

応用からの レーザーの展望

サイバーレーザー(株)
阪口光人

1 はじめに

レーザー光は太陽光やランプ・蛍光灯の光と同じ光には違いないが、その性質は電波としての特徴を持っている。レーザー光の特徴はおいおい述べるとして、レーザーを応用した機器は我々の生活や仕事の場のいたる所で使われている。例えば、家庭ではCD (Compact Disc) やDVD (Digital Versatile Disc), また最近では100 Mb/sの光ブロードバンドインターネット通信、パソコン用レーザープリンタがある。また、ちょっと見えないところの例としては、デジタルカメラを現像に出すと、3原色のレーザーを使って写真光沢紙にプリントされた写真が戻ってくる。スーパーマーケットでは商品に付いているバーコードを読み取るレーザーPOS端末が使われており、病院に行けば無痛な歯科用レーザードリル、花粉症用のレーザーメスが導入され始めている。

我々の眼に触れない社会インフラには、もっと大規模なレーザー応用機器が社会の高度化や高性能な製品作りに活躍している。一例としては、100 Mb/sの光ブロードバンドを多数束ねて100倍以上の高速でかつ数10 kmの遠方に伝送する光ファイバー通信や、日米間を繋ぐ光海底中継からLSIチップの100 nm回路パターンを焼き付けるリソグラフィ装置、さらに液晶ディスプレイの欠陥を無くするマスク修正装置等まで幅広く普及している。

これらのレーザー応用を技術別に分類すると、光ファイバー通信、光ディスクメモリー、レーザー記録、レーザー加工、レーザー入力・計測等になる。これらの装

置は日進月歩しており、使われているレーザーの高性能化は目覚ましいものがある。

本シリーズは、上記応用に使われている最新のレーザーの特徴や性能とその使い方を重点的に解説するものである。従来の解説ではレーザーの基礎から始まり応用で終わる説明が多かったのに対して、本解説はレーザーを使う立場から、応用に必要なレーザーの特性と使い方を説明した後、さらに詳しくレーザーを知りたい読者に基礎を説明する書き方にする。

そこで、本シリーズ第1回目の本稿は、レーザー応用を市場規模から概観する視点と、応用別にレーザーの特徴を明確にする視点およびレーザー応用の開発経緯と将来への展望の視点の三方向から各種レーザーを立体的に位置付けることを試みる。次回以降は全体のレーザーの中で進展の著しいレーザーや光結晶等に重点を置いて解説し、最後に将来の夢を語る予定である。

2 レーザー応用の市場規模

本市場規模の概略を頭に入れてもらうために、光産業技術振興協会 (www.oitda.or.jp/index-j.html) が統計を取っている国内の生産額を使って説明する (図1)。2003年3月で締める2002年度の実見込みは下記の通りである。

各種の光ファイバー通信関連は2,782億円、CDやDVD等の光ディスクメモリーは8,740億円、レーザープリンターやバーコードリーダー等の光入出力装置は6,300億円、医療用を含めたレーザー加工とLSIリソグラフィの光プロセス装置は2,794億円と見込まれる。

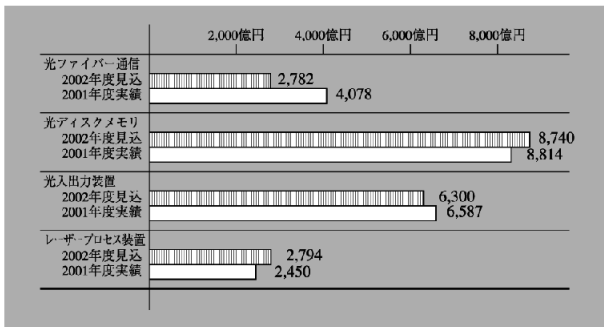


図1 光産業の国内生産額

その他も加えたレーザー応用の総生産額は2兆円超と考えばよい。レーザー単体の生産額は2,383億円と統計されているが、レーザーを自ら開発し装置に組み込む場合（外販しない場合）は、この統計には表れないと考えられるので生産の実態とは乖離している。

