

トランスの M 結合とはナニモノでどのように測るか

(中編：M 結合を測るためローコスト LC メータを買ってしくみを考えてみた)

著者：石井 聡

はじめに

ひとつまえの技術ノート [TNJ-028](#) (前編) では、トランスの M 結合の測定方法について、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。

この技術ノートはその中編としてご提供するものです。これまでみ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みるための予備実験、という内容です。またその LC メータの購入の顛末、そしてそこで実現されている測定の原理や、関連情報のご紹介もしていきたいと思います。

ローコスト LC メータが目にとまった

トランスの M 結合に関する理論的検討をおこなっていた前後で、とあるトレーニング用に US 資料 (パワーポイント) の翻訳を始めました。その資料中でフィルタの設計ツールの紹介のところに、「AADE」と見慣れない用語がありました。「これはなんだあ？」と思い、サーチしてみると、「Almost All Digital Electronics」

<http://www.aade.com> (以下の理由によりリンク切れです)

という、とあるアメリカの小さな会社のことでした。「Almost All Digital Electronics」…。会社名 (Almost) が泣かせます。ここでフリーのフィルタ設計ツールを用意しているらしいことが US 資料の記載から想像できました。早速そのサイトの中を見てみると、たしかに「AADE Filter Design」というツールが。このツールは、パッシブ LC フィルタの設計 (合成) ができるものです。パッシブ LC フィルタは計算が難しいため、「これは重宝できそうだな」と思わせるものでもありました。

当時、容量、自己/相互インダクタンス測定のマイブームの私としては、eBay で出物のあった HP 4277A (かなり大型の LCR メータ。前職のときにも、棚に鎮座していた) を落札しなかったことに結構後悔しておりまして (笑)、何かないものか？といろいろ探していました。国内でも安価な LC メータが出ていますが、精度的にどうかと思い、そちらは購入をためらっていました。が…、フリーのフィルタ設計ツールを提供する AADE のトップページに「L/C Meter IIB Inductance/Capacitance Meter」とあるではないですか！本当に偶然ですが、AADE でローコストな LC メータを発売していたのです。

<http://www.aade.com/lcmeter.htm> (以下の理由によりリンク切れです)

完成品\$120 + \$12 (SHIPPING 費用) です。面白そうなので買ってしまいました (汗) !

なおキットなら\$99 です。趣味でも購入できるレベルですね。キットで電子工作を楽しんでもいいのですが、キットを作る時間を取るならやるべきこともあり、\$21 差なら、完成品を購入してしまうか！と思ったのでした (汗) 。

なんと！「Neil Heckt passed away on August 19, 2015.」

TNJ-028, TNJ-029, TNJ-030 を執筆する前後で、あらためて AADE のサイトを見て詳細を確認しておこうと思いました。しかし「AADE」とか、「Almost All Digital Electronics」、「AADE Filter Design」、「AADE LC Meter」などでサーチしてみても、同社のページがヒットしません。

「なぜだろう？」と思ってさらに見てみると、

<http://forums.qrz.com/index.php?threads/almost-all-digital-electronics-neil-heckt-passing-reported.491901/>

に「Neil Heckt passed away on August 19, 2015.」とあります…。passed away は「逝去」。このようなときに「死ぬ」= died をあまり使わないのは、国が変わっても人間の本质としては同じなのだなと思うわけです。またこの情報源の QRZ.com は、アメリカのアマチュア無線の交流サイトであり、AADE (Neil Heckt 氏) がアマチュア無線家の間でいかに評価が高かったかも分かるものです。

オーナーが亡くなったために AADE のサイトがクローズしてしまったわけですから…。

なめてはいけない！「L/C Meter IIB」

「精度もそこそこか？」と思って、さきに示したリンクの同社の説明を (購入当時の話ですが) 見て行くと、「error analysis against standard inductor / capacitor sets.」とあって、驚くことにこのコストで良好な (1%程度) の精度が出るようです。このページには製品のレビューも掲載されていました。



