原 著 論 文

温室環境計測機器のための低コスト相対湿度センサの耐候性評価

星 岳彦^{*1)}・越智眞之助¹⁾・松山智紀¹⁾・
安場健一郎²⁾・黒崎秀仁³⁾・岡安崇史⁴⁾

- 1) 近畿大学生物理工学部生物工学科 〒649-6493 和歌山県紀の川市西三谷 930
2) 岡山大学環境生命科学研究科 〒700-8530 岡山県岡山市津島中 1-1-1
3) 農研機構西日本農業研究センター 〒765-0053 香川県善通寺市生野町 2575
4) 九州大学農学研究院生産環境科学部門 〒812-8581 福岡県福岡市東区箱崎 6-10-1

要旨

多種の低コスト相対湿度センサが市販されるようになり、温室用環境計測機器に使用されるようになった。しかし、低コスト相対湿度センサが温室植物生産環境でどの程度の耐候性を持つのか、明らかになっていない。また、製品間の比較データも乏しい。低コスト相対湿度センサ6種を用いて、トマト栽培温室の環境に3ヶ月間曝露処理し、その性能に変化が生じるかの試験を実施した。その結果、トマト栽培温室の多湿・多塵埃環境での曝露処理により、相対湿度90%～96%の高相対湿度領域では、温室設置区で曝露処理前後の計測値の変化が最大4%程度低めになった温室植物生産では、高相対湿度環境が、蒸散抑制、結露、病害発生に大きく影響するため、このようなセンサを使用した製品を導入する場合、その特性を考慮した取り扱いが必要である。

キーワード

環境制御システム, 測定精度, 相対湿度, スマート農業, UECS

はじめに

植物生産において、湿度環境は蒸発散に直接的な影響を与えるとともに、植物の光合成、吸水、病虫害の発生を左右する要因であるので、生産の高度化のためにはその計測制御が必要になる(渋谷・嶋津 2015)。さらに、温室における潜熱冷却装置や灌水・培養液供給装置の運転などにおいて、飽差をはじめとした湿度の計測制御が重要であり、そのために湿度センサが用いられるようになってきた(Handarto et al. 2006, Chanseetis et al. 2010)。これまでは、乾湿球温度を計測して相対湿度を計算する方式が主流であった。しかし、乾湿球型湿度センサは給水、湿球の清掃等のメンテナンスが定期的に必要で、中小規模の生産温室への普及は進まなかった。その後、セラミック相対湿度センサが利用されるようになったが、周期的に加熱クリーニングが必要で計測回路が複雑・高価になり、また、そのために計測不能期間が生じ、やはり普及しなかった。近年、

数千円以下の低コスト高分子系相対湿度センサ(一之瀬 2008)が各種市販されるようになった。低コスト相対湿度センサはメンテナンス不要で、しかも相対湿度が計測値として直接得られるので、温室用環境計測装置に良く使用されている。例えば、低コストを指向した自律分散型環境計測制御システムであるユビキタス環境制御システム(UECS)(Hoshi et al. 2004)において、低コスト相対湿度センサを利用した各種計測制御システム(安場ら 2009, 2010, 星 2012, 安場ら 2013)が開発された。ところが、相対湿度センサの性能劣化や腐蝕など、実用化に向けた課題が発生した。また、農業用センサネットワークシステムであるフィールドサーバ(深津・平藤 2003)に搭載されている低コスト相対湿度センサについても経時による性能劣化が報告され、その対処法が検討された(深津ら 2013)。

低コスト相対湿度センサは主に居住空間での使用を想定した民生機器への組込を目的として開発されたので、相対湿度や塵埃環境が大幅に異なる生産温室での使用は想定されておらず、このような空間での実際の耐候性能についても明らかにされていない。そこで、植物生産用低コスト気

* Corresponding Author
E-mail: hoshi@waka.kindai.ac.jp

象計測装置に使用されることが想定される6種の低コスト相対湿度センサを冬季のトマト生産温室内に3ヶ月間設置し、連続的に温室内環境に暴露する試験を行い、その性能の変化を評価した。

