

湿度センサの耐環境性能向上技術の開発

Technology for Improvement of Humidity Sensor Durability

アズビル株式会社
ビルシステムカンパニー

杉山 正洋
Masahiro Sugiyama

キーワード

湿度センサ, 環境, 高分子膜, ドリフト, エレメント加熱, 潮解性物質, 有機溶剤

湿度エレメントはその感湿部が測定雰囲気直接晒されるために、薬品や消毒剤を使用する製造環境や研究施設などの環境では、計測値のずれであるドリフト課題が避けられない。本技術開発では、湿度エレメントの耐環境性能を向上させるために①エレメント加熱機能 ②ドリフト検知機能 ③ドリフト量から加熱周期を最適化する機能 ④故障診断機能などの技術を開発した。また、この技術を使った耐環境湿度センサを開発したので報告する。

Because humidity-sensing elements are directly exposed to the atmosphere being measured, in environments where disinfectants or other chemicals are used, such as industrial plants and research facilities, a shift of the measured value away from the actual humidity is inevitable. To make humidity-sensing elements more robust, we have developed novel functions such as: (1) element heating, (2) drift detection, (3) heating interval optimization based on detected error, and (4) failure diagnosis. We also report on our newly developed environmentally resistant humidity sensor, which employs these new functions.

1. はじめに

製造環境や研究施設などにおける湿度の管理は製品の品質や研究成果に影響するため、非常に重要になってきている。しかし、それらの施設に設置されている湿度センサは、生産・研究過程で発生する有機溶剤や消毒剤などの薬品の飛散、および、空調の給気に含まれる外気成分などの付着が原因となってセンサエレメント（湿度検出素子）の経年劣化が早まり、湿度の測定誤差（ドリフト）が大きくなるケースがある。

従来の湿度センサではこれらによる経年劣化を避けることが難しいため、劣化状態をこまめにチェックしドリフト状態を把握することで、問題が発生する前に製品を交換するなど事前に対処してきた。しかし、このような対処は顧客や現場作業者にとっても非常に負担がかかってしまう。その理由の一つは費用負担であるが、それ以上に交換作業を含む現場管理の負担が大きいことがある。製造現場や動物飼育室などの研究施設では、24時間空調を稼働する機会が多く、それらの施設では空調を簡単に止めることはできない。また、クリーンルームや動物飼育室、病院では、外部からのほこりや細菌の持込みの危険性から簡単に入室を許可することができない。このようにセンサが故障したからといって簡単に交換できないなど、現場管理の負担が増加している。

こうした背景から耐環境性能を向上させた湿度センサ

は、現場ソリューションに繋がる重要な技術として開発を望まれていた。

2. 湿度センサの計測原理

ここで、湿度センサの特徴と計測原理について説明する。当社の湿度センサは高分子容量式を採用している。図1に高分子容量式湿度エレメントの出力特性のグラフを示した。横軸に相対湿度、縦軸に静電容量をとり、温度ごとに特性を示した。グラフからもわかるように高分子容量式の特長は、①出力特性の直線性が良い。②温度係数が小さい。③低湿から高湿まで広い範囲で計測できる、である。しかし、アルコールなどの有機溶剤で水分子に類似しているガスは水分子との区別ができず、計測誤差の原因になる。

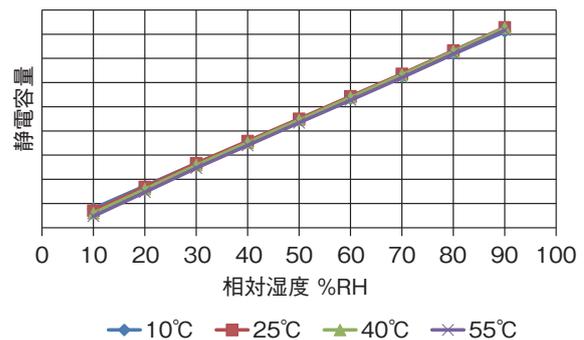


図1 高分子容量式湿度エレメント出力特性

図2に高分子容量式湿度エレメントの模式図を示す。図2のように、上側電極と下側電極の間に感湿性高分子膜を挟んだ平行平板型コンデンサが形成されている。感湿性高分子膜は数ミクロン程度の厚さがあり、適度な吸着水分量を持っている。図3に高分子容量式湿度エレメント構造模式図を示す。上側電極には水分が通過できる程度の小さい穴が開いており、水分はこの穴を通過して高分子膜に吸着する。

