

絶縁材料の電気特性に及ぼす電極の影響

Electrode Arrangement for Dielectric Constant

村上 義夫*

Yoshio Murakami

(2000年7月7日 受理)

キーワード：比誘電率，有効面積

1. はじめに

絶縁材料の比誘電率及び損失率の測定は，体積抵抗率や絶縁破壊強さなどの測定とともに絶縁材料の性質を表す基本的な電気特性として重要な位置づけがされている。近年の移動通信機器の普及に伴い，回路基板の設計を行う上で，高周波における比誘電率及び損失率（以下，誘電性と云う）の測定に対する重要性が高まってきている。誘電性の測定において測定周波数が数MHz以下の範囲では，同心円電極が，それ以上の周波数では保護電極を用いない2電極法が広く用いられる。いずれの電極構成を用いた場合でも電極の大きさと電極間隔（試料の厚み）によって主電極の外側への電気力線の拡がりの補正（以下，縁端補正という。）が必要なことは知られていた。その計算式には双曲線関数が用いられ計算が面倒なこと，比誘電率の測定が補正に見合う精度で測定できなかったことなどから，この縁端補正のために，同心円電極を用いた誘電性の測定では，主電極と保護電極との間の距離（間隔）が小さい場合にはその間隔を主電極の直径に加え，補正する方法と，単に主電極の直径そのものを用いる方法が用いられてきた。しかし，計測器の精度の向上に伴い補正が必要な静電容量測定が可能となってきた。あわせてパソコン等の計算処理能力向上によって，補正計算が容易な状況となってきた。

当研究所で実施した多くの誘電性測定について，補正の加え方について検討した結果，ASTM規格に採用されている補正式の有効性が確認されたので，測定例を紹介する。

* システム技術部電子計測グループ

2. 比誘電率の算出

図1に示す同心円電極構成で比誘電率 ϵ_r の測定は，測定試料を電極間に挟み，主電極と対電極間の静電容

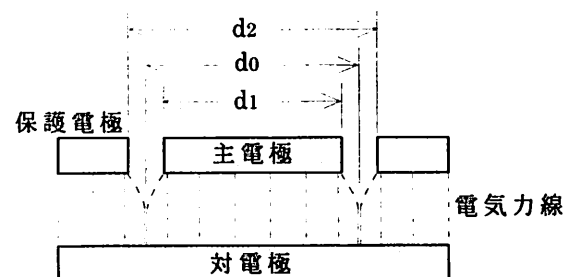


図1 同心円電極配置と電気力線の拡がり

量 C_x を測定し，次式により求める。

$$\epsilon_r = C_x / C_0 \quad \dots (1)$$

ここで， C_0 は幾何学的静電容量と呼ばれ，電極から試料を取り去った場合の真空中における静電容量で，主電極面積 S (mm^2)と試料厚み t (mm)をもとに次式により算出する。

$$C_0 = 0.0088542 * S / t \quad \dots (2)$$

$$\text{ここで } S = \pi d_1^2 / 4$$

3. 電極有効面積の補正

幾何学的静電容量を決定する場合，電極の面積 S は，主電極の外径 d_1 をもとに算出している。同心円電極を用いて誘電性の測定を行う場合，図1の中で点線で示すように主電極から保護電極の方向に電気力線の拡がりを生じ，主電極直径は見かけ上， d_0 まで拡がり，

主電極の有効面積が大きくなる。比誘電率の測定に関してはJIS-K-6911「熱硬化性プラスチック一般試験方法」やJIS-C-2141「電気絶縁用セラミック材料試験方法」などの材料試験方法の中で規定されている。これらの規格でも電極の大きさが異なり、縁端補正についても補正を加えない場合と、補正を加える場合の双方が取り入れられていて、統一されていないのが現状である。この同心円電極を用いた場合の主電極から保護電極の方向への電気力線の拡がりの程度については、多くの理論的な検討が加えられ、その検討結果が材料試験方法の規格の一つであるASTM規格に採用されている。

