使いやすい高出力レーザーを求めて

——ガスレーザーのコンパクト化——

西 前 順 一 (三菱電機(株)中央研究所レーザー基礎技術研究)
吉 沢 憲 治 (三菱電機(株)中央研究所レーザー基礎技術研究部)

1. はじめに

CO₂レーザー、YAG レーザを代表とする高出力レーザーが、加工を目的として、生産現場に本格的に導入されて10年になる。この間、レーザー発振器本体の開発はもちろんのこと、様々なレーザーシステム技術、加工用途、加工技術が開発され、めざましい進歩を遂げてきた。その用途は金属材料の切断、溶接、改質から、セラミックや樹脂などの非金属材料加工、種々の材料に対するマーキング、トリミング、更には、アニーリング、成膜へと拡大している。現在では、高出力レーザーによる加工は、非接触かつフレキシビリティが高いという特長を活かし、欠くことのできない加工手段として、産業界に深く浸透している。現時点は、導入当初、ハイテク加工の側面のあったレーザー加工が、良い意味で陣腐化し、ごく一般的な加工ツールとして定着しつつある時期にあるように思われる。

高出力レーザーシステムが実生産現場に定着するに従って、当然のことながら、その“使いやすさ”への要求が高くなってくる。これらの要求にこたえるために、過去10年の間に、レーザー発振器およびレーザーシステムは、出力やビーム品質などの基本性能の向上とともに、高信頼化、高安定化、小型化、低価格化に関して急速な進歩を遂げてきた。なかでも小型化への要求は非常に強いものがあり、例えば、代表的な高出力レーザーである三軸直交型のCO₂レーザーを例にとると、10年間に同出力レベルの発振器の体積は1/2に圧縮され、据付面積の削減が実現されている。しかしながら、低力の可視レーザーとして普及しているHe-Neレ

ーザや、民生用の機器に組み込まれ、我々にとって、空気のような存在となっている半導体レーザーと比べると、高出力レーザーの小型化、高信頼化、低価格化に関しては、まだまだ改善の余地があるように思われる。

32ビットNCとデジタルACサーボの採用によって、レーザー加工機の高速・高精度化が進行したのは最近のことであるが、マイクロプロセッサを核とする生産の統合化(CIM)の進行には、目をみはるものがあり、レーザー加工機のスタイルにも、三次元加工機を経て、レーザーロボットが出現してきている。レーザーが本来有する高い制御性とフレキシビリティは、CIMとの相性がよく、ますますCIMに取り入れられていくものと考えられる。無人工場の生産ラインで、多数のレーザーシステムの連続運転を行うことが計画され、発振器に対しても、それに耐えうるだけの小型化と高信頼性・安定性が要求されようとしている。本稿では、高出力CO₂レーザー発振器の小型化、高信頼化を中心に最近の技術動向を紹介する。

2. 高出力レーザーの現状

CO₂は、高効率で、大出力化が比較的容易であるため、高効率レーザー発振が確認されて以来、産業利用が想定され、様々な形式のレーザー発振器が開発されてきた。励起方式として、電子ビーム励起や熱励起(ガスダイナミックレーザー)も実現されてきたが、現在、産業用に利用されているものは、制御性が良く、小型化・高信頼化が実現しやすい放電励起によるものだけであると考えてよい。放電形式としては、DC放電、高周波放電の両者が用いられているが、電極部の信頼性、出力の制御性などの点で、高周波放電がやや有利である。特に、誘電体を介して高周波放電を行う方式は、電極部自体の信頼性が高く、電極に起因するレーザーガスの汚染が少ないため、信頼性の高い発振器を実現するのに有効である。また、高密度で非常に均一な

Development of Compact High Power Gas Laser—Smallness in Size Makes High Power CO₂ Lasers Attractive—
By Junichi Nishimae and Kenji Yoshizawa (Mitsubishi Electric, Corp.)