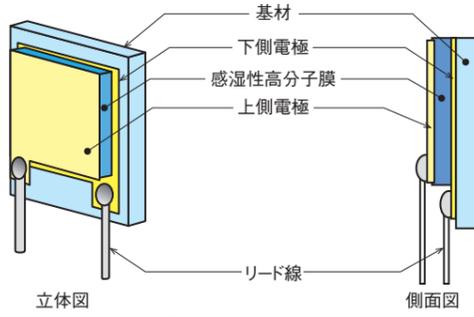


図2 高分子容量式湿度エレメント模式図

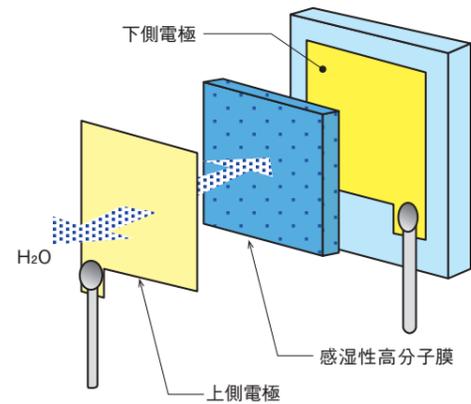


図3 高分子容量式湿度エレメント構造模式図

水分子は比誘電率80の誘電体であり、高分子膜に水分子が入り込むと高分子膜の誘電率が大きくなり、静電容量も大きくなる。この高分子膜に吸着・脱離する水分量は周囲の相対湿度に比例しており、静電容量を測定することで湿度を計測することができる。

静電容量CpUは式(1)のように表すことができる。

$$CpU = \alpha \times \epsilon U \times \frac{S}{t} \quad (1)$$

- CpU : 相対湿度Uにおける湿度エレメントの静電容量
- α : 定数
- ϵU : 相対湿度Uにおける高分子の誘電率
- S : 電極の有効面積
- t : 電極間距離

3. 対象市場環境の特徴

3.1 対象市場の領域

湿度センサを使う空調市場は表1のように大きく三つの領域に分けることができる。

表1 湿度センサ市場領域

市場領域	環境
(1) オフィスビル, ホテル, 店舗	ドリフト原因ガスを含まない環境
(2) 半導体製造工場, 印刷工場, 塗装工場	有機溶剤ガスを多く含む環境
(3) 動物飼育室, 研究所, 病院, 百葉箱	消毒剤ガス, 外気を多く含む環境

これらの市場のうち、(2)、(3)で示した有機溶剤ガスを多く含む環境と、消毒剤、外気を多く含む環境に対して長期間安心して使用できる湿度センサの技術開発を試みた。

3.2 有機溶剤ガスを多く含む環境の特徴

表1(2)で示した半導体製造工場、印刷工場、塗装工場の環境とは、有機溶剤ガスを多く含む環境のことである。

これらの施設では、有機溶剤のエッチング液や塗料の溶剤などが使用されるため、湿度センサは有機溶剤ガス雰囲気に晒されてしまう。このような施設では夜間空調を止めることもあるため、室内に残留している有機溶剤ガスは給気ダクトにも入り込み、ダクトに設置している湿度センサも有機溶剤ガス雰囲気に晒されてしまう。

表2の図で示したように、有機溶剤ガスは水分と同じように湿度エレメントの上側電極を通過し、感湿性高分子膜の中に入り込んでしまう。有機溶剤も誘電体であり、高分子膜に入り込むことで高分子膜の誘電率が大きくなり、静電容量が増加するためドリフトが発生する。

有機溶剤によるドリフトの特徴は、有機溶剤ガス濃度によっては短期間にドリフトすること、および、低湿になるほどドリフト量が増えることがあげられる。その他の特徴は表2に記載した。

