

# まえがき

近年における伝送データの爆発的な増加に対応するため、時分割光多重技術や波長・周波数多重技術、光多値伝送などの開発・実用化が進められている。本書はまず、このような光伝送システムの構成要素である光ファイバや発光デバイス、光変調器、光増幅器などの動作・構成・動向をわかりやすく解説する。つぎに、これら基礎技術の応用例として、急速に導入が進んでいる光・無線伝送技術、すなわち RoF (radio on fiber) 技術について具体例を紹介する。周波数多重光伝送技術は異なる変調方式の RF 信号を多重伝送できることから、無線との親和性が良く、CATV (cable television) などで用いられてきたが、近年、この技術をさらに発展させた RoF 技術が注目され、さまざまな分野で使用されている。

無線および光技術は単独で使用しても高い効果を持っているが、融合させることで、さらに社会に大きな利便性をもたらすものと期待されている。光・無線伝送技術は、通信分野ではまず衛星通信のリモートアンテナへ応用され、ついで携帯電話の電波不感地区、すなわち地下街や建物内、トンネルなど外からの電波が届きにくい場所に導入された。放送分野では FTTH (fiber to the home) などの周波数多重伝送システム、地上デジタル放送のギャップファイラー、送受信点が分離されたテレビ中継局の雷害対策、あるいは送信電波の回り込み抑制対策として効果的に利用されている。さらに、マイクロ波帯・ミリ波帯への応用も進んでおり、これらについても紹介する。最後に、マルチサービス路車間通信システムなど通信システムへの応用や、光 OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) を含めた超高速光ネットワークの最新動向、放送・通信分野における共通技術である光電界センサについても触れる。

なお、本書の執筆にあたっては、NHK 放送技術研究所の小山田公之氏と中

## ii ま え が き

戸川剛氏の文献を利用させていただいたほか、広島市立大学情報科学部の藤坂尚人氏、神尾武司氏を初め、多くの方々からご協力をいただいた。この場を借りて厚く御礼申し上げます。終わりに、コロナ社の関係各位の方々のご尽力に対して謝意を表する次第である。

2013年9月

著者しるす

# 目 次

## 1. 光伝送技術の基礎

1.1 電磁波としての光 .....	1
1.2 光ファイバと同軸ケーブル .....	4
1.3 光伝送における SN 比と CN 比 .....	7
1.4 電波と光の性質 .....	17
引用・参考文献 .....	19

## 2. 光ファイバの原理と特徴

2.1 光の反射と屈折 .....	20
2.2 位相速度と群速度 .....	26
2.3 光ファイバの原理と構造 .....	33
2.4 光ファイバの損失 .....	40
2.5 光ファイバの分散 .....	42
2.6 光ファイバの接続 .....	49
2.6.1 接 続 損 失 .....	49
2.6.2 接 続 方 法 .....	50
2.7 光ファイバの最新動向 .....	55
2.7.1 微細構造光ファイバ .....	55
2.7.2 ファイバヒューズ .....	60
2.7.3 マルチコアファイバ .....	60
引用・参考文献 .....	61

### 3. 光伝送用デバイス

3.1 発光デバイス .....	63
3.1.1 発光デバイスの基礎 .....	63
3.1.2 半導体レーザダイオード .....	69
3.2 受光デバイス .....	76
3.2.1 pn 接合フォトダイオード .....	76
3.2.2 PIN-PD .....	79
3.2.3 APD .....	82
3.3 光回路部品 .....	89
3.3.1 光分岐・結合回路 .....	89
3.3.2 光分波・合波回路 .....	90
3.3.3 光スイッチ .....	93
3.3.4 光相反回路 .....	94
3.4 光増幅器 .....	97
3.4.1 希土類添加光ファイバ増幅器 .....	99
3.4.2 ファイバラマン増幅器 .....	102
3.4.3 半導体光増幅器 .....	104
引用・参考文献 .....	105

### 4. 光変復調方式

4.1 光変調とコヒーレント光伝送の概要 .....	107
4.2 直接光変調と直接検波方式 .....	108
4.2.1 IM-DD 方式の原理と性質 .....	108
4.2.2 IM-DD 方式で用いられる光源モジュール .....	113
4.2.3 IM-DD 方式で用いられる受光回路 .....	115
4.3 外部光変調方式 .....	119
4.3.1 光変調器の種類 .....	119
4.3.2 マツハツエンダ型光変調器 .....	121
4.3.3 電界吸収型変調器 .....	128

4.4 コヒーレント光伝送方式 .....	131
4.4.1 コヒーレント光伝送の動作原理 .....	131
4.4.2 インコヒーレント検波方式 .....	137
4.4.3 コヒーレント検波方式 .....	140
引用・参考文献 .....	142

