

フェムト秒領域のパルスレーザーによる材料加工技術の開発

若松 利享¹⁾・中嶋 清²⁾・松尾 真一郎²⁾・甲藤 正人³⁾・横谷 篤至⁴⁾

Development of Material Processing Technology using Laser of Pulse Duration in fs-region

Toshitaka WAKAMATSU¹⁾, Kiyoshi NAKAJIMA²⁾, Shinitirou MATSUO²⁾
Masato KATTO³⁾, Atsushi YOKOTANI⁴⁾

Abstract

Materials processing using the short pulse lasers are very attractive, because of non-contact processing that realizes accurate processing avoiding the effects of the excessive energy of laser pulse. The use of fs-lasers is effective to avoid the thermal effect induced by the excessive energy, however, there are only few cases that the effects of the pulse duration on the processing properties is treated quantitatively in fs-region pulse, although many reports have been presented for the rough comparison between fs and ns pulse durations. So we have investigated the relation between the processing characteristic and pulse duration in fs-region on the drilling process. We performed two kinds of experiments in order to find out the pulse duration dependence of processing characteristic for the processing with lasers in fs-region. First, we have investigated the relation between the degree of thermal effect and the pulse duration on the drilling process of metals by using the developed system in order to find out the optimized condition for the processing with lasers in fs-region. We found that the dimension of thermal-affected region formed around the drilled hole became smaller when the melting points of the samples were lower and the pulse durations were shorter. Through these experiments, we could estimate the pulse duration short enough for the process in which the thermal-affected region was eliminated for each samples. Second, we have investigated pulse duration dependency of processing threshold for the processing technology with lasers in fs-region. As a result, we found the ablation threshold for each sample is determined by fluence. These research results will become a big step on the development of processing technology with the pulse laser in fs-region.

Key Words :

Fs-laser, Pulse duration, Processing characteristic, Thermal effect, Ablation threshold, Thermal-affected region

1. はじめに

現在、電子機器の小型化、高性能化が進み、それに伴い電子機器を構成する電子デバイスの小型化、高性能化が求められている^{1,2)}。ここ数十年、フェムト秒領域の短パルスを利用したレーザー材料加工に関する研究は、MEMS、半導体、生化学などへの産業応用分野で盛んに行われている。一般的な機械加工では、加工部や切断部分に欠陥を生み出してしまうため、微細で高精度な加工が要されるMEMS技術などに使用するの

1) 電気電子工学専攻大学院生 2) 電気電子工学科学部生
3) 産学連携支援センター准教授 4) 電気電子工学科教授

能化が求められている^{1,2)}。ここ数十年、フェムト秒領域の短パルスを利用したレーザー材料加工に関する研究は、MEMS、半導体、生化学などへの産業応用分野で盛んに行われている。一般的な機械加工では、加工部や切断部分に欠陥を生み出してしまうため、微細で高精度な加工が要されるMEMS技術などに使用するの

は困難である。さらに、従来の刃物や切削器具を用いても不可能な機械加工が多数存在した。そこで、解決策として材料を非接触で加工できるレーザー加工が注目されている。現在までに加工用レーザーとしては、エキシマレーザーや YAG レーザーなどのナノ秒レーザーがすでに実用化されている⁹⁾。一般にレーザー加工は照射部の物質を急激に膨張させ瞬間的に蒸発させるレーザーアブレーション加工であるが、加工に使用されなかった余剰エネルギーがバリや熱変成部を形成してしまう問題があり、ナノ秒レーザーではこの割合が決して無視できるレベルではない⁶⁾。パルス幅をより短くすることでバリや熱変成部を抑えた高精度の加工が出来ることが分かっている⁹⁾¹⁰⁾。そこで注目されているのがフェムト秒レーザーである。当初フェムト秒領域のパルス幅を持つレーザーは、直接物質の電子を励起し、クーロン爆発等の過程により加工部除去が行われると言われていた¹¹⁾¹²⁾。しかし、そういう効果も含まれているが、穴あけ加工においてはフェムト秒レーザーを使用して加工しても完全に熱影響を取り除けるわけではない¹³⁾。フェムト秒レーザー加工における典型的な加工穴の代表例として亜鉛の加工穴を図 1.1 に示す。図 1.1 より、加工部とは、穴あけ加工で形成された穴の直径である A)、加工穴の周りにいったん融解した物質が再固化したことによりできるバリ部の B)、B)の周辺に熱により表面形状が変化したと思われる熱変成部の C)、C)の周辺にはおそらく表面汚染などが熱の影響で焦げたとと思われる D)より構成され、このうち、B)の周辺に熱変成部 C)が観測できた。また、ナノ秒とフェムト秒など大きくかけ離れた領域間での比較は良くされている¹⁴⁾¹⁶⁾が、フェムト秒領域内のパルス幅に対する加工特性が定量的に評価されている例は少ない。この原因としては、現在の短パルスレーザー装置においてパルス幅を連続的に変化させるために専門的な知識を必要とするからである。そこで我々はそのような実験的研究を行うにあたり、まずフェムト秒領域のパルスの幅を簡便にかつ連続的に変化できる周波数チャープを利用したフロントエンド型の装置を開発した。これを用いて、異なる物性の金属に穴あけ加工を行い、それぞれの金属の加工閾値のパルス幅依存性を形成された加工穴の深さから求めた。さらに、図 1.1 で観測された各パルス幅によって形成された熱変成部の幅から、熱変成部のパルス幅依存性を求めることにした。これらの結果より、フェムト秒領域内の加工特性のパル

