J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 150, p.115～123 (2022)

熱収支ボーエン比法による蒸発散量算定への Arduino と CMOS 温湿度センサーの適用

伊藤祐二[1]・平嶋雄太[2]・宮本英揮[2]・籾井和朗[1]

Application of Arduino and CMOS temperature-humidity sensor to evapotranspiration calculation by Bowen ratio energy budget method

Yuji ITO[1], Yuta HIRASHIMA[2], Hideki MIYAMOTO[2] and Kazuro MOMII[1]

Abstract: A case study of measurements using Arduino was conducted to examine its applicability in evaluating the evapotranspiration (ET) from an upland field. A system to control an inexpensive CMOS sensor was assembled and used to measure air temperature and relative humidity. Assuming a light user, the basis of the system and its handling when using Arduino as a data logger were introduced. The minimal customization required to build a temperature-humidity measurement system was also described. The results show that the constructed system had a lower ET calculation accuracy than the conventional expensive and high-performance system, and that this was due not only to the sensor performance but also to the hardware customization. However, the analyses demonstrate that all operations of selecting and removing sensors with large individual specificity, setting appropriate conditions for removing undesirable data in the ET calculation method, averaging the data, or bias correction for individual specificity were effective at attaining acceptable accuracy as compared with that of the conventional system. The accumulation of information on such measurements is essential for promoting the utilization of a low-cost open-source system.

Key Words: Open source, low-cost system, bias correction, sensor specificity, elimination of undesirable data

1. はじめに

Arduino は，ハードウェアのマイコンボード（Arduino ボード）とソフトウェアの統合開発環境（IDE）から構成され，2005 年にイタリアで開発されたシステムである．その特徴は，安価で，システムの開発や構築に関する十分な専門知識がなくても比較的容易に使用でき，オープンソースのため，開発に関する情報（接続方法，入出力結果，ソフトウェアなど）が多くのユーザーから公開され，無償で利用できることである．そのため，現在では，電子工学などの専門分野に加え，教育業界や企業でも使用され，世界で広く普及している（高本, 2014）．こうした背景から，工学系分野に限らず様々な学術分野で利用が期待される．

とりわけ農学分野では，屋内外の様々な測定，モニタリング，機器の制御などで Arduino の使用機会が想定される．たとえば，農地における環境計測技術としてセンサーネットワークやフィールドサーバーの研究・開発が進み（溝口・伊藤, 2015），こうしたシステムの中枢を担う制御用マイコンとして Arduino が使用されている（深津・平藤, 2020）．同様の環境計測システムは施設園芸においても開発が進み，その制御に Arduino が用いられている（安場ら, 2013）．また，ロボットへの活用事例として，用水路の自走式水草刈機の制御基板にも利用されている（山岡ら, 2020）．これまで培われてきた様々なセンサー，測定，ロボットなどの技術を基礎とし，無線化やネットワーク化を実現した ICT・IoT システムの自作が Arduino の高いユーザビリティーによって可能になったと言える．

こうしたシステム開発への適用事例に比べて，Arduino の最も根本的な活用方法である計測を中心に論じた報告は少ない．Arduino は，その汎用性や拡張性の高さから，様々な入出力装置やセンサーを制御することができる．最近，1 台数百円 ～ 数千円程度の安価なセンサーが流通し，安ければ Arduino を含めて 2,000 円以内で様々な測定システムを構築することができる．そうした多様なセンサーの接続や制御に関する情報は web 上で容易に入手できるが，その多くは趣味や教育目的にとどまり，測定結果を含めて学術レベルで整理した内容は少ない．

本稿では，Arduino を活用した計測事例として，安価な温湿度センサーを制御するシステムおよびその測定デー

[1]Faculty of Agriculture, Kagoshima University, 1-21-24 Korimoto, Kagoshima 890-0065, Japan. Corresponding author: 伊藤祐二, 鹿児島大学農学部.
[2]Faculty of Agriculture, Saga University, 1 Honjo-machi, Saga 840-8502, Japan.
2021 年 8 月 31 日受稿　2021 年 2 月 15 日受理

タに基づく畑地の蒸発散量（ET）の算定について紹介する．ライトユーザーを想定し，Arduino ボードをデータロガーとして使用する場合の基本的なシステムとその扱い方を可能な限り詳細に説明した．その際，最低限必要なハードおよびソフトウェアのカスタマイズについても言及した．ET 算定法には熱収支ボーエン比（BREB）法を用い，温湿度センサーの性能が ET 算定精度に及ぼす影響を中心に整理した．

