

第1章

電気と電波の基礎

本題のスペクトラム・アナライザの話に入る前に、ごく初歩的な交流や電波のお話をしてみましょう。スペクトラム・アナライザで測定しようとする信号の基礎編です。スペクトラム・アナライザをこれから使ってみようという貴方にとっては、釈迦に説法かもしれません。

直流と交流

電流の種類には直流と交流があります。

●直流

直流は図1.1に示すように、時間の経過にかかわらず、常に+と-が一定の電流です。

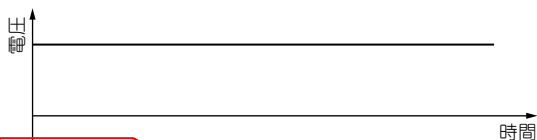
乾電池や車のバッテリー、今話題の燃料電池などの化学的に作り出す電気は直流です。電熱器やモーターなどといったもの以外の電子機器は、基本的に直流で動作するものがほとんどです。

●交流

交流は、図1.2のような時間の経過に合わせて、周期的に電流の方向が変わる電流です。

交流の電圧は、0から正の方向に増加していき、最大点に達すると、再び0に向かって減少し、その後-（マイナス）の最小点まで減少すると、また0に向かって増加を始めます。

交流は、発電が簡単で変圧器（トランス）により容易に電圧を変えることができ、簡単な回路で交流から直流に変換できるため、電灯線や動力線として広く供給されています。一般家庭のコンセントには正弦波と呼ばれる、電圧100Vの交流が電力会社より供給されています。



見本

図1.1 直流の電圧と時間の関係

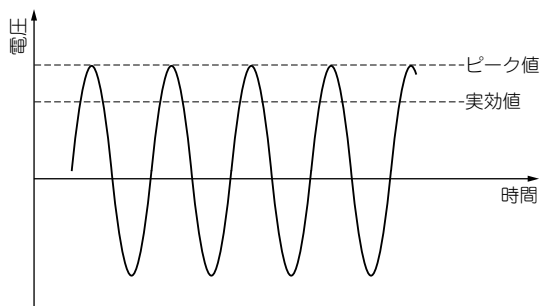


図1.2 交流の電圧と時間の関係

家庭用電灯線コンセントに接続して使用するほとんどの電化製品は、内部で供給電圧の100 Vを直流に変換しています。

また、電化製品によく付属してくるACアダプタは、一般家庭に供給されている100 Vの交流から、機器に必要な電圧を直流に変換するためのものです。

交流と電波

●周波数

周波数は、1秒間に交流の電流の向きが変わる回数を表しています(図1.3)。

基本の単位はヘルツ(Hz)を使用し、補助単位(正式にはSI接頭語)として、

キロヘルツ(k)Hz = 1,000 Hz

メガヘルツ(M)Hz = 1,000,000 Hz (1,000 kHz)

ギガヘルツ(G)Hz = 1,000,000,000 Hz (1,000 MHz)

が使用されています。これ以上もテラ(T)、ペタ(P)…と続きますが、スペクトラム・アナライザで扱う信号のほとんどは、単なるヘルツとキロヘルツ、メガヘルツ、ギガヘルツの単位です。

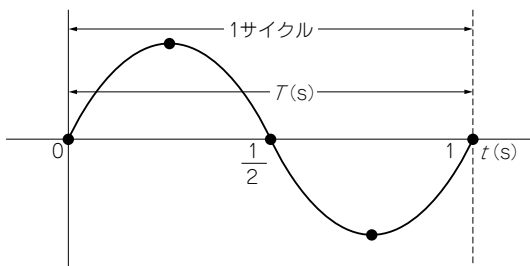
家庭用電灯線では、西日本は1秒間に60回向きが変わるので60 Hz、東日本では50 Hzです。携帯電話で使用される800 MHzは1秒間に8億回向きが変わります。