キーワード：レーザー、拡散冷却、マイクロ波放電、共振器

図 1 拡散冷却型 CO₂レーザの基本構造

励起が可能のため、ビーム品質に優れ、小型化にも適している。

よく知られているように、CO₂レーザは比較的低いエネルギー準位間の遷移を利用するために、ガス温度が 200°C 以上になると、下位準位が熱励起され、発振効率が急速に劣化する。このため、CO₂レーザにおいてレーザガスの効果的な冷却は最も重要な要素の一つとなっている。

最もコンベンショナルな冷却方式は図 1 に示されるようなものであり、この場合、放電管の外壁を冷却媒体で冷却し、レーザガス温度はガス自身の熱拡散によって低温に保たれている。この拡散冷却型のレーザは、ビーム品質、安定性の面で優れているが、単位放電長あたりの出力が 50 W/m 程度に制限されるため、比較的小出力の発振器に限られている。これに対して、産業用の高出力 CO₂レーザは、大量のガスフローによって、放電で発生する熱を運び去り、レーザガスを低温に保つ構成をとるものが多い。

図 2 は代表的なガスフローの形式を示したものであり、レーザ光軸とガス流方向および放電電流方向の組み合わせによって、三軸直交型、高速軸流型、二軸直交型などに分類されている。これらのガスフロー型の CO₂レーザは、単位放電長あたりに取り出せるレーザ出力が大きく、小型高出力化に適している⁽¹⁾。

加工の高精度化や高速化の要求に対応して、出力と安定性向上やハイピークパルス出力化などが図られている。高速応答のパワーセンサを用いてフィードバック制御することにより、±1% 以下の出力安定性が実現されている。ハイピークパルスを用いることによって、

① 銅やアルミニウムなどの高反射率材料の加工が容易になる

② アシストガスに窒素、空気を使用できる

③ ドロスの少ない高精度の加工が可能になる

④ ピアッシング時間が大幅に短縮できる

(a) 図軸形 (軸流形)

(b) 横励起形 [横流 (2 軸直交) 形]

(c) 横励起形 [横流 (3 軸直交) 形]

図 2 ガスフロー型 CO₂レーザの構造

⑥ 熱衝撃に弱い材料の加工が可能になるなど様々な効果が得られている。特に、パルスの立ち上り、立ち下りの速い矩形波パルスが有用であることが知られている⁽³⁾⁽⁴⁾。

軸流型の発振器は、発振モードに合致した媒質を使用するために発振効率が高い、また比較的製作しやすく、低価格化に有利であるという特長がある。一方、ガス流が乱れやすく、ビーム品質、出力安定性の点では三軸直交型の方が有利である。また、高出力領域に余裕のある三軸直交型の方が、矩形のハイピークパルスが発生しやすいと考えられている。

3. CO₂レーザの小型化

3.1 冷却方式

前章にも述べたように、ガスフロー型の CO₂レーザ発振器は、単位放電長あたりに取り出せるレーザ出力が大きく、小型高出力化に適しているとされるが、必然的に、ガスダクト系、真空容器、熱交換器、プロアなどが必要であり、これらのレーザガスを高速で循環・冷却するための構成部分によってレーザ発振器の大きさが決定されているといっても過言ではない。また、プロアの軸受け部分の寿命が短く、全体の信頼性を損なう要因となるとともに、軸受け部に使用される油がレーザガス中に不純物を発生し、レーザガス寿命および共振器ミラーの寿命を短くする大きな原因となることが知られている。更に、プロアに起因する振動やガスフローの乱れによって、レーザ発振出力や出力ビームに乱れを生じる場合があるなど、大量のガスを流すのがゆえに生じる問題が存在する。

上記の欠点は、従来、高速軸流型の発振器においては細長い流路に大量のガスを流すために静圧の高いプロアが必要であり、ルーツタイプのプロアを用いることが一般的であった。ルーツプロアは複数のまゆ型ロータの噛み合せを利用する一種のロータリーポンプであり、レーザガス中への油の混入が多く、重量や体積も大きなものとなる。このため、従来、高速軸流型の発振器において上記の欠点が顕著となる傾向があったが、最近、ルーツプロアの代りに高速回転の軸流プロアであるターボプロアを使用することによって、これらの問題を軽減することが行われている。ターボプロアは、ルーツプロアに比べて小型であり、潤滑油の使用量、振動、ガス流量変動も小さく、高速軸流型発振器の小型化、高信頼化に寄与するものと考えられる。

これらガスフロー型の発振器に対して、近年、レーザガスの熱伝導によって熱を逃がす、拡散冷却型の CO₂レーザを見直す動きが活発化してきている。これまでも、円筒形の放電管を直列に並べたものや、並

列に配置して多重の折り返し共振器を用いた、高出力の拡散冷却型の CO₂レーザが作られているが、装置の大きさ、共振器の安定性・信頼性の面で満足のいくものではなかった。

