

MUSES-C探査機のタッチダウンダイナミクス

Touch Down Dynamics of MUSES-C for Asteroid Sampling

Arata Noguchi, O Haruhisa Katoh, Kazuya Yoshida

野口 新, O加藤 治久, 吉田 和哉

東北大学大学院工学研究科

Tohoku University

キーワード: Planet Exploration, Sample Return, Collision Dynamics

連絡先: 〒980-8579宮城県仙台市青葉区青葉荒巻字01 東北大学 工学研究科 航空宇宙工学専攻
吉田研究室, Tel.:(022)217-6993, E-mail:kato@astro.mech.tohoku.ac.jp

1. はじめに

地球外の惑星探査は、地球観測、天文観測と並び、宇宙科学研究の大きな柱の1つであり、宇宙開発の歴史とともに始まっている。惑星探査において、惑星表面のサンプルを採取し、地球に持ち帰ることができれば、それにより得られる科学的意義は非常に高い。

現在、文部科学省宇宙科学研究所（宇宙研）では、小惑星を対象とした具体的なサンプルリターンミッション（MUSES-C）の開発が進められている。このミッションを実現するためには、探査機の誘導航法制御、対象天体へのランデブー、軟着陸の制御、サンプルの採取法、地球への帰還、大気圏再突入など、多くの技術的な課題を解決しなければならない。特に、探査機が小惑星と接触し、サンプルを採取し離脱する部分は重要なポイントである。

本研究室では、これまでにMUSES-C探査機

のタッチダウンダイナミクスに関する研究として、日本無重量総合研究所（MGLAB）において、MUSES-C探査機を模擬したミニチュアモデルによる微小重力環境下におけるタッチダウン試験を行い、同試験で得られたデータをもとに、これまで構築してきたシミュレーションモデルとの比較検討を行った。本稿は、この結果をMUSES-C探査機に反映させ、小惑星表面にタッチダウンした時のダイナミックな挙動を明らかにすることを目的とする。

2. 小惑星探査の科学的意義

小惑星は最大のものでも直径が約1000kmという小さな天体である。その多くが火星と木星の間の小惑星帯に存在している。小惑星は太陽系創生時の残留物、地球上には稀にしか存在しない鉱物を含んでいる可能性を秘めている。従来、小惑星に関するデータを得るため

に取られた手段は、地上からの観測と隕石の分析である。これまで蓄積された天文観測と隕石研究において、それぞれ独立の手法によって得た小惑星に関する膨大な研究データの関連を明らかにすることが望まれている。サンプルリターンミッションであるMUSES-C計画は、これらの整合性を明らかにするとともに、太陽系物質の進化に関する研究においても新たな骨組みを構築する契機を与えてくれるものである。

3. MUSES-C計画の概要

3.1 小惑星探査衛星MUSES-C

MUSES-Cとは、宇宙研が開発を進めている小惑星探査衛星であり、2002年11月に打ち上げが予定されている。MUSES-Cの概略図を図1に示す。質量約510[kg]、1.6[m]×1.0[m]×1.0[m]の本体に、太陽電池パドル、通信用アンテナ、姿勢制御のためのリアクションホイール、スラスタ、さらにサンプル採取のためのサンプラーホーン、サンプルを地球に持ち帰るための再突入カプセルなどが取り付けられている。

