

## まえがき

通信工学という学問は、情報を離れたところへ伝送するために、信号をある場所から離れた場所に伝える通信技術に関する学習をする。伝送は人工衛星のように遠く離れたところで行われることもあるし、コンピュータの中央処理装置（CPU）内のごく近距離でも行われることもある。取り扱う信号は音声や映像のようなアナログ信号の場合もあるが、近年ではアナログ信号もデジタル信号に変換して、いろいろな情報を統合した形で扱う場合が多い。

通信技術はわれわれの社会生活に密接に関連しており、その利用形態や技術革新は目まぐるしく変化しているのであるが、通信システムの基本構成は昔からほとんど変化していない。したがって、これからの通信技術を理解するためにも、通信システムを構成する基礎的事項を習得することが不可欠であろう。そこで、本書は将来の通信技術の理解とさらなる発展の一助となることを願って執筆されている。まず、1章では序論として身のまわりで行われている通信の実例、歴史や通信システムの構成についての概要を述べる。2章では、身のまわりのいろいろな情報通信の形態を具体的な例で学び、情報通信技術の重要性を学ぶ。

連続信号の数学的な取り扱いに関する理解を深めるため、3章では信号解析と呼ばれる領域の学習を行う。関数の内積の定義を学び、周期関数のフーリエ級数展開、孤立波のフーリエ変換について学ぶ。時間領域の信号が、フーリエ解析により周波数領域でどのように表現できるかを学ぶ。アナログ信号について、信号の数学的な取り扱いに関する理解を深める。フーリエ変換の基本的な性質を学んだ後に、デルタ関数を導入し、フーリエ変換の適用範囲を広げる。

4章で有線・無線の通信路や通信路容量について学ぶ。5章では、アナログ変調の振幅変調、周波数変調、位相変調等の各種変調方式について学び、パルス変調へと進む。6章ではデジタル変調方式を学ぶ。さらに7章では、周波数分割多元接続や時分割多元接続など多元接続方式を学び、デジタル信号処理の発展に伴って出現したCDMA方式についても学ぶ。

本書における数学的な表記や取り扱いについて述べておきたい。まず虚数単位は、数学では $i$ を用いるが、本書では、電気・電子工学の教科書等で広く採用される $j$ を用いる。

また、フーリエ変換の変数として、周波数領域においては周波数を用い、角周波数は用いない。これにより、フーリエ変換と逆変換の対称性が良くなる。2次元画像のフーリエ変換のように、工学的にはこのほうが余分な係数がなく収まりが良い。

1章から4章までを竹下が担当し、5章から7章までを吉川が担当した。もちろん用語等については二人で話し合いをし、統一した。

浅学非才のため、執筆内容には思わぬ間違いや認識の誤りが含まれているかもしれない。そのような場合には、読者諸氏からのご指摘、ご叱正を歓迎する。最後に、本書を執筆する機会をいただいたコロナ社の方々に感謝する。

2010年10月

竹下鉄夫  
吉川英機

# 目 次

## 1. 通信工学入門

1.1	さまざまな場面における通信	1
1.2	通信と放送	2
1.2.1	放送と通信の分類	2
1.2.2	通信の評価	3
1.2.3	ベースバンドとブロードバンド	4
1.2.4	放送	6
1.3	デジタル通信とアナログ通信	8
1.4	無線通信と有線通信	11
1.5	伝送量の単位	12
	演習問題	14

## 2. 情報の符号化

2.1	文字情報の符号化	15
2.2	音声情報のデジタル化・符号化	16
2.2.1	アナログ情報の符号化と標本化定理	16
2.2.2	量子化ステップ数と量子化雑音の関係	21
2.2.3	音声データの符号化	22
2.3	画像の符号化モデル	24
2.3.1	画像データのデジタル化	24
2.3.2	2値画像の符号化	25
2.3.3	濃淡画像・動画像の符号化	25
2.3.4	バーコード	27
2.4	情報源符号化の概要	28

