

やる夫で学ぶインピーダンス計測
ダイジェスト版

野中 智

平成30年7月3日

目次

まえがき	9
はじめに	9
この文書のねらい	9
注意	9
謝辞	9
第1章 インピーダンスと抵抗、コイル、コンデンサ	1-1
1.1 抵抗とインピーダンス	1-1
1.1.1 抵抗	1-1
1.1.2 インピーダンス	1-2
1.2 コンデンサとインピーダンス	1-4
1.2.1 静電容量	1-4
1.2.2 虚数平面とインピーダンス	1-8
1.2.3 練習問題	1-10
1.3 コンデンサと Q と損失	1-11
1.3.1 直列等価回路	1-11
1.3.2 並列等価回路	1-13
1.3.3 直列等価回路と並列等価回路の関係	1-14
1.3.4 練習問題	1-15
1.4 コイルとインピーダンス	1-16
1.4.1 ファラデーの法則	1-16
1.4.2 インダクタンス	1-18
1.4.3 練習問題	1-19
1.5 コイルと Q	1-20
1.5.1 直列等価回路	1-20
第2章 大きなインピーダンス、小さなインピーダンス	2-1
2.1 大きなインピーダンス	2-1
2.1.1 絶縁抵抗	2-1
2.1.2 3端子法	2-3
2.1.3 まとめ	2-5
2.2 小さなインピーダンス	2-6
2.2.1 接触抵抗	2-6
2.2.2 4端子法	2-7
2.2.3 まとめ	2-9

2.2.4	熱起電力	2-10
2.2.5	まとめその2	2-13
2.3	広い範囲のインピーダンス	2-14
2.3.1	3端子法と4端子法	2-14
2.3.2	仮想接地	2-15
2.3.3	自動平衡ブリッジ	2-17
2.3.4	4端子対回路とバッファアンプ	2-20
2.3.5	4端子対回路と電極クリーニング	2-20

目 次

1.1	新旧の抵抗器の記号	1-2
1.2	水晶とその等価回路	1-3
1.3	コンデンサ	1-4
1.4	コンデンサの電流 $i(t)$ と電圧 $v(t)$	1-6
1.5	電流 $i(t)$ と電圧 $v(t)$ とベクトル	1-7
1.6	複素平面とベクトル	1-8
1.7	コンデンサのインピーダンスベクトル	1-9
1.8	実際のコンデンサ (直列等価回路)	1-12
1.9	実際のコンデンサのインピーダンスベクトル	1-12
1.10	実際のコンデンサ (並列等価回路)	1-13
1.11	実際のコンデンサのアドミッタンス	1-14
1.12	コイルの記号	1-16
1.13	コイルのインピーダンスベクトル	1-19
1.14	実際のコイル (直列等価回路)	1-21
1.15	実際のコイルのインピーダンスベクトル	1-21
2.1	チップ部品の測定	2-2
2.2	絶縁物の抵抗	2-2
2.3	3端子法	2-4
2.4	測定器との接続	2-4
2.5	チップ部品を測定	2-7
2.6	接触子と接触抵抗	2-7
2.7	4端子法	2-8
2.8	ケルピンクリップの例	2-9
2.9	熱起電力の例	2-10
2.10	熱起電力がある場合の4端子測定	2-12
2.11	リードリレー	2-13
2.12	低熱起電力リードリレー	2-13
2.13	4端子法	2-14
2.14	ガードを導入	2-15
2.15	反転増幅回路	2-16
2.16	4端子法にオペアンプ導入	2-16
2.17	4端子対法	2-18
2.18	4端子対法の2端子化	2-19
2.19	バッファ付き4端子対法	2-20

2.20 電極クリーニング法 2-21

表 目 次

1.1	SI 接頭語	1-10
1.2	長岡係数	1-20
2.1	熱起電力の例	2-11

まえがき

はじめに

以前に執筆した「やさしい計測ガイド」は、記述の正確さを意識したものでしたが、その結果数式が多くなったり、教科書的だったりして、取っつきにくいという声がありました。そのため、今回は、某2ちゃんねる方面で有名なキャラ、「やる夫」に登場願うことにしました。この文書では、「やる夫」は、オームの法則は知っている、三角関数、対数関数、微分、積分は一応知っているけど心許ない、という設定にしてありますので、比較的取っつきやすいのではないかと思います。

この文書のねらい

インピーダンスの基本的な概念から入り、実際に自動機でワークを測定する際に直面するいろいろな問題に対してある程度の確な対応が取れるようになるまでの知識を学ぶことが目標です。

注意

この文書は、「やるおで学ぶインピーダンス計測」のダイジェスト版です。本来の文書のはじめの2章を切り出したものです。内容の把握に用いていただければ幸いです。

記載されている会社名、製品名またはサービス名は各社の商標または登録商標です。また、Agilent Technology は、Keysight Technology に社名変更されました。

謝辞

この文書を書き始めたのは、東北大学大学院情報科学研究科の鏡慎吾準教授の公開されている“やる夫で学ぶデジタル信号処理”を読んだことがきっかけでした。このような文書を公開されたことに敬意と感謝の意を表します。また、本文書は、社内教育用に作成したものであり、公開の機会を与えていただいたことに感謝します。

第1章 インピーダンスと抵抗、コイル、コンデンサ

1.1 抵抗とインピーダンス

1.1.1 抵抗

やる夫 仕事で、電子部品のインピーダンスを測定しろと言われてたけど、インピーダンスって何のことかよくわからないお。やらない夫に聞いてみるお。

やらない夫 おまえ、そこからかよ…。先が長すぎだろ。常識的に考えて…。

やる夫 そもそもインピーダンスってなんだお。抵抗とかコンデンサなら知っているお。

やらない夫 インピーダンスって言うのは、元々英語で impede するもの、という意味だ。impede は、抵抗する、と言う意味だから、抵抗とインピーダンスは同じような意味だな。

やる夫 同じような意味なら、なんで違う言葉をつかっているのかお。抵抗ならみんな抵抗で良いじゃないかお。

やらない夫 わざわざ違う用語を使っているのは、意味が微妙に違うからだ。どう違うかという、インピーダンスは抵抗の拡張概念なんだ。

やる夫 拡張…概念…?

やらない夫 だめか。では、順番にいこう。抵抗は知っていると言ったが、オームの法則はどうだ。

やる夫 知ってるお。いーいこーるあいあーる、あいーいこーるあーるぶんのいーだお。

やらない夫 語呂合わせで覚えているだけじゃないのか? まあいい。

$$E = IR \tag{1.1}$$

ってやつと、

$$I = \frac{E}{R} \tag{1.2}$$

だな [1]。これは、それぞれ抵抗値が $R(\Omega)$ の抵抗器に電流 $I(\text{A})$ を流すと両端の電圧が $E(\text{V})$ になること、抵抗値 $R(\Omega)$ の抵抗器の両端に直流電圧 $E(\text{V})$ を加えると、電流 $I(\text{A})$ が流れることを表している。ちなみに、抵抗器は図 1.1 のように書くことになっている。

やる夫 なんか古い方の記号はギザギザした形がいかにも電気が流れにくそうな形をしているお。それにくらべて、新しい方はなんかすんなり電気が流れそうな形をしているお。

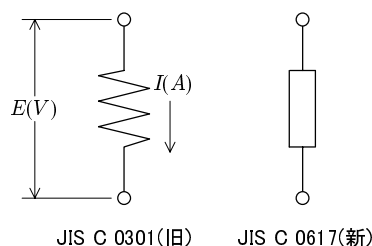


図 1.1: 新旧の抵抗器の記号

やらない夫 形はあまり気にしない方が良い。実際はまだ古い記号の方が一般的なようだ。先ほどから「抵抗器」や「抵抗値」という言い方をしているが、実際はどちらも「抵抗」という言い方をしていることが非常に多い。文脈で判断できるので、混乱していないんだな。ということで、以下はいちいち「抵抗値」や「抵抗器」という言い方をしないで、「抵抗」というぞ。

やる夫 わかったお。

1.1.2 インピーダンス

やる夫 インピーダンスは抵抗を拡張したものだとなると、拡張するというのは、どこをどう拡張するんだお。

やらない夫 さっきの抵抗に印加した電圧だが、「直流」電圧だといったな。これを「交流」電圧に拡張するんだ。

やる夫 なんで拡張する必要があるんだお。

やらない夫 電圧には、直流と交流があるからだ。直流、っていうのは、時間がたっても変化しない電圧で、交流、っていうのは、変化する電圧だ。普通に考えて、変化する電圧の方が一般的だろう。

やる夫 それはそうだお。ずうっと変化しない電圧なんて、ほとんど無いお。

やらない夫 それに、もう一つ大きな理由がある。それは、さっきやる夫が言ったコンデンサや、もうひとつ言っていないけどコイルのためだ。電子部品の測定をするときは、抵抗、コンデンサ、コイルの3つを覚えておけば良いんだ。

やる夫 なんでだお。電子部品といたら、いっぱい種類があるお。3つだけで足りるのかお。

やらない夫 電子部品は、大きく言うと、能動部品と受動部品に分けられる。

やる夫 攻めと受けみたいだお。

やらない夫 その話はおいておけ。能動部品というのは、IC やトランジスタ、ダイオードなど、まあ半導体部品で、コンピュータのように情報を操作したり、アンプのようにエネルギーを増幅したりする。それに対して、受動部品というのは、それ自体でエネルギーを増幅することが無い。なので「受動」だな。その受動部品というのが、抵抗とコイルとコンデンサの3つだけなんだ。

やる夫 では、水晶やフィルターはどうなんだお。抵抗やコイルやコンデンサは入ってないお。

やらない夫 入っていないけれど、入っているのと等価なんだ。それらは、全て抵抗、コイル、コンデンサからなる等価回路で表すことができるんだ。

やる夫 なにが等価なんだお。

やらない夫 たとえばある水晶と、抵抗、コイル、コンデンサで構成したその等価回路は、電気的には全く同じ振る舞いをするんだ。だから「等価」という。たとえば水晶の等価回路は図 1.2 ということになっている。

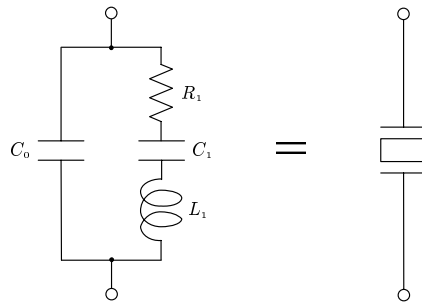


図 1.2: 水晶とその等価回路

やる夫 ふーん、便利なものがあるもんだお。そうすると、抵抗とコイルとコンデンサがあれば、全ての受動部品が表せるということかお。早く教えるんだお。

やらない夫 まあ、そうせかすな。では、さっきの抵抗の話に戻るぞ。抵抗に交流電圧を印加した場合を考える。交流電圧は、たとえば、

$$v(t) = V_m \cos \omega t \quad (1.3)$$

というやつだ。

やる夫 なんか急に難しくなったお。なぜ三角関数がでてくるんだお。

やらない夫 交流を考えると、一番単純だからなんだ。交流、というからには、ある周期で、電圧が変化する必要があるんだが、それを一番単純に記述できるからなんだ。

やる夫 これで単純かお。 ω というのがなにかわからんお。

やらない夫 ω というのは角速度と呼ばれるもので、角度を時間で割ったものだ。それに時間 t を掛けるから、角度になって、 \cos とつじつまが合う。実用的には、 $\omega = 2\pi f$ として、周波数 f から計算できる。それから、 V_m は波の大きさだ。添え字の m は最大値の MAX から来ているんだと思うが、良くこう書く。この 2 つにだけ注目すればいい。この電圧 $v(t)$ を、抵抗 R に印加すると、流れる電流 $i(t)$ は、

$$i(t) = \frac{V_m \cos \omega t}{R} \quad (1.4)$$

となる。

やる夫 この式の形は、式 1.2 と同じ形だお。ということは、抵抗とインピーダンスは同じだお。

やらない夫 まあ早まるな。抵抗に関しては、抵抗値とインピーダンスは同じだと言うことだ。

1.2 コンデンサとインピーダンス

1.2.1 静電容量

やらない夫 次はコンデンサの話だ。コンデンサというのは、キャパシタとも言うんだが、中身はどうなっているか、知っているか？

やる夫 ばかにするなお。金属電極が絶縁物を挟んで対向していることくらい知っているお。図 1.3 のようになっているんだお。記号も知っているお。

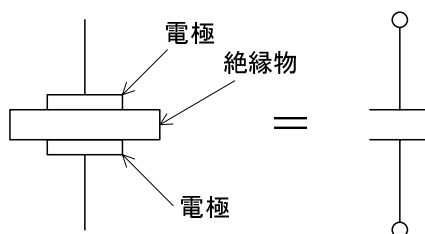


図 1.3: コンデンサ

やらない夫 そうだ。記号の通り、電極の間には電気の通る道はない。そんなものに、直流電圧をかけると、どうなると思う？

やる夫 電気は流れないお。子供でもわかる話だお。

やらない夫 そう、直流ならその通りだ。しかし、電圧がかかっていない時と比べて、金属電極に電圧がかかると、電極には電荷がたまる。

やる夫 電荷ってなんだお。電流とちがうのかお。

やらない夫 ちょっと違うんだ。電荷が動くと電流になる。電荷は電流が動いて溜まったもの、と考えると良い。ある電流 I が時間 T だけ流れると、電荷 Q がたまる。つまり、

$$Q = I \times T \quad (1.5)$$

だ。電流 I が一定でなくて、 t の関数 $i(t)$ だったりすると、ちょっと面倒で、時間 0 から T までの電荷 Q は、

$$Q = \int_0^T i(t) dt \quad (1.6)$$

となる。

やる夫 積分かお。学生時代は苦手だったお。

やらない夫 積分という演算は、グラフの面積を求める演算だと思っておけばいい。だから、ここでは、電流 $i(t)$ のグラフの時間 0 から T の面積だから、電流の量を積算している、みたいな感じだな。

やる夫 そういう風に言われるとちょっとわかる気がするお。

やらない夫 式 1.6 の両辺を微分すると、

$$\frac{dQ}{dt} = i(t) \quad (1.7)$$

ということになる。電荷が「動く」とのニュアンスが、時間で微分する、という感じだな。

やる夫 微分かお。学生時代はもっと苦手だったお。

やらない夫 ある関数を微分するという処理は、関数のグラフの傾きを求めることだから、時間微分するというのは、時間的な変化量を見る、ということの意味するので、なにも難しく考えることはない。

