

省エネルギーのための電子技術専門誌

グリーン・ Green Electronics エレクトロニクス

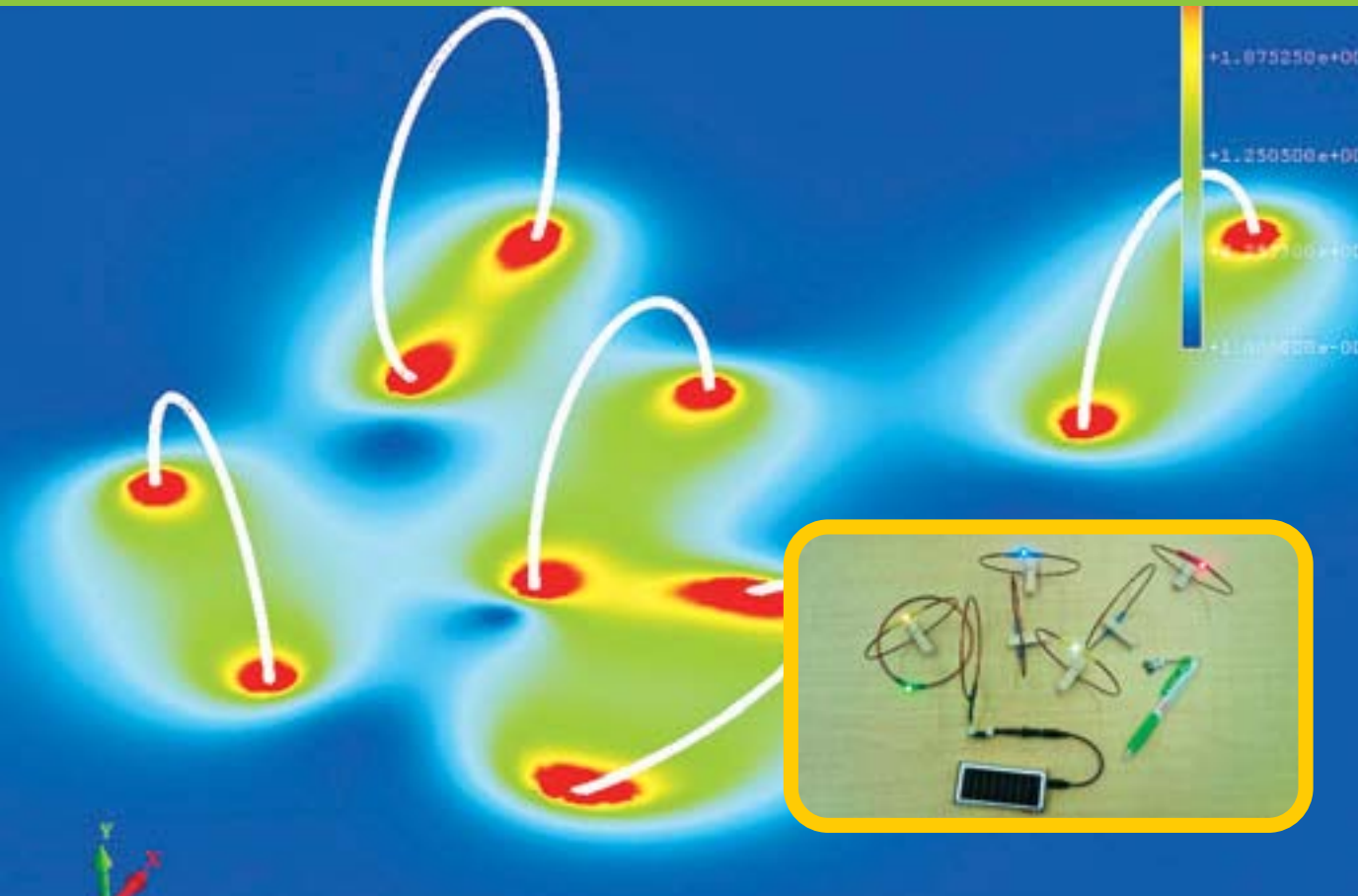
No.
11

応用技術によって新しい時代を切り拓くための設計&測定技術

特集 高周波パワー・エレクトロニクスの展望

- スイッチト・キャパシタ方式デジタル増幅器
- 計器用変流器CTと計器用変圧器PTの使用法

見本





新しい時代を拓く 高周波パワー・エレクトロニクスに向けて 価値創造と計測技術への 展望と期待

細谷 達也
Tatsuya Hosotani

今は、新しい技術開発に取り組むチャンスです。近年、報道などによりエレクトロニクス業界の厳しい状況が伝えられています。

新しい技術開発に取り組むことは難しい状況にあるように思えます。しかし、実は、新しい技術開発こそが復興、復活、そして皆が元気になるための近道と考えます。

技術開発と新しい価値創造

● 技術開発への期待

エレクトロニクスにおいては、新興国の追い上げは激化し、「技術立国」とまで言われた日本の電機産業は厳しい状況にあります。日本には優れた技術がたくさんあり、教育も充実しているのに、なぜでしょうか？

一つには、高度な生産設備の普及により、研究開発に取り組まなくても品質の良い製品が製造されるようになってきたからでしょう。もちろん、ほかにもさまざまな要因はあるでしょう。そこで、技術者の視点で、私たちの弱みと強みを考えてみたいと思います。

日本の強みは、「技術力」と「現場力」ではないでしょうか？ 先人のエンジニアは、科学技術に真摯に向き合い、「技術力」を高めてきました。勤勉、勤労により「現場力」を伸ばしてきました。これらにおい

ては諸外国に比べても非常に優れていると思います。

一方、弱みは何でしょうか？ 一つの答えとしては、「これまでにない」製品があまり生まれていないことと思います。たくさんの新技術や新製品は、生まれてはいるのですが、「これまでにない」と驚きを感じるような斬新な技術や製品は、少ないように思います。スマートフォンやタブレットなどの製品は海外生まれです。簡単に真似できたり、応用できる製品ならば、「技術力」や「現場力」を活かすことは難しいです。変化がともなう始めて「技術力」や「現場力」が本質的な強みとして活かされてくると思います(図1)。

● 新しいライフ・スタイルのイメージ

私たちは何を目標せばよいのでしょうか？

ずばり「新しいライフスタイルをイメージできる価値創造」が大事でしょう。「価値創造」ってどういうこと？…と思われる方もおられると思います。ここでは、今までとは違うライフ・スタイルや、これまでになかった面白い製品を生み出すことと考えて良いと思います。もちろん、面白い製品は良品であることが前提です。

