

レーザーによるダイヤモンドの精密加工に関する研究

日本工業大学 機械工作センター

講師 宮沢 肇

(平成4年度研究開発助成 AF-92016)

1. 緒言

かつては非常に高価であった寸法数mm程度以上といった大きなダイヤモンドも、高温高压法やCVD法といったダイヤモンド合成技術の急速な進歩により、比較的安価に入手できるようになった。その結果、その優れた硬度や光学的特性、熱的特性故に多方面への活用が検討されるようになり、それに伴ってダイヤモンドの加工技術に関する研究も活発に行われるようになった。

超硬質材であるダイヤモンドの加工技術としてのレーザー加工技術は、加工に必要な高いエネルギー密度が微小スポットで得られる点において有効な手段となり得ることはよく知られている^{1) 2)}。しかし、レーザー加工は一般に大気中又は酸素雰囲気中で行われることから、加工面にダイヤモンドの特性を阻害するグラファイト等の熱影響層が発生しやすく、“精密加工”といった観点からはいまだ難点がある。そこで著者は、熱影響層を生成させないダイヤモンドの加工法として“液体中レーザー加工法”を採用することを考え、その有効性を調べるとともに同加工法の実用性について検討した。以下にその結果を報告する。

2. 実験方法および条件

液体中レーザー加工法の基本的な考えは、反応溶液を入れた容器中にダイヤモンドを静置し、その表面にレーザービームを集光照射して局部的に高温活性化し、溶液との間で熱化学反応を誘起させ、加工面に熱影響層を生成することなく当該材料の除去加工を行なおうとするものである。本研究では、試料のダイヤモンドには高温高压法による単結晶ダイヤモンドおよびCVD法による多結晶ダ

イヤモンド膜の2種類を用い、レーザーは、集光性が良い点で精密加工に適したシングルモードのQ_{sw}-YAGレーザー(波長:1.06μm)を使用した。

レーザー加工においては、材料の光学的特性、すなわちビームの吸収率、反射率および透過率が加工特性に大きな影響を与えることがよく知られている。そこで、はじめに供試ダイヤモンドのビーム透過率を調べた。

図1に供試ダイヤモンドのビーム透過率の波長依存性を示す。

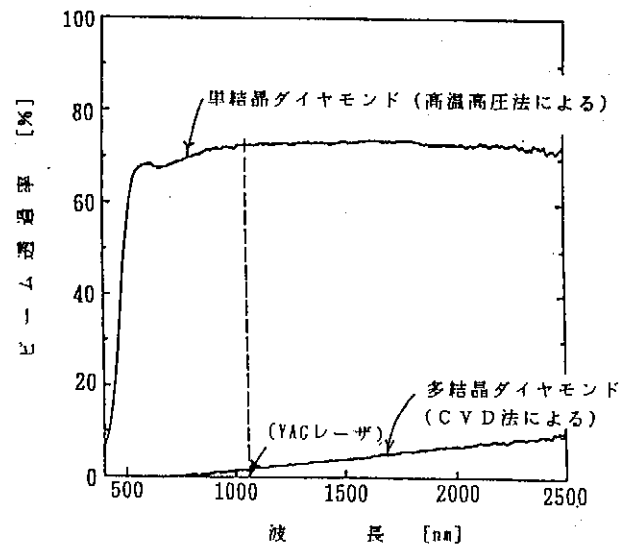


図1 供試ダイヤモンドのビーム透過率の波長依存性

図から、YAGレーザービームの波長(1.06μm)に対するビーム透過率は、単結晶ダイヤモンドでは約70%と高いのに対し、CVDダイヤモンドでは数%程度と低いことがわかる。従って、レーザー加工の状況は供試ダイヤモンドの種類によって

大きく異なるであろうことが予測され、特に単結晶ダイヤモンドを効率よく加工するためには、ダイヤモンドを透過したビームを有効に活用することが必要である。具体的にはダイヤモンドを金属板上に固定し、透過したビームを当該金属板に吸収させて加熱し、ダイヤモンドを金属板との接触面すなわちダイヤモンドの裏面から加工する方法が考えられる。

