

金属レーザー積層材を用いた異方性を活かした浸炭強化部品の製造方法

旭川工業高等専門学校 機械システム工学科

杉本 剛

はじめに

近年, EV 等の電動車の駆動機構では, その大きな減速比や走行モードの多様化から複雑化が加速しており, 既存の機械加工や鍛造等の製造方法だけでは対応が難しく, 新しい製造が求められている. 複雑化の事例には, 例えば歯車機構の入れ子構造などがあげられ, 既存の技術では, 初期状態から組み合わさった状態を製造することは難しい. そこで近代, 目覚ましい技術発展をしている金属積層造形 (Additive Manufacturing: AM) 技術の活用が考えられる. AM 技術は 3 次元造形する手法で 3D デジタルモデルに基づき材料を重ねて 3 次元の形状を作成する工法である. AM 技術は CAD データから再現することが用意であることから, 今後, 製造産業において重要な製造プロセスになることが予想される.

AM 材の原料として使われる金属としてマルエージング鋼がある. マルエージング鋼は高強度で疲れ強さや耐へたり性に優れた材料であり, 遅れ破壊や応力腐食に対しても良好な性質を示す. 成分は低炭素 18%Ni 鋼に時効硬化元素として Co, Mo, Ti, Al 等を添加した時効硬化型の超強力鋼である.

金属材料は様々な製品に利用されているが, その中でも多くの高強度な金属製品は性能を向上させるため様々な熱処理を加えられている. 歯車などの自動車部品には表面を重点的に強化する浸炭熱処理を行うことが多い. 浸炭熱処理は金属表面から炭素を固溶させ, 表面のみを強化させる技術であり, 機械部品などの高負荷がかかる部品に対し, 表面からの傾斜強度による靱性と耐荷重の両立や耐摩耗性を向上させる目的で行う. 浸炭熱処理は他の熱処理に比べ金属内部の金属的性質の変化が少なく, また処理温度が低いため, 歪みや変寸が少ない傾向があるため, 高強度用途の金属製品を製作するために必要な技術となっている. 本研究では AM 材に浸炭をすると何が起きるのかを調査する. マルエージング鋼は浸炭し利用することが少ない金属材料であるが, 通常浸炭熱処理後に行われる焼入れをせずとも硬さが得られる等の性質を持っており, 熱処理変形も小さいため, 高強度で高形状精度な浸炭強化部品を製作する為の研究の基としては適している材料と考えられる.

一般に AM 材は鍛造部品や機械加工品と比べ機械的性質が劣るとされているが, 一般的な金属材料に比べ, 機械的性質が明らかになっている情報が少ない. そこで本研究では AM 材に浸炭することで何が起きるのかを調査した.

目的

金属積層造形技術は, 最終製品の 3 次元 CAD データから作成した 2 次元スライスデータに基づいて, レーザーや電子ビーム走査により金属粉末を選択的に溶融・凝固させ, その繰り返し積層することで 3 次元構造体を作製する技術である. この手法により, 複雑な内部形状を有する製品でもそのまま成形することが可能となり, 従来のものづくりのプロセスを根本から変え, 工期とコストの大幅削減が期待される. 特にオンデマンド型の多品種・少量生産が可能となり, 低炭素社会実現の鍵と言われている. AM 技術は, ものづくりの設計思想や手法そのものを根底から覆す可能性があり, 複雑形状の 3 次元構造物をニアネットシェイプで創製できる特徴を有する. AM 技術による積層造形は希望の製品形状を創り上げるだけでなく, 造形物に必要

な高強度・高機能性等を与えるために積層造形や後続すべき熱処理工程における加工パラメータの最適化および組織制御が今後の製造業の一端となる金属材料学にあると考え、探求の価値があると考えます。

本研究ではマルエージング鋼を AM 技術にて成形したうえで強化処理として浸炭処理をした際の特性を評価する。

実験方法

本研究では、マルエージング鋼（成分は Fig 1 参照）粉末を原料とし AM 材の試験片を作成した。加工法は粉末レーザー焼結であり、長岡技術科学大学所有の DMG 森精機 AMLASERTEC30SLM を用いた。