なぜライフ・スタイルなの？…と思われる方もいるかもしれません。簡単に言えば、生活が豊かになって私たち消費者は、時代とともに「欲しいものを買う」というように変わってきました。1970年代の日本の高度成長期の時代のような造れば売れるという時代でもなく、1990年代の品質が良ければ売れるというような時代でもない、新しい時代なのかもしれません。時代とともに、エレクトロニクスにおいて目指す目標も変わる必要があると思います。

このような「価値創造」を実現するには、やはり「技術開発」が重要です。技術者として目指すところは、見せかけのデザインや外装の変化だけでは、不十分です。目標や志は高く掲げたいです。一方、必ずしも難しい技術だけが「価値創造」を生み出すわけではありません。簡単な技術であっても、または見慣れた技術であっても、応用や用途を変えることによって、新しい価値創造を具現化し、未来社会をイメージするよう

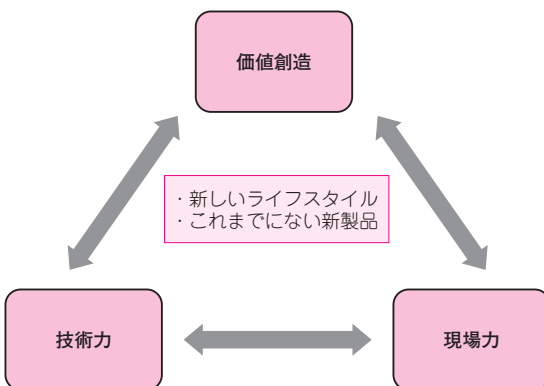


図1 日本の強みと期待

な技術開発は可能だと思います。

科学技術の発展によって素敵な未来社会を描くこと、その実現に向けて一歩ずつ進むことが、私たちエンジニアの目標であり、誇りになると思います。

● 技術により描く未来社会

「価値創造」, 「技術力」, 「現場力」が三位一体となることで、新しい未来社会を描くような科学技術や製品開発が可能になると思います。このようにして技術や努力を積み重ねることで、社会の発展に貢献できるのではないのでしょうか。きっと、エンジニアも消費者も皆が元気になる方向に進むと信じます。

「技術力」と「現場力」に「価値創造」をプラスすることは、とても大事なことです。日本は資源に乏しい国です。これを補うためにも工業が発達することは大事なことです。資源のない国では、経済的な意味においても「国としての価値をどのように創造するか」ということも考えていかなければいけません。もちろん、グローバル化が進むなかで国ごとに分けて考えることが不合理なところがあるかもしれません。しかし、グローバルな視点で一人一人が自らの役割や自分のできることを考えて行動することは大切だと思います。

● 高周波パワー・エレクトロニクス

これまでにない価値創造を目指した新しい学際技術分野として、「高周波パワー・エレクトロニクス」を提唱し、期待します。「高周波パワー・エレクトロニクス」とは、「パワー・エレクトロニクス」, 「高周波エレクトロニクス」, 「パワー・デバイス」の三つの技術分野を柱とし、技術融合と相乗効果により発展と進

化を期待する新しい学際技術分野です。

「パワー・エレクトロニクス」は、電力用半導体素子をスイッチとして用い、電力の変換と制御を行う技術の総称です。

「高周波エレクトロニクス」は、電磁波工学、半導体工学などを手段として、主として高周波での通信を目的にさまざまなデバイスやシステムを開発する技術の総称です。

また、「パワー・デバイス」は、電力用半導体工学や電気材料工学などを手段として、電力を扱うさまざまな電力用電子部品を開発する技術の総称です。

これら各技術分野に関わる技術者がそれぞれの強みを活かし、技術融合と相乗効果により切磋琢磨して新しい技術的変革を導くことを期待します。「高周波パワー・エレクトロニクス」は、新しい価値創造が期待できる新しい技術分野です(図2)。

高周波パワー・エレクトロニクスにおける有望技術の一つに「ワイヤレス給電」があります。これまで電気機器や電子機器を動作させるためには、通電線が必要でした。もし、通電線なしに電力が供給できるようになると、今までとは違うライフ・スタイルや、これまでになかった面白い製品を生み出すことができそうに思いませんか？

そのイメージが新しい価値創造に繋がります。資源がない国で培う技術だからこそ、エネルギーを大切に地球環境を守ることができます。電力効率の良い製品、地球に優しい製品が開発できます。

私たちは、価値創造をもっと大切にする必要があります。物質的な資源の消費だけの経済成長には限界があります。科学技術の発展に挑戦していきましょう。

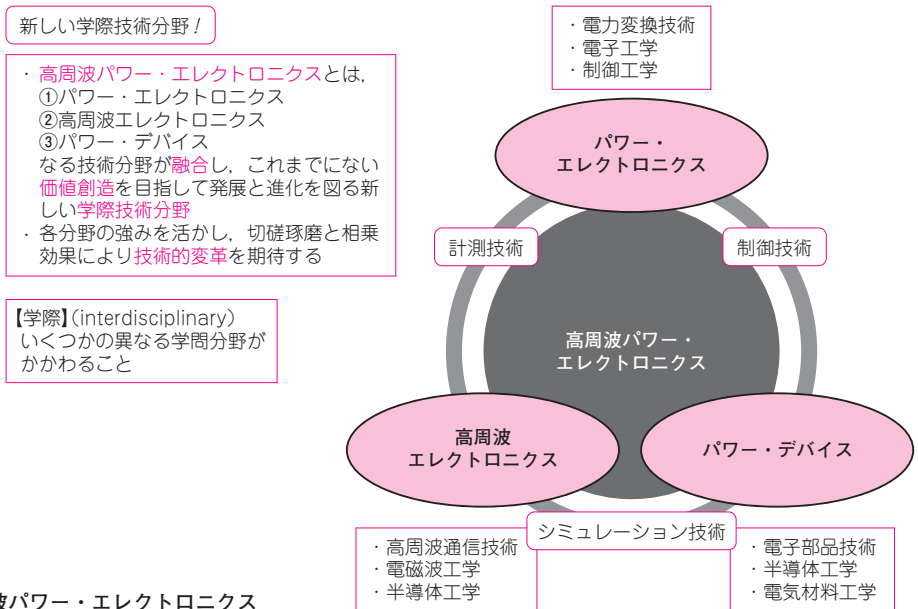


図2 新技術分野：高周波パワー・エレクトロニクス

● パワー・エレクトロニクスの高周波化

パワー・エレクトロニクスでは、ゆっくりと動作周波数の高周波化が進んでいます。歴史を振り返ると、パワー・エレクトロニクスにおいて創出された多くの電力変換回路やスイッチング電源では、ゆっくりと動作周波数が高周波にシフトしています。

