

# Basic Research on the Production of Construction Materials from Lunar Resources

Hiroshi Kanamori<sup>1</sup>, Yoshihiko Shinoda<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Technology, Shimizu Corporation,  
3-4-17, Etchujima, Koto-ku, Tokyo, 135-8530 Japan

<sup>2</sup> The Wakasa Wan Energy Research Center  
64-52-1 Nagatani, Tsuruga City, Fukui Prefecture, 914-0192 Japan

## Abstract

According to the Global Exploration Roadmap, the initial phase of lunar base will be established in the second half of 2020's. Several lunar ISRU missions, including indigenous production of construction materials are also expected to be performed prior to the base construction. Lunar soil simulant is particularly important material to develop experimental devices for these missions. Lunar soil simulant FJS-1 well simulates mechanical properties of lunar soil, and is now used in various studies for developing machineries to be operated on the Moon. Because the FJS-1 is made from natural minerals of the Earth however, it contains a little too much of alkalis such as Na and K comparing with actual lunar soils obtained in the Apollo program. In order to produce the lunar soil simulant that can be used for chemical and/or thermal processing studies, authors produced chemically synthesized simulants with low alkali contents, and investigated their behavior of sintering process.

# 月資源からの建設資材の製造に関する基礎検討

金森洋史（清水建設）

篠田佳彦（若狭湾エネルギー研究センター）

## 1. はじめに

国際宇宙探査協働グループ（ISECG）が掲げるロードマップ（Global Exploration Roadmap）によれば、2020年代の後半には、初期型の月基地が建設されると共に、月利用の商業化が進められる見通しとなっている<sup>1)</sup>。その実現性を高めるために、資源利用可能性検討を含む複数の無人月探査ミッションが行われるものと予想される。

このような月の探査活動を支援する様々な機器類を開発するためには、地上における月環境の模擬が必要となる。国内で比較的多く使われている模擬月土「FJS-1」は、月の表土と組成の近い地上の自然由来鉱物を原料としており、主に月表土の機械的な性質を模擬した材料として、月面と直接接する機器（ランダやローバ）等の開発に使われている。しかし、地上由来鉱物の宿命として、FJS-1は月の鉱物よりも若干多くのアルカリ成分を含んでおり、焼結・溶融や反応等のプロセスを伴う資源利用の検討に対して十分な性質を有しているとは言えないものであった<sup>2)</sup>。特に、月資源から建設資材を製造するプロセスにおいては、多くの場合加熱処理が必要になるため、従来のFJS-1に加え、アルカリ成分量を調整した材料による検討も必要と考えられた。そこで、化学的に合成したアルカリ成分の少ない模擬月土を試作し、その加熱特性等について調べた。

## 2. 化学モデル模擬月土の検討

表1に、代表的なアポロ試料とFJS-1の化学組成を示す<sup>3),4)</sup>。A11はアポロ11号着陸サイトの代表的な試料で、月の海の領域に存在する試料である。同様に、A16はアポロ16号着陸サイトの試料で、月の高地領域の試料である。アポロ14号着陸サイトは丘陵地であり、海と高地の両方の特徴を兼ね備えている。

表1から明らかなように、FJS-1はアポロ試料と比べて鉄の酸化状態とアルカリ量の二点において大きな違いが認められる。

表1 アポロ試料とFJS-1の化学組成（%）

組成	A11	A16	A14	FJS-1
SiO <sub>2</sub>	42.2	45.0	48.1	46.8
TiO <sub>2</sub>	7.8	0.5	1.7	1.6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.6	27.3	17.4	17.8
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.3	0.3	0.2	0.0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	3.8
FeO	15.3	5.1	10.4	8.3
MnO	0.2	0.3	0.1	0.3
MgO	7.8	5.7	9.4	3.9
CaO	11.9	15.7	10.7	11.2
Na <sub>2</sub> O	0.5	0.5	0.7	3.7
K <sub>2</sub> O	0.2	0.2	0.6	1.0

