

## 惑星基地建設材料の製造に関する基礎的研究

田島 孝敏      森    拓雄      笠井 泰彰  
 小熊 直樹      甚野 智子      石川 洋二

(本社エンジニアリング本部)

### Basic Study on the Manufacturing of Construction Materials for a Planetary Base

Takatoshi Tajima      Takuo Mori      Yasuaki Kasai  
 Naoki Oguma      Tomoko Jinno      Yoji Ishikawa

#### Abstract

The conveyance of construction materials from the earth to off-planetary bases on the surface of the moon and Mars would be financially prohibitive. If construction materials could be developed on site using locally sourced soil, development costs for space exploration could be significantly reduced. We examined the applicability of microwave heating and cold press using lunar-regolith simulated soil. Using microwave heating, the soil became molten at 1,200°C, and we manufactured a sintering object by restraining outside heat radiation from the specimen. Compacted specimens were created using the cold press technique involving high pressure compression of a soil and bentonite mixture. These methods were shown to make the manufacture of construction material using lunar-soil.

#### 概 要

月面や火星表面での拠点基地建設に必要な資材を地球から運ぶには莫大な費用がかかるため、月や火星の資源を用いて建設資材を現地で調達できれば大幅な低コスト化を図ることが可能となる。そこで、現地の資源を利用して建設材料を製造することを目的として、月面土壌を模擬した試料を用いてマイクロ波加熱とコールドプレスに関する実験的検討を行った。マイクロ波加熱では、試料を1200°Cに加熱して熔融固化物を作製し、被焼成物からの放熱を抑制することにより焼結物を作製した。一方、常温で圧縮成型するコールドプレスでは、試料にベントナイトを添加して高圧力で締固めることにより成型体を作製した。いずれの技術も建設材料の製造方法としての適用可能性が示された。

#### 1. はじめに

近年、有人ロケットや宇宙エレベータなど宇宙開発が脚光を浴び、将来的に月面基地の建設が構想されている。国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構(JAXA)は、国の「科学技術イノベーション総合戦略2014」の方針に基づき「宇宙探査イノベーションハブ」を平成27年4月1日に設置し、国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)のイノベーションハブ構築支援事業に応募し採択された<sup>1)</sup>。これは月や火星等の惑星を探査する技術を民間から募り、研究開発を推進することで、宇宙および地上で用いる技術にイノベーションを興すことを意図している。平成27年度の研究提案募集で「火成岩あるいは粘土鉱物を主体とする土質材料からの建設材料の作製」が地産・地消型探査技術の研究開発の一つに採択され、平成28年度にJAXAと共同で研究を行った。地産・地消探査技術の概念をFig. 1に示す。

本研究は、月や火星で利用可能な材料を用いて、建設材料を作製することを目的とした。本論では月の表土を模擬した土(以後、模擬月土と称する)を用いて、マイクロ波加熱により熔融もしくは焼結する方法と、常温で圧縮

成型するコールドプレスの方法により、各々固化体のサンプルを作製し、これらの圧縮強さを測定した結果について報告する。



Fig. 1 地産・地消型探査技術<sup>1)</sup>  
 Space Exploration Techniques of Local Production and Local Consumption

## 2. 模擬月土の特性

1969年7月にアポロ11号が月着陸に成功してから、いくつかの岩石が地球に持ち帰られた。研究で使用した模擬月土「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。Photo 1に外観を示す。代表的なアポロ試料(A11, A16, A14)と模擬月土の化学組成をTable 1に示す<sup>2)</sup>。FJS-1の化学組成はアポロ試料とほぼ類似しているが、鉄の酸化状態が異なっている。月面が真空であるのに対して、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。模擬月土の粒度分布をFig. 2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。



Photo 1 模擬月土  
Lunar-Regolith Simulated Soil

## 3. マイクロ波加熱技術による作製

これまでに、月面で建設材料を製作することを目的として、模擬試料を熔融した後、冷却してガラス質の建材を作製する方法について検討されている。熔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。既往の研究では、装置が簡単で、真空でも適用可能で、目標物のみを加熱するため効率が良くと考えられるマイクロ波加熱によって固化体が作製されている<sup>3),4),5)</sup>。マイクロ波加熱の原理と加熱試験の概要を以下に述べる。

### 3.1 マイクロ波加熱の原理

マイクロ波は電磁波の一つで、周波数が300MHz～300GHzの電磁波をマイクロ波と呼んでいる。電磁波は、電界と磁界が相互に作用し合って伝播し、伝播速度は周波数に関わらず一定で約30万km/secである。家庭用・業務用電子レンジ、工業用加熱に利用されているマイクロ波の周波数は2.45GHz、波長は122mmである。マイクロ波の照射によって物質が吸収するエネルギーは誘電加熱、磁性加熱およびジュール加熱の3つで、物質の電気的性質によって吸収されるエネルギーの種類が異なる。模擬月土は誘電性材料のため、誘電加熱により加熱される。

