

レーザ除染技術の開発（3）  
(レーザ伝送系の特性試験)  
(技術報告書)

1999年4月

核燃料サイクル開発機構  
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松4番地49  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:  
Technical Cooperation Section,  
Technology Management Division,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1194,  
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)  
1999

レーザ除染技術の開発（3）  
(レーザ伝送系の特性試験)  
(技術報告書)

福井康太\*, 小川竜一郎\*,  
石島 昇\*, 谷本健一\*

## 要 旨

レーザ除染法は、物質表面にレーザ光を照射し、表層面を急速加熱して蒸散あるいは溶融させて、それらをシールドガスとともに排気系に捕集することにより汚染を除去するものである。この方法の利点は、徹底除染が可能であること、二次廃棄物量が少なく処理が容易なこと、遠隔除染が可能であることである。本試験は、ステンレス鋼表面の除染に適するレーザとして選定された YAG レーザ（ノーマルパルス型、Q スイッチパルス型）を用いて、レーザ伝送に関する試験及び放射性廃棄物への適用性を試験評価した。

主な結果は以下の通りである。

### (1) レーザビーム伝送特性試験

レーザ光の伝送媒体に光ファイバを用いて、エネルギーの伝送特性を明らかにし、適用性を評価した。ノーマルパルス YAG レーザは、78%以上の伝送効率を確保しながら、除染に必要なエネルギーである数十Wを十分上回る最大 420W のエネルギー伝送が可能である。Q スイッチパルス YAG レーザは、除染に必要なエネルギーを単一の光ファイバで伝送するのは困難である。

### (2) 各種形状模擬試験片の除染試験

実廃棄物を模擬した L 型アングル、ボルト、円筒の試験片を用いて除染係数を確認した。溶融が主体であるノーマルパルス YAG レーザは、すべての試験片に対して除染係数  $10^2$  程度が得られた。Q スイッチパルス YAG レーザは、表面が平滑なアングルや円筒に対しては  $10^2$  程度或いはそれ以上の除染係数が得られたが、ボルトは 10 以下であった。

### (3) 二次生成物特性測定試験

レーザ除染によって生じる二次生成物の回収方法の検討に反映するため、シールドガスの種類等をパラメータとして、二次生成物の発生量、粒径、飛散状況等を明らかにする試験を行った。この結果、シールドガスとしてアルゴンを用いた場合には、溶融による落下ドロスが主な二次生成物となる。シールドガスに空気を用いた場合には、燃焼の効果によって飛散ドロスは減少するが気中浮遊物が増加する。気中浮遊物の粒径は  $3 \mu\text{m}$  以下が主であり、ドロスの飛散はほぼ 1m の範囲内であった。

---

\*大洗工学センター 照射施設運転管理センター 環境保全課

Development of laser decontamination technique(3)  
(Experiments of laser beam transmission)

Yasutaka Fukui\*, Ryuichirou Ogawa\*  
Noboru Isijima\*, Kenichi Tanimoto\*

Abstract

Laser decontamination system is able to decontaminate thoroughly, and it is able to mitigate the secondary waste quantity, and the system is able to operate by remote control. It is advantageously method compared with other decontamination methods. Irradiation by YAG laser beam is competent for decontamination of stainless steel surface.

In this paper, using normal and Q switch pulse YAG laser, Experiments to confirm transmission efficiency using mirror and Optical fiber, shape dependency at decontamination, and secondary waste size distribution were performed. The results of the work are as follows.

- (1) The beam energy of normal pulse YAG laser is able to transmit using optical fiber. The beam energy of Q switch pulse YAG laser is difficult to transmit using a single optical fiber.
- (2) Normal pulse YAG laser has  $10^2$  Decontamination Factor(DF) on L-shaped, bolt-shaped, and cylindrical-shaped waste. Q switch pulse YAG laser has over  $10^2$  DF on L-shaped and cylindrical-shaped waste, but on the other hand, under 10 DF on bolt-shaped waste.
- (3) In the case of using the argon gas as auxiliary gas, almost particles of secondary products are dropped as dross. In the case, scattering area is within 1m. On the other hand, in the case of using the atmosphere gas as auxiliary gas, almost particles of secondary products are floated in the air, its diameter are under  $3\mu m$ .

---

\* Oarai Engineering Center Waste Management Section

## 目 次

1.はじめに .....	1
2.除染用集光光学系の設計・製作 .....	3
2.1 設計概要 .....	3
2.2 設計内容 .....	3
2.3 設計 .....	3
2.4 結果 .....	5
3.試験装置 .....	7
3.1 レーザビーム伝送特性試験 .....	7
3.2 各種形状模擬試験片の除染試験 .....	9
3.3 二次生成物特性測定試験 .....	10
4.試験方法 .....	12
4.1 レーザビーム伝送特性試験 .....	12
4.2 各種形状模擬試験片の除染試験 .....	13
4.3 二次生成物特性測定試験 .....	15
5.試験結果 .....	17
5.1 レーザビーム伝送特性試験 .....	17
5.2 各種形状模擬試験片の除染試験 .....	19
5.3 二次生成物特性測定試験 .....	22
6.考察 .....	24
6.1 レーザビーム伝送特性試験 .....	24
6.2 各種形状模擬試験片の除染試験 .....	25
6.3 二次生成物特性測定試験 .....	27
7.まとめ .....	29
7.1 ビーム伝送光学系・集光光学系の伝送試験 .....	29
7.2 各種形状模擬試験片の除染試験 .....	29
7.3 二次生成物の飛散状況確認試験 .....	30
7.4 今後の課題 .....	30
8.謝辞 .....	32
9.参考文献 .....	33
図 表 .....	34
付 錄(データ表) .....	145

## 図表目次

表 3.1 パルス YAG レーザ発振器の仕様 .....	34
表 3.2 伝送試験に使用する伝送光学系の仕様 .....	34
表 3.3 伝送特性試験に使用する試験片の仕様 .....	34
表 3.4 照射試験に使用する模擬試験片の仕様 .....	35
表 3.5 伝送特性試験に使用する試験片の仕様 .....	35
図 2.1 ノズル設計方法フローチャート .....	36
図 2.2 光学系概念図及びレンズ仕様 .....	37
図 2.3 スポットダイアグラム .....	38
図 2.4 ノズル概念図 .....	39
図 2.5 ノーマルパルス YAG レーザファイバ伝送出射ノズル外観写真 .....	41
図 2.6 伝送ビームによる模擬汚染除去試験片外観写真 .....	43
図 4.1 ノーマルパルス YAG レーザのファイバ伝送試験概念図 .....	45
図 4.2 ノーマルパルス YAG レーザのファイバ伝送試験写真 .....	47
図 4.3 Qスイッチパルス YAG レーザのミラー伝送試験概念図 .....	49
図 4.4 Qスイッチパルス YAG レーザのミラー伝送試験写真 .....	51
図 4.5 Qスイッチパルス YAG レーザのファイバ伝送試験概念図 .....	53
図 4.6 Qスイッチパルス YAG レーザのファイバ伝送試験写真 .....	55
図 4.7 模擬試験片除染試験概念図 (Qスイッチパルス YAG レーザ) .....	57
図 4.8 模擬試験片除染試験概念図 (ノーマルパルス YAG レーザ) .....	58
図 4.9 除染試験装置写真 (Qスイッチパルス, L型アングル) .....	59
図 4.10 除染試験装置写真 (Qスイッチパルス, 円筒) .....	59
図 4.11 除染試験装置写真 (Qスイッチパルス, ボルト) .....	61
図 4.12 除染試験装置写真 (ノーマルパルス, L型アングル) .....	61
図 4.13 除染試験装置写真 (ノーマルパルス, 円筒) .....	63
図 4.14 除染試験装置写真 (ノーマルパルス, ボルト) .....	63
図 4.15 照射方法 (Qスイッチパルス, L型アングル) .....	65
図 4.16 照射方法 (Qスイッチパルス, 円筒) .....	66
図 4.17 照射方法 (Qスイッチパルス, ボルト) .....	67
図 4.18 照射方法 (ノーマルパルス, L型アングル) .....	68
図 4.19 照射方法 (ノーマルパルス, 円筒) .....	69
図 4.20 照射方法 (ノーマルパルス, ボルト) .....	70
図 4.21 二次生成物特性測定試験概念図 .....	71

図 4.22 二次生成物特性測定試験装置外観写真	73
図 5.1 ノーマルパルス YAG レーザのファイバ伝送特性	75
図 5.2 ノーマルパルス YAG レーザのファイバ伝送効率	76
図 5.3 伝送ビームパターン	77
図 5.4 伝送ビーム径と拡がり角	79
図 5.5 Qスイッチパルス YAG レーザのミラー伝送特性	80
図 5.6 Qスイッチパルス YAG レーザのミラー伝送効率と損失	81
図 5.7 ミラー伝送前後のビームパターン 1/2	83
図 5.8 ミラー伝送前後のビームパターン 2/2	85
図 5.9 Qスイッチパルス YAG レーザのミラー伝送によるビーム径の変化	87
図 5.10 ビームパターンの伝送距離依存性 1/2	89
図 5.11 ビームパターンの伝送距離依存性 2/2	91
図 5.12 Qスイッチパルス YAG レーザのファイバ伝送特性	93
図 5.13 損傷したファイバの外観写真	95
図 5.14 Qスイッチパルス YAG レーザのファイバ伝送効率	97
図 5.15 Qスイッチパルス YAG レーザのファイバ入射強度特性	98
図 5.16 ビームパターン 1/3 (Qスイッチパルス, ファイバ長: 0.5m)	99
図 5.17 ビームパターン 2/3 (Qスイッチパルス, ファイバ長: 0.5m)	101
図 5.18 ビームパターン 3/3 (Qスイッチパルス, ファイバ長: 0.5m)	103
図 5.19 Qスイッチパルス YAG レーザ照射部位別 DF 測定結果	105
図 5.20 Qスイッチパルス YAG レーザ照射試験片外観写真	107
図 5.21 Qスイッチパルス YAG レーザ照射部位別 DF 測定結果	109
図 5.22 Qスイッチパルス YAG レーザ照射試験片外観写真	111
図 5.23 Qスイッチパルス YAG レーザ照射部位別 DF 測定結果	113
図 5.24 Qスイッチパルス YAG レーザ照射試験片外観写真	115
図 5.25 Qスイッチパルス YAG レーザ照射試験 DF の形状依存性	117
図 5.26 ノーマルパルス YAG レーザ照射試験部位別 DF 測定結果	118
図 5.27 ノーマルパルス YAG レーザ照射試験片外観写真	119
図 5.28 ノーマルパルス YAG レーザ照射飛散物発生状況概念図	121
図 5.29 ノーマルパルス YAG レーザ照射部位別 DF 測定結果	122
図 5.30 ノーマルパルス YAG レーザ照射試験片外観写真	123
図 5.31 ノーマルパルス YAG レーザ照射試験分割方法	125
図 5.32 ノーマルパルス YAG レーザ照射部位別 DF 測定結果	126
図 5.33 ノーマルパルス YAG レーザ照射試験片外観写真	127
図 5.34 ノーマルパルス YAG レーザ照射試験 DF の形状依存性	129
図 5.35 ノーマルパルス YAG レーザ照射試験 DF の形状依存性	130

図 5.36 ノーマルパルス YAG レーザ照射試験片外観写真	131
図 5.37 ノーマルパルス YAG レーザ照射試験片外観写真	133
図 5.38 ノーマルパルス YAG レーザ照射試験片外観写真	135
図 5.39 気中浮遊物粒径分布へのシールドガス種類の影響	137
図 5.40 落下ドロスへのシールドガス種類の影響	138
図 5.41 落下ドロスへのシールドガス流量の影響	139
図 5.42 落下ドロスへの繰り返し速度の影響	140
図 5.43 落下ドロスへのデューティ比の影響	141
図 5.44 落下ドロスへの移動速度の影響	142
図 6.1 ノーマルパルス YAG レーザのファイバ伝送報告例 <sup>4)</sup>	143
図 6.2 照射手順	144

## 1. はじめに

レーザ除染法は、物質表面にレーザ光を照射し、表面層を急速加熱し蒸散あるいは溶融させることにより汚染を除去するものである。この原理は、すでにセラッミクポリマーの微細加工、各種薄膜の生成、電子回路の修正(リペアリング)等に応用されている。

この原理を原子力施設のデコミッショニングや放射性廃棄物処理における除染作業に適用すべく、これまでに以下の開発試験を実施した。

- ① 文献調査及び Q スイッチパルス YAG レーザによる SUS304 ステンレス鋼の基礎的な表面除去試験を行い、金属表面の除染にレーザ光が適用できることを明らかにした<sup>1)</sup>。
- ② 各種レーザ(CO<sub>2</sub> レーザ、CO レーザ、YAG レーザ、エキシマレーザ)を用いて、核燃料施設で用いられている主要な材料(SUS304 ステンレス鋼、SS41 炭素鋼、鉛、鉛ガラス、アクリル)に対して模擬汚染物質(ニッケルチタンエロー塗装)の除去試験を行い、各種材質に対し最適なレーザ光を選定した<sup>2)</sup>。
- ③ レーザ除染システムの概念検討と、ステンレス鋼に最適な YAG レーザを用いて、模擬汚染物質(亜鉛メッキ)の除染試験を行い、YAG レーザがステンレス鋼に対し、高除染性能( $DF=10^3$ )を有することを確認した<sup>3)</sup>。

これらの成果を含まえ、デコミッショニングの現場で使用するレーザ除染システムを構築するため、伝送光学系の検討と廃棄物形状依存性を確認するため、以下の試験を実施した。

### ① レーザビーム伝送特性試験

先に行われた模擬汚染を用いた除染試験<sup>3)</sup>によって選定されたノーマルパルス YAG レーザ(以下、N-P YAG)及び Q スイッチパルス YAG レーザ(以下、Q-P YAG)の伝送性能の確認試験を実施した。

レーザ光の伝送方法には、取扱い上の自由度が高い石英光ファイバを選定し、N-P YAG レーザと Q-P YAG レーザについて試験を行った。また、Q-P YAG レーザについてはビーム伝送に関する研究が少ないとから、ミラーによる伝送方法についても合わせて試験を行い、エネルギー密度の伝送性能を確認した。

## ② 各種形状模擬試験片の除染試験

実廃棄物を模擬した各種形状の試験片 3 種について除染試験を実施した。

適用するビーム伝送法は①の試験の検討結果に基づいて N-P YAG レーザではファイバ伝送、Q-P YAG レーザではミラー伝送で行った。除染性能は、模擬汚染物質の残存量から DF を求め評価した。また、各試験片の部位別の DF を求めて除染が困難な部分などの有無について評価した。

## ③ 二次生成物特性測定試験

レーザ除染では、二次生成物として落下ドロスや気中浮遊物が発生する。N-P YAG レーザによる試験片のレーザ照射試験を行い、二次生成物の発生量、発生挙動、粒径と、シールドガスの種類、シールドガスの流量、繰返し速度、デューティー比、移動速度の各パラメータとの関係を明らかにし、さらに発生した二次生成物の回収方法について検討した。

## 2. 除染用集光光学系の設計・製作

### 2.1 設計概要

N-P YAG レーザの石英ファイバ伝送に用いる除染用集光光学系(ノズル)の設計・製作を行った。伝送ビーム特性(発散角、強度分布など)の測定を行い、伝送ビームの集光特性について調査し、必要なエネルギー密度が得られることを確認するとともに、実際に試験片へレーザを照射し除染性能の確認を行った。

本ノズルは3章で行う除染性能確認試験で用いるものである。

### 2.2 設計内容

#### (1) 設計条件

本ノズルはN-P YAG レーザをファイバで伝送し、円筒型の除染対象物の内面を除染することを目的として設計した。設計条件は以下の2点である。

- ファイバから出射されたレーザ光をコア径程度( $\phi 600 \mu\text{m}$ )まで集光可能。
- 円筒模擬試験片の全内面( $\phi 66\text{mm}$ 、高さ $30\text{mm}$ )に適用可能。

#### (2) 設計方法

設計にあたって、まずファイバを通った後のレーザ光の広がり角度を測定した。得られた広がり角度から光学レンズの形状、焦点距離、枚数を選び、専用の光学設計ソフトで集光性の確認を行い、除染対象となる円筒廃棄物の内面に照射できるか確認し、ノズルの仕様を決定した。フローチャートを図2.1に示す。

### 2.3 設計

#### (1) ファイバから出射されるレーザ光の拡がり角

ファイバ出射端から $30\text{mm}$ の位置で出射光の径を測定したところ約 $10\text{mm}$ であった。出射光拡がり角(NA)は $5/30=0.167$ である。

#### (2) 光学系(形状、焦点距離、枚数)の選定

球面レンズの場合、球面収差のために光がレンズ中心以外を通過すると理想的な結像面で像を結ばなくなり光源よりも大きくなる。したがって、像の大きさを実体と同じにするための球面収差補正が必要となり、コリメート用と集光



### (3) 光学設計ソフトによる集光性の確認

集光性の確認は光線追跡による光学設計ソフト(オプト社製光学設計プログラム OPTAS)を用い、スポットダイアグラム(点光源のあるレンズ系により結像した場合にできる像)を求めてることで行った。スポットダイアグラムを求めてることによって、そのぼけ量とずれ量、つまり収差の補正具合が分かる。計算の入力パラメータとしては、NA、ファイバ径、レンズ形状、レンズ間距離、ファイバ端とレンズ間の距離である。

上記により決定したレンズ形状、レンズ間距離、ファイバ端とレンズ間の距離、集光光学系とレンズ間の距離から、概略的なノズル形状を決定した。

## 2.4 結果

### (1) 集光性能

決定した組み合せレンズの仕様、スポットダイアグラム及びノズルの概略図をそれぞれ図 2.2～図 2.4 に示す。ここで、図 2.3(b)はファイバ中心から出たレーザ光、図 2.3 の(a)と(c)はそれぞれファイバのコア断面の上端及び下端から出た光に対するスポットダイアグラムである。各中央の丸い部分が点光源の像を表わし、下と右側の三角状の分布はその断面図(強度分布)を示している。また、図中  $Y_{\text{imag}}$  は像点のファイバ中心からのずれを表わしている。たとえば、図 2.3(a)では、 $Y_{\text{imag}} = -0.35$  で、これは中心から  $0.35\text{mm}$  ずれていることを示している。したがって、ぼけ量は約  $0.1\text{mm}$ (像の直径)、ずれ量は  $0.35\text{mm}$  となり  $\phi 0.6\text{mm}$  から出射された光は  $0.1 + 0.35 \times 2 = \phi 0.8\text{mm}$  に結像されることになる。これまでの試験で用いた照射ビーム径は  $1\sim 1.5\text{mm}$  程度であり、上記設計値( $\phi 0.8\text{mm}$ )は十分裕度がある。以上の設計に基づき製作したノズルの概観を図 2.5 に示す。

### (2) 伝送エネルギー

ファイバでレーザ光を伝送後、実際に製作した前記集光光学系で集光し、スポット径を測定したところ、設計値( $\phi 0.8\text{mm}$ )より約 20% 大きい  $\phi 1.0\text{mm}$  であった。ノズル出口で得られた最大レーザパワーは約  $280\text{W}$  であることから、パワー密度としては  $36\text{kW}/\text{cm}^2$  が得られていることになる。数  $\text{kW}/\text{cm}^2$  以上のパワー密度があれば除染が可能である<sup>2)</sup>ことから、製作した集光光学系の有効性を確認し

た。

### (3) 伝送ビームによる摸擬汚染物質付試験片の除去試験

今回製作した除染用集光光学系(ノズル)を用い、3章の伝送特性試験で使用した厚さ  $0.1\mu\text{m}$  亜鉛メッキ試験片(表 2.3)を用いて除染効果の確認を行った。レーザ照射条件を以下に示す。

- レーザパワー : 288W(ノズル後)
- 繰り返し速度 : 30Hz
- デューティー比 : 50%
- シールドガス : アルゴン、40Nℓ/min
- 試験片移動速度 : 10mm/s
- 試験片ずらし距離 : 0.7mm
- ディフォーカス長 : 5mm
- スタンドオフ : 5mm

レーザ照射前後の試験片外観写真を図 2.6 に示す。ICP 分析によりレーザ照射前後の亜鉛量を測定した結果 DF=1693 が得られ、製作した除染用集光光学系(ノズル)の基本性能を確認した。

### 3. 試験装置

レーザビーム伝送特性試験、各種形状模擬試験片の除染試験、2次生成物特性測定試験に用いた機器の種類、選定理由を以下に示す。

#### 3.1 レーザビーム伝送特性試験

##### (1) レーザ発振器

試験に使用するレーザ発振器の仕様を表3.1に示す。各レーザ発振器の特徴及び選定理由は以下の通りである。

###### ① Q-P YAG レーザ

特 徴 : Q-P YAG レーザの平均パワーは 4W 程度だがピークパワーは 40MW 以上に達し、周囲に熱影響を与えることなく照射部のみを瞬時に溶融蒸発させることが可能である。

選定理由 : 二次生成物が少ない。

###### ② N-P YAG レーザ

特 徴 : N-P YAG レーザは平均パワーが 400W と高いことから大きな除去深さが高速で得られる。

選定理由 : 金属で  $10 \mu\text{m}$  以上の除去深さが容易に得られる<sup>2)</sup>。

##### (2) 伝送光学系

レーザの伝送系としてミラー伝送及びファイバ伝送について試験を行った。使用する伝送光学系の仕様を表3.2に、選定理由を以下に示す。

###### ① ミラー伝送

ミラー数 : 5枚 伝送損失の確認が行いやすい。

伝送距離 : 10m ほぼファーフィールドの最短距離である。

###### ② ファイバ伝送

- N-P YAG 伝送試験 : Graded Index(GI)型、コア径  $600 \mu\text{m}$ 、長さ 1, 5, 10m(三菱電線工業製大出力レーザ用ライトガイド, KSV-D80LKA-SGLH600F-SY)
- Q-PYAG 伝送試験 : Step Index(SI)型、コア径  $1200 \mu\text{m}$ 、長さ 0.5, 1m(三菱電線工業製大出力レーザ用ライトガイド, ST1200I-SY)

ここで、N-P YAG には GI 型を、Q-P YAG には耐光強度が GI 型より高い SI 型を使用した。コア径はエネルギー密度を低くするため大きいものを選択した。ファイバの長さは、伝送距離の影響を見るため 2 種類の長さのものを使用した。

(3) 分析機器及び観察機器

① レーザエネルギー計

メーカー及び型式 : i) OPHIR 社製 GDX-RP  
ii) COHERENT 社製 LABMASTER PLUS CONSOLE  
用途 : 伝送前後のレーザエネルギーの測定

② ビームプロファイラ

メーカー及び型式 : コヒーレント社製 BEAMCODE6.2  
用途 : 伝送前後のビーム強度分布の測定

③ 電子プローブ微小部分析装置(EPMA)

メーカー及び型式 : 島津製作所製 EPMA-8750  
用途 : レーザ照射後の残留亜鉛の測定

④ IRイメージプレート

メーカー及び型式 : 住田光学ガラス社製 EPMA-8750  
用途 : ファイバ伝送後の出射ビームパターンの測定

(4) 試験片

試験片の仕様を表 2.3 に示す。

- ① 尺 法 : これまでの試験<sup>1)~2)</sup>で使用した寸法
- ② 表面仕上げ : 実際の廃棄物を想定
- ③ メッキ : 亜鉛は基板(SUS304)に含まれない物質でありかつ製作及び厚さの調整が容易である
- ④ 材 質 : 廃棄物として一番多い

(5) シールドガス

- ① 種 類 : アルゴンガス
- ② 仕 様 : 純度 99.9%以上
- ③ 選定理由 : 飛散粒子の少ない不活性ガスを選定  
(金属に対して不活性ガスのみ有効)

### 3.2 各種形状模擬試験片の除染試験

(1) レーザ発振器 レーザビーム伝送特性試験と同じレーザを用いた。

① N-P YAG レーザ : 表 3.1 と同じ

② Q-P YAG レーザ : 表 3.1 と同じ

#### (2) 伝送光学系

試験に使用する伝送光学系は、レーザビーム伝送特性試験の検討結果から以下のように選定した。

① N-P YAG レーザ : ファイバ伝送ビームにより十分な除染性能が得られたため選定

② Q-P YAG レーザ : ファイバ伝送では除染に必要なエネルギーが得られなかつたためミラー伝送を選定

#### (3) 分析器機及び観察機器

① プラズマ発光分析装置(ICP)

メーカー及び仕様 : 島津製作所製 ICPS-1000

用途 : レーザ照射前後の亜鉛濃度の測定

② 原子吸光光度計

メーカー及び仕様 : 島津製作所製 AAA-640

用途 : レーザ照射前後のセシウム濃度の測定

#### (4) 模擬試験片

模擬汚染物質としてはモリブデン酸セシウムの焼付け塗装及び亜鉛メッキを使用した。亜鉛メッキ試験片は N-P YAG レーザ及び Q-P YAG レーザによる除染試験に用い、モリブデン酸セシウム試験片は N-P YAG レーザによる除染試験に用いた。また、亜鉛メッキ試験片を使って N-P YAG レーザと Q-P YAG レーザの DF を比較した。模擬試験片の仕様を表 3.4 に示す。また、形状の違いによって以下の確認を行った。

① L アングル : コーナ部の影響

② 円筒 : 曲面の影響

③ ボルト : 凹凸の影響

なお、モリブデン酸セシウムの焼付け塗装方法は次の手順に従った。

- ① 各試験片を硝酸に浸し洗浄する。
- ② 8.3%モリブデン酸セシウム水溶液に25分間浸し自然乾燥させる。
- ③ 100°Cで1時間乾燥させる。
- ④ 350°Cで1時間焼付ける。

(5) シールドガス

- ① N-P YAG レーザ

種類 : アルゴン(40Nl/min)

選定理由 : 飛散粒子の少ない不活性ガスを選定

- ② Q-P YAG レーザ

種類 : ヘリウム(15Nl/min)

選定理由 : 電離電圧が高いためプラズマの発生が少なく、高い除去特性が得られることより選定

### 3.3 二次生成物特性測定試験

(1) レーザ発振器

ビーム伝送特性試験と同じレーザを用いた。

N-P YAG レーザ : 表 3.1 と同様

(2) 伝送光学系

伝送試験の結果より、ファイバ伝送ビームにより十分な除染性能が得られたことからファイバ伝送を選定した。

(3) 分析機器及び観察機器

① アンダーセン分粒装置

メーカー及び型式 : 東京ダイレック社製 AN-200

用途 : ガス中の二次生成物(気中浮遊物)粒度分布の測定

② 電子天秤

メーカー及び型式 : メトラー・トレド社製 AG-245

用途 : 二次生成物重量の測定

(4) 試験片

試験片の仕様を表 2.5 に示す。

寸法 : これまでの試験<sup>1)~2)</sup>で使用した寸法

表面仕上げ : 二次生成物の基本的な発生状況を把握するため摸擬汚染物質はつけないこととした。

材 質 : SUS304 は一般に原子力施設で使用されている。

(5) シールドガス

種 類 : アルゴン(40、60Nl/min)

選定理由 : 飛散粒子の少ない不活性ガスを選定

種 類 : 空気(40Nl/min)

選定理由 : 酸化熱を利用した除去が可能なので選定

(6) フード

高さ 60cm、幅 50cm、長さ 150cm のフードを使用した。

## 4. 試験方法

前章において選定した機器を用いて各種試験を行った。以下に試験方法について述べる。

### 4.1 レーザビーム伝送特性試験

#### (1) N-P YAG レーザのファイバ伝送試験

図 4.1 に試験概念図を、図 4.2 に試験状況を示す。

- ① 発振器から出射されたレーザ光は、固定伝送光学系を経てファイバ入射光学系により集光しファイバに入射した。
- ② レーザビーム径が約 24mm、ファイバの NA(Numerical Aperture の略でファイバへの最大許容入射半角を表わす)が 0.2 であることから、使用可能な焦点距離は  $24/2/0.2 = 60\text{mm}$  以上となるため、入射光学系は焦点距離 60mm の平凸レンズを用い、入射端の発熱を防止するために水で冷却した。
- ③ 伝送前のレーザパワーは、固定伝送系内に設置した IR センサ(フォトダイオード)でモニタリングし、伝送後のレーザパワーは、パワーメータで測定した。
- ④ 伝送ビーム特性(発散角、強度分布)は、ファイバ端から約 50mm 離れたところに設置した IR イメージプレートで可視化させ、可視光像をビデオカメラで撮影し、コンピューターで画像処理することにより測定した。
- ⑤ 6 章で製作したノズルの伝送ビームの集光特性(集光径、強度分布)の測定を行い、除染に必要なエネルギー密度が得られていることを確認するとともに、実際に試験片(厚さ  $1\mu\text{m}$  亜鉛メッキ SUS304)のレーザ照射試験を行い除去性能の確認を行った。

#### (2) Q-P YAG レーザのミラー伝送試験

図 4.3 に試験概念図を、図 4.4 に試験状況を示す。

- ① 伝送後のレーザ光のエネルギーを、エネルギー計で測定した。
- ② このとき、ビーム径の拡がりによりエネルギー計のセンサヘッドよりも 1~2mm ほど大きくなつたため、レンズによりビーム径を約 2/3 に縮小した。
- ③ ビームプロファイルにより、伝送前後のビームプロファイルを測定した。

### (3) Q-P YAG レーザのファイバ伝送試験

図 4.5 に試験概念図を、図 4.6 に試験状況を示す。

- ① 発振器から出射されたレーザ光は集光せずにアーチャに固定されたファイバに入射し、アーチャ径内のレーザエネルギーのみが伝送される構造となっている。
- ② アーチャ径はファイバのクラッド径( $\phi 1.5\text{mm}$ )よりもやや大きい $\phi 1.6\text{mm}$ とした。
- ③ 入射エネルギーの測定では、ファイバを取り付けない状態でアーチャを通過したレーザのエネルギーを測定した。
- ④ ビームプロファイルにより伝送前後のビームプロファイルを測定した。

## 4.2 各種形状模擬試験片の除染試験

図 4.7 と図 4.8 に Q-P YAG レーザ及び N-P YAG レーザによる除染試験概念図を示す。また、図 4.9～図 4.11 に Q-P YAG レーザによる L 型アングル、円筒、ボルトの照射試験装置外観写真を示す。図 4.12～図 4.14 に N-P YAG レーザによる L 型アングル、円筒、ボルトの照射試験装置外観写真を示す。

- ① N-P YAG レーザはファイバ伝送で、Q-P YAG レーザはミラー伝送で模擬試験片に照射した。
- ② レーザ光(ノズル、集光レンズ)を固定し試験片を平行移動または回転させることで、試験片全表面に照射した。図 4.15～図 4.20 に具体的な照射方法を示す。
- ③ レーザ照射前及びレーザ照射後の試験片について、模擬汚染物質存在量の全体及び部分測定を行うことで、試験片全体の DF と DF 分布をもとめた。ここで部分測定については、亜鉛メッキ試験片についてのみ実施した。各試験片の分割箇所を以下に示す。主な分割位置は表 3.4 外観図中に破線で示した。

- L 型アングル

2 箇所(コーナ部、平板部) N-P YAG レーザ使用時

3 箇所(コーナ部、平板部、エッジ部) Q-P YAG レーザ使用時

- 円筒

5 箇所(外側 2、内側 2、エッジ部 1) N-P YAG レーザ使用時

3箇所(外側1、内側1、エッジ部1) Q-P YAG レーザ使用時

- ボルト

3箇所(ネジ部、非ネジ部、エッジ部) N-P、Q-P とも同条件

また、亜鉛メッキは厚さ  $1 \mu\text{m}$  として製作したが、電気メッキの施工上試験片の形状等によりその厚さが異なる。各試験片の代表的な部分の亜鉛量を以下に示す。

- L型アングル :  $0.8 \text{mg/cm}^2$
- 円筒 :  $0.7 \text{mg/cm}^2$
- ボルト :  $4.3 \text{mg/cm}^2$

亜鉛メッキ試験片に対する Q-P YAG レーザの照射条件は以下のとおりである。

- レーザエネルギー :  $400 \text{mJ}$
- ディフォーカス長 :  $15 \text{mm}$
- 繰り返し速度 :  $10 \text{Hz}$
- 試験片移動速度 :  $0.25 \text{mm/s}$
- シールドガス : ヘリウム,  $15 \text{Nl/min}$
- 照射回数 : 2回
- 試験片ずらし量 :  $5 \text{mm}$

レーザエネルギー、ディフォーカス長、試験片移動速度、試験片ずらし量は前試験<sup>2)</sup>の亜鉛メッキ試験で使用した値である。各スキャン時のレーザ照射のオーバーラップ幅はビーム径  $8 \text{mm}$  とずらし量より約  $3 \text{mm}$  と計算される。

