

## 超音波締めを応用した月面インフラ材料の開発

Development of Material for Moon Base Infrastructure by Ultrasonic Wave Compacting

徳山工業高等専門学校 准教授 温品達也

### (研究計画ないし研究手法の概略)

#### (1) 月面でのインフラ材料開発の条件

月面の環境は厳しく地球と同じような材料開発は困難であることが予想され、月面でのインフラ材料開発の条件や課題を洗い出し、対応する必要がある。そこで、考慮すべき条件として①月レゴリスのみを使用する、②水は生命維持に優先するため使用しない、③真空中で実現可能である、④低コストで作製可能である、⑤月面の温度差に耐えられるという5つが挙げられる。今回は第一段階として温度変化に関する実験は行わず、月レゴリスの固化を目標とした。

#### (2) 超音波による固化の仕組み

超音波による粉体の固化は図-1に示すように、超音波の振動で粒子間の摩擦を減少させ、粒子が再配列し間隙が減少することで生じる。それにより高密度化するため、超音波を用いることで緻密で圧縮強度の高いものになる。しかし、超音波のみでは固化できる大きさに限度があるため非効率的である。そのため、本研究では超音波と圧縮を用いた固化について検討した。



図-1 超音波による固化の仕組み

#### (3) 実験材料および装置

本研究では超音波を用いてシミュラントを固化することを目的としている。そこでまず、超音波と振動子のわずかな自重のみでの締め固めを行い、超音波振動が締め固めに効果的であるかを検討した。さらに、照射時間、層数、出力電圧を変えて実験を行うことで、効率的に締め固められる条件を検討した。実験装置については写真-1に示し、実験に使用した材料および器具等を以下に述べる。



写真-1 超音波振動子(左), 円柱型枠(中), 金属板(右)

##### a) 月の模擬砂(シミュラント)

本実験は、月レゴリスの模擬材(以下、シミュラント)を用いて行った。シミュラントとして使う材料は、月レゴリスと同じ玄武岩である富士砂とする。富士砂は園芸用として、低価格で多量に流通しているものである。富士砂を月レゴリスの粒度分布と一致させるために、粉砕機で粉体化したものをシミュラントとした。

##### b) 超音波振動子

本実験に用いた超音波振動子は、周波数273kHz、質量606gである。これをシミュラントに押し当てることで締め固めを行った。

### c) その他

シミュラントを締め固めるための容器として、円柱型枠を用いた。また、超音波振動子の直径が型枠よりも小さいため、振動をシミュラントへ様に伝えるために、型枠と同じ径の金属板を用いて締め固めを行った。

#### (4) 実験方法

実験装置の概要を**写真-2**に、超音波振動子、超音波発信機、オシロスコープが接続してある状態を示す。超音波振動子に接続されている装置の、上がオシロスコープ、下が超音波発信機である。超音波発信機で電圧、周波数を変更でき、オシロスコープでは振動の波形を見ることができる。

次に装置を使用するための手順を説明する。まず、先ほど説明した3つの装置を**写真-2**のように接続する。超音波発信機と超音波振動子の赤の銅線同士、青の銅線同士をつなぎ、オシロスコープと青の銅線をつなぐ。接続ができれば超音波発信機の電源を入れ、周波数と電圧を設定することで、超音波振動子が振動を始める。

超音波を当てる場合と当てない場合に分け、締め固めの効果を比較した。超音波を当てない場合は、シミュラントを円柱型枠の中に9層に分けて入れ、1層につき超音波振動子を1回沈下させ自重のみで締め固めた。超音波を当てる場合は、**写真-3**のように沈下させた状態の時に200Vで30秒間、超音波を照射した。

さらに、層数や出力電圧を要因として検討するために、**表-1**、**表-2**に示すケースで実験を行った。層数は9層に加え4層、18層とした。出力電圧は200Vに加え、100Vおよび装置の限界値である280Vで実験を行った。



