

ガラスの電気的特性の評価方法

日本板硝子(株) 研究開発部 日本統括部

田島 扶久江

Evaluation of electrical properties of glass

Fukue Tajima

R&D Japan

Nippon Sheet Glass Co., Ltd.

1. はじめに

ガラスは、ディスプレイや電子回路基板のような絶縁体からリチウム電池の電解質のような導電体まで、それぞれの電気的特性を活かした幅広い用途で利用されている。このようなガラスの組成開発において、電気的特性の評価が行われている。電気的特性の評価方法の規格は幾つか制定されているが、ガラスを対象とした規格は少なく、評価方法の多くはセラミックスもしくは電気絶縁材料を対象とした規格に準拠している。本稿では、ガラスの電気的特性を評価する際に利用されている JIS 規格を中心に、電気的特性の評価方法の概要と評価時の留意点について説明する。また、簡単に規格間の違いに触れる。

2. ガラスの電気的特性について

ガラスで評価される電気的特性としては、導電特性と誘電特性の2つが挙げられる。

導電特性は電気の流れ易さを示す特性である。多くのガラスは電気を流し難い材料であることから、導電率ではなく抵抗率で評価するこ

とが一般的である。その抵抗率には、体積抵抗率と表面抵抗率の2種類があり、両者ともに絶縁材料として必要な性能の「高抵抗を有すること」を確認するために評価される。

誘電特性は、誘電現象の発生のし易さを示す特性であり、比誘電率および誘電正接で示される。比誘電率が低い材料は、蓄えられる静電エネルギー量が小さく、絶縁性に優れている。反対に蓄えられる静電エネルギー量が大きい場合はコンデンサとしての利用価値が見出される。ゆえに、絶縁材料やコンデンサとしての性能を評価する際に、比誘電率の測定が行われる。また、誘電正接が大きいと大きな電力損失をもたらすことから、誘電正接は絶縁材料としての評価時に確認されることが多い。

電気的特性の評価方法に関する規格一覧を表1に示す。表1に示される規格は全て、基本的には同じ測定原理に基づいている。表面抵抗率は、ディスプレイ素子に用いるガラス基板の重要な特性であることから、ガラスを対象とした評価方法の規格が制定されている。

3. ガラスの電気的特性の評価方法

3-1. 導電特性の評価方法

一般に抵抗率に関して、絶縁体のような高抵抗から導電体のような低抵抗までの範囲を1つの手法で測ることは難しい。このため、抵抗率

表 1 電気的特性の評価方法の規格^{1)~9)}

規格 物性	JIS		ASTM	IEC
体積抵抗率	JIS C2141 電気絶縁 用セラミ ック材料 試験方法	JIS C2139 固体電気絶縁材料 一体積抵抗率及び 表面抵抗率の測定 方法	ASTM D257-07	IEC 62631-3-1
表面抵抗率		JIS R3256 基板ガラス表面 の電気抵抗率の 測定方法		IEC 62631-3-2
誘電特性		JIS C2138 電気絶縁材料－比 誘電率及び誘電正 接の測定方法	ASTM D150-11	IEC 60250

は、 $10^6\Omega$ 程度の抵抗値を閾値として2通りの方法で求められている。 $10^6\Omega$ 以下の抵抗率の場合は定電流印加法で、それ以上の場合は定電圧印加法で測ることが一般的である。ガラスの場合、常温において多くが絶縁体であることから、定電圧印加法が用いられている。