亜鉛メッキ及びモリブデン酸セシウム試験片に対する N-P YAG レーザの照射条件は以下のとおりである。

- レーザパワー :  $288 \text{W}$
- 繰り返し速度 :  $30 \text{Hz}$
- デューティー比 :  $50\%$
- シールドガス : アルゴン,  $40 \text{Nl/min}$
- 試験片移動速度 :  $10 \text{mm/s}$
- 試験片ずらし距離 :  $0.7 \text{mm}$
- ディフォーカス長 :  $4 \text{mm}$
- スタンドオフ :  $4 \text{mm}$

- 照射回数 : 1回

繰り返し速度、デューティー比、シールドガス流量は前回の試験<sup>2)</sup>で最適化した値である。試験片移動速度、試験片ずらし距離については前回の試験よりもパワーが低いため遅く設定した。ディフォーカス長、スタンドオフは5mmでも可能であるが、1mm余裕を持たせた。照射回数は前回の試験で  $DF \approx 100$  が得られた値である。

#### 4.3 二次生成物特性測定試験

図4.21に試験概念図を、図4.22に試験装置を示す。試験片の周りをすべてフードで覆い、ファイバ伝送光学系を用いて N-P YAG レーザ光を伝送し試験片に照射した。

- ①二次生成物(落下ドロス)を各場所ごとに回収して重量測定を行い、その分布を求めた。
- ②回収場所は図4.21に示すように4箇所で、それぞれ照射地点から 40~63cm、63~85cm、85~108cm、108~130cm(幅はすべて50cm)である。
- ③レーザ光軸とガス流軸をずらすことで突起部を偏らせ、除去物質を一方向に飛ばす方法<sup>2)</sup>を採用した。そのため、二次生成物の測定はその一方向のみについて行った。
- ④また、予想より全体的に落下ドロスが少なかったため、幅方向は分割せず測定した。
- ⑤落下ドロスの一部はフードの壁に衝突したが、壁には付着せずに全て回収シートに落下した。
- ⑥さらに、ガス中に含まれる二次生成物(気中浮遊物)は排気途中に設置したアンダーセン分粒装置でろ紙に回収し、粒子の大きさごとに電子天秤で重量を測定し、粒径分布を求めた。
- ⑦1回のレーザ照射長は20mmであるが、重量測定に十分な量の粒子を得るために照射を44回繰り返した。
- ⑧基本的なレーザ照射条件を以下に示す。
  - レーザパワー(ノズル後) : 288W
  - 繰返し速度 : 30Hz

- デューティー比 : 50%
- 試験片移動速度 : 10mm/s
- ディフォーカス長 : 3mm
- スタンドオフ : 3mm
- シールドガス : アルゴン、40Nℓ/min

レーザパワーは本試験における最大パワーである。繰り返し速度、デューティー比、シールドガスはレーザ除染に関する適用性試験<sup>2)</sup>で最適化した値を用いた。試験片の移動速度はレーザパワーがレーザ除染に関する適用性試験時よりも低いので遅く設定した。ディフォーカス長、スタンドオフは他試験と同様の5mmでも可能であるが2mm余裕を持たせた。



## (2) Q-P YAG レーザのミラー伝送試験。

## ①最大伝送パワーと伝送効率

図 5.5 に伝送エネルギーの入射エネルギー依存性を示す。伝送エネルギーは、入射エネルギーの増加に伴い線形に増加し、最大伝送エネルギー 425mJ が得られた。

図 5.6 は、伝送効率とミラー 1 枚当たりの損失 ( $= (100 - \text{伝送効率}) \times 1/5$ ) の入射エネルギー依存性を示したものである。伝送効率は、入射エネルギーに関わらず約 93%で、ミラー 1 枚当たりの損失に換算すると約 1.4% である。

## ②伝送ビーム特性

伝送エネルギー 267mJ、320mJ の場合における伝送前後のビームパターンを図 5.7 に、396mJ、457mJ の場合のビームパターンを図 5.8 に示す。図 5.7、図 5.8 から求めた伝送前後のビーム径の入射エネルギー依存性を図 5.9 に示す。

伝送前のビーム径は、入射エネルギーに関わらず約 8mm であるが、伝送後のビーム径は入射エネルギーが大きいほど小さくなっている、入射エネルギーが大きいほどビームが拡がりにくいことが分かる。

レーザエネルギー 400mJ と 650mJ の場合の各伝送距離におけるビームパターンを、図 5.10、図 5.11 に示す。今回の試験で用いた発振器は、最大 650mJ のエネルギーが得られるが、伝送エネルギーとしては 500mJ 程度に制限された。これは、伝送途中で局所的にビームの強度が強くなるホットスポットが現れ、500mJ 以上では伝送ミラー表面に損傷が発生したことによる。ホットスポットはエネルギーが高いほど発振器の近くに発生し、500mJ 以下のエネルギーでは伝送距離 10m 以内でミラーに損傷が起こるほどのホットスポットは発生しない。

## (3) Q-P YAG レーザのファイバ伝送試験

図 5.12 にファイバ長 50cm と 1m の場合の、入射エネルギーと伝送エネルギーの関係を示す。ファイバ長 50cm の場合、伝送エネルギーは入射エネルギーにほぼ比例して増加している。これに対してファイバ長 1m の場合、入射エネルギー 20mJ までは 0.5mJ と同様の伝送エネルギーが得られた。しかし、入射エネルギー約 30mJ で、ファイバの損傷が発生した。損傷したファイバの外観写真を図 5.13 に示す。ここで、損傷部の被覆は損傷確認のため除去してある。損傷箇所は入射端から約 55mm で、入射面にはまったく変化はない。50cm では変化が起こら

ず、1m の時のみファイバ内部で損傷が起きた原因解明のため、今後自己集束等に関する調査を行う必要がある。

図 5.14 にファイバ長 50cm と 1m の場合の入射エネルギーと伝送効率の関係を示す。入射エネルギーが約 30mJ までは約 82.5% 前後の伝送効率が得られているが、40mJ を越えると 73% まで低下した。

図 5.15 は図 5.12 の縦軸を伝送パワー密度 (= 入射エネルギー ÷ パルス幅 ÷ ファイバコア面積) に換算したものである(ただしファイバ長 50cm のみ)。図中実線の耐光強度はメーカーのカタログ値<sup>3)</sup>を示している。この図より本試験ではメーカー耐光強度の約 4 倍の伝送強度が得られた。

図 5.16～図 5.18 に各エネルギーにおける伝送前後及びアーチャ前のビームプロファイルを示す(ファイバ長 50cm)。入射ビームはアーチャ通過後約 160mm の位置で、伝送後のビームはファイバ出射端から約 80mm の位置で測定を行った。入射ビームはアーチャによる回折によりリング状のプロファイルとなっていることが分かる。しかし、実際にはファイバ入射端とアーチャはほぼ同じ位置にあり、このようなプロファイルではなくアーチャ前のプロファイルの中心部分を切り取ったような分布になるものと推測される。また、伝送後のビームは入射ビームやアーチャ前のビームとは全く異なり、非常に不規則なパターンとなる。

## 5.2 各種形状模擬試験片の除染試験

### (1) Q-P YAG レーザによる除染試験結果

#### ① L アンダル

図 5.19 に L アンダルの部位別 DF 測定結果、図 5.20 にレーザ照射前後の試験片外観写真を示す。正味のレーザ照射時間は 2 回照射で約 1 時間、スキヤン回数は 64 回である。また、レーザ照射前の 1cm<sup>2</sup>当たりの亜鉛付着量は、平板部で約 0.94mg、コーナ部で約 0.72mg、エッジ部で約 0.9mg であった。

図 4.19 より DF は平板部で 45、コーナ部で 51、エッジ部で 86 であり、エッジ部が一番大きい結果となった。試験片全体としての DF は 55 である。

#### ② 円筒

図 5.21 に円筒の部位別 DF 測定結果、図 5.22 にレーザ照射前後の試験片外

観写真を示す。正味のレーザ照射時間は2回照射で約4時間、スキャン回数は16回である。また、レーザ照射前の $1\text{cm}^2$ 当たりの亜鉛付着量は内面及び外面で約0.83mg、エッジ部で約3.9mgであった。DFはいずれも検出限界の1000が得られた。今回使用した円筒程度の曲面(外径76mm、内径66mm)においては平板同様の高いDFが得られることが分かった。

### ③ボルト

図5.23にボルトの部位別DF測定結果、図5.24にレーザ照射前後の試験片外観写真を示す。正味のレーザ照射時間は2回照射で約1時間20分、スキャン回数は32回、3回照射では約2時間、スキャン回数は48回である。また、レーザ照射前の $1\text{cm}^2$ 当たりの亜鉛付着量はエッジ部で約6.7mg、ネジ部で約4.3mm、非ネジ部で約3.9mgであった。2回及び3回照射のDFは、エッジ部でそれぞれ3と3.8、ネジ部でそれぞれ2.4と2.3、非ネジ部でそれぞれ5.6と7.7といずれの部位でも非常に低く、また、照射回数を増加させてもあまり向上しない。試験片全体のDFは2回照射で2.7、3回照射で2.8であった。

図5.25にDFの試験片形状依存性を示す。この図からQ-P YAGレーザによる亜鉛メッキ除去の場合、除去性能への形状の影響が非常に大きいことが分かる。これは照射の順序や形状による再付着の起こりやすさや亜鉛メッキ量の違いによるものと推定される。

## (2) N-P YAGレーザによる除染試験結果

### ①L アンダル

図5.26に亜鉛メッキLアンダルの部位別DF測定結果、図5.27にレーザ照射前後の試験片外観写真を示す。レーザ照射は、図5.28に示したようにノズルと試験片が干渉しないよう試験片を「く」の字状に立て、横から行った。正味のレーザ照射時間は1回照射で約3分、スキャン回数は132回である。試験片はQ-P YAGレーザ同様にエッジ部も切り出し分割する予定であったが、図5.27のようにレーザ照射後の試験片の形状変化が大きいためエッジ部分を分割することができず、平板部とコーナ部のみに分割してDFを測定した。DFは平板部で411、コーナ部で177と、コーナ部の方が低い。試験片全体としてのDFは299であった。

## ②亜鉛メッキ円筒

図 5.29 に亜鉛メッキ円筒の部位別 DF 測定結果、図 5.30 にレーザ照射前後の試験片外観写真を示す。正味のレーザ照射時間は 1 回照射で約 17 分、スキャン回数は 60 回である。試験片の分割数は 5 で、分割方法を図 5.31 に示す。DF はエッジ部、外側(スタート)及び外側(エンド)で検出限界の 1000 以上、内側(スタート)で 19、内側(エンド)で 17 と、内側の方が低い。試験片全体としての DF は 85 である。

## ③ボルト

図 5.32 に亜鉛メッキボルトの部位別 DF 測定結果、図 5.33 にレーザ照射前後の試験片外観写真を示す。正味のレーザ照射時間は 1 回照射で約 6 分 30 秒、スキャン回数は 190 回、2 回照射で約 13 分、スキャン回数は 380 回である。1 回照射及び 2 回照射の DF は、エッジ部で 242(1 回目)と 1000 以上(2 回目)、ネジ部で 701(1 回目)と 1000(2 回目)、非ネジ部で 64(1 回目)と 1000(2 回目)と、1 回照射においては非ネジ部で低くなっているが、2 回照射を行うことにより全ての部位で検出限界の 1000 以上が得られている。試験片全体としては 1 回照射で 262、2 回照射で 1000 以上の DF が得られている。

図 5.34 に亜鉛メッキ試験片における DF の形状依存性を示す。この図から除去性能への形状の影響は、Q-P YAG レーザの場合ほど顕著には現れないことがわかった。

次に模擬汚染としてモリブデン酸セシウムを使った試験片を用いて上記(1)、(2)と同様の試験を行った。図 5.35 にモリブデン酸セシウム試験片における DF の形状依存性を示す。照射条件は亜鉛メッキ試験片と同様である。また、図 5.36～図 5.38 にレーザ照射前後の各試験片外観写真を示す。正味のレーザ照射時間とスキャン回数はボルトでそれぞれ約 6 分 30 秒、190 回、L アングルでそれぞれ約 14 分 30 秒、188 回、円筒でそれぞれ約 40 分、スキャン回数は 104 回である。

レーザ照射前のモリブデン酸セシウム付着量は、ボルトで 5.2mg、L アングルで 2.8mg、円筒で 5.9mg であった。DF はボルトが 1000 以上、L アングルが 45、円筒が 155 と形状による差が比較的大きい結果となった。図 5.34 と図 5.35 を比較すると、ボルトと円筒についてはモリブデン酸試験片の方が DF

は高いが、アングルではモリブデン酸セシウム試験片の方が低くなっている。

### 5.3 二次生成物特性測定試験

シールドガス種類が気中浮遊物、落下ドロスの発生状況に与える影響を評価した。図 5.39 にシールドガスにアルゴンと空気を用いた場合の気中浮遊物の粒径分布を示す。レーザ照射条件は、それぞれのガスにおいて最大処理速度が得られる条件<sup>3)</sup>で行った。ここで、縦軸の発生重量とは実際に回収した二次生成物重量から見積もった全発生量のこととで、次式から算出される。

$$\text{発生重量} = \frac{\text{シールドガス流量 } 40\text{Nl/min}}{\text{回収流量 } 28.3\text{Nl/min}} \times \text{回収重量} \quad \dots \dots \dots \quad (4.1)$$

気中浮遊物はどの粒径においてもシールドガスがアルゴンの場合に比べて空気の場合のほうが多く、特に  $2.1 \mu\text{m}$  以下の粒径で差が著しい。全発生量は、アルゴンで約 0.4mg、空気では約 7mg と空気の方が 10 倍以上多い。

図 5.40 にシールドガスにアルゴンと空気を用いた場合の落下ドロスの飛散分布を示す。どちらのガスも落下ドロスは  $63\sim85\text{cm}$  の場所で一番多く、分布は同じ傾向を示していることが分かる。しかし、全発生量はアルゴンで 1.03g、空気では 0.19g とアルゴンの方が 5 倍以上多い結果となった。

シールドガス流量が落下ドロスの発生状況に与える影響について、図 5.41 にシールドガス(アルゴン)流量を  $40\text{Nl/min}$  及び  $60\text{Nl/min}$  とした場合の落下ドロスの飛散分布を示す。全発生量は  $40\text{Nl/min}$  で 1.0g、 $60\text{Nl/min}$  で 0.7g と流量が少ない方が多くなっている。しかし、流量  $40\text{Nl/min}$  の時はレーザ照射部に近いところで落下ドロスが多いが、流量を  $60\text{Nl/min}$  に増加させると、より遠いところまでドロスが飛散した。

レーザ繰り返し速度が落下ドロスの飛散状況に与える影響については、図 5.42 にレーザの繰り返し速度を  $30\text{Hz}$  及び  $40\text{Hz}$  とした場合の落下ドロスの飛散分布を示す。ここで、平均レーザパワー( $280\sim288\text{W}$ )とデューティー比(50%)は一定とした。したがって、パルス幅、パルスエネルギー、ピークパワーは以下のようになる。

- $30\text{Hz}$ : パルス幅  $16.7\text{ms}$ 、パルスエネルギー  $9.6\text{J}$ 、ピークパワー  $575\text{W}$

- 40Hz: パルス幅 12.5ms、パルスエネルギー 7.0J、ピークパワー 560W

図 5.42 より繰返し速度が速いほうが落下ドロス量は少ない。全発生量は 30Hz で 1.0g、40Hz で 0.45g である。また、飛散量は照射部から遠ざかるに従い単調に減少している。

デューティー比が落下ドロスの飛散状況に与える影響については、図 5.43 にデューティー比を 50% 及び 40% とした場合の落下ドロスの飛散分布を示す。ここで、平均レーザパワー (246~247W) と繰り返し速度 (30Hz) は一定とした。したがって、パルス幅、パルスエネルギー、ピークパワーは以下のようになる。

デューティー比 50% : パルス幅 16.7ms、パルスエネルギー 8.2J、ピークパワー 491W

デューティー比 40% : パルス幅 13.3ms、パルスエネルギー 8.2J、ピークパワー 617W

図 5.43 より分布の傾向に差はないが、発生量としてはデューティー比が大きいほうが少ない(全発生量はデューティー比 50% で 0.16g、40% で 0.37g) ことが分かる。

移動速度が落下ドロスの発生状況に与える影響について、図 5.44 に移動速度を 5mm/s 及び 10mm/s とした場合の落下ドロスの飛散分布を示す。5mm/s の方が照射部に近い部分の飛散量が多くなっているが、全発生量は 5mm/s で 1.14g、10mm/s で 1.03g と大きな差は生じない。

## 6. 考 察

### 6.1 レーザビーム伝送特性試験

#### (1) N-P YAG レーザのファイバ伝送

伝送効率が低い原因としては、ファイバ出射端(非水冷)での発熱が観測されていることから、ファイバ入射端でレーザ光がファイバコア内に入りきれていないことが考えられる。これはレーザ発振器から出射するビームの集光性が十分でないためで、発振器の改良等の処置が必要である。

N-P YAG レーザのファイバ伝送に関するデータの報告例<sup>5)</sup>を図 6.1 に示す。ここで、ファイバはコア径  $550\mu\text{m}$ 、長さ  $200\text{m}$  の GI 型でレーザの動作条件は繰り返し速度  $42\text{Hz}$ 、デューティー比  $50\%$ である。最大伝送パワーは  $1.5\text{kW}$ 、伝送効率は約  $90\%$ で、伝送パワーの飽和は見られない。ファイバ長以外の条件は本試験(ファイバコア径  $600\mu\text{m}$ 、GI 型、ファイバ長  $1\sim10\text{m}$ 、繰り返し速度  $30\text{Hz}$ 、デューティー比  $50\%$ )とほぼ同様であるが、伝送効率は約  $4\%$ ほど本試験結果のほうが低くなっている。この差は、ファイバ入射端でレーザ光がファイバコア内に入りきれていないためと推測される。

ファイバ出射ビームの出射角は入射ビームの入射角が保存される<sup>5)</sup>ため、パワーの増加に伴い入射ビーム径が大きくなるために出射ビーム径が変化していると考えられる。

#### (2) Q-P YAG レーザのミラー伝送

$400\text{mJ}$  のエネルギーで十分な除染効果を確認しており、Q-P YAG レーザ光をミラー伝送により伝送することが可能である。

高出力レーザ用全反射鏡の典型的な反射率は  $99\%$ 程度であり<sup>6)</sup>、本試験でも同様の結果となっている。

YAG レーザには、レーザロッドが励起ランプからの熱のために膨張したり屈折率が不均一になることにより凸レンズのような働きをする、熱レンズ効果が発生することが知られている。この熱レンズ効果はレーザエネルギーが大きいほど強くなり、一般に YAG レーザの発振器はこの効果によるビームの集光を補正するように設計されている。通常この補正は最大エネルギー条件で最適化されているため、本試験のように最大エネルギー以下で使用した場合には、この

補正がずれてしまい、最大エネルギーの場合よりも拡がりが大きくなつた。

ホットスポットは局所的な熱レンズ効果により発生する。エネルギーが高いほど熱レンズ効果は強いので、より発振器に近いところでホットスポットが発生するものと考えられる。このホットスポットの発生は個々の発振器によって異なるため、Q-P YAG レーザのミラー伝送を行う場合には、それぞれの発振器ごとにホットスポットの発生状況について調べる必要がある。

### (3) Q-P YAG レーザのファイバ伝送

入射面の汚れはファイバの周りのアーチャがレーザ照射によってアブレーションされ、付着したのではないかと考えられる。したがって、高入射エネルギー時の伝送エネルギーの低下はこの汚れによるものと考えられる。対策としては以下の方法がある。

- アーチャの材質を石英ガラス等の YAG レーザ光を透過する材質にする。
- ファイバ入射端よりも前にアーチャを設置する。
- アーチャを使用せずにファイバに入射する。

今回伝送効率が約 82.5% と低いのは、先に述べたように入射エネルギーにファイバを取り付けない状態でファイバ径よりも大きいアーチャを通過したエネルギーを使用していることと、両端面での反射損失であり、ファイバ内部での損失はほとんどない。

メーカ耐光強度の約 4 倍の伝送強度が得られたのは、レーザ光を集光せずに平行光のままファイバに入射させたために、ファイバ内部でレーザ光の集光が起こりにくくなつたためと推測される。

伝送ビームの不規則なパターンは、ファイバ内を反射しながら進んだ光線がランダムに干渉したものと考えられる。ビームパターンが不均一であると、除去表面も不均一になり問題となる。しかし、実際にはファイバからの出射ビームをそのまま使用するのではなく、集光光学系により集光して使用する。したがって、5 節同様に集光光学系を設計・製作し、集光特性を評価する必要がある。

## 6.2 各種形状模擬試験片の除染試験

### (1) Q-P YAG レーザ

L型アングルにおいて、エッジ部で DF が最も高いのは、各部位における照射

順番の影響によるものと考えられる。図 6.2 に各部位の照射順番を示す。各回の照射は平板部とコーナ部を照射した後にエッジ部の照射を行っている。したがって、最後にエッジ部を照射したときに除去された亜鉛の一部が他の部位に再付着した可能性がある。

ボルトで DF が低い原因としては、メッキ量が他の試験片に比べて多いこと、ネジ部では反対面への再付着が起こりやすいこと、切削痕にメッキが入り込んでいること、ネジ山の影響により実効的なフルエンスが低下すること等があげられる。

システム構築のための開発課題として、Q-P はシリンドリカルレンズを使用しているために、ノズルが比較的大きくなってしまい、一つのノズルで各種の形状に対応することは難しいと考えられる。したがって、今回の試験のようにレンズとノズルを別々にすることによって、汎用性を高める方法がある。また、隣り合う面への再付着が起こる可能性があるため、複数回照射する場合には、部分的に複数回照射後に他の部位を行うのではなく、一度全面照射を行ってから次の照射に移る方法が良い。また、局所吸引等の適用により再付着の低減を図る検討も必要である。

## (2) N-P YAG レーザ

亜鉛メッキ L アングルにおいてコーナ部の方が DF が低いのは、図 4.33 に示したような照射法の場合、ノズルと試験片の隙間がコーナ部方向で大きくなり、除去物質の多くはコーナ方向に飛散し、その一部がコーナ部に堆積してしまうためである。亜鉛メッキ円筒において内側の DF が低い原因としては、レーザ照射による飛散物が照射部以外の内面に付着したためではないかと推測される。亜鉛メッキ試験片において DF の形状依存性が低いのは、N-P YAG レーザによる表面除去は物質をレーザ光で溶融し、ガスによって吹き飛ばすという方法であるため、除去深さが大きいことによる。

また、モリブデン酸セシウムのほうが蒸発しやすいため亜鉛メッキ試験片より DF が高いがアングルについて、モリブデン酸セシウム試験片より亜鉛メッキ試験片の DF が高いのは、亜鉛メッキ試験片の長さがモリブデン酸セシウム試験片の 1/5 と小さいために再付着が少なかったことによる。

システム構築のための開発課題 N-P YAG レーザは二次生成物の飛散が広くそ

の回収方法が問題になる。また、熱による変形や表面形状の変化が大きいために、対象物の汎用的な固定方法の開発が必要である。

### 6.3 二次生成物特性測定試験

シールドガスの種類が気中浮遊物や落下ドロスの発生量に与える影響は、アルゴンを用いた場合には試験片表面は単に溶融除去されるのに対して、空気を用いた場合には溶融と同時に燃焼が起こり蒸発が促進されるというメカニズムの違いによる。

二次生成物の飛散距離を小さくするためにはガス流量を少なくしたほうが良いことになるが、前試験結果<sup>2)</sup>から流量を40Nℓ/minより少なくすると処理速度が低下するということが分かっている。以上の結果から、ドロス量は増えるが飛散距離を小さくしたい場合はガス流量40Nℓ/min、また、ドロスの飛散距離は大きくなるが量を少なくしたい場合は60Nℓ/minが適している。

レーザ繰り返し速度を速くすると、落下ドロス量は減少する。これは、繰り返し速度が速い方がパルスエネルギーとしては小さくなるために、溶融量が減少するためと考えられる。また、繰り返し速度を速くすると処理速度が低下するということが分かっている<sup>2)</sup>。以上の結果から繰り返し速度は、速い処理速度が必要な場合は30Hzの方が、ドロス発生量の低減を優先する場合は、40Hzの方が適していると言える。

デューティー比を大きくすると、ピークパワーが低くなり、溶融量及び落下ドロスが減少する。また、デューティー比を大きくすると処理速度が増加する<sup>2)</sup>。以上の結果より、デューティー比は50%の方が処理速度も速く、かつ、発生ドロス量も少ないことが分かった。

移動速度は処理速度に非常に大きな影響を与える<sup>2)</sup>。したがって、移動速度は処理速度を主眼に最適化(レーザパワー密度等によって異なる)すればよい。  
安全かつ効率の良い二次生成物回収方法

- 気中浮遊物: 気中浮遊物に関しては今回行ったように、対象物をフードで囲い排気ポンプの途中にフィルタを置き回収する方法が簡便で廃棄物も少なく有効であると考えられる。しかし、フィルタで回収できないような粒径の気中浮遊物もあり、この点に関しては今後詳細な調査が必要であると考

えられる。

- 落下ドロス:落下ドロスに関しては、対象物に近いところにフードを設け、その下に回収用の容器を置く方式が考えられる。これによるとドロスはフードの壁に衝突するため飛散が防止できかつ、回収容器に捕集することが可能である。

## 7.まとめ

レーザ除染システムに関する具体的な検討と実廃棄物への適用制を評価することを目的に、各種の試験を実施した。試験結果をまとめると以下の通りである。

### 7.1 ビーム伝送光学系・集光光学系の伝送試験

- ① N-P YAG レーザのファイバ伝送において、最大約 420W の伝送を確認した。伝送効率の低下やファイバの損傷などは見られず、レーザ除染システムへの適用が十分に可能であるが、伝送損失が計算値よりも大きいことがわかった。伝送損失を低減するには発振器ビームの高品質化等の改良が必要である。
- ② Q-P YAG レーザのミラー伝送において、伝送エネルギーは、ホットスポットによる伝送ミラー表面の損傷によって制限されたが、ホットスポットの発生がない発振器を用いることで、レーザ除染システムへの適用が十分に可能である。
- ③ Q-P YAG レーザのファイバ伝送において、メーカーによる耐光強度の約 4 倍の伝送パワー密度が得られたが、レーザ除染システムに適用するにはまだ伝送パワーが足りないため、単一ファイバによる伝送ではエネルギー不足があるので、複数のファイバによる伝送を検討する必要がある。

### 7.2 各種形状模擬試験片の除染試験

- ① Q-P YAG レーザは、比較的平坦な形状の試験片に対しては高い除染性能が得られるが、N-P YAG の移動速度 10mm/s に対して 0.25mm/s と処理速度が遅い。
- ② N-P YAG レーザは、試験片形状による除去性能の差が小さく、汎用性が高いが、熱影響による試験片の変形が大きい。
- ③ 模擬汚染物質として使用したモリブデン酸セシウムと亜鉛メッキを比較すると、モリブデン酸セシウムを用いたほうが円筒に対しては約倍の DF が得られた。しかしアングルについては逆に亜鉛メッキのほうが倍の DF

が得られる結果となった。モリブデン酸セシウムは亜鉛メッキに比べて蒸発しやすいことから、形状によっては再付着などが生じるためである。

- ④ Q-P YAG レーザでは、サイドノズルの使用により各種形状試験片の除染に適用可能であるが、今後、適切な照射手順の選択や局所吸引等の適用により再付着量の低減を図る必要がある。N-P YAG レーザでは、熱による試験片の変形が大きいために、機器の再利用を目的にする場合などは利用できない。

### 7.3 二次生成物の飛散状況確認試験

- ① 気中浮遊物の発生は、シールドガスに空気を用いた場合の方がアルゴンを用いた場合より 18 倍と多いが、反対に落下ドロス量はアルゴンを用いた場合の方 5 倍多い結果となった。
- ② 落下ドロスの飛散距離は、シールドガス流量の増加に伴い増大する。
- ③ 繰り返し速度が速い方が、パルスエネルギー及びピークパワーが小さくなり二次生成物は減少する。
- ④ デューティー比が大きい方が、ピークパワーが小さくなり二次生成物は減少する。
- ⑤ 二次生成物発生に対する試験片移動速度について 5mm/s と 10mm/s で比較した。この場合、2 次生成物量はほぼ同じであり、移動速度の与える影響は小さい。
- ⑥ 二次生成物の回収方法としては、対象物をフードで囲い、気中浮遊物はフィルタで、落下ドロスはフード内で回収する方式が有効である。

### 7.4 今後の課題

- ① 以上のように、ビーム伝送方法に関しては N-P YAG レーザではファイバ伝送が使用できることが確認されたが、Q-P YAG レーザのファイバ伝送は伝送エネルギーに制限があるため、今後複数ファイバにする伝送方式の開発が必要である。
- ② 各種形状対象物に対する適用性に関しては形状依存性があることが明らかとなり、処理表面の品質向上(特に N-P YAG レーザ照射におけるドロスの

再付着防止)や処理速度向上の検討が必要である。

- ③ 二次生成物に関しては今後具体的な回収方式につき検討するとともに、フィルタを通過してしまう可能性のあるガス状生成物について調査を行う必要がある。

## 8. 謝 辞

レーザ除染適用性試験作業を実施するにあたり、御協力を頂いた(財)産業創造研究所の佐藤主任研究員、清水研究員に感謝の意を表します。

## 9. 参考文献

- (1) 福井康太、根本正信、谷本健一、照沼誠一:レーザ除染技術の開発(1)(レーザ除染に関する調査と基礎試験), PNC ZN9410 95-041 1994. 12
- (2) 福井康太、根本正信、谷本健一:レーザ除染技術の開発(2)(レーザ除染に関する適用性試験), PNC ZN9410 96-058 1996. 2
- (3) ファイバオプティクス付属資料(カタログ):三菱電線工業、3(1992)
- (4) A. Yokoyama, T. Nagashima, O. Matsumoto, Y. Nagura, and T. Ishide, Proc. Of 5th Int. Symposium of the Japan Welding Soc., 29 (1990)
- (5) 三浦、沖野、「高出力 CW YAG レーザー光のファイバー伝送特性」、レーザー研究 Vol. 16, p. 310 (1988) .
- (6) レーザーハンドブック、レーザー学会編、オーム社、417(1982)

表 3.1 パルス YAG レーザ発振器の仕様

種類	仕様
Qスイッチパルス	Spectra-Physics 社製 CGR-150 型 最大出力エネルギー 650mJ/pulse (パルス幅 8nsec) 繰り返し周波数 10Hz
ノーマルパルス	日本電気製 SL117-2c 型 ピーク出力 800W以上 (50Hz, デューティー比 50%時)

表 3.2 伝送試験に使用する伝送光学系の仕様

伝送方法	Qスイッチパルス	ノーマルパルス
ミラー	ミラー数：5枚 伝送距離：10m	
ファイバ	型式：SI*1型 コア径：1200 μm 長さ：0.5, 1m	型式：GI*2型 コア径：600 μm 長さ：1, 5, 10m

## 備考

\*1：ステップ・インデックス (Step Index) 型

コアの屈折率が一定でクラッドとコアの境界で屈折率がステップ状に変化しているもので、比較的高いパワーを伝送するのに用いられる。

\*2：グレーデット・インデックス (Graded Index) 型

コアの屈折率が二次関数的に変化しているもので伝送ビームの集光性が良い

表 3.3 伝送特性試験に使用する試験片の仕様

寸法	表面状態	メッキ	材質
$20^{\pm 0.5} \times 50^{\pm 0.5} \times t5$	受け入れのまま	亜鉛メッキ 厚さ：1 μm	SUS304

表 3.4 照射試験に使用する模擬試験片の仕様

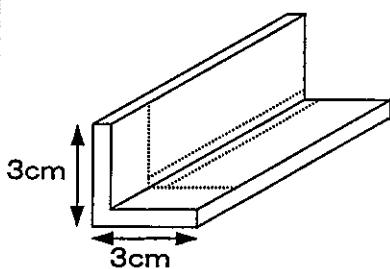
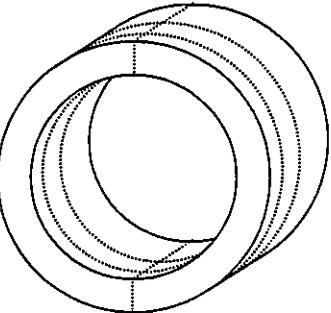
材質	SUS304(表面は受け入れのまま)		
模擬物質	①モリブデン酸セシウムの焼付け塗装 : 燃料材料試験施設ではセシウムは重金属と共存しているため重金属化合物を選定し、さらにバースト試験等でセシウムが固着する可能性があるので焼付け塗装とした。 ②亜鉛メッキ(厚さ 1 μm) : 選定理由は表 2.3 同様。		
仕様	名称	L アングル	円筒
	外観 破線: 分割箇所を示す		
寸法	厚さ : 0.6cm 長さ : 1.0cm (亜鉛メッキ) 5.0cm (モリブデン酸セシウム)	外径 : 7.6cm 内径 : 6.6cm 長さ : 1.5cm (亜鉛メッキ) 3.0cm (モリブデン酸セシウム)	M16 長さ : 5cm

