

# 1

第1章

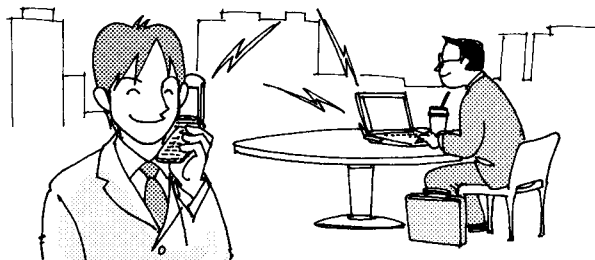
## 身の回りのデジタル無線通信，そのわけ

❖  
私たちの生活の中に  
デジタル無線通信を利用したツールが増えてきました。  
なぜ，デジタル無線通信が必要とされているのでしょうか？  
通信をデジタル化するメリットを  
電波の性質や社会のニーズと合わせて考えてみます。  
❖

### 1-1 身の回りで使っている無線通信システムのなかに

図1-1を見るまでもなく，現代は無線通信がユビキタス(Ubiquitous)の具現として，一般の人々に多数利用されています。言葉の何たるかを定義する前に，技術的なことは何もわからないが流行や便利なものに敏感な人々，とくに若い世代がまったくユビキタス・ハイテクというものを意識せずとも，日常の一般的なツールの一つとして，すでにそれらの機器を使いこなしています。

完成度の低い，どこか弱点を持つ技術は，その限界をユーザに簡単に見破られて



**見本**

【図1-1】現代の無線通信は「ユビキタス(Ubiquitous)」の具現

しまうものですが、現在使われているこれらの機器は、ハイテクをハイテクと感じさせない、超ハイテク技術のなせる技ではないかと感じます。

デジタル変復調(変調と復調を略してこう呼ぶ)技術は、このハイテク・システムの中でデータ伝送を実現するために、その主要な部分に用いられており、現代社会において開花し結実した技術の主役を演じていることにまちがいはありません。

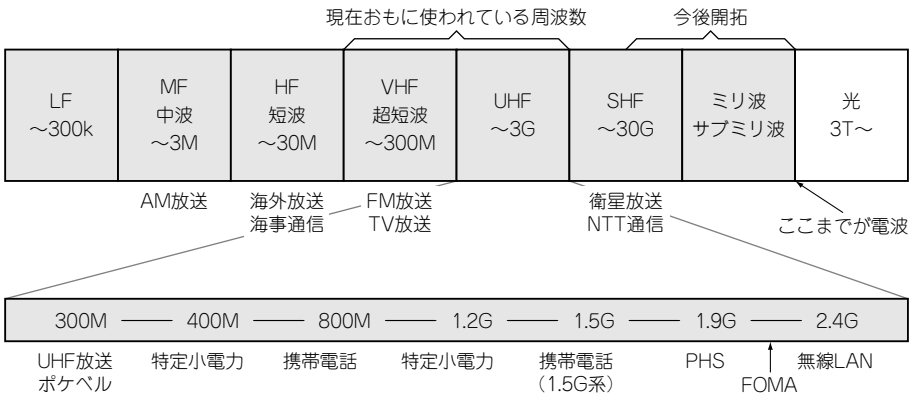
本書でこれから説明していくデジタル変復調技術は、上記に示した例だけではなく、現在の無線通信機器にはほとんどと言ってよいほど高い割合で用いられている技術です。そこで、この章では本題の前座として、なぜデジタル無線通信システムが用いられているかを簡単に説明していきましょう。

## 1-2 有限な資源「電波」

### ● 電波資源の定義

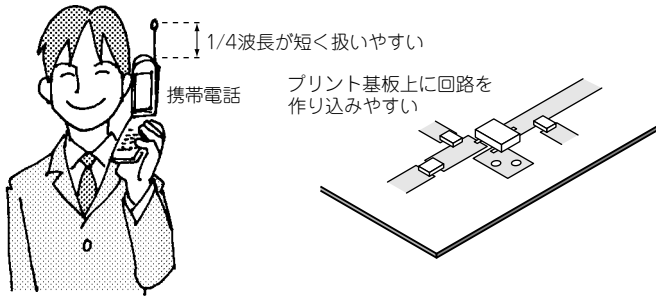
電波法では、電波は3000GHz (= 3THz = 3,000,000MHz)までの周波数として規定されています。この電波法は電波という限られた周波数資源を、公平かつ能率的に利用しようと定められた法律です。その電波は図1-2に示すように、大体VHF(Very High Frequency)帯からUHF(Ultra High Frequency)帯が主に用いられています。

