

光通信ネットワーク入門



改訂版

加島宜雄著

株式
会社

オプトロニクス社

まえがき

光ファイバ通信技術や光通信ネットワーク技術は、電話、携帯電話のみならず、インターネットなどのコンピュータ間通信をささえる重要な基本技術である。1970年に実現した石英系光ファイバの低損失化(20dB/km)や半導体レーザーの室温連続発振を契機として現在に至るまで、この技術は急激に実用化が進んだ。高度に実用化が進化した結果の現状技術について、細部にこだわらず、光通信ネットワークの全体を見渡して理解をする事が光通信ネットワークの理解で重要と考えた。すなわち、ちょうど飛行機から見ると都市の景観がよくわかるように、細部にこだわらず光通信ネットワークの全体を見渡せることを第一として本書を執筆した。具体的には、光ファイバ、半導体レーザーという構成要素だけでなく、光伝送技術や光ネットワークも強調し、光通信ネットワークの全体像を大学学部生や、この分野になじみの薄い一般の技術者・研究者の方々に与える事を目的としている。このため、出来るだけ平易に記述し、図や表を多用してわかりやすくしている。本書のレベルは、大学3、4年生の講義や大学院生の講義の導入部分で使用できるものとした。この分野に興味を持たれたら、より進んだ専門書を読まれる事を読者にお薦めする。

著者は、光ファイバ通信の黎明期(1975年)から23年間企業の研究

所で、光通信に関する幅広い分野の研究・開発に従事し、現在大学に移り講義・研究を行っている。黎明期の“よちよち歩き”の技術が、現在力強く世界の通信インフラを支える技術に成長していく過程の中に身を置き、技術や学問は自分たちで作りあげるものだという事を体験出来る幸運にめぐまれた。この技術分野の持つダイナミックな雰囲気はこの本によりお伝え出来れば幸いである。

以下に本書の各章の内容の要約を示す。

第1章 光通信の概要

光通信についての歴史的な側面を説明すると共に、光通信が広く普及している理由、光通信の特徴について説明する。

第2章 通信ネットワークの概要

通信の仕組みや各種通信ネットワークについて説明し、通信ネットワークに関する知識を深めることを目的にする。

第3章 光ファイバ

光ファイバは光ファイバ通信の最重要な構成部品の一つであり、その特性が光ファイバ通信の特徴や使い方、光通信ネットワークを左右する。この光ファイバについての基本的な知識を深めることを目的にする。

第4章 光通信部品

光通信部品のうちの基本的な光部品である半導体レーザーやホトダーオードを説明し、ファイバの接続について説明する。

第5章 光伝送技術

一般的なデジタル伝送技術の説明をした後に、現在実用されている光の強度を変調し、直接検波するIM/DD方式について説明する。また、通常の電気通信で使用されている位

相や周波数を変調するコヒーレント方式についてもふれる。

第6章 光増幅

光を電気に変換し、電気のアンプで増幅する事で光通信システムは構築されてきたが、増幅特性の良好なファイバアンプの実現により光を電気に変換しないで光の状態を増幅する光増幅が実用化され、光通信システムは飛躍的に発展した。光増幅技術について説明する。

第7章 WDM用部品

波長多重 (WDM) を用いた光通信で使用する、または将来使用されると思われる光部品について説明する。

第8章 光ネットワーク

今までの章で説明した通信ネットワークや光通信用部品の理解の上で、現状および現在研究中の光通信ネットワークについて説明する。

最後に、本書は教科書的なスタイルをとっているので、参考文献は最小限にさせていただき、世界中の多数の研究者の研究成果を引用なしに採用させて頂いた事をお断りしておきます。

平成13年3月

著者

Contents

第1章 光通信の概要	1
1.1 光通信の幕開け	1
1.1.1 低損失光ファイバ以前	1
1.1.2 低損失光ファイバの実現	4
1.1.3 光通信システムの開発経緯	6
1.2 光通信の特徴	8
1.2.1 光通信の原理	8
1.2.2 光通信の特徴	9
演習問題	11
第2章 通信ネットワークの概要	12
2.1 通信の仕組み	12
2.1.1 電話による通信と通信の種類	12
2.1.2 交換機の役割と多重	14
2.1.3 データ通信	16
2.2 公衆通信網	18
2.2.1 中継系	18
2.2.2 SDHとATM	20
2.2.3 アクセス系	24

2.3	コンピュータネットワーク	26
2.3.1	LAN	26
2.3.2	階層構造	28
2.3.3	インターネット	31
2.4	ルーティング	32
	演習問題	37
第3章	光ファイバ	38
3.1	光ファイバとその製造法	38
3.2	光ファイバの分類	42
3.3	光ファイバの導波原理	46
3.4	光ファイバの解析	48
3.5	光ファイバの特性	53
3.6	光ケーブル	55
	演習問題	59
第4章	光通信用部品	60
4.1	半導体レーザー	60
4.1.1	光の発光とレーザー	60
4.1.2	レーザー光の特徴とLDの発振	63
4.1.3	半導体レーザーの発振	65
4.2	半導体レーザーの特性	72
4.2.1	変調特性	72
4.2.2	線幅とチャープング	76
4.2.3	半導体レーザーの等価回路	77
4.3	ホトダイオード	77
4.3.1	変換電流	77

