

金属積層造形の品質向上技術の高度化に関する研究

斧 督人*
ONO Masato

要旨 指向性エネルギー堆積法を用いた金属 3D プリンタは、既存部品に対して、同種や異種材料を追加で積層造形可能であるという、他方式の金属 3D プリンタでは実現が難しい、大きな特徴を有している。このため、例えば、金属素形材産業の企業が、既存金型の特性向上が必要な箇所のみ積層造形を行い、補修や耐久性向上のための改善を図るという活用方法が、この指向性エネルギー体積法金属 3D プリンタにおいて期待されている。これまでの研究において、金型鋼 SKD61 上への同種 (SKD61) や耐摩耗性/靱性改良を目的とした異種 (SKH40) 追加積層造形を検討し、その接合性や剥離課題に対する接合界面の材料傾斜化の有用性を明らかにした。ここで、金型や工具を活用する産業において、硬質な異種材料の追加造形後の仕上げ切削工程におけるコスト増加が製品化への妨げとなるという懸念が寄せられている。

そこで本研究では、鋼材上への硬質異種材料追加造形時において、後工程である仕上げ切削工程の効率化を図った接合材料およびその接合方法の検証を行った。さらに、金型鋼 SKD61 上への同種 (SKD61) 積層造形後の後工程である熱処理後の特性について併せて検証を行った。

1 はじめに

金属 3D プリンタを用いた金属積層造形においては、粉末床溶融結合法 (以下、PBF 方式)、指向性エネルギー堆積法 (以下、DED 方式)、バインダージェット法 (以下、BJT 方式) など様々な方法が存在し、それぞれの特徴を活かしながら活用されている。

金属 3D プリンタ造形において、従来の一般的な印象は、PBF 方式を活用して、中空構造造形による部品の軽量化や内部に冷却水管を設け冷却性能を向上させた金型等、従来の切削加工では構造上実現が難しい複雑形状の造形に有用性を見出してきた。しかしながら、PBF 方式は、複雑形状を含めた造形を行うことが可能である反面、単一材料の造形が一般的である。一方、DED 方式は、レーザー照射と同時に同じノズルから搬送用ガス (以下、キャリアガス) を介して金属粉末を吐出し、併せて造形箇所の酸化を抑制する不活性ガス (以下、シールドガス) を用いながら、肉盛り溶接のように積層造形を行う手法である。レーザーによる造形箇所の溶融地形成が必要なため、ラティスや中空構造などの複雑形状の造形は不可能である反面、DED 方式は PBF 方式とは実現し難い異種材料の追加積層造形、複数の粉末供給部 (パウダーフィーダー) の同時稼働により実現する複合材料や傾斜機能材料 (接合) の造形などが行えることが大きな特徴として挙げられる。

このように DED 方式は既存製品に対して追加で積層造形可能であるという大きな特徴を有していることから、例えば既存金型の形状修正、割れや剥離箇所の

補修、異種材料による硬さや靱性特性の改良に関する活用が期待されている。

ここで、金型に一般的に用いられている工具鋼において、大別される合金工具鋼や高速度工具鋼などの種類の他、冷間金型用、熱間金型用など様々な分類の下、多くの材料が金型本体や溶接補修などに活用されている。このように既存分野や手法で活用されている工具鋼だが、さらなる長寿命化が期待される超硬合金については、DED 方式金属 3D プリンタを活用した積層造形・異種材料接合積層に関する検討例は極めて少ない。ここで、過去の研究において、金型補修への展開を期待し、熱間金型鋼材 SKD61 上への高速工具鋼 SKH40 や超硬合金の異種材追加積層造形を検討し、粉末 DED 方式金属積層造形の有用性について明らかにしてきた。しかしながら、材料コストのみならず造形後の後加工工程である切削工程におけるコスト (切削時間や工具交換頻度等) を考慮すると、異種材追加造形界面の強固な接合のみならず、切削仕上げ加工しやすい接合方法の検討が製品化への課題となっている。

