ノート

インピーダンスアナライザの利活用に関する研究

石澤　賢太*　牧野　斉*

Research on the Utilization of Impedance Analyzer

ISHIZAWA Kenta* and MAKINO Hitoshi*

1. 緒　　言

5G, IoT や各種無線通信の分野においては電子機器の技術的進展が著しく，使用される電子部品も高周波化が進んでいる。これに伴う高周波分野における電子部品評価ニーズの高まりを背景に，下越技術支援センターではインピーダンスアナライザ（日置電機（株）製 IM7587 [1]）を令和 3 年度に導入した。測定器の外観を図 1 に示す。

インピーダンスアナライザは以下に示す電気的定数の周波数特性を測定するもので，電気電子分野における基本測定器である。

・インピーダンス（Impedance，以下 Z）
・リアクタンス（Reactance，以下 X）
・インダクタンス（Inductance，以下 L）
・キャパシタンス（Capacitance，以下 C）
・レジスタンス（Resistance，以下 R）

今後県内企業からの有効活用を図るため，本測定器の機能ならびに具体的測定事例を概説する。

2. インピーダンスアナライザの測定原理 [2,3]

本測定器は，1 MHz から 3 GHz までの周波数帯域における測定に対応している。原理としては RF I-V 法を採用しており，測定器本体と DUT（Device Under Test，被測定物）とを電気的に接続するためのテストフィクスチャから構成される。

一般的に DUT の Z を測定する機器としては，インピーダンスアナライザの他にもベクトルネットワークアナライザ（以下 VNA）が知られている。VNA は，測定器の特性インピーダンス Z_0（一般的には 50 Ω）を基準として動作する。そのため，DUT のインピーダンス Z_x が Z_0 に近い場合には高精度な測定が可能となる。一方インピーダンスアナライザは RF I-V 法により，与えられる電圧と電流との比から Z を算出するため，Z の大きさに依存せず広い周波数領域において精度良く測定可能である。

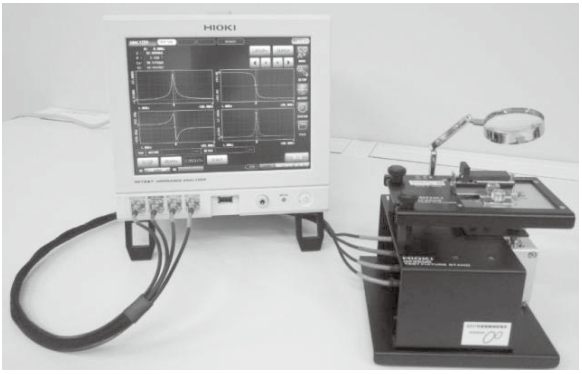


図 1　インピーダンスアナライザ IM7587

なお本研究では，使用したテストフィクスチャ [4]の仕様上，上限周波数を 600 MHz として測定を行った。

3. 研究内容および結果

本測定器は，インダクタやキャパシタといった受動部品の電気的定数を，指定した周波数ポイントで測定する LCR メータ機能と，電気的定数の周波数特性を解析するアナライザ機能との双方を備えている。本研究では，前者を用いた 1 項目と，後者を用いた 3 項目との計 4 項目（機能・事例）について調査した。

*　下越技術支援センター

表１　特性インピーダンス測定結果

線路番号	線路長さ L [cm]	公称特性インピーダンス Z_c [Ω]	実測値				
			抵抗 R_l [mΩ]	コンダクタンス G_l [nS]	インダクタンス L_l [nH]	キャパシタンス C_l [pF]	特性インピーダンス Z_{cmeas} [Ω]
①	288.5	50	313.39	0.00	783.55	293.43	51.73
②	302.6	50	318.35	929.73	832.34	302.19	52.53
③	111.8	75	388.87	195.17	463.68	79.83	76.55
④	979.8	75	2363.41	0.01	4136.34	686.04	77.81

