

レーザー熱処理によるステンレス鋼のフライス切削における切削バリの抑制*

田中隆太郎^{*1}, 鬼頭 昂志^{*2}, 細川 晃^{*1}, 古本 達明^{*1}, 上田 隆司^{*1}

Prevision of Cutting Burr at Face Milling of Stainless Steels Using Laser Heat Treatment

Ryutaro TANAKA^{*1}, Takashi KITO, Akira HOSOKAWA
Tatsuaki FURUMOTO and Takashi UEDA

^{*1} Kanazawa Univ. Dept. of Mechanical Engineering
Kakuma-machi, Kanazawa-city, Ishikawa, 920-1192 Japan

This paper deals with the method to prevent cutting burr at face milling of stainless steels. Without laser heat treatment for workpiece, SUS304 caused largest burr height in three type stainless steels. SUS430 was easier to be hardened using laser heat treatment compared with SUS304 and SUS403. As for SUS304, it was possible to reduce burr height. However, it was impossible to prevention burr generation perfectly. As for SUS430 and SUS403, choosing optimum cutting conditions, it was possible to prevention burr generation perfectly. Therefore, laser heat treatment for workpiece is efficient to prevent cutting burr at face milling of stainless steels.

Key Words : Face Milling, Stainless Steel, Cutting Burr, Laser Heat Treatment, Feed Rate, Exit Angle

1. 緒 言

切削加工において発生したバリの除去工程は加工能率の観点から出来る限り少なくすることが望ましい。発生するバリを小さくすること⁽¹⁾⁽²⁾やその除去方法⁽³⁾についての研究は多くみられるが、バリの発生自体を完全に抑制できる方法についてはこれまで提案されていなかった。筆者らはこれまでに、炭素鋼の正面フライス切削において発生する切削バ리를抑制する方法として被削材の部分的熱処理による方法を提案した⁽⁴⁾⁽⁵⁾。この方法では、切削加工を行う前に被削材のカッタ出口部分にレーザー熱処理を行い照射部表面にマルテンサイト層を生成することにより脆性を付与して、カッタが被削材から離脱するときに意図的に脆性破壊による微小なコバ欠けを発生させバリの抑制を可能にしている。

これまでの研究では被削材として炭素鋼 S45C を用いてきたが、その適用範囲を広げるためにステンレス鋼を被削材としたときのフライス切削における適用を試み、本手法の有効性について検討した。ステンレス鋼は耐熱性や耐食性に優れているため、工業製品の素材としての用途がきわめて多く、本手法の適用性の評価が望まれている。

2. 実験方法

2・1 ステンレス鋼のレーザー熱処理特性の評価方法

ステンレス鋼に対するレーザー照射による硬化に関する研究はいくつか多く行われており、特にマルテンサイト系ステンレスに関するものがみられ、ステンレス鋼でのレーザー熱処理の可能性が確認できる⁽⁶⁾⁽⁷⁾。そこでこの研究で用いる3種類のステンレス鋼のレーザーによる熱処理特性を調べるために、レーザー照射部の組織変化の観察と硬度の変化している範囲を調べ熱処理特性の評価をおこなった。被削材は、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304、フェライト系ステンレス鋼 SUS430 およびマルテンサイト系ステンレス鋼 SUS403 である。

* 原稿受付 2011年2月21日

^{*1} 正員, 金沢大学 理工研究域 機械工学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

^{*2} 金沢大学大学院自然科学研究科

(現 三菱電機(株)名古屋製作所 (〒461-8670 愛知県名古屋市中区東区矢田南5-1-14))