この統計で特筆すべきことは、光ファイバー通信装置は米国のITバブルが崩壊した2000年以降前年度に比して毎年30%前後の生産ダウンを記録していること、光ディスクメモリーは価格低下や生産の海外シフトのため2001年度は前年度比25%減、2002年度はほぼ横ばいに推移している。また、光入出力装置の大半を占めるプリンター関連はデジタル化、フルカラー化が進み単価は上昇したが、生産の海外シフトが進み2000年度以降毎年数%の減少を記録している。それに対してレーザープロセス装置は、2002年度には15%以上の伸びが見込まれている。レーザープロセス装置は従来から安定に伸張してきたが、国内のレーザー専門メーカーがプロセス向きの高性能レーザーを研究用ばかりでなく工業用としても高安定・高寿命化を達成し始めたので、このレーザープロセス市場は今後順調に拡大する可能性が高い。

3 レーザーの基本構成と特徴

前述のレーザー応用に使われているレーザーの大半は、固体レーザー、ガスレーザー、半導体レーザーと呼ばれるレーザーである。それぞれの名称はレーザーの基本要素である光増幅素子の材料名である。

レーザーの原理を基礎から説明するためには、1916年のアインシュタインの誘導放出（Stimulated Emission）

の研究にまで遡らなければならないが、その解説は本シリーズの後半に譲るとして、本号ではレーザーの構成要素を基に説明する（図2）。ちなみにレーザー（Laser）は造語であり、Light Amplification by Stimulated Emission of Radiationの頭文字を取って名付けられた。誘導放出（Stimulated Emission）光（Radiation）による光増幅（Light Amplification）という技術内容を意味する。余談であるが、中国ではレーザーを激光、ハワイ語では雲間から差し込む光条（絵画史ではレンブラント光という）から連想されたワナアと言うそうである。レーザーのハワイ語があるというのは驚きであるが、レーザー光は激しい光でもあり、神秘的な光でもあるということであろう。さて、レーザーを作るには、まず光増幅素子にエネルギーを注入し光増幅器を構成する。固体レーザーではランプ等の光がエネルギー源で、ガスレーザーでは放電、半導体レーザーでは電流注入が相当する。これは電子回路のトランジスター増幅器を動作させるのに電圧（電力）を加えるのと同じである。この光増幅素子の両端に反射鏡を置くと、増幅された出力光は再度光増幅素子に戻り増幅される。2枚の反射鏡によりこの動作を繰り返すことになる。全体として光の損失よりも増幅度が打ち勝った時点で、光増幅素子と反射鏡とで構成する共振器の特性に従ったレーザー光が発振する。一方の反射鏡から数%の光を透過するように構成するとレーザー光を外部に取り出せる。電子回路でいえばトランジスターの出力を入力にフィードバックすると電気が発振器が構成できるのと等価で理解できる。

