

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 被削材のレーザ熱処理の効果 (第2報) —レーザ照射条件とカット経路の最適化—

鬼頭昂志*1, 田中隆太郎*2, 細川 晃*2, 上田隆司*2, 古本達明*2

Effects of laser heat treatment of workpiece for prevention of burr formation
in face milling of carbon steel
-2nd report: Optimization of laser irradiation conditions and cutter path-

Takashi KITO, Ryutaro TANAKA, Akira HOSOKAWA, Takashi UEDA and Tatsuaki FURUMOTO

著者らが提案した、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について、より効率的なバリの抑制を実現するために、フライスカッタの出口角度、送り速度、切削速度およびレーザ照射強度が切削後の端部形状におよぼす影響を調査した。その結果、切削後の被削材端部の形状は、カット出口角度と送り速度によって定まる切り取り厚さと、カット出口角度と切削速度によって定まる熱処理部の切削時間に依存することが明らかとなった。また、レーザ照射条件を制御してマルテンサイト層を厚く生成することによって、より確実にバリの発生を抑制することができることが明らかとなった。

Key words : face milling, burr formation, CO₂ laser, laser heat treatment, martensite, carbon steel

1. 緒言

延性を持った金属材料を切削加工すると発生するバリは、加工部品の精度を著しく低下させるほか、後続工程の障害となる。したがって、仕上げ切削するとき発生するバリの発生を抑制することは、製品品質と生産効率の両面から非常に重要なことである。

従来のバリに関する研究は主として、バリが発生しにくい切削条件を見出すことを目的とした、コンピュータシミュレーションを用いたバリの生成機構に関する解析¹⁾や、実験的に切削条件とバリの形状、寸法の関係性を調査した研究²⁾⁻⁷⁾が挙げられる。しかし、実際には完全にバリを抑えることは困難であり、少しでもバリが生成されればバリ取り作業が必要になるという問題がある。また、生成したバリの除去方法としては、研削加工の原理を用いた方法が普及しているが、粉塵や騒音など作業環境におよぼす悪影響が問題となっている。このように、発生するバリを小さく抑える方法および発生したバリの除去方法には多くの課題が残っているのが現状である。

一方、これまでにバリの発生そのものを完全に抑制しようとした研究は見られなかった。著者らは、炭素鋼の正面フライス加工において加工能率を維持したままバリの抑制を図る方法として、レーザを用いた被削材の部分的熱処理による方法を

提案し、その有効性を明らかにした⁸⁾⁹⁾。この方法は、切削加工前に被削材のカッタ出口部分にレーザ熱処理を行い照射部表面にマルテンサイト層を生成し脆性を付与することによって、切削加工において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としている。そこで本報では、さらに効率的なバリの抑制を実現するために、フライスカッタの出口角度、送り速度、切削速度およびレーザ照射強度が切削後の端部形状におよぼす影響を調査し、切削条件とレーザ照射強度の最適化を目的として実験を行った。

2. 実験方法

表1に、レーザ照射条件を示す。炭酸ガスレーザ加工機を用い、出力100~700W、スポット径1.1~1.5mmで照射を行った。レーザ走査速度は、12.5mm/secで一定とした。なお、レーザの照射を行う前に、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。

図1に、被削材におけるレーザ熱処理を行う位置を示す。正面フライス加工では、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 (**図1(a)**)。このことを考慮して、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共振で行った (**図1(b)**)。

表2に、切削条件を示す。TiN/AlNコーテッド超硬工具K10 (住友電工ハードメタル, SNMN120408) を直径100mmのカッタ (住友電工ハードメタル, DNF4100R) に取り付け、切削速度75~200m/min, 送り速度0.05~0.15mm/tooth, 出口角度60~150度で正面フライス加工を行った。切込みは0.4mmで一

*1 金沢大学大学院自然科学研究科: 〒920-1192 石川県金沢市角間町 Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University

*2 金沢大学理工研究域: 〒920-1192 石川県金沢市角間町 Institute of Science and Engineering, Kanazawa University (学会受付日: 2010年1月28日)

表1 レーザ照射条件

レーザー	CO ₂ (CW)
レーザー出力: Q	100~700 W
スポット径: D	1.1~1.5 mm
走査速度: S	12.5 mm/sec
波長	10.6 μ m

