Nd:YAG 高調波レーザによる 窒化アルミニウムの加工特性評価*

— レーザ光の波長が加工特性に及ぼす影響 —

岡本康寛** 片岡範生*** 宇野義幸** 中芝伸一*** 谷野 至†

Evaluation of Machining Characteristics of Aluminum Nitride by Harmonics of Nd:YAG Laser
- Effects of Laser Beam Wavelength on Machining Characteristics -

Yasuhiro OKAMOTO, Norio KATAOKA, Yoshiyuki UNO, Shin-ichi NAKASHIBA and Itaru TANINO

Machining characteristics of aluminum nitride by various kinds of the harmonics of Nd:YAG laser, that is the fundamental harmonic ($\lambda_1 = 1064\text{nm}$), the second harmonic ($\lambda_2 = 532\text{nm}$), the third harmonic ($\lambda_3 = 355\text{nm}$) and the forth harmonic ($\lambda_4 = 266\text{nm}$), were experimentally investigated. Since the material removal is mainly performed by thermal processing in the case of long wavelength such as fundamental wavelength, the removal rate greatly decreases with increasing the distance from the focusing point to the tip of removal. Thus, the limit of removal depth was shallow, since the material removal was sensitive to the energy density of laser beam. On the other hand, when the photon energy of laser beam is larger than the bonding energy of material, the material is mainly removed by the photochemical reaction. Thus, the decrease of removal rate was small for shorter wavelength. Therefore, the removal rate increases with decreasing the wavelength of laser beam for long term irradiation under the same energy condition. In the case of deep hole drilling, the drilled depth increases proportionally with the number of laser shot at the beginning region. Therefore, the removal depth could be controlled by the number of laser shot in this region.

Key words: Nd:YAG laser, harmonics, drilling, aluminum nitride

1. 緒 言

窒化アルミニウムは、極めて高い熱伝導率と電気絶縁性とを合わせ持つことから、半導体用セラミックス基板等に多く用いられており、電子材料として重要な位置を占めている¹⁾。しかし、窒化アルミニウムは他のセラミックスと同様、硬く、脆いという性質を有するため、機械加工による精密微細加工は困難である。一方、レーザ加工は材料の硬度に依存しないことから高硬度材料に対しても容易に加工を行える。しかし、波長が近赤外領域に属するNd:YAGレーザの基本波による加工では、熱衝撃による脆性破壊が生じる。そのため、レーザパルスの波形制御等によるクラック発生の抑制策が必要である^{2) 3)}。ところで近年では、非線形光学結晶を用いた波長変換技術により、固体レーザにおいても短波長化が進んでいる⁴⁾。非線形光学結晶に入射されたレーザ光の全てが波長変換されるわけでないことから、変換後に得られるエネルギーは変換前に比べて小さくなる⁵⁾。しかし、この短波長のレーザ光を使用することで、主体的な加工現象は光化学反応へ移行する⁶⁾。これにより、熱衝撃によるクラックの発生を抑制でき、高精度な精密微細加工が期待できる。また、レーザ光が試料に吸収される割合は、その波長によって大きく異なり、一般的に金属材料の吸収率は波長が短いほど大きくなる⁷⁾。さらに、波長が短くなるほど微細スポットに集光できることから空間分解能が向上するなど、短波長のレーザ光を用いる利点は大きい^{8) 9)}。そこで本研究では、Q

スイッチ発振のNd:YAGレーザの基本波($\lambda_1 = 1064\text{nm}$)、第2高調波($\lambda_2 = 532\text{nm}$)、第3高調波($\lambda_3 = 355\text{nm}$)並びに第4高調波($\lambda_4 = 266\text{nm}$)を用いて窒化アルミニウムに対する微細穴加工を行い、レーザ光の波長が加工特性に及ぼす影響について実験的検討を行った。

2. 実験方法

2.1 高調波レーザの発生

本研究で使用したレーザ発振器は、QスイッチNd:YAGレーザ(Brilliant, QUANTEL社製)である。このレーザ発振器は、図1に示すように非線形光学結晶である KH_2PO_4 (KDP)¹⁰⁾を用いて波長1064nmの基本波(周波数 ω)の他に、波長532nmの第2高調波(周波数 2ω)、波長355nmの第3高調波(周波数 3ω)、波長266nmの第4高調波(周波数 4ω)を出力でき

