

起動しないパソコンから故障した電解コンデンサを取り出して電氣的に解剖してみる

著者: 石井 聡

はじめに

某年1月2日、お正月の寒い朝、私個人のPC (Personal Computer) の電源を入れたら起動しません。「昨日も遅くまで使っていたのに」。ほうっっておいて5分後くらいに電源再投入したら、なんとか起動。「ありゃ、これはいいよ…。」そうなのでした、PCの電解コンデンサの故障なのでした。ネットで調べると、この故障はよくあり、(詳しい人は)電解コンデンサを交換しているようです。

予備で同じPCを準備してあり、HDD (Hard Disk Drive) を入れ替えて事なきをえました。しかし私も「電気屋のはしくれ」。自分で修理を試みようと思いましたが、また無駄な時間を消費してしまうことになるわけでした。

修理しても、もう一回起動不良が起きたら、諦めて買い直すしかないのかもしれない。みなさんも重要なデータのバックアップはお忘れなく!

さっそく PC のコンデンサを交換してみよう!

ということで、このPCのコンデンサを交換してみます。しかし数が40個くらいあり、先行きがどうなるかと不安がよぎります。参考用として、ヤフオクで同じMB (Mother Board) を探し出しました。落札したものは、他の臓物は摘出され、ケースとMBのみで2500円のジャンク品です。

図1は、並んだ6.3V 1500 μ Fの8個の電解コンデンサが底抜けしたようすです。図2は、同じPCの別のところのようすです。上側が盛り上がっています。下も抜けています。図3は、MB上に載っていたアナログ・デバイセズのIntegrated SoundMAX CODEC AD1981Bでした!

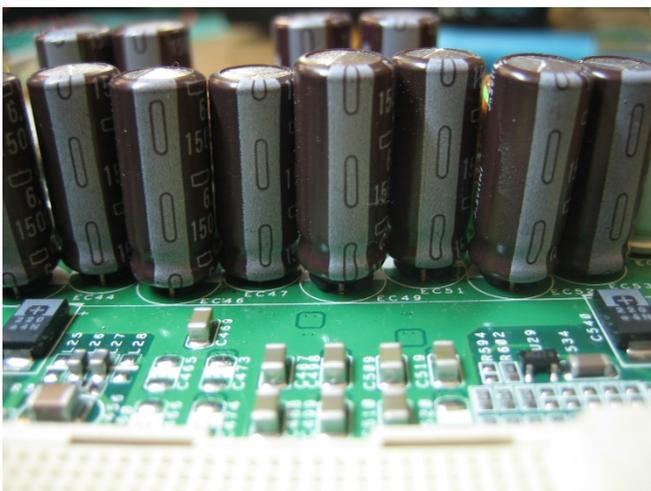


図1. 6.3V 1500 μ Fの8個の電解コンデンサが底抜けしている



図2. 同じPCの別のところ。上側が盛り上がっており、底も抜けている

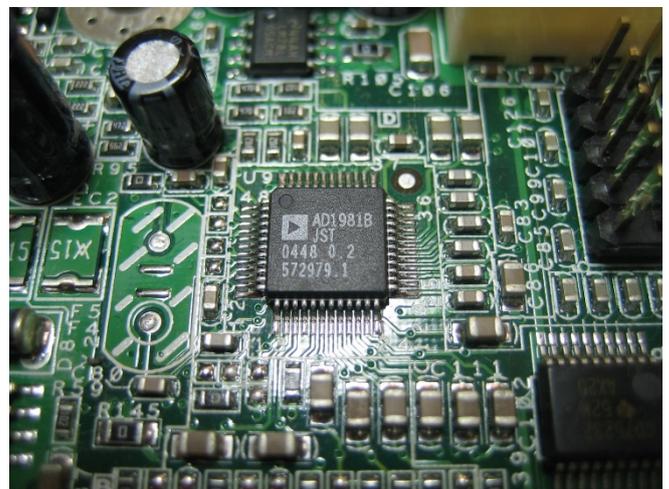


図3. 載っていたアナログ・デバイセズのAD1981B

コンデンサの取り外しは意外と大変

コンデンサの取り外しは意外と大変です。MBは多層基板が使われているため、常温では内層に熱が逃げてしまうので、半田ごてだけだと難しいと思います。ホットプレートで150 $^{\circ}$ Cくらいにして、まずは時間をかけて基板(内層)を加熱し、それから半田ごて2本で取り外す必要があります。助手に裏側から引っ張ってもらう必要もあります。