3-1-1. 体積抵抗率の評価方法

図1に体積抵抗率の測定回路図の例を、図2に試験片の電極付与例を示す。図2に示すように、ガラス試験片に主電極、対電極およびガー

ド電極を付け、主電極と対電極の間に規定の直流電圧を印加する。その際に流れる電流を高絶縁抵抗計で計測し、体積抵抗を算出する。算出された体積抵抗を用いて、式(1)~(3)より体積抵抗率を求める。尚、ガード電極は、その印加時に主電極と対電極の間以外に流れる漏れ電流をアースに逃がし、主電極と対電極の間に流れる電流のみを検出するために付けてある。

$$\rho_v = \frac{A}{d} R_v \tag{1}$$

$$A = \frac{\pi(D_1 + g)^2}{4} \tag{2}$$

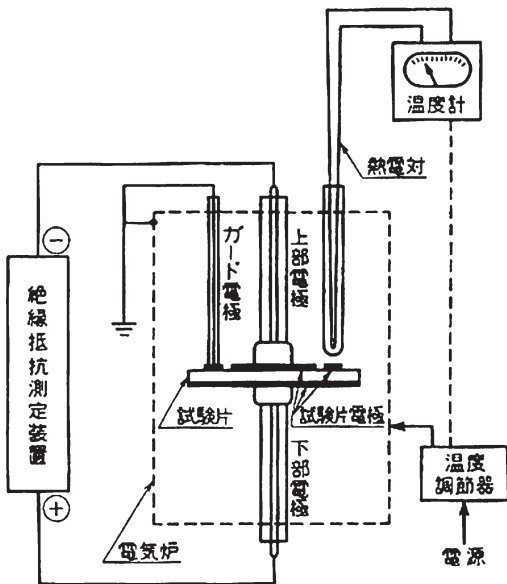
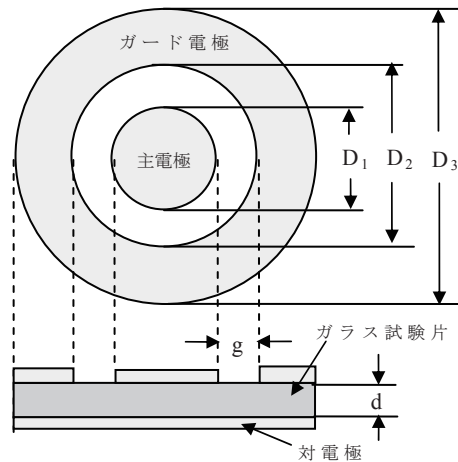


図1 体積抵抗率の測定回路図例¹⁾



d: 試験片の厚さ, g: 主電極とガード電極の隙間, D₁: 主電極の直径, D₂: ガード電極の内径, D₃: 対電極の直径

図2 体積抵抗率測定試験片の電極付与例

$$g = \frac{D_2 - D_1}{2} \quad (3)$$

- ここで、 ρ_v ：体積抵抗率 ($\Omega \cdot m$)
- R_v ：体積抵抗 (Ω)
- A ：主電極の有効面積 (m^2)
- d ：試験片の厚さ (m)
- g ：主電極とガード電極の間隙 (m)
- D_1 ：主電極の直径 (m)
- D_2 ：ガード電極の内径 (m)

絶縁材料の特性上、電極間に直流電圧を印加した際に流れる電流は、誘電分極および移動性イオンの電極への移動により時間とともに漸近的に減少する。体積抵抗率が約 $10^{10} \Omega m$ 未満の材料の場合は、一般に1分以内に定常状態に達することから、抵抗はこの課電時間経過後に測定するように規定されている^{1),7)}。体積抵抗率がより高い材料については、その時間依存性に合わせて適切な印加時間を設定する方が良いとされている^{2),5),7)}。

体積抵抗率の測定の前提としては、表面に沿って流れる漏れ電流や試験片と電極との界面で起こり得る分極現象はないものと考えられている。しかし、体積抵抗率が高いガラスでは、表面の僅かな汚染物や水分が付着することにより容易に漏れ電流が発生するため、その影響を抑えるためには表面の取り扱いに注意するとともに、温度、湿度および電圧の設定にも留意する

