

土壌採取機体「ノヴァ ～nova～」

金沢工業大学 夢考房 人工衛星開発プロジェクト

佐々木貴志・梅田佳奈・池田壮伸・菊池涼介

辻直哉・原野貴洸・矢崎由実子・湯田晴也・潟中圭介

1. 序論

1.1 背景・目的

近年、多くの宇宙開発機関が太陽系の成り立ちを知るために微小重力天体の調査・研究を行っている。特に、土壌を採取し解析することは上記を知る手段として非常に有効である。過去に小惑星探査機「はやぶさ」は微小重力天体からサンプルリターンを成功させた¹⁾。しかし、微小重力天体のサンプルリターンにおける土壌採取方法は未だ確立されていない。そこで、土壌採取機体「ノヴァ ～nova～」(以下本機体)を提案する。

本機体のミッションは微小重力天体の土壌を採取することである。これは微小重力天体のサンプルリターンに繋がるものである。微小重力天体の対象は惑星科学分野と惑星探査分野から注目されている火星衛星フォボスとする。

フォボスの誕生にはジャイアント・インパクト説と捕獲説の2説が唱えられているが、未だ解明されていない²⁾。本機体が採取したフォボスの土壌と火星探査機「キュリオシティ」が採取した火星の土壌のスペクトル型を比較することで、フォボスと火星の土壌が類似したものか判断でき、フォボス誕生の解明につながる。また、前者の場合、フォボスの土壌に火星の物質が含まれている可能性が高いと考えられている。さらに火星のサンプルリターンは、大気と重力の影響により大きなエネルギーを必要とするため現在まで達成されていない。フォボスでサンプルリターンを行うことで火星からサンプルリターンを行うよりも小さなエネルギーで火星の土壌を得ることができる。

1.2 ミッション要求

本ミッションの要求を以下に記す。

- ・10[g]以上のサンプリングができる³⁾。
- ・上下方向に混合されていない数 cm 以上(目標 3[cm])のサンプリングができる³⁾。
- ・微小重力天体表面より 30[cm]以深でのサンプリングができる³⁾。

2. 設計

2.1 全体像

本機体の全体像を図 2-1 に示す。

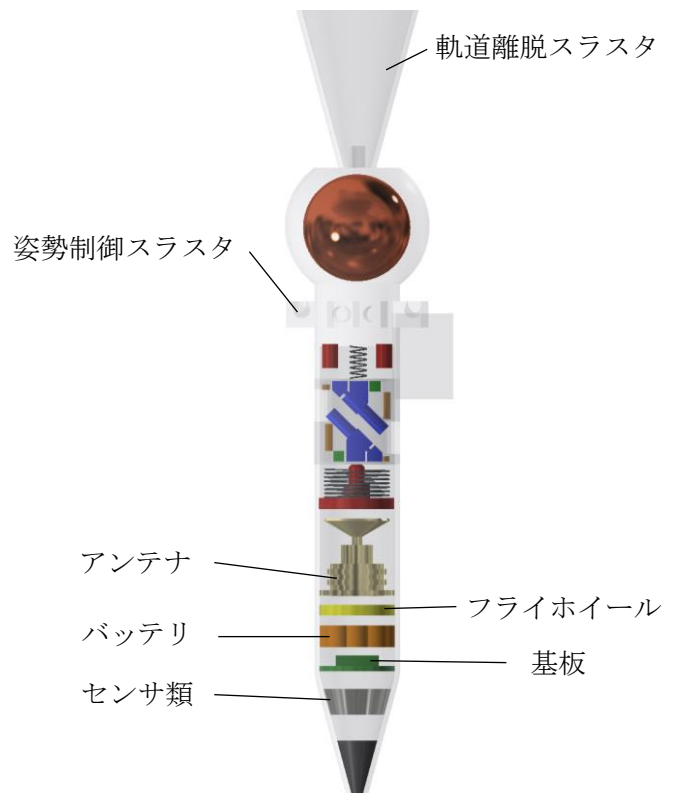


図 2-1 全体像

表 2-1 に本機体の諸元を示す。

表 2-1 本機体の諸元

		単位	値
機体	全長	mm	1480
	推進部を除く全長	mm	857
	直径	mm	160
	全体重量	kg	43.8
	突入部重量	kg	15.6
	モータ搭載個数	個	2
カプセル	全長	mm	160
	直径	mm	140
	重さ	kg	5.10
	モータ搭載個数	個	2

