

テーマ名：宇宙での粉体操作 ～「宇宙粉体工学」の提案～

鳥羽商船高等専門学校 5年 西川 晨也*、石島 拓哉*

杉浦 秀哉**

4年 吉川 波希*

指導教員 伊藤 友仁

(*：制御情報工学科、**：商船学科)

1. 緒言

数 100 年後の未来、人類は火星周辺まで生活圏を求めて進出していくと予想される。将来、人類が火星で生活する場合、産業を支えるレアメタルや貴金属は小惑星から採取・精錬して火星に供給することが最も効率的と考えられる。その際必要な技術は、現在地上で行われている、粉碎、分級分離、輸送などの粉体操作である。地球上での粉体操作に関しては、「粉体工学」という学術体系ができており、粉体操作に関わる装置類がこれに基づき設計・製作されている。粉体工学の応用範囲は、医薬、食品、建築分野など極めて幅広い。

地球上での粉体に関する物理現象のほとんどが重力の影響を受けていて、宇宙のような無重力環境下では、種々の粉体現象の予測は難しい。今回の目的は、粉体を無重力下で扱う場合を想定し、比較的現象の予測とコントロールすることが難しいと思われる項目について簡単な地上実験をすることである。今回は、無重力下での粉体輸送と粒子の分級等に着眼して実験的を行い、「宇宙粉体工学」の

必要性を確認し、未来の小惑星からの鉱物資源採取の予測を行った。

我々はこのテーマを取り組むにあたり、今後の人類の宇宙進出に必要な不可欠な工学の一つになると思われる「宇宙粉体工学」の確立することを提案する。

2. 宇宙の粉体工学の事前検討

2-1 粉体特性

粉体を大量に扱う場合、あたかも水のような流体と類似した物質であると錯覚しがちである。しかし、それらの大きな違いは、流体が連続体であるのに対し、粉体は固体粒子の集合体で、粒子自身とそれらの相互作用によって流体挙動が大きく変化する。従って、流体の密度や粘性のような特性値とは異なる方法で粉体を評価する必要がある。粉体の特性を表す最も簡単な方法の一つに安息角がある。図 1 (a)のように砂を入れた円筒容器をゆっくり回転させた場合、砂は図 1 (b)に至るまで容器と共に回転し、一定の角度を超えると砂が滑り落ちる。その時の角度が安息角である。

この安息角は砂の盛りやすさの指標として地球では重要視されている。しかし、無重力下ではこのような重力を利用した評価法は全く利用できなくなる。これは、重力が無くなると粉体の基本的評価ですら難しくなることを示す一例である。

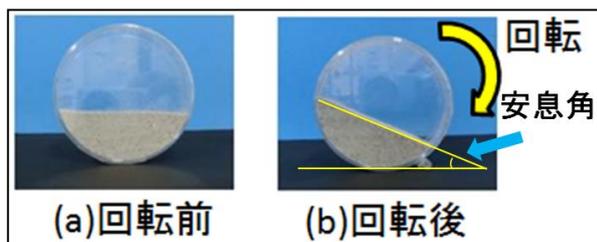


図1 傾斜法による安息角の測定

2-2 宇宙粉体工学の主な分野

我々が提案する「宇宙粉体工学」は、基本的には既存の粉体工学の分野と同じと考えられる。しかし、重力の影響を大きく受ける地上での粉体現象が、無重力下の宇宙ではどのように変化するか、ほとんどわかっていないと思われる。そこで、表1に「宇宙粉体工学」に必要な技術と宇宙での可能性について簡単にまとめて示した。表に示されるように、宇宙での粉体に関する技術分野は、未知の領域がいくつかある。そこで、特に未知の部分が大きいと判断した粒子の分級および粉体の輸送について簡単な実験を行うことで、実現の可能性を確認することとした。

