

ヨーロッパにおけるレーザー微細加工に関する 研究開発動向調査報告

(株)ニューガラスフォーラム ナノガラスつくば研究室

成田 善廣

Report on Research and Development of Laser Micro-processing in Europe

Yoshihiro Narita

Tsukuba Research Laboratory, NEW GLASS FORUM

1. はじめに

我々は現在新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託を受け平成13年度よりナノガラス技術プロジェクト¹⁾を行っている。このプロジェクトで重要な技術の一つが超短パルスレーザーである。しかし我々はあくまでユーザであり、超短パルスレーザーの商業利用の可否が本プロジェクトの成功を左右すると考えられる。そこでレーザー微細加工技術の最新動向を探るため、レーザー加工の商業化に力を入れているドイツを中心に関連するヨーロッパの研究機関を訪問して情報収集を行ってきた。表1に訪問先をまとめた。

Nanofair 2003はスイスのナノテクノロジー国家プロジェクトTOP NANO 21主催で行われた国際展示会であり、産業技術総合研究所とNEDOが共同で展示を行った。NEDOの展示ではNEDOのナノテクノロジーへの取組みと

ともにナノカーボン、ナノガラスプロジェクトの紹介を行った。訪問先の内訳は短パルスレーザーのメーカ2、レーザーの研究機関5、その他3の計10ヶ所である。

2. 短パルスレーザーの研究開発動向

Ti:Sapphireを用いたフェムト秒パルスレーザーはその広い利得帯域から数fsの短パルス発生が可能であり、現在までに多くの研究^{2),3)}がなされてきている。バルク結晶を用いてコヒレント、スペクトラ・フィジックス、フェムトレザーズなどがフェムト秒パルスレーザーの製品化を行っている。近年ではこのほかにも希土類添加光ファイバ（製品化イムラ・アメリカなど）、レーザー結晶（Ti:Sapphire, Nd:YAGなど）の薄円盤（シンディスク、製品化タイムバンドウィズ）などを用いて数10から数100fsのレーザーパルスが発生可能となってきている。これら光ファイバ、シンディスクを用いたフェムト秒パルスレーザーは比較的新しい製品であり、今後の展開が期待される。

今回訪問した2ヶ所のメーカ（フェムトレ

〒300-2635 茨城県つくば市東光台5-9-9
筑波研究コンソーシアム第2サテライト2F
TEL 029-848-1880
FAX 029-848-1882
E-mail: narita@ngp.trc-net.co.jp

表1 訪問先一覧

月日	訪問先	面会者(代表)
9/01(月)	Univ. of Cambridge (イギリス)	Adrian Welford (Prof. Ian White の代理)
	Hitachi Cambridge Lab. (イギリス)	Dr. Hiroshi Mizuta
9/02(火)	Univ. of Southampton (イギリス)	Prof. David N Payne
9/03(水)	FEMTOLASERS (オーストリア)	Andreas Stingl
9/04(木)	Friedrich-Schiller-Universität Jena (ドイツ)	Prof. Andreas Tuennermann
	IPHT (ドイツ)	Prof. Hartmut Bartelt
9/05(金)	Universität Stuttgart (ドイツ)	Prof. Friedrich Dausinger
9/09(火)	EMPA (スイス)	Dr. Xaver Edelmann (Prof. Louis Schlapbach の代理)
9/10(水)- 11(木)	Nanofair 2003 (スイス)	
9/12(金)	ETH (スイス)	Dr. Ruediger Paschotta (Prof. Ursula Keller の代理)
	Time-Bandwidth Products (スイス)	Ph.D. Thomas Ruchti

ザーズ, タイムバンドウィズ) はそれぞれウィーン工科大学, スイス連邦工科大学 (ETH) からのスピノフである。フェムトレレーザーはチタンサファイア結晶を用いた短パルスレーザーを製品化しており, そのパルス幅 12 fs は現在製品となっているもののなかで最も短い。特長としてはチャープ誘電体ミラーの使用により高品質なレーザーパルスを発生可能なことである。今後の展開としてはキャリアエンベロープ位相の制御による短パルス (~5 fs) の安定発生⁴⁾, 過飽和吸収ミラーによるレーザー発生のセルフスタート, 安定化に力を入れていくようだ。一方タイムバンドウィズでは ETH での研究成果に対応して高出力, 高繰返しのパルスレーザーの製品化を目指している。特長は ETH で考案され, 製造されている半導体過飽和吸収ミラー (SESAM) を用い, Stuttgart 大のシンディスクをレーザー発生源としていることである。シンディスクの特長はレーザー媒質が薄いので熱効果が低減できる, SESAM によるソリトンモード同期により短パルス発生するため励起光源のビーム品質 (M^2) が悪くてもよいことである。このため高出力, 高繰返しの短パルスレーザーを低価格にすることができる。残念ながら現状はフェムト秒パルスレーザーは繰返し 100 MHz, 出力 500 mW のもの (オシレータ) しか製品化してないが, 今後アンプシステムにつ