Fig.1 Process to obtain 2nd, 3rd and 4th-harmonic lasers

* 原稿受付 平成 17 年 6 月 3 日

** 正 会 員 岡山大学大学院自然科学研究科 (岡山市津島中 3-1-1)

*** (株)片岡製作所 (京都市南区久世築山町 140)

† 学生会員 岡山大学大学院自然科学研究科

Fig. 2 Optical system and beam profiles

る。いずれの波長においても、繰り返し数 20Hz, パルス幅 5ns 一定である。非線形光学結晶はレーザ共振器外部に設置しており、目的とするレーザ光の波長によって必要とする非線形光学結晶を選択配置する。

2.2 レーザ光照射方法

図 2 に本研究で使用した光学系の模式図とレーザ光の強度分布を示す。発振器から出力されたレーザ光にはビーム形状および強度分布に偏りが見られた。そこでこの偏りを修正するため、レーザ光を凹レンズ($f=100\text{mm}$)と凸レンズ($f=400\text{mm}$)を組み合わせたガリレオ型ビームエキスパンダによって 4 倍に拡大した。エキスパンダを通過したレーザ光は板厚 0.5mm, 直径 5mm の円形マスクによって周囲のレーザ光がカットされる。この成形後のレーザ光を焦点距離 100mm のレンズで集光して試料に照射した。照射パルス数の設定には Q スイッチ信号と同期させたガルバノ式シャッタで 20Hz にて連続発振しているレーザ光の 1 パルスを正確に抽出し、必要なパルス数を制御した。加工痕形状の測定には 3 次元触針式形状測定器 (Taly Scan M137, Taylor Hobson 社製) を用いた。

2.3 供試材料

試料には窒化アルミニウムを使用した。この試料は熱伝導率が $180\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ と大きく、 2450°C で昇華する。図 3 は、各波長における厚さ 1mm の試料の吸収、反射、透過率を示したものである。これはキャリブレーション試料として硫酸バリウムを用い、積分球を備えた分光光度計 (UV-3100PC, 島津社製) を使用して反射および透過光を測定することにより吸収率を求めたものである。吸収率は波長が短くなるにしたがい増加していることから、波長が短いほど加工効率が向上することが予想される。

ところで、照射するレーザ光の光子エネルギーが物質を構成する原子の結合エネルギーよりも大きくなると、光化学反応による除去が可能になる。光子 1mol のエネルギー D_0 は、レーザ光の波長を λ , 振動数を ν , 速度を c , プランク定数を h , アボガドロ数を N とすると次式(1)により与えられる¹⁰⁾。

$$D_0 = h\nu \cdot N = h \frac{c}{\lambda} \cdot N \quad (1)$$

式(1)より求めた各波長における光子 1mol のエネルギー D_0 を表 1 に示す。試料である窒化アルミニウムの結合エネルギーが 240.5kJ/mol であることから、第 3 および第 4 高調波による加工の場合には光化学反応の可能性が生ずる。実際には、光化学反応の作用のみで加工が進行するのではなく、レーザ光の吸収に

Fig. 3 Absorptivity, reflectivity, and transmissivity of AlN($t=1\text{mm}$) for various wavelengths

Table 1 Photon energy

Wavelength (nm)	1064	532	355	266
Photon energy (kJ/mol)	112.4	224.9	337.0	449.7

Fig. 4 SEM photographs of drilled hole for various wavelengths

ともなう熱的除去作用も同時に生じるので、材料除去は熱的除去作用とアブレーションによる光化学反応の組み合わせによって行われる。しかし原理的には、アブレーションは光化学反応による加工であるので、第 3 および第 4 高調波を用いた場合は熱影響層や熱変形の少ない高精細な加工が期待できる。

3. 実験結果および考察

3.1 加工痕形状

図 4 は、基本波、第 2、第 3、第 4 高調波における加工痕の SEM 写真である。加工は全て焦点を試料表面に合わせて行っており、パルスエネルギー 1mJ のレーザ光をそれぞれ 1, 5, 20 パルスずつ照射した。図から明らかなように、基本波は結晶の脱離を中心とした加工であるのに対し、第 2、第 3、第 4 高調波では比較的美しい円形に加工されていた。また、波長が短くなるにつれてマスクによるレーザ光の干渉が加工痕に大きく影響しているのがわかる。前述したように波長が短い第 3 および第 4 高調波では、原子間の結合を直接切断する光化学反応が加工に大きく寄与しているが、第 2 高調波でも光子 1mol の解離エネルギーが 224.9kJ/mol と試料の結合エネルギー 240.5kJ/mol に近いことから加工痕形状はレーザ光の強度分布の影響を受けやすくなったものと考えられる。また、全てのレーザ光波長でパルス数が少ないほど結晶の脱離が発生しやすいが、パルス数の増加にともないその脱離は目立たなくなっていた。このことから、試料に照射される総エネルギー量が増加するほど波長による加工形態の違いが顕著に現れてくるものと考えられる。

