

レーザー除染技術の開発（４）
（レーザービーム転送試験と照射条件の最適化）
（技術報告）

1999年7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
してください。

〒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

レーザー除染技術の開発（４）

（レーザービーム伝送試験と照射条件の最適化）

（技術報告）

福井 康太*、小川 竜一郎*
石島 昇*、谷本 健一*

要 旨

レーザー除染技術を核燃料サイクル施設のデコミッショニングや放射性廃棄物の処理に適用することを目的に、光ファイバによるレーザービーム伝送試験、照射条件の最適化による除染速度向上試験、二次生成物の発生状況及び性状を調査する試験を実施した。得られた成果を以下に要約する。

(1) ビーム伝送試験

QスイッチパルスNd:YAGレーザーの石英ファイバによるビーム伝送試験では、ファイバのコア径が大きいほど、伝送エネルギーが大きくなる。コア径1.0mmのファイバでは、損傷を与えることなく入射エネルギー72mJに対し、最大61mJのエネルギーを伝送できた。バンドルファイバは、単線ファイバの伝送エネルギーにバンドル数を乗じたエネルギーよりも大きな伝送エネルギーを得ることができ、レーザー光のビーム伝送系として適用できる。

(2) 除染速度向上試験

模擬廃棄物を対象とした除染試験では、QスイッチパルスNd:YAGレーザーの照射回数を2回、試験片移動速度を3.0mm/sec、ビーム幅を1.2mm、繰返し速度を10Hzにした場合、単位面積当たりのレーザービームショット数が4ショット以上となり、模擬廃棄物が完全に除去できることを確認した。フルエンスを一定とした場合、ビーム径を拡大することにより、単位面積当たりのショット数は大きくなり、除染速度の向上には、ビーム径の拡大が有効である。

(3) 二次生成物確認

SUS304の試験片にQスイッチパルスNd:YAGレーザー及びノーマルパルスNd:YAGレーザーを照射した際の二次生成物の粒径について測定した。QスイッチパルスNd:YAGレーザーでは、二次生成物の50%以上が粒径0.1 μ m以下の微粒子であり、ノーマルパルスNd:YAGレーザーでは二次生成物の50%以上が0.1~1.0 μ mの粒子である。

Development of Laser Decontamination (4)
(Test of beam transmission by fibers and the most suitable condition)

Yasutaka Fukui* , Ryuichirou Ogawa*
Noboru Ishijima* , Kenichi Tanimoto*

Abstract

In this work , the characteristics of laser beam transmission by optical fibers and decontamination speed by the most suitable condition and improvement of the characteristics of secondary products are experimented for apply laser decontamination technique to radioactive wastes treatment and decommissioning of nuclear fuel facilities. The results are as follows.

(1) Beam transmission

For Q switch pulse YAG laser , beam transmission by optical fibers were examined. Transmission energy increase in proportion to diameter of fiber. The maximum transmission energy of optical fiber was 61mJ , which was not damaged. The transmission energy of bundle fiber was more plenty than the energy of single fibers at same numbers. It is able to apply bundle fiber to transmission system of Q switch pulse YAG laser beam.

(2) Improvement of decontamination speed

Imitation contaminants were removed perfectly on the condition that , the irradiation frequency was 2 times , move speed of test piece was 3.0mm/sec , beam diameter was 1.2mm , repetition speed was 10Hz. At this time , the number of beam shots were more 4 in the unit area. The case of fluence is constant , the number of beam shots were increased by spread of beam diameter in the unit area.

(3) Measurement of secondary products

Particle diameters of more than 50% secondary products by Q switch pulse YAG laser were less than $0.1\mu\text{m}$. Particle diameters of more than 50% secondary products by normal pulse YAG laser were from $0.1\mu\text{m}$ to $1\mu\text{m}$.

* Waste Management Section

目 次

1. はじめに	1
2. 試験装置及び測定装置	3
2.1 ビーム伝送試験	3
2.2 除染速度、性能向上試験	4
2.3 二次生成物（気中浮遊物）調査試験	5
3. 試験方法	7
3.1 ビーム伝送試験	7
3.2 除染速度、性能向上試験	8
3.3 二次生成物（気中浮遊物）調査試験	9
4. 試験結果	11
4.1 ビーム伝送試験	11
4.2 除染速度、性能向上試験	16
4.3 二次生成物（気中浮遊物）調査試験	19
5. 小型除染ノズルの設計	21
5.1 設計概要	21
5.2 設計方法	21
5.3 スタンドオフを一定に保つ機構の検討	23
6. 考察	25
6.1 ビーム伝送試験	25
6.2 除染速度、性能向上試験	25
6.3 二次生成物（気中浮遊物）調査試験	26
6.4 小型除染ノズルの設計	26
7. まとめ	27
8. 謝辞	28
9. 参考文献	29
図 表	30

図 表 目 次

表2.1	パルスYAGレーザー発振器の仕様	30
表2.2	除染速度・性能向上試験に使用する試験片の仕様	30
表2.3	二次生成物調査試験に使用するパルスYAGレーザー発振器の仕様	30
表4.1	伝送後のビーム特性	30
表4.2	亜鉛メッキ密度一覧	30
図3.1.1	ファイバ伝送試験概念図	31
図3.1.2	ファイバ曲げ伝送試験概念図	32
図3.1.3	バンドルファイバ伝送試験概念図	33
図3.1.4	バンドルファイバ入射端外観写真	34
図3.1.5	ビームプロファイル測定試験概念図	35
図3.2.1	ビーム拡大法模式図	36
図3.2.2	ボルト模擬試験片照射試験概念図 QスイッチパルスYAGレーザー	37
図3.3.1	二次生成物調査試験概念図(Qスイッチパルス)	38
図3.3.2	二次生成物調査試験概念図(ノーマルパルス)	39
図4.1.1(1)	伝送特性へのファイバコア径の影響 (Fiberguide Industries社製)	40
図4.1.1(2)	伝送特性へのファイバコア径の影響 (Meteor Optics社製)	40
図4.1.1(3)	伝送特性へのファイバコア径の影響 (三菱電線)	41
図4.1.1(4)	異なるファイバメーカーによる伝送特性の比較 (コア径: $\phi 0.6\text{mm}$)	41
図4.1.1(5)	異なるファイバメーカーによる伝送特性の比較 (コア径: $\phi 0.8\text{mm}$)	42
図4.1.1(6)	異なるファイバメーカーによる伝送特性の比較 (コア径: $\phi 1.0\text{mm}$)	42
図4.1.1(7)	損傷発生箇所と発生頻度	43
図4.1.1(8)	入射端外観写真 (Meteor Optics社製)	44
図4.1.1(9)	入射端外観写真 (Fiberguide Industries社製)	45
図4.1.1(10)	入射端外観写真 (三菱電線製)	46
図4.1.1(11)	伝送効率へのファイバコア径の影響 (Fiberguide Industries社製)	47
図4.1.1(12)	伝送効率へのファイバコア径の影響 (Meteor Optics社製)	47
図4.1.1(13)	伝送効率へのファイバコア径の影響 (三菱電線)	48
図4.1.1(14)	伝送効率へのファイバコア径の影響 (コア径: $\phi 0.6\text{mm}$)	48
図4.1.1(15)	伝送効率へのファイバコア径の影響 (コア径: $\phi 0.8\text{mm}$)	49
図4.1.1(16)	伝送効率へのファイバコア径の影響 (コア径: $\phi 1.0\text{mm}$)	49
図4.1.1(17)	最大伝送エネルギーへのファイバコア径の影響 (Fiberguide Industries社製)	50
図4.1.1(18)	最大伝送エネルギーへのファイバコア径の影響 (Meteor Optics社製)	50
図4.1.1(19)	最大伝送エネルギーへのファイバコア径の影響 (三菱電線)	51
図4.1.1(20)	最大ピークパワー密度へのファイバコア径の影響 (Fiberguide Industries社製)	51

図4.1.1(21)	最大ピークパワー密度へのファイバコア径の影響 (三菱電線)	52
図4.1.1(22)	最大ピークパワー密度へのファイバコア径の影響 (Meteor Optics社製)	52
図4.1.1(23)	最大伝送エネルギーへのファイバコア径の影響 (コア径: $\phi 0.6\text{mm}$)	53
図4.1.1(24)	最大伝送エネルギーへのファイバコア径の影響 (コア径: $\phi 0.8\text{mm}$)	53
図4.1.1(25)	最大伝送エネルギーへのファイバコア径の影響 (コア径: $\phi 1.0\text{mm}$)	54
図4.1.1(26)	ファイバメーカーによる最大ピークパワー密度の違い (コア径: $\phi 0.6\text{mm}$)	54
図4.1.1(27)	ファイバメーカーによる最大ピークパワー密度の違い (コア径: $\phi 0.8\text{mm}$)	55
図4.1.1(28)	ファイバメーカーによる最大ピークパワー密度の違い (コア径: $\phi 1.0\text{mm}$)	55
図4.1.1(29)	損傷箇所模式図 (三菱電線製, コア径 $\phi 1.0\text{mm}$)	56
図4.1.2(1)	伝送ビームプロファイル (コア径 0.6mm)	57
図4.1.2(2)	伝送ビームプロファイル (コア径 0.8mm)	58
図4.1.3(1)	伝送ビーム集光スポットプロファイル (コア径 0.6mm)	59
図4.1.3(2)	伝送ビーム集光スポットプロファイル (コア径 0.8mm)	60
図4.1.4(1)	伝送エネルギーへのファイバ曲げ角度の影響	61
図4.1.4(2)	伝送効率へのファイバ曲げ角度の影響	61
図4.1.4(3)	彎曲ファイバーの幾何学的解析	62
図4.1.4(4)	曲げ角度 90° の場合の伝送ビームプロファイル (コア径 0.6mm)	63
図4.1.4(5)	曲げ角度 180° の場合の伝送ビームプロファイル (コア径 0.6mm)	64
図4.1.4(6)	拡がり半角へのファイバ曲げ角度の影響	65
図4.1.5(1)	バンドルファイバの伝送特性	65
図4.1.5(2)	バンドルファイバ伝送ビームプロファイル	66
図4.1.5(3)	バンドルファイバ伝送ビーム集光スポットプロファイル	67
図4.2.1	照射回数をパラメータとしたCs濃度のフルエンス依存性	68
図4.2.2	試験片外観写真 (図4.2.1と対応)	69
図4.2.3	照射回数をパラメータとしたCs濃度の移動速度依存性	70
図4.2.4	試験片外観写真 (図4.2.3と対応)	71
図4.2.5	Cs濃度の試験片移動速度依存性	72
図4.2.6	試験片外観写真 (図4.2.5と対応)	73
図4.2.7	Cs濃度のディフォーカス長依存性	74
図4.2.8	試験片外観写真 (図4.2.7と対応)	74
図4.2.9	Cs濃度の拡大率依存性	75
図4.2.10	試験片外観写真 (図4.2.9と対応)	75
図4.2.11	DFの形状依存性 Qスイッチパルス, 亜鉛メッキ, 2回照射	76
図4.2.12	試験片外観写真 (図4.2.11と対応)	76
図4.2.13	部位別DF測定結果 Qスイッチパルス, ボルト, 亜鉛メッキ	77
図4.3.1	二次生成物の粒径分布 QスイッチパルスYAGレーザー, フルエンス: $5.3\text{J}/\text{cm}^2$	78

図4.3.2	二次生成物の粒径分布 QスイッチパルスYAGレーザー, フルエンス : 6.6J/cm ²	78
図4.3.3	二次生成物の累積捕集割合 QスイッチパルスYAGレーザー	79
図4.3.4	二次生成物の粒径分布 ノーマルパルスYAGレーザー, シールドガス : 空気.....	80
図4.3.5	二次生成物の粒径分布 ノーマルパルスYAGレーザー, シールドガス : Ar	80
図4.3.6	二次生成物の累積捕集割合 ノーマルパルスYAGレーザー	81
図5.2.1	ノズル設計方法フローチャート	82
図5.2.2	レンズ形状	83
図5.2.3(1)	光学系概念図及びレンズ仕様 レンズ外径 : 50mm	84
図5.2.3(2)	集光径の隙間D23依存性 レンズ径 : φ 50mm	85
図5.2.3(3)	光学系概念図及びレンズ仕様 レンズ外径 : 25mm	86
図5.2.3(4)	集光径の隙間D23依存性 レンズ径 : φ 25mm	86
図5.2.3(5)	光学系概念図及びレンズ仕様 レンズ外径 : 15mm	87
図5.2.3(6)	集光径の隙間D23依存性 レンズ径 : φ 15mm	87
図5.3.1	ノズル概念図	88
図5.3.2	エアセンサ ³⁾	89
図5.3.3	静電容量式センサ ³⁾	89
図5.3.4	光学式センサ ³⁾	90
図5.3.5	オートフォーカス方式 (遮へい板を用いたフーコー法) ³⁾	90
図5.3.6	接触方式	91

1. はじめに

物質表面にある程度以上のレーザ光線を照射すると、表面物質を急速加熱し、溶融蒸散させることができ、セラミックや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。この現象は、放射性廃棄物の表面汚染層の除去、つまり除染技術への適用が可能である。レーザ光を用いた除染は、①化学溶剤等を必要としない気中（乾式）プロセスであるため、二次廃棄物の低減が図れる、②非接触のプロセスで多関節ミラーやファイバ等による伝送が可能であるため遠隔操作に適している、③金属以外の有機物やペイント等にも適用が可能で汎用性が高い、④局所的除染が可能である、等の特徴を有している。

このことから、核燃料サイクル施設等のデコミッションングに適用する除染技術としてレーザ光と光ファイバを組合せた、レーザ除染技術の開発を実施している。

レーザ除染技術の開発に関し、これまでに以下の試験を実施した。

- ①各種レーザによる模擬汚染物質を用いた除染試験を実施し、ステンレス等の金属表面の除染にはYAGレーザが適していることを確認した。
- ②二次生成物飛散状況確認試験を実施し、二次生成物の50%以上は粒径1 μm 以下であることを確認した。

これらの成果を踏まえ、レーザ除染技術を実際のデコミッションングに適用するため、システムを構築する上で必要となる基礎データの取得を目的に以下の試験を実施した。

①ビーム伝送試験

QスイッチパルスNd:YAGレーザのファイバ伝送に関する詳細なデータの取得を目的として、複数の石英ファイバによるビーム伝送試験を行い、伝送エネルギーの比較検討、伝送ビーム特性・集光特性の測定を行った。また複数本のファイバを束ね（バンドル）、伝送エネルギーの増加を図った。

②除染速度・性能向上試験

QスイッチパルスYAGレーザーによる除染において、照射スポットの拡大及び照射条件の最適化を行うことで、除染速度を向上させて試験を行った。

③二次生成物（気中浮遊物）調査試験

QスイッチパルスYAGレーザー及びノーマルパルスYAGレーザーによる照射試験時に発生する二次生成物（気中浮遊物）のうち、0.43 μm 以下の超微粒子について、その発生状況・性状を調査した。

④小型除染ノズルの設計

これまでに製作したノーマルパルスYAGレーザー用除染ノズルを小型化するための設計を行った。また、スタンドオフを一定に保つ機構（スタンドオフ自動制御機構）についても検討を行った。

2. 試験装置及び測定装置

2.1 ビーム伝送試験

(1) レーザ発振器

ビーム伝送試験には、表2.1に示すQスイッチパルスYAGレーザーを使用した。本レーザー発振器は、

①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熔融蒸発することが可能である。

②二次生成物が少なく、徹底除染への適用が可能である⁶⁾。等の特徴を有している。

(2) 伝送光学系(ファイバ)

試験に使用した伝送光学系(ファイバ)は以下の通りである。

・形式：S I (ステップインデックス) 型

Meteor Optics社製、Fiberguide Industries社製、三菱電線社製の三種類

・コア径：0.6mm、0.8mm、1.0mm

・長さ：1.0m

・曲げ半径： ∞ (ストレート)、410mm(90度)、170mm(180度)

製作メーカー、コア径、曲げ半径の違いによる伝送特性を確認するため、それぞれ3種類のものを選定した。また、S I型を選定したのは、高いパワーを伝送できるためである(S I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)。

(3) 分析機器及び観察機器

① レーザエネルギーメータ

形式：GDX-RP(OPHIR社製)

用途：伝送前後のレーザーエネルギーの測定

② ビームプロファイラ

形式：BEAMCODE 6.2(コヒーレント社製)

用途：伝送前後のビーム強度分布の測定

2.2 除染速度、性能向上試験

(1) レーザ発振器

2.1(1)と同じ。

(2) 分析機器及び観察機器

① 電子プローブ微小部分分析装置 (EPMA)

形式：EPMA-8705(島津製作所製)

用途：レーザ照射後の残留Csの測定

② プラズマ発光分析装置 (ICP)

形式：ICPS-1000II(島津製作所製)

用途：レーザ照射前後の亜鉛濃度の測定

(3) 試験片

試験に使用した試験片は表2.2に示すようにモリブデン酸セシウムを焼付け塗装した平板及び亜鉛メッキを施したボルトを用いた。詳細な仕様及び選定理由を以下に示す。

① 平板

材質：SUS304(核燃料サイクル施設の代表的構造材)

表面状態：表面仕上げなし

形状：30mm×50mm×2mm(ビーム径3倍まで使用可能)

模擬物質：モリブデン酸セシウム(燃材施設のCs汚染は重金属と共存しているため、重金属化合物を選定)

塗布方法：焼付け塗装(バースト試験等によるCsの固着を模擬)

塗布手順：(a)各試験片をHNO₃に浸し洗浄する。

(b)8.3%モリブデン酸セシウム水溶液に1分間浸し、自然乾燥させる。

(c)100℃で1時間乾燥させる。

(d)350℃で1時間焼き付ける。

② ボルト

材質：SUS304(核燃料サイクル施設の代表的構造材)

表面状態：表面仕上げなし

形状：M16×50mm

模擬物質：亜鉛メッキ（亜鉛は基板（SUS304）に含まれない物質であり、製作及び厚さの調整が容易）

(4) シールドガス

シールドガスにはプラズマの抑制効果が高いヘリウムガス（純度99.9%以上）を使用した。

2.3 二次生成物（気中浮遊物）調査試験

(1) レーザ発振器

試験には表2.3に示すQスイッチ及びノーマルパルスの2種類のYAGレーザ発振器を選定した。各々を選定した理由は以下に示す通りである。

・ QスイッチパルスYAGレーザ：二次生成物が少なく、徹底除染へ適用可能である⁶⁾。

・ ノーマルパルスYAGレーザ：金属廃棄物への適用性が高い⁵⁾。

(2) 試験片

① 平 板

材 質：SUS304（核燃料サイクル施設の代表的構造材）

表面状態：表面仕上げなし

形 状：20mm×50mm×5mm

(3) 分析装置及び観察機器

① アンダーセン型ロープレッシャーインパクト

形 式：LP-20（東京ダイレック社製）

用 途：ガス中の二次生成物粒度分布の測定

② 電子天秤

形 式：AG245（メトラー・トレド社製）

用 途：二次生成物重量測定

(4) シールドガス

試験に使用したシールドガスの種類、仕様及び選定理由を以下に示す。

① ヘリウムガス

純度99.9%以上：プラズマの抑制効果が高いため

②アルゴンガス

純度99.9%以上：ヘリウムに比べて安価な不活性ガスである（金属に対して不活性ガスのみ有効）

3. 試験方法

3.1 ビーム伝送試験

(1) ファイバ伝送試験

ファイバ伝送試験では、ファイバ入射端面での損傷発生や空気の絶縁破壊を避けるため、図3.1.1に示すように焦点距離の長い ($f=300\text{mm}$) 集光レンズを用いた。また、焦点をファイバ端面の手前に置き、伝送エネルギーの増加を図った。焦点外し距離を調節することにより、ファイバ入射端面におけるビーム径が、ファイバコア径の80%程度になるようにした。また、ファイバ入射エネルギーの増減を、発振器内のフラッシュランプ電圧の増減で行うと、レーザ光のパルス幅が変化してしまうため、発振器から出射されるレーザ光のエネルギーを200mJと固定し、外部のNDフィルタによってファイバへの入射エネルギーの調整を行った。なお、伝送試験は1種類のファイバについて各2~3本行った。

(2) ファイバ曲げ伝送試験

ファイバ曲げ試験は図3.1.2に示すように、曲げ角度が伝送特性に与える影響について調査するために、0度(曲率半径 ∞)、90度(同410mm)、180度(同170mm)の3種類の角度について行った。この試験では、伝送エネルギーの測定と伝送後ビームの強度分布測定を行った。

(3) バンドルファイバ試験

図3.1.3にバンドルファイバの試験概念図を、図3.1.4にバンドルファイバの端面の写真を示す。バンドルファイバは、図3.1.4に示すように入射端付近の被覆を取り除いた単線ファイバ(コア径0.8mm、Meteor Optics社製)19本を軸対称に束ね、また入射端面の位置を揃えて固定したものである。バンドルの最大径は約5mmと、レーザ光の直径(約8mm)よりは小さくなっている。ファイバ本数が19本であることから、全入射エネルギーが高く、レンズで集光した場合には空気の絶縁破壊が発生する。このため、発振器からの出力ビームを集光せず、平行に入射す

る方法を採用した。入射エネルギーの調整は、エネルギーが高いことによりNDフィルタでの調整が困難なため、バンドルファイバ試験についてのみ発振器本体側で行った。

(4) ビームプロファイル測定

ファイバ伝送後のビームプロファイル測定は、図3.1.5に示すように、ファイバ出射端から52mm離れた位置において、ビームプロファイラを用いて行った。また、伝送ビームの集光特性を調べるために、ファイバ出射端から200mm離れた位置に球面レンズ（焦点距離102.4mm）を置き、ファイバから出射されたビームを集光し、最小スポット位置での強度分布を測定した。

3.2 除染速度、性能向上試験

モリブデン酸セシウムに対する除染速度向上試験のビーム拡大法模式図を図3.2.1に示す。また、基本的なレーザ照射条件を以下に示す。本試験は、ビームの集光光学系による除染速度の向上を目的とするため、照射条件は前回実施したレーザ伝送系の特性試験⁷⁾と同一とした。

- ・レーザエネルギー：400mJ
- ・ディフォーカス長：15mm
- ・繰り返し速度：10Hz（発振器の固定値）
- ・試験片移動速度：0.25mm/s
- ・シールドガス種類：ヘリウム
- ・シールドガス流量：15Nl/min
- ・照射回数：2回
- ・試験片ずらし量：5mm
- ・オーバーラップ量：約3mm

前回のレーザ伝送系の特性試験では、図3.2.1に示すように、発振器から出射したレーザ光をそのままシリンドリカルレンズで集光し、試験片に照射した⁷⁾。しかし、ビーム径が約8mmと小さいために、処理速度が限られていた⁷⁾。そこで処理速度の向上を図るため、図3.2.1に示すように、凹レンズ（焦点距離-50mm）と凸レンズ（焦点距離150mm）を組合せたビームエキスパンダでレー

ザ光を3倍のビーム径まで拡大し、拡大ビームをシリンドリカルレンズで集光した後、試験片に照射した。さらに、照射回数、移動速度、フルエンス、ディフォーカス長等の照射条件を最適化することによって、除染速度の向上を図った。

レーザー照射後の試験片は、EPMAによってCsの表面分析を行った。

レーザー伝送系の特性試験⁷⁾において実施した模擬汚染物質除染試験では、亜鉛メッキ付きボルト試験片では高い除染性能が得られていない。これは、他の試験片に比べ亜鉛メッキ量が多いことが原因であった。このためボルト試験片は、平板試験片と同程度の亜鉛メッキ量になるように調整した。ボルト試験片のレーザー照射試験は、図3.2.2に示すようにレーザー光（ノズル）を固定とし、ボルトを長手方向に平行移動しながら回転させることにより、全表面照射した。

照射後のボルト試験片は、ネジ部と非ネジ部に分割し、各々の残留亜鉛分布を求め、除染係数を算出した。

3.3 二次生成物（気中浮遊物）調査試験

QスイッチパルスYAGレーザーを用いた二次生成物調査試験は、図3.3.1に示すように、シールドガスをサイドノズルで供給しながら回収ノズルで排気し、ガス中に含まれる二次生成物は排気系の途中に設置した分粒装置で回収した。試験時のレーザー照射条件は以下に示す通りである。

- ・レーザーエネルギー：400mJ
- ・ディフォーカス長：15mm
- ・繰り返し速度：10Hz（発振器の固定値）
- ・試験片移動速度：0.25mm/s
- ・シールドガス種類：ヘリウム
- ・シールドガス流量：15Nl/min

ノーマルパルスYAGレーザーを用いた二次生成物調査試験は、図3.3.2に示すように、試験片の周りを全てフードで覆い、ガス中に含まれる二次生成物を排気途中に設置した分粒装置で回収した。試験時のレーザー照射条件は以下に示す通りである。

- ・ レーザパワー : 273W
- ・ 繰り返し速度 : 30Hz
- ・ デューティ比 : 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
- ・ シールドガス種類 : アルゴン及び空気
- ・ シールドガス流量 : 40Nl/min

回収した二次生成物は粒径 $0.43\mu\text{m}$ (分粒装置の測定下限値⁷⁾)以下の超微粒子を含め、その発生重量、発生挙動、粒径等を測定した。

4. 試験結果

4.1 ビーム伝送試験

4.1.1 最大伝送パワーと伝送効率

(1) 伝送特性へのファイバコア径の影響

図4.1.1(1)～図4.1.1(3)に、ファイバコア径をパラメータとした伝送エネルギーの入射エネルギー依存性を示す。図中の破線で示した伝送効率(=伝送エネルギー/入射エネルギー)は、ファイバ入射端面と出射端面でのフレネル表面反射損失(合成石英ガラスに光が垂直入射したと仮定)のみを考慮した場合の理論伝送効率(93.4%)で、(1)式より求められる。

$$T = \left(\frac{4n}{(n+1)^2} \right)^2 \dots \dots \dots (1)$$

T: 理論伝送効率

n: 屈折率(合成石英1.449)

なお、パワー伝送用SI型純石英ファイバ内部での、吸収と散乱による損失は1～2dB/km程度であり、本試験で用いたファイバ長1m程度では損失が0.01～0.02%程度と無視できる。図4.1.1(1)～図4.1.1(3)より、コア径に依存せず伝送エネルギーは、入射エネルギーの増加に伴い線形に増加することが分かる。図4.1.1(1)に示すように、コア径1.0mmのファイバ(Fiberguide Industries社製)では、入射エネルギー71.7mJに対しファイバが損傷することなく、最大伝送エネルギー61mJが得られた。61mJは本試験において得られた単線ファイバによる最大伝送エネルギーの値である。

(2) ファイバメーカーによる伝送特性の比較

図4.1.1(4)～図4.1.1(6)に各メーカーのファイバによる伝送エネルギーの入射エネルギー依存性をコア径別に示す。これらの図より、入射エネルギーの増加に対する伝送エネルギーの変化(伝送効率)は、ファイバメーカー間で大きな差がないことが分かった。

(3) ファイバの損傷状況

本試験では、試験に使用したファイバ17本中16本に損傷が発生

した。図4.1.1(7)に損傷発生箇所（入射端面、ファイバ内部、出射端面）と発生頻度の関係を示す。図4.1.1(7)に示すように、ビーム伝送で損傷が発生しなかったのは、コア径1.0mm、Fiberguide Industries社製の1本だけであった。またほとんどの損傷は入射端面で発生していることが分った。図4.1.1(8)～図4.1.1(10)にMeteor Optics社製、Fiberguide Industries社製、三菱電線製ファイバの損傷入射端の外観写真を示す。損傷の形態の多くは、クレータ状であるが、一部には完全に破壊したものもあった。入射端面での損傷発生の原因は、入射ビームに局所的に損傷しきい値を越えるような高い強度の箇所があったためと考える。従って、入射ビームの強度分布を均一化することにより、高エネルギーの伝送が可能であると考えられる。

(4) 伝送効率へのファイバコア径の影響

図4.1.1(11)～図4.1.1(13)にファイバコア径をパラメータとした伝送効率の入射エネルギー依存性を示す。伝送効率は入射エネルギー及びコア径によらず80～90%の値が得られることが分かった。先の4.1.1(1)項で述べたように、1m程度の長さの石英ファイバでは、内部の吸収による損失がほとんどないため、伝送損失としては主に端面でのフレネル反射、散乱による結合損失によるものと考えられる。また、外乱等によりレーザ光軸とファイバ軸がずれ、入射ビームのすその部分がクラッド等のコア以外に入射したことも原因と考えられる。

図4.1.1(14)～図4.1.1(16)にファイバメーカーが異なる場合の伝送効率の入射エネルギー依存性をコア径別に示す。ファイバメーカーによらず伝送効率としては80～90%の値が得られていることが分かった。

(5) 最大伝送エネルギーへのファイバコア径の影響

図4.1.1(17)～図4.1.1(19)に最大伝送エネルギー（損傷発生無しで伝送できたエネルギーの最大値）のコア径依存性を、また図4.1.1(20)～図4.1.1(22)に最大ピークパワー密度（ファイバ損傷無しで伝送可能であったピークパワー密度の最大値）のコア径依存性を別に示す。図4.1.1(20)～図4.1.1(22)に示すように、コア

径が大きいほど最大伝送エネルギーは大きくなるが、最大ピークパワー密度としてはあまり変化はなかった。一般に、入射レーザー光の径が小さくなる（ビーム伝送試験ではファイバのコア径が小さくなる場合に相当）と、ファイバに内在する欠陥によって発生する損傷の確率が減少するために、損傷しきい値（レーザー照射によって損傷が発生し始めるフルエンスもしくはパワー密度）は増加する。しかし、試験条件の範囲内では、コア径によらず最大ピークパワー密度はほぼ一定であった。従って最大伝送エネルギー（=最大ピークパワー密度×コア面積×パルス幅）としてはコア径の増加に伴い大きくなった。最大ピークパワー密度がコア径によらず一定であることから、本試験のビーム径0.5～0.8mm程度では損傷の確率に大きな差はないと考えられる

図4.1.1(23)～図4.1.1(25)に各ファイバの最大伝送エネルギー、図4.1.1(26)～図4.1.1(28)に各ファイバの最大ピークパワー密度をコア径別に示す。コア径が0.6mm及び0.8mmの場合、ファイバメーカーによらず、最大伝送エネルギー及び最大ピークパワー密度共に差は見られない。しかし、コア径が1.0mmの場合、Fiberguide Industries社製に比べて三菱電線製の最大伝送エネルギー及び最大ピークパワー密度が20%以下に低下することが分かった。三菱電線製ファイバの場合、損傷が発生した位置は、2本とも図4.1.1(29)に示したようなジャケット（ファイバ外装）の端であった。これはジャケット除去時（ジャケット先端部はメーカーで除去）において、ファイバに微小な傷が付いたために、低いレーザーエネルギーでもジャケット端部の傷が容易に拡大したのではないかと考えられる。

4.1.2 伝送ビーム特性

コア径0.6mmと0.8mm（Meteor Optics社製）の場合におけるファイバ伝送後のビームの強度分布をそれぞれ図4.1.2(1)、図4.1.2(2)に示す。伝送後のビームの強度分布は、ファイバ内部の伝搬モード間の干渉（スペックル）によって、非常に不規則になっていることが分かった。また、コア径が大きいほど出射ビーム径が大きくなっていることが分かった。このビーム径から伝送ビー

ムの拡がり角（半角）を求めた結果を表4.1に示す。表4.1に示すようにコア径が大きいほどビームの拡がり角が大きくなったのは、(2)式²⁾に示されるように、入射角が同じであっても、コア径の2乗に比例してファイバ内部を伝搬するモードの次数が増加するためであると考えられる。

$$N_m = 0.5 \left(\frac{\pi d \phi}{\lambda} \right)^2 \dots \dots \dots (2)$$

N_m : モード数、 d : ファイバコア径、 ϕ : 入射角
 λ : 入射レーザー光の波長

4.1.3 伝送ビームの集光特性

コア径0.6mm、0.8mmのファイバにより伝送したビームを焦点距離102.4mmのレンズで集光したときの、集光スポットの強度分布を図4.1.3(1)及び図4.1.3(2)に示す。コア径によらず最小スポットが得られたのは、集光レンズから約215mm離れた位置であった。ファイバ出射端からレンズまでの距離が200mm、レンズからスポット位置までが215mmであることから、理論的にはコア径×(215/200倍)のスポット径が得られることになるが、いずれのコア径においても、215mm離れた位置ではコア径と同程度まで集光されることが分かった。

4.1.4 伝送特性の曲げ半径依存性

ファイバ曲げ角度をパラメータとした、伝送エネルギー及び伝送効率の入射エネルギー依存性を図4.1.4(1)及び図4.1.4(2)に示す。これらの図より、ファイバを曲げることによって、伝送効率が最大25%程度低下することが分かった。

ファイバを曲げた場合には、曲げた部分において光が臨界角（コアとクラッド界面で全反射を起こす最小角度）を越えることで、光の一部がクラッド側に抜けて損失が発生することがある。

図4.1.4(3)に示すような一定の曲率半径Rで曲げられたファイバを考えた場合、角度 θ でファイバに入射した光は(3)式に示すスネルの法則によりファイバ内部では角度 θ_0 となる。

$$n \sin \theta = n_0 \sin \theta_0 \dots \dots \dots (3)$$

また、臨界角はコアとクラッドの屈折率から(4)式及び(5)式に

より求められる。

$$\sin \theta_0 = \frac{n_1}{n_0} \dots \dots \dots (4)$$

曲げた部分での角度 ϕ は

$$\sin \phi = \frac{\cos \theta_0 \left(\frac{R}{d} + 0.5 \right)}{\frac{R}{d} + 1} \dots \dots \dots (5)$$

従って、 $\sin \phi \geq \sin \phi_0$ であれば、曲げた部分においても光は全反射し、損失は発生しない。本試験では入射角 $\theta = \text{約} 0.013 \text{rad}$ 、コア径 $d = 0.6 \text{mm}$ 、各屈折率 $n = 1$ 、 $n_0 = 1.449$ 、 $n_1 = 1.432$ であるので、損失の発生しない最小曲率半径は25mmとなる。しかし、試験条件の曲率半径は170mmと410mmであり、25mmよりもかなり大きいことから、伝送効率の低下は臨界角を越えたことによる損失ではないと考えられる。

ファイバ曲げ角度90、180度におけるファイバ伝送後の強度分布をそれぞれ図4.1.4(4)、図4.1.4(5)に示す（ファイバ曲げ角度0度は図4.1.2(1)参照）。また、これらの強度分布から求めた、伝送ビームの拡がり角（半角）の曲げ角度依存性を図4.1.4(6)に示す。曲げ角度0度の場合と比べて、曲げ角度90度の場合、出射ビーム径は大きくなり、さらに180度の場合にはビーム径が増加するだけでなく中心部が抜けてドーナツ型になることが分かった。