E-mail: r-tanaka@t.kanazawa-u.ac.jp

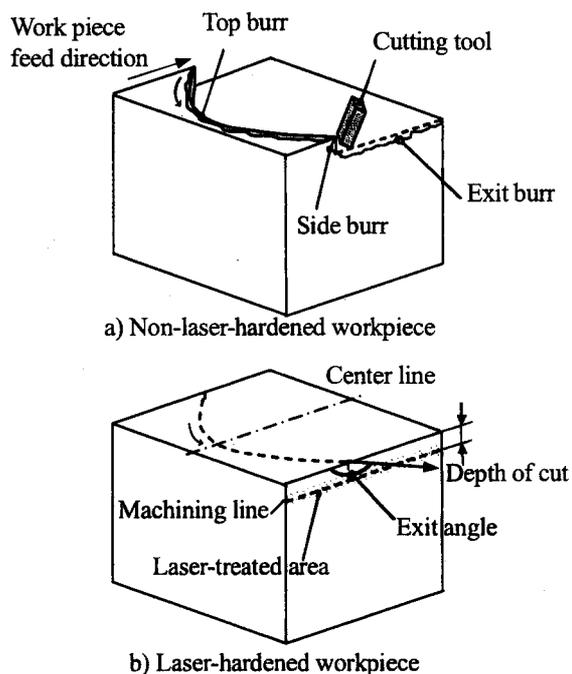


Fig. 1 Laser irradiation on the workpiece

Table 1 Irradiation conditions

Laser	Carbon dioxide (CW)
Laser power: Q	200W
Spot diameter: D	1.1mm
Scan speed: S	12.5mm/s
Energy density: q	165W/mm ²
Wavelength	10.6 μ m

Table 2 Cutting conditions

Tool	Carbide K10 (TiCN coated)
Nose radius: R	0.8mm
Work	SUS304, SUS430, SUS403
Cutting speed: V	100m/min
Depth of cut: d	0.4mm
Feed rate: f	0.075-0.15mm/tooth
Cutter diameter	100mm
Work size	Width 20mm Length 35mm
Coolant	Dry
Cutter exit angle: ϕ	90-140deg.

図1に、被削材におけるレーザ熱処理を行う位置を示す。図1(a)をみると、正面フライス切削において、切削工具が被削材から離脱する部分に出口バリが生じることがわかる。このことを考慮して、図1(b)に示すようにレーザ照射はカッタ出口面の端部に沿った切り取り予定線に連続発振で行った。また、工具が被削材から離脱するときの速度の接線方向と切削前の被削材の出口側の稜線がなす角度を出口角とした。

表1にレーザ照射条件を示す。出力200W、スポット径1.1mm、走査速度12.5mm/secとした。レーザ照射を行う前に、照射面のレーザの吸収率を高めるために被削材の表面にカーボン系吸収剤(UNICON レーザノンドロス371)を塗布している。アシストガスは使用していない。

2.2 正面フライス切削における評価方法

本研究では、図1(b)に示すように工具が被削材を離脱した瞬間の工具の接線方向速度ベクトルと被削材端部がなす角度はカッタ出口角度と定義している。被削材の中心線をフライスカッタの回転中心線から任意の距離だけ移動させることによって、任意の出口角度に設定することができる。

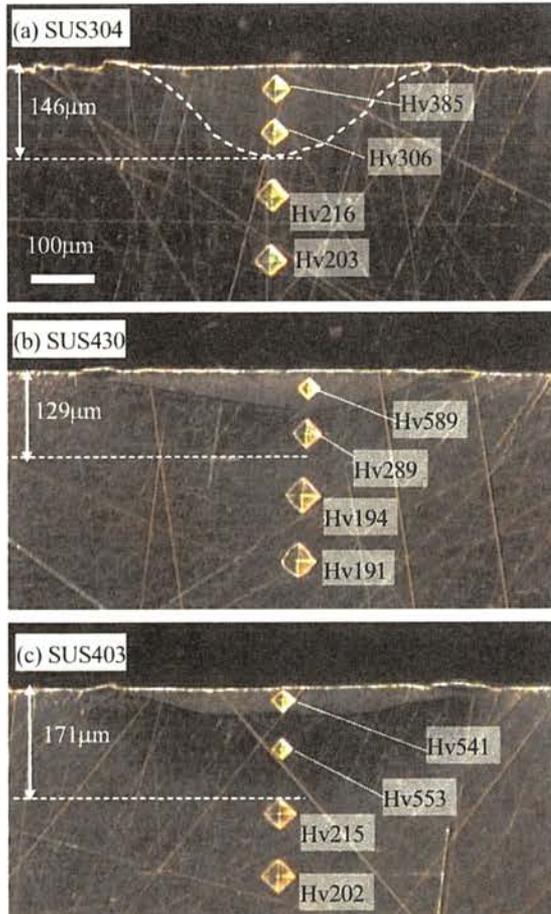
実験では、レーザ熱処理を行った被削材を正面フライス切削し、レーザ照射条件および切削条件が切削後の端部形状におよぼす影響について調査した。切削後の端部形状の観察は、レーザ変位計(KEYENCE製LK-080)による測定と切削後の被削熱硬化性樹脂に埋め断面を研磨した後、光学顕微鏡により観察する方法で行った。試料のエッチングには塩酸を用いた。