1969年に月面着陸したNASAのアポロ計画において、トランスを小型化してスイッチング電源は開発されました。現在まで40年余りの間に半導体技術、電子部品技術、回路技術は大きく進歩し、あらゆる電気/電子機器に電力を供給する装置として用いられるようになりました。

1970年代頃は、音鳴りを避けるために可聴周波数領域以上の20 kHz程度で動作させることが多く、時代とともに50 kHz、100 kHzと高周波化が進んでいます。EMCノイズ規格である雑音端子電圧での優位性から、現在では動作周波数は150 kHz程度にとどまっていますが、小型化の要求が強いPOL(Point of load)用途などのDC-DCコンバータでは、動作周波数が数100 kHzからMHzとなる電源装置も増えてきています。

なぜ、ゆっくりと高周波化は進んでいるのでしょうか？ 長所としては、高周波化により部品の小型化ができると、電源装置の小型化も可能になるからです。では、なぜゆっくりなのでしょう？ 主たる答えは、高周波化によって技術課題が指数関数的に増すからです。

本来、高周波化は目的ではありません。電力効率や価格などとバランスを取りながら、高周波化により小型化が図られ、現在の動作周波数に落ち着いていると言えます。言い換えれば、高周波化はパワー・エレクトロニクスの技術進歩の歩みと連動していると言ってもよいでしょう。

● 高周波化での技術課題

高周波化によりどのような技術課題が現れてくるのでしょうか？ 高周波化は、電力効率において、ほとんど不利な要素しかありません。

電力用半導体素子を高周波で動作させると、動作周波数に比例してスイッチング損失は増大します。インダクタンスやトランスにおいても磁性体のヒステリシス損などの鉄損は、動作周波数に比例して増大します。配線や部品の寄生要素は高周波動作においては、あたかも電子部品として存在しているかのようにふるまいます。主に電子部品の結線関係で構成していた電気回路は、まったく別の電気回路となります。

簡単に言えば、教科書などに書いてある理想的な回路動作と現実とのギャップが大きくなります。これらを扱うには、高周波回路に対する特有の知識や経験が必要となります。技術難易度は、一気に高まります。

さらに重大な課題としては、小型化のために高周波化を目指しても、電源装置が許容できる放熱量は小型化により小さくなります。このため小型化を図るには、電力損失そのものを低減する必要があります。しかし、これは、高周波化が電力効率においてほとんど不利な要素しかない、ということに反しています。

小型化を図るために高周波化をしようとしても電力損失は増加し、これまで以上に電力損失を低減しなければいけないという大きな技術課題に直面します。とある大学教授の言葉を借りると「動作周波数を2倍に上げると、技術難易度は2倍になる。10倍だと、難易度も10倍だ」となります。これは大変に納得できる言葉です。

高周波パワー・エレクトロニクスでは、これまで100 kHz程度であった動作周波数を一気に100倍の10 MHz程度まで向上させるなどの研究が行われています。この場合、難易度は100倍になるということです。言い換えれば、これまで1年であった開発期間は、100年の開発期間が必要になるという計算です。

一方、このような技術課題を越えることが価値創造につながります。幸いにも高周波パワー・エレクトロニクスにおいて日本は、世界でも技術的に先行しています。詳細については、第1章の「世界を変えるワイヤレス給電技術」を読んでください。

● 高周波化と高速化の違い…1万倍の法則

高周波エレクトロニクスの代表である通信技術では、マイクロ波やミリ波といった高周波化が進んでいます。

一方、パワー・エレクトロニクスの代表である電力変換技術では、高周波化は非常に高度な技術です。高周波エレクトロニクスと何が違うのでしょうか？

一つには、通信技術では、信号の伝送を目的として、エネルギーつまり電力損失や発熱の問題が著しく小さいことが挙げられます。パワー・エレクトロニクスは、エネルギーを扱うために発熱という課題を解決する必要があります。課題解決は圧倒的に難しくなります。

また、通信技術では「高周波化」を重視しますが、パワー・エレクトロニクスでは「高速化」を重視します。「高周波化」と「高速化」は似ていますが、同じではありません。通信技術では、高速な通信を目的として、周波数領域での「高周波」を重視しています。一方、パワー・エレクトロニクスでは、電力効率の良い電力変換を目的として、時間領域での「高速」を重視しています。

言い換えれば、高周波エレクトロニクスでは、半導体デバイスを高周波(数十MHz～数十GHz)で低速動作をさせます。一方、パワー・エレクトロニクスでは、半導体デバイスを低周波(数百kHz～数MHz)で高速動作をさせます。

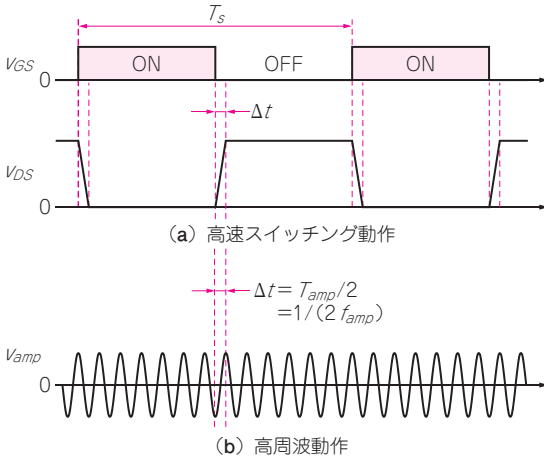


図3 高速スイッチング動作と高周波動作

例えば、10 MHzのスイッチング動作を高速に行うとして、1スイッチング周期の1%の期間において電力用半導体素子が能動領域で動作するとします。能動領域での動作期間を発信周波数の1/2と仮定し、通信回路の100倍の電圧をスイッチングする場合、半導体素子には1万倍の動作周波数が求められます。すなわち、「1万倍の法則」です。発信周波数は100 GHzに相当します。つまり、10 MHzのスイッチング動作は、100 GHzのマイクロ波の技術領域をも包括していると考えられることもできます(図3)。

このように、これまでではそれぞれ独立に発展してきた技術領域であっても、実は技術課題は似ている場合があります。異分野技術が交流することにより新しい技術視点が明確になります。これは、価値創造の第一歩です。これから拓かれる新しい時代に向かって、高周波化と高速化の融合と差異化が求められます。そしてこれらの取り組みにより、きっと、これまでにない新技術、新製品が生まれるでしょう。