## 5. 地上デジタル放送ネットワークへの応用

5.1 送受分離テレビ中継局用無給電光伝送システム .....	144
5.1.1 開発の必要性 .....	145
5.1.2 システムの基本構成 .....	146
5.1.3 地上デジタルテレビ中継局用システムの開発 .....	151
5.1.4 地上デジタル放送用システムの構成 .....	154
5.1.5 高感度化・広帯域化に向けての検討 .....	157
5.1.6 入力の広ダイナミックレンジ化と光源の半導体レーザ化 .....	163
5.1.7 実用システムの性能 .....	167
5.2 テレビ中継局用 LN 光変調器の耐雷性評価 .....	169
5.2.1 デバイス構造およびシステム構成 .....	170
5.2.2 変調動作点変動要因の調査 .....	171
5.2.3 解析結果および対策 .....	172
5.2.4 サージ試験による雷耐量の確認 .....	173
5.3 地上デジタルテレビ放送波の長距離光ファイバ伝送 .....	175
5.3.1 検討の経緯 .....	176
5.3.2 設計・検討のためのシステムモデル .....	177
5.3.3 システム設計 .....	179
5.3.4 実際の光ファイバ網を使用したフィールド実験 .....	187
5.4 ファイバラマン増幅器を用いた長距離無中継光伝送 .....	191
5.5 地上デジタルテレビ放送用ギャップファイラー .....	194
5.5.1 ギャップファイラーの位置付け .....	194
5.5.2 ギャップファイラーの構成 .....	195
引用・参考文献 .....	197

## 6. マイクロ波・ミリ波への応用

6.1	3.4 GHz 帯音声番組光伝送システム	199
6.1.1	目標仕様	201
6.1.2	光変調器の設計	201
6.1.3	評価結果	207
6.2	6～7 GHz 帯地上デジタルテレビ放送番組光伝送システム	208
6.2.1	システムの系統と目標仕様	209
6.2.2	6～7 GHz 帯光変調器の設計	210
6.2.3	モジュール化の検討	212
6.2.4	6～7 GHz 帯光変調器の試作と性能評価	213
6.2.5	理論検討および考察	215
6.3	10 GHz 帯光変調器実現に向けての検討と試作	216
6.3.1	電磁界シミュレータによる 10 GHz 帯光変調器実現に向けての検討	217
6.3.2	10 GHz 帯 LN 光変調器の試作結果	226
6.4	放送素材信号伝送システム	227
6.4.1	TSL 用光伝送システム	228
6.4.2	ロードレース中継への適用	230
6.5	ミリ波を利用した放送波の再送信システム	232
6.5.1	開発の背景とシステムの概要	232
6.5.2	自己ヘテロダイン方式によるミリ波再送信システム	234
6.5.3	搬送波を低減した光 SSB 変調器	235
6.5.4	高感度ミリ波受信機	238
6.5.5	ミリ波 RoF システムの総合伝送実験	240
	引用・参考文献	242

## 7. 通信・その他のシステムへの応用

7.1	携帯電話用システム	244
7.1.1	電波の不感地帯対策用システムの概要	245
7.1.2	技術の特徴	246

7.2	マルチサービス路車間通信 .....	247
7.2.1	基本システム .....	247
7.2.2	伝送特性 .....	249
7.3	ミリ波帯への応用 .....	249
7.3.1	ミリ波用高速光変調器 .....	250
7.3.2	ミリ波・テラヘルツ波の発生 .....	250
7.3.3	フォトダイオードの高速化 .....	255
7.4	超高速光ネットワーク .....	257
7.4.1	コヒーレント光通信技術の必要性 .....	257
7.4.2	超高速デジタルコヒーレント光通信システム .....	259
7.4.3	コヒーレント光通信用デバイス .....	264
7.4.4	光 OFDM 変調方式 .....	267
7.5	光電界センサ .....	271
7.5.1	等方性小型光電界センサの装置構成 .....	272
7.5.2	センサヘッドの小型化（高分解能化）および等方性の検討 .....	274
	引用・参考文献 .....	285
<b>索 引</b>	.....	<b>288</b>

# 光伝送技術の基礎

本章では、光伝送技術の基礎として、まず、光と電波の特徴について述べる。つぎにベースバンド方式光伝送方式における SN 比（信号対雑音比）およびサブキャリア光伝送方式における CN 比（搬送波対雑音比）について述べる。