図 5 は図 4 で示したレーザ光照射痕の最大深さを測定した結果である。第 2、第 3、第 4 高調波に比べて基本波の加工深さが

Fig.5 Change of removal depth with number of pulse for various wavelengths

Fig.6 Blind hole for various wavelengths

大きいことがわかる。第1パルスの加工では基本波の加工痕が最も深くなっていたが、この場合はパルス数の増加にともなう加工深さの進展は大きく鈍化している。一方、第4高調波では第1パルスにおける加工深さは浅いものの、基本波に比べるとパルス数の増大にともなう加工深さの増加量は大きい。つまり、波長が短い場合はパルス数の増加にともなう加工速度の低下率が小さいと考えられる。

3.2 とまり穴形状

繰り返し数 20Hz の連続パルス発振を用い、連続して 1 分間試料にレーザー光を照射し続けてとまり穴加工を行った。焦点は試料表面に合わせており、パルスエネルギーは 1mJ である。その時の各波長におけるとまり穴の断面形状を図6に示す。図から明らかなように、レーザー光の波長が短くなるにつれて加工深さが増加している。これは、前述のように波長が長いほどパルス数の増加にともなう加工速度が小さくなるという結果と良く対応しており、長時間加工することによって各波長における深さ方向への進行速度の差が顕著に現れたものと考えられる。焦点位置で加工を行う場合、スポット径が小さいことから高いエネルギー密度が得られる。そのため、波長の長い熱加工が主体となる場合、試料表面はすぐに熔融、気化する。しかし、加工の進行にともなう加工位置が焦点位置から外れていくためにエネルギー密度が低下し、加工位置での表面温度が試料の融点に達することができなくなる。一方、波長が短い光化学反応が主体となる加工では、加工位置が焦点位置からずれても光子のエネルギーが原子の結合エネルギーを上回っていれば加工することができる。前述したように波長が短くなるにつれて光子のエネルギーが大きくなり、吸収率も増大するために加工深さが

Fig.7 Penetration hole for various wavelengths

大きくなったと考えられる。

一方、とまり穴先端部分の断面形状に着目すると、基本波では先端が尖っているが、波長が短くなるにつれて丸みを帯びているのがわかる。照射したレーザー光の強度分布は、全ての波長において照射領域にわたって比較的一様であるので、原子間結合を直接切断する光化学反応では、この分布に近似した先端部形状となっている。しかし、長波長領域の熱加工では、加工が進展して加工位置が深くなるほど照射面積が大きくなるため、熱が集中しやすい中心部のみが局所的に加工されたものと考えられる。また基本波では、加工表面に金属溶融層が残留し¹²⁾、それによって穴内面でレーザー光が反射して中心部の光束強度が高くなることも報告されており¹³⁾、その結果とも良く一致している。ところで表1で示した様に、各波長の光子エネルギーと試料の結合エネルギーの関係より、光化学反応が発生するのは第3高調波と第4高調波の場合のみである。しかし第2高調波におけるとまり穴の先端形状は、基本波ほど鋭くはない。また、図5で示したように第2高調波の加工速度は比較的大きい。さらに、試料である窒化アルミニウムの結合エネルギー 240.5kJ/mol に対して波長 532nm における光子の解離エネルギーは 224.9kJ/mol とほぼ同等の値を有することから、一部光化学反応が作用していることが考えられる。

3.3 貫通穴形状

繰り返し数 20Hz の連続パルス発振によって貫通穴加工を行い、レーザー光の波長が貫通穴の出入口、および断面形状に及ぼす影響を観察した。加工はとまり穴の場合と同様に試料表面に焦点を合わせて行っており、試料の板厚は 1mm、パルスエネルギーは 1mJ である。また、試料の後方にパワーメータを設置し、その測定されたパルスエネルギーが 0.2mJ 以上では出口径がほとんど変化しなかったことから、この値を基準として貫通を判断した。図7に各波長における貫通穴の出入口および断面を示す。図中の T_p は貫通時間であり 5 回の加工結果の平均値で表している。ところで、基本波では 20 分間レーザー光を照射しても貫通に至らなかったことから加工を中断し、図中にはその時形成されたとまり穴の入口および断面形状を示している。図5で示したように、いずれのパルス数においても基本波の加工量が最

