

## 切削加工の高度化・複合化 —金沢大学における取り組み—

Advanced and Combination Cutting Technologies  
— Proactive Approaches in Kanazawa University—

○細川 晃\*, 田中隆太郎\*, 古本達明\*, 上田隆司\*

\*金沢大学理工研究域機械工学系

Akira HOSOKAWA\*, Ryutaro TANAKA\*, Tatsuaki FURUMOTO\*, Takashi UEDA\*

\*Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Science and Engineering, Kanazawa University

Key Words: *Combination cutting, Actively driven rotary tool Laser-assist cutting, Milling-combined laser metal sintering*

### 1. 緒言

旋削加工やエンドミル加工に代表される切削加工は、研削加工とともに古くから発達してきた工作技術であり、生産加工技術の中で占める位置は依然として大きい。特に近年は、機械部品の高精度化・複雑化の要求に応えるべく、5軸制御マシニングセンタや複合加工機といった高度な工作機械が市場に投入されている。しかしながら、難削材加工や微細加工などを含め、さらなる高能率化・高精度化あるいは環境への負荷低減を実現するためには、現存する加工技術だけでは不十分な面もあり、例えば超音波振動加工や熱的エネルギー加工と機械加工の複合など、種々のハイブリッド化加工が提唱されている<sup>(1)(2)</sup>。

著者らの所属する研究室では、金属材料はもとより硬ぜい材料や歯材などの生体材料を対象として、これまで研削加工、切削加工、電解加工およびレーザー加工などに関して多くの研究を行ってきた<sup>(3)-(5)</sup>。これらの研究の過程でそれぞれの加工の特長と問題点が明らかになるとともに、これらを融合することによって既存の加工技術に新たな展開が可能なることもみえてきた。たとえば、レーザードレッシングなどは研削加工にレーザー技術を融合させたものである<sup>(6)</sup>。

さて、本報は“*切削加工分野*”における高速・高精度化がテーマであることから、本研究室にて行っている切削加工関連の高度化・複合化技術を紹介する。研究途上のものもあり、必ずしも高速化・高精度化に成功しているわけではないが、興味をもっていただければ幸いである。

### 2. 能動的ロータリ工具による難削材の高能率旋削加工<sup>(7)</sup>

Ti合金やNi基合金などの高強度耐熱合金は高温下における機械的性質が優れているため、発電プラントや航空機など多くの分野での使用されている。しかし、これらの材料はその優れた機械的特性のため難削性を示し、工具摩耗が極度に発達して高能率な切削加工が極めて困難な状態にある。

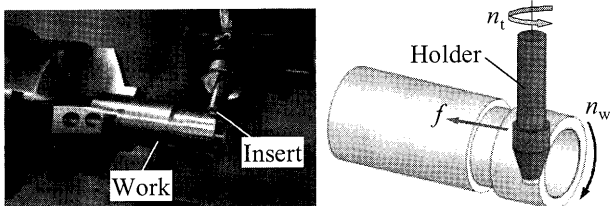


Fig.1 Turning with actively driven rotary tool (ADRT)

本研究は、図1に示すように、通常のバイトによる旋削ではなく特殊なホルダに装着した円板状工具 (ADRT: Actively Driven Rotary Tool) を回転させ、その回転工具で難削材の高能率加工を実現することを目的としている。この手法は、基本的には連続切削であるが、回転する工具からみれば工作物との接触域における極短時間の加熱と空転時における冷却という断続的な熱サイクルが繰り返されることになり、工具への熱的負荷が緩和され、工具寿命が増大すると考えられる。

図2に光ファイバ連結型2色温度計を用いた工具逃げ面温度測定法を示す。ファイバ-Aは工作物内に装着され、工作物とともに回転する。ファイバ-Aの受光面は円筒形の工作物表面に貫通した測定孔に挿入されており、工具が測定孔を通過するとき工具から放射される赤外線を受光する。ファイバ-Aにより受光された赤外線はもう一方の固定ファイバ-Bに非接触で送られ、2色素子へと伝送される。2色温度計とは対象の温度を2色素子の出力比から求めるもので、測定感度が測定対象物の放射率に依存しない特徴をもっている。