表 3.5 伝送特性試験に使用する試験片の仕様

寸 法	$20^{\pm 0.5} \times 50^{\pm 0.5} \times t5$
表面状態	受け入れのまま
材 質	SUS304

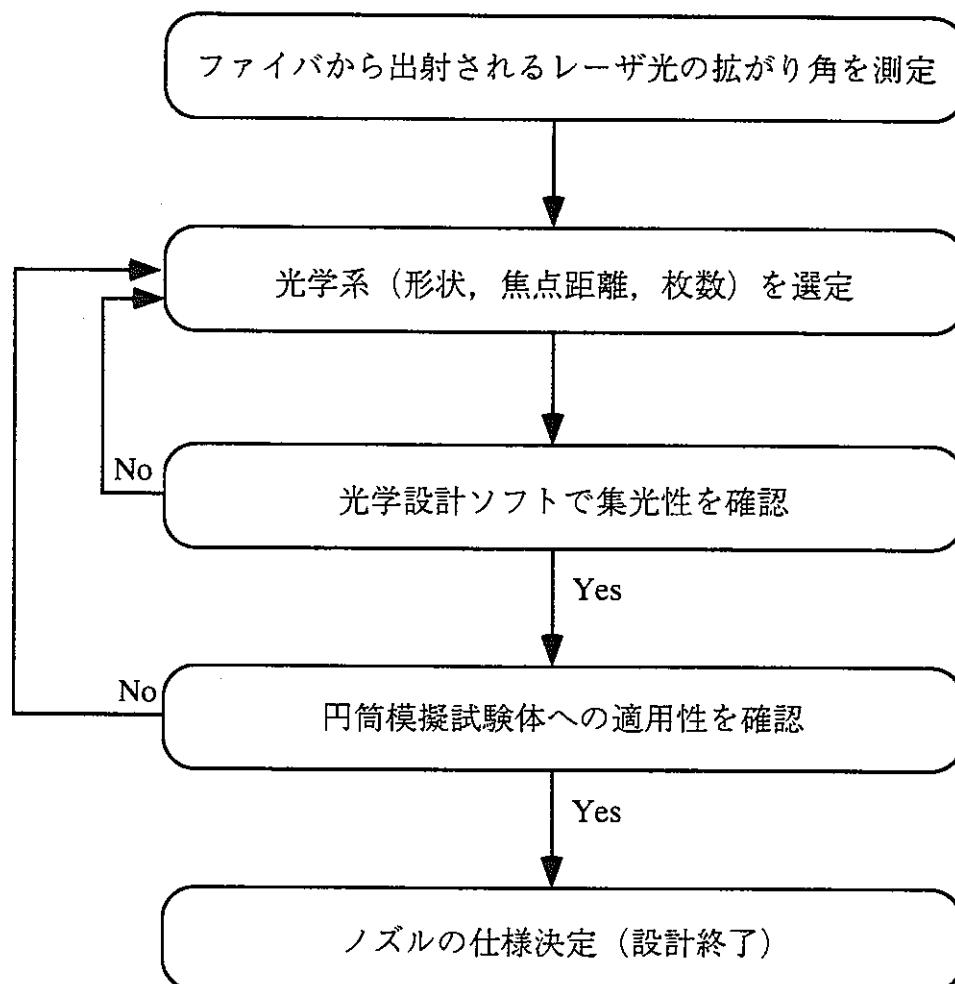
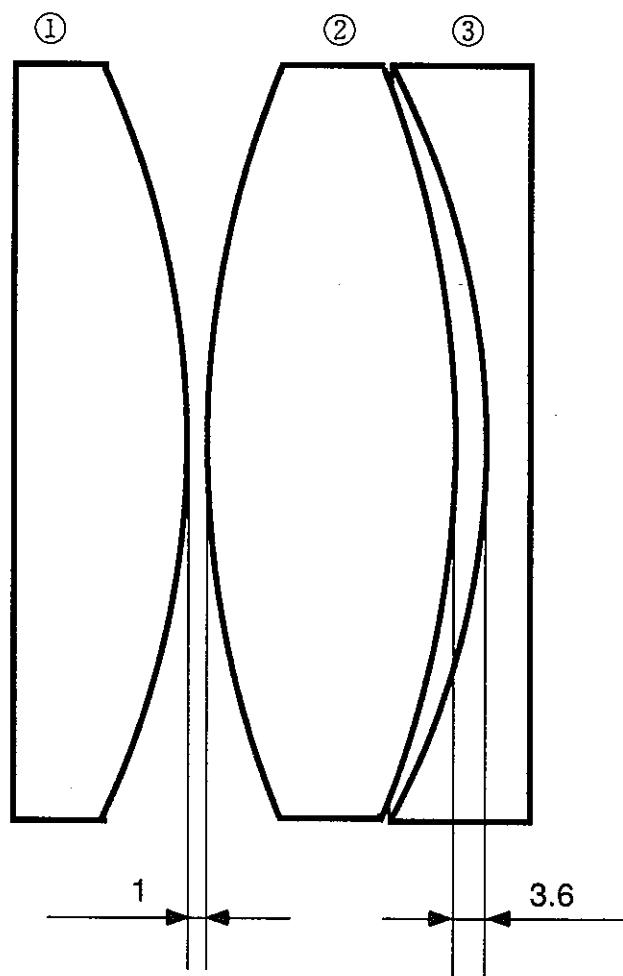


図 2.1 ノズル設計方法フローチャート



No.	種類	焦点距離	曲率半径	中心厚さ	エッジ厚さ	直径
①	平凸	80 mm	41.52 mm	11.4 mm	3 mm	50 mm
②	両凸	50 mm	51.9 mm	15.8 mm	3 mm	50 mm
③	平凹	-70 mm	36.33 mm	3 mm	13 mm	50 mm

図 2.2 光学系概念図及びレンズ仕様

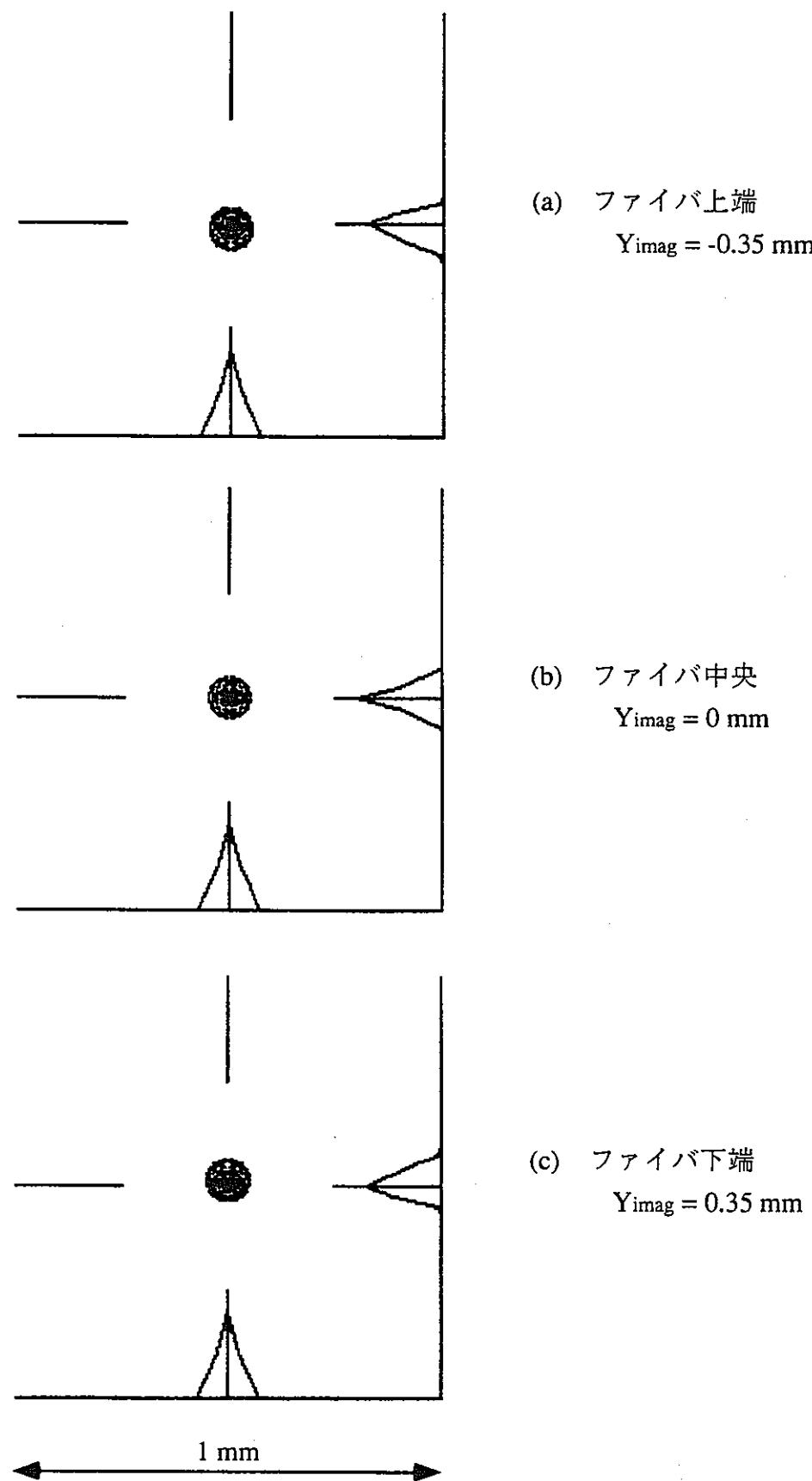


図 2.3 スポットダイアグラム

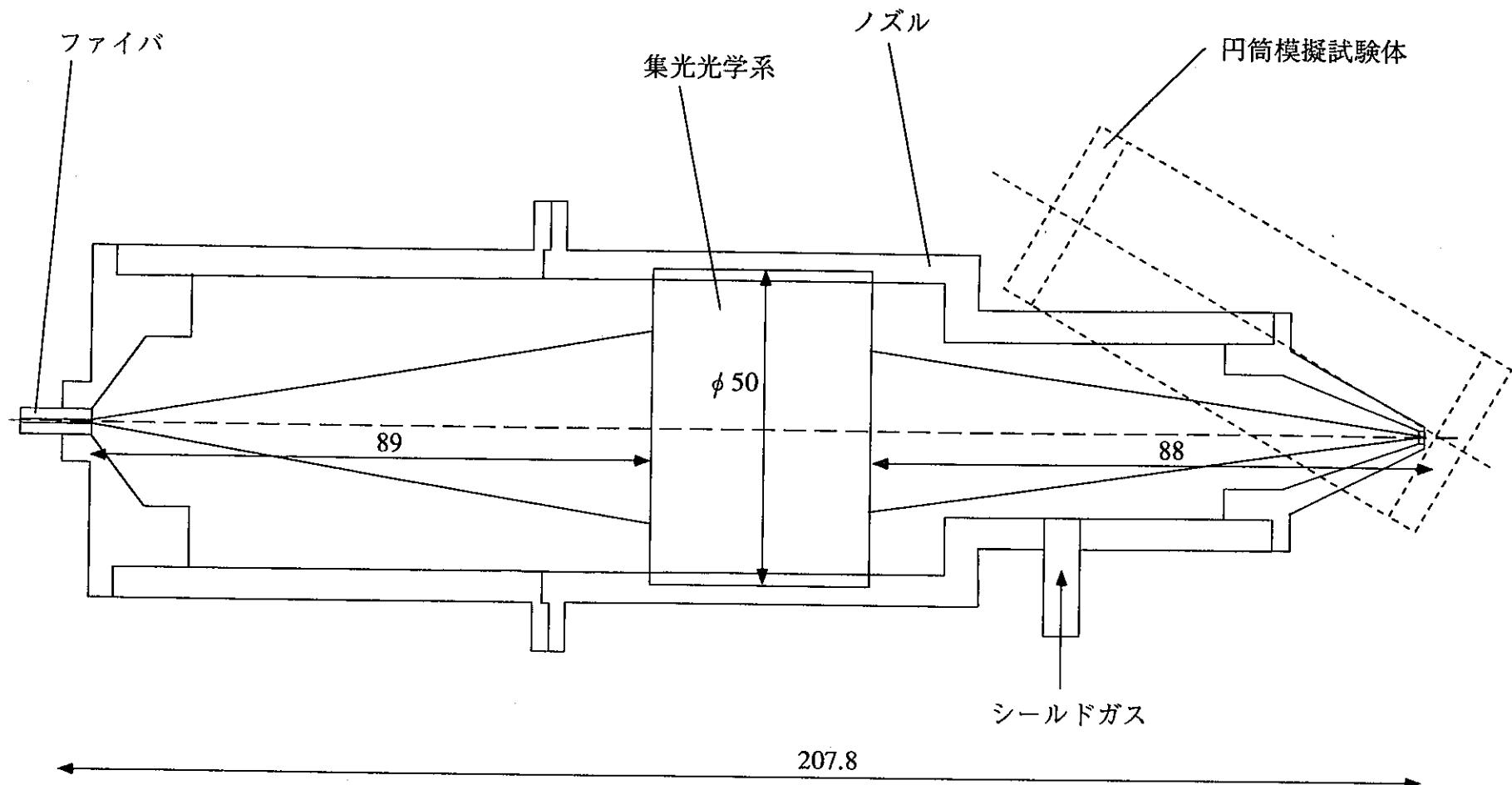
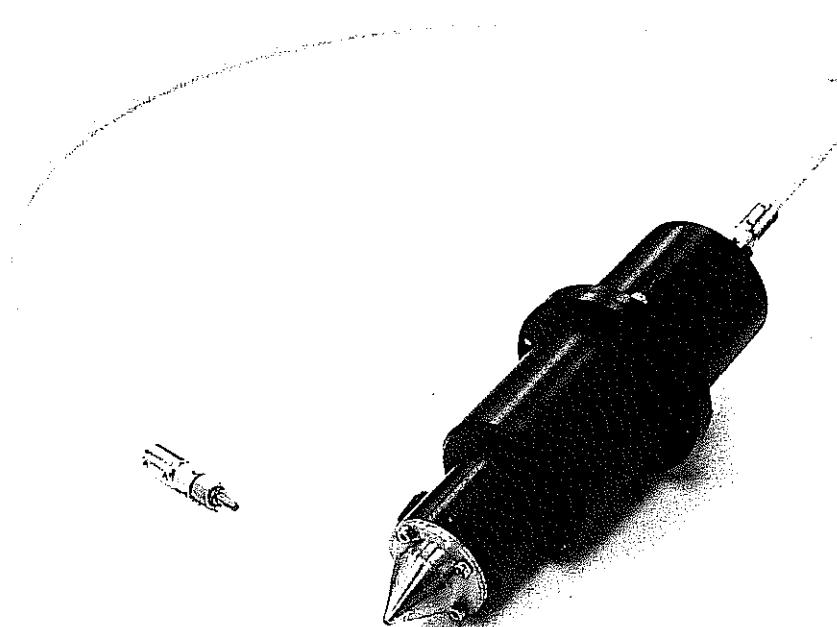
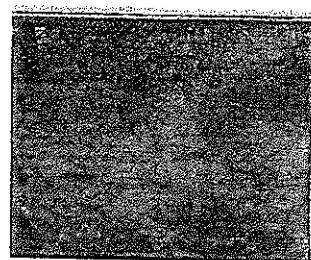


図 2.4 ノズル概念図

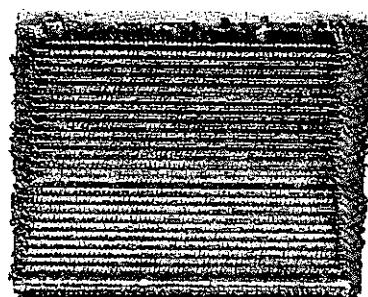


サイズ : 20cm ×  $\phi$  6cm  
重量 : 760g (レンズを含む)

図 2.5 ノーマルパルス YAG レーザファイバ伝送出射ノズル外観写真



(a) レーザ照射前



(b) レーザ照射後

図 2.6 伝送ビームによる模擬汚染除去試験片外観写真

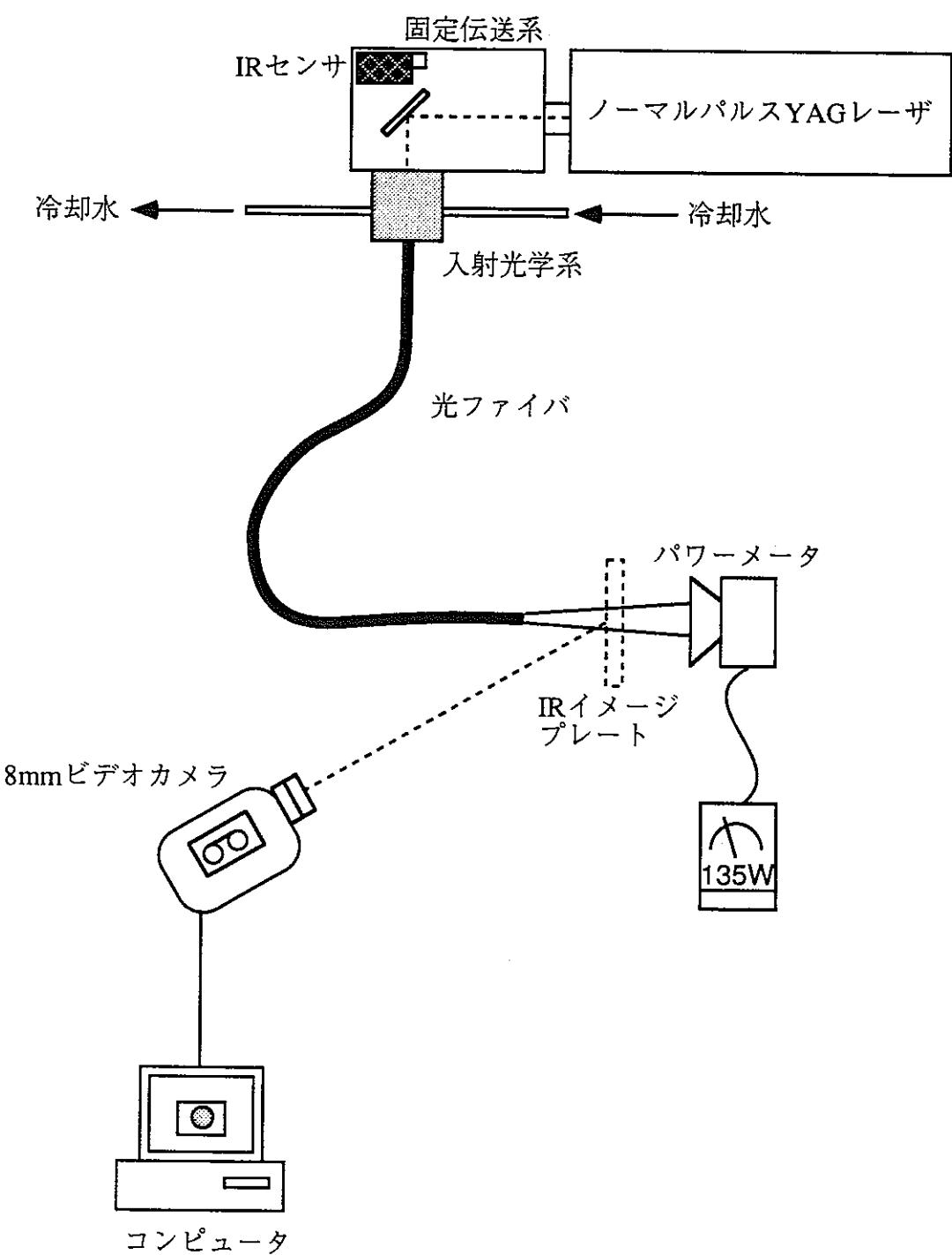


図 4.1 ノーマルパルス YAG レーザのファイバ伝送試験概念図

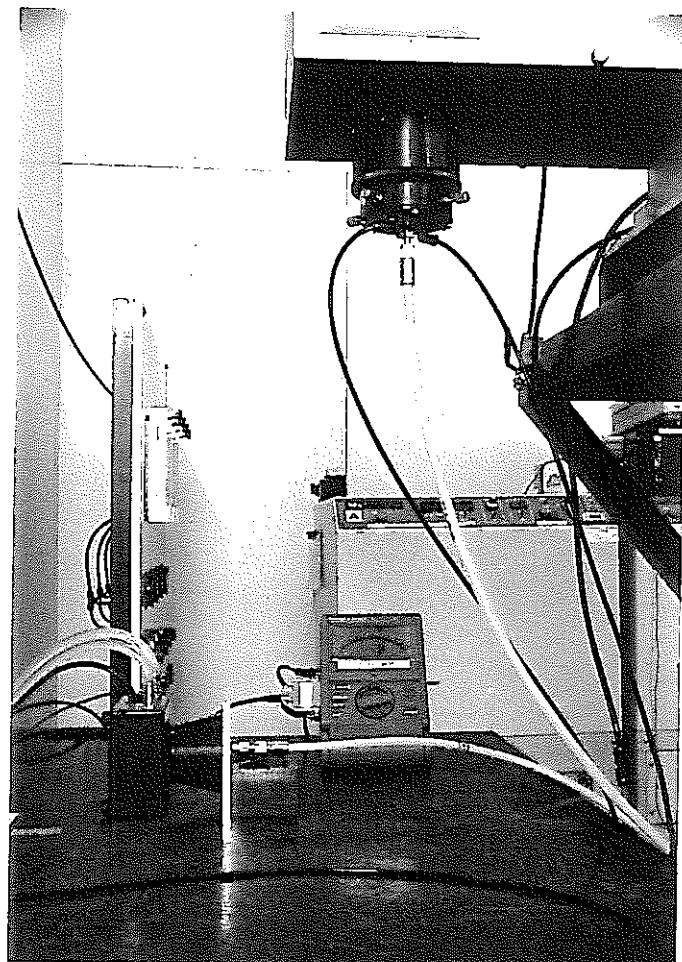


図 4.2 ノーマルパルス YAG レーザのファイバ伝送試験写真

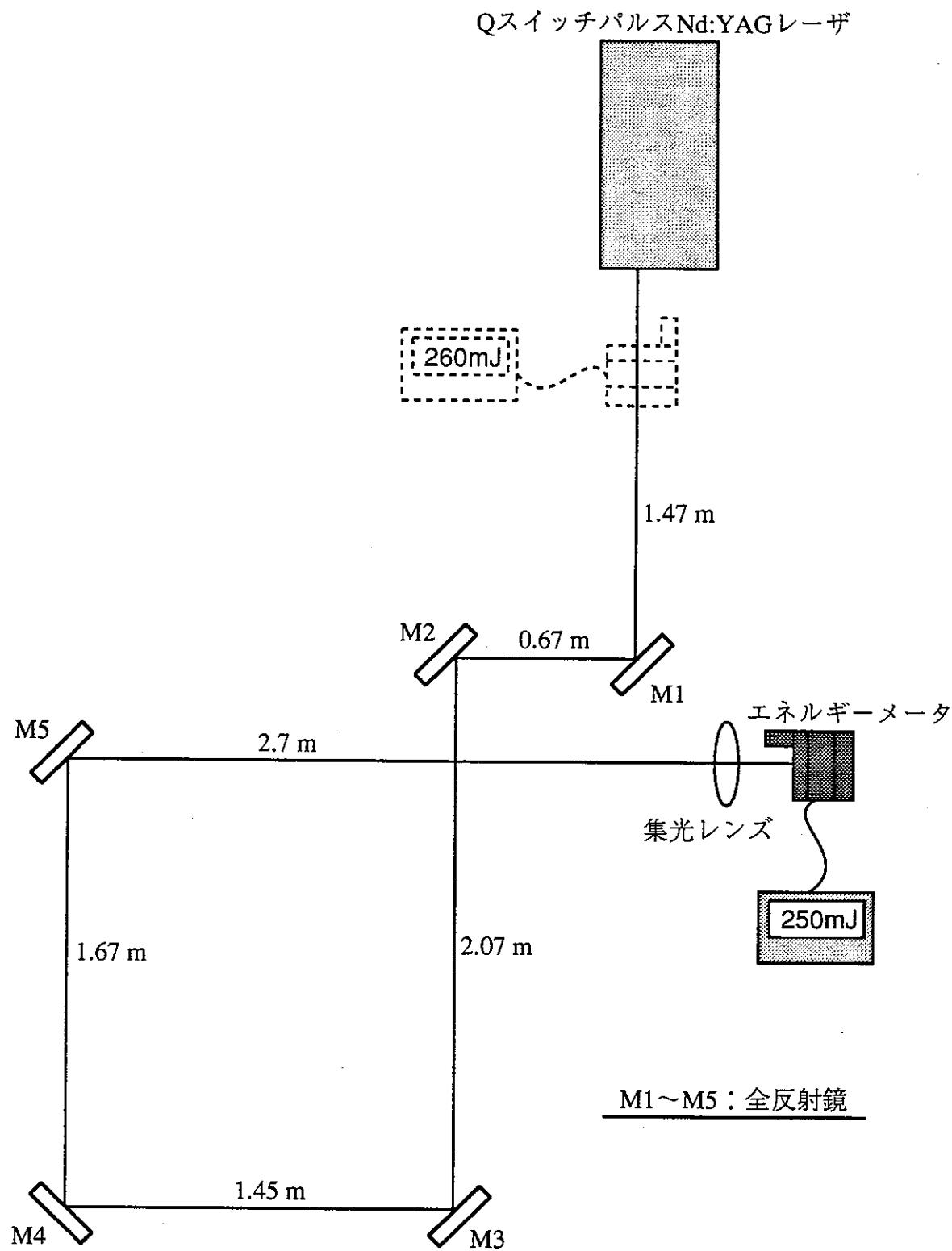


図 4.3 Qスイッチパルス YAG レーザのミラー伝送試験概念図

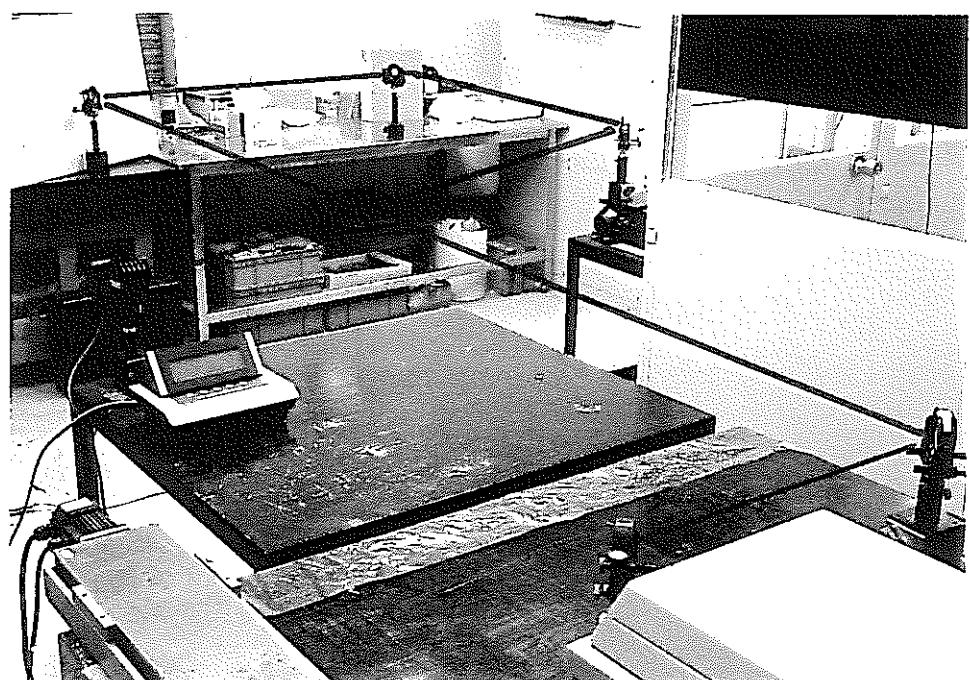


図 4.4 Qスイッチパルス YAG レーザのミラー伝送試験写真

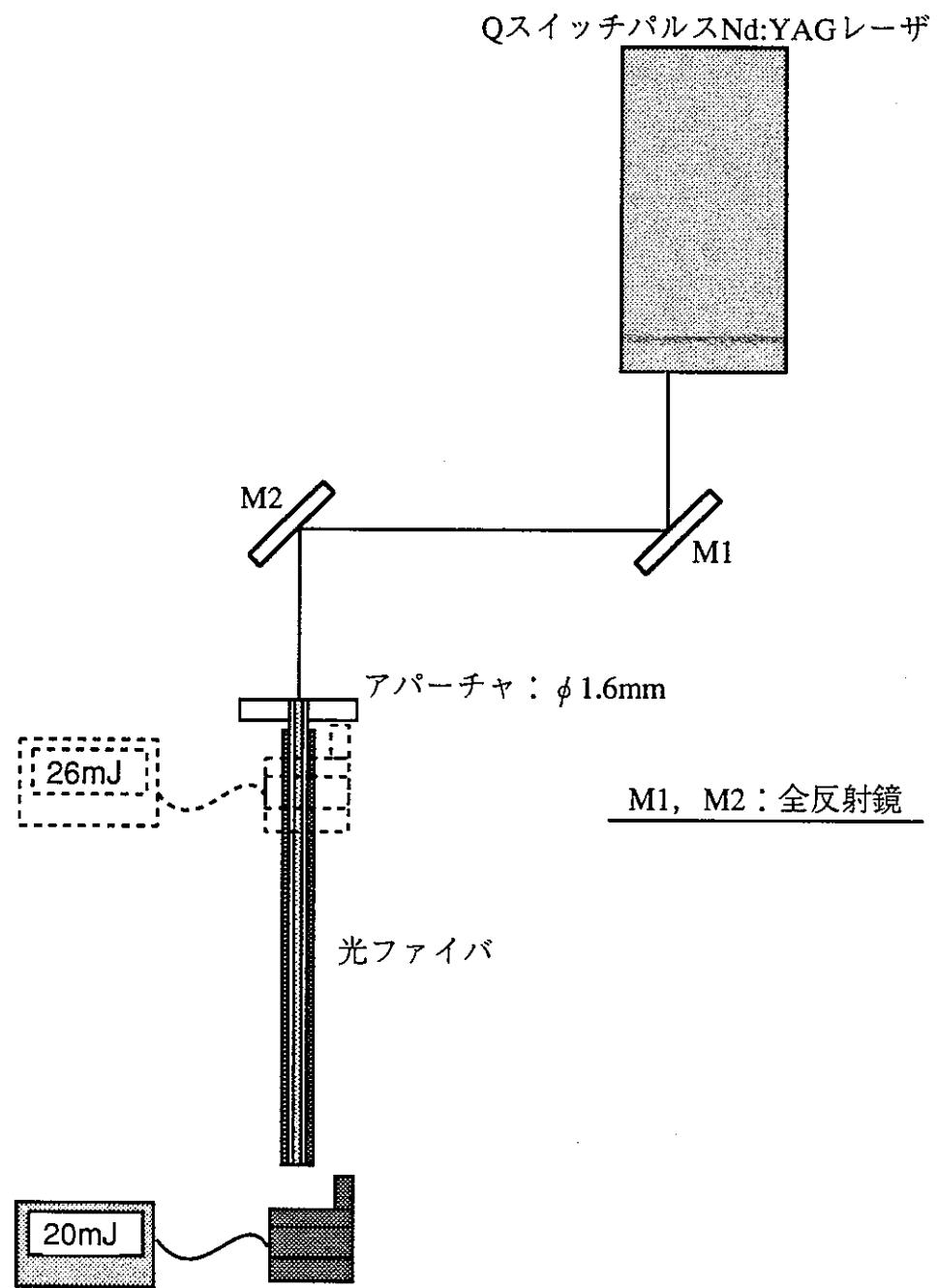


図 4.5 Qスイッチパルス YAG レーザのファイバ伝送試験概念図



図 4.6 QスイッチパルスYAGレーザのファイバ伝送試験写真

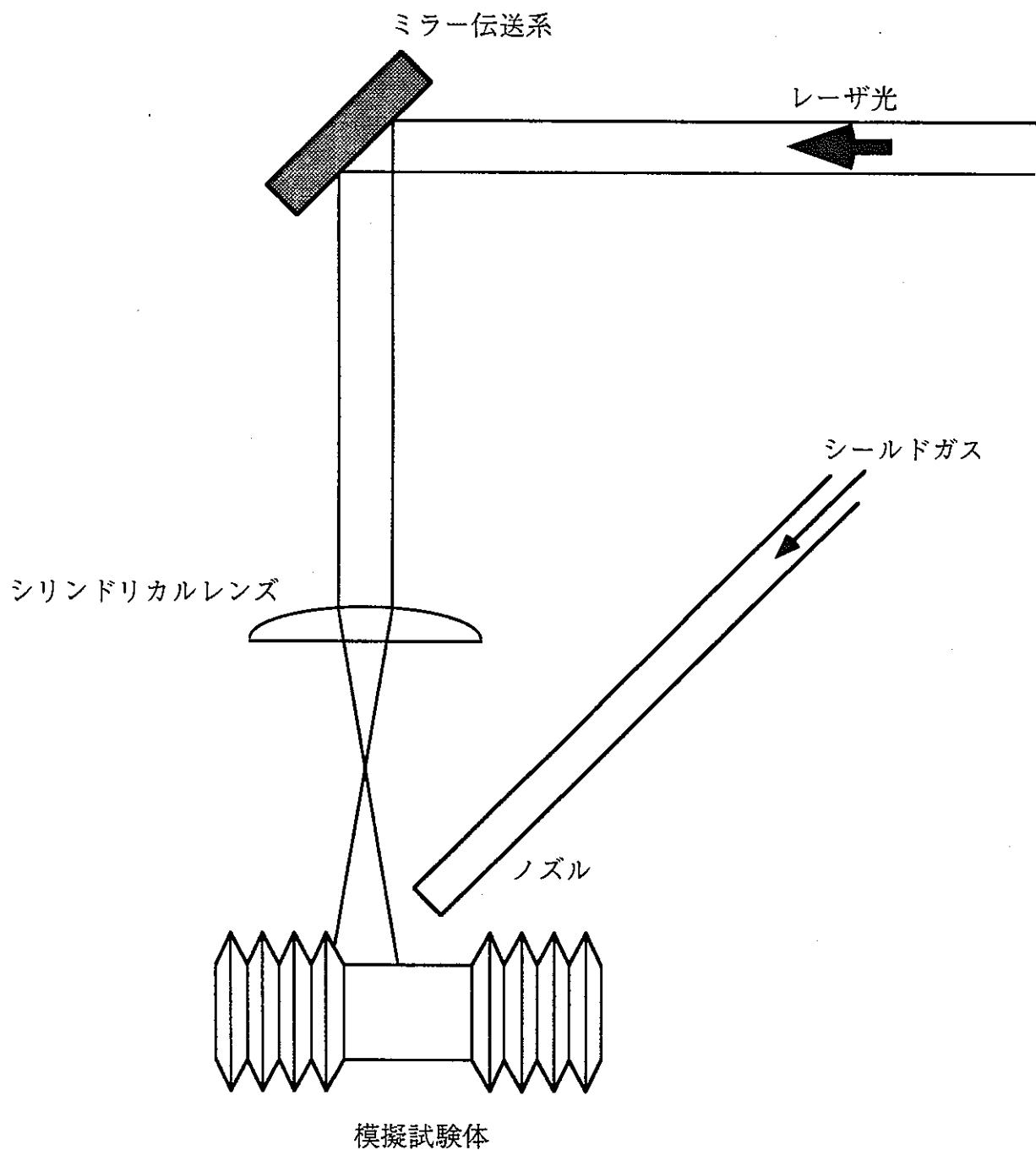


図 4.7 模擬試験片除染試験概念図 (Q スイッチパルス YAG レーザ)