図2に実験装置の概念図を示す。

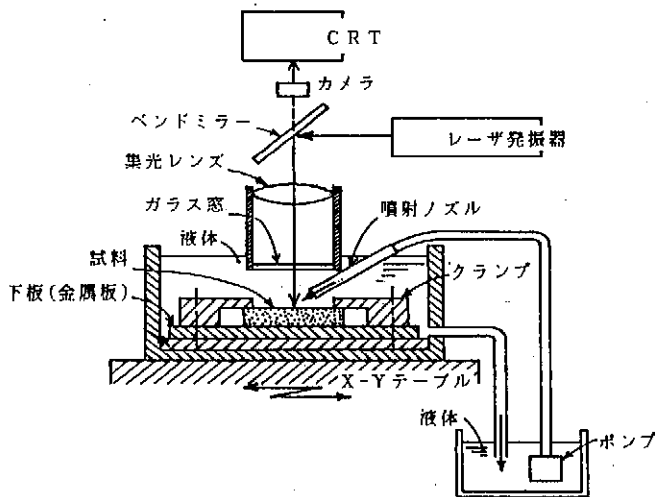


図2 実験装置の概念図

試料のダイヤモンドは金属板（以後“下板”と記す）に固定し、液体が入ったガラス容器の中に静置した。レーザー発振器から出力されたビームはベンドミラーと集光レンズを経て容器の中に導入される。本実験装置の特徴は加工の際に生じるバブルや霧状の微粉末といった加工生成物を強制的に排除するための液体噴射ノズルを備え、かつ液体を噴射することで生じる液体表面の乱れの影響を除去するために液体中にガラス窓を設備しているところにある。この装置によれば前記加工生成物によるビームの散乱や吸収を防止でき、また液体表面の乱れによるビームの“揺れ”も防止できる。また、加工の状況は目視及びモニターにより観察

できるようになっている。

加工パラメータは、はじめに単結晶ダイヤモンドを供試材に用いて加工の成否に大きな影響を及ぼすと考えられる液体の種類をとりあげ、これが加工溝の形成に及ぼす影響を調べ、得られた結果をCVDダイヤモンドの加工にも適用することにした。液体は、最も単純な純水の他に、過酸化水素水、PZTや Al_2O_3 -TiCのレーザーアシストエッチング³⁾に実績のあるKOH水溶液、そしてダイヤモンドに対して活性な KNO_3 および $NaNO_3$ 水溶液を採用し、その効果はダイヤモンドに形成された溝の状況を観察、比較することで評価した。次に加工状況に及ぼすビーム照射条件（ビーム走査速度および走査回数）の影響を調べ、しかる後に加工面における熱影響層の生成状況を同定した。液体中レーザー加工法の効果は、加工部のSEM（走査型電子顕微鏡）観察並びに加工面における熱影響層の生成状況をラマン分光法で分析調査することで行なった。比較のため、従来法によるレーザー加工（大気中レーザー加工）も行った。そして最後に、液体中レーザー加工法によるダイヤモンド加工製品の具体的な用途を検討した。

表1に実験条件をまとめて示す。なお、表に示すレーザー出力条件は、ビーム照射した時にダイヤモンドが破損することなく、加工部分が発光し、かつ当該部分から小さいバブルや霧状の微粉末が排出されるのがモニターで観察されるような条件である。

表1 レーザ照射条件

レーザーの種類	Qsw-YAG(波長:1.06 μ m)
ビームモード	TEM ₀₀
周波数(kHz)	1~5 kHz
平均出力(W)	0.3~3.3
集光レンズの焦点距離(mm)	40
ビーム走査速度(mm/min)	10~100

3. 結果および考察

3.1 単結晶ダイヤモンドの液体中レーザ加工

3.1.1 加工溝の形成におよぼす各種パラメータの影響

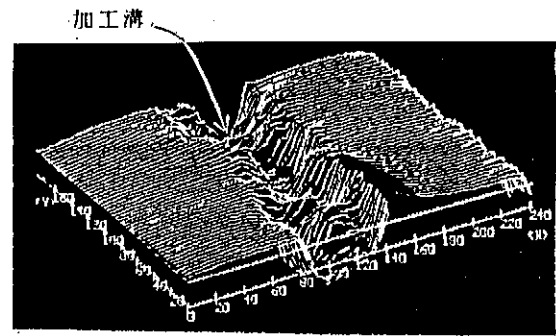
予期したように、単結晶ダイヤモンドの場合は試料を透過したビームによってその裏面から加工される（溝が形成される）ことがわかった。しかし、その加工状況は液体の種類によって大きく異なる。

