

# HVIGBTモジュールのシリコンゲルの吸湿挙動と結露リスクの調査

羽鳥憲司\*

Kenji Hatori

登 羽香奈†

Wakana Noboru

中村圭一\*

Keiichi Nakamura

Investigation of Humidity Absorption Behavior and Condensation Risk of Silicone Gel in HVIGBT Modules

## 要 旨

大電力を高速にスイッチングする三菱電機のHVIGBT (High Voltage Insulated Gate Bipolar Transistor)モジュールは、1997年に製品化して以来、高い信頼性が評価され、主に電鉄の駆動システムなどの電力変換装置に広く採用されてきた。

近年、市場の拡大に伴ってパワー半導体が様々な環境下で使用されるようになってきた。電鉄・電力市場では、高い信頼性が求められるため、こうした様々な環境に対する耐環境性能を確認することの重要性が高まっている。また、湿度の高い環境については、モジュールが密閉構造ではないため、その影響を完全に排除することは難しく、耐湿性の向上とその確認技術が強く求められていた。そのため、

当社ではHVIGBTモジュールの耐湿性向上<sup>(1)(2)</sup>及び耐湿性確認技術<sup>(3)(4)(5)</sup>の構築に取り組んできた。

湿気の侵入という観点で見ればHVIGBTモジュールにはローパスフィルタとして機能するシリコンゲルを充填しており、このシリコンゲルの吸湿挙動を理解することがHVIGBTモジュールの耐湿性を議論する上で重要になる。そのため、シリコンゲルの次に挙げる吸湿挙動や結露リスクを明らかにした<sup>(6)</sup>。

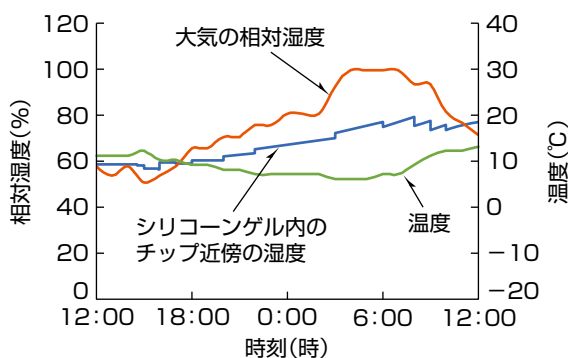
- (1) 異なる二つの方式での結露試験での素子の吸湿挙動
- (2) 様々な環境下での素子の吸湿挙動
- (3) 市場環境での素子の吸湿挙動

### シリコンゲルの吸湿モデル式

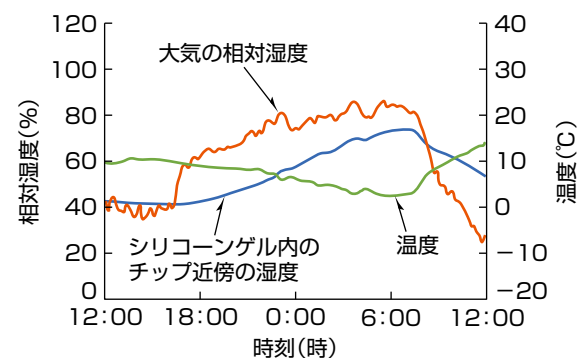
$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial c}{\partial x} \right) \quad D = D_0 \exp \left( -\frac{E_D}{RT} \right)$$

$$c(t=\infty) = S \cdot P_v \quad S = S_0 \exp \left( -\frac{\Delta H_S}{RT} \right)$$

$c$  : 水蒸気溶解度,  $D$  : 拡散係数,  $E_D$  : 活性化エネルギー,  $R$  : 気体定数,  $S$  : 水蒸気溶解度係数



ロンドンの環境データ(2020年2月1日~2日)に基づくHVIGBTモジュール内のシリコンゲルの吸湿シミュレーション結果



東京の環境データ(2020年2月4日~5日)に基づくHVIGBTモジュール内のシリコンゲルの吸湿シミュレーション結果

### シリコンゲルの吸湿モデルに基づく市場環境下でのシリコンゲルの吸湿シミュレーション結果

2020年のロンドン及び東京の環境データから高湿環境下の1日を抽出し、HVIGBTモジュール内の吸湿シミュレーションを実施した。大気相対湿度が100%RH(Relative Humidity)に達しているような条件下でもシリコンゲル内の湿度は100%を大きく下回っており、大気に比較してシリコンゲル内の結露リスクが小さいことを確認した。

