

# 分布ラマン増幅伝送のための光ファイバの研究

2014 年 3 月

埼玉大学大学院理工学研究科 (博士後期課程)  
理工学専攻 (主指導教員 白井 肇 教授)

深井 千里



# 目次

## 第 1 章：序論

1.1	はじめに	1
1.2	技術背景	3
1.2.1	光通信における大容量化技術	3
1.2.2	光通信における光増幅技術	5
1.2.3	光ファイバにおけるラマン増幅の特長	8
1.3	本研究の背景と目的	9
1.3.1	光ファイバの研究経緯	9
1.3.2	目的と検討課題	16
1.4	本論文の構成	17

## 第 2 章：充実型光ファイバの DRA 特性

2.1	はじめに	19
2.2	光ファイバ構造とラマン特性	19
2.2.1	ドーパントとラマン利得特性の関係	19
2.2.2	屈折率分布とラマン利得特性の関係	24
2.3	WDM 伝送システムにおける DRA 特性	28
2.3.1	計算モデル	28
2.3.2	光ファイバパラメータと DRA 伝送性能の関係	31
2.3.3	DRA を適応した WDM 伝送システムに最適な光ファイバ設計	39
2.4	まとめ	41

### 第3章：PCFのDRA特性

3.1	はじめに	43
3.2	PCFのラマン特性	43
3.2.1	ラマン利得係数スペクトル特性	43
3.2.2	ラマン利得係数の波長特性	47
3.3	PCFにおけるDRA伝送特性	49
3.3.1	DRAを適応した伝送特性	49
3.3.2	広波長帯域におけるDRAの適応性	55
3.3.3	DRA伝送におけるPCFの設計	56
3.4	まとめ	60

### 第4章：RG-DFのDRA特性

4.1	はじめに	63
4.2	RG-DFのラマン増幅特性	63
4.2.1	計算モデル	63
4.2.2	DRAを適応した伝送特性	66
4.3	RG-DFによるSNR改善効果	70
4.3.1	ファイバパラメータとSNR改善効果の関係	70
4.3.2	DRA伝送におけるRG-DFの設計	72
4.4	まとめ	75

### 第5章：高出力光照射に対する光ファイバの長期信頼性

5.1	はじめに	77
5.2	高出力光照射による光ファイバへの影響	77
5.2.1	純石英ガラスにおける光反応	77

5.2.2	ゲルマニウムドープガラスにおける光反応	79
5.3	実験	80
5.3.1	実験構成	80
5.3.2	SCF の光学特性変化	81
5.3.3	DSF の光学特性変化	84
5.4	長期信頼性	86
5.5	まとめ	88
第6章：結論		91
参考文献		93
記号一覧		102
用語一覧		110
発表論文一覧		113
謝辞		117



# 第1章：序論

## 1.1 はじめに

現在、光ファイバを用いた光通信ネットワークによって、電話、インターネット、並びにテレビなどのサービスが提供されている。図 1-1 は光通信ネットワークのイメージ図を示す。光通信ネットワークは主に、家庭やオフィス等のユーザと通信設備センタを結ぶアクセス系ネットワーク、陸上において設備センタ相互を結ぶコア系ネットワーク、並びに海底を經由して設備センタ相互を結ぶ海底ネットワークに分類される。光通信ネットワークの発展においては、光ファイバの低損失性及び広帯域性の特長から経済効果をもっとも発揮しやすいコア系ネットワークから光ファイバの導入が開始され、1981 年、マルチモード光ファイバを用いた中継間隔 20 km（光通信波長 1310 nm、通信速度 32 Mbps）及び 10 km（光通信波長 1310 nm、通信速度 100 Mbps）の光通信ネットワークが構築された[1-1]。その後、ネットワークの大容量・長距離化が推進され、現在ではコア系ネットワークは 1 スパンあたり 80 km の光ファイバに光増幅器を接続し、合計 4 スパン(中継間隔 320 km) から構成されている。

図 1-2 はコア系ネットワークにおけるインターネットトラフィック総量の試算を示しており[1-2]、[1-3]、近年、インターネットの人口普及率が増大し[1-4]、また、情報通信機器が多様化され、その保有率が増加される[1-5]とともに、トラフィック総量は年間 200 Gbps ずつ着実に増大し、10 年から 20 年後には現在の 2 倍から 3 倍の伝送容量が必要になると試算される。このため、光通信ネットワークの大容量化に関する研究開発が進められ、様々な技術が導入されている。図 1-3 はコア系ネットワークの大容量化技術における商用化年度と光ファイバー芯当たりの伝送容量を示す[1-6]。1980 年代初頭に導入された光通信システムは、時分割多重(Time division multiplexing : TDM)技術によって 1996 年までに 10 Gbps まで伝送容量を拡大し、その後、波長分割多重(Wavelength division multiplexing : WDM)技術との併用により、現在では光ファイバー芯当たりの伝送容量は 1.6 Tbps まで拡大されている。この大容量化技術とともに、1995 年以降には光増幅技術が商用化され、現在ではエルビウム添加光ファイバ増幅器(Erbium doped fiber amplifier : EDFA)及び分布ラマン増幅(Distributed Raman amplification : DRA)技術が併用されている。

本章では、光通信ネットワークにおける技術背景を概説し、本研究の目的と位置づけについて述べる。

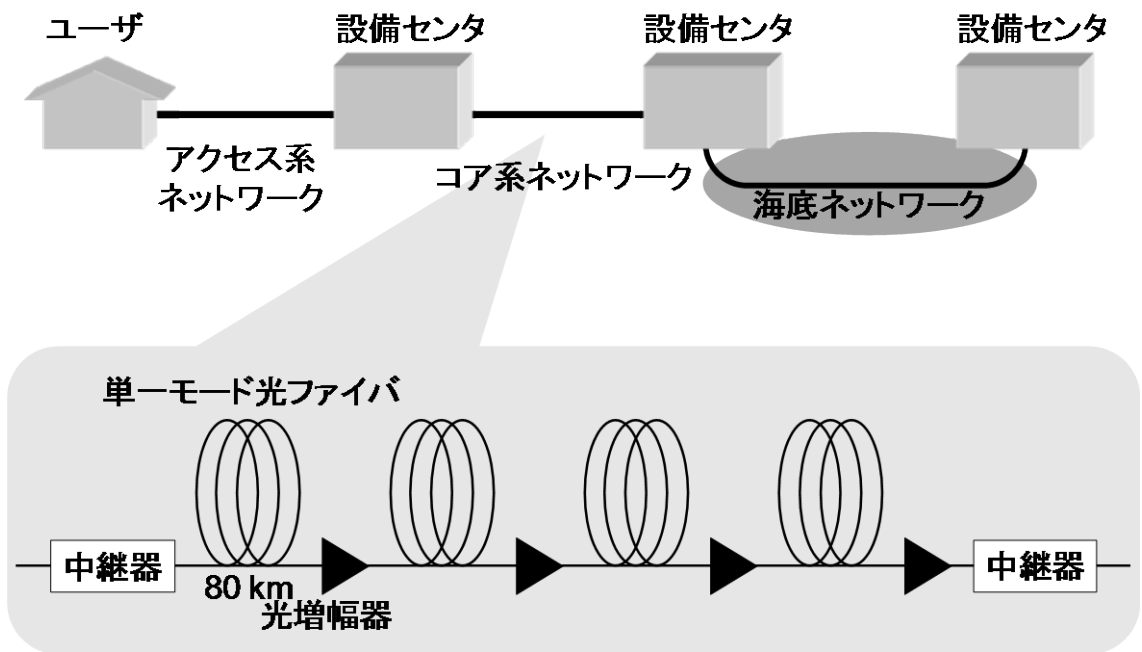


図 1-1 光通信ネットワークのイメージ図

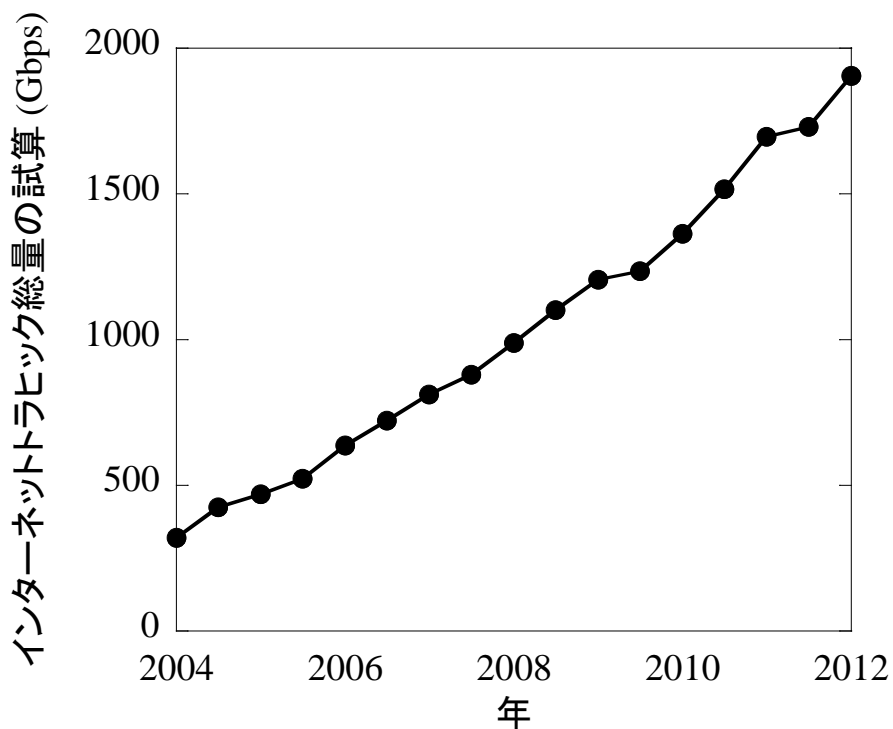


図 1-2 コア系ネットワークにおけるインターネットトラフィック総量の試算



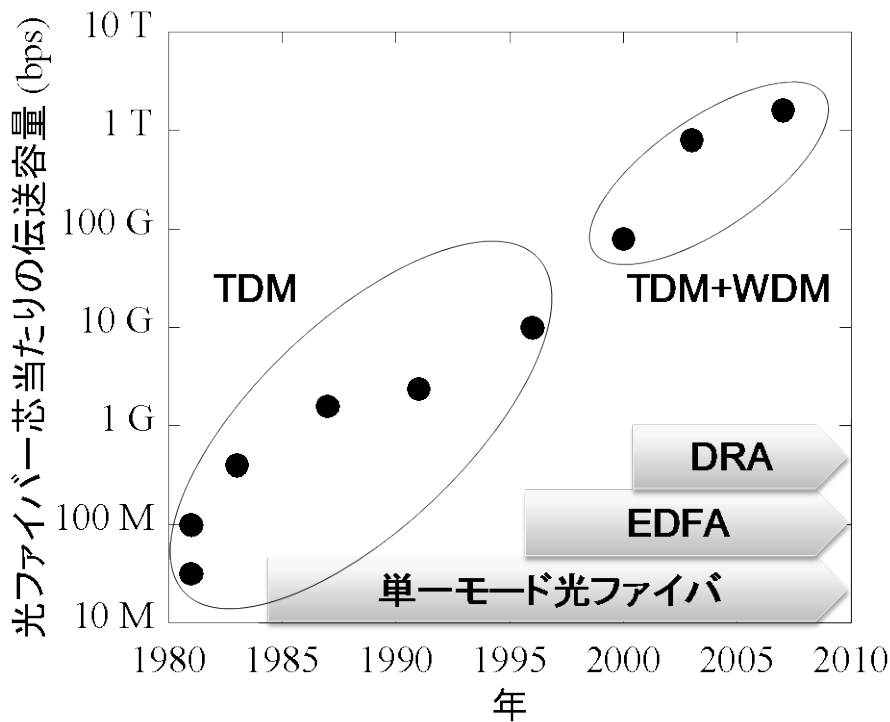


図 1-3 コア系ネットワークの大容量化技術における商用化年度と光ファイバー芯当たりの伝送容量

## 1.2 技術背景

### 1.2.1 光通信ネットワークにおける大容量化技術

複数のチャンネルの信号を束ねて 1 本の光ファイバで伝送することを多重化という。現在導入されている多重化技術には TDM 及び WDM があり、図 1-4 及び図 1-5 にそれぞれ原理を示す[1-7]。TDM は、複数の低速信号を時間軸上で多重化し、より高速の信号伝送を行い、分離器で分離された光信号を各送信機のタイミングに合うように対応する受信機によって受信する方法である。一方、WDM は、送信側において波長の異なる複数の光信号を波長軸上で多重化し、より広帯域な信号伝送を行い、光分波器によって分離された光信号を各送信機の波長に対応する受信機によって受信する方法である。このように、TDM 及び WDM 技術により、信号を多重化して伝送することによって、光ファイバー芯当たりの伝送容量を大容量化することが可能である。尚、WDM は、波長の間隔によって、粗密度 WDM(Coarse wavelength division multiplexing : CWDM)と高密度 WDM (Dense wavelength division multiplexing : DWDM)の 2 種類に分類され[1-8]、コア系ネットワークでは主に DWDM が用いられるため、本研究では WDM として DWDM を想定することとする。

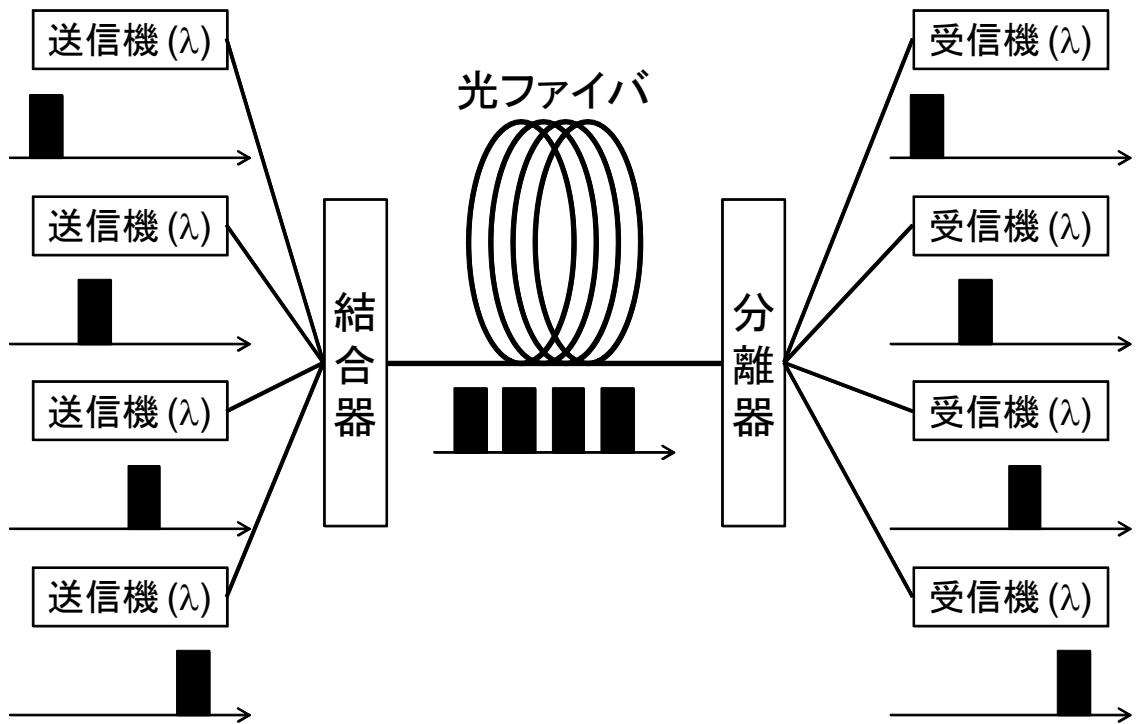


図 1-4 TDM 伝送システム

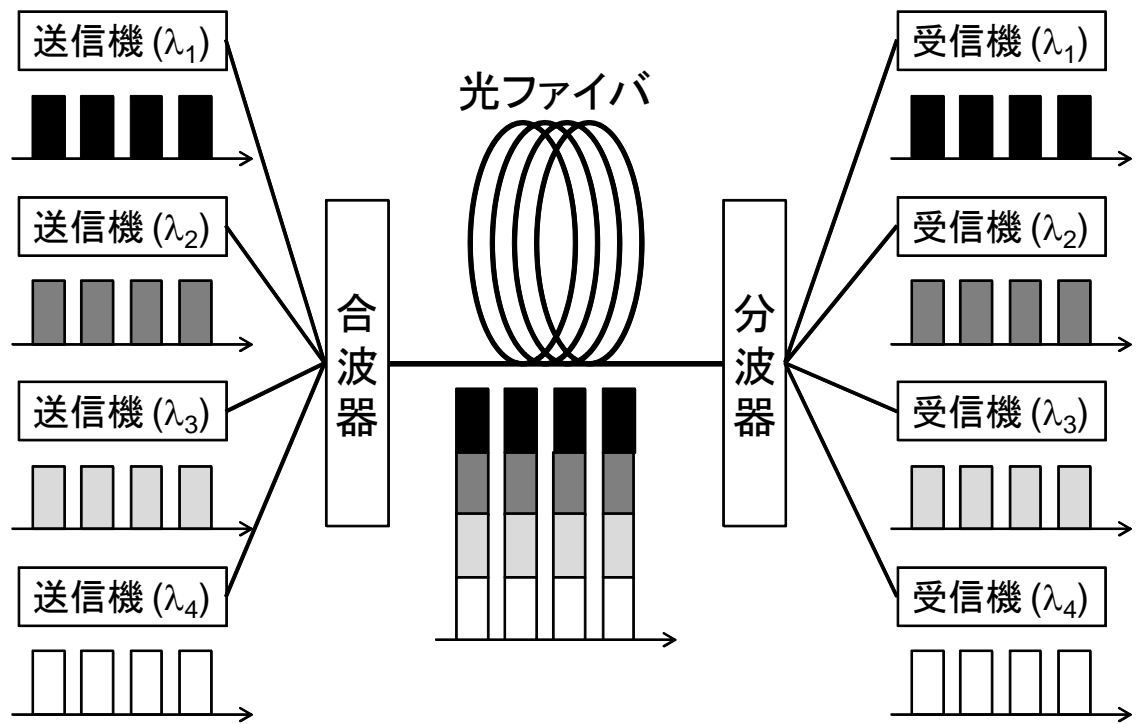


図 1-5 WDM 伝送システム

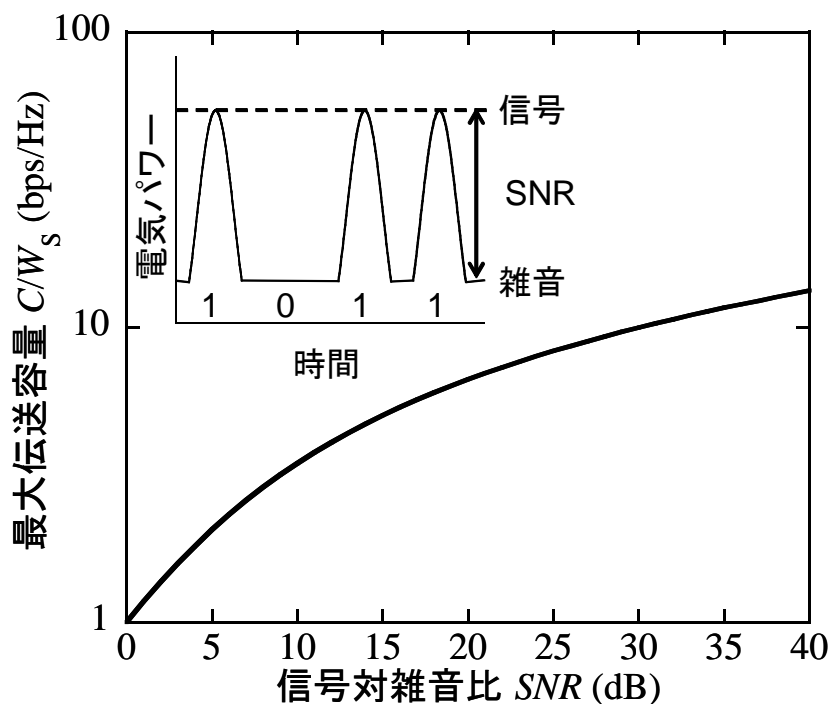


図 1-6 最大伝送容量と信号対雑音比の関係

TDM 及び WDM 技術のいずれを用いる場合においても、シャノン理論により伝送容量の指標となる周波数利用効率  $C/W_s$  が信号対雑音比(Signal-to-noise ratio : SNR)によって制限されることが知られている[1-9]。SNR とは、受信機において時間軸上で計測される電気パワーの信号領域と雑音領域の差のことである。図 1-6 は、式(1-1)より求めた SNR に対する  $C/W_s$  を示す。

$$C/W_s = \log_2(1 + SNR) \quad (1-1)$$

ここで、 $C$  及び  $W_s$  は、それぞれ最大伝送容量及び信号帯域を表す。また、図 1-6 より、SNR の減少とともに周波数利用効率つまり伝送容量が制限されることが分かる。このため、伝送容量を拡大するためには、TDM 及び WDM 技術を活用するとともに、光増幅技術によって受信機における SNR を改善することが重要である。

## 1.2.2 光通信ネットワークにおける光増幅技術

光増幅技術とは、光信号を電気信号に変換することなく、光信号を直接増幅する技術であり、ピコ秒以下の短光パルスの増幅が可能である。また、直接的な増幅であるため、出

光光に入力光の位相情報が保存されるなどのメリットがある。光増幅技術は、動作原理として、半導体光増幅器(Semiconductor optical amplifier : SOA)及び希土類添加型光増幅器などの誘導放出現象を用いるものと、ラマン増幅などの非線形光学現象を用いるものに大別される[1-10]。誘導放出現象を用いるものは集中型増幅器として使用することが可能であり、一方、ラマン増幅では集中型だけでなく分布型としても使用することが可能である。

SOA では、半導体チップに電流を注入することにより反転分布を形成し、反転分布のエネルギー準位に応じた信号光を入射すると誘導放出により信号光が増幅される。小型であるため他の光素子との集積化に優れ、また増幅波長帯域の自由度が高いという特長をもつ。一方では、比較的雑音指数が高く、光ファイバとの結合損失も大きいことから、光増幅器としての利用例は少なく、半導体集積化回路での波長変換や光路スイッチ等のデバイスとしての利用が検討されている。

希土類添加型光増幅器では、希土類を添加した光ファイバに強い光を入射することにより反転分布を形成し、反転分布のエネルギー準位に応じた信号光を入射すると誘導放出により信号光が増幅される。高効率で低雑音性を実現し、また大出力化や低偏波依存性等の特性をもつ。一方では、添加した希土類のもつエネルギー準位に依存して増幅波長帯域が制限されるという欠点をもつ。図 1-7 は、光増幅器と増幅波長帯域の関係を示す[1-11]。図中のプロットは一般的な光ファイバの伝送損失の測定例を示す。光通信波長帯域は、波長

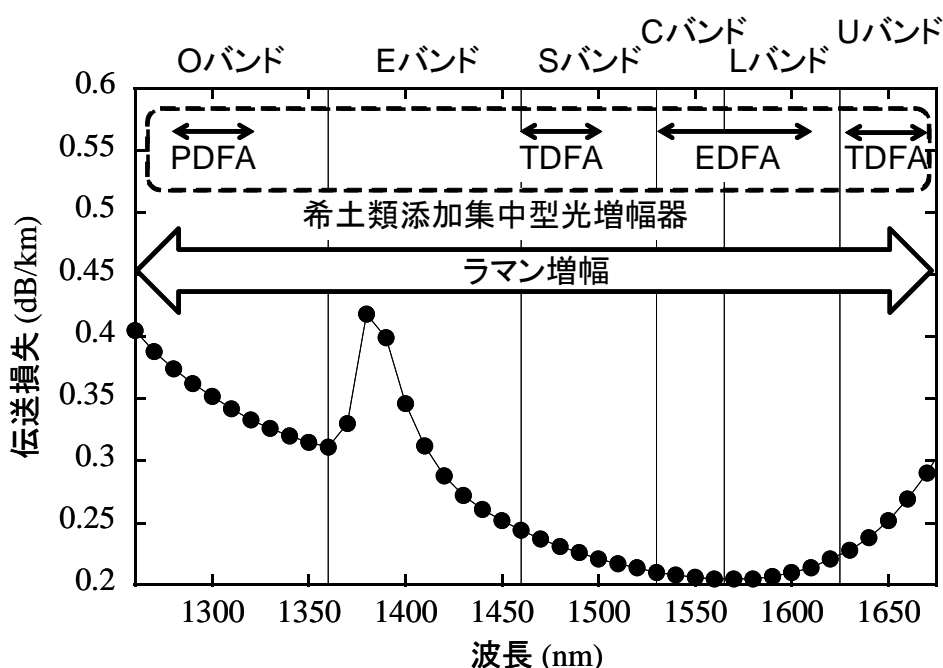


図 1-7 光増幅器と増幅波長帯域の関係

1260 から 1675 nm の範囲で使用することが可能であり、それぞれ、O バンド、E バンド、S バンド、C バンド、L バンド、U バンドと区分されている。現在、伝送損失が小さい 1530 から 1600 nm 帯の C、L バンドがコア系ネットワークでは主に使用されており、希土類添加型光増幅器としてエルビウムを添加した EDFA が用いられている。また、1310 nm 帯の O バンドではプラセオジウムを添加した光ファイバ増幅器(Praseodymium doped fiber amplifier : PDFA)があり、1480 nm 帯の S バンド及び 1650 nm 帯の U バンドでは、それぞれツリウムを添加した光ファイバ増幅器(Thulium doped fiber amplifier : TDFA)などがある。

ラマン増幅は、光ファイバの非線形光学効果の一つであるラマン散乱効果を用いた増幅技術である。光ファイバに励起光を入射すると、そのうちの一部がガラス分子の光学フォノンを励起することによってエネルギーを失い、その分だけ低い周波数の光へと変換される。励起によって消失するエネルギー分だけ励起光から周波数シフトした信号光を励起光と同時に光ファイバに入射することにより、励起光パワーが信号光へ遷移し、信号光が増幅される。図 1-8 は、エネルギー準位におけるラマン増幅過程のイメージを示す[1-12]。量子力学的には、媒質中の電子が光子を吸収し仮想状態へ励起し脱励起する過程で自然ないし誘導放出を行い一つ上の分子準位に帰着する過程において増幅が行われる。ラマン増幅では、増幅波長帯域が広帯域であること、さらに、実準位が存在しないため、信号光吸収が小さく、自然放出光(Amplified spontaneous emission : ASE)の割合が小さくなり、上の準位が実在するため下の準位に電子が存在すると信号光を吸収して自然放出光の割合が増加してしまう EDFA に比べ、低雑音化が容易であるという特長がある。一方、高出力な励起光源が必要であり、また、EDFA と比較して低効率であるという欠点を持つ。現在の商用化システムでは、多波長の励起光源を用い、トータル励起パワーが 500 mW 以下となる[1-13] ように調整した多波長励起による DRA が EDFA と併用して用いられている。

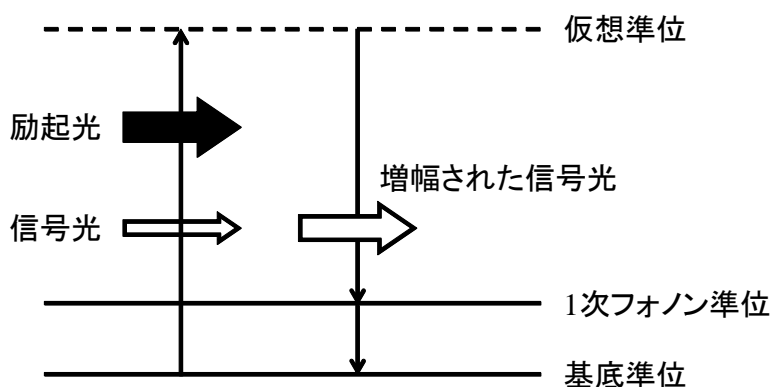


図 1-8 ラマン増幅過程

### 1.2.3 光ファイバにおけるラマン増幅の特長

光ファイバにおけるラマン増幅は、TDM や WDM 伝送システムにおける光増幅技術として優れた特長をもつ[1-14]。光ファイバ中のラマン散乱は、光学フォノンの分散関係が波数に対してほぼ一様であるため、励起光と信号光の伝搬方向に依存せずに位相整合を取ることが可能であり、前方及び後方励起の増幅が可能である。増幅帯域が増幅媒体に依存する周波数シフト量によって決められるため、励起波長を選択することにより任意の波長帯域の信号光を増幅することが可能である。また、励起波長を多重化することによって、増幅される信号波長の帯域も広帯域化し、多重化信号の一括増幅が可能であるとともに、励起光の波長配置及びパワーを最適化することにより容易に利得等化を行うことができる[1-15]。さらに、ラマン増幅は石英系光ファイバ中で発生するラマン散乱効果を用いることが可能であるため、伝送用光ファイバを増幅媒体として利用することができ、集中型だけでなく、分布型の増幅器として用いることが可能である。図 1-9 は、信号レベルのダイアグラムを表す。点線及び実線はそれぞれ集中型及び分布型を使用した場合の光パワーを示す。集中型では、伝送路中信号はその損失係数に応じて一様に減衰し、中継地点にある集中型光増幅器によって信号レベルが復元する。この際、光増幅に伴う雑音(量子雑音)は、光増幅器への信号入力レベルが低いほど大きくなる。そのため、信号レベルを全体的に高く設定しようとする、今度は、スパンへの入力信号レベルが高くなりすぎて、例えば自己位相変調(Self-phase modulation : SPM)[1-16]などの非線形現象により、信号波形が劣化してしまう。分布型の増幅を用いると、伝送路ファイバの損失係数が利得によって補償されるので、高い伝送性能を保持したまま伝送することが可能となる。

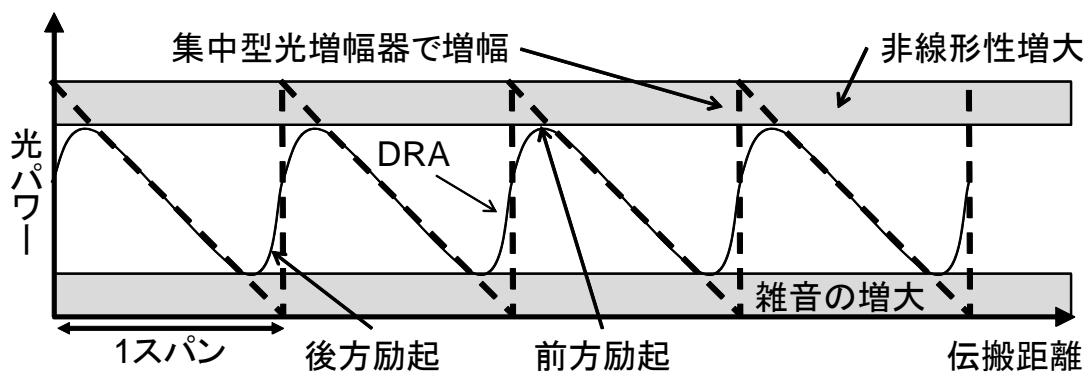


図 1-9 信号レベルのダイアグラム

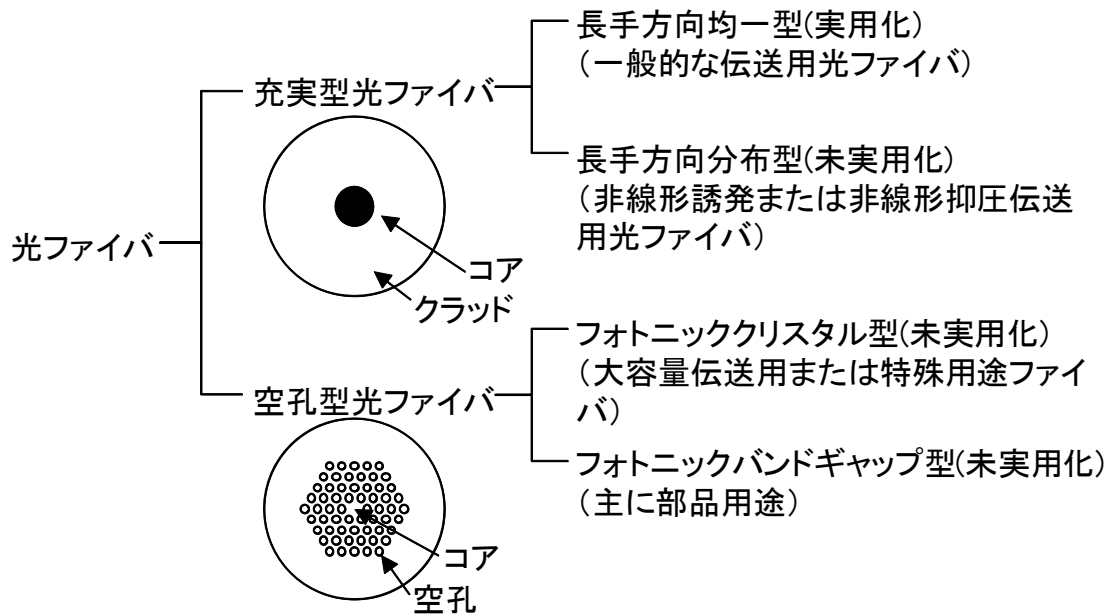


図 1-10 研究開発における光ファイバの分類

### 1.3 本研究の背景と目的

#### 1.3.1 光ファイバの研究経緯

一般に用いられる単一モード光ファイバは、石英を主成分としたガラス構造となっており、コアとクラッドからなる。図 1-10 は研究開発における光ファイバの分類を示す。充実型光ファイバは、石英ファイバのコアまたはクラッドにドーパントを添加してコアとクラッドの屈折率差を設けることにより、コアに光を閉じ込めて信号伝送を行うことができ、光ファイバの長手方向におけるファイバパラメータが均一であるタイプ、並びに長手方向におけるファイバパラメータが分布しているタイプに分類することができる。一方、空孔型光ファイバは、主に大容量伝送用や特殊用途に用いられるフォトニッククリスタル型と、現在、部品用途として研究が進められているフォトニックバンドギャップ型に分類することができ、フォトニッククリスタルファイバ(Photonic crystal fiber : PCF) では石英ファイバの断面にコアとなる部分を除いて複数個の空孔を設け、空孔中に充填されている空気により空孔層の実質的な屈折率を下げることによってコアに光を閉じ込めて信号伝送を行うことができる。現在、実用化されている光ファイバは、長手方向に均一なファイバパラメータを有する充実型光ファイバであり、気相軸付け法(Vapor axial deposition : VAD)[1-17]等によって製造される。その他の光ファイバは、既存の製造法では伝送損失が大きく、現状では

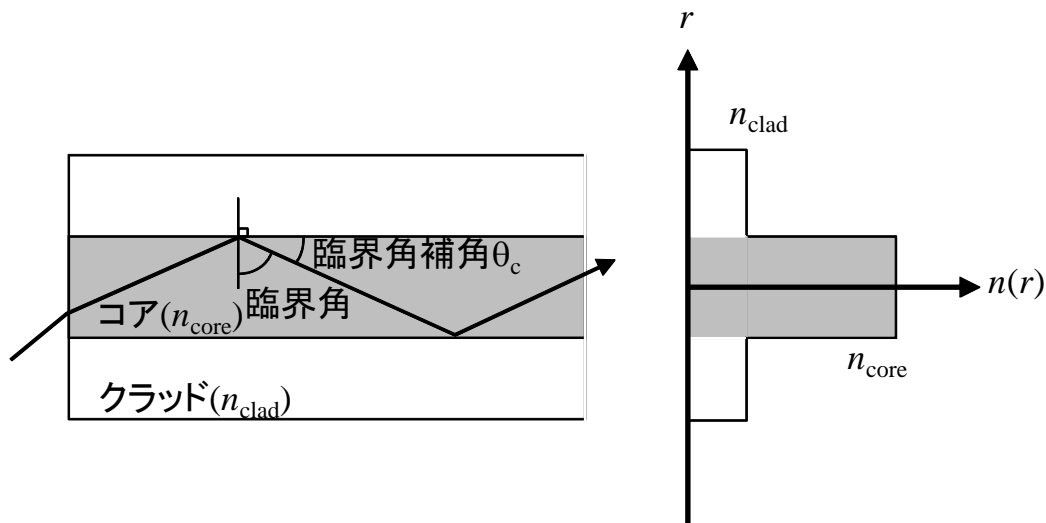


図 1-11 充実型光ファイバの概念図及び屈折率分布

実用化が困難であり、将来の伝送路の候補として研究が進められている。

図 1-11 はステップ型の屈折率分布を有する充実型光ファイバの概念図及び屈折率分布を示す。ここで、 $n_{core}$ 、及び  $n_{clad}$  はコア及びクラッドの屈折率を表す。スネルの法則より式(1-2)を満たす臨界角補角 $\theta_c$ 以下の角度となるように信号光を入射することにより、入射信号光はコアとクラッドとの境界において全反射しながらコアに閉じ込められたまま信号伝送を行うことが可能である[1-18]。

$$\cos \theta_c = \frac{n_{clad}}{n_{core}} \quad (1-2)$$

光通信に用いられる光ファイバは、国際標準化団体である ITU-T(International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector)によってその特性が勧告化されている。表 1-1 に単一モード光ファイバ(G.652.A)の光ファイバ特性を示す[1-19]。ここで、クラッド直径、コア偏心量、並びにクラッド非円率は光ファイバの製造精度を表し、また、引張応力は光ファイバの機械特性を表す。モードフィールド径(Mode field diameter : MFD)、遮断波長、曲げ損失、並びに波長分散は、光通信における伝送性能にかかわる光学特性を表し、光ファイバの屈折率分布の設計により制御することが可能であり、多層分割法や有限要素法を用いることによって数値解析により各特性を算出することが可能である[1-20]。以下に各光学特性について説明する。



モードフィールド径 (波長1310 nm)	8.6-9.5 ±0.6 μm
クラッド径	125.0 ±1 μm
コア偏心量	0.6 μm
クラッド非円率	1.0%
最大遮断波長	1260 nm
曲げ損失 (波長1550 nm, 曲げ半径30 mm, 巻き回数100回)	0.1 dB
引張応力	0.69 Gpa
波長分散	1300-1324 nm
分散スロープ	0.092 ps/nm <sup>2</sup> × km

表 1-1 光ファイバ特性

### MFD

MFD は電界分布の拡がりを示すパラメータであり、軸中心からの距離  $r$  及び電界強度  $\phi(r)$  を用いて式(1-3)より  $W$  として算出することが可能である[1-21]。

$$W^2 = 2 \frac{\int_0^\infty \phi^2(r) r^3 dr}{\int_0^\infty \phi^2(r) r dr} \quad (1-3)$$

図 1-12 は SMF の電界分布の測定例を示す。MFD は、単一モード光ファイバに使用波長の光を入射し、光ファイバ端面からの遠方出射パターンをフォトディテクタ(Photo detector : PD)を用いて受光する遠方出射法(Far field pattern : FFP)[1-22]を用いて測定した FFP の光強度分布から求めることが可能であり、FFP の光強度分布  $F(\theta)$  は電界分布  $\phi(r)$  とハンケル変換により関連し、式(1-4)及び式(1-5)に記述できる[1-23]。

$$F(\theta) = A_1 \int \phi(r) J_0 \left( \frac{2\pi}{\lambda} r \sin \theta \right) r dr \quad (1-4)$$

$$\phi(r) = A_2 \int F(\theta) J_0 \left( \frac{2\pi}{\lambda} r \sin \theta \right) \sin 2\theta d\theta \quad (1-5)$$

ここで、 $A_1$  及び  $A_2$  は、それぞれ定数である。式(1-3)を式(1-4)及び式(1-5)を用いて、FFP 測定による MFD の定義式である式(1-6)を導出することができる。

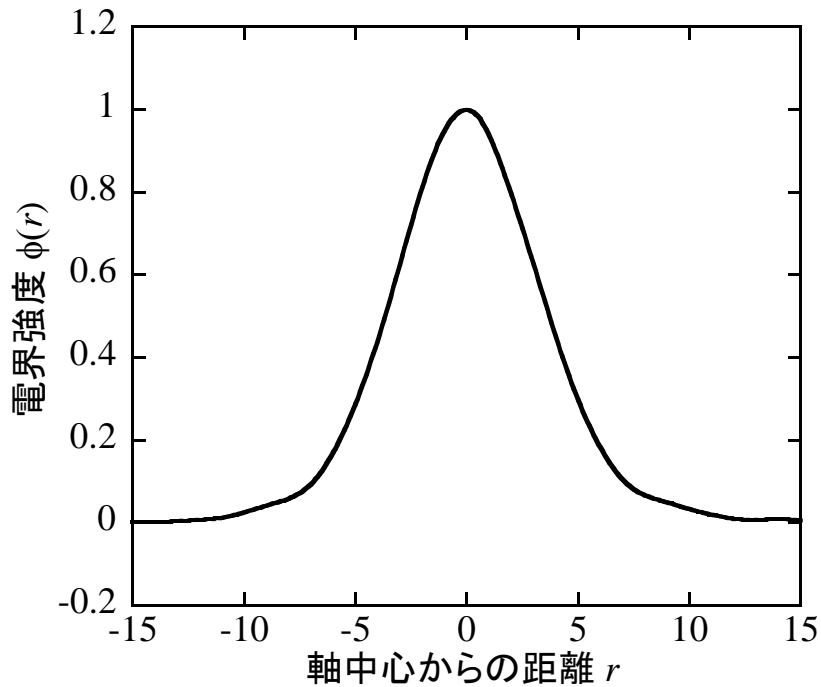


図 1-12 電界分布の測定例

$$2W = \frac{\lambda}{\pi} \left( 2 \frac{\int_0^{\pi/2} F^2(\theta) \sin \theta \cos \theta d\theta}{\int_0^{\pi/2} F^2(\theta) \sin^3 \theta \cos \theta d\theta} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1-6)$$

MFD は、接続損失を評価する上で重要なパラメータであり、MFD がそれぞれ  $W_1$ 、 $W_2$  の 2 本の単一モード光ファイバが接続される場合、MFD の相違に起因する接続損失  $\alpha_c$  は式 (1-7) で表される [1-24]。

$$\alpha_c = -10 \log \left\{ \left( \frac{2W_1 W_2}{W_1^2 + W_2^2} \right)^2 \right\} \quad (1-7)$$

### 遮断波長

ステップ型の屈折率を有する充実型光ファイバ中の伝搬モード数  $N(N=0, 1, 2 \dots)$  は、 $\theta_c$ 、コア半径  $a$ 、 $n_{\text{core}}$ 、波長  $\lambda$  を用いて式 (1-8) より求めることができ [1-25]、単一モード光ファイバでは、信号波長において基本モード ( $N=0$ ) のみを伝搬するように屈折率分布を制御する必要がある。遮断波長  $\lambda_c$  とは、基本モードのみを伝搬する波長の下限値を表す。

