

OTDRによるラマン利得効率スペクトル分布の間接測定法

堤 康宏[†] 大橋 正治[†]

Indirect Technique for Measuring Raman Gain Efficiency Spectrum Distribution Using OTDR

Yasuhiro TSUTSUMI[†] and Masaharu OHASHI[†]

あらまし GeO₂ 添加コア光ファイバ伝送路のラマン利得効率のスペクトルを評価する簡易な測定法を提案した。本測定法は、2 波長のモードフィールド半径の測定値から、任意波長での実効断面積を算出し、光ファイバの比屈折率差の測定値及び、2 本の参照光ファイバのラマン利得効率スペクトルから、間接的に被測定光ファイバのラマン利得効率スペクトルを評価する方法である。2 波長でのモードフィールド半径分布及び、比屈折率差分布は双方向 OTDR 法により、市販の OTDR を用いて測定可能であるため、従来のラマン利得効率スペクトル測定法よりも測定装置構成の簡略化が可能である。また、励起光を用いない間接測定法であるため、励起光パワーの減衰による測定距離の制約が緩和されるなどの利点がある。また、2 本のポビン巻き参照光ファイバと 2 本のポビン巻き被測定光ファイバで構成される光伝送路のラマン利得効率スペクトルの測定を提案法を用いて行い、光スペクトルアナライザを用いた直接測定法による測定結果と比較し、提案法の有効性を確認した。

キーワード ラマン利得効率スペクトル、長手方向の分布測定、OTDR、多段接続ファイバ、測定方法

1. ま え が き

分布ラマン増幅は、その増幅帯域が広帯域であり、更に、励起波長により利得帯域を制御することができるという特徴がある [1]。そのため、周波数の異なる複数の励起光源を用意し適切に制御することで、一定利得超広帯域増幅が可能である。更に、既設伝送路を増幅媒体として利用できるため、最小限のシステム変更で、通信システムをアップグレードできる。また、既設伝送路で分布ラマン増幅を行うことで SN 比が改善することも示されている [2]。このような利点から、実用化されている [3]。

分布ラマン増幅を用いた伝送システムの設計には、伝送路のラマン利得特性を評価することが必要である。一般に、光ファイバのラマン利得特性は、光ファイバパラメータに依存する。そのため、複数の光ファイバの多段接続で構成されている実伝送路においては、長手方向のラマン利得効率の分布測定が必要となる。

また、利得平坦度の高いラマン増幅器を設計するに

は、複数の励起光源を用いて、ラマン利得の重ね合わせを行うため、光ファイバのもつラマン利得効率のスペクトル形状を測定する必要がある。

既設伝送路のラマン利得効率の分布測定法としていくつかの方法が報告されている [4]~[6]。中でも OTDR を用いた方法は、光ファイバの一端から非破壊で分布測定が可能のため、既設伝送路に対して効果的と考えられ、我々も OTDR を用いて光ファイバのラマン利得効率分布を簡易測定する方法 [7] を検討してきた。ただし、これらの方法は、被測定光ファイバに励起光を伝搬させる必要があるため、励起光の減衰による測定精度の低下及び測定距離の制約などを受ける。更に、励起光と信号光の相対偏波状態に依存した偏波依存性利得を抑えるためのデポライザ等の装置が必要であり、測定系が複雑になる傾向があった。そこで、我々は OTDR により、モードフィールド半径分布 w 分布と比屈折率差 Δ 分布を測定し、それらのファイバパラメータと実効断面積及び、ラマン利得係数の関係を用いて、間接的にラマン利得効率を評価する方法を提案した [8]。しかし、この方法では、利得ピーク波長でのラマン利得効率の測定のみで、ラマン利得効率のスペクトル測定はできなかった。

[†] 大阪府立大学大学院工学研究科，堺市
Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University, 1-1 Gakuen-cho, Naka-ku, Sakai-shi, 599-8531 Japan

本論文では、OTDR を用いて間接的にラマン利得効率スペクトルを簡易に測定する方法を提案する。本提案法は、GeO₂ 添加コア光ファイバにおけるモードフィールド半径 w の波長依存性、比屈折率差 Δ とラマン利得係数の関係を利用し、双方向 OTDR 法 [13], [14] により、被測定光ファイバの比屈折率差分布 $\Delta(z)$ 、及びモードフィールド半径分布 $w(z)$ を求め、これらの光ファイバのパラメータをもとにラマン利得効率のスペクトルを間接的に測定する方法である。

本提案法は、励起光を必要とせず、励起光の減衰による測定精度の低下を気にする必要がないため、測定距離の制約が緩和される。また、励起光と信号光の相対偏波状態に起因する偏波雑音を考慮する必要がない。更に、2 波長のモードフィールド半径の値から、任意波長での実効断面積を間接的に算出し、2 種類の参照光ファイバのラマン利得効率スペクトルから、被測定光ファイバのラマン利得効率スペクトルを評価するため、被測定波長の光源をもつ可変波長光源や光スペクトルアナライザのような装置を必要とせず、測定系の簡略化が可能になる利点がある。

本提案法の測定限界距離や距離分解能は、OTDR により測定した後方散乱光強度の SN 比に依存する。本論文では、後方散乱光強度のばらつきによる提案法の測定誤差を解析的に評価する。

更に、SMF と DSF の 2 種類のポビン巻き光ファイバ 4 本からなる伝送路のラマン利得効率スペクトルを提案法により測定し、光スペクトルアナライザによる直接測定法による測定結果と比較することで、本測定法の妥当性を示す。

