レーザーオリジナル

YAGレーザー光による切屑切断の研究

三浦 宏^{*†}・笹川 隆^{*}

(1988年5月11日 受理)

Study on YAG Laser Chip Breaking

Hiroshi MIURA^{*†} and Takashi SASAGAWA^{*}

(Received May 11, 1988)

Chip breaking during a finish boring process has previously been a problematic procedure due to a lack of suitable automatic chip breaking methods. This paper presents the novel and automatic chip breaking method that utilizes a YAG laser together with an optical fiber. Preliminary experiments with sample model chips showed that a YAG laser of a CW oscillation mode could cut the model chips for wider ranges of width and thickness than that of a Q-switched mode. Succeeding experiments on an actual turning process revealed that a focused laser beam of more than 10^4 W/cm² fully covering the positional fluctuation of generating chips could cut chips satisfactorily. These experimental results were used in the design of a new tool holder with a YAG laser machining optics for finish boring. The tool holder exhibited an excellent performance under the conditions: a machining speed of 60m/min, a depth of cut of 0.05–0.1mm and a feed rate of 0.08–0.2mm/rev. The laser power used was 150 W.

Key Words: CW YAG laser, Chip breaking, Depth of cut, Feed rate, Fiber.

1. はじめに

切削加工時に発生する流れ型切屑は、加工の自動化を防げるため、この切屑を処理する方法として主にバイトにチップブレイカをつけて切断することが従来よりおこなわれている^{1,2)}。しかしこの方法は、荒削りでは適用範囲が広いが、仕上げ加工時の細く薄い切屑に対しては加工物

の材質や切削条件により十分折れないことがある。これの対策として、あらかじめV溝を設けたり、送りを断続的に行い切屑の連続発生を避ける方法が試みられている³⁾。また切屑から発生する赤外線を監視することによって、切屑がバイトや工作機械にからまる状態を予め知る試みもある⁴⁾。しかしこれらの方法は加工時間、加工コストを増加させ、特に後者の方法では、中ぐ

* 日本電気株式会社レーザ装置事業部 (〒229 相模原市下九沢1120)

† 現在：日本電気株式会社半導体特許技術センター (〒211 川崎市中原区下沼部1753)

* Laser Equipment Division, NEC Corporation (Shimokuzawa, Sagami-hara, 229)

† Present Address: Semiconductor Patent Technology Center, NEC Corporation (1773) Shimonumabe, Nakaharaku, Kawasaki, 211)

り加工の場合には運用が難しくなる。

本論文は、マシニングセンターにおける中ぐり仕上げ加工時に発生し加工の無人化を防げる切屑をYAGレーザーによって切断する新しい方法を提案するものである。マシニングセンターにおいてこの方法を実現するためには、(1)高速で流出する切屑を切断するためのレーザーパワー、発振の形態、集光系の決定、(2) 流出、移動する切屑にレーザー光を確実に照射でき、加工物、バイトを損傷させず、中ぐり加工に対しても位置的制限を生じないレーザー加工光学系の開発、(3) ATC (Automatic tool changer) と位置的に干渉せず、切削加工の無人化を妨げないレーザー光の導入方法の決定、等を行う必要がある。ここではこれらの問題を解決するための与条件として、中ぐり仕上げ加工時に発生する切屑を対象とし、材質SCM3からなるスリーブにおける穴径100mm、深さ60mm程度の内面仕上げ加工時に発生する切屑切断を具体的目標に設定して研究を行った。

2. レーザー発振の形態と伝送方式の選定

2.1 レーザー発振の形態とパワーレベル

以上のことから切断すべき切屑の検討対象としては、切削速度30~200m/minにおいて、切込み0.2mm以下、送り0.02~0.3mm/revで発生する切屑とした。この切屑を切断するためのレーザー出力、発振の形態を決定するために、厚さ0.01~0.09mm (0.01mmステップ) のシックネステープ (SK-5) を巾0.1~0.9mm (0.1mmステップ) に切断し、このタブ状のサンプルを下部が中空のサンプルホルダーに固定し、連続出力100W、或いは10kHzのQスイッチ動作で60Wが得られるYAGレーザー光を焦点距離100mmの対物レンズで集光、照射して、切断可能なサンプルの厚み、巾、この時の、レーザー照射時間を求めた。焦点位置はすべてサンプル表面上に置いた。この時の理論上の集光径は約500 μ mである。結果をFig.1に示す。これからサンプルを静止した状態では、高い尖頭値を持つが平均出力が低いQスイッチ発振に比べて、これより

Fig.1 Comparison of the cutting characteristics for a CW and a Q-switched YAG lasers. The data are taken as functions of the width and thickness of sample model chips. The model chips were prepared so that they had the shape of tabs and the same width and thickness as actually generated chips had. Focal length of objective lens, 100 mm; Beam expanding magnification, $\times 3$.

