

月資源を用いた拠点基地建設 材料の製造技術の開発

大林組

名古屋工業大学

レーザー技術総合研究所

2024年3月22日



MAKE BEYOND

つくるを拓く

本日の発表内容

1. 拠点基地建設における建設材料の用途
2. 月資源を用いた建設材料の製造方法
3. 建設材料のマイクロ波、レーザー加熱製造試験
4. 建設材料の性能評価
5. 月環境での製造可能性の検討
6. 今後の課題



【本プロジェクト研究開発実施者：代表者及び共同実施者、全36者(重複込み)】

https://www.mlit.go.jp/tec/constplan/sosei_constplan_tk_000045.html

令和5年度(2023年度) 研究開発一覧(継続、移行)

| 技術分類 | | 技術研究開発名称 | 実施者 (○代表者、共同実施者) | 実施 Stage |
|-------------------------------|---|--|--|-----------------------|
| 技術Ⅰ： 無人建設 (自動化・ 遠隔化) | 施工 (掘削、積込等) | 建設環境に適応する自律遠隔施工技術の開発 一次世代施工システムの宇宙適用 | ○鹿島建設 宇宙航空研究開発機構、芝浦工業大学 | R&D (継続) |
| | 施工 (敷均し等) | 自律施工のための環境認識基盤システムの開発 及び自律施工の実証 | ○清水建設 ポッシュエンジニアリング | |
| | 施工 (測位) | 月面適応のためのSLAM自動運転技術の開発 | ○大成建設 パナソニックアドバンステクノロジー | R&D (F/Sからの 移行) |
| | 施工 (全体システム) | トータル月面建設システムのモデル構築 | ○有人宇宙システム | |
| | 建設機械・施工 | デジタルツイン技術を活用した、月面環境に適応する 建設機械実現のための研究開発 | ○小松製作所 | R&D (継続) |
| | 測量・調査 | 月面の3次元地質地盤図を作成するための測量・ 地盤調査法 | ○立命館大学 芝浦工業大学、東京大学大学院、横浜国立大学、港湾空港技術 研究所、アジア航測㈱、基礎地盤コンサルタンツ㈱、ソイルアンド ロックエンジニアリング㈱ | |
| | 輸送(調査) | 索道技術を利用した災害対応運搬技術の開発 | ○熊谷組 住友林業、光洋機械産業、加藤製作所、工学院大学 | |
| 基礎(調査) | 回転切削圧入の施工データを利用した、月面建設 の合理的な設計施工プロセスの提案と評価 | ○技研製作所 | | |
| 技術Ⅱ： 建材製造 | 月資源を用いた拠点基地建設材料の製造と施工方 法の技術開発 | ○大林組 名古屋工業大学、レーザー技術総合研究所 | | |
| 技術Ⅲ： 簡易施設建設 | 月面インフラタブル居住モジュールの地上実証モ デル構築 | ○清水建設 太陽工業、東京理科大学 | R&D (継続) | |
| | 月面における展開構造物の要件定義および無人設 営検討の技術開発 | ○大林組 宇宙航空研究開発機構、室蘭工業大学、サカセ・アドテック | | |
| | 月の縦孔での滞在開始用ベースキャンプの最小形 態と展開着床機構の開発 | ○東京大学 九州大学、宇宙航空研究開発機構 | R&D (F/Sからの 移行) | |

