

DED 方式金属堆積造形により製作した金型の 高靱性化に関する研究

新潟県工業技術総合研究所
平石 誠

(2021 年度 一般研究開発助成 AF-2021207-B2)

キーワード：アディティブ・マニュファクチャリング，工具鋼，曲げ強さ

1. 緒言

材料技術や加工技術が日々高度化する中，工業製品の製造を支える金型の使用状況はますます厳しくなり，高い耐久性が必要となっている．一方，金型の製作においては，消費者ニーズの多様化や製品サイクルの短期化に伴って，製品の設計変更柔軟かつ短納期に対応しコストアップを抑えた加工技術が求められている．

DED (Directed Energy Deposition) 方式金属堆積造形は，レーザー光等の局所熱源を照射した箇所に金属材料を投入し，これを熔融・凝固させながら堆積して立体造形するものである．既存部品にニアネットで作成できることや，基材とは異なる材料を部分的に付加できることから，上述のような金型製作におけるニーズに対応する技術として期待されている．

一方，高速度工具鋼は高硬度で耐摩耗性が高いため，これを用いた金型の堆積造形については多くの報告^{1~3)}があるが，造形の際に熔融・凝固過程を経ることから堆積層にはネットワーク状に連なった共晶炭化物が生じ，このために靱性が低いとされている^{2,4)}．

本研究では，金属堆積造形による高速度工具鋼金型の靱性向上を目的に，堆積造形時のレーザー加熱条件が堆積層の炭化物分布や組織，硬さ，曲げ強度に及ぼす影響について調べた．また，有限要素法シミュレーションにより堆積造形プロセスを再現するとともに実際の金型形状を堆積造形する際の温度変化の予測を試み，レーザー加熱条件が曲げ強度に及ぼす影響について検証した．

2. 実験方法

2.1 堆積造形装置

堆積造形にはパウダ DED 方式堆積造形装置 LAMDA200 (ニデックマシンツール (株)) を使用した．実験装置の模式図を図 1 に示す．レーザーヘッドの先端からは波長 $1.07\mu\text{m}$ のレーザー光が照射され，基材表面に熔融池を作る．また，堆積材料である粉末はレーザー光の光軸周りに配置されたノズルから吐出され，熔融池にて堆積層を形成する．造形時の高温部を大気から遮蔽するためのシールドガスおよび粉末のキャリアガスには Ar を用いた．

2.2 供試材

堆積材料となる粉末には高速度工具鋼 (SKH40 相当) を使用した．組成を表 1 に示す．粒径分布は $45\sim 150\mu\text{m}$

である．

基材には幅 6mm，長さ 46mm，高さ 50 mm の SS400 製の板を用いた (図 2)．基材の $6\times 46\text{mm}$ の面を堆積面とし，長さ 40mm のビードを幅方向に 3 列引き，これを 1 層として高さ方向に 8 層積層して高さ 3.3mm の堆積層を造形した．ビードを引く方向は一方向とした．

2.3 温度測定

造形中の堆積層および基材の温度変化を測定した．測定器の配置，測定位置を図 1，2 に示す．

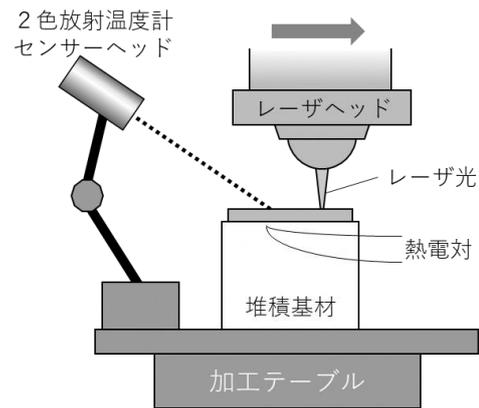


図 1 実験装置

表 1 堆積材料の化学組成 (mass%)

C	Si	Mn	Cr	Mo	W	V	Co	Fe
1.27	0.15	0.34	4.26	4.56	6.53	3.15	8.15	Bal.

