

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

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

Effects of laser heat treatment for prevention of burr formation
in face milling of carbon steel

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

本研究では、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手法として、レーザーを用いた被削材の部分的な改質による方法について提案した。実験では炭酸ガスレーザーを用いて選択的に熱処理を行った炭素鋼 JIS S45C の正面フライス加工において、切削後の被削材端部の形状についてバリの高さの測定と断面の組織観察を行い、被削材へのレーザー熱処理によるバリの抑制効果について検討を行った。切削後における被削材の端部の形状はレーザー照射条件に依存し、表層にマルテンサイト組織が生成されていると微小なコバ欠けが生じる。またマルテンサイト組織が生成されていなくても、レーザー熱処理により硬度が母材よりも高くなっていると発生するバリの高さが小さくなる。最終切削予定線へレーザー熱処理を行えば、それ以前の切削でバリが発生していても最終切削においてバリの発生を抑制することができる。仕上げ面粗さは、レーザー熱処理の影響をほとんど受けない。

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

1. 緒言

切削加工時に発生するバリは、製品の品質低下だけでなく後続工程の障害になるうえ、バリ取り作業を追加することで生産コストの上昇の要因となる。したがって、仕上げ切削において発生するバ리를抑制することは、表面品位や加工能率を考える上で非常に重要である。その対策としてバ리를全く発生させない切削条件を見出すことが理想的であるが、そのような条件を見出すことは非常に困難である。

現状ではバリの発生をできる限り小さくすることによって、切削後に行うバリ取り作業に掛かる負担を小さくする手法が取られている。このような観点から、これまでにコンピュータシミュレーションを用いたバリの発生機構に関する解析¹⁾や、実験的に切削条件とバリ発生との関係^{2)~6)}を調査した研究がある。しかしながら、バ리를小さく抑えることができて、少しでもバリが生成されればバリ取り作業を行う必要があり、必ずしも加工能率の向上にはつながらない。また、レーザーを用いたバリの除去手

法⁷⁾についての研究もある。この報告によればレーザー切断を応用した方法であり、エアジェットを併用していることから複数の装置が必要となりデブリの飛散も問題となる。このように発生するバ리를小さく抑える方法や発生したバ리를いかにして除去するかについての研究は行われているが、バリの発生自体を抑制しようとした研究は見られない。

本研究では、加工能率を維持したままバリの低減を図るため、レーザー照射による被削材の部分的熱処理による方法について検討を行い、最適なレーザー照射条件とバリ低減の機構を解明することを目的としている。実験では、連続発振で炭酸ガスレーザーを照射した炭素鋼 JIS S45C の正面フライス加工時に生じたバリ高さを測定し、バリ抑制における被削材へのレーザー熱処理の有効性について検討を行った。

2. 実験方法

表 1 に使用した被削材 (JIS S45C) の化学成分および硬度を示す。被削材は熱間鍛造の後、850°C で 5 時間保持後、保冷、焼きならししてある。硬さは、Hv240 となっている。

表 2 にレーザー照射条件を示す。レーザーの照射を行う前に、被削材の表面におけるレーザーの吸収率を高めるためにカーボン系吸収剤 (UNiCON レーザーノンドロス 371) を塗布している。炭酸ガスレーザー加工機を用い、出力 100 W、スポット径

*1 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

*2 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

〈学会受付日: 2008年12月10日〉

表1 炭素鋼 S45C の化学成分および硬度

	化学成分 体積%					硬さ HV
	C	Mn	Si	Sol.Al	N	
S45C	0.44	0.75	0.19	0.019	66ppm	240

表2 レーザ照射条件

レーザ	CO ₂ (CW)	
レーザ出力 Q	100, 500W	
スポット径 D	1.1, 1.5mm	
走査速度 S	12.5mm/sec	
エネルギー密度 q	57, 526W/mm ²	
波長	10.6μm	

