

## RFID Reader Unit アンテナ設計と特性測定の記録

250710 akita11([akita@ifdl.jp](mailto:akita@ifdl.jp))

## 目標

Felica も読める RFID リーダをつくって販売したい (M5Stack の RFID2 Unit は Felica は対応していない)。AliExp などでも売っているものもある (Arduino 用ライブラリなどもある) が、日本の電波法令の基準を満たしているかが表示されていない。また形状も M5Stack の Unit サイズにしたい。

そこで、Felica を読める IC を使って Unit サイズのものを設計し（マイコンとの通信は I2C）、日本の電波関連法令の基準を満たしていることを示したうえで販売したい。

なお 13.56MHz RFID の規格が歴史的経緯から複雑だが、大まかには以下の通り。なおよく使われている NXP の PN532 は、ISO/IEC14443-3 TypeA/B, MIFARE, Felica に対応しているので、これを使うことにする（正確にはその互換品の Forsinve 社 FSVP532 を使う）。

- ISO/IEC14443-3
  - Type A: MIFARE など（NFC-A と呼ばれる）
  - Type B: マイナンバーカード、日本のパスポートなど（NFC-B と呼ばれる）
- MIFARE：ISO 14443 Type A を拡張した NXP 独自規格。日本の交通系 IC カード。Classic, DESFire, Ultralight など複数シリーズが存在。
- FeliCa：ソニー独自規格（ISO 18092 準拠）、楽天 Edy、WAON、交通系 IC カードなど。（NFC-F と呼ばれる）

## RFID リーダのアンテナ設計の一般論

一次情報として、使う NXP 社から提供されている、PN532 のアプリケーションノート AN1445("Antenna design guide for MFRC52x, PN51x and PN53x")からはじめる。

