

高機能材料および電子部品の開発に関する調査研究

Research Study for Development of Electronic Components and High-Performance Materials

平尾 友二*
Yuji Hirao

抄 録

本調査研究では、商用電力システムを用いる制御機器などの電気的基本特性（インピーダンス特性）を測定するために、高速バイポーラ電源とインピーダンスアナライザを連携して、商用電圧下でのインピーダンス測定を実現するとともに、ESR（等価直列抵抗）の測定などの実験により実用性を示した。また、インピーダンスアナライザとネットワークアナライザを用いた液体・固体材料のインピーダンス測定環境を構築するために、液体誘電率測定治具を製作し、インピーダンスアナライザを使って液体の誘電率測定実験を行うとともに、ネットワークアナライザを使った固体の誘電率測定実験を行うことによって、その実用性を示した。本報告ではその手法と実験結果について解説する。

1 はじめに

本研究の目的は、商用電力システムを用いる制御機器などの省力化に役立つ新しい電子部材・電子機器の開発に不可欠な電気的基本特性（インピーダンス特性）の測定環境を整えるとともに、その評価方法のノウハウを習得することであった。

当所では、電気的基本特性（インピーダンス特性）の測定には、主に NF 回路ブロック製インピーダンス・ゲインフェーズアナライザ ZGA5920（0.1mHz～15MHz）（以後、インピーダンスアナライザと称す）と KeySight 製ネットワークアナライザ E5071C（100kHz～6.5GHz）の 2 機種を用いることができる。また、KeySight 製 LCR メータ 4285A（75kHz～30MHz）を用いることもできる。しかし、前述の 2 機種は、高周波機器の開発に伴う研究において、フィルタ回路等のインピーダンス特性測定用に購入した設備であるため、様々な対象のインピーダンス特性を測定するために必要な環境は整えられていなかった。

そこで、本調査研究では、この 2 機種について、様々な対象のインピーダンス特性が測定できるように、不足している周辺治具等について調査し、これを購入・整備した。次に、標準試料や電子部品を実

際に測定することにより、評価方法のノウハウ習得を行ったので報告する。

2 インピーダンスアナライザ

2・1 商用電力システムへの対応

インピーダンスアナライザの最大出力電圧は 10Vpk であるため、これまでは装置単体で商用電力システムに用いる高電圧用電子部品や測定時に高電圧を印可する必要があるセラミック系材料などのインピーダンス測定は出来なかった。そこで、印可電圧を増幅する高速バイポーラ電源を購入し、図 1 に示す測定システムのようにインピーダンスアナライザと連携させることで 250Vpk までの測定を、また、高速バイポーラ電源を 2 台パラレル接続することによ



図 1 測定システム

* 電子技術担当

り±250V の測定を可能とした。

実証実験として、表1のような電力系統用コンデンサについて、これまでの低電圧印可時の特性と使用環境に近い高電圧印可時の特性の比較を行った。

その結果、得られた知見の一例を示す。図2および図3は、電力系統用コンデンサ(QXL2E104KTPT)のインピーダンス特性を測定したものである。電力

系統用コンデンサは、国内では50Hzあるいは60Hzにて用いられることを想定しているため、測定周波数範囲は10Hz～100Hzとした。図2は5Vpkを印可した場合、図3は150Vpkを印可した場合に観測したインピーダンス特性である。比較し易くするため図2と図3の縦軸スケールは同じに設定してある。図2では容量Cpが周波数によって激しく変動を示

