

平成 30 年 8 月 28 日現在

機関番号：32714

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K18043

研究課題名(和文) 始原天体表層探査のための日本刀技術を用いたサンプリング機構に関する研究

研究課題名(英文) A Study on Sampling Mechanism Using Japanese Swordsmithing Technology for Asteroid Sample Return

研究代表者

渡部 武夫 (Watanabe, Takeo)

神奈川工科大学・工学部・准教授

研究者番号：40433180

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：将来の小惑星サンプルリターン技術としてテザー型サンプリングシステムを検討している。本研究では、円管形状の採取器(コアラー)を小惑星表層に貫入させ、深さ方向に層序を保ったサンプルを取得するためのデバイス開発を目的とし、実験と数値解析を実施した。貫入性能を高めるために、日本刀技術を応用したデバイス「日本刀コアラー」を開発、試作した。落錘式貫入試験機と軽量コンクリート製の小惑星表層模擬試料を用いて貫入試験を実施するのに平行して、有限要素法解析による数値シミュレーションを実施した。これらの解析の結果は、貫入ダイナミクスの解明やその性能向上に資すると期待できる。

研究成果の概要(英文)：We are considering a tether-type sampling system that can be used as a future technology for asteroid sample return. In this research, experiments and numerical analyses were carried out with the aim of developing a device to acquire a stratigraphic sample in which a circular, tube-shaped collector (a corer) penetrates into the surface layer of an asteroid. In order to enhance the penetration performance of this technology, we developed and prototyped a corer based on Japanese swordsmithing technology. A numerical simulation was carried out by finite element analysis simultaneously with a penetration test. A penetration test machine was used with a falling weight onto simulated asteroid surface made of lightweight concrete. The results of these analyses can be expected to contribute to the elucidation of penetration dynamics and the improvement of its performance.

研究分野：宇宙工学

キーワード：宇宙探査 サンプルリターン ペネトレーション 日本刀技術 多孔質材料

1. 研究開始当初の背景

将来の始原天体探査，なかでもサンプルリターンミッションにおいて，深さ方向に層序を保った表層試料を取得することが望まれており，研究代表者らはこれに応えることを目指すサンプリング手法として，テザー型サンプリングシステムを提案している（図1）．これはテザーでつながれた採取器（コアラー）を小惑星表層に貫入させ，その後テザー張力により引き抜き回収するものである．その貫入フェーズに焦点を当てると，多孔質材料に対する円管形状のコアラーの衝突および破壊問題としてモデリングできる．また，研究代表者らのグループはかねてより，貫入性能を高めるために，高い切断性能を持つ刃物である日本刀の作刀技術を取り入れることに着想し，準備を進めてきた．

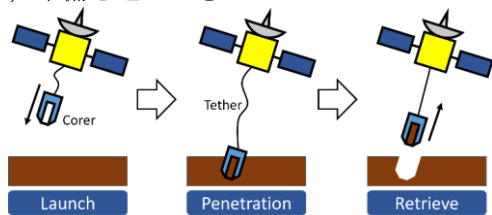


図1 テザー型サンプリングシステム

2. 研究の目的

本研究では，テザー型サンプリングシステムにおけるコアラーの貫入性能を高めることを目的とし，特に以下の3つのテーマに関して，実験並びに数値解析を実施した．

- ・貫入性能と迎角の影響についての実験的解析
- ・日本刀コアラー開発・試作と実験
- ・有限要素法解析による貫入ダイナミクスの数値シミュレーション

3. 研究の方法

本研究において実施した研究の方法および用いた機器類を以下に記す．

3-1 貫入パラメータと迎角の影響解析

過去の実験結果から，軽量コンクリートに対する円管状構造物の貫入深さは mv^2 という物理量に比例する傾向があることが実験的にも確認されており，本研究ではこれを貫入パラメータ χ と定義して用いている．

一方で，貫入深さは，コアラーの衝突，貫入時の姿勢角にも影響を受けることが確認されている．図2はコアラーの速度と姿勢のベクトルがなす角 α を表した図である．この姿勢の不一致の角度を貫入迎角 α と定義する．この迎角が増大していくほど，コアラーの貫入性能は減少していくと予想される．この現象は，日本刀で巻き藁など対象物を切断する際の「刃筋」と呼ばれる概念と共通しており，

コアラー先端が刃物状になっていることから性能を検討するうえで重要な要素と考えられる．図3は，迎角が貫入性能に与える影響についての予想モデルである．貫入深さが貫入パラメータ χ の関数になりうると仮定し，その係数 C_p を貫入係数として貫入性能を示す値とした．システムの性能に合わせ，望ましい感度特性をもつコアラーを選択することが肝要となる．

