

# 「フォトン計測・加工技術」プロジェクトの概要

松野 建一

(財) 製造科学技術センター 常務理事・フォトンセンター所長

要約：「フォトン計測・加工技術」プロジェクトは、経済産業省（旧通商産業省工業技術院）の産業科学技術研究開発制度の中で、平成9年度から本年3月末日まで推進された。3分野6テーマの研究開発は順調に進捗して、世界初・世界トップレベルの成果が数多く得られ、ほぼすべてのテーマで最終目標を達成することができた。ここでは、本プロジェクトの背景・経緯、研究開発体制、進捗状況・成果を簡単にまとめる。

## 背景・経緯・体制

レーザーは1960年の発明以降、研究及び技術開発の進展が実に速く、各種のレーザー発振装置及びレーザー利用の計測技術、加工技術、通信技術、医療技術などの発達、並びにそれらの広範囲な分野への普及には目を見張るものがある。

レーザー（フォトンビーム）応用の加工・計測技術は、近年製造業に変革をもたらし、その役割は年々大きくなっているが、今後高品質・高効率レーザーが実用化されれば、製造プロセス・コストの大幅な改善、製品の生産性・信頼性やエネルギー利用効率の大幅な向上につながり、今後の製造業に大変革をもたらす可能性が高いと期待されている。

しかしながら、高出力・高品質のレーザーを高効率・低コストで発生させる技術が未確立であり、またレーザーを高度に利用する加工技術、計測技術には未開拓の領域がまだかなり多く残されている。

そこで、工業技術院では、今世紀における製造業の革新を目指し、産業科学技術研究開発制度のプロジェクトの一つとして、平成9年度から5年計画で「フォトン計測・加工技術」プロジェクトを実施することになり、フォトンの発生、フォトンを用いた加工、計測の3技術分野の中から、6つの研究テーマを選定し、基本計画を策定した。その中には、当時の技術レベルから見ると極めて高い数値を含む挑戦的な最終達成目標が定められていた。表1が各研究テーマの内容、最終達成目標である

これを基に新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）が民間委託先を公募し、国立研究所は工業技術院が公募して、応募の中から技術評価委員の意見を参考にして担当機関が決定された。民間委託先としては（財）製造科学技術センター、国立研は工技院所属の4研究所（昨年4月に独立行政法人産業技術総合研究所として統合）であった。

製造科学技術センターでは、本プロジェクト推進のために、平成9年8月1日にフォトンセンターを設置し、同センターの会員となった13企業・1大学が、国

立研と連携を取り、また大学等の協力を得て研究開発を実施した。各テーマには表1の目標に加えて自主目標や年次目標も設定した。

フォトンセンターに設置された技術委員会及び総合調査委員会で各テーマの進捗状況を把握し、また国内外における関連技術動向の調査等を実施して、研究開発の促進に努めるとともに、NEDOのフォトン計測・加工技術推進委員会の意見も参考にした。図1が本プロジェクトの研究開発体制である。

平成9年8月末にNEDOとの間で委託契約が結ばれて以来、本年3月末日まで実質的研究開発期間は約4年半であったが、各テーマとも即座に立ち上がり、以降順調に進捗して世界初・世界トップレベルの成果が数多く得られ、ほぼすべてのテーマで最終目標を達成することができた。

以下に本プロジェクトの研究開発の進捗状況と最終成果について概要を紹介する。

## 進捗状況及び成果

### (1) フォトン発生技術

「高出力完全固体化レーザー技術」では、ロッド型、スラブ型ともに毎年度の目標出力値を順調に達成し、また発振効率（電気-光変換効率）の向上、レーザーヘッド寸法の縮小化にも取り組んだ結果、最終目標値をすべて達成することに成功した。

ロッド型ではNdをドープした円柱状YAG結晶を発振媒体とし、周囲3方向に励起用LDスタックを配置した独自設計の励起モジュールを開発し、これを6段直列に配置した共振器構成で、平均出力12kW、発振効率23%、レーザーヘッド体積0.045m<sup>3</sup>と最終目標を達成した。

一方、スラブ型ではNdドープの板状YAG結晶を発振媒体とし、結晶の両側面各2方向に励起用LDスタックを配置した、独特の設計の励起光閉じ込め方式を採用し、LDスタックとYAG結晶の間に円柱状レンズと特殊形状フィラーストリップを配置した熱レンズ低減型4方向励起ヘッドを開発し、2台のヘッドの出力

