

粉体レーザー肉盛溶接と切削加工を組み合わせた耐熱合金の高精度造形技術の研究

神奈川県立産業技術総合研究所 情報・生産技術部

部長 薩田 寿隆

(平成 29 年度 一般研究開発助成 AF-2017225)

キーワード：粉体レーザー肉盛溶接，切削加工，インコネル合金

1. はじめに

粉体レーザー肉盛溶接は，入熱域を抑えることができるため，薄い対象物に肉盛ができる．例えば，工業用カッターの刃先への硬化層形成¹⁾，航空機や火力発電用ガスタービンのタービンブレード等のエンジン部品補修²⁾³⁾等に利用されている．

航空機のエンジン部品は，稼働中は 1,000℃前後の高温環境下にあるため，高温酸化により損耗する．損耗した部品は，整備時に交換・廃棄される．しかしながら，材料費は高価なため，補修・再利用への要望は強い．航空機産業が盛んなヨーロッパでは，粉体レーザー肉盛溶接装置・LMD による補修の研究開発が行われ，様々なエンジン部品への適用が試みられている．この粉体レーザー肉盛溶接は，エンジン部品の補修における重要な基盤技術となるものと考えられる．しかしながら，レーザー肉盛層の表面状態は平滑では無いため，部品として供するには成形が必要となる．複雑な形状のものが多いため，マシニングセンタにおける切削加工技術の開発が必要となる．

航空機エンジン部品の代表的な材料であるインコネル合金は，高温強度が高い，加工硬化が生じやすい，工具材料との親和性が大きい，熱伝導率が小さいといった要因のため，難削材であることが知られている．航空機産業の成長を見越し，近年，インコネル合金を対象とした切削に関する研究報告が増えている．しかし旋削加工が主体で薄肉のエンジン部品の加工で行われるミーリング加工の実用的な切削データは十分に存在していない．工具材種や切削工具の切れ刃形状の選択，切削条件の設定などに関して，指針となる基礎データは不足している．さらにインコネル 625 合金は固溶強化型，718 合金は析出強化型合金であり，レーザー肉盛時の後続パスにより先行パス中の固溶体や析出物が熱影響を受けることが想定される．熱影響により硬さを始めとする材料特性が場所により異なり，被削性は場所により相違すると推定される．このような不均質材料に対する被削性に関する研究報告はなされていない．

このような背景から本研究では，インコネル 625 合金を対象とし，その肉盛層の被削性を明らかにすることを目的とする．

2. 実験方法

2・1 レーザ粉体肉盛溶接

レーザーはディスクレーザー（トルンプ製 Trudisk3306）を用いた．レーザー照射条件は，出力 1.6 kW，ビーム径 ϕ 4.3 mm，走査速度 0.01 m/s とした．粉末はインコネル 625 合金を用い，供給量は 16 g/min とした．粉末成分を表 1 に，外観写真を図 1 に示す．粒径は $-44/+125 \mu\text{m}$ である．基材は SUS304 で，サイズは，100 mm×50 mm×10 mm である．レーザー光の吸収率を上げるために，アルミナ製メディアを基材表面に投射し，表面に凹凸を形成した．これらの条件で，幅約 30 mm，長さ約 70 mm，高さ約 5 mm の積層造形をおこなった．

表 1 粉末組成 (mass%)

C	Si	Mn	Cr	Fe	Mo	Nb	Ni
0.01	0.45	0.39	21.79	0.4	9.26	3.57	Bal.

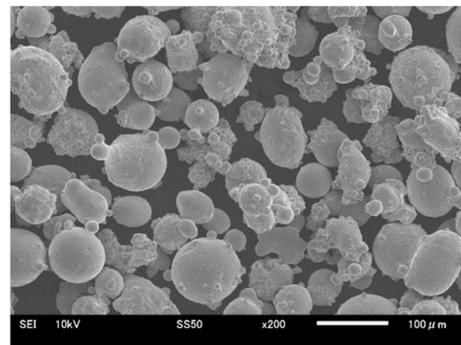


図 1 粉末の外観 SEM 像

2・2 切削加工

上記肉盛材を 20 mm×60 mm×4 mm のブロック状にエンドミルで加工し，被削材として切削実験に供した．また，比較のためにインコネル 625 合金の溶製材を用意し，同様の形状に加工し切削試験をおこなった．