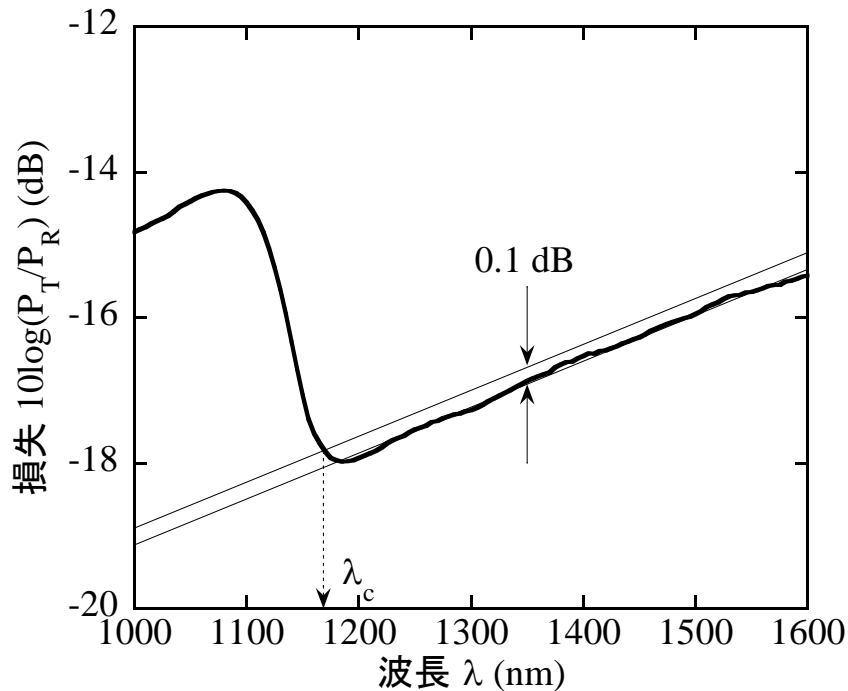


図 1-13 遮断波長の測定例

$$N = \left( \frac{4n_{core}a}{\lambda} \sin \theta \right) - 1 = \left( \frac{4a}{\lambda} \sqrt{n_{core}^2 - n_{clad}^2} \right) - 1 \quad (1-8)$$

図 1-13 は SMF の遮断波長の測定例を示す。遮断波長の測定には透過光パワー法があり、被測定ファイバからの透過光パワーを基準光パワーと比較することにより求める方法である[1-26]。基本モードと 1 次高次モードのモード損失の差を利用し、透過光パワー  $P_T(\lambda)$  及び基準光パワー  $P_R(\lambda)$  を用いて式(1-9)を満足する最大波長で定義される。

$$10 \log \left\{ \frac{P_T(\lambda)}{P_R(\lambda)} \right\} = 0.1 \quad (1-9)$$

基準光パワーの測定方法として、被測定光ファイバに小さな曲げを与える曲げ法と 1~2 m のマルチモードファイバを用いるマルチモード励振法がある[1-27]。尚、図 1-13 はマルチモード励振法による測定結果である。

### 曲げ損失

光ファイバはケーブル化工程、ケーブル敷設、並びに接続時の余長処理等により曲げられる。曲げられた光ファイバを伝搬する信号光のコアとクラッドとの境界面における入射

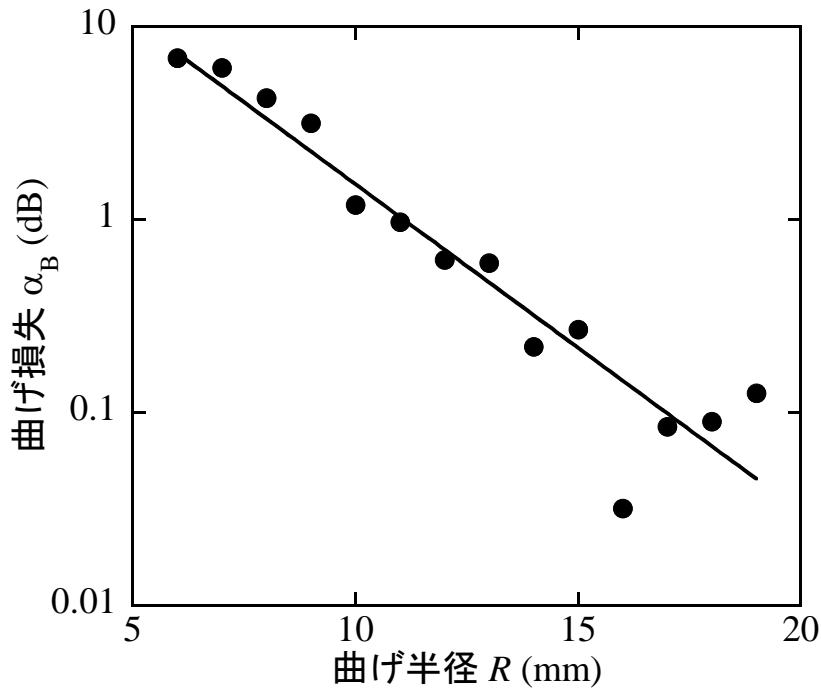


図 1-14 曲げ損失特性の測定例

角度は、直線時の光ファイバにおける入射角度と異なり、入射角度が臨界角以上となる場合には信号光はコア外部へ放射され、損失を生じる。ステップ型の屈折率を有する充実型光ファイバの半径  $R$  に対する一様曲がり損失  $\alpha_B$  は式(1-10)で表される[1-28]。

$$\alpha_B = \frac{\pi^{1/2} \kappa^2 \exp\left\{- (2/3)R(\gamma^2 / \beta^2)\right\}}{2\gamma^{3/2} k^2 a^2 (n_{core}^2 - n_{clad}^2) R^{1/2} \{K_1(\gamma a)\}^2} \quad (1-10)$$

ここで、 $\kappa$ 及び $\gamma$ は、それぞれ横方向の伝搬定数であり、 $\beta$ 、 $k$ 、並びに  $K_1$  は、それぞれ導波モードの伝搬定数、波数、並びに第 2 種変形ベッセル関数である。

図 1-14 は SMF の曲げ損失特性の測定例を示す。光ファイバの曲げ損失は、光ファイバの両端をそれぞれ光源及び受光器に接続した状態で、直線時の光ファイバの出射光  $P_{Straight}$  と曲げ付与時の光ファイバの出射光  $P_{Bend}$  を測定し、式(1-11)を用いて算出される[1-22]。

$$\alpha_B = 10 \log \left( \frac{P_{Straight}}{P_{Bend}} \right) \quad (1-11)$$

### 波長分散

光ファイバに入射した信号光パルスは、光ファイバの屈折率分布、光源のスペクトル幅、

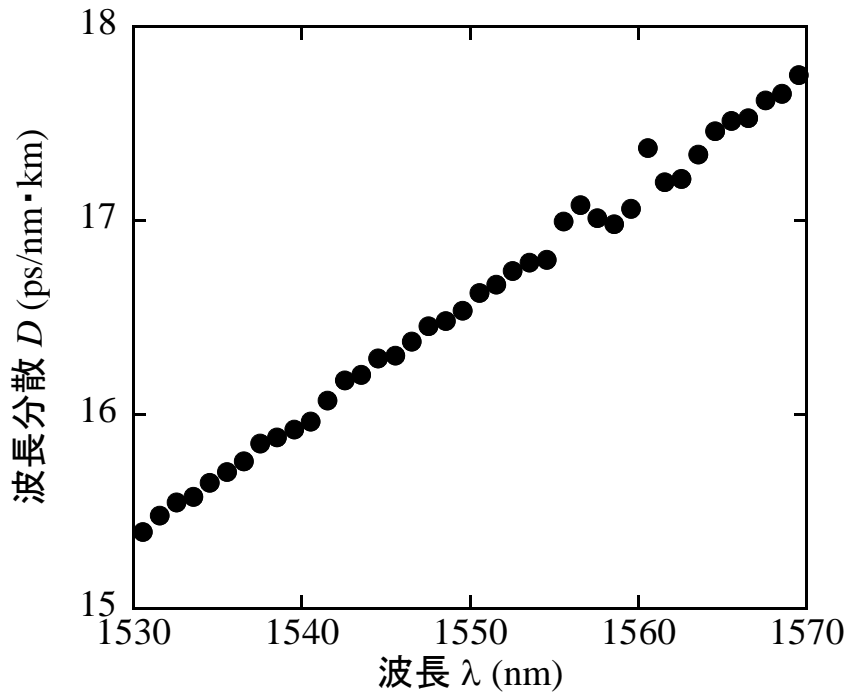


図 1-15 波長分散特性の測定例

並びに光ファイバ材料の分散性のために波形歪みを受け、受信端でのパルス波形が広がり、隣り合う信号波形の重なりにより信号誤りが発生する。単一モード光ファイバにおいて光パルスの広がり、の主な要因は波長分散  $D$  であり、材料分散と導波路分散との和から求めることができ、式(1-12)で表される[1-29]、[1-30]。

$$D = -\frac{1}{c\lambda} \left\{ k \frac{dN_2}{dk} + k \frac{d(N_1 - N_2)}{dk} \frac{d(\nu b)}{d\nu} + (N_1 - N_2)\nu \frac{d^2(\nu b)}{d\nu^2} \right\} \quad (1-12)$$

ここで、 $c$ 、 $N_1$ 、 $N_2$ 、 $\nu$ 、並びに  $b$  は、それぞれ光速、コアの群屈折率、クラッドの群屈折率、規格化周波数、並びに規格化伝搬定数である。図 1-15 は SMF の波長分散特性の測定例を示す。波長分散の測定法には変調位相シフト法[1-31]があり、周波数  $f$  で変調された二つの波長の光は、光ファイバを伝搬した後に群遅延時間  $\tau$  が生じ、式(1-13)で表される光の変調信号間に位相差  $\varphi$  を生じる。

$$\varphi = 2\pi f\tau \quad (1-13)$$

従って、群遅延時間差に依存した位相変化を求めることにより、群遅延時間を得られ、結果として波長分散を求めることができる。

現在、開発経緯が異なる 3 種類の光ファイバが導入されており、それぞれ 1.3 $\mu\text{m}$  帯零分散単一モードファイバ(Single mode fiber : SMF)、1.55 $\mu\text{m}$  帯に零分散がある分散シフトファイバ(Dispersion shifted fiber : DSF)、並びに純石英コアファイバ(Silica core fiber : SCF)である。SMF は以前のマルチモード光ファイバに比べ、低損失で単一モード伝送を可能とすることを目的とし、1260 nm 以下に遮断波長が存在し、1.3  $\mu\text{m}$  に零分散が存在するため、1.3  $\mu\text{m}$  における 1 波長伝送用として開発がおこなわれ、DSF は光ファイバの最低損失を実現する 1.55  $\mu\text{m}$  を零分散波長とすることにより、1.55  $\mu\text{m}$  における 1 波長伝送用として開発された。さらに、SCF はコアに不純物となるドーパントを添加しないことにより 1.55  $\mu\text{m}$  における伝送損失を低減し、海底ネットワークを構成する超長距離伝送路として開発が行われた。

### 1.3.2 目的と検討課題

現在、コア系または海底ネットワークにおいて、SMF、DSF、並びに SCF いずれかの光ファイバを用いた WDM 伝送システムが運用されており、光増幅器として EDFA とともに DRA が適応されている。更なる大容量化として、TDM 及び WDM による 1 信号当たりの伝送速度の高速化及び信号波長帯域における多重信号の集積化が考えられ、いずれの場合においても大容量化の実現には高い SNR が必要となる[1-9]。DRA では低非線形性及び低雑音性が実現可能であることが明らかとなっているが、既存の光ファイバは DRA を適応した WDM 伝送システムへの適応を目的として開発されたわけではないため、更なる SNR の向上にあたっては、光ファイバの最適化が重要な課題となる。

1.3.1 項に示した各光ファイバパラメータは、特定の波長における伝送性能を補償するためのものであり、光ファイバの設計において非常に重要な項目である。同様に、光ファイバ中のラマン増幅特性も光ファイバパラメータと強く関連する[1-32]ため、DRA 伝送における伝送性能は光ファイバパラメータに依存し、DRA 伝送システムに最適な光ファイバを設計するためには、この伝送性能と光ファイバパラメータとの関係を明確にする必要がある。光ファイバパラメータは光ファイバのコア構造により決定され、充実型光ファイバでは最適な屈折率分布の設計が必要となり、PCF では最適な空孔配置の設計が必要となる。また、既存伝送路に DRA を適応する場合には、光ファイバの長手方向に沿ってファイバパラメータであるラマン利得率を変化させたラマン利得率分布型光ファイバ(Raman gain efficiency distributed fiber : RG-DF)を挿入することによって伝送性能の向上が期待できる。RG-DF を用

いたハイブリッド伝送路における伝送性能改善においては、RG-DF の長手方向における屈折率分布の設計が非常に重要である。さらに、DRA を適応した WDM 伝送システムでは、多重化された信号光及び高出力レーザーによる励起光などの高出力光照射が想定され、光ファイバの長期的な信頼性を調査することは重要である。以下に、本論文の主な課題を明記する。

- ① DRA 伝送システムにおいて、S、C、L バンドの使用を想定した場合の波長多重数を最大にする充実型光ファイバの設計条件の明確化
- ② DRA 伝送システムにおいて、PCF を用いた超広帯域信号伝送実現可能性の明確化
- ③ DRA 伝送システムにおいて、RG-DF を用いた伝送性能改善の実現性の明確化
- ④ DRA 伝送システムを適応した光ファイバ伝送路における高出力光照射に対する長期信頼性の明確化

本論文は、上記の 4 つの課題に着目して検討することによって、光ファイバの伝送容量拡大を実現する DRA 伝送システムにおいて、伝送性能の向上に寄与するとともに、更なる大容量化を目指す次世代の光ファイバ伝送路の実現に貢献することを目的とする。

## 1.4 本論文の構成

本論文は、コアネットワークにおける伝送容量の拡大のため、DRA 伝送システムを適応した際の伝送性能を向上することを目的とし、光ファイバの最適な設計条件を明確化する上で 1.3.2 項の 4 つの課題に着目して検討した結果をまとめたものである。本論文は 6 章から構成されており、各章を要約すると以下ようになる。

第 1 章は、序論であり、光通信技術の技術背景として、光通信における大容量化技術及び光増幅技術、並びに光ファイバにおけるラマン増幅の特長について記述する。また、本研究の目的、並びに構成について述べる。

第 2 章では、純石英にドーパント材料であるゲルマニウムまたはフッ素を添加して屈折率を変化することにより、光ファイバのコア及びクラッドを形成した充実型光ファイバの DRA 特性について述べる。光ファイバのドーパント材料及び添加量とラマン利得係数の関係、並びに光ファイバの屈折率分布に依存して変化する電界分布を考慮することにより、増幅効率であるラマン利得率の評価について論じる。また、WDM 伝送システムにおける伝送性能の指標として SNR 及び Q 値に着目し、ファイバパラメータと DRA 伝送特性の関係

を明らかにし、DRA を適応した WDM システムに最適な光ファイバの設計条件を明らかにする。

第 3 章では、純石英ガラスから成る光ファイバのクラッド内に多数の空孔を設け、空孔中の空気層により実効的にクラッド内の屈折率分布を下げることにより光ファイバコアに光を閉じ込めて信号光の伝搬を可能とする PCF の DRA 特性について述べる。純石英コアの充実型光ファイバと比較したラマン利得係数スペクトル及びラマン利得係数の励起波長依存性の観点から、PCF のラマン特性を明らかにする。また、PCF を用いた DRA を適応した WDM 伝送性能、並びに PCF の広帯域 DRA 伝送への適応性を明らかにし、DRA 伝送における PCF の設計条件を明確にする。

第 4 章では、既設伝送路の一部に異種ファイバを組み合わせた DRA 伝送路における伝送性能向上として、屈折率分布を長手方向において変化させた充実型光ファイバを想定し、信号光の入射側と出射側におけるファイバパラメータを変化させた RG-DF の DRA 特性について述べる。SNR 改善効果に着目した計算モデルを設定し、ファイバパラメータとラマン増幅特性の関係について示す。また、RG-DF におけるファイバパラメータと SNR 改善効果の関係を明らかにし、DRA 伝送における階段型屈折率分布から成る RG-DF の設計条件を明確にする。

第 5 章では、DRA における高出力光照射に対する光ファイバの長期信頼性について述べる。クラッドにフッ素を添加した純石英コアの充実型光ファイバ、並びにコアにゲルマニウムを添加したゲルマニウムコアの充実型光ファイバにおいて、それぞれ波長 1480 nm、数 W の連続光を約 2000 時間に渡って連続照射を行い、照射実験前後におけるラマンスペクトル及び損失係数スペクトルのスペクトル形状変化から、多光子吸収による欠陥増加に関する長期信頼性を明らかにする。

第 6 章は、以上の章の結論として、本研究で得られた結果の要点を述べる。



## 第2章：充実型光ファイバのDRA特性

### 2.1 はじめに

石英ガラスを用いた光ファイバ中のラマン利得特性は、光ファイバコアのドーパント材料とその添加量に依存して変化する[2-1]。一般に、純石英を母材とした光ファイバでは、コアとクラッドの屈折率差を設けるために、コアまたはクラッドにそれぞれゲルマニウムまたはフッ素を添加している。ゲルマニウムはラマン利得係数が高いため、石英ガラスへの添加量が増加するほどラマン利得が増大する傾向が知られている[2-2]。しかしながら、ゲルマニウム添加量が増加するとともに、レイリー散乱係数が増大し、伝送損失も増大してしまう[2-3]。また、WDM 伝送システムでは、使用波長帯域における単一モード伝送を可能とし、波長分散や非線形要因による劣化を抑制する必要がある。このため、屈折率分布から求められるファイバパラメータである、遮断波長、モードフィールド径、並びに波長分散などの最適化が必要となる。

本章では、ゲルマニウムまたはフッ素をコアに添加した光ファイバを想定し、光ファイバ中のドーパントとラマン利得特性の関係を明らかにする。また、屈折率分布によって設定されるファイバパラメータとラマン利得特性の関係を明らかにする。また、伝送性能の指標として信号対雑音比及び Q 値を用い、ファイバパラメータと DRA 伝送特性の関係を明らかにし、DRA を適応した WDM 伝送システムに最適な光ファイバの設計を行う。

### 2.2 光ファイバ構造とラマン特性

#### 2.2.1 ドーパントとラマン利得特性の関係

光ファイバのドーパント材料をゲルマニウム、またはフッ素とし、各ドーパントをコアに添加した光ファイバのラマン利得スペクトルを測定した。表 2-1 は測定に用いた光ファイバのファイバパラメータを示す。ここで、FDF(Fluorine doped optical fiber)はフッ素ドーパファイバである。いずれも屈折率分布はステップ型を用い、比屈折率差 $\Delta_1$ はコアの屈折率 $n_{core}$ 及び純石英の屈折率 $n_{SiO_2}$ を用いて式(2-1)に定義した。

$$\Delta_1 = \frac{n_{core}^2 - n_{SiO_2}^2}{2n_{core}^2} \quad (2-1)$$

一般に、純石英にゲルマニウムを添加すると屈折率は高くなり、フッ素を添加すると屈折

率は低くなる。したがって、 $\Delta_1$ の符号がマイナスである FDF は、コア及びクラッドにフッ素を添加した光ファイバであり、 $\Delta_1$ の符号がプラスである SMF は、コアにゲルマニウムを添加し、クラッドは純石英からなる光ファイバである。また、SCF はクラッドのみにフッ素を添加し、コアは純石英からなる光ファイバである。尚、クラッドに対するコアの比屈折率差 $\Delta$ はコアの屈折率  $n_{core}$  及びクラッドの屈折率  $n_{clad}$  を用いて式(2-2)に定義され、FDF 及び SCF の $\Delta$ は約 0.3 から 0.4 %であった。

$$\Delta = \frac{n_{core}^2 - n_{clad}^2}{2n_{core}^2} \quad (2-2)$$

	FDF	SCF	SMF
比屈折率差 $\Delta_1$ (%)	-0.33	0	0.34
ファイバ長 $L$ (km)	3.7	4.0	25.0
損失係数 $\alpha_p$ (dB/km)* <sup>1</sup>	0.29	0.22	0.23
励起波長における 実効断面積 $A_{eff-P}$ ( $\mu\text{m}^2$ )* <sup>1</sup>	75.3	71.2	72.4
信号波長における 実効断面積 $A_{eff-S}$ ( $\mu\text{m}^2$ )* <sup>2</sup>	82.1	76.6	80.1

\*1: 励起波長  $\lambda_p = 1450$  nm

\*2: 信号波長  $\lambda_s = 1550$  nm

表 2-1 ファイバパラメータ

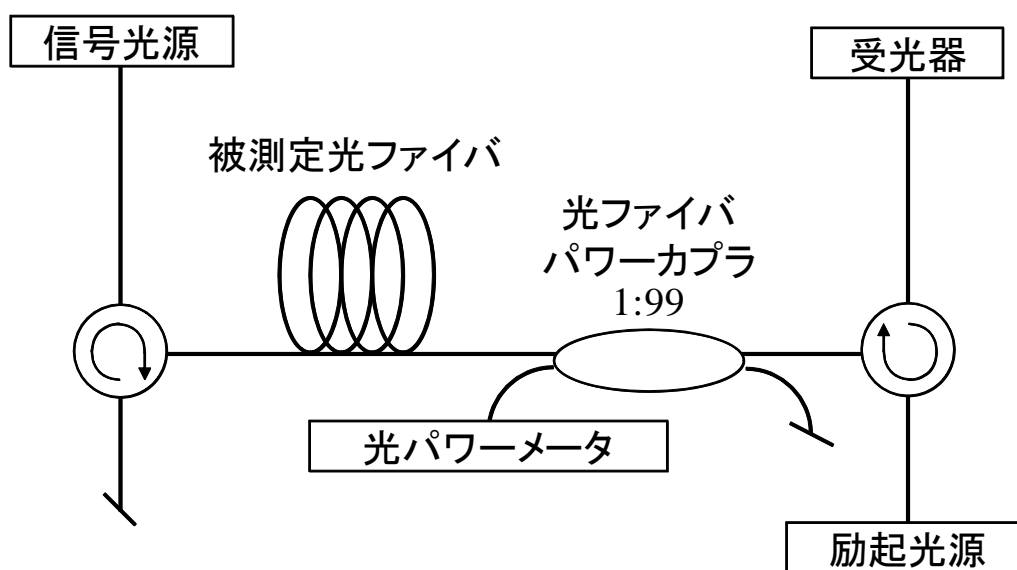


図 2-1 ラマン利得測定系

図 2-1 に、一般的な光ファイバのラマン利得の測定系を示す[2-4]。被測定光ファイバに信号光及び励起光を反対方向へ伝播するようにサーキュレータを介して接続し、増幅された信号光を受光器によって受光する。このとき、被測定光ファイバへ入射する励起光パワーは、光ファイバパワーカップラを介して接続された光パワーメータを用いて観測する。図 2-2 は各種光ファイバのラマン利得係数スペクトルを示す。図中の破線、実線、並びに点線は、それぞれ SMF、SCF、並びに FDF を示す。ここで、信号光源及び受光器には、それぞれ 1550nm 帯スーパーluminescentダイオード(Super luminescent diode : SLD)及び光スペクトラムアナライザ(Optical spectrum analyzer : OSA)を用い、励起光源には波長 1450 nm のラマンファイバレーザ(Raman fiber laser : RFL)を用いた。

光ファイバのラマン利得係数  $g_R$  は、信号光のみを入射した状態の出射光パワー  $P_1$ 、励起光のみを入射した状態の出射光パワー  $P_2$ 、並びに信号光と励起光をともに入射した状態における出射光パワー  $P_3$  をそれぞれ測定し、式(2-3)及び式(2-4)を用いて求めることができる[2-5]、[2-6]。

$$G = \frac{P_3 - P_2}{P_1} \quad (2-3)$$

$$g_R = C_R A_{eff} = \frac{\ln(G)}{P_P L_{eff}} A_{eff} \quad (2-4)$$

$C_R$ 、 $A_{eff}$ 、 $P_P$ 、並びに  $L_{eff}$  は、それぞれラマン利得率、実効断面積、入射励起光パワー、並びに有効相互作用長を表す。また、 $A_{eff}$  は信号光と励起光が相互作用する断面積を示しており、光ファイバの電界分布がガウス型に近似できる場合、 $A_{eff}$  は信号波長  $\lambda_S$  におけるモードフィールド径  $W_S$  及び励起波長  $\lambda_P$  におけるモードフィールド径  $W_P$  を用いて式(2-5)に表される[2-7]。

$$A_{eff} = \frac{(A_{eff-S} + A_{eff-P})}{2} \approx \frac{\pi(W_S^2 + W_P^2)}{2} \quad (2-5)$$

$A_{eff-S}$  及び  $A_{eff-P}$  は、それぞれ  $\lambda_S$  及び  $\lambda_P$  における実効断面積を表す。さらに、 $L_{eff}$  は  $\lambda_P$  における損失係数  $\alpha_P$  及びファイバ長  $L$  を用いて式(2-6)より求めることができる[2-8]。

$$L_{eff} = \frac{1 - \exp(-\alpha_P L)}{\alpha_P} \quad (2-6)$$

図 2-2 より SCF において、13.2 THz と 14.5 THz の  $\lambda_P$  からの周波数シフト  $F$  に、それぞれ SiO 結合に起因する横光学モード(transverse optical mode : TOM)と縦光学モード(longitudinal

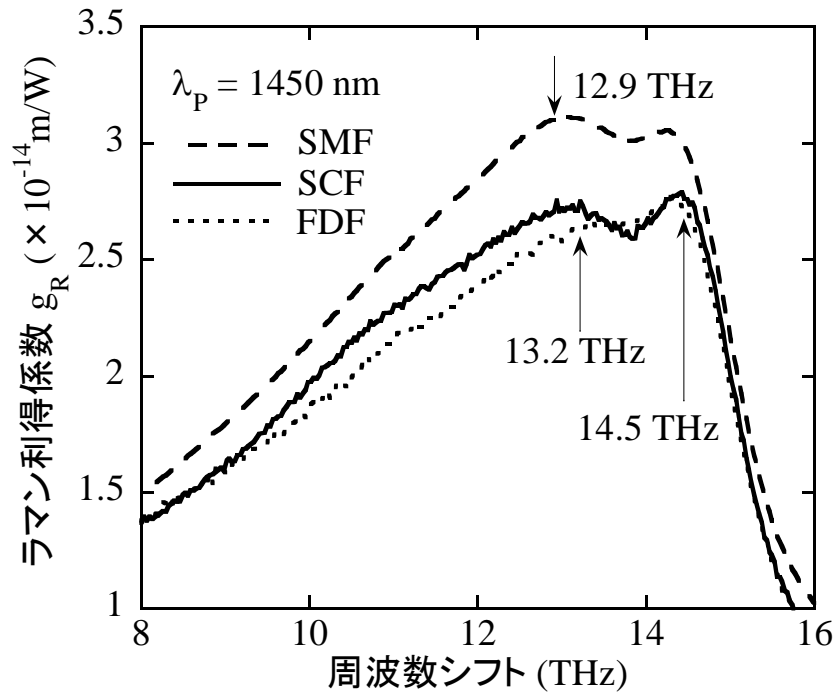


図 2-2 ラマン利得係数スペクトル

optical mode : LOM)に相当する 2 つのピークを観測することができる。また、SMF におけるラマン利得係数は、SCF や FDF に比較して大きく、13.2 THz のピークが 12.9 THz へシフトしていることがわかる。これは、12.8 THz に GeO 結合に起因するピークが存在し、SiO 結合に起因するピークと相互作用するためである[2-9]。また、GeO 結合に起因するラマン散乱強度は SiO 結合に起因するラマン散乱強度よりも大きいため、SMF のラマン利得係数スペクトルのピークは他の光ファイバよりも大きくなったと考えられる[2-2]。一方、FDF の 13.2 THz におけるピークは、SMF や SCF よりも小さくなっていることがわかる。ラマン散乱に作用する TOM は、Si+ や SiO- などの欠陥に強く依存しており[2-10]、フッ素を添加することによって、これらの欠陥とフッ素が結合し、ラマン散乱が減少するためと考えられる。尚、光ファイバ中の分子結合状態は完全なアモルファスであるため、ラマン利得係数のスペクトル形状はほぼコアのドーパント材料とその添加量に依存し、例えば、通常の SMF であれば図 2-2 の SMF のラマン利得係数スペクトルにほぼ一致する。

ステップ型の屈折率分布を有する石英系光ファイバの場合、コアのラマン利得係数  $g_{Rcore}$  は、純石英のラマン利得係数  $g_{RsiO2}$  及び  $\Delta_1$  を用いて式(2-7)に表すことができる[2-7]。

$$g_{Rcore} = g_{RsiO2} + A|\Delta_1| \quad (2-7)$$

ここで、 $A$  は $|\Delta_1|$  とラマン利得係数の関係を表す定数であり、 $g_{Rcore}$  と $\Delta_1$  の測定値から最小二乗法を用いて  $g_{Rcore}$  及び  $A$  を求めた。

表 2-2 に評価に用いたファイバパラメータを示す。ここで、 $\Delta_1$  の符号がマイナスである Fiber 1 から Fiber 3 は、コア及びクラッドにフッ素を添加した FDF であり、 $\Delta_1$  の符号がプラスである Fiber 5 から Fiber 8 は、コアにゲルマニウムを添加したゲルマニウムドープファイ

	比屈折率差 $\Delta_1$ (%)	ファイバ長 $L$ (km)	損失係数 $\alpha_p$ (dB/km)* <sup>1</sup>	実効断面積 $A_{eff-p}$ ( $\mu\text{m}^2$ )* <sup>1</sup>	実効断面積 $A_{eff-s}$ ( $\mu\text{m}^2$ )* <sup>2</sup>
Fiber 1	-0.33	3.7	0.29	75.3	82.1
Fiber 2	-0.29	5.1	0.25	74.3	81.5
Fiber 3	-0.15	3.8	0.24	88.5	96.3
Fiber 4	0	4.0	0.22	71.2	76.6
Fiber 5	0.34	25.0	0.23	72.4	80.1
Fiber 6	0.36	25.0	0.24	71.6	78.4
Fiber 7	0.68	3.5	0.27	39.2	42.7
Fiber 8	1.08	8.6	0.39	26.5	28.8

\*1: 励起波長  $\lambda_p = 1450$  nm

\*2: 信号波長  $\lambda_s = 1550$  nm

表 2-2 ファイバパラメータ

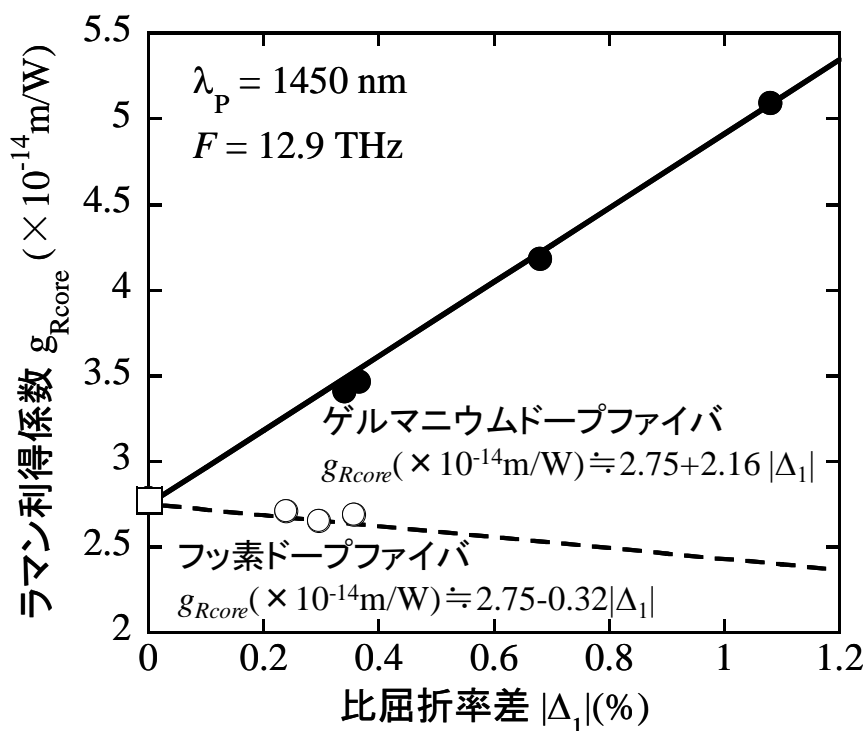


図 2-3 比屈折率差の絶対値 $|\Delta_1|$  とファイバコアのラマン利得係数  $g_{Rcore}$  の関係

バ(Germanium doped optical fiber : GDF)である。また、Fiber 4 は SCF である。尚、それぞれの光ファイバはステップ型の屈折率分布を有し、Fiber 1 から Fiber 4 の $\Delta$ は、約 0.3 から 0.4 % であった。

図 2-3 に比屈折率差の絶対値 $|\Delta_1|$ と  $g_{\text{Rcore}}$  の関係の結果を示す。図中の黒丸及び白丸は、それぞれ GDF (Fiber 5 から Fiber 8) 及び FDF (Fiber 1 から Fiber 3) を示す。また、四角のプロット点は SCF (Fiber 4) を示す。GDF は $|\Delta_1|$ が大きいほど、即ち、ファイバコアのゲルマニウム添加量が多いほど  $g_{\text{Rcore}}$  が大きく、FDF は $|\Delta_1|$ が大きいほど、即ち、ファイバコアのフッ素添加量が多いほど  $g_{\text{Rcore}}$  が小さくなっていることがわかる。さらに、図中の実線及び破線は、それぞれ GDF 及び FDF のプロット点の近似直線であり、GDF 及び FDF のラマン利得係数  $g_{\text{Rcore-Ge}}$  及び  $g_{\text{Rcore-F}}$  は、それぞれ $|\Delta_1|$ を用いて式(2-8)及び式(2-9)に表すことができる。

$$g_{\text{Rcore-Ge}}(12.9\text{THz}) \approx 2.75 \times 10^{-14} + 2.16 \times 10^{-14} |\Delta_1| \quad (2-8)$$

$$g_{\text{Rcore-F}}(12.9\text{THz}) \approx 2.75 \times 10^{-14} - 0.32 \times 10^{-14} |\Delta_1| \quad (2-9)$$

式(2-8)及び式(2-9)より、 $\Delta_1 = 0$  の時、つまり純石英コアの  $g_{\text{Rcore}}$  は  $2.75 \times 10^{-14} \text{ m/W}$  であることがわかる。また、FDF における $\Delta_1$ に対する  $g_{\text{Rcore-F}}$  の傾きは、GDF のものよりも約 1/3 と小さく、FDF におけるラマン利得係数の $\Delta_1$ 依存性が小さいことがわかった。

## 2.2.2 屈折率分布とラマン利得特性の関係

一般に、モードフィールド径、遮断波長、曲げ損失、並びに波長分散等のファイバパラメータは、光ファイバの屈折率分布に依存して変化する。同様に光ファイバ中のラマン特性も屈折率分布に依存して変化する。DRA を用いた伝送システム用の光ファイバの設計において、任意の屈折率分布の適応を想定し、屈折率分布とラマン利得特性の関係を検討した。任意の屈折率分布を有する光ファイバ中の  $F$  における実効的なラマン利得率  $C_{\text{Reff}}(F)$  は、ファイバコアの軸中心からの距離  $r$  におけるラマン利得係数  $g_{\text{R}}(r, F)$  及び電界強度  $\phi(r, \lambda_s)$  を用いて式(2-10)に定義することができる。

$$C_{\text{Reff}}(F) \equiv \frac{g_{\text{Reff}}(F)}{A_{\text{eff-S}}} = \frac{\int_0^\infty \{g_{\text{R}}(r, F)\phi^4(r, \lambda_s)r\}dr}{2\pi \left[ \int_0^\infty \{\phi^2(r, \lambda_s)r\}dr \right]^2} \quad (2-10)$$

ここで、 $g_{\text{Reff}}(F)$  は任意の屈折率分布を有する光ファイバ中の  $F$  における実効的なラマン利

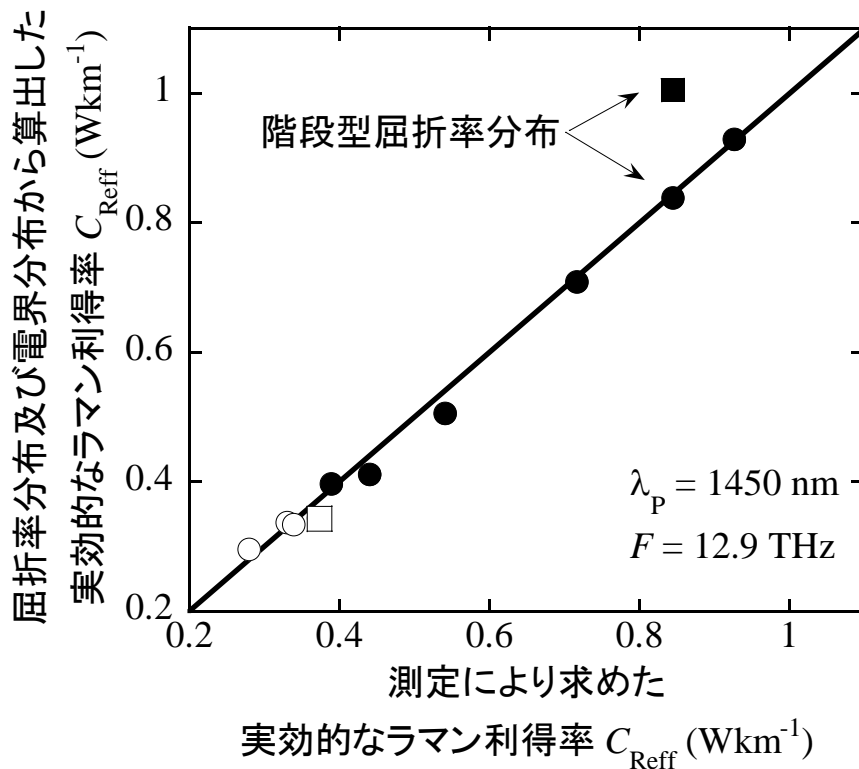


図 2-4 各種光ファイバの実効的なラマン利得率の測定値及び算出値の関係

得係数を表す。

式(2-8)、式(2-9)、並びに式(2-10)を用いて、任意の屈折率分布を有する光ファイバの実効的なラマン利得率の評価を行なった。評価のために、ステップ型、階段型、並びにセグメントコア型を含む 10 本の光ファイバを用いた。図 2-4 に各種光ファイバの実効的なラマン利得率の測定値及び屈折率分布と電界分布から算出した値の関係を示す。図中の黒丸及び白丸は、それぞれゲルマニウムドープファイバ及びフッ素ドープファイバを示す。また、白四角のプロット点は純石英コアファイバを示す。 $\lambda_p$  及び  $F$  は、それぞれ 1450 nm 及び 12.9 THz を用いた。図 2-4 より、屈折率分布と電界分布から算出した結果が、実際の実験系を用いて測定した結果と良く一致していることがわかる。一方、図中の黒四角のプロット点は、階段型屈折率分布を有する光ファイバの中心コアの  $\Delta_1$  から、式(2-8)を用いて求めたラマン利得率を示す。階段型屈折率分布を有する光ファイバの電界分布は、中心コアからサイドコアへ染み出し[2-11]、それぞれのコアにおける屈折率、つまりラマン利得係数が異なるため、中心コアにおける  $g_{\text{Rcore}}$  をサイドコアにも適応することにより、実際の測定結果と誤差が生じた。したがって、任意の屈折率分布においても、屈折率分布及び電界分布を考慮す

ることにより、実効的なラマン利得率を高精度に評価可能であることが明らかとなった。

光ファイバに **DRA** と **WDM** 技術を併用して適応する場合、光ファイバ中のラマン増幅特性は、個々の光ファイバのラマン利得スペクトル形状に依存する。そのため、**DRA** を適応した **WDM** 伝送システムに最適な光ファイバを設計する場合、各信号波長での伝送性能をシミュレーションにて把握するため、屈折率分布と電界分布から算出される特定の波長におけるラマン利得だけではなく、ラマン利得スペクトル情報が必要となる。そこで、重回帰分析[2-12]を用いたラマン利得スペクトルの推定方法について検討を行った。複数本の光ファイバを仮定し、 $m$  本目の光ファイバの $\lambda_p$  から  $i$  番目( $i=1, 2, \dots, l$ )の周波数シフト  $F_i$  における実効的なラマン利得率スペクトル  $C_{\text{Reff}}(F_i)$  は、式(2-11)を用いて表すことができる。

$$C_{\text{Reff}}(F_i)_m = \sum_{k=1}^{n_{\text{total}}} CI_{ik} C_{\text{Reff}}(F_k)_m \quad (2-11)$$

ここで、 $C_{\text{Reff}}(F_k)$  及び  $n_{\text{total}}$  は、それぞれ推定される部分集合の  $k$  番目の周波数シフト、つまり評価周波数シフト  $F_k$  における実効的なラマン利得率及びそれらの評価周波数シフトの総数を表す。また、 $CI_{ik}$  は偏回帰係数と呼ばれる  $i \times k$  個の要素で構成される行列式であり、複数本の光ファイバサンプルから最小二乗法を用いて求めることができる。したがって、予め偏回帰係数及び任意の  $F_k$  における任意の  $C_{\text{Reff}}(F_k)$  を求めておくことにより、式(2-11)を用いて評価したい光ファイバの実効的なラマン利得率スペクトルを把握することが可能となる。また、光ファイバの設計において、屈折率分布を仮定することにより式(2-7)を用いて屈折率分布及び電界分布より任意の周波数シフト  $F_k$  における任意の実効的なラマン利得率  $C_{\text{Reff}}(F_k)$  を求め、実効的なラマン利得率スペクトルを推定することが可能である。式(2-11)を用いて、実際に **SMF** 及び **DSF** の実効的なラマン利得率スペクトルの推定を行なった。偏回帰係数を求めるために、ステップ型、階段型、並びにセグメントコア型を含む 6 本のゲルマニウムドープファイバを用意した。図 2-5 は各種光ファイバの実効的なラマン利得率スペクトルを示す。ここで、 $\lambda_p$  は 1450 nm を用いた。図 2-5 から、 $F_k$  を **SiO** 結合に起因するピークが観測される励起波長 1450 nm からの周波数シフト 13.2 THz と 14.5 THz とし、最小二乗法により  $F_i$  における  $CI_{ij}$  を算出した。図 2-6 は  $F_i$  と  $CI_{ij}$  の関係を表す。評価を行ないたい光ファイバの 13.2 THz と 14.5 THz における  $C_{\text{Reff}}(F)$  を求めることにより、図 2-6 から周波数シフト 1 THz から 24 THz における実効的なラマン利得率スペクトルを推定することができる。

