

超短パルス光で励振した多モード光ファイバーのモード結合特性

梶本 孝夫・佐藤 信也・加野 裕・今井 正明

室蘭工業大学工学部電気電子工学科 〒050-8585 室蘭市水元町 27-1

Mode-Coupling Characteristics in Multimode Fibers Excited by Ultra-Short Optical Pulses

Takao KAJIMOTO, Shinya SATO, Hiroshi KANO and Masaaki IMAI

Department of Electrical and Electronic Engineering, Muroran Institute of Technology, 27-1 Mizumoto-cho, Muroran 050-8585

The fundamental mode in multimode (MM) fibers can be launched by reducing mode-coupling and suppressing modal speckle. The presence of speckle due to modal interference between many modes can be eliminated by use of optical sources with short temporal coherence. In this paper, the mode-coupling coefficients and launching efficiencies into step-index and graded-index MM fibers as well as erbium-doped fibers (EDF) are determined experimentally from diffraction half-angles of output emitted from these MM fibers. The mode-coupling and single-mode (SM) excitation are also demonstrated using a Ti:Sapphire laser with ultrashort pulse. Then, M^2 -values that are typically used to characterize the quality of near-diffraction-limited optical beams are defined in output of MM fibers and followed by experiment. We confirmed that at wavelength of 790 nm the SM output ($M^2 < 1.2$) is maintained in a sample of EDF up to 3.5 cm, whereas slightly degraded spatial-mode quality, $M^2 < 2.0$ is maintained in a longer distance of 15 cm for the same sample.

Key words: ultra-short optical pulse, multimode optical fiber, mode-coupling, single-mode excitation, M^2 -value

1. はじめに

現在の光通信システムや光干渉計システムでは単一モード光ファイバーを使用した光ファイバーデバイスが多く用いられている。しかしながら、光ファイバー増幅器などの急速な発達に伴い、単一モード光ファイバーにおける伝送パワーの限界や非線形光学効果の影響が無視できなくなつた¹⁾。一方、エルビウムドープ光ファイバー増幅器を用いた長距離伝送システムでは、光ファイバーの非線形特性の影響により、伝送特性が劣化する。この非線形光学効果を軽減するために、単一モード光ファイバー増幅器の代わりに、多モード光ファイバーレーザーおよび増幅器を用いることができる。

近年、非線形光学効果を軽減して高パワーを伝送するために多モード光ファイバーを使用した光ファイバーデバイ

スが提案され研究されるようになった²⁻⁴⁾。多モード光ファイバーはコア径が大きいため、接続等の取り扱いが容易であり高パワーの伝送が可能となる。また、有効コア断面積 A_{eff} が大きいため、非線形光学効果が軽減される。しかし、多モード光ファイバー中を伝搬する数多くのモードは、コア-クラッド間の境界面の不均一性等により、隣接モード間においてモード結合が生じる。モード間の干渉の結果、その出射パターンには斑点分布の模様、いわゆるスペックルが観測される^{5,6)}。しかし、光源のコヒーレンス時間がモード間の群遅延時間よりも小さくなると、2つのモード間は光ファイバーの出射端において干渉しない。そのため、時間的コヒーレンス長の短い光源を用いることにより、異なるモード間の干渉を避けることができる。また、特定の条件の下では、多モード光ファイバーのモード

結合を軽減することが可能である⁷⁾. そのため、モード結合を軽減した多モード光ファイバーによる单一モード励振が注目されている. この多モード光ファイバーの单一モード励振には、モード結合特性や单一モード励振特性を知ることが重要である.

本論文では、時間的コヒーレンス長の短い光源としてフェムト秒 (femtosecond: fs) パルス Ti: サファイアレーザーを用いてスペックルを除去している. また、多モード光ファイバーからの出射光の回折半角を測定することより、モード結合係数、結合効率を算出した. 次に、出射光の M^2 因子を測定することにより、モード結合特性について検討した. さらに、单一モード励振距離を見積り、多モード光ファイバーからの出射光を单一モード光ファイバーに結合させた場合の波長スペクトル波形を比較した. 理論と実験の結果より、单一モード励振特性について検討した.