やる夫 そう考えると、式 1.7 は、電荷 Q の変化量が電流 i になるということかお。

やらない夫 そうしたことだ。コンデンサに電荷 Q がたまると、実は電極間の電圧が変化する。前に言ったように、交流の場合も考えるから、電圧は $v(t)$ とすると、

$$Q = Cv(t) \quad (1.8)$$

という関係式が成り立つ [2]。

やる夫 ここの C というのはなんだお。

やらない夫 この C が静電容量というものだ。やる夫も聞いたことくらいはあるだろう。

やる夫 聞いたことはあるし、使ってもいるが、本当はよくわかってないお。

やらない夫 式 1.8 をよく見てみる。電圧 $v(t)$ が同じ時、静電容量 C が大きい方が、電荷 Q がたくさん溜まるということだ。

やる夫 そうということかお。

やらない夫 そこで、その式 1.8 に、前に出た式 1.6 を代入すると、

$$Q = Cv(t) = \int i(t)dt \quad (1.9)$$

両辺を C で割って

$$v(t) = \frac{1}{C} \int i(t)dt \quad (1.10)$$

両辺を t で微分すると

$$\frac{dv(t)}{dt} = \frac{i(t)}{C} \quad (1.11)$$

両辺に C を掛けて変形すると

$$i(t) = C \frac{dv(t)}{dt} \quad (1.12)$$

となる。

やる夫 いきなり式が増えたお。

やらない夫 まあ、この変形の途中は別に覚えなくても良い。最後の式が重要なんだ。

やる夫 わかったお。で、この式はどういう意味かお。

やらない夫 つまり、コンデンサの電流 $i(t)$ は、印加された電圧 $v(t)$ の変化量に応じて、また、静電容量 C に比例して流れる。ということだ。抵抗の電流と電圧の関係とはちょっと違うな。

やる夫 ということは、直流の電圧を印加した場合は、変化量は0だから、電流は流れないお。

やらない夫 そうということだ。前にやったように、交流 $v(t) = V_m \cos \omega t$ を印加した場合は、

$$i(t) = C \frac{dv(t)}{dt} = -\omega C V_m \sin(\omega t) = \omega C V_m \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}) \quad (1.13)$$

ということになる。

やる夫 いきなり三角関数の微分が出てきたお。

やらない夫 \cos の微分は $-\sin$ 。あと \sin と \cos の変換も使っている。詳しく知りたければググって見ればいいが、ここでは、微分の話ではなくて、その結果の式に注目して欲しい。これを前の抵抗の場合の式 1.4 と比べてみる。

やる夫 抵抗と比べると、 R に相当するのは...分母に付いている方だから...わかった、 $\frac{1}{\omega C}$ だお。でも、よく見ると \cos の中に $\frac{\pi}{2}$ なんていうものが付いているお。

やらない夫 良く気がついたな。 \cos の中の $\frac{\pi}{2}$ は、位相が 90° ずれているということだ。図で書くと図 1.4 のようになる。

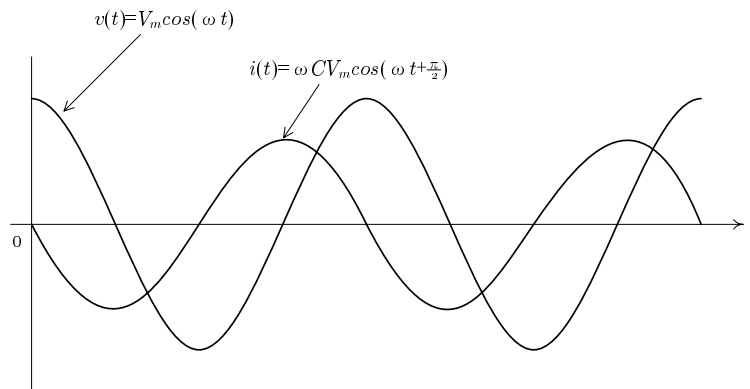


図 1.4: コンデンサの電流 $i(t)$ と電圧 $v(t)$

やる夫 抵抗の時は $\frac{\pi}{2}$ なんていうものが付いていなかったお。ということは抵抗では位相が同じだったということかお。今度は違っているのはなんでだお。

やらない夫 もともと交流というのは、振幅、というか大きさと、位相、というか時間という2つの次元を持つ量なので、大きさだけ持つ直流にくらべて拡張されているんだ。抵抗というのは、大きさだけを変えるんだが、コンデンサやコイルは、大きさと時間の両方を変える働きがある。つまり位相も変わるんだな。拡張されている、というのはそういう意味で言っている。

やる夫 いつも2つの次元を取り扱うのは面倒だお。なにかまとめて扱う手はないかお。

やらない夫 あるぞ。2次元と聞いて、思いつくものはないか。

やる夫 2次元といえば、平面だお。

やらない夫 その通りだ。平面の中の量を表す手段として、ベクトルというものがある。わかりやすく言うと「矢印」だな。矢印の大きさと、矢印の向きで、2次元が表せる。

やる夫 そうすると、振幅と位相が、矢印で表せるのかお。

やらない夫 そういうことだ。図1.5を見てくれ。図1.4と似ているが、左側にベクトルの図をちょっと付け加えたものだ。 $t=0$ の時の電流 $i(0)$ 、電圧 $v(0)$ が点線の矢印、 $t=t_1$ の時のそれぞれの値が

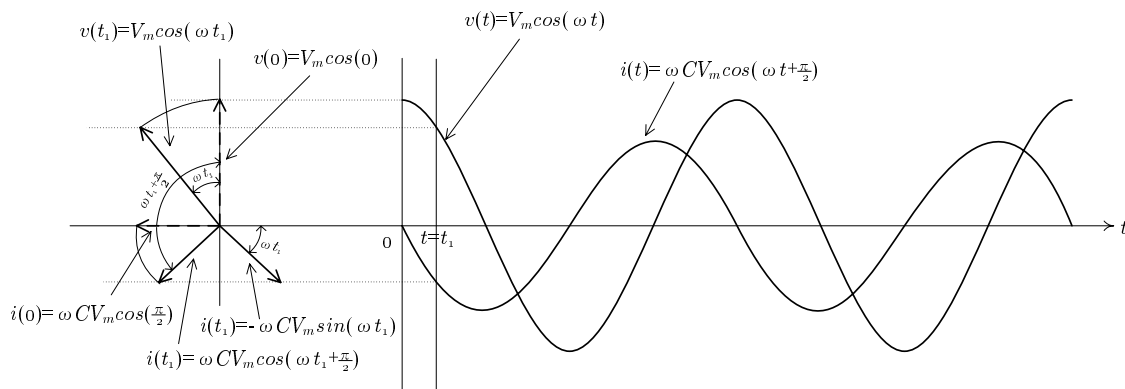


図 1.5: 電流 $i(t)$ と電圧 $v(t)$ とベクトル

実線の矢印になっている。 $t=0$ と $t=t_1$ で、それぞれの矢印の大きさは変わらずに、角度が ωt_1 だけ回転していることがわかると思う。

やる夫 おお、そうになっているお。それで、この矢印をどういう風に表現するのかお。

やらない夫 それには、複素平面、というのを使うと便利だ。

やる夫 また難しいものが出てきたお。複素平面、じゃなくて、複素数、というのは学校でちょっと習ったお。虚数単位 i というのをつかうんだお。でも、どんなものに使うかわからなかったから、まじめに勉強しなかったお。複素平面、というのは、それと何か関係があるのかお。

やらない夫 複素平面は、複素数の幾何的な書き方だ。複素数、というのは、実はこういうベクトルを表すためにあるのではないかと思うくらいうまく表現できるんだ。図1.6がその複素平面の例だ。横軸に実数(Re)、縦軸に虚数(Im)を置く。この図では、長さ V_m のベクトル V が、座標 $(0,0)$ から座標 $(V_m \cos \omega t, V_m \sin \omega t)$ に伸びている。水平からのベクトルの角度は ωt だ。ベクトルは、座標で表すと (a, b) のように、常に2つの数字を見ないといけないが、これを複素数と見ることで、 $a + jb$ と、ひとつの式として扱うことができる。

やる夫 ひとつの式として扱うのが、そんなに大切かお。あと、縦軸の虚数が i でなくて j になっているお。誤植だお。

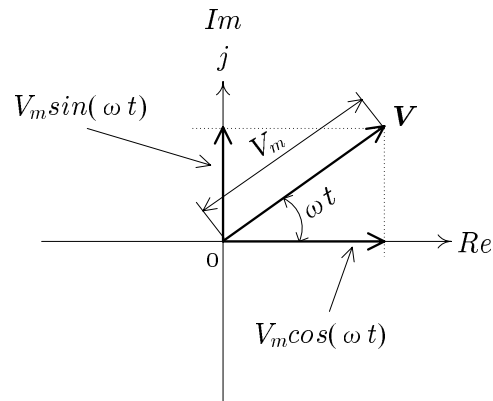


図 1.6: 複素平面とベクトル

やらない夫 ひとつの式として扱うことができれば、数式などにハンドリングするのも簡単になるから、すごく大切なことなんだ。それから、電気関係では、 i は電流を表すことが多くて、紛らわしいので、虚数単位に j を用いることが多いんだ。ここでもそれに倣うことにする。それから、ベクトルは太字で表されることが多いので、ここでもそれに倣っている。

1.2.2 虚数平面とインピーダンス

やらない夫 さて、さっきの図 1.6 だが、この図から、このベクトル V の実数部分はわかるか？

やる夫 簡単だお。 $V_m \cos \omega t$ だお。

やらない夫 正解だ。では、虚数部分は？

やる夫 これも簡単だお。 $V_m \sin \omega t$ だお。でも、実数と虚数をどういう風に 1 つにまとめるんだお。

やらない夫 それにはオイラーの公式というのを使う。

やる夫 おいらの公式かお。

やらない夫 オイラーの公式だ。これは、

$$e^{j\theta} = \cos \theta + j \sin \theta \quad (1.14)$$

という式だ。ここで、 e はネイピア数で、自然対数の底だ。この式を使うと、実数軸が \cos 、虚数軸が \sin 、角度が θ のベクトルを、 $e^{j\theta}$ という一個の形で表すことができる。三角関数、指数関数、虚数、それぞれ全然別のものが、こうやって 1 つにまとまるというのは、美しいと思わないか。

やる夫 特にそのことについて感動はないお。でも、1 つで表せるというのは便利だお。それじゃあ、この式を使うとさっきのベクトル V は、

$$V = V_m \cos \omega t + j V_m \sin \omega t = V_m e^{j\omega t} \quad (1.15)$$

となるのかお。

やる夫 そういうことだ。この式 1.15 を前に出た式 1.12 に代入すると、

$$I = C \frac{dV}{dt} = j\omega C V_m e^{j\omega t} = j\omega C V \quad (1.16)$$

となる。

やる夫 なんだか複雑だお。 $e^{j\omega}$ の微分まででてきたお。でも、 e の微分は形が変わらないと習ったから、考えやすくして便利だお。

やる夫 そういうことだな。これを前に出た式 1.2 とか式 1.4 と比べてみると、 R に相当するのは、

$$\frac{1}{j\omega C} = -j \frac{1}{\omega C} \quad (1.17)$$

ということになる。このインピーダンスをベクトルあるいは複素平面で書くと、図 1.7 のように、大きさ $\frac{1}{\omega C}$ のベクトルが虚数軸である真下を向いている形になる。

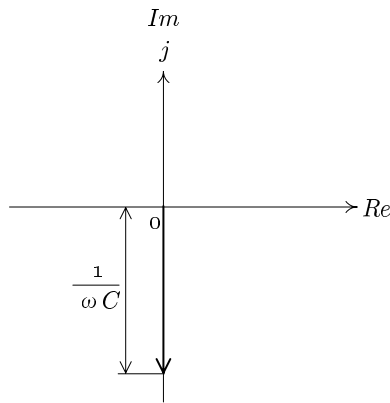


図 1.7: コンデンサのインピーダンスベクトル

やる夫 インピーダンスが下を向いているっていうのは、どういうことだお。

やる夫 ベクトルが水平から角度がついている、っていうのが、位相が変化している、ということを表すんだ。まあ、今まで説明したことは、教科書的なことで、忘れちゃっても良い。実用的には、容量が C のコンデンサのインピーダンスの大きさ Z_C は、周波数 f では、

$$Z_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \quad (1.18)$$

になるということだけしっかり覚えておけばいい。

やる夫 そういうことなら簡単だお。ちゃんと覚えられるお。でも、この式から、周波数 f が分母にあるってことは、コンデンサのインピーダンスは、周波数が高くなるほど、容量が大きくなるほど、小さくなるということかお。

やる夫 そういうことだ。よく気がついたじゃないか。

やる夫 まかしておけだお。

1.2.3 練習問題

やらない夫 では、問題。

やる夫 いきなりかお。

やらない夫 容量 $0.1 \mu\text{F}$ のコンデンサの、周波数 1 kHz のインピーダンス Z_C はいくつだ？ μ とか、 p とかいう接頭語は、表 1.1 にまとめたので、見ても良いぞ。

接頭語	読み方	値	接頭語	読み方	値
k	キロ (killo)	10^3	m	ミリ (milli)	10^{-3}
M	メガ (mega)	10^6	μ	マイクロ (micro)	10^{-6}
G	ギガ (giga)	10^9	n	ナノ (nano)	10^{-9}
T	テラ (tera)	10^{12}	p	ピコ (pico)	10^{-12}
P	ペタ (peta)	10^{15}	f	フェムト (femto)	10^{-15}
E	エクサ (exa)	10^{18}	a	アト (atto)	10^{-18}

表 1.1: SI 接頭語

やる夫 ええと、式 1.18 を使って、周波数を代入すると、 k は 1×10^3 で、 μ は 1×10^{-6} だから、

$$Z_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2 \times 3.1415926 \times 1 \times 10^3 \times 0.1 \times 10^{-6}} = 1591.55[\Omega] \quad (1.19)$$

だお。

やらない夫 正解。では、 100 pF で 1 MHz ならいくつだ？

やる夫 p は 10^{-12} で、 M は 10^6 だから、

$$\frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2 \times 3.1415926 \times 1 \times 10^6 \times 100 \times 10^{-12}} = 1591.55[\Omega] \quad (1.20)$$