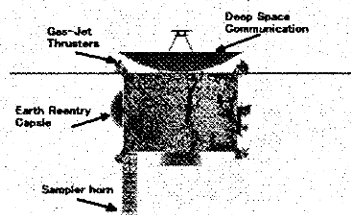


Fig. 1 MUSES-Cの概略図

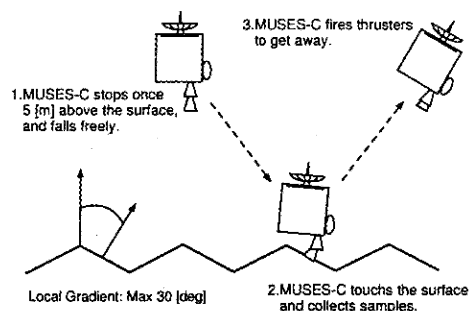


Fig. 2 サンプル採取シーケンス

3.2 ターゲット衛星1998SF36

目標天体である1998SF36は、周期1.5年、近日点距離0.954(AU)、軌道傾斜角1.7度で太陽の周りを周回している。重力加速度は、 $9.8 \times 10^{-5} [\text{kgm/s}^2]$ である。大きさや形状の詳細に関しては未知である。

3.3 サンプル採取シーケンス

図2にMUSES-Cのサンプル採取シーケンスを示す。上記のとおり、小惑星の重力加速度は非常に小さいため探査機はフリーフライング状態で小惑星と接触することになる。そのため、安定的に表面上に立つことは困難である。このような条件下で安全かつ確実にサンプル採取を行う方法として、MUSES-Cでは図3のように探査機の一部（サンプラーホーン）を表面に接触させてプロジェクティルを射出することによりサンプルを採取する、この時のシーケンスを以下に示す。

- 1) 小惑星に近づいた探査機は、表面から5[m]上空まで降下し、スラスタを使い、いったん停止し、その後自由落下する。
- 2) サンプラーホーンが小惑星表面に接触したところでプロジェクティルを表面に向けて射出し、破碎された表面の破片を採取する。

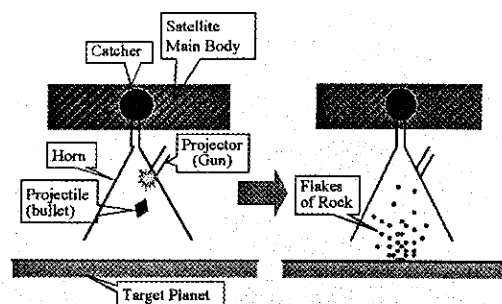


Fig. 3 サンプル採取法

- 3) スラスタを噴射し、小惑星から上昇、離脱する。

この一連のシーケンスにより、サンプルを採取する。本稿ではこの接触前後のダイナミクスに注目する。

4. 摩擦接触を含むダイナミクスのモデル化

4.1 摩擦を考慮したコンタクトダイナミクス

MUSES-C探査機には、図1に示すように柔軟性をもったサンプラーホーンが取り付けられている。よってMUSES-C探査機のシミュレーションモデルは、弾性ヒンジによって連結される多節リンク系としてモデル化を行う。図4は多節リンク系の一般的なモデルである。今、同図において EndPoint と記した点がホーン先端部に相当し、小惑星からの接地反力 F_e が作用する。一方、Base と記された部分が探査機本体に相当し、AOCS/GNC 系によるスラスタ力、リアクションホイール反動力などの制御力 F_b が作用する。

摩擦力を考慮したコンタクトダイナミクスの解析については、摩擦を含めた接地力を陽に記述し、接地力の作用による系の挙動を、順動力学方程式を解いて積分することにより求め

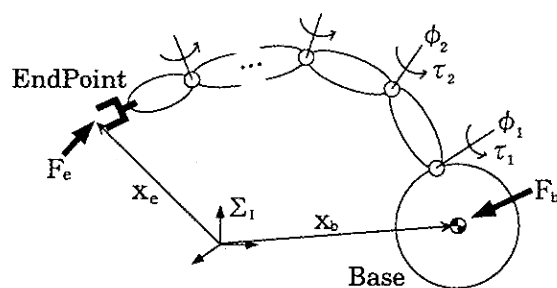


Fig. 4 多節リンク系の一般的なモデル

る。シミュレーションには東北大にて MATLAB 環境用に開発された SpaceDyn ツールボックスを用いる。小惑星との接地は、円筒形の下部ホーンの円周上の1点のみにおいて発生する(点接触)と仮定する。接地力 F_e は、接触点の法線方向に生じる微小変形の粘弾性力 f_n と、接線方向に運動を妨げる向きに作用する摩擦力 f_t との合力であらわされる。