表2に、切削条件を示す。TiCNコーテッド超硬合金工具(Sumitomo Electric Hardmetal EH10Z, SNMN120408)を直径100mmのカッタ(Sumitomo Electric Hardmetal, DNF4100R)に取付け、切削速度100m/min、送り速度0.075~0.15mm/tooth、カッタ出口角度90~140°で正面フライス切削を行った。切り込みは0.4mmの一定である。

3. 実験結果および考察

3.1 ステンレス鋼のレーザ熱処理特性

図2に、レーザを照射したステンレス鋼の試料の断面写真を示す。この写真から、レーザ照射によって変色した領域が観察できる。耐食性に優れるSUS304ではエッチング液による腐食が進行しにくく熱影響部が確認しにくいいため、母材と熱影響部の境界線を点線で示した。SUS430とSUS403では熱影響部が2つの層から形成されていることがわかる。熱影響部の深さを測定すると、SUS403の熱影響部が他の材料と比べてやや深くなっている。



$Q=200\text{W}, D=1.1\text{mm}, S=12.5\text{mm/sec}$

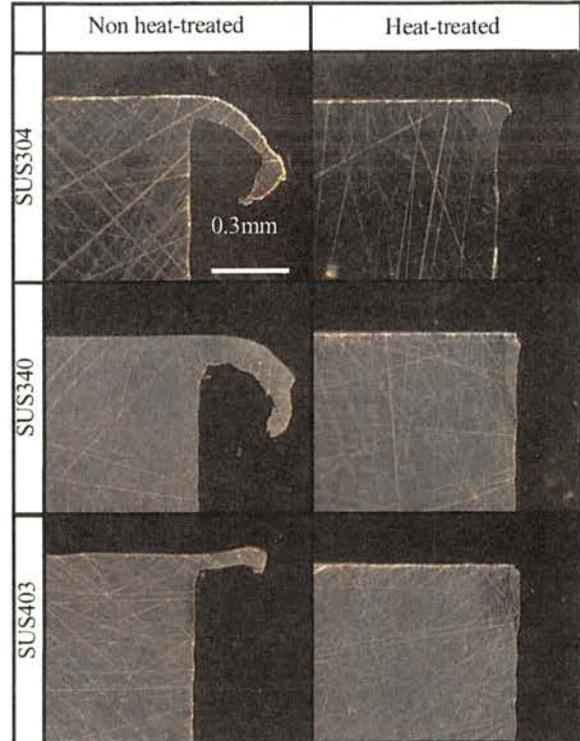
Fig. 2 Influence of laser radiation on structure and hardness of stainless steels

熱影響部の硬度測定によって、どのステンレス鋼においても母材と比べると熱影響部の硬度が高くなっていることがわかった。3種類のステンレス鋼のなかでは、SUS304の熱処理部の硬度上昇の程度が最も小さい。SUS430は最表面の硬さがHv589を示し3つの材料のうち最も高くなっているが、その下の層では硬度が急激に低くなっている。SUS403では最表面の硬さがHv541を示し、その下の層の硬度もHv553となっている。このようにオーステナイト系と比べると、フェライト系さらにマルテンサイト系のステンレス鋼がレーザー照射による硬度上昇と硬化深さが大きくなる傾向にあることがわかる。

