

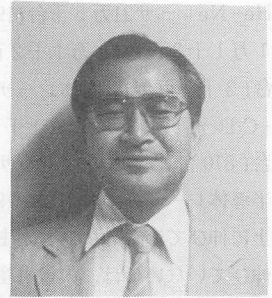
■ 展望・解説 ■

レーザー応用の新技術

New Technologies of Laser Applications

佐藤 卓 蔵*

Takuzo Sato



1. はじめに

1960年にルビーレーザーによって最初のレーザー発振が観測されて以来、新しいレーザーの研究開発とレーザー応用技術の開拓が精力的に進められてきた。その結果、レーザー加工、光通信、光メモリー、医療などの広範な応用分野において、レーザーの実用化は当初の予想を上回るほどに著しい進展を遂げている。

本稿では、レーザーの応用分野を概観するとともに、レーザープロセス分野における新しい技術開発を中心に解説することにする。

2. レーザーの需要分野

レーザーの需要分野は、レーザー加工、光通信、光ディスクメモリー、医療等と広範囲にわたっている。そのレーザーの需要分野別の生産額の推移を示したのが、図-1である^{1)~4)}。1986年に非共産圏で販売されたレーザーの総生産額(軍用を除く)は、約5億9百万ドルである。その中でも大きい需要分野としては、研究開発用(23%)、レーザー加工用(22%)、光通信用(17%)、医療用(治療+診断、16%)、光ディスクメモリー用(オーディオディスク+ビデオディスク+記憶ディスク、7%)、レーザープリンター用(6%)などである。

図-1をみると、レーザー加工、レーザープリンター、医療分野では早くからレーザーの需要は大きいものであった。最近需要が伸びた分野としては、光通信、光ディスクメモリー、レーザープリンター分野であるが、この中でも光ディスクメモリーの分野はコンパクトオーディオディスクや記憶装置用ディスクなどの需要が年々増大しているところから最も順調な伸びを示している。

各種レーザーの生産額を、図-2に示す。1986年におけるレーザー別の生産額を比較すると、半導体レーザーが約27%、炭酸ガス(CO₂)レーザー22%、イオンレーザー16%、

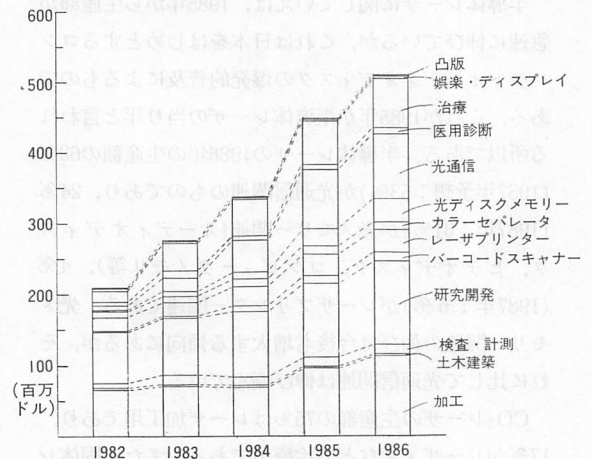


図-1 レーザーの需要分野別の生産額の推移

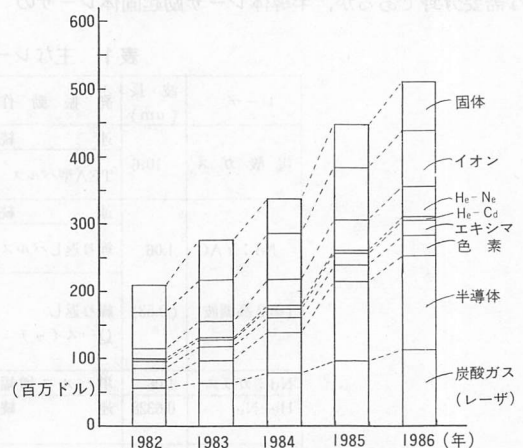


図-2 各種レーザーの生産額

固体レーザー14%、He-Neレーザー9%、色素レーザー6%、エキシマレーザー5%、He-Cdレーザー1%となっている。固体レーザーに関しては、レンジファインダ等の軍用のものは除かれているが、それらを入れると生産額はおそらくその2倍近くになると言われる。

