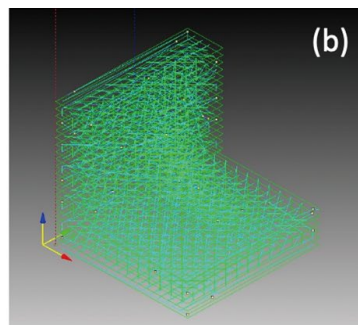
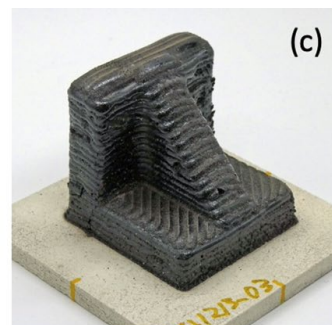


(a)



(b)



(c)

【表紙図】DED法によるアングル型造形物：

(a) CADデータ(単位はmm)、(b) CAMデータ、(c)造形物

レーザーを使って月面で 基地建設資材の調達を目指す

◆アポロ計画から半世紀を経てアルテミス計画へ

今夏、大阪では大阪・関西万博が開催され、アポロ17号が採取した「月の石」が展示されている。1970年に開催された大阪万博でもアポロ11号と12号が持ち帰った「月の石」が展示され、一目見ようと長蛇の列ができていた。今から55年前に人類は月へ行って帰ってきている。アポロ15号、16号、17号では、宇宙飛行士がローバー(4輪探査車)で月面を走り回っていた。

アポロ計画から半世紀以上経った今、アルテミス計画が進んでいる。直接の当事者ではないので詳細を説明する立場にはないが、火星への有人ミッションを将来的に見据えて、月面への有人離着陸および長期滞在を前提とした月探査を目的としており、月面基地を建設する計画がある。基地での長期滞在のためには、インフラ整備として居住棟は元より、離発着場や道路が必要となる。また、宇宙線や隕石からクルーを守るための施設も求められる。

◆月面で基地建設資材の調達を目指して

基地建設の資材を地球から輸送すると、運搬コストは約1億円/kgといわれており非現実的である。月面にあるものを使えば、それに越したことはない。月面はレゴリスと呼ばれる細かな砂で覆われている。この

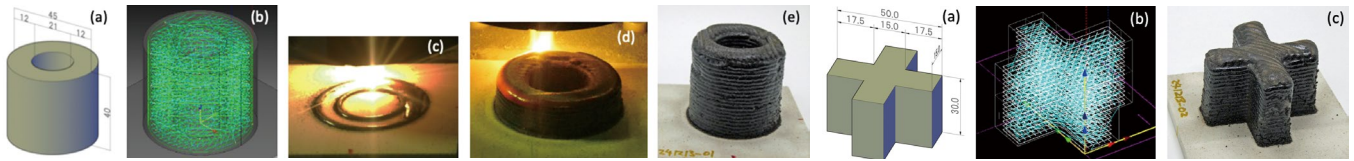
レーザープロセス研究チーム 藤田雅之

砂を使って資材を作れば課題解決となりそうだし、世界中で研究が進められているが、そのほとんどは僅かな水や結合材(バインダー)を砂に添加して成形している。我々は、水や結合材を使わずに砂をレーザーで加熱するだけで建材と呼べるものを作ることができるのか、という点にこだわって研究を進めてきた。

レーザー加熱だと3Dプリンターが使える。レーザー加熱3Dプリンターには、2種類の手法(粉末床溶融結合(PBF: Powder Bed Fusion)法と指向性エネルギー堆積(DED: Directed Energy Deposition)法)があり、2020年から両手法で積層実験を実施し、造形物の比較・評価を行ってきた(レーザークロス No.400、No.410、No.414)。

◆産業用3Dプリンター(DED法)の便利な機能を使ってみた

滋賀県工業技術総合センターが保有している金属積層造形装置(LAMDA200)をお借りしてDED法を用いた実験を行ってきた。直方体の積層造形の際には、積層方向を90°ずつ変えた4層分の始点と終点の座標を手入力して実験を行ってきたが、今回、CAD(Computer Aided Design)/CAM(Computer Aided Manufacturing)データに基づく自動造型機能を利用してチョット