図 1. 自宅に到着した L/C Meter IIB の梱包

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

アナログ・デバイス株式会社

本 社 / 〒105-6891 東京都港区海岸 1-16-1 ニューピア竹芝サウスタワービル
電話 03 (5402) 8200
大阪営業所 / 〒532-0003 大阪府大阪市淀川区宮原 3-5-36 新大阪トラストタワー
電話 06 (6350) 6868

アナログ電子回路技術ノート

TNJ-029

さらに以下の（オーストラリアのアマチュア無線家の）ページでは、測定原理についても詳しく説明されています。

<http://my.integritynet.com.au/purdic/lc-meter-project.htm>

精度良い 1020pF のコンデンサを基準リアクタンスとするようですね。あとは XTAL の発振精度でしょうから、それは数 10ppm 程度の精度が得られますから、このコンデンサをより高精度にすればよいのでしょうか…。

購入したものが到着した

ということで、PayPal で決済して完成品の方をオーダーしてしまいました！以降、本人からのメールも一切なく、1 週間くらいして「いつ発送するの？」とメールしたら「注文当日に発送した。日本まで 2 週間くらいだろう」とのこと。「これではまるで蕎麦屋の出前みたいだな」と思ったしだいです（笑）…。

それでも 2 週間かからず現品到着（図 1）。Tariff Code（関税番号）8525 20 04 Accessories for Amateur Radio Hobby use となっており、「趣味用途のアマチュア無線関連機材」という扱いなようです。なお私の個人情報削除させていただいております（笑①）。

開けてみると、さすがアメリカからの発送ということで、図 2 のように梱包材として英字新聞が！（笑 ②）。小学生のころの図画工作の時間に「一番大事なものは、絵の中で一番大きく描きなさい」と先生が言っていてまして…、それを思い出して 1 段組で大きい画像にしました（笑 ③）

電源が 9V 電池の 006P なのですが、それだと使いたいときに電池が切れている可能性もあるので、早速ばらして、外部から安定化電源で供給できるようにケーブリングしました（笑）。中のようすは図 3 のとおり、こんな感じです。見たところ、驚くほど簡単な作りです…。

図 4 のように、47nF の 1% 精度のコンデンサ（こんなものも買っている^^;）を測定してみました。公称値 47nF と比較して 0.5% 程度という差ししかありません。絶対精度ははっきり判りませんが（また pF あたりはケーブルなどの浮遊誤差も出てきますが）、簡単な作りのわりにはだいぶよさそうです。

