

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



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

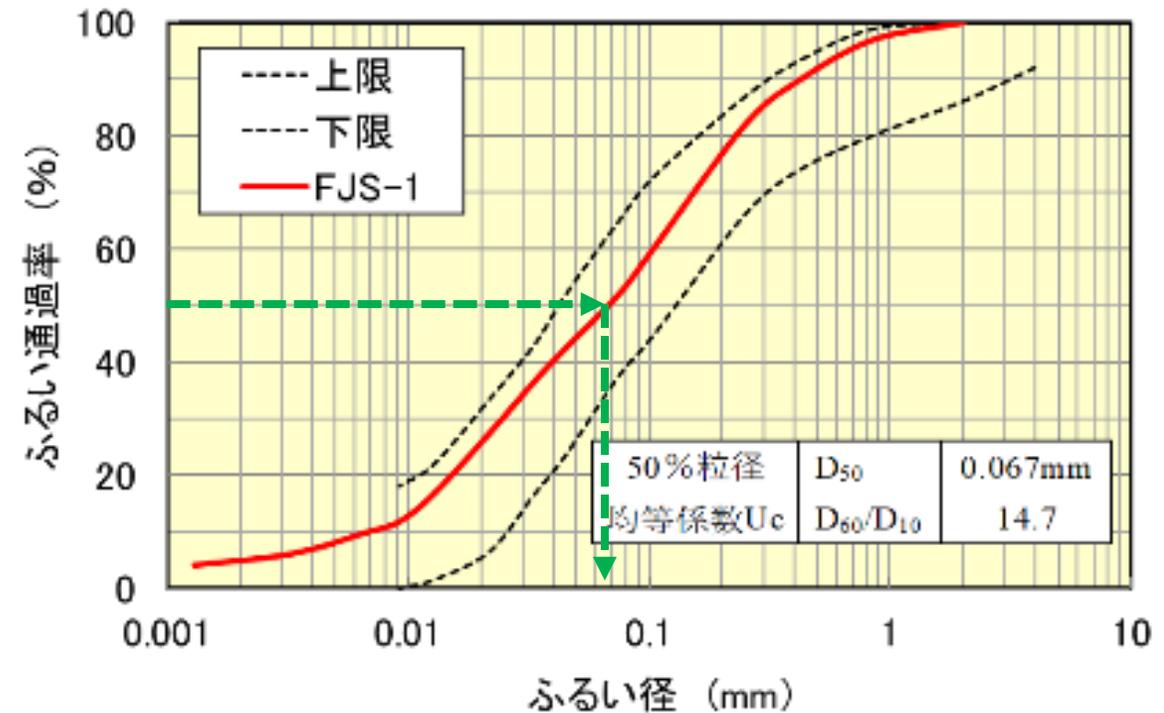
月レゴリスと月面模擬砂の化学組成

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



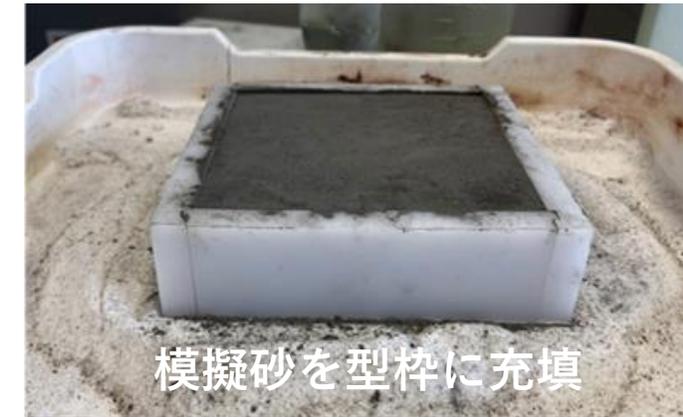
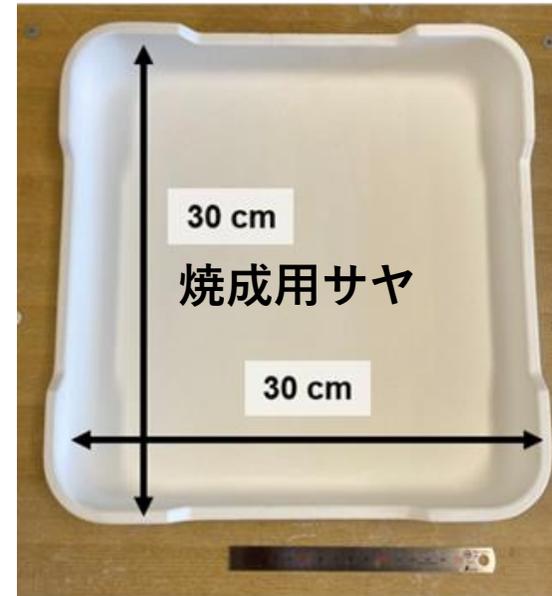
マイクロ波加熱による製造試験