いても製品化の予定である。私個人としては高出力 (数十 W), 高繰返し (数十 MHz) なサブピコ秒レーザーが低価格で製品化できれば, レーザ照射による三次元光回路形成の商業化がぐっと近くなるのではと感じているので ETH の研究成果と今後の進展については非常に興味を持っている。

次に研究機関での動向についてまとめる。サウサンプトン大, イエナ大, IPHT では高出力のファイバレーザーの研究を行っている。IPHT は州立の研究機関でイエナ大と共同研究を行っている。サウサンプトン大は光ファイバ (フォトリソグラフィッククリスタルファイバを含む), 希土類添加光増幅ファイバの研究では世界のトップである。パルスレーザーではないが, CW シングルモード光ファイバレーザーで出力 1 kW を達成⁵⁾している。イエナ大でも同様のレーザーで出力 700 W を達成している。現在高出力ファイバレーザーの最大手メーカーである IPG (ロシア) は CW シングルモードファイバ出力で 300 W, マルチモードファイバ出力で 10 kW のシステムを既に製品化⁶⁾している。今後ヨーロッパでのファイバレーザー高出力化競争の展開が楽しみである。短パルスファイバレーザーに関してはイエナ大で出力 75 W, パルス幅 350 fs を達成している。シュツットガルト大学ではシンディスクを特徴とするピコ秒パルスレーザーの研

究開発を行っている。商業化に直結する研究のため企業との共同研究が多い。日本ではフェムト秒レーザというとまだまだ研究用レーザという感があるが、ヨーロッパ（特にドイツ）では既に製品化を目指した研究開発が進められている。ETHではSESAM、シンディスク（シュットガルト大との共同研究）を用いた高出力、高繰返しの短パルスレーザ（ピコ秒、フェムト秒）の研究を行っている。高出力では出力72 W、パルス幅800 fs、繰返し56 MHz、高繰返しでは出力110 mW、パルス幅ピコ秒、繰返し157 MHzまで達成している^{6),7)}。

3. ドイツにおけるレーザ微細加工の研究開発

ドイツではフェムト秒パルスレーザの国家プロジェクト「フェムト秒テクノロジー」(1999-2004年)が行われており、ポッシュ・ダイムラークライスラーがレーザ微細加工技術開発のため参入している。このほかにもカールツァイス・パーフェクトビジョン⁸⁾が医療分野（歯科、眼科治療など）でフェムト秒パルスレーザを用いた治療装置を開発し、製品化段階となっている。このプロジェクトで行われているレーザ微細加工の研究開発の成果について簡単に説明する。多くの微細加工においては最適なパルス幅はピコ秒（10 ps程度）である。これはナノ秒では熱の影響、フェムト秒ではプラズマ形成による加工形状の劣化が生じるためである。ただし、ダイヤモンドの加工や医療用途についてはフェムト秒レーザが有利である。フェムト秒レーザ加工では加工部を減圧することによりプラズマ形成が抑制できる。金属のアブレーション加工を行う際、照射レーザの偏光方向と加工形状に相関がある。常に加工方向と平行な偏光となるようにレーザを走査すると表面が平滑な加工が可能である。また、回転するウエッジ基板によりレーザビームを円錐状に回転させて任意のテーパ角をもつ加工断面を形成できる

（例：入口150 μm 、出口220 μm ）。このような微小孔は高効率なインジェクションノズルとして用いられる。また、エンジンのシリンダー内壁表面に微細構造形成することにより摩擦の低減にも役立つ。興味のある方はプロジェクトのHP⁹⁾から担当者に連絡することをお勧め致します。微細加工はPRIMUSプロジェクト、医療はMUSKLプロジェクトをご参照下さい。

