

# 農業ハウス向けの低コストで高耐久な環境計測装置の開発\* —低価格帯の環境センサの耐久性評価—

菊池 貴\*\*、堀田 昌宏\*\*、紺野 亮\*\*

施設園芸における環境制御技術の普及のために、環境計測装置の低コスト化が求められている。そのためには採用する環境センサのコストダウンが必要であるが、低価格帯の環境センサは耐久性や精度が劣るものが少なくない。そこで、低価格帯の温度センサ、湿度センサおよびCO<sub>2</sub>濃度センサについて、恒温恒湿槽を用いた加速劣化試験と圃場でのフィールド評価実験を通して、測定精度の経時変化を評価し、施設園芸に適した環境センサを選定した。

**キーワード：施設園芸、環境計測、環境センサ、耐久性評価**

## Development of low-cost and high endurance environmental measurement equipment for greenhouse -Endurance evaluation of low-priced environmental sensors-

KIKUCHI Takashi, HOTTA Masahiro and KONNO Ryo

**Key words : greenhouse, environmental measurement, environmental sensor, endurance evaluation**

### 1 緒言

岩手県沿岸南部地域は狭隘で傾斜の多い地形のため小規模な農地が点在しており、小規模でも高収益が実現できる品目としてきゅうりの栽培が行われている。平成26年には販売額が1億円を越えるなど、同地域の野菜生産における主力品目に位置づけられているが、近年は栽培面積や生産量の減少が続き、平成29年度には販売額は7千万円程度まで落ち込んでおり、収量向上が求められている。

果菜類の増収技術として施設園芸における環境制御技術<sup>1),2)</sup>の導入が図られており、県内でも内陸を中心に関心が高まっている。環境制御では気温、日射量、CO<sub>2</sub>濃度、飽差などの複数の環境計測を行い、そのデータを基に設備を制御し生育に好適な環境を作り出す。しかし、農業現場は昼夜の温度差が大きく電子機器にとって過酷な環境であることから、使用できる環境センサが限られるため環境計測装置は一般に高額であり、小規模施設への導入の妨げとなっている。

近年では、環境センサの低価格化に伴い、低コストな環境計測装置が製品化されてきているが、使用している環境センサの耐久性や精度が考慮されていないものや、劣化が早く維持費が増加する事例がみられる。今後、小規模施設へ環境制御技術を導入し普及拡大していくためには、初期費用の低減と共に、十分な耐久性を持つ環境センサによる保守管理業務の軽減が求められる。

本研究では、低価格な環境計測装置を開発し、試作機の現地実証を行った。その中で当センターは環境計測装

置に搭載する低価格帯の温度、湿度およびCO<sub>2</sub>濃度センサの特性と耐久性について評価し、施設園芸に適した環境センサについて検討したので報告する。

### 2 温度センサの評価

#### 2-1 実験方法

ビニルハウス内は高温かつ高湿度であり、昼夜の温湿度差も大きく電子機器にとって過酷な環境である。このようなビニルハウス内環境において、長期間にわたって温度センサを運用した際の測定誤差の経時的な変化を評価するために、恒温恒湿槽を用いた加速劣化試験と特性評価実験を実施した。本実験で用いた恒温恒湿槽 Eyn-4HA-7 (IMV社)の温度制御範囲は、-70℃～+180℃、湿度制御範囲は20%Rh～98%Rh、温度変動幅は±0.5℃、湿度変動幅は±4%Rhである。

加速劣化試験では、ハウス内の昼夜の温湿度変化を再現するため、夜間を模した温度20℃かつ湿度95%Rhの低温環境と昼間を模した温度30℃かつ湿度70%Rhの高温環境を設定し、図1に示すように変化させた。この温湿度変化を1サイクルとして、3年間に相当する1080サイクルを実施した。

特性評価実験では、温度センサを各5個用い、0、10、20、30、40℃の5条件について、それぞれ10回測定し50個のデータを取得し、最大誤差とばらつきについて比較した。この時、湿度は制御しなかった。

