

—超音波振動を利用した科学観測支援加工技術に関する検討—

超音波振動を利用した岩石研削方式の検討

研究代表者 研究員 國井 康晴（中央大学理学部・助教授）
共同研究者 客員研究員 久保田 孝（ISAS/JAXA・助教授）
共同研究者 客員研究員 黒田 洋司（明治大学理学部・助教授）
共同研究者 準研究員 多田 興平（中央大学大学院理学研究科）

1 はじめに

惑星探査ローバによるミッションでは、惑星表面上に存在する岩石などを対象とした地質学的な観測が目的となり、目的地到着後、分光器など科学観測機器による組成分析を実施する。観測の際、ローバは試料をマニピュレータなどにより採取し、試料の表面を観測機に向けるため、採取する試料のサイズの調整や、観測面の面出しのため、加工が必要となる。しかし、ローバなどの宇宙機には、厳しい重量制限やサイズ制限が存在するため、地上で用いられる一般的な加工機を搭載することは難しく、加えて、真空環境では熱、磨耗の問題からカッタなどの使用は困難である。これに対し、我々は、超音波振動を利用した岩石研削機（USD: UltraSonic Drill）を検討している。USDでは、超音波振動をホーンによって増幅し、研削対象に印加する。ホーンの形状により振動伝搬経路が異なるため、力の増幅率や伝達はホーンによって異なる。よって、ホーン形状による研削力の違いを確認するため、初期検討として形状の異なるホーンによる研削実験をおこなった。この結果、USDにより岩石研削が可能であり、またホーン形状によってその研削能力に違いが生じることが確認された。そこで、本稿では、ホーン形状と研削性能の関係明らかにし、ホーン先端と試料の接触面での現象を解析する。

2 岩石の研削

岩石の組成分析を実施するためには、試料となる岩石を科学観測器で分析可能な形状に加工し、また十分な観測精度が得られるように観測面の面出しを行う必要がある。宇宙環境での岩石加工、特に真空環境下での岩石研削技術は未だ確立されておらず、加工技術の確立が期待されている。ここでは、宇宙環境での岩石研削を実現するため、地上における加工方式の宇宙環境への適応に関して議論する。

一般に地上で用いられる研削・研磨手法には、

1. グラインダ等の押しつけによる表面減削
2. 刃ものによる切削
3. ドリルやボール盤により穿孔

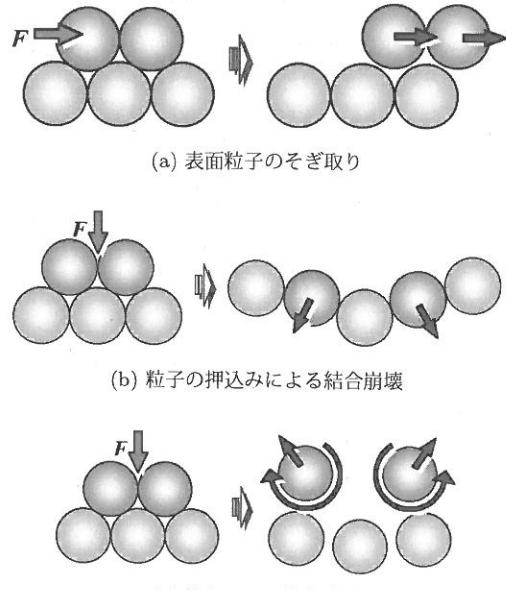


Fig.1 研削・研磨の分類

4. 静荷重の印加による圧壊

5. ハンマー等の打ち付け衝撃による破碎

などが存在する。これらの方針において研削・研磨現象は、「工具で対象の接触面上に力を印加し、凸出した部位を破壊し、切り離すこと」と定義される。ここで破壊とは、研削対象を構成する粒子間の結合破壊を意味し、Fig.1に示す3つの場合に分類され、前述の各研磨・研削手法は、それぞれ、1～3が(a)に、4が(b)に、5が(c)に分類される。

