商用化されている超短パルスレーザ技術：パート1 ーレーザ

ロナルド・D・シェーファー

超短パルスレーザを提供するメーカーは急増している

産業用レーザ市場全体に占める割合はまだかなり小さいが（10%未満）、超短パルス（ultrashort pulse：USP）レーザの売上高シェアは、おそらく他のどの産業用レーザ市場部門よりも急速に成長しており、今後数年間の成長予測にも有望性が示されている。USPレーザ（筆者はピコ秒またはフェムト秒レーザと定義する）は実際、市場予測において現時点ではまだ十分な存在感を示してはいないものの、まもなく1つのカテゴリーを確立するほど大きな分野になる可能性がある。著名な業界アナリストであるアレン・ノジー氏（Allen Nogee）でさえも、特殊なレポート以外では、フェムト秒またはピコ秒レーザの追跡調査を通常は行わない。ノジー氏によると、「そのすべてをカウントするのはたやすい作業ではない。大量に販売しなければ利益が出ない連続波（Continuous Wave：CW）レーザと比べて、ほんの少数しか製造していない小規模企業が多く存在するためだ。多くの企業が、非常にニッチな分野を対象とした小規模企業である」という。まさにそのとおりなのだが、筆者は、技術的な会話においても展示会においてもUSP市場の期待感を実感している。前者は、広大な新規用途の開拓につながる可能性があり、後者では、どのベンダーも口をそろえて成長を語っている。

筆者が最後にレーザ一覧を示した2015年から、何が変わったのか。まず、ほとんどのレーザメーカーが、フェムト秒とピコ秒のソリューションを提供するようになった。1つのパッケージで出力がチューニング可能な製品を提供するメーカーもあれば、それぞれ特定の分野を対象とする複数のモデルを提供するメーカーもある。フェムト秒レーザとピコ秒レーザを個別にとらえるのではなく、筆者はそれらすべてをUSPレーザとしてまとめることにした。この方法は、業界アナリストらの見方とほぼ一致している。すべてをUSPレーザとしてみなすため、レーザがピコ秒なのかフェムト秒なのかという考察は行わない。これらのレーザは、数年前と比べると「コモディティ」化が進んでいる。しかし、USPレーザそのものは必要ではあるが、十分ではない。この技術を適切に実装するには、光学部品、システム統合、プロセス開発も必要になるためである。USPレーザの利幅は、競争の激化に伴っておそらくほとんどの分野で減少しているが、生産量はかなり増加している。USP市場分野は市場アナリストらによって、2024年まで25%の年平均成長率（Compound Annual Growth Rate：CAGR）で成長すると予測されている。最大規模を誇る市場は北米とアジアで、医療分野において膨大な数の利用者が想定されている。

USPレーザメーカーの追跡さえ容易ではないのだから、技術の実装に必要なその他すべての「構成要素」を把握するのは、気の遠くなる作業である。中国をはじめとする多くの国に、USPレーザ市場に従事しているか、従事していると主張する企業が多数存在するが、管理できる状態にするために、筆者は以下の規則に従うことにした。

- USPレーザと光学部品：国際的に販売されているすべての製品を含む
- USPレーザシステム：米国でUSPシステムを販売または販売促進するすべての企業を含む
- USP契約製造：米国で契約を履行する企業に限定する

上記の制約を設けても、データの大部分を観測及び推定することができる。USPレーザは今や、加工システムのボトルネックでも弱点でもなく、むしろ、USPレーザを有効活用してその可能性を最大限に引き出すために必要となる、多数の異なる要素のうちの1つ（非常に重要な1つであることを強調しておく）だというのが筆者の意見である。実際、USPレーザそのものは、技術的にはほぼ頭打ちの状態で、ほとんどのメーカーが高出力化、低コスト化、小型化などを今後の目標にしている状況にある。それ自体は良いことだが、マーケティングやイノベーションではなく、販売やエンジニアリングへと軸足が移っていることを表している。

一方、これも筆者の意見だが、素晴らしい点は、応用分野の開拓はかなり

進んだ状態にあり、新しい用途がレーザメーカー全般にわたる成長を促進すると思われることである。この数年間に、主に買収によるレーザメーカーの統合が多数見られたが、買収されたり廃業したりした企業をはるかに上回るペースで、新しい企業が誕生している。単純に「消え去った」企業（米レイディアンス社[Raydiance]など）はほんのわずかで、ほとんどが成長を遂げている。率直に言って、この成長基調の中で生き延びることができない企業は、おそらくビジネスモデルが悪いか製品が悪いかのどちらかであるため、そもそも存続不可能だったと考えるべきだろう。

