

# 小惑星探査衛星 MUSES-C のダイナミクスシミュレーション Dynamics Simulation of the MUSES-C Exploration Satellite

○吉田 和哉\*, 平岡 忠志\*\*

○Kazuya Yoshida\*, Tadashi Hiraoka\*\*

\*東北大学 大学院 工学研究科 航空宇宙工学専攻, \*\*(株)ナムコ

\*Dept. of Aeronautics and Space Engineering, Tohoku University

\*\*NAMCO Limited

キーワード : 惑星探査 (Planet Exploration), 小惑星 (Asteroid), サンプル採集 (Sample Return Mission), ランデブー (Rendezvous), 接触ダイナミクス (Collision Dynamics)

連絡先 : 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉01 東北大学 大学院 工学研究科 航空宇宙工学専 吉田和哉

Tel: (022)217-6992, Fax: (022)217-6992, E-mail: yoshida@astro.mech.tohoku.ac.jp

## 1. はじめに

文部省宇宙科学研究所では、太陽系内の微小天体である小惑星の一つに軟着陸しその表面からサンプルを持ち返る探査衛星 (MUSES-C)<sup>1)</sup>の開発を進めている。本発表では同衛星が小惑星に touch-down し、離陸上昇するシーケンスについてダイナミクスシミュレーションを行った結果を報告する。

## 2. MUSES-C 計画の概要

### 2.1 小惑星

小惑星とは、主に火星と木星の間に多数散在する微小天体であり、太陽系創生時の残留物であるともいわれている。具体的にサンプルを採取してその組成を明らかにすることは、科学的にきわめて意義が大きい。さらに小惑星には地球上には稀にしか存在しない鉱物を多く含んでいる可能性も

高く、将来の資源としての利用価値も考えられる。MUSES-C 計画ではこれらの謎を解明するため、無人探査機により小惑星から直接サンプルを採集し地球へ持ち帰ることを目指している。

探査の候補は平均的な小惑星であり、その大きさは1 Km 程度でいびつな岩塊のような形をしていると予想される。それ自身の引力は非常に小さく、探査機はフリーフライング状態で接近し、表面にコンタクトし、安全に上昇/帰還しなければならない。

### 2.2 小惑星探査衛星 MUSES-C

MUSES-C の概観を図1に示す。同衛星はおよそ400 kgの衛星本体上にイオン推進エンジン、太陽電池パネル、通信用アンテナ等を持ち、また姿勢制御のためのリアクションホイール、ガスジェットスラスタを持つ。小惑星表面にコンタクトしサンプルを採取するためのサンプルホーン、およびサ

ンプルを地球に再突入させるためのリエントリーカプセルが取り付けられている。

同衛星は、西暦 2002 年（予定）に M-V ロケットによって打ち上げられた後、イオン推進により 1 年 8 ヶ月かけてターゲットとなる小惑星に接近し、約 2 ヶ月かけて表面の計測、サンプリングを行い、2 年 2 ヶ月かけて地球に帰還する。