図3は工具回転速度 $v_t$ と工具逃げ面温度 $\theta$ の関係を示したものである。図にみるように、 $v_t$ が150 m/min程度までの範囲では工具回転数の増加とともに工具逃げ面温度が減少していることがわかる。これは、工具回転数の増加とともに切削(加熱)時間が減少し、温度の上昇が抑制されたためと考えられる。当然ながら空転時における工具の冷却も作用する。図は省略するが、工具摩耗も切れ刃全周にわたって平均化されるため減少する。これらの結果より、本手法は難削材の高能率加工に有効であると考えられる。現在はNi基合金への適用やMQLの有効性について検討している。

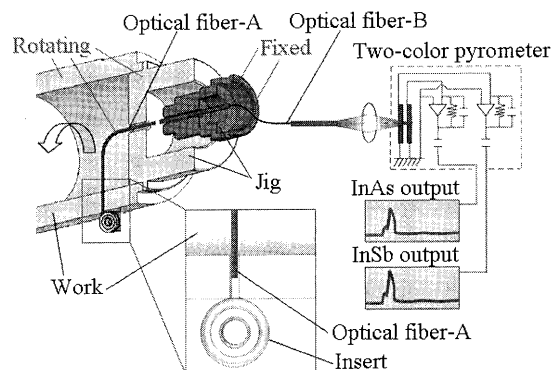


Fig.2 Fiber-coupled two-color pyrometry in turning

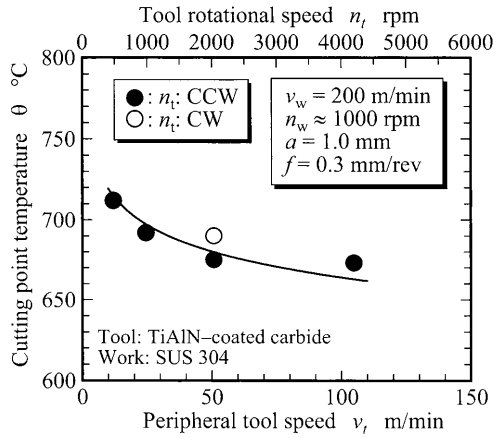


Fig.3 Influence of tool rotational speed on tool temperature

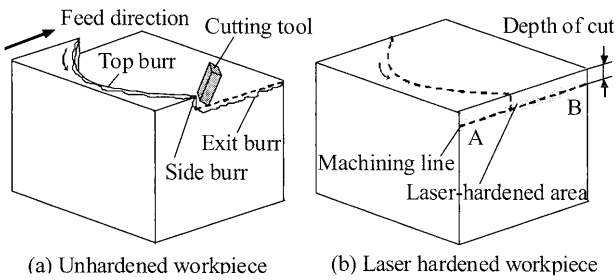


Fig.4 Laser irradiation on the workpiece before face milling

### 3. レーザアシストによる切削加工の高度化技術

近年、レーザ発振器の小型化・高出力化にともないその用途が飛躍的に拡大しており、それと相まっての加工との複合化も進みつつある<sup>(1)</sup>。本研究は、レーザを用いた被削材の熱処理によって切削加工の高効率化を図ることを目的としたものである。なお、機械構造用材料として最も使用頻度が高く、且つ熱処理(レーザ照射)によってその機械的特性が比較的容易に制御できる炭素鋼を加工対象としている。

#### 3-1 レーザ熱処理によるバリの抑制<sup>(8)</sup>

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、後続工程の円滑な移行を妨げたり、バリ取り作業によるコスト上昇などをまねく。したがって、加工時に生じるバリを抑制することは加工能率上極めて重要になる。