そこで本研究では、金型補修の観点から鋼材上への異種材料追加積層造形を検討し、観察や評価を通じて課題を明らかにした。さらにこの課題を材料面から克服する手段として傾斜機能化を含めた接手法ならびに造形後の熱処理を検討したので、報告する。

2 実験方法

2.1 金属 3D プリンタ装置の概要

センターでは、技術研究組合次世代 3D 積層造形技術総合開発機構 (TRAFAM) より開発された日本電産マシントール株式会社製のパウダ DED 方式 3 次元

* 機械システム係

金属積層造形機 LAMDA200 の商用初号機を、平成 30 年度に「生産性革命に資する地方創生拠点整備交付金」（平成 29 年度内閣府補正予算）により整備した。本研究では、この DED 方式の金属 3D プリントを用いた。

図 1 に装置外観写真を示す。装置は、造形部本体、粉末供給部（パウダーフィーダー）、レーザー発振器、チラー、集塵装置より構成されている。積層時は、造形物を静置させるテーブルが X および Y 軸方向に稼働し、レーザー照射や粉末が吐出されるノズルが Z 軸方向に稼働する。最大造形サイズは 200 x 200 x 200 mm、レーザー出力の最大値は 2000W、パウダーフィーダーは 2 つ備えており、同時稼働が可能である。

2.2 使用材料および主な積層造形条件

積層造形に用いた金属材料は、全てガスアトマイズ法で作製された粉末であり、本研究では SKD61 相当粉末（大同特殊鋼株式会社製 DAPSKD-MOD-HTC50 粒径 15~53 μm ）、SKH51 相当粉末（山陽特殊製鋼株式会社製 粒径 45~150 μm ）および SUS316L 相当粉末（山陽特殊製鋼株式会社製 粒径 45~150 μm ）を用いた。また、積層造形は SKD61 相当材（HRC53 調質）のプレート（約 75mm x 75mm x 5mm）上で行った。

表 1 に主要な造形条件を示す。主にレーザー出力と走査速度（稼働速度）を変化させ、造形およびスリット幅の影響を検討した。ビードの幅に影響をおよぼすスリット径は $\phi 2\text{mm}$ とし、粉末のキャリアおよび積層箇所のシールドには Ar ガスを用いた。なお、後述する傾斜機能材料（材料の傾斜機能化）においては、混合吐出する各粉末の吐出量の制御を行った。また、図 2 に造形形状の概略図を示す。造形サイズに影響をおよぼす積層回数などは、全ての造形サンプルにおいて共通のプログラムを利用し、約 50mm x 10mm x 約 5mm サイズの造形サンプルを評価の対象とした。

2.3 積層時の材料接合概要

図 3 に本研究において検討した追加積層造形における機材との接合手法の概要を示す。大別して、異種材単体接合、基材界面において材料傾斜化を試みた傾斜接合、基材界面に単一材料を挿入した単相接合の三パターンである。具体的には、SKD61 基材上への SKH51 材単体積層、基材界面を同種の SKD61 材もしくは SUS316L 材を用いて SKH51 材への傾斜化を図った傾斜接合、基材界面に SUS316L 単相を挿入した後 SKH51 材を積層した単相接合である。

これまでの研究において、直接単体積層において材料同士の炭素当量の違いによる剥離が懸念されることが明らかであり、また、基材と同種の SKD61 材を用いた傾斜接合の有用性を明らかとしている。本研究では、後工程の切削加工の簡便さおよびコスト削減を図るために、特に SUS 材を用いた傾斜化ならび単相接合に着目して進めた。

2.4 評価方法

積層造形物の観察・評価は、デジタルマイクロスコープ（株式会社キーエンス製 VHX-6000）を用いた。また、硬さ測定は、マイクロビッカース硬さ試験機（株式会社ミットヨ製 HM-221）を用いた。