図 2-7 に **SMF** 及び **DSF** の実効的なラマン利得率スペクトルの推定評価結果を示す。図中



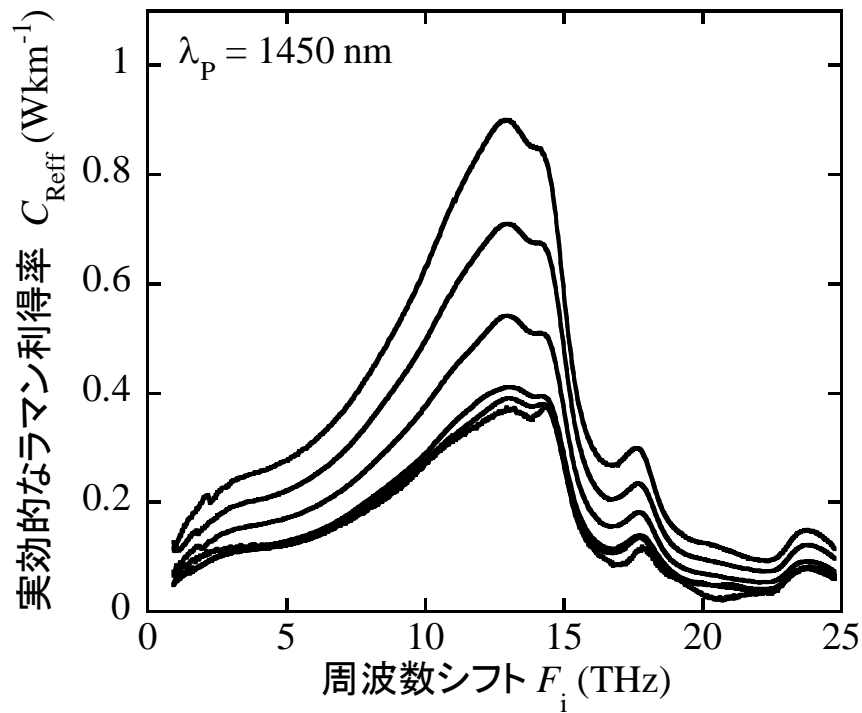


図 2-5 各種光ファイバの実効的なラマン利得率スペクトル

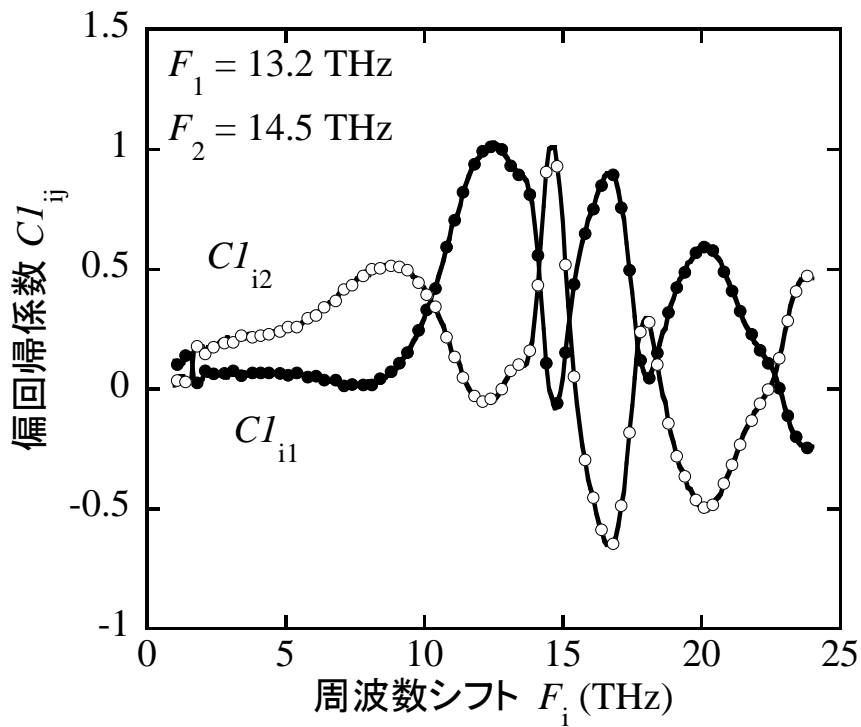


図 2-6 周波数シフト  $F_i$  と偏回帰係数  $CI_{ik}$  の関係

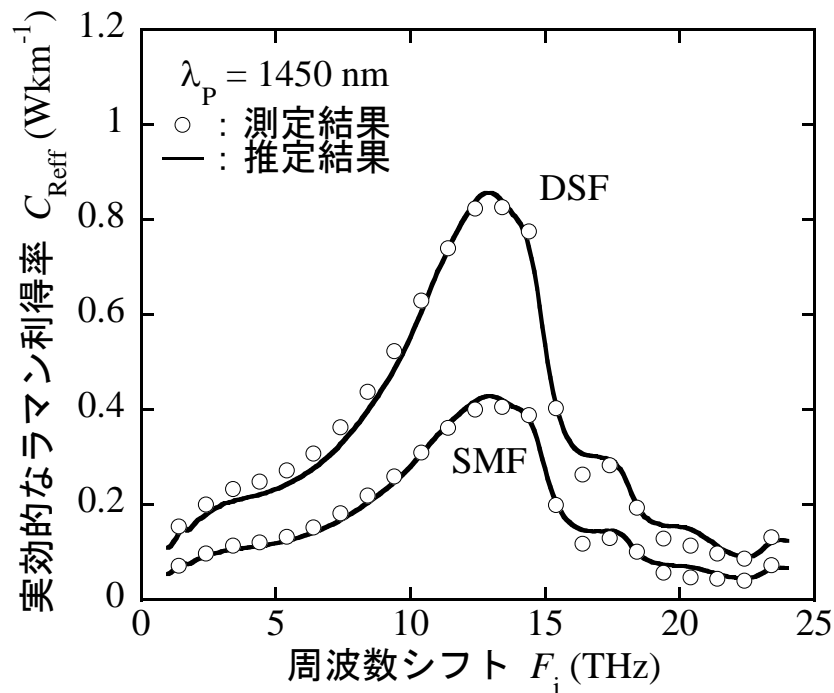


図 2-7 SMF 及び DSF の実効的なラマン利得率スペクトルの測定及び推定結果

の白丸は図2-1の実験系を用いて測定した測定結果を示す。また、実線は13.2 THzと14.5 THzを評価周波数シフトとして推定した推定結果である。図 2-7 より、推定結果は測定結果と良く一致していることがわかる。ここで、SMF 及び DSF の  $C_{\text{Reff}}(F_i)$  における最大絶対誤差の絶対値は、それぞれ 0.03 及び 0.05 ( $\text{W} \cdot \text{km}^{-1}$ ) であり、実効的なラマン利得率のピーク値に対して、それぞれ 10%未満であった。したがって、予め  $C_{I_{ij}}$  及び任意の  $F_k$  における任意の  $C_{\text{Reff}}(F_k)$  を求めておくことにより、重回帰分析を用いて評価したい光ファイバの実効的なラマン利得率スペクトルを精度良く推定可能であることが確認できた。

## 2.3 WDM 伝送システムにおける DRA 特性

### 2.3.1 計算モデル

DRA を適応した WDM 伝送システムに適応するための光ファイバの最適条件として、光ファイバパラメータと伝送性能の関係を明らかにすることは重要である。光通信において、信号光は時間的に幅を持ったパルス波形をしているため、光ファイバを伝送中に SPM などの非線形性や群速度分散(Group velocity dispersion : GVD)などにより波形が劣化する可能性

がある[2-13]。一般に、波形劣化の指標として Q 値が用いられ、光ファイバのファイバパラメータや伝送装置のシステムパラメータを設定することによりスプリットステップフーリエ(Split-step Fourier : SSF)法[2-14]を用いて伝送性能を求めることが可能である。非線形性による波形劣化は、信号光パワー及び式(2-12)に定義される非線形係数 $\gamma$ [2-13]の積に依存して変化し、 $\gamma$ が大きくなるほど波形劣化が顕著に現れる。

$$\gamma \equiv \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{eff}} \quad (2-12)$$

また、 $n_2$ は非線形屈折率を表し、 $\Delta_1$ の関数として、式(2-13)に表される。

$$n_2(\Delta) = 2.507 + c_1 \Delta_1 \quad (2-13)$$

ここで、 $c_1$ はドーパント材料に起因する係数であり、ゲルマニウムドープファイバ及びフッ素ドープファイバにおける係数  $c_1$ は、それぞれ 0.505 及び 0.220 である[2-15]。また、GVDは屈折率分布から多層分割法などにより求めることができる[2-16]。

また、DRA を適応する場合、光ファイバのファイバパラメータに応じたラマンゲイン、ASE、並びに二重レイリー散乱(Double Rayleigh scattering : DRS)による雑音成分を考慮する必要がある。ここで、光ファイバの位置  $z_A$  から  $z_B$  までのラマンゲイン  $G_R(z_A, z_B)$ は、式(2-14)に表される。

$$G_R(z_A, z_B) = \exp \left[ \frac{C_R P_B \{ e^{-\alpha_P(L-z_A)} - e^{-\alpha_P(L-z_B)} \}}{\alpha_P} \right] \quad (2-14)$$

ここで、 $P_B$ は後方励起光パワーである。また、伝送損失  $T_L(z_A, z_B)$ を用いることによりネットゲイン  $G_{Net}(z_A, z_B)$ は、次式に表される。

$$T_L(z_A, z_B) = \exp \{ -\alpha_S (z_B - z_A) \} \quad (2-15)$$

$$G_{Net}(z_A, z_B) = G_R(z_A, z_B) T_L(z_A, z_B) \quad (2-16)$$

ここで、 $\alpha_S$ は $\lambda_S$ における損失係数であり、 $\alpha_\lambda$ ( $\lambda = S$  または  $P$ )は、赤外吸収損失 $\alpha_{IR} = 6.65 \times 10^{12} \exp(-52.62/\lambda)$ を用いて式(2-17)に表される[2-3]。

$$\alpha_\lambda = 0.8(1 + \alpha_1 \Delta_1) / \lambda^4 + \alpha_{IR} \quad (2-17)$$

ここで、ゲルマニウムドープファイバ及びフッ素ドープファイバにおける係数 $\alpha_1$ は、それぞれ 0.44 及び-0.41 である。さらに、ASEによる光雑音パワー密度  $N_{ASE}$ 及びDRSによる雑音パワー $P_{DRS}$ は、それぞれ式(2-18)及び式(2-19)に表される。

$$N_{ASE} = h\nu \int_0^L C_R P_B e^{-\alpha_P(L-z)} G_{Net}(z, L) dz \quad (2-18)$$

$$P_{DRS} = P_{in} G_{Net} R^2 \int_0^L G_{Net}(0, z)^{-2} \int_z^L G_{Net}(0, \xi)^2 d\xi dz \quad (2-19)$$

ここで、 $P_{in}$  は入射信号光パワーである。また、 $R$  はレイリー散乱係数であり、式(2-20)に示される[2-17]。

$$R = \frac{0.8(1 + \alpha_1 \Delta_1)}{\lambda^4} \times \frac{1.5\lambda}{4\pi A_{eff}(\lambda) n_{core}} \quad (2-20)$$

本論文では、 $Q$  値の算出において Rsoft 社製の「OptSim 3.5」を用いることとした。本シミュレーションソフトでは、DRA を適応した WDM 伝送システムにおける伝送性能の解析が可能であるが、DRA の雑音成分において ASE のみ考慮されており、DRS による影響を反映することは不可能である。DRS は励起光パワーの制限を与えるため、DRS を考慮した伝送性能評価が必要である。このため、DRS を考慮した SNR 改善効果について検討を行った。ここで、SNR 改善効果  $R_{SNR}$  [2-18] は式(2-21)に定義した。

$$R_{SNR} \equiv \frac{SNR_{EDFA+DRA}}{SNR_{EDFA}} \approx \frac{NF_{EDFA}}{NF_{EDFA+DRA} R_N} \quad (2-21)$$

ここで、 $SNR_{EDFA}$  及び  $NF_{EDFA}$  は、それぞれ DRA を適応しない、つまり、EDFA のみを増幅技術として使用した場合の SNR 及び雑音指数(Noise figure : NF)を表す。また、 $SNR_{EDFA+DRA}$  及び  $NF_{EDFA+DRA}$  は、それぞれ増幅技術として EDFA と DRA を併用させた場合の SNR 及び NF を表す。さらに、 $R_N$  は非線形性を表す。 $NF_{EDFA+DRA}$  及び  $R_N$  は、それぞれ  $G_{Net}$ 、 $N_{ASE}$ 、フォトンエネルギー  $h\nu$ 、 $P_{DRS}$ 、電気フィルタ幅  $B_e$ 、光フィルタ幅  $B_o$ 、並びに  $L_{eff}$  を用いて、式(2-22)及び式(2-23)に表される。

$$NF_{EDFA+DRA} = \frac{1}{G_{Net}} \left( \frac{2N_{ASE}}{h\nu} + \frac{5P_{DRS}}{9h\nu \sqrt{B_e^2 + B_o^2/2}} + 1 \right) \quad (2-22)$$

$$R_N = L_{eff} \int_0^L G_{Net}(0, z) dz \quad (2-23)$$

従って、光ファイバにおける  $\Delta_1$  及び  $A_{eff}$  から、式(2-21)を用いて SNR 改善効果と励起光パワーの関係を明らかにし、「OptSim 3.5」において最適化した励起光パワーを設定し、 $Q$  値を算出することにより、DRA を適応した WDM 伝送システムにおける光ファイバの最適条件を求めることが可能となる。

### 2.3.2 ファイバパラメータと DRA 伝送性能の関係

DRS を考慮した計算モデルの検証を行うため、SNR 改善効果を計算及び実験により調査した。ここで、ファイバパラメータと DRA 伝送性能の関係を検討するため、SNR 改善効果は、光ファイバ伝送路に EDFA のみを増幅技術として用いた場合の SNR に対する、EDFA に DRA を併用して伝送した場合の SNR の改善量として定義した。図 2-8 は DRA 伝送路構成を示す。信号光の非線形現象による波形劣化抑制のため、後方励起による DRA を適応し、伝送路の前方及び後方に NF は 6.5 dB の EDFA を接続して伝送を行なうものと仮定した。また、後方に設置した EDFA からの出射光パワーは、光ファイバへの入射光パワーと等しいものと仮定した。さらに、光ファイバ中の累積分散及び累積分散スロープは、損失や非線形性を無視した理想的な分散補償モジュール(Dispersion compensating fiber module : DCFM)を用いて完全に補償されるものと設定した。 $\lambda_s$  及び  $\lambda_p$  は、それぞれ 1550 及び 1450 nm と、1580 及び 1480 nm を用いた。光ファイバの  $L$  は 80 km とした。さらに、伝送速度  $B$  は、10 及び 40 Gbit/s を用い、 $B_o$  及び  $B_e$  は、それぞれ  $1 \times B$  及び  $0.7 \times B$  と設定した。また実験では、信号光に外部共振器型レーザー(External cavity laser : ECL)を用い、パルスパターン発生器(Pulse pattern generator : PPG)を接続したニオブ酸リチウム(LiNbO<sub>3</sub> : LN)変調器によって 1/2 のマーク率の非ゼロ復帰(Non-return-to-zero : NRZ)信号に変調されるものとした。このときの擬似ランダムシーケンス(Pseudo-random bit sequence : PRBS)は  $2^{23} - 1$  と設定した。励起光源には RFL を用い、アイソレータ及びサーキュレータを介して被測定光ファイバに入射するものとした。伝送した信号光は EDFA、光バンドパスフィルタ(Band-pass filter : BPF)、

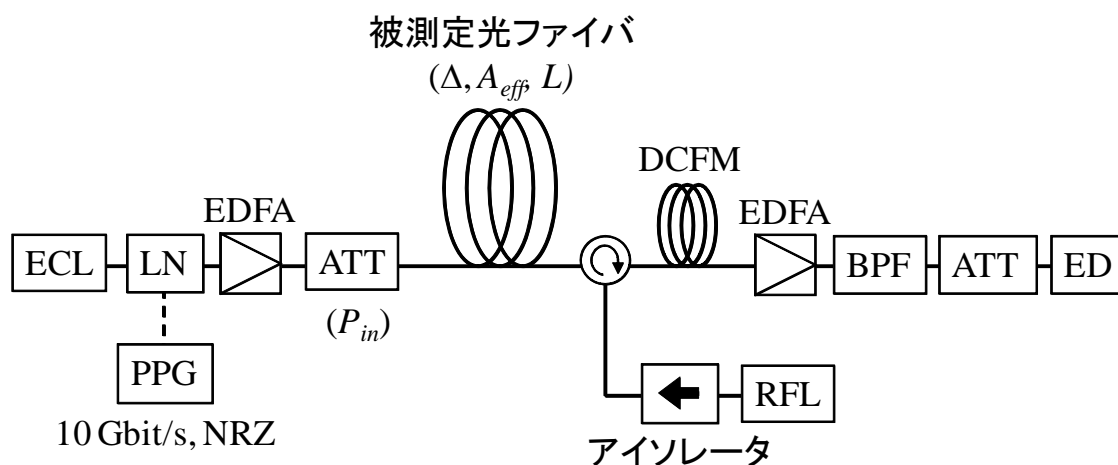


図 2-8 DRA 伝送路構成

	Fiber A	Fiber B	Fiber C
比屈折率差 $\Delta_1$ (%)	0.35	0.80	0.00
実効断面積 $A_{\text{eff}}^*$ ( $\mu\text{m}^2$ )	80	43	75
損失係数 $\alpha^*$ (dB/km)	0.20	0.20	0.18
ラマン利得率 $C_R^*$ ( $\text{Wkm}^{-1}$ )	0.41	0.89	0.37
波長分散 $D^*$ ( $\text{ps/nm}\cdot\text{km}$ )	16	0.1	18
分散スロープ $S^*$ ( $\text{ps/nm}^2\cdot\text{km}$ )	0.06	0.07	0.06
ファイバ長 $L$	75	80	81

\* $\lambda = 1550 \text{ nm}$

表 2-4 ファイバパラメータ

並びに光減衰器(Attenuator : ATT)を介して誤り率検出器(Error detector : ED)に入射した。EDによって符号誤り率(Bit error rate : BER)を測定し、式(2-24)及び式(2-25)に示される BER、Q値、並びに SNR の関係[2-19]から SNR を算出し、 $R_{\text{SNR}}$  を求めた。

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \quad (2-24)$$

$$SNR = 4Q^2 \quad (2-25)$$

表 2-4 は、実験に用いた光ファイバのファイバパラメータを示す。Fiber A 及び Fiber B はゲルマニウムドープファイバであり、Fiber C はクラッドにフッ素を添加した SCF である。それぞれの光ファイバは、波長分散  $D$  の変化量が  $0.7 \text{ ps/nm}\cdot\text{km}$  以下の 3 または 4 本のポビンから構成されている。また、残留分散による波形劣化を抑制するため、図 2-8 の受信機に入射する信号光の全分散の絶対値を、 $200 \text{ ps/nm}\cdot\text{km}$  以下になるよう DCFM によって調整した。この全分散の絶対値が  $200 \text{ ps/nm}\cdot\text{km}$  以下ということは、 $10 \text{ Gbit/s}$  における NRZ 信号光伝送の分散制限に比べて非常に小さいと言える[2-20]。

図 2-9 は、 $R_{\text{SNR}}$  と  $P_B$  の関係の計算及び実験結果を示す。ここで、 $P_{\text{in}}$  及び  $B$  は、それぞれ  $-10 \text{ dBm}$  及び  $10 \text{ Gbit/s}$  であった。また、 $\lambda_s$  及び  $\lambda_p$  は、それぞれ  $1580$  及び  $1480 \text{ nm}$  を用いた。図中の実線及び破線は、それぞれ表 2-5 の Fibers A 及び Fiber B の計算結果を示す。また、黒丸及び白丸は、それぞれの光ファイバの実験結果を示す。ここで、いずれの場合にも Fiber A を EDFA のみを増幅技術として用いた場合の伝送路として設定した。図 2-9 より、 $P_B$  が増加するとともに  $R_{\text{SNR}}$  も増大し、さらに  $P_B$  を増加すると  $R_{\text{SNR}}$  が減少していることが

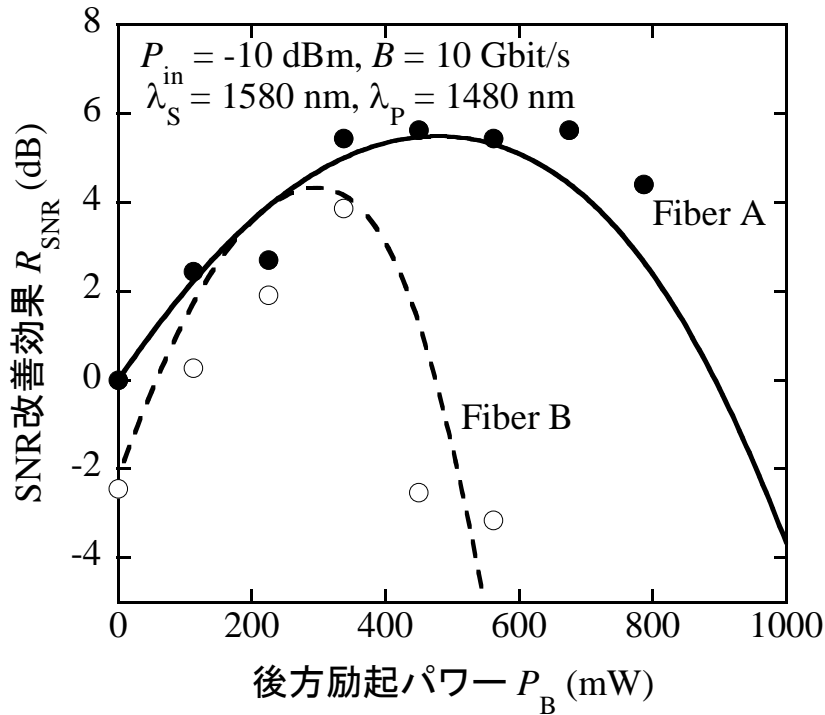


図 2-9 SNR 改善効果  $R_{\text{SNR}}$  と後方励起光パワー  $P_B$  の関係

分かる。ここで、 $R_{\text{SNR}}$  の最大値  $R_{\text{SNR-max}}$  を実現する最適な後方励起光パワー  $P_{B\text{-opt}}$  が存在し、それらの値は、それぞれの光ファイバにおいて異なることがわかった。 $P_B$  の増加とともにラマン利得が得られるため、SNR が改善される。一方、 $P_{B\text{-opt}}$  以上となる  $P_B$  では、雑音成分である DRS が急速に増大するため、SNR が劣化したと思われる。本実験における測定誤差は約  $\pm 1$  dB であり、計算結果は実験結果とよく一致したと思われる。このため、式(2-21)に示される  $\Delta_1$  及び  $A_{\text{eff}}$  を考慮した計算モデルが、DRA における光ファイバパラメータと伝送性能の関係を評価する上で有効であることが確認された。続いて、式(2-21)を用いて、ファイバパラメータを変数とした場合の SNR 改善効果と励起パワーの関係について調査した。

図 2-10 は、 $A_{\text{eff}}$  が  $80 \mu\text{m}^2$  であるときの、ゲルマニウムドープファイバ及びフッ素ドープファイバの  $|\Delta_1|$  を変化させたときの  $P_{B\text{-opt}}$  及び  $R_{\text{SNR-max}}$  の計算結果を示す。ここで、 $P_{\text{in}}$  及び  $B$  は、それぞれ  $-10$  dBm 及び  $40$  Gbit/s であった。また、 $\lambda_S$  及び  $\lambda_P$  は、それぞれ  $1550$  及び  $1450$  nm を用いた。図中の実線及び破線は、それぞれゲルマニウムドープファイバ及びフッ素ドープファイバにおける計算結果を示す。図 2-10 より、DRA 伝送システムを適応することにより、今回計算を行ったすべてのパラメータ範囲において、SNR が改善していることが分かる。これは、DRA における NF が EDFA の NF に比べて小さいためであると考えられ

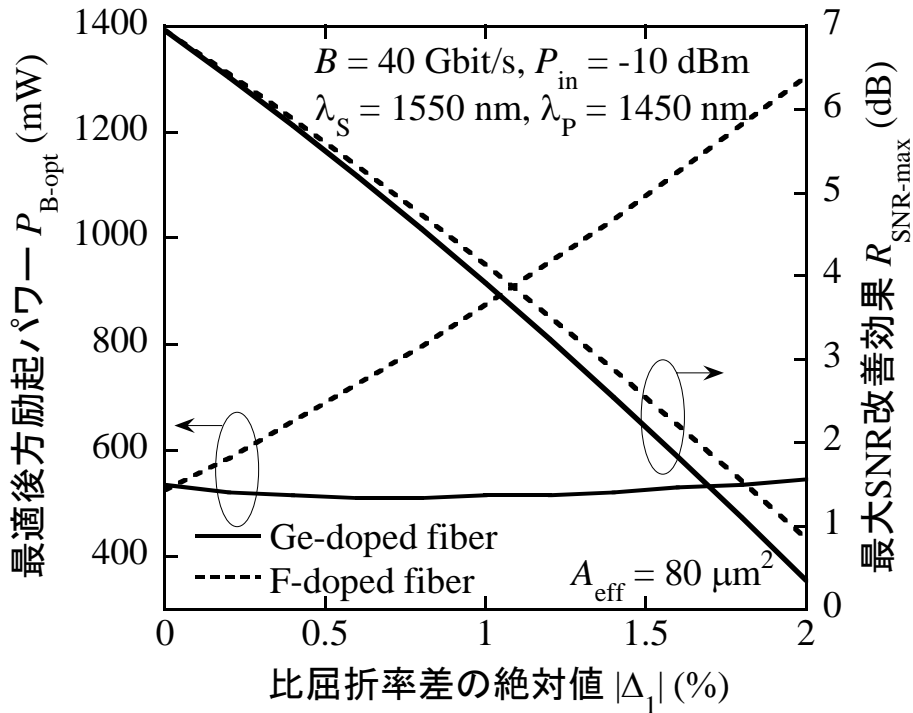


図 2-10 比屈折率差の絶対値 $|\Delta_1|$ を変化させたときの最適後方励起光パワー $P_{B-opt}$ と最大 SNR 改善効果  $R_{SNR-max}$  の計算結果

る。さらに、 $|\Delta_1|$  が 0 に近づく、つまりドーパント量が減少するほど、 $R_{SNR-max}$  が増加しており、0.3 % 以下の  $|\Delta_1|$  では  $R_{SNR-max}$  が 6 dB 以上になることがわかる。ゲルマニウムドープファイバ及びフッ素ドープファイバにおいて、ドーパント量が増大するほど、ラマン利得係数はそれぞれ増大、減少する。一方、損失係数は、ドーパント量が増大するほど、いずれの光ファイバにおいても増大してしまう。したがって、図 2-10 の結果は、SNR 改善では、ラマンゲインによる増幅効果よりもむしろ損失による劣化のほうが大きな影響を与えることを示しているといえる。また、 $P_{B-opt}$  の値は、ゲルマニウムドープファイバでは  $|\Delta_1|$  の変化に対してほぼ 0.53 W で一定であるのに対し、フッ素ドープファイバでは  $|\Delta_1|$  が大きくなるほど 1.3 W まで増大していることが分かる。これは、フッ素ドープファイバのラマン利得係数がゲルマニウムドープファイバに比べて小さいため、ゲルマニウムドープファイバと同等の増幅特性を得るためには、より高い励起光パワーが必要となるためである。

図 2-11 は、 $|\Delta_1|$  が 0.3 % のゲルマニウムドープファイバ及びフッ素ドープファイバにおいて、 $A_{eff}$  を変化させたときの  $P_{B-opt}$  及び  $R_{SNR-max}$  の計算結果を示す。ここで、 $P_{in}$  及び  $B$  は、それぞれ -10 dBm 及び 40 Gbit/s であった。また、 $\lambda_s$  及び  $\lambda_p$  は、それぞれ 1580 及び 1480 nm



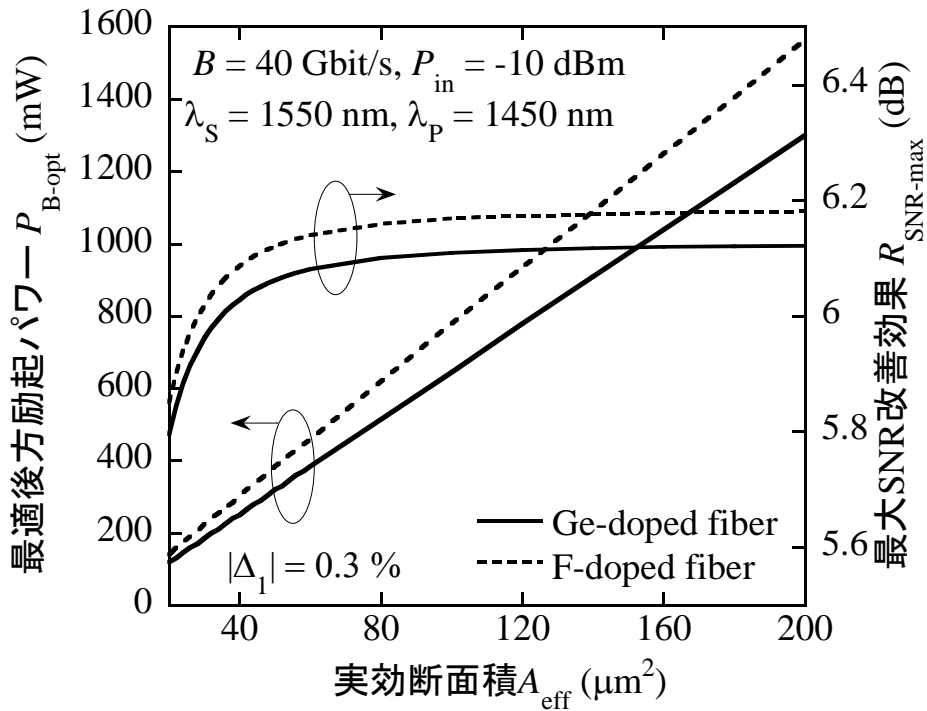


図 2-11 実効断面積  $A_{\text{eff}}$  を変化させたときの最適後方励起光パワー  $P_{B\text{-opt}}$  及び最大 SNR 改善効果  $R_{\text{SNR-max}}$  の計算結果

を用いた。図中の実線及び破線は、それぞれゲルマニウムドープファイバ及びフッ素ドープファイバの計算結果である。図 2-11 より、 $A_{\text{eff}}$  が大きくなるとともに  $P_{B\text{-opt}}$  が増大しており、ゲルマニウムドープファイバ及びフッ素ドープファイバにおいて、それぞれ  $A_{\text{eff}}$  が  $150$  及び  $130 \mu\text{m}^2$  のとき、 $1 \text{ W}$  以上の後方励起光パワーが必要となることが分かる。これに対し、 $R_{\text{SNR-max}}$  は、 $A_{\text{eff}}$  が  $80 \mu\text{m}^2$  のとき、それぞれ  $6.12$  及び  $6.18 \text{ dB}$  でほぼ一定であることが分かる。これは、 $A_{\text{eff}}$  の増大が、SNR 改善効果に顕著な影響を与えないことを示唆する。さらに、より小さい実効断面積  $A_{\text{eff}}$  における SNR 改善効果  $R_{\text{SNR}}$  の減少は、主に過剰な DRS 雑音の影響が原因である。以上の結果から、ファイバパラメータと SNR 改善効果の最大値及び励起パワーの最適値に相関関係があり、ファイバパラメータに応じて適切な励起パワーを設定することが重要であることが明らかとなった。

実際の伝送性能においては、光ファイバ中の SPM 及び GVD によって信号波形が劣化する。次に、SPM 及び GVD の影響を調査するため、「OptSim 3.5」を用いて伝送性能の指標の一つである Q 値の計算を行った。図 2-12 は、 $-20$  から  $10 \text{ dBm}$  の  $P_{\text{in}}$  における Q 値の計算及び実験結果を示す。ここで、 $\lambda_s$  及び  $\lambda_p$  は、それぞれ  $1580$  及び  $1480 \text{ nm}$  を用いた。図中の

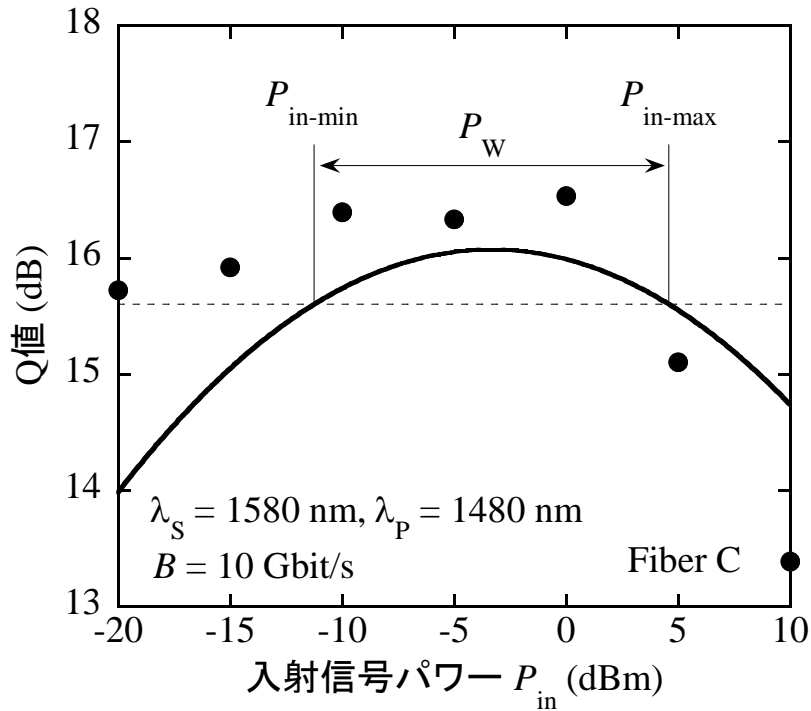


図 2-12 -20 から 10 dBm の入射信号光パワー  $P_{in}$  における Q 値の計算及び実験結果

実線及びプロット点は、それぞれ表 2-5 に示される Fiber C を用いた 10 Gbit/s 伝送における計算及び実験結果を示す。実験結果は、-16 dBm の受光パワーにおける BER の測定値から、式(2-24)を用いて算出した[2-19]。また、それぞれの  $P_{in}$  における励起光パワーは、式(2-14)から式(2-23)を用い、 $R_{SNR-max}$  を得る  $P_{B-opt}$  として求めた。さらに、実際の実験に用いた DCFM の挿入損失は 6.9 dB であり、計算と実験の整合性をあわせるため、計算における DCFM の挿入損失を 6.9 dB と設定した。図 2-12 より、 $P_{in}$  が -10 から 5 dBm のとき、1 dB 以下の精度で計算結果が実験結果と一致していることがわかる。しかしながら、-15 dBm 以下の  $P_{in}$  における実験結果は、計算により求められた Q 値よりも高くなっていることがわかる。一方、5 dBm 以上の  $P_{in}$  では、Q 値の実験結果が急速に小さくなった。EDFA の NF は入射信号光パワーに依存して変化し、 $P_{in}$  が高いまたは低い領域では NF が大きくなるが、計算では EDFA の NF を 6.5 dB 一定と設定したためと考えられる[2-21]。ここで、 $P_{in}$  が -10 から 5 dBm の範囲において  $10^{-9}$  の BER に相当する 15.6 dB の Q 値を達成することが可能であることが分かる。15.6 dB の Q 値を達成する最小及び最大入射信号光パワーを、それぞれ  $P_{in-min}$  及び  $P_{in-max}$  と定義すると、 $P_{in-min}$  及び  $P_{in-max}$  は、それぞれ DRA を適応した WDM 伝送における 1 チャネルあたりの最小入射信号光パワー及び全チャネルにおける最大トータル信号光パワーを

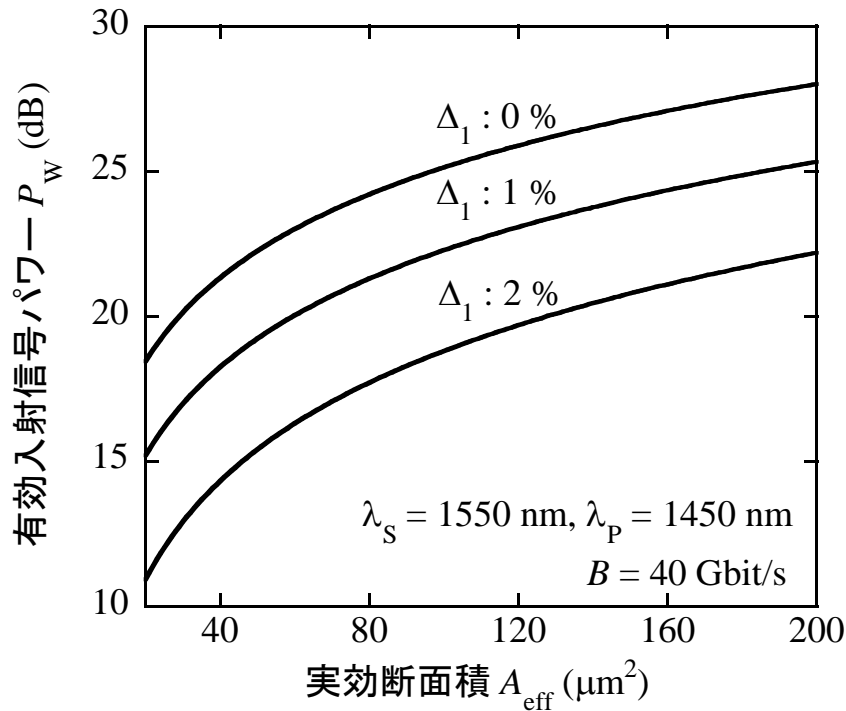


図 2-13 実効断面積  $A_{\text{eff}}$  を変化させたときの有効入射信号光パワー幅  $P_W$  の計算結果

表す。また、WDM 伝送における最大チャネル数を示唆する有効入射信号光パワー幅  $P_W$  は、 $P_{\text{in-min}}$  及び  $P_{\text{in-max}}$  を用いて式(2-26)に定義した。

$$P_W = \frac{P_{\text{in-max}}}{P_{\text{in-min}}} \quad (2-26)$$

ここで、 $P_W$  が大きいほど、伝送容量の拡大が可能となる。

図 2-13 は、 $\Delta_1$  がそれぞれ 0、1、並びに 2% における  $A_{\text{eff}}$  を変化させたときの  $P_W$  の計算結果を示す。ここで、光ファイバのドーパントはゲルマニウムを仮定した。また、 $B$  を 40 Gbit/s とし、80 km×4 スパンの伝送システムを想定し、 $\lambda_s$  及び  $\lambda_p$  は、それぞれ 1550 及び 1450 nm を用いた。波長 1550 nm における  $D$  及び分散スロープ  $S$  は、それぞれ 1 ps/nm•km 及び 0.07 ps/nm<sup>2</sup>•km と設定した。図 2-13 より、 $A_{\text{eff}}$  の増大とともに、それぞれの  $\Delta_1$  における  $P_W$  が増大していることがわかる。これは、 $A_{\text{eff}}$  の増大とともに非線形性が抑制されるためと考えられる。一方、 $\Delta_1$  が増大するとともにいずれの  $A_{\text{eff}}$  においても  $P_W$  が減少することが分かる。これは、 $\Delta_1$  の増大とともに損失係数が増大し、 $P_{\text{in-min}}$  が大きくなるためと考えられる。以上の結果をまとめ、図 2-14 に  $\Delta_1$  及び  $A_{\text{eff}}$  を変化させたときの  $P_W$  及び  $P_{B\text{-opt}}$  の関係を示す。図中の実線及び破線は、それぞれ等  $P_W$  及び等  $P_{B\text{-opt}}$  曲線を示す。ここで、 $\Delta_1$  の符号がプラス

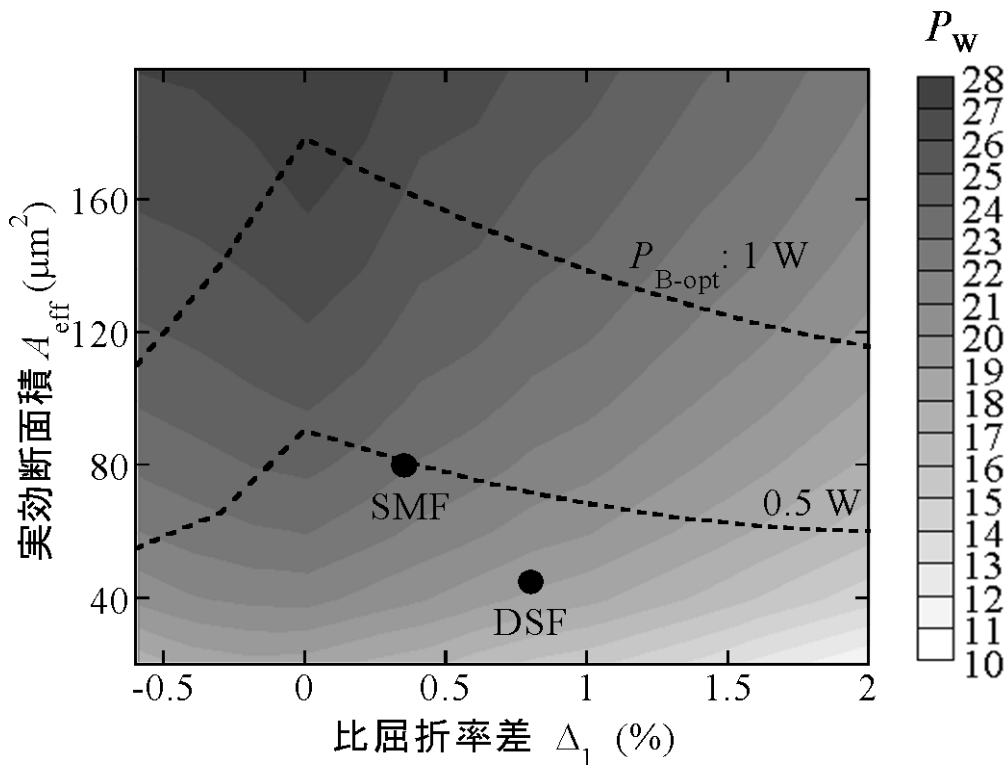


図 2-14 比屈折率差 $\Delta_1$ 及び実効断面積 $A_{\text{eff}}$ を変化させたときの有効入射信号光パワー幅 $P_w$ 及び最適後方励起光パワー $P_{\text{B-opt}}$ の関係

及びマイナスの領域は、それぞれゲルマニウムドープファイバ及びフッ素ドープファイバに相当する。また、2つのプロットはそれぞれ汎用の SMF 及び DSF の値を示す。図 2-14 より、 $\Delta_1$ の絶対値 $|\Delta_1|$ が小さく、 $A_{\text{eff}}$ が大きいとき、 $P_w$ が大きくなることが分かる。一方、 $P_{\text{B-opt}}$ は、 $\Delta_1$ の絶対値 $|\Delta_1|$ 及び $A_{\text{eff}}$ が大きいとき、大きくなるのがわかる。したがって、純石英コアによって形成された光ファイバが、有効入射信号光パワーの拡大に効果があることがわかった。