表1 「宇宙粉体工学」に必要な技術分野と宇宙での可能性

技術分野	地上での代表的な方法	微小重力下で予想(期待)される方法	微小重力下での可能性
① 粉砕	鉱山で大規模な採掘。採掘したものは重力を利用してハンマーやボールを落とし粉砕。重力に依存しない方法もあり。	小惑星からの資源採掘。採掘した大きい物は重力の安定しているところで微粉砕。また少量の小さい物はレーザー粉砕も可。	? (未知) ⇒掘削方法(荒い粉砕)を今回提案
②分級(分離)	粒子を篩にかけ、重力により分級(分離)	地上の方法で、重力の代わりに遠心力を利用	? (未知) ⇒今回実験
③混合	攪拌や容器の回転等で粒子を混合。重力(密度)により重い粒子が沈降。	無重力下では、ほぼ粒子重量に依存せず、均一な混合が可能	○
④集塵	空気中の粒子をフィルターまたは静電気で捕集	空気中の粒子は地上同様に捕集。真空中では静電気が有効。	○
⑤輸送	ベルトやバケットコンベアに、重力により粒子を載せ大量に輸送。空気に分散した輸送。	地上のコンベア方式を宇宙用に改良。静電気や空気による輸送は可能?	? (未知) ⇒今回実験・アイデアを提案
:	:	:	:

3. 「宇宙粉体工学」に関する実験

宇宙での粉体挙動を考える為、できるだけ重力の影響を少なくする意味で、軽量の粒子を用いることを考えた。その結果、活性炭粒子（平均径約0.7mm）を実験で使用することとした。また、活性炭の大きさは、球内接径で評価した。

3-1 遠心力を利用した粒子の分級実験

地球上で粒子をふるいにかけて、ふるいの網目をくぐるもの（ふるい下）と網上に残るもの（ふるい上）に分かれる。つまり、ふるい下の小さい粒子とふるい上の大きい粒子に分級することができる、これを無重力の宇宙で行なうことを考えた。図2に示す。

重力の代わりに回転による遠心力を利用した宇宙用ふるいを製作した。図のふるいには、約1.5mm間隔のメッシュを設置し、回転機を中心から300mmの位置に設置し、240rpmで回転させ回転軸側から外へ遠心力を加えた。その結果、図3に示すように、ふるい上に比較的大きい粒子、ふるい下には小さい粒子が多くなっており、地上と同様のふるいの効果が得られた。

3-2 無重力を想定した粒子の輸送

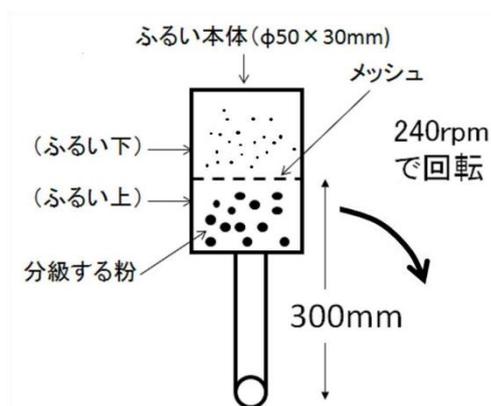


図2 遠心力による分級方法

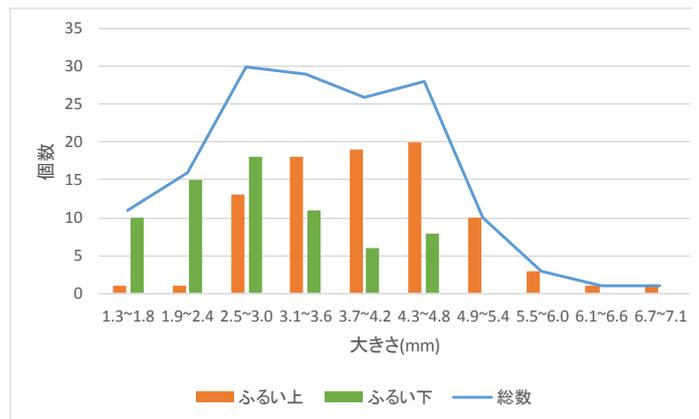


図3 宇宙用ふるいを使った活性炭粒子の分級結果

粉体に働く力は重力のみでなく、静電気力や水分による凝集力など、種々の微小な力が働いている。しかし、地球上では重力が他の力より桁違いに大きいため、一定の大きさ以上の粉体（石片も含む）を輸送する場合、ベルトやバケットに積み移動させる。しかし、重力が無い場合の粉体輸送の方法は確立されていないのが現状である。そこで、無重力下での大量の粉体を輸送する方法の可能性を検討するため、以下の実験を行った。