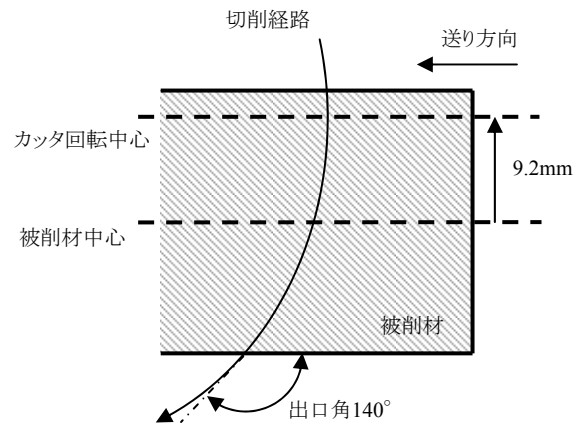


図2 出口角の設定

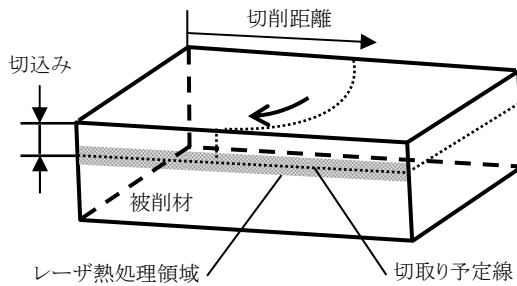
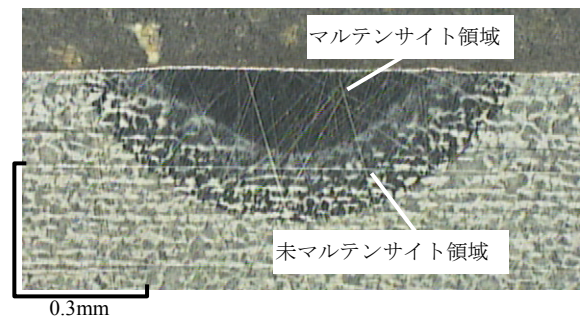


図1 被削材におけるレーザ熱処理を行う位置



$Q=500W, D=1.1mm, S=12.5mm/s$

図3 レーザ熱処理後における炭素鋼S45Cの断面写真

表3 切削条件

工具	超硬 M20 (TiN コーティング)	
被削材	S45C	
切削速度 V	100 m/min	
切込み a	0.2~1.0 mm	
送り速度 f	0.1 mm/tooth	
カッタ径	50 mm	
被削材寸法	幅 20 mm 長さ 50 mm	
クーラント	Dry	
カッタ出口角度	140 deg	

1.5 mm (エネルギー密度 57 W/mm²) および出力 500 W, スポット径 1.1mm (526 W/mm²) の 2 条件で照射を行った。レーザ走査速度 S は、12.5 mm/s で一定とした。

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、カッタ出口面の被削材の端部にバリが生じる。このことを考慮して、レーザ熱処理は、カッタ出口面の端部に沿った切り取り予定線上に連続発振で行った。

表3 に切削条件を示す。TiN コーテッド超硬合金工具 M20 (工具形状 TEEN1603PETR1) を直径 50mm のカッタ (三菱マテリアル製 SE300R503S32) に取付け、切削速度 V を 100m/min, 送り f を 0.1mm/tooth として、切込み a を 0.2 から 1.0mm の間で変化させ乾式で正面フライス加工を行った。被削材の寸法は、幅 20mm, 長さ 50mm である。

図2 に切削方式を示す。フライスカッタの回転中心を被削材の中心線から切れ刃入口側へ 9.2mm 移動させ、出口角が 140°となる状態で正面フライス加工を行っている。

切り取り予定線に沿ってレーザ熱処理された被削材を正面フライス加工し、レーザ熱処理していない被削材を切削した場合と比較し発生するバリへおよぼす影響について検討を行った。切削後の端部形状の観察は、レーザ変位計 (KEYENCE 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顕微鏡 (KEYENCE VH-5910) により観察する方法で行った。

また、被削材へのレーザ熱処理が切削状態へおよぼす影響を調べるために切りくずの観察、仕上げ面粗さの測定および切削抵抗の測定も行った。切削抵抗は、圧電式センサ型 3 成分工具動力計 (KISTLER Type 9257A) を用いて測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 レーザによる炭素鋼の熱処理特性