本研究は、正面フライス切削を対象として、切削加工前の被削材にレーザを照射し、部分的にその機械特性を変化(脆化)させることによってバリを抑制しようとするものである。図4に被削材におけるレーザ熱処理を行う位置を示す。図に示すように、正面フライス加工ではフライスカッタ出口面の被削材の端部にバリが生じるため、被削材出口の切り取り予定線に沿ってレーザをライン照射した。レーザは連続発振CO<sub>2</sub>レーザ(出力100~700 W、スポット径1.1~1.5 mm)を使用し、材料の吸収率を考慮し吸収剤を塗布したのち照射した。

図5に切削後の被削材端部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、ナイトル溶液による腐食後のものである。図にみるように、レーザ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のに対し(図5(a))、高エネルギー密度(210 W/mm<sup>2</sup>)のレーザを照射した被削材では、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5(c))。一方、エネルギー密度が低い場合(57 W/mm<sup>2</sup>)、切削後の端部に微小なバリが発生する。このときバリ周辺にはマルテンサイト層が

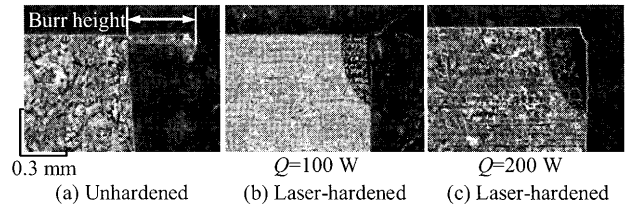


Fig.5 Cross-section of machined workpiece surface

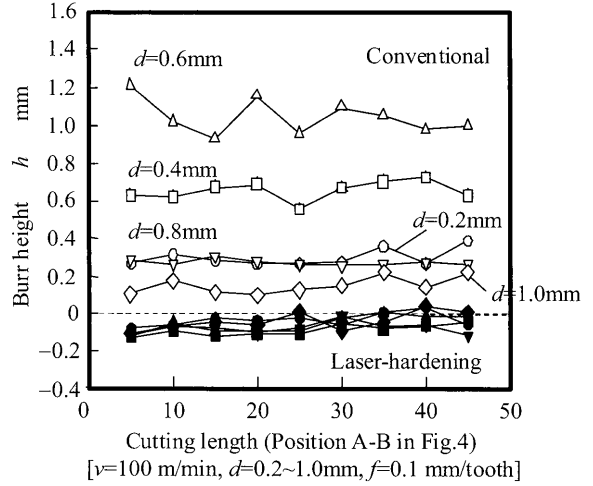


Fig.6 Influence of laser-hardening on burr height

ほとんど存在していない(図5(b))。このことから、バリを発生させないためには、被削材の出口面層にマルテンサイト組織を生成させ、材料を脆化させることが必要となる。

図6は高エネルギー密度(210 W/mm<sup>2</sup>)でレーザを照射した後、切込みを0.2~1.0 mmの範囲で変化させて切削したときのバリの高さを被削材長さ方向の分布で示したものである。図より、レーザ熱処理を行っていない被削材を切削すると、切込み深さdに依存してバリ高さが変化することがわかる。一方、レーザ熱処理を行った被削材を切削した場合、切込みの大きさに関わらず被削材端部はすべて微小なコバ欠け状(バリ高さhが負)になっている。

このように、被削材の出口面にレーザ熱処理を施して部分的に硬化・脆化させることによって、被削材端部の形状を制御することが可能であることが明らかになった。

#### 3-2 レーザ熱処理と切削の複合加工による機能面の創生<sup>(9)</sup>

一般に、高性能工作機械の姿勢制御等に使用される位置決めブレーキには高い静止摩擦係数が求められる。そのため、ホーニングによるクロスハッチ溝やきざげ加工による微小凹み(油だまり)など、摩擦摺動面に微細なパターンを形成する機会が多い。しかしながら、これらの加工法にはホーニング盤などの専用の設備や熟練者の技能が必要不可欠で、加工能率が悪く大量生産には適していない。

本研究は、材料の表面にレーザを照射することによって部分的に熱処理を行い、意図的に表面層の機械的性質を不均一にした炭素鋼を切削することによって、所定の幾何学的パターンを有する機能表面を得ようとするものである。本報では、湿式位置決めブレーキを想定し、切削前におけるレーザ熱処理の際の照射パターンの違いが静止摩擦係数へ及ぼす影響について検討した結果を紹介する。

