ノート

3Dプリンタによる新しい金型製造技術の開発（第2報）

平石　誠*　須藤　貴裕*　青野　賢司*

New Production Method of Metal Die Utilizing Additive Manufacturing (Part 2)

HIRAISHI Makoto*, SUTOH Takahiro* and AONO Kenji*

1. 緒　　言

金属 3D プリンタは，切削加工や塑性加工に次ぐ新たな加工技術として注目され，現在，様々な造形方式のものが実用化されている。その内，DED（Directed Energy Deposition）方式のものは基材と異なる材料を堆積できるため，必要な材料特性（例えば耐摩耗性，耐熱性など）を必要な場所に付与できること，既存の部品に任意の形状を追加できることが特徴である。

本研究では，近年の製品サイクルの短期化に対応する柔軟で迅速な金型製造工程の確立を目指して，DED 方式 3D プリンタによる硬質・耐摩耗層の堆積造形技術の開発に取り組んだ。前報 [1)]では，高速度工具鋼や粒子分散複合材料の堆積造形について検討し，堆積層は金型に要求される硬さを有することや造形時に堆積層に生ずる割れを抑制する方法について報告した。本報では，高速度工具鋼を用いて金型を試作する際に生じた課題，すなわち

(1)堆積層内に生ずる空孔欠陥の抑制

(2)堆積時の余熱が堆積層に及ぼす影響

について検討した結果を報告する。

2. 実験方法

2.1 3D プリンタ

堆積造形にはパウダ DED 方式金属堆積造形装置　LAMDA200（日本電産マシンツール（株））を使用した。ファイバーレーザの定格出力は 2kW，レーザ加熱部のシールドおよび粉末送給に用いたガスは Ar である。

2.2 材　　料

堆積材料には粒径 45～150μm の高速度工具鋼粉末（粉末ハイス）を使用した。基材は SS400 製の板材（長さ 100mm，幅 20mm，厚さ 10mm）とした。

2.3 評価方法

2.3.1 断面観察および硬さ試験

基材に走査長さ 50mm の堆積層を 5 列，5 層堆積し，走査方向に直交する断面において欠陥の発生密度測定およびビッカース硬さ試験を行った。欠陥の発生密度は約 20mm^2 の面積について光学顕微鏡像を画像解析して測定した。

2.3.2 抗折試験

基材に走査長さ 60mm の堆積層を幅 10.5mm，高さ 13mm に堆積し，焼戻し熱処理（540℃，1 時間，3 回）を施した後，ワイヤ放電加工により試験片（長さ 50mm，幅 4mm，厚さ 3mm）を 6 本切り出した。試験片の表面を粒径 30μm のダイヤモンド研磨盤で 60 秒間研磨した後，図 1 に示す 3 点曲げ試験に供して抗折応力を測定した。