高い平均出力を持つ連続発振の方が加工範囲が大きいことが分かった。このことから、この実験に用いたQスイッチのレベルの尖頭出力 (約30kW) と集光径では照射パワー密度は 7×10^6 W/cm²程度であり、実験に用いた規模の加工物をすべて蒸発にいたらせず、平均出力による溶融から溶断にいたる切断が主な過程であると考えられた。従って以後の実験は連続発振モードで行った。この実験ではアシストガスは用いなかったが、以上の加工過程から酸素ガスを用いることにより加工範囲が広がることが予想され、出力200Wの連続発振レーザーを数10~数100

ms照射することによって検討対象の切屑を切断出来ると考えた。以上のことから定性的評価を行う外ぐり実験では出力100W, 定量的評価を行う内ぐり実験では200Wのレーザーを用いた。一方実際の切屑は500~3000mm/sの速度で成長しており, レーザー照射1msの場合には実効的加熱スポット径が切屑の成長方向に0.3~0.5mm延び, パワー密度は約半分に低下することになる。この場合の切断特性の評価結果は次項で述べる。

2.2 レーザー光伝送方式

レーザー光を切削点近くに導入する方法として(1) ミラー, プリズムを用いて導入する方法, (2) ファイバーによる方法, が考えられる。(1)の方法では空間的コヒーレンシが失われず, 長い焦点深度が得られレーザー加工の観点からは望ましい。しかし(a) オイルミストが充満する切削環境でこれらの光学部品を保護する必要性, (b) マシニングセンターにおける中ぐり加工において, このためのツールホルダーがATCにより工具交換される場合に, レーザー光の伝送のために複数枚の反射ミラーを配置する必要がある位置的自由度が無いことを考慮すると(1)は実行が困難であり(2)の方法を採用することとした。CWレーザーを200W伝送し前項の実験と等価の最終集光径を得るためにはコア径400~600 μ mのファイバーを用いて, このコア径を1:1に結像する必要がある。

この最終集光径を得るために次項で述べる外ぐり加工ではコア径400及び500 μ mで, NA0.25のグレイデッド インデックスファイバーを, 内ぐり加工では400及び500 μ mのコア径で, NA0.3のステップ インデックスファイバーを用いたがコア径及びファイバーの種類による切屑切断特性の差異は認められなかった。

3. 外ぐり加工による予備実験

3.1 実験装置

最終目的である内径100mmの内ぐり加工で発生する切屑を切断するレーザー加工ヘッドを設

計する前に, 実験セットの設置に比較的自由度のある外ぐり加工で, 切屑発生 of 挙動の観察と生成, 移動する切屑に集光したレーザーを命中させる確率の確認, さらに実際に発生する切屑を切断可能なレーザーパワーと, 最適レーザー照射角度の確認などをおこなった。

実験はFig.2に示すように旋盤の横送り台にX-Y-Z, 水平回転及び俯仰の微調機構を設けこの機構部にFig.3に示す外ぐり用レーザー加工光学系を取りつけて行った。この加工光学系はファイバーで伝送されたYAGレーザー光を

Fig. 2 Experimental setup for YAG laser chip breaking at turning.

Fig. 3 Schematic diagram for laser machine optics.

