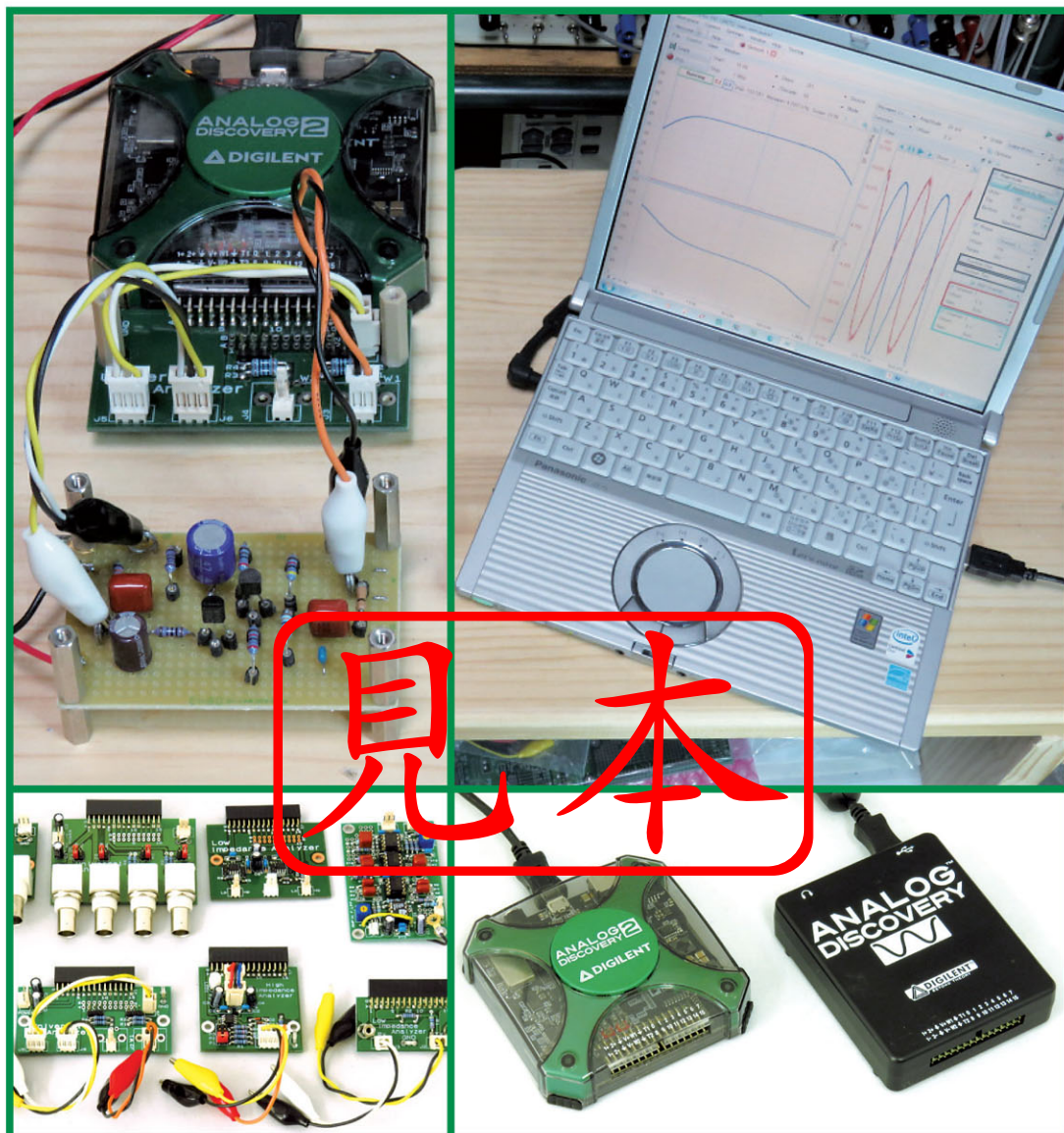


測定しながらアナログ回路技術を磨く

高精度14ビット/DC~10MHz, オシロ, ネットアナ, スペアナ&DDS
+グレードアップ回路術を満載

Analog Discovery USB測定器 活用入門

遠坂 俊昭 著



見本

まえがき

電子装置の進化は留まることなく続いています。新たな電子装置を実現するためにはアナログ技術、デジタル技術そしてソフトウェアの3つが必須です。いずれが欠けても世の中に受け入れられる製品をつくることができません。

最近ではアナログ・デジタルという言葉が電子装置以外にも広く使われています。アナログというと古風な昔の懐かしいものを指し、デジタルというと進化した最新のものを指すようです。まったく本来の意味とはかけ離れた使い方です。アナログ回路技術に携わってきた私としては、なんとも残念なアナログ・デジタルの言葉の使いようです。

しかし実際にはアナログ回路技術も休むことなく進化を続けています。アナログ回路の主役であるOPアンプ1つ取っても、取り扱える周波数が誕生時は数十kHzであったものが今ではGHzに迫っており、直流ドリフトも周囲温度1℃の変化で数十 μ Vの変動であったものが、今では数nVと1/10000も小さく改善・進化を続けています。

アナログ回路の理論を学ぶには、今ではLTspiceを始めとしたアナログ回路シミュレータが個人レベルで自由に使い、解説書もたくさんあり、ネット検索で知識を得ることができます。

しかしそのようなソフトウェア的な知識だけでは、必要なアナログ回路スキルをすべて獲得することはできません。アナログ電子回路は実際に組み立て動作させないとわからないことがたくさんあります。どのような特性を実現するのが難しいのか、実装状態によってどのような特性が影響を受けるのか、どの部品が実装したとき大きさを左右するのか、部品のコスト・入手性そして実装方法の何がネックとなるのかと、実際に組み立てて動作させないとわからないスキルがたくさんあります。

そして残念ながら、人は他人から知識を聞いただけではスキルを自分のものにすることができません。自分で悩み、自分で解決して初めて自分のスキルとすることができます。

このようなことからアナログ回路技術者としては自分で実際にアナログ回路を組み立て、動作させることが重要です。しかし、そのためにはたくさんの道具と計測器が必要になります。とくにネットワーク・アナライザなどの計測器は高価で広い設置場所が必要です。

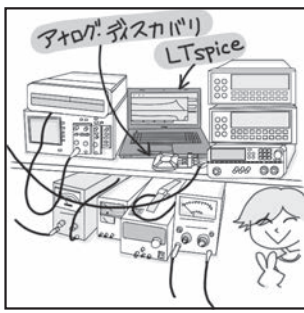
なんとか簡単に回路の実験ができるデバイスはないかと探し、パソコンのオプションのサウンド・ボードを使ってみました。波形を発生したり計測したりすることはできるのですが、その目的から直流が扱えず、最高周波数も数十kHz止まりで、周波アナログ計測器としてはちょっと物足りないものでした。

このような中、CQ出版社が主催する電子回路技術研究会でアナログ・デバイス社の藤森さんからAnalog Discoveryを紹介していただき、価格・形状・特性と私が求めていたものとぴったり一致し、たちまちAnalog Discoveryの虜になりました。