ファイバを曲げた場合の出射ビームの強度分布は、入射角、ファイバ長、コア径、曲率半径の組合せによって複雑に変化するため予測が困難であり、数値計算等による解析が必要である。また、このようなドーナツ型のビームで除染を行った場合には、当然中心部は除去されないため、ビームの均一化を図る必要がある。

4.1.5 バンドルファイバの伝送特性

図4.1.5(1)にバンドルファイバにおける入射エネルギーに対する伝送エネルギーの依存性を示す。入射エネルギーは、発振器から出力されたエネルギーであり、伝送エネルギーは全ファイバから出力されたエネルギーの合計である。また、図中には、集光レ

レンズを用いない入射方法(バンドルファイバと同じ)で伝送した単線ファイバによる伝送結果も示す。図中の破線は、単線ファイバによる伝送エネルギーを単純に19倍したものである。入射エネルギー604mJに対して最大伝送エネルギー158mJが得られた。バンドルファイバの伝送エネルギーは、単線ファイバの伝送エネルギーを19倍したものよりも大きいことが分かった。これは、試験に使用しているレーザービームの中心部のエネルギー密度が、平均エネルギー密度(=全エネルギー/ビーム面積)よりも小さく、また単線ファイバの場合、レーザービームの中心部(エネルギー密度の小さい部分)を伝送させていることから、1本の伝送エネルギーを19倍したものよりも、バンドルファイバの伝送エネルギーの方が大きくなったと考える。伝送試験後のファイバの観察では、一番外側の12本中の1本に損傷が発生したが、残りのファイバには全く損傷は見られなかった。損傷箇所は、入射端から数cmの内部であった。

図4.1.5(2)にファイバ出射端から52mmの位置での出射ビームプロファイルを示す。単線ファイバの場合と同様、ファイバの内部伝搬モード間及び各ファイバからの出射光間の干渉によって、非常に不規則になることが分かった。

図4.1.5(3)に伝送後のビームを焦点距離102.4mmのレンズで集光したときの、集光スポットのプロファイルを示す。最小スポットが得られたのは、単線ファイバ同様、集光レンズから約215mm離れた位置であり、各々の出射光はほぼコア径と同程度まで集光されていることが分かった。この時のフルエンスは平均 $1.7\text{J}/\text{cm}^2$ で、レーザー除染に必要なフルエンス⁷⁾(約 $5\text{J}/\text{cm}^2$)の約1/3であった。従って、今後は1本当たりの伝送エネルギーを増加させるとともに、各々のファイバからの出射光を重ね合わせ、照射部において必要なフルエンスが得られるようにする必要がある。また、今回出射端は入射端と同じ円形としたが、出射端を線状に並べ、幅広の除去面を得ることも可能であると考えられる。

4.2 除染速度、性能向上試験

レーザー照射条件(フルエンス及び移動速度等)が除染速度に与え

る影響について以下に示す。

(1) Cs濃度のフルエンス依存性

図4.2.1に照射回数をパラメータとしたCs濃度のフルエンス依存性を示す。試験片外観写真を図4.2.2に示す。照射回数が1回の場合、フルエンスが2.7J/cm²の条件において、Cs濃度が最も低くなった。高フルエンスでCs濃度が高くなったのは、一度除去されたCsが再付着したためと考えられる。また、照射回数2回の場合、フルエンスが5.3及び8.0J/cm²の条件で、バックグラウンドレベルまで、Csが除去されることが分かった。

(2) Cs濃度の試験片移動速度依存性

図4.2.3に照射回数をパラメータとしたCs濃度の試験片移動速度依存性を示す。また、試験片外観写真を図4.2.4に示す。照射回数が1回の場合、移動速度0.25及び0.5mm/sに対し80cps程度のCsが検出されたが、照射回数2回の場合は、いずれの移動速度においても、バックグラウンドレベルまで、Csが除去されることが分かった。

照射箇所における照射パルス数Sは(6)式で求められる。

$$S = \frac{W}{T} RN \quad \dots \dots \dots (6)$$

W：ビーム幅、T：試験片移動速度

R：繰り返し速度、N：照射回数

(6)式から、N/Tが同じであれば照射パルス数は同じことになる。しかし、移動速度0.25mm/s、照射回数1回の場合と0.5mm/s、2回照射の場合では、N/Tが同じであるにもかかわらず、Cs濃度が大きく異なっている。これは、2回目の照射時には、Csが1回目の照射で再付着したものであるため除去されやすい状態にあったと考えられ、Csを完全に除去するためには、2回以上の照射回数が必要であることが分かった。

図4.2.5に照射回数を2回と固定した場合の、Cs濃度の試験片移動速度依存性を示す。また、その時の試験片外観写真を図4.2.6に示す。移動速度3.0mm/sまではほぼバックグラウンドレベルまでCs濃度が低下しているが、4.0mm/s以上ではCs濃度が大

大きく増加していることが分かった。

従って、試験片移動速度3.0mm/s、ビーム幅1.2mm、繰り返し速度10Hz、照射回数2回とした場合にCsを完全に除去するためのショット数は、(6)式より4ショットであると考えられる。

(3)照射スポット径の除染速度に与える影響

図4.2.7に、フルエンスを $2.7\text{J}/\text{cm}^2$ (照射回数2回)と一定とした場合の、Cs濃度のディフォーカス長依存性を示す。また、その時の試験片外観写真を図4.2.8に示す。ディフォーカス長が増加すると、Cs濃度が低下する(除染効果が高い)ことが分かった。これは、ディフォーカス長の増加に伴い、ビーム幅が広がるため(6)式より照射パルス数が増加することによると考える。

図4.2.9に、照射エネルギー及びフルエンスをそれぞれ400mJ及び $5.3\text{J}/\text{cm}^2$ (照射回数2回)と一定とした場合の、Cs濃度の拡大率依存性を示す。また、その時の試験片外観写真を図4.2.10に示す。照射エネルギー及びフルエンスを一定とするために、拡大率1倍のときはディフォーカス長を15mm、拡大率3倍のときには同5mmとした。ビーム径を3倍に拡大しても、Csは完全に除去されており、ビーム径の拡大が処理速度向上に有効であることが分かった。

(4)亜鉛メッキ付きボルト試験片の除染性能

表4.2に前回のレーザ伝送系の特性試験での各種形状模擬試験片除染試験⁷⁾及び本試験で用いた試験片の亜鉛メッキ密度を示す。表の値より、各種形状模擬試験片除染試験で製作したボルト試験片のメッキ密度は他の試験片と比べて、約5倍高いことが分かった。これは、電気メッキではメッキ厚さが時間に比例するため、厚さの制御は通常通電時間で行っており、ボルトの場合は突起部に電流が集中してしまうことから、同じ通電時間でもメッキ厚が大きくなったと考える。通電時間を短くした結果、本件で製作したボルト試験片のメッキ密度は $1.0\text{mg}/\text{cm}^2$ であり、各種形状模擬試験片除染試験で製作したLアングル及び円筒試験片と同程度の亜鉛メッキ密度となっていることが分かった。

た。また、図4.2.11にレーザ照射前後の亜鉛メッキ量から求めたDFの試験片形状依存性を示す。ボルトにおいても亜鉛メッキ量を調整することにより、Lアングルと同程度のDFが得られることが分かった。照射前後の試験片外観写真を図4.2.12に示す。

図4.2.13に部位別のDFを示す。部位によらず各種形状模擬試験片除染試験の結果よりも高いDFが得られることが分かった。このため、各種形状模擬試験片除染試験の際に亜鉛メッキ付ボルトのDFが低かったのは、他の試験片に比べ亜鉛メッキ量が多かったことが原因であると断定できる。

4.3 二次生成物（気中浮遊物）調査試験

レーザ照射条件（フルエンス等）の超微粒子発生状況に与える影響を以下に示す。

フルエンス $5.3\text{J}/\text{cm}^2$ の場合の粒径分布を図4.3.1に示す。縦軸は全回収量における各粒径範囲に捕集された重量の割合である。この図より、二次生成物のほとんどが $1\ \mu\text{m}$ 以下の微粒子であることが分かった。同様に、図4.3.2に示すようにフルエンス $6.6\text{J}/\text{cm}^2$ の場合でも二次生成物の多くは $1\ \mu\text{m}$ 以下の微粒子であることが分かった。

また、図4.3.3に図4.3.1及び図4.3.2の結果を累積した粒径分布を示す。これよりフルエンスによる二次生成物の粒径の差はほとんど見られないことが分かった。

QスイッチパルスNd：YAGレーザをSUS304に照射した場合、二次生成物（気中浮遊物）は、フルエンスに依存することなく50%以上が $0.1\ \mu\text{m}$ 以下の粒子であることが分かった。レーザ除染の場合、表面層のみを除去するため二次生成物の量が少なく、さらに粒径が非常に小さい。このため、二次生成物の回収には、HEPAフィルタ（ $0.3\ \mu\text{m}$ の粒子で99.97%除去可能）が適していると考えられる。

次に、ノーマルパルスNd：YAGレーザを使用したシールド条件（ガス種類等）の超微粒子発生状況に与える影響を以下に示す。

シールドガスに空気を使用した場合の粒径分布を図4.3.4に示

す。この図より粒径 $0.2\sim 0.3\mu\text{m}$ の粒子をピークとした山型の粒径分布となることが分かった。

シールドガスにアルゴンを使用した場合の粒径分布を図4.3.5に示す。空気と同様に、粒径 $0.2\sim 0.3\mu\text{m}$ の粒子をピークとした山型の粒径分布となっているが、空気と比べ $0.05\mu\text{m}$ 以下の粒子が多くなることが分かった。

図4.3.6は図4.3.4と図4.3.5を累積した粒径分布である。80%程度が $1\mu\text{m}$ 以下の微粒子である。また、シールドガスとしてアルゴンを用いた方が空気を用いた場合に比べ、 $0.05\mu\text{m}$ 以下の粒径が10%程度多くなることが分かった。

ノーマルパルスNd:YAGレーザーの場合、二次生成物（気中浮遊物）は、約50%が $0.1\sim 1\mu\text{m}$ の粒子であり、QスイッチパルスNd:YAGレーザーと比較すると粒径が10倍程度大きいことが分かった。しかし、粒径が $0.1\sim 1\mu\text{m}$ の範囲であれば、簡便で取り扱いの容易なHEPAフィルタ（ $0.3\mu\text{m}$ の粒子で99.97%除去可能）が適していると考えられる。

5. 小型除染ノズルの設計

5.1 設計概要

ファイバ伝送方式のノーマルパルスYAGレーザを除染に適用するために製作した専用ノズル⁷⁾(以下、現状の除染ノズル)を更に小型化するための設計を行った。また、スタンドオフを一定に保つ機構(スタンドオフ自動制御機構)についても検討を行った。

5.2 設計方法

5.2.1 設計内容

(1)設計条件

- ① ファイバから出射されたレーザ光を1mm以下(現状の除染ノズルの実測値⁷⁾)まで集光可能であること
- ② 現状の除染ノズルより小型化すること

(2)設計方法

設計方法(フローチャート)を図5.2.1に示す。

5.2.2 設計

(1)ファイバから出射されるレーザ光の拡がり角

現状の除染ノズルの試験で得られた出射光拡がり角である(NA: Numerical Aperture)0.167を用いた。

(2)光学系(形状、枚数)の選定

形状、焦点距離、レンズ間距離を変えることによってレンズの球面収差を補整することができる平面、両面、平凹レンズ3枚の組合せを選択した。

(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(点光源をレンズ系により結像した場合にできる像)を求め、ぼけ量とずれ量(収差の補整具合)の評価を行った。具体的には、図5.2.2に示すようなレンズの組合せにおいて、まずレンズの外径及び各レンズの焦点距離・形状を市販レンズの中から選定し、最も集光性の良い隙間D23(隙間D12は集光性への影響が小さい

ため1mmと固定)を光学設計ソフトにより求めた。計算の入力パラメータは、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。

5.2.3 設計結果

図5.2.3(1)に現状の除染ノズルの光学系の模式図を実物大で示す。ファイバ出射端から照射点までの長さが約213mmで、レンズ外径は50mmである。また図5.2.3(2)に集光径の隙間D23依存性を示す。図中の破線の下限值とは、レンズの形状によって制限される隙間D23の最小値である。この図から隙間の下限值3.6mmにおいて集光径0.79mmが得られることが分かる。現在のノズルの実測では約1mmのビーム径が得られている。

次にノズルを小型化するために、レンズの径を現在のノズルの半分(25mm)に設定して設計を行った。ファイバから出射されるレーザー光は、5.2.2項で述べたように角度0.167rad(半角)で広がっている。従って、レンズの径を小さくすることによりファイバ出射端とレンズ間の距離を狭くする必要がある。そこで、図5.2.3(3)(実物大)に示すような光学系を選定して集光径の評価を行った。図5.2.3(4)に集光径の隙間D23依存性を示す。この図から隙間の下限值1.8mmにおいて集光径0.78mmが得られることが分かる。この時のファイバ出射端から照射点までの長さは約107mmとなり、外径、長さ共に現状の除染ノズルの半分の大きさ(体積では1/8)となる。

さらに小型化を進めるために、レンズの径を15mmと設定して設計を行った。選定した光学系を図5.2.3(5)に実物大で示す。また集光径の評価を行った結果を図5.2.3(6)に示す。この図から隙間1.37mmにおいて集光径0.76mmが得られることが分かる。この時のファイバ出射端から照射点までの長さは約67mmとなり、外径、長さ共に現状の除染ノズルの1/3以下の大きさ(体積では1/27以下)のノズルを製作できる見通しを得た。

しかし、実際にはレンズの有効径は固定用の治具により狭められ、狭められた有効径の分だけレンズ径を大きくする必要がある。特にレンズ径が小さい場合には、有効径が大きくなると、焦点距

離の短いレンズは収差が大きくなる。このため集光性が悪くなり、焦点距離が制限を受け、ノズルの小型化に限界が生じると考えられる。また、ノズルを小さくすると、レンズと照射部との距離が短くなり、レンズへの除去物質の付着が起こりやすくなることが予想される。このため、カバーガラス等によるレンズの保護が必要になる。ノズルにはカバーガラスの他に、シールドガス供給口やファイバ出射端の冷却系を設ける必要もあり、これらの取り付けスペースからも小型化は制約を受けるものと考えられる。

5.3 スタンドオフを一定に保つ機構の検討

ノーマルパルスNd:YAGレーザーによる除染は、レーザー光によって金属表面を溶融し、その溶融金属をガスジェットによって吹き飛ばす方式である。従って、ガスジェットの強さが除去性能に大きく影響すると考えられる。ガスジェットは図5.3.1のノズル概念図に示すように、レーザー光と同軸にノズル先端から溶融部に吹きつける方式になっている。このため必要なガスジェットを安定して得るためには、ノズル先端と除染対象物までの距離（スタンドオフ）を一定に保つ必要がある。

そこで、スタンドオフを一定に保つ機構（ハイトセンサ）について調査・検討を行った。

(1) エアセンサ方式³⁾

図5.3.2にエアセンサ式ハイトセンサの模式図を示す。この方式は、ノズルから吹き出すガスジェットの背圧を検出し、その大きさの変化からノズルと対象物との距離を検知するものである。

(2) 静電容量方式³⁾

図5.3.3に静電容量方式のハイトセンサの概念図を示す。これは、ノズルと対象物間に電圧をかけておき、スタンドオフが変化したことによる静電容量の変化を検知する方法である。

(3) 三角測量方式³⁾

図5.3.4に三角測量方式のハイトセンサ概念図を示す。これは、半導体レーザーやHe-Neレーザーを対象物に照射し、その反射

光をリニアアレイセンサ等で位置変化として検知し、三角測量によってスタンドオフの変化を評価する方法である。

(4)オートフォーカス方式³⁾

図5.3.5にオートフォーカス方式のハイトセンサ概念図を示す。これは、三角測量方式と同様に半導体レーザやHe-Neレーザを対象物に照射し、その反射光を2分割ディテクタで検出するもので、スタンドオフが変化すると、各々のディテクタで検出される強度が変化する。

(5)接触方式

図5.3.6に接触方式のハイトセンサ概念図を示す。この接触方式は図に示されるように、ノズルの先端に支柱を取りつけ、その先端には全方向に移動可能なキャストがついている。

上記(1)～(5)の各方式についての検討結果を以下に示す。

エアセンサ方式は、ノズルと対象物の角度が変化する場合、スタンドオフが同じでも測定位置によって測定値が変化すると考えられ、レーザ除染への適用は難しいと考える。また三角測量方式やオートフォーカス方式などの光学方式は、反射光強度や方向が対象物の表面状態に大きく依存し、同様にレーザ除染への適用は難しいと考える。従って、レーザ除染を自動化する場合には静電容量方式が最も適していると考えられる。しかし、作業者がノズルを遠隔操作する場合には、接触式の方が制御を確実に行うことができ、適用性が高いと考える。

6. 考察

6.1 ビーム伝送試験

QスイッチパルスNd:YAGレーザービームにおいて、単線ファイバは、理論伝送効率と同程度のエネルギーを伝送できることを確認した。しかし、ファイバに損傷が発生することが分かった。ファイバの損傷は、入射ビームのエネルギーの強度にむら(中心が弱い)があるためと考える。

バンドルファイバは、単線ファイバの伝送エネルギーにバンドル数を乗じた値よりも大きな伝送エネルギーを得ることができた。これは、単線ファイバによる伝送の場合、エネルギー密度の低いビーム中心のエネルギーを伝送しているためと考えられる。

上記二つの考察により、レーザー光の伝送系として石英バンドルファイバを使用できる可能性が高いことを確認した。

今後の課題として、再現性と安定性を確保するとともに、長距離伝送の確認試験を行う必要がある。さらに、伝送後のビームにおいて必要なフルエンスを得るため、集光光学系の検討を行う必要がある。

6.2 除染速度、性能向上試験

試験片にQスイッチパルスNd:YAGレーザーを2回以上照射することで、模擬汚染物質を完全に除去することができた。これは、1回の照射において除去した模擬汚染物質が再付着しやすいため、2回目の照射で再付着した汚染を除去したためと考えられる。

また、照射エネルギー及び照射フルエンスを一定とした場合、ディフォーカス長によりビーム径を拡大しても除染性能に影響がないことが分かった。このため、ビーム径の拡大が処理速度向上に有効であると考えられる。

今後は、再付着及びビーム径の拡大効果を確認するための実廃棄物によるホット試験が必要である。

6.3 二次生成物（気中浮遊物）調査試験

QスイッチパルスNd:YAGレーザー及びノーマルパルスNd:YAGレーザーをSUS304に照射した場合、二次生成物（気中浮遊物）の発生は少なく、二次生成物の50%以上が粒径 $0.1\mu\text{m}$ 以下の微粒子であることを確認した。このため、二次生成物の回収には、設置が容易なHEPAフィルタが適用できる見通しを得た。

今後は、実際にHEPAフィルタを用いた除染システムにより二次生成物の回収試験を行う必要がある。

6.4 小型除染ノズルの設計

レーザー除染用の専用ノズルとして、外径約15mm、長さ約67mmのノズルを製作できる見通しを得た。しかし、ノズルを小さくすると、レンズと照射部との距離が短くなり、レンズへの二次生成物の再付着が起こりやすくなることが予想される。このため、ノズル先端には、カバーガラス等を設けレンズを保護する必要があると考える。

スタンドオフ自動制御機構としては、エアセンサ方式、三角測量方式、オートフォーカス方式、静電容量方式が報告されているが、レーザー除染を自動化する場合には静電容量方式が適しており、作業者によるマニプレータ等の遠隔操作で除染する場合には、接触式が適していると考えられる。

7.まとめ

レーザ除染技術を実際の除染作業に適用するための基礎データの取得を目的に実施した、今回の試験において、得られた成果を以下に要約する。

- ① ビーム伝送試験により、レーザ光の伝送系として石英バンドルファイバが適用できる見通しを得た。
- ② 模擬汚染物質を完全に除去するためには4ショット以上のパルスで2回以上照射する必要がある。
- ③ 除染処理速度の向上には、ビーム径の拡大が有効である。
- ④ QスイッチパルスNd:YAGレーザ及びノーマルパルスNd:YAGレーザによる除染で発生する二次生成物の回収にはHEPAフィルタが適している。
- ⑤ レーザ除染用の専用ノズルとして、外径約15mm、長さ約67mmのノズルを製作できる見通しを得た。しかし、除去物質がレンズへ付着しやすくなるため、カバーガラス等によるレンズの保護が必要である。
- ⑥ レーザ除染を自動化する場合のスタンドオフ自動制御機構は静電容量方式が適しており、作業による遠隔操作で除染する場合のスタンドオフ自動制御機構には接触式が適している。

8. 謝辞

レーザ除染システム化基礎試験作業を実施するにあたり、ご協力を頂いた(財)産業創造研究所の矢島正美参与、清水幸喜主任研究員に感謝の意を表します。

9. 参考文献

- 1). W. M. Trott and K. D. Meeks, J. Appl. Phys. 67, 3297 (1990).
- 2). V. Sturm, R. Sattmann, and R. Noll, Appl. Phys. B 63, 363 (1996).
- 3). 「レーザープロセッシング」日経技術図書株式会社、181 (1990).
- 4). 福井康太、根本正信、谷本健一、照沼誠一：レーザー除染技術の開発(1)(レーザー除染に関する調査と基礎試験) PNC ZN9410 95-041 (1994.12)
- 5). 福井康太、根本正信、谷本健一：レーザー除染技術の開発(2)(レーザー除染に関する適用性試験) PNC ZN9410 96-058 (1996.2)
- 6). 清水幸喜、谷脇学、佐藤俊一、須賀芳睿：レーザー除染システム概念検討 PNC ZJ1564 96-003 (1996.2)
- 7). 福井康太、小川竜一郎、石島昇、谷本健一：レーザー除染技術の開発(3)(レーザー伝送系の特性試験) JNC TN9410 99-008 (1999.4)

表 2.1 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 GCR-150-10 型 最大出力エネルギー 650mJ/pulse (パルス幅 10nsec) 繰返し周波数 10Hz

表 2.2 除染速度・性能向上試験に使用する試験片の仕様

材質	SUS304	
模擬物質	モリブデン酸セシウム 焼付け塗装	亜鉛 メッキ
形状	平板 (30mm×50mm×2mm)	ボルト (M16×50mm)

表 2.3 二次生成物調査試験に使用するパルス 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 GCR-150-10 型 最大出力エネルギー 650mJ/pulse (パルス幅 10nsec) 繰返し周波数 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、Duty 比 50%時)

表 4.1 伝送後のビーム特性

コア径	0.6mm	0.8mm
ビーム径	1.2mm	2.6mm
拡がり半角	0.012rad	0.25rad

表 4.2 亜鉛メッキ密度一覧

試験名	各種形状模擬試験片除染試験 ⁷⁾			除染速度、性能向上試験
	円筒	Lアングル	ボルト	
試験片形状	円筒	Lアングル	ボルト	ボルト
亜鉛メッキ密度	約 0.8mg/cm ²	約 0.9 mg/cm ²	約 4.3 mg/cm ²	約 1.0 mg/cm ²

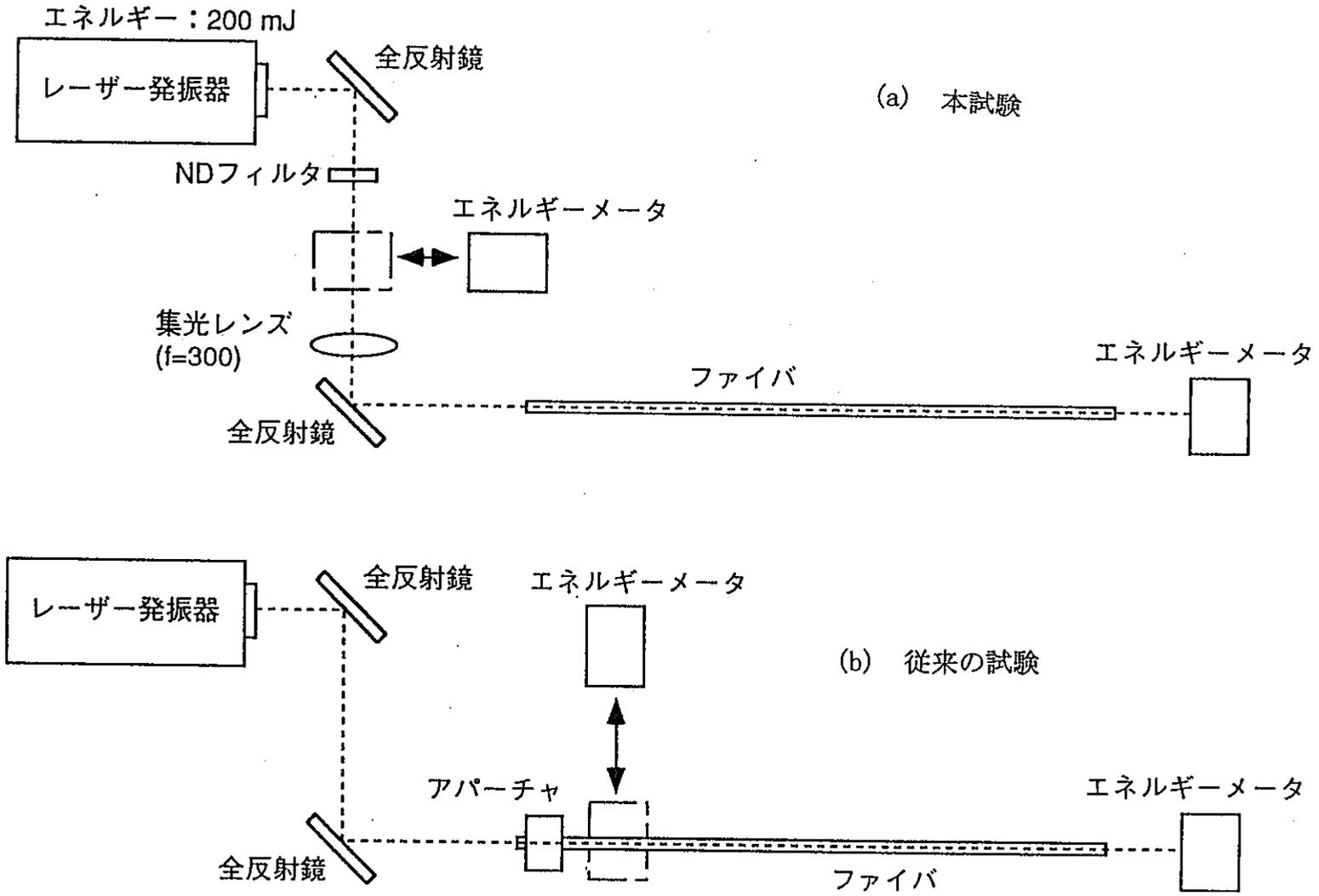


図3.1.1. ファイバ伝送試験概念図

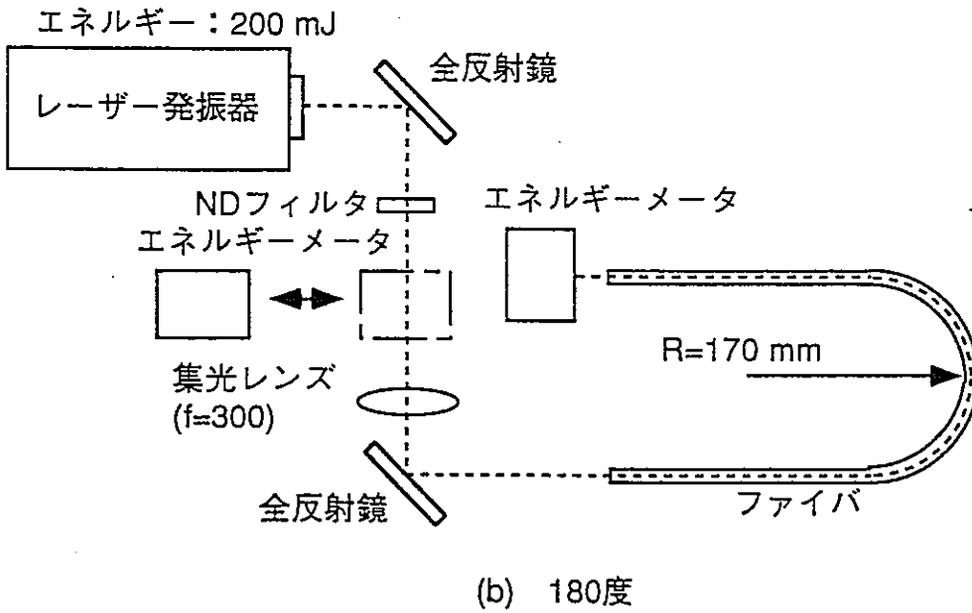
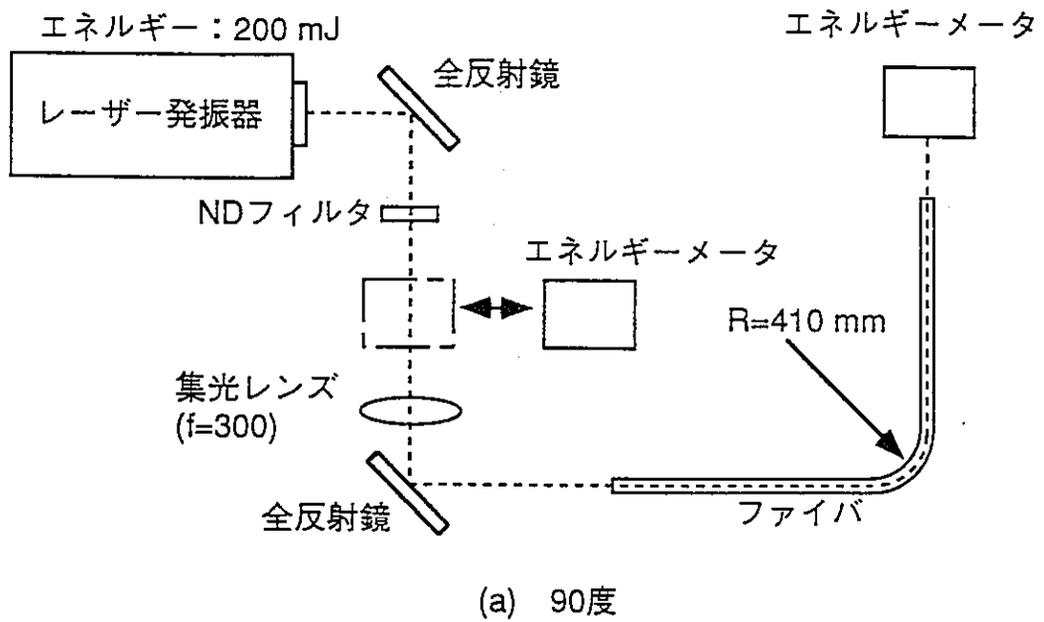