また、1986年に販売されたレーザーの台数を比較すると、半導体レーザーが約640万個(1985年：280万個)、

*電子技術総合研究所電波電子部レーザー研究室長

〒305 茨城県新治郡桜村梅園1-1-4

He-Neレーザー21万5千台(19万8千台), イオンレーザー1万1千3百台(1万1千2百台), CO₂レーザー3千百台(2千7百台), 固体レーザー3千台(2千7百台), He-Cdレーザー1千7百台(1千5百台), 色素レーザー1,050台(870台), エキシマレーザー420台(370台)である。半導体レーザーの生産台数が1986年には前年より2倍以上に伸びているのに対し, 生産額は前年度比18%しか伸びていないのは, 大量生産で半導体レーザーの単価が安くなってきているためである。

半導体レーザーに関していえば, 1985年から生産額が急速に伸びているが, これは日本をはじめとするコンパクトオーディオディスクの爆発的普及によるものである。これが1985年が半導体レーザーの当り年と言われる所以である。半導体レーザーの1986年の生産額の63%(1987年予想:53%)が光通信関連のものであり, 24%(1987年:31%)が光メモリー関連(オーディオディスク, ビデオディスク, コンピュータメモリー等), 4%(1987年:6%)がレーザープリンター関連である。光メモリー関連の伸びは今後も増大する傾向にあるが, それに比して光通信関連は伸び悩んでいる。

CO₂レーザーの生産額の75%はレーザー加工用であり, 17%がレーザーメスなどの治療用である。また, 固体レーザーも同様に, レーザー加工(37%)と治療用(25%)が主な需要分野であるが, 半導体レーザー励起固体レーザーの

研究開発が注目されていることもあり研究開発分野での需要(37%)もかなりある。

イオンレーザーの生産額の33%は眼科の治療や細胞分離診断などの医療用であり, 13%がカラーセパレータ用, 26%が研究開発用である。He-Neレーザーの主な需要分野はレーザープリンター(39%)とスーパーマーケットのバーコードリーダー(25%)などである。He-Cdレーザーの需要の30%近くはレーザープリンター用であるが, その伸びは横這いである。

色素レーザーの87%, エキシマレーザーの88%と両レーザーとも, 90%近くが研究開発分野で活用されている。色素レーザーは, 眼科治療や癌の光化学的治療などの医療分野で, エキシマレーザーはレーザーCVDなどの半導体プロセス分野の先端的基礎研究に活用されている。半導体プロセス分野では, エキシマレーザーを利用した微細加工装置の実用化が, 着実に進んでいる。