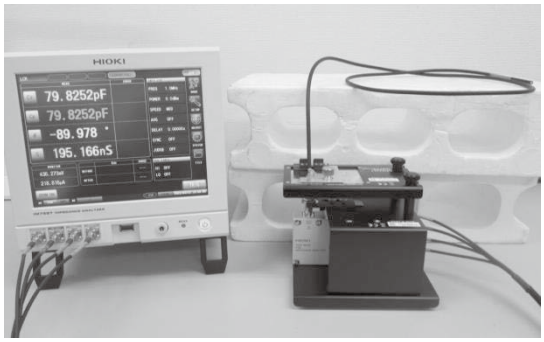
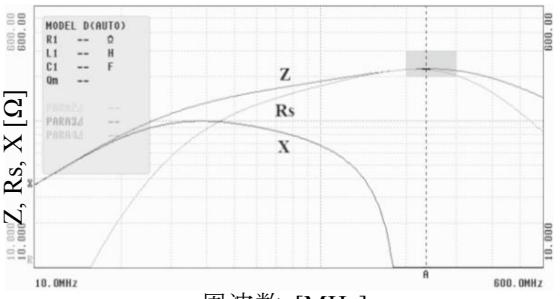


図２　同軸線路の特性インピーダンス測定



周波数 [MHz]

図３　ピーク判定
（判定領域　f:200-300 MHz, Z：200-300 Ω）

3.1　同軸線路の特性インピーダンス測定

LCR メータ機能の活用例として，図 2 に示すような構成で同軸線路の特性インピーダンス測定を実施した。

一般に同軸線路の特性インピーダンスは，簡易的に L_l/C_l の平方根によって算出されることが多い。ここで，L_l は単位長さあたりのインダクタンス，C_l は単位長さあたりのキャパシタンスを表す。しかし上述の式は無損失同軸線路の場合であることから，ここでは単位長さあたりの抵抗 R_l およびコンダクタンス G_l も考慮し正確な特性インピーダンスの算出を試みた。なお理論上，同軸線路の特性インピーダンスは周波数に依存しない。一方，同軸線路メーカのスペックシート等では慣例的に 1 MHz における特性インピーダンスが記載されることが多い。そこで，本研究でも上記周波数での測定を試みた。公称特性インピーダンスが 50 Ωならびに 75 Ωの同軸線路を各々2 本測定し表 1 の実測値に示す結果を得た。

一般に，同軸線路の公称特性インピーダンス値としては 50 Ω系または 75 Ω系の 2 種類が存在する。今回測定した同軸線路における特性インピーダンス値は，公称特性インピーダンスからの偏差が最大 5 %程度（線路番号：②）であった。このことから線路番号①②は 50 Ω系，③④は 75 Ω系に該当することが確認できた。

3.2　周波数特性による部材の良否判定

本測定器は，コンデンサやインダクタ，フィルタなど電子部品の周波数特性について良否判定を行うコンパレータ機能を搭載している。ここでは電子回路の EMC（Electro-Magnetic Compatibility，電磁環境両立性）対策部品として用いられるフェライトビーズ（TDK 製，MPZ1608S-181A）を例に当該機能を調査した。