2.2 本機体に対しての要求仕様

- ・突入時の衝撃に耐える。
- ・土壌採取中の反力で機体が動かない。
- ・カプセルを安定して発射することができる。
- ・土壌採取部から土壌が出ない機構である。
- ・160[m/s]で本機体が突入する。

フォボスへ突入する速度(160[m/s])は月探査衛星「LUNAR-A」のペネトレータ衝突実験⁴⁾とエウロパのペネトレータ実験⁵⁾で得られた式を参考に計算する。

得られた計算式を以下に示す。

$$D = \alpha N \frac{M}{S} \log\{1 + (\frac{V}{V_0})^2\} \quad (1.1)$$

ただし、

D : 貫入深さ

V : 突入速度

V₀ : 砂の硬さに対応し速度の次元を持つ係数

N : ペネトレータの先端形状による係数

M : ペネトレータの質量

S : ペネトレータ機体の最大面積

α : 砂の硬さに依存する比例係数

とする。また、Nは

$$N = 0.26 \left(\frac{L_n}{d}\right) + 0.56 \quad (1.2)$$

ただし、

L_n : ノーズコーンの長さ

d : ペネトレータの直径

とする。まず、月探査用ペネトレータが衝突速度

300[m/s], 貫入深さ 2[m]のときの(1.1)未知数 α を求める。

α を求めることでフォボスの土壌が月の土壌と同様であると仮定したとき、本機体を 160[m/s]で突入させたとすると貫入深さ 1.44[m]になる。要求 30[cm]以深での土壌採取に必要な貫入深さは 1.1[m]以上であるため、要求を満たすことができる。

2.3 システム

本機体の動作システムは以下の五つのフェーズに分けられる。システム概要図を図 2-2 に示す。

- ① 航行フェーズ
- ② 突入フェーズ
- ③ 土壌採取フェーズ
- ④ カプセル発射フェーズ
- ⑤ カプセル回収フェーズ

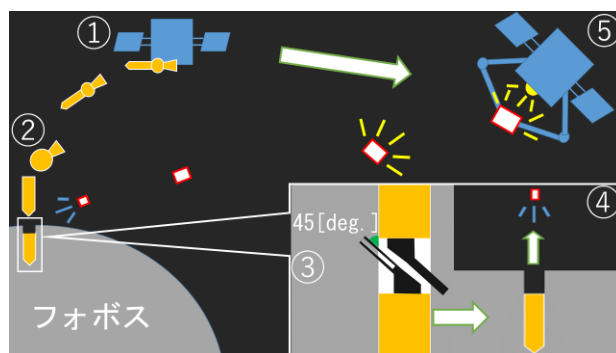


図 2-2 システム概要図

2.3.1 航行フェーズ

航行フェーズでは、本機体は親探査機に 2 機搭載された状態でフォボスへ移動する。親探査機は火星衛星探査計画(MMX)と同様の規模で大きさは縦 4.5[m], 横 2.1[m], 重量 3500[kg]である⁶⁾。また、ソーラパネルを含めた横の大きさは 14[m]である。搭載機器は帰還モジュール、探査モジュール、推進モジュールである。親探査機がフォボスの観測を行い、2 箇所の突入位置を決定する。その後、2 機の本機体がそれぞれの突入位置で親探査機から切り離される。

2.3.2 突入フェーズ

突入フェーズでは、親探査機から切り離した本機体を姿勢制御スラスタで時計回りに回転させ、

軌道離脱スラストで 160[m/s]まで加速させる。加速した後、2種類のスラストを切り離し地面に打ち込む。突入時の耐衝撃性については、月探査衛星「LUNAR-A」のペネトレータを参考にした⁷⁾。本機体の先端の形状は貫入のときに衝撃が小さくなるようにオジャイブ型にする。また、機体内部の隙間は樹脂を流し込み、衝撃で内部機器が壊れないようにする。