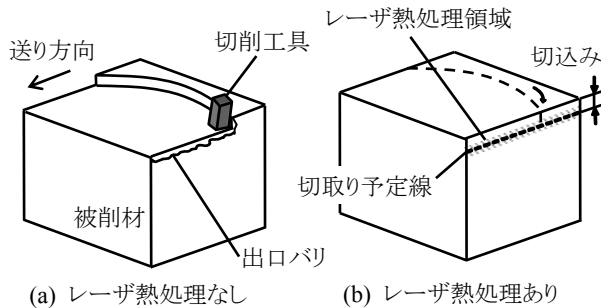


図1 被削材におけるレーザー熱処理を行う位置

表2 切削条件

工具	超硬 K10 (TiN/AlNコーティング)
被削材	S45C (Hv220)
切削速度: V	75~200 m/min
切込み: d	0.4 mm
送り速度: f	0.05~0.15 mm/tooth
カッタ径	100 mm
カッタ出口角度: ϕ	60~150 deg.
被削材寸法	幅 20 mm 長さ 35 mm
クーラント	Dry

定とした。被削材は炭素鋼S45Cで、熱間鍛造の後、850°Cで5時間保持後、保冷、焼きならししてある。寸法は、幅20mm、長さ35mmで硬度はHv220となっている。

図2に、切削方式を示す。本研究では、出口面端部切削時の接線方向速度ベクトルと被削材端部がなす角度を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、所定の出口角度に設定して実験を行った。

実験では、レーザー熱処理を行った被削材を正面フライス加工し、レーザー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を調査した。切削後の端部形状の観察は、レーザー変位計（キーエンス、LK-080）による測定と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。

3. 実験結果

3.1 レーザ熱処理がバリの発生におよぼす影響

図3に、切削後の被削材端部の断面写真を示す。写真は被削材送り方向と垂直な面を示しており、ナイトル溶液によって腐食している。レーザー熱処理を行っていない被削材では、端部にバリが生じている(図3(a))。一方、レーザー熱処理を行う

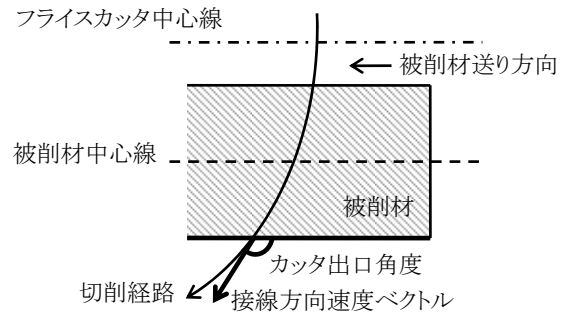
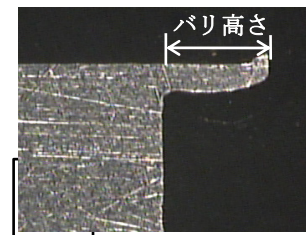
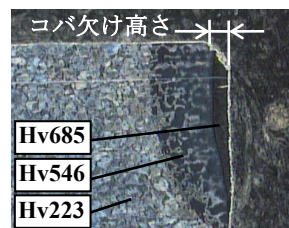


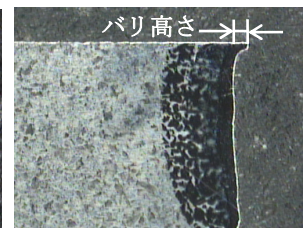
図2 カッタ出口角度の設定



(a) レーザ熱処理なし
($f=0.15\text{mm/tooth}$, $\phi=90\text{deg.}$)



(b) レーザ熱処理あり
($f=0.15\text{mm/tooth}$, $\phi=90\text{deg.}$)



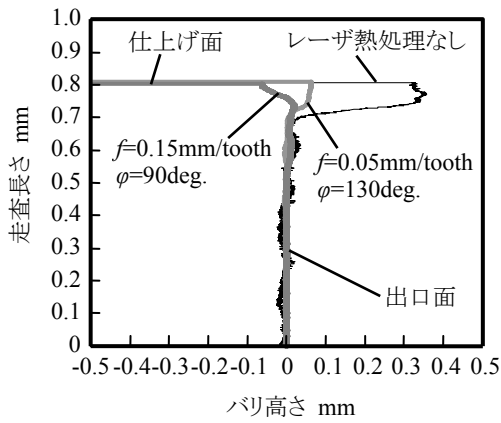
(c) レーザ熱処理あり
($f=0.05\text{mm/tooth}$, $\phi=130\text{deg.}$)

$V=100\text{m/min}$, $d=0.4\text{mm}$, $f=0.05, 0.15\text{mm/tooth}$, $\phi=90, 130\text{deg.}$, $Q=200\text{W}$, $D=1.1\text{mm}$, $S=12.5\text{mm/sec}$