2. ラマン利得効率分布測定の測定原理

一般的な、コアに GeO₂ が添加された石英系光ファイバのラマン利得係数 g_R は、次式のように GeO₂ の添加濃度 χ_{GeO_2} と関連づけられる [9]~[11]。ただし、 $g_{RP}(SiO_2)$ は、利得ピーク波長での純石英コア光ファイバのラマン利得係数、 $c(\lambda)$ は linear regression factor と呼ばれる波長依存性をもった係数である [9]~[11]。また、 λ は信号光波長、 λ_{SP} はラマン利得がピークとなる信号光波長であり、コアの屈折率 n_1 、クラッドの屈折率 n_2 としている [9]~[11]。

$$g_R(\lambda) = \frac{n_1^2}{n_2^2} \left(g_R(SiO_2, \lambda) + c(\lambda) \chi_{GeO_2} g_{RP}(SiO_2) \frac{\lambda^3}{\lambda_{SP}^3} \right) \quad (1)$$

比屈折率差 Δ は、GeO₂ の添加濃度 χ_{GeO_2} に線形比例する。その比例定数を A とすると、以下のように表せる。

$$\Delta = A \chi_{GeO_2} \quad (2)$$

式 (2) 及び、コアとクラッドの屈折率差 $n_1 - n_2$ が小さいことから、式 (1) は以下のように近似できる。

$$\begin{aligned} g_R(\lambda) &= \frac{n_1^2}{n_2^2} \left(g_R(SiO_2, \lambda) + c(\lambda) \frac{\Delta}{A} g_{RP}(SiO_2) \frac{\lambda^3}{\lambda_{SP}^3} \right) \\ &\cong g_R(SiO_2, \lambda) + c(\lambda) \frac{\Delta}{A} g_{RP}(SiO_2) \frac{\lambda^3}{\lambda_{SP}^3} \end{aligned} \quad (3)$$

位置 z_0 でのラマン利得係数のスペクトル $g_R(\lambda, z_0)$ が既知である GeO₂ 添加コア光ファイバを参照光ファイバとして用いると、式 (3) より、以下の式が成り立つ。

$$\begin{aligned} g_R(\lambda, z) - g_R(\lambda, z_0) &\cong c(\lambda) \frac{1}{A} g_{RP}(SiO_2) \frac{\lambda^3}{\lambda_{SP}^3} (\Delta(z) - \Delta(z_0)) \end{aligned} \quad (4)$$

更に、位置 z_1 でのラマン利得係数のスペクトル $g_R(\lambda, z_1)$ が既知である参照光ファイバを用いると、以下の式が成り立つ。

$$\frac{g_R(\lambda, z) - g_R(\lambda, z_0)}{g_R(\lambda, z_1) - g_R(\lambda, z_0)} \cong \frac{\Delta(z) - \Delta(z_0)}{\Delta(z_1) - \Delta(z_0)} \quad (5)$$

光ファイバのラマン利得効率は、ラマン利得係数 g_R と実効断面積 A_{eff} を用いて g_R/A_{eff} のように表され、実効断面積 A_{eff} は次式で定義される。

$$A_{eff} = 2\pi \frac{\int \phi_S^2(r) r dr \int \phi_P^2(r) r dr}{\int \phi_S^2(r) \phi_P^2(r) r dr} \quad (6)$$

ϕ_S 及び ϕ_P は、それぞれ信号光及び励起光波長の径方向 r の界分布を示す。ガウス型の界分布を仮定すると、 A_{eff} は次式のように求められる。

$$A_{eff}(\lambda, \lambda_P, z) = \frac{\pi(w(\lambda, z)^2 + w(\lambda_P, z)^2)}{2} \quad (7)$$

ここで $w(\lambda, z)$ と $w(\lambda_P, z)$ は、位置 z における信号光及び励起光の各波長におけるモードフィールド半径である。

実効断面積 A_{eff} のスペクトルは、式 (6) より、モードフィールド半径の波長依存性より求められる。モー

ドフィールド半径の波長依存性は、Marcuse の経験式に基づいて、次のように近似できる [12].

$$w(\lambda, z) = a(z) + b(z)\lambda^{1.5} \quad (8)$$

ここで $a(z)$, $b(z)$ は、屈折率分布に依存した定数である. この係数 $a(z)$, $b(z)$ は、2 波長 λ_1 , λ_2 でのモードフィールド半径 $w(\lambda_1, z)$, $w(\lambda_2, z)$ を用いて、下記のように、解析的に解ける.

$$a(z) = -\frac{w(\lambda_1, z)\lambda_2^{1.5} - w(\lambda_2, z)\lambda_1^{1.5}}{\lambda_1^{1.5} - \lambda_2^{1.5}} \quad (9)$$

$$b(z) = \frac{w(\lambda_1, z) - w(\lambda_2, z)}{\lambda_1^{1.5} - \lambda_2^{1.5}} \quad (10)$$

ゆえに、任意の波長 λ でのモードフィールド半径 $w(\lambda, z)$ は以下のようにかける.

$$w(\lambda, z) = -\frac{w(\lambda_1, z)\lambda_2^{1.5} - w(\lambda_2, z)\lambda_1^{1.5}}{\lambda_1^{1.5} - \lambda_2^{1.5}} + \frac{w(\lambda_1, z) - w(\lambda_2, z)}{\lambda_1^{1.5} - \lambda_2^{1.5}} \lambda^{1.5} \quad (11)$$

式 (5), (7), (11) より、被測定光ファイバの任意の波長 λ でのラマン利得効率 $g_R(\lambda, z)/A_{eff}(\lambda, \lambda_P, z)$ のスペクトル分布は、次のように表せる.