ス幅依存性を定量的に評価した。

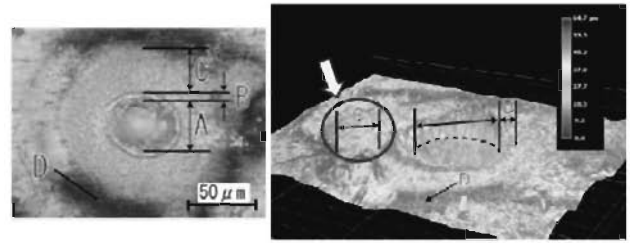


図 1.1 亜鉛の加工穴画像 (左) 2D 画像 (右) 3D 画像。

2. パルス幅制御装置

2.1 装置の設計

フェムト秒レーザー装置の再生増幅器に用いられる回折格子を利用したストレッチャーは、構造が複雑で、高価な部品が多用され、また取扱に専門知識も必要なことから、我々は新しく 1 辺 5 cm の直角プリズム 4 つから構成されているパルス幅制御装置を考案した。図 2.1 に示すように、プリズムを設置し入射させる。1 つ目のプリズムで光が分散されるが、十分近い位置に 2 つ目のプリズムを設置したことで、2 つ目のプリズムから出る光の光路は入射光と位置はずれるが平行になる。更に図 2.1 に示すように鏡面对称にもう一对のプリズム 2 個を設置したことで、出射光は入射光の延長線上にもどる。図 2.1 に示したように、矢印の方向にプリズムを移動させることにより、プリズム内の光路長を変化させ、速度差を生じさせる。

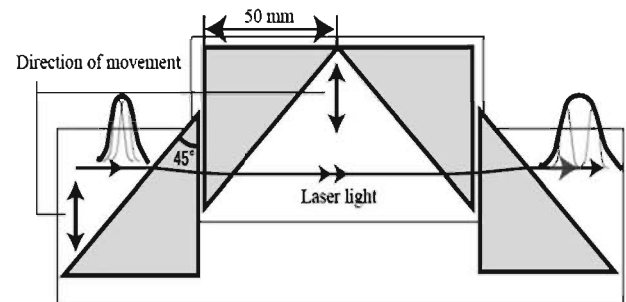


図 2.1 プリズムの設置位置。

2.2 パルス幅伸長特性

製作したパルス幅制御装置により短いパルスを出すときの手法を模式的に図 2.2(a)に示す。BK-7 製プリズムの外側の組と内側の組は個別に 2 つのコンピューター制御された直線移動ステージに設置された。1 軸の直線移動ステージは 1 μm 単位で制御することができるものを用いた。外側の 2 つのプリズムと内側の 2 つのプリズムを動かし、Input パスと Output パスが同軸上