(1) 静電気を利用した粉体輸送の実験

図4に示すように、一片が約1cmの正方形のステンレス製の板電極（厚さ0.02mm）の8mm上方に直径1.2mmの針金電極を配置し電極間の直流電圧を5kVまで印加できるようにした。

鉍物の粉体を想定した活性炭粒子（最大径0.5mm程度）を10個ほど板電極上に置き、電極間に印加する電圧を徐々に高くしていった。その結果、印加電圧4~5kVで活性炭粒子は針金電極方向に徐々に吸引され飛散し始めた。

図5は粒子が飛び出すときの連続写真である。粒子が飛び出す理由は、板電極から負の電荷が粒子に注入され、負の電荷を帯びた粒

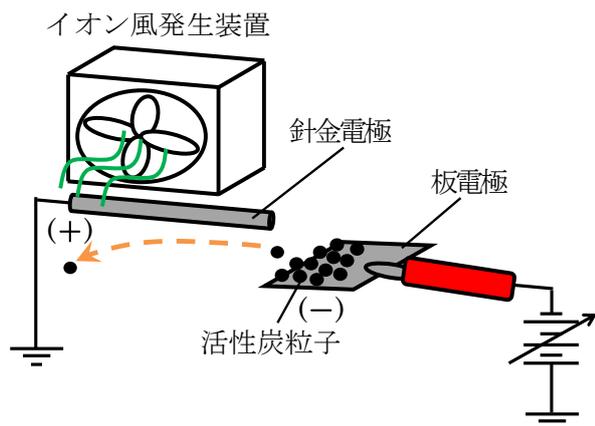


図4 粒子の静電輸送装置の概略図

子と板電極との反発、および粒子どうしの反発が起こり不規則な方向に飛散する傾向が認められる。しかし、負に帯電した活性炭粒子は正の針金電極にクーロン力で吸引され、写真のように板電極から浮き上がって針金電極方向に空中を移動すると考えられる。実験を繰り返した結果、このような粒子の移動が常に、容易に起こることがわかった。

電圧が比較的高くなると、粒子が数珠玉のように連なって移動することで、電極間を架橋し短絡してしまうこともあった。しかし、針金電極付近にイオン風を送り帯電した粒子を電氣的に中和することで、短絡が抑制される傾向が顕著であった。また、この実験では直流高圧電源を使用したのが、玩具に使用されるバンデグラフ発電機でも少量の粒子を移動させるには十分な効果が得られた。

この実験の結論として、簡単な電極構造の装置を用いて電力を殆ど要しない静電気力による粒子の輸送の可能性が確かめられた。また、実際に宇宙で粉体を大量輸送する場合は、イオン風による帯電した粒子の中和を組み合わせることで粉体の「静電輸送」の実用化が可能と考えられる。

