# Part 5

## 測定器、使えてますか？

みわ よしこ

Chapter 16　組込み開発現場に入ってみよう
Chapter 17　測定器と仲良くなろう～電流・電圧
Chapter 18　測定器と“もっと”仲良くなろう～オシロスコープ
Chapter 19　モノづくりの世界に踏み込もう～“ICE”の魅力

# Chapter 16

# 組込み開発現場に入ってみよう

**組込みシステム開発では、さまざまな測定器を使用します。Part 5 では、組込みシステムの開発現場にある基本的な「測定器」を取り上げ、時代の流れとともに少しずつ変化している機器の背景や使い方をわかりやすく紹介します。**

**Chapter 16 では、「モノ」のある組込み開発の世界での「モノ」との付き合いの常識・測定の常識について解説します。**

## 16-1 初めての「組込み開発現場」

組込みソフトウェアが他の領域のソフトウェアと大きく異なる点の1つとして、「具体的なモノに何かをさせる」という点があります。つまり、組込み開発の現場には必ず、開発対象となる特定の「モノ」があるのです。PCアプリケーションソフトウェアの開発であれば、ごく一般的なPC向けOSを搭載したマシンのデスクトップ画面がそのまま、そのOS向けの開発・テスト環境となります。

Webアプリケーションの開発であれば、Webサーバなどの環境が用意されていれば、同じくデスクトップ画面がやはりそのまま開発・テスト環境となります。

しかし組込み開発の場合、「OSやミドルウェアが用意された携帯電話に対して、それらのシミュレーション環境が用意されたPCの上で、各種ケータイアプリを書くだけ」といったケースを除いて、必ずそこには何か「モノ」があります。その「モノ」はボード（基板）のプロトタイプであったり、製品のプロトタイプであったりします。

「モノ」のない世界と「モノ」のある世界は、異なる文化で、「モノ」のある世界には「モノがあるゆえの常識」が数多くあります。会社によっては、入社時の研修で明文化されたルールを教えてくれることもありますが、そうではないことも多々あります。

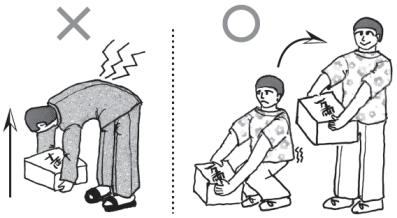
また、組込みシステムはボードやマイコンに必要な周辺回路を付加し、適切なプログラムを書いてCPUに実行させることで成り立ちます。その中で、ハードウェアの正常動作を知る目的で「測定」という技術が必要になってきます。Part 5では、ソフト屋さんでも知っておくべき「モノ」「測定」の基礎知識について解説します。

## 16-2 自分が傷つかないために

一般的な組込み開発の現場にありそうな工具類で、深刻なケガをすることは、それほど多くありません。人間の自然な本能として、たとえば熱されたハンダゴテ（先端の温度は300℃～450℃くらい）を皮膚にくっつけて3秒ガマンしていることは困難ですから、治らないような火傷はしたくてもできません。しかし「リード線を切ったら、その先端が目に飛び込んできた」「製品で利用するレーザ光線*1をじーっと覗いていたら、網膜が焼けた」となるとかなり問題ですし、「板金を切っていたら、飛散した切り屑が手に突き刺さった」も、あんまり体験したくないことですよね？

その他にも、あなた自身にとっては自分の身体を守るために必要な配慮がたくさんあります。とりあえず、ごく普通の日常生活で注意する必要があること*2に加えて、「走らない」「踵（かかと）を固定できない履物（スリッパやサンダルなど）はなるべく履かない」「重いものを持ち上げるときには、立位体前屈の姿勢から上へ持ち上げるのではなく、しゃがんで膝を伸ばす力で持ち上げる（**図16-1**）」「左利きであっても、配電盤のスイッチや電極は右手で扱う*3」の4点くらいは、「常識」として覚えておきましょう。

**▼図16-1　重量物を持ち上げるときはぎっくり腰に注意**



＊1　レジのバーコード読み取り機に使われている赤色レーザ光は、網膜を損傷する可能性のあるパワーを持っている場合があります。また赤外線レーザなど「見えない」光線に対しては、色として見える光線よりも注意が必要です。
＊2　たとえば「濡れた手で電源プラグに触れない」「電源プラグの抜き差しは、プラグ本体を持って行う」など。
＊3　左手で扱った場合、感電すると電流が心臓を直撃する可能性が高いからです。右手で扱えば、同じ電流でも死なずに済む確率が高いといわれています。

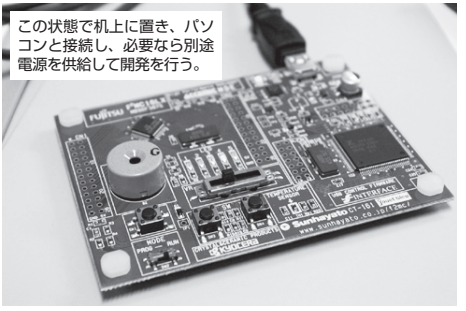
また、作業の安全に関することで上司や先輩に注意を受けたら、注意の内容は以後守るようにしましょう。それはたいてい、明確な理由のある注意なのです。

## 16-3 大切な「モノ」を壊さないために

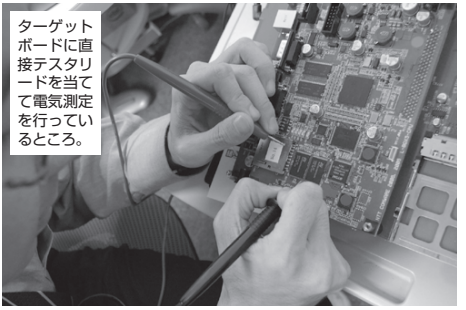
組込み開発を行っている現場には、たいてい、ターゲット基板やそのプロトタイプなどが「剥き出し」の状態で置かれています（**図16-2**）。「モノ」の中で最優先で「守ってあげたい」のはターゲットボード、続いて開発環境となっている高価なパソコン、といったところでしょう。

基板をケースに入れれば、いくらか安全にはなります。しかし「剥き出し」にしておけば、たとえば何か正体不明のトラブルが発生したとき、電圧を直接測定することも可能です（**図16-3**）。このような理由で、ターゲットボードは「剥き出し」で

**▼図 16-2　ターゲットボードの一例**




**▼図 16-3　電気測定**



置かれるのです。

ターゲットボードを壊す可能性のあるものは、

- **水分**
- **塩分**
- **金属の破片**
- **過大な電圧・電流（静電気を含む）**
- **物理的な力**

といったものです。以下、簡単に説明します。

### ●注意1：水分

作業中に喉が渇くこともあるでしょう。でも机の上にコーヒーの紙カップやマグを置くことはやめましょう。せめてペットボトル飲料にしましょう。そして飲むとき以外は蓋はきっちり締めておきましょう。ノートが飲料で濡れたのなら乾かせばよいだけのことですが、動作中のターゲットボードに飲料をこぼしてしまったら、しばしばターゲットボードの「ご臨終」となります。

### ●注意2：塩分

塩分は金属を腐食する可能性があります。基板の上のボードを手で直接触ることは、なるべく避けましょう。「ボードの横で食事をしていて、味噌汁をボードにこぼした」などというのは論外です。

### ●注意3：金属の破片

開発環境の近くで板金や電線などの金属材料を扱うときは、破片がターゲットボードの上に飛び乗ったり、PCの中に飛び込んだりしないように注意しましょう。できれば、工作スペースは、開発環境と別に用意しておきたいところです（**図16-4**）。

### ●注意4：過大な電圧・電流

ターゲットボードを動作させるときには、電源の電圧・電流に注意しましょう。AC100VをDCに変換するアダプタが、簡便なのでよく利用されていますが、同じサイズでも電圧が異なることもあり、プラグの電極にも「中心が＋（プラス）」「中心が－（マイナス）」の2通りがあります。誤った電源を供給しないようにしましょう。

▼図 16-4　シリコンリナックス㈱の工作ブース

日本における組込みLinuxの先駆的な存在であるシリコンリナックス社の工作ブース。中央付近の紙カップは飲料を飲むためではなく「ちょっと切り屑を入れておく」といった用途で利用される。

▼図 16-5　静電気防止手袋（左）、導電スリッパ（右）

また、ターゲットボードにはしばしば静電気に弱い部品が搭載されています。触れるときには必ず、静電気の逃げ道を確保しておくようにしましょう。「右手でターゲット基板に触れる前に、左手をPCのケースの裏面の金属部分に触れておく（いわゆる“人体アース”）」といったことで十分なことが多いのですが、より安全を期すならば、手に静電気防止手袋を装着し静電気を足を通じて床面に逃す目的で、導電スリッパ・導電シューズを利用することもあります（**図16-5**）。また、手首に導電性の「腕輪（リストストラップ）を装着して、さらに付属の電線の先端を確実に「アース」に接続することもあります。ボード自体は、出荷時には導電性プラスチックの袋に入っている状態ですが、机の上にその導電性プラスチックの袋を敷き、その上にボードを置くようにすると、机からの静電気の侵入を防ぐことができます。

もちろん保管時は、その導電性プラスチックの袋に入れておきます*4。

### ●注意5：物理的な力

最後に「物理的な力」です。力任せにボードを折ろうとする人はいないでしょうが、「ケーブル類を持ってボードをぶら下げる」といったことは、実際にはしばしば見られます。「わざと」でなくても、たとえば「机からボードがずり落ちて、ケーブルで空中にぶら下がった状態になった」といったことは起こります。この場合、ケーブルのプラグには想定外の負荷が加わります。ケーブルが抜けてボードが床に落ちたら、衝撃に弱い部品を搭載しているボードは壊れてしまうかもしれません。先端の尖った金属でボードに触れることも避けましょう。

また、開発を行う机の上には必要なもの以外はなるべく載せないようにしましょう。飲食は、ターゲットボードの載っている机から離れて行うのがベストです。作業にどうしても必要な工具や計測器がある場合でも、「出番」以外はなるべくボードから遠ざけておきましょう（**図16-6**）。

どのような危険が潜んでいるかは、机の前に座っていると若干わかりにくいものですが、2～3m離れて眺めてみると、案外、いろいろな問題の可能性に気づくものです。

**メ　モ**

ボード上に通常数多く設けられている、設定用の小さなディップスイッチがあります。これを ON/OFF する場合に、小さな「−」ドライバや錐の先端を用いる人がときどきいますが、ちょっと恐ろしい風景です。手元が少し狂ったら、スイッチもボードも簡単に壊れてしまうではありませんか？

「工具でなくて文具ならいいだろう」とシャープペンシルを持ち出す人もいますが、こちらもボードにとっては「凶器」です。芯が出ていない状態では、先端は尖った端のある金属ですし、芯を出していれば、芯そのものが導電性であるうえに折れる可能性まであります。ボールペンの先端は尖っていませんが、金属ボールが入っている場合があります。どこでも入手できる木製の「つまようじ」なら安心です。

＊4　保管時に適切な袋が見当たらない場合は、料理用のアルミホイルで基板を包んでおくことで静電気対策とすることができます。もちろん、その状態で通電してはいけません。

▼図 16-6　シリコンリナックス社の開発机の工夫

開発中の机上に、必要なものだけを載せられるようにするための工夫。壁面は有効に利用できる。ディスプレイは、必要でないときには机の上から追い出してしまえると便利。

# 16-4 工具や測定器は大切な「協力者」

ちょっとした周辺回路が必要なとき、自分で作れるに越したことはありません。電子・電気の勉強は少しずつやっていくとして、ここではそのためのツールである「工具」「測定器」の主なものと、それらとの「付き合い方」について解説したいと思います。

「付き合い方」といっても、それほど難しいことはありません。基本的には「その道具が何のために作られて、どのように働くものであるか」を知り、目的外の利用・機能を損なうような利用を避ければよいのです。

## 工具と仲良く「付き合う」ためには

結論からいえば「何のために使う道具か」「どのように機能するか」「機能を悪化

させるような使用を避ける」の3点につきます。ここでは、電線を切断するのに用いる「ニッパ」を例にとって説明しましょう。

**●ニッパ**

「ニッパ」は2枚の刃を対向させて、電線を切断します。この際、力を入れすぎると、切断のついでに刃先と刃先を押し付け合うことになります。そうすると刃先は鈍ります。次に何かを切断するときには、もっと力を入れなくてはなりません*5から、もっと刃先が鈍ります。その悪循環が繰り返されていくと、ついには刃物として機能しなくなってしまい、「かつてはニッパであった」ということが、およそ信じられないような代物に変化してしまいます。こうなったら、もう一度新品のニッパを買ってきて、鈍ってしまったニッパは捨てるなり他用途で活用するなり*6するしかありません。

工具を適切に扱っていたとしても、いつか機能が劣化していくことは避けられません。特に、JIS規格に準拠して製造された「由緒正しい工具」の場合、形状・材質・機能（刃物であれば切れ味）・強度（刃物であれば何かを切ったときのひずみ）などに詳細な規定があります。この場合、規格を満たさなくなった時点で「由緒正しい工具」としての寿命が終わります。

「手になじんでいるから」という理由で、劣化した工具を無理に使い続けるのは、作業効率の面からも安全性の面*7からも望ましくありません。適切なタイミングで、新品と交換しましょう。

## 測定器に正しく「教えてもらう」には

組込みの現場では、さまざまな事柄を測定するために、多様な種類の測定器を使います。「測定」についてはChapter 17で詳しく解説しますが、ここでは長さを測定する「ノギス」と、各種電気測定を行う「マルチメータ（いわゆるテスタ）」について解説します。

＊5　使用している工具が「思いっきり力を入れなくては使えない」としたら、目的に対して適切な工具でないか、不適切な力を加えられた結果、工具としての正常な機能を失いつつあるかのどちらかです。
＊6　刃先が鈍ってしまったニッパは、少し硬いプラスチックを粗く切断するのに便利に使えます。
＊7　たとえば、切れなくなった刃物は予期しないリアクションを引き起こすので、使用し続けること自体が危険です。

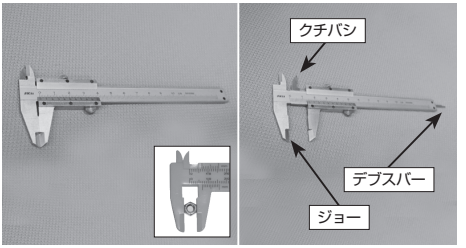
## ●ノギス

測定器との付き合い方も、「何のために使う道具か」「どのように機能するか」「機能を悪化させるような使用を避ける」の3点につきます。

多く見かけるノギスは、0.05mm単位で精度が求められる長さ測定に用いるタイプです。読み取りに用いる目盛りは1mm単位ですが、「副尺」を併用することにより、「1mm単位の目盛りで0.1mm単位の違いを測る」ことが可能なしくみになっています。形状は**図16-7**の左のようになっており、右のように「開く」ことにより、外のり・内のり・段差を測ることが可能です。

対象物にジョーを当てるときに加える力は、必要最低限にします。それ以上の力を加えると、ジョーの先端が開いていき、正確な測定のできないノギスになってしまいます。「モンキーレンチの代用品として、六角ネジを回す」などということは絶対にやめましょう。

▼図 16-7　M 型ノギス



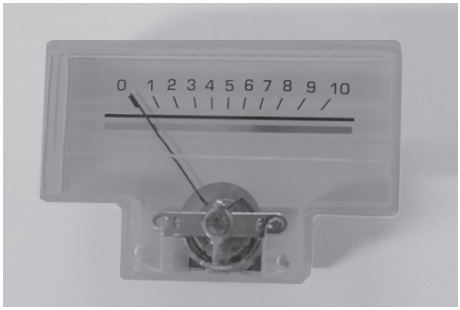

## ●マルチメータ

「マルチメータ」は電流・電圧・抵抗値などの電気測定を行うツールです。アナログタイプとデジタルタイプがあります。

正しい測定値を得るためには、実際には多数のノウハウが必要ですが、何を測定するにしても最低限「ゼロであるべき場所がゼロである」「無限大であるべき場所が無限大である」の2点をチェックする必要があります（**図16-8**、**図16-9**、**図16-10**）。

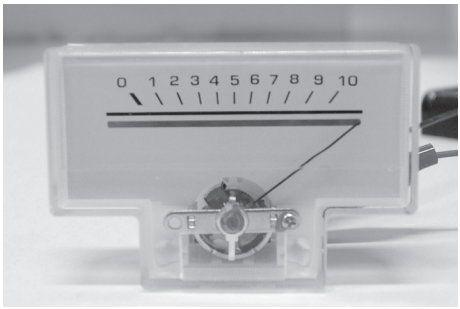
マルチメータの場合、このチェックはテスタリード（対象物に当てるための針）を用いて簡単に行うことができます。