3・2 レーザ熱処理のバリ抑制効果

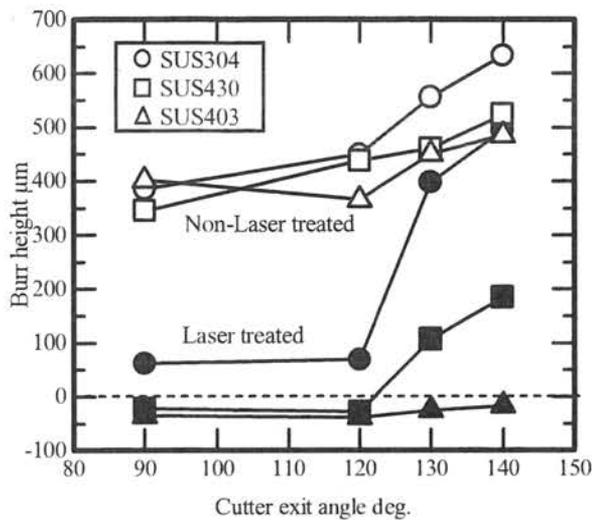
図3に、切削後の3種類のステンレス鋼端部の断面写真を示す。断面写真は被削材送り方向と垂直な面を示しており、塩酸によって腐食した後、光学顕微鏡(Keyence, VH-5910)を用いて撮影した。レーザー熱処理を行っていない被削材では、全てのステンレス鋼において端部に大きなバリが生じている。SUS403がSUS304やSUS430と比べるとバリの大きさがやや小さいように思われる。図中で一番下に示した硬度が、熱処理前の硬度に相当する。

一方、レーザー熱処理を行った被削材を切削すると、SUS304にはバリが生じているが、SUS430とSUS403では端部にコバ欠けが生じていることがわかる。SUS304は、レーザー熱処理による硬度上昇が不十分であるため、コバ欠けが発生せず微小なバリが形成したと考えられる。SUS430とSUS403で生じたコバ欠けは、レーザー照射によって被削材の最表面に生成された層において生じていることが観察できる。このことから、レーザー熱処理によって高硬度の組織を生成することによって、ステンレス鋼の切削においても炭素鋼切削時と同様の機構で微小なコバ欠け発生させバリの抑制ができると考えられる。



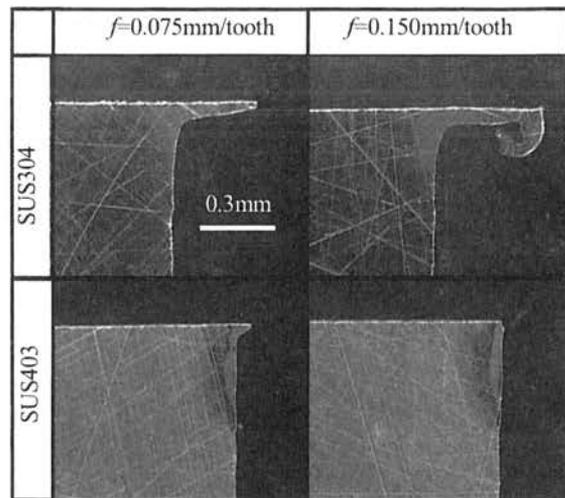
$l=100\text{m/min}, d=0.4\text{mm}, f=0.15\text{mm/tooth}, \varphi=120\text{deg.},$
 $Q=200\text{W}, D=1.1\text{mm}, S=12.5\text{mm/sec}$

Fig. 3 Difference of machined edge of stainless steel with or without laser heat treatment



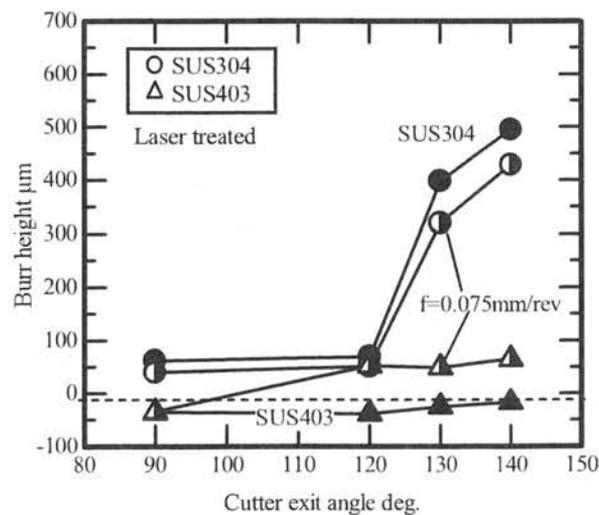
$V=100\text{m/min}$, $d=0.4\text{mm}$, $f=0.15\text{mm/tooth}$, $\phi=120\text{deg}$,
 $Q=200\text{W}$, $D=1.1\text{mm}$, $S=12.5\text{mm/sec}$

