

# 月資源を用いた拠点基地建設材料の製造に関する研究

田島 孝敏      新村 亮      瀧田 安浩  
 (土木本部生産技術本部)      (未来技術創造部)

新述 隆太      石川 洋二      小関 裕二  
 (未来技術創造部)      (未来技術創造部)      (大林道路)

## Research on Production of Materials for Moon Base Construction Using Lunar Resources

Takatoshi Tajima      Akira Shimmura      Yasuhiro Fuchita  
 Ryuta Niinobe      Yoji Ishikawa      Hiroji Koseki

### Abstract

The government of Japan has decided to participate in the Artemis mission, a federally funded United States human spaceflight program focused on lunar exploration. As a part of this program, the future need to establish a lunar base is imperative. The lunar base concept envisions the creation of various zones and infrastructure elements, such as landing pads for landing craft, roads for transporting supplies, a power plant, and residential facilities. Given the substantial transportation costs of bringing materials from Earth, prioritizing using lunar resources in manufacturing is imperative. Therefore, we studied the solidification of lunar regolith by sintering or melting employing microwave and laser additive manufacturing techniques. Additionally, we conducted tests to evaluate the compressive and bending strength of solidified materials created from lunar regolith simulants. We examined the potential applications of these manufacturing methods, including their suitability for tasks like constructing pavements and creating protective layers against meteorite impacts.

### 概要

我が国は米国の有人月面探査計画への参加を決め、内閣府主導で通信、電力、拠点基地建設に係る技術開発を進めている。将来、拠点基地の建設が必要になり、着陸機の発着場、物資輸送道路などのインフラや居住施設等が構想されている。建設材料をロケットで月に運ぶ場合、1kgあたり1億円と莫大な費用がかかるため、月の資源を極力利用して現地で建設材料を製造することが考えられている。そこで、月の表土を模擬した砂を原料にして、マイクロ波で溶融もしくは焼結する方法とレーザー光を照射して積層造形する方法により固化体を作製し、圧縮強度と曲げ強度を測定した。これらを道路の舗装材や隕石防護層に要求される強度と対比することにより、焼成体の適用可能性について考察した。

### 1. はじめに

2020年12月、日本政府は、米国と月周回有人拠点の協力に関する了解覚書を取り交わし、月面への有人月面探査と火星着陸を目標とするアルテミス計画<sup>1)</sup>への参加を決めた。月面開発等では様々な分野の高度な技術の集結

が必要になるため、内閣府（宇宙政策委員会）は、関係省庁の連携と産学の参画の下で技術開発に取り組む枠組として「宇宙開発利用加速化戦略プログラム（スターダストプログラム）」を2021年3月に創設した<sup>2)</sup>。

2021年7月、各省庁の主担当プロジェクトが決定し、国土交通省は月面での建設を目指すと同時に地上の建設技術の高度化のため、「月面等での建設活動に資する無人建設革新技術開発推進プロジェクト」を開始した<sup>3)</sup>。プロジェクトのフローをFig. 1に示す。2021年から5ヶ年計画で基盤技術を開発し、2025年から実証・実用化、2030年以降に無人拠点建設、有人常時滞在を想定している。

2021年11月に実施対象10件が決定した<sup>4)</sup>。内訳は、I. 無人建設(自動化・遠隔化)に係る技術(6件)、II. 建材製造に係る技術(2件)、III. 簡易施設建設に係る技術(2件)であった。大林組から提案した、IIの「月資源を用いた拠点基地建設材料の製造と施工方法」、IIIの「月面における展開構造物の要件定義および無人設営検討」が採択された。本論では、IIの検討結果の一部について述べる。

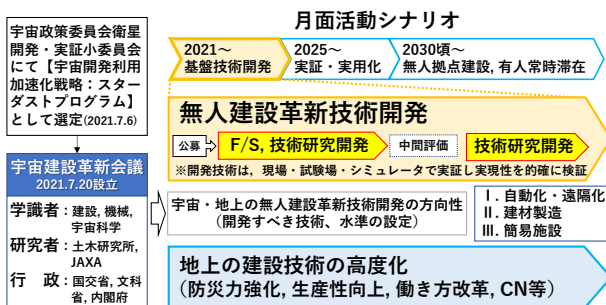


Fig. 1 国土交通省プロジェクトフロー<sup>2)</sup>  
 Flow of Stardust Project of MLIT

## 2. 建設材料の原料、種類および用途

### 2.1 原料

月の表層を覆う土は、緩く積もった岩石由来の粒子やかけら、隕石の衝突によって生成したガラス片、粉末等で構成され、月レゴリスと呼ばれる。アポロ計画で月レゴリスの堆積状態が現地で調査され、地球に持ち帰られたサンプルについて、粒子形状、粒径、化学組成、構成鉱物が調べられている。これらの性状を考慮して建設材料の製造方法を検討することになる。

### 2.2 建設材料の種類

月面拠点基地の建設材料として、月レゴリスを高温で焼いて製造したセメントを用いる月コンクリート、月レゴリスを主原料とするジオポリマー、サルファーコンクリート、ポリマーコンクリートなどの多種多様なコンクリートが検討されている<sup>5),6)</sup>。これらを製造する場合、セメントの水和反応に使用する水、あるいは、樹脂、硫黄などの材料を地球からロケットで運搬する必要がある。一方、月レゴリスをマイクロ波やレーザー光で加熱して焼き固める方法は現地の資源を原料に用いるため、輸送費を大幅に削減できるメリットがある。

