内部構造を探ることが出来る、小惑星は そのスペクトル型に対応する隕石の母天体と考えら れているが、隕石に比してバルク密度はかなり低い ため、空隙率が大きいのではないかと考えられてい る、しかし、その原因については考察材料が乏し い、これらを解明する糸口として、再集積過程と熱 的進化に重要な制約を与える、全球の内部構造探査 が大切である. 月や地球では、これまでペネトレー タを使った地震計やレーダーサウンダーが考案され てきた. 彗星核についてはロゼッタでレーダーサウ ンダーが計画されているが、空隙率が多いために地 震波(人工震源が必要)やレーダーサウンダーの信 号の伝播が容易ではないと想像される小惑星では, まだ実施例はない.

(6) 温度計

軌道上からの探査では熱赤外放射計を利用し,実 効放射率と対象表面温度を測定することが出来る. この場合,広範囲の分布と時間変化の観測が容易で あり,表面温度を支配する深さを調べたり,構成物 質,粒径,比熱,熱伝導率等の関数である熱慣性[3] の地図を作製することが出来る.着陸探査では熱電

يواحمه المراجع والمرور وواحمه والمرور والمراجع والمراجع والمواجع والمواجع والمراجع والمراجع والمراجع والمراجع والمراجع

対を使って複数深度の温度を計測し、熱伝導率、熱 流量を計測することが出来る.これらはいずれも、 現在の表層環境を定量的に把握する基礎として重要 な数値である.

その他に探査で明らかになる量として,質量・重 力場・バルク密度などがある.これらは探査機自身 の軌道のずれから求められる.まず小惑星近傍にお ける探査機のずれを,地上から測距する方法や自由 落下に要する時間から計測し,小惑星の質量・重力 場を求める.それらを撮像器・測距計から得られた 全体形状から求めた体積の情報と併せることで,小 惑星のバルク密度が得られる.

1.3 異なる深さのレゴリス層の探査意義と手法

地上観測によるデータを補完する,探査でしか得 られない情報は,表面レゴリスの直接観測によって 得られる物理的・鉱物的・地質的情報である.これ らの調査には、ランダーやローバーによる探査,あ るいはサンブルリターンが必要不可欠である. また,地上観測のみならず,既に多量のサンプルを 入手している宇宙塵・隕石のデータベースと直接結 びつける為には,表層,あるいはもう少し深い地点 での調査が必要である.そこでこの項では,レゴリ ス層の深さに対する探査意義を以下にまとめた. (1) 0.1~1mmオーダー深さのレゴリス

地上観測や地球軌道上から観測されている小惑星 表面の性質は、全て表層レゴリスに依存しているの で、表面のレゴリス層は重要な調査対象である。周 回軌道からの蛍光X線観測では、表面から100µm 程度までの深さに関する主要元素の存在度が調査で きる。また表層レゴリスでは、メテオロイド衝突と 太陽風のスパッタリングを受けたことによる宇宙風 化の影響が観測され、最表層で宇宙に曝露していた 期間が推定できる[12].表面の厚密構造や微細構造 の直接観測等をするためには表層レゴリスの観測や 222

サンブルリターンが必要となる.

(2) 1 cm オーダー深さのレゴリス

このオーダー深さのレゴリスには、太陽起源の放 射線は届かないが、高エネルギーの銀河宇宙線が到 達している。そこで銀河宇宙線による生成核種の同 位体比計測、希ガス測定が出来れば、レゴリス層の 集積に関する履歴が辿れる。しかし現在の技術で は、小惑星表面にて同位体分析やmm~µmレベル の顕微観測を地上の実験室と同じ精度で行える小型 機器は作られていない。そのため、この深さの試料 分析にはサンブルリターンが必要となる。

(3) 10cm オーダー深さのレゴリス

この深さのレゴリスは表層とかなり撹拌されてい ると考えられる.この深さのレゴリスの宇宙風化度 を表層レゴリスの宇宙風化度と比較する等の手法に より、撹拌度を押さえて表層レゴリスの物質循環を 定量的に制約することから、レゴリス形成の歴史に 関する知見が期待される.このような調査にあたっ ては地質層序を広範囲に渡り調べることが必要なた め、ローバーによる移動探査が有効である.

