

パルス Nd:YAG レーザによる超砥粒砥石の穴開け加工に関する研究 軸付き砥石へのレーザ加工の適用

古本達明*1, 上田隆司*2, 尾倉秀一*3

Improvement of drilling of super abrasive stone by pulsed Nd:YAG laser beam
Application of laser drilling to mounted wheels

Tatsuaki FURUMOTO, Takashi UEDA and Hidekazu OGURA

超砥粒軸付き砥石の製造における軸取り付け用の穴加工は、硬度の影響から焼成後に行うことが困難であるため、焼成前の生原石に下穴加工を行い、焼成後に仕上げ加工するのが一般的である。しかしながら、この加工法では下穴が焼成収縮の影響を受けるため、粒度や気孔率、結合材等の品質ごとに調整が必要となるなど課題が多い。そこで、本研究では超砥粒軸付き砥石の生産性向上のため、レーザによる超砥粒砥石への穴加工を提案し、ドリル加工との比較を行いながらその有効性について調べた。その結果、レーザによる加工穴は真円度、加工穴断面形状共に、焼成前にドリル加工を行う従来手法より精度が良いことがわかった。また、レーザ切断面表層の熱変質層が軸の取り付け強度に与える影響はなく、軸取り付け時の砥石内部への接着剤の浸透を抑える働きがあることがわかった。さらに、従来手法と比較して加工工程が削減できることから、代替加工法としてレーザによる穴開け加工が十分適用可能であることを示した。

Key words: pulsed Nd:YAG laser beam, drilling, laser cutting, super abrasive stone, heat affected zone, mounted wheel, productivity

1. 緒言

自動車部品や光学部品等の超仕上げ加工に用いられるビトリファイド超砥粒砥石は、硬脆材料であるため、その成形や穴開けを機械加工で行うことが困難とされている。超砥粒軸付き砥石を製造する場合、軸を取り付けるための穴加工は、焼成前の生原石のときに下穴加工を行い、焼成後に要求サイズに応じた仕上げ穴加工を行うか、焼成収縮の影響を考慮して生原石への下穴加工を大きくし、焼成後の穴径が要求サイズに応じるように調整しながら行われている。しかしながら、粒度や結合材、気孔率などの組み合わせが多く、要求される砥石ごとに適切な下穴条件を選定する必要があることから、生産性が向上しないことが課題であった。

一方、我々はこれまで、パルス Nd:YAG レーザを用いて、ビトリファイド超砥粒砥石を精密に切断加工することを目的に研究を行ってきた。それによれば、厚さ 3mm のビトリファイド超砥粒砥石のレーザ切断は、ダイヤモンドブレードによる切断と比較して歩留まりが良く、また、レーザ切断面表層に形成される熱変質層が気孔を塞ぐため、砥石の曲げ強度を上げる働きがある¹⁾²⁾。

そこで本報告では、パルス Nd:YAG レーザを用いて、ビトリファイド超砥粒砥石に穴開け加工を行うことを目的としている。まず、ビトリファイド超砥粒砥石のレーザ加工特性を把握するため、cBN 砥石およびダイヤモンド砥石の熱伝導率を調べた。そして、真円度測定や穴断面の観察によって、ドリル加工した穴との精度比較を行った。また、加工した穴にそれぞれ軸を接着してトルク試験を行い、レーザ切断面表層の熱変質層が軸の取り付け強度に与える影響を調べた。さらに、軸の取り付け穴表層からの接着剤の浸透度を調べて、超砥粒軸付き砥石へのレーザ穴開け加工の適用の可能性について検討したので、以下に報告する。

2. 超砥粒軸付き砥石の生産工程

ビトリファイド超砥粒軸付き砥石の従来製作工程と、レーザ加工を適用した場合の製作工程を比較したものを図 1 に示す。従来製作工程の場合、砥粒と結合材を攪拌させて生成した生原石を常温でプレス整形・乾燥後、焼成によって超砥粒砥石が硬化する前にドリル加工を行い、焼成後にブレードを用いて切り出し、軸を接着してツルーイングを行う。一方、レーザ加工を適用する場合、生原石を整形・乾燥した後に砥石の焼成を行い、焼成後の超砥粒砥石にレーザを用いて穴開け加工および切り出しを行う。