2.5 通信路符号化の概要 .....	30
演習問題 .....	32

### 3. 信号解析

3.1 フーリエ級数 .....	33
3.1.1 ベクトルの内積 .....	34
3.1.2 周期関数の内積 .....	35
3.1.3 三角関数によるフーリエ級数展開 .....	36
3.2 パーシバルの定理 .....	42
3.3 複素フーリエ級数 .....	44
3.3.1 複素指数関数の直交性 .....	44
3.3.2 複素指数関数によるフーリエ級数展開 .....	45
3.3.3 複素フーリエ級数についてのパーシバルの定理 .....	48
3.4 フーリエ変換 .....	50
3.4.1 フーリエ変換 .....	52
3.4.2 フーリエ逆変換 .....	54
3.5 インパルス関数 .....	58
3.5.1 インパルス関数のフーリエ変換 .....	59
3.5.2 インパルス関数のフーリエ逆変換 .....	59
3.6 フーリエ変換の性質 .....	60
3.6.1 線形性 .....	60
3.6.2 共役対称性 .....	60
3.6.3 時間のシフト .....	61
3.6.4 周波数のシフト .....	63
3.6.5 周期関数のフーリエ変換 .....	64
3.6.6 微分と積分 .....	65
3.7 畳込み積分 .....	66
3.7.1 伝達関数 .....	66
3.7.2 畳込み積分 .....	69
3.7.3 畳込み積分のフーリエ変換 .....	71

3.7.4 エネルギースペクトル密度と電力スペクトル密度	73
3.8 フィルタ	74
3.8.1 低域通過フィルタと高域通過フィルタ	75
3.8.2 帯域通過フィルタと帯域阻止フィルタ	77
演習問題	78

## 4. 通 信 路

4.1 有 線	80
4.1.1 ベアケーブル	81
4.1.2 同軸ケーブル	83
4.1.3 光ファイバケーブル	84
4.1.4 導 波 管	85
4.1.5 その他の通信用ケーブル	86
4.2 無 線	87
4.2.1 電波の利用例	87
4.2.2 アンテナ	88
4.2.3 衛星通信	90
4.2.4 赤 外 線	92
4.3 整 合 回 路	92
4.4 通信路のモデルと通信路容量	93
演習問題	96

## 5. アナログ変調方式

5.1 変調方式と雑音について	97
5.1.1 変調方式の分類	97
5.1.2 白色雑音の性質	98
5.2 振 幅 変 調	99
5.2.1 振幅変調方式の概要	99
5.2.2 両側波帯変調	102
5.2.3 振幅変調方式の通信品質の評価	104

5.3 周波数変調	107
5.3.1 角度変調方式	107
5.3.2 狭帯域周波数変調	109
5.3.3 広帯域周波数変調	110
5.3.4 周波数変調信号の生成と検波	113
5.3.5 周波数変調方式の通信品質の評価	115
5.3.6 周波数変調方式における信号対雑音比の改善方法	116
5.4 位相変調	117
5.4.1 周波数変調と位相変調の関連	117
5.4.2 位相変調と周波数変調の関係	118
5.5 パルス変調	120
5.5.1 パルス変調	120
5.5.2 パルス振幅変調	120
5.5.3 パルス符号変調	122
演習問題	124

## 6. デジタル変調方式

6.1 雑音の解析	127
6.2 オンオフキーイング	129
6.3 周波数シフトキーイング	132
6.3.1 2値周波数シフトキーイング	132
6.3.2 2値周波数シフトキーイングの通信品質	133
6.3.3 最小シフトキーイング	137
6.4 位相シフトキーイング	138
6.4.1 2値位相シフトキーイング	138
6.4.2 差動位相シフトキーイング	141
6.5 多値変調	144
6.5.1 多値振幅変調	144
6.5.2 多値位相変調	145
6.5.3 直交振幅変調	146

6.5.4 マッピング	149
6.5.5 各種変調方式の評価	150
演習問題	152

## 7. 多元接続方式

7.1 周波数分割多元接続	153
7.1.1 周波数分割多元接続の概要	153
7.1.2 波長分割多重方式	155
7.1.3 セルラー方式	155
7.2 時分割多元接続	157
7.2.1 時分割多元接続の概要	157
7.2.2 チャンネルの固定割り当てとランダム割り当て	158
7.3 符号分割多元接続	162
7.3.1 スペクトル拡散	162
7.3.2 拡散符号	164
7.3.3 符号分割多元接続方式とその特徴	165
7.4 直交周波数分割多重	168
演習問題	172