実験は炭素鋼S45Cに、出力500 W、スポット径1.0 mm、走査速度10 mm/sにてCO<sub>2</sub>レーザを照射した。なお、試料表面にはカーボン系吸収剤を塗布している。図7はレーザ熱処理を

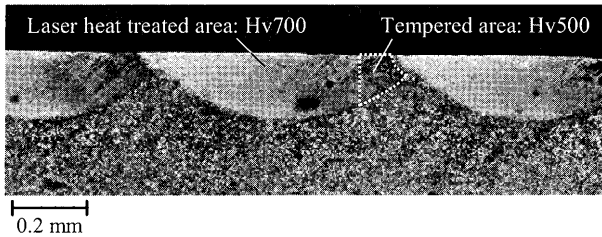


Fig.7 Photograph of laser heat treated structure in S45C

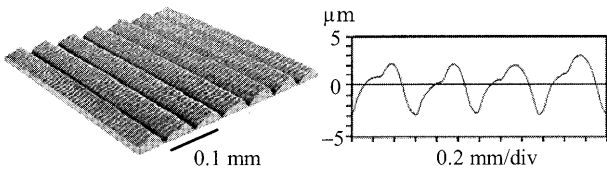


Fig.8 Profiles of machined surface of heat treated steel

行った炭素鋼の断面写真であるが、深さ0.5 mm、幅1 mmの半円状に母材と異なる組織が観察できる。半円状の内部のほとんどがHv700程度に硬化されている。図はレーザービームを一部重複するように左から右に順次照射したものであるが、後から熱処理した半円状の領域の外側(左側:白破線内)に焼き戻しされて軟化( $\approx$ Hv500)した部分が形成されているのがわかる。すなわち、試料表面には周期的に硬度が変化した層が形成されたことになる。

図8はこの試料を切削したときの仕上げ面のプロファイルである。図にみるように、レーザー熱処理後に切削加工した試料表面は、レーザーの走査ピッチ(0.6 mm)に対応した緩やかなうねりが形成されていることがわかる。これは試料表面の硬さ(被削性)の違いにより、切削抵抗(実切込み)が変化したことに起因する。このうねりの最大高低差はおよそ6  $\mu$ mである。また、切削後の試料凸部の硬度はHv485で、母材より硬度が高く保たれている。

この試料を位置決めブレーキの摺動面と想定し、その摩擦係数を往復式摩擦試験装置により評価した。すなわち、10 mm $\times$ 10 mmの試料に一定の荷重を负荷して移動ステージにより直線運動を与え、動き出す直後の摩擦力のピークより静摩擦係数を算出した。図9は静摩擦係数の測定結果を示したもので、比較のため、研磨加工、切削加工およびレーザー熱処理と切削の複合加工の結果を併記している。レーザー熱処理-切削複合加工については、摩擦試験の摺動方向をパターン溝に対して垂直方向と水平方向の両者で行っている。図にみるように、レーザー熱処理-切削複合加工の試料は、研磨加工や切削加工の試料に比べ、水平・垂直直方向とも摩擦係数が高いことがわかる。レーザー熱処理と切削加工によって創生された微小なうねりは周期0.6 mm、高低差6  $\mu$ m程度であることから、接触している2面間から余分な油剤の排出が効率よく行われ、直接接触している領域が増加したためと考えられる。

これらの結果より、炭素鋼ではレーザー熱処理に切削するとレーザーの走査ピッチに対応した緩やかなうねりが形成され、摩擦係数の高い高機能面が創生できることが確認できた。レーザーを用いれば種々の走査パターンで試料表面を部分的に熱処理できるため、種々の機能表面の創生が期待できる。

#### 4. 金属粉末光造形複合加工<sup>(10)</sup>

金属粉末にレーザーを照射しながら粉体を焼結して積層していく積層造形法では、必要な分量の粉体を固めていくことから、金属部品や金型の製造時間を大幅に短縮することができる。ところが、本方法ではレーザービーム径や粉体構造に起因する寸法誤差や仕上げ面不良が避けられない。そこで、薄

