

貫入試験機を用いた小惑星表層のサンプリング手法の検討 Investigation of Sampling Method for Asteroid Surface using Penetrator

○菊入剛司¹, 小池竜¹, 細田淳嗣¹, 内山賢治², 藤井裕矩²*Tsuayoshi Kikuri¹, Ryu Koike¹, Junji Hosoda¹, Kenji Uchiyama², Hironori A. Fujii²

The relationship between penetration velocity and penetration depth were clarified for asteroid sampling using a penetrator in Harpoon & Penetrator method (H & P method). However, it was difficult to estimate sufficiently the relationship because the velocity range in drop tests was narrow. Then we developed the experimental system for the penetration test to obtain wide range of penetration velocity. Penetration tests are performed by using the experimental system in order to discuss the feasibility of H & P method.

1. はじめに

JAXA の太陽系始原天体サンプルリターンミッションでは、2010 年 6 月に帰還した「はやぶさ」に続き「はやぶさ 2」が検討されており^[1], ESA・JAXA の共同ミッションである「Marco Polo」計画では小惑星表面の層序構造を保持した試料採取が検討されている。

試料の採取機構としては種々のものがあるが、本研究では機構の単純さと層状採取の可能性を考えてテザーサンプリング機構について検討する。この機構を用いた試料採取方法として、Harpoon & Penetrator 方式(以下 H&P 方式)が考えられている^[2]。この方法では、テザーにつけたコアラー(採取器)を高速で惑星表面に打込み、テザーを引くことでコアラーと試料を回収する。しかし、機構構造やコアラーの打込み性能など、実際のミッションに対する本手法の適用性については十分に議論されていない。本報では、コアラーの貫入速度と貫入量の関係を明らかにすることを目的とした実験について述べる。結果から、小惑星試料採取機構としての H&P 方式の可能性についても言及する。

2. 実験方法・装置

本研究室では、落下試験を行いコアラーの貫入速度と貫入量の関係を明らかにしてきたが、貫入に必要な速度がより高速なため貫入試験用の装置を新に制作した。

図 1 に実験装置、表 1 に使用したモータの仕様を示す。本装置では、円板が取り付けられたモータを二つ組み合わせてコアラーを押し出す方法を用いている。モータ軸に取り付けられたアルミ合金のプーリにベルトを装着し、コアラーを押し出す際にエネルギー損失を抑えるようにした。

「はやぶさ 2」では C 型小惑星への探査が検討されているものの、その表層がどのような状態であるということは明らかになっていない。本研究では、これま

で数種類の対象物に打込み実験を行って来たが^[3], ここでは対象物に珪砂を取り扱う。

実験に用いるコアラーの材質は SUS304, 形状は中空円筒とし、先端形状はほぼ平坦である。コアラー直径は 5mm から 25mm まで 5mm ごとに 5 本用意し、どれもコアラーの厚みは 0.5mm, 長さは 500mm である。なお、本実験の目的はコアラー貫入速度と貫入量の関係を明らかにすることなので、テザーなどの紐をコアラーに取り付けての引抜き実験は行っていない。

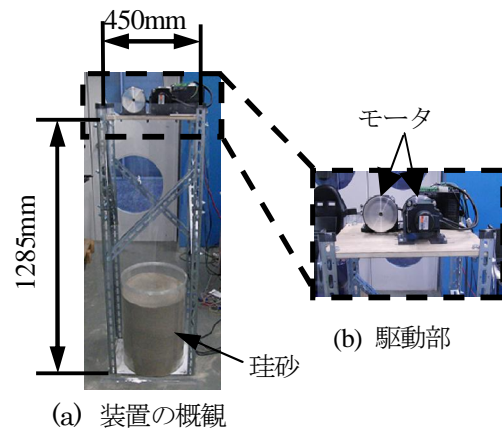


Figure 1. Experimental system for penetration

Table 1. Specification of motors

型式	BX5120-A2
定格出力	120 [W]
定格回転速度	3000 [r/min]
定格トルク	0.4 [N·m]

3. 実験結果

コアラーの貫入速度と貫入量の関係については W.Weige 氏らが挙げた実験式^[4]を用いたが、氏らが弾丸を木板に打込んでいるのに対し、本研究ではコアラーを粒状物質に打込むため、関係式をそのまま利用できない。そこで、式を書き換えた以下の関係を用いる。

$$D = C_p \frac{mV^n}{S} \quad (1)$$

D はコアラーの貫入量, C_p は貫入係数, m はコアラー質量, V は貫入速度, S はコアラーの断面積を示す. 本実験では, 貫入係数 C_p と貫入指数 n を同定し, 貫入速度と貫入量の関係を明らかにする.