$$\begin{aligned} & \frac{g_R(\lambda, z)}{A_{eff}(\lambda, \lambda_P, z)} \\ &= \frac{\Delta(z) - \Delta(z_0)}{\Delta(z_1) - \Delta(z_0)} \left(\frac{g_R(\lambda, z_1)}{A_{eff}(\lambda, \lambda_P, z_1)} R_{A_{eff}}(z_1) \right. \\ & \quad \left. - \frac{g_R(\lambda, z_0)}{A_{eff}(\lambda, \lambda_P, z_0)} R_{A_{eff}}(z_0) \right) \\ & \quad + \frac{g_R(\lambda, z_0)}{A_{eff}(\lambda, \lambda_P, z_0)} R_{A_{eff}}(z_0) \end{aligned} \quad (12)$$

ただし、 $R_{A_{eff}}(z_i)$ ($i = 1, 2$) は次式で定義される被測定光ファイバと参照光ファイバの実効断面積の比である.

$$\begin{aligned} R_{A_{eff}}(z_i) &= \frac{A_{eff}(\lambda, \lambda_P, z_i)}{A_{eff}(\lambda, \lambda_P, z)} \\ &= \frac{w^2(\lambda, z_i) + w^2(\lambda_P, z_i)}{w^2(\lambda, z) + w^2(\lambda_P, z)} \end{aligned} \quad (13)$$

式 (11)~(13) は長手方向のラマン利得効率スペクトル分布が、2 波長でのモードフィールド半径分布 $w(z)$ 、及び比屈折率差分布 $\Delta(z)$ から求められることを示している. 光ファイバの 2 波長でのモードフィールド半径分布 $w(z)$ 及び、比屈折率差分布 $\Delta(z)$ は市販の OTDR を用いて測定することができる [13], [14].

したがって、2 本のラマン利得効率スペクトルが既知である光ファイバを参照光ファイバとして用い、双方向 OTDR 法によりモードフィールド半径分布 $w(z)$ 及び、比屈折率差分布 $\Delta(z)$ を測定することにより、被測定光ファイバのラマン利得効率スペクトルの分布特性を測定できる.

本測定法は、ラマン利得係数 g_R と比屈折率差 Δ の関係、実効断面積 A_{eff} とモードフィールド半径 w の関係を用いたものである. これらのパラメータの波長依存性を双方向 OTDR 法により評価し、ラマン利得効率スペクトルを間接的に評価するため、励起光を必要としない. そのため、偏波依存性利得 (PDG) による偏波雑音の影響を受けない高精度な測定法である. 更に、2 波長でのモードフィールド半径の値からモードフィールド半径の波長依存性を間接的に評価するため、多波長 OTDR のような複雑な装置は必要なく市販の OTDR で測定できるため簡易である.

3. 測定誤差

提案法では OTDR により測定した後方散乱光強度を解析することでラマン利得効率を測定する. OTDR の散乱光信号は非常に微弱であるため、距離分解能を高めた測定では、その SN 比が問題になる.

本章では OTDR により測定した後方散乱光パワーのばらつきによる、ラマン利得効率の測定誤差について検討する.

OTDR により測定した、双方向からの後方散乱光のばらつきは、ともに等しく、その標準偏差が距離平均値 δS で表せると仮定すると、測定波長 λ_i ($i = 1, 2$) のモードフィールド半径のばらつき $\delta w(\lambda_i)$ は以下の式で表せる [13].

$$\begin{aligned} \delta w(\lambda_i) &= \sqrt{\left(\frac{\partial w(\lambda_i)}{\partial I(\lambda_i)} \right)^2 (\delta I(\lambda_i))^2} \\ &= w(\lambda_i) \left| \frac{\ln \frac{w(\lambda_i, z_1)}{w(\lambda_i, z_0)}}{I(\lambda_i, z_1) - I(\lambda_i, z_0)} \right| \sqrt{2} \delta S(\lambda_i) \end{aligned} \quad (14)$$

ただし、 $I(\lambda)$ は、不整損失寄与成分であり、双方向から測定した後方散乱光波形 (dB) の相乗平均である [13], [14]. $\delta I(\lambda)$ は、不整損失寄与成分のばらつきである. また、 z_0 , z_1 は、参照点である. なお、特に指摘する必要がない場合、距離方向を表す z は省略している.

任意の波長のモードフィールド半径は式 (11) で表

せる。したがって任意の波長のモードフィールド半径のばらつき $\delta w(\lambda)$ は、以下の式で表せる。

$$\begin{aligned}\delta w(\lambda) &= \sqrt{\sum_{i=1}^2 \left(\frac{\partial w(\lambda)}{\partial I(\lambda_i)} \right)^2 (\delta I(\lambda_i))^2} \\ &= \sqrt{\sum_{i=1}^2 (\delta w(\lambda_i))^2 \left(\frac{\partial w(\lambda)}{\partial w(\lambda_i)} \right)^2} \quad (15)\end{aligned}$$

ただし、

$$\begin{aligned}\frac{\partial w(\lambda)}{\partial w(\lambda_1)} &= \frac{-\lambda_2^{1.5} + \lambda^{1.5}}{\lambda_1^{1.5} - \lambda_2^{1.5}} \\ \frac{\partial w(\lambda)}{\partial w(\lambda_2)} &= \frac{\lambda_1^{1.5} - \lambda^{1.5}}{\lambda_1^{1.5} - \lambda_2^{1.5}} \quad (16)\end{aligned}$$

