技術資料

テーマ特集

溶接・接合分野における新しい技術

材料加工用レーザー装置の開発の現状*

入 江 宏 定**

The State of the Art of Laser Apparatus for Material Processing in Japan*

by Hirosada Irie**

キーワード：材料加工，スラブレーザー，アレキサンドライトレーザー，CO レーザ，よう素レーザー

1. 結 言

近年溶接，切断あるいは穴明けなどの材料加工レーザー装置あるいは周辺技術の進歩には目を見張るものがある。特に CO_2 及び Nd^{3+} :YAG レーザのそれは日進月歩の勢いで進んでいる。前者においては切断機を中心とした出力 2~3kW 以下の機種ではレーザー出力の長時間安定化，関連部品の開発，加工ソフトの開発が重ねられ，すでに生産機の販売台数も膨大なものがある。一方 5kW 以上特に 10kW 以上の出力機では現在レーザー装置に組み込まれた光学部品の不均質加熱に基づく熱変形，いわゆる熱レンズ効果によるレーザー特性の時間変化が生産上の大問題としてクローズアップされ，大出力レーザーの普及上の障害として解決が急がれている。YAG レーザにおいては過去に 800W が限界とされていた出力を，レーザーロッドをカスケードに接続することで kW クラスまで増大することに成功している。さらに光通信で利用されてきた石英系ファイバーの進歩により，低損失で大出力 YAG レーザ光を長距離伝送できるようになり，広範囲な利用が図られている。これらのレーザーに関しては文献も豊富であり実際の装置に簡単に触れることもできるため，本稿ではこれらのレーザーよりも優れた特徴を有しかつ出力が比較的大きく，すでに切断を中心とした材料加工への適用が試みられているレーザーについて，その現状を紹介したい。なお内容は現在国内で積極的に材料加工用レーザーとして開発を進めている企業の公表された資

料に基づき，著者がその特徴と開発課題を中心に簡単にとりまとめたものである。詳細は後の参考文献を参照されたい。ここで取り上げるレーザーは固体レーザーとしてスラブレーザー，アレキサンドライトレーザー，気体レーザーとして CO レーザ，よう素レーザーである。現在ポリマーを中心として実用化の開発が行われているエキシマレーザーについては既に本誌 59 巻 4 号で詳細に紹介されているためここでは省略する。

2. スラブレーザー¹⁻¹²⁾

一般にレーザーの名称はレーザー物質名で呼ばれるが，スラブレーザーはその形状からの総称で，板状の結晶であるためにこの名前がつけられている。スラブレーザーの対象となっている結晶は非常に多いが，現在国内で中心的に利用されているスラブ結晶は，Nd 添加の YAG と Nd 添加の GGG($\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$)がある。したがってロッド型 YAG レーザと同様に Nd^{3+} イオンが発振し 1.06 μm のレーザー光を発生する。

両結晶の相違は YAG が熱特性に優れているのに対し，GGG は Nd のドープ量が多くでき結晶成長も速い。スラブレーザーがロッド型 YAG レーザと比して注目されている点は，後者では出力が増大するに従い温度分布が厳しくなり，ロッドの熱変形により発散角が増大するため YAG の特徴である高集束性が著しく阻害されるのに対し，スラブレーザーは構造原理上熱変形が均一で，1 つの結晶で高出力が期待でき（発振器の小型化が可能）かつ発散角を小さくできる点である。

図 1 はスラブレーザーの構造原理を示したものである⁸⁾。板上結晶は上下面を水冷され，その上からランプで

*原稿受付 平成 2 年 9 月 25 日

**正 員 金属材料技術研究所 Member, National Research Institute for Metals

図 1 スラブレーザ基本構造図(YAG, 500W)⁸⁾ 図 2 GGG スラブレーザの発振特性例⁹⁾

励起される、前後面は斜角にカットされ両側の共振ミラーから入出力するレーザ光は結晶の上下面での反射を繰り返しながらジグザグに進行する。一般に側面は熱絶縁体で固定される。ランプ及び反射板はスラブ全体が均

図 3 安定・不安定共振器スラブレーザ⁴⁾

質に励起されるように工夫されている。またスラブのランプ光吸収特性を改善するためのランプ光の波長の選択などの技術や Q スイッチ組込みなどの光学上の技術開発が行われている。