にくるようにコンピューターで制御した。パルス幅制御装置にパルス幅 160 fs のフェムト秒レーザーを 1 パス通した時のパルス幅の伸長結果を図 2.3, 図 2.4 に示す。光路差が最小のとき (図 2.2(a)) 170 fs, 最大のとき (図 2.2(b)) 320 fs まで伸張させることが出来た。今回の実験で、さらにパルス幅を伸張するために、この装置の前後にミラーを各 1 枚設置し、レーザー光を 3 パス通した。図 2.5 に実際に装置内を 3 パス通したときのレーザー光のパルス幅の測定結果を示す。横軸 (上) はガラス内の光路長, 横軸 (下) は最大の光路長のプリズムペアの位置から移動した距離, 縦軸はパルス幅を表している。本実験では、開発したシステムによって簡単に連続的にパルス幅を変えることが可能になった。3 パス通すことで、160 fs のパルス幅を 190 fs から 510 fs まで伸ばすことが可能である。パルス幅は、510 fs から 270 fs まで直線的な伸長傾向を示したが、実験で使用したレーザー装置のもともとのパルス幅は 160 fs であるため、徐々にパルス幅の変化量が少なくなっていく様子が見えてきた。この装置は水平面内でレーザーを偏向させるので、ミラーを調整して、5 パス以上この装置を通すことにより、パルス幅のさらなる伸長が期待できる。

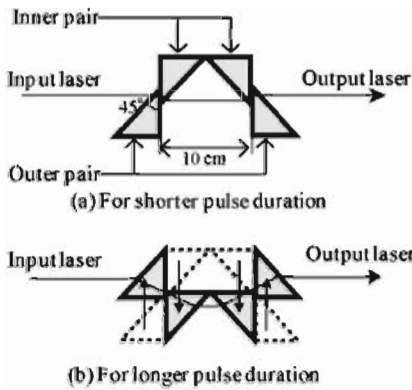
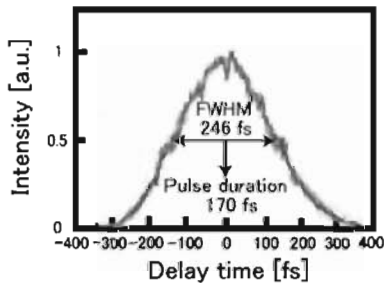
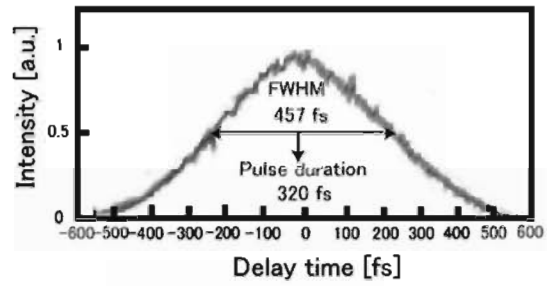


