

# 超精密工具としての超高速レーザー

ジェフ・ヘクト

ピコ秒やフェムト秒のレーザーは、1回に微量の材料をアブレーションすることによって、脆いガラスやセラミックを清浄に加工するだけでなく、外科手術などを含む繊細な操作も下層物質の損傷なしに実行する。

改良された技術のおかげで、超高速レーザーは、研究所の枠を越えて産業や医学の世界にまで浸透し、精密で繊細な作業に使われるようになった。これらの成功の鍵はピコ秒からフェムト秒の間隔内に光エネルギーを凝縮させ、空間の小さな体積上に光を集光させるそれらの能力にある。この凝縮は、下層部を損なうことなく、表面から材料を迅速かつきれいにアブレーションするために必要とされる高強度を提供する。

精密さと繊細さの組み合わせは、ガラスやセラミックなどの脆い材料の加工、あるいはタービン翼のような超硬合金へのクリーンな穴あけなどの用途にとって、測り知れないほど貴重である。そのことによって、超高速レーザーは医療分野でもニッチを獲得し、冠状動脈のバイパス手術に使われるステントをは

じめとする繊細な医療用デバイスの製造と、角膜手術を含む高精度な医療処置の実行の双方に活用されている。

## レーザー-材料相互作用

パワー強度とパルス幅は、レーザービームが材料といかに相互作用するかを決定する主因子である。長い時間スケールでは、材料は光のエネルギーの一部を吸収し、それを熱に変換し、その熱を材料全体に伝導する。もし、ビーム強度が十分に高いならば、ビームはその材料を融解し、融解された材料が熱を周辺に伝導する。吸収、融解、そして熱伝導がナノ秒程度の短い時間スケールで起きる。

パルスエネルギーが約100ps以下の短い時間スケールで供給された時には、材料に依存する遷移との関係で、事態は一変する。ピーク強度はパルスのピ

ーク出力が増加するにともなって急激に上昇する。例えば、1MWのピーク出力と1psのパルス幅をもつマイクロジュールパルスは、5 $\mu$ mのスポットに集光された場合、外殻電子をはぎ取るのに十分な約 $4 \times 10^{12}$  W/cm<sup>2</sup>のピーク強度を発生する。その相互作用はあまりにも高速であるため、そのエネルギーが下層物質に移動する前に、表面からそれらのイオンをアブレーションする。このアブレーションモードにおけるエネルギー移動は、強度がかなり低いこともあって材料の吸収にはほとんど依存しないが、材料間あるいはレーザー波長によって違いが生じる。例えば、紫外パルスは、ガラス転移を容易に誘起する近赤外パルスに比べて、ガラスなどの透明材料をより高精度で切断する。

その結果は、時折「コールドアブレーション」と呼ばれる。図1に示されるように、その表面は短時間で非常に熱くなるが、下地層を加熱または損傷する前に、表面のイオンがアブレーションされる。こうして、ピコ秒またはフェムト秒のパルスは繊細または脆い材料から非常に薄い層を損傷なしに取り除くことができる。研磨研究者たちは、アブレーションしきい値のすぐ上の強度をもつ70psのパルスを使って透明なニス剤を油絵から取り除き、その除去を光コヒーレンストモグラフィーで監視した<sup>(1)</sup>。ピコ秒レーザーを使うことによって、マッチを発火させることなく、マッチの先端にパターンを描画することができた、と米フォトンクス・インダストリーズ社 (Photonics Industries) のジョイス・キルマー氏 (Joyce Kilmer) は語っている。