このうち10GHzを超える周波数は、いまだに開拓されていない周波数ですが、実際問題として高周波回路の作り込みがかなり難しいことや、長距離の通信が確



[図1-2] 電波資源の定義と利用状況(横軸はlogスケール) 単位は[Hz]





[図 1-3] VHF, UHF帯が多用される理由

保できないことから、ほとんど使用されていないのが実情です。3000GHzから10GHzを引くと、なんと2990GHzもあります。

つまり実際に使われている周波数は、電波として規定されている周波数のうち0.3%程度であり、この中に多数の局が、まさにひしめき合って限られた資源の電波を使っています。

さて、電波の中でも、大体VHF(30MHz～300MHz)からUHF(300MHz～3GHz)がおもに使われていると説明しました。この周波数帯は、電波の波長が10m～10cmと短く、アンテナとして電波を放射する効率が高くなる1/4波長としても2.5m～2.5cmとなり、人間がアンテナ付き無線機(より一般的には携帯電話)として使いやすい周波数帯であると言えます。

同様に、その電子回路は小さいチップ型の部品で充分な性能が得られることや、一般的なプリント基板上に回路を作り込むことが容易なので、使いやすい周波数帯であると言えるでしょう(とは言え、実際の高周波回路の作り込みは大変である)。

当然、使いやすい華の周波数帯は、より多くの無線局がひしめき合って利用することになります。

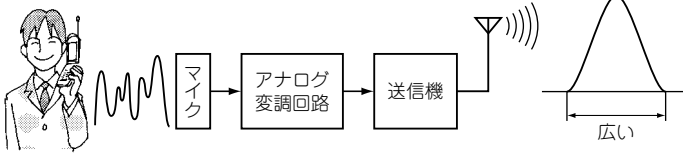
### ● ひしめき合う周波数資源をより有効に活用する

以上の理由もあり、VHFからUHFの周波数は非常に混み合っています。逆に携帯電話などのシステムを考えれば、できるだけ多くのユーザを収容、つまり同時に通信できる環境を提供することが要求されることは誰でも想像でき、考えられることです。この相反する問題を解決するには、決められた周波数帯域の中で、できるだけ有効に無線通信のできる変復調方式が望まれるということです。

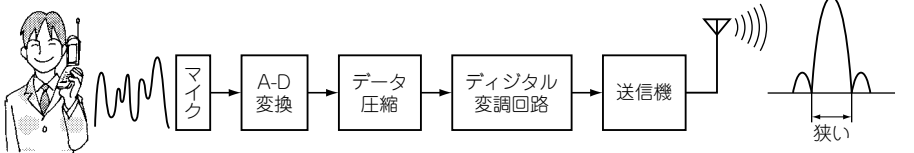
**見本**

ナログ伝送とデジタル伝送を比べると、デジタル伝送のほうが少ない無線

### アナログ伝送



### デジタル伝送



【図1-4】 アナログ伝送とデジタル伝送で同じ情報量を伝送する

周波数帯域で通信することができます(図1-4)。これが、従来のアナログ伝送からデジタル伝送にシフトしていく理由の一つになっています。

## 1-3

## なぜデジタルで伝送するのか

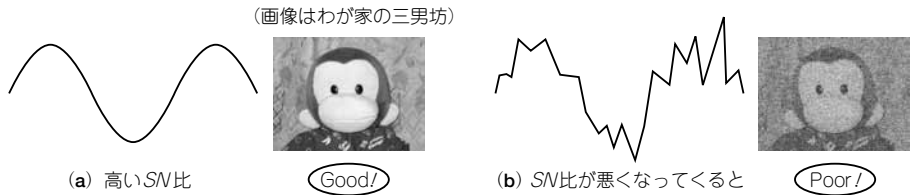
従来の無線伝送は、アナログ伝送が主体でした。例えばAM放送やFM放送、さらにテレビなどはアナログ伝送です。そのテレビさえも地上波デジタル・テレビに移行しようとしています。他の従来型方式も順次デジタル伝送に移行していくでしょう。