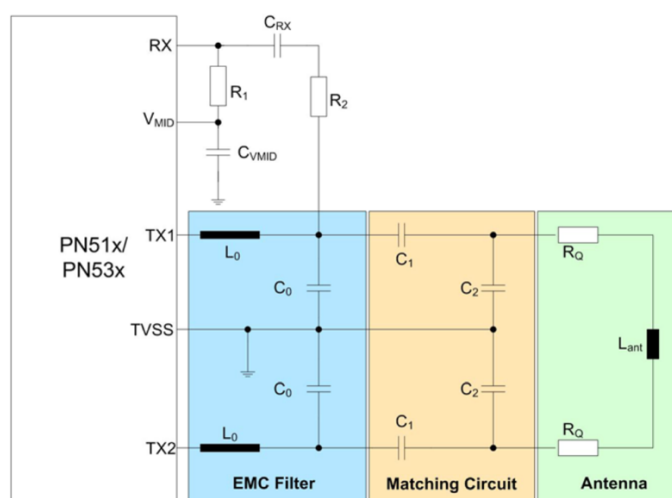


图 1

アンテナ部分は、EMS Filter 部、Matching Circuit 部、Antenna 部、からなる。

Antenna 部分は、基板パターンをぐるぐる巻いた配線パターン（ループアンテナ）で、まずはこれを設計

する。

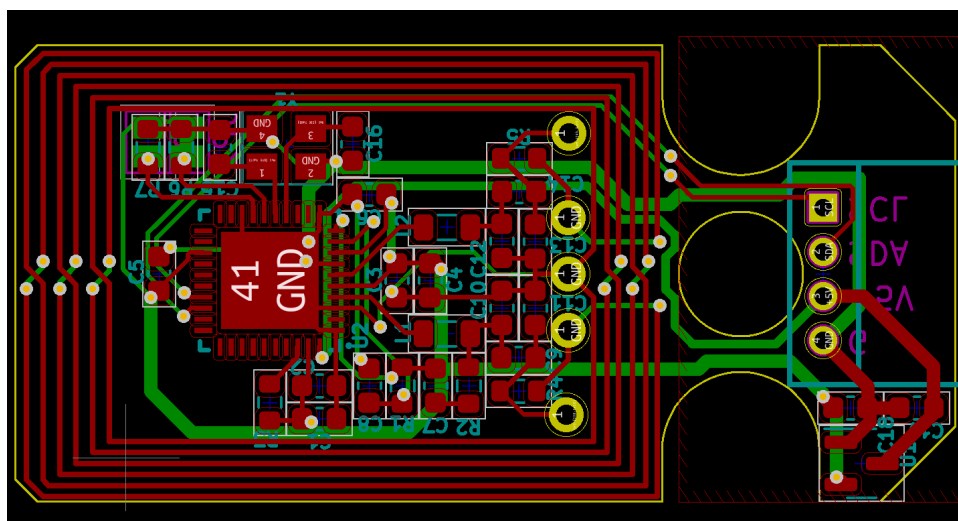


図 2

今回は、いろいろな事例を参考に、図 2 のような基板パターンを設計した。左側の外周部を 6 回まわっている配線パターンがインダクタになる。なお基板の素材や厚さ、配線幅や巻数からインダクタを計算するツールもあるが、正直、その精度がどの程度あてになるかわからないので、今回は、まずは基板パターンを設計し、それを実測することにした。

この基板を製造し、そのインピーダンス（等価回路）を計測し、それにあわせて図 1 の EMC Filer 部と Matching Circuit 部の素子値を決めていく。その後、計算（シミュレーション）と実測を行き来しながら、目的の特性になるような素子値を決定する。

なおこの AN1445 は、けっこう途中が省略されていて（例えば C1,C2 を変えるとどう特性が変わるか、など、また L0 を 560nH で決め打ちしている（後述のようにこれは変更しないとマッチングがとれない）、など）、こちらの別の RFID Reader 用 IC のアプリケーションノートを読むことで理解が深まり、マッチング調整の方針の見通しを立てることができた。

- AN12549 ("PN5190 antenna design guide")
- AN13219 ("PN7160 antenna design and matching guide")

また素子値の計算はまあまあ面倒な式で、それを計算するための Excel シート (AN144411.xls) が AN1445 で紹介されて提供されているので、それを使ってもいいと思う。ただ個人的には、これの計算過程に出てくる等価回路が 2 種類あって、並列等価回路の  $R_a$  の計算・求め方がわからなかったため、結果としてあまり使わなかった。逆に今回は、別の IC 用の「PN7160\_matching\_calculator.xls」がかなり使えた（ただこれが NXP 公式サイトでは見つからず、どこかのオンラインフォーラムでみつけた）。

インピーダンスアナライザでのアンテナ等価回路の測定

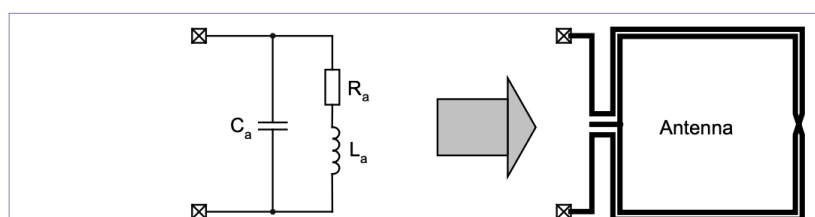


Fig 2. Series equivalent circuit

図 3

AN1445 では、インピーダンスアナライザまたは VNA (Vector Network Analyzer) でアンテナ (ループアンテナ) の等価回路を求める手順が示されている。そこで HIOKI のインピーダンスアナライザ (IM7580A) で、図 3 の等価回路を求めた。ただ結論から言うと、この等価回路パラメータがどの程度正確かがよくわからず、結果として後述の NanoVNA を使ってすべての計測は行った。なお計測前の計測器の校正 (Open/Short/Load : 後述) は行うべき。