レンズ f_1 で平行にし、ダイクロイックミラーで直角に曲げた後、レンズ f_2 で集光するものである。レーザーの理論的集光径はファイバーのコア径に f_2/f_1 の値をかけて得られ⁵⁾、外ぐりの実験では $f_2/f_1=0.67$ 及び1が得られる2種類のレーザー加工光学系を比較のため用いた。これと同時に切屑発生を観測、発生点へのレーザーの照準を行うためにレーザー集光点の拡大像をダイクロイックミラーを通してバンドルファイバーに送りTVモニター上に映せる構造とした。この構成では切屑発生の確認と発生点付近にレーザー光の焦点を合わせるためには、レーザー加工光学系と旋盤の旋回台が干渉するためバイトの取り付け角を 45° 、加工物径を30mmとした。このためバイトは片刃バイトを用いた。

3.2 実験結果

この実験装置で各切込みと送りで切屑流出方

Fig. 4 Sketch of the expanded T.V. image through laser machining optics at the chip generation point. Cutting condition. Feed rate $30 \mu\text{m}/\text{rev}$; Cutting speed: $94\text{m}/\text{min}$; Depth of cut: (a) $30 \mu\text{m}$, (b) $50 \mu\text{m}$, (c) $70 \mu\text{m}$, (d) $90 \mu\text{m}$.

向を観察すると、切屑発生位置が比較的ばらつかない個所はすべてバイトのすくい面上にあるが、切屑切断のためにこの個所にレーザー光を照射するとこの面がレーザーで損傷する。そこでバイトの前切れ刃に約1Cの面取りを行い切屑をバイトのノーズを中心にしてすくい面上で回転させた方向へ流出させた。この時のバイトノーズ近辺における切屑流出の拡大像をFig. 4に示す。Fig. 4は送り $30 \mu\text{m}$ で切削速度 $94\text{m}/\text{min}$ における切込み30, 50, 70, $90 \mu\text{m}$ の切削条件におけるバイトノーズ近辺の切屑流出の様子をFig. 3のレーザー加工集光系のTVモニターをスケッチして得たものである。この切削条件では切込みの小さな場合、切屑は発生直後のバイトノーズの近くから広がるが、切込みが増えるにつれて切屑の剛性が増し流出巾が少なくなっている。同じ切削速度で切込み $100 \mu\text{m}$ で送り $75 \sim 150 \mu\text{m}$ においてもほぼ同様の流出状態を示した。

レーザーによる切屑切断を行うためには確実にレーザー光を切屑に当てなければならず、このためにはレーザー照射範囲は定常流の切屑流出巾をカバー出来なければならない。更にバイトが集光したレーザー光で損傷されないためにはバイトはレーザー集光径の外になければならない。これらを考慮したレーザー集光点をFig. 4に円で示した。この円の直径は本実験で用いたファイバーのコア径 $500 \mu\text{m}$ に $f_2/f_1=0.67$ をかけて理論的集光径を求め、更にTVモニター上の像の拡大倍率をかけて得たものである。なおレーザーは旋盤の旋回台との干渉を避けるために垂直から 40° 加工物の円筒軸から水平に 40° 傾けて照射した。

以上の実験構成で外径30mmのSK-5をFig. 4の(c)の切削条件で加工した時のレーザー切断した切屑をFig. 5に示す。レーザーはファイバー出口で100Wの出力を1ショット/1秒、1ショット当たり0.5秒焦点を切屑表面上にあわせて照射した。Fig. 5の切屑はレーザーが照射されない0.5秒間に成長したもので、各切屑の両端はレーザーにより溶融切断されている。Fig. 5

LASER OUTPUT POWER 100W
 LASER IRRADIATION TIME 0.5SEC/1SHOT
 FEED SPEED 30 μ m/rev
 DEPTH OF CUT 0.07mm

Fig.5 Chip broken by a YAG laser at turning. Cutting condition: the same as (c) of Fig.4.

Fig.6 Expanded photograph of chip broken by a YAG laser.

の切屑の片端を拡大すると Fig.6 の A のようにレーザー照射により切屑が溶融し、この溶融物の表面張力により丸みを帯びている。同図の B は 0.5 秒間レーザーが照射されている間に生じた切屑が、レーザー光により溶融し表面張力により塊となったものである。以上の実験を繰返し行いレーザーが切屑に当たり切断される確率を確認した。この結果 Fig.5 と同様のほぼ同じ長さの切屑が規則的に得られ、これらはレーザー光が照射されない時間に発生、圧縮、カール

cutting speed 45 m/min
 laser output power 100 W
 work material SK-5

Fig.7 YAG laser chip breaking characteristics at turning.