図 2.2 パルス幅制御装置の模式図。



(a) In the case of 20-mm-path-length

図 2.3 パルス幅の最小伸長結果 (1 パス時)。



(b) In the case of 150-mm-path-length

図 2.4 パルス幅の最大伸長結果 (1 パス時)。

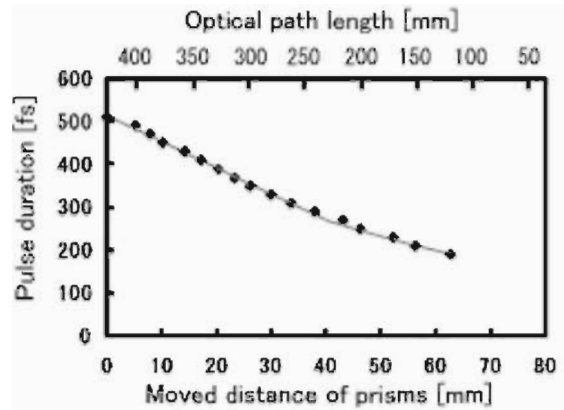


図 2.5 パルス幅の伸長結果 (3 パス時)。

3. フェムト秒レーザーによる加工特性の評価

3.1 実験装置・方法

図 3.1 にパルス幅変化による加工の閾値測定実験の装置構成図を示す。フェムト秒レーザー発生装置 (波長:882 nm, パルス幅:160 fs, 繰り返し周波数:1 kHz) から発振したレーザー光は出力調整部を通りパルス幅制御装置に入射させた。今回の実験では、パルスエネルギーを出力調整部で 10 $\mu\text{J}/\text{pulse}$ から加工穴が十分形成される出力まで 10 $\mu\text{J}/\text{pulse}$ ずつ増加させた。レーザー光をパルス幅制御装置に 5 パス通過させることでパルス幅を最大 700 fs まで伸ばして実験を行った。パルス幅をオートコリレータにより確認し、パルス幅を 190 fs, 300 fs, 600 fs の 3 つの場合に固定して、オートコリレータで随時確認して実験を行った。パルス幅制御されたレーザー光はメカニカルシャッターを通り平凸レンズで集光され、金属サンプルの穴あけ加工実験を行った。実験で使用した金属サンプルは、亜鉛, シリコン, スズ, チタンの 4 つを使用した。この 4 つの金属サンプルの代表的な物性値は、表 3.1 に示す。ショット数はメカニカルシャッターで 40 shots に設定した。実験により形成された加工穴はデジタルマイクロ

スコープを用いて測定し、それぞれの金属サンプルごとに加工穴の深さやバリの形成の様子を調べた。図 3.2 に測定画像例を示す。

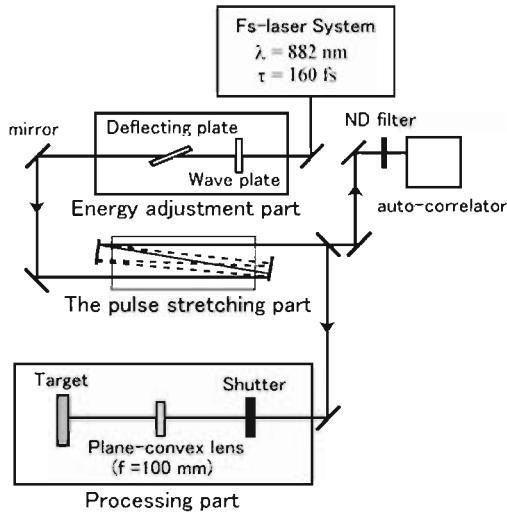


図 3.1 実験装置構成図.

表 3.1 各サンプルの物性値.

	比熱 [J/K*g]	熱伝導率 [W/m*K]	融点 [K]	密度 [Kg/m ³]
スズ	0.228	66.6	505	7310
亜鉛	0.394	116	692	7140
シリコン	0.716	148	1687	2330
チタン	0.522	21.7	1941	4507

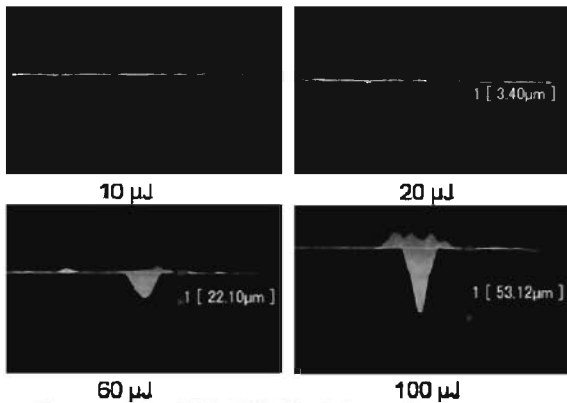


図 3.2 スズの測定画像例 (パルス幅 190 fs).

3.2 実験結果

各金属でパルスエネルギーを増加させていくと加工穴が形成され始め、さらに加工穴の深さが深くなっているのが分かった。加工穴が形成されるエネルギーはパルス幅に関係なく一定の値であったが、加工穴の深さはパルス幅が長くなると浅くなっていくのが観測できた。そのため、加工穴の深さをパルス幅ごとに測定

した結果のグラフを図 3.3 ~ 図 3.6 に示す。縦軸は加工穴の深さ、横軸はフルエンスを表している。各金属の加工閾値のフルエンスは、パルス幅に関係なく、それぞれスズが 0.6 J/cm²、亜鉛が 1.8 J/cm²、シリコンが 2.4 J/cm²、チタンが 3.6 J/cm² で加工穴が形成された。

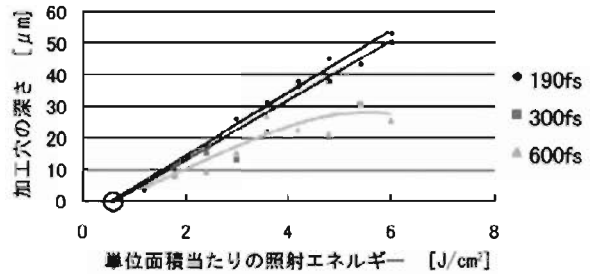


図 3.3 スズの測定結果.