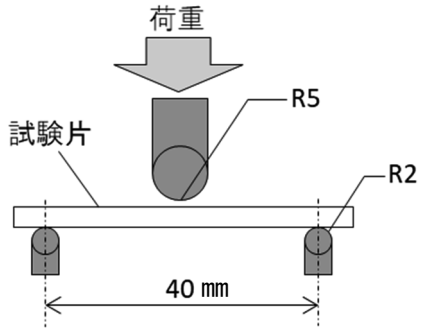


図 1　抗折試験

* 研究開発センター

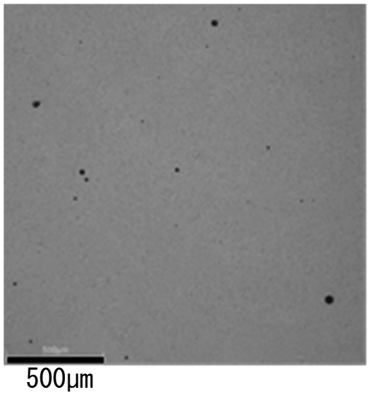


図 2　堆積層内に生じた空孔欠陥

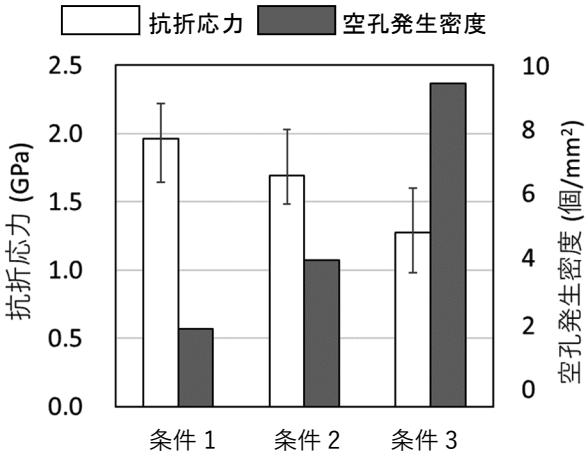


図 3　堆積層の抗折試験結果

3. 実験結果および考察

3.1 堆積層内に生ずる空孔欠陥

堆積層内には空孔欠陥がしばしば観察される。図 2 に見られる黒い点が空孔であり，球形をしていることから気体由来であると思われる。

空孔の発生量は堆積条件によって変化し，入熱量が大きくなるほど減少する傾向が見られた。図 2 は空孔が比較的多く発生する条件の例であり発生密度は 10.8 個/ mm^2 である。また，空孔の直径は 20μm 以下のものが約 80%を占めたが，発生密度が大きい条件では稀に直径数百 μm に達する空孔も観察された。

堆積条件を変化させて発生密度 2.3～9.5 個/ mm^2 の空孔を持つ試験片を作製し抗折試験に供した。

試験結果を図 3 に示す。空孔発生密度の低下に伴って抗折応力は大きくなることがわかる。高速度工具鋼の堆積層は後述のように高い硬さを持つ反面，靭性は低いため，欠陥密度がその強度に強く影響したことが推察される。

なお，金型の製作過程において堆積層の機械加工を行う際に金型のエッジ部に発生した欠損は，空孔発生密度が低い条件で造形することにより抑制された。堆積層内の空孔欠陥を完全になくすことは困難であると思われるが，適正な堆積条件を選び，空孔欠陥の発生を抑えることが重要である。

3.2 堆積時の余熱が堆積層に及ぼす影響

一般的に高速度工具鋼は，1050～1300℃からマルテンサイト変態開始点（Ms 点）以下に冷却して焼入れした後，520～600℃での数回の焼戻しにより炭化物の析出と生地のマルテンサイト変態を伴う 2 次硬化を生じさせて所望の硬さを得る。

一方，金属堆積造形した堆積層は焼入れ工程を経ず，焼戻しだけで硬化する。堆積時に鋼粉末はレーザ光により融点以上に加熱されるが，基材や既積層への放熱や周囲への放射によって間もなく Ms 点以下に冷却されるものと思われる。図 4 に代表的な高速度工具鋼の連続冷却曲線を示す。

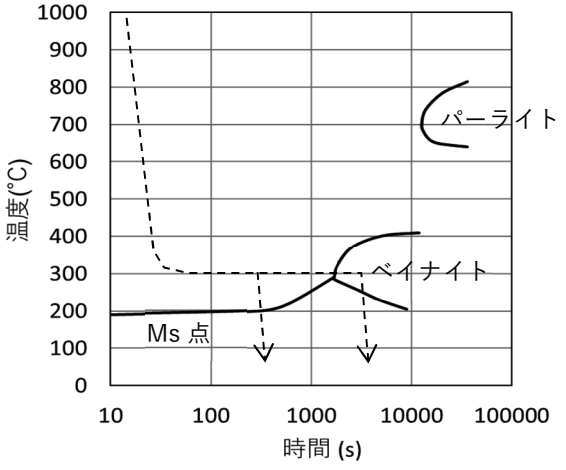


図 4　高速度工具鋼(SKH51)の CCT 線図 [2)]

高速度工具鋼は焼入れ性が良く，ベイナイト変態までに 10～100 min 程度（図 4 では 1700s≒30 min）の余裕があるため，積極的な冷却操作を行わなくてもマルテンサイト変態を生じやすい材料と言える。

しかし，金属堆積造形では所望の堆積厚さを得るまでに繰り返しレーザ光が照射され，都度，余熱により昇温するため，冷却が遅れマルテンサイト変態を生じないことが懸念される。

そこで，冷却が遅れる状態を模擬して予熱状態での堆積実験を行った。予熱温度は高速度工具鋼の一般的な Ms 点温度である 200℃を上回る 300℃とした。想定した温度変化を図 4 に破線で示す。実験方法は次のとおりである。

