

FRP のレーザーによる高速，高品質切断技術の開発

Development in High Speed and High Quality Laser Cutting Process
in Fiber Reinforced Plastics

技術本部 石出 孝*¹ 白田 春雄*²
松本 長*³
下関造船所 磯部 松久*⁴

KFRP (Kevlar Fiber Reinforced Plastics) のトリミングは従来人手による粉じん雰囲気でのカット切断に頼っている。この省人化のためレーザーによる切断を検討し、CO₂レーザー、YAGレーザー、ExcimerレーザーとKFRPの相互作用を調べた。その結果、CO₂レーザーとExcimerレーザーを併用した新しいトリム方法を提案した。この方法は先行する集光CO₂レーザービームで高速の切断を行いつつ、後行のExcimerレーザーで切断面に生じた炭化層を除去する方法である。また本方法に用いる光学系、加工系を製作し、板厚1mmのKFRP材に対し16.7mm/sの高速、高品質切断を実現した。

The ordinary method of KFRP (Kevlar Fiber Reinforced Plastics) trimming in which a cutter was used by a worker needed much time and labor. The working environment was not good due to cutting dust. So we tried to use laser processing in trimming instead of a hand cutter. First, we investigated the interaction between three kinds of lasers (CO₂, YAG and Excimer lasers) and KFRP. Finally we have proposed a new cutting method using CO₂ and Excimer lasers. We have manufactured the optical system and cutting head and carried out high speed and high quality cutting.

1. ま え が き

航空機用部材等に用いられるFRPのトリム作業（部材周辺の不要部分を切断する作業）は、回転刃物を用いたハンドカットによる手作業により行われている。この切断面は機械的にひきちぎられることから繊維が毛羽立ちマトリックスの樹脂も荒れ、仕上げ作業として人手による磨き作業が必要となる。これら人手による作業がトリム工程に多大な工数がかかる一つの要因となっている。さらにトリム作業は切断で生じた微細な切粉の舞う中で防じんマスクを着用しての作業であることから、作業環境の改善が強く望まれている。

そこで、Epoxyのマトリックスに対しKevlar繊維を織込んでいるKFRPに対する各種レーザー切断のトリム作業への適用を検討するとともに切断、研磨作業の自動化、省人化が可能で高速、高品質トリムが可能な新しいレーザープロセスを検討した。

2. 各種レーザーによるKFRPの切断特性

現在、加工用レーザーで比較的高出力の得られるレーザーにはCO₂、YAG、Excimerレーザーがある。そこで3kWのCO₂レーザー発振器、400WのパルスYAGレーザー発振器、200WのExcimerレーザー（KrF発振）発振器を用い、各々のレーザーによる切断特性の比較を行った。用いた材料は板厚1mmのKFRPである。いずれの場合でも切断ガスとしてArガスを用いている。また本プロセスで狙う切断速度は、従来プロセスであるハンドカットと同等の速度とし、16.7mm/sとしている。

CO₂レーザーでは平均出力160W程度のパルス状の発振（パルス幅0.5ms、パルス周波数150Hz）により切断速度16.7mm/s程度の高速の切断が可能である。ただし切断面はいずれも黒色となり、品質上好ましくない。一方、YAGレーザーの同一平均出力では、切断速度が5mm/s以上での切断は難しく、切断部表面は焦げ、切断面も荒れている。そこでピーク出力を20kWまで上