マシニングセンタ（牧野フライス製作所製 V33）のテーブルに 3 成分切削動力計（キスラー製 9257B）を設置し，その上に上述の被削材を固定した．

直径 6 mm の 4 枚刃スクエアエンドミル（三菱メテアル製 VQ-MHV 6）を用いて被削材の側面切削をおこなった．切削速度を 40 m/min および 120 m/min の 2 条件

とし、送り量、切込み量は一定とした。

切削液とその供給方法は次の通りとした。水溶性切削油剤としてエマルジョン（20倍希釈）を選定し、約7.5 ℓ/minで2本のノズルから切削点に供給した。また比較として、水道水、浸透性を高めた水道水（高浸透水）、不水溶性切削油剤を、0.5 MPaの圧縮空気とともにミスト供給する方法（供給量約1 ml/min）も実施した。さらに、切削液を供給しないドライでも実験をおこなった。

切削後のエンドミルの刃先をマイクロSCOPE（キーエンス製VHX-600）により観察した。

3. 実験結果

3.1 肉盛層の金属組織と硬さ

SUS304上に肉盛層を形成し肉盛方向に直角に切断し、その面の光学顕微鏡による金属組織観察と硬さ測定をおこなった。その結果をまとめて図2に示す。

図の下側に示す金属組織写真において、楕円を少し傾けた形の明るく見える領域が周期的に観察される。この明るく見える領域は、熔融凝固境界を表している。肉盛パスの形成は左から右側に向けて順番に行っているため、この明るい領域より左側が後続の肉盛パスを堆積した際に昇温されたために生じた熱影響部である。また写真の左側の一部でデンドライト組織が見られ、熔融凝固境界を貫いて、エピタキシャルに成長していることが確認できる。

肉盛層全体を観察すると、割れや大きなポロシティは観察されず、健全な肉盛層が形成されている。

図2の上部には、最表面に形成した肉盛層の硬さ分布を示す。金属組織中に明示した線は硬さ測定位置を示している。この線上を0.2 mmピッチで硬さ測定をおこなった。硬さは240~300HVの範囲にあり、板材をTIG溶接により突合溶接をおこなったものと同じ硬さの範囲にある⁴⁾。

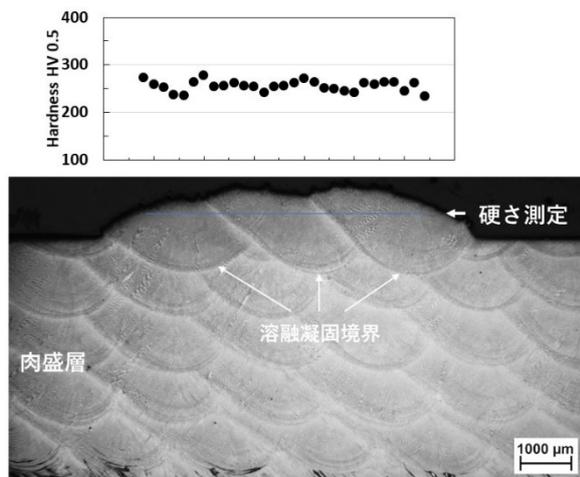


図2 肉盛層の金属組織と硬さ分布

また熔融凝固境界の左側では硬さは数十HV上昇している。インコネル625合金は620~800℃の昇温により時効硬化することが明らかにされており⁵⁾、後続パスの形成時の昇温により、時効硬化が生じたと推察される。

3.2 切削試験

①肉盛材と溶製材の比較

肉盛材と溶製材の切削特性について調査した。切削条件は、切削速度：40 m/min、送り：0.03 mm/tooth、径方向切込み：0.5 mm、軸方向切込み：3.0 mm、切削液：水溶性切削油剤、加工距離：1,800 mmとした。

図3に両者の切削抵抗の加工距離に対する変化を示す。加工初期の切削抵抗値は、溶製材のほうが低いが、加工距離とともに増加した。一方肉盛材では、加工初期の抵抗値は大きいが、加工の進展に伴い一旦減少しそこから溶製材に比べ緩やかな増加になり最終的には溶製材の約85%の抵抗値であった。