## 1.1 電磁波としての光

光は、電波と同様に電磁波である。電気通信に用いられる電磁波の分類とその応用例を図 1.1 に示す。電波法では、3 kHz から 3 THz（テラヘルツ）までの周波数を電波として定義している<sup>1)†</sup>。これを超える周波数帯が光の領域であり、さらに  $3 \times 10^{16}$  Hz 以上は放射線として分類されるのが一般的である。そのおもな用途としては、ラジオ放送、携帯電話、地上や衛星の放送、無線 LAN などの電波を使ったサービスやリモコンなどの赤外線通信、カメラ、光ファイバ（optical fiber）を使ったインターネットサービスなど光を使ったサービス、あるいはレントゲン撮影用 X 線など放射線を使った医療サービスなどで、これらは日常生活に深く溶け込んでいる。

このように広範囲の周波数が開拓されてきた背景には、多数の同種のサービスの信号を周波数や時間、位相などに多重して、高い周波数の搬送波を変調することにより大容量化を効率的に達成するという考え方があると思われる。そ

† 肩付き数字は、章末の引用・参考文献の番号を表す。



2 1. 光伝送技術の基礎

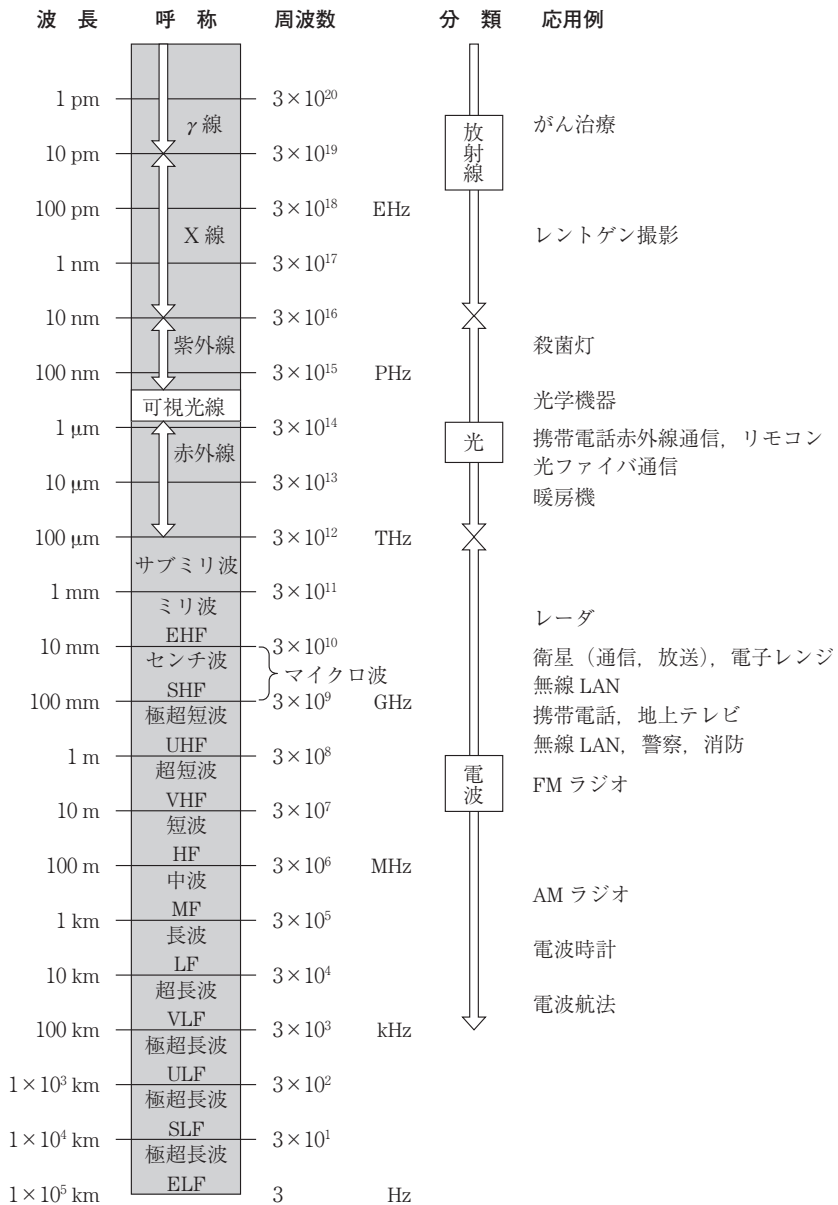


図 1.1 電磁波の分類とその応用例

の搬送波の周波数は、多重する信号のベースバンド帯域幅に応じて適切に選ばれているところが興味深い。例えば、ベースバンド帯域が kHz の音声信号を多波伝送するために、ラジオ放送の搬送波はおおむね MHz 帯で選ばれている。