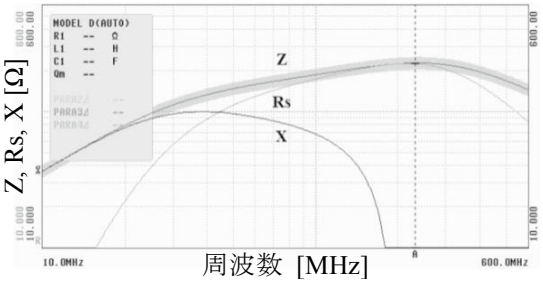


図 4　エリア判定
（判定条件　基準周波数特性の±10 %以内）

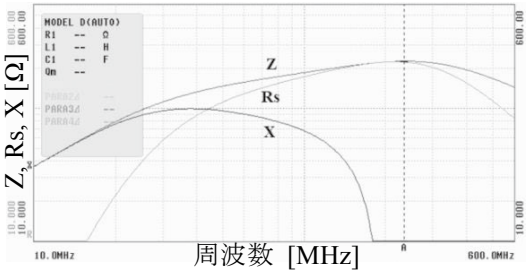
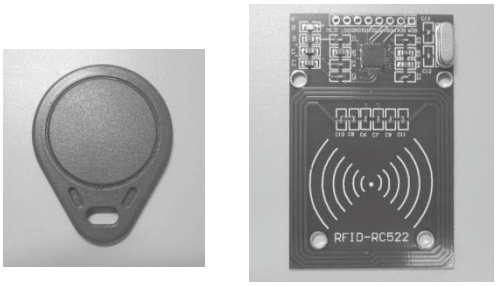
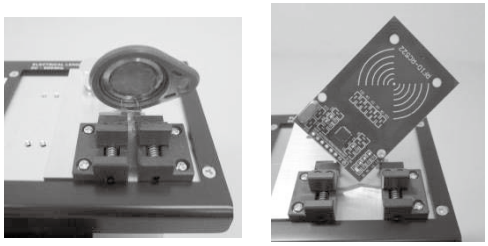


図 5　スポット判定
（判定条件　Z@100 MHz：200-300 Ω，
R@235 MHz：220 Ω±10 %，
X@100 MHz：≦ 100 Ω ）



(a)タグ側　　(b)リーダ/ライタ側
図 6　測定対象の部材



(a)タグ側　　(b)リーダ/ライタ側
図 7　測定対象部材のテストフィクスチャへの取り付け

なおコンパレータ機能は更に，ピーク判定，エリア判定，スポット判定の 3 つの判定機能に分けられることからそれぞれの機能について以下に示す。

3.2.1　ピーク判定

共振周波数の偏差が，設定した許容領域内かを判定する場合などに適用できる。設定領域内に周波数特性のピークがあるかを測定器が判断し IN・OUT で表示する。

図 3 において，判定条件として周波数特性のピーク値が存在する領域を指定した。周波数（横軸）と Z（縦軸）で指定した範囲が画面上で領域表示されていることが確認できる。

3.2.2　エリア判定

周波数特性のカーブが，基準となる特性カーブに対して，測定帯域全体で許容値内かを判定する場合などに適用できる。測定帯域内に特異な共振がないか等を確認する際に有効である。

図 4 は判定条件として，基準部品のインピーダンス周波数特性に対して，±10 %のトレランスを設定した例である。基準部品の周波数特性カーブ上に沿って領域表示されていることが確認できる。

3.2.3　スポット判定

周波数特性カーブの任意のポイントにおいて，良否を判断するパラメータを選択して判定する場合に適用できる。

図 5 で，特定周波数における Z，R，X 値の判定条件を設定した。なおここでは判定条件として 3 項目を指定したが，機能的には最大 16 項目まで設定できる。

3.3　RFID の共振周波数測定

13.56 MHz 用 RFID（Radio Frequency Identification，無線識別システム）モジュール（SunFounder 社製，MFRC-522）について共振周波数を測定した。図 6 に示すようにタグ側と

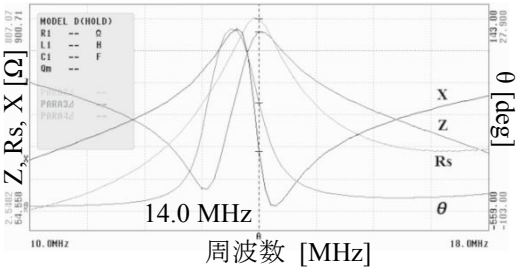


図 8　リーダ/ライタ側の周波数特性（単独）

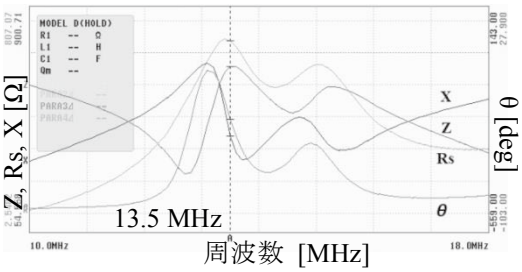


図 9　リーダ/ライタ側の周波数特性
（タグ近接時）

リーダ/ライタ側とがセットになった部材について，双方の周波数特性を測定した。

測定対象部材をテストフィクスチャへ取り付けた際の写真を図 7 に示す。タグ側，リーダ/ライタ側ともにアンテナコイルの両端で測定を行った。その際，基板に実装されている無線 IC が持つ端子間静電容量も考慮する必要があることから，測定電極間に無線 IC も並列に接続された状態とした。