従来の製作工程では、焼成前に穴加工を行うため、焼成による砥石の収縮を考慮する必要があり、砥粒、粒度、結合

*1 石川県工業試験場: 〒920-8203 金沢市鞍月2-1

*2 金沢大学工学部: 〒920-8667 金沢市小立野2-40-20

*3 株式会社: 〒610-0121 城陽市寺田袋尻82

(学会受付日: 2005年 5月19日)

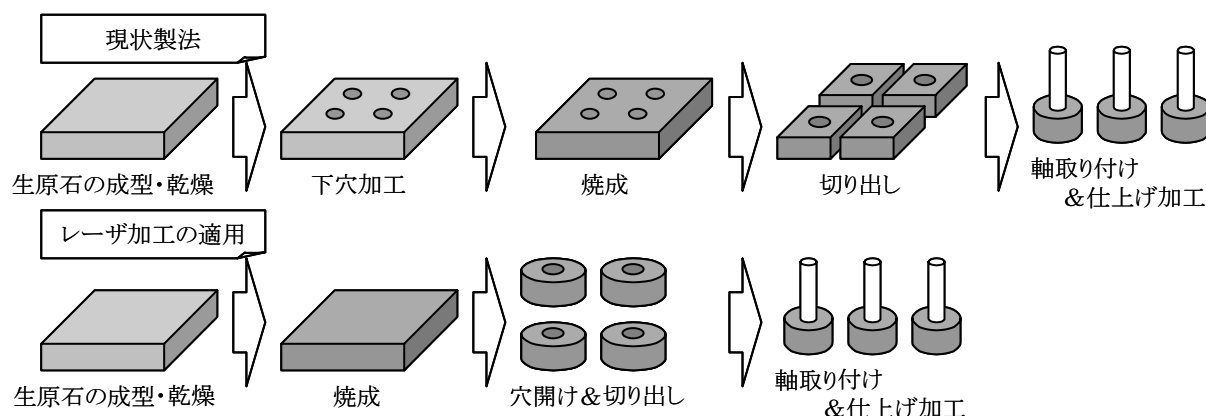


図1 超砥粒軸付き砥石の製作工程の比較

表1 熱伝導率測定試料

砥粒	cBN, ダイヤモンド
結合材	ビトリファイド
砥石厚さ	3.0mm
粒度	#2000
気孔率	58%
集中度	130

表2 超砥粒砥石の熱伝導率

Unit: W/m・K				
超砥粒砥石		砥粒		SiO ₂
cBN	ダイヤモンド	cBN	ダイヤモンド	
3.60	6.53	1300	2000	1.35

表3 レーザ照射条件

レーザ種類		Nd:YAG
波長	λ	1064 nm
パルス幅	τ	0.2 ms
ピーク出力	Q	2.5 kW
エネルギー	E	0.5 J/pulse
パルス周波数	n	160 Hz
レーザ走査速度		20 - 50mm/s
アシストガス		エア(0.9MPa)
ノズル径		1.5mm

材等の成形条件毎に下穴条件を選定する必要がある。一方、レーザ加工を適用することで、焼成後の穴開け加工および切り出しが同一工程で可能となり、軸付き砥石の製作工程の削減が実現できる。また、レーザビームの2次元走査によって、仕上げ形状に近い形状にまで超砥粒砥石を切り出すことが可能で、仕上げ加工の時間短縮も期待できる。

3. ビトリファイド超砥粒砥石のレーザ加工特性

レーザによる超砥粒砥石の穴開け加工は、レーザ照射によって生じた熱で砥石を熔融・蒸発させたり、熔融した砥石をレーザ照射時に噴射しているアシストガスで吹き飛ばしたりしながら加工を進めていく。そこで、レーザによる超砥粒砥石の加

工特性を調べるため、ホットディスク法熱物性測定装置(京都電子工業(株)製:TPA-501)を用いて、ビトリファイド cBN 砥石およびビトリファイドダイヤモンド砥石の常温における熱伝導率を測定した。