以降では、第2章、第3章につながる「新しい計測技術」に焦点を当てていきたいと思います。

計測機器の新しい使いかたと創意工夫

● パワー・エレクトロニクにおけるベクトル・ネットワーク・アナライザの活用

これまでパワー・エレクトロニクにおいては、それほど高周波動作は求められていませんでした。一方、新しい時代を切り拓くために高周波動作が求められてくると、現在使っている測定器に関しても新しい使いかたや創意工夫が必要になります。

例えば、電力変換回路の開発設計においてオシロスコープを用いるだけでは不十分かもしれません。ここ

では、現役の計測機器を工夫して用いる新しい技術について紹介をしたいと思います。まずは、高周波エレクトロニクス技術者が積極的に活用しているベクトル・ネットワーク・アナライザ(VNA)を高周波パワー・エレクトロニクス技術者はどのように活用できるかなどについて実用的な新技術を紹介します。

電源回路設計者などのパワー・エレクトロニクス技術者は、オシロスコープを用いて時間領域における測定を行います。一方、通信回路設計者などの高周波エレクトロニクス技術者は、VNAを用いて周波数領域での測定を行います。ワイヤレス給電などの技術はこれらの二つの専門技術分野の狭間に位置すると考えられます。

このような新しい技術分野では、システム回路の設計や解析に用いる計測機器においても、その目的や測定対象に適切に対応して使い分けことが大事です。計測器の長所を積極的に活用して用いることが求められます。

● VNAの特長

VNAは、共振器などの周波数特性の測定において用いられ、測定精度やダイナミック・レンジなどに優れています。入出力インピーダンスは50 Ωに統一されており、電力変換回路に関する測定では、創意工夫と注意が必要です。これらについては、後述します。

VNAでは信号周波数を掃引して、被測定物に対する反射係数と透過係数の周波数特性などが測定できます。入力信号に対する電力比を複素量のベクトルとして測定します。測定結果は、例えば、スミス・チャート上の2次元平面に描くことができます。S/N(ノイズ対信号比)は極めて高く、-100 dBm以下の微弱信号を検出することもできます。このように測定ダイナミック・レンジは広く、このような点においてはオシロスコープよりも勝っています。

代表的な2ポートのVNAでは、Sパラメータとして、 S_{11} 、 S_{21} 、 S_{22} 、 S_{12} を測定することができます。デジタル信号処理を行うことで、振幅と位相の表示、実部と虚部の表示、入出力インピーダンスへの変換表示などを行うことができます。例えば、ワイヤレス給電システムなどにおいて、送電装置、受電装置、または中継装置などの電力伝送デバイスとして共振器を用いる場合、共振器の測定にはVNAは便利です。

VNAを用いることで、①自己共振周波数 f_r 、②共振器の共振の鋭さであるQ値、③結合係数 k を測定することができます(これらの具体的な測定方法については後述)。これらのパラメータの設計は、システム設計においては重要となり、システムの性能に大きく関与し、システム設計、解析においてVNAは有用な測定器であると言えます。

● VNAによる電力伝送デバイスの測定

電力伝送デバイスとしての共振器についての①自己共振周波数 f_r 、②共振器の共振の鋭さである Q 値、③結合係数 k の測定は次のように行うことができます。

① 自己共振周波数

自己共振周波数 f_r の値は、図4のような測定構成により S パラメータの $|S_{11}|$ を測定することで得ることができます。VNAのポート1を疎結合ととして共振器と接続するために、ループ・コイル・プローブを用います。図4のように、ループ・コイル・プローブを共振器から十分に離して S_{11} を測定できます。疎結合であればループ・コイル・プローブを使わなくても測定はできます。

図5に示すように、共振周波数においてはエネルギーが吸収されることにより $|S_{11}|$ に鋭い谷が生じます。この周波数を読み取ることで、自己共振周波数 f_r を測定することができます。

② 共振器の共振の鋭さ Q 値

共振器の共振の鋭さである Q 値は、次のように測定できます。共振周波数の測定と同様にして、図4のループ・コイル・プローブにVNAのポート1(またはポート2)を接続して、 S パラメータの $|S_{11}|$ を周波数の

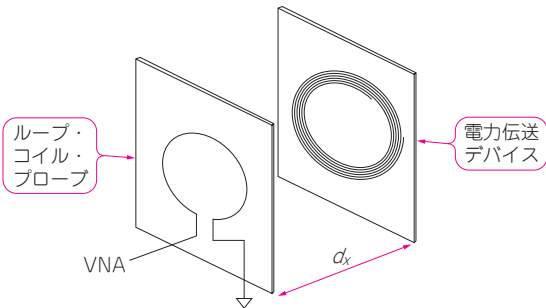


図4 VNAによる自己周波数 f_r の測定
距離 d_x を離すことで電力伝送デバイスに対するループ・コイル・プローブの影響を少なくすることができる

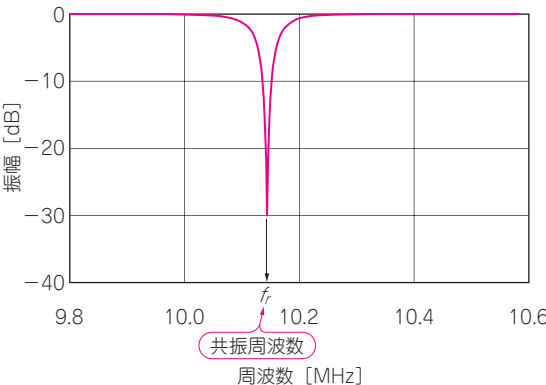


図5 自己共振周波数 f_r の測定
反射波の谷となっている共振周波数を読み取る

関数として測定します。

ここでは、ループ・コイル・プローブとスパイラル共振器の間の距離をさまざまな値に変化させながら測定します。ある距離に対して図5と同様に図6のように $|S_{11}|$ の鋭い谷を観測します。dBで測定したその最小値 $-L_0$ (L_0 は正)を用いて、次式により L_1 (L_1 は正)を求めます。

$$L_1 = 10 \log 2 - 10 \log \left(10^{-\frac{L_0}{10}} + 1 \right) \dots\dots\dots (1)$$