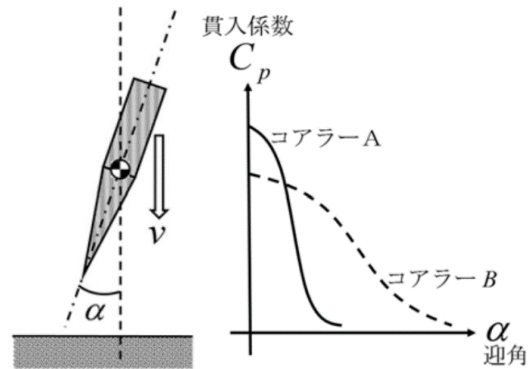


図2 迎角 α (左)

図3 迎角と貫入係数モデル (右)

3-2 落錘式貫入試験機



図4 落錘式貫入試験機外観 (左)

図5 コアラー迎角設定機構 (右)

図4に，本研究にて構築した落錘式貫入試験機を示す．所望の力学的エネルギー，あるいは貫入パラメータを得るために，錘の質量，保持高度を定め，コアラーを電磁石で保持した状態から通電をとめて保持を解除することにより落錘試験を実施することができる．

また，下面では，対象物をジャッキ機構により3軸で固定することができ，貫入の衝撃による試料の跳ね返りを防いでいる．貫入の様子はハイスピードカメラで撮影するが，その際，電磁石の電源系と同期したLEDにより，タイミングを合わせることができる．

また，図5は，迎角を設定するための機構を示している．二本のチェーンの長さ調整により，初期迎角を任意に定めることができる．

3-3 模擬試料

貫入実験のターゲットとして、発泡黒曜石粒（フォーライト）を添加した軽量コンクリートで小惑星表層模擬試料を作成した。外観を図6に示す。軽量コンクリートの空隙率はフォーライトとセメントの配合比で調整することができ、本実験では空隙率70%台のものと空隙率50%台のものを製作した。



図6 小惑星表層模擬試料

3-4 日本刀コアラーの試作

コアラーの貫入性能を高めるために、コアラー先端に日本刀の作刀技術を応用した。これを「日本刀コアラー」と呼称し、以前の実験で用いてきたステンレス製の「基準コアラー」と区別する。具体的には以下の4要素を日本刀技術として取り入れている。

(1) 素材としての玉鋼と折り返し鍛錬による材料要素



図7 玉鋼インゴット

図7は、日本刀コアラー試作用に製作した玉鋼のインゴットである。木炭の燃焼熱と還元反応により砂鉄から得た玉鋼を繰り返して鍛錬し日本刀の材料と同等の素材を製作した。

(2) 真剣からの直接採寸による刃先断面形状要素



図8 切り出したコアラー刃先

図8にインゴットからワイヤー放電加工で切り出したコアラー刃先を示す。刃先の断面の曲率は、真剣の表面を3D計測器で実測して得られた値を用いており、NC旋盤でその形状を再現した。

(3) 和釘焼き入れ用の炉と焼刃土を用いた熱処理要素

図9、10は熱処理の様子を示している。焼き刃土をのせたコアラーに対して、和釘を製作する際の小型の炉を用いて加熱し泥水で急冷させることにより日本刀と同様の焼き入れを行った。



図9 熱処理、炉での加熱

図10 熱処理、焼き入れ

(4) 旋盤を用いた研磨による仕上げ要素

図11は、コアラー先端の研ぎの様子を示している。コアラーは円筒形状であるので、旋盤で回転を与えて均一に研磨できるように工夫した。

これらの工程をふまえて製作された日本刀コアラーを、図12に示す。寸法は直径25mm、肉厚2mmとした。



図11 旋盤を用いての研ぎ

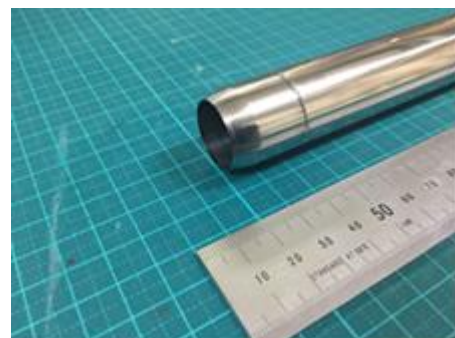


図12 日本刀コアラー

3-5 数値解析

切断時の破壊モードの再現において、数値解析で用いられる有限要素法ではミクロ的な刃の鋭さ・切れ味を直接的には表現できない。そこで、構造解析ソフトウェアの材料破壊設定を応用し、接触時に要素に生じる主ひずみが規定の最大主ひずみを越えた時にその要素が除去される事で局所破壊を表現する手法を用いた。この手法を消失法と命名し、設定する最大主ひずみを臨界ひずみとした。この手法では、切断される側の臨界ひずみ設定を調節する事でマクロ的に切れ味を表現することも望める。図13は消失法により樹脂棒を鋼製のくさびが切断破壊する様子を示している。臨界ひずみが大きいケースでは刃の切れ味は悪く、逆に小さい時は鋭い刃物として、刃物の性能を表現することが出来る。