実験には、表1に示すように粒度が#2000で厚みが3mmのビトリファイド砥石を用いた。また、気孔率は58%であり集中度は130である。

ビトリファイド超砥粒砥石の熱伝導率測定結果を表2に示す。なお、比較のため、砥石および結合材の主成分であるSiO₂の熱伝導率も併せて示す³⁾⁴⁾。cBN 砥粒やダイヤモンド砥粒単体の熱伝導率は、金属材料等と比較して非常に大きい。焼成して砥石となると熱伝導率が著しく小さくなっている。これは、結合材の熱伝導率が小さいことと、砥石が焼結体であり、砥粒、結合材、気孔それぞれの界面で熱伝導性が悪くなるためと考えられる。この結果から、超砥粒単体では入熱してもすぐに拡散するためレーザによる加工性が悪いが、焼成した砥石はレーザによる加工性が上がることがわかる。

4. 超砥粒砥石のレーザ穴開け実験

4.1 パルス Nd:YAG レーザ

実験に用いたレーザは、波長が1064nmのNd:YAG基本波である。このレーザの発振媒体はスラブ型を呈しており、レーザ光のビーム品質が高いことを特長としている⁵⁾。また、パルス発振であるため、試料への入熱を抑えることも可能である。

超砥粒砥石のレーザ穴開け条件を表3に示す。これまでの研究で、超砥粒砥石の切断加工において、熔融幅を狭く、かつ切断速度を早くするには、パルス幅が短く、ピーク出力を抑えた加工条件が適当であることがわかっており¹⁾²⁾、本実験においてもパルス幅を0.2msと一定として、穴加工できる最小のピーク出力で加工を行った。また、レーザ光は焦点距離80mmのレンズで集光させ、超砥粒砥石の表面が焦点位置となるように照射し、アシストガスとして0.9MPaの高圧エアを常時噴射させ、加工ノズル先端と試料表面の距離を1mmとした。

4.2 実験試料および実験方法

実験に用いる超砥粒砥石は、表 4 に示すようにビトリファイド cBN 砥石とビトリファイドダイヤモンド砥石の 2 種類で、粒度はともに #220 である。砥石の厚さは 5.0mm で、常圧焼結したものをを用いた。また、超砥粒砥石の加工穴径は $\phi 3\text{mm}$ とした。

表 4 レーザ加工実験試料

砥粒	cBN	ダイヤモンド
結合材	ビトリファイド	
砥石厚さ	5.0mm	
加工穴径	$\phi 3.0\text{mm}$	
粒度	#220	#220
気孔率	38%	45%
集中度	185	160

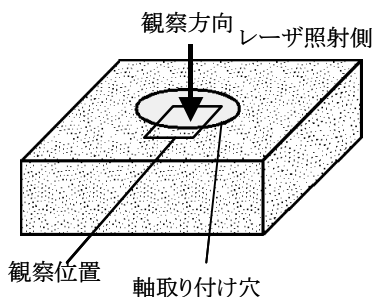
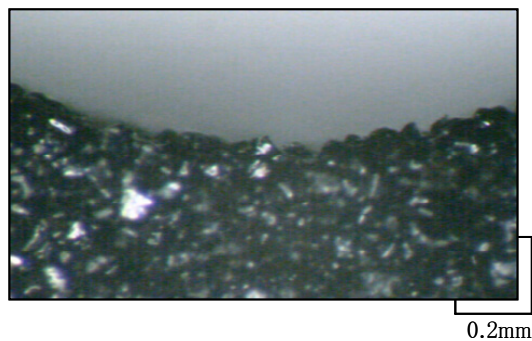
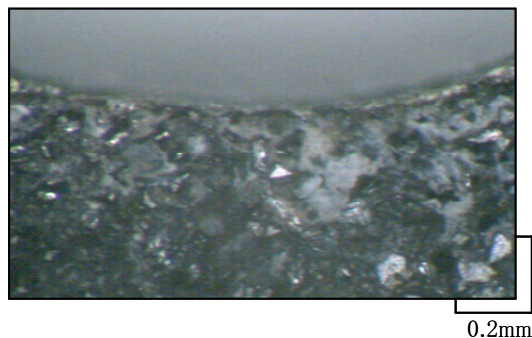


図 2 穴開け実験の観察位置



(a) ドリル加工



(b) レーザ加工

図 3 加工方法の違いによる表面形状の比較

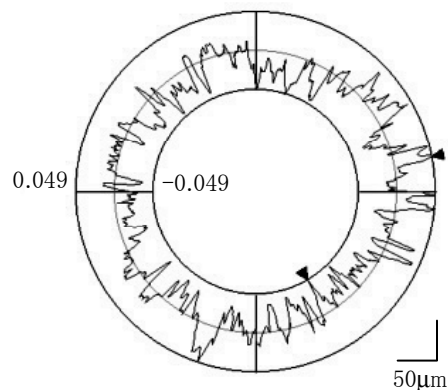
なお、レーザー加工との比較に用いるドリル加工穴は、生原石を成型した後、焼成収縮を考慮して下穴径を調整し、焼成後の穴径が $\phi 3.0\text{mm}$ となるようにしたものである。