実験に用いた温度センサの種類と仕様を表1に示す。

\* 平成30年度～令和2年度 食料生産地域再生のための先端技術展開事業のうち現地実証研究委託事業

\*\* 電子情報システム部

低価格帯の温度センサはサーミスタと呼ばれる半導体を使ったものが主流であり、温度によって抵抗値が変化す

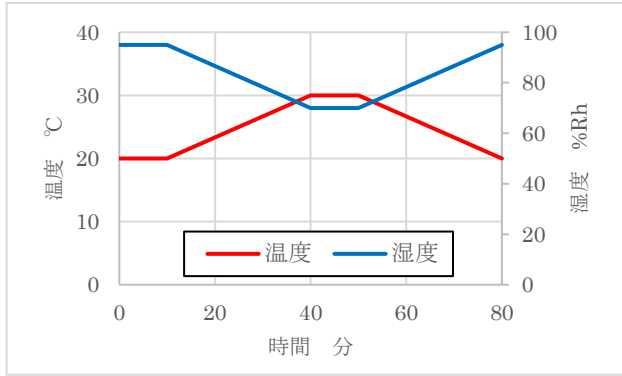


図 1 加速劣化試験の条件

表 1 試験対象の温度センサー一覧

	センサ A (S 社)	センサ D (M 社)	センサ S (Se 社)	センサ U (U 社)
方式	アナログ	デジタル 1-Wire	デジタル I2C	デジタル 1-Wire
測定範囲	-50 ~90°C	-55 ~125°C	-40 ~125°C	0 ~55°C
測定精度	-1.39~ 0.62°C  (-50~ 90°C)	±0.5°C  (-10~ 85°C)	±0.1°C  (-20~ 60°C)	記載なし
保護方法	樹脂封止	ステンレ ス管封止	露出	露出
温湿度 一体	—	—	○	○
購入価格	100 円	2,000 円	2,500 円	2,500 円

る特性を利用している。温度センサは耐候性を考慮し、センサヘッド部を樹脂やステンレス管で保護するものが一般的である。また、近年では温度センサと湿度センサを一体化した製品も増えており、センサの小型化や低価格化に有効であるが、湿度センサの原理上センサヘッドの保護が困難であり、温度センサも封止されず露出している。これらの特徴を踏まえ、本実験では4つのセンサを選定した。センサAはアナログ式でセンサヘッド部を樹脂で封止している。センサDはデジタル式であり、センサヘッド部をステンレス管で封止している。センサSおよびセンサUはデジタル式であり、温度センサと湿度センサが一体化したものであるため、前述のとおりセンサヘッド部は封止されず露出している。

## 2-2 実験結果及び考察

加速劣化試験前後の特性評価実験の結果を図2に示す。図2では測定温度5条件それぞれにおける測定値のばらつきを箱ひげ図で表している。最初に各センサの最大誤差について比較を行った。センサAは加速劣化試験前後いずれにおいても最大誤差が最も大きく、試験前が設定温度 0 °C のときで 4.6 °C、試験後が設定温度

10 °C のときで 4.2 °C であった。一方、センサDは加速劣化試験前後とも最大誤差が最も小さく試験前が設定温度 10 °C のときで 1.0 °C、試験後が設定温度 30 °C のときで 1.6 °C であった。センサSの最大誤差は、試験前が設定温度 0 °C のときで 1.6 °C、試験後が設定温度 30 °C のときで 2.2 °C、センサUの最大誤差は、試験前が設定温度 40 °C のときで -1.2 °C、試験後が設定温度 30 °C および 40 °C のときで 2.1 °C であった。

また、測定値のばらつきについて比較した結果、センサAはばらつきも最も大きく、試験前が設定温度 0 °C のときで 1.2 °C、試験後が設定温度 20 °C のときで 1.8 °C であった。一方、センサDはばらつきも最も小さく、試験前が設定温度 0 °C のときで 1.0 °C、試験後が設定温度 20 °C のときで 0.5 °C であった。センサSは試験前が設定温度 0 °C のときで 1.0 °C、試験後が設定温度 20 °C のときで 0.7 °C、センサUは試験前が設定温度 40 °C のときで 1.2 °C、試験後が設定温度 40 °C のときで 0.9 °C であり、いずれもセンサDと同程度に抑えられていた。

次に加速劣化試験前後の測定値の傾向を比較した。図2(b)~(e)から、センサD、センサS、センサUは経時的に測定値が高くなっていく傾向を確認したが、センサDおよびセンサSは増加が 0.6 °C 以下であった。