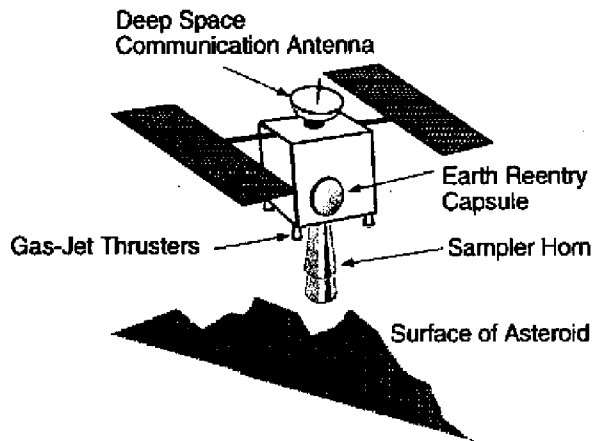


Fig. 1 MUSES-C の概略図

### 2.3 サンプルの採取方法

小惑星表面においてサンプルを採取する方法について代表的なもの 3 つを図 2 に示す。

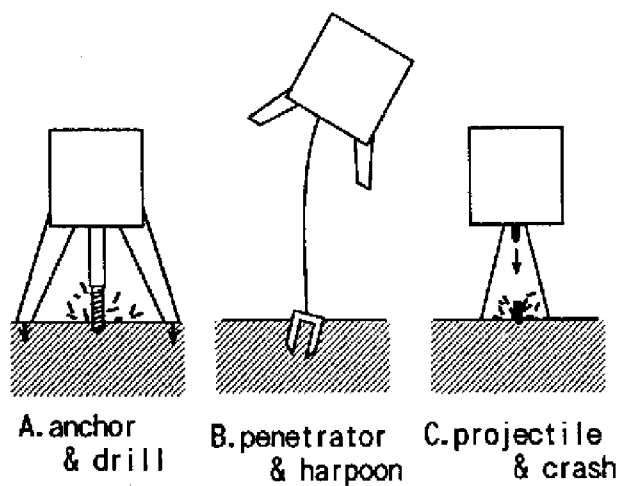


Fig. 2 サンプル採取法

MUSES-C では C. の方法が採用される。これは、弾丸状のプロジェタイルを高速度で射出し表面を破碎し、反射してくる破片をホーン状の筒の中

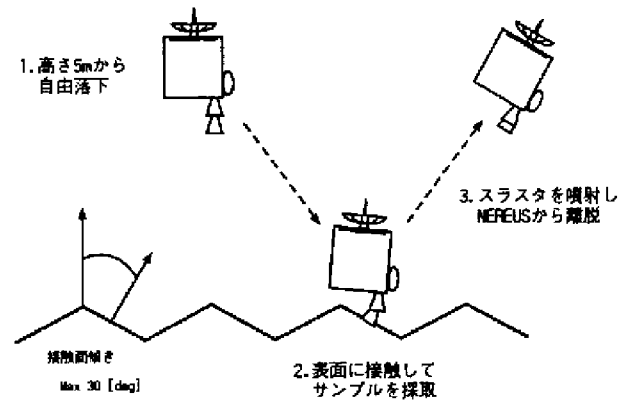


Fig. 3 タッチダウンシーケンス

に回収する方法である。ホーンが 1 秒程度表面に接していれば、サンプルの採集が可能である。

### 2.4 タッチダウンシーケンス

小惑星に最終接近しサンプル採取を行うシーケンスは、以下のようにまとめられる。

- 1) 対象小惑星に接近した探査機は、光学観測により着地点を決定し、着地点上空にて小惑星自転と同期した周回運動を保ちつつ、降下する。
- 2) 小惑星表面から 5 m 上空の地点で一旦相対停止し、微小重力によりゆっくりとした自由落下を行う。小惑星引力が  $10^{-4}g$  ( $g$  は地球重力加速度) とすると、およそ 100 秒後に 0.1 m/s の速度で表面に接触する。
- 3) サンプラホーン先端が表面に接触すると同時にプロジェタイルを発射し、その直後には破片がホーン上部に跳ね返ってくる。探査機はホーン接触の反動で上昇速度を持つが、離脱を確実にするためスラスタ噴射により上昇運動を制御する。

この一連のシーケンスの中で、本研究では探査機が惑星表面に接触する瞬間のダイナミクスに注目する。

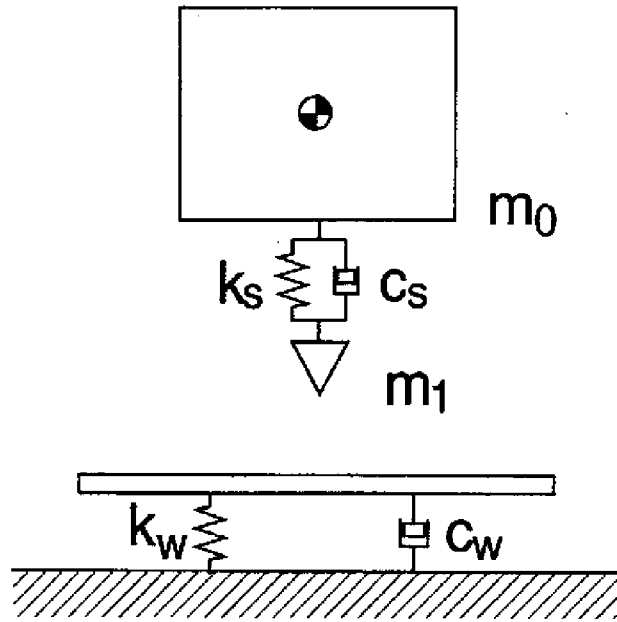


Fig. 4 数学モデル

### 3. 接触ダイナミクスのモデル化

ダイナミクスシミュレーションには、本研究室で開発を進めている汎用多体系の定式化<sup>2)</sup>を用いた。サンプラーホーンが小惑星表面に接触する部分については、点接触を仮定し以下のような定式化を行った。