穴開け加工を行った超砥粒砥石は、まず光学顕微鏡(キーエンス(株)製:VH-6300)を用いて、図 2 に示すようにレーザー照射側の砥石表面を観察した。次に、各加工による精度の検討を行うため、非接触 3 次元測定器(株式会社ニコン製:VMH-300N)を用いて最小領域法による真円度測定を行った。また、超砥粒砥石の表裏の加工穴径を測定してテーパ角を調べ、両者を比較した。

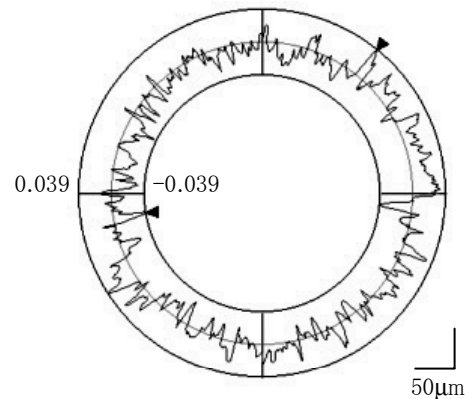
4.3 実験結果

4.3.1 加工面の観察

ビトリファイド超砥粒砥石の各加工穴を光学顕微鏡で観察した結果を図 3 に示す。ドリル加工した穴の表面は、図 3(a) に示すように砥粒が露出しており凹凸が激しい。一方、レーザー加工した穴の表面は、図 3(b) に示すように凹凸がなく滑らかとなっている。これは、レーザー加工面表層に、レーザー照射で生じた熱で熔融して再凝固した熱変質層が存在しているためである。この熱変質層は、砥粒が存在せずに気孔が塞がれ、また、加工面全体に一樣に存在することがわかっている²⁾。



(a) ドリル加工



(b) レーザ加工

図 4 加工方法の違いによる表面形状の比較

表 5 テーパー角測定結果

Unit: deg		
砥石	ドリル加工	レーザ加工
cBN砥石	2.53	0.69
ダイヤモンド砥石	2.58	1.2

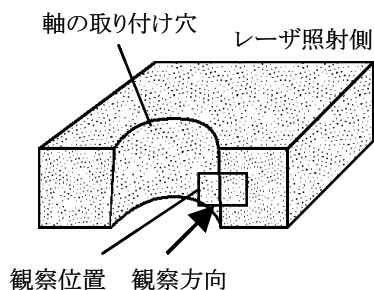


図 5 加工穴の観察位置

4.3.2 加工穴の精度

ビトリファイド超砥粒砥石の各加工穴を真円度測定した結果を図 4 に示す。図からわかるように、ドリル加工した穴の真円度が $98\mu\text{m}$ で、レーザ加工した穴の真円度が $78\mu\text{m}$ とレーザ加工した穴が良好な結果となった。これは、ドリルによる穴加工を焼成前に行うため、焼成時の収縮による影響で真円度が悪くなったものと考えられる。

各加工穴のテーパ角を測定した結果を表 5 に示す。ドリル加工による穴形状は焼成収縮の影響を受け、また、レーザ加工による穴形状はレーザ光の焦点深度の影響を受けてテーパ状となっている。cBN 砥石の場合、ドリル加工では 2.53° 、レーザでは 0.69° とレーザ加工穴のテーパ角が小さい。また、ダイヤモンド砥石の加工穴についても同様にレーザ加工穴のテーパ角が小さくなっている。