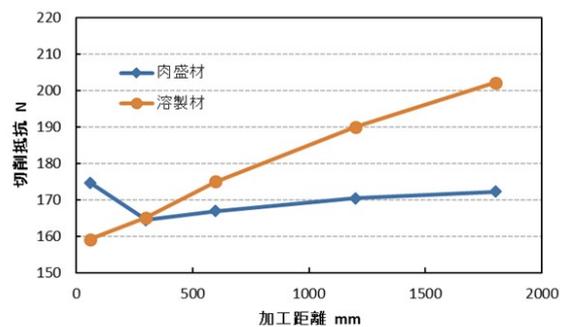


図3 肉盛材と溶製材の切削抵抗の比較

図4に1,800 mm加工後の工具逃げ面の状態を示す。いずれにおいても大きな損傷は認められない。刃先の凝着状態を比較すると、溶製材のほうがやや凝着が多く認められる。これにより溶製材の切削抵抗が大きくなったと考えられる。

本実験では、切削速度を中心として工具メーカーの推奨切削条件を採用し、水溶性切削油剤を供給しながら切削試験をおこなった。この条件を用いれば、大きな問題もなくインコネル625合金による肉盛層の切削が可能であることを確認できた。

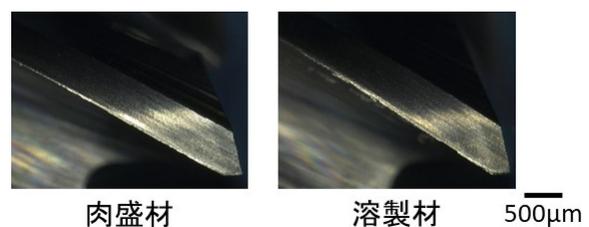


図4 工具逃げ面の状態

②切削液供給方法が切削特性に及ぼす影響

上述した切削実験により、適正な切削条件を選定することにより、難加工材と言われているインコネル 625 合金の肉盛層ならびに溶製材の切削が可能であることが明らかにできた。そこで次に被削材を肉盛材に限定し、切削液の供給方法が切削特性に及ぼす影響について調査した。

切削条件は、切削速度：40,120 m/min, 送り：0.03 mm/tooth, 径方向切込み：0.5 mm, 軸方向切込み：3.0 mm, 加工距離：1,800 mm とした。切削液供給方法は、先におこなった水溶性切削油剤を直接供給する方法に加え、油剤を供給しないドライおよびミストによる供給方法を採用した。その理由を以下に記す。近年レーザ粉体肉盛溶接と切削の機能を併せ持つ複合機が市販されている。レーザ粉体肉盛による造形と切削を交互に繰り返すことにより、一台の装置で所定の形状の製品を形成することが可能となっている。造形と切削を繰り返す際、切削液がレーザ照射面に多量に残留していると、レーザ照射による液体の気化・膨張により肉盛層にポロシティの発生が懸念される。

上記の理由よりドライ切削が望まれるが、工具寿命の低下が想定されることから、切削液量の低減が期待されるミストによる供給も評価することとした。切削液として、不水溶性切削油剤、水道水、水道水に添加剤として界面活性剤を 1% 添加して浸透性のみを向上させたもの（以降高浸透水と記す）を採用した。これらの切削液の特性をまとめ、表 2 に示す。また図 5 にインコネル 625 合金による肉盛層上に滴下した切削液の拡がり方を示す。高浸透水は拡がりが大きく濡れ性が良い、すなわち浸透性が高いことが推定