(4) 1 mオーダー深さのレゴリス

このオーダー深さでは、レゴリス・角碟化した岩 石等からなる、宇宙線照射やメテオロイド衝突によ る衝撃・熱変成を受けていない層が存在していると 思われる.この層に関する岩石・鉱物学的研究か ら、その小惑星の比較的大規模な衝突破壊の履歴 や、場合によっては水質変成の情報も得られるだろ う.これらを調査するためのその場分析器も開発が 進められているが[13]、それにはコアボーリングや 後述のインパクトサンブリング等による深部試料の 採集技術を確立しなくてはいけない.また、小惑星 表面にはPhobosに見られるようなグルーブといっ た、地下深くまで続いていると考えられる割れ目が 存在している可能性が有り、このような割れ目近傍 までローバーを送り、そこから光ファイバーを差し 込む、あるいは蛇型のブルーブを降下させる等の方 法も考えられる.

(5) 10mオーダー深さのレゴリス

火星衛星フォボスやS型小惑星エロスのような数 + kmサイズの小天体では、このレベルの深さでレ ゴリス層が尽きると考えられる[14].そこでこのオ ーダー深さから試料を採集出来れば、地球に到達し ているコンドライト隕石等と同様な、角碟化してい ない岩石試料が入手できるかも知れない。

レゴリス試料のサンプル リターン

1.3節で見たように、小惑星レゴリスは探査でき る深さによって、その科学的意義や観測対象が異な る.そのため次に、様々な深さから小惑星物質を採 取する具体的な方法について検討していく

2.1 サンプルリターン技術の変遷

惑星探査におけるサンプルリターンは、1960 -70年代の米ソの月探査から始まった.米国のアボロ 計画では、有人着陸機および有人ローバーによる6 着陸ミッションの合計で約300 kgの月面試料を地 球に持ち帰った.それらは宇宙飛行士が拾い上げた 表面岩石や、コアボーリングしたレゴリス層の試 料、および宇宙服や道具に付着した徴粒子を含んで いた.一方、旧ソ連のルナ計画では、2回の無人ロ ーバーでレゴリスと小石を掬って、約300 gの月面 試料を地球に回収した.

1980年代以降には、地球低軌道上の有人往還機, 回収型長期曝露衛星,そしてミール宇宙基地などを 利用して、数千個もの「地球環境と反応していな い」メテオロイドの捕集や衝突痕残留物の回収が, 頻繁に行われるようになった[15].現在は、MUSES-Cやスターダストの他にも、太陽風粒子をシリコン ウェハーへ打ち込ませて回収する「ジェネシス」が 2001年の打ち上げを控えている. 2000年代以降も、こうした無人探査機による小天 体サンプルリターンの機運は高まっている.JPLで は、彗星核や火星地下土壌のコアボーリングによる サンプルリターン計画が、それぞれ2000年代後半、 2010年代の打ち上げを目指して準備されている.さ らにディスカバリー計画でも、火星衛星にフライバ イして衝突放出物を捕集する(後述)「アラジン」 や、近地球型小天体3個にランデブーした後に、 MUSES-C同様の「タッチ&ゴー」手法(後述)で ドリルを使った試料採集を行う「ヘラ」ミッション が提案されている.

2.2 レゴリス試料採集地点の狙い目

1/6 Gもの表面重力がある月と違って小惑星で は、その小さなサイズ、表面での微小重力、空隙率 が大きな内部構造などから(詳細は道上他[14]を参 照)、メテオロイド衝突によって表面各地でばら撒 かれた放出物は広範囲に展開している.また、ガリ レオ、マーズグローバルサーベイヤー、NEAR-Shoemakerの探査で、少なくとも~10kmサイズの小 惑星表面には比較的厚いレゴリス層が形成されてい ることが分かってきた.