2. 多モード光ファイバーの結合特性

2.1 モード結合係数 D と結合効率 η

時間的コヒーレンス長の長い光源ではモード間の干渉によって、多モード光ファイバーからの出射光にはスペックルが生じる. このスペックルはファイバーの振動等により急激に変化するため、出射光の回折半角の測定は困難となる. しかし、光源のコヒーレンス時間がモード間の群遅延時間よりも小さくなると、モード間の干渉を防ぐことができる. 基本モードと高次モード（最高次モード）の群遅延時間 τ_g とコヒーレンス時間 τ_c はそれぞれ、式(1)、式(2) および式(3) より与えられる⁶⁾.

$$\tau_g = \frac{n_1}{c} \Delta L \quad : \text{SI型} \quad (1)$$

$$\tau_g = \frac{n_1}{c} \frac{\Delta^2}{2} L \quad : \text{GI型} \quad (2)$$

$$\tau_c \approx \frac{\lambda^2}{c \delta \lambda} \quad (3)$$

ここで、 n_1 はコアの屈折率、 c は真空中の光の速度、 Δ は比屈折率差、 L はファイバー長、 λ は波長、 $\delta\lambda$ はスペクトル幅である. $\tau_g > \tau_c$ のとき、多モード光ファイバーからの出射光のスペックルが除去される. そのため、出射光の空間ビームプロファイルが安定し、回折半角を測定することができる^{8,9)}. 本論文では、光源には Ar⁺ レーザー励起による波長可変 Ti: サファイアレーザーを使用した. パルス幅は約 60~90 fs, 繰り返し周波数は 78.1 MHz である. スペクトル幅 $\delta\lambda$ は 3.15 nm であり、コヒーレンス時間は 0.66 ps となる. また、群遅延時間はそれぞれのサンプルにおいて、0.45 ps (No. 1), 1.5 ps (No. 2), 1.0 ps

(No. 3), 40 ps (No. 4), 8.3 ps (No. 5) となっている. No. 1 は完全には $\tau_g > \tau_c$ となっていないが、スペックルがほぼ除去できていることを出射パターンの観測より確認した. ここで回折半角は最大値から $1/\exp(2)$ に減衰する角度を測り求めた¹⁰⁾.

回折半角とモード結合係数 D の関係は式(4)、式(5)により与えられる¹¹⁾.

$$\theta_m^2 = 4Dz + \theta_0^2 \quad (4)$$

$$\theta_0 = \frac{\lambda}{2d} \quad (5)$$

ここで、 z はファイバー長、 d はコア直径、 λ は入射波長である. また、 θ_0 と θ_m はそれぞれ基本モードと多モード光ファイバー出射後の回折半角である. 式(4)、式(5)より次の式(6)が得られる.

$$D = \frac{\theta_m^2 - \theta_0^2}{4z} \quad (6)$$

一方、モード結合係数はファイバーパラメーターと次のような関係にあることが知られている⁸⁾.

$$D \propto \frac{d^8}{b^6 \lambda^4} \quad (7)$$

ここで、 b はクラッド直径である. モード結合係数は式(7)からわかるように、コア直径が大きいほど、あるいはクラッド直径が小さいほど大きくなり、また波長の 4 乗に逆比例して小さくなる.

また多モード光ファイバーからの出射後の单一モード光ファイバーへの結合効率 η は式(8)により与えられる.

$$\eta \approx \left(\frac{\theta_0}{\theta_m} \right)^2 \quad (8)$$

式(8)は式(4)と式(5)より次のようになる^{8,9)}.

$$\eta(z) = \left(1 + \frac{16Dz^2}{\lambda^2} \right)^{-1} \quad (9)$$

この式(9)より、单一モード光ファイバーへの結合効率を算出する.

2.2 M^2 因子によるビーム品質評価

回折限界の TEM₀₀ ガウシアンビームを基準として、 M^2 因子がビームの横モード品質を示す量として導入されている^{12,13)}.

$$M^2 = \frac{n\pi d_0 \Theta}{4\lambda_0} \quad (10)$$

ここで、 λ_0 は真空中の波長、 n は媒質中の屈折率、 d_0 はビームウエスト直径、 Θ は遠視野広がり角である.