月資源から建設資材を製造するためには、焼結材や鋳物などの加熱加工を必要とする場合も想定されるが、その際の焼結温度や溶融温度は、原料中に含まれるアルカリ成分が大きく影響するため、これらの成分を調整した化学モデル模擬月土が必要となる。

化学モデル模擬月土を作製するために、単体の化学物質を数種類混合して模擬月土を作製する手法を試みた。目標としてA11（海）およびA16（高地）の化学組成を設定し、表2に示す配合で化学物質を混合した。

表2 化学モデル模擬月土の配合\*

混合化学物質	A11モデル	A16モデル
SiO <sub>2</sub>	42.2	45.0
TiO <sub>2</sub>	7.8	0.54
Al（粉末）	7.2	14.5
Cr（粉末）	0.21	0.23
Fe（粉末）	11.9	3.96
Mn（粉末）	0.15	0.23
Mg（粉末）	4.7	3.44
Ca(OH) <sub>2</sub>	15.7	20.7
NaCl	0.89	0.87
KCl	0.25	0.27
P（赤りん）	0.03	0.06
S（粉末）	0.12	0.07

\*各100gを作製するための必要量（g）

化学物質を混合した試料は、酸化物となっていないものが含まれていることや、かさ密度が最大でも1.4~1.5 g/cm<sup>3</sup>程度と実際の月試料の最大かさ密度

(約 1.8 g/cm<sup>3</sup>) に比べて小さくなった。そこで、模擬月土として利用するために化学物質混合試料を一旦酸化気中で熔融・固化（一次焼結）させて模擬的な岩石を作製した。

予備的な加熱実験を行った結果、今回は一次焼結を 1,500°C で行った。図 1 に一次焼結後の A11 試料を示す。なお一次焼結には、60×60×35mm の角形アルミナ (99%) 坩堝を使用した。また、図 2 に坩堝から回収した一次焼結材の状況を示す。



図 1 一次焼結した A11 モデル



図 2 回収した一次焼結材

今回は、回収した一次焼結材料をラボネクト社製のミニスピードミル (MS-09) で簡易粉碎したものを化学モデル模擬月土とした。図 3 に粉碎後の一次焼結材を、図 4 に FJS-1 と粉碎後の A11 モデル (=A11S) および A16 モデル (=A16S) の粒度を示す。化学モデルの粒径中央値は FJS-1 の 70 μm に対して 100~150 μm 程度と粗くなっている。

表 3 に化学モデル模擬月土の化学組成を示す。表 1 に示した FJS-1 の組成に比べて、化学モデル模擬月土のアルカリ成分はかなりアポロ試料に近くなっていること、また月の海と高地の組成の違いを明確に表していることが明らかとなった。



図 3 粉碎後の一次焼結材

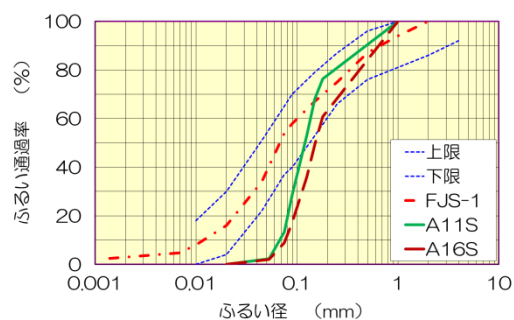


図 4 模擬月土の粒度

表 3 化学モデル模擬月土の化学組成

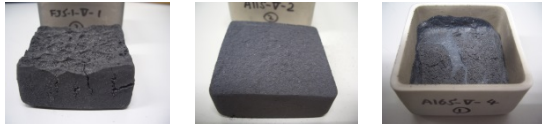
組成	A11	A11S	A16	A16S
SiO <sub>2</sub>	42.2	39.0	45.0	41.2
TiO <sub>2</sub>	7.8	8.7	0.54	0.72
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.6	18.6	27.3	27.5
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.3	0.4	0.3	0.4
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	7.6	-	3.7
FeO	15.3		5.1	
MnO	0.2	0.3	0.3	0.3
MgO	7.8	9.7	5.7	6.3
CaO	11.9	14.0	15.7	18.5
Na <sub>2</sub> O	0.5	0.6	0.5	0.1
K <sub>2</sub> O	0.2	0.1	0.2	0.1

