

## 小惑星サンプリング手法の検討 採取器の先端形状による貫入量の変化

### Investigation of Sampling Method for Asteroid Surface Effect of Tip Shape of Corers on Penetration Depth

○朴直彦<sup>1</sup>, 新家健太<sup>1</sup>, 後藤那由多<sup>1</sup>, 内山賢治<sup>2</sup>, 藤井裕矩<sup>2</sup>\*Naohiko Boku<sup>1</sup>, Kenta Shinya<sup>1</sup>, Nayuta Goto<sup>1</sup>, Kenji Uchiyama<sup>2</sup>, and Hironori Fujii<sup>2</sup>

Abstract: The sampling method employed with corers has been studied in the sample return mission of asteroids planned by JAXA. We have clarified the relationship between the penetration depth and the projectile speed by penetration tests. Large amount of massive energy is necessary to reach the objective and we have decided to study the effect of tip shape of corers on the reduction of the massive energy. The relationship between the tip shape and the penetration depth is analyzed in this paper by penetration test leading to verification for the feasibility of the present sampling method employed with corers.

#### 1. はじめに

現在、宇宙開発において、小惑星の層状構造を保持した試料を採取するため、表面から 300mm の試料採取が必要とされている。本研究では機構の単純さと層状採取の可能性を考慮して、Harpoon & Penetrator 方式<sup>[1]</sup>というサンプリング機構について検討している。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ち込み、テザーを引くことでコアラーと試料を回収する。コアラーの貫入速度と貫入量の関係についてはこれまでの研究で明らかにしてきたが、要求を満たすために必要なエネルギーについては改善する余地があった。一方、次元解析の結果から、貫入量は貫入速度の他にコアラーの幾何形状にも依存することが分かった。そこで、本報ではコアラーの先端形状が貫入量に与える影響について実験を行い、必要エネルギーという観点から本手法の可能性について議論する。

#### 2. 実験装置, 方法

実験に用いるコアラーは、回転する円板を組み合わせて押し出されている<sup>[2]</sup>。モータ軸に取り付けられたアルミ合金の円板にはベルトが装着され、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ている。また、コアラーの打ち出し速度は打ち出し機構の下に取り付けたフォトインタラプタを用いて計測した。

コアラーの材質は SUS304 を用い、形状は厚さ 0.5mm、長さ 510mm、直径は 25mm で中空円筒のものに統一した。ただし、先端形状については 0° から 45° まで 15° ごとに加工したコアラーを 4 本用意した (Fig.1)。打ち込み対象物には軽量コンクリートを使用した。なお、本実験の目的はコアラーの先端形状と貫入量の間

明らかにすることなので、テザーをコアラーに取り付けての引き抜き実験は行っていない。

Table 1. Specification of motors

model	BX5120-A2
rated output	120 [W]
rated revolution speed	3000 [r/min]
rated torque	0.4 [N·m]

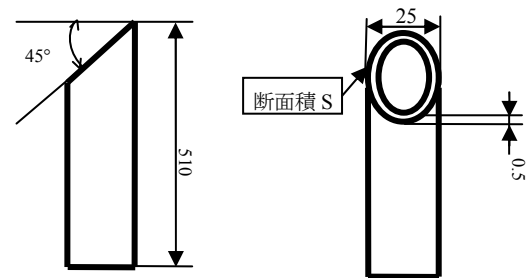


Figure 1. Tip shape and sectional area of the corer

#### 3. 実験結果

##### 3-1. 測定可能速度域での実験結果

Fig.2 に貫入試験の結果を示す。本実験ではコアラーの射出速度を 10~17m/s で調節しコアラーの先端角度を変えて貫入量を測定した。

Fig.2 より今回打ち込み試験を行った速度域では、先端角度が大きいほど対象物である軽量コンクリートに貫入しやすくなるという結果が得られた。しかし、コアラーの先端速度が大きくなると射出速度に対する貫入量の増加率は小さくなるという結果が得られた。つまり、本速度域では先端角度の大きいコアラーが、より深く貫入しているが、高速度域においては先端角度と貫入量の関係が逆転すると推察される。

