

宇宙粉末冶金実験「EMPEROR」

ISS における粉末冶金実験の実施方法及び特性調査に関する提案

徳山工業高等専門学校

専攻科 機械制御工学専攻 2年 田中 怜

本科 機械電気工学科 5年 田中 章浩

機械電気工学科 5年 藤原 汰智

機械電気工学科 5年 石田 篤弘

1. 背景

現在、月の表面に堆積しているレゴリスの中にはセラミックス化した金属資源があることがアポロ計画やルナ計画によって解明されている⁽¹⁾。また、探査機「はやぶさ」によって調査された「イトカワ」のような小惑星にも金属資源があることが予想され調査が進められている。近未来では、宇宙への進出が想定される。しかし、現在の技術では多くの物資を運ぶことは大変難しく、また高コストであることから現実的ではないといえる。そのため、地球からの物資は最低限にし、現地で調達し製造するところが効率的だと考えられる。

1992年に行われた第1次材料実験 (FMPT : First Material Processing Test) で微小重力環境下でも金属の溶製が行われていることから、金属を溶かすほどの高温の使用が可能であることが証明されている⁽²⁾。加えて微小重力環境下では比重量がほぼ等しくなることから均一に混合でき、また宇宙空間には酸素が無いため酸化皮膜を形成することがない。このようなことから宇宙空間での金属部品の製造には粉末冶金法が有効なのではないかと考えられる。今日に

至るまで、金属とセラミックスなどの混合材料の焼結実験は行われているが金属のみでの焼結は行われていない。そのため新規性があると考えられる。

2. 目的

微小重力環境下で粉末冶金を行った際、原料となる金属粉が均一に混合されることなどから、地上で作ったものとは異なる材料特性を持つ可能性がある。したがって、微小重力環境下で作成された粉末冶金製品が、どのような材料特性を持っているのかを調査することが求められる。今回はISS内の微小重力環境下において粉末冶金を用いた試験片の作成を実施し、それを地上で作成された試験片と比較調査することをミッション目標として設定した。

粉末冶金を実施するためには、原材料となる金属粉を混ぜあわせる「混合」、混合された金属粉を型に入れて押し固める「成形」、そして、押し固められた成形品を焼結炉に入れ焼き固める「焼結」といった工程を経る必要がある⁽³⁾。そのため、今回はISS内の微小重力環境下においてそれら三工程の実施するための方法を検討する。

3. サクセスレベル

Minimum Success	微小重力環境下で試験片をひとつ作り，地上に持ち帰り材料特性を把握するために試験を行う。
Full Success	微小重力環境下で材料の割合を変化させた複数の試験片を作り，地上で特性把握のための試験を行う。
Extra Success	微小重力環境下で焼結時間を変化させ複数の試験片を作り，地上で特性把握のための試験を行う。

4. 混合方法の提案

圧縮成形装置（図 2、図 3）に粉末と潤滑剤を加え，装置をシェイクすることで混合する。実際に微小重力環境下で混合をする際、装置内部の粉末がどのような挙動を起こすのか、blender というソフトの物理演算機能を用い、シミュレーションを行った。（図 1）。

具体的なパラメータとして

- ・粉末直径 6mm
- ・容器寸法：横幅 5cm 高さ 12cm
奥行き 3cm
- ・速度 20mm/s

- ・振動回数 2 回

- ・変位 4cm

とした。

図 1 より、上下に分かれた 2 種類の粉末が振動により均一に混合するというシミュレーション結果が得られた。したがって、宇宙空間で粉末を混合することは可能であると考えられる。

また、JAXA の実験で、宇宙空間で水と油の混合に成功した例がある⁽⁴⁾。この実験に基づき、粉末に潤滑剤を加え、流体とすることで同様に混合することができるのではないかと考える。そして、比重比が大きい程混合状態が悪くなるということが実験で分かっている⁽⁵⁾。したがって、宇宙では比重の影響がなくなるため、粉末を均一に混ぜることが可能であると考えられる。