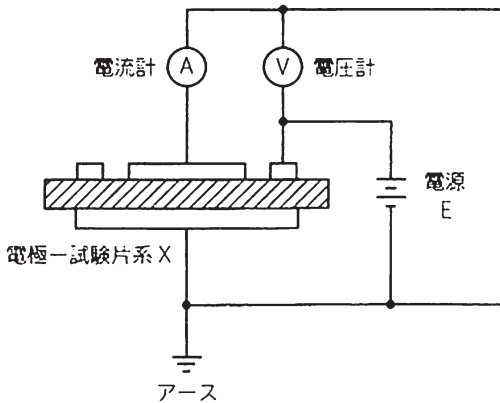


図3 表面抵抗率の測定回路図例¹⁾

ことが必要である。

3-1-2. 表面抵抗率の評価方法

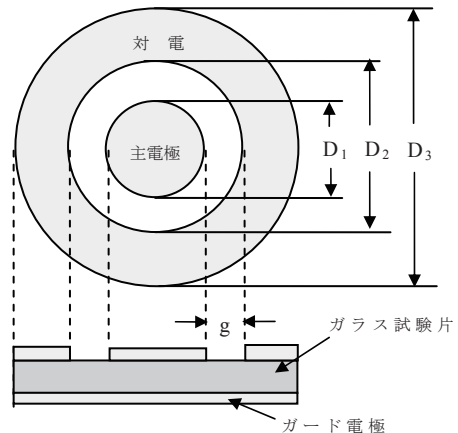
図3に表面抵抗率の測定回路図の例を、図4に試験片の電極付与例を示す。図4に示すように、ガラス試験片に主電極、対電極およびガード電極を付け、主電極と対電極の間に規定の直流電圧を印加する。その際に流れる電流を高絶縁抵抗計で計測し、表面抵抗を算出する。算出された表面抵抗を用いて、式(4)および式(5)より表面抵抗率を求める。尚、ガード電極は、体積抵抗率と同様、印加時に主電極と対電極の間以外に流れた漏れ電流を除去するために付けてある。

$$\rho_s = \frac{D_m \pi}{g} R_s \quad (4)$$

$$D_m = \frac{D_1 + D_2}{2} \quad (5)$$

- ここで、 ρ_s ：表面抵抗率 (Ω)
- R_s ：表面抵抗 (Ω)
- D_m ：電極の平均直径 (m)
- g ：主電極と対電極間の隙間 (m)
- D_1 ：主電極の直径 (m)
- D_2 ：対電極の内径 (m)

表面抵抗率の測定において、電極間に直流電



g ：主電極とガード電極の間隙、 D_1 ：主電極の直径、 D_2 ：対電極の内径、 D_3 ：ガード電極の直径

図4 表面抵抗率測定試験片の電極付与例

圧を印加した際に計測する電流には試験片の表面だけでなく試験片の内部を流れた電流も一部含んでいる。そのため、多少の体積抵抗率成分を含むものとして数値を取り扱う方が良い。

また、体積抵抗率と同様、表面の汚染物の影響があるため、影響する可能性がある溶剤および水分（湿度）などには十分配慮し、試験片の表面を清浄にすることが重要である。そのため、JIS R 3256では、「試験片の洗浄は表面を中性洗剤を用いて、こすり洗いをした後水道水によるすすぎを行い、更に超純粋、アセトン、エタノールなどの溶剤中で超音波洗浄を行う。」と具体的に定められている。尚、表面抵抗率の測定における水分の影響は極めて急速に変化することから、測定時に急激な抵抗率の変化がある場合は水分の影響を疑うと良い。

3-1-3. 抵抗率のデータ処理について

ガラスの電気伝導は、概ねイオン伝導であることから、理論的には式(6)のアレニウス式の考え方に従うとされている¹⁰⁾。

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{\rho_0} \exp\left(-\frac{\Delta H_{dc}}{RT}\right) \quad (6)$$

ここで、 σ ：導電率

ρ ：抵抗率

ρ_0 ：定数

ΔH_{dc} ：電気伝導の活性化エネルギー

R ：気体定数

T ：温度

式(6)の対数をとると、式(7)が得られる。

$$\log \rho = \log \rho_0 + \frac{\Delta H_{dc}}{RT} \quad (7)$$

式(7)から、温度の逆数(1/T)と抵抗率の対数(log ρ)との間に一次式の関係があることが分かる。このアレニウスプロットが、抵抗率のデータ処理時に一般的に利用される。特に常温の抵抗率は、複数の高温での測定値から求められた直線式を用いて外挿することが科学的に