本書はAnalog Discoveryの入門書として取り扱い方法を説明しています。できるだけ使用例をたくさん記載し、実際に使うときの手助けになるよう務めました。

最後にAnalog Discoveryを紹介していただいた藤森さん、群馬大学の 세미나でAnalog Discoveryを活用する機会を与えていただいた山越先生、弓仲先生に厚くお礼を申し上げます。

なお本誌はトランジスタ技術に連載した内容とは異なり、新たに入門者向けに書き下ろしたものです。トランジスタ技術の連載記事は追加・修正して応用編として発行の予定です。



第1章

Analog Discoveryで 便利な測定環境を作り上げる

1.1 Analog Discoveryとは

● **ブレイクスルーの時代**
 趣味としての電子工作にはさまざまな分野が広がっています。はじめの頃はアマチュア無線やオーディオ、ロボット製作、近年はITや宇宙との接続など、広く・深く進化していきそうです。

電子工作を始めたばかりの頃は雑誌掲載の記事のとおりに製作して楽しんでいますが、そのうちに物まねだけでは物足りなくなり、自分オリジナルな装置を作りたいくなってきます。

しかし電子装置を設計・製作し、より高性能な装置にするためには、設計・製作したものの特性検証、改善のために、

- オシロスコープ
- 信号発生器
- ひずみ率計(オーディオをやるなら特に)
- ネットワーク・アナライザ
- スペクトラム・アナライザ
- インピーダンス・アナライザ
- 半導体カーブ・トレーサ

など、多くの測定器(計測器)が必要になります。しかしこれらを個人ですべてそろえることは、費用や設置場所などの都合から大きな難題です。とても無理と、あきらめた方も少なくないから不思議です。

また、工業高校・工専・大学・大学院での研究などにおいても、電気・電子関係の実験を行う際には多くの測定器が必要になります。予算の潤滑な研究室に入れば幸いですが、大半の研究室では限られた予算で研究を行わなくてはなりません。

● **米国の大学工学部で広く利用されている**

このような状況のなか、IC/LSI技術の進化(回路技術+高集積化+企画力)の恩恵として、非常に大きな可能性をもったデバイスが登場しました。写真1.1に示す Analog Discovery と呼ばれるセットです。

この Analog Discovery は US Diligent 社が Analog Devices 社と Xilinx 社の協力を得て、米国の大学生が

電子回路スキルを磨く際に役立つ汎用の USB 測定器として開発されました。14ビット100 MHz サンプルの A-D/D-A コンバータと FPGA を使い、表 1.1 に示すようなさまざまな機能と性能が内蔵されています。

なお、本書では以降 Analog Discovery のことを AD と表記することにします。

1.2 機能・性能を補う 自作アダプタも作れる

AD は低価格にしては非常に多機能・高性能で魅力的なデバイスです。しかし、AD だけで市販の多くの測定器とすべて同等に使えるかということ、残念ながら無理な場合もあります。

● **アンチエイリアス・フィルタが付いていない**

図 1.1(p.9)にスペクトラム解析…FFT アナライザの事例を示します。スペクトラム解析では、入力したアナログ信号を A-D コンバータでデジタル変換して FFT 解析を行います。そのとき、A-D コンバータにサンプリング周波数の 1/2 以上の周波数成分が入力されていると、エイリアスと呼ばれる誤ったデータが混入してしまいます。

このため市販の FFT アナライザでは、A-D コンバータの前段にアンチエイリアス・フィルタと呼ばれる LPF (Low Pass Filter、ローパス・フィルタ) を挿入し、サンプリング周波数の 1/2 以上の周波数成分を除去してから A-D 変換しています。

以前、図 1.1(a) に示すようにアンチエイリアス・



写真 1.1 新旧の Analog Discovery
 左側が新版の Analog Discovery2

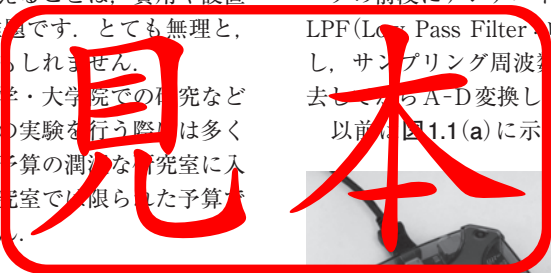


表 1.1 Analog Discoveryの機能と性能

機能はアプリケーション・ソフトWaveForms (Diligent社Webサイトからダウンロード)によって選択する。AD2は仕様が細かく正確に記載されているだけで、電源を除いた内容は新旧ほぼ同じ

項目	旧AD	AD2	
		BNCアダプタ 使用時	Wire Kit 使用時
アナログ 入力帯域幅	5 MHz	30 MHz@3 dB, 10 MHz@0.5 dB, 5 MHz@0.1 dB	9 MHz@3 dB, 2.9 MHz@0.5 dB, 0.8 MHz@0.1 dB
アナログ 入力精度	規定なし	± 10 mV ± 0.5 %@0.5 V/div以下, ± 100 mV ± 0.5 %@1 V以上	
アナログ 最大入力電圧		± 25 V	
アナログ 出力帯域幅	5 MHz	12 MHz@3 dB, 4 MHz@0.5 dB, 1 MHz@0.1 dB	9 MHz@3 dB, 2.9 MHz@0.5 dB, 0.8 MHz@0.1 dB
アナログ 出力精度	規定なし	± 10 mV ± 0.5 %@1 V以下, ± 100 mV ± 0.5 %@1 V以上	
アナログ 最大出力電圧		± 5 V	
電源出力電圧	± 5 V 固定	0.5 ~ 5 V 可変	
電源出力電力	± 5 V 固定, 50 mA _{max} (USB電源)	500 mW _{total} (USB電源)	
	なし (外部電源)	2.1 W (外部電源)	
電源電圧精度 (無負荷)	規定なし	± 10 mV	
電源出力 インピーダンス	規定なし	50 mΩ _{typ}	

