



パルス Nd:YAG レーザを用いた CBN 及びダイヤモンド砥石の切断特性*

—超砥粒砥石のレーザ切断—

古本達明** 上田隆司*** 舟田義則** 尾倉秀一†

Cutting Characteristics of CBN Stone and Diamond Stone with Pulsed Nd:YAG Laser
- Laser Cutting of Super Abrasive Stones -

Tatsuaki FURUMOTO, Takashi UEDA, Yoshinori FUNADA and Hidekazu OGURA

In this paper, the cutting characteristics of super abrasive stones using a pulsed Nd:YAG laser are studied. The influence of the heat on the stone surface cut by laser is investigated. As work materials, CBN stones and diamond stones with grain size of #2000 are used. As a result, the super abrasive stone of 3mm in thickness can be cut with the molten width of 0.2mm in maximum and with no chipping at the edge. The cutting speed of laser beam is 2.6 times faster than that of diamond blade in the case of CBN stone and 24 times faster in the case of diamond stone. There remains a heat affected zone (HAZ) in the stone surface and its thickness is about 0.02mm. In the HAZ, the abrasive grains are oxidized and their crystal structures are changed by the heat of laser irradiation. However, the HAZ raises the absorption of the laser beam at the stone surface and raises the strength of the stone a little because the pores in the HAZ are closed by the re-solidified vitrified bond. Therefore, laser cutting is useful for the manufacturing of the super abrasive stones in productivity and quality.

Key words: laser cutting, super abrasive stone, pulsed Nd:YAG laser, cutting characteristic, absorption characteristic, heat affected zone

1. 緒 言

シリンダ内面やベアリングレース面のホーニングや超仕上げに用いられる超砥粒スティック砥石は、ダイヤモンドブレードを用いたバルク素材からの切り出しによって製造されている。しかしながら、超砥粒は硬質であるため、加工能率の低さやダイヤモンドブレードの摩耗、切断中のチッピングや割れが問題とされている¹⁾。さらに、一般的に使用される切断ブレードは、寿命を考慮すると薄いものでも 0.5mm 以上の厚みが必要であるため、その厚みに起因する歩留まりの低さも検討すべき課題とされている。

本研究では、ブレード切断に代わる新しい方法としてレーザ切断に注目した。レーザ切断は、機械加工と異なり非接触で加工するため、材料の硬度に依存しないことや工具を摩耗しないという特長がある²⁾。また、近年はレーザ光の出力やビーム品質が向上しており、レーザ切断の高精度化が進んでいる³⁾。そこで、CBN やダイヤモンド砥粒を含む超砥粒スティック砥石の切断にパルス Nd:YAG レーザを適用して、砥石の生産性向上を目標とし、これまで、超砥粒砥石に使用されているビトリファイドボンドと同じ酸化物系セラミックスであるアルミナをレーザ切断実験して、切断品質や強度に影響を及ぼす加工パラメータを調べ、2.8mm 厚の CBN スティック砥石が切断可能であることを示した⁴⁾。本報告では、スティック砥石製造におけるレーザ切断技術の適用性の検討をさらに進めるため、CBN 砥石に加えてダイヤモンド砥石

を取り上げ、照射前後における砥石表面のレーザ光吸収特性を調べ、また、切断面を EPMA 分析、FT-IR 分析、ラマン分光分析して、レーザ照射によって生じる熱が超砥粒砥石に与える影響を物性の面から調べた。さらに、切断した砥石の曲げ試験を行うことにより、レーザ照射に起因する熱亀裂の有無など強度的な面に及ぼす影響を調べ、超砥粒砥石の生産工程におけるレーザ切断適用の可能性を検討したので、以下に報告する。

2. 実験方法

2.1 レーザ加工機

超砥粒スティック砥石の切断に用いたレーザ加工機は、スラブ型パルス YAG レーザ(コマツエンジニアリング(株)製:2×2)である。同加工機は、スラブ型と呼ばれる特殊形状を呈した YAG 結晶を採用しており、ロッド型のもを使用している従来型の YAG レーザ加工機と比べて、レーザ光のビーム品質が高いことを特長としている⁵⁾。更に、レーザ発振形態がパルスであるため、試料への過剰な入熱の抑制が期待できる。