材料および方法

相対湿度センサおよび曝露処理

供試した低コスト相対湿度センサは、すべて高分子系相対湿度センサに分類される。図1および表1に示した6種類を試験に使用した。

新品の6種のセンサ各10個を用いた。これらを5個ずつ2グループに分け、一方のグループを、室内環境での保管を想定して、ウィークディの日中のみエアコンにより気温約25℃、相対湿度は制御していない大学研究室にある扉を半開きにした木製戸棚の棚板に、包装容器から取り出したセンサを裸で並べて静置した（以降、室内保管区と呼

ぶ）（図2）。他方は、温室での通風型計測筐体での実使用を想定した曝露装置を2個製作した。長さ約300mmに切断した直径60mmの白（ミルク）色塩ビ製雨樋の両端にエルボーパイプを取り付け、内部に断熱材を内張り、一端にファン（風速約0.7ms⁻¹）を取り付けて排気し、もう一端は目合い1mmの防虫網で覆った。2個の曝露装置に、15個ずつのセンサを断熱材に挿すなどして固定した（図3）。曝露処理中、センサは通電せずに静置した。曝露装置のファンを連続運転してセンサ周囲を常時温室空気が流れるようにした。曝露装置は、和歌山県農業試験場の土耕トマト栽培温室内（気温8～30℃、相対湿度40～90%）の高さ約1m程度の位置に設置した（図4）（以降、温室設置区と呼ぶ）。曝露処理は、供試温室のトマトが繁茂して栽培が終了するまでの中で、温室の換気が低く抑えられ密閉度が高くなる期間である2014年9月3日から12月3日までの3ヶ月間実施した。

図1 供試した低コスト相対湿度センサの外観
センサの型番は、それぞれ、(a) SHT11, (b) SHT15, (c) SHT75, (d) HIH-4030, (e) CHS-MSS, (f) AM2302 になる。

図2 室内保管を想定して実験室内戸棚に静置したセンサ

表1 供試した低コスト相対湿度センサの諸元

型番	計測方式	計測範囲		分解能 (%RH)	精度 (%RH)	ヒステリシス (%RH)	応答時間 (s)	動作温度範囲		価格* (JPY)	製造会社
		最小 (%RH)	最大 (%RH)					最低 (℃)	最高 (℃)		
SHT11	静電容量型	0	100	—	3.0	—	8	−40.0	123.8	¥3,173	Sensirion
SHT15	静電容量型	0	100	—	2.0	—	8	−40.0	123.8	¥4,229	Sensirion
SHT75	静電容量型	0	100	—	1.8	—	8	−40.0	123.8	¥5,076	Sensirion
HIH-4030	静電容量型	0	100	—	3.5	3.0	5	−50.0	125.0	¥2,117	Honeywell
CHS-MSS	抵抗変化型	5	95	—	3.0	0.0	60	—	—	¥2,930	TDK
AM2302	静電容量型	0	100	0.1	2.0	0.3	2	−40.0	80.0	¥950	Aosong Electronics

* 価格は2016年1月現在の代表的な通販小売価格（1個）

図3 温室設置区の相対湿度センサ曝露装置の概略図

図4 トマト栽培温室内での曝露処理の様子
右手前に吊り下げられている2台が曝露装置。

センサ性能の計測

センサの性能計測は、曝露処理前後に実施した。センサからの計測信号は、汎用コンピュータ基板 Arduino Ethernet (<<https://www.arduino.cc/>>, 2015年7月31日参照)と、センサの信号出力を変換して基板に入力する変換回路を自作し、それらを使用して記録した。Arduino Ethernetに内蔵した計測記録プログラムには、基板通電後、センサ計測値をスロットに挿入されたSDメモリに5秒周期で連続記録する機能を持たせた。計測記録プログラムの開発は、専用の計測ライブラリが提供されているセンサはそれを利用し、それ以外の部分は自作した。