図3.1.2 ファイバ曲げ伝送試験概念図

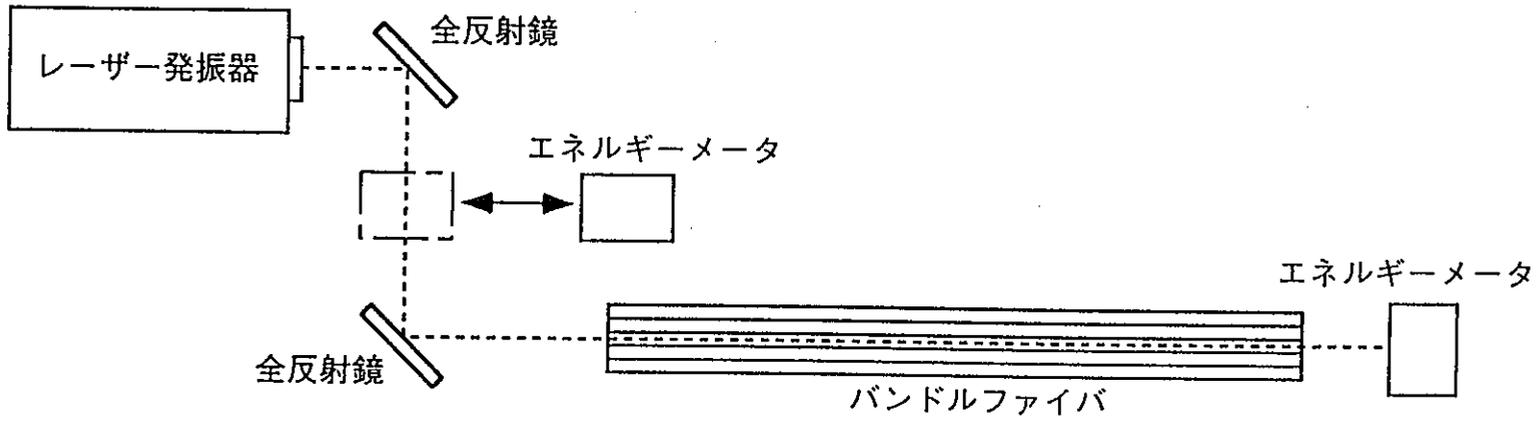


図3.1.3 バンドルファイバ伝送試験概念図

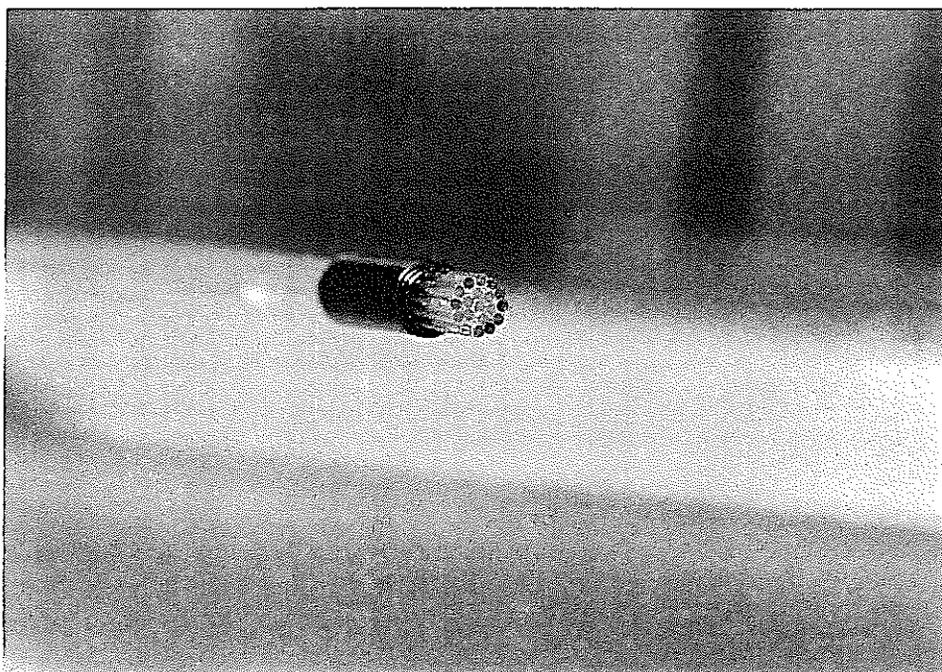


図 3.1.4 バンドルファイバ入射端外観写真

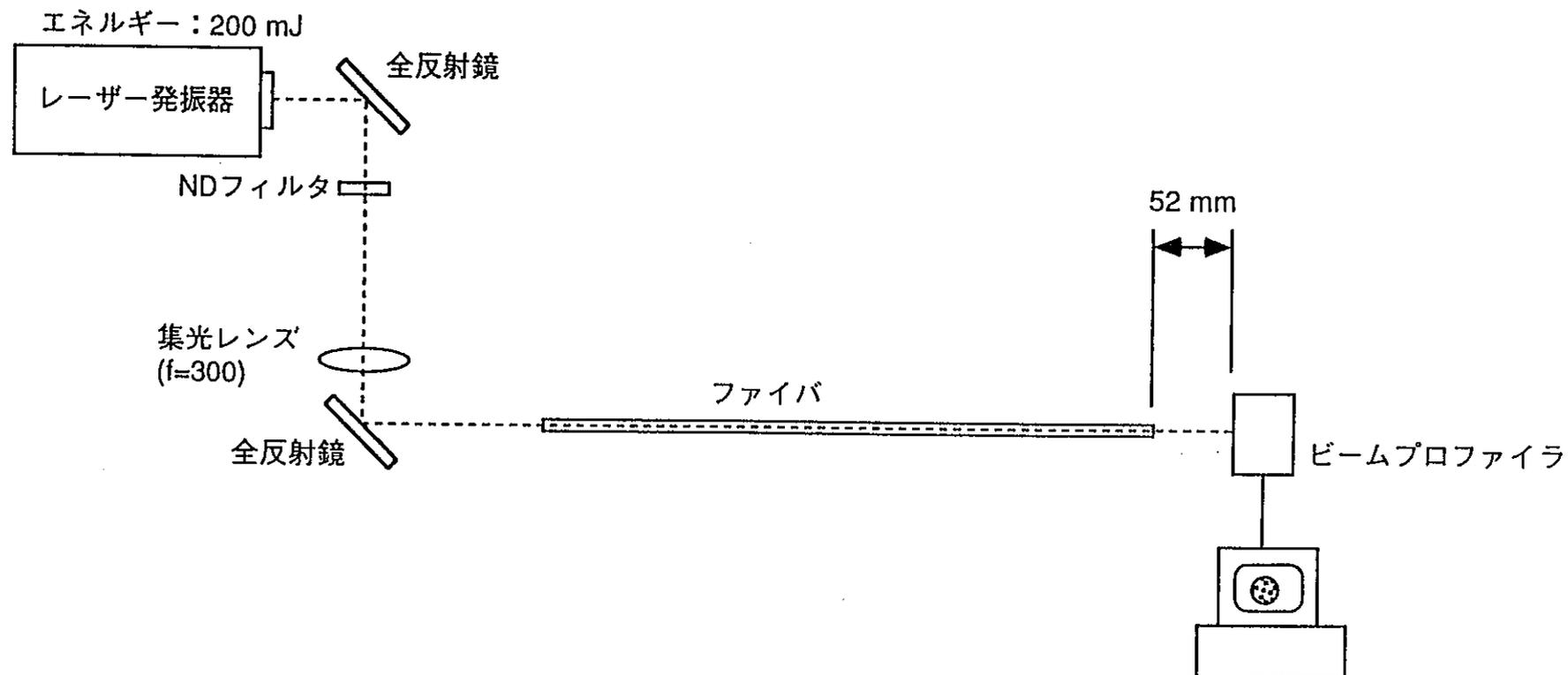


図3.1.5 ビームプロファイル測定試験概念図

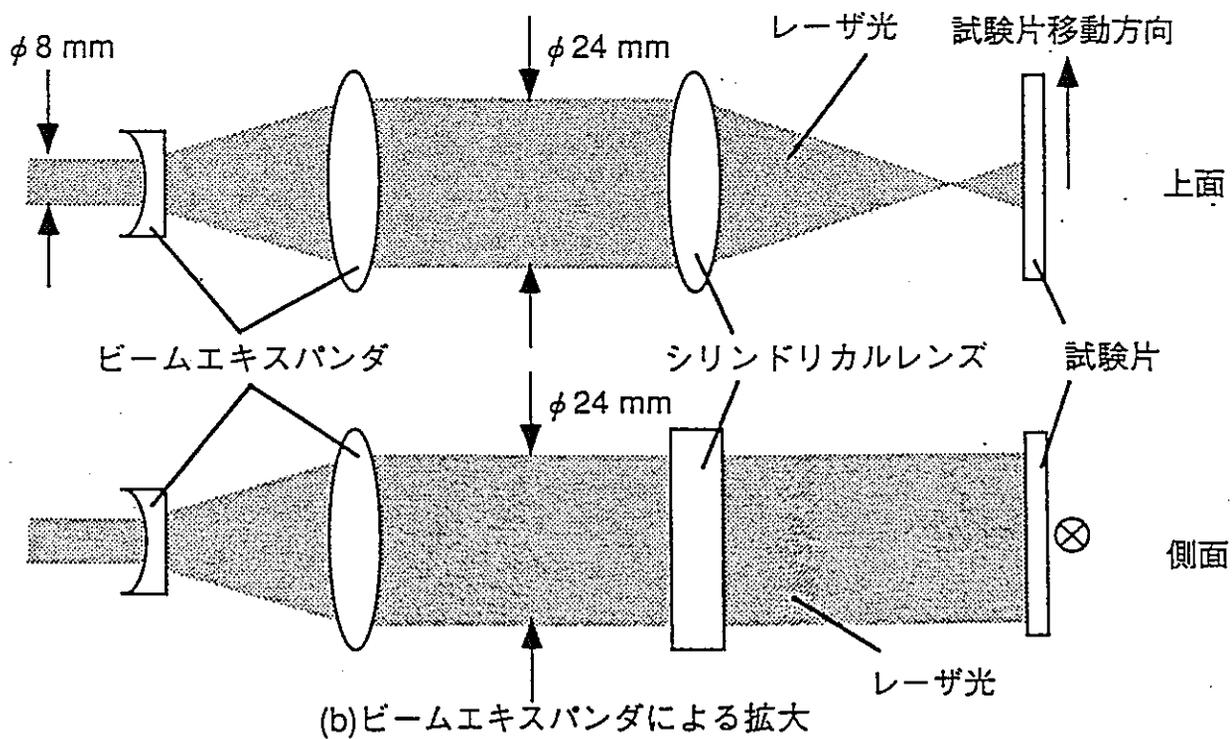
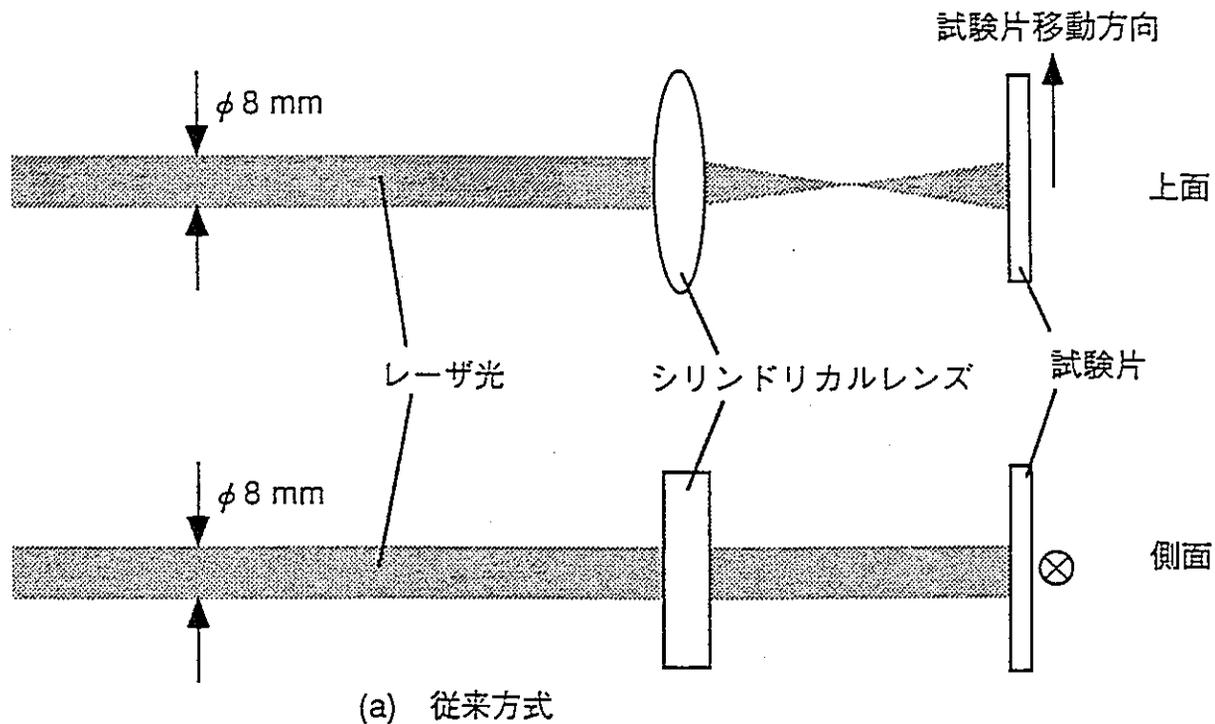


図3.2.1 ビーム拡大法模式図

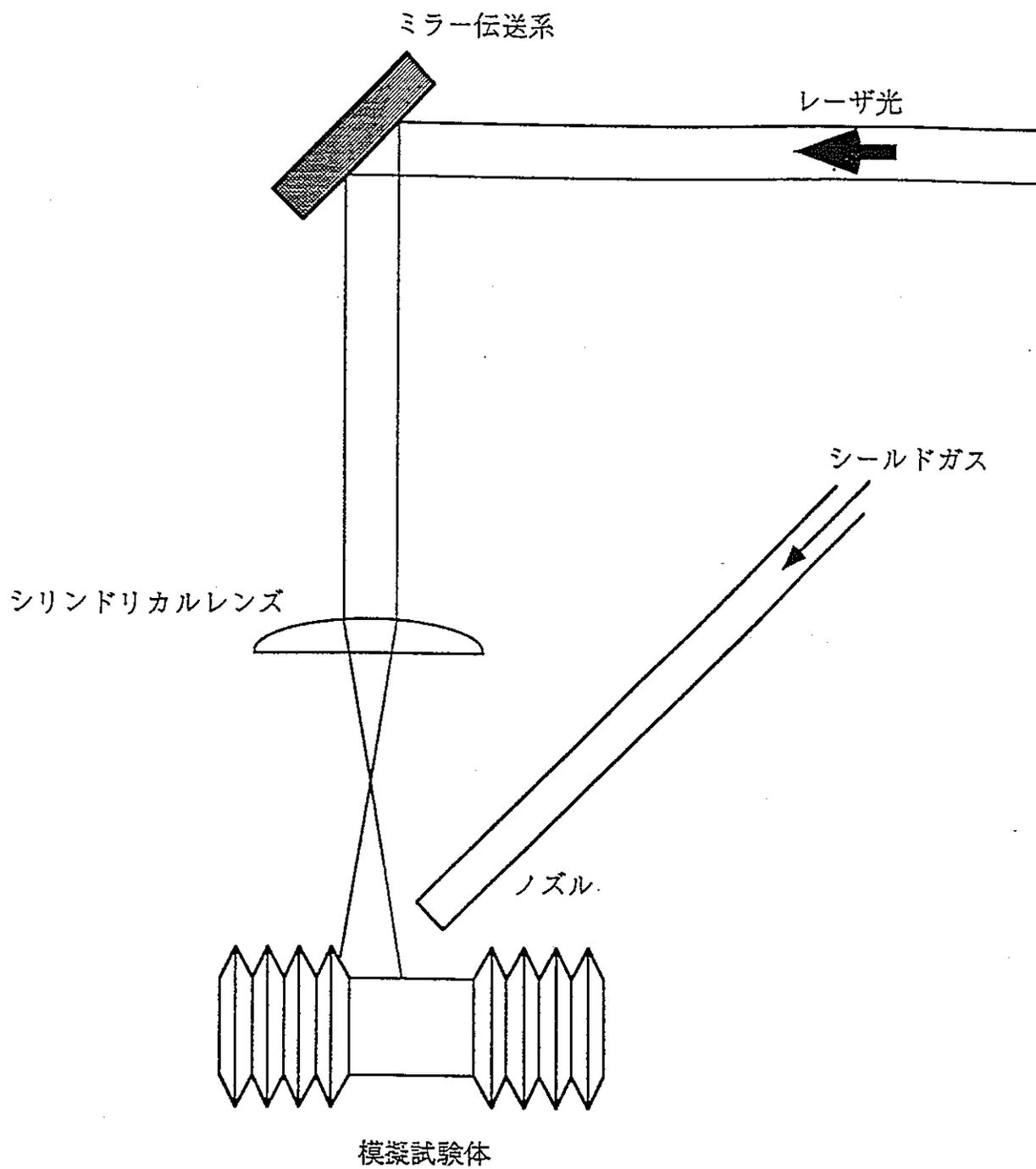


図3.2.2 ボルト模擬試験片照射試験概念図 QスイッチパルスYAGレーザー

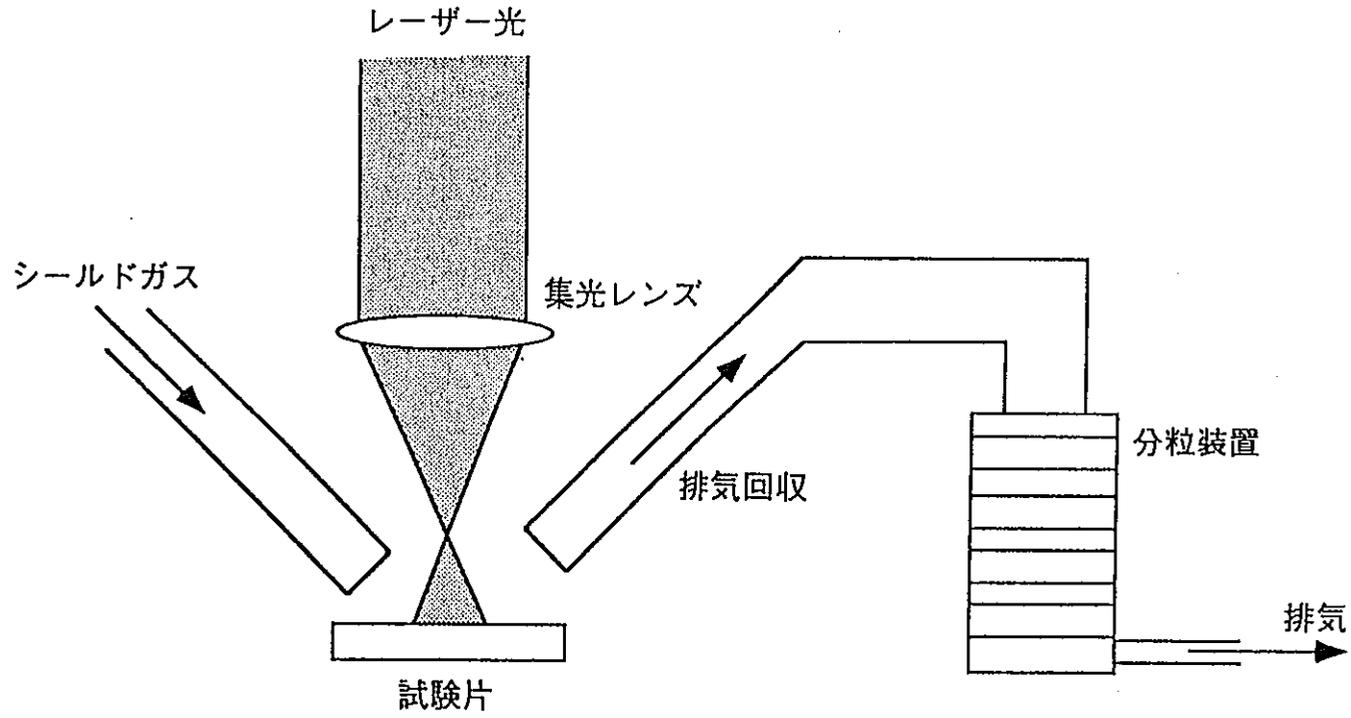
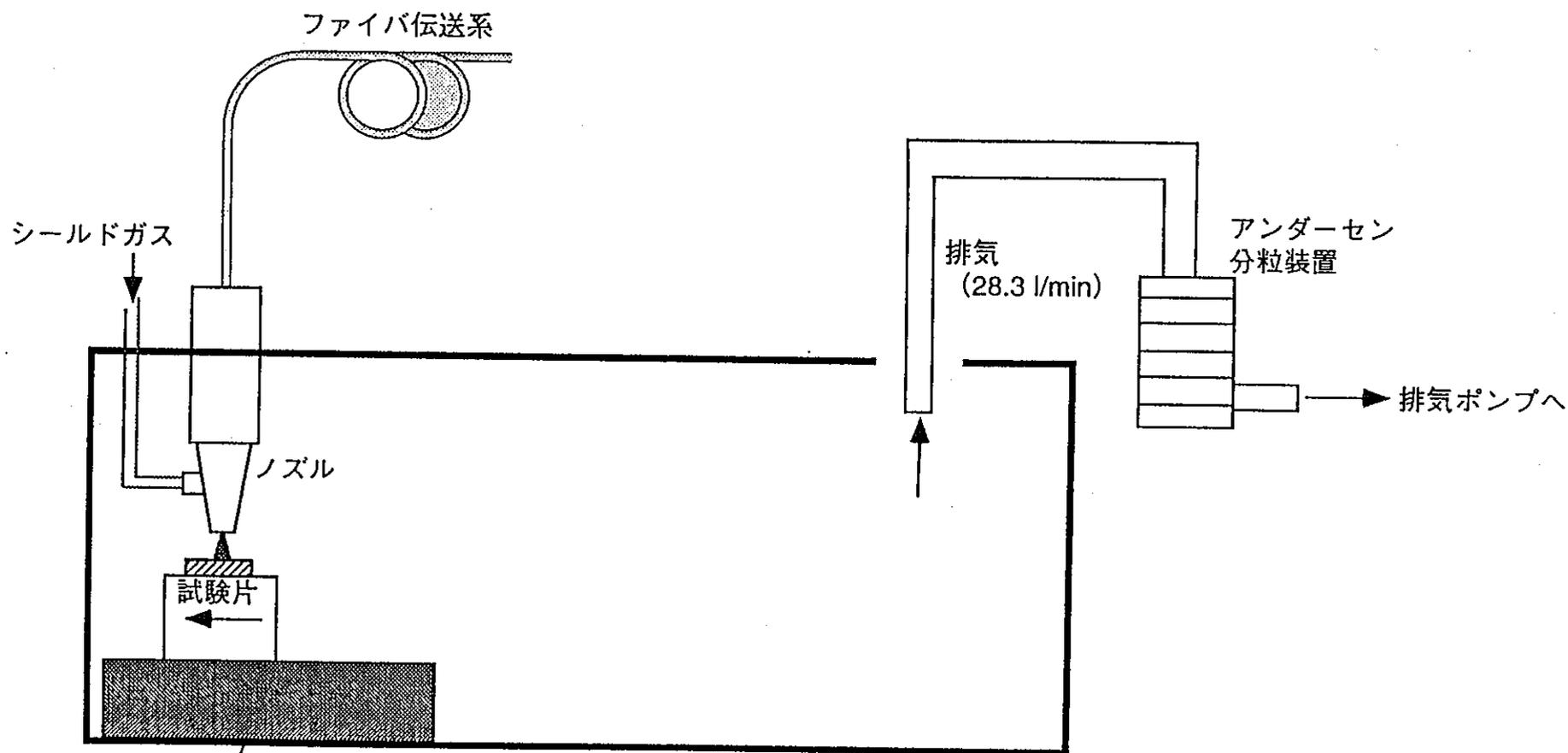


図3.3.1 二次生成物調査試験概念図(Qスイッチパルス)



フード
 寸法 : 長さ1.5 m×高さ0.6 m×幅0.5 m
 材質 : 透明塩ビ

図3.3.2 二次生成物調査試験概念図(ノーマルパルス)

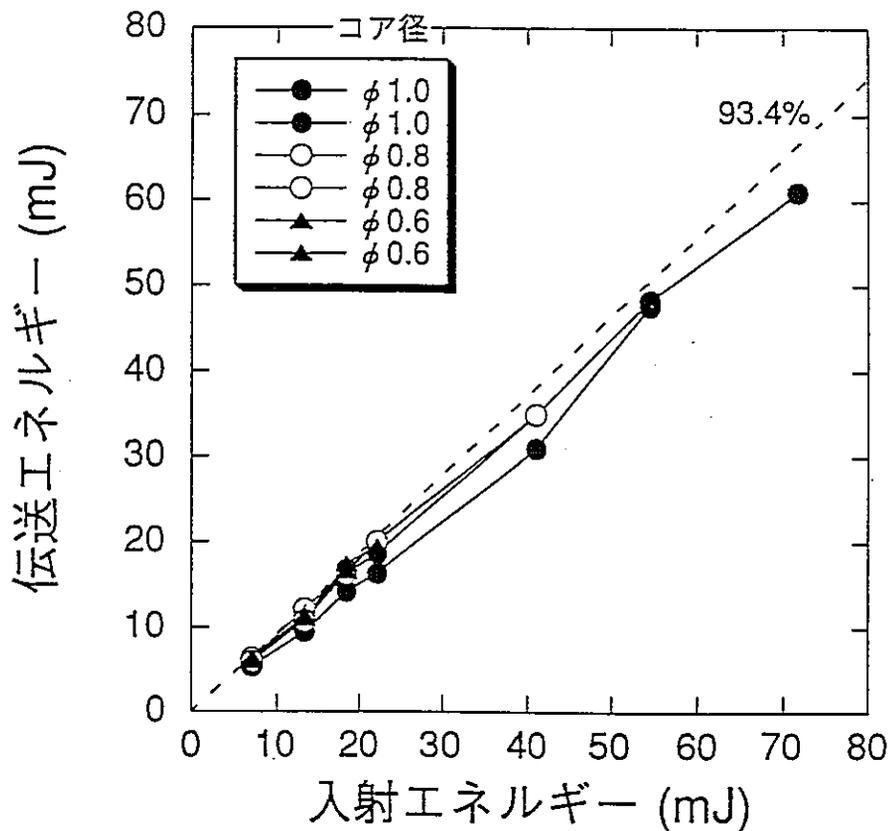


図4.1.1(1) 伝送特性へのファイバコア径の影響 (Fiberguide Industries社製)

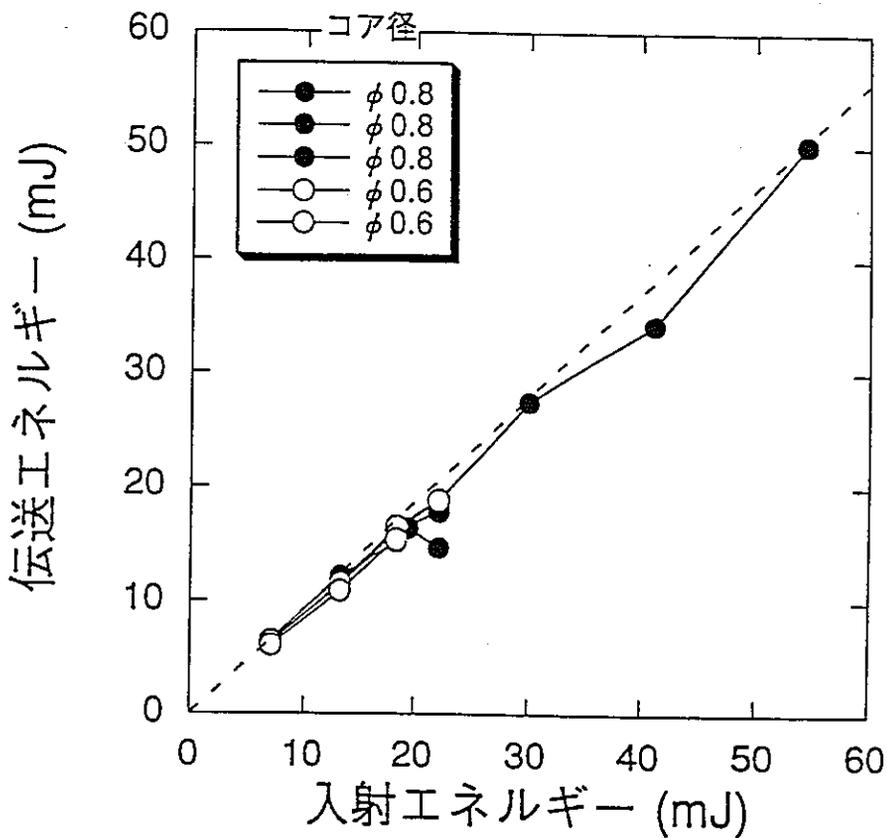


図4.1.1(2) 伝送特性へのファイバコア径の影響 (Meteor Optics社製)

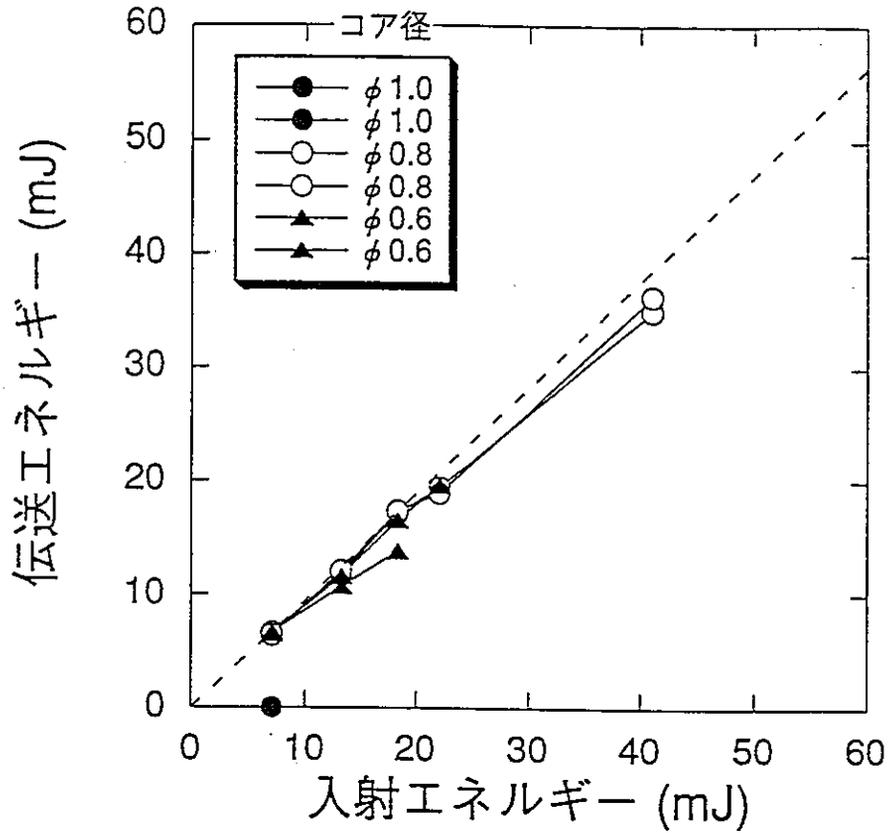


図4.1.1(3) 伝送特性へのファイバコア径の影響 (三菱電線)

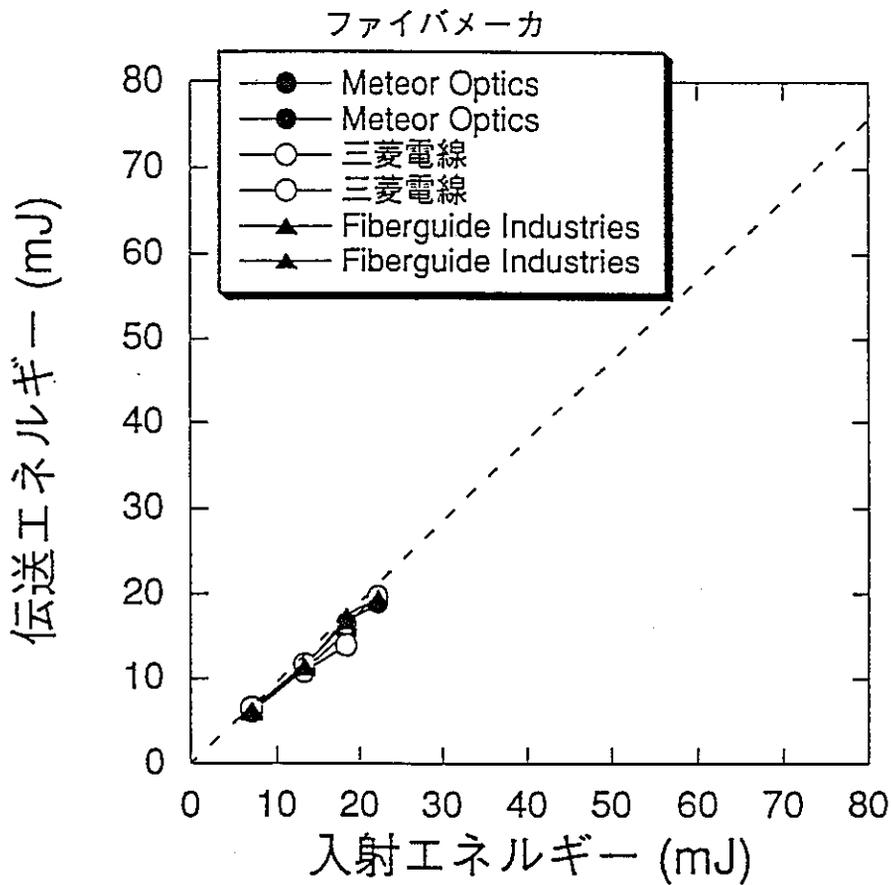


図4.1.1(4) 異なるファイバメーカーによる伝送特性の比較 (コア径: φ0.6mm)

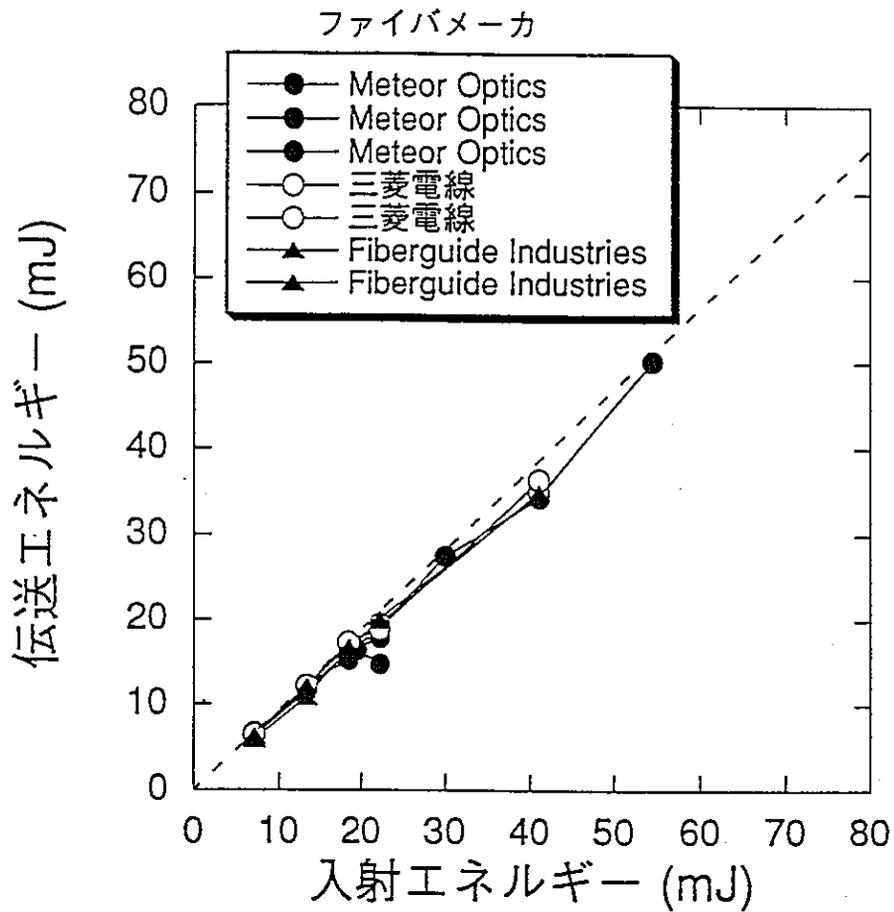


図4.1.1(5) 異なるファイバメーカーによる伝送特性の比較 (コア径: $\phi 0.8\text{mm}$)

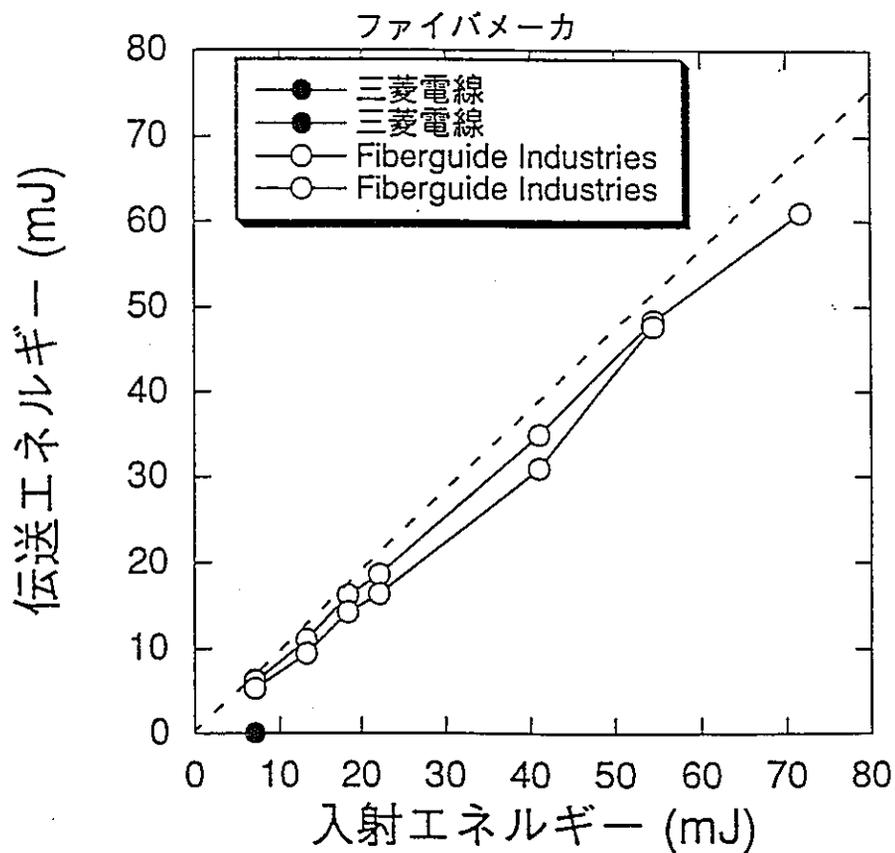


図4.1.1(6) 異なるファイバメーカーによる伝送特性の比較 (コア径: $\phi 1.0\text{mm}$)

