

火成岩を主体とする土質材料を用いた惑星基地建設材料の作製

大林組 正会員    ○田島 孝敏, 正会員    森 拓雄, 正会員    石川 洋二  
JAXA 正会員    金森 洋史,                      星野 健

1. はじめに

月や火星での拠点基地建設にあたっては資材を地球から運ぶと莫大な費用がかかるため、現地の資源を用いて建設資材を調達できれば大幅なコスト削減を図ることができる。そこで、月の表土の模擬試料（模擬月土と称する）をマイクロ波で加熱して固化体を作製し、強度特性を基に建設材料への適用性について考察した。

2. 模擬月土

1969 年 7 月にアポロ 11 号が月着陸に成功してから、いくつかの表土が地球に持ち帰られた。試験に用いた模擬月土「FJS-1」は、月の表土と組成に近い地上の自然由来鉱物を原料とした物質である。代表的なアポロ試料と模擬月土の化学組成を表 1 に示す<sup>1)</sup>。FJS-1 の化学組成はアポロ試料と類似しているが、鉄の酸化状態が異なる。模擬月土の粒度分布を図 1 に示す。図中の上限・下限はアポロ試料の平均的な分布に基づいて設定され、FJS-1 はこの範囲にある。粒子密度は 2.93g/cm<sup>3</sup> である。

3. マイクロ波加熱技術

月面で建設材料を製造することを目的として、模擬試料を溶融、冷却してガラス質の建材を作製する方法が検討されている<sup>2)</sup>。溶融方法として電気炉、太陽光集光、レーザー光集光、マイクロ波加熱などがある。この中で、真空中でも適用可能で、目標物を加熱できるマイクロ波加熱により固化体を作製した。ここでは、シングルモード加熱とマルチモード加熱によって模擬月土を焼成した。試験概要と結果を以下に述べる。

3.1 シングルモード加熱法

これは図 2 に示すように、導波管を用いてマイクロ波を誘導する方法である。導波管の終端を閉じることで入力波と反射波が干渉し合い、定在波を形成する方法で、マイクロ波のエネルギーが最大となる部分を有効活用できることが特長である。導波管内部にサンプルを設置し、マイクロ波発振器からマイクロ波を照射し、サンプルを通過したマイクロ波をショートプランジャで反射する。

模擬月土をアルミナ製容器に充填した。容器は内寸 φ63mm×h30mm、試料量は約 150g である。これにマイクロ波を照射し、一定時間、最高温度を保持した後に自然冷却した。サンプル内部に熱電対を設置し、昇温から定温までの温度プログラムに沿ってマイクロ波の出力を制御した。事前に模擬月土を加熱して 1100℃～

表 1 アポロ試料と模擬月土の化学組成

| 組成                             | アポロ試料 |      |      | 模擬月土  |
|--------------------------------|-------|------|------|-------|
|                                | A11   | A16  | A14  | FJS-1 |
| SiO <sub>2</sub>               | 42.2  | 45.0 | 48.1 | 45.3  |
| TiO <sub>2</sub>               | 7.8   | 0.5  | 1.7  | 2.0   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 13.6  | 27.3 | 17.4 | 17.7  |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.3   | 0.3  | 0.2  | 0.0   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | -     | -    | -    | 4.0   |
| FeO                            | 15.3  | 5.1  | 10.4 | 8.9   |
| MnO                            | 0.2   | 0.3  | 0.1  | 0.2   |
| MgO                            | 7.8   | 5.7  | 9.4  | 3.3   |
| CaO                            | 11.9  | 15.7 | 10.7 | 12.1  |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.5   | 0.5  | 0.7  | 3.9   |
| K <sub>2</sub> O               | 0.2   | 0.2  | 0.6  | 1.2   |

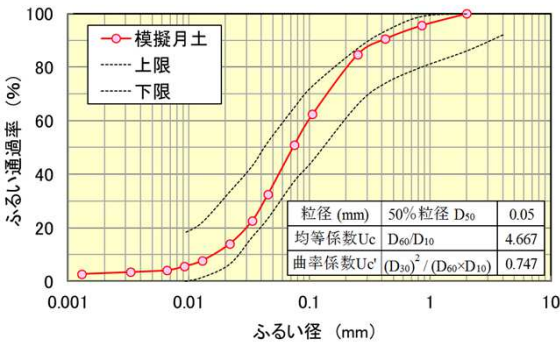


図 1 模擬月土の粒径分布

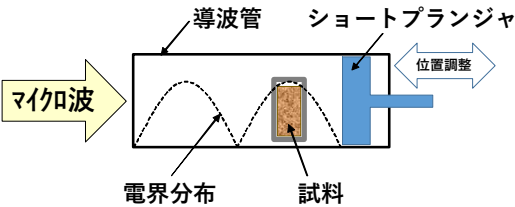


図 2 シングルモードによる加熱方法<sup>3)</sup>

キーワード：模擬月土，マイクロ波加熱，溶融，焼結，建設材料

連絡先：〒204-8558 東京都清瀬市下清戸 4-640 大林組 技術研究所 自然環境技術研究部 TEL 042-495-1102

1150℃で焼結，1200℃で熔融することを確認し，試験ケースを表 2 に示すように設定した．No.1～3 は最高温度を 1150℃とし，No.4 は 1200℃とした．加熱試験結果を表 2 に併記する．No.1 はアルミナ容器が破損し，模擬月土の一部が熔融した．No.2 は中央部の試料が熔融固化し，周囲は