M^2 因子は理想的なガウシアンビームに対する、集光強度の劣化の度合いを示す. また、ガウシアンビームに対する伝搬式に、 λ を $M^2 \lambda$ に置換した波長を代入することで、高次モード成分を含むビームの伝搬特性が記述できる. この M^2 因子は高次モードのビームの伝搬記述に有用

Table 1 Specifics and parameters of graded-index (GI) and step-index (SI) MM fibers and erbium-doped multimode fiber (EDF). VAD: Vapour-phase axial deposition, OVD: Outside vapour deposition, MCVD: Modified chemical vapour deposition.

Fiber sample	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5
Refractive index	GI	GI	GI	SI	(EDF)
Core diameter (μm)	50	62.5	62.5	50	18.4
Cladding diameter (μm)	125	125	125	125	125
Numerical aperture: NA	0.212	0.3	0.3	0.134	0.069
Manufacturing process	VAD	OVD	MCVD	VAD	—
Fiber length (m)	1.8	1.5	1.0	2.0	1.5
Diffraction half-angles θ_m (rad)	0.159	0.220	0.178	0.118	0.048
Mode-coupling coefficient D (m^{-1}) [$\lambda = 790 \text{ nm}$]	3.5×10^{-3}	8.1×10^{-3}	7.9×10^{-3}	1.7×10^{-3}	0.31×10^{-3}
Launching efficiency η (%) [$\lambda = 790 \text{ nm}$]	0.24	0.0084	0.13	0.46	20.4
M^2 -value [$\lambda = 800 \text{ nm}$, $z = 1.5 \text{ m}$]	39.4	115	113	20.3	5.73

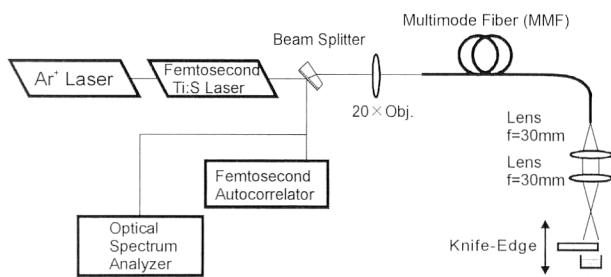


Fig. 1 Optical setup for measuring M^2 -value in MM fibers.

なだけでなく、横モードの品質も表すためレーザーの輝度も評価できるパラメーターである。すなわち、 M^2 因子は最低次から数えて何番目くらいまでの高次モードがレーザービームに含まれているかを示す尺度である¹⁴⁾。しかし、高次モードの合成比に関する情報は得られないため横モードの分布形状までは記述できない。ここでは、この M^2 因子を用いて多モード光ファイバー出射後のレーザービームの品質評価を行った。次節3章1節で M^2 因子を用いた測定結果とモード結合特性を示す。

3. 測定結果と考察

3.1 モード結合特性

Table 1に測定した多モード光ファイバー (sample No. 1~5) の屈折率分布、コア直径、クラッド直径、開口数 (numerical aperture: NA), 製造方法およびファイバー長を示す。ただし、サンプル No. 5 はエルビウムドープファイバー (erbium-doped fiber: EDF) である。それらのファイバーを用いたときの回折半角、モード結合係数、結合効率および M^2 因子の測定結果を示す。Table 1より、コア径が大きい多モード光ファイバーほどモード結合係数が大きくなっている。これはコア径が大きくなると伝搬モード数が増加するため、モード結合が起こりやすくなるた

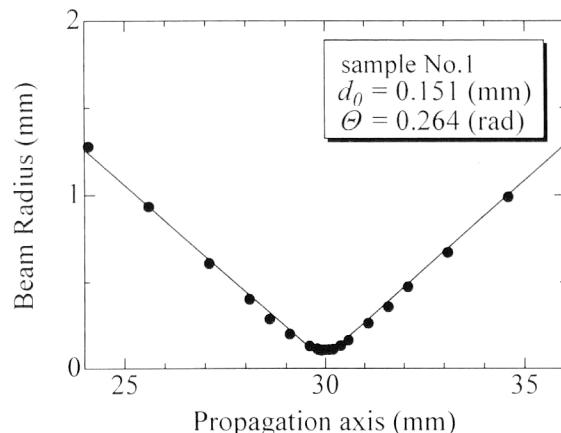


Fig. 2 Focused beam radius of sample No. 1 as a function of propagation axis.

