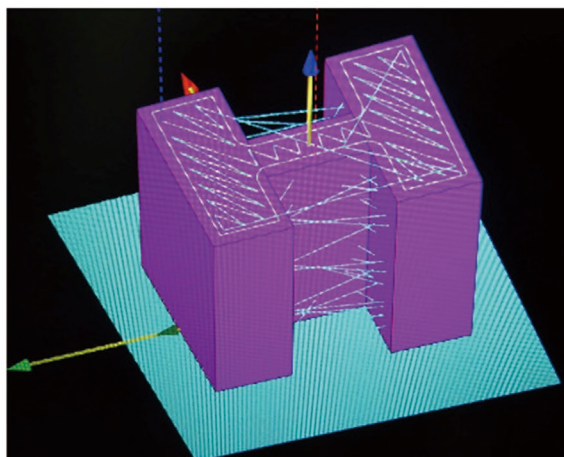




【表紙図】CAD/CAMデータ(左)とそれに対応する高地シミュラントLHS-1を用いた造形物(右)

## 月面基地用建材を レーザー3Dプリンターで

### ◆月の模擬砂にレーザーをあて続けて6年

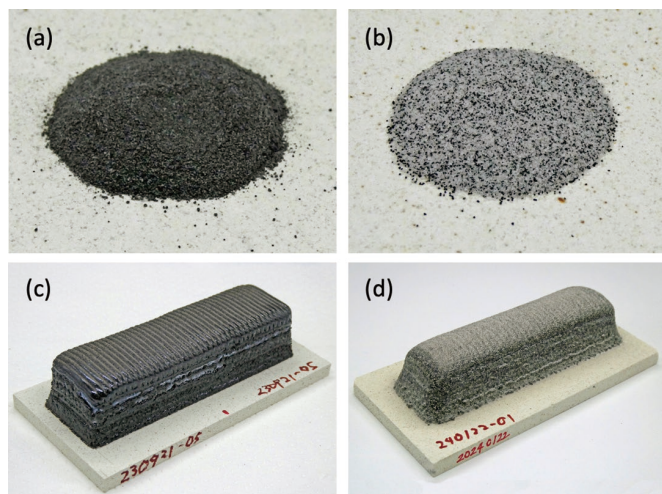
2018年に(株)大林組から“月の模擬砂”なるものの提供を受けた。最初はとにかくレーザーを砂に集光してどうなるかのお試しであった。レーザーで砂を焼くというよりは、溶かしてどうなるのか、溶けて固まった砂の形状をコントロールできるのか、というところからこの研究は始まった。溶けた砂はビーズ状に固まる。それらがくっついて層をなす。ボルトとナットで簡易のパウダーベッドを作って積み重ねると円柱状のブロックができた(レーザークロス No.391、2020年10月)。直径20mm、高さ18mm程度の円柱ができたものの、手作業でこれ以上の大きさを作るには無理があった。

次は、砂の供給を自動化して大きな造形物を作りたいところである。市販の3Dプリンターを使えばそれは可能であるが、1台数千万円の装置を買うわけにもい

レーザープロセス研究チーム 藤田雅之

かない。有償で装置を借りるにしても、砂を入れさせてくれる3Dプリンターなんてあるのか、と心配していたところ、(株)アスペクト(東京都多摩市)と滋賀県工業技術総合センター(栗東市)が快く対応してくれた。レーザーの出力や掃引速度などを最適化していき、最大40mm角程度の立方体を積層造形することができた(レーザークロス No.400、2022年4月)。アスペクトには6回、滋賀県工業技術総合センターには10回以上通って実験を進めた。

それなりの大きさになってくると、造形ができるできないの話ではなくなってきた。レーザーで焼き固めたブロックは月面基地用建材として使えるのか、ということが問われてきた。用途に応じた圧縮や曲げの力に耐えられるのか、に答えを出すべく強度試験を進めていった(レーザークロス No.410、2023年)。こま



【図1】2種類の月の模擬砂とそれを用いた造形物：  
(a), (c) FJS-1 (海)、(b), (d) LHS-1 (高地)

でくると、さらに話が進んでくる。今では、重力1/6かつ真空の月面環境でそもそも3Dプリンターは使えるのか、どう使うのか、ということを明らかにするように求められている。