図3 にレーザ熱処理後における炭素鋼 S45C の断面写真を示す。写真はレーザ走査方向と垂直な面を示しており、ナイトル溶液により腐食後のものである。図にみるように、母材である初析フェライト+パーライトの組織の中に、レーザ照射によって変色した半円状の領域が確認できる。この変色した半円状の領域は、表面に近い部分に完全にマルテンサイト化した領域と、熱影響は受け変色しているがマルテンサイト化には至っていない領域とに分けられる。

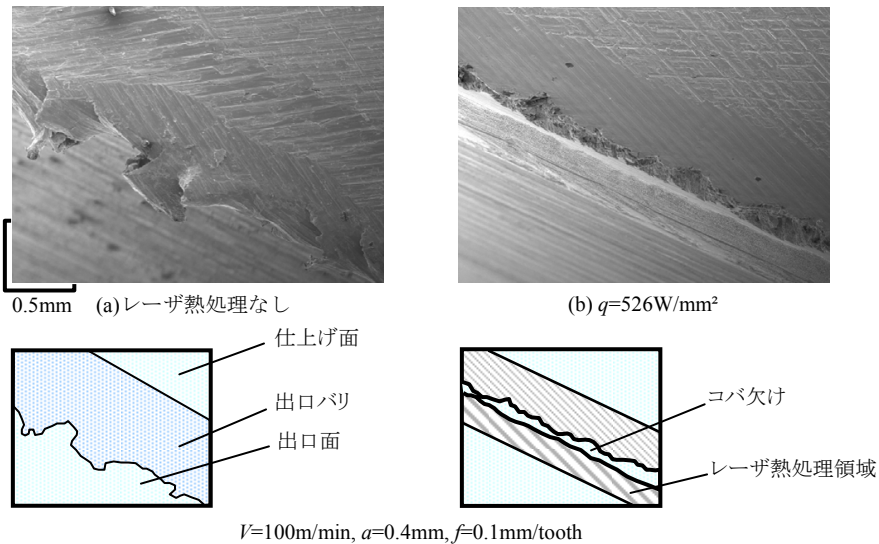


図4 切削後の被削材端部のSEM画像

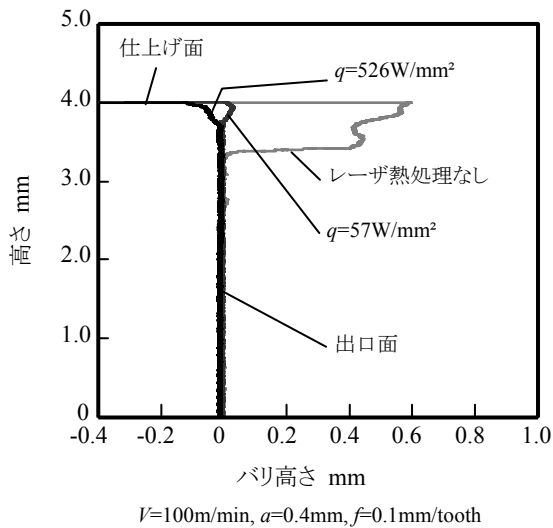


図5 レーザ変位計を用いて測定した被削材端部の断面形状

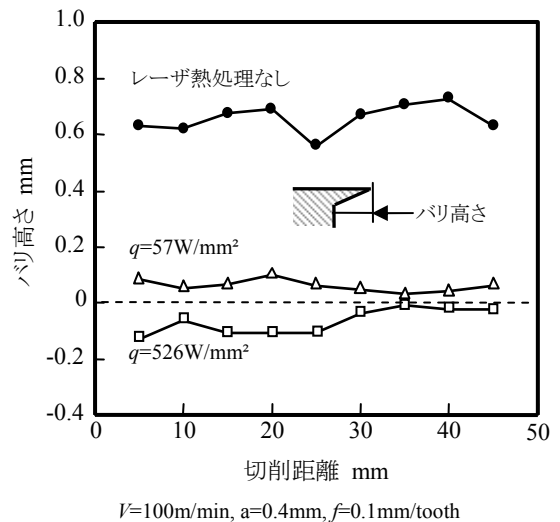


図6 出口面に生じたバリ高さ分布

ていない領域のふたつの領域に分かれていることがわかる。この変色した領域の硬度はいずれも母材の硬度より高く、表面に近いマルテンサイト組織の領域においてはその最大硬度は約 Hv・700であった。これにより、レーザー照射により被削材を部分的に熱処理でき硬化させることが可能であることが確認できた。

