

**Q-46** フェムト秒レーザーのメリットならびにその開発状況はいかがでしょうか

**A-46** 初めにフェムト秒レーザーのメリットを説明するために、特徴である非熱的加工の原理を述べるとともに、加工例を示します。次に、最新のフェムト秒レーザーの開発状況について紹介します。

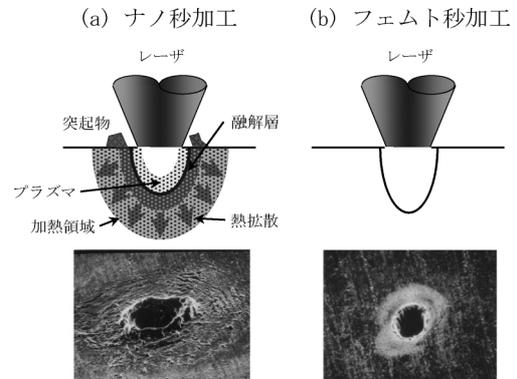
### 1. フェムト秒レーザー加工—非熱的加工の原理—

フェムト秒レーザーはいくつかの点で、ナノ秒レーザーとは異なるアブレーション過程を示します。レーザーアブレーションの過程において金属にレーザーを照射した場合、エネルギーは逆制動放射により自由電子に吸収されます。この吸収されたエネルギーは、電子系の加熱や格子系へのエネルギー移乗を経て、金属内部へ熱拡散します。レーザーにより金属が融点を超える温度に加熱されると蒸発が起こり、加熱部は除去されアブレーションが起こります<sup>1)</sup>。レーザーのパルス幅が電子-フォノン結合時間（数ピコ秒）よりも短い場合、金属内部への熱伝導による損失過程を無視できるため、レーザーエネルギーが格子系に効率よく注入されます<sup>2)</sup>。そのためアブレーション過程はピコ秒の時間スケールを境に、熱的加工（ピコ～ナノ秒領域）と非熱的加工（フェムト～ピコ秒領域）とに区別されます。

### 2. 加工例

#### 2.1 微細加工

ナノ秒レーザーとフェムト秒レーザーによるレーザー穴あけ加工の違いを **Fig. 1** に示します。ナノ秒レーザーを固体ターゲットに照射した場合 (**Fig. 1(a)**)、レーザーは発生したプラズマを加熱し続けるため、周囲には融解層が形成されます。これに対しフェムト秒レーザーの場合 (**Fig. 1(b)**)、レーザーは固体のみに相互作用し、不要な加熱がなくなるため、エネルギー効率が高く切れ味は鋭くなります。Pronko らは、レーザーフルーエンスを閾値近傍に調整したレーザー（波長800 nm、パルス幅200 fs）を銀フィルム表面に集光照射（集光径3000 nm）し、口径300 nm の加工痕を得ています<sup>3)</sup>。パラメータ（レーザー波長、パルス幅、集光光学系など）の最適化を行えば、さらに小さなナノオーダーの精密加工も可能になると考えられます。また、フェムト秒レーザーはフルーエンスを変化させることで、平均的な加工深さを1パルス照射あたり100 nm～0.01 nm と広範囲にわたって安定的に制御することができます。特に低フルーエンス領域ではピコ～ナノ秒のレーザーではみられない非常に浅い加工深さの領域があります。



**Fig. 1** レーザパルス幅による加工の違い

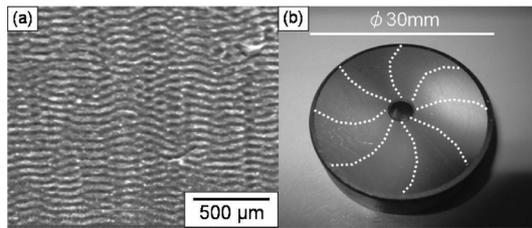
#### 2.2 ナノ周期構造

1965年にルビーレーザーによる半導体のダメージを分析したところ、加工の底面に波長サイズの周期を有する周期構造が形成されていることが偶然発見されました<sup>4)</sup>。その発見により、レーザー波長やパルス幅をパラメータとして、さまざまな固体物質について周期構造の研究報告がなされてきました。周期構造の形成は入射光と表面にできるプラズマ波もしくは散乱波との干渉によりできる定在波に起因していると考えられており、また偏光方向にも依存します。周期構造の間隔  $d$  は、レーザーの入射角  $\theta$  に依存し、 $d = \lambda / (1 \pm \sin \theta)$  の関係で変化します<sup>5)</sup>。  $\theta = 0^\circ$  の入射角の場合、間隔  $d$  は照射レーザー波長  $\lambda$  と同程度となり、それ以下になることはありませんでした。しかしフェムト秒レーザー照射による金属材料の周期構造は、レーザーフルーエンスを制御することで周期が波長よりも短くなることが報告されています<sup>6)</sup>。

経済産業省地域新生コンソーシアム研究開発事業（平成17-18年度）「フェムト秒レーザーを使った省エネルギー・長寿命部品加工機の開発」において、フェムト秒レーザー照射により形成されるナノ周期構造がエンジン摺動部等 (**Fig. 2**) の摩擦低減に有効であることが示されています<sup>7)</sup>。摩擦試験時において潤滑油を使用してナノ周期構造形成による摩擦低減効果が確認できたのは本プロジェクトが初めてです。

### 3. 最新のフェムト秒レーザー装置

2010年には、ドイツ、フラウンホーファー ILT では、平均出力が1.1 kW、繰り返し周波20 MHz、ピークパワー90 MW のフェムト秒レーザーが開発されました。高い平均出力により、生産スループットの向上が期待されます。また、光ファイバーを用いた安定性の高いフェムト秒レーザー



**Fig. 2** 摩擦試験用ナノ周期構造形成サンプル：(a) ナノ周期構造，(b) 中心部から弧を描いて外側に向かうように形成されたナノ周期構造形成外観写真

(フェムト秒ファイバーレーザー) も開発されています。従来のフェムト秒レーザーは複雑かつ特殊な光学系が多用されており、高額にならざるを得ません。また、その性能を維持するためには恒温室への設置が不可欠であり、使用者は常に光学系の調整を余儀なくされてきました。これらの問題点を解決するために、米国、レイディアンス社では、光

ファイバーによって構成されるフェムト秒ファイバーレーザーが開発されました。平均出力6 W、繰り返し周波数200 kHz、ピークパワー35 MW を達成し、2010年に販売を開始しています。

#### 参 考 文 献

- 1) C. Chalearb. et al: Proc. of SPIE Laser Surface Processing Vol. 3404 (1998), pp. 432
- 2) C. Momma. et al: Opt. Commun, Vol. 129 (1996), 134
- 3) P. Pronko. et al: Opt. Commun, Vol. 114 (1995), 106
- 4) M. Birnbaum. et al: J. Appl. Phys, Vol. 36 (1965), 3688
- 5) E. E. B. Campbell. et al: Material Science Form, Vol. 301 (1999), 123
- 6) M. Tsukamoto, K. Asuka, H. Nakano, M. Hashida, M. Katto, N. Abe, and M. Fujita: Periodic microstructure produced by femtosecond laser irradiation on titanium plate, Vacuum, Vol. 80 (2006), 1346
- 7) 加藤貴行, 阿部信行, 山中正宣, 松本康太郎: フェムト秒レーザーを使用した摩擦低減部品加工装置の開発, レーザ研究, 36, (2008), 144.