5. 混合する材料に関して（原料・潤滑剤）

- ・原料

月面のレゴリスには鉄とチタンが多く含まれているため⁽¹⁾，本実験では原料として鉄とチタンを用いる。

- ・成分比（質量比）

成分比は 6:4 とし，可能であれば成分比を変えて再度実験を行う。

成分比，必要な原料を表 1 に示す。

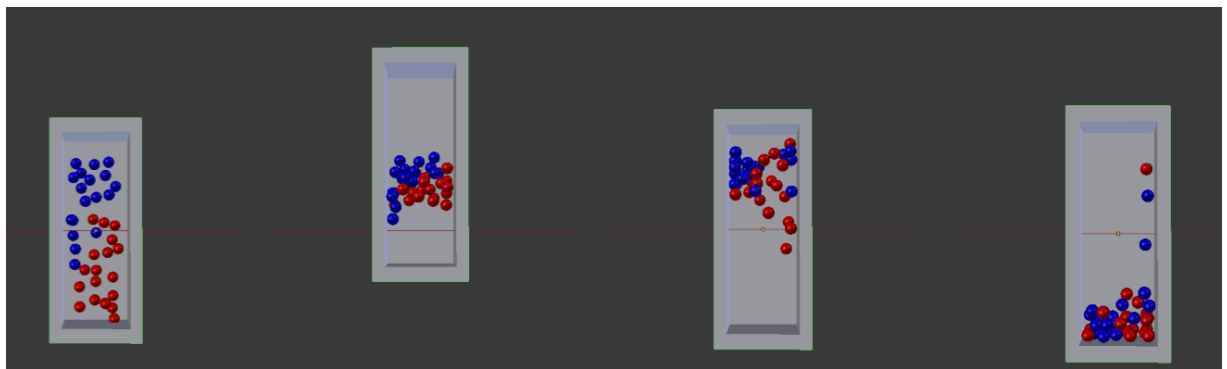


図1 シミュレーション結果

表 1. 成分比と必要な原材料の関係

	Fe	Ti
6:4 の場合	約 11.4g	約 7.6g
5:5 の場合	約 9.0g	約 9.0g
4:6 の場合	約 6.8g	約 10.2g

・潤滑剤

本実験では混合の際、混ぜやすくするために潤滑剤を添加する。一般に潤滑剤にはステアリン酸亜鉛、ステアリン酸リチウム、パラフィン、レジンなどが用いられる⁽³⁾。

6. 圧縮方法の提案

圧縮成形には通常、プレス機が用いられるが、宇宙にプレス機を持っていくのは困難である。そのため、ねじを使用して万力のように粉末を圧縮成形する手法を用いる。

粉末冶金において、加圧力の大きさは常温加圧の場合、一般に約 1t/cm² 以上が必要である⁽⁶⁾。この手法において、必要な加圧力を満たすことが可能であるか以下で検討する。

一般に、トルクと締め付け力の関係は、次の式(1)を用いて示すことができる。

$$T = kdF \dots \dots (1)$$

ここで

T: 締め付けトルク

F: 軸力

d: ねじの呼び径

k: トルク係数

である。

トルク係数とは、ねじの座面の表面粗さやピッチなどを考慮した係数であり、0.15~0.2 が一般的な値である⁽⁷⁾。

本実験において、M10 のボルトを使用し、締め付けトルクを 40[N・m]、k=0.2 と仮定すると軸力 F は以下の式 (2) に示されるように

$$F = \frac{T}{kd} = \frac{40}{0.2 \times 0.01} = 20,000[N] \approx 2[t] \dots \dots (2)$$