また、ベースバンド帯域が MHz の映像信号を多チャネル伝送するために、地上や衛星テレビ放送の搬送波はおおむね GHz 帯というように、多重する信号帯域の 100 ~ 1 000 倍程度の周波数が選ばれている。テレビやインターネットサービス用のチャネルを多数伝送することのできる CATV (cable television) に適した搬送波の周波数としては THz 帯が期待されるが、これまで無線通信で使われてきた周波数帯と比べると未成熟で、目下、周波数開拓の研究が精力的に進められている周波数帯である<sup>2)</sup>。

この CATV のサービスがもう一つ先に相当する光の搬送波で実現されていることは素晴らしいことである。その普及の鍵となったのが光ファイバである。このような光周波数を通信に使用する関心が高まったのはレーザーが発明されてからである。その周波数は約 100 THz であるので、現在盛んに用いられている GHz 帯と比べても 1 万倍広い帯域であるため、超大容量伝送を提供できるものとして期待され、空間光伝送の多数の実験が行われた<sup>3)</sup>。当時の空間光伝送はデバイスが未成熟なことに加えて、伝送路には霧や雨、空気の揺らぎなど実用化していくうえで解決すべき課題が多く、限界があった。しかし、空間光伝送は電波免許を取得することなく大容量の伝送システムを作ることができるなどの魅力があり、現在では非圧縮ハイビジョンを 1 km 双方向伝送できる実用システムが開発されている<sup>4)</sup>。大容量化のもう一つのアプローチである光ファイバも当初は大きな伝送損失があったが、現在ではマイクロ波帯 (SHF 帯の通称) で提供されるサービスをきわめて低損失で伝送できるまでに至っており、光ファイバの発明と特性改良には目を見張るものがある。

この低損失性を利用してマイクロ波やミリ波のような高い周波数の信号を光ファイバ内に閉じ込めて遠くに伝送したのちに電波として発射する RoF (radio on fiber) 技術が注目されている。光ファイバの低損失性と電波の機動性のよいとこ取りをした技術に関する多くの応用例を 5 章以降で紹介する。

光ファイバはこのように広帯域な信号を伝送することができるが、光の強度を変化させる方法が一般的であり、電波システムのように波として扱うコヒーレント光伝送 (coherent optical transmission)<sup>5)</sup> は盛んに研究が進められている段階である。現在のところ、信号光を局部発振光により十分な効率でダウンコンバートできる周波数帯は受光器が使える直流近傍に限られているが、将来、例えば THz 帯に中間周波数を設定するような光領域で動作する周波数変換器などができれば、さらに高い設計度を持った大容量伝送システムが実現できるものと期待される。

## 1.2 光ファイバと同軸ケーブル

前節で述べたように、光伝送システムが周波数帯を一つ飛び越して普及、発展できた技術的なポイントとしては、つぎの二つを挙げることができる。

- ① 伝送媒体である光ファイバが広帯域、低損失で、線形ひずみが少なく、同軸ケーブルや導波管などと比べて軽く、曲げられるなど取扱いが容易であったこと。
- ② 連続光を常温で発振する小型の半導体レーザーダイオードが開発されたこと。

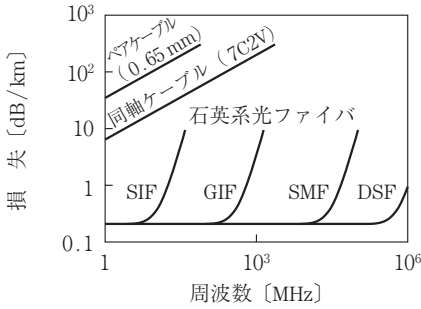
光ファイバ伝送の歴史<sup>6)</sup> を表 1.1 に示す。光ファイバの基本技術は 1970 年にコーニング社から 20 dB/km という当時としてはきわめて低損失の光ファイバが報告<sup>7)</sup> されて以来、10 年間で損失特性が劇的に改善され、1980 年には現在主流の波長 1.55  $\mu\text{m}$  帯で 0.2 dB/km の損失の光ファイバが NTT により開発されている<sup>8)</sup>。この時点で光ファイバの基本技術は十分に実用段階の域に達し、光ファイバを利用したさまざまな光伝送システムの開発が進められた。その開発段階には多数のブレイクスルーがあるが、1970 年代から見ると、ベル研究所での半導体レーザーの室温連続発振<sup>9)</sup>、シングルモード光ファイバ (single mode optical fiber) および光ファイバ増幅器 (optical fiber amplifier)<sup>10)</sup> の貢献度は顕著であると考えられる。このほかにも、大容量化を牽引したものに