図3 切削後の被削材端部断面写真

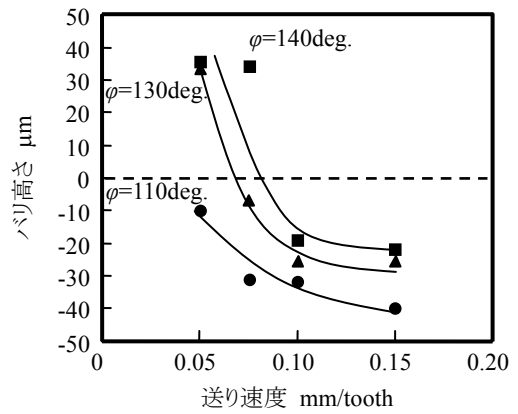
と、切削条件によってコバ欠けが生じる場合(図3(b))と、微小なバリが生成する場合(図3(c))がある。コバ欠けが生じる場合、レーザー照射によって被削材表面に生成したマルテンサイト層においてコバ欠けが生じている。この領域の最大硬度は680Hv程度である。熱影響部が塑性変形してバリが生じる場合でも、その高さはレーザー照射なしのときと比べれば大幅に小さくなっている。このように、レーザー熱処理によって選択的に被削材の硬度を向上させることにより、切削時の被削材端部の塑性変形の程度を抑え、バリの生成を抑制できることが確認できた。

図4に、レーザー変位計を用いて測定した被削材端部の断面プロファイルを示す。バリ高さの定量的評価は、レーザー変位計を用いて任意の位置で断面プロファイルを測定し、出口面からバリの先端部までの距離をバリ高さとして定義した。なお、コバ欠けが生じた場合は、負の値として評価した。



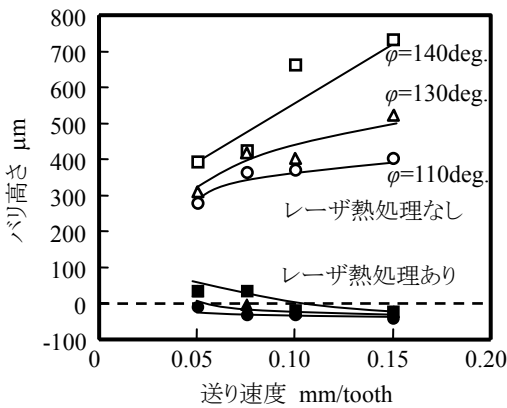
$V=100\text{m/min}$, $d=0.4\text{mm}$, $f=0.05, 0.15\text{mm/tooth}$, $\phi=90, 130\text{deg.}$, $Q=200\text{W}$, $D=1.1\text{mm}$, $S=12.5\text{mm/sec}$

図4 レーザ変位計を用いて測定した被削材端部断面プロファイル



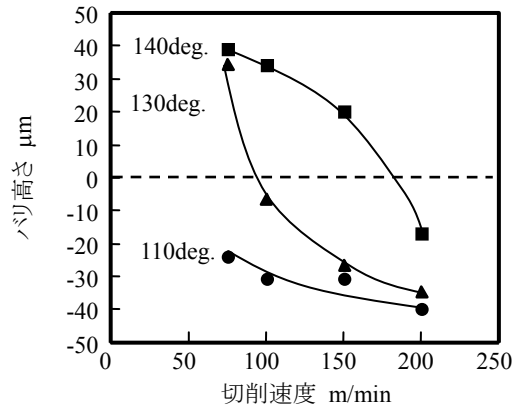
$V=100\text{m/min}$, $d=0.4\text{mm}$, $f=0.05\sim 0.15\text{mm/tooth}$, $\phi=110\sim 140\text{deg.}$, $Q=200\text{W}$, $D=1.1\text{mm}$, $S=12.5\text{mm/sec}$

図6 レーザ熱処理した被削材を切削したときの送り速度が端部形状におよぼす影響



$V=100\text{m/min}$, $d=0.4\text{mm}$, $f=0.05\sim 0.15\text{mm/tooth}$, $\phi=110\sim 140\text{deg.}$, $Q=200\text{W}$, $D=1.1\text{mm}$, $S=12.5\text{mm/sec}$

図5 送り速度が切削後の端部形状におよぼす影響



$V=100\sim 200\text{m/min}$, $d=0.4\text{mm}$, $f=0.075\text{mm/tooth}$, $\phi=110\sim 140\text{deg.}$, $Q=200\text{W}$, $D=1.1\text{mm}$, $S=12.5\text{mm/sec}$

図7 レーザ熱処理した被削材を切削したときの切削速度が端部形状におよぼす影響

3.2 送り速度および切削速度が切削後の端部形状におよぼす影響

図5に、送り速度が切削後の端部形状におよぼす影響を示す。レーザー熱処理を行っていない被削材では、送り速度やカッタ出口角度によって300~750 μm 程度の高さのバリが生成したが、レーザー熱処理を行った被削材については、バリ高さは最大でも40 μm 程度であり、レーザー熱処理によるバリ抑制効果は明らかである。

図6に、レーザー熱処理した被削材を切削したときの送り速度が端部形状におよぼす影響を示す。送り速度0.05mm/toothでは微小なバリが生じているが、出口角度を小さく設定することによってコバ欠けを発生させることができる。送り速度を0.075mm/tooth以上になると、ほとんどの切削条件でコバ欠けが生じていることがわかる。