となることから、この手法を用いて圧縮成形を行うことが可能であると考えられる。

具体的には、以下の図 2、図 3 に示されるような装置を用いて圧縮成形を行う。

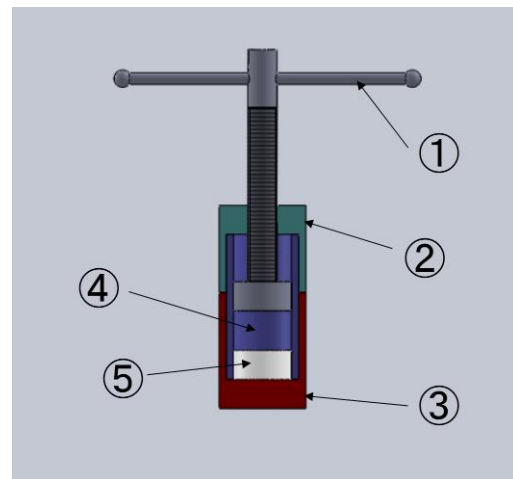


図 2 圧縮成形装置詳図

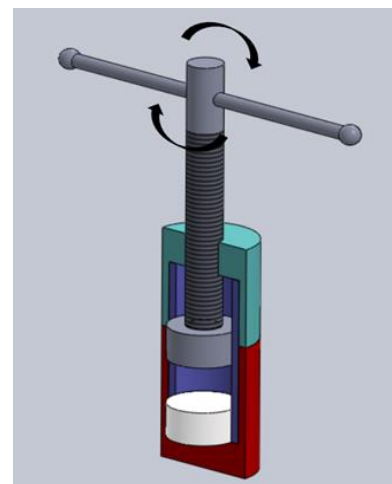


図 3 投影図

手順

I ①を図3のように回転させ混合した粉末を圧縮する。尚、⑤は圧縮成形後の粉末を示す。

II ③を取り外し、①を回転させ④から⑤を取り出す。

7. 焼結・冷却方法の提案

焼結・冷却に関しては、国際宇宙ステーション「きぼう」日本実験棟内にある勾配炉実験ラックの温度勾配炉（GHF）で行うことを想定する⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

基本仕様

温度勾配炉

- ・加熱温度範囲：500~1600℃
- ・温度安定性：±0.2℃以内

・カートリッジ寸法

ボス部：約 93mm

カートリッジ部：約 505mm(φ 34.4~36.1mm)

最大試料寸法：φ 31mm×370mmL

加圧成形した粉末をカートリッジ内に移動し、焼結を行う。焼結を行う際、まず400℃~600℃で予熱し、混入されている潤滑剤を気化放出させ、その後 1100℃~1250℃で焼結し、冷却する。

焼結時間に関しては、何パターンか実施し、検証する。

尚、ISS 内の温度勾配炉の試料カートリッジはその構造上、封入作業が地上でしか行えないため現状本実験の実現は困難である。したがって、本焼結方法の提案はあくまでアイデア段階であり、ISS の将来の展望の一例として挙げる。

8. 材料の試験

将来、宇宙空間に粉末冶金による大型構造物を作成する際の指標とするために、本実験において異なる条件下作成された焼結体の諸特性を調査する必要がある。

調査は以下の①密度、②硬さ、③その他機械特性の3点について、実験完了後地上において実施する。

① 密度の測定

焼結体の密度は、焼結体の強度を決定する上での最も重要な特性の一つであり⁽³⁾、表面張力の影響が増大する微小重力環境下においては材料間の隙間である気孔の発生に変化が生じる可能性があることから、密度の検証が必要であると考えられる。

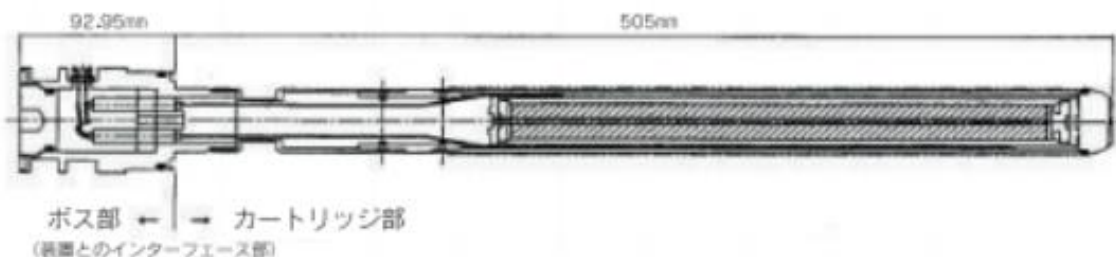


図4 カートリッジ詳細図⁽⁶⁾

密度 $D(\text{g/cc})$ は焼結時に形成された多数の気孔を油、若しくはパラフィンを用いてふさぐことで、アルキメデスの原理に基づき、式(3)によって求めることができる⁽³⁾。

$$D = \frac{A}{B - C} \dots (3)$$

ここで

A：空気中における焼結体の重量

B：気孔を塞いだ焼結体の空気中の重量

C：気孔を塞いだ焼結体の水中の重量

である。

② 硬さの測定

微小重力環境下においては、重い粉が沈殿せず混合されるため、材料が強くなる可能性があることから、硬さの検証も必要であると考えられる。

測定には通常の金属材料試験と同じものを用いるが、気孔の多さにより材料表面で硬度のばらつきがある⁽³⁾ため、比較的広範囲に圧力をかけ測定するブリネル硬さ試験を用いるのが適当である。