$$F_e = f_n n - f_t t \quad (1)$$

$$f_n = K_w(d)^r + D_w(\dot{d})^s \quad (2)$$

ここで、 n は法線方向の単位ベクトル、 t は接線方向の単位ベクトル、 d は接触部位の微小変形量、 $\dot{d}$ はその速度、 K_w は接地面の剛性定数、 D_w は粘性係数を示す。ここでは、法線方向に微小変形モデルを仮定する。(すなわち $r = s = 1$)

4.2 Stick-Slip model

MUSES-C探査機のタッチダウンシミュレーションにおいて、サンプラーホーンと接地面との摩擦の取り扱いは大変重要である。本研究では、摩擦モデルとしてStick-Slip modelを提案する。Stick-Slip とは、サンプラーホーンと接地面との接触において、いったん接触点で静止し、その後滑り出す現象のことである。摩擦力 f_t において法線方向と同様に接線方向

Table 1 シミュレーションパラメータ

本体の質量 [kg]	m_0	1.05
本体の 慣性モーメント [kg・m ²]	I_{0xx}	0.093
	I_{0yy}	0.093
	I_{0zz}	0.093
バネの剛性 [N/m]	K_x	280
	K_y	280
	K_z	750
接地面の剛性 [N/m]	K_w	10000
接地面の粘性 [Ns/m]	D_w	25.5
衝突面傾斜角度 [deg]	θ	-30 ~ 30

にも線形弾性モデルを仮定する。ここで、最大静止摩擦力 f_s を閾値として式 (3) のように摩擦力 f_t を仮定する。

$$f_t = \begin{cases} K_t d_t + D_t \dot{d}_t & (f_t \leq f_s) \\ \mu f_n & (f_t > f_s) \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 K_t は接地面の接線方向の剛性定数、 D_t は粘性係数、 d_t は接触部位の微小変形量、 $\dot{d}_t$ はその速度を示す。また、 μ は動摩擦係数である。

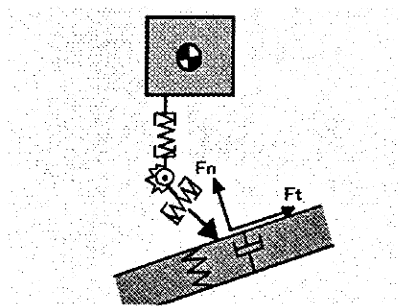


Fig. 5 接触力学モデル

5. 無重力下での模擬タッチダウン実験

本節では、日本無重量総合研究所(MGLAB)において、MUSES-C探査機のミニチュアモデルによる微小重力下でのタッチダウン試験を

行った結果について述べる。

5.1 実験装置

図7は本実験に使用した装置の横断面の模式図である。この図に示すように、ビデオカメラをはさんで上下に Setting Box を 2 つ用意する。それぞれの Setting Box 内において 2 つの供試体を対象面 (箱上面) に衝突させる。これにより、1 回の落下につき 4 パターンの実験が可能である。また、供試体を図7のように設置することにより、落下開始と同時に供試体は初速を与えられる。対象面には力覚センサを取り付け、衝突時の力・トルクを計測する。供試体は、本体、ホーンバネ部、ホーン先端部からなる。本体はアルミ製であり、重さ 1050 [gf]、一辺 73 [mm] の立方体である。ホーンバネ部には 2 種類の剛性のバネを使用する。また、ホーン先端部はアルミ製で、その形状は円錐状と円筒状の 2 種類を用意する。図6にミニチュアモデルのイメージ図を示す。

