

18. 真空条件下における レゴリスシミュラントと金属材料の摺動接触

明石工業高等専門学校 ○松本 和彦
明石工業高等専門学校 江口 忠臣

1. 背景

近年、宇宙開発が注目されている。2010年に帰還した小惑星探査機「はやぶさ」や、2013年に打ち上げが成功した固体燃料ロケット「イプシロン」など、人類の宇宙進出が進んでいる。そして、月探査計画（SELENE計画）も進行中である。これは、月周回衛星「かぐや」による月面の地形、組成そして重力場などを計測するもので、将来の月資源利用のための基礎データを収集した。さらに、SELENE-2の計画も進められており、これは月に着陸しその内部を詳しく調査するものである。

月を目指す動機のひとつに月資源利用がある。これは、月にある物資や環境を利用して人類の活動に役立てようとするものであり、月の資源利用には以下の2つの意味がある¹⁾。1つは、月で採取された資源を地球に輸送して利用するというものである。地球と月の往復の輸送コストを上回る価値のある物資が月には存在する。

もう1つは、月で採取された資源を月面上もしくは宇宙で利用するというものである。これは、近年の人類の宇宙進出によって新たに生み出された価値である。地球外に進出する際に必要となる物資や消耗品などの輸送にはコストがかかる。したがって、地球からの輸送にだけ依存しながら活動領域を拡大するのは得策ではない。現地で生産、製造が可能になれば活動の自由度が大きく広がる。ゆえに、月に実際に存在しているもので利用可能な物質が新たな資源としての意味合いを持つのである。

より経済的に月資源を利用するためには、以下の3点を考慮に入れなくてはならない。

- ・材料の入手性（存在量と収集のしやすさ）
- ・加工の技術的難易度
- ・生成物の重要性（有人活動に向けての必要性）

過去のSELENE計画やアポロ計画などによって月面に存在する物質に関してある程度の情報は得られている。比較的容易に月の資源から加工抽出できることが明らかになっており、重要度の高い目的物質はH₂O、O₂、Fe、Ti、Siである¹⁾。

これらの物質を製造するための技術を確立するためには、1) 月面において資源材料となる物質を検出するためのセンシング技術（見つける技術）、2) 検出された資源を掘削、運搬するハンドリング技術（調達する技術）、3) 材料から目的物質を製造するプロセッシング技術（製造する技術）が求められる。

月で人間が活動を行うためには、新たに月環境に適応したシステムを構築しなければならない。表-1に月と地球の環境の相違を示す。重力、大気、日照、温度などの環境条件が異なる。施工技術の分野においては、これらの環境を考慮したハンドリング技術、すなわち採取、掘削、運搬の技術開発が行われなければならない。

表-1 月と地球の環境の相違

	月	地球
重力	1/6G	1G
大気	高真空	21%O ₂ , 79%N ₂
1日の長さ	23.53日	1日
平均温度	107°C, -153°C	15°C
極地温度	-230°C	-20°C

2. 目的

本研究では、月の資源を調達する際に行われる掘削、運搬作業に伴う作業部の摺動場面における土砂との摩耗の問題を取り扱う。地球上では工学的に培われた経験則が通用するが、月面環境、とくに高真空雰囲気であること、月土壌がレゴリスと呼ばれる特殊な土砂であることが、金属と土砂との接触にどのような影響を及ぼすかが十分に検証されておらず解明すべき点が多い。

本研究では、月土壌であるレゴリスを人工的に地球上の鉱物で再現した月面模擬土（レゴリスシミュラント）と金属材料を真空中で摺動接触させる実験を行った。これによって、月面での摺動接触特性を見出し、ハンドリング技術開発のための基礎データを得ることが目的である。

3. 摺動接触実験方法

3.1 使用材料

(1) レゴリス及びレゴリスシミュラント

レゴリスとは月の表層面に堆積している土砂で、粒径の中央値が $70\mu\text{m}$ 、最大値が 2mm 程度の粒の集合体である。その組成はアポロ 11 号などが持ち帰った試料から明らかにされている。その成分は表-2 に示す通りである。地球上の鉱物に比べ、酸化鉄、酸化カルシウム、酸化マグネシウムそして酸化チタンが多く存在する²⁾。

レゴリスシミュラント（月面模擬土）とは、月面の土壌であるレゴリスの組成をもとにして地球上の鉱物資源で人工的に作った模擬土のことである。100 倍に拡大したレゴリスシミュラントを図-1 に示す。その成分は、レゴリスには含まれない酸化鉄Ⅲ (Fe_2O_3) を 5%弱含んでいる（表-2）。