## 1. ま え が き

鉄道は他の交通機関と比較してエネルギー効率に優れており、交通分野全体の環境負荷の軽減に資することから、地球温暖化問題の解決への貢献のため、鉄道の利用が世界的に促進されている。また、低炭素社会の実現の観点から、鉄道の非電化区間の電化や、蓄電池車両の導入などが推進されている。それに伴って、電車が地球上の様々な環境で走行するようになってきた。

鉄道車両用パワーモジュールは小型、低損失であることに加えて、民生、一般産業用途に比べて高い信頼性が要求されている。そのため、こうした様々な環境に対する耐環境性能を確認することの重要性が高まっている。特に湿度の高い環境については、モジュールが密閉構造ではないため、その影響を完全に排除することは難しく、耐湿性の向上とその確認技術が強く求められていた。

こうした背景を踏まえて、当社ではHVIGBTモジュールの耐湿性向上及び耐湿性確認技術の構築に取り組んできた。HVIGBTモジュールには湿気の侵入という観点で見ればローパスフィルタとして機能するシリコンゲルが充填されており、このシリコンゲルの吸湿挙動を理解することがHVIGBTモジュールの耐湿性を議論する上で重要になる。しかしながら、これまでシリコンゲルのような材料レベルの吸湿挙動の研究はなされてこなかった。

本稿では、シリコンゲルの吸湿挙動と結露リスクの調査結果について述べる。

## 2. シリコンゲルの吸湿挙動

一般にHVIGBTモジュールはシリコンゲルが充填されている。シリコンゲルのような樹脂は周囲環境に依存して吸湿し、その吸湿量は水蒸気の拡散と溶解で説明できることが知られている<sup>(7)(8)</sup>。水蒸気の溶解度 $c$ は式(1)で示されるフィックの法則を用いて拡散係数 $D$ で表される。この拡散係数 $D$ は式(2)に示すように頻度因子 $D_0$ と気体定数 $R$ 、活性化エネルギー $E_D$ 、温度 $T$ で表される。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial c}{\partial x} \right) \dots\dots\dots (1)$$

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_D}{RT}\right) \dots\dots\dots (2)$$

一方、吸湿が十分飽和した状態での溶解度 $c_{(t=\infty)}$ は式(3)に示すように溶解度係数 $S$ と水蒸気圧 $P_v$ で表される。この溶解度係数 $S$ は式(4)に示すように頻度因子 $S_0$ と気体定数 $R$ 、エンタルピー $\Delta H_s$ 、温度 $T$ で表される。

$$c_{(t=\infty)} = S \cdot P_v \dots\dots\dots (3)$$

$$S = S_0 \exp\left(-\frac{\Delta H_s}{RT}\right) \dots\dots\dots (4)$$

これらの拡散係数 $D$ と溶解度係数 $S$ の特定がシリコンゲルの吸湿挙動を理解する上で重要であり、これらを特定するために吸湿時のシリコンゲルの質量増加の傾向を測定した。図1に示すように、直径5.000mmの金属シリンドラにシリコンゲルを1.823mm充填したサンプルを準備し、まず50℃/0%RHで8時間乾燥させた。その上で、25℃/45%RH、40℃/45%RH、45℃/45%RHのそれぞれの槽に入れて、質量変化を測定した。

測定結果を表1及び図2に示す。表1に示すように、シリコンゲルの水蒸気溶解度は大気の水蒸気密度の約20倍になっており、この事実はシリコンゲルに水蒸気が溶解していることを示唆していると言える。この結果を用いて式(3)から各条件下での溶解度 $S$ を算出できる。図3に示すように、溶解度係数 $S$ は温度に対して負の相関を示すことを確認した。

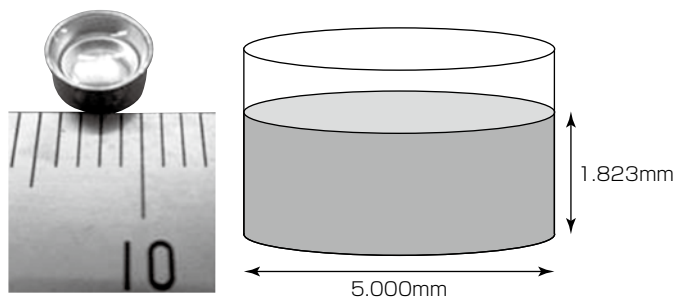


図1. 吸湿下でのシリコンゲル質量測定サンプル

表1. 様々な環境条件下での水蒸気溶解度測定結果

周囲環境	シリコンゲルの水蒸気溶解度(mg/mm <sup>3</sup> )	大気の水蒸気密度(mg/mm <sup>3</sup> )
25℃/45%RH	2.89 × 10 <sup>-4</sup>	1.04 × 10 <sup>-5</sup>
40℃/45%RH	4.05 × 10 <sup>-4</sup>	2.30 × 10 <sup>-5</sup>
45℃/45%RH	4.39 × 10 <sup>-4</sup>	2.94 × 10 <sup>-5</sup>