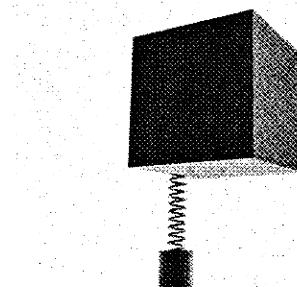


Fig. 6 MUSES-Cを模擬したミニチュアモデル

5.2 実験条件

実験パラメータとして、衝突速度、ホーン部取り付け位置、ホーンバネ部剛性、ホーン先端部形状、衝突斜面傾斜、衝突面材質を変えいくつかの実験を行なった。ホーン部は供

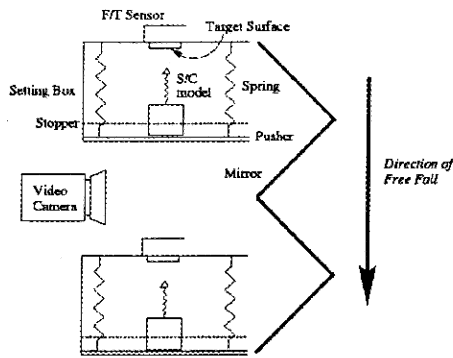


Fig. 7 実験装置(横断面図)

試体の本体底面に取り付け、底面中央に取り付けたものを「中央」、底面X軸上の端に取り付けたものを「端」とする。また、衝突面傾斜は供試体座標でピッチ軸回りに $+30$ [deg], 0 [deg], -30 [deg] とする。

実験パラメータを変えることにより、計 20 ケース (4×5 回) の実験を行なった。

5.3 実験結果とシミュレーション値との比較

前節で述べた模擬タッチダウン試験から得られたデータをもとに、供試体の接地力および供試体の挙動について、シミュレーション値との比較を行なう。実験データは力覚センサによって得られた接地力のデータと、ビデオ画像を解析することによって得られる供試体各部の位置および姿勢を対象としている。また、供試体の接地が確認できる時刻を 0 [s] とし、 0.3 秒間のデータを解析の対象とする。

ここでは、次の 2 つのケースについて、検討した結果を示す。

図 8 は case1 において法線方向の接地力を示している。タッチダウン直後に衝撃力として約 5 [N] が生じている。衝撃力とミニチュアモデルの重さによって、ばねが圧縮され接地反力が増大している。その後、ばねの復元力に

よって、接地反力の減少、並びにミニチュアモデルが接地面から離れていく現象が起きている。ミニチュアモデルのピッチ軸回りの姿勢角の変化は、ばねの取り付け位置がミニチュアモデルの重心から離れているために生じるものである。姿勢角の変化については、図 9 に示す。

図 10 は case2 において法線方向の接地力について、図 12 は姿勢角、図 11 は接線方向の接地力について、それぞれ実測値とシミュレーション値との比較を示している。接線方向の接地力には、ある周期をもった波形が現れている。これは、シミュレーションによる解析から、ばね剛性の影響であるといえる。case1, case2 のいずれの場合も、シミュレーションと実測値はほぼ一致している。

case1 衝突速度: 約 0.2 [m/s], バネ取付位置: 端, 衝突面傾斜角: 0 [deg]

case2 衝突速度: 約 0.1 [m/s], バネ取付位置: 端, 衝突面傾斜角: 30 [deg]

なお、シミュレーションで用いる諸パラメータは、表 1 のように設定する。なお、case1, case2 とともに衝突面材質をレンガとしている。

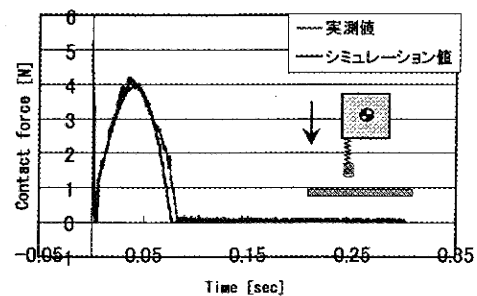


Fig. 8 法線方向の接地力の比較 (case1)

