

トランスの M 結合とはナニモノでどのように測るか
(後編：買ったローコスト LC メータで実際にやってみた)
著者：石井 聡
はじめに

これまでのふたつの技術ノート、まず **TNJ-028** (前編) では、トランスの M 結合の測定方法に関して、その理論的な面とそれを確認するためのシミュレーション結果についてご説明しました。また次の **TNJ-029** (中編) では、TNJ-028 で見てきた理論的な観点を実際に確認してみるために購入した、ローコスト LC メータのしくみと性能を調べてみた、という内容でした。LC メータの購入の顛末、そしてその LC メータで実現されているノウハウや関連情報もご紹介してきました。

この技術ノート TNJ-030 は、その後編としてご提供するものです。これまで見てきた理論的な観点を、私が購入したローコスト LC メータで実際に測って確認してみた、という内容です。

トロイダルコアの考え方とトランスの構成
トロイダルコアで得られる自己インダクタンスを簡単に計算できる A_L 値

実験に使ったトロイダルコア FT-50-43 (詳細は以降に説明します) を図 1 に示します。

トロイダルコアには A_L 値というのがあり、これは「インダクタンス係数」「1 ターンあたりのインダクタンス」「1 平方ターンあたりのインダクタンス」とか呼ばれるようです。この単位は「H/巻数²」で、この A_L 値から自己インダクタンス L を

$$L = A_L \times N^2$$

として求めることができます。ここで N は巻数です。

ここでは図 1 のとおり、アミドン社 (Amidon Associates, Inc.) の FT-50-43 というトロイダルコアを用いていますが、この A_L 値はデータシート上では 440mH/1000 turns (参考文献[1]参照) であり、「1000 回巻き (turns)」で設定されています。形成されるインダクタンス L は巻数の自乗となりますので、

$$L = A_L \times \left(\frac{N_{REAL}}{N_{SPEC}} \right)^2$$

で計算できます。ここで A_L は (さいしよの定義と異なりますが) データシートに規定されている「 N_{SPEC} 回巻いたときの A_L 値」、 N_{REAL} は実際に巻いた数です。

ところで「 N_{REAL} はどう巻いた状態でひと巻きと考えるか?」という FAQ があります。そういう私も昔は「?」だった覚えがあります。この答えはリード線をコアの中を通過させた数になります。図 1 のようにすれば、これが $N_{REAL} = 1$ に相当します。

この「中を通せば 1 回」というのは、なぜか? と感じるかと思えます。これは図 2 のように、高校の物理でやった「右ネジの

法則」のとおりであり、それを考えれば「中を通せば 1 回」の原理もお分かりいただけるかと思います。



図 1. 実験に使用するトロイダルコア FT-50-43 とそれに 1 回巻きしたようす

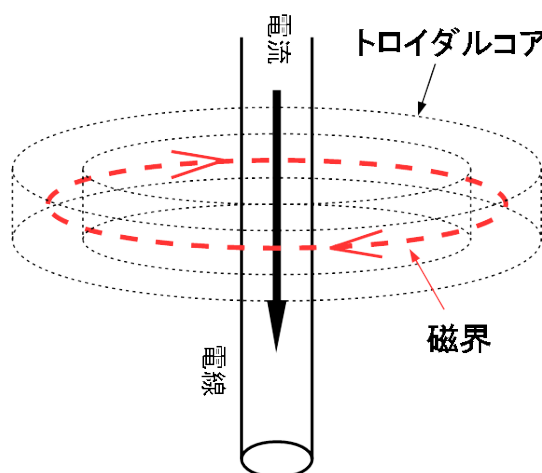


図 2. 「中を通せば 1 回」の原理を「右ネジの法則」から考える

アナログ・デバイス株式会社は、提供する情報が正確で信頼できるものであることを期していますが、その情報の利用に関して、あるいは利用によって生じる第三者の特許やその他の権利の侵害に関して一切の責任を負いません。また、アナログ・デバイス社の特許または特許の権利の使用を明示的または暗示的に許諾するものでもありません。仕様は、予告なく変更される場合があります。本紙記載の商標および登録商標は、それぞれの所有者の財産です。
©2017 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