2.3.3 土壌採取フェーズ

土壌採取フェーズでは、本機体から2本のコアラーを反対方向に伸ばし、土壌を採取する。採取した後、コアラーをカプセルに収納し、電磁石によって蓋をする。

コアラーはカプセル内部にあり、伸張させるためにボールネジ機構を用いる。コアラーはカプセルの底面に対して 45[deg.]に固定している。2本のコアラーを反対方向に伸張する理由は、機体が一方方向の反力によって意図せず動くことを防ぐためである。コアラーは長さ 10[cm]の円筒で先端が丸く、コアラーをカプセルに戻すとき、採取した土壌をこぼさないためにカエシをつけた。土壌採取部を図 2-3 に示す。

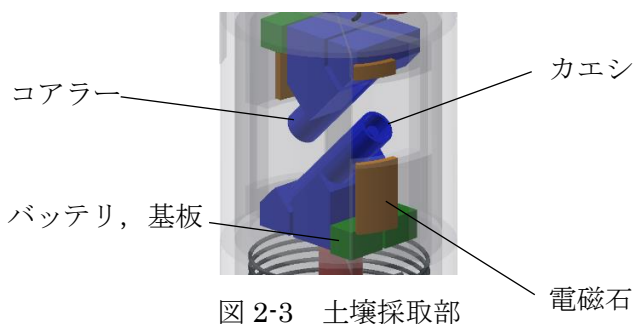


図 2-3 土壌採取部

ボールネジ機構はモーターで軸を回すことで接続している物体を前後に動かすことができる。これにより、モーターを固定した状態でコアラーをカプセルから土壌に伸張させることができる。コアラーがカプセルから土壌へ伸張する様子を図 2-4 に示す。

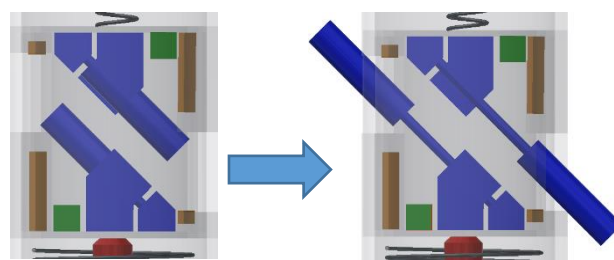


図 2-4 伸張する様子

2.3.4 カプセル発射フェーズ

カプセル発射フェーズでは、ばねと pinpuller⁸⁾、ばねと microlatch⁹⁾を用いてカプセルを発射する。pinpuller や microlatch 内部に形状記憶合金が組み込まれており、電荷を加えることで起こる合金の形状変化を利用したものである。発射のとき、レールを用いてカプセルの軌道を修正する。カプセル発射部を図 2-5 に、レールを図 2-6 に示す。

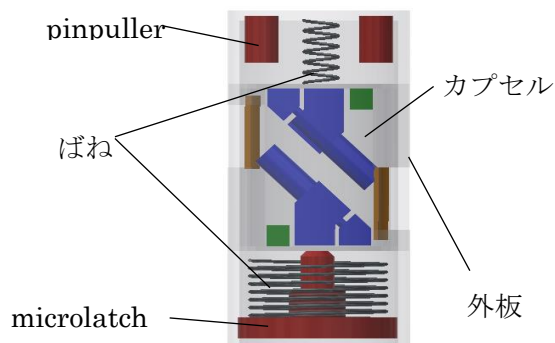


図 2-5 カプセル発射部

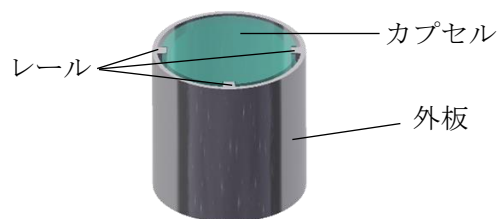


図 2-6 レール

カプセル発射のタイミングは、アンテナを用いて親探査機と交信し、親探査機が本機体付近の上空に滞在しているときである。

発射は蓋とカプセルの2段階に分かれる。

はじめに、本機体の最上部にある蓋を発射し、突入したときの機体上部に被った土を払い、カプセルの軌道を確保する。次に、カプセルを発射する。カプセル発射の流れを図 2-7 に示す。