この構成から太陽光やランプ光に対してレーザー光の特徴が現れる。まず光であることから波長が短いのは当

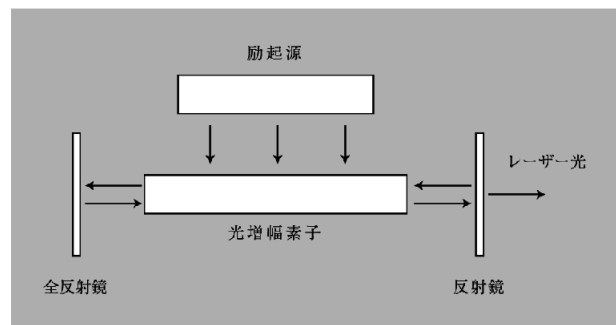


図2 レーザーの基本構成

然として、共振器による発振光であるので、波が揃った単一波長の光が得られる。光の波長と周波数の関係は、 $\lambda \cdot f = C$ (λ は波長、 f は周波数、 C は光速で 3×10^8 m/s) で表わされる。例えば赤い光 $0.6 \mu\text{m}$ のレーザーの場合、周波数は 5×10^5 GHzと計算される。現在携帯電話で使われている電波のGHz帯に比べて50万倍も高周波である。いかに高周波であるか理解されよう。この特徴から、レーザー光は光共振器で決まるモードで一方向に出力する集光性があると同時に、レンズで集光すると、 λ/NA (NAはレンズの焦点距離と有効口径で決まる明るさを示す開口数と呼ばれる数字) で決まる限界まで収束できる。波長 λ が $0.6 \mu\text{m}$ でNAが0.6の場合は $1 \mu\text{m}$ まで収束できる。レーザー共振器から出力した光はレンズ等の吸収を除けば100%近く光パワーを収束できる。また、光は電子と違って電荷を持たないので収束しても光同志が反発することはない。いくらでも集めて高輝度を実現できる。但し電荷を持たないために、レーザー光の変調やレーザー波長を可変にすることは電気に比べて容易でない。固体レーザーやガスレーザーの種類が多い理由の一つは、レーザー波長を可変に出来なかった為に多種の光増幅素子を選ばねばならなかったことによる。また、従来、レーザーの特徴の一つに高速性が挙げられることが多いが、これはレーザー光の周波数が高いため、その可能性を言ったままで、現実に高速変調を実現するには多大な研究が必要であった。最近の固体レーザーと半導体レーザーでは、応用からの要請による技術開発が進出し、波長可変性、高速変調や高速パルス化は著しく向上した。その詳細はこのシリーズのレーザーの各論で説明する。

4 応用から見た各種レーザーの特徴

4.1 レーザー波長

レーザー応用の機能を大別すると、レーザーサブシステムとその光を受けて伝送・記録・加工・計測等の処理を行う処理サブシステムとに簡略化される。光通信の処理サブシステムは、光ファイバーと高速・高感度フォトダイオードが相当する。光ディスクメモリーでは光ディスクメディアとフォトダイオードが、レーザープリン

ターでは電子写真プロセスが、加工等のレーザープロセスではレーザー光のスキヤナーと加工・記録される材料、例えば金属、半導体、絶縁体、有機材料等が当てはまる。レーザー医療では生体が相当する。これらの処理サブシステムではそれぞれ最も効果的・効率的に動作する波長が存在する。各レーザーサブシステムではその動作波長に合ったレーザー波長を作らねばならない。どのタイプのレーザーを使うかという選択の第一条件である。例えば、光通信の最適波長は、光信号を伝送する光ファイバーの低損失波長で決まってきた。1970年代の低損失波長は $0.85 \mu\text{m}$ 帯 (光損失3 db/km) であった。その後 $1.3 \mu\text{m}$ 帯 (光損失0.35 db/km) さらに $1.5 - 1.6 \mu\text{m}$ 帯 (0.2 db/km) へと移るに従って、電気信号を光信号に変換する半導体レーザーもGaAs系材料からInP系材料へと変更されながらレーザー発振波長が開発された。光ディスクメディアは波長感度の設計自由度が高いために、高密度化が波長を決定する第一条件になっており、 $0.85 \mu\text{m}$ から始まり現在 $0.65 \mu\text{m}$ 帯の半導体レーザーが使用されている。また、次世代は $0.4 \mu\text{m}$ 帯の半導体レーザーを使用した光ディスクメモリーの開発競争が盛んである。波長が半分になると4倍の高密度になる。これら光通信、光ディスクメモリー等のIT機器では、数万時間以上の寿命、数10 mWの光出力とLSIとの実装、放熱の共通性からレーザーとしては半導体レーザーが選ばれている。

レーザー加工やLSIリソグラフィーのレーザープロセスの原理は、加工材料の吸収波長に合ったレーザー光を照射し、集光部分の温度を急激に上げて、その部分を蒸発させる、あるいは溶かして他の材料と溶接させる等のプロセスである。そして、加工、記録材料は、生産されるデバイスや機器から与えられるのが前提である。加工材料が違えば最適波長は違うので、この応用のレーザー波長は多種類にわたり、多種類のレーザーが使われている。それらの中でもYAGやYVO₄等の固体レーザー (発振波長 $1.06 \mu\text{m}$) がレーザー加工の中心に使われてきたが、超kW以上が必要な加工用途にはCO₂レーザー ($10.6 \mu\text{m}$) や、微細記録が必要なLSIリソグラフィー用途には紫外線の発振波長のKrFエキシマレーザー (248 nm)、ArFエキシマレーザー (193 nm)、F₂レーザー (157 nm) 等のガスレーザーが使われてきた。以上のレ