表 2 切削液の特性

	水溶性切削油剤	不水溶性切削油剤	水道水	高浸透水
潤滑性	○	◎	×	×
冷却性	◎	△	◎	◎
浸透性	○	○	×	◎

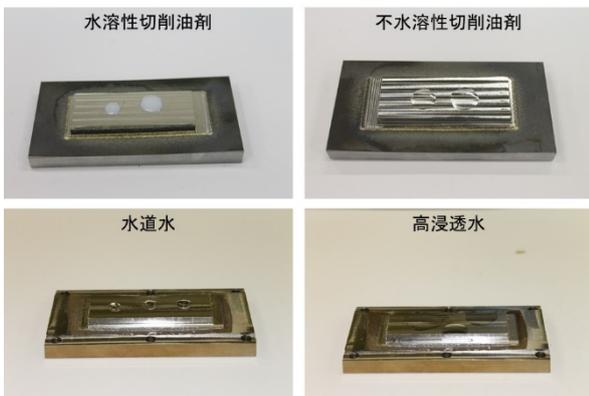


図 5 切削液の濡れ性

される。

図 6 に切削速度 40 m/min で加工をおこなった際の切削抵抗の変化を示す。図中のウェットは水溶性切削油剤、水は水道水、オイルは不水溶性切削油剤をそれぞれ示す。容易に想定されることではあるがドライの場合は切削抵抗が最も大きく、水溶性切削油剤と高浸透水ミストは同程度の切削抵抗、さらに水道水ミスト、不水溶性切削油剤ミストの順で切削抵抗は低くなった。不水溶性切削油剤ミストの切削抵抗は低く、潤滑性の効果が表れていると考えられる。またいずれの場合も加工距離の増加に伴い切削抵抗

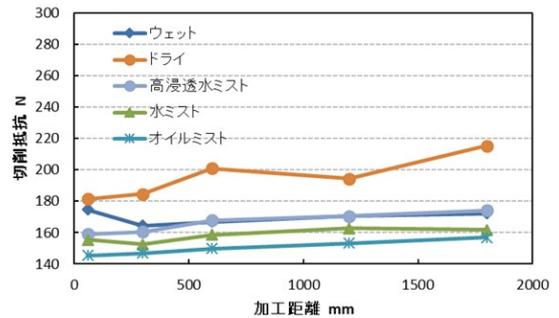


図 6 切削速度 40 m/min における切削抵抗の変化

が上昇する傾向を示している。

切削速度 120 m/min での切削抵抗の変化を図 7 に示す。加工距離の増加に伴い、ドライ、水道水ミスト、不水溶性切削油剤ミストの抵抗値は急激に増大した。特にドライと不水溶性切削油剤ミストでは工具の損傷が顕著であったため、1,200 mm 時点で加工を中止した。一方、高浸透水ミストでは、水溶性切削油剤とほぼ同等の低い切削抵抗のまま 1,800 mm まで加工が可能であった。

図 8 に加工終了後の工具逃げ面の損傷状態を示す。切削速度 40 m/min では、ドライの場合に大きな欠損があった。水道水ミストと高浸透水ミストの場合は、水溶性切削油剤や不水溶性切削油剤ミストに比べて凝着物が多くみられた。不水溶性切削油剤ミストでは、凝着はほとんどないが、複数の小さな欠けが発生した。

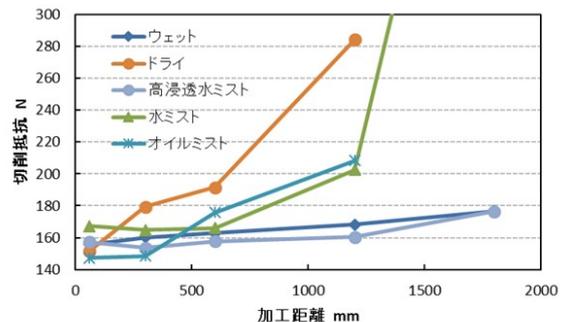


図 7 切削速度 120 m/min における切削抵抗の変化

一方切削速度 120 m/min では、ドライ、水道水ミスト、不水溶性切削油剤ミストの場合に、大きく欠損した。高浸透水ミストの場合は、欠損は無く、逃げ面摩擦も水溶性切削油剤と同程度であった。

③切削液の効果の考察

はじめに、切削速度 40 m/min について考察する。この切削速度は、工具メーカーの推奨条件である。ドライで工具に大きな欠損が生じたことから、インコネル 625 合金肉盛材のドライ切削は困難であることがわかった。工具刃先に凝着物がみられることから、摩耗形態は、熱的摩耗（拡散摩耗）と凝着摩耗のいずれの可能性も考えられる。これらの摩耗を抑制するには、切削液による冷却と潤滑が必要である。水溶性切削油剤のウェット加工において切削抵抗が低く工具の損傷が抑えられたのは冷却と潤滑の効果の発現と考えられる。