これらの結果から、温度センサはセンサDおよびセンサSが今回の加速劣化試験による性能低下が少なく、3年間の安定した測定が見込まれることから有望と考えた。測定精度については環境制御で求められる温度精度は±1 °C 程度と言われており、センサDおよびセンサSは初期校正を行うことで実用的な値が得られると考えられる。また、この2つのセンサはいずれもデジタル方式であり、内蔵された測定回路や補正式により誤差が抑えられていると考えられる。一方、アナログ式のセンサを使用する際は、測定回路や補正式は独自に付加する必要がある。本実験で使用したセンサAはデータシートを元に検量線を作成したが、誤差が大きかったことから個体差の影響も考慮し、実測値に基づく補正式の作成が必要である。

## 3 湿度センサの評価

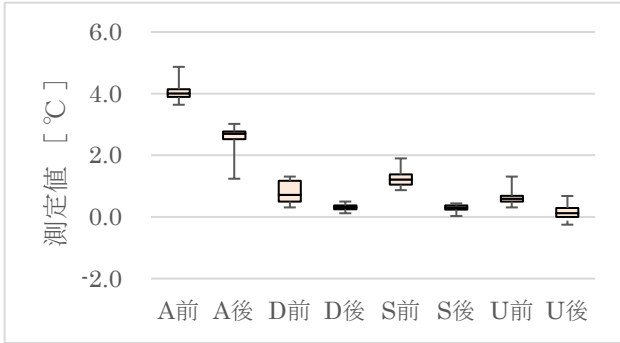
### 3-1 実験方法

前述の温度センサと同様に湿度センサについても加速劣化試験と特性評価実験を実施した。加速劣化試験については前述の温度センサの場合と同様に実施した。

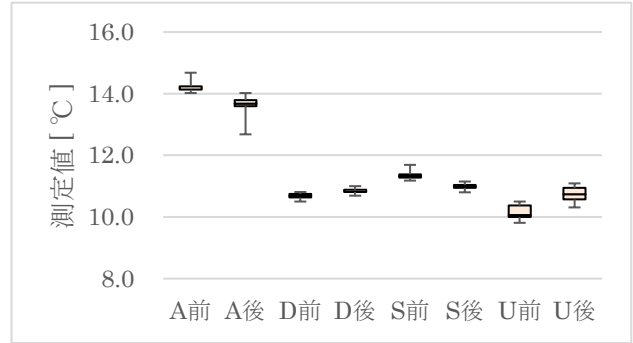
特性評価実験では温度を 25 °C で一定とし、40、50、60、70、80、90 %Rh の6条件について、温度センサの場合と同様の個数および手順で、それぞれ 50 個のデータを取得し、同様に最大誤差とばらつきを比較した。実験に使用したセンサの種類と仕様を表2に示す。センサHはアナログ式であり、センサSとセンサUはデジタル式

である。また、センサSとセンサUは温度センサと湿度センサが一体化したもので前述の表1に記載したものと

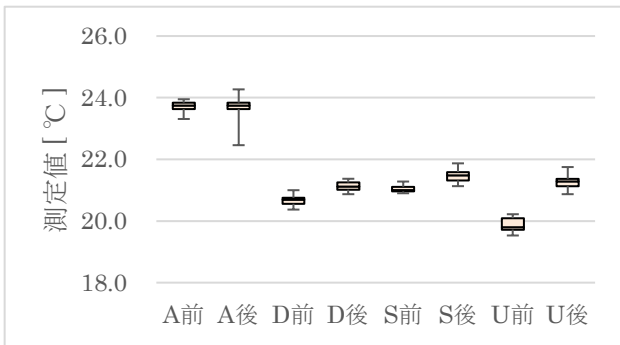
-6.0 %Rh であった。加速劣化試験後に最も誤差が大きかったのはセンサHであり試験前が設定湿度 40 %Rh の