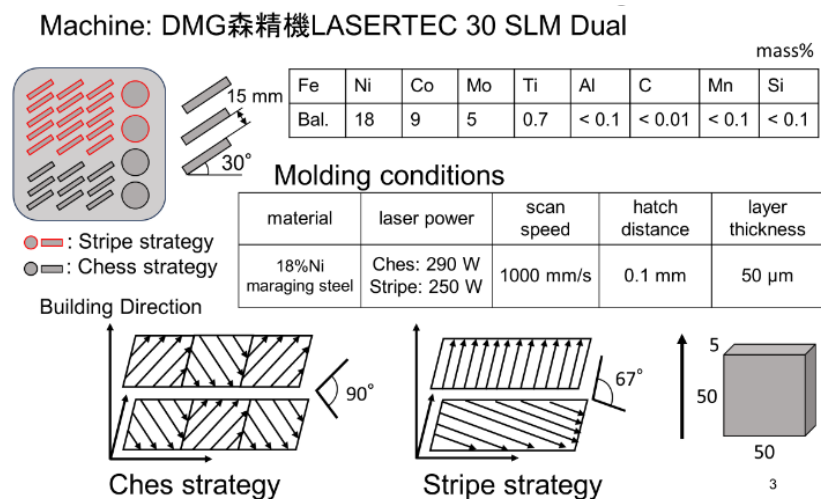


Fig. 1 AM 材試験片の作成条件

この際、2 種類の条件で加工を行っており、Fig.1 下側に示すように Ches strategy は積層されるたびに方向が異なるものであり、90 度の角度をつけて重ねている。Stripe strategy は同方向に積み重ねたものであり、67 度で積み重ねているものである。以降 Ches strategy を異方向材、Stripe strategy を同方向材と称す。

積層した材料の角部を 5mm×5mm×5mm のサイズに試料切断機を用いてカットしこれを供試材に用いた。また AM 材の外皮は粗いため、AM 材の積層方向に対し平行、垂直、奥行き方向に対し浸炭熱処理を行うため各々カットしこの試験片に浸炭熱処理を行った、本研究では真空浸炭で行い、炉はフルテック FT-02VAC-50 炉であり、φ40mm の石英ガラス管管状炉である。処理圧力-99.8kPaG、熱処理時間は 120 分、温度は 930℃、ガスはアセチレンとし流入量は 50L/h、流入総時間 30 分、その後真空炉冷を行った。Fig. 2 にヒートパターンを示す。浸炭時間と熱処理時間は一般的な鋼材の浸炭熱処理時間を参考にした。

30 分加熱したのち、アセチレンを 15 分流入し、15 分停止させることで金属表面の炭素を内部へ拡散を最適化させるため停止した。その後再び、15 分アセチレンを流入し、75 分間保持した。その後、真空状態で炉冷した。

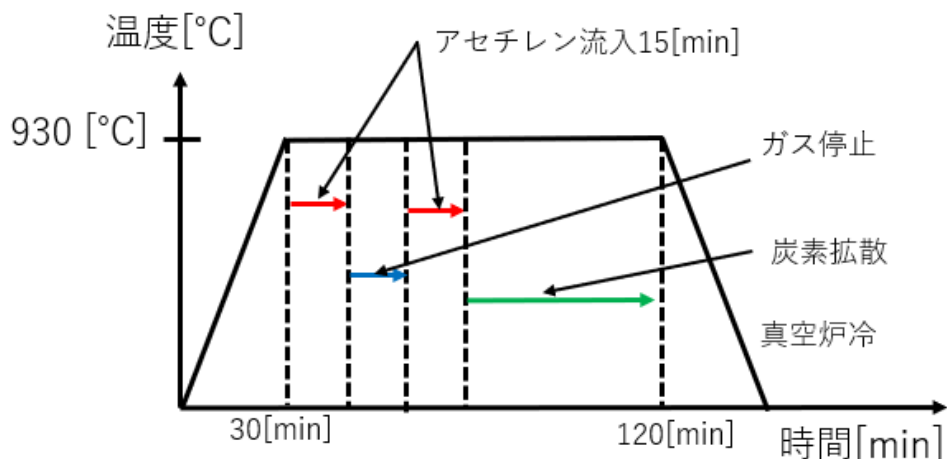


Fig. 2 AM 材試験片への浸炭条件

浸炭熱処理を行った AM 材を樹脂に埋め込んだのち $0.03\mu\text{m}$ までの鏡面研磨し表面からの硬さ分布測定を行った．また，硬さ結果が AM 材のどのような金属組織に影響を受けているかを調べるため，3%ナイトール腐食液で 2 分腐食したのちの金属組織観察，SEM・SEM-EBSD・SEM-EDS による組織観察を行った．SEM・SEM-EBSD には日立ハイテクフィールドイングス社製 反射型電子顕微鏡 SU8600 を用い，観察条件は電圧が 15V～20V, 電流が $10\mu\text{A}$ である．