付 録	173
-----	-----

1. 基本公式	173
2. 標本化定理の証明	174

引用・参考文献	177
---------	-----

演習問題解答	179
--------	-----

索引	184
----	-----

# 1

## 通信工学入門

本章では、通信工学を学問的に学ぶ前に、電気通信の歴史や電気通信のシステムがどのような構成になっているのかなどについて述べる。

### 1.1 さまざまな場面における通信

**通信** (communication) とは、離れたところにいる人になんらかの事柄を伝えたいという点に基本がある。事柄は身のまわりの出来事であったり、自分自身のことであったりするが、とにかく知らせることに大きな意味がこめられている。人と人をつなぐことのみが通信であるかといえば、それ以外にも通信といえるものがある。例えば、コンピュータの中の IC や LSI を結んで信号を伝えることも通信の一種と見ることができるし、見たり、聞いたり、感触を感じたりした感覚が人の神経細胞を伝わっていくことも人体内の通信であろう。また、われわれの住んでいる銀河系の彼方や、他の銀河から到達する光も、星の組成や速度をわれわれに知らせてくれているという意味で、通信とはいわないまでも、観測することで星に関するなんらかの情報を得ることができるものである。ここで、伝送距離に着目して、いろいろな通信の例をまとめたものを表 1.1 に示す。

通信の究極の目標は「いつでも、どこでも、だれとでも」というものであったが、携帯電話の普及は、人と人とを結ぶ通信の最終目標を達成したといっても過言ではない。人を結び付ける通信は、これからもその重要性が減じる



## 2 1. 通信工学入門

表 1.1 いろいろな通信ネットワークと伝送距離の例

相対比	絶対距離	通信の例
$10^{-6}$	0.001 mm (1 $\mu\text{m}$ )	VLSI 内
$10^{-5}$	0.01 mm (10 $\mu\text{m}$ )	LSI 内
$10^{-4}$	0.1 mm (100 $\mu\text{m}$ )	IC 内 人間の脳内のニューロン結合
$10^{-3}$	1 mm	基板内
$10^{-2}$	1 cm	基板内
$10^{-1}$	10 cm	基板間, バーコード, IC カード
1	1 m	コンピュータシステム内
$10^1$	10 m	計算機室内, ETC, LAN
$10^2$	100 m	建物内, LAN
$10^3$	1 km	敷地内 (校内, 構内 LAN), LAN
$10^4$	10 km	都市内, 市内通話, WAN
$10^5$	100 km	国内, 市外通話, WAN
$10^6$	1 000 km	大陸内, 国際通話
$10^7$	10 000 km	地球内, 大陸間
$10^8$	100 000 km	月面まで (380 000 km) BS (放送衛星) まで 36 000 km

ことはないが、これからの通信はコンピュータに代表される機械と人との通信、そして、コンピュータとコンピュータを結ぶ通信とネットワークとが技術の中心として重要な問題となっていくであろう。

## 1.2 通信と放送

### 1.2.1 放送と通信の分類

離れたところに情報を送るという点で通信と放送は同じであるが、送信者と受信者が 1 対 1 である通信と、多数の受信者を抱える放送とでは、その事業の形態が著しく異なる。技術という点で見れば、受信者の数が異なるだけのようにだが、社会での運用の様子には大きな違いがある。

一方、今日広く普及しているインターネット接続の形態を考えてみると、電子メールは電話のような通信と同様に 1 対 1 となっており、ウェブサーバによる情報配信は放送と同様に 1 対多と考えることができるだろう。それ以外に、掲示板、E ラーニングのようなサービスは、複数ユーザの情報が常に