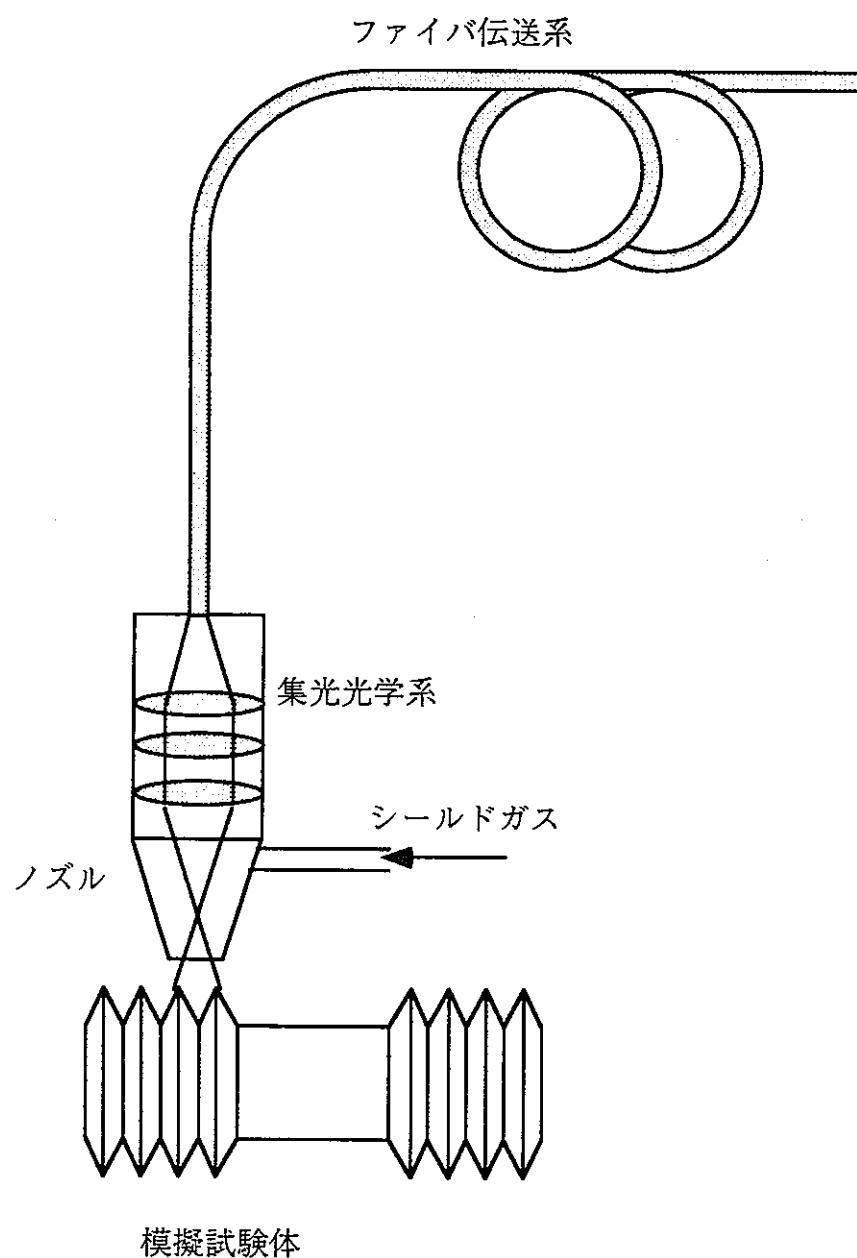


図 4.8 模擬試験片除染試験概念図（ノーマルパルス YAG レーザ）

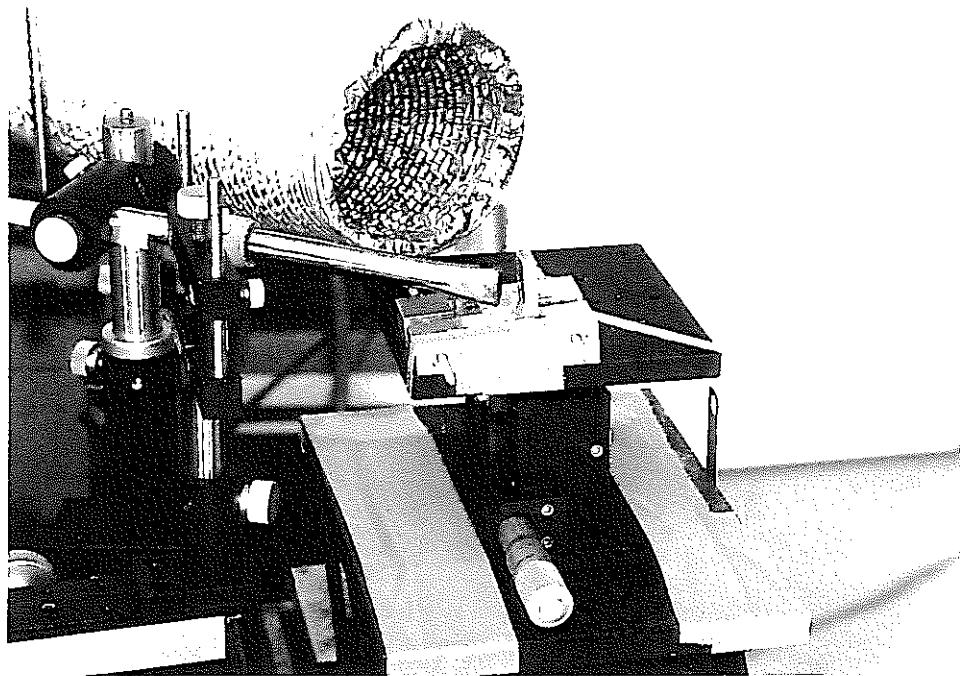


図 4.9 除染試験装置写真 (Q スイッチパルス, L型アングル)

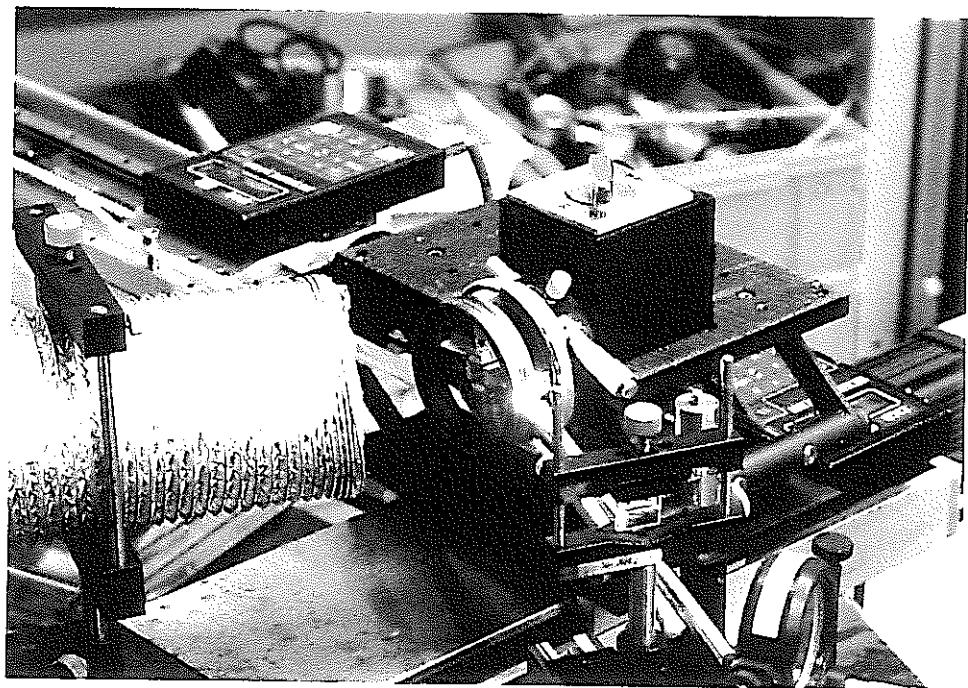


図 4.10 除染試験装置写真 (Q スイッチパルス, 円筒)

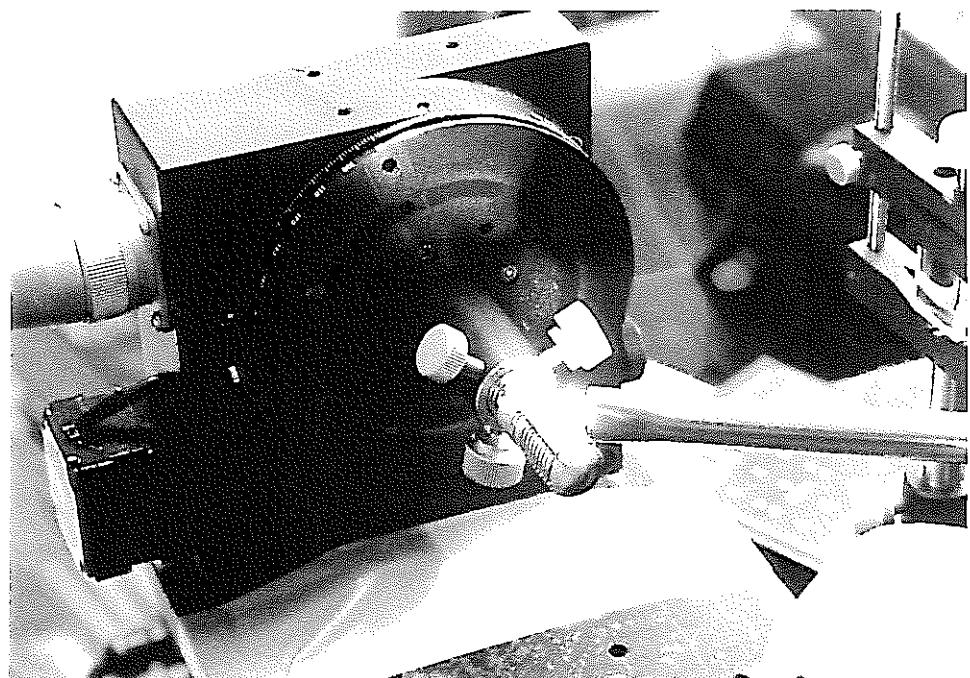


図 4.11 除染試験装置写真 (Q スイッチパルス, ボルト)

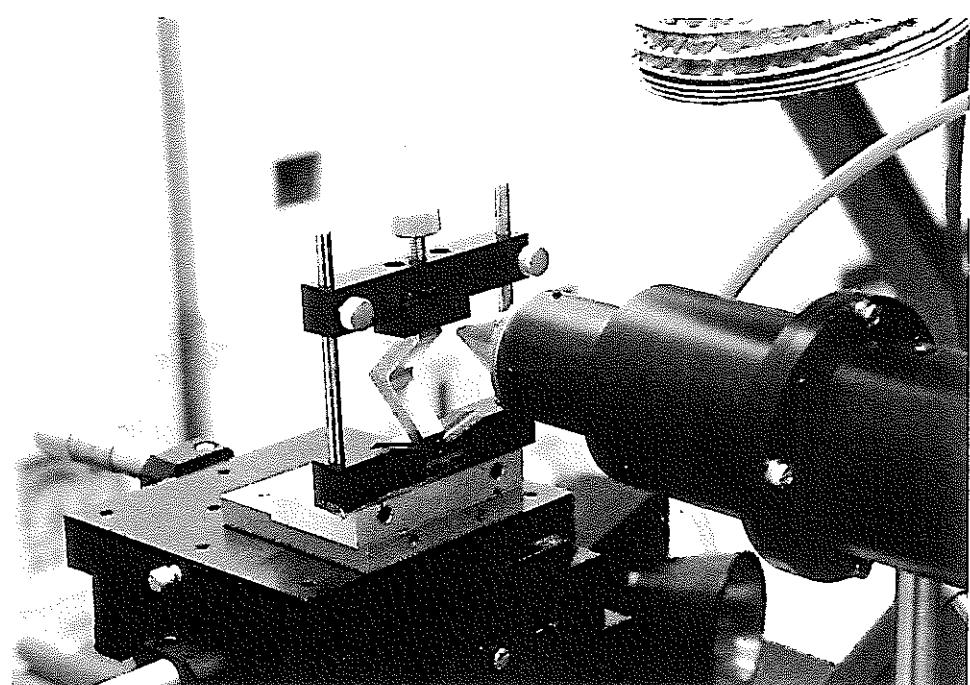


図 4.12 除染試験装置写真 (ノーマルパルス, L型アングル)

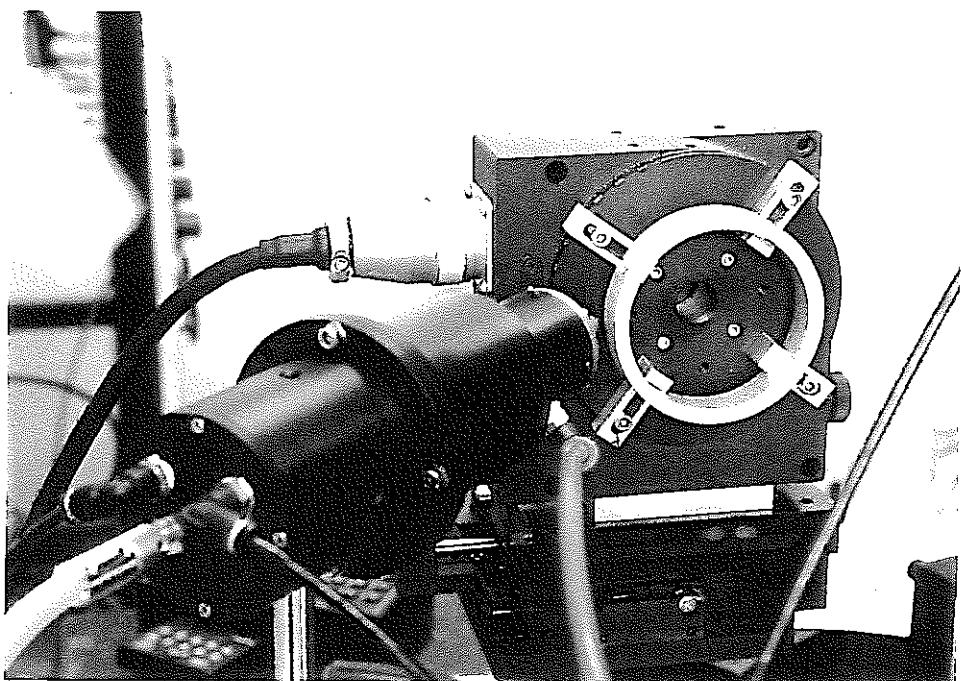


図 4.13 除染試験装置写真（ノーマルパルス，円筒）

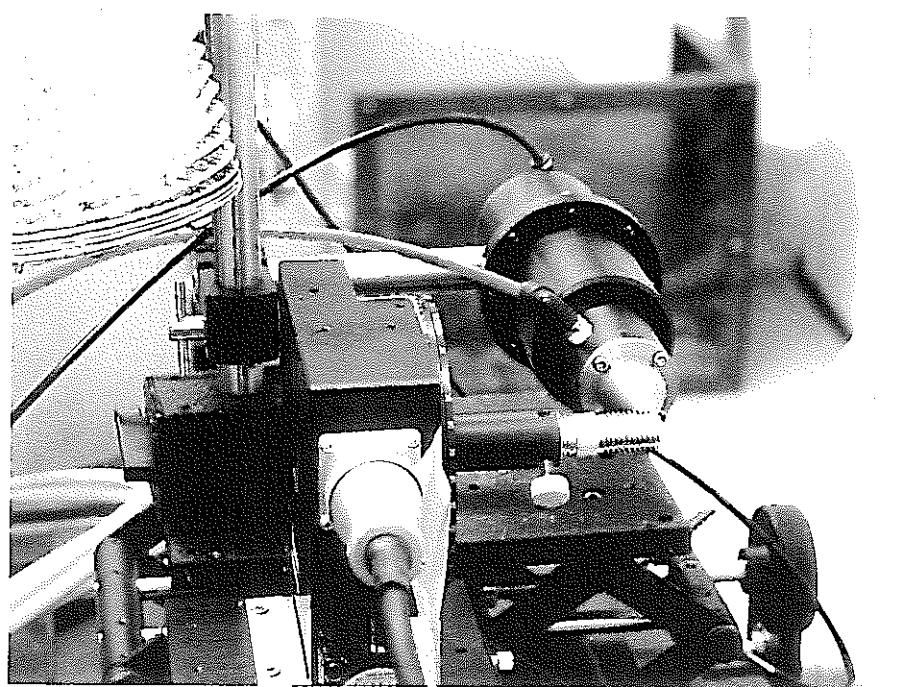


図 4.14 除染試験装置写真（ノーマルパルス，ボルト）

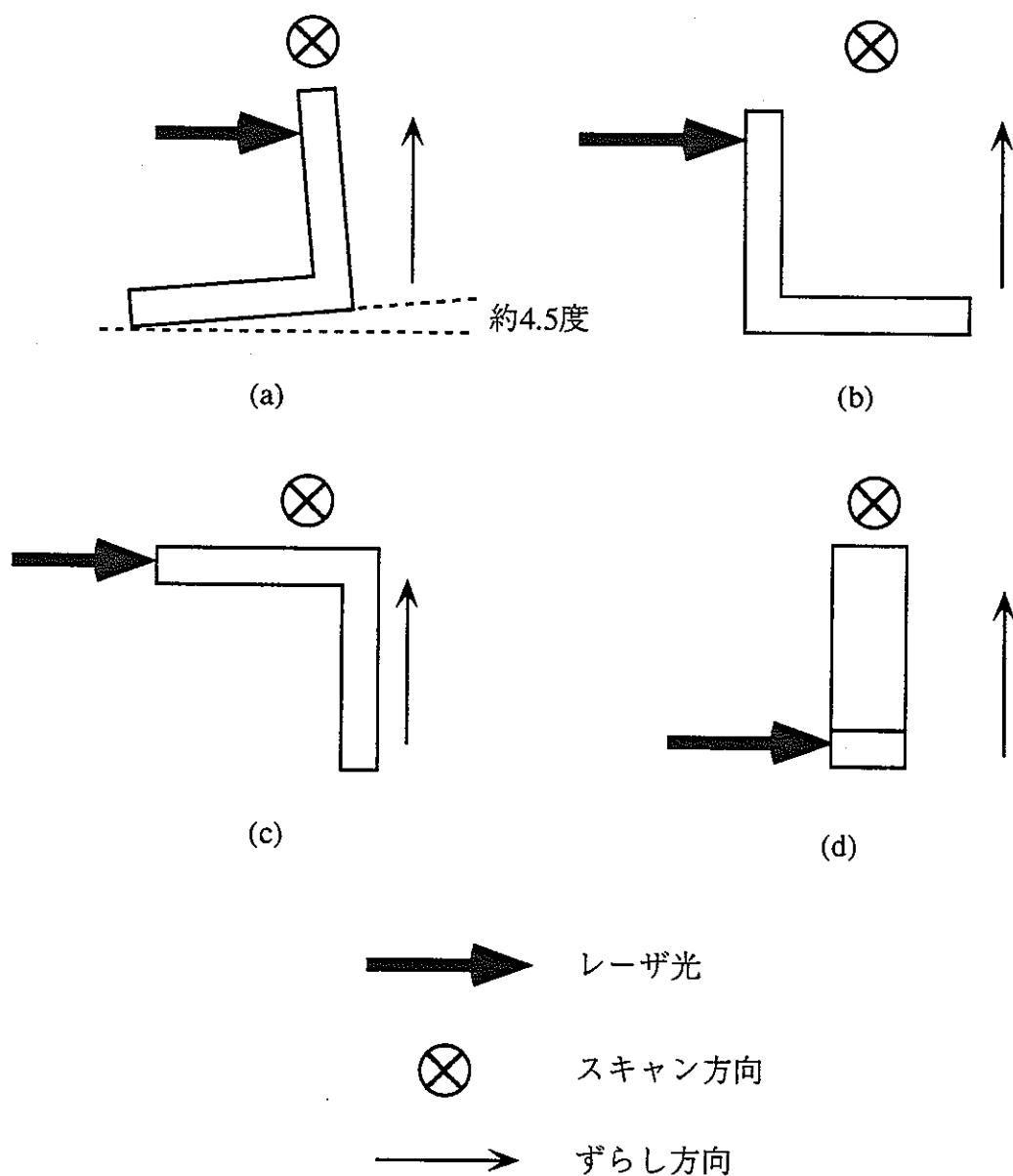


図 4.15 照射方法 (Qスイッチパルス, L型アングル)

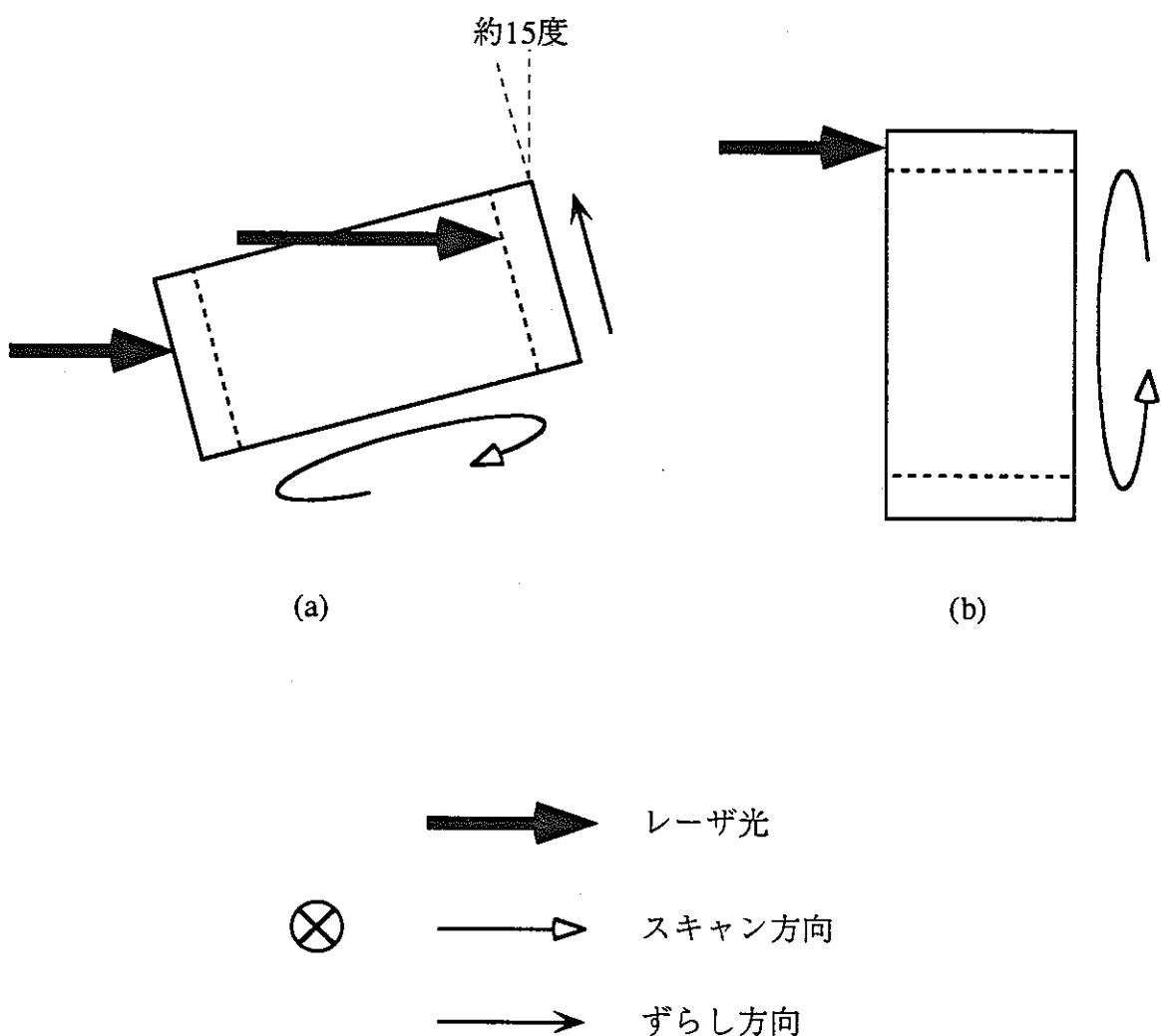
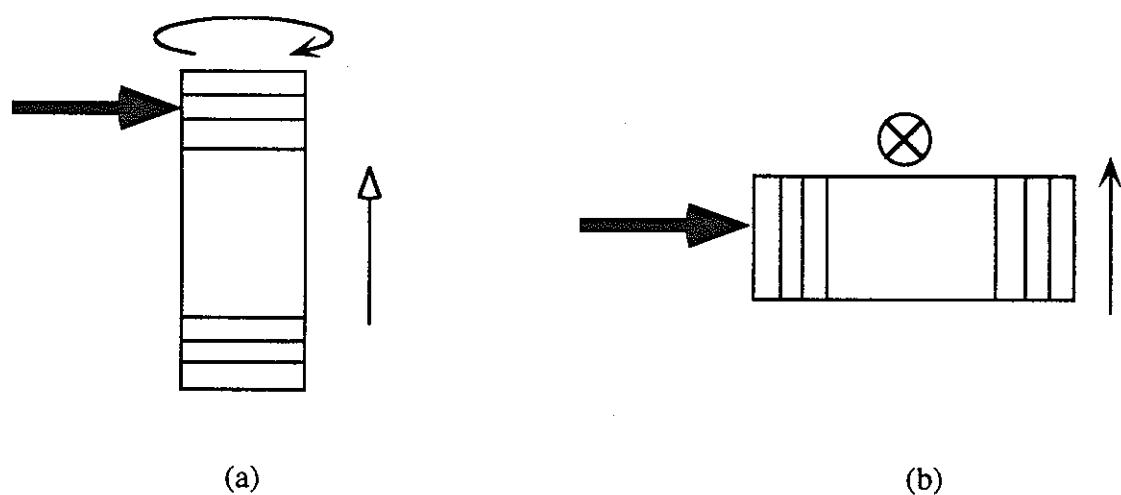


図 4.16 照射方法 (Qスイッチパルス, 円筒)



(a)

(b)

→ レーザ光

⊗ → スキャン方向

→ ずらし方向

図 4.17 照射方法 (Qスイッチパルス, ボルト)

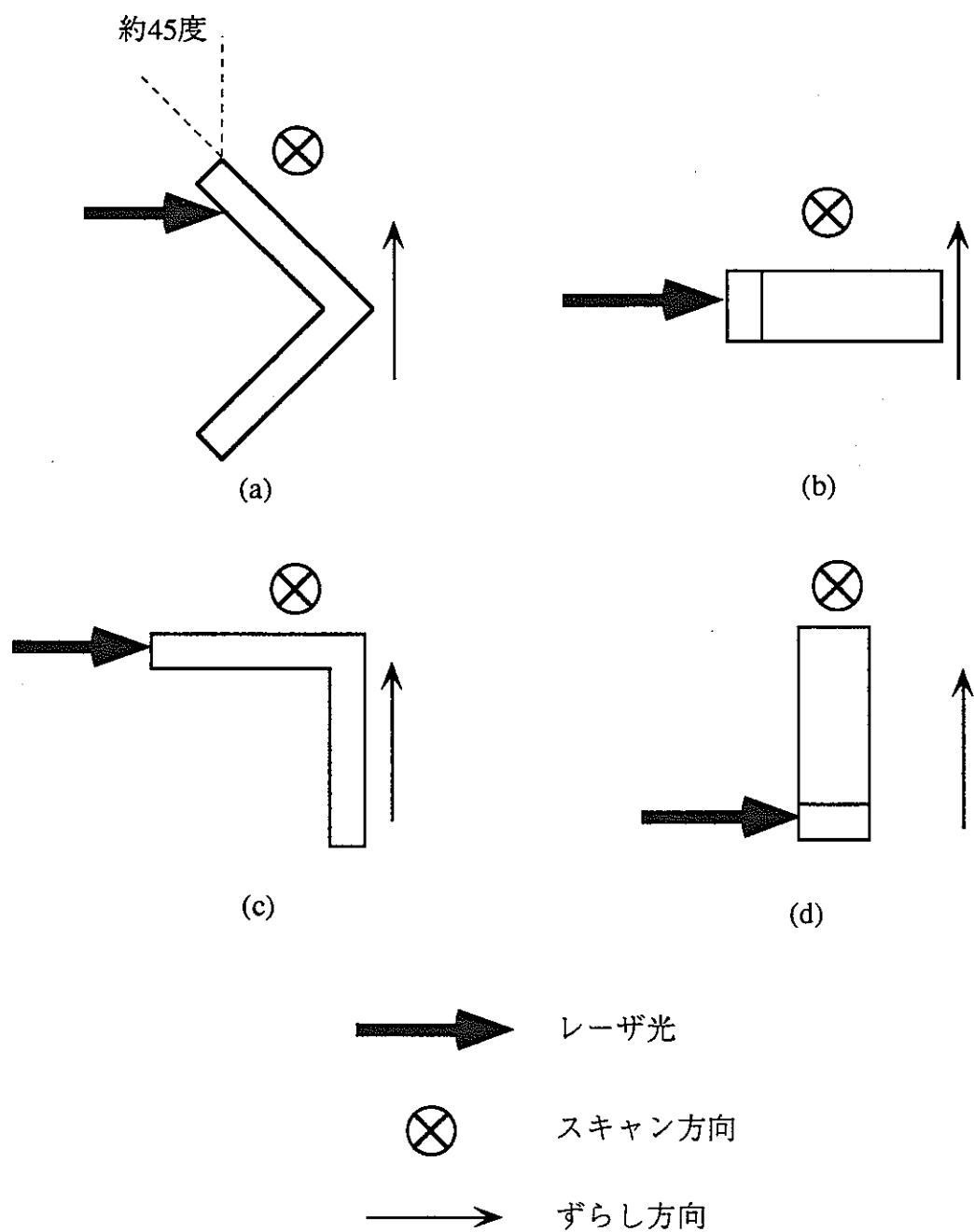
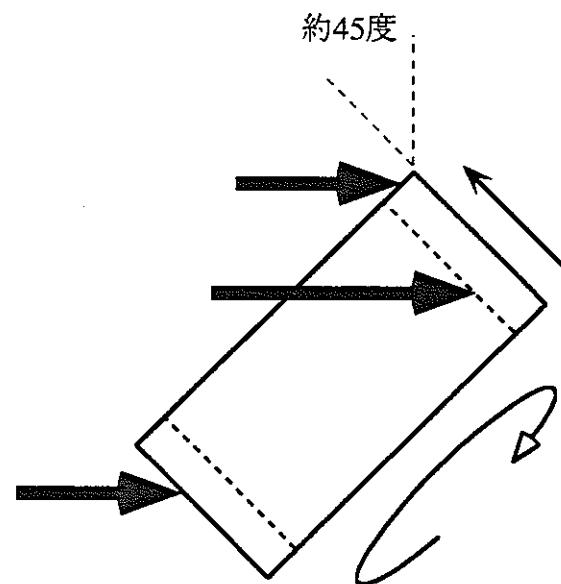