レーザ

ここで、産業用USPレーザを定義しよう。本稿では、レーザのパルス幅は少なくとも1ns未満、できれば20ps未満とする。シングルパルスのエネルギーは、フェムト秒の場合で10mJ、ピコ秒の場合はそれ以上とする。レーザは、最大100kHzの繰り返し周波数で動作可能とする（標準的には100kHz～1MHzが用いられる）。出力は「利用可能出力」とする。出力パワー（W）は、パルスエネルギー（J）と繰り返し周波数（s^{-1}）の積として、次の式で求められる。

$$E_{plus} \times \text{Rep Rate} = P$$

出力は、繰り返し周波数を過度に高くしたり、パルスあたりのエネルギーを過度に低くしたりすることなく（いずれの場合も利用可能でない出力が生じる）、達成できるものとする。最後に、レーザは「産業用」で、以下の条件を満たすとする。

・価格競争力があること。ただし、実証された品質があれば顧客は購入すると考えてよい。
・小さな筐体に「パッケージ化」されているが、使用と保守が容易であること。
・光学部品や動作などに必要な電気接続とトリガ機構のすべてが搭載されていること。
・年中無休稼働に対応する信頼性を備えること。
・アフターサービスを企業が提供していること。
・利用可能な繰り返し周波数とパルスあたりエネルギーを持つこと。高調波が利用できる場合は、周波数変換後に十分なパルスエネルギーを持つこと。
・合理的な期間で出荷できること。

データ

50社に所属する約100人にアンケートを送付した（一部の人には複数回送付した）。ほとんどが、SPIE Photonics West（カリフォルニア州サンフランシスコ）、UKP Workshop（ドイツのアーヘン）、LASER World of PHOTONICS（ドイツのミュンヘン）など、2019年のUSPレーザ関連のイベントで個人的に連絡先を交換した人々である。上に示したとおり、それぞれの所属先は4つのカテゴリーに分類される。個人的に連絡先が交換できず、企業の代表電子メールアドレス宛てに何度も連絡を試みるも回答がまったく得られなかった企業については、公開されているウェブサイトから情報を得て、データを含めた。22社のUSPレーザメーカーに連絡して、そのうちの16社が最初の問い合わせに回答してくれた。最終的に、直接回答が得られたのは22社のうち20社（91%）で、その結果が本稿の表に示されている。表にはすべ

2013年にミュンヘンで開催された見本市LASER World of PHOTONICSで、筆者はピコ秒／フェムト秒レーザ製造に従事する企業の一覧を作成しようと決意した。作成した一覧表は、本誌の記事（http://bit.ly/Schaeffer2013）に掲載した他、それに続く2015年のウェブキャストでも紹介した。その後、USPレーザメーカーの数が急激に増加し始めて、2017年には、そうした状況に対する筆者の準備が足りず、企業一覧を作成することができなかった。そして時は流れて2019年、筆者は、SPIE Photonics West（カリフォルニア州サンフランシスコ）、UKP Workshop（ドイツのアーヘン）、LASER World of PHOTONICS（ドイツのミュンヘン）に参加した。そのすべての会場で、USP事業に従事していると主張するすべての人々と会話しようと努め、その結果を基に企業一覧を作成した。この2部構成の記事では、4つのカテゴリーの対象企業に所属する個人の回答に主に基づいて、筆者がまとめたデータを紹介する。4つのカテゴリーとは、レーザそのもののメーカー、USP業界に関連する光学部品メーカー、USPシステムメーカー、ジョブショップ／契約製造業者である。世界規模に事業を展開する大小すべての企業を網羅しようと努めたが、一覧からもれてしまった企業が間違いなく存在する。レーザと光学部品のデータは世界中をほぼ網羅しているが、USPシステムメーカーについては米国で事業を展開する企業に比重を置き、契約製造業者については米国で製造を行う業者に限定した。