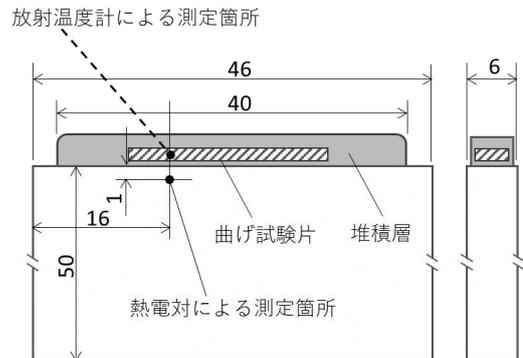


図 2 基材サイズと曲げ試験片の切り出し位置

堆積層の温度測定には 2 色放射温度計 Metis M322 (Sensortherm GmbH) を用いた。測定可能範囲は 350～1300℃, 測定スポット径はφ1mm である。測定位置は基材の幅の midpoint 位置で, 造形開始側から 16mm 付近 (斜めに入射しているため堆積高さの増加とともに 2mm 程前後する) の位置とした。

また, 基材の温度は素線径φ0.2mm の K 熱電対により測定した。熱電対は, 基材の側面上で造形開始側から 16mm, 堆積面から 1mm 離れた位置に溶接した。

2.4 堆積造形条件

堆積層が凝固するときの冷却速度を変化させるため, 基材温度あるいは時間間隔を変えて造形した。前者では, ある層を堆積した後, 熱電対で測定した基材温度が 100℃, 150℃, 200℃に低下するのを待って次の層を堆積した (以下, 各条件を「○○℃維持」と記載)。なお, 100℃維持条件では堆積層に割れが生ずる場合があった。後者では, 1 層ごとに 0s または 5s 停止させて次の層を堆積した (以下, それぞれ「連続」, 「5s 間隔」と記載)。なお, レーザ出力, レーザヘッドの送り速度, 粉末供給量等の条件は, 予備実験にて内部欠陥が最も少なくなる条件で一定とした。

2.5 堆積層の評価

造形された堆積層に焼戻し熱処理を施した後, 曲げ試験および硬さ試験に供した。熱処理条件は, 加熱温度 560℃, 保持時間 1 時間を 3 回繰り返した。

曲げ試験片は基材による希釈がない位置 (基材表面から 0.6～2.1mm) から切り出した (図 2)。試験片の大きさは長さ 24mm, 幅 4mm, 厚さ 1.5mm とし, 上下面を研磨により 0.2μm Ra 以下に仕上げた。試験は 3 点曲げ (支点間距離 20mm, 支点ロール直径は 4mm) とし, 各条件について 4 本の試験片の破断荷重から平均値を求め, 曲げ強さとした。

硬さはビッカース硬さ試験により評価した。

3. 実験結果

3.1 冷却速度

造形中の基材温度の変化を測定した例を図 3 に示す。のこぎり刃状に連なる山の一つ一つが, 各層を造形したときの昇温に対応している。連続条件では急速に昇温し, 最終層の造形時は 730℃に達した。

曲げ試験片の上面切り出し位置に相当する 5 層目を造形しているときの堆積層の温度を測定した例を図 4 に示す。横軸は, レーザ光が測定点に接近し 1300℃に達した時を 0s とし, その後の経過時間を示している。150℃維持条件に比べて 5s 間隔や連続条件では温度低下が緩やかであることがわかる。各堆積造形条件にて 5 層目を造形したときに測定された 1250～1150℃の間の冷却速度は表 2 のとおりとなった。

3.2 曲げ強さ

各堆積造形条件で得られた堆積層の曲げ試験結果を図

5 に示す。150℃維持条件で最も高い曲げ強さが得られた。また, 表 2 の冷却速度との関係では, 冷却速度が大きくなるほど高い曲げ強さが得られる傾向が認められた。