### 3.2 マイクロ波加熱方法

マイクロ波の利用の仕方により、いくつかの加熱方法がある<sup>6)</sup>。主な加熱方法の概要を以下に述べる。

**3.2.1 シングルモード加熱法** マイクロ波を誘導するために用いられる導波管をキャビティ(空洞)として利用した加熱方法である(Fig. 3参照)。これは、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、定在波を形成するように調整する方法である。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。ただし、導波管の断面寸法は110mm×50mm程度のため、加熱できる対象物は小さい。

Table 1 アポロ試料と模擬月土の化学組成  
Chemical Composition of Lunar-Regolith and Simulant

組成	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

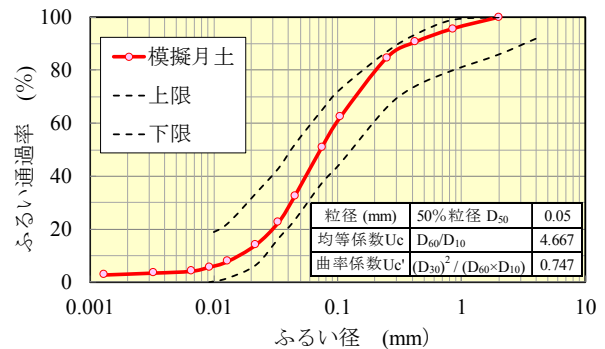


Fig. 2 模擬月土の粒度分布  
Grain Size Distribution of Lunar-Regolith

**3.2.2 マルチモード加熱法** 一般の電子レンジと同様に金属製のキャビティを用いて、入力波を攪拌羽根と壁面で多重反射させて加熱する方法である(Fig. 4参照)。多重反射の目的はキャビティ内に生じる定在波の影響を極力少なくし、均一な加熱を行うことであるが、反射によるエネルギーロスが避けられない。

本試験では、まずシングルモード加熱法により、小型の容器に模擬月土を入れて集中的にマイクロ波を照射して加熱した。次に、マルチモード加熱法により、より大きいサイズの容器に模擬月土を入れて、マイクロ波を均等に照射、加熱した。以下に試験結果を示す。

### 3.3 シングルモード加熱試験

シングルモード加熱装置の外観をPhoto 2に、加熱装置の構成をFig. 5にそれぞれ示す。処理部(導波管)にサンプル

ルを設置し、これにマイクロ波発振器(2.45GHz, 6kW max)からサンプルに向けて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ブランジヤで反射する。サンプルへの吸収電力が最大となるショートブランジヤの位置を数値シミュレーションにより設定した。

模擬月土をアルミナ製容器(以後、サセプタと称する)に充填した。サセプタは内寸φ63mm×h30mmで、試料量は約150gである。これを処理部に設置して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。

**3.3.1 試験ケース** 試験ケースをTable 2に示す。事前に電気炉を用いて模擬月土を加熱して1200℃で溶融、1150℃で焼結することを確認した。まず焼結物を得ることを目的として、No. 1~3は最高温度を1150℃に設定し、昇温速度と最高温度の保持時間を変えた。次に、溶融固化物を得るため、No. 4は最高温度を1200℃に設定した。

**3.3.2 試験結果** 試験結果をTable 2に併記する。No. 1はサセプタが破損し、模擬月土の一部が溶融した。No. 2では昇温速度を50℃/minに下げ、サセプタの底面と側面を断熱材で覆った。その結果、サセプタは健全であったが、サセプタ中央部の試料が溶融固化し、周囲は砂の状態であった。No. 3では最高温度の保持時間を300minに延長し、サセプタ全面を断熱材で覆った。溶融固化物が多少大きくなったものの、その周囲は焼結していなかった。

No. 4では模擬月土の溶融固化を目的として最高温度1200℃を300min保持した。模擬月土の温度と電力の経時変化をFig. 6に示す。熱電対3本の内、サセプタ中央の熱電対温度が一定速度で1,200℃まで昇温し、300min保持されていることがわかる。電力は消費電力に対して、