つまり，同法では，2 高度間の温湿度差の測定精度が ET 算定精度に影響を及ぼすため，使用する 2 台のセンサーの器差に着目して結果を整理した．この点を踏まえ，検討するセンサーとして，コンピューター（PC）の CPU にも利用される相補型金属酸化膜半導体（CMOS）を内蔵する Sensirion 製 SHT71 センサー（以下，SHT71 と表記）を用い，研究用として定評のある高額・高性能の Vaisala 製 HMP110 センサー（以下，HMP110 と表記）と温湿度測定精度および器差を比較した．Arduino の最大の魅力である低コストを重視し，安価な Arduino-SHT71 温湿度測定システムによる ET の算定精度および誤差補正について検討した．

2. 実験材料および方法

2.1 Arduino 測定システム

Arduino ボードには，フラッシュメモリーや ROM の容量，CPU の処理速度，入出力端子数の違いによって，複数のタイプがある（高本, 2014）．Arduino Uno は，デジタル端子数：14，アナログ端子数：6，フラッシュメモリー：32 KB，ROM：1 KB，CPU 処理速度：16 MHz を備え，シリーズの中で標準のタイプである．本研究では，Arduino Uno の上位モデルである Arduino Mega 2560 R3 の互換機 Keyestudio Mega 2560 R3（Keyestudio; 以下，Keyestudio Mega と表記）を使用した．Keyestudio Mega は，デジタル端子数：54，アナログ端子数：16，フラッシュメモリー：256 KB，ROM：4 KB，CPU 処理速度：16 MHz を備える．サイズは，Arduino Uno よりも長辺が約 3 cm 長く，長辺 10.8 cm，短辺 5.3 cm，高さ 1.3 cm であり，web サイト（たとえば，https://www.amazon.co.jp/）から 1 台 1,500 円程度で購入することができる．仕様は Arduino Mega 2560 R3 と同じであり，Arduino Uno とは異なるものの，3 者の基本的な取り扱い方は同じである．

Arduino ボードは，多くの入出力に対応するが，数値データの記録装置と正確な内部時計を備えていないため，データロガーとして直接利用することはできない．たとえば，気温の時間変化を測定する場合，時系列データを得るためには，SD カードモジュールと RTC（Real time clock）モジュールを接続し，各機能を追加する必要がある．本研究では，SDSC（最大容量 2 GB）と SDHC（最大容量 32 GB）の規格に対応する Catalex 製 microSD カードモジュール（v1.0 11/01/2013）および時間測定精度が比較的高い DS3231RTC モジュール（誤差 5 sec month^{-1}; 製造元不明）を用いた．いずれも一般に広く利用されており，使用方法やトラブルシューティングの情報が得やすいこと，1 台数百円程度の低価格で Amazon 等の web サイトでも購入可能であることから，入手しやすく取り扱いが容易なモジュールである．

これらの機器の結線は，専用のジャンパーワイヤとブレッドボードを用いて行った（Fig. 1a, b）．Keyestudio Mega の電源は，7 ～ 12 V に対応する丸形 DC ジャックまたは Arduino 標準のピンタイプ端子，5 V の USB（B タイプ）から入力できるが，今回は Campbell Scientific 製のバッテリー（PS100）からピン端子を介して 12 V で給電した．Keyestudio Mega と各機器の接続と配線を整理・集約するためにブレッドボードを利用し，バッテリーやボード間の結線にはジャンパーワイヤを用いた．Arduino 規格に対応したピン端子を備える SD カードと RTC の両モジュールはブレッドボードに直接接続した．Keyestudio Mega との結線の詳細は，参考書（たとえば，神崎, 2012）や web サイトに譲り，ここでは割愛する．