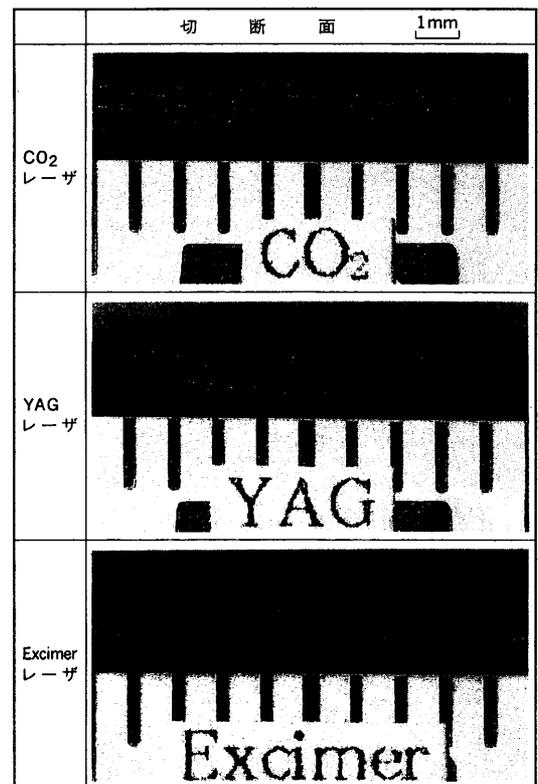


図1 各種レーザーによる切断面の比較 Excimerレーザーによる切断面品質が最も良く、CO₂レーザー切断面は炭化する。YAGレーザーによる切断は難しい。
Comparison between CO₂, YAG and Excimer laser cutting quality

げた切断も試みたが切断面の荒れは改善できなかった。Excimerレーザーではパルス幅がnsと短く、材料に対する光の浸透深さが浅いことから熱影響の少ない切断が可能なもの集光ビームでの切断速度は遅く、100Wのレーザー出力でも切断速度は0.167

*1 高砂研究所製造技術開発センター 工博 *3 高砂研究所次長 工博
*2 高砂研究所製造技術開発センター *4 機械部長

mm/s 以下である。

以上の切断面の典型的な例を図1に示す。この切断面の赤外吸収スペクトル計測結果から、Excimer レーザ切断面からはベンゼン核、炭化水素基等が認められ KFRP の成分である Epoxy, Polyamid 樹脂が確認されるものの、CO₂ レーザ、YAG レーザの切断面ではすす状物質となっていることが分かった。

このように波長により切断品質が異なるのは材料に対する各レーザの反射、透過特性が異なることがその一因と考えられる。そこで KFRP に対し Excimer レーザ、YAG レーザについては積分方式分光反射率計測を、CO₂ レーザでは赤外分光光度計による反射率の計測を実施した。その結果、YAG レーザの反射率が約 40% と最も高く、CO₂ レーザが 30%、Excimer レーザが 5% となった。さらに透過率についても YAG レーザ、CO₂ レーザ、Excimer レーザの順に大きいことからビームエネルギーの材料へのカップリングは Excimer レーザが最も良く、YAG レーザが低いことが分かった。ただし、この計測結果は加工中の状態とは異なり、実際の加工ではさらに複雑になることが予想される。

3. Excimer レーザによる切断高速化

前述までの検討結果から、Excimer レーザにより切断速度を向上することが可能なら高品質な切断が実現できる。そこで Excimer レーザによる KFRP のアブレーション特性を調査した。その結果、図2(a)に示すようにレーザフルーエンス（レーザエネルギー密度）が $10 \times 10^{-4} \text{ J/m}^2$ 以上で材料の除去深さは飽和している。これはビーム照射部に生じるレーザ誘起プラズマにレーザビームが吸収される⁽¹⁾ことに起因しており、ビームエネルギーを有効に利用するには集光ビームのような高フルーエンスビームを用いるより、 $10 \times 10^{-4} \text{ J/m}^2$ 程度のレーザフルーエンスに調整したレーザビームによる加工が適していることが分かる。そこで集光ビームを線状ビームとし切断する手法を検討した。

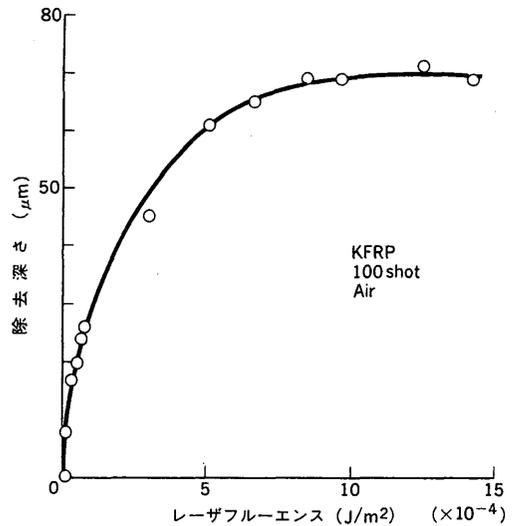
線状ビームは2枚の円筒レンズと結像レンズから成る合計7枚のレンズ群から成る光学系で作り出し、円筒レンズ間距離によりビーム長さを自由に変えることが可能である。図2(b)にこの光学系の集光ビーム特性をビーム強度を考慮した光線追跡⁽²⁾により求めた結果を示す。この光学系でビーム長さ3mmとして切断を行った際の切断速度を図2(c)に示した。板厚1mmの材料では0.5mm/s以下の切断速度となり、集光ビームを用いて切断する場合より切断速度の高速化は可能なものの目標切断速度を Excimer レーザ単体で得るのは難しいことが分かった。