2.2 実験条件

実験に用いた超砥粒砥石は、CBN 砥石とダイヤモンド砥石の 2 種類で、これらの仕様を表 1 に示す。粒度は共に #2000 であり、ガラスが主成分であるビトリファイドを結合材として、厚みが 3.0mm で常圧焼結したものをを用いた。また、集中度は 130 であり、気孔率は 58% である。これらのレーザ切断は、超砥粒砥石の表面を焦点位置としてレーザ光を照射し、表 2 に示すようにレーザ光のピーク出力やパルス幅、繰り返し数、加工テーブルの送り速度を変えながら行った。なお、レーザ照射時は、アシストガスとして 0.9MPa の高圧エアを使用し、加工ノズル先端と試料表面

* 原稿受付 平成 16 年 7 月 20 日

** 正 会 員 石川県工業試験場(石川県金沢市鞍月 2-1)

*** 正 会 員 金沢大学工学部(石川県金沢市小立野 2-40-20)

† 正 会 員 株式会社ミズホ(京都府城陽市寺田袋尻 82)

Table 1 Property of super abrasive stone

Abrasive grain	CBN, Diamond
Grain size	#2000
Concentration	130
Bond material	Vitrified
Porosity	58%
Thickness	3.0mm

Table 2 Experimental conditions

Irradiation conditions	Peak power	2.5~6.8kW
	Frequency	5~320Hz
	Pulse width	0.2ms
Cutting-off speed		1~60mm/min
Assist gas		Air(0.9MPa)
Diameter of nozzles		1.5mm