(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)

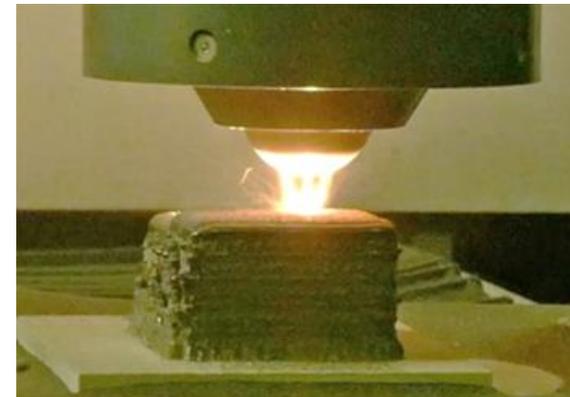
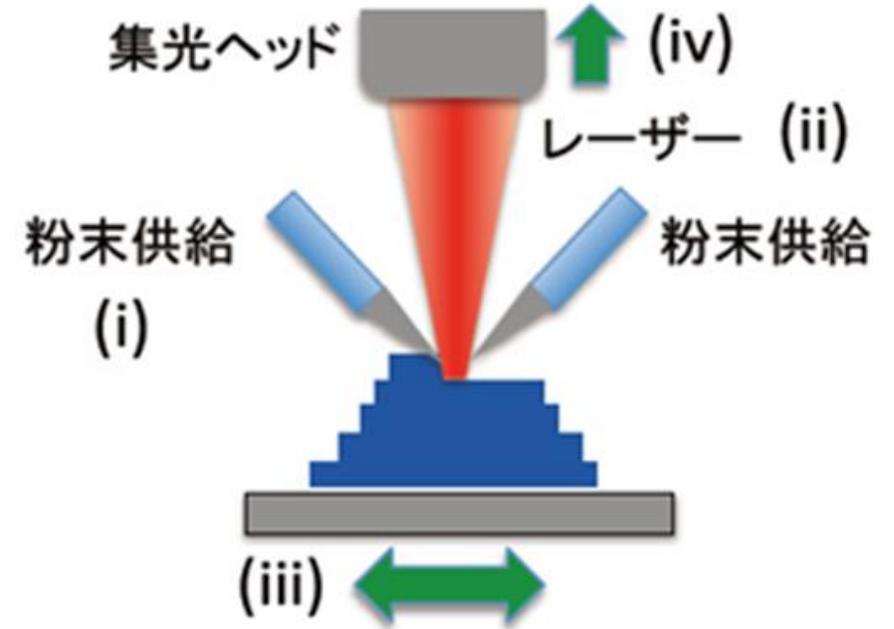
レーザー加熱による製造試験

