

B12 金属 3D プリンタのスラスト部品への適用について

升岡正, 香河英史, 池田博英 (JAXA)

Tadashi Masuoka, Hideshi Kagawa, Hirohide Ikeda(JAXA)

1. 諸言

近年, 樹脂材料を中心とした 3D プリンタ技術の関心が高まっているが, 金属を用いた積層造形技術に関しても, 医療分野や航空宇宙用部品への適用について, 論文および講演会による報告が増えている. 航空宇宙用部品は多品種少量生産であるため, 宇宙開発分野における金属積層造形法の適用に関するニーズはかなり大きいと予想される. 金属積層造形法の宇宙用部品への適用例として, EADS ASTRIUM 社

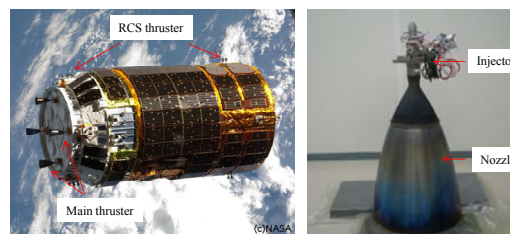


図 1 金属積層造形適用を目指す二液式スラスト用噴射器およびノズル (例として図左はH T V 3 号機、右はメインエンジン^{3),4)})

は商用通信衛星 (Atlantic Bird 7) の Ka バンドアンテナ部材の一部を電子ビーム積層造形法 (Electron Beam Melting : EBM) で製作し, 2011 年 9 月に打ち上げを行っている¹⁾. 米国では NASA Marshall Space Flight Ceter を中心に, 金属積層造形法の宇宙機器への適用研究が急速に進められており, レーザー積層造形法により製作された噴射器を使用したロケットエンジンの燃焼試験が実施された²⁾. 著者らは EBM 法に注目し, 人工衛星や宇宙機用の軌道変換や姿勢制御に使用される二液式スラスト^{3),4)} 用部品(図 1)への適用に向け, 国内研究機関および民間企業と協力して研究を行っている. 本稿では, 材料として金属積層造形法の適用が比較的進んでいるチタン合金 (Ti-6Al-4V) を選択し, 同材料を使用している二液式スラスト用噴射器およびノズルへの適用性を評価した. 材料の機械特性に関する基礎データ取得およびスラスト部品を模擬した噴射器およびノズルを試作し, 同法の適用性を評価したのでこれらについて報告を行う.

2. 基礎データ取得

金属積層造形品の材料特性 (主に強度) を把握するために, EBM (Electron Beam Melting) および DMLS(Direct Metal Laser Sintering)により引張試験片を製作し (図 2), 引張試験を実施した⁵⁾. 材質はすべてチタン合金 (Ti-6Al-4V) であり, 平行部直径は 4 mm とした. 装置について, EBM は Arcam AB 社製 Arcam A2x, DMLS は EOS GmbH 社製 EOSINT-M により製作した. 試験片の製造条件を表 1 に示す. 材料特性の比較用として, AMS(Aerospace Material Specification)材により試験片を製作した他, 積層方向と材料特性の関係を明らかにするために, 積層ステージに対する試験片の角度 (Direction) を 0, 45, 90 度になるような試験片を製作した (図 2 右参照). また, EBM については表面状態の影響を評価するために, 表面全体を機械加工(Machining)したものと平行部について表面を積層後にそのまま残した試験片を製作した (図 2 左参照). さらに EBM について HIP(Hot Isostatic Pressing)処理の効果把握するための試験片も準備した. 引張試験結果(引張強度、伸びおよび絞り)を図 3 示す. AMS 材(No.1)と EBM 材