筆者らは、マイクロ波で月面模擬砂を高温加熱して、焼結もしくは熔融固化した焼成体を作製できることを示した<sup>7)</sup>。そして、レーザー光を月面模擬砂に照射し、砂を熔融しながら任意の形状に積層できることを実証した<sup>8)</sup>。そこで、これらの方法によって固化体を作製し、基地のインフラ施設や居住施設等、各種用途に要求される強度を確保できるか評価した。

### 2.3 建設材料の用途

日本の国際宇宙探査シナリオ(案) 2021<sup>9)</sup>で示された月探査基地の構想を以下に示す。

**2.2.1 有人月面基地の目的** 低重力での長期滞在、月資源探査の他、人が基地に常駐することにより、以下に掲げる項目が期待されている。

- ① 1/6重力下での500日滞在実証(有人滞在、技術実証)
- ② 資源利用による本格的な探査(燃料製造、現地物質の直接利用)
- ③ 科学技術の発展(調査・分析、整備・保守)

**2.2.2 拠点建設の前提条件** 現地でのインフラ整備、拡張性を備えた活動空間の構築、現地資源の活用が必要で、拠点建設の前提条件をTable 1に示す。

**2.2.3 基地の建設地点** 建設地点として南極域が候補として考えられている。その理由は、クレーター底部の永久影領域(-170℃以下)に水氷(H<sub>2</sub>O)が存在する観測データが得られていること、極域において日照時間が長い(年間日照率が80%以上)地域がクレーターの縁などの小高い丘に存在し、人の長期滞在と大規模な長期観測に対して太陽光発電による電気を確保するのに有利なためである。

さらに、月探査衛星「かぐや」が観測したデータを基に、2017年に直径、深さ共に約50mの縦孔がマリウスの丘(北緯14度)付近で発見され、縦孔から西方に延長約50kmの空洞(高さ数十m、幅数百m)が存在する可能性が示唆された。空洞は溶岩チューブと呼ばれ、内部は宇宙放射線や隕石衝突から人や機器が守られ、温度変化が月表面に比べて小さいため、拠点基地のもう一つの候補と考えられている。

**2.2.4 拠点基地に必要な建設材料の用途** JAXAの月面基地構想図(Fig.2参照)に、月面着陸機、運搬路を走行するトラック、ドーム型の建築物等が描かれている。これを参考にして文献調査等を行い、建設材料の用途として下記の可能性を検討することとした。

- ① 運搬路の舗装材料
- ② 月面着陸機の発着場の舗装材料
- ③ 居住施設の隕石防護層

Table 1 拠点建設の前提条件<sup>9)</sup>  
Prerequisites for Luna Base Construction

| 項目         | 内容   |
|------------|--|
| 構築期間       | 2035年頃、月面に4人が長期間滞在可能な拠点が構築される  |
| 中長期計画等     | 拠点の拡張性と合わせて検討  |
| 拠点全体規模     | 約4km <sup>2</sup> (約2km四方)   |
| 拠点の構成      | 着陸、居住、サービス、観測の各ゾーンとゾーン間道路  |
| 拠点の拡張性     | 増設可能な建設方式が不可欠<br>用途変更を含めるかは要検討                                       |
| 拠点建設方式     | 拡張性と効率を両立する方式を選定。モジュール方式、展開方式、組立方式、現地での建設方式など                        |
| 現地調達が可能な材料 | 物質：岩石鉱物、レゴリス、噴出性揮発物質(火山性ガス等)、隕石<br>エネルギー：太陽光・熱、重力<br>人工物：使用済着陸機、タンク等 |



© 宇宙航空研究開発機構(JAXA)

Fig. 2 月面基地構想図  
Schematic Plan of Luna Base

### 3. 建設材料の製造および施工方法

月レゴリスを原料にして製造したセメントを使用する月コンクリートや、月レゴリスを高温で焼き固める方法などが検討されているが、現地資源である月レゴリスを最大限に活用できる焼成材の製造方法を検討した。

#### 3.1 加熱方法の比較

レゴリスを高温で加熱する方法として、電気炉、太陽光集光、マイクロ波、レーザー光がある。これらの特徴をTable 2に示す。月面の真空環境での建設材料作製の可能性がある加熱方法は、太陽光集光、マイクロ波およびレーザー光が挙げられる。真空や低重力の特殊環境での装置の稼働性と固化体の力学特性を考慮することで、用途に応じた建設材料を作製可能と考えられる。

本研究では月面環境での適用の可能性、固化体の力学特性、技術の成熟性を考慮してマイクロ波とレーザー光を用いた高温加熱実験を行い、固化体を作製した。

#### 3.2 使用材料

実験に使用した月面模擬砂「FJS-1」は、月の表土と組成が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月面模擬砂の化学組成をTable 3に示す。FJS-1の化学組成はアポロ試料と類似しているが、鉄については、2価鉄以外に3価鉄が含まれている。月面が真空であるのに対し、地球は酸素が存在する環境の違いが原因と考えられている。

月面模擬砂の粒度分布をFig. 3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2.87kg/m<sup>3</sup>である。熱的特性は、電気炉を用いて月面模擬砂を加熱して1100℃付近で焼結、1150℃付近で熔融することを確認した。