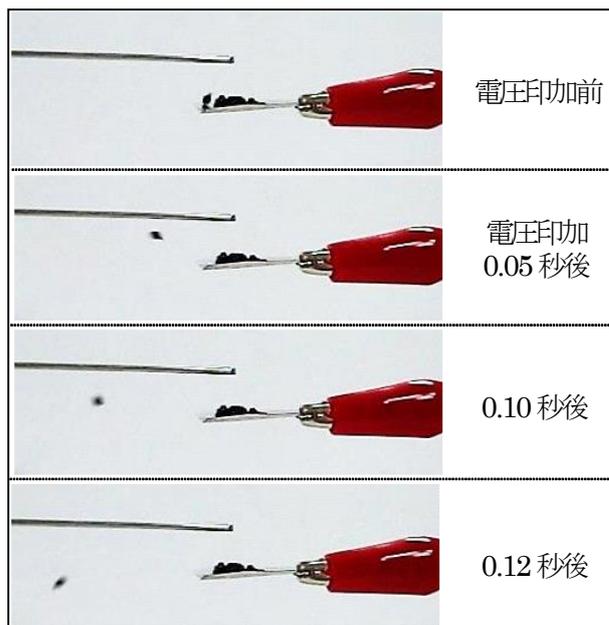


図5 電極間に 5kV 印加した時の活性炭粒子の挙動

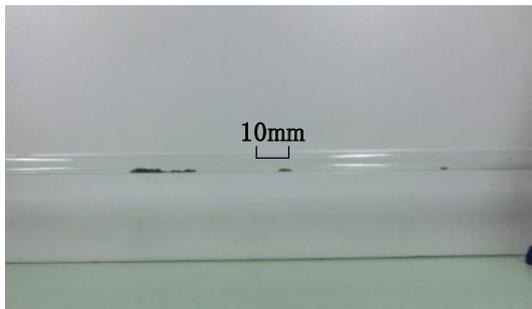
(2) ガスを利用した粉体輸送法の実験

図6は、活性炭粒子を置き、市販のA0機器用の洗浄ガスポンプを使用して流れを作り、ガスと一緒に粒子を輸送する実験の様子である。図6-a.は、ガスと一緒に移動している粒子を撮影したものである。一方、図6-b.はガスの流れを止めた後、パイプのそこに残った粒子が示されている。後の粒子径を測ったところ、比較的大きいものがパイプ底面に落ちて残っていた。地球では、重力が粒子に作用する為、このような結果になったものと考えられる。

しかし、宇宙では、粉体に重力は働かないので、粒子の大きさに関わらず、すべての粒子がガスと一緒にパイプ内を流れるものと思われる。即ち、ガスの流れを利用した粒子の輸送は、地球で行うよりも宇宙で行ったときのほうが効果的に行う事が可能となる。但し、この方法の欠点は宇宙で大量にガスを確保す



a. 気流と一緒に移動する粒子



b. 気流を止めた後にパイプ底面に残った粒子

図6 活性炭粒子のガス輸送実験

ることは難しく、少量の粒子を輸送するだけの、限られた方法である。

3-3 実験で得られた結論

無重力の宇宙空間あるいは宇宙船の中で、粒子の分級および粉体を輸送することを想定し、簡単な実験を行った。これまで確立されてきた既存の粉体技術を宇宙でそのまま転用することは殆ど不可能である。今回の実験のように、無重力であることを考慮した新しい発想が少なからず必要である。今回の実験で、過去にない「宇宙粉体工学」を確立する必要性を認識できた。

4. 将来の展望

宇宙での粉体の扱いについての研究を行うこと、即ち「宇宙粉体工学」を確立することは、今後人類が宇宙に生活の拠点を拡大していく上で必要不可欠な技術開発の一つである。そこでわれわれは次のような遠い未来の一場面を想像してみた。

(1) 掘削輸送船による小惑星資源の採取

数100年後の未来、人類は地球と月は勿論のこと火星への移民を開始し、一気にその生活圏を広げようとしている。今後、生活圏が広がると、レアメタルや貴金属は欠かせない物となる。近年アステロイドベルトのM型小惑星にはレアメタルを大量に含むものが無限に存在すると言われている²⁾。そこで我々は小惑星鉱山からの採取を提案する。図7は、小惑星鉱山からの採取の手順の流れを表した想像図である。掘削輸送船はM型小惑星を探し(図7.A)、アンカーを打ち込み(図7.B)採掘を行う(図7.C)。採掘が終了したら離脱して(図7.D)火星に向かう。図7.Bで掘削輸送船の先からノズルが伸び、その先端から、図8に示す掘削及び粒子輸送装置が小惑星を削り始める。このような粗い粉碎機と輸送方法を組み合わせた掘削と鉱物の輸送装置を提案する。鉱物輸送部はスクリーコンベアを応用したもので、この方法を用いれば、掘削と輸送を一度に行う事が出来るのではないかと考えた。