(No.2-4)との比較について、EBM 材の強度は AMS 材より低い。しかし、強度低下は 10%程度であり実用上支障のない値といえる。材料特性の積層方向の依存性については、EBM 材(No.2-4)の結果が示すように強度、伸びおよび絞りについて異方性を持つことが分かる。よって、EBM 材を As-built で使用する場合は設計上注意を要する。表面状態の材料特性への影響については、EBM 材(No.2-4)と(No.5-7)の結果が示すように、表面の粗い材料(No.5-7)の方が強度および伸びが低下する結果となった。特に伸びの低下が顕著であるが、これは引張試験の末期において表面の粗い部分に応力集中が発生し破断が早まったためである。よって、スラスト用ノズルのような薄肉部材で荷重負荷が大きいものについては、後加工による表面処理が重要であることが示唆される。HIP の効果について、EBM 材(No.2-4)と EBM+HIP 材(No.8-10)を比較すると、HIP を行うことにより強度および伸びに改善がみられ AMS 材に近い値となることが分かった。さらに、EBM 材(No.2-4)でみられるような材料特性の積層方向に対する依存性が小さくなる効果もみられた。HIP を行うことで製造コストは増加するが、材料特性の向上には非常に有効な手法であることが確認された。DMLS(No.11-13)の結果について、引張強さが AMS 材より大きい結果となった。しかし、伸びが 4%程度と低い値となっており、材料が硬化していることが分かった。これは EBM と DMLS の製造プロセスの違いに起因している。EBM では、造形中に高速スキヤニングによってパウダーを余熱しており造形後の温度低下が緩やかであるが、DMLS では余熱の機能がなく、造形後の温度低下が早いとため残留応力が大きいことが要因となっている。しかし、DMLS は HIP により材料特性が大幅に向上するという報告があり⁶⁾、表面粗さは EBM より小さく造形後に金属粉が抜けやすい等のメリットがある。よって、部品によって特性が生かされやすいものを選択することが重要となる。図 4 に引張試験後の破断面観察結果を示す。AMS 材と比較し、EBM 材は材料中にボイドが確認された。引張試験結果では強度にはさほど影響がみられなかったが、疲労等の起点になることが予想されるため、これらのデータ取得も今後必要となる。

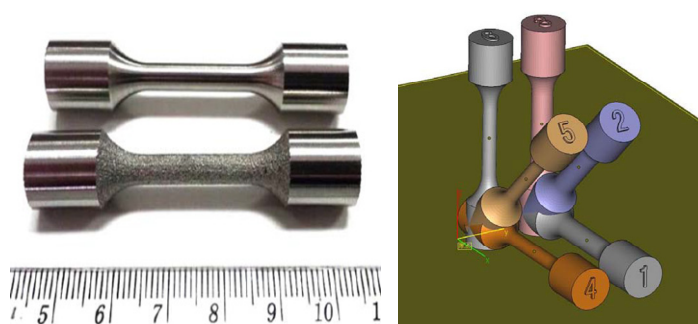


図 2 金属積層造形により製作した引張試験片

表 1 引張試験片製造条件

No	Specimen	Direction [degree]	Post treatment
1	AMS	-	-
2	EBM-1	0	Machining
3	EBM-2	45	Machining
4	EBM-3	90	Machining
5	EBM-4	0	-
6	EBM-5	45	-
7	EBM-6	90	-
8	EBM-HIP-1	0	HIP+ Machining
9	EBM-HIP-2	45	HIP+ Machining
10	EBM-HIP-3	90	HIP+ Machining
11	DMLS-1	0	Machining
12	DMLS-2	45	Machining
13	DMLS-3	90	Machining

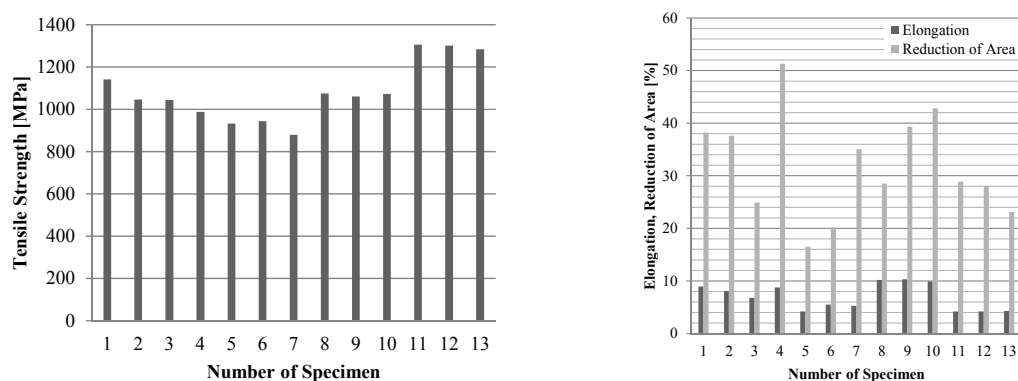


図 3 引張試験結果(引張強度、伸びおよび絞り)

