

マイクロ波およびレーザーを用いた月面基地建設材料の製造に関する研究

大林組 正会員 ○田島孝敏, フェロー会員 新村 亮
名古屋工業大学 白井 孝, 加藤邦彦
レーザー技術総合研究所 藤田雅之

1. 目的

1969年に人類が月に着陸して半世紀が経過し、世界各国で宇宙開発が盛んに行われている。米国 NASA は 2025 年に月に宇宙飛行士を送り、月資源を探索するアルテミス計画を進めている。日本も参加を表明し、各省庁が宇宙政策を実施し、国交省は 2021 年 7 月に「宇宙無人建設革新技術開発推進事業」を設立した。月拠点建設に資する課題として「無人建設」、「建材製造」、「簡易施設建設」が設定され、筆者らは、月の資源を利用した建材製造を目的として、マイクロ波とレーザーで模擬砂を加熱して固化体を製造する技術を検討した。

2. 建設材料の用途

JAXA は、有人月面基地として、約 2km 四方に離着陸、居住、発電設備、および観測の 4 つのゾーンと、各ゾーンを連絡する道路を配置する案を構想している¹⁾。

本研究では、建設材料の用途として、①離発着場の舗装材料、②運搬路の舗装材料、③居住施設の防護材を選定し、作用荷重を設定して構造解析や文献等で部材に求められる力学性能を検討した(表 1 参照)。部材の製造方法としてマイクロ波焼成とレーザー積層造形を選定し、月表土を模擬した砂を用いて固化体を作製した。そして、圧縮強度等を要求性能値と照合し、適用性を判定した。

表 1 建設材料の用途、部材、作用荷重

用途	部材	作用荷重	力学性能
離発着場の舗装材料	インターロッキングブロック	離発着機の脚荷重	圧縮強度 曲げ強度
運搬路の舗装材料		トラックの輪荷重	圧縮強度 曲げ強度
居住施設の防護材	外壁パネル	微小隕石の衝突荷重	圧縮強度

3. 月レゴリスシミュラント（月土壌の模擬砂）

実験では、火山溶岩石を原料とする月土壌シミュラント FJS-1 を使用した。主な化学組成は SiO_2 49.8%, Al_2O_3 19.9%, CaO 10.2% である。図 1 に粒径分布図を示す。アポロ計画で採取された土壌の粒度分布の上・下限内に収められ、50% 粒径が 0.067 mm と微粒子で構成される。加熱による状態変化については 1000℃で粒子の焼結が始まり、1100℃で焼結、1200℃で熔融した。

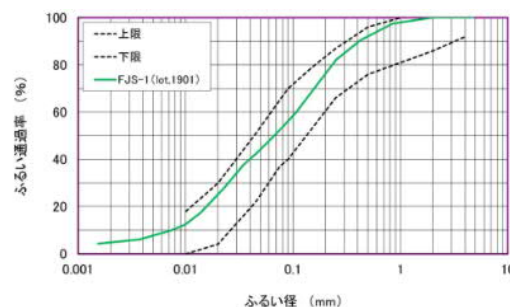


図 1 月土壌シミュラントの粒径分布図

4. マイクロ波による焼成体の作製

4.1 作製方法

作製手順を以下に示す。

- 1) 月レゴリスシミュラントへの加水
- 2) 型枠(10×10×h3cm)への充填・成型(図 2)
- 3) 脱型後、成型体周囲を断熱材で被覆
- 4) マイクロ波を照射して成型体を焼成
- 5) 焼成物を切断加工



図 2 成型体作製



図 3 焼成体（平面，断面）

キーワード 月レゴリス, 建設材料, マイクロ波, 焼成, レーザー, 積層造形

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 050-3828-3057

4.2 焼成物の特性

焼成には高砂工業製マイクロ波炉（2.45GHz，最大出力 3kW）を用いた．温度プログラムは，室温から最高温度 1050℃まで 3 時間で昇温し，これを 3 時間保持した後，自然冷却させた．