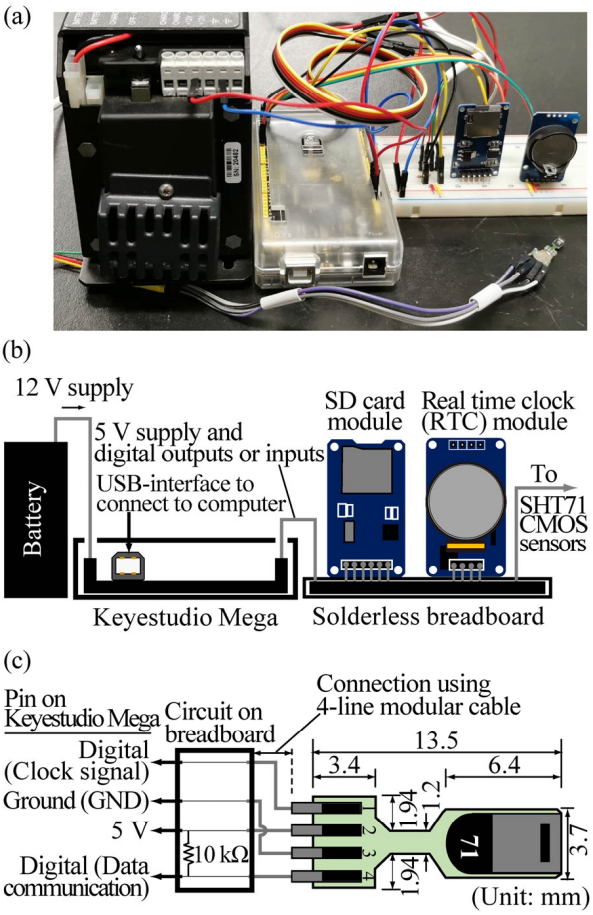


Fig. 1 Arduino 互換ボード Keyestudio Mega と SHT71 CMOS センサーを用いた温湿度測定システム（(a) 写真，(b) 模式図，(c) センサー接続の模式図）．
Temperature-humidity measurement system using Keyestudio Mega (Arduino-compatible board) and SHT71 CMOS sensor ((a) photograph, (b) schematic diagram, and (c) schematic diagram of sensor wiring).

SHT71 は，1 台 3,000 円以下（2017 年当時 ※）で購入可能なデジタル温湿度センサーであるが，Arduino 用に開発されていないためカスタマイズを要した（Fig. 1c）．まず，端子が規格外のため，はんだ付けした 4 芯のモジュラーケーブルを利用してブレッドボードと接続した．また，SHT71 にはデジタルデータ通信用のプルアップ抵抗（10 kΩ）が必要なため，回路をブレッドボード上に組み，それを介して Keyestudio Mega と接続した．なお，回路やボードとの結線にはジャンパーワイヤを用いた．

測定システムは，PC 上で作成するプログラムで制御することができる（Fig. 2）．Arduino ボードの制御用プログラムは，基本的にスケッチ（拡張子が「ino」のファイル）とライブラリー（拡張子が「h」のヘッダーファイルと拡張子が「cpp」のソースファイル）から構成され，C 言語と C++ 言語をベースにした Arduino 特有のプログラミング言語で記述される．プログラムは統合開発環境（IDE）で作成することができ，IDE は Arduino の公式 web サイト（https://www.arduino.cc/）から無料でダウンロードすることができる．制御プログラムは必ずしもすべて自作する必要はなく，カスタマイズは必要であるが，大部分を基礎プログラムとして web サイト（たとえば，GitHub: https://github.com/）から無料で入手できる場合が多い．

本研究でも，制御プログラムを可能な限り web サイトから入手し，稼働までのプロセスを省力化した．まず，web サイトからダウロードした SHT シリーズのセンサー制御用プログラムを基礎とし，スケッチとヘッダーファイルのみ若干の修正を加えた．前者はモジュール等の必要なヘッダーファイルの読込みと測定時間インターバルのステートメントおよび入出力端子の番号，後者はセンサー出力値（デジタル値）の温湿度換算係数を SHT71 用にカスタマイズした．測定の際は，USB ケーブルでノート PC と Keyestudio Mega を接続し，IDE を立ち上げて両者の接続を認識させた．作成したプログラムを IDE 内でコンパイルした後，ノート PC から Keyestudio Mega のフラッシュメモリーに書き込み，設定した時間インターバルで測定を開始した．

2.2 熱収支観測

鹿児島大学農学部郡元キャンパス内のクリムゾンクローバー畑（長辺 57 m，短辺 22 m）の中央に，SHT71，HMP110，純放射計（Q7.1, REBS），地中熱流板（HFT3-L, Hukseflux），風向風速計（03001, Young）から成る観測ステーションを構築した．純放射計は地表面から 1.5 m の位置に設置し，熱流板は地下約 2 cm に埋設した．HMP110 は 2 台，SHT71 は 4 台を用い，それぞれラジエーションシールド内に固定してステーションに設置した．HMP110 については専用のセンサー保護フィルターとシールド（YG-41003, Young）を使用したが，SHT71 では専用のシールドが市販されていないため，Onset 製の小型シールド（RS3-B）を代用した．