レーザ出力は一般にパルスで、その大きさはスラブの大きさに依存するが、GGG 結晶で図 2 のように平均出力 830 W までが達成されている⁹⁾。一方そのままの出力では当然レーザは矩形またはそれに近い形状になる。また発散角も期待されたほど小さくはなっていない(厚み方向 $3 \times$ 幅方向 10 mrad 程度)。このためさまざまな開発が行われているが、図 3 のように安定形共振器内に不安定共振器を一部構成させた共振器の開発も行われ出力 150 W ながら 1.5 mrad 以下の発散角で高エネルギー密度を達成している⁴⁾。

スラブレーザの最大の課題は安定したスラブ結晶の供給である。図 2 中のスラブ B のように同じ結晶から切り出したスラブでもその研磨精度が異なると出力特性が大きく異なる。要求される研磨精度は非常に厳しく研磨技術の確立が重要となっている。

3. アレキサンドライトレーザ¹³⁻¹⁷⁾

本稿で扱うレーザでは最も短波長で金属の加工には吸収力の観点から有利なレーザと考えられる。現在開発されている大出力固体レーザでは唯一の可変波長レーザである。天然宝石のアレキサンドライトは照明により変色するものであるが、レーザに使用するガーネットは人工 BeAl_2O_4 に Cr をドーピングしたもので、ルビーレーザと同じ Cr^{3+} イオンがレーザ反応を生じる。エネルギー単位は結晶格子の振動モードと結合し振動状態となる。したがって基底準位と励起準位とも振動的であれば、幅の広いスペクトルの発振を起こす。発振波長は 700~820 nm の連続スペクトルである。結晶特性としては熱特性(熱伝導率、膨張係数、熱衝撃特性)が YAG レーザよりも優

図4 アレキサンドライトレーザ基本構造図¹⁴⁾ 図5 アレキサンドライトレーザの出力特性¹⁴⁾

れ、また機械的特性も優れているが、誘導放出面積は比較的小さい。本レーザは他のレーザと異なり、結晶温度が高くなるほど発振効率が增大し、発振のピークスペクトルも長波長側に移る。

図4に発振器の構成原理図を示す¹⁴⁾。フラッシュランプには結晶の吸収スペクトルを考慮してXeランプが用いられているが、さらに吸収を高めるための工夫がなされている。ロッドは高温で使用するため、温水により温度制御が行われる。現在平均出力150Wのパルス発振が実現しているが、そのときの発振スペクトルが図5である¹⁴⁾。特定の波長を使用するときの同調は複屈折フィルターが使用される。さらに線幅を小さくするためにはエタロンが使用されている。またQスイッチを組み込んだ短時間パルス発振も容易である。

4. COレーザ¹⁸⁻²⁷⁾

COレーザはCO₂レーザよりも発振効率が非常に高く、波長も5μm帯を中心とした短波長であるため数10kWクラスにいたるまでの高出力レーザとして注目を集めているものである。COレーザの励起にはさまざまな方式が提案されているが、現在国内で開発が進められているものはCO₂レーザと同様にレーザガスを亜音速で循環させ放電励起を行う方法である。図6にその装置の原理

図を示す²⁰⁾。レーザガスにCO-N₂-He混合ガスを使用してDCグロー放電を行うと、N₂及びCO分子同士の振動エネルギー交換により励起が行われ発振する。発振はガス温度に非常に敏感で、液体窒素冷却時での発振周波数は4.7~8.2μmまでの多波長であるが、中心は5μm帯にある。この波長は現状では適用可能なフレキシブルなファイバーは開発されていないが、CO₂レーザの波長に比べ将来ファイバーが開発される可能性が高く、これが実現されれば一段と普及する可能性を秘めている。図7はCOレーザのガス温度と発振効率を示したものであるが²³⁾、ガス温度が低いほど効率が高い。このため大出力で安定に発振するためには、循環ガスの冷却がCO₂レーザに比べ一段と厳しくなる。現状では液体窒素による熱交換で冷却を施しているが、一般に普及するためには取扱いの容易な冷凍器の開発及び冷却システムの開発が必要と考えられている。

現在この方式のレーザ発振器で最大7kWまでの出力と

図6 COレーザ基本構造図²⁰⁾ 図7 COレーザのガス温度と発振効率²³⁾

5kWでの4時間連続運転が報告され²¹⁾, また3kWでの安定度 $\pm 3\%$ が報告されている²⁷⁾, 発振効率も低出力で25%以上, 大出力で20%以上が達成されている^{20,24)}.