Rev. 0

ところで、思い起こしてみれば「アミドン」。それはアマチュア無線にはまりきっていた高校生の頃だったのかもしれませんが。当時、CQ ハムラジオ誌だと思いますが、「アミドンのトロイダルコア◎◎を…」という記事があり、「あみどん?」「網井?」などと、一体それはナニモノという状態でしたが、その数年から十数年後に「アミドン社 (Amidon Associates, Inc.)」という「会社名」ということを知ったのでした…。

トロイダルコアで得られる自己インダクタンスを「L/C Meter IIB」で測ってみる

さて、図 3 はトロイダルコアに 10 回巻き（コアの中を通す回数が巻数 N_{REAL} になる）にしたものです。これから自己インダクタンス $L = 44 \mu H$ と計算できます。

なお、トロイダルコアは磁気飽和（BH カーブ）があります。そのため、どんな電流量を流してもこの自己インダクタンス値 L が得られるというものではありませんので、注意が必要です。

それでは FT-50-43 に 10 回巻きしたインダクタの自己インダクタンスを「L/C Meter IIB」で測ってみましょう。このようすを図 4 に示します。37.8 μH で、-14% のずれです。公差についてはアミドン社のホームページには記載が無いようですが、参考資料 [2] によると、このトロイダルコアの A_L 値の公差は $\pm 20\%$ とのこと…。ぼちぼちいい感じというところでしょうか。

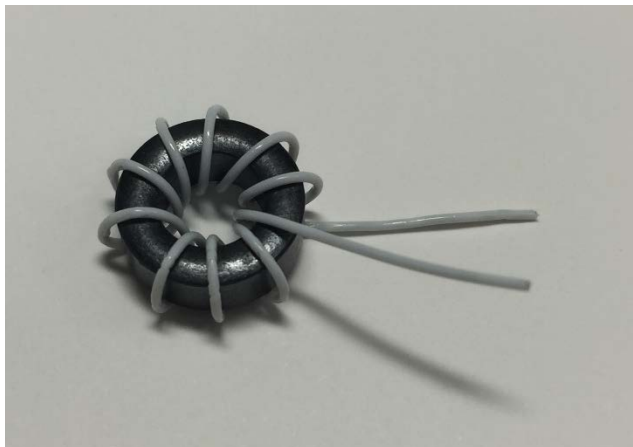


図 3. 実験に使用するトロイダルコア FT-50-43 に 10 回巻きした

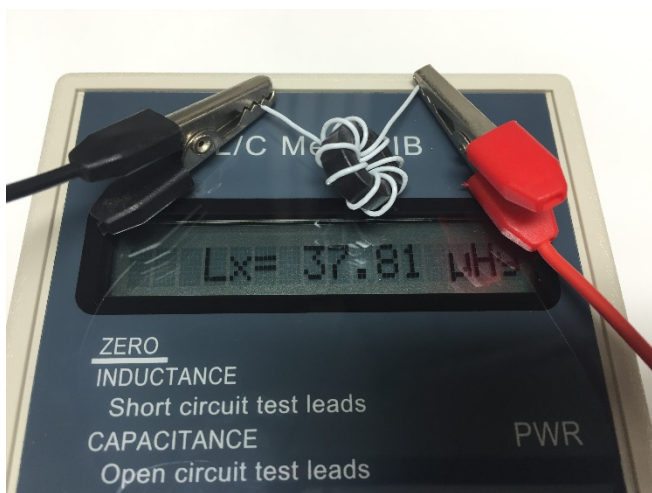


図 4. FT-50-43 に 10 回巻きしたインダクタンスを「L/C Meter IIB」で測ってみた

トロイダルコアに対するリード線の適切な巻き方は「コアに均一になるように巻きつける」ことです。図 3 もそのように巻いてあります。コア一周にわたって均一にリード線を巻きつけることで、リード線から発生した磁束とコアとの結合度が良好になります。