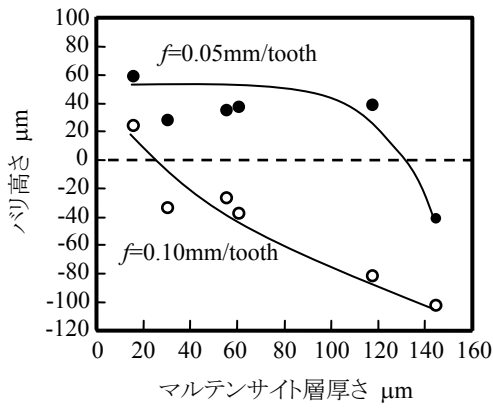
図7に、レーザー熱処理を行った被削材において、切削速度が端部形状におよぼす影響を示す。切削速度が大きいほど、コバ欠けが生じやすくなる。また、切削速度が同一の場合は、

よりカッタ出口角度が小さいときにコバ欠けが生じやすいことがわかる。なお、同時に切削抵抗を測定した結果、切削速度による切削抵抗の顕著な変化は認められなかった。したがって、切削速度の増加に伴いコバ欠けが生じやすくなった原因は、切削速度の増加により熱処理部がより衝撃的にひずんだことと、後述する切削熱の影響が小さくなったことが考えられる。

このように、送り速度、切削速度およびカッタ出口角度が切削後の端部形状に影響をおよぼすことが明らかとなった。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と考えられる。

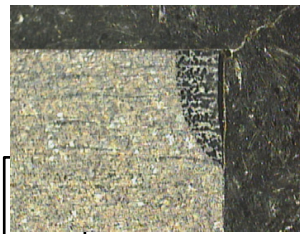
3.3 マルテンサイト層厚さが切削後の端部形状におよぼす影響

図8に、出口面に生成するマルテンサイト層深さが端部形状におよぼす影響を示す。出口面に照射するレーザー出力とスポット径を操作することによって、生成されるマルテンサイト層の厚さを制御した。送り速度0.10mm/toothでは、マルテンサイト層の厚さが増加するとともにコバ欠けの大きさが増大してい

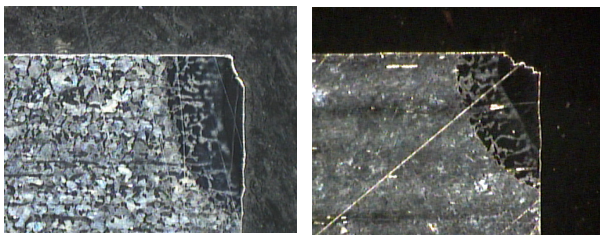


$V=100\text{m/min}$, $d=0.4\text{mm}$, $f=0.05, 0.10\text{mm/tooth}$, $\phi=140\text{deg}$.
 $Q=100\sim 700\text{W}$, $D=1.1\sim 1.5\text{mm}$, $S=12.5\text{mm/sec}$

図8 マルテンサイト層厚さが切削後の端部形状におよぼす影響



(a) $Q=100\text{W}$, $D=1.5\text{mm}$



(b) $Q=200\text{W}$, $D=1.1\text{mm}$

(c) $Q=500\text{W}$, $D=1.1\text{mm}$

$V=100\text{m/min}$, $d=0.4\text{mm}$, $f=0.10\text{mm/tooth}$, $\phi=140\text{deg}$.
 $Q=100\sim 500\text{W}$, $D=1.1\sim 1.5\text{mm}$, $S=12.5\text{mm/sec}$

図9 マルテンサイト層厚さを変化させたときの切削後の被削材端部断面写真

る。送り速度が小さい場合はバリが生成されやすくなるが、マルテンサイト層の厚さを140 μm 程度生成するとバリは抑制できる。

図9に、マルテンサイト層厚さを変化させたときの切削後の被削材端部断面写真を示す。レーザー照射強度が弱く、マルテンサイト層がほとんど生成していない場合は端部にバリが生成している(図9(a))。一方、十分にマルテンサイト層を生成させると端部にコバ欠け生じ、マルテンサイト層が厚くなるほどコバ欠け高さが大きくなっている(図9(b), 図9(c))。このように、レーザー熱処理によって生成するマルテンサイト層の厚さは、切削後の端部形状に大きく影響を与える。したがって、切削条件に適した必要最低限のマルテンサイト層を生成することによって、効率的にバリの抑制ができると考えられる。