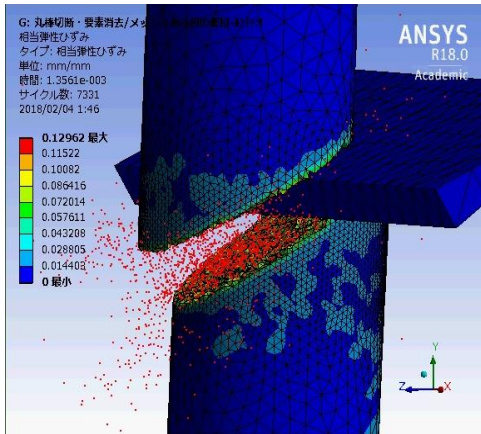


図13 樹脂棒の切断シミュレーション例

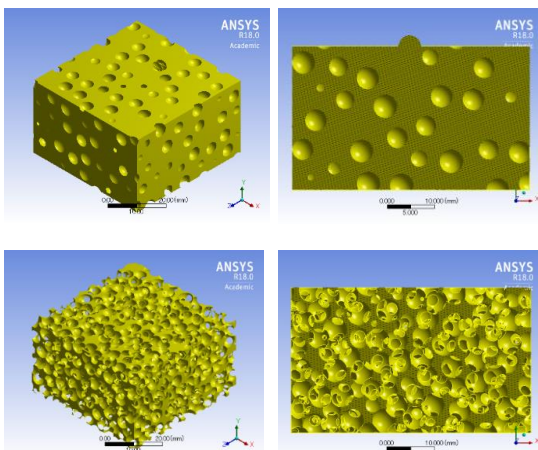


図14 多孔質材料のモデリング例

図14は、解析で用いた多孔質材料のモデルのアイソメトリック図と断面図を示している。上段は空隙率20%、下段が空隙率80%のモデルをそれぞれ示している。多孔質モデルは、設定した径の球落下のモデルが作成された後、ユニットセル中の球のモデルを削除することで生成される。

4. 研究成果

4-1 実験結果：貫入性能

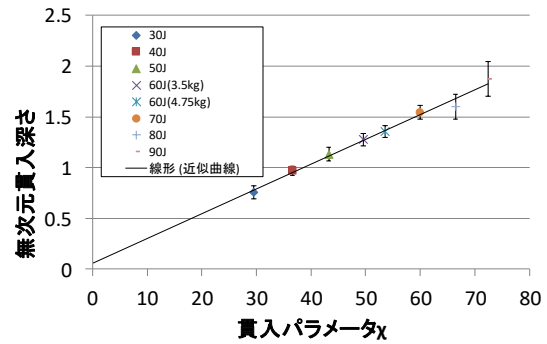


図15 貫入深さの傾向

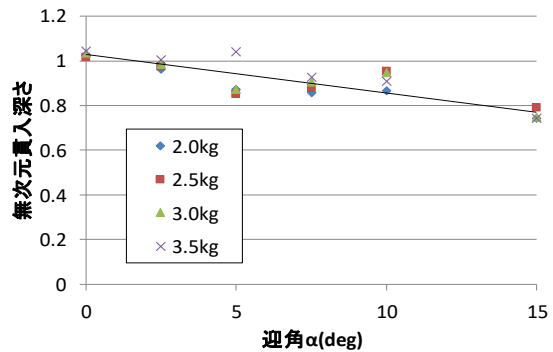


図16 迎角の影響

実験結果として、図15に貫入パラメータ χ に対する無次元貫入深さを示す。縦軸の貫入量は、横軸の貫入パラメータにほぼ線形比例していることが確認でき、これは過去に得られた実験結果とも同様の傾向であった。また、図16では、様々なコアラー質量に関して迎角に対する無次元貫入深さプロットしている。貫入性能は迎角の増加にともない緩やかに低下しており、迎角15度程度で、2割ほどの性能低下がみられる。迎角 α が15度を越える状況において、貫入時にコアラーが倒れこむ例が多く確認された。