## NanoVNA でのアンテナ等価回路の測定

NanoVNA とは

AN12810 ("How to use the NanoVNA for the NFC reader antenna design") に、使ってアンテナマッチングに NanoVNA をどう使うか、について書かれている。NanoVNA は、オープンソースな小型 VNA で、スイッチサイエンス等で買える。VNA は、周波数を変えたときの特性 (インピーダンス) やスミスチャートを書くことができ、PC につないでグラフを見たり保存したりすることもできる。この AN12810 では、簡易的な計測法としてピンヘッダ・ソケットを使う方法が紹介されており、この方法でも十分に計測・設計を行うことができた。とりはずしがしやすいので、L や C を変更しながら特性を測る、という作業が捗る。

スミスチャート

高周波回路の話で必ずといっていいほどよく出てくるスミスチャートについては、事前にこちらの記事で勉強しておいた。

<https://www.wti.jp/contents/ts-blog/190613.htm>

周波数によって LC のインピーダンス (リアクタンス) が変化するが、スミスチャートは、それが周波数とともにどう変化するか、を理解しやすい図。主な特徴は以下。

- LCR 回路に R を直列に追加すると、リアクタンスは変化しないので、全体のインピーダンスは「等リアクタンス円」上を移動する
- LCR 回路に LC を直列に追加すると、抵抗分は変化しないので、全体のインピーダンスは「等抵抗円」上を移動する。
- 中央が  $50\Omega + j0$  ( $50\Omega$  抵抗のみ)。
- 一般には目標周波数でのインピーダンスを  $50\Omega$  にしたいので、R または LC を直列追加して両円に沿ってインピーダンスを移動させて、 $50\Omega$  にもっていく。
- R や LC を並列接続する場合は、アドミタンスチャートを使う。

## NanoVNA の校正

一般にインピーダンスを計測するときには、計測に使うケーブル・コネクタに、(1)Short (短絡)、(2)Open (開放)、(3)Load (負荷) の 3 種類の負荷を接続し、それが  $0\Omega \cdot \infty \cdot 50\Omega$  になるように校正する。

AN12810 では、4p ピンソケットと  $100\Omega$  チップ抵抗 2 個を使って、この 3 種類の負荷を繋げる方法が紹介されているので、これをつくり、それを使って校正する。

## アンテナ等価回路の算出

まずループアンテナ (等価回路の  $R_Q$  の右側) に 2p ピンソケットをとりつけ、NanoVNA で、 $10\text{MHz} \sim$

30MHz の範囲で、スミスチャートと  $Z$  ( $R$  と  $jX$ ) を計測する。(なお RFID の中心周波数は 13.56MHz) スミスチャート上のマーカを移動させ、13.56MHz 付近での  $R$  と  $X$  を求める。この周波数では、コンデンサのリアクタンスは十分大きくてほぼ無視できるため、図 3 の等価回路の  $C_a$  を求めることはできない。この周波数での  $X$  はほぼインダクタンスのリアクタンスなので、それから  $L_a$  を求めることができる (NanoVNA では  $L$  も表示もできる)。同様に  $R_a$  も求められる。なおこのときは、ほぼインダクタを計測していることになるので、スミスチャートは、おおままには図 4 の赤線のあたりにくる (ほぼ誘導性の純リアクタンス)。

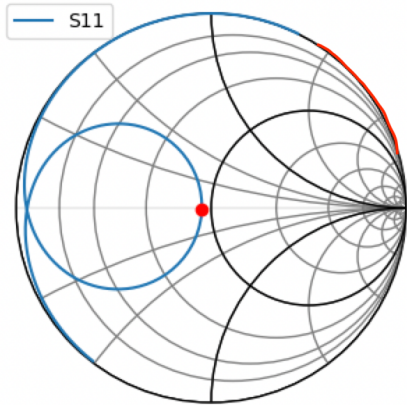


図 4

図 3 の  $C_a$  の計測は、試行錯誤の結果、あまり正確ではないかもしれないが、ピンセット型 LCR メータを C 計測モードとしてループアンテナに接触させて計測した。