以上の結果から、2.3.1 項で示した計算モデルの有効性が確認され、DRA における光ファイバパラメータと伝送性能の関係が明らかとなり、上利用可能な後方励起光パワー、並びに必要となる有効入射信号光パワー幅、つまり伝送したいチャンネル数を設定することにより、ファイバパラメータである最適な $\Delta_1$ 及び $A_{\text{eff}}$ を求めることが可能となること、一方では、 $\Delta_1$ 及び $A_{\text{eff}}$ を設定することにより、DRA を適応した WDM 伝送における伝送可能なチャンネル数、つまりは伝送容量を見積もることも可能であることが明らかとなった。

### 2.3.3 DRA を適応した WDM 伝送システムに最適な光ファイバ設計

DRA を適応した WDM 伝送システムに最適な光ファイバの設計では、伝送性能の要求条件を満たす光ファイバの $\Delta_1$ 及び $A_{\text{eff}}$ の関係に加え、遮断波長 $\lambda_c$ 、曲げ損失 $\alpha_B$ 、並びに $D$ 特性を制御する必要がある。80 km×4 スパンの中継系伝送路を想定し、損失係数が比較的小さい S(1460 nm～1530 nm)、C(1530 nm～1565 nm)、並びに L(1565 nm～1625 nm)バンド[2-22]を光通信波長帯域として使用するものとした。したがって、最も短い波長である 1460 nm を $\lambda_s$ としてラマン増幅するために必要となる $\lambda_p$ は、1460 nm から 13.2 THz 短波長側へ周波数シフトした 1360 nm となる。このため、 $\lambda_c$ 及び零分散波長 $\lambda_0$ の上限を 1360 nm と設定した。また、波長 1625 nm において、半径 3 cm で 100 回巻いたときの $\alpha_B$ の上限は 0.5 dB と設定した[2-23]。

図 2-15 は、設計に用いた屈折率分布、並びに波長 1550 nm における $D$ を変化させたときの最大実効断面積 $A_{\text{eff-max}}$ の計算結果を示す。屈折率分布は純石英をコアとしたステップ型とした。ここで、 $A_{\text{eff-max}}$ とは、各波長分散を実現する $\Delta$ と $a$ の関係において、 $\alpha_B$ による制限によって決定される実効断面積の最大値を表す。図 2-15 において、2 点の黒丸は、それぞれ $\lambda_0$ 及び $\lambda_c$ によって制限される $D$ の最小値及び最大値を表す。したがって、 $D$ を 9.1 から

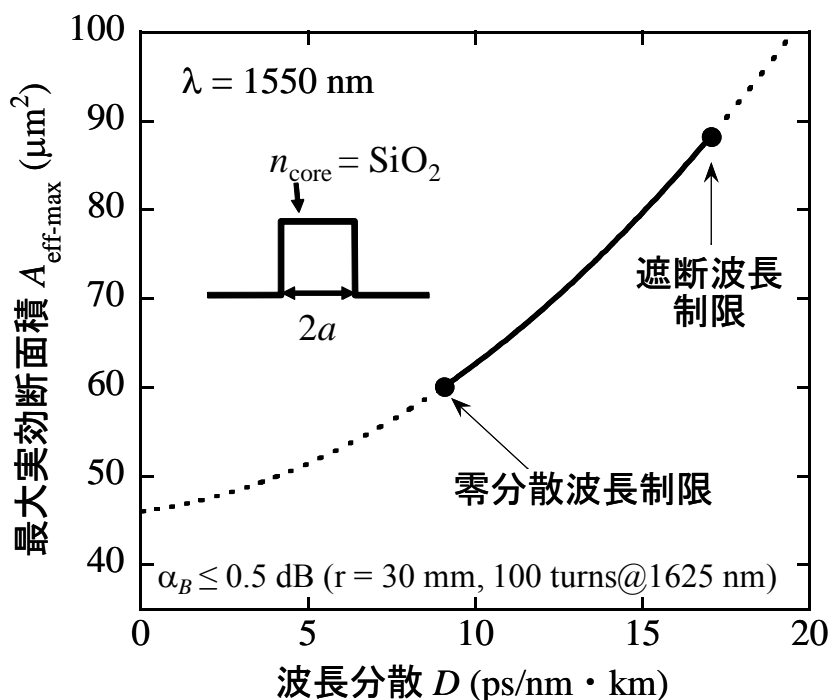


図 2-15 波長 1550 nm における波長分散 $D$ を変化させたときの最大実効断面積 $A_{\text{eff-max}}$

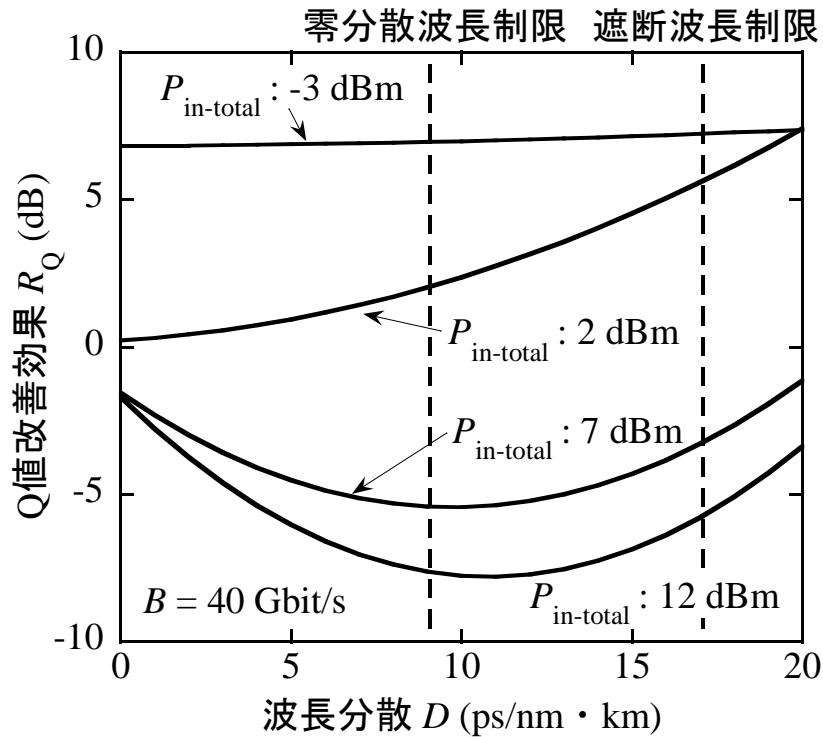


図 2-16 波長分散  $D$  に対する  $Q$  値改善効果  $R_Q$  の計算結果

17.1 ps/nm•km とし、 $A_{\text{eff-max}}$  を 61 から 88  $\mu\text{m}^2$  に設定することにより、上記の  $\lambda_c$ 、 $\lambda_0$ 、並びに  $\alpha_B$  の制限を実現する SCF を設計することが可能である。

DRA を適応した WDM 伝送システムに最適な光ファイバの設計手法の有効性を確認するため、100 GHz 間隔に配置された C バンドの 16 チャンルの信号における  $Q$  値を計算により求めた。80 km×4 スパンの伝送路において、伝送速度 40 Gbit/s 伝送システムを想定した。

図 2-16 は、 $D$  に対する  $Q$  値改善効果  $R_Q$  の計算結果を示す。ここで、 $R_Q$  とは、DRA を適応しない、つまり、EDFA のみを増幅技術として使用した場合の  $Q$  値  $Q_{\text{EDFA}}$  に対する、増幅技術として EDFA と DRA を併用させた場合の  $Q$  値  $Q_{\text{EDFA+DRA}}$  の比であり、式(2-27)に定義される。

$$R_Q \equiv \frac{Q_{\text{EDFA+DRA}}}{Q_{\text{EDFA}}} \quad (2-27)$$

図 2-16 において、4 本の実線は、トータル入射信号光パワー  $P_{\text{in-total}}$  がそれぞれ -3、2、7、並びに 12 dBm であるときのを示す。また、2 本の破線は、それぞれ  $\lambda_0$  及び  $\lambda_c$  によって制限される  $D$  の最小値及び最大値を表す。図 2-16 より、9.1 から 17.1 ps/nm•km の  $D$  で設計された SCF では、 $P_{\text{in-total}}$  が 2 dBm 以下の領域において  $R_Q$  が約 2 dB 以上となることが分かる。ま

た、 $-3$  dBm 以下の  $P_{in-total}$  を使用する場合、 $D$  の値に関わらず  $7$  dB の  $Q$  値の改善が可能であることが分かる。仮に、 $Q$  値が  $2$  dB 改善する場合、式(2-25)より SNR は  $4$  dB 改善され、 $20$  dB の SNR の場合にはシャノン理論により、 $1.3$  bps/Hz の周波数利用効率の向上が見込まれ、 $C$  バンドは約  $4$  THz であるため、約  $5.2$  Tpbs の伝送容量拡大が期待できる。これは図 1-2 より試算される、 $10$  年から  $20$  年後に必要とされるトラフィック総量に相当するため、通信ネットワークにおける大容量化として非常に高い効果が見込まれる。

以上の結果から、純石英をコアに用いたステップ型の屈折率分布による光ファイバを設計し、WDM 伝送システムに DRA を適応することによって高い伝送性能を保持することが可能であることが明らかとなった。さらに、図 2-15 より、 $D$  を  $17.1$  ps/nm•km とすることにより  $A_{eff-max}$  を  $88$   $\mu\text{m}^2$  とした SCF を設計することが可能であり、図 2-14 より、 $A_{eff}$  を  $88$   $\mu\text{m}^2$  とした SCF では、 $0.5$  W の励起光パワーを使用することで  $24$  dB の  $P_w$  が得られ、従来の SMF や DSF と比較した場合、設計した SCF では波長多重数、つまり伝送容量がそれぞれ  $1.4$  倍及び  $3.5$  倍となり、 $P_{in-total}$  が  $2$  dBm 以下の領域では約  $2$  dB 以上の  $R_Q$  が得られ、 $20$  dB の SNR の場合には  $1.3$  bps/Hz の周波数利用効率の向上により、 $C$  バンドにおいて約  $5.2$  Tpbs の伝送容量拡大が見込まれ、大容量化に高い効果が期待できる。

## 2.4 まとめ

本章では、充実型光ファイバの光ファイバ構造とラマン特性の関係を明らかにした。また、SNR 改善効果及び非線形性を考慮した  $Q$  値の観点から、ファイバパラメータと伝送性能の関係について明らかにし、DRA を適応した WDM 伝送システムに最適な光ファイバの設計を行った。本章で得られた結果を以下にまとめる。

- ゲルマニウムまたはフッ素を添加した石英系の充実型光ファイバのラマン利得係数スペクトルは、励起波長から  $13.2$  THz と  $14.5$  THz 周波数シフトした位置に、それぞれ SiO 結合に起因するピークを観測することができ、ゲルマニウムドープファイバでは、 $13.2$  THz のピークが GeO 結合と相互作用して  $12.9$  THz により大きなピークが観測される。 $12.9$  THz のラマン利得係数は、ファイバコアにおけるゲルマニウムまたはフッ素の添加量に依存して変化し、コアと純石英の比屈折率差に比例して増減することを明らかにした。

- 任意の屈折率分布を有する光ファイバにおいても、屈折率分布と電界分布を考慮し、コアと純石英の比屈折率差とラマン利得係数の関係を用いることによって、実効的なラマン利得率を高精度に評価することが可能である。また、予めラマン利得率スペクトルの偏回帰係数及び任意の評価周波数シフトにおけるラマン利得率を求めておくことにより、重回帰分析を用いることによって実効的なラマン利得率スペクトルを高精度に評価することが可能であることを明らかにした。
- DRA を適応した WDM 伝送システムに適応するための光ファイバの最適条件として、SNR 改善効果及び  $10^{-9}$  の BER に相当する Q 値を達成する有効入射信号光パワー幅に着目して検討を行い、コアを純石英とすることにより、高い伝送性能が期待できること、並びに、利用可能な後方励起光パワー、並びに必要となる有効入射信号光パワー幅を設定することにより、最適な比屈折率差及び実効断面積を求めることが可能となることを明らかにした。
- 伝送性能の要求条件を満たす光ファイバの比屈折率差及び実効断面積の関係に加え、遮断波長、曲げ損失、並びに波長分散特性を考慮し、DRA を適応した WDM 伝送システムに最適な光ファイバの設計を行い、波長分散を  $17.1 \text{ ps/nm}\cdot\text{km}$  とすることにより実効断面積を  $88 \mu\text{m}^2$  とした SCF が実現可能であり、 $0.5 \text{ W}$  の励起光パワーを使用することにより  $24 \text{ dB}$  の有効入射光パワー幅が得られ、従来の SMF や DSF と比較して、それぞれ  $1.4$  倍及び  $3.5$  倍の波長多重数が可能となり、大容量化に高い効果が期待できること、さらに、 $2 \text{ dBm}$  以下のトータル入射信号光パワーを使用することにより  $2 \text{ dB}$  以上の Q 値改善効果が得られることを明らかにした。



## 第3章：PCFのDRA特性

### 3.1 はじめに

PCFはクラッド内に多数の空孔を設けた構造を持ち、従来の充実型光ファイバにはない優れた特性を実現できることから、将来の超大容量・超長距離光伝送媒体として研究開発が進められている。PCFの優れた特性の1つに、赤外光から可視光にわたる極めて広い波長域でシングルモード動作するという特徴がある[3-1]。さらに、分散特性の制御性にも優れるため、波長分割多重伝送として利用できる波長領域を飛躍的に拡大することも可能である[3-2]。また、PCFは、石英ガラスに設けた空孔だけで導波路構造を実現できるため、損失要因の1つとなるコアの添加物を不要とし、究極の低損失性を生かした超長距離伝送用の光ファイバを製造することが可能である[3-3]。前章の2.3.2項において、光ファイバの低損失性がDRAを適応したWDM伝送システムの大容量化に高い効果をもつことが明らかとなった。したがって、究極の低損失性を有し、超広帯域シングルモード伝送が可能であるPCFは、DRAを適応したWDM伝送システムにおいて更なる効果が期待できる。

本章では、ラマン利得係数スペクトル及びラマン利得係数の励起波長依存性の観点から、PCFのラマン利得特性を明らかにする。また、PCFを用いたDRAを適応したWDM伝送性能、並びにPCFの広帯域DRA伝送への適応性を明らかにし、DRA伝送におけるPCFの設計条件を明確にする。

### 3.2 PCFのラマン特性

#### 3.2.1 ラマン利得係数スペクトル特性

PCFのラマン特性を評価するため、空孔構造の異なる2種類のPCFを準備した。図3-1はPCF断面の模式図を表す。純石英母材にコアとなる中心位置の周囲に六方最密の配置となるように60個の空孔を設けた。ここで、 $d$ 及び $\Lambda$ は、それぞれ空孔直径及び空孔間隔である。表3-1に、実験で用いた光ファイバのファイバパラメータを示す。尚、比較のため1.0 kmのSMF及び5.3 kmのSCFを使用した。2種類のPCFは、ともに外径が125  $\mu\text{m}$ であった。PCF 1は、 $\Lambda$ 及び規格化空孔直径 $d/\Lambda$ が、それぞれ5.4及び0.6  $\mu\text{m}$ であり、PCF 2の $\Lambda$ 及び $d/\Lambda$ は、それぞれ5.4及び0.5  $\mu\text{m}$ であった。カットバック法[3-4]で測定したPCF 1の853、1100、1450、並びに1550 nmにおける損失係数 $\alpha$ は、それぞれ2.76、1.16、0.66、並びに0.38

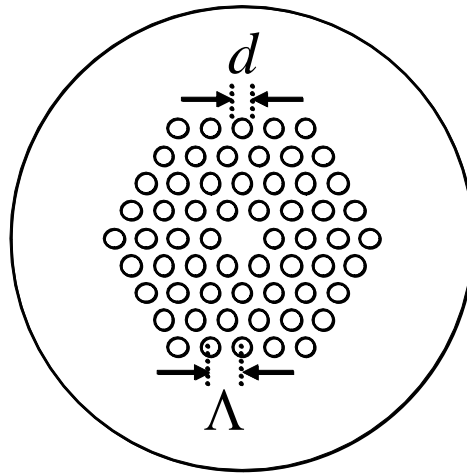


図 3-1 PCF 断面の模式図

		PCF 1	PCF 2	SMF	SCF
ファイバ長 (km)		1.6/6.0	12.7	1.0	5.3
空孔数		60	60	-	-
規格化空孔直径 $d/\Lambda$		0.6	0.5	-	-
空孔間隔 $\Lambda$ (mm)		5.4	5.6	-	-
損失係数 $\alpha$ (dB/km)	853 nm	2.76	2.71	-	-
	1100 nm	1.16	1.15	-	-
	1450 nm	0.66	0.70	0.25	0.21
	1550 nm	0.38	0.55	0.19	0.17
実効断面積 $A_{eff}$ (mm <sup>2</sup> )	853 nm	24.0	36.2	-	-
	1100 nm	26.2	39.6	-	-
	1450 nm	29.6	40.6	74.8	71.6
	1550 nm	30.7	41.4	82.1	76.7
波長分散 $D$ (ps/nm·km)	853 nm	-77.3	-67.4	-	-
	1100 nm	-4.5	-4.9	-	-
	1550 nm	43.2	42.5	16.8	18.4
遮断波長 $\lambda_C$ (nm)		-	-	1180	1390

表 3-1 ファイバパラメータ

dB/km であった。また、PCF 2 の各波長における $\alpha$ は、それぞれ 2.71、1.15、0.70、並びに 0.55 dB/km であった。PCF 1 の波長 1550 nm における実効断面積  $A_{eff}$ 、及び波長分散  $D$  は、それぞれ 30.7  $\mu\text{m}^2$ 、及び 43.2 ps/nm·km であり、PCF 2 の  $A_{eff}$ 、及び  $D$  は、それぞれ 41.4  $\mu\text{m}^2$

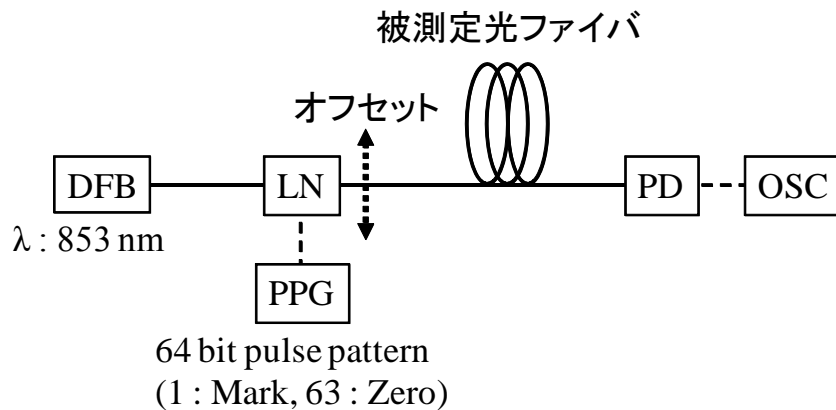


図 3-2 モード伝送特性測定系

、及び  $42.5 \text{ ps/nm}\cdot\text{km}$  であった。また、SMF 及び SCF の波長  $1550 \text{ nm}$  における  $\alpha$  は、それぞれ  $0.19$  及び  $0.17 \text{ dB/km}$  であり、遮断波長  $\lambda_c$  は、それぞれ  $1180$  及び  $1390 \text{ nm}$  であった。PCF は、 $d/\Lambda$  が  $0.43$  以下の条件でエンドレスリーシングルモード (Endlessly single mode : ESM) を実現する [3-5]。表 3-1 より、本章で用いた PCF の  $d/\Lambda$  は  $0.5$  以上であり、ESM の条件を達していないため、短波長における高次モードの影響が懸念される。したがって、 $d/\Lambda$  が  $0.6$  であり遮断波長が長波長側に存在する PCF 1 において、シングルモード特性を測定により確認した。図 3-2 は、モード伝送特性の測定系を示す。光源は、PPG を接続した LN 変調器により、 $100 \text{ ps}$  間隔の  $64$  ビットパルスパターン (マーク率  $1/64$ ) に外部変調された、波長  $853 \text{ nm}$  の分布帰還型 (Distributed feedback : DFB) レーザーを用いた。パルス光は PCF 1 または SMF を伝送し、PD 及びサンプリングオシロスコープ (Optical sampling oscilloscope : OSC) を用いて観測した。なお、高次モードの影響を調査するため、調芯装置を用いて入射側に  $3 \mu\text{m}$  のオフセットを設けた。

図 3-3 は、受光時間に対する光パルス波形を示す。図中の (a) は入射パルスを示し、(b) 及び (c) はそれぞれ PCF 1、及び SMF を伝送後の光パルス波形を示す。尚、PCF 1 のファイバ長  $L$  は  $1.6 \text{ km}$  とした。図 3-3(c) より、入射パルスとともに約  $2000 \text{ ps}$  ずれたところにパルス波形が観測された。これは、SMF における  $\text{LP}_{01}$  モードと  $\text{LP}_{02}$  モード間の微分群遅延に相当する [3-6]。これに対し、PCF 1 伝送においては明らかな高次モードの影響は観測されなかった。また、図 3-4 は  $853 \text{ nm}$  の光源を用いて測定した PCF 1 の出射端面上の光強度分布 (Near field pattern : NFP) [3-7] を示す。この測定結果からも高次モードの影響は観測されなかった。したがって、本章で用いた PCF は完全な ESM ではないものの、波長  $853 \text{ nm}$  においては高

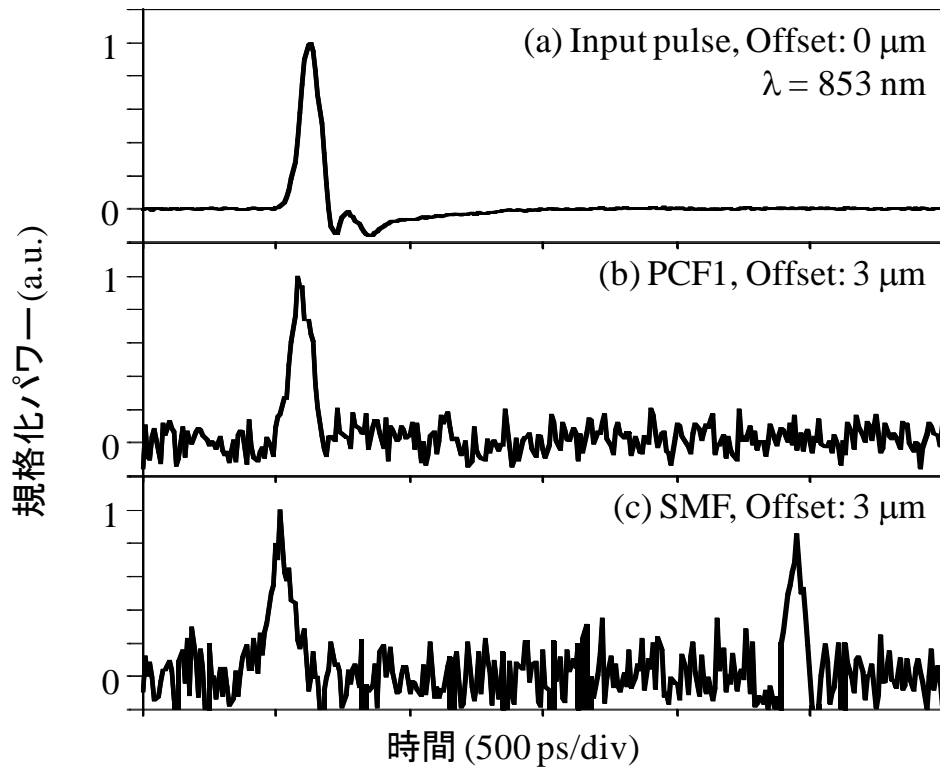


図 3-3 受光時間に対する光パルス波形

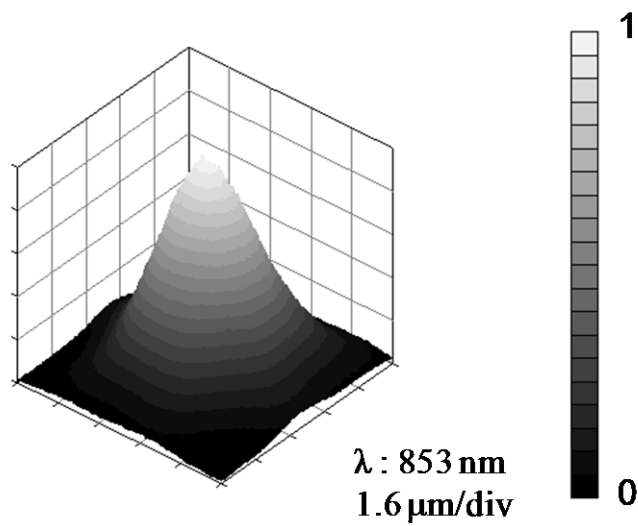


図 3-4 出射端面上の光強度分布

次モードの影響がなく、853 nm 以上の波長帯域においてシングルモード伝送が可能であることがわかった。

PCF 1 及び PCF 2 を用いて前章の図 2-1 で示した実験系により、ラマン利得係数スペクト

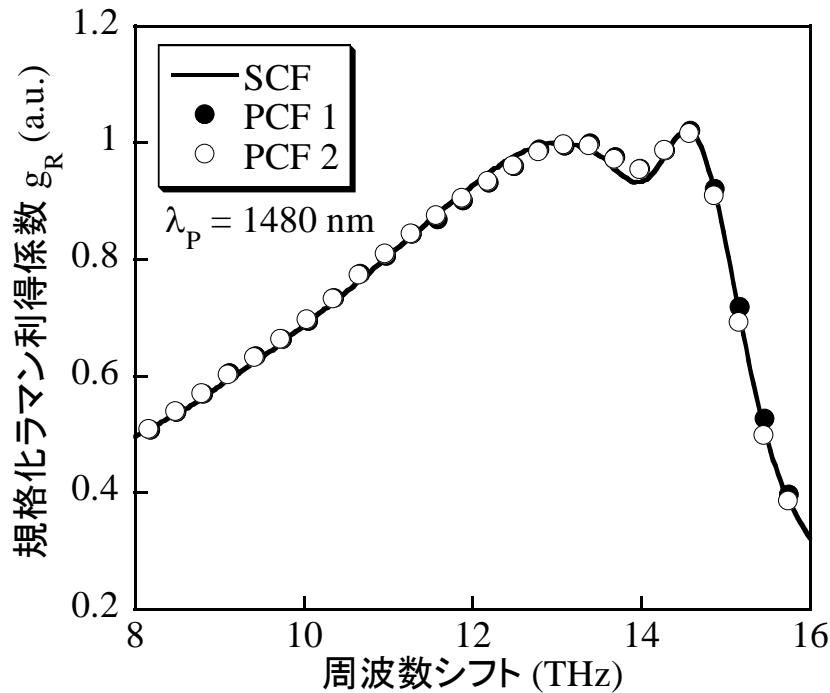


図 3-5 SCF 及び PCF におけるラマン利得係数スペクトル

ルの測定を行った。図 3-5 は、1480 nm の励起波長 $\lambda_p$ を用いて測定したラマン利得係数スペクトルを示す。図中の実線、黒丸、並びに白丸は、それぞれ SCF、PCF 1、並びに PCF 2 の規格化ラマン利得係数スペクトルを示す。図 3-5 より、PCF 1 及び PCF 2 の測定結果は、SCF の測定結果とよく一致し、13.2 THz と 14.5 THz の $\lambda_p$ からの周波数シフト  $F$  に、それぞれ SiO 結合に起因する TOM と LOM に相当する 2 つのピークを観測することができる。この結果は、文献[3-8]、[3-9]の報告ともよく一致している。この結果より、PCF のコア中に存在する SiO の分子結合状態が SCF と同等であり、信号光及び励起光のコアにおける閉じ込め効果も SCF と同程度であると考えられる。

### 3.2.2 ラマン利得係数の波長特性

PCF の広帯域 DRA 伝送への適応性を検討するにあたり、PCF のラマン利得特性の波長依存性を明らかにする必要がある。波長 822、1050、並びに 1480 nm の励起光源を用いて、PCF のラマン利得係数  $g_R$  を測定した。図 3-6 は、ラマン利得係数の測定系を示す。822、1050、並びに 1480 nm の $\lambda_p$ において、光源はそれぞれチタンサファイアレーザー(Titanium sapphire

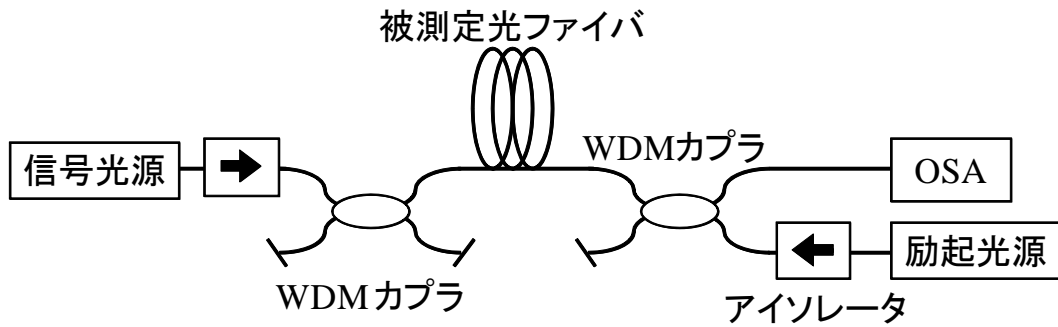


図 3-6 ラマン利得係数測定系

laser : TSL)、イッテルビウムファイバレーザー(Ytterbium fiber laser : YFL)、並びに RFL を用いた。また、それぞれの励起光源に対し、中心波長が 850 nm のエルビウム添加フッ化物ファイバ増幅器(Erbium doped fluoride fiber amplifier : F-EDFA)の ASE、中心波長が 1070 nm のイッテルビウム添加ファイバ増幅器(Ytterbium doped fiber amplifier : YDFA)の ASE、並びに中心波長が 1580 nm の SLD を信号光源として用いた。信号光源の 10 dB バンド幅は、それぞれ 10、50、並びに 100 nm であった。それぞれの波長領域における信号光と励起光は、2つの WDM カプラを用いて被測定光ファイバに入射した。そして、それぞれの励起波長におけるラマン利得スペクトルを OSA によって測定し、 $g_R$  の $\lambda_p$ 依存性を評価した。

図 3-7 は、13.2 THz の周波数シフトにおける  $g_R$  の $\lambda_p$ 依存性を示す。図中の白四角、黒丸、並びに白丸は、それぞれ SCF、PCF 1、並びに PCF 2 における測定結果を示す。また、図中の実線は、純石英ガラスにおける  $g_R$  と $\lambda_p$ の関係  $g_R = g_{R1} / \lambda_p$  ( $g_{R1}$  は $\lambda_p = 1 \mu\text{m}$ の時のラマン利得係数) [3-10]から算出した理論値である。尚、SCF は $\lambda_c$ が 1390 nm であるため、 $\lambda_p$ は 1480 nm のみとした。また、822 及び 1050 nm の $\lambda_p$ を用いた PCF 2 のラマン利得係数スペクトル測定では、本測定系におけるダイナミックレンジが不十分であり、再現性の良い結果を得ることが困難であったため、PCF 2 においても $\lambda_p$ は 1480 nm のみとした。図 3-7 より、1480 nm の $\lambda_p$ における SCF、PCF 1、並びに PCF 2 の  $g_R$  は、図 3-5 と同様によく一致していることがわかる。また、PCF 2 の  $g_R$  と $\lambda_p$ との関係は、理論値とよく一致した。一般に、物質中の  $g_R$  は $\lambda_p$ に反比例する関係がある。これは光エネルギーが波長に対して反比例するためである。ドーパントが添加されていない純石英ガラス及び PCF は、ともに SiO 結合のみによって構成されており、図 3-5 より、それぞれのラマン利得係数スペクトルがよく一致したことから、SiO の分子結合状態が同様であると考えられ、 $g_R$  と $\lambda_p$ との関係においても同様に反比例する結果が得られたものと考えられる。

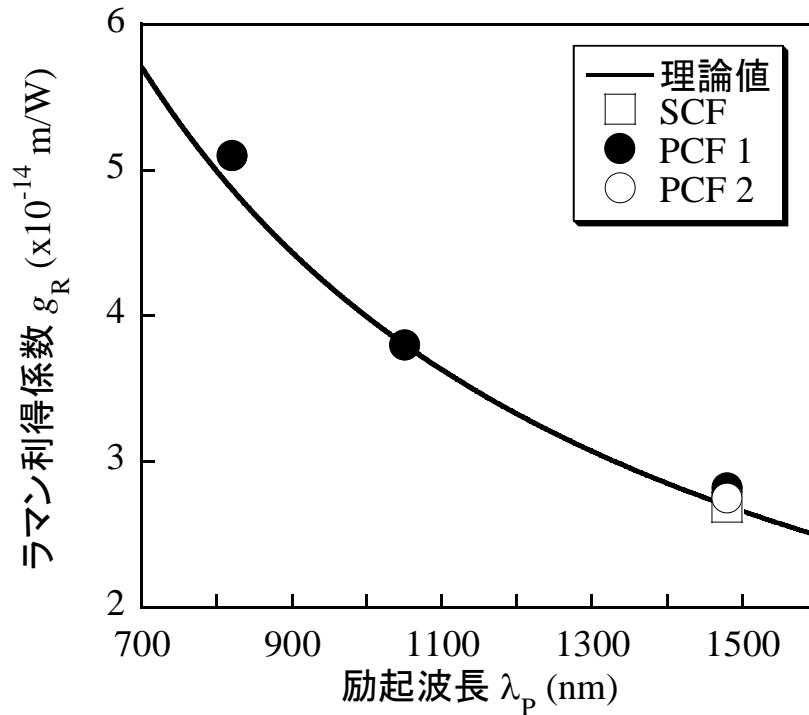


図 3-7 13.2 THz の周波数シフトにおけるラマン利得係数  $g_R$  の励起波長  $\lambda_p$  依存性

### 3.3 PCF における DRA 伝送特性

#### 3.3.1 DRA を適応した伝送特性

PCF の DRA 伝送特性を調査するため、波長 853 nm 及び 1576.5 nm の信号光を用いて、それぞれ単一波長伝送を行なった。図 3-8 は、DRA 伝送路構成を示す。信号光の増幅技術として、後方励起による DRA と、集中定数型光増幅器(Amplifier : AMP)を併用するものとした。波長 853 nm、及び 1576.5 nm の信号光は、それぞれ DFB 及び ECL によって生成し、

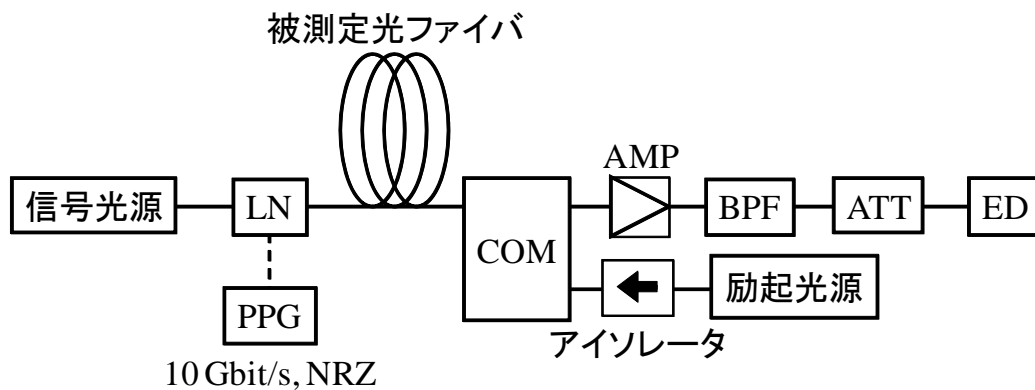


図 3-8 DRA 伝送路構成

LN 外部変調器を用いて、10 Gbit/s の 1/2 のマーク率の NRZ 信号に変調した。波長 853 nm 及び 1576.5 nm の信号光に対し、それぞれ TSL 及び RFL を励起光源として用いた。また、それぞれの励起光は、結合器(Combiner : COM)として WDM カプラ及びサーキュレータを用いて被測定光ファイバに入射するものとした。波長 853 nm 及び 1576.5 nm の信号伝送において、それぞれ表 3-1 に示した PCF 1 及び PCF 2 を用いた。伝送した信号光は AMP、BPF、並びに ATT を介して ED に入射した。波長 853 nm 及び 1576.5 nm の信号伝送において、AMP として F-EDFA 及び EDFA をそれぞれ使用した。さらに、波長 1576.5 nm では、累積分散による影響を無視するため、サーキュレータの後に DCFM を挿入した。また、実験結果の有効性を確認するため、前章の式(2-21)を用いて計算を行った。

図 3-9 は(a)波長 853 nm 及び(b)波長 1576.5 nm における受光パワー $P_{rec}$ に対する BER の測定結果を示す。図中の黒丸及び黒四角は、それぞれバックトゥーバック(Back-to-back : BTB)伝送及び DRA を使用しない、つまり後方励起光パワー $P_B$ が 0 mW の時の伝送における測定結果を表す。また、白抜きで示されたプロットは各  $P_B$  における測定結果を示す。波長 853 nm 及び 1576.5 nm における入射信号光パワー $P_{in}$ は、それぞれ-4.7 dBm 及び-4.0 dBm に設定した。また、それぞれの波長における PRBS は、1/2 のマーク率をとまって、 $2^{31}-1$  及び  $2^{23}-1$  とした。図 3-9(a)より、DRA を使用しない場合では、 $10^{-9}$  の BER で 4 dB 以上のパワーペナルティがあることがわかる。非常に狭いチャープの無いスペクトルを仮定した場合、853 nm の波長においては 0.5 dB のパワーペナルティにおける分散限界は 2000 ps/nm 以上と予想される[3-11]。PCF 2 における累積分散の絶対値は 480 ps/nm であるため、測定されたパワーペナルティは分散による波形劣化ではなく、SNR の劣化によるものと考えられる。図 3-9(a) 及び(b)において、DRA を用いることにより BER 特性が明らかに改善していることがわかる。図 3-9(a)では、525 mW の  $P_B$  のとき、パワーペナルティが 2 dB 改善している。また、図 3-9(b)では、460 mW の  $P_B$  のとき、 $10^{-9}$  の BER におけるパワーペナルティが 0.7 dB 改善していることがわかる。したがって、既存の SMF で使用される波長領域である 1576.5 nm と同様に、SMF では使用不可能である遮断波長以下の 853 nm の波長領域においても、DRA を適応することにより、PCF 伝送路において SNR が良好に改善されることが確認された。

図 3-10 は、 $P_B$  に対する SNR 改善効果  $R_{SNR}$  の測定及び計算結果を示す。図 3-10 は(a)波長 853 nm 及び(b)波長 1576.5 nm における  $R_{SNR}$  を示す。図中の白丸及び実線は、それぞれ測定及び計算結果を示す。計算では、PCF のレイリー散乱係数  $R$  を、純石英ガラスの値である  $0.8 \text{ dB/km} \cdot \mu\text{m}^4$  として用いた[3-12]。また、AMP の NF は 6.5 dB であった。更に、10 Gbit/s



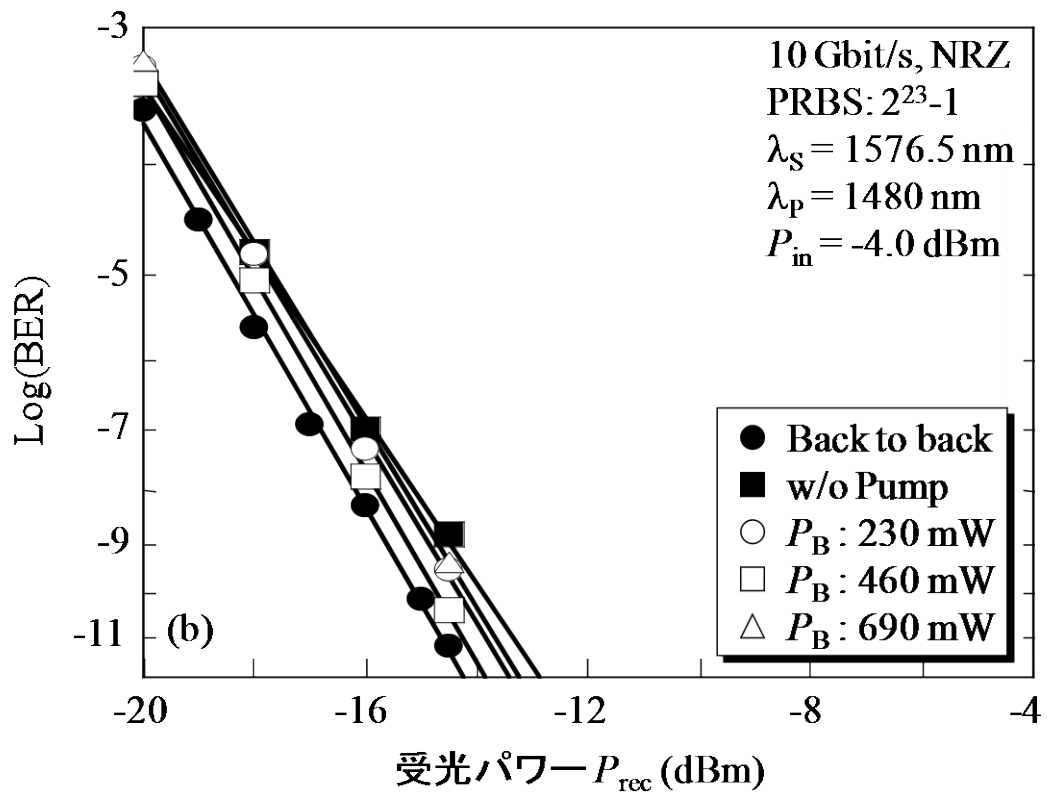
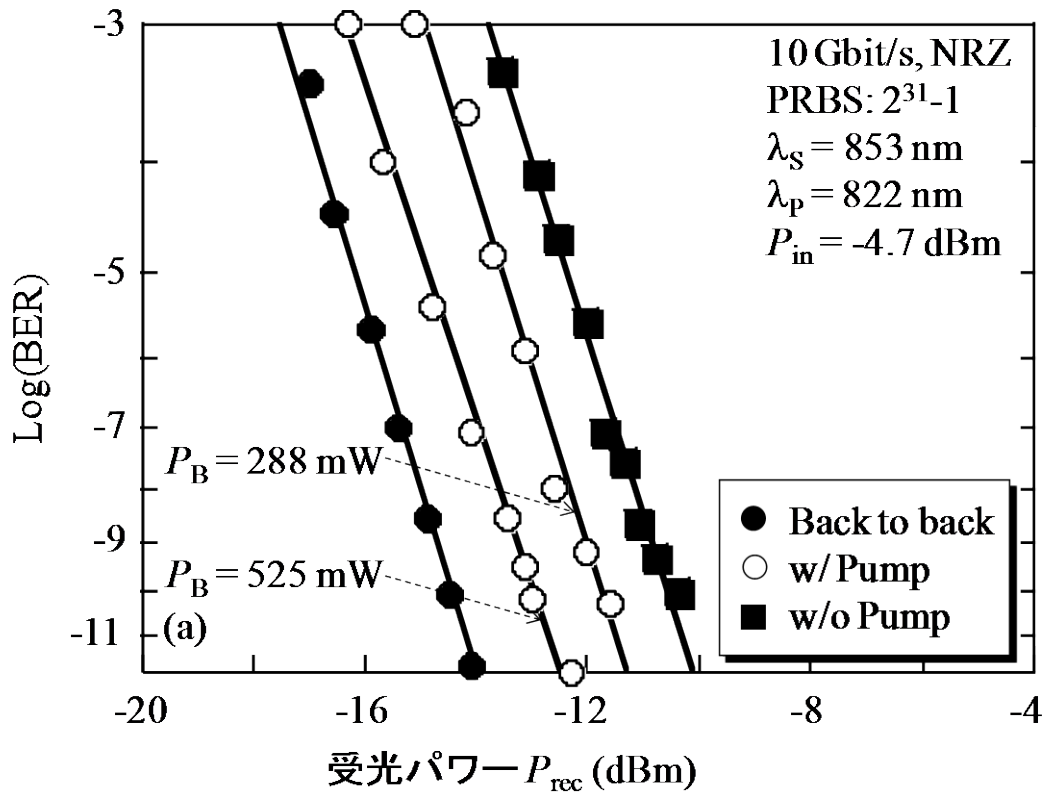