### 4. マイクロ波焼成法

#### 4.1 試験体の作製

工業用マイクロ波炉（高砂工業製，MWK-B-3.0）を用いて月面模擬砂を焼成固化して試験体を作製した。

4.1.1 作製方法 試験体の作製手順は以下に示すとおりである。成型体の作製状況をPhoto 1に示す。

- ① 月面模擬砂に加水
- ② 焼成用サヤに載せた型枠へ充填・成型
- ③ 脱型後、成型体側面をアルミナ敷粉で敷き詰め
- ④ マイクロ波炉内に移し、1050℃で焼成
- ⑤ 焼成体を切断加工

4.1.2 試験体の外観 焼成固化した試験体の外観をPhoto 2に示す。焼成前の成型体(100×100×30mm)に比べて形状が変化し、平面寸法は110~120mm角と成型体より大きくなり、厚さは20mm程度に薄くなった。砂が焼結または熔融して充填時に形成された粒子間空隙の容積が減少して、厚さ方向に縮小したと同時に平面が拡大したと

Table 2 各種加熱方法の特徴

| Characteristics of Various Heating Methods |                                  |                                   |   |
|--|----------------------------------|-----------------------------------|---|
|  | 概要                               | 長所                                | 短所  |
| 電気炉  | 炉内に設置されたヒーターに通電，発熱させ，炉内の物体を焼成する  | 装置が単純で操作が容易                       | 真空中で空気による熱対流が生じないため，加熱が非効率                              |
| 太陽光集光                                      | 集光パネルで太陽光を集め，焦点位置で物体を溶かす         | 熱源が安定している<br>施設の位置によっては太陽光を集光しやすい | 集光パネルが大きくなる<br>密実な固化体を得るための工夫が必要になる <sup>10), 11)</sup> |
| マイクロ波                                      | 炉内の対象物にマイクロ波を照射し，電磁波により加熱して焼成する  | 高密度，高強度の固化体を作製できる                 | 粉体を型に充填して成形する専用装置が必要になる                                 |
| レーザー光                                      | レーザー光を対象物に照射し，溶かしながら積層して立体物を造形する | 任意形状の造形が可能<br>他の方法に比べて装置の規模が小さい   | 高強度の固化体を得るには月レゴリスの熔融と凝固に関する特性を把握する必要がある <sup>12)</sup>  |

Table 3 月レゴリスと月面模擬砂の化学組成<sup>13)</sup>

Chemical Composition of Lunar Regolith and Simulant

|                                | A11  | A16  | A14  | FJS-1 |
|--------------------------------|------|------|------|-------|
| SiO <sub>2</sub>               | 42.2 | 45.0 | 48.1 | 49.8  |
| TiO <sub>2</sub>               | 7.8  | 0.5  | 1.7  | 1.4   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 13.6 | 27.3 | 17.4 | 19.9  |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.3  | 0.3  | 0.2  | 0.0   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | -    | -    | -    | 8.2   |
| FeO                            | 15.3 | 5.1  | 10.4 | 2.0   |
| MnO                            | 0.2  | 0.3  | 0.1  | 0.2   |
| MgO                            | 7.8  | 5.7  | 9.4  | 3.9   |
| CaO                            | 11.9 | 15.7 | 10.7 | 10.2  |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.5  | 0.5  | 0.7  | 2.9   |
| K <sub>2</sub> O               | 0.2  | 0.2  | 0.6  | 0.7   |

注釈) Aはアポロ計画で持ち帰られた月レゴリスを意味し，数字は宇宙船の号数を示す。

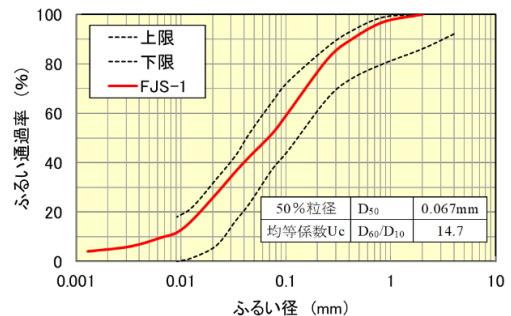


Fig. 3 月面模擬砂の粒度分布  
Particle Size Distribution of the Simulant



考えられる。断面の表層数mm程度は未焼結であったが、表層から底部にかけて緻密質で極めて堅牢であるという点で、熔融体に似た特徴が認められた。焼成体の上面は赤褐色に変化しており、これは月面模擬砂に含まれる鉄が酸化雰囲気中で焼成されて、熔融温度以下で $Fe_2O_3$ として安定に存在するためである。

**4.1.3 焼成体の加工** ダイヤモンド砥石を用いて、焼成体から強度試験用の供試体を切り出した。圧縮試験用は約 $20 \times 20 \times 20$ mmの立方体、曲げ強度試験用は約 $20 \times 20 \times 80$ mmの直方体とした。

**4.2 強度試験**

**4.2.1 圧縮強度試験** 試験体の圧縮強度をTable 4に示す。3体の平均圧縮強度は $312 \text{N/mm}^2$ で、超高強度コ

ンクリート( $100 \text{N/mm}^2$ 以上)に相当する強度が得られた。

**4.2.2 曲げ強度試験** 3点荷重法で曲げ強度を測定した。2体の試験体の曲げ強度は $42.9 \text{N/mm}^2$ ,  $30.4 \text{N/mm}^2$ で、平均値は $36.7 \text{N/mm}^2$ であった。曲げ強度の圧縮強度に対する比は1/8程度であった。