だお。おお、同じになったお。

やらない夫 これが、アジレントの C メータで、コンデンサを計るときに周波数を切り替える理由だな。

やる夫 同じようなインピーダンスになるようにしているということかお。勉強になったお。

やらない夫 ちなみに、 100 pF のコンデンサを実際に作ってみたいのであれば、 1 片が 10 cm の正方形の金属板を 2 枚、 0.88 mm の間隔を開けて並べるとできる。面積 S 、間隔 d の 2 枚の平行平板電極の容量 C は、

$$C = \epsilon \epsilon_0 \frac{S}{d} \quad (1.21)$$

で、 ϵ_0 は真空の誘電率で 8.854×10^{-12} 、 ϵ は空気の比誘電率でほぼ正確に 1 なので、これから、

$$C = 1 \times 8.854 \times 10^{-12} \times \frac{0.1 \times 0.1}{0.88 \times 10^{-3}} = 100.61 \times 10^{-12} = 100.61[\text{pF}] \quad (1.22)$$

となるわけだ。実際には縁端容量といって、金属板の縁で電界が変化するので、正確にこの値にはならないが、ほとんど同じになるはずだ。

やる夫 金属板の間に何か絶縁物を挟むと何か変わるのかお。

やらない夫 良いところに気がついた。そうすると容量が大きくなってしまふ。

やる夫 なんでだお。絶縁するから小さくなると思ったら違うのかお。

やらない夫 絶縁物は誘電体とも言うくらいで、その比誘電率は空気の比誘電率よりも大きいんだ。たいていの絶縁物で 3 以上ある。セラミックなどは 10 以上だ。だから、それを式 1.22 に代入するとわかるが、間に比誘電率 10 のセラミックを挟むと容量は 1006.1 pF と 10 倍になる。

やる夫 いきなり 10 倍は大きいお。小さいものはないのかお。

やらない夫 テフロンは比誘電率が 2 くらいで、ほとんどの誘電体の中で最も小さいものだな。でもテフロンは柔らかいので、しっかりした構造を作るのには向いていない。三井化学の TPX は比誘電率 2.11 くらいで結構硬い [3]。ジュラコンなんかは 3.7 くらい、ガラスエポキシ FR-4 で 4.7 くらいだな。

やる夫 いろいろあるんだお。覚えきれないお。

やらない夫 丸善の理科年表 [4] という本にいろいろ載っている。見てみるといい。

1.3 コンデンサと Q と損失

やらない夫 いままで、コンデンサの話をしてきたんだが、この話に出てきたコンデンサというのは、実際にはあり得ない理想の形なんだ。

やる夫 理想の形って何だお。じゃあ、実際の形はどういう風になって居るんだお。

やらない夫 コンデンサは電極と絶縁物からできている、と言う話を前にしたな。その電極は金属でできている。超伝導体でも無い限り、金属には抵抗分がある。絶縁物も、絶縁抵抗が無限大、というのは実際にはありえなくて、僅かであるが電流が流れる。

やる夫 確かにそうだお。その場合はどういう風になるのかお。

やらない夫 じゃあ、まず、電極に抵抗がある場合を考えよう。

1.3.1 直列等価回路

やらない夫 図 1.8 を見て欲しい。コンデンサの容量成分が C_S 、電極の抵抗分が R_S で現されている。抵抗とコンデンサが直列なので、直列等価回路という。

やる夫 さっきの等価回路っていうのが、ここでも出てきたお。

やらない夫 そうだ。ご期待にそって、ここを出してみた。それで、インピーダンス Z_S はコンデンサ C_S のものと抵抗 R_S のものの和だから、

$$Z_S = \frac{1}{j\omega C_S} + R_S = -j\frac{1}{\omega C_S} + R_S \quad (1.23)$$

となる。このインピーダンスベクトルを描くと、図 1.9 のようになる。

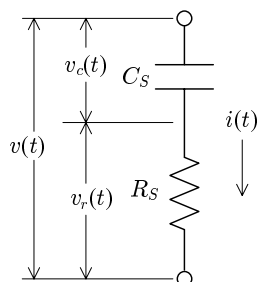


図 1.8: 実際のコンデンサ (直列等価回路)

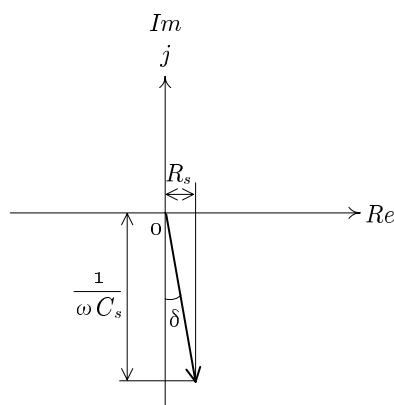


図 1.9: 実際のコンデンサのインピーダンスベクトル

やる夫 ベつに期待はしていないが、言いたいことは判ったお。それで、これがどういう意味なんだお。

やらない夫 コンデンサが必ずしも理想の形ではない、という話を聞くと、ではどれだけ理想に近いか、ということが気にならないか?

やる夫 そう言われてみればそうだお。理想に近いのが良いコンデンサだお。

やらない夫 そういうわけで、理想に近いかどうかの目安となるのが Q 値 (Q factor) という値だ。これは

$$Q = \frac{\frac{1}{\omega C_S}}{R_S} = \frac{1}{\omega C_S R_S} \quad (1.24)$$

という値だ。コンデンサの静電容量分のインピーダンスを現す $\frac{1}{\omega C_S}$ を、抵抗 R_S で割った形で、理想に近ければ近いほど、つまり、コンデンサの質が良くなればなるほど大きくなる。まさに Q 値の Q は Quality の Q だというのがよく判るな。

やる夫 なんか、感動に浸っているみたいだが、それはどうでも良いお。でも、図 1.9 に δ という角度があるお。あれは何だお。

やらない夫 これは損失角という。コンデンサの損失を現すものだ。損失、つまり R_S 成分がなければ 0

で、大きいほど角度が大きくなる。このタンジェントを考えてみると、図から判るように、

$$\tan \delta = \frac{R_S}{\frac{1}{\omega C_S}} = \omega C_S R_S = D \quad (1.25)$$

となる。この値は tangent delta だから俗にタンデルなどとも言うな。聞いたことは有るだろう。タンジェントは日本語で正接だから、誘電正接とも言う。コンデンサの測定器などでは、これを D とか Df と表しているものもある。Dissipation Factor から来ているのだろうな。Dissipation というのは、消費とか消失とか言う意味だ。だから、損失係数とも言う。

やる夫 よく自動機でタンデルの切れが悪い、とか、Df のばらつきが、なんて聞くお。意味がよく判らなかつたんだが、意味は同じで、みんなこれのことを指していたのかお。

やらない夫 そういうことだ。それと、Q の式 1.24 と、式 1.25 を見ると、何か気がつくことはないか？

やる夫 Q と $\tan \delta$ は逆数になっているお。

$$Q = \frac{1}{\tan \delta} = \frac{1}{D} \quad (1.26)$$

だお。

やらない夫 その通り、 $\tan \delta$ や D が損失係数と言うのはうなずけるな。つまり、Q の逆数だから、悪さの指標と言う事だな。

1.3.2 並列等価回路

やらない夫 では、今度は絶縁物に漏れ電流が有る場合を考えよう。図 1.10 を見て欲しい。絶縁物の漏

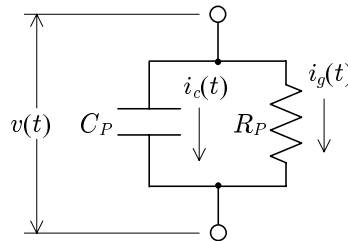


図 1.10: 実際のコンデンサ (並列等価回路)

れ電流を現す抵抗が R_P で、コンデンサの容量成分 C_P と並列に接続されている。並列等価回路だな。これのインピーダンス Z_P は、やってみるか？

やる夫 わかったお。A と B の並列接続は、ただ足すんじゃなくて、 $\frac{1}{\frac{1}{A} + \frac{1}{B}} = \frac{AB}{A+B}$ だから、同じように、

$$Z_P = \frac{1}{\frac{1}{R_P} + j\omega C_P} = \frac{R_P}{1 + j\omega C_P R_P} \quad (1.27)$$

だお。これを有理化すると、分子分母に $1 - j\omega C_P R_P$ を掛けるから、

$$Z_P = \frac{R_P(1 - j\omega C_P R_P)}{1 + (\omega C_P R_P)^2} = \frac{R_P - j\omega C_P R_P^2}{1 + (\omega C_P R_P)^2} \quad (1.28)$$

だお。めんどくさいお。

やらない夫 頑張ってるね。でも、良いことを教えようか。並列回路の場合は、アドミタンスで考える方が簡単になることが多いんだ。

やる夫 アドミタンス、ってなんだお。あまり聞いたこと無いお。

やらない夫 インピーダンスの逆数だ。コンダクタンスの拡張概念、って所かな。よく Y で現される。 $Y = \frac{1}{Z}$ だな。

やる夫 そのコンダクタンス、ってやつも聞いたこと無いお。

やらない夫 コンダクタンスは、抵抗の逆数だ。conduct するもの、という意味だな。conduct は、導く、ということだから、導電性、みたいな意味だ。良く G で現される。 $G = \frac{1}{R}$ だな。で、問題の並列回路をアドミタンス Y_P で現すと、

$$Y_P = G_P + j\omega C_P \quad (1.29)$$

となる。ここで、 $G_P = \frac{1}{R_P}$ だな。このベクトル表示は、図 1.11 のようになる。アドミタンスベクトル、だな。

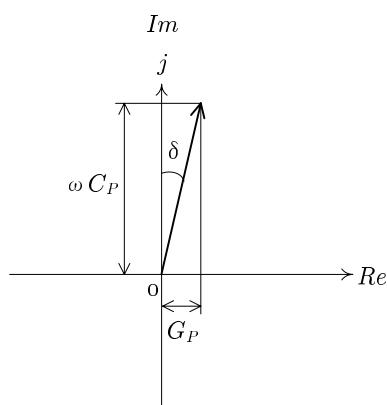


図 1.11: 実際のコンデンサのアドミタンス

やる夫 じゃあ、これの Q も計算できるのかお。

やらない夫 できる。図 1.11 から、

$$\tan \delta = \frac{G_P}{\omega C_P} = \frac{1}{\omega C_P R_P} = \frac{1}{Q} \quad (1.30)$$

となって、直列等価回路とちょうど反対の形だな。

1.3.3 直列等価回路と並列等価回路の関係

やる夫 ところで、コンデンサの直列等価回路と並列等価回路の話が出たけれど、それぞれ違うものなのかお。

やらない夫 そんなことは無い。本質的に同じコンデンサを違った目で見ているだけなので、お互いに変換することもできるぞ。直列等価回路のインピーダンスの式 1.23 と、並列等価回路の式 1.28 をイコールで結んで解けば良い。やってみるか？

やる夫 そんなことだろうと思ったお。わかったお。やってみるお。まず、それぞれの式を繋いで、

$$R_S - j \frac{1}{\omega C_S} = \frac{R_P}{1 + (\omega C_P R_P)^2} - j \frac{\omega C_P R_P^2}{1 + (\omega C_P R_P)^2} \quad (1.31)$$

これから、実数部と虚数部がそれぞれ等しければ良いから、

$$R_S = \frac{R_P}{1 + (\omega C_P R_P)^2} \quad (1.32)$$

$$\frac{1}{\omega C_S} = \frac{\omega C_P R_P^2}{1 + (\omega C_P R_P)^2} \quad (1.33)$$

を考えれば良いんだお。

やらない夫 ここで、 $Q = \frac{1}{D} = \omega C_P R_P$ であることを考えると、どうなるかな。

やる夫 そうか、良いことを聞いたお。

$$R_S = \frac{R_P}{1 + Q^2} \quad (1.34)$$

$$\frac{1}{\omega C_S} = \frac{\omega C_P R_P^2}{1 + (\omega C_P R_P)^2} = \frac{(\omega C_P R_P)^2}{1 + (\omega C_P R_P)^2} \frac{1}{\omega C_P} = \frac{Q^2}{1 + Q^2} \frac{1}{\omega C_P}$$

$$\text{だから、} \quad C_S = \frac{1 + Q^2}{Q^2} C_P = \left(\frac{1}{Q^2} + 1 \right) C_P = (1 + D^2) C_P \quad (1.35)$$

となるお。

やらない夫 ここから判ることは、D が十分に小さい (=Q が十分に高い) 場合は、 C_S と C_P はほとんど一緒になる、ということだな。逆に、Q が大きくない場合は、一緒と見なせなくなるので注意しないとイケない。

やる夫 そういうことだお。

1.3.4 練習問題

やらない夫 では、問題。

やる夫 またかお。

やらない夫 まあまあ、そういわずに。ある $1 \mu\text{F}$ のコンデンサは、 1 kHz で測定すると、容量が $0.9854 \mu\text{F}$ 、Df が 0.00015 であるとする。このコンデンサを測定するのに、接触抵抗が $150 \text{ m}\Omega$ ある電極を使ったら、Df は幾つに測定されるか？

やる夫 直列等価回路で考えるんだお。まず等価直列抵抗 R_S を計算するお。Df が 0.00015 ということは、

$$Df = 0.00015 = \omega C_S R_S = 2 \times \pi \times 1 \times 10^3 \times 0.9854 \times 10^{-6} \times R_S \quad (1.36)$$

ということだから、

$$R_S = \frac{0.00015}{2 \times \pi \times 1 \times 10^3 \times 0.9854 \times 10^{-6}} = 0.02423[\Omega] \quad (1.37)$$

ということだお。この R_S に接触抵抗 $150 \text{ m}\Omega$ が加わるから、測定される Df は、

$$Df = 2 \times \pi \times 1 \times 10^3 \times 0.9854 \times 10^{-6} \times (0.02423 + 0.15) = 0.001079 \quad (1.38)$$

だお。接触抵抗が $150 \text{ m}\Omega$ しか無いのに、Df は 7 倍くらい悪くなったお。

やらない夫 やっぱり容量 C_S が大きくてインピーダンス $\frac{1}{C_S}$ が小さいと、 R_S も小さくなるから、ちょっとの接触抵抗が大きな影響を与えるんだな。