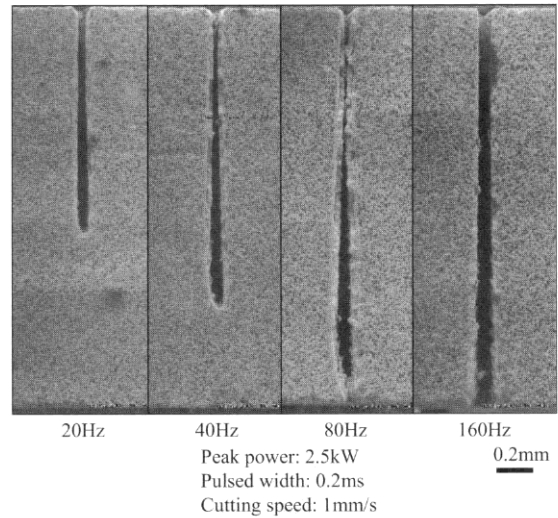
の距離を 1mm とした。

3. 超砥粒砥石のレーザ切断面

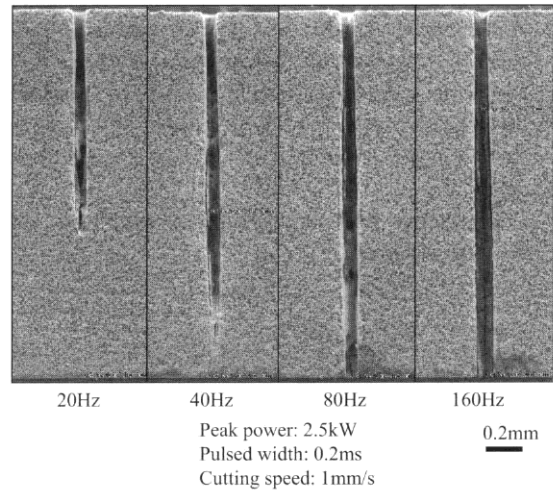
3.1 超砥粒砥石のレーザ切断面の観察

レーザパルス幅およびテーブル送り速度を一定として、パルス周波数を変えながらレーザ切断した CBN 砥石およびダイヤモンド砥石の断面を電子顕微鏡((株)日立製:S-3000N)で観察した結果を図 1 に示す。CBN およびダイヤモンド砥石共に、レーザ照射部の中心付近が除去されて溝が形成され、パルス周波数が増えるにつれてその深さは増している。CBN 砥石の場合は周波数が 160Hz、ダイヤモンド砥石の場合は周波数が 80Hz に達すると溝が裏面まで貫通している。その幅は、最も広いところでも 0.2mm であり、一般的に使用される幅 0.5mm のダイヤモンドブレードによる切断と比較して 1/2 以下の幅で切断が可能である。また、レーザ切断面表面には、レーザ照射によって生じた熱で溶融したが、アシストガスによって吹き飛ばされずに残存した付着物が存在する。これらは、加工された溝幅が狭いため溝の深部にいくにつれてアシストガスの効果が小さくなり、溶融物が再凝固して残存したものと考えられる。一方、レーザ切断幅は、砥石表面から裏面にいくにつれて広がっている。これは、レーザ光の焦点深度に比べて砥石が厚すぎるためであり、表面に集光したレーザ光が裏面でデフォーカス状態となりスポット径が大きくなるためである。それでも、パルス周波数を上げて、同一箇所をレーザをオーバーラップさせながら照射することで、レーザ照射によって形成された溝が深部まで進行して、裏面まで貫通することが分かった。

レーザ切断面表面に残存した付着物を取り除くため、蒸留水



(a) CBN stone



(b) Diamond stone

Fig.1 SEM image of cross section cut-off abrasive stick stone with various number of pulse

に浸して超音波洗浄した試料を SEM で観察して、ブレード切断した砥石面と比較した結果を図 2 に示す。図 2(a)および(c)に示すように、ブレード切断した砥石表面はどちらも砥粒とそれを固定するための結合材からなるポーラスな状態を呈しており、砥粒が砥石表面に存在しているのが確認できる。一方、図 2(b)および(d)に示すように、レーザ切断した砥石表面は、両砥石共にレ

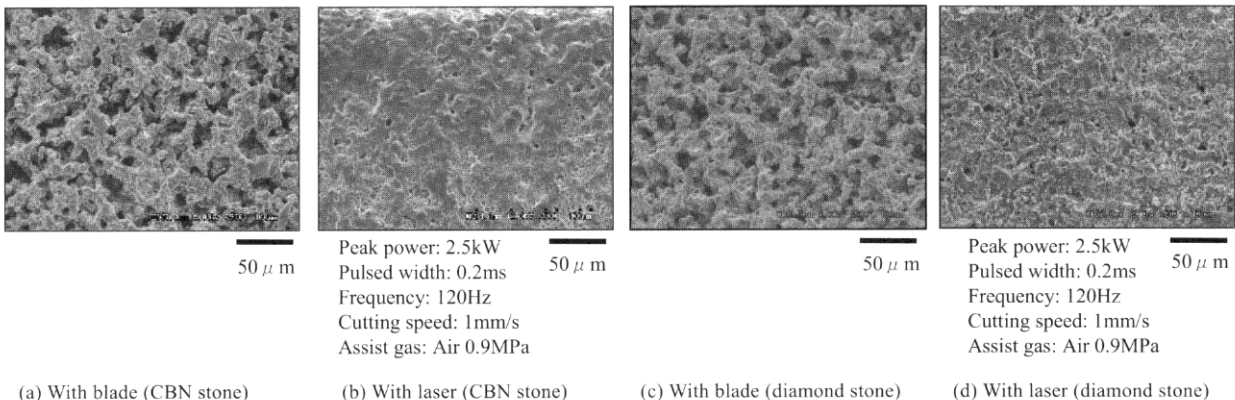
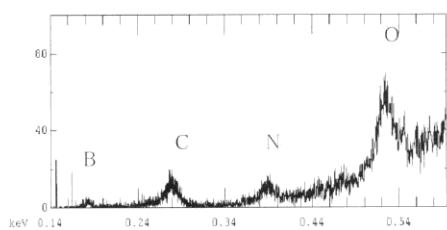
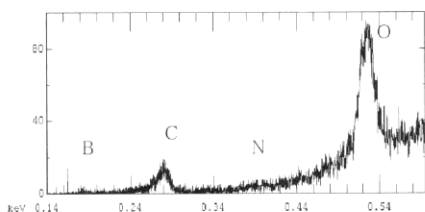