レゴリス及びレゴリスシミュラント共に、地球の砂と比較して非常に細かく粒も尖っているため、摺動接触に与える影響も大きいと考えられる。

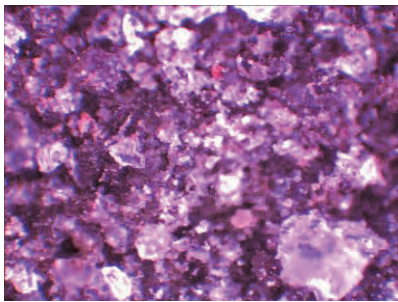


図-1 レゴリスシミュラント

表-2 レゴリス及びシミュラントの組成

成分	Apollo 11	シミュラント
SiO_2	42.20	49.14
TiO_2	7.80	1.91
Al_2O_3	13.60	16.23
Cr_2O_3	0.30	0.00
FeO	15.30	7.50
Fe_2O_3	—	4.77
MnO	0.20	0.19
MgO	7.80	3.84
CaO	11.90	9.13
Na_2O	0.47	2.75
K_2O	0.16	1.01
P_2O_5	0.05	0.44
S	0.12	0.00
H_2O	0.00	0.43
Total	99.90	98.14

(2) 金属試料

建設機械の作業部に用いられる金属試料は、地球上では通常タングステンカーバイトなどの超硬金属が用いられている。しかし、初期段階における月面での掘削においては、岩の削岩ではなくレゴリス収集のための掘削が想定されるため、表面の耐摩耗性が保たれるのであれば、超硬金属である必要はないと考えられる。実際に行われている月面掘削関連の既往研究^{3) 4) 5)}において、アルミニウムとステンレスが用いられているため、本研究においてもこれを用いることとした。

① アルミニウム (A1050)

アルミニウムは、日常使う身近な製品にも多く使われている。1つの特徴は比重の軽さである。アルミニウムの使用によって、他の金属を使うよりも重量を抑えることが出来る。同時に十分な強度も得ることが可能である。また、耐食性にも優れ、低温特性も備えている。液体窒素 (-196°C) や液体酸素 (-183°C) 中でも脆性破壊を起こさず靱性が大きい。そのため、夜の平均気温が -150°C にもなる月面上での使用にも耐えうることが期待できる。

本研究では、アルミニウムを 99.5%以上含む、純度と強度とを適度に備えた A1050 のアルミニウムを用いた。用いた試料のビッカース硬度は $H_V=25.6$ である。

② ステンレス (SUS430)

ステンレスは、強度や耐摩耗性に優れており、地球上の建設機械のバケットの部分にもよく使われる材料である。

また、掘削の前段階でセンシングを行う必要があるが、探査の段階では各種の鉱物や揮発性物質を観測するため、観測対象となるアルミニウムやチタン、鉄などを含む材料の使用ができない場合がある。このような場合、アルミニウム以外の金属の使用を検討する場合、ステンレス使用の必要性が出てくる。ただし、ステンレスは鉄 (Fe) をベースにクロム (Cr) やニッケル (Ni) を加えて作られた合金であることに注意を要する。

本研究では、ステンレスとして一般的な SUS304 ではなく、これよりも安価だが耐食性が劣る SUS430 を使用した。月面環境では、酸素がないため耐食性はあまり意味を成さない可能性がある。また、SUS430 は熱膨張率が小さいという利点があるので、温度変化の大きい月面では有利であると考えられる。さらに、センシング技術のことも含めると、なるべく少ない元素からなる材料を用いることが重要であるため、ニッケルを含まない SUS430 は適しているといえる。用いた試料のビッカース硬度は $H_V=104.4$ である。

(3) 標準砂

レゴリスシミュラントとの比較のために標準砂も実験試料として用いた。

本研究では、JIS A 1214 に規定されている砂置換法による土の密度試験に用いる砂、豊浦標準砂を使用した。主な化学物質の割合を示すと、 SiO_2 : 92.6%, Al_2O_3 : 3.7%, Fe_2O_3 : 0.7%, CaO : 0.5%, MgO : 0.2% である。

3.2 試験機器

(1) 摺動装置

摺動接触とは、物体同士を滑らせることにより接触させ、摩耗発生を促すものである。本実験ではスライダークランク機構を用いて再現する。スライダークランク機構とは、図-2 に示すように、回転運動を直線運動に変える機構である。モーターによって右の円盤が回転し、単棒で接続された金属試料が左右に移動する仕組みになっている。

