

抵抗型湿度センサの開発

－多孔質材料による応答速度の改善－

奥谷潤* 米澤保人* 的場彰成**

本研究では、耐環境性が必要な輸送分野などに適応が見込める抵抗型湿度センサにおいて課題となっている湿度変化に対する応答速度を高速化するため、感湿材料に多孔質を検討した。多孔質材料にメンブレンフィルタを使用して作製した湿度センサは、湿度変化における90%応答時間が市販の抵抗型湿度センサに対して80%以上短くなった。このことから、多孔質材料の使用によって抵抗型湿度センサの応答速度を改善できることが明らかとなった。

キーワード：抵抗型湿度センサ，多孔質材料，応答速度

Development of Resistive Humidity Sensor

- Improvement of Response Time by Using Porous Material -

OKUTANI Jun, YONEZAWA Yasuto and MATOBA Akinari

In this study, we investigated the use of porous materials as humidity sensors to speed up the response time to humidity change, which has been a problem for resistive humidity sensors that are expected to be adapted to the transportation field, where environmental resistance is required. In a humidity sensor fabricated using a membrane filter as the porous material, the 90% response time for humidity change was shortened by more than 80% compared to that of a commercially available resistive humidity sensor. This means that the response time of resistive humidity sensors can be improved using a porous material.

Keywords: resistive humidity sensor, porous material, response speed

1. 緒 言

IoT(Internet of Things)は、パソコンやスマートフォンだけでなく、産業機械から電化製品、自動車、住宅まで、様々なものをインターネットにつなげる技術である。このIoTには、多くのセンサが利用される。このうち湿度センサは、ある雰囲気温度の飽和水蒸気量に対する水蒸気量の割合を相対湿度として表すセンサである。電子機器の生産において、湿度が低くなると静電気が発生しやすくなるため、電子部品が損傷する可能性が高まる。また、湿度が高いと電子部品のモールド樹脂が吸湿し、はんだ付け不良が発生する要因となる。電子機器の生産に限らず、このような湿度のモニタリングは、美術館・博物館、食品製造、物流倉庫など様々な場面で重要な管理項目となっている。

電気信号を取り出せる湿度センサは、静電容量型および抵抗型の2種類が一般的である。静電容量型湿度

センサは、低湿領域に湿度測定範囲が広く、応答速度が速いといった特長がある。高分子感湿膜を電極が挟み込んでおり、感湿膜に水分が吸着すると静電容量が変化する。原理上、雰囲気ガス(水分以外の吸着)や振動・電気ノイズといった環境に対する耐性が低い¹⁾。一方、抵抗型湿度センサは、測定系が簡単で安価、耐久性に優れ、耐環境性が高いといった特長があり、輸送といった耐環境性が必要な分野に適応が見込める。基板上に印刷したくし形電極の上に高分子感湿材料が塗布されており²⁾、感湿材料の表面から取り込まれた水蒸気が感湿材料の下のくし形電極付近に達し、電気抵抗が変化する。静電容量型湿度センサの応答速度が数秒から数十秒であるのに対し、水蒸気が取り込まれるまでに時間を要する抵抗型湿度センサの応答速度は、数分と遅い。

これまでに多孔質材料を利用した水蒸気センサが開発されている^{3),4)}。しかし、水蒸気に対する応答の有無についての確認や水蒸気量変化の測定結果を示すに

*電子情報部 **機械金属部/電子情報部

留まり，応答速度にまで言及されていない。空気が多孔質材料を通過する場合，水蒸気が感湿材料に取り込まれる場合よりも応答速度が高速になるとと思われる。

本研究では，このような水蒸気センサに注目し，多孔質を抵抗型湿度センサの感湿材料に使用することにより，湿度変化における応答速度を高速化した抵抗型湿度センサを開発した。

2. 実 験

2. 1 湿度センサの作製

2. 1. 1 構 造

図1に，本研究で作製した抵抗型湿度センサの断面模式図を示す。多孔質材料および電極を空気が通過できる構造とした。多孔質の感湿材料に空気が接触することにより，電気抵抗が変化し始めるまでの時間が短縮され，応答速度が高速化できると期待できる。