なんとか数個無事にはずせました。ネットで調べると、

<http://www.noseseiki.com/drhanda/condensa.html>

アナログ・デバイセズ株式会社は、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・デバイセズ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

アナログ電子回路技術ノート

TNJ-026

ここで超良心的な価格でコンデンサの交換をやってくれているのを見つけました。この会社、電子業界でも有名なところですよ。

ご存知な方もいらっしゃる…

この図 1、2 の写真を見た方から「これは 2001 年頃から大騒ぎになった台湾製 PC だと思います」というコメントをいただきました。また「色からすると日本製の電解コンデンサのようですね」というするどいご指摘でした。おっしゃるとおりで…。そういう私は外国製のコンデンサとばかり思っており、このコメントをもとに再確認したところ、国産メーカーの「マーク」を見つけられました。

PC だと、コンデンサは結構パンクするものが多いようです。Wikipedia を見ても「不良電解コンデンサ問題」というページもあります。一方でそのページにも書かれていますが、日本メーカーはこれらの問題を克服し、近年は性能向上しているということのようです。

なお私の PC 自体は日本のメーカーのもので、2003 年発売開始で、私は中古で 2007 年に入手しました。設計・製造が台湾なのかは分かりません。

コンデンサの取り外しには助手が必要

都合、3 台の PC を修理することとなりました（汗）。

- ① 1 月 2 日に故障した PC
- ② ヤフオクで落札した他の臓物は抽出された PC
- ③ 予備で準備してあった同型式の PC

③は通常使用に必要ですので、とりあえずそのまま運用を継続させておりました。

春の三連休に、故障した①の 1 台とヤフオクでゲットした②の 1 台、つまり 2 枚の MB のコンデンサを「天の声（家庭の運行が鶴の一声で決まってしまうという意味。笑）」に助手をやってもらい、殆ど終わりにしました。

最初は息が合わなかったり、慣れなかったりで、うまく取り外せませんでした。慣れてくると面白いように取り外せます。「どう、おもしろくなってきた？」の質問に「全然…」 ^_^;

取り外したコンデンサや基板のようすを眺めてみる

図 4 は取り外したコンデンサです。図 5 は PCB（Print Circuit Board）上のようすですが、ミニタワーのため MB（PCB）は縦付けです。図 5 のようにプロセッサの上に問題の電源回路があり、プロセッサの熱が上側に上がってきて、この電源回路（コンデンサ）が周囲温度から上昇してしまうという残念な構造です。

アナログ回路でもそうですが、過大な熱が加わらないように、電子回路はレイアウト設計する必要がありますね（高精度回路などが特に）。

MB 上のコンデンサは、高容量、低耐圧、おかしそうという OR を取って 1 枚あたり 33 個交換しました。都合 3 台分を交換する必要があるため [またハイスペックな超 Low ESR（Equivalent Series Resistance）コンデンサを購入したので]、発注金額はなんだかんだで 1 万円近くになってしまいました。まあコンデンサだけではなかったのですが。



図 4. 取り外した底抜けした電解コンデンサ

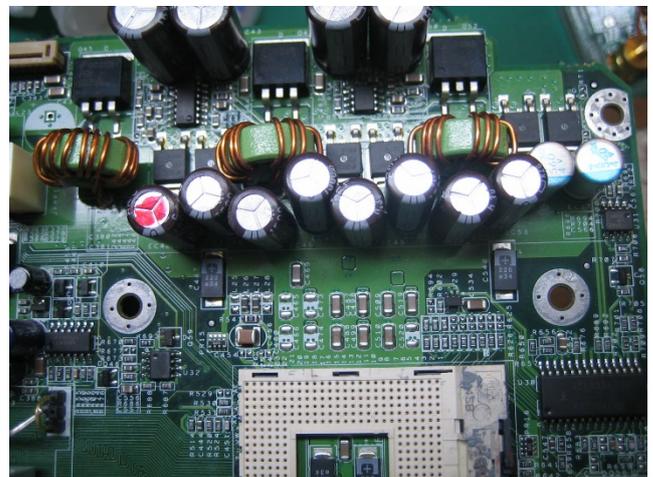


図 5. プロセッサの上にコンデンサがあり、熱でコンデンサの温度が周囲温度から上昇してしまう

取り外したコンデンサを解剖してみる

ということで三連休も終わりとなりました。PC オタクの記事ならこれで「めでたしめでたし」で終わりですが、私も「電気屋のはしくれ」。はしくれらしい活動を次にしてみたいと思います。