表2 有機溶剤ガスによるドリフトの原因・特徴

主な現場	半導体製造工場, 印刷工場, 塗装工場
原因	<p>有機溶剤ガスは上側電極を通過し、高分子膜に入り込む。有機溶剤が高分子膜に入り込み静電容量が増加する。</p>
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・短期間でドリフトする。 ・低湿になるほどドリフト量が多い。 ・有機溶剤の濃度が高いほどドリフト量が増加する。 ・有機溶剤の種類により、ドリフトしないものもある。
対策	・湿度エレメントを加熱し、高分子膜に入り込んだ有機溶剤を飛ばす。

3.3 消毒剤ガス, 外気を多く含む環境の特徴

表1(3)で示したように動物飼育室、研究所、病院、百

葉箱で使用する環境は、消毒剤ガス、外気を多く含む環境である。

動物飼育室、研究所、病院の手術室では定期的に室内の消毒が行われるため、室内に設置された湿度センサは消毒剤ガス雰囲気に晒されてしまう。通常、消毒が行われている間はセンサケースにカバーをかけて養生が行われるが、残留物による消毒剤ガスの影響を少なからず受けてしまう場合がある。

また、このような施設、特に動物飼育室や病院では、外部からの細菌の流入を防ぐだけでなく、内部での感染拡大を防ぐ必要性から空調設備ではオールフレッシュ空調方式をとっている場合が多い。このオールフレッシュ空調とは、図4に示したように、給気された空気はレターン(空気循環)せずすべて排気する仕組みである。これにより、室内で発生した汚染ガスは循環されず、他の室内の汚染を防ぐことができる。

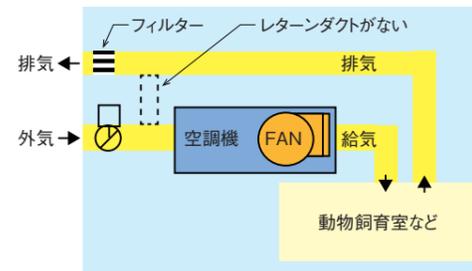


図4 オールフレッシュ空調

しかし、この方式は外気を通常よりも多く取り入れることになる。外気にはわずかに硫化物や塩類の不純物を含んでいるため、給気ダクトや室内に設置された湿度センサはより多くの不純物に触れることになる。

また、これらの室内で使用される消毒剤には塩素成分が含まれていることがある。この成分と外気に含まれる硫化物や塩化物、および、それらの化合物から潮解性物質が生成される(図5参照)。この潮解性物質とは大気中の水蒸気を吸収してしまう物質で、乾燥材などの塩化カルシウムがこれにあたる。

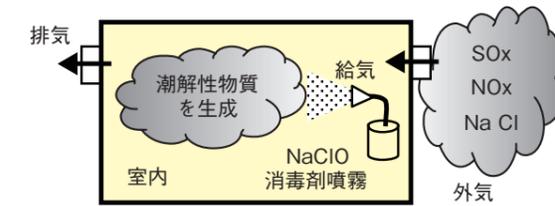


図5 潮解性物質の生成

表3の図で示したように、潮解性物質が湿度エレメントの表面に触れるとその一部が付着してしまい、周囲の水蒸気を吸収してしまうため、湿度エレメント周囲の相対湿度が上昇し、正しい湿度を計測できなくなってしまう。

このように、動物飼育室、研究所、病院、百葉箱などでのドリフト原因は、この潮解性物質の付着である場合が多い。そのドリフトの特徴は半年から数年という長い時間をかけてエレメント表面に蓄積していくため少しずつ劣化していくこと、および、高湿になるほどドリフト量が増えることが挙げられる。表3にそのドリフト原因およびドリフトの特徴を示した。

表3 潮解性物質によるドリフトの原因・特徴

主な現場	動物飼育室, 研究所, 病院, 百葉箱
原因	<p>潮解性物質が上側電極に付着。潮解性物質に水分が吸着する。エレメント表面に潮解性物質が付着すると周囲の水分が吸着し、相対湿度が上昇する。</p>
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・半年から数年かけて少しずつドリフトする。 ・高湿になるほどドリフト量が多い。 ・付着量が多いほどドリフト量が大きくなる。
対策	・エレメント表面に付着した潮解性物質を除去する。