なぜ、このように伝送方式のデジタル化が進んでいくのでしょうか。これには、いくつかの理由があります。

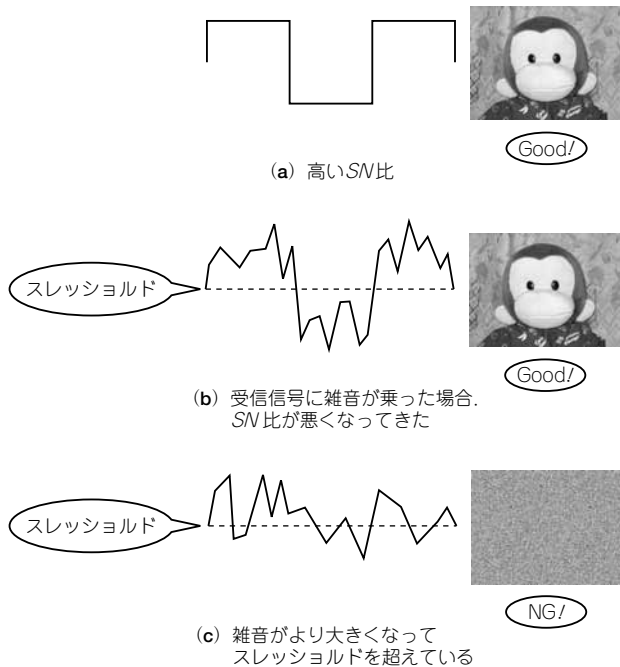
### ● SN比の関係

テレビの例で考えてみましょう。従来のアナログ伝送方式だと、受信する側において、図1-5(a)に示すように高いSN(Signal to Noise)比で受信した場合は高い品質、この例では良質な画質が得られますが、同図(b)のようにSN比が悪くなってくる(雑音が増えてくると、徐々に画質が悪くなってきます。これは受信した信号の波形自体がそのまま画像となっているため、信号に乗った雑音画像信号の

見本



[図 1-5] 従来のアナログ伝送方式



[図 1-6] デジタル伝送方式

一方、デジタル伝送方式では、図 1-6(a)に示すようにデータは1/0のデジタル・ビット情報として送られます。高いSN比の場合はアナログ伝送方式と同様、ビットは正しく受信側に送られます。そのため、当然画質の低下はありません。

では、SN比が悪くなった場合はどうでしょうか。図 1-6(b)に受信信号に雑音

乗った例を示します。この雑音を上記のアナログ伝送方式の場合で考えてみると、

これだけ信号に雑音に乗ったら画像はかなり雑音によって乱されてしまいます。しかし、デジタル伝送方式では、受信した信号が1であるか0であるかの、いわゆる一般社会でも言われているような**デジタル的な決定**をします。いくら受信信号が雑音によって乱されていても、ある基準値(これをスレッシュホールド；閾値(しきい値)と呼ぶ)に対してどっちであるかを決めるだけです。そのため、いくら雑音に乗った信号であっても、あるレベルの雑音の量までなら、きちんと1なら1、0なら0という正しい値が出力されるわけです。

アナログ伝送方式では、すでに画面が雑音っぽくてかなり見えづらくなっているレベルでも、デジタル値を元にして画像を構成した画面は画質の劣化がなく、雑音のない場合と同じようにとても鮮明なものが得られます。

それでは、さらに雑音が増えた場合を考えてみましょう。図1-6(c)を見てください。この雑音の量は、先の(b)の例と比較するとかなり大きい量です。ここでは受信信号に乗る雑音により、基準値であるスレッシュホールド・レベルを超えています。この場合は、送信側が1を送信したとしても、正しく1であると決定されず、0が出力されてしまいます。雑音がこのレベルになるともう受信はできなくなります。

