

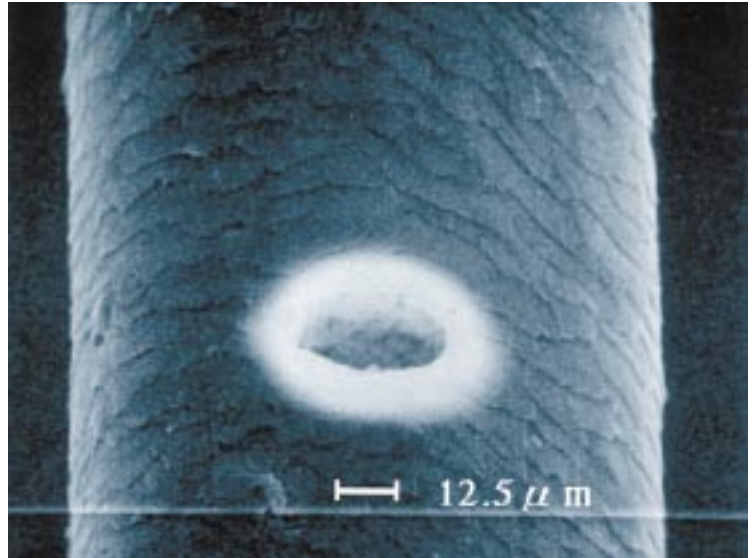
2001, Oct.

No. 163

CONTENTS

- 超微細加工を可能にするフェムト秒レーザー
- 第5回フェムトケミストリー国際会議 (FCV 2001)に参加して
- 『光と蔭』ブラックホール

【写真】人の毛髪(100 μ m)をターゲットとして、集光スポット100 μ mよりも十分小さな20 μ mの加工を達成



超微細加工を可能にするフェムト秒レーザー

レーザー環境応用計測研究チーム 研究員 橋田昌樹

フェムト秒レーザーによるアブレーションしきい値加工
超短パルスレーザーアブレーションは、熱的な影響を軽減でき、レーザーとプラズマとの相互作用がないことから、さまざまな応用(精密加工、元素分析、新機能性材料創成、レーザー除染等)の高性能化にむけての研究がすすめられている。なかでも、フェムト秒レーザーのアブレーションしきい値加工は、光学系の最適化により、集光スポット径よりも小さな径(数 μ m以下)の加工が可能となることから注目を集めている。

この最適化のために、フェムト秒レーザーアブレーションに関する理論が重要となる。これまで理論計算に関して、多くの研究論文が出版されてきた。しかしながら、特定のパラメータ(レーザー波長、パルス幅、レーザーフルエンス、標的物質、標的の表面状態)の時にのみ有効なもので、パラメータの1つが変われば適用できないものが少なくない。現状では、微細加工に必要とされるアブレーションしきい値やアブレーション率は、実験的に調べられている。当研究所では、実験データの構築を進めつつ統合コードの開発も行っている。統合コードが完成すれば、物理データのみから、微細加工のための最適条件を計算することができる。ここでは、これまで蓄積してきた微細加工のための実験結果を紹介する。

微細加工に必要なデータを短時間に取得

レーザー加工をナノメートルで制御するためには、アブレーションしきい値を正確に知ることが鍵となる。アブレーションしきい値は、一般に、アブレーション率のレーザーフルエンス依存性から求められる。アブレーション率は1レーザーパルス照射当たりのクレーターの深さを意味する。アブレーション率 L は、次式で表記される。

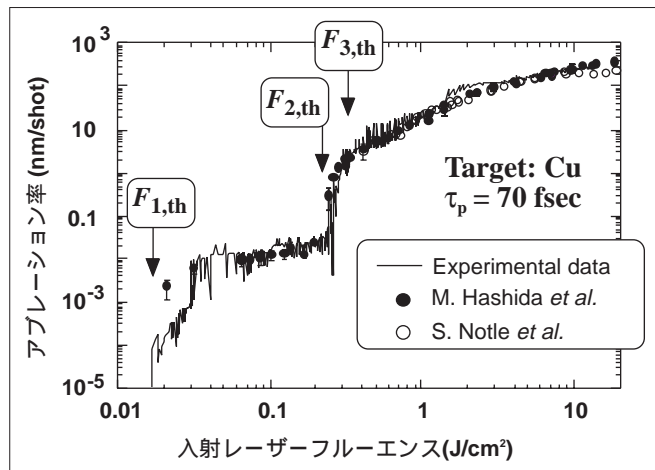
$$L = \frac{1}{\alpha} \ln \left(\frac{F}{F_{th}} \right) \quad (1)$$