主なレーザーの特性と応用分野を, 表1に示す。次にレーザーの新しい応用技術の中でも, 最近研究開発が活気を呈しているレーザープロセス技術を中心に述べてみたい。

3. レーザー加工—熱プロセス

レーザー加工においては, CO₂レーザー(波長:10.6 μm)やNd:YAGレーザー(波長:1.06 μm)を材料表面に集

表1 主なレーザーの特性と応用分野

レーザー	波長 (μm)	発振動作	出力 (ピーク出力)	寿命	主な応用分野
炭酸ガス	10.6	連続	20kW		加工, 医療
		TEA型パルス	(10MW) (10Hz)		マーキング レーザーレーダ
Nd:YAG (第2高調波)	1.06 (0.53)	連続	400W		加工, 医療
		繰り返しパルス	(10kW) (100Hz)		加工
		繰り返し Qスイッチ	(5kW) (10kHz) (10MW) (10Hz)		電子部品加工 レーザーレーダ マーキング
Nd:ガラス	1.06	単パルス増幅	(10TW)		核融合
He-Ne	0.6328	連続	10mW	2万時間	計測, 民生機器 情報機器
He-Cd	0.442	連続	100mW	5千時間	情報機器
Arイオン	0.5145	連続	10W	2千時間	医療, 民生機器 ディスプレイ
	0.4880				
半導体	0.85	連続	100mW	10万時間	光通信, 民生機器 情報機器
	1.3 1.55	繰り返しパルス	10W(平均)		測距, 医療
エキシマ	0.308	繰り返しパルス	100W(平均)	10 ⁶ ~10 ⁸ ショット	光化学加工
	0.249		(10MW)		
	0.193		(500Hz)		
色素	0.3~ 1.2	連続	1W		分光
		繰り返しパルス	10W(平均) (1MW) (10Hz~kHz)		分光 レーザーレーダ

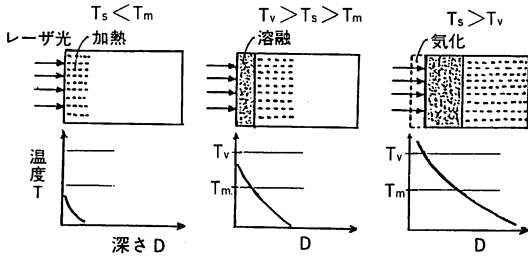


図-3 レーザ照射による材料の表面温度と表面状態

光照射することによって、材料を加熱、溶融、気化することにより、各種加工を行うことができる。

材料の表面温度は、レーザーのパワーと照射時間に依存する。レーザー光を材料に照射すると、材料のエネルギーは吸収され材料は加熱される。レーザー照射を続けて行き材料の表面温度 T_s が上昇を続けると、融点 T_m に達し材料表面は溶融する。さらにレーザー照射を続けると、表面温度は沸点 T_v に達し、材料は気化・蒸発する。レーザー照射による材料の表面温度と表面状態の様子を図-3に示す。この材料の表面温度 T_s によって、レーザー加工の種類を分けることができる。

$T_s < T_m$:

材料の表面温度が融点以下の場合には、鑄鉄の焼入れなどの表面硬化、材料の欠陥をなくすためのアニーリングなどの表面熱処理が行われる。

例えば、鑄鉄の焼入れによる表面硬化は、次のような過程で行われる。レーザー照射により変態温度 T_1 以上に表面を加熱してオーステナイト状態になったところでレーザー照射を停止すると、金属内部への熱拡散により表面が急冷されると同時にマルテンサイト状態に移行するので、表面硬化が起こる。

$T_v > T_s > T_m$:

材料の表面温度が融点以上になると材料表面は溶融状態となるので、溶接などの熱処理、表面合金化やアモルファス合金化などの表面処理が可能となる。

一例として、レーザーを用いた表面合金化過程を図-4に示す。(a)のように、金属基板Aに他の金属膜Aをコーティングした材料表面にパルスレーザー照射を行うと、(b)のように金属膜Aと基板Bの表層が溶融する。この溶融状態でA原子とB原子の融合が行われた後レーザー照射が停止すると、急冷固化が進み、(c)のようにAとBの合金 A_xB_{1-x} が形成される⁵⁾。

$T_s > T_v$:

表面温度が沸点以上になると、材料表面は気化・蒸発するので、切断、穴あけ、トリミング、スクライビ

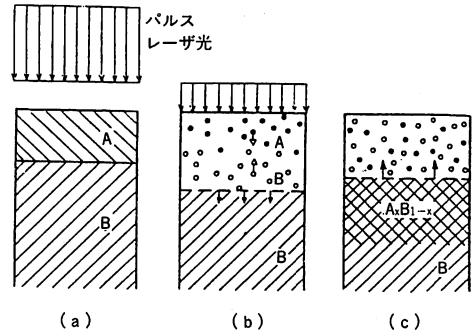


図-4 表面合金化プロセス

ング、マーキングなどのいわゆるレーザー加工が可能となる。これらのレーザー加工は、既に実用化されているものである。

4. エクシマレーザープロセス—光励起プロセス

CO₂レーザーやNd:YAGレーザーを用いたレーザー加工は、赤外レーザー光を熱エネルギーとして利用した熱プロセスであるといえる。これに対し、紫外域で高出力のエクシマレーザーを用いたレーザープロセスは、フォトンエネルギーの高い紫外レーザー光による光励起化学反応を介して、レーザーCVD (Chemical Vapor Deposition: 化学的気相堆積)、レーザードーピング、レーザーエッチングなどを行う光励起プロセスということができる。

エクシマレーザーを用いた光励起プロセスは、従来の熱的レーザー加工に比べて低温プロセスであること、選択反応による高品位薄膜形成や局所的微細加工も可能となるので、半導体プロセスや医療の分野で研究開発が活発化してきており実用化も徐々に進められている。

4.1 エクシマレーザーの開発現状

エクシマ(Excimer: Excited dimer)は、励起状態でのみ存在する分子である。エクシマレーザーの歴史は1970年に液体Xeを電子ビームで照射し誘導放出を観測したのに始まり、その後1970年代に希ガスエクシマ(Xe₂, Kr₂, Ar₂)、希ガス—酸素エクシマ(XeO, KrO, ArO)、水銀ハライドエクシマ(HgBr, HgCl, HgI)、希ガスハライドエクシマ(KrF, XeCl, ArFなど)などのレーザーが続々と開発された⁶⁾。

この中でも1975年に開発された希ガスハライド系のエクシマレーザーは、最も高効率で高出力のエクシマレーザーとして実用化のための研究開発が精力的に進められてきたものである⁷⁾。その希ガスハライドエクシマレーザーの励起方式には、電子ビーム励起方式と放電励

起方式がある。電子ビーム励起方式では、単一パルスで大出力のエネルギーを取り出せるということから、レーザー核融合用レーザーとして大体積大出力 KrF エキシマレーザが開発されており、既に 10.5 kJ/パルス (パルス幅：500 ns)の大出力が達成されている (米国ロスアラモス研究所)。

一方、放電励起方式のエキシマレーザは1パルス当りのエネルギーは1 J前後と小さいが、高繰返し化により平均出力を増大させることができるので、小型で取扱い易く実用性が高いということから、光励起プロセスの研究開発などに利用されるとともに実用化も進められてきている。我国においても、エキシマレーザを利用した光励起プロセスの有用性と将来性に注目し、通産省の大型プロジェクト「超先端加工システムの研究開発」(昭和61~68年度)の中で放電励起方式の大出力エキシマレーザの研究開発を進めて行く計画が建てられている。その大型プロジェクトにおける大出力エキシマレーザの開発課題と開発目標は次のようなものである。

- 長寿命化：10⁹ショット (ArF レーザに対し)
- 高繰返し化：5 kHz
- 大出力化：2 kW (平均出力)

現在市販されている放電励起エキシマレーザの特性を、表2に示す。

表2 放電励起エキシマレーザ(市販品)の代表的性能

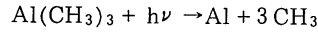
エキシマレーザ	波長 (nm)	平均出力	繰返し数	寿命
ArF	193	60W	250Hz	5×10 ⁶ ショット
KrF	248	100W	500Hz	10 ⁷ ショット
XeCl	308	150W	500Hz	10 ⁸ ショット