探査ミッションにおいて岩石の研削研磨は、試料の分析や観測の前処理として行われ、分析や観測に適した形状に加工するため、研削対象の任意の箇所を任意の形状に研削する加工性が求められる。しかし、(b).の「粒子の押込みによる結合崩壊」では、碎くことは出来ても、破壊面の制御が出来ず任意の観測面を出すことが難しく、また、大きな力が必要とされる。したがって、科学観測のための岩石研削方法として、(a).「表面粒子のそぎ取り」と(c).「撃力による結合破壊」の検討を進める。

一方、真空環境における加工では、放熱が難しく、発生した熱が逃げずに蓄積される。このため、接触点での摩擦熱やアクチュエータの発熱などにより、加工機の寿命の短縮、加工対象の熱変質の発生が懸念される。観測機による観測精度の低下を防ぐため、加工面の熱変質を避ける必要がある。しかし、(a)「表面粒子のそぎ取り」では、工具を連続的に加工面に対し擦るように接触するため、摩擦による発熱量が大きく、地上においても十分な冷却が求められ、真空環境での加工方式としては不利である。以上より、本研究では衝撃印加方式、すなわち、(c)「撃力による結合破壊」による岩石研削方式を検討していく。

衝撃印加方式では、加工対象に対し、瞬間的な大きな力を印加し、さらに同じ箇所に対し連続して印加することが研削性能向上のため有効である。次に、衝撃力の発生源として、DCモータと超音波振動を検討する。一般に、DCモータは、トルクとサイズが比例的関係にあり、トルクと回転数が反比例的関係にあるので、高速、高トルクを得るためににはシステムが大型化し、重量が増す可能性がある。加えて、単位時間内に印加できる回数に限界がある。一方、超音波振動は、可動部がなく、ピエゾ素子を用いて振動発生部を構成できるため、小型化、軽量化が期待できる。さらに、発生力をホーンにより集約し、大きな衝撃力を獲得でき、また駆動周波数が超音波領域にあるため高速に繰り返し衝撃力の印加が可能である[1]。よって、本研究では、研削・研磨のための衝撃力の発生源として超音波振動を利用する。

3 超音波を駆動力とした岩石研削

超音波振動を用いた研削システムでは、研削対象への力の伝達は、以下に示す2つの過程に分けられる。

1. 超音波エネルギーの增幅
2. 研削対象へのエネルギー印加

すなわち、研削力は、「岩石に対して印加される力の大きさ」と「力の岩石への伝達方法」により決定される。ここで、ホーンによるエネルギー増幅率は発振方式や印加方式によらず研削性能に影響が大きいため、まず入力された超音波エネルギーのホーンにおける増幅過程に関して検討する。

3.1 超音波エネルギーの増幅

加工力は、単位時間あたりに印加されるエネルギーに依存する。超音波振動を利用した場合、このエネルギーの大きさは先端部の移動量、すなわち振幅の大きさとなる。しかし、発振器から得られる振動振幅は非常に小さいため、十分な研削力を得ることは難しいため、振動をホーンと呼ばれる伝送体により増幅する。