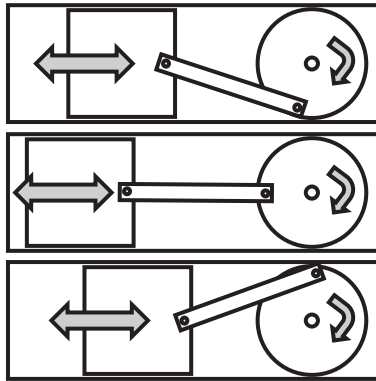


図-2 スライダークランク機構

(2) 真空チャンバ

月面環境の再現の上で重要なのが、真空雰囲気である。この真空中での挙動を調べることが重要になるが、これを真空チャンバ(図-3)の中に再現する。摺動装置を真空チャンバ内に設置し、コンプレッサーによって空気抜きを行い、1/3600 気圧まで減圧する。以下、この状態を真空状態として試験を行った。

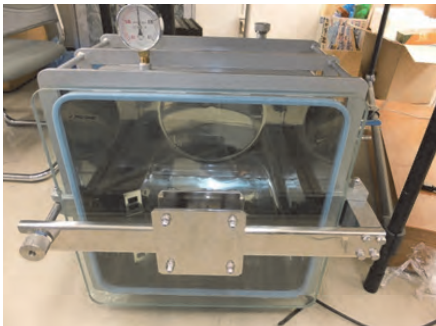


図-3 真空チャンバ

3.3 試験条件

試験は、雰囲気条件、金属試料、接触土砂の3種類を変更し、それぞれの組み合わせについて試験を行った。雰囲気条件は大気中及び真空中、金属試料はアルミニウム及びステンレス、接触土砂はレゴリスシミュラント及び標準砂である。

測定するデータは、金属試料の摺動前後の質量差とした。この質量の減少量をもとの金属試料の質量に対する百分率で表したものを摩耗量とした。質量を測定する電子天秤の感量は 10^{-4}g である。また、金属反射顕微鏡によって、金属試料の表面の様子も観察した。

摺動時間は、真空中で連続的に10分、20分、30分、40分、50分、60分、120分間摺動させる。これにより、質量測定の際に大気に触れる影響を除外し、各時間摺動接触した後の摩耗量を計測することができる。ただし、試験が終了し質量を測定する際には大気に触れることを避けられない。

4. 結果及び考察

本実験の真空中での試験結果を以下の図-4 及び図-5 に示す。

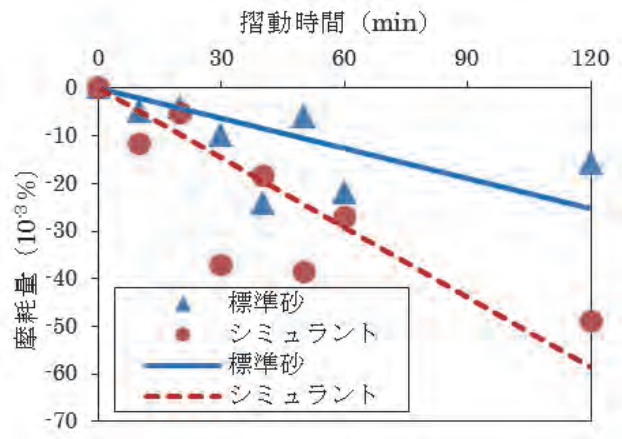


図-4 アルミニウムの結果

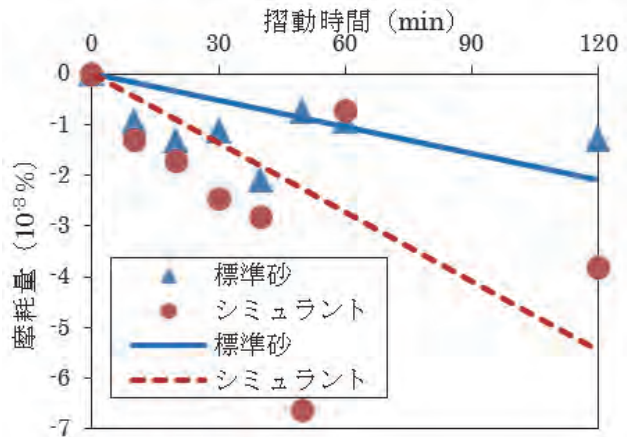


図-5 ステンレスの結果

横軸に摺動時間を、縦軸に摩耗量をとっており、プロット点1つに対して1つの供試体に対応する。この2つの結果はいずれも摩耗量がマイナスになっている。これはつまり、質量が見かけ上増加したことを示している。アルミニウムでは質量比 $48.8 \times 10^{-3}\%$ 、正味質量で $9.7 \times 10^{-3}g$ の増加、ステンレスでは質量比 $6.6 \times 10^{-3}\%$ 、正味質量で $2.0 \times 10^{-3}g$ の増加となっている。