これでインダクタンスも測れるので、結構便利につかえそうです。



図 2. 梱包から取り出した L/C Meter IIB。緩衝材には英字新聞が（それも iPod の広告が）！

アナログ電子回路技術ノート

TNJ-029

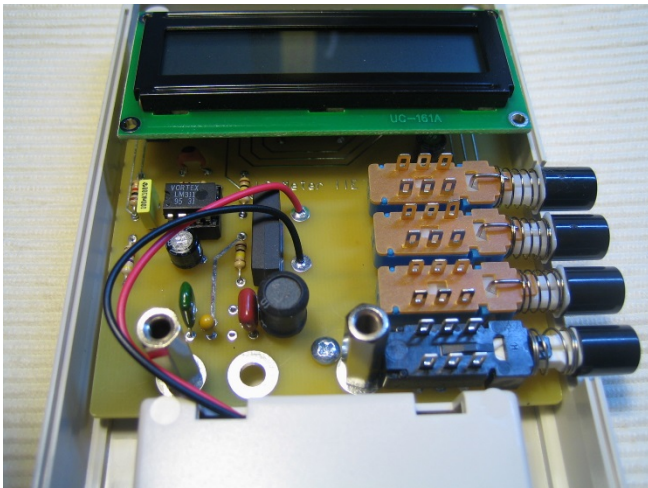


図 3. L/C Meter IIB のケースをあけてみた。
とても簡単な構造になっている



図 4. 47nF の 1%精度のコンデンサを測定してみた

日本のアマチュア無線家も参加している

日本語で、日本のアマチュア無線家がこの LC メータを紹介するページもあります。

<http://www5a.biglobe.ne.jp/~jh2clv/lcmeter2b.htm>

TNX JH2CLV

また日本語マニュアルもありますね。

<http://www.jtw.zaq.ne.jp/cfaax409/LCIIBinstruction.html>

TNX JA3KEV

それぞれご参考になれば幸いです。

コアは「フランクリン発振回路」と呼ばれるものが用いられている

この「L/C Meter IIB」についてあるところで紹介したところ、「これはフランクリン発振回路とコンパレータを使っているものですね」というコメントをいただきました。

私は「フランクリン発振回路」という名前は聞いたことがなかったのですが、Google でサーチしてみますと「なるほど、この回路のことね」と分かりました。

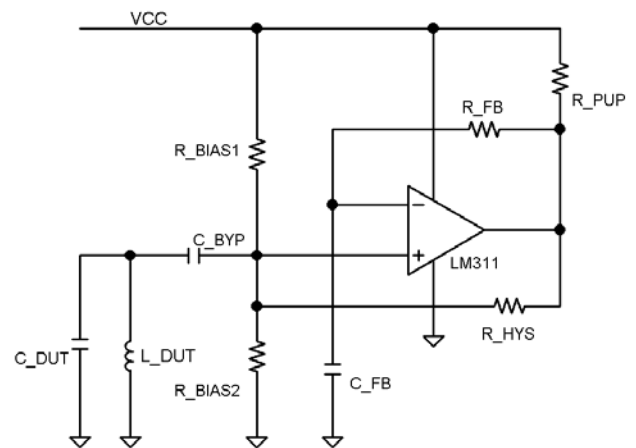


図 5. LC メータで用いられているフランクリン発振回路の原理的な回路構成

詳細は精査していませんが、LC メータで用いられているフランクリン発振回路 (Franklin Oscillator) は、図 5 のような原理的な回路構成になっています。コンパレータ LM311 が発振回路のゲイン部分となっており、この周波数特性と、コンパレータとしてのリミッティング動作で発振を維持できます (発振の利得条件)。R_FB と C_FB で負帰還をかける構成となっており、LM311 の周波数特性を逆方向に補正するようにしているところなど、簡単ですが結構興味深い回路とも思われます。

またコンパレータで位相ゼロの入出力を構成し (発振の位相条件)、それを共振回路 (この LC メータにおいては被測定物; DUT, Device Under Test) に加えると、並列共振であることによりその共振回路の共振周波数で端子の電圧が最大化 (発振の利得条件) します。

この共振周波数の前後で位相が大きく変化しますが、共振周波数では位相がゼロの純抵抗成分のみとなり (発振の位相条件)、これで発振の利得条件と位相条件がめでたく成立し、この共振周波数で発振を継続します。

とはいえ、コンパレータ LM311 の入出力がゼロ位相になっているとは (とくに高い周波数においてはその周波数特性ゆえに) 考えづらく、また R_FB と C_FB で遅れも生じるので、それらは測定の誤差要因になっているはずだと、精度劣化要因だと考えることができます。

この回路のいちばんの特徴は、「共振回路部分 (DUT) の片側をグラウンドに落とせる」というところだと考えます。こうすることで安定した測定系を構成することができるといえるでしょう。

原典はアナログ発振回路の構成だった

さらにサーチしてみると、アナログの発振回路の構成も見つかりました (英語サイト)。

<http://www.zl2pd.com/HFRFgen.html>

このサイトから、アナログ発振回路としてのフランクリン発振回路は、図 6 のような構成になっていることが分かりました。そこには「たぶん、コルピッツやハートレーと比較しても、あまり知られていないと思われる」という記述もあります…。