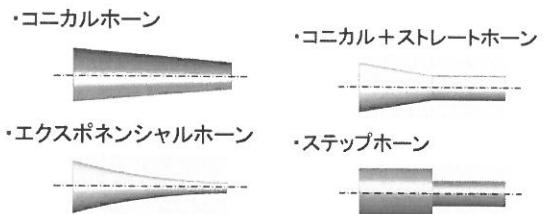


Fig.2 代表的なホーン形状

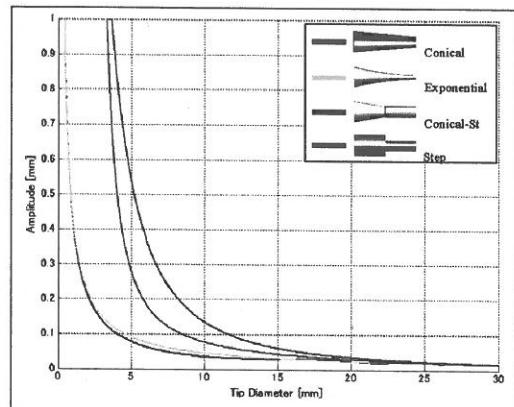


Fig.3 振幅拡大率と形状

ホーンでは、形状により振動波の伝搬経路が異なるため、先端で波形が集約され振幅が増幅される。Fig.2に代表的なホーン形状、Fig.3に先端における振幅増幅率を示す。Fig.2に示した形状以外にそれぞれの複合型が考えられるが、基本となる形状により特性を推定可能である。Fig.3の横軸は先端直径 [mm]、縦軸は先端振幅 [mm] を示している。また入力振幅は、発生可能な振動を想定し 0.015[mm]、ホーン底面の直径は 30[mm] とした。これより、形状にかかわらずホーン先端が小さくなるにつれ先端振幅拡大率は上昇し、Step型やConical-Straight型ホーンの振幅増幅率が他のホーンに比べて大きくなる。以上より、Step型やConical-Straight型を用い、先端直径を小さくすることで高い加工力が得られることが分かる。

3.2 研削対象へのエネルギー印加方式

次に、ホーンで増幅された超音波振動を岩石に印加することを考える。印加方式として、以下の2つが検討可能である。

- ・先端を、直接、対象に接触させて印加
- ・先端に刃などの工具を装着し印加

ここで、工具を使用する場合も、まずホーン先端でのエネルギーの伝達状況の把握が必要になるため、ここではまずホーンによる直接研削に関して検討を進める。

一般に、ホーン先端と岩石の接触面では、岩石表面が平面ではないため、接触面が一致せず、加工力は点接触で伝

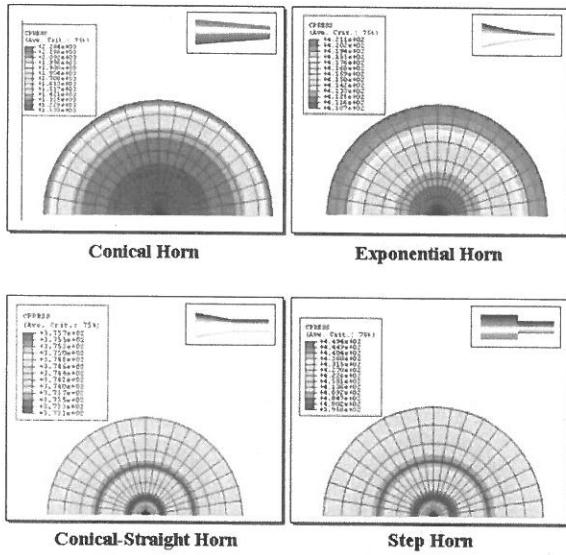


Fig.4 ホーン先端での応力分布

達することになる。また、ホーン先端面も一様に振動していないと予想されるため、効率的な岩石研削を行うには、ホーン先端での力分布と作用を明らかにし、効率的にエネルギーを伝達すること必要である。よって、ホーン先端の応力分布を確認する。

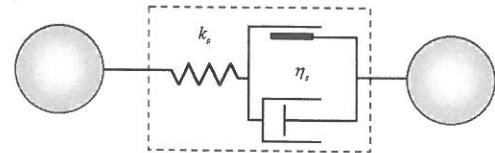
Fig.4 に、有限要素法による先端の応力分布解析結果を示す。ここでは色が赤いほど、応力が大きい。この結果、Conical型と Exponential型では、中心から同心円状に外側に向かって徐々に大きくなり、Step型と Conical-Straight型では中心部に大きな力が現れ、外周に向かって小さい波紋状の力分布となっていることが分かる。さらに、先端の振幅増幅率が大きいホーンと、応力分布が波紋状となるホーンが一致していることが判る。

4 仮想モデルによるシミュレーションと研削実験

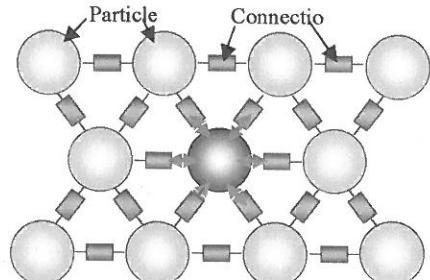
先端の応力分布と研削性能との関係に関して議論を進めることで、先端の接触点における挙動や対象の内部現象などの破壊現象を実験により確認することは極めて困難である[2]。また、パラメータなどの条件を一致させることは不可能であり性能の比較なども困難なためシミュレーションにより検討を進める。