5. よう素レーザー²⁸⁻³¹⁾

化学反応による反応エネルギーを利用してレーザー物質を励起する化学レーザーはHFレーザーが有名であるが, 国内ではより波長の短く安全なよう素レーザーの開発が進められている. よう素レーザーは基本的には I_2 と O_2 の混合ガスから構成され, H_2O_2 と Cl_2 及びNaOHから O_2 を発生するときの反応エネルギーで I_2 を解離し, かつI原子を励起する.

よう素レーザーの波長は $1.3\mu m$ でありYAGレーザーに近く, ファイバーの利用が容易である. また CO_2 に比べ短波長であるため金属への吸収効率の向上が期待できるなどの材料加工上の特徴があるが発振器としては化学反応を利用しているため効率がよく, かつ大出力化も容易であることが期待される.

よう素レーザーの発振器の原理を図8に示す³⁰⁾. 燃料から発生した活性酸素が不必要な反応生成物(H_2O , NaCl)が取り除かれた後レーザーキャビティに導入される. 一方蒸気化したよう素分子もキャビティに噴出され両者の反応によりレーザー光が発生する.

現在1kW出力のよう素レーザーが開発されているが³⁰⁾, 長時間安定運転のためレーザー物質発生・導入機構あるいは反応生成物の回収機構などの化学プラントとしての開発が主体であり, レーザーの発散角も $9\sim 12mrad$ と小さくなっておらず, よう素レーザーの本来の特徴を充分活用するため大出力化へのプラント設計や高集束特性のための共振器の開発などが開発課題として残されている.

図8 よう素レーザー発振器基本構造図³⁰⁾

おわりに

現在大出力を発生し材料加工への適用実験が行われている4種類のレーザーについて簡単に紹介した. 紙面の関

係で特徴的な点のみを記したが正確さにかける点が多々あると危惧している. いずれのレーザーも既存の CO_2 あるいはYAGレーザーに比べて優れた特性を持っており, その実用化が大いに期待される. しかしすでにかかなりの総合的技術水準に達している2つのレーザーと競合し広く普及するためにはかなりの開発努力が必要であろうと思われる.

なお上記のレーザー以外でも, 半導体レーザーは1Wクラスの出力を実現しており, またArイオンレーザーや金属レーザーの出力も増大しマーキングなどの利用には可能な領域に達していると考えられるが材料加工用全体からみるとまだ充分な出力とは考えにくいため省略した.

本稿をまとめるにあたり, 貴重な資料を提供していただき, またコメントをいただいた三菱電機㈱, 住友金属鉱山㈱, ㈱富士電気総合研究所, ㈱東芝, 三菱重工㈱, 石川島播磨重工業㈱, 及び川崎重工業㈱各社に深甚の謝意を表したい.

参考文献

スラブレザー

- 1) K. Kuba *et al* :Tech. Digest of CLEO' 90, (1990) 298-299
- 2) 久場 一樹ほか: 第23回レーザー熱加工研究会論文集, (1990)7-12
- 3) 久場 一樹ほか: レーザー学会学術講演会 第10回年次大会予稿, (1990)41
- 4) K. Kuba *et al* : Optics Letters, Vol. 15 No. 2(1990)121-123
- 5) 藤井 義正: セラミックス, 21巻1号(1986)26-31
- 6) 藤井 義正: 昭和63年電気・情報関連学会連合大会予稿, (1988)3-25-3-27
- 7) 住友金属鉱山社カタログ
- 8) 葛西 彪ほか: 昭和63年電気・情報関連学会連合大会予稿, (1988)3-37-3-40
- 9) 葛西 彪: OPTRONICS, 6巻(1988)94-98
- 10) 光産業技術振興協会 光技術動向報告書V, . 1-002, (1989)305-309
- 11) 同上VI, 2-002, (1990) 273-274
- 12) T. Kasai *et al* : Proc. SPIE, The Int. Soc. Opt. Eng., Vol. 1040(1989)32-36