1.4 コイルとインピーダンス

1.4.1 ファラデーの法則

やらない夫 さて今度はコイルの話だ。コイルというのは、どういうものか、知っているか。

やる夫 コイルはコンデンサに比べて見る機会がすくないお。でも、チップインダクタというのがあるのは知っているお。

やらない夫 そうだ。コイルはインダクタともいうんだ。中身は線をぐるぐる巻いてあるものが多い。記号は図 1.12 なんだが、その図の通りだ。

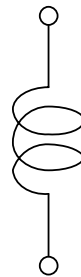


図 1.12: コイルの記号

やる夫 これに直流電圧をかけたら、ただの線だから、とんでもなく電流が流れて、終いには切れてしまうお。

やらない夫 直流ではその通りだ。だが、電流を掛けた瞬間から電流が流れるかということ、ちょっと違う。

やる夫 何が起こるんだお。

やらない夫 ファラデーの電磁誘導の法則というのを知っているか？

やる夫 右手で、電、磁、力、とやる、あれだお。

やらない夫 それはフレミングの右手の法則だ。ファラデーの電磁誘導の法則は、コイルの巻き線に流れる電流は、それを貫く磁界の変化の割合に比例する、というものだ。

やる夫 そうだったお。で、そのファラデーの法則がどうかしたかお。

やらない夫 ファラデーの法則で、電流と磁界の関係がわかる。で、その電流の変化と、磁界の変化の関係を表すのがレンツの法則だ。

やる夫 レンツさんという人は知らないお。

やらない夫 ロシアの学者だ。この法則は、磁界が変化すると電流が発生するが、その電流の方向は、磁界を妨げる方向になる、というものだ。

やる夫 ということは、どういうことかお。

やらない夫 つまり、コイルに電流が流れると磁界が発生するが、その磁界によって電流が妨げられるので、一度にどっと流れることが無いわけだ。反対に、ある電流が流れていたとき、それを切るうとしても、電流は流れ続けようとする。

やる夫 電流が流れ続けようとするって、どういうことだお。

やらない夫 その電流が流れるように、コイルの両端の電圧が変化する。つまり、コイルに一定の電流を流しておいて、それをスイッチなどでいきなり切るとする。これはスイッチの抵抗をほぼゼロ Ω からほぼ無限大 Ω にする、ということだから、それにむりやり電流を流すためにコイルの両端の電圧はほぼ無限大になる。そのため、スイッチの両端にもほぼ無限大の電圧が発生する。ソレノイドやリレーの本質はコイルなんだが、その駆動回路によくクランプダイオードなどの保護素子を入れてあるのはそのためだ。

やる夫 そうすると、保護素子に流れる電流は元々コイルに流れていた電流かお。

やらない夫 その通りだ。なかなか鋭いじゃないか。原理的に、保護素子には元のコイルに流れていた電流以上の電流は流れない。

やる夫 この前、なんか大きなダイオードをつけていたのを見たお。

やらない夫 無駄だな。

やる夫 それと、ダイオードをつけるとソレノイドの動作速度が遅くなるというのを聞いたお。

やらない夫 それはその通りで、電流がダイオードとコイルの巻き線抵抗で減衰するまでソレノイドが ON しっぱなしになるから、どうしても OFF が遅れる。そのため、保護素子として、ダイオードでなく、バリスタなどを使う手もある。バリスタならダイオードより抵抗が大きい分早く減衰するからな。

やる夫 今度やってみるお。

1.4.2 インダクタンス

やらない夫 そのコイルなんだが、コイルの両端の電圧 $v(t)$ と、流れる電流 $i(t)$ の間には、こんな関係がある。

$$v(t) = L \frac{di(t)}{dt} \quad (1.39)$$

やる夫 また微分だお。

やらない夫 微分は変化を表すから、電流の変化が、という感じがでているんじゃないかな。

やる夫 この L というのは何だお。

やらない夫 これがインダクタンスというものだ。コンデンサの容量と似たようなもので、これが大きいコイルは電圧 $v(t)$ が大きくなる。

やる夫 そういうことかお。

やらない夫 この式 1.39 に $i(t) = I_m e^{j\omega t}$ を代入する。

やる夫 また複素数かお。

やらない夫 細かい説明は以前コンデンサの時にやったから省略するぞ。同じことだから、後でやってみると良い。

やる夫 わかったお。でもめんどくさいお。

やらない夫 まあ、そういうな。結果だけ書くと、

$$v(t) = L \frac{di(t)}{dt} = j\omega L I_m e^{j\omega t} \quad (1.40)$$

となる。これを式 1.16 に書いたようなベクトルで表すと、

$$V = j\omega L I \quad (1.41)$$

となる。ちなみに、図で書くと、図 1.13 のようになる。これをコンデンサの時と同じようにオームの法則の式と比較すると、抵抗 R に相当するのは $j\omega L$ ということになる。

やる夫 つまり、コイルのインピーダンスの大きさ Z_L は、インダクタンス L 、周波数 f の時、

$$Z_L = \omega L = 2\pi f L \quad (1.42)$$

ということでもいいのかお。

やらない夫 その通りだ。

やる夫 コンデンサと同じで、ベクトルの向きが逆なだけだから簡単だお。

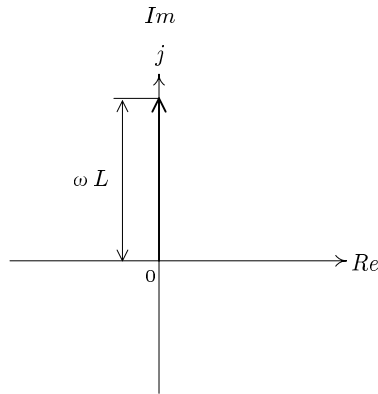


図 1.13: コイルのインピーダンスベクトル

1.4.3 練習問題

やらない夫 では問題。

やる夫 前にもやったお。

やらない夫 良いじゃないか。インダクタンス 10 nH のコイルは、周波数 100 MHz の時のインピーダンス Z_L はいくつだ?

やる夫 ええと、式 1.42 に周波数とインダクタンスを代入すると、 n は 1×10^{-9} で、 M は 1×10^6 だから、

$$Z_L = 2 \times 3.1415926 \times 100 \times 10^6 \times 10 \times 10^{-9} = 6.2831852[\Omega] \quad (1.43)$$

だお。かなり小さいお。

やらない夫 そうだな。このくらいのチップインダクタは、測定にかなり注意をしないと接触抵抗の影響をすぐに受けてしまうのがこれでわかるだろう。

やる夫 気をつけるお。

やらない夫 この程度のインダクタンスのコイルは、実際にどのくらいの大きさになるか、計算してみよう。コアに何も入っていない、空芯コイルというのでやってみる。直径 D 、長さ l の空芯コイルのインダクタンス L は、

$$L = k \frac{\mu n^2 S}{l} \quad (1.44)$$

で与えられる。 k は長岡係数と呼ばれるもので、コイルの直径 D と長さ l の比で決まる係数だ。 μ は真空の透磁率で $4\pi \times 10^{-7}$ 、 n は巻き数、 S はコイルの断面積で $S = \frac{\pi D^2}{4}$ だ。

やる夫 長岡係数っていうのはどんな値かお。

やらない夫 これは、長岡係数の表、というのがいろいろなところに載っているのを見ておくといい [5]。一例を挙げると、表 1.2 のようになる。これは、 D/l が大きくなる、つまりコイルが短くなると、無限長ソレノイドに比べて端の磁束が漏れ出すので、無限長ソレノイドに比べてインダクタンスが小さくなる、ということを表している。

D/L	長岡係数 k	D/L	長岡係数 k
0.1	0.959	1.0	0.688
0.2	0.920	2.0	0.526
0.3	0.884	3.0	0.429
0.4	0.850	4.0	0.365
0.5	0.818	5.0	0.320
0.6	0.789	6.0	0.285
0.7	0.761	7.0	0.258
0.8	0.735	8.0	0.237
0.9	0.711	9.0	0.219
1.0	0.688	10.0	0.203

表 1.2: 長岡係数

やる夫 無限長ソレノイド、って何だお。

やらない夫 無限に長いコイルのことだ。無限に長ければ端のことは考えなくて良くなるので、理論的に考えやすくなる。

やる夫 そういうものかお。

やらない夫 そういうものだ。それで、10 nH 位のインダクタンスの話に戻るぞ。たとえば、直径 2.5 mm、巻き数 2、長さ 0.5 mm の小さいコイルを考えると、このインダクタンス L は、式 1.44 を使って、

$$L = k \frac{\mu n^2 S}{l} = 0.320 \times \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 2^2 \times \frac{\pi \times 0.0025^2}{4}}{0.0005} = 15.79 \times 10^{-9} = 15.79 [\text{nH}] \quad (1.45)$$

となる。 D/l は $2.5/0.5 = 5$ なので長岡係数 $k = 0.320$ を使った。

やる夫 こんなに小さくて 15 nH かお。ということは、ちょっと線を引き回しただけで、10 nH のインダクタンスに簡単になってしまうということかお。

やらない夫 そういうことだ。測定用電極の大きさに注意ということだな。

1.5 コイルと Q

やらない夫 今までのコイルの話は、理想的な場合だ。コンデンサと同じく、コイルも実際は導線を巻いて作るので、その抵抗分はある。

やる夫 それは判るお。直列等価回路になるんだお。

1.5.1 直列等価回路

やらない夫 そう、図 1.14 のように抵抗分が直列になったものだ。

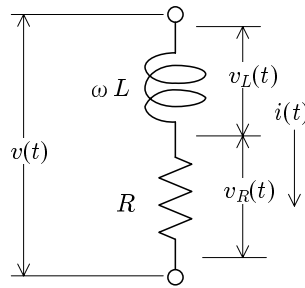


図 1.14: 実際のコイル (直列等価回路)

やらない夫 コンデンサでは並列等価回路も良く使われるが、コイルではもっぱら直列等価回路だな。インピーダンス Z_S は、

$$Z_S = R + j\omega L \quad (1.46)$$

で、そのインピーダンスベクトルは、図 1.15 のようになる。

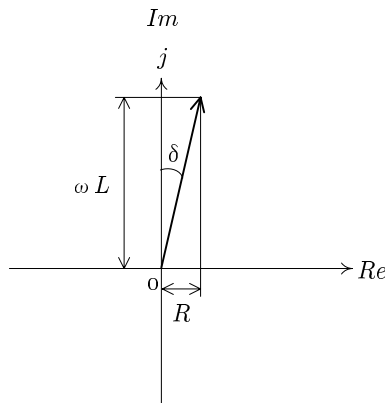


図 1.15: 実際のコイルのインピーダンスベクトル

やる夫 コンデンサと同じように、Q という概念も有るのかお。

やらない夫 ああ、ある。同じような式だ。やっぱり、コイルのインピーダンスを現す ωL を、損失を現す R で割って、

$$Q = \frac{\omega L}{R} \quad (1.47)$$

となる。それから、損失角という概念もやっぱりあって、

$$\tan \delta = D = \frac{1}{Q} = \frac{R}{\omega L} \quad (1.48)$$

となるんだが、あまり一般的ではないようだな。

第2章 大きなインピーダンス、小さなインピーダンス

2.1 大きなインピーダンス

2.1.1 絶縁抵抗

やる夫 今度は絶縁抵抗を計るんだと言われたお。絶縁抵抗ってなんだお。またやらない夫に聞いてみるお。

やらない夫 絶縁抵抗か。絶縁する抵抗のことだ。

やる夫 ふざけてないで、ちゃんと教えるお。

やらない夫 絶縁ってというのは、電気機器の世界では、AC 100 Vなどの電力線から、アース端子あるいは筐体などの接地線への漏れ電流が十分に少ないことをいうんだ。これが良くないと漏電が起きているんな問題が起きるな。

やる夫 そうではなくて、電子部品での話だお。

やらない夫 電子デバイスでも同じで、コンデンサなど、本来漏電が起きるべきでないデバイスの漏れ電流を表す時に使うんだ。

やる夫 で、どうやって計るんだお。

やらない夫 まあ、あせるな。これは、非常に高い抵抗を計ると言うことだから、まず一般的に大きいインピーダンスを測定する時の話をするにすることにする。

やる夫 やらない夫は一般化が好きなのかお。

やらない夫 まあ、そういうことだな。一般化すると、いろいろ他に応用が効くからな。“大きいインピーダンス”は、良く“高いインピーダンス”という表現をするので、ここでもそう表現するぞ。では、まず、質問だが、高インピーダンスを計るために必要なものは何かな。

やる夫 高インピーダンスを計ることができる計測器だお。もちろんそのインピーダンスで精度が保証されている測定器を使うんだお。

やらない夫 そうだ。それから？

やる夫 計測器を計る対象と繋がればそれで終わりだお。もちろん繋ぐためのケーブルは測定器に付属しているものを使うお。それで計測器の値を読めば良いんだお。

やらない夫 それは、ちょっと違う。

やる夫 なんてだお。それで終わりじゃないのかお。

やらない夫 測定器と測定対象を繋ぐケーブルに注意をしたのは良い着目点だ。しかし、それではまだちょっと足りないな。ケーブルと測定対象をどうやって接続するんだ？

やる夫 ケーブルの先の接触子を手で押さえ付けたんじゃだめなのかお。

やらない夫 高いインピーダンスでは、押さえ付ける手の抵抗まで考えないといけない。

やる夫 そうか。わかったお。DUTは接触子以外はほとんど接触しないようにするお。接触子は絶縁物で支えればいいんだお。

やらない夫 たとえば測定対象をチップ部品とすると、測定対象とケーブル、接触子を、この図 2.1 のように接続するという事かな。測定対象は DUT(Device Under Test) と呼ぶことが多いので、そう書いてある。

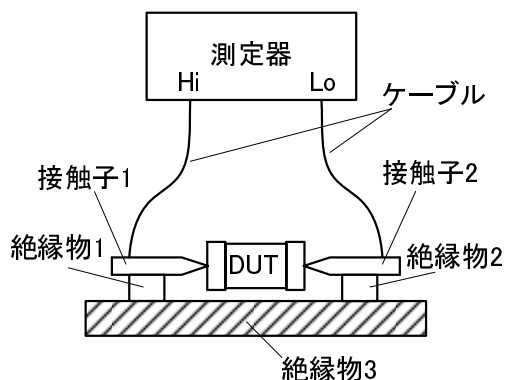


図 2.1: チップ部品の測定

やる夫 そうだお。

やらない夫 これだと、絶縁物の抵抗の問題が出てくる。絶縁物 1、絶縁物 2、絶縁物 3 の抵抗をそれぞれ R_1 、 R_2 、 R_3 として、図 2.1 をちょっと拡大して書き直すと、図 2.2 のようになる。DUT と並列

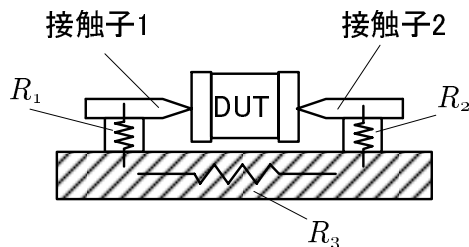


図 2.2: 絶縁物の抵抗

に $R_1 + R_3 + R_2$ の抵抗が入っているのがわかるだろう。

やる夫 でも絶縁物の抵抗は十分に大きいから関係ないお。

やらない夫 そうはいかない。元々絶縁抵抗というのは絶縁物の抵抗なので高いから、接触子を支える絶縁物の抵抗も考えないといけない。この例では、DUT のインピーダンス Z_x に対して、測定器で計測されるインピーダンス Z_m は、

$$Z_m = Z_x // (R_1 + R_2 + R_3) = \frac{Z_x(R_1 + R_2 + R_3)}{Z_x + (R_1 + R_2 + R_3)} \quad (2.1)$$