AM 材の柱状晶組織と等軸晶組織の内側の Fe の縁の Ni, Co 部分の硬さの差を調べるためにナノインデントーを利用した．実験は北海道大学に AM 材を送って実験をしていただいた．利用機器は Bruker TI-950 TriboIndenter である．

試験条件は負荷・除荷速度： $400\mu\text{N}/\text{sec}$ 最大負荷荷重： $10000\mu\text{N}$ 保持時間：10sec $30\times 3=90$ 点ずつ $10\mu\text{m}$ 間隔で測定でおこなった．また，得られた組織について力学特性を評価するため，硬さを測定した箇所についてナノインデントー評価も行った．

実験結果

金属 AM 材の製作工程では，金属の熔融と急冷凝固を繰り返し，高さ方向に積層していく．このため造形物の機械的性質は方向性を持っている Fig. 3 に示す様に，積層方向に垂直，平行，奥行き方向の観察を行った．それぞれ方向を 1，2，3 で表す．特に 2 の面では同方向と異方向で形成されている組織が違いが見て取れる．

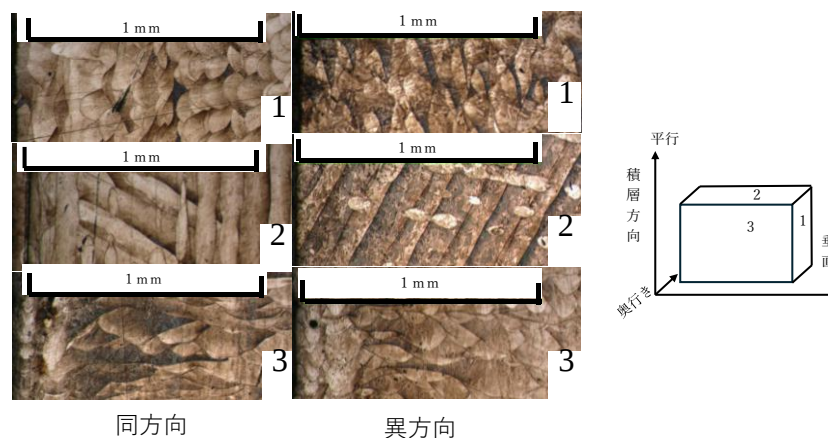


Fig. 3 As AM の状態での金属組織

ビッカース硬さ試験は積層方向に対し、垂直、平行、奥行き方向で行った。荷重は小さい荷重で行うと、積層痕の影響があることがあり、積層方向と積層痕の影響が大きくなってしまったため、十分に大きい 500gf で行い、間隔は 0, 50, 100, 200, 300, 400, 500 μm で行った。結果として同方向材では試験方向による硬さの差は見られなかったが、異方向材では試験方向による差が見られた。(Fig. 4, 5 参照)

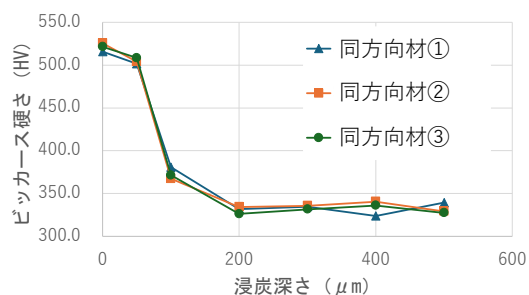


Fig. 4 同方向材の硬さ分布

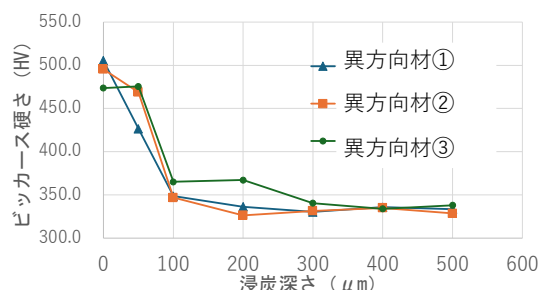


Fig. 5 異方向材の硬さ分布

炭素の拡散の原因を明らかにするために、作成された後、何も熱処理されていないもの (AsAM 材) を腐食し、観察した。観察は日立ハイテクフィールドディングス社製 反射型電子顕微鏡 SU8600 で行い、これらは 20000 倍で観察したものである。(Fig. 6 参照) それぞれ観察方向は 1, 2, 3 であり方向によって異なる組織が観察される。腐食によって発生している。また同方向材では等軸晶組織、異方向材では柱状晶組織が観察された。