F/S・・・Feasibility Study 実現可能性の検証 【1年度間】

R&D・・・Research & Development 技術研究開発 【複数年度間】

拠点基地建設における建設材料の用途

月有人基地の目的（日本の国際宇宙探査シナリオ(案)）

- ①500 日滞在実証
- ②月資源利用による本格的な探査（燃料製造）
- ③科学研究

建設材料の用途

- ①運搬路の舗装（水氷を含むレゴリスの推薬生成プラントへの運搬）
- ②月離着陸機の離発着場の舗装
- ③居住施設の構造材や微小隕石・宇宙放射線に対する防護層

月資源を用いた建設材料の製造方法

| 種類 | 製造方法 | 使用材料 | 長所 | 短所 |
|-------------|------------------------------|-------------|------------|-----------------------|
| 月コンクリート | レゴリスからセメントを製造し、水、レゴリスと混合 | 水（水素）、レゴリス | 耐久性が高い | 水の運搬が必要 必要なエネルギーが大 |
| ジオポリマー | 高アルカリ溶液とレゴリスを混合し、非晶質の縮重合体を製造 | 水、水ガラス、レゴリス | 硬化後に水は回収可能 | 水、高アルカリ溶液の運搬が必要、強度が弱い |
| サルファーコンクリート | 溶かした硫黄とレゴリスを混合・冷却して固化 | 硫黄、レゴリス | 水が不要 | 硫黄の運搬が必要 高温に弱い |
| ポリマーコンクリート | ポリマーによってレゴリスを固化 | ポリマー、レゴリス | 水が不要 | ポリマーの運搬が必要 |
| レゴリス焼成体 | レゴリス粉末を高温で加熱し固結 | レゴリス | 水が不要 | 温度管理が難しい、必要なエネルギーが大 |
| 無機繊維 | レゴリスを溶融して押出 | レゴリス | 水が不要 | 必要なエネルギーが大 |