したものと略一致する事からこの確率はほぼ 100%と考えられる。但し Fig.4 のレーザー照射位置をバイトのノーズから遠ざけるとこの確率は低下した。これはこの切削条件ではレーザー照射範囲である同図の円よりも切屑流巾が大きくなり、レーザー照射されない切屑が増えるためである。Fig.7 は切削速度を一定にし送りと切込みを変えた場合の切屑切断の可否を求めたデータである。この図で○は切断可能条件を×は不可能な条件を示す。この実験で○印の曲線以下の条件では送りと切込みが小さく Fig.4 の(a)のようにレーザー集光範囲に切屑流の中が入らない切削条件以外で切断可能であった。×印以上の切込みで切断不可能となったのは、すべてレーザーパワーの不足によるものでパワー増加によって切屑切断可能な切削範囲は広がるものと思われる。以上の外回り加工の実験から、切屑の定常流巾以上の集光径を持ち約 10^4 W/cm² 以上のパワー密度を持つレーザーを数 100ms の

間この定常流に当てることによりほぼ100%の確率で発生する切屑を切断出来ることが分かった。

4. 内ぐり切削用切屑切断レーザー加工光学系の設計

以上の外ぐり加工の実験をもとに内径100 mm 深さ57mmの内ぐり加工のためのレーザー集光ヘッドの設計を行った。この場合はバイトとレーザー加工光学系の相対位置関係に制限を受ける。又実用上からレーザー加工光学系はツールホルダーと一体構造であるのが望ましい。このためツールホルダーを3ヶの部分に分解し、これらでレーザー加工光学系をはさみつける構造とした。又将来、より小さい内径の加工物に対応する場合位置的制限を受けるツールホルダー内でレーザー光の反射回数を少なく出来ることからレーザーの光軸はツールホルダーの軸を含む面に置いた。又切屑流出方向は外ぐり加工の場合のようにすくい面を回転させると加工物に妨げられ、定常流が得られず更に前述のバイトシャンクとレーザー光軸の位置関係から、レーザー光がバイトのすくい面とほぼ平行の方向から入射する構造となり、切屑の薄く巾広い面に垂直にレーザー光を照射するためには、バイトのすくい面上でこの面に垂直に切屑を立上らせる

Fig. 8 Directional relationship between chip generation and laser irradiation at boring.

必要があり、これをバイトのすくい面形状で行う構造とした。この切屑成長方向のレーザー照射方向をFig. 8に示す。

次にこの切屑にレーザー集光点を照準する必要があるが、これをレーザー光を動かして行うとツールホルダー内に複数枚のミラーを置いた複雑な機構が必要となるため、レーザー集光点は固定としこの点に切屑の発生点を微調整して合致させる構造とした。このためツールホルダーの軸にほぼ垂直にバイトを移動して調整後固定可能とし、この移動方向と垂直な方向の位置調整を、厚みの異なるスペーサーを選択して位置を調整しバイトを固定する方式とした。レーザー加工光学系は外ぐり用と同じであるが外形上の制限を受けてFig. 3において $f_2/f_1=1$ のものを使用した。又レーザー光の焦点合わせは f_1 を微移動、固定する機構を設けて行った。

Fig. 9は以上の検討の結果設計したバイトホルダーの組立分解図を、Fig. 10はこれの写真を示す。なお切削用水溶性冷却液を使用した場合の実験、及びレーザー切断性能向上のための酸素ガス吹付け実験のためにノズルを付加出来る構

Fig. 9 Breaking picture of a tool holder with laser machining optics for chip breaking at boring.

Fig. 10 Actual breaking photograph of tool holder with laser machining optics.

造とした。当初このバイトホルダーは一体構造でないためにバイト刃先にビビリを生じたが Fig. 10のツールホルダー 2の材質をSNCM8からD50に変更することによってこれを軽減することが出来た。このレーザー加工光学系を内蔵

Fig. 11 Photograph of experimental setup for YAG laser chip breaking at boring.