表 1.1 光ファイバ伝送の歴史

年	光ファイバ基本技術	光伝送システム	ブレイクスルー
1970	20 dB/km 低損失ファイバ (コーニング社)		半導体レーザの室温連続 発振 (ベル研究所)
1977	1.3 $\mu\text{m}$ で 0.47 dB/km (NTT, 藤倉)		シングルモードファイバ
1980	1.55 $\mu\text{m}$ で 0.2 dB/km (NTT)		
1981		公衆通信ネットワーク導入 (100 Mbit/s)	
1985		日本縦貫光ルート完成 (1.3 $\mu\text{m}$ , SMF)	
1987		DFB レーザの商用システ ムへの導入	
1989			光ファイバ増幅器
1995		EDFA 光中継システム実用 化 (10 Gbit/s)	
1996		数十 Gbit/s 波長多重シス テム	
2001		B フレッツサービス開始	
2002	1.55 $\mu\text{m}$ で 0.148 4 dB/km (住友)	テレビ共同受信システムの 光化開始	
2003		FTTH によるインターネッ トサービス	
2004		GE-PON 3 波 WDM 映像配 信システム RoF 利用地上デジタル 放送送受信分離局	
2010		RoF 利用地上デジタル 放送ギャップファイラ	デジタルコヒーレント

DFB (distributed feedback) レーザダイオード<sup>11)</sup> と光波長多重デバイス<sup>12)</sup> を挙げることができよう。特に、波長多重は同軸ケーブルにはない多重方法であり、狭い波長間隔で多重した DFB レーザの光信号を一括して増幅することができる光ファイバ増幅器の発明<sup>13)</sup> は、光伝送システムの普及に大きく貢献したといえる。また、高速 LAN の一つであるギガビットイーサネットに用いられている面発光レーザ<sup>14)</sup> も光の市場の拡大に大きく貢献したといえる。

光ファイバの特徴としては、低損失、広帯域、無誘導、軽量などのすぐれた特徴がある。その特徴の一つである損失について、ほかの有線伝送メディアで



SIF : step index fiber  
 GIF : graded index fiber  
 SMF : single mode fiber  
 DSF : dispersion shifted fiber

図 1.2 損失の周波数特性

あるペアケーブル、同軸ケーブルと比較して図 1.2 に示す。ペアケーブルや同軸ケーブルの損失は周波数の平方根に比例して増加する。CATV 施設において 450 MHz の伝送帯域に配列したチャンネルを同軸ケーブルで 1 km 伝送しようとする損失が 100 dB 程度となる。広いエリアをカバーするには、この損失を補うための多数の中継増幅器が必要となる。一方、一般的に用いられる石英系光ファイバの損失は、光損失が最も小さい光波長 1.55  $\mu\text{m}$  帯を用いると 1 km で 0.2 dB 程度と桁違いに小さく、しかも損失の周波数特性は 1 THz を超えるほど平坦できわめて広帯域であることがわかる。このように、光ファイバはペアケーブルや同軸ケーブルと異なり、変調帯域に対して損失は変動しない。ただし、伝送できる帯域幅はファイバの材料や構造、使用する光波長により分散<sup>†</sup>の制限を大きく受ける。図の縦軸は損失で、分散による帯域制限とは異なるものであるが、光ファイバの選択によって実際に伝送できる帯域が大きく変化するイメージを理解してほしいためこのように記載した。この分散による制限については 2 章で述べる。

光伝送システムの基本構成を図 1.3 に示す。光送信装置では、複数の電気信号を多重化回路で一つの信号とし、これを発光デバイスに加えて光信号に変換して光ファイバに送出する。光受信装置では光ファイバで伝送された光信号を受光デバイスで電気信号に戻し、多重分離回路に導くことで送信した複数の電気信号が得られる。光ファイバで伝送する間に光信号は減衰するので、満足の品質が得られるように、必要に応じて中継装置を置く。中継装置の構成には光

<sup>†</sup> 分散 光の波長などのわずかな違いなどにより到着時間が異なるため受信信号が劣化する現象で、波長分散やモード分散がよく知られている。

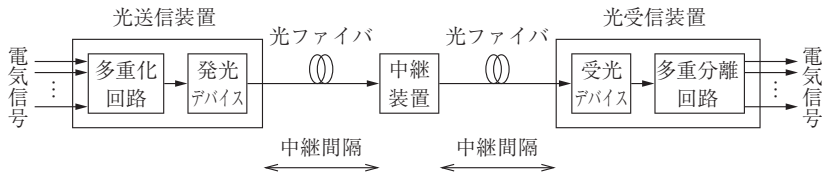


図 1.3 光伝送システムの基本構成

受信器，波形整形回路，光送信器を使っていったん電気信号に戻す方法と，光増幅器を使って，光ファイバの損失を光のまま補償する方法がある。いずれの方法においても光ファイバの損失や分散は中継装置の間隔を左右することになるので重要である。

