

最近の技術から

フェムト秒レーザーアブレーション

緑川克美

理化学研究所レーザー科学研究グループ 〒351-01 和光市広沢 2-1

1. まえがき

最近の超短パルスの発生と增幅技術の進展、特にモード同期チタンサファイアレーザーとチャーブパルス增幅の出現は、超短パルス高出力レーザーの分野に革新的な技術の進歩をもたらした。その結果、専門家以外でも比較的容易にフェムト秒レーザーが使えるようになり、その応用分野が大きく広がりつつある。一方、アブレーション加工は高出力レーザーの産業応用の一つとして、従来技術では困難な材料加工や微細構造の作製等に用いられてきた。フェムト秒高出力レーザーによるアブレーション加工はそのようなレーザー装置技術および応用技術の進展を背景にして生まれ、今後、新たな用途を生み出していくものと期待されている。

ここでは、筆者らの最近の研究成果^{1,2)}を中心にフェムト秒レーザーによるアブレーション、特に多光子吸収を用いた加工について紹介する。

2. ポリマーのアブレーション

フェムト秒レーザーによるアブレーション加工の有効性は、まず紫外域のエキシマレーザーを用いて実証された^{3,4)}。その結果、線形な吸収のない物質に対しても、光強度の大きな超短パルスレーザーでは2光子過程による非線形吸収が起りアブレーション加工が可能になる

ことが明らかにされた。しかし、これが赤外光の場合は4あるいは5光子吸収が起こらなければならない。果たしてそのような加工が可能なのであろうか。また、できる限り周辺部への熱的影響を避けてアブレーション加工を行うためには、どの程度短いパルス幅のレーザーが有效であるのか。筆者らは、このような疑問を動機にして実験を開始した。以下にポリマーフィルムで得られた典型的な結果を紹介する。

図1は、それぞれ(a)polyimide(PI)と(b)tetrafluoroethylene-hexafluoropropylene(FEP)フィルムにおけるレーザーフルエンスとアブレーション速度の関係である。このとき使用したチタンサファイアレーザーのパルス幅は、それぞれ200 fsと170 fsであり、中心波長は798 nmである⁵⁾。実験値と多光子吸収モデルによる計算値の比較から、それぞれPIでは3光子吸収($n=3$)が、FEPでは5光子吸収($n=5$)が支配的に起こっていると考えられる。これらの値はそれぞれの材料の吸収端波長およびその近傍での吸収係数を考慮することにより理解される。すなわち、PIでは288 nm、FEPでは160 nm付近から強い吸収が立ち上がっている。

ここで用いたモデル⁶⁾は、熱伝導や緩和過程による吸収エネルギーの損失を無視できるものとしており、逆にそのような簡単化されたモデルが適用できるのは数百fsの短い時間スケールの場合のみであると考えられる。

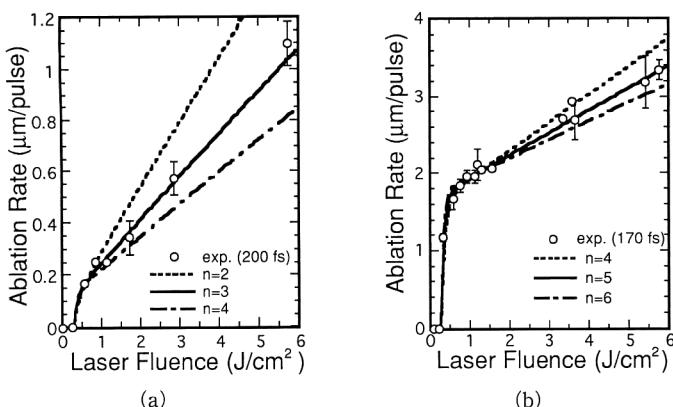


図1 PI(a), FEP(b)におけるレーザーフルエンスとアブレーション速度の関係(白丸は実験値で、実線および破線が計算値)