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

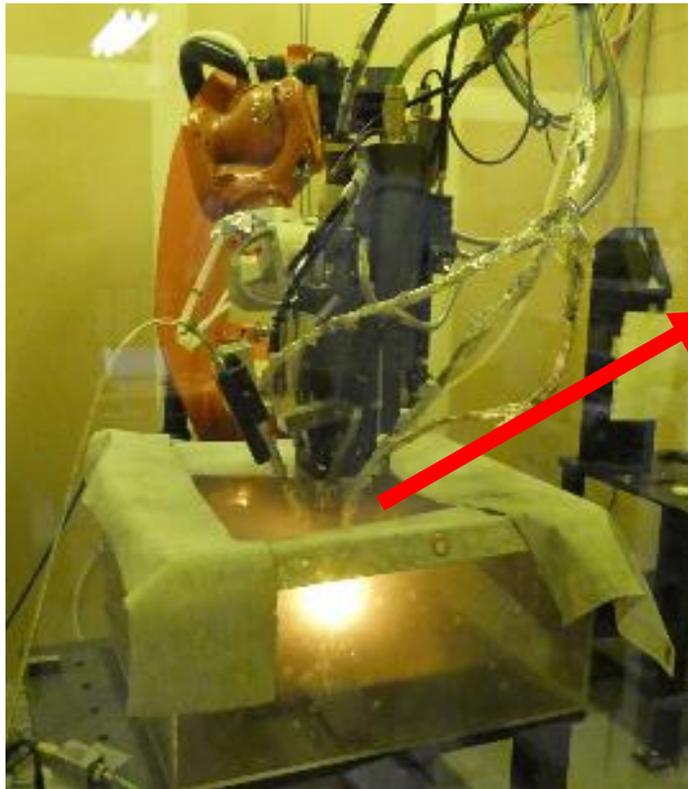
- i. 粉末を集光ヘッド(3か所)から供給
 - ii. 焦点位置でレーザー加熱
 - iii. ステージをx-y方向に移動しながら ビード
（溶融した砂）を掃引
 - iv. 一層ごと、集光ヘッドを積層厚さだけ上昇
（約2mm）
- i~iv 所定高さまで積層を繰り返す

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



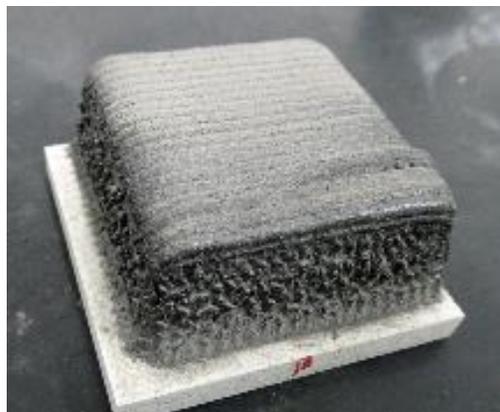
レーザー造形条件

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

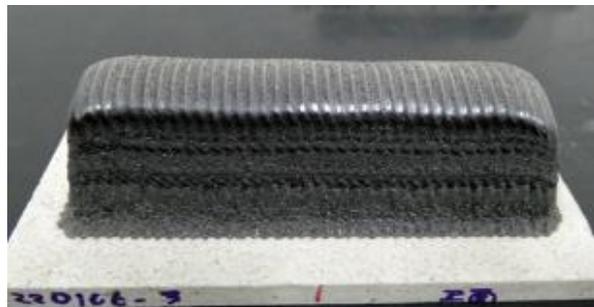
- 圧縮強度はコンクリートと同程度
- 温度降下によるひび割れのため曲げ強度低い
- 載荷方向で曲げ強度が異なる

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)

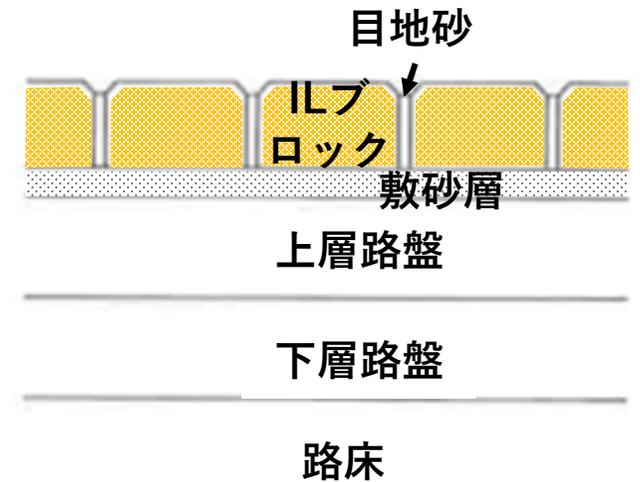
		3Dプリンター	ロボットアーム
圧縮強度		46.4	68.0
曲げ強度	上面上	0.88	0.65
	上面下	—	0.65
	側面上下	—	1.53

