619 惑星探査のための小型振動加工機の開発

Development of Small Vibratory Crusher for Planetary Exploration

○古谷克司 (豊田工大)
三枝嘉孝 (豊田工大)

田形泰健 (豊田工大)

Katsushi FURUTANI, Toyota Technological Institute, 12-1, Hisakata 2-chome, Tempaku-ku, Nagoya
Yasutake TAGATA, Toyota Technological Institute
Yoshitaka MIEDA, Toyota Technological Institute

This report deals with a small and light drilling machine by using a piezoelectric actuator. The piezoelectric actuator itself hits a drill stem by reciprocating between a stopper and the stem. The collision of the piezoelectric actuator with the stopper or the tool was detected by the reverse current from the actuator caused by the generated charge. The device could generate an impact force of 150 N with an average frequency of the impulse of 120 Hz. The machine could crush pumice and gypsum. In addition a surface of basalt could be removed.

Key words: Piezoelectric actuator, Crusher, Vibration, Collision

A 1. はじめに

近年、原始太陽系のイベントの発生時期や現象の調査のため、月や小惑星で少量の試料を採取して地球に持ち帰るサンプル・リターンが計画されている。試料採集で使用される振動加工機は小型・軽量で消費電力が少ないものが望ましいため、衝撃力を利用したものが有効であると考えられる。そこで本研究ではさらに小型な振動加工機を開発するために、アクチュエータ自体で打撃する機構を提案することを目的とする。

A 2. 試作した振動加工機と動作原理

振動加工機の概略を図 A1 に示す。振動加工機は圧電素子を超鋼の板で挟んだハンマ、ハンマを工具側に反発させるた

Fig. A1 Schematic view of crusher

めのストップ、ハンマの振動方向を拘束するための板ばね、岩石をたたく工具、さらにこれらを固定するためのフレームで構成される。ハンマは圧電素子であり、それ自体が伸縮を繰り返すことで、工具とストップの間を往復し、衝撃力を発生する。

A 3. 振動加工機の性能

図 A2 のようにほぼ一定間隔で衝撃力が発生した (打撃が正)。ハンマの移動速度および発生する衝撃力は、ハンマと工具の間隔が 1.7mm~1.9mm 付近で最大になった。

岩石は破碎を行う面が平らになるように整形した。岩石と衝突する部分の形状が図 A3 のような $\phi 3.9\text{mm} \times 100\text{mm}$ の超鋼製の工具を使用し、試料として石膏を 60 分間かけて破碎した。結果を図 A4 に示す。脆い岩石の破碎や岩石の風化した部分の除去に使用可能であると考えられる。

Fig. A2 Generative force of crusher

Fig. A3 Shape of tool tip (Tungsten carbide)

Fig. A4 Machined hole (gypsum)

1. はじめに

近年、原始太陽系のイベントの発生時期や現象の調査を月や小惑星の物質の分析によって行おうとする動きがある。しかし、大きな分析装置を現地まで持っていくには、巨大な探査機が必要であり技術的、コスト的な困難を伴う。そこで月や小惑星に行き少量の試料を採取して地球に持ち帰るサンプル・リターンが計画されている。試料を採取する装置以外にも運ぶことを考えると採集装置は小型・軽量で消費電力が少ないものが望ましい。試料を採集することのみが求められているので岩石を破碎する際には精度が求められない。様々な方法が提案されているが⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾、試料採集には衝撃力や振動を利用したものが有効であると考えられる。アメリカ・ジェット推進研究所 (NASA/JPL) は、超音波振動子を利用して衝撃力を発生する振動加工機 (Ultrasonic/ Sonic Driller/ Corer: USDC) を開発している⁽¹⁾。しかし、振動振幅を増幅するための超音波ホーンの寸法が振動子の共振周波数により制限されるため、小型化には限界があると考えられる。

そこで本研究ではさらに小型な振動加工機を開発するために、アクチュエータ自体で打撃する機構を提案することを目的とする。以下では振動加工機の試作を行い、その性能を評価した結果について述べる。

2. 試作した振動加工機と動作原理

振動加工機の構成と工具の加振原理を図2に示す。アクチュエータにより伸縮されるハンマがストップと工具の間に置かれている。次のサイクルを繰り返しハンマで工具を打撃することで、工具と岩石の間に連続して衝撃力を加える。①ハンマがストップと衝突する。②衝突した瞬間に圧電素子を急速に伸ばす。③ハンマはストップから離れ、工具側に移動する。④圧電素子を縮める。⑤ハンマが工具と衝突する。⑥②と同様。⑦ハンマが工具から離れ、ストップ側に移動する。⑧④と同様。①に戻る。