図6に示すように、最小値 $-L_0$ と $-L_1$ とを縦軸に当てはめて、水平線と共振曲線との交点から二つの周波数を求めて f_1 、 f_2 とします。これらと自己共振周波数 f_r から、次式により Q 値を得ることができます。

$$Q_L = \frac{f_r}{f_2 - f_1} \dots\dots\dots (2)$$

③ 結合係数 k

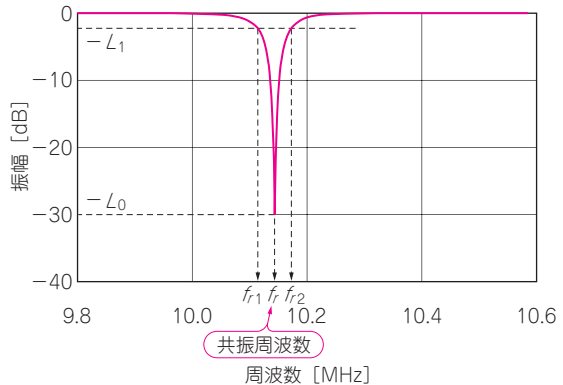
共振器間の結合係数 k は、測定によって得られる共振周波数 f_{r1} 、 f_{r2} を用いて次式で求めることができます。

$$k = \frac{f_{r2}^2 - f_{r1}^2}{f_{r1}^2 + f_{r2}^2} \dots\dots\dots (3)$$

また、例えば、結合する二つの共振器が同じである場合、結合回路が有する固有共振周波数 f_r は、共振器の自己共振周波数 f_r と同じになります。固有共振周波数 f_r は、次式で表すことができます。

$$f_r = \sqrt{\frac{2f_{r1}^2 f_{r2}^2}{f_{r1}^2 + f_{r2}^2}} \dots\dots\dots (4)$$

これらの式で、共振周波数 f_{r1} 、 f_{r2} は、二つの共振器が結合することにより形成されて測定される二つの共振周波数を示しています。例えば、結合するまえの二つの共振器が同じ共振周波数をもっている場合、これらの共振器の共振周波数は自己共振周波数 f_r として表すことができます。ただし、これらの解析式は、コイルの内部抵抗などの抵抗成分を無視していることに



$$L_1 = 10 \log 2 - 10 \log \left(10^{-\frac{L_0}{10}} + 1 \right) \quad Q_L = \frac{f_r}{f_2 - f_1}$$

図6 共振の鋭さ Q 値の測定

注意してください。

前式で示された共振周波数 f_{r1} 、 f_{r2} は、自己共振周波数 f_r が結合によって、固有共振周波数 f_r に対して低周波側と高周波側に位置する二つの共振周波数として分離したと考えられます。もともとは同じであった自己共振周波数 f_r が、共鳴結合によって二つの共振周波数に分離したと考えることができます。

共鳴型ワイヤレス給電システムでは、これら二つの共振周波数において、二つの共振器は共鳴結合を形成することができます。

測定では、図7に示すようにループ・コイル・プローブと疎結合した二つの電力伝送デバイスである共振器を対向させて、ポート1からポート2への透過係数 $|S_{21}|$ を測定します。ここでもループ・コイル・プローブは、十分にスパイラル共振器と離さなければ誤差は大きくなります。測定結果としては、図8に示すように $|S_{21}|$ の二つのピークから f_{r1} 、 f_{r2} を得ることができます。

一方、注意すべき点は、前式に示されるように、結合係数の測定においては、二つに分割された共振周波数 f_{r1} 、 f_{r2} の測定値が結合係数の測定精度に密接に関係します。例えば 10^{-3} の精度を結合係数の測定精度として求めるのであれば、 10^{-3} 以上の精度で共振周波数 f_{r1} 、 f_{r2} を測定する必要があります。

VNAを使ってSパラメータの $|S_{21}|$ を測定することにより、二つのピークから f_{r1} 、 f_{r2} を測定します。しかし、結合係数 k が小さくなる条件においては、共振周波数 f_{r1} 、 f_{r2} は自己共振周波数 f_r に近づき、共振周波数 f_{r1} と f_{r2} の差は小さくなります。

また、二つの共振器の結合を複数の共振周波数をする複共振回路として見た場合、結合係数 k が小さくなる条件においては、インピーダンスの実部は大きくなります。このために結合係数 k が小さくなる条件においては、共振周波数 f_{r1} 、 f_{r2} における測定値のピークは緩やかになり、ピークは一つに融合します。

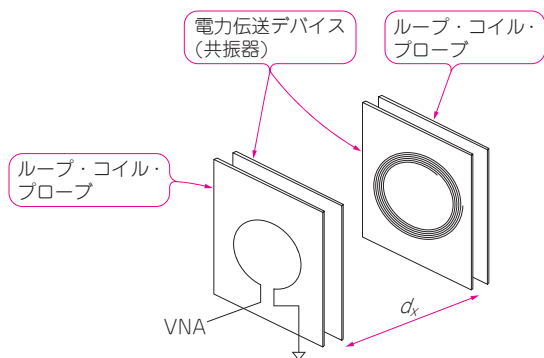


図7 結合係数の測定
VNAによる結合係数の測定回路。電力伝送デバイス(共振器)とループ・コイル・プローブはできるだけ離すことが好ましい

その結果、あまりにも小さい結合係数 k は測定できないということになります。注意が必要です。目安としては、例えば0.01以下の結合係数の測定は難しくなります。

● ベクトル・ネットワーク・アナライザとデジタル・オシロスコープとの比較

VNAの使いかたを創意工夫することにより、①自己共振周波数 f_r 、②共振の鋭さ Q 値、③結合係数 k を測定することができます。これらの測定においては、オシロスコープなどと比較してもVNAが優れていると言われているでしょう。

一方、VNAの課題としては、周波数領域での分析は優れるものの、時間領域におけるリアルタイムの測定は困難です。例えば、非線形回路の動作の測定や周期性をもたない動作の分析においては、圧倒的にデジタル・オシロスコープが有用になります。

VNAは、微小信号に対する測定に優れてはいますが、電力に依存して変化するパラメータなどの測定や非線形要素の測定には有用ではありません。言い換えれば、共振器などの電力伝送デバイスやインダクタ、トランス、キャパシタなどの電気特性の測定にはVNAが便利であり、これらの測定に基づいて解析や設計を行って、電力変換回路や電力伝送回路に関する実際の動作機構に関する測定には、デジタル・オシロスコープを用いることが適しています。

以降では、VNAでの測定値をデジタル・オシロスコープなどで測定する電力変換回路の設計に展開する具体的な解析/設計手法として、VNAで測定されたSパラメータを電力変換回路や電力伝送回路の設計で大いに活躍するFパラメータに変換する技術を紹介いたします。