以上の手順での計測結果は以下の通り。

- $R_a = 4.03[\Omega]$
- $L_a = 1.581[\mu H]$
- $C_a = 9.43[pF]$

なおアンテナに直列につなぐ 2 個の  $R_Q$  は、アンテナの  $Q$  値 (共振の鋭さ) を適切な値 (35 程度) とするために、AN1445 の手順で求める。今回の場合は、計算したところ、 $R_Q=0\Omega$  で大丈夫そうだった。

#### スミスチャートのシミュレーション

このループアンテナの等価回路に対して、EMI Filter 部と Matching Circuit 部の  $L_0$ ,  $C_0$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  を求めるのに進む。ただこれらの値のアタリをつけたいのと、それぞれの値を変化させたときに、スミスチャートと  $Z$  (実部と虚部) がどう変化するか傾向を知りたかったので、ChatGPT を使いながら、インピーダンスとスミスチャートを計算するプログラム (match.py) を作成し、傾向をつかんだ。ちなみに  $C_0$  は、AN1445 などから、EMI Filter 部の共振周波数  $f_{c0}=1/2\pi\sqrt{(L_0C_0)} = 14.3MHz$  となるように求める。AN1445 などには以下のような調整法が書いてあり、この傾向は、この match.py でも確認できる。

- $C_1$ : 共振点でのインピーダンス (スミスチャートの一回りループの大きさ)。小さいほどインピーダンスが小さくなる。
- $C_2$ : 共振点の位置。スミスチャート上の  $f=13.56MHz$  点の位置を決める。

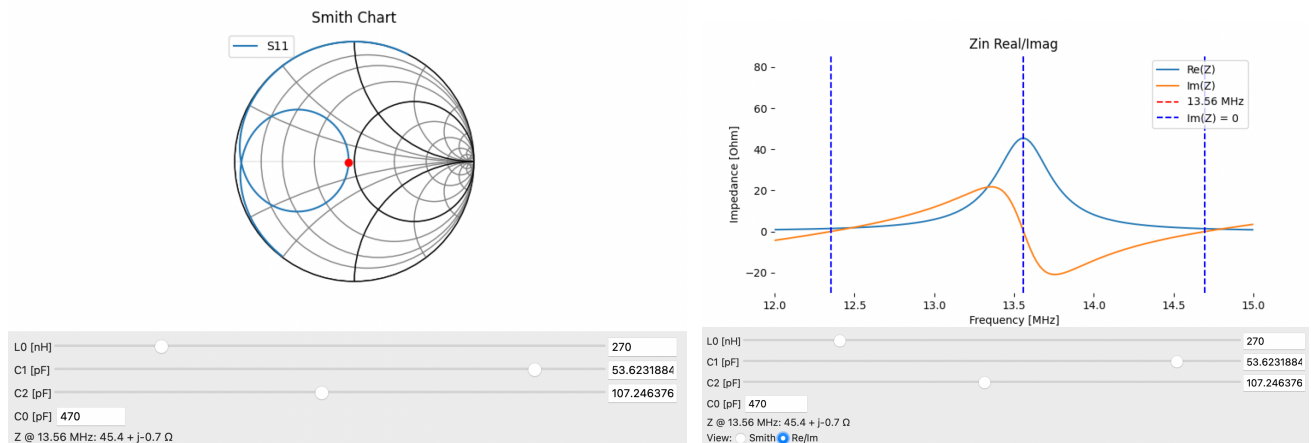


図 5

AN1445 などから、目標は以下の通りに設定する。

- スミスチャート：13.56MHz を中心に上下が対称となるように、ぐるりと一回りする。13.56MHz（上手の赤点の位置）でのインピーダンスは 40～50Ω（これは実軸上に来るはずで、その等抵抗円の値から求める。ちなみにスミスチャートの中心は 50Ω）。
- インピーダンス：上記のスミスチャートは、Z の実部・虚部のグラフでは、13.56MHz で実部がピーク（40～50Ω）、虚部が 0 となる。またこの 13.56MHz を中心に左右が対称となるように。