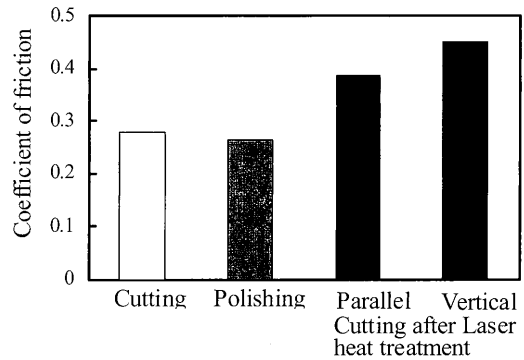


Fig.9 Comparison of static coefficient of friction

い金属粉末焼結層を積層していく過程で逐次エンドミル加工を行い、高精度の製品を能率的に製作する金属粉末光造形複合加工が提案され、注目を集めている<sup>(11)</sup>。

ところで、金属粉末光造形複合加工では500  $\mu$ m程度の厚みのレーザー焼結層を小径のボールエンドミルで加工するが、小径になるにしたがって工具の切削性能や剛性が低下し、高精度の加工が難しくなる。条件によってはエンドミルが破損してしまい、製品に決定的な損傷を与える。加えて、焼結材料はレーザー照射条件によって大きくその機械特性を変化させるだけでなく、顕著な異方性が生じる場合もあり、加工を一層難しくしている。

本報では、金属粉末光造形複合加工における切削加工に焦点をあて、上述したような特徴をもつレーザー焼結体の小径ボールエンドミル加工特性を検討している。

図10は金属粉末の焼結法と焼結体の表面組織(SEM写真)を示す。粉末材料は粒径30  $\mu$ mのクロムモリブデン鋼、ニッケルおよび銅である。図中の記号Eは焼結時のレーザーパワーを示しており、E<sub>l</sub>は低レベル、E<sub>m</sub>は中レベル、E<sub>h</sub>は高レベルである。図にみるように、E<sub>l</sub>ではエネルギー密度が低く粉末は溶融していないため焼結が不十分で、表面に多数の気孔が観察される(密度:6950 kg/m<sup>3</sup>、硬さ:Hv211)。E<sub>m</sub>になると金属粉末は溶融するため表面に気孔はほとんど観察されず、密度、硬さとも上昇している( $\rho$ =7680 kg/m<sup>3</sup>、Hv275)。E<sub>h</sub>はではさらに表面が滑らかになっているが、密度や硬さにほとんど変化がない。この結果より、金属粉末の焼結にはレーザーエネルギーは中レベルで十分であるといえる。なお、図(e)は焼結材料の側面であるが、表面とはその様相が異なり、全面に金属粉末が付着した状態にあることがわかる。

図11は焼結材料の均一性を調べるため、材料内部の硬さ分布を測定した結果である。図のx軸、y軸、z軸のいずれの方向においても材料表面で硬さが高くなっているが、表面下1 mmになると硬さは低下してほぼ一定値に収束している。したがって、表面層の加工が最も難しいことが推察される。

図13は3種類の焼結材料をボールエンドミルで表面切削したときの比切削エネルギーを比較したものである。E<sub>m</sub>とE<sub>h</sub>材料ではほぼ同じ比切削エネルギーを示しており、両材料の被削性には大差がなく、また、S55Cより被削性に劣ることがわかる。ところが、E<sub>l</sub>材料になると比切削エネルギーは大きく低下し、S55Cよりはるかに被削性がよい材料であることがわかる。なお、図は省略するが、切削温度はS55Cよりも高くなっている。これは、焼結体の熱伝導率ははるかに小さいことによるものであり、工具刃先への熱負荷が大きくなる。

以上のように、金属粉末光造形複合加工においては焼結条件や加工面(上表面/側面/内部)に応じて加工条件や工具経路を最適化する必要があり、今後、焼結体の残留応力との関連も含めて検討すべき課題は多い。