2. 1. 2 多孔質材料

多孔質材料には，ポリビニリデンフロライド(PVDF)製メンブレンフィルタのうち，孔径 $0.1\ \mu\text{m}$ (VVL04700，メルク(株))および孔径 $0.45\ \mu\text{m}$ (HVL04700，メルク(株))を使用した。表1に示すとおり，今回使用した多孔質材料の表面積は，孔径 $0.1\ \mu\text{m}$ の方が孔径 $0.45\ \mu\text{m}$ に対して約2.8倍大きい。なお，この表面積は，細孔分布測定装置(BELSORP-max-N-VP，日本ベル(株))を

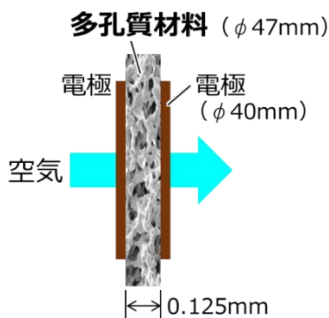


図1 作製した湿度センサの断面模式図

表1 使用した多孔質材料

孔径	0.1 μm	0.45 μm
表面積 (m^2)	0.65	0.23
空気の流量 ($\text{L}/\text{min}/\text{cm}^2$) @69kPa, 20℃	0.15	4
直径／厚さ (mm)	φ47／0.125	
材質	親水性PVDF	
空隙率 (%)	70	

用いてBET法により測定した比表面積から算出した。

2. 1. 3 電極の形成

図2に電極を形成した多孔質材料の外観を示す。電極は，AuおよびCuを積層した金属薄膜をフィルム状の多孔質材料の両面に形成した。電極は，開口部φ40mmのマスキングを使用し，スパッタリング装置(E-1030，(株)日立製作所)によってAuを付与した後，電子ビーム蒸着装置(UEP-4000，(株)アルバック)によってCuを200nm程度蒸着した。なお，電極および感湿材料は，空気を通過させる必要がある。図3に示す電極表面の電子顕微鏡像の観察からは，メンブレンフィルタの孔が塞がれることなく，多孔質構造が維持されていることが確認できた。

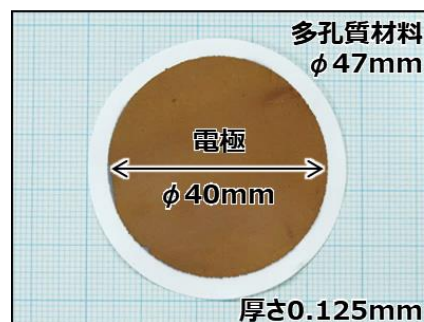
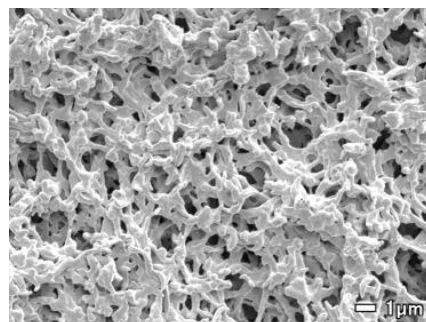
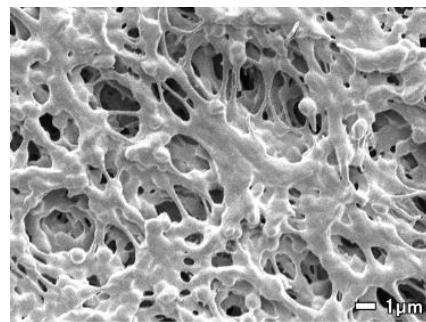


図2 電極を形成した多孔質材料の外観



a) 孔径 $0.1\ \mu\text{m}$



b) 孔径 $0.45\ \mu\text{m}$

図3 電極表面の電子顕微鏡像

2. 2 湿度センサの評価方法

2. 2. 1 電気抵抗の相対湿度依存性

作製した湿度センサの評価に必要な安定した温湿度の雰囲気の設定には、環境試験槽(PDL-4J, エスペック(株))を利用した。表2に作製した湿度センサの評価に使用した雰囲気の設定条件を示す。雰囲気温度は、20℃から50℃まで、また各温度における湿度は、20%RHから90%RHまでそれぞれ段階的に設定した。