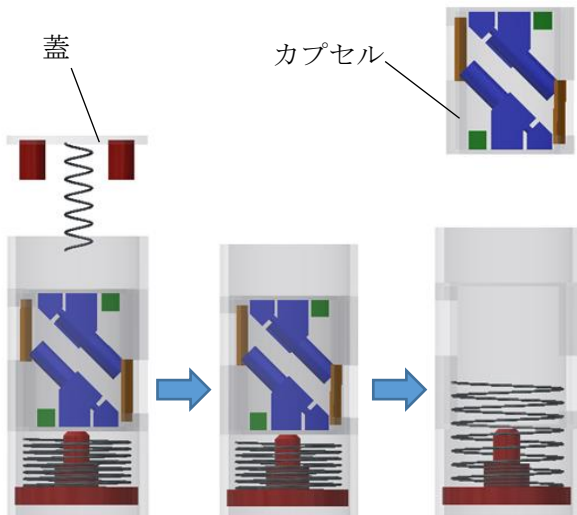


図 2-7 カプセル発射の流れ

フォボスの重力場の作用圏は半径 7.8[km]である。フォボスの三軸半径は最も短いところで 9[km]であるため、ペネトレータはフォボスの重力場の作用圏内に入らない¹⁰。そのため、カプセル射出はフォボスの重力場の影響を受けずに達成できる。

2.3.5 カプセル回収フェーズ

カプセル回収フェーズでは、親探査機がカプセルに向けて光を発し、光を反射したカプセルを感知する。感知したカプセルを 2 本のロボットアーム¹¹を用いてサンプルリターンカプセルに収納する。その後、親探査機が地球へと帰還する。

カプセルは反射材で覆われており、光を反射することで親探査機が認識し回収を行う。

3. 実験

本機体が要求仕様を達成できる設計であるか評価するために実験を行った。

3.1 土壌採取の実験

3.1.1 実験の目的および条件

土壌採取の実験目的は、以下の三つの要求を検証することである。

- ・ 10[g]以上のサンプリングができる。
- ・ 上下方向に混合されていない数[cm]以上(目標 3[cm])のサンプリングができる。
- ・ 土壌採取部から土壌が出ない機構である。

コーラーの先端部にあるカエシの形状を変えて実験を行う。カエシの因子は角度と形状である。角度は 90[deg.]、45[deg.]で、形状は円、三角、四角である。また、カエシ先端の因子は形状である。形状はとがりと丸である。土壌採取の実験で使用した機材を図 3-1 に、カエシの種類を図 3-2 に示す。実験因子を表 3-1 に示す。