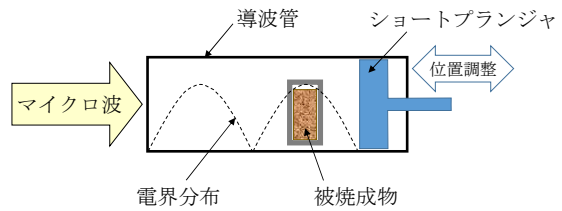


Fig. 3 シングルモードによる加熱方法  
Single Mode Heating

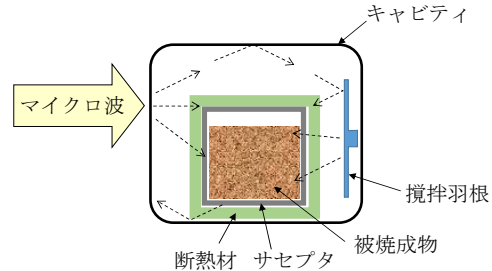


Fig. 4 マルチモードによる加熱方法<sup>6)</sup>  
Multi Mode Heating

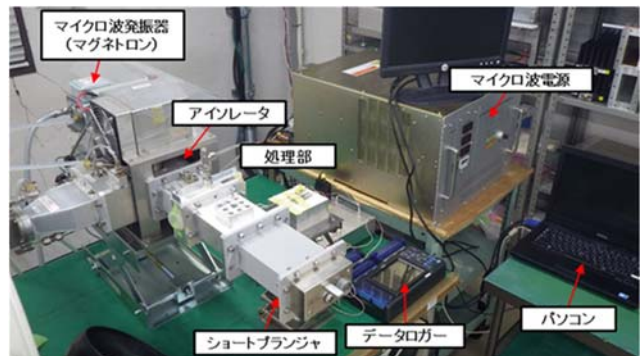


Photo 2 シングルモード加熱装置  
Apparatus of Single Mode Heating

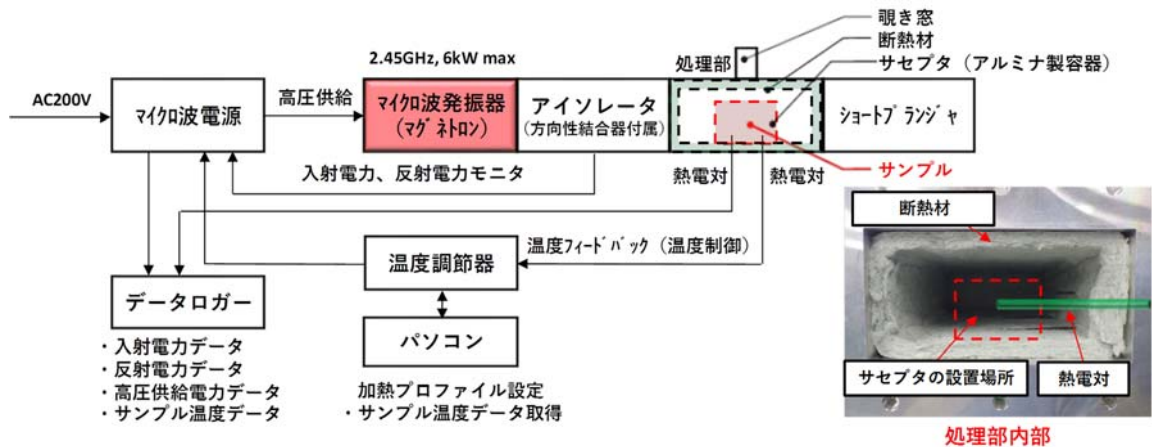


Fig. 5 シングルモード加熱装置の構成  
Microwave Heating Apparatus for Single Mode

Table 2 シングルモード加熱試験ケースおよび試験結果  
Test Cases and Results of Single Mode Heating

No.	昇温速度 (°C/min)	最高温度 (°C)	保持時間 (min)	サセプタの断熱 材設置	サンプルの状態	消費電力 (MJ)
1	100	1150	2	なし	サセプタが破損し、一部溶融していた。	—
2	50	1150	30	サセプタ下部, 側面	試料の中央部が溶融していた。	1.26
3	10	1150	300	サセプタ全面	試料の中央部が溶融していた。	6.71
4	10	1200	300	サセプタ全面	試料は全体的に溶融し、サセプタ内で固 結していた。	12.06

マイクロ波発振器の損失を差し引いた分が入射電力になり、さらに反射電力を差し引いた分が吸収電力になる。試験開始120min付近で消費電力、入射電力および吸収電力の変動が大きいのは、試料温度が温度プログラムに追従するよう、マイクロ波電源のON/OFFが頻繁に繰り返されたため、試験開始150min以降は各電力とも安定している。自然冷却後、模擬月土のほぼ全てが溶融固化していた。

最高温度1150°Cの場合、サセプタ中央部の試料が溶融固化し、その周りは焼結しなかったことから、模擬月土を焼結するには、試料全体にマイクロ波を万遍なく照射すると同時に、サセプタ外部への放熱を抑制する必要があると考えられた。

3.4 マルチモード加熱試験

サセプタ外部への放熱を抑制する方法として、サセプタ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考案されている<sup>7)</sup>。ここでは、円柱形サセプタ(内寸φ74mm×h76mm)を、これより一回り大きいSiCるつぼに入れて、サセプタ外部からも加熱する方法を試行した。加熱装置は、シングルモード型に比べてマイクロ波をより均等に被焼成物に照射できるマルチモード型(2.45GHz, 6kW max)を使用した。