したバイトホルダーを外ぐり切削の場合と同様に旋盤の横送り台に固定して以下の実験を行った。この実験装置の写真をFig. 11に示す。

5. 内ぐり切削における実験結果

外ぐり切削の実験で得られた結果によれば本方式で切屑切断を行うためには、安定した切屑流を発生させ、これに流出巾より大きくパワー密度が約 10^4 W/cm^2 以上のレーザー光をあてる必要がある。内ぐり加工においてはバイトのすくい面上にこの切屑流を立上がらせる必要があり、これをすくい角 8.5° 、 0.5mmR のチップブレーカによって得た。これにより

- (1) 切削速度 50~180m/min
- (2) 送り 0.06~0.25mm/rev
- (3) 切り込み 0.04~0.15mm

の切削条件でコイル径 $1.4\sim 1.7\text{mm}$ の流れ型連続切屑を安定して発生させることが出来た。

レーザーは $\phi 8\text{mm} \times 150\text{mm}$ のYAGロッドをもちいてファイバー出口で200Wが得られるものを用いた。ファイバーはコア径 $500\mu\text{m}$ 、NA0.3のステップ インデックス型を用いた。なお以後

Fig. 12 Dependence of the laser power to break chips on the machining speed for three different laser irradiation times at constant feed rate and a constant depth of cut.

の実験では切断可能範囲を広げるために酸素ガスをレーザー光軸と同軸にノズルを介して 0.3 kg/cm^2 の圧力で吹付けた。

Fig. 12は送りと切込みを一定にし、切削速度とレーザー出力を変え1ショット/秒のレーザー照射における照射時間をパラメーターにして切屑切断可否の実験結果を示す。ある切削速度と照射時間の条件ではこの図の直線より上部のレーザー出力で切断が可能であることを示す。この図から照射時間を大きくすればレーザー出力が低くても切断可能となる事が分るが切削速度をあげた場合、単位時間当たりの切屑長が増大するため、切屑を短く分断しようとするレーザーの照射時間を短くして1秒当たりのショット数を増す必要があり、より高パワーのレーザーを用いる必要がある。

Fig. 13は切削速度を 60 m/min 、送りを 0.15 mm/rev と一定にして切込みとレーザー照射時間を変えた場合の切断状態を示す実験結果である。

Fig. 13 Chip breaking characteristics relationship between the laser irradiation time and depth of cut at a constant laser power, machining speed, and feed rate.

レーザー出力はファイバー透過後で 150 W である。この図で左側の低切込み領域において切断不安定となるのは切込みが少いためにレーザー集光点での切屑流出巾がレーザー照射領域以上に広がり、レーザーの照射される確率が低く、切断の確率が 100% とならないためである。又右側の不安定領域は反対に切込みが大きくこのレーザー出力ではパワー不足の為に切断される確率が 100% とならない領域であり、さらにこれが進むと切断されない確率が 100% となる $\times$ の領域となる。

Fig. 14はレーザー出力 150 W 、照射時間 0.4 秒で切削速度 60 m/min において切込みと送りを変えた場合の切屑切断状態を示す実験結果である。この図で小さい送り領域における切断不可能、不安定領域は切屑発生不安定によるものであり、右上部の領域はレーザーパワー不足による切断不安定、不可能領域である。これから切込み $0.05 \sim 0.1 \text{ mm}$ 、送り $0.08 \sim 0.2 \text{ mm/rev}$ の

Fig. 14 Chip breaking characteristics relation between the feed rate and depth of cut at a constant laser power, irradiation time and machining speed.

Fig. 15 Dependence of the laser irradiation time to break chips on the laser power for two different depths of cut.

仕上げ加工条件範囲で切屑切断が可能である事が分かった。

Fig. 15は切削速度60m/min, 送り 0.15mm/revにおいて切込みをパラメータとし切断可能なファイバー透過後のレーザー出力と照射時間を求めた実験結果である。この曲線より上部のレーザー出力と照射時間が各切込みに対して切断可能な条件を示す。切込みの増大は切屑巾を大きくさせ、これを切断するためにはレーザー出力を上げるか、照射時間を大きくする必要がある事が分る。これらの実験で切断可能となった切屑は外ぐり加工の場合と同様に両端が溶断され、溶融物の表面張力で丸みを帯びている。

以上の実験結果からファイバー透過後の連続発振出力200Wが得られるYAGレーザーを用いることにより検討対象の内ぐり仕上げの切削加工範囲に近い条件で切屑が切断可能である事が確認された。