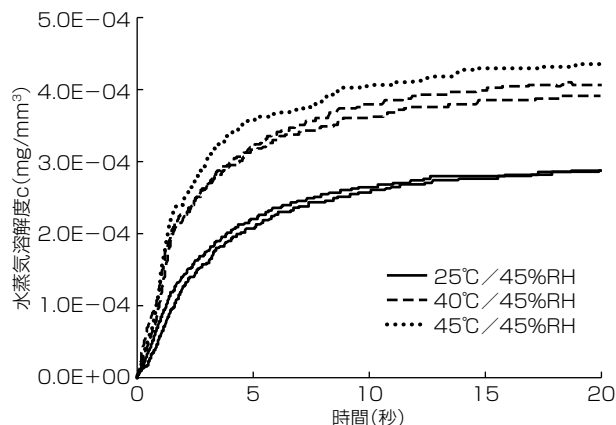


図2. 様々な環境条件下でのシリコンゲル質量増加

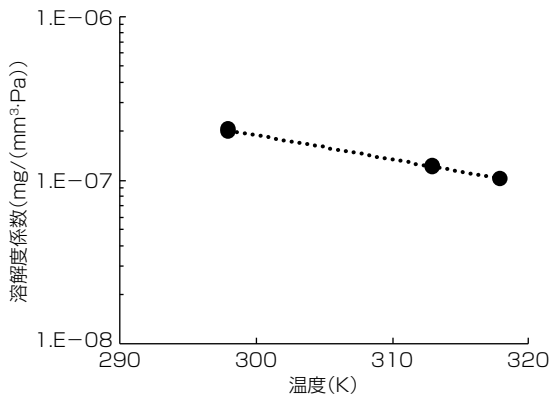


図3. シリコーゲルの溶解度係数の温度依存性

図3と式(4)から、エンタルピー $\Delta H_s = -26.8\text{kJ/mol}$ 、頻度因子 $S_0 = 4.12 \times 10^{-12}\text{mg}/(\text{mm}^3 \cdot \text{Pa})$ と計算される。

一方、拡散係数 $D$ については、溶解度増加の傾きを用いて近似的に算出する方法がB. Ellis等によって提案されている<sup>(9)</sup>。この近似式を式(5)に示す。ここでの $L$ はサンプルの樹脂の厚さである。図4で、横軸に $t^{0.5}/L$ を取って、縦軸に $c(t)/c(t=\infty)$ を取っている。質量増加カーブの傾きは $0.2 < c(t)/c(t=\infty) < 0.6$ の範囲から算出した。その結果を表2及び図5に示す。

$$\frac{c(t)}{c(t=\infty)} = 2 \sqrt{\frac{Dt}{L^2\pi}} \dots\dots\dots (5)$$

図5に示すように、シリコーゲルの水蒸気拡散係数 $D$ は温度に対して正の相関を示すことが確認された。図5及び式(2)から、活性化エネルギー $E_D = 20.8\text{kJ/mol}$ 及び頻度因子 $D_0 = 40.3\text{mm}^2/\text{s}$ と計算される。

算出された溶解度係数を基に $40^\circ\text{C}/80\%RH$ での溶解度は $715\text{g}/\text{m}^3$ と計算される。急冷時は溶解度(SH)を一定とみなすことができるため、図6の $SH = 715\text{g}/\text{m}^3$ のカーブから $40^\circ\text{C}/80\%RH$ から $10.5\text{K}$ 温度低下した際にシリコーンゲル内が結露することが分かる。一方、大気は急冷時に絶対湿度(AH)を一定とみなすことができ、図6の $AH = 41\text{g}/\text{m}^3$ のカーブから、 $40^\circ\text{C}/80\%RH$ から $4.4\text{K}$ の温度