・予熱した造形テーブルに基材を置き，基材が予熱温度に達するのを待って堆積造形した。
・堆積後すぐに 300℃に加熱した電気炉に投入。
・設定時間保持後，炉から取り出して空冷し，焼戻し（540℃，1 時間，3 回）を行った。保持時間は 100～3000s とした。

堆積層の硬さ試験の結果を図 5 に示す。造形のままと焼戻し後のいずれも 300s より長時間側において硬さの低下が生じた。焼入れ時の冷却速度が低下してベイナイト変態が生ずるようになると，焼戻し硬さが低下することが報告されており[3,4]，その理由として，焼入れ冷却過程でベイナイト変態由来の炭化物が析出すると，続く焼戻し過程では炭化物形成元素が 2 次硬化に

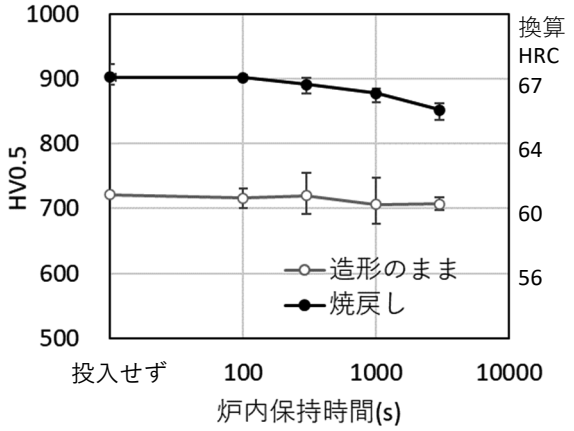
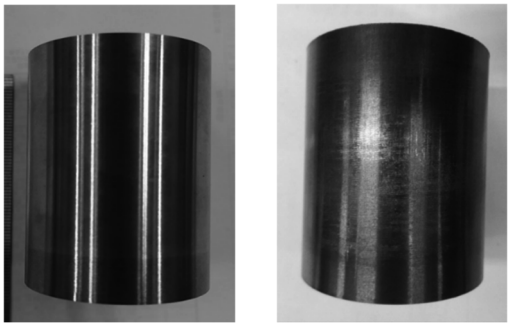


図 5　炉内保持した堆積層の硬さ



実証試験前　　**試験後**

図 6　試作した鍛造抜型

充分寄与しなくなり，加えて当該炭化物の凝集により軟化することが考察されている[3]。

本実験においてベイナイトの生成は確認されていないが，同様の現象が生じていると考えられる。硬さを重視する用途では，冷却工程を入れる等の温度履歴の管理が必要となるであろう。

3.3 試作型による加工実証

図 6 に示す鍛造抜型（ϕ50mm，高さ 60mm）を試作して，製品に見立てた S35C，厚さ 22mm の板材を対象に熱間型打ち試験を行った。型打ち回数は 500 回とした。

試験の結果，製品側の形状および傷に関しては従来品と変わらず問題なく，また，抜型に欠けや傷は認められなかった。

4.　結　　言

3D プリンタによる金型の造形技術の開発を目的に，高速度工具鋼の堆積造形における欠陥の抑制と余熱の影響について検討し，また，試作型による加工実証を行い，以下の結果を得た。

1) 堆積層の空孔欠陥の発生を抑制することにより抗折応力は大きくなった。
2) 堆積後 300℃に保持される時間が 300s を超えると，堆積層の硬さは徐々に低下した。
3) 試作した鍛造抜型にて 500 回の型打ち試験を行い，型に欠けや傷は認められなかった。

参考文献

1) 平石誠ほか，“3D プリンタによる新しい金型

製造技術の開発”, 工業技術研究報告書, No.50, 2021, pp.9-12.
2) 大同特殊鋼（株）冷間鍛造型用鋼 DRM3 カタログ(2020)
3) 上原紀興 他, “熱間工具鋼の実用特性に及ぼす焼入れ冷却速度の影響”, 電気製鋼, vol.52,no.3(1981), pp.165-173.
4) 伊藤一夫 他, “高速度工具鋼の焼もどし硬さに及ぼす焼入冷却速度の影響”,電気製鋼, vol.53, no.4(1982), pp.248-255.