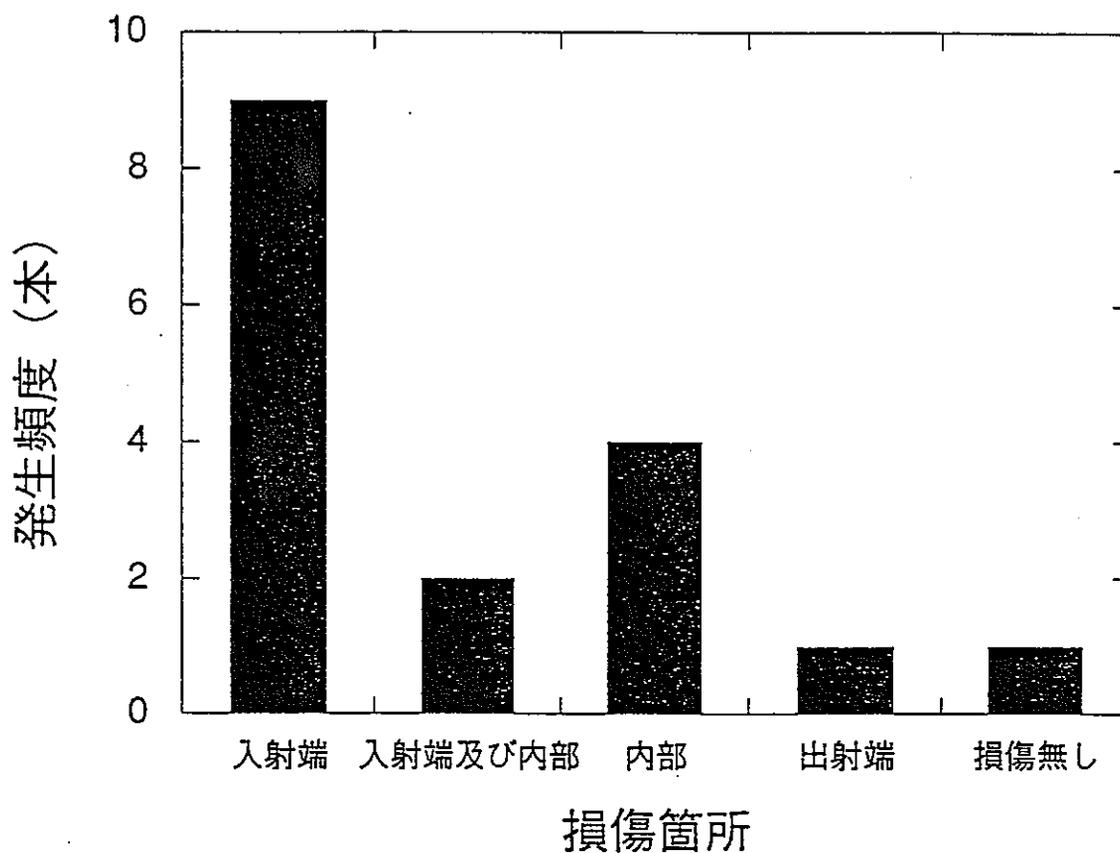
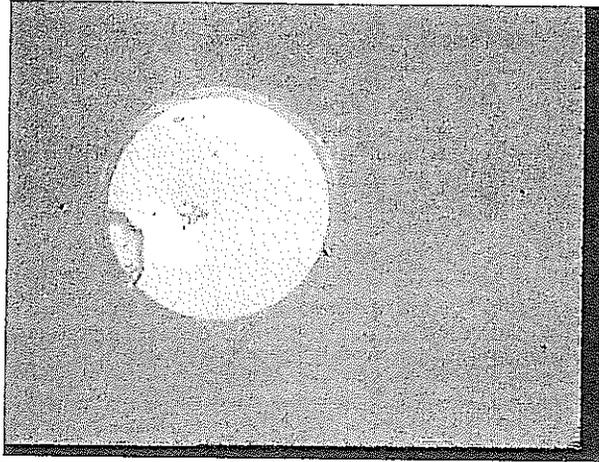
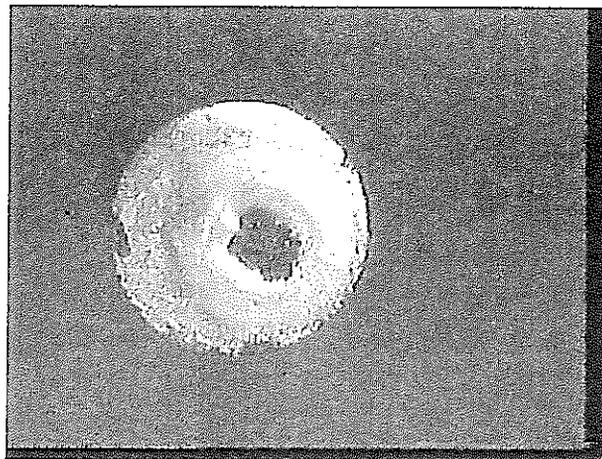


図4.1.1(7) 損傷発生箇所と発生頻度

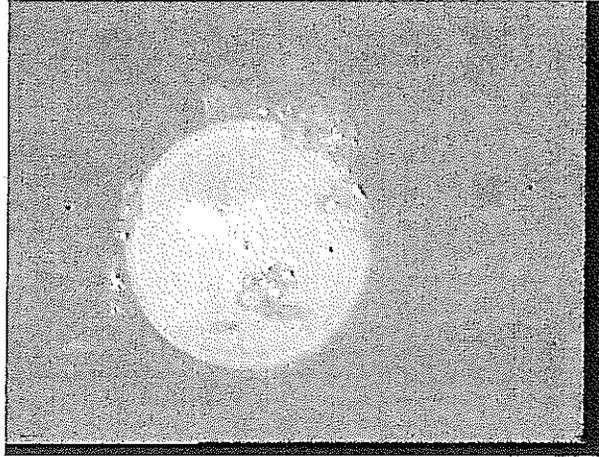


(a) コア径 ϕ 0.6 mm

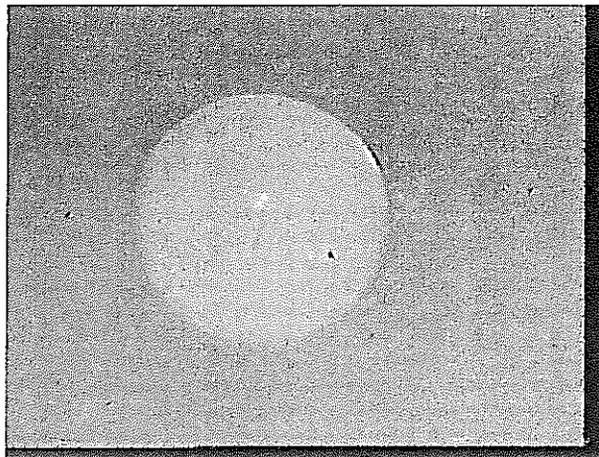


(b) コア径 ϕ 0.8 mm

図 4.1.1(8) 入射端外観写真(Meteor Optics 社製)

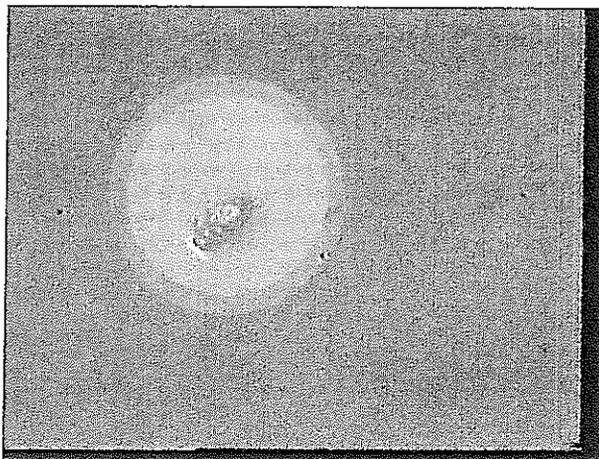


(a) コア径 ϕ 0.6 mm

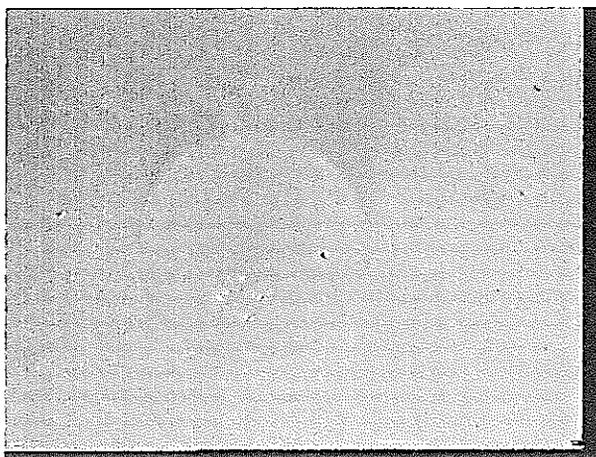


(b) コア径 ϕ 1.0 mm

図 4.1.1(9) 入射端外観写真(Fiberguide Industries 社製)



(a) コア径 ϕ 0.6 mm



(b) コア径 ϕ 0.8 mm

図 4. 1. 1 (10) 入射端外観写真 (三菱電線製)

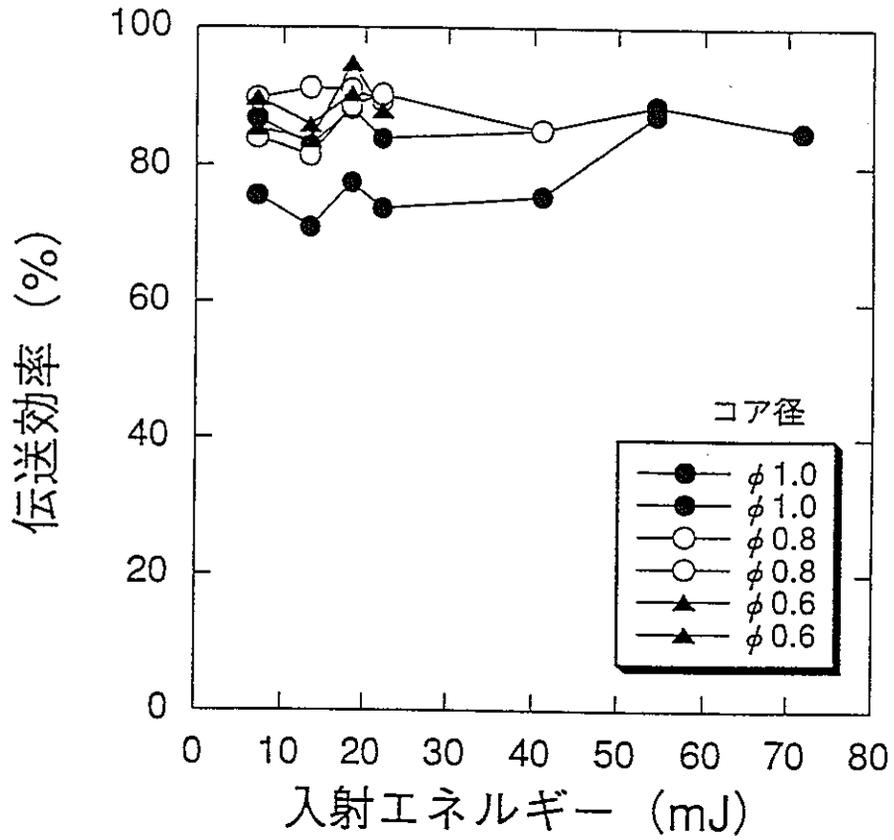


図4.1.1(11) 伝送効率へのファイバコア径の影響 (Fiberguide Industries社製)

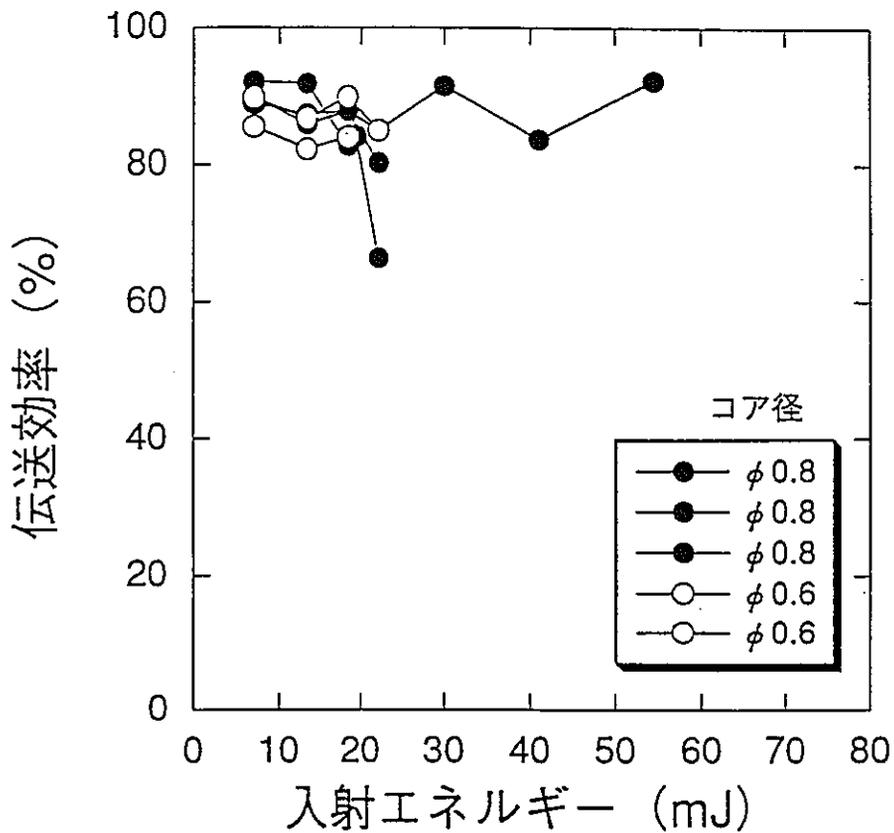


図4.1.1(12) 伝送効率へのファイバコア径の影響 (Meteor Optics社製)

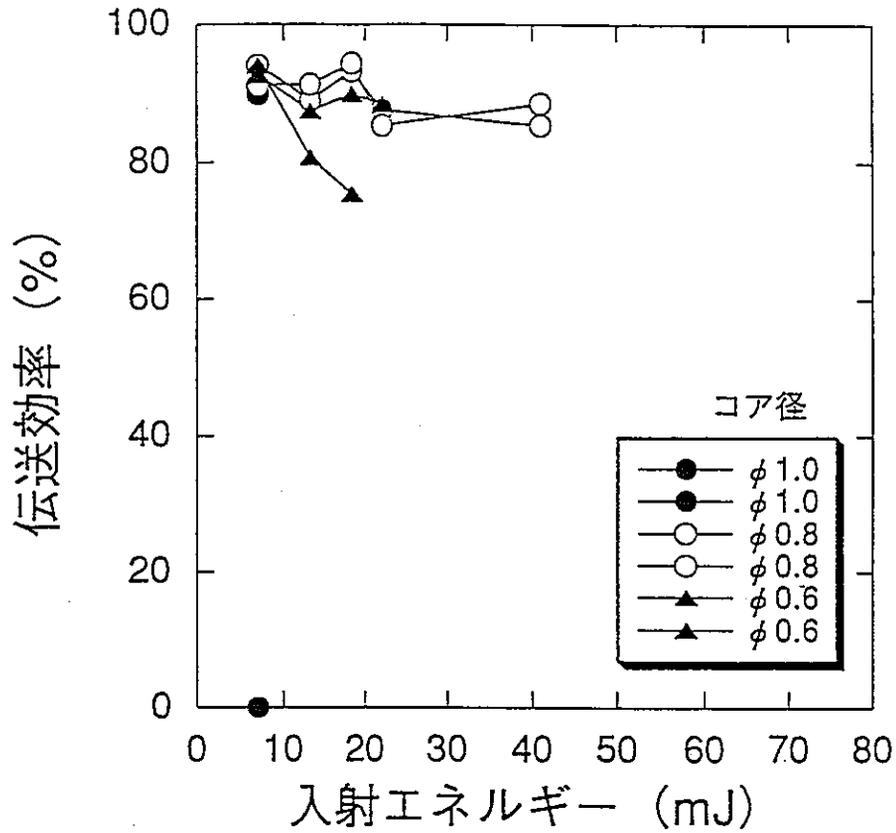


図4.1.1(13) 伝送効率へのファイバコア径の影響 (三菱電線)

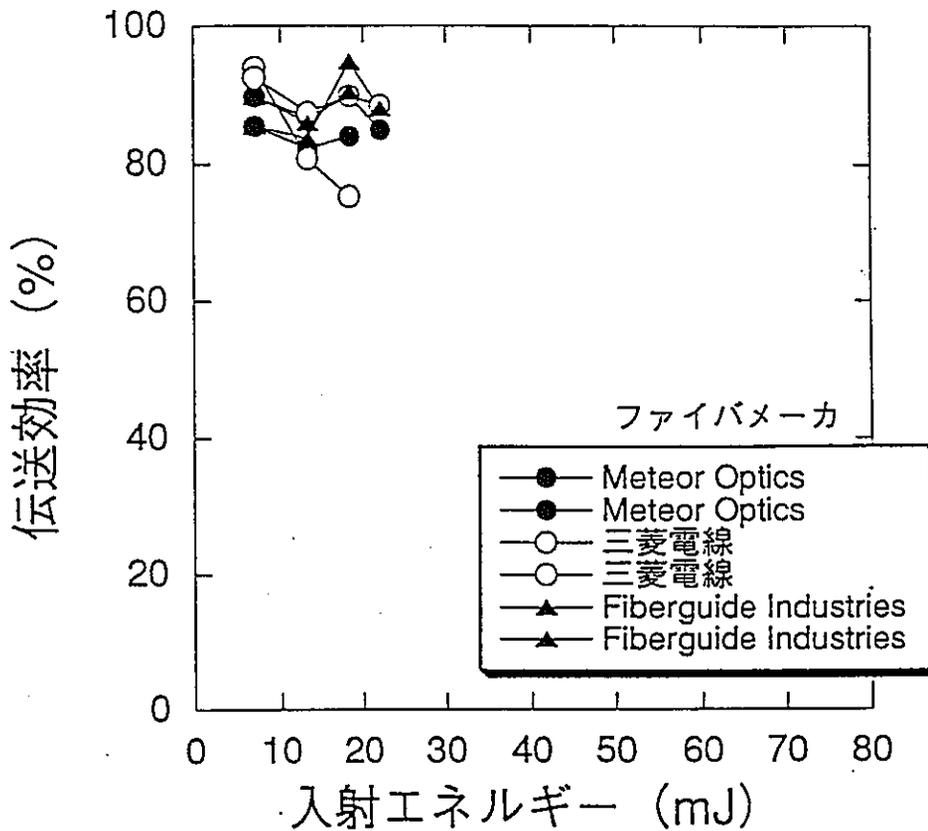


図4.1.1(14) 伝送効率へのファイバコア径の影響 (コア径: φ0.6mm)

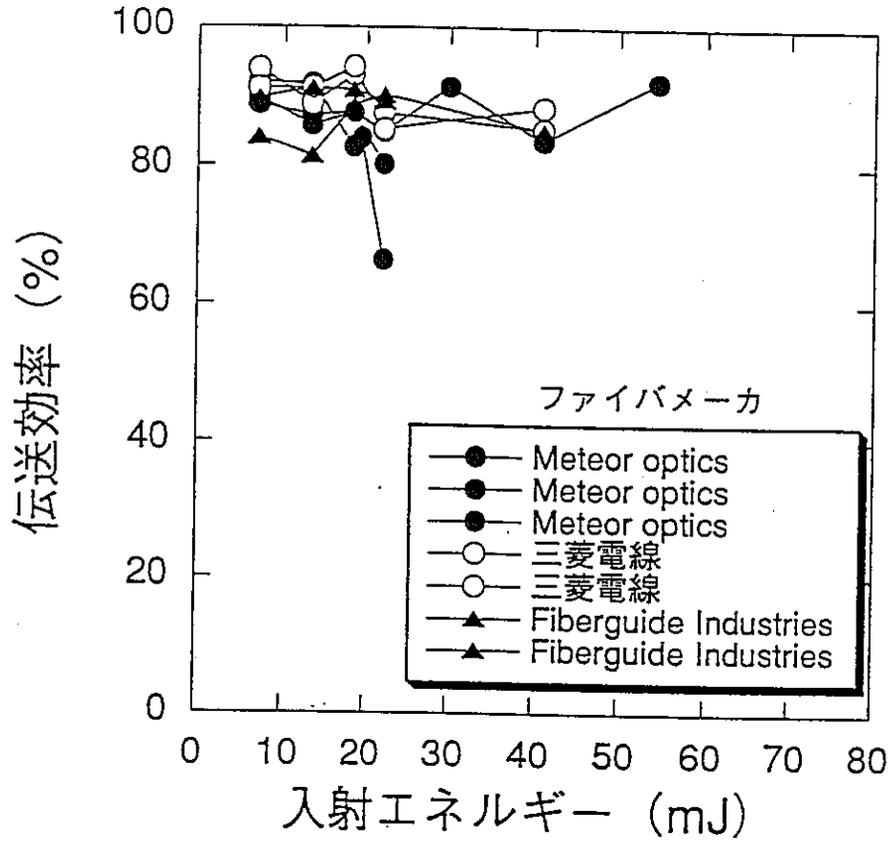


図4.1.1(15) 伝送効率へのファイバコア径の影響 (コア径 : $\phi 0.8\text{mm}$)

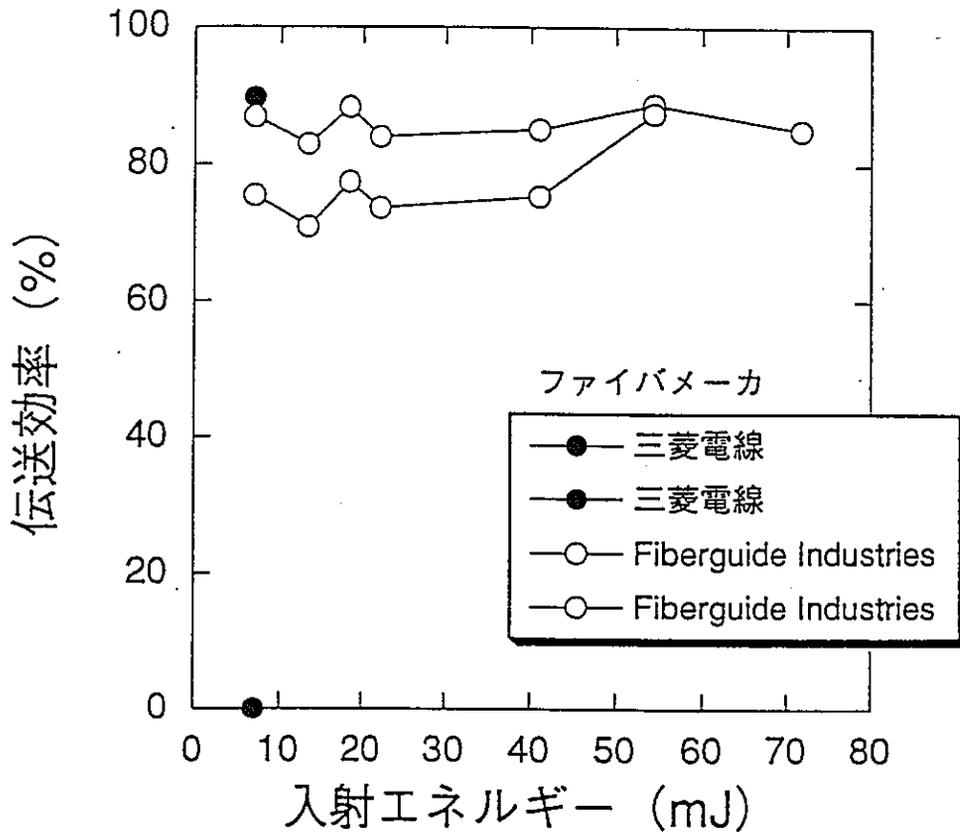


図4.1.1(16) 伝送効率へのファイバコア径の影響 (コア径 : $\phi 1.0\text{mm}$)

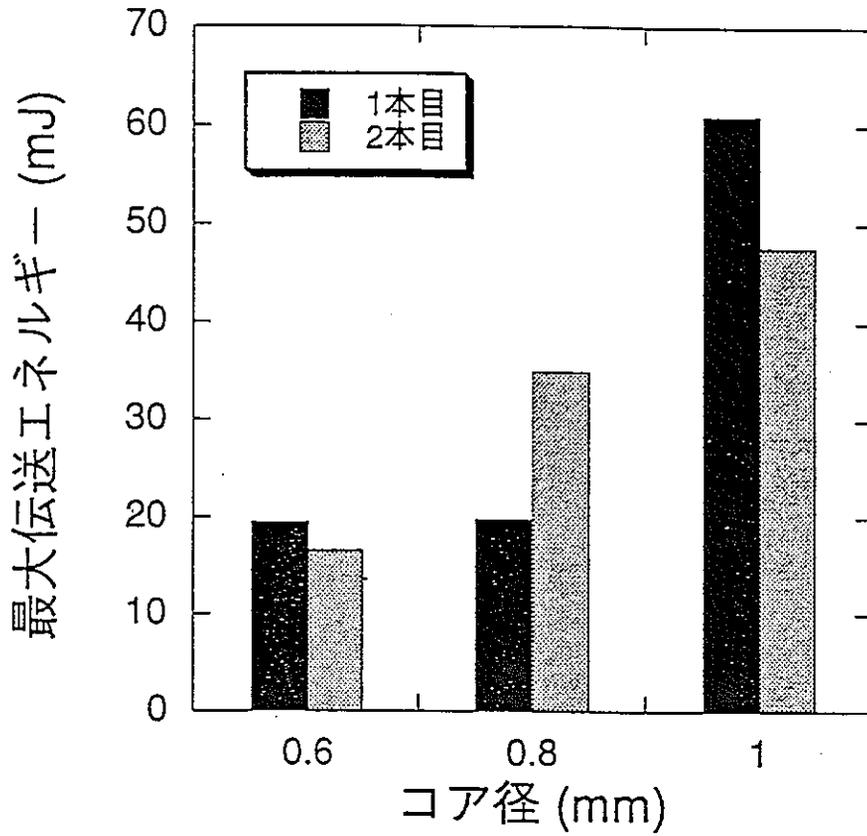


図4.1.1(17) 最大伝送エネルギーへのファイバコア径の影響 (Fiberguide Industries社製)

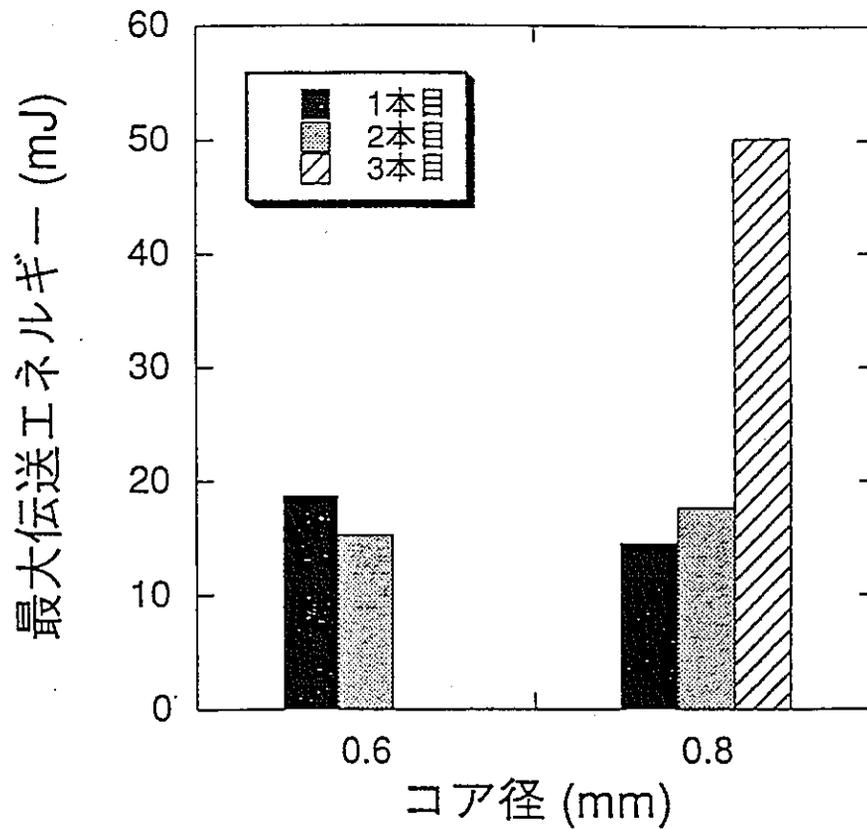


図4.1.1(18) 最大伝送エネルギーへのファイバコア径の影響 (Meteor Optics社製)

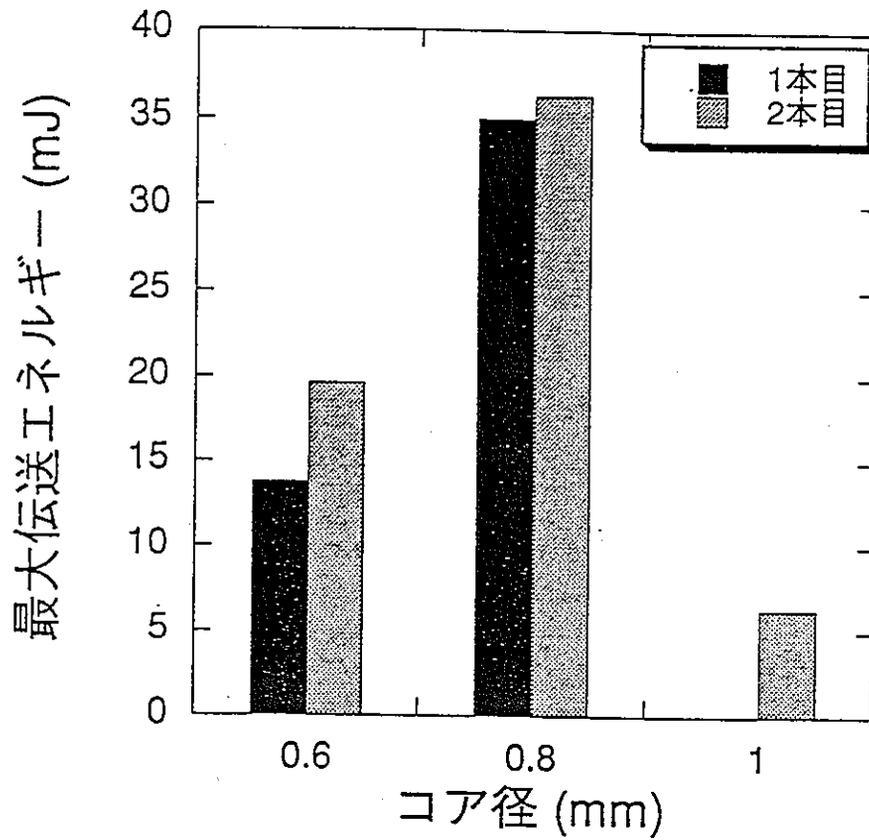


図4.1.1(19) 最大伝送エネルギーへのファイバコア径の影響 (三菱電線)

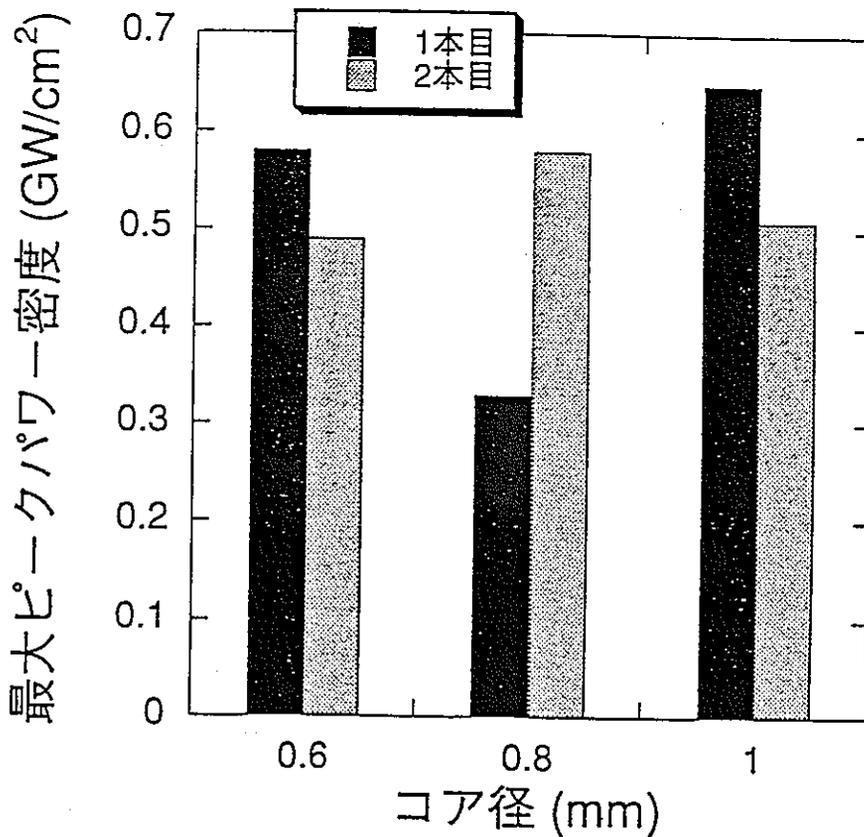


図4.1.1(20) 最大ピークパワー密度へのファイバコア径の影響 (Fiberguide Industries社製)