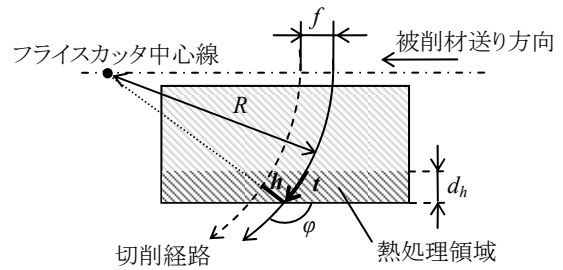


図10 各パラメータの幾何学的関係

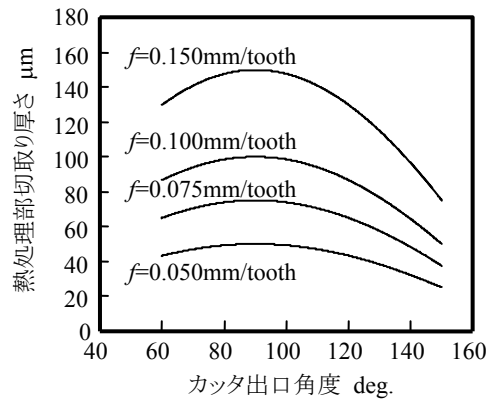


図11 カッタ出口角度および送り速度と切り取り厚さの関係

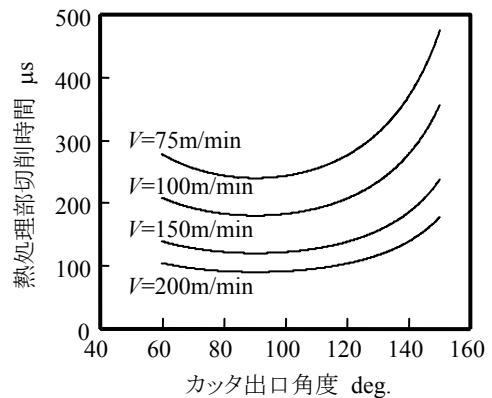


図12 カッタ出口角度および切削速度と切削時間の関係

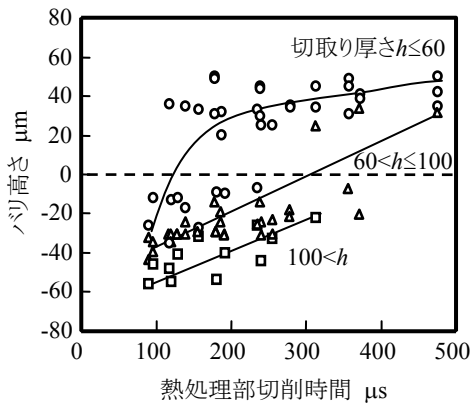
4. 考察

4.1 熱処理部の切り取り厚さおよび切削時間と切削後の端部形状の関係

図10に、切削面を上部から見た各パラメータの幾何学的関係を示す。ただし、 R はカッタ半径、 d_h はレーザー照射によって生成した熱影響部の深さである。正面フライス加工における工具刃先の軌跡はトロコイド曲線を描いており、送り速度、切削速度および出口角度の変化にともない、熱処理部の切り取り厚さ h および切削に要する時間 t が変化する¹⁰⁾¹¹⁾。

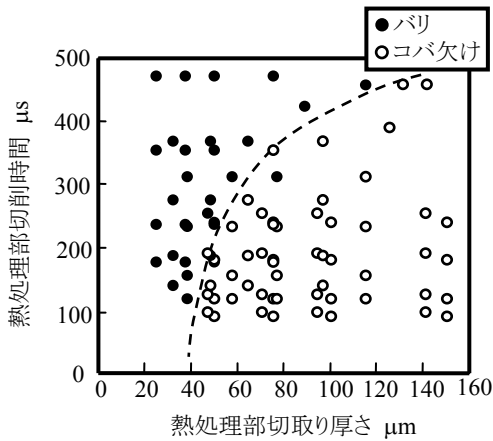
カッタ出口角度 ϕ と熱処理部切削時の切り取り厚さ h の関係は幾何学的に次のように近似できる。

$$h = f \sin \phi \quad (1)$$



$V=75\sim 200\text{m/min}$, $d=0.4\text{mm}$, $f=0.05\sim 0.15\text{mm/tooth}$
 $\phi=90\sim 150\text{deg.}$, $Q=200\text{W}$, $D=1.1\text{mm}$, $S=12.5\text{mm/sec}$

図 13 熱処理部の切り取り厚さおよび切削時間が切削後の端部形状におよぼす影響



$V=75\sim 200\text{m/min}$, $d=0.4\text{mm}$, $f=0.05\sim 0.15\text{mm/tooth}$
 $\phi=90\sim 150\text{deg.}$, $Q=200\text{W}$, $D=1.1\text{mm}$, $S=12.5\text{mm/sec}$