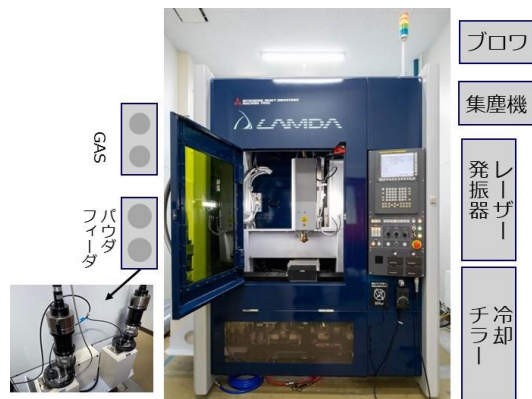


図 1 DED 方式金属 3D プリント LAMDA200 の外観写真

表 1 主要な積層造形条件

レーザー出力 (W)	走査速度 (mm/min)	スポット径 (mm)	粉末吐出量 (g/min)	ハッチピッチ (mm)	Zピッチ (mm)
1000~1400	800	2	11	1	0.5
キャリアガス (L/min)	インナーガス (L/min)	アウターガス (L/min)			
4	15	20			

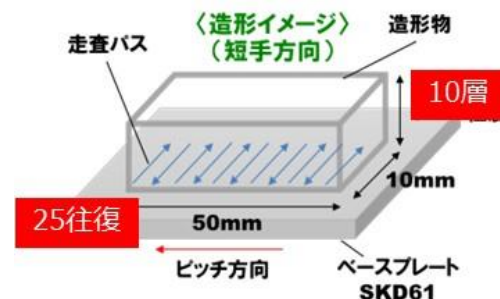


図 2 造形形状概略図



図 3 接合方法の概略

表 2 熱処理概略

焼入れ			焼き戻し		
温度 (°C)	時間 (min)	冷却方法	温度 (°C)	時間 (min)	冷却方法
950	20	水冷	550	60	空冷
1100			600		
950			550		
950			600		
950					

2.4 熱処理

表 2 に造形後の熱処理概略を示す。造形対象物は、SKD61 基材上への SKD61 同種粉末を積層したサンプルである。レーザー出力は 1000W 固定とし、焼入れに関しては温度 950℃もしくは 1100℃、焼入れ時間は 20min、冷却方法は水冷を検討した。また、焼き戻しに関しては、焼き戻し温度 550℃もしくは 600℃、時間は 60min、冷却方法は空冷を検討した。これら条件において、造形後に焼入れのみ、もしくは焼入れと焼き戻しを表 2 のとおり組合せ、後工程である熱処理の影響について調査した。

3 実験結果

3.1 外観および断面観察（単体および傾斜材）

図 4 と図 5 に、SKD61 基板上に造形した SKH51 材単体および接合界面傾斜材の外観写真をそれぞれ示す。単体積層はレーザー出力条件 1000W、1200W、1400W であり、傾斜材は 1200W の外観写真である。造形後の外観は各材料形態、各条件において基材との剥離や造形割れ、き裂などは確認されなかった。

図 6 と図 7 に同じく SKD61 基板上に造形した SKH51 材単体および接合界面傾斜材の切断面の観察写真の一例を示す。切断は回転刃を用いた湿式切断にて行った。図 6 で示したように SKH51 材単体積層において、レーザー出力 1000W においては、湿式切断時に基材と造形界面より剥離が生じたが、1200W および 1400W においては剥離が生じなかった。これは、レーザー出力 1000W においては、基材への溶け込みが不十分であったことが主たる要因であると考えられる。また、1400W 造形においては、基材界面近傍および低層（造形初期）において内部欠陥が散見された。この内部欠陥は空隙ではなく、顕微鏡観察より未熔融の粉末の残存であった。これは、高出力のレーザー照射により、本来であれば飛散してロスとなる金属粉末がメルトプール近傍に付着残存したことによると考えられる。レーザー出力 1200W においてはそのような欠陥は散見されないことから、今回検討した粉末吐出量に対して 1200W が必要十分な条件であることがうかがえる。一方、図 7 に示したように、傾斜材に関しては、切断後も剥離は生じなかった。基材と同じ SKD 材を用いた傾斜材および全く異種である SUS 材共に基材界面の接合はされており、割れも見られないことから、この基材界面との傾斜材接手法は、接合箇所リスク回避に寄与することが明らかである。