●電波

電波は電磁波の一種で、高い周波数の交流電流が流れると、空間に発生します。電磁波のうち、無線通信などに使われるものを意味する言葉です。

電磁波には電波のほかにもわれわれの目で見ることのできる可視光線やレントゲンなどのX線、赤外線なども含まれます。

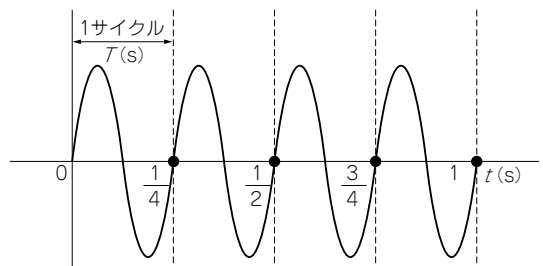
日本の電波法では、3000ギガヘルツ(3000 GHz = 3 THz)までが電波と定められています(表1.1)。



$$\text{周波数} = \frac{1}{\text{周期}} \text{ (Hz)}$$

$$f = \frac{1}{T(\text{s})} \text{ (Hz)} = \frac{1}{1} = 1 \text{ (Hz)}$$

(a) 1秒に1回向きが変わると1Hz



$$\text{周波数} = \frac{1}{\text{周期}} \text{ (Hz)}$$

$$f = \frac{1}{T(\text{s})} \text{ (Hz)} = \frac{1}{1/4} = 4 \text{ (Hz)}$$

(b) 1秒に4回向きが変わると4Hz

見本

図1.3 交流の周波数と周期

表1.1 電波の種類

周波数	波長	呼び名	用途など
30 kHz 以下	10 km 以上	超長波(VLF)	電波時計
30 ~ 300 kHz	1 ~ 10 km	長波(LF)	長波放送、潜水艦との通信
300 kHz ~ 3 MHz	100 m ~ 1 km	中波(MF)	ラジオ放送
3 ~ 30 MHz	10 ~ 100 m	短波(HF)	海外向けラジオ放送
30 ~ 300 MHz	1 ~ 10 m	超短波(VHF)	テレビ
300 MHz ~ 3 GHz	0.1 ~ 1 m	極超短波(UHF)	テレビ、携帯電話、無線LAN
3 ~ 30 GHz	0.01 ~ 0.1 m	センチ波(SHF)	衛星放送、レーダ
30 ~ 300 GHz	0.001 ~ 0.01 m	ミリ波(EHF)	車載レーダ
300 GHz ~ 3 THz	0.0001 ~ 0.001 m	サブミリ波 / 遠赤外線	-
3 ~ 370 THz	810 nm ~ 0.0001 m	赤外線	加熱
370 ~ 790 THz	380 ~ 810 nm	可視光	-
790 THz ~ 30 PHz	10 ~ 380 nm	紫外線	殺菌
30 PHz ~ 300 EHz	0.001 ~ 10 nm	X線	レントゲンなど
3 EHz 以上	0.1 nm 以下	γ線	放射線

k(キロ), M(メガ), G(ギガ), T(テラ), P(ペタ), E(エクサ)