また物理的に動かないように、きつめに巻きつけることも重要でしょう。

トロイダルコアのトランスの巻き方

図 5 はいよいよ本番となりますが、トロイダルコア FT-50-43 に巻いてみたトランスです。これはバイファイラ巻き（Bifilar Winding）と呼ばれる巻き方で、この Bifiler は「2 つの繊維を持った、または使った（Weblio より）」という意味です（というより、だそうです）。このように 2 つの銅線を「十分に、よく擦（よ）って」、密に結合することによって、それぞれの相互インダクタンス（結合係数）を高めるようにします。コアに対して均一に巻きつけることもここでもポイントです。

図 5 を見て、一次側巻線の磁束がほぼすべてトロイダルコアの内部を通り抜け、そのほとんどが二次側巻線と鎖交することで、高い結合係数が得られそうだということは直感的に気がつくと思います。

ところで銅線 3 本で巻くことをトリファイラ巻き（Trifilar Winding）といいます。Trifiler というのは正式な英語には無い、一種の「造語」のようです。しかし Bifiler という単語さえも、オックスフォード現代英英辞典; Oxford Advanced Learner's Dictionary 7th Edition（単語辞書部分で 2010 ページのもの）に載っていないのです…。ラテン語から来ているようですが、銅線 4 本で巻くのであればクワッドファイラ巻き（Quadfiler）、銅線 5 本で巻くのであればクイントファイラ巻き（Quintfiler）というのでしょうかね…（笑）。そういえば「クインテット」は 5 人組のことですよ。

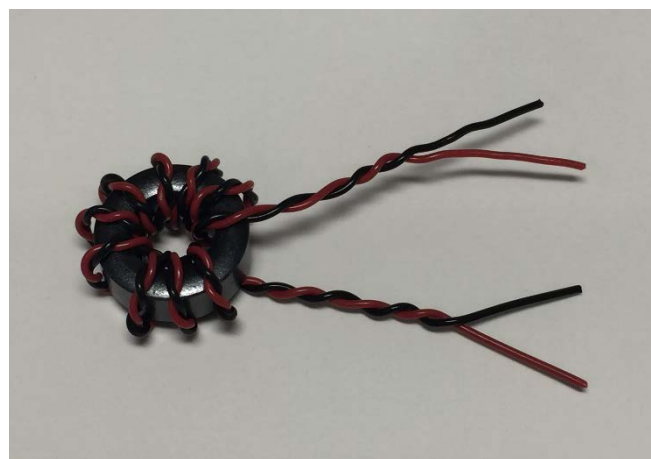


図 5. トロイダルコアにバイファイラ巻き（10 回）したトランス

アナログ電子回路技術ノート

TNJ-030

いよいよ本題！買った「L/C Meter IIB」でトランスの M 結合を測ってみた

それではいよいよ本題（といいつつ、ここまで複数の技術ノートを通して、何ページを消費したのか…）です。

いよいよ実際に測ってみる

ということで（溜息）、図 5 のトランスを実際に測ってみました。測定方法はふたつ前の技術ノート TNJ-028 の図 10（片側の巻き始めと反対側の巻き終わりを接続して、一次・二次を直列接続。本技術ノートに図 6 として再掲）、図 12（両側の巻き終わり同士を接続。同じく本技術ノートに図 7 として再掲）で示した方法です。

図 6 の測定方法による結果を図 8 に示します。150.8 μH と読めます。つづいて図 7 の測定方法による結果を図 9 に示します。0.198 μH と読めます。図 8 と図 9 の結果の差異は大きいです。