ということになる。仮に、 $R_1 + R_2 + R_3$ が Z_x の 10 倍あるとしても、測定されるインピーダンス Z_m は

$$Z_m = \frac{Z_x(R_1 + R_2 + R_3)}{Z_x + (R_1 + R_2 + R_3)} = \frac{Z_x \times 10Z_x}{Z_x + 10Z_x} = \frac{10}{11}Z_x = 0.90909Z_x \quad (2.2)$$

ということになって、約 1 割ほど小さく測定されてしまう。

やる夫 じゃあ元々 1 割大きく読んでおけばいいお。

やらない夫 そういうわけにも行かない。というのは、 $R_1 + R_2 + R_3$ というのは不安定なんだ。

やる夫 どう不安定なんだお。

やらない夫 絶縁物の抵抗というのは、表面抵抗と体積抵抗の並列になるからなんだ。

やる夫 表面抵抗と体積抵抗ってなんだお。

やらない夫 表面抵抗は、絶縁物の表面を流れる電流で決まる値だ。体積抵抗は、内部を流れる電流で決まる値だ。体積抵抗は、たとえば前に出てきた理科年表に載っている“体積抵抗率”から求められるが、物質が一定であればある程度の安定度はある。たとえばアルミナセラミックの体積抵抗率は $10^{12} \Omega\text{m}$ 程度だから、1 cm 角のアルミナの固まりは $10^{15} \Omega$ ($100 \text{ T}\Omega$) 程度はある。それに対して、表面抵抗は、表面の状態、たとえば汚れや水分によって大きく変わる。湿度が高いときなど、条件によっては数 $\text{k}\Omega$ のオーダーまで低下することがある。

やる夫 数 $\text{k}\Omega$ なんて値になったら、まともに測定できないお。

やらない夫 ああ、だから湿度が高い梅雨時は、測定をしてはいけないんだ。

やる夫 そういうわけにはいかないお。良い方法はないのかお。

やらない夫 ある、といえば、1 つある。

2.1.2 3 端子法

やらない夫 それは、ガード電極を使う方法だ。これしかないといっても良い。これを使うと、絶縁物の抵抗を無限大にすることができる。図 2.3 を見て欲しい。図 2.2 と似ているが、接触子をサポートする絶縁物 1、絶縁物 2 の下にガード電極が入っている。これを、電極が 3 つ、つまり端子が 3 つあるので、3 端子法というんだ。

やる夫 無限大、って、また大層な話だお。端子を 1 つ増やしたくらいでそんなに変わるのかお。

やらない夫 劇的に変わる。ここで注意しなければならないことは、ガード電極の接続先だ。必ず図 2.4 のように、測定器のガード端子に接続する。

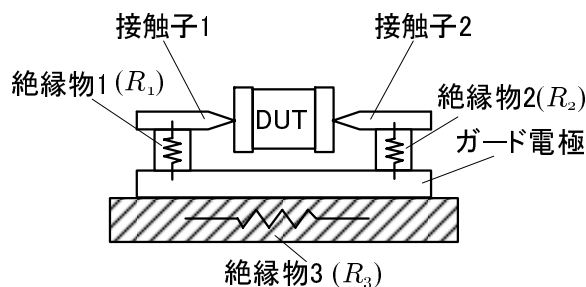


図 2.3: 3 端子法

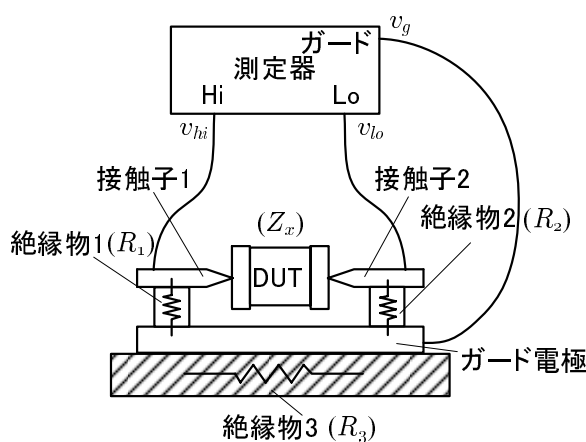


図 2.4: 測定器との接続

やる夫 するとどうなるのかお。

やらない夫 ガード端子は、図 2.4 の v_{lo} と同じ電圧が出力されるようになっている。しかもこの端子の出力インピーダンスは低い。

やる夫 だからどうなるのかお。

やらない夫 まあ話は順番に行こう。まず図の記号に沿って、電流の流れを考えてみよう。DUT のインピーダンス Z_x を測定するには、 Z_x の両端の電圧と、電流がわかれば良い。インピーダンスだから、電流と電圧も大きさと位相を知ることが必要だ。これは前に説明したとおりだ。

やる夫 わかっているお。

やらない夫 では、測定端子 Hi から電流が流れ出す。この端子の電圧は v_{hi} だ。電流は、ここから接触子 1 へ流れ、接触子で DUT へ行く電流と絶縁物 1 へ行く電流に分かれる。

やる夫 それで、絶縁物 1 を通った電流は、絶縁物 3 を通って絶縁物 2 を通って Lo 側の接触子 2 に流れ込むお。

やらない夫 そう、ガード電極が無い場合は、やる夫が言うように、DUT へ流れる電流と、それ以外の絶縁物 1 などに流れる電流が混ざってしまっても測れない。しかし、ガード電極を使うと、そうはならない。

やる夫 なんてだお。

やらない夫 ガード電極と接触子 2 は同電位で、しかも測定器のガード端子が低インピーダンスなので、ガード電極に流れ込んだ電流は接触子 2 に行くことがないからだ。つまり、絶縁物 1 などに流れる電流はガード端子に吸い込まれてしまうと考えるのも良い。だから、ガード電極と接触子 2 の間の絶縁物 2 には電流が流れなくなり、その抵抗 R_2 が無限大になったのと同じ効果が得られるんだ。これは、抵抗だけではなくて、漂遊容量が絶縁物にある場合も同じ働きをして、漂遊容量のインピーダンスを無限大、つまり静電容量を 0 にしてくれる。

やる夫 本当かお。すごいお。

やらない夫 この 3 端子法の効果は、何回も言うようだが接触子 2 とガード電極が同電位になっている時に限られる。電位が違っていれば、絶縁物 2 には、その電位 $\div R_2$ だけ電流が流れるので、それが誤差になる。

やる夫 ところで、具体的にガード電極の電位はどのくらいだお。

やらない夫 良くあるのが、ガード電位がアース電位になっている例だ。たとえば Agilent Technology の一連のインピーダンスメータ E4981A、4268A、4278A、4288A、4294A、などはみんなガード電位はアースになっている。これは、内部回路の関係で、測定器の L_o 端子がアース電位になっているためだ。仮想接地とも言える。耐圧計の PT シリーズ、ILT シリーズとか VIM シリーズもそうだ。Agilent Technology の絶縁計 4339A は接続によってはアース電位にすることができる。

やる夫 では、このガード電極と、シールドというのは違うのかお。シールドもアース電位だと聞いたお。

やらない夫 シールドというのは、外来ノイズを防ぐために、測定系の周りを安定した電位に接続した金属で囲う、というもので、ガードとは意図するところが違う。前に言った Agilent の 4339A はガードとシールドの 2 重の測定ケーブルを備えている。

やる夫 両方アース電位だと一緒に繋いでしまえば良いお。面倒くさくなくて良いお。

やらない夫 二つが別々の端子で出ている 4339A や E4981 などは、一緒にしてはだめだ。役割が違うから。特に測定周波数が高い場合に、妙な誤差がでたり、ばらつきが大きくなったりするから、決してやってはいけない。

やる夫 わかったお。楽ができると思ったが、だめかお。気をつけるお。

2.1.3 まとめ

やらない夫 では、高インピーダンス測定の注意点をまとめておこう。

- DUT と並列のインピーダンスに気をつける。絶縁物はインピーダンスだ。漂遊容量もインピーダンスだ。絶縁物は何も絶縁していない。

- 並列のインピーダンスをキャンセルするにはガードを施すしかない。高圧側接触子から低圧側接触子へのパスが必ずガード電極で遮られているようにしろ。
- インピーダンスが高くてノイズを拾いやすい場合はシールドをしる。シールドは測定系の最も安定した電位のところに接続しろ。多くの場合はアースだ。

このくらいかな。

やる夫 よくわかったお。

2.2 小さなインピーダンス

2.2.1 接触抵抗

やる夫 さっきインダクタンスの話の時にやらない夫に言われた、“測定にかなり注意をしないと接触抵抗の影響をすぐに受けてしまう (1-19 ページ)” というのは、どういうことなんだお。もう一回やらない夫に聞いてみるお。

やらない夫 さっきの話か。すんなり聞いていたから、わかっていると思っていたが。

やる夫 あれは流れで聞いていただけだお。改めて説明してほしいお。

やらない夫 わかったわかった。では説明しよう。小さなインピーダンスは、低いインピーダンスという呼び方も良くするので、ここでもそれで行く。それから、高インピーダンスと同じように、やはり低インピーダンスに一般的な話にするぞ。では、まず質問だ。一般的に低インピーダンスの DUT を計るために必要なものは何だ？

やる夫 またかお。測定器に決まっているお。もちろんそのインピーダンスで精度が保証されているやつだお。それからその測定器に付いているケーブルだお。

やらない夫 そこまでは OK だな。それで？

やる夫 そのケーブルの先の接触子を DUT に押し当てて測定すればいいお。こんどはインピーダンスが低いから手で押し当ててもいいお。

やらない夫 それはわかっているんだな。じゃあ、それを図にしてみよう。図 2.5 のようになるな。

やる夫 これは、図 2.1 と同じだお。

やらない夫 そうだ。同じだ。だけど、これからが違う。図 2.5 をちょっと拡大して書き直すと、今度は図 2.6 になる。 R_1 と R_2 が接触子の抵抗、 R_3 と R_4 が接触子と DUT の接触抵抗だ。

やる夫 接触子自体の抵抗といっても、接触子が金属なんだから、そんなに問題になるのかお。

やらない夫 この接触子の抵抗は、接触子とケーブルの抵抗の合計と思ってもらって良い。銅の体積抵抗率は $1.55 \times 10^{-8} \Omega\text{m}@0^\circ\text{C}$ だから、直径 0.5 mm、長さ 1 m の銅ワイヤーの抵抗値は 0.0788Ω ほどになる。数 Ω のインピーダンスの測定の場合は無視して良い値じゃない。

やる夫 これはその分だけあらかじめ見込んで測定すればいいお。

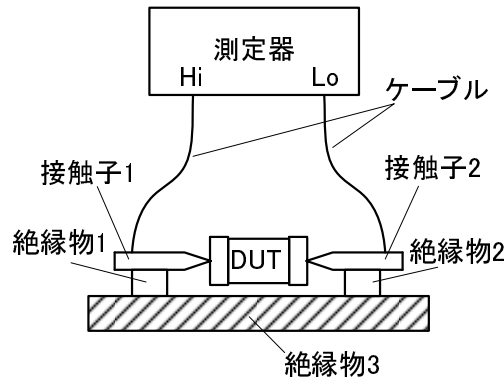


図 2.5: チップ部品を測定

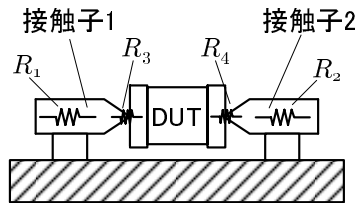


図 2.6: 接触子と接触抵抗

やらない夫 そういう手は確かにあって、その抵抗だけならそれでいいんだが、もっとやっかいなのが接触抵抗だ。この接触抵抗っていうやつは、接触子と DUT の表面状態に大いに左右されるんだが、きれいな状態ならば数十 $m\Omega$ 程度ですむが、汚れたり酸化したりすると簡単に数 Ω 以上になる。

やる夫 そんな状況によって変わるんでは、正確に測定できないお。

やらない夫 実は、これを解決する方法が 1 つだけあるんだ。

2.2.2 4 端子法

やらない夫 この 4 端子法を使うと、接触子やケーブルの抵抗や、接触抵抗を無視することができる。

やる夫 それはどういうものかお。もったいぶっていないで、早く教えるお。

やらない夫 まあ、あせるな。インピーダンス測定というのは、DUT を流れる電流と、DUT 両端の電圧を測定すれば良いと言うことは前に話したな。

やる夫 そんなこと聞いたような気がするお。

やらない夫 それでだ。高インピーダンスの場合は絶縁体の漏れ電流によって、DUT を流れる電流がうまく測れないという問題があって、それを解決するために 3 端子法があったわけだが、今度は接触子の抵抗や接触抵抗によって電圧が変化してしまうので、DUT 両端の電圧がうまく測れないということが問題なんだ。そこでだ。図 2.7 を見て欲しい。

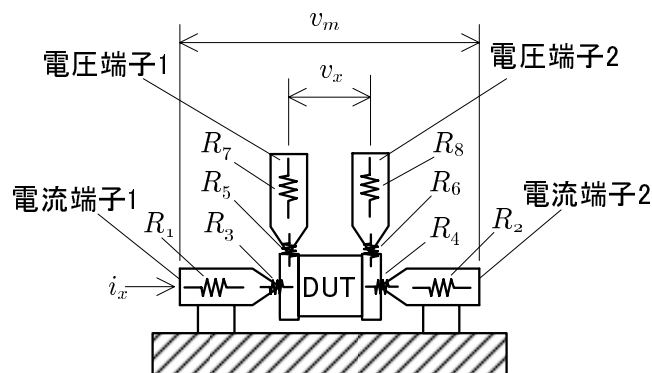


図 2.7: 4 端子法

やる夫 接触子が増えているお。電圧端子とか電流端子とか書いてあるお。

やらない夫 それは、接触子の役割を、電流を流す端子と電圧を測る端子に分けたから、わかりやすいように変えてみたんだ。電流、電圧、併せて端子が4つあるから、4端子法というんだ。