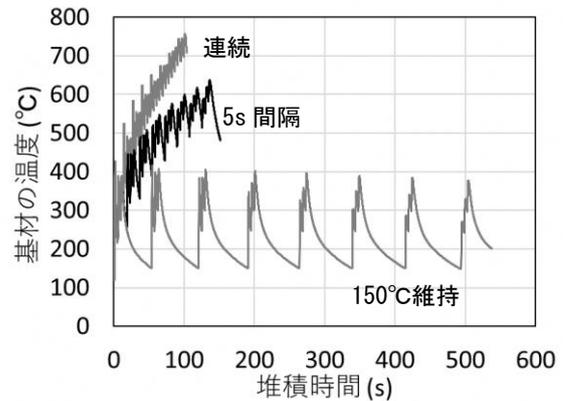


図 3 基材の温度変化

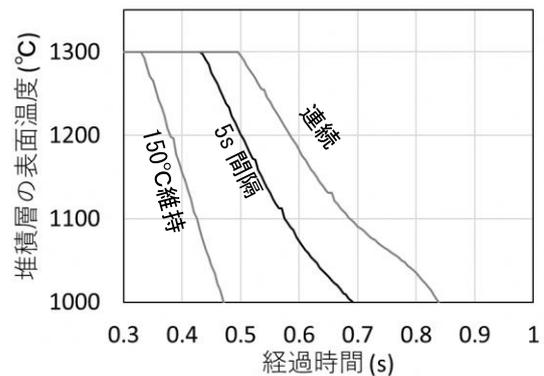


図 4 堆積造形中 (5 層目) の温度変化

表 2 各堆積造形条件での冷却速度 (1250→1150℃冷却時) (°C/s)

100℃維持	150℃維持	200℃維持	5s間隔	連続
2323	2186	1959	1438	1182

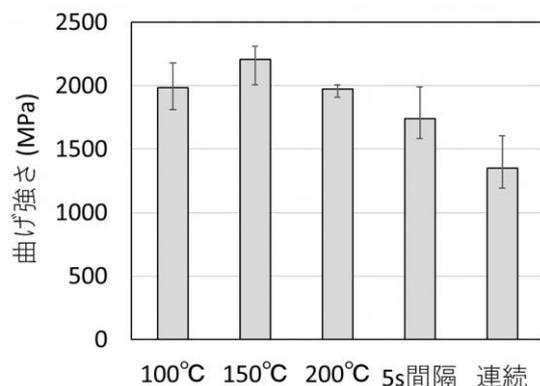
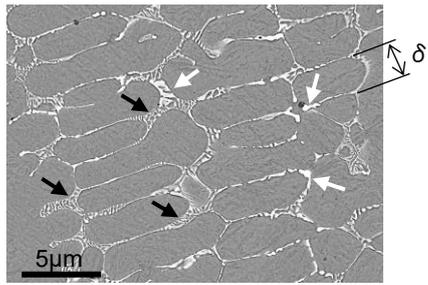
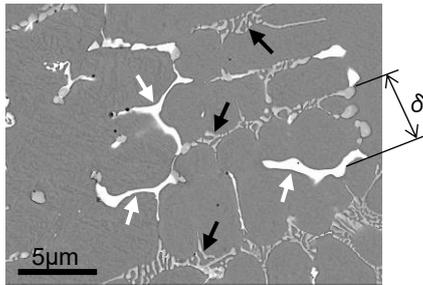


図 5 各堆積造形条件での曲げ強さ



(a) 5s 間隔条件



(b) 連続条件

図6 堆積層の断面 (反射電子像)

4. 考察

4.1 冷却速度が低い条件での強度低下

5s 間隔条件と連続条件での堆積層の断面を観察した。観察面はビードと平行し、中央のビードの中心を通る面とし、基材表面から 2mm 離れた位置とした。

反射電子像を図 6 (a), (b) に示す。いずれの条件でも柱状デンドライト組織を呈しており、右斜め上方に成長している 2 次アームの間隙には、図中に矢印で示したように共晶炭化物が形成されていた。成分分析の結果から、白い組織 (白矢印) は Mo, W の炭化物、明るいグレーの組織 (黒矢印) は V 炭化物であると考えられる。

連続条件では、5s 間隔条件に比べてデンドライトアーム間隔が大きく、炭化物間の距離 δ も大きい。また、5s 間隔条件では共晶炭化物のほとんどが層状であるのに対し、連続条件では厚いフィルム状の炭化物が多く観察された。