接触点が接触面の法線方向に  $\delta z$  だけ変形したとすると、その瞬間の接触力は、部材の変形モデルに基づき

$$F_z = f(\delta z, \delta \dot{z}) \quad (1)$$

と表される。また接触接線方向については摩擦係数  $\mu$ 、接触相対速度の入射角  $\eta$  を用いて

$$F_x = \mu \cos \eta F_z \quad (2)$$

$$F_y = \mu \sin \eta F_z \quad (3)$$

となる。

ここでは、変形モデルとして線形バネダンパモデルを仮定した。

### 4. シミュレーションおよび実験

小惑星表面に接触する衛星を、図4のように単純化してモデル化する。

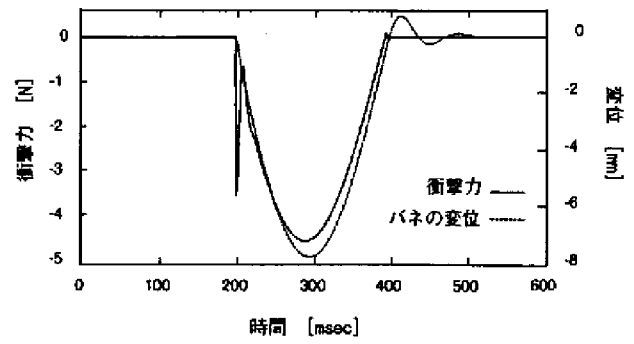


Fig. 5 シミュレーション結果

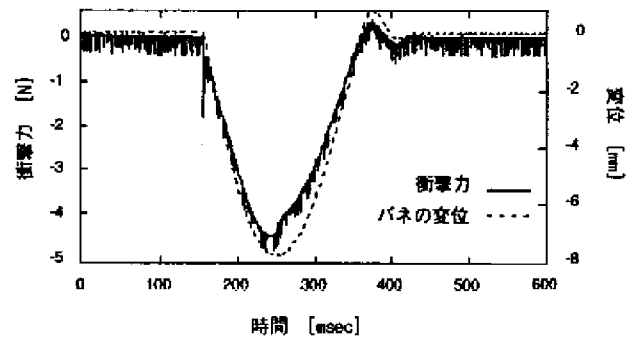


Fig. 6 実験結果

またこの数学モデルに対応する空気浮上型の実験装置を作り、衝撃力等を計測した。実験では、衛星と接触点の間に

$$k_s = 600, \quad \zeta_s = 0.3$$

のバネを差し挟んだ。また、小惑星表面は耐火レンガで模擬しその粘弾性特性は、

$$k_w = 10000, \quad \zeta_w = 0.3$$

と仮定した。

上記パラメータを用いたシミュレーション結果と実験結果を図5,6に示す。両者はよく一致しており、ここに示したモデル化の正しさを示している。

### 5. あとがき

以上に示した定式化に、MUSES-C の設計パラメータを用いて現在シミュレーションをすすめている。接近最終速度、接触点の傾斜や摩擦の条件によっては、接触点を中心に衛星にモーメントが

働き、タッチダウンの後に十分な上昇をせず横倒しになってしまう場合も観察されている。ミッションを成功に導くためには、重大な回転運動を生じることなく安全に衛星が接地・上昇できる条件を明確にしていかなければならない。

## 参考文献

- 1) 宇宙科学研究所 小惑星探査計画ワーキンググループ, 「小惑星探査計画 (MUSES-C) 提案書」, 1996.
- 2) 吉田, 藤島; 衛星捕獲のダイナミクスシミュレーション, ロボメック'98 2BI1-2, 1998.