表1 測定に使用した電子部品

品 種	型 名	メーカー名	耐電圧	容量	精度
ポリエステルフィルムコンデンサ	ECQE2A104KF	パナソニック	250Vac	100nF	±10%
ポリエステルフィルムコンデンサ	QXL2E104KTPT	ニチコン	250Vac	100nF	±10%
ポリエステルフィルムコンデンサ	ECWF2104JAQ	パナソニック	250Vdc	100nF	±5%
ポリエステルフィルムコンデンサ	FHACD631V104J0LGZ0	日本ケミコン	250Vac	100nF	±5%
積層セラミックコンデンサ	GRM31CR72E104KW03L	村田製作所	250V	100nF	±10%
積層セラミックコンデンサ	QMK325BJ104KN-T	太陽誘電	250V	100nF	±10%
アルミ電解コンデンサ	EEEHB1HR10R	パナソニック	50V	100nF	
アルミ電解コンデンサ	UVK2D0R1MED	ニチコン	200V	100nF	
タンタルコンデンサ	204M5002 104K4	松尾電機	50Vdc	100nF	±10%
タンタルコンデンサ	T356A104K050AT	KEMET	50Vdc	100nF	±10%
紙コンデンサ	PME271E610M	KEMET	300Vac	100nF	±20%
紙コンデンサ	PME271Y433MR30	KEMET	250Vac	3.3nF	±20%
ポリスチレンコンデンサ	FSC		160Vac	10nF	±2.5%
ポリスチレンコンデンサ	EXFS		63Vdc	10nF	±1%

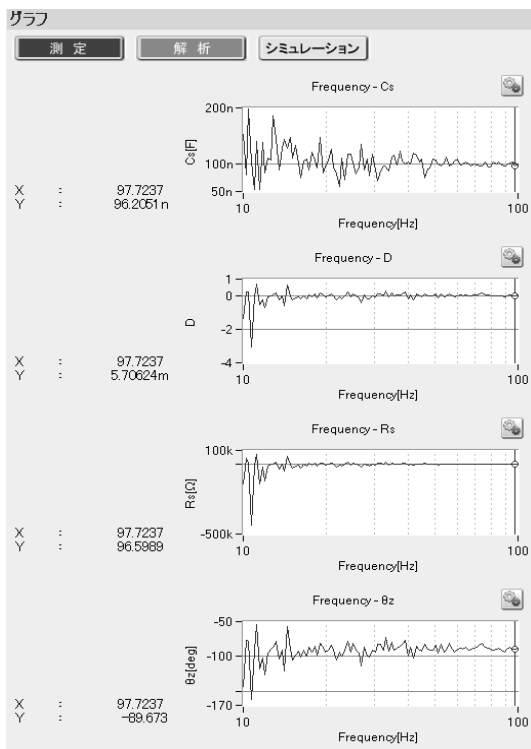


図2 5Vpk印可時の測定結果

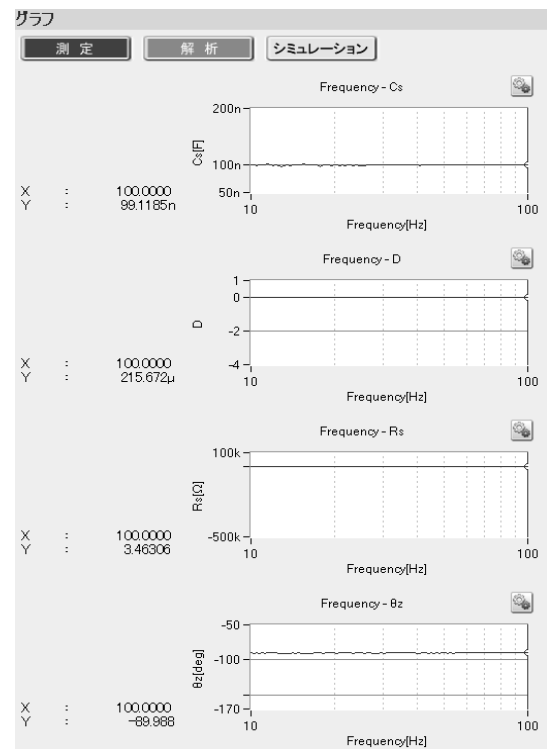


図3 150Vpk印可時の測定結果

しているが、図3では周波数にかかわらずほぼ一定を示している。この結果から解るように、電子部品の特性評価は使用環境に近い条件で測定する方が良い。なお、100Hz以上の高周波数領域では、インピーダンス特性に差異は見られなかった。

2・2 ESR（等価直列抵抗）の測定^{1), 2), 3)}

理想のコンデンサは、C（キャパシタンス成分）のみで表され、そのインピーダンス特性は図4のように周波数に反比例して減少するが、実際のコンデンサは、L（インダクタンス成分）とR（抵抗成分）を有しており、その特性は、周波数が高くなるとCよりもLの方が支配的になる。また、Rの大きいコンデンサでは、異常発振による誤動作の原因や、リップル電流が流れることにより損失が大きくなり、発熱により劣化が促進されるなどの問題を引き起こすこととなる。このため、このR成分をESR（等価直列抵抗）として特に測定したい場合がある。