③ その他機械特性の測定

①及び②の試験により、材料の特性の変化が確認された場合、実際に構造物を作成する際に必用となる諸機械特性を把握する必要があると考えられる。

試験は通常の金属材料に適応されるものと同様に、引張試験、曲げ試験、せん断試験、疲労試験、高温材料試験、破壊靱性試験、衝撃試験、高速変形試験を実施し、焼結体の基本特性の解析を行うのが適当である⁽¹⁰⁾。

9. 粉体の作成

今回、我々は微小重力環境下での粉末冶金に必用とされる「混合技術」と「成形技術」についての検討を行った。

本実験が完了した後、実際に粉末冶金を用いた巨大構造物を建設する段階に到達した場合、資材の運搬コストの面から省みて、使用される粉末原料は月、その他小天体において採掘された金属原料を製粉し、資材として利用することが望ましい。

金属粉を生産する最も一般的な方法のひとつにボールミル法が存在する。これは粉砕すべき粗粉と多数の硬質な球体を封入した円筒を回転させることで、球体が円筒に沿ってある程度の高さまで来たときに自然落下し、その時発生する球と球の間の衝撃で粗粉を粉砕する方法である⁽³⁾。従って、ボールミル法を用いた粉砕は安定した重力環境下でなければ実施不可能、あるいは大幅な効率低下が考えられるため、微小重力環境下での製粉には次の図5で示されるような装置が必要となる。

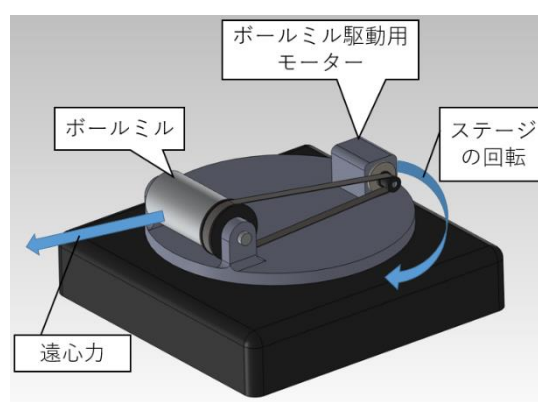


図5 微小重力環境下での製粉装置外略図

図 5 は、回転ステージ上にボールミルを設置し、回転時に発生する遠心力を見立て、製粉を行う装置の概略図である。

ステージ直径を 1000mm 程度と仮定すれば次の式(4)に示されるように、ステージを角速度 4.43[rad/s]で回転させることにより、地上とほぼ変わらない重力環境下での製粉が可能となる。

$$F = \frac{ml\omega^2}{2}$$

$$\frac{1}{2}m\omega^2 = F = mg = 9.81m$$

$$\omega = 4.43[\text{rad/s}] \cdots \cdots (4)$$

ここで

F:遠心力 (N), g:重力加速度 (m/s²) =9.81
m:質量(kg), l:直径(m), ω :角速度(rad/s)
である。

取り出し時の粉末の飛散を避けるため、製粉後、ボールミル内部に少量の流体を加え、ボールミルの取り出し口付近には、細かい網目状のフィルターのようなものを設けることで、球体の進行を抑え、製粉した粉末だけを飛散することなく取り出すことが可能であると考えられる。尚、流体に関しては少量であるので、焼結工程により蒸発し、無くなるものと考えられる。

10. 将来の展望

人類が宇宙進出を進めるにあたって、宇宙機・拠点などの建造を地球外で行う手法の確立は重要な課題であり、現在多くの機関が解決に取り組んでいる。代表的なものでは、欧州宇宙機構 (ESA) が推進している月面のレゴリスを用いた 3D プリンタによる月面基地の計画⁽¹¹⁾がその一例にあげられる。3D プリンタは樹脂や粉末などを溶か

して積層させ、立体の造形物を作ることができる特性から、少数の特殊形状の部品を試作するのに適している反面、単一部品の大量生産には向いていないという欠点も存在する。宇宙開発をより大規模なものに発展させるためには、安価に大量の部品を生産することが必要不可欠であり、粉末冶金が利用できれば、型を一つ作成すれば複雑な形状の部品を短時間に大量生産できる上に、粉末の調合次第で様々な性質を持つ材料を作成することが可能となる⁽¹⁰⁾。