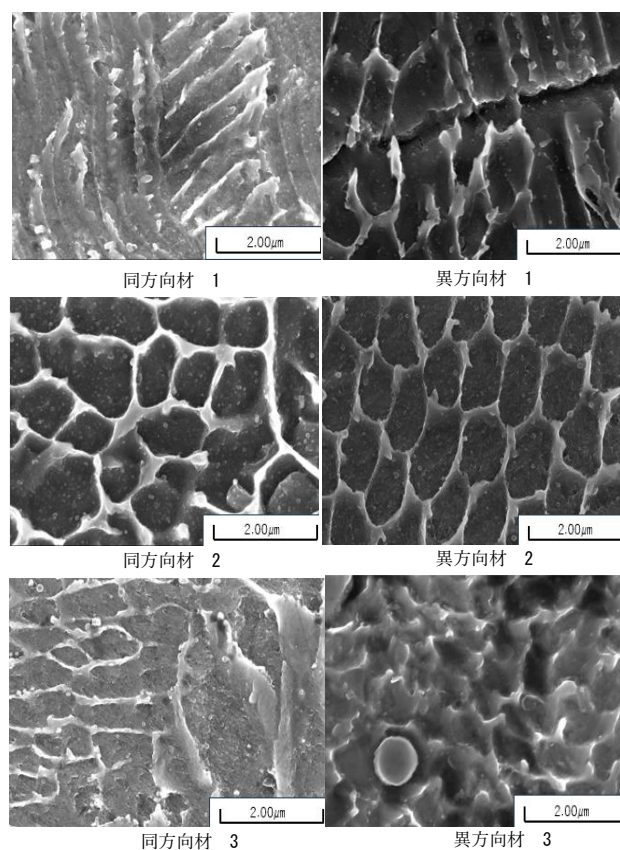


Fig. 6 SEM でみた腐食後の As AM 材組織

SEM EDS 分析

前述の組織は金属成分が偏析していることが考えられたため、異方向材の AM 材料に対し EDS のライン分析を行った。Ni, Co が白い部分に偏析していて、黒い部分は腐食によって解け落ちている部分が Fe となっている。

同様にマップ分析でも行った。マップ分析では電圧を 20V にすることでより鮮明に見えるようにして行った。マップ分析では Ni, Co の偏析が鮮明に確認された。結果を Fig. 7 に示す。

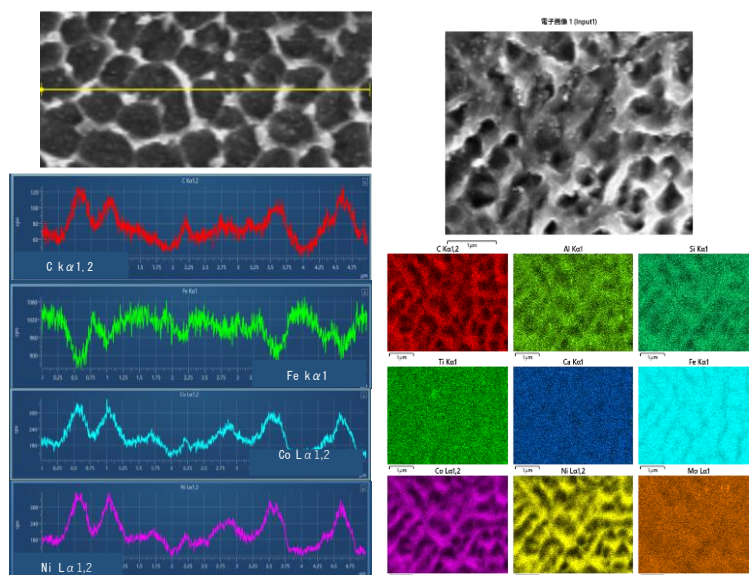


Fig. 7 SEM-EDS による同方向材のライン分析およびマップ分析結果

SEM EBSD 分析

結晶方位を明確にするため、EBSD 観察を行った。AM 材料を湿研磨後、仕上げ研磨、イオンミリングを行っている。結果は下の図の通りである。異方向材の 1 は SEM の写真と比較して柱状晶が伸びているように見えるため、全体的に柱状の結果がわかる。(Fig. 8 参照)