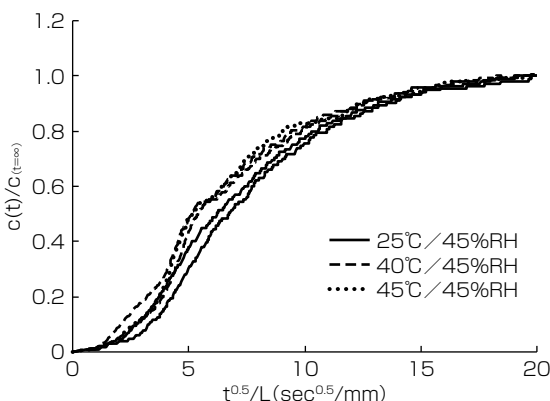


図4. 様々な環境条件下でのシリコーンゲル質量増加

表2. シリコーゲルの拡散係数

周囲環境	重量増加の傾き： $2 \times (D/\pi)^{0.5} (\text{mm}/\text{s}^{0.5})$	拡散係数( $\text{mm}^2/\text{s}$ )
25°C/45%RH	0.108	$9.19 \times 10^{-3}$
40°C/45%RH	0.135	$1.44 \times 10^{-2}$
45°C/45%RH	0.137	$1.48 \times 10^{-2}$

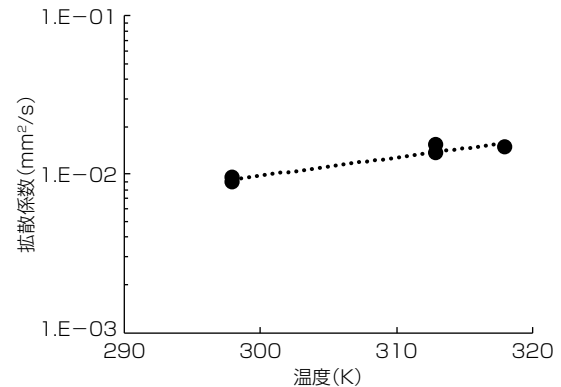


図5. シリコーゲルの水蒸気拡散係数の温度依存性

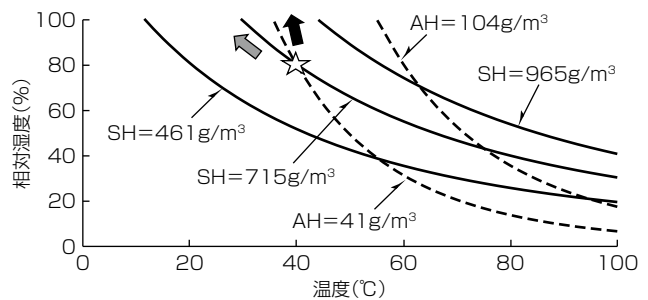


図6. 溶解度(SH)曲線と絶対湿度(AH)曲線

低下によって大気中では結露することが分かる。すなわち、大気と比べてシリコーンゲル中での結露は発生しにくいことが確認された。

### 3. 市場環境下でのゲルの吸湿挙動

導出されたシリコーゲルの水蒸気溶解度係数と水蒸気拡散係数を用いて、市場での吸湿リスクについて調査した。この調査では、素子の動作による加熱効果は考慮せず、単純化して外気による温度変化と素子の温度変化は同等にした。ここでは、東京とロンドンの2020年の環境データのうち、夏と冬で比較的湿度が高かった日を抽出し、シリコーンゲルの吸湿シミュレーションを実施した。その結果を図7、図8、図9、図10に示す。

シリコーンゲル内チップ近傍の湿度は早朝に高くなる傾向を示しており、早朝が最も結露リスクが高いことが確認された。しかし、周囲環境が100%近い相対湿度を示す場合でも、シリコーンゲル内チップ近傍の湿度は100%を下