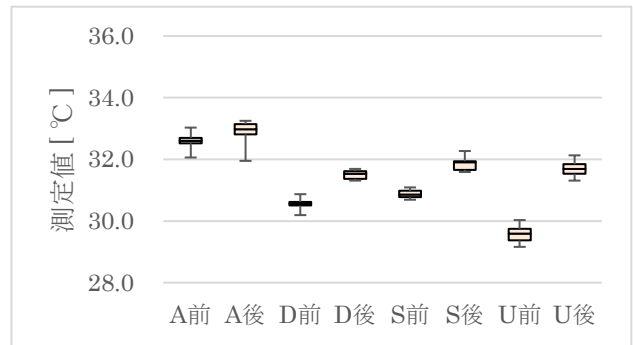
(a) 設定温度 0 °C



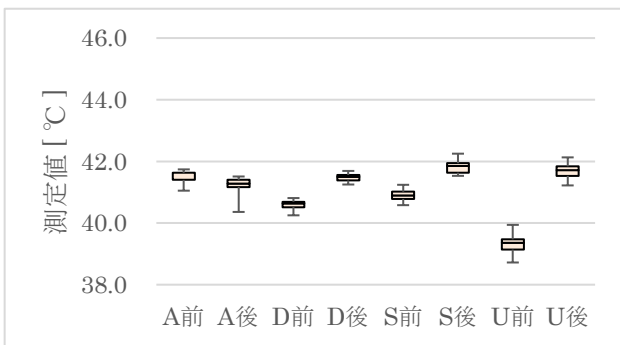
(b) 設定温度 10 °C



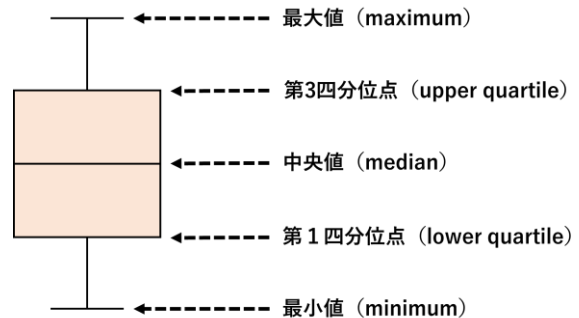
(c) 設定温度 20 °C



(d) 設定温度 30 °C



(e) 設定温度 40 °C



箱ひげ図が表す値

図2 加速劣化試験による温度センサの測定値のばらつきの変化

(図中の横軸のアルファベットはセンサ名、前と後はそれぞれ加速劣化試験前と加速劣化試験後を表す)

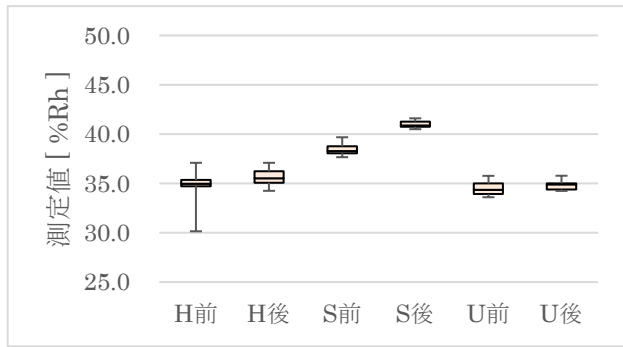
同一である。低価格帯の湿度センサは、乾湿性高分子材料に水分が吸着すると、抵抗値や静電容量が変化する特性を利用している。そのため、粉塵や結露に由来する異物等が高分子材料に付着すると測定誤差が増大する。そのため、湿度センサの測定値は経時的に高くなっていくことが予想される。

### 3-2 実験結果及び考察

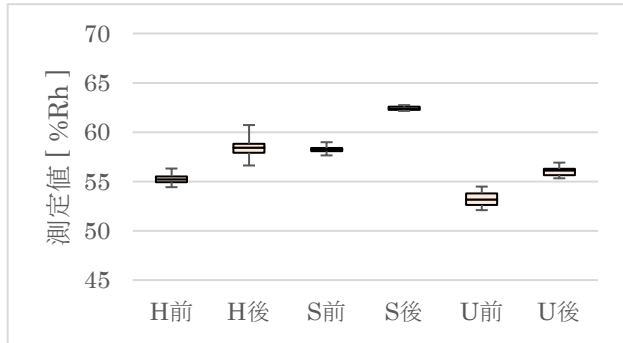
加速劣化試験前後の特性評価実験の結果を図3に示す。最初に各センサの最大誤差について比較した。加速劣化試験前で最も誤差が大きかったのはセンサUであり、試験前の最大誤差が設定湿度 90 %Rh のときで -10.4 %Rh、試験後が設定湿度 90 %Rh のときで