写真-2 実験装置



写真-3 超音波による締め固めの様子

表-1 層厚変更の条件

照射時間(s)	層数(層)	出力電圧(V)
30	4	200
	9	
	18	

表-2 出力電圧変更の条件

照射時間(s)	層数(層)	出力電圧(V)
30	18	100
		200
		280

#### (実験調査によって得られた新しい知見)

##### [ダイジェスト]

超音波によりシミュラントの密度が向上し、締め固め層数や振動子の電圧を高めることでさらに密度が上昇した。最も密度の高い条件では型枠内でシミュラントが固化したものの、脱枠の際に崩壊する程度の固化であった。そこで、建材ブロックの製造方法を参考に型枠振動機を用いて圧縮固化を検討したところ、レンガブロックサイズの固化体を得た。

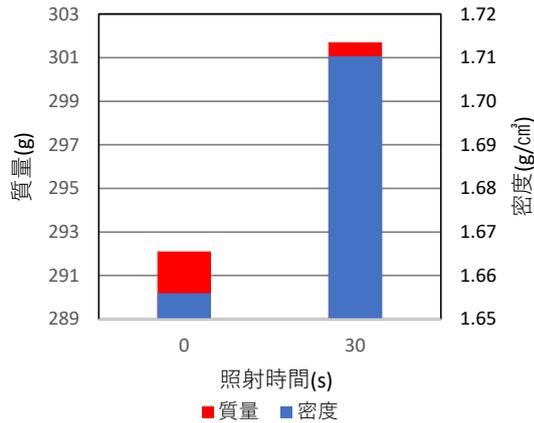


図-2 超音波の有無による質量・密度の変化  
(層数9層, 出力電圧200V)

a) 超音波による締め実験結果

超音波を当てる場合と当てない場合の実験を行い、質量と、容器の体積から密度を計算したところ、図-2に示す結果を得た。超音波を当てなかった場合の質量が292.11g、密度が1.66g/cm<sup>3</sup>、当てた場合の質量が301.71g、密度が1.71g/cm<sup>3</sup>となり、超音波を当てた場合の方がわずかに密度は高く、超音波による粒子の再配列の効果があったものと考えられる。

b) 層数・出力電圧の変更

層数、出力電圧を変更した場合の実験を行い、質量と密度を計算したところ、図-3、図-4に示す結果を得た。層数を変更した場合の実験(図-3)は照射時間30秒、出力電圧200Vで行った。4層の場合の質量が298.60g、密度1.69g/cm<sup>3</sup>、9層の場合の質量が301.71g、密度が1.71g/cm<sup>3</sup>、18層の場合の質量が316.73g、密度が1.79g/cm<sup>3</sup>となった。特に4層と9層の密度の差はわずかだが、層数が増えるほど密度が上がる傾向にあることがわかる。これは、超音波がシミュラント内を伝搬できる距離に限りがあり、層が薄いほど超音波がよく伝搬するためだと考えられる。

出力電圧を変更した場合の実験(図-4)は、照射時間30秒、層数18層で行った。100Vの場合の質量が313.20g、密度が1.78g/cm<sup>3</sup>、200Vの場合の質量が316.73g、密度が1.79g/cm<sup>3</sup>、280Vの場合の質量が323.86g、密度が1.84g/cm<sup>3</sup>となった。100Vと200Vの密度の差はわずかだが、出力電圧が高くなるほど密度が上がる傾向にある。これは、現在主流となっている超音波振動子が電歪型振動子であり、電圧を加えることで伸び縮みする性質を利用し、超音波振動を発生させていることが関係していると推察される。