図5 相対湿度センサの計測性能評価装置

図の(a)は恒湿空気発生装置の恒湿槽、(b)は鏡面冷却式露点計を示す。

用し、それ以外の部分は自作した。

計測は、恒湿空気発生装置 (SRH-1R135ADR, 神栄テクノロジー株式会社製) と、鏡面冷却式露点計 (DewStar S-1S/S-1M, 神栄テクノロジー株式会社製) を用いて行った (図5)。恒湿空気発生装置は、純水中へのバブリングで飽和させた湿り空気と、除湿装置 (ヒートレスエアドライア, HD-0.5-AC100V, CKD 製) によって生成した乾燥空気を、流量計 (ロータメータ, 1357AV, プルックス製) で確認しながら一定割合で混合して、135 mmφ × 240 mm の試験槽に毎分 10 l 注入できる。系は、± 0.5°C に水温制御されたウォーターバスの中に沈められている。このようにして、相対湿度 ± 1.0% に制御された恒温恒湿の湿り空気を発生させ、センサ性能の評価に用いた。この方法は、分流式湿度計—試験方法 (JIS B7920) の規定に準拠したものである。

今回の計測では、冬季日中のトマト温室環境条件を想定し、恒湿空気発生装置の槽内気温を25°Cに設定した。そして、相対湿度20%, 40%, 60%, 70%, 80%, 90%の6段階と、装置で発生相対湿度の下限（約4%）と上限（約96%）の2段階の、計8段階に恒湿槽内の湿り空気を調湿した。6種のセンサ各1個を試験槽内に挿入後、5秒ごと10分間計測し平均値を求めた。供試センサの応答時間（表1）は、2秒～1分間の幅があり、その10倍以上の10分間の計測時間にした。そして、計測開始直後、中間、終了時の、計測開始0, 5, 10分後に鏡面冷却式露点計の小数点以下2桁までの相対湿度計測値を記録し、3値の平均値を比較用の基準相対湿度とした。以上をセンサ毎に5回行った。供試センサの曝露処理前後の、基準相対湿度と供試センサの相対湿度計測値との差の平均値を求め、それを平均絶対誤差（%RH）とし、評価に用いた。室内保管区と温室設置区の2グループで、それぞれ計測・評価した。

結果および考察

室内保管区の結果を図6に、温室設置区の結果を図7に、それぞれ示した。図の標準偏差が示す通り、計測値のセンサ個体によるばらつきは小さかった。曝露処理前のセンサ特性をみると、相対湿度の計測範囲が他のセンサより狭いにもかかわらず、CHS-MSSの計測値が基準にした露点計

の計測値と良く一致していた。一方、SHTシリーズのセンサは、相対湿度60%以下の低相対湿度域で、4%程度計測値が高くなる傾向を示した。また、SHT15はSHT11の高精度選抜品とされているが、両者の計測誤差には大きな違いは観察されなかった。

室内保管区の曝露処理前後で、AM2302を除いて、相対湿度計測値に大きな変化は観察できなかった。供試したセンサの中では最廉価の製品であるAM2302は全体的に相対湿度計測値が数%高めになり、センサの計測特性の曝露処理前後の変化が他のセンサと比較して著しかった。

温室設置区では、AM2302は相対湿度60%～96%で曝露処理後に著しく平均絶対誤差が増加したので、図7のAM2302の縦軸のレンジを3倍にしたグラフを図8に示した。AM2302は、経時変化が大きく長期間使用が難しいだけでなく、植物生産施設での3ヶ月間の使用で、相対湿度60～90%の計測値が最大15%程度高めに出るので、この範囲の相対湿度が頻繁に出現する温室環境の正確な計測制御に使用するのは困難であると思われた。HIH-4030も、相対湿度20%～80%の領域で、室内保管区と比較して曝露処理後に最大2%程度高目の値になる傾向にあった。しかし、AM2302を除いて、5種のセンサでは、相対湿度90%～96%の高相対湿度領域では、温室設置区で曝露処理前後の計測値の変化が最大4%程度低めになった（図9）。