【図1】円筒形状の積層造形；(a) CADデータ、(b) CAMデータ、(c) 外周と内周を掃引した後に内部を塗りつぶし、(d) 層毎に塗りつぶしの方向を45° ずつ変えて積層、(e) 造形物

複雑な形状の作製を試みた。本装置は産業用に開発された3Dプリンターなので便利な機能が搭載されている。

表紙図にCAD/CAMデータを用いたアングル形状の積層造形物を示す。それぞれ、(a) CADデータ(単位はmm)、(b) CAMデータ、(c)造形物である。形状を定義したCADファイルを作成し、USBメモリでLAMDA200に転送すると、ほぼ自動的にレーザーの掃引方向、掃引の順番等を装置が判断して造形が行われる。CAMデータの線はレーザーを掃引する線を示している。各層やパーツ毎に座標を入力する手間が省ける。

図1にCAD/CAMデータを用いた円筒形状の積層造形の様子を示す。図1(a)は外周と内周を掃引した後に内部を塗りつぶしていく様子、(b)は層毎に塗りつぶしの方向を45° ずつ変えて積層していく様子である。(a)の層と(b)の層では塗りつぶしの方向が90° 異なっている。

図2には十字形状の積層造形物を示す。層毎に十字形の領域を塗りつぶしていくわけだが、この場合も各層でレーザーの掃引方向を45° ずつ回転させて積層が進んでいく。また、最初の掃引で形状の輪郭をなぞった後に内部を塗りつぶして積層するなど産業用途で得られている知見を活かすことができる。これらの掃引を座標の手入力で行うことは、ほぼ不可能といえる。

◆造形物内部をX線CTで見てみた

DED法で作製した供試体はほぼガラス化しており、圧縮には強いが表面や内部に微細なクラックやひび割れが生じているため、曲げ強度は圧縮強度に比べて低

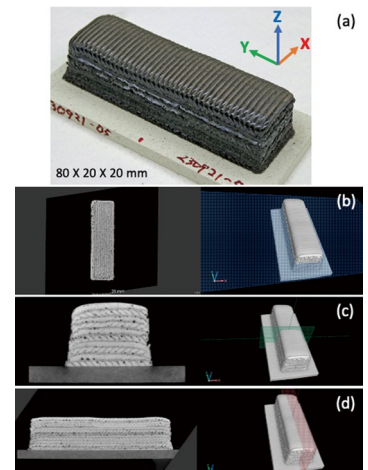
【図2】DED法による十字型造形物；

(a) CADデータ(単位はmm)、(b) CAMデータ、(c) 積層造形物

いという課題がある。これまで、外観や破断面から内部クラックの存在を推測していたが、今回、 μ X線CT装置を用いた内部観察を行った。図3(a)に μ X線CTで内部観察を行った曲げ強度試験用供試体を示す。観察には神奈川県立産業技術総合研究所のTXS-33000FDを用いた。図3に μ X線CTによる内部観察結果 (b) Z方向の異なるXY断面(Z軸は厚み方向)、(c) Y方向の異なるXZ断面、(d) X方向の異なるYZ断面を示す。各層毎の断面形状や空隙が観測されており、サンプルを破壊すること無く、内部のクラックや空隙の存在、積層の構造が確認できた。

◆今後は

レーザー加熱3Dプリンター(DED法)の自動造形機能を利用して、模擬砂を用いた様々な形状の積層造形を実証することができた。外観のアピールはできたものの、これからは内部に目を向けて質の向上を目指すことが求められる。 μ X線CTという強力なツールを駆使して、積層条件の最適化やポストプロセスの可能性を探っていきたい。



【図3】月の模擬砂を用いた造形物 (a) と μ X線CT像のXY断面(b)、XZ断面(c)、YZ断面(d)