とはいえ、本書では説明しませんが、ビット・エラー訂正技術がここに応用されます。現在のデジタル変復調は、この訂正技術とは切っても切れない関係です。

もし、上記のように1を0として出力してしまう場合でも、ビット・エラー訂正技術によって誤りを訂正することで、正しいデータを伝送させることができるわけです。

この技術を用いることで、図1-6(c)のような、さらに雑音の多い環境下であっても、エラーのない、より信頼性の高い通信が可能になります。

## ● 伝送に必要な帯域幅は伝送速度に比例する

ここでまず、伝送に必要な帯域幅について説明します。

同じアナウンサーが、たくさんの原稿と、少ない原稿を同じ時間を使ってしゃべるには、たくさんの原稿のときには早口でしゃべる必要があります。また、高い音まで緻密に再生できるオーディオ機器は、高い周波数帯域まで対応しているのが普通です。

このこととまったく同じで、より多いデータを一定時間に伝えようとすると、**伝送速度は高速**になり、伝送速度に比例したより高い周波数が必要になり、その

見本

結果として、比例したより広い帯域が必要になります。このことを元にして以下のデータ量と帯域幅についてもう少し詳しく見ていきましょう。

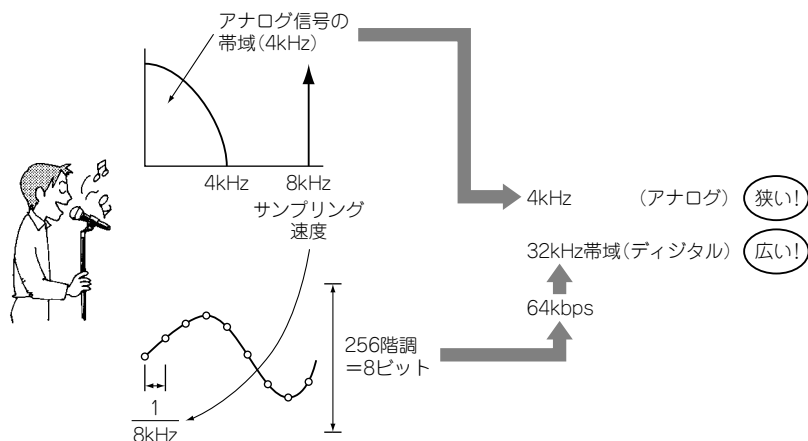
## ● データ圧縮技術の進歩

音声や画像のデータを単純にA-D(アナログ→デジタル)変換して伝送する場合、非常に大量のデータ量となるので、高速の伝送速度が必要になります。この様子を図1-7に示します。

例えば、4kHz帯域の音声信号(電話レベルの音質)を、8kHzのサンプリング速度で8ビット分解能でサンプリングしたとします。このとき、1秒間に必要なデータ量は、

$$8\text{kHz}(\text{サンプリング速度}) \times 8\text{ビット}(\text{分解能}) = 64\text{kbps}^{*1}(\text{bpsはビット} \cdot \text{パー} \cdot \text{セコンド, 1秒あたりに伝送するビット数. ビット} \cdot \text{レート})$$

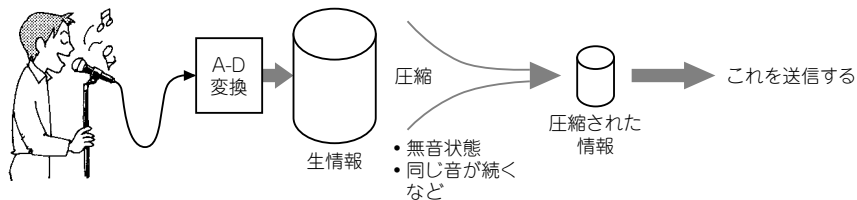
となり、最小の場合でも、アナログの4kHzの信号を伝送するのに、デジタルで32kHz(64kbpsのビット速度の半分)の帯域が必要な計算になります。ここでは、有限の無線周波数帯域幅(例えば全体で32kHz帯域)しか提供できない無線システ



[図1-7] アナログ伝送と単純にデジタル化して伝送した場合の比較

\*1 この考えがISDNの64kbpsの基本速度算出の根本になっている。





〔図1-8〕音声や画像の情報を圧縮する

ムからすれば、「1システムあたり4kHz：32kHz = 1：8の帯域幅なので、アナログのほうが8倍多く同時通信ができる。アナログのほうが良いのではないか？」と思うのも当然といえるでしょう。