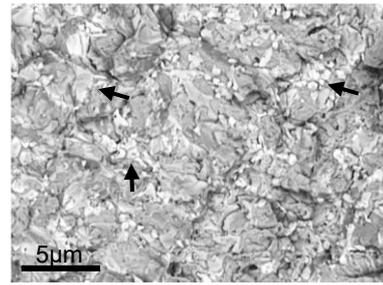
5s 間隔条件と連続条件について、曲げ試験片の破面の反射電子像および同視野の元素マッピング像をそれぞれ図 7, 8 に示す。観察位置は曲げ試験片の表側 (試験で中央ロールが当たった面の反対面) の表面近傍である。

いずれの条件でも破面にはデンドライトに対応した凹凸が観察された。

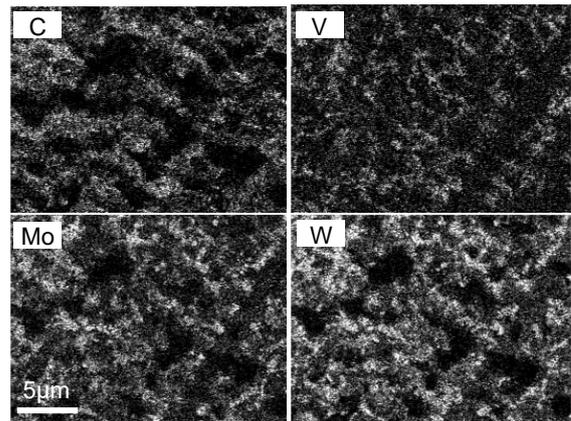
5s 間隔条件の破面 (図 7 (a)) には、矢印で示した明るいトーンの粒や層が多く認められる。これらは元素分析の結果から V, Mo, W の炭化物であると判断され、図 6(a) に観察された層状組織の断面と考えられる。

一方、連続条件の破面 (図 8 (a)) にも Mo, W を含み、明るいトーンで観察される炭化物が存在するが、5s 間隔条件と比べるとその面積は広く、面状に分布している。これは、断面 (図 6 (b)) に観察された厚いフィルム状の

炭化物がクラックの伝播経路となり、破面に露出したものと考えられる。

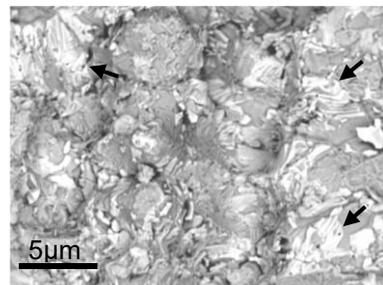


(a) 反射電子像

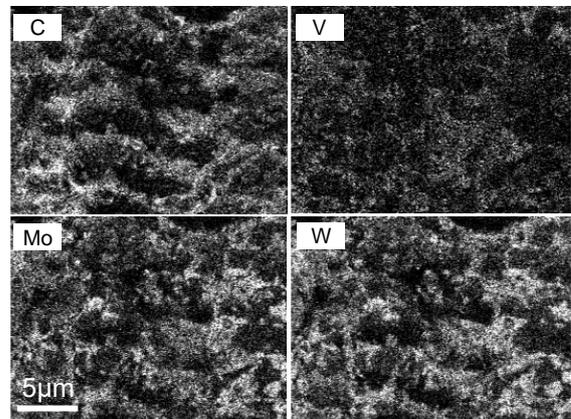


(b) 元素マッピング像

図7 5s 間隔条件の曲げ試験片破面



(a) 反射電子像



(b) 元素マッピング像

図8 連続条件の曲げ試験片破面

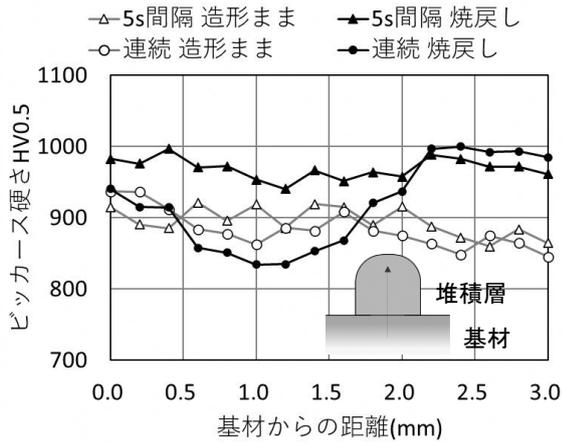


図9 堆積層の硬さ分布

連続条件において曲げ強さが低下した原因として、高速度工具鋼に応力が加わったとき、大きな炭化物ほど高い応力集中が生じること⁵⁾や、炭化物間の距離が比較的大きいために炭化物周辺のマトリックスに多くの転位が集積し⁶⁾、炭化物にクラックが発生しやすくなったことが推察される。