である。

式 (7), (11), (15), (16) より、実効断面積のばらつき $\delta A_{\text{eff}}(\lambda, \lambda_P)$ は、以下の式で記述できる。

$$\begin{aligned}\delta A_{\text{eff}}(\lambda, \lambda_P) &= \pi \sqrt{\sum_{i=1}^2 \left(\frac{\partial}{\partial I(\lambda_i)} \left(\frac{w^2(\lambda) + w^2(\lambda_P)}{2} \right) \right)^2 (\delta I(\lambda_i))^2} \\ &= \pi \sqrt{w^2(\lambda)(\delta w(\lambda))^2 + w^2(\lambda_P)(\delta w(\lambda_P))^2} \\ &+ 2w(\lambda)w(\lambda_P) \sum_{i=1}^2 (\delta w(\lambda_i))^2 \frac{\partial w(\lambda)}{\partial w(\lambda_i)} \frac{\partial w(\lambda_P)}{\partial w(\lambda_i)} \quad (17)\end{aligned}$$

次に、比屈折率差 Δ のばらつき $\delta \Delta$ は、次式で表せる [14]。

$$\begin{aligned}\delta \Delta &= \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta}{\partial I(\lambda_1)} \right)^2 (\delta I(\lambda_1))^2} \\ &= \frac{1}{k} (1 + k\Delta) \left(\frac{\ln 10}{10} \sqrt{2} \delta S(\lambda_1) + 2 \frac{\delta w(\lambda_1)}{w(\lambda_1)} \right) \quad (18)\end{aligned}$$

これらより、ラマン利得効率のばらつき $\delta G(\lambda, \lambda_P)$ は、次式で表せる。

$$\begin{aligned}\delta G(\lambda, \lambda_P) &= \sqrt{\sum_{i=1}^2 \left(\frac{\partial G(\lambda, \lambda_P)}{\partial I(\lambda_i)} \right)^2 (\delta I(\lambda_i))^2} \\ &= \sqrt{\frac{(\delta A_{\text{eff}}(\lambda, \lambda_P))^2}{A_{\text{eff}}^2(\lambda, \lambda_P)} \left(\frac{g_R(\lambda, \lambda_P)}{A_{\text{eff}}(\lambda, \lambda_P)} \right)^2} \\ &\quad - 2 \frac{\frac{g_R(\lambda, \lambda_P)}{A_{\text{eff}}(\lambda, \lambda_P)}}{A_{\text{eff}}^2(\lambda, \lambda_P)} \delta w(\lambda_1) \\ &\quad \cdot \left(w(\lambda_1) \frac{\partial w(\lambda)}{\partial w(\lambda_1)} + w(\lambda_P) \frac{\partial w(\lambda_P)}{\partial w(\lambda_1)} \right) \\ &\quad \cdot \left(\frac{\frac{g_R(\lambda, \lambda_P, z_1)}{A_{\text{eff}}(\lambda, \lambda_P, z_1)} A_{\text{eff}}(\lambda, \lambda_P, z_1)}{\Delta(z_1) - \Delta(z_0)} \delta \Delta \right. \\ &\quad \left. - \frac{\frac{g_R(\lambda, \lambda_P, z_0)}{A_{\text{eff}}(\lambda, \lambda_P, z_0)} A_{\text{eff}}(\lambda, \lambda_P, z_0)}{\Delta(z_1) - \Delta(z_0)} \delta \Delta \right) \quad (19)\end{aligned}$$

これらの式を用いて、OTDR による後方散乱光強度のばらつきが、提案法による測定結果へ及ぼす影響を、標準偏差の真値に対する相対誤差で評価した。後に述べる実験と対応をとるため、OTDR の測定波長 $\lambda_1 = 1.55 \mu\text{m}$, $\lambda_2 = 1.31 \mu\text{m}$ とし、表 1 に示すようなパラメータをもつ光ファイバに対して計算した。また、モードフィールド半径及びラマン利得効率の測定には、Fiber A, Fiber B を、比屈折率差の測定には Fiber B を参照光ファイバとした。簡単のため、後方散乱光強度のばらつき (標準偏差) は、波長によらず一定と仮定した。励起光波長 λ_P は $1.47 \mu\text{m}$ とした。

図 1 に、2 波長 $\lambda_1 = 1.55 \mu\text{m}$, $\lambda_2 = 1.31 \mu\text{m}$ における後方散乱光強度のばらつきによるモードフィールド半径の相対誤差を示す。2 波長における後方散乱光強度のばらつきを等しいと仮定したため、2 波長でのモードフィールド半径の相対誤差は、同一の値となる。また、式 (14) より、測定誤差は参照光ファイバのモードフィールド半径と後方散乱光強度のばらつきのみに依存するため、各光ファイバで相対誤差は同一の値を

表 1 ファイバ諸元

Table 1 The parameters of fibers.

Parameter	Fiber A	Fiber B	Fiber C	Fiber D
MFD at 1.31 μm	9.02	6.46	8.90	6.49
1.55 μm $\langle \mu\text{m} \rangle$	10.17	7.86	10.04	7.86
Cutoff wavelength $\langle \mu\text{m} \rangle$	1.26	1.15	-	1.01
Relative-index difference (%)	0.37	0.78	0.39	0.77
Loss factor at 1.47 μm $\langle \text{dB/km} \rangle$	0.24	0.238	0.24	0.288
Fiber type	SMF	DSF	SMF	DSF
Fiber length $\langle \text{km} \rangle$	25.0	9.99	25.2	20.0

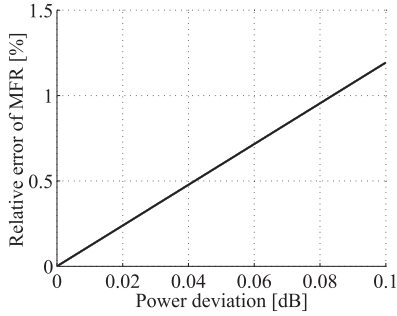


図1 後方散乱光強度のばらつきによるモードフィールド半径の相対誤差

Fig. 1 Relationships between power deviation and relative error of mode field radius.