作製した湿度センサは、電気抵抗が $10^5 \sim 10^{10} \Omega$ と非常に大きいため、電気抵抗の測定にはオペアンプ(TL072CP, Texas Instruments)による反転増幅回路を利用した⁵⁾。図4に作製した湿度センサを反転増幅回路の入力抵抗とした電気抵抗測定システムを示す。安定化電源(R6142, (株)アドバンテスト)から入力電圧として直流16 Vを入力し、出力電圧をデータロガー(LR8401, 日置電機(株))で記録した。各温湿度における作製した湿度センサの電気抵抗(入力抵抗)は、入力電圧、出力電圧および帰還抵抗の値から算出した。

2. 2. 2 湿度変化における応答速度

図5に湿度変化における応答速度測定の実験方法を示す。作製した湿度センサは、抵抗型湿度センサを搭載した市販の温湿度計(RTR503B, (株)ティアンドデイ; 以下, 市販品)のセンサ部分とともに密閉容器内に設置し、温度40℃湿度40%RHの雰囲気の環境槽内で容器を閉じ、続けて環境槽内を温度40℃のまま、湿度80%RHに変更する。環境槽内の雰囲気が安定した時点で密閉容器を開放し、容器内の湿度を急峻に上昇させる。密閉容器の開放後、作製した湿度センサにおいては反転増幅回路の出力電圧、市販品においては湿度表示がそれぞれ安定するまでの時間を測定した。応答速度は、密閉容器の開放前の数値をそれぞれ0%, 開放後に安定となった時点の数値をそれぞれ100%とし、各数値の変化の割合が90%になるまでの90%応答時間を評価した。また同様に、雰囲気温度40℃において湿度を80%RHから40%RHに下降させた場合も評価した。

3. 結果および考察

3. 1 電気抵抗の相対湿度依存性

図6に作製した湿度センサの電気抵抗の相対湿度依存性を示す。いずれの孔径の湿度センサにおいても、相対湿度が高くなるのにしたがって電気抵抗が低下すること、および雰囲気温度が高くなるのにしたがって

表2 雰囲気の設定条件

温度 (℃)	20, 30, 40, 50
相対湿度 (%RH)	20, 40, 60, 80, 90

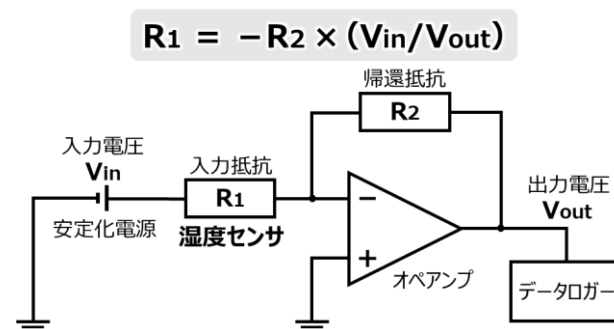


図4 反転増幅回路による電気抵抗測定システム

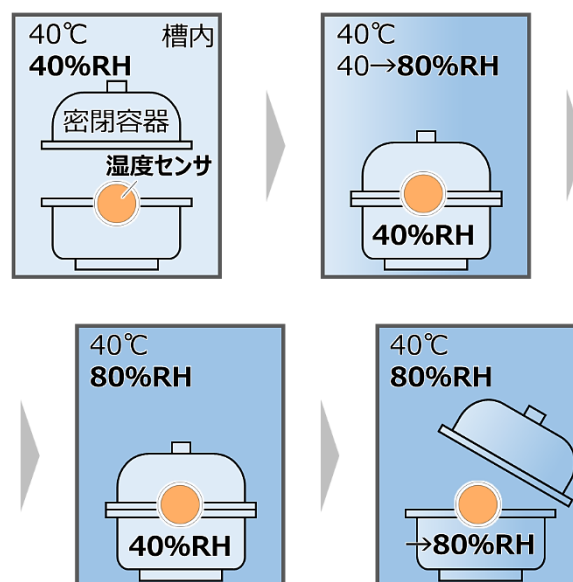
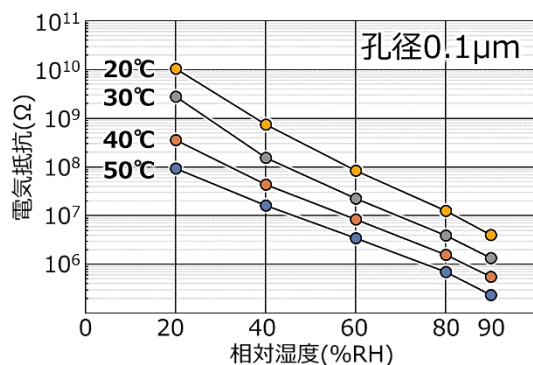