はじめに純水を用いた場合は、溝の形成は可能ではあるものの断続的かつ不安定であり、同様に下板の損傷も断続的である。KOH溶液を用いた場合は加工状況がほぼ均一で安定しており、下板の損傷も均一でかつ少ない。KNO₃溶液を用いた場合は深い溝が形成されるものの下板の損傷も大きい。また、この場合は他の液体の場合と比べて加工部における反応が激しく、ダイヤモンドが割れ易いといった難点があることがわかった。NaNO₃溶液を用いた場合は1回のビーム走査では加工不可能で、下板の損傷は軽微である。そしてH₂O₂を用いた場合は1回のビーム走査では試料は加工されず、下板の損傷も皆無である。この原因は、容器中にダイヤモンドをセットした段階で全体にわたって無数の微細な気泡が観察されることから照射されたビームがこれらの気泡によって“散乱”され、下板表面に到達しにくいと考えられる。

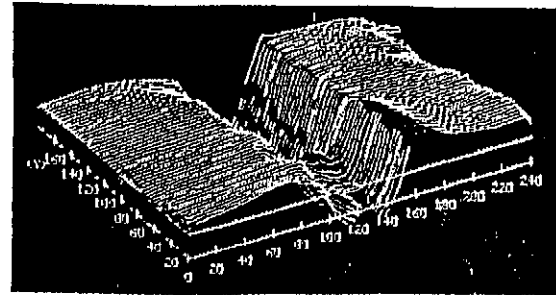
以上の結果から、使用する液体はKOH溶液が適当であると理解され、以後、液体はKOH溶液を用いることにした。

次に、加工溝の形成に及ぼすビームスキャン速度の影響は、10mm/min程度の低速度では連続した加工溝が形成されるものの、60mm/min程度の速さに達すると溝の形成が断続的になり、それ以上の速度では加工不可能になる。

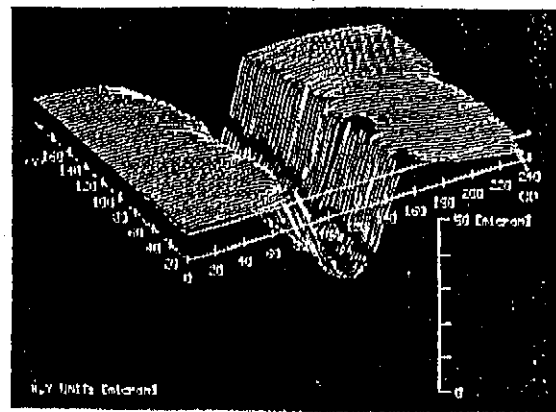
図3に加工溝の形成におよぼすビームスキャン回数の影響を示す。



(a) ビームスキャン: 1回



(b) ビームスキャン: 2回



(c) ビームスキャン: 4回

(液体: KOH水溶液)

図3 加工溝の形成におよぼすビームスキャン回数の影響

図からビームスキャン1回では必ずしも滑らかな加工面は得られないことがわかる。この原因としては、最初の加工の際はダイヤモンドの裏面と下板の表面が密着しており、したがって溶液が加工部に浸入しにくく、安定した熱化学反応がおきにくいと考えられる。しかし、スキャン回数が増えるに従って溶液が浸入しやすくなり、加工面の形状および表面あらさが改善されると考えられる。

3.1.2 レーザ加工面における熱影響層生成状況の評価

図4(a)に加工前の供試ダイヤモンド表面の、同図(b)に液体中レーザー加工法による加工面のラマン分光分析結果を示す。比較のため、同図(c)に大気中でのレーザー加工面の分析結果を示す。