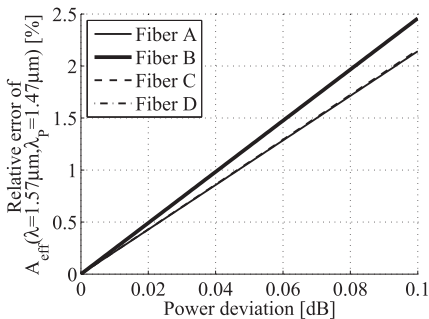


図2 後方散乱光強度のばらつきによるラマン利得ピーク波長での実効断面積 A_{eff} の相対誤差

Fig. 2 Relationships between power deviation and relative error of effective area at the peak gain wavelength.

とる。モードフィールド半径の測定値は、後方散乱光強度のばらつき 0.1 dB に対して、1.2%程度の誤差を含むことが分かる。

図2に、後方散乱光強度のばらつきによるラマン利得ピーク波長での実効断面積 $A_{eff}(\lambda = 1.57 \mu\text{m}, \lambda_P = 1.47 \mu\text{m})$ の相対誤差を示す。SMFであるFiber A、及びFiber Cと比べて、DSFであるFiber B、及びFiber Dの実効断面積の相対誤差が大きくなっている。これは、DSFのモードフィールド半径の波長依存性が大きいため、式(17)第3項の値が大きくなるためである。本測定法で算出した実効断面積は、後方散乱光強度のばらつき 0.1 dB に対して、2.5%程度の誤差を含むことが分かる。

図3に、後方散乱光強度のばらつきによる利得ピーク波長でのラマン利得効率 $g_R/A_{eff}(\lambda = 1.57 \mu\text{m}, \lambda_P = 1.47 \mu\text{m})$ の相対誤差を示す。実効断面積の相対誤差とほぼ同様の値となっている。これは、式(19)の第1項が第2項に比べて非常に大きく、ラマン利得効率の

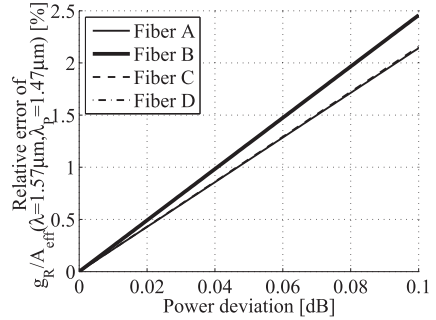


図3 後方散乱光強度のばらつきによる利得ピーク波長でのラマン利得効率 g_R/A_{eff} の相対誤差

Fig. 3 Relationships between power deviation and relative error of Raman gain efficiency at the peak gain wavelength.

相対誤差が、比屈折率差の相対誤差よりも、実効断面積の相対誤差に強く依存するためである。この結果より、実質的に実効断面積の誤差、つまりモードフィールド半径の相対誤差が、ラマン利得効率の主な相対誤差となることが分かる。本測定法で算出したラマン利得効率は、後方散乱光強度のばらつき 0.1 dB に対して、2.5%程度の誤差を含むことが分かる。

また、これらの結果より、モードフィールド半径の相対誤差約 1.2% に対して、実効断面積及び、ラマン利得効率の相対誤差は 2.5% 程度となることが分かる。

4. 原理確認実験

提案法を用いて、4本のポビン巻き光ファイバから構成される全長約 80 km の伝送路のラマン利得効率スペクトル $g_R(\lambda, z)/A_{eff}(\lambda, \lambda_P, z)$ の測定を行い、光スペクトルアナライザを用いた直接測定法 [9] による測定結果と比較することにより、提案法の有用性を確認する。

提案法による測定では、まず2波長 OTDR を用いて、双方向から伝送路の後方散乱光特性を測定する。次に、2波長での双方向からの後方散乱光波形を用いて、波長 $1.55 \mu\text{m}$ 及び $1.31 \mu\text{m}$ でのモードフィールド半径分布 $w(z)$ を求め [13]、式(12)より、各位置 z における任意の波長 λ における実効断面積のスペクトル分布 $A_{eff}(\lambda, \lambda_P = 1.47 \mu\text{m}, z)$ を求める。更に、比屈折率差分布 $\Delta(z)$ を求め [14]、式(13)により、ラマン利得効率スペクトル分布 $g_R(\lambda, z)/A_{eff}(\lambda, \lambda_P, z)$ を測定する。

なお、光スペクトルアナライザによる直接法での測定 [9] では、励起波長 $\lambda_P = 1.47 \mu\text{m}$ の半導体レーザーで励起し、可変波長光源を用いて、信号光波長 λ を、

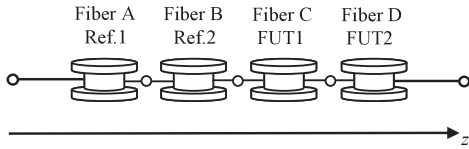


図 4 測定光ファイバの構成
Fig. 4 Configuration of measured fiber link.