※齊藤亮介、鵜山尚大：宇宙とコンクリート～月面基地建設～、コンクリート工学、Vol.54, No.9, 2016年9月

⇒ 月面環境での製造の可能性、材料の力学特性を考慮して**マイクロ波**と**レーザー加熱**による焼成体の製造実験を実施

月レゴリスの模擬砂

月模擬砂「FJS-1」※を使用

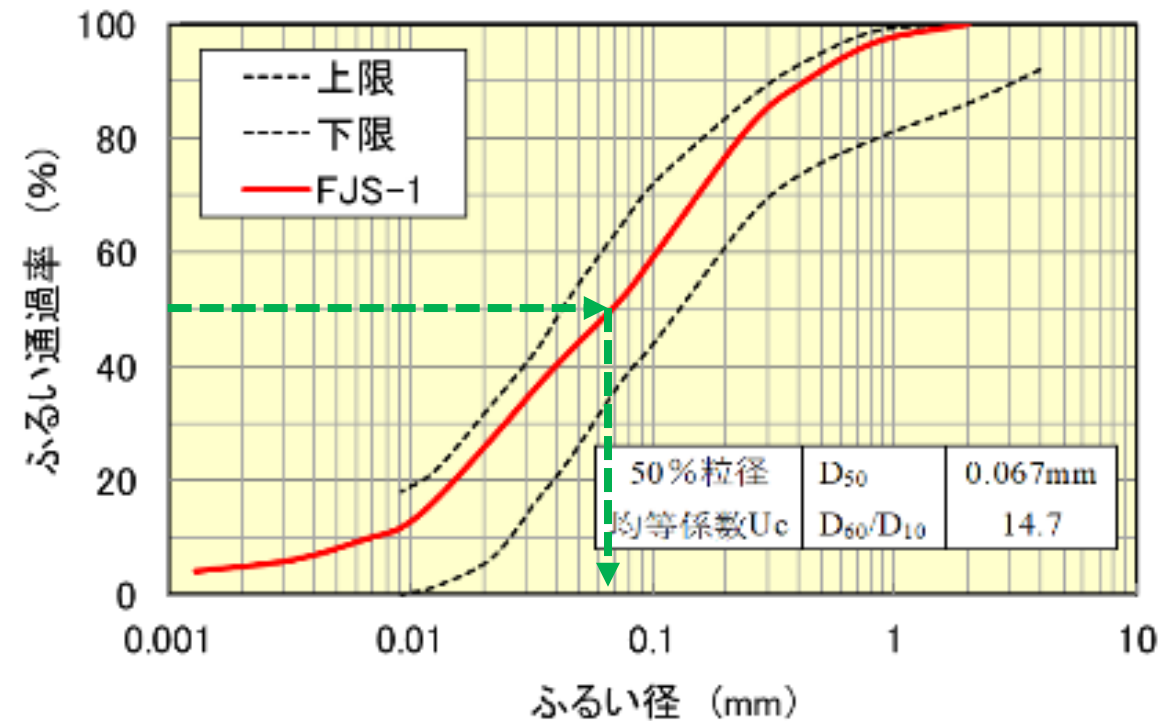
月レゴリスと月面模擬砂の化学組成

| 組成 | A11 | A16 | A14 | FJS-1 |
|--------------------------------|------|------|------|-------|
| SiO ₂ | 42.2 | 45.0 | 48.1 | 49.8 |
| TiO ₂ | 7.8 | 0.5 | 1.7 | 1.4 |
| Al ₂ O ₃ | 13.6 | 27.3 | 17.4 | 19.9 |
| Cr ₂ O ₃ | 0.3 | 0.3 | 0.2 | 0.0 |
| Fe ₂ O ₃ | - | - | - | 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 ₂ O | 0.5 | 0.5 | 0.7 | 2.9 |
| K ₂ O | 0.2 | 0.2 | 0.6 | 0.7 |

※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

1100°Cで焼結、1200°Cで熔融

月面模擬砂の粒度分布



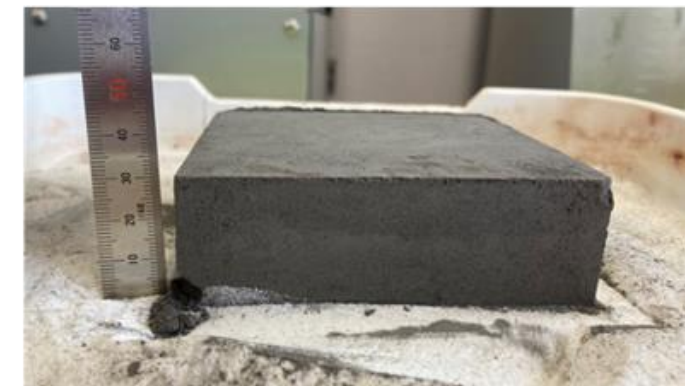
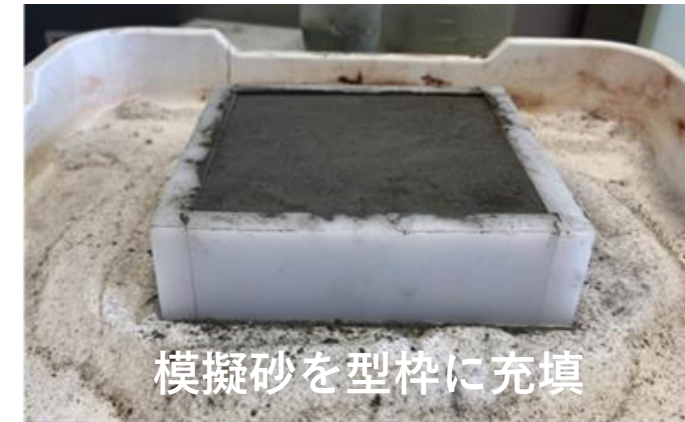
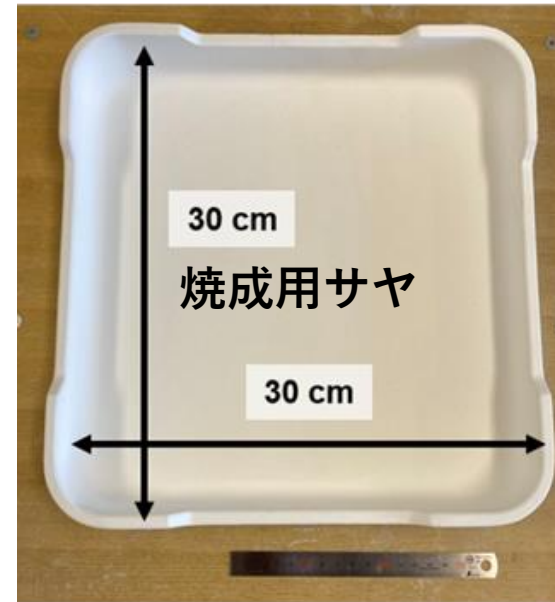
マイクロ波加熱による製造試験

(1) 試験体作製

工業用マイクロ波加熱炉（2.45GHz, 3kW max）を使用

(2) 作製手順

- ① 月面模擬砂に加水
- ② 焼成用サヤに載せた型枠に充填し、
- ③ 圧縮成型（10cm角 × 高さ3cm）
- ④ 成型体の側面をアルミナ敷粉で被覆
- ⑤ **1050°C**（3h保持）で焼成
- ⑥ 強度試験体切出し