▼図 16-8　0 を指した状態



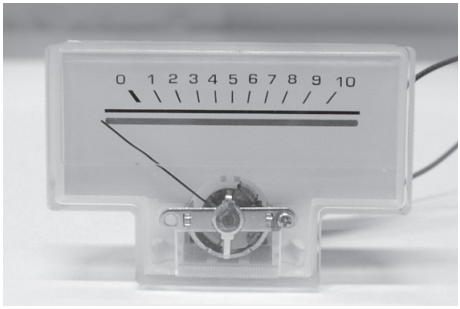

製造者・仕様とも不明の電流計（30円）。誤使用時の現象を示すためにあえて入手した。何も接続していないとき、目盛りは「0」を指している。アナログタイプの計測器の大半は、特に記述がなければ平置きし、針の指す値は真上から読む。

▼図 16-9　振り切れの状態




測定可能なレンジを越えた場合、「振り切れ」が起こる。「振り切れ」状態が数秒以上続くと、針が曲がってしまい、正確な測定ができなくなってしまう。

▼図 16-10　逆振れの状態




電流のプラス・マイナス（極性）を逆に接続した場合には、このような「逆振れ」が見られる。この状態も、連続すると針が曲がる原因になる。

### 電流

電流の場合、2本のリードが接触していなければ「0」、2本のリードが接触すれば、理論上は無限大の電流が流れるので「振り切れ」*8（デジタルの場合は「測定限界以上」を示す表示）となります。この単純な動作によって、少なくとも「動作している」ことを確認できます。

### 電圧

電圧の場合、2本のテスタリードが接触した瞬間に針（またはデジタル表示）が「0」あるいは「0とみなすのが妥当な極めて小さな値」に張り付くのが正常動作です。

抵抗値の場合、2本のテスタリードが接触したら「0Ω」、2本のテスタリードを離したら無限大（または「測定限界以上」を示す表示）となるのが正常動作です。アナログマルチメータの場合、抵抗値の「0」は電流・電圧の「0」と逆側にあることが多いので、数値の読み取りには注意が必要です。

### 交流電源測定

**図16-11**は、交流100V電源を測っているところです。直流・交流とも測定できるマルチメータの場合、どちらを測るのか、正しく設定しておかなくてはなりません。交流を測定するのであれば、直流電圧と交流電圧の2つのうち「交流」を選んでおく必要があります。この写真では、テスタリードを交流電源の2つの電極に接触させるため、プラグを少し浮かせ、そこにリードを当てています。「104V」という数値が読み取れます。もしここで誤って、直流電圧を選択して測定していると、交流電源の平均電圧の「0V」が表示されるはずです。

マルチメータによっては、導通チェック、ダイオードの極性チェック、キャパシタの容量測定、温度測定*9などの機能を含んでいることがあります。

### ダイオード極性チェック

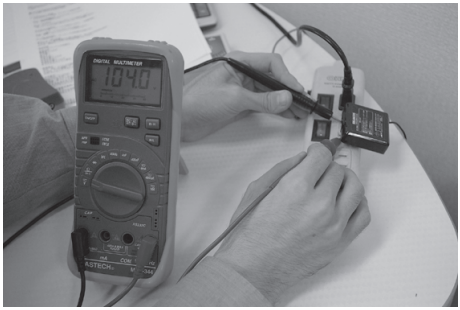
**図16-12**は、ダイオードの極性をチェックしているところです。極性をチェックするには実際に電圧をかけてみる必要があります。この例では563mVの電圧によって順方向に電流が流れることを確認できています。なお、テスタリードやデバイ

---

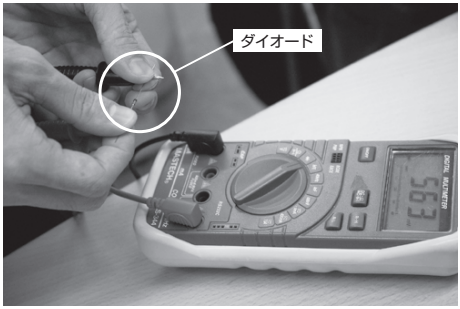
＊8　近年、数百円の最低品質ラインのマルチメータにも保護回路が組み込まれるようになったので、「振り切れ」や「逆振れ」を見る場面はなくなりました。このような場合、針は「0」を指したままであることが多いようです。

＊9　この場合、テスタリードの代わりに「熱電対」を接続します。温度変化によって異なる電圧が現れるので、それを温度に換算することで温度を測定します。

▼図 16-11　交流 100V を交流レンジで測定する



▼図 16-12　ダイオード極性チェック






スのリード線を、このように直接指で触れることはやめましょう。誤差発生の原因になりますし、指先の皮脂や塩分は、テスタリードにもデバイスのリード線にも悪影響を与えます。

### LED極性チェック

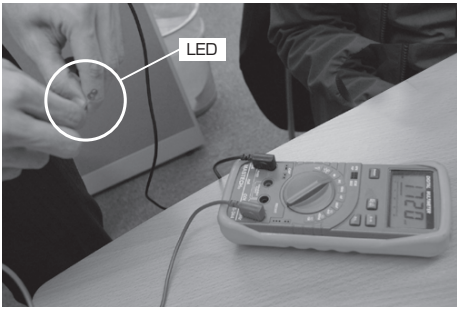
**図16-13** は、LEDの極性をチェックしているところです。正しく順方向に接続されているので、写真ではわかりづらいですが、電流が流れてLEDが赤く光っています。マルチメータにはこのとき、約1.7Vの電圧が印加されていることが示されています。LEDの場合、「光らせる」のに必要な電圧は赤色・黄色で2V前後[*10]で、その電圧を加えなくては電流が流れないのですが、マルチメータによっては1V程

＊10　青色・緑色 LED ではさらに高く、4V 前後です。

度で「あきらめ」て、それ以上の電圧を加えないことがあります。このようなマルチメータでは、LEDの極性チェックはできません。「自分の持っているマルチメータが何をやっているのか」を知っておかなければ、「良品のLED100個を全部極性チェックしてみて、どちらにも電流が流れなかった、全部不良品だ」という誤解をしてしまう原因にもなります。

何を測定するにせよ、自分の「道具」が何をしているのかを知っておかなくては、何もわからないのです。

▼図 16-13　LED 極性チェック




以上、「組込み開発の現場」でどのようなモノに囲まれるかについて、駆け足で見てきました。以下のChapterでは「測定」「動作チェック」に用いるツールの数々について、「それが何であって、どのように用いるのか」を解説していきます。

# Chapter 17

# 測定器と仲良くなろう～電流・電圧

**Chapter 17 では、電流測定・電圧測定を中心に電気計測の基礎について解説します。**

## 17-1 嘘をつく測定器

映像ドキュメンタリー作家の森達也氏は常々、「ドキュメンタリーは事実の記録ではなく、フィクションである」といい切っています。ビデオカメラを持ったカメラマンが現場に入ることそのものが、現場の雰囲気を変えてしまいます。マイクを向けられた場面で「いつもと同じようにしゃべる」人はあまりいません。カメラの向け方やインタビューのやり方しだいで、取材対象者からはいろいろな感情を引き出してしまいます。同じ場所を同じように撮影したとしても、「ビデオカメラをどこに向けるか」「編集でどのシーンを切り取り、どうつなぐか」によって、まったく異なった作品が出来上がります。森氏は『ドキュメンタリーは嘘をつく』（草思社）という書籍を出版し、その数年後には「ドキュメンタリーは嘘をつく」という同名の映像「ドキュメンタリー」作品を作りました。

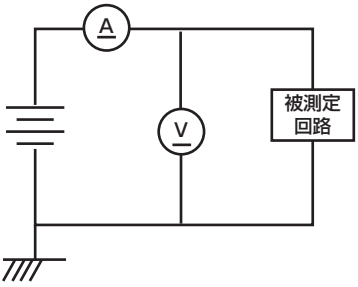
測定器はドキュメンタリー作家とは異なり、考えや感情を持たない「モノ」です。ドキュメンタリーと同様、それを使えば「事実」がわかる、と考えられています。しかし測定器が何らかの結果を出すとき、そこには必ず「嘘」が含まれています。測定器を利用する私たちに可能なことは、「なぜ、どのような嘘をつくのか」を把握し、測定器が提示してくれるさまざまな数値やデータから、そこで起こっている「事実」を想像し、推測することです。

Chapter 17ではまず、嘘をつかざるをえない測定器らの「事情」に迫ってみたいと思います。

# 17-2 「対象に影響を与えない測定」はありえない

前述したように、「正確に測定しよう」という目的で行う行為はすべて、測定対象に何らかの影響を与えてしまいます。「正確な測定」のために私たちができる精一杯の努力は、どのような影響を与える可能性があるかを把握し、結果として得られる測定値には「測定による影響」を加味して解釈することです。もちろん、場合によっては「実用面では、測定による影響を実質的に無視できる」という場面も多々ありますが、それでも「影響をまったく与えていない」ということはありません。

▼図 17-1　回路全体の電流・電圧を測定する




「回路に流れ込む電流を測る」「回路に印加される電流を測る」というよくあるシーンについて考えてみましょう。この場合、一般的には**図 17-1** のように電流計・電圧計を配置します。

## 電流計

回路の動作に影響を与えないためには、電流計が電圧を落としてはいけません。電圧計が電流を食ってはいけません。というわけで、電流計の理想は「電気抵抗はゼロ」であり、電圧計の理想は「電気抵抗∞（無限大）」です。このような電流計や電圧計を作ることがもしも可能であれば、論理上は回路にまったく影響を与えずに、電流・電圧を測定することができます。しかし、その状態で実際に測定することは可能でしょうか？

電流計は、自分自身に流れ込む電流を測定して電流値を出します。電流計の抵抗値をなるべく小さくする努力ならできますが、ゼロにすることはできません。電流計を置くことによって、「オームの法則」に従い、

**電流計に流れ込む電流値（I）×電流計の持つ抵抗値（R）＝電流計による電圧降下（V）**＊1

＊1　物理の世界では、「＝」で結ばれる式（等式）を書く場合、慣習的に「＝」の左側に「原因」、「＝」の右側に「結果」を書きます。

と、電圧低下が起こります*2。**図17-1**の配置では、電流計によって落とされた電圧を、電圧計が測定することになります。

## 電圧計

次に、電圧計について考えてみましょう。電圧計は、「自分自身に流れ込む電流によって、どれだけの電圧降下が発生するか」を測定しています。もちろん、回路に流すはずの電流を電圧計が全部食ってしまっては回路は動きません。若干の電流は食わざるをえないとしても、なるべく少なく食うように、電圧計自体の抵抗値は十分に高くしておく必要があります。しかし電圧計の抵抗値が∞であったら、電圧計には電流がまったく流れ込んでこないので、何も測れないのです。というわけで、電圧計を置くことによって、

**電圧計の両端の電圧（V）÷電圧計の持つ抵抗値（R）＝電圧計が食ってしまう電流（I）**

と、電流値が減ってしまうのです。ですから、電流計や電圧計が回路の中に置かれているとき、読み取った電流値や電圧値は決して「回路の電流や電圧の真の値」ではありえないのです。

# 17-3 究極の「正しい測定」とは

何を測定するのであっても、「測定しようとすること自体が対象に影響を及ぼす」ことから自由になることはできません。たとえば風速計を用いれば、風速を計ることができます。原理は基本的には「風車を回して、1秒間の回転数を数え、それを風速に換算する」だけです*3。しかし、風の流れの場に風車を置くこと・風車を回すこと自体が、風の流れを変えてしまいます。風車やその枠を小さく・軽くする努力を払うことは可能ですが、風車そのものをなくすことはできません。

というわけで、測定器に現れる値が「真の値」であることはありえないのです。しかし、何らかの測定結果を出さなければスクラップにされてしまうので、誤差や対象に影響を与えながら（もしかしたら、心の中で「ごめんなさい」といいつつ）

＊2　ごく普通のアナログ電流計の場合、内部には必ずコイルがあります。このコイルは「インダクタンス」と呼ばれる電圧を生成するため、電流計による電圧降下にさらに影響を与えます。
＊3　この他「熱線を風にさらし、温度低下によって風速を計る」といった方法の風速計もあります。

何らかの数値を表示しているのです。その事情は、測定器を利用する側の人間が汲み取ってやらなくてはなりません。

究極の正しい測定は「**測ってないからわかりません**」です。しかし、いくら「究極に正しい」とはいえ、上司や先輩にそんなことをいうことは……できませんよね？

私たちの測定は、どれだけ努力したところで「これこれの範囲で、このくらい確からしい」以上のものにはならないのです。測定しようとする試みそのものが対象に影響を与えてしまうのですから、当然のことです。「測定とは、そういうものなのである」と割り切って、測定するしかありません。

## 17-4 人間が持ち込む「嘘」

「測定器は本当のことをいえない」となると、測定器を扱う人間のほうが「しっかり」しなくてはいけません。しかし実際にはしばしば人間が、測定器に嘘をつかせる原因となってしまいます。

### 測定器の置き方

電流計や電圧計をはじめとする測定器には、平置きするタイプと縦置きするタイプがあります。平置きタイプを縦置き（あるいはその逆）で使うと、測定結果が変わってしまいます。また本来は、平置きするなら水準計で作業台の水平を確認しておかなくてはなりません。縦置きするなら、水準計で水平を確認したうえ、測定器が鉛直に置かれていることを確認しなくてはなりません。

### 最小限の目盛りの較正（こうせい）

測定を開始する前に、「ゼロであるべき場合に測定値がゼロである」または「∞であるべき場合に測定値が∞である」ことを確認し、もし「ずれ」が発生しているようならば直しておく必要があります。電流計ならば、電流が流れていなければゼロ。電圧計ならば、プラス・マイナスを直結（ショート）したときにゼロ。抵抗計ならば、何も接続していなければ∞。もし「ずれ」が発生しているようなら、測定器に必ず付いている調整用のネジを回して調整します。

## 接続と設定

たとえば直流電流・電圧を測定するなら、プラス・マイナスを間違えないようにしましょう。デジタルマルチメータの場合、逆に接続すると測定値に「−」が付くだけですが、アナログマルチメータの場合は「逆振れ」という現象が起こります（Chapter 16の**図16-10**を参照）。

また、測定レンジにも注意しましょう。たとえば12Vの電圧を10Vのレンジで測定したら、測定限界を超えていますから、アナログマルチメータの場合は「振り切れ」という現象が起こることがあります（Chapter 17の**図16-9**を参照）。

「振り切れ」や「逆振れ」を起こすと測定が行えないだけでなく、測定器を壊す原因になります。また、デジタルマルチメータのほとんどでレンジは自動切換になっていますが、測定レンジの最大以上の電流・電圧を加えると、故障の原因になります。

測定を行う際は、まず何を測るのか（たとえば、直流か交流か・電流か電圧か）と、極性がある場合はプラスとマイナスを誤らないようにしましょう。測定を始める前に、ロータリースイッチを回して測定レンジを最大にしておき、1つずつ下げていき、振り切れが起こる手前で測定を行うようにしましょう。

## 目盛りの読み方

デジタルマルチメータの場合は、表示されている数値を読み取るだけですが、アナログマルチメータの場合、針の指している値を読むのにも注意が必要です。

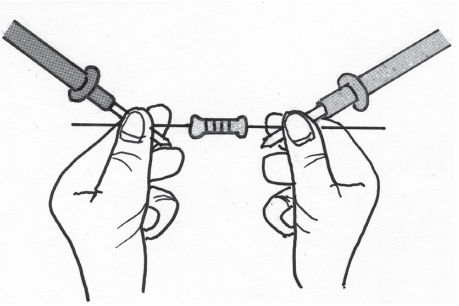
平置きの場合は針の真上から、横置きの場合は針の真ん前から読むようにしましょう。斜めに読むと、それにより読み取り誤差が発生します。

また、アナログマルチメータの場合、目盛り面に何本もの目盛りが刻まれていますが、測定レンジに対応した目盛りを読む必要があります。「目盛りを見る前に測定レンジを見る」という習慣をつけておくとよいでしょう。