SiCるつぼ底面に熱電対を接触させて、加熱中の温度をモニタリングした。熱電対の温度と電力量の経時変化をFig. 7に示す。マイクロ波を2kW, 30min→2.5kW, 10min→3kW, 10min→2.7kW, 20min→2.7kW 30minで段階的に照射し、段階ごとに照射を中断し、試料の加熱状態を目視で確認しながらマイクロ波を照射した。その結果、模擬月土はほぼ均等に焼結した。

3.5 加熱サンプルの物性と圧縮強さ

シングルモード加熱試験No. 4の溶融固化物と、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た。抜き出す前の溶融固化物をPhoto 3に、各供試体の外観をPhoto 4, 5に示す。これらの供試体の一軸圧縮強さを測定した。

溶融固化物の応力-ひずみ曲線をFig. 8に示す。ひずみは、外部変位計と、供試体に貼付したひずみゲージを用いて測定した。ひずみゲージはε=1.6%で測定不能にな

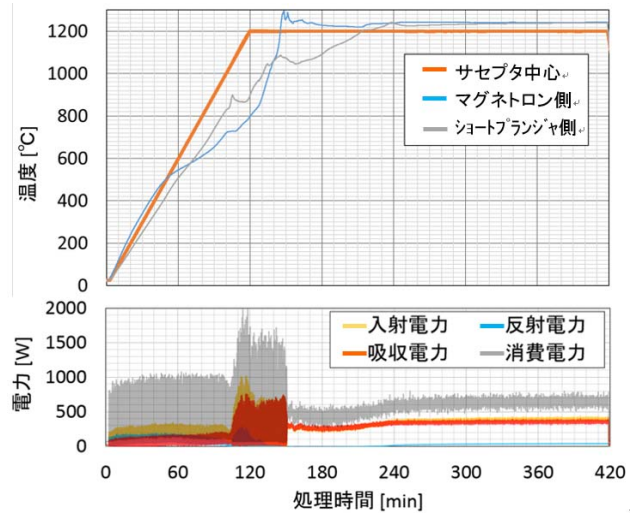


Fig. 6 シングルモード加熱の試料温度と電力の経時変化  
Profile of Temperature and Electric Power

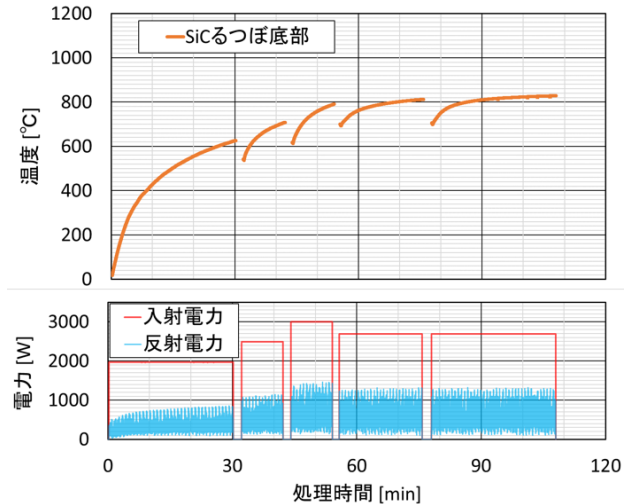


Fig. 7 マルチモード加熱の試料温度と電力の経時変化  
Profile of Temperature and Electric Power

ったため、そこまでの値をプロットしている。一軸圧縮強さは141.6N/mm<sup>2</sup>で、ひずみゲージによる応力-ひずみ曲線から求めたヤング係数は4.1×10<sup>3</sup>N/mm<sup>2</sup>であった。

次に、焼結物からは円柱供試体を2体採取した。これらの応力-ひずみ曲線をFig. 9に示す。ひずみは外部変位計

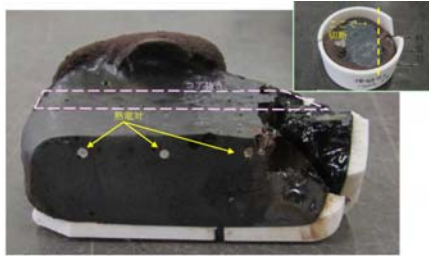


Photo 3 溶融固化物  
Sample of Molten Slag



Photo 4 溶融固化物から作製した円柱供試体  
Cylindrical Specimen of Molten Slag for Uniaxial Strength

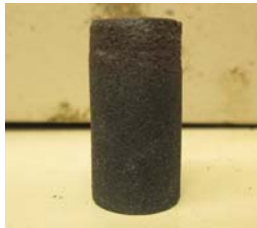


Photo 5 焼結物から作製した円柱供試体  
Cylindrical Specimen of Sintered Object for Uniaxial Strength