表2 試験対象の湿度センサー一覧

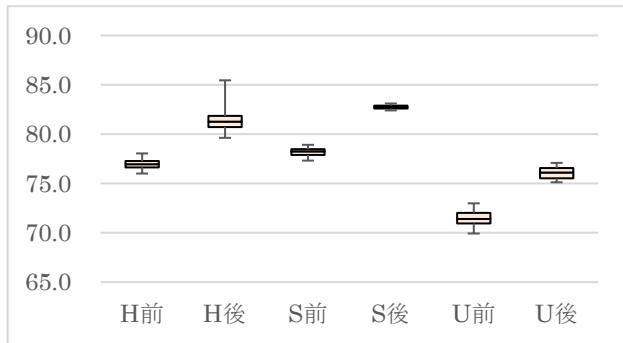
	センサH (H社)	センサS (S社)	センサU (U社)
通信方式	アナログ	デジタル I2C	デジタル 1-Wire
測定範囲	0~100%Rh	0~100%Rh	10~95%Rh
測定精度	±3.5%Rh	±1.5%Rh (0~80%Rh)	記載なし
温湿度 一体	—	○	○
備考	—	表1センサS と同一	表1センサU と同一
購入価格	2,500円	2,500円	2,500円



(a) 設定湿度 40 %Rh

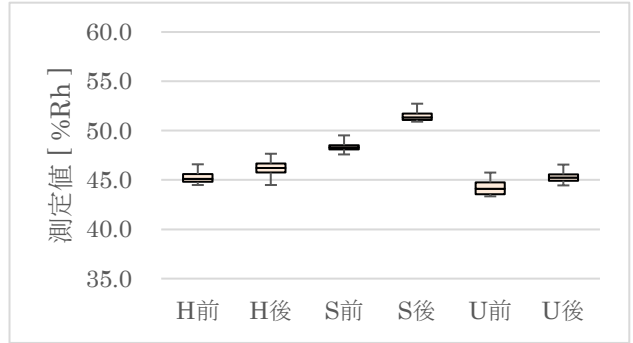


(c) 設定湿度 60 %Rh



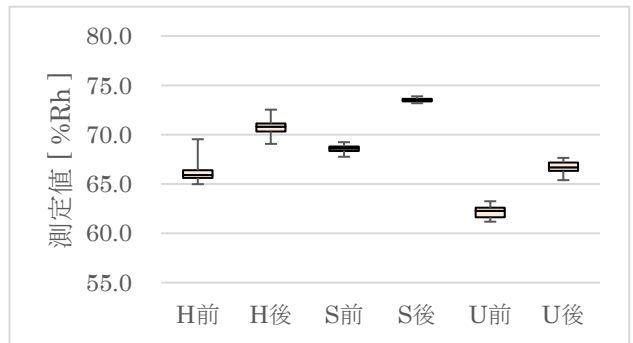
(e) 設定湿度 80 %Rh

また、センサUのばらつきは、試験前が設定湿度 90 %Rh のときで 3.21 %Rh、試験後も設定湿度 90 %Rh のとき



(b) 設定湿度 50 %Rh

(a)



(d) 設定湿度 70 %Rh

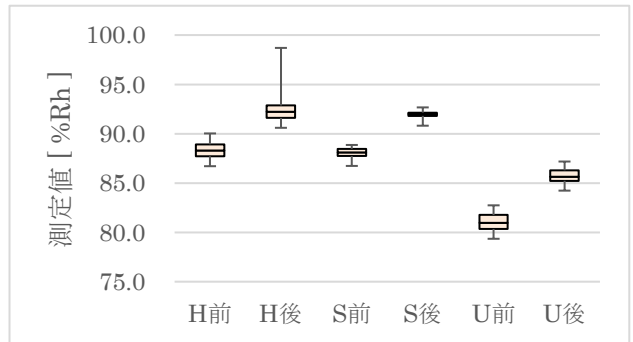


図3 加速劣化試験による湿度センサの測定値のばらつきの変化

(図中の横軸のアルファベットはセンサ名、前と後はそれぞれ加速試験前と加速試験後を表す)