それぞれの方向 1, 2, 3 は結晶方位が全体的に異なっていることが分かる。

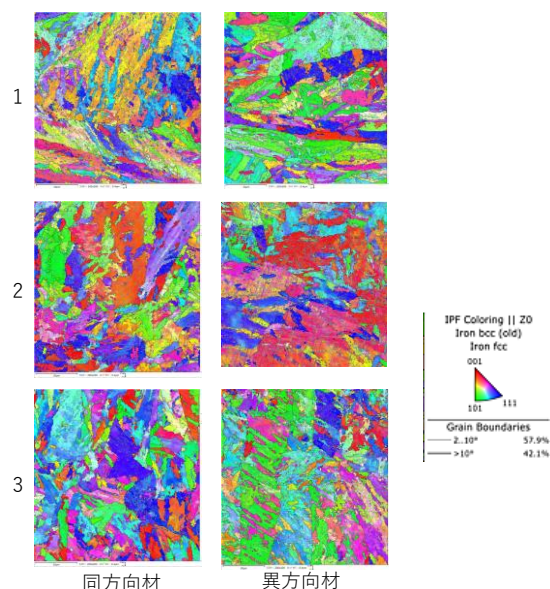


Fig. 8 SEM-EBSD による結晶方位調査結果

ナノインデントによる調査結果

ビッカース硬さ試験では圧痕が大きいと、積層痕の影響を受けると考えられるため、ナノインデントによる実験を行った。(Fig.9 参照) 結果として、ビッカース硬さ試験と同じく、積層方向による差が見られた。また、異方向材の向きにより硬さ分布の違いがみられるのはビッカース試験と同様であり、ビッカース試験結果を裏付けるものとなった。

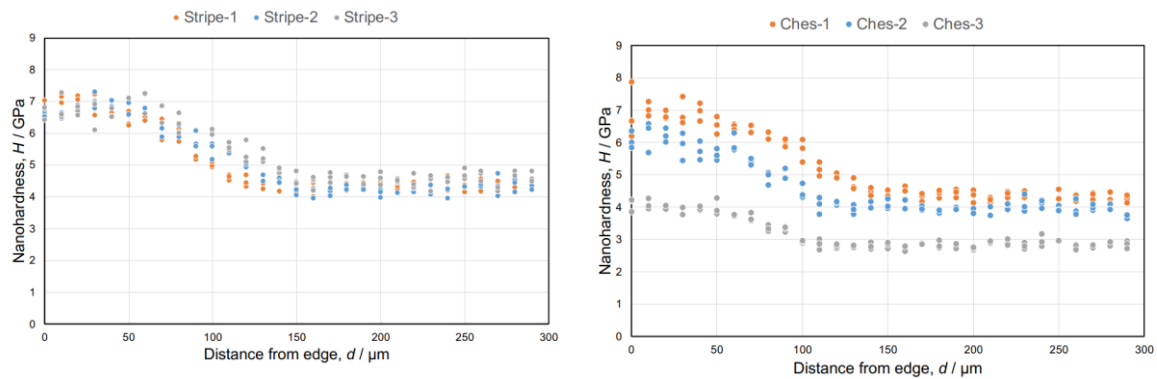


Fig.9 ナノインデントによる硬さ分布測定結果(左 同方向材, 右異方向材)

考察

以上より、マルエージング鋼の AM 材は浸炭熱処理を行うことで、一般的な鋼材と同じ浸炭深さプロットを得ることができた。また、方向に違い、積層方向によって浸炭深さが異なることが判った。この浸炭深さは AM 材の金属方位や柱状晶の向きによって異なると考えられ、これは AM 材の生成時の条件によって変化すると考えられる。

レーザー照射による溶融・凝固のため、レーザー痕の中央と端では凝固する速度が異なっていることが考えられる。そのため、生成時の条件が異なる AM 材を利用して比較することで、AM 材の金属特性が得られると考えられる。

本研究の AM 材は生成条件より柱状晶と等軸晶が積層されて作成されていたため、一般的な鋼材と比べると、硬さ試験だけでなく、引張試験などの結果が異なることが考えられる。