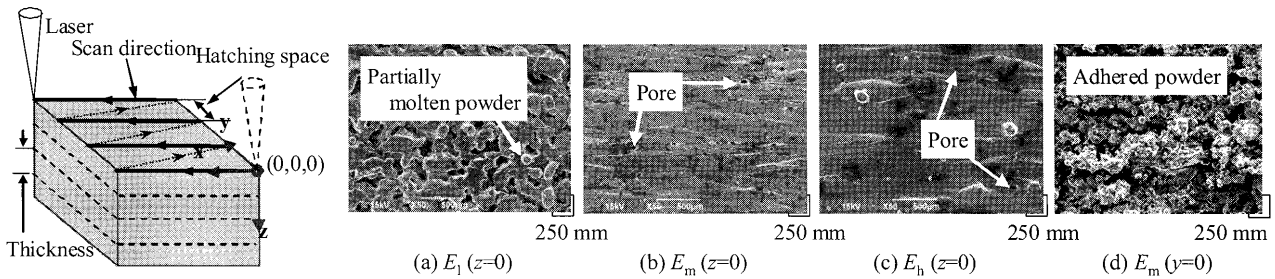


Fig.10 Laser metal sintering method and SEM images of sintered surfaces

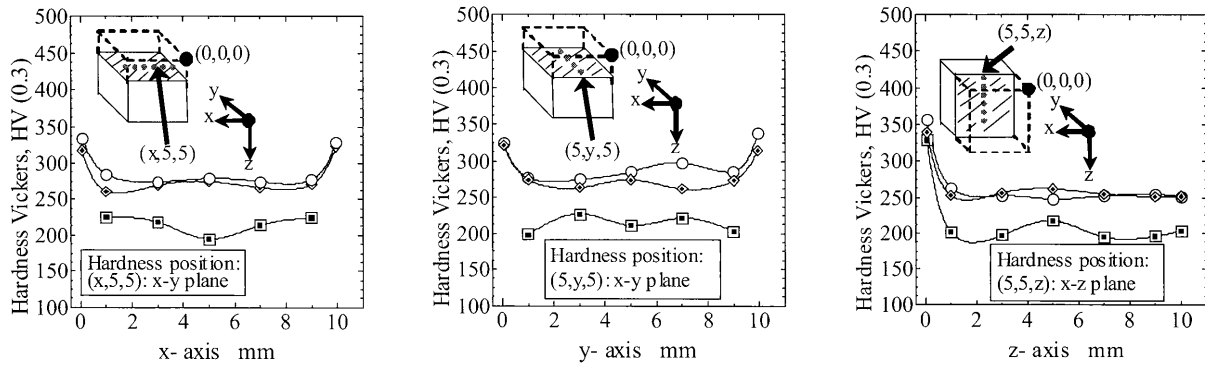


Fig.11 Hardness distribution of the sintered materials

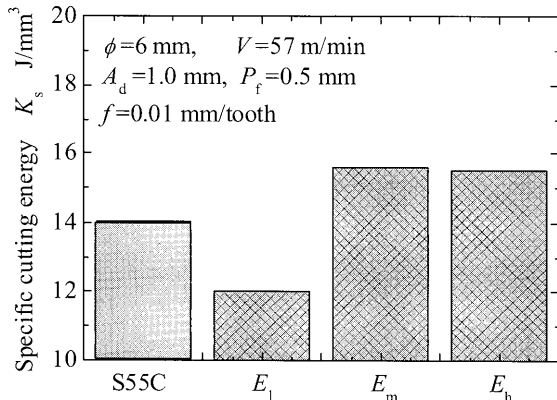


Fig.12 Effect of energy density on specific cutting energy

5. 結 言

切削加工の高度化・複合化というテーマにて、現在著者らの研究室で行っている研究の一部を紹介した。紙面の都合から切削加工とレーザー加工との複合化による高度化技術が主体になったが、この他、レーザー熱処理により切りくずの折断や<sup>(12)</sup>、レーザドレッシング・ツルーイング、研削焼入れなど、研削加工の高度化にも挑戦している。また、このような複合化だけでなく、マルチノズル方式によるMQL旋削加工<sup>(13)</sup>や低摩擦係数のコーティングエンドミルの開発など、いわば正攻法による取り組みも併行して行っている。