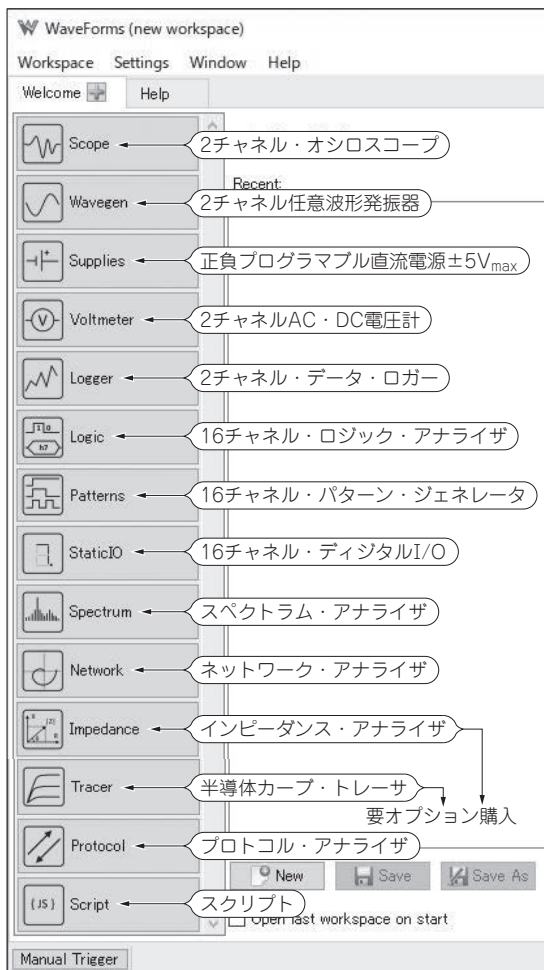
(a) ハードウェアの性能

フィルタの高域カットオフ周波数を、A-Dコンバータのサンプリング周波数にしたがって切り替えています。ところが最近ではデジタル処理デバイスが高性能・低価格になってきました。そのため図 1.1 (b) に示すように、A-Dコンバータは最高クロック周波数固定で動作させ、デジタル信号にしてから分析周波数帯にしたがってデジタル・フィルタ処理を行うようになっていきます。アナログ・フィルタの数を少なくする構成になっているわけですね。

● 切り替え型のLPFを用意する

一方、ADのFFTに関する内部構成は図 1.1 (c) のようになっています。エイリアス除去のためのLPFが内蔵されていません。そして、周波数レンジの最高分析周波数の2倍の周波数データでFFT演算を行います。ただし、低サンプリング速度のときは1サンプルで複数のデータを採取し、その平均値でFFT演算を行うAverageと呼ぶ機能があります。結果、高域での雑音の影響が低減されます。

よってADのFFTにおいてエイリアスを除くには、図 1.1 (a) に示すように外部にアンチエイリアス・フィルタを挿入する必要があります。本書では周波数レンジにしたがって、高域カットオフ周波数を5点切り



(b) WaveFormsによって実現する測定メニュー

替えるLPFを製作・紹介します。

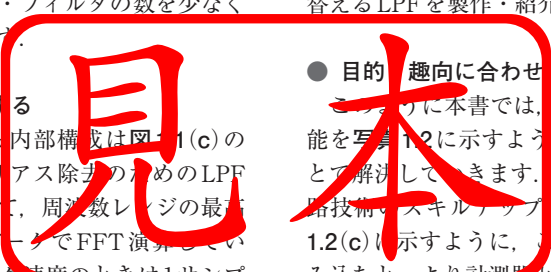
● 目的 趣向に合わせたアダプタを用意する

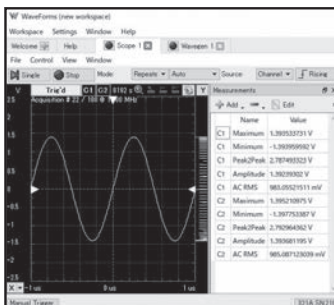
ちなみに本書では、ADに不足している機能・性能を写真 1.2 に示すような外部アダプタを自作することで解決していきます。このことは読者自身の電子回路技術のスキルアップにつながります。また、写真 1.2 (c) に示すように、これらの機能を1つの筐体に組み込めば、より計測器としての完成度を上げることができます。

本書ではADを核として、周辺のアナログ・フロントエンドを自作することにより、自らの趣向に合った実験ラボを完成させていきます。

● 扱える周波数範囲はDC~10 MHz

本書で扱う信号周波数の範囲は、ADの扱える周波





第2章

高精度14ビットでDC～10 MHzをカバーする 高機能デジタル・オシロ… Scope活用法

電子回路技術を学ぶとき、もっとも効果的に役立つ測定器がオシロスコープです。電気信号の大きさ、波の形、速さなどを目で直接見ることができるので、昔から電気・電子回路技術者にとっては必携の測定器といわれていました。ただ、現実には高価なことが最大のネックでした。

しかし、電子回路…半導体技術の進歩によってデジタル・オシロスコープが登場し、じきにアナログ・オシロスコープを凌駕、ついには Analog Discovery (以下ADと表記)のような高機能、しかも低価格の測定器が登場してきました。

2.1 波形観測のあらまし

- オーディオ・アンプに入力した信号波形を追跡
オシロスコープとは何と言っても測定器の代表です。

見えない電気を可視化して、電子装置(電子回路)の動作状態を示してくれます。

写真2.1は、(Diligent社のアプリケーションWaveFormsを導入したPCに接続した)ADのScope [Scope]機能の概略を確認するために、以下の手順で観測しているようすです。

- ① AD内蔵の信号発生器 Wavegen W₁から信号を発生させる
- ② ①の信号をオーディオ・パワー・アンプに入力
- ③ パワー・アンプの入出力波形をADのScope機能で観測

図2.1に測定のための結線図を示します。測定対象のオーディオ・パワー・アンプは、Kenwood社1995年頃の「A-1001」というプリ・メイン・アンプ。20 Hz～20 kHzにおいてTHD (Total Harmonic Distortion: 全高調波ひずみ率) 0.09% (40 W×2 @8 Ω) というセット

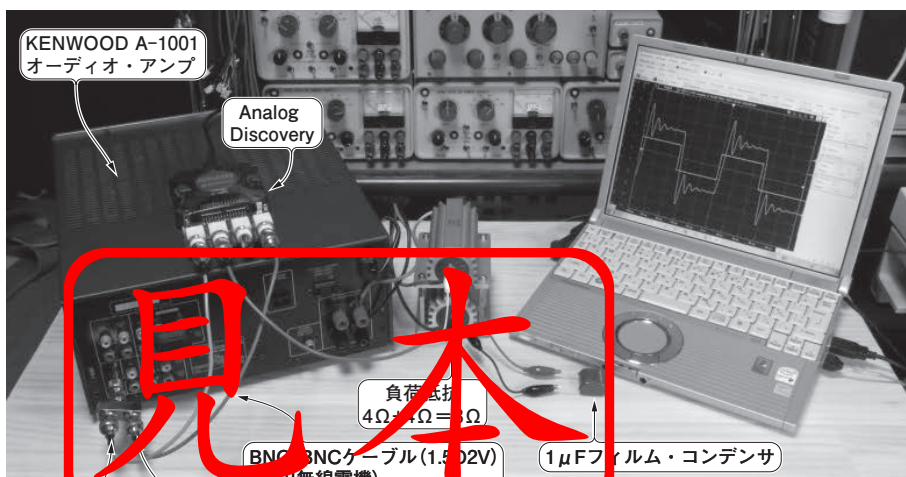


写真2.1 ADのScopeでオーディオ・アンプの波形応答を観測しているようす

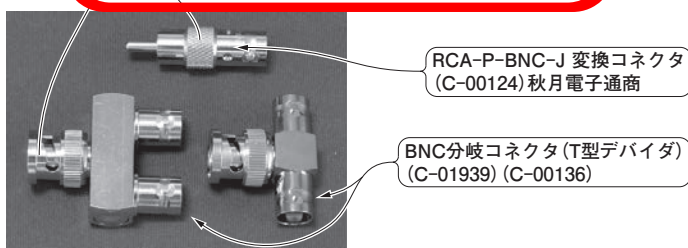


写真2.2 BNCアダプタの例

です。

ADとの接続にはBNCアダプタを使用します。Wavegen W₁信号出力をパワー・アンプ入力に接続するとともに、写真2.2に示すBNCアダプタでCH₁入力に接続しています。また、パワー・アンプの出力であるスピーカ端子には8Ωの負荷抵抗を接続し、抵抗両端をワニ口クリップを通してCH₂に接続しています。