4. Excimer 併用 CO₂ レーザ切断技術

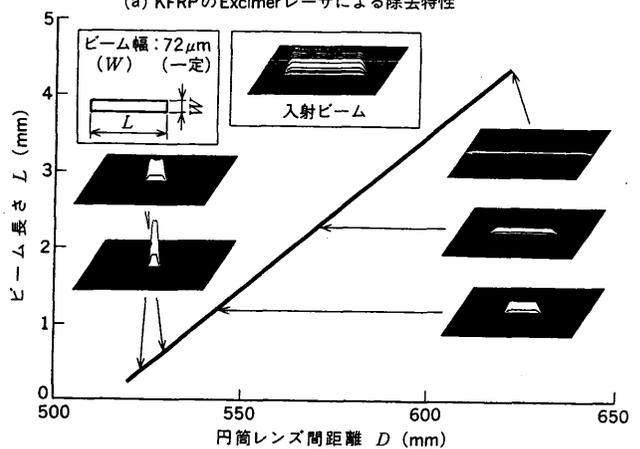
前述の各種レーザによる KFRP の切断結果から、CO₂ レーザでは高速の切断が可能なものの、切断面が炭化し切断品質が劣化し、Excimer レーザでは熱影響が極力抑えられた高品質な切断面が得られるものの切断速度は極端に遅くなることが分かった。そこでこれら両者の欠点を補いつつ、高速高品質切断を実現するため、CO₂ レーザと Excimer レーザを併用した切断技術を検討した。

4.1 Excimer 併用 CO₂ レーザ切断の原理

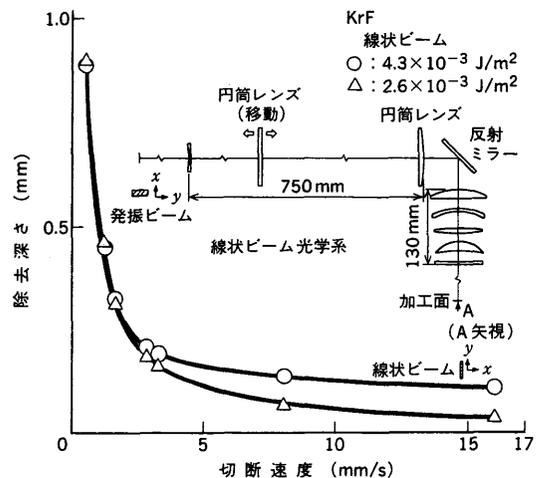
図3に本切断方法の原理を示す。先行の集光された CO₂ レーザビームで KFRP を高速切断すると同時に後行の整形された線状ビームにより CO₂ レーザで生じた炭化層を蒸発除去する方法である。この炭化層の厚さは数 μm から数 $10 \mu\text{m}$ であることから Excimer レーザで十分除去可能で、高速の切断にも対応可能



(a) KFRP の Excimer レーザによる除去特性



(b) 線状ビーム光学系によるビーム強度分布形状



(c) Excimer 線状ビームによる切断速度

図2 Excimer レーザによる切断の高速化
Excimer レーザ単体で切断速度をあげるため線状ビームによる切断を検討したものの十分な切断速度は得られなかった。
High speed cutting method by Excimer laser

と考える。

全体システムでは、三次元形状の部材に適用できることを考慮し、どのようなビーム伝送を行っても2種類のビームの相対位置が一定となることが望ましい。そこでビーム伝送には二つのレーザの光軸を一致させ、Excimer レーザをリング状のビームとし、この中央に CO₂ レーザを伝送することを考えた。CO₂ レーザをリ