最近の拡散冷却型 CO₂レーザに対する関心の高まりは、二つの事実が一般的に認識されるようになったことによる。一つは放電空間の断面形状を円筒形以外の適当な形に選ぶことによって、コンパクトかつシンプルな発振器で高出力が得られること、もう一つはレーザ共振器を工夫することによって、円筒形以外の断面形状をもつ活性媒質から効率良く品質の良いビームを取り出せるという事実である。

円筒形以外の断面形状をもつレーザ活性媒質を使用して、コンパクトな高出力 CO₂レーザを実現しようとする試みは、矩形断面を有する導波路型 CO₂レーザに始まっている。図3に導波路型 CO₂レーザの構成を示す。一辺が2 mm 程度の正方形断面を有する放電管を使用し、この放電管を光導波路として作用させることによって、回折損失の影響なしに、小さくて安定な共振器を組むことができる。現在、10 W レベルと低出力ながら、HeNe レーザ並の小型化と、1,000 時間オーダーのメンテナンスフリー動作を可能にする信頼性が実現されている⁽⁵⁾。

導波路型 CO₂レーザの断面のアスペクト比（放電媒質断面の縦と横の寸法比）を変化させる実験や、並列動作の研究を通じて、小型・高出力の拡散冷却型 CO₂レーザが検討されるようになってきた。図4に高出力の拡散冷却型 CO₂レーザの構成例を示す。図4(a)は導波路を並列に多数個ならべた構成、図4(b)はアスペクト比の大きな長方形断面を有するスラブ状媒質を用いたもの、図4(c)は同軸状電極間の狭い放電媒質を利用するものであり、いずれも、光軸方向の単位長あたりの、熱拡散による冷却能力を高め、放電間自体に熱交換器の作用をもたせた構成となっている⁽⁶⁾⁽¹⁰⁾。

放電媒質形状とレーザ出力のスケール則が、媒質中央部のガス温度のみを考慮した簡単な熱計算から求められている。円形断面を有する拡散冷却型 CO₂レーザの単位放電長あたりの出力を P_0 、放電媒質の全幅を w 、放電ギャップ長を d とすると、図4の発振器から取り出される単位放電長あたりのレーザ出力 P は次式で与えられる。

$$P = f \cdot \frac{w}{d} \cdot P_0 \dots\dots\dots (1)$$

比例定数 f の値は、図4(b)のスラブ状媒質に対して、 $f \sim 0.5$ 、導波路を並列に並べた図4(a)の構成のものに対しては $f \sim 1$ であり、他の形状に対しても同

図3 導波路型 CO₂レーザの構造

(a) マルチ導波路型 CO₂ レーザ

(b) スラブ型拡散冷却 CO₂ レーザ

(c) 同軸型拡散冷却 CO₂ レーザ

図 4 高出力拡散冷却型 CO₂ レーザの構造

図 5 ギャップ長 d と冷却能力の関係

様のスケール則が成立する。図5は、ガス温度が250°C一定であるという条件の下で、放電空間壁の単位面積から取り去られる熱量を、ギャップ長 d の関数として計算したものであり、(1)式と同じ内容を表わしている。図5、(1)式に示されるように、放電媒質のアスペクト比を大きくすることによって、任意の高出力が得られる。発振器の小型化のためには、ギャ

図 6 マイクロ波放電励起 CO₂ レーザの構造

ップ長を小さくすることが有効であるが、ギャップ長が小さくなると導波路の伝送損失が急激に増加する。現実には、導波路の伝送損失が問題にならない範囲で2 mm 程度のギャップ長が選ばれることが多い。

P_0 を50 W/m, ギャップ長を2 mm とすると、幅100 mm 程度のスラブ状媒質から1.25kW/mの高出力が期待できることになる。スラブ状媒質をはじめとする高出力拡散冷却型 CO₂ レーザは、プロア、熱交換器、ダクトを必要とせず、CO₂ レーザに本質的に必要な要素だけで構成される非常にシンプルな発振器であり、CO₂ レーザ発振器の小型化、高信頼化、低コスト化を進めるうえで、有力な候補になりうると思われる。

次節から、この高出力拡散冷却型 CO₂ レーザを中心に、レーザ発振器にとつと必要な要素である励起方式と共振器について紹介する。

3.2 励起方式

高出力拡散冷却型 CO₂ レーザは、小型で冷却能力を高めるために、短ギャップを用い、数10 W/cm³の高い電力密度の放電を行わせている。ガスフローによる放電安定化作用なしに、高電力密度のグロー放電を維持することと、電極の信頼性を高めることのために、DC 放電ではなく、RF 放電を用いることが一般的である。