容量抜けを時定数で測定してみる

さて、パンクしたコンデンサの特性を測定してみました。10V の電源をステップ源として、1500 μ F 6.3V の当該コンデンサと 1k Ω の抵抗をつかって、63%（つまり 6.3V）まで上昇する時間（時定数）で容量抜けを確認してみます。

図 6 がオシロでの応答波形ですが、なんと 10V を加えても、ピーク電圧が 4.28V までしかいきません。1k Ω の抵抗に流れる電流を計算してみると、

$$\frac{10V - 4.28V}{1k\Omega} = 5.72mA$$

となり、5mA 以上のリークがあるようです。

また 4.28V の 63% は 2.7V であり、その電圧までの上昇時間は 272ms。つまり 272 μ F 相当の容量に、リークが 5mA 以上という特性になっています。

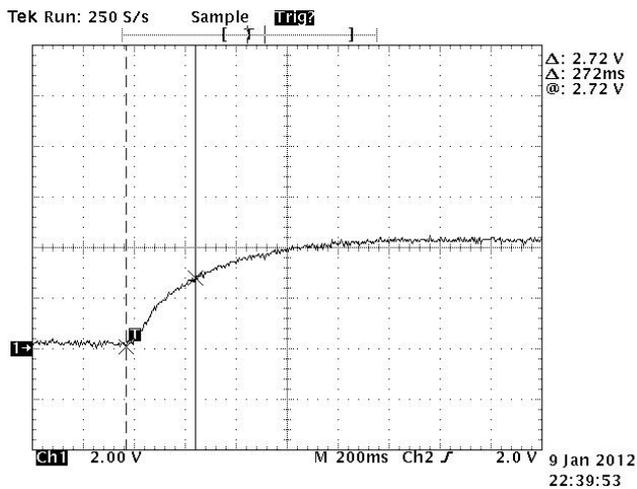


図 6. パンクしたコンデンサの時定数特性を測定してみた。
10V まで変化するはずが 4.28V までしかいかない



図 7. ネットワーク・アナライザの 50Ω 入出力に
並列にコンデンサを接続して測定してみた

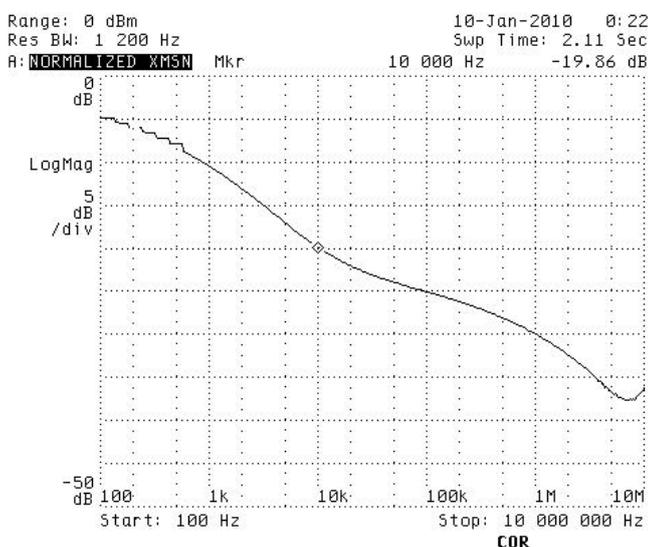


図 8. パンクしたコンデンサの周波数特性を
ネットワーク・アナライザで測定してみた

周波数特性も測定してみる

周波数特性も測定してみました。ネットワーク・アナライザの 50Ω 出入口のバスに並列にコンデンサを図 7 のように接続します。容量が大きいので、インダクタンスも小さくする必要もあると思います、こんなふうにしてみました。DC バイアスはなしです。

測定結果を図 8 に示します。REF LEVEL が一番上で 0dB、5dB/div です。やはりなんだか変な感じです。

注文してあるハイスペックな超 Low ESR コンデンサが入手できたら、同じように周波数特性も測定してみたいと思います。しかし余計な仕事を作ってしまったなど改めて思いました…。いや、これはこれでシュミのうちでしょうか？(笑)