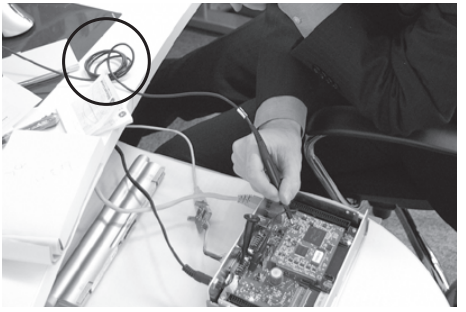
## 誤差の原因になりうる使用

マルチメータのテスタリードは2本で、人間の手も2本です。というわけで、たとえば抵抗器の抵抗値を測定する時、つい**図17-2**のようなことをやってしまいがち

▼図 17-2　人体の抵抗も一緒に測りたいならこれでよいのですが……



▼図 17-3 「とぐろ」を巻いたケーブル



です。しかし人体はかなり大きな抵抗値*4を持っていますので、測定器に現れる抵抗値は「その抵抗器と人体の抵抗を並列に接続した場合の値」となってしまいます。測定する抵抗器の抵抗値が10Ω程度以下であれば、人体のほうの影響は無視しても実害はないことが多いのですが、人体の抵抗と同等以上の抵抗器を測定している場合には、測定値に無視できない影響を与えます。

また、回路の中の電圧を測っている場合には「測定器に流れ込む電流によって測定結果が変わってしまう」といったこともあります。「回路の中の電圧・電流を測定しているのだけど数値はどこもゼロ、ヘンだな？ と思ったら、なんと電源を接続していなかった」というバカバカしいミスも、実際には極めてよくあるパターンです。

オシロスコープを用いた波形測定では、「プローブのケーブルが『とぐろ』を巻いている*5（**図17-3**）」「グランドを取り忘れる」「測定対象から離れたところでグラン

＊4　皮膚が乾燥している場合に 4k Ω、汗をかくなど皮膚が湿っている場合に 2k Ω程度といわれています。
＊5　「とぐろ」部分が「コイル」として働いてしまうため、測定結果に影響を与える可能性があります。

ドを取る」といったケースがよくあります。いずれも、測定結果に影響を与えたり、測定そのものが無意味になってしまう原因となります。

## 17-5 測定手段そのものによってもたらされる「嘘」

簡易に温度を測定する測定器の1つに「放射温度計」があります（**図17-4**、**図17-5**）。この温度計は、先端に赤外線センサが付いており、対象物から発される赤外線の量を測定することによって、対象物の温度を測定するしくみとなっています。対象物に直接触れることなく－30℃～＋550℃の測定が可能な優れモノです。

しかし、測定しているのは赤外線の量です。このため、赤外線そのものを放射しているものを測ろうとすると、温度によって発生する赤外線と、光として発される赤外線の合計を測ってしまうことになります。身近な例では「焼き鳥屋の炭火」といったものが該当します（うちわで風を送られて真っ赤に燃えている炭火の表面温度は1,000℃を超えますから、この温度計の測定レンジ以上であり、そもそも測れないのですが）。

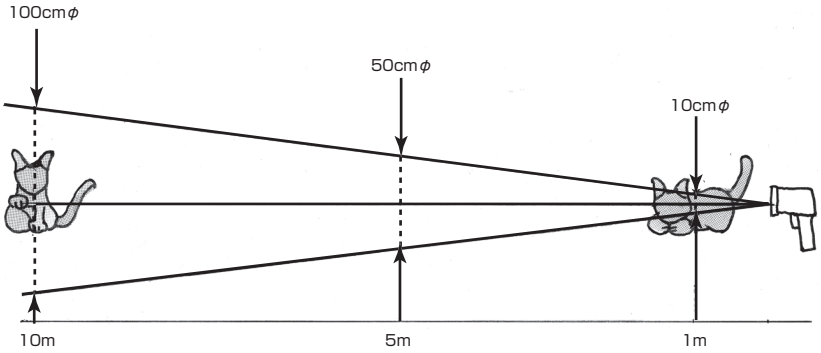
また、「どの範囲の赤外線を測定しているか」にも注意が必要です。この温度計の場合、先端から25cm先では2.5cm $\phi$、50cm先では5cm $\phi$、1m先では10cm $\phi$の範囲を測定していることがマニュアルに明記されています。**図17-6**のように光の直進性を考えれば、5m先では50cm $\phi$、10m先では1m $\phi$の範囲を測定することになります。「そのあたりのだいたいの空気の温度」を測るのであれば、この温度計の「照準」を10m先に当ててもかまいません。しかし「10m先の壁の前に座っている猫の体温」を測ろうとすると、「照準」を猫（眼は避けて）に合わせたとしても、得られ

▼図 17-4　放射温度計の一例

「銃」の形をしている。「引き金」を引き、先端から「照準」として発射される赤色レーザ光を対象物に当てると、その周辺の温度を知ることができる。

▼図 17-5　放射温度計で味噌汁を測る

▼図 17-6　光の性質を知る




る結果は「10m先の壁の温度に、猫の小さな身体の体温の影響がわずかに加わったもの」となるでしょう。

「何を」「どうやって（手段）」測定しているのかを意識していないと、結果として、測定器の示す値が「嘘」になってしまいます。この放射温度計は、そのことを学ぶための非常によい材料です。

## 「校正」と「較正」

測定器が嘘をつくのは宿命であるとしても、なるべく小さな嘘をついてほしいものです。このため、測定器は定期的に点検し、可能な限り正しい値を表示できるようにする必要があります。この作業のことを「校正」あるいは「較正」と呼びます（読みはどちらも「こうせい」です）。自分で行えることもありますが、測定器メーカに依頼しなくてはならない場合もあります。

校正／較正作業は、基本的には「基準と考えられる値と測定器の示す値を比較し、測定器を調整し、同じ値を表示できるようにする」の積み重ねです。現在は「正しい値を出せるようにする」という意味合いで「校正」と呼ばれることが多くなっています。しかし「較べて正す」という本来の意味からは、「較正」と書くのがより妥当であろうと筆者は考えるので、Part 5 では「較正」を使用することにします。

## 17-6 誰が「事実」を述べているの？

これまでに述べてきたように、測定器は「真の値」をいえない宿命にあります。測定器で測定しようとすること自体も、「真の値」を変えてしまう原因になります。1つの電子・電気回路を、複数の測定器で測定しようとすれば、登場「人物」の数が増えるにつれて「真の値」はあやふやになっていきます。

黒澤明の映画「羅生門」では、1つの殺人事件に対して被害者・加害者・4人の目撃者の証言がすべて食い違っており、事実が明らかになるどころか混乱を増すばかりの状況が描かれています。人ならぬ測定器や電子・電気回路の世界でも、事情は同じです。さて、「誰」を信用すればよいのでしょうか？

……実は「誰」も信用できません。ただし「安定している部分は、誤差込みで一応信用してよい」ということはありえます。電源からの電流・電圧を測定し続けている状態で回路を動作させているときに、ある部品の両端の電流・電圧を測定しようとしたら、とたんに電源電流・電源電圧の数値が大きく変動したのであれば、「犯人はおまえだ！」です。最後に加わった測定は、おそらく回路に対して何か大きな影響を与えている「悪いコ」なのです。

しかし、その「悪いコ」測定器が食う電流・下げる電圧・内部抵抗といった要因をチェックすれば、なぜ・どのように影響が加わったのかを推測することができます。そうすれば、そのような影響を加えない「良いコ」測定器とはどのようなものであるかがわかり、市販されていれば入手することができます。

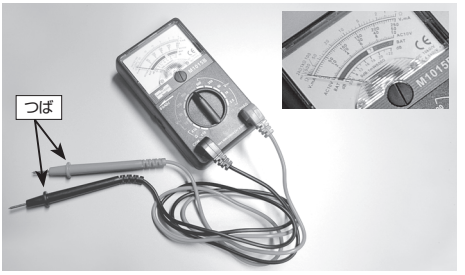
このようにして、私たちは「事実」＝「真の値」にいくらか近づくことができるのです。

## 17-7 600円のアナログマルチメータで始める電気測定

秋月電子通商[*6]では、**図17-7**の600円のアナログマルチメータを販売しています。「バッタ品」の類を除いて、現在日本で入手できる最も安価なマルチメータです。以下では、基本的な扱い方について説明します。

＊6　http://akizukidenshi.com/

▼図 17-7　600 円のアナログマルチメータ




## ●Step 1

購入したらまず、測定レンジ切り替えスイッチが「OFF」を指していることを確認のうえ、裏側の2つのネジをドライバーで回してケースを外し、電池を入れます。

## ●Step 2

次に、付属しているテスタリードを接続します。「COM」に黒、「VmA Ω」に赤を接続します。直流の場合「赤＝プラス、黒＝マイナス」という国際的な決まりがあります。逆にすると測定ができないというわけではないのですが、見た目が紛らわしくなるとミスの原因になります。このような決まりごとは守りましょう。

## ●Step　3

次にテストリードのキャップを外します。このキャップがあれば、マルチメータにテストリードをつなぎっぱなしにしておいても安全ですが、おそらくすぐに失くしてしまうことでしょう。キャップを失くしたら、測定を行わないときはテスタリードを外しておくようにします。

このマルチメータでは、電流・電圧・抵抗値・電池の残量チェックが行えます。身の回りのいろいろなものを測ってみればよいと思います。注意すべきことは、

- **直流・交流を間違えない。**
- **直流の場合は極性を間違えない。**
- **電流・電圧の場合はゼロ点・抵抗の場合は∞点を最初に確認し、ずれていたらネジで合わせる。**
- **測定レンジは最初は最大にしておき、1つずつ下げていく。**
- **平置きし、針は真上から読む。**

といった「基本のキ」程度です。

## 600円×高級アナログマルチメータの特徴

このマルチメータは交流500Vを測定することができますので、家庭周辺の「低圧系」と呼ばれる交流電圧の大半を測定することができますが、感電事故には注意しましょう。感電事故を避けるためには、テストリードのプローブ（対象に当てる針の付いた棒）の「つば」（**図17-7**参照）から先を持たないようにします。また、プローブは両側を一度に対象に当てるのではなく、片側を接触させておいた状態で、もう片側を軽く接触させるようにします。このような接触のしかたをすれば、何か問題があったときに、すぐに離すことができる可能性が高くなります。

電流は直流しか測れず、しかも最大は250mAです。最近の電池の電流を測ろうとすれば、壊してしまうかもしれません。もし壊してしまったら、ついでに徹底分解して中を見てみるとよいでしょう。「メータのコイルがどのように巻かれてどこに配置されているか」「電流計や電圧計のレンジ切り替えがどのように行われているか」といったことを実際に見ることができます。

アナログマルチメータの高級品の一部では、たとえば5Vの電圧を10Vレンジで測るとき、いきなり針が「ぴこん」と5Vに跳ね上がるのではなく、少しずつ「しずしず」と上がっていき、5Vで止まるようなものもあります。それは正確な測定を行うための1つの方法なのですが、この600円のアナログマルチメータには、そんな配慮はまったくありません。電圧測定モードの状態で電源をオン・オフすれば、針が勢いよく動くのを見ることができます。いかにも「安物感」が漂いますが、目の前で起こっている生々しい現象をとらえるには、このタイプのアナログマルチメータのほうが有利なのです。1秒単位での電圧の変化ならば針の動きで見ることが可能なので、「なんちゃって簡易オシロスコープ」といった使い方も可能です。

# 17-8 デジタルマルチメータの特徴

デジタルマルチメータでの電流・電圧の測定原理も、実はアナログマルチメータと変わりません。測定したアナログ値をA/Dコンバータでデジタル化して取り込み、デジタル信号処理によってデジタルな値として表示しているだけです。

デジタルマルチメータの大半で、レンジは自動切り換えとなっていますので、レンジ合わせに神経を使う必要はありません。ただし、測定限界を超えるとヒューズが切れたり本体が破損したりします。最初の何台かは、あまり高級品を購入しない

ほうがよいでしょう（**図17-8**）。

デジタルマルチメータの場合、1秒間に1,000～50,000回*7程度の測定を行い、1秒ごとにその平均値を表示します*8。したがって、1秒単位以下で起こる現象を「生々しく」とらえることはできません。その代わり、数値を直接数字として読み取ることができます。アナログマルチメータのように「針の読み方」に注意する必要がないので、眼の真下にマルチメータを置けない場面でも便利です。特に注意されていない場合、置き方にも制約がありません。

**▼図 17-8　安価なデジタルマルチメータの一例（筆者所有）**

ネットオークションでしばしば「1円スタート」で出品されている。直流・交流電圧、直流電流、抵抗値、導通チェックに加えて温度、トランジスタの増幅率（hFE）まで測定でき、一見多機能。しかし精度や測定値の安定性にはおおいに問題があるし、デジタルメータなのにレンジが自動切り換えでないあたりにも「安物感」が漂う。「電気測定のできるおもちゃ」とみなすべきであろう。

## 17-9 マルチメータの「フォールトトレランス」と「初めての2台」

マルチメータは、少なくとも2台持っておく必要があります。いわゆる「フォールトトレランス」の問題です。一見無駄に見える「代わり」を用意しておくことで、いざというときに備えることができる、という考え方です。

マルチメータを2台持っておくと、1つが故障したときに、もう1つで故障の症状や原因を調べることができます。電池切れなのかヒューズが切れたのか、それとも完全にイカれてしまったのかを調べるには、「無傷」なマルチメータが必要です。

電子・電気計測初心者は、1,000円以下のアナログマルチメータと、1,000円前後のデジタルマルチメータを1つずつ持っておくとよいでしょう。そうすれば、片方

＊7　カタログに「カウント数」と書かれている項目です。高級になるほど多くなります。
＊8　高級品では「一秒間の最大値・最小値・最頻値を表示する」といったことも可能です。

が故障しても原因を調べられるのみならず、アナログとデジタルの違いを学ぶことができます。また、その程度の価格帯であれば、うっかり壊してしまっても「買い換えればいいや」で済みます。買い替えのときには、壊したものとちょっと違うタイプを選択するようにしましょう。そういう買い替えを繰り返していくうちに、「自分にとってよいマルチメータ」を見つけることができるようになります。

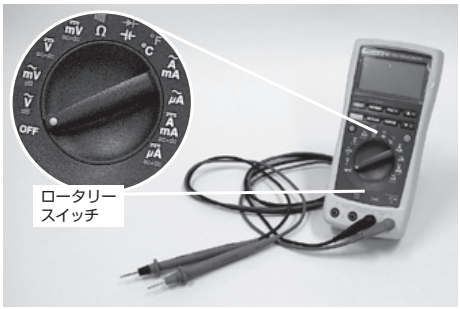
## 17-10 「プロフェッショナル」と「趣味の電子工作」のマルチメータの違い

「秋月電子通商」「千石電商*9」に代表される趣味の電子工作*10の世界で販売されるマルチメータは、安いものは1,000円以下、多機能・高性能なデジタルマルチメータでは、最高価格が20,000円前後です。ところが計測器専門店にいくと、見た目は前述の店で3,000円程度のデジタルマルチメータと同程度なのに、約50,000円のデジタルマルチメータが存在します（**図17-9**）。どこが違うのでしょうか？

まず、趣味の電子工作の世界のマルチメータには「較正（校正）」「保証」という概念がありません。あくまで売り切り、「不具合が出たら買い替えてください」という考え方です。そのマルチメータが示している値が真の値に近いかどうかは、誰も保証してくれません。壊れても修理に対応してくれる業者はありません。

しかしFLUKE*11のような「プロフェッショナルのための計測器」のメーカは、当然のこととして、製品の較正・修理にいつでも対応できる体制を持っています。また、付属ドキュメントを読むと、作業者の安全に対する配慮、故障につながる入

▼図 17-9　デジタルマルチメータ FLUKE187




＊ 9　http://www.sengoku.co.jp/
＊10　これらのショップはプロフェッショナル向けにも部品や製品を販売していますが、主に試作や小ロット製品生産への対応です。
＊11　http://www.fluke.com/

力*12から本体を保護するための保護回路や速断ヒューズなど、「趣味の電子工作」の世界では見ることのできない配慮がなされていることが読み取れます。

さらに高価格帯の製品では、パソコンに接続し、パソコンからの制御・パソコンへのデータ転送が可能なものもあります。「ちょっと測っておしまい」ではなく、測定したデータをさらに解析するような用途に対応できるのです。製品によっては、電流測定時の電圧降下につながる内部抵抗値・電圧測定時の電流現象につながる測定時電流など、測定結果に影響を与える可能性のあるデータが明記されている場合もあります。

遠くない将来、このような「プロフェッショナルのためのツール」を使いこなせるようになるために、今は安価なマルチメータを使い倒し、壊し、そこから学べるものを学び取りましょう。失敗を繰り返し、何かを学びとっていくことは、より高度な計測への道です。

## 17-11 Let's Challenge〜 空き缶とエナメル線と方位磁針で電流計ができる

ここでは、計測器を自分で作ってみることにチャレンジしてみましょう。まずは電流計です。

小学校の理科の授業で扱われた「電磁石」を覚えていますか？ 電磁石と方位磁針があれば、ごく原始的な電流計を作ることができます。

### ●用意するもの

- 焼きなましされた軟鉄
- エナメル線
- 両面セロハンテープ
- 赤色LED 1個
- 絶縁用のテープ
- 市販の方位磁針1個
- 紙やすり
- 一般的な1.5V電池2個
- 電池ボックス（電池2個直列用）
- 配線材料（余ったエナメル線と金属製の紙止めクリップでも可）