行き交うインタラクティブ（双方向）の形態であり，多対多のサービスを提供していると言ってよいだろう。

このような状況は送信者，受信者の単数，複数という組み合わせの中でいえば，表 1.2 に示すように送受信者の数が複数対複数という通信の形態が表れてきたともいえる。

表 1.2 通信，放送とインターネット

種 類	送信者	受信者
通信	単数	単数
放送	単数	複数
インターネット	複数	複数

しかし，近年ではインターネット回線が飛躍的に高速化したことに伴って，インターネットを通じてラジオやテレビの放送を配信するサービスが始まっていることから，通信と放送の融合という現象が進んでおり，表 1.2 のような分類が当てはまらなくなってきている。

### 1.2.2 通信の評価

通信は，遠く離れたところへ「情報」を伝えるという目的を達成することが最も重要な点であるが，工学の立場からは，その目的を達成するいろいろな手段とその実行結果を評価する必要がある。

そのときの評価の項目は，以下に述べるように「速い」「安い」「うまい」の3項目である。ちょうどレストランの評価とも似ており，語呂も良いので覚えやすい。以下に，通信の評価項目の3大要素を説明してみよう。

#### (1) 速い

情報はできる限り速く伝わるのが望ましい。電気信号や電波を利用した電気通信では，その伝搬速度は電気信号や電波伝搬を媒介する物理的な媒体にも依存しており，この速度を超えて情報を伝送することは不可能である。しかし，適切な伝送方式の選択によって限界速度に近づけ

#### 4 1. 通信工学入門

ることは可能である。伝送方式の進歩によって、単位時間により多くの情報が伝送できるようになった。

##### (2) 安い

工学の主たる目的は、安価にサービスやモノを提供することにあるので、同じ情報（通信）量を伝えるならば、より安いコスト（価格）で伝えることが大事である。

##### (3) うまい

食べ物と違って、通信に「うまい」という評価は当たらない。「うまい」は「品質が良い」という評価項目と置き換えてもよい。通信において品質が良いとは、音声通信であれば、もちろん音質が良いことである。また、雑音や妨害に強い通信方式のほうが優れているといえる。

1番目の項目は、高速伝送が実現できる変調方式や、送信データ量を削減できる情報圧縮技術により実現することができる。2番目の項目については、1番目の項目が実現できれば回線利用時間を短縮できるので、コストダウンを実現することができる。3番目の項目については、雑音の影響が小さくなる変調方式や伝送路における誤りの訂正技術の導入により、高品質の通信を提供できる。

上記のことをまとめると、良い通信ネットワークとは「低コストで情報を高速かつ正確に伝えられること」に集約されるといえる。

#### 1.2.3 ベースバンドとブロードバンド

情報を離れたところに送る際に、情報を加工しないで、そのまま伝送する信号を**基底帯域**信号、あるいは**ベースバンド** (baseband) 信号という。デジタル信号は0と1の2値のみを用いるのであるが、これを電気信号に変換するときは「オン」と「オフ」の2値パルス波形に対応させてそのまま伝送するのがベースバンド伝送である。ベースバンド信号は、伝送距離が長くなるにつれて減衰してひずみも大きくなるので、室内などの短距離の通信方式

として用いられる。図 1.1 (a) は、デジタル情報 010110 をパルス波を用いたベースバンド信号の時間軸波形、およびその周波数スペクトルの例である。ここで、 $t$  は時間、 $f$  は周波数を表している。

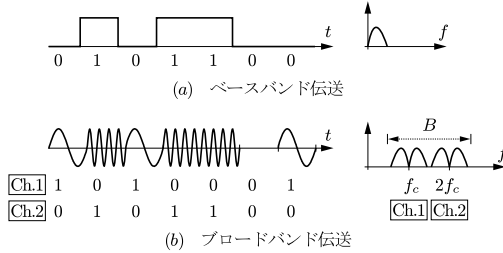


図 1.1 ベースバンド伝送と帯域伝送 (搬送波周波数  $f_c$ ,  $2f_c$ ) の信号波形と周波数帯域の例

これに対して、**搬送波** (carrier) と呼ばれる運び役の電気信号に、運ぶ物としてのベースバンド信号を乗せて伝送する方式を帯域伝送方式と呼び、搬送波にベースバンド信号を含ませる操作を変調と呼ぶ。例えば、携帯電話などの無線通信では、電波のような高周波信号に音声などの低周波信号を含ませて空間中を伝送している。帯域伝送方式は、ベースバンド伝送に比べて占有する**帯域幅** (bandwidth)  $B$  が広がるが、これにより高速で大容量の情報伝送を実現できる。**ブロードバンド** (broadband) は文字どおり訳せば広帯域となるが、これは光ファイバ通信のように高速で多様な通信サービスを提供できる伝送回線を指しており、従来の電話線を用いた狭帯域で低速な回線に対してこのように呼ばれる。