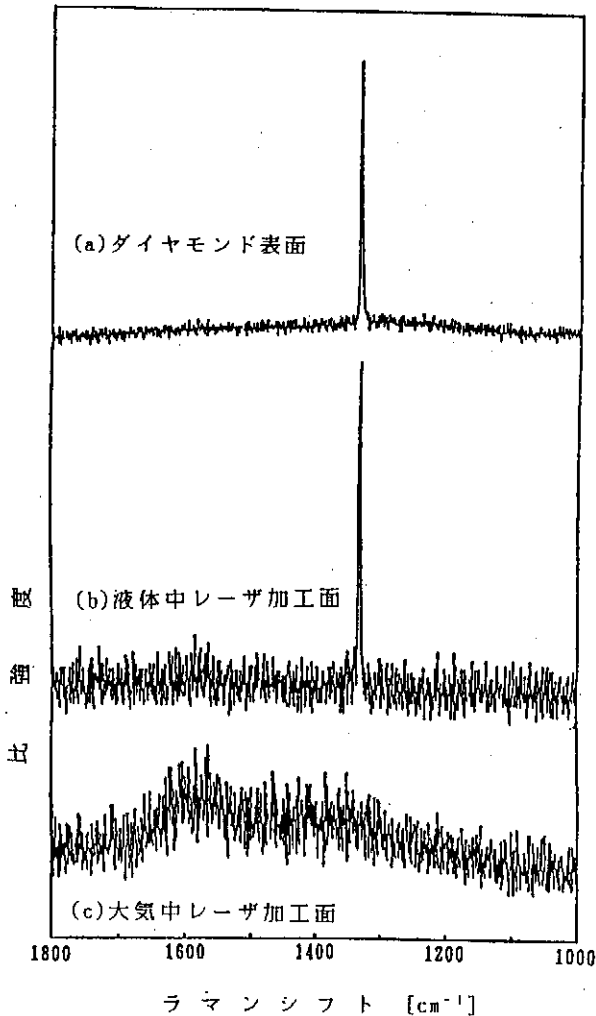


図4 供試ダイヤモンドおよびレーザー加工面のラマン分光分析結果

図から、大気中での加工面はアモルファス化してしまっているのに対し、液体中レーザー加工法によれば熱影響層のない加工面が得られることがわかる。

3.1.3 精密切削用ダイヤモンドバイトへのチップブレイカ形成への応用

単結晶ダイヤモンドの代表的な用途として純アルミやアルミ合金等の精密切削工具がある。しかしながら、例えば純アルミの切削を行なおうとすると、いかなる切削条件においても連続した切り屑が生成し、これが刃先からみついて先に加工し終った面を傷つけてしまうといった難点がある。この問題を解決する手段として、バイトの刃先部分に適切な形状のチップブレイカを形成し、切り屑を細断する方法が考えられる。しかし、単結晶ダイヤモンドバイトに対するチップブレイカの形成は種々の事情により、実現されていなかった。しかし、これまでに示したように、液体中レーザー加工法によれば、小さな単結晶ダイヤモンドの表面に、熱影響層のない細い溝を形成することができる。したがって、この技術を活用すれば、単結晶ダイヤモンドバイトに対してもチップブレイカ溝が形成できると期待される。

図5に液体中レーザー加工法で形成したチップブレイカ溝を有する単結晶ダイヤモンドバイトの例を示す。

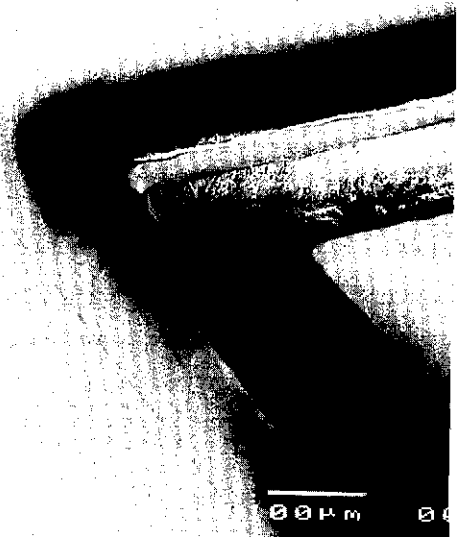


図5 液体中レーザー加工法で形成したチップブレイカ溝を有する単結晶ダイヤモンドバイトの例

図に見られるように、右勝手、左勝手いずれの切削にも対応できる細いブレイカ溝が形成されている。純アルミを被削材に実切削試験を行ったところ、切り屑が細断されることを確認した。