「焼きなましされた軟鉄」そのものを入手するのは意外に困難ですが、注意深く周

＊12　たとえば雷や大電流のスイッチ ON による「サージ」。

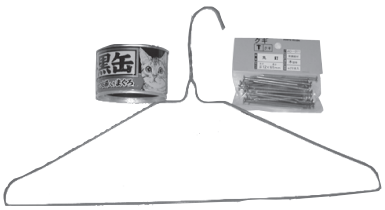
囲を見てみると、いろいろな「焼き入れされていない軟鉄」を発見することができます。クリーニング屋で無料で分けてもらえるワイヤーハンガー、鉄製の缶詰容器といったものを利用しましょう（**図17-10**）。

絶縁用のテープは一般的なセロハンテープでかまいませんが、医療用の白いサージカルテープを利用すると「巻けたかどうか」を目視で簡単に確認できて便利です。

エナメル線・LED・電池ボックスは、スーパーマーケットやホームセンターでは入手できないことのほうが多いでしょう。秋葉原・大須・日本橋のような電気街に足を運ぶか、電気街のショップの通信販売を利用しましょう。いずれも、ごく安価なものです。ついでに、両端にミノムシクリップが付いたビニール線10本ほどのセット（「ミノムシコード」といった名称で、400円前後で販売されています）を入手しておくと便利です。

エナメル線は0.5mmφ程度のものが扱いやすいのですが、強力な電磁石を作るために巻き数を増やしたい場合は、0.2mmφ程度の細いものを利用したほうがよいでしょう。長さは10mもあれば十分ですが、通常は短くても100m単位・1kg単位での販売になります。「切り売り」してくれる業者を探すとよいでしょう。LEDは安価な製品でも、1個単位で購入すると高くつきます。1袋100個入りで500円程度（1個5円）のものを購入しておくとよいでしょう。

**▼図 17-10　ワイヤーハンガー、空き缶、軟鉄（釘）**



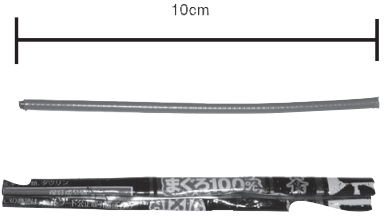

「軟鉄」候補。空き缶の材質はアルミニウムではダメ。鉄かどうかは、磁石が着くかどうかで確認できる。釘は焼きなましないとダメ。

### ●Step 1　電磁石の鉄心を作る

まず、電磁石の芯となる軟鉄棒を作ります。ワイヤーハンガーの直線部分10cmほどを金ノコで切り取るなり、空き缶を金工ハサミ（100円均一ショップにもあります）で切り取って折りたたむなりします（**図17-11**）。ワイヤーハンガーはすでに

絶縁されていますから、両端から「中身」の軟鉄線が飛び出さないように絶縁用のテープで止めます。空き缶を折りたたんだ場合、ハサミで切った端が鋭利で危険なので、両端も含めて全体を絶縁用のテープで巻いてしまいます。

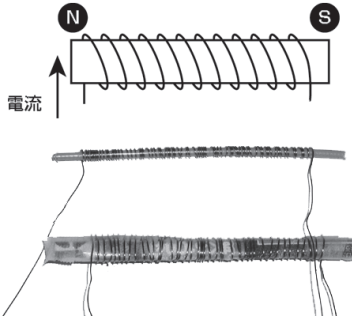
▼図 17-11　ハンガーを切り、缶を丸める




## ●Step 2　エナメル線を巻く

次に、これらにエナメル線を巻きます。巻く前に、巻き始め予定位置から巻き終わり予定位置までを両面セロハンテープで巻いておくと、手を離してもほどける心配がありません（**図17-12**）。巻き数は50回程度で十分です。エナメル線の両端は、あとで電源を接続できるように、紙やすりでエナメルを剥がしておきます。

▼図 17-12　エナメル線を巻く

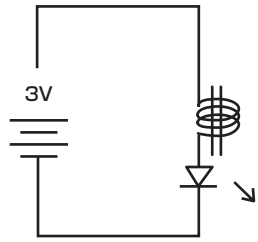



一番上の図の巻き方で左側に電池の＋、右側に電池の－を接続すると
左側が磁石のＮ極・右側がＳ極になる。巻く方向に注意。

## ●Step 3　回路を組む準備

**図17-13**のような回路を組む用意をしますが、ここでは電池はまだ接続しないでおきます。

▼図 17-13　電磁石と LED を直列に接続した回路

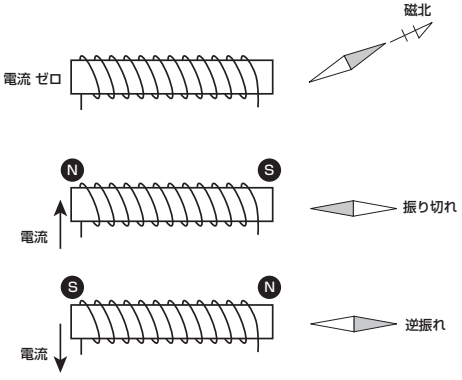



LEDは足の長い側がプラス・短い側がマイナスです。赤色LEDに対して3Vは若干高すぎるのですが、壊れることはありません。回路にLEDを入れておくと、光るかどうかで通電チェックが行えるだけでなく、抵抗としても働くため、電池のプラスマイナスの短絡（ショート）を避けることができます。

### ●Step 4　コイルと方位磁針の準備

周囲に磁石がなければ、方位磁針は地磁気に反応して「磁北」を指しているはずです。この状態を「電流ゼロ」の状態とみなせるように、コイルを**図17-14**のように配置します。方位磁針の位置を少し「ずらす」のがコツです。

▼図 17-14　方位磁針を電流と反応させる

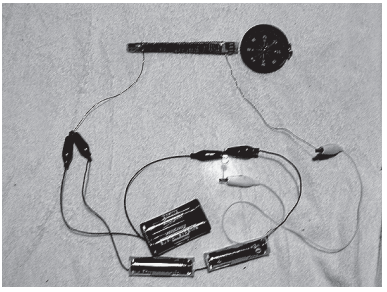



### ●Step 5　方位磁針に電流を感知させる

ここで回路の両端に電池を接続します（**図17-15**）。通電はLEDの点灯で確認できるはずです。電流が流れれば、コイルは電磁石となり、方位磁針の指す方向は**図**

**17-14**の①のように変わるでしょう。電流計としては「振り切れ」状態ですが、とにもかくにも方位磁針が電流を感知しています。ついでに、回路の両端に電池を逆に接続して、先ほどと逆向きの電流を流します。方位磁針の指す向きは**図17-14**の②のように変わるはずです。これが電流計としての「逆振れ」状態です。

**▼図 17-15　電流で磁石を動かす**



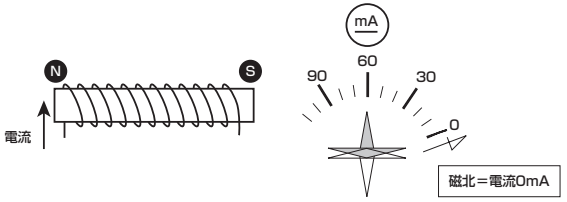
この実験を行っている様子。電池は3V相当を2本並列につないでいる。

さて、電池を外しましょう。コイルの鉄心は磁化されているので、電池を外してもしばらくは磁石として働いてしまいます。時間がたてば「ただの軟鉄」に戻りますが、手っ取り早くただの軟鉄に戻すには、両端に同程度の強さの磁石の同じ極をくっつけます。文房具として販売されているメモ止め用の磁石で十分です。

乾電池の電流はかなり強い*13ため、この実験では、「方位磁針を電流計にできる」といっても、「0」と「測定レンジ外（振り切れ）」「逆振れ」の3つの状態しか出現させられません。しかし、より小さい電流を流せる電源を用意し、なおかつコイルの電磁石としての強さをうまく調節すれば、**図17-16**のように、方位磁針の方位目盛りを電流値に読み替えることができます。コイルの電磁石としての強さを調節するには、巻き数を増減する・「巻き」の直径を大きくしたり小さくしたりする・鉄心の本数を変える（あるいは抜いてしまう）といった方法があります。

電流計の原理は、基本的にはたったこれだけのことです。なお、実際の電流計では、磁石の中で可動コイルを動かしています。

**▼図 17-18　方位磁針「電流計」化計画**




＊13　だいたい100mA程度ですが、最近は3Aの電流を流すことのできる乾電池もあります。

## クランプメータ

大電流の測定では、いくらプローブが絶縁されているといっても、直接触れること自体が危険です。また、回路を切って電流計を入れるのでなく、回路を切らずに電流を測定したい場合もあります。このような場合に用いられるのが、**図 17-17** のような「クランプメータ」です。

この製品には電流（直流・交流）、電圧（直流・交流）、抵抗値の測定機能があります。電流のみクランプで測定します（電圧・抵抗値はプローブで測定）が、600A まで測定できます。「600A」という電流は、手に持ったプローブを触れるなど怖くて考えられないレベルですが、クランプを開いて、中に電線を入れてクランプを閉じるだけであれば、いくらか安全です。

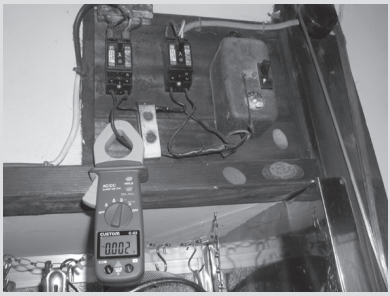
原理は、通常の電流計と同じく「磁石とコイル」です。クランプ部分の中には、コイルの巻かれた鉄心が入っています。クランプの中に電線を通すと、電線を流れる電流がコイルの作っている磁場に影響を与えます。磁場に与えられた影響を「電流値」として読み取ることで、電流を測定します。

直流電流を測定する場合は、対象となる電線が 1 本なので、その電線をクランプの中に通すだけで測定できます。しかし交流電流を測定する場合は注意が必要です。電気機器の AC プラグにつながっている電線をクランプの中に入れても、電流値は「0」としか表示されません。これは当たり前の話で、クランプの中に入っている 2 本の電線を流れる電流が、互いに逆の磁場を発生するからです。

交流電流を測定する場合は、電線を 1 本だけクランプの中に通します。配電盤のような場所では、交流電線が 1 本になっている箇所を見つけることができるので、**図 17-18** のように電流値（この例では 2.1A）を測定することができます。

▼図 17-17　クランプメータ

▼図 17-18　測定例



# Chapter 18

# 測定器と“もっと”仲良くなろう ～オシロスコープ

**ボードや周辺回路の正常動作を確認する場面では、「オシロスコープ」という機器をよく利用します。「オシロスコープ」とは「波（oscillation）」を「見る（scope）」という機能から生まれた名称です。Chapter 18 では、名前のとおり「波」として現れるさまざまな現象について詳しく説明します。**

## 18-1 オシロスコープは「波」を見る道具

オシロスコープは、組込みの現場にはだいたい必ずあります。そして現場にある計測器の中で、おそらく1番目か2番目に高価です。操作パネルには、実にたくさんのボタンやロータリースイッチ（あるいはボリューム）が並んでいます。高価になればなるほど、ボタン類の数も増えていきます。たぶん、組込みの現場に初めて入った人にとって、最も敷居の高い計測器であろうと思います。

初めて触る方は、「何をどうすればいいの？」「うっかり壊してしまったらどうしよう？」と「ビビる」のではないでしょうか？

しかし、「オシロスコープ（oscilloscope）」は名前のとおり、「波（oscillation）」を「見る（scope）」というだけの道具です。基本的には「電圧の変化」として現れる「波」を見ます。日本の交流電源を測定すれば*1、振幅141V*2・周期1秒（60Hz）／1.2秒（50Hz）の「正弦波」を見ることができるでしょう。

といっても、音や電波は目に見えません。たとえば携帯電話の「着メロ」の音も、「着メロ」の受信に用いるRF帯の電波も目に見えません。だけどそこに何らかの信

＊1　安全に測定するためにはさまざまなノウハウが必要です。「ちょっと出来心」で安易に測ってみるようなことは絶対にやめてください。
＊2　「え、100V ではないの？」という疑問があることと思います。発電所が供給する電気が交流の正弦波になっているのは、発電方式の都合です。実際の電気機器では、交流電源を交流のままで使うことはほとんどなく、直流に変換します。振幅 141V の正弦波の絶対値を取り（0V 以下に振れている部分をプラス側に折り返し）、さらにそれを時間平均すると、直流の 100V になります。

号の変化があるならば、それを電圧に変換することが可能です*3。

「いかにも波っぽい波」でなくてもかまいません。たとえば乾電池から出る直流1.5Vの電圧は、「振幅がゼロ、周期は無限大、中心値が1.5V」の「波」と考えることができます。スイッチをON/OFFした瞬間には、スイッチが持ち込むノイズ・電流が突然加わることによるノイズも出現します。それらも広い意味で「波」です*4。

オシロスコープは「電圧の変化として現れる波を見る」だけの道具です。正体がわかっていれば、仲良くなるのも簡単です。

## 18-2 オシロスコープを眺めてみよう

オシロスコープはかつてアナログ回路で作られていましたが、現在はほとんどがデジタル化されています。しかし「やっぱりアナログでなくては」という場面は、趣味の問題でなく、開発の現場にいまだに現実に存在します。デジタルにせよアナログにせよ、オシロスコープが「波を見る道具」であることに違いはありません。両方のタイプのオシロスコープの「面構え」を眺めてみましょう。

**図18-1**は、日本テクトロニクス㈱から貸し出しを受けたデジタルオシロスコープ「DPO4104」です。この機種は、テクトロニクスのオシロスコープの現在のハイエンドに位置しており、1GHzまでの周波数の波を扱うことができます。価格は新品で100万円を超えます。**図18-2**は、岩崎通信機㈱のアナログオシロスコープ「SS-7611」です。この機種は1989年に発売され、1993年に発売終了となりました。性能としては100MHzまでの周波数に対応することができ、当時の最先端でした。なおかつ画面に重要な数値などを文字表示できる*5便利さが好評で、人気のあるオシロスコープでした。本機種は現在も、ネットオークションや中古計測器店の人気機種の1つで、5万円前後で入手することができます*6。

＊3　スピーカの「音が鳴る」のは、音波が電圧の変化に変換され、その電圧が十分に増幅され、増幅された電圧の変化によってスピーカのコーン（紙あるいはプラスチック薄膜）を音波と同じ周波数で動かしているからです。コーンが空気を振動させ、その空気によってあなたの鼓膜が震えるので、あなたの耳は音を聞くことができるのです。

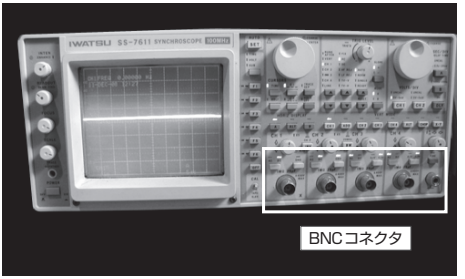
＊4　一瞬だけ出現するこの種の「波」を、「いかにも波っぽい波」と区別するため、「単発波形」と呼びます。

＊5　1990年前後、オシロスコープの世界ではまだ圧倒的にアナログが愛されていたのですが、この時期から、アナログオシロスコープの中にCPUを組み込み、画面に測定値などを文字表示できる機種が出現し始めました。

＊6　「外観が美しくない」「若干の不具合がある」などの場合、1万円以下で入手できます。そういったもので十分ですから、勉強のために1台「マイ・オシロ」を持っておきたいところです。外観がボロボロでも動作に不具合がなければ何の問題もありませんし、不具合があっても、それを考慮して扱えば、十分に計測器として役に立てることができます。「電源投入から30分間は動作が安定しない」という不具合があるようなものは10,000円以下で入手できます。筆者がネットオークションで見た例では、「姿形はお美しいのですが、輝線がいささかひねくれておられます」と書かれた不具合品が、9,000円で落札されていました。

▼図 18-1　デジタルオシロスコープ

▼図 18-2　アナログオシロスコープ




## ●トリガ

どちらの機種も、向かって左側に波を「見る」ためのディスプレイ*7、向かって右側に各種操作ボタン類があります。右側の下部には、ケーブルを接続するためのコネクタ（BNCコネクタ）が5つ並んでいます。BNCコネクタの一番右側の1つは「外部トリガ入力」という機能のためのものです。「トリガ」とは「何をもって波の始まり（あるいは終わり）とみなすか」を決定する重要な要素ですが、オシロスコープの操作にかなり習熟してから勉強しても遅くありません。Chapter 18では後で軽く触れるに留めておきます。