高出力拡散冷却型 CO₂ レーザの励起に用いられる放電周波数は、放電中の電子がギャップにトラップされることによって放電維持に対する電極の役割が減少し、電極近傍に存在するレーザ励起に不適当な高電界部(シース)の影響が小さくなるような周波数が望ましいとされている。放電周波数を f 、電子のドリフト速度を v 、ギャップ長を d とすると、放電電界の半周期の間に、電子がドリフトする距離がギャップ長以下になる条件は、

$$f \geq \frac{v}{2d} \quad (2)$$

図 7 マイクロ波放電励起レーザーの発振特性

$v \sim 10^7 \text{ cm/s}$, $d = 2 \text{ mm}$ とすると, $f \geq 50 \text{ MHz}$ の高周波が必要となる。発振効率の放電周波数に対する依存性を調べた研究によると, 2 mm 程度のギャップでは, 150 MHz 近傍の周波数が最適であるとされる。 150 MHz 以下の周波数ではシースの影響により, 150 MHz 以上の周波数では表皮効果と分布伝送線路効果に基づく放電の不均一性のために, 発振効率が低下すると報告されている。しかしながら, 150 MHz 近傍の高周波は, 大出力の電源が高価で大きかりなものになる。また, テレビ放送に使用される VHF 帯の真ん中に存在するために, 完璧なシールドを施す必要がある⁽¹¹⁾。

このような問題に対して, マイクロ波放電励起を採用した MD (Microwave Discharge) 式 CO_2 レーザの開発が進められている。マイクロ波源に電子レンジ用のマグネトロンを使用しており, 電波法で許された周波数帯で, 小型, 安価, 高効率の電源が利用できる。試作機の断面図を図 6 に示す。放電空間は, 誘電体と金属境界の間に形成され, マイクロ波はマイクロ波の入射窓である誘電体に垂直な電界を形成するように供給される。この構成により, 表皮効果を引き起す誘電体表面に平行な放電が抑制され, 均一なマイクロ波放電が達成される。図 7 はこの試作機 (放電長 400 mm) の発振特性であり, 導波路型 CO_2 レーザとしては最高レベルの発振効率を得られている⁽¹²⁾。

マイクロ波放電は, 誘電体を介して非常に高密度の電力を投入可能であり, 超高密度の安定なグロー放電を実現できる。また, 電源となるマグネトロンは, 出力の高速変調に優れるとともに, 高いピーク出力を容易に発振可能である。これらの利点を活かして, マイ

図 8 マイクロ波放電励起レーザーのパルス発振波形

共振器構成の外観図

X-Z 断面 (負枝不安定型)

Y-Z 断面 (導波路型)

図 9 ハイブリッド共振器の構成

クロ波放電励起 CO_2 レーザは, 平均出力に比べてピーク出力が一けた以上高い, ハイピーク短パルスが発生する。

図 8 にマイクロ波放電励起レーザーのパルス発振波形を示す。放電長 400 mm , 放電体積 15 cm^3 の小型発振器からパルスピーク 1 kW , パルス幅 $30 \mu\text{s}$ の従来にない高速応答パルスが得られている。このようなハイピーク短パルスビームは, 加工時の“切れ味”はピーク出力に対応する強さをもちながら, 加工対象に与える熱影響が小さく, セラミックガラスなどの硬脆材料や樹脂材料の高品位な加工に非常に有効であることが知られており, マイクロ波放電励起レーザーによってもその有効性が実証されている。

マグネトロンを並列運転して, 広い面積のマイクロ波放電を発生させ, スラブ状の高出力拡散冷却型 CO_2 レーザに適用すれば, 電源の制約なしに, ピーク出力

10 kW の小型、高信頼性のレーザ発振器が実現されることが期待できる。

拡散冷却型とは別に、小型の装置で、より大出力の“切れ味”を実現するために、ハイピーク短パルス出力を迫及した発振器（高尖頭値パルス CO₂レーザ）が開発されている。ハイピーク短パルスビームの利点を活かして、セラミックの精密加工、ガラスエポキシの加工など、従来の CO₂レーザでは困難であった加工を可能にしている⁽¹³⁾。

3.3 共振器

加工に使用されるレーザビームには、出力だけでなく、集光性能、対称性などが要求される。スラブ状媒質のように、フレネルナンバーが大きく、非軸対称の媒質から集光性能、対称性に優れたビームを取り出すための共振器が工夫されている。