ときで -9.8 %Rh、試験後が設定湿度 90 %Rh のときで 8.7 %Rh であった。最も誤差が小さかったのはセンサ S であり、最大誤差は試験前で設定湿度 90 %Rh のときで -2.9 %Rh、試験後は設定湿度 70 %Rh のときで 3.8 %Rh であった。

また、測定値のばらつきについて比較した結果、試験前後いずれにおいてもばらつきが最も大きかったのは、センサ H であり、試験前が設定湿度 90 %Rh のときで 7.2 %Rh、試験後が設定湿度 90 %Rh のときで 11.3 %Rh であった。ばらつきが最も小さかったのではセンサ S であり、試験前が設定湿度 40 %Rh のときで 2.0 %Rh、試験後が設定湿度 40 %Rh のときで 1.2 %Rh であった。

で 3.26 %Rh と大きな変化は無かった。

次に、加速劣化試験前後の測定値の傾向を比較した。3つのセンサいずれも経時的に測定値が高くなっていく傾向を確認した。また、センサ H は経時的に湿度のばらつきが大きくなっていく傾向があり図 3 (e)、(f) から高湿度の場合、ばらつきの増加が顕著であった。一方、センサ S はばらつきが減少する傾向があり、センサ U は経時的な変化は小さかった。

これらの結果から、湿度センサはセンサ S が今回の加速劣化試験による性能低下が少なく、3年間の安定した測定が見込まれることから有望と考えた。センサ S およびセンサ U はいずれもデジタルセンサであるため、湿度センサと同様に補正された値が取得できていると考え

られる。また、センサUは最大誤差が大きい傾向がある

表3 試験対象のCO<sub>2</sub>濃度センサー一覧

	センサB (E社)	センサD2 (E社)	センサI (Mu社)
通信方式	アナログ/ デジタルUART	アナログ/ デジタルUART	アナログ
測定範囲	0~2000ppm	0~5000ppm	0~2000ppm
測定精度	±30ppm±3%	±30ppm±3%	±50ppm±5%
購入価格	20,000円	30,000円	30,000円

が、試験前の誤差が元々大きく、経時的な変化が小さいことから、初期校正を行うことで実用に耐えるものと考えられる。

#### 4 CO<sub>2</sub>濃度センサの評価

##### 4-1 実験方法

CO<sub>2</sub>濃度センサについては、CO<sub>2</sub>ガス濃度を制御することが困難であったため、実際の農業用ハウス内でCO<sub>2</sub>濃度計測機であるVaisala社のGMD20（以下、「基準器」という。）との比較により評価を行った。基準器の測定範囲は0~2,000ppm、測定精度は±（測定範囲2% + 指示値の2%）である。実験期間は2020年8月9日から11月26日までの109日間であり、表3に示した3つのセンサを用いた。

##### 4-2 実験結果及び考察

実験開始後2~3日目の計測結果を図4に示す。センサBおよびセンサD2の測定値が短期間で大きく変動していることを確認した。一方、センサIは基準器と同様に変動が小さいことを確認した。これは、センサBおよびセンサD2は計測の瞬間の値をそのまま出力しており、一方基準器およびセンサIは一定時間内の計測値を平均化した値を出力しているものと考えられる。よって、センサBとセンサD2についても同様の平均化処理を行うことで、測定値の変動を抑えることが可能と考える。そこで今回は、センサBおよびセンサD2については直近の計測値5点を用いた移動平均を求め、基準器およびセンサIと比較した結果を図5に示す。センサIが基準器に対して最も誤差が小さいが、センサBおよびセンサD2もグラフの増減傾向そのものは類似していることを確認した。次に、増減傾向が類似している点に注目し、基準器との測定誤差からオフセット値を求め、一点補正を行うことで基準器と同様の測定値が得られると考えた。そこで今回は、測定開始直後に取得した計測値10点の平均からオフセット値を求め、一点補正した結果を図6および図7に示す。図6から実験開始直後は移動平均と一点補正を行うことで、センサBとセンサD2共に基準器と同様の測定結果が得られているが、図7から実験後期ではセンサD2の測定値が高くなる傾向を確認した。図6および図7に示す期間における各センサの基準器に対する平均誤差を図8、最大誤差を図9に示す。実験開始