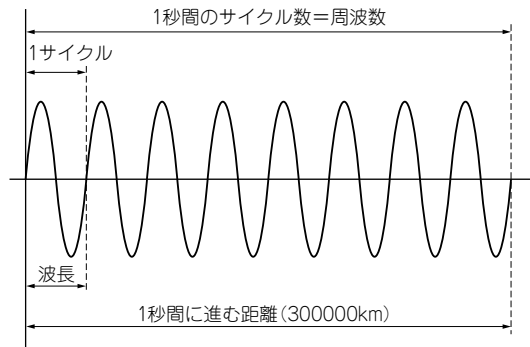


図1.4 周波数と波長

電波は交流の一種なので、ゼロから始まって上がって下がり、マイナスになって、また上がってゼロに戻ってきます。

図1.4に示すように1秒間に上記のサイクルを繰り返す回数を周波数、1サイクルにかかる時間と電波の速度から求められる長さを波長と呼びます。

電波の速度は一定で、光と同じ秒速30万kmです。そこで波長は、

$$\text{波長 [m]} = 300000000 \div \text{周波数 [Hz]}$$

で求められます。

波長は1サイクルの長さなので、周波数が高くなるほど短くなります。

見本

第2章

オシロスコープとスペクトラム・アナライザ

画面に電気信号の波形を表示する測定器として、オシロスコープは一般的に普及しています。

スペクトラム・アナライザも、画面に信号の波形を示す測定器です。ここでは、オシロスコープとスペクトラム・アナライザのどこが違うのかについて解説します。

オシロスコープ

電気信号を観測する測定器にオシロスコープがあります(写真2.1)。

オシロスコープとは、電圧(振幅)の時間変化を表示する測定器で、ディスプレイの縦軸は電圧、横軸は時間を表します(画面2.1)。

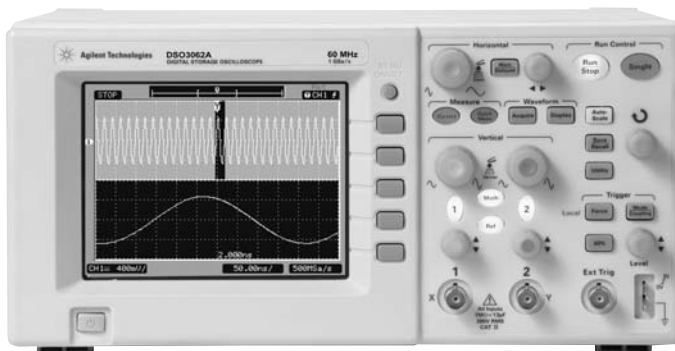
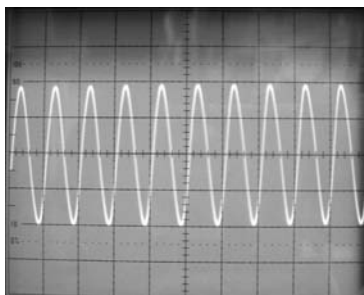


写真2.1 オシロスコープの外観



画面2.1 オシロスコープの表示画面

見本

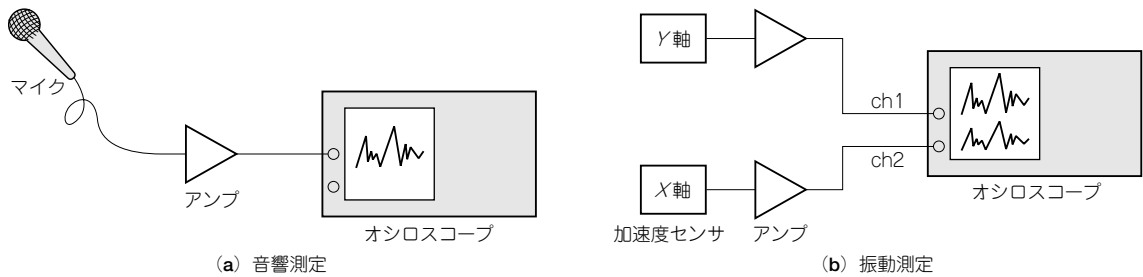


図2.1 オシロスコープの活用

オシロスコープは電圧を測定する測定器ですが、測定対象の現象を電圧に変換することによりさまざまな現象を測定することができるため、多くの分野で使用されています(図2.1)。