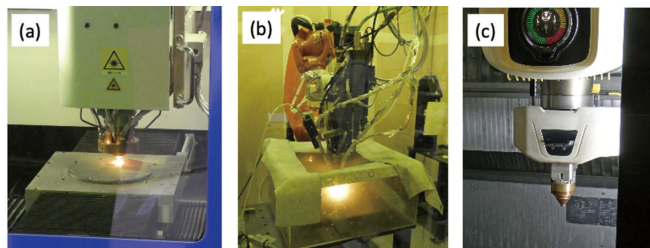
### ◆2種類の模擬砂(シミュラント)

月面環境を考慮すると同時に、月面の土質に対する対応も迫られている。これまで黒い月の模擬砂(FJS-1)を使ってきたが、月表面には白っぽいところと黒っぽいところがある。黒っぽいところは濃い色の玄武岩で覆われていて、月の海と呼ばれており“餅をつくウサギ”に見えと言われていているところである。一方で、白っぽいところは月の高地に対応するところで、斜長岩成分が多くLHS-1と呼ばれるシミュラントを購入することができる。人類が最初に月面基地を建設する予定の極域の土質はLHS-1に近いと言われている。図1に2種類の月の模擬砂とそれを用いた造形物を示す。図1 (a), (c)がFJS-1、(b), (d)がLHS-1の砂の見た目と造形物である。加熱して溶ける温度がFJS-1は約1200℃、LHS-1は約1350℃であり、LHS-1の方が若干多めの入熱を要する。

表紙図に、LHS-1を用いて積層したH型造形物のCAD/CAMデータと写真を示す。市販の3Dプリンター



【図2】これまで試してきたパウダーベッド：  
(a) ボルトとナット、(b) アスペクト社製RaFaEl II、(c) ステンレス製枠



【図3】これまで試してきたDEDヘッド：  
(a) Z軸ステージ、(b) ロボットアーム、(c) 多軸マシニングセンタの主軸に装着されている様子

では、CAD(Computer-Aided Design)データを入力すると複雑形状でも描引の順番や方向などが自動で制御される(CAM: Computer-Aided Manufacturing)ようになっている。

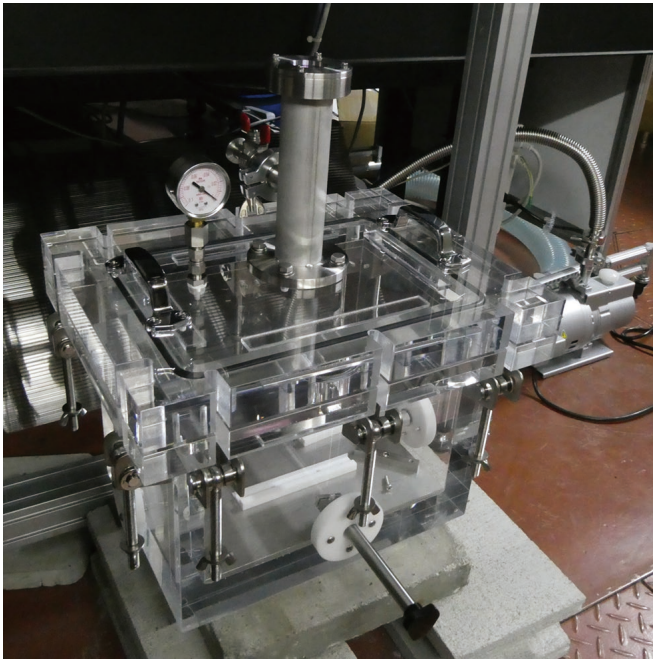
### ◆2種類のレーザー加熱3Dプリンター

レーザーで粉体を加熱して積層造形する3Dプリンターとしては、PBF(Powder Bed Fusion: 粉末床溶融結合)法とDED(Directed Energy Deposition: 指向性エネルギー堆積)法の2種類がある。月の模擬砂を材料として積層造形するにはどちらが適しているのか、この6年間、両者を比較してきた。最初は手作業のPBF法でスタートして、アスペクト社のPBF造形装置(RaFaEl II 150-HT)、滋賀県工業技術総合センターのDED造形装置(LAMDA200)を使って積層実験を進めてきた。