＊7　アナログオシロスコープの場合は必ずブラウン管です。動作原理から必然的にそうなります。関心がある方は、多数存在するオシロスコープ入門書を読んでみてください。

## ●BNCコネクタ

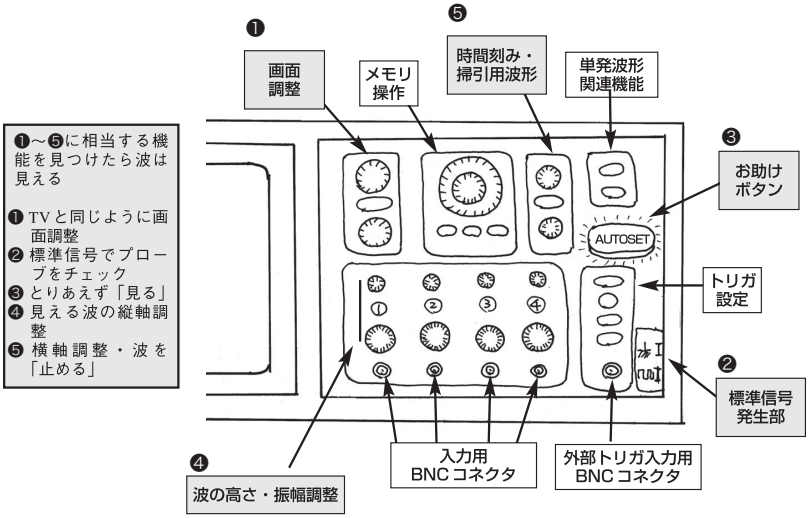
左側の4つのBNCコネクタは、波を入力するためのものです。どちらの機種にも、波を入力するコネクタが4つあります。4つあれば、オシロスコープのカタログには「4現象オシロスコープ」と書かれています。2つしかないものもあり、「2現象オシロスコープ」と呼びます。いずれにしても、これらのBNCコネクタに「プローブ」と呼ばれる電線を接続し、「プローブ」の先に付けた針や金属クリップで「波」をとらえます。

## ●操作パネル

さて、操作パネルを見てみましょう。メーカによらず、たいていは**図18-3**のような配置になっています。

「波をどのように見るか」だけがわかれば、後はTV画面を調整するのと同じです。波の見え方を決めるのは、「横軸の時間刻み」「波の画面上の高さ」「波の幅」「トリガ」の4つです。それだけがわかれば、あとは「画面表示を見やすくする」ために、明るさ（intensity）・コントラスト（contrast）・表示される線の太さ（focus）といったTV並みの操作をするだけです。

▼図 18-3　デジタルオシロスコープの操作パネルのよくある例



さて今のところ、あなたは「トリガ」についての知識を持っていないとしましょう。しかし、現在入手できるほとんどのオシロスコープで（中古も含めて）、「トリガがわからないあなたのためのお助けボタン」といったものがあります。操作パネルの上の端のどちらか、あるいは右の端のどこかあたりに、「Auto set」あるいは「SET」などと書かれた、ちょっと目立つ[*8]ボタンがあるはずです。「トリガ」について考えなくても、そのボタンを押せば波は「見え」ます。

## 18-3 プローブはオシロスコープの「舌」

私たちが美味しいものを食べて「美味しい」と感じるのは、舌に味覚があるからですね。オシロスコープは、波を見せてくれる道具ですが、そのためには当然ながら、波を「食わせて」やらなくてはなりません。そのために使うのが「プローブ」です。

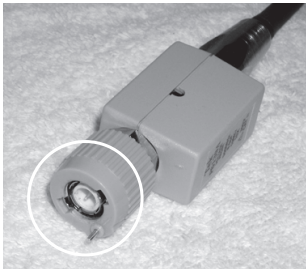
通常見かける「オシロスコープのプローブ」は、**図18-4**のようなもので、「波として現れる電圧変化」を感知する目的で作られています[*9]。一方の端は**図18-5**のようにBNCプラグで、これをオシロスコープ本体のBNCコネクタに接続します。反対側の端は**図18-6**のようにICクリップと同じスプリングフックになっていたり、先端の尖ったピンになっていたりします。目的に応じて使い分けます。

プローブの先端形状がどのようであっても、その根元あたりから1本のリード線が分岐していて、その先にはミノムシクリップが付いています。このミノムシクリップは「グランドを取る」目的のために付けられています。「グランド」は「電圧が0Vになる点」つまり「波の中心値」を確保する目的のためにあります。グランドは、プローブの先端[*10]の近くで取るのがコツです。プローブの先端を当てる点のなるべく近くに「電圧0Vとみなしてよい点」を見つけ、ミノムシクリップをそこに固定するのです。

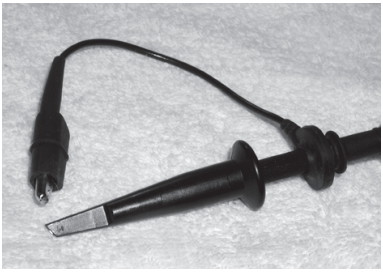
＊8　他のボタンと色が違う・ボタンが大きい・ボタンの上に書かれている字が大きいといった目立ち方です。
＊9　一般的なプローブは、「中心値が0V」であることを前提に電圧変化を感知します。「15Vの電圧が、15Vを中心として周期的に変動する」といった現象をとらえるには、「差動プローブ」というタイプのプローブを利用します。また電流変化の変化を波としてとらえるためには「電流プローブ」を使います。高い周波数の測定に特化したプローブもあります。
＊10　この部分を指して「プローブ」と呼ぶこともあります。「対象物にプローブを当てる」という場合は、電圧感知部分のことを指して「プローブ」と呼んでいることになります。

▼図 18-4　プローブ

▼図 18-5　BNC プラグ



▼図 18-6　スプリングフック



通常のプローブは「10：1」と呼ばれるタイプです。「10：1」といった表記を「倍率」といい、「10分の1」あるいは「10倍」と読みます。

プローブ本体の中には9MΩの抵抗が含まれています。一方、オシロスコープのBNCコネクタの内側には1MΩの抵抗が接続されています。プローブのBNCプラグをオシロスコープのBNCコネクタに接続することによって、9MΩと1MΩの抵抗が直列に接続されることになり、プローブが検出する電圧が1/10になるので、「10分の1プローブ」と呼ばれます。もちろんこの場合、オシロスコープ側に「10分の1プローブを接続している」という設定を行うこと・表示される数値を10倍に読み替えることが必要ですが、最近のオシロスコープでは、プローブの倍率の自動検出・表示する数値の自動換算が「当たり前」になりつつあります。

信号を1/10にする必要がない場合には、「1：1」（1倍）のプローブを用いてもかまいません。また、高い電圧を測定する場合、1/10では足りず、1/100にする必要がある場合もあります。この場合は「100：1」プローブを利用します。プローブの倍率とオシロスコープ側の内部抵抗のマッチングプローブの倍率による表示の違いには、十分な配慮を払う必要があります。

# 18-4 プローブの較正

どのような測定でも、測定を始める前には「基準値が基準値として感知されるか」をチェックしておく必要があります。

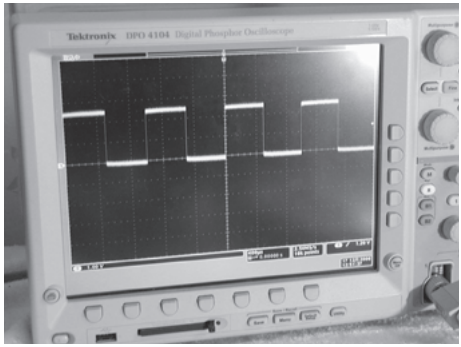
オシロスコープの場合の「基準値」は、「一定の形の波」です。形のわかりやすさから、方形波*11（「矩形波」と呼ぶこともある）が利用されます。オシロスコープには必ず、「一定周波数の方形波」を出す「基準信号発生」機能があります。DSO4104の場合、正面から見て右下に、一定周波数の方形波を出す端子とグランド端子があります。プローブを接続して最初に行うことは、「方形波が方形波に見える」初期状態を確保することです。

**図18-7**は、入力の一番にプローブを接続し、さらにプローブの先端とグランドのミノムシクリップを、基準信号発生箇所に固定したところです。画面には「何か」が現れるはずです。何も現れないようであれば、「一番からの入力が画面に出ないようにセットアップされている」あたりが疑わしいと思われます。「何か」が現れても、それを眼で見てわかる波として表示させるには、設定が必要です。オシロスコープでは「横軸の時間刻み」「波の画面上の高さ」「波の幅」「トリガ」の4つを適切に設定する必要があります。しかしたいていは、「Auto set」「SET」といった「お助けボタン」を押せば、全項目について適切な設定が行われ、**図18-8**のように画面に方形波が現れます。このように、「方形波に見える方形波」が表示されればOKです。

**▼図 18-7　プローブの較正**

＊11　より正確には「デューティ比 50%の方形波」です。図 18-8 で記述した例では、方形波の「最大値」「最小値」が同じ時間幅になっていますが、そうではない方形波もあります。

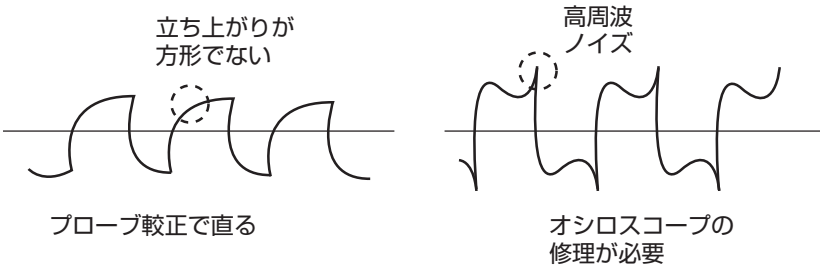
▼図 18-8　オシロスコープに用意されている標準波形




見やすくするため、高さを少し上げ、最小値が縦軸の「0」になるように調整している。

しかし**図18-9**のような見え方をする場合には、プローブに何らかの問題がある可能性があります*12。このような場合には、プローブのBNCプラグのすぐ近くにあるネジをドライバで回し、正しい波形が表示されるようにします。前出の**図18-5**の場合、BNCプラグの隣の直方体の「箱」の中央付近に、小さな孔(あな)が見えます。この孔の中にネジが入っていて、精密ドライバで回せるようになっています。ネジの先には「トリマコンデンサ」と呼ばれる可変コンデンサが入っており、ネジを回すことによって容量が変えられるようになっています。このコンデンサの容量を変えると、プローブの周波数特性が変わり、方形波の「見え方」が変わるのです。

▼図 18-9　波の見方




＊12　もしかすると本当は、オシロスコープ側の基準信号が狂っているのかもしれません。しかし「基準信号が正しい」ということを一応信用しないと、そこから先の測定には一歩も進めないので、基準信号のほうを信用することにするのです。基準信号が狂っていては困りますから、1～2年に一度、オシロスコープそのものの較正をする必要があります。較正作業はメーカで行いますが、より安価な料金の較正専門業者も多数存在します。

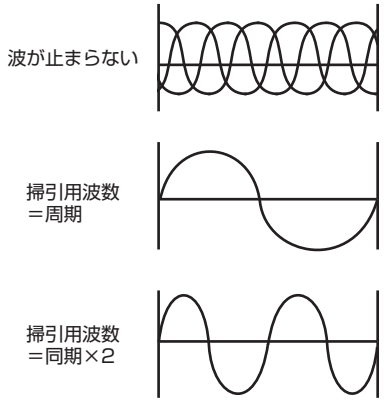
以上で、測定の準備は終了です。文章で書くと長い道のりに見えてしまいますが、慣れてしまえば、これらの手順は身体の「癖」になり、無意識のうちに行えるようになります。そうなるまでに必要な時間は、長くても3ヶ月程度です。怖がることなくオシロスコープに触れ、正しい手順を身体に覚えさせましょう。

# 18-5 「波が止まって見えないんですけど」〜掃引周波数とトリガ

## お助けボタン

現在のオシロスコープで現象をとらえようとするときには、プローブを接続し、「SET」「Auto set」といった「お助けボタン」を押すだけで、一応「波を見る」が可能になります。しかし、自動設定が必ずしも「見たいもの」を見るのに適しているとは限りません。たとえば1m秒単位の現象を見たいのに、「お助けボタン」が1μ秒の設定をしてしまったら、目的は達せられません。

▼図 18-10　波が「止まらない」ときは掃引周波数を調整




「波」として現れる現象を、どのような時間単位でとらえるかは、「掃引周波数」で決まります。「Time/div.」といったロータリースイッチがあれば、それを回すことで、掃引周波数が変わります。掃引周波数が波の周期と同期できないと、「波が止まって見えない」という現象が起こります。掃引周波数を波と同期がとれるように調整し、波を「止め」ます（**図18-10**）。

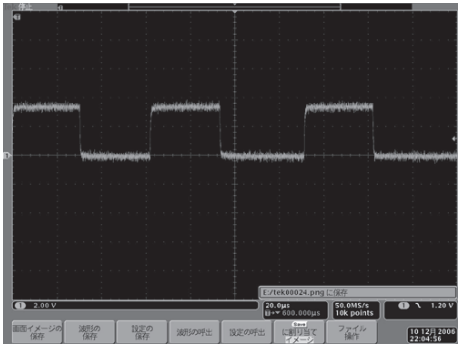
## トリガの設定

さらに、「何をもって波の始まり（あるいは終わり）とするか」をオシロスコープに認識させるために、「トリガ」を設定します。

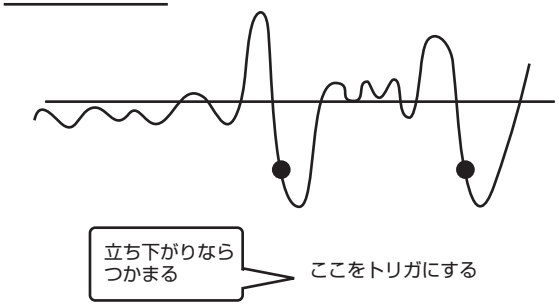
図18-11のような信号の場合、一応「振幅4Vの方形波」ではあるのですがノイズが多いです。「立ち上がりトリガ」が、たとえば100mV程度に設定してあると、ノイズに「埋もれて」しまって「立ち上がり」が検出できません。しかしこの信号の場合、「立ち上がり」「立ち下がり」は一応直線状になっていますから、「立ち上がってノイズより十分に高い電圧になったところ」を「トリガ」に設定することによって、オシロスコープは「そこが波の始まり」であることを正しく認識することができます。

「トリガ」は「立ち下がり」に設定しなくてはならない場合もあります。たとえば制御信号など「不定期」に起こる現象の場合、立ち下がり側で「終わり」をとらえたほうがよい場合もあります。また図18-12のような波形の場合は、トリガで「始まり」をとらえることが不可能なので、立ち下がり時の、図中の点のような位置を「ト

▼図 18-11　ノイズの多い方形波



▼図 18-12　立ち下がりをトリガにするほうが波をとらえやすいこともある



リガ」としなくては波をとらえられません。

何でも「お助けボタン」で済ませてしまう段階を卒業するためには、掃引周波数とトリガを理解し、オシロスコープで実際に設定できるようになる必要があります。

## 18-6 デジタルオシロスコープは嘘をつく

アナログオシロスコープは、連続した「波」を連続したまま扱いますから、「ナマの波」を見ることができます。表示誤差の発生は避けられないとしても、基本的には「現象そのもの」を見ることができます。この点が「人気」の根拠です。

しかし、デジタルオシロスコープの「デジタルならでは」の利便性は捨てがたいものです。また、同じ周波数帯域に対応している機種であれば、どうしてもアナログオシロスコープのほうが高価になります。とすれば、デジタルオシロスコープの「嘘つき」の理由を知り、なんとか「よろしくやっていく」しかありません。

### デジタルオシロスコープは波を切り刻む～サンプリング

今回取り上げた、テクトロニクスのデジタルオシロスコープ「DPO4104」は、1GHzまでの周波数帯域に対応しています。周期でいえば1ナノ秒です。

さて、製品カタログを見てみると「サンプル・レート」という数値があり、そこには「5GS/s」などと書かれています。これは「サンプリング」の周期です*13。つまりこの機種の場合、1秒を5G（50億）個に均等に刻み、刻んだ時刻ごとに数値を取り込み（サンプリング）、取り込んだ切れ切れの値が「連続した波」に見えるように画面に表示しているのです。つまり、性能のギリギリの上限である1GHz程度の波を観察するときには、1つの波の中の、たった5点しか見ることができないのです。当然、取りこぼしが発生します。それが、次に解説する「エリアシング」です。製品の性能に対して余裕のある使い方をしても、何らかの「取りこぼし」が発生することは避けられません。これは「デジタル」＝「離散」であるゆえの宿命です。