2019年USPレーザメーカー

企業	パルス幅範囲	波長範囲	パルスあたりエネルギー	繰り返し周波数	ベース技術
米アドバリューフォトニクス社（AdValue Photonics）	350fs～50ps	IR、緑色、2μm	最大50μJ	最大2MHz	ファイバ
米アドバンストオプトウェーブ社（Advanced Optowave）	800fs～30ps	IRと高調波	IRで最大45W IRで最大15W	最大1MHz	DPSS/MOPA
仏アンプリチュードシステムズ社（Amplitude Systèmes）	フェムト秒及びピコ秒	IRと高調波	最大数十mJ	最大 40MHz	Yb:YAG
中国ベルリンレーザ社（Bellin Laser）	フェムト秒及びピコ秒	IR（psとfs） SHG（ps） THG（ps）	IRで最大75W IRで最大40W	?	DPSS（ピコ秒）
米クラークMXR社（Clark-MXR）	150～250fs	IRと高調波	最大1mJ	シングルショットから1MHz	Ti:サファイアとファイバ
米コヒレント社（Coherent）	300fs～10ps	IRと高調波	IRで最大1mJと IRで最大250μJ	1～50MHz 1～4MHz	固体レーザ
独ダウジンガーアンドギーセン社（Dausinger and Giesen）	500fs～10ps	IR、SHG50%、THG30%	100μJ～200mJ	1kHz～1MHz	Nd:YAGベースのthin diskレーザ
独エッジウェーブ社（EdgeWave）	500fs 12ps	IR、SHG50%、THG30%	最大3mJ、600W	シングルショットから50MHz	Innoslab Nd:YVO_4（ps）とYb:YAG（fs）
リトアニアのエクスプラ社（Ekspla）	300～10ps	IR、SHG50%、THG33%	ピコ秒:30～200μJ、フェムト秒:3μJ以上	ピコ秒:0.1～1MHz、フェムト秒:1～5MHz	ファイバとDPSS
米イムラアメリカ社（IMRA America）	350～600fs	IRと高調波	20～80μJ	100kHz～1MHz	ファイバ
米IPGフォトニクス社（IPG Photonics）	フェムト秒及びピコ秒	IR+SHG	最大200μJ	最大 2.7MHz	ファイバ
米KMラブズ社（KMLabs）	12fsと1ps	IR+高調波	3μJ～30mJ	Ti:サファイア:1～200kHz、ファイバ:1～15MHz	Tiサファイアとファイバ
リトアニアのライトコンバージョン社（Light Conversion）	290fs～10ps	IR 1030、SHG50%、THG25%、それ以上＋OPO	80μJ～2mJ	シングルショットから1MHz	DPSS
米ルーメンタム社（Lumentum）	10ps	IR、SHG、THG	IR200μJ、SHG100、THG75	シングルショットから8MHz	ネオジム添加の利得材料
デンマークのNKTフォトニクス社（NKT Photonics）	400fs～10ps	IR、SHG50%、THG30%		20～80MHz	ファイバとファイバ／SSフロントエンド
独フォトンエナジー社（Photon Energy）	15ps未満	IR+高調波	最大300μJ	シングルショットから6MHz	DPSS
米フォトニクスインダストリーズ社（Photonics Industries）	10ps	IR、SHG70%、THG45%	最大1mJ	シングルショットから8MHz	ロッド
仏スパークレーザーズ社（Spark Lasers）	400fs未満と10ps未満	IR SHG50%	最大120μJ（ピコ秒）と60μJ（フェムト秒）	シングルショットから1MHz	フェムト秒―ファイバ ピコ秒―ハイブリッド
米スペクトラフィジックス社（Spectra-Physics）	25fs～20ps	SHG、THG、OPOなど	ナノジュール～15mJ	1kHz～80MHz	ファイバ、DPSS、ハイブリッド
独トプティカフォトニクス社（Toptica Photonics）	100～300fs	複数のIR波長（高調波については応相談）	1.5～10W 2～4μJ（1MHz）	80MHz、10MHz未満からシングルショット	SAMモードロック リング型ファイバ発振器 ファイバ増幅器
独トルンプ社（Trumpf）（旧アンフォス社［Amphos］）	400fs～20ps	IR、SHG60%、THG30%+OPCPA	標準で50～500μJ 最大で20mJ	200kHz～200MHz、オプションで40MHz	ファイバ、ディスク、スラブ-Yb:YAG
中国YSLフォトニクス社（YSL Photonics）	400fs～10ps	IR、SHG50% THG30%	最大200μJ	25kHz～5MHz	ファイバ