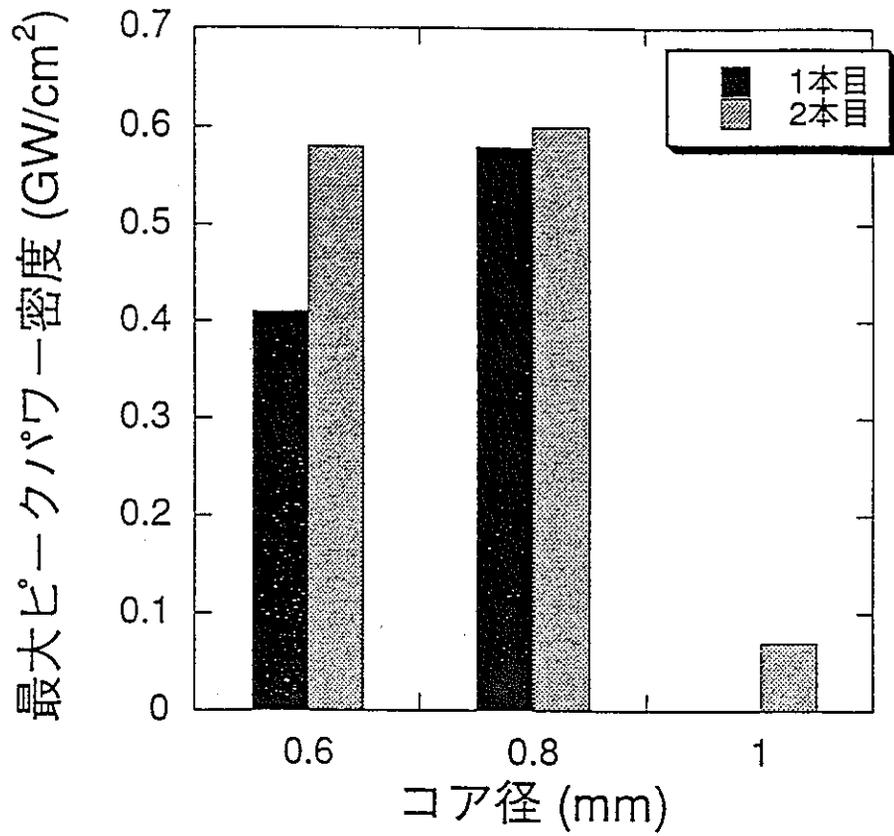


図4.1.1(21) 最大ピークパワー密度へのファイバコア径の影響 (三菱電線)

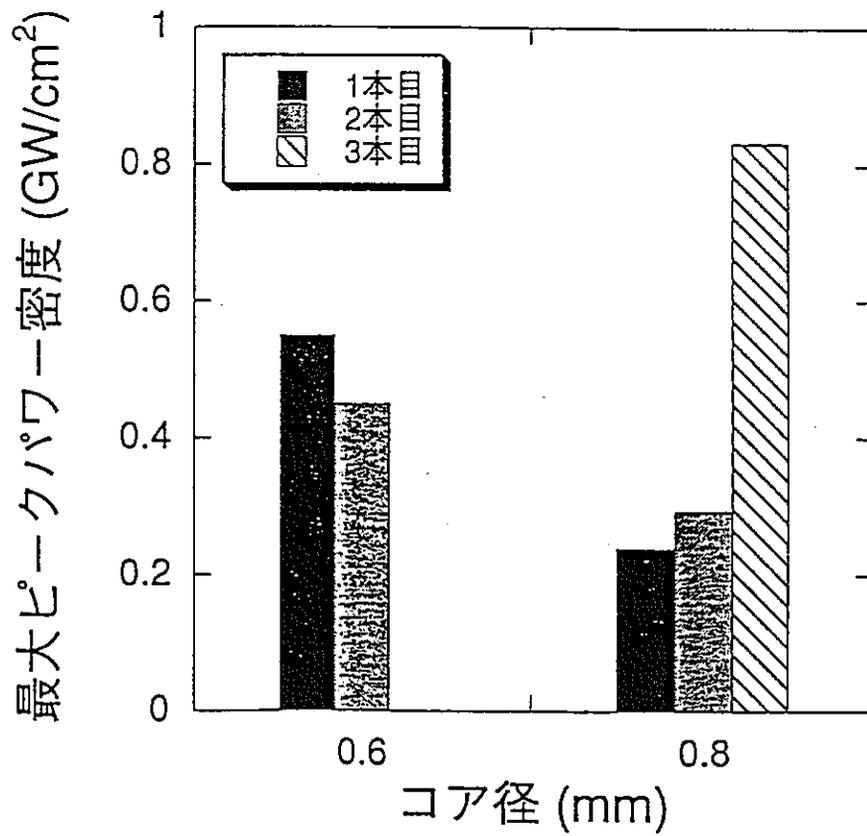


図4.1.1(22) 最大ピークパワー密度へのファイバコア径の影響 (Meteor Optics社製)

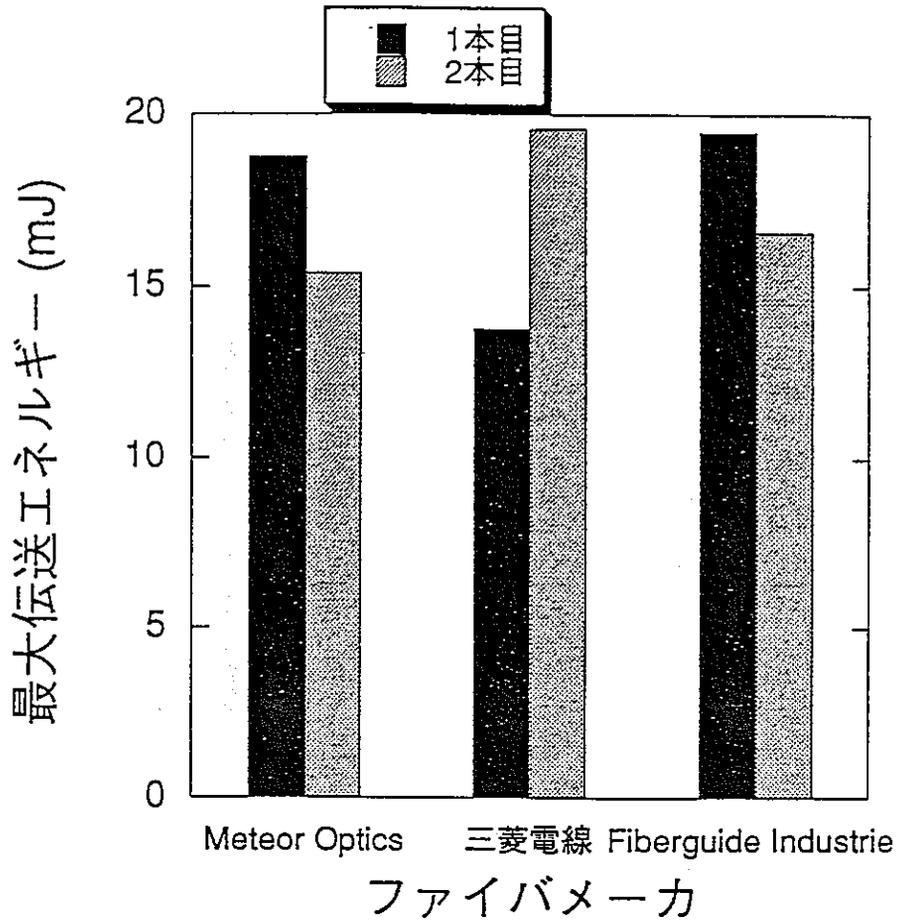


図4.1.1(23) 最大伝送エネルギーへのファイバコア径の影響 (コア径: $\phi 0.6\text{mm}$)

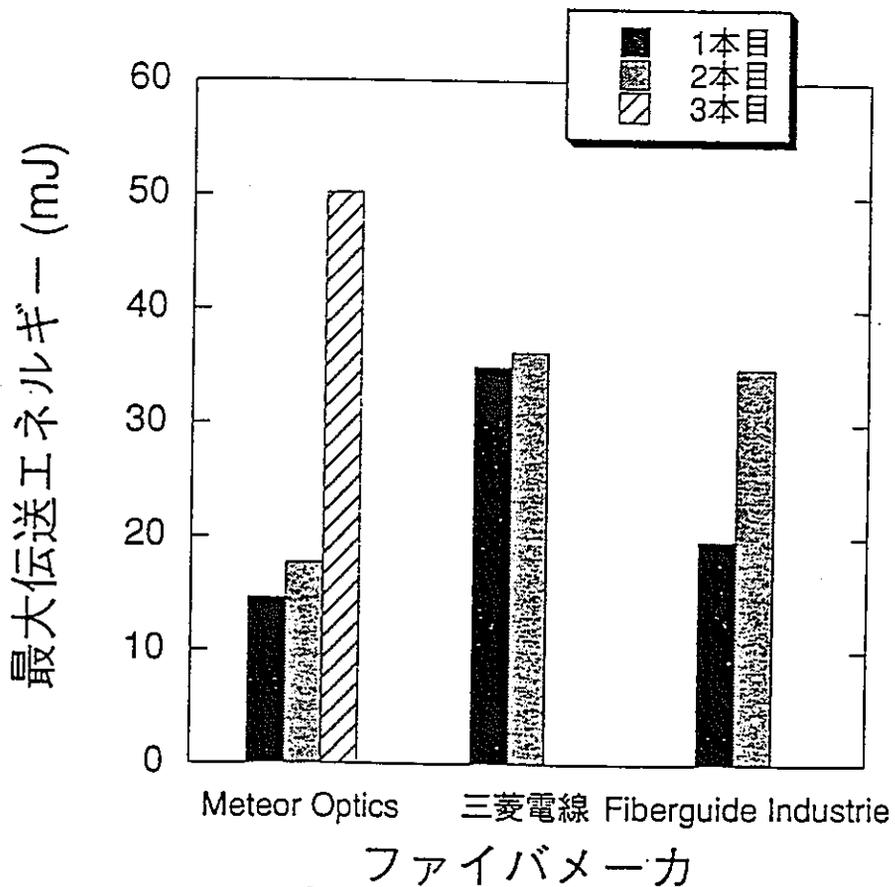


図4.1.1(24) 最大伝送エネルギーへのファイバコア径の影響 (コア径: $\phi 0.8\text{mm}$)

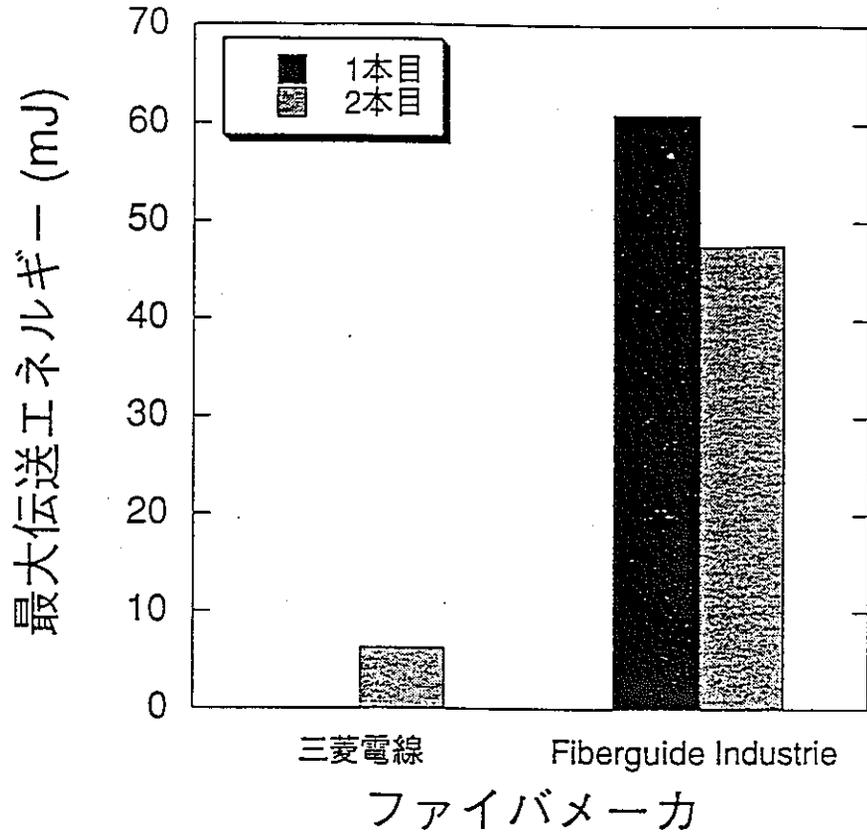


図4.1.1(25) 最大伝送エネルギーへのファイバコア径の影響 (コア径: $\phi 1.0\text{mm}$)

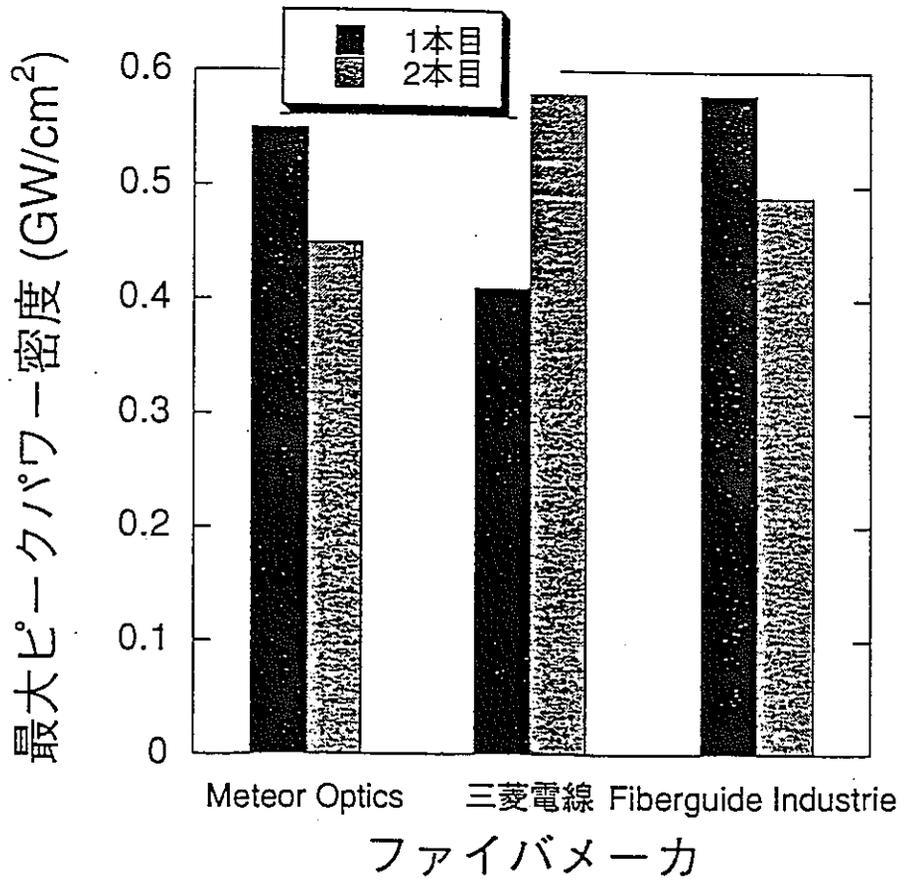


図4.1.1(26) ファイバメーカーによる最大ピークパワー密度の違い (コア径: $\phi 0.6\text{mm}$)

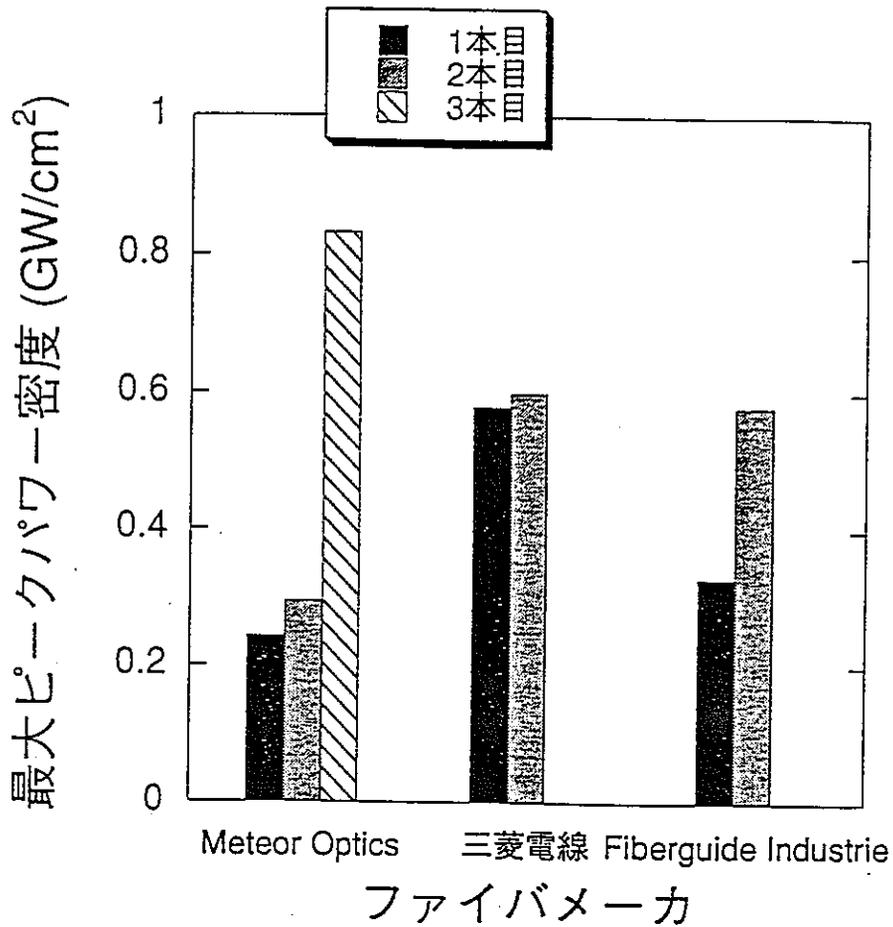


図4.1.1(27) ファイバメーカーによる最大ピークパワー密度の違い (コア径: $\phi 0.8\text{mm}$)

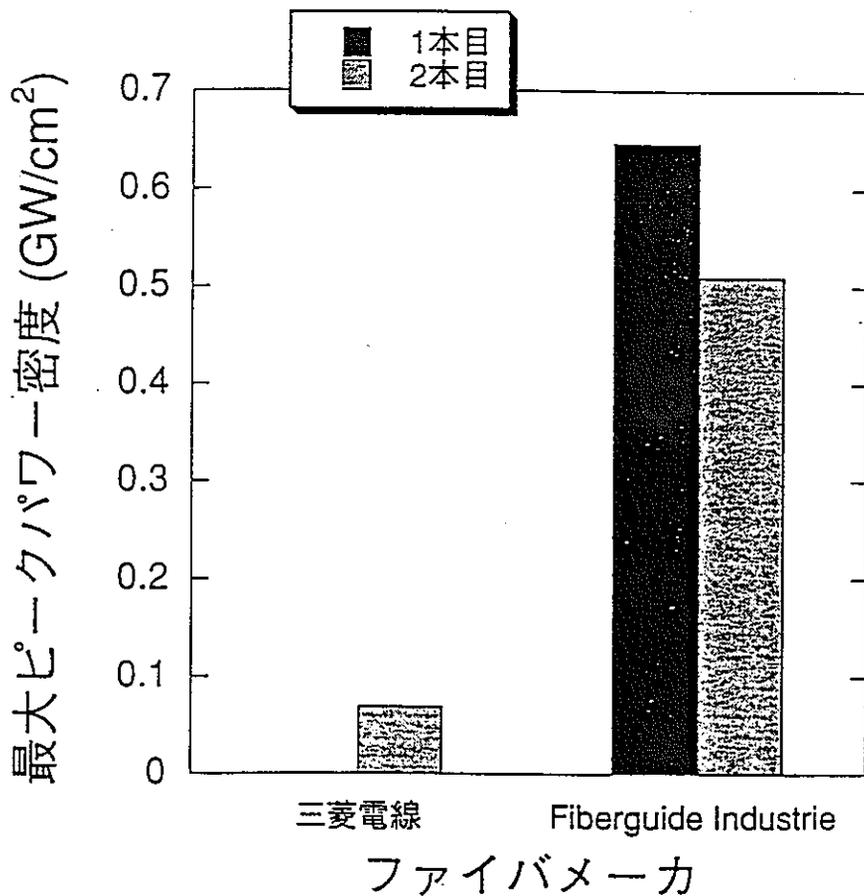


図4.1.1(28) ファイバメーカーによる最大ピークパワー密度の違い (コア径: $\phi 1.0\text{mm}$)

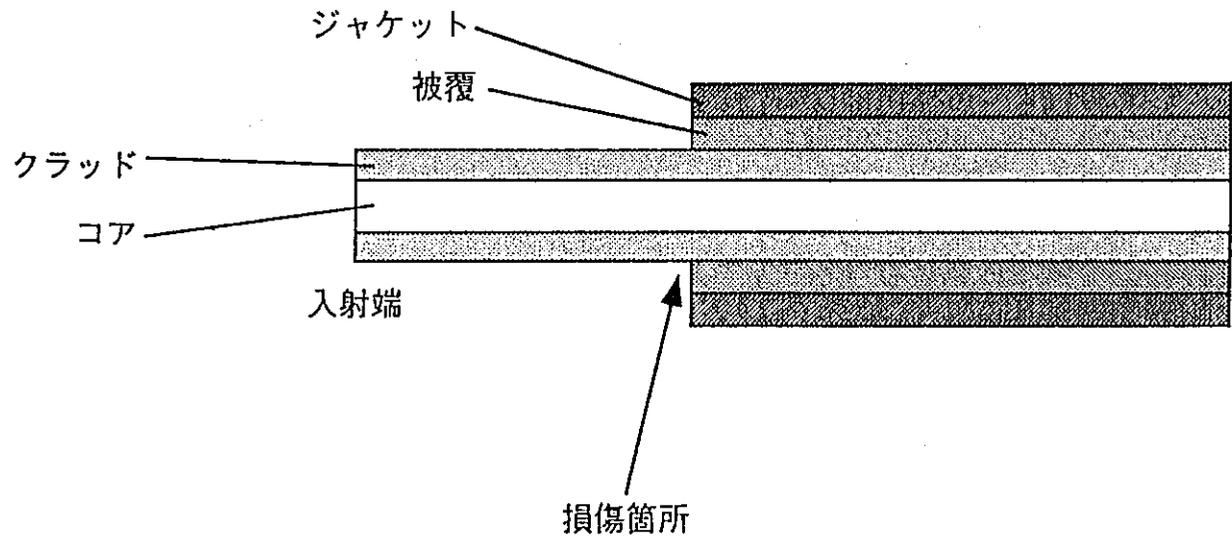


図4.1.1(29) 損傷箇所模式図 (三菱電線製、コア径 $\phi 1.0\text{mm}$)

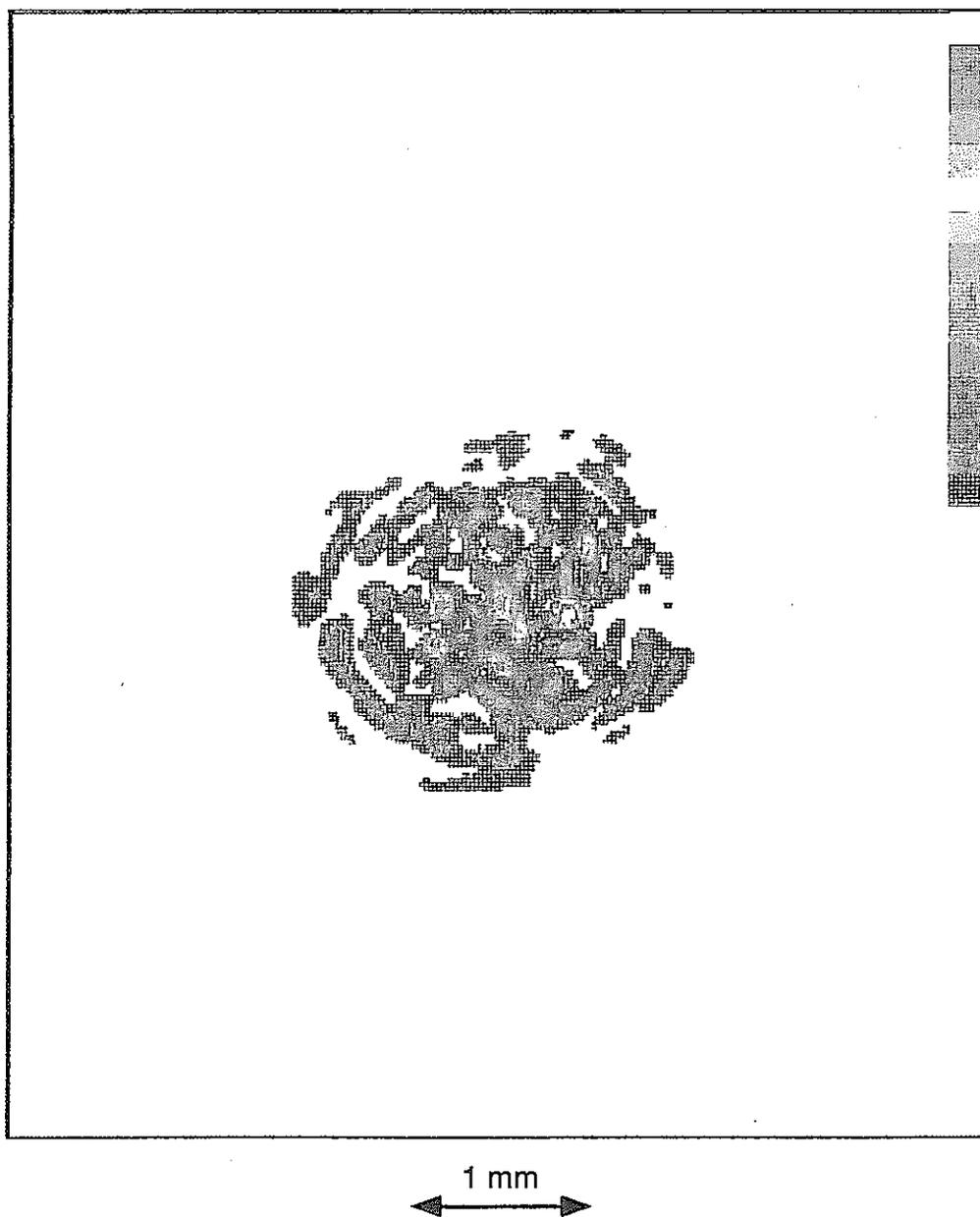


図 4. 1. 2(1) 伝送ビームプロファイル(コア径 0. 6mm)



図 4. 1. 2(2) 伝送ビームプロファイル(コア径 0. 8mm)

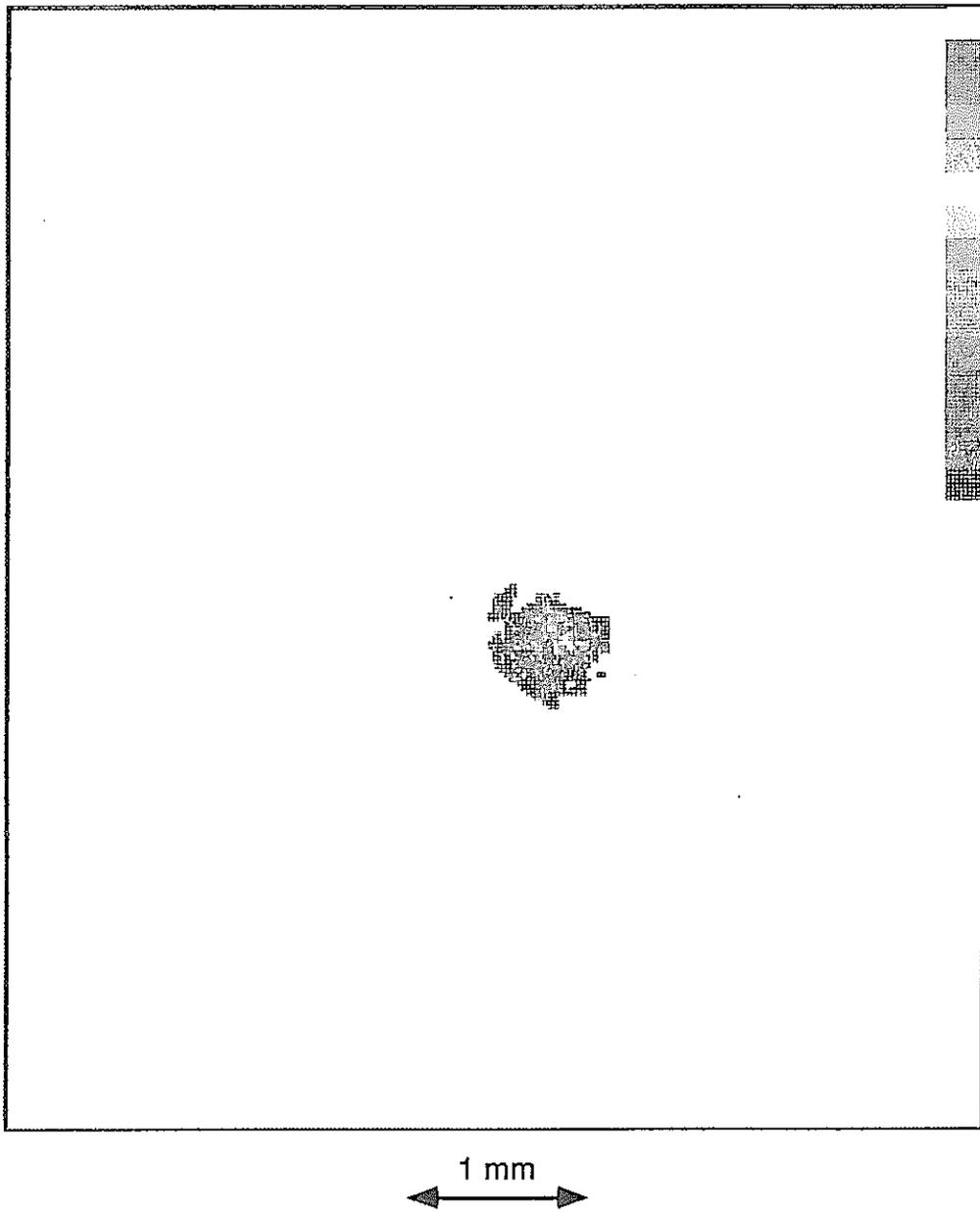


図 4. 1. 3 (1) 伝送ビーム集光スポットプロファイル(コア径 0. 6mm)

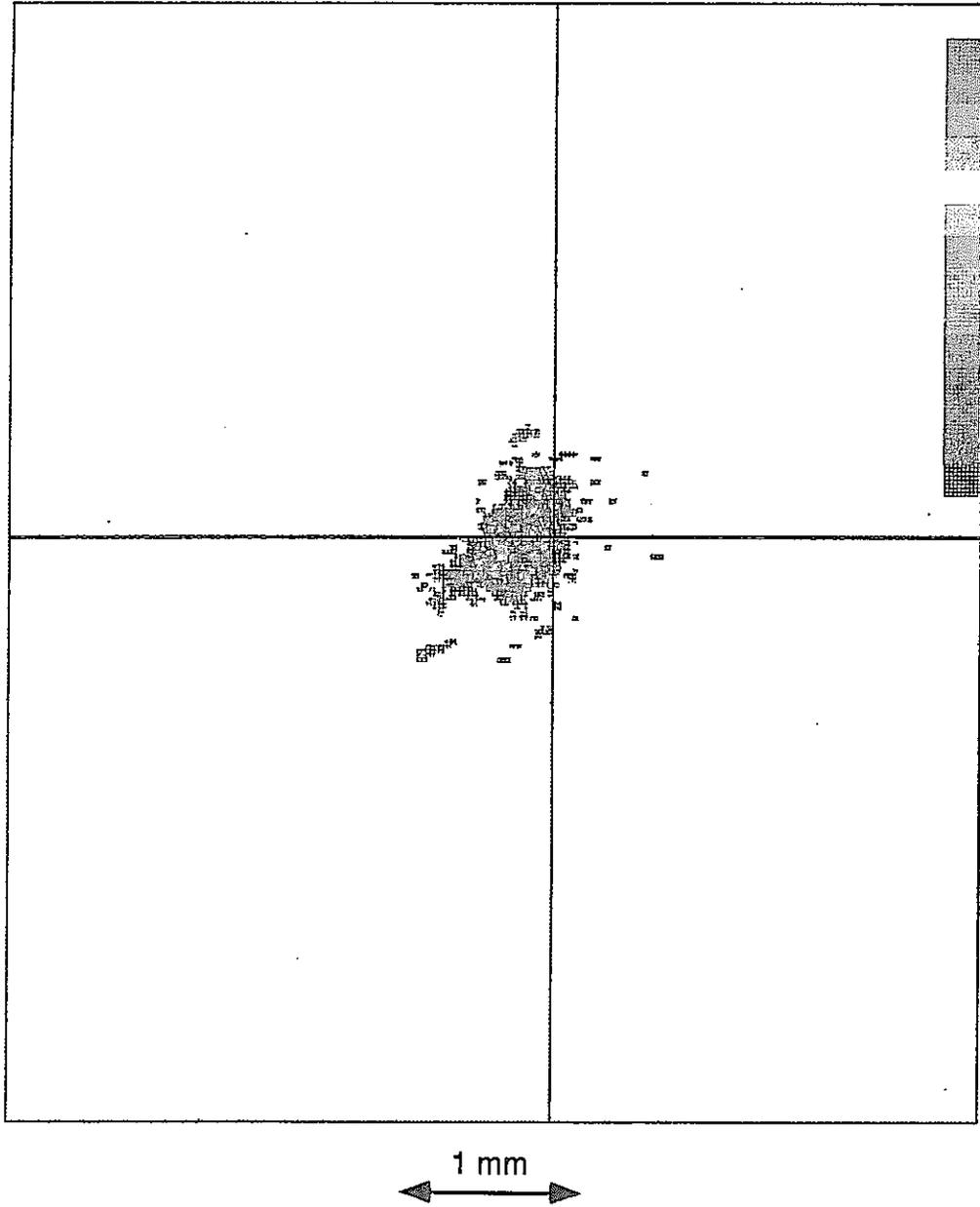


図 4. 1. 3 (2) 伝送ビーム集光スポットプロファイル(コア径 0. 8mm)