ASTM-D150¹⁾では詳細な補正を含め電極の厚みおよび電極間の比誘電率の影響を加味した補正式を提案している。提案されている補正式の中から、測定電極に制限の少ないと考えられる2つの補正式によって主電極有効面積を決定する場合と、補正を加えない場合について比較・検討を行った。

主電極の有効面積を求めるために、

a : 主電極の厚み

κ' : 主電極と対電極間にみたまされている材料の誘電率

κ_{μ} : 主電極と保護電極間にみたまされている材料の誘電率

t : 試料厚み (主電極と対電極間の間隔)

とした場合、主電極の厚みが厚く、 $\kappa' = \kappa_{\mu}$ の場合には下記の式(3)で表される¹⁾。

$$2\delta/g = 2/\pi \tan^{-1}(g/2t) - 2t/\pi g \ln[1+(g/2t)^2] \quad \dots\dots (3)$$

また、主電極の厚みにかかわらず $\kappa' \gg \kappa_{\mu}$ の場合には下記の式(4)で表される¹⁾。

$$2\delta/g = 4t/\pi g \ln \cosh(\pi g/4t) \quad \dots\dots (4)$$

上記式(3)および(4)で得られた $2\delta/g$ の値をもとに補正係数Bを次の式で求める。

$$B = 1 - 2\delta/g$$

この補正係数Bを用いて、電極有効面積 S_e を次の式(5)で決定する。

$$S_e = \pi (d_1 + B * g)^2 / 4 \quad \dots\dots (5)$$

ここで d_1 : 主電極直径(mm)

g : 主電極と保護電極との間隔(mm)

4. 補正式の比較

式(3)および(4)で表した補正式から主電極と

保護電極の間隔gが有効面積に与える割合は、間隔gと主電極と対電極との間隔(以下、試料厚みという)tとの比g/tに依存することがわかる。この2つの補正式より算出される補正係数Bの値とg/tとの関係を図2に示す。

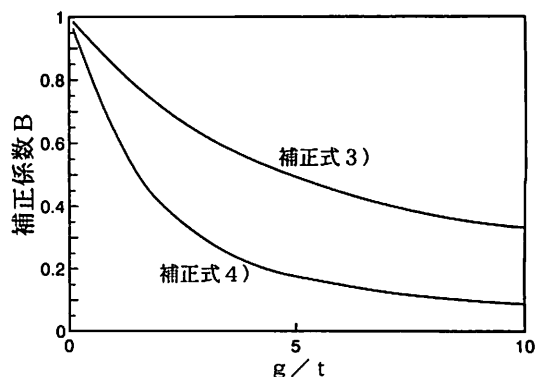


図2 電極間隔gと試料厚みtの比と電極補正係数Bとの関係

図2から、電極の間隔gに比べ試料厚みtが大きく、g/tが小さい場合には、電極有効面積は主電極の直径に間隔を加えた値に近づくが、逆に試料が薄くなり、g/tが大きくなると電極有効面積は主電極の面積そのものに近づくことがわかる。さらに、同一寸法の電極配置を用いた場合、式(4)を用いた場合には式(3)に比べ、電気力線の拡がりを低く抑えていることを図2の曲線は示している。実際の測定では、式(3)の補正は粉体の測定のように電極が試料で埋まるような場合に該当すると考えられる。また、式(4)の補正は通常のシート状試料の測定の場合に該当すると考えられるため、補正式の有効性については式(4)の場合を例に検討を進めた。

5. 比誘電率の測定

比誘電率測定はHP社製LCRメータ4284Aと誘電体損測定用電極を組み合わせて行なった。測定電極は表1に示す主電極及び保護電極を組み合わせ、表2に示す材料に対して、測定周波数1kHz、測定電圧1Vの条件で測定した。電極を接続しているリード線、測定器内部の浮遊容量や残留インダクタンス成分の影響によって生じる静電容量の測定誤差を少なくするために、OPENおよびSHORT補正を実施後、電極間の静電容量を測定し、それぞれの比誘電率 ϵ_r を算出した。

表1 電極構成

電極構成	主電極直径 d_1 (mm)	保護電極内径 d_2 (mm)
①	25	35
②	25	39
③	38	39
④	38	51
⑤	50	51
⑥	50	70