4-2 実験結果：日本刀コアラー

図17、18は空隙率50%の試料への貫入後のコアラー先端を示している。ステンレス製の基準コアラーは先端に大きな変形が確認されるのに対し、日本刀コアラーでは刃こぼれなど変形、破損等は見られなかった。実験の試行数が少ないため、統計処理を行うに十分なデータが得られるには至らなかったが、日本刀技術の優位性を示唆する結果の一例として報告する。

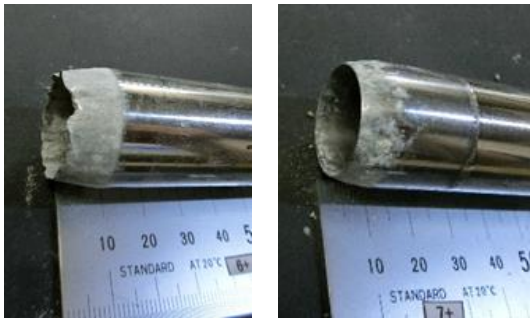


図 1 7 試験後の基準コアラー刃先 (左)
 図 1 8 試験後の日本刀コアラー刃先 (右)

4-3 数値解析

図 1 9 に、貫入シミュレーション例を示す。生成された多孔質モデルに対してコアラーが突入し、慣性力により発生したコアラー先端接触部の圧縮応力で臨界ひずみを超えた要素が消失し、コアラー貫入が進行していく様子が表現できることを示すことができた。

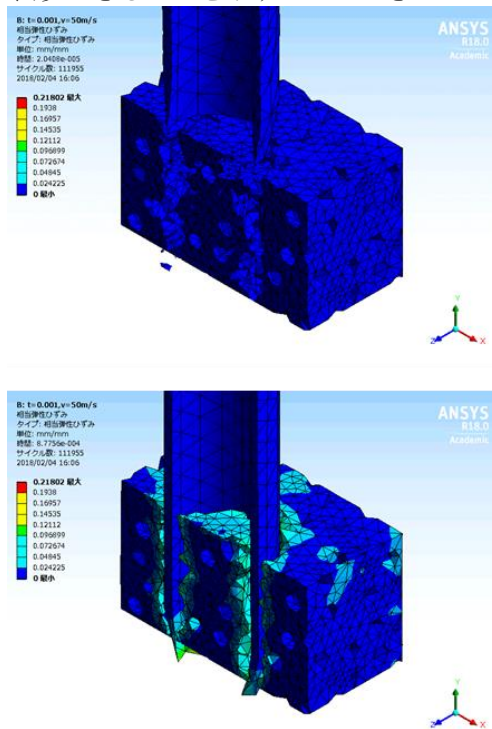


図 1 9 数値シミュレーション結果例

まとめ

本研究では、以上の実験的、数値的解析より、テザー型サンプリングシステムにおけるコアラーの貫入性能向上に資する多くの知見を得ることができた。実験できる貫入対象物に制限があるものの、力学条件に対する貫入性能の傾向を得ることができた。また、当初計画していた日本刀コアラーの試作にも成功し、限定的ではあるがその優位性を示すことができた。同時に、研究開始当初に計画していなかった数値解析を実施し、今後、実験が困難なケースについても数値シミュレーションでの解析が見込めるに至った。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① Takeo WATANABE, Hironori A. FUJII, Takeshi SAKAMOTO, and Genrokuro MATSUNAGA, “Penetration Dynamics of an Asteroid Sampling System Inspired by Japanese Sword Technology”, TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES, AEROSPACE TECHNOLOGY JAPAN, pp.Pk_23-Pk_28, 2016

[学会発表] (計 2 件)

- ① 渡部武夫、大橋拓馬、山本昌平、小川達也、坂本武司、藤井裕矩、松永源六郎、桶田正信、『多孔質材料への菅状サンプリング装置の貫入解析』、第 60 回構造強度に関する講演会、2018 年 8 月、徳島
- ② 渡部 武夫、小川 達也、櫻井 遼輔、藤井 裕矩、坂本 武司、松永 源六郎、桶田 正信『ユビハブ式グリッピング機構の開発と円管型試料採取システムの貫入解析』第 15 回「運動と振動の制御」シンポジウム(MoViC2017)、2017、豊橋

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等 なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡部 武夫 (WATANABE Takeo)
 神奈川工科大学・工学部機械工学科・准教授
 研究者番号：40433180

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

藤井 裕矩 (FUJII Hironori)
 株式会社 TMIT・研究開発部・教授(移行)
 研究者番号：30070650

坂本 武司 (SAKAMOTO Takeshi)
 有明工業高等専門学校・創造工学科・講師
 研究者番号：60452934

(4) 研究協力者

松永源六郎 (MATSUNAGA Genrokuro)

桶田正信 (OKEDA Masanobu)