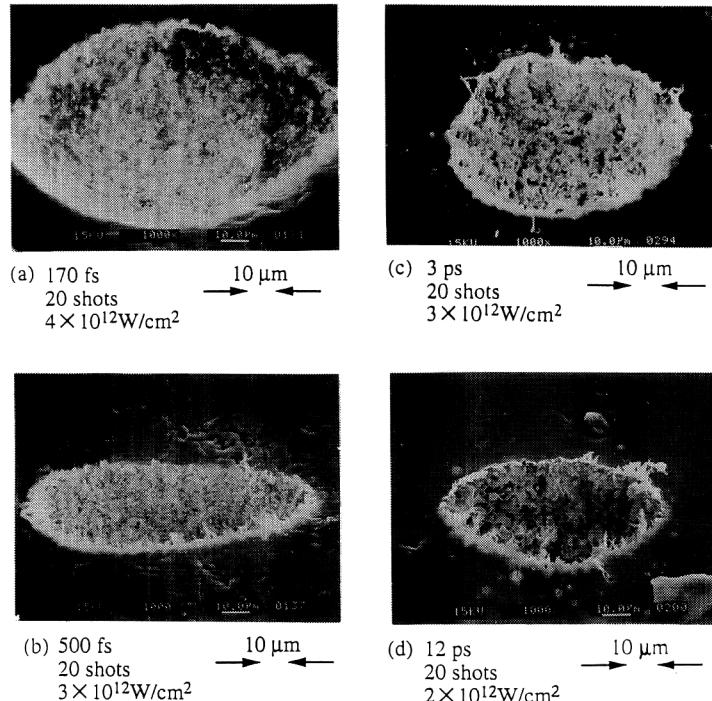


図2 電子顕微鏡により観測されたアブレーション後のFEP表面の形状

すなわち、パルス幅がこれらの損失過程の起こる時間よりも十分に短ければ、実験結果はそのような理想的なモデルを用いても記述できるものと考えられる。一方、パルス幅が長くなれば、当然、計算値とは一致しなくなる。

そこで、そのような理想モデルの適用限界を調べるために、FEPにおいてパルス幅を170 fsから12 psまで変化させ、レーザーフルエンスとアブレーション速度の関係を測定した。この結果から、パルス幅が500 fsよりも大きくなるとモデル計算とは全く一致しないことがわかった。また、このとき電子顕微鏡を用いてアブレーション後の試料の表面状態を観測した結果、170 fsと500 fs以上のものでは穴の周辺部や壁面に明らかな差異が認められ、パルス幅が大きくなるにしたがって周辺部や壁面の状態が荒れてくることがわかった。図2にこのとき観測された電子顕微鏡写真を示す。

次に、超短パルスレーザーによるアブレーションの特性を評価するために、照射レーザーエネルギーに対してアブレーションに寄与したエネルギーの割合としてエネルギー効率 η を定義した。ここで、アブレーションに要したエネルギーは、実験でアブレーションされた体積

と粒子数密度および結合エネルギーから求められた。その結果、レーザー強度 $2 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ のとき、パルス幅170 fs, 500 fsおよび3 psに対して、 η はそれぞれ、80%, 20%および7%と求められた。これらの結果は、パルス幅が170 fsから500 fsに変化するだけで、さまざまなエネルギーの損失過程が無視できなくなることを示している。

3. む す び

フェムト秒高出力レーザーによるアブレーション加工の報告は、まだあまり多くはないが、その潜在的 possibility は大きく非常に魅力のあるものである。また、ここでは取り上げなかったが、このレーザーが瞬間に作り出す高エネルギー密度状態では化学結合は完全に切断され原子レベルにまで均一に分解されるため、薄膜形成にも非常に有効であることが

期待される。今後のフェムト秒レーザー装置の進展とともにさまざまな加工分野に応用されることを期待すると同時に、新しい応用が開かれるこことを願いたい。

文 献

- R. Srinivasan, E. Sutcliffe and B. Braren : "Ablation and etching of polymethylmethacrylate by very short (160 fs) ultraviolet (308 nm) laser pulses," *Appl. Phys. Lett.*, **51** (1987) 1285-1287.
- S. Kuper and M. Stuke : "Ablation of polytetrafluoroethylene (Teflon) with femtosecond UV excimer laser pulses," *Appl. Phys. Lett.*, **54** (1989) 4-6.
- H. Kumagai, K. Midorikawa, K. Toyoda, S. Nakamura, T. Okamoto and M. Obara : "Ablation of polymer films by a femtosecond high-peak-power Ti: sapphire laser at 798 nm," *Appl. Phys. Lett.*, **65** (1994) 1850-1852.
- 中村真毅, 緑川克美, 熊谷 寛, 小原 實, 豊田浩一 : "超短パルスレーザによるポリマのアブレーション", 電気学会研究会資料, 光・量子デバイス研究会, OQD-94-3 (1994).
- S. Nakamura, K. Midorikawa, M. Obara and K. Toyoda : "Ring-type Ti: sapphire regenerative amplifier with a wide tuning range," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **32** (1993) 3833-3837.
- R. Sauerbrey and G. H. Petitt : "Theory for the etching of organic materials by ultraviolet laser pulses," *Appl. Phys. Lett.*, **55** (1989) 421-422.

(1995年2月28日受付)