めである。NA が小さな多モード光ファイバーのモード結合係数は小さい。NA が小さいと規格化周波数が低くなるためだと考えられる。また、ファイバーの製造方法や屈折率分布の違いによってもモード結合係数は変化する⁸⁾。サンプル No. 5 のモード結合係数が小さいのは、コア直径が他のサンプルに比べ非常に小さいためである。一方、単一モード光ファイバーへの結合効率は、モード結合係数が小さな多モード光ファイバーほど大きい。サンプル No. 2 よりも No. 3 の結合効率が大きいのは、MCVD 法で製造されているためである⁸⁾。

Fig. 1 に M^2 因子の測定光学系を示す。多モード光ファイバーからの出射光を焦点距離 30 mm のレンズを組み合わせて集光した。ビーム径の測定には、垂直に移動するナイフエッジでビームを遮ってゆくナイフエッジ法¹⁵⁾を用いた。ナイフエッジを伝搬軸方向に移動させることにより、ビームウエスト直径と遠視野広がり角を求める、式(10)より M^2 因子を算出する。サンプル No. 1 と No. 4 のビーム径の測定結果をそれぞれ Fig. 2 と Fig. 3 に示す。ビーム

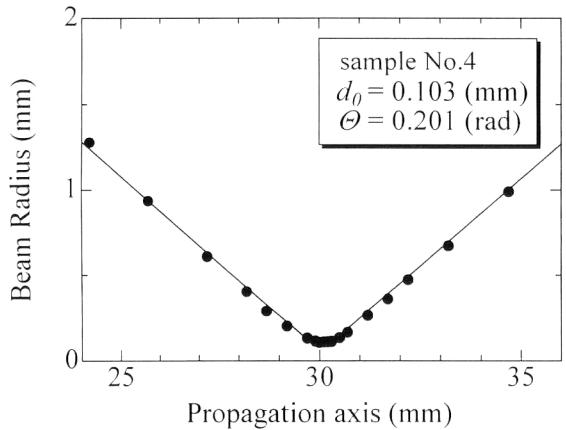


Fig. 3 Focused beam radius of sample No. 4 as a function of propagation axis.

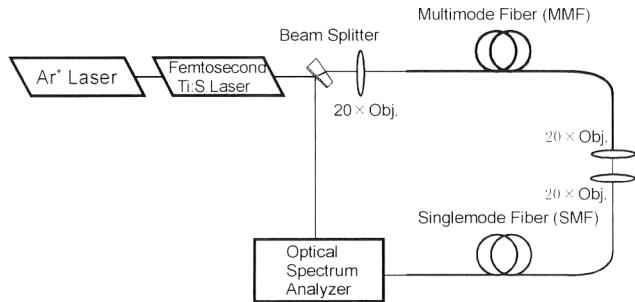


Fig. 4 Optical setup for measuring mode-coupling and launching efficiency in MM fibers.

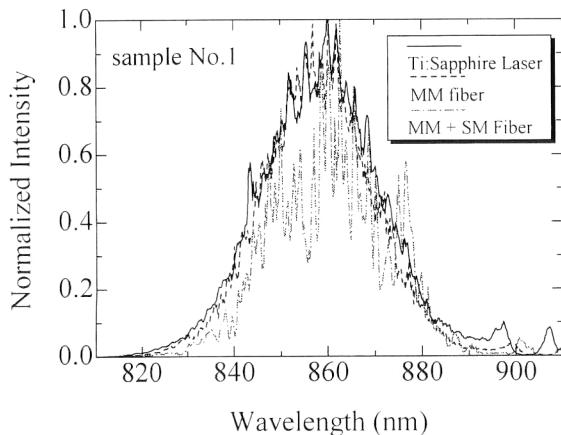


Fig. 5 Optical spectra of ultra-short pulse from a Ti:Sapphire laser (solid line) and those after it was propagated in MM fiber only (dashed line) and the MM fiber followed by the SM fiber of sample No.1 (chain line).