詳しくは後の章で述べるが、搬送波周波数を適切に割り当てることによって、一つの伝送路で同時に複数の送信者、あるいは伝送路 (チャネル) の情報を伝送する多重化が可能となる。図 1.1 (b) は二つのチャネルの情報を 2 搬送波を用いて帯域伝送する場合の時間軸波形と周波数スペクトルの例である。この場合、ベースバンド伝送に比べて 2 倍の速度で伝送できるが、チャネル数が増えると帯域幅  $B$  が増加することがわかる。

## 6 1. 通信工学入門

したがって、多くのチャンネル情報を同時に伝送するためには、広い帯域が必要であり、そのためには、より高い周波数を利用しなければならず、それだけの周波数が利用できる伝送路が必要となる。例えば、10 MHz の帯域の伝送路では 1 MHz の帯域を持つチャンネルは最大で 10 しか割り当てることができないが、1 GHz の伝送路では 1000 のチャンネルの情報伝送を同時に実行することができる。

光ファイバは従来の電線ケーブルと比較して非常に広帯域であり、高い周波数の信号を伝送できる媒体であることから、これを伝送路とすることによって、高速ブロードバンドネットワークが実現できるようになった。

また最近の通信方式では、チャンネルが一つであっても、運び役となる搬送波が一つではなく、複数で分担することにより、一つの搬送波が劣化しても通信品質が維持できるような**マルチキャリア方式**と呼ばれる変調方式が出現し、無線 LAN や地上波デジタル放送で応用されている。

### 1.2.4 放 送

放送の歴史は、20 世紀初頭にラジオ放送で始まった。当初は中波による AM（振幅変調）方式であった。その後、大陸をまたぐほどの広範囲の長距離放送が実現できる、短波によるラジオ放送も始まった。1938 年には、米国で FM（周波数変調）方式のラジオ放送も始まった。日本では、1925 年に東京放送局（現在の NHK、コールサインは JOAK）が中波によるラジオ放送を始めた。テレビ放送も 1931 年に米国で始まっており、日本におけるテレビ放送は 1953 年に始まった。

このようにして見ると、20 世紀は放送の時代といってもよく、それまでの新聞などの紙媒体を凌駕した。ラジオ、テレビなどの媒体により、音声、映像が離れたところにいる人々に伝えられ、それらは人々の生活に中に広まっていった。

図 1.2 に示すように、情報伝送の方向がつねに一定である形態を一方向通

# 索 引

<b>【あ】</b>	狭帯域 FM	109	振 幅	74
アーラン分布		161	振幅スペクトル	55
圧 縮		124	振幅変調	64, 98
アンテナ		88	<b>【す】</b>	
	<b>【く】</b>		スペクトル	55
<b>【い】</b>	グレイ符号	149	スペクトル拡散	162
位 相			<b>【せ】</b>	
位相シフトキーイング		138	正規直交	34
位相スペクトル		55	正規分布	98, 127
位相変調		98	整合回路	92
インタラクティブ		7	赤外線通信	92
インパルス応答		66	絶対デシベル	13
インパルス関数		58	セ ル	156
	<b>【こ】</b>		<b>【た】</b>	
<b>【え】</b>	検 波	98	帯域阻止フィルタ	77
衛星通信		90	帯域通過フィルタ	77
エイリアジング		20	帯域幅	5
エネルギースペクトル密度		74	多元接続	153
エントロピー		28	畳込み積分	66
	<b>【さ】</b>		多値変調	144
<b>【お】</b>	最小シフトキーイング	137	単位関数	70
折り返し雑音		20		
オンオフキーイング		129	<b>【ち】</b>	
	最大長周期系列	164	直接拡散	163
<b>【か】</b>	差動位相シフトキーイング	141	直線位相	62
カーソンの法則		113	直交周波数分割多重	169
ガウス分布		98	直交性	35
角度変調		107	<b>【つ】</b>	
確率密度関数		127	通 信	1
	<b>【し】</b>		通信路	80
<b>【き】</b>	指数分布	160	通信路符号化	30
擬似雑音		164		
基底周波数帯域		97		
基底帯域		4		
	実効面積	88		
	時分割多元接続	157		
	遮断周波数	75		
	周期関数	33		
	周波数シフトキーイング	132		
	周波数スペクトル	55		
	周波数特性	74		
	周波数分割多元接続	153		
	周波数変調	98		
	周波数ホッピング	163		
	情報源符号化	28		
	シングルキャリア方式	169		
	信号対雑音電力比	104		
	伸 長	124		