アナログ電子回路技術ノート

TNJ-029

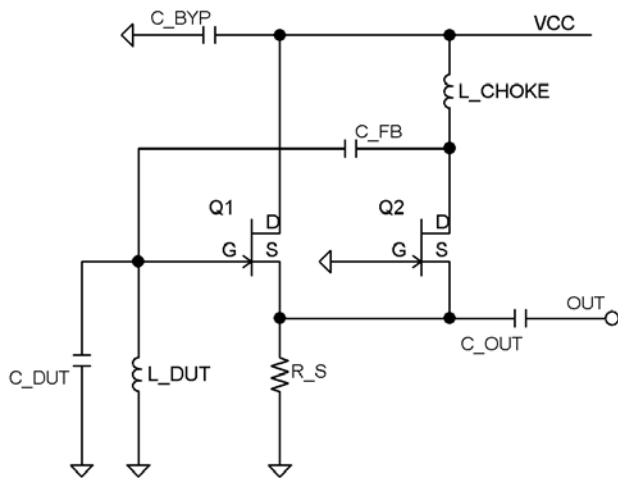


図 6. より原典に近いアナログのフランクリン発振回路

さらに原典を探していくと「短波帯で安定度の良い発振器として初期のものがフランクリン発振回路で、1920 年ごろに開発された」とあり、真空管が用いられた回路として、以下のようなサイトを見ることもできます（英語サイト）。真空管の構成ではありませんが、図 6 の回路構成とほぼ同じと考えることができます。

<http://www.robkalmeijer.nl/techniek/electronica/radiotechniek/habladen/radcom/1994/11/page60/index.html>

この図 6 の「原典に近いアナログ発振回路構成」は、二つの FET から増幅素子が構成されています。Q1 のゲートに共振回路（LC メータでは DUT となるもの）が接続されていますが、ここは Q1 がソースフォロア的に動作するため、ゲートの入力インピーダンスを高く維持できます。これはコンパレータ LM311 で構成された LC メータ用の回路と同じイメージとして考えることができます。

Q1 のソース出力は、ゲート接地構成である Q2 のソースに接続されています。Q1 のソースからは低インピーダンスで電流 I_{Q1D} が Q2 に対して供給され、この I_{Q1D} （Q2 のソース電流）がそのまま Q2 のドレインに流れます。

Q2 のドレインはインピーダンスが高く、かつ L_CHOKE で発生するリアクタンスが大きいため、先の Q2 のソース電流 I_{Q1D} により、 L_CHOKE で大きな電圧降下が生じ、Q1 と Q2 で電圧増幅回路が構成されます。 C_FB は結合用コンデンサで、小容量で構成するものですが、Q2 のドレインと L_CHOKE のインピーダンスが高いので、小容量でも問題なく、これら全体で高いインピーダンスで共振回路を駆動することができます。

Q1 と Q2 で非反転アンプの構成となり、共振回路（LC メータでは DUT となるもの）の部分は、先に説明した LC メータでの共振回路の説明（動作）と同じかたちになります。

測定原理と精度維持のしくみを式から考えてみる

さきのオーストラリアのアマチュア無線家のページからしくみを学びつつ、うごきを式で考えてみます。なお、さきに示した LM311 の入出力特性については、理想素子として動作すると仮定し、誤差要因には組み込んでいません。