**5. レーザー積層造形法**

**5.1 試験体の作製**

レーザー光による積層造形物の作製方法の1つである、指向性エネルギー堆積法(Directed Energy Disposition)により試験体を作製した。本法の概念図をFig. 4に示す。レーザー光の焦点位置に粉体を空気圧で供給し、粉体を溶かしてステージに固定した板の上に掃引する。ステージは平面方向に移動し、1層目の積層が終わったらレーザーヘッドが上に移動する。これを繰り返して立体造形物を作製する。

本研究では、3Dプリンター装置(LAMDA200, 日本電産マシンツール製)を用いて試験体を作製した。本装置は出力 $2 \text{kW}$ のファイバーレーザー(波長 $1 \mu\text{m}$ )を搭載し、集光ヘッドが上下方向(z軸方向)に動く。ステージに固定した磁製耐熱板の上に溶けた砂を掃引して、1層ごとにヘッドを層厚分だけ上昇させて立体物を作製した。本法による積層造形の様子をPhoto 3に示す。

**5.1.1 圧縮強度試験用** 試験体の形状寸法をFig. 5に示す。これを作製するために、ステージをx-y方向に移

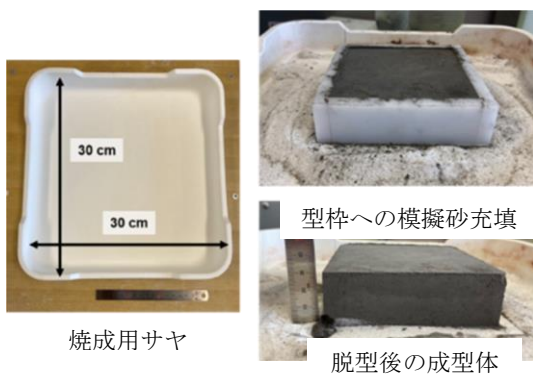


Photo 1 成型体の作製  
Fabrication of Molding Body

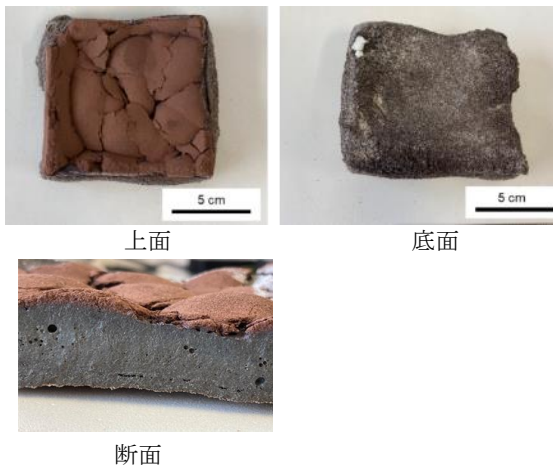


Photo 2 焼成体の外観 (1050°C, 3時間保持)  
Sintered Body (Maximum Heating Temp. 1050°C)

Table 4 圧縮強度(マイクロ波焼成法)  
Compressive Strength of Sintered Sample

| 供試体No. | 圧縮強度 [N/mm <sup>2</sup> ] |
|--------|---------------------------|
| 1      | 301                       |
| 2      | 365                       |
| 3      | 270                       |
| 平均     | 312                       |

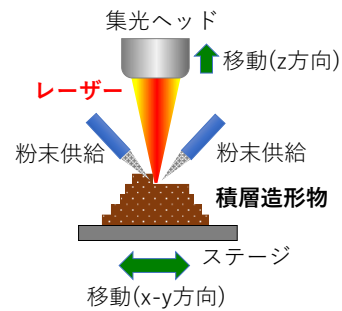


Fig. 4 指向性エネルギー堆積法の概念図  
Additive Manufacturing by DED Method

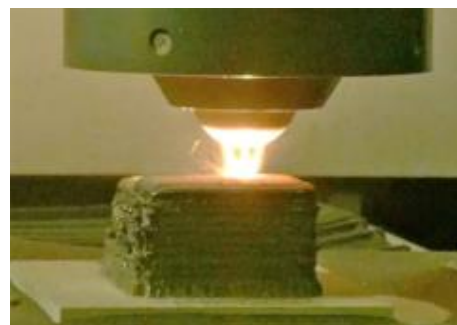


Photo 3 積層造形の様子  
Laser Additive Manufacturing

動してレーザー掃引方向を変えて積層した。まず、x方向にピッチ 2mmで長さ45mmのビードを21本掃引し、次いで、y方向に同様に掃引した。次に掃引の始点を変えて、同様にx、y方向に掃引した。これを6~8回繰り返して、試験体を作製した。これをダイヤモンドカッターで4分割し、約20mm角の立方体に加工して強度試験に供した。

**5.1.2 曲げ強度試験用** 試験体の形状寸法をFig. 6に示す。作製は、まず、x方向にピッチ2mmで長さ85mmのビードを13本掃引し、次いで、y方向にピッチ2mmで長さ25mmのビードを43本掃引した。同様に90°ずつ、掃引方向並びに掃引の始点を変えながら積層した。

**5.2 強度試験**

**5.2.1 圧縮強度試験** 試験結果をTable 5に示す。3体の試験体の平均圧縮強度は46.4N/mm<sup>2</sup>で、一般的なコンクリートと同程度の強度が得られた。

**5.2.2 曲げ強度試験** 3点載荷法により曲げ強度を測定した。2体の曲げ強度は0.87N/mm<sup>2</sup>、0.90N/mm<sup>2</sup>で、平均値は0.88N/mm<sup>2</sup>であった。圧縮強度に対する比は1/50程度で、曲げに対する抵抗性は小さかった。原因として、レーザー光で溶けた砂が掃引直後に急冷して収縮するのを下の層が拘束して引張応力が発生し、ひび割れが生じたためと推定される。