を用いて測定した。一軸圧縮強さは16.4N/mm<sup>2</sup>と15.3N/mm<sup>2</sup>であった。ひずみ-応力曲線の初期の直線部分から求めたヤング係数は、 $2.3 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ と $1.6 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ であった。

測定結果をTable 3に示す。溶融固化物の圧縮強さは高強度コンクリートに相当する値であった。なお、一軸圧縮強さ150N/mm<sup>2</sup>の高強度コンクリートのヤング係数は約 $4.5 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ で、溶融固化物のヤング係数はこれに比べて1/10程度という特徴があった。一方、焼結物の圧縮強さは約16N/mm<sup>2</sup>であり、JISの普通れんが2種(15N/mm<sup>2</sup>以上)に相当する強度を有していた。溶融固化物の圧縮強さは焼結物の約9倍であった。溶融固化物の密度は2.75g/cm<sup>3</sup>で焼結物に比べて2割以上大きく、空隙が少なく密実であるため高強度を示したと考えられる。

### 3.6 まとめ

シングルモード加熱試験において、模擬月土は最高温度1200℃で溶融し、最高温度1150℃ではサセプタ中央部のみ溶融して、その周囲は砂状であった。サセプタを断熱材で被覆してサセプタ外部への放熱を抑制したものの、

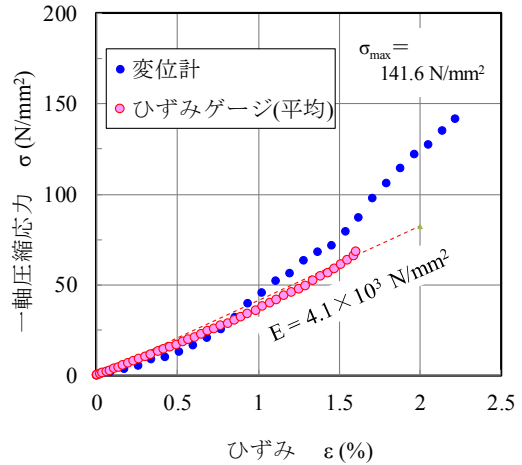


Fig. 8 溶融固化物の応力-ひずみ曲線  
Stress-Strain Curve of Molten Slag

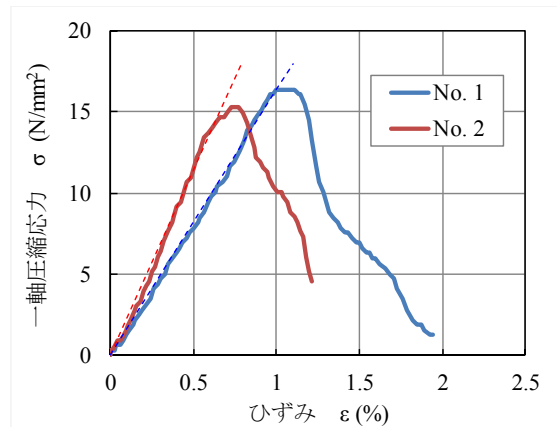


Fig. 9 焼結物の応力-ひずみ曲線  
Stress-Strain Curve of Sintered Object

Table 3 圧縮試験結果  
Results of Compressive Strength Test

	溶融固化物	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
一軸圧縮強さ (N/mm <sup>2</sup> )	141.6	16.38	15.26
ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )	$4.1 \times 10^3$	$1.6 \times 10^3$	$2.3 \times 10^3$

その効果は十分表れなかった。そこで、試料を充填したサセプタをSiCのつぼに入れて、マルチモード加熱法でマイクロ波を照射したところ、サセプタ外周面からの放熱が抑えられ、模擬月土はほぼ均等に焼結した。

被焼成物の寸法が大きくなるほど表面積が大きくなるため、レンガ大の焼結ブロックを製造する場合は、外部放熱を抑制することが重要と考えられる。

## 4. コールドプレス技術

コールドプレスとは、砂と粘土鉱物の混合物を常温で圧縮成型する方法であり、粘土鉱物の存在が確認されている火星での適用が考えられる。ここでは、模擬月土と粘土(ベントナイト)の混合土を常温で圧縮成型して円柱供試体を作製し、その一軸圧縮強さを測定することにより、建設資材としての力学性能を有するかどうか検討した。さらに、コールドプレス時の大気の有無が圧縮強さに及ぼす影響についても調査した。

### 4.1 圧縮成型容器の設計

石川らは、月の模擬砂とベントナイトを用いてコールドプレスでブロックを製作し、強度を測定している<sup>3)</sup>。一軸圧縮強さとして0.36~2.12N/mm<sup>2</sup>が得られているが、多くのケースで載荷途中でモールドが破損した。モールドが破壊しなかったケースの圧縮成型応力に対する一軸圧縮強さの比は約1/5(0.15~0.21)であった。