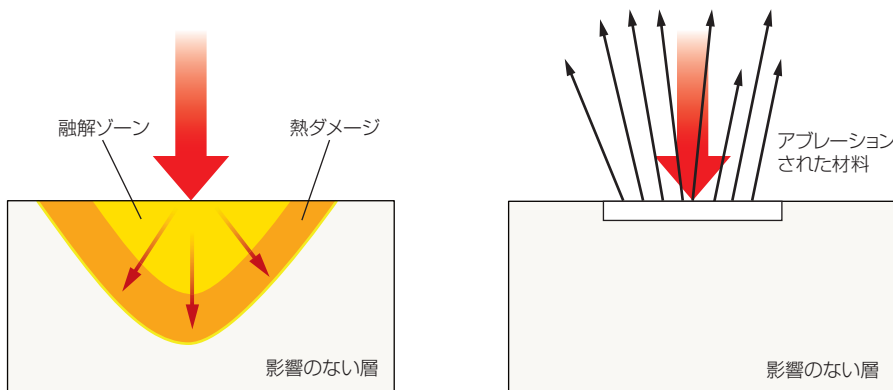


図1 ナノ秒パルスとフェムト秒パルスの効果を比較した。左のナノ秒パルスはアブレーションが起る前に表面の材料を融解し、その熱が隣接領域に伝わり、材料の広い範囲を改質した。右のフェムト秒パルスは、隣接材料への熱伝導なしに、多光子イオン化によって材料をアブレーションした。

一般にピコ秒アブレーションは、そのパルスが運ぶエネルギーが通常よりも多いため、高速になる傾向がある。一方フェムト秒アブレーションは、より滑らかで、より精密な表面を生み出す傾向がある。実際の性能はパルスパラメータ、ターゲット材料、その他の考慮事項に依存する。繰り返し率は、アブレーションによってビーム光路内に材料が飛び散るため、重大である。メガヘルツの繰り返し率では、1つのパルスで発生したブルームが十分に散逸する前に、次のパルスが着火される。キロヘルツの反復率は、材料が散逸するのに十分な時間を許容するため、材料のより精密な除去に有効である。

## 材料加工

コールドアブレーション工程は金属、半導体、ガラス、結晶、セラミックなどの各種材料に適用することができる。コールドアブレーションの典型的なしきい値は、イッテルビウム (Yb) ファイバと Ti: サファイアレーザからのフェムト秒パルスを使った場合、表1に示されるように  $0.05 \sim 5 \text{ J/cm}^2$  の範囲であった<sup>(2)</sup>。

超短パルスは、特に、ガラス、セラミック、シリコン、CIGS (薄膜太陽電池で使われているセレン化インジウムガリウム銅) などの脆い材料の切削または加工に好適である。アブレーション工程は、ガラスの穴あけまたは切断における亀裂発生を避け、図2に示されるように、鋭く、クリーンなエッジと表面を作り出す。液晶ディスプレイまたは携帯電話に使われる薄いガラス板は、一列に並んだコールドアブレーションレーザドリル穴に沿って機械的圧力を加えることにより目的の形状へと切断される。アブレーションは高しきい値の非線形プロセスであるため、レーザパワーが焦点の中心位置においてだけ

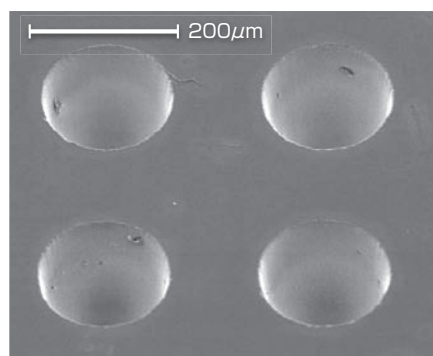
表1 金属、半導体、および誘電体のアブレーションしきい値 ( $\text{J/cm}^2$ ) \*

材料	ファイバレーザ	Ti: サファイア
銅	0.47	0.37
アルミニウム	0.071	0.085
チタン	0.12	0.1
スズ	0.058	0.057
ステンレス鋼	0.087	0.063
リン化インジウム	0.05	0.038
リン化ガリウム	0.053	0.04
ゲルマニウム	0.08	0.075
シリコン	0.12	0.1
サファイア	1.9	1.9
熔融石英	2.9	3.6

\* 1045nm Yb ファイバレーザからの200kHz、350fsパルス (中列) と780nm Ti: サファイアレーザからの1kHz、150fsパルス (右列) の場合。(データ出典は参考文献5)