4.1 個別要素法によるシミュレーション

ホーン先端での応力分布と、印加された力の研削対象への伝達過程、伝達された力による岩石内の破壊をシミュレーションにより実現する。ここでは、個別要素法 (Distinct Element Method : DEM) を利用して研削対象をモデル化する[3]。個別要素法では物体を粒子の集合体で表現するため、粒子間結合の断絶により物体の崩壊を表現すること

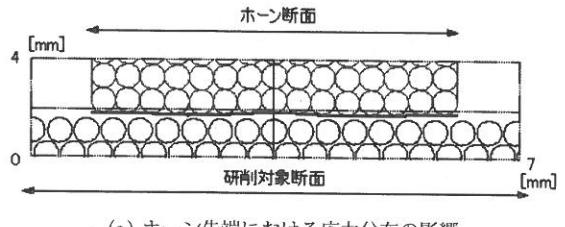


(a) 粒子間結合モデル

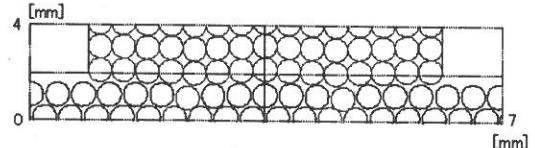


(b) DEM モデル全体像

Fig.5 DEM における粒子の結合モデル



(a) ホーン先端における応力分布の影響



(b) ホーン先端部と研削対象の接触

Fig.6 個別要素法によるホーン先端と研削対象モデル

が可能になる。Fig.4 に、各要素の粒子間結合モデルを示す。粒子間は弾性を表現可能なビンガム物体と呼ばれるモデルで結合される。

X 方向を横軸、Y 方向を縦軸とした場合、接触時に粒子 i に加わる各軸方向の力 (F_{xi} , F_{yi}) および回転モーメント (M_i) は以下の式で表される。

$$[F_{xi}]_t = \sum_j \{-[f_n]_t \cos \alpha_{ij} + [f_s]_t \sin \alpha_{ij} + m_i g\}$$