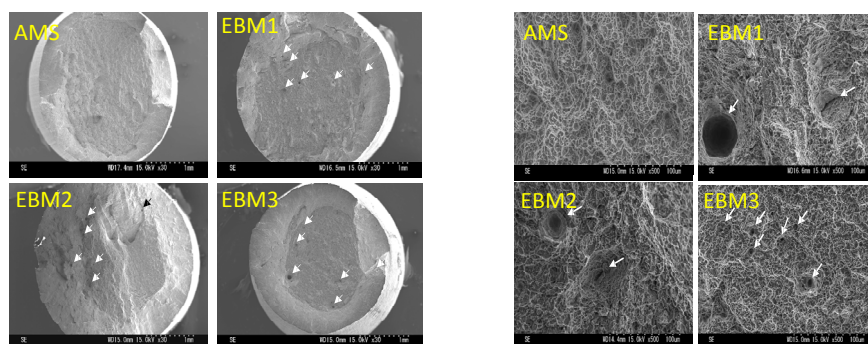


図 4 引張試験後の破断面観察

3. 噴射器およびノズルの試作

EBM 法の二液式スラスト用噴射器製造への適用性を評価するために、模擬噴射器（衝突型）を試作した。図 5 左に噴射器の断面図を、右に EBM 造形に使用した CAD 図を示す。噴射器への入口は二つあり、内部構造は内側と外側の二重のマニフォールドで仕切られている。大きさは直径 $D=104\text{ mm}$ 、高さは 30 mm とした。図中に示されている噴射孔(直径: 1 mm)については、EBM 法のみでは形状精度や表面粗さ要求を満たさないことが予想されたため、機械加工による追加工で製作した。噴射孔の数は内側、外側それぞれ 24 個ずつあり、孔の方向に角度を持たせた衝突型とした。図 6 左に EBM 造形後の噴射器、右に EBM 造形後に機械加工による追加工を実施した噴射器を示す。図 6 が示すように EBM 造形後の表面は粗い状態だが、機械加工で表層を落とすと鍛造材から切削したものと遜色がないほどの金属光沢が現れる。試作の初期段階では、噴射器マニホールドに残留する金属粉が造形後に除去できない事態が発生した。このため、粉抜き孔(図中 Powder outlet)の大きさを変える等の処置が必要となった。微細構造を内部に製造する場合は、粉抜きの方法について課題を持つことが明らかとなった。従来製造法と新製造法の両噴射器について、上流から加圧水を流して噴射孔から排出される噴流を高速ビデオカメラで撮像した。噴射器上流圧は 0.9 MPa に設定し、撮影のフレーム速度は 1000 fps とした。図 7 に撮影結果を示す。当初、新製造法で製作した噴射器について、噴射孔近傍の表面粗さが大きいことによる噴流への影響が懸念されたが、両者に違いは見られず良好な結果が得られた。このように、金属積層造形法で実用上問題のない噴射器を製造できる見込みを得たが、噴射器の内部に残存する金属粉の除去方法や清浄度管理が今後の課題となる。

EBM法の二液式スラスタ用ノズル製造への適用性を評価するために、模擬ノズルとしてコンカルノズルを試作した。二液式スラスタ用ノズルは従来製造法では鍛造材インゴットから切削で製作している。EBMを適用することで、材料調達にかかる時間がかからず、切削による材料廃棄ロスを大幅に削減することが可能となる。図8にEBM造形後に機械加工を実施したコンカルノズルを示す。大きさは上端（内径が小さい側: $\phi 40\text{mm}$ ）、下端（内径が大きい側 $\phi 60\text{mm}$ ）高さ 70mm とした。ノズルはシェル構造のため、EBM後に材料中に含まれる残留応力の影響を受けやすく要求する形状精度を満たすことが難しい。よって、追加工により目標精度まで形状を補正する技術が重要となる。今回は造形に当たり、EBM時は設計値に対しあらかじめ余肉をつけて、機械加工により両面を設計厚さになるよう追加工した。この結果、十分な形状精度要求精度を満足することができた。