図 4.18 照射方法（ノーマルパルス, L型アングル）



→ レーザ光

⊗ → スキャン方向

→ ずらし方向

図 4.19 照射方法（ノーマルパルス、円筒）

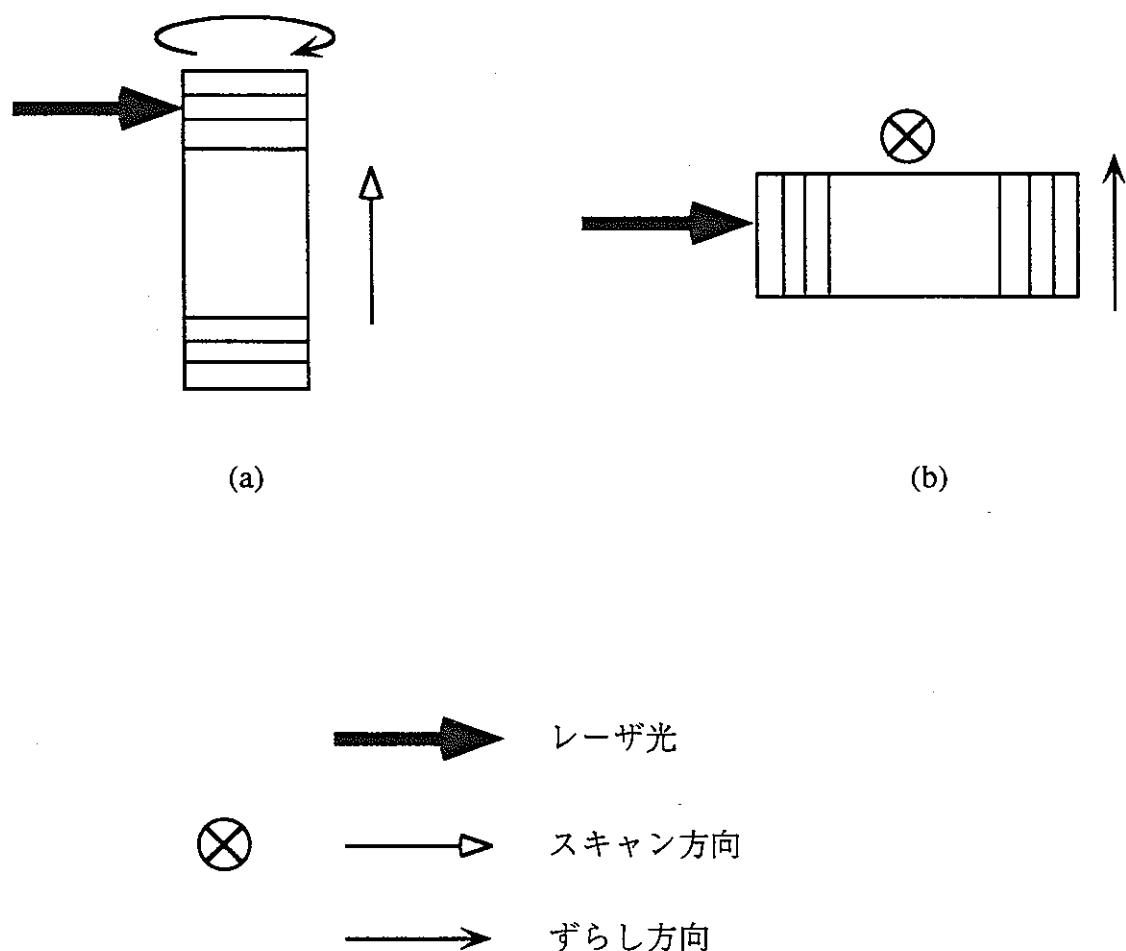


図 4.20 照射方法（ノーマルパルス，ボルト）

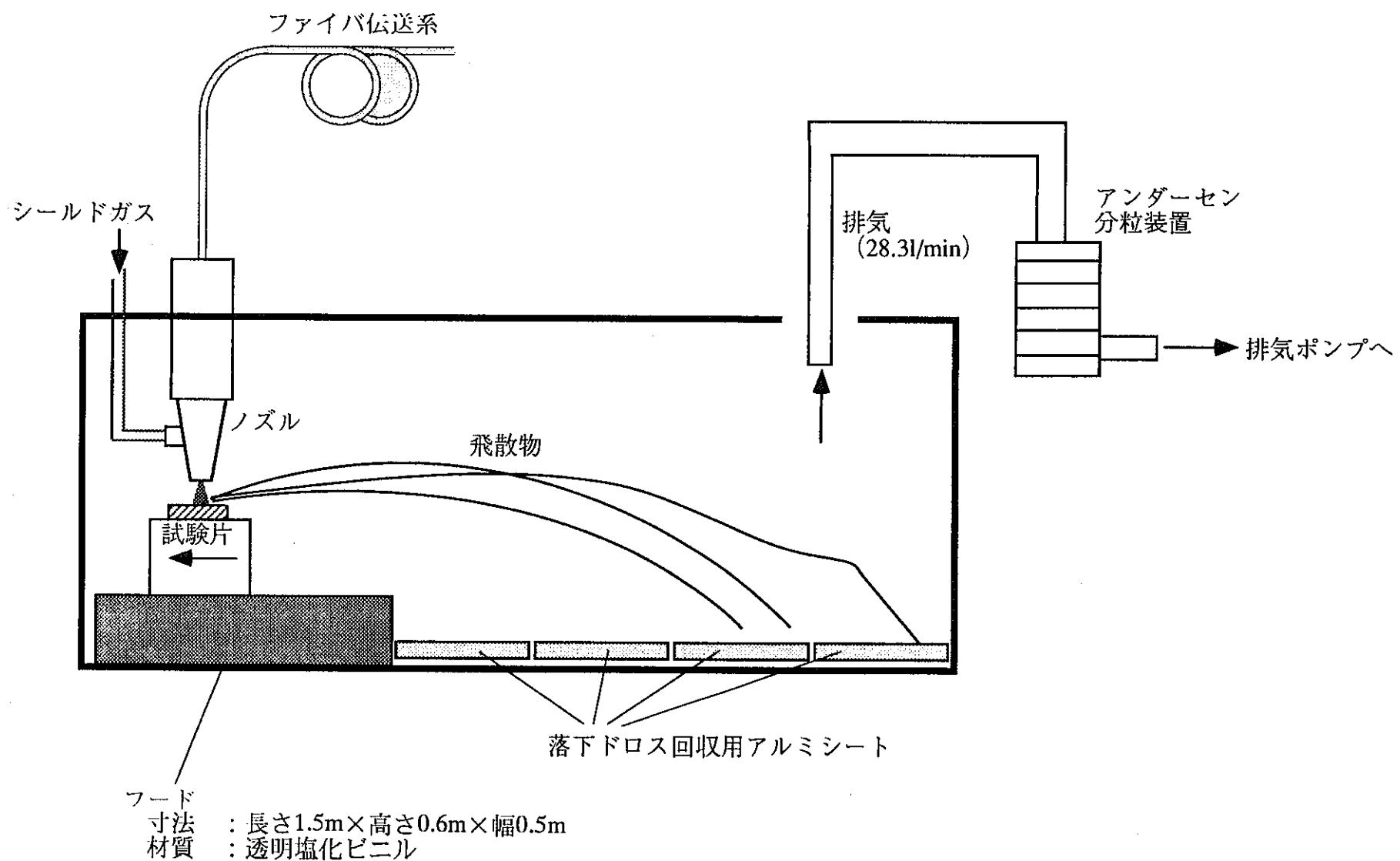


図 4.21 二次生成物特性測定試験概念図

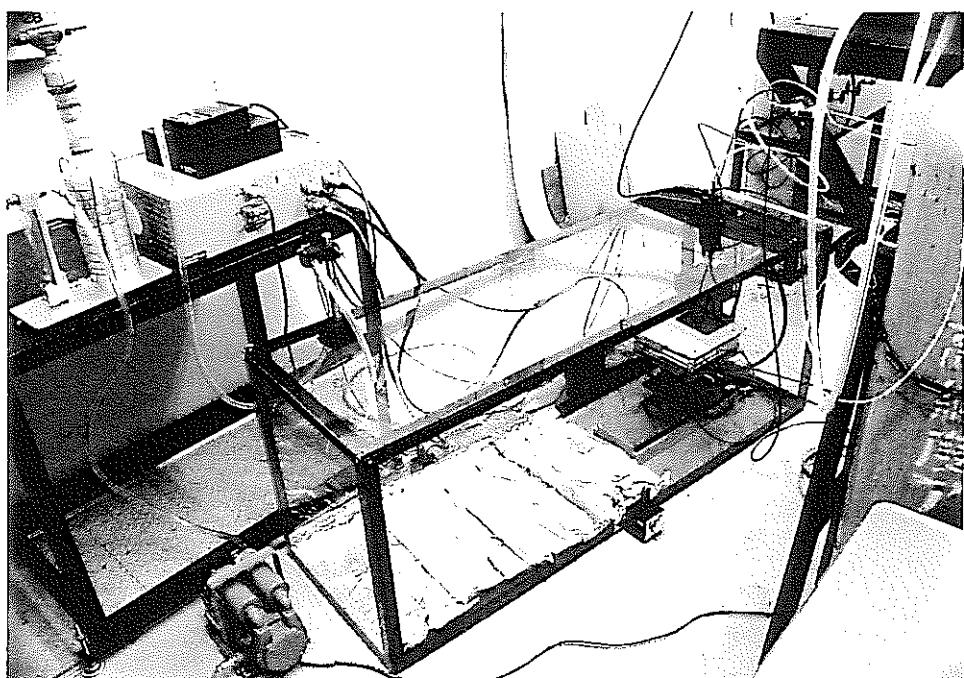


図 4.22 二次生成物特性測定試験装置外観写真

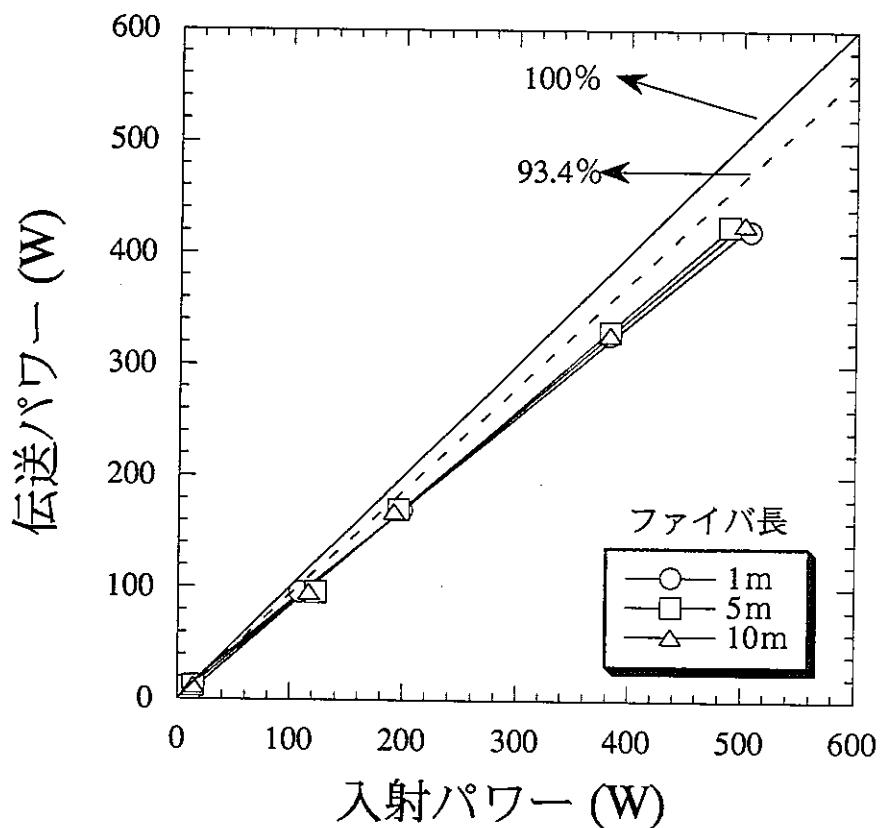


図 5.1 ノーマルパルス YAG レーザのファイバ伝送特性  
繰り返し速度 : 30Hz, デューティ比 : 50%  
ファイバ : コア径  $\phi 600 \mu\text{m}$ , GI 型

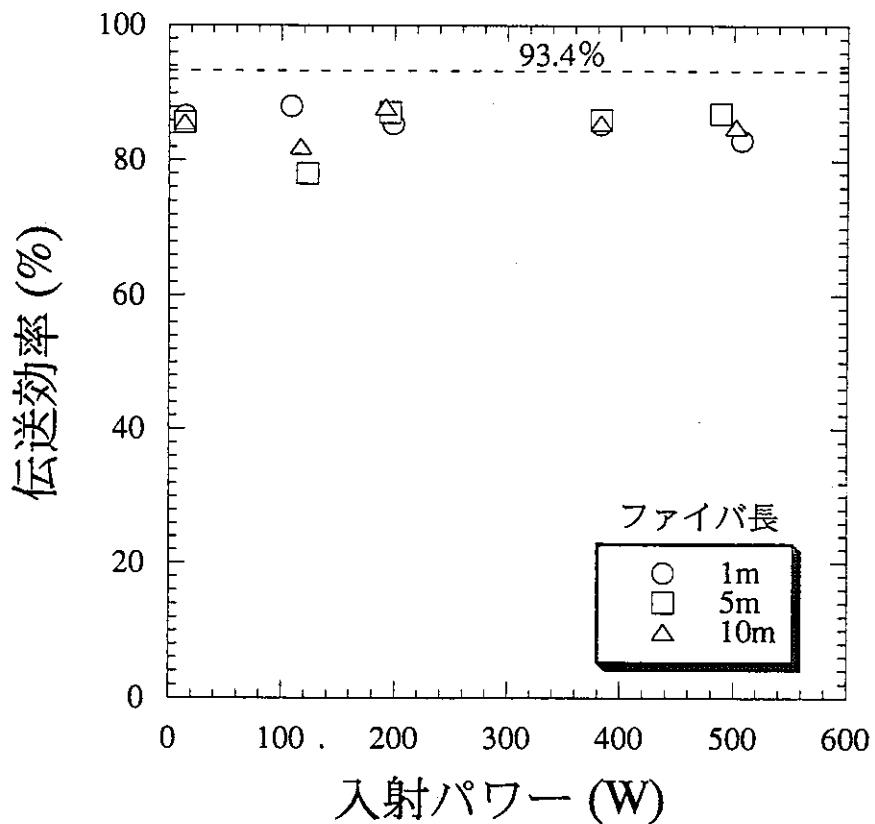
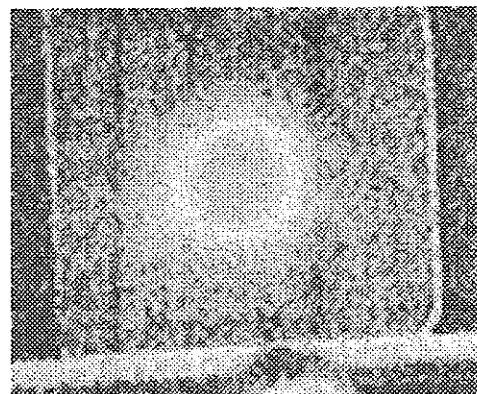
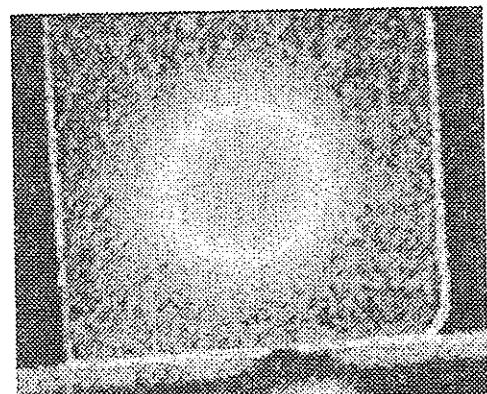


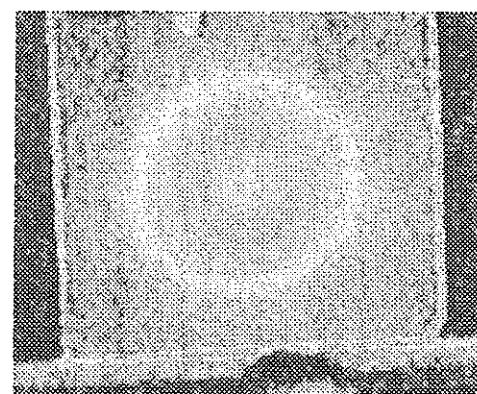
図 5.2 ノーマルパルス YAG レーザのファイバ伝送効率  
繰り返し速度 : 30Hz, デューティ比 : 50%  
ファイバ : コア径  $\phi 600 \mu\text{m}$ , GI 型



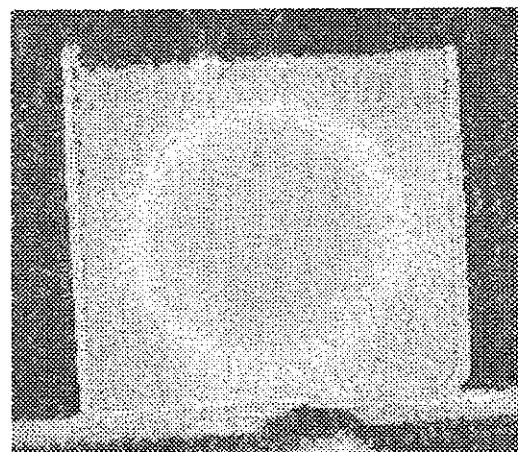
出射パワー：96 W



出射パワー：170 W



出射パワー：327 W



出射パワー：421 W

10 mm  
↔

図 5.3 伝送ビームパターン  
(ノーマルパルス, ファイバ長：1m, ファイバ端から約 50mm)

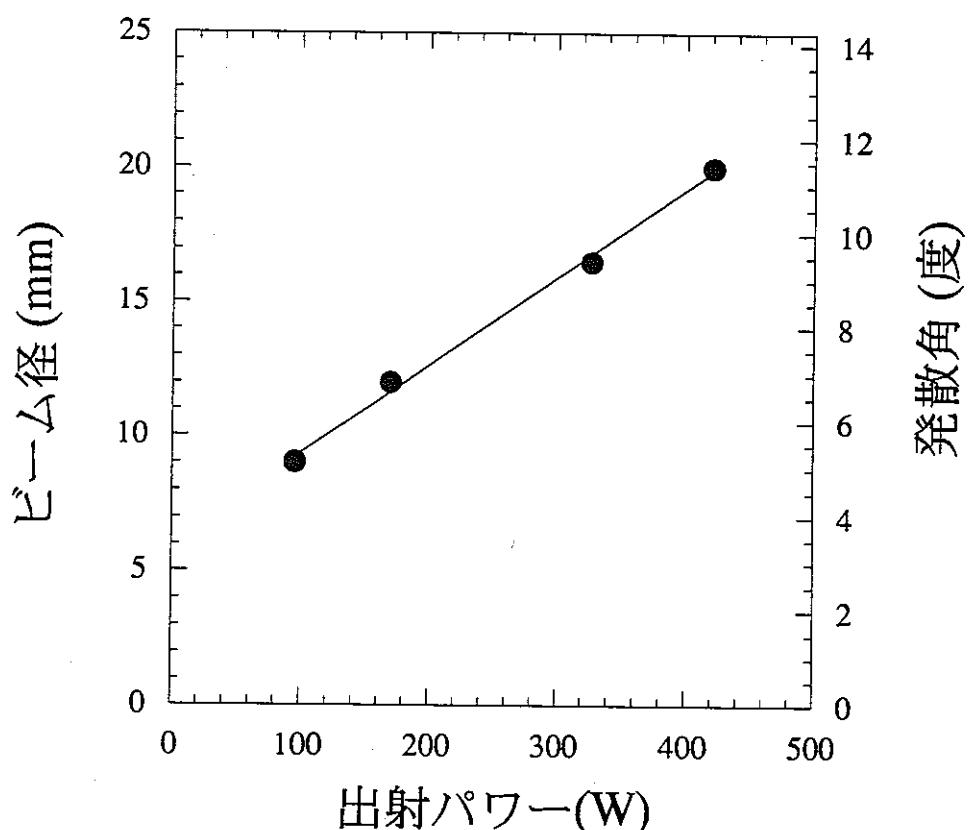


図 5.4 伝送ビーム径と拡がり角  
繰り返し速度 : 30Hz, デューティ : 50%  
ファイバ長 : 1m, 測定位置 : ファイバ端から 50mm

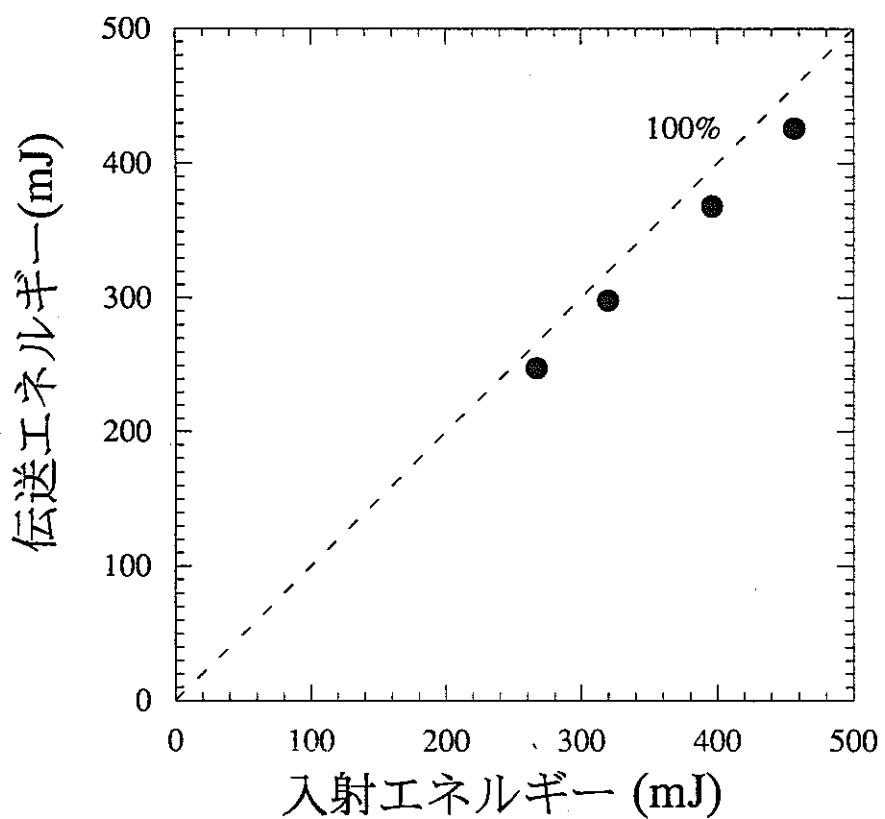


図 5.5 Q スイッチパルス YAG レーザのミラー伝送特性  
(ミラー数 : 5 枚, 伝送距離 : 10m)

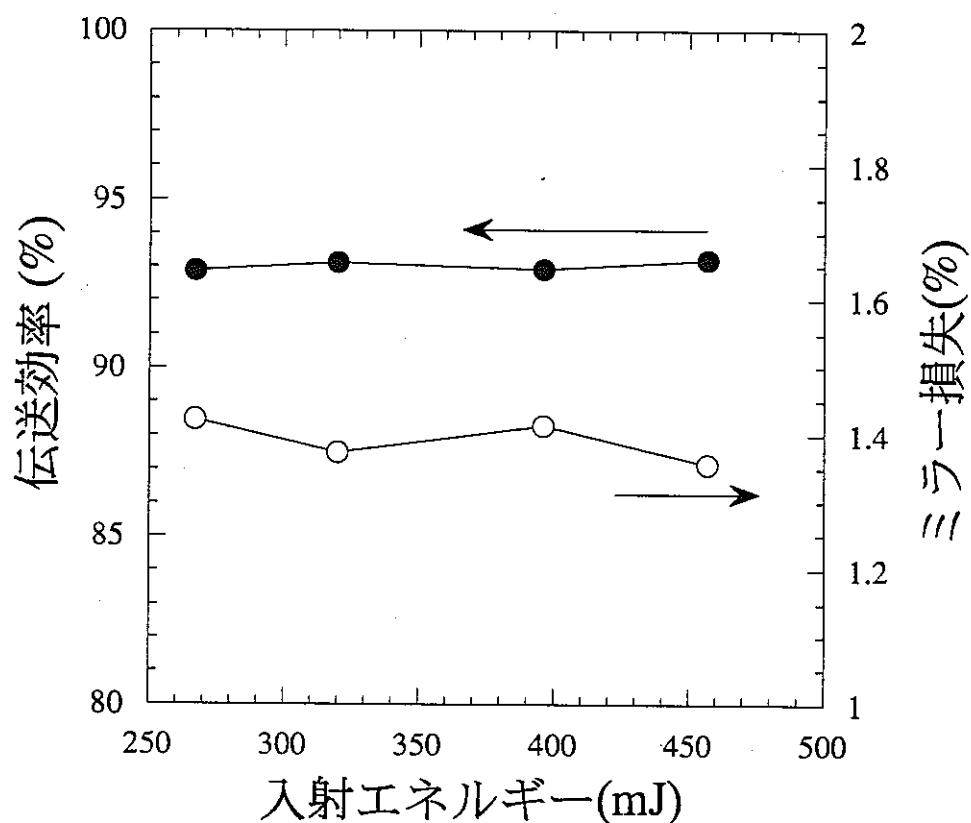
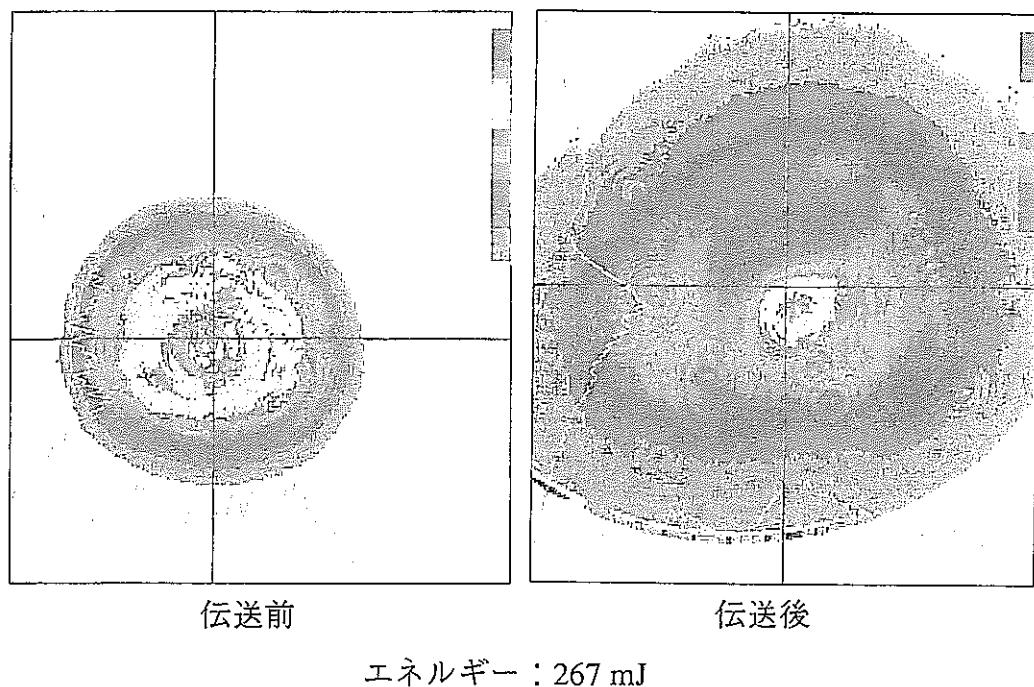
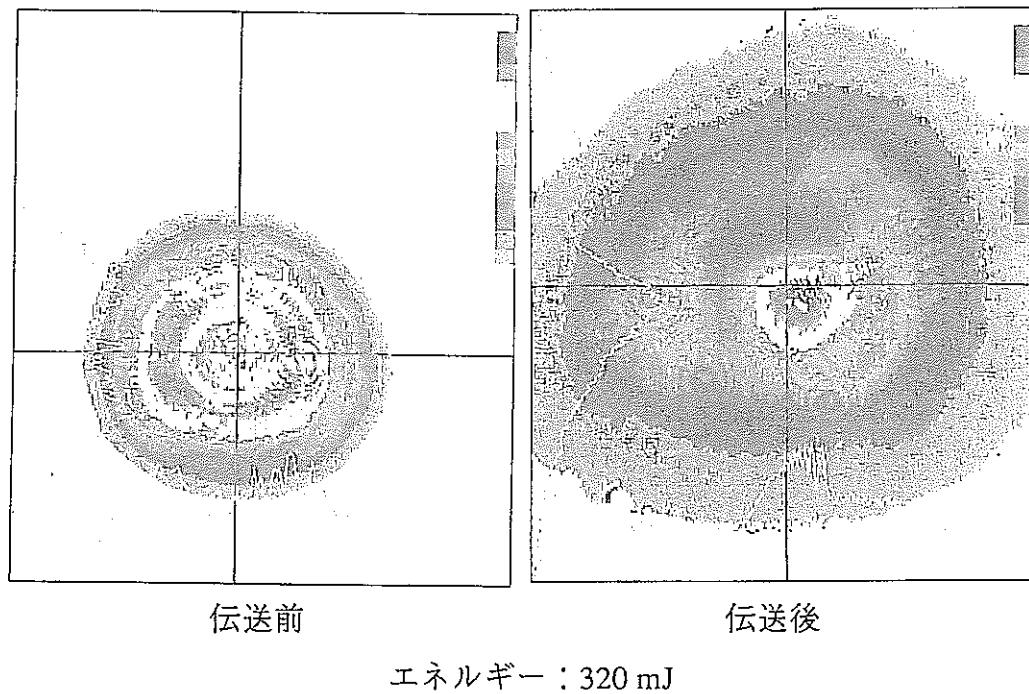


図 5.6 Q スイッチパルス YAG レーザのミラー伝送効率と損失  
(ミラー数 : 5 枚, 伝送距離 : 10m)



エネルギー : 267 mJ



5 mm

図 5.7 ミラー伝送前後のビームパターン 1/2  
(Qスイッチパルス, 伝送距離: 10m)