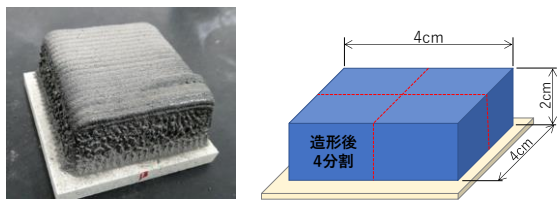


Fig. 5 圧縮強度試験用供試体の形状寸法  
Specimen for Compressive Strength Test

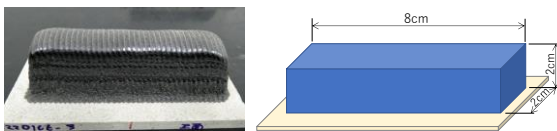


Fig. 6 曲げ強度試験用供試体の形状寸法  
Specimen for Bending Strength Test

Table 5 圧縮強度 (レーザー積層造形法)  
Compressive Strength of Solidified Sample

| 供試体No. | 圧縮強度 [N/mm <sup>2</sup> ] |
|--------|---------------------------|
| 1      | 44.2                      |
| 2      | 53.1                      |
| 3      | 41.9                      |
| 平均     | 46.4                      |

**6. 月面における必要強度の試算**

運搬路、着陸機の発着場(以下、発着場と称する)および居住施設の防護層に関して、マイクロ波とレーザー光を用いて作製した固化体の適用性を検討した。運搬路と発着場はインターロッキングブロック(以下、ILBと称する)を用いた舗装を想定し、月レゴリスの地盤定数を仮定して有限要素法による構造解析を試みた。居住施設は隕石防護層を想定し、固化体の圧縮強度と既往の研究で得られた要求値とを対比した。

**6.1 運搬路および発着場の舗装における必要強度**

**6.1.1 舗装の施工方法** 施工方法は、以下の通りを想定した。

- 1) 表層のレゴリスを掘削して路床を形成した後、レゴリスを充填した土のう袋を敷き並べて路盤を構築する。
- 2) 路盤の上に砂を敷いてクッション層を形成し、その上にILBを敷き並べる。
- 3) ブロック間の目地に砂を充填する。

ILB舗装の概念図をFig. 7に示す。ILBの平面形状は正方形として、300mm角×厚さ80mmを基本に、平面寸法と厚さをパラメータにした。

**6.1.2 有限要素法解析モデル** ILBの必要強度の算定は、西澤がILB舗装の構造解析のために開発した3次元FEM解析プログラム「BlockPave3D」<sup>14)</sup>を使用した。本手法では、路床、路盤およびILBを弾性体のソリッド要素で分割し、ILBの目地と、ILBと路盤との間のクッション層を境界面ばね要素でモデル化する。3次元FEM解析モデルをFig. 8、Fig. 9に示す。解析領域は6m×6m、路床厚は1mとした。これに運搬車両と着陸機の重量をそれぞれ載荷し、ILBに発生する最大応力を求めた。これをマイクロ波とレーザー光で作製した試験体の曲げ強度と比較することにより、ILBへの適用可能性を評価した。

**6.1.3 解析入力パラメータ** 解析に用いた材料定数を下記のように設定した。ただし、月面の材料を想定しており、十分なデータがあるわけではないことから、値の妥当性については今後の課題である。路床、路盤およびILBのパラメータ値を次のように設定した。

(1) 路床(地山レゴリス)の材料定数 山田の研究<sup>15)</sup>によると、レゴリスの締め固め度合による基礎物性が得られており、地盤反力係数は、締め固め度合が軟らかい(soft)場合は156kN/m<sup>3</sup>(=0.016kgf/cm<sup>3</sup>)、固い場合(firm)は

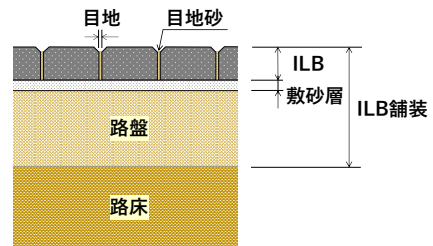


Fig. 7 ILB舗装の概念図  
Concept of Pavement using Interlocking Block

814~1452kN/m<sup>3</sup>(=0.083~0.148kgf/cm<sup>3</sup>)としている。ここでは、路盤の自重で締め固め度合が異なる場合を想定し、路床の弾性係路床のヤング係数を0.2~0.9MPaに設定した。ポアソン比は0.35と仮定し、路床厚を1mとした。

(2) 路盤の材料定数 地上での路盤の施工は、下層路盤にクラッシュランを、上層路盤に粒度調整砕石等をそれぞれブルドーザで敷き均し、ローラで転圧するのが一般的である。月面での施工は、重機を使用する代わりに、月レゴリスを土のう袋に詰めて路床上に設置することを考えた。ここでは、松岡らの研究<sup>10)</sup>に示される白銀珪砂3号(平均粒径1.2mm)を中詰め材とした場合の平板載荷試験値10MPa(10000kN/m<sup>2</sup>)を土のう路盤のヤング係数とした。ポアソン比は0.35と仮定し、路盤厚を50, 100, 200mmとした。

