

金属粉末積層造形品の機械的性質に関する研究

深澤郷平・勝又信行・古屋雅章・寺澤章裕

Study on the Mechanical Property of Metallic Additive Manufacturing

Kyohei FUKASAWA, Nobuyuki KATSUMATA, Masaaki FURUYA and Akihiro TERASAWA

要 約

金属積層造形技術は従来加工では製造できない複雑形状を得ることができ、航空、医療及び金型分野への応用が期待される新しい技術である。一方、その製造工程において金属の溶融と急冷による凝固が繰り返されることや原料に金属粉末を用いることから、圧延・鍛造工程を行う従来材とは機械的性質が異なる懸念がある。そこで、本研究ではマルエージング鋼粉末を用いた金属積層造形素材の機械的性質の評価及び積層方向による影響を調査した。また、金属積層造形後の仕上げ加工を想定した熱処理について検討し、切削性を評価した。その結果、積層方向に平行及び垂直方向の引張強さは 1150MPa 程度とほぼ同じであったが、斜め 45° 方向の引張強さは上述よりも 50MPa 程度小さかった。また、造形後の金属組織は積層の痕跡があり、内部に格子状に並んだ気孔が観察された。造形後の素材の切削性は市販材に比べて劣るが、焼鈍処理を施すことで切削性は改善した。

1. 緒 言

金属積層造形技術は従来の加工方法では不可能であった製品形状を得ることができ、航空部品、医療製品や金型へ利用されるなど新しい加工方法として期待されている。その工法は一様に敷き詰められた金属粉末にレーザーや電子ビームを照射し、局所的に溶融、焼結させ、これを高さ方向に繰り返し行い、立体形状を得るものである。切削加工や放電加工が材料を除去して加工するのに対して、積層造形技術は材料を付加していく加工のため付加加工 (AM: Additive Manufacturing) と呼ばれている¹⁾。金属積層造形技術 (以下、金属 AM と記す) は casting, 鍛造, 切削などの従来加工では製造できない形状が得られる。一方、製造工程に金属の溶融と急冷による凝固過程を含むことから、金属組織には不安定な一面を有し、素材内部に残留応力が存在する可能性がある。また、金属粉末を原料にしているため、従来の粉末冶金製品と同様に材料内部に多少ならずとも気孔を含んでいることも知られている。このため、圧延・鍛造工程を行う従来材料とは金属組織や機械的性質が異なる懸念があり、材料の信頼性も不明瞭である。今後、金属 AM により多様な製品が製造できるようになるが、これを構成する金属材料の機械的性質の把握は十分ではなく、また製品寿命の評価も始まったばかりである。そこで、本研究では金属 AM で製造された金属素材の機械的性質を明らかにし、また機械的性質を調整するための熱処理技術について検討を行った。

2. 実験方法

2-1 供試材の造形条件及び化学成分

(1) 造形条件

供試材はマルエージング鋼粉末材を用いて、金属積層造形装置 (LUMEX Avance-25 (株) 松浦機械製作所) により造形したものである。図 1 に造形後の外観を示す。造形物は積層方向による影響を調査する目的で、積層方向に平行、垂直及び斜め 45° の 3 種類を作製し、そのサイズはそれぞれ 10 mm×50 mm×100 mm とした。また、積層高さの影響を調査するために 15 mm×15 mm×100 mm の造形物も作製した。造形条件はレーザー出力 320W, スポット径 0.2 mm, レーザ走査速度 700 mm/s で行い、ベースプレート温度は 50°C, 残存酸素量 3%未満の窒素雰囲気中で行った。その後、ワイヤー放電及び機械加工を施し、試験片を作製した。

(2) 化学成分

造形に用いたマルエージング鋼粉末材の拡大写真を図 2 に、金属積層造形に用いたマルエージング鋼粉末材および市販の 18%Ni マルエージング鋼 YAG300 (以下、市販材と記す) の代表的な化学成分を表 1 に示す。なお、化学成分はミルシートを参照した。