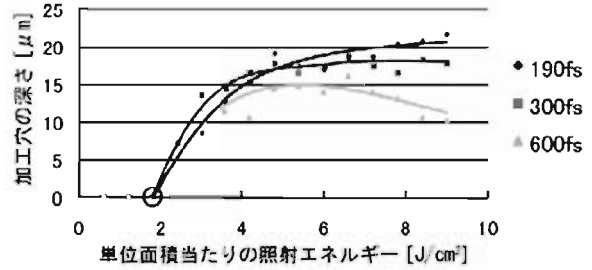


図 3.4 亜鉛の測定結果.

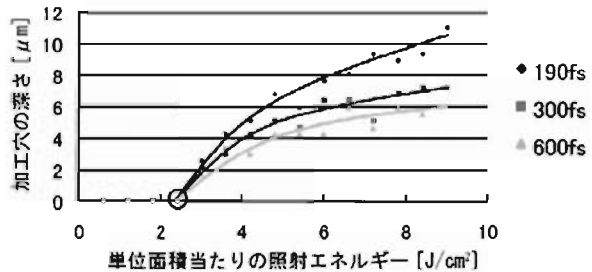


図 3.5 シリコンの測定結果.

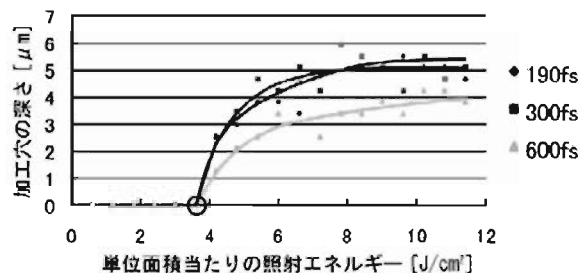


図 3.6 チタンの測定結果.

3.3 考察

各金属において、穴が形成されるフルエンスはパルス幅に関係ない事がわかった。これはレーザーの電場が直接金属中の電子に作用しているのではない事を示唆している。ただし、パルス幅をかえても閾値

が変化してないので、吸収率もほとんど変わっていない。つまり閾値を論ずる限りにおいては非線形吸収などにより十分良くエネルギーが吸収される状況になっており、今回用いた最長のパルス幅でも十分短いパルス幅と扱える領域になっていると判断できる。しかし、そのようにレーザーのエネルギーがほとんど瞬時に材料に伝わってしまうという状況が起きているにもかかわらず、伝わってしまった後のエネルギーが引き起こす現象である加工穴形成は、パルス幅が長くなると浅くなっていくのが観測された。例えば、スズの結果について説明すると、加工穴の深さはパルス幅 300 fs と 600 fs の間に大きな差がみられた。しかし、パルス幅 300 fs と 190 fs の間では、形成される加工穴の深さはほぼ変化しなかった。従って、300 fs でもスズにとっては穴形成の過程も加工効率の良い十分短いパルス幅であることが分かった。これと同様な結果がチタンでも得られた。次に、亜鉛については、スズとチタンの結果のようにパルス幅 300 fs と 600 fs の間に大きな加工穴の深さの差がみられた。また、パルス幅 300 fs と 190 fs にも若干の差がみられた。しかし、190 fs と 300 fs の差は大きくないため、亜鉛にとっては、300 fs でも十分短いパルス幅とはいえないようである。最後にシリコンの結果について、パルス幅が短くなるごとに加工穴の深さも深くなっていることが観測された。このことから、シリコンにとっては 190 fs でもまだ十分短パルスでないと考えられる。これらの結果より、各金属に存在する加工効率の良い十分短いといえるパルス幅がそれぞれ求まる結果となった。次にそれぞれの加工閾値や十分短いといえるパルス幅と表 3.1 に示した物性値の関係をグラフにした結果、図 3.7 ~ 図 3.9 より材料数 4 種類という少ないサンプル数ではあるが、加工閾値は融点、パルス幅は比熱と熱伝導率に相関関係がみられた。これらの結果から、加工特性のパルス幅依存性を定量的に捉えることができた。