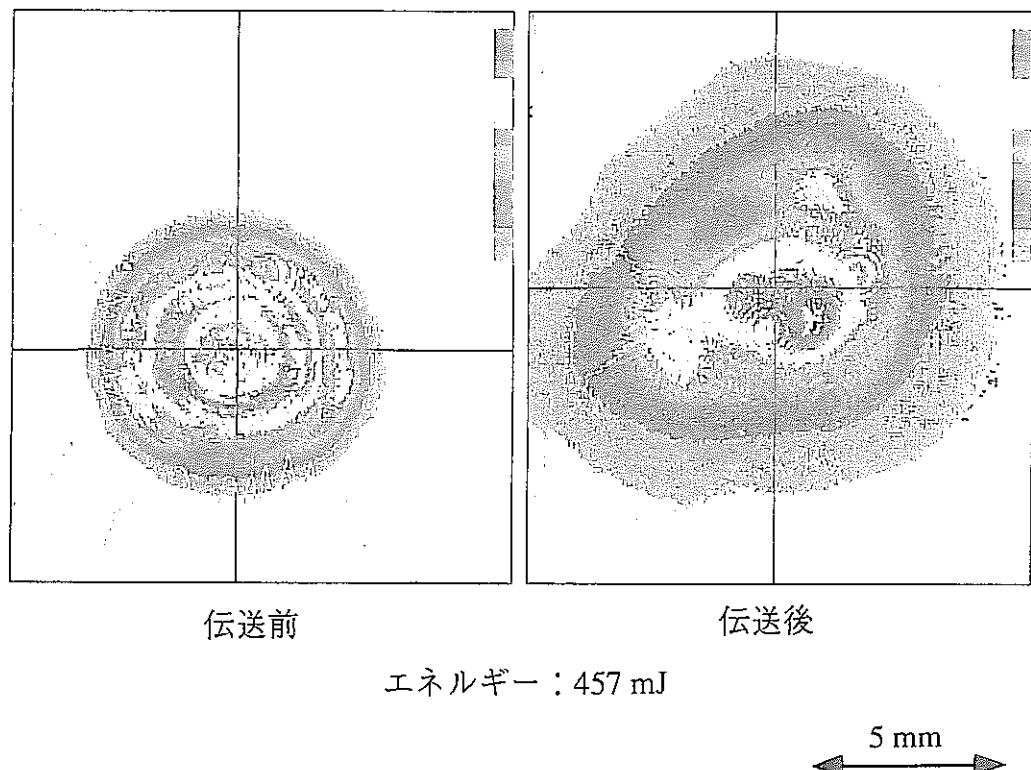
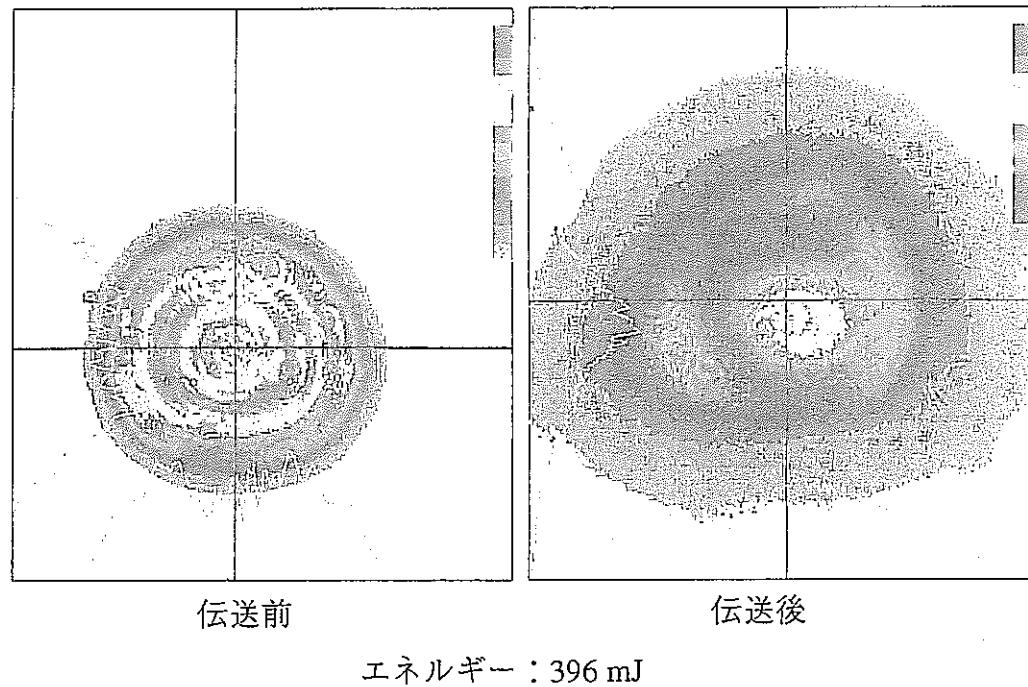


図 5.8 ミラー伝送前後のビームパターン 2/2  
(Q スイッチパルス, 伝送距離 : 10m)

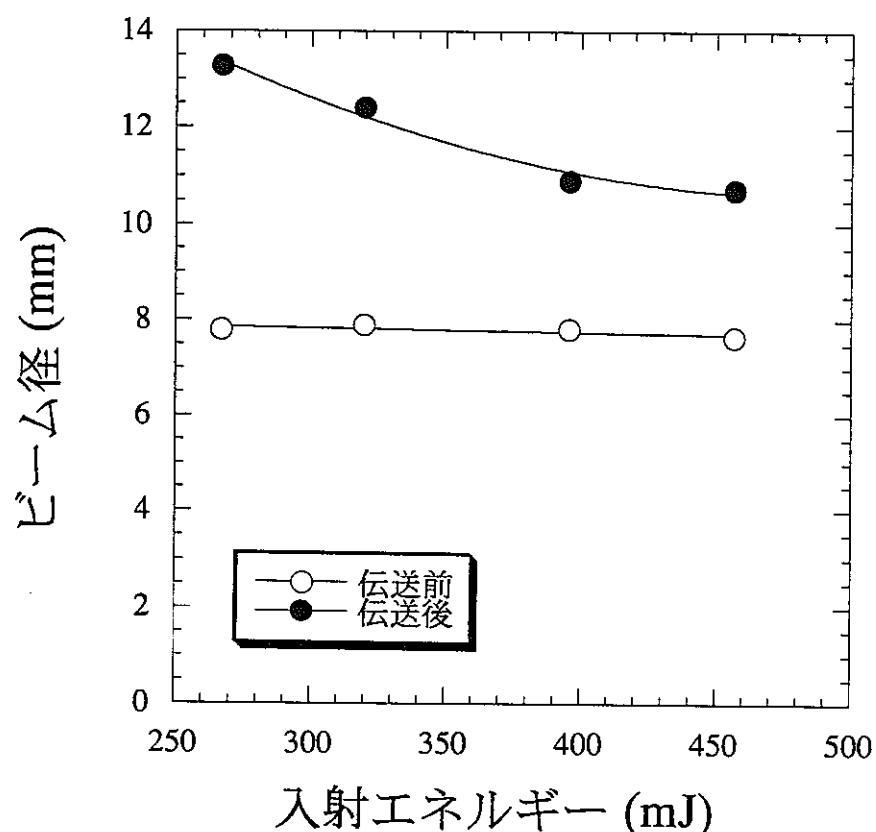
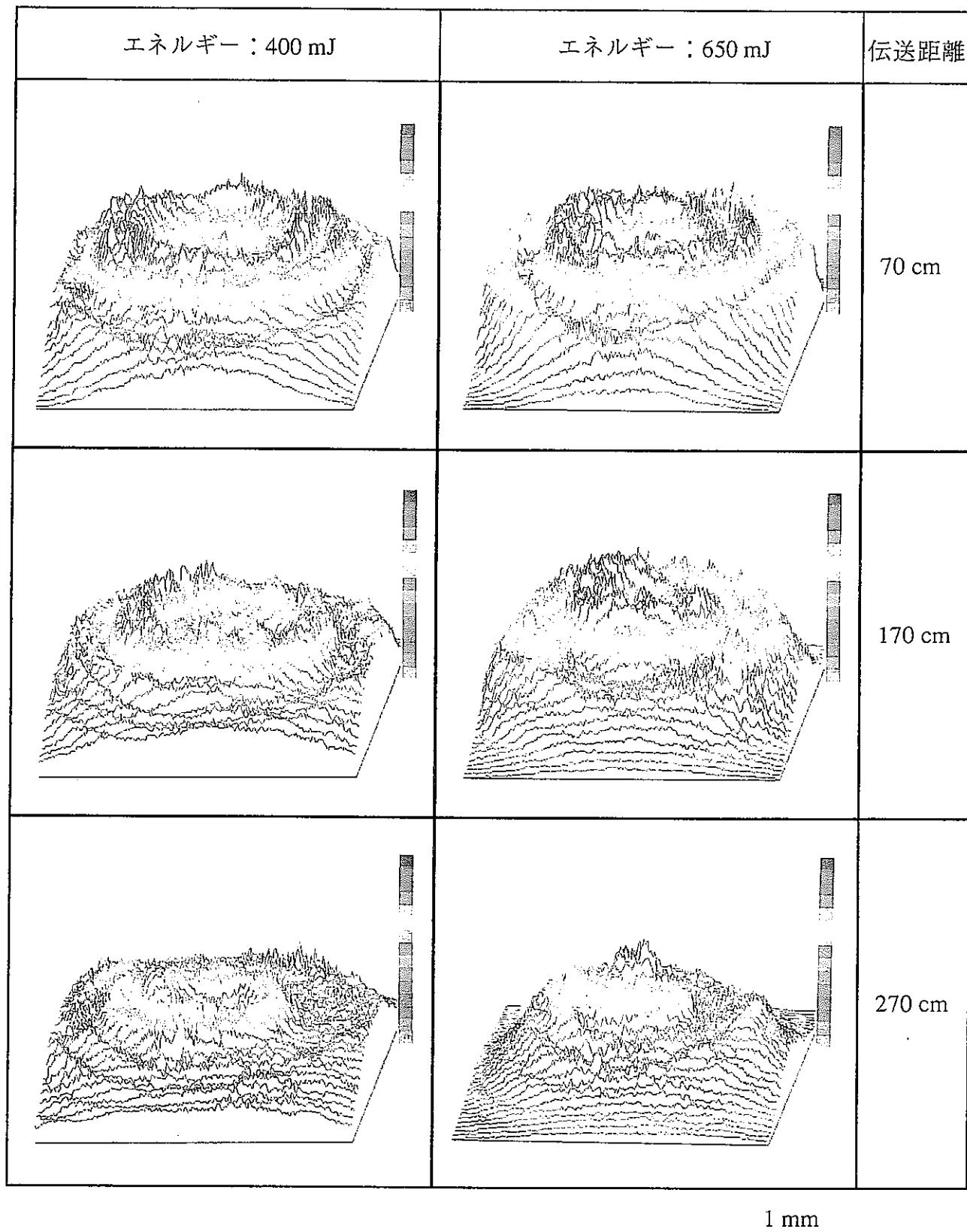
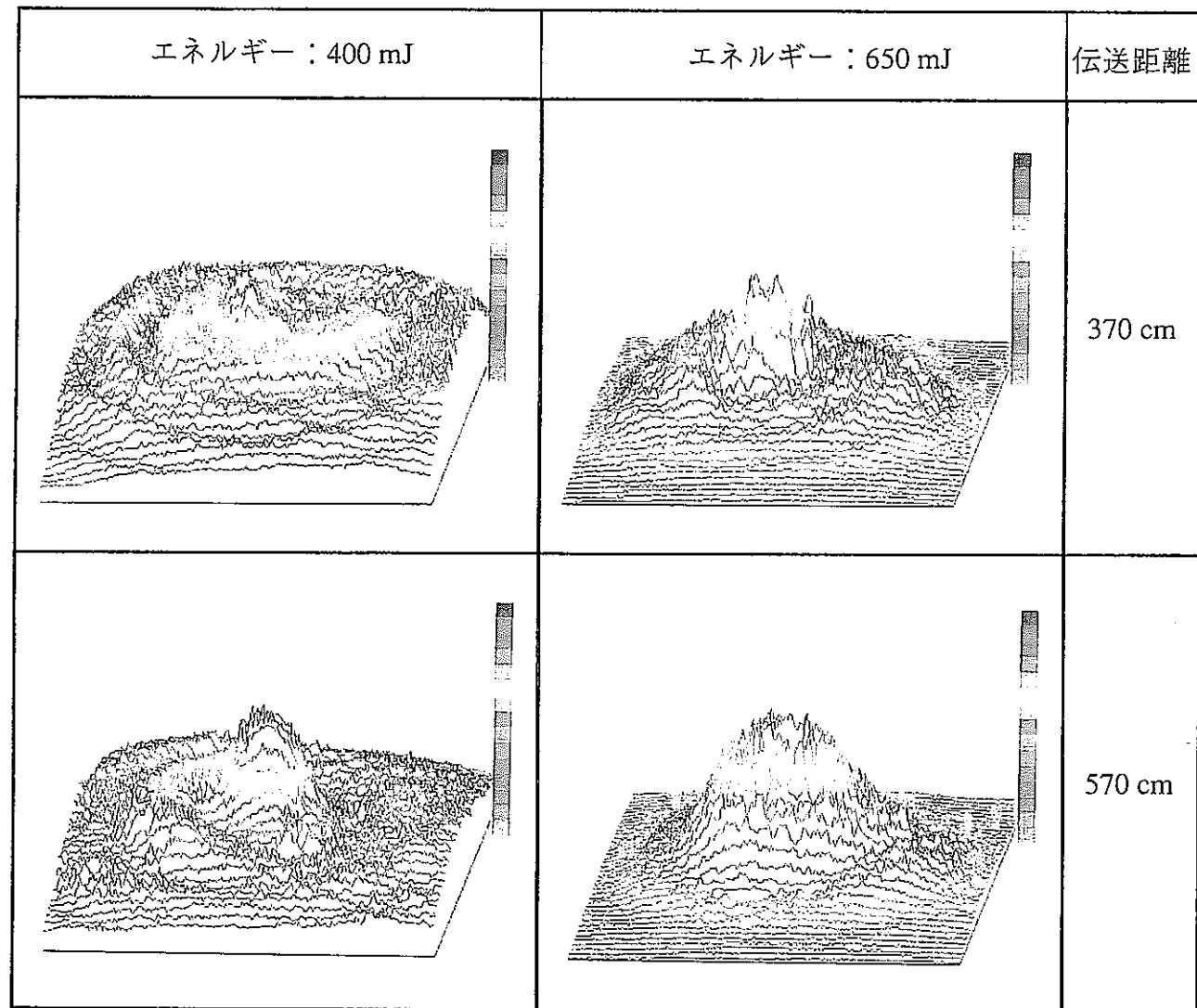


図 5.9 Qスイッチパルス YAG レーザのミラー伝送によるビーム径の変化  
(ミラーナンバー: 5枚, 伝送距離: 10m)



1 mm  
↔

図 5.10 ビームパターンの伝送距離依存性 1/2  
(Qスイッチパルス)



1 mm  
↔

図 5.11 ビームパターンの伝送距離依存性 2/2  
(Q スイッチパルス)

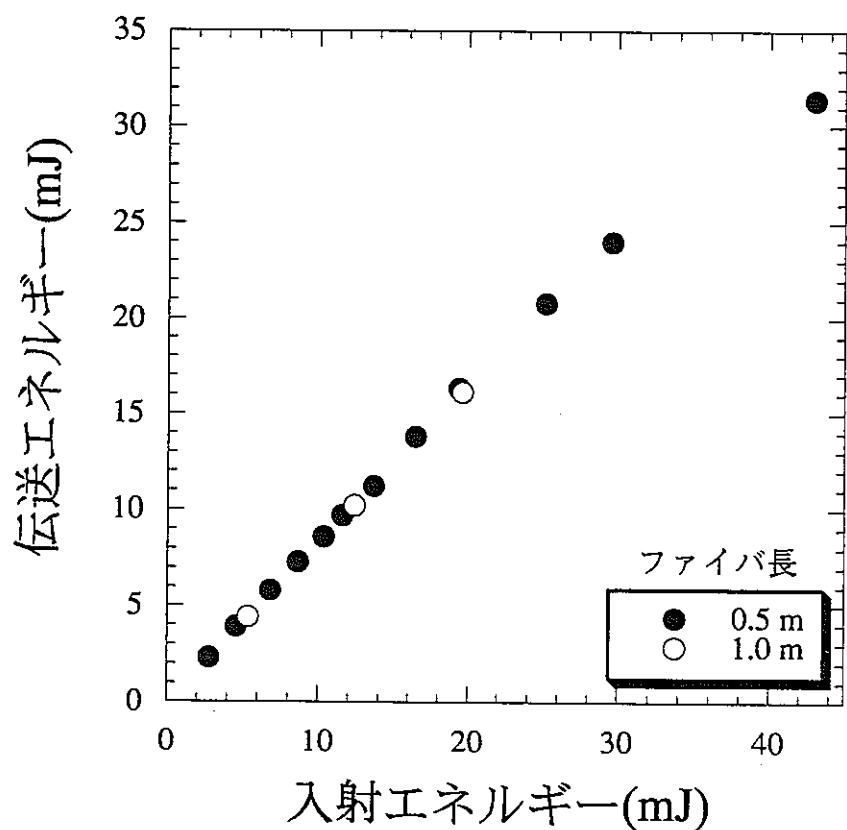


図 5.12 Qスイッチパルス YAG レーザのファイバ伝送特性  
(ファイバ: コア径  $\phi 1.2\text{mm}$ , SI型)

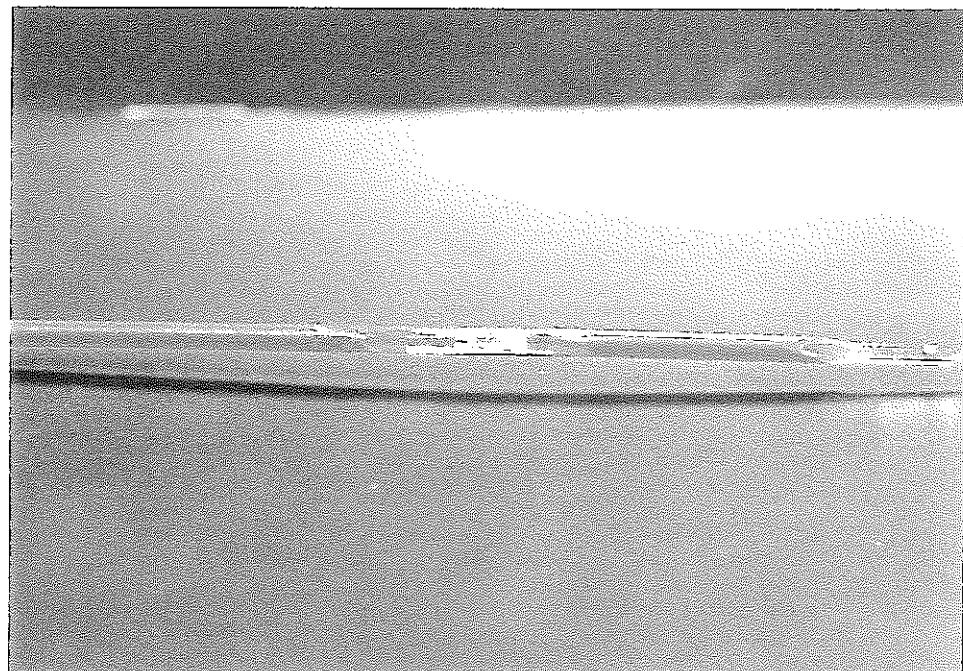


図 5.13 損傷したファイバの外観写真

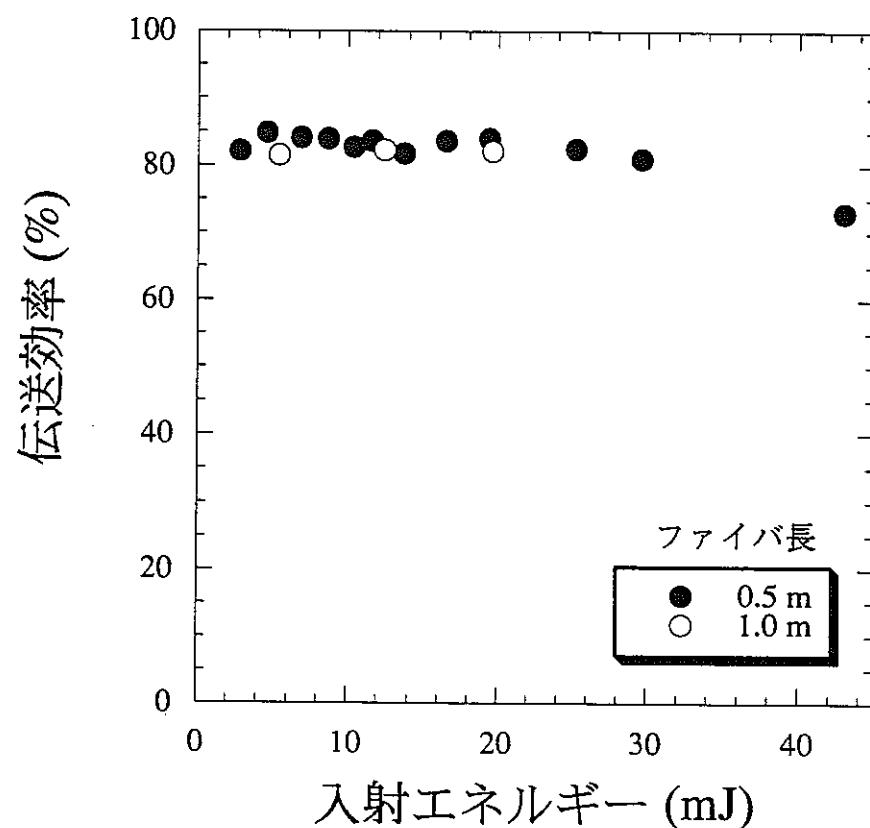


図 5.14 Qスイッチパルス YAG レーザのファイバ伝送効率  
(ファイバ: コア径  $\phi 1.2\text{mm}$ , SI型)

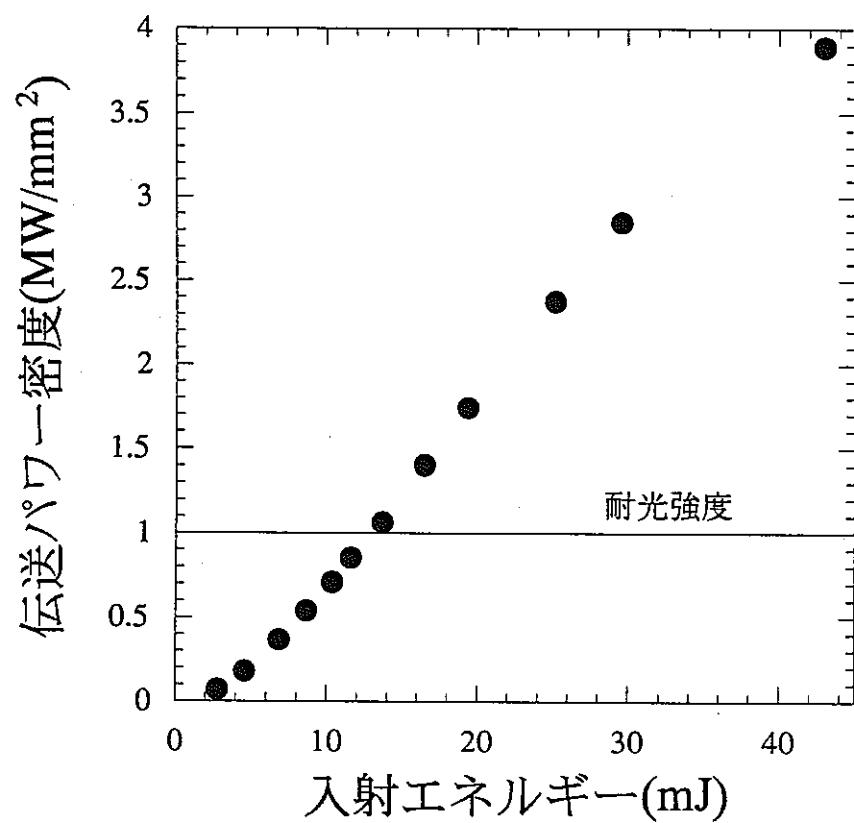


図 5.15 Qスイッチパルス YAG レーザのファイバ入射強度特性  
(ファイバ: コア径  $\phi 1.2\text{mm}$ , SI型, 長さ 50cm)

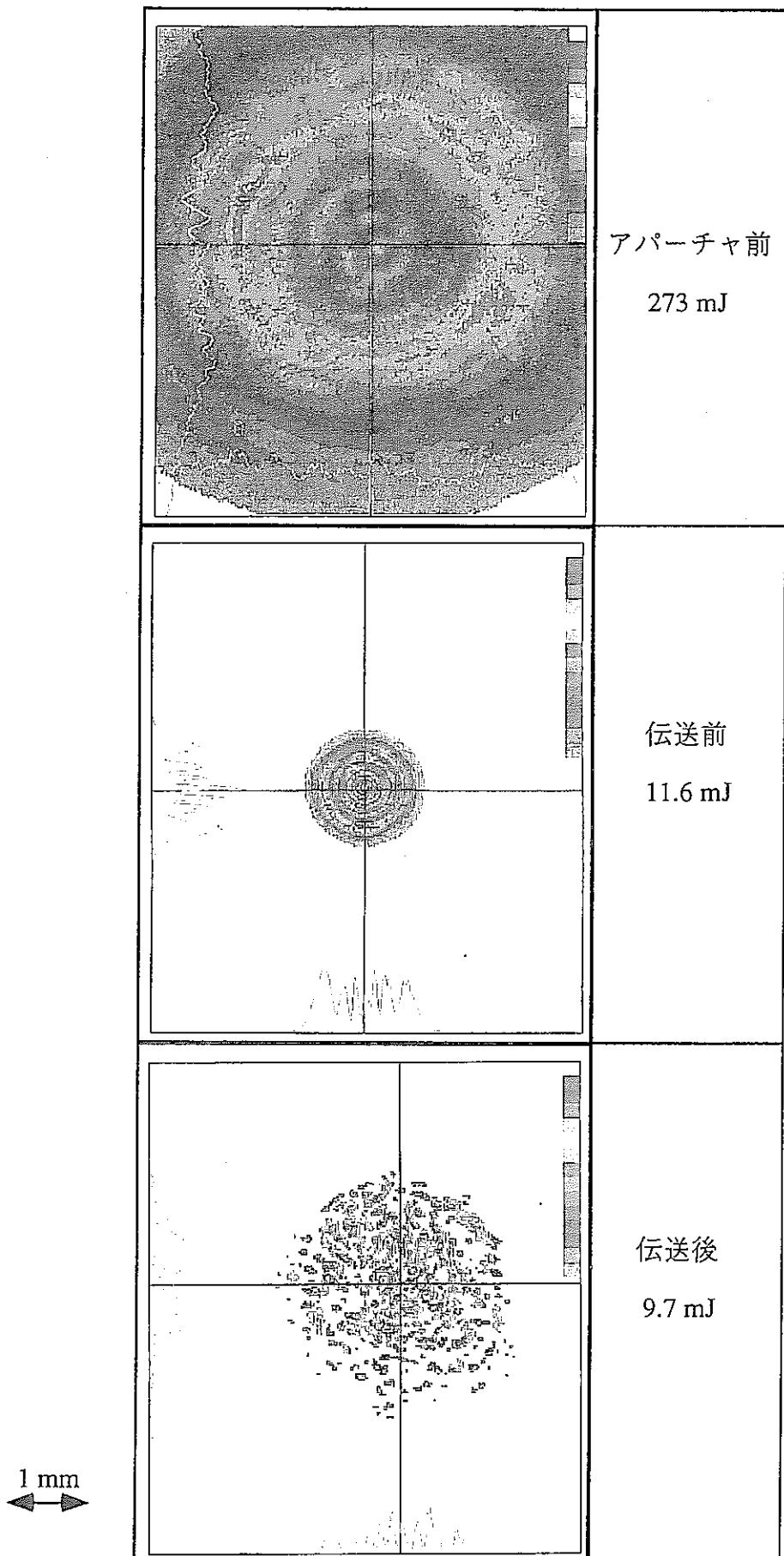


図 5.16 ビームパターン 1/3 (Qスイッチパルス, ファイバ長: 0.5m)

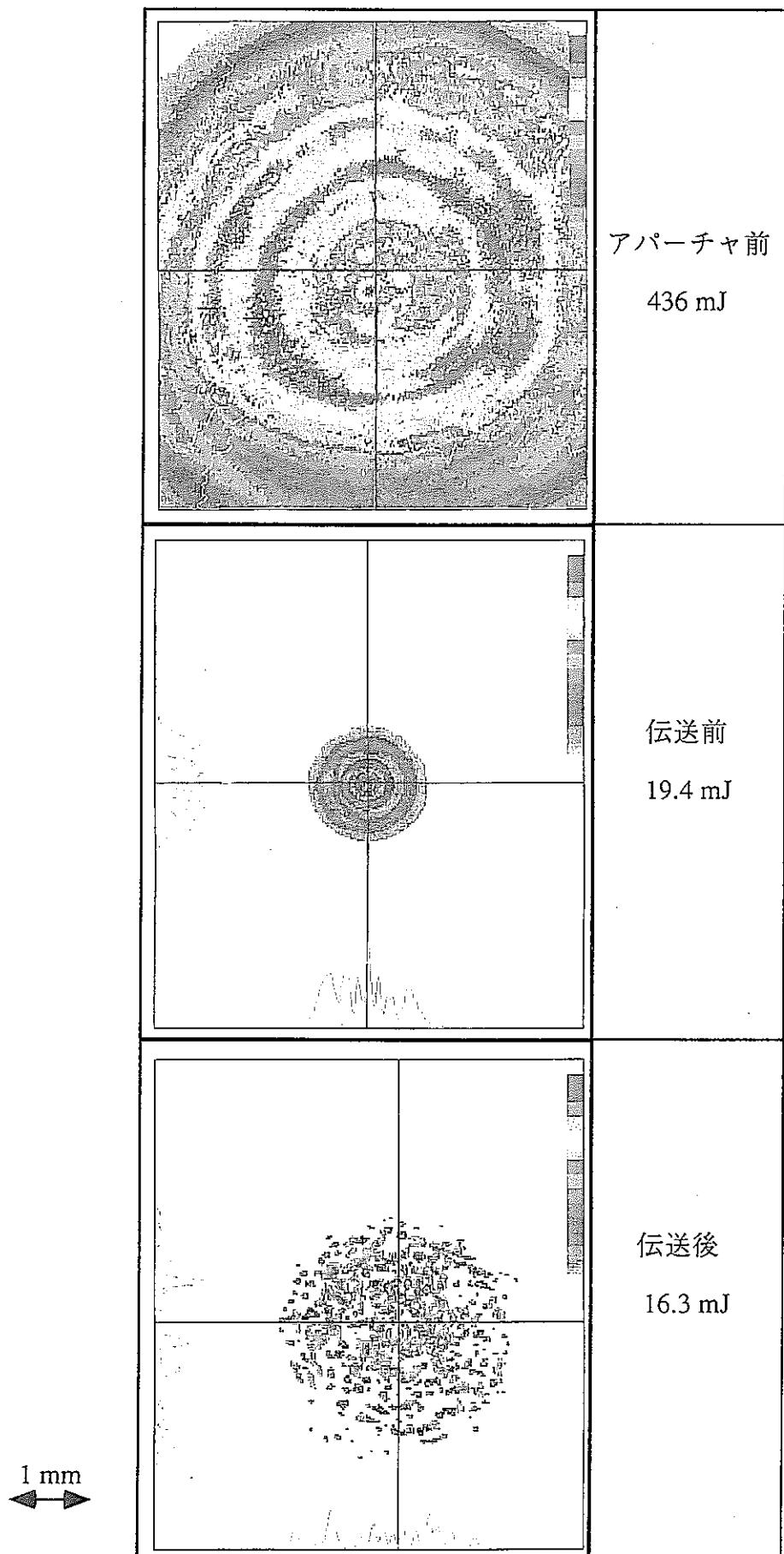


図 5.17 ビームパターン 2/3 (Qスイッチパルス, ファイバ長: 0.5m)