USPが事業に占める割合(%)	強み	今後の計画
小さい	カスタムガラス及びファイバ設計と、生産能力	革新的で信頼性の高いレーザ製品の提供
小さい	世界(特にアジア)における大規模な設置基盤、DPSS技術の業界リーダー	革新的な製品の継続的な設計と開発
非常に大きい	USPの世界的リーダーとしての地位、USPに主に専念している、優れたR&D、大学との連携	高出力化
?	1000台を超えるレーザを世界中に提供した実績、主要市場との緊密な関係	?
ほぼ100%	USPレーザ、取り扱い、検査、カスタムソリューション、世界レベルのサービスに関する30年以上にわたる経験	?
10%未満	年中無休稼働に対する大規模な設置基盤、応用分野に関する広大な知識、必要に応じてレーザ、レーザサブシステム、または完全なシステムを提供する能力	高出力化とさらなる買収(?)
65～70	ディスクレーザの高いパルスエネルギーと出力、次世代レーザの開発	パルスエネルギーと平均出力の向上
60	コンパクトでフレキシブルなパルス制御、ビーム成形、高い出力とパルスエネルギー、バーストモード	平均出力とパルスエネルギーの拡大、パルス長の短縮
55%以上	USPにおける26年以上の経験、カスタムレーザアーキテクチュアに対するオープン性、10年近い製品サポートの経験、世界規模での事業展開	フェムト秒レーザの高出力化(その他は企業秘密)
ほぼ100%	最も古いフェムト秒レーザ企業、日本のアイシングループに所属(アイシン精機は世界第3位の自動車部品企業)	高出力化
小さいが増加中	垂直統合、世界規模での事業展開、ファイバレーザ／光学部品／システム設計の業界リーダー	差別化を図ったファイバ製品の製造による、幅広い業界への進出
99	イノベーションと最先端技術、非常に短くクリーンなレーザパルス	低コスト化と、信頼性の向上
100	フェムト秒レーザにおける25年以上の経験、高いスキルと教養を併せ持つ労働力、優れた企業文化を維持する決意	今後18カ月間で、出力と繰り返し周波数の向上と低価格化
小さい	世界規模での事業展開、高いUV信頼性、柔軟性、高い生産量、高い性能、応用研究所	
40	PCFファイバアーキテクチュア、非線形ファイバ(スーパーコンティニュアム)、USPファイバ利得	高出力化、短パルス化、低コスト化
?	堅牢性と信頼性	他を損なうことなく、短パルス化と低コスト化
50	高いパルスエネルギー、小さなフォームファクタ、高い効率、低い消費電力	低コスト化
100	カスタムレーザ、競争力ある価格設定、世界規模での事業展開、イノベーション、効率、開発	高出力化、短パルス化、低コスト化と、その他の改良
小さいが重要	USPの業界リーダー、高出力ではなく精度に注力、レーザに加えてすべての必須要素を提供	出力の拡大、コストの削減、プロセスの柔軟性の拡大、近い将来の新製品投入
小さい	堅牢で費用対効果の高いシステム、シンプルなプッシュボタン操作、研究者との連携、中規模までのシーダーを業界に供給してきた経験に基づくメリット	大学と緊密に連携して、画期的技術を製品に組み込む
小さい	年中無休稼働の信頼性、補完部品、幅広いポートフォリオ	より多くの波長に対応、可変パルス幅、500fs未満で300W以上の出力の達成
60	ファイバに関するR&D、量産、大規模市場(中国)との緊密な関係	2019年末までに1000Wのフェムト秒レーザを投入、低出力モデルの生産量の増加

ての企業のデータが含まれており、回答が得られなかった企業については、その企業のウェブサイトの情報に基づくデータが記載されている。これ以外に、中国で大きな事業を展開していて、それ以外の地域にも進出しつつあることから、おそらくは注視が必要な、中国企業が存在する(ハーレイ社[Huaray]やレイカス社[Raycus]など)。また、微細加工よりも計測やその他の用途に有効な出力レベルを売りとした製品を提供する数社の企業も、除外されている。

論評

現在、USPレーザのほとんどの応用分野で、長パルス(ナノ秒)のトレンドに従って、基本IR(赤外)波長が用いられている。そのため、特に高調波発生に十分なパルスエネルギーを持たないすべてのファイバレーザについては、多くの企業がこの波長に注力している。ファイバレーザは一般的に、特に第2高調波発生を超えると、簡単に変換できるだけの十分なパルスエネルギーを持たない。しかし、周波数二倍化／三倍化レーザは、波長が短いほうが材料との相互作用が良い場合か、あるいは、小さなフィーチャサイズの達成が求められる場合に、間違いなく用途がある。今後の計画に関する設問に回答してくれた企業のほとんどが、低コスト化、高出力化、高調波発生が、パルス長の短縮よりも重要と回答した。実際、フェムト秒レーザの多くの応用分野において、1ps周辺で最も高い効率が得られ、それよりも短いほうが必ずしも効率が高いわけではない。

紙面の都合ですべての項目に触れることはできないが、表を参照していただければ簡単に比較できると思う。価格は、地域、レーザモデル、出力、高

調波などの要因に依存するので、価格欄は設けていない。競争が激化しているため、レーザ価格は合理的に設定されているはずだが、品質と性能が実証されていれば、たとえ高額でも顧客は購入をためらわないだろう。