最も密度の高かった電圧280Vで締め固めたシミュラントを写真-4に示す。型枠内にある状

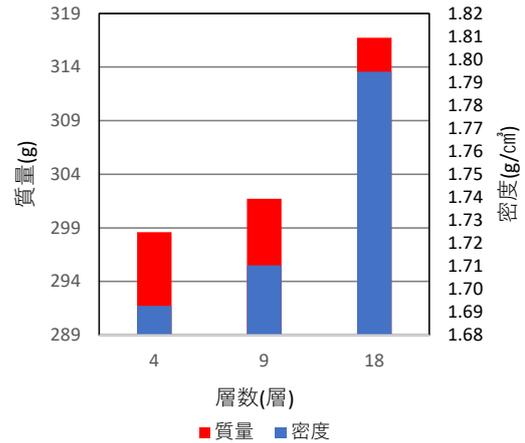


図-3 層数変更による質量・密度の変化

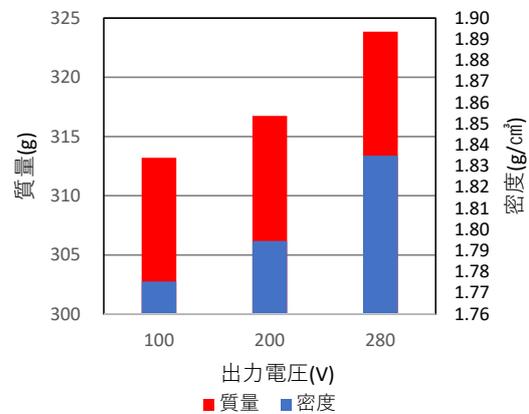


図-4 出力電圧の変更による質量・密度の変化



写真-4 脱型前のシミュラント(左),  
脱型後のシミュラント(右)



写真-5 型枠振動機と圧縮装置によるシミュラントの固化実験状況

態では指で押ししたり、型枠を逆さまにしても崩壊せず、ある程度の固化は達成されたと言える。しかし、型枠を取り外した際は、その衝撃や型枠との摩擦によりシミュラントの固化体は崩壊し、いくつかの破片となった。

### C) 今後の方針

振動による固化を検討する過程で、地球のインフラにおける歩道ブロックの主流であるインターロッキングブロックの製造方法に着目した。インターロッキングブロックは、高強度のコンクリートを超音波でなく、通常の振動によって締め固めて緻密化している。そこで、インターロッキングブロックの大きさ(一般的なレンガブロックサイズ)の金属型枠を製作し、コンクリート用の型枠振動機により振動を与えながら、200kNの圧縮力を加えた(写真-5)。

圧縮後、写真-6に示すように型枠を押し抜きながら取り外したところ、レンガブロック形状を有する固化体を得ることができた(写真-7)。この固化体は、筆者の総重量(58kg)に耐えたことから、月面では300kg程度の重さに耐えられると考えられる。振動がない圧縮のみの場合は、脱枠の際にシミュラントが崩壊したことから、振動と圧縮の組み合わせによる固化が非常に有効であることがわかった。また、先行研究などでは10mm程度の固化体試作にとどまっており、レンガブロックサイズで水を使わずにシミュラントを固化できた本成果は、月基地インフラにおいて非常に実用的な技術であると言える。

今後、固化する際の振動機の各種性能や型枠の改良などを行い、合理的にシミュラントを固化できる条件の探索や、圧縮強度の検討、真空・高温・低温環境での耐久性を検討していく。



写真-6 圧縮後の脱枠状況



写真-7 振動と圧縮により固化したシミュラント

**( 発 表 論 文 )**

- 1) 山下航星, 大上喬之, 温品達也 : 月レゴリスにおける加圧固化方法の研究, 第 66 回宇宙科学技術連合講演会論文集, P102, 2022.
- 2) (投稿予定)尾崎未悠, 温品達也 : 月地下基地におけるインフラ材料の検討, 第 67 回宇宙科学技術連合講演会論文集, 2023.
- 3) (投稿予定)山下航星, 温品達也 : 振動加圧による月レゴリスの固化, 第 67 回宇宙科学技術連合講演会論文集, 2023.
- 4) (投稿予定)温品達也, 大上喬之, 田辺百花 : 月基地開発における月表土模擬材の検討, 土木学会年次学術講演概要集第 79 号, 2024.
- 5) (投稿予定)尾崎未悠, 山下航星, 温品達也 : 月基地開発における月レゴリスの固化実験, 土木学会年次学術講演概要集第 79 号, 2024.