2-2 機械的性質におよぼす積層方向の影響

金属 AM 工程において、金属の溶融と急冷凝固を繰り返し行い高さ方向に積層していくため、造形物の機械的性質は方向性を持っている懸念がある。そのため、図 1 に示した積層方向に平行、垂直及び斜め 45° の 3 方向

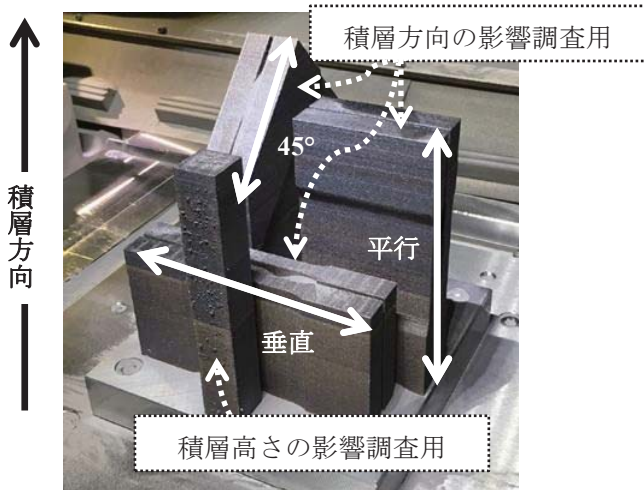


図1 金属 AM 材の外観

表 1 各供試材の代表的な成分 (%)

	C	Ni	Mo	Co	Ti
マルエージング 鋼粉末材	0.01	18.0	5.1	9.0	0.6
市販材 (YAG300)	0.002	18.42	4.91	8.99	0.9

について次の試験を行い、機械的性質におよぼす積層方向の影響について調査した。なお、市販材についても圧延方向に平行及び垂直方向における機械的性質を調べた。また、金属 AM 材は積層初期においてレーザ照射による熱がベースプレートに逃げるため冷却が速く、積層が進むにつれて次第に冷却が遅くなると考えられる。また、レーザ照射により繰り返し熱が加わることも考慮し、積層高さ方向の硬さ分布を測定し、その影響を調査した。

(1) 顕微鏡観察

金属 AM 材の内部気孔の有無と組織の方向性を調べるために光学顕微鏡によるマイクロ組織観察を行った。なお、エッチングは塩化第二鉄、塩酸及びエタノールの混合液による化学腐食を行った。

(2) 硬さ試験

硬さ試験機はマイクロビッカース硬さ試験機 (MVK-G3500AT (株) アカシ) を用い、試験荷重 1.961 N、保持時間 10 s の条件で測定した。各試料 3 点を測定し、その平均値を測定値とした。

(3) 引張試験

試験片は造形物からワイヤー放電加工により切り出し、平行部に機械加工を施して、幅 5 mm、厚さ 5 mm 平行部長さ 35 mm のダンベル形状に作製した (図 3)。なお、市販材についても圧延方向と平行及び垂直方向の試験片を作製し、引張試験を行った。引張試験機は万能材料試験機 (UCT-30T (株) オリエンテック) を用い、