ハイスペックな超 Low ESR が届いた

図 6 のテストではステップ電圧の 10V を入れてみましたが、あらためて考えてみると耐圧 6.3V でしたね。今更気がつきました。まあ 1kΩ でダンブさせているので、もし新品でも(ましてや短時間のテストだし)劣化は大丈夫ではないのかな、とか思いました。

さて某月某日に、千石電商に web 注文してあった超 Low ESR コンデンサが多数到着しました。そのうちの 1 種類の写真を撮影してみました(図 9)。金色+黒色ケースなのでなんかよさそうな感じです。これは 1500μF 6.3V 品で 74 円という結構高めの子ニチコン HZ シリーズというものです。

前回と同じ条件で周波数特性も測定してみる

図 7, 8 と同じ条件で測定してみました(図 10)。ESR が低いのでアウトレンジになっています。そこで 10dB/div に変更してみました(図 11)。このプロットからも ESR がかなり低いことが分かりますね!

図 11 のプロットはフロア(ボトム)部分がノイズ気味ですが、ここを減衰のフロアとして考えると、さて ESR は何Ω と計算できるでしょうか? 後半で考えてみたいと思います。



図 9. 注文してあった超 Low ESR コンデンサ
(1500μF 6.3V 品)

図 8、図 10、図 11 のカレンダーは気にされませぬよう…

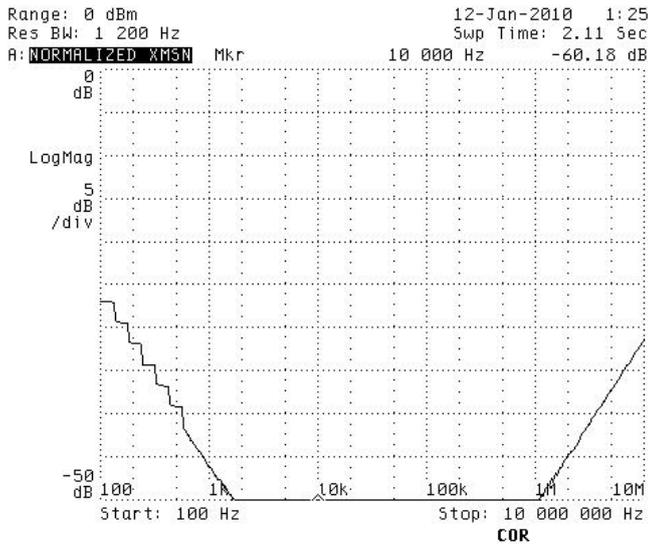


図 10. 注文した超 Low ESR コンデンサ (1500 μ F 6.3V 品) の周波数特性を測定してみた (RL=0dBm, 5dB/DIV)

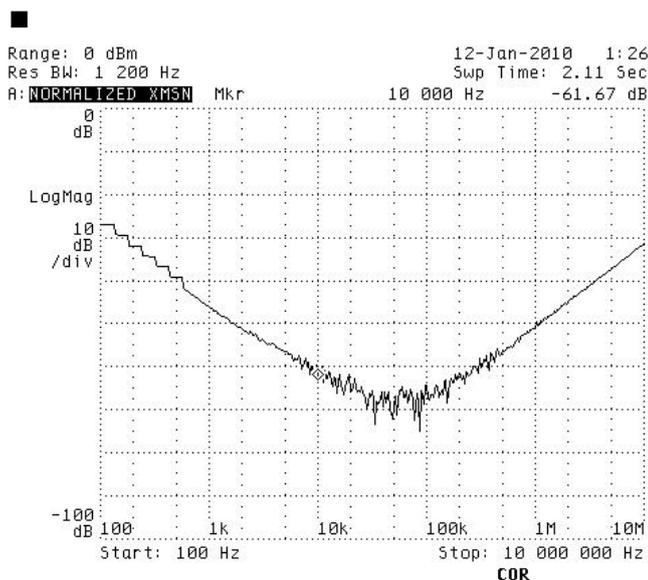


図 11. 注文した超 Low ESR コンデンサ (1500 μ F 6.3V 品) の周波数特性を測定してみた (RL=0dBm, 10dB/DIV)