$$[F_{xi}]_t = \sum_j \{-[f_n]_t \sin \alpha_{ij} + [f_s]_t \cos \alpha_{ij}\}$$

$$[F_{xi}]_t = \sum_j \{[f_s]_t\}$$

ここで、 f_n は、2 粒子間の法線方向の力、 f_s は、せん断方向の力、 α_{ij} は、粒子 i , j の中心を結んだ直線と X 軸がなす角である。

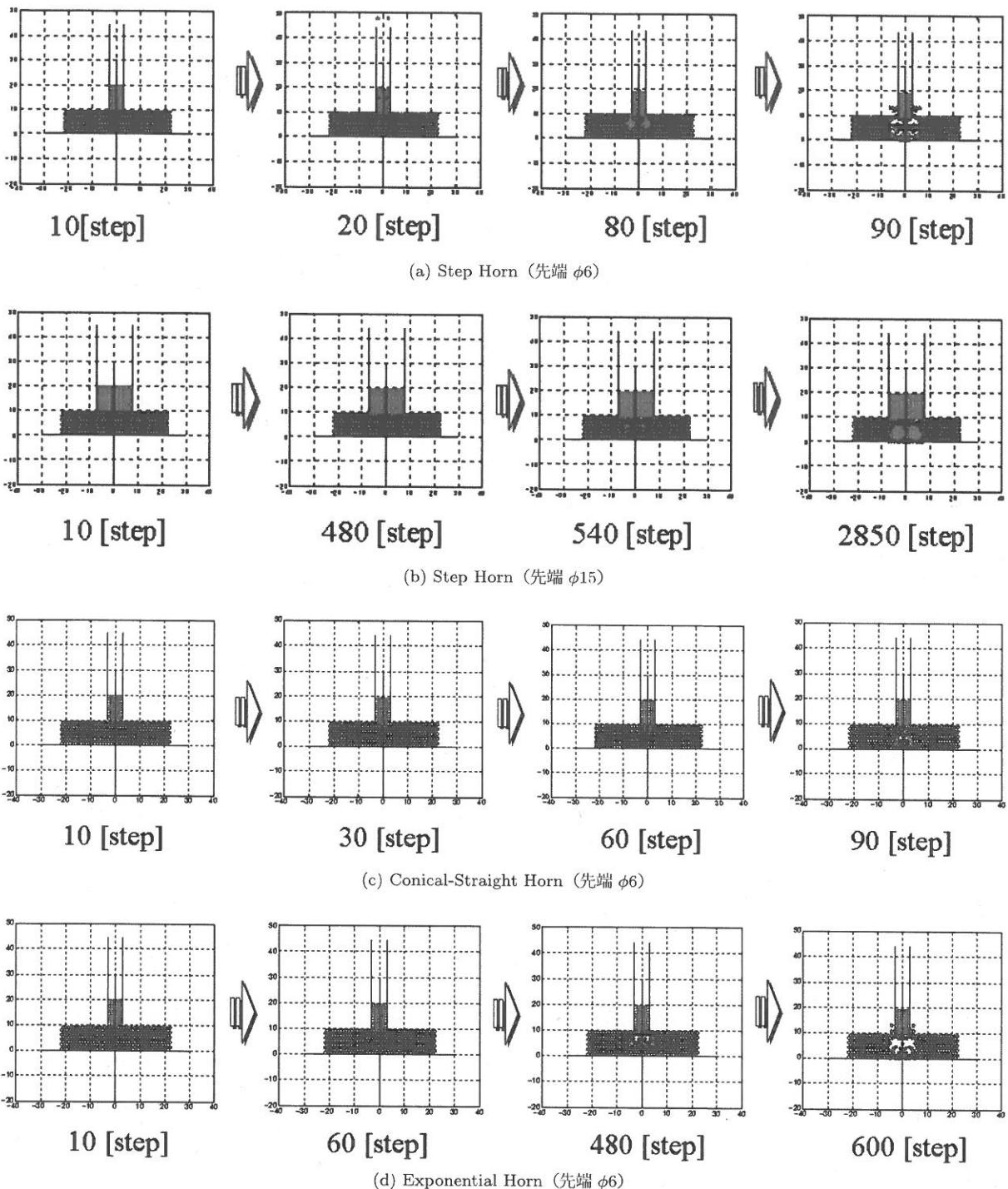
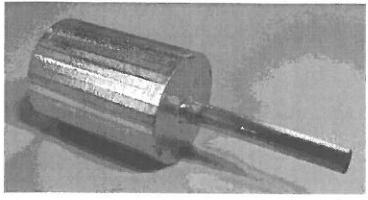


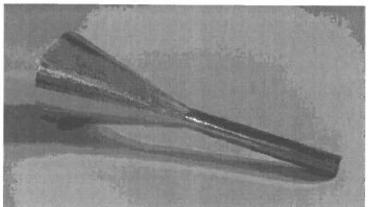
Fig.7 シミュレーション結果：ホーン形状による研削過程の違い

ここでは、初期検討として、研削対象の粒子群を同一粒子によって構成し、密度を一定とする。また、ホーンの粒子群は、細いホーンが束状になっていると仮定し、それぞれが独立した縦振動を行うことで応力分布を実現する。そして有限要素法の検討結果より、最大印加力とその比によりホーン形状による振幅増幅率の違いと先端応力分布を表現する。

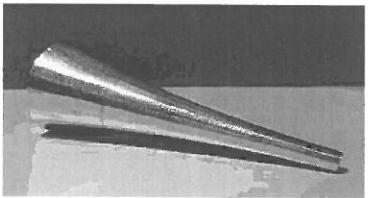
Fig.6 (a) に、研削対象モデルに対し Step 型ホーンを上から近づけた場合の接触直前の状態を示す。ホーン先端を黒線によって明示した。また、(b) に研削対象に接触した瞬間の状態を示す。赤くなっている粒子は、ホーンから力が印加されたことを示す。以上より、ホーンの先端が波状に隆起し、Step 型ホーン先端における波面状の応力分布が確認できた。