やる夫 なんで4つに増やしたのかお。

やらない夫 さっき言ったように、DUTの両端の電圧を測定したいと思っても、接触子の抵抗や接触抵抗のために正確に測れない、というのが問題だったわけだ。

やる夫 そうだお。図でいうと、電流端子1と2の間の電圧 v_m は、DUTのインピーダンスを Z_x とすると、

$$v_m = i_x(Z_x + R_1 + R_3 + R_2 + R_4) = i_x Z_x + i_x(R_1 + R_3 + R_2 + R_4) \quad (2.3)$$

みたいな感じになるお。

やらない夫 もうすこし踏み込んで言うと、式2.3の第1項だけが知りたいのに、第2項が切り離せないのが問題なわけだ。

やる夫 そういう言い方もできるお。計測器は大元の電圧 v_m しかわからないから、そうになってしまうお。

やらない夫 そこでだ。DUTの両端の電圧を直接測れる端子があればどうだ。

やる夫 でも、その端子にも接触抵抗があるから、同じことだお。

やらない夫 それが、そうではないんだ。端子自体の抵抗や接触抵抗があるとなぜ問題か、よく考えてみよう。

やる夫 抵抗があると電流が流れると電圧が発生するお。その電圧がDUTの両端の電圧に加算されてしまうから問題になるお。簡単だお。

やらない夫 では、その抵抗に電流が流れなければどうだ。

やる夫 流れなければ電圧は発生しないから問題にならないお。でも電流を流さないと測定できないお。

やらない夫 そのために、電流端子があるんだ。電流端子に電流 i_x を流して、電圧端子で電圧 v_x を検出する。電圧端子に電流が流れなければ、接触抵抗 R_5, R_6, R_7, R_8 の電圧降下はゼロだから、 v_x は正確に DUT の両端の電圧になる。

やる夫 電流端子の抵抗と接触抵抗 R_1, R_2, R_3, R_4 はどうなるんだお。

やらない夫 そこでの電圧降下はあるが、電圧端子で計測している DUT 両端の電圧 v_x には関係ない。電圧端子に電流が流れなければ、電流端子に流れる電流 i_x は全て DUT に流れるから、インピーダンスを計算するのに、電流端子の電流 i_x と、電圧端子の電圧 v_x で正確に算出できる。

やる夫 おお、これで正確に測れるお。でも電圧端子に少しでも電流が流れたらだめだお。

やらない夫 そうだな。だから電圧端子の入力インピーダンスは接触抵抗より十分に高くないといけない。ただ、接触抵抗はたかだか数 Ω だから、回路的にはあまり難しいものではない。この 4 端子法は、主に直流や低周波の低抵抗の測定器によく使われている。アジレントの 34401A や 34410A や HIOKI の抵抗計などでよく見られるな。

やる夫 Sense Ω 4W なんて書いてある端子があるのがそれかお。

やらない夫 そうだ。それにケーブルを繋いで電圧端子にする。専用の 4 端子法用の測定ケーブルもある。

やる夫 DUT に 4 本の端子を立てるのは大変だお。手がかりそうだお。

やらない夫 そういう時に便利なのがケルピンクリップと呼ばれている端子だ。例えば、図 2.8 のような形をしている (文献 [6] より引用)。単なるワニグチクリップみたいに見えるが、電流端子と電圧端

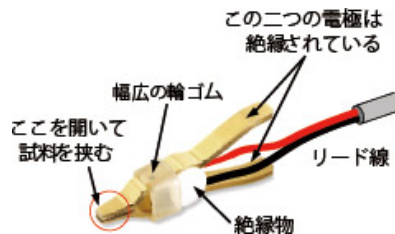


図 2.8: ケルピンクリップの例

子がそれぞれワニグチの上の顎と下の顎になるようになっていて、1 つクリップするだけで電圧端子と電流端子が接触する。

やる夫 それは便利だお。だけど DUT にリードが生えていないとクリップするのが難しいお。

やらない夫 それはうまくやることだな。

2.2.3 まとめ

やらない夫 では、低インピーダンス測定をまとめておこう。

- DUT と直列のインピーダンスに気をつける。ケーブルの抵抗、接触抵抗が問題になる。ケーブルや端子のインダクタンスにも気をつける。

- ケーブルの抵抗や接触抵抗をキャンセルするには4端子法を使うしかない。ただ、4端子法は高周波ではうまくいかないことが多い。
- DUTに流れる電流が大きくなることが多いので発熱に注意しろ。熱で特に抵抗値が変わることが多い。

このくらいかな。

やる夫 注意するお。

2.2.4 熱起電力

やらない夫 そうそう、1つ言い忘れていた。

やる夫 何だお。

やらない夫 低いインピーダンスの場合は、DUTの両端の電圧が小さくなるな。

やる夫 インピーダンスが低いから当然だお。できる限り大きくするために、大きな電流を流して測定することもあるお。そのために発熱に注意、というのは、上でも言っているお。

やらない夫 そう、その場合に、特に発熱がある場合に、今まで説明してきたこと以外に、注意しておかなければならないことがある。

やる夫 それは何だお。

やらない夫 熱起電力というものだ。

やる夫 それは何だお。

やらない夫 熱による起電力だ。

やる夫 だから、それは何だお。

やらない夫 ゼーベック効果とも言う。2つの異種金属を接合して閉回路を作ると、図2.9のように、異種金属の接合点は J_1 、 J_2 の2つができるな。そのそれぞれの接合点の温度が T_1 、 T_2 とすると、温度差 $T_1 - T_2$ に応じた電圧 v_t が発生する現象だ。熱電対は、この原理を使った温度センサーだ。

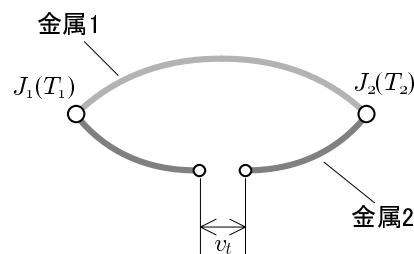


図 2.9: 熱起電力の例

やる夫 熱電対は、使ったことがあるお。針金みたいな線が 2 本あるだけだったお。あれは 2 つ種類が違う金属だったのかお。

やらない夫 そうだ。よくある熱電対は K 型がアルメルとクロメル、E 型がクロメルとコンスタンタン、J 型が鉄とコンスタンタンという金属の組み合わせだ。

やる夫 アルメルとかクロメルとかコンスタンタンってなんだお。聞いたこと無いお。

やらない夫 アルメルはニッケル、アルミその他の合金、クロメルはクロム、ニッケルその他の合金でどちらも商品名だ。コンスタンタンは銅ニッケル合金で、抵抗の温度係数がきわめて小さい特徴がある。これも商品名だったらいい。まあ、それは置いておいて、熱起電力の話だ。

やる夫 ということは、熱電対以外の金属でも熱起電力があるということかお。

やらない夫 その通りだ。熱電対は、単に熱起電力が安定していて、しかもさびにくい金属を使っているだけにすぎない。いろいろな金属の熱起電力を表 2.1 に挙げておいた (文献 [7] より引用)。これ以

金属	発生電圧
アルメル-クロメル	41 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
クロメル-コンスタンタン	63~72 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Fe-コンスタンタン	52~55 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Fe-Cu	12 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Cu-Ni	22 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Cu-Cu	$\leq 0.2 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Cu-Ag	0.3 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Cu-Au	0.3 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Cu-Pb/Sn	1-3 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Cu-CuO	$\sim 1000 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$

表 2.1: 熱起電力の例

外に、前にも話した理科年表にもいろいろ載っているから見ておくと良い。

やる夫 やっぱり熱電対に使われる金属は熱起電力が大きいお。銅と金や銀やはんだは、鉄やニッケルに対するより熱起電力が小さいお。酸化銅はすごく大きいお。で、この熱起電力と低インピーダンス測定に何の関係があるんだお。

やらない夫 さっきも言ったように、低インピーダンス測定では、DUT の両端の電圧がかなり小さくなる。マイクロボルトオーダーになることだってある。それに、電極と DUT の接点は異種金属のことが多い。たとえば前に話した 4 端子測定の場合は、図 2.10 のようなことになる。ここで電池の記号で表した v_{t1} 、 v_{t2} が熱起電力だ。このようになったら、どうなるかな。

やる夫 測定誤差が増えるお。 v_x が $v_x + (v_{t1} - v_{t2})$ になっているお。これは問題だお。誤差を増やさないためには、DUT の両端の電圧 v_x を大きくすればいいから、DUT に流れる電流 i_x を大きくすればいいお。

やらない夫 さっきも言ったように、それでは発熱が大きくなって熱起電力がさらに大きくなる。

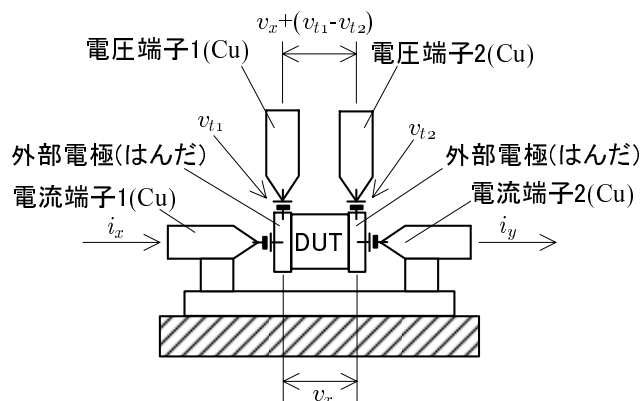


図 2.10: 熱起電力がある場合の4端子測定

やる夫 うーん、良い方法はないかお... ピコーン! 閃いた! 熱起電力は異種金属の接合点の温度差によっておきるお。だから接合点の温度を一緒にすれば $v_{t1} = v_{t2}$ となって熱起電力は誤差にならないお。

やらない夫 そう、原理的には、その方法は正しいんだが、こと温度に関しては、いくら離れた場所の温度を一定に保つのは至難の業だ。ちょっと風が吹いただけで簡単に1、2度は温度が変わる。

やる夫 そうだ、判ったお。電流の向きを変えればいいんだお。 i_x の向きを変えれば、電圧端子の電圧は $-v_x + (v_{t1} - v_{t2})$ になるお。向きを変える前の電圧との差を取ると、

$$v_x + (v_{t1} - v_{t2}) - (-v_x + (v_{t1} - v_{t2})) = 2v_x \quad (2.4)$$

となって、正確に v_x が求まるお。

やらない夫 そうだな、それが正解だ。温度が変わってしまっではどうしようもないが、変わらないように素早く切り替えれば良い [9]。日置電機の抵抗計 RM3543 などにも搭載されている [8]。同じ考えで、低周波の交流を印加して測定するのも手だな。ところで、上の図では、DUTと電極の接触箇所の例を挙げたが、熱起電力という、考えなければいけないデバイスがある。何か判るかな。

やる夫 デバイスかお。ちょっと思い当たりませんですお。

やらない夫 金属接点があって、暖くなるものだ。

やる夫 うーん... そうだ、判ったお。リレーだお。接点があって、コイルがあって、リレーがオンするとコイルが熱くなるお。

やらない夫 正解だ。リレーの熱起電力というのが、案外問題になりやすい。特に、リードリレーは問題が起きやすい。

やる夫 なんて特にリードリレーなんだお。

やらない夫 リードリレーは、接点が磁性体のリードでできている。図 2.11 の“磁性体金属”と書いてあるのがそれだ。ということは、銅線や、はんだと磁性体の接合点があるということだ。前にも言ったが、鉄やニッケルなどの磁性体は銅やはんだとの熱起電力が大きい。しかもその接点が図 2.11 のようにコイルと直ぐ近くにある。

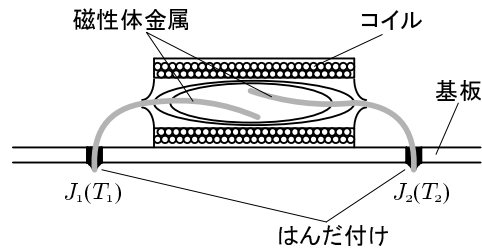


図 2.11: リードリレー

やる夫 図の J_1 と J_2 の温度が違うとまずいお。コイルの熱で暖まるとよけいまずいお。

やらない夫 その通りだ。だから、低熱起電力リードリレーという物がある。

やる夫 どんな物なのかお。早く教えてお。

やらない夫 まあまあ、あせるな。磁性体と銅線の接合自体は避けられないから、それぞれの接合点の温度差をできるだけ小さくする工夫をしてあるんだ。図 2.12 がその例だ。

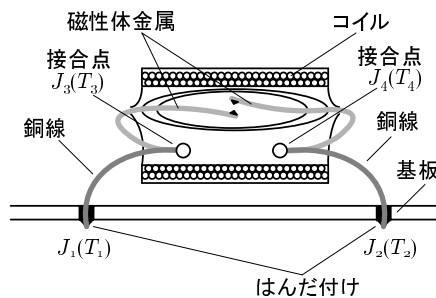


図 2.12: 低熱起電力リードリレー

やる夫 磁性体と銅線の接合点が二つともコイルの中にあるお。これはなんでだお。

やらない夫 コイルの中側は、コイルの熱で温度が比較的一定なんだ。接合点をその中に入れて、しかも J_3 と J_4 の 2 つの接合点を近づけることによって、それぞれの温度 T_3, T_4 を同じにしている。これで熱起電力を等しくして打ち消しているんだ。

やる夫 はんだとの接合点 J_1, J_2 は変わっていないお。

やらない夫 銅線とはんだの熱起電力は、磁性体とに比べれば小さいから、実用上はこれで大丈夫なんだ。

やる夫 そうかお。いろいろ考えるものだお。

2.2.5 まとめその2

やらない夫 では、追加のまとめだ。

- 熱起電力は、接合点の温度差で発生する。温度差に気をつける。
- もちろん、金属の種類にも気をつける。とくに銅と酸化銅の熱起電力は大きい。酸化被膜に注意だ。
- リレーなど、熱起電力の対策品があるものもある。困ったら探してみるといい。

やる夫 了解だお。

2.3 広い範囲のインピーダンス

2.3.1 3端子法と4端子法

やる夫 やらない夫が、3端子法は高いインピーダンス用で、4端子法は低いインピーダンス用だと言っていたお。じゃあ、高いインピーダンスから低いインピーダンスまで計りたかったらどうすればいいのお。またやらない夫に聞いてみるお。