4. Nanofair 2003 展示会

展示会はチューリッヒから電車で東に1時間、ボーデン湖に程近いザンクトガレンのオルマメッセにて行われた。ザンクトガレン¹⁰⁾は世界文化遺産に指定されている修道院と大聖堂・付属図書館のある人口7万人の市である。また古くから繊維・織物業の盛んな街でもある。展示会での出展者は79団体あったがTOP NANO 21の成果報告会という色合いが濃く、ほとんどが関連する機関の展示である。ナノテクノロジーの展示会ということで半分くらいの展示はSPM関連（装置、プローブ、ナノステージなど）であった。スイスにはIBMチューリッヒ研究所があり、1986年にSTMの発明で2名のノーベル賞受賞者を輩出しているため非常にこの分野の研究が盛んである。この100年のノーベル賞受賞者数（物理学、医学・生物学、化学）を比べるとスイス15、日本9である。日本と比べて面積1/10、人口1/20であるにもかかわらず、圧倒的にスイスが多いことに驚いた。またドイツに隣接しているためか、あるいは精密機械工業が発達しているためか、微小光学部品のメーカーもいくつかあった。しかし、比較的小規模な企業が多く顧客はスイス国内かヨーロッパ内である。TOP NANO 21における対象分野は生命科学・ツール&センサ・光学&電子部品・材料&表面・サービス・教育&研究と非常に多岐にわたっている。日本のナノテクノロジープログラムの1/10ほどの予算ながら250以上のプロジェクトを行って

おり、Nano Conference のポスターセッションも 172 件あった。Nanofair 2004 は 2004 年 9 月 14 日から 16 日に同じ場所で開催される¹¹⁾。

5. その他の訪問先

ケンブリッジ大学はヨーロッパでもっとも古い大学のひとつである。工学部の光通信関係の研究室を見学したが、マルチモード通信・短距離高速通信・アナログ通信など日米の光通信の研究とは一味違った研究を続けていた。日立ケンブリッジ研究所では高密度メモリ・ナノエレクトロニクス・量子情報などの研究を行っている。光学特性評価のためにフェムト秒パルスレーザーを作製していた J. J. Baumberg がサウサンプトン大に教授として移籍して面会できなかったのが残念であった。キャベンディッシュ研究所（ケンブリッジ大の物理学科）はマックスウェル、レーリー、トムソン、ラザフォード、ブラッグが研究所長を歴任してきた研究所であり、多くのノーベル賞受賞者を輩出してきた。展示室にはさまざまな歴史的実験機器があり感無量であった。イエナではアッペ光学博物館も訪れ、顕微鏡・メガネ・望遠鏡などの歴史、カールツァイスやショットとの交流などに胸が熱くなった。EMPA では繊維に連続 CVD コートする装置やナノバイオ関連の実験室を見学した。私の研究分野にはあまり関連ないものであったが、とても興味深い研究であった。

6. おわりに

ヨーロッパは多くの国が比較的近くに位置し、EU などの枠組みもあるため非常に国際的な共同研究が盛んであった。また、学生・研究者の教育プログラムにも非常に力を入れていた。多くの研究者と情報交換することができてとても有意義であった。最後に今回訪問先との日程調整及び同行して調査を援助していただいた NEDO ナノテクノロジー・材料技術開発室山出善章氏ほか関係者各位に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 上杉勝之ほか, NEW GLASS, Vol. 16, No. 1, 3 (2001).
- 2) R. Ell ほか, Optics Letters, Vol. 26, Issue 6, 373 (2001).
- 3) U. Keller, Nature, Vol. 424, 831 (2003).
- 4) A. Baltuska ほか, Nature, Vol. 421, 611 (2003).
- 5) <http://optics.org/articles/news/9/8/23/1>
- 6) E. Innerhofer ほか, Optics Letters, Vol. 28, No. 5, 367 (2003).
- 7) L. Krainer ほか, J. of Quantum Electronics, Vol. 38, No. 10, 1331 (2002).
- 8) <http://www.2010pv.com/en/fset.html>
- 9) <http://www.fgsw.uni-stuttgart.de/fst/english/projects/index.html>
- 10) <http://www.myswiss.jp/area/stgallen.htm>
- 11) <http://www.nanofair.ch>