図5にQMK325BJ104KN-TのESRを実測した結果を、図6にメーカー公表のESRをそれぞれ示す。横軸はともに対数スケールとなっているが、図5の縦軸は1Ω加算前の値で、リニアスケールとなっている。図6の縦軸は対数スケールである。測定されたESR曲線は、図5からおおよそ900kHzで、約480mΩ（1Ω加算後）の最小値を示している。一方、メーカーのデータシートでは、ESR曲線は、1MHz付近で約60mΩの最小値となっている。メーカーのデータシートが、製品の代表例であることなどを考慮すると、周波数的にはほぼ一致していると言えるが、ESRの最小値は異なっており、治具（接続ケーブルなど）の影響かと思われる。

2・3 液体材料の誘電率測定^{4), 5), 6)}

電子材料のインピーダンス測定としてJISC2138を参考に、図7のような液体誘電率測定用簡易治具を設計製作した。これは、地元の化学メーカーなどが大手電機メーカーからの依頼で電子機器に用いられる液体電子材料を製作していることから、液体誘電率の測定やインピーダンス測定の要望があったためである。

製作した治具は、電極長さ100mm、内側電極径25mm、外側電極径27mm、ギャップ1mmとした。

これを使って、標準試薬の比誘電率を測定した結果を表2に示す。電極サイズから算出した比誘電率（理論値）と比較すると、低い試薬では誤差が少ないが、高くなるに従って誤差が大きくなる傾向がみられた。