Fig.2 Observation of the surfaces cut with laser beam and diamond blade



(a) Surface cut with diamond blade



(b) Surface cut with laser beam

Fig.3 EPMA analysis of CBN stone surface

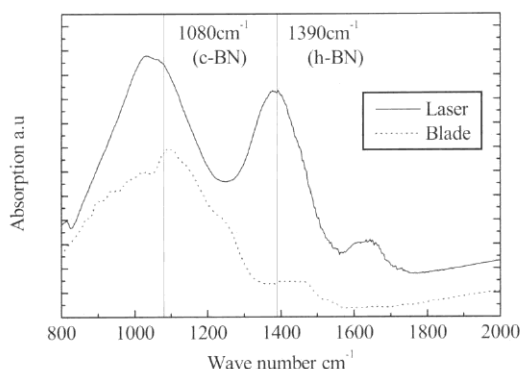


Fig.4 FT-IR analysis of CBN stone surface

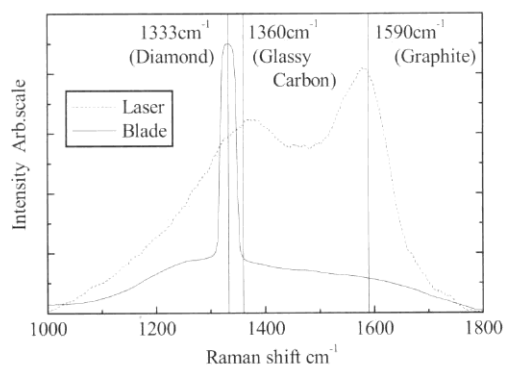


Fig.5 Raman spectroscopy of diamond stone surface

レーザー照射による熱で溶融したが除去に至らなかった溶融物が深さ方向に約 20 μ m 存在し、この再凝固層によって気孔が塞がれ砥粒も露出していないことが分かった。

3.2 CBN 砥石のレーザー切断面の組成

レーザー切断面表層の再凝固層の組成を調べるため、EPMA (日本電子(株)製:JXA-8100)を用いてブレード切断した砥石表面とレーザー切断面表面とで元素分析を行って両者を比較した。図 3(a)は、ブレード切断した砥石表面の EPMA スペクトルである。砥粒成分である窒素と結合材の成分である酸素に対応するピークがそれぞれ存在する。これに対して、図 3(b)に示すレーザー切断面の EPMA スペクトルでは、窒素のピークが確認されず、酸素のピークが大きい。一般的に、CBN は 950 $^{\circ}$ C で酸化して酸化ポロン

が形成されることが知られており⁶⁾、レーザー切断面の再凝固層は、レーザー照射によって生じた熱によって照射部近傍が加熱されて CBN 砥粒が酸化した熱変質部と考えられる。

レーザー切断面の結晶構造を調べるため、フーリエ変換赤外分光分析装置((株)パーキンエルマージャパン製:1600seriesFTIR)を用いてブレード切断した砥石表面とレーザー切断面表面とで分析を行って両者を比較した。分析結果を図 4 に示す。両者の吸収スペクトルを比較した場合、1080 cm^{-1} に位置するピークはどちらにも確認できるが、1390 cm^{-1} に位置するピークはレーザー切断面に対応する吸収スペクトルのみに見られる。1080 cm^{-1} に見られるピークは立方晶の BN 結合(以下 c-BN)に対応して、1390 cm^{-1} に見られるピークは六方晶の BN 結合(以下 h-BN)に対応することが知られており^{7)~9)}、このことから、レーザー切断面には素材にない h-BN が存在することが分かる。これは、レーザー切断時の熱により砥石を構成する c-BN 結晶粒の一部が h-BN 結晶粒へ構造が変化したものと考えられる。