土砂と金属を摺動させて摩耗現象を再現しているにも関わらず、見かけ上質量が増加している。これは、金属試料の表面に土砂が付着していると考えられることで説明できる。

図-6は雰囲気条件が真空中のアルミニウムの30分間摺動後の金属表面であり、図-7は同条件でのステンレスの40分間摺動後の金属表面である(倍率は共に100倍)。白くなっている部分が金属もとの表面であり、黒くなった部分が摩耗の生じた部分である。両金属ともに、この黒くなった部分にレゴリスシミュラントの付着が確認された。

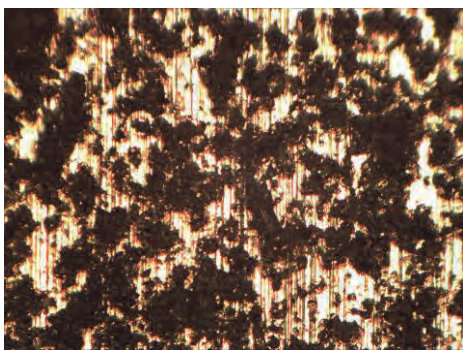


図-6 真空中アルミニウム 30分摺動後

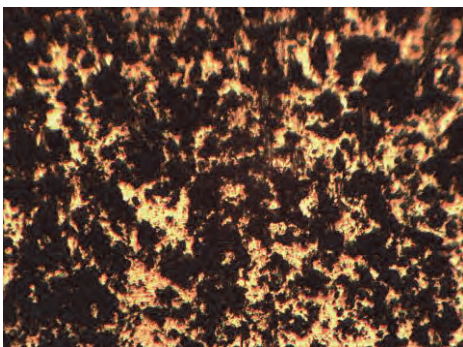


図-7 真空中ステンレス 40分摺動後

試験終了後、金属試料を摺動装置から取り外し、表面の土砂払拭を行っているが、この除去作業では取り除けない付着が発生しているといえる。

アルミニウムとステンレスを比較すると、アルミニウムの方が見かけ質量の増加量が多い。表面硬度は、ビッカース硬度でステンレスがアルミニウムの約4倍硬い。つまり、表面硬度が硬いほ

ど、質量の増加量は少なくなっている。また、アルミニウム及びステンレス共に、標準砂よりもレゴリスシミュラントの方が見かけ質量の増加が大きい。このことから、表面の硬さと粒の大きさや形状が摺動接触時の付着に影響する要因であり、表面が柔らかいほど、土砂の粒が小さいほど付着が発生しやすいと考えられる。

さらに、両金属ともに摺動時間が長くなれば、測定質量の予測が困難になっていく可能性がある。摺動接触によって金属試料表面で摩耗や付着が複雑に発生しているためと考えられ、摩耗量や付着量の計測はその質量によっては測定できないと考えられる。

本研究で行った摺動接触は、金属試料の自重のみで生じる圧力での接触である。この圧力は両金属とも100Pa以下で、摺動条件としてはかなり小さい圧力である。

5. 結論

レゴリスシミュラントと金属材料の真空中摺動場面の実験から、以下の結論を得た。

- ① 雰囲気条件が真空で、土砂がレゴリスシミュラントの条件で、かつ接触圧が小さい場合には金属に土砂が付着する可能性がある。
- ② 真空中であっても、表面硬度や土砂の形状が摺動接触に影響を及ぼす要因になりうる。
- ③ 摩耗量を質量で判定する場合、付着による見かけ質量の増加の影響があることに留意しなければならない。

本実験では、レゴリスシミュラントを用いたが、実際のレゴリスには含まれない Fe_2O_3 が含まれていることに留意する必要がある。

今後、摩耗を卓越させるために大きな接触圧力の条件下で摺動接触を行った場合、付着と摩耗の関係を検討しなければならない。

参考文献

- 1) 月資源利用研究会：月資源利用ワークショップ--技術の現状と可能性--，2006
- 2) H.Kanamori, K.Matsui, A.Miyahara, and S.Aoki : Development of New Lunar Soil Simulants in Japan,2006
- 3) 安田進, 小松敬治：D3 反力トルクを使用したレゴリス掘削機構の研究, 日本機械学会第18回スペース・エンジニアリング・コンファレンス講演論文集 pp.75-79, 2010
- 4) 矢田剛之, 大森隼人, 中村太郎：月面での地震計設置のための蠕動運動型掘削ロボットの開発, JSME Conference on Robotics and Mechatronics, 2008
- 5) 居相政史：リップによる月レゴリス掘削の効率化, 日本機械学会第19回スペース・エンジニアリング・コンファレンス講演論文集, 2010