図 3-9 受光パワー  $P_{rec}$  に対する BER 特性

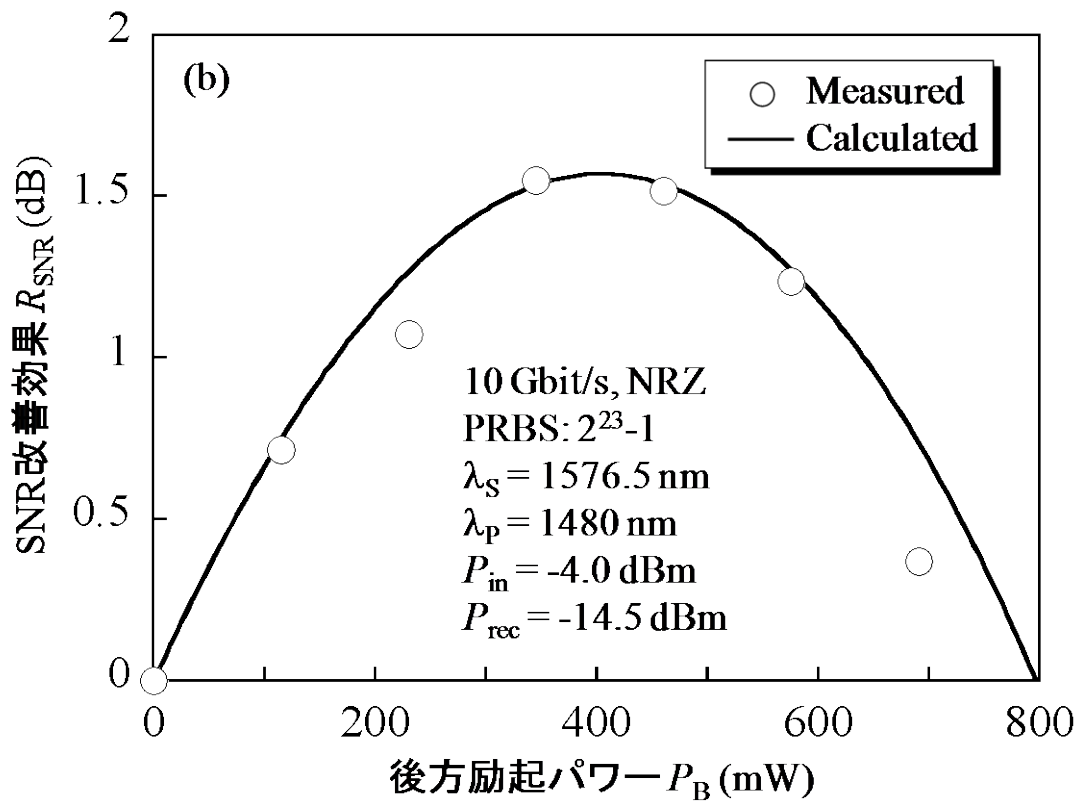
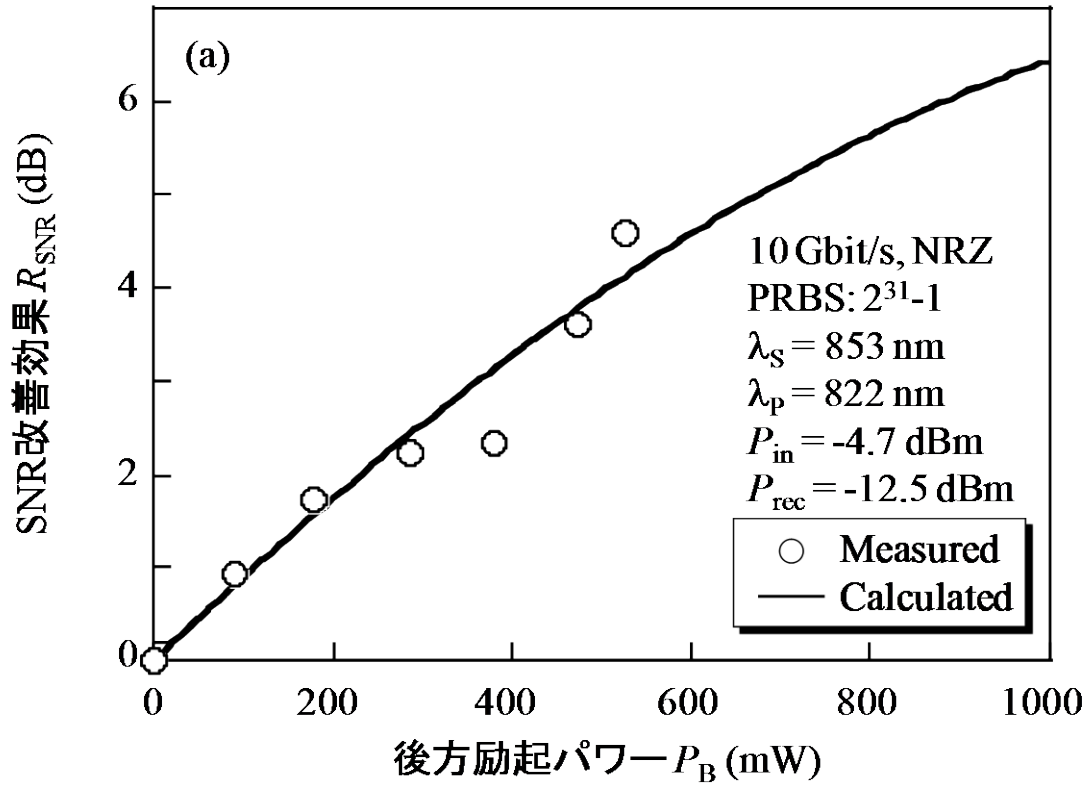


図 3-10 後方励起光パワー  $P_B$  に対する SNR 改善効果  $R_{\text{SNR}}$

の伝送速度  $B$  に対し、電気フィルタ幅  $B_e$ 、及び光フィルタ幅  $B_o$  は、それぞれ 7 GHz 及び 10 GHz を用いた。また、ある一定の  $P_{rec}$  における BER の値から  $Q$  値を算出し、 $SNR \approx 4Q^2$  として、 $R_{SNR}$  の測定値を求めた[3-13]。波長 853 nm 及び 1576.5 nm において、算出に用いた  $P_{rec}$  は、それぞれ -12.5 dBm 及び -14.5 dBm であった。各波長における  $P_{in}$  は、それぞれ -4.7 dBm 及び -4.0 dBm であった。図 3-10(a)及び(b)において、測定結果と計算結果が良く一致しており、 $P_B$  の増加とともに  $R_{SNR}$  が向上していることがわかる。これにより、前章の 2.3.1 項で示した SNR 改善効果の計算モデルにより、PCF 伝送路において信号波長帯にかかわらず、DRA の適応効果を評価可能であることが確認された。また、図 3-10(b)では、約 400 mW の最適後方励起光パワー  $P_{B-opt}$  において、1.5 dB の最大 SNR 改善効果  $R_{SNR-max}$  が得られたが、図 3-10(a)では、測定した範囲に  $R_{SNR-max}$  となる  $P_{B-opt}$  が存在しなかった。これは、波長 853 nm における PCF 1 の損失係数は約 3 dB と大きく、1 W までの  $P_B$  では DRS が低く抑えられたためと思われる。

低損失を有する PCF では、従来の SCF と同様のラマン利得特性を有しており、また DRA 伝送における SNR 改善効果も期待できることから、DRA を適応した WDM 伝送における伝送性能を実験により検証した。図 3-11 は、DRA を適応した WDM 伝送実験系を示す。後方励起による DRA と従来の EDFA を増幅技術として併用するものとした。DFB レーザーを用いた 8 チャンネルの信号光は、1571.5 nm から 1583.1 nm の波長において、200 GHz 間隔に配置された。合波器(Multiplexing : MUX)によって合波された信号光は、偏波コントローラ(Polarization controller : PC)により偏光面を調整した後、LN 外部変調器を用いて 10 Gbit/s の 1/2 のマーク率の NRZ 信号に変調した。励起光源は、RFL を用い、サーキュレータを介して被測定 PCF に入射するものとした。伝送路に用いた PCF は表 3-1 に記載した PCF 2 を用いた。また、PRBS は  $2^{23} - 1$  であった。さらに、PCF 伝送路中の累積分散による BER 特性劣化を抑制するため、受光器の前に DCFM を接続して実験を行なった。

図 3-12(a)及び(b)は、それぞれ DRA 有り及び DRA 無しの条件における  $P_{rec}$  に対する BER 特性を示す。ここで、DRA 無しとは  $P_B$  を 0 mW にしたときの測定結果である。図中の黒丸及び白抜きのプロットは、それぞれ BTB 伝送及び各チャンネルにおける測定結果を示す。ここで、 $P_{in}$  及び  $P_B$  は、それぞれ -4 dB/ch 及び 460 mW を用いた。図 3-12(a)より、460 mW の  $P_B$  を用いることにより、すべての信号光がエラーフロア無しに良好に伝送されたことがわかる。ここで、 $10^{-11}$  の BER におけるパワーペナルティはすべてのチャンネルにおいて 1.5 dB 未満であった。また、図 3-12(b)より、同等の BER の値で得られる結果と比較して、DRA

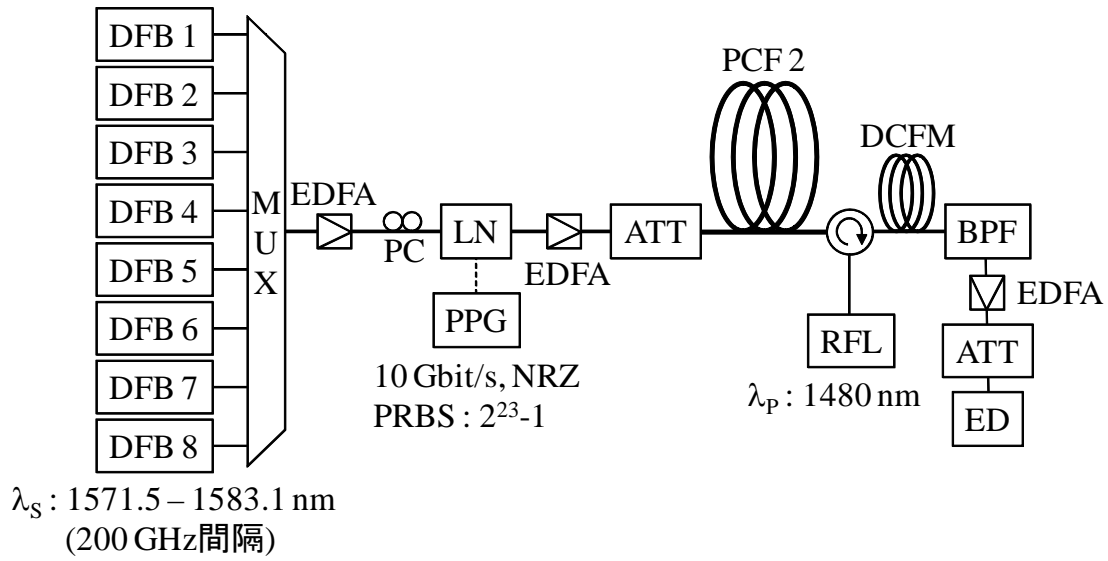


図 3-11 1550 nm 帯 DRA を適応した WDM 伝送実験系

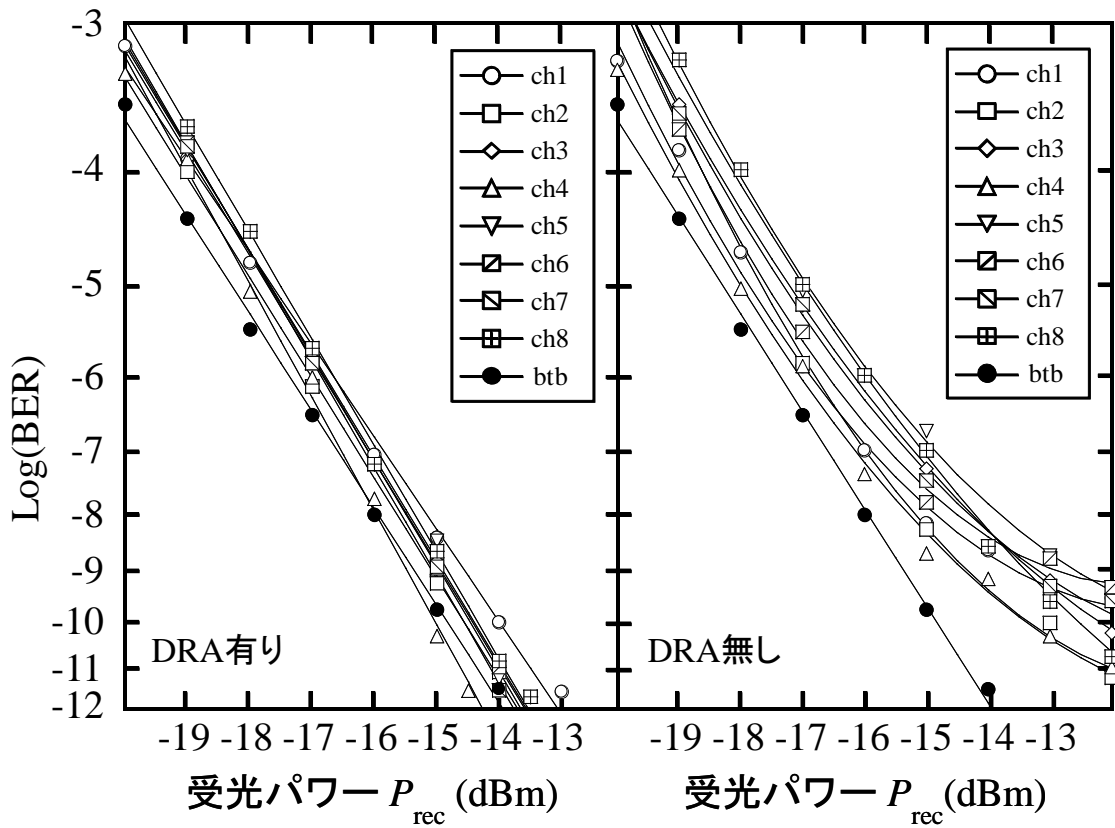


図 3-12 受光パワー  $P_{rec}$  に対する BER 特性

を使用することにより、各チャネルにおけるパワーペナルティの改善量にばらつきがあるものの、いずれのチャネルにおいても 1.5 から 3 dB のパワーペナルティが改善されていることがわかる。今回の実験では、1 台の励起光源によりラマン増幅を行なったため、パワーペナルティの改善量のばらつきは、ラマン利得スペクトルにおけるリップルによるものと考えられ、励起光の多波長化によるラマン利得スペクトルの平坦化[3-14]を行なうことにより改善されるものと思われる。以上の結果から、DRA を適応した WDM 伝送システムにおいても、PCF は高い伝送特性を有していることが明らかとなった。

### 3.3.2 広波長帯域における DRA の適応性

PCF の広波長帯域における DRA の適応性について、SNR 改善効果を用いて検討を行った。図 3-8 に示した DRA 伝送系を想定し、信号光の増幅技術として後方励起による DRA と、AMP を併用するものとした。また、後方に設置した AMP からの出射光パワーは、光ファイバへの  $P_{in}$  と等しいものと仮定した。さらに、光ファイバ中の累積分散、及び累積分散スロープは、損失や非線形性を無視した理想的な DCFM を用いて完全に補償されるものと設定した。計算に用いた PCF のファイバパラメータは、表 3-1 に示した PCF1 の値を用いた。また計算モデルの簡略化のため、各波長における  $\alpha$  は、PCF1 から求められるレイリー散乱係数  $1.3 \text{ dB/km} \cdot \mu\text{m}^4$  と純石英ガラスの赤外吸収損失の波長特性の和として用いた[3-12]。PCF への  $P_{in}$  は 0 dBm とし、APM の NF は 6.5 dB と設定した。また、 $B$ 、 $B_0$ 、並びに  $B_e$  は、それぞれ 40 Gbit/s、40 GHz、並びに 28 GHz と設定した。さらに、後方励起光パワーの最大値  $P_{B-max}$  は、安全性を考慮して 500 mW とした[3-15]。計算では、PCF に AMP のみを増幅技術として用いた場合の SNR に対する、AMP に DRA を併用して伝送した場合の SNR の改善効果を  $R_{SNR}$  として求めた。

図 3-13 は、信号波長  $\lambda_s$  及び  $L$  を変化させたときの  $R_{SNR}$  特性の関係を示す。図中の実線は等  $R_{SNR}$  曲線を示す。また、図中の破線は、PCF の  $\lambda_s$  における損失係数  $\alpha_s$  と最小受光レベル  $P_{rec-min}$  から求めた各  $\lambda_s$  での伝送距離限界  $L_{lim}$  であり、式(3-1)を用いて求めることができる[3-16]。

$$L_{lim} = \frac{P_{in} - P_{rec-min}}{\alpha_\lambda} \quad (3-1)$$

ここで、 $P_{rec-min}$  は、プランク定数  $h$ 、光速  $c$ 、1 ビット当たりの信号光電子の平均数  $n_s$ 、 $B$ 、

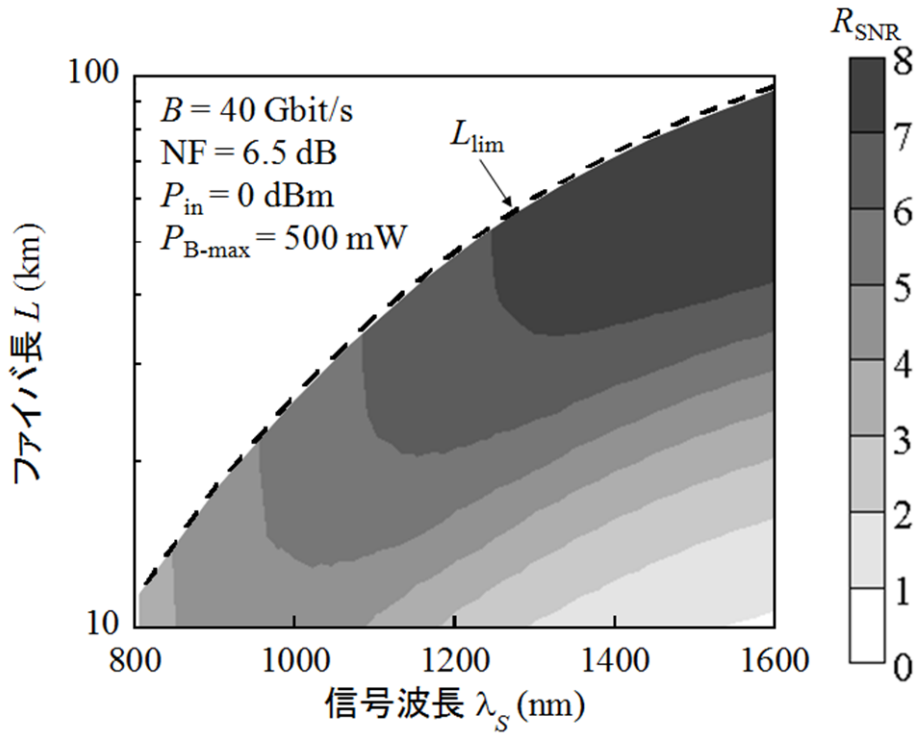


図 3-13 信号波長 $\lambda_s$ 、及びファイバ距離 $L$ を変化させたときの $R_{\text{SNR}}$ 特性の関係

量子効率 $\eta$ 、並びに $\lambda_s$ を用いて、式(3-2)より求めることが可能であり、図 3-13 では受光素子の量子効率を 70 % として計算を行なった[3-17]。

$$P_{\text{rec-min}} = \frac{hcn_s B}{\eta \lambda_s} \quad (3-2)$$

図 3-13 より、PCF 1 に DRA を適応することにより、800 nm から 1600 nm の $\lambda_s$ において $R_{\text{SNR}}$ が 3 dB 以上となり、良好な SNR 改善量が得られることがわかる。また、波長 1000 nm 帯を用いた約 20 km の伝送において 5 dB 以上の $R_{\text{SNR}}$ を得ることが可能であることがわかる。さらに、O から L バンドでは $R_{\text{SNR}}$ が 7 dB 以上であり、40 km 以上の長距離伝送に DRA を適応することにより良好な伝送特性を実現可能であることがわかる。

### 3.3.3 DRA 伝送における PCF の設計

前章の図 2-13 より、DRA を適応した WDM 伝送システムでは、 $A_{\text{eff}}$ の増大とともに有効入射信号光パワー幅 $P_w$ が拡大し、チャンネル数を増大することが可能となるため、超

大容量・超長距離光伝送媒体としては  $A_{\text{eff}}$  を拡大した光ファイバが望ましい。PCF では  $d$  及び  $\Lambda$  の配置条件によって、従来の充実型光ファイバでは実現不可能なファイバパラメータを実現することが可能であり、 $A_{\text{eff}}$  を拡大した PCF における DRA 伝送の適応性を検討した。S、C、並びに L バンド [3-18] の光通信波長帯域において、80 km の DRA 伝送システムを想定し、SNR 改善効果を計算により求めた。計算では、図 3-8 に示した DRA 伝送系を用い、信号光の増幅技術として後方励起による DRA と、AMP を併用するものとした。また、後方に設置した AMP からの出射光パワーは、光ファイバへの  $P_{\text{in}}$  と等しいものと仮定した。さらに、光ファイバ中の累積分散、及び累積分散スロープは、損失や非線形性を無視した理想的な DCFM を用いて完全に補償されるものと設定した。PCF への  $P_{\text{in}}$  は 0 dBm とし、APM の NF は 6.5 dB と設定した。また、 $B$ 、 $B_0$ 、並びに  $B_c$  は、それぞれ 40 Gbit/s、40 GHz、並びに 28 GHz と設定した。さらに、後方励起光パワーの最大値  $P_{B\text{-max}}$  は、安全性を考慮して 500 mW とした [3-15]。各波長における  $\alpha$  は、レイリー散乱係数  $0.7 \text{ dB/km}\cdot\mu\text{m}^4$  [3-19] と純石英ガラスの赤外吸収損失の波長特性の和とし、OH 基吸収損失を含むその他の損失は無視できるものと仮定した [3-12]。計算では、 $50 \mu\text{m}^2$  の  $A_{\text{eff}}$  を有する PCF に AMP のみを増幅技術として用いた場合の SNR に対する、AMP に DRA を併用して伝送した場合の SNR の改善効果を  $R_{\text{SNR}}$  として求めた。

図 3-14 は  $\lambda_s$  と  $A_{\text{eff}}$  に対する等  $R_{\text{SNR}}$  特性を示す。図 3-14 より、 $50 \mu\text{m}^2$  から  $400 \mu\text{m}^2$  の  $A_{\text{eff}}$  を有する PCF を用いた DRA 伝送において、波長 1450 nm から 1650 nm の波長帯域で SNR 改善効果が得られており、 $A_{\text{eff}}$  が約  $230 \mu\text{m}^2$  以下の場合、S~L バンドで  $R_{\text{SNR}}$  が 3 dB 以上であることがわかる。約  $150 \mu\text{m}^2$  以上の  $A_{\text{eff}}$  では、 $A_{\text{eff}}$  を拡大するとともに  $R_{\text{SNR}}$  が減少していることが分かる。これは、最大  $R_{\text{SNR}}$  を得るために 500 mW 以上の励起光パワーが必要であり、励起光パワー不足のために  $R_{\text{SNR}}$  が減少しているためと考えられる。また、 $\lambda_s$  が 1500 nm 以下または 1600 nm 以上の波長領域では、それぞれレイリー散乱損失または赤外吸収損失が大きく、DRA を使用しない伝送における SNR の劣化が大きいため、DRA を使用することによる改善効果の値が大きくなったと考えられる。

図 3-1 に示した六方最密構造に 60 個の空孔を配置した PCF において、実際に設計可能な空孔配置条件を検討した。図 3-15 は、 $\Lambda$  に対する  $A_{\text{eff}}$  及び曲げ損失  $\alpha_B$  を示す。波長  $\lambda$  は 1550 nm であり、有限要素法を用いて計算を行った。図中の実線、破線、及び点線は、それぞれ  $d/\Lambda$  が 0.3、0.4、並びに 0.5 の時の計算結果を示す。いずれの  $d/\Lambda$  においても、 $\Lambda$  が大きくなるほど、 $A_{\text{eff}}$  及び  $\alpha_B$  が增大していることが分かる。ESM を満たす条件から  $d/\Lambda$  は 0.43 以下 [3-5]

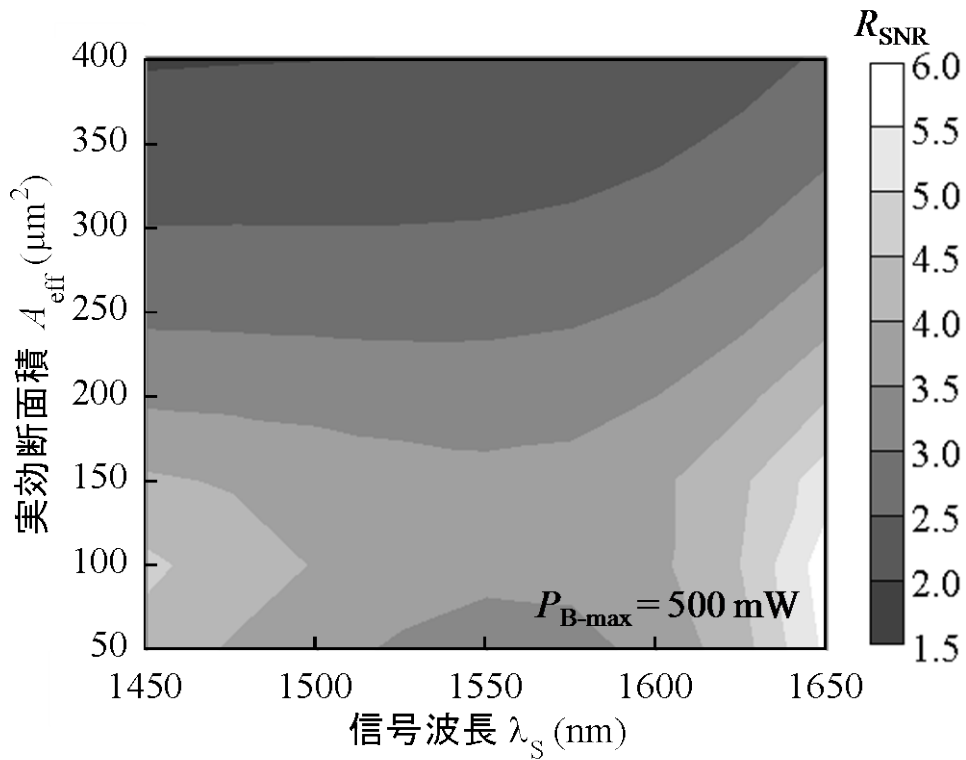


図 3-14 信号波長 $\lambda_s$ 及び実効断面積 $A_{\text{eff}}$ を変化させたときの $R_{\text{SNR}}$ 特性の関係

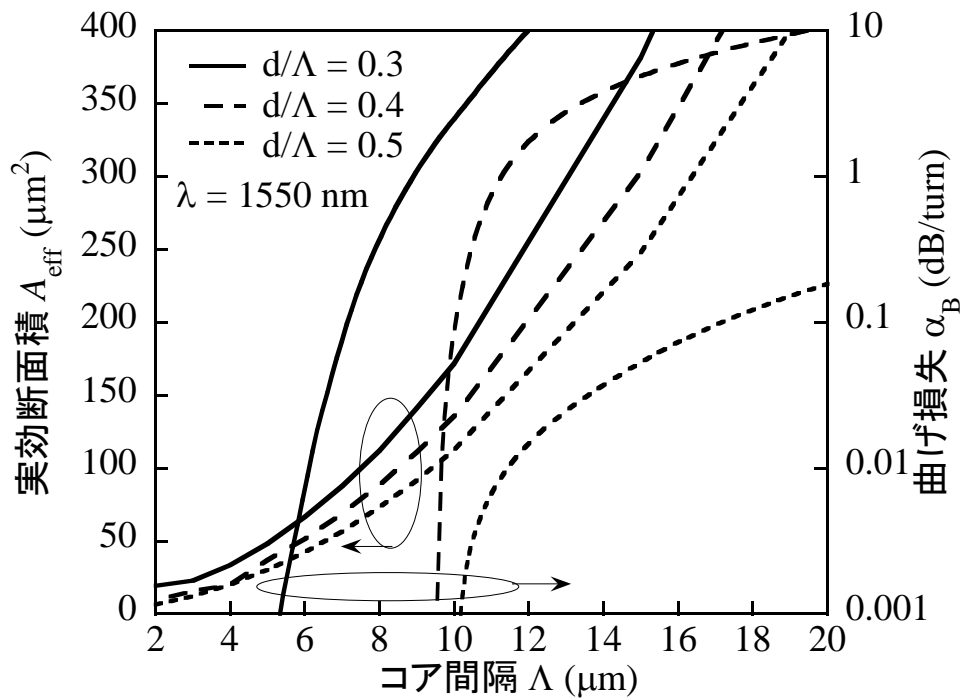


図 3-15 空孔間隔 $\Delta$ に対する実効断面積 $A_{\text{eff}}$ 及び曲げ損失 $\alpha_B$ 特性



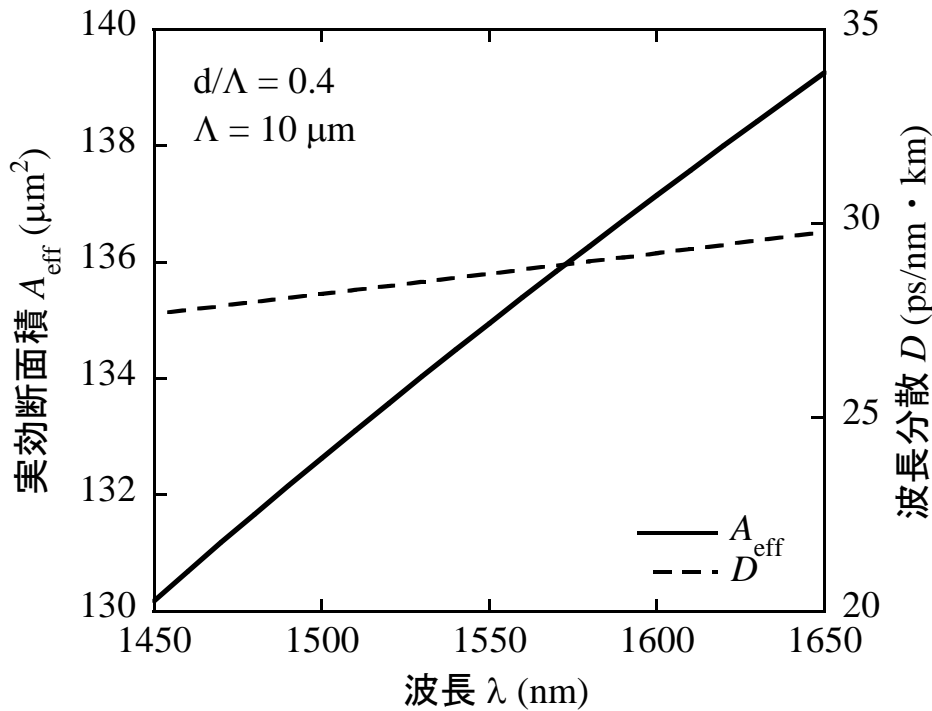


図 3-16 波長 $\lambda$ に対する実効断面積  $A_{\text{eff}}$  及び波長分散  $D$  特性

とし、波長 1550 nm における半径 3 cm で 100 回巻いたときの $\alpha_B$ の上限を 0.1 dB[3-20]と仮定すると、 $d/\Lambda$ 及び $\Lambda$ をそれぞれ 0.4 及び 10  $\mu\text{m}$  に設計することによって、135  $\mu\text{m}^2$  の  $A_{\text{eff}}$  が得られることがわかる。

図 3-16 は、 $d/\Lambda$ 及び $\Lambda$ がそれぞれ 0.4 及び 10  $\mu\text{m}$  のときの $\lambda$ に対する  $A_{\text{eff}}$  及び  $D$  を示す。図 3-16 より、 $A_{\text{eff}}$  の波長依存性は低く、S から L バンド帯において約 135  $\mu\text{m}^2$  で一定であることが分かる。一方、 $D$  は 20 から 34 ps/nm $\cdot$ km と従来の SMF よりも大きかった[3-20]が、分散スロープは従来の SMF と同程度[3-20]であり、累積分散は従来の DCFM で補償することが可能である。以上の結果から  $d/\Lambda$  及び  $\Lambda$  をそれぞれ 0.4 及び 10  $\mu\text{m}$  に設計することにより、S から L バンド帯において  $A_{\text{eff}}$  が約 135  $\mu\text{m}^2$  となり、図 3-14 から S から L バンド帯において 3.5 dB 以上の SNR 改善効果を得ることが可能となる。また、図 2-13 から  $P_W$  が 26 dB であり、充実型光ファイバよりも 2 dB 拡大でき、1.5 倍の波長多重が可能である。また、従来の SMF や DSF と比較した場合には、波長多重数、つまり伝送容量はそれぞれ 2.0 倍及び 5.0 倍とることから、設計した PCF を用いた DRA 伝送において、非常に高い伝送性能向上が期待できることが明らかとなった。

### 3.4 まとめ

本章では、純石英をコアとした PCF におけるラマン特性について調査を行った。ラマン利得係数の波長依存性を明らかにし、広波長帯域における単一波長及び C バンドにおける WDM 伝送の伝送性能を示した。また、DRA 伝送において SNR 改善効果を向上する実効断面積を拡大した PCF の設計を行った。本章で得られた結果を以下にまとめる。

- PCF のラマン利得係数スペクトルを測定し、SCF と同様に 13.2 THz と 14.5 THz の励起波長からの周波数シフトに、それぞれ SiO 結合に起因する TOM と LOM に相当する 2 つのピークを観測した。PCF のコア中に存在する SiO の分子結合状態が SCF と同等であり、信号光及び励起光のコアにおける閉じ込め効果も SCF と同程度であることを明らかにした。
- PCF のラマン利得係数と励起波長の関係は、純石英のバルクガラスにおけるラマン利得係数の励起波長特性と同様に、ラマン利得係数が励起波長に反比例する関係であることを明らかにした。ドーパントが添加されていない PCF は、純石英ガラスと同様に SiO 結合のみによって構成され、かつ、SiO の分子結合状態が同様であると考えられているためである。
- PCF を用いた DRA 伝送における単一波長伝送実験を行い、DRA を用いない場合と比較して、853 及び 1576.5 nm の信号波長において、それぞれ 4.3 及び 1.5 dB の SNR 改善効果があることを示した。また、信号波長 1550 nm 帯での 8 チャンネルの WDM 伝送では、パワーペナルティが 1.5 から 3 dB 改善され、DRA を適応した WDM 伝送システムにおいても、PCF は高い伝送特性を有していることを明らかにした。
- 試作した PCF のファイバパラメータを用い、広波長帯域における DRA の適応性を検討した。それぞれの波長帯域における SNR 改善効果は、800 nm から 1600 nm の信号波長において 3 dB 以上、波長 1000 nm 帯を用いた約 20 km の伝送において 5 dB 以上、さらに、O から L バンドでは 40 km 以上の長距離伝送において 7 dB 以上が期待され、DRA を適応することにより良好な伝送特性が得られることを明らかにした。
- 超大容量・超長距離光伝送を実現するため、実効断面積を拡大した PCF の設計を行い、DRA 伝送の適応性を検討した。規格化空孔直径及び空孔間隔をそれぞれ 0.4 及

び  $10\ \mu\text{m}$  に設計することにより、S から L バンド帯における実効断面積を約  $135\ \mu\text{m}^2$  一定にすることが可能となり、S から L バンド帯において  $3.5\ \text{dB}$  以上の SNR 改善効果を得られることを示した。また、有効入射信号光パワー幅が  $26\ \text{dB}$  と充実型光ファイバよりも  $2\ \text{dB}$  拡大できることから、DRA 伝送における伝送性能を向上する PCF の設計条件が明らかとなった。



## 第4章：RG-DFのDRA特性

### 4.1 はじめに

第2章及び第3章では、DRA伝送路を新設する場合の最適な光ファイバの設計条件を明らかにした。しかし、既設伝送路にDRAを適応する場合には、伝送路の一部に異種ファイバを組み合わせたハイブリッド伝送路を用いることによって、伝送性能を向上することが可能である。例えば、実効断面積の異なる光ファイバを組み合わせたハイブリッド伝送路を用いたDRA伝送システムにおいて、良好な伝送性能が実現可能である[4-1]、[4-2]。また、ラマン増幅を含む光ファイバ中の非線形現象は、光ファイバの長手方向におけるファイバパラメータの分布特性に依存して変化することから、非線形現象の一つである誘導ブリルアン散乱や四光波混合などは、光ファイバの長手方向に沿ってコアのドーパント量を変化させることによって発生を抑制することができる[4-3]、[4-4]。DRAにおける増幅特性は、光ファイバの屈折率分布によって決定されるラマン利得率によって効果が変化し、光ファイバの長手方向に沿って線形にラマン利得率を変化させたRG-DFを既設伝送路と組み合わせることにより、良好な増幅特性が期待できる。

本章では、光ファイバの長手方向に沿って線形にラマン利得率を変化させたRG-DFを用いたハイブリッド伝送路に後方励起によるDRA伝送システムを適応した場合のSNR改善効果を算出する計算モデルを示し、実験及び計算によりDRA伝送特性を明らかにする。また、RG-DFにおけるファイバパラメータとSNR改善効果の関係を明らかにし、RG-DFの設計条件とDRA伝送特性の関係について述べる。

### 4.2 RG-DFのラマン増幅特性

#### 4.2.1 計算モデル

RG-DFのDRA伝送におけるSNR改善効果を検討するため、光ファイバを $n$ 個のセグメントに分割し、各セグメントにおいて屈折率分布が段階的に変化することとした。つまり、光ファイバの長手方向に沿ってコアと純石英との比屈折率差及び実効断面積が変化し、結果的にラマン利得率を変化させることが可能となる。図4-1は、光ファイバ構造のイメージ図を示す。ここで、 $C_R(i)$ は $i$ 番目のセグメント( $i=1, 2, \dots, n$ )におけるラマン利得率を示す。 $C_R(i)$ は、 $i$ 番目のセグメント( $i=1, 2, \dots, n$ )におけるラマン利得係数 $g_R(i)$ 及び実効断面積

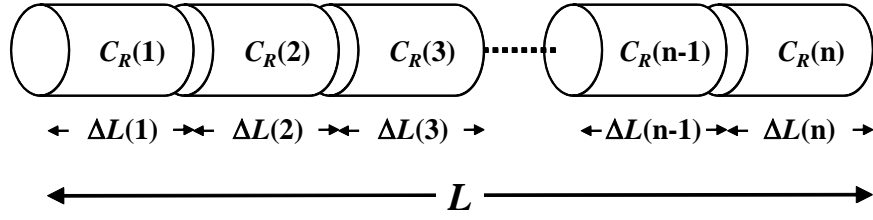


図 4-1 光ファイバ構造のイメージ図

$A_{\text{eff}}(i)$ を用いて式(2-4)より算出できる。尚、長さ $\Delta L(i)$ の各セグメントにおいて、ファイバパラメータは一定であると仮定した。

DRA 伝送における SNR 改善効果  $R_{\text{SNR}}$  は式(2-21)に定義される。本章では、RG-DF を適応した伝送路を想定しており、EDFA と DRA を併用させた場合の雑音指数  $NF_{\text{EDFA+DRA}}$  及び非線形性  $R_N$  は、ASE による光雑音パワー密度  $N_{\text{ASE}}$ 、光子エネルギー  $h\nu$ 、DRS による雑音パワー  $P_{\text{DRS}}$ 、電気フィルタ幅  $B_e$ 、光フィルタ幅  $B_o$ 、並びに有効相互作用長  $L_{\text{eff}}$  を用いて、それぞれ式(4-1)及び式(4-2)に表される。

$$NF_{\text{EDFA+DRA}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n G_R(i) T_{\text{EDFA+DRA}}(i)} \left\{ \frac{2N_{\text{ASE}}}{h\nu} + \frac{5P_{\text{DRS}}}{9h\nu(B_e^2 + B_o^2/2)^{\frac{1}{2}}} + 1 \right\} + \frac{NF_{\text{EDFA}} - 1}{\sum_{i=1}^n G_R(i) T_{\text{EDFA+DRA}}(i)} + 1 \quad (4-1)$$

$$R_N = \frac{\sum_{i=1}^n \gamma_{\text{EDFA+DRA}}(i) P(i-1) G_R(i) T_{\text{EDFA+DRA}}(i)}{\sum_{i=1}^n \gamma_{\text{EDFA}}(i) P(i-1) T_{\text{EDFA}}(i)} \quad (4-2)$$