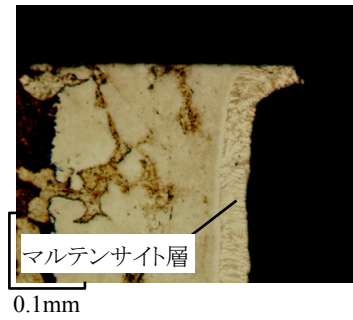
図 14 熱処理部の切り取り厚さおよび切削時間と切削後の端部形状の関係

図 11 に、カッタ出口角と熱処理部切削時の切り取り厚さの関係を示す。この図から、切り取り厚さは出口角度が 90 度のときに極大値となり、その値は一刀当たりの送りと等しくなる。また、出口角度が 90 度から離れるほど切り取り厚さは減少する。

また、カッタ出口角度 ϕ と熱処理部の切削に要する時間 t の関係は次式で表すことができる。

$$t = \frac{R}{V} \left\{ \cos^{-1}(\cos \phi) - \cos^{-1} \left(\cos \phi + \frac{d_h}{R} \right) \right\} \quad (2)$$

図 12 に、カッタ出口角度と熱処理部の切削時間の関係を示す。ただし、 $R=50\text{mm}$, $d_h=0.3\text{mm}$ ($Q=200\text{W}$, $D=1.1\text{mm}$, $S=12.5\text{mm/sec}$ でレーザー照射した場合) としている。この図から、切削時間は出口角度が 90 度のときに極小値となり、出口角度



$V=100\text{m/min}$, $d=0.4\text{mm}$, $f=0.05\text{mm/tooth}$, $\phi=140\text{deg.}$
 $h=32\mu\text{m}$, $t=278\mu\text{s}$, $Q=200\text{W}$, $D=1.1\text{mm}$, $S=12.5\text{mm/sec}$

図 15 熱処理部が塑性変形してバリが生成したときの端部の断面写真

が 90 度から離れるほど増大することがわかる。

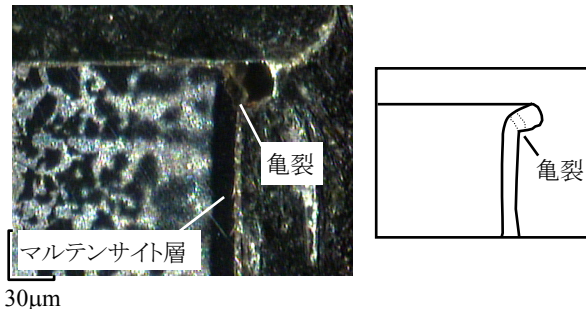
このように、送り速度、切削速度および出口角度を変化させることによって、熱処理部切削時の切り取り厚さと切削時間が変化すると考えられる。このことを考慮して、図 13 に、熱処理部の切り取り厚さおよび切削時間が切削後の端部形状におよぼす影響を示す。熱処理部の切削時間が短いほどコバ欠けが生じやすい。また、切削時間が同様の場合はより切り取り厚さが大きいときにコバ欠けが生じやすいことがわかる。このように、送り速度、切削速度およびカッタ出口角度によって定まる熱処理部の切り取り厚さおよび切削時間が、切削後の端部形状に大きく影響を与えることが明らかとなった。

図 14 に、熱処理部の切り取り厚さおよび切削時間と切削後の端部形状の関係を表す分布図を示す。この分布図から、切削後の端部形状は、熱処理部の切り取り厚さと切削時間の組合せに依存することがわかる。切り取り厚さがより大きく、切削時間がより短くなるように、切削速度、送り速度および出口角度を選定することによって、確実にバリの発生を抑制することができるといえる。

4. 2 レーザ熱処理を行った被削材の切削においてバリが生成する原因

本実験では、レーザー熱処理を行った被削材の切削においてバリが生成する場合がある。熱処理によって生成するマルテンサイト組織が非常に脆性の高く、塑性変形しにくい特性をもつにもかかわらずバリが生成した原因を検討する。

まず、熱処理部の切り取り厚さが減少し、切削時間が増大する切削条件ではバリが生成する傾向がある(図 14 参照)。図 15 に、熱処理部が塑性変形してバリが生成したときの端部の断面写真を示す。塑性変形が起きた領域は、変形していないマルテンサイト層と比べ、ナイトル溶液による腐食が進行し、やや黒く変色している。したがって、この塑性変形した領域は他のマルテンサイト領域とは異なる組織になっていると考えられる。このように組織変化した原因に切削熱の影響が考えられる。端部切削時の切り取り厚さが減少すると、被削材の単位長さあたりの切削回数が増え、多くの切削熱が被削材に伝わる。また、切削速度の減少に伴い熱処理部の切削時間が増大することも、被削材に伝わる切削熱が増える要因となる。



$V=100\text{m/min}$, $d=0.4\text{mm}$, $f=0.10\text{mm/tooth}$, $\phi=140\text{deg}$.
 $Q=100\text{W}$, $D=1.5\text{mm}$, $S=12.5\text{mm/sec}$