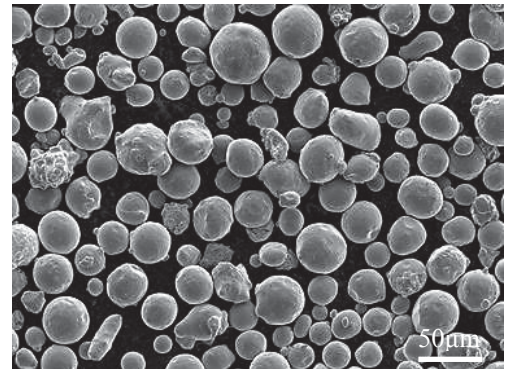


図 2 金属 AM に用いたマルエージング鋼粉末

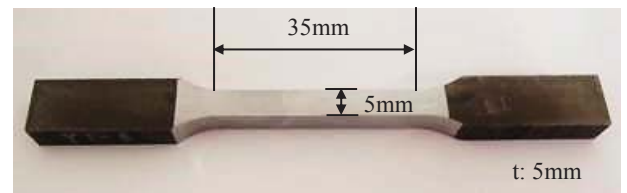


図 3 引張試験片形状

ロードセルは 100 kN を用いた。試験速度は 5 mm/min で行い、各試料 3 点を測定し、その平均を測定値とした。

2-3 金属 AM 材の切削性

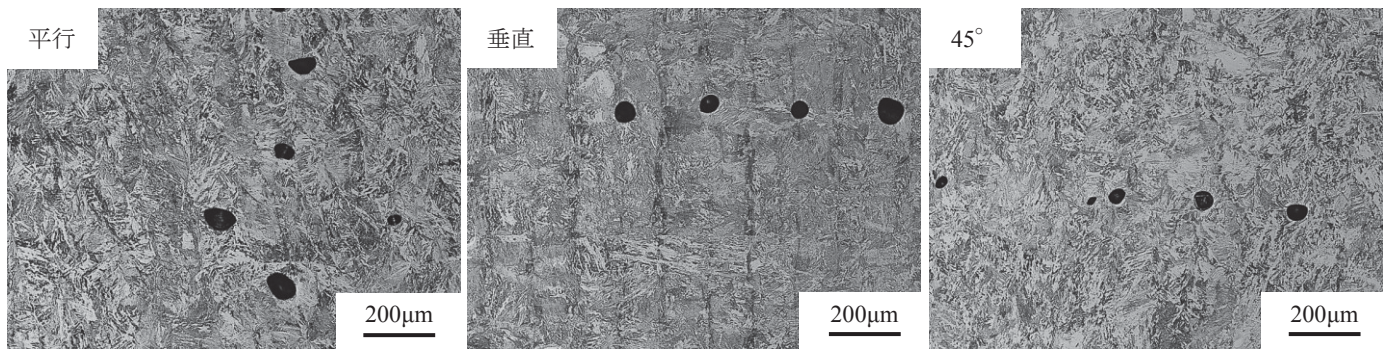
金属 AM 装置により造形を行った場合の寸法精度は 50~100 μm 程度、表面粗さは 40 μm 程度であり³⁾、切削加工よりも劣っている。また、造形物をベースプレートから切り離す際に素材内部の残留応力が解放し、変形する恐れもある。そのため、精度を求める品物の場合には造形後に仕上げ加工を施す必要があると考えられる。そこで、造形後の金属 AM 材に仕上げ加工を想定し、機械加工性について検討を行った。また、金属 AM 材に焼鈍処理を施したものも併せて評価した。なお、市販材は 830°C で 1 時間保持後に大気空冷による焼鈍処理が施されたものである。

(1) 焼鈍処理

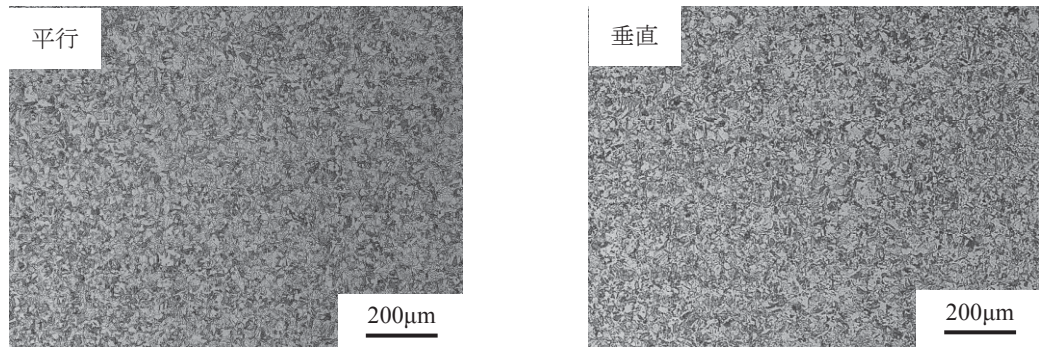
熱処理に用いた試料サイズは 5 mm×10 mm×25 mm であり、焼鈍温度は一般的な鋼材の応力除去焼鈍しの処理温度である 650°C、市販材の焼鈍温度と同じ 830°C、及びその±50°C の計 4 種とした。焼鈍温度に加熱後 1 時間保持した後、大気中に空冷した。焼鈍後の硬さ試験はビッカース硬さ試験機 (AVK (株) アカシ) で行い、試験荷重 98.07 N、保持時間 10 s の条件で各 3 点を測定し、その平均を測定値とした。