Fig. 8 Removal depth per pulse for various wavelengths

Fig. 9 Observation method of drilled depth

大となっていた。それにもかかわらず、基本波では板厚 1mm の窒化アルミニウム板に対して貫通穴加工を行うことができなかった。

ここで、図 5 の加工深さより 1 パルス当たりの平均加工深さを算出した結果を図 8 に示す。図中の 1 パルスでは各波長における 1 パルスでの加工深さを、2～5 パルスおよび 6～20 パルスではその間における 1 パルス当りの平均加工深さを示している。図から明らかなように、パルス数が少ない場合、すなわち加工初期では基本波における 1 パルス当りの加工深さが大きい、加工が進むにつれてその値は著しく低下している。一方、第 4 高調波では 1 パルスでの加工深さが浅かったものの、加工が進んでも 1 パルス当りの平均加工深さの低下率が少ないことがわかる。つまり、基本波では加工の進行にともなって 1 パルスあたりの加工量が大きく減少する。さらに、基本波では図 3 で示したように材料への吸収率が低く、また波長が長いことから光子エネルギーも高調波に比べて低い。したがって、基本波では熱的加工が主体であることを考慮すると、加工初期は十分なパワー密度が得られるので大きな加工量が得られるが、加工の進行にともなってパワー密度が低下してその除去量は著しく低下する。そして、加工穴先端でのパワー密度が溶融、蒸発による加工限界値以下になったところで加工が停滞したために貫通に至らなかったと考えられる。

一方、図 7 の貫通穴出入口形状に着目すると、加工穴入口の形状はいずれの波長においても円形であるが、出口形状は第 2 高調波がきれいな円形であるのに対して、第 3、第 4 高調波では出口の穴周囲で結晶が著しく脱離していることがわかる。図 6 および図 7 で述べたように、波長が長いほど加工穴の先端部

Fig. 10 Change of drilled depth for various wavelengths

は鋭角になり、加工終了までに長時間を要する。この点を考慮すると、長波長での貫通穴加工では、穴貫通直前でまず試料裏面に小さな穴があき、その後徐々にこの穴が拡大してゆくため出口周囲に結晶の脱離が発生しにくい。一方、短波長を用いた貫通穴加工では加工穴の先端部が丸みを帯びているため、試料裏面に最初にあく穴も大きく、また、貫通部近傍では 1 回当たりの除去量が多いことから、出口穴近傍では結晶の脱離が発生しやすくなったのではないかと考えられる。

以上のように、窒化アルミニウムに対して深穴の加工を行う場合、第 4 高調波を用いれば短時間で加工することができ、第 2 高調波を用いれば良好な出口および断面形状が得られるなど波長によってその特性が異なることから、加工を行う際には目的に応じた波長を選択する必要があると考えられる。

3.4 加工深さの推移

厚さ 1mm の試料を貫通することが可能な高調波を用いた時のレーザ光照射時間に対する加工深さの推移を測定するとともに、限界加工深さについても検討した。ここでは図 9 に示すような観察手法を用いた。まず鏡面仕上げした板厚 0.5mm の試料に対して、側面方向よりパルスエネルギー 1mJ、繰返し数 20Hz でレーザ光を照射する。総レーザ光照射時間は 40 分であるが、加工深さを測定するために 100 秒ごとに照射を一旦止め、裏面から観察用照明光をあてた時に現れる加工穴の影を CCD カメラによって撮影してその時における加工穴深さとした。ただし基本波の場合は本測定法で測定するのに十分な加工深さが得られなかったため除外している。

図 10 に各波長における加工穴深さの時間的推移を示す。全ての高調波において加工の進展は、加工深さが急速に進行する第 1 段階、加工深さが加工時間にはほぼ比例する第 2 段階、ほとんど進行せず停滞する第 3 段階の 3 つの領域に大別できる。第 1 段階では図 6 で示したように、波長が短いほど加工深さが多い。第 2 段階では加工深さが線形に増加していることから、この領域においては加工深さの制御が可能であると考えられる。ところで第 3 段階では一見加工深さは飽和しているようであるが、時に加工深さが増加する現象が確認された。そこで、この現象を解明するために加工穴形成の状態を観察した。

一例として、第 4 高調波の場合の各時刻における加工穴影の画像を図 11 に示す。第 4 高調波では、照射時間 600 秒で照射時間と加工深さが比例する第 2 段階が終了し、その後第 3 段階の停滞領域に入るが、照射時間 1200 秒から 1600 秒にかけて加工深さが急増している。この点をふまえて観察すると、第 2 段階終了後のレーザ光照射時間 800 秒までは目立った変化はないが、