アブレーションしきい値を超えるようにパルスを集光させれば、回折限界よりも小さい穴をあけることができる。

プロセス動力学は、シリカ・オン・シリコンのような薄膜の場合、複雑になることもある。ピコ秒パルスは、シリカを上部から下部へとアブレーションするのではなく、透明なシリカを通り抜けてシリコンを融解し、それから融解物を十分に蒸発させ、薄膜を基板から浮き上がらせる、と独ハーメルン太陽エネルギー研究所 (Institute for Solar Energy Research Hameln) のソニア・ヘルマン氏 (Sonja Hermann) のチームは報告している。それゆえ、しきい値



は  $\text{SiO}_2$  厚みに依存する<sup>(3)</sup>。

高開口数の光学系を使って集光させたピコ秒パルスは、パワー密度が焦点位置でかなり高くなるため、表面への影響なしにガラスまたは他の透明材料内部にエッチングを行うことができる。例えば、北京工科大学 (Beijing Institute of Technology) のベニェ・リー氏 (Benye Li) のチームは、Ti: サファイアレーザからの35fsパルスを使ってシングルモードファイバのコア面に長周期のファイバブラッググレーティングを描画した<sup>(4)</sup>。このグレーティングは1465~1575nmバンド内に20dBの減衰を作り出した。バルクガラス内部の熔融石英導波路に複屈折を導入することによって、カナダのトロント大学 (University of Toronto) のルイス・フェルナンデス氏 (Luís Fernandes) のチームは消光比が最高24dBの2cm長の波長選択方向性結合器を製作した。彼らは、このスプリッタが、「3次元光回路内の偏光依存デバイスの創製に向けて新しい道筋を切り開くであろう」と報告している<sup>(5)</sup>。

## ナノ粒子とナノファイバ

超高速レーザはパルスレーザ蒸着に対しても新しい展開を提供する。ナノ秒レーザパルスが薄膜堆積の標準であ

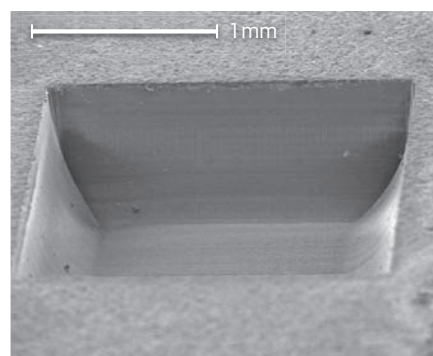


図2 ガラスの超高速パルスマイクロマシニング。a) 355nmの10μJパルスを使ってガラス中に開けられた440μmの穴。b) 355nmパルスでパイレックス中に開けられた2mm四方の領域。(資料提供: コヒーレント社)

ったが、それらは膜上に10 $\mu$ mの液滴をはね散らすこともある。アイルランドのトリニティ・カレッジ ダブリン大学(Trinity College Dublin)のイナム・ミルザ氏(Inam Mirza)とジェームズ・G・ラニー氏(James G. Lunney)は、ナノ秒パルスによって銀ターゲットから生成されたフラックスを試験した時に、表面で多少の自己スパッタリングが起きていることを裏付ける、堆積速度を超えるイオンフラックスを見出した。しかし、フェムト秒パルスを使った時には、生成させたイオンフラックスが堆積速度のたった1%にすぎないことを見出した。これはアブレーションされた材料の大半がナノ粒子を形成していることを示唆している<sup>(6)</sup>。他の研究からは、フェムト秒パルスによって作り出されたナノ粒子のサイズがレーザーフラックス、ガス環境、ターゲット材料に依存することが示された。

カナダのライアソン大学(Ryerson University)のクリシュナン・ベンカタクリシュナン氏(Krishnan Venkatakrishnan)のチームは、フェムト秒パルスが濃密にもつれた多量のシリカナノファイバを容易に生成すると報告した。Ybファイバからの214fsパルスの12.4 MHz列をシリコン上に最高1.17J/cm<sup>2</sup>の強度で集光させることによって、4タイプのナノフィラメントが生成した。最大は直径が数百ナノメートルで、長さが10mmほどと長かった。最も微細なファイバは直径が数10ナノメートルであり、数百ミクロンまで伸長された。しかし、もつれのために詳細に調べることはできなかった<sup>(7)</sup>。