物体の輸送方法に関し、大量の輸送を行う場合はスクリーを用いた方法が適していると考えられる。

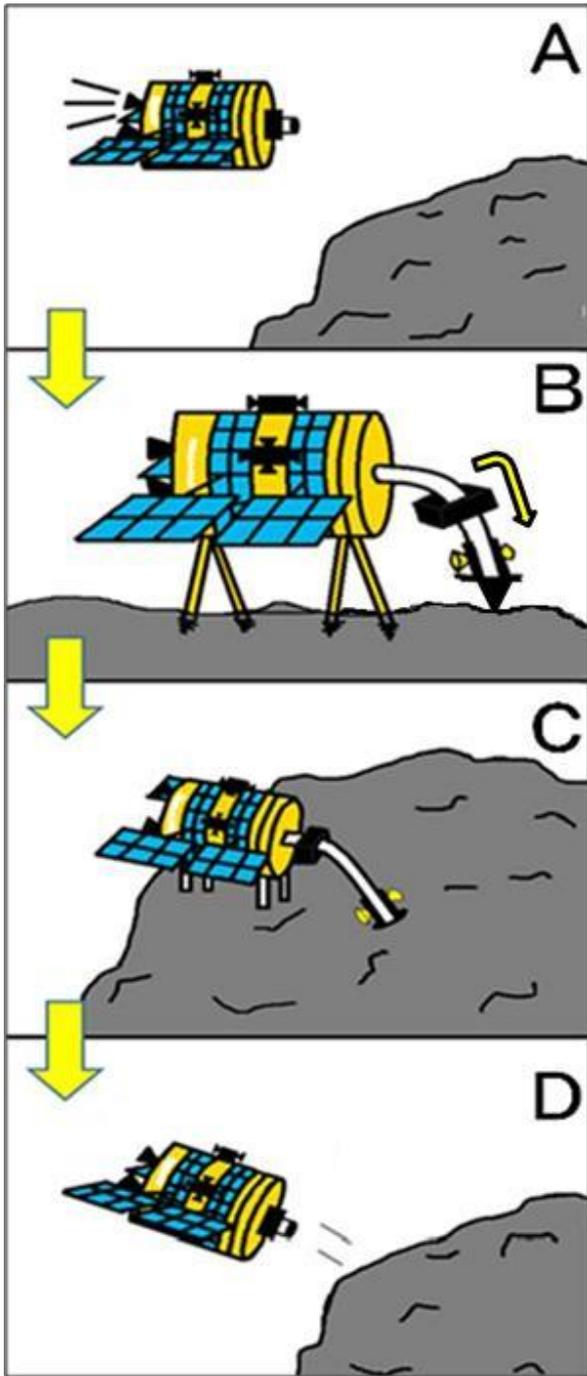


図7 掘削輸送船による小惑星鉱山の採掘

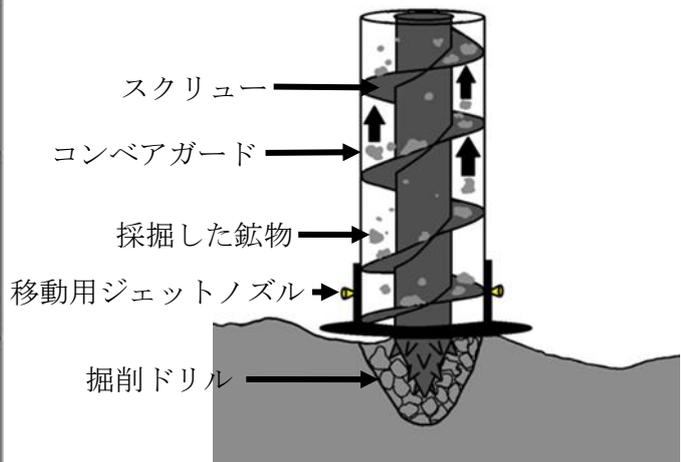


図8 掘削及び粒子輸送装置の概略

(2)火星でのレアメタル製造

この頃には、火星にレアメタルの製錬工場を建設して商用生産を行い、火星、地球および月へ供給する。図9は、数100年後に小惑星からレアメタルを製造する一連の流れを表した想像図である。掘削輸送船でM型小惑星から採掘採取した原料となる粉体を火星の衛星フォボスの倉庫に一時保管、その後カプセルに入れ火星大気に突入させ、最後はパラシュートで落下させて回収する。精錬工場で再粉碎および製錬してレアメタルの生産を行う。特にこの一連のプロセスで利用したい技術は、掘削輸送船がフォボスの倉庫にドッキングして鉱物原料粉体を静電輸送することである。倉庫の中に帯電した粉体が大量に入るので、内部の粒子は帯電により凝縮、または火花放電することが懸念される。そこで図にあるようなイオン風を内部に送って粉体の電荷を中和し、安全に貯蔵する。なお、製錬工場を宇宙空間やフォボス上でなく火星に建設する理由としては、レアメタルの製錬工程で最終粉碎は地上同様の重力下が有効であること、