Fig. 4 Effect of laser heat treatment for workpiece on prevention of burr formation



$V=100\text{m/min}$, $d=0.4\text{mm}$, $f=0.075, 0.150\text{mm/tooth}$,
 $\phi=130\text{deg}$, $Q=200\text{W}$, $D=1.1\text{mm}$, $S=12.5\text{mm/sec}$

Fig. 5 Influence of feed rate at face milling on the machined edge shape



$V=100\text{m/min}$, $d=0.4\text{mm}$, $f=0.15\text{mm/tooth}$, $\phi=120\text{deg}$,
 $Q=200\text{W}$, $D=1.1\text{mm}$, $S=12.5\text{mm/sec}$

Fig. 6 Influence of feed rate at face milling on the burr formation

図4に、カッタ出口角度が端部形状におよぼす影響を示す。送りは、 0.15mm/rev に設定した。レーザ熱処理を行っていない被削材を切削すると、いずれのステンレス鋼においても $350\mu\text{m}$ 以上のバリが生成した。カッタ出口角度の増大とともにバリ高さが増大する傾向は一般の延性材料の切削においてみられる傾向である。出口角が小さいときは材料間に違いが見られないが、出口角度が大きくなるとバリの大きさは SUS304 が最も高く、他の材料と比べ伸びが大きいという特性が、レーザ熱処理をしないときにおいてバリの大きさに大きく影響していると考えられる。

ところが、レーザ熱処理を行った被削材では、バリ高さは出口角度がある程度大きくなるまではほとんど変化しない傾向にある。ただし、レーザ熱処理のバリ抑制効果は鋼種によって大きく異なることがわかる。SUS430では、全てのカッタ出口角度においてバリが生成し、カッタ出口角度が 130° より大きくなると急激にバリが大

きくなる。SUS403では、カッタ出口角度 120° より小さいとコバ欠けが生じるが、 130° より大きくなるとバリが生じている。SUS430では、カッタ出口角度にかかわらずコバ欠けが生じている。コバ欠けの大きさは、カッタ角度が大きくなるとやや小さくなることがわかる。

レーザ熱処理後の正面フライス切削における送り速度がバリ抑制効果におよぼす影響を調査した。ここでは最もバリが抑制しやすいマルテンサイト系ステンレス鋼 SUS403 と最もバリを抑制しにくいオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 について比較しながら検討した。

図5に、送り速度を変化させたときの切削後の被削材端部の断面写真を示す。SUS304では、送り速度に関わらず大きなバリが生成している。ところが、SUS403をみると、送り速度が小さいときには微小なバリが生成しているが、送り速度が大きいつきに切削後の端部にコバ欠けが生じている。

図6に、送り速度が端部形状におよぼす影響を示す。SUS304では、送り速度に関わらず、全てのカッタ出口角度においてバリが生成し、カッタ出口角度が 130° より大きくなるとほとんどバリの大きさを抑制できないことがわかった。出口角度を一定としたとき、送り速度が大きくなるとやや大きいバリが生成している。これは延性材料の切削においてよく見られる傾向である。したがって、SUS304のレーザ熱処理部の硬度は上昇しているが脆性的特性は切削加工においてコバ欠けが生じるには十分ではない組織であると考えられる。