1 台目をこのコンデンサに交換したところ、図 12 のような壮観な眺めになりました。黒金がきれいです…。このコンデンサを使えば、この PC まだ 10 年は長生きできそうです。今更ながら MB 上に SATA (Serial ATA) の I/F (Interface) があることを発見し、当時は「ムフフ、まだまだ」と思ったのでした (笑)。

さすがにこの原稿執筆時点では、後継の PC…当然のごとく SATA の I/F 品を用いています (また中古ですが…笑)



図 12. 超 Low ESR コンデンサに交換した壮観な眺め

黒金のコンデンサが並ぶ PC が動く日が楽しみだ

詳しくは確認していませんが、PC のプロセッサ電源は電圧 1.5V くらいで 80W 程度のようなので、50A 以上のプロセッサ電流のようです。リップル電流は相当なモノのはず、コンデンサがおかしくなってもしょうがないかなあと、「電気屋のはしくれ」はちょっと思うのでした。

ここでいう「リップル電流」は、プロセッサの CLK 脈動ではなく、スイッチング電源のリップルのことを意図しています。プロセッサの CLK 脈動は (図 1、図 5 の写真のように) プロセッサ周辺にセラミック・コンデンサがばら撒かれているので、これで対応というところでしょうか。

80W だなんて…。アマチュア無線の HF 帯 (短波帯) なら地球の裏まで飛んでいく電力だ…。

作業はまだまだ続くのだった

交換作業はまだまだ続きます。ゆっくり作業できる時間もなく、まだ TH (Through Hole) に半田を再度埋め込んだ状態でした。これから TH の半田抜き、コンデンサ実装、テスト HDD で OS インストール、Prime95 (プロセッサ負荷試験) や MEMTEST (メインメモリのテスト) でのテストランと続きます。1 台目が立ち上るのにあと 2 週間くらいはかかるかも…というところでした。

いずれにしても黒金のコンデンサが並ぶ PC が動くようすを楽しみにしている今日この頃でありました。

スルーホールの半田ヌキは皆さんどうしているのだろうか

しかしコンデンサ抜き取りまでは良かったのですが、TH からの半田ヌキに相当なこずりました。ネットでは「高容量の半田ごととアミアミの半田吸い取り (ソルダーウイック) でやりました！」とか書いてありますが、私には無理です…。超技です…。

私としてはホットプレート上で半田吸い取り器 (アミアミではありません、「器」です) を使って、さらに反対側から助手 (前出の「天の声」) に 60W のコテで熱してもらって漸 (ようや) く TH から半田を抜けました。この設備で「漸く」なので、皆さんホントどうやっているのでしょうか？

とくに内層+L1, L4 にベタがある、グラウンド・パターンが難しかったです…。

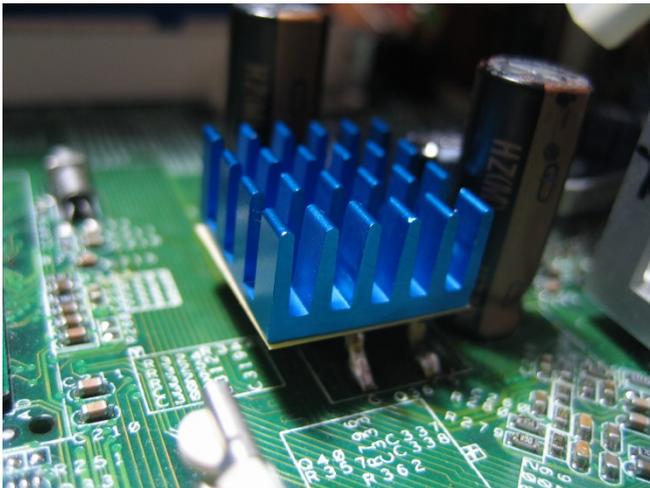


図 13. プロセッサ周辺の FET に Amazon で売っていたミニ放熱ブロックを取り付けた。焼け石に水だが、フィンの実装向きはエアフローも考慮してある

プロセッサの温度上昇を考える

交換後の Prime95 の負荷試験と MEMTEST でのメモリチェックで合計数時間回して問題ありませんでしたから、問題なく稼働するものと思います。

プロセッサは負荷をかけると消費電力が変わるようです。アイドルの状態ではヒートシンクを手で触ると低い温度なのですが、Prime95 負荷テストで 100%状態にすると徐々に温度が上がってきます。普通の人なら「あたりまえじゃん」と思うかもしれませんが、デジタル回路としては、

$$P \propto (k, f_{CLK}, n, V^2) \quad (1)$$

として消費電力 P [W] が決まってきます。 k はゲート活性率、 f_{CLK} はプロセッサ内部ロジックの同期クロック周波数、この 2 つで流れる電流量 I が決まり、ゲート数 n とコア電圧 V^2 (のはず…電流 I も V によって変るので) が加わり、これらが掛け算…関数式となって、電力 P が決まります。