本方法では、アクチュエータの共振を利用せず、アクチュエータ自体をハンマとして利用するため、装置の小型化、軽

Fig. 1 Principle of vibration generation

量化が期待できる。

振動加工機の構造を図2に示す。振動加工機は圧電素子を超鋼の板で挟んだハンマ、ハンマを工具側に振動させるためのストップ、ハンマの振動方向を拘束するための板ばね、岩石をたたく工具、さらにこれらを固定するためのフレームで構成される。振動加工機は台座上に載せられ、台座を上下させることにより送られる。また、工具が倒れるのを防ぐためガイドを設けた。工具を除いたサイズは42mm×55mm×14mm、質量は67gである。圧電素子の寸法は5mm×5mm×20mmで100V印加時に11.6μm伸びる。2本のM2ボルトを側面で締め付けて予圧をかけた。圧電素子を伸縮させるために、パルス幅167μs、波高値90Vの矩形波を印加した。ハンマがストップまたは工具と衝突すると、圧電素子から電流が逆向きに流れる。これをカレントトランスで測定し、衝突を検出した。このほかに、電気的な接触を用いることで、接触している時間を測定した。衝撃力の測定時には岩石の代わりに圧電式ロードワッシャを置いた。ハンマの変位はハンマとストップが接する位置を基準とし、ハンマが工具へ向かう方向を正として測定した。

3. 振動加工機の性能

3・1 ハンマ伸長のタイミング

ハンマと工具が衝突したときの例を図3に示す。上からハンマへの印加入力電圧、ハンマの変位、ハンマと工具との接触検知、衝撃力である。接触検知後、圧電素子を伸ばす時間を0.016msとして衝撃力が発生させた。入力を加えない場合にハンマと工具が接触する時間は0.192msであった。圧電素子を伸ばさない場合の衝撃力は27Nであったが、伸ばすことで同図の場合には91Nの衝撃力が発生した。ハンマを静止した工具に衝突させ、衝突してからハンマを伸ばすまでの時間を変化させた場合の速度の変化と衝撃力を表1に示す。衝突の前後では変位が直線的に変化しているため、その傾きを速度とした。速度比は、ハンマが工具に衝突する速度に対す

Fig. 2 Schematic view of crusher

Fig. 3 Example of hammer displacement and impulse

Table 1 Influence of timing of extension

Lapse time after collision ms	Velocity ratio	Maximum impulse N
0.016	1.10	87.4
0.069	1.07	53.0
0.102	1.13	46.3
0.132	1.40	43.7
0.184	1.15	33.9

る衝突後の速度の比である。いずれの場合にも加速されたため、速度比は1を超えた。定常速度は飽和するが、圧電素子の伸長の速度より大きい。したがって、振動した状態を維持できる。速度は衝突後の経過時間に対して一定の傾向が見られなかった。経過時間が短いほど衝撃力は大きかった。衝突時の衝撃力と圧電素子が伸びることによる衝撃力がほぼ同時に発生することで、足しあわされた衝撃力となるためであると考えられる。衝撃力が高いほど破碎の効率が良いので、今回は衝突を検知してから最短でハンマを伸ばすタイミングの①を使用した。

3. 2 振動加工機の基本特性

ギャップ長を 0.7~2.4mm の間で設定し、基本特性を測定した。

ギャップ長が 1.9mm の場合のハンマ変位と衝撃力の例を図 4 に示す。縦軸のハンマ変位は上が工具側で、衝撃力は正が打撃を示す。衝撃力の発生間隔はほぼ一定であった。ハンマは初期に設定したハンマと工具の間隔（以下ギャップ長）よりも狭い範囲を移動した。これは、工具がハンマに叩かれてロードセルから弾んでいることが原因であると考えられる。

ハンマと工具の間隔とハンマの移動速度および発生する衝撃力の平均値との関係を図 5 に示す。速度、衝撃力共に 1.7mm~1.9mm 付近で最大になった。衝撃力は運動量に依存し、ハンマと工具の質量はそれぞれ一定である。したがって、衝撃力と速度の傾向は同様になったと考えられる。