### 3. 模擬月土の焼結特性

月の土から焼結材を製造し、それを建設資材として利用することを想定して、FJS-1 および化学モデル模擬月土 (A11S, A16S) を真空環境下 (到達真空度約 1×10<sup>-4</sup> Pa) で加熱し、その熔融・焼結状況を観察した。予備的な焼結実験に基づき、FJS-1 については 1,100°C、A11S については 1,200°C、また A16S については 1,400°C を最高温度とし、いずれも昇温 3 時間、最高温度維持 2 時間その後自然冷却として二次焼結材を製造した。これらの温度は、焼結試料の加工性

を考慮して試料全体が熔融するまでには至らない条件として選定した。

図 5 に二次焼結後の各試料の状況を示す。FJS-1 および A11S については焼結温度が低かったため、焼結材とアルミナ製坩堝との離型性が高かった一方、1,400°Cで焼結した A16S は坩堝融着した。



(a) FJS-1 (b) A11S (c) A16S

図 5 二次焼結後の模擬月土

これらの二次焼結体の機械的性質を調べるために、内周刃スライサを用いて試験体の切り出しを行った。切り出し後の試験体の状況を図 6 に示す。切り出し寸法は 1×1×2 cm を目標としたが、焼結材のひび割れ状況に応じて調整した。



(a) FJS-1 (b) A11S (c) A16S

図 6 切り出し後の二次焼結試験体

切り出した二次焼結材の主な機械的性質を表 4 に示す。

表 4 二次焼結試験体の機械的性質

焼結試料	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング率 (GPa)	ポアソン比	比強度 (kN・m/kg)
FJS-1	1.86	13.9	—	—	7.5
A11モデル	1.53	1.2	—	—	0.8
A16モデル	2.86	532	83.6	0.33	186

FJS-1 と A11S については焼結温度が充分ではなく、粒子間の結合が不足していたことが推測される。一方、A16S については、一般的な岩石と同等の密度ならびにアルミ合金に近い強度特性が得られた。

#### 4. おわりに

本検討の結果、化学物質を混合し、それを焼結・粉砕することによって、①アルカリ成分がアポロ試

料と同等の模擬月土を作製できること、②月の地域（海と高地）によって加熱特性が変化すること、③化学モデル模擬月土から作製した焼結材がアルミ合金に匹敵する強度特性を有する可能性のあることなどが明らかとなった。



図 7 10kW 太陽炉 (WERC 保有)

今後は、化学モデル模擬月土の製造ならびにそれを用いた焼結材の評価方法についてより詳細な検討を行うとともに、月面における実用的な加熱炉の一つと期待される太陽炉を用いた焼結材の製造についての検討を行い、エネルギー的な観点から電気炉との比較したい。図 7 は今後の実験に使用する予定の 10kW 太陽炉 (若狭湾エネルギー研究センター保有) を示す。

#### 参考文献

- 1) NASA ホームページ, 'International Space Exploration Coordination Group', <http://www.nasa.gov/exploration/about/isecg/>, 2007.5.
- 2) 金森ほか, '月の地域に対応した月土壌シミュラントの開発と性質', 第 51 回宇宙科学技術連合講演会, 日本航空宇宙学会, 2007.
- 3) G. H. Heiken, D. T. Vaniman and B. M. French, 'Lunar Sourcebook', Cambridge University Press, LPI, p. 346, 1991.
- 4) H. Kanamori, et. al, 'Properties of Lunar Soil Simulant Manufactured in Japan', *Proceedings of the international symposium on space 98, ASCE, Reston, Va.*, pp. 462-468, 1998.