図 8 にレーザー出力 1200W における SKH51 材単体、SKH51-SKD61 傾斜材および SUS316L-SKH51 傾斜材の断面高さ方向のビッカース硬さ分布を示す。ここで、合計 10 層の積層において、基材界面より 5 層が傾斜材であり（SKH51 含有傾斜体積比率 20, 40, 50, 60, 80Vol.%）、残りの 6~10 層は SKH51 単体である。高さは基材表面を高さ 0mm とした。SKH51 材単体積層においては、基材近傍において基材 SKD61 相当硬さ

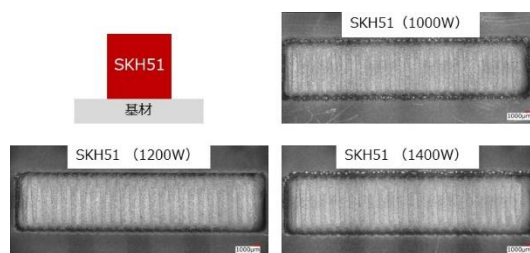


図 4 造形形状概略図（単体 表面）

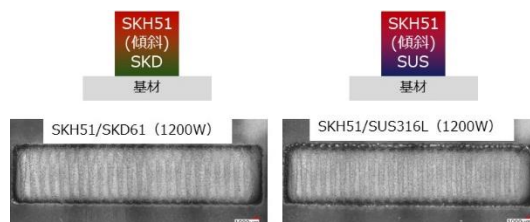


図 5 造形形状概略図（傾斜材 表面）

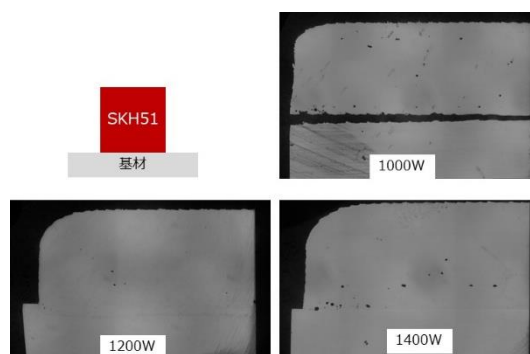


図 6 造形形状概略図（単体 断面）

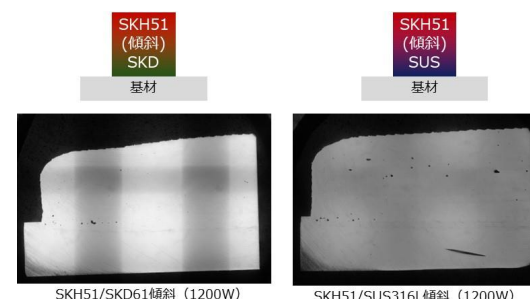


図 7 造形形状概略図（傾斜材 断面）

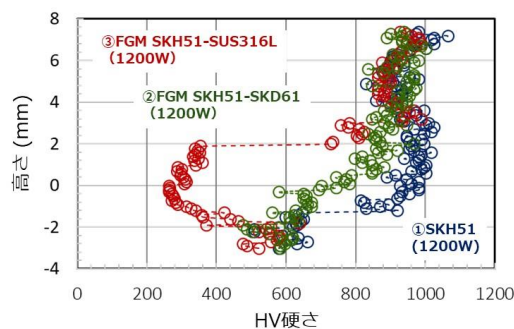


図 8 ビッカース硬さ分布

から SKH51 単体硬さに大きく硬さが上昇した。一方、SKD61 材を用いた傾斜材においては、傾斜層である初期 5 層において緩やかな硬さ上昇を実現した。しかしながら、SUS 材を用いた傾斜材においては、SUS 材と SKH 材の硬さが大きく異なることから、接合は可能であったものの緩やかな硬さの傾斜は実現しなかった。硬さ特性の連続的な傾斜という傾斜材本来の機能発現の観点からは SKD 材を用いる方が適切ではあるが、本研究の目的の一つである造形後の切削加工の高能率化の観点からは、SUS 材を用いた傾斜材の選択もコスト低下に大きく寄与するものと考えられる。