3.2 レーザ熱処理がバリの発生におよぼす影響

図4に正面フライス加工後の炭素鋼 S45C 端部の SEM 画像を示す。図4(a)に示すように、レーザー熱処理を行っていない被削材を切削すると、端部にバリが発生していることが確認できる。一方、レーザー熱処理(エネルギー密度 526 W/mm²)を行った被削材を切込み 0.4mm で切削した場合、図4(b)のように端部にバリはほとんど見られず、幅 0.1mm、高さ 0.2mm 程度

の大きさの微小なコバ欠けが生じていることがわかる。

図5にレーザー変位計を用いて測定した被削材端部の断面形状の一例を示す。レーザー熱処理を行っていない被削材を切削すると、端部に高さおよそ 0.6mm のバリが発生している。一方、高エネルギー密度(526 W/mm²)のレーザー熱処理を行った被削材を切削すると、バリはなくコバ欠けが生じている。低エネルギー密度(57 W/mm²)のレーザー熱処理を行った被削材を切削すると、バリが生じていることがわかる。しかし、その大きさはレーザー熱処理を行っていない場合と比べるとかなり小さい。

図6に出口面に生じたバリの被削材長さ方向の高さの分布を示す。任意の切削距離において断面形状をレーザー変位計で測定し、出口面に生じるバリの高さの分布を調べた。なお、コバ欠けが生じた場合は、高さを負の値として評価した。レー

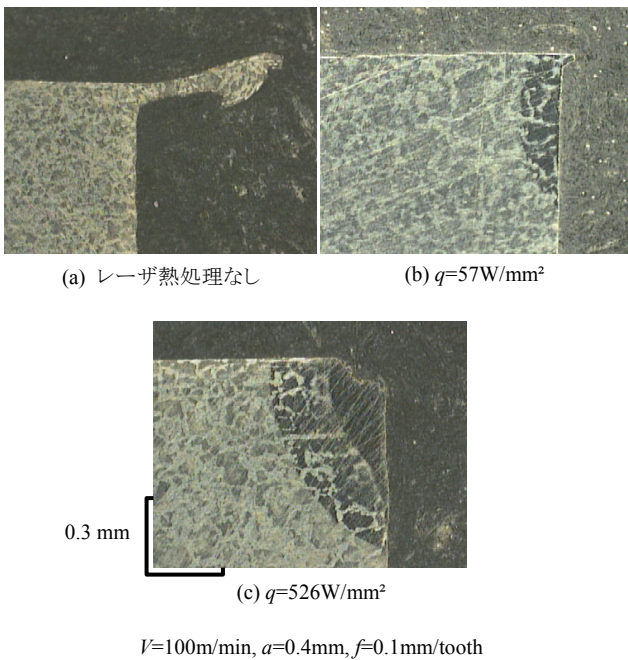


図7 切削後の被削材端面断面写真

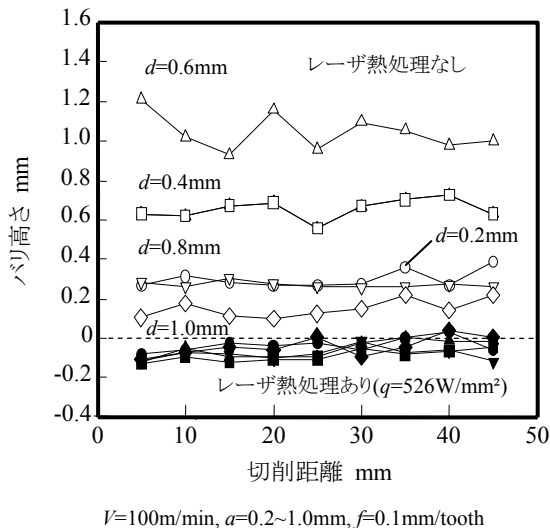


図8 切削距離によるバリ高さの変化

ザ熱処理を行っていない被削材の場合、最大で 0.7 mm 程度の高さのバリが生じている。これに対し、レーザーのエネルギー密度が低い場合、バリ高さは最大で 0.1 mm 程度となり、レーザー熱処理を行っていない場合と比べると大幅にバリ高さが減少した。高エネルギー密度のレーザーで熱処理を行った被削材を切削すると、バリは発生せず 0.1 mm 程度の微小なコバ欠けが生じた。このように、切削後の被削材端面の形状は切削する前に行う被削材へのレーザー照射により多大な影響を受け、バリの抑制も可能であることがわかった。