4. ドリフト対策

ドリフト対策は、ドリフトの原因によって異なるが、主に三つの対策がある。

- ①エレメント加熱
- ②エレメント洗浄
- ③エレメント交換

4.1 エレメント加熱による対策

エレメントの加熱は、潮解性物質の付着と有機溶剤ガスの両方のドリフトに対して効果がある。

有機溶剤ガスの場合は加熱することで高分子膜に入り込んだ有機溶剤を飛ばしドリフトが回復する。

潮解性物質の付着の場合は加熱することで潮解性物質に吸着した水分を飛ばしドリフトが回復する。ただし、この場合は潮解性物質が除去された訳ではないので、時間経過と共に再びドリフトしてしまう欠点がある。

エレメント加熱の問題点は、加熱中は環境の湿度計測ができないことである。動物飼育室をはじめ半導体製造工場などでは24時間空調を稼働しているため、加熱中に計測を止めることはできない。そこで、二つのエレメントを交互に切り換え、片方が加熱中のときはもう一方のエレメントで計測する方式にした。二つのエレメントを使用すると、エレメントを切り換えたときに、器差により出力が変動する課題は、加熱を行っていない間に互いの計測値を比較し器差補正することで解決した。

4.2 エレメント洗浄による対策

エレメント洗浄はエレメント表面に付着した潮解性物質によるドリフトに対して効果がある。洗浄により潮解性物質を除去するため、加熱のときは一時的な回復であったが、洗浄には永続的な効果が期待できる。

しかし、通常、湿度エレメントが濡れてしまうと感湿性高分子膜に過剰の水分が入り込み、相対湿度が下がっても水分が残留してしまい、ドリフトしたり、ヒステリシスが大きくなったりする。

そこで、洗浄の方法や手順を考案した。洗浄後にはエレメントを加熱し、高分子膜内の余分な水分を飛ばす手順を決めたことで、エレメント洗浄が可能となった。

4.3 エレメント交換による対策

エレメント加熱や洗浄でも回復しないドリフトや経年劣化に対応するため、加熱素子一体型エレメントFP4を開発し、エレメント交換を可能とした。写真1はその加熱素子一体型エレメントFP4とそれをプローブに取り付けた状態である。



エレメント単体 プローブに取り付けた状態
写真1 加熱素子一体型エレメントFP4

5. ドリフト検知・応用技術

前章までに述べてきたように、ドリフト原因によってドリフト傾向が異なっている。図6は横軸に相対湿度、縦軸にドリフト量をとったグラフで、原因別のドリフト傾向を示している。有機溶剤ガスによるドリフトは低湿度のときに大きく、潮解性物質の付着によるドリフトは高湿度のときに大きく傾向がある。

この傾向を利用してドリフト量を検知する技術を開発した。

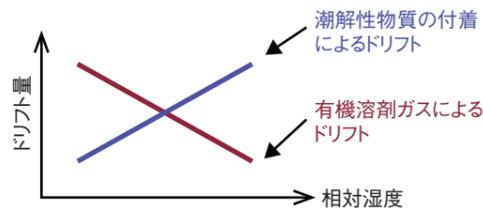


図6 原因別のドリフト傾向

5.1 有機溶剤によるドリフトの検知

有機溶剤によるドリフト対策はエレメント加熱が有効であることを述べてきたが、溶剤の種類や濃度、暴露期間によっては加熱しても完全に回復しないことがある。そのため、ドリフトを検知する技術が望まれており、その技術を開発したので説明する。

エレメントを加熱した時のエレメントの相対湿度変化を図7に示した。図7は横軸に温度をとり、縦軸に水蒸気圧をとったもので、飽和水蒸気圧曲線を示している。図7では25℃50%RHの環境にあるエレメントを加熱したときの変化を表している。

エレメントはその表面温度が約120℃になるように加熱している。加熱を行ってもエレメント周囲の水蒸気圧(絶対水分量)は変化しないので、エレメントの計測点は水蒸気圧曲線上を水平に120℃まで移動する。加熱中の相対湿度は約1%RHになり、その相対湿度に合わせて感湿性高分子膜の水分が飛ぶため、正常なエレメントであれば、エレメント