室内保管区と比較して温室設置区でのセンサ性能の劣化

図6 室内保管区の曝露処理前後での各相対湿度センサが各相対湿度を計測したときの平均絶対誤差
誤差線は標準偏差を示す。

図7 温室設置区の曝露処理前後での各相対湿度センサが各相対湿度を計測したときの平均絶対誤差
誤差線は標準偏差を示す。

図8 温室設置区の曝露処理前後での AM2302 相対湿度センサが各相対湿度を計測したときの平均絶対誤差

図7のグラフの縦軸のスケールを3倍にして曝露処理後のデータが収まるようにした。

がより大きくなった原因として、低コスト相対湿度センサに使用されている高分子系の水蒸気吸着資材が結露に弱いことが考えられる。温室では結露が頻繁に起こり、今回の曝露処理中にも結露が発生した可能性があるからである。細霧冷房を行っている温室では、低コスト相対湿度センサの早期腐食や破損のトラブルが発生しており、これも、通風計測筒内への細霧の吸い込みが原因といわれている。性能劣化を防止するために、防水通湿布等の素材でセンサを保護する必要があると思われるが、応答性の低下が心配され、さらに良い解決法が求められている。図10は温室設置区の曝露処理後のAM2302の外観である。図1と比較

(a) 室内保管区

(b) 温室設置区

図9 高相対湿度域での室内保管区と温室設置区の曝露処理前後の各センサの計測値変化

図 10 温室設置区の曝露処理後の AM2302 の外観

較するとセンサの白色プラスチック製筐体の表面の汚損が認められる。これは、温室内土壌の微粒子が通風計測筒に吸引され、センサに付着したものと考えられる。このような塵埃もセンサ性能劣化の一因と考える。今回は 1 mm 目の網を吸気口に取り付けて曝露処理を行ったが、不十分であった。実際にはさらに目の細かい不織布やウレタンスポンジなどの使用を検討すべきである。その一方で、通風抵抗の増加による風速低下への対応と定期的なフィルタの清掃・交換が必要になる。

低コスト相対湿度センサを植物生産施設の環境計測制御装置に採用する場合、3 ヶ月程度の使用で、高相対湿度域の計測値が低めに出る傾向が観察され、その対応を考える必要がある。静電容量変化型の高分子系相対湿度センサは、各社未公表の高分子素材を用いた樹脂フィルムに水蒸気を吸着させ、両面に取り付けた金電極からなるコンデンサの電気容量の変化によって相対湿度を計測する（一之瀬 2008）。濡れや塵埃吸着による樹脂フィルムの劣化に起因する性能の低下が、高相対湿度域での計測値の低下をもたらすのではないかと推察している。また、センサが結露してしまうと計測不能になるので、高相対湿度を好む植物の温室生産、結露防止の制御などに使用する場合には注意が必要である。具体的方策として、性能劣化の経時変化を推定して補正織り込んだ変換式を使用すること（深津ら 2013）、センサおよび計測筐体の耐結露性、防霧性、防塵性を高める対策を行うこと、センサは消耗品と考えて定期的な交換を促す機能、および、センサの交換が容易な機構を持たせること、などがあげられる。

ここで、植物生産において要求される相対湿度の計測精度について考察を試みる。例えば、熱容量が大きく気温の上昇に追従できないキュウリ等の果実温を制御して結露防止を行うケースで考えてみる。25°C で相対湿度 100% の湿り空気を、計測誤差によって 95% と測定すると、その露点温度は約 24°C になってしまい、結露する限界の気温の判断に約 1°C の誤差が生じる。温室の気温制御は 1°C

単位で一般的に行われているので、本目的での制御に使用するセンサとして考えた場合、この誤差を 1°C 未満に押さえるためには、相対湿度 $\pm 2.5\%$ 程度以上の精度が要求されることになる。今回の結果のように高相対湿度域の測定誤差が $\pm 4\%$ 程度になると、結露防止の温度制御する場合、安全率を見込んで設定値を 2°C 以上高めにする必要があることを示唆し、これは暖房エネルギーの無駄使いにつながる。

相対湿度センサは計測時の温度による計測素子、計測回路の特性変化に起因して計測値が変動するため、各種の温度補償を行っており、動作温度範囲が規定されている（表 1）。温度補償性能の曝露処理後の変化の有無を確かめるには、25°C 以外の温度での試験を実施する必要があると思われる。

謝辞

温室栽培環境での曝露処理にご協力賜った和歌山県農業試験場の東卓也主査研究員に謝意を表する。本報告は、JSPS 科研費 25292517（オープン CPU 基板を用いた低コスト自律分散型施設環境計測制御情報システムの構築）の助成を受けて実施した。