図7に切削後の被削材端面断面の組織写真を示す。写真は工具の送り方向と垂直な面を示しており、ナイトル溶液によ

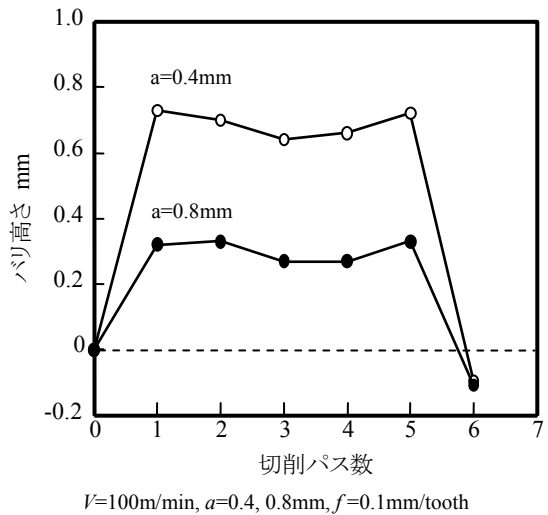
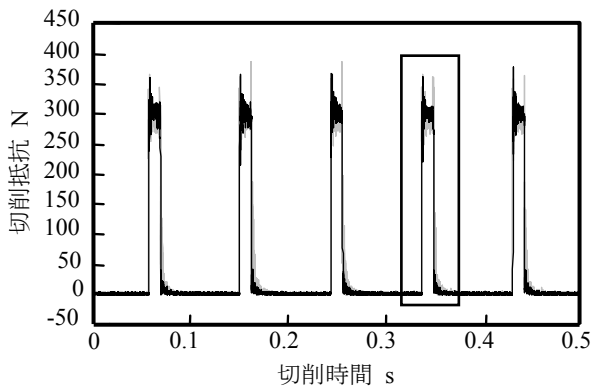


図9 切削パス数の増加にともなうバリ高さの推移

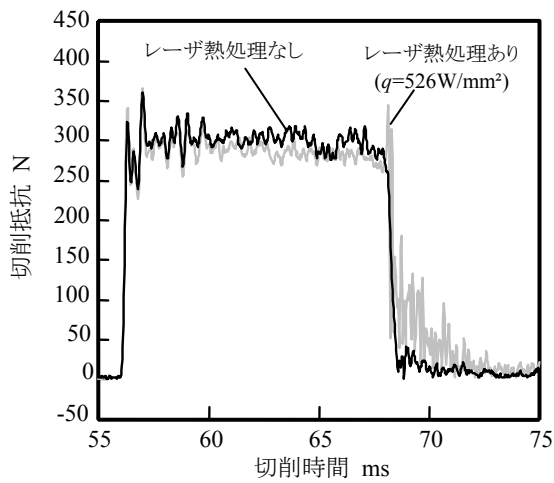
り腐食後のものである。レーザー熱処理をしていない被削材では、端部に大きなバリが生じている(図7(a))。高エネルギー密度(526 W/mm²)のレーザー照射した被削材を切削すると、熱影響を受けた領域のうち、マルテンサイト組織においてコバ欠けが発生している(図7(c))。一方、エネルギー密度が低い場合(57 W/mm²)では、切削後の端部に微小なバリが発生しているが、バリ周辺にはマルテンサイト組織がほとんど存在していないことがわかる(図7(b))。したがって、バリを発生させないためには表層にマルテンサイト組織を生成させておくことが必要であるといえる。