通信路容量	94	波長分割多重接続	155	ベースバンド	4
【て】		パルス振幅変調	120	変 調	97
低域通過フィルタ	75	パルス幅変調	120	変調指数	109
ディエンファシス	117	パルス符号変調	120	変調度	99
デシベル	12	パルス変調	120	【ほ】	
デルタ関数	58	搬送波	5	ポアソン分布	160
伝達関数	74	搬送波送出両側波帯	102	包絡線検波器	105
電力スペクトル	50	搬送波対雑音電力比	104	【ま】	
電力スペクトル密度	74	搬送波抑圧両側波帯変調	102	マッピング	149
【と】		【ひ】		マルチキャリア方式	6, 169
同期検波	107	光ファイバ	84	【り】	
同軸ケーブル	83	ビット誤り率	126	量子化	17, 123
導波管	85	標本化	122	量子化雑音	18, 123
【な】		標本化定理	19	両側波帯変調	102
伸上-ライス分布	128	【ふ】		【れ】	
【の】		フィルタ	74	レイリー分布	128
ノッチフィルタ	77	フーリエ逆変換	54	~~~~~	
【は】		フーリエ級数	33	【英字】	
バーシバルの定理		フーリエ変換	50	M 系列	164
フーリエ級数展開の —	42	フェージング	168	【数字】	
フーリエ変換の —	74	復 調	98	2 元対称通信路	94
複素フーリエ級数展開の —	48	符号化	15		
バーシバルの等式	42	符号分割多元接続	165		
白色雑音	98, 127	プレエンファシス	117		
		ブロードバンド	5		
		【へ】			
		ベアケーブル	81		

### 著者略歴

竹下 鉄夫 (たけした てつお)

19 0 年 豊田工業高等専門学校電気工学科卒業  
1981 年 豊田工業高等専門学校講師  
198 年 豊田工業高等専門学校助教授  
199 年 豊田工業高等専門学校教授  
現在に至る  
199 年 博士 (工学) (名古屋大学)

吉川 英繼 (よしかわ ひでき)

1989 年 大分工業高等専門学校電気工学科卒業  
1991 年 電気通信大学電気通信学部通信工学科卒業  
199 年 電気通信大学大学院博士前期課程修了  
199 年 鈴鹿工業高等専門学校助手  
2000 年 博士 (工学) (大阪市立大学)  
200 年 鈴鹿工業高等専門学校講師  
200 年 東北学院大学准教授  
現在に至る

### 通 信 工 学

o u o ee ○ ke e uo ek o k 2010

2010 年 12 月 20 日 初版第 1 刷発行

検印省略

著 者 竹 下 鉄 夫  
吉 川 英 繼  
発 行 者 株式会社 コロナ社  
代 表 者 牛 采 真 也  
印 刷 所 三美印刷株式会社

112 0011 東京都文京区千石 4 4 10

発行所 株式会社 コロナ社

ok o

振替 00140 8 14844 ・ 電話 (0 ) 941 1 1 (代)

ホームページ <http://www.coronashaco.jp>

9 8 4 9 0120  
e

(大井) (製本: 愛千製本所)



無断複写・転載を禁ずる

落丁・乱丁本はお取替いたします