図 3-1 実験機材

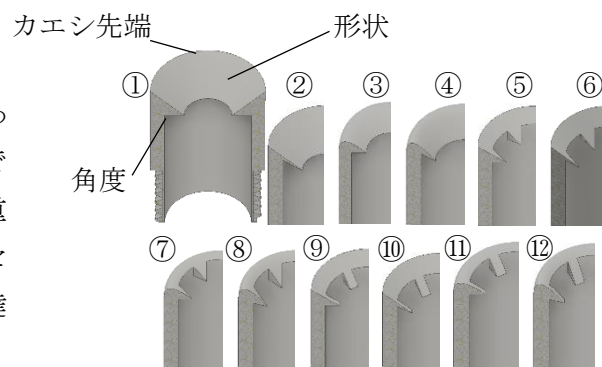


図 3-2 カエシの形状の種類

表 3-1 因子

	円	三角	四角	
90[deg.]	①	⑤	⑨	とがり
45[deg.]	②	⑥	⑩	とがり
90[deg.]	③	⑦	⑪	丸
45[deg.]	④	⑧	⑫	丸

カエシは 3D プリンタで造形したもの(材料は ABS)を使用する。ただし、表 3-1 の⑧と⑫は、カエシの造形に失敗したため実験ができなかった。

試料は珪砂と、珪砂と石炭系活性炭を 1:1 の体積割合で混合したもの(以下混合試料とする)の 2 種類を使用する。三つの要求を満たすものを採用する。

3.1.2 実験方法

始めに実験概要図を図 3-3 に示す。実験手順を以下に記す。

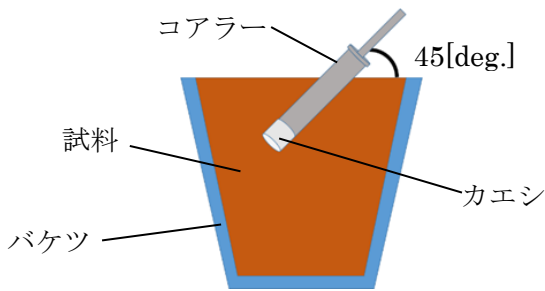


図 3-3 コアラの実験概要図

- 1) コアラにカエシを取り付ける。
- 2) 試料に 45[deg.]の角度でカエシの先端から 80[mm]までコアラを刺す。
- 3) 45[deg.]の角度のまま試料表面まで抜く。
- 4) 先端部から試料が出ないようにアルミ板で押さえる。
- 5) 電子天秤で採取した試料が何[g]であるか計量する。

また、試行回数は 10 回とする。

3.1.3 実験結果・考察

コアラの実験結果を図 3-4 に示す。

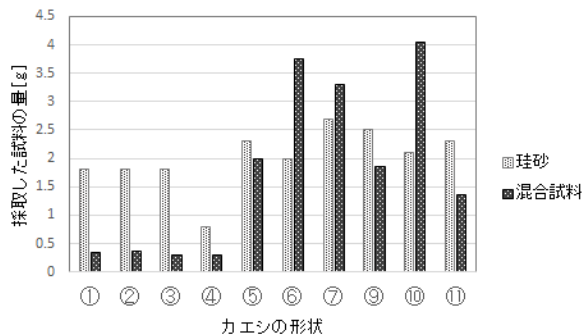


図 3-4 コアラの実験結果

図 3-4 より、試料毎に考察する。

珪砂の場合、カエシの形状による大きな違いはほとんどみられなかったが、⑤、⑥、⑦、⑧、⑨、⑩が 2.5[g]以上の試料を採ることができた。

混合試料の場合、⑥、⑦、⑩が 3[g]以上の試料を採ることができたが、先端形状が丸①、②、③、④のときは、0.5[g]以下の試料しか採れなかった。これは活性炭の粒が 2.36[mm]から 0.5[mm]のため、カエシに引っかかりコアラに試料が入らなかったことが原因と考えられる。

上記の考察の結果より⑥、⑦、⑩が多くの試料

を採ることができると分かる。2 種類の試料で安定して多く採れている⑦のカエシを採用した。採用したカエシを図 3-5 に示す。

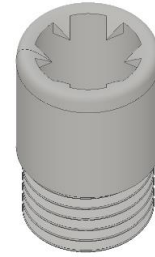


図 3-5 ⑦のカエシ

3.2 カプセルの実験

3.2.1 実験の目的および条件

カプセルの実験目的は、以下の要求を検証することである。

- ・カプセルを安定して発射することが出来る。

カプセルの形状、レールの本数、錘の三つの条件を与えて実験を行う。実験で使用したカプセルを図 3-6 に示す。

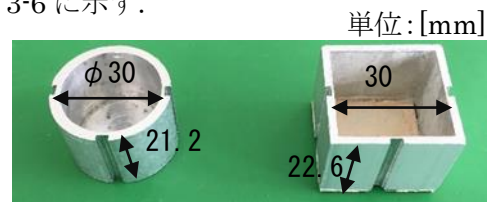


図 3-6 カプセル

レールは 2 本(90[deg.]), 2 本(180[deg.]), 3 本の場合を検討する。カプセル発射部を上から見た様子を図 3-7 に示す。また、実験に使用した錘の重さを表 3-2 に示す。