ここには「プロセッサの負荷状態」の係数はありません。でもかなり温度が変わります。これはたぶん、

- ゲート活性率が変わるのか？
- ダイナミック動作の部分が多いのか？
- クロックゲーティングをしているのか？

というところかなと部外者は思います…。

パワー-FET も結構熱いものがある

図 13 はプロセッサ周辺の FET 部分ですが、ここで 5V を 1.5V にドロップしています。流れる電流も多いようで結構熱くなります。放熱は内層に逃がして、半田面からピンク色の放熱シートでケースに逃がす構造です。でもかなり熱く、内層に熱を逃がせばその周辺のコンデンサの温度も上がってしまいます。どうなのかな？と思いました。

そこで Amazon でミニ放熱ブロック (これも図 13. こんなものが Amazon で売っていること自体も凄いですが) を購入し、それをつけてみました。簡易計測で温度を測ってみると、放熱なし = 65°C、放熱あり = 63°C で殆ど変わりません。誤差の範囲です。なーんだと思う一方、内層に廻ってピンク色放熱シートに流れる熱量が相当なものなんだな、とも思った次第です。

なお「焼け石に水」ですが、ミニ放熱ブロックのフィンの向きはプロセッサから生じる熱のエアフローを考慮してこの向きにしています (無意味なコダワリ?)

なんとか順調に交換作業は進んでいく

引き続きはもう 1 台のジャンク購入分の改造です。このジャンク購入分は、1 台目が動くことは確認できたので、CPU, MEM, ソケットリテンション, IDE ケーブルなど、ジャンク購入時に不足していたものをヤフオクでゲットしていきました。P4 2.6G FSB 800M = 300 円、PC2700-512M × 2 = 1200 円という感じで、殆どゴミ値段で完成しそうです (笑)。

代替として使っていたマシンもケースを開けてみましたが、こちらもコンデンサがかなり膨らんでいました。ジャンク品の修理 (2 台目) 後に、こちらもコンデンサ交換しようと思いましたが、

低 ESR 固体電解コンデンサも使われていた

少し話題が外れてきましたので、MB で使われていた超 Low ESR 「固体」電解コンデンサの話題に移ってみたいと思います。

黒金の超 Low ESR 電解コンデンサはニチコンの UHZ1C152MPM (1500 μ F 6.3V) というものですが、これは ESR = 12m Ω max (10mm×12.5mm 品) のようです。これが 8 個並列になっていますので、全体で 1m Ω ちょっと程度になっていると推測します。

それプラス、図 14 のようなコンデンサがついていました。680 4V と書いてありました。「これは何だろう？」とネットでサーチしながら考えていました。ケース上のマークが日本ケミコンに似てはいたのですが、単なる「四角」にしか見えず、そこまで気がつきませんでした。いろいろサーチした結果、日本ケミコンの「APSA4R0ELL561MHB5S 560 μ F 4V 品」ということが分かりました。それで四角マークを「ああ、なるほど」と思ったのでした。現品も RS コンポーネンツでゲットし、交換することができました。

この固体電解コンデンサは ESR がとても低い！

これは「CONDUCTIVE POLYMER ALUMINUM SOLID CAPACITORS (導電性高分子アルミ固体電解コンデンサ)」という固体コンデンサで、さきの UHZ1C152MPM の ESR = 12m Ω max と比べて、1 個で 7m Ω max というものです。有名な SANYO OS コンと同類なもののようなですね。