3.3 ダイヤモンド砥石のレーザー切断面の組成

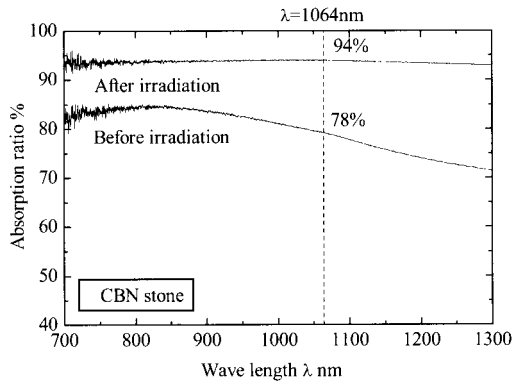
レーザー切断面表層の再凝固層の組成を調べるため、ラマン分光分析装置を用いてブレード切断した砥石表面とレーザー切断面表面とで分析を行って両者を比較した結果を図 5 に示す。両者のラマンスペクトルを比較した場合、砥石表面は 1333 cm^{-1} に位置するピークが確認でき、レーザー切断面表面には 1360 cm^{-1} と 1590 cm^{-1} に位置するピークが確認できる。1333 cm^{-1} に見られるピークはダイヤモンド結合に対応することが知られている¹⁰⁾。また、1360 cm^{-1} に見られるピークは結晶性の低いガラス状炭素に対応して¹¹⁾、1590 cm^{-1} に見られるピークはグラファイトに対応することが知られており¹²⁾、このことから、ダイヤモンド砥石のレーザー切断面には素材に無いガラス状炭素およびグラファイトが存在することが分かる。これもやはり、CBN 砥石のレーザー切断面と同様、レーザー切断時の熱により砥石を構成するダイヤモンド砥粒の一部が結晶構造を変えたためと考えられる。

これらの結果から、超砥粒砥石のレーザー切断面には、レーザー照射によって生じた熱の影響を受けて、砥粒が酸化したり結晶構造が変化したりして、砥石としての性能が低下した層が存在していることが分かった。また、切断面表層には CBN 砥粒およびダイヤモンド砥粒の露出が確認できないことから、レーザー切断面を砥石面として利用するためには、ドレッシング等の後加工が必要であるといえる。

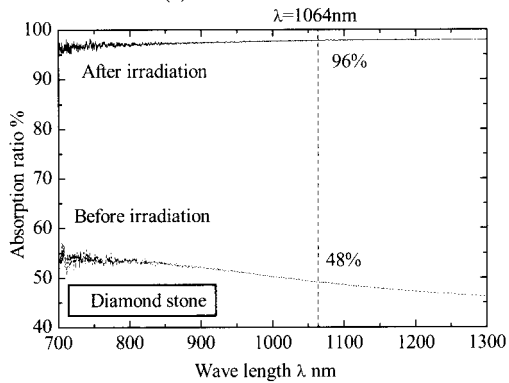
4. 超砥粒砥石のレーザー切断特性

4.1 超砥粒砥石のレーザー光吸収特性

レーザー切断面表層に再凝固層が形成される前後の超砥粒砥石へのレーザー光吸収特性を調べるため、近赤外分光光度計(株)パーキンエルマージャパン製:spectrum ONE NTS)を用いて、レーザー切断前の砥石表面とレーザー切断面表面の再凝固層とで各波長における透過率および反射率を測定して、これらの結果から吸収率を算出した結果を図 6 に示す。各測定は両砥石共に厚みが 3mm のものを用いており、透過光はほとんど検出されなかった。図 6(a)は、CBN 砥石の吸収率の測定結果である。再凝固層における各波長の吸収率は、砥石表面の吸収率と比較して上昇して、YAG レーザの発振波長である 1064nm において、吸収率が 78%から 94%まで上昇している。一方、図 6(b)に示すように、ダイヤモンド砥石の場合も同様に、吸収率が 48%から 96%まで上昇している。これらの結果から、砥石表面に再凝固層が形成され



(a) CBN stone surface



(b) Diamond stone surface

Fig.6 Absorption characteristics of super abrasive stones

るまではレーザー光の反射によって効果的なエネルギー供給をすることができないが、一旦再凝固層が形成されると、両砥石共に殆どのレーザーエネルギーが砥石表面の再凝固層に吸収され、このエネルギー供給によって生じた熱で加工が効果的に進行することが分かった。