しかし、もっと低速で伝送できるように、デジタル信号処理技術を使ってデータの**圧縮**が行われます。これは現在、高機能かつ高速度のデジタル素子(デジタル・シグナル・プロセッサなど)が低コストで入手や作製が可能になったからなせる技です。

例えば音声では、無音区間や同じような音が継続する部分、映像では、同じ色や画像が継続する部分が、情報を圧縮できる部分です。それらを有効に圧縮することで、多い情報量をわからない、気がつかない、問題ない程度に少なくして、全体のデータ量を少なくすることができます。これを図1-8に示しています。

これは例えば、CDのシングル曲データをMP3に変換すると、オリジナルのWAVファイルの約1/10程度になるのは、最近の身近な良い例といえるでしょう。データ量が少なければ、より低い通信速度となり、より狭い帯域幅での伝送が可能になります。

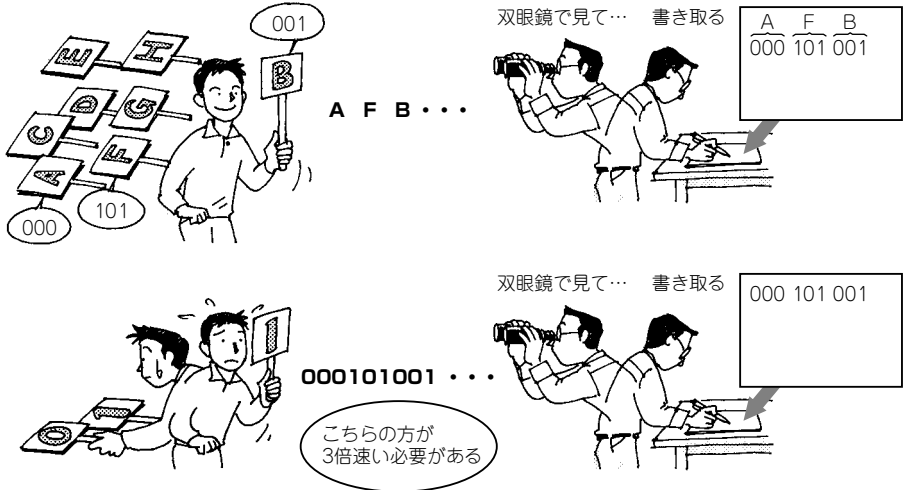
一方、データやファイルを伝送する場合には、未圧縮のファイルは圧縮ができますが、すでに圧縮されている場合は、ほぼファイル・サイズぶんの伝送をしなくてはなりません。

### ● デジタル変復調では一度に多数のビット情報を伝送できる

デジタル変復調のメリットとして、一度に複数のビット情報を送れるという点があります。これは第3章で詳しく説明しています。詳細はそちらを見ていただくとして、ここでは概念を、たとえ話として説明します。図1-9を見てください。

**見本**





[図 1-9] 一度に多数のビット情報を伝送する概念の説明

[表 1-1] デジタルで伝送される理由をまとめる

• SN比の低いところでも安定した通信が可能
• データ圧縮技術によりデジタル化しても必要なデータ量を少なくできる
• 一度に多数のビット情報を伝送できる
• この2, 3番目により, 使用帯域幅をアナログ方式と比較して, 同じか, より狭くできる

例えば, A~Hという文字を表示するサインボードがあったとします。A~Hは8個の異なる種類であり,  $8 = 3$ ビットぶんなので, 1文字で3ビットの情報を一度に伝送できることになります。これと1と0を(1ビットずつ)表示させるサインボードを比較すると,  $1/3$ の伝送速度でよいことになります。デジタル変復調でもこれとまったく同じことができるのです。