ここに、 λ^{-1} は光侵入長(cm)、 F は入射レーザーフルエンス(J/cm^2)を示す。上式から、アブレーションしきい値 F_{th} は $L=0$ となるレーザーのフルエンスから評価される。図1に銅の実験結果を示す。これまでの実験では、アブレーション率のレーザーフルエンス依存性を得るため、その分析に数ヶ月程度の時間を必要としていた(図中の、で示した実験結果)。当研究所で新たに開発した分析手法では、数時間でアブレーション率のレーザーフルエンス依存性を得ることができ(図中の実線)、同時にアブレーションしきい値を高精度で評価できる。本手法により、実験条件(レーザー波長、パルス

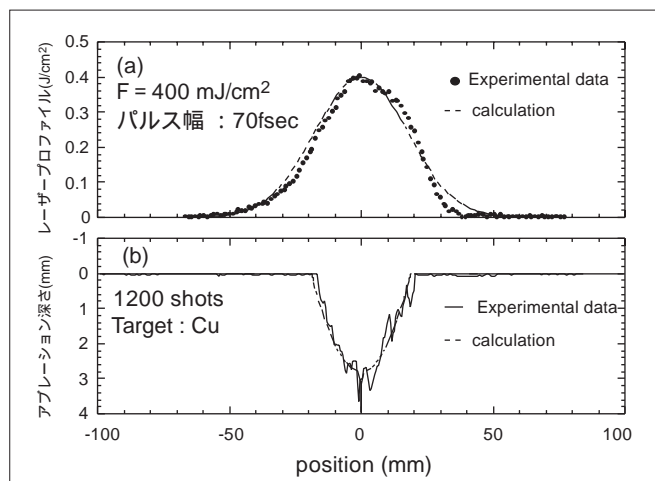
次ページへつづく▶

(前ページよりつづく)

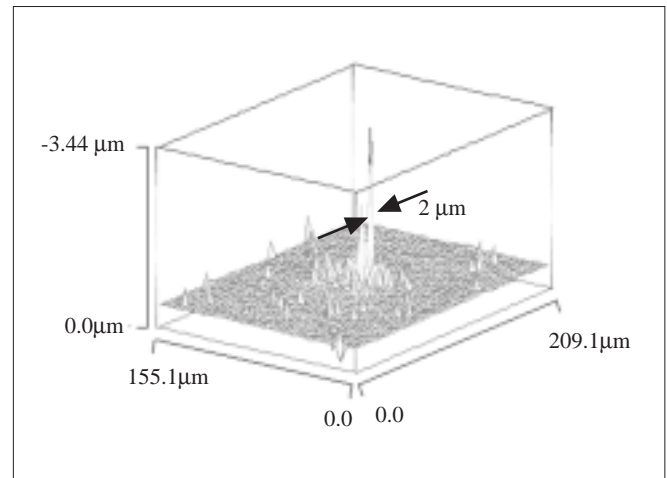
幅、レーザーフルエンス、標的物質、標的の表面状態、雰囲気ガス種)が異なる場合でも、アブレーションしきい値、アブレーション率を短時間に高精度測定を可能にした。結果から、銅のアブレーションしきい値は3つ ($F_{1,th}$ 、 $F_{2,th}$ 、 $F_{3,th}$)あることがわかった。



【図1】アブレーション率のレーザーフルエンス依存性 (レーザー波長800nm)



【図2】銅表面の加工痕形状の予測結果と実験結果 (レーザー波長800nm)



【図3】アブレーションしきい値加工は、集光スポット50μmよりも遥かに小さな2μmの加工を可能にした(レーザー波長800nm)

われわれの成果により加工形状が容易に予測可能

レーザー加工形状は実験結果(アブレーションしきい値、アブレーション率)を使って予測することができる。ここで、集光スポットでのレーザーの空間プロファイルは径が50μmガウス関数を仮定(図2(a)の破線)、図2(b)の破線は、銅表面の加工形状の予測結果を示す。その正しさを確かめるための実験結果を図2(b)の実線で示す。実験結果は、アブレーションしきい値フルエンス(0.25 J / cm²)を超える位置で明白なアブレーションが起こっており、予測した加工形状と非常に良い一致を示している。金属元素(Cu、Al、Fe、Ni、Mo、Zn、Pb)について実験結果を得ており、加工形状は予測どおりであった。

フェムト秒レーザーを使ったナノメートル加工への展開

図3には、アブレーションしきい値加工によりにできた銅の表面の微細加工形状を示す。加工痕の直径は約2μm、深さは3.4μmであった。加工痕の直径はレーザーのスポット径50μmよりも遥かに小さい。今後、パラメータ(レーザー波長、パルス幅、集光光学径等)の最適化を行えば、容易にナノオーダーの加工を可能にする。アブレーションしきい値加工は、熱的な影響を軽減できるフェムト秒レーザー特有の現象を利用したものである。