図8に切込みを0.2mmから1.0mmの範囲で変化させて切削したときの切削距離による出口面に生じたバリの高さの変化を示す。レーザー熱処理はエネルギー密度 526 W/mm²で行っている。レーザー熱処理部の中心が仕上げ面となるようにレーザー熱処理を行っている。レーザー熱処理を行っていない被削材を切削すると、切込みの違いにより生成されるバリの大きさは異なっている。切込みが増加していくとバリの大きさも高くなるが、切込みが0.6mmよりも大きくなるとバリの高さが減少している。これは、バリの先端が分離することで形成される二次バリによるものと考えられる²³⁾⁵⁾。一方、レーザー熱処理を行っている被削材を切削すると、切込みの大きさに関わらず、切削後の被削材の端面の形状は微小なコバ欠け状となることがわかった。

図9に切削パス数の増加にともなうバリ高さの推移を示す。被削材には切削を行う前に最終切削予定線に沿ってレーザー熱処理が行われている。レーザー熱処理はエネルギー密度 526 W/mm²で行っており、切削開始前にはバリはない。切削開始にともないバリが発生し、切削パス数が増加してもバリはほぼ一定の高さを示している。最後の切削となる6回目の切削後の被削材の端面においてバリは発生せず、微小なコバ欠けとなる。このように切削する前にバリが発生していても、最終切削予定線にだけレーザー熱処理が行われていればバリの発生



(a) 切削抵抗の変化



(b) 1パスにおける抵抗の変化の拡大図

$V=100\text{m/min}$, $a=0.8\text{mm}$, $f=0.1\text{mm/rev}$

図10 切削時における接線方向の切削抵抗

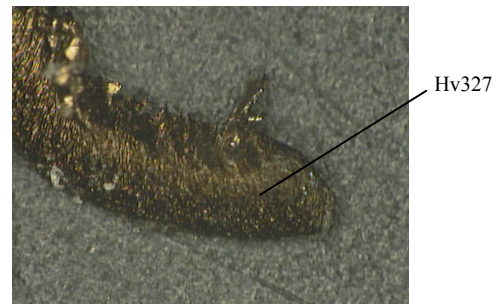
の抑制が可能であることがわかる。

切削後の被削材端部の形状を決定する要因の一つに、被削材の機械的性質がある⁷⁾。硬度が低く延性が高い被削材を切削すると、カッタが出口面に近づくとき端部に大きな塑性変形が生じバリが発生する。硬さが增大すると延性が低下し、塑性変形が生じる領域が小さくなるためバリは小さくなる。さらに硬さが増大し脆性を示すようになると、脆性破壊によりコバ欠けが発生する。レーザー照射によって被削材の機械的特性を部分的に変化させると、このようなメカニズムによって、切削加工におけるバリの抑制が可能となると考えられる。

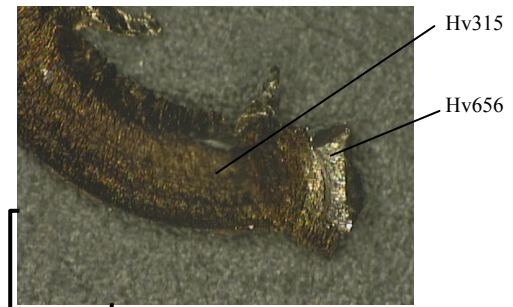
3.3 レーザ熱処理が切削抵抗および仕上げ面粗さへおよぼす影響

図10に切削時における接線方向の切削抵抗を示す。レーザー熱処理した被削材を切削すると切削終了時にパルス状に切削抵抗が増加する部分が見られる。これは、工具刃先の前方の高硬度部分が存在することで被削材の変形形態が影響を受け、切削抵抗が瞬間的に増加したと考えられる。