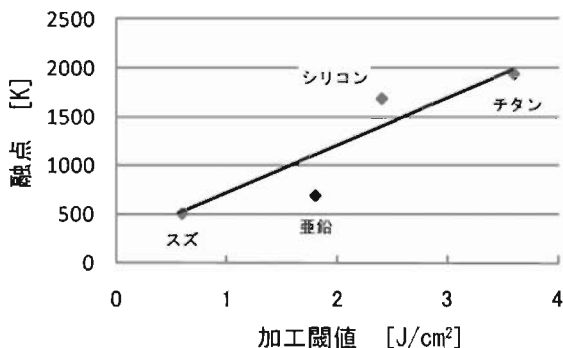


図 3.7 加工閾値と融点の関係。

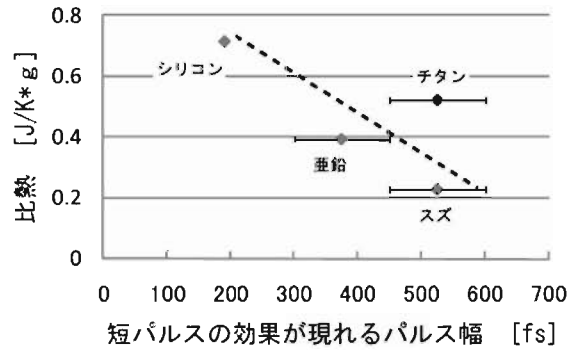


図 3.8 パルス幅と比熱の関係。

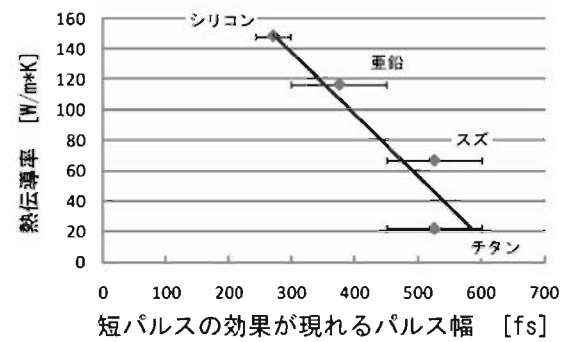


図 3.9 パルス幅と熱伝導率の関係。

4. 熱変成部のパルス幅依存性

4.1 実験装置・方法

実験装置は図 3.1 に示したものと同様のフェムト秒レーザー装置、出力調整部、パルス幅制御装置、加工部で構成した。パルスエネルギーは出力調整部で 80 μJ/pulse に調整し、ショット数をメカニカルシャッターでそれぞれ亜鉛、スズ、シリコンは 15 shots、チタンは 60 shots に固定した。そして、パルス幅制御装置にレーザーを 3 パス通すことで 160 fs のパルス幅を 190 fs から 510 fs まで連続的に伸ばすことが可能であるため、パルス幅を 190 fs から 510 fs まで 20 fs ずつ変化させて穴あけ加工実験を行った。伸ばさせたパルス幅はオートコリレータを用いて随時確認した。サンプルはスズ、亜鉛、シリコン、チタンを使用した。使用したサンプルの物性値は表 3.1 に示したものと同様である。各パルス幅で行った穴あけ加工で形成された加工穴はデジタルマイクロスコープを用いて観察した。図 4.1 に測定画像の例として、亜鉛に形成された加工穴の画像を示す。各金属の加工穴の画像より、レーザー照射により形成された加工穴の形状やバリ部、そして、加工穴周辺の熱変成部の領域をパルス幅ごとに調べた。

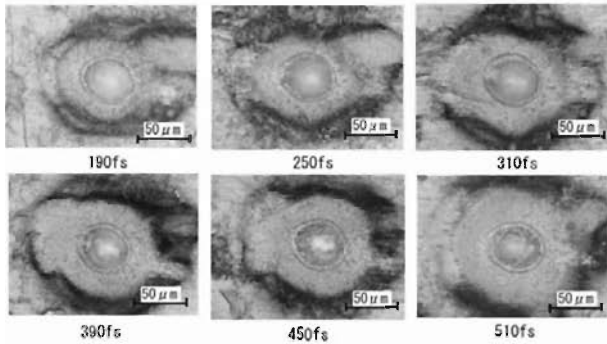


図 4.1 亜鉛の測定画像例.