ここで、 $T_{\text{EDFA}}(i)$ 、 $T_{\text{EDFA+DRA}}(i)$ 、 $G_R(i)$ 、 $\gamma_{\text{EDFA+DRA}}(i)$ 、 $\gamma_{\text{EDFA}}(i)$ 、並びに  $P(i)$  は、それぞれ  $i$  番目のセグメント ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) における、EDFA のみを使用した場合の伝送損失、EDFA と DRA を併用させた場合の伝送損失、ラマンゲイン、EDFA と DRA を併用させた場合の非線形係数、EDFA のみを使用した場合の非線形係数、並びに光伝送パワーである。また、 $NF_{\text{EDFA}}$  は EDFA の NF である。 $T_{\text{EDFA+DRA}}(i)$  及び  $T_{\text{EDFA}}(i)$  は、それぞれ  $i$  番目のセグメント ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) における信号波長の損失係数  $\alpha_{\text{EDFA+DRA}}(i)$  及び  $\alpha_{\text{EDFA}}(i)$  を用いて、式(4-3)及び式(4-4)に表される。

$$T_{EDFA+DRA}(i) = \exp(-\alpha_{EDFA+DRA}(i)\Delta L(i)) \quad (4-3)$$

$$T_{EDFA}(i) = \exp(-\alpha_{EDFA}(i)\Delta L(i)) \quad (4-4)$$

また、 $G_R(i)$ 、 $N_{ASE}$ 、並びに  $P_{DRS}$  は、 $i$  番目のセグメント( $i = 1, 2, \dots, n$ )における励起波長の損失係数 $\alpha_p(i)$ 、レイリー散乱係数  $R_F(i)$ 、並びに後方励起光パワー $P_p$ を用いてそれぞれ式(4-5)、(4-6)、並びに(4-7)に表される。

$$G_R(i) = \exp \left\{ C_R(i)P_p \frac{\exp \left\{ -\alpha_p(i) \left[ \left( \sum_{j=1}^n \Delta L(j) - \sum_{j=1}^i \Delta L(j) \right) \right] \right\}}{\alpha_p(i)} \right\} \quad (4-5)$$

$$N_{ASE} = h\nu \sum_{i=1}^n C_R(i)P_p \exp \left[ -\alpha_p(i) \left( \sum_{j=1}^n \Delta L(j) - \sum_{j=1}^i \Delta L(j) \right) \right] \\ \times \exp \left\{ C_R(i)P_p \frac{\left\{ 1 - \exp \left[ -\alpha_p(i) \left( \sum_{j=1}^n \Delta L(j) - \sum_{j=1}^i \Delta L(j) \right) \right] \right\}}{\alpha_p(i)} \right\} \quad (4-6) \\ \times \exp \left[ -\alpha_{EDFA+DRA}(i) \left( \sum_{j=1}^n \Delta L(j) - \sum_{j=1}^i \Delta L(j) \right) \right]$$

$$P_{DRS} = P_{in} \sum_{i=1}^n G_R(i)T_{EDFA+DRA}(i) \\ \times \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{R_F(i)}{\left[ \sum_{j=1}^i G_R(j)T_{EDFA+DRA}(j) \right]^2} \right. \\ \left. \times \sum_{k=n-(i-1)}^n \left\{ R_F(k) \left[ \sum_{l=1}^k G_R(l)T_{EDFA+DRA}(l) \right]^2 \right\} \right\} \quad (4-7)$$

第2章の2.2.2項及び2.3.1項で示したように、 $g_R$ 、 $\gamma$ 、 $\alpha$ 、並びに  $R_F$  は、それぞれコアと純石英との比屈折率差と相関関係にあるため、光ファイバの長手方向に沿ってコアと純石英

との比屈折率差及び実効断面積を変化し、上記式(4-1)から式(4-7)を用いることによって、RG-DFを用いたDRA伝送におけるSNR改善効果を算出することが可能である。

#### 4.2.2 DRAを適応した伝送特性

4.2.1項で示した計算モデルの検証を行うため、既設伝送路としてDSFを想定し、RG-DFと組み合わせて用いたハイブリッド伝送路において、後方励起によるDRAを適応した伝送システムにおける伝送特性を計算及び実験により調査した。本章では、DRA伝送路は、長手方向に沿って均一なファイバパラメータを有するDSFと長手方向に沿ってラマン利得率が線形に増大または減少するRD-GFから構成されるものと設定した。表4-1に使用したDSF及びRG-DFのファイバパラメータを示す。RG-DFは両側のファイバ端において異なるコア直径を有しており、そのため、両側のファイバ端(A)及び(B)におけるMFD及び遮断波長は、それぞれ異なる値となっている。図4-2は、RG-DFの長手方向におけるMFD分布を示す。RG-DFの1550nmにおける波長分散の平均値は、4.2 ps/nm・kmであった。また、及びRG-DFの1550nmにおける損失係数は、それぞれ0.20及び0.37 dB/kmであり、光ファイバ伝送路の全長における伝送損失は19.62 dBであった。ここで、 $A_{\text{eff}}(i)$ は、 $i$ 番目のセグメント( $i = 1, 2, \dots, n$ )におけるMFDである $W(i)$ を用いて式(4-8)から求めた。

$$A_{\text{eff}}(i) = \pi \left\{ \frac{W(i)}{2} \right\}^2 \quad (4-8)$$

図4-3は、DRA伝送路構成を示す。DRA伝送路は50kmのDSFと26kmのRG-DFから構成され、DSFへ入射された信号光はRG-DFを伝搬し、サーキュレータ及びBPF等のコン

	DSF	RG-DF
比屈折率差 $\Delta$ (%)	0.85	0.87 (A), 0.87 (B)
モードフィールド径 ( $\mu\text{m}$ )*	7.7	8.3 (A), 7.8 (B)
遮断波長 $\lambda_c$ ( $\mu\text{m}$ )	1.00	1.40 (A), 1.05 (B)
波長分散 $D$ (ps/nm・km)*	0.1	4.2
損失係数 $\alpha$ (dB/km)*	0.20	0.37
ファイバ長 (km)	50	26

\* $\lambda = 1550$  nm

表4-1 DSF及びRG-DFのファイバパラメータ



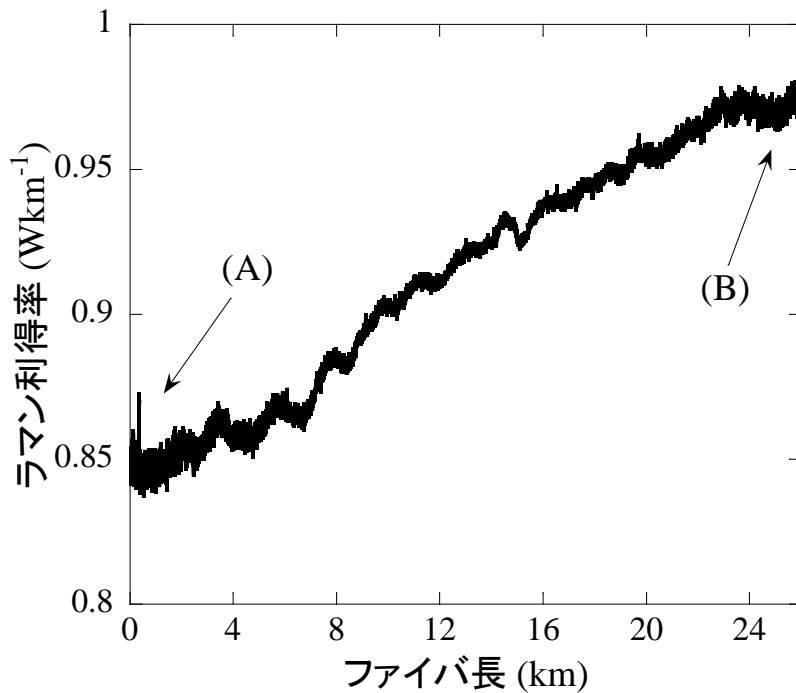


図 4-2 RG-DF の長手方向における MFD 分布

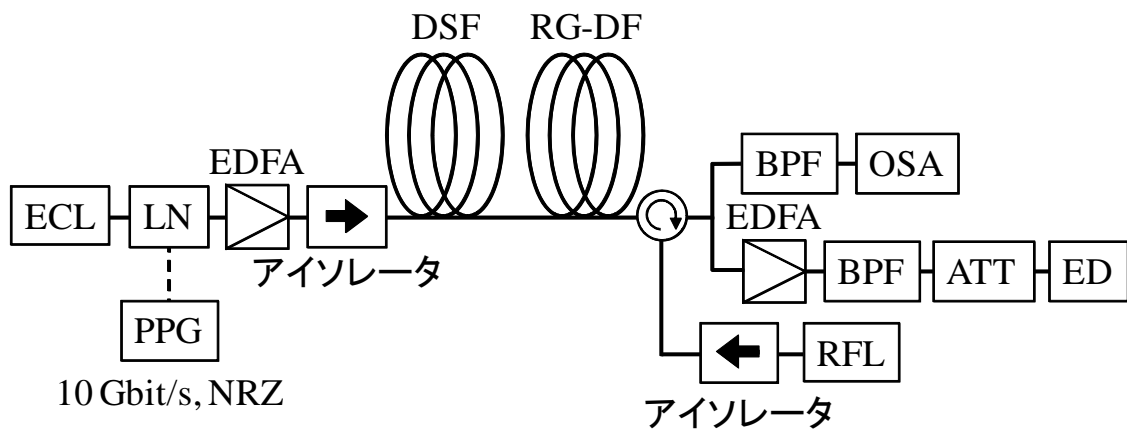


図 4-3 DRA 伝送路構成

ポーネントを介して受光器へ出射されることとした。信号光の増幅では、後方励起による DRA と 6.0 dB の NF を有する EDFA を併用するものとした。信号光源として波長 1550 nm の ECL を使い、LN 外部変調器によって、10 Gbit/s の 1/2 のマーク率の NRZ 信号に変調した。また、励起光源として波長 1450 nm の RFL を使い、励起光はアイソレータ及びサーキュレータを介して RG-DF へ入射されるものとした。ここで、10 Gbit/s の伝送速度に対して受信機中に含まれる  $B_o$  及び  $B_e$  は、それぞれ 10 及び 7 GHz と設定した。実験では、OSA に

よりラマンゲイン  $G_R$  及び ASE 雑音パワー  $P_{ASE}$  を測定し、また、ED によって BER を測定し、BER、Q 値、並びに SNR の関係[4-5]から SNR を算出し、 $R_{SNR}$  を求めた。

図 4-4 は  $P_p$  に対する(a) $G_R$  及び(b) $P_{ASE}$  を示す。図中の破線及び黒丸は、それぞれ RG-DF の(A)端より励起光を入射した場合の計算及び測定結果を示す。また、実線及び白丸は、それぞれ RG-DF の(B)端より励起光を入射した場合の計算及び測定結果を示す。図 4-4(a)より、測定結果における  $P_p$  に対する  $G_R$  の傾向が計算結果とよく一致していることが分かる。また、測定及び計算結果において、RG-DF の(B)端から励起光を入射した場合の各  $P_p$  における  $G_R$  は、(A)端から励起光を入射した場合よりも大きくなった。例えば、(B)端から励起光を入射した場合の 600 mW の  $P_p$  における  $G_R$  の実験結果は、(A)端から励起光を入射した場合に対して約 0.5 dB 大きかった。これは、DRA 伝送路における RG-DF の長手方向に対するファイバパラメータの方向依存性による効果であると思われる。また、図 4-4(b)より、測定結果では 600 mW 以上の  $P_p$  における測定結果が計算結果よりも大きくなったが、600 mW 以下の  $P_p$  において測定及び計算結果の  $P_p$  に対する  $P_{ASE}$  の傾向はよく一致した。雑音パワーの測定では、 $1550 \pm 2.5$  nm の領域における信号スペクトルを測定し、スペクトル中の裾部分である雑音パワーをガウス型に近似することにより波長 1550 nm における雑音パワーを算出した[4-6]。  $P_p$  が小さい領域における雑音成分は ASE 雑音が支配的であるのに対し、 $P_p$  が大きくなるとともに DRS 雑音が増大し、信号スペクトルの裾部分に影響を与えるため、600 mW 以上の  $P_p$  における測定は計算結果と一致しなかったものと考えられる。また、500 mW 以下の  $P_p$  において、(A)端から励起光を入射した場合の各  $P_p$  における  $P_{ASE}$  の実験結果は、(B)端から励起光を入射した場合よりも大きく、さらに、(A)端から励起光を入射した場合の各  $P_p$  における  $P_{ASE}$  の計算結果に対して約 2.0 dB 大きかった。(A)端から励起光を入射した場合の実験では、信号光の変調条件が不十分であり、信号入射側の EDFA において過剰な雑音成分が付加され、光ファイバへ入射した信号光の SNR がもともと良好ではなかった。この過剰に付加された雑音成分が DRA によってさらに増幅されたため、(A)端から励起光を入射した場合の  $P_{ASE}$  は大きな値となってしまったものと考えられる。

図 4-5 は  $P_p$  に対する  $R_{SNR}$  を示す。図中の破線及び黒丸は、それぞれ RG-DF の(A)端より励起光を入射した場合の計算及び測定結果を示す。また、実線及び白丸は、それぞれ RG-DF の(B)端より励起光を入射した場合の計算及び測定結果を示す。ここで、受光パワー  $P_{rec}$  及び入射信号光パワー  $P_{in}$  は、それぞれ -18 及び -5 dBm とした。図 4-5 より、測定結果における  $P_p$  に対する  $R_{SNR}$  の傾向が計算結果とよく一致していることが分かる。特に、RG-DF の(B)

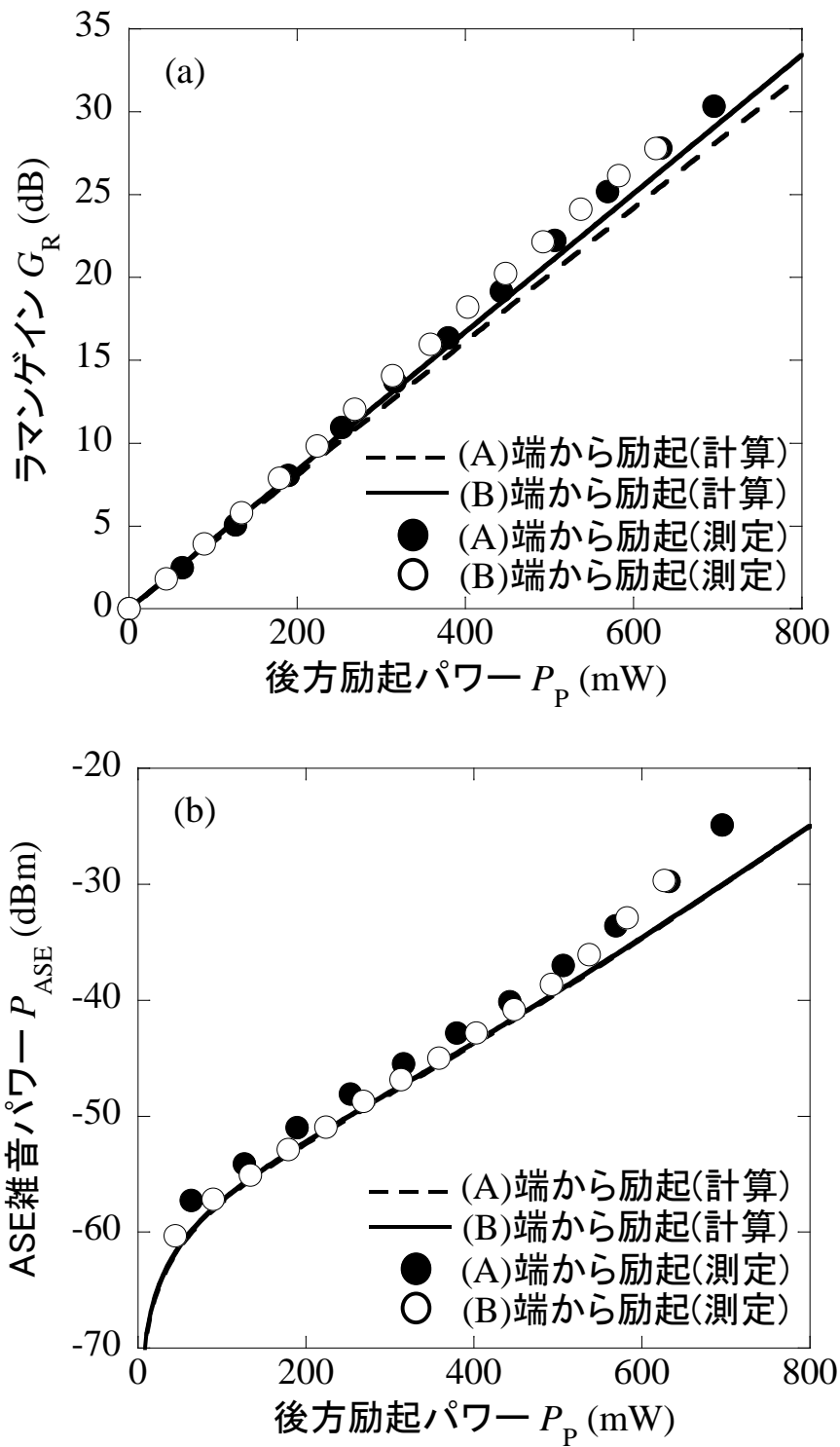


図 4-4 後方励起光パワー $P_p$ に対する(a)ラマンゲイン  $G_R$  及び(b)ASE 雑音パワー $P_{ASE}$

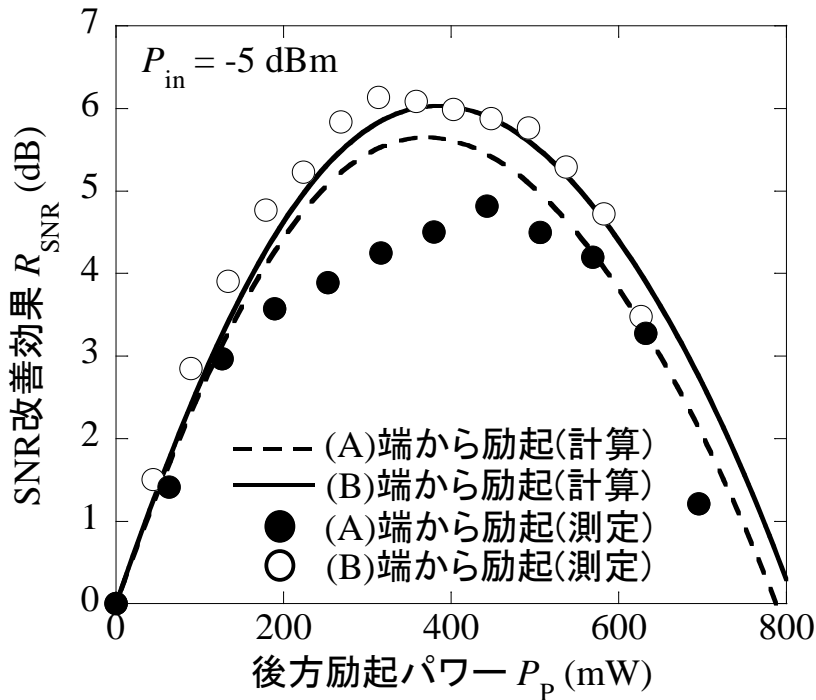


図 4-5 後方励起光パワー  $P_p$  に対する SNR 改善効果  $R_{SNR}$

端から励起光を入射した場合には、各  $P_p$  における  $R_{SNR}$  の測定及び計算結果はよく一致した。一方、(A)端より励起光を入射した場合には、200 から 500 mW の  $P_p$  において測定結果が計算結果よりも劣化した。これは、図 4-4(b)で示したように、入射信号光における変調条件の不備から、増幅器等で付加された過剰な ASE 雑音成分の影響であると考えられる。さらに、(B)端から励起光を入射した場合の最大 SNR 改善効果  $R_{SNR-max}$  は、計算及び測定ともに(A)端から励起光を入射した場合の値よりも大きくなった。以上の結果から、4.2.1 項で示した計算モデルが、RG-DF を使用した DRA 伝送性能の評価において有効であることが確認された。また、RG-DF の(B)端における実効断面積  $A_{eff}$  は(A)端における  $A_{eff}$  よりも小さく、つまり、後方励起による DRA 伝送システムにおいて、光ファイバの長手方向に沿って信号入射側から信号出射側に向けて  $C_R$  が線形に増大する RG-DF を使用することにより、より高い伝送性能を達成できることが明らかとなった。

### 4.3 RG-DF による SNR 改善効果

#### 4.3.1 ファイバパラメータと SNR 改善効果の関係

RG-DF を用いた後方励起による DRA 伝送システムでは、RG-DF の長手方向に沿って  $C_R$  を増大させることによって、より高い SNR を得ることができる。そこで、ラマン利得率の変化量  $R_{CR}$  を式(4-9)に定義し、RG-DF のファイバパラメータと SNR 改善効果の関係を検討した。

$$R_{CR} \equiv \frac{C_{R-output} - C_{R-input}}{C_{R-output} + C_{R-input}} \quad (4-9)$$

ここで、 $C_{R-input}$  及び  $C_{R-output}$  は、それぞれ RG-DF の信号入射側及び信号出射側における  $C_R$  を表す。光ファイバの  $C_R$  は屈折率分布から得られるコアと純石英との比屈折率差  $\Delta_1$  及び  $A_{eff}$  から求めることができるため、RG-DF の  $R_{CR}$  は信号入射側及び信号出射側における屈折率分布を設定することにより決定することが可能である。4.2.2 項より、RG-DF を用いた後方励起による DRA 伝送システムでは、信号入射側から信号出射側に向けて  $C_R$  が線形に増大することにより SNR 改善効果が高くなるため、本章では  $C_{R-output}$  を大きく、かつ  $C_{R-input}$  を小さく設計したの符号がプラスとなる RG-DF を想定した。RG-DF を用いない、長手方向において均一なファイバパラメータを有する光ファイバのみを伝送路として用いた場合の  $R_{SNR}$  を  $R_{SNR\_without\_RG-DF}$  とし、均一なファイバパラメータを有する光ファイバに RG-DF を組み合わせて伝送した場合の  $R_{SNR}$  を  $R_{SNR\_with\_RG-DF}$  と定義した時、RG-DF を適応した場合の  $R_{SNR}$  を  $R_{SNR-RGDF}$  として式(4-10)に定義した。

$$R_{SNR-RGDF} \equiv \frac{R_{SNR\_with\_RG-DF}}{R_{SNR\_without\_RG-DF}} \quad (4-10)$$

図 4-6 は RG-DF の長さ  $L_{RG-DF}$  及び  $R_{CR}$  を変化させたときの  $R_{SNR-RGDF}$  特性の関係を示す。ここで、均一なファイバパラメータを有する光ファイバの  $\Delta_1$  及び  $A_{eff}$  は、それぞれ 0.85 % 及び  $45 \mu m^2$  を用いた。RG-DF のファイバパラメータは  $\Delta_1$  を 0.85 % 一定とし、 $A_{eff}$  の平均値を  $45 \mu m^2$  として信号入射側及び信号出射側の  $A_{eff}$  を変化した。DRA 伝送路の全長を 80 km とし、EDFA の NF は 6.5 dB に設定した。また、波長 1550 nm の信号光を 10 Gbit/s の NRZ 信号に変調したものと想定し、 $B_o$  及び  $B_e$  はそれぞれ 10 及び 7 GHz に設定した。図 4-6 より、各  $R_{CR}$  において、約 20 km の  $L_{RG-DF}$  で  $R_{SNR-RGDF}$  の最大値が得られることが分かる。光ファイバ中のラマン特性は、 $L_{eff}$  によって制限され、0.85 % の  $\Delta_1$  から得られる損失係数と 80 km の  $L$  から得られる  $L_{eff}$  は約 20 km であるため、 $R_{SNR-RGDF}$  の最大値が約 20 km の  $L_{RG-DF}$  で得られたものと考えられる。また、 $R_{CR}$  が増大するとともに  $R_{SNR-RGDF}$  の最大値も増大し、例えば 23 km の  $L_{RG-DF}$  と 0.4 の  $R_{CR}$  において、約 1 dB の  $R_{SNR-RGDF}$  が得られることが分かる。

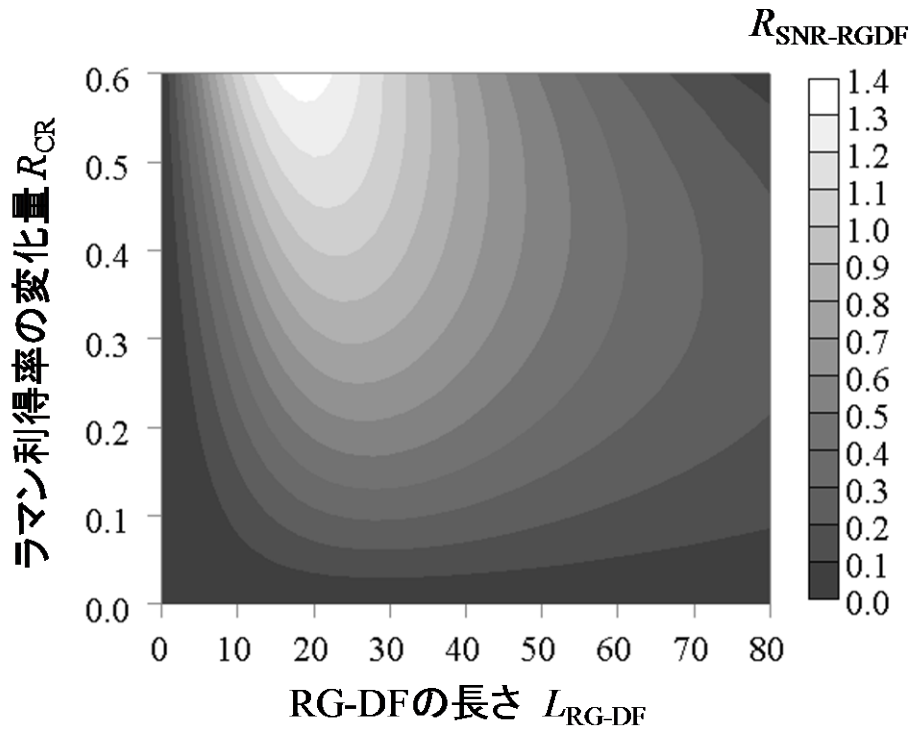


図 4-6 RG-DF の長さ  $L_{\text{RG-DF}}$  及びラマン利得率の変化量  $R_{\text{CR}}$  を変化させたときの RG-DF を適応した場合の SNR 改善効果  $R_{\text{SNR-RGDF}}$  特性

### 4.3.2 DRA 伝送における RG-DF の設計

4.3.1 項より、 $R_{\text{CR}}$  が大きくなるほど SNR 改善効果が高くなることから、DRA 伝送システムに適応する RG-DF の設計条件としては、遮断波長  $\lambda_{\text{C}}$ 、曲げ損失  $\alpha_{\text{B}}$ 、並びに波長分散  $D$  特性で制限される領域の中で  $R_{\text{CR}}$  が最も大きくなるように、信号入射側及び信号出射側における屈折率分布を設定することが重要である。波長 1550 nm の 1 チャンネル伝送を想定し、零分散波長  $\lambda_0$  を 1550 nm と設定した場合の、階段型の屈折率分布における RG-DF の設計領域を検討した。ここで、中心コアと純石英との比屈折率差を  $\Delta_1$  とし、サイドコアと純石英との比屈折率差を  $\Delta_2$  と設定した。また、コア及びサイドコアにおける半径をそれぞれ  $a_1$  及び  $a_2$  と設定し、相対比屈折率差  $R_{\Delta}$  及び相対コア半径  $R_a$  をそれぞれ式(4-11)及び式(4-12)に定義した。

$$R_{\Delta} \equiv \frac{\Delta_1}{\Delta_2} \quad (4-11)$$

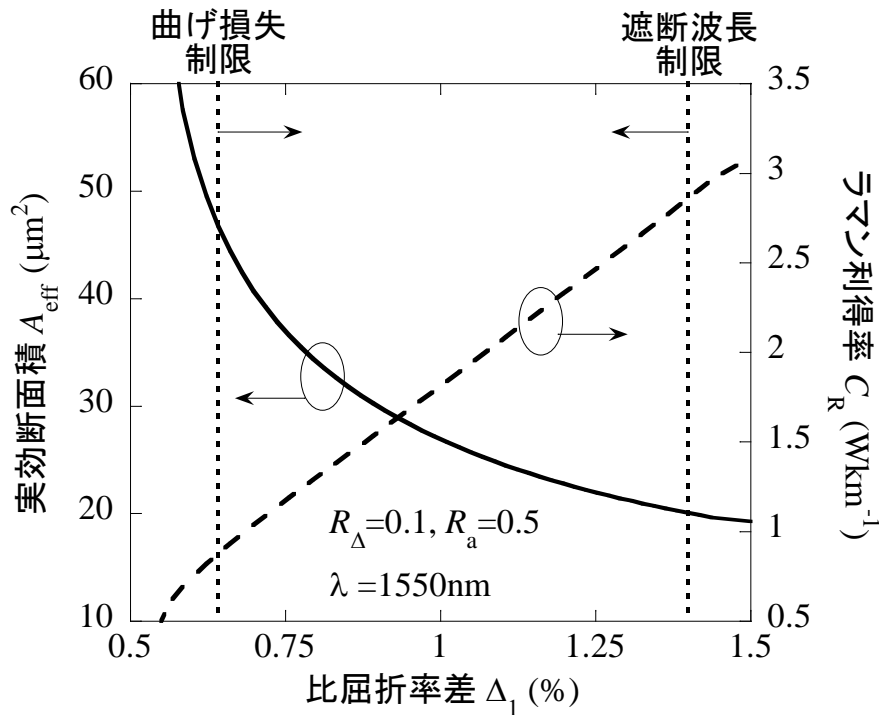


図 4-7 コアと純石英との比屈折率差 $\Delta_1$ に対する波長 1550 nm における実効断面積  $A_{\text{eff}}$  及び  
ラマン利得率  $C_R$

$$R_a \equiv \frac{a_1}{a_2} \quad (4-12)$$

図 4-7 は $\Delta_1$  に対する波長 1550 nm における  $A_{\text{eff}}$  及び  $C_R$  を示す。ここで、 $R_\Delta$  及び  $R_a$  はそれぞれ 0.1 及び 0.5 を用いた。図中の実線及び破線は、それぞれ  $A_{\text{eff}}$  及び  $C_R$  を示す。図 4-7 より、 $\Delta_1$  が大きくなると伴に  $A_{\text{eff}}$  は小さくなり、 $C_R$  は大きくなる。図中の点線は、波長 1550 nm における半径 3 cm で 100 回巻いたときの  $\alpha_B$  の上限を 0.5 dB、信号波長 1550 nm に対して 13.2 THz 周波数シフトした波長 1460 nm を  $\lambda_c$  の上限と設定[4-7]したときの設計制限を示す。これらの制限より、 $\Delta_1$  は 0.64 から 1.4 % までで設計可能であることが分かる。同時に  $A_{\text{eff}}$  及び  $C_R$  は、それぞれ 20.1 から 46.8  $\mu\text{m}^2$  及び 0.9 から 2.9  $\text{Wkm}^{-1}$  で使用することが可能である。従って、式(4-12)より  $R_{\text{CR}}$  の最大値は 0.53 となる。ここで、 $\Delta_1$  及び  $A_{\text{eff}}$  の平均値は、それぞれ 1.02 % 及び 33.5  $\mu\text{m}^2$  であった。

図 4-8 は 0.53 の  $R_{\text{CR}}$  における  $L_{\text{RG-DF}}$  に対する  $R_{\text{SNR-RGDF}}$  を示す。ここで、信号入射側の  $\Delta_1$  及び  $A_{\text{eff}}$  はそれぞれ 0.64 % 及び 46.8  $\mu\text{m}^2$ 、信号出射側の  $\Delta_1$  及び  $A_{\text{eff}}$  はそれぞれ 1.4 % 及び 20.1

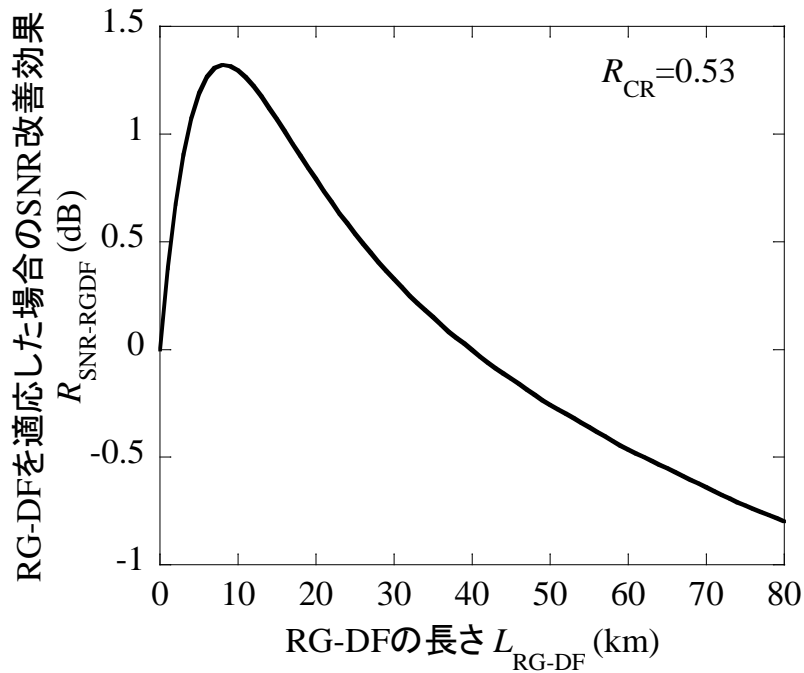


図 4-8 0.53 のラマン利得率の変化量  $R_{CR}$  における RG-DF の長さ  $L_{RG-DF}$  に対する RG-DF を適応した場合の SNR 改善効果  $R_{SNR-RGDF}$

$\mu m^2$  を用いた。また、均一なファイバパラメータを有する光ファイバの  $\Delta_1$  及び  $A_{eff}$  は、図 4-7 における  $\Delta_1$  及び  $A_{eff}$  の平均値である 1.02 % 及び  $33.5 \mu m^2$  を用いた。また、システムパラメータは 4.3.1 項の図 4-6 と同じ値を用いた。図 4-8 より、約 8 km の  $L_{RG-DF}$  において、 $R_{SNR-RGDF}$  は最大値である 1.3 dB を得ることができると分かる。図 4-6 及び図 4-8 において  $A_{eff}$  の平均値は異なり、また、図 4-6 で  $\Delta_1$  は一定であるのに対して図 4-8 では信号入射側から信号出射側までの  $\Delta_1$  が線形に変化していた。しかしながら、 $R_{CR}$  が 0.53 における  $R_{SNR-RGDF}$  の最大値は同程度であった。またこのときの最適な  $L_{RG-DF}$  は図 4-8 のほうが図 4-6 よりも短くなった。図 4-8 では  $\Delta_1$  の平均値が大きく、励起波長における損失係数が大きくなり、 $L_{eff}$  が短くなったため、最適な  $L_{RG-DF}$  が短くなったものと考えられる。一方、 $A_{eff}$  の相違は、2.3.2 項で示したように必要となる励起光パワーに依存し、励起光パワーの制限がない場合には SNR 特性への影響は無視できる。このため、異なる  $A_{eff}$  を適応した DRA 伝送の計算において、同等の SNR 改善効果が得られたものと思われる。以上の結果から、DSF を用いた全長 80 km のハイブリッド伝送路に DRA を適応する場合、伝送路の一部をファイバ長を最適な値に調整した 0.4 以上の  $R_{CR}$  を有する RG-DF に置き換えることによって、1 dB 以上の SNR 改善効果を得ることが可能であることが明らかとなった。1 dB の SNR 改善では、仮に、20



dB の SNR の場合、シャノン理論により 0.3 bps/Hz の周波数利用効率が向上される。今回、1 チャンネル伝送を想定して RG-DF の設計を行ったが、約 20 THz の帯域を有する S から L バンドでの WDM 伝送を想定して光ファイバの設計を行った場合には、約 6 Tbps の伝送容量拡大が期待できる。

#### 4.4 まとめ

本章では、光ファイバの長手方向に沿って線形にラマン利得率を変化させた RG-DF を用いたハイブリッド伝送路の後方励起による DRA 伝送システムを適応した場合のラマン増幅特性及び伝送特性を明らかにした。また、RG-DF におけるファイバパラメータと SNR 改善効果の関係を明らかにし、RG-DF の設計条件と DRA 伝送特性の関係を明らかにした。本章で得られた結果を以下にまとめる。

- 均一なファイバパラメータを有する光ファイバに RG-DF を組み合わせたハイブリッド伝送路の後方励起による DRA 伝送において、光ファイバの長手方向に線形にラマン利得率が増大する RG-DF を用いることによって、後方励起光パワーに対するラマンゲインが増大し、結果として高い SNR 改善効果を得られることを明らかにした。
- RG-DF の長手方向におけるラマン利得率の変化量及びファイバ長をパラメータとして、RG-DF を用いることによる SNR 改善効果の調査を行った。実効断面積を変化させることによりラマン利得率を変化させた RG-DF を用いた後方励起による DRA 伝送システムにおいて、ラマン利得率変化量が増大するとともに、RG-DF を適応した場合の SNR 改善効果の最大値が増大することを明らかにした。また、RG-DF の最適な長さは有効相互作用長に依存することを示した。
- 階段型の屈折率分布を仮定して RG-DF の設計領域を調査し、設計した RG-DF を用いた後方励起による DRA 伝送システムにおける SNR 改善効果を確認した。波長 1550 nm の 1 チャンネル伝送を想定して、遮断波長、曲げ損失、並びに波長分散特性を決定することにより、比屈折率差は 0.64 から 1.4 % で設計可能であり、そのときの実効断面積は 20.1 から 46.8  $\mu\text{m}^2$ 、またラマン利得率は 0.9 から 2.9  $\text{Wkm}^{-1}$  で使用可能であることを明らかにした。また、得られるラマン利得率の変化量の最大値は 0.53 であり、約 8 km のファイバ長を用いて 1.3 dB の SNR 改善効果が得られることを明ら

かにした。

## 第5章：高出力光照射に対する光ファイバの長期信頼性

### 5.1 はじめに

DRA を適応した WDM 伝送では、光信号の多重によるトータル信号光パワーレベルの増加、また、DRA の励起により、光ファイバ中に入射される光パワーレベルが数百 mW 以上となることが想定される。高出力光照射に対する信頼性の調査は、DRA を適応した WDM 伝送システムを使用した光ファイバ伝送路において非常に重要な検討課題である。

一般に、短期的に発生する光ファイバの損傷の要因として、コネクタ端面における汚れや不純物の付着による光ファイバヒューズ[5-1]、[5-2]や、非常に小さい曲げ半径で光ファイバを曲げた時の漏洩光による光ファイバ被覆の損傷[5-3]などがあげられる。これに対し、長期的に高出力光を照射することによって、アモルファスSiO<sub>2</sub>中では、放射線誘起欠陥[5-4]や、光誘起欠陥[5-5]-[5-8]が発生することが報告されている。また、純石英やドーパントを含む石英では、生成された欠陥が紫外や可視領域において光の損失となりうる[5-4]。さらに、純石英、またはドーパントが添加された石英系ファイバは、構造内に欠陥を含んでいるため、紫外、可視、並びに赤外領域において光の減衰を受けることがある[5-4]。光ファイバの第二高調波(Second harmonic generation : SHG)[5-9]や、ファイバブラッググレーティング(Fiber Bragg Grating : FBG)へ応用される光誘起屈折率変化[5-10]は、ゲルマニウムドープファイバにおいて光誘起欠陥に関連する現象の例としてよく知られている。

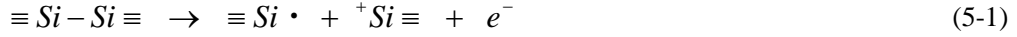
本章では、DRA 伝送システムにおける、長期的な高出力光照射による光誘起欠陥の影響を調査する。SCF 及び DSF に、それぞれ波長 1480 nm、数 W の連続光を約 2000 時間に渡って連続照射を行い、照射実験前後におけるラマンスペクトル及び損失係数スペクトルのスペクトル形状変化の測定結果から、多光子吸収による欠陥増加に関する長期信頼性を明らかにする。

### 5.2 高出力光照射による光ファイバへの影響

#### 5.2.1 純石英ガラスにおける光反応

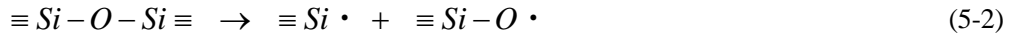
光ファイバの母材である石英ガラスは、放射線や紫外線といった高エネルギーの照射により、常磁性欠陥が発生する。常磁性欠陥の中で最も有名である E' センターは、3 つの酸素と結合した珪素に 1 つの不對電子が存在する構造(≡Si·)の欠陥である。高純度シリカに 100

keV 以上の高エネルギーを照射することにより、式(5-1)に示されるようにノックオン過程からコンプトン電子がはじき出される[5-11]。



また、0.4 から 3.9 keV のエネルギーを有する X 線照射においても、ノックオン過程により高濃度の E' センターが生成する[5-12]。さらに、含有する OH 基が数 ppm であるシリカでは、5 から 7.9 eV の紫外レーザー照射によっても E' センターが生成される[5-13]。

また、E' センターと同様に石英ガラスの常磁性欠陥として知られる非架橋酸化ラジカル (Non Bridging Oxygen Hole Center : NBOHC) も、石英ガラスに高エネルギー照射を行なうことにより生成される。NBOHC の生成過程は、式(5-2)、式(5-3)、並びに式(5-4)に表される[5-11]、[5-14]。



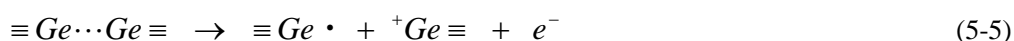
式(5-2)、(5-3)、並びに(5-4)において、結合を切断するために必要なエネルギーは、それぞれ 7.9 eV(Si-O 結合)、9 eV(O-O 結合)、並びに約 20 eV(O-H 結合)であり、F<sub>2</sub> レーザー(7.9 eV) や ArF レーザー(6.4 eV)などを用いた光誘起欠陥生成では、主に、式(5-2)、及び式(5-3)に示される過程を経て NBOHC が生成される[5-8]、[5-11]。

分布ラマン増幅を適応した光ファイバ伝送においては、ラマン増幅を行なうために高出力の励起光を伝送路中に入射する必要がある。1260 から 1625 nm の光通信波長帯域において分布ラマン増幅を使用する場合、0.8 から 1.0 eV のエネルギーを有する励起光が用いられる。E' センターや NBOHC の生成に必要なエネルギーは数 eV であるため、光通信波長帯域における分布ラマン増幅の使用において 1 光子過程による光誘起欠陥はほとんど生成されない。しかしながら、0.1 ps、4.0 eV のパルス光照射において、2 光子過程により 5.6 eV(220 nm)及び 2.0 eV(630 nm)のそれぞれ E' センター及び NBOHC に起因する光吸収強度が増加することが報告されており[5-7]、多光子過程を経ることによって欠陥が生成される可能性がある。また、光ファイバにおける分布ラマン増幅技術は、光ファイバ中の各分子結合に起因するラマン散乱を用いており、光誘起欠陥生成によって分子結合状態が変化してしまう場合、ラマン増幅特性への影響が懸念される。特に、Si-O-Si の伸縮モードに起因する 440 cm<sup>-1</sup>(13.2 THz)のブロードなピークや、構造不規則性において欠陥とされる 3 員環、及び 4 員環構造に起因するそれぞれ D<sub>1</sub>、及び D<sub>2</sub> と呼ばれる 606 cm<sup>-1</sup>(18.0 THz)、及び 495 cm<sup>-1</sup>(14.5