しかし、入力信号に複数の周波数成分が含まれている場合、オシロスコープではまとめて表示されるために、期待する測定結果が得られない場合があります。

スペクトラム・アナライザ

スペクトラム・アナライザにもディスプレイがあり、オシロスコープと似た外見をしています(写真2.2)。

スペクトラム・アナライザは、入力された信号を周波数別に分解し、周波数別の信号レベルを表示する測定器で、縦軸は信号成分の大きさを表示します。

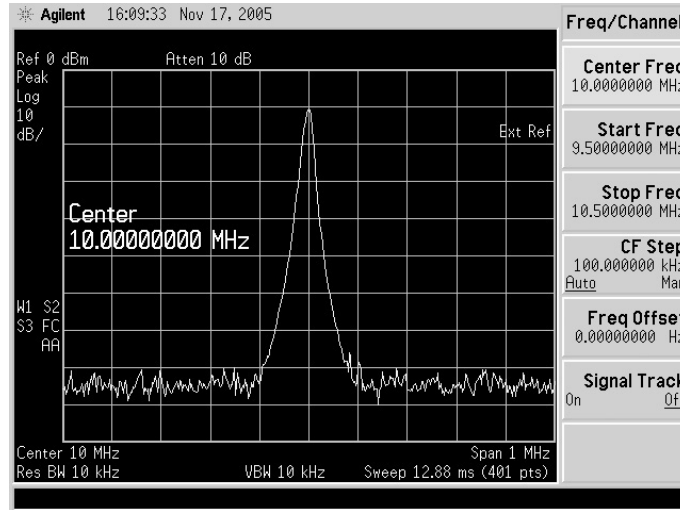
オシロスコープとの最大の違いは、ディスプレイの横軸がオシロスコープでは時間なのに対して、スペクトラム・アナライザでは周波数になっていることです(画面2.2)。

このため、オシロスコープはタイム・ドメイン(時間ドメイン)の測定器、スペクトラム・アナライザは周波数ドメインの測定器と呼ばれています。



見本

写真2.2 スペクトラム・アナライザの外観(アジレント・テクノロジー ESA-L シリーズ)



画面2.2 スペクトラム・アナライザの表示画面

スペクトラム・アナライザは、以下のような測定を行うことができます。

- ・ 信号の電力レベルと周波数
- ・ 変調の周波数と変調度
- ・ 単側波帯の搬送波抑圧比
- ・ 信号の高調波
- ・ ひずみ、スプリアス
- ・ 雑音、EMI
- ・ トラッキング・ジェネレータを併用した被測定物の周波数特性

周波数ドメインとタイム・ドメイン

ところで、なぜ周波数ドメインでスペクトラムを解析するのでしょうか？

フーリエ変換の発見者フーリエの理論では、タイム・ドメインの任意の信号は、さまざまな周波数の正弦波の組み合わせで成り立っています。

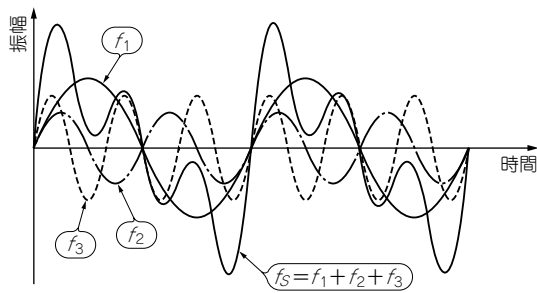
すなわち、タイム・ドメインの信号は、対応する周波数ドメインの信号に変換することができます。

タイム・ドメインの信号を周波数ドメインの信号に変換すると、それぞれの周波数にどれだけのエネルギーが存在するかを観測することができます。

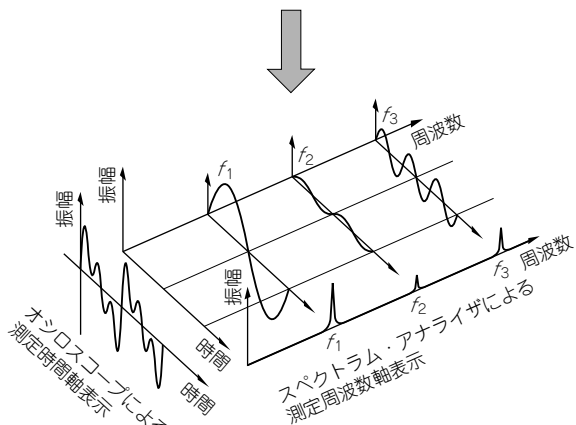
正弦波は、振幅と位相で記述され、周期 T の繰り返し波形は、 $1/T$ の基本周波数の高調波に展開されます。