レーザー応用とレーザー波長の関係を図3にまとめた。

最新の技術開発では、1.06 μmの固体レーザー波長を二分の一（532 nm）、三分の一（355 nm）、四分の一（266 nm）等にして短波長レーザーを実現したり、光パラメトリック発振という非線形現象を使って数 μmのレーザー光を発生する技術が進展している。近い将来、この光プロセス応用の多くを新規の固体レーザーでカバーできる見通しが出てきた。ガスレーザーは一般的に、ガスの劣化や放電励起用高電圧・高電流による電磁ノイズ発生の問題があり、電子回路では、多くの真空管応用がトランジスターに置き換わってきたように、固体レーザーの進展とともにガスレーザーは特殊分野に使われることになる。

また、フェムト秒レーザー（1フェムト秒=10⁻¹⁵秒）という最先端レーザーをレーザー加工に应用すると、従来のレーザー光による熱加工と全く違った新しい加工原理、すなわち、専門的には多光子吸収という材料の吸収特性に依存しない加工方法が実用になり始めた。従来このフェムト秒レーザーは安定性に欠けていたため基礎研究にしか使われてこなかったが、国内のレーザー専門メーカーが100フェムト秒クラスの高安定レーザーを出荷したのを機に、応用の市場が広がる機運が高まっている。

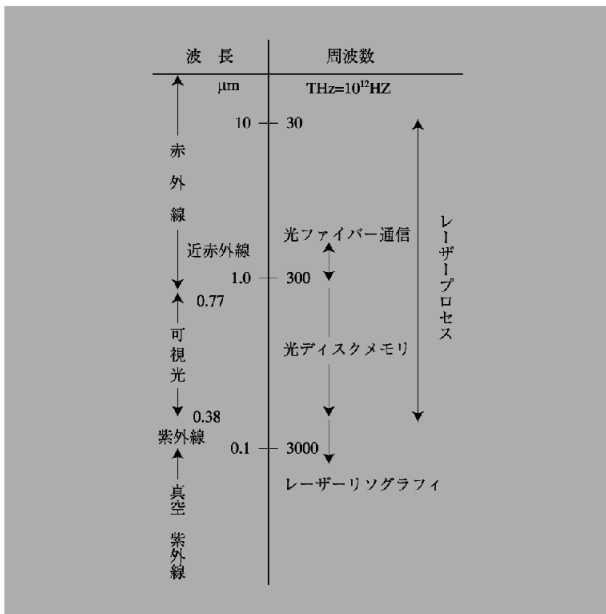


図3 レーザー波長とレーザー応用の関係

フェムト秒はレーザーでしか出せないパルスであり、正にレーザーの高周波性の特徴をいかんなく使っている。

4.2 レーザー出力と熱

各種レーザー応用に必要なレーザー出力は、処理サブシステムの光損失や光感度と動作速度やプロセス速度に依存する。光ファイバー通信は光ファイバーが極限まで低損失化されており、フォトダイオード等の光電変換素子も高感度に設計されているので、10 GB/sの超高速や100 kmの長距離伝送システムでも半導体レーザー出力は数10 mWでよい。光ディスクメモリーへの情報の書き込み、レーザープリンターの電子写真への潜像記録でも数10 mWの半導体レーザー出力でよい。電気-光変換を30%と低めに見積もっても半導体レーザーへの電気入力数は数100 mW、そして放熱も同程度でLSIとの同時実装が可能である。

一方、レーザープロセス応用ではワットクラスからキロワットクラスのレーザーが必要である。その出力を得る電気入力数は数10 Wから数10 kWまで必要で、レーザーを駆動する電源や放熱装置（空冷、水冷）は大規模であるばかりでなく、レーザー特性の安定性に深く関わる。特にレーザー増幅素子、レンズ、反射鏡および短波長にしたり、パラメトリック発振をする非線形光学素子の特性は温度依存性がある。技術力のあるレーザーメーカーはこの点に関しても細心の設計を行っているが、レーザーを使う立場の読者も温度管理については、注意が必要である。