4.2 レーザ CVD

エキシマレーザを用いた光励起プロセスの中でも、最も研究例が多いのは、レーザー CVD による薄膜形成に関する分野である。超 LSI などの集積回路技術においては、微小領域の金属配線膜や絶縁膜などの薄膜形成技術が重要な課題となっている。しかも、集積回路の高密度化に伴い、サブミクロンパターンの形成や微小領域の改質などに低温プロセスが必要になってきている。エキシマレーザによる光解離あるいは光化学反応を介したレーザー CVD による薄膜形成やレーザードーピング、レーザーエッチングは低温プロセスであり、上記の要請に応えるものとして、半導体プロセス分野でも注目され研究開発が活発に行われている⁷⁾。

例えば、金属膜の形成過程は次のようなものである。

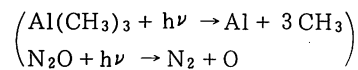
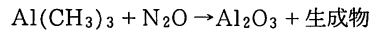
反応ガスとしての有機金属分子ガス(例：Al(CH₃)₃)にArFエキシマレーザを照射すると、Al(CH₃)₃は光解離を起こし、金属原子Al(アルミニウム)が遊離する。



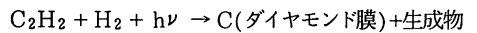
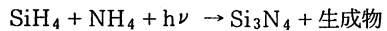
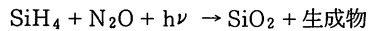
この遊離した金属原子 Al を基板上に堆積させると、金属薄膜が形成される。このような光解離を介して薄膜形成を行うために使用されるガス状分子としては、次のようなものがある。

金属アルキル：Al(CH₃)₃, B(CH₃)₃, Ga(CH₃)₃, Zn(CH₃)₂, Cd(CH₃)₂, Si(CH₃)₄, Ge(CH₃)₄, 金属カルボニル：Cr(CO)₆, W(CO)₆, Mo(CO)₆など

また、エキシマレーザ CVD による絶縁膜の形成過程は次のようなものである。例えば、反応ガスとして Al(CH₃)₃ と N₂O の混合ガスを用い、ArF エキシマレーザ(あるいは KrF エキシマレーザ)を照射すると、それぞれの分子が光解離を起こす。その光解離によって遊離した Al 原子と O 原子が化学反応を起こして、Al₂O₃ という絶縁膜が形成される。



同様の絶縁膜形成例を、下に示す。



これらのエキシマレーザ CVD の特長としては、

- (a) 低温プロセスである(基板温度：200~500℃)
- (b) 高速で膜形成ができる(~0.1 μm/分)
- (c) 局所的微細パターンも形成できる、

などが挙げられる。そのエキシマレーザ CVD の概念図を、図-5に示す。

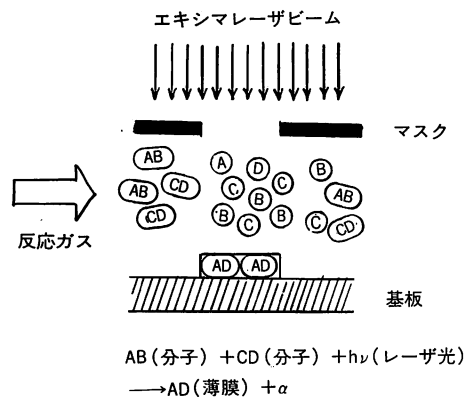


図-5 エキシマレーザCVD の概念図

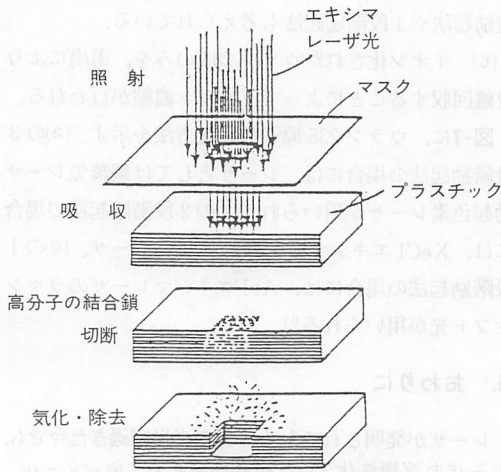
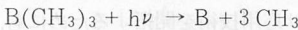
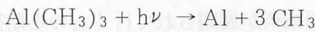