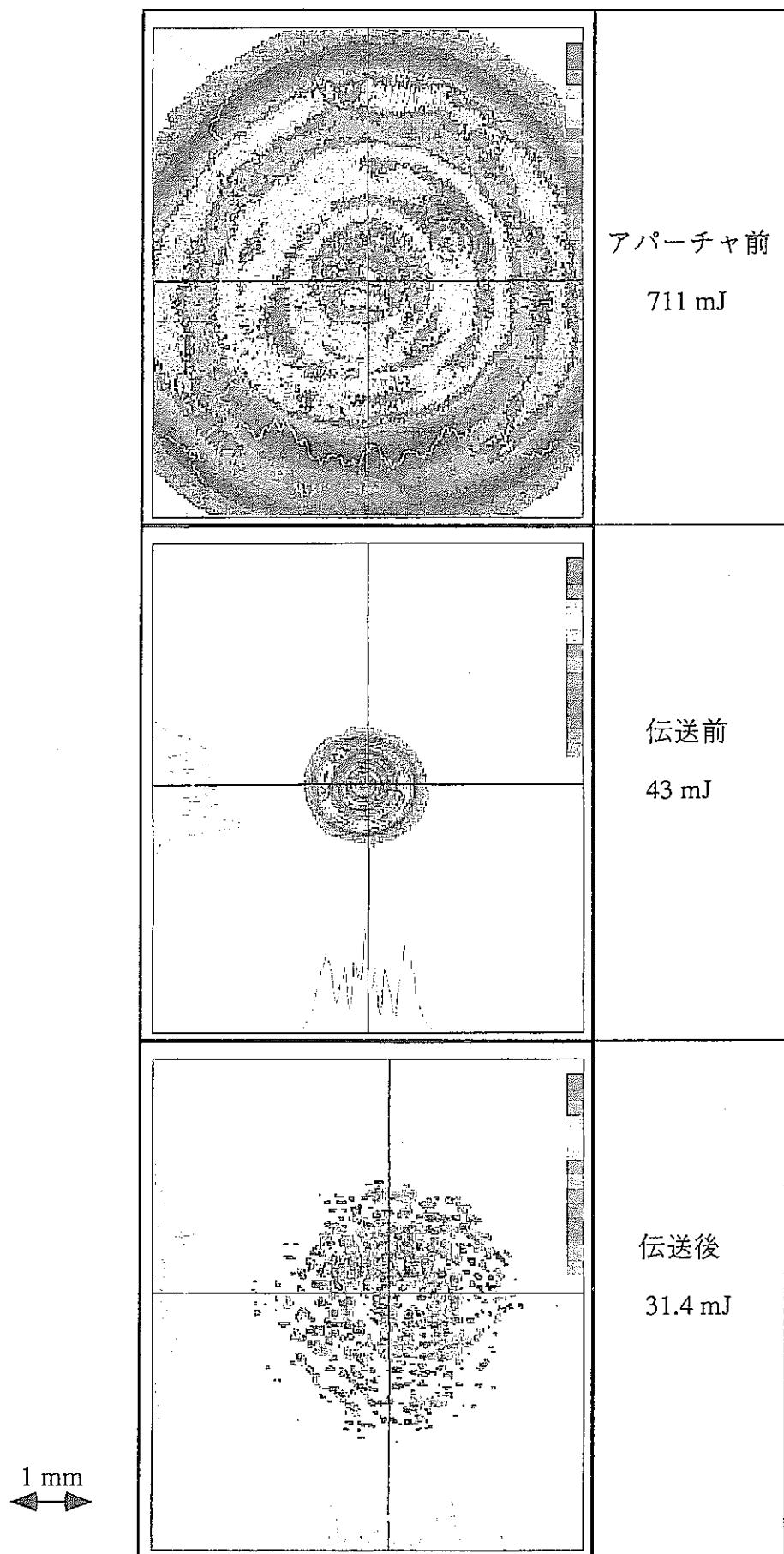


図 5.18 ビームパターン 3/3 (Qスイッチパルス, ファイバ長: 0.5m)

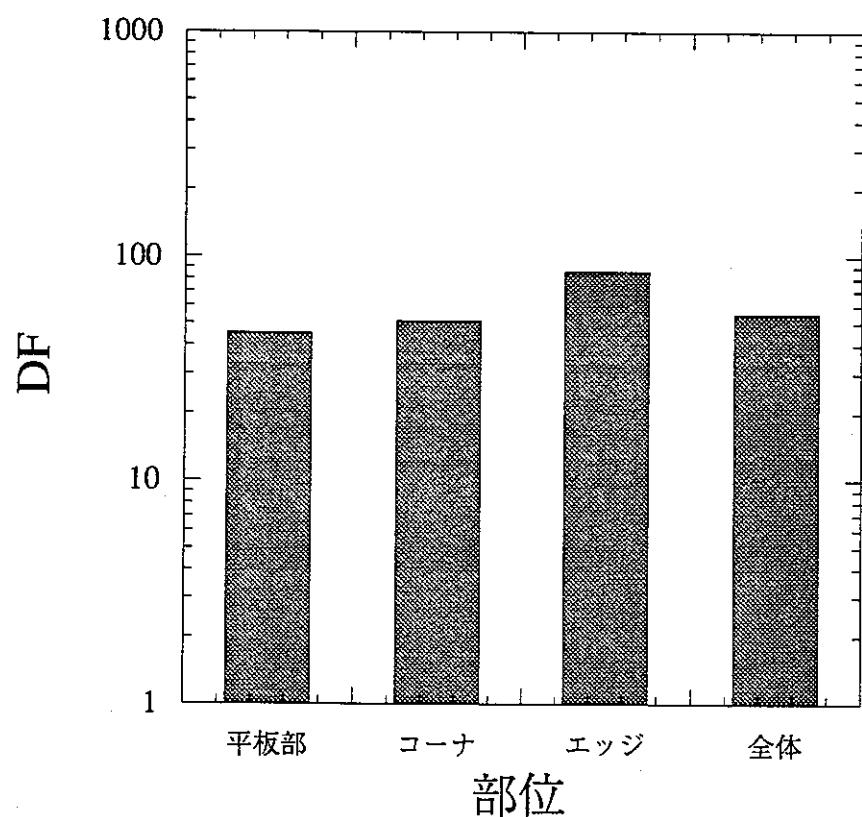
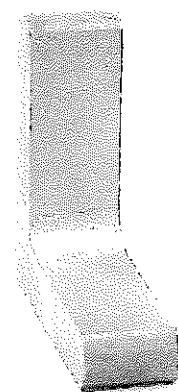
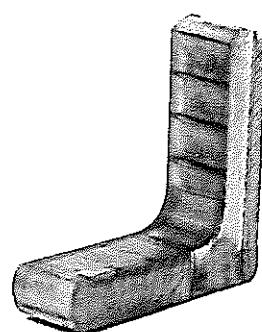


図 5.19 Qスイッチパルス YAG レーザ照射部位別 DF 測定結果  
(L型アングル, 亜鉛メッキ, 2回照射)



(a) レーザ照射前



(b) レーザ照射後

図 5.20 Q スイッチパルス YAG レーザ照射試験片外観写真  
(L型アングル, 亜鉛メッキ, 2回照射)

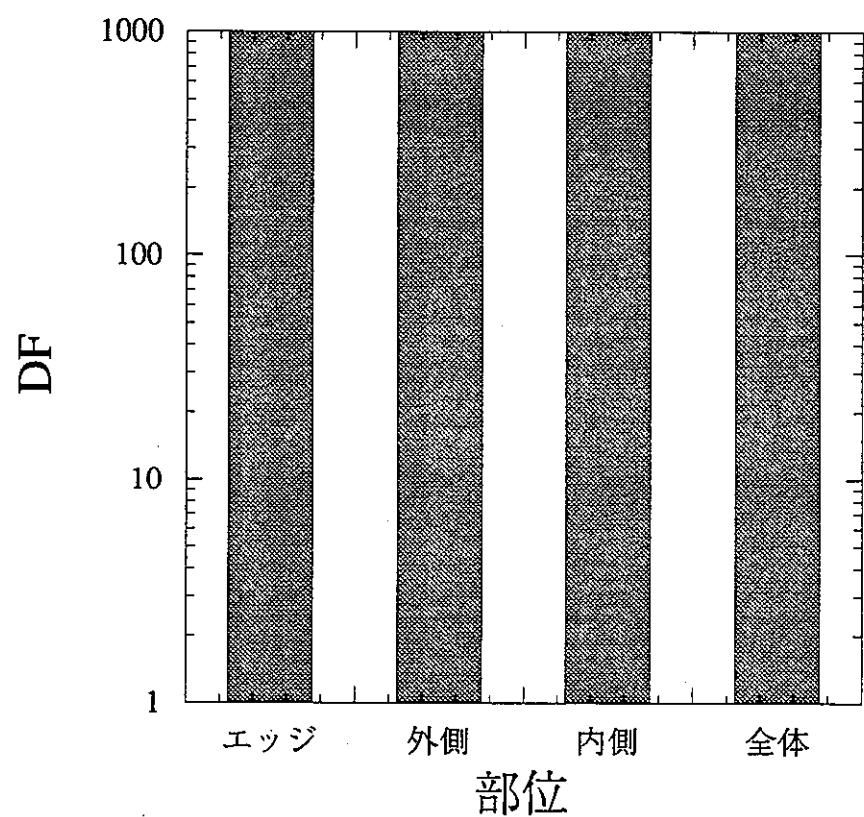
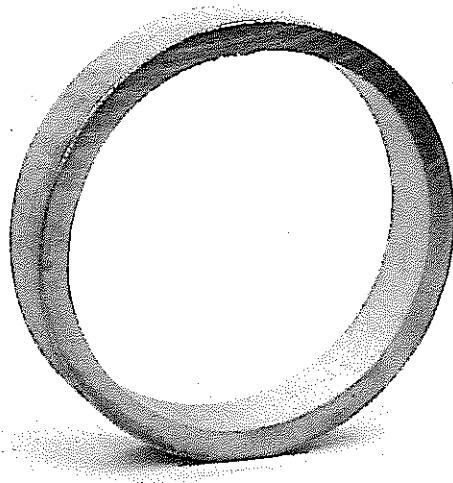
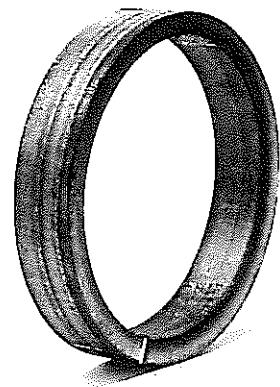


図 5.21 Q スイッチパルス YAG レーザ照射部位別 DF 測定結果  
(円筒, 亜鉛メッキ, 2 回照射)



(a) レーザ照射前



(b) レーザ照射後

図 5.22 Q スイッチパルス YAG レーザ照射試験片外観写真  
(円筒, 亜鉛メッキ, 2 回照射)

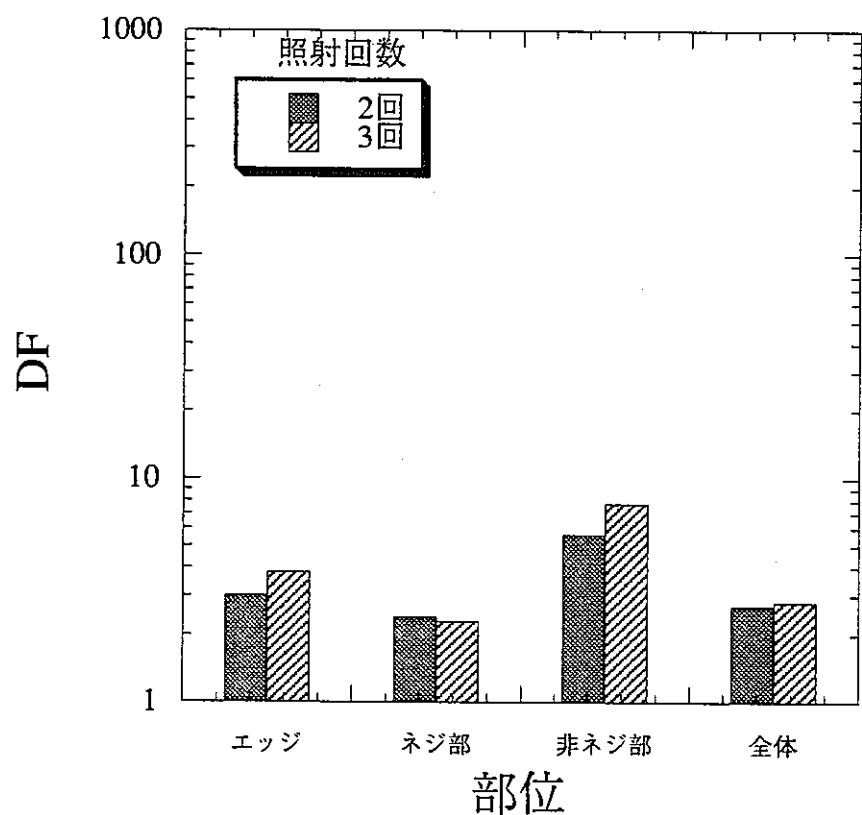
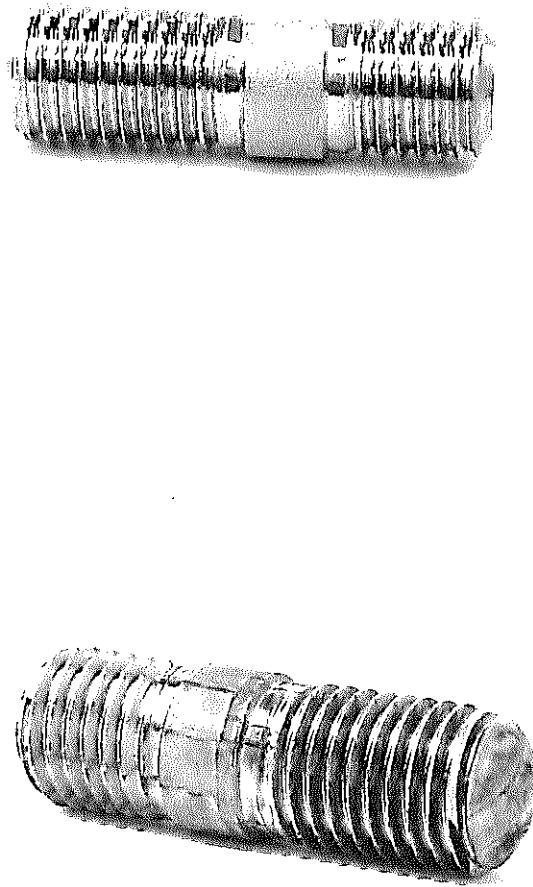


図 5.23 Qスイッチパルス YAG レーザ照射部位別 DF 測定結果  
(ボルト, 亜鉛メッキ)



左上 レーザ照射前  
上 レーザ照射後（2回照射）  
左 レーザ照射後（3回照射）

図 5.24 Qスイッチパルス YAG レーザ照射試験片外観写真  
(ボルト, 亜鉛メッキ)

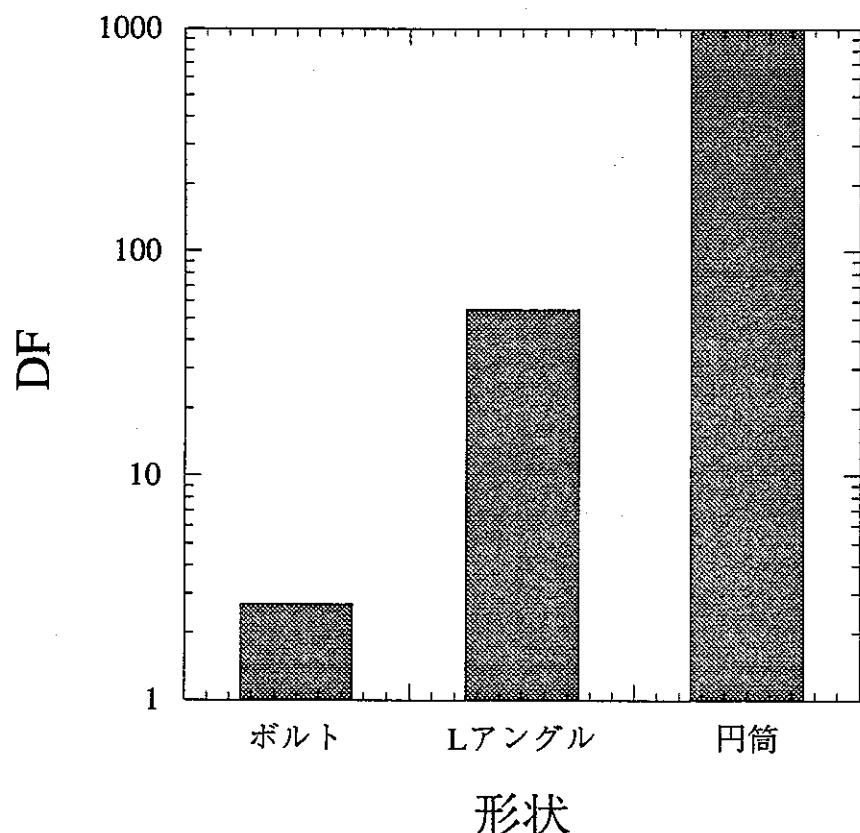


図 5.25 Q スイッチパルス YAG レーザ照射試験 DF の形状依存性  
(亜鉛メッキ, 2 回照射)

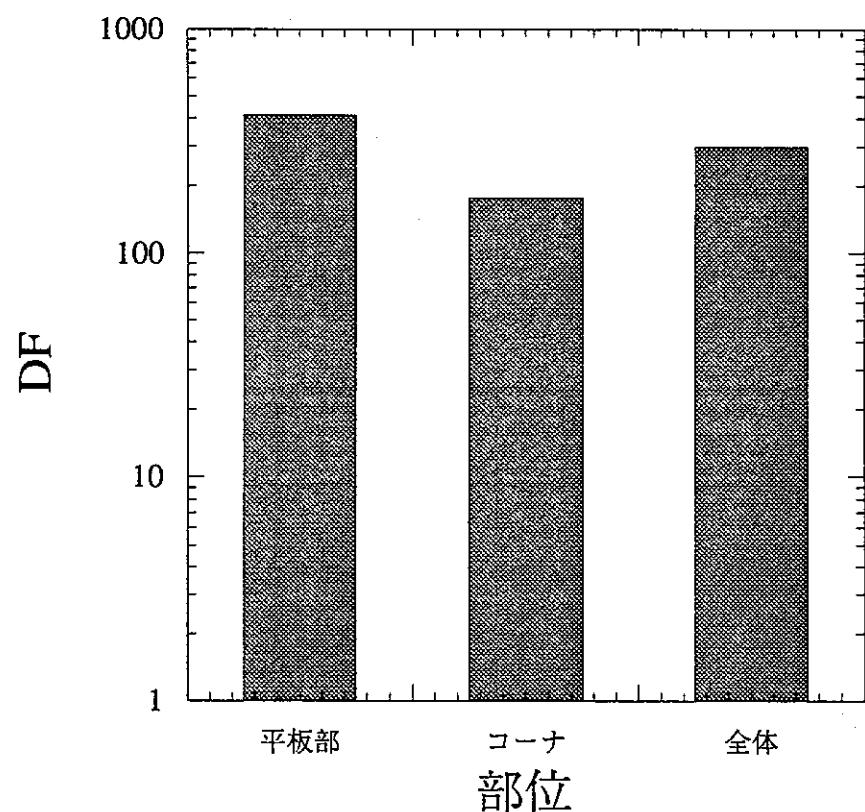
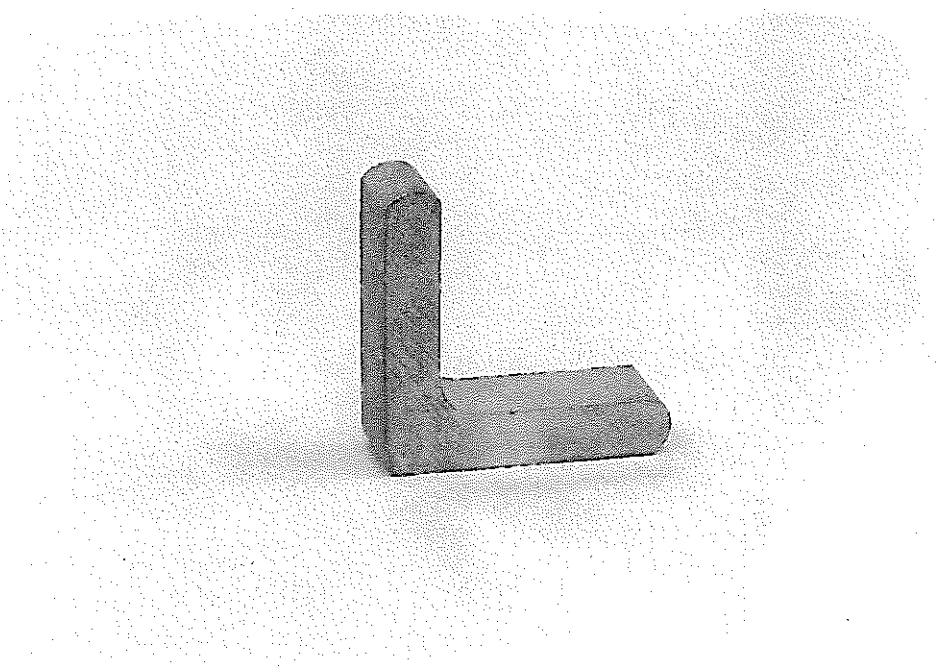
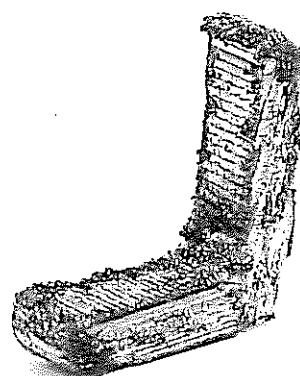


図 5.26 ノーマルパルス YAG レーザ照射試験部位別 DF 測定結果  
(L型アングル, 亜鉛メッキ, 1回照射)



(a) レーザ照射前



(b) レーザ照射後

図 5.27 ノーマルパルス YAG レーザ照射試験片外観写真  
(L型アングル, 亜鉛メッキ, 1回照射)

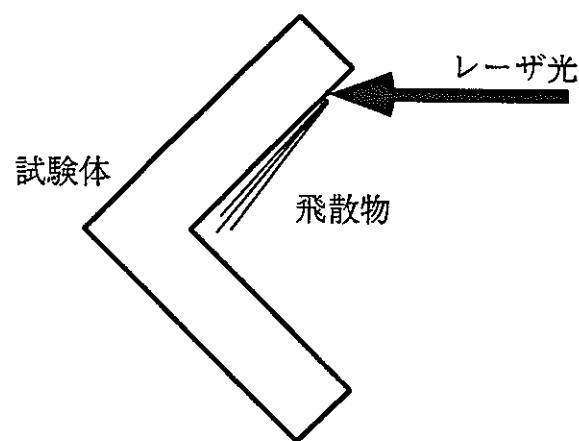


図 5.28 ノーマルパルス YAG レーザ照射飛散物発生状況概念図

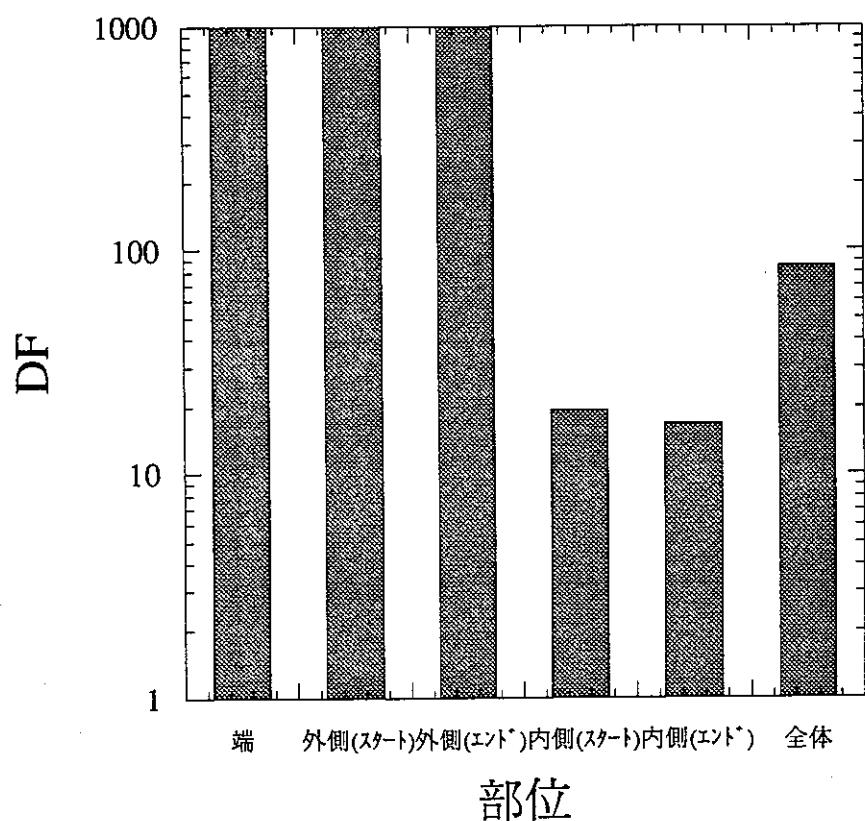
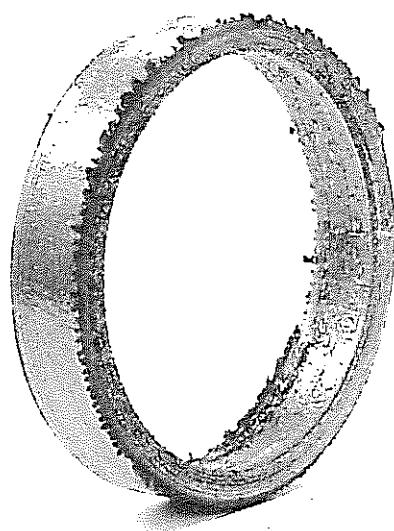


図 5.29 ノーマルパルス YAG レーザ照射部位別 DF 測定結果  
(円筒, 亜鉛メッキ, 1 回照射)



(a) レーザ照射前



(b) レーザ照射後

図 5.30 ノーマルパルス YAG レーザ照射試験片外観写真  
(円筒, 亜鉛メッキ, 1 回照射)

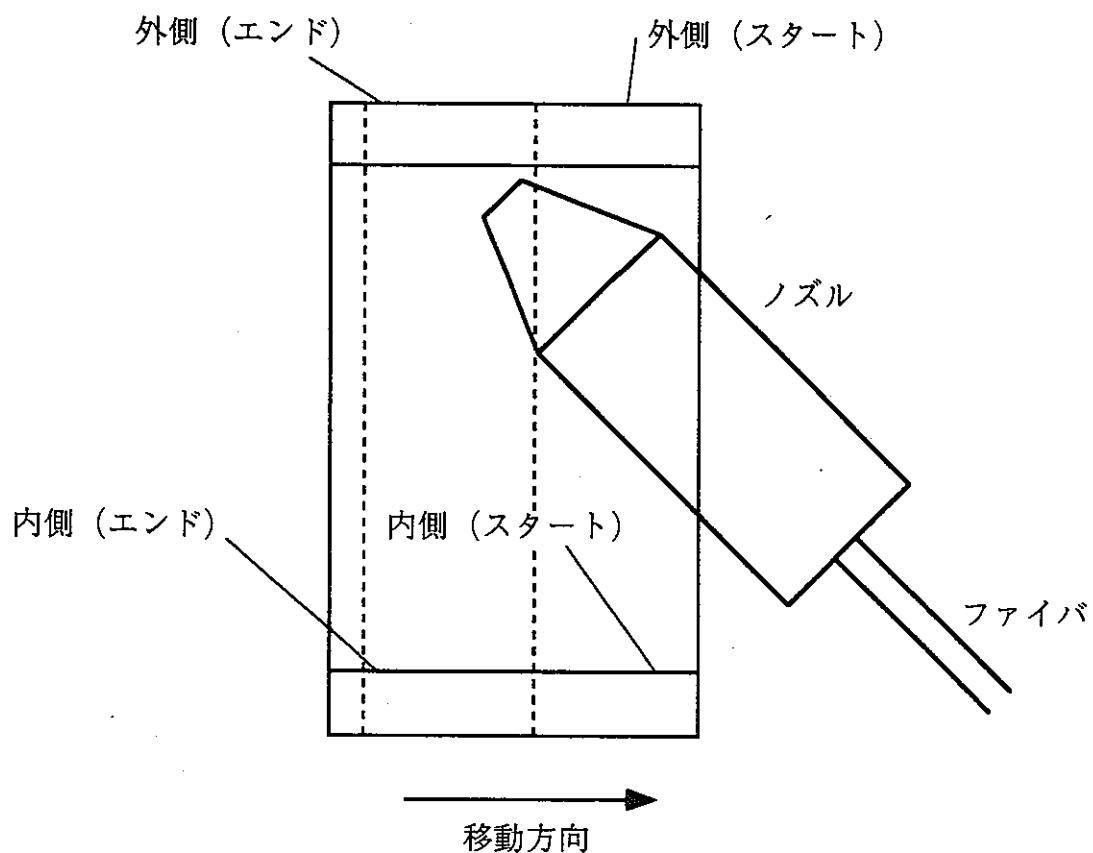


図 5.31 ノーマルパルス YAG レーザ照射試験分割方法

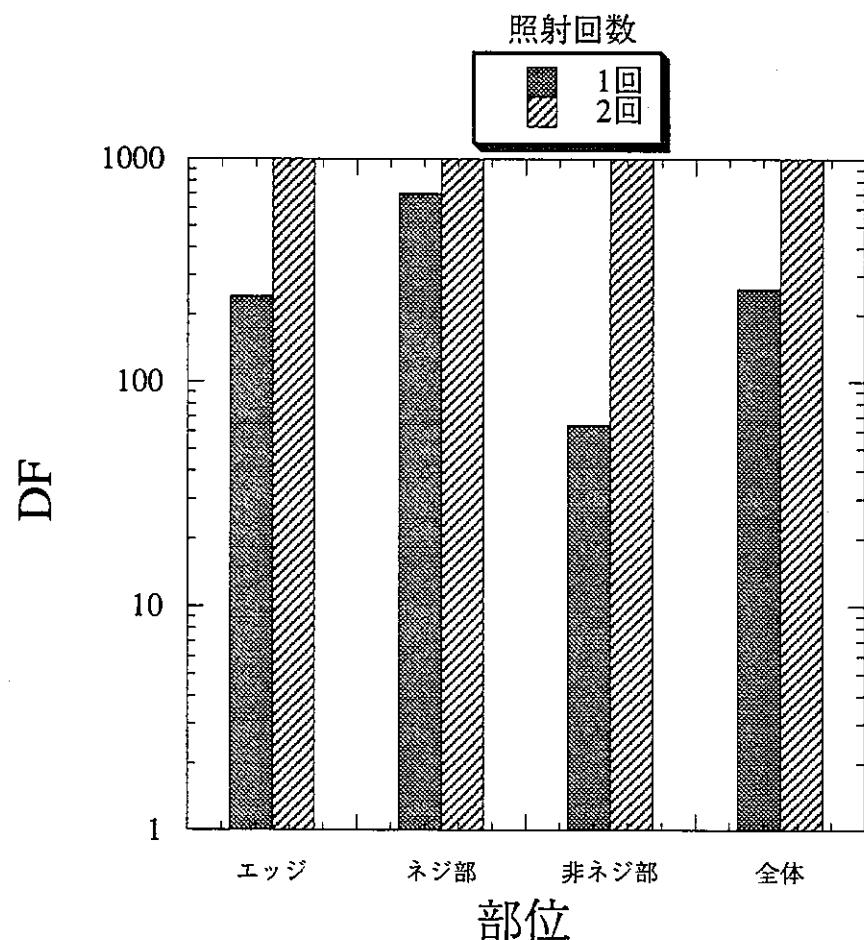
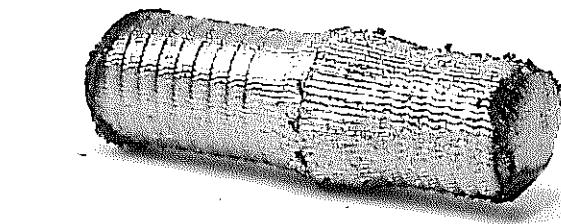
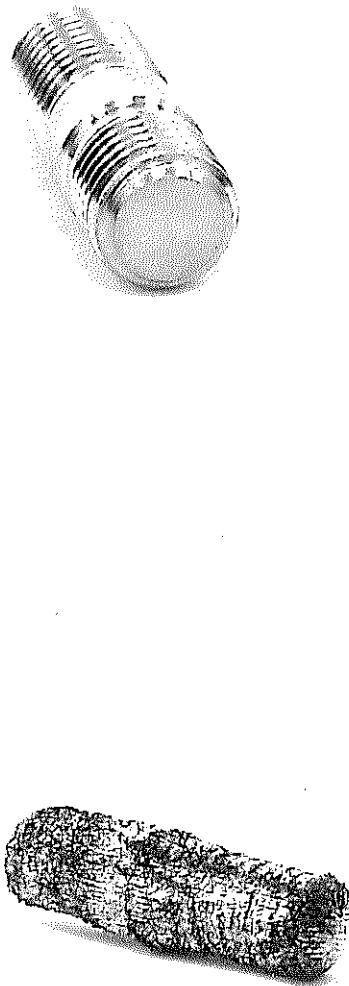