4.2 レーザピーク出力と溶融幅の関係

図 7 は、パルス幅が 0.2ms、テーブル送り速度が 10mm/min、繰り返し周波数が 20Hz で一定の下で、レーザーピーク出力を変化させて切断実験を行い、熱変質層を含んだ溶融幅が最大となる試料裏側における各砥石の溶融幅の変化を示す。溶融幅は、ピーク出力が 2.5kW のとき、CBN 砥石が 200 μ m、ダイヤモンド砥石が 140 μ m であり、共にピーク出力が増加するにつれて広くなり、ピーク出力が 6.8kW のとき、CBN 砥石は 300 μ m、ダイヤモンド砥石は 240 μ m となった。これらは、レーザービームの強度分布に対応して溶融幅が形成されたものと考えられ、ピーク出力を可能な限り小さく抑える必要があることが分かる。一方、砥粒の違いにおける変化をみると、ダイヤモンド砥石の方が全般的に溶融幅が狭い。これは、ダイヤモンド砥粒の熱伝導率が CBN 砥粒より大きく熱が拡散しやすいため、レーザー焦点位置の最高温度が CBN 砥石よりも低くなり、除去される幅に違いが生じたものと考えられる。

4.3 レーザ照射間隔と溶融幅の関係

超砥粒砥石の溶融幅形成に及ぼすレーザー照射条件の影響を考慮するため、パルス周波数およびテーブル送り速度といったレーザー照射条件における時間パラメータを変化させて切断実験を行い、砥石裏側における溶融幅を測定した結果を図 8 に示す。測定結果は、横軸を切断距離 1mm 当たりのレーザー照射回数としてまとめた。溶融幅は、切断距離 1mm 当たりのレーザー照射回数

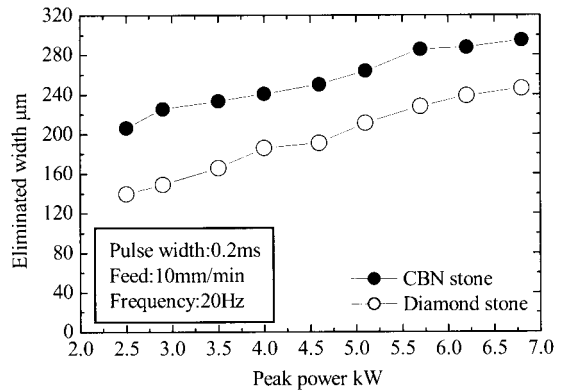


Fig.7 Effect of peak power on eliminated width by cutting

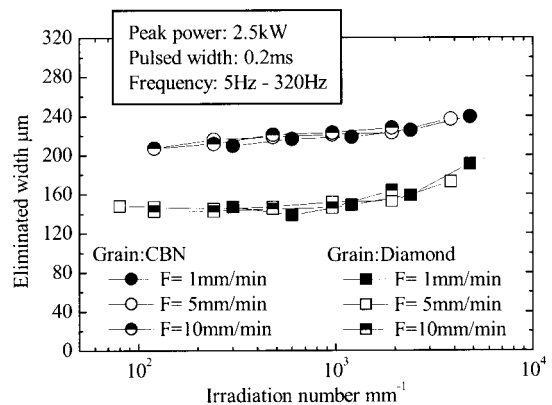


Fig.8 Effect of irradiation number on eliminated width by cutting

が 120 回 のとき、CBN 砥石が 200 μ m、ダイヤモンド砥石が 140 μ m であり、共に切断距離 1mm 当たりのレーザー照射回数が 1000 回程度までは溶融幅にあまり変化がみられない。これは、レーザーが照射されて次のレーザー光が照射されるまでのパルス間に砥石表面の温度が常温付近まで戻るためと考えられる。1000 回を越えると溶融幅は少しずつ広くなる傾向を示しているが、その影響は小さく、ピーク出力ほど条件設定を厳密に行う必要が無いと言える。次に、砥粒の違いにおける変化をみると、ダイヤモンド砥石の方が全般的に溶融幅が狭くなっている。これは前述したように、両砥粒における熱伝導率の違いによるものと考えられる。