### 1.3 光伝送における SN 比と CN 比<sup>15)</sup>

デジタル光伝送の性能を表す尺度の一つにビット誤り率 (bit error rate, BER) がある。一般的に用いられる 2 値のデジタル伝送システムでは，受信側でマーク (符号 1) とスペース (符号 0) の判定を行うが，送信側で送った情報を誤って判定してしまう確率が BER である。

いま，送信側でマークのときには強い光を，スペースのときには弱い光を送るという伝送形式を考えることとする。

このように伝送信号の情報を光の強度にそのまま変換して伝送する方式をベースバンド方式という。図 1.4 のように，ベースバンド方式で伝送された信号が識別器に加えられたとしよう。

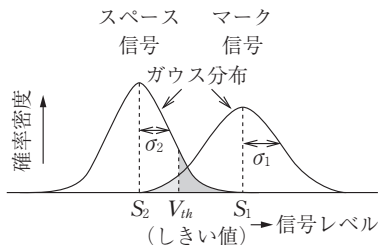


図 1.4 信号レベルの配置

マーク信号に平均電圧  $S_1$ ，雑音の標準偏差  $\sigma_1$ ，スペース信号に平均電圧  $S_2$ ，標準偏差  $\sigma_2$  が対応しており，加えられた信号はしきい値電圧  $V_{th}$  で判定されるとする。マーク信号とスペース信号の生起確率をそれぞれ  $p(1)$ ， $p(0)$

# 索引

<b>【あ】</b>	境界面	20	<b>【し】</b>		
アバランシェフォト	強度変調	108	しきい値電流	68	
ダイオード			自然放出	63	
255	<b>【く】</b>		自然放出光	98	
<b>【い】</b>	空孔	55	実効光変調度	15	
イオン化比	空孔アシスト光ファイバ	55	時定数	164	
イオン化率	ゲースヘンシェンシフト	26	自動温度制御	113	
位相速度	屈折	20	自動電力制御	113	
位相変調	屈折率	20, 36	自動利得制御	229	
インコヒーレント伝送	屈折率分布	45	遮断波長	33	
インピーダンス整合	クラッド	33	受光感度	157	
16	クラッド層	67, 73	シュタルク効果	128	
<b>【え】</b>	グレーデッドインデックス		順バイアス接続	78	
エルビウム添加光ファイバ	型ファイバ	36	消光比	151, 205	
増幅器	グレーデッドインデックス		障壁電位	78	
100	光ファイバ	18	ショット雑音	9, 148	
<b>【か】</b>	群速度	26	シングルモード光ファイバ	4	
開口数			シングルモードファイバ	34, 156	
ガイド層	<b>【こ】</b>		真性半導体	64, 79	
外部反射	コア	33	<b>【す】</b>		
外部光変調方式	高インピーダンス型	116	垂直共振器面発光レーザ	36	
過剰雑音	格子結晶	76	ステップインデックス型		
過剰雑音係数	格子整合	75	ファイバ	36	
活性層	格子定数	75	ストークスシフト	102	
価電子帯	誤差補関数	8	スネルの法則	21	
間接遷移型	コヒーレンシー	133	スーパーコンティニューム光	58	
64	コヒーレンス時間	108	<b>【せ】</b>		
<b>【き】</b>	コヒーレント伝送	133	整合回路	146	
規格化周波数	コヒーレント光伝送	4, 108	赤外吸収	40	
規格化伝搬定数	<b>【さ】</b>		先鋭度	149	
基板屈折率	材料分散	43	全反射	21	
基板誘電率	雑音指数	116	<b>【そ】</b>		
逆高速フーリエ変換	差動位相変調	250	相互変調ひずみ特性	161	
逆バイアス接続	差動4相位相変調	258			
ギャップファイラ	サブキャリア伝送	109			
吸収	三次相互変調ひずみ	229			
吸収損失	散乱損失	41			
41					
狭域通信システム					
247					