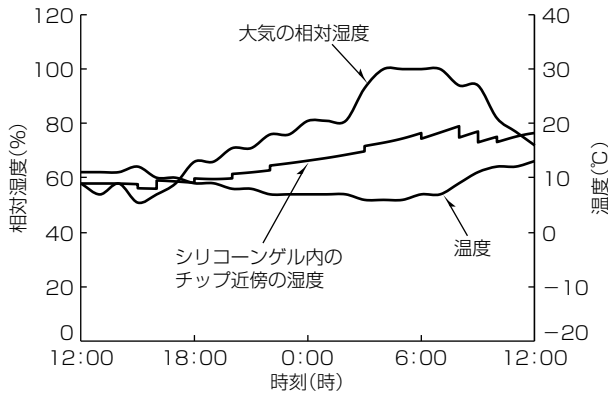


図7. 冬のロンドン(2020年2月1日~2日)での吸湿シミュレーション

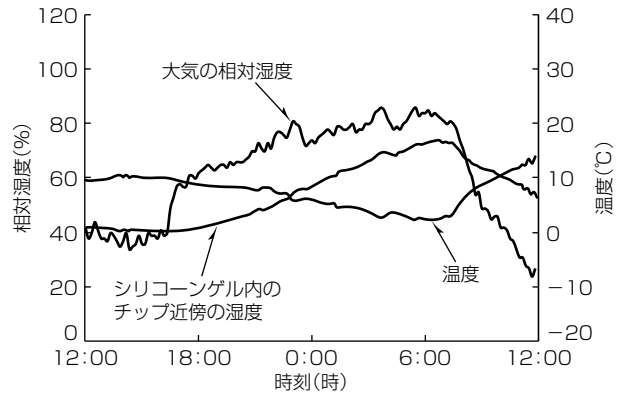


図9. 冬の東京(2020年2月4日~5日)での吸湿シミュレーション

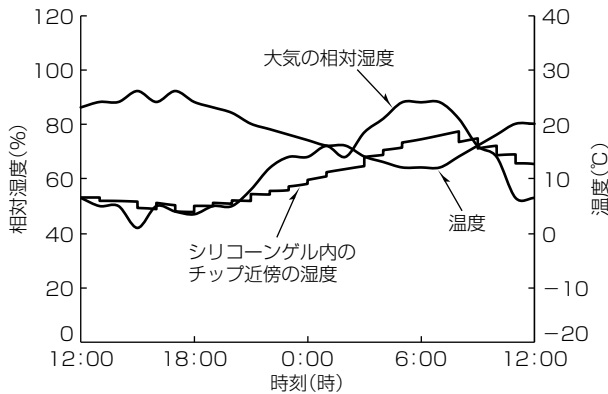


図8. 夏のロンドン(2020年8月1日~2日)での吸湿シミュレーション

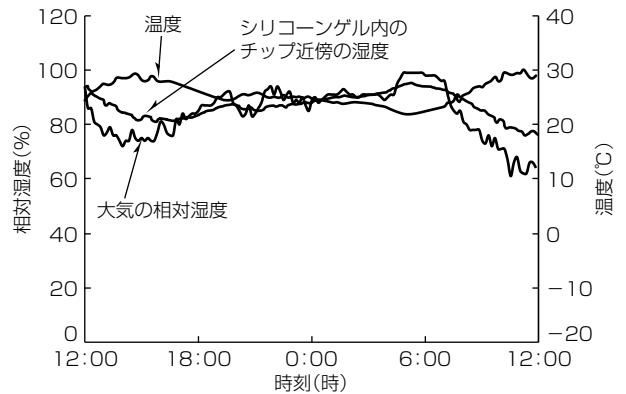


図10. 夏の東京(2020年7月31日~8月1日)での吸湿シミュレーション

回っていることが確認され、このシミュレーションでも周囲環境に比べてモジュール内部の結露は発生しにくいことを示唆していると言える。

## 4. むすび

実験結果に基づいて、シリコンゲルの水蒸気溶解度係数と水蒸気拡散係数を算出し、その結果に基づいて、周囲環境に比べてシリコンゲル内部の結露リスクは小さいことを確認した。

当社は確立した耐湿性評価技術や耐湿性向上技術を用いて、パワー半導体モジュールの高い信頼性を実現し、低炭素社会と豊かな生活の両立の実現に貢献していく。

## 参考文献

- (1) Honda, S., et al.: High Voltage Device Edge Termination for Wide Temperature Range plus Humidity with Surface Charge Control (SCC) Technology, ISPSD 2016, 291~294 (2016)
- (2) Tanaka, N., et al.: Durable Design of the New HVIGBT Module, PCIM Europe 2016, 425~431 (2016)
- (3) Kitajima, Y., et al.: Lifetime estimation model of HVIGBT considering humidity, PCIM Europe 2017, 353~358 (2017)
- (4) Tanaka, N., et al.: Robust HVIGBT module design against high humidity, PCIM Europe 2015, 368~373 (2015)
- (5) Nakamura, K., et al.: The test method to confirm robustness against condensation, EPE 2019, No.17 (2019)
- (6) Hatori, K., et al.: Humidity Absorption Behavior of Silicone Gel in HVIGBT Modules, EPE 2021, 247~254 (2021)
- (7) Mizutani, T.: Warpage Analysis in LCD Panel under Moisture Diffusion and Hygroscopic Swelling, Journal of Japan Institute of Electronics Packaging, Vol.12, 144~153 (2009)
- (8) 永井一清: バリア技術, 共立出版, 62~63 (2014)
- (9) Ellis, B., et al.: The effects of water absorption on a polyester/chopped strand mat laminate, Composites, 14, No.3, 237~243 (1983)