図 8 にリーダ/ライタ側単独時のインピーダンス等の周波数特性結果を示す。リーダ/ライタ側のように受信と送信双方の機能を持つ機器の場合，一般的には，送信時に直列共振回路，受信時に並列共振回路となるよう内部で回路を切り替える。そのため単独時の測定を実施した際は，受信時の回路構成（並列共振回路）であったと考える。

また，13.56 MHz 用 RFID の Z を単独状態で測定した場合，共振周波数より高い周波数で最大値を示す。これは，リーダ/ライタとタグ両者が近接したときに形成される相互インダクタンスが考慮されていないためである [5]。実際に，リーダ/ライタ側にタグ端末を近接させた

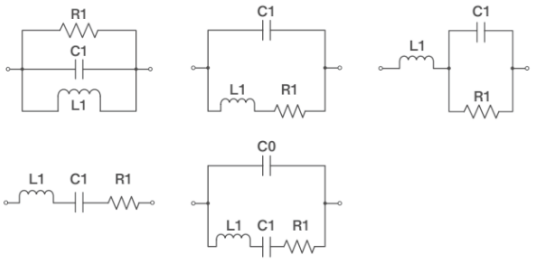


図 10　等価回路モデル

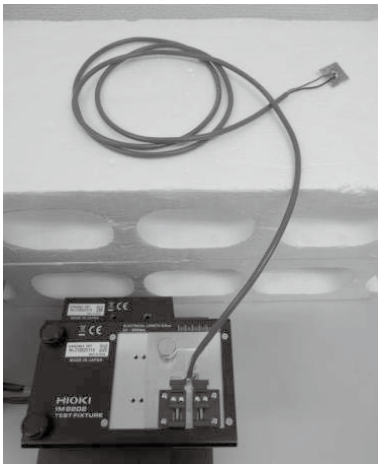


図 11　線材付き PCB

ところ，図 9 の結果が得られた。このことから，リーダ/ライタ側とタグ側とが近接した際に 13.56 MHz で共振するように設計されていることを実験的に確認できた。

3.4　等価回路解析機能

等価回路解析機能では，測定結果を元に等価回路定数を推定することができる。本測定器では，図 10 に示す 5 種類の等価回路モデルを使用することができる。ここでは 13.56 MHz に共振する LC 並列回路を対象に，等価回路解析を試みた。

まず，チップ部品単体（L と C との並列実装）で 13.56 MHz に共振する定数を選定し，これを PCB（Printed Circuit Board：プリント基板）上に実装した。つぎに，この PCB に対して更に，図 11 に示す長さ 50 cm の線材を半田付けした。この線材は，チップ部品単体時よりも共振周波数を変化（低下）させることを目的として用いた。

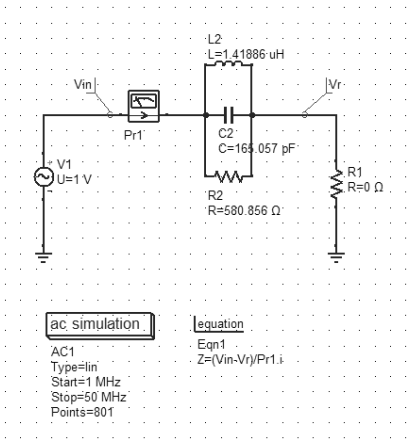


図 12　QucsStudio で作成した回路

この線材付き PCB について，インピーダンスアナライザの等価回路解析機能を適用し，R，L，C のみで構成される回路を推定した。回路推定にあたってはオート選定機能を使用し，等価回路に加え回路定数の情報も得た。なお測定器が推定した回路は RLC 並列回路（図 10 左上）であり，R1, C1, L1 の各定数はそれぞれ 580.856 Ω，165.057 pF，1.41886 μH となった。

しかしこの一連操作のみでは，推定結果の妥当性を判断できない。そこで等価回路解析で得られた定数値ならびに等価回路を用いて，回路シミュレータ上で同様のモデルを作成し，両者のインピーダンス周波数特性を比較した。