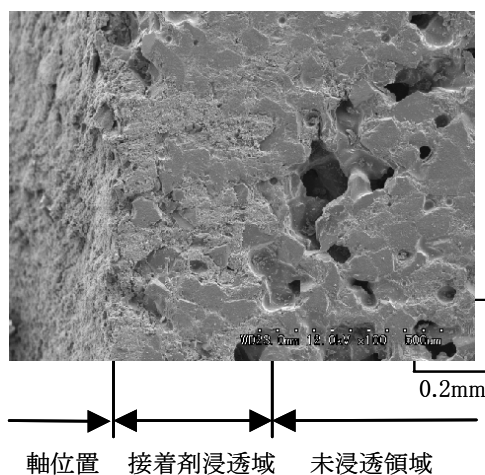
以上の検討より、精度の面において、レーザ加工ではドリル加工より精度良く加工できることから、レーザによる穴加工がドリル加工の代替加工法として十分適用可能であるといえる。

5. 超砥粒砥石への軸の取り付け実験

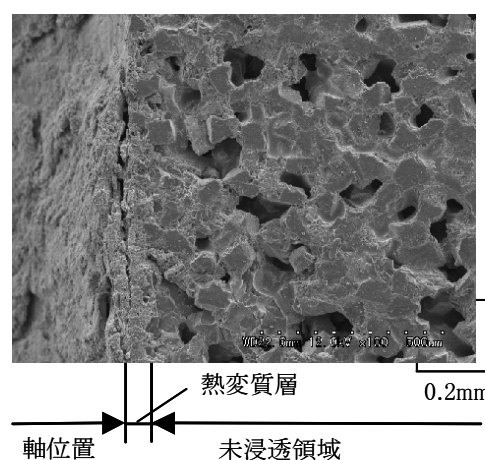
5.1 実験試料および実験方法

接着剤の浸透で気孔が塞がることで、砥石の性能低下が生じるため、接着剤の浸透はなるべく少ない方が望ましい。そこでまず、レーザ加工面表層に存在する熱変質層が、軸を取り付けるときに用いる接着剤の浸透度に与える影響を調べた。実験に用いた試料は、表 4 に示す cBN 砥石およびダイヤモンド砥石である。ドリル加工およびレーザ加工した穴に、接着剤を用いて軸を固定して乾燥させた後、軸を引き抜いて、図 5 に示すように砥石を切断して接着剤の浸透の様子を SEM 観察した。

次に、レーザ加工面表層の熱変質層が軸の取り付け強度に与える影響を調べるため、接着剤を用いて軸を固定して乾



(a) ドリル加工穴の断面



(b) レーザ加工穴の断面

図 6 cBN 砥石の軸取り付け部の観察

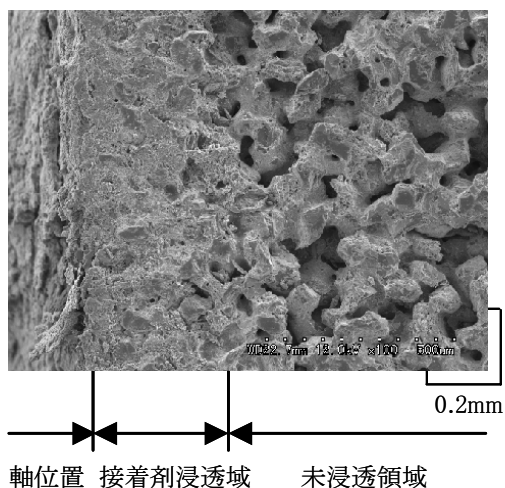
燥させた後、ねじり試験を行って取り付け軸が砥石から剥離する強度を測定した。取り付け試験に用いた軸は、 $\phi 3.0\text{mm}$ で取り付け面全面をローレット加工したものである。

5.2 レーザ加工面の接着剤の浸透度

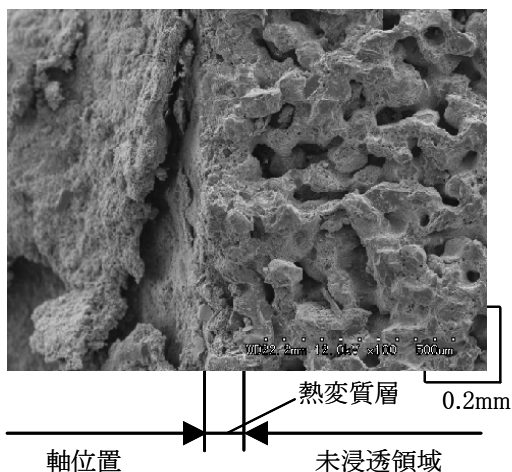
cBN 砥石の切断面を SEM 観察した結果を図 6 に、ダイヤモンド砥石の切断面を SEM 観察した結果を図 7 に示す。ドリル加工した穴は、図 6(a)、図 7(a)に示すように cBN 砥石、ダイヤモンド砥石ともに、加工穴表面から法線方向に接着剤が浸透して、気孔が塞がれていることがわかる。その深さは両砥石共に約 $500\mu\text{m}$ である。一方、レーザ加工した穴は図 6(b)、図 7(b)に示すように、加工穴表面に存在する熱変質層によって、接着剤の浸透が抑えられている。これらの結果より、レーザ加工によって生じた熱変質層が接着剤の浸透防止に効果的で、研削性能を保ったまま、より軸付近まで砥石が使用可能であることがわかる。