(2) 切削性の評価

5 mm×10 mm×25 mm の試料に対して切削加工を施



a) 金属 AM 材の積層方向に対する各方向のマイクロ組織



b) 市販材の圧延方向に対する各方向のマイクロ組織

図 4 金属 AM 材及び市販材のマイクロ組織

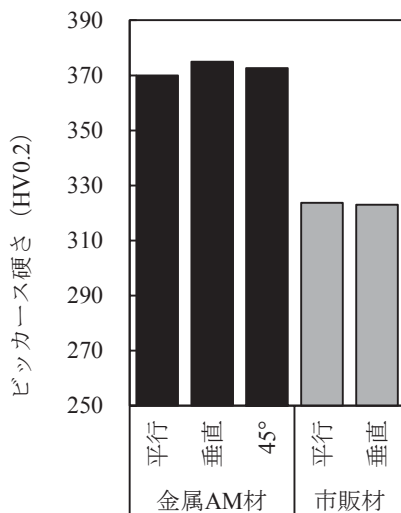


図 5 金属 AM 材及び市販材の硬さ

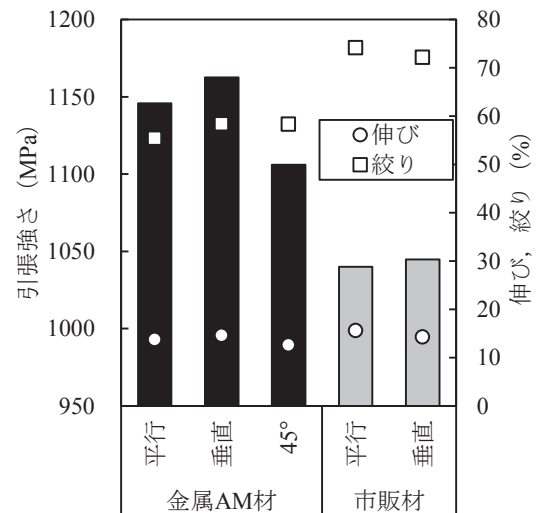


図 6 金属 AM 材及び市販材の引張試験結果

し、その際にバイスに生じた XYZ 方向の力を圧電式切削動力計 (9257B KISTLER (株)) により計測し、3 方向の合力を計算で求め、切削抵抗として評価した。用いた加工機は精密マシニングセンタ (VU50A 三井精機工業 (株)) で、工具はスクエアエンドミルを使用した。切削条件は送り速度 50 m/min, 主軸回転数 2000 rpm, 切り込み量 1.0 mm で行った。なお、刃物磨耗による影響を考慮して、各試料 3 点を順不同に実施し、その平均を測定値とした。

3. 結果及び考察

3-1 機械的性質におよぼす積層方向の影響

図 4 に金属 AM 材の積層方向及び市販材の圧延方向に対する各方向のマイクロ組織の代表例を示す。金属 AM 材はいずれの方向においても 50~100 μm 程度の球状の気孔が多数存在しており、この気孔は一定の間隔を保って格子状に並んでいるように観察された。なお、金属 AM 材のマイクロ組織には積層方向の痕跡が観察された。一方、市販材のマイクロ組織はいずれの面も結晶粒が小さ

く均一に分布しており、内部欠陥は見られなかった。

図 5 に金属 AM 材の積層方向と市販材の圧延方向に対する硬さを示す。金属 AM 材の硬さはいずれの方向も 375HV0.2 程度であり、積層方向による硬さへの影響はなかった。また市販材も圧延方向による差はなく、いずれの方向も 320HV0.2 程度であった。市販材に焼鈍処理が施されているため、金属 AM 材よりも硬さが大きかったものと思われる。