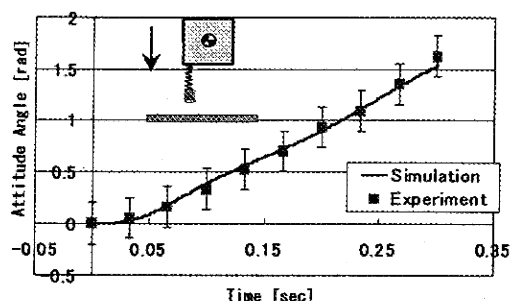


Fig. 9 供試体の姿勢角（ピッチ）(case1)

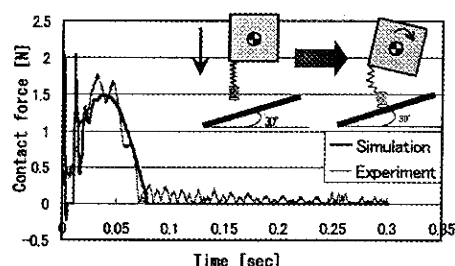


Fig. 10 法線方向の接地力の比較 (case2)

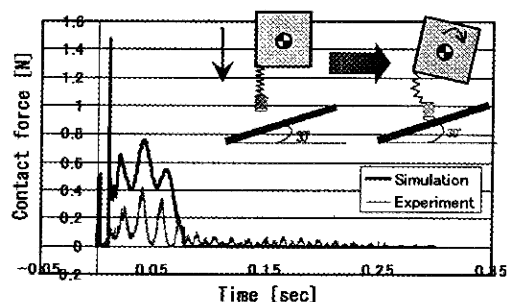


Fig. 11 接線方向の接地力の比較 (case2)

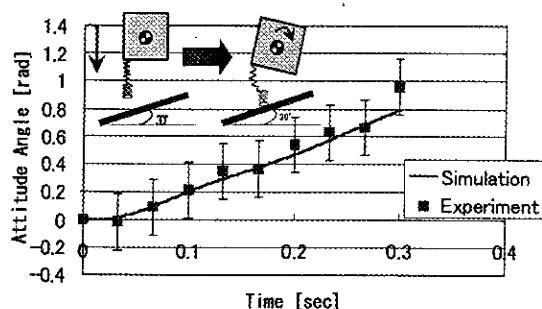


Fig. 12 供試体の姿勢角（ピッチ）(case2)

6. サンプラーホーンの性能試験

サンプラーホーンの性能特性を把握することは、MUSES-C探査機のシミュレーションモデルを構築する上で大変重要である。ここでは、実物のサンプラーホーンの挙動を三次元の動作が呈示可能なロボットマニピュレータ、通称HWSによって測定を行った結果について述べる。

図13は、DHS¹を含むサンプラーホーン概念図である。DHSによって、サンプラーホーン特性は図14に示すように、力と変位の関係が非線形となる。非線形性を考慮したシミュレーションモデルを構築し、HWSによって得られた測定結果から、ばね剛性の同定を行った。一例として、図15に示すような水平な面に対して垂直に降下する場合の、衛星重心からみたサンプラーホーン先端の水平方向の変化量と、垂直方向の変化量をそれぞれ図16、図17に示す。