3.2 多結晶ダイヤモンドの液体中レーザー加工

3.2.1 加工状況 —大気中加工法による場合との比較—

CVDダイヤモンドは、ビーム透過率が数%程度と低い点において前記の単結晶ダイヤモンドと光学特性は大きく異なり、その結果、当該ダイヤモンドはビーム入射側表面から加工される。

図6 (a)に大気中レーザー加工法、同図(b)に液体中レーザー加工法によるCVDダイヤモンド表面への1辺の長さが2mmの正方形の溝加工の例を示す。

図から、加工溝の形成状況は、大気中レーザー加工法による場合は加工面およびその周辺全体に加工生成物が付着しているのに対し、液体中レーザー加工法による場合はそのような付着物はみられず、全体にクリーンな加工が行われていることがわかる。したがって、液体中レーザー加工法によれば、単結晶ダイヤモンドの時と同様、CVDダイヤモンドにおいても熱影響層のない加工面が得られることが期待される。

3.2.2 レーザ加工面における熱影響層生成状況の評価

液体中レーザー加工法によるCVDダイヤモンド加工面についても、単結晶ダイヤモンドの場合同様、ラマン分光分析法により熱影響層生成の有無を調べた。その結果、図示はしないが、液体中レーザー加工法によれば熱影響層生成防止が可能であることがわかった。

3.2.3 精密部品の切断加工への応用

近年、CVDダイヤモンド作製に関する技術的進歩には目覚ましいものがあり、将来は高品位化と量産化がより進むと考えられる。このCVDダイヤモンドを板状の素材と考えると、これは、もともと超硬質材料であるが故に摩耗が少なく、熱伝導率が高いが故に熱変形がおきにくく、また化学的に安定しているといった多くの特徴を有する

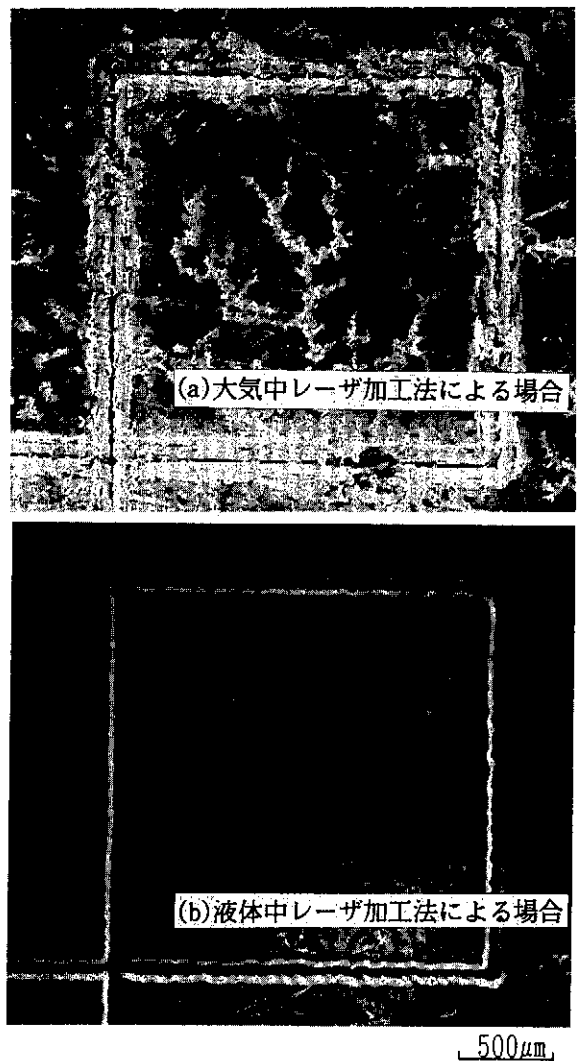


図6 加工溝の形成状況
—大気中レーザー加工法と液体中レーザー加工法の比較—

ことから、高機能構造部品の素材となり得ることは明らかである。そこで、加工面に熱影響層を生成することなく加工できる液体中レーザー加工法の応用技術として、CVDダイヤモンドの微小輪郭形状製品の加工を試みた。製品は、形状が比較的複雑で、かつ、代表的な機械要素である歯車形状とした。