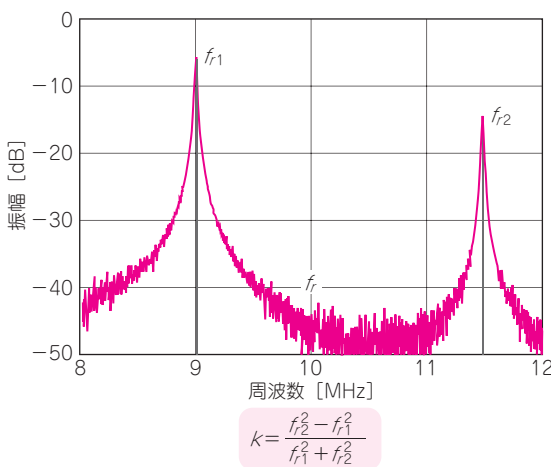


図8 結合係数の測定のためのデータ
VNAによる結合係数の測定結果。分離した二つの共振周波数から結合係数を求めることができる

● SパラメータからFパラメータへの変換

スイッチング電源などの電力変換回路においては、50 Ω系の通信回路などの設計において用いられるSパラメータは使うことができません。電力変換回路では50 Ω系は関係がないからです。このためVNAによって測定された測定値はそのままでは電力変換回路に使うことができません。電力変換回路ではインピーダンスをほとんどもたないために、Sパラメータを用いて考えようとしても伝達係数は0となり、Sパラメータを定義することはできないのです。

一方、周波数領域で設計/解析できるような共振形コンバータなどの電力変換回路においては、Fパラメータの活用が非常に有効です。Fパラメータを用いることによってシステム回路の設計や解析において、電圧と電流でシステムの特性を把握することが可能となります。

これらのことから、VNAによって測定されたSパラメータをFパラメータに変換することができれば、パワー・エレクトロニクスの技術分野においてもVNAは非常に有効な計測器として活用することができます。

特に、パワー・エレクトロニクスの技術分野において課題となっているのは、数MHzを越えるような動作システムにおける設計をどうするかということです。デジタル・オシロスコープでは、数百kHz程度での動作解析には適当な測定精度を有しており、有用な測定器です。しかし、数MHzを越えるような動作解析においては、測定精度が著しく低下してしまいます。

そこで創意工夫して、パワー・エレクトロニクスの技術分野でVNAを使おう、となります。VNAを有効に活用できる技術を紹介しましょう。

図9に示すようにFパラメータ(4端子回路網)の基本行列は次式で表されます。SパラメータとFパラメータでは、出力側の電流の向きが異なるために注意が必要です。

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ I_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_2 \\ I_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_2 \\ I_2 \end{pmatrix} \dots\dots (5)$$

入力抵抗 R_{in} 、出力抵抗 R_{out} が与えられ、Sパラメータが存在する場合、Fパラメータの行列要素(A, B, C,

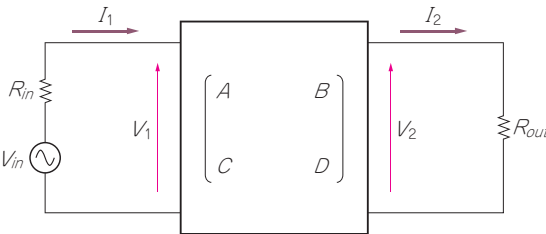


図9 Fパラメータ(4端子回路網)
Fパラメータ(F行列)を表す回路。F行列とS行列とは、出力側の電流の向きが異なることに注意

$D)=(F_{11}, F_{12}, F_{21}, F_{22})$ は、次式で表すことができます。

$$A = F_{11} = \frac{\sqrt{R_{in}} \{(1+S_{11})(1-S_{22})+S_{12}S_{21}\}}{2\sqrt{R_{out}} S_{21}} \dots (6)$$

$$B = F_{12} = \frac{\sqrt{R_{in}R_{out}} \{(1+S_{11})(1+S_{22})-S_{12}S_{21}\}}{2S_{21}} \dots (7)$$

$$C = F_{21} = \frac{\{(1-S_{11})(1-S_{22})-S_{12}S_{21}\}}{2\sqrt{R_{in}R_{out}} S_{21}} \dots\dots (8)$$

$$D = F_{22} = \frac{\sqrt{R_{in}} \{(1-S_{11})(1+S_{22})+S_{12}S_{21}\}}{2\sqrt{R_{out}} S_{21}} \dots (9)$$

以上より、VNAによって測定されたSパラメータをFパラメータに変換することができました。よって、VNAを用いてSパラメータを測定し、 $R_{in}=R_{out}=50 \Omega$ を代入することで、Fパラメータを得ることができました。

● インピーダンス・パラメータへの変換

共振形インバータなどの場合においては、理想的には $R_{in}=0$ として考えることができ、前式において求めたFパラメータの各行列要素A, B, C, Dを用いて伝送電力 P_{tr} や入力電流 I_1 そして、電力伝送回路における伝送効率 η_{tr} を求めることが可能となります。伝送電力 P_{tr} は、次式で表されます。

$$P_{tr} = |I_2|^2 R_{out} \dots\dots\dots (10)$$

一方、 $V_1=AV_2+BI_2$ 、 $I_1=CV_2+DI_2$ より、 $V_1=V_{in}$ 、 $V_2=I_2R_{out}$ を代入して次式を得ます。

$$I_2 = \frac{V_{in}}{AR_{out}+B} \dots\dots\dots (11)$$

これらより伝送電力 P_{tr} が求まります。また、伝送回路における伝送効率 η_{tr} は、次式で求めることができます。

$$\begin{aligned} \eta_{tr} &= \frac{P_{tr}}{V_{in} \text{Re}[I_1]} = I_1 \\ &= \frac{P_{tr}}{V_{in} \text{Re} \left[\frac{CR_{out}+D}{AR_{out}+B} V_{in} \right]} \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

以上より、VNAを用いてトランスなどを測定してSパラメータを得て、これらをFパラメータに変換することでSpice系の回路シミュレータなどを用いて解析することが可能となります。これによりシステム特性を解析することが可能となります。

一方、Fパラメータは、インピーダンス・パラメータであるZパラメータを用いて表すこともできます。Zパラメータは次式で定義されます。

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (13)$$

Zパラメータを用いて、Fパラメータは、次式で表すことができます。

$$A = \frac{Z_{11}}{Z_{21}} \dots\dots\dots (14)$$

$$B = \frac{Z_{11}Z_{22} - Z_{12}Z_{21}}{Z_{21}} \dots\dots\dots (15)$$

$$C = \frac{1}{Z_{21}} \dots\dots\dots (16)$$

$$D = \frac{Z_{22}}{Z_{21}} \dots\dots\dots (17)$$

さらに、回路解析などによりFパラメータが得られた場合にSパラメータに変換する変換式を以下に示しましょう。変換における途中の計算式は、非常に複雑な行列計算となるためにここでは割愛します。行列式を丁寧に変換していくことで、次式を得ることができます。