THz)の鋭いピーク[5-15]は、ラマン増幅帯域に観測されるためこれらの結合状態の変化は、ラマン利得変動による伝送性能劣化の要因となる可能性がある。

## 5.2.2 ゲルマニウムドープガラスにおける光反応

ゲルマニウムドープガラスでは、高エネルギーの照射により、ゲルマニウムドープガラス中に存在する Ge-Ge 結合が切断されることによって、GeE'センター( $\equiv\text{Ge}\cdot$ )の生成とともに電子がはじき出される[5-16]。



光誘起欠陥である GeE'センターの生成は、これまでに数多く報告されており[5-17]、[5-18]、GeE'センターに関連する現象の例として、光誘起による SHG[5-9]や光誘起屈折率変化[5-10]がよく知られている。例えば、紫外光である 4.9 eV の水銀ランプを  $\text{GeO}_2\text{-SiO}_2$  ガラスへ照射することにより、5 eV 付近の酸素欠乏欠陥に起因する吸収バンド及び 6.4 eV 付近の強いピークの生成を伴って GeE'センターが発生する[5-18]。また、KrF レーザーや XeCl レーザー照射により、2 つの常磁性欠陥である 4 員環に配位された Ge イオン(Germanium electron center : GEC)に関連する電子トラップセンターと自己トラップホールセンター(Self-trapped hole : STH)が生成され、長時間のレーザー照射により GEC 構造が飽和状態となり、GeE'センターが生成される[5-18]。

石英を母材とするゲルマニウムドープガラスへの高エネルギーの照射による欠陥生成以外のメカニズムとして、構造緩和により構造の再配列が生じ、純石英の緻密化が起こる。ラマンスペクトルはファイバ中の分子結合状態に起因してピークを発生するため、この純石英の緻密化は、ラマンスペクトル形状を変化させる原因となる[5-19]。13 %mol のゲルマニウムを添加した石英ガラスは、 $436\text{ cm}^{-1}$ (13.0 THz)付近の周波数シフト位置に Ge-O-Ge の伸縮モードと Si-O-Si の伸縮モードが相互作用したブロードなピークが存在する。このガラスに 5.0 eV の KrF レーザーや 6.0 eV の ArF レーザーを照射すると、石英の緻密化が生じ、SiO 結合が優勢となるため、Si-O-Si の伸縮モードである  $440\text{ cm}^{-1}$ (13.2 THz)のピーク、及び  $D_1$  と呼ばれる 4 員環構造に起因する  $495\text{ cm}^{-1}$ (14.5 THz)のピークへと変化する。また、 $606\text{ cm}^{-1}$ (18.0 THz)の周波数シフト位置に存在する  $D_2$  と呼ばれる 3 員環構造に起因するピークは、純石英の緻密化に伴って、より鋭い形状となる[5-19]。したがって、ゲルマニウムドープファイバを用いた伝送路において、ラマン増幅などにより高出力励起光の入射により、光誘

起が発生する場合には、ラマン利得変動による伝送性能劣化の要因となる可能性がある。

## 5.3 実験

### 5.3.1 実験構成

図 5-1 は、高出力光照射実験系を示す。波長 1480 nm の RFL の出射光を、熱放射板を備えたアイソレータを介して被測定ファイバに入射した。被測定ファイバからの出射端は、出射端面からの反射光を抑制するため、斜め研磨(Angled physical contact : APC)コネクタを接続し、被測定ファイバからの出射光を熱放射板へ照射した。被測定ファイバは、高出力光照射による欠陥生成の、コアのドーパントによる影響を考察するため、クラッドにフッ素を添加した SCF と、SMF よりも高いゲルマニウム添加量であり、かつ、小さい実効断面積を有する DSF を用いた。表 5-1 は、測定に用いた光ファイバのファイバパラメータを示す。ここで、DSF のゲルマニウム添加量は 7.2 mol% であり、SCF 及び DSF のコアとクラッドとの比屈折率差は、それぞれ 0.4 % 及び 0.8 % であった。また、波長 1390 nm における損失係数の測定値より、SCF 及び DSF の OH 濃度は、それぞれ 0.002 ppm 及び 0.001 ppm と推定される。被測定ファイバは紫外光照射硬化剤により被覆され、直径 20 cm のポビンに巻き

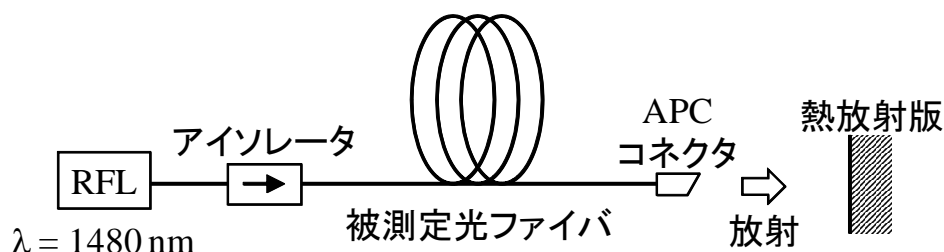


図 5-1 高出力光照射実験系

	SCF	DSF
ゲルマニウム濃度 (mol%)	0	7.2
ファイバ長 (km)	3	1
損失係数* (dB/km)	0.20	0.23
実効断面積* ( $\mu\text{m}^2$ )	73	44
ラマン閾値パワー* (W)	15	17

\* $\lambda = 1480 \text{ nm}$

表 5-1 光ファイバパラメータ

た状態で固定した。SCF 及び DSF への入射光パワーは、それぞれ 8 W 及び 8.5 W であり、各光ファイバにおける入射光パワー密度は、それぞれ 11 MW/cm<sup>2</sup> 及び 19 MW/cm<sup>2</sup> であった。また、入射光の半値全幅は 1.5 nm であるものを光源に用いた。ここで、入射光のスペクトル幅が非常に狭い場合、誘導ブリルアン散乱によって非線形的な後方散乱光が発生し、高出力光を被測定ファイバに照射することができない。そこで、本実験では誘導ブリルアン散乱を抑制できるほど十分広い半値全幅を有する光を入射光に使い、被測定ファイバからの出射光パワーが入射光パワーと線形的に増大することを確認した。一方、ラマン閾値を得るための臨界励起光パワー  $P_0^{cr}$  は、実効断面積  $A_{eff}$ 、ラマン利得係数  $g_R$ 、並びに有効相互作用長  $L_{eff}$  を用いて式(5-6)に表すことができる。

$$P_0^{cr} \cong \frac{16 \times A_{eff}}{g_R L_{eff}} \quad (5-6)$$

表 5-1 より、SCF 及び DSF の臨界励起光パワーは、それぞれ 15 W 及び 17 W であり、照射実験に用いた入射光パワーはそれぞれのラマン閾値よりも小さいため、誘導ラマン散乱による励起光のラマンシフトは無視できる程小さいと考えられる。

上記の高出力光照射実験系を用い、約 2000 時間の照射の前後における損失係数及びラマン利得係数スペクトルの変化の比較を行なった。ここで、カットバック法により損失係数の波長特性を測定した。また、ラマン利得係数スペクトル測定において、信号光、及び励起光として、それぞれ広帯域 LED 及び波長 1480 nm のラマンファイバレーザを用いた後方励起法により測定を行なった。

### 5.3.2 SCF の光学特性変化

図 5-2 は、高出力光照射実験前後における SCF の損失係数スペクトルを示す。高出力光照射実験は、室温環境下で行なった。図中の実線、及び破線は、それぞれ照射実験前及び 1900 時間照射実験後の測定結果を示す。尚、スペクトル分解能は 10 nm であった。図 5-2 より、波長 600 nm から 1600 nm において、照射実験前後における損失係数スペクトルの明らかな相違は観測されないことがわかる。したがって、波長 1480 nm の 8 W (11 MW/cm<sup>2</sup>) のエネルギーを有する光を、SCF に 1900 時間した場合においても、光通信波長帯域における損失係数への影響は無視できる程小さいものと考えられる。アモルファスな SiO<sub>2</sub> では、波長 315 nm (4.0 eV) の非常に強いレーザーパルスを入射することにより、波長 630 nm に一時

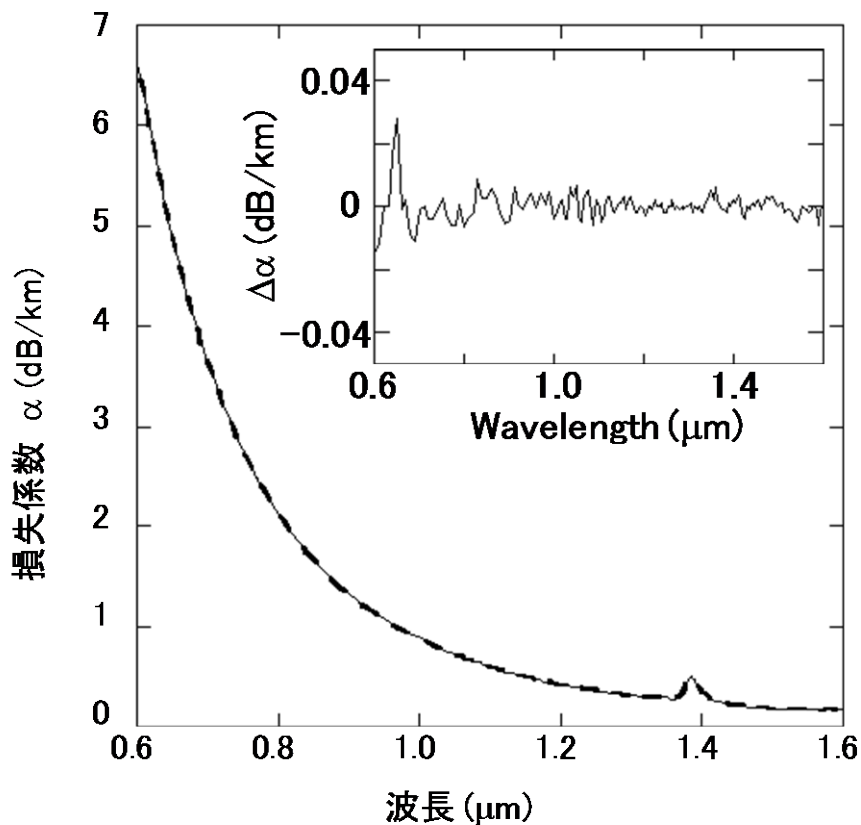


図 5-2 損失係数スペクトル

的な吸収が生じることが観測されている[5-7]。波長 630 nm の誘導吸収は NBOHC の形成に起因するものである。ここで、 $3 \text{ TW/cm}^2$  のパルスピーク強度に相当する  $0.4 \text{ J/cm}^2/\text{pulse}$  の光パワー密度であり、 $4.0 \text{ eV}$  のエネルギーを有する  $120 \text{ fs}$  のパルス光を使用する場合、NBOHC は 2 光子過程によって引き起こされる。また、よりエネルギーの高い、波長  $157 \text{ nm}$  ( $7.9 \text{ eV}$ ) の  $\text{F}_2$  エキシマレーザーにより、1 光子過程によって E' センターと NBOHC がともに観測されることも報告されている[5-8]。しかしながら、図 5-2 より、本実験においては  $630 \text{ nm}$  においても誘導吸収は観測されなかった。本実験における NBOHC の検出限界は、式(5-7)に示される Smakula の式[5-20]を用いて求めることができる。

$$N_c f = \frac{1.29 \times 10^{17} n \alpha \omega}{(n^2 + 2)^2} \quad (5-7)$$

ここで、 $N_c$ 、 $f$ 、 $n$ 、 $\alpha$ 、並びに $\omega$ は、それぞれ欠陥中心の濃度、振動子強度、ファイバコアの屈折率、吸収バンドのピークにおける吸収係数、並びに半値全幅である。式(5-7)の $f$ 、 $n$ 、 $\alpha$ 、並びに $\omega$ の項に、それぞれ  $1.5 \times 10^{-4}$  [5-21]、 $1.46$ 、 $2.3 \times 10^{-7} \text{ cm}^{-1}$ 、並びに  $0.2 \text{ eV}$  [5-22]を



代入することにより、 $2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  の  $N_c$  が得られる。ここで、 $\alpha$  は、波長 630 nm の測定における分解能 0.1 dB/km から算出した。それゆえ、1900 時間の照射によって生成された NBOHC の検出限界は  $2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  以下であると考えられる。本実験におけるエネルギーは 0.84 eV (1.48  $\mu\text{m}$ ) であるため、NBOHC が発生するためには多光子励起 ( $m \geq 10$ ) が必要となる。多光子吸収断面積は、2 光子吸収断面積よりも非常に小さいため、本実験で使用した光強度では NBOHC を発生させることは不可能であると考えられる。

Friebele らは、1 MeV 以下の放射エネルギーにより、石英、及びドーパントをコアに添加したファイバにおいて、赤外領域での放射線誘起欠陥が発生することを報告している [5-4]。しかしながら、本実験においては、使用した光子エネルギーが、赤外領域での誘起吸収が発生しないほど低かったと考えられるため、図 5-2 から明らかなように、赤外領域において 0.01 dB/km 以下の損失変動しか観測されなかった。

図 5-3(a) は、高出力光照射実験前後において、励起波長 1480 nm を用いて測定した SCF の規格化ラマン利得係数スペクトルを示す。図中の実線、及び破線は、それぞれ照射実験前及び 1900 時間照射実験後の測定結果を示す。また、図 5-3(b) は、高出力光照射実験前後における規格化ラマン利得係数の差分を示す。尚、図 5-3(a) は 13.2 THz の SiO 結合に起因するピークが 1 となるように規格化したスペクトルを示す。図 5-3(a) より、14.6 THz 及び 18.0 THz にそれぞれ  $D_1$  バンド、及び  $D_2$  バンドの 2 つの鋭いピークが観測される。これらのピークは、それぞれ石英ガラスにおいて 4 員環、及び 3 員環の左右対称の伸縮モードに起因している [5-15]、[5-23]。図 5-3(a)、及び (b) より、8 W の高出力光を 1900 時間照射した後の規格化ラマン利得係数スペクトルは、照射実験前とほぼ同等であり、その差は  $\pm 5\%$  未満であった。近年、 $F_2$  レーザー照射によって 3 員環、及び 4 員環の結合が切断されることにより、 $E'$ -NBOHC ペアが生成されることが報告されている [5-8]。 $D_1$ 、及び  $D_2$  バンドのピーク強度は、それぞれ 4 員環、及び 3 員環の数に相関しているため、0.84 eV (1480 nm) のエネルギーを有する光照射による多光子励起により  $E'$ -NBOHC ペアが生成する場合、 $D_1$ 、及び  $D_2$  バンドのピーク強度は減少する。しかしながら、本実験において NBOHC の生成が、検出限界である  $2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  の欠陥中心濃度以下であったため、 $D_1$ 、及び  $D_2$  バンドのピーク強度の明らかな減少は観測されなかったと考えられる。また、1900 時間の照射実験後に SCF の張力測定を行い、光ファイバの機械的な劣化が起こらないことを確認している。さらに、500 時間の高出力光照射実験（通算 2400 時間照射）を行い、損失係数スペクトル、及び規格化ラマン利得係数スペクトルの測定を行なったが、損失増加、及びピーク強度の減少は

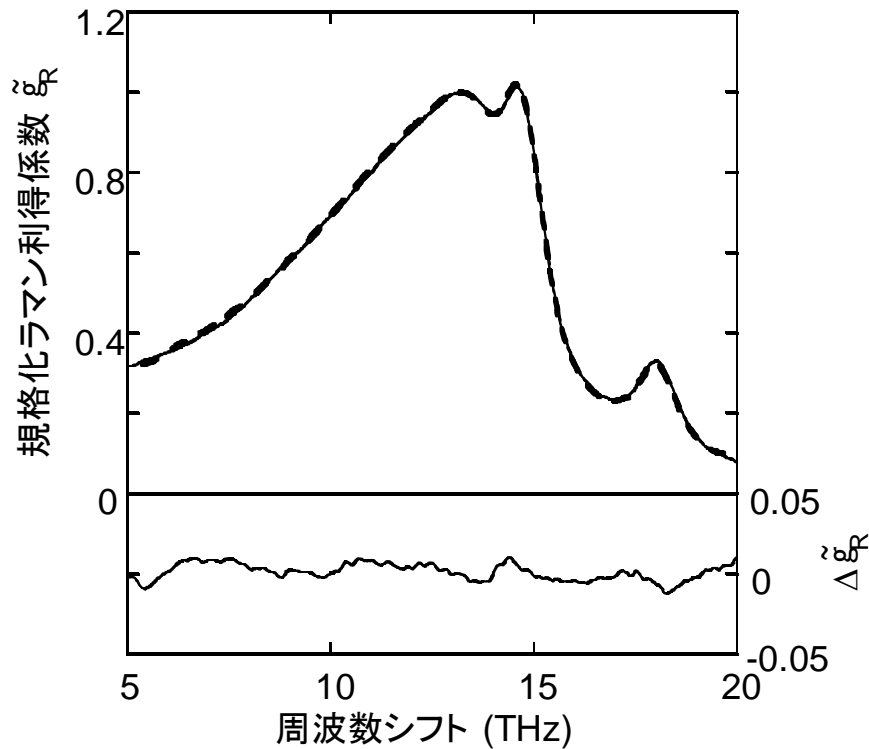


図5-3(a) 規格化ラマン利得係数スペクトル、  
 (b) 高出力光照射実験前後における規格化ラマン利得係数の差分

観測されなかった。

### 5.3.3 DSF の光学特性変化

図 5-4 は、8.5 W の高出力レーザーを 2000 時間照射実験前後における DSF の損失係数スペクトルを示す。高出力光照射実験は、室温環境下で行なった。図中の実線及び破線は、それぞれ照射実験前及び 2000 時間照射実験後の測定結果を示す。図 5-4 より、波長 600 から 1600 nm において、照射実験前後における損失係数スペクトルの明らかな相違は観測されないことがわかる。したがって、波長 1480 nm の 8.5 W (22 MW/cm<sup>2</sup>) のエネルギーを有する光を、DSF に 2000 時間した場合においても、光通信波長帯域における損失係数への影響は無視できる程小さいものと考えられる。また、波長 1480 nm、8.5 W のレーザー光を 2000 時間照射後の Ge<sup>+</sup> センターの生成を調査するため、光スペクトラムアナライザにより、波長 740 nm における SHG パワーを測定し、光強度が観測されないことを確認した。したが

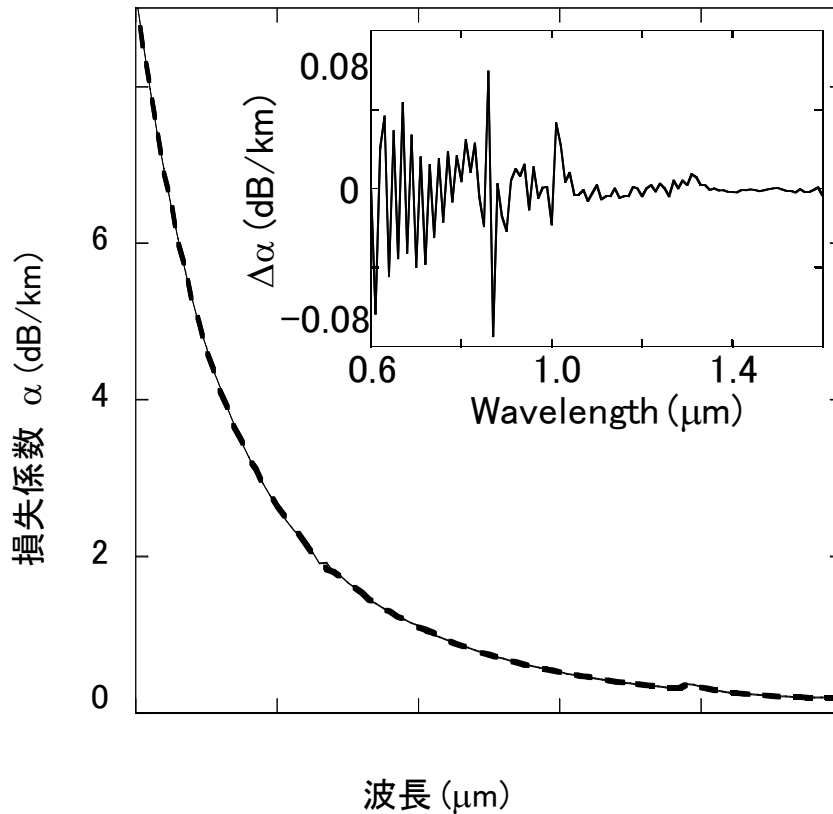


図 5-4 損失係数スペクトル

って、SHG パワーは検出限界以下であり、その変換効率は  $10^9$  より小さいことが推測される。0.84 eV(1480 nm)のエネルギー照射では、GeE'センターを生成するために必要とされる 5 eV 以上のエネルギーを得るために、多光子吸収が必須となる。しかしながら、波長 1060 nm の連続波モードロックレーザーを用いた SHG 発生実験においては、300 W のピークパワーにおいて SHG が観測されないとの報告がある[5-24]ことから、本実験における 8.5 W のエネルギーは、多光子吸収によって GeE'センターを生成するためには非常に小さかったものと考えられる。

図 5-5(a)は、高出力光照射実験前後の、5~20 THz の周波数領域における DSF の規格化ラマン利得係数スペクトルを示す。図中の実線、及び破線は、それぞれ照射実験前、及び 2000 時間照射実験後の測定結果を示す。2000 時間照射前後のそれぞれのスペクトル形状変化を調査するため、図 5-5(a)は 13.2 THz のピークが 1 となるように規格化したスペクトルを示す。さらに、図 5-5(b)は 2000 時間の高出力光照射実験前後における規格化ラマン利得係数の差分を示す。高出力光照射実験後の規格化ラマン利得係数スペクトルは、実験誤差の範囲内

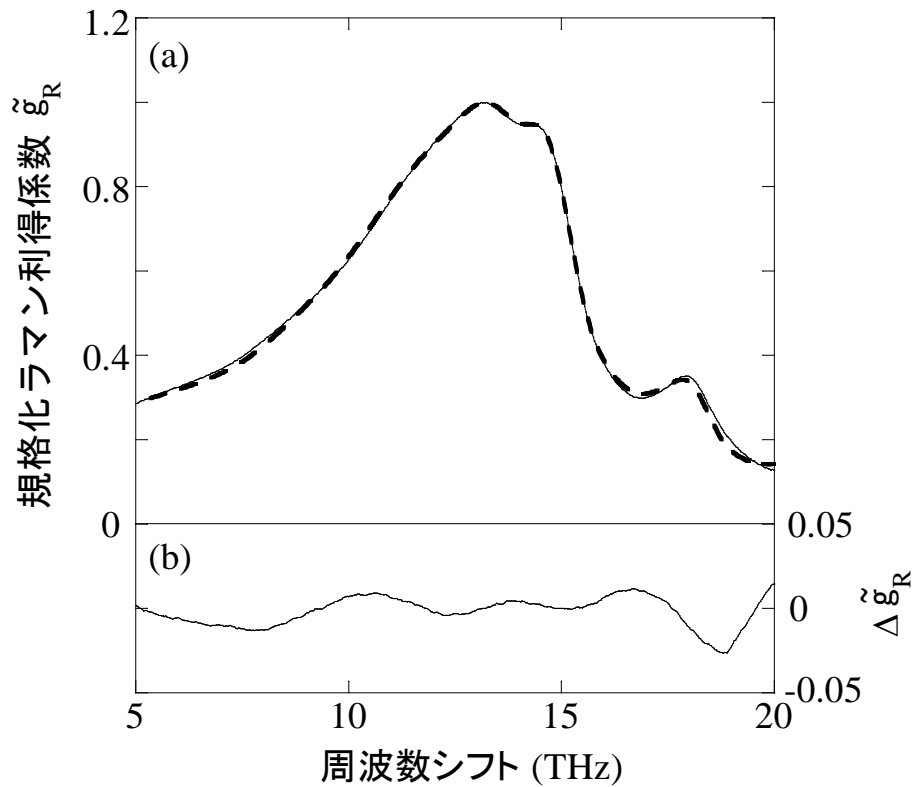


図5-5(a) 規格化ラマン利得係数スペクトル、  
 (b) 高出力光照射実験前後における規格化ラマン利得係数の差分

で照射実験前のスペクトルとほぼ重なり、その差は $\pm 5$  %未満であった。ゲルマニウムドー  
 プファイバにおいては、SHG 過程を伴って  $D_1$  バンドの強度と  $D_2$  バンドの形状が変化する  
 ことが報告されている[5-25]。しかしながら、本実験では 2000 時間の高出力光照射による  
 SHG 発生は観測されなかったことから、規格化ラマン利得係数スペクトルにおける  $D_1$  バン  
 ドの強度と  $D_2$  バンドの形状変化も観測されなかったものと考えられる。

#### 5.4 長期信頼性

図 5-1 から図 5-4 における実験結果より、SCF における欠陥生成が吸収した光エネルギー  
 の多光子過程のみで発生する場合、S、C、並びに L バンドの光通信波長帯域における数ワ  
 ットの光照射においては、SCF の欠陥生成は観測されず、長期的な信頼性が確保できると  
 想定される。光誘起欠陥の生成数は式(5-8)に示され、2 光子吸収による欠陥形成もこの式に  
 よって求めることができると考えられる[5-7]。

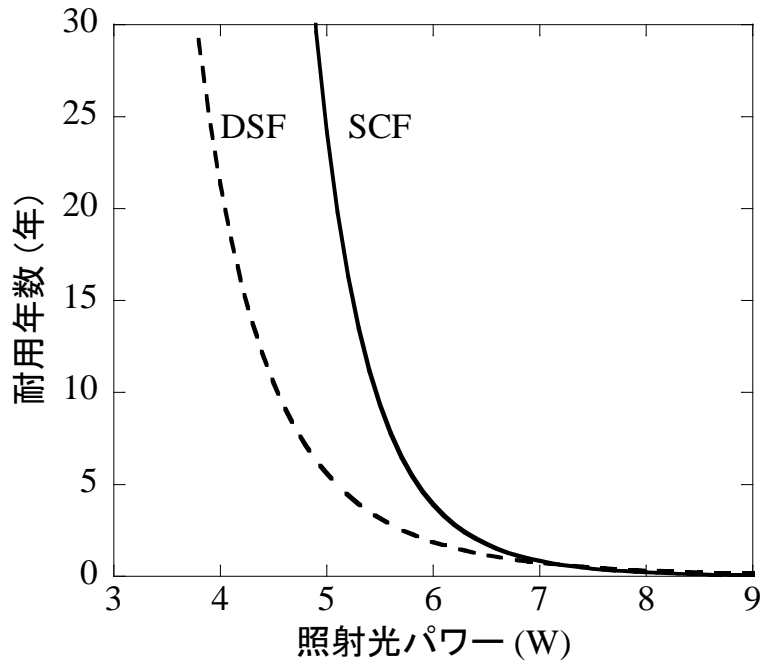


図 5-6 照射光パワーに対する耐用年数

$$\frac{dN}{dt} = kI^m - \frac{N}{\tau} \quad (5-8)$$

ここで、 $N$ 、 $t$ 、 $k$ 、 $I$ 、 $m$ 、並びに  $\tau$  は、それぞれ欠陥数、照射時間、光子吸収の断面積に比例する定数、入射光強度、価電子帯電子を伝導帯へ励起するために必要な光子数、並びに欠陥緩和時間である。ここで、簡易化のために  $\tau$  の単一緩和時間を想定する。これまで SCF における光誘起欠陥の緩和時間に関する報告が無いため、最悪値として  $\tau = \infty$  とする。また、式(5-8)を式(5-9)に変換する。

$$N = kI^m t \quad (5-9)$$

上記の NBOHC の生成に関する考察、またアモルファス  $\text{SiO}_2$  の光学バンドギャップが 9 eV であるという報告[5-26]に基づき、S、C、並びに L バンドにおける入射光強度において、光誘起欠陥を発生させるために必要な  $m$  は、10 以上となる。また、DSF においては、 $\text{GeE}'$  センターを発生させるために必要なエネルギーは少なくとも 5 eV である[5-18]ため、 $\text{GeE}'$  センターを発生させるための S、C、並びに L バンドにおける入射光強度において、 $m$  は 6 以上である必要がある。図 5-6 に、式(5-9)を用いて計算した照射光パワーに対する耐用年数を示す。ここで、耐用年数とは、光誘起欠陥の生成による損失係数スペクトル及びラマン利得係数スペクトルへの影響が図 5-2 から図 5-5 に示した結果と同等レベルに保持される年

数のことである。一般に、光ファイバの破断による寿命は 20 年以上とされており [5-27]、仮に耐用年数を 20 年とした場合には、図 5-6 より、SCF で 5 W 以下、DSF で 4 W 以下の光パワーで使用することが望ましいことが分かる。光ファイバ運用上の安全性の観点から、光ファイバにおける励起光パワーの最大値は 500 mW であり [5-28]、20 年の耐用年数には十分耐えうる値であることから、石英系の光ファイバを用いた DRA 伝送において高出力光に対する信頼性が長期的に確保できることが明らかとなった。

## 5.5 まとめ

本章では、純石英コア及びゲルマニウムを石英に添加したコアを有する光ファイバを想定し、純石英及びゲルマニウムを添加した石英における高出力光照射による光誘起欠陥の生成について、実験により調査を行った。また、多光子過程による光誘起欠陥の生成と高出力光照射時間の関係から長期信頼性について検討を行った。本章で得られた結果を以下にまとめる。

- SCF に波長 1480 nm の 8 W の光を 1900 時間照射して、照射前後における損失係数スペクトル及びラマン利得係数スペクトル形状を調査し、各スペクトル形状に変化がないことを確認した。純石英ガラスでは、数 eV のエネルギー照射により光誘起欠陥である NBOHC が生成されるが、光通信で用いられる波長における光エネルギーから NBOHC を生成するためには、10 光子以上の多光子励起が必要であり、さらに、多光子吸収では吸収断面積が非常に小さいため、検出限界以上の NBOHC を生成することは困難であることを明らかにした。
- DSF に波長 1480 nm の 8.5 W の光を 2000 時間照射して、照射前後における損失係数スペクトル及びラマン利得係数スペクトル形状を調査し、各スペクトル形状に変化がないことを確認した。ゲルマニウムを添加した石英ガラスでは、数 eV のエネルギー照射により SHG が発生し、GeE' センターが生成されるが、今回用いた光通信波長帯域の光源では SHG を発生することが困難であり、GeE' センターの生成に至らないことを明らかにした。
- 多光子過程によって光誘起欠陥が生成するための光強度と照射時間の関係を検討し、SCF で 5 W 以下、DSF で 4 W 以下の励起光入射では、光誘起欠陥の生成による損失

係数スペクトル及びラマン利得係数スペクトルへの影響が測定結果と同等レベルに保持される耐用年数は20年以上であり、これは光ファイバ運用上の安全性の観点から制限される、光ファイバにおける励起光パワーの最大値の500 mWよりも非常に小さく、石英系の光ファイバを用いたDRA伝送における高出力光に対する信頼性が長期的に確保できることを明らかにした。





## 第6章：結論

本論文は、光ファイバの伝送容量を拡大することを目的とした DRA を適応した WDM 伝送システムにおいて、伝送性能を向上するための最適な光ファイバの設計に関する研究成果をまとめたものである。第2章から第5章までの結論をまとめると以下のようになる。

第2章では、ゲルマニウムまたはフッ素を添加した石英系の充実型光ファイバの光ファイバ構造とラマン特性の関係について検討し、ラマン利得係数がファイバコアにおけるゲルマニウムまたはフッ素の添加量に依存して増減することを明らかにした。また、システム設計の際に必要なラマン利得率スペクトルは、偏回帰係数及び任意の評価周波数シフトにおけるラマン利得率を求めておくことにより、重回帰分析によって評価可能であることを明らかにした。さらに、SNR 改善効果及び  $10^9$  の BER に相当する Q 値を達成する有効入射信号光パワー幅に着目して検討を行い、DRA を適応した WDM 伝送システムのための光ファイバの最適条件は、純石英コア及び実効断面積の拡大化であることを明らかにした。比屈折率差及び実効断面積の最適条件に加え、遮断波長、曲げ損失、並びに波長分散特性を考慮した場合、 $88 \mu\text{m}^2$  の実効断面積を有する SCF が実現可能であり、0.5 W の励起光パワーを使用することにより 24 dB の有効入射光パワー幅が得られ、2 dBm 以下のトータル入射信号光パワーを使用することにより 2 dB 以上の Q 値改善効果が得られることを明らかにした。

第3章では、純石英をコアとした PCF におけるラマン特性について検討し、PCF のラマン利得スペクトル及びラマン利得係数の波長特性が SCF とほぼ同等であることから、PCF のコア中に存在する SiO<sub>2</sub> の分子結合状態が SCF と同等であり、信号光及び励起光のコアにおける閉じ込め効果も SCF と同程度であることを明らかにした。DRA を適応した広波長帯域における単一波長及び C バンドにおける WDM 伝送において 1.5 dB 以上の SNR 改善効果を実証した。また、試作した PCF のファイバパラメータを用いた広波長帯域における DRA の適応性について検討し、800 nm から 1600 nm の信号波長において 3 dB 以上の SNR 改善効果が見込まれることを示した。さらに、超大容量・超長距離光伝送を実現する実効断面積拡大 PCF の設計を行い、設計条件として規格化空孔直径及び空孔間隔をそれぞれ 0.4 及び  $10 \mu\text{m}$  とすることにより、S から L バンド帯における実効断面積が約  $135 \mu\text{m}^2$  一定となり、3.5 dB 以上の SNR 改善効果を得られ、充実型光ファイバよりも 2 dB 大きい 26 dB の有効入射信号光パワー幅が得られることを明らかにした。

第 4 章では、均一なファイバパラメータを有する既存光ファイバ伝送路の伝送性能向上を目的とし、光ファイバの長手方向に沿って線形にラマン利得率を変化させた RG-DF を用いた後方励起による DRA 伝送システムにおけるラマン増幅特性及び伝送特性を検討し、光ファイバの長手方向に線形にラマン利得率が增大する RG-DF を用いることによって、後方励起光パワーに対するラマンゲインが増大し、結果として高い SNR 改善効果を得られることを明らかにした。また、RG-DF のラマン利得率変化量が增大するとともに、RG-DF を適応した場合の SNR 改善効果の最大値が増大し、RG-DF の最適な長さは有効相互作用長に依存することを明らかにした。さらに、階段型の屈折率分布を仮定した RG-DF の設計領域を調査し、波長 1550 nm の 1 チャンネル伝送を想定した遮断波長、曲げ損失、並びに波長分散特性より、比屈折率差は 0.64 から 1.4 % で設計可能であり、そのときのラマン利得率は 0.9 から  $2.9 \text{ Wkm}^{-1}$  で使用可能であることを明らかにした。得られる  $R_{CR}$  の最大値は 0.53 であり、約 8 km のファイバ長を用いて 1.3 dB の SNR 改善効果が得られることを明らかにした。

第 5 章では、純石英コア及びゲルマニウムを石英に添加したコアを有する光ファイバを想定して、DRA 伝送システムにおける高出力光照射による光誘起欠陥の生成について検討し、SCF 及び DSF に波長 1480 nm、数 W の連続光を約 2000 時間にわたって連続照射を行い、いずれの光ファイバにおいても照射実験前後のラマンスペクトル及び損失係数スペクトルのスペクトル形状に変化がないことを確認し、本実験では光通信で用いられる波長における光エネルギーによる多光子過程によって生成される NBOHC または GeE' センターの損失係数スペクトル及びラマン利得係数スペクトルへの影響が認められないことを示した。また、SCF で 5 W 以下、DSF で 4 W 以下の励起光入射では、光誘起欠陥の生成による損失係数スペクトル及びラマン利得係数スペクトルへの影響が測定結果と同等レベルに保持される耐用年数は 20 年以上であり、これは光ファイバ運用上の安全性の観点から制限される、光ファイバにおける励起光パワーの最大値の 500 mW よりも非常に小さく、石英系の光ファイバを用いた DRA 伝送において高出力光に対する信頼性が長期的に確保できることを明らかにした。

DRA 伝送システムは、集中定数型の光増幅器のみで構成される伝送システムに対して、光ファイバ 1 心における伝送容量を拡大するまたは伝送距離を長距離化することを可能とする。本研究の研究成果は、既存の DRA 伝送システムにおいて更なる伝送性能向上の効果をもっており、既存伝送システムの更なる大容量化及び長距離化を可能とし、より快適なネットワークサービス提供への貢献が期待される。

## 参考文献一覧

### 第一章

- [1-1] 久保園, "すべてが解る！光ファイバ通信," オーム社, pp. 12-13, 2012.
- [1-2] 「平成 21 年版情報通信白書」(総務省)  
<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h21/html/l4334000.html>
- [1-3] 「平成 25 年版情報通信白書」(総務省)  
<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h25/html/nc245320.html>
- [1-4] 「平成 25 年版情報通信白書」(総務省)  
<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h25/html/nc243120.html>
- [1-5] 「平成 25 年版情報通信白書」(総務省)  
<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h25/html/nc243110.html>
- [1-6] 日比野, 坪川, 神野, 高田, 宮本, "最新フォトニックネットワーク技術の概要," NTT 技術ジャーナル, vol. 19, no. 10, pp. 8-13, 2007
- [1-7] 三木, 須藤, "光通信技術ハンドブック," オプトロニクス社, p. 42, 2002.
- [1-8] 可児, "アクセス系ネットワークの光インタフェース標準化動向," NTT 技術ジャーナル, vol. 19, no. 7, pp. 46-49, 2007.
- [1-9] 宮本, 佐野, 増田, 吉田, "10 Tbit/s を超える超大容量フォトニックトランスポート技術," NTT 技術ジャーナル, vol. 19, no. 10, pp. 30-34, 2007.
- [1-10] 三木, 須藤, "光通信技術ハンドブック," オプトロニクス社, p. 165-186, 2002.
- [1-11] 山田, 清水, "広帯域光ファイバ増幅技術," NTT 技術ジャーナル, vol. 15, no. 4, pp. 50-53, 2003.
- [1-12] 藤井, "ブロードバンド光ファイバ応用技術," シーエムシー出版, pp. 76-88, 2001.
- [1-13] JIS C 6803, "レーザー製品の安全-光ファイバ通信システムの安全," 2013.
- [1-14] 江森, 並木, "ファイバラマン増幅器," レーザー研究, vol. 29, no. 9, pp. 594-598, 2001.
- [1-15] 江森, 並木, "波長多重励起光源を用いた広帯域 WDM 伝送用ラマン増幅器の開発," 古河電工時報, 第 108 号, 6 月, pp. 37-40, 2001.
- [1-16] A. Naka and S. Saito, "In-line amplifier transmission distance determined by self-phase modulation and group-velocity dispersion," J. Lightwave Technol., vol. 12, no. 2, pp. 280-287, 1994.

- [1-17] T. Izawa, S. Sudo, and F. Hanawa, "Continuous Fabrication Process for High-Silica Fiber Preforms," *IEICE Trans.* vol. E62, no. 11, pp. 779-785, 1979.
- [1-18] 石原, "(改訂版)実務に役立つ光ファイバ技術 200 のポイント," オーム社, pp. 65-66, 2000.
- [1-19] ITU-T Recommendation G.652, Characteristics of a single-mode optical fibre and cable, 2009.
- [1-20] 川上、白石、大橋, "光ファイバとファイバ形デバイス," 培風館, pp. 24-30, 1996.
- [1-21] K. Petermann, "Microbending loss in monomode fibre," *Electron. Lett.*, vol. 12, no. 4, pp. 107-109, 1976.
- [1-22] ITU-T Recommendation G.650.1, "Definitions and test methods for linear, deterministic attributes of single-mode fibre and cable," 2010.
- [1-23] K. Hotate and T. Okoshi, "Measurement of refractive-index profile and transmission characteristics of a single-mode optical fiber from its exit-radiation pattern," *Appl. Opt.*, vol. 18, no. 19, pp. 3265-3271, 1979.
- [1-24] D. Marcuse, "Loss analysis of single-mode fiber splice," *Bell Sys. Tech.*, vol. 56, no. 5, pp. 703-718, 1977.
- [1-25] 末松、伊賀, "光ファイバ通信入門(改訂3版)," オーム社, pp. 20-28, 2001
- [1-26] Y. Katsuyama, M. Tokuda, N. Uchida, and M. Nakahara, "New method for measuring V-value of a single-mode optical fibre," *Electron. Lett.*, vol. 12, no. 25, pp. 669-670, 1976.
- [1-27] 川上、白石、大橋, "光ファイバとファイバ形デバイス," 培風館, pp. 155-158, 1996.
- [1-28] D. Marcuse, "Curvature loss formula for optical fibers," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 66. no. 3, pp. 216-220, 1976.
- [1-29] D. Gloge, "Dispersion in weakly guiding fibers," *Appl. Opt.*, vol. 10, no. 11, pp. 2442-2445, 1971.
- [1-30] N. Kuwaki, M. Ohashi, C. Tanaka, N. Uesugi, S. Seikai, and Y. Negishi, "Characteristics of dispersion-shifted dual shape core single-mode fibers," *J. Lightwave Technol.*, vol. LT-5, no. 6, pp. 792-797, 1987.
- [1-31] B. Costa, D. Mazzoni, M. Puleo, and E. Vezzoni, "Phase shift technique for the measurement of chromatic dispersion in optical fibers using LED's," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 18, no. 10, pp. 1509-1515, 1982.

- [1-32] R. H. Stolen, "Nonlinearity in Fiber Transmission," Proceedings of the IEEE, vol. 68, no. 10, pp. 1232-1236, 1980.

## 第二章

- [2-1] N. Shibata, M. Horiguchi, and T. Edahiro, "Raman spectra of binary high-silica glasses and fibers containing  $\text{GeO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ , and  $\text{B}_2\text{O}_3$ ," J. Non-Cryst. Solids, vol. 45, no. 1, pp. 115-126, 1981.
- [2-2] S. T. Davey, D. L. Williams, B. J. Ainslie, W. J. M. Rothwell, and B. Wakefield, "Optical gain spectrum of  $\text{GeO}_2$ - $\text{SiO}_2$  Raman fibre amplifiers," IEE Proceedings J. Optoelectronics, vol. 136, no. 6, pp. 301-306, 1989.
- [2-3] M. Ohashi, K. Shiraki, and K. Tajima, "Optical loss property of silica-based single-mode fibers," J. Lightwave Technol., vol. 10, no. 5, pp. 539-543, 1992.
- [2-4] S. Gray, "Raman gain measurements in optical fibers," in Proc. Symposium on Optical Fiber Measurements (SOFM2000), pp.151-153, Boulder, CO, Sep., 2000.
- [2-5] D. Hamoir, N. Torabi, A. Bergonzo, S. Borne, and D. Bayart, "Raman spectra of line fibres measured over 30 THz," in Proc. Symposium on Optical Fiber Measurements (SOFM2000), pp. 147-149, Boulder, CO, Sep., 2000.
- [2-6] IEC 62324/TR, "Single-mode optical fibres Raman gain efficiency measurement using continuous wave method Guidance," 2007.
- [2-7] T. Nakashima, S. Seikai, and M. Nakazawa, "Dependence of Raman gain on relative index difference for  $\text{GeO}_2$ -doped single-mode fibers," Opt. Letters, vol. 10, no. 8, pp. 420-422, 1985.
- [2-8] R. H. Stolen, "Nonlinearity in Fiber Transmission," Proceedings of the IEEE, vol. 68, no. 10, pp. 1232-1236, 1980.
- [2-9] F. L. Gallener and G. Lucovsky, "Longitudinal optical vibrations in Glasses:  $\text{GeO}_2$  and  $\text{SiO}_2$ ," Phys. Rev. Lett., vol. 37, no. 22, pp. 1474-1478, 1976.
- [2-10] H. Hosono, M. Mizuguchi, L. Skuja, and T. Ogawa, "Fluorine-doped  $\text{SiO}_2$  glasses for  $\text{F}_2$  excimer laser optics: fluorine content and color-center formation," Opt. Lett., vol. 24, no. 22, pp. 1549-1551, 1999.