図 2 は貫入試験の結果である. 貫入速度を 10~15m/s で調節し, コアラー打込み時の貫入量を測定した. この速度領域ではコアラーの貫入速度と貫入量の間には式 (1) のような比例関係があることがわかる. また, 貫入対象が珪砂の場合, コアラー直径と貫入量の相関は小さいという結果が得られた.

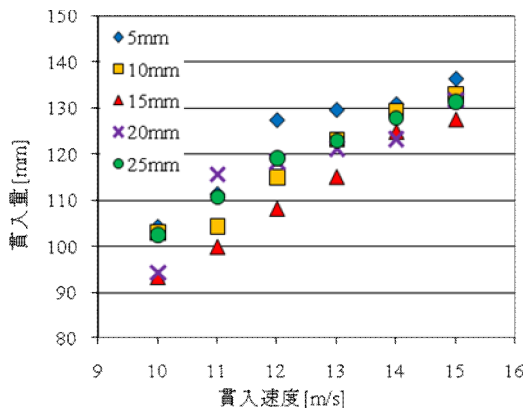


Figure 2. Results of penetration tests

Table 2. Calculation result of coefficients

直径 [mm]	貫入係数 C_p	貫入係数 C'_p	貫入指数 n	質量 m
5	6.55	23.4	0.659	25.2
10	4.57	20.0	0.703	65.4
15	3.85	14.5	0.809	85.6
20	5.84	21.1	0.679	110.9
25	6.65	22.8	0.658	131.8

実験結果から貫入係数と貫入指数を算出したものを表 2 に示す. ここで, 図 2 より貫入量がコアラー直径に依存していないという結果を用いて, 貫入速度と貫入量について算出した係数 C'_p も示した.

$$D = C'_p V^n \quad (2)$$

15mm のコアラー直径を除いて, 貫入指数 n については 2/3 前後の近い値を取り, 貫入係数 C'_p に関しては, 20 強の値が算出された.

小惑星表層試料の採取においては, 層序構造を保持したまま約 300mm の試料採取も検討されている. 本実験装置では最大 150mm の貫入量しか得られなかった. そこで, 外挿により貫入量 300mm に対する必要速度を計算したものを図 3 に示す. 図から曲線はほぼ一致し

ていることが判る. また, 貫入量 300mm を得るために必要な貫入速度は約 50m/s であることが推察される. 「はやぶさ」計画におけるサンプル採取用の弾丸の射出速度は 300m/s 程度なので^[1], この観点から H&P 方式によるサンプリングも十分に実現可能であると言える.

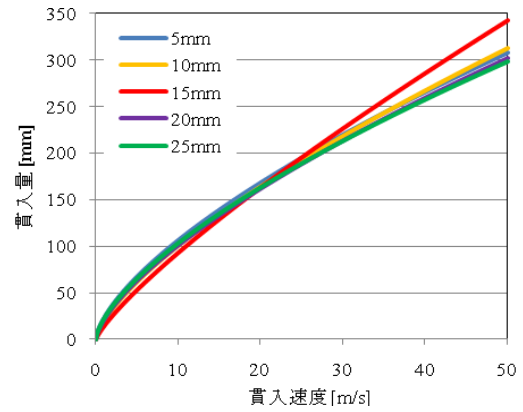


Figure 3. Estimation of penetration depth

4. 結論

本報では, コアラーの打込み性能について実験を行った. 実験から得られた結果を以下にまとめる.

- ・高速域での貫入速度と貫入量の関係を明らかにした.
- ・貫入量はコアラー直径に依存しないと判った.
- ・貫入対象が珪砂の場合, 貫入指数 n は 2/3, 貫入係数 C'_p は 22 となった.
- ・珪砂に対しては貫入速度約 50m/s で目標の貫入量を得られるため, H&P 方式による層状採取は現実的であることが判った.

参考文献

- [1] 高木靖彦, 平田成, 橋省吾, 中村良介, 吉川真, はやぶさ 2 プリプロジェクトチーム: 「はやぶさ 2: 経緯と計画概要」, 日本惑星科学会誌, 第 19 巻, 第 1 号, pp48-55, 2010
- [2] T.Watanabe et al: δ Micro Gravity Experiment and 3 Dimensional Dynamic Analysis of Tethered Samplerö, Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Space Technology Japan, Vol.7, No.26, pp17-22, 2009
- [3] K.Iijima, K.Satoh, R.Ohkawa, H.A.Fujii, K.Uchiyama: δ Experimental Study on Penetration of Corer for Asteroid Samplingö, 5th Asian Conference on Multibody Dynamics, CD-ROM, 2010
- [4] G.Book, W.Weige, and G.Seitz: δ Handbuch der Faustfeuerwaffen, Neumann-Neudamm Verlag, 8.neubearb.u.erw, pp639-660, 2002