ムウェストはそれぞれレンズの焦点距離30 mmの距離にあり、サンプルNo.1ではビームウェスト直径と遠視野広がり角はそれぞれ0.151 mmと0.264 radとなった。また、サンプルNo.4ではビームウェスト直径と遠視野広がり角はそれぞれ0.103 mmと0.201 radとなった。Table 1においてモード結合係数と M^2 因子を比較すると、モード結

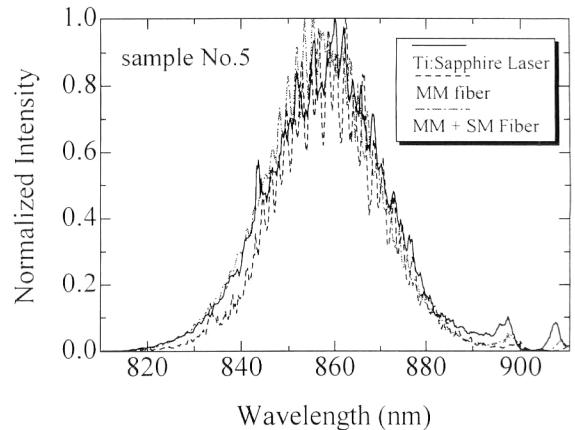


Fig. 6 Optical spectra of ultra-short pulse from a Ti:Sapphire laser (solid line) and those after it was propagated in MM fiber only (dashed line) and the MM fiber followed by the SM fiber of sample No.5.

合係数が小さな多モード光ファイバーでは M^2 因子も小さくなっている。この結果より、モード結合係数が小さな多モード光ファイバーではその出射光のビーム品質もよいことがわかる。

3.2 単一モード励振特性

Fig. 4に单一モード励振特性評価の光学系を示す。初めに、光源の波長スペクトルを光スペクトルアナライザで測定した。次に、レーザー光を多モード光ファイバーに入射する。多モード光ファイバーを伝搬した光は、二重回折系のレンズによって結合された单一モード光ファイバーを伝搬して光スペクトルアナライザに入射する。この光学系を用いて、多モード光ファイバーと单一モード光ファイバー伝搬後のレーザー光の波長スペクトルを測定した。そして両者の波長スペクトルを比較した。サンプルNo.1とNo.5の波長スペクトルの比較結果をそれぞれFig. 5とFig. 6に示す。実線は光源出射後、破線は多モード光ファイバー出射後、一点鎖線は後方の单一モード光ファイバー出射後の波長スペクトルである。ここで、実験に使用した单一モード光ファイバーのコア直径、クラッド直径、比屈折率差およびファイバー長は、それぞれ9.5 μm, 125 μm, 0.31% および10 mである。モード結合係数の大きいサンプルNo.1は、单一モード光ファイバー出射後の波長スペクトルが光源の波長スペクトルとは異なり、大きな振動成分をもっている。出射光の波長スペクトルが光源の波長スペクトルと異なるのは、多モード光ファイバー伝搬中に基本モードから高次モードへ変換した成分が、单一モード光ファイバーに結合されなかったためである^{9,10)}。この理由から、モード結合係数が小さい多モード光ファイバー（サンプルNo.5）では、单一モード光ファイバー出射