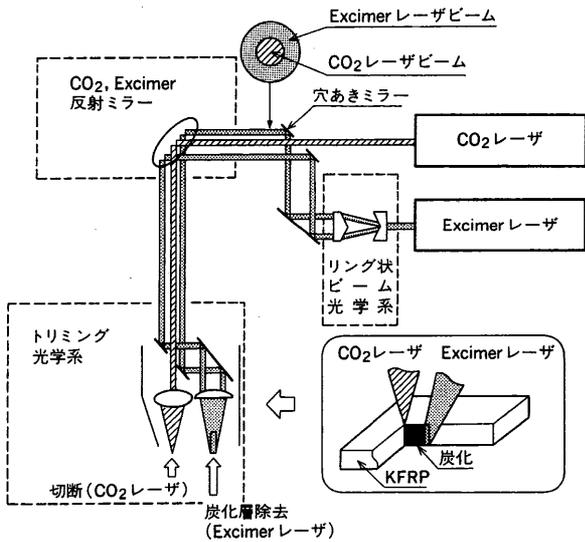
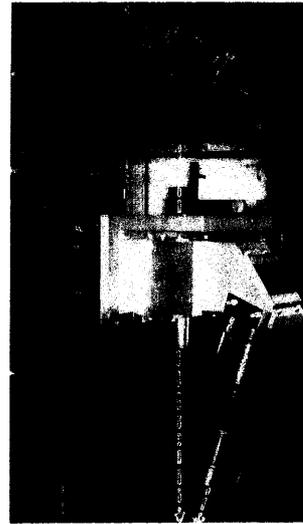
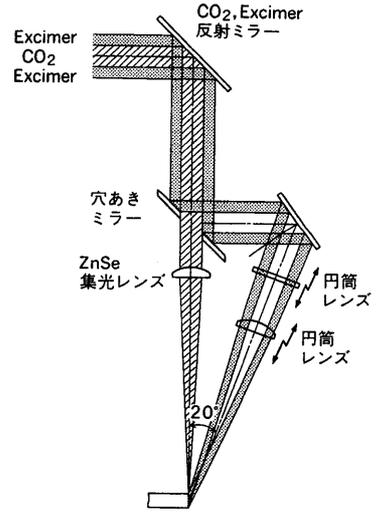


図3 Excimer 併用 CO₂ レーザトリミングシステム
三次元形状部材にも適用可能な Excimer レーザと CO₂ レーザを用いたトリミングシステムの構成とその切断原理を示す。
CO₂ and Excimer laser trimming system



(a) 外観



(b) 光学系の構成

図5 Excimer 併用 CO₂ レーザトリミングヘッド CO₂ レーザは集光し切断に利用し、Excimer レーザは線状ビームとして炭化層を除去するトリミングヘッドの構成を示した。
Trimming optics with CO₂ and Excimer laser

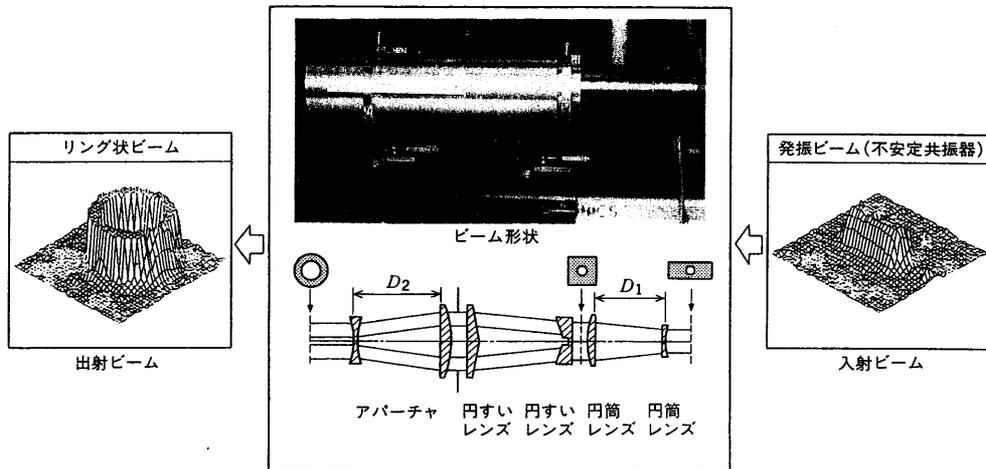


図4 リング状ビーム光学系 くの形状の発振ビームをリング状のビームとする光学系の構成とそのビーム強度分布計測結果を示す。
Ring beam optics

リング状としなかったのは、本システムが CO₂ レーザ加工機としても十分機能するために CO₂ レーザのビーム品質劣化を避けたためである。各々のビームは穴あきミラーにより合成された後に CO₂ レーザと Excimer レーザを反射する 2 波長反射ミラーで反射され加工光学系に導かれる。ここで CO₂ レーザと Excimer レーザは再分岐され、CO₂ レーザは集光し、Excimer レーザは線状ビームに整形され加工に用いられる。