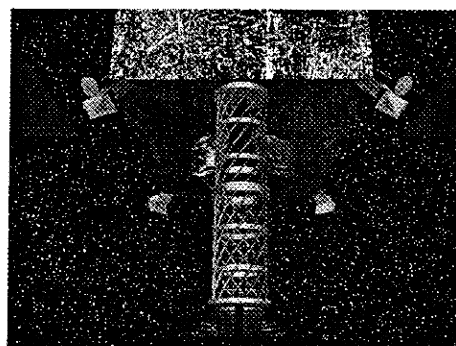


Fig. 13 DHSを含むサンプラーホーン概念図

¹DHS は、Double reserved Herical Springの略語である。

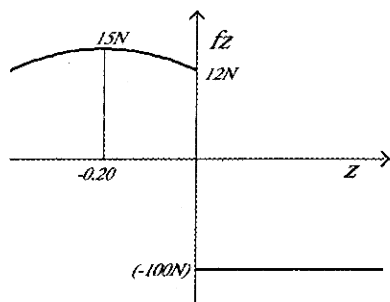


Fig. 14 サンプラーホーン 縦方向の特性

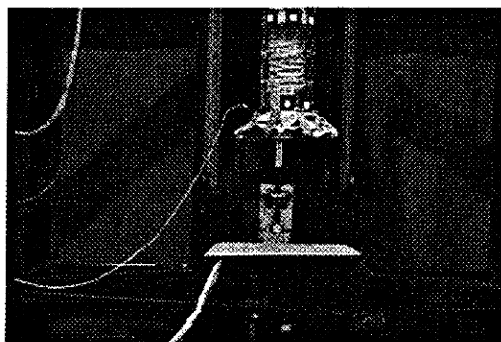


Fig. 15 HWSによる実験の様子（水平面へのタッチダウン）

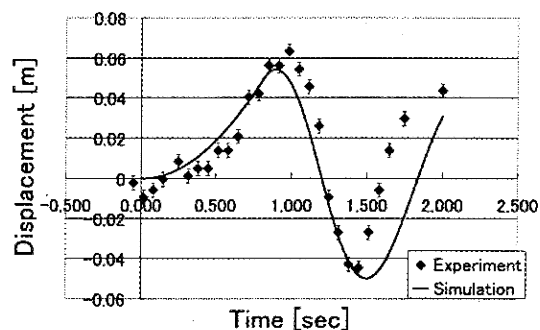


Fig. 16 水平方向への変位

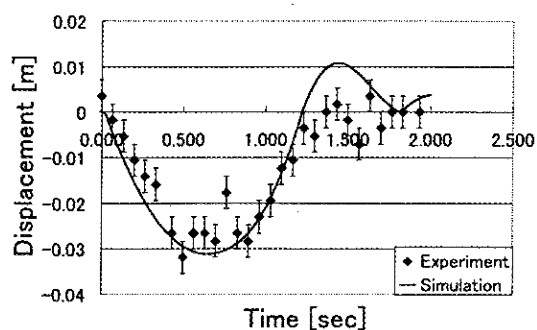


Fig. 17 垂直方向への変位

7. MUSES-C探査機のタッチダウンシミュレーション

前節では、ミニチュアモデルによる微小重力環境下におけるタッチダウン実験の結果と、Stick-Slip 現象を考慮して構築したシミュレーションモデルの比較検討を行った。本節では、サンプラーホーンの特性を考慮したシミュレーションモデルをMUSES-C探査機に反映させ、探査機のタッチダウン直後の挙動について述べる。

7.1 シミュレーションモデル

ダイナミクスシミュレーションでは、図18に構成およびその大きさを示す探査機のモデルを用いた。また、シミュレーションにおいて仮定したMUSES-Cの諸パラメータは表2の通りである。

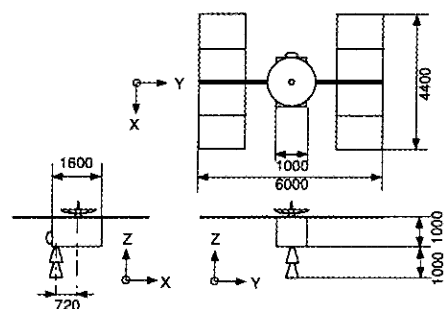


Fig. 18 シミュレーションに用いたMUSES-Cの基本外形

7.2 シミュレーション

以下のケースについて検討した結果を示す。
タッチダウン速度: $v_z = -0.1$ [m/s], 水平方向速度: $v_x = +0.08$ [m/s], 接地面傾斜角: $\theta = 0$ [deg], 摩擦係数: $\mu = 0.3$

case1における接地点からみたホーン先端の

Table 2 MUSES-C シミュレーションパラメータ

本体の質量 [kg]	m_0	510.35
本体の慣性モーメント [kg・m ²]	I_{0xx}	109.46
	I_{0yy}	183.72
	I_{0zz}	182.59
サンプラーホーン先端の質量[kg]	m_1	2
慣性モーメント [kg・m ²]	I_{1xx}	1.0
	I_{1yy}	1.0
	I_{1zz}	1.0
接地面の剛性 [N/m]	K_w	20000
接地面の粘性 [Ns/m]	D_w	283
衝突面傾斜角度 [deg]	θ	-30 ~ 30