相対強度雑音	13	等価 CN 比劣化量	152	光変調度	11, 148
挿入損失	151	透過型	211	ビクセル	74
増倍率	82	同期検波	134	微細構造光ファイバ	55
組成比	66	導波路分散	44	ひずみ量子井戸 LD	76
		トランズインピーダンス型		ビット誤り率	7
			116	非同期検波	134
<b>【た】</b>		<b>【な】</b>		<b>【ふ】</b>	
ダイレクトコンバージョン		内部反射	21	ファイバラマン増幅器	102
	135	雪崩降伏電圧	82	ファブリ・ペロー LD	69
多重量子井戸	129	雪崩増倍	82	ファブリ・ペロー共振器	104
多重量子井戸構造半導体		雪崩増幅フォトダイオード		ファラデー効果	94
レーザ	73		82	フェルミ準位	67
縦モード	70			フェルルール	225
ダブルヘテロ構造	67			フォトダイオード	11
単一周波数ネットワーク	151	<b>【に】</b>		フォトニック結晶ファイバ	
単一周波数ネットワーク局		ニオブ酸リチウム	121		55
	145	二次ひずみの集合体	183	フォトニックバンド	
端面発光レーザ	74	入射面	21	ギャップ型ファイバ	56
<b>【ち】</b>		<b>【ね】</b>		複屈折性	32
遅延検波	134	熱雑音	9	符号間干渉	140
地上デジタルテレビ放送		<b>【は】</b>		不純物添加半導体	64
	144	波数	28	プラスチッククラッド	
チャーピング	108, 176	波長多重	257, 269	ファイバ	39
中間周波数	131, 145	波長分散	44, 156, 264	プラスチックファイバ	39
超高速デジタルコヒー		バックオフ	246	ブラッグ波長	71
レント光通信システム	257	発光ダイオード	64	ブラッグ反射	59
直接検波	108, 133	パルス変調方式	109	ブルースター角	24
直接遷移型	64	反 射	20	フレネルの公式	23
直接光変調方式	107	反射型	211	分散シフト型シングル	
直交振幅変調	258, 261	反射防止膜コート	72	モード光ファイバ	39
<b>【て】</b>		反転分布	64	分散関	33
デジタルコヒーレント		半導体光増幅器	104	分散方程式	31
検波方式	135	半導体レーザダイオード		分散補償光ファイバ	45
ディップ	151		11, 64	分散補償ファイバ	177
電界吸収型	228	半波長電圧	124	分布帰還 LD	71
電界吸収型変調器	128, 250			分布帰還型	131
電界吸収型レーザ		<b>【ひ】</b>		分布帰還型レーザ	
ダイオード	114	光アイソレータ	94	ダイオード	246
電気光学効果	149	光検出器	146	分布ブラッグ反射 LD	71
電磁界シミュレータ	216	光スイッチ	93	分離閉込め構造	73
伝導帯	63	光単側波変調波	113	<b>【へ】</b>	
伝搬定数	27	光導波路	150	平衡型受信器	139
<b>【と】</b>		光ファイバ	1	ベースバンド伝送	109
等価 CN 比	163	光ファイバ増幅器	4	ヘテロ接合	66



ヘテロダイン検波	134	マルチモードファイバ	34		
変調誤差比	168, 185			<b>【よ】</b>	
偏波多重コヒーレント		<b>【む】</b>		横モード	71
光伝送	137	無変調連続波	154, 165, 184	<b>【り】</b>	
偏波保持ファイバ	273			リーチスルー電圧	80
偏波モード分散	264	<b>【め】</b>		量子井戸構造	72
<b>【ほ】</b>		面発光レーザー	74	量子効率	10
ボーアの条件	63	<b>【も】</b>		両側波	113
包絡線検波	134	モード	30	両側波帯搬送波抑圧	250
ホモ接合	66	モード雑音	47	<b>【れ】</b>	
ホモダイン検波	134	モードフィールド径	38	零分散光ファイバ	176
<b>【ま】</b>		モード分散	34, 36	レイリー散乱	40
マイクロ波回線	199	モードホッピング	70	<b>【ろ】</b>	
マッハツェンダ型	150	<b>【ゆ】</b>		路車間通信システム	247
マッハツェンダ型光変調器	114, 121	誘導ブリルアン散乱	181		
		誘導放出	64		