(a) S型



(b) CST型



(c) E型

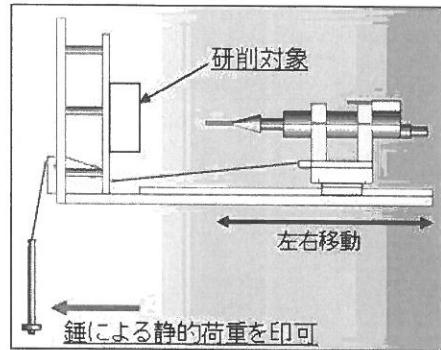
Fig.8 試作ホーン

次に本モデルを利用し、個別要素法による破壊シミュレーションを行った (Fig.7)。シミュレーション結果より、ホーン先端が研削対象の表面に接触後、対象表面において粒子の研削が確認される。さらに (a), (b) では、同一形状のホーンでは先端直径の細い方が、短時間で研削が可能である事が確認され、先端応力が波紋状になる Step 型 (a), Conical-Straight 型 (c) が、外側に向けて力が大きくなる Exponential 型 (d) に比べ、より短時間で研削可能であることが確認された。また、先端応力が波紋状になるホーンでは、外側に向かって力が大きくなるホーンに比べ、飛散した粒子の回転力が大きい傾向があった。これより、研削対象の構成粒子を回転させた方が、結合が切断されやすく、高い研削性能が得られる可能性があることが分かった。

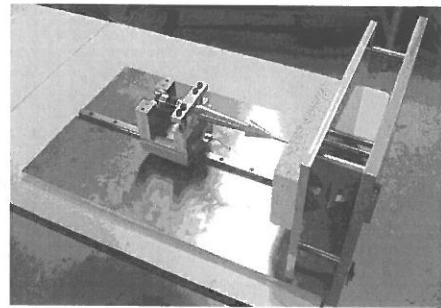
4.2 研削ホーン試作と岩石研削実験

以上の結果を確認するため、ホーンを試作し、研削実験を行う。ここでは、応力が波紋状のホーンが外に向かって大きくなるホーンよりも高い研削力を示し、先端が小さい方が高い研削力有することを確認する。

ホーンの材質として、伸縮運動と研削による磨耗を考え最適な素材として Titanium などが検討される。しかし、試作の容易さなどの観点から代替素材としてヤング率に優れる Aluminum (A2024) を選定した。先端面と底面の断面積比は、素材の内部損失や疲労破壊の観点から、振幅増



(a) 実験手法



(b) 研削ホーン固定装置

Fig.9 岩石研削実験装置

幅率が最も大きくなる Step 型 (S型) で 30 倍以内とし、今回は 1/5 とした。ここで S型は、断面積の変化が急であり、変化点での応力集中により金属疲労による破壊が懸念されるため、S型に近い特性を持ち、断面積変化が穏やかな Conical-Straight 型 (CST型) も試作することとした。また、先端応力分布の違いによる研削能力の変化を確認するため、応力分布が外周に向けて大きくなる Exponential 型 (E型) の試作も行った (Fig.8)。

研削能力を評価するため、ホーンを一定の力で研削対象に対して垂直に押しつける必要があるため、研削実験装置を製作した (Fig.9)。なお押しつけ力は、錘により重力をを利用して実現する。

初期実験として、ホーンによる研削能力の違いを明らかにするため、研削対象に比較的脆い軽量ブロックを用いた。実験では、ブロックに対して各ホーンを 1 分間押し当てる、研削対象への貫入量を計測する。横軸に押しつけに用いた加重 [g]、縦軸を研削深さ [mm] とした実験結果を Fig.10 に示す。実験から、CST 型が E 型よりも高い研削性能を示した。ここで、S 型は、予備実験にて CST 型よりも遙かに高い性能を示していたが、反力が大きく発振器への負担が大きく、用意した発振器では安定性に問題があるため、今後の課題とした。次に、CST 型の断面積比を 1/2 にして実験を行ったところ、性能の低下が確認でき、ホーン両