図 9 に基材界面に SUS316L 単相を積層挿入したサンプルの断面観察写真を示す。比較として、同条件下で積層した SKH51 材単体サンプルの断面写真を示す。本 SUS316L 単相接合は、基材表面に SUS316L を一層積層後、残り 9 層は全て SKH51 材単体の積層を行った。レーザー出力 1000W 造形において、SKH51 材単体で生じた剥離が解消された。また、レーザー出力 1200W においては内部欠陥が散見されたが、その他特に大きく異なる現象はなかった。ここで、特に低出力 1000W において懸念された造形後の剥離現象が、基材表面にわずか一層だけ SUS 材を挿入することにより剥離が抑制されたことは特に注目したいところである。前記した SUS 材を用いた傾斜材も同様だが、接合材として活用した SUS316L 材の Ni 成分が、基材 SKD61 ならびに造形部 SKH51 材との十分な接合に寄与したものと考えられる。以上のように、基材と追加異種材を用いた傾斜材（本研究では SLH51-SKD61 傾斜材）が有用であることはこれまでの研究と同様に明らかであった一方、本研究で初めて検討した第三の接合材料（本研究では SUS316L）を用いた場合において、その傾斜材（SKH51-SUS316L 傾斜材）はもちろんのこと SUS 一層接合においても剥離抑制に寄与することが明らかとなった。

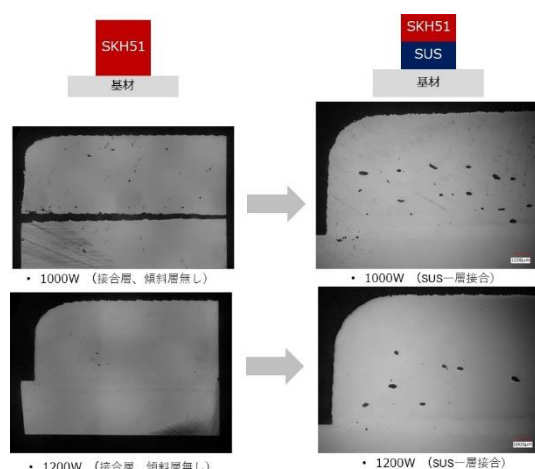


図 9 超硬合金-インコネル傾斜混合比率

これは、例えば金型最表面や刃物刃先のみ高価な硬質材料を用い、補修造形に必要なその他造形箇所はより安価で切削性も改善が見込まれる第三の材料を用いるという設計が可能となることであり、造形後の後加工工程である仕上げ切削加工時に懸念されるコスト増加の解消につながるものと考ええる。

3.2 SKD61 基材上への同種 SKD61 造形サンプルの熱処理の影響

図 10 に SKD61 基材上への同種 SKD61 造形サンプルの熱処理の影響として断面の硬さ分布を示す。図 6 は焼き戻しをみの結果である。焼き戻し温度 550℃および 600℃ともに、熱処理を行っていない造形ままと同様な硬さ分布を示した。ここで、造形部ではなく基材表面近傍の基材側の硬さ特性に着目すると、造形時の入熱冷却による高炭素鋼ならではの硬化部/軟化部が見られた。これら硬さの急激なバラツキは、たとえ造形部において剥離やき裂等がなかった場合においても、補修金型を使用する際に懸念されるところである。本結果より、造形後の熱処理手法として、単に焼き戻しのみではこの硬化部/軟化部を抑制することは不可能であることが明らかである。