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{A+BY_o-CZ_o-D}{A+BY_o+CZ_o+D} & \frac{2(AD-BC)}{A+BY_o+CZ_o+D} \\ \frac{2}{A+BY_o+CZ_o+D} & \frac{-A+BY_o-CZ_o+D}{A+BY_o+CZ_o+D} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} A+BY_o-CZ_o-D & 2(AD-BC) \\ 2 & -A+BY_o-CZ_o+D \end{bmatrix} \dots\dots\dots (18)$$

ただし、

$$\Delta = A+BY_o+CZ_o+D, Y_o = \frac{1}{Z_o} \dots\dots\dots (19)$$

パワー・エレクトロニクスの技術分野においてFパラメータを積極的に活用する具体的な方法や実施例については、第1章で詳しく述べられています。ぜひ、参考にしてください。

以上までにおいて、VNAを用いたSパラメータの測定と、Sパラメータの測定値をパワー・エレクトロニクスの技術分野において活用する方法を述べました。

以降では、これらの測定技術と関連が深い優れた計測機器やソフトウェアについて、いくつかを具体的に紹介します。

期待される計測機器

● **ベクトル・ネットワーク・アナライザの活用**

計測機器の大手であるアジレント・テクノロジー製のE5061B ENAシリーズ・ネットワーク・アナライザは、5 Hz～3 GHzの周波数ドメイン・デバイス解析が可能であり、低周波から高周波までの電子部品や回路のさまざまな測定が可能です(写真1)。

前述した変換式を用いることで、測定によって得られたSパラメータをFパラメータに変換し、等価回路を形成することで電力変換回路の解析は可能となります。回路シミュレータを活用することで、線形回路であっても非線形回路であっても回路解析が可能となります。詳細については、第1章を参考にしてください。

また、適用するアプリケーションに合わせてポートの数、周波数、バイアス・ティーを選択したい場合は、E5071C ENAシリーズ・ネットワーク・アナライザが有効です。クラス最高のRF性能と速度、広い周波数レンジ、汎用機能を備えており、20 GHzまでのRF電子部品や回路開発設計においての特性評価に適しています。

また、ソフトウェアとハードウェアのどちらのオプションでも、シリアル番号を変更せずにすべてのオプションを必要なときにアップグレードすることができ、将来の設備投資計画を考えると柔軟に対応できることも魅力です(写真2)。

● **ネットワーク・アナライザとの組み合わせソフトウェアの活用**

アジレント・テクノロジーは、ワイヤレス給電用の



写真1 ベクトル・ネットワーク・アナライザ(E5061B, アジレント・テクノロジー)

アンテナなどの電力伝送デバイスに関して、入出力における高周波交流電圧と電流、伝送電力、伝送効率を解析するソフトウェア「PS-X10-100 E5061Bネットワーク・アナライザ用ワイヤレス給電アンテナ解析ソフトウェア」を2012年8月1日より販売しています(図10)。ワイヤレス給電では、アンテナなどの電力伝送デバイスを対向させることによって電力を伝送し、電力伝送デバイスを適切に測定したり、評価することはとても重要です。

アジレント・テクノロジー(電子計測本部アプリケーション・エンジニアリング部)では、ENAネットワーク・アナライザ「E5061B(オプション3L5)」と組み合わせて、ワイヤレス給電の設計や解析において必要となる電力伝送デバイスの入出力における交流電圧、交流電流、伝送電力、伝送効率を測定器単体で測定でき、簡単かつ柔軟に解析するためのソフトウェアを提供しています。

特徴としては、電力伝送デバイスに接続される高周波交流電圧源の電圧値、負荷のインピーダンス値を入力することで、E5061Bネットワーク・アナライザによるアンテナの測定結果を元にして、アンテナの入出力における高周波交流電圧と電流、電力、伝送効率を表示することができます。ワイヤレス給電などに用いられる電力伝送デバイスのAC解析に機能を限定することで、高価なシミュレーション・ツールを用いなくても解析ができるように対応をしています。

また、測定結果はE5061Bネットワーク・アナライザの画面上に、リアルタイムで更新しながら表示することができます。電力伝送デバイスの対向状態や距離を変化させた場合での伝送効率の変化などを観測することができ、柔軟な解析が可能です。使い勝手の良いソフトウェアを提供することで、ネットワーク・アナライザ測定器の価値をより高めていると言えます。

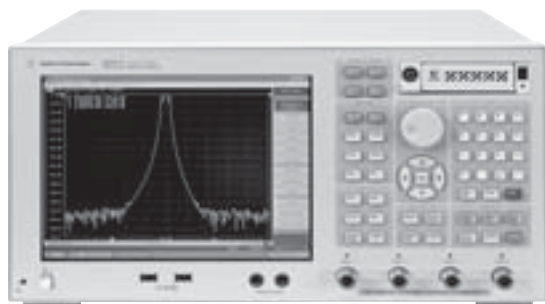


写真2 ベクトル・ネットワーク・アナライザ(E5071C, アジレント・テクノロジー)

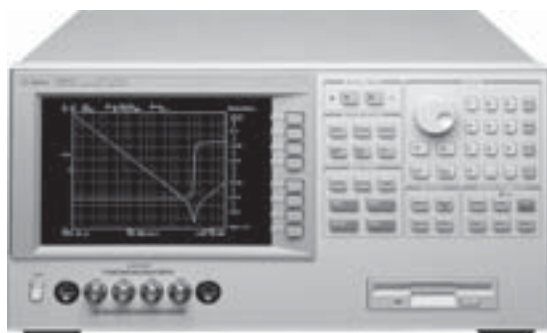
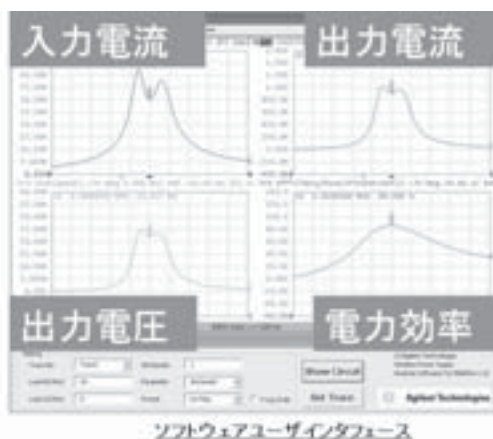
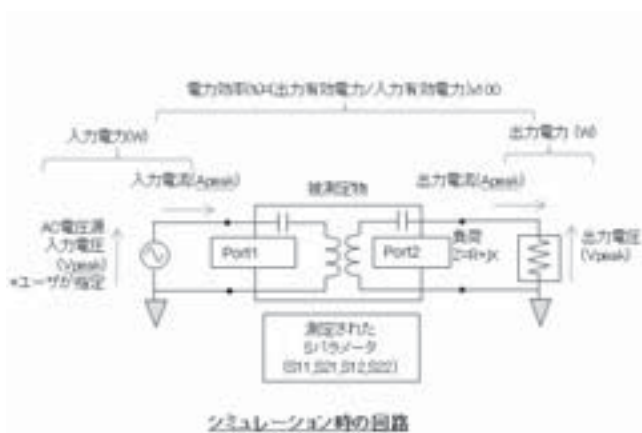