今後も切削加工を主体とした機械加工の重要性に変わりではなく、さらなる高精度化・複雑化・高能率化の要求に応えるべく様々な取り組みがなされるであろう。

参考文献

1) Shimizu, Multi-tasking Machine Realizing High Productive and Accurate Machining —Present State and Evolution in Future—

(in Japanese), J. Japan Soc. Prec. Eng., Vol.74, No.4 (2008), pp.325–328.  
 2) Shamoto, E., Moriwaki, T., Study on Elliptical Vibration Cutting, Annals of the CIRP, Vol.43, No.1 (1994), pp.35–38.  
 3) Hosokawa, A., Mashimo, Yamada, K., Ueda, T., Evaluation of Grinding Wheel Surface by Means of Grinding Sound Discrimination, Int. J. JSME, Ser.C, Vol.47, No.1 (2004), pp.52–58.  
 4) Ueda, T., Hosokawa, A., Yamada, K., Effect of Oil Mist on Tool Temperature in Cutting, J. Manuf. Sci. Eng., Trans. ASME, Vol.128, No.1 (2006), pp.130–135.  
 5) Ueda, T., Sentoku, E., Yamada, K., Hosokawa, A., Temperature Measurement in Laser Forming of Sheet Metal, Annals of the CIRP, Vol.54, No.1 (2005), pp.179–182.  
 6) Hosokawa, A., Ueda, T., Yunoki, T., Laser Dressing of Metal Bonded Diamond Wheel, Annals of the CIRP, Vol.55, No.1 (2006), pp.329–332.  
 7) Onishi, R., Hosokawa, A., Ueda, T., Tanaka, R., Furumoto, T., Studies on Turning of Difficult-to-Machine Materials with Spinning Tool (in Japanese), Proc. JSPE Hokuriku-Shin'etsu Branch Meeting, A05 (2009), pp.11–12.  
 8) Tanaka, R., Kito, T., Hosokawa, A., Ueda, T., Furumoto, T., Machined Workpiece Edge Shape Control by Laser Hardening —Optimizing Laser Scan Conditions and Cutter Paths—, Int. J. Automation Tech., Vol.4, No.1 (2010), pp.21–25.  
 9) Inoue, T., Tanaka, R., Hosokawa, A., Ueda, T., Furumoto, T., Frictional Characteristics of the Surface Formed by Machining Combined with Laser Heat Treatment (2nd Report) (in Japanese), Proc. JSPE Hokuriku-Shin'etsu Branch Meeting, A09 (2009), pp.19–20.  
 10) Yassin, A., Ueda, T., Hosokawa, A., Furumoto, R., Tanaka, R., Abe, S., Study on Cutting Characteristics of Sintered Material with Yb:Fiber Laser, J. Adv. Mech. Design, System and Manuf., Vol.2, No.5 (2008), pp.833–843.  
 11) Abe, S., Higashi, Y., Fuwa, I., Yoshida, N., Yoneyama, T., Milling-Combined Laser Metal Sintering System and Production of Injection Molds with Sophisticated Functions, Proc. 11th Int. Conf. Prec. Eng., Tokyo (2006), pp.16–18.  
 12) Lin, Y., Tanaka, R., Hosokawa, A., Kusano, T., Ueda, T., Studies on Chip Control in Turning by Partially Laser Hardening of Carbon Steel, J. Adv. Mech. Design, Sys. and Manuf., Vol.3, No.1 (2009), pp.13–21.  
 13) Ozawa, M., Hosokawa, A., Tanaka, R., Furumoto, T., Ueda, T., Effect of Minimum Quantity Lubrication in Turning —Actions of Oil Mist Supplied to Tool Rake Face and Flank Face—, J. Japan Soc. Abrasive Tech., Vol.53, No.2 (2009), pp.88–93.