

# マイクロチップレーザーの開発 平等拓範

総合研究大学院大学助教授機能分子科学専攻／自然科学研究機構分子科学研究所助教授

小型でありながら、圧倒的なパワーをもち、波長や時間的特性の制御も可能なマイクロチップレーザー。その高性能化の背景には、従来の固体レーザー材料の特性を徹底的に見直す努力があった。

## 固体レーザーを超えるレーザー

メイマンにより発明されたレーザー光は、空間的・時間的なコヒーレンス（干渉性）に優れるため、物質との強い相互作用が期待できる。なかでも固体レーザーは、Qスイッチやモードロックによる高輝度光発生が可能であるなどの際立った特長を備えていたため、不安定かつ大型で大電力を要するものの、先端科学技術の探求には不可欠な存在であり続けた。

これに対して、マイクロチップレーザーは、低出力ながらもコヒーレンスに優れた特殊な高性能固体レーザーとして登場した。従来の固体レーザーにはスペクトル純度が低いという欠点があり、これを改善するために厚さ1mm程度の薄ガラス板などをエタロン（反射面の間隔を一定に保つためのスペーサー）として挿入するが、マイクロチップレーザーではエタロンそのものをレーザー共振器とする。これは、レーザー媒質を薄くして一つの発振モードでしか共振しないようにするためだが、

効率も出力も低くなるため、レーザーとしては現実的ではなかった。

われわれはマイクロチップレーザー材料探索の指針となる性能指数を明らかにし、Nd:YVO<sub>4</sub>\*<sup>1</sup>を用いて連続波（CW）100mWを超える高効率、単一周波数発振を実現してみせることで、この分野の確立を促した。その後も、既存の固体レーザーや常識にとらわれず、理想的な固体レーザー材料を求め、本来あるべきレーザー構成とは何であるかを問い直してきた。

その結果、今日では結晶厚300μmのYb:YAG\*<sup>2</sup>マイクロチップからCWで340Wの出力を得るに至っている（図1a）。パワー密度では57.7kW/cm<sup>3</sup>となり、角砂糖1個分の媒質容積から大型のレーザー加工機数十台分の約60kWという出力が得られる勘定になる。このような大出力化は、形状をマイクロチップとし、均質な面冷却を実現することで可能となった。

さらに、高出力超短パルスレーザーを狙った研究も進めている。具体的には、

セラミックスの高い自由度に着目し、Yb:YAGの母材に別の元素を導入することでスペクトル幅を拡大し、280フェムト秒\*<sup>3</sup>という短パルスの発生に成功している。また、これらの高輝度レーザー材料の発振波長は1μm付近に限定されているため、波長域の拡大も図っている。実際、光リソグラフィーにより作製した擬似位相整合（QPM）素子（周期分極反転マグネシウム添加ニオブ酸リチウムPPMgLN）を用いて波長変換を行い、紫外光から中赤外光領域までの高効率発振を検証した（図1b）。

## マイクロ固体フォトリニクスの幕開け

これらの成功は、地道な分光学的研究の積み重ねに基づいている。例えば、固体レーザー媒質として広く使われているNd:YAG\*<sup>2</sup>は、レーザー黎明期に発掘されたもので、長い歴史をもち、もう研究の余地はないと思われていた。しかし、誘導放出断面積など発振特性にかかわる重要なパラメーターが文献によって数倍以上も異なっており、吸収断面積すらよく

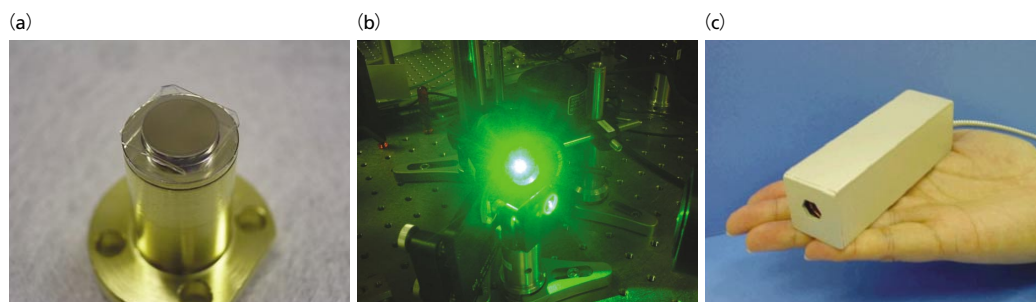


図1 (a) 金属材料加工用高出力レーザーとして開発した単結晶Yb:YAG/セラミックYAG複合構造マイクロチップレーザー（結晶厚は300μm）。(b) PPMgLNによる高効率単行波長変換により得られた高出力CW緑色光。(c) 受動Qスイッチによる手のひらサイズメガワットレーザー（尖頭出力1.7MW、パルス幅480ピコ秒）。写真提供：常包正樹ほか／水内公典ほか／酒井博ほか／平等拓範