金属 AM 材の積層方向及び市販材の圧延方向に対する引張強さ、伸び及び絞りを図 6 にまとめて示す。積層方向に平行及び垂直方向における引張強さは 1150 MPa 程度とほぼ同じであり、45° 方向の引張強さは 1100 MPa 程度とやや小さかった。このため、斜め方向に造形する場合には強度の低下に留意が必要と考えられる。一方、市販材の引張強さは圧延方向に関係なくいずれも 1050 MPa 程度であった。金属 AM 材は内部に気孔が存在しているため、引張強さは市販材よりも小さいと予測されるが、素地の硬さは金属 AM 材の方が大きくこちらの影響を受け、引張強さは大きかったものと考えられる。また、金属 AM 材の伸びはいずれの方向も 13~15%と大差はなく、市販材の伸びも 14%~16%であり、金属 AM 材との差はほとんどなかった。一方、絞りは金属 AM 材が 55~58%、市販材が 72~74%であり、金属 AM 材のほうが小さかった。

金属 AM 材の積層高さ方向における硬さ分布を図 7 に示す。積層高さ 0 付近~99.0 mm までは 360~400HV0.2 程度であったが、最上部の 100 mm 付近では硬さは急激に小さくなり、320HV0.2 程度であった。積層高さが低い場合はベースプレートに熱が逃げるため冷却速度は速くなり、積層が進むにつれて次第に冷却速度は遅くなる。一般的な鋼材はこの冷却速度の影響を受けて硬さが異なる場合がある²⁾。一方、18%Ni マルエージング鋼の場合は焼入性が非常に大きく、焼鈍による徐冷でもマルテンサイト変態が起きる程である⁴⁾。そのため、積層高さによる冷却速度の影響を受けず、一様に焼入されるため硬さは変わらないと考えられる。また、18%Ni マルエージング鋼は焼入状態における硬さが小さく、時効処理によって硬化する。金属 AM の積層工程において、レーザ照射によりマルエージング鋼粉末材が熔融、冷却し、一旦は焼入状態となるが、その後、積層される度にレーザ照射による熱が繰り返し加わるため、金属 AM 材の内部は時効硬化したと考えられる。以上のことから、積層高さ 0 付近~99.0 mm まで硬さは焼入後に時効硬化がなされ 360~400HV0.2 程度で推移した。一方、最後に造形された数層は焼入状態のまま、時効硬化がなされなかったために硬さが小さかったと推察される。

3-2 金属 AM 材の焼鈍処理及び切削性

金属 AM 材に仕上げ加工を施すことを想定し、その機械加工性について検討した。図 8 に 650°C、780°C、830°C、880°Cの各温度に加熱し 1 時間保持後に空冷した試料の硬さを示す。650°Cに加熱した場合の硬さは未処理品とほぼ同じであったが、780°Cになると硬さはやや小さくなった。加熱温度の上昇に伴って硬さはさらに小さくなり、830°Cでは市販材の硬さと同程度、880°Cでは 295HV10 程度に小さくなった。

焼鈍処理をしていない金属 AM 材、830°Cと 880°Cで焼鈍処理を施した AM 材及び市販材の各切削抵抗を図 9 に示す。焼鈍処理をしていない金属 AM 材の切削抵抗は大きく、切削性は市販材よりも劣っていた。一方、焼鈍処理を施した金属 AM 材の切削抵抗は小さくなっており、焼鈍により切削性は改善されることがわかった。