これから、 $L_0=270\text{nH}$ （これから  $C_0=470\text{pF}$  となる）、 $C_1=56\text{pF}$ 、 $C_2=110\text{pF}$  あたりが妥当そうと目星をつけることができた。そのときのスミスチャートとインピーダンスは図 5 のとおり。

### 実デバイスのアンテナインピーダンス測定

上記の素子値の L, C, R をループアンテナ基板に実装する。なおインダクタはなるべく巻線抵抗が小さいものを選ぶ（今回は 0806 サイズのチップ巻線インダクタ）。またセラミックコンデンサには、材料と温度特性からは大きく以下の 2 種類があるが、今回は容量が 100pF 程度と小さいため、温度特性の小さい C0G 型を使う。なお特性のマッチング調整のために、少しずつ R や C の値を変化させる（取り替えて試す）ことが多いので、いわゆる「サンプル本」が手元にあると安心。例えば 0603 サイズの各種セラミックコンデンサが 100 種類（各 50 個程度）ぐらいのものが AliExp など 2000 円くらいで売っている。

- Class I (C0G/NPO): 小容量だが、温度変化に対する静電容量の変化が小さい
- Class II (X7R, X5R など): 大容量だが、温度変化による静電容量の変化が大きい

この状態で、IC の TX1/2 端（ $L_0$  の IC 側の 2 端子）のインピーダンスを NanoVNA で計測する（IC も実装した状態の方が良い）。その結果は図 6 のとおり。緑色の線がスミスチャートで、実軸に対して対称ではないが、 $f=13.56\text{MHz}$  でのインピーダンスが 50Ω 程度（リアクタンスはほぼ 0）であることが確認できる。またインピーダンスの実部（水色）と虚部（紫色）も、ほぼ実部がピーク・虚部が 0 となる共振点が 13.56MHz 付近にあり、共振に対してほぼ左右対称になっていることが確認できる。