拡散冷却型高出力 CO₂レーザ用の共振器として最も研究が進んでいるのは、スラブ状媒質とし組み合わせて用いられるハイブリッド共振器であると思われる。図9はマイクロ波放電励起 CO₂レーザに適用されたハイブリッド共振器を示している。媒質断面の短いほうは、2 mm 程度のギャップとし、導波路型共振器を構成し、媒質断面の長い方向に関しては、大きなフレネルナンバー領域においても、基本モードを選択できる不安定型共振器を構成している。不安定共振器は軸外シアライメントされ、出力ビームはミラーの片側から出射される。この結果、出力ビームは位相の揃った中詰まりのビームとして取り出され、ガウスビームに近い集光性能が得られる。また、不安定型共振器は正枝型（Positive-branch）と負枝型（Negative-branch）に分けられるが、共振器ミラーの角度変化に対する光軸の移動量が小さいという特長を有する負枝の不安定型共振器を適用することによって、共振器の安定性を高めている。

不安定型共振器は拡大率（ M 値）を選ぶことによって、ビーム出口における不安定側のビーム径を任意に制御することができる。この特性を利用して図10に示されるように、出力ビームを対称化できる。ハイブリッド共振器によって、図11に示されるような、軸対称ガウスビームに近い出力ビームが得られている。 M 値を最適結合率が得られるように決定した場合、一般的には、出力ビームが非対称になるが、図12に示されるように、シリンドリカル光学系や、トロイダルミラーとして対称化することができる⁽¹⁶⁾。

導波路をアレイ状に並べた構成に対しては、半導体レーザで行われている位相同期アレイ共振器が用いられている。これは、導波路間でレーザ光をリーク、結

図 10 拡大率とビーム対称性の関係

図 11 ハイブリッド共振器の出力ビームパターン

図 12 非等方性ビームの整形方式

合させ、各導波路のビームの位相を同期させて出射することによって、集光性能の高い出力ビームを得るものである。また、多重折り返し共振器も試みられており、同軸状の媒質に対して適用される、ヘリオットセルと名付けられた折り返し共振器などが知られている^{(6)~(11)}。

共振器に関する最近の話題では、拡散冷却型の CO₂レーザとは直接の関係はないが、特に 5 kW 以上の大

図 13 位相整合共振器の構造

図 14 位相整合共振器の出力ビームパターン

出力発振器の高性能化および小型化と信頼性向上に寄与する共振器技術として、位相整合共振器がある。

5 kW を超える高出力になると、共振器取り出しミラーの耐光性の制限から、径の太いビームを用いなければならない。安定型共振器の基本モード（ガウスモード）を出すためには、長大な共振器が必要になる。このため、5 kW を超える大出力 CO_2 レーザにおいては、短い共振器長で大きな基本モード体積の取れる不安定型共振器が使用されることが多かった。不安定型共振器から取り出されるリングモードは、ガウスモードに比べると、集光性能が劣るという欠点がある。

シンプルな短い共振器で、収束性の良い大出力ビームを取り出す手段として、図 13 に示される位相整合共振器(Phase Unified Resonator: PURE)が開発されている。リングモードビームの中心部からも周辺部と位相をそろえたビームを取り出すことで、ガウスビームに近い集光性能が得られる。ビーム径を大きく取れるために、共振器ミラー上のビーム強度が低く、共振器の信頼性が向上する。最近、負枝型の共振器構成とすることで、レーザ出力、ビーム集光性能、およびビームの出射方向（ポインティング）の安定性が格段に向上するという報告がなされている。溶接、切断などの用途で、従来のリングモードをはるかに上回る試験結果も出てきており、純粋なガウスビームを得ることが困難な大出力領域において、レーザ発振器の小型化、高性能化に非常に有効であると思われる⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾。

4. おわりに

高出力レーザを使用した加工システムは、その優れた特性を活かして、産業界に広く普及している。レーザシステムのさらなる用途拡大と使いやすさを求めて、高機能化、高信頼化を追求する努力が続けられている。

本稿では、 CO_2 レーザ発振器に焦点をあて、高出力レーザの小型化と高信頼化に関する最近の話題を紹介させていただいた。円筒形以外の媒質と、媒質の非対称性を克服する共振器を用いた拡散冷却型 CO_2 レーザは、その特性に不明な点が残されているものの、必要最小限の要素から構成されており、高出力レーザの小型化・高信頼化を進めるうえで、有力な新候補となりうるものと考えられる。また、マイクロ波放電励起は、拡散冷却型 CO_2 レーザに、高い機能と実用性を付加し、励起手段として期待される。