表2 測定試料

測定試料	試料名	厚み (mm)
PTFE	4フッ化エチレン樹脂	3
PMMA	アクリル樹脂	3
PF	紙基材フェノール樹脂	1
PET	ポリエステル樹脂 (SMC)	3

比誘電率の算出結果を測定試料の材料別に、表3(1)～(4)にまとめた。表では、比誘電率の算出基礎となる主電極面積の求め方によって、第2列目に主電極寸法を用いた場合、第3列目は主電極直径に間隔を加えた場合、第4列目には式(4)による補正を加えた場合のそれぞれを電極構成ごとに整理した。

これらの結果から、主電極と保護電極との間隔が0.5mmと狭い電極構成③と⑤を用いた場合には、電極寸法及び補正の有無にかかわらず、偏差の最も大きな試料PFの場合でも最大0.2の差となっており、補正の効果は見られない。補正式を用いた場合には、試料PFの測定において、直径25mmの主電極を用いた電極構成での補正後の値は他の電極構成に比べて大きな値となり、補正の効果が見られなかったが、他の電極構成では、補正が有効であった。さらに、主電極直径に間隔を加える補正を行う方法は間隔が狭い場合には誤差が少ないが、この間隔が数mm以上に拡がると補正が強くなり、比誘電率の算出結果に誤差を生じる。などがわかる。

測定試料PFにおいて、主電極直径が25mmの時、他の電極構成に比べ、比誘電率が大きく測定された理由については、厚みが1mmと他の試料に比べ薄く、 g/l 比が大きくなり、縁端補正を実施しても電極有効面積が大きくならなかったことが考えられるが、これだけでは理由を十分に説明できない。今後、多くの材料についての測定データを解析することで、このような測定結果を得た理由を特定したいと考えている。

表3 比誘電率測定結果

(1) 測定試料：PTFE

電極構成	比誘電率		
	πd_1^2	$\pi (d_1 + g)^2$	$\pi (d_1 + Bg)^2$
①	2.4	1.7	2.1
②	2.5	1.5	2.1
③	1.9	1.9	1.9
④	2.2	1.6	2.0
⑤	2.0	1.9	1.9
⑥	2.2	1.5	2.1

(2) 測定試料：PMMA

電極構成	比誘電率		
	πd_1^2	$\pi (d_1 + g)^2$	$\pi (d_1 + Bg)^2$
①	3.9	2.7	3.3
②	4.0	2.4	3.3
③	3.1	3.1	3.1
④	3.7	2.7	3.2
⑤	3.2	3.2	3.1
⑥	3.6	2.5	3.3

(3) 測定試料：PF

電極構成	比誘電率		
	πd_1^2	$\pi (d_1 + g)^2$	$\pi (d_1 + Bg)^2$
①	6.2	4.3	5.7
②	6.2	3.8	5.8
③	5.1	4.9	4.9
④	5.3	3.9	5.0
⑤	5.0	4.9	4.9
⑥	5.3	3.6	5.0

(4) 測定試料：PET

電極構成	比誘電率		
	πd_1^2	$\pi (d_1 + g)^2$	$\pi (d_1 + Bg)^2$
①	5.2	3.6	4.3
②	5.5	3.3	4.5
③	4.4	4.3	4.3
④	5.0	3.6	4.4
⑤	4.4	4.3	4.3
⑥	4.9	3.4	4.4

6. 測定結果の検討

電極構成の違いによって、比誘電率の測定値に対し補正を加えた結果に、有意な差があるか否かを測定試料ごとの電極の相違による測定値の大小をもとに符号検定法(数値の大小による検定)を用いて統計的に検定した。その結果、主電極の大きさと比誘電率の関係は25mm電極を用いた電極構成①、②場合には他の電極に比べ、大きい数値を示すが、それ以外の電極構成では補正が有効であることがわかった。数値計算でも、