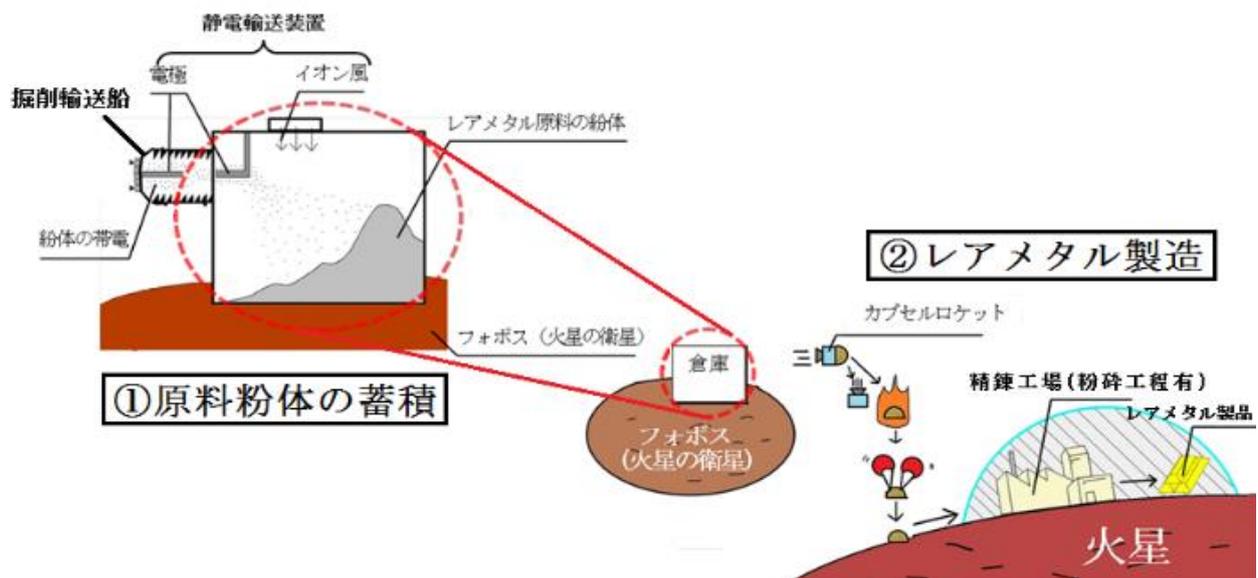


図9 M型小惑星からの粉砕物を火星衛星工場へ集約し、火星の精錬工場でレアメタルを製造する想像図

及び強酸等の危険な液体を使用するため、微小な重力環境では安全上の問題を解消できないと判断したためである。そこで地球の1/3の重力がある火星に工場を建設することを考えた。

5. 結言

今回、我々は今後の人類の宇宙進出に必要な不可欠な工学の一つである「宇宙粉体工学」を確立することを提案した。まず、粉体は無重力下で扱う場合を想定し、比較的現象の予測とコントロールすることが難しいと思われる項目について簡単な地上実験を行った。今回は、無重力下での粒子の分級および粉体の輸送方法に着目して実験的を行い「宇宙粉体工学」の必要性を確認した。また、遠い未来には人類が火星付近まで生活圏を拡大し、小惑星からの鉱物資源採取をしている状況を想像した。小惑星鉱山へ鉱物を採取しに行く掘

削輸送船を提案し実用規模での掘削方法を粒子の輸送方法を示した。

本提案がきっかけとなり、人類が深宇宙や太陽系外へ進出していくことを期待する。

参考文献

- 1) 山口英一監修「トコトンやさしい非鉄金属の本」日刊工業新聞社、2010年
- 2) リチャード・ノートン「隕石コレクター」築地書館、2007年
- 3) 水谷仁「ニュートン別冊 これからの最先端技術に欠かせない レアメタルレアアース」ニュートンプレス、2011年
- 4) 内藤牧男・牧野尚夫編著「初歩から学ぶ粉体技術」2011年
- 5) 三輪茂雄著「粉体工学通論」日刊工業、1981年