## 医療用途

周辺領域の損傷または粗いエッジ形成なしでクリーンに切断する超高速パルスの能力は、医用インプラントの加

工と繊細な外科手術の双方において不可欠である。

滑らかな表面は、特に、ステント(詰まった動脈に挿入して、血流を回復させるために利用する拡張可能な管)において重要である。身体は、ステントを癒痕組織で覆ってインプラントと反応し、動脈を再び詰まらせることが時折ある。各種材料からなるステントの超高速レーザー加工は非常に滑らかな表面を作り出すため、癒痕組織成長の可能性を減らす。

フェムト秒レーザーはまた、レーシック(LASIK)屈折矯正手術において内部を露出させるために角膜の表面にフラップを切り込む標準的手段になった。主な魅力は、従来の外科手術に比べてかなり正確にフラップを切りこめるその能力にある。

今や、眼科医は白内障手術にまでフェムト秒レーザー技術を拡張し始めた。目標の1つは、白内障を起こしている水晶体の硬化した中心部を軟化させることであり、その部分が容易に除去された。もう1つは、水晶体を除去して、眼の他の部分への損傷を最小にして置換物を挿入するのに必要とされる切開を実行することだ。3つのメーカーが両プロセス用のフェムト秒レーザーシ

テムを開発している<sup>(8)</sup>。

結果はこれまでのところ有望である。10月の米国眼科学会の会議で、マイアミ医科大学(University of Miami School of Medicine)のバスコムパーマー眼科研究所(Bascom Palmer Eye Institute)のウィリアム・カルバートソン氏(William Culbertson)は、フェムト秒レーザー処置は外科手術の必要性を緩和し、レンズ除去中の超音波照射を軽減すると報告した。同会議で、米オレゴン保健科学大学(Oregon Health and Sciences University)のマーク・パッカー氏(Mark Packer)は、フェムト秒レーザー手術は、従来の白内障手術で損なわれがちであった、重大な角膜内皮細胞の損失を避けることができると報告した。

## 将来展望

超高速処理はピコ秒とフェムト秒レーザーの産業化のおかげで、専門家でなくとも産業や医療環境で利用できるようになった。これまで、超高速処理はニッチ用途で最大の成功を収めてきたが、コストと物質除去速度が重大な課題として残っている。しかし性能の利点が、ステント製造や繊細な眼科手術といった用途を強固に実現させた。

## 参考文献

- (1) P. Targowski et al., "Picosecond laser ablation system with process control by Optical Coherence Tomography," Proc. SPIE, 7391, 7391-15(2009).
- (2) IMRA, Technical Note T-0401, "High Precision Machining"; <http://www.imra.com/pdf/TechNoteT0401.pdf>.
- (3) S. Hermann et al., "Picosecond laser ablation of SiO<sub>2</sub> layers on silicon substrates," Appl. Phys. A, 99, 151-158(2010); doi:10.1007/s00339-009-5464-z.
- (4) B. Li et al., "Femtosecond laser fabrication of long period fiber gratings and applications in refractive index sensing," Optics & Laser Technol., 43, 1420-1423(2011).
- (5) L.A. Fernandes et al., "Femtosecond laser fabrication of birefringent directional couplers as polarization beam splitters in fused silica," Opt. Exp., 19, 11992(June 20, 2011).
- (6) I. Mirza and J.G. Lunney, "Fabrication of metal nanoparticle films using pulsed laser deposition," 30th ICPIG, Belfast, Northern Ireland, UK (Aug. 28-Sept. 2, 2011); [http://mpserver.pst.qub.ac.uk/sites/icpig2011/187\\_D13\\_Mirza.pdf](http://mpserver.pst.qub.ac.uk/sites/icpig2011/187_D13_Mirza.pdf).
- (7) K. Venkatakrishnan et al., "Nanofibre fabrication by femtosecond laser ablation of silica glass," Opt. Exp., 19, 15776(Aug. 15, 2011).
- (8) L. He, K. Sheehy, and W. Culbertson, "Femtosecond laser-assisted cataract surgery," Current Opinion in Ophthalmol., 22, 43-52(January 2011); doi:10.1097/ICU.0b013e3283414f76.