図 3 に焼成物の外観と断面を示す．成型時に比べて平面方向に広がり，厚みが減少した．1000℃を超えたあたりから模擬砂が焼結し，徐々に熔融して成型体の容積が減少したと考えられる．断面を見ると，表層数 mm 程度は赤褐色に変色し，その下は濃い灰色で緻密であった．

圧縮強度試験では直方体(4×4×h2cm)を四等分して 2cm 角の立方体を用いた．曲げ強度試験では直方体(2×2×L8cm)の成型体を 3 点載荷法で曲げ強度を測定した．圧縮強度は 3 体平均で 312N/mm²で，超高強度コンクリート相当の強度が得られた．曲げ強度は 2 体平均で 36.7N/mm²(圧縮強度の 1/10 程度)で高強度であった．

5. レーザーによる積層造形物の作製

5.1 作製方法

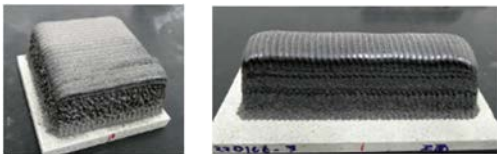
レーザー照射位置に粉末材料を供給し，熔融した材料を任意の形状に積層する「指向性エネルギー堆積法」(DED)を採用した．実験では日本電産マシンツール製 3D プリンタ(LAMDA 200)を用いた．図 4 に装置の概念図と積層造形の様子を示す．ヘッド先端から吐出した砂がレーザー焦点で熔融し，X-Y ステージが平面方向に動いて幅数 mm のビードが積層される．



図 4 指向性エネルギー堆積法(DED)

5.2 積層造形物の特性

レーザー出力 300 W，掃引速度 450 mm/min で積層した．圧縮強度試験体(4×4×h2cm)を作製するため，まず，x 方向に 2mm ピッチで長さ 45mm のビードを 21 本引いて 45×40×t2mm の層を作り，次に，その上に Y 方向にビードを引いて 2 層目を作った．1 層毎に掃引方向を 90 度変えながら積層し，高さ 2cm の直方体を造形した．曲げ強度試験体(2×2×L8cm)も同様の方法で積層造形した．図 5 に積層造形物を示す．圧縮強度は 3 体平均で 46.4N/mm²，曲げ強度は 2 体平均で 0.88N/mm²であった．



(a)圧縮強度試験用 (b)曲げ強度試験用

6. 各用途に対する要求性能への適合性

離着着場および道路の構成材料は，路床に地山のレゴリス，路盤に土嚢袋，舗装材にインターロッキングブロックを想定した．ブロックの品質規格は「インターロッキング舗装設計施工要領(平成 29 年 3 月)」に準じ，圧縮強度 32.0N/mm²以上，曲げ強度 5N/mm²以上を設定した．

居住施設防護の検討では微小隕石を対象とした．畑中の研究²⁾で質量 1g の隕石に対し，圧縮強度 40N/mm²，厚さ 3.7cm の防護層が必要と算出されており，防護パネルの圧縮強度は 40N/mm²以上を設定した．

マイクロ波とレーザーで作製した固化体の強度と照合した結果を表 2 に示す．離着陸場と道路の舗装に関して，マイクロ波焼成物は要件を十分満足し，レーザー積層造形物は曲げ強度が不足した．一方，防護パネルは両者ともに要件を満足した．今後，レーザー積層造形物の曲げ強度増加を検討する予定である．

謝辞

本研究は，令和 3 年度「宇宙開発利用加速化戦略プログラム・宇宙無人建設革新技術開発」の一環として，国土交通省の委託を受けて実施した．

参考文献

1) 宇宙航空研究開発機構：日本の国際宇宙探査シナリオ(案) 2021 (2022.4)
2) 畑中菜穂子：Investigation on practical production methods of lunar concrete，東京大学博士論文(2008.3)

表 2 各用途の要件と適合性			
		圧縮強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)
離着陸場，道路の舗装		32.0 以上	5 以上
作製法	マイクロ波	◎312	◎36.7
	レーザー	○46.4	×0.88
居住施設防護		40 以上	—
作製法	マイクロ波	◎312	—
	レーザー	○46.4	—