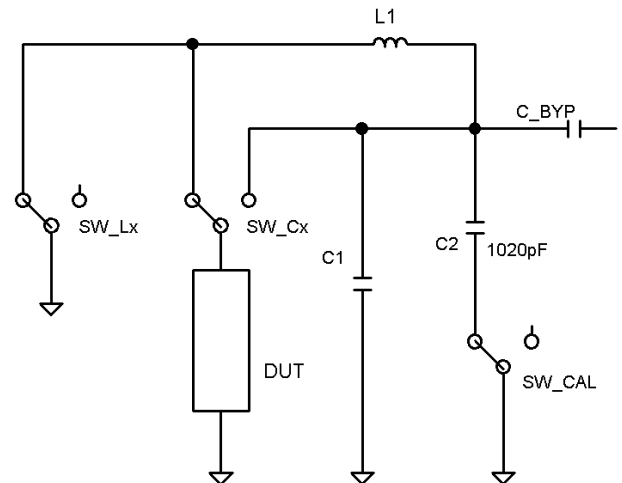


図 7. 図 5 の共振回路部分のみを実際の LC メータの構成にあわせて取り出して部品番号を振りなおして記載してみた

式を追っていくと、この測定原理と精度維持方法は、別にフランクリン発振回路でなくとも、共振周波数を求める他の方式でも同じだということにも気がつきます。

図 7 は、図 5 の共振回路部分のみを実際の LC メータの構成にあわせて取り出し、部品番号を振りなおしたものです。基準となる共振回路は C_1, L_1 となりますが、これらの素子の正確な値は初期状態では分かりません（未知となります）。

校正のしくみを式から考えてみる

そこでまず校正動作として、この未知の C_1, L_1 を求めます。スイッチ SW_CAL を右側に投入して、基準容量 1020pF は回路から遮断し、ここでの発振周波数 f_1 を記録します。 f_1 は

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}}$$

で決まります。つづいてスイッチ SW_CAL を左側に投入し、基準容量 1020pF を回路に接続し、ここでの発振周波数 f_2 を記録します。 f_2 は

$$f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 (C_1 + 1020\text{pF})}}$$

となり、周波数 f_1, f_2 が求まることから、まず C_1 については

$$C_1 = \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \times 1020\text{pF}$$

と得られます。周波数 f_1, f_2 は XTAL で測りますが、XTAL の周波数精度は十分ですから、たしかに 1020pF のコンデンサが支配的誤差要因です。また L_1 についても同じく、

$$L_1 = \frac{1}{4\pi^2 f_1^2 C_1}$$

となり、周波数 f_1 と支配的誤差要因である 1020pF で測定結果の精度が決まり、未知の大きさの C_1, L_1 を精度高く、正しく得ることができます。

アナログ電子回路技術ノート

TNJ-029

未知のインダクタンス測定のしくみを式から考えてみる

つづいて測定対象 (DUT) となる未知のインダクタンス L_{DUT} を測定することを考えてみます。図 7 のスイッチ SW_CAL を右側に投入して 1020pF を回路から遮断し、SW_Lx は右側、SW_Cx は左側として、未知のインダクタンス L_{DUT} を DUT のところに接続します。こうする L_{DUT} と L_1 とが直列に接続され、このときの発振周波数 f_3 は

$$f_3 = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_1 + L_{DUT})C_1}}$$

となり、 L_{DUT} を

$$L_{DUT} = \left(\frac{f_1}{f_3}\right)^2 L_1$$

として得ることができます。

未知の容量測定のしくみを式から考えてみる

未知の容量 C_{DUT} についても、図 7 のスイッチ SW_CAL を右側に投入して 1020pF を回路から遮断し、SW_Lx は左側 (ショート)、SW_Cx は右側として、未知の容量 C_{DUT} を DUT のところに接続します。こうする C_{DUT} と C_1 とが並列に接続され

$$C_{DUT} = \left(\frac{f_1}{f_3}\right)^2 C_1$$

として C_{DUT} を得ることができます。

なるほどこのしくみなら簡単な構成でも高い精度が維持できる

これらから分かることは、XTAL の周波数精度と 1020pF のコンデンサの精度が誤差要因であり、(XTAL は高精度なので) 1020pF のコンデンサが支配的誤差要因になるということです。

周波数源にルビジウム発振器を使って、ここでは 1020pF だった基準容量を「校正用円筒容量基準器」なるもの (どこに書いてあったか見つけれず…。切削精度をきちんと取れば、かなりの精度が出るそうで) で適切な容量として自作すれば、ppm オーダ精度の測定器もこれでできそうですね！ (なんて、無用の長物発言…。系全体から、また DUT からすれば、純粋なりアクタンス成分だけでもあるまいに…)