の計測する相対湿度も約1%RHに下がる。

図6に示したように、有機溶剤ガスによるドリフトは低湿度の方が大きい傾向があることから、加熱により低湿状態にすることで、ドリフトを検知しやすくしている。

図8に正常なエレメントと有機溶剤ガスによりドリフトしているエレメントの加熱動作による出力変化を示した。

25℃50%RHの環境にある正常なエレメントは加熱すると約1%RHに下がる。一方、有機溶剤によりドリフトしているエレメントは、低湿でのドリフトが大きいため、エレメントの出力が1%RHまで下がらない。この時の出力からドリフト量を検出する。

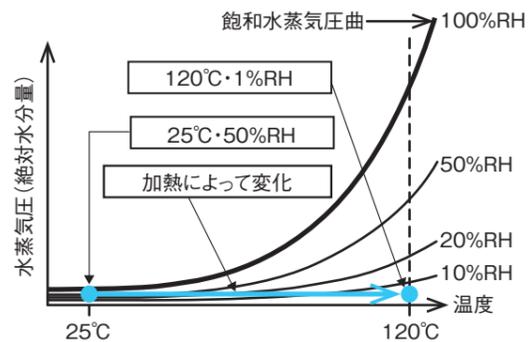


図7 加熱による相対湿度の変化

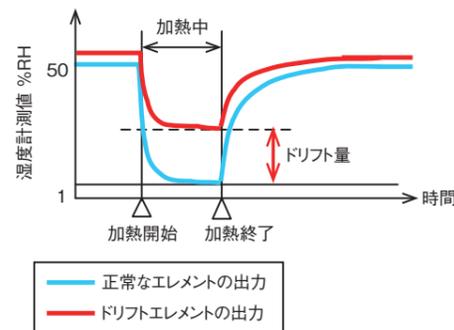


図8 加熱動作によるエレメントの出力変化

5.2 潮解性物質付着によるドリフトの検知

潮解性物質付着によるドリフト対策はエレメント洗浄が有効であるが、人手による作業であり、負担を減らすためにもできるだけ行わないで済ませたい。ドリフトが検知できれば、管理がしやすくなり負担を軽減することができる。ここでは、その検知技術を説明する。なお、この検知技術は有機溶剤によるドリフトでも有効に機能する。

図6に示したように、潮解性物質の付着によるドリフトは低湿度のときは小さいことから、5.1節で示した方法ではこのドリフトを検知できない。そこで、このドリフトの特徴を使ってドリフトを検知する。

表3で示したように、潮解性物質の付着によるドリフトは潮解性物質が周囲の水分を吸収するために起こるものであり、潮解性物質の付着量が多く、水分が多い高湿状態になるほどドリフトが大きくなる。ドリフトした状態で加熱すると、吸収された水分は蒸発し一時的にドリフトは回復するが、加熱では潮解性物質は除去できないため、再びドリフトし始める。このため二つの湿度エレメントを交互に加熱

して、加熱から時間の経ったエレメントと、加熱直後のエレメントの湿度計測値を比較することで、そのドリフト量を求める技術を開発した。

図9にドリフトしていないエレメントの動作を示した。図9は横軸に時間、縦軸に湿度計測値をとったグラフである。図9で示す計測エレメントとは、計測値を出力する側のエレメントのことで、次の切換えタイミングまでは加熱を行わない。この計測エレメントは加熱周期に合わせた切換えタイミングでエレメント①とエレメント②が交互に切り換わる。

図9のように、エレメント①とエレメント②の計測値はドリフトしていないため一定になっており、切換えタイミングでのエレメント間の計測値に差がないことがわかる。なお、説明の便宜上湿度計測値は一定になっているが、実際には環境に合わせて変動するものである。

次にドリフトしているエレメントの動作を図10に示した。図10の横軸と縦軸は図9と同じである。

図10ではエレメントに潮解性物質が付着しているため、加熱終了直後からドリフトが始まり、時間経過とともにドリフトが大きくなる。

このような場合、加熱の前後で湿度計測値が大きく変わるため、切換えタイミングで二つのエレメントの計測値を比較したときに差が生じる。この差をドリフト量として検出する。