一般的な市販装置に限って言えば、PBF法はレーザー集光径が数100 $\mu$ mであり、精密造形や中空構造の造形に適している。一方で、DED法はレーザー集光径が約4mmで大型の造形に適している。だがこれは、あくまで地上で使われている市販装置の話である。

### ◆月面で使うにはそれぞれ一長一短

月面でレーザー加熱3Dプリンターを使うとしたら、原理的にどちらの手法が適しているであろうか？ 砂の供給という点では、ノズルを通してガスで搬送するDED法よりも機械的に敷き均すPBF法が、搬送ガス不要で砂詰まりが起きないという点では適している。パウダーベッドは型枠さえ用意できれば何とかなる。後は砂を敷き均す治具とパウダーベッドを上下移動させる機構が必要になるが、機械的な構造だけで設計しやすい。図2に、これまで試してきたパウダーベッドと砂の敷き均しの様子を示す。図2 (a) はボルトとナットと料理用のヘラ、(b) はアスペ



【図4】造形試験に用いた真空容器

クト社製RaFaEl II のパウダーベッドとローラー、(c) はAeroEdge社でステンレス製の枠と金属板のヘラを使った時の写真である。

一方で、DED法にはPBF法にない特徴がある。DED装置の集光部と粉体吐出部は一体となってユニット化されている(以降、これをDEDヘッドと呼ぶ)。このDEDヘッドは工具の一種とみなしてロボットアームやマシニングセンタに取り付けることができる。図3に、これまで試してきたDEDヘッドを示す。図3 (a) はZ軸ステージ(滋賀県工業技術総合センター)、(b) はロボットアーム(神奈川県産業技術総合研究所)、(c) は多軸マシニングセンタの主軸(AeroEdge社)に装着されている状態の写真である。(b)と(c)は多軸で動かせるので、斜面への造形や壁面の隙間埋め、造形物同士の接合(レーザークロス No.410、2023年)などPBF法ではできない作業が可能となる。搬送ガスを用いずに真空中で粉体を吐出させる機構さえ実現できれば月面での用途が広がると期待される。

#### ◆真空中でやってみた

月面で使えることを実証するには、重力1/6、真空という2つの条件下で造形試験を行わなければならない。地上で重力1/6の環境を実現するのは大変であるが、真空ならば比較的容易に準備できる。図4に示す真空容器を作製して、PBF法での造形試験を試みた。アクリルでできた容器上部のステンレス製ポートはレーザーの導入口となっており、その上にはガルバノスキャナーが設置してある。



【図5】真空中で造形したサンプル(3ビード × 3層)

また、市販3Dプリンターではレーザー集光径が数100  $\mu\text{m}$ と固定されていたが、ここでは敢えてビームを直径約7mmに拡大して照射することにした。それに合わせてパウダーベッドの積層厚を大きめの2mmに設定した。レーザーパワー(最大300W)に余裕があるため、造形速度の向上をねらった。パウダーベッドの昇降機構は設けておらず、積層厚は厚さ1mmのステンレス板を階段状に重ねて調整した。このステンレス板には大きさが異なる方形の開口を設けており、その内部に積層を行った。敷き均しは真空容器の左右からOリングを介して挿入した棒2本にヘラを付けて行ったため、積層は最大3層となる。

図5に7mm間隔で3本のビード(長さ20mm)を引いて、3層重ねたサンプルを示す。図中、手前から奥に向かって順番にビードを並べ、厚さ2mmの砂を敷きながら3回繰り返して積層を行った結果である。真空中では冷却時間が長いと予測され、表面状態は明らかに大気中のそれとは異なる。最後に引いたビードは表面が虹色に発色している。今後、定量的な温度変化を測定する予定である。

#### ◆今後は

真空容器の内部に改良を加えてパウダーベッドを手動で上下させる機構を設計中である。真空中での40mm角程度の立方体の積層造形を目標としている。また、断面観察により大気中と真空中での造形物の比較を行いたいと考えている。その次は、1/6重力下での実験ではあるが、航空機を使った簡易無重力実験についての検討を進める予定である(はっきり言って、ジェットコースターは苦手なのだが・・・)。