5 レーザ応用の開発経緯と将来展望

5.1 開発経緯

1960年のルビー固体レーザー（レーザー波長0.694 μm）やHe-Neガスレーザー（1.15 μm）の出現によりレーザーエレクトロニクスは誕生した。誕生以来半世紀にも達しない若い技術である。1960年のレーザー発振は突然成し遂げられたものではなく、1950年代にマイクロ波通信や衛星通信の飛躍的發展からの要請により、電波の高周波へ高周波へとの新電波帯開拓の頂点として達成された

ものである。LASERの前にはMASER（MはMicrowaveの頭文字で、ASERはLASERと同じ意味）が発明されていたことは記憶されてよい。

さて、He-Neレーザーを開発した米国のベル研究所では、その年のクリスマスにレーザーを使った空間伝送の光通信のデモが行われた。このように1960年代は現在のレーザー応用のほとんどすべてが提案されたといっても過言ではない。この時代のレーザー応用の多くは0.6328 μmのHe-Neレーザーが使われた。その理由はレーザー光の空間分布（技術用語では横モードという）、時間分布（縦モードという）が他のレーザーに比較して、いわゆる“きれい”（技術用語では単一横モード、単一縦モード）な光を比較的容易に安定に得られ、集光したり、変調した場合、設計値通りの実験値が得られやすかったからである。また、このレーザー光は赤色なので眼で光学調整するのも容易であった。数10 mWのHe-Neレーザー長は1 m超ではあったが比較的安定で研究実験には十分な寿命を持っていた。半導体レーザーは1962年に発明されたが、低温でしか動作しなかった。また、室温で連続発振するYAG固体レーザーは1964年に成功したので、パワーの必要なレーザー加工の研究に使われはじめていた。

1970年はレーザーエレクトロニクス次の飛躍の年になった。半導体レーザーが室温での連続発振と、光通信用ファイバーの損失が20 db/kmを達成したのが、共に0.85 μmの波長で実現したことである。光ファイバー通信の研究が加速されることになったが、半導体レーザーの長寿命化が達成されるまで10年ほどの時間が必要であった。この時代はまた、レーザー光の空間的コヒーレンス（光の波面がきれいで可干渉性が高い）を使ってホログラフィーの応用研究も盛んであったが、メモリーや三次元ディスプレイ等の工業製品にするには、応用装置の安定性等が十分でなかった。そこでレーザー研究は金ばかり使って、社会に役立たないブレイボーイと揶揄された時代でもあった。しかし、この時代に我慢をして製品化の開発を続けた応用と事業体が1980年代の勝者になった。日本ではレーザー加工事業が小さいながらも最初のレーザー応用事業であった。次にNTT（当時は日本電信電話公社）主導の光ファイバー通信が、さらにCD

に規格統一された光ディスクメモリーが、そしてレーザープリンター・レーザーPOS等の入出力機器が製品化された。

1990年代はIT化、デジタル化の波に乗って、上記の事業が飛躍的に伸張し、ITバブルの崩壊とともに調整期を迎えているのが現状である。レーザープロセスは、上述の装置・部品の生産プロセスばかりでなく、自動車、重機械等多くの産業に広く深く導入されてきたので、比較的景気の影響を受けずに、地味ではあるが順調に事業を拡大している。このレーザープロセス分野のトピックスは1990年代になってLSIのリソグラフィ装置の光源がランプからエキシマーレーザーに交代したことである。またレーザー医療では、光線力学的治療法（Photodynamic Therapy, PDT）という、選択的に“がん”を治療する方法が発展した。

このような流れのなかで各種レーザーの使われ方も変遷していった。1960～70年代にHe-Neレーザーが使われていた通信、メモリー、入出力機器のレーザーは長寿命が達成された半導体レーザーに置き換えられ、現在も各種半導体レーザーの研究開発は盛んである。当初から高出力が必須な要件であったレーザープロセスでは固体レーザーが使われてきた。そして従来の固体レーザーでは不得意だったために使われているCO₂ガスレーザーやエキシマーガスレーザーも、最近の新固体レーザーによる高出力化、短波長化が進展するに従い、ガスレーザ