CRDSによる惑星資源探査

大阪大学理学研究科 山中千博 村山純平

茨城大学理工学研究科 橋爪 光

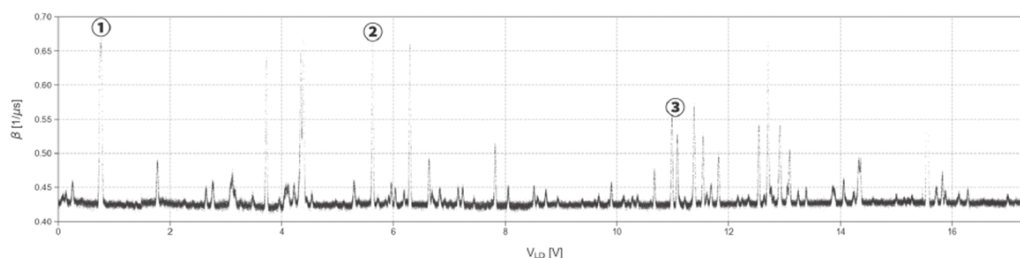
◆太陽系での生命必須元素の探索

太陽系内の水素、炭素、窒素、酸素などの揮発性物質の挙動の理解は、惑星科学の重要な課題の一つである。近年、リモートセンシングの結果から、月の極域クレーター内部の永久影領域には水やアンモニアを含めた揮発性物質が長期間にわたり保存されていることが明らかになってきた。 H_2O 、 NH_3 といった揮発性分子の同

位体測定は、「地球-月システムにおける生命必須元素の供給源」についての知見を与えるとともに、今後人類が月面に進出した際の利用可能な資源量を判断するうえでも重要である。

◆キャビティリングダウン分光 CRDS

我々は宇宙における揮発性分子の濃度/同位体比測定を可能とするため、CRDS(Cavity Ring Down



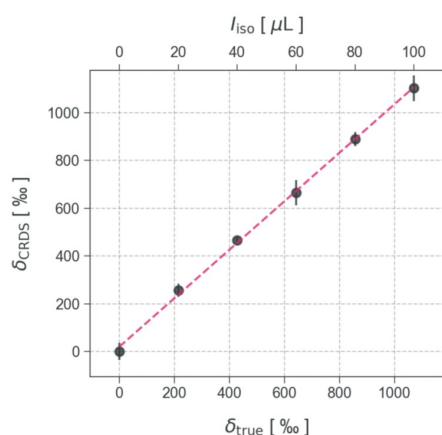
【図1】2 Paにおける $^{15}\text{NH}_3$ 標準ガスのCRDS吸収スペクトル。横軸はレーザー波長に対応し、範囲は1494.5 ～ 1495.5 nm。① ～ ③ は同位体分析のために選択した吸収線領域

Spectroscopy)を用いる観測法の研究を行ってきた。CRDS の最大の特徴は、高反射率ミラー($R=99.995\%$ 以上)を用いた共振器セルを用いることにより、km以上の光路長を実現し、吸光度において 10^{-10} に達する高い感度を有することである。このためCRDSは、微量ガスの定量および軽元素同位体比の測定用として地上では広く使われている。宇宙探査用としては軽量かつコンパクトな装置であることが必要で、現在、波長1.39 μm 、共振器長5 cmの小型CRDS装置(15 cm^3 のセル)を用いて1 ngレベルの水分子を検出を可能とするとともに水の同位体比分析も可能な高感度を実現できている。この小型CRDSは、JAXA(Japan Aerospace Exploration Agency) が進める月面極域探査計画LUPEX(Lunar Polar Exploration)において利用するべく、開発が進められている状況である^[1,2]。

◆ NH_3 の安定同位体測定

現在、我々は近赤外CRDSによる NH_3 の安定同位体($^{14}\text{NH}_3$ 、 $^{15}\text{NH}_3$ 、 NDH_2 、 NH_2D 、 ND_3)の測定を進めている。本稿ではこのうち、 $^{15}\text{NH}_3/^{14}\text{NH}_3$ 測定について紹介する。