図5 湿度変化における応答速度測定の実験方法

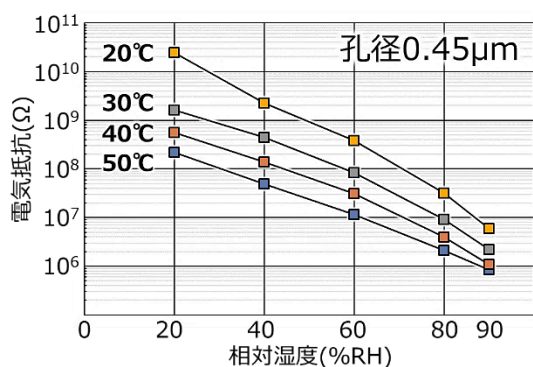
電気抵抗が低下することが確認された。また、湿度20%RHから90%RHにおける電気抵抗の変化は、いずれの孔径の湿度センサにおいても3桁程度であった。なお、孔径0.1 μmの方が電気抵抗は小さく、これは、表1に示す通り、孔径0.1 μmの方が孔径0.45 μmに比べて表面積が大きいためと考えられる。

3. 2 湿度変化における応答速度

図7に作製した湿度センサおよび市販品の湿度変化における応答速度の測定結果、表3に各湿度変化にお

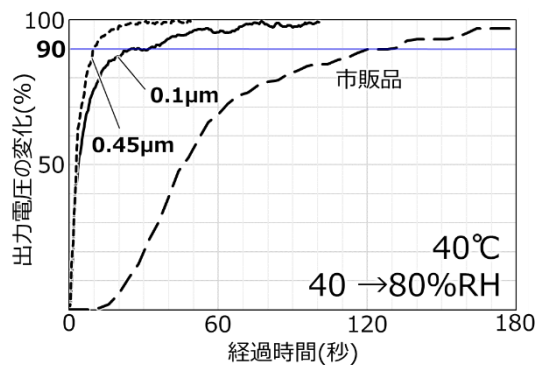


a) 孔径0.1μm

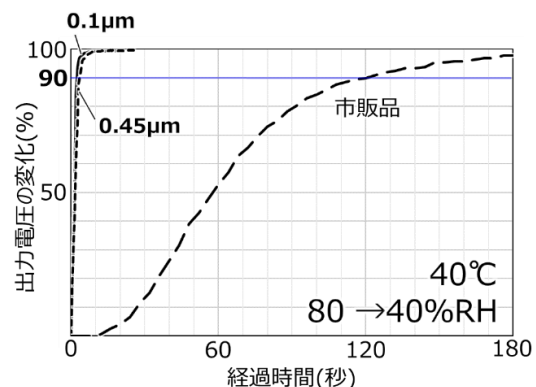


b) 孔径0.45μm

図6 電気抵抗の相対湿度依存性



a) 40℃40%RHから40℃80%RH



b) 40℃80%RHから40℃40%RH

図7 応答速度の測定結果

ける各湿度センサの90%応答時間をそれぞれ示す。湿度が上昇した場合の90%応答時間は、市販品に対して、孔径0.1 μmで約80%，孔径0.45 μmで約90%短くなった。また、湿度が下降した場合の90%応答時間は、市販品に対して、孔径0.1 μm，および孔径0.45 μmのいずれにおいても約90%短くなった。空気が多孔質材料を通過する構造にしたことにより、水蒸気の吸着・脱着が定常状態になるまでの時間を市販品よりも短縮できたためと考えられる。なお、孔径0.45 μmの方が湿度上昇時の90%応答時間が短いことは、表1に示す通り、孔径0.45 μmの方が孔径0.1 μmに比べて空気の流量が大きなためと考えられる。

3.3 メンブレンフィルタの導電メカニズム

今回測定した電気抵抗の値は、メンブレンフィルタの表面に吸着した水蒸気，または水蒸気を吸水したメンブレンフィルタ自体のいずれかの値と考えられる。

吸着には、ファンデルワールス力といった弱い相互作用による物理吸着，および化学反応を伴う化学吸着の2通りがある。メンブレンフィルタにおいては、雰囲気温度が同じにも関わらず、湿度が下降する場合に