表には、多数の異なる種類の企業が含まれているので、そのいくつかについて説明しておく。列挙されている企業の中には、USPレーザ、特にフェムト秒レーザを専門とする企業がある。リトアニアのライトコンバージョン社（Light Conversion）は、USP業界に25年間従事し、仏アンプリチュードシステムズ社（Amplitude Systèmes）も、ほぼ同じだけ同業界に携わってきた。どちらも、主にフェムト秒レーザ開発に専念する小規模企業として創業したが、現在では世界で事業を展開する中規模企業となっている。どちらの企業も、技術を社内で開発するか、地元の学術機関との提携によって開発しており、IR、第2高調波発生（Second-Harmonic Generation：SHG）、第3高調波発生（Triple-Harmonic Generation：THG）などの、複数のモデルを提供している。優れたサポートと適正な価格を提供し、さらに高次の高調波を生成するためのファイバ発振器や自由空間光学部品を提供する業界リーダーでもある。どちらも、継続的なアプリケーション開発をサポートし、技術的な場での発表も頻繁に行っており、基本的にUSP加工に100%専念している。

米ルーメンタム社（Lumentum）は、Industrial Laser Solutions誌のBillion-Dollar Club（産業用レーザ製品売上高が10億ドルを超えるメーカーの総称）に含まれる1社で、最も堅牢なピコ秒レーザの1つを製造している。ただし、ピコ秒レーザだけである。産業用レーザが、同社の総売上高に占める割合はほんのわずかで、ピコ秒レーザはさらにその一部にしかすぎない。世界規模で事業を展開しており、同社のUVレーザは、信頼性と寿命に非常に優れている。ルーメンタム社は適切な設備が整った素晴らしい応用研究所を構え、レーザだけでなく、ピコ秒応用分野にかなり注力している。

「ワンストップショップ」と呼べる企業もいくつか存在する。米クラークMXR社（Clark-MXR）と米スペクトラフィジックス社（Spectra-Physics）が、その2つの例である。両社は、レーザのみを提供するか、レーザサブシステムまたは完全なレーザ加工システムの構築を行う。スペクトラフィジックス社は、低フェムト秒からピコ秒までの多数のUSPレーザモデルに加えて、光学アセンブリやモーション部品などを提供している。世界規模で事業を展開しており、米MKSインスツルメンツ社（MKS Instruments）というさらに規模の大きな企業の傘下にある。USPは、現時点では小さいが、重要で成長中の事業部門であり、同社は、出力ではなく精度に注力している。一方、クラークMXR社は、USP技術のパイオニアで、フェムト秒ソリューションのみを提供している。今でも規模は小さいが、フェムト秒レーザ加工に携わってきた年数は、おそらくどの企業よりも長い。フェムト秒レーザ生産システムを製造しており、ジョブショップ／契約製造業務も行っている。

中国YSLフォトニクス社（YSL Photonics）は、筆者の問い合わせに回答してくれた唯一の中国企業で、中国以外の市場への進出を真剣に検討している姿勢を感じた。しかもその回答は完全かつ明快だった。400fs～10psでチューニング可能なレーザを提供しており、高調波にも対応している。中国国内の大規模市場と緊密な関係にあり、欧州と米国への事業進出を検討している。2019年末には1kWのフェムト秒レーザを発表しており、今後の計画としては、低出力モデルの生産量増加を挙げている。

結論

USPレーザの世界市場規模は、という筆者の設問に対し、「無回答」だった企業が最も多かった。次に多かったのは「企業秘密なので回答できない」、3番目は「わからない」だった。その他の回答は、米国で年間100～1000台、世界で千～数千台の範囲だった。米国で200～300台、世界で2000台というのが現実的な範囲で、ともに増加傾向にあると筆者は考えている。ただし、これらの数値には、外科や計測など、材料加工以外の応用分野に提供されるものが含まれていないことに注意してほしい。また、例えば、いずれか1つの国で「販売された」レーザの数を定義するのは難しい。ある国で製造または購入されたレーザが、システムに搭載されて別の国に出荷される場合があるためである。

前述のとおり、レーザは、すべてのレーザ加工システムにおける基本要素だが、レーザ以外の要素がなければシステムは成り立たない。本誌英語版2020年3/4月号に掲載予定の「商用化されている超短パルスレーザ技術：パート2－光学部品、システム、契約製造」では、USP光学部品の供給メーカー、システムメーカー、米国の契約製造業者について解説する予定である。

著者紹介
ロナルド・D・シェーファー博士（RONALD D. SCHAEFFER, Ph.D.）は、Industrial Laser Solutions誌編集顧問で、米HHフォトニクス社（HH Photonics）の最高経営責任者（CEO）。
e-mail: rschaeffer072657@gmail.com

ILSJ