新鮮な露岩や、あるいは他の地域と違った特徴的 な傾向を示す地点からの試料採集は小惑星の熱進化 を調査する上で貴重であるが、地上観測のデータと 照らし合わせる場合には、むしろ平均的な組成から のサンブルリターンが必要となる. MUSES-C、ア ラジン、ヘラ(表2参照)など現在考えられている 無人機による小惑星サンプルリターンでは、どれも ローカルな「表面物質」を採集することになってい る.しかし衝突に伴う放出物は広範囲に渡ってばら まかれているため、局所的な地点から採集されたレ ゴリス試料であっても、より広範囲の平均的組成を 代表している可能性が高い.

現在, MUSES-Cでは複数個所からの試料採集が 予定されている.しかしもしも一回しかサンプリン

sylvapsiinkess**uum** saara ansiskke visi yr is reacha yr 100km i 100km a dynas

グが許されないならば、地上観測やランデブー計測 のデータと比較するために、全球の平均的特徴を代 表するレゴリス層を狙うのが望ましい.勿論、複数 回の試料採集が可能であれば、レゴリス以外に他地 域と際立って異なる傾向を示す地点も狙うことにな るだろう.

2.3 MUSES-C:「タッチ&ゴー」運用と インパクトサンプリング

MUSES-Cがサンプルリターンを行う近地球型小 惑星1998SF36は、執筆段階で正確なサイズやスペ クトル型が判明していないものの、絶対等級の明る さから、直径1km未満の大きさだろうと推測され る.するとその表面重力は、仮定するバルク密度に よって1万分の1Gから10万分の1G程度の微小なも のだと考えられる。そうした環境に着陸する場合、 機体着陸時の反跳を防ぐために噴射用燃料や探査機 自身をつなぎとめる錨等が必要で、大掛かりな探査 機になってしまう。また、試料採集場所のローカル な地形や表面状態(例えば、硬い岩石かレゴリス層 か)は、現地でサンプリングをするまで分からな い.

微小重力環境に着陸固定せず,一定量以上の表面 物質の試料を採集するために,MUSES-Cの設計段 階では「ハエ取り紙式」「ブラシ式」「ハーブーン 式」など様々なアイディアが出された[16].しかし 試作品の実験結果から,(1)自律航法による「タッ チ&ゴー」(降下・接触・上昇)運用を行い[17], (2)わずか1-3秒の接触時間の間に,5gの金属製 「弾丸」を秒速300mで表面に撃ち込み(図2),放 出される破片を筒と円錐を組み合わせた「ホーン機 構」によって探査機内部の格納部(キャッチャ)に 導く「インパクトサンブリング式」が採用された. ブロジェクタ,ホーン,キャッチャ,そしてそれを 地球帰還カブセルに移動させる搬送機構を合わせて 「サンプラー」と呼ぶ(図3)[18].

la la susse diber la susse diber sus la fi**nden**e en la signi la menta sus este su



図2 1G下でのMUSES-C実速・実寸スケールの耐火レンガ への衝突実験。放出物がホーン部に入っていく。



図3 MUSES-C動作試験用モデルに搭載されたサンプラーと 地球帰還カプセル

この方式は,主にミッション運用に優れている. まずレゴリスが全くない金属塊でない限り,硬い岩 石からレゴリス層まで多様な標的に単一のシステム で対応できるため,試料採集地点の表面状態がわか らない天体(初めて訪れるほとんどの小惑星)に対 しても事前にミッション計画が立てられる.次に, 着陸せずに採集できるため,探査機を小惑星に固定 するために必要な多量の燃料を節約できる.また装 置が比較的小型のモジュール式なので,小型探査機 にも積める.MUSES-Cのサンプラーは10kg未満で, 一回のタッチ&ゴーに費やされる燃料は約3kgに抑 えられている.さらに秒速300mでの衝突破壊は, いわゆる「超高速衝突」に比べて,試料の変成がは るかに少ない.