マイクロ波による製造結果

- 砂が溶融して、若干大きくなり（10cm→11～12cm程度）、厚さが減少（3cm→2cm）焼結または溶融し空隙が減少したため
- 表層は酸化雰囲気での焼成のため、赤褐色（ Fe_2O_3 ）に変色
- 表層以下は緻密で極めて堅牢



上面



底面



断面

断面を拓く

マイクロ波焼成体の強度試験結果

- 強度は超高強度コンクリート相当

| | |
|------|-----------------------|
| 圧縮強度 | 312 N/mm ² |
| 曲げ強度 | 36.7N/mm ² |

圧縮強度試験

供試体(2×2×h2cm)



曲げ強度試験

供試体(2×8×h2cm)



3点載荷法 (支点間距離60mm)

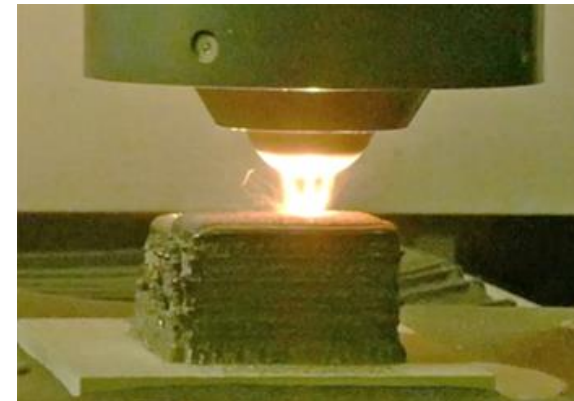
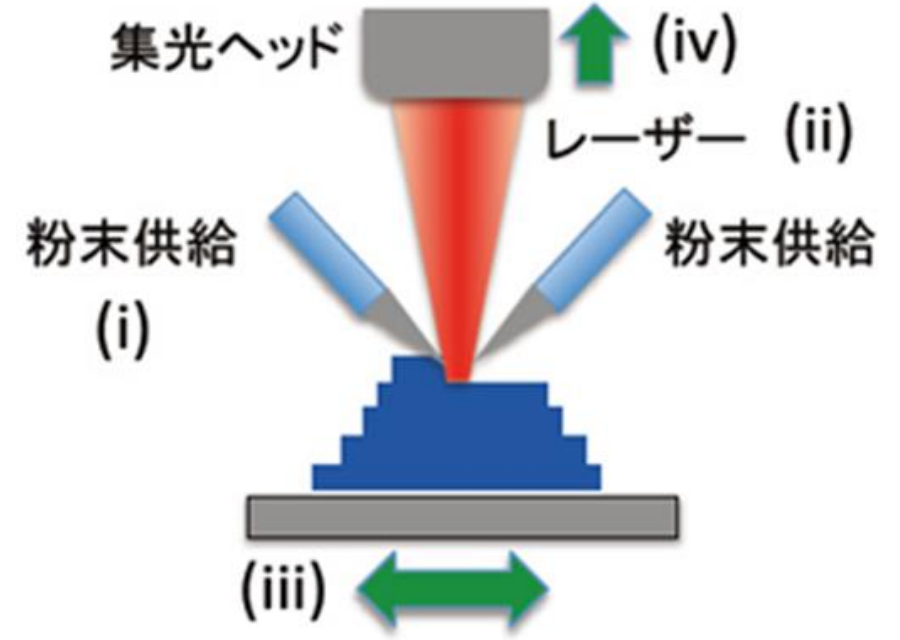
レーザー加熱による製造試験