ギャップ長と単位時間当たりの衝撃回数の関係を図 6 に示す。図中の衝撃回数の限界は入力信号によって決定される値である。衝撃回数はギャップ長が広くなるに従って減少した。これはハンマの移動距離が増加し、ストップと工具の間を往復するために必要な時間が増加したことが原因である。

破碎は衝撃力が高いほど効率が良いため、ギャップ長を 1.7mm~1.9mm として岩石の破碎を行った。

3. 3 岩石の破碎実験

破碎した試料には、軽石、石膏、玄武岩を使用した。破碎する面が平らになるようにあらかじめ整形してから加工した。使用した超硬工具の寸法は、直径 3.9mm、長さ 100mm

Fig. 4 Generative force of crusher

Fig. 5 Average of impulse and hammer velocity

Fig. 6 Relationship between frequency of impulse and gap distance

である。先端の形状は図 7 に示す 3 種類を用いた。

加工後の試料の外観を図 8 に示す。軽石を 5 分間破碎した結果、穴径は $\phi 4.3\text{mm}$ 、深さは 4mm であった。また、質量が 6mg 減少した。試料として石膏を 60 分間かけて破碎した

Fig. 7 Tip shapes of drill stems made of tungsten carbide

Fig. 8 Results of machining

Table 2 Comparison of developed crusher with USDC

	Impulse N	Impulse frequency Hz	Dimensions mm	Mass g	Average power W
Developed crusher	150	120	42×55×14	67	4
USDC ⁽¹⁾	350	1100	φ36×111	450	12
Crusher/ USDC	0.43	0.11	0.38 in length	0.15	0.33

場合には、工具の先端はφ2.2mmのときに加工した穴の底面の直径は2.9mmであった。最も深く掘れた位置の深さは2mmであった。また、加工により除去されていた質量は20mgであった。また玄武岩の表層を除去することもできた。したがって脆い岩石の破砕や岩石の風化した部分の除去に使用可能であると考えられる。

4. USDC との比較

超音波振動子を利用した振動加工機である USDC と比較を行った結果を表2に示す。試作した振動加工機の値は、ギャップ長が1.9mmの場合の値である。USDCは超音波振動子、ホーン、フリーマス、工具で構成される。ホーンを超音波振動させることによってフリーマスを叩き、さらにこれが工具に衝突し、岩石の間に衝撃力を与える⁽¹⁾。USDCの値は論文に記載されたものである。USDCに対して破砕の性能は劣るが、小型化・低電力化は達成された。今後はさらに衝撃力を向上させる必要がある。

5. まとめ

本研究ではアクチュエータ自体を打撃するために振動させることにより小型化した振動加工機を開発した。結果をまとめると以下ようになる。

- (1) 試作した振動加工機でギャップ長と衝撃力、衝撃回数との関係を明らかにした。
- (2) 試作した振動加工機で軽石と石膏を破砕できた。また、

玄武岩の表層を除去できた。

研究の遂行に当たりご助言いただいた JAXA/ISAS 久保田孝助教授、中央大学國井康晴助教授、豊田工業大学近藤一義客員教授に感謝いたします。本研究の一部には文部科学省私立大学ハイテク・リサーチ・センター整備事業補助金(平成15年度～平成19年度)「宇宙ロボティクス研究センター」を用いました。記して感謝いたします。

文 献

- (1) X. Bao, Y. Bar-Cohen, Z. Chang, B. P. Dolgin, S. Sherrit, D. S. Pal, S. Du, T. Peterson: Modeling and Computer Simulation of Ultrasonic/ Sonic Driller/ Corer (USDC), IEEE Trans. Ultrasonics, Sonics and Frequency Control, 50, 9 (2003) 1147-1160.
- (2) 多田興平, 國井康晴, 久保田孝, 大竹真紀子: 超音波を用いた検索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講演集, (2003) 1489-1490.
- (3) A. Sukhanov, O. Duraou: Autonomous Navigation And Sample Collection for the Low-cost Main-belt Asteroid Sample Return Mission, J. Spacer Rockets, 38, 5, (2001) 736-744.
- (4) B. Dachwald, W. Seboldt, L. Richter: Multiple Rendezvous and Sample Return Mission to Near-Earth Objects Using Solar Sailcraft, 5th IAA Conf. Low-Cost Planetary Missions (2003) 5-6.