5.3 軸の取り付け強度

各加工穴について、軸が剥離するトルク強度を測定した結果を表 6 に、レーザ加工した cBN 砥石の試験後の穴断面を



(a) ドリル加工穴の断面



(b) レーザ加工穴の断面

図7 ダイヤモンド砥石の軸取り付け部の観察

SEM 観察した結果を図8に示す。ねじり試験によって軸が剥離する位置は、図に示すように軸を取り付ける接着剤部分で生じている。このため、表6に示すように、cBN 砥石、ダイヤモンド砥石共に、加工法の違いによる軸の剥離強度にほとんど違いがみられない。したがって、レーザ加工面表層の熱変質層が軸の取り付け強度に与える影響はないといえる。

超砥粒砥石に各加工で穴開けを行い、接着剤の浸透度および軸の取り付け強度について検討した結果、軸の取り付け強度に違いがみられず、また、レーザ加工で生じる熱変質層が接着剤の浸透を防ぐ効果があることから、砥石への軸の取り付けに関しても、ドリル加工による穴開けの代替加工法としてレーザ加工が十分適用可能であるといえる。

6. 結言

パルス Nd:YAG レーザを用いてビトリファイド超砥粒砥石に穴開け加工を行い、ドリル加工による穴と比較しながら、軸付

表6 ねじり試験結果

砥石	Unit: N・m	
	ドリル加工	レーザ加工
cBN砥石	1.05	1.00
ダイヤモンド砥石	1.00	0.94

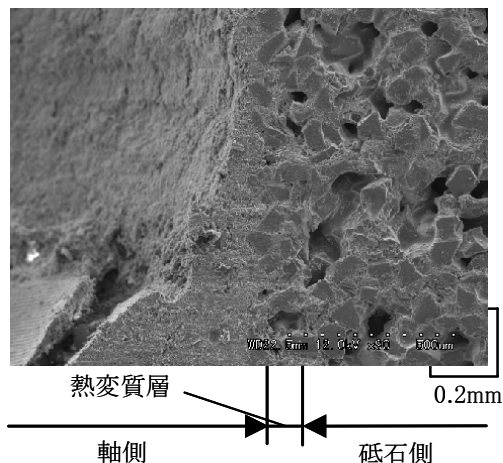


図8 ねじり試験後の軸の剥離位置

き砥石へのレーザ加工の適用性について検討した結果を以下にまとめて示す。

- (1) cBN 砥石、ダイヤモンド砥石共に熱伝導率は小さく、レーザによる加工性は良い。
- (2) レーザ加工した穴は、ドリル加工の穴と比較して、真円度、テーパ角ともに精度の面で精度良く加工することが可能である。
- (3) レーザ加工面の熱変質層が軸の取り付け強度に与える影響はなく、むしろ加工面表層の気孔を塞ぐため、軸を取り付ける接着剤が砥石内部へ浸透することを防止する効果がある。
- (4) レーザによる加工穴は、精度および軸の取り付け強度の面でドリル加工より優れており、現状製法の代替加工法として十分に適用可能である。

謝辞

最後に、本研究における熱伝導率測定に御協力頂いた京都電子工業(株)高井様に感謝いたします。

7. 参考文献

- 1) 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.
- 2) 古本達明, 上田隆司, 舟田義則, 尾倉秀一: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-, 精密工学会誌, 71, 04 (2005) 501.
- 3) (社)精密工学会編 新版精密工学便覧, コロナ社, (1992) 297.
- 4) (社)日本機械学会編 機械工学便覧, 丸善(株), (1987) A6-117.
- 5) Jeff Hecht: Understanding LASERS, IEEE Press, (1994)216.