4.2 実験結果

図 1.1 ですでに示した通り加工穴の特徴は、A) ~ D)の 4 つの部分に大別できるとして扱った。過去の多くの他の研究が B)のバリ部を小さくすることを目的に行われており、ここで得られた結果も一般的にナノ秒レーザーで行われている加工よりもバリ部は十分小さくなっていった。そこで、今回の実験で我々はパルス幅と熱変成部 C)の領域との関係を見出すことにした。例え見かけ上、加工エッジにバリが小さい、鋭い加工ができたとしても、材料が変質してしまえばは良好な加工とは言えない。得られた顕微鏡画像から一見して、どの材料でもパルス幅が大きくなっていくにつれて、熱変成部の幅も広がっていくことが分かった。従って、加工穴の周りに形成された熱変成部はパルス幅と相関関係があることが確認された。これより、図 4.2 に材料ごとの熱変成部の領域の広がり方とパルス幅の関係をグラフで示した。縦軸は熱変成部の幅、横軸はパルス幅を表している。図 4.2 に示したグラフより、スズの場合はパルス幅が 210 fs 以下なら熱変成部 C)がほとんど形成されないことが分かった。また、得られたグラフから熱変成部 C)の領域が形成されなくなるパルス幅をそれぞれ見積ると、亜鉛の場合はパルス幅が約 70 fs 以下、シリコンはパルス幅が約 65 fs 以下、チタンはパルス幅が約 30 fs 以下ならば、熱変成部の生成を無視できることが分かった。

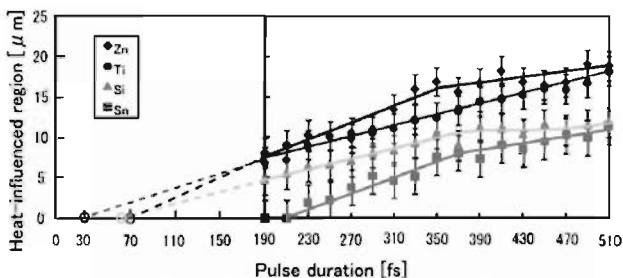


図 4.2 熱変成部のパルス幅依存性

4.3 考察

レーザー加工における熱変成部の生成を無視できるようになるパルス幅と表 3.1 に示した物性値の関係をグラフにした結果、比熱、熱伝導率、密度に関して相関関係はみられなかった。また、線形ではないが、図 4.3 に示されるように、融点と最も相関がみられた。しかし、この図における亜鉛、シリコン、チタンに対する値は、図 4.2 で外挿により求めた値である。従って、この考察の妥当性を検証するため、スズよりも低融点であるスズービスマス合金 (融点 411 K) にも同様の条件で穴あけ加工実験を行った。その結果、熱変成部の生成を無視できるパルス幅は 230 fs 以下となり、スズの結果よりも長くなった。求めたスズービスマス合金の熱変成部の生成を無視できるパルス幅と融点の関係を図 4.3 に併せて示した。4 つの純金属の相関関係から大きく離れたところがないので、熱変成部の生成を無視できるパルス幅は、融点と最も相関があるという考察はあながち奇抜な考えではないと思われる。

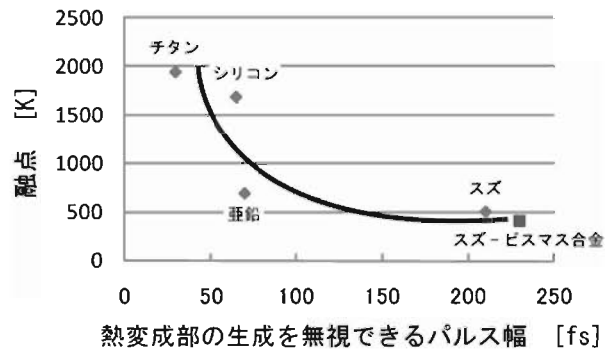


図 4.3 パルス幅と融点の関係.