引用文献

- Chanseetsi, C., Y. Shinohara, T. Maruo, M. Takagaki and M. Honjo (2005) An Estimation of Tomato Transpiration for Effective Fertigation Management System Using Integrated Solar Radiation and Vapor Pressure Deficit, *Environment Control in Biology*, 43(2): 105–112.
- 深津時広・平藤雅之（2003）圃場モニタリングのためのフィールドサーバの開発，*農業情報研究*，12(1): 1–12.
- 深津時広・平藤雅之・竹澤邦夫（2013）長期野外計測時の湿度センサ劣化を回避する外気湿度推定手法，*農業情報研究*，22(1): 50–59.
- Handarto, M. Hayashi, K. Ohyama, H. Toida, E. Goto and T. Kozai (2006) Developing Control Logic for a High-Pressure Fog Cooling System Operation for a Naturally Ventilated Greenhouse, *Environment Control in Biology*, 44(1): 1–9.
- Hoshi, T., Y. Hayashi and H. Uchino (2004) Development of a decentralized, autonomous greenhouse environment control system in ubiquitous computing and Internet environment, *Proc. of 2004 AFITA/WCCA Joint Congress on IT in Agriculture*, Bangkok, Thailand, 490–495.
- 星 岳彦（2012）オープンプラットフォーム CPU 基板 Arduino を用いた低コスト UECS 温室内気象ノードの試作，*日本農業気象学会 2012 年全国大会講演要旨*，p. 51.
- 一之瀬昇（2008）6.3 湿度センサ，*次世代センサハンドブック*（藍光郎監修），培風館，273–279.
- 渋谷俊夫・嶋津光鑑（2015）第 4 章 湿度制御，*施設園芸・植物工場ハンドブック*（（一社）日本施設園芸協会 企画・編集），農文協，163–178.
- 安場健一郎・黒崎秀仁・高市益行・大森弘美・川嶋浩樹・星 岳彦（2009）自律分散型環境制御システムを利用した細霧冷房支援のための温室換気率および蒸発散速度計算ノードの開

発, 植物環境工学, 21(4): 162-168.
 安場健一郎・黒崎秀仁・高市益行・大森弘美・川嶋浩樹・星 岳彦 (2010) エンタルピー調整と細霧の噴霧を利用した温室内気温およびの同時制御システムの開発, 植物環境工学, 22(1): 29-35.
 安場健一郎・星 岳彦・金子 壮・東出忠桐・大森弘美・中野明

正 (2013) オープンソースハードウェアを利用した環境計測ノードの構築, 農業情報研究, 22(4): 247-255.

受付日 2015 年 8 月 17 日
 受理日 2016 年 3 月 28 日
 担当分野 工学分野

Agricultural Information Research 25(3) 2016. 79-85

Weatherability Evaluation of Low-cost Relative Humidity Sensors for Use in Greenhouse Environments

Takehiko Hoshi^{*1)}, Shinnosuke Ochi¹⁾, Tomonori Matsuyama¹⁾, Ken-ichiro Yasuba²⁾, Hideto Kurosaki³⁾ and Takashi Okayasu⁴⁾

1) Faculty of Biology-Oriented Science and Technology, Kinki University,
 Nishimitani 930, Kinokawa, Wakayama 649-6493, Japan

2) Graduate School of Environmental and Life Science, Okayama University,
 1-1-1 Tsushima-naka, Okayama, Okayama 700-8530, Japan

3) NARO Western Japan Agricultural Research Center, Ikano 2575, Zentsuji, Kagawa 765-0053, Japan

4) Faculty of Agriculture, Kyushu University, 6-10-1 Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka 812-8581, Japan

Abstract

Although many kinds of low-cost, commercially available relative humidity (RH) sensors are used in greenhouses, it is not known whether they have sufficient weather resistance in that environment. We tested the weather resistance of 6 kinds of low-cost RH sensors in a tomato production greenhouse for 3 months. At RH > 90%, the values reported by the sensors were reduced by up to 4%. This reduced accuracy can pose problems, since high humidity influences transpiration, condensation, and disease incidence. When low-cost RH sensors are used in greenhouses, it may be necessary to allow for this deterioration.

Keywords

environmental control system, measurement accuracy, relative humidity, smart agriculture, UECS

* Corresponding Author
 E-mail: hoshi@waka.kindai.ac.jp