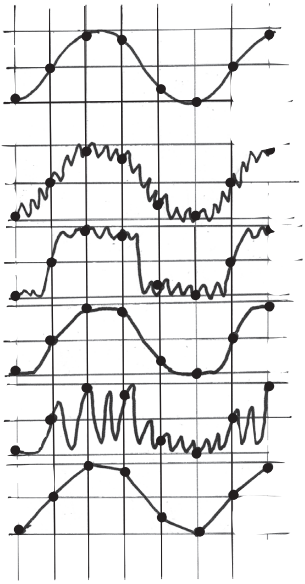
＊13　サンプリングが短い間隔で行われるほど、「現象の取りこぼしが少ないオシロスコープ」ということになります。サンプルレートはデジタルオシロスコープの性能を決める重要な要素です。サンプルレートが多いほど（より短い時間刻みでサンプリングできるほど）高級なオシロスコープということになり、価格も高価になります。

## 現象が正しく見えない〜エリアシング

周波数が1GHzの波を、サンプルレート5GS/sで見たとしましょう。この場合、波の1周期を5分割するわけですから、**図18-13**のような多様な波が画面上では同じ波形に見えてしまいます。

さらに条件がシビアになると、画面に表示される波形は、何のために何を測定しているのか完全にわからなくなります。サンプルレートの半分に当たる周波数を「ナイキスト周波数」と呼びますが、ナイキスト周波数を超える現象をデジタルオシロスコープでとらえようとすると、もはや現象を「波」としてとらえることは完全に不可能になります（**図18-14**）。

▼図 18-13　デジタイズ（離散化）すると
必ず「取りこぼし」がおこる



▼図 18-14　「ナイキスト周波数」以上の波は見えない

「ナイキスト周波数」の問題は、たとえば1GHzレベルのオシロスコープで100MHzの波を見る場合にも発生します。この場合は、サンプルレートが5GS/sならば、1つの波を50分割できるので、波そのものをかなり正確にとらえることができます。しかし、この波に、もしナイキスト周波数以上の現象が含まれているとすれば、それをとらえることはできません。

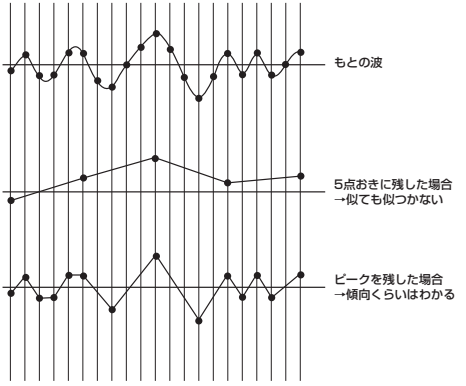
デジタルオシロスコープの画面に現れる「波」を見るときには、「どういうサンプリングが行われていて、何が取りこぼされている可能性があるか」を同時に考える必要があります。

## なるべく現象を正しく見たいのに〜表示エリアシング

デジタルオシロスコープでは、測定結果をメモリに蓄積しておき、「履歴」を呼び出すことが可能です。しかし、メモリの容量には限度があります。長い時間にわたる現象をとらえたいときには、サンプリングした結果を全部メモリに蓄積することができないため、データを「間引く」ことが行われます。このとき、「5回に1度」と定期的に間引くと、**図18-15**の上側のように、元の現象とは似ても似つかないデータを見ることになってしまいます。これを「表示エリアシング」と呼びます。デジタルであり、なおかつメモリの容量に限度があるゆえの宿命です。

デジタルオシロスコープの一部では、「表示エリアシング」の問題を回避するために、「データを間引くときに、特徴的な点を選んで残す」といった処理を行えるものもあります。この場合、**図18-15**の下側のように、「元の現象そのものではないけれ

**▼図 18-15　データが「間引かれて」いるときは間引かれ方に注意**



ども、元の現象がある程度わかるデータ」を見ることができます。

デジタルオシロスコープで「測定結果をメモリに蓄積しておいて、後で見る」機能を利用する場合には、データが間引かれる可能性や、データがどのように間引かれているかに注意する必要があります。

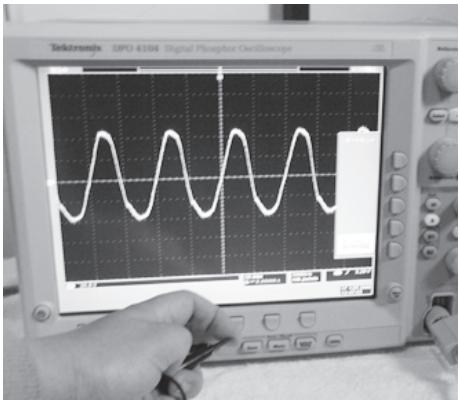
どのような測定器であれ、判断の根拠とするに十分な測定結果を得るためには、「どのような測定を行っているか」に常に自覚的である必要があります。オシロスコープで、「波が何か見えてるから測定できている」と思っていると痛い目に遭います。カタログやマニュアルに書いてある数値を理解し、自分の目的に適した使い方ができるようになっておきましょう*14。

## 18-7 Let's Challenge～ 自分の「波」を測る

「人体電流（実際には電圧）の変化を測ってみる」というのは、オシロスコープで最初にやる「お約束」のイタズラです。プローブの先端を身体に直接触れるのは感心しませんが、まあ、誰でもやることですから、一度はやってみてもよいでしょう。

**図18-16**は、プローブの先端を指先に当てて、電圧変化を測っているところです。グランドを取る場所はないので、グランドは浮遊させている状態です。画面には周

**▼図 18-16　指先の電圧変化を測る**




＊14　オシロスコープの機能の限界に近い測定を行う場合には、プローブの選択にも注意が必要です。プローブが対応できる周波数帯域には限界がありますから、たとえば周波数 500MHz の現象をとらえるには、500MHz に対応できるプローブを選択する必要があります。

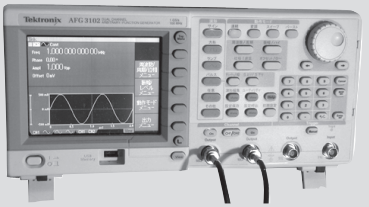
## 1つは持っておきたい「任意波形発生器」

オシロスコープで「正しく測れている」ということを確認するためには、最初に「オシロスコープの標準信号でプローブを較正する」という作業を行います。しかし、標準信号は本当に正しいのでしょうか？

2現象・4現象オシロスコープの場合、同じ信号に対して同じ表示が得られることを、どうやって確認すればよいでしょうか？ このような目的で用いられるのが「任意波形発生器（Function Generator：FG）」です。基本的な機能は、任意の周波数の正弦波・方形波・三角波を発生することです。出力は2つ以上用意されていることが多いため、両方から同じ波が出力されるようにしておき、それらをオシロスコープのBNCコネクタに直接入力すると、オシロスコープ側に問題がないかどうかをチェックすることができます。もちろん、FG側に問題があれば何のチェックにもなりませんから、FGは較正されたものを使用する必要があります。

高機能な任意波形発生器では、評価したい信号を自分の思いどおりに作成することができます。また、オシロスコープの表示チェックのみならず、「任意の音を載せたAM（FM）電波を作成し、チューナーのチェックを行う」といった用途に用いることが可能なものもあります。このような高機能・任意波形発生器の一例が、**図18-17**です。ここでは正弦波を発生させていますが、方形波出力ではデューティ比（「High」部分の比率）を変えることが可能なため、たとえば「周期的な短いパルス」にしか見えないクロック信号を発生させ、そのクロック信号で回路が動作するかどうかをチェックすることも可能です。

▼図18-17　テクトロニクス｛AFG3102｝



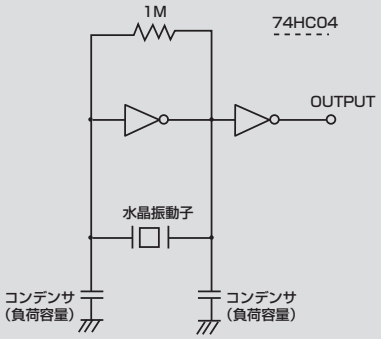

波数500Hz・振幅40V程度の正弦波チックな波形が現れています。本来、人体の皮膚の電位（電圧）変動を見るのであれば、グランドは口の中などで取らなくてはなりません。またプローブと人体の「インピーダンス*15マッチング」といった問題などもありますから、ここで現れている波形は、いったい何を見ているのだか実はわからない状態なのですが、とりあえず「指先にプローブを当てて『お助けボタン』を押したら、何か波形が出た」というのは、「あ、波が出てれば測れるんだな」ということを確認できる、大変お手軽な遊びです。

＊15　とりあえず、「インピーダンス」＝「抵抗みたいなもの」と思っておけばよいでしょう。プローブと対象物で適切なマッチングを取る必要がある値の1つです。

## きれいな波形は好きですか?

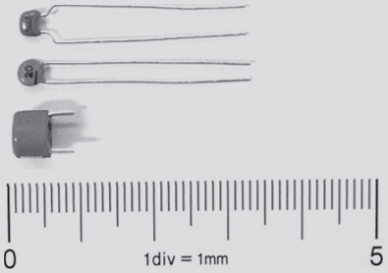
水晶振動子を使用する場合、両端に接続するよう推奨されているコンデンサ（**図 18-18**）を外したほうが「きれいな」波形になる場合があります。しかしこのときの発振は、基板の浮遊容量など、あやふやな「見えないコンデンサ」に支えられた「たまたま」のものです。何らかの理由があって浮遊容量が変化したら、発振が止まってしまい、大変危険です。どうしても「きれいな波形」にこだわりたい場合には、コンデンサの一方を**図 18-19** のようなトリマコンデンサに置き換え、セラミック精密ドライバで、トリマコンデンサの中央の「ネジ」を回し、容量を調整します。

▼図 18-18　発振回路




このとき、金属製のドライバは絶対に使用してはいけません。手元にセラミックドライバがない場合は、竹串・つまようじ・マッチの軸など導電性でない素材を削って、代用品を作ります。

▼図 18-19　トリマコンデンサ



# Chapter 19

# モノづくりの世界に踏み込もう ～“ICE”の魅力

**ハードウェアの正常動作を知る目的でも、ボードやマイコンにプログラムを書き込む目的でも、「ICE」というツールが多く用いられます。Chapter 19 では ICE について詳しく説明します。**

## 19-1 基板の中の「出来事」がわからないとモノはできない

私たちは日々、ごく普通のパソコンにごく普通のパソコン向けOSを搭載し、そのOSのために作成されたアプリケーションをインストールして利用しています。そこで考えられるバリエーションは、基本的には「ハードウェアは、PC/AT互換機かApple社のMacシリーズか」「OSは、WindowsかMac OSかPC UNIXか」といったことです。選択肢は多くありません。「ハードウェアアーキテクチャに関して2通り[*1]×OSに関して3通り[*2]＝6通り」しかないのです。

PC/AT互換機においてもMacシリーズにおいても、パソコンのハードウェア（CPUを含めて）は一定の規格に基づいて製造されています。そしてハードウェアが一定の規格を満たしていることを前提として、パソコン向け汎用OSを開発することが可能になります。さらに世の中に存在する多種多様なパソコン向けアプリケーション・ソフトウェアは、ハードウェアとOSが一定の規格を満たしていることを前提として、初めて開発が可能になります。

規格に縛られて生きていくのは息が詰まりますね。では、個性を発揮してみることにしましょう。PCの自作でもしましょうか？ それにしても、たとえば「PC/AT

＊1 「PC/AT」と「Mac」の２つです。おのおのの中に、さらに歴史的に大きな差異が存在しますが、それらは無視することにします。
＊2 ここでは便宜的に「Windows」「Mac OS」「PC-UNIX」の３つ、という数え方をすることにしますが、「Mac OS X」の実体は UNIX です。また PC-UNIX には数多くの分派があり、その下にまた分派（Linux における「ディストリビューション」）があります。そのあたりの「数え方」の問題に踏み込むと、「宗教戦争」というべき状況に陥りますので、深入りはやめておきます。

アーキテクチャ」[*3]そのものから自由になることはできません。ハードウェアにおける選択の余地は、せいぜい「筐体の外形デザイン」「筐体の色」「性能」の3点程度です。

思想・信条面の理由から「Intelのパソコン向けCPUを利用せず、AMDの同等品を利用する」という選択をする人もいるかもしれませんが、それで「Intelから自由になった」というのは不思議な話です。「動作の面ではAMD製品がIntel製品と同等である」という事実を思い浮かべれば、「AMD製品を選んだからといってIntelから自由になっているわけではない」ということは明白です。「思想・信条」という「個性」が発揮できているのかどうか、極めてあやふやではありませんか？

OSを新しく自分で開発することに「個性」を発揮する余地はありますが、既存のアプリケーションの多くが利用できなくなるでしょう。OSを新規開発するなら、ありふれたアーキテクチャのパソコンを利用すること自体の意味を問い直すべきかもしれません。

## ソフトウェアの「個性」

では、ソフトウェアで「個性」を発揮してみることにしましょうか。デスクトップ画面の背景やスクリーンセーバを自分好みのものに変えてみるのは簡単です。しかし、それは一般的なOSの機能を利用しているにすぎません。パソコンの利用において私たちが「個性」を発揮できるのは、せいぜい搭載するアプリケーションや利用するコンテンツの選択においての話です。

ちなみに原稿執筆中の2006年12月13日、ファイル共有ソフトウェア「Winny」の開発者である金子勇氏に、京都地裁は「著作権侵害の幇助（ほうじょ）」を理由として有罪判決を下しました。そもそも「Winny」を利用するかどうか？ これは倫理・セキュリティ・その他もろもろを総合した、各人の「個性」的判断といえるでしょう。どのようなファイルをダウンロードして閲覧・利用するか？ そこにはおおいに「個性」が発揮されることでしょう。ハリウッド映画派、エロ・グロ系コンテンツ派、流出する官庁や大企業の内部資料愛好派……ハードウェアアーキテクチャやOSの制約でガチガチに縛られた中での、せめてもの、いじましい「個性」の祭典です。

インフラストラクチャのレベルでも事情は似たようなものです。現在、世界の多くの場所がインターネットで結ばれており、私たちはその利便を享受できます。な

＊3　Macシリーズのアーキテクチャは長らく非公開でしたが、現実には「Apple」をもじった「Banana」といったクローン機の数々が、1980年代から存在しました。

ぜなら、ネットワーク通信に必要な世界規模のインフラストラクチャが存在し、そこでの通信手段がプロトコル（規約）に定められているからです。「通信プロトコルから自由になる」ということは、ネットワーク通信をあきらめることと同じです。

パソコンの利用において私たちが「個性」を発揮できる余地は、極めて限定されています。しかし、ガチガチに限定されたアーキテクチャやプロトコルの数々のおかげで、私たちは自由の許される部分ではワガママ・好き勝手のやり放題、著作権侵害や非合法取引を含めて（？）「個性」的に振る舞うことができるのです。

## OSとデバイスドライバの開発

さてここまで、「各ユーザは、適切なハードウェアと適切なOSを選択することが可能である」という現状を、暗黙の前提として考えてきました。同じ「PC/ATアーキテクチャのパソコン」といっても、ハードウェア構成には無数の選択肢が存在します。OSの選択肢が3つしかないとはいえ、なぜそこに一般的なOSを搭載することができるのでしょうか？ 商用製品のOSにせよOSS（Open Source Software）のOSにせよ、誰かがそのアーキテクチャ向けにOSを作ってくれた、または移植してくれたのです。無数の周辺機器の組み合わせに対しては、誰かがデバイスドライバを作ってくれたのです。

OSやデバイスドライバの開発においては、「ハードウェアが所期の動作をしているかどうか」の検証が不可欠です。「××というソースコードを書いて、△△のようにコンパイルしたら、ハードウェアは○○のように動作した。では、ソースコードのここらへんをちょっと変更して……」という感じで、ハードウェアを「ブラックボックス」と考えてOSやデバイスドライバを開発することは可能です。しかし、ハードウェアの中で実際に何がどうなっているのかわからない今までの「手探り」の開発では、思いもよらない不具合を見落とす可能性があります。チューンアップしてハードウェアのポテンシャルを最大に発揮させようとするなら、なおさらハードウェアの中の動作を知ることが不可欠です[*4]。