5. まとめ

今回我々は、フェムト秒レーザー加工のメカニズムを解明するため、それぞれ異なる視点からフェムト秒レーザー加工技術における加工特性のパルス幅依存性を求めた。以下に研究により得られた成果を列記する。

- ・各金属の加工閾値のフルエンスは、パルス幅に関係なく一定であった。これより、加工閾値は照射強度ではなく、フルエンスで決まるため、電場強度が関与せず、フェムト秒といえども熱加工であることが分かった。
- ・加工穴の深さに関しては、パルス幅が長くなると加工穴の深さも浅くなることから短パルスのほう

が効率良い加工であることが分かった。さらに、各金属の加工効率の良い十分短いといえるパルス幅をある程度の範囲で求めることができた。

- ・レーザー加工における熱変成部の生成を無視できるパルス幅は、スズが 210 fs 以下、亜鉛が 70 fs 以下、シリコンが 65 fs 以下、チタンが 30 fs 以下であることが分かった。

以上の結果より、フェムト秒領域のパルスレーザーを用いた加工における加工特性のパルス幅依存性を定量的に評価することができたといえる。

参考文献

- 1) S. Ohmi and R.T. Tung "Effect of Ultrathin Mo and Mo Six Layer on Ti Silicide Reaction" *J. Appl. Phys.*, 86, pp. 3655-3660 (1999).
- 2) S. Ohmi and R. T. Tung "Silicide Formation in Co-Deposited Ti Six Layers; The Effect of Deposition Temperature and Mo", *J. Electronic Materials*, 28, pp. 1115-1122 (1999).
- 3) J. Ihlemann, B. Wolff and P. Simon, "Nanosecond and Femtosecond Excimer Laser Ablation of Fused Silica", *Appl. Phys.* **A54**, p. 363, (1992).
- 4) B. C. Stuart, M. D. Feit, A. M. Rubenchik, B. W. Shore and M. D. Perry, "Laser-Induced Damage in Dielectrics with Nanosecond to Subpicosecond Pulses", *Phys. Rev. Lett.*, 74, p. 2248, (1995).
- 5) J. Ihlemann, A. Scholl, H. Schmit and B. Wolff-Rottke, "Nanosecond and Femtosecond Excimer-Laser Ablation of Oxide Ceramics", *Appl. Phys.*, **A60**, p. 411, (1995).
- 6) J. Ihlemann, B. Wolff and P. Simon, *Appl. Phys.*, 54, 363 (1992).
- 7) B. C. Stuart, M. D. Feit, A. M. Rubenchik, B. W. Shore and M. D. Perry, *Phys. Rev. Lett.*, 74, 2248 (1995).
- 8) J. Ihlemann, A. Scholl, H. Schmit and B. Wolff-Rottke, *Appl. Phys.*, 60, 411 (1995).
- 9) B.N. Chichkov, C. Momma, S. Nolte, F. von Alvensleben and A. Tünnermann. *Appl. Phys. A* **63** (1996), p. 109.
- 10) J. Krüger and W. Kautek. *Proc. SPIE* **2403** (1995), p. 436.
- 11) R. Stoian, D. Ashkenasi, A. Rosenfeld and E.E.B. Campbell, *Phys. Rev. B.* 62, (2000) 13167.
- 12) R. Stoian, D. Ashkenasi, A. Rosenfeld, M. Witmann, R. Kelly and E.E.B. Campbell, *Nucl. Instr. Meth. B* 166-167, (2000) 682.
- 13) T. Kurita, K. Komatsuzaki and M. Hattori, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 48, 220 (2008).
- 14) Etsuji Ohmura, Ichirou Fukumoto and Isamu Miyamoto "Sattering of Evaporation Particles in Ultrashort-Pulse Laser ablation", Proc. 2nd Int. Symp. On Laser Precision Microfabrication, Singapore, 2001, in press.
- 15) J. Kruger, S. Martin, H. Madebach, L. Urech, T. Lippert, A. Wokaun and W. Kautek, *Appl. Surf. Sci.*, 247, 406 (2005).
- 16) X. Zhu, D.M. Villeneuve, A.Yu. Naumov, S. Nikumb and P.B. Corkum, *Appl. Surf. Sci.*, 152, 138 (1999).