現時点では、惑星基地建設材料の明確な仕様がないため、暫定の目標強度を土木分野のコンクリート構造物の設計で一般的に用いられる21N/mm<sup>2</sup>とした。石川らの知見を基に、一軸圧縮強さの5倍の圧縮成型応力(載荷応力: 21N/mm<sup>2</sup> × 5 ≒ 100N/mm<sup>2</sup>, 載荷重: π・15<sup>2</sup> mm<sup>2</sup> × 100N/mm<sup>2</sup> ≒ 70kN)に耐えうるモールドを製作した。通常の土質試験の供試体は直径50mm×高さ100mmであるが、今回は①小さい荷重で大きな載荷応力を得る、②材料(模擬月土)に限りがある、③モールドの構造・経済性の理由から、直径30mm×高さ60mmの円柱形とした。

### 4.2 試験概要

原材料は、2章で述べた模擬月土と、山形産のNa型ベントナイト(クニゲルV1)を用いた。Fig. 10に供試体作製と試験の手順を示す。まず、圧縮予備試験を実施し、Fig. 11に示す圧縮成型応力~乾燥密度の関係を求めた。モールド側面の摩擦の影響で圧縮成型応力の伝搬がばらついて供試体の密度が不均一になることを避けるため、Fig. 11の結果を基に、一層あたりの仕上がり厚さが20mmと