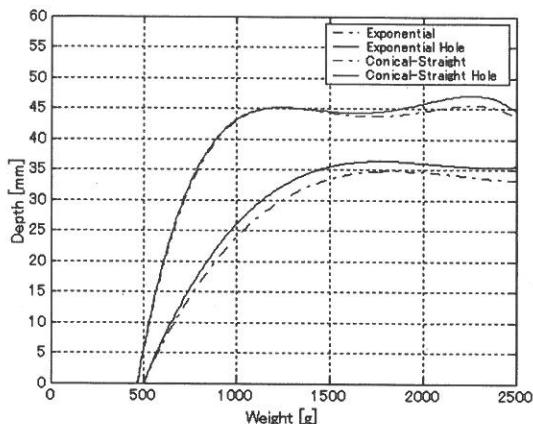


Fig.10 実験結果

端の面積比が、加工力に影響を与えることが確認された。よって、同心円状に応力分布がある CST 型ホーンの方が高い性能を示した。また S 型については発振器に大きな負担がかかるほど、大きな反力を帰ってきたことからも、研削力が非常に大きいことが予想されるため、同心円状の応力分布に加え、大きな振幅の方が、高い研削力を示すことが予想された。

以上より、シミュレーションの結果と同様な結果が確認された。ここで、実験より、ホーンと研削対象間の押しつけ力には振動振幅を有効に作用させるための最適値があり、さらに削りカスの除去により研削性能が向上する可能性が確認された。なお実験中の観察から確認できた事項を以下にまとめる。

- ・振動を与えた部位だけでなく、その外側が崩れる傾向がある
 - ・研削中、加工速度は一定ではなく、一旦停止してから深く貫入する傾向がある
 - ・実験後、ホーンと研削対象の間には多くの削りカスが堆積していた
 - ・印加時の押しつけ力が、大きすぎると研削速度低下
- 今後、個別要素法シミュレーションを用いて研削対象内部に伝わる振動の破壊への影響に関する検討を行い、詳細な分析を進める。

5まとめと今後の予定

超音波振動を駆動力とした岩石研削手法として、衝撃力の印加による研削方式の検討を進めている。初期検討試験で得られたホーンによる研削性能の違いを明らかにするため、本報告ではホーン先端における振幅増幅率の解析と、有限要素法の先端応力分布分析結果をもとに個別要素法による研削シミュレーションを行った。

シミュレーション結果より、ホーン形状の違いによる研削能力の変化、先端面と底面の断面積比の違いによる研削能力の変化を確認することができた。また、先端の応力分布により生じる粒子の回転運動の研削性能への寄与の可能性が明らかになった。さらに試作ホーンによる研削実験から、シミュレーションで高い研削能力を示したホーンが、実機においても高い研削力を有することが確認された。今後の予定として、岩石の破壊過程の解明とホーン先端での応力分布の違いの破壊過程への影響を、個別要素法シミュレーションにより分析する。

参考文献

- [1] 島川正憲，“超音波工学－理論と実際－”，工業調査会，1975
- [2] 日本機械学会，“岩石破壊力学とその応用”，コロナ社，1989
- [3] 粉体工学会，“粉体シミュレーション入門”，産業図書，1998
- [4] 伯野元彦，“破壊のシミュレーション－拡張個別要素法で破壊を追う－”，森北出版，1997
- [5] 日本機械学会，“衝撃破壊工学”，技報堂出版株式会社，1990
- [6] 西松 裕一，“岩盤力学”，東京大学出版会，1999
- [7] Y. Bar-Cohen, S. Sherrit, et al., “Ultrasonic/sonic drilling/koring (USDC) for in-situ planetary applications,” Proc. of the SPIE Smart Structures Conf., Vol. 3992, No.101, 2000.
- [8] 多田, 國井, 久保田, 大竹, “超音波を用いた研削システムにおけるホーン形状の研削性能評価”，第47回宇宙科学技術連合講演会，2003.
- [9] 桑原秀彦, 麻生稔彦, 弘中雅志, “個別要素法を用いた杭の打込み解析に関する研究”，山口大学工学部研究報告第53巻第1号, 2002