図-6 光化学的直接エッチング過程

4.3 レーザドーピング

エキシマレーザー照射によって、有機金属ガスが光解離を起こし、金属原子を遊離させることができることは前に述べた。



そこで、エキシマレーザー光を基板に集光し、基板表面を加熱すると、これらの遊離金属原子が基板中に導入される(ドーピング)。基板がn型Siの場合に、遊離金属原子のAlあるいはB(ボロン)原子が基板中にドーピングされると、p-n接合が形成され太陽電池が製作できる。エキシマレーザードーピングによって製作された太陽電池の特性を、表3に示す。

表3 エキシマレーザー・ドーピングの特性

レーザードーピングによる形成層	基板	反応ガス	エキシマレーザー	太陽電池の効率
p-n 接合	n-Si	Al(CH ₃) ₃ , B(CH ₃) ₃	ArF	9.6% (AM1)
	GaAs	H ₂ S	ArF, XeF	10.8% (AM1)

また、エキシマレーザー光を基板に集光し、基板表面が熔融・高温化する場合には、高温の基板表面に付着した有機金属ガス分子が熱解離を起こし、その熱解離によって遊離した金属原子が基板中にドーピングされる。この場合のレーザードーピング法は、GILD(Gas Immersion Laser Doping)法と名付けられている。

レーザードーピングの特長としては、

- (a) 非常に浅い接合が形成できる(～0.1 μm),
- (b) 高濃度のドーピングができる(10¹⁹～10²⁰cm⁻³),

(c) 急熱レーザーアニーリングも可能である、などが挙げられる。

4.4 レーザエッチング

短波長のエキシマレーザーを高分子膜に照射すると、高分子の化学結合鎖が切られて、レーザーの照射部分のみが酸化・除去される。高分子を構成するC-C結合鎖の化学結合エネルギーが約3.6eVであるのに対し、ArFエキシマレーザーの光子エネルギー(hν)は6.4eVでありC-Cの結合エネルギーよりも十分大きい。このために、ArFエキシマレーザー照射によって高分子の化学結合鎖は切られ光分解が起こるので、レーザー照射部分の酸化・除去(アブレーション:溶脱)が行われる。このアブレーション効果による光化学的エッチングの場合には、レーザー照射部の周りに熱的な影響を与えることなく、レーザー照射部分のみが直接的にエッチングされる。図-6に直接エッチング過程の概念図を示す。

このようなアブレーション効果による直接エッチングは、ArFエキシマレーザーを生体組織に照射した場合にも起こる。そこで、ArFエキシマレーザー光を光ファイバーで血管内に導入し、動脈瘤の切除を行うという研究も進められている。このように、エキシマレーザーは材料プロセスの分野のみならず、医療分野においても応用研究が活発化してきている。

また、エキシマレーザーは次世代のリソグラフィ用光源としても有望視されている。すでに、KrFエキシマレーザーを光源とするリソグラフィの研究開発において、サブミクロン(～0.3 μm)の微細パターンの形成が可能になってきている。

5. レーザ同位体分離

最近のエネルギー分野におけるレーザー応用技術の話題としては、レーザーによるウランの同位体分離の研究開発がある。レーザー同位体分離によるウラン濃縮法は、分離効率が大きく、経済性も遠心分離法やガス拡散法に比較して優れているということで、1985年6月米国エネルギー省が今後のウラン濃縮法の研究開発をレーザー法に絞って行うことを決定した。これに刺激されて、我国においても1987年4月民間主体でレーザー濃縮技術研究組合が設立されるなど、本格的にレーザーによるウラン濃縮法の研究開発を推進して行く体制が組まれた。