パワー・アンプでは当然ながらWavegen W₁の入力波形が増幅され、出力されます。相似な出力波形になるのが理想ですが、条件によっては相似性が崩れます。

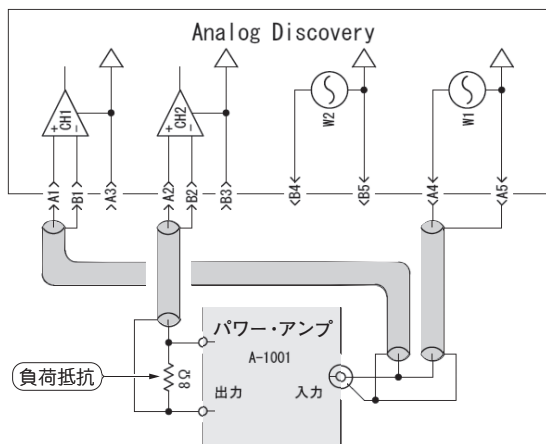
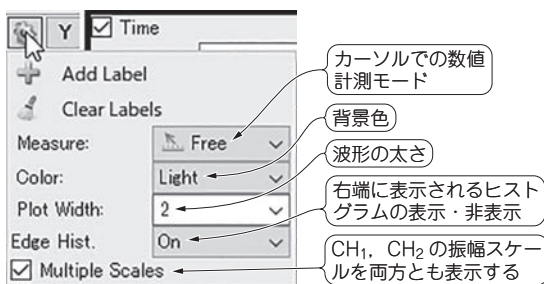


図2.1 ADとオーディオ・アンプとの接続

● 正弦波形を観測すると10 kHzで位相ずれ？

図2.2は、Wavegen W₁に1 kHz 1V_{0-p}の正弦波を設定し、アンプ出力が2V_{0-p}になるよう(アンプの)ボリュームを設定したときの入出力波形です。振幅が2倍になり、相似な入出力波形が得られています。このとき出力波形がひずんでいたり、クリップしているようだとアンプの故障が疑われます。

図2.3に示すのはW₁出力の周波数を10 kHzにして、ScopeのY軸を200 μs/divから20 μs/divに変化させたときの入出力波形です。ほぼ相似な正弦波出力波形ですが、よく見ると0Vをよぎる点がずれ、全体的に入力波形に対し出力波形が遅れています。これはアンプの入出力位相特性が、1 kHzではほぼ0°だったものが10 kHzでは数度の位相遅れが発生したことを示しています。この位相-周波数特性については、後述の



(a) 波形表示の設定

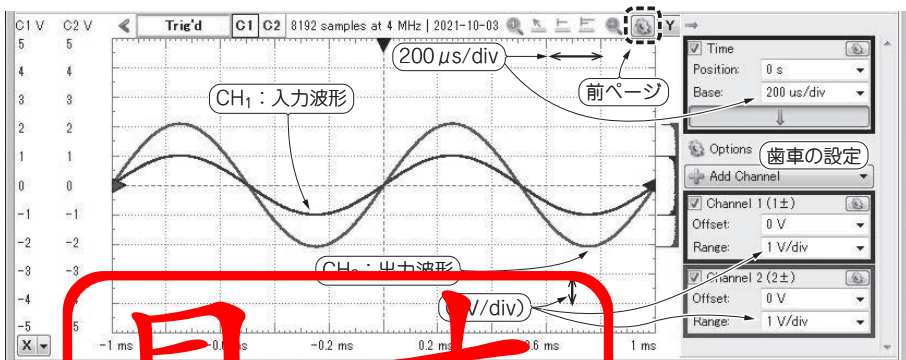


図2.2 Wavegenによる1 kHz正弦波をパワー・アンプに入力したときの入出力波形の測定

() 利得が2倍になるよう(アンプ・ボリューム)を設定した

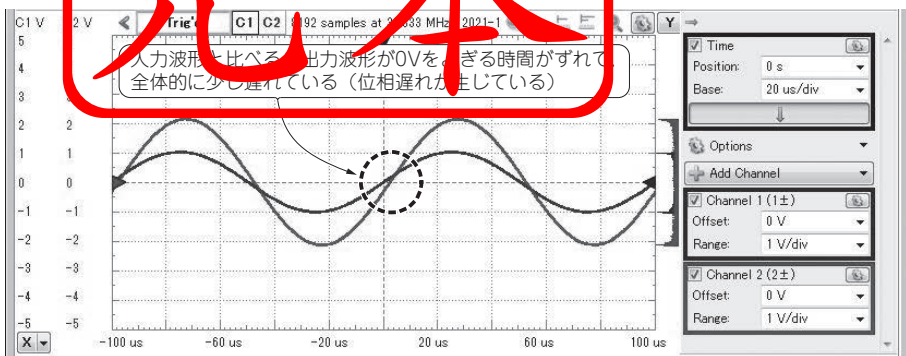


図2.3 正弦波出力を10 kHzに設定したときの波形(20 μs/div)
入力波形と比べると、出力波形が0Vをよぎる時間がずれて、全体的に少し遅れている(位相遅れが生じている)

見本



第3章

ファンクション・ジェネレータ+AM/FM変調信号源

高機能DDS信号発生器… Wavegen活用法

新しいOPアンプやモジュール、あるいは試したい回路があったとき、その回路の挙動を実際に調べるには、信号発生器と確認のためのオシロスコープや各種アナライザが欠かせません。素早い実験には、使い慣れた信号発生器を身近につねに用意しておくことがとても重要です。

Analog Discovery(以下ADと表記)には従来のファンクション・ジェネレータを上回る機能をもつWavegen(ウェブジェネ)が内蔵されています。

する信号発生器のことで、(従来タイプのセットは)図3.1に示すように、コンパレータと積分器によって周波数を可変できる方形波と三角波を発生させ、三角波からダイオードを使った折れ線近似回路によって正弦波を生成するような構成になっています。

現在のファンクション・ジェネレータは図3.2に示

3.1 信号発生器のあらまし

● 市販のファンクション・ジェネレータでは
 写真3.1に、製品として販売されているファンクション・ジェネレータの一例を示します。ファンクション・ジェネレータは、各種測定のための信号源として使われるもので、方形波や三角波、正弦波などを生成