柱状晶は Fig. 10 左に示すような構造になっていることが判った。炭素は Fe に拡散されやすいため、Fig. 10 右のような拡散がされることが考えられる。

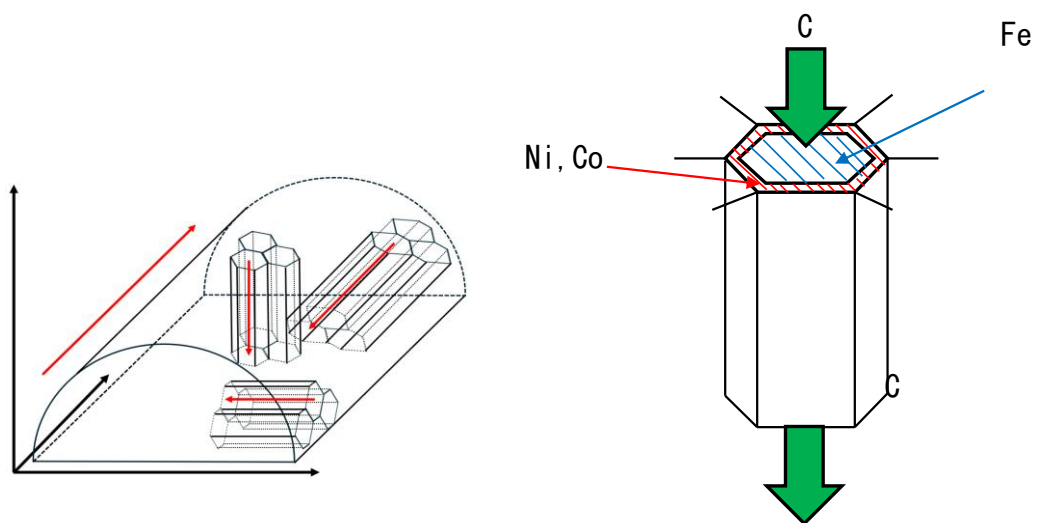


Fig. 10 AM 材の中にできる柱状組織と炭素拡散の異方性モデル

細長い柱状結晶は, Fig. 10 に示す積層傷跡に対して半円弧の方向に成長すると考えられる. 浸炭により, 積層傷跡と粒界の間の隙間に沿って炭素が拡散するが, その後, より小さな柱状結晶構造に拡散すると考えられる. ニッケルは炭素と結合しないが, コバルトは結合するため, 余分な炭素が拡散し, 細長い柱状結晶に炭素の偏析を引き起こすと考えられる.

結言

マルエージング鋼の積層造形材の浸炭熱処理をビッカース硬さ試験, 光学顕微鏡観察, SEM 解析, ナノインデント試験を行うことで以下の結論を得た.

- 1) 積層方向に対する向きによって浸炭深さ, 炭素の拡散速度が異なる.
 - 2) 積層され方によって浸炭深さ炭素の拡散速度が異なる.
 - 3) マルエージング鋼で生成される AM 材では, 腐食後 SEM 観察, EDS 解析を行うと金属元素が偏析している.
 - 4) 異方向材はそれぞれ柱状晶組織が積層され, 同方向材は等軸晶組織が積層されている.
- 今後, 本研究に基づき, 実際にマルエージング鋼に浸炭した材料がどのような強度特性を持っているのかを評価し, 実用性等を検証していく予定である.

謝辞

本研究は(公益財団法人)天野工業技術研究所の研究助成の下実施された. 関係各位に謝意を表する.

参考文献

- (1) 陳 中春, マルエージング鋼の 3D 積層造形および組織制御による高性能化, JFE21 世紀財団 2018 年度研究報告書, 2018
- (2) 深澤郷平・勝又信行・古屋雅章・寺澤章裕・鈴木大介・佐野正明 金属粉末積層造形品の機械的性質に関する研究(第2報), 山梨県産業技術センター研究報文, 2018
- (3) 石川信幸, 高岩徳寿, 柏崎親彦, 金属 3D プリント造形品の構造部材適用に向けた耐久性・信頼性に関する研究, 栃木県産業技術センター研究報告 No.19-31, 2022.
- (4) 京極秀樹, 池庄司敏孝, 図解金属 3D 積層造形のきそ, 日刊工業新聞社, 2017