指向性エネルギー堆積法（DED法）3Dプリンター

2kWのファイバーレーザー（波長 $1\mu\text{m}$ ）を使用、
ステージに磁製耐熱板を設置

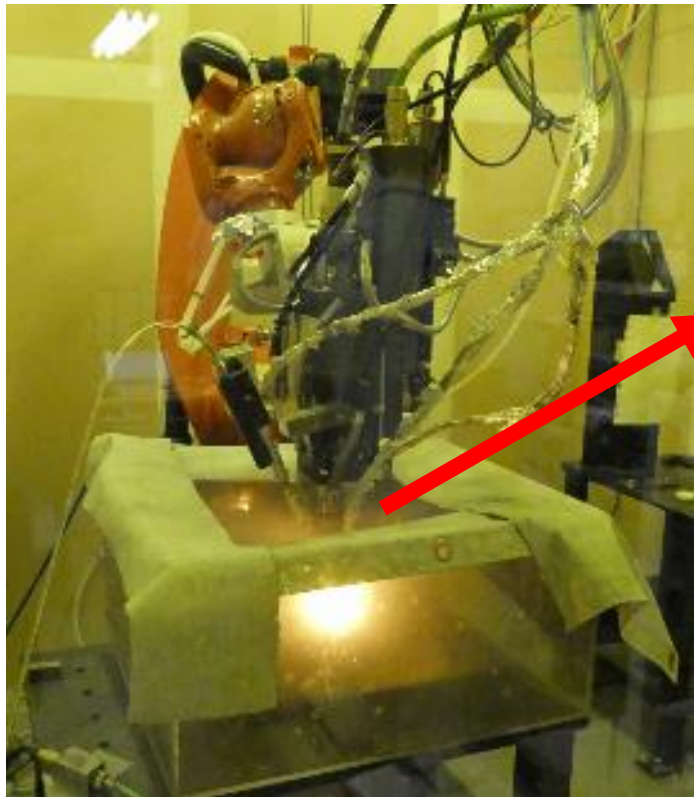
- i. 粉末を集光ヘッド(3か所)から供給
 - ii. 焦点位置でレーザー加熱
 - iii. ステージをx-y方向に移動しながら ビード
（溶融した砂）を掃引
 - iv. 一層ごと、集光ヘッドを積層厚さだけ上昇
（約2mm）
- i~iv 所定高さまで積層を繰り返す

DED法による積層造形 11



レーザー加熱による製造試験

レーザー溶接用6軸駆動ロボットアームに製造試験 自由な造形が可能



DED
ヘッド



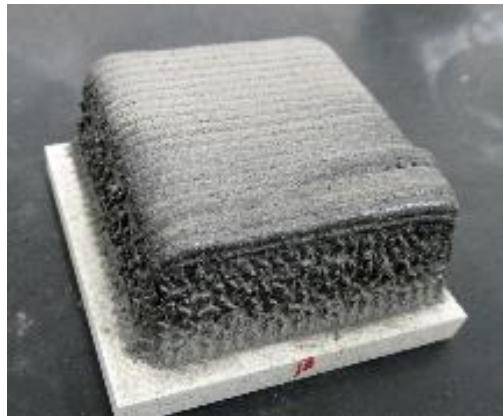
レーザー造形条件

| 造形条件 | 3Dプリンター | ロボットアーム |
|------------|------------------------------|------------------------|
| レーザーパワー | 100 or 200W | 300W |
| スポットサイズ | 4mm | 4mm |
| 照射強度 | 0.8 or 1.6kW/cm ² | 2.4 kW/cm ² |
| 掃引速度 | 4mm/s | 7.5mm/s |
| エネルギー密度 | 6.0 or 12.5J/mm ² | 10J/mm ² |
| ピッチ間隔 | 2mm | 2mm |
| 層当たりの積算照射量 | 12 or 25 J/mm ² | 20J/mm ² |
| 積層厚 | 1.5~3mm | ~2mm |

レーザー加熱製造試験結果

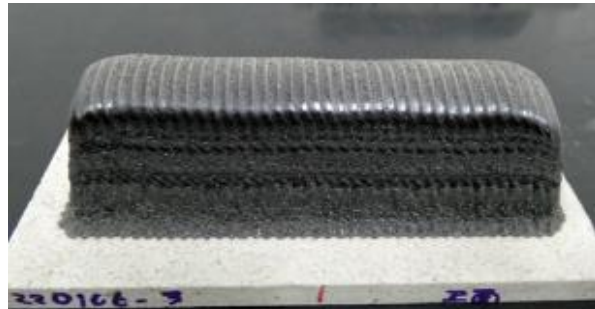
- 圧縮強度はコンクリートと同程度
- 温度降下によるひび割れのため曲げ強度低い
- 載荷方向で曲げ強度が異なる