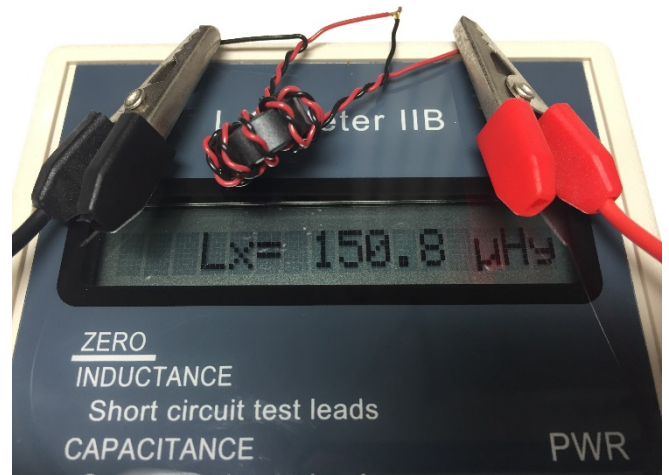


図 8. 図 6 の「その 1」の結線でインダクタンスを測ってみる



図 9. 図 7 の「その 2」の結線でインダクタンスを測ってみる

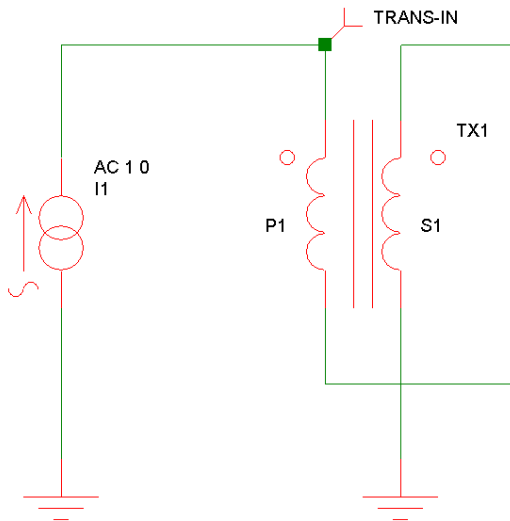


図 6. 相互インダクタンス M を求めるためのシミュレーション用の回路「その 1」（TNJ-028 の図 10 再掲）

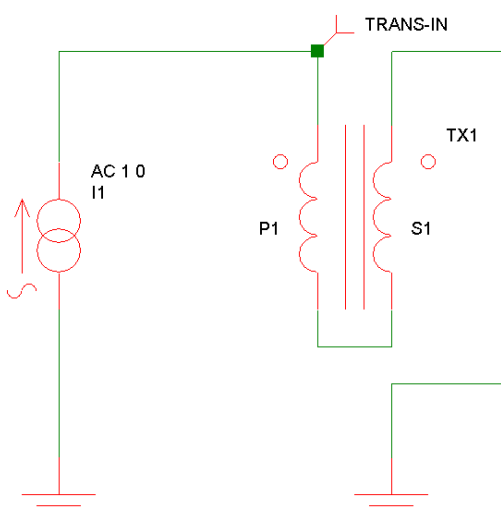


図 7. 相互インダクタンス M を求めるためのシミュレーション用の回路「その 2」（TNJ-028 の図 12 再掲）

結果を解析してみる

ここまで測定した二つの結果、TNJ-028 でいうところの L_{CN1} 、 L_{CN2} は、

$$L_{CN1} = 150.08\mu\text{H}$$

$$L_{CN2} = 0.198\mu\text{H}$$

となりました。これをもとに TNJ-028 での式

$$L_{CN1} - L_{CN2} = 4M = 149.882\mu\text{H}$$

から $M = 37.4705\mu\text{H}$ が得られることとなります。さらに

$$L_{CN1} + L_{CN2} = 4L = 150.278\mu\text{H}$$

から $L = 37.5695\mu\text{H}$ が得られることとなります。この L の大きさと、図 3、図 4 で得られた自己インダクタンス 37.8 μH とはかなり近い値だということも分かります。

結合係数 k は、 $L_1 = L_2 = L = 37.5695\mu\text{H}$ だとすると、

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$$

から $k = 0.9974$ というこたえも得られ、高い結合係数をもつトランスになっていることも分かります。

アナログ電子回路技術ノート

TNJ-030

インピーダンス測定といえば AD5933 が…！

ここまで「L/C Meter IIB」というローコスト LC メータを用いて容量計測の実験をしてきましたが、アナログ・デバイスでも意外な製品があります。それも「インピーダンス・コンバータ」というもので、インピーダンスをデジタル値に変換（コンバート）してくれるのです！