有意義とされている⁴⁾。その理由としては2つ挙げられる。1つ目は、水分の影響が少ない高温の測定値を用いることによる測定誤差の抑制である。2つ目は、測定装置の絶縁抵抗以上の抵抗率を示すために常温での測定が不可能なガラスについて常温の抵抗率を算出できることである。

図5にガラス数種のアレニウスプロットの一例を示す。図5の近似直線は高温側の測定値4点を用いて求めたものとなっている。図5に示すように、低温で高抵抗を示す石英ガラスや高歪点ガラスの場合の実測値は、アレニウスプロットから外れて低い抵抗率を示すものとなっているが、抵抗が比較的高くないソーダ石灰ガラスの実測値は、低温域においてもアレニウスプロットに概ね乗っている。このように、高抵抗を示すと予想されるガラスに対しては、アレニウスプロットによる外挿が有効であることが分かる。一方、ソーダ石灰ガラスのように抵抗が比較的高くないガラスについては外挿でも実測値でも求めることが可能である。尚、測定可能な抵抗値の上限は測定装置や測定環境ごとに異なる。

3-2. 誘電特性の評価方法

誘電特性は、試験片に対向する主電極と対電極間に高周波の交流電圧を印加した際の静電容量および誘電正接をLCRメーターやインピー

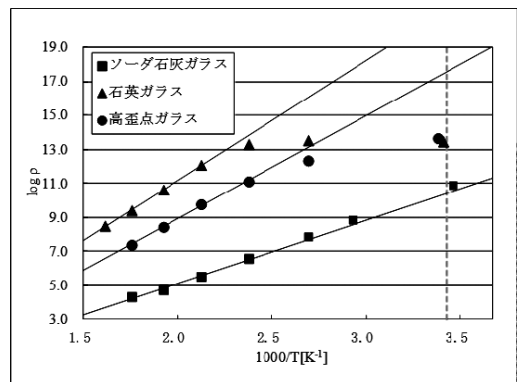


図5 ガラス数種のアレニウスプロット

ダンスアナライザなどで測定することにより得られる。比誘電率は、測定した静電容量から式(8)~(10)を用いて求められる。図6に試験片の電極付与例を示す。ガード電極は、主電極と対電極の間以外に発生する電界により静電容量が増加することを防ぐために付けられる。

$$\epsilon = \frac{C_x}{C_o} \quad (8)$$

$$C_o = \frac{\left(\frac{D_1 + g}{2}\right)^2}{3.6 d} \times 100 \quad (9)$$

$$g = \frac{D_2 - D_1}{2} \quad (10)$$

ここで、 ϵ_r ：比誘電率

C_x ：試験片の主電極の静電容量値 (pF)

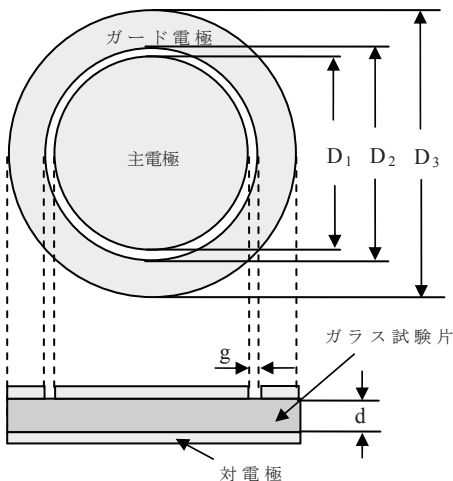
C_o ：主電極の面積および試験片の厚さから算出した比誘電率 $\epsilon = 1$ のときの静電容量値 (pF)

D_1 ：主電極の直径 (m)

g ：主電極とガード電極間の隙間 (m)

d ：試験片の厚さ (m)