一方, MUSES-C方式の欠点は, 主に試料の大き さに関する限界にある.5g, 300m/sの弾丸による 放出物は、表面物質の層序関係を崩してしまう上、 表層の厚さ数mmから数cm程度の情報しか持って いないので、強いエネルギーの宇宙線フラックス (深く入射するもの)は分からない.また,露岩の 場合は数mm以上の組織構造(例:コンドリュール) が物理的に壊されたり、レゴリス層でも空隙を圧縮 してしまう可能性がある. 落下塔を使った微小重力 下での模擬採集実験からも、回収試料は少数の数 mmの破片と多数のmm未満の微粒子から構成され ることが予想されている. つまりそれらに必要なハ ンドリング・分析技術(特に非破壊)は、南極で人 間が拾えるほど大きな隕石よりも、成層圏や極地氷 床、地球低軌道などで採集される宇宙塵試料にはる かに近く, MUSES-Cでは宇宙塵試料と同様の手法 を採用している.この傾向は今後計画されているス ターダスト, ヘラ, アラジンにも共通している. なお, MUSES-Cにおける微小試料の汚染管理対策 としては、サンプラーの設計・材料の選定、製作・ 各種試験、地上・宇宙での運用、回収試料の分析の 各段階において、(1)「防止」(製作段階で高純度の 材料を用いたり,滅菌することで完全に汚染を防ぐ 方法),(2)「抑制」(地上試験・運用段階で試料に接 触する部分に蓋をしたり、窒素パージによって陽圧 環境を作って汚染物質の流入を抑制する方法),そ して (3) 「モニター」(航行中の探査機からのアウト ガスなど排除し切れない汚染については、各段階に

応じた「ウィットネスプレート」の設置・交換によ って汚染の程度を記録する手法),の主に3種類が 実行される.

2.4 次世代サンプルリターン技術の検討例

このような試料採集技術では,試料の収量や科学 的意義が小天体物質の表面状態に大きく左右され る.例えば,1998SF36のレゴリス層の厚さが数cm 未満でないと,直下の岩盤の情報を取り出せる可能 性は小さい.前章で述べたように,小天体の層序関 係,熱的分化の程度,空隙率といった内部構造に関 する情報を直接探査したい場合は,表面から10cm, 1m,10mオーダーの深さから試料を入手する必要 がある.深さだけに注目する代案としては,自律航 法できる500kgもの「弾丸」子機を超高速で彗星核 にぶつけて100mオーダーのフレッシュなクレータ ーを作る「ディーブインパクト探査機」方式によ り,放出物を採集する方法があり得る.しかしこの 手法では,どの深さからの試料かを特定することは 出来ない.

一方、層序やマクロ組織を維持した試料採集がし たい場合は、着陸とアンカーとコアボーリングを組 み合わせた「彗星核サンプルリターン」や「火星サ ンプルリターン」式が代案となる.しかしこれだ と、着陸機や小天体離脱・地球帰還用の燃料がかさ むので、試料を持ち帰る代わりに「実験室を現地に 持ち込む|ロゼッタのような逆転の発想もある。但 し、いずれの場合も大型のロケットが必要となる. 打ち上げ費用は節約しつつも、一つの探査機で複数 の小天体からサンブルリターンを行いたい場合、軌 道的に最も効率が良いのが「フライバイ・サンプリ ング」、つまり小天体にランデブーせず、最接近時 にディーブインパクト同様の自律型子機を表面に衝 突させる方式である.採集試料はやはり放出微粒子 だが、10kgオーダーの子機をぶつける(秒速8km ~9kmで衝突する)と数10cmから1mオーダーの深