やらない夫 今度は何かな。

やる夫 広い範囲のインピーダンスを計るためにはどのようにしたらいいか聞きたいお。まさか3端子法と4端子法の両方を使えば良いとか言うんじゃないかお。

やらない夫 その通りだ。両方を組み合わせれば良い。

やる夫 そんな安易なことは聞きたくないお。

やらない夫 安易だと言っても、それが一番うまい方法だからしょうがない。といっても、ただ単に組み合わせるだけではうまくなくて、ちょっと工夫が必要ではあるが。

やる夫 その工夫を聞きたいお。

やらない夫 考え方としては、4端子法にガードを掛ける、というようにするのがわかりやすいので、その線で考えてみる。まず4端子法は、図2.13のようになっている。

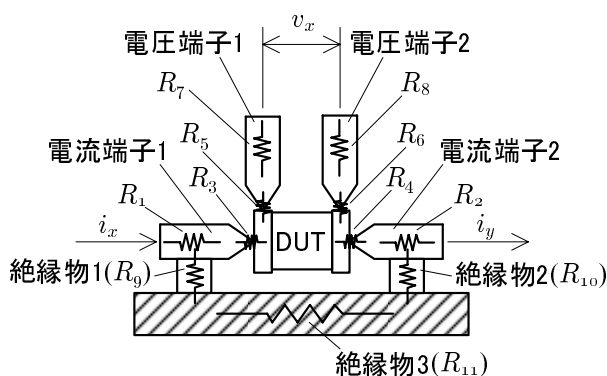


図 2.13: 4端子法

やる夫 前に出た図2.7と同じだお。

やらない夫 そうだ。この図をよく見て、どこにガードを掛けたらよいか考えるんだ。

やる夫 電圧は電圧端子の間の電圧だから問題ないとして、電流が問題だお。絶縁物に電流が流れてしまうと、DUT に流れる電流と、図の i_x と i_y は一緒にならないお。だからここにガードを付けるお。

やらない夫 そうすると、図 2.14 のようになるな。問題は、ガードの電位をどうするかということだ。それと、電圧端子に流れ込む電流をどうするかという問題もあるな。

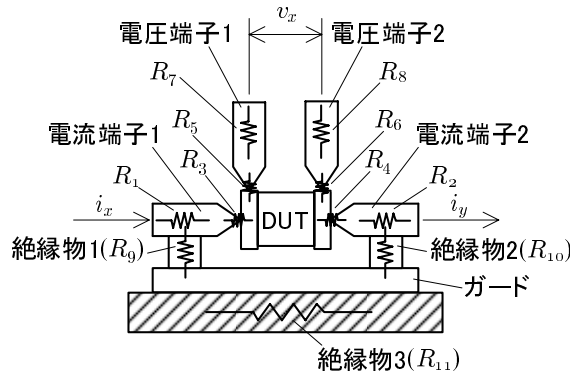


図 2.14: ガードを導入

やる夫 電圧端子の入力インピーダンスは十分高いはずじゃなかったのかお。

やらない夫 電圧端子は、接触抵抗に対しては十分高いインピーダンスだが、絶縁物の抵抗に対しては十分ではないぞ。だから、対策を考えないと、DUT に流れる電流を正確に測れなくなる。

やる夫 どうすればいいかお... ピコーン! ひらめいた! 電圧端子のどちらかをアース電位にすればいいお。そして、ガードもアース電位にすれば、そちら側の電圧端子の漏れ電流と、絶縁物の漏れ電流は無視できるお。

やらない夫 それは良いことを考えたな。で、電圧端子 1 と 2 のどちらをアース電位にするんだ? それから、どうやってするんだ?

やる夫 それはよくわからないお。やらない夫ならどうやるのかお。

やらない夫 いろいろ手はあると思うが、良くあるのが、仮想接地を使う方法だな。

2.3.2 仮想接地

やる夫 仮想接地? 仮の接地って何のことかわからないお。

やらない夫 この図 2.15 を見て欲しい。

やる夫 いきなり何だお。これはオペアンプではないかお。

やらない夫 オペアンプを知っているとは感心。演算増幅器とも言って、入力インピーダンスが高く、利得も非常に高い増幅器のことだ。

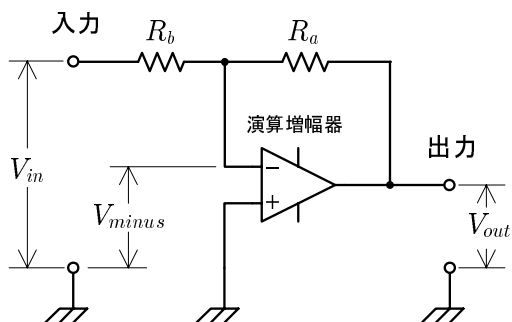


図 2.15: 反転増幅回路

やる夫 これと仮想接地が関係あるのかお。

やらない夫 おおありだ。このオペアンプの動作を考えると、接地されていないのに接地電位を維持しているところがある。

やる夫 どこだお。

やらない夫 反転入力のところだ。図中では“-”の記号で表されている。

やる夫 ほんとかお。

やらない夫 オペアンプは、大変利得が高いので、図中の V_{minus} がわずかでもプラスになれば、出力 V_{out} はマイナス方向にふれる。また、わずかでもマイナスになれば、同じようにプラス方向にふれる。だから、常に 0V つまりアース電位に保たれる。

やる夫 おお、そうだお。ということは、これを電圧端子に使うと良いお。でも、その他の端子はどうしたら良いかわからないお。

やらない夫 それは、図 2.16 のように、オペアンプの出力を基準抵抗 R_s 経由で電流端子に繋ぐと大変に都合が良いんだ。そうすると、この電圧端子 2 の電位がアース電位になるようにオペアンプの

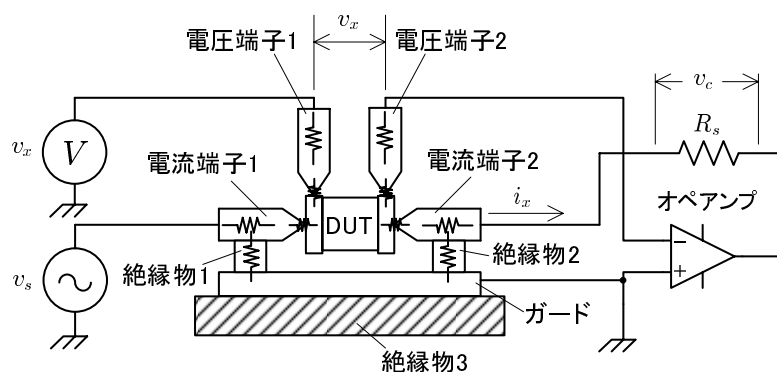


図 2.16: 4端子法にオペアンプ導入

出力電圧が自動的に変化する。さらに、この電圧端子 2 がつながっているオペアンプの入力インピーダンスは、高いとはいえ無限大ではないが、ここの電位がアース電位であることにより、漏れ電流を考える必要はなくなる。DUT の電流 i_x は、

$$i_x = \frac{v_c}{R_s} \quad (2.5)$$

となって、 v_c を測れば DUT の電流を簡単に計ることができる。また、ガードの電位もアース電位なので、漏れ電流を考えなくて良い。

やる夫 でも、ちょっと気になるところがあるお。電流端子 2 は、接触抵抗があるので、その電位は完全にはアース電位にならないお。だから絶縁物 2 の漏れ電流は無視できないお。

やらない夫 良いところに気づいたな。その通り、絶縁物 2 の漏れ電流は誤差要因になる。しかし、この漏れ電流を気にしないといけない場合というのは、DUT のインピーダンスが高い場合だから、DUT の電流は小さくなる。その場合は、電流端子 2 の接触抵抗があっても、それによる電位差はあまり小さくなる。つまり、その場合は電流端子 2 の電位はほぼアース電位なので、ほとんどの場合大丈夫なんだ。

やる夫 そういうものかお。

やらない夫 さらに、DUT の両端の電圧は、電圧端子 2 がアース電位なので、電圧端子 1 の電圧そのまままで良いから測定回路が簡単になる。図中の v_x がそれだ。

やる夫 それがなんで簡単なのかお。

やらない夫 電圧端子 1 と電圧端子 2 の差の電圧が必要な場合は、2 つの電圧の差をとる差動増幅回路が必要なんだが、この場合は電圧端子 1 の電圧だけ測ればいいので、それがいらないんだ。

やる夫 そうかお。

やらない夫 素っ気ないな。実はこれは結構大きいんだぞ。前に、4 端子法は高周波でうまくいかないことが多いという話をしたが、この対策にもなっている。

やる夫 ということは、この仮想接地を使った 4 端子法は高周波で使えるのかお。

やらない夫 いろいろ工夫すれば、なんとかなるんだ。

やる夫 どんな工夫なのかお。

2.3.3 自動平衡ブリッジ

やらない夫 自動平衡ブリッジというものがあってな [10][11]、Agilent の 4294A という測定器は、最高 110 MHz までこれで測定している。まあ、まるまる図 2.16 と同じではないがな。

やる夫 どんな回路なんだお。

やらない夫 図 2.17 がその回路だ。Agilent では 4 端子対回路とも呼んでいるが、図 2.16 の測定ケーブルを同軸ケーブルにして、その同軸ケーブルの外皮をガードにしたものと思って良い。

やる夫 この回路にはオペアンプが入っていないお。

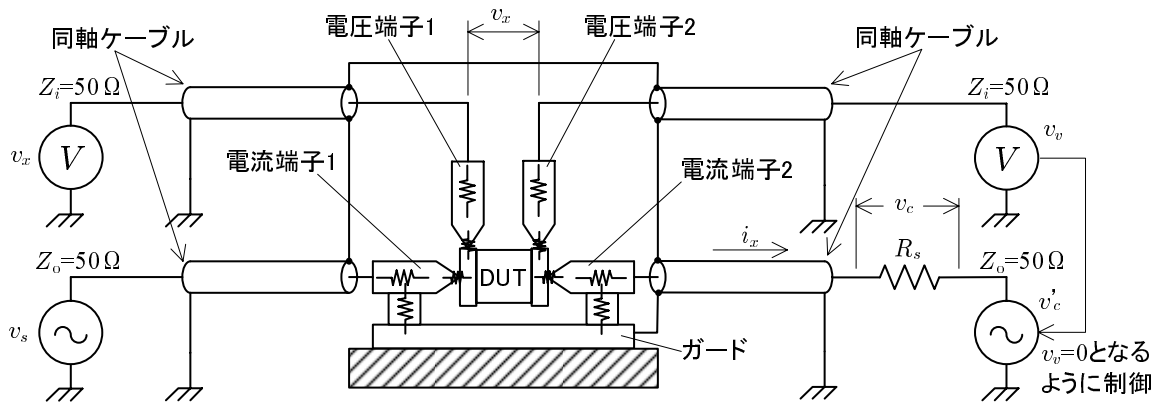


図 2.17: 4 端子対法

やらない夫 良く気がついたな。オペアンプは、周波数が高い場合には使えない。なので、この回路にも使っていない。

やる夫 では仮想接地がうまくいかないお。

やらない夫 そのために、電圧端子 2 の電圧 v_v を検出して、それがゼロになるように電圧源 v'_c を制御するようになっている。結果的に電圧端子 2 の電圧がゼロに保たれるから、この回路でも仮想接地は成立するんだ。自動的にゼロに保たれるから、自動平衡ブリッジと言うんだ。

やる夫 そうかお。それならこの図 2.17 の回路は低いインピーダンスから高いインピーダンスまで、低周波から高周波まで測れて完璧だお。

やらない夫 実は、この回路は 1 つだけ欠点がある。

やる夫 何だお。今までの説明では、全部うまくいくように聞こえたお。

やらない夫 今までの説明のように、電圧端子 2 の周りのガードはそこそこうまく働くので、電圧端子 2 とその周辺の漏れ電流はほとんど問題にならない。だが、電圧端子 1 のほうはそうはいかない。電圧端子 1 と DUT の間の接触抵抗は、問題になるんだ。

やる夫 でも、前の説明では、入力インピーダンスが高いから問題にならないと... あ、この図 2.17 の場合は入力インピーダンスが 50Ω だお。これはあまりうまくないお。

やらない夫 そうだ。高周波まで測定しようとして、測定ケーブルを同軸ケーブルにしたので、ケーブル自体は高周波まで使えるようになったんだが、インピーダンスが 50Ω になってしまったために、電圧端子 1 の接触抵抗の影響を受けるようになった。さらに、同軸ケーブルはだいたい 1 メートルあたり 100 pF 程度の容量があるので、接触抵抗とその容量のために v_x の位相が回ってしまって、誤差原因になってしまった。

やる夫 でもその分差し引いておけば大丈夫じゃないかお。

やらない夫 接触抵抗とケーブルの容量による位相の回転は、接触抵抗が変わるたびに変わるので、あらかじめ差し引いておくのは無理だな。

やる夫 では正確に測れないじゃないかお。

やらない夫 ということ、自動機に4端子対測定回路を導入するときには、よく電流端子と電圧端子をあらかじめ接続して、図2.18のように2端子で測定していることが多いんだ。

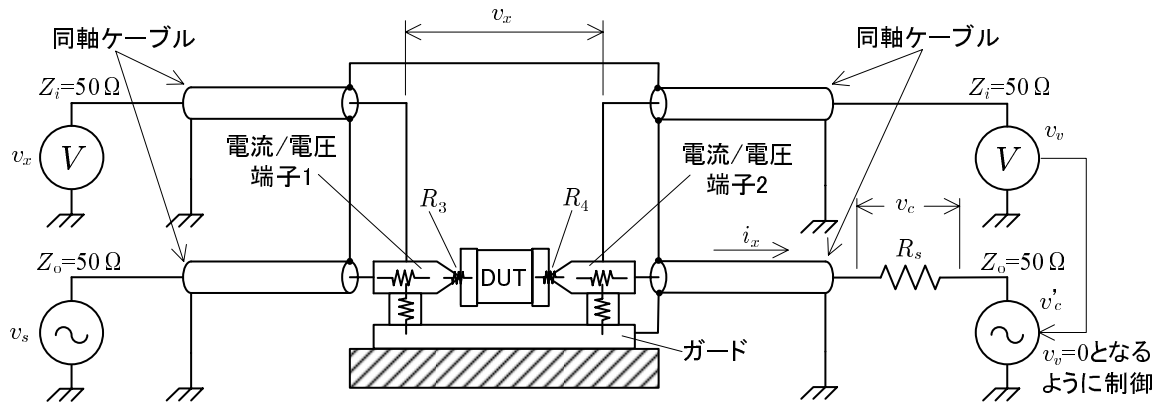


図 2.18: 4 端子対法の 2 端子化

やる夫 接触抵抗の R_3 、 R_4 はどうなったんだお。

やらない夫 接触抵抗が大きいと、コンデンサ測定では D が大きく見え、コイルの測定では Q が小さく見える。コンデンサの直列等価回路では、等価直列容量を C_S 、等価直列抵抗を R_S とすると、式 1.25(1-13 ページ) でやったように、 D は、

$$D = \tan \delta = \frac{1}{Q} = \omega C_S R_S \quad (2.6)$$

と表されるから、接触抵抗 R_3 と R_4 は R_S と直列になり、見かけの D' は

$$D' = \omega C_S (R_S + R_3 + R_4) \quad (2.7)$$

ということになる。低損失コンデンサでは R_S はミリ Ω 以下なので、接触抵抗が大きいと D はものすごく大きく見えてしまう。これは、練習問題でもやったな。

やる夫 そうだったお。それで、大きく見えるとどうなるのかお。

やらない夫 コンデンサは D が大きいと不良、コイルは Q が小さいと不良なので、これによって不良が増えてしまうことになるな。でも、さっきの接触抵抗とケーブルによる位相回転は、容量値やインダクタンス値が変わって見えてしまうことがわかんと思う。これによって容量やインダクタンスの誤選別になってしまうのに比べれば、 D や Q の不良はまだましなんだ。