この技術を用いることで, より低い伝送速度と狭い帯域でデータを伝送することが可能になるわけです。

いままで説明した技術を用いることで, デジタル伝送でもアナログ伝送と同じか, より狭い帯域で同程度の量の情報伝送が可能になるわけです。ここで表 1-1

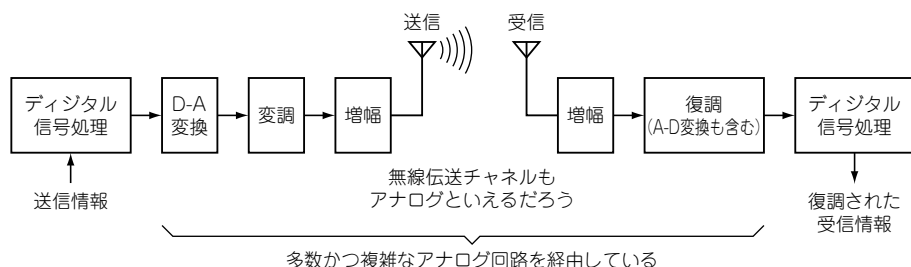
にまとめてみましょう。

**見本**

最先端のデジタル通信，デジタル変復調技術も，実はアナログ回路があってこそ成り立っています。デジタルといっても，実際に伝送される際の波形は，まるっきりアナログ波形です。図1-10のようにデジタル信号処理の後のD-A変換，変調，増幅，送信，そして受信，増幅，復調(A-D変換も含む)と多数かつ複雑なアナログ回路を経由して伝送するわけですから，まともにアナログ回路が動かなければ，いかに素晴らしい方式であっても砂上の楼閣<sup>ろうかく</sup>になってしまうことがわかるでしょう。

つまり，アナログ技術は廃れることはなく，高性能なデジタル処理を実現するためには，なくてはならない綿々と生きる技術，実は最先端の技術の一部であると言えます。この要求があることは，現在の技術者求人の様子からもわかると思います。

読者の皆さんの中には，アナログは古臭いという概念をもっている人がいるかもしれませんが，見直してくれましたでしょうか？



[図1-10] アナログ回路を通して伝送される。アナログあつてのデジタル伝送

見本

## 第2章

## まずは基本の基本「アナログ変復調」

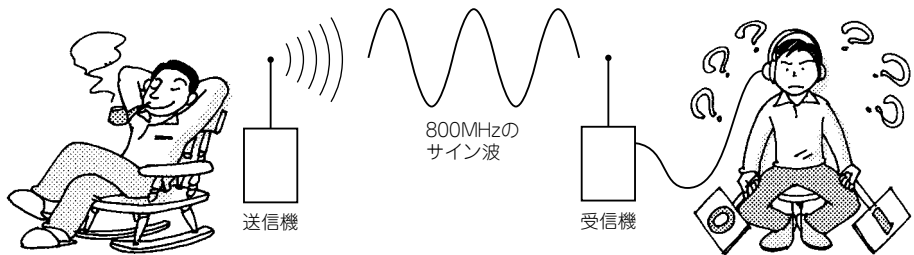
❖  
伝えたい信号を電波に乗せる方法と、  
電波に含まれる信号を取り出す方法を  
キャリアの振幅、キャリアの周波数、キャリアの位相の  
それぞれを使った場合の動作の原理を確かめます。  
❖

## 2-1

## 変調/復調するとは

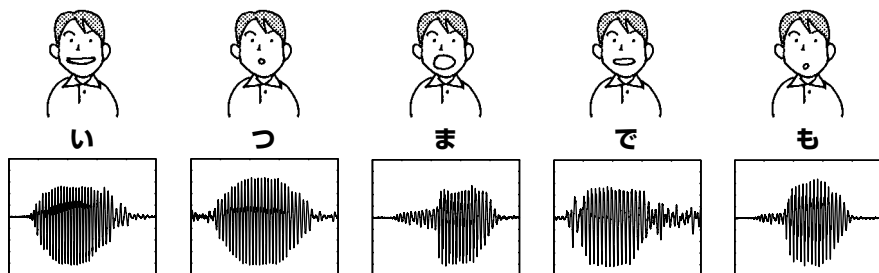
離れた2点間の通信を無線で行うために、送信したいデータをそのまま無線信号として伝送することはできません。例えばEIA232Fのケーブルに流れる1/0のデータがそのまま遠くに伝わるわけがないことは明らかでしょう。

そこで無線周波数を用い、無線通信を行います。しかし、ただ無線周波数(例えば)800MHzのサイン波の信号を相手方に送るだけでは、目的とした、送信したいデータを伝送することができません(図2-1)。そのためには、データをこの無線周