図7に液体中レーザー加工法による微小歯車の加工例を示す。

図示した歯車の大きさは、歯先円の直径が約0.9mmの微小歯車であり、液体中レーザー加工法はCVDダイヤモンドの精密切断加工にも十分対応できることを示している。

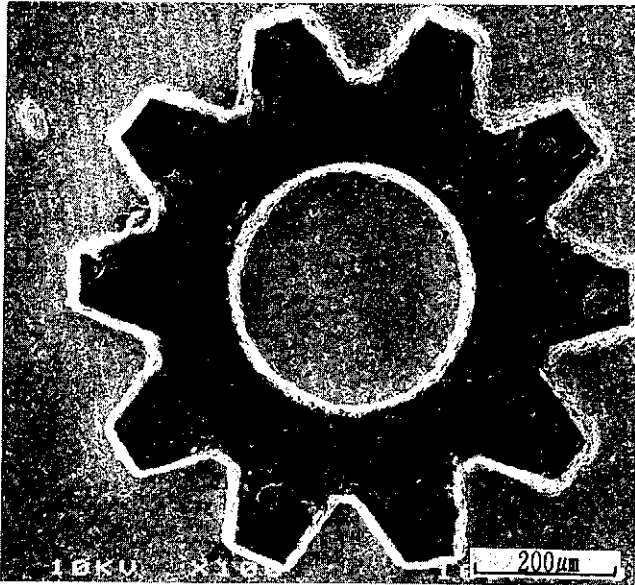


図7 液体中レーザー加工法によるCVDダイヤモンド微小歯車の加工例

4. 結論

従来、高生産性が得られ、かつ局所的な加工にも対応できるといった大きな特徴があるものの加工面への熱影響層の生成が避けられなかったレーザーによるダイヤモンドの精密加工に、熱影響層を生じさせないレーザー加工法の実現を意図して液体中レーザー加工法を採用し、その効果を検証した。試料には、ビーム透過率が高い高温高圧法による単結晶ダイヤモンドとビーム透過率が低いCVD法による多結晶ダイヤモンド膜の2種類を用いた。金属板の上に固定した試料を各種溶液を満たした容器中にセットし、試料の表面にレーザービームを集光照射した結果、KOH溶液を用いた場合、いずれのダイヤモンドにおいても意図した熱影響層防止精密レーザー加工が実現できることを示した。また、同加工法の実用性については、実製品を加工することで十分にその可能性があることを示した。

おわりに、本研究は(財)天田金属加工機械技術振興財団の研究開発助成を戴いて実施したものであることを明記し、ここに甚大なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 例えば小林昭:増補版・レーザー加工, 開発社, (1984) に穴加工についての初期の文献がいくつか整理して示されている。
- 2) 手塚信一, 吉川昌範:YAGレーザー照射によるダイヤモンド粒の切断, 精密工学会誌, 55, 10(1989) 1863.
- 3) 小藪国夫, 渡辺純二:Nd:YAGレーザーとKOH液による Al_2O_3/TiC セラミックスのレーザーアシストエッチング, 精密工学会誌, 53, 7(1987)1027.

[研究結果の公表状況]

1. 論文

- 1) Laser-Assisted Thermochemical Processing of Diamond:Applied Physics Letters, 64, 3(1994)387.
- 2) ダイヤモンドのレーザーアシスト熱化学加工に関する基礎的研究:精密工学会誌, 61, 3(1995)351.

2. 国際会議のプロシーディング

- 1) Basic Study on Laser-Assisted Etching of Diamond:Advances in New Diamond Science and Technology(ICNDST-IV)(1994)453.
- 2) Laser Microcontouring of Diamonds:Laser Materials Processing(ICALEO'95)(1995)印刷中

3. 学会等における口頭発表

- 1) ダイヤモンドのレーザーアシスト熱化学加工:1993年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集(1993)987.
- 2) ダイヤモンドのレーザーアシスト熱化学加工-第2報 溶液の種類が加工状況に及ぼす影響-:1993年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集(1993)515.
- 3) ダイヤモンドのレーザーアシスト熱化学加工-第3報 各種ダイヤモンドの加工特性の比較-:1994年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集(1994)217.
- 4) 液体中レーザー加工法による単結晶ダイヤモンドへのチップブレードの形成, 1996年度精密工学会秋季大会学術講演会にて発表予定(申込み済)