AD5933: 12 ビット、インピーダンス・コンバータ、1MSPS、ネットワーク・アナライザ

【概要】

AD5933 は、高精度インピーダンス・コンバータのシステム・ソリューションで、周波数発生器と 1MSPS の 12 ビット A/D コンバータ (ADC) を内蔵しています。周波数発生器では、既知の周波数で外部の複素インピーダンスを励起することができます。インピーダンスからの応答信号は内蔵の ADC でサンプリングされ、内蔵の DSP エンジンで離散フーリエ変換 (DFT) が行われます。DFT アルゴリズムは、各出力周波数で実数 (R) と虚数 (I) のデータワードを返します

測定方法は「L/C Meter IIB」とはだいぶ異なる

AD5933 の測定方法はここまで見てきた「L/C Meter IIB」とはだいぶ異なります。データシートをご覧くださいと詳細もご確認いただけますが、基本的には以下の手順で行います。

- ① **DDS** (ダイレクト・デジタル・シンセサイザ) で測定励起周波数を発生させる
- ② DUT にその信号を電圧として加える
- ③ DUT から流れ出る電流量を IV 変換し、電圧値として AD 変換する
- ④ AD 変換した値を、離散フーリエ変換を用いて、当該測定周波数でのインピーダンス値をその実数部 (Real Part)、虚数部 (Imaginary Part) として得る

このようなかたちで **AD5933** ではインピーダンス測定を行いますので、L/C Meter IIB の実験で説明したような、抵抗成分が含まれることでの精度誤差などが生じません。この抵抗成分 (純抵抗) も含め、インピーダンス値として答えが得られるからです。これにより安定した測定が可能なシステムが実現できます。

また **L/C Meter IIB** は原理的に共振を利用しており、単一の周波数での測定しかできません。これまでの式から分かるように、被測定インダクタンスに付加容量がつくことにより (もしくは被測定容量に付加直列インダクタンスがつくことにより)、正確には測定できないわけなのです…。

これは単一周波数で測定する測定方法、もしくは **AD5933** で、単一周波数で測定する場合も同じなのですが、**AD5933** で励起周波数を変えて、インピーダンスの変化を測定していくと、これらの付加容量/付加インダクタンスも見つけることができるわけです。この考え方は市販のネットワーク・アナライザも同じです。

そういえば「アナログ技術セミナー2013」でも AD5933 を使っていた

この **AD5933** は「アナログ技術セミナー2013」でも、「産業用計測技術 (複素インピーダンス計測・重量計測)」というセッションで私をご紹介したものであります。

図 10 にそのときのスライドの一部をご紹介して、この技術ノートを終わりにしたいと思います。

インピーダンス計測ソリューション AD5933/AD5934

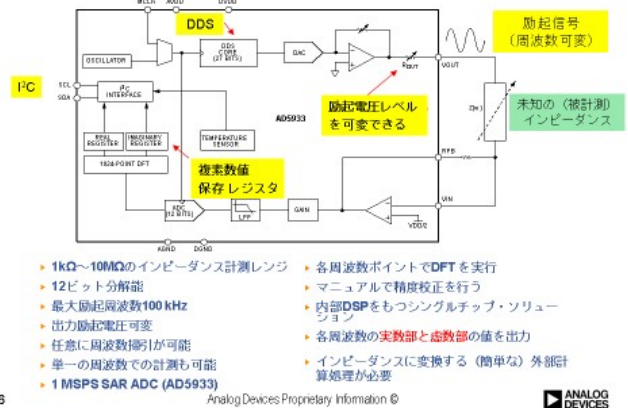


図 10. 2013 年アナログ技術セミナーでおこなった「インピーダンス計測」セッションのスライド。AD5933 を題材にしている

参考文献

- [1] Amidon Tech Data, Ferrite Material, Ferrite Toroidal Cores, 2-08 Physical Dimensions and AL Tables
- [2] Specs for FT50-43 RF Toroids