図 5.32 ノーマルパルス YAG レーザ照射部位別 DF 測定結果  
(ボルト, 亜鉛メッキ)



左上 レーザ照射前  
上 レーザ照射後（1回照射）  
左 レーザ照射後（2回照射）

図 5.33 ノーマルパルス YAG レーザ照射試験片外観写真  
(ボルト, 亜鉛メッキ)

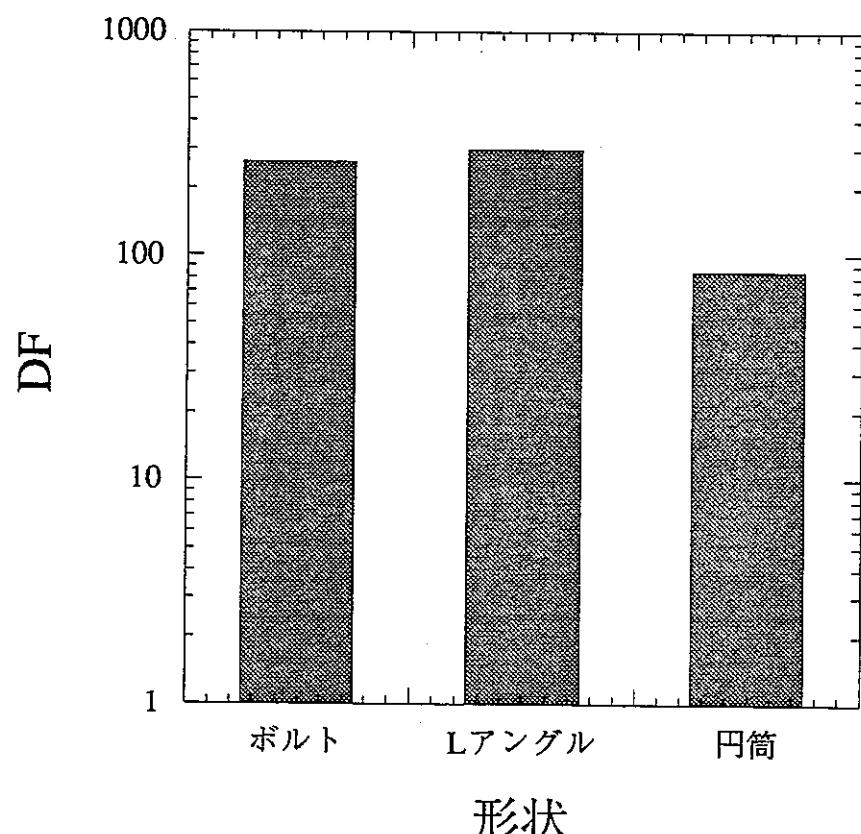


図 5.34 ノーマルパルス YAG レーザ照射試験 DF の形状依存性  
(亜鉛メッキ, 1 回照射)

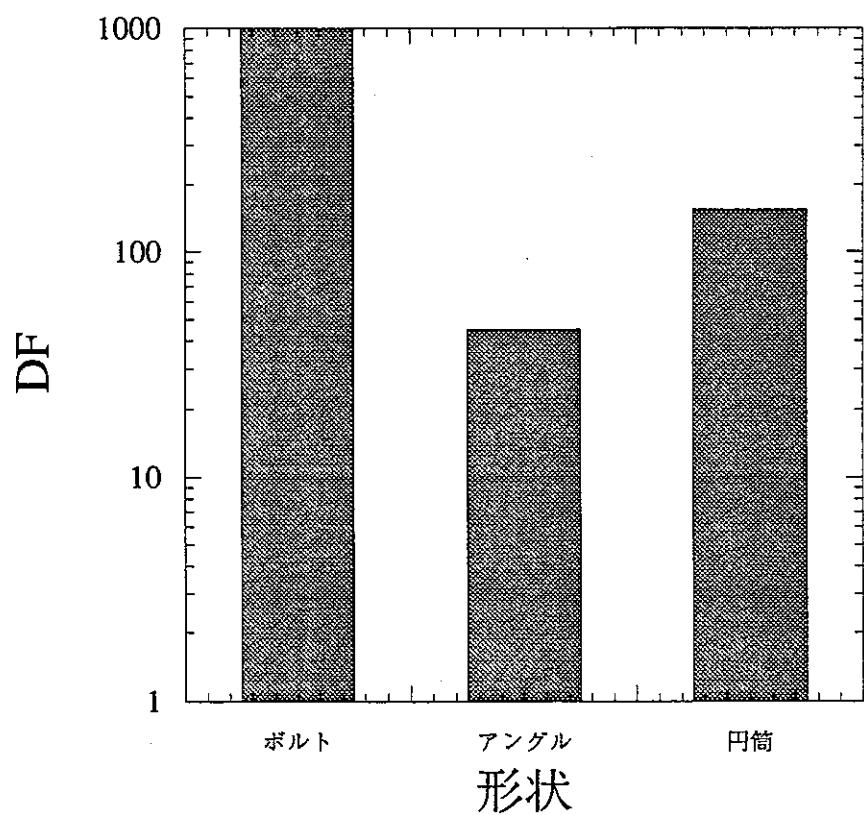
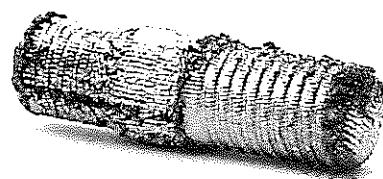


図 5.35 ノーマルパルス YAG レーザ照射試験 DF の形状依存性  
(モリブデン酸セシウム, 1回照射)

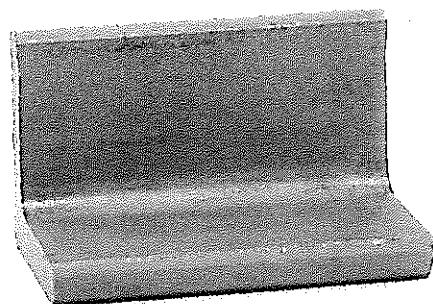


(a) レーザ照射前

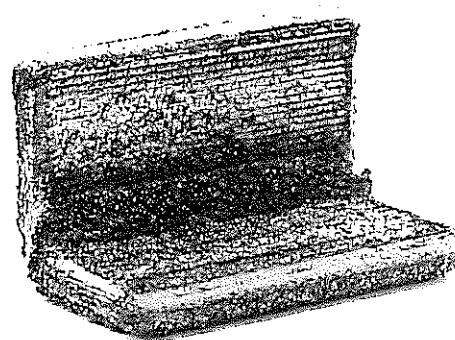


(b) レーザ照射後

図 5.36 ノーマルパルス YAG レーザ照射試験片外観写真  
(ボルト, モリブデン酸セシウム, 1 回照射)

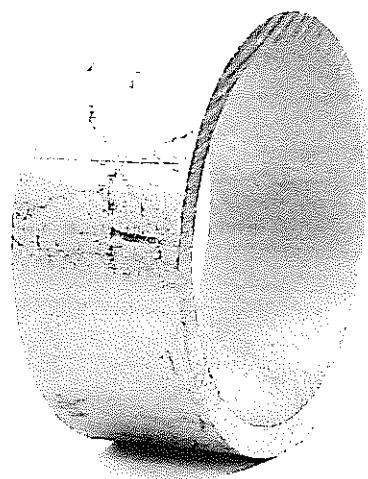


(a) レーザ照射前

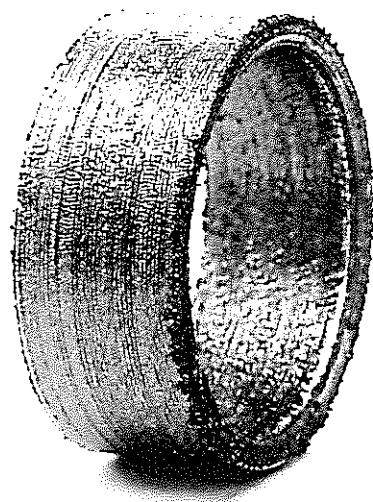


(b) レーザ照射後

図 5.37 ノーマルパルス YAG レーザ照射試験片外観写真  
(L型アングル, モリブデン酸セシウム, 1回照射)



(a) レーザ照射前



(b) レーザ照射後

図 5.38 ノーマルパルス YAG レーザ照射試験片外観写真  
(円筒, モリブデン酸セシウム, 1回照射)

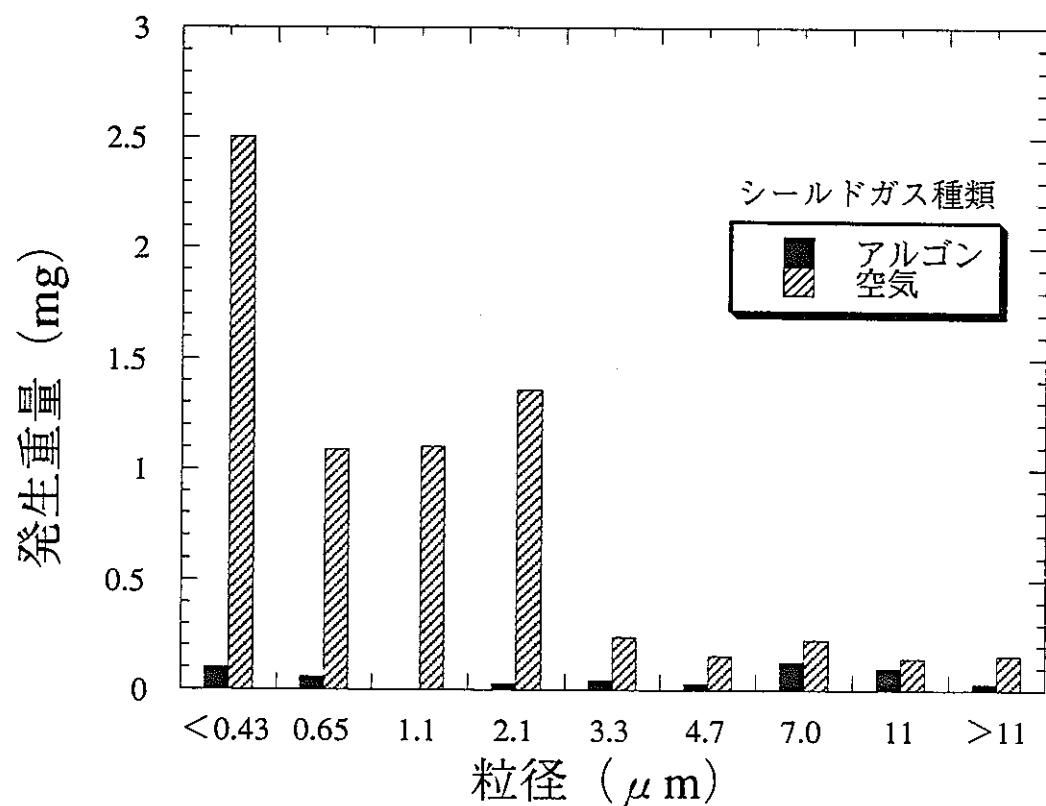


図 5.39 気中浮遊物粒径分布へのシールドガス種類の影響

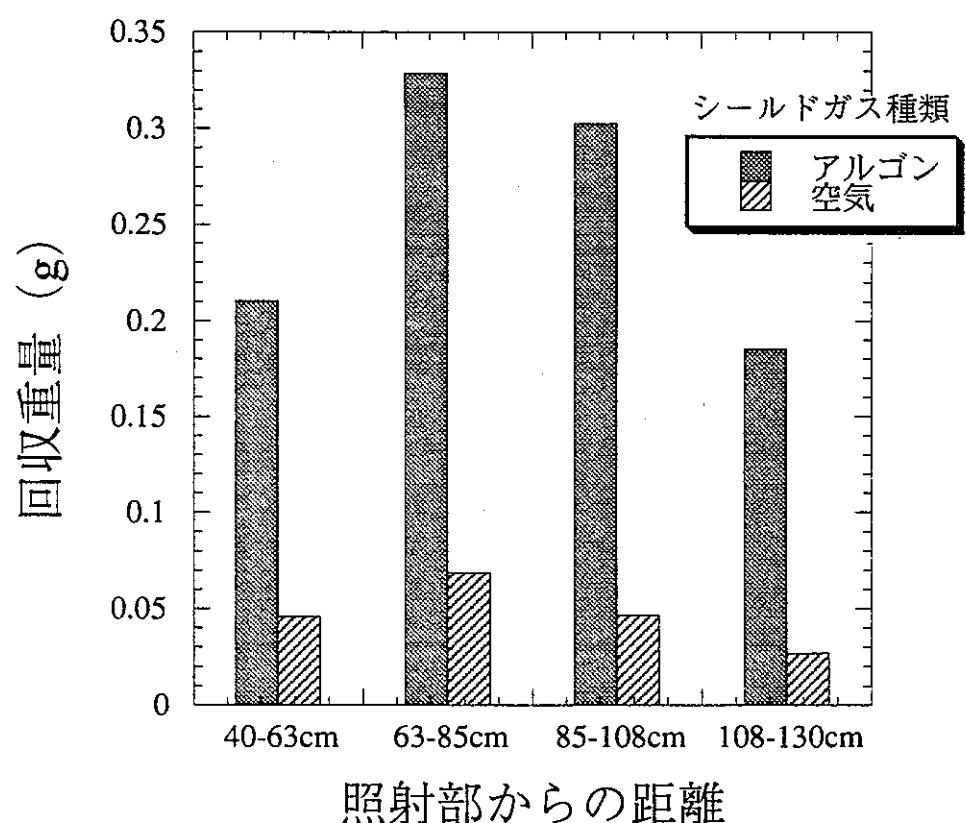


図 5.40 落下ドロスへのシールドガス種類の影響

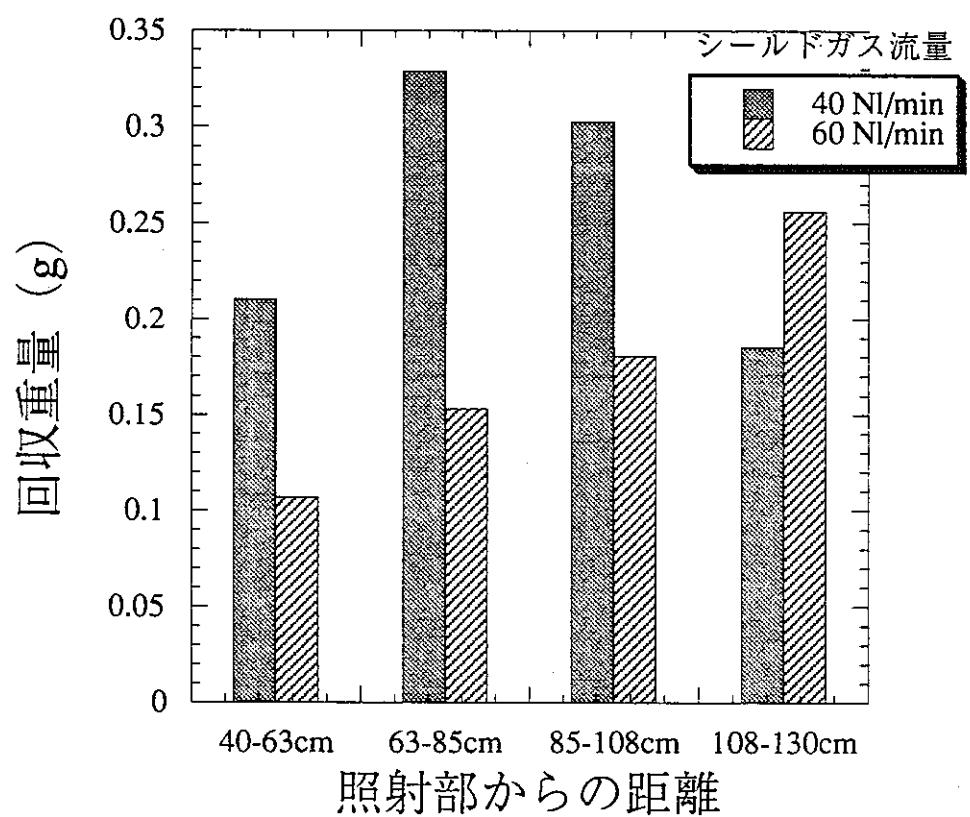


図 5.41 落下ドロスへのシールドガス流量の影響

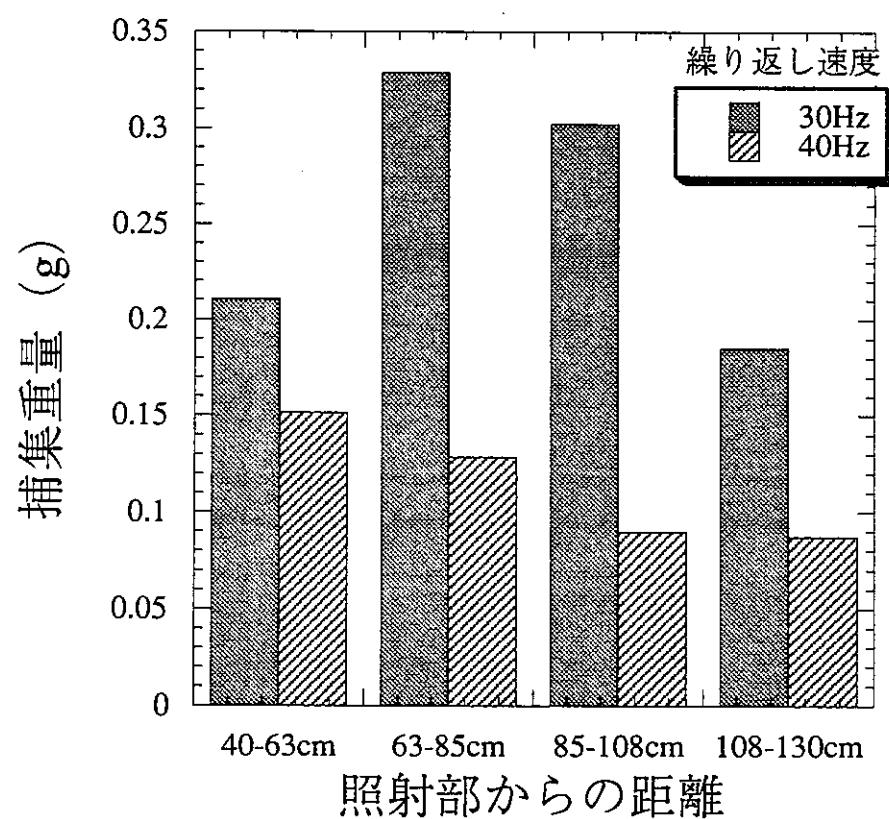


図 5.42 落下ドロスへの繰り返し速度の影響

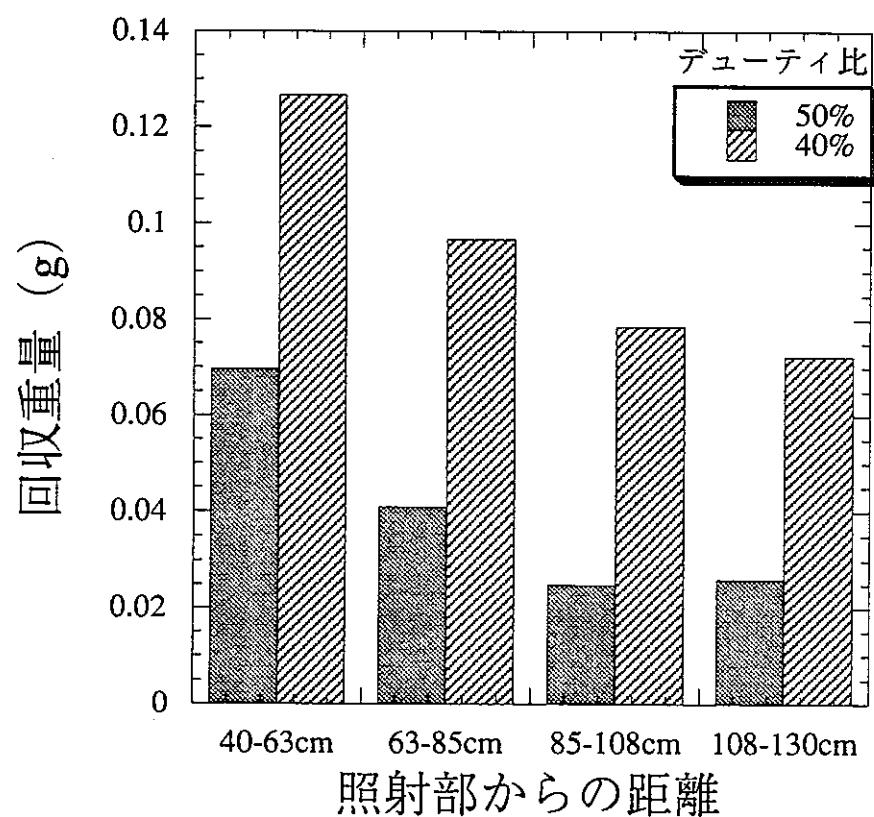


図 5.43 落下ドロスへのデューティ比の影響

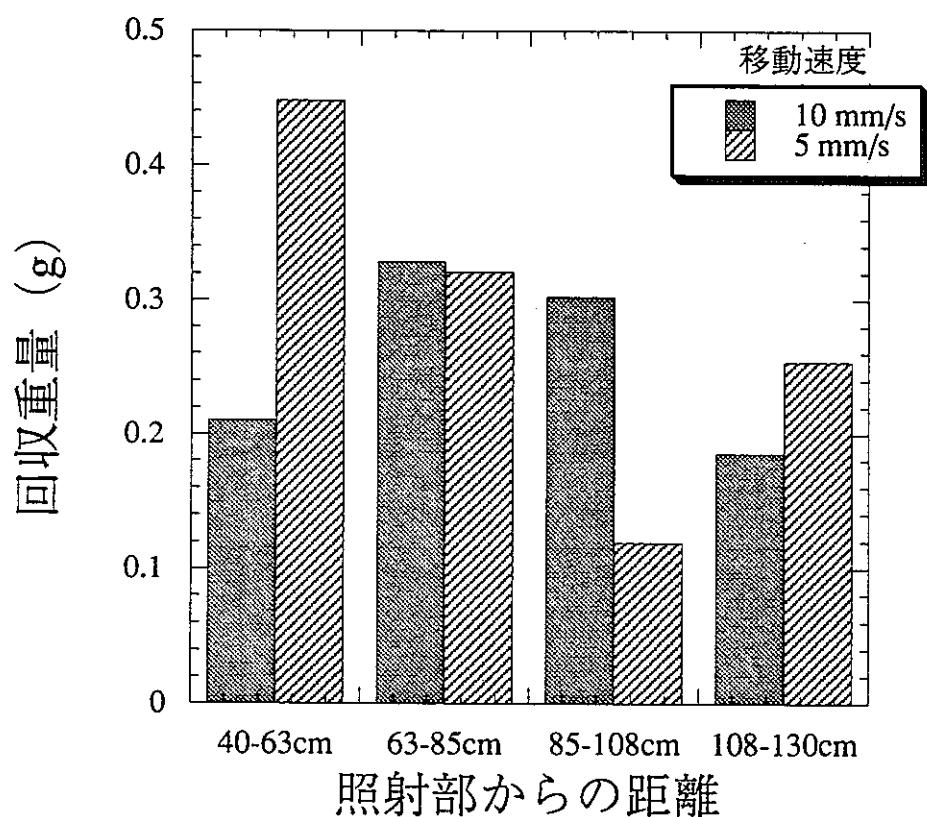


図 5.44 落下ドロスへの移動速度の影響

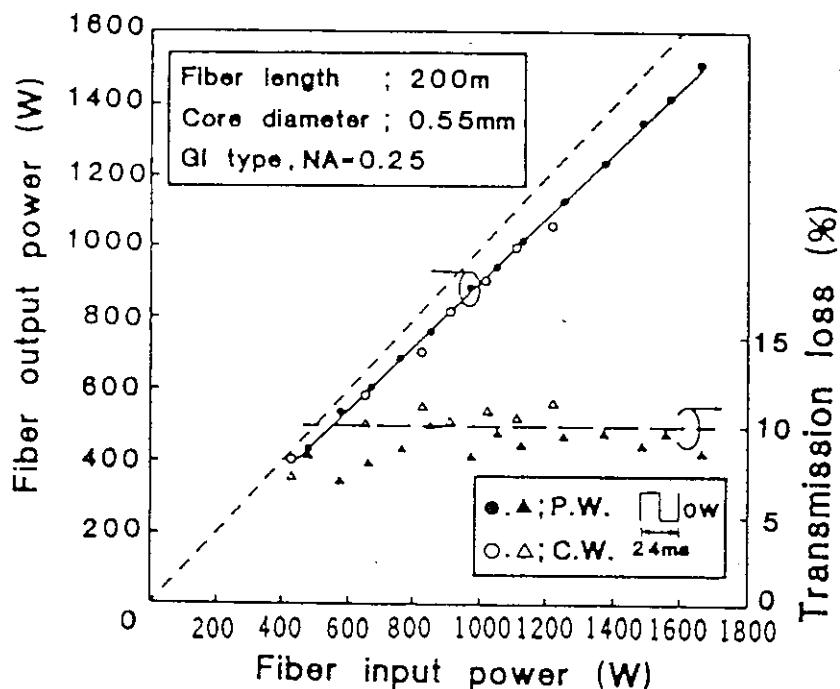


Fig. 4 Transmission loss of lengthy optical fiber (GI type, 200m)

図 6.1 ノーマルパルス YAG レーザのファイバ伝送報告例<sup>4)</sup>

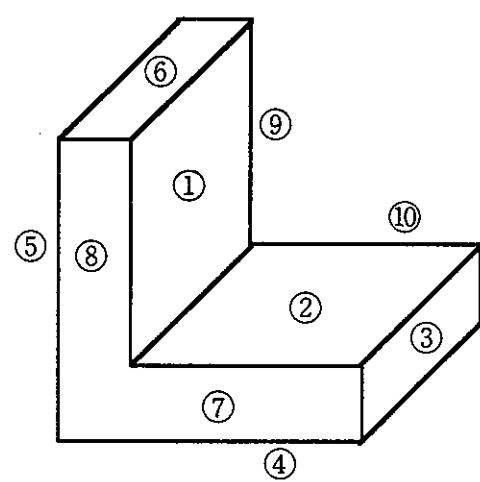


図 6.2 照射手順

付 錄

データ表

5章の試験結果の図に対応するデータを以下に示す。

付表1 図5. 1に対するデータ

ファイバ長 1m

入射パワー(w)	伝送パワー(w)
15	13
109	96
199	170
383	327
507	421

ファイバ長 5m

入射パワー(w)	伝送パワー(w)
14	12
123	96
196	171
383	330
488	425

ファイバ長 10m

入射パワー(w)	伝送パワー(w)
14	12
117	96
192	169
383	328
502	427

付表2 図5. 2に対するデータ

ファイバ長 1m

入射パワー(w)	伝送効率(%)
15	86.6
109	88.0
199	85.4
383	85.3
507	83.0

ファイバ長 5m

入射パワー(w)	伝送効率(%)
14	85.7
123	78.0
196	87.2
383	86.1
488	87.0

ファイバ長 10m

入射パワー(w)	伝送効率(%)
14	85.7
117	82.0
192	88.0
383	85.6
502	85.0

付表3 図5. 4に対するデータ

伝送パワー(w)	ビーム径(mm)	発散角(度)
96	9.0	5.2
170	12.0	6.9
327	16.5	9.5
421	20.0	11.5

付表4 図5.5に対するデータ

入射エネルギー(mJ)	伝送エネルギー(mJ)
267	248
320	298
396	368
457	426

付表5 図5.6に対するデータ

伝送エネルギー(mJ)	伝送効率(%)	ミラー損失(%/枚)
267	92.9	1.42
320	93.1	1.37
396	92.9	1.41
457	93.2	1.36

付表6 図5.9に対するデータ

伝送エネルギー(mJ)	伝送前ビーム径(mm)	伝送後ビーム径(mm)
267	7.8	13.3
320	7.9	12.4
396	7.9	10.9
457	7.6	10.7

付表7 図5.12に対するデータ

ファイバ長 0.5m	ファイバ長 1.0m
入射エネルギー (mJ)	伝送エネルギー (mJ)
2.8	2.3
4.6	3.9
6.9	5.8
8.7	7.3
10.4	8.6
11.6	9.7
13.7	11.2
16.5	13.8
19.4	16.3
25.2	20.8
29.6	24.0
43.0	31.4
43.0	31.4

付表8 図5.14に対するデータ

ファイバ長 0.5m

入射エネルギー (mJ)	伝送効率 (%)	入射エネルギー (mJ)	伝送効率 (%)
2.8	82.1	5.4	81.5
4.6	84.8	12.4	82.3
6.9	84.1	19.6	82.1
8.7	83.9		
10.4	82.7		
11.6	83.6		
13.7	81.8		
16.5	83.6		
19.4	84.0		
25.2	82.5		
29.6	81.1		
43.0	73.0		

付表9 図5.15に対するデータ

ファイバ長 0.5m

入射エネルギー (mJ)	伝送パワー密度 (MW/mm <sup>2</sup> )
2.8	0.07
4.6	0.15
6.9	0.37
8.7	0.54
10.4	0.71
11.6	0.85
13.7	1.06
16.5	1.40
19.4	1.74
25.2	2.37
29.6	2.85
43.0	3.89

付表10 図5.19に対するデータ

部位	DF
平板部	45
コーナ	51
エッジ	86
全体	55
全体	55

付表11 図5.21に対するデータ

部位	DF
平板部	45
コーナ	51
エッジ	86
全体	55
全体	55

付表12 図5. 23に対するデータ

部位	DF	
	照射回数 2回	照射回数 3回
エッジ	3.0	3.8
ネジ部	2.4	2.3
非ネジ部	5.6	7.7
全体	2.7	2.8

付表13 図5. 25に対するデータ

形状	DF
ボルト	2.7
Lアングル	55.0
円筒	1000.0

付表14 図5. 26に対するデータ

形状	DF
ボルト	411
Lアングル	177
円筒	299

付表15 図5. 29に対するデータ

形状	DF
端	1000.0
外側(スタート)	1000.0
外側(エンド)	1000.0
内側(スタート)	19.3
内側(エンド)	16.8
全体	85.0

付表16 図5. 32に対するデータ

部位	DF	
	照射回数 1回	照射回数 2回
エッジ	242	1000
ネジ部	701	1000
非ネジ部	64	1000
全体	262	1000

付表17 図5. 34に対するデータ

形状	DF
ボルト	2.7
Lアングル	55.0
円筒	1000.0

付表18 図5. 35に対するデータ

形状	DF
ボルト	411
Lアングル	177
円筒	299

付表19 図5.39に対するデータ

粒径 ( $\mu\text{m}$ )	発生重量(mg)	
	アルゴン	空気
<0.43	0.10	2.50
0.65	0.06	1.09
1.1	0.00	1.10
2.1	0.03	1.36
3.3	0.04	0.24
4.7	0.03	0.16
7.0	0.13	0.23
11.0	0.10	0.14
>11	0.03	0.16

付表20 図5.40に対するデータ

距離 (cm)	回収重量(g)	
	アルゴン	空気
40-63cm	0.2104	0.0457
63-85cm	0.3287	0.0688
85-108cm	0.3025	0.0468
108-130cm	0.1853	0.0268

付表22 図5.42に対するデータ

距離 (cm)	回収重量(g)	
	30Hz	40Hz
40-63cm	0.2104	0.1512
63-85cm	0.3287	0.1284
85-108cm	0.3025	0.0894
108-130cm	0.1853	0.0871

付表24 図5.44に対するデータ

距離 (cm)	回収重量(g)	
	10mm/s	5mm/s
40-63cm	0.2104	0.4474
63-85cm	0.3287	0.3211
85-108cm	0.3025	0.1191
108-130cm	0.1853	0.2535
108-130cm	0.1853	0.2535

付表21 図5.41に対するデータ

距離 (cm)	回収重量(g)	
	40Nl/min	60Nl/min
40-63cm	0.2104	0.1068
63-85cm	0.3287	0.1532
85-108cm	0.3025	0.1805
108-130cm	0.1853	0.2562

付表23 図5.43に対するデータ

距離 (cm)	回収重量(g)	
	50%	40%
40-63cm	0.0696	0.1266
63-85cm	0.0409	0.0966
85-108cm	0.0249	0.0786
108-130cm	0.0261	0.0722