後の波長スペクトルの振動成分が小さくなり、入射光の波長スペクトルに近づくことがわかる。

次に単一モード励振距離を見積る。2章1節で記述した単一モード光ファイバーへの結合効率 η と、2章2節で記述した M^2 因子との間には、式(11)のような関係がある^{8,16)}。

$$\frac{1}{\eta} \approx \sqrt{M^2} \quad (11)$$

本論文ではこの式(11)を用いて、多モード光ファイバー中の単一モード励振距離 ($M^2 < 1.2$) を見積った。また、高次モードが完全に発生する距離 ($M^2 < 2.0$) も同様に見積ることができる¹⁰⁾。式(10)より算出したサンプル No. 1 と、No. 4 および No. 5 のファイバー長に対する M^2 因子の変化を Fig. 7 に示す。Fig. 7 には、サンプル No. 5 の実験値 ($z=0.8, 1.5$ m) もプロットした。Fig. 7 より、サンプル No. 5において $M^2 < 1.2$ の基本モードは 3.5 cm と見積ることができる。また $M^2 < 2.0$ までのビーム品質はサンプル No. 1 と No. 4 ではそれぞれ 0.18 cm と 0.38 cm であり、モード結合係数が最も小さい No. 5 では 15 cm まで維持される。また、サンプル No. 1 と No. 4 および No. 5 を比較すると、モード結合係数の小さい多モード光ファイバーでは、ビーム品質を維持できる距離が長いことが確認できる。今回の実験では、単一モード励振距離が短く、多モード光ファイバー出射端では高次モードが十分に発生している（高次モード発生距離^{2,14)} ≪ ファイバー長）。

M^2 因子の実験値 (No. 5) と理論曲線は一致していない。理論式（式(11)）では M^2 因子は伝搬モード数の増加とともに増加するが、最大伝搬モード数に達した場合の飽和効果は考慮されていない¹⁶⁾。そのため、理論式は最大伝搬モード数に達する伝搬距離までしか近似することができない。今回の実験では、測定点 (0.8, 1.5, 3.0 m) よりも短い伝搬距離において最大伝搬モード数に達したため、Fig. 7 に示すように M^2 因子（実験値）がほぼ一定値となり、実験値と理論曲線が異なる結果となっている。そのため、最大伝搬モード数に達する距離より短い伝搬距離、Fig. 7 では $z=0.6$ m 以下においてのみ理論式は適用可能である。

4. まとめ

本論文では、数種類の異なるパラメーターをもつ多モード光ファイバーに時間的コヒーレンス長の短い光源である超短パルス光を入射して、モード結合と単一モード励振特性について調べた。モード結合の小さい場合には、単一モード光ファイバーへの結合効率は大きく、レーザービーム

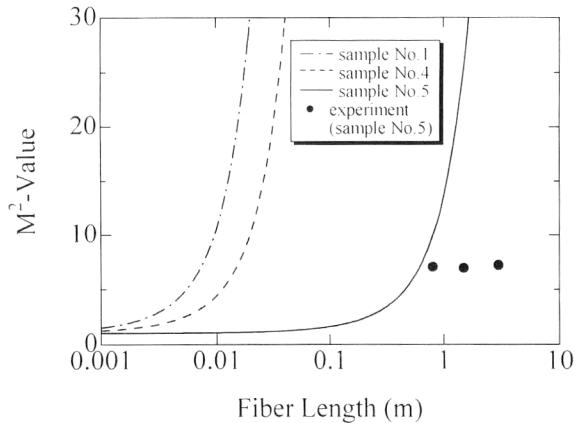


Fig. 7 Measurement and theoretical curves of M^2 -Values in sample No. 1 (chain line), sample No. 4 (dashed line) and sample No. 5 (solid line) MM fibers as a function of fiber length.

の品質因子である M^2 因子は小さくなる。また、単一モード励振距離が長くなること、単一モード光ファイバーに結合させた場合の波長スペクトルの振動成分が小さいことを確認した。今回の測定では、入射波長が $\lambda = 790$ nm のとき、規格化周波数 $V = 5.04$ の EDFにおいて単一モード励振距離は 3.5 cm ($M^2 < 1.2$)、高次モード発生の距離は 15 cm ($M^2 < 2.0$) となった。しかし、多モード光ファイバーは、クラッド径、NA、屈折率分布、製造方法を最適化することによりモード結合を減らすことができる。また、レーザー光の波長が長いほど伝搬可能なモード数が減少するためモード結合が軽減される。そのため、エルビウムドープファイバーレーザー（発振波長：1.55 μm）では、単一モード励振距離の増加が見込まれる。今後は、より短い伝搬距離において M^2 因子の理論式と実験値を比較検討することが課題である。