1.52 μm から 1.62 μm まで波長掃引して測定している。また、励起光波長での損失分布を測定する必要があるが、励起光波長での各光ファイバの減衰定数は、ポビン巻き光ファイバごとに、白色光源とスペクトルアナライザを用いて、励起光波長での減衰量を測定し、光ファイバ長で除算することで、ポビン巻き光ファイバの平均的な減衰定数を求めた。今回の実験では、提案法での測定結果と光スペクトルアナライザによる直接法による測定結果を比較するため、提案法でも、励起光波長 λ_P は 1.47 μm とし、信号光波長 λ は、1.52 μm から 1.62 μm の範囲としてラマン利得効率スペクトル分布を求めた。図 4 に示すように、ITU-T G.652 準拠の標準的な SMF である Fiber A と Fiber C, ITU-T G.653 準拠の標準的な DSF である Fiber B と Fiber D を用いて、SMF と DSF を交互にコネクタ接続し、伝送路を構成した。なお、本測定法は、実伝送路のラマン利得効率スペクトル分布の測定を目的としており、実伝送路の大半は、SMF と DSF で構成されているため、この 2 種類の光ファイバを用いた。提案法による測定には、2 本の参照光ファイバが必要であるが、測定装置の集約を目的に、今回は Fiber A と Fiber B を参照光ファイバとして用い、Fiber C と Fiber D を被測定光ファイバとした。

表 1 に伝送路に使用した各光ファイバのパラメータを示す。

OTDR (Agilent E6003C) のパルス波長は、1.55 μm 及び 1.31 μm を使用し、パルス幅は、3 μs (空間分解能約 300 m), 平均化回数を 2^{19} 回として後方散乱光波形を測定した。

図 5 に、図 4 の光ファイバを双方向から OTDR により測定した後方散乱光特性を示す。実線及び破線は、それぞれ波長 1.55 μm 及び 1.31 μm での後方散乱光波形である。いずれも遠端まで明瞭な波形が得られていることが分かる。光ファイバ接続点至近に見られる反射は、コネクタ接続点でのフレネル反射であり、以降の図では、このコネクタ付近のフレネル反射の影響を含む部分は除去している。

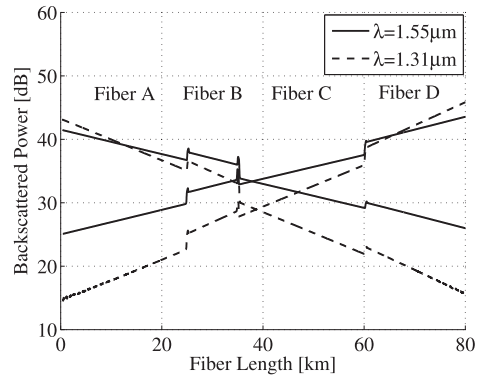


図 5 後方散乱光分布
Fig. 5 Backscattering distributions of the fiber link.

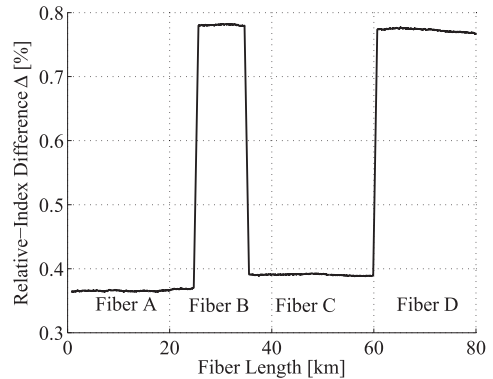


図 6 比屈折率差分布
Fig. 6 Relative-index difference distributions of the fiber link.

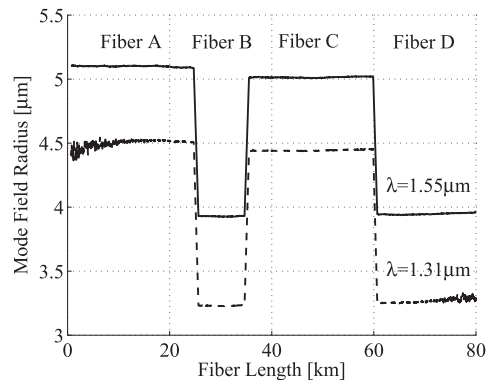


図 7 モードフィールド半径分布
Fig. 7 Mode-field radius distributions of the fiber link.

この四つのトレースを用いて、長手方向の比屈折率差分布及び、各波長でのモードフィールド半径分布を算出したものを、それぞれ図 6, 図 7 に示す。なお、

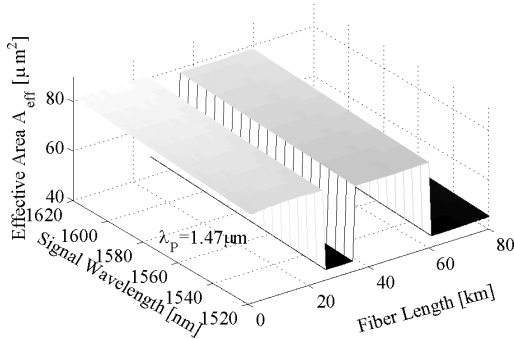


図8 実効断面積のスペクトル分布
Fig.8 Effective area spectrum distribution.