2009年に月面クレーター観測センシング衛星(LCROSS)を用いた赤外線分光測定によりカベウスクレーターの土壤中に水の痕跡が検出されるとともに、水に対して6.03%のアンモニアが観測された^[3]。アンモニアは水に容易に溶解し、氷と同様な状況で存在するため、同時に測定できることが望ましい。一方、同位体吸収線において多数を占める $^{14}\text{NH}_3$ 吸収線の経験的パラメータは HITRAN



【図2】 $^{15}\text{NH}_3$ 同位体サンプルの検量線。横軸の $\delta^{15}\text{N}_{\text{true}}$ は、 $^{15}\text{NH}_3$ 標準ガスの導入量から計算された同位体比で、縦軸は $^{15}\text{NH}_3$ free の状態 $i_{\text{iso}} = 0$ の値を0として測定した同位体比。回帰直線は $R=0.9989$ となり、極めて良い精度で測定できていることがわかる

域の広い範囲では入手できない。重水素置換アンモニアについては、近赤外域の吸収波長データがHITRANデータベース上で全く欠落しており、本研究においては、同位体試料の作成および吸収線の同定という基本的なところから研究を進める必要があった。

$^{15}\text{NH}_3$ 測定装置の測定では、波長1.49 μm のDFBレーザー、共振器セルは直径35 mm、長さ50 cmで容積は480 cm^3 のものをを用い、温度は $30 \pm 1^\circ\text{C}$ にてPID制御した。また試料は、 $^{14}\text{NH}_3$ および $^{15}\text{NH}_3$ 標準ガスを混合してセルに導入した。この方法で、任意の異なる $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ 比のアンモニアガスを生成し、CRDS測定を通じて同位体比の検量線を引くこととした。図1に $^{15}\text{NH}_3$ 標準ガスのCRDS吸収スペクトルを示す。また得られた同位体比検量線を図2に示す。 δ 値とは、標準物質の同位体比を基準としたサンプル物質の同位体比の偏差であり、

$$\delta^{15}\text{N} = \left\{ \frac{\left(\frac{^{15}\text{N}}{^{14}\text{N}} \right)_{\text{sample}}}{\left(\frac{^{15}\text{N}}{^{14}\text{N}} \right)_{\text{standard}}} - 1 \right\} \times 1000$$

という千分率 で示される指標である。

◆太陽系のアンモニア/水の同位体分析を目指して

本研究は、CRDSを用いた NH_3 同位体測定における新たな成果といえる。1.5 μm 付近に窒素同位体測定に適した $^{15}\text{NH}_3$ 吸収線から、測定の際のばらつき等を検証し、最適な波長域を決定した。更に、任意の異なる $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ 比のアンモニアガスを導入するラインをデザインし、同位体比の検量線を引くことに成功した。得られた結果は、探査の要求分析精度を満たし、100%変動時における検量線のずれを約 1% に抑えられる結果を得た。現在は、重水素置換同位体について、測定を進めている。氷天体における $\text{NH}_2\text{D}/\text{NH}_3$ 観測は、太陽系における重水素濃縮の起源について制約を与える可能性があり、重要な課題となっている。軽量で高感度であることからCRDSは、太陽系外縁部における同位体調査の有効な手段であることは間違いないと思われる。

参考文献

- [1] J. Murayama, C. Yamanaka, K. Hashizume, S. Takigami, Sens. Actuators A-Phys., 338, 113481, 2022.
- [2] H. Abe, K. Hashiguchi, D. Lisak, S. Honda, T. Miyake, H. Shimizu, Sens. Actuators A-Phys., 320, 112559, 2021.
- [3] A. Colaprete, P. Schultz, J. Heldmann, D. Wooden, M. Shirley, K. Ennico, B. Hermalyn, W. Marshall, A. Ricco, R. C. Elphic, D. Goldstein, D. Summy, G. D. Bart, E. Asphaug, D. Korycansky, D. Landis, L. Sollitt, Science, 330, 463-468, 2010.