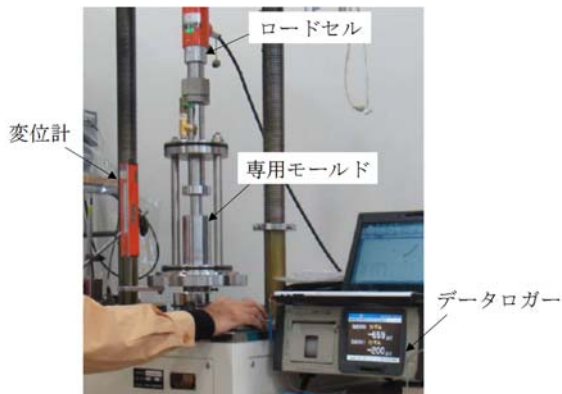


Photo 6 圧縮成型状況  
Molding by Cold Press

なる材料を計量し、Photo 6に示すように所定の荷重で圧縮成型した。この工程を3回繰り返して、高さ 60mmの円柱供試体を作製した<sup>8)</sup>。

Table 4に試験ケースを示す。各ケースとも3本の供試体を作製し、強度試験を行った。

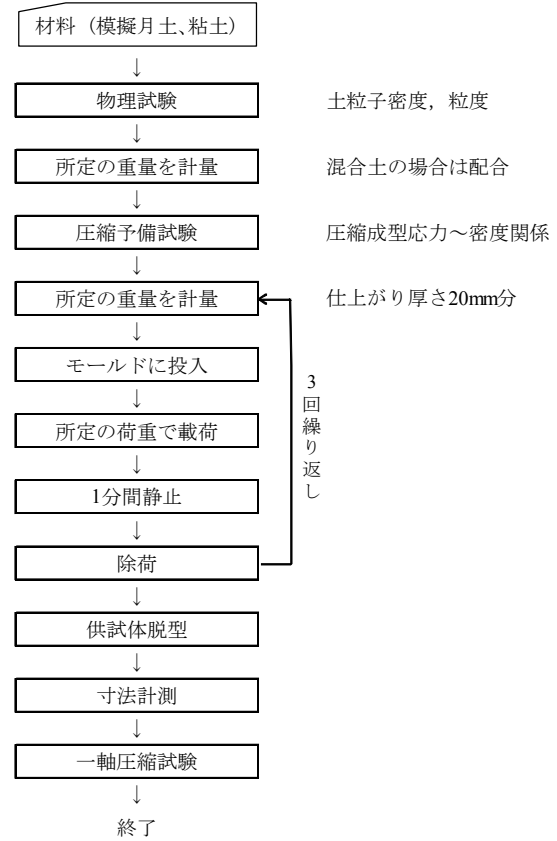


Fig. 10 コールドプレス供試体作製と試験の手順  
Procedure of Specimen Molding and Strength Test

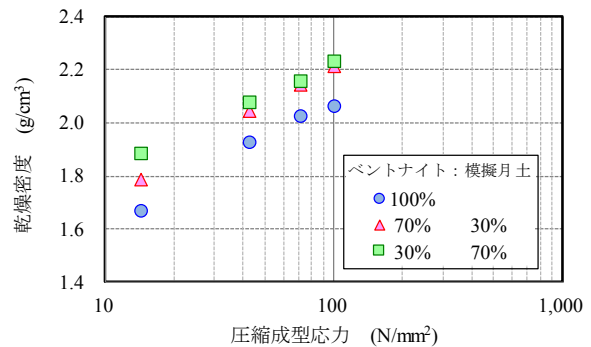


Fig. 11 圧縮成型応力と乾燥密度の関係  
Cold Press Stress and Density of Specimen

Table 4 試験ケース  
Experimental Cases

材料 (質量比)		目標密度 g/cm <sup>3</sup>
ベントナイト	模擬月土	
100	0	2.06
70	30	2.22
30	70	2.24

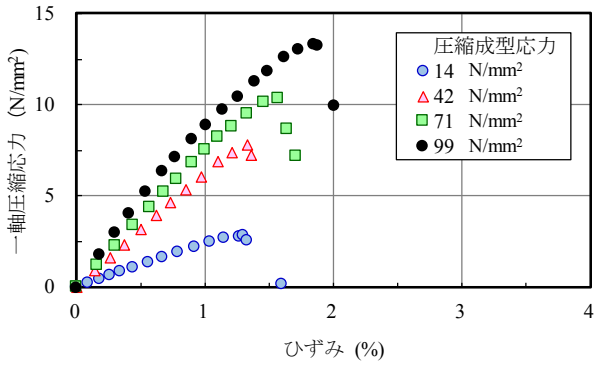


Fig. 12 応力-ひずみ曲線：ベントナイト70%  
Stress-Strain Curve

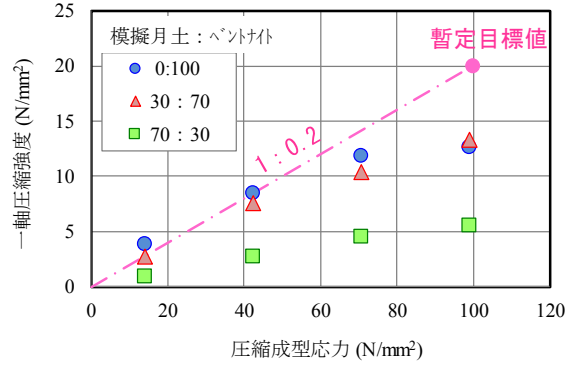


Fig. 13 圧縮成型応力と一軸圧縮強さの関係  
Cold Press Stress and Unconfined Strength

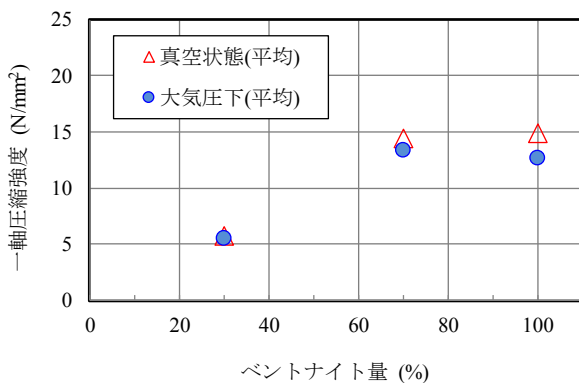


Fig. 14 一軸圧縮強度に及ぼす大気の影響  
Atmosphere Influence on Unconfined Strength

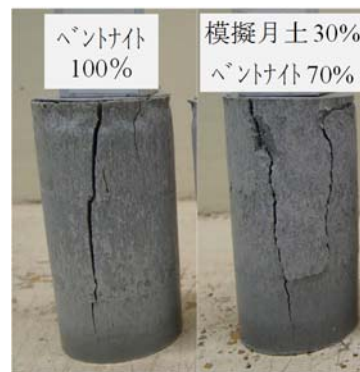


Photo 7 試験後の供試体 (圧縮成型応力99N/mm²)  
Specimens after Strength Test

#### 4.3 コールドプレスで得られる建設材料の強度

Fig. 12, 13に一軸圧縮試験結果を、Photo 7に一軸圧縮試験後の供試体をそれぞれ示す。圧縮成型応力が大きくなるにしたがい、供試体の一軸圧縮強さが大きくなっている。ベントナイト100%および70%(模擬月土30%)の場合、圧縮成型応力が43N/mm<sup>2</sup>までは応力と一軸圧縮強さの比は約0.2の関係が保たれているが、それ以上の応力では強度比が次第に小さくなった。圧縮成型応力が99N/mm<sup>2</sup>では強度比は0.13であった。試験では、最大一軸圧縮強さ13.4N/mm<sup>2</sup>のブロック(供試体)が得られた。

一方、ベントナイト30%(模擬月土70%)の場合は強度比が0.06程度で、供試体の圧縮強さはベントナイト100%および70%の場合に比べて小さい。模擬月土を母材にしてコールドプレスを行う場合、バインダーとして少なくとも30%以上のベントナイトが必要と考えられる。