モードフィールド半径分布の測定には、2本の参照光ファイバが必要であり[13]、本測定では、Fiber AとFiber Bを参照光ファイバとして用いた。また、比屈折率差分布の測定には1本の参照光ファイバが必要であり[14]、本測定ではFiber Bを参照光ファイバとして用いた。Fiber A, Fiber B, Fiber C, Fiber Dの測定結果は、表1に示している値より、妥当な測定結果となっていることが分かる。なお、測定光ファイバの両端でモードフィールド半径の測定結果にばらつきが見られるが、これは、OTDRによる後方散乱光測定時のSN比の劣化によるものと思われる。このときの端から約6kmのモードフィールド半径の標準偏差の真値に対する相対誤差は、波長1.55μmでFiber A: 0.042%, Fiber D: 0.06%, 波長1.31μmでFiber A: 0.76%, Fiber D: 0.43%であった。

図8に、波長1.55μm及び1.31μmでのモードフィールド半径分布 w を用いて評価した実効断面積のスペクトル分布 $A_{eff}(\lambda, \lambda_p = 1.47 \mu\text{m}, z)$ を示す。実効断面積の値は、モードフィールド半径の値が小さいDSFの方が、SMFに比べて小さくなっている。また、モードフィールド半径分布と同じく、光ファイバの両端で実効断面積にばらつきが見られた。端から約6kmのラマン利得ピークである波長1.57μmでの実効断面積の標準偏差は、Fiber A: 0.18%, Fiber D: 0.17%であった。先に示したモードフィールド半径の標準偏差と式(16), (17)により計算した実効断面積のばらつきによる相対誤差の理論値は、Fiber A: 0.18%, Fiber D: 0.17%であり、測定誤差の実測値と理論値とが一致している。

図9に、以上の結果から求めた、励起光波長 λ_p が1.47μmでの、信号光波長 λ が1.52μmから1.62μm

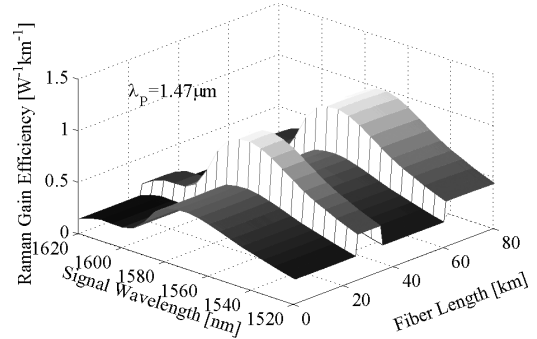


図9 ラマン利得効率スペクトル分布
Fig.9 Raman gain efficiency spectrum distribution of the fiber link.

のラマン利得効率スペクトル分布を示す。なお、ラマン利得効率スペクトルの参照光ファイバとして、Fiber A及び、Fiber Bを用いた。ファイバの種類がDSFであるFiber Dのラマン利得効率は、SMFであるFiber Cよりも大きくなっていることが分かる。また、同一ファイバの分布は、ほぼ同じラマン利得効率値をとっており、測定に使用した光ファイバの均一性が高いことが分かる。また、GeO₂の添加濃度 χ_{GeO_2} が高く、実効断面積 A_{eff} が小さいDSFの方が、SMFよりもラマン利得効率の値は大きくなっている。また、モードフィールド半径、実効断面積分布と同じく、光ファイバの両端でばらつきが見られた。端から約6kmのラマン利得ピークである波長1.57μmでのラマン利得効率の標準偏差は、Fiber A: 0.18%, Fiber D: 0.18%であった。式(19)により計算したラマン利得効率のばらつきによる相対誤差の理論値は、Fiber A: 0.18%, Fiber D: 0.16%であり、測定誤差の実測値と理論値とが、ほぼ一致している。

図10に被測定光ファイバの全長に対する規格化ラマン利得効率スペクトルの平均値を示す。ただし、縦軸は、Fiber Bの利得最大値で規格化している。点は光スペクトルアナライザにより測定したラマン利得効率スペクトルの真値であり、実線がFiber AとFiber Bの2本を参照光ファイバとして用いて、提案法により測定した結果である。Fiber C, Fiber Dともに提案法による測定結果と光スペクトルアナライザで測定したラマン利得効率の真値は、ほぼ一致している。

図11に、提案法による測定結果と光スペクトルアナライザを用いた直接法による測定結果の相対誤差を示す。相対誤差は約5%以下と十分小さく、伝送路設計の観点では十分実用的であると思われる。

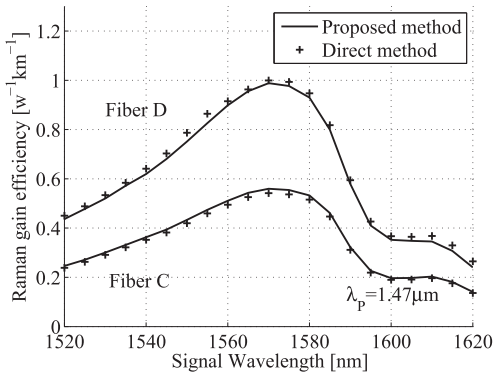


図 10 各ファイバごとのラマン利得効率スペクトル距離平均
Fig. 10 Averaged Raman gain efficiency spectrum of each fiber.

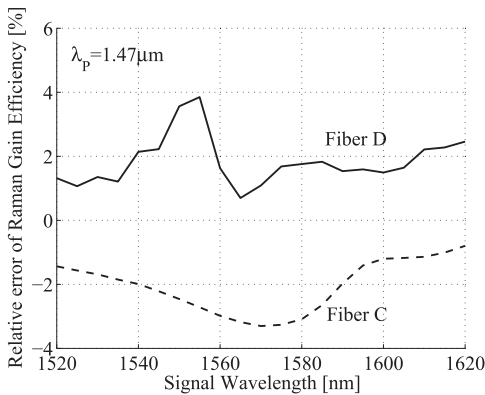


図 11 ラマン利得効率スペクトルの相対誤差
Fig. 11 Relative errors of average Raman gain efficiency spectra of fibers under test.