「L/C Meter IIB」で抵抗成分込みの容量値を測定し、測定誤差の発生するようすもみてみる

LC による共振構成の LC メータですから、DUT に抵抗成分が入ると共振周波数が変わるはずで、共振周波数が変われば測定値である容量値も変わることになります。

並列 LC の片側に抵抗成分があると共振周波数が若干変化するしくみで確認してみましょう。ここまで DUT として用いた 47nF に、直列に抵抗を挿入して測定値がどのように変化するかをみてみました。

10Ω を直列に挿入しない状態の発振波形と測定容量値を確認してみる

容量値の変化のようすを観測するまえに、「どのくらいの周波数で発振しているの？」ということが気になったので、まず波形を確認してみました。回路図も良く確認しないままなので、アンパイ (注：麻雀用語…) を取り、図 8 のように、差動プローブで測定してみました。

それにしても作業台もだいぶ年季が入ってきました！ (笑)

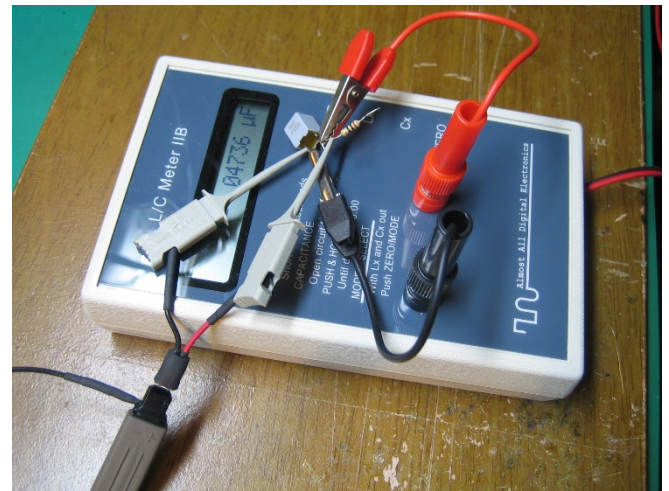


図 8. 発振波形を確認するために差動プローブを接続して測定してみた

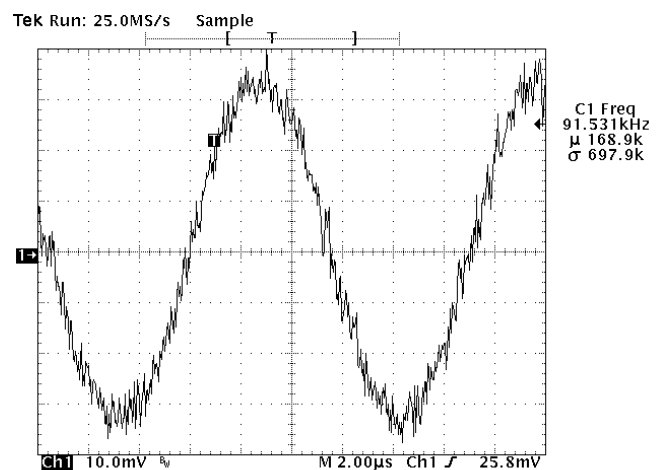


図 9. 図 8 のように接続して観測した発振波形



図 10. 差動プローブをはずして DUT の容量値を読んでみる。
47.4nF となっている

アナログ電子回路技術ノート

TNJ-029

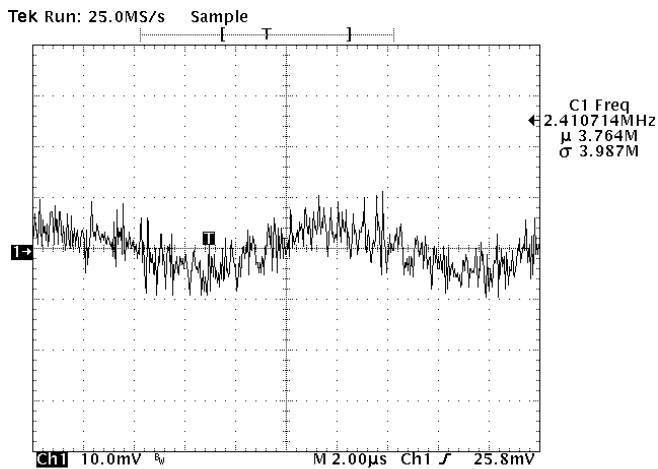


図 11. DUT の 47nF に 10Ω の抵抗を直列に接続した状態で観測した発振波形

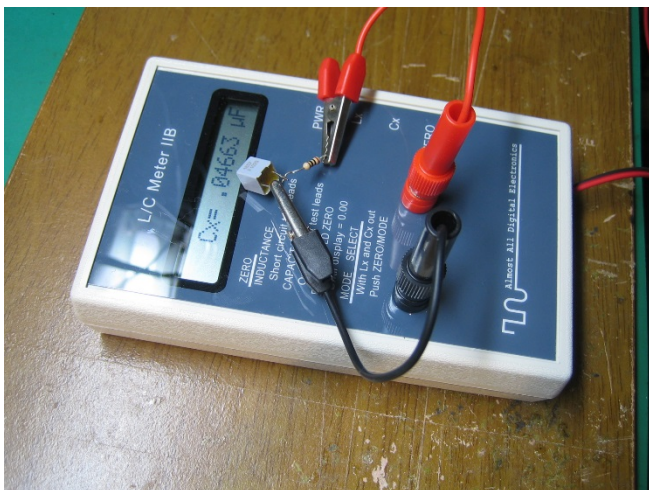


図 12. こんどは 10Ω を直列に挿入して DUT の値を読んでみる。
46.63nF と若干変化している

図 8 では直列に接続した抵抗が見えますが、これが以降で比較実験する直列挿入抵抗 10Ω です。しかしここでは、その抵抗は経由させずに、LC メータと差動プローブを接続してあります。