図6 (b)に見られる炭化物がどのように形成されたのかを検討するため、硬さ試験を行った。図9に堆積層の硬さ分布を示す。造形後に焼戻しを施した状態と造形のままの状態を併記している。グラフの横軸は基材表面からの距離である。

5s 間隔条件では、造形のままの状態での硬さは概ね900HVであり、焼戻しにより2次硬化し950~1000になった。一方、連続条件では、造形のままの状態では5s 間隔条件と同等かわずかに低下する程度であるが、焼戻しをしても基材表面から2mmの範囲では2次硬化が認められず、むしろ硬さが低下する領域も認められた。

高速度工具鋼の2次硬化には、遷移金属Mの炭化物 M_2C (Mo_2C や W_2C)の析出と残留オーステナイトのマルテンサイト化が寄与する⁴⁾が、 M_2C はその析出温度範囲である540~580℃を超えると粗大な M_6C や $M_{23}C_6$ に変化し⁷⁾、凝集するため、硬さや曲げ強さが低下するとされている⁴⁾。

図3に示した造形中の基材温度の変化を見ると、連続条件では6層目の堆積（堆積時間65s）以降、基材の温度が600℃を超えており、既に造形されていた堆積層はそれ以上の温度に加熱されたことは明らかである。以上のことから、図6 (b)の厚いフィルム状炭化物は、遅くとも6層目以降の堆積造形に伴う熱影響により M_6C 等が凝集したものと考えられる。

4.2 冷却速度の増加に伴う強度向上

図10 (a)~(d)に100℃~200℃の各温度で維持した条件および5s 間隔条件での堆積層の断面の反射電子像を示す。各図の下に記載した λ 値はデンドライトの2次アーム間隔である ($50 \times 50 \mu m$ 視野の光学顕微鏡像から切断法にて測定した)。

5s 間隔条件、200℃、150℃、100℃維持条件の順に冷

却速度は大きくなり（表2）、それとともに λ 値は小さくなった。併せて、5s 間隔条件において観察される層状の共晶炭化物（矢印で示す）もその面積を減じ、100℃維持条件や150℃維持条件では細く、一部不連続な線状に変化した。

図11 (a), (b)は150℃維持条件での曲げ試験片の破面を観察した2次電子像と同視野の元素マッピング像である。曲げ試験片の表側近傍にはリバーパターンを呈した擬へき開割れが認められた。また、図11 (b)から炭化物が細い線状に分布していることがわかる。