符号検定の結果を裏付ける検定結果が得られた。

したがって、電極の有効面積補正は有効であり、測定主電極を可能な限り大きくすることで、比誘電率算出のもととなる静電容量測定誤差を小さくできる。

7. 広帯域の測定例

誘電特性の測定周波数については、低周波領域から1 GHz帯までの周波数の広い範囲での測定が要望されてきている。このような広い周波数範囲では1台の測定器で測定することは困難で複数の測定器を用いなければならない。このように複数の装置を用いて測定すると測定器の違いによる誘電性の測定結果の連続性が損なわれることが多いが、電子回路用の印刷配線基板材料について、100Hz～1 GHzの範囲について測定した結果、図3に示すように連続性が保たれる結果を得ることができた。この測定において、低周波側では、主電極は直径50mm、保護電極には内径70mmの電極を用いて、有効面積補正を行なった。高周波側では、比誘電率既知の試料の測定値を測定器内部に記憶させ、実効的な電極の有効面積補正を行なった。

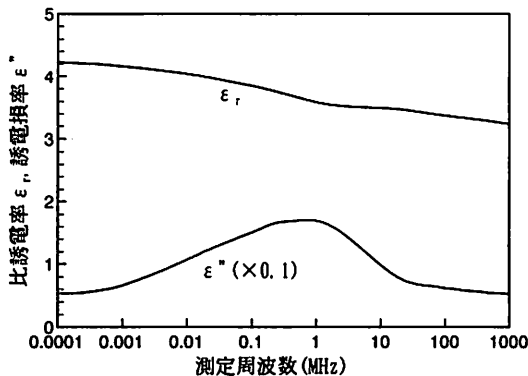


図3 広帯域における誘電特性測定例

8. 体積抵抗率測定時の補正

誘電性測定時には、電気力線の拡がりを押さえるために主電極と保護電極の間隔を十分に狭くすることができるが、誘電性測定と同様の電極構成を用いる体積抵抗率測定では、主電極と保護電極との間隔を狭くしすぎるとこの間の抵抗が小さくなり、測定に影響をおよぼすために狭くできない。そこで、先に述べた補正式(4)を用いて電極の有効面積を測定試料厚みをもとに求めると図4のような結果となって、主電極の直

径が50mmで保護電極内径が70mmの場合には、試料厚みが3mm以上の時、補正後の有効面積をもとに計算された抵抗率は、主電極面積だけをもとに抵抗率を計算する場合に比べ、10%以上高くなる。

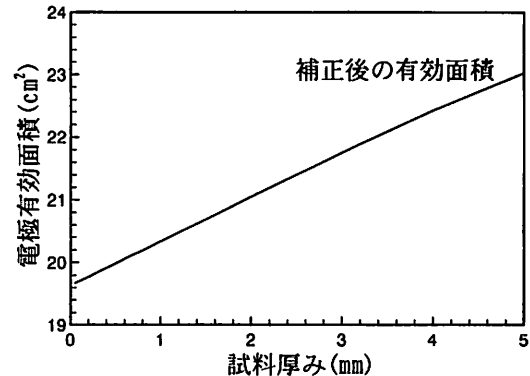


図4 抵抗率測定電極の有効面積と試料厚みの関係

9. 最後に

絶縁材料の誘電性測定は多くの実施例があり、本報告の内容も周知のことが多いと思われる。しかし、先にも述べたようにJIS規格を参考に測定を実施した場合、電極の有効面積について考慮しないことがあり、測定電極の大きさや試料の厚みが異なった場合の相互比較を行う場合には補正が重要であることが、本報告よりわかる。

本測定結果をもとに誘電性および抵抗率測定時の要点をまとめると以下ようになる。

1. 比誘電率の計算には主電極と保護電極との間の間隔の補正が必要である。
2. 体積抵抗率の計算も抵抗測定機器の精度が向上しているために主電極と保護電極との間の間隔の補正が必要である。
3. 測定主電極は可能な限り大きな電極を用いる。

当研究所では、以上の理由から、誘電性及び抵抗率の測定に際し、電極の補正を加えて測定を実施しているところである。この報告が同様な測定を行っている技術者各位の参考になれば幸いです。最後に30MHzを超える周波数帯での誘電性測定について、当研究所、システム技術部電子計測グループの田中健一郎氏の協力を得たことに謝辞を申し上げる。

参考文献

- 1) ASTM-D150-1993