したがって、本提案法を用いて測定したラマン利得効率スペクトル分布の平均値と光スペクトルアナライザを用いた直接法の結果が 2 種類のファイバに対してほぼ一致していることから本測定法の妥当性が明らかになった。

5. む す び

励起光を用いずに光ファイバのラマン利得効率スペクトルの分布特性を評価する間接測定法を提案した。提案法は、励起光の減衰による測定精度の低下を気にする必要がないため、OTDR の測定限界距離まで長距離測定が可能であるが、その測定限界距離や距離分解能は、OTDR により測定した後方散乱光強度の SN 比に依存する。そこで、後方散乱光強度のばらつきによる提案法の測定誤差を解析的に評価した。次に、提

案法を用いて、2 本の参照光ファイバと 2 本の被測定光ファイバからなる光伝送路のラマン利得効率スペクトルの分布特性を測定し、光スペクトルアナライザにより測定した結果と比較した。提案法による測定結果と光スペクトルアナライザを用いた直接測定法による測定結果の相対誤差は、5%以下と十分小さく、提案法が有効であることが確認された。

本提案法は、簡易な方法であり、励起光を用いないため、偏波依存性利得の影響を受けない高精度な測定が可能である。本提案法は、既設伝送路を用いたシステムのアップグレードにおいて有益な測定法になると思われる。

文 献

- [1] M.N. Islam, "Raman amplifiers for telecommunications," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol.8, no.3, pp.548–559, May/June 2002.
- [2] H. Masuda, M. Tomizawa, and Y. Miyamoto, "High-performance distributed Raman amplification systems: Practical aspects and field trial results," 2005 Optical Fiber Communications Conf., no.OthF5, Anaheim, U.S.A., March 2005.
- [3] M. Tomizawa, A. Hirano, and Y. Miyamoto, "Safety issues in high-power optical fibre communication systems, including distributed Raman amplification systems," *Proc. 2003 International Laser Safety Conf.*, no.1003, pp.291–297, Jacksonville, U.S.A., 2003.
- [4] D. Mahgerefteh, D.L. Butler, J. Goldhar, B. Rosenberg, and G.L. Burdge, "Technique for measurement of the Raman gain coefficient in optical fibers," *Opt. Lett.*, vol.21, no.24, pp.2026–2028, Dec. 1996.
- [5] M. Wuilpart, G. Ravet, P. Megret, and M. Blondel, "Distributed measurement of Raman gain spectrum in concatenations of optical fibres with OTDR," *Electron. Lett.*, vol.39, no.1, pp.88–89, Jan. 2003.
- [6] K. Toge and K. Hogari, "Raman gain efficiency distribution measurement in single-mode optical fibers by using backscattering technique," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol.17, no.8, pp.1704–1706, Aug. 2005.
- [7] 尾路京一, 旗田宏樹, 山下育男, 大橋正治, "OTDR による多段接続された各ファイバのラマン利得効率の測定," *電学論 (C)*, vol.128, no.1, pp.152–153, 2008.
- [8] 堤 康宏, 大橋正治, 藪 哲郎, 尾路京一, 山下育夫, "OTDR を用いたラマン利得効率分布の簡易測定法," *信学論 (B)*, vol.J93-B, no.8, pp.1043–1050, Aug. 2010.
- [9] Y. Kang, Calculations and Measurements of Raman Gain Coefficients of Different Fiber Types, M.S. Thesis, Dept. Electrical Engineering, Virginia Polytechnic Inst., Blacksburg, VA. [Online]. Available: <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-01102003-020757/>, 2002.

- [10] S.T. Davey, D.L. Williams, B.J. Ainslie, W.J.M. Rothwell, and B. Wakefield, "Optical gain spectrum of GeO₂-SiO₂ Raman fibre amplifiers," IEE Proc. J. Optoelectronics, vol.136, no.6, pp.301-306, Dec. 1989.
- [11] K. Thyagarajan and C. Kakkar, "Fiber design for broad-band gain-flattened Raman fiber amplifier," IEEE Photonics Technol. Lett., vol.15, no.12, pp.1701-1703, Dec. 2003.
- [12] K. Nakajima, M. Ohashi, and M. Tateda, "Chromatic dispersion distribution measurement along a single-mode optical fiber," J. Lightwave Technol. Lett., vol.15, no.7, pp.1095-1101, July 1997.
- [13] A. Rossaro, M. Schiano, T. Tambosso, and D. D'Alessandro, "Spatially resolved chromatic dispersion measurement by a bidirectional OTDR technique," IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., vol.7, no.3, pp.475-483, May/June 2001.
- [14] M. Ohashi, "Novel OTDR technique for measuring relative-index difference of fiber links," IEEE Photonics Technol. Lett., vol.18, no.24, pp.2584-2586, Dec. 2006.

(平成 23 年 5 月 26 日受付, 9 月 14 日再受付)



堤 康宏 (学生員)

平 19 阪府大・電気電子システム卒。平 21 同大学院博士前期課程了。現在、同大学院博士後期課程に在学中。OTDR を用いたファイバパラメータの測定法に関する研究に従事。



大橋 正治 (正員)

昭 52 名工大・電気卒。昭 54 東北大学院博士前期課程了。同年日本電信電話公社(現 NTT)茨城電気通信研究所入所。以来、光ファイバの設計、伝送特性、測定法の研究、光ファイバの低損失化技術に関する研究に従事。平 9 から平 20 まで ITU-TSG15 の光ファイバ海底ケーブルシステム課題のラポータ。平 14 より阪府大・工・教授。工博、現在に至る。共著「光ファイバとファイバ形デバイス」(培風館)。応用物理学会、IEEE、OSA 各会員。