ここでは，回路シミュレーションツールとして，高周波回路シミュレータ QucsStudio[6,7]を用いた。図 12 に回路モデル作成時の画面を，図 13 にインピーダンス周波数特性の比較結果をそれぞれ示す。このように，実測結果およびシミュレーション結果（図 13 において Meas. PCB と Sim. PCB は 10 MHz 付近にピークがある特性曲線）が概ね類似したインピーダンス周波数特性であることを確認した。

しかしながら，実測とシミュレーションとで Z の特性曲線が完全に一致をしている訳ではない。特に，11 MHz から 20 MHz までの周波数帯域において，特性曲線が一致しない理由を検討し以下 2 点を考察した。

・インピーダンスアナライザが変換できる等価回路モデルは 5 種類のみで，必ずそのいずれかが適用される。

・いずれの等価回路も 3 点ないし 4 点の受動素子（R，L，C）で構成され，反共振点を 1 つもった一端子対回路である。

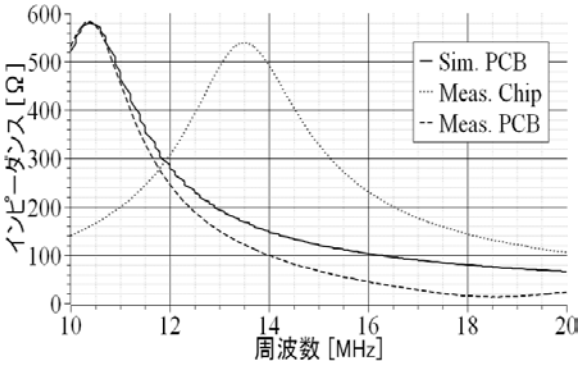


図 13　インピーダンス周波数特性の測定結果

本検討では，測定器側で RLC 並列回路のモデルを自動選定した。一般に RLC 並列回路が近似できるのは，ピーク値を 1 つ持った単峰型の周波数特性である。ところが図 13 の PCB 実測結果（Meas. PCB）は，20 MHz 付近において Z が再び微増傾向を示している。そのために 11 MHz から 20 MHz までの周波数帯域におけるインピーダンス周波数特性を一致させることが難しかったものと考える。

なお 20 MHz 付近における Z の微増は，キャパシタの自己共振と考える。とはいえ，インピーダンス周波数特性のピーク値ならびにピーク周波数を捉えた特性曲線であることから等価回路解析としては十分と判断した。

4. 結　　言

(1) 新規導入したインピーダンスアナライザを用いた電子部品等の測定事例を示した。LCR メータ機能とアナライザ機能の両機能について紹介した。

(2) フェライトビーズの周波数特性測定を例に，コンパレータ機能について紹介した。測定用途に応じて，ピーク判定・エリア判定・スポット判定の 3 機能から選択できることを示した。

(3) 測定事例紹介として，13.56 MHz 用 RFID の共振周波数を測定した。

(4) 等価回路解析機能について紹介した。高周波回路シミュレータ QucsStudio との併用事例を示すと共に，シミュレーションと実測結果とを比較し当機能の妥当性について考察した。

参考文献

1) 日置電機(株），“インピーダンスアナライザ IM7587”，https://www.hioki.co.jp/jp/products/detail/?product_key=1641

2) Agilent Technologies “インピーダンス測定ハンドブック 2003 年 11 月版”, 2003, pp 30-34.

3) 小室貴紀,“インピーダンスアナライザの基礎知識”,RF ワールド No.10，CQ 出版社，2010, pp 51-57.

4) 日置電機(株)，“テストフィクスチャ IM9202”，https://www.hioki.co.jp/jp/products/detail/?product_key=1818

5) 高橋応明， “RFID タグ用アンテナの設計 コロナ社，2012, pp 65-66.

6) エンジャー,“高周波回路シミュレータ QucsStudio 入門: 回路シミュレーションの基本から脱初心者のテクニックまで”，Amazon ペーパーバック，2022.

7) エンジャー, “QucsStudio 実践入門: 実務で役立つ 4 つのシミュレーション手法”，Amazon ペーパーバック，2022.