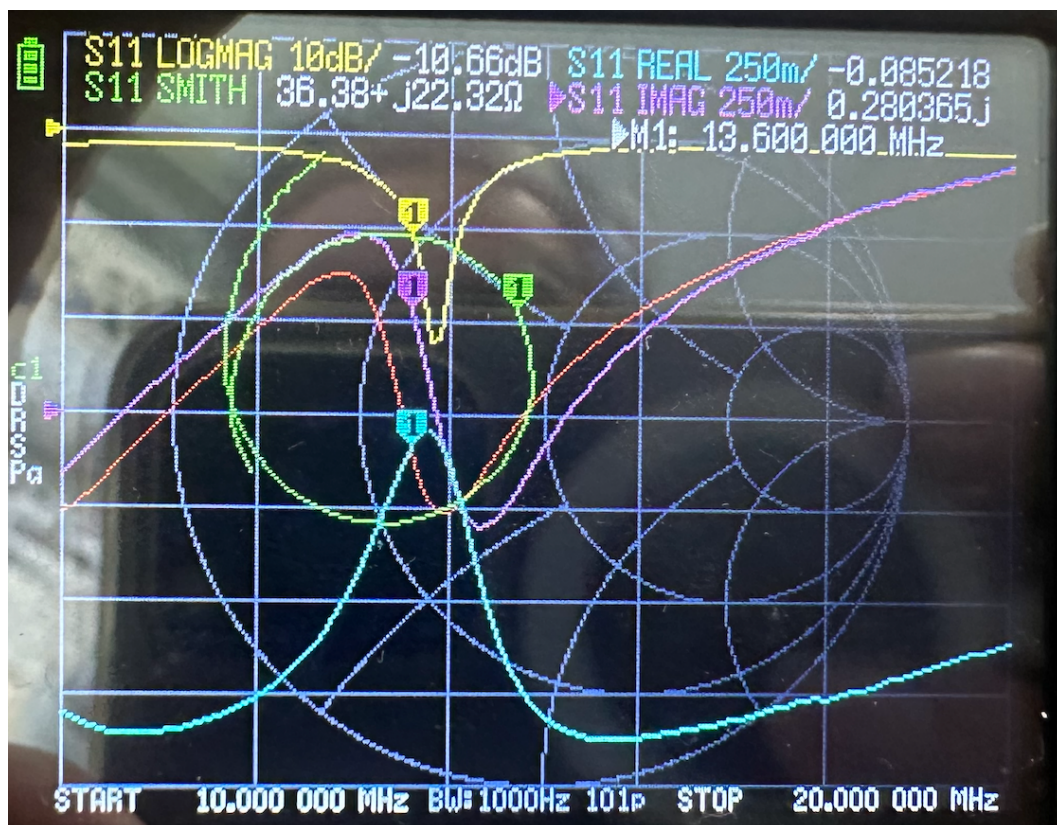


図 6

## 受信回路の設計

AN1445 の手順にそって、受信回路側の素子値を決める。まず  $R_1=1k\Omega$ 、 $C_{RX}=1nF$ 、 $C_{VMID}=100nF$  とする。その後、 $R_2$ を決めるための手順が AN1445 に書いてあり、アクティブプローブを使って RX 端子での電圧を測ることになっている。今回は eBay で購入した半 DIY のアクティブプローブを購入して、それをオシロに繋いで波形を観測したが、その校正（計測値と実際の値との対応）がいまいちわからず、他の PN532 ボードで同一箇所の電圧を計測して、同程度となるように  $R_2$  を決定した。結果として、他の PN532 ボードと同じ  $R_2=1k\Omega$  で大丈夫そうと判断できた。

## 実デバイスの動作

Arduino に I2C 接続し、PN532 用ライブラリの読み出し用サンプルプログラムを書き込んで動作テストを行った。なお PN532 用のライブラリはいくつかあるが、Adafruit や Seeed のものは Felica 読み出しのサンプルが入っていない。これらから fork している、こちらのライブラリ（実は AliExp などによく見かける赤色正方形の PN532 ボードのメーカ）が、Felica 読み出しのサンプルが入っているので、こちらを使うのがよい。

<https://github.com/elechouse/PN532>

適当な Felica をかざし、読み出しができることを確認した。なおアンテナに多少大きな電流を流すために、IC が多少発熱する。（アンテナのマッチングが不完全だとこの発熱が大きい）

## 電波関連法令と放射電界強度の測定

今回の 13.56MHz を使う RFID リーダは、WiFi 機器や Bluetooth 機器のような無線通信機器ではなく、「特定無線設備」の中の「誘導式読み書き通信設備」というカテゴリに含まれる。そのため、無線通信機器の認証に必要な、いわゆる技適は無関係。（電波法施行規則 44 条第 2 項第 2 号（許可を要しない通信設備 - 誘導式読み書き通信設備）

参考（法令関連の情報まとめの例） <http://dsas.blog.klab.org/archives/2018-04/52291765.html>

「誘導式読み書き通信設備」は、法令の要件（電界強度の規定、または総務大臣型式指定）を満たせば許可不要で 사용할 ことができる、と規定されている。その要件のうちの「電界強度の規定（ $500\mu\text{V/m}$ （約  $54\text{dB}\mu\text{V/m}$ ）以下）」を満たしていることの表示方法については明記されていない。そのため、測定条件や測定データ等の客観的なデータを示すことで、その要件を満たす、というのが一般的な解釈と考えられる。例えば取れば（株）スイッチサイエンスで販売している RFID2 Unit（<https://www.switch-science.com/products/8301>）では、製品紹介ページに電界強度の測定法・結果を掲載しており、それに基づいて規定を満たしている、と表示している。

実際の使用には、EMI（電磁輻射）計測装置で RFID Reader UNIT の電界強度を測定し、この要件を満たしていることを確認する必要がある。今回のものの測定結果は、“RadioTestReport.pdf”に掲載してある。