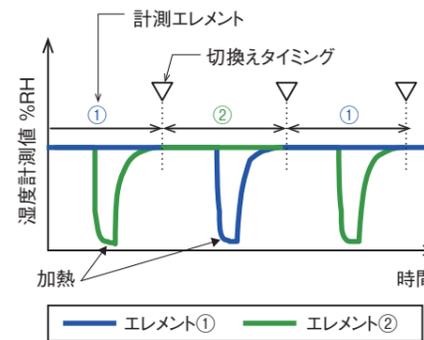


図9 加熱動作による正常なエレメント出力

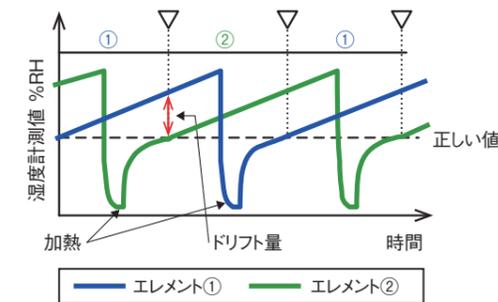


図10 ドリフトしたエレメント出力

潮解性物質の付着量が多いと単位時間当たりのドリフト量が大きくなるので、検出するドリフト量も大きくなる。また、有機溶剤ガスの濃度が高くても単位時間当たりのドリフト量が大きくなるので、ドリフトを検知することができる。

5.3 加熱最適化機能

加熱最適化機能とは、5.2節の潮解性物質付着によるド

リフト検知で求めたドリフト量から、加熱周期を変更し最適化する機能のことである。

エレメントは一定の周期で加熱を繰り返しており、製品の初期設定では加熱周期は24時間になっている。しかし、有機溶剤の種類や濃度、暴露時間によってドリフト量が異なり、ドリフトが大きい場合はより短い加熱周期が望ましく、小さい場合は長い加熱周期にすることも可能である。

ただし、設備管理者がこのドリフト量を管理し、加熱周期を変更することは、製品の機能上可能ではあるが、どのように値を変更するのか判断することは難しい。

そこでこの機能では、ドリフト検知で求めたドリフト量が製品精度の±2%RH以内になるように、自動で加熱周期を3時間から48時間まで段階的に変更し、加熱周期を最適化する。

6. 耐環境温湿度センサの開発

6.1 製品概要

前章までに述べてきた技術を搭載した耐環境温湿度センサ(写真2)の製品開発を行った。



室内用
(横 195 × 縦 115 × 奥行 56)



ダクト用
(横 155 × 縦 115 × 奥行 56, センサケーブル長 540)
写真2 耐環境温湿度センサ (mm)

この製品は、温度検出に白金薄膜測温抵抗体を使用し、湿度検出に高分子容量式湿度エレメントを使用した温湿度センサである。室内用とダクト用の2タイプがある。製品の外観を写真2に示す。基本仕様を表4に示す。

表4 基本仕様

項目		室内用	ダクト用
測定範囲	温度	0 ~ 50℃	-20 ~ 60℃
	湿度	0 ~ 95%RH	0 ~ 100%RH
	露点温度	-30 ~ 50℃ td	-40 ~ 60℃ td
精度	温度	0.2℃ ± 1digit @ 25℃	
	湿度	2%RH ± 1digit @ 25℃ 50%RH	
	露点温度	1℃ td ± 1digit @ 25℃ 50%RH	