直後は3つのセンサの平均誤差と最大誤差は同程度であ

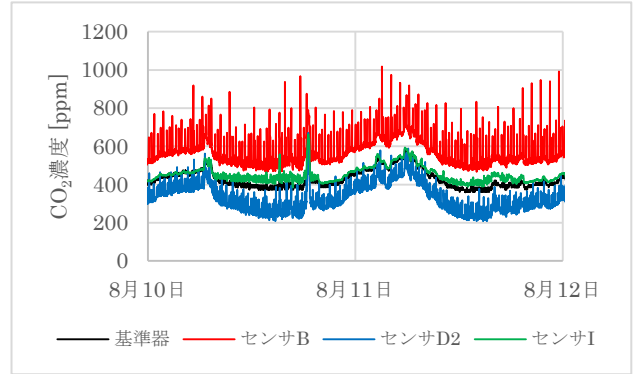


図4 CO<sub>2</sub>濃度センサの測定値

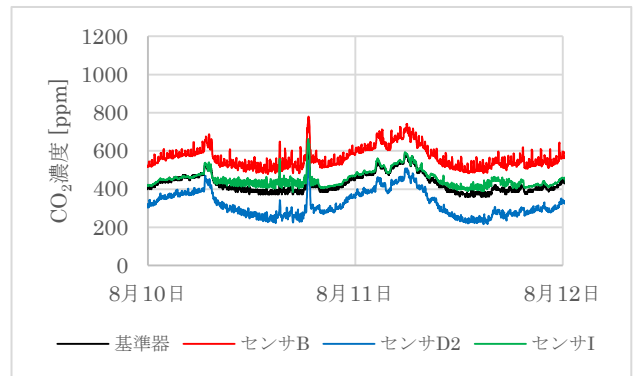


図5 センサBおよびセンサD2について移動平均を適用した結果

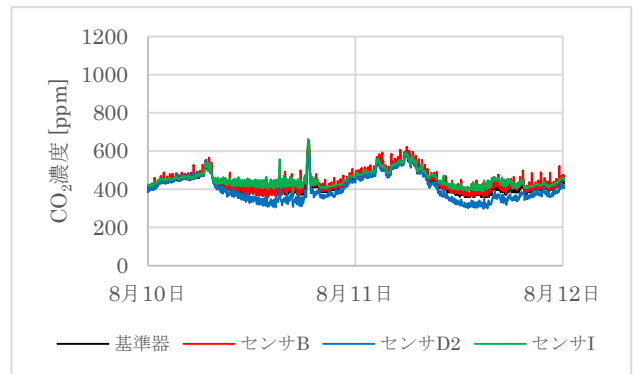


図6 センサBおよびセンサD2について移動平均および一点補正を適用した結果（実験開始後2~3日）

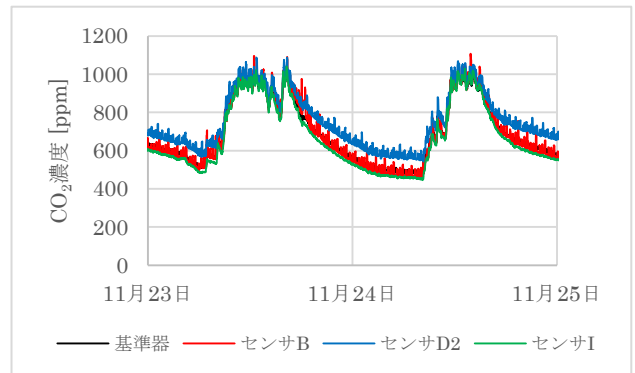


図7 センサBおよびセンサD2について移動平均および一点補正を適用した結果（実験開始後107~108日）

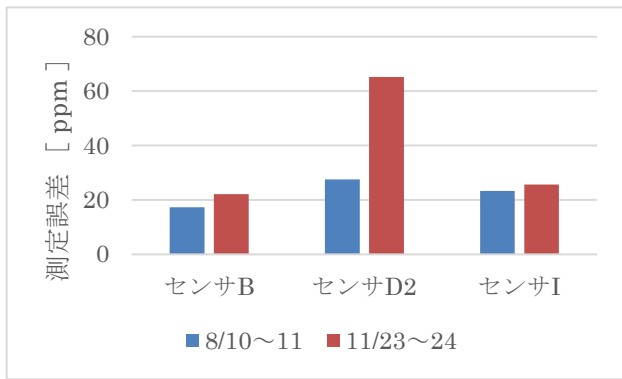


図8 CO<sub>2</sub>濃度センサの平均誤差の比較

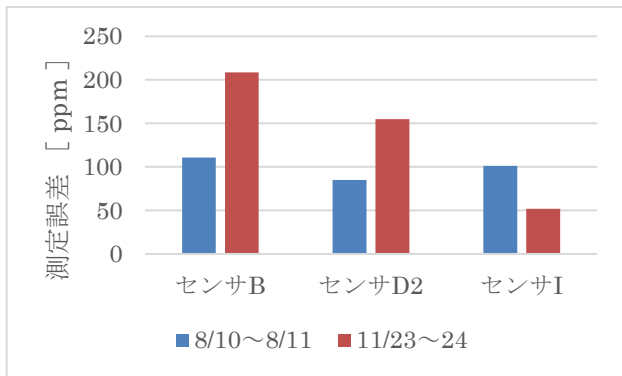


図9 CO<sub>2</sub>濃度センサの最大誤差の比較

ったが、測定後期においてはセンサD2が平均誤差、最大誤差いずれも増加していることを確認した。また、センサBは平均誤差は抑えられていたが最大誤差が大きく増加することを確認した。本実験ではセンサBとセンサD2については移動平均と一点補正といった後処理を付加したが、誤差低減のためにパラメータの調整および加重移動平均などの異なる後処理方法についても今後検討する。これらの結果から、CO<sub>2</sub>濃度センサはセンサIが有望と考えた。センサBとセンサD2は前述のとおり、後処理方法の検討が必要と考える。

今回用いたCO<sub>2</sub>濃度センサはいずれもNDIR（非分散型赤外）方式であるため、センサ内に直接雰囲気を取り込む必要がある。そのため、粉塵の混入や結露などにより異物が光源や受光部に付着し測定誤差が増大し計測値が高くなっていくと考えられる。本実験ではセンサD2が誤差の増大が顕著であったが、雰囲気を取り込み方法や