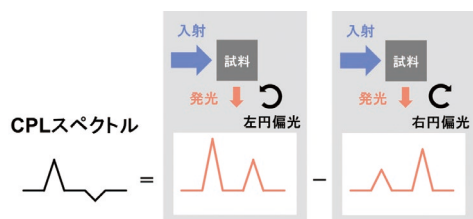
# アクチノイド錯体の円偏光ルミネッセンスの計測に向けて

レーザー計測研究チーム 松田晶平  
日本原子力研究開発機構 横山啓一

## ■円偏光ルミネッセンスとは

円偏光ルミネッセンス(Circularly Polarized Luminescence: CPL)は、キラルな分子の発光における左右の円偏光の強度差( $I_{\text{CPL}} = \Delta I = I_{\text{Left}} - I_{\text{Right}}$ )である(図1)。反対の吸収に対応するものが円二色性(Circular Dichroism: CD)である。CDを測定するには光が試料を透過しなければならないが、CPLは透過する必要がないので表面分析に応用できる。微弱な信号であるものの、発光特性が分子ごとに異なるため同定手段となり得る。

現在ではランタノイドとキラル配位子との錯体などを対象にバイ



【図1】CPLスペクトルの概念

オマーカー、三次元ディスプレイ、セキュリティインクなどへの応用に向けた研究が盛んに行われており、高いCPL発光強度を示す分子の設計や発光機構の開発が競争的な状況にある。

錯体の中心金属にランタノイドを用いる場合、内殻電子による可視域の電子構造を利用して発光させるものが多い。アクチノイドも似たような電子構造を持つ。そのため、アクチノイドを用いた場合でも同様に強いCPLを示すことが期待できる。実際にCPLの最初の報告はウランについてであり、酢酸ウラニル(VI)ナトリウムの結晶で観測された<sup>[1]</sup>。しかし、溶液中のアクチノイド錯体に関する報告はほとんどなく、これまでにウランとキュリウムの二元素に留まっている<sup>[2, 3]</sup>。

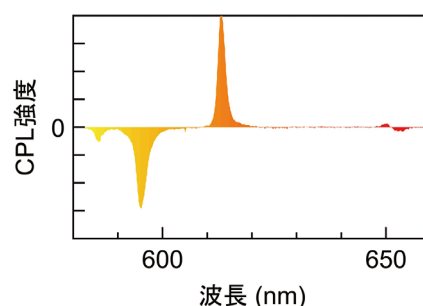
## ■測定装置

CPL測定装置は左右の円偏光の信号を取得する方式の違いから三代に大別できる。一般に装置は各研究グループで構築される場合が多いが、現在では市販品もある。しかし、高価であり手軽には導入できない。ま

た、アクチノイドは放射性であるため、実験を行う際に管理区域での取り扱いとなる。このようなエリアでは様々な制約により分光計測にとって過酷環境となる。そのため、光学素子の損傷などの懸念が通常に比べ高い。そこで、安価で可搬型かつメンテナンスの容易な測定装置が必要となる。これらの条件を満たすため、現在主流となっている光弾性変調器を用いる方式ではなく、古典的な光学レイアウトをもとに効率的に信号を得る工夫を施した測定システムを構築している。

## ■開発状況

試作段階の装置で測定したCPL標準物質(Eu-[(+)-facam]<sub>3</sub>)のスペクトルを図2に示す。現時点でも概形(波長特性)



は参照スペクトルと良好に一致している。そのため、アクチノイド錯体からのCPLを計測するために必要な感度を達成することが今後の課題である。これを克服し、アクチノイドの機能の創出のために新規物性を開拓したい。

【図2】開発中の装置を用いて測定した標準物質のCPLスペクトル。色は波長に対応

## ■退職のご挨拶

誠に恐縮ですが、執筆者の松田は2024年3月31日をもってレーザー技術総合研究所を退職いたします。皆様のこれまでのご支援に厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] B. Samoilov, *J. Exp. Theor. Phys.* **18**, 1030–1040 (1948).
- [2] D. Schnable et al., *J. Am. Chem. Soc.* **144**, 10718–10722 (2022).
- [3] G.-L. Law et al., *J. Am. Chem. Soc.* **134**, 15545–15549 (2012).