圧縮強度供試体



40 × 40 × h20 mm

曲げ強度供試体



20 × 20 × 80 mm

強度試験結果 (N/mm²)

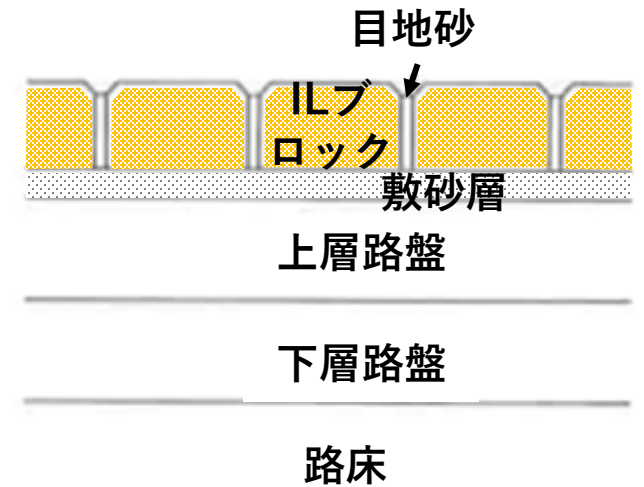
| | | 3Dプリンター | ロボットアーム |
|------|------|---------|---------|
| 圧縮強度 | | 46.4 | 68.0 |
| 曲げ強度 | 上面上 | 0.88 | 0.65 |
| | 上面下 | — | 0.65 |
| | 側面上下 | — | 1.53 |

建設材料の性能評価

検討条件， 施工方法・構成要素案

| 用途 | 検討条件 | 施工方法・構成要素 |
|----------|--|--|
| 運搬路 | 外力：運搬車（25t） 構造：路床，路盤， 表面舗装 | 路床：表面のレゴリスを掘削し地耐力を確保 路盤：土嚢舗装などを適用して平坦性を確保 表面舗装：ILブロック |
| 着陸機の離発着場 | 外力：着陸機（全備 wet 40t） 構造：路床，路盤， 表面舗装 | 路床：表面のレゴリスを掘削し地耐力を確保 路盤：土嚢舗装などを適用して平坦性を確保 表面舗装：ILブロック |
| 居住施設の防護層 | 外力：1gの微小隕石 衝突 構造：外装パネル | 圧縮強度40 N/mm ² ，厚さ37mmの防護層が必要⇒マイクロ波、レーザーのいずれの圧縮強度も満足 |