最後に、本研究で使用した多モード光ファイバーサンプルを提供していただいた古河電工(株)小倉邦男氏に感謝いたします。また、本研究の初期段階で種々助言をいただいた本学大学院 MC 鈴木裕一氏（現在、富士通東日本デジタルテクノロジ(株)勤務）、実験にご協力いただいた本学卒業研究生松尾将樹氏（現在、クローバー電子工業(株)勤務）に感謝します。

文 献

- 1) M. E. Fermann, A. Galvanauskas, G. Sucha and D. Harter: "Fiber-lasers for ultrafast optics," Appl. Phys., **B65** (1997) 259–275.
- 2) H. L. Offerhaus, N. G. Broderick, D. J. Richardson, R. Sammut, J. Caplen and L. Dong: "High-energy single-transverse-mode Q-switched fiber laser based on a

- multimode large-mode-area erbium-doped fiber," Opt. Lett., **23** (1998) 1683-1685.
- 3) J. P. Koplow, D. A. V. Kliner and L. Goldberg: "Single-mode operation of a coiled multimode fiber amplifier," Opt. Lett., **25** (2000) 442-444.
 - 4) H. Jeong, K. Oh, H. S. Seo, S. Choi and W. Shin: "A new Nd-doped large core double clad fiber laser cavity adiabatically tapered at both ends," *Proceedings of OECC/IOOC 2001 Conf. Incorporating ACOFT* (2001) pp. 501-502.
 - 5) E. G. Rawson and J. W. Goodman: "Speckle in optical fibers," *Proceedings of Soc. Photo-Optical Instrum. Eng. on Applications of Speckle Phenomena*, **243** (1980) pp. 28-34.
 - 6) 今井正明, 大塚善弘: “光ファイバとコーヒーレンズ”, レーザ研究, **9** (1981) 222-236.
 - 7) W. A. Gambling, D. N. Payne and H. Matsumura: "Mode conversion coefficients in optical fibers," Appl. Opt., **14** (1975) 1538-1542.
 - 8) M. E. Fermann: "Single-mode excitation of multimode fibers with ultrashort pulse," Opt. Lett., **23** (1998) 52-54.
 - 9) 鈴木裕一, 佐藤信也, 今井正明: “超短パルスによる多モード光ファイバのモード結合と単一モード励振特性”, 電子情報通信学会技術研究報告, **100** (2000) 43-48.
 - 10) Y. Suzuki, S. Sato and M. Imai: "Reduction of mode coupling and single-mode excitation in multimode fibers by use of ultra-short optical pulses," Trans. IEE Jpn., **121-A** (2001) 933-938.
 - 11) D. Gloge: "Optical power flow in multimode fibers," Bell Syst. Technol. J., **51** (1972) 1767-1783.
 - 12) 平等拓範: “レーザビーム品質測定の基礎”, レーザ研究, **26** (1998) 723-729.
 - 13) M. W. Sasnett and T. F. Johnston, Jr: "Beam characterization and measurement of propagation attributes," *Proceedings of Soc. Photo-Optical Instrum. Eng. on Laser Beam Diagnostics*, 1414 (1991) pp. 21-32.
 - 14) M. W. Sasnett: "Propagation of multimode laser beams: The M^2 factor," *The Physics and Technology of Laser Resonators*, eds. D. R. Hall and P. E. Jackson (Hilger, London, 1989) pp. 132-142.
 - 15) A. E. Siegman, M. W. Sasnett and T. F. Johnston, Jr.: "Choice of clip levels for beam width measurements using knife-edge techniques," IEEE J. Quantum Electron., **27** (1991) 1098-1104.
 - 16) M. E. Fermann, A. Galvanauskas, D. Harter, J. D. Minelly and J. E. Caplen: "High-power single-mode fiber amplifiers using multimode fibers," *Technical Digest of OFC 1998 Conf.* (San Jose, 1998) pp. 39-40.