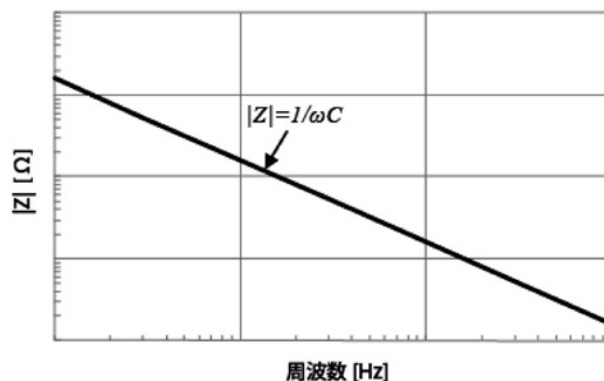


図4 理想コンデンサのインピーダンス特性

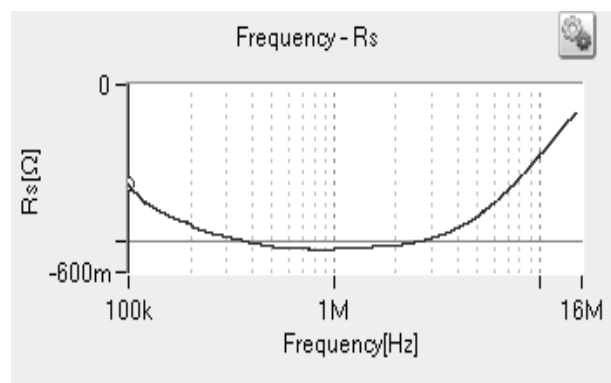


図5 測定値から求めたESR曲線
（縦軸は1Ω加算前）

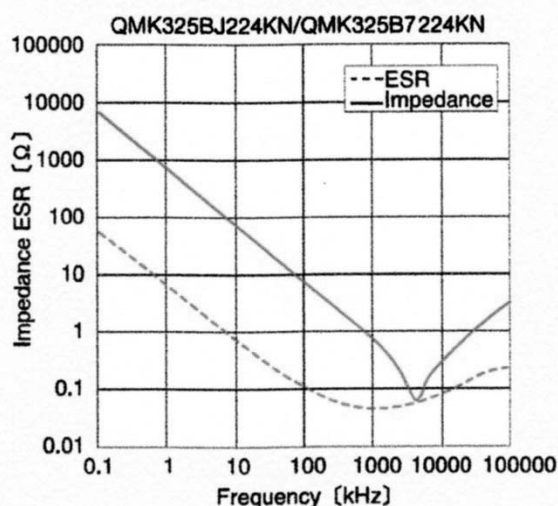


図6 メーカーのデータシート

次にこの結果を理論値とともにグラフ化したものを図8に示す。グラフを見ると計測値は原点を通るほ



図7 液体誘電率測定用簡易治具

表2 試薬の誘電率

試薬名	理想値	実測値	誤差%
トルエン	2.38	2.3	3.36
トリクレン	3.3	3.48	5.45
ジクロロベンゼン	9.93	10.7	7.75
イソプレパノール	18.3	19.8	8.2
アセトン	19.5	21.2	8.72
エタノール	24	27.4	14.17
メタノール	33	38.6	16.97

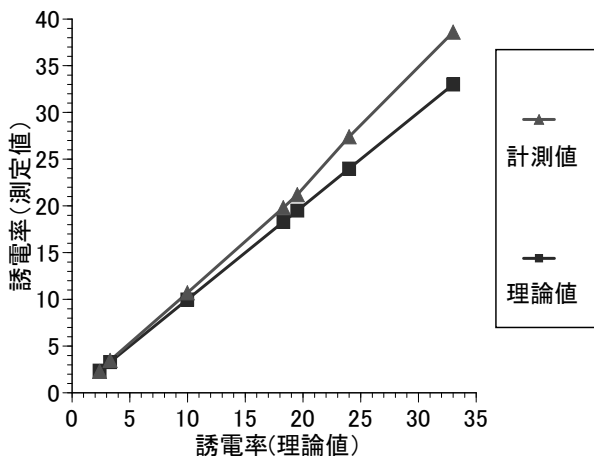


図8 液体試薬の誘電率測定結果

ぼ直線上に並んでいることが解る。このことから、測定値は補正が可能である。理論値とのずれは、治具電極の加工精度の問題が大きいと考えられる。

また、測定においては、治具の洗浄や乾燥が重要であること、測定前に電極に試薬をなじませること、微細気泡を除去することが必要であるなど、経験に伴うノウハウがあり、熟練の必要性を感じた。

今後、簡易治具の電極形状や加工面荒さなどの調整を行い、精度を向上させていきたい。

3 ネットワークアナライザ

3・1 計測環境の整備^{7), 8)}

ネットワークアナライザを用いたインピーダンス測定では、印可した信号の通過・反射電力の周波数特性を測定することでインピーダンスを算出する。このため、使用する治具（接続ケーブルやコネクタなど）には、高周波特性の明確な物が必要とされ、コネクタの締め付けトルクなども測定に影響を与えるため管理する必要がある。

そこで、BNC, SMA, 3.5mm, N, 7mmの4種類のコネクタについて測定環境を整えることとし、欠品しているコネクタ部品を購入した。なお、コネクタおよびテストケーブルは全て50Ω系とした。表3にそれぞれのコネクタの締め付けトルクを、図9に使用するトルクレンチを示す。上からSMA用、3.5mm用、N, 7mm用である。一例として、図10にSMA用治具一式を示す。ネットワークアナライザがN型コネクタを標準としているので、治具には、N-SMA変換コネクタ2個、接続による誤差を補正するために行う校正に必要な、テストリードを2本、SHORT, OPEN, LOAD (50Ω終端)の校正用コネクタをそれぞれ2個、このほかオスおよびメスの中

表3 コネクタの締め付け圧

コネクタの種類	締め付けトルク値	レンチサイズ
SMA	56N-cm/5in-lb	5/16"
3.5mm	90N-cm/8in-lb	5/16"
N	135N-cm/12in-lb	3/4"
7mm	135N-cm/12in-lb	3/4"

継コネクタなどを整えた。

3・2 固体材料の誘電率測定⁹⁾

図11のような固体測定用治具とネットワークアナライザを用いて、固体試料の比誘電率測定実験を行った。固体測定用治具は、地元の化学メーカーと共同で電波吸収用材料などの共同研究を過去に行った際に入手し、保有していた物である。