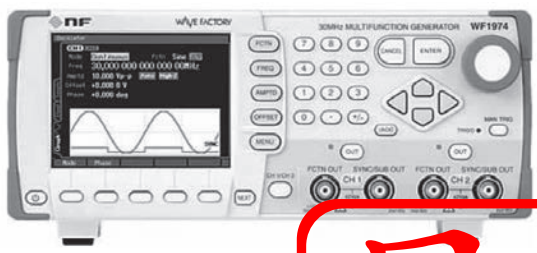


写真3.1 製品として販売されているファンクション・ジェネレータの一例

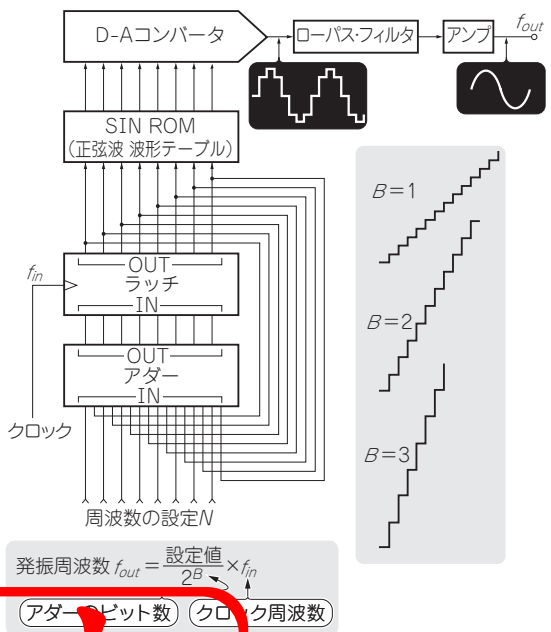


図3.2 DDS方式によるファンクション・ジェネレータの構成

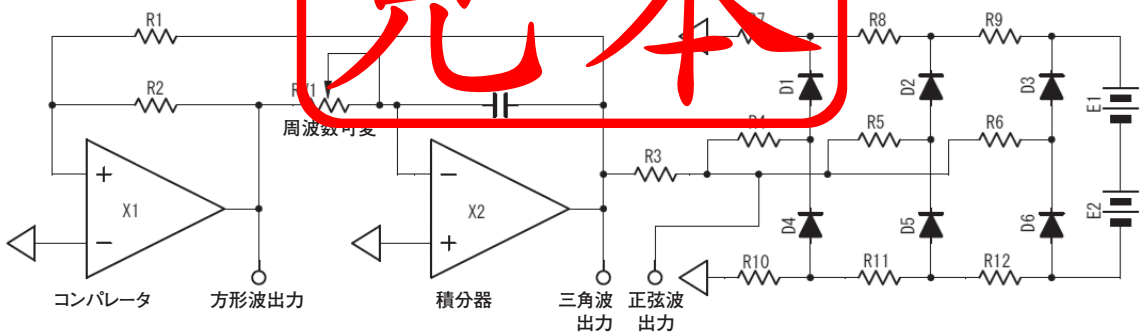


図3.1 アナログ回路方式ファンクション・ジェネレータの構成

見本

すように、まず基準クロックを加算器とラッチで演算し、のこぎり波状のデジタル・データを生成します。そして、このデジタル・データを正弦波データが書かれたメモリのアドレスとして使用します。その後、正弦波デジタル・データをD-Aコンバータでアナログ信号に変換し、LPF(ロー・パス・フィルタ: Low Pass Filter)で階段状の波形をなめらかな正弦波にして出力しています。この波形生成法をDDS(Direct Digital Synthesizer)と呼んでいます。

● Wavegen も DDS 方式

ADのWavegenでも、同様にDDSによって波形が生成されています。図3.3に、筆者がリファレンス・マニュアルから書き写した波形発生部分の回路図を示します。

Wavegenでは(周波数変動の小さい)低ジッタの20 MHz水晶発振器が基準周波数になっています。この基準信号をPLL(Phase Locked Loop)回路で100 MHzに通倍しています。D-Aコンバータのクロック周波数は100 MHz一定のようなので、DDS方式の波形生成はFPGA内部で行い、D-Aコンバータに送っているようです。

そしてOPアンプIC15AでD-Aコンバータの出力電流を電圧に変換し、IC16Aで11倍しています。IC16Aはゲインが高いので回路をたどってみると、IC15Aの出力はヘッドホン・アンプに接続されています。ヘッドホン・アンプの最大出力電圧が±992 mVであることから、IC15Aの出力電圧を低く抑えてあるようです。信号周波数がオーディオ帯域であれば、ヘッドホン出力によって(耳で)信号周波数を確認することができます。

ADは本来は、米国の電気・電子系学生の教材向けということなので、このような配慮があるのだと思われます。

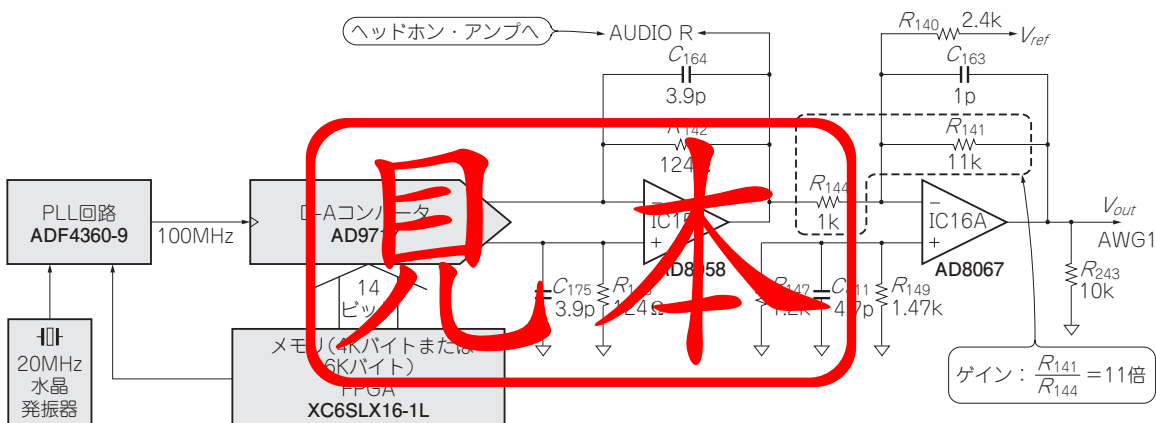
3.2 Wavegen出力の特性を改善しておく

● 小信号出力時のS/Nが良くない

図3.3に示すように、IC16Aのゲインが11倍と大きいので、図中の式のように雑音を概算したところ、 $744 \mu\text{V}_{\text{RMS}}$ の値が得られました。この値はWavegenの最大出力振幅の0.021%に相当します。したがって計算上のひずみ率は、増幅器でひずみが発生しなくてもこの値よりも低くならないことになります。ただし、市販ひずみ率計の高域カットオフ周波数は1 MHz程度以下です。高域雑音は減衰して計測されるのでこの値以下になります。