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

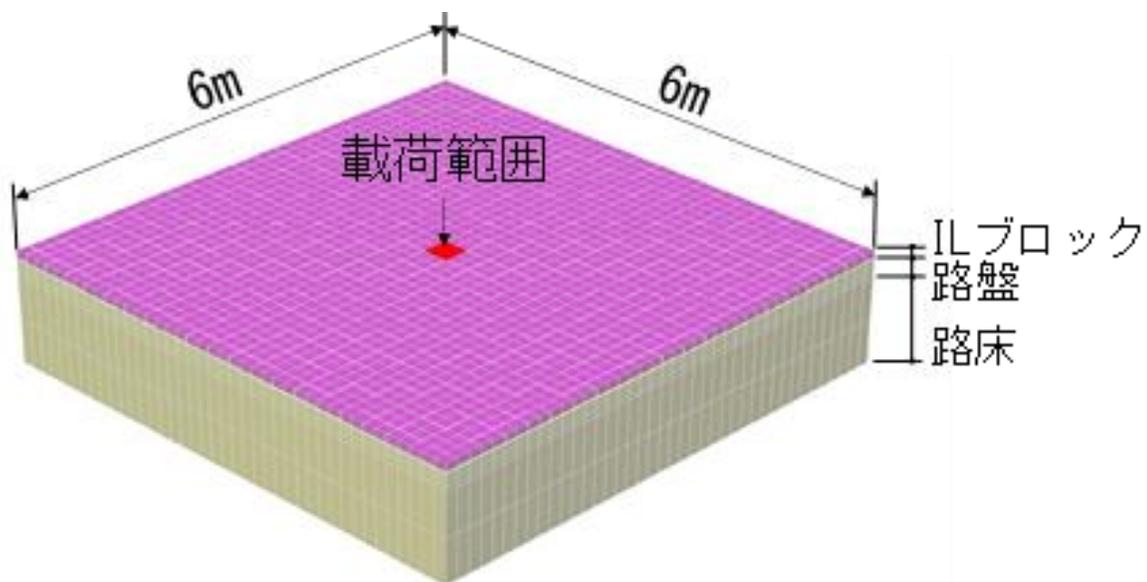
インターロッキングブロック舗装の構成



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

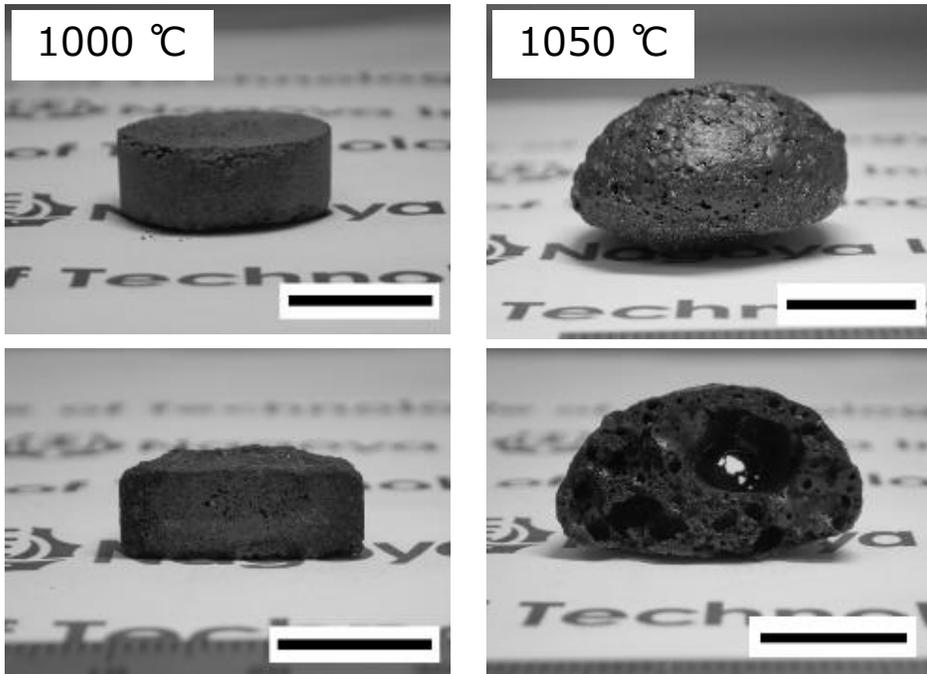
	加熱方法	ILB寸法 (cm)	路盤厚 (cm)	曲げ引張応力 (N/mm ²)	判定
運搬路	マイクロ波	50×50×2	5	0.34	◎
	レーザー	50×50×2	5	0.20	◎
離発着場	マイクロ波	50×50×2	5	4.39	◎
	レーザー	15×15×8	20	0.72	×