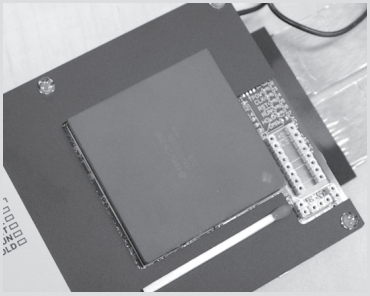
組込み開発の場合、ハードウェアを新規に開発することからスタートすることは珍しくありません。CPUを完全に新規開発することは稀ですが、既存のCPUやCPUコアを利用して、CPUを含む論理処理チップやマイコンを新規開発することがあります。つまり「誰かがOSやデバイスドライバを書いてくれたハードウェア」

＊4 「OSを使わない」＝「機械語（アセンブラ）で開発する」という選択肢もあります。この場合、ハードウェアの内部動作を直接知る必要性は、より高くなります。

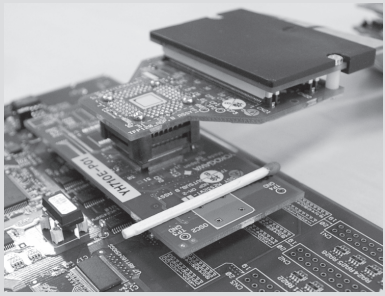
## 実チップとEVAチップ

EVAチップ（×××ページ参照）は評価用の回路追加・内部バスの外部への取り出しなどの要求から、実チップに比べてピン数やパッケージサイズが大きく増大します。ルネサステクノロジのH8SX/1600ファミリではピン数は120～144本ですが、それらのEVAチップであるH8SX/1688のピン数は250本です。サイズの違いは**図19-1**と**図19-2**で見てとれるとおりです。

▼図19-1　EVAチップ：約50mm□



▼図19-2　EVAチップ：約14mm□



ではありません。誰がOSやデバイスドライバを書いてくれるのでしょう？……他でもありません。そのプロダクトに関与するエンジニアです。場合によっては、あなた自身です。開発しようとしているプロダクトが何であれ、「ハードウェアの内部動作を直接見る」ことが行えなければ、OSもデバイスドライバも書けず、したがってプロダクトは永久に完成しないのです。

しかし、いかに目を凝らして基板を眺めたところで、ハードウェアの内部動作が見えるわけはありません。基板の中で起こっている「出来事」―基板の中の物語―を知るためには、「見る」ためのツールが必要です。基板の中に思いどおりのタイミングで何かを起こしたら、物語の結果が変わるかもしれません。それにしても「何かを起こす」ためのツールが必要です。

Chapter 19では、基板の中の出来事を知るための重要な開発ツール「ICE」について解説します。

# 19-2 ICEとは何か

## CPUの動きを見る

基板の中で起こる数多くの「出来事」の中で最も重要なのは、CPUの内部動作です。CPUが受け取った入力に反応して何かが起こり、その結果としてCPUは外部に何かを出力します。しかし当然のことながら、CPUをどれだけ眺めていても、CPUの中で起こっていることを見ることはできません。

CPUがどのように設計されているかは、CPUメーカが発行しているデータシートに書いてあります。データシートを頼りに、「ここでこう入力したから、ここでこう出力される、ふむふむ」という理解をすることは可能ですし、できなくてはなりません。しかし実際にどのように動作しているかは、何とか手段を講じて「見て」みないとわかりません。「入力から予測できない出力が出た」という事態は、実際に起こります。神ならぬ人間が作ったCPUです。完璧であるとは限りません。特定の入力パターンに対して「計算ミス」をしてしまうかもしれません。実際の使用条件で起こりうる電圧低下・クロック信号の劣化・ノイズの混入などによってCPUが誤動作をするのなら、最終的なプロダクトの使用条件を見直さなくてはならないかもしれません。

そもそも出来立ての「まっさら」な基板の上のストレージ（たとえばフラッシュメモリ）には、まだ何も書き込みが行われていません*5。電源を投入すれば、CPUのしかるべきピンにしかるべき動作電圧が印加（いんか）されますが、何も起こりません。

### ●CPUの起動

パソコンならば「電源が投入されると、BIOSが起動してブート可能なデバイスを探して選択し、ブート可能なデバイスのブートローダ（HDDならMBR：Master Boot Recordに置かれている）を起動し、ブートローダからOSを起動させる」という手順が暗黙のうちにたどられます。開発者のあなたは、目の前の「まっさら」の基板で、それに相当する作業を行えるようにしなくてはなりません。どうすればよいのでしょう？

＊5　ブートローダやOSがすでに書き込まれている場合は、この限りではありません。

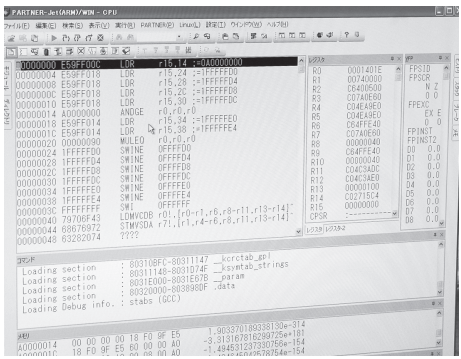
まず、組込み機器においては、たいていは「ブート可能なデバイスは1つ」と考えてかまいません。したがって「BIOSがブート可能なデバイスを探す」に相当する工程を削ることが可能です。

### ●ブートローダの起動

次にブートローダです。CPUは電源ON時*6から、「命令の取得（fetch）→解読（decode）→実行（execute）→命令の取得→……」の「ぐるぐる回り」を開始します。何としても一番最初の命令を取得せねば、話が始まりません。最初の命令は、何らかの形でCPUからアクセス可能なメモリ*7の0番地（最初の番地）に置かれています。それを実行することから、基板の上の「物語」が始まります。やらなくてはならないことは極めて単純です。まずはメモリの0番地に、最初の1命令を置いてやることです。これはIPL（Initial Program Loader）が行います（**図19-3**）。

もちろん、命令がただ1つで終わることはありえませんから、ブートローダが起動して、次いでOSがブートアップして……という手順を追えるように、メモリにプログラムを書いてやらなくてはなりません。最初からすべてが成功するわけはありませんから、「物語」を1ステップずつ追って（トレース）いき、必要なら修正を行い、また「物語」を追っていく……という作業の繰り返しの結果、OSのブート完了までの「物語」を進めることができます。

**▼図 19-1 「PARTNER-Jet」で見ているプログラムメモリの 0 番地**



＊6 正確にはリセット時ですが、「電源 ON ＝リセット」という設計が多く行われているので、「電源 ON 時の処理」と考えても支障ありません。
＊7 いわゆる「主記憶装置」です。プログラムは「補助記憶装置」である各種ストレージからメモリに転送され、実行されます。

## 0番地への命令

この作業の最初の一歩、「メモリの0番地に最初の命令を書き込む」にも、何かツールが必要です。OSのブート完了まで段階を追って、1つひとつの命令がCPUの中でどう実行されているのかを見るためにも、正常動作が確認できた段階でフラッシュメモリにプログラムを書き込むためにもやはりツールが必要です。このような目的で使用されるツールが「In-Circuit Emulator」[*8]、略して「ICE」[*9]です。直訳すれば「回路の中で真似するもの」となります。「真似する」相手はCPUそのものですが、観測できる範囲や影響を与えられる範囲は、メインメモリやフラッシュメモリなど、「CPUが動作するために必要なすべて」に及びます。

では、ICEはどのようにCPUを真似るのでしょうか？ 次節ではICEの「真似ぶり」をご紹介します。

# 19-3 フルICEとJTAG ICE

## フルICE

「CPUの内部動作を見たい」という衝動に駆られた開発者たちの発想は、非常に単純でした。CPUが基板の上に載ったままじゃどうしようもないから、CPUを空中に浮かせてしまえ。別のコンピュータを空中のCPUに接続し制御・観察できるようにしてしまえ。単純にいえば、それだけのことからICEが誕生しました。時期でいえば1970年代、8ビットCPUの時代です。このタイプのICE、実チップを何らかの形で利用するICEを、現在は「フルICE」と呼んでいます。

もう少し時期が下がると

1. **CPUを基板上のソケットから引き抜く。**
2. **CPUと同じ形状・同じピン数のダミーCPUを用意する。ダミーCPUの中は空っぽだが、各ピンに電線が接続されている。**

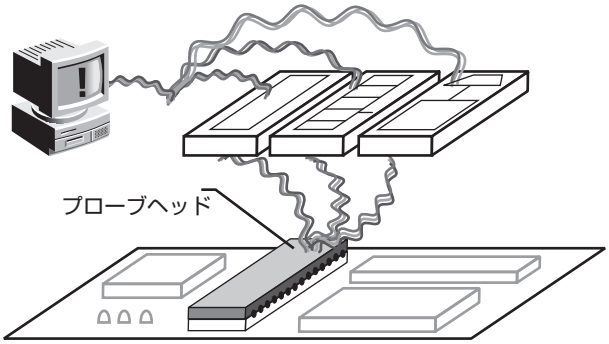
＊8 「CPUのブートアップに始まる各処理のどの段階からを見る（制御する）ことができるか」は、ICEの機種によって若干の違いがあります。
＊9 「ICE」はIntel社の登録商標です。

3. CPUの内部をブロックごとにバラバラにして配線は元どおりにする。配線の中の信号は読み出せるようにしておく。CPUを外部から制御・観察するのに必要な周辺回路があればそれも接続して「プロセッサモジュール」を作る。この「プロセッサモジュール」をダミーCPUの先に接続する。
4. 「プロセッサモジュール」のパーツそれぞれを制御・観察できるように、ホストコンピュータに接続する。制御・観察はホストコンピュータから行う。

といった感じになりました（**図19-4**）。このタイプのICEも、現在は「フルICE」と呼びます。

それまで、CPUのピンを通じた入出力で「たぶんこうなっているんだろうな」とおぼつかない推測を立てながらデバッグすることしかできなかった開発者たちにとって、「ICEを使ったらCPUの中の動きが直接見える」ことの喜びと驚きはいかほどであったでしょうか。「百聞は一見にしかず」は、CPUの内部動作においても同様です。

▼図 19-4　ごく初期の ICE のイメージ



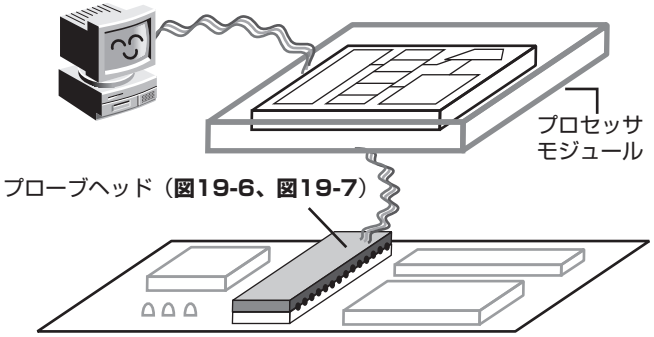

バラバラにされたCPUが接続されて空中に浮いており、
CPUの動作をホストコンピュータから「見る」ことが可能。

## EVAチップ

ICEを使った開発・デバッグが当たり前になると、CPUやマイコンのメーカが、製品チップと同時に、評価用の「EVA（Evaluation“評価”の頭文字3文字）チップ」を製造して販売するようになりました。**図19-5**の「プロセッサモジュール」に相当するものです。動作履歴を記録するためにメモリを追加したり周辺回路を追加

したり、チップ内部のバスを外に引き出したりする分、サイズは大きくなりピン数も増えますが、「メーカ自身が供給している評価チップである」ことの安心感は、相当のものであっただろうと推察されます*10。

▼図 19-5　図 19-4 よりやや時代が下がった ICE のイメージ




ICEで「見る」ためのモジュールが「プロセッサモジュール」として一体化された。

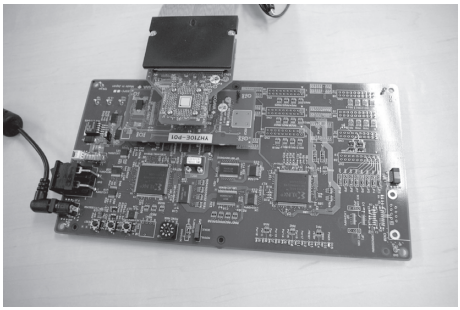
メーカが評価用のEVAチップ（×××ページのコラムを参照）を供給してくれるのであれば、ICEなど開発ツールのベンダは、当然のこととしてそれを利用します。

時期でいえば1980年ごろから2000年ごろまで、8ビット～16ビットマイコンの開発現場には、ツールに投資する余裕があれば「EVAチップとICE」という組み合わせのデバッグ環境が存在しました。このタイプのICEも、現在は「フルICE」と呼ばれています（**図19-8**）。

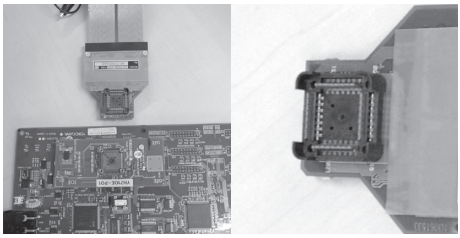
しかし1990年代に入り、基板の表も裏もくまなく部品が埋めつくしている「高密度実装」*11が当然のものとなると、試作段階といえども、「基板にソケットを付けておき、チップを着脱できるようにする」ということが現実的でなくなってきました。チップは可能な限り小さく薄く作られるようになり、ピンは細くなり、ピン間の間隔も狭くなりました（**図19-9**）。基板に「べったり」とへばり付く感じにハンダ付けするのには適した形状ですが、どうやってICEを利用するのでしょうか？ まさか、デバッグのたびにハンダゴテで熱してチップを外し、ダミーチップをハンダ付けして……というわけにはいきません。

＊10　「EVA チップで動作するプログラムが実チップで動かない」という現象が、実際にはときどき起こっています。
＊11　このような場合、基板の中が数層の重ね合わせとなっており、重ね合わせた中で配線が行われます。

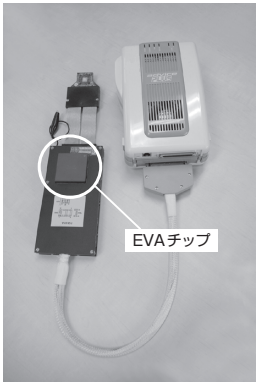
▼図 19-6　現在の洗練されたプローブヘッド（本文中の「ダミーCPU」は、現在ではプローブヘッドの形になっている）



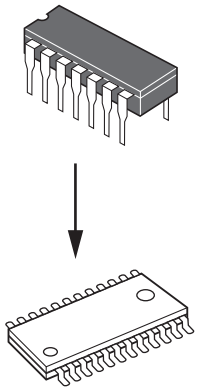
▼図 19-7　プローブヘッドを CPU ソケットから外したところ



▼図 19-8　横河ディジタルコンピュータの ICE「advicePLUS」




▼図 19-9　チップの変化



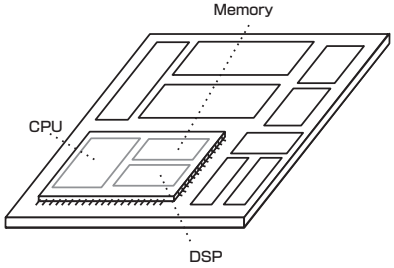
## 混載LSI

1990年後半になると、さらに困った問題が発生し始めました。チップメーカ各社は既存製品の付加価値を高めるために、CPUやマイコンに別の機能を追加して1パッケージとした「○○混載」LSIを好んで出荷するようになったのです（**図19-10**）。

「○○混載」には、「DSP混載」から「アナログ回路混載」まで多種多様なバリエーションがあります。同じチップ面積・同じピン数で機能が増えるのであれば、高密度実装を求められている基板の設計者には歓迎されるのですが、ICEを利用するわけにはいかなくなります。

いろいろなプロセッサと一緒にパッケージの中に混載されているCPUを、どうやって単体で取り出すのでしょうか？ しかもパッケージは基板にべったりとハンダ付けされているのです。パッケージを慎重に削って薬品で溶かせばチップの中身を露出させることは可能ですし、そこに現れている電極に直接触れることも不可能ではありませんが、デバッグのたびにそんな手間をかけるのは、まったく現実的でありません。

**▼図 19-10　混載 LSI**



## JTAGピン

そこで注目されたのが、テスト用としてチップに作りこまれていたJTAGピンです。もともと1980年代から、チップのピン間隔は狭くなる一方だったため、ピンに直接プローブの針を触れて動作テストを行うのが困難になってきていました。このため、チップ内部の回路をカスケード接続（数珠つなぎ）し、回路の内部状態を順次読み出していくことで動作テスト（バウンダリスキャンテスト）を行うしくみが考え出され、1990年にはIEEEの標準となりました。標準なのでチップに作りこまれています。チップをパッケージに封入した後のテストに使用するのですから、当然のこととしてJTAGピンがパッケージの外部に出ています。基板に「JTAG端子」があって、JTAGピンがそこに接続されていれば、基板からチップ内部のCPUにアクセスすることが可能です。パッケージがハンダ付けされていたり、パッケージの中でCPUが他のプロセッサと「同居」していたって怖くありません。