一般的なファンクション・ジェネレータの場合、LPFはOPアンプ増幅器の後に挿入し、最高発振周波数以上の雑音を除去しています。また数十mV程度の低い電圧を出力する場合は、OPアンプでは数Vの出力とし、その後、抵抗で構成する50 Ω程度のアッテネータで減衰させて出力しています。

しかし、ADではコストとスペースの都合なのか、このLPFと出力アッテネータが付いていません。OPアンプ出力が直接、出力コネクタに接続されています。このため出力電圧を低くする場合は、デジタル・データを小さな値にして出力しています。結果、図3.4に示すように10 mV_{RMS}程度の低い信号電圧の場合でも、雑音成分は $744 \mu\text{V}_{\text{RMS}}$ (雑音波形の±ピーク値はその6~8倍)と変わらず、S/N(信号対ノイズの比)が



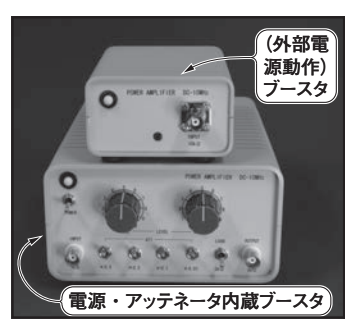
- ・ IC15Aの入力換算雑音電圧密度 $7\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 、IC15Aの雑音ゲインを2倍とすると $14\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
- ・ IC16Aの入力換算雑音電圧密度 $6.6\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 、IC16Aの雑音ゲイン12倍から
- ・ IC16Aの出力雑音電圧密度 $=\sqrt{14^2 + 6.6^2} \times 12 \approx 186\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
- ・ 10MHz帯域での出力雑音実効値 $= 186\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}} \times \sqrt{10\text{MHz}} \times 1.57 \approx 744 \mu\text{V}_{\text{RMS}}$
- ・ 最大出力電圧実効値との比は $744 \mu\text{V}_{\text{RMS}} \div (5V_{\text{peak}} \div \sqrt{2}) \approx 0.021\%$

図3.3 ADに内蔵されている波形発生部 Wavegenの構成

第4章

市販ファンクション・ジェネレータと肩を並べるために

Wavegen出力ブースタの設計・製作



AD(Analog Discovery)はPC+USBによる動作をコンセプトにしているため、アナログ信号は最大 $\pm 5\text{V}$ までしか出力することができません。一方、市販のファンクション・ジェネレータでは無負荷の場合、最大 $\pm 10\text{V}$ 程度まで出力できるタイプが多いです。

本章では、無負荷のとき $\pm 18\text{V}$ 、 50Ω 負荷のとき $\pm 9\text{V}$ まで出力できるアンプをADの外部に追加することにします。これにより、 $\pm 5\text{V}$ 以上のOPアンプ回路の評価実験や、ゲート駆動電圧として 10V くらい印加しないとイケないときの評価実験が行えるようになります。

4.1 信号発生器 Wavegen の性能

● ADの出力は最大 $\pm 5\text{V} \cdot 50\text{mA}$ まで
前述のように、ADの最大出力電圧は $\pm 5\text{V}$ です。最大出力電流の定格値は記載されていません。

ADの信号発生部の出力回路にはOPアンプIC AD8067(アナログ・デバイセズ社)が使用されています。このICのデータシートを見ると、周波数 1MHz 、 $SFDR$ (スプリアス・フリー・ダイナミック・レンジ)が 60dB 以上での出力電流が 30mA (typ)、負荷短絡時の電流が 105mA (typ)と記載されています。最大出力電流は約 $\pm 50\text{mA}$ のようです。図4.1にADの信号発生器 Wavegen の出力段構成を示します。ADでは出力電圧を最大化するときには、(a)に示すように負荷は 100Ω 以上にします。

● 無負荷時出力は最大 $\pm 10\text{V} \cdot 100\text{mA}$ 欲しい
一般的なファンクション・ジェネレータは無負荷のときに $\pm 10\text{V}$ (max)、 50Ω 負荷のときは(出力インピーダンスが 50Ω なら)振幅が半分になるので、 $\pm 5\text{V}$ (max)まで出力することができます。 50Ω 負荷でも波形がクリップすることはないので、最大出力電流は $\pm 100\text{mA}$ 流すことができます。

ファンクション・ジェネレータの場合は図4.1(b)に示すように、出力アンプの後に 50Ω の抵抗を挿入し、出力インピーダンスを 50Ω にしています。出力アンプ自体の出力インピーダンスは、負帰還によって 1Ω 以下と低インピーダンスです。

近年のファンクション・ジェネレータは、出力電圧が数値設定できるようになっています。メーカーによっては、設定する数値が定格負荷 50Ω を接続したときと無負荷の場合があります。ファンクション・ジェネレータの出力電圧は、負荷条件を確認したうえで設定する必要があります。

● パワフルOPアンプADA4870を使えば無負荷時最大 $\pm 18\text{V} \cdot 1\text{A}$

図4.1(c)に示すのが、製作するブースタ・アンプの出力回路です。使用するのは広帯域でパワフルなOPアンプADA4870(アナログ・デバイセズ社)です。図4.2にADA4870の概要を示します。難があるとなれば、現時点では入手性かもしれません。電源電圧 $\pm 20\text{V}$ まで用でき、最大出力電流が 1A です。 50MHz

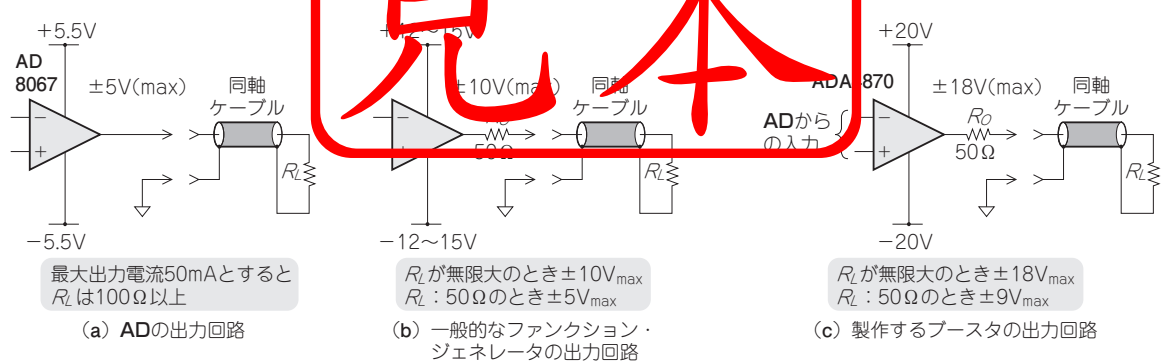
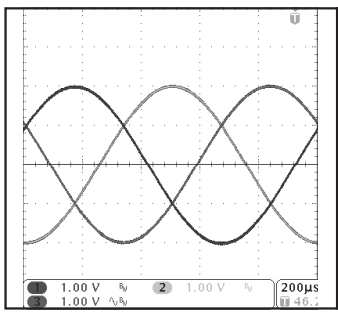