これが 2 個ついていました。これは Intel のリファレンスデザインで決められているのかなあと、これも思ったものでした。



図 14. 超低 ESR の導電性高分子アルミ固体電解コンデンサ

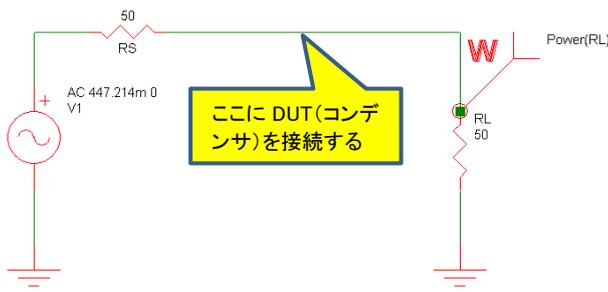


図 15. ネットアナでの測定をシミュレーションの系として用意してみた

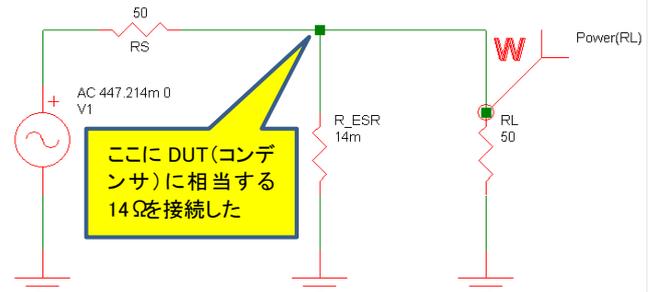


図 17. シミュレーション系に DUT となるコンデンサの ESR を接続してみた

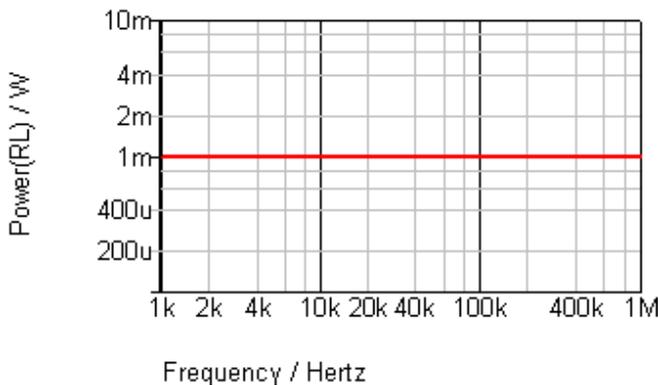


図 16. 図 15 の系でシミュレーションしてみた。
1mw (0dBm) が得られている

さきのネットワーク・アナライザの結果から ESR を求めてみる

中盤のあたりでネットワーク・アナライザを用いてコンデンサのリアクタンス (と ESR) を測定し、「さて ESR は何Ωと計算できるでしょうか?」とクイズを出させていただきました。ここでいよいよ実際にその答えを求めてみます。

図 15 はネットワーク・アナライザ (以降「ネットアナ」と呼びます) を超簡単に ADIsimPE 上でモデル化したものです。ネットアナは、このように信号源と信号源インピーダンス R_S 、ネットワーク (回路) を経由した電力を測定する負荷抵抗 R_L にて構成されているものです。この R_S と R_L の間に測定対象 DUT (Device Under Test) であるコンデンサを並列に接続します。

原理的には、ネットアナの信号源の大きさはいくらでもよく、図 15 のように接続して、そのとき R_L に生じた電力レベルを 0dB として設定します。これを「スルー校正 (スルー・キャリブレーション)」といいます。

とはいえ、この ADIsimPE でのモデル化では、この「校正」プロセスはありませんから、このように接続したときに R_L に 0dBm (1W) が発生するように、信号源の大きさを設定してあります ($1V/\sqrt{5}$)。

一応確認してみましょう。図 16 に図 15 の状態で R_L で得られる電力を示します。ただしく 1mW (0dBm になる) が得られていることがわかります。

実際の手計算を最初にやってみる

まずは図 11 のネットアナでの実測結果から、手計算で考えてみましょう。ADIsimPE で実際にシミュレーションしてみる回路にもなりますが、この手計算のための等価回路として、図 17 にネットアナでの測定系のモデルを示します。

コンデンサの ESR (R_{ESR}) は $R_L = R_S = 50\Omega$ と比較して非常に小さいものです。

そのためネットアナ信号源からその信号源インピーダンス $R_S = 50\Omega$ とコンデンサの ESR と負荷抵抗 R_L との分圧により、ESR の端子 (負荷抵抗 R_L の端子でもある) に生じる電圧は、

$$V_{RL} = \frac{\frac{R_{ESR} R_L}{R_{ESR} + R_L}}{\frac{R_{ESR} R_L}{R_{ESR} + R_L} + R_S} V_{SRC} \quad (2)$$