tells is a test of a state of the

さから試料を得ることができる. 親機は小天体上空 で、スターダストのように極低密度素材で非破壊捕 集して,次の目的地へ向う.この方式に一番近いの がアラジンであり、日本で検討されている「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)」(表2.) 案も同様であ る.これらの各要素技術はすでに地上では、編隊飛 行や追尾型ミサイルの技術として確立している. 表層レゴリスの微粒子から読み取れる情報で科学的 に満足できればMUSES-Cの延長線上の採集技術で 良い. しかし母天体の衝突履歴や熱的分化など小惑 星の内部構造が鍵を握る課題の解明には、表層以下 のレゴリスからの情報が必要になってくる、そのた めには上記で検討したような、新しいタイプの小惑 星サンブルリターンミッションの運用計画および探 査機のデザインが求められる.

3. むすび

以上述べてきたように,小惑星探査には様々な科 学目的が想定され、それぞれに行くべき天体、必要 な情報が得られる深さ、そして最適な手法が異な る. MUSES-Cまでの小惑星探査は、まず工学的に 行ける小惑星で基礎的なデータを得ること自体が目 的となり得た.しかしポストMUSES-C時代のミッ ションでは、豊富な小惑星の地上観測データと宇宙 塵・隕石試料のデータベースを橋渡しして「小惑星 の博物学」が主目的である時代を早期に終わらせる ため、あるいは原始太陽系の進化過程の様々なイベ ントを解明するために、それぞれの目的に合致した 小惑星を選ばなくてはいけない、特に「小惑星の内 部構造」は多くのイベントを理解する上で重要であ り、その鍵を握るのが、深さによって科学的意義が 異なるレゴリス層である.そこで、それぞれの深さ からの試料採集法について、現有技術の長所と短 所,そして今後検討すべき課題を論じた.ポスト

MUSES-C時代の小惑星探査のあり方を考えるにあ たって、本稿が多少なりとも参考となれば幸いであ る.

謝辞

本稿をまとめるに当たっては、次世代の小天体ミ ッションを検討するインターネットグループ「小天 体探査フォーラム(MEF)http://www.egroups.co.jp/ group/minorbody/」[19]で交わされた議論を、適宜参 考にさせていただきました。130名を超える全国の MEFメンバー各位に心から感謝致します。また、本 稿執筆にあたり貴重なコメント、アドバイスを頂い た査読者各位および編集者の山本聡氏にも深く感謝 致します。

参考文献

- [1] 吉田二美他2000: 遊星人 本号集録
- [2] Binzel R. P. et al., 1997 : Icarus, 128, 95-103
- [3] Mitchell D. L. et al., 1995 : Icarus, 118, 105-131
- [4] Veverka J. et al., 1994 : Icarus, 107, 2-17
- [5] Thomas P. C. et al., 2000 : Icarus, 145, 348-350
- [6] 宇宙科学研究所 2000: MUSES-C 計画概要, 宇宙科学研究所
- [7] 宇宙科学研究所 2000: LUNAR-A 計画概要, 宇宙科学研究所
- [8] Barucci M. A., Lazzarin M., 1995 : Icarus, 118, 216-218
- [9] Fink U. et al., 1999 : Icarus, 141,331-340
- [10] 齋藤宏文 2000 : ISAS ニュース, No.231
- [11] 水谷仁 1980: クレータの科学,東京大学 出版会
- [12] Yamada , M. et al., 1999 : Earth, Planets and Space, 51, 1255-1265

- [13] 秋山演亮他 1999:次期月探査シンポジウ ム集録,国立天文台・宇宙科学研究所・宇 宙開発事業団
- [14] 道上達広他 2000: 遊星人 本号集録
- [15] Thomas P. et.al., 1992 : MARS pp1263- , Univ. of Arizona Press
- [16] Yano, H. 1999 : Earth, Planets and Space, 51 1233-1246
- [17] 吉田和哉 2000: 計測と制御 39 576-580
- [18] 久保田孝,中谷一郎 2000:計測と制御 39 570-575
- [19] 矢野創,小天体探査フォーラム 2000:日本惑星学会秋季講演会集録,82