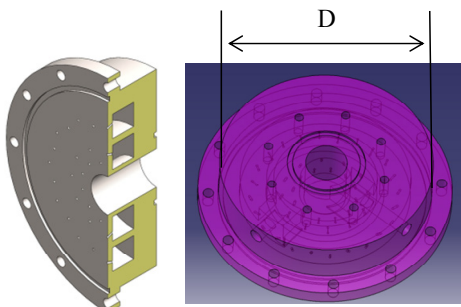


図5 噴射器の断面構造（図左）およびEBM製作で使用したCAD図（図右）



図6 EBM造形後の噴射器(図左)、造形後に機械加工を実施した噴射器（図右）

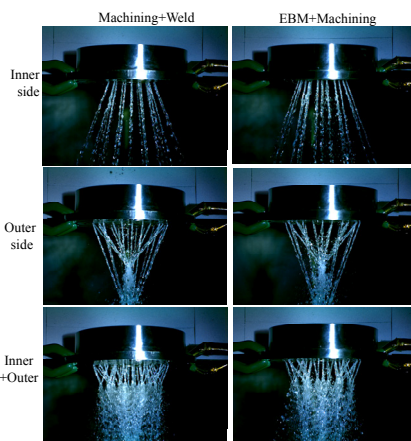


図7 高速度カメラによる水流し試験撮影結果



図8 EBM後に機械加工を実施したコンカルノズル

4. 結言

本稿では、材料として金属積層造形法の適用が比較的進んでいるチタン合金（Ti-6Al-4V）を選択し、材料機械特性に関する基礎データ取得、ならびに二液式スラスタ部品を模擬した噴射器およびノズルを試作することで、同法の適用性を評価した。材料特性の積層方向に対する異方性や中空構造の内部に残留する金属粉の粉抜きの問題、非破壊検査手法に関連する品質保証の方法が課題であ

ることが明らかになったものの、金属積層造形法の同部品の適用について高いポテンシャルを有していることがわかった。また、従来法では製造できない形状が実現できることを試作で確認した。

謝辞

本稿の引張試験は鈴鹿高専黒田研究室と（独）宇宙航空研究開発機構との共同研究により実施された。噴射器、ノズルの試作およびそれを用いた各種試験については、経済産業省関東経済産業局が実施する戦略的基盤技術高度化支援事業「電子ビーム積層造形法と精密切削加工技術の融合による衛星用スラスタ部品の開発」として実施された。共同で開発を行う（株）コイワイ、（株）由紀精密、早稲田大学吉田研究室、東北大学千葉研究室にご協力を頂いた。本研究にご協力頂いた皆様に深く感謝する。

参考文献

- 1) Brindeau, A., Lopes, J.L., Brivot, F., Bourneaud, F., Desagulier, C., :Logic for Qualification and Industrialisation of Additive Layer Manufacturing Parts for Spatial Application, 12th European Conference on Space Structures, Materials & Environmental Testing, ESA SP-691, 2012.
- 2) NASA, Industry Test '3D Printed' Rocket Engine Injector , <http://www.nasa.gov>
- 3) 葛西徹，市川千秋，植松洋彦：HTV3 号機誘導制御の評価，第 56 回宇宙科学技術連合講演会講演，JSASS-2012-4385, 2012.
- 4) 高田真一，深津敦，杉森活彦：国産スラスタを初搭載した HTV3 号機推進系の評価，第 56 回宇宙科学技術連合講演会講演，JSASS-2012-4386, 2012.
- 5) 黒田大介、藤井瑛大、御手洗容子、小野嘉則、升岡正、香河英史：金属粉末積層造形技術により作製した Ti-6Al-4V 合金構造体の力学特性”，日本金属学会秋期講演大会，J11, 2013.
- 6) 唐土庄太郎，増尾大慈，矢倉孟，山本泰弘：積層造形と HIP 処理によって準備した Ti-6Al-4V 材料の機械特性，紛体および粉末冶金，第 61 巻，第 5 号，pp.250-254, 2014.