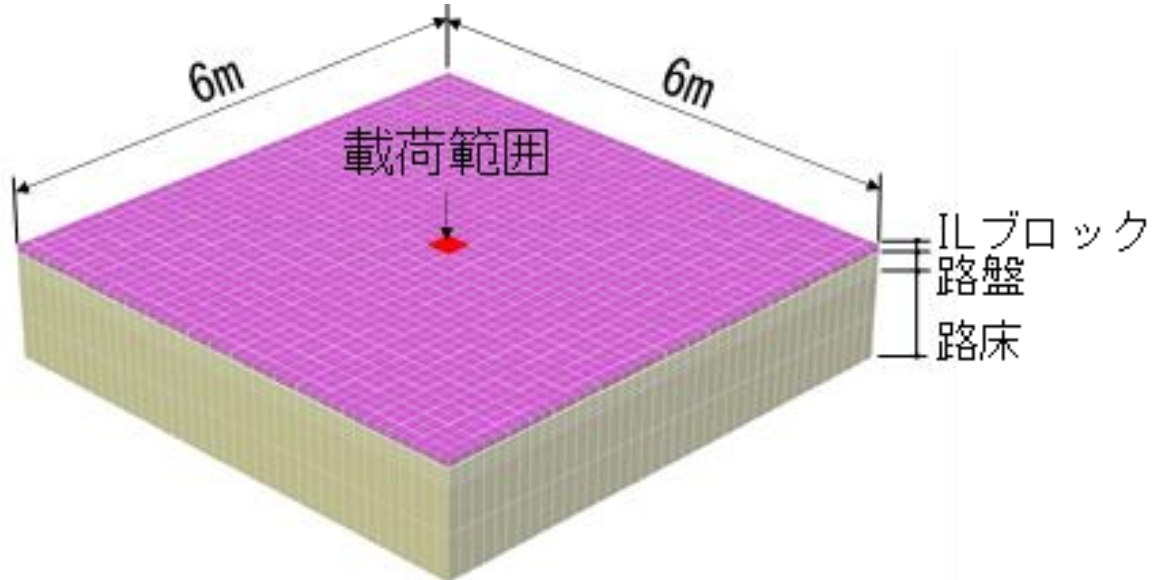
インターロッキングブロック 舗装の構成



運搬路と離発着場の舗装応力解析

- 運搬路と離発着場の舗装について、ILB寸法と路盤厚をパラメータにした応力解析を実施
- 曲げ許容応力度を満足するかを判定

舗装ブロックFEM解析モデル



応力判定結果

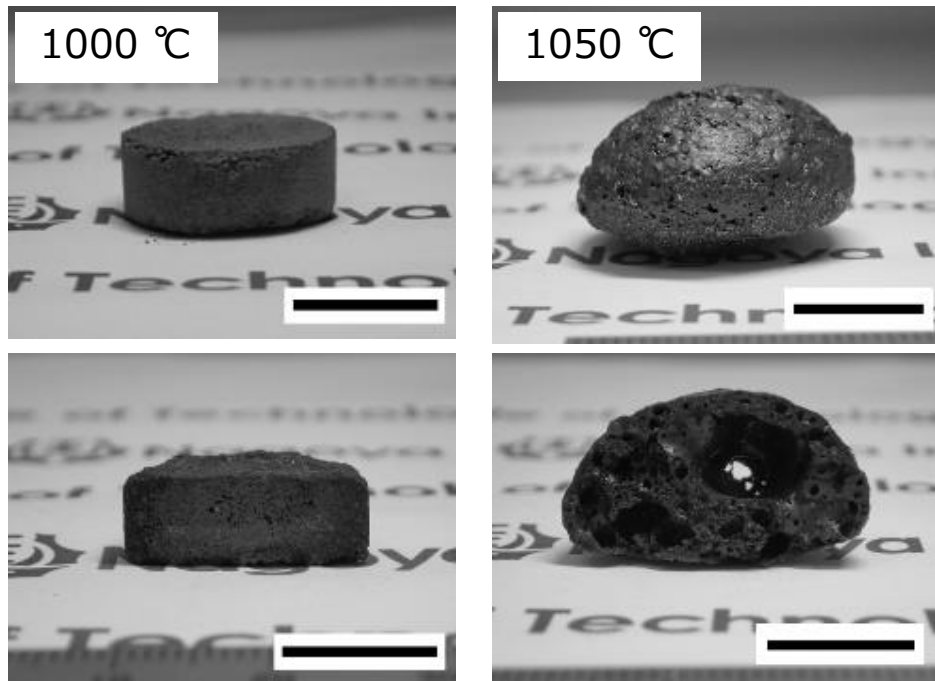
| | 加熱方法 | ILB寸法 (cm) | 路盤厚 (cm) | 曲げ引張応力 (N/mm ²) | 判定 |
|------|-------|------------|----------|-----------------------------|----|
| 運搬路 | マイクロ波 | 50×50×2 | 5 | 0.34 | ◎ |
| | レーザー | 50×50×2 | 5 | 0.20 | ◎ |
| 離発着場 | マイクロ波 | 50×50×2 | 5 | 4.39 | ◎ |
| | レーザー | 15×15×8 | 20 | 0.72 | × |