を合成させて平均出力10.2kW、発振効率20.1%、レーザーヘッド体積0.047m<sup>3</sup>を達成した。

「高集光完全固体化レーザー技術」のうち、ファイバーレーザーに関しては、Nd添加コア径90 $\mu$ m、一辺200 $\mu$ mの矩形断面石英ファイバーの作成に成功し、これを巻いて外径220mmの円盤状構造体にして、周囲に配置した12個のLDで励起するモジュールを完成させ、このモジュールを3台直列に連結して出力(ピーク)1kWを達成した。発振効率は17%と目標値にはやや足りなかったが、このファイバーレーザーは我が国独自の発想に基づく世界初の成果である。

また、ファイバーレーザー励起用LDの開発では、Alフリーの新材料InGaAsPを活性層に持つ、1cmバー当たり平均出力80W以上、ピーク出力200W以上、変換効率50%以上と目標値を上回る成果を達成し、独自考案の噴流水冷式高効率冷却方式を採用した励起モジュールに組み立てて、ファイバーレーザーの励起用に供給した。

一方、高エネルギーパルス・高品質レーザーの開発では、独自設計の高効率LD励起モジュールを開発し、これを2台熱変形を打ち消し合うように組み合わせ、平均出力500W、発振効率20%のレーザービームを直径50 $\mu$ mに集光することに成功した後、4台連結することにより、平均出力1kW、発振効率23%、集光径50 $\mu$ m以下を同時に実現し、目標を達成した。

また、新考案の攪拌式結晶育成炉で、レーザー損傷耐力の高い波長変換用CLB0結晶の育成に成功し、難加工材であるこの結晶を高精度切断・超精密研磨加工後、防湿パッケージして波長変換素子に組み上げる技術を完成させて、グリーンレーザー光(波長532nm)から世界最高値である出力42Wの紫外レーザー光(波長266nm)の発生に成功した。また、出力20W超の紫外光を約100時間連続発生させて安定動作を実証した。

## (2) フォトン応用加工技術

「マクロ加工技術」では、レーザー溶接時のインプロセスモニタリング技術の開発、欠陥防止のための最適溶接条件の解明、制御手法の開発等を行った後、高品位レーザー溶接システムを開発した。

そして、YAGレーザーとよう素レーザー(波長がYAGとほぼ同じ)の出力の合成ビーム(23kW)を用いて、窒素ガス雰囲気中で板厚30mmのステンレス鋼及び板厚20mmのアルミニウム合金板を、1.0m/分以上の速度、高アスペクト比(板厚/溶接幅)で、欠陥を生ずることなく、高品位溶接できることを実証した。溶接部の強度試験も行って、母材と同様以上の強度を確認した。また、YAGレーザーと紫外レーザーのハイブリッド溶接実験も行い、入熱・溶接溶け込み深さを約5%増加させる効果を確認した。

「ミクロ加工技術」では、量子型発光素子の形成

を目指すシリコン超微粒子で平均粒径2~10nm、量子機能回路形成の形成を目指すタングステン等高融点金属超微粒子で平均粒径20~50nmの超微粒子を作製する技術を確立し、電気移動度分級法(DMA)により、いずれの超微粒子とも粒径分布の幅を目標値である幾何標準偏差1.2以下に抑えることに成功した。

シリコン超微粒子は、パルスレーザー堆積法により透明導電体との2元堆積を実施し、可視発光素子、超高精細表示素子を試作して発光を確認し、高融点金属超微粒子は、直接吹き付け描画による抵抗体素子、誘電体素子、微細配線等の作製に成功した。

## (3) フォトン応用計測技術

「in-situ状態計測技術」の赤外吸収によるガス濃度計測では、量子型赤外検出器、波長可変光源を開発後、検出波長3~10 $\mu$ mの高感度量子型赤外検出器組み込みのシステムを完成させ、1ppb以上の感度の計測技術を完成させた。レーザーブレイクダウンによる微粒子計測では、粒径30~40nm粒子の原子発光計測に成功し、30nmまでの粒子の成分元素含有率が10%以上の精度で計測する技術を確立した。

また、高温物体の高分解能計測を実現するため、量子効果利用の波面補償素子を試作して機能を確認した後、システムとしての性能を実証した。3次元形状計測では、白色レーザーを用いたヘテロダイン干渉計を開発し、精度40nmの形状計測に成功した。