本方式で切屑を切断した場合に加工物のレーザー照射点付近に相当する内面に変色がみられた。これはレーザー照射によって切屑が燃焼し

た時の熱によるものでレーザー照射時間を短縮する事によって軽減し、照射時間 0.1 秒による実験では確認が困難な程度の変色であった。変色を皆無にするためには、より高出力のレーザーにより 0.1 秒以下の照射を行う必要がある。Fig. 12~15から明らかなように高出力レーザーの短時間照射は本方式で切屑切断が可能となった切削加工範囲をより早い切削速度と大きな送り及び切込みの範囲に拡大するためにも必要である。以上の実験結果から当初設定した仕上げ切削の場合の切屑を切断する条件が得られたが、これよりさらに小さな送りと切込みの切削条件に対して本方式の切屑切断を行うためには切屑流のより安定しているバイトのノーズ近くにレーザー集光点を近づける必要がある。バイトをレーザーで損傷することなくこれを行うためにはFig. 3で f_2/f_1 の値を小さくするか、細いコア径のファイバーを用いてレーザー集光径を小さくする必要がある。前者の方法の場合レンズ f_2 の焦点距離を小さくするとこのレンズとバイトが干渉しやすくなり、レンズ f_1 の焦点距離を大きくすると、このレンズの口径を大きくする必要があり、いずれも位置的制限を受けるツールホルダー内では好ましくない。従ってレーザー集光径を小さくするためにはビーム広がり角の小さいレーザー発振器を用いてコア径の小さいファイバーを用いる必要がある。

本方式による切屑切断を安定に行う為には、安定した切屑流の発生が最も重要である。中ぐりバイトとして、(1)JIS P10超硬チップ (2)QBN (立方晶窒化硼素) (3)セラミック系のサーメットの三種類をロー付けし、研削盤による溝加工によって連続したコイル状の切屑を発生させるチップブレイカを得て切屑発生の安定性を確認した。このうち(2),(3)は刃先の損耗、チップピングが初期の状態で発生し長時間にわたる安定した切屑の発生を得る事が出来ず最終的には(1)をスローアウェイバイトにロー付けしたものがこの目的に適している事が分かり、これを使用した。

又水溶性切削液を使用した場合の切屑切断状

態を確認した結果、切削液が1)レーザー照射と酸素アシストガスによる切屑の燃焼を妨げる、(2)切屑に当たって切屑発生流を乱す為に切断は不可能であった。

6. おわりに

以上の研究によりレーザーによる切屑切断の基本的な可能性が確認されたが今後本方式を実用化するためには

- (1) より小さな内径の内ぐり加工に対応するための小型レーザー加工ヘッド、
 - (2) アルミニウム、銅やこれらの合金のように延性があり切屑切断しにくい材質の加工物に対する切断特性、
 - (3) 本実験で用いたレーザーよりさらに高出力のCWレーザー或いは高出力Qスイッチレーザーやパルスレーザーによる短時間照射による加工物品質の向上、
 - (4) 切削液を使用した場合の切断特性、
 - (5) 安価な専用レーザー、
- 等の開発を行う必要があると思われる。

なお本研究は工作物側が回転するモデルで行ったが、工具側が回転する場合はレーザーの非

接触エネルギー伝達によりさらに他の方法に比べて容易に切屑を切断するためのエネルギーをバイトノーズの近くに持込める。具体的には工具の回転中心にこれと回転を同じくする100%反射ミラーを置いて、ファイバーで伝送されたレーザー光を非接触にこのミラーに入射させれば、以後は本研究と同様の切屑切断加工ヘッドを得ることができる。

謝辞

本研究は通商産業省工業技術院大型プロジェクト「レーザー応用複合生産システムの研究開発」の一環としてなされたものである。御指導頂いた(株)ソルテック研究所長(現)池田正幸博士並びに、岐阜工業高等専門学校教授(現)石原克巳博士に感謝いたします。

参考文献

- 1) 森, 前田: 機械の研究, **35** (1983) 35.
- 2) 森, 前田: 機械の研究, **35** (1983) 50.
- 3) K. Nakayama: Bull. Japan Soc. of Prec. Engg., **18** (1984) 97.
- 4) 新井, 中山他: 精密機械, **51** (1983) 122.
- 5) 三浦, 沖野: レーザー研究, **16** (1988) 310.