D_2 ：ガード電極の内径 (m)



d ：試験片の厚さ、 g ：主電極とガード電極の隙間、 D_1 ：主電極の直径、 D_2 ：ガード電極の内径、 D_3 ：ガード電極の直径

図6 比誘電率測定試験片の電極付与例

誘電特性は周波数により変化する。この誘電特性の変化は、有極性分子の双極子配向および材料内の不均一性から引き起こされる界面分極などの誘電分極および電気伝導によって引き起こされるものである。実質上、比誘電率および誘電正接が一定とみなせる誘電材料は、少数の材料に限られており、ガラスは該当しないことから、実際に使用される周波数で測定することが重要である。また、周波数による影響は、温度や水分の存在(湿度)により変化するため、温度および湿度は使用環境に近い条件にて計測することが良い。

周波数以外には、温度及び試料の水分含有量の様な物理的条件、また、特殊な場合として、電界の強さの影響を受けるため、測定時にはこれらの影響を受けないように注意する必要がある。もしくは、条件を記載することを推奨する。

4. 規格間の相違点

JIS, ASTM 及び IEC 規格間においては、抵抗率計測時の電極寸法に違いがある。表2に、各規格の電極寸法の比較一覧を示す。

高抵抗を示すガラスの場合、数式上では主電極の面積が大きい方が抵抗値の測定誤差は小さくなると考えられる。しかし、主電極の面積増加に伴い、電極と試験片の接触ムラの誤差が発生し易くなることから、主電極寸法を単純に大きくすればよいというものでもない。大凡5 mm 以下のガラス厚みでは JIS 規格の寸法が実用的と考えられるが、ガラス厚みがより大きくなる場合は、ASTM 規格に示されるように厚みに応じて電極寸法を大きくした方が良い。

5. おわりに

本稿では、ガラスの電気的特性を評価する手法や留意点について JIS 規格に基づき説明した。ガラスが電子材料の1つとして注目されている今、その電気的特性の評価はガラスの組成開発を進めて行く上で重要と考えられる。本稿

表2 抵抗率計測時の電極寸法の違い [mm]

寸法	規格		IEC62631-3-1	IEC62631-3-2			ASTM-257
	JIS C2141	JIS R3256		タイプ 1	タイプ 2	タイプ 3	
D ₁ : 主電極の直径	約 26	約 26~36	記載なし	50	76	25	d の 4 倍以上
D ₂ : ガード電極の内径	約 38	約 38		60	88	38	D ₁ +4d
D ₃ : 対電極の直径	約 48	約 48		80	100	50	D ₂ +4d

が多くの方のより良い電気的特性評価に繋がれば幸いである。

参考文献

- 1) JIS C 2141 「電気絶縁用セラミック材料試験方法」
- 2) JIS C 2139 「固体電気絶縁材料－体積抵抗率及び表面抵抗率の測定方法」
- 3) JIS C 2138 「電気絶縁材料－比誘電率及び誘電正接の測定方法」
- 4) JIS R 3256 「基板ガラス表面の電気抵抗率の測定方法」
- 5) ASTM D 257-07 “Standard Test Methods for DC Resistance or Conductance of Insulating Materials”
- 6) ASTM D 150-11 “Standard Test Methods for AC Loss Characteristics and Permittivity (Di-

- electric Constant) of Solid Electrical Insulation”
- 7) IEC 62631-3-1 “Dielectric and resistive properties of solid insulating materials-Part 3-1 : Determination of resistive properties (DC methods) -Volume resistance and volume resistivity -General method”
 - 8) IEC 62631-3-2 “Dielectric and resistive properties of solid insulating materials-Part 3-2 : Determination of resistive properties (DC methods) -Surface resistance and surface resistivity”
 - 9) IEC 60250 “Recommended methods for the determination of the permittivity and dielectric dissipation factor of electrical insulating materials at power, audio and radio frequencies including meter wavelengths”
 - 10) 作花済夫, 境野照雄, 高橋克明 「ガラスハンドブック」(朝倉書店)