「非破壊組成計測技術」では、高密度短波長光源、内部透過計測装置を製作し、高精度3次元DT像を撮影して、空間分解能1 $\mu$ m以上の欠陥測定が可能なことを実証した。光電子分光技術では、飛行時間型光電子分光装置を製作し、波長3.37nmまでの軟X線光源を用いて、空間分解能0.1 $\mu$ mを達成した。

さらに、蛍光X線分析による不純物検出のため、従来より大きな電荷出力、検出効率が期待できるバルクアルミニウム単結晶製超伝導X線検出素子を開発して評価し、検出感度1ppb達成の条件を明確にした。

## おわりに

本プロジェクトの成果は、学協会誌、国際会議、新聞雑誌等で公表しており、多数の特許出願にも結びついた。各方面からの関心は非常に高く、早期に実用化・事業化へと進み、製造業の再活性化や新規産業の創出につながるよう期待している。

レーザー加工装置、レーザー計測装置は工作機械、産業用ロボット等と同じく資本財であるため、装置自体の生産数量は消費財に比べて少なく、生産金額は当面は数千億円/年規模であろうが、それらの装置の製造業への寄与は数兆円/年規模、寄与する産業は非常に広範囲にわたると予想される。

産学官関係各位の今後一層のご支援とご鞭撻をお願いする次第である。

表1. 「フォトン計測・加工技術」研究開発の内容と達成目標

技術分野	研究テーマ	研究開発の内容	達成目標
フォトン 応用加工技術分野	マクロ加工技術	溶接現象のインラインプロセスモニタリング技術や予測制御技術を適用した高信頼性レーザー溶接技術を開発する。	板厚30mmの鉄鋼板及び板厚20mmのアルミ合金板を高アスペクト比で、母材と同等以上の強度を持って毎分1m以上の速度でレーザー溶接する技術を確立する。
	マイクロ加工技術	レーザーによる高温高圧場を用いて、高純度で均一な粒径・構造の超微粒子を作製し、これを集積・堆積して新たな量子レベルの機能を有する微小構造体を作製する技術を開発する。	1~50nmの任意の粒径で、粒径分布の幾何標準偏差 $\sigma_g$ が1.2以下(半数以上の粒子が平均粒径の±約12%の粒径範囲に含まれる分布)である高純度な超微粒子を作製するとともに、これを用いて量子レベルの機能を有する微小機能構造体を形成する技術を確立する。
フォトン応用計測技術分野	in-situ 状態計測技術	赤外域から真空紫外域までのフォトンを利用して、気体や微粒子の成分及び濃度、並びに温度を高感度で測定するin-situ計測技術を開発する。	赤外域における光源波長走査型吸収分光により気体の濃度を1ppb以上の感度で計測する技術、及び真空紫外領域までの発光分光により大きさ30nm以下の粒子の成分元素の含有率を10%以上の精度で測定する技術を確立する。また、精密温度計測用に、1mW/nm <sup>2</sup> 以下の微弱光量でも10 $\mu$ msecの高速応答可能な素子による波面補償技術を確立する。
	非破壊 組成計測技術	小型高輝度短波長フォトンを用いて、物体の表面近傍の組成や状態、並びに物体内部の欠陥を高精度で観測する非破壊計測技術を開発する。	固体表面近傍の計測に関しては、光電子分光測定による空間分解能30nm以上の不純物検出技術、及び短波長光検出による $\mu$ mレベルの微小領域での検出感度1ppb以上の不純物検出技術、並びに固体内部の計測に関しては、空間分解能1 $\mu$ m以上の欠陥測定が可能な技術を確立する。
フォトン 発生技術分野	高出力 完全固体化 レーザー技術	機械加工プロセスのツールとなる高出力高効率発振のレーザーダイオード励起完全固体化レーザー技術を開発する。	レーザーヘッドの体積が0.05m <sup>3</sup> 以下の装置で、平均出力10kW以上、発振効率20%以上の特性を持つ高出力完全固体化レーザーの発生技術を確立する。
	高集光 完全固体化 レーザー技術	精密・高精度加工のツールとなる、取扱い性に優れた、高集光完全固体化レーザー技術を開発する。	加工対象物上での集光径50 $\mu$ m以下、平均出力1kW以上、発振効率20%以上の特性を持つ小型完全固体化レーザーの発生技術を確立する。

「フォトン計測・加工技術」研究開発体制図