写真3 インピーダンス・アナライザ(4294A, アジレント・テクノロジー)



✓ E5061B内部で動作するワイヤレス給電用アンテナ解析ソフトウェアにより AC(アンテナ)部分の電流、電圧、電力をシミュレーション可能

図10 ワイヤレス給電アンテナ解析ソフトウェア(PS-X10-100, アジレント・テクノロジー) E5061Bネットワーク・アナライザ用ワイヤレス給電アンテナ解析ソフトウェア

● インピーダンス・アナライザの活用

高周波動作におけるインダクタやキャパシタなどの電子部品や、ワイヤレス給電における電力伝送デバイスや共振器の測定および解析には、インピーダンス・アナライザが役立ちます。

アジレント・テクノロジー製の4294Aプレジジョン・インピーダンス・アナライザは、電子部品や回路のインピーダンスの測定や解析ができる一体型の計測機器です(写真3)。4294Aは、 $\pm 0.08\%$ の基本インピーダンス精度があり、40 Hz～110 MHzと広い周波数レンジでの測定に対応しています。

信号レベル・レンジが広く、実際の動作条件下においてデバイスを評価することも可能です。テスト信号レベル・レンジは5 mV～1 V_{RMS}、または200 μ A～20 mA_{RMS}、DCバイアス・レンジは0 V～ ± 40 V、または0 mA～ ± 100 mAとなっています。

● デジタル・オシロスコープの活用

デジタル・オシロスコープでは、横河メータ&インスツルメンツ製のDLM2000シリーズは、軽量、コンパクト・サイズであり、性能に優れていて使いやすいです(写真4の右側)。200 MHz、350 MHz、500 MHz帯域モデルをラインナップしており、8.4インチ大画面液晶ディスプレイを搭載、最大125 Mポイントのロング・メモリと最大2.5 Gsps(4ch時1.25 Gsps)の高速サンプリング・レートを実現しています。

特に、デジタル制御回路の動作を見る場合には、ch4のアナログ入力をロジック8ビットに切り替えて、アナログ3ch&ロジック8ビットのMSO(ミックスド・シグナル・オシロスコープ)として機能させることができます。ロジック入力を使用すれば、アナログ3chとロジック8ビットにより、最大11個の入力信号を同時に観測することができます。ロジック入力をデータ信号/制御信号の観測やトリガ源として使用するだけでなく、ロジック入力でのI²CバスやSPIバスのシリアル・バス解析も可能となります。

さらに最新機種として、アナログ8chの同時観測が

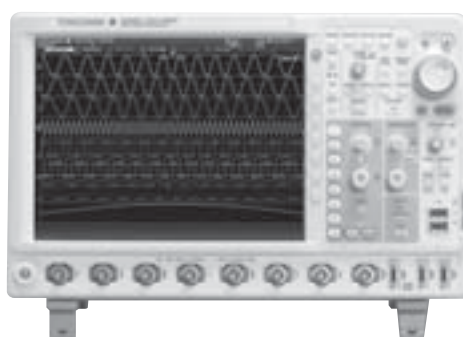
行えるDLM4000シリーズもラインナップされています。12.1インチ大画面液晶ディスプレイを搭載し、多現象信号の同時観測に使用できます(写真4の左側)。最大125 Mポイントの入力データを記憶できる8チャンネル・デジタル・オシロスコープ「DLM4058」は、サンプリング周波数は最大2.5 GHz、入力信号の帯域幅は最大500 MHzです。8チャンネルのうち1チャンネルを使わなければ、8ビットのロジック・アナライザ機能もアナログ入力と同期させて利用できます。

オプション機器を使うと、8チャンネルをすべてアナログ入力に使用して16ビット・ロジック・アナライザ機能を追加することができます。また、7チャンネルのアナログ入力と24ビットのロジック・アナライザ機能を使うこともできます。電力変換回路の測定において七つのアナログ波形を観測し、同時に24ビットのデジタル・ロジック波形を観測できることはとても有用です。

また、電力変換回路の時間領域での動作解析においては、見たい波形を確実に捕らえるために継続的な測定が必要です。この点においては、長時間測定可能な125 Mポイント大容量メモリはとても魅力です。10 kHzの信号を最大5,000秒間記録することが可能という計算になります。サンプル・レートが1.25 Gspsの場合においても最大0.1秒の波形を捕捉することができます。

ヒストリ機能としては、過去に取り込んだ波形を最大20,000個、アクイジション・メモリに保持することもできます。ヒストリ波形に対してカーソル測定、演算などができ、ヒストリ機能を使うことで稀に発生する異常波形の解析なども可能です。

また、ヒストリ・サーチ機能を使えば、過去に取り込まれた最大20,000の波形から、条件に合うヒストリ波形を検索することができ、検索した波形に対してもカーソル測定などの解析ができます。リプレイ機能を使えば、ロータリ・ノブを使って画面に1波形ずつ順に表示しながらヒストリ波形を自動的に再生、停止、早送り、巻き戻しができて、大変に便利です。



DLM4000シリーズ



DLM2000シリーズ

写真4 デジタル・オシロスコープ
(DLM2000/4000、横河メータ&イン
スツルメンツ)

見本

このPDFは、CQ出版社発売の「グリーン・エレクトロニクス No.11」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 <http://shop.cqpub.co.jp/hanbai/books/MSP/MSPZ201212.htm>

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

電子技術 増刊
SPECIAL

グリーン・エレクトロニクス

No.11

CQ出版社

〒170-8461 東京都豊島区巣鴨1-14-2
TEL.03-5395-2141(営業部)

定価2,310円

本体2,200円

雑誌 16712-12

©2013.3.29



4910167121226

02200