一方、図 8 に見るように、切断距離 1mm 当たりのレーザー照射回数が CBN 砥石の場合 120 回未満、ダイヤモンド砥石の場合 80 回未満では切断することができなかった。したがって、パルス周波数を大きくすることができれば切断距離 1mm 当たりのレーザー照射回数が増え、これと共に切断速度を速くすることが可能となる。そこで、溶融幅に変化が見られない領域でパルス周波数を大きくして、切断速度が最大になる条件を求めた。比較したダイヤモンドブレードは、CBN 砥石切断のときは厚みが 0.5mm、ダイヤモンド砥石切断のときは厚みが 0.8mm のものを用いた。各切断における最大速度を比較した結果を表 3 に示す。その結果、CBN 砥石の場合 160mm/min、ダイヤモンド砥石の場合 240mm/min の速度で切断が可能であることが分かり、これはブレード切断と比較して CBN 砥石の場合 2.6 倍、ダイヤモンド砥石の場合 24 倍速くなることが分かった。

4.4 レーザ切断した超砥粒砥石の強度評価

レーザー切断面表層に熱亀裂が残存する可能性があり、砥石強度を低下させる恐れがある。また、切断後表層にはレーザー照射に伴う

Table 3 Comparison of cutting speed with laser and that with diamond blade

	Blade mm/min	Laser mm/min
CBN stone	60	160
Diamond stone	10	240

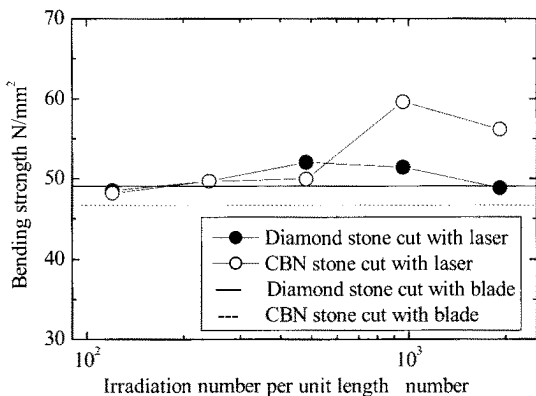


Fig.9 Bending strength of super abrasive stones cut with laser beam and diamond blade

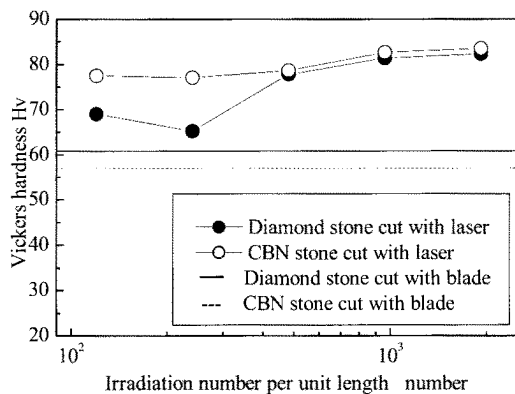


Fig.10 Vickers hardness of stone surfaces cut with laser beam and diamond blade

再凝固層が形成されており、その影響を調べる必要がある。そこで、レーザ切断面に引張力が作用するように 4 点曲げ試験(RTC-2410A(株)オリエンテック製)および硬さ試験((株)アカシ製:HV-112)を行った。どちらの試験も共に、比較のため、ダイヤモンドブレード(リファインテック(株)製 :t0.3mm)を用いて切断(MICROSAW ROA-005:笠井商工(株)製)した試料について同様の試験を行った。

図 9 は曲げ試験の結果であり、曲げ強度と切断距離 1mm 当たりのレーザ照射回数との関係を示している。また、図中の実線および破線は、ダイヤモンドブレードにより切断した場合の強度を示している。切断形態の違いによる曲げ強度を比較した場合、いずれの砥石も共に、レーザ切断した砥石の曲げ強度が同程度もしくは大きくなっている。したがって、レーザ切断面には砥石強度に影響するような亀裂は存在しておらず、むしろレーザ切断面表層の再凝固層が、砥石表面の気孔を塞ぐことに起因して強度が上がっていると考えられる。一方、レーザ照射条件の違いにおける変化をみてみると、切断距離 1mm 当たりのレーザ照射回数が増加するにつれて曲げ強度が大きくなる。これは、切断距離 1mm 当たりのレーザ照射回数が増加するにつれて、より再凝固層が広がったためと考えられる。