第5回フェムトケミストリー国際会議 (FCV 2001)に参加して

レーザーバイオ科学研究チーム 研究員 ハイク・コスロービアン

はじめに
去る9月2日から6日にトレド(スペイン)のCastilla-La Mancha 大学(UCLM)で開催された第5回フェムトケミスト

リー国際会議(Femtochemistry-V Conference: FCV2001)に参加した。トレドは首都であるマドリードから70km程度離れたところに位置する。古くは王国の首都として栄えた町であり、世

界遺産として世界で初めて認定されたことでも知られている。

この国際会議は、フェムト秒領域での分子科学の基礎的な側面や、それらに関連した新たな研究手法にスポットを当て、1993年からスタートし以後2年に一度開催されている。今回の会議においても20ヶ国以上の国々から多くの研究グループが集まり、気相やクラスター、溶相、ナノストラクチャー、固相、ポリマー、表面や界面、生体システムなどのフェムト秒領域での研究や、新しい技術や制御などに関する興味深いトピックが多数報告された。参加者は225名に上り、47件の口頭発表と130件のポスター発表があった。発表はEUの国々あるいは米国の研究グループによるものが主であったが、驚いた事に日本からの発表は我々のグループを含めて4件しかなかった。日本においてもこの分野での研究は盛んに行われているのだが、今回に限っては開催場所と日程が日本にとっては良くなかったのかもしれない。また今回の会議はこの研究分野からノーベル化学賞(1999年)受賞者が出て以来最初の開催であり、受賞者であるAhmed H. Zewail教授(California Institute of Technology)の功績(フェムト秒分光による化学反応の遷移状態)をたたえるセ

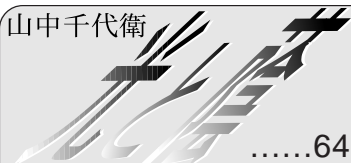
レモニーと記念講演が行われた。以下に、発表の中から筆者が興味をひかれたトピックについて述べる。

超短X線パルス発生

シンクロトロンによるX線分光は、原子レベルでの物質の“静的”な構造を観測する有効な手段であることが示されているが、時間分解測定に関しては、その分解能は30ピコ秒以上に限られていた。このタイムスケールは原子の動きの時間領域(~100フェムト秒)に比べ100倍以上長い。このため、原子あるいは分子の超高速の構造ダイナミクスを観測するためには、より時間幅の短いX線パルスを用いる必要がある。これに関連して、Lawrence Berkeley National Laboratory(LBL、米国)のR. W. Shoenleinらから、超短X線パルス(100フェムト秒以下)発生 of 新しい手法についての報告がなされた。現在彼らのグループによりLBLのAdvanced Laser Systems Divisionにおいて超高速X線分光のためのシステムが構築されつつあり、化学、物理、生物など各分野への幅広い応用が考えられる。また、Technical University Vienna(オーストリア)の研究グループ

次ページへつづく▶

山中千代衛



.....64

ブラックホール

産業の空洞化が叫ばれて、早くも10年を経過しようとしている。生産大国日本の行方が心配される昨今である。大企業から中小企業まで、生産拠点の工場を海外に移転する動きは止まりそうにない。高賃金のわが国において、ものづくりは成り立たなくなりつつある。もちろん高品質で他の追随を許さぬ製品に関しては、なお国内生産が続けられているが、それも見方によっては時間の問題とも言えるのではなからうか。

まず考えられる原因はIT技術の発達である。地球上のいかなる所からでも、意欲さえあれば先端技術の情報がたやすく入手できるのだ。したがって新技術により開発された高価値の製品はその高い技術ポテンシャルの魅力が人々を引き寄せ、すぐに平準化が起こるのである。言い換えれば、絶えず新技術の開発を推し進め、あらゆる手段を講じてトップを走りつづけて初めて先進国たり得るのだ。新技術のソースを生みつづける努力が研究開発サイドに強く求められる。そのために必要なインセンティブをどう保つか、大切な政策課題であろう。

もう一つは、国民の勤労意欲と給与の問題である。戦後ジャーナリズムが無邪気に宣伝した日本人ワーカホリック説は、知ったかぶりもいいところ。無残にも邦人の気質を変えてしまった。勤勉と質実が欠点であるかのような受け取り方をする若者が増えている。3Kなどという文言も馬鹿なジャーナリストのたわごとだ。世の中には仕事はいろいろあり、分担してこなしていかなければならないのは当たり前のことで、きれいごとだけを手掛け、他は放置して済むものか。