4.2 光学系の検討

4.2.1 リング状ビーム光学系

図4に Excimer 発振ビームをリング状ビームへ整形するための光学系の構成と、入射ビームと出射ビームの強度分布の実測値を示す。発振ビームは 7×26 mm の長方形のビームとして発振される。これを円筒レンズで正方形のビームに整形後、円すいレンズの組合せによりビーム中央部を中空化する。さらにコリメート過程でアパーチャによりビームの周辺を削除し、内径 13 mm、外径 40 mm 以下のリング状ビームに形を整える。このビームの内径は CO₂ レーザのビーム径から決め、外径は加工ヘッドの寸法が大きくなり過ぎないように設定した。ただしビームの内、外

径は図4のレンズ間距離 D_1 、 D_2 を調整することにより変化させることができる。同図中の計測されたビーム強度分布により、くの形状の発振ビームがリング状に整形されていることが確認できた。また、この光学系の伝送損失は約 20% であった。

4.2.2 加工光学系

加工光学系のうち線状ビームに整形する Excimer レーザ用光学系の仕様設定には、炭化層を除去するために必要なレーザーフルエンスを明らかにする必要がある。そこで、KFRP を CO₂ レーザで切断した際の炭化層切断面を用い、炭化層の除去に必要なレーザーフルエンスを求めた。このときの CO₂ レーザ切断条件は平均出力 160 W、切断速度 16.7 mm/s である。その結果、炭化層除去に必要なレーザーフルエンスは $1\sim 2 \times 10^{-5}$ J/m² であることが分かった。さらに、対象としている KFRP は板厚が 1~2 mm で、16.7 mm/s の除去速度で炭化層を除去することを考えると、レーザーのパルス周波数を 100 Hz (発振器では 300 Hz まで可能)、ビーム寸法 0.5×3 mm によれば、平均出力 30 W 程度の先端出力により十分炭化層の除去が可能なレーザーフルエンスが得られる。そこで Excimer レーザのビーム寸法が 0.5×3 mm

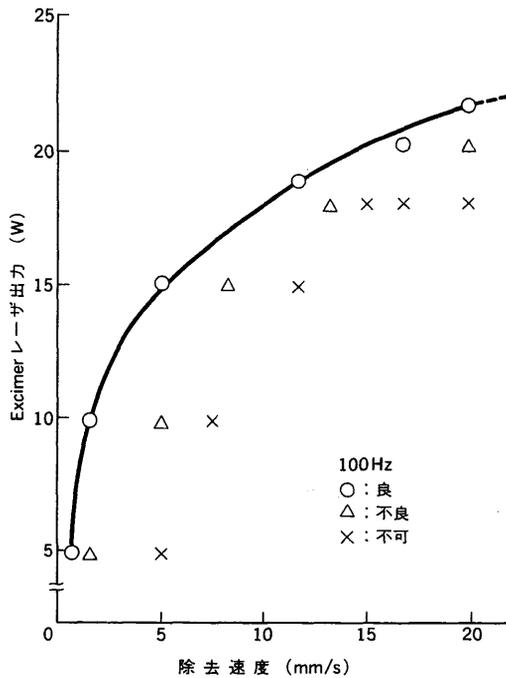


図6 CO₂レーザー切断面炭化層の除去速度 1mmの板厚のKFRPをCO₂レーザーで切断し、その切断面炭化層を除去するのに必要なExcimerレーザー出力と除去速度との関係。
Removal speed of carbonized layer with trimming optics