図2.2にタイム・ドメインと周波数ドメインの関係図を、画面2.3にタイム・ドメインであるオシロスコープの画面を、画面2.4に周波数ドメインのスペクトラム・アナライザによる実際の表示画面を示します。

周波数ドメインの解析には、周波数、振幅、位相情報を必要とする場合があります、このような解析を

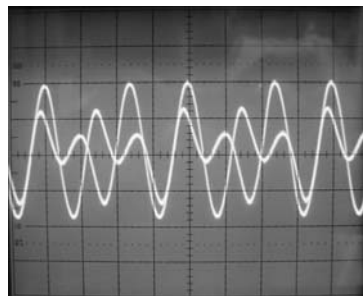


(a) オシロスコープの波形

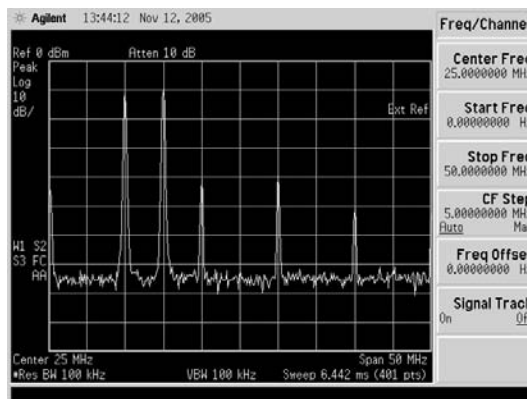


(b) スペクトラム・アナライザの波形

図2.2 オシロスコープとスペクトラム・アナライザの表示の違い



画面2.3 横軸が時間のタイム・ドメインの表示(オシロスコープ)



画面2.4 横軸が周波数の周波数ドメインの表示(スペクトラム・アナライザ)

ベクトル信号解析と呼び、ネットワーク・アナライザと呼ばれる測定器が使用されます、

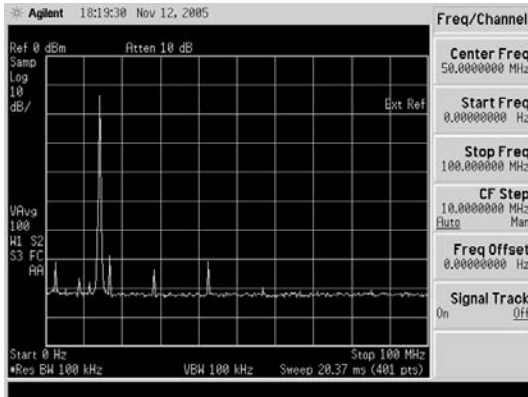
ただ、通常の周波数ドメイン解析には、位相情報を知る必要がないことが多く、このような周波数と振幅のみで行う解析をスペクトラム解析と呼び、本書で解説するスペクトラム・アナライザはそのために使用されます。

しかし、周波数ドメインでの測定を行えば、タイム・ドメインでの測定は不要になることはありません。タイム・ドメインが適している測定は多く存在しますし、タイム・ドメインでしか行えない測定も存在します。デジタル回路で多用する、パルスの立ち上がり・立ち下がりやチャタリングなどの測定、のこぎり波の波形の直線性などは、タイム・ドメインでの測定が向いています。

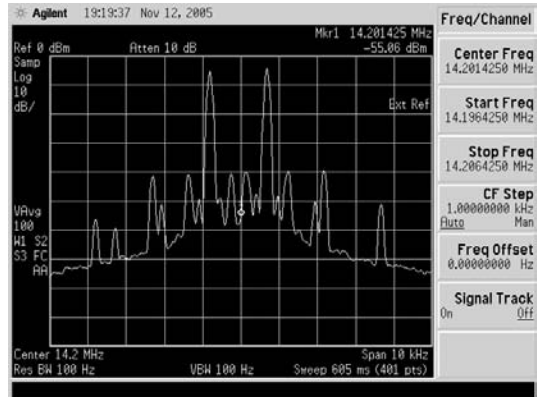
ですから、スペクトラム・アナライザがあればオシロスコープが不要というわけではありません。