図16 マルテンサイト層が薄い場合の切削で端部に生成したバリの断面写真

その結果、この領域の組織が焼き戻されることによって塑性変形が可能となり、バリが形成したと考えられる。

また、レーザ照射強度が弱く、生成するマルテンサイト層が薄い場合の切削においてもバリが生成した(図8, 図9参照)。

図16に、マルテンサイト層が薄い場合の切削で端部に生成したバリの断面写真を示す。あわせて写真のモデル図を示す。この写真から、変形したマルテンサイト組織に亀裂が生じていることが観察できる。このようにマルテンサイト層に亀裂が生じた原因を考察するために、熱処理部のせん断強度について検討する。図17に、熱処理を行った被削材の2次元切削モデルを示す。この図のように、工具が被削材端部に接近すると、主せん断領域とは別に被削材内部にせん断領域が発生し、脆性材料の切削では、このせん断領域に沿って亀裂が進展しコバ欠けを形成すると考えられる¹⁾²⁾。レーザ熱処理を行った被削材は、大きな熱影響を受ける表層部から熱影響を受けない母材まで、連続的に組織の性質が変化していると考えられるが、ここでは簡単のため図17のように、表面に生成したマルテンサイト層(約Hv680)と、マルテンサイト化には至っていないが熱影響を受け硬度が上昇している層(約Hv540)の二層に近似して考える。それぞれの層の厚さはレーザ照射条件によって変化し、未切削の各層の厚さを L_1 , L_2 , せん断強度を τ_1 , τ_2 とすると、単位幅当たりの熱処理部のせん断に要するせん断力 F は式(3)のように表すことができる。

$$F = L_1\tau_1 + L_2\tau_2 \quad (3)$$

ここで、 τ_1 , τ_2 は材料の硬度と引張強度の関係¹²⁾および引張強度とせん断強度の関係¹³⁾から、 $\tau_1=1800\text{ N/mm}^2$, $\tau_2=1400\text{ N/mm}^2$ と概算できる。

また、マルテンサイト層が破断するときの工具刃先と被削材端部の距離(L_1+L_2)について検討すると、レーザ出力100Wで照射した場合、約15 μm の厚さのマルテンサイト層が生成し切削後にはバリが生成している(図9(a))のに対し、レーザ出力200Wで照射した場合、約55 μm の厚さのマルテンサイト層が生成し、切削後には約30 μm のコバ欠けが生じていることがわかる(図9(b))。したがって、工具刃先と被削材端部の距離

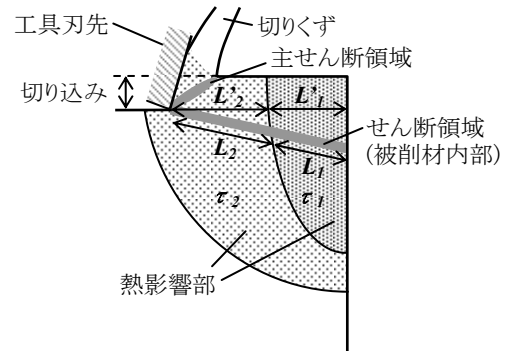


図17 被削材端部の2次元切削モデル

表3 熱処理部のせん断に要するせん断力 (工具刃先と被削材端部の距離が30 μm のとき)

マルテンサイト層厚さ μm	$L'_1 \mu\text{m}$	$L'_2 \mu\text{m}$	$F \text{ N}$
15	15	15	48
55	30	—	54

($\tau_1=1800\text{ N/mm}^2$, $\tau_2=1400\text{ N/mm}^2$)

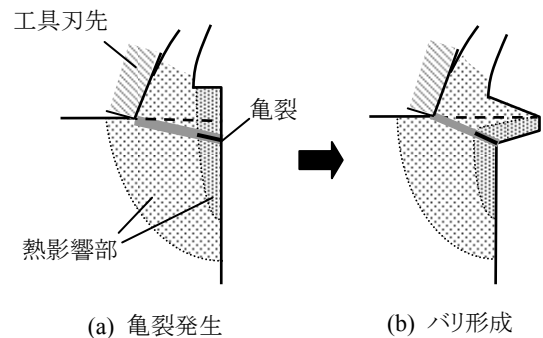


図18 マルテンサイト層が薄い場合の切削におけるバリ生成プロセス

が30 μm まで接近したときにマルテンサイト層が破断したと考えられる。

表3に、概算した τ_1 , τ_2 を用いて式(3)から算出した、工具刃先と被削材端部の距離が30 μm のときの熱処理部のせん断に要するせん断力 F を示す。ただし、簡単のために図17および式(3)における L_1 , L_2 を切り取り線方向の長さ L'_1 , L'_2 で近似している。レーザ照射によって生成するマルテンサイト層の厚さが薄い場合、マルテンサイト層が厚いときと比べて熱処理部のせん断に要するせん断力 F が小さいことがわかる。したがって、マルテンサイト層の厚さが薄い場合は、工具刃先と被削材端部の距離がより大きい時点で熱処理部に破断が生じると考えられる。