よって、宇宙空間に原料となる岩石から金属を取り出せるような金属精錬施設、また粉末冶金を実施可能な工場を建設することができれば、構造物の巨大化が飛躍的に推進され、更に、使用される材料を地球外の小天体で生産し、マズドライバー等の簡易な施設で軌道上に輸送するシステムを構築することで、安価な部品の継続的な生産が可能となる (図 6) と予想される。また、粉末冶金の欠点として、使用する粉末の表面に酸化皮膜が形成するのを防ぐために、不活性ガス、或いは真空に近い環境下で作業しなくてはならず⁽³⁾、鑄造等の他の製造法と比べコストが割高になるというものがあるが、宇宙空間、或いは小天体表面にはすでにこの環境が準備されているため、微小重力環境下の粉末冶金工場にはランニングコストの節約が可能となるメリットも存在する。

本検証によって、人類の宇宙進出が大きく進展することを切に願いたい。

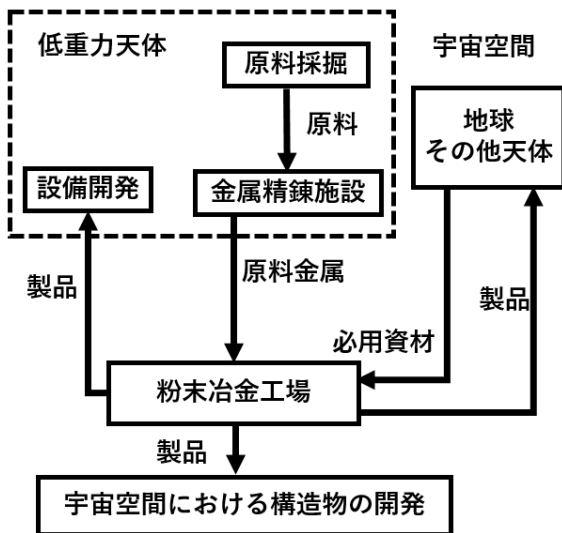


図 6 宇宙粉末冶金工場のシステム提案

11. 謝辞

衛星設計コンテストに出場するにあたって、様々なご示唆・ご協力を頂きました北村健太郎先生に深くお礼申し上げます。

12. 参考文献

(1) Stuart R. Taylor (1992). Solar system evolution. Cambridge Univ. Press.

(2) 第一次材料実験 (FMPT) テーマの選定 -研究テーマの概要一覧- 上林 明夫

http://www.jasma.info/journal/wp-content/uploads/sites/2/2015/01/JASMA1_2E2.pdf

(3) 榛葉久吉(1960) 『粉末冶金学』 コロナ社

(4) 宇宙の不思議 うそ、ほんと -宇宙でくらす/つくる (3) -

http://iss.jaxa.jp/iss_faq/go_space/step_3_3.htm

1

(5) 研究報告 混合速度および混合度におよぼす 粉体の流動性と - J-STAGE Journals

<https://www.jstage.jst.go.jp/article/sptj19>

[64/9/2/9_2_83/ pdf](#)

(6) 松山芳治・三谷裕康・鈴木寿(1972) 『総説 粉末冶金学』 日刊工業新聞社

(7) ねじの締め付けトルク (軸力との関係)

<http://d-engineer.com/kikaiyouso/toruq.html>

(8) 温度勾配炉パンフレット

http://iss.jaxa.jp/kiboexp/equipment/pdf/kibo_equipement/03_ghf.pdf

(9) 温度勾配炉パンフレット (研究者向け)

<http://iss.jaxa.jp/kiboexp/equipment/pdf/users/g hf.pdf>

(10) 日本材料学会 (編) (2005) 『改定 材料強度学』 日本材料学会

(11) Europe wants to build a VILLAGE on the moon: Esa space boss describes plans for a ‘crazy’ lunar settlement

<http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-3401462/Europe-wants-build-VILLAGE-moon-Esa-space-boss-describes-plans-crazy-lunar-settlement.html>

(12) 門間改三(1978) 『大学基礎機械材料 改訂版』 廣済堂

(13) 山口克彦・沖本邦郎(2000) 『材料加工プロセス』 共立出版

(14) 第 22 回衛星設計コンテスト 宇宙での粉体操作 鳥羽商船高等専門学校

http://www.satcon.jp/history/prize22/pdf/22_encourage2.pdf