周波数ドメインでの測定は、電波を使用する無線通信の分野では欠かせません。

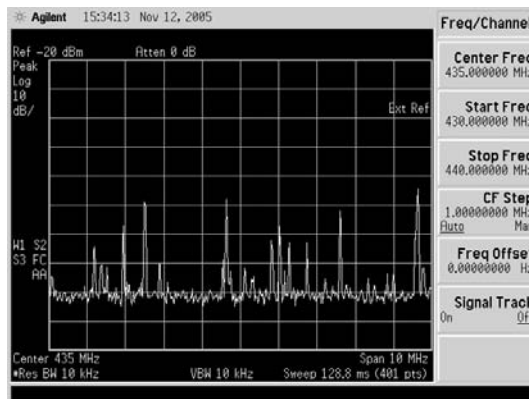
見本 電波を放射する機器は、他の通信などに影響を与えないように、電波法で高調波やスプリアス、占有帯域など厳しく指定されています。これらが要件を満たしているかを測定するには、周波数ドメインでの測定が不可欠です。



画面2.5 スプリアス測定



画面2.6 IMD測定



画面2.7 バンド・モニタ

周波数ドメインのもう一つの用途は周波数のモニタリングです。

電波は有限の資源のため、使用目的や用途に合わせて、周波数帯が政府機関より割り当てられています。通信が割り当てられた周波数と帯域で行われているかをモニタするためにもスペクトラム・アナライザが使用されています。

その他、通常の受信機では観測しにくいノイズや電磁波障害(EMI)の測定などにも活用され、EMI測定用の機能が内蔵されているスペクトラム・アナライザも存在します。

画面2.5～画面2.7にスペクトラム・アナライザを使用した代表的な測定例を示します。



第3章

スペクトラム・アナライザの基本原理

ここではスペクトラム・アナライザの動作原理を説明します。動作原理を知っておくことで測定中に起こる疑問が解消されることもあるので、ある程度理解しておくことは必要です。

スペクトラム・アナライザの方式

入力信号を周波数ごとに分解する方法は、過去いくつか検討されてきました。その主なものを紹介してみましょう。

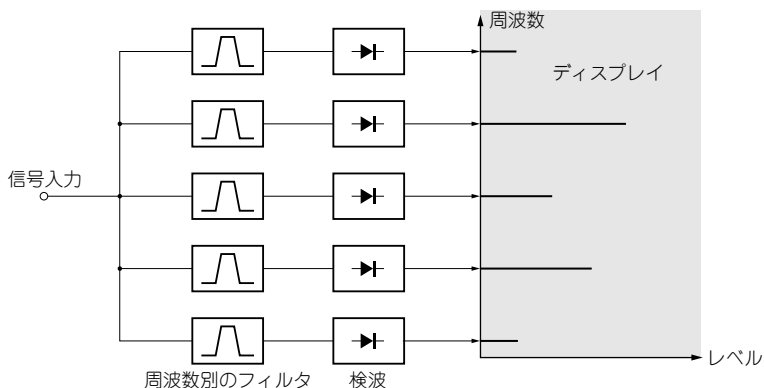
● マルチプル・フィルタ方式

図3.1のように、通過周波数の異なるバンドパス・フィルタを、観測する周波数範囲に並べることで周波数ごとに分解する手法です。

リアルタイム性がありますが、周波数の可変が困難で分解性能を上げようとすると精度の高いフィルタを多数用意する必要があるために、オーディオ帯域(ミニコンポなどのグラフィック・イコライザやスペアナ機能)などで使われています。