位置(図19), 接地反力(図20), 探査機の姿勢変動(図21)を示している. 時刻 $t=0.5[s]$ にホーン先端が小惑星表面にタッチダウンし, その瞬間に衝撃力 $f_z=38[N]$ が発生し, その後は緩やかに圧縮力(z方向)および摩擦力(x方向)が作用している. 接触時間はおおよそ $2.8[sec]$ である. ホーン先端は, 接触直後には+x方向に変位する. そして, ホーンの横剛性による復元力から-x方向に押し戻される. 運動方向の切換に対応して, 摩擦力の発生する向きも切り替わっている. 接触終了時点での探査機の姿勢はおおよそ, $11[deg]$ である.

7.3 離脱フェーズの検討

サンプリングフェーズにおいて, サンプルを回収するのに要する時間はおおよそ, 1秒と見込まれている. このサンプルに要する時間が, MUSES-C探査機の離脱フェーズにどのような影響を与えるか検討することは重要である. また, タッチダウンした接地面の傾斜によっては, MUSES-C探査機の一部が接地面に

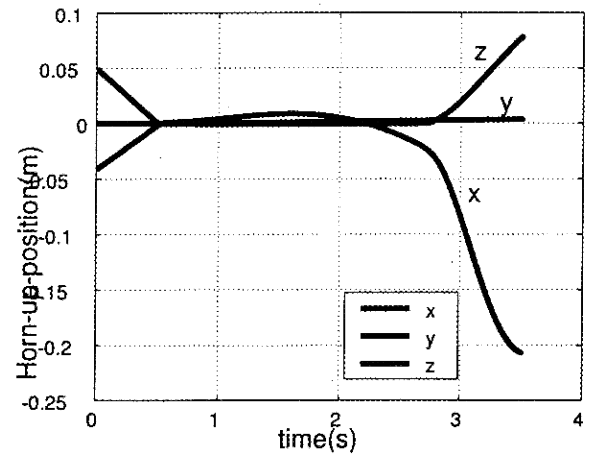


Fig. 19 ホーン先端位置

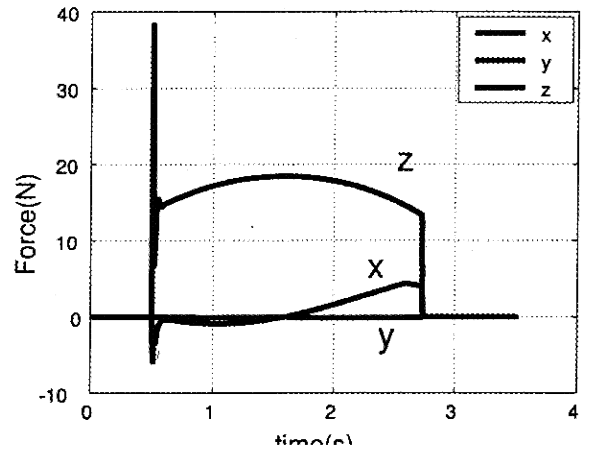


Fig. 20 接地反力

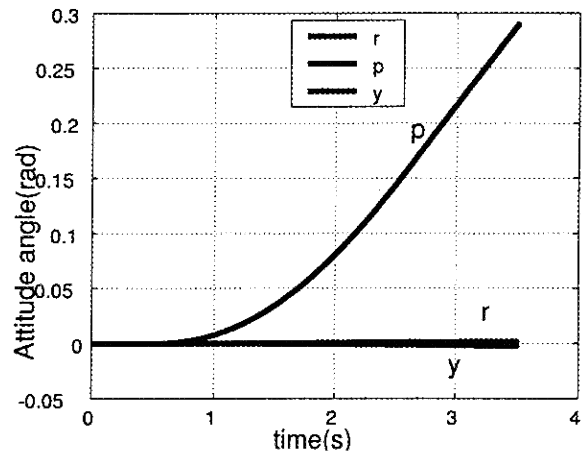


Fig. 21 探査機の姿勢変動

接触する危険性がある。本節では、スラスタを噴射するタイミングと、接地面の傾斜との関連から、一連のシーケンスの中で、「接触」の危険性について考察する。スラスタの推力は $4 \times 20[\text{N}]$ で、衛星のz軸、負の方向に連続的に加える。²

7.4 水平な接地面へのタッチダウン

図22は、接地面が水平な場合に関しては、サンプリングフェーズに十分時間を取ったとしても、スラスタを吹くタイミングには余裕があるといえる。しかしながら、水平な面にタッチダウンしたとしても、近くに岩がある場合も考えられるので、接触する危険性がある。