一方、SUS403で送りを 0.15mm/rev としたとき、全てのカッタ出口角度においてコバ欠けが生じ、完全にバリを抑制できた。しかし、送り速度を 0.075mm/rev と小さくすると、カッタ出口角度が小さいときはコバ欠けが生じるが、カッタ出口角度が 120° より大きくなるとバリが生成した。このように送り速度が大きく、出口角度が小さい場合にコバ欠けが生成しやすい傾向は、レーザ熱処理を行った炭素鋼の切削において切削速度が端部形状におよぼす影響と一致している。このことから、SUS403を小さい送りで切削したときに微小なバリが生成する原因は、炭素鋼切削時と同様に、切削熱でレーザ照射によって硬化した部分が焼き戻され軟化した部分を切削したためであると考えられる。

これまでの結果から、本研究が炭素鋼の正面フライス切削で検証したレーザを用いた被削材の部分的熱処理によるバリの抑制方法は、ステンレス鋼の切削においても十分なバリ抑制効果を有しているといえる。ただし、バリが抑制できる切削条件の範囲はステンレス鋼の鋼種によって大幅に異なり、また、送り速度やカッタ出口角度によって完全にバリが抑制できる場合と、微小なバリが生成する場合に分かれる。したがって、バリを完全に抑制するためには最適な切削条件を選定することが必要であることがわかった。

4. 結 言

本研究では、レーザ熱処理による切削バリの抑制手法をステンレス鋼のフライス加工へ適用することを目的にその有効性について調査した。オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304、フェライト系ステンレス鋼 SUS430 およびマルテンサイト系ステンレス鋼 SUS403 を被削材として用い検討を行った結果以下の得られた。

(1) 3種類のステンレス鋼のなかでは、SUS304が熱処理部の硬度上昇の程度が最も小さい。SUS430は最表面の硬さが3種類の中で最も高くなっているが、その下の層の硬度上昇が小さい。SUS403がレーザ熱処理により硬化を最も深くまでできる。

(2) 炭酸ガスレーザを用いた被削材の部分的熱処理によるバリの抑制方法は、ステンレス鋼の切削においても効果があるといえる。

(3) レーザ熱処理がバリの発生へおよぼす影響はステンレス鋼の鋼種によって大幅に異なり、SUS430、SUS403では完全にバリが抑制できる切削条件を見出すことができた。SUS304についてはバリの大きさを抑えることができたが、バリの発生を完全に抑えることはできなかった。

文 献

- (1) 橋村雅之, 上田完次, 真鍋圭司, David A. Dornfeld, “二次元切削におけるバリ生成機構の解析”, 精密工学会誌, Vol.66, No. 2 (2000), pp. 218-223.
- (2) Gwo-Lianq Chern, “Experimental observation and analysis of burr formation mechanisms in face milling of aluminum alloys”, *International Journal of Machine & Manufacture*, Vol.46 (2006), pp. 1517-1525.

- (3) Seoung Hwan Lee, David A. Dornfeld, " Precision Laser Deburring", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol.123 (2001), pp. 601-608.
 - (4) 田中隆太郎, 鬼頭 昂志, 細川 晃, 上田 隆司, 古本 達明, "炭素鋼の正面フライス加工におけるバリの抑制におよぼす被削材のレーザー熱処理の効果", 砥粒加工学会誌, Vol.53, No. 6 (2009), pp. 379-384.
 - (5) 鬼頭 昂志, 田中隆太郎, 細川 晃, 上田 隆司, 古本 達明, "炭素鋼の正面フライス加工におけるバリの抑制におよぼす被削材のレーザー熱処理の効果(第2報)ーレーザー照射条件およびカッターパスの最適化ー", 砥粒加工学会誌, Vol.54, No.6 (2010), pp. 359-365.
 - (6) K.H. Lo, F.T. Cheng, and H.C. Man, " Laser transformation hardening of AISI 440C martensitic stainless steel for higher cavitation erosion resistance", *Surface and Coating Technology*, Vol.173 (2003), pp. 96-104.
 - (7) B. Madmoudi, M.J. Torkamany, A.R. Sabour Rush Aghdam, J.Sabbaghzade, " Laser surface hardening of AISI 420 stainless steel treated by pulsed Nd:YAG laser", *Materials and Design*, Vol. 31(2010), pp. 2553-2560.
-