(3) 境界面要素のばね定数 目地およびクッション層の境界面ばね要素は、Fig. 9に示す通り、それぞれ2方向の水平ばねおよび垂直ばねで構成される。

ここでは、地上材料を対象とした値ではあるが、西澤の論文<sup>14)</sup>で使用されたばね定数を用いた。目地のばね係数は簡単のためすべて等しいとみなし、K<sub>J</sub>で代表されている。また、クッション層のせん断剛性は低いものとし、水平ばね係数K<sub>h</sub>は鉛直ばね係数K<sub>v</sub>に比べて低い値が設定されている。入力したばね定数をTable 6に示す。

(4) ILBの材料定数 マイクロ波およびレーザー光で作製した試験体の力学特性値をTable 7に示す。ヤング係数は一軸圧縮試験の応力-ひずみ曲線から算定した。ポアソン比は0.2と仮定した。

6.1.4 荷重条件 運搬路に作用する荷重は、四輪トラックの輪荷重を想定した。ここでは、2トン電動トラッ

クの満載時総質量を3.3トンに設定し、これが4輪に均等分配されると仮定して荷重を求めた。月の重力は1.62m/s<sup>2</sup>(地球の約1/6)なので、1輪あたりの荷重は1.34kNとなる。解析においては、タイヤ接地面を150mm×150mmの矩形として、解析領域の中央に載荷した。

発着場における荷重は、4本の脚を有する着陸機の1脚を想定した。着陸機の満載時質量を40トンとした場合、月面での1脚当たりの重量は16.2kNである。着陸時に4脚が同時に着地しない場合を想定し、安全率3を仮定すると、月面での荷重は48.6kNとなる。解析では、脚先端のパッドの直径を1mと仮定し、解析領域中央の0.9m角の範囲に載荷した。

6.1.5 解析ケース 運搬路と発着場について、ILBの寸法と路盤厚をパラメータにして解析を行った。解析ケースをTable 8に示す。ILBの寸法は300×300×80mmを基本とし、ILBの平面寸法と厚さが最大応力に及ぼす影響と路盤厚がILBの最大応力に及ぼす影響を調べた。

Table 6 目地とクッション層の入力パラメータ  
Input Parameters of Joint and Cushion Layer

| 部位     | 寸法      | ばね係数 [GN/m <sup>3</sup> ]                               |
|--------|---------|---|
| 目地     | 幅 5mm   | 水平・鉛直方向<br>K <sub>J</sub> = 23.6                        |
| クッション層 | 厚さ 20mm | 水平方向 K <sub>h</sub> = 1.0<br>鉛直方向 K <sub>v</sub> = 24.0 |

Table 7 ILBの力学特性値  
Mechanical Properties of ILB

| 作製方法  | ヤング係数 [MPa] | ポアソン比 [-] |
|-------|-------------|-----------|
| マイクロ波 | 7828        | 0.2       |
| レーザー光 | 3721        | 0.2       |

Table 8 解析ケース  
Analysis Cases

| No. | 設置場所 | ILB製造法  | ILB [mm] | ILB厚 [mm] | 路盤厚 [mm] | 路床の締め固め度合 |
|-----|------|---------|----------|-----------|----------|-----------|
| 1   | 運搬路  | マイクロ波   | 300×300  | 80        | 200      | 固い        |
| 2   |      | 500×500 | 20       | 50        | 中        |           |
| 3   |      | レーザー光   | 300×300  | 80        | 200      | 固い        |
| 4   |      | 500×500 | 20       | 50        | 中        |           |
| 5   | 発着場  | マイクロ波   | 300×300  | 80        | 200      | 固い        |
| 6   |      |         | 500×500  |           | 200      |           |
| 7   |      |         | 300×300  | 20        | 100      | 固い        |
| 8   |      |         | 500×500  |           | 50       |           |
| 9   |      | レーザー光   | 300×300  | 80        | 200      | 固い        |
| 10  |      |         | 200×200  |           |          |           |
| 11  |      |         | 150×150  |           |          |           |
| 12  |      |         |          |           |          |           |

注記) クッション層厚は20mmとした

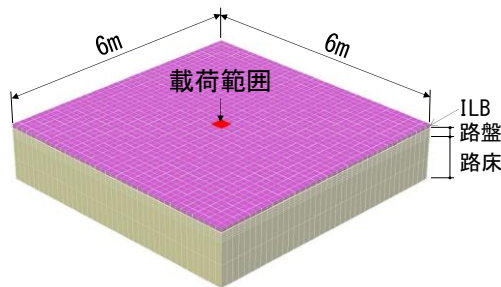


Fig. 8 解析モデル (ケースNo.1)  
Numerical Analysis Model (Case-1)

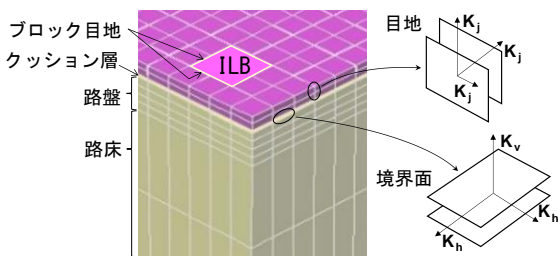


Fig. 9 ILBの目地とクッション層の解析モデル  
Analysis Model of Joint and Cushion Layer



6.1.6 解析結果 300mm角×厚さ80mmのILBを厚さ200mmの路盤上に敷いたケースの変形図をFig. 10に示す。図はILBのみを表示し、変位量は実寸の100倍で表している。運搬路の場合、マイクロ波およびレーザー光のいずれも変位量は0.8mm程度と小さいが、発着場の場合、いずれも変位量が15mm前後であった。