<b>【A】</b>		DCF	45, 177	FRA	102
AGC	154, 229	DD	108	FSK	136
APC	54, 113	DFB	5, 131	FTTH	178, 257
APD	82, 255	DFB-LD	71, 72, 165, 246	FWM	45
ASE	98, 180	DH	67	<b>【G】</b>	
ASK	136	DPMZM	265	GF	194
ATC	113	DPSK	138, 250	GIF	36
<b>【B】</b>		DQPSK	258	<b>【H】</b>	
BER	7	DSB	113, 236	HAF	55
BPF	146, 228	DSB-SC	250	HDTV	228
BPSK	138	DSF	39	HFC	232
<b>【C】</b>		DSRC	247	<b>【I】</b>	
CATV	3	<b>【E】</b>		IF	228
CD	264	EA	228	IFFT	267
CNR	11	EA 型変調器	128, 250	IM	108
CN 比	11, 147	EA 変調方式	119	IMD 特性	161
CO-OFDM	141	EDFA	100, 257	IMT2000	248
CSO	183	EML	114	IP	175
CW	154, 165, 184	EO 変調方式	119	ITS	247
C 帯	45	ETC	247	i 型半導体	79
<b>【D】</b>		<b>【F】</b>		<b>【L】</b>	
DBR-LD	71	FIR	264	LD	11, 64, 250
		FP-LD	69, 156		
		FPU	227		

LD-YAG	165	PBGF	56	SC	58
LD 直接変調器	177	PC	54	SFN	151
LED	64	PCF	39, 55	SFN 局	145
LN	121	PCM	109	SIF	36
LN 結晶基板	150	PD	11	SMF	34, 156
LNA	228	PDC	248	SNR	8
LP <sub>11</sub> モード	35	PFM	109	SN 比	8
L 帯	45	PHS	248	SOA	104
		PIN-PD	79	SPC	54
<b>【M】</b>		pin フォトダイオード	255	SSB	113, 233, 236
MCPA	196	PLL	262	STL	208
MER	168, 185	PMD	264	S 帯	45
MIMO	60	PMF	156, 273	S 波	21, 96
MMF	34	POF	39	<b>【T】</b>	
MOF	55	PPM	109	TE 偏光	21
MQW	129	PSK	136, 258	TE モード	123
MQW-LD	73	PWM	109	TM 偏光	21
MSK	136	P 波	22, 96	TS	175, 228
MZ	150	<b>【Q】</b>		TSL	227
MZ 光変調器	114, 121	Q	149	TTL	208
		QAM	141, 258	<b>【V】</b>	
<b>【N】</b>		QCSE	128	VCSEL	36, 74
NA	34, 50	QPMZM	266	VICS	247
NF	157, 229	QPSK	154	V-ONU	178
NRZ	9, 266	<b>【R】</b>		<b>【W】</b>	
		RF	175	WDM	257, 269
<b>【O】</b>		RIN	13, 147, 228	<b>【X】</b>	
OFDM	152, 175, 215, 227, 267	RoF	3, 199, 227, 244	X-cut LN 光変調器	144
OMI	11, 148	RZ-DBPSK	140		
OOK	136, 260	<b>【S】</b>			
		SAR	272		
<b>【P】</b>		SBS	181		
PAM	109				
PAPR	153				

<b>【ギリシャ文字】</b>	<b>【数字】</b>	19 MHz 帯	145
$\lambda/4$ シフト DFB-LD	72	4 光波混合	45
16QAM	140, 261	64QAM	154, 227

— 著者略歴 —

**前田 幹夫** (まえだ みきお)

1979年 北海道大学工学部電子工学科卒業  
1981年 北海道大学大学院工学研究科  
修士課程修了(電子工学専攻)  
1981年 日本放送協会(NHK)勤務  
1984年 NHK放送技術研究所勤務  
1993年 博士(工学)(北海道大学)  
2012年 工学院大学教授  
現在に至る



**生岩 量久** (はえいわ かずひさ)

1970年 徳島大学工学部電気工学科卒業  
1970年 日本放送協会(NHK)勤務  
1988年 工学博士(東京大学)  
2004年 広島市立大学教授  
2013年 広島市立大学名誉教授



**鳥羽 良和** (とば よしかず)

1988年 東邦大学理学部物理学科卒業  
1988年 東北金属工業株式会社  
(現NECトーキン株式会社)勤務  
2006年 株式会社精工技研勤務  
現在に至る  
2009年 博士(情報工学)(広島市立大学)



# 光・無線伝送技術の基礎と応用

Fundamentals and Their Applications of Radio on Fiber Technologies

© Maeda, Haeiwa, Toba 2013

2013年10月10日 初版第1刷発行

★

検印省略

著者 前田 幹夫  
生岩 量久  
鳥羽 良和  
発行者 株式会社 コロナ社  
代表者 牛来真也  
印刷所 新日本印刷株式会社

112-0011 東京都文京区千石4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替00140-8-14844・電話(03)3941-3131(代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-00854-8 (新井) (製本：愛千製本所)

Printed in Japan



本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられております。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めておりません。

落丁・乱丁本はお取替えいたします