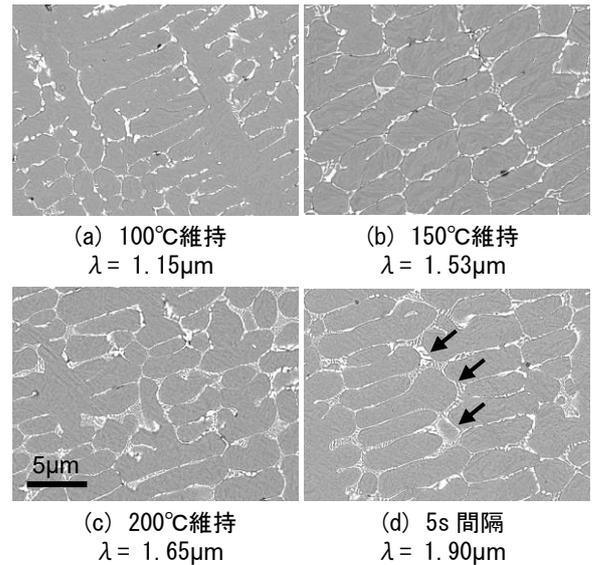
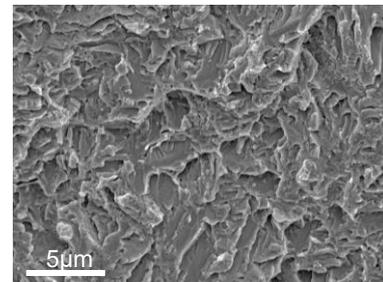
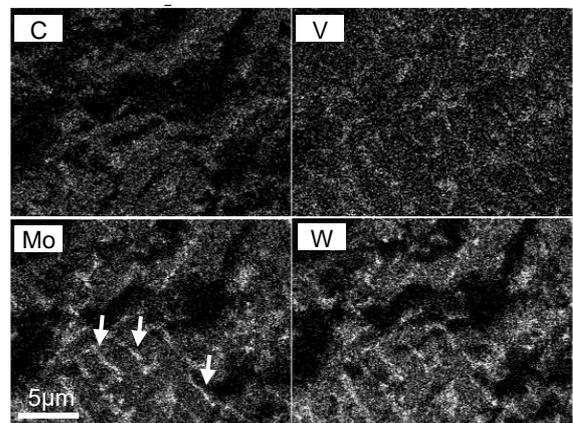


図10 堆積層の断面組織



(a) 2次電子像



(b) 元素マッピング像

図11 150℃維持条件の曲げ試験片破面

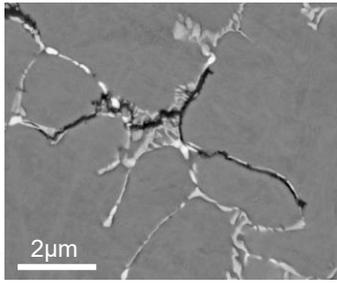


図 1 2 100℃維持条件の堆積層に生じたクラック

これらのことは、割れが共晶炭化物を横断しマトリックス内で生じたことを示しており、デンドライトアーム間の共晶炭化物で割れた 5s 間隔条件や連続条件とは対照的である。

この原因は連続条件における強度低下と逆の説明で理解される。すなわち、炭化物のサイズや炭化物間の距離（ λ に相当）が小さいために炭化物の破壊が生じにくくなり、結果として大きな応力を要するマトリックス内での破壊に至ったと考えられる。

造形時の冷却速度が大きな条件で堆積層の曲げ強さが向上した一方、100℃維持条件では低下した。2.4 節で述べたように同条件では堆積直後に割れが生ずる場合があった。目視では割れが認められなかったものの、堆積層の断面を詳細に観察すると図 1 2 のような微小なクラックが生じており、これが予備亀裂となって曲げ強さを低下させたと考えられる。

5. 冷却速度が曲げ強さに及ぼす影響に関する検証

適切な範囲の冷却速度で造形することにより高い曲げ強さを持った堆積層が得られることが期待される。本章ではこのことを検証するために、冷却速度の目標値を定めて造形したときの堆積層の強度を評価した結果について述べる。実際の金型形状を対象として所望の冷却速度を実現する堆積条件を決定するにあたり、有限要素法によるシミュレーションを用いることを試みた。

5.1 シミュレーションモデルの作成

図 2 の試験片の堆積実験において得られた表 2 の堆積条件と冷却速度の関係を再現するシミュレーションモデルを作成した。シミュレーションソフトには Simufact Welding (Hexagon AB) を用い、関与する材料の熱伝導率、放射率、熱伝達率、堆積層を形成するビードの大きさ、堆積材料の融点をパラメータとしてシミュレーション結果と実験結果との合わせ込みを行った。

5.2 金型の造形シミュレーション

図 1 3 に示す形状のせん断加工用金型を対象とした。基材には 15×70×25mm の SCM415 製ブロックを用いた。基材の一辺に幅 10mm、深さ 3mm の入隅を設け、長さ 66mm のビードを幅方向に 6 列、高さ方向に 8 層積層して高さ 3.3mm の堆積層を造形した。また、堆積層と基材の温度をそれぞれ 2 色放射温度計と熱電対で測定した。