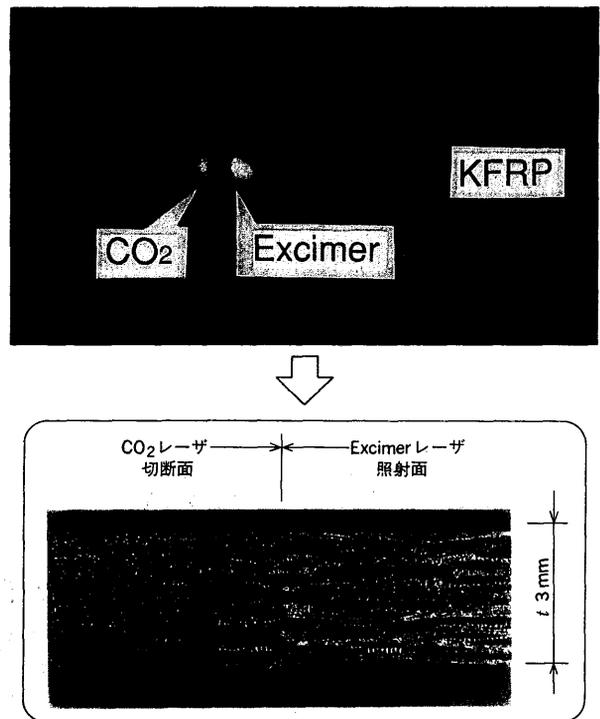


図7 Excimer併用CO₂レーザーによるKFRPの切断状況
製作したトリミングシステムによるKFRPの切断状況及びその切断面を示す(切断速度16.7mm/s).
CO₂, Excimer laser cutting in KFRP

となる加工光学系を製作した。その構成を図5に示した。2波長反射ミラーで反射されたビームのうち、中央のCO₂レーザーは焦点距離254mmのZnSeレンズで集光される。一方リング状のExcimerレーザービームは穴あきミラーで再度反射され、2枚の円筒レンズによりビーム寸法が可変な線状ビームとし、ビーム入射角20°で切断面に斜入射する。この線状ビームは幅0.5mm、長さ(KFRP板厚と平行な方向のビーム寸法)1mmから3mmまで可変で、CO₂レーザーの集光点の10mm後方の位置に照射される構成となっている。この加工光学系でのExcimerレーザービームの伝送損失は8%であり、光学設計により予想される値とほぼ同等の値となった。

4.3 加工試験結果

前述の光学系を用い、各々のビーム単体により1mmの厚さのKFRPの切断を実施した。CO₂レーザーは先端出力約160Wで切断速度16.7mm/sでの切断が可能であった。この切断面に対し図6に示すように、Excimerレーザーは約20Wのレーザー出力でCO₂レーザー切断により生じた炭化層の除去が可能である。図7には、KFRPの切断面にCO₂レーザー集光ビームとExcimerレーザー線状ビームを同時に照射した状況を示した。また、両者ビームを同時照射しつつ切断を実施した際、切断速度16.7mm/sにより切断断面に炭化層のない高品質な切断面が得られることが確認できた。

5. む す び

KFRPのトリム作業に各種レーザーによる切断の適用を検討し、新たなレーザー切断方法としてExcimer併用CO₂レーザー切断方法の提案を行い、光学系を製作し切断による実証を行った。得られた結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) KFRP (板厚1mm) を対象とした各種レーザーによる切断を検討した結果、YAGレーザーでは良好な切断は難しく、CO₂レーザーでは160W程度の出力で16.7mm/s以上の高速切断が可能なもの切断面が炭化し好ましくない。一方、Excimerレーザーでは高品質な切断面が得られるもののレーザー出力を上げてもレーザー誘起プラズマによるビーム吸収により切断速度は遅く、実用には適さない。
- (2) 各レーザーの長所を生かし、欠点を補う切断方法とし、CO₂レーザーとExcimerレーザーを併用した新しいレーザー切断方法を提案した。この方法は三次元形状部材への適用を考慮し、Excimerレーザーをリング状ビームに整形し、その中央をCO₂レーザーを通したビーム伝送を行う。ビーム伝送には二つの波長を反射するミラーを用い、集光したCO₂レーザーで切断するとともに、これで生じた炭化層を線状ビームに整形したExcimerレーザーで同時に蒸発除去する方法である。
- (3) Excimer併用CO₂レーザー切断用光学系としてリング状ビーム光学系、加工ヘッドを製作しこれにより、CO₂レーザー出力160W、Excimerレーザー出力20Wで切断速度16.7mm/sの速度による切断が可能であることを示した。

参 考 文 献

- (1) Miyamoto et al., Processing Mechanism of Ceramics with High Power Density Lasers, LAMP '92 Proceedings p. 293~298
- (2) Ishide et al., Beam energy transmission mechanism in high power YAG laser welding, ICALEO '93 Proceedings p.305~311
- (3) 石出ほか, レーザービーム評価手法の開発, 第28回レーザー熱加工研究会論文集, 平成4年7月 p.31~41