- [2-11] N. Kuwaki, M. Ohashi, C. Tanaka, N. Uesugi, S. Seikai, and Y. Negishi, "Characteristics of dispersion-shifted dual shape core single-mode fibers," *J. Lightwave Technol.*, vol. 5, no. 6, pp. 792-797, 1987.
- [2-12] M. Ohashi, K. Sato, and Y. Katsuyama, "Loss model for singlemode fibres," *Electron. Lett.*, vol. 28, no. 1, pp. 6-7, 1992.
- [2-13] A. Naka and S. Saito, "In-line amplifier transmission distance determined by self-phase modulation and group-velocity dispersion," *J. Lightwave Technol.*, vol. 12, no. 2, pp. 280-287, 1994.
- [2-14] G. P. Agrawal, "Nonlinear fiber optics," Academic Press Inc., Boston, pp. 56-60, 1995.
- [2-15] K. Nakajima and M. Ohashi, "Dopant dependence of effective nonlinear refractive index in GeO<sub>2</sub>- and F-doped core single-mode fibers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 14, no. 4, pp. 492-494, 2002.
- [2-16] G. P. Agrawal, "Fiber-optic communication systems third edition," A John Wiley & Sons Inc., NY, pp. 38-39, 2002.
- [2-17] E. Brinkmeyer, "Analysis of the backscattering method for single-mode optical fibers," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 70, no. 8, pp. 1010-1012, 1980.
- [2-18] R. J. Essiambre, P. Winzer, J. Bromage, and C. H. Kim, "Design of bidirectionally pumped fiber amplifiers generating double Rayleigh backscattering," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 14, no. 7, pp. 914-916, 2002.
- [2-19] N. S. Bergano, F. W. Kerfoot, C. R. Davidson, "Margin measurements in optical amplifier systems," *IEEE Photon. Technol. Lett.* vol. 5, no. 3, pp. 304-306, 1993.
- [2-20] P. S. Henry, "Lightwave primer," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-21, no. 12, pp. 1862-1879, 1985.
- [2-21] M. Movassaghi, M. K. Jackson, V. M. Smith, and W. J. Hallam, "Noise figure of erbium-doped fiber amplifiers in saturated operation," *J. Lightwave Technol.*, vol. 16, no. 5, pp. 812-817, 1998.
- [2-22] ITU-T G-series Recommendations – Supplement 39, Optical system design and engineering considerations, 2012.
- [2-23] ITU-T Recommendation G.655, Characteristics of a non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable, 2010.

### 第三章

- [3-1] T. A. Birks, J. C. Knight, P. S. J. Russell, "Endlessly single-mode photonic crystal fiber," *Opt. Lett.*, vol. 22, no. 13, pp. 961-963, 1997.
- [3-2] D. Mogilevtsev, T. A. Birks, P. St. J. Russell, "Group-velocity dispersion in photonic crystal fibers," *Opt. Lett.*, vol. 23, no.21, pp. 1662-1664, 1998.
- [3-3] K. Tsujikawa, K. Tajima, J. Zhou, "Reduction in optical loss of conventional and photonic crystal fibers," in *Proc. the 29th Annual Conference on Optical Fiber Communication (OFC2004)*, paper WI5, Los Angeles, CA, February, 2004.
- [3-4] 川上、白石、大橋, "光ファイバとファイバ形デバイス," 培風館, p. 164, 1996.
- [3-5] M. Koshiba, "Full-vector analysis of photonic crystal fibers using the finite element method," *IEICE Trans. Electron. E85-C*, no. 4, pp. 881-888, 2004.
- [3-6] K. C. Byron and D. M. Ashworth, "Intermodal and intramodal dispersion measurements on 1.3  $\mu\text{m}$  single-mode fibre for use at 0.85  $\mu\text{m}$ ," *IEE Proceedings Optoelectronics*, vol. 135, no. 3, pp. 220-222, 1988.
- [3-7] W. T. Anderson and D. L. Philen, "Spot size measurements for single-mode fibers-a comparison of four techniques," *J. Lightwave Technol.*, vol. 1, no. 1, pp. 20-26, 1983.
- [3-8] Z. Yusoff, J. H. Lee, W. Belardi, T. M. Monroe, P. C. Teh, D. J. Richardson, "Raman effects in a highly nonlinear holey fiber: amplification and modulation," *Opt. Lett.*, vol. 27, no. 6, pp. 424-426, 2002.
- [3-9] C. J. S. de Matos, K. P. Hansen, J. R. Taylor, "Experimental characterization of Raman gain efficiency of holey fibre," *Electron. Lett.*, vol. 39, no. 5, pp. 424-425, 2003.
- [3-10] R. H. Stolen, "Nonlinearity in Fiber Transmission," *Proceedings of the IEEE*, vol. 68, no. 10, pp. 1232-1236, 1980.
- [3-11] P. S. Henry, "Lightwave primer," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-21, no. 12, pp. 1862-1879, 1985.
- [3-12] M. Ohashi, K. Shiraki, and K. Tajima, "Optical loss property of silica-based single-mode fibers," *J. Lightwave Technol.*, vol. 10, no. 5, pp. 539-543, 1992.
- [3-13] S. Song, V. Bhatnagar, and J. Livas, "On the Gaussianly-distributed Q-factor in optical communication systems," in *Proc. the 13th Annual Meeting on Lasers and Electro-Optics*

- Society (LEOS2000), paper WB3, Rio Grande, Puerto Rico, Nov., 2000.
- [3-14] S. Namiki, Y. Emori, "Ultrabroad-band Raman amplifiers pumped and gain-equalized by wavelength-division-multiplexed high-power laser diodes," *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, vol. 7, no. 1, pp. 3-16, 2001.
  - [3-15] N. Nishimura, K. Seo, M. Shiino, and R. Yuguchi, "Study of high-power endurance characteristics in optical fiber link," in *Proc. Topical Meeting on Optical Amplifiers and Their Applications OAA2003*, no. TuC4, Otaru, Japan, July, 2003.
  - [3-16] G. P. Agrawal, "Fiber-optic communication systems third edition," A John Wiley & Sons Inc., NY, pp. 189-190, 2002.
  - [3-17] S. D. Personick, "Receiver design for optical fiber systems," *Proceedings of the IEEE*, vol. 65, no. 12, pp. 1670-1678, 1977.
  - [3-18] ITU-T G-series Recommendations – Supplement 39, Optical system design and engineering considerations, 2012.
  - [3-19] K. Tsujikawa, K. Tajima, K. Ieda, K. Nakajima, K. Kurokawa, K. Shiraki, and I. Sankawa, "Evaluation of Rayleigh scattering loss in photonic crystal fibers by using bi-directional OTDR measurement," in *Proc. Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC2006)*, Paper OThA8, Anaheim, CA, March, 2006.
  - [3-20] ITU-T Recommendation G.652, Characteristics of a single-mode optical fibre and cable, 2009.

#### 第四章

- [4-1] T. Okuno, T. Tsuzaki, and M. Nishimura, "Novel optical hybrid line configuration for quasi-lossless transmission by distributed Raman amplification," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 13, no. 8, pp. 806-808, 2001.
- [4-2] T. Miyamoto, M. Kakui, Y. Kubo, and M. Shigematsu, "Design optimization of the effective area managed unrepeated transmission lines composed of pure silica core fibers employing distributed Raman amplification," in *Proc. the 7th optoelectronics and communication conference (OECC2002)*, Paper 10D1-2, Yokohama, Japan, July, 2002.



- [4-3] K. Shiraki, M. Ohashi, and M. Tateda, "SBS threshold of a fiber with a Brillouin frequency shift distribution," *J. Lightwave Technol.*, vol. 14, no. 1, pp. 50-57, 1996.
- [4-4] K. Nakajima, M. Ohashi, K. Shiraki, T. Horiguchi, K. Kurokawa, and Y. Miyajima, "Four-wave mixing suppression effect of dispersion distributed fibers," *J. Lightwave Technol.*, vol. 17, no. 10, pp. 1814-1822, 1999.
- [4-5] N. S. Bergano, F. W. Kerfoot, C. R. Davidson, "Margin measurements in optical amplifier systems," *IEEE Photon. Technol. Lett.* vol. 5, no. 3, pp. 304-306, 1993.
- [4-6] 松本, "光測定器ガイド," オプトロニクス社, pp. 244-251, 2004.
- [4-7] ITU-T Recommendation G.653, Characteristics of a dispersion-shifted, single-mode optical fibre and cable, 2010.

## 第五章

- [5-1] D. P. Hand and P. S. J. Russell, "Solitary thermal shock waves and optical damage in optical fibers: The fiber fuse," *Opt. Lett.*, vol. 13, no. 9, pp. 767-769, 1988.
- [5-2] R. Kashyap and K. J. Blow, "Observation of catastrophic self-propelled self-focusing in optical fibers," *Electron. Lett.*, vol. 24, no. 1, pp.47-49, 1988.
- [5-3] R. M. Percival, E. S. R. Sikora, and R. Wyatt, "Catastrophic damage and accelerated ageing in bent fibers caused by high optical powers," *Electron. Lett.*, vol. 36, no. 5, pp.414-416, 2000.
- [5-4] E. J. Friebelle, M. E. Gingerich, and K. J. Long, "Radiation damage of optical fiber waveguides at long wavelengths," *Appl. Opt.*, vol. 21, no. 3, pp. 547-553, 1982.
- [5-5] T. E. Tsai, D. L. Griscom, and E. J. Friebelle, "Mechanism of intrinsic Si E' –center photogeneration in high-purity silica," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 61, no. 4, pp. 444-446, 1988.
- [5-6] H. Nishikawa, R. Nakamura, R. Tohmon, Y. Ohki, Y. Sakurai, K. Nagasawa, and Y. Hama, "Generation mechanism of photoinduced paramagnetic centers from preexisting precursors in high-purity silicas," *Phys. Rev. B*, vol. 41, no. 11, pp. 7828-7834, 1990.
- [5-7] P. N. Saeta and B. I. Greene, "Primary relaxation processes at the bad edge of SiO<sub>2</sub>," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 70, no. 23, pp. 3588-3591, 1993.
- [5-8] H. Hosono, Y. Ikuta, T. Kinoshita, K. Kajihara, and M. Hirano, "Physical disorder and

- optical properties in the vacuum ultraviolet region of amorphous SiO<sub>2</sub>," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 87, no. 17, pp. 175 501-1-175 501-4, 2001.
- [5-9] U. Österberg and W. Margulis, "Dye laser pumped by Nd: YAG laser pulses frequency doubled in a glass optical fiber," *Opt. Lett.*, vol. 11, no. 8, pp. 516–518, 1986.
- [5-10] K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson, and B. S. Kawasaki, "Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 32, no. 10, pp. 647–649, 1978.
- [5-11] 大木, 長沢, "高純度シリカガラスの放射線・レーザー誘起欠陥," *応用物理*, 第 60 卷, 第 7 号, pp. 708-711, 1991.
- [5-12] B. B. Triplett, T. Takahashi, and T. Sugano, "Electron spin resonance observation of defects in device oxides damaged by soft x ray," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 50, no. 23, pp. 1663-1665, 1987.
- [5-13] J. H. Stathis and M. A. Kastner, "Photoinduced paramagnetic defects in amorphous silicon dioxide," *Phys. Rev. B*, vol. 29, no. 12, pp. 7079-7081, 1984.
- [5-14] K. Kjihara, L. Skuja, and M. Hirano, "Formation and decay of nonbridging oxygen hole centers in SiO<sub>2</sub> glasses induced by F<sub>2</sub> laser irradiation: In situ observation using a pump and probe technique," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 79, no. 12, pp. 1757-1759, 2001.
- [5-15] A. Pasquarello and R. Car, "Identification of Raman defect lines as signatures of ring structures in vitreous silica," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 80, no. 23, pp. 5145–5147, 1998.
- [5-16] H. Hosono, H. Kawazoe, and J. Nishii, "Defect formation in SiO<sub>2</sub>:GeO<sub>2</sub> glasses studied by irradiation with excimer laser light," *Phys. Rev. B*, vol. 53, no. 18, pp. R11921-R11923, 1996.
- [5-17] T. E. Tsai, M. A. Saifi, E. J. Friebele, D. L. Griscom, and U. Österberg, "Correlation of defect centers with second-harmonic generation in Ge-doped and Ge-P-doped silica-core single-mode fibers," *Opt. Lett.*, vol. 14, no. 18, pp. 1023–1025, 1989.
- [5-18] J. Nishii, K. Fukumi, H. Yamanaka, K. Kawamura, H. Hosono, and H. Kawazoe, "Photochemical reactions in GeO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> glasses induced by ultraviolet irradiation: Comparison between Hg lamp and excimer laser," *Phys. Rev. B*, vol. 52, no. 3, pp. 1661–1665, 1995.
- [5-19] F. X. Liu, J. Y. Qian, X. L. Wang, L. Liu, and H. Ming, "UV irradiation-induced defect study

- of GeO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> glasses by Raman spectroscopy," *Phys. Rev. B*, vol. 56, no. 6, pp. 3066-3071, 1997.
- [5-20] H. Hosono, M. Mizuguchi, H. Kawazoe, and J. Nishii, "Correlation between GeE' centers and optical absorption bands in SiO<sub>2</sub>:GeO<sub>2</sub> glasses," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 35, pt. 2, no. 2B, pp. L234-L236, 1996.
- [5-21] T. Suzuki, L. Skuja, K. Kijihara, M. Hirano, T. Kamiya, and H. Hosono, "Electronic structure of oxygen dangling bond in glassy SiO<sub>2</sub>: The role of hyperconjugation," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 90, no. 18, pp. 186404-1–186404-4, 2003.
- [5-22] L. Skuja, "The origin of the intrinsic 1.9 eV luminescence band in glassy SiO<sub>2</sub>," *J. Non-Cryst. Solids*, vol. 179, pp. 51–69, 1994.
- [5-23] A. E. Geissberger and F. L. Galeener, "Raman studies of vitreous SiO<sub>2</sub> versus fictive temperature," *Phys. Rev. B*, vol. 28, no. 6, pp. 3266–3271, 1983.
- [5-24] U. Österberg and W. Margulis, "Experimental studies on efficient frequency doubling in glass optical fibers," *Opt. Lett.*, vol. 12, no. 1, pp. 57–59, Jan. 1987.
- [5-25] J. M. Gabriagues and H. Fevrier, "Analysis of frequency-doubling processes in optical fibers using Raman spectroscopy," *Opt. Lett.*, vol. 12, no. 9, pp. 720–722, 1987.
- [5-26] R. DeSalvo, A. A. Said, D. J. Hagan, E. W. Van Stryland, M. Sheik-Bahae, "Infrared to ultraviolet measurements of two-photon absorption and n<sub>2</sub> in wide bandgap solids," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 32, no. 8, pp. 1324-1333, 1996.
- [5-27] 藤井, "ブロードバンド光ファイバ応用技術," シーエムシー出版, pp. 15-16, 2001.
- [5-28] JIS C 6803, "レーザ製品の安全-光ファイバ通信システムの安全," 2013.

## 記号一覧

### 第一章で用いた記号

$C$  : 最大伝送容量

$W_S$  : 信号帯域

$SNR$  : 信号対雑音比

$n_{\text{core}}$  : コアの屈折率

$n_{\text{clad}}$  : クラッドの屈折率

$\theta_c$  : 臨界角補角

$W$  : モードフィールド径

$r$  : 軸中心からの距離

$\phi(r)$  : 電界強度

$F(\theta)$  : FFP の光強度分布

$\alpha_C$  : 接続損失

$N$  : 伝搬モード数

$a$  : コア半径

$\lambda$  : 波長

$\lambda_C$  : 遮断波長

$P_T(\lambda)$  : 透過光パワー

$P_R(\lambda)$  : 基準光パワー

$R$  : 曲げ半径

$\alpha_B$  : 曲げ損失

$\kappa$  : 横方向の伝搬定数

$\gamma$  : 横方向の伝搬定数

$\beta$  : 導波モードの伝搬定数

$k$  : 波数

$K_1$  : 第 2 種変形ベッセル関数

$P_{\text{Straight}}$  : 直線時の光ファイバの出射光

$P_{\text{Bend}}$  : 曲げ付与時の光ファイバの出射光

$D$  : 波長分散

$c$  : 光速

$N_1$  : コアの群屈折率

$N_2$  : クラッドの群屈折率

$\nu$  : 規格化周波数

$b$  : 規格化伝搬定数

$f$  : 周波数

$\tau$  : 群遅延時間

$\phi$  : 位相差

## 第二章で用いた記号

$\Delta_1$  : コアと純石英との比屈折率差

$n_{\text{core}}$  : コアの屈折率

$n_{\text{SiO}_2}$  : 純石英の屈折率

$\Delta$  : コアとクラッドとの比屈折率差

$n_{\text{clad}}$  : クラッドの屈折率

$L$  : ファイバ長

$\alpha_p$  :  $\lambda_p$  における損失係数

$\lambda_p$  : 励起波長

$A_{\text{eff-S}}$  :  $\lambda_S$  における実効断面積

$A_{\text{eff-P}}$  :  $\lambda_p$  における実効断面積

$\lambda_S$  : 信号波長

$g_R$  : ラマン利得係数

$P_1$  : 信号光のみを入射した状態の出射光パワー

$P_2$  : 励起光のみを入射した状態の出射光パワー

$P_3$  : 信号光と励起光をともに入射した状態における出射光パワー

$C_R$  : ラマン利得率

$A_{\text{eff}}$  : 実効断面積

$P_P$  : 入射励起光パワー

$L_{\text{eff}}$  : 有効相互作用長

$W_S$  :  $\lambda_S$ におけるモードフィールド径  
 $W_P$  :  $\lambda_P$ におけるモードフィールド径  
 $\alpha_P$  :  $\lambda_P$ における損失係数  
 $F$  : 周波数シフト  
 $g_{Rcore}$  : コアのラマン利得係数  
 $g_{RSiO_2}$  : 純石英のラマン利得係数  
 $g_{Rcore-Ge}$  : ゲルマニウムドープファイバのラマン利得係数  
 $g_{Rcore-F}$  : フッ素ドープファイバのラマン利得係数  
 $C_{Reff}(F)$  :  $F$ における実効的なラマン利得率  
 $r$  : 軸中心からの距離  
 $g_R(r, F)$  :  $r$ におけるラマン利得係数  
 $\phi(r, \lambda_S)$  :  $r$ における電界強度  
 $g_{Reff}(F)$  :  $F$ における実効的なラマン利得係数  
 $g_{Rcore}(F)$  : コア( $r=0$ )のラマン利得係数  
 $g_{Rclad}(F)$  : クラッド( $r=\infty$ )のラマン利得係数  
 $a$  : コア半径  
 $C_{Reff}(F_i)$  :  $\lambda_P$ から  $i$  番目( $i=1, 2, \dots, 1$ )の周波数シフト  $F_i$ における実効的なラマン利得率  
 $F_k$  : 推定される部分集合の  $k$  番目の評価周波数シフト  
 $C_{Reff}(F_k)$  :  $F_k$ における実効的なラマン利得率  
 $n_{total}$  : 評価周波数シフトの総数  
 $CI_{ik}$  :  $i \times k$  個の要素で構成される行列式である偏回帰係数  
 $R_{SNR}$  : SNR 改善効果  
 $SNR_{EDFA}$  : EDFA のみを増幅技術として使用した場合の SNR  
 $NF_{EDFA}$  : EDFA のみを増幅技術として使用した場合の NF  
 $SNR_{EDFA+DRA}$  : EDFA と DRA を併用させた場合の SNR  
 $NF_{EDFA+DRA}$  : EDFA と DRA を併用させた場合の NF  
 $R_N$  : 非線形性  
 $G_{Net}$  : ネットゲイン  
 $N_{ASE}$  : ASE による光雑音パワー密度  
 $h\nu$  : フォトンエネルギー

$P_{\text{DRS}}$  : DRS による雑音パワー

$B_e$  : 電気フィルタ幅

$B_o$  : 光フィルタ幅

$G_R$  : ラマンゲイン

$T_L$  : 伝送損失

$P_B$  : 後方励起光パワー

$\alpha_S$  :  $\lambda_S$  における損失係数

$\alpha_{\text{IR}}$  : 赤外吸収損失

$P_{\text{in}}$  : 入射信号光パワー

$R$  : レイリー散乱係数

$\gamma$  : 非線形係数

$n_2$  : 非線形屈折率

$B$  : 伝送速度

$D$  : 波長分散

$R_{\text{SNR-max}}$  :  $R_{\text{SNR}}$  の最大値

$P_{\text{B-opt}}$  : 最適な後方励起光パワー

$P_{\text{in-min}}$  : 最小入射信号光パワー

$P_{\text{in-max}}$  : 最大入射信号光パワー

$P_W$  : 有効入射信号光パワー幅

$S$  : 分散スロープ

$\lambda_C$  : 遮断波長

$\alpha_B$  : 曲げ損失

$\lambda_0$  : 零分散波長

$A_{\text{eff-max}}$  : 最大実効断面積

$R_Q$  : Q 値改善効果

$Q_{\text{EDFA}}$  : EDFA のみを増幅技術として使用した場合の Q 値

$Q_{\text{EDFA+DRA}}$  : EDFA と DRA を併用させた場合の Q 値

$P_{\text{in-totoal}}$  : トータル入射信号光パワー

### 第三章で用いた記号

$d$  : 空孔直径  
 $\Lambda$  : 空孔間隔  
 $d/\Lambda$  : 規格化空孔直径  
 $\alpha$  : 損失係数  
 $A_{\text{eff}}$  : 実効断面積  
 $D$  : 波長分散  
 $\lambda_C$  : 遮断波長  
 $L$  : ファイバ長  
 $\lambda_P$  : 励起波長  
 $F$  : 周波数シフト  
 $g_R$  : ラマン利得係数  
 $P_{\text{rec}}$  : 受光パワー  
 $P_B$  : 後方励起光パワー  
 $P_{\text{in}}$  : 入射信号光パワー  
 $R_{\text{SNR}}$  : SNR 改善効果  
 $R$  : レイリー散乱係数  
 $B$  : 伝送速度  
 $B_e$  : 電気フィルタ幅  
 $B_o$  : 光フィルタ幅  
 $R_{\text{SNR-max}}$  : 最大 SNR 改善効果  
 $P_{B\text{-opt}}$  : 最適な後方励起光パワー  
 $\lambda_S$  : 信号波長  
 $\alpha_S$  :  $\lambda_S$  における損失係数  
 $P_{\text{rec-min}}$  : 最小受光レベル  
 $L_{\text{lim}}$  : 伝送距離限界  
 $P_{B\text{-max}}$  : 後方励起光パワーの最大値  
 $h$  : プランク定数  
 $c$  : 光速  
 $n_s$  : 1 ビット当たりの信号光電子の平均数  
 $\eta$  : 量子効率



$\alpha_B$  : 曲げ損失

$\lambda$  : 波長

#### 第四章で用いた記号

$C_R(i)$  :  $i$  番目のセグメントにおけるラマン利得率

$g_R(i)$  :  $i$  番目のセグメントにおけるラマン利得係数

$A_{\text{eff}}(i)$  :  $i$  番目のセグメントにおける実効断面積

$\Delta L(i)$  :  $i$  番目のセグメントにおける長さ

$R_{\text{SNR}}$  : SNR 改善効果

$NF_{\text{EDFA+DRA}}$  : EDFA と DRA を併用させた場合の雑音指数

$R_N$  : 非線形性

$N_{\text{ASE}}$  : ASE による光雑音パワー密度

$h\nu$  : フォトンエネルギー

$P_{\text{DRS}}$  : DRS による雑音パワー

$B_e$  : 電気フィルタ幅

$B_o$  : 光フィルタ幅

$L_{\text{eff}}$  : 有効相互作用長

$T_{\text{EDFA}}(i)$  :  $i$  番目のセグメントにおける EDFA のみを使用した場合の伝送損失

$T_{\text{EDFA+DRA}}(i)$  :  $i$  番目のセグメントにおける EDFA と DRA を併用させた場合の伝送損失

$G_R(i)$  :  $i$  番目のセグメントにおけるラマンゲイン

$\gamma_{\text{EDAF+DRA}}(i)$  :  $i$  番目のセグメントにおける EDFA と DRA を併用させた場合の非線形係数

$\gamma_{\text{EDFA}}(i)$  :  $i$  番目のセグメントにおける EDFA のみを使用した場合の非線形係数

$P(i)$  :  $i$  番目のセグメントにおける光伝送パワー

$NF_{\text{EDFA}}$  : EDFA の NF

$\alpha_{\text{EDFA+DRA}}(i)$  :  $i$  番目のセグメントにおける EDFA と DRA を併用させた場合の信号波長の損失係数

$\alpha_{\text{EDAF}}(i)$  :  $i$  番目のセグメントにおける EDFA のみを使用した場合の信号波長の損失係数

$\alpha_p(i)$  :  $i$  番目のセグメントにおける励起波長の損失係数

$R_F(i)$  :  $i$  番目のセグメントにおけるレイリー散乱係数

$P_P$  : 後方励起光パワー

$W(i)$  :  $i$  番目のセグメントにおける MFD

$G_R$  : ラマンゲイン

$P_{ASE}$  : ASE 雑音パワー

$P_{rec}$  : 受光パワー

$P_{in}$  : 入射信号光パワー

$R_{SNR-max}$  : 最大 SNR 改善効果

$A_{eff}$  : 実効断面積

$R_{CR}$  : ラマン利得率の変化量

$C_{R-input}$  : RG-DF の信号入射側における  $C_R$

$C_{R-output}$  : RG-DF の信号出射側における  $C_R$

$\Delta_1$  : コアと純石英との比屈折率差

$R_{SNR\_without\_RG-DF}$  : 長手方向において均一なファイバパラメータを有する光ファイバのみを伝送路として用いた場合の  $R_{SNR}$

$R_{SNR\_with\_RG-DF}$  : 均一なファイバパラメータを有する光ファイバに RG-DF を組み合わせて伝送した場合の  $R_{SNR}$

$R_{SNR-RGDF}$  : RG-DF を適応した場合の  $R_{SNR}$

$L_{RG-DF}$  : RG-DF の長さ

$\lambda_C$  : 遮断波長

$\alpha_B$  : 曲げ損失

$D$  : 波長分散

$\lambda_0$  : 零分散波長

$\Delta_2$  : 第一クラッドと純石英との比屈折率差

$a_1$  : コア及び第一クラッドにおける半径

$a_2$  : コア及び第一クラッドにおける半径

$R_\Delta$  : 相対比屈折率差

$R_a$  : 相対コア半径

## 第五章で用いた記号

$P_0^{\text{cr}}$  : ラマン閾値を得るための臨界励起光パワー

$A_{\text{eff}}$  : 実効断面積

$g_{\text{R}}$  : ラマン利得係数

$L_{\text{eff}}$  : 有効相互作用長

$N_{\text{c}}$  : 欠陥中心の濃度

$f$  : 振動子強度

$n$  : ファイバコアの屈折率

$\alpha$  : 吸収バンドのピークにおける吸収係数

$\omega$  : 半値全幅

$N$  : 欠陥数

$t$  : 照射時間

$k$  : 光子吸収の断面積に比例する定数

$I$  : 入射光強度

$m$  : 価電子帯電子を伝導帯へ励起するために必要な光子数

$\tau$  : 欠陥緩和時間

## 用語一覧

AMP (Amplifier) : 集中定数型光増幅器

APC (Angled physical contact) : 斜め研磨

ASE (Amplified spontaneous emission) : 自然放出光

ATT (Attenuator) : 光減衰器

BER (Bit error rate) : 符号誤り率

BPF (Band-pass filter) : 光バンドパスフィルタ

BTB (Back-to-back) : バックトゥーバック

COM (Combiner) : 結合器

CWDM (Coarse wavelength division multiplexing : CWDM) : 粗密度 WDM

DCF (Dispersion compensating fiber module) : 分散補償モジュール

DFB (Distributed feedback) : 分布帰還型

DRA (Distributed Raman amplification) : 分布ラマン増幅

DRS (Double Rayleigh scattering) : 二重レイリー散乱

DSF (Dispersion shifted fiber) : 分散シフトファイバ

DWDM (Dense wavelength division multiplexing) : 高密度 WDM

ECL (External cavity laser) : 外部共振器型レーザー

ED (Error detector) : 誤り率検出器

EDFA (Erbium doped fiber amplifier) : エルビウム添加光ファイバ増幅器

ESM (Endlessly single mode) : エンドレスリーシングルモード

FBG (Fiber Bragg Grating) : ファイバブラッググレーティング

FD (Fluorine doped optical fiber) : フッ素ドープファイバ

F-EDFA (Erbium doped fluoride fiber amplifier) : エルビウム添加フッ化物ファイバ増幅器

FFP (Far field pattern) : 遠方出射パターン

GEC (Germanium electron center) : Ge イオン

GFD (Germanium doped optical fiber) : ゲルマニウムドープファイバ

GVD (Group velocity dispersion) : 群速度分散

ITU-T (International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector) : 国際電気通信連合電気通信標準化部門

LN (LiNbO<sub>3</sub>) : ニオブ酸リチウム

LOM (Longitudinal optical mode) : 縦光学モード

MFD (Mode field diameter) : モードフィールド径

MUX (Multiplexing) : 合波器

NBOHC (Non Bridging Oxygen Hole Center) : 非架橋酸化ラジカル

NF (Noise figure) : 雑音指数

NFP (Near field pattern) : 出射端面上の光強度分布

NRZ (Non-return-to-zero) : 非ゼロ復帰

OSA (Optical spectrum analyzer) : 光スペクトラムアナライザ

OSC (Optical sampling oscilloscope) : 光サンプリングオシロスコープ

PCF (Photonic crystal fiber) : フォトニッククリスタルファイバ

PC (Polarization controller) : 偏波コントローラ

PD (Photo detector) : フォトディテクタ

PDFA (Praseodymium doped fiber amplifier) : プラセオジウム添加光ファイバ増幅器

PPG (Pulse pattern generator) : パルスパターン発生器

PRBS (Pseudo- random bit sequence) : 擬似ランダムシーケンス

RFL (Raman fiber laser) : ラマンファイバレーザ

RG-DF (Raman gain efficiency distributed fiber) : ラマン利得率分布型光ファイバ

SCF (Silica core optical fiber) : 純石英コアファイバ

SHG (Second harmonic generation) : 第二高調波

SLD (Super luminescent diode) : スーパールミネッセントダイオード

SMF (Single mode fiber) : 1.3 $\mu$ m 帯零分散単一モードファイバ

SNR (Signal to noise ratio) : 信号対雑音比

SOA (Semiconductor optical amplifier) : 半導体光増幅器

SPM (Self-phase modulation) : 自己位相変調

SSF (Split-step Fourier) : スプリットステップフーリエ法

STH (Self-trapped hole) : 自己トラップホールセンター

TDFA (Thulium doped fiber amplifier) : ツリウム添加光ファイバ増幅器

TDM (Time division multiplexing) : 時分割多重

TOM (Transverse optical mode) : 横光学モード

TSL (Titanium sapphire laser) : チタンサファイアレーザー

VAD (Vapor Axial Deposition) : 気相軸付け法

WDM (Wavelength division multiplexing) : 波長分割多重

YDFA (Ytterbium doped fiber amplifier) : イッテルビウム添加ファイバ増幅器

YFL (Ytterbium fiber laser) : イッテルビウムファイバレーザー

## 発表論文一覧

### A. 論文

- [1] C. Fukai, K. Nakajima, J. Zhou, K. Tajima, K. Kurokawa, and I. Sankawa, "Optimum optical fiber design for a DRA-based DWDM transmission system", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 23, No. 3, pp. 1232-1238, March 2005.

© 2005 IEEE.

In reference to IEEE copyrighted material which is used with permission in this thesis, the IEEE does not endorse any of Saitama university's products or services. Internal or personal use of this material is permitted. If interested in reprinting/republishing IEEE copyrighted material for advertising or promotional purposes or for creating new collective works for resale or redistribution, please go to [http://www.ieee.org/publications\\_standards/publications/rights/rights\\_link.html](http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/rights_link.html) to learn how to obtain a License from RightsLink.

- [2] C. Fukai, K. Kurokawa, K. Tajima, K. Nakajima, I. Sankawa, and H. Shinohara, "Long-term reliability of single-mode fibers when exposed to high-power laser light", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 23, No. 9, pp. 2713-2718, September 2005.

© 2005 IEEE.

In reference to IEEE copyrighted material which is used with permission in this thesis, the IEEE does not endorse any of Saitama university's products or services. Internal or personal use of this material is permitted. If interested in reprinting/republishing IEEE copyrighted material for advertising or promotional purposes or for creating new collective works for resale or redistribution, please go to [http://www.ieee.org/publications\\_standards/publications/rights/rights\\_link.html](http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/rights_link.html) to learn how to obtain a License from RightsLink.

- [3] C. Fukai, K. Nakajima, K. Kurokawa, K. Tajima, T. Matsui, K. Shiraki, and T. Kurashima,

“Applicability of silica core photonic crystal fiber for distributed Raman amplification transmission”, *Optical Fiber Technology*, Vol. 14, No. 3, pp. 196-202, July 2008. © 2007 Elsevier Inc.

## B. レター

- [1] C. Fukai, K. Nakajima, J. Zhou, K. Tajima, K. Kurokawa, and I. Sankawa, “A study of the optimum fiber design for a distributed Raman amplification transmission system”, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 15, No. 11, pp. 1642-1644, November 2003. © 2003 IEEE.
- [2] C. Fukai, K. Nakajima, J. Zhou, K. Tajima, K. Kurokawa, and I. Sankawa, “Effective Raman gain characteristics in germanium- and fluorine-doped optical fibers”, *Optics Letters*, Vol. 29, No. 6, pp. 545-547, March 2004. © 2004 Optical Society of America.
- [3] K. Kurokawa, C. Fukai, J. Zhou, K. Tajima, K. Nakajima, N. Yoshizawa, and I. Sankawa, “Long-term reliability of pure silica core single-mode fiber when exposed to high-power laser light”, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 16, No. 4, pp. 1110-1112, April 2004. © 2004 IEEE.
- [4] K. Nakajima, C. Fukai, K. Kurokawa, K. Tajima, T. Matsui, and I. Sankawa, “Raman amplification characteristics at 850 nm in a silica-based photonic crystal fiber”, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 18, No. 3, pp. 451-453, February 2006. © 2006 IEEE.
- [5] C. Fukai, K. Nakajima, and T. Matsui, "Applicability of large effective area PCF to DRA transmission", *IEICE TRANSACTIONS on Communications*, Vol. E92-B, No. 6, pp. 2251-2253, June 2009. ©2009 IEICE.

## C. 国際会議

- [1] C. Fukai, K. Nakajima, and M. Ohashi, “Dopant dependence of Raman gain coefficient in fluorine doped silica fiber”, 7th Optoelectronics and Communications Conference (OECC 2002), Yokohama, Japan, 2002, paper 10D2-6.
- [2] K. Kurokawa, C. Fukai, J. Zhou, K. Nakajima, K. Tajima, K. Hogari, and I. Sankawa, “High power tolerance of optical fiber cable”, 9th Optoelectronics and Communications Conference/3rd International Conference on Optical Internet (OECC/COIN 2004), Yokohama,



Japan, 2004, paper 13D1-3.

- [3] C. Fukai, K. Nakajima, J. Zhou, K. Tajima, K. Kurokawa, and I. Sankawa, “Distributed Raman amplification based DWDM Transmission in a low loss photonic crystal fibre”, 30th European Conference on Optical Communication (ECOC 2004), Stockholm, Sweden, 2004, paper We1.3.6.
- [4] K. Nakajima, C. Fukai, K. Kurokawa, K. Tajima, T. Matsui, and I. Sankawa, “Distributed Raman amplification at 850 nm in a low loss photonic crystal fibre”, 31st European Conference on Optical Communication (ECOC 2005), Glasgow, Scotland, 2005, paper Tu4.4.3.

#### **D-1. 国内学会、研究会**

- [1] 深井 千里, 中島 和秀, 大橋 正治, “フッ素ドーパファイバのラマン利得係数の評価”, 2002年 電子情報通信学会総合大会, B-10-48, 2002年3月.
- [2] 深井 千里, 中島 和秀, 周 建, 佐藤 公紀, “ラマンゲインスペクトルの推定法に関する検討”, 2002年 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-10-111, 2002年9月.
- [3] 深井 千里, 中島 和秀, 周 建, 田嶋 克介, 黒河 賢二, 三川 泉, “光ファイバパラメータとDRA伝送特性に関する考察”, 2003年 電子情報通信学会総合大会, B-10-145, 2003年3月.
- [4] 深井 千里, 黒河 賢二, 周 建, 田嶋 克介, 中島 和秀, 三川 泉, “高出力光照射における光ファイバの長期信頼性に関する検討”, 2003年 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-10-3, 2003年9月.
- [5] 深井 千里, 中島 和秀, 周 建, 田嶋 克介, 黒河 賢二, 三川 泉, “DRAを用いた既設光伝送路の大容量化に関する検討”, 2004年 電子情報通信学会総合大会, B-10-62, 2004年3月.
- [6] 深井 千里, 中島 和秀, 周 建, 田嶋 克介, 黒河 賢二, 三川 泉, “低損失PCFの分布ラマン増幅伝送特性”, 2004年 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-13-8, 2004年9月.
- [7] 中島 和秀, 深井 千里, 黒河 賢二, 田嶋 克介, 松井 隆, 三川 泉, “低損失PCFの850nm帯分布ラマン増幅特性”, 2005年 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-13-2, 2005年9月.

- [8] 深井 千里, 中島 和秀, 黒河 賢二, 白木 和之, 三川 泉, “純石英コア PCF のラマン増幅特性”, 2007 年 電子情報通信学会総合大会, B-13-17, 2007 月 3 月.
- [9] 深井 千里, 中島 和秀, 白木 和之, 三川 泉, ”ラマン利得率変化型光ファイバの DRA 伝送における SNR 改善効果”, 2007 年 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-13-23, 2007 年 9 月.
- [10] 深井 千里, 中島 和秀, 山本 貴司, 黒河 賢二, 田嶋 克介, 倉嶋 利雄, “MFD 変化型光ファイバのラマン利得特性”, 2008 年 電子情報通信学会総合大会, B-13-9, 2008 月 3 月.
- [11] 深井 千里, 中島 和秀, 黒河 賢二, 田嶋 克介, ”光ファイバのラマン特性”, 2008 年 電子情報通信学会ソサイエティ大会, BS-11-3, 2008 年 9 月.
- [12] 深井 千里, 中島 和秀, 黒河 賢二, 田嶋 克介, 松井 隆, ”純石英コアフォトニック結晶ファイバの分布ラマン増幅伝送特性”, 信学技報, OFT2008-34, 1-4, 2008 年 10 月.

## 謝辞

本論文をまとめるにあたり、ご指導とご高配を賜りました埼玉大学大学院 理工学研究科 物質科学部門 物理機能系専攻 機能材料工学コースの白井 肇 教授に謹んで感謝の意を表します。

また、ご多忙な中、審査委員をご快諾いただき、ご助言を賜りました埼玉大学大学院 理工学研究科の鎌田憲彦 教授、酒井政道 教授、矢口裕之 教授、上野啓司 准教授に厚くお礼申し上げます。

本研究は、日本電信電話株式会社アクセスサービスシステム研究所において行われたものであり、研究の機会を与えて頂いたオリジン電気株式会社 佐藤 登 専務取締役（元 NTT アクセスサービスシステム研究所 所長）、日本電信電話株式会社 篠原弘道 常務取締役（元 NTT アクセスサービスシステム研究所 所長）、一般社団法人情報通信エンジニアリング協会 作久田浩司 専務理事（元 NTT アクセスサービスシステム研究所 所長）、池野通建株式会社 作山裕樹 代表取締役社長（元 NTT アクセスサービスシステム研究所 所長）、NTT アクセスサービスシステム研究所 久保園浩明 所長、株式会社フジクラ 佐藤公紀 執行役員（元光アクセス網プロジェクト マネージャ）、NTT アドバンステクノロジー株式会社 灰原正 ビジネスユニット長（元アクセスメディアプロジェクト マネージャ）、NTT アドバンステクノロジー株式会社 清水正利 プロジェクト推進部門長（元アクセスメディアプロジェクト マネージャ）、早稲田大学大学院 情報生産システム研究科 坪川 信 教授（元アクセスメディアプロジェクト マネージャ）、NTT アドバンステクノロジー株式会社 富田 茂 副ビジネスユニット長（元アクセスメディアプロジェクト マネージャ）、NTT アドバンステクノロジー株式会社 東 裕司 主幹担当部長（元アクセスメディアプロジェクト マネージャ）、アクセスメディアプロジェクト 白木 和之 マネージャに深く感謝致します。

本研究を進めるにあたり、NTT アクセスサービスシステム研究所 中島和秀 主幹研究員、北見工業大学電気電子工学科 黒河賢二 教授には直接御指導いただくとともに、多大なる御助言と御討論を賜りましたことに深く感謝いたします。また、NTT アクセスサービスシステム研究所 倉嶋利雄 媒体応用グループリーダー、辻川恭三 主任研究員、山本貴司 主任研究員、戸毛邦弘 主任研究員、松井 隆 研究主任、田嶋克介 氏（元 NTT アクセスサービスシステム研究所 主任研究員）、周 健 氏（元 NTT アクセスサービスシステム研究所 社員）、大阪府立大学大学院工学研究科 大橋正治 教授（元アドバンス光メディアグループ

リーダ)、NTT エレクトロニクス株式会社 三川 泉 企画部長(元媒体基礎グループリーダ)、  
NTT 先端技術総合研究所 阪本 匡 担当部長、島根大学大学院総合理工学研究科 増田浩次  
教授には有益な御助言、御討論をいただきました。

最後に、本研究の遂行並びに論文執筆に多大なるご協力をいただきました皆様に深く感謝いたします。