Table 9に各ケースについて、ILBの最大応力に対する曲げ強度の比を示す。マイクロ波で作製したILBは、運搬路の場合、基本寸法(300×300×80)のブロックは465倍の曲げ強度を有する。材料体積を低減したブロック(500×500×20)を用い、路盤厚を薄くしたケース(No.2)においても108倍の強度を有していた。発着場の場合は、基本寸法(300×300×80)に対して25倍の曲げ強度を有する。材料体積を低減したブロック(500×500×20)を用い、路盤厚を薄くしたケース(No.9)でも8倍の強度を有していた。したがって、材料定数等における不確かさを考慮しても十分な適用性がある。

一方、レーザー光で作製したILBは、運搬路の場合、基本寸法(300×300×80)のブロックの曲げ強度は最大応力の13倍であり、材料定数の不確かさを考慮しても十分な余裕がある。発着場の場合は、基本寸法(300×300×80)のブロックの曲げ強度は最大応力の0.8倍しかないため適用できないが、寸法を150×150×80に小さくすると曲げ強度が最大応力の1.2倍になる。したがって、荷重条件等を考慮してブロック寸法を選定することにより、ILBへの適用が可能と考えられる。

6.2 居住施設の防護層

月面では隕石が高速で落下するため、居住施設には隕石の衝突に耐える防護層が必要である。1gの微小隕石の単位面積、単位時間当たりの落下数は、 $10^{-15}/m^2 \cdot sec$ 程度であり、拠点全体規模2km四方に落下する確率は8年に1回程度と推定される。

畑中は密度 $3.3kg/m^3$ 、質量1gの微小隕石が、72km/secの速度で衝突したときの防護層として、圧縮強度40MPaの

月コンクリートの場合、37mmの部材厚が必要と算定している<sup>9)</sup>。マイクロ波焼成体の圧縮強度は312MPaであり、畑中らの検討における材料と異なることを考慮しても十分な強度レベルにあると言える。一方、レーザー光で積層造形した固化体の圧縮強度は46.4MPaで、防護層の必要強度の約1.2倍であった。材料の種類が異なることを考慮し、余裕を確保するには増厚が必要と考えられる。

7. まとめ

大気雰囲気での月面模擬砂をマイクロ波とレーザー光で加熱して作製した固化体の強度を測定した。月面拠点基地の建設材料への適用性を評価するため、運搬路、着陸機の発着場に対してILB舗装を想定した数値解析を行い、ILBに発生する応力を試算して、試験体強度と比較した。

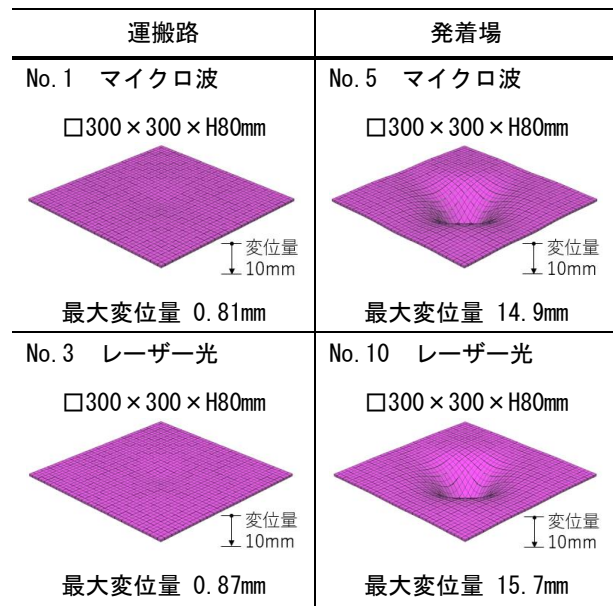


Fig. 10 解析結果 (変形図)  
Result of Analysis (Deformation)

Table 9 曲げ強度と最大応力による適用性評価  
Applicability Evaluation by Bending Strength and Maximum Stress

| No. | 設置場所 | ILB製造法     | 曲げ強度 [MPa] | ILB寸法 [mm] | 路盤厚 [mm] | 最大応力 [MPa] | 曲げ強度と最大応力の比 | 評価 |
|-----|------|------------|------------|------------|----------|------------|-------------|----|
| 1   | 運搬路  | マイクロ波      | 36.7       | 300×300×80 | 200      | 0.079      | 465         | ○  |
| 2   |      |            |            | 500×500×20 | 50       | 0.341      | 108         | ○  |
| 3   |      | レーザー光      | 0.88       | 300×300×80 | 200      | 0.070      | 13          | ○  |
| 4   |      |            |            | 500×500×20 | 50       | 0.197      | 4           | ○  |
| 5   | 発着場  | マイクロ波      | 36.7       | 300×300×80 | 200      | 1.44       | 25          | ○  |
| 6   |      |            |            | 500×500×80 | 200      | 1.51       | 24          | ○  |
| 7   |      |            |            | 300×300×20 | 200      | 2.21       | 17          | ○  |
| 8   |      |            |            | 300×300×20 | 100      | 3.79       | 10          | ○  |
| 9   |      | 500×500×20 | 50         | 4.39       | 8        | ○          |             |    |
| 10  |      | レーザー光      | 0.88       | 300×300×80 | 200      | 1.13       | 0.8         | ×  |
| 11  |      |            |            | 200×200×80 | 200      | 0.941      | 0.9         | ×  |
| 12  |      |            |            | 150×150×80 | 200      | 0.719      | 1.2         | ○  |