このことを考慮して、図18に、マルテンサイト層が薄い場合の切削におけるバリ生成プロセスをモデル図で示す。レーザ熱処理によって生成するマルテンサイト層が薄い場合、被削材端部のせん断強度が小さいため、工具がマルテンサイト層

に達する以前に、被削材端部に加わるせん断力がマルテンサイト層を破断するのに十分な大きさとなり、より脆性の高いマルテンサイト層に亀裂が生じると考えられる(図18(a)). このことによって、工具の進行にともなう塑性変形を抑えることができなくなりバリを形成したと考えられる(図18(b)).

5. 結 言

本研究では、炭酸ガスレーザーを用いた被削材の部分的熱処理を利用したバリの抑制において、より効率的なバリの抑制を実現するために、フライスカッタの出口角度、送り速度、切削速度およびレーザー照射強度が切削後の端部形状におよぼす影響を調査し、切削条件とレーザー照射強度の最適化について検討を行った結果、以下の結論が得られた。

- 1) 端部切削時の切り取り厚さがより大きく、熱処理部の切削に要する時間がより小さくなるように、カッタ出口角度、送り速度および切削速度を設定することによって、効果的にバ리를抑制できる。
- 2) レーザ照射条件を制御して深いマルテンサイト層を生成することによって、バリの発生を抑制することが容易になる。
- 3) レーザ熱処理を行った被削材においてバリが生じる原因は、切り取り厚さの減少および熱処理部の切削に要する時間の増大によって、被削材に伝わる切削熱が増加し、熱処理部の組織が焼き戻されることが考えられる。
- 4) マルテンサイト層が薄い被削材においてバリが生じる原因は、切削時にマルテンサイト層に亀裂が生じることが考えられる。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり多大なご支援をいただきましたJFE条鋼に記して感謝の意を表します。

6. 参考文献

- 1) Masayuki Hashimura, Kanji Ueda, Keiji Manabe, David A. Dornfeld: Analysis of Burr Formation in Orthogonal Cutting, Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 66, 2 (2000) 218 (in Japanese).
- 2) Kazuaki Iwata, Kanji Ueda, Koichi Okuda: Study of Mechanism of Burrs Formation in Cutting Based on Direct SEM Observation, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 48, 4 (1981) 510-515 (in Japanese).
- 3) Gwo-Lianq Chern: Experimental observation and analysis of burr formation mechanisms in face milling of aluminum alloys, International Journal of Machine & Manufacture, 46 (2006) 1517.
- 4) O. Olverai, G. Barrow: An Experimental Study of Burr Formation in Square Shoulder Face Milling, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 36, 9 (1996) 1005.
- 5) Gwo-Lianq Chern: Study on mechanisms of burr formation and edge breakout near the exit of orthogonal cutting, Journal of Materials Processing Technology, 176 (2006) 152.
- 6) Teruaki Miyake, Akihiro Yamamoto, Waichiro Kishimoto, Keiichi Yamanaka, Kensuke Takano: Study of Burr Formation in Face Milling (1ST Report) -Condition and Mechanism of Burr Formation-, Journal of the Japan society for Precision Engineering, 53, 1 (1998) 98 (in Japanese).
- 7) Suehisa Kawamura, Shigeki Okuyama, Junji Yamakawa, Takayasu Shiraishi: On the Formation Mechanism of Side Burr in Orthogonal Cutting, Journal of the Japan society for Precision Engineering, 53, 8 (1987) 1240 (in Japanese).
- 8) Ryutaro Tanaka, Takashi Kito, Akira Hosokawa, Takashi Ueda, Tatsuaki Furumoto: Effect of Laser Heat Treatment for Workpiece on Prevention of Burr Formation in Face Milling of Carbon Steel, Journal of the Japan Society for Abrasive Technology, 53, 6 (2009) 379 (in Japanese).
- 9) Takashi Kito, Ryutaro Tanaka, Akira Hosokawa, Takashi Ueda, Tatsuaki Furumoto: Prevention of Burr Formation in Face Milling of Carbon Steel by Laser Hardening, Key Engineering Materials, 407 (2009) 672.
- 10) 益子正巳ほか: フライス削りとフライスの設計, ラジオ技術社, (1964) 3.
- 11) 切削油技術研究会: フライス加工ハンドブック, (1988) 12.
- 12) 武井英雄: 金属材料学, 理工学社 (1978) 94.
- 13) プレス加工データブック編集委員会, プレス加工データブック, (1980) 5.