試料には、周波数依存度が低いことから、安定した値が得られるものと考えられるテフロンを選んだ。

KeySight製ネットワークアナライザE5071Cは、2ポート構成の機器である。まず、コネクタの締め付けはトルクレンチを用いて規定圧で締め付け、ケーブル先端にてOPEN・SHORT・LOADとケーブル先端をスルー接続して行うフル2ポート校正を行った。そして、3~5GHzの範囲で掃引し、このうち、比較

的安定して測れていると思われる3.3MHzで4つのSパラメータ値を計測した。Sパラメータは、入出力関係を示すパラメータで、今回のように試料を挟んで回路が左右対称となるような場合には、 $S_{11}=S_{22}$ 、 $S_{21}=S_{12}$ となる。次に、Sパラメータの値から比誘電率を求めるために、まずインピーダンス表示であるZパラメータに変換し、さらにアドミッタンス表示であるYパラメータに変換して、算出した結果、2.07という値を得た。テフロンの比誘電率の理論値は2なので、測定誤差は3.5%と許容範囲内であった。

Sパラメータから比誘電率を求める演算は複雑で手間が掛かることから、今後、マクロプログラムなどを作成するなど、測定環境の改善を進めていく必要がある。

4 まとめ

研究用に購入していたインピーダンスアナライザとネットワークアナライザに、不足している治具や機器を付加することにより、本調査研究の目的である、商用電力系統を用いる電子部品や機器の測定評価環境および液体・固体材料の電気的基本特性（インピーダンス特性）の測定環境を整えた。そして、測定実験を通じて、測定ノウハウを蓄積し、良好な結果が得られた。実験においては、新たに不足している治具等も判明したので、今後折を見て補充を検討して行きたいと考えている。



図9 トルクレンチ



図10 SMA用コネクタ治具一式

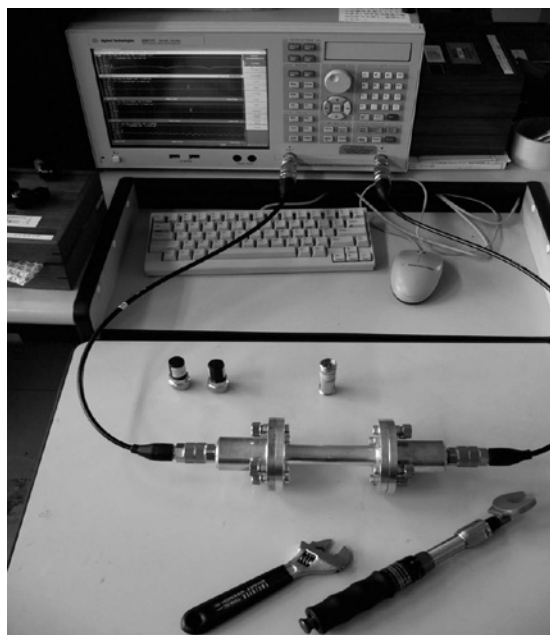


図11 固体試料測定用治具

謝辞

本研究は公益財団法人 JKA の平成 27 年度公設工業試験研究所等における人材育成等補助事業において実施しました。

参考文献

- 1) アルミ電解コンデンサテクニカルノート. ニチコン(株). CAT.1101F.
- 2) Notice for TAIYO YUDEN product, Information on the General Catalog. 太陽誘電(株).
- 3) 鈴木茂夫. 高周波技術入門. 日刊工業新聞社. 2015, 183p., ISBN978-4-526-05177-7.
- 4) JIS C 2138 電気絶縁材料—比誘電率及び誘電正接の測定方法.
- 5) 北沢綾子. 液体の誘電率について. 東京外国語大学日本語学校論集, 1979, vol.6, p. 205-211.
- 6) 加藤悠人. 誘電率等材料定数の測定技術と標準供給に関する調査研究. AIST Bulletin of Metrology, 2014, vol. 9, No. 1, p. 99-116.
- 7) Agilent Technologies. 誘電体測定の基礎. 2014. 25989-2589JAJP.
- 8) Agilent Technologies. ネットワークアナライザの基礎. 2013. 5988-6966JA.
- 9) 市川古都美, 市川裕一. 高周波回路設計のための S パラメータ詳解. CQ 出版社. 2014, 195p., ISBN978-4-7898-3025-6.