表 2 シングルモード加熱試験ケースおよび試験結果

| No. | 昇温速度<br>(℃/min) | 最高温度<br>(℃) | 保持時間<br>(min) | 断熱材設置   | サンプルの状態    |
|-----|-----------------|-------------|---------------|---------|------------|
| 1   | 100             | 1150        | 2             | なし      | 容器が破損，一部熔融 |
| 2   | 50              | 1150        | 30            | 容器下部，側面 | 試料の中央部が熔融  |
| 3   | 10              | 1150        | 300           | 容器全面    | 試料の中央部が熔融  |
| 4   | 10              | 1200        | 300           | 容器全面    | 試料は全体的に熔融  |

砂の状態であった．No.3 は熔融固化物の寸法が大きくなったが，その周囲は焼結していなかった．No.4 は最高温度 1200℃で 300min 加熱し，模擬月土が全て熔融固化した．これより，模擬月土を焼結するには，試料全体にマイクロ波を均一に照射して，容器外部への放熱を抑制する必要があると判断した．

3.2 マルチモード加熱法

これは図 3 に示すように，電子レンジと同様に金属製のキャビティ用いて攪拌羽根と壁面で入力波を多重反射させて加熱する方法である．多重反射により均一に加熱できるが，反射によるエネルギーロスがある．充填容器からの放熱を抑制する方法として，容器の周囲に炭化ケイ素(SiC)などのマイクロ波吸収発熱体を設置する方法がある．ここでは，アルミナ製容器(内寸 φ74mm×h76mm)を，ひと回り大きい SiC 容器に入れてマイクロ波を照射した．試料の加熱状態を熱電対でモニタリングした結果，模擬月土は均等に焼結した．

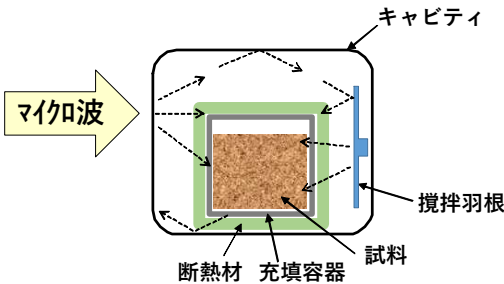


図 3 マルチモードによる加熱方法<sup>3)</sup>

3.3 焼成物の物性と圧縮強度

シングルモード加熱試験 No.4 の熔融固化物と，マルチモード加熱試験の焼結物について，内径 15mm のコアドリルを用いて円柱供試体を抜き出し，これらの供試体の一軸圧縮強度を測定した．試験結果を表 3 に示す．

表 3 圧縮試験結果

|                             | 熔融固化物               | 焼結物                 |                     |
|-----------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|                             |                     | No.1                | No.2                |
| 直径 (mm)                     | 14.5                | 14.2                | 14.4                |
| 高さ (mm)                     | 23.4                | 26.6                | 30.3                |
| 質量 (g)                      | 10.6                | 9.37                | 10.75               |
| 密度 (g/cm <sup>3</sup> )     | 2.75                | 2.22                | 2.17                |
| 一軸圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> ) | 141.6               | 16.38               | 15.26               |
| ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )  | 4.1×10 <sup>3</sup> | 1.6×10 <sup>3</sup> | 2.3×10 <sup>3</sup> |

熔融固化物の一軸圧縮強度は 141.6N/mm<sup>2</sup> で，これは高強度コンクリートの圧縮強度に相当する．一方，焼結物の一軸圧縮強度は約 16N/mm<sup>2</sup> で，JIS 規格の普通れんが 2 種 (15N/mm<sup>2</sup> 以上) に相当する．熔融固化物の圧縮強度は焼結物の約 9 倍と大きい，これは，焼結物には粒子間の空隙が残っているのに対して，熔融固化物では空隙が充填されて密実になったためと推定される．

4. まとめ

基地建設材料の要求性能は使用箇所や建設工法によって異なるが，月の重力加速度は地球の約 1/6 と小さいため，普通れんがが相当の強度を有する焼結物は月面基地の建設資材としての適用性があると考えられる．

5. おわりに

本研究は，JST イノベーションハブ構築支援事業に基づく JAXA 宇宙探査イノベーションハブとの共同研究として実施したものである．

参考文献

1) 金森，篠田：月資源からの建設資材の製造に関する基礎検討，the 34th ISAS Space Energy Symposium, 6th March, 2015  
2) Ishikawa, Y., et al., “Simple and Efficient Methods to Produce Construction Materials for Lunar and Mars Bases”, Engineering, Construction, and Operations in Space III, Denver, May-June, 1992  
3) 梶田吉晴：マイクロ波セラミックス焼成炉の加熱原理，金属，Vol.80, No.3, 2010