「レーザー技術の最先端～レーザー加工からインフラ診断まで～」

ILT2025 令和6年度研究成果報告会を開催

■ILTオープンセミナーを大阪で開催

2025年7月16日、マイドーム大阪(大阪市中央区)にて、レーザー総研オープンセミナー「レーザー技術の最先端～レーザー加工からインフラ診断まで～」ILT2025令和6年度研究成果報告会を開催いたしました。昨年と同様、オプトロニクス社主催の展示会、「光・レーザー関西2025」との同時開催となりました。

セミナーでは、月面拠点基地建設に向けたレーザー加熱3Dプリンター技術、光学素子のレーザー損傷耐性試験の自動化に必要なプラズマ発光計測による損傷検出手法、レーザーによる液中アブレーションや還元反応を用いたナノ粒子合成法の開発と応用、複数のレーザービームのポインティングを高精度でそろえる新手法の開発、鉄筋コンクリート構造物の塩害対策に向けたレーザー誘起ブレイクダウン分光法を用いた塩分検知技術の開発、海中の二酸化炭素やガス漏洩検知に向けたハイパースペクトル計測が可能なラマンライダーの開発など、レーザー応用に関する様々な技術に関して当研究所の最新の研究成果を報告いたしました。また、会場後方ではポスター展示も行いました。50名を超える御出席者があり、皆様方と活発な意見交換を行うことができました。関東地区の成果報告会は、本年11月、パシフィコ横浜で開催いたします。「インターオプト2025・光とレーザーの科学技術フェア」との同時開催を予定しています。

■「泰山賞」贈呈式

セミナーにおいて、第16回泰山賞の贈呈式を行いました。2025年は次の方々が受賞され、井澤靖和所長より賞状と記念品を贈呈いたしました。

【レーザー進歩賞】

光産業創成大学院大学 北川米喜氏、森 芳孝氏
受賞題目:「繰り返し方式レーザー核融合実験の先導的研究」



【写真1】泰山賞贈呈式(左から井澤靖和所長、北川米喜氏、森芳孝氏、藤田雅之副所長)

■特別講演「レーザー核融合エネルギーへの期待」

泰山賞を受賞された北川先生と森先生より「レーザー核融合エネルギーへの期待：繰り返し方式レーザー核融合実験とエネルギー源へのアプローチ」と題したご講演をいただきました。

北川先生らのグループは、安定した国産エネルギーの実現を目指して、企業との共同研究により、レーザー核融合の研究を2006年にスタートされました。先生らの研究の大きな特長は、繰り返しレーザー照射技術の開発を先導され、世界に先駆けてレーザー核融合中性子の連続発生実験に成功された点にあります。

講演は前後半に分け、これまでの研究の歩みと、これからの発電炉に向けてのレーザー核融合開発戦略をご紹介いただきました。前半の北川先生は繰り返し方式レーザー核融合実験についてご講演され、核融合燃料ターゲットの繰り返し投入技術や、ターゲット投入位置へのレーザー照射技術などの開発を経て、レーザー核融合中性子の10Hz連続発生実験に至る研究の経緯や対向照射による重水素ポリスチレン(CD)ターゲットの爆縮、高速点火のモデル実験などの成果を報告されました。

後半の森先生からは、投入したレーザーエネルギーより大きな核融合エネルギーの発生に成功した米国NIFによるレーザー核融合点火の実証を受け、新しいエネルギー源としての核融合への期待と機運が高まる中で、世界各国が独自に打ち出し始めている新しい研究開発戦略と官民連携の状況をご紹介いただきました。我が国でも、世界に先駆けて2030年代の発電実証をめざすフュージョンエネルギー・イノベーション戦略が動き始めており、ご自身の携わるスタートアップ企業の事例も踏まえつつ、レーザー核融合炉実現に向けた技術課題やロードマップが紹介されました。

■「光・レーザー関西2025」に出展

オープンセミナーと同時開催の展示会「光・レーザー関西2025」(7月16日、17日)において弊所は技術紹介の展示を行いました。展示ブースではビデオ上映のほか、パネル展示や本誌のバックナンバーやパンフレットの配布、技術相談を行いました。当日は多くの方にご来訪いただき、貴重なご意見をいただきました。



【写真2】ILTオープンセミナーの様子