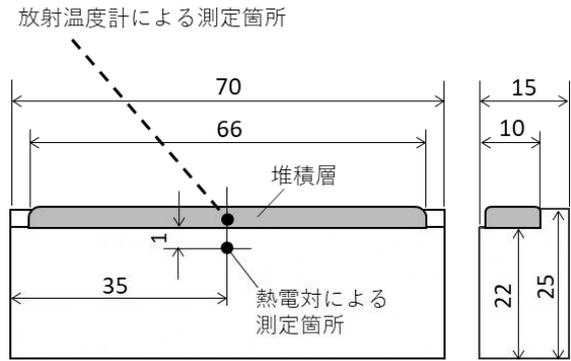


図 1 3 検討対象としたせん断加工用金型

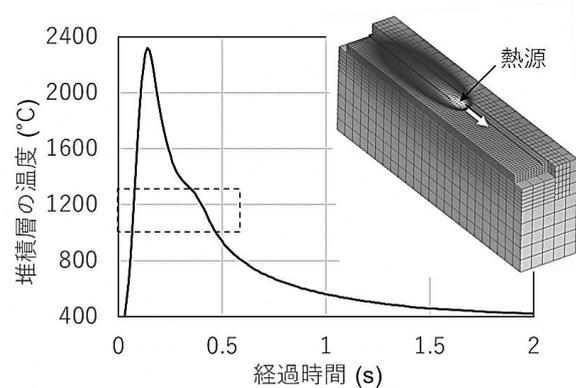


図 1 4 堆積造形のシミュレーションの一例

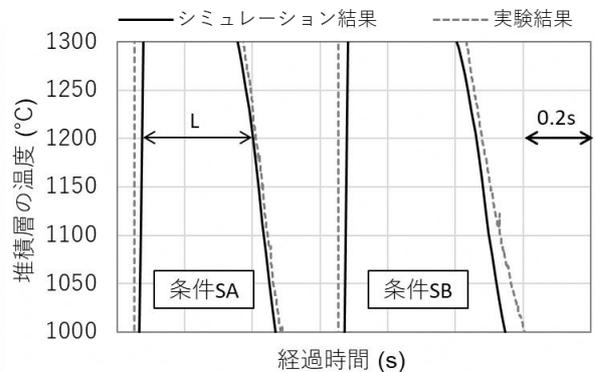


図 1 5 堆積層の温度変化についてのシミュレーション結果と実験結果の比較

作成したシミュレーションモデルを用いて 2 つの堆積条件を探索した。1 つは層を堆積するごとに基材温度が 200℃に低下するのを待って次の層を堆積する条件（以下、条件 SA と記載）、もう一つは図 5 にて最大の曲げ強さを示した 150℃維持条件と同等の冷却速度（2183℃/s）が得られる条件（以下、条件 SB と記載）である。

検討の結果、レーザー出力と送り速度は一定かつ送り方向は一方向として、条件 SA ではビードを 3 列堆積するごとに堆積を 50~70s 停止させる条件、また、条件 SB ではビードを 1 列堆積するごとに 0.5s 停止させる条件を得た。シミュレーションの一例を図 1 4 に示す。図中の立体図

は解析モデルであり、グラフは図中に示した熱源が温度測定点を通じたときの温度変化の解析結果である。

条件 SA および SB にて堆積造形を行った。図 1 5 は、図 1 4 のグラフの破線囲み部分を拡大したものであり、両条件にて 5 層目を堆積しているときの温度変化についてシミュレーション結果と実験結果を比較して示している。なお、横軸上の位置は、便宜的に昇温過程で 500℃付近に達した時刻を一致させた。

昇温時にある温度に達してから冷却時に再び同じ温度に至るまでの時間を L としたとき、条件 SA に比べて条件 SB の方が時間 L が長く、また、冷却が緩やかであるが、それらの傾向はシミュレーションで予測できていることがわかる。シミュレーション結果に比べて実験結果の時間 L が長くなるのは、測定スポット径が大きさを持っていることが一因になっていると考えられる。

各堆積条件における 1250～1150℃の間の冷却速度は表 3 に示すとおりであり、シミュレーションにより予測した値に近い実験値が得られた。

5.3 曲げ強さ

条件 SA および SB にて造形した堆積層について曲げ強さを評価した。試験は 2.5 節と同様とし、2つの金型（図 1 3）から 2 本ずつ計 4 本を切り出して曲げ試験に供した。