月環境での製造の可能性の検討

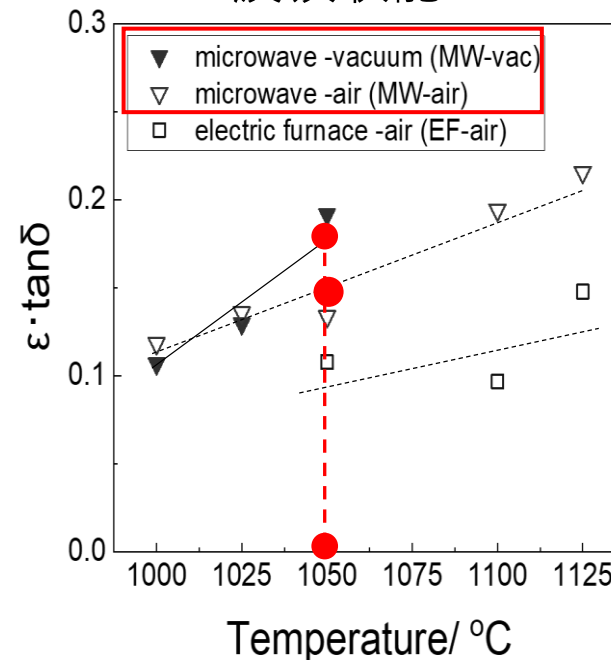
真空下でのマイクロ波加熱による製造検討

- 1000 °C付近で溶融緻密化し、1050°Cでドーム状に膨張
- 1050°C付近でマイクロ波吸収能が大きい
- 加熱温度を最適化することにより気孔形成を抑制

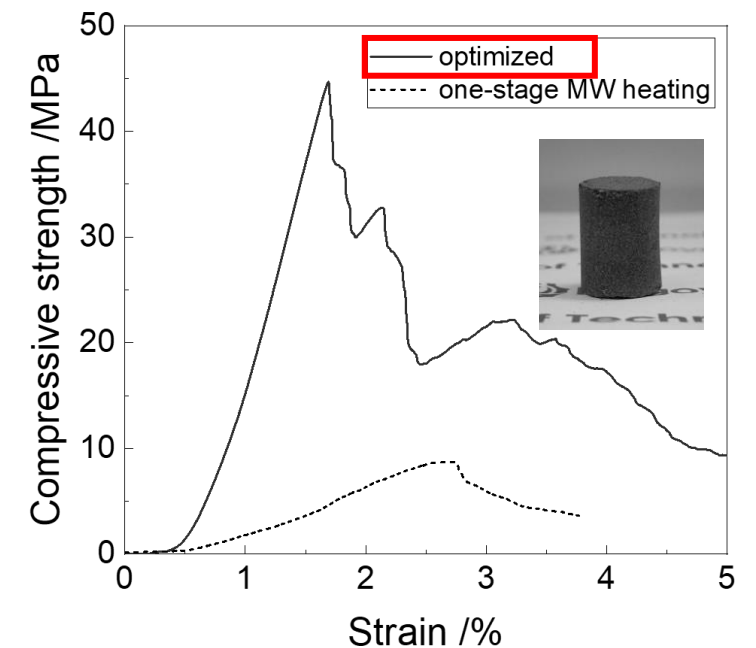
真空中でマイクロ波加熱した供試体



加熱供試体のマイクロ波吸収能



真空中でマイクロ波加熱した供試体の圧縮応力・ひずみ関係

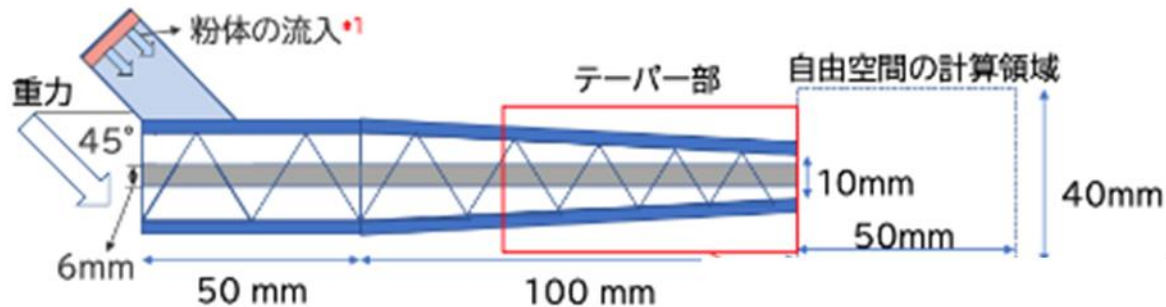


月環境での製造の可能性の検討

月環境でのレーザー加熱による製造検討

- DED法ではアルゴンガスで粉体を搬送
- 真空かつ低重力環境での機械的粉体搬送のシミュレーションを行い、搬送可能なことを実証

粉体搬送解析モデル



粉体を実施搬送シミュレーション結果
(搬送流れ) (速度分布)