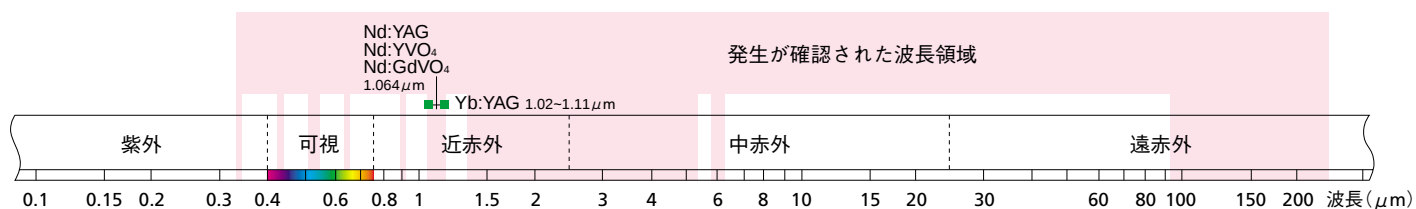


図2 光波制御マイクロチップレーザーにより拡大された波長域。領域拡大に向けた挑戦は今も続いている。

わかっていないというのが実情であった。

そこで、分光学的な基礎に立ち返った研究の結果、共振器長が15mmの受動Qスイッチマイクロチップレーザーにおいて、単一周波数、基本横モードでパルスエネルギー0.96mJ、時間幅480ピコ秒<sup>\*4</sup>、すなわち、尖頭値で1.7MW<sup>\*5</sup>に達する高輝度出力特性が実現できた。輝度にして0.14PW/sr-cm<sup>2</sup>とサブペタワット<sup>\*6</sup>の特性が、手のひらサイズの装置により、バッテリー駆動も可能な低消費電力で得られたことになる（図1c）。この高輝度特性は非線形波長変換に有利であり、すでに波長200μmに至るテラヘルツ波<sup>\*7</sup>発生も高効率に得られている（図2）。

マイクロチップレーザーの光分子科学、および、その関連分野への応用範囲は広い。通常の光学素子では不可能だが、マイクロチップレーザーなら、低輝度の半導体レーザー光を結合し、高ビーム品質光に変換することができる。さらに、スペクトル純度の改善、光スイッチによる時間的な特性の制御、QPM等の非線形光学素子を用いた波長変換、位相特性制御などが望める（図3）。

また、マイクロチップ構造では、通常の固体レーザーに比べて光子の共振器走行時間が3桁以上短いことから、量子干渉効果が顕在化する。このため、溶液中微小粒子のブラウン運動や混濁した水槽中のコイン表面形状が観察できる高精度光干渉計、カオス通信などへの応用も提案されている。

加えて、高機能非線形光学波長変換により得られるCW及びパルスの紫外光、可視光、赤外光、テラヘルツ波コヒーレント光は、バイオ・メディカル、光ディスプレイから環境計測・セキュリティま

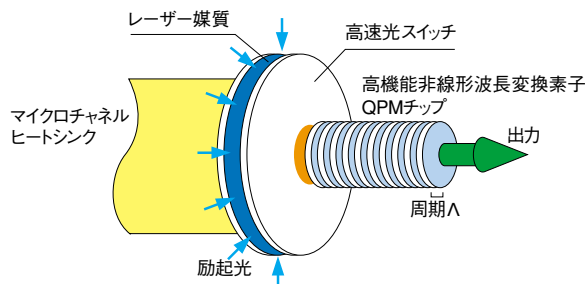


図3 マイクロチップレーザーの概念

での高度な応用を可能とする。例えば、紫外光で皮膚がんが発生することからもわかるように、紫外光はDNAに直接作用する。一方で、中赤外光域は分子振動にもとづく固有吸収が多くあり、分子の同定や選択励起が可能となる。広帯域で発振が可能なレーザーは、分子レベルの仕事を行う際のピンセット、ハサミや糊となり、われわれに大きな可能性を与えるであろう。

また、マイクロチップレーザーは2次元アレイ化も容易であり、位相同期動作による大出力化・多機能化も可能である。この他にも、微細穴開けから金属光造形までを含めたレーザー加工が視野に入ってきた。さらに小型堅牢性を利用したレーザー点火内燃機関による低燃費・低排気ガス車の提案など、エネルギー・環境分野への応用も可能になりつつある。

このように光波特性を自在に制御できるマイクロチップレーザーは、今や「マイクロ固体フォトニクス」とでも呼ぶべき新領域を形成しつつあり、基礎科学から産業までの幅広い分野から開発が期待されている。完成度が高く近寄り難い先端技術も、意外と初歩的な問題が見過され、物事を複雑にしていたりする。詰まったときは思い切って切り口を変えるのもたいへんよい。先入観をもたない若い人たちの参加により、レーザー開発の

さらなる発展が望めるものと期待している。

\*1 YVO<sub>4</sub>（イットリウムバナジウム）をレーザー媒質の母体とし、ネオジムイオン（Nd<sup>3+</sup>）を添加してレーザー発振させる。

\*2 YAGは、イットリウム・アルミニウム・ガーネット（Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>）の略。これを母体とし、イッテルビウムイオン（Yb<sup>3+</sup>）やNd<sup>3+</sup>を添加してレーザー発振させる。

\*3 1フェムト秒＝10<sup>-15</sup>秒（1000兆分の1秒）

\*4 1ピコ秒＝10<sup>-12</sup>秒（1兆分の1秒）

\*5 1MW（メガワット）＝10<sup>6</sup>W（100万W）

\*6 1PW（ペタワット）＝10<sup>15</sup>W（1000兆W）

\*7 p.8参照。



平等拓範（たいら・たくのり）

三菱電機のLSI研究所から大学に転出し、高分解分光法を背景としたレーザーレーダーによる環境計測に従事した。その際、実験時間の大半を固体レーザーの調整に費やし、先端科学技術であるはずのレーザーに大きな疑問を感じた。企業で超LSI、マイクロプロセッサを研究開発していた視点より固体レーザー及びその周辺技術を見直したところ、かなり根深い問題があることに気がつき、現在に至った。写真提供：平等拓範