現行の原子力発電(軽水炉発電)に利用されるウランは、ウラン235である。しかし、天然ウランにはウラ

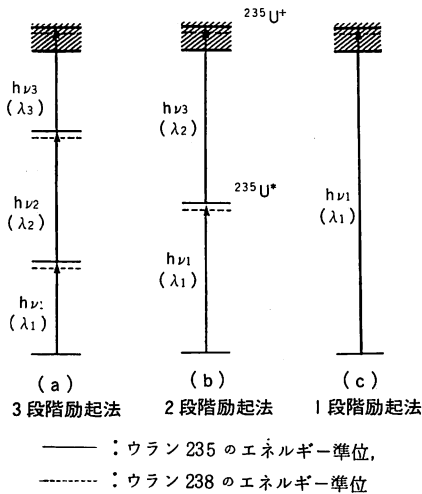
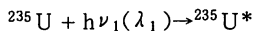


図-7 ウラン原子のレーザー同位体分離過程

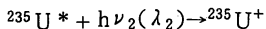
ン 235 は 0.7% しか含まれておらず、残りのほとんどはウラン 238 である。そこで、燃料としてはウラン 235 の濃度を 3% と高めた濃縮ウランが使用されている。レーザー濃縮法は、ウラン 235 とウラン 238 の質量差からくるウラン原子(あるいは分子)のエネルギー準位の差(同位体シフト)を利用して、ウラン 235 だけを波長同調レーザーによって励起→電離(イオン化)して、分離回収する方法である。

ウラン原子のレーザー同位体分離は、次のような過程で行われる。

(a) ウラン蒸気を選択励起用波長同調色素レーザー(波長 λ_1) を照射することによって、ウラン 235 のみを励起する。



(b) 次に、電離用レーザー(λ_2) を照射することによって、励起状態のウラン 235 原子をイオン化する。



イオン化の方法として、この 2 段階励起法の他に、3 段

階励起法や 1 段階励起法も考えられている。

(c) イオン化されたウラン 235 のみを、電場により分離回収することによって、ウラン濃縮が行われる。

図-7 に、ウラン 235 原子の励起方法を示す。(a) の 3 段階励起法の場合には、レーザーとしては銅蒸気レーザー励起色素レーザーが用いられ、(b) の 2 段階励起法の場合には、XeCl エキシマレーザー励起色素レーザー、(c) の 1 段階励起法の場合には、ArF エキシマレーザーのラマンシフト光が用いられる⁸⁾。

6. おわりに

レーザーが発明されてから 4 分の半世紀過ぎた今でも、レーザーの高機能化(レーザー波長域拡大、短パルス化、大出力化、長寿命化など)の研究開発が行われている一方で、自由電子レーザーや X 線レーザーなどの新レーザーの研究開発も活発に進められている。

このようなレーザーの高機能化や新レーザーの研究開発が刺激となり、エネルギー分野においても、レーザーによる核融合プラズマ診断やレーザー核融合など、さらにまた新しい応用技術が展開されて行くものと期待される。新しいレーザー応用技術を開拓するためにも、その基礎となるレーザーそのものの研究開発がさらに重要になってくるものと考えられる。

参考文献

- 1) Lasers & Applications Vol. 3, No. 1 (1984), 51~58.
- 2) Lasers & Applications Vol. 4, No. 1 (1985), 47~56.
- 3) Lasers & Applications Vol. 5, No. 1 (1986), 45~56.
- 4) Lasers & Applications Vol. 6, No. 1 (1987), 65~75.
- 5) 佐藤; 工業材料 第 33 卷, 第 6 号 (1985), 55~59.
- 6) 佐藤; レーザー研究 Vol. 13, No. 12 (1985), 18~29.
- 7) 佐藤; 電子通信学会誌 Vol. 67, No. 9 (1984), 991~997.
- 8) H. Chen and J.I. Davis; Photonics Spectra Vol. 16 No. 10 (1982), 59~66.