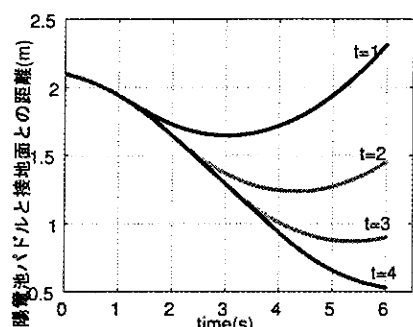


Fig. 22 接地面が0度の場合

7.5 接地面の傾斜20度へのタッチダウン

図23は、接地面の傾斜が20度ある場合である。タッチダウンしてから2.5[s]後にスラスタを吹いた場合は、接地面と接触する。水平な面に対しては、スラスタを噴射するタイミングに余裕があるが、小惑星表面の形状や固さなどは未知である。よって、安全なサンプリングを行うためには、1[s]以内にスラスタを噴射することが望まれる。

²図中に記されているtは、タッチダウンしてから何秒後にスラスタを吹いたかを示すものである。

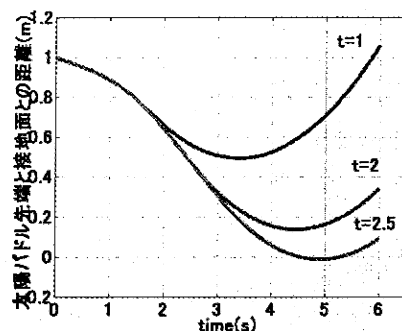


Fig. 23 接地面が30度傾いている場合

8. おわりに

本稿では、MUSES-C探査機が小惑星表面にタッチダウンする時の挙動を明らかにするべく、ミニチュアモデルを用いた微小重力下における模擬タッチダウン実験を行い、得られたデータとシミュレーションモデルとの比較検討について述べた。また、サンプラーホーンの特性を踏まえて、MUSES-C探査機のシミュレーションモデルを構築し、タッチダウン時の挙動と、危険領域の提言を行った。今後は、摩擦接触に関する評価とサンプラーホーンのシミュレーションモデルをさらに詳細に検討する。

参考文献

- 1) 宇宙科学研究所:MUSES-C中間報告書, 2001
- 2) 川辺洋:衝突・接触を伴う宇宙機のダイナミクスシミュレーションに関する研究, 東北大学大学院工学研究科修士学位論文, 2001
- 3) 野口新, 川辺洋, 吉田和哉, 久保田孝:MUSES-C小惑星探査機のタッチダウンダイナミクス解析, 日本航空宇宙学会北部支部2001年講演会および第2回再使

用型宇宙推進系シンポジウム講演論文集,
pp.193-198, 2001