高出力レーザには、レーザの種類によらず、共通な問題があり、今回取り上げた技術の中には CO_2 以外のレーザに使われているものも多い。マイクロ波放電励起はエキシマレーザに適用され、非常に小型の発振器を実現している。スラブ状媒質とハイブリッド共振器の組み合わせは、Nd-YAG をはじめとする固体レーザや半導体レーザに適用され、小型の発振器で高品質の高出力ビームを発生することに効果を発揮している。このなかには、別種のレーザにおいては、意外と古くから取り入れられていた概念もある。本質を見極め技術の横通しを進めることで、高出力レーザ全体のレベルが向上していくものと思われる。

今回は発振器の部分について述べたが、“使いやすさ”を実現するためには、システムとしての視点が不可欠である。電力系統や LAN を利用するように、高出力のレーザ光を利用する環境が実現できると思われるが、筆者の能力外のことであり、次の方に期待することとして筆を置かせていただく。

(平成 3 年 12 月 9 日受付)

文 献

- (1) レーザ加工に関する参考書、例えば、レーザ加工技術実用マニュアル(昭 62)新技術開発センター
- (2) 田中・八木・田畑:「高周波無声放電による CO_2 レーザ励起」電学論 A, 104, 217(昭 59-4)
- (3) 木谷, 他:三菱電気技報 63, 4, 17(平 1)
- (4) 菱井, 他:同上 61, 6, 36(昭 62)
- (5) K. D. Laakmann & W. H. Steier: "Waveguides; characteristics modes of hollow rectangular dielectric waveguides", *Appl. Optics*, 15, 5, 1334(1976-5)

- (6) R. Nowack, et al. : "High Power CO₂ Waveguide Laser of the 1 kW Category", *Proc. SPIE*, 1276, CO₂ Lasers Applications II, p. 18(1990)
- (7) J. G. Xin & D. R. Hall : "Compact multipass, single transverse mode CO₂ laser" *Appl. Phys. Lett.* 51, 7, 469(1987-8)
- (8) L. A. Newman, et al. : "High Power Coupled CO₂ Waveguide laser array : " *ibid.*, 48, 25, 1701(1986-6)
- (9) Parazzoli & Chien : "Numerical Analysis of a CW RF Pumped CO₂ Waveguide Laser", *JEEE J. Qunt. Elec.*, QE-22, 3, 479(1984-3)
- (10) D. R. Hall & H. J. Baker : "Area scaling boosts CO₂-laser performance", *LASER FORCUS WORLD*, p. 77(1989-10)
- (11) D. He & D. R. Hall : "Frequency Dependence in RF Discharge Excited Waveguide CO₂ Lasers", *IEEE J. Qunt. Elec.*, QE-20, 5, 509(1984-5)
- (12) Nishimae & Yoshizawa : "Development of CO₂ laser excited by 2. 45 GHz microwave discharge, *Proc. SPIE* 1225, High-Power Gas Lasers p. 340(1990)
- (13) 森安, 他 : 1990 年度精密工学会秋季学術講演論文集 p. 149(平 2)
- (14) Yasui, Tanaka, & Yagi : "An unstable resonator with a phase-unifying output to extract a large uniphase beam of a filled-in circular pattern", *J. Appl. Phys.* 65, 1, 17(1989-1)
- (15) 竹中, 他 : 「負枝位相整合共振器 CO₂レーザ」平成 3 年電気関係学会関西支部連合大会予稿集 p. G 203
- (16) 西前, 他 : 「マイクロ波放電励起 CO₂レーザの開発」平成 3 年レーザ学会学術講演会第 11 回年次大会予稿集 p. 78(平 3)

西 前 順 一

昭和 33 年 7 月 8 日生。57 年 3 月東京大学工学部電気工学科卒業。59 年 3 月東京大学大学院電子工学科修士課程修了。同年 4 月三菱電機(株)入社, 現在に至る。その間, マイクロ波放電励起レーザ, ハイブリッドレーザ共振器に関する研究に従事。

吉 沢 憲 治

昭和 25 年 9 月 13 日生。48 年 3 月大阪大学工学部通信工学科卒業。50 年 3 月大阪大学大学院通信工学専攻修士課程修了。同年 4 月三菱電機(株)入社, 現在に至る。その間, マイクロ波放電光源, マイクロ波励起レーザに関する研究に従事。