表3 90%応答時間

湿度変化	40→80%RH (40℃)	80→40%RH (40℃)
孔径0.1μm	26秒	3秒
孔径0.45μm	10秒	4秒
市販品	132秒	124秒

において、湿度が上昇する場合よりも速い応答速度が示された。このことから水蒸気の脱着に化学反応を伴っていないと推測され、水蒸気のメンブレンフィルタへの吸着は、物理吸着によるものと考えられる。

なお、湿度が上昇した場合において、孔径0.45 μmの方が孔径0.1 μmよりも速い応答速度が示された。図3に見られるように孔径0.45μmの方が孔径0.1 μmよりもメンブレンフィルタの繊維が太い。繊維が水蒸気を吸水することで電気抵抗が変化した場合、繊維の細い孔径0.1 μmの方が材質内部までの吸水時間が短く、湿度変化における応答速度が速くなると考えられる。しかし実験では、孔径0.45 μmの方が速い応答速

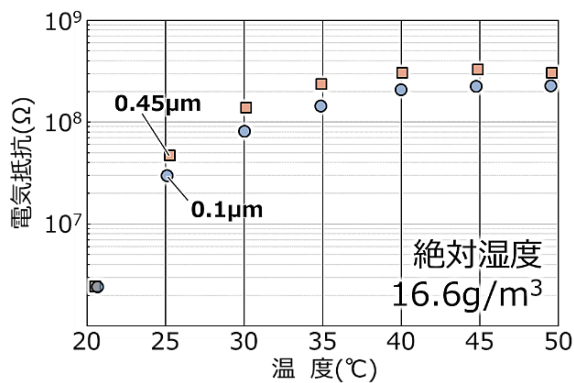


図8 電気抵抗の温度依存性

度であったことから、メンブレンフィルタ自体は、水蒸気を吸水せず、表面に吸着した水蒸気を導電することで電気抵抗が変化したと考えられる。

また、絶対湿度16.6 g/m³となるように各温度における雰囲気調整し、電気抵抗を測定した。図8に作製した湿度センサの電気抵抗の温度依存性を示す。環境槽内には同じ量の水蒸気が存在するのにも関わらず、いずれの孔径の湿度センサにおいても雰囲気温度が高いと電気抵抗が大きくなることが示された。これは、雰囲気温度が高いほど、メンブレンフィルタ表面における水蒸気の脱着が多くなり、導電に寄与する表面に吸着している水蒸気が少なくなるため、電気抵抗が大きくなったと考えられる。

これらのことから、多孔質材料であるメンブレンフィルタにおける導電メカニズムは、表面に物理吸着した水蒸気によると推測できる。

4. 結 言

本研究では、抵抗型湿度センサの応答速度の改善を目指し、多孔質であるメンブレンフィルタを感湿材料に使用した抵抗型湿度センサを作製した。作製した2種類の孔径の湿度センサについて、湿度に対する電気抵抗の測定、湿度変化における応答速度の市販品との比較を行った。得られた知見を以下に示す。

- (1) 多孔質であるメンブレンフィルタを感湿材料に用いたところ、湿度20%RHから90%RHにおける電気抵抗の変化は、3桁程度であった。
- (2) 作製した湿度センサの湿度変化における90%応答時間は、市販品に対して80%以上短くなった。

参考文献

- 1)"湿度センサとは". CEND. https://cend.jp/heat_primer/humidity_sensors.html (参照 2024-8-20).
- 2)"湿度センサ CHSシリーズ". TDK(株). <https://product.tdk.com/ja/techlibrary/productoverview/humidity-sensors.html> (参照 2024-7-25).
- 3)鎌田俊英, 吉田学, 小笹健仁, 植村聖, 星野聡, 高田徳幸. フレキシブルプリンタブルデバイス製造技術の開発 - 「どこでもデバイス, だれでもデバイス」の実現に向けて. Synthesiology. 2008, vol.1, no.3, p.190-200.
- 4)鎌田俊英, 星野聡. 水蒸気センサおよび製造方法, 水蒸気測定装置, 蒸散量測定方法. 特開2006-214858.
- 5)星野聡, 鎌田俊英. 蒸散量計測装置. 特開2009-115671.