一方、ミスト切削でも、一定の加工が可能であることが明らかになった。すなわち水道水ミストと高浸透水ミストでは、凝着が生じるものの、刃先の欠けはほとんど認められず、切削抵抗も水溶性切削油剤によるウェット加工には及ばないものの加工距離に伴う大きな上昇は見られなかった。水は潤滑作用がほとんどないことから凝着を抑制できないが、冷却作用により拡散摩耗を抑制されたと推察される。不水溶性切削油剤によるミスト切削では凝着はほとんど生じないが、小さな欠けが多数発生した。この理由は、不水溶性切削油剤の潤滑作用により凝着は抑制されたが、冷却不足により拡散摩耗が進行したと考えられる。

以上から、インコネル 625 合金肉盛材の切削には、刃先の欠損を防止するために、切削液による冷却作用が支配因子であることが明らかになった。

次に、切削速度 120 m/min における切削特性を考察する。図 8 に見られるように、切削速度 120 m/min では、ドライ、水道水ミスト、不水溶性切削油剤ミストのいずれにおいても工具に大きな欠損が生じた。切削速度 120 m/min では 40 m/min に対し、刃先温度が上昇し、ドライはもとより、冷却能力が高くない不水溶性切削油剤ミストも冷却が不十分であったと考えられる。冷却能力の高い水でも工具の欠損を防止することができなくなったのは、水の浸透性が影響したと考えられる。水は浸透性に劣り、狭い隙間に入りにくい。40 m/min の場合は、切削速度が高くないため浸透性の低い水でもある程度刃先付近に侵入することができたが、120 m/min の高速条件では水は刃先へ到達できず、冷却が不十分であったと考えられる。高浸透水ミストの場合、刃先への浸透、冷却により工具の損傷なく 1,800 mm の加工が可能であったと考えられる。

以上から、切削速度 120 m/min の高速条件においては、切削液の冷却作用と、刃先に到達させる浸透性の必要性が明らかになった。

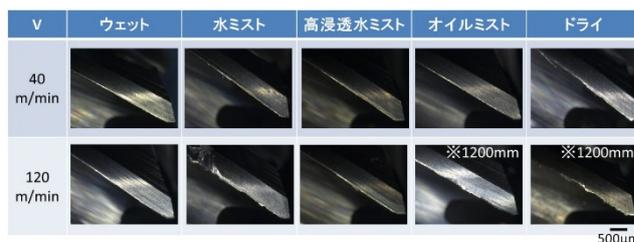


図 8 工具逃げ面の損傷

4. まとめ

インコネル 625 合金粉末を用いレーザー粉末肉盛溶接の肉盛層の金属組織と硬さ並びに切削特性について調べた。得られた結果を以下に記す。

- 1) 所定の条件を選定することにより、割れやポロシティ等の欠陥を発生させることなく肉盛層の形成が可能であった。また硬さは、熱影響部で僅かな上昇が見られた。
- 2) 肉盛材と溶製材の被削性を比較したところ、切削距離が増えるにつれ、切削抵抗は溶製材のほうが高くなった。肉盛材の切削距離に対する切削抵抗の上昇率は小さく、比較的問題なく切削をおこなうことができた。
- 3) 肉盛材に対して、切削速度 40 m/min でのドライ切削ではエンドミルに欠損が生じ、安定した切削は困難であった。一方、水道水または不水溶性切削油剤をミスト供給すれば切削抵抗が低い状態で加工することができた。特に水道水ミストで刃先の欠けが生じていなかったことから、切削液の冷却作用が欠け防止に有効であることがわかった。
- 4) 切削速度 120 m/min においては、浸透性を高めた高浸透水を用いることにより、ミスト供給でもウェット並みに工具損傷がほとんどなく切削をおこなうことが可能であった。

謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団の平成 29 年度一般研究開発助成 (AF-2017225) によるものである。ここに謝意を表す。また切削試験は、当所主任研究員の横田知宏が実施した。併せて謝意を表す。

参考文献

- 1) 金安力：溶射技術, 34, (2014), 69.
- 2) Steffen Nowotny et.al : J. Therm. Spray Tech., 16, (2007), 344.
- 3) 牧野吉延ら：溶接技術, 60, (2012), 63.
- 4) 日本溶接協会特殊材料溶接研究委員会編：スーパーアロイの溶接, (2010), 69, 産報出版.
- 5) 草開清志ら：鉄と鋼, 85, (1999), 241.