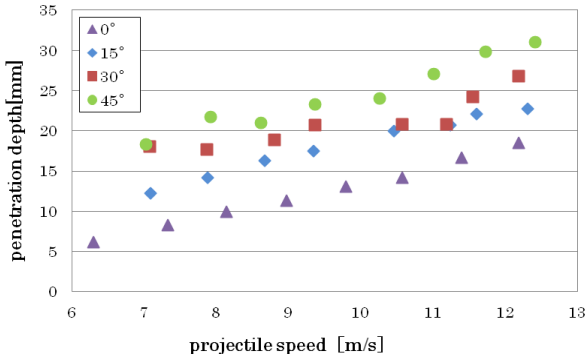


Figure 2. Experimental results of penetration depth with respect to penetration velocity

3-2. 次元解析

300mm 貫入のために必要な速度とエネルギーを求めるため、Buckingham の  $\pi$  定理を用いて貫入量とそれに影響を与える物理量との関係式を導出した<sup>[3]</sup>。X は貫入量、S はコアラーの断面積、M はコアラーの質量、V は射出速度、 $f_c$  は軽量コンクリートの圧縮強度を表す。 $\alpha$  と  $\beta$  はそれぞれ先端形状によって変化するパラメータであり、実験的に求めた。

$$\frac{X}{\sqrt{S}} = \alpha \left( \frac{MV^2}{f_c \sqrt{S^3}} \right)^\beta \quad (1)$$

Table3 に本実験で用いた質量 M と圧縮強度  $f_c$  を示す。式(1)から各コアラーの比例定数  $\alpha$ 、指数  $\beta$  及び断面積 S の値を Table4 に示す。

Table 3. Values of mass and compressive strength

mass M[kg]	compressive strength $f_c$ [N/m <sup>2</sup> ]
0.132	$2.7 \times 10^7$

Table 4. Calculation results of coefficient

tip angle	$\alpha$	$\beta$	sectional area S[m <sup>2</sup> ]
0°	1.22	0.807	$3.85 \times 10^{-5}$
15°	2.02	0.559	$3.92 \times 10^{-5}$
30°	2.71	0.328	$4.15 \times 10^{-5}$
45°	3.03	0.444	$4.66 \times 10^{-5}$

Table4 より、比例定数  $\alpha$  の値は 0°、15°、30°、45° の順に大きくなり、指数  $\beta$  は 30° を除いて逆の順で小さくなった。この結果と Fig.2 より、 $\alpha$  は貫入のしやすさ、 $\beta$  は貫入量の増加率に関係していると言える。

ここで、外挿により各角度での 300mm 貫入に対する必要速度と必要エネルギーを Table5 に示した。

Table 5. Velocity and kinetic energy of penetrator (for 300mm depth)

tip angle	velocity [m/s]	energy [J]
0°	68.4	154
15°	120	476
45°	164	887

Table5 より先端形状 0° が一番少ないエネルギーで 300mm 貫入させることが出来るということが分かった。また、Table4 及び Table5 より、 $\alpha$  がより大きく、 $\beta$  がより小さくなるような先端形状がエネルギーが小さく、理想であることが分かった。尚、30° は分散が大きくなってしまい、外挿するには信憑性のあるデータが得られなかったので、Table5 には示していない。

4. 結論

- 今回実験を行った速度域では、先端角度が大きいほど貫入しやすいことが判った。

- 無次元化により求めた 300mm 貫入に必要な速度及びエネルギーの理論値は、速度・エネルギー共に先端角度 0° の時が最小だった。

今後は今回用いた竹槍状の他の先端形状においても同様の実験を行い、少ないエネルギーで 300mm 貫入可能な先端形状を見つける。また、速度を上げた場合においても実験を行い、今回求めた理論値との比較を行う。

参考文献

[1] T.Watanabe et al. : “Micro Gravity Experiment and 3 Dimensional Dynamic Analysis of Tethered Sampler”, Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Space Technology Japan, Vol.7, No.26, pp.17-22, 2009

[2] J. Hosoda, et al. : “Experimental Study of Harpoon & Penetrator Method for Sampling Mission”, International Symposium on Space Technology and Science, ID2011-k-20, 2011

[3] Buckingham, E., On Physically Similar Systems; “Illustration of the Use of Dimensional Equations”, Physical Review, 4, pp.345-376, 1914