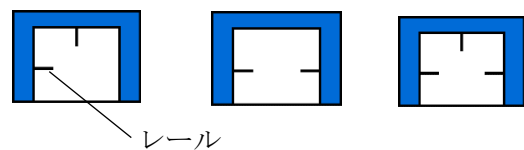


図 3-7 カプセル射出部のレール

表 3-2 錘の重さ

形状	錘の重さ[g]		
丸	26	52	78
四角	38	76	113

カプセルの形状とレールの本数は、飛距離が大きく、発射台から出た後に生じる揺れや回転が小さい方を採用する。

3.2.2 実験方法

カプセルの実験で使用した発射装置を図 3-8 に、実験概要図を図 3-9 に示す。

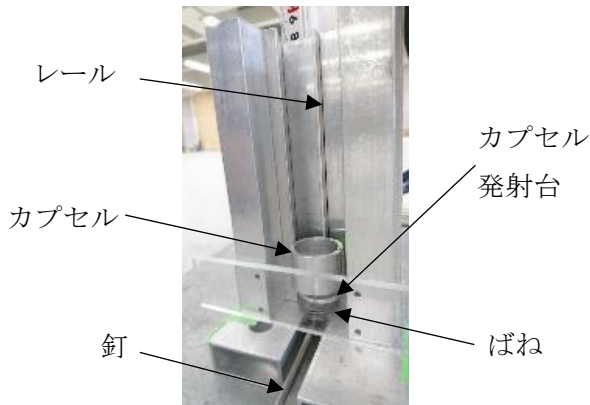


図 3-8 カプセルの発射装置

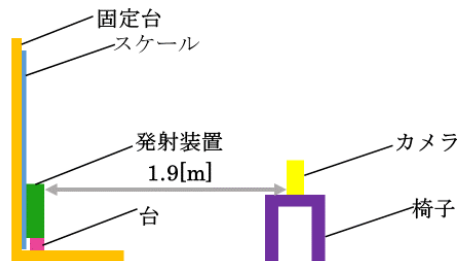


図 3-9 カプセルの実験概要図

スケールを台に固定し、カメラは実験の様子を撮るために発射装置から 1.9[m]離れた場所に設置する。実験作業の手順を以下に示す。

- 1) ばねを縮め、発射パーツに釘を通して、ばねが縮んだ状態で固定する。
- 2) 発射パーツを発射台に入れ、その上にカプセルを置く。
- 3) 釘を抜いてばねを解放する。
- 4) カプセルの飛距離と打ち上がる様子を、動画で確認する。

また、試行回数は 10 回とする。

3.2.3 実験結果・考察

カプセルの実験結果を図 3-10 に、カプセルの質量を合わせた実験結果を図 3-11 に示す。

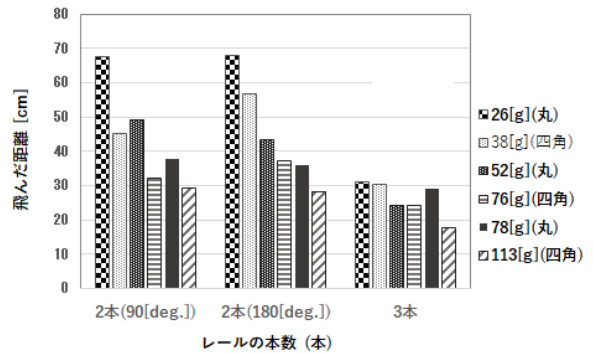


図 3-10 カプセルの実験結果

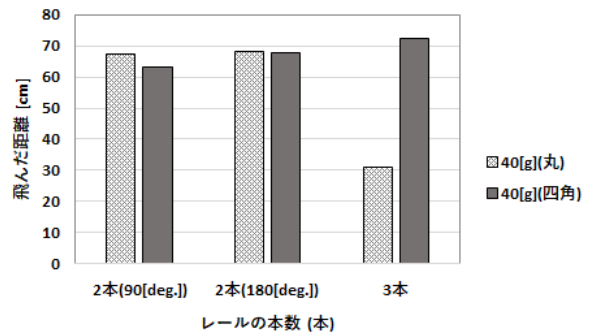


図 3-11 カプセルと錘の総重量を統一した結果

図 3-10、図 3-11 より、丸と四角では丸の 3 本以外で飛距離や飛び方に大きな差異はなかった。レールの本数が丸の 3 本的时候は、実験機材を製作したときに生じたと考えられる機械的な差によって、レールとカプセルの間に過剰な摩擦が発生したため、飛距離が伸びなかった。動画で確認したところ、レールの本数が増えるほどカプセルは鉛直方向にまっすぐ飛んだ。これは、レールによってカプセルが発射台から出た後に生じる揺れや回転が抑制されたためだと考えられる。しかし、同時にレールを増やすことによってカプセルの飛距離が小さくなった。これはレールが増えることにより、カプセルに作用する摩擦が増えたためだと考えられる。