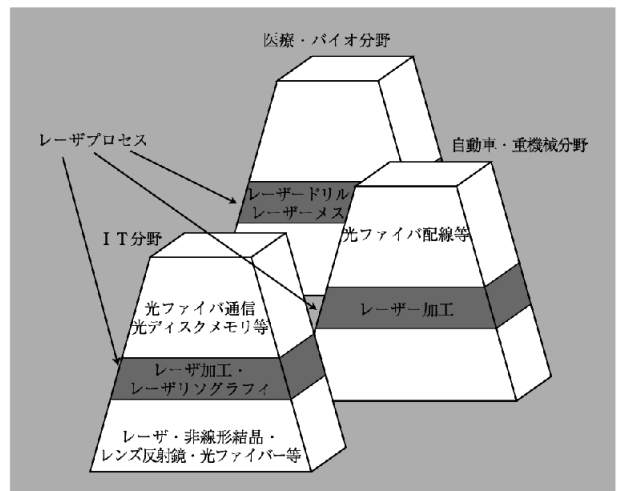


図4 各種産業とレーザー応用の鳥瞰図

ー応用は徐々に新固体レーザーに代替される可能性がある。本シリーズの解説は、このような新固体レーザーが中心になる。

以上の各種レーザー応用の俯瞰図を図4に示す。

5.2 レーザー応用の展望

レーザー応用を別の視点から分類すると、閉じた系と開放系に分けられよう。閉じた系とは光通信や光ディスクメモリーのように、電気信号を光信号に変換して伝送や記録を行い、それからの読み出した光信号を電気信号に変換する系をいう。電気信号からみれば光部分は光“ブラックボックス”である。開放系とは光プロセスのようにレーザー光を受け、処理された媒体（無機材料、有機材料、生体等）は別の目的のために別の場所に組み込まれる系である。レーザープリンターやディスプレイは人間の目を光電変換素子に使っている。閉じた系とも開放系ともいえる。

さて、閉じた系の将来のキーワードは“インテグレーション”であろう。小さくは各種デバイスのインテグレーション、大はネットワークとしてのインテグレーション、そしてハードとソフトのインテグレーションを意味する。すなわち光“ブラックボックス”はシステム上デバイス化していくことが想定される。ITシステム全体の付加価値がソフトウェアとチップに偏在する傾向がこの応用にも当てはまる。光“ブラックボックス”は必要不可欠であるが標準化されていくものと予想する。それに対して開放系はレーザーサブシステムと処理サブシステムとの接点において新しい組み合わせによる発展が期待される。例えば、バイオやナノエレクトロニクスとの組み合わせにおいて、新しい物理、プロセスの発展、その結果としての新しいビジネスの誕生が期待される。すなわち、開放系は新しい科学や技術と結びついて常に

発展する機会がある。この分野のレーザーは波長可変性、超高速性ばかりでなく空間的制御性の開発が新応用の実現を加速するだろう。1960年代に提案された技術のうちで、期待の大きかった割にはビジネスでの成功例が少ないホログラフィの再登場があるのかもしれない。この開放系の研究は広く深く継続して行われるべきであるが、ビジネスとしては時間軸を考えた選択と集中投資が重要になる。この意味からも、大学や国立研究所と企業との連携が重要な分野である。この点も含めて本シリーズの解説を進める予定である。

次号（8月）はまず最近進展の著しいレーザー加工とこの応用の基本のレーザーである新固体レーザーを解説する。以降、市場の立ち上がりが急な短波長レーザー等の順に解説を進める。

■ A prospect of laser applications and lasers

■ Mitsuhiro Sakaguchi

■ Cyber Laser Inc. Advisor



サカグチ ミツヒロ

所属：サイバーレーザー㈱ 顧問

連絡先：〒106-6034 東京都港区六本木1-6-1

泉ガーデンタワー34F

Tel. 03-3560-3840 Fax. 03-3560-3804

E-mail : sakaguchi@cyber-laser.com

経歴：1962年に日本電気㈱に入社。当初コンピュータの研究に従事。68年にホログラフイーを図形入力装置に応用する発明以降、91年に同

社光エレクトロニクス研究所長を卒業するまでレーザーに関する研究、マネジメントに従事。その後、同社支配人、北米研究所の上級副社長を経て退職。現在、レーザーのベンチャー企業であるサイバーレーザー㈱の顧問。工学博士。電子情報通信学会フェロー。