ダクト用の湿度精度を図11に、露点温度精度を図12に示した。それぞれの精度は温度と湿度に依存している。

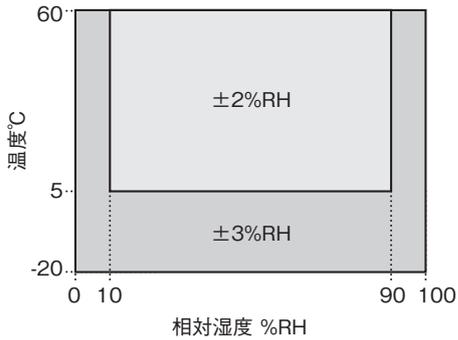


図11 ダクト用センサ 湿度精度

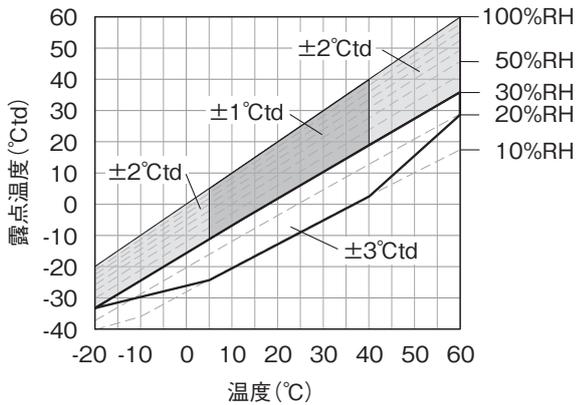


図12 ダクト用センサ 露点温度精度

その他の主な仕様・機能は以下のとおりである。

- ・交換可能な加熱素子一体型温湿度エレメントFP4(写真1)を採用
- ・加熱中も計測を継続するダブルエレメント方式
- ・湿度計測と露点温度計測の切換え機能搭載
- ・1-5V, 4-20mAアナログ出力切換え機能搭載
- ・加熱周期自動選定(加熱最適化)機能搭載
- ・故障診断機能搭載

故障診断機能とは、加熱しているエレメントの温湿度の値から故障かどうかを診断する機能である。

6.2 耐薬品性能

この製品の有機溶剤に対する耐性を表5に記載した。ドリフト量は薬品の種類、濃度、暴露時間によって変わるため、表5の値は試験条件を24時間ごとに10分間の加熱で3年間暴露した場合の値である。

表5 加熱による耐薬品性能

有機溶剤	ドリフト量と暴露濃度
エタノール	± 2%RH @250ppm
アセトン	± 2%RH @100ppm
メチルエチルケトン	± 2%RH @100ppm
乳酸エチル	± 2%RH @50ppm

6.3 耐環境性能評価比較

加熱機能のない従来製品と耐環境温湿度センサの耐環

境性能を比較した。試験はサンプルを加速試験装置に設置し、約200日ごとに装置から取り出し、精度測定によりドリフト量を求めた。

その試験結果を図13と図14に示した。グラフは横軸に試験経過日数を取り、縦軸にドリフト量をとっている。

図13は有機溶剤ガス雰囲気を想定した加速試験結果である。図14は潮解性物質、外気を想定した加速試験結果である。

従来製品に比べて耐環境温湿度センサではドリフト量が小さく、加熱の効果が表れている。

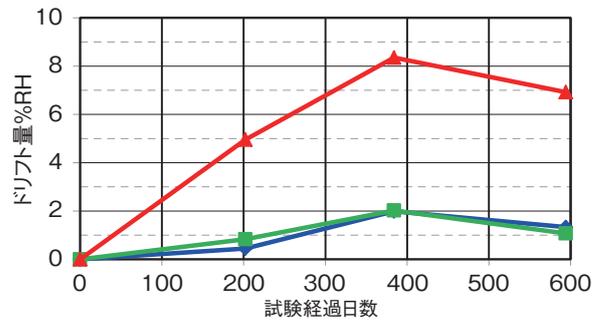


図13 有機溶剤ガスを想定したドリフト加速試験結果

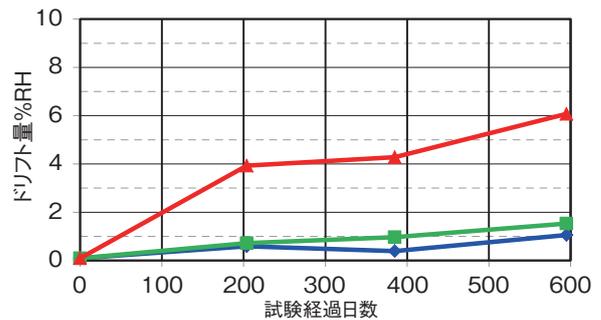


図14 潮解性物質を想定したドリフト加速試験結果

7. おわりに

従来はドリフトしたり、故障したりしていた生産・研究現場などの環境でも使用できる湿度センサの技術開発を行った。また、その技術を用いた耐環境温湿度センサを開発した。

この製品により、現場環境の安定した温湿度管理に貢献することで現場ソリューションに繋がることを期待している。

<参考文献>

- (1) アズビル株式会社:製品紹介 耐環境温湿度センサ, 計測制御, 2014, V01.53, No.6 pp.540-541, 公益社団法人計測自動制御学会
- (2) 日本機械学会編著:湿度・水分計測と環境のモニタ, 1992,技報堂出版

<著者所属>

杉山 正洋 ビルシステムカンパニー
開発本部開発2部