月環境での製造の可能性の検討

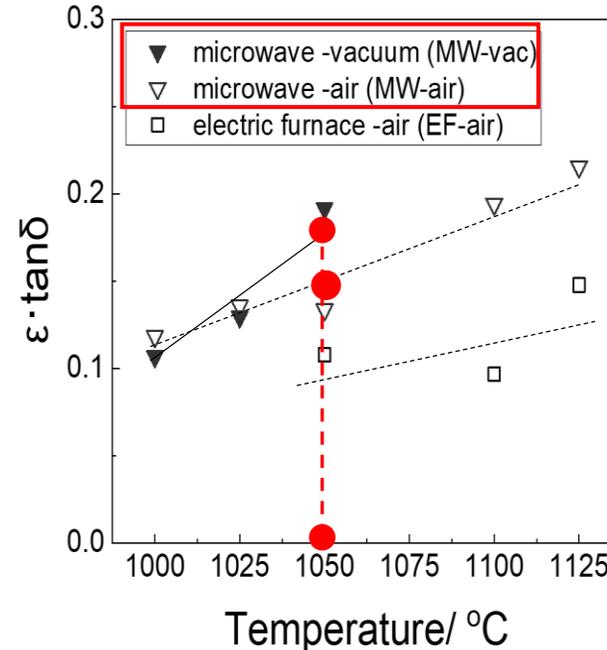
真空中でのマイクロ波加熱による製造検討

- 1000 °C付近で熔融緻密化し、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

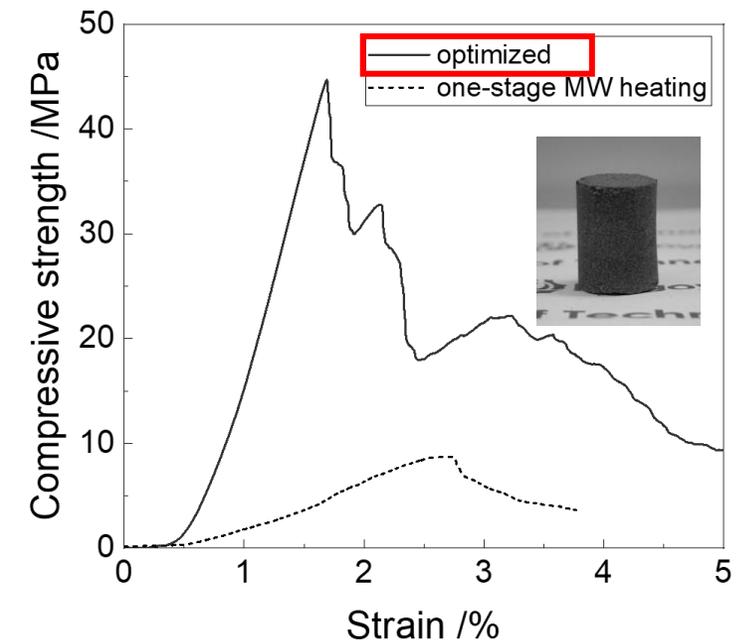
真空中でマイクロ波加熱した供試体



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

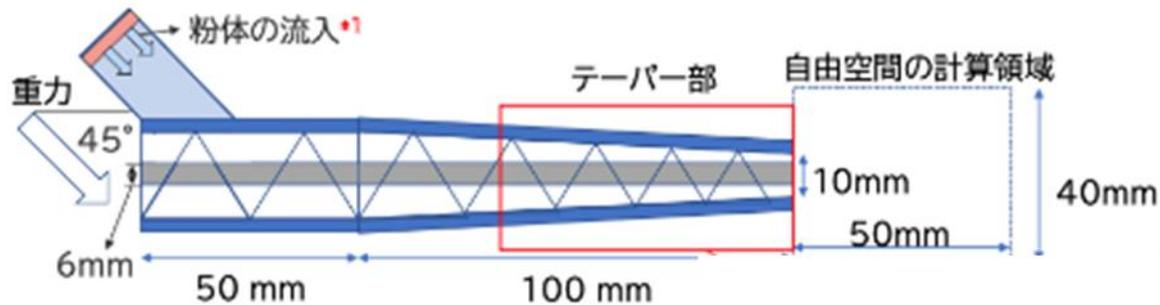


月環境での製造の可能性の検討

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)