図11に切りくず形状および硬度を示す。レーザー熱処理した



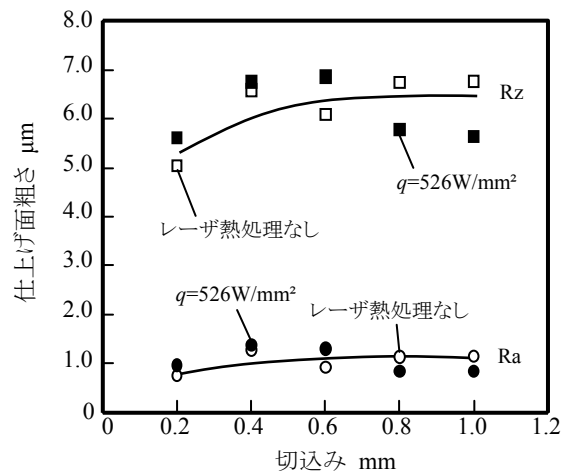
(a) レーザ熱処理なし



(b) $q=526\text{W/mm}^2$

$V=100\text{m/min}$, $a=0.4\text{mm}$, $f=0.1\text{mm/tooth}$

図11 切りくず端部の硬度



$V=100\text{m/min}$, $a=0.2\sim 1.0\text{mm}$, $f=0.1\text{mm/tooth}$

図12 レーザ熱処理が仕上げ面粗さにおよぼす影響

被削材を切削すると切りくずの端部にレーザー熱処理を受けた部分が観察できる(図11(b))。切りくずは切削中に受ける塑性変形により加工硬化しており被削材よりも高い硬度を示す。切削前の被削材の硬度は Hv240 であり、これと比べると切りくずの硬度は Hv300 程度と高くなっていることがわかる。端部の硬度を測定すると Hv650 程度であることから、コバ欠けとなった部分は切りくずとともに被削材から分離されたと考えられる。

図12にレーザー熱処理が仕上げ面粗さへおよぼす影響について示す。図には算術平均粗さ Ra と最大高さ粗さ Rz を示し

た. いずれも 10 点測定を行いその平均値を示している. Rz についてはレーザー熱処理を行った被削材を切削すると, レーザ熱処理を行っていない場合と比べ粗さが小さくなる場合も見られるが, レーザ熱処理の有無にかかわらずほぼ同程度の粗さを示すことがわかる. 炭素鋼 S45C の旋削加工においては, 被削材にレーザー熱処理を行うと若干ではあるが仕上げ面粗さが小さくなる傾向⁸⁾が認められている. 今回行った正面フライス加工においてこの傾向があらわれなかったのは, 切削方式が断続切削であり, 被削材の幅が 20mm と小さく一回の切削が比較的短い時間で終了するために, 被削材の凝着が少なかったことが考えられる.

4. 結 言

本研究では, 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手法として, レーザを用いた被削材の部分的な改質による方法について提案した. 実験では炭酸ガスレーザーを用いて選択的に熱処理を行った炭素鋼 JIS S45C の正面フライス加工において, 切削後の被削材端部の形状について, バリの高さ, 断面の組織観察などを行い, 被削材へのレーザー熱処理によるバリの抑制効果について検討を行った結果, 以下の知見が得られた.

- 1) 切削前に被削材のカッタ出口面の切削予定線へレーザー照射を行い部分的に熱処理することで, 正面フライス加工後の端部の形状を制御できる.
- 2) 正面フライス加工後における被削材の端部の形状はレーザー照射条件に依存し, 表層にマルテンサイト組織が生成されると微小なコバ欠けが生じる. またマルテンサイト組

織が生成されていなくても, レーザ熱処理部の硬度が母材よりも高くなっていると発生するバリの大きさが減少する.

- 3) 最終切削予定線へレーザー熱処理を行えば, それ以前の切削でバリが発生していても最終切削においてバリの発生を抑制することができる.
- 4) 仕上げ面粗さは, レーザ熱処理の影響をほとんど受けない.

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.

5. 参考文献

- 1) Masayuki HASHIMURA, Kanji UEDA, Keiji MANAME, 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) 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.
- 3) O. Olverai and G. Barrow: An Experimental Study of Burr Formation in Square Shoulder Face Milling, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 36, 9 (1996) 1005.
- 4) 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.
- 5) Teruaki MIYAKE, Akihiro YAMAMOTO, Waichro 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).
- 6) Seoung Hwan Lee, David A. Dornfeld: Precision Laser Deburring, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 123 (2001) 601.
- 7) 矢島悦次郎ほか: 第 2 版 若い技術者のための機械・金属材料, 丸善, (2004)148.
- 8) Ryutaro TANAKA, Yongchuan LIN, Kazumasa TANBE, Tasahi UEDA, Akira HOSOKAWA: Fundamental Study on Improvement of Chip Controllability in Turning with laser heat treatment, Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 73, 9 (2007) 1025 (in Japanese).