図4.1 信号発生器の出力段の構成



第5章

2相出力をベクトル合成して任意の位相信号を生成

Wavegen出力から 3相交流を作る

一般に信号発生器は、1出力または2出力です。周波数と位相が同期した3つ以上の信号を生成するタイプはありません。したがって、たとえば3相交流の実験を行うときは、3相発振器と3台の電力増幅器で構成することになります。

3相発振器は交流電源のオプションとして組み込まれ、単独で販売されることはほとんどありません。特注するとかなり高価になります。

ここでは、3相交流電源やモータの基礎実験などに活用できる3相発振器をAD Wavegenの2相出力を利用して作ります。Wavegenが出力する0°と90°の信号をベクトル合成すれば、任意位相の信号を複数、同時に生成することができます。

5.1 3相交流のしくみ

● 大電力の送電に向いている

工作機械などで大電力を必要とするとき、日本では200Vの3相交流電源が用いられています。この3相交流電源は図5.1に示すように、位相が120°ずつ離れた3つの交流発電出力が組み合わせられ送電されています。送電システムのことを電力系統と呼びます。

この3相交流 3つの位相は、業界や使用場所によってRST、UVW、ABCなど、呼び名が異なります。電力を作っている電力会社でも配線色が異なるなど、複雑です。RSTの呼び名ではR相が基準相、120°遅れているのがS相、240°遅れているのがT相と呼ばれています。

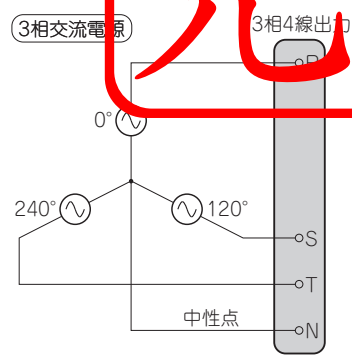


図5.1 3相3線式交流電源のしくみ
R相を基準にすると、120°遅れたS相、さらに240°遅れたT相からなっている

ます。

日本の電力分野では、たんに120°という120°遅れであることを意味します。位相進みでの数値は使用しないようです。計測器の分野では+120°は位相進み、-120°は位相遅れを意味します。

● 日本では3相3線式、世界では3相4線式

单相を3つ組み合わせる3相交流電源は、図5.1に示すように共通線(中性点)も含めると4本です。共通の線は常時電圧がゼロになります。これを中性点と呼び、事故が起こると異常電圧が発生します。日本ではこの中性点は需要家(電力を消費する側をこう呼ぶ)には配線されない3相3線式になっています。

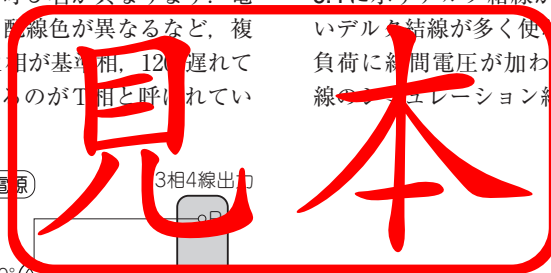
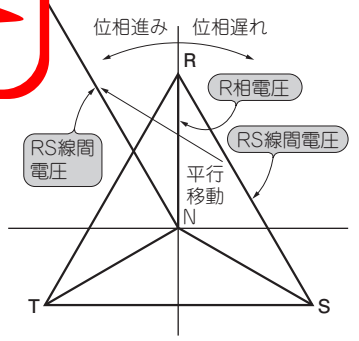
世界では3相4線式送電のほうが多いようです。3相4線式送電の場合は、電力消費の大きい機器は高電圧の線間電圧を使用した3相電源になっています。小さい消費電力の機器は低圧の相電圧を使用した单相電源として併用できます。

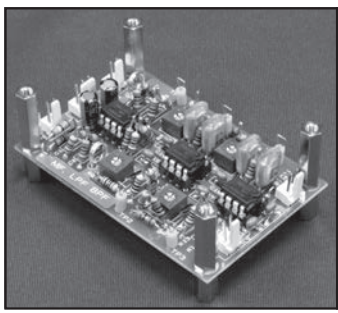
図5.2に示すように送電側の中性点からの電圧を相電圧、各線の間電圧を線間電圧と呼びます。日本では線間電圧が200Vです。したがって、各位相が120°と等しいので相電圧は1/√3の約115Vです。

3相交流の負荷には、図5.3に示すスター結線と図5.4に示すデルタ結線があります。現在は配線の少ないデルタ結線が多く使われています。デルタ結線では負荷に線間電圧が加わります。図5.4(b)にデルタ結線のシミュレーション結果を示します。線間電圧は相電圧の√3倍になっている

図5.2 平衡3相交流電源のベクトル表示

平衡3相では各相の振幅が等しく、位相が0°、120°、240°なので線間電圧は相電圧の√3倍になっている





第6章

オーディオ測定を高度化する Wavegen用 ひずみ低減フィルタの設計・製作

市販のファンクション・ジェネレータは、機能や発生できる波形の種類などがとても多彩です。しかし、オーディオ帯域で重視される *THD* (Total Harmonic Distortion: 全高調波ひずみ) は 0.2% 程度で、オーディオ測定を目的にする用途では不満足です。キーサイト社の最新ファンクション・ジェネレータ 33500B シリーズでも 0.04% です。

ここでは *AD* (Analog Discovery) の *Wavegen* 出力にフィルタとアッテネータを挿入して、オーディオ帯域でのひずみ改善を試みます。出力電圧 100 mV_{RMS}、1 kHz 時の *THD* を 1/10 (約 0.01%) に低減しています。写真 6.1 が仕上がったフィルタを使用している風景、写真 6.2 が製作したフィルタとアッテネータの外観です。

6.1 ひずみは高域周波数を制限すれば低減できる

● 信号発生器のひずみ要因
信号発生器においてひずみが生じる要因は、信号の元になるデジタル・データを D-A 変換してアナログ波形に変換する際の量子化誤差と、クロック漏れに

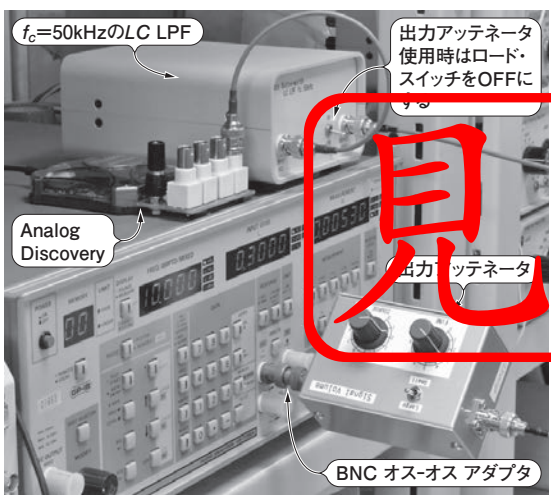


写真 6.1 ひずみ低減フィルタと出力アッテネータの使用例
AD Wavegen のひずみを改善目的…ケーブル容量の影響を少なくするため、出力アッテネータはひずみ率計またはパワー・アンプの直前に設置する