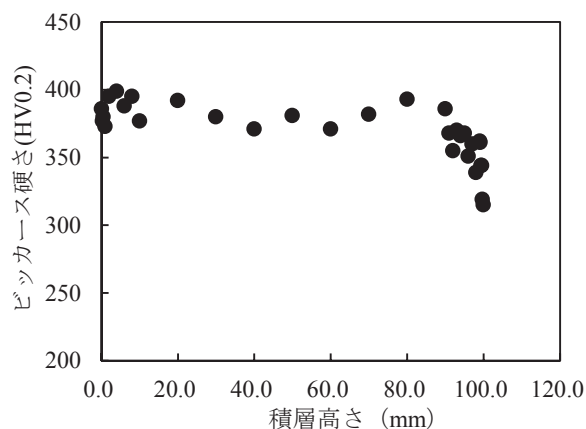


図 7 金属 AM 材の積層高さにおける硬さ分布

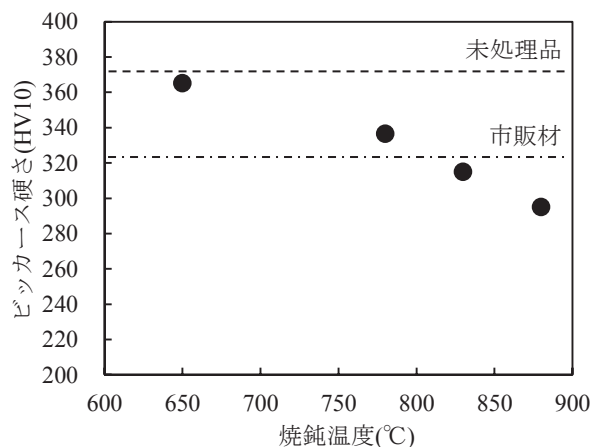


図 8 金属 AM 材の各焼鈍温度における硬さ

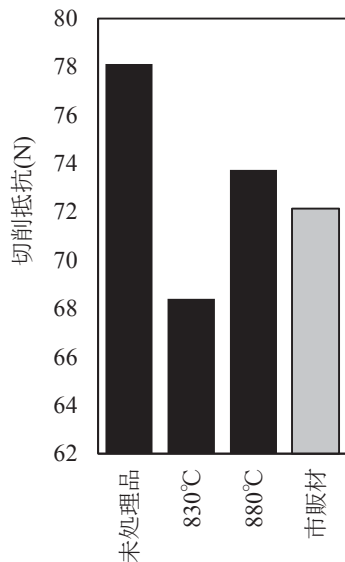


図9 各試料の切削抵抗

4. 結言

金属 AM 材の積層方向に対して平行，垂直，斜め 45° の 3 方向について各種試験を行い，機械的性質におよぼす積層方向の影響について調査し，市販材との比較を行った．また，仕上げ加工を想定し，切削性についても検討を行った．以下に結論を記す．

- 1) 金属 AM 材のマイクロ組織は積層の痕跡が見られ，内部には球状の気孔が観察された．なお，この気孔は格子状に並んでおり，いずれの方向でも観察された．一方，市販材のマイクロ組織は結晶粒が細かく均一に分布しており，内部欠陥はなかった．
- 2) 金属 AM 材の硬さはいずれの方向も 375HV0.2 程度であり，積層方向による硬さへの影響はなかった．また市販材の硬さは 320HV0.2 程度であり，金属 AM 材の方が硬さは大きかった．
- 3) 積層方向に平行及び垂直方向の引張強さは 1150 MPa 程度とほぼ同じであったが，斜め 45° 方向の引張強さは約 1100 MPa と小さかった．
- 4) 造形したままの金属 AM 材の切削性は市販材に比べて劣っていたが，焼鈍処理により改善された．

金属 AM 材は斜め 45° 方向における引張強さがやや小さいため，留意が必要である．また，仕上げ加工を行う際は造形後に 830°C 程度の焼鈍を行うと効率の良い加工が行えると考えられる．

参考文献

- 1) 中本貴之，白川信彦，乾晴行：鋼系粉末の積層造形法における造形物の高性能化，粉体および粉末

冶金，Vol.60，No.11，p.460（2013）

- 2) 安達充，小岩井修二，小岩井豊己：電子ビームを用いた金属積層法の特徴とその可能性，粉体および粉末，Vol.61，No.5，p.229（2014）
- 3) 京極秀樹：金属 3D プリンタの開発動向と今後の展開，近畿大学次世代基盤技術研究所報告，Vol.5，p.141（2014）
- 4) 大和久重雄：マルエージング鋼，日本金属学会会報，Vol.3，No.12，pp.719-728（1964）