ただし，予備実験において，SHT71 をシールド内に直接設置すると，塵埃や水滴による腐食によってセンサーが故障したため，以下の保護フィルターを自作して防食加工を施した．まず，接続ケーブルの一部を含む SHT71 全体を直径 1.2 cm のポリプロピレン製円筒に入れ，シリコン接着剤で固定した．次に，円筒の側面にあらかじめ設けた通気用スリットをろ紙（PHWP02500，Merck）で内側から塞いだ．最後に，それ以外の通気穴をシリコン接着剤で塞いで，全体を小型シールド内に固定した．

各センサーによるデータは，温湿度センサーの器差評価と BREB 法による ET の算定のために，それぞれ期間を分けて取得した．まず，器差を評価するために，HMP110 と SHT71 のすべてを高さ 1 m の位置に併設し，2018 年 10 月 23 日 ～ 2019 年 1 月 16 日まで（欠測日を除く 86 日間）測定した．その後，ET 算定のため，HMP110 のセンサー 1（HMP110-1）と SHT71 のセンサー 1 と 3（SHT71-1 と-3）を高さ 0.2 m，他を 2 m に移設し，2019 年 1 月 22 日 ～ 4 月 15 日まで（欠測日を除く 88 日間）測定した．ただし，地表面側（蒸発面側）に設置した 3 台の各センサーは，クリムゾンクローバーの草丈（平均草丈と最大草丈は約 0.35 m と約 0.5 m）に応じて，4 月 3 日以降の設置高度を 0.5 m とした．Keyestudio Mega に接続した SHT71 以外のセンサーをデータロガー CR1000（Campbell Scientific）に接続し，SHT71 を含めた全データの測定間隔を 5 分とした．

本研究における吹送距離（測点から風上側に広がる同一植生面の水平距離）の取り扱いについて付記する．上述の温湿度測定高度に対し，吹送距離は少なくとも 20 倍の長さに設定する必要があるが（Heilman et al., 1989），

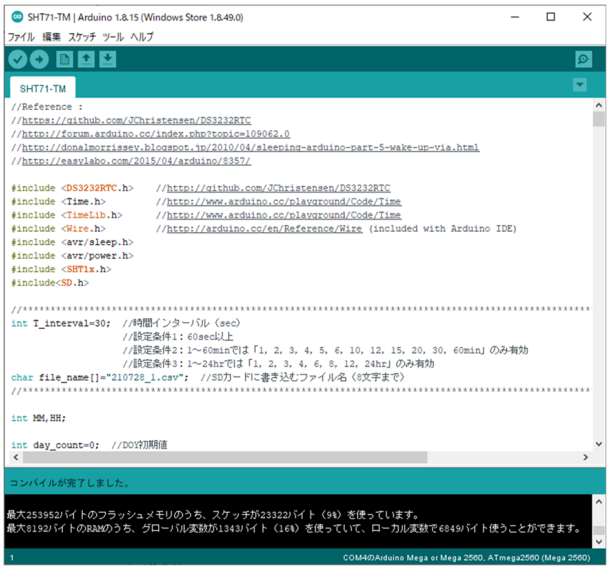


Fig. 2　コンピューター上の統合開発環境（IDE）で作成した温湿度測定用プログラム（スケッチ）．
Programs (sketch) for temperature-humidity measurement described using Integrated development environment (IDE) on a computer.

本研究では十分な距離を確保することができなかった．しかし，この問題は，HMP110 と SHT71 を同じステーションの同一高度に設置したため，両センサーに基づいて評価した ET を比較する目的において無視できると考えた．

2.3 BREB 法による蒸発散量の算定

BREB 法による ET（kg m^{-2} s^{-1}）は，ボーエン比（β）および熱収支要素の純放射量（R_n; W m^{-2}）と地中熱流量（G; W m^{-2}）を用いて次式で計算することができる（Bowen, 1926; Brutsaert, 1982; ASCE, 1996）．

$$\mathrm{ET} = \frac{R_\mathrm{n} - G}{l(1+\beta)} \tag{1}$$

ここで，l は水の気化潜熱（J kg^{-1}）である．BREB 法では，残りの熱収支要素である潜熱輸送量と顕熱輸送量はそれぞれ lET（W m^{-2}）と βlET（W m^{-2}）で与えられ，すなわち β は両者の比として次式で定義される．

$$\beta = \frac{H}{l\mathrm{ET}} = \gamma\frac{T_1 - T_2}{e_1 - e_2} \tag{2}$$

ここで，H は顕熱輸送量（W m^{-2}），γ は乾湿計定数（0.667 hPa °C^{-1}），T は温度（ °C），e は水蒸気圧（hPa）である．また，添え字の 1 は蒸発面側，2 はそれよりも高い位置の地表面高度をそれぞれ示す．R_n と G は純放射計と地中熱流板によって，β は温湿度センサーによる T および T と相対湿度（RH ; %）から計算される e（Ham, 2005）を式（2）に代入することによってそれぞれ得られ，ET はこれらを式（1）に代入して求められる．