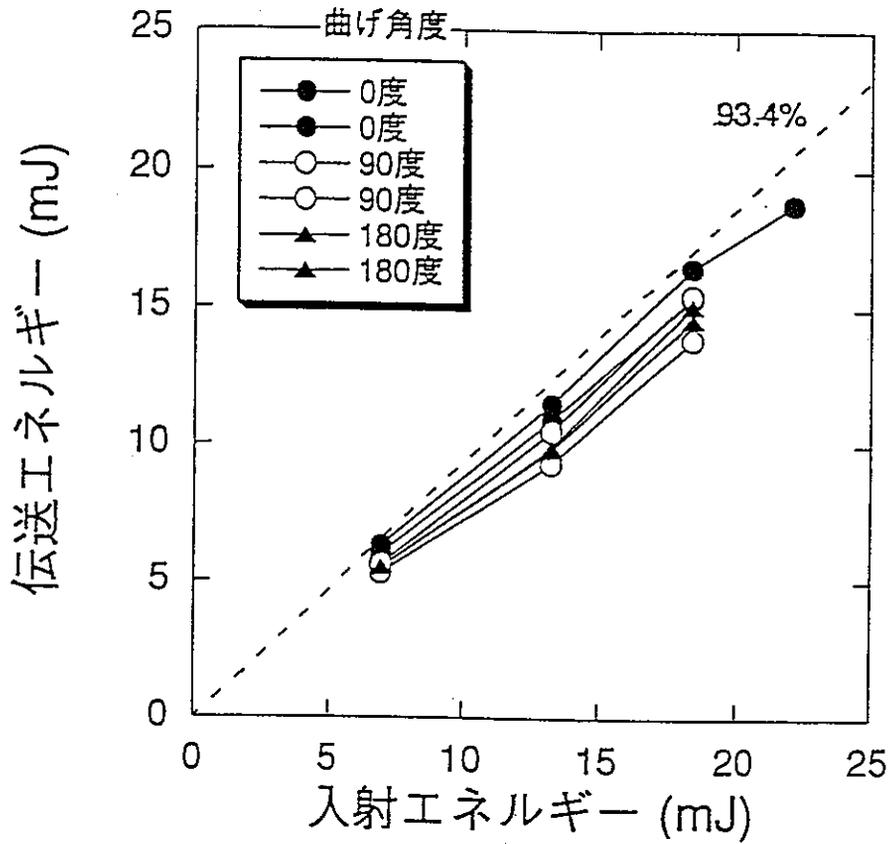


図4.1.4(1) 伝送エネルギーへのファイバ曲げ角度の影響

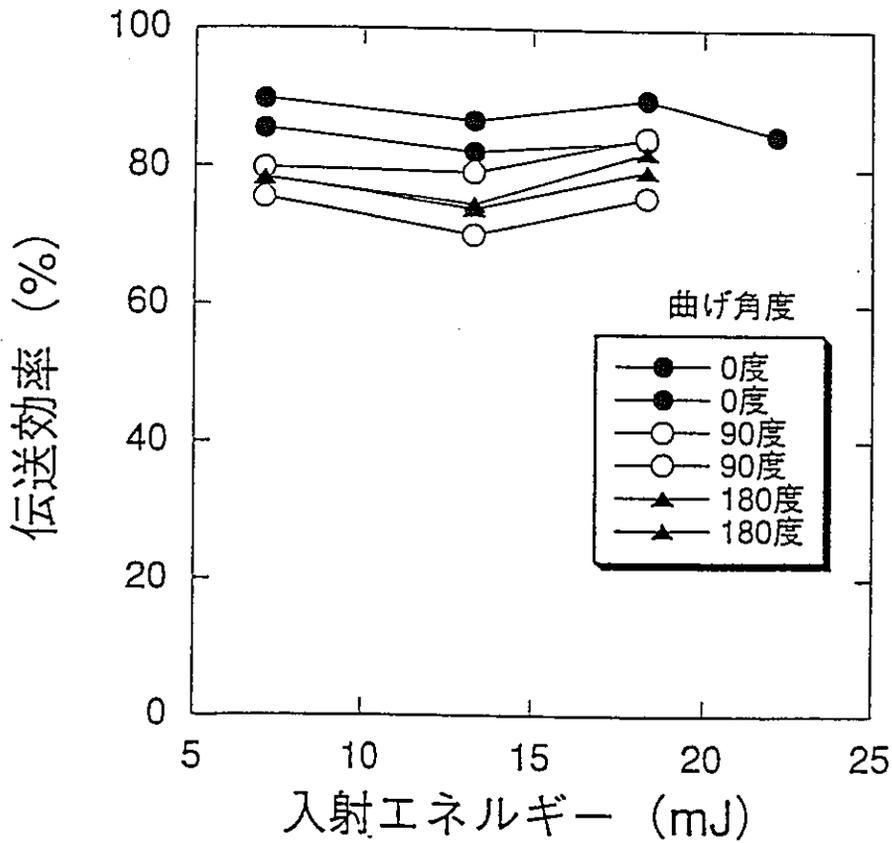


図4.1.4(2) 伝送効率へのファイバ曲げ角度の影響

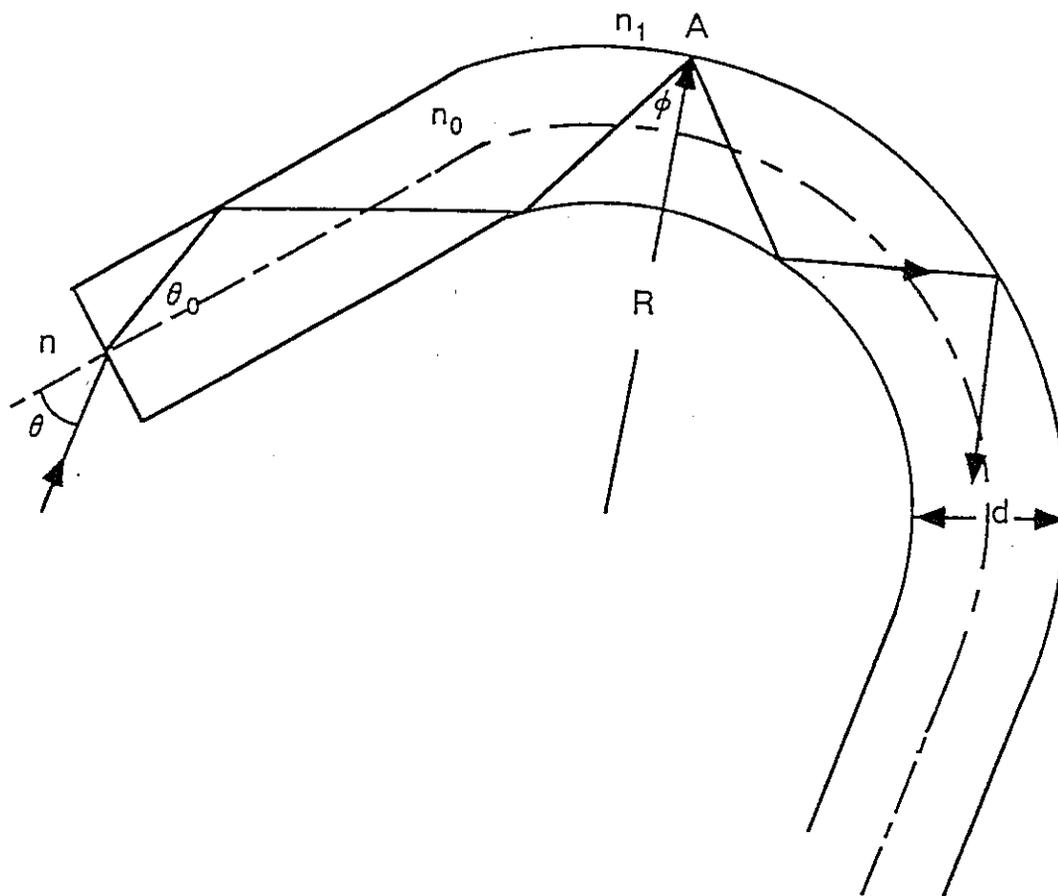


図4.1.4(3) 彎曲ファイバーの幾何学的解析

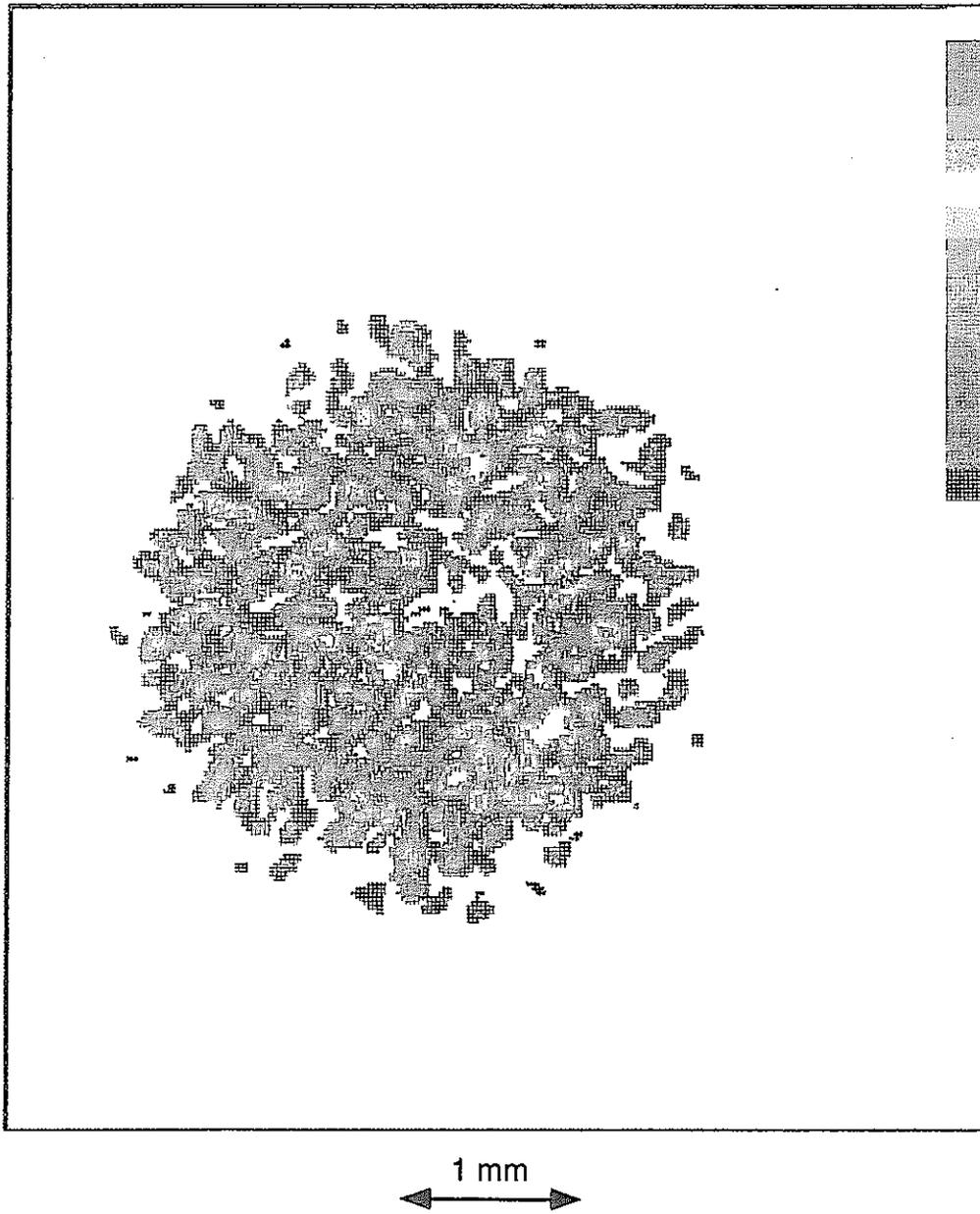


図 4. 1. 4(4) 曲げ角度 90 度の場合の伝送ビームプロファイル(コア径 0. 6mm)

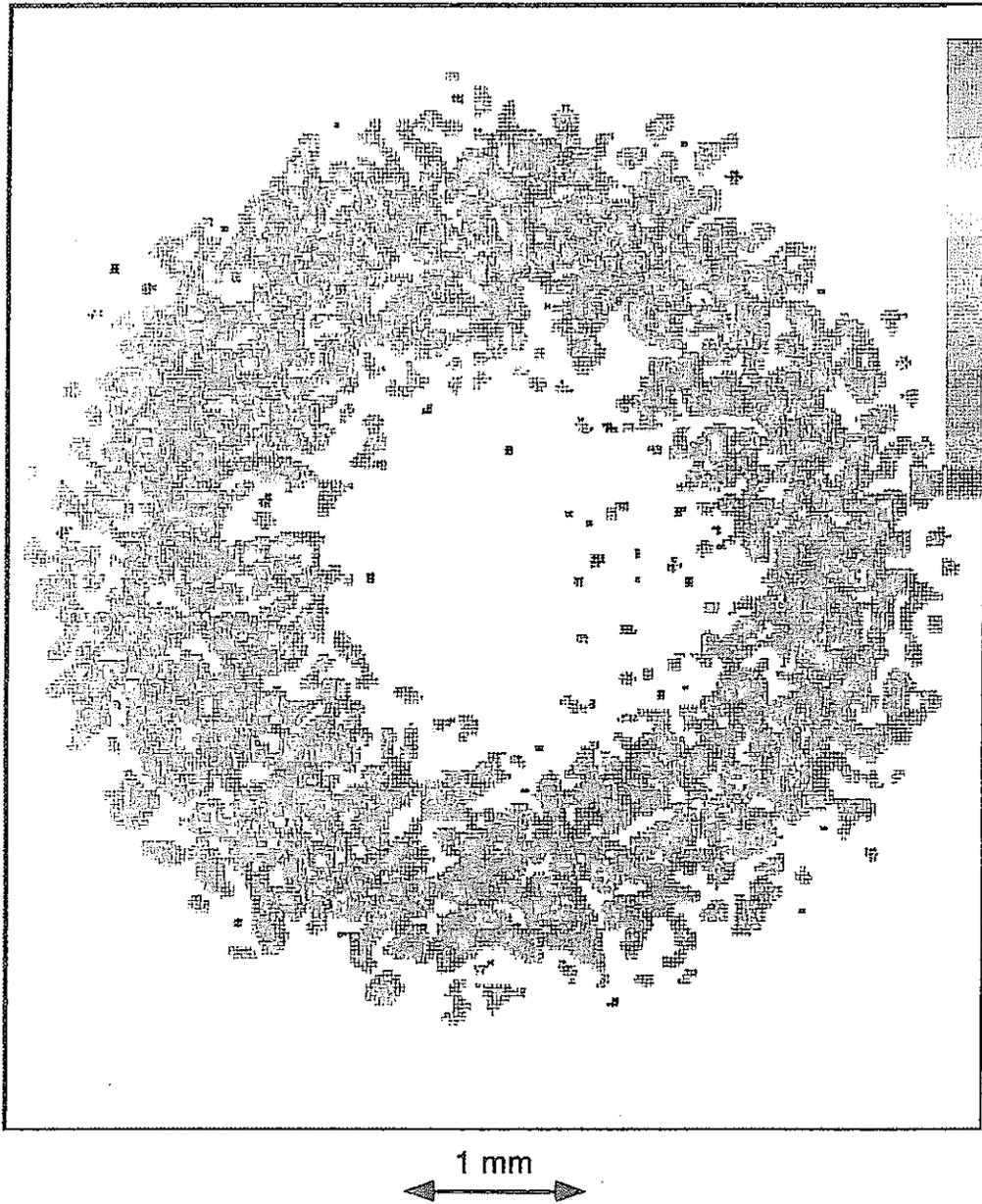


図 4. 1. 4(5) 曲げ角度 180 度の場合の伝送ビームプロファイル(コア径 0. 6mm)

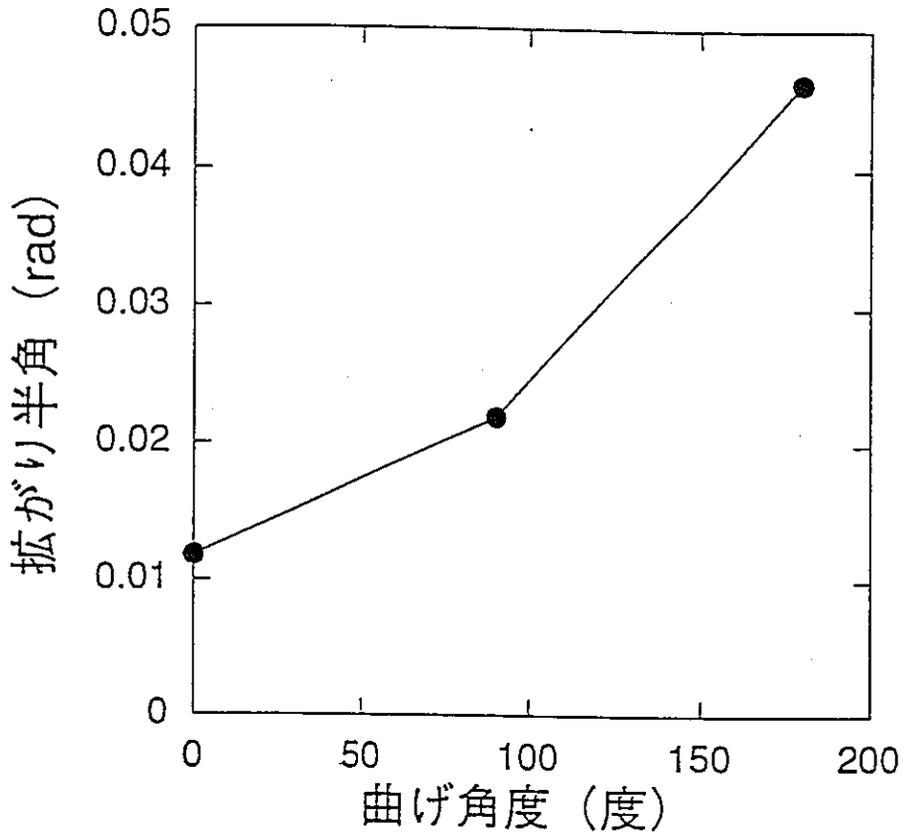


図4.1.4(6) 拡がり半角へのファイバ曲げ角度の影響

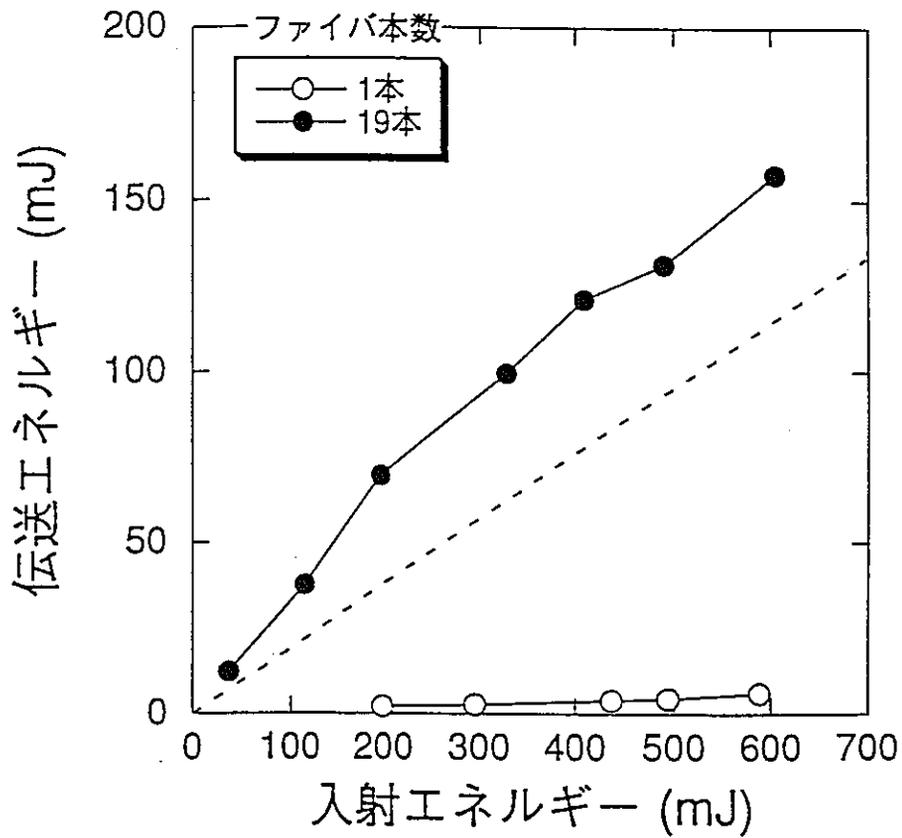


図4.1.5(1) バンドルファイバの伝送特性

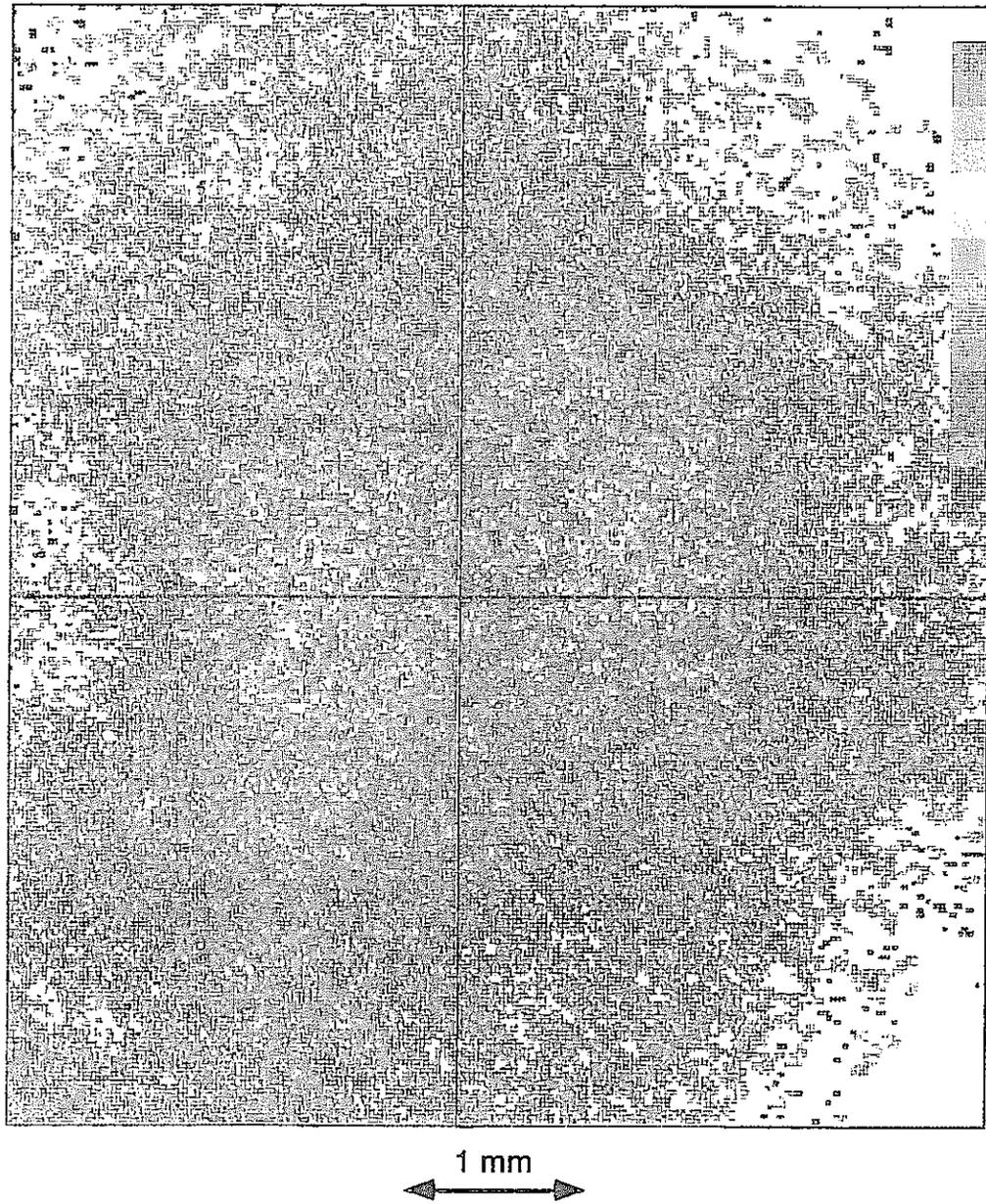


図 4.1.5(2) バンドルファイバ伝送ビームプロファイル

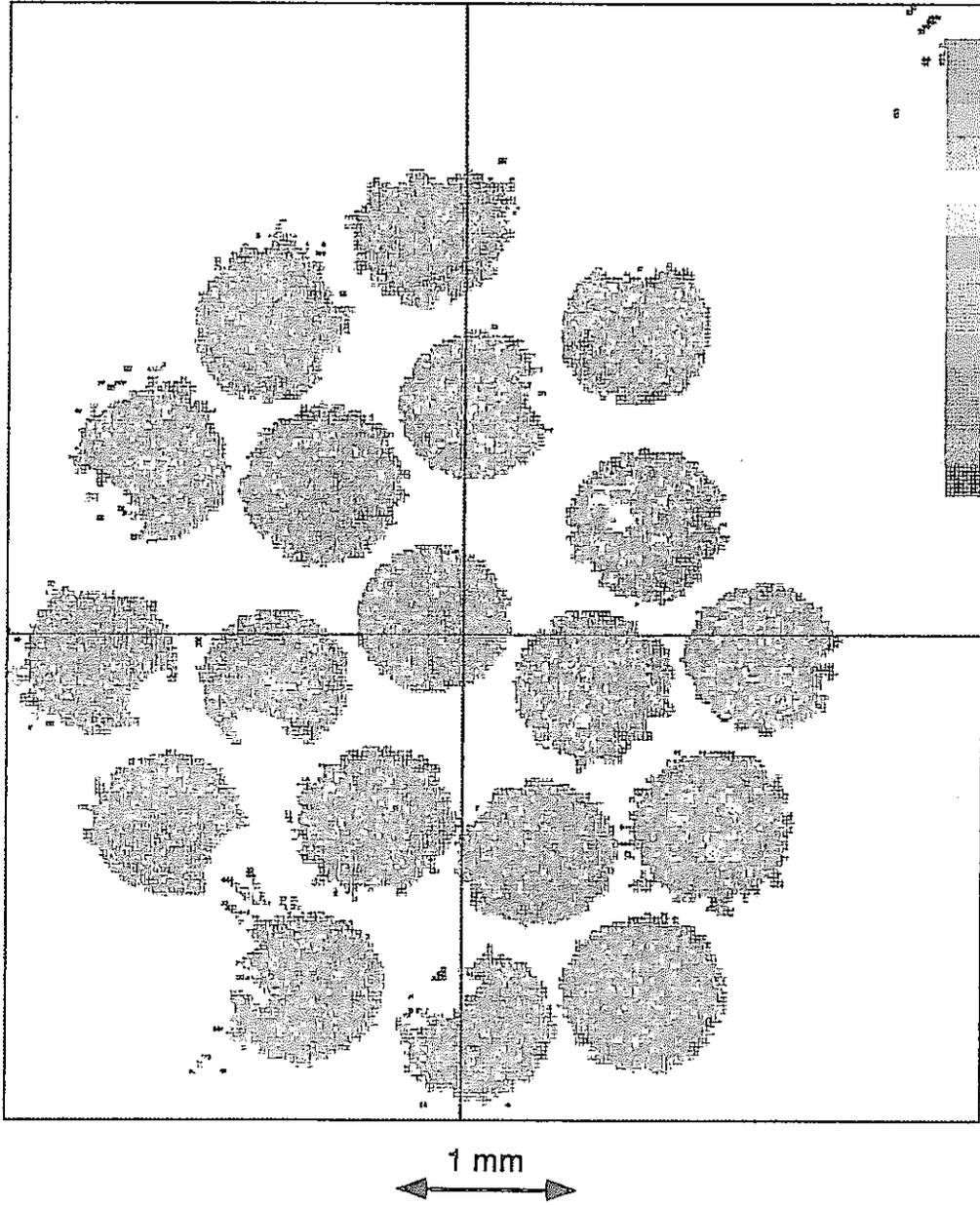


図 4.1.5(3) バンドルファイバ伝送ビーム集光スポットプロファイル

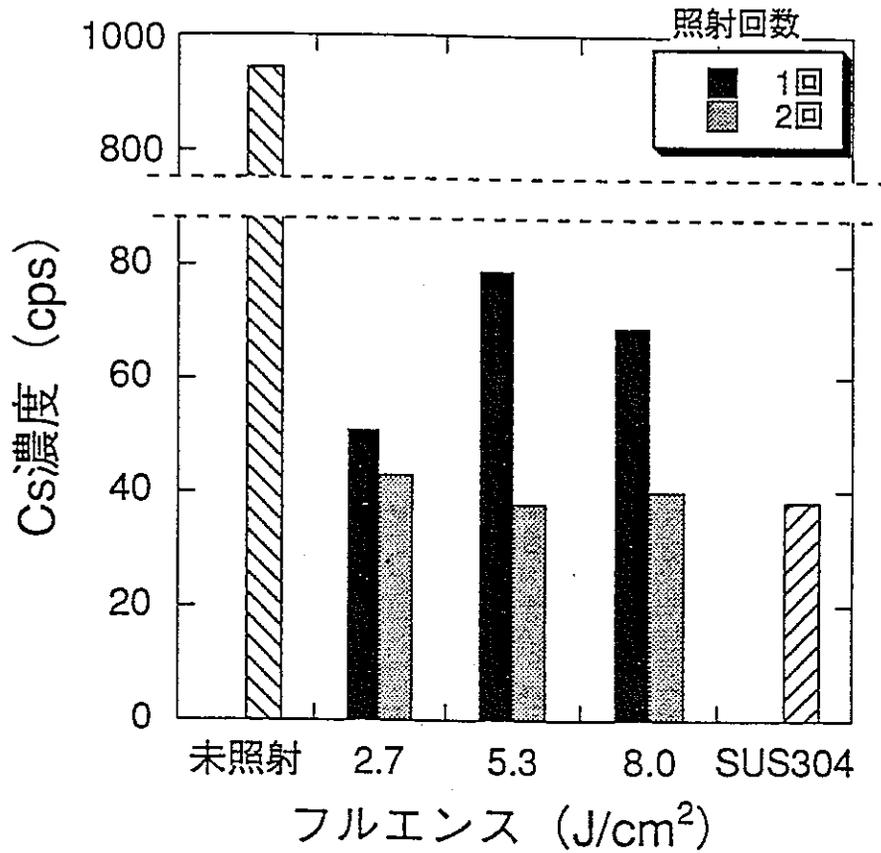


図4.2.1 照射回数をパラメータとしたCs濃度のフルエンス依存性

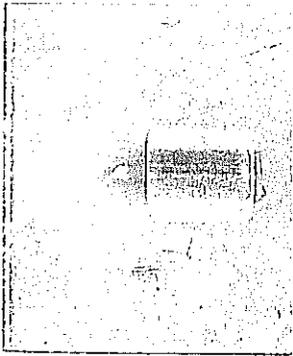
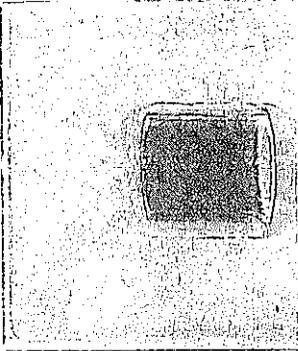
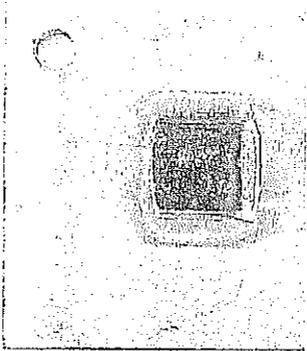
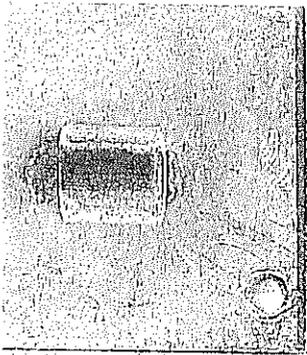
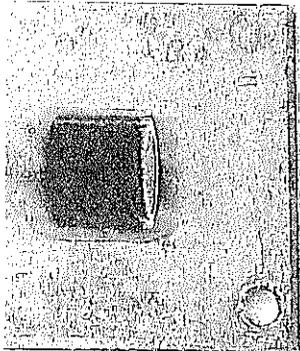
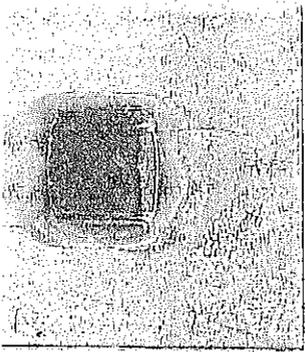
照射回数 1回			
照射回数 2回			
	フルエンス 2.7 J/cm ²	フルエンス 5.3 J/cm ²	フルエンス 8.0 J/cm ²

図 4. 2. 2 試験片外観写真(図 4. 2. 1 と対応)

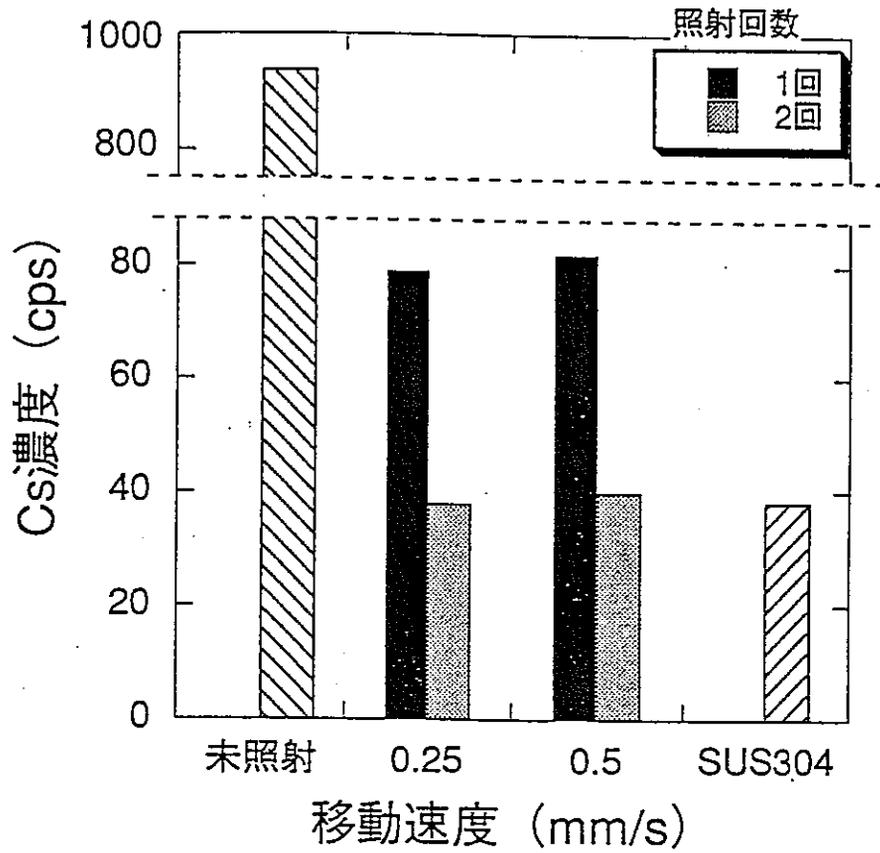


図4.2.3 照射回数をパラメータとしたCs濃度の移動速度依存性

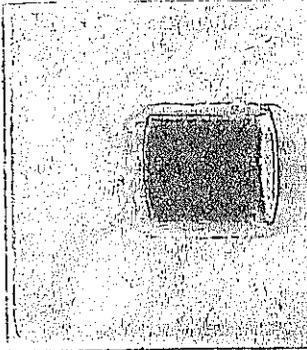
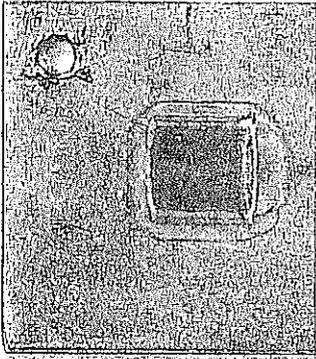
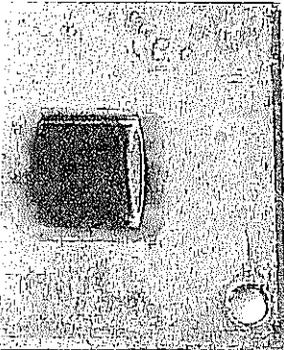
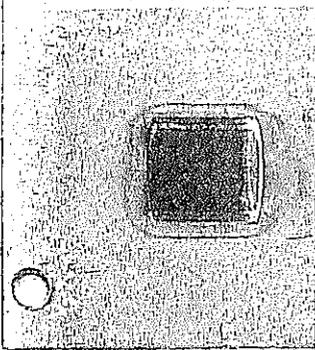
照射回数 1回		
照射回数 2回		
	移動速度 0.25 mm/s	移動速度 0.5 mm/s