図 10 は硬さ試験の結果であり、ピッカース硬度と切断距離 1mm 当たりのレーザ照射回数との関係を示している。図中の実線および

破線は、各砥石においてブレード切断した試験結果である。切断形態の違いにおける硬さを比較した場合、どちらの砥石も共に、レーザ切断した砥石の方が硬度は大きい。また、切断距離 1mm 当たりのレーザ照射回数が増加するにつれて硬度が大きくなる。曲げ試験結果と同様に、レーザ切断面表層に残存する再凝固層が砥石表面の気孔を塞ぐことに起因していると考えられる。

以上の結果から、レーザ切断面表層には熱応力による亀裂は残存せず、再凝固層は砥石としての切削能力は無いが、レーザ切断面表層の気孔を塞ぐため砥石強度を向上させる働きがあることが分かった。一般に、超砥粒スティック砥石は、加工機に取り付けるときの砥石保持面を高分子材料でコーティングして砥石を保護することが知られているが、レーザ切断で得られた再凝固層をこの保護面として活用できる可能性があることが分かる。

5. 結 言

スラブ型パルス YAG レーザ加工機を用いて超砥粒砥石をレーザ切断実験して、切断面の観察および強度評価を行った結果を以下にまとめて示す。

- 1)パルス幅が 0.2ms の時、超砥粒砥石の除去幅は最も幅が広い位置でも 0.2mm であり、一般的に用いられる 0.5mm 厚のダイヤモンドブレードによる切断と比較して 1/2 以下の切断を行うことができる。
- 2)超砥粒砥石のレーザ切断面表層に残存する再凝固層は、砥粒が酸化したり結晶構造が変化したりして砥石としての性能が低下している。そのため、レーザ加工面表層を砥石として利用するためには、ドレッシング等の後加工が必要となる。
- 3)レーザ照射によって生じた熱で超砥粒砥石表面に熱変質層が形成された後は、レーザ光がほとんど試料に吸収され効果的な切断が可能となる。
- 4)パルス幅が 0.2ms の時、超砥粒砥石の切断速度は、パルス周波数を大きくすることで切断距離 1mm 当たりのレーザ照射回数を大きくし、ダイヤモンドブレードによる切断と比較して、CBN 砥石の場合 2.6 倍、ダイヤモンド砥石の場合は 24 倍の切断速度が得られる。
- 5)レーザ切断した超砥粒砥石は、砥石強度を低下させる熱亀裂は残存せず、むしろ砥石表面の再凝固層が気孔を塞ぐため、砥石の曲げ強度および結合度を上げる働きがある。

参 考 文 献

- 1) 最新切断技術総覧編集委員会編, 最新切断技術総覧, (株)産業技術サービスセンター, (1985) 66.
- 2) 川澄博通:レーザ加工技術, 日刊工業新聞社, (1985) 41.
- 3) 鈴木義成:実用レーザ加工応用ハンドブック, (株)オプトロニクス社, (2000) 64.
- 4) 古本達明, 舟田義則, 上田隆司:パルス YAG レーザ加工機を用いた超砥粒砥石の切断特性, 砥粒加工学会誌, 47,1, (2003) 39.
- 5) Jeff Hecht: Understanding LASERS, IEEE Press, (1994) 216.
- 6) (社)日本セラミックス協会編, セラミックス工学ハンドブック, 技法堂出版(株), (1989) 2239.
- 7) T.Takahashi, H.Itoh, A.Takeuchi: Chemical Vapor Deposition of Hexagonal Boron Nitride Thick Film on Iron, J. Cryst. Growth, 47, (1979) 245.
- 8) R. Geick and C. H. Perry: Normal Modes in Hexagonal Boron Nitride, Phys. Rev., 146, (1966) 543.
- 9) R. Marshall, S. S. Mitra, P. J. Gielisse, J. M. Plendl and L. C. Mansur: Reststrahlung Spectra of MnO and BN, Bull. Amer. Phys. Soc., 10, (1965) 370.
- 10) S. A. Solint and A. K. Ramdas: Raman Spectrum of Diamond, Phys. Rev. B1, (1970) 1687.
- 11) M. I. Nathan, J. E. Smith Jr., and K. N. Tu: Raman spectra of glassy carbon, J. Appl. Phys., 45, (1974) 2370.
- 12) F. Tuinstra and J. L. Koenig: Raman Spectrum of Graphite, J. Chem. Phys., 53, (1970) 1126.