よる雑音の混入があるためです。また *AD* における *Wavegen* では、周波数帯域が 10 MHz 以上と広いためです。

しかし、オーディオ帯専用発振器の上限周波数は一般に 100 kHz 程度です。Wavegen は周波数帯域が広い雑音が多くなってしまい、*THD* を悪化させています。

● 雑音は周波数帯域幅の平方根に比例して増加する抵抗から発生する原理的な雑音は、熱雑音と呼ばれていて、周波数スペクトラムが平坦です。

抵抗から発生する熱雑音 v_n は以下の式で表されます。

$$v_n = \sqrt{4k \times T \times R \times B} \quad [\text{V}_{\text{RMS}}]$$

k : ボルツマン定数 ($1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$)
 T : 絶対温度 [$^{\circ}\text{K}$]
 R : 抵抗値 [Ω]
 B : 周波数帯域幅 [Hz]

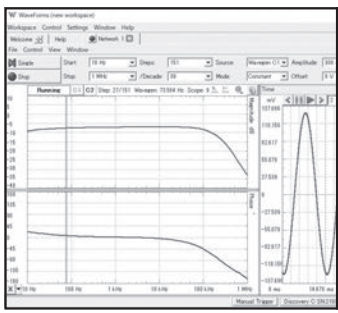
計算しやすい式では $T = 300 \text{ K}$ (27°C) とすると、

$$v_n = 0.126 \sqrt{R[\text{k}\Omega] \times B[\text{kHz}]} \quad [\mu\text{V}_{\text{RMS}}]$$

また、たとえば OP アンプなどで発生する雑音も、中域ではスペクトラムが平坦で、周波数帯域幅の平方根に比例した雑音量になります。同じ雑音密度 (1 Hz あたりの雑音電圧) の OP アンプでも、高域カットオフ周波数 10 kHz と 1 MHz では周波数が 100 倍違うため、10 kHz 帯域に比べると、1 MHz 帯域では雑音電圧が 10 倍増加します。



写真 6.2 製作したフィルタとアッテネータ



第7章

利得・位相-周波数特性測定を自動化する ネットワーク・アナライザ機能… Network 活用法

電子回路の実験・検証において、アンプや回路部品などDUT(Device Under Test：被測定体)の回路網としてのリアルな特性を確認することはとても重要です。この測定は既知の信号発生器SG出力をDUT入力に接続し、SGの周波数を変化させながらオシロスコープなどでDUT出力の利得と位相の周波数特性を把握すれば良いはずですが、これを個別装置の組み合わせで行うのは合理的ではありません。

SGの操作、周波数スイープ、利得・位相-周波数特性測定など一連の作業を自動的に行うのが、ネットワーク・アナライザ(ネットアナと表記)と呼ばれる装置です。AD(Analog Discovery)にはWaveFormsによるネットアナ機能Networkが組み込まれており、使わない手はありません。使用法の熟知をぜひともお勧めします。

7.1 ネットワーク・アナライザのあらまし

● オシロの次に欲しくなる測定器
一般的になってきたオシロスコープを超えて、次の高度な測定器と呼ばれる代表的なものに「スペクトラム・アナライザ(スペアナ)」と「ネットワーク・アナライザ(ネットアナ)」と呼ばれるものがあります(図7.1)。

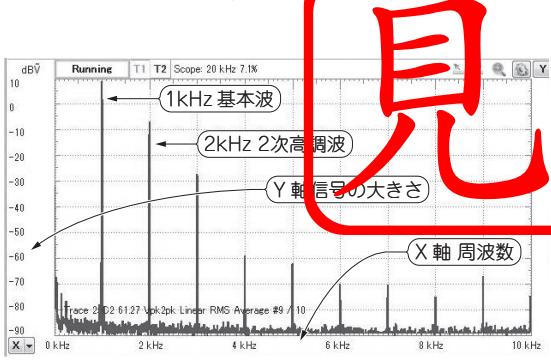
スペアナは図7.1(a)に示すように、信号に含まれる周波数成分を分析し、横軸に周波数、縦軸に信号レ

ベルの大きさを表示するものです。対して、ネットアナは図(b)に示すように、横軸は周波数ですが、縦軸に利得と位相が表示されるので、アンプやフィルタなどの利得・位相-周波数特性を表示します。この章ではADの特筆すべき機能といえるネットアナの活用について紹介します。

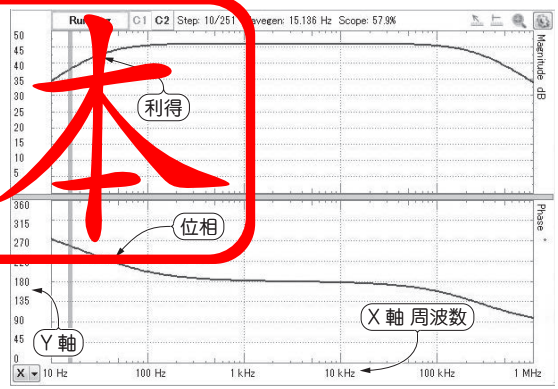
● スイープする発振器とデジタル・スコープ

筆者が新人だった頃は、ネットワーク・アナライザは会社にとっても高価な機器で、おいそれと手の出せるものではありませんでした。よって、アンプやフィルタの利得-周波数特性を測定する際には、まず発振器と周波数を確認するカウンタがあり、指針式の交流電圧計で周波数1点ごとに測定し、データをグラフ用紙に書き込んでいたものでした。とくに周波数が10 Hz程度以下になると、交流電圧計では針が振動してしまい測定できず、残光性オシロスコープの画面を注視しながら振幅を測定したものでした。

このような作業がADのNetwork機能を使うと、いとも簡単にmHzの極低周波から25 MHz程度までの利得・位相-周波数特性がPC画面に描かれます。そしてデータをエクスポートすると、Excelでまとめることもできるようになります。ただし、1点の周波数



(a) スペアナによる測定例



(b) ネットアナによる測定例

図7.1 図3.5(p.49)で示したエミッタ共通アンプの特性をスペアナとネットアナで測定
1 kHzの正弦波を増幅・出力したときの信号を測定している。スペアナではアンプのひずみを高調波として観測するが、ネットアナでは周波数によってゲインと位相がどう変化するかを知ることができる

ISBN978-4-7898-4798-8

C3055 ¥2600E

CQ出版社

定価 2,860円(本体2,600円)⑩



9784789847988



1923055026001

このPDFは、CQ出版社発売の「USB測定器 Analog Discovery活用入門」の一部見本です。

内容・購入方法などにつきましては以下のホームページをご覧ください。

内容 <https://shop.cqpub.co.jp/hanbai/books/47/47981.htm>

購入方法 <https://www.cqpub.co.jp/order.htm>

測定しながらアナログ回路技術を磨く

高精度14ビット/DC~10MHz, オシロ, ネットアナ, スペアナ&DDS
+グレードアップ回路術を満載

Analog Discovery
USB測定器 活用入門

見本