試験結果を図 1 6 に示す。冷却速度が 2100℃/s 付近になる条件 SB において高い曲げ強さを示し、より大きな冷却速度になる条件 SA では強度が低下した。この傾向は図 5 と同様であり、適切な冷却速度の堆積条件で造形することにより高い曲げ強さが得られることが確認された。

6. 結 言

金属堆積造形による高速度工具鋼金型の靱性向上を目的に、堆積造形時の凝固過程における冷却速度が堆積層の炭化物分布や曲げ強度に及ぼす影響について調べた結果、以下の結論を得た。

- (1) 冷却速度が大きくなるほど堆積層の曲げ強さは高くなる傾向が認められた。
- (2) いずれの条件でも柱状デンドライト組織を呈しており、デンドライトアーム間には共晶炭化物が形成されていた。
- (3) 冷却速度が小さい条件では、後続層の熱影響により共晶炭化物が厚いフィルム状に凝集し、曲げ試験におけるクラックの伝播経路になった。
- (4) 冷却速度が大きい条件では、共晶炭化物は細い線状となり、炭化物間の距離は小さくなった。このために炭化物の破壊が生じにくくなり、曲げ強さが向上したことが推察された。ただし、冷却速度が過剰に大きい条件では堆積層に割れが生じ、曲げ強さが低下した。

表 3 各堆積造形条件での冷却速度
(1250→1150℃冷却時) (°C/s)

	条件SA	条件SB
シミュレーション結果	2681	2154
実験結果	2705	2070

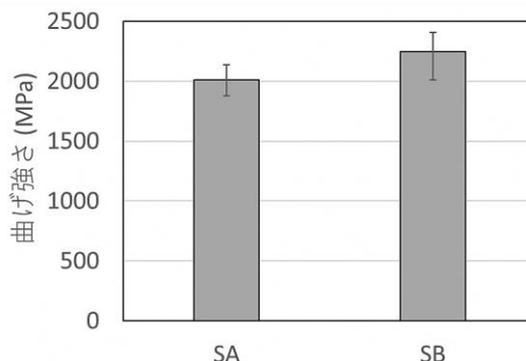


図 1 6 金型の堆積層の曲げ強さ

- (5) 堆積造形プロセスのシミュレーションにより造形時の冷却速度を予測できた。
- (6) 適切な冷却速度となる堆積条件で造形することにより高い曲げ強さが得られることが確認された。

謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団の一般研究開発助成によるものであり、ここに付記して深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 京極 秀樹, 生田 明彦, 上森 武, 柿迫 健, 他 2 名, “工具鋼粉末のレーザ積層造形”, 近畿大学次世代基盤技術研究報告書, vol. 3, 2012, pp. 55-60.
- 2) 薩田 寿隆, 石川 毅, 高橋 和仁, 横田 知宏, 他 3 名, “粉体レーザ肉盛りにより形成した高速度工具鋼肉盛り層の特性”, 熱処理, vol. 59, no. 2, 2019, pp. 53-60.
- 3) 山本 隆久, 澤田 俊之, “レーザークラッド及び PTA で作製した粉末ハイス層の特性”, 溶接学会全国大会講演概要, vol. 104, 2019, pp. 40-41.
- 4) 佐藤 忠雄, 相沢 力, “プレス型材料と熱処理”, 日刊工業新聞社, 1972, p. 24, p. 95.
- 5) 三谷 状士, 沙魚川 智之, 渡邊 千尋, 門前 亮一, “高速度工具鋼の疲労挙動への窒素の効果”, 日本金属学会誌, vol. 72, no. 2, 2008, pp. 105-110.
- 6) 高木 節雄, “多結晶フェライト鋼における降伏・変形挙動”, 日本金属学会誌, vol. 83, no. 4, 2019, pp. 107-118.
- 7) 仁平 宣弘, “高速度工具鋼 (ハイス) の焼入れ焼戻し”, 工業加熱, vol. 60, no. 2, 2023, pp. 19-24.