アレキサンドライト

- 13) 今井 信一ほか: レーザー研究, Vol. 13 No. 7 (1985) 27-37
- 14) 山田 明孝ほか: 東芝レビュー, 42巻7号(1987) 521-524
- 15) 石川 憲: 光学, 16巻11号(1987)472-473
- 16) 今井 信一ほか: 応用物理, 56巻12号(1987) 1649-1650
- 17) S. Imai *et al* : Appl. Phys. Letter, Vol. 54 No. 27(1989)1206-1208

COレーザー

- 18) S. Sato *et al* : Proc. ICALOE'88, (1988)

- 19) 正野 進ほか：ILT レーザ技術研究会 第3会
レーザー加工シンポジウム予稿集, (1989) 73-78
 - 20) 佐藤 俊一ほか：電気学会 光・量子デバイス研
究会資料, OQD-89-4 (1989)
 - 21) ニュースレターNo. 110, (1989)
 - 22) S. Wingnarajah *et al* : Proc. 5th Int. Symp. of
JWS, (1990)35-40
 - 23) 金沢 祐孝ほか：昭和 61 年電気・情報関連学会連
合大会予稿, (1986)2-76-2-78
 - 24) 金沢 祐孝ほか：石川島播磨技報, 27 巻 2 号
(1987)1-6
 - 25) H. Saito *et al* : Rev. Sci. Instru., Vol. 58 No. 8
(1987)1417-1421
 - 26) H. Kanazawa *et al* : Proc. 7th Int. Symp. on
Gas Flow and Chemical Lasers, SPIE Vol.
1031(1988)112-118
 - 27) 金沢 祐孝：私信
- よう素レーザー**
- 28) H. Fujii *et al* : Proc. Symp. Gas-Flow Lasers
and Chemical Lasers' 87, Inst. Laser & Chemi-
cal Tech, Nagaoka (1987)11-19
 - 29) H. Fujii *et al* : J. Appl. Phys., Vol. 66 No.
3(1989)1033-1037
 - 30) H. Fujii *et al* : *ibid.*, Vol. 67 No. 9(1990)3948-
3953
 - 31) 藤井 洋郎ほか：第 22 会レーザー熱加工研究会論
文集, (1989)25-28

11W 20ヶ国溶接用語集出版のご案内

書 名 : Multilingual Collection of Terms for Welding and Allied Processes

—Part 1 : GENERAL TERMS—

体裁及び内容 : 16.5×23.5cm, 510 ページ, 868 語 20 ヶ国語, 英仏語による 482 語の定義, 320 図解,
収録言語は, チェコ, デンマーク, オランダ, 英, フィンランド, 仏, 独, ハンガリー, 伊, マケ
ドニア, ノルウェー, ポーランド, ポルトガル, ルーマニア, ロシア, セルボクロアチア, スロバ
キア, スロベニア, 西, スウェーデン

内容は, General terms for welding and allied techniques, forms of welded joints and types
of welded assemblies—Weld preparation, joint preparation—Types of welds—Characteristics
for calculations for welds—Welding operation—Welding work—Welding techniques—Welding
processes—Welding facilities—Industrial safety—Thermal and physical effects—distortion—
Fatigue and fracture mechanics—Defects—Quality control.

価 格 : 10,000 円 (送料込)

次のパートについても下記宛お申し込み下さい。

Part 2 : Gas Welding, 1982 年

Part 4 : Resistance Welding, 1961

Part 5 : Thermal Cutting, 1968

Part 6 : Thermal Spraying, 1968

Part 7 : Brazing Soldering and Braze Welding, 1971

Part 9 : Gas Welding, 1982 年

申し込み先 : 〒101 東京都千代田区神田佐久間町 1-11

日本溶接会議 (ファックス : 03-253-3059)

送金方法 : 現金, 小切手は, 上記申し込み先へ。銀行振込は第一勧業銀行神田駅前支店 普通預金
口座 No. 1237598 へお願いします。