図 11 に焼入れのみの熱処理の結果を示す。焼入れ温度 950℃においては基材表面近傍の基材側に硬化部が生じていた。一方、焼入れ温度 1100℃においては、硬化部は小さいものの大きな軟化部が生じていた。これらのことより、仮に焼入れのみを行う際は、造形後 950℃の条件下で行うことが効果的であることが明らかとなった。

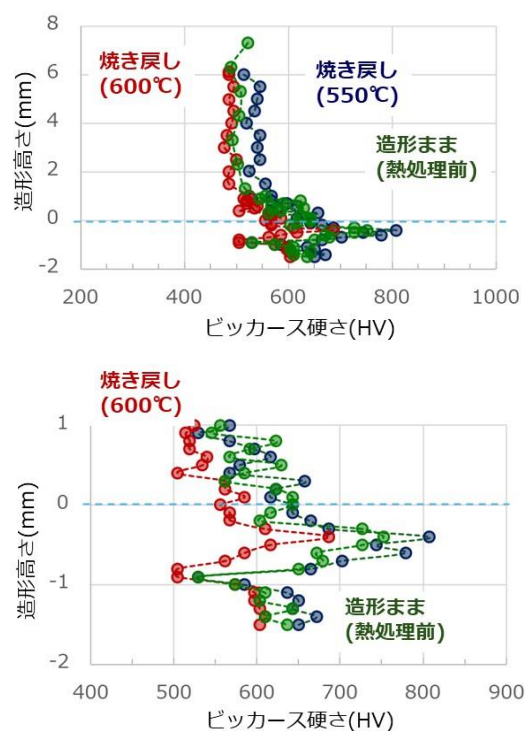


図 10 硬さ分布におよぼす焼き戻し処理の影響

以上のことをふまえ、焼入れ工程と焼き戻し工程を組み合わせた結果を図 12 に示す。具体的には、SKD61 基材上への同種 SKD61 造形後、950℃にて焼入れを行い、その後焼き戻しを 550℃もしくは 600℃で行った。造形ままで懸念されていた基材近傍基材側の硬化部/軟化部は解消され、硬さのばらつきは抑制されたことが明らかである。このことから、造形時のレーザー照射により生じた基材への熱影響を解消する方法として、焼入れ後に焼き戻し処理を適切な温度域で行うことが効果的であることが明らかとなった。高炭素鋼特有の硬化部/軟化部の解消は、補修金型の品質改善につながるため、造形後の熱処理手法として今後も検討していきたい。

4 まとめ

DED 方式金属 3D プリントは異種材料を追加で積層可能という大きな特徴を有するため、金型補修の分野での活用が期待されている。しかし、材料コストのみならず造形後の後加工工程である切削工程におけるコスト（切削時間や工具交換頻度等）を考慮すると、異種材追加造形界面の強固な接合のみならず、切削仕上げ加工しやすい接合材料や接合方法の検討が製品化への課題となっている。そこで本研究では、金型補修の観点から鋼材上への異種材料追加積層造形を検討し、観察や評価を通じて課題を明らかとした。さらにこの課題を材料面から克服する手段として傾斜機能化を含めた接合手法を検討した。さらに、金型補修の観点から鋼材上への異種/同種材料追加積層造形および熱処理を検討し、観察や評価を通じて課題を明らかとした。

- (1) SKD61 基材に対して SKH51 材の追加異種材料積層造形において、単体積層のほか基材近傍の傾斜化を検討したところ、これら材料を利用した傾斜材（SKH51-SKD61）はもちろんのこと、第三の材料を用いた傾斜材（SKH51 - SUS316L）においても接合可能であり、剥離抑制に傾斜接合手法の有用性が改めて明らかとなった。
- (2) 傾斜材において期待される硬さ特性の連続的な傾斜については、硬さが大きく異なる SKH51 - SUS316L 傾斜材は連続的な硬さの傾斜は実現されなかった。硬さ特性の連続的な傾斜という傾斜材本来の機能発現の観点からは SKD 材を用いる方が適切ではあるが、本研究の目的の一つである造形後の切削加工の高能率化の観点からは、SUS 材を用いた傾斜材の選択もコスト低下に大きく寄与するものと考えられる。
- (3) 傾斜材による接合ではなく、SUS316L 単相を基材界面に積層挿入した場合、例えばレーザー出力 1000W において SKH51 材単体積層時において生じた剥離が抑制された。材表面にわずか一層だけ SUS 材を挿入することにより剥離が抑制されたことは特に注目したいところである。前記した SUS 材を用いた傾斜材も同様だが、接合材