測定した波形が図 9 です。90kHz くらいで発振しているようです。なお 47nF @ 90kHz = 37Ω と計算できます。

つづいて DUT の容量を測定するために、差動プローブを一旦はずして数値を読んでみます。図 10 がそのようですが、リードアウトとして 47.4nF になっています。1%以下で公称値と測定値が合っていますね…。

10Ω を直列に挿入して発振波形と測定容量値を確認してみる

こんどは 10Ω を入れて測定してみます。あらためて差動プローブを接続して波形を測定してみました。このようすを図 11 に示します。オシロの周波数リードアウトは全然合っていないよう(変動している高周波の部分で周波数カウント、つまり誤カウントしているようす)ですが、横軸の掃引 div は同じなので発振周波数はそれほど変わっていないようです。でもレベルが弱いしノイズっぽいぞ…。

次に差動プローブをはずして、数値を読んでみます(図 12)。表示される容量値が変化しています。たしかにこれは理論どおり(測定原理のしくみのとおり)で、直列に挿入された抵抗分で共振周波数が変化することによって、答えに誤差が出るというわけなのですね。

中編のまとめ

この技術ノートでは、購入したローコスト LC メータで容量を測ってみたいようすや、その測定原理などをご紹介しました。また並列共振回路に直列抵抗が挿入されると共振周波数がずれ、それにより LC メータでの測定周波数も変化し、容量測定値に誤差が生じるようすも実験してみました。それこそ理論どおりになっているわけでした。

次の技術ノート TNJ-030 では、三部作の最後として、前編で説明した相互インダクタンスを、実際にこの LC メータで測定して求めてみる、という話題をご提供していきます。是非ご覧いただければと思います。

※

ところで以降、「伝送線路で構成されたインダクタンス」なるものをこの LC メータで測定していましたが、これが測定値が安定しないで参りました…。基本的にも、容量よりインダクタンスの測定のほうが難しいですが、伝送線路ですので容量成分も内在しており、これが原因のようなのですが…。