【図2-1】無線周波数のサイン波を伝送するだけではデータは送れない

見本



〔図2-2〕人の声，音響振動に違いを与えて伝える，受ける．これが変調，復調

波数のサイン波に乗せる必要があります。

このことを人の声で考えてみましょう。図2-2にこれを示します。「あー」と同じ強さで同じ音の，単純な音響振動をずっと続けて出しているでも，相手は何をいつているのか，わかりません。相手に自分の言いたいことを伝えるには，「いつまでもわすれない」と，強さを変えたり，違う音を使ったり，つまり発音として，単純な音響振動に違いを与えて，言いたいことを伝えています。

変調は，まったくこれと同じことです。無線周波数のサイン波に対して，送信側で違いを与えて，離れた受信側に対して自分から送りたい内容を伝えます。

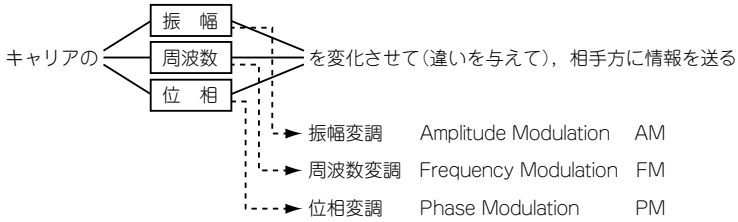
もう一度，人の声に戻ってみましょう。違いを与えられた「いつまでもわすれない」という音響振動を耳で受け，音響振動の「い・つ・ま・で・も」を一つずつ，異なる発音ごとの違いを見つけて，その違いの意味を取り出すことにより，相手の言いたいことを理解します。

復調も，まったくこれと同じことです。違いを与えられた無線周波数の信号に対して，受信側がそれぞれの違いを見つけて，送信側の送った内容を理解します。

このように純粋なサイン波(スプインの信号とも言える)に違いを与え，意味付けすることが変調であるといえます。このスプイン信号のことを専門用語として搬送波とか，その英語表現としてキャリア(carrier)と呼びます。本書では，これ以降は統一してキャリアと呼びます。

最初に，ここでは導入として，従来方式であるアナログ変調について説明していきます。アナログ変調とデジタル変調は異なり，新旧のものとも考えることもできますが，本質からすると，それぞれ単にアナログ情報をキャリアに乗せるか，**デジタル**情報をキャリアに乗せるかの違いだけであり，変調の原理として

**見本**



[図2-3] キャリアに対して変調をする方法

は同じであるといえます。キャリアに対してアナログ変調するには、図2-3に示す3種類があります。

昔から用いられてきたアナログ変調は、このうち、振幅変調(これ以降AMと呼ぶ)と周波数変調(これ以降FMと呼ぶ)が主流で、位相変調(これ以降PMと呼ぶ)はあまり用いられません。しかし、デジタル変復調においてPMは主流の変調方式であり、とても重要な概念です。

これ以降では、AM、FM、PMそれぞれの変調と復調のしかたについて説明していきます。なお、PMについては場合によると、いま一つ理解できないかもしれませんが、以降のデジタル変復調の章でよりわかりやすく、詳しく説明しますので、あまり心配しないでください。

## 2-2 振幅を変えるAM(Amplitude Modulation), 振幅変調

AMは、中波のAM放送が一例、そしてTVの映像信号もAMの仲間です。

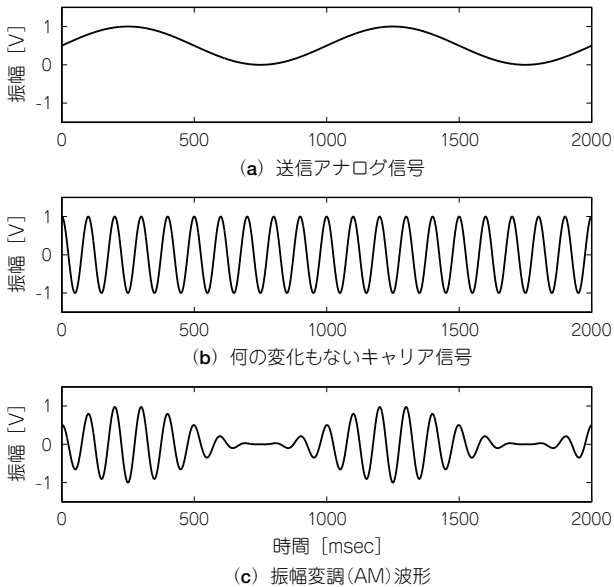
### ● AMはどうやって変調するか

図2-4はAMの変調をする過程を示しています。図2-4(a)のアナログ信号で、(b)のなんの変化もないスッピンなキャリア信号の振幅を変化させ、(c)の変調波形のように、キャリアの振幅を変化させることで振幅変調(AM)します。この変調された信号を無線で受信側に伝送(送信)します。