#### 4.4 真空状態でのコールドプレス

Photo 8に示す真空セル内で圧縮成型を行った。Fig. 14に大気圧下および真空状態で圧縮成型した供試体の一軸圧縮強さを示す。真空状態でコールドプレスすることにより、圧縮強さが5~18%増加し、ベントナイト量が多いほど強度増加の傾向が強くなっている。

一方、出来上がった供試体の乾燥密度は、大気圧下と真空状態で有意な差は見られなかった。真空状態でコー

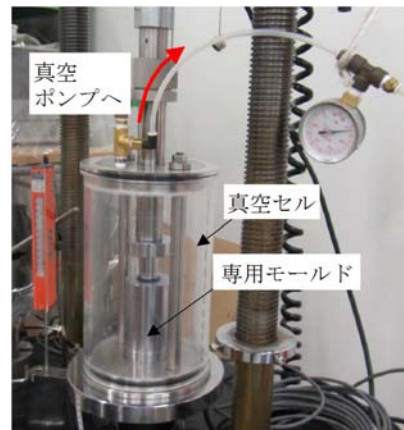


Photo 8 真空状態でのコールドプレス  
Cold Press under Vacuum State

ールドプレスした供試体の密度は変わらず、強度が増加した理由として、大気圧下の供試体は空気を巻き込んだ状態で圧縮され、真空状態の供試体に比べて粒子の接触面積が小さいためと推定される。ベントナイト量が多いほど強度増加率が大きいことから、この推定は裏付けられる。この結果から、大気圧下でプレスした成型体の圧縮強さを測定すれば、真空下でプレスした成型体の強度を安全側に評価できると考えられる。

## 5. まとめ

惑星基地の建設資材を製造することを目的として、月の表土を模擬した材料を用いてマイクロ波加熱およびコールドプレスによって固化体を作製し、圧縮強さなどの力学特性を調べた。その結果、以下のことが明らかとなった。

### 1) マイクロ波加熱技術

- ・模擬月土を最高温度1200°Cで加熱すると試料全体が溶融固化した。
- ・模擬月土を焼結するには試料外部への放熱を抑えることが重要で、マイクロ波を吸収、発熱する炭化ケイ素のろつぼを外側に配置することにより、試料全体がほぼ均質に焼結した。
- ・圧縮強さは溶融固化物が141N/mm<sup>2</sup>、焼結物が約16 N/mm<sup>2</sup>であった。溶融固化物の圧縮強さは高強度コンクリートとほぼ同等であり、焼結物の圧縮強さはJIS普通れんが2種に相当した。

### 2) コールドプレス技術

- ・高圧力で材料を締固めて成型体を作製する際、ベントナイトを添加することで模擬月土を固結できた。
- ・模擬月土30%+ベントナイト70%の試料を圧縮成型応力99N/mm<sup>2</sup>でプレスした成型体の一軸圧縮強さは13.4N/mm<sup>2</sup>であった。

惑星基地の建設材料に要求される力学性能は、用途、使用場所、建設工法等によって異なると予想されるが、月面の重力加速度は地上の約1/6と小さいことを考慮すると、いずれの技術も建設材料の製造方法としての適用可能性があると考えられる。

## 謝辞

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「火成岩あるいは粘土鉱物を主体とする土質材料からの

建設材料の作製」に関する共同研究として実施したものである。模擬月土の提供ならびに本研究を実施する機会を与えていただきました宇宙航空研究開発機構(JAXA)の関係各位に深謝致します。

## 参考文献

- 1) 国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 宇宙探査イノベーションハブ：パンフレット「宇宙探査 INNOVATION HUB」, 2016
- 2) 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
- 3) 石川洋二, 日笠山徹巳, 清水幸夫, 佐々木哲男, 栗木恭一：月面基地のための建設材料の製作, Future Space Activity Workshop/Lunar Base Workshop 1991.6
- 4) 石川洋二, 日笠山徹巳, 清水幸夫, 佐々木哲男：Simple and Efficient Methods to Produce Construction Materials for Lunar and Mars Bases, Engineering, Construction and Operation in Space III Proceedings of Third International Conference Denver, CO/May 31 to Jun 4, 1992
- 5) 石川洋二, 森拓雄, 田島孝敏, 金森洋史, 星野健：火成岩あるいは粘土鉱物を主体とする土質材料からの建設材料の作製, 第60回宇宙科学技術連合講演会, 2016.9
- 6) 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, pp. 16-21, 2010.3
- 7) 水野正敏：マイクロ波(2.45GHz)によるアルミナセラミックスの焼成技術, 金属, Vol. 76, No. 8, pp. 41-46, 2006.8
- 8) 森拓雄, 齋藤典之, 小峯秀雄：余裕深度処分における緩衝材の長期廃棄体支持性能に関する実験的研究, 土木学会論文集C(地圏工学), Vol. 68, No. 4, pp. 633-642, 2012.10