やる夫 あまりすっきりとしないお。何か 4 端子対法のままで測定する良い方法はないものかお。

やらない夫 あると言えばあるな。2 つほどある。

やる夫 もったいぶっていないで、早く説明するお。

2.3.4 4端子対回路とバッファアンプ

やらない夫 そもそもその原因は、電圧端子1の入力インピーダンスが高くていけないことにあるので、1つめの方法は、それを高くすればいい、と言う考え方だ。図2.19のように電圧端子1の直後に高入力インピーダンスの高速バッファを入れれば、症状を緩和することができる。25年くらい前にやったことがある。

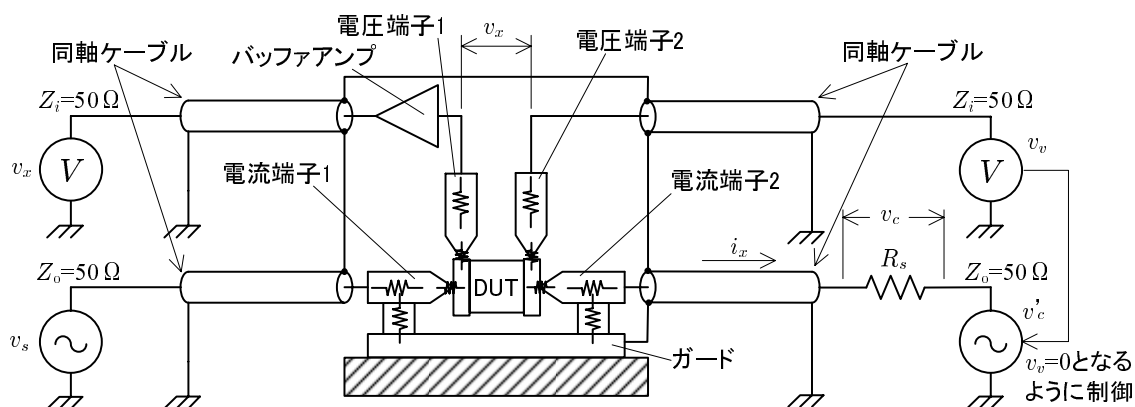


図 2.19: バッファ付き4端子対法

やる夫 それでは、それを使うお。

やらない夫 まあ、その当時最も速いクラスのバッファICを使ったんだが、そのICの位相回転の影響が取りきれないこともあって、誤差を完全に防ぐことはできなかった。今の半導体技術を使うと、もっと速いバッファがあるので、うまくいくかもしれないが、ちょっとわからないな。

2.3.5 4端子対回路と電極クリーニング

やる夫 それじゃあ、2つめの方法というのは、どんな方法かお。

やらない夫 接触抵抗があるなら、除去してしまえば良いんじゃないか、と言う方法だ。具体的には、測定端子に直流を流してクリーニングをする。

やる夫 測定端子に直流、っていっても、コンデンサだお。流れるわけ無いお。

やらない夫 まあ、そういわず、話を聞くんだ。4端子対測定だから、高圧側電流端子、高圧側電圧端子、低圧側電圧端子、低圧側電流端子、というように4つ端子がある。

やる夫 そうだお。でも、いくら4端子対でも、コンデンサは2端子だお。

やらない夫 だから、高圧側、低圧側で、それぞれ端子が2つあるから、その間で電流を流せば、コンデンサに電圧を掛けずに、接点に電流を流すことができる。図2.20を見るとよく判るだろう。

やる夫 よく判らないお。説明してくれだお。

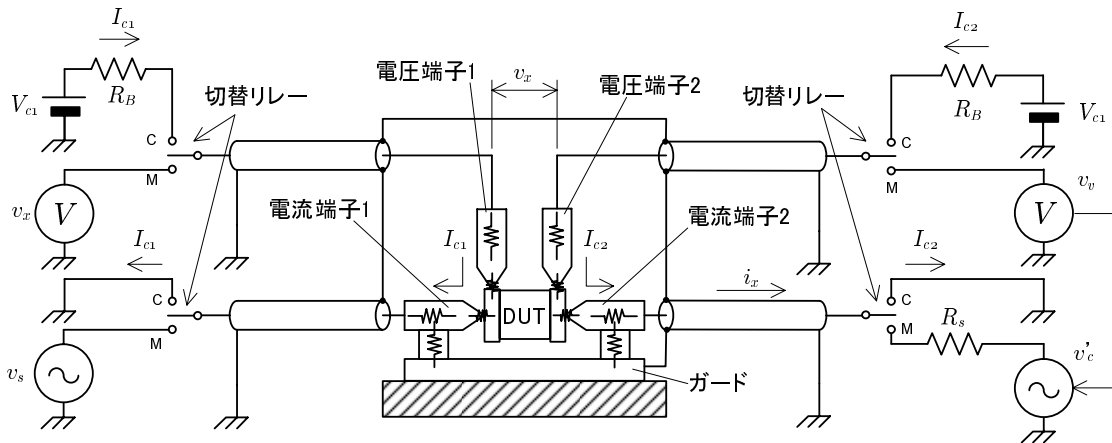


図 2.20: 電極クリーニング法

やらない夫 まず、もとの構成は、図 2.17 の 4 端子対法だ。これに、図 2.20 のように切替リレーを 4 つ付けてある。通常の測定の時は、リレーの接点を“M”の方に接続しておく。そうすると、図 2.17 と何も変わらずに測定ができる。

やる夫 うん。ここまでは判ったお。

やらない夫 それで、接点のクリーニングをしたいときは、切替リレーの接点を“C”の方に接続する。すると、電源 V_{c1} から、抵抗 R_B を通って、電圧端子 1、電流端子 1、アースの経路でクリーニング電流 I_{c1} が流れる。同時に電圧端子 2、電流端子 2、アースの経路でクリーニング電流 I_{c2} も流れる。

やる夫 それは判ったお。でも、何で直流を流すと接点クリーニングになるんだお。

やらない夫 それは、さっき話したとき、さらっと流したから判っていると思っていたんだが。

やる夫 よく考えると判らなくなったんだお。良いから教えるお。

やらない夫 まず、接触抵抗が大きくなる、ということはなぜなのかを考えると、接点表面が酸化して、非導電性のさびみたいな皮膜ができている、ということが考えられる。また、非導電性の汚れが付いていることも考えられる。

やる夫 接点金属に良く用いられる銅や真鍮は、放っておくとさびてしまうから、それが電気を通さない膜みたいになっているのは、あり得る話だお。

やらない夫 それで、そういう汚れやさびの皮膜は、付いたばかりだからかなり薄いはずだ。また、一定の厚さ、ということではなくて、厚みもバラバラだ。そういう状態の時には、ある程度高い電圧を印加すると、被膜の絶縁を破壊することができる時がある。

やる夫 時がある、ってなんか弱々しいお。

やらない夫 必ず破壊できるわけではない、という所が弱いところだな。だけど、かなりの確率で破壊できる。皮膜が極めて薄いので、絶縁耐圧もあまり高くない事が多いからだ。破壊できて、電流が流れると、被膜は抵抗だから、その所で熱が発生する。

やる夫 熱が、っていうと、電極が溶けてしまうお。

やらない夫 安心しろ、そういう風にはならないから。そもそも、電極と DUT は、両方とも完全な平面ではない。拡大してみると、両方ギザギザになっていると考えて良い。だから、お互いに接触しているのは、そのギザギザの高いところ同士がたまたま当たっているところにすぎない。極小さな点で数力所当たっているだけだ。そのところに被膜や汚れが付いて導通できなかったわけだ。だから、電流が流れ始めると、その僅かな点に電流が集中して、その点付近だけ温度があがり、被膜や汚れが焼き切れる。ごく小さな点だけなので、他の場所は温度は上がらない。

やる夫 仕組みは判ったお。でも、焼き切るんだから、高い電圧で大電流を流す必要があるんじゃないかお。

やらない夫 所が、そうでもない。電圧は数ボルト、電流も 100mA もあれば十分だ。図 2.20 の V_{c1} や R_B も、そこら辺を考えた値にしてある。

やる夫 そうかお。そんな物でクリーニングできるんなら、積極的に取り入れると良いお。

やらない夫 実際に、ESR の測定が必要な自動機には標準装備されている。

やる夫 ESR ってなんだお。時々聞くけど、よく判らないお。

やらない夫 Equivalent Series Resistance のことで、等価直列抵抗のことだ。

やる夫 等価直列抵抗なら、 R_S という名前でも出て来たお。このことかお。これのことなら、別に改めて測定しなくても、C と Q が Df を測定して、式 1.25 や 1.26 (1-13 ページ) を使って計算で出せば良いお。簡単だお。

やらない夫 まあ、その通りなんだが、顧客によっては、特別の周波数で ESR を測定したいと言ってくるのがあってな。

やる夫 特別、って何だお。

やらない夫 例えば、C (容量) の測定は 1kHz なのに、ESR だけ 100kHz で計りたい、なんていう例があった。

やる夫 そういうことだと、C と Df を測定して計算、と言うわけにはいかないお。ESR だけ別の周波数で改めて測定するしかないお。

やらない夫 そう、そういったときに、ESR はミリ Ω の単位の事が多いから、接触抵抗の影響が少ない 4 端子対測定をちゃんとやらなきゃいけない。そのときにこのクリーニング方法が役立つんだ。

やる夫 そういうことかお。よく判ったお。じゃあ、そういう特別な事がない場合は、どうやっているのかお。4 端子対測定を使わなくても図 2.18 のような 2 端子接続で何とかなる場合の話だお。

やらない夫 そういうときには、電極と DUT をこすらせて、電極や DUT の表面の汚れや酸化皮膜を取ってしまう方法を取ることが多い。こすり付ける圧力が高いほど汚れは取れるが、DUT に傷が付いてしまい、そちらの方でなかなか悩ましい問題もあるが、現状ではその方法でやっているな。

やる夫 よくわかったお。

ダイジェスト版はここまでです。

参考文献

- [1] 本郷廣平:「基礎課程 電気回路」, 実教出版株式会社 (1978)
- [2] 柿元 章:「比誘電率、誘電正接測定の手引き」, 静岡大学 (1990)
- [3] 三井化学:「TPX メチルペンテンポリマー」, <http://www.mitsuichem.com/jp/service/mobility/polymers/tpx/index.htm>
- [4] 国立天文台 編:「平成 26 年 理科年表」, 丸善出版株式会社 (2014)
- [5] 日本ユニバーサル電気:「ソレノイドコイルの簡単設計」, http://jpuni.co.jp/coil/kobore/contents/coil_kantan_sekei.htm
- [6] エヌエフ回路設計ブロック:「ケルビックリップ」, <http://www.nfcorp.co.jp/techinfo/dictionary/054.html>
- [7] ケースレーインスツルメンツ:「高感度測定ハンドブック 第 4 版」, 東陽テクニカ (1995)
- [8] 日置電機株式会社:「抵抗計 RM3543」, https://www.hioki.co.jp/jp/products/detail/?product_key=467
- [9] 野中 智:「抵抗率および比誘電率、誘電正接の精密測定」, 静岡大学大学院博士論文 (1990)
- [10] 野中 智:「やさしい計測ガイド」, 株式会社ヒューモラボラトリー (2017)
- [11] 水口ほか:「インピーダンス測定ハンドブック 2003 年 11 月版」, キーサイトテクノロジー, 5950-3000JA.pdf(2003)
- [12] 本郷廣平:「電波工学の基礎」, 実教出版株式会社 (1983)
- [13] 滝 貞男 監修:「人工水晶とその電気的応用」, 日刊工業新聞社 (1974)
- [14] 岡野庄太郎:「水晶周波数制御デバイス」, 株式会社テクノ (1995)
- [15] 日本水晶デバイス工業会:「水晶デバイスの解説と応用」, 日本水晶デバイス工業会技術委員会 (2002)
- [16] 日本水晶デバイス工業会:「水晶デバイスとは」, <http://www.qiaj.jp/pages/frame20/page01.html>
- [17] Dwane Rose: “Load Resonant Measurements of Quartz Crystals”, Saunders and Associates Inc, <http://www.saunders-assoc.com/paper/paper.html>
- [18] 白藤 立:「電気回路学基礎 2017-07-26 版」, 大阪市立大学大学院 工学研究科, 第 7 章 共振回路, EC1-Text.pdf, p.5(2017)

- [19] Arthur Lee and Kenneth Chan: “Direct Impedance Method For Load Resonant Measurement of Crystal”, Kolinker Industrial Equipments Limited, 21st Piezoelectric Devices Conference & Exhibition(1999)
- [20] 労働省産業安全研究所: 「静電気安全指針」, 労働省, p.3(1988)
- [21] 尾崎 弘: 「過渡現象論」, 共立出版株式会社 (1959)
- [22] “Maxima, a Computer Algebra System”, <http://maxima.sourceforge.net/>
- [23] 岩崎 俊: 「電磁波計測 -ネットワークアナライザとアンテナ-」, コロナ社 (2007)
- [24] 丹羽一夫: 「物知りアマチュア無線」, CQ 出版社, p.134(2002)
- [25] 村田製作所: 「インダクタの基礎知識」, <http://www.murata.com/ja-jp/products/inductor/chip/learn/basic>
- [26] サガミエレク株式会社: 「コイルを使う人のための話 第一部」, coil_doc_100j.pdf, p.21(2017)

やる夫で学ぶインピーダンス計測 (ダイジェスト版)

2018 年 7 月 3 日 発行

著者 野中 智
出版社 株式会社ヒューモラトリー

Copyright© 2017-2018 by Humo Laboratory, Ltd.