$R_{ESR} \ll 50\Omega$ なわけですから、ESR の端子間に得られる電圧は「 R_L の影響により電圧が低下することなく」ほぼそのままネットアナの負荷側 $R_L = 50\Omega$ に加わることになります。つまり、

$$V_{RL} \approx \frac{R_{ESR}}{R_{ESR} + R_S} V_{SRC} \quad (3)$$

一方、校正を取った状態というのは、 $R_L = R_S = 50\Omega$ となり、上記の式同様に計算すると、

$$V_{RL} = \frac{R_L}{R_L + R_S} V_{SRC} = \frac{1}{2} V_{SRC} \quad (4)$$

となります。たとえばネットアナが 1V を基準 (0dB) に校正されていれば、このときの信号源電圧は「 $V_{SRC} = 2V$ 」になります (この「2倍」という考え方が高周波回路では大切です)。

つまり図 11 の結果が「-65dB」ということは、 $-65dB = 20\log(V_{RL}/1V)$ ですので [1V を基準 (0dB) に校正されているので分母はこうなる]、

$$V_{RL} = 0.000562V$$

であり、再度、式(3)を簡略化して

$$V_{RL} \approx \frac{R_{ESR}}{R_{ESR} + R_S} 2V \approx \frac{R_{ESR}}{R_S} 2V \quad (5)$$

とすれば、 $R_S = 50\Omega$ なので、上記を式変形して代入すると、

$$R_{ESR} = \frac{V_{RL} R_S}{2V} = 14m\Omega \quad (6)$$

となり ESR が 14mΩ 程度になると計算できます。これは赤金 HZ シリーズ電解コンの ESRmax (12mΩ) にかなり近い値ですね。測定時での実態は、-65dB より若干小さい値になっていたでしょう。

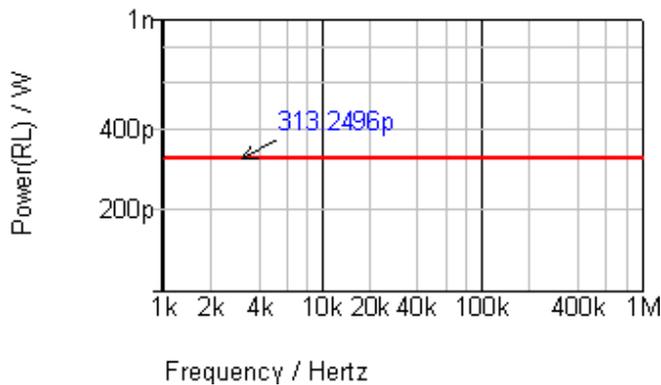


図 18. R_ESR = 14mΩ を接続しシミュレーションしてみた

ADIsimPE で検算してみる

ここまでの流れをあらためて説明します。図 11 で HZ シリーズ電解コンの ESR の実測結果を示しました。また図 15 にネットアナでの測定を ADIsimPE でモデル化したようすを示しました。

図 17 ではシミュレーション系に DUT となるコンデンサの ESR (R_ESR = 14mΩ) を接続してあります。

前の節で計算結果が「14mΩ」として得られたので、いよいよこの節で検算してみましょう。

図 15、図 16 で分かるように、このシミュレーション系ではスルー校正として 0dBm が得られるように設定しています。

図 17 のように R_ESR = 14mΩ を接続しシミュレーションしてみると、図 18 の結果のように $313.25\text{pW} = -65.04\text{dBm}$ として計算できます。

つまり、ここまでの手計算での考え方は正しかったということが分かるわけです。

まとめにかえて

無事に 3 台の PC が立ち上がった（復旧した）数日後、福井に居る長男が、旅行先の山形の酒をもって帰ってきました。「合計 3 台パソコンが出来るが要るか?」「プロセッサは何?」「P4 2.6G だよ」「ふっりーなあ。ワード・エクセルならいいんだろうが、オレは要らないよ」とのこと。「10 年は使えるぞ!」「かー…PC で 10 年?! (笑)」。さてどうしよう…。

※現時点ではこれら 3 台の PC は全て廃棄し、秋葉原で中古で購入したマシンを使用しています（また中古…笑）