4.3.2	雑音	80
4.4	光接続	81
4.4.1	接続の種類	81
4.4.2	接続損失	82
4.4.3	接続での反射	84
4.4.4	接続の例	85
	演習問題	87

第5章 光伝送技術 88

5.1	デジタル伝送技術	88
5.1.1	PCMの概要	88
5.1.2	再生中継の概要	91
5.1.3	デジタル伝送の評価	92
5.2	IM/DD方式	93
5.2.1	方式の概要	93
5.2.2	直接検出	94
5.2.3	レシーバの感度	99
5.2.4	光レシーバの構成	101
5.2.5	理想的なIM/DD方式	102
5.3	コヒーレント方式	104
5.3.1	方式概要	104
5.3.2	レシーバ構成と誤り率	108
5.3.3	コヒーレント光通信方式の特徴	109
5.4	多重化技術	109
5.4.1	多重化技術の概要	110
5.4.2	双方向伝送の方式	112
5.4.3	多重化技術の適用例	118

演習問題	119
第6章 光増幅	120
6.1 光アンプの概要	120
6.2 LDアンプ	123
6.3 ファイバアンプ	124
6.4 雑音	126
6.4.1 光アンプの基本方程式	126
6.4.2 TWAアンプの雑音	128
6.4.3 EDFAの雑音	131
6.4.4 光アンプの雑音	132
演習問題	133
第7章 WDM用部品	134
7.1 多波長発振LDとチューナブルLD	134
7.1.1 多波長発振LD	135
7.1.2 チューナブルLD	135
7.2 バルク形WDMフィルタ	140
7.3 ファイバ形WDMフィルタ	142
7.3.1 方向性結合形WDMフィルタ	145
7.3.2 グレーティング形WDMフィルタ	148
7.4 導波路形WDMフィルタ	151
7.5 チューナブルフィルタ	156
演習問題	158
第8章 光ネットワーク	159
8.1 中継網	159

8.2	アクセス網	161
8.3	LANとCATV網	164
8.4	WDM網	166
	演習問題	172
	参考文献	173
	索引	174
	著者紹介	182

光通信の概要

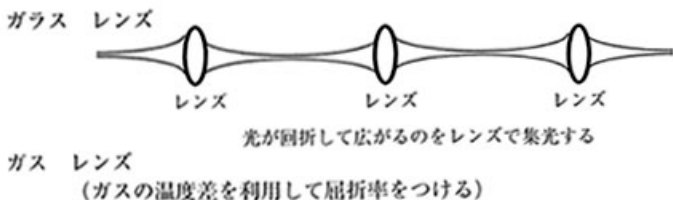
この章で、光通信の歴史的な側面を説明すると共に、光通信の特徴や光通信が広く普及している理由について説明する。この章で用いている用語の一部は後の章で詳しく説明するので細部にこだわらずに読み、出来れば本書を全部を読んだ後に再度読み直すことを推奨する。

1.1 光通信の幕開け

1.1.1 低損失光ファイバ以前

光通信は電圧や電波の代わりに光を用いた通信技術である。光は電磁波の一種で、波長が短い波である事は良く知られている。通常、人間の目に見える電磁波を“光”というが、実際に光ファイバを用いた光通信では通常の“光”でなく、目に見える光よりも少し波長の長い、目に見えない“光”（赤外光）を用いている。光通信は光を使用する通信であるから、歴史的にみて色々な方法が考えられた。図 1.1 に、光通信の種類を示す。1960年代にレンズを並べて光を導波しようとする研究やガスの温度差による屈折率の

- (1) レンズ列や鏡の列 (レンズや鏡を並べて光を伝送) 1960年代



- (2) 薄膜光導波路 1960年代

- (3) 空間光伝送
のろしの時代から現在まで

- (4) 光ファイバ 光ファイバ通信を光通信と呼ぶことが多い。



図 1.1 光通信の種類

変化を利用してレンズ作用させ光を導波しようとする研究が行われた。また、マイクロ波のストリップラインのような導波路を作製し光に適用出来るようにした薄膜光導波路の検討も行われた。さらに、電波のように空間を導波路とする空間光伝送も検討され実験も行われている。

なぜ、光通信を研究したのだろうか？ という疑問がわく(表 1.1)。1936年(昭和11年)の非常に早い時期にわが国で光通信方式の特許申請がなされている。研究者は、マイクロ波よりも、もっと高周波の電磁波である光なら超高速(大容量)の通信が出来るはずだと考えたと思われる。1960年のルビーレーザーの発明でレーザー光というすばらしい光源が登場し、図 1.1 に示した多数の検討がなされた。この1960年代に来るべく情報化社会に備えるため、1965年