● FFT方式

マルチプル・フィルタ方式は、多数のフィルタを必要とするために、アナログ回路で汎用的なスペクトラム・アナライザを構成するのは困難です。



見本

図3.1 マルチプル・フィルタ方式のスペクトラム・アナライザの構成

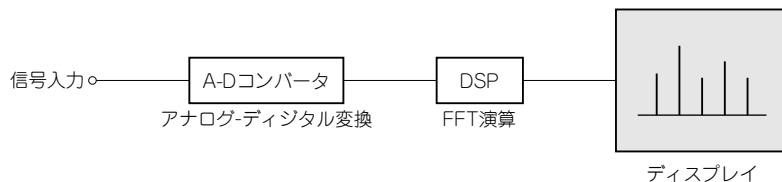


図3.2 FFT方式のスペクトラム・アナライザの構成

そこで、デジタル技術を使用して等価的にマルチプル・フィルタ方式を実現するために考えられたのが、図3.2に示すFFT方式です。入力信号をA-Dコンバータでデジタル信号に変換し、FFT (Fast Fourier Transform) という計算を行うことで、入力信号を周波数ごとの振幅に分解します。そのため、この方式を採用しているスペクトラム・アナライザはFFTアナライザとも呼ばれます。

フィルタ方式と同じリアルタイム性があり、突発現象の解析や振動解析などに多用されています。

また振幅だけではなく、位相の測定も可能で、まとまった時間範囲のデータを内部に記憶しているために、掃引方式では難しいデータの取り込み後にさらに詳しく解析することも可能です。

欠点は、次項で説明するスーパー・ヘテロダイン方式と比較して、周波数範囲や感度、ダイナミック・レンジが制限されることです。

このFFTアナライザは、現状では一般的に、40 MHz ぐらいまでの信号解析に使用されています。しかし、今後は通信や放送のデジタル化、高速データ通信などでリアルタイム性に近い高速性も求められ、半導体の性能向上は目を見張るものがあるため、今以上にFFT方式のアナライザが、その特長を活かして使われていくのではないかと思います。

●スーパー・ヘテロダイン方式

現在高周波帯域のスペクトラム・アナライザの主流はスーパー・ヘテロダイン方式です。

スーパー・ヘテロダインとは、ミキサを使用して入力信号と局部発振器の信号を混合し、両方の信号の周波数差を中間周波数に変換する方式です。スーパーとはスーパー・オーディオ周波数、可聴範囲を超える周波数のことで、ヘテロダインとは混合という意味です。

変換後の中間周波数は一定なので、フィルタの同調周波数は固定でよく、局部発振周波数を変化させることにより、フィルタの同調周波数を変化させることと等価な働きをさせる方式です。

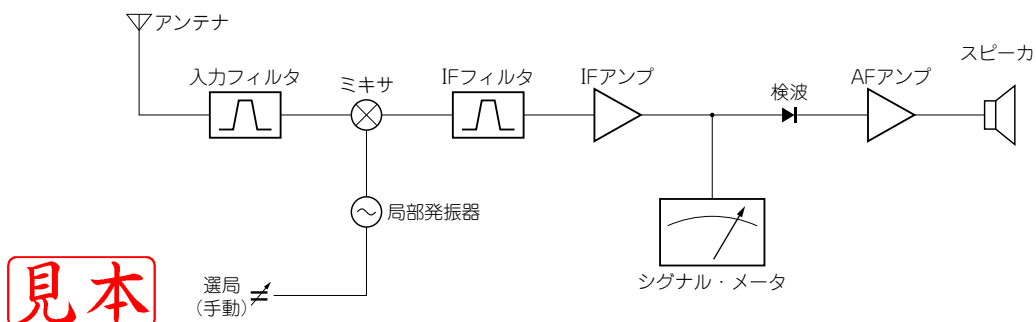


図3.3 スーパー・ヘテロダイン受信機の構成