センサ部の密閉方法の違いによるものと考えられる。また、低価格帯のCO<sub>2</sub>濃度センサは個体差が大きい傾向があり、実装上の品質のばらつきも考えられる。そのため、低価格帯のCO<sub>2</sub>濃度センサを用いる際は、初期特性の把握と定期的な校正を行うなど留意することが必要である。

## 5 結 言

本研究では、恒温恒湿槽を用いた加速劣化試験とフィールド実験により、低価格帯の温度センサ、湿度センサおよびCO<sub>2</sub>濃度センサの測定精度の経時的な変化について評価し、以下の知見を得た。

- 1) 温度センサについて、最大誤差とばらつきについて比較評価を行い、センサDとセンサSを選定した。加速劣化試験後の最大誤差はセンサDが1.6℃、センサSが2.2℃、ばらつきはセンサDが0.5℃、センサSが0.7℃であった。
- 2) 湿度センサについて、最大誤差とばらつきについて、比較評価を行い、センサSを選定した。加速劣化試験後の最大誤差が3.8%Rh、ばらつきが1.2%Rhであった。また、センサUについては、初期校正を行うことで実用的な値が得られると考えられる。
- 3) CO<sub>2</sub>濃度センサについて、基準器に対する平均誤差と最大誤差について比較評価を行い、センサIを選定した。実験開始後107~108日目における平均誤差が25.6ppm、最大誤差が52.0ppmであった。また、センサBおよびセンサD2については平均化処理や一点補正等の後処理を付加する必要がある。

本研究の成果について、関係機関との協力のもと安価なセンサを搭載した環境計測装置の製品化および事業化を予定している。導入コストについては従来製品の6割程度に低減できる見込みである。

## 文 献

- 1) 星岳彦、安場健一郎、黒崎秀仁：日本の施設園芸とユビキタス環境制御システムの現状と展望、植物環境工学、28巻、4号、p163-171 (2016)
- 2) 安場健一郎、黒崎秀仁、高市益行、鈴木克己：ユビキタス環境制御システム通信実用規約に基づいた施設園芸用管理ソフトウェアの開発、野菜茶業研究所研究報告、11号、p.63-72 (2012)