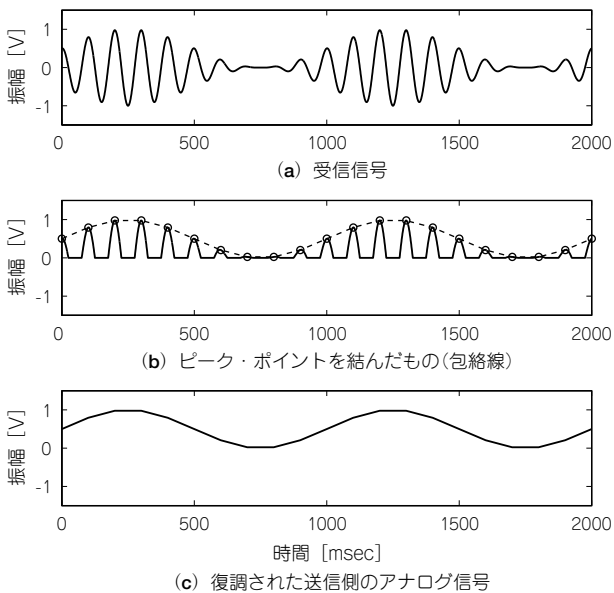
### ● AMはどうやって復調するか

変調され、無線伝送された信号を受信側で受信し、その内容を取り出すことを復調と呼びます。図2-5に示すように、受信信号(a)の上半分を切り出し、そのピ

見本



【図2-4】 AMの変調をする過程



【図2-5】 AM信号を復調する方法

見本

ーク・ポイントを(b)のように結んでいくようにすれば(包絡線), 図2-4(a)の送信側のアナログ信号, 図2-5(c)を取り出すことができます。

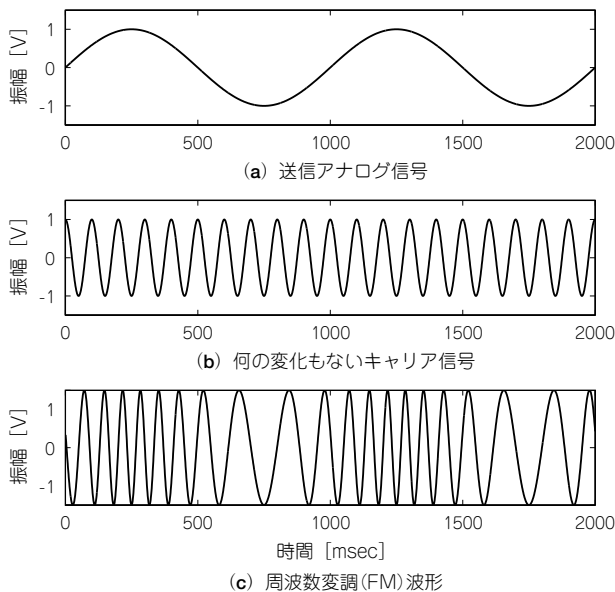
### 2-3 周波数を変えるFM(Frequency Modulation), 周波数変調

FMは, FM放送, TVの音声信号などが例として挙げられます。

#### ● FMはどうやって変調するか

図2-6は, FMの変調する過程を示しています。図2-6(a)のアナログ信号で, (b)のなんの変化もないスツピンなキャリア信号の周波数を変化させ, (c)の変調波形のように, キャリアの周波数を変化させることで周波数変調(FM)します。この変調された信号を無線で受信側に伝送(送信)します。

変調には, いくつかの方法があります。もっとも単純なのは, 周波数発振器の発振周波数を振らせる, つまり外部から強制的に周波数を変える方法です。



見本

【図2-6】 FMの変調をする過程