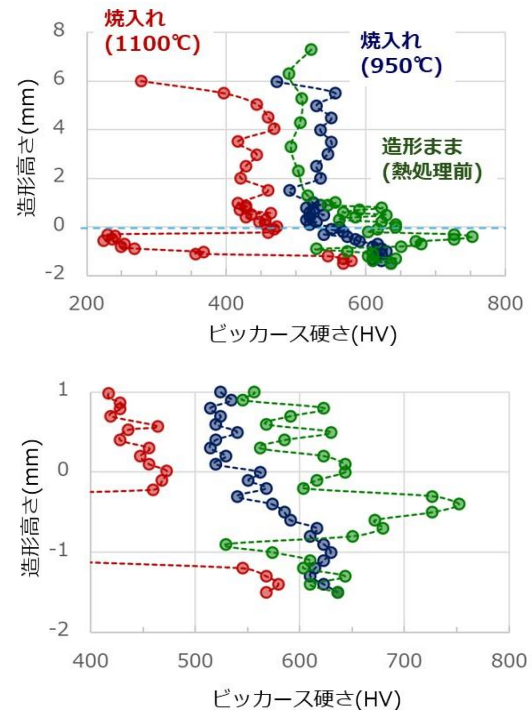


図 11 硬さ分布におよぼす
焼入れ処理の影響

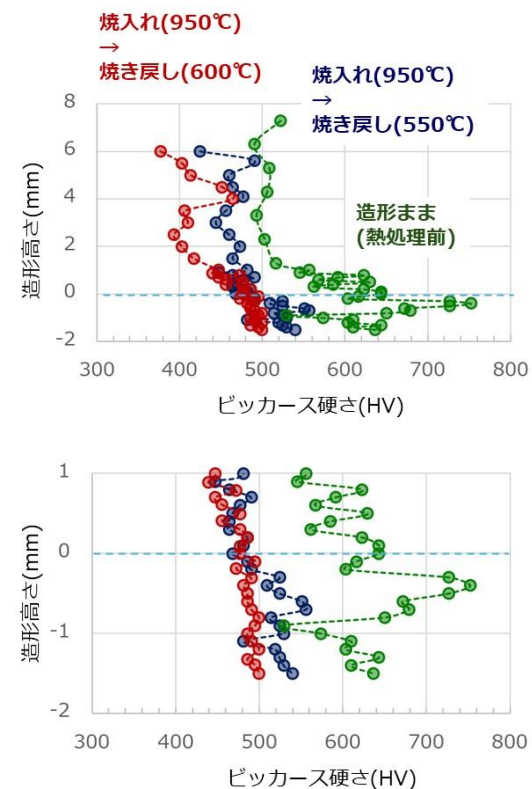


図 12 硬さ分布におよぼす
焼入れ後焼き戻し処理の影響

として活用した SUS316L 材の Ni 成分が、基材 S
KD61 ならびに造形部 SKH51 材との十分な接合
に寄与したものと考えられる。

- (4) 既存金型の補修を目的とした SKD61 基材への S
KD61 同種材追加造形において、造形ままの場合、
基材近傍基材側において高炭素鋼特有の硬化部/
軟化部が生じた。これらは補修金型の安全な使用
に懸念される現象である。この硬さのバラツ
キを解消する手法として、造形後に焼入れ処理
を行い、その後焼き戻し処理を行うことが有用
であることを明らかとした。