図 4. 2. 4 試験片外観写真(図 4. 2. 3 と対応)

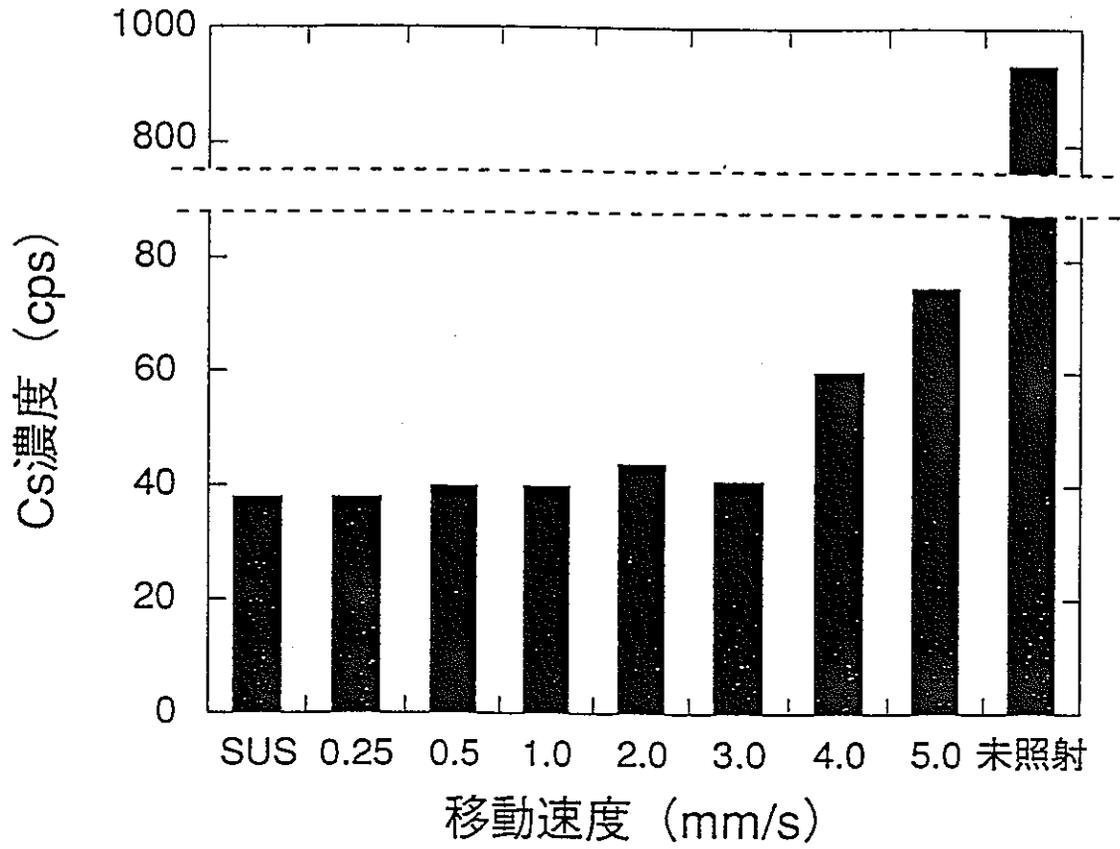


図4.2.5 Cs濃度の試験片移動速度依存性

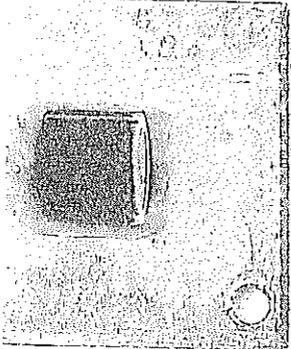
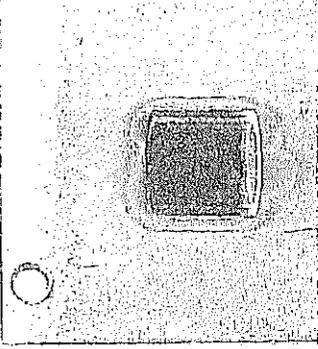
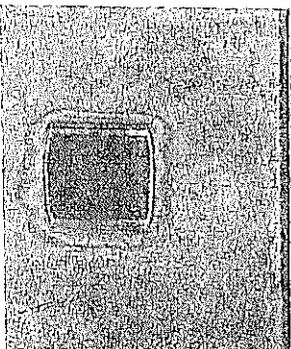
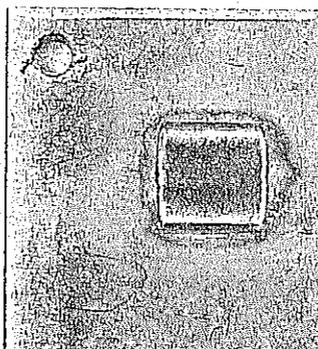
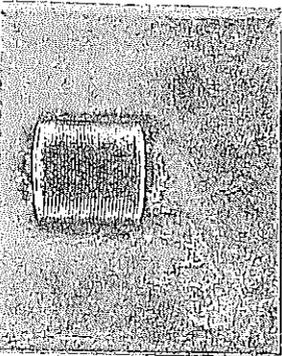
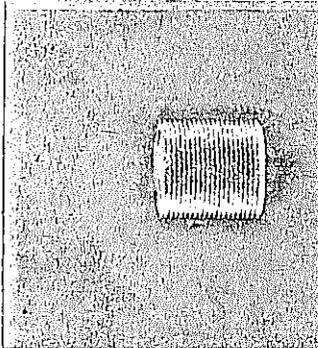
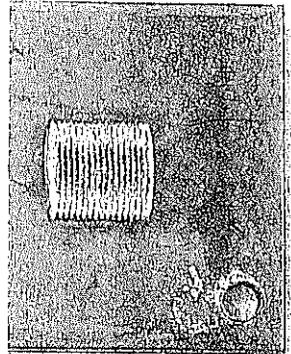
			
移動速度 0.25 mm/s	移動速度 0.5 mm/s	移動速度 1.0 mm/s	移動速度 2.0 mm/s
			
移動速度 3.0 mm/s	移動速度 4.0 mm/s	移動速度 5.0 mm/s	

図 4. 2. 6 試験片外観写真(図 4. 2. 5 と対応)

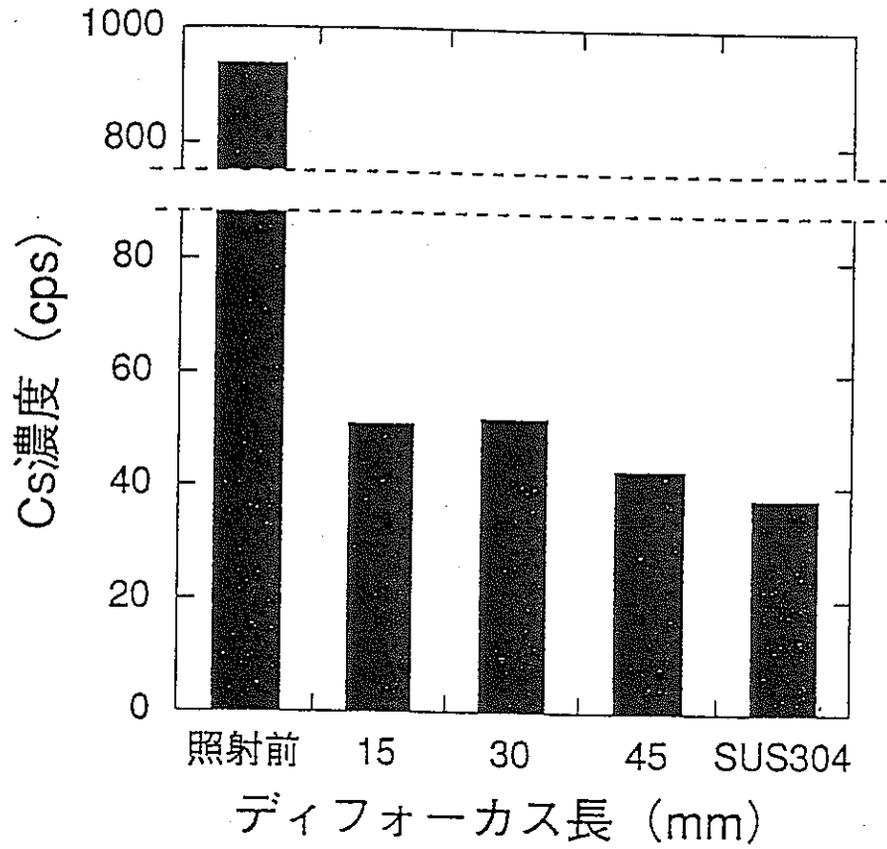


図 4.2.7 Cs 濃度のデフォーカス長依存性

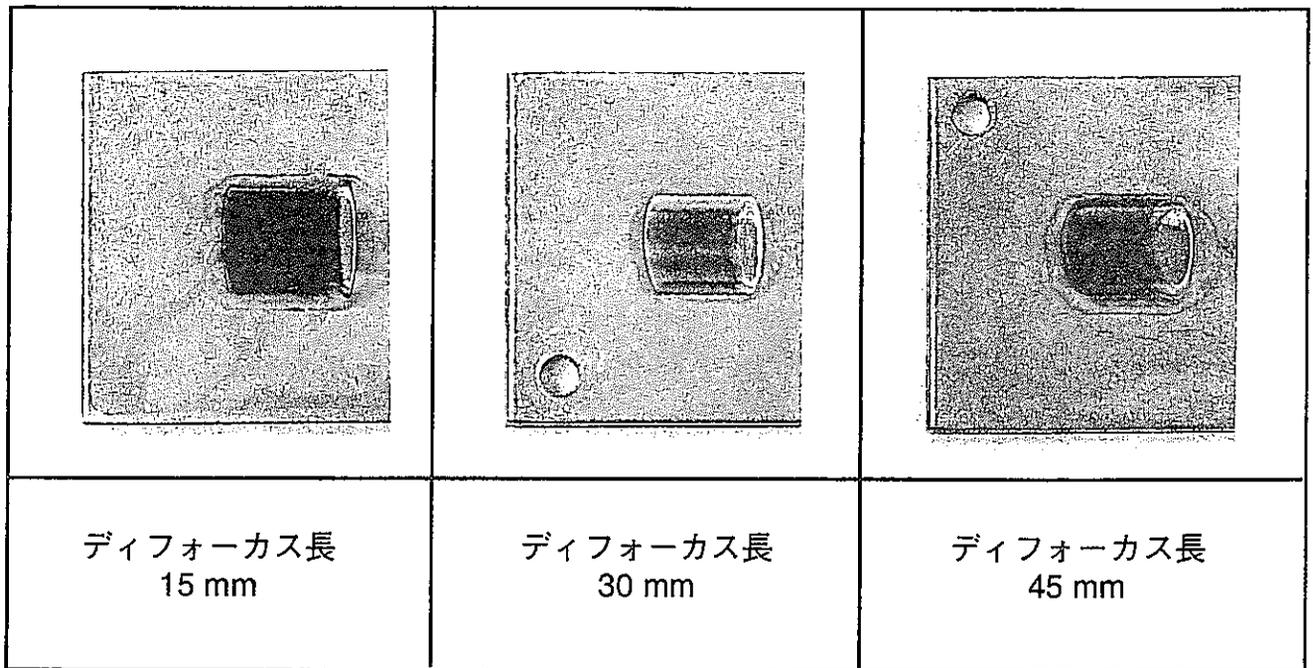


図 4.2.8 試験片外観写真(図 4.2.7 と対応)

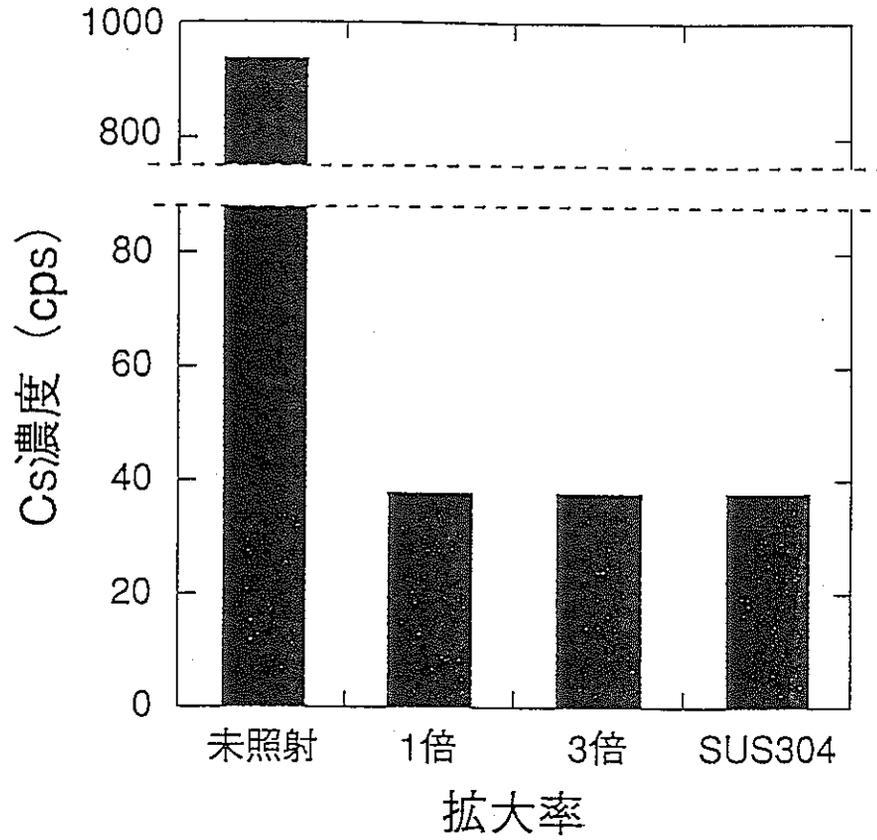


図 4. 2. 9 Cs 濃度の拡大率依存性

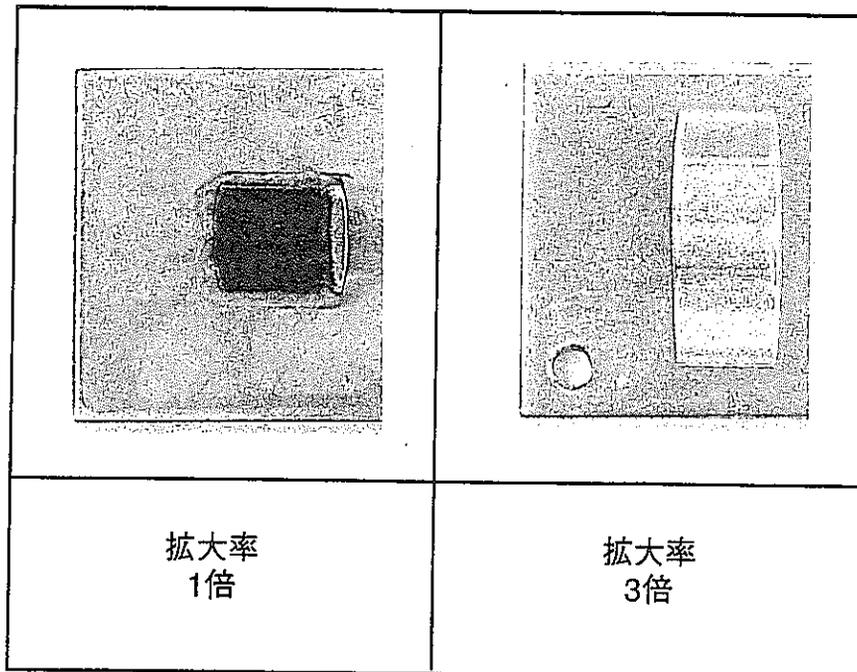


図 4. 2. 10 試験片外観写真(図 4. 2. 9 と対応)

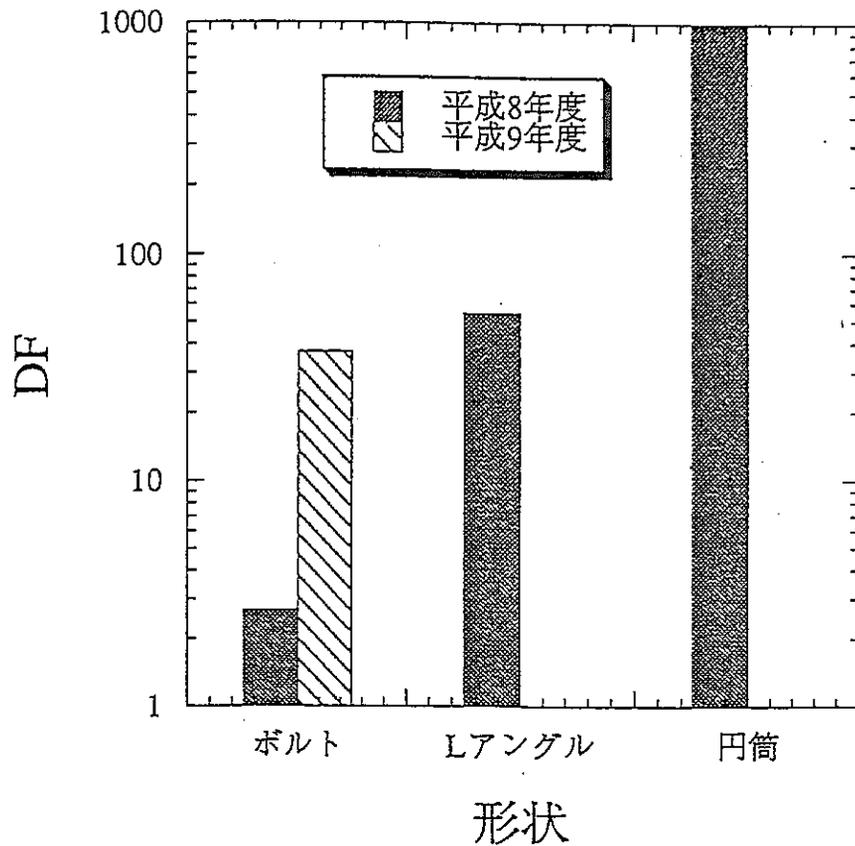
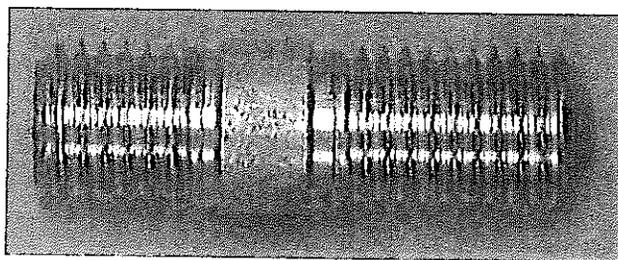
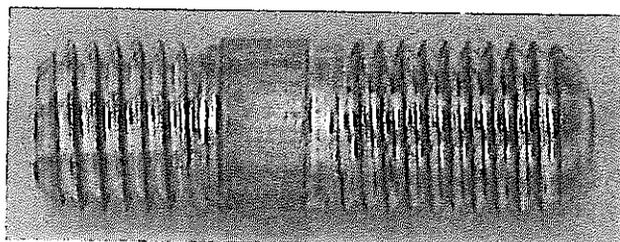


図 4. 2. 11 DF の形状依存性 Qスイッチパルス, 亜鉛メッキ, 2回照射



(a) レーザ照射前



(b) レーザ照射後

図 4. 2. 12 試験片外観写真(図 4. 2. 11 と対応)