居住施設の隕石防護層に対して、既往の研究で算定された部材強度と比較した。得られた知見を以下に示す。

- 1) マイクロ波で月面模擬砂を焼成して作製した固化体は密実で、超高強度コンクリート相当の圧縮強度が得られた。
- 2) マイクロ波による焼成体の強度は、運搬路と着陸機のILB舗装および居住施設の隕石防護層の要求性能を十分満足した。
- 3) レーザー光で月面模擬砂を溶かしながら積層した固化体は、普通コンクリート相当の圧縮強度が得られたが、曲げ強度が低かった。熔融した砂が急冷して収縮する際にひび割れが発生したことが原因と考えられた。
- 4) レーザー光による熔融固化体は、ILB舗装に対し、運搬路の要求性能を満足した。発着場の場合、ブロック寸法を小さくすることにより要求性能を満足した。居住施設の隕石防護層に対しては圧縮強度の要求値を満足したものの、余裕を確保するには増厚が必要と考えられた。

今後の課題について、レーザー光による熔融固化体の作製では照射条件を見直し、ひび割れ発生を防止して曲げ強度の向上を図る。さらに、マイクロ波とレーザー光による固化体作製の共通課題の解決のため、真空や低重力等の月面環境を模擬した実験を行い、固化体の物理化学特性と力学特性を把握する。

2023年6月に「宇宙基本計画」が閣議決定され、月面における持続的な有人活動が重要項目に挙げられた。我が国の月面有人探査への貢献を世界にアピールできるように、国、大学、研究機関および民間企業と協力して、月面基地建設材料の製造システムの確立を目指す。

## 謝辞

本研究は、令和3年度および令和4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。

研究遂行にあたって、名古屋工業大学の白井孝先生、加藤邦彦先生、レーザー技術総合研究所の藤田雅之先生および滋賀県工業技術総合センターの斧督人氏に多大な支援をいただきました。ここに深謝いたします。

## 参考文献

- 1) 佐藤直樹：アルテミス計画とJAXAの取組状況について、[https://www.jaxa.jp/projects/files/youtube/lc-omo-tenashi-equuleus/sls\\_20220826\\_1.pdf](https://www.jaxa.jp/projects/files/youtube/lc-omo-tenashi-equuleus/sls_20220826_1.pdf)

- 2) 宇宙政策委員会，宇宙開発加速化戦略プログラムに関する基本方針(案)，内閣府，2021-01-29。  
<https://www8.cao.go.jp/space/committee/dai92/siryou3.pdf>，(参照 2023-05-17)
- 3) 総合政策局，公共事業企画調整課，「月面での建設活動に資する無人建設革新技術開発推進プロジェクト」を開始します，国土交通省，2021-07-20。  
[https://www.mlit.go.jp/report/press/sogo15\\_hh\\_000288.htm](https://www.mlit.go.jp/report/press/sogo15_hh_000288.htm) (参照 2023-05-17)
- 4) 総合政策局，宇宙無人建設革新技術の実施対象を決めました，国土交通省，2021-11-18。  
[https://www.mlit.go.jp/report/press/sogo15\\_hh\\_000302.htm](https://www.mlit.go.jp/report/press/sogo15_hh_000302.htm) (参照 2023-05-17)
- 5) 畑中菜穂子：ルナコンクリートの実現に向けて，コンクリート工学誌，Vol.55, No.1, 2017.1
- 6) 齊藤亮介，鶴山尚大：宇宙とコンクリート～月面基地建設～，コンクリート工学誌，Vol.54, No.9, 2016.9
- 7) 田島孝敏，森拓雄，甚野智子，石川洋二，星野健，金森洋史：マイクロ波を用いた月面模擬砂の焼成実験，第65回宇宙科学技術連合講演会，2021年11月
- 8) 藤田雅之，遠藤康平，兒玉了祐，田島孝敏，新村亮，金森洋史：レーザー加熱による月の模擬砂を用いた建設材料の作製，第65回宇宙科学技術連合講演会，2021年11月
- 9) 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年3月，p.117
- 10) 九州大学ほか：月土壌の水素還元システムの構築—低品位原料の工業的利用を目指して—，JAXA宇宙探査イノベーションハブ，2016年4月～2017年3月
- 11) Nakamura, T., et al.: Solar Thermal System for Lunar ISRU Applications: Development and Field Operation at Mauna Kea, HI, Proceedings of the SPIE, Vol.8124(2011)
- 12) A. Meurisse, et al.: Solar 3D printing of lunar regolith, Acta Astronautica 152,800-810(2018)
- 13) 金森洋史，篠田佳彦：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
- 14) 西澤辰男：3次元有限要素法に基づいたブロック舗装の構造解析プログラムパッケージの開発，土木学会舗装工学論文集，第13巻，2008年12月
- 15) 山田哲也：月面構造物設計条件の検討 月の自然環境・地質の調査，土木学会第47回年次学術講演会，1992年9月
- 16) 松岡元ほか：「土のう」の変形係数の現場測定法と品質管理，第39回地盤工学研究発表会（新潟），2004年7月