ところで中国は人口12億人、共産党一党支配の資本主義国である。まことに妙な組み合わせであるが、個人主義と資本主義の融合具合は米国にひけをとらない。しかも一般大衆の賃金はわが国に比べ、沿岸地域で10分の1、内陸部で30分の1という。この人たちは、かつての文化革命時代とは様変わりし、極めて強い利益追求心と勤労意欲を持っている。このため日本企業は生き残りをかけて、労働力の豊富な中国にまるでブラックホールに吸い寄せられるように、国内から流出しているのである。

わが国は長所とする組織力と高い教育水準を礎に、かつては存在した強靱な精神力を回復しなければ経済産業大国日本の21世紀はない。考えてみればこの50年、次代を担う後継者育成に大いなる誤りがあったのではなからうか。これは歴史認識にもとづくテーマでもある。

【(財)レーザー技術総合研究所 研究所長】

(前ページよりつづく)

ブからは、7フェムト秒、1.6eVのドライバーパルスの高次高調波を利用した軟X線シングルパルス(1.8フェムト秒、90eV)の発生手法についての報告がなされた。これまでも高繰り返しのアト秒パルスについては報告例があるが、パルストレーン間隔が非常に短い(1~2フェムト秒)ため、実際の研究への適用範囲は限られたものであった。これに対し、ここで報告された軟X線シングルパルス発生とそれをを用いた測定技術は、励起光電場よりも速い原子過程の直接的な追跡を可能とし、サブフェムト秒分光や本格的なアト秒科学への新たな道を開くものとして期待される。

化学反応のコヒーレントコントロール

Wuerzburg University(ドイツ)のG. Gerberらから、化学反応のコヒーレントコントロールに関する画期的な報告がなされた。科学者にとって分子(分子システム)の反応を自由に制御することは長年の課題であるが、近年フェムト秒レーザー技術を用いて分子システムをコヒーレントに制御する事により、分子反応経路の選択が可能であることが示された。しかしながら、各分子に最適な励起パルスの位相条件の設定など実験的には困難な点が多い。これに対し、彼らはコンピュータによって位相制御が可能なフェムト秒パルスレーザーを用い、複数存在する光分解反応経路のうち、必要とする経路の反応効率を自動的に最適化するシステムを開発した。この手法は、必要とする反応生成物の生成量をモニタリングし、その情報をEvolutionary Algorithmと呼ばれるアルゴリズムを通してコンピュータにフィードバックする事により、生成量が最大となるように励起パルスの位相を徐々に最適化していくというものである。これは反応制御の条件を実験的に求める手法であり、理論的予測が困難な多原子分子系にも広く応用できる可能性があることを示している。彼らは、 $C_5H_5F(CO)_2Cl$ における2種類の光解離反応のうち一方のみを選択的に引き起



【写真2】トレド市の眺め。キリスト教、イスラム教、ユダヤ教の3つの宗教が共存している都市であり、“3つの文化の都市”、“小エルサレム”などと呼ばれる。市内には古い教会、ユダヤ教会、モスクが近接して建ち並んでいる。

こし、その結果、実験条件により2つの異なった反応生成物を別個に生成させる事に成功している。また、 $Fe(CO)_5$ 、 CH_2BrCl などの複雑な分子においても、分子に関する情報や実験条件などの初期条件を設定せず、アルゴリズムのみにより反応制御の条件を最適化することにも成功している。この報告は化学反応制御という研究領域で一つのブレイクスルーとなり得、反応副生成物の生成を抑え、最大効率で化学合成を行うための最初のステップとなるものと思われる。

フェムトバイオロジー

今回の会議では光生物学に関する多くの報告があり、光集光性バクテリアの機能や光合成における光エネルギー集積過程のメカニズム、ポルフィリン誘導体の電子移動過程、ミオグロビンのダイナミクスなどについての報告が興味深かった。生物系のレーザー分光による研究は最近特に増えている。次の会議名は“Femtochemistry”から“Femtochemistry and Femtobiology”に変更されるかもしれない。

なお、この会議で報告された研究は、“Femtochemistry and Femtobiology”というタイトルで書籍にまとめられ、翌年4月に出版(World Scientific Publishing House)される予定である。興味のある方は参照されたい。



【写真1】筆者(写真左)と他国からの会議参加者。Castilla-La Mancha大学構内にて。



10月26日は原子力の日です。

掲載記事の内容に関するお問い合わせは、編集者代表
藤田雅之(TEL&FAX:(06)6879-8732,E-mail:m Fujita@
ile.osaka-u.ac.jp)までお願いいたします。