上記の考察と機体形状を考慮した結果、要求を満たすため、カプセルの形状は丸とし、レールは発射後に生じる揺れや回転の少ない 3 本とする。

3.3 改善案

土壌採取実験の結果から今回は最も安定して試料が採れたカエシを採用したが要求を満たすことができていない。そのため、カエシの改善が

必要である。改善策として、コアラーを回転させる機構をつけ、多くの土壌を採取できるようにすることが挙げられる。

カプセルの実験結果からレールとカプセルの摩擦によって、飛距離が落ちることが分かる。改善策としてカプセルに摩擦が極力発生しない材料にすることや加工の精度を高めることが挙げられる。

4. 結論

私たちは微小重力天体での土壌採取方法を確立するため、本ミッションの対象を火星の衛星フォボスとし本機体を提案した。

これまで微小重力天体におけるペネトレータを用いたサンプルリターンの実用例はない。また、重力の大きな天体において、ペネトレータによるサンプルリターンは重力圏を脱出するために大きなエネルギーが必要である。しかし、フォボスのような微小重力天体であれば小さなエネルギーで脱出することができる。よって、ペネトレータを用いたサンプルリターンは微小重力天体に有効な方法である。さらに深層の土壌を採取することができるため、科学的に有意義なものである。

今後の課題は、本ミッションを達成するために必要なペネトレータの衝撃や貫入についての実験や宇宙空間内での温度に対応したシステム、岩石に対応できるコアラーの開発等である。

最後に、本ミッションの遂行から宇宙線による土壌の風化やフォボスと火星の成り立ちの解析が進むこと、微小重力天体での土壌採取方法が確立され新たな探査機の発展に繋がることを望む。

参考文献

- 1) 小惑星探査機「はやぶさ」 Asteroid Explorer Hayabusa, <<http://www.jaxa.jp/projects/pr/brochure/pdf/04/sat14.pdf>>, (参照日 2017年10月29日)
- 2) フォボス・ダイモスの力学的 起源のレビュー 2, <https://www.cps-jp.org/~satellite/2015/pdf/2015_P04_Higuchi-2.pdf>, (参照

日 2017年10月29日)

- 3) 次期小惑星探査のサンプリング機構開発について, <http://dust.cc.gakushuin.ac.jp/ICRR_meeting/previous/pdf050711/Noguchi.pdf>, (参照日 2017年10月29日)
- 4) ペネトレータによる月内部の計測, <https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjspe1986/63/10/63_10_1346/_pdf>, (参照日 2017年10月29日)
- 5) Europa Kinetic Ice Penetrator System for Hyper Velocity Instrument Deposition, <https://digital.lib.washington.edu/researchworks/bitstream/handle/1773/35520/Robinson_washington_02500_15623.pdf?sequence=1&isAllowed=y>, (参照日 2017年10月29日)
- 6) Martian Moons eXploration (MMX) Mission Overview, <http://www.isas.jaxa.jp/en/topics/files/MMX170412_EN.pdf>, (参照日 2017年10月29日)
- 7) 月探査情報ステーション, <<https://moonstation.jp/faq-items/f505>>, (参照日 2017年10月29日)
- 8) TiNiAerospace pinpuller, <<https://tiniaerospace.com/products/space-pinpuller/>>, (参照日 2017年10月29日)
- 9) TiNiAerospace microlatch, <<https://tiniaerospace.com/products/microlatch/>>, (参照日 2017年10月29日)
- 10) 作用圏境界を飛行する軌道の力学的性質と小惑星探査への応用, <<https://repository.exst.jaxa.jp/dspace/bitstream/a-is/35036/1/29047000.pdf>>, (参照日 2017年10月29日)
- 11) ロボットアーム, <<http://iss.jaxa.jp/glossary/jp/ki/jemrms.html>>, (参照日 2017年10月29日)