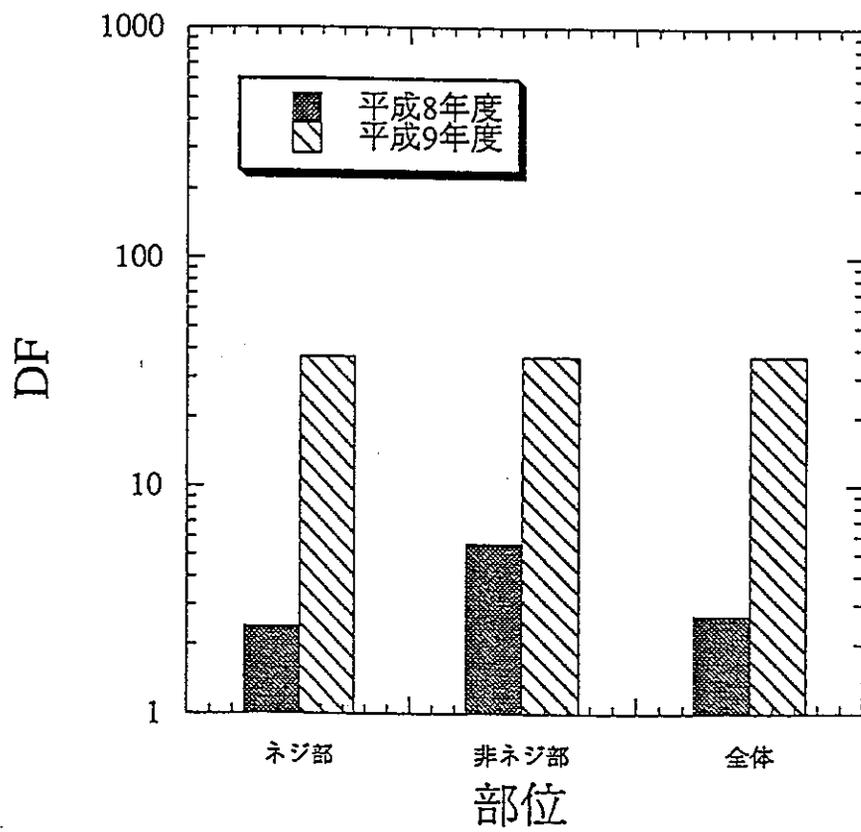


図4.2.13 部位別DF測定結果 Qスイッチパルス, ボルト, 亜鉛メッキ

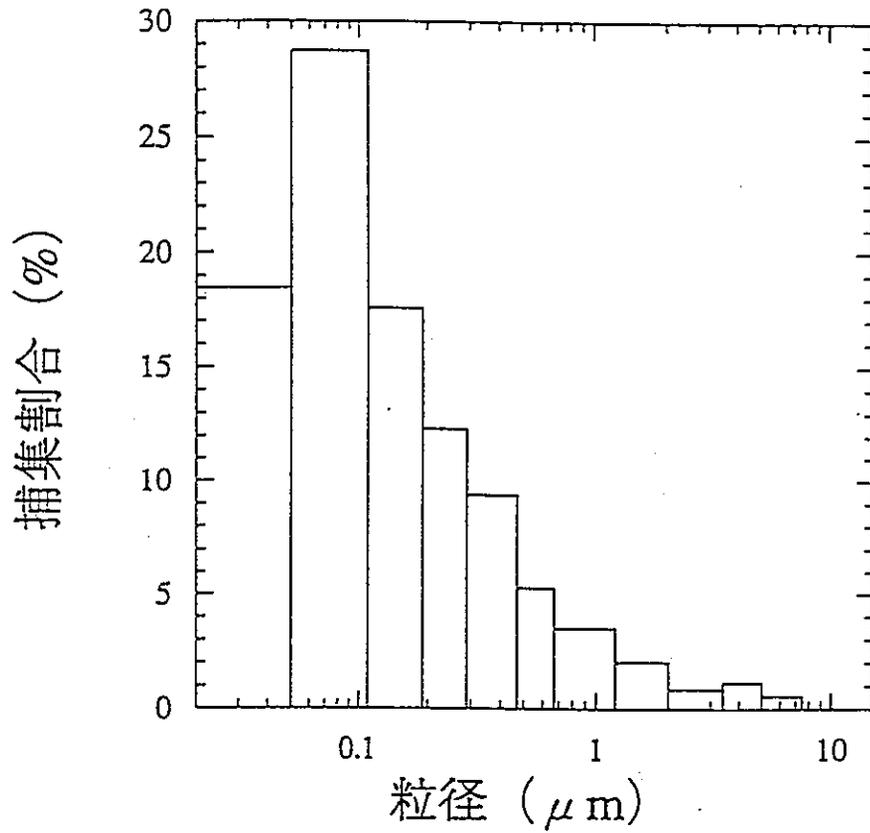


図4.3.1 二次生成物の粒径分布 QスイッチパルスYAGレーザ，フルエンス：5.3J/cm²

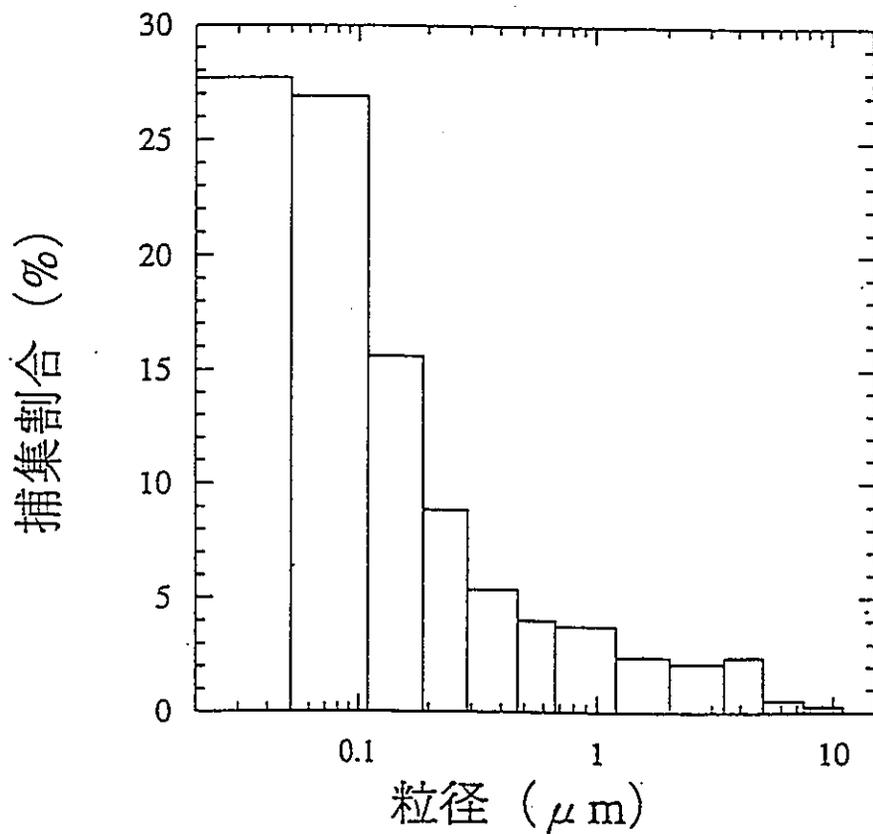


図4.3.2 二次生成物の粒径分布 QスイッチパルスYAGレーザ，フルエンス：6.6J/cm²

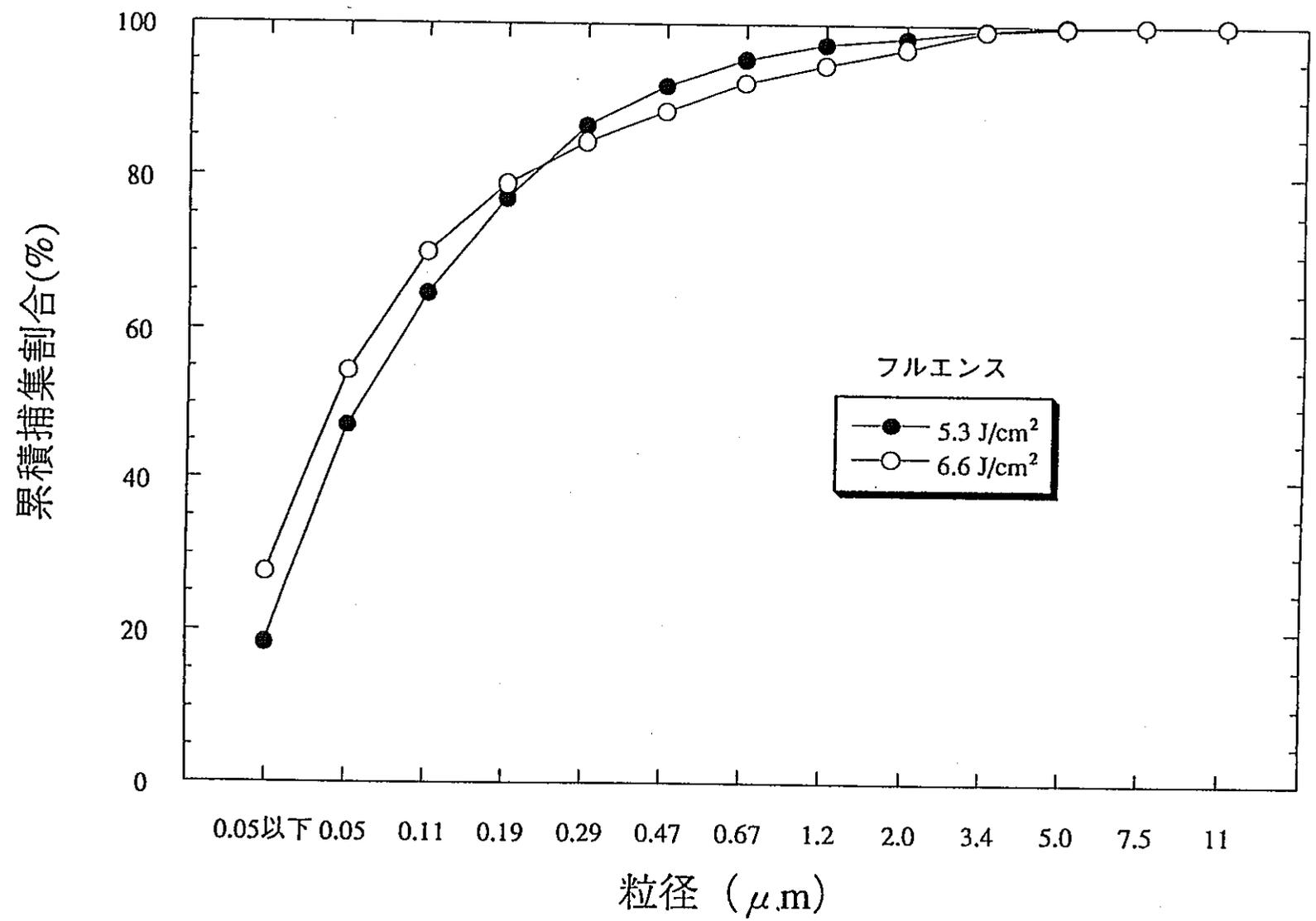


図4.3.3 二次生成物の累積捕集割合 QスイッチパルスYAGレーザー

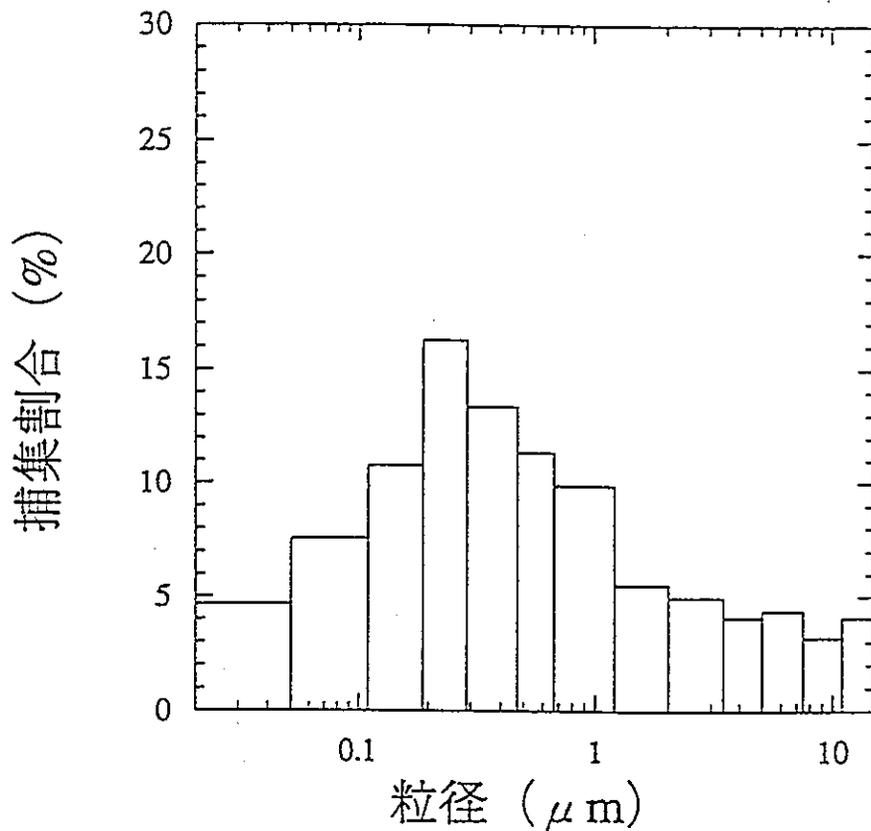


図4.3.4 二次生成物の粒径分布 ノーマルパルスYAGレーザ, シールドガス: 空気

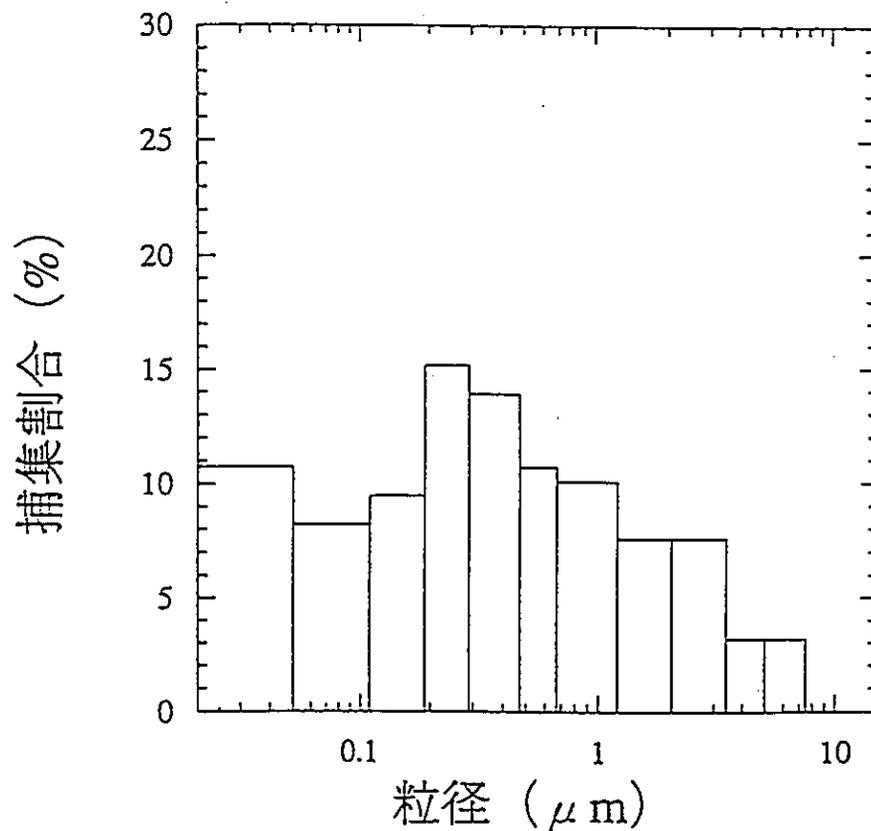


図4.3.5 二次生成物の粒径分布 ノーマルパルスYAGレーザ, シールドガス: Ar

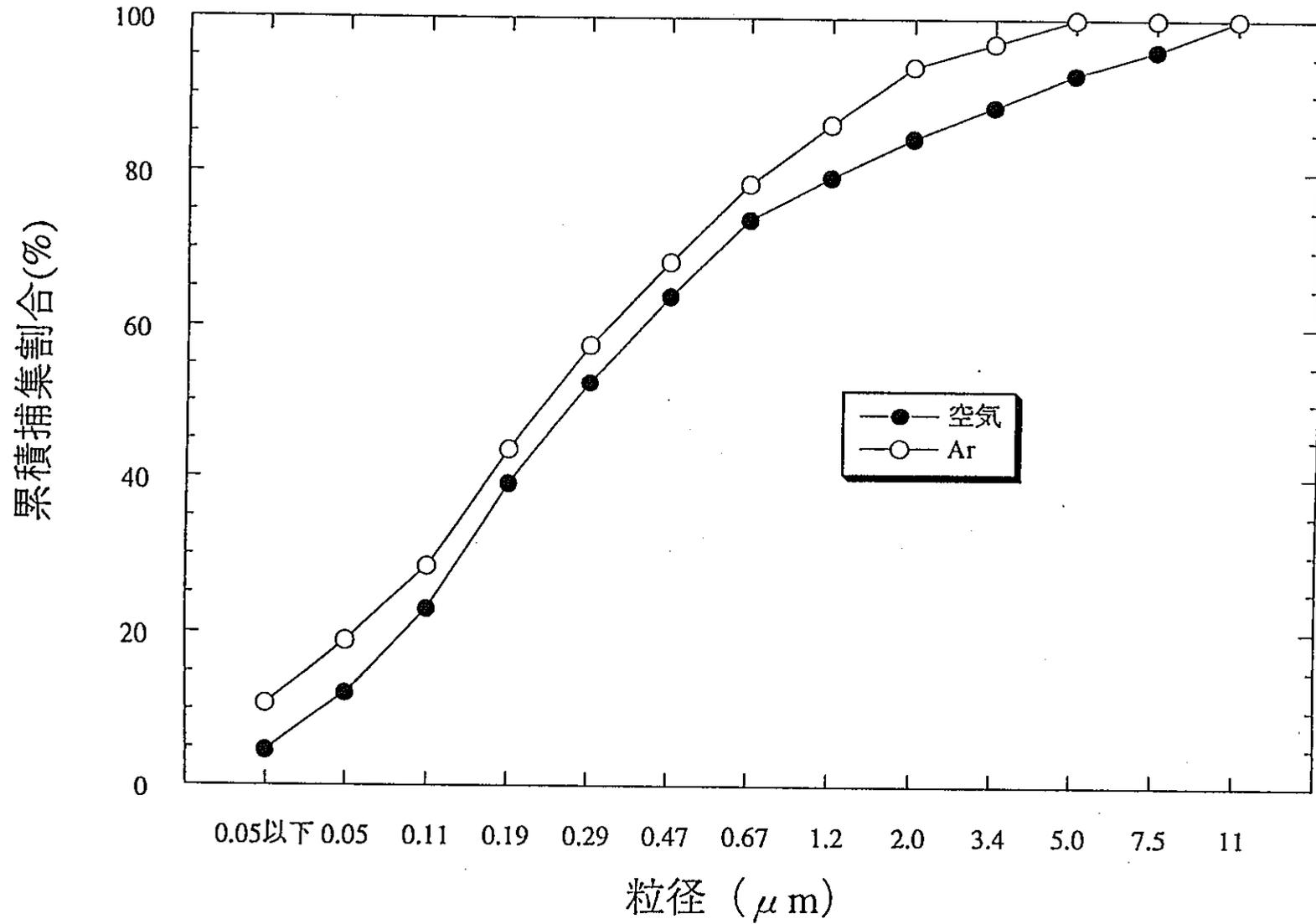


図4.3.6 二次生成物の累積捕集割合 ノーマルパルスYAGレーザー

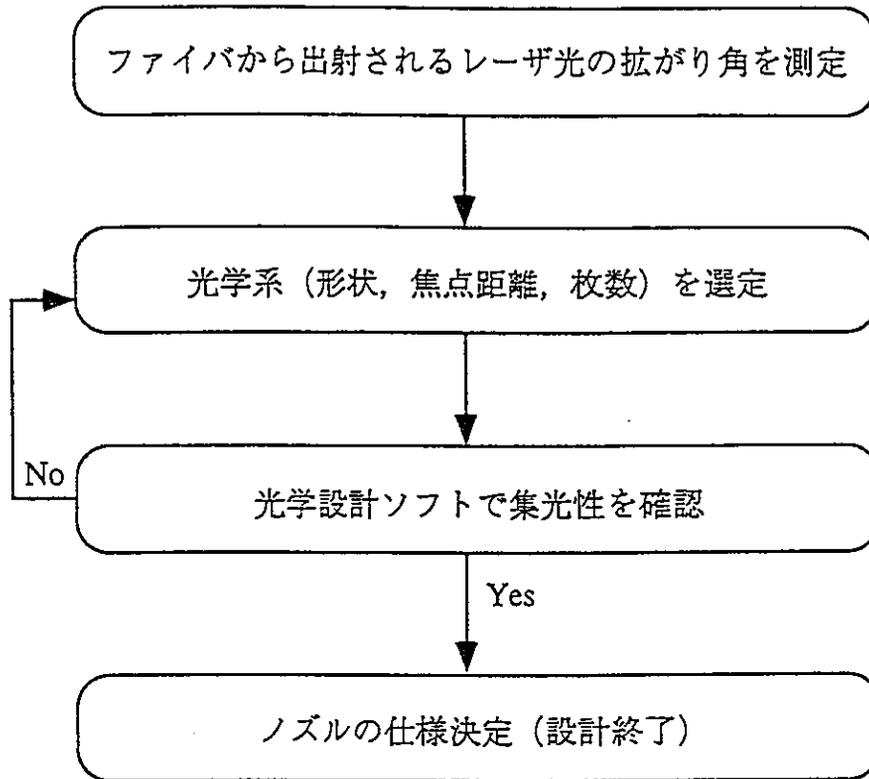


図5.2.1 ノズル設計方法フローチャート

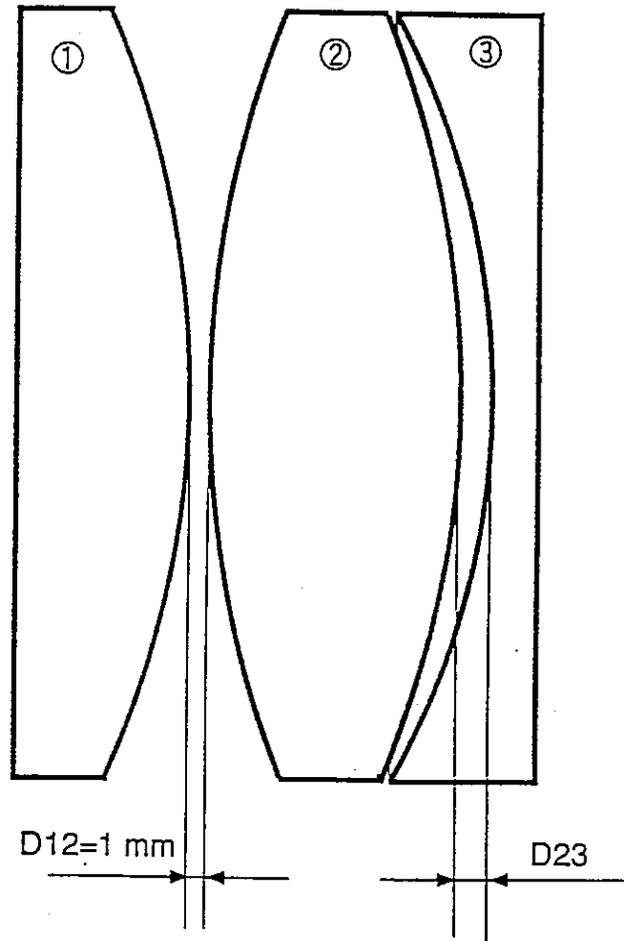
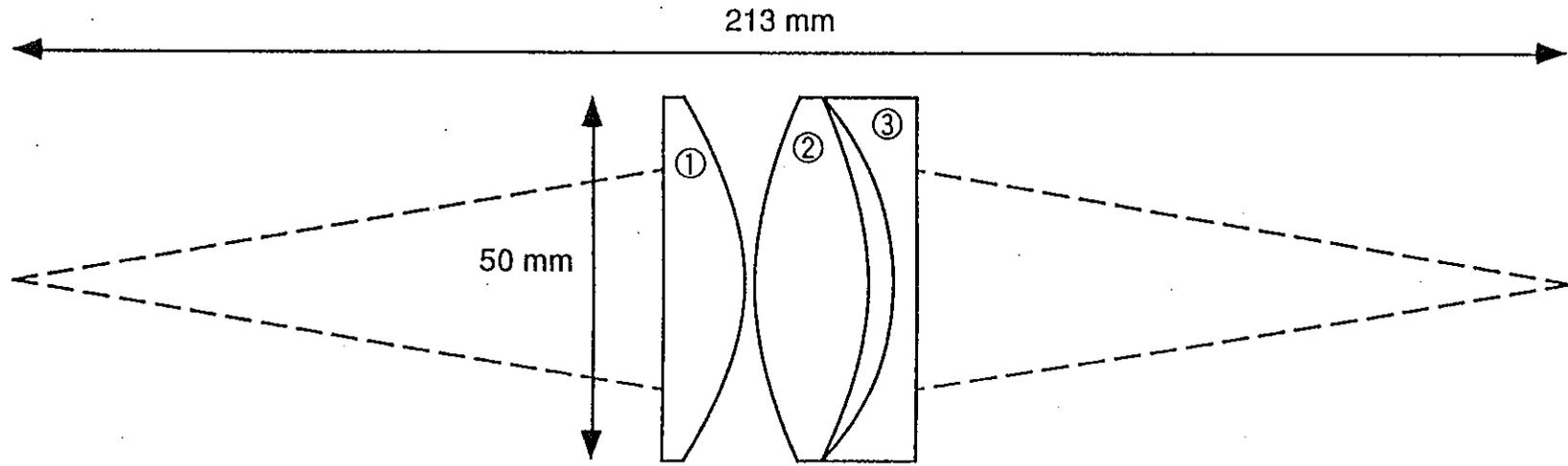


図5.2.2 レンズ形状



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5.2.3(1) 光学系概念図及びレンズ仕様 レンズ外径：50mm

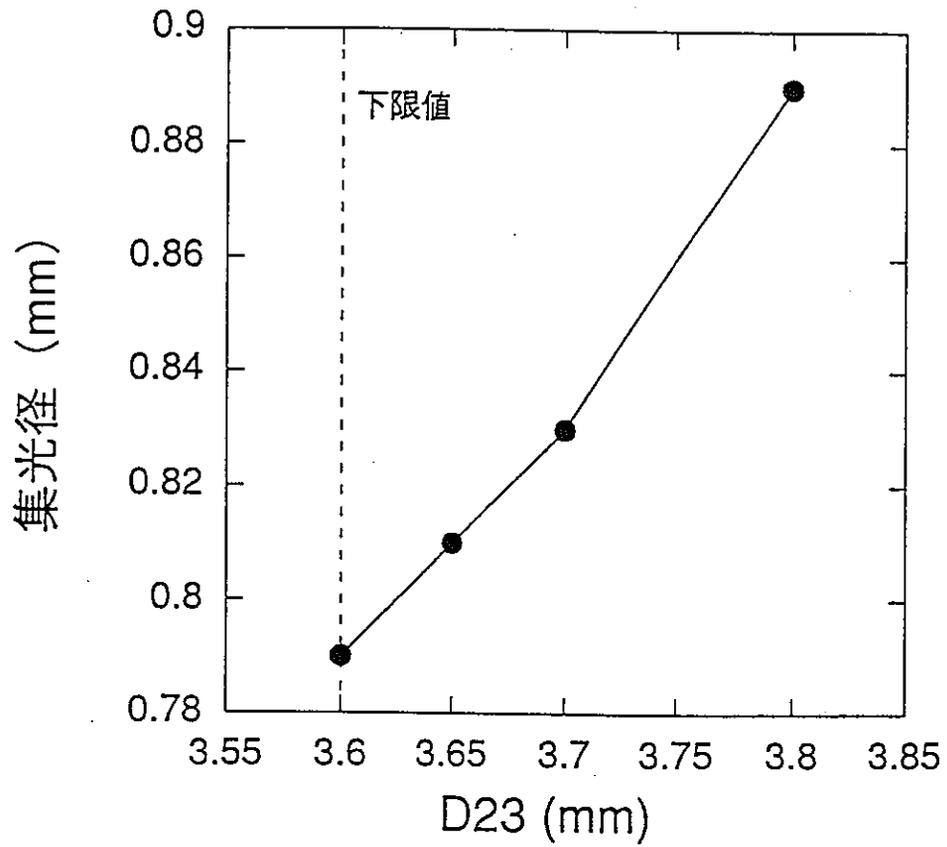
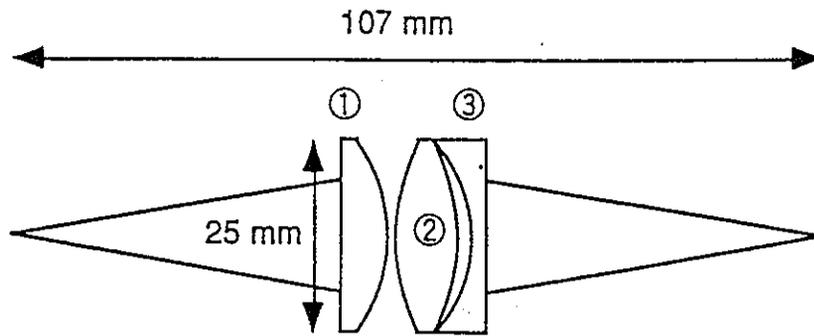


図5.2.3(2) 集光径の隙間D23依存性 レンズ径：φ50mm



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	40 mm	20.76 mm	6.2 mm	2 mm	25 mm
②	両凸	26.5 mm	25.95 mm	8.4 mm	2 mm	25 mm
③	平凹	-35 mm	20.76 mm	2 mm	7 mm	25 mm

図5.2.3(3) 光学系概念図及びレンズ仕様 レンズ外径：25mm

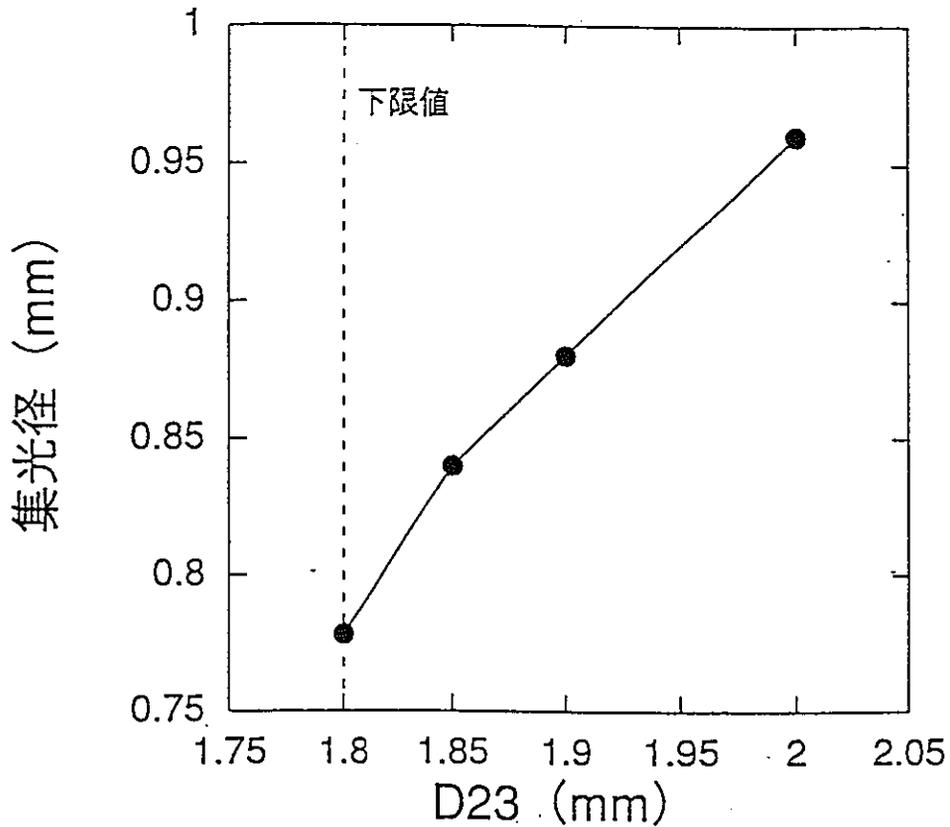
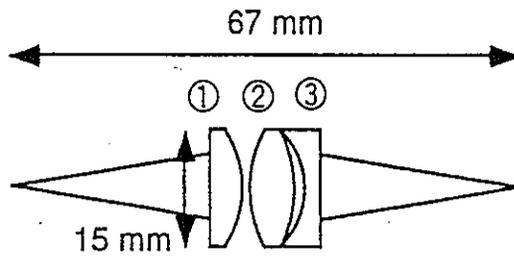


図5.2.3(4) 集光径の隙間D23依存性 レンズ径：φ25mm



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	25 mm	12.98 mm	4.4 mm	2 mm	15 mm
②	両凸	16 mm	15.57 mm	5.9 mm	2 mm	15 mm
③	平凹	-20 mm	10.38 mm	2 mm	5.2 mm	15 mm

図5.2.3(5) 光学系概念図及びレンズ仕様 レンズ外径：15mm

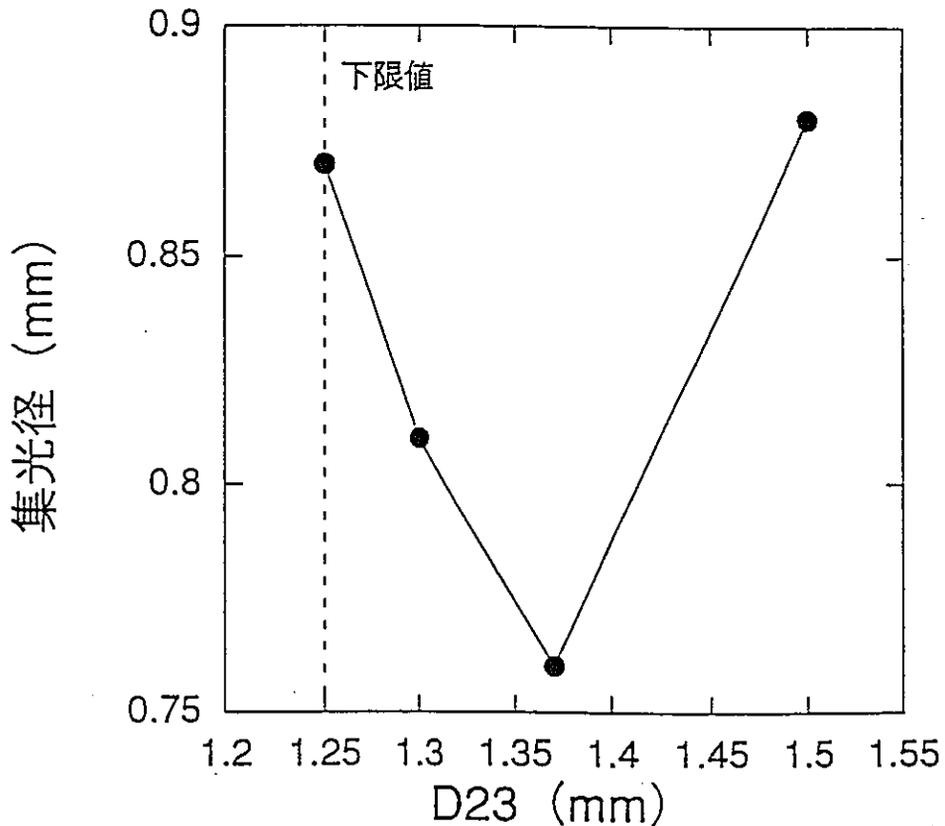


図5.2.3(6) 集光径の隙間D23依存性 レンズ径：φ15mm

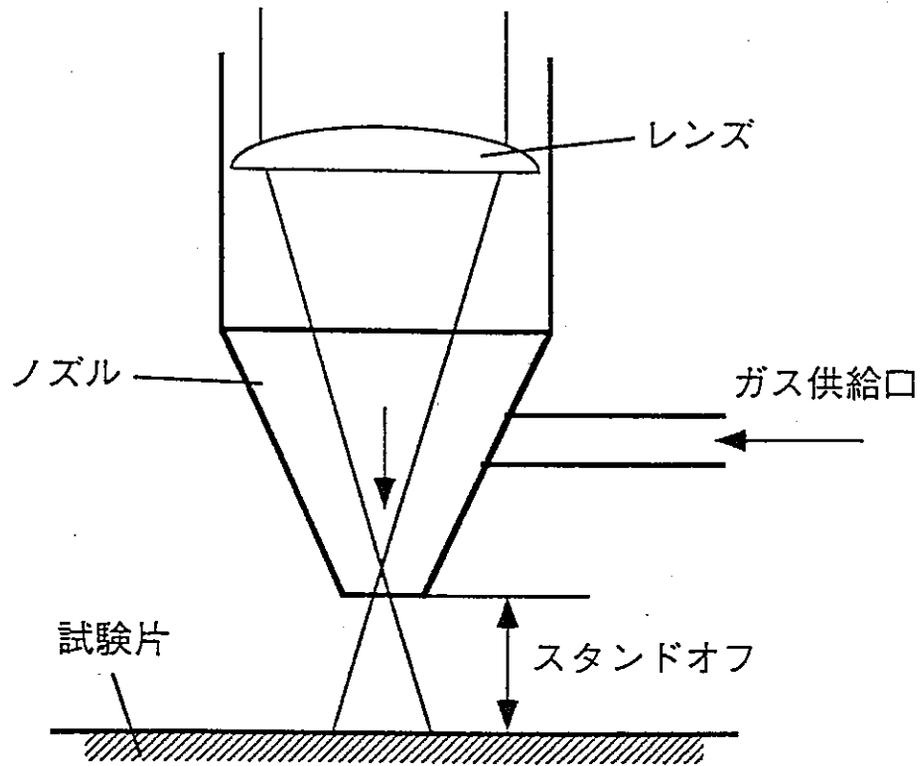


図5.3.1 ノズル概念図

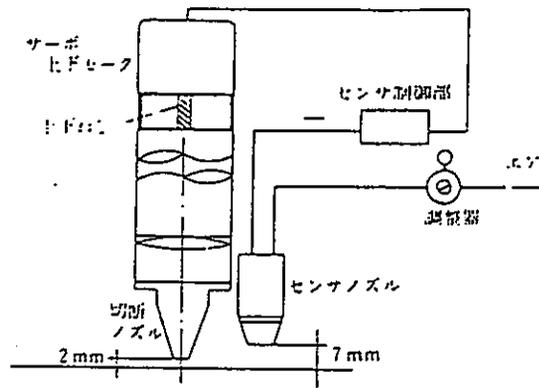


図5.3.2 エアセンサ³⁾

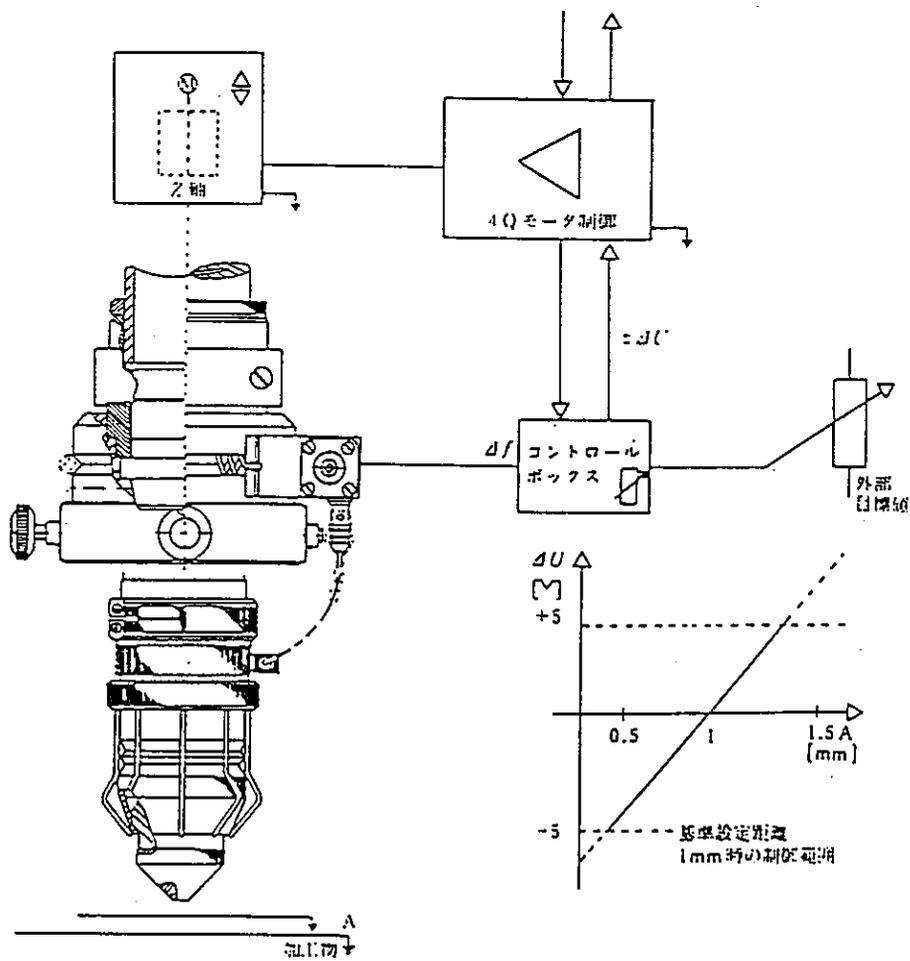


図5.3.3 静電容量式センサ³⁾

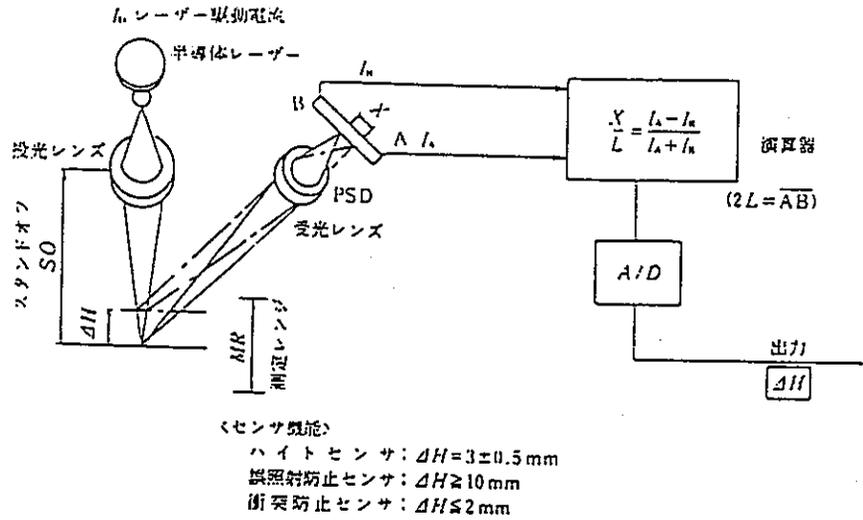


図5.3.4 光学式センサ³⁾

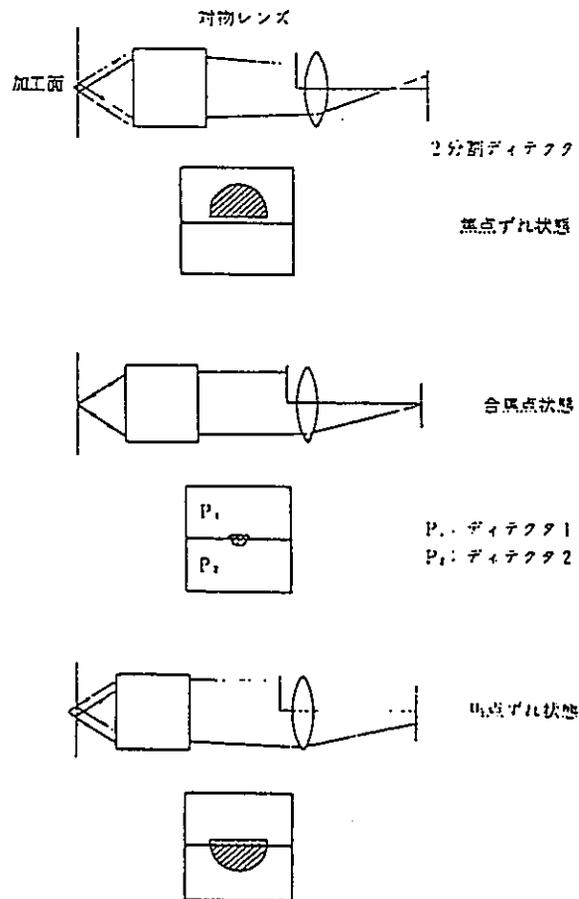


図5.3.5 オートフォーカス方式 (遮へい板を用いたフーコー法)³⁾

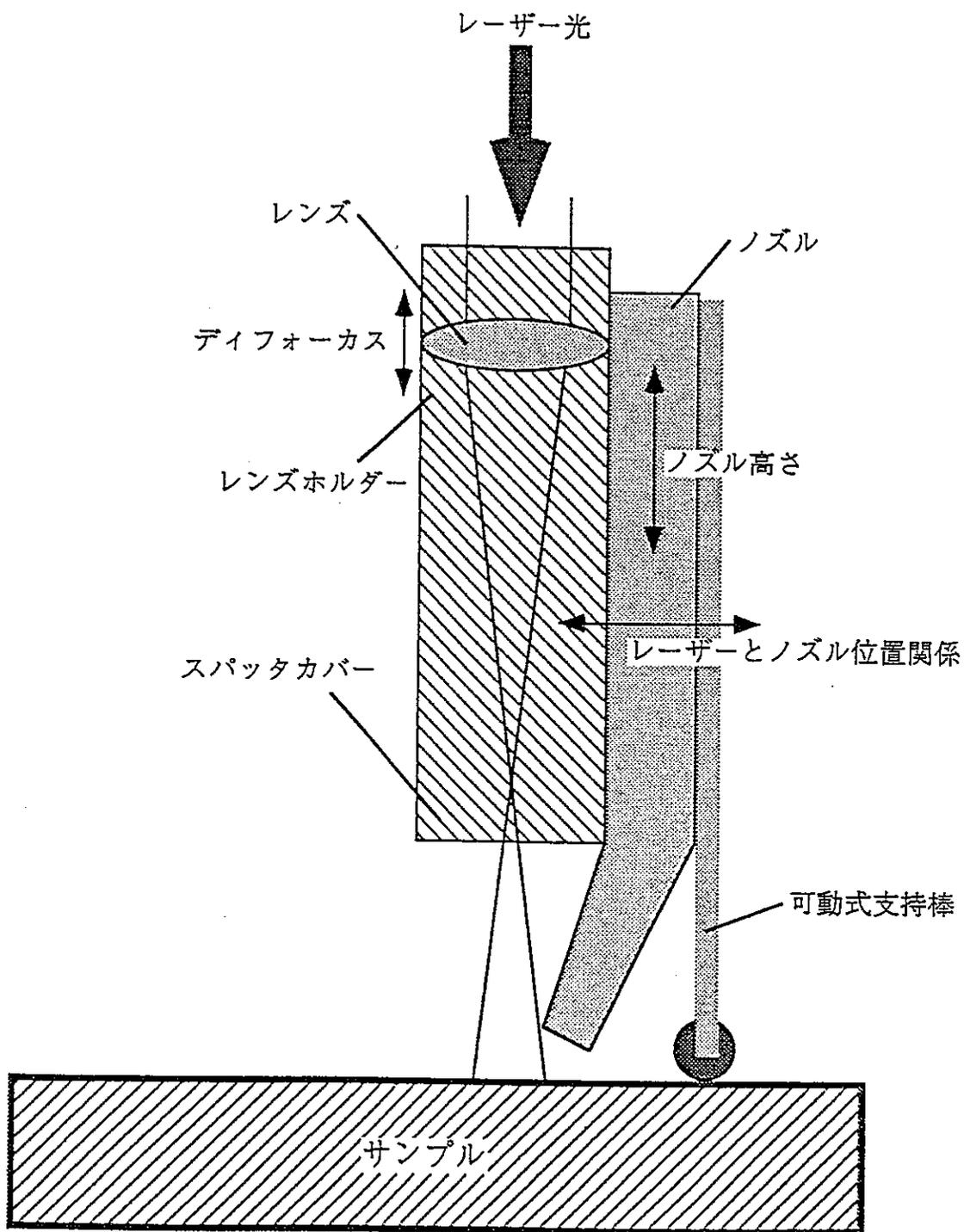


図5.3.6 接触方式