## JTAG端子

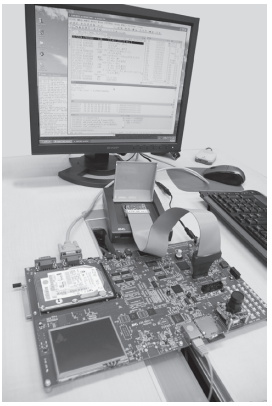
このような経緯から、2000年ごろ以後、かつて「フルICE」で行っていた開発・デバッグ作業の多くが、基板のJTAG端子を利用して行われるようになりました。かつての「フルICE」の「いかにも回路の中」というイメージからはほど遠いので、一時期は「JTAGデバッガ」「JTAGエミュレータ」「JTAG ICE」などと用語の混乱がありましたが、やがてJTAG端子を利用するデバッグツールを「ICE」と呼ぶ場面が多くなりました。すべてを14～20ピンのJTAG端子で行える手軽さもあり、ICE本体の価格は急激に低下しました*12。現在の主流はこのタイプです（**図19-11**、**図19-12**、**図19-13**）。

JTAG端子を利用するタイプのデバッグツールが「ICE」と呼ばれるようになったので、昔ながらの「CPUやマイコンが挿されるべきソケットから電気信号の入出力を行う」というICEのほうは「フルICE」と呼ばれるようになりました。

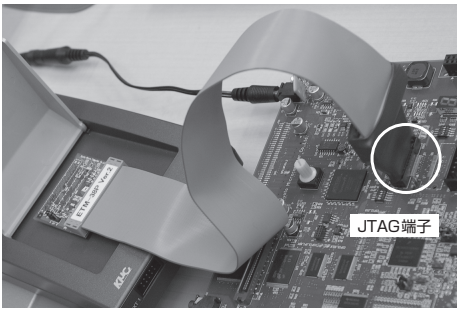
近年、半導体メーカが新製品の出荷の際にEVAチップを供給しなくなってきたこともあり、「フルICE」の利用が可能な場面そのものが減少しつつありますが、「フルICE」は車載製品を中心として、クリティカルかつリアルタイム性の高いプロダクトの開発場面を中心として、現在も根強く支持されています（**図19-14**）。

＊12　数年前までフルICEは200万円が常識でしたが、現在は50万円程度の製品が存在します。しかしJTAG ICEはさらに安価に製造できるため、10万円台の製品が存在します。

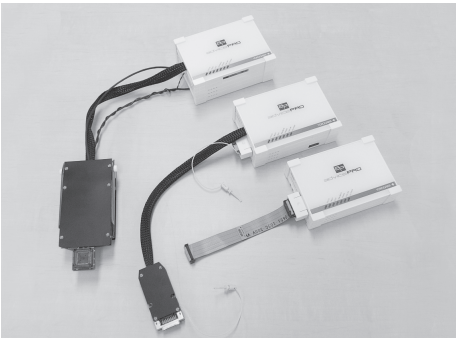
▼図 19-11　京都マイクロコンピュータの JTAG ICE「PARTNER-Jet」を用いたデバッグ風景



▼図 19-12　JTAG ICE と基板の JTAG 端子は、各基板に対応した専用ケーブルで接続する

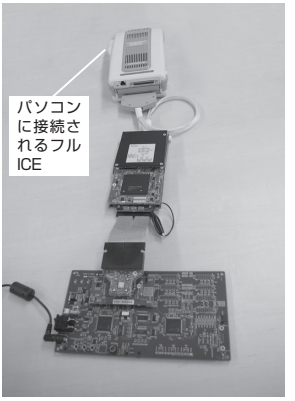



▼図 19-13　横河ディジタルコンピュータの ICE「advicePRO」



「advicePRO」では、本体の中にオプションを増設して機能追加していくことができる。手前から奥にかけて厚みが増えていることに注目されたい。一番上の増設例では、フルICE 相当となる。JTAG ICE の中にはこのように、オプションによってフルICE相当の機能を持たせられる製品もある。

▼図 19-14　横河ディジタルコンピュータのフル ICE を用いた開発風景



## JTAG の限界とこれから

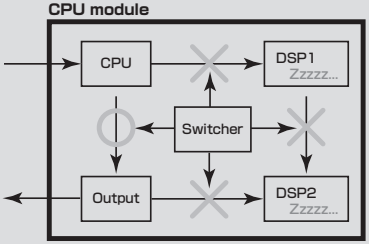
JTAG 端子はもともと、ICE での開発・デバッグ用途での利用を想定して付けられたものではありません。したがって、さまざまな限界があります。

本文でも触れたように、JTAG ではチップ内の回路をカスケード接続しています。回路数が多い場合、最初の回路から最後の回路までたどりつくまでの経路（スキャン・チェーン）が長くなり、データ送受信に時間がかかります。ときおり「ICE を使ったら発生するのだけれど、使わなかったら発生しない（あるいはその逆）」といった問題が発現しますが、そのような現象は、JTAG 仕様そのものに由来している可能性もあります。

JTAG のカスケード接続は、マルチコアプロセッサの場合「信号が出ない回路があるからデバッグできない」といった問題も引き起こします。たとえば「CPU と DSP を混載したプロセッサで、省電力モード時には DSP が動作を停止する」といった場合、DSP が動作を停止してしまったら、そこを通って出てくるはずの信号は出てこなくなってしまいます。「省電力モードではデバッグできない」では困りますので、「省電力モードに入ったら停止している回路を迂回できるように、最初から制御回路を組んでおき、それを JTAG で設定する」というアクロバット的な方法が採られることもあります（**図 19-15**）。

プロセッサのさらなる複雑化は避けられない流れなので、JTAG を無理やり使ったアクロバットで「逃げる」といったことではなく、もっと本質的な改善が望まれています。現在は技術の過渡期なので、数年後には「JTAG の流用ではなく、最初からエミュレーション用に開発されたピンが標準化される」「JTAG そのものが現在のプロセッサに対応して改良される」といったことがらが実現しているかもしれません。執筆時点では、**図 19-16** のようになっています。

▼図 19-15　CPU と DSP 混載の省電力モード時




▼図 19-16　JTAG デバッグ機能の追加例

「advicePLUS」にはJTAGデバッグ機能（手前）をベースに、エミュレーションメモリ、バストレース機能を追加することができる。

# 19-4 ICEがあるからできること

## ハードウェアの動作を知る

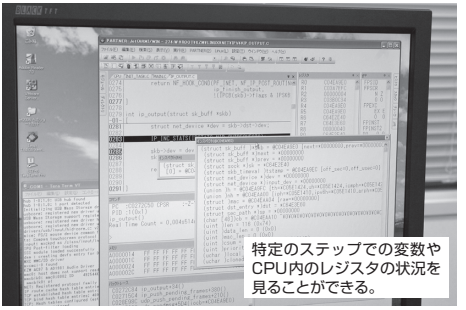
ICEは、これまで述べたようにCPUの内部動作を見るツールですが、CPUの動作とセットになるメモリ使用状況などのチェックも同時に行うことができます。

OSを利用した開発の場合、「OSが起動した」がソフトウェア開発のスタート地点となりますが、そこに至るまでの障壁を1つひとつ、「何が問題であるか」をハードウェアの中の状況を見ながら確認し、ソースコードの修正によってCPUやメモリの動作の何が変わるのかを確認し、OSの起動まで到達することができます（**図19-17**）。

OSが起動したらICEは不要なのかというと、そのようなことはありません。たとえばOSそのものが正常動作しなくなった場合、当然ながらOS上でのデバッグは不可能です。しかしICEを使えば、Windowsの「ブルースクリーン」やLinuxの「Kernel Panic」といった「手も足も出ない」状況でも、ハードウェアの中で何が起こっているのでそんな状況に陥ったのかを調べることが可能です。アプリケーションの異常終了（Linuxならば「Segmentation fault」）に対しても、同様に原因を詳しく調べることができます。

日々そのような作業を行っていれば、イヤでもCPUそのものや、その延長にあるコンピュータそのものを深く理解することになってしまいます。ICEは「CPUを学ぶためのツール」と位置付けることもできます。

**▼図 19-17　Linux カーネルのネットワークサービス起動部分**



## ICE がない場面でのデバッグ

組込み開発向けのボードには VGA コネクタも PS/2 コネクタもないことが多いので、ディスプレイやキーボードといった入出力装置を接続することはできません。もし USB コネクタがあったとしても、利用可能になるのは、OS と USB デバイスドライバが起動した後です。しかしシリアルポートはほとんどのボードに存在し、パソコンと開発ボードをシリアルケーブルで接続し、パソコンの画面上で「シリアルコンソール」と呼ばれるソフトウェアを利用することによって、パソコン上に開発ボードを「出現」させることができます。文字ベースの入出力しかできませんが、ブートローダの起動後は低レベルながら「開発環境」として利用できます。

新規に開発するボードの開発の初期段階では、まず「シリアルコンソールを利用可能にする」こと、つまり「シリアル通信が可能な段階まで到達する」が課題となります。ICE があれば、「リセット直後の初期化で IPL が正常に動作しているかどうか」といった状況を実際に見ながら行える作業ですが、ICE がない場合には、初期化のどの段階まで進行したか、たとえば LED アレイを実装しておくことでわかるようにしておきます。パソコンを利用して開発した初期化プログラムを各種不揮発メモリに書き込み、そのメモリを基板に装着し、LED の点灯数が増えていくのを目視で確認しながら、シリアルコンソールが利用可能になるまでの試行錯誤を繰り返すのです。

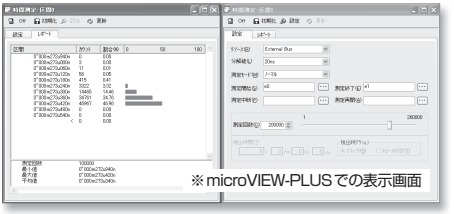
ハードウェア開発の面からは、特に「最終製品の品質を高めるためのツール」としてICEを位置付けることができます。ひと口に「ソフトウェア開発」といっても、パソコンと自動車ではまったく異なります。たとえばパソコンのOSやアプリケーションの場合は「フリーズしたらリセットボタン（または強制終了）」で済んでしまい、誰もが「そういうものだ」と何となく納得しています。そういう世界では、「ソフトウェア品質を高める」といっても、そもそも要求される「品質」がそれほど高くありませんし、不具合によって発生する損失もそれほど多くありません。

しかし自動車の制御ソフトウェアの開発現場では、しばしば「バグがあったら人が死ぬんだからね」といわれています。失われた人命が戻らないことの重さは当然のことですが、さらに大規模なリコール問題に発展し、企業生命を左右しかねない損失が発生する可能性もあります。ECUに代表される自動車の制御システムの世界では、極めて高いリアルタイム性が求められるうえに、不具合が発現したからといって停止することは許されません。「数百万回に1回」という桁で極めて出現頻度が低い不具合や、再現性が極めて低い不具合も含めて、「バグ・ゼロ」が望まれます。

高いリアルタイム性が求められる場面では、個々の関数のパフォーマンス・割り込み応答時間・想定されている時間の上限内で終わらない（あるいは想定されている時間の下限以下で終わる）処理といった要因も考慮しなくてはなりません（**図**

19-18)。しかも止めることができないシステムの開発であれば、システムを止めないままテストを行う必要があります。このような場合、フルICEを用い、CPU上で対象となるソフトウェアを走らせたままで評価を行う必要があります。

▼図 19-18　パフォーマンス測定



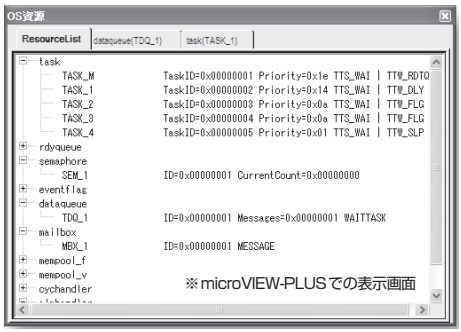

## メモリ使用状況のチェック

組込みシステムでは、「リソースが足りないからちょっと増やす」ということが困難です。したがって「ソフトウェア品質」には、メモリ利用やCPUパワーを含めた「リソースの有効利用」も含まれます。CPU上でソフトウェアを動作させながらメモリの使用状況をチェックし、CPUへの負荷をチェックするといった作業が必要になりますが、これはMPUを実際の動作条件下に置いて行う必要があります（**図19-19**）。フルICEが現在も求められるゆえんです。

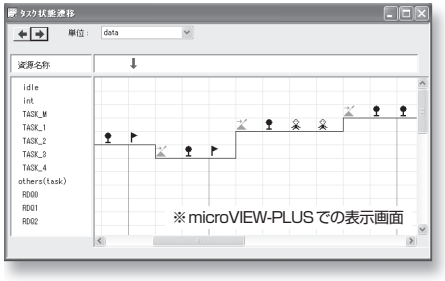
問題のありそうな関数や、注意を払うべき変数が明確になったら、それらを実際に動作させて、「関数が呼び出された瞬間」「変数が読み書きされた瞬間」の状況をとらえる必要があります。また、モデリング段階で作成したステートチャートで、特定の経路をたどる場合に要注意であることが判明している場合は、実際にその経路をたどった瞬間の状況をとらえる必要があります（**図19-20**）。

ICEを利用することにより、ソフトウェア品質を高め、最終的な製品の品質を高めることが可能になります。またICEを利用した開発を行うことにより、否応なく、「CPUの中」に関する本質的な理解を深めることが可能になります。ICEを利用する機会に恵まれたら、「CPUが本当にわかる人」になるチャンスを与えられた、と喜びましょう。

▼図 19-19　OS 資源表示




▼図 19-20　タスク遷移・システムコールとレース表示



## ロジックアナライザ

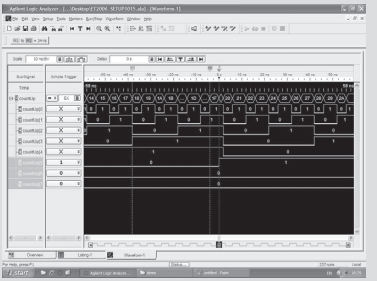
購入したCPU上でソフトウェアを開発するのであれ、FPGAやCPLDで専用回路を作成するのであれ、実際に所期の論理回路動作が得られるかどうかは、動作させてみないとわかりません。

ロジックアナライザは、実際の論理回路動作の面でソフトウェアや回路をチェックするためのツールです。世の中的に「デジタル＝正確」というイメージがありますが、実際の論理回路の動作には、しばしばアナログ的な要因が影響します。低いクロック周波数では問題にならないようなタイミングの「ずれ」は、クロック周波数が2倍になったら不具合の原因になるかもしれません（**図19-21**）。

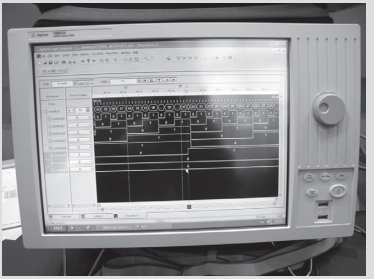
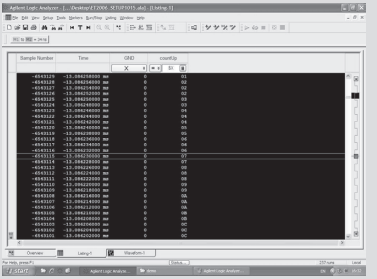
論理回路動作のチェックは、ある程度はオシロスコープで行うことが可能です。特に近年のデジタルオシロスコープは、論理回路動作のチェックに特化した機能を豊富に有していたりもします。このような背景から、近年、ロジックアナライザはあまり生産されなくなりました。日本でロジックアナライザを販売しているのは、アジレントテクノロジー社などがあります（**図19-22**）。

しかし論理回路の最終的な動作を「このタイミングでこの入力が行われた場合に、出力はどのようになるか」「請願されないイベントによる予期しない入力が行われた場合に、出力はどのようになるか」「ここでノイズが入ったら出力はどうなるか」と詳細にチェックしなくてはならない場面は少なくないので、ロジックアナライザの需要そのものが皆無になることはないでしょう（**図19-23**）。

▼図19-21　基板の論理回路動作チェック画面



▼図19-22　アジレントテクノロジーのロジックアナライザ「16802A」



▼図19-23　8ピコ秒ごとにグランドとカウントアップ状況を数値でチェックしている