Fig. 11 Change of drilled depth with irradiation time

照射時間 1000 秒で加工穴の先端よりやや手前の穴径が増大しているのが確認できる。その後、穴径の増大はこの部分を起点にして加工穴先端に到達し、照射時間 1200 秒から加工深さが増大している。さらに、レーザー光照射時間 1000 秒において穴径が増大すると同時に加工穴内部にくぼみが発生していることも確認できる。

以上のように、加工深さが照射時間に比例する第 2 段階では、全ての波長において照射時間によって比較的容易に加工深さを制御することができる。また、第 3 段階でも加工深さの増加割合は小さいものの、その増大が期待できる。しかし、加工深さの増大は偶発的であることから、効率や利便性の面から考えれば、第 2 段階までが実用的であると考えられる。

4. 結 言

本研究では、Nd:YAG レーザの基本波、第 2、第 3、第 4 高調波を用いて窒化アルミニウムに対して微細穴加工を行い、レーザー光の波長が加工特性に及ぼす影響について検討した。得られた主な結論は以下のようなものである。

- (1) レーザ光の波長が長い基本波の場合、数パルス程度の照射による加工量は多いが、加工の進行にともない加工速度は大きく低下するため限界加工深さは小さい。一方、

波長が短く光子のエネルギーが試料の結合エネルギーよりも大きい場合、加工点が焦点から離れても加工速度の低下率は基本波の場合と比較して小さい。

- (2) 第 2 高調波では良好な出口穴形状が得られるが、第 3、4 高調波より加工速度は小さい。しかし、第 3、4 高調波では出口穴周囲に欠けが生ずることから、目的に応じて波長を選択する必要がある。
- (3) Nd:YAG レーザの高調波を用いた深穴加工における加工深さの進展は、急速な進行、照射時間にほぼ比例、停滞の 3 つの領域にわけられ、照射時間に比例する領域では加工深さの制御が可能である。
- (4) 急速に加工が進行する領域において同等のパルスエネルギーを用いた場合、波長が短いほど加工深さが大きい。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、実験装置の製作にご協力いただいた岡山大学工学部塩田三喜也技官、実験装置に多大な便宜を図っていただいた(株)日本レーザー、並びに貴重な実験試料をご提供いただいたイビデン(株)に謝意を表す。また、本研究の一部は、文部科学省都市エリア産学官連携促進事業からの助成を受けて行われたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 宮島信夫：ニューセラミックス，地人書館（1994）231.
- 2) 森田 昇，渡部武弘，吉田嘉太郎：共有結合性セラミックスのレーザー加工に関する研究（第 2 報）—破壊要因とクラックの抑制—，精密工学会誌，**58**，1，（1992）99.
- 3) 森田 昇，渡部武弘，吉田嘉太郎：窒化けい素セラミックスの無欠陥レーザー加工，日本機械学会論文集(C 編)，**56**，522，（1990）498.
- 4) オプトロニクス社編集部編：実用レーザー加工応用ハンドブック，オプトロニクス社，（2000）177.
- 5) Liming HE, Yoshiharu NAMBA and Yuji NARITA: Wavelength Optimization for Machining Metals with the Harmonic Generations of a Short Pulsed Nd:YAG Laser, Precision Engineering, **24**, 3, (2000) 245.
- 6) 永井治彦：レーザープロセス技術～基礎から実際まで～，オプトロニクス社，（2000）73.
- 7) 宮崎俊行，宮沢 肇，村上正夫，吉岡俊郎：レーザー加工技術，産業図書，（1991）18.
- 8) レーザ熱加工研究会編：レーザーによる精密・微細加工の現状と将来技術，産業図書，（1991）22.
- 9) John F. Ready: Handbook of Laser Material Processing, Magnolia Publishing, (1999) 69.
- 10) 黒澤 宏：レーザー基礎の基礎，オプトロニクス社，（1999）204, 206.
- 11) 中井貞雄：レーザー工学，㈱オーム社，（1999）91, 97.
- 12) 電気学会編：レーザーアブレーションとその応用，コロナ社，（1999）34.
- 13) 桑田 隆，森田 昇，渡部武弘，吉田嘉太郎：共有結合性セラミックスのレーザー加工に関する研究（第 4 報）—深穴生成過程の解析—，精密工学会誌，**59**，11，（1993）1797.