表 1.1 光通信への期待

- ・ レーザーの発明
1960年 Maiman の ルビーレーザー → 通信への応用
- ・ もっと高速（大容量）の通信ができないか？
マイクロ波よりも もっと 高周波の光なら出来るはず
→ 光による高速（大容量）通信の期待
- ・ 電磁気を使用した電気通信の困った点を解決できないか？
インパルス性雑音（雷、スパーク・・・） 電磁誘導
大きなアンテナ なんとかならないか？
フェーディング もっと安定した伝送路はないか？
太い・曲がらない導波管 なんとかならないか？
→ 光への期待

・ メタル線（ペア線）

電話の線
細い、価格安い
雑音に弱い、帯域が狭い

・ 同軸ケーブル

TVに使用している線
雑音に強い、帯域は広い
価格高い、太い

・ 導波管

マイクロ波で使用（水道管のような物）
雑音に強い、帯域は広い
価格高い、太い、曲がりにくい

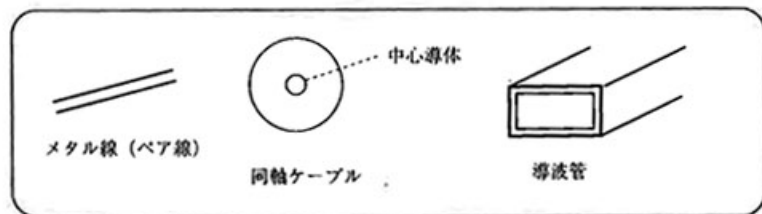
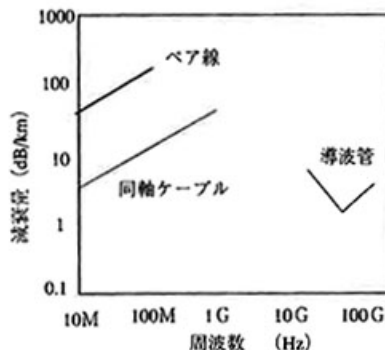


図 1.2 光ファイバケーブル以前の伝送路

の通信衛星（アーリーバード）や、あとで述べるインターネットのはしりとなったARPANETの構築が行われている。光ならば電磁誘導による雑音がないという優れた特徴がある。さらに、電波で使用している空間を導波路とするときの不安定要因（フェーディングなど）をなんとか克服する事が望まれた。これらのことから、光通信の実現への期待が高まった。

低損失光ファイバが実現するまでの代表的な伝送路を図1.2に示すが、いずれも金属を主材料としたもので、図中の減衰量と周波数の関係からペア線や同軸線では高い周波数で減衰量が大きくなる傾向が読みとれる。なお、導波管は高周波で低損失であるが、価格や取り扱いの面で理想的な導波路とは言いがたかった。

1.1.2 低損失光ファイバの実現

1960年代後半の収束形光ファイバの提案や、低損失なガラスファイバの実現の可能性を指摘した論文が出て、実際に1970年に約20dB/kmの低損失光ファイバが作製された。今までのガラスファイバーが1000dB/km程度であったため、画期的な出来事であった。1970年は光通信にとって記念すべき年で、それまで冷却しないと発振しなかった半導体レーザーが室温で連続発振したのが1970年である。これから、光通信が現実の通信として捉えられるようになった。表1.2に示すように1970年から石英ガラスを材料とする光ファイバのさらなる低損失化の研究が行われ、9年後には

表 1.2 1970 年以降の低損失化の歩み

1970	…	~20dB/km (米国)	
1974	…	1.1dB/km (米国)	波長 1.02ミクロン
1976	…	0.47dB/km (日本)	波長 1.2ミクロン
1979	…	0.2dB/km (日本)	波長 1.5ミクロン
1986	…	0.15dB/km (日本)	波長 1.55ミクロン

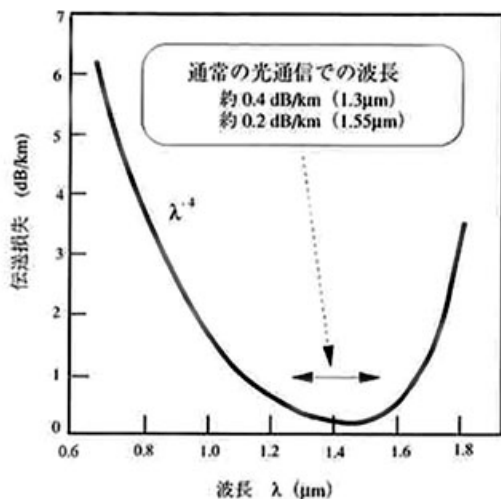


図 1.3 現在の低損失ファイバ

0.2dB/kmの低損失化が達成された。現在の石英系光ファイバの損失波長特性を図 1.3 に示すが、この図のように光ファイバの損失は波長によって大きく変化し、波長 1.55μm (ミクロン) あたりで最低損失となる。