本研究では，Keyestudio Mega と SHT71 を組み合わせた測定システムが ET 算定精度に及ぼす影響を以下の手順で評価した．まず，CR1000 に接続した HMP110 の T と RH から ET を算定し，これを SHT71 の T と RH から算定した ET の比較の基準とした．両システムで ET を求める際，R_n と G にはいずれも上述の同じ測定値を用いた．各 ET は 5 分間隔で計算し，それらを算術平均して求めた日単位の ET で比較した．ただし，BREB 法では，使用した測定機器の誤差により，算定した ET が異常値となる問題があり（Irmak et al., 2014），この問題に対処する必要がある．本研究では，5 分間隔で計算した ET が異常値であるかどうかを Ohmura（1982）が提案した評価基準によって判定し，異常値と判定された場合は算術平均のデータから除去した（伊藤ら, 2008）．

この評価基準では使用する温湿度センサーの T と RH およびそれらの関数である e の測定分解能（ε_T，ε_RH，ε_e）のデータを要する．HMP110 では，出力電圧分解能 0.12 °C mV^{-1} と 0.1 % mV^{-1} および CR1000 の A/D 変換分解能（0.667 mV）より $\varepsilon_\mathrm{T} = 0.08$ °C と $\varepsilon_\mathrm{RH} = 0.07$ % とした．SHT71 では，データシート（Sensirion, 2011）より $\varepsilon_\mathrm{T} = 0.01$ °C と $\varepsilon_\mathrm{RH} = 0.03$ % としたが，ET を適切に算定することができなかったため，ε_T のみ HMP110 と同じ 0.08 °C を採用した（3.3 節参照）．ε_e は，T と RH の測定値から求めた $e(T,\mathrm{RH})$ と $e(T+\varepsilon_\mathrm{T}, \mathrm{RH}+\varepsilon_\mathrm{RH})$ の差として 5 分間隔でセンサー別に算出した．

3. 結果と考察

3.1 温湿度測定差

HMP110 に対する SHT71 の測定差は大きく，差異は T と RH の変動が大きい時間帯で特に拡大した（Fig. 3）．T の測定差（Fig. 3a, b）は，夜間は概ね −1.0 °C ～ 0.3 °C の範囲内であったが，日の出頃（7 時頃）から急増し，T が最高となる日中（たとえば，14 時頃）にかけて 2 °C ～ 3 °C で最大となり，それ以降，日没頃（17 時頃）に急減する変動パターンを示した．検討した 10 月 23 日 ～ 1 月 16 日の HMP110-1 と HMP110-2 の平均値（HMP110ave）に対する SHT71-1 ～ SHT71-4 の T の二乗平均平方根残差（RMSD）はそれぞれ 0.93 °C，0.80 °C，0.90 °C，0.82 °C であり，残差の平均値（Bias）は 0.45 °C，0.67 °C，0.61 °C，0.56 °C であった．一方，RH の測定差（Fig. 3c, d）は，T が上昇する日中に負，T が低下する夜間に正となり，概ね −8 % ～ 10 % で推移した．センサー 1 ～ 4 の RH の RMSD はそれぞれ 2.9 %，2.2 %，2.5 %，2.0 % であり，Bias は 2.2 %，3.7 %，3.8 %，1.9 % であった．これらの結果から，SHT71 は一般に RH を過大評価し，高温ほど T を過大および RH を過小に評価することが分かった．

測定差の原因を調べるために，別途，両センサーの比較実験を行った．6 台の SHT71 と 2 台の HMP110 をシールドを外して室内の実験台に固定し，17.5 °C ～ 27.0 °C および 43.5 % ～ 72.5 % の温湿度条件で両センサーの測定値を比較した（Fig. 4）．温湿度条件が特に不安定となった空調による冷却開始時と冷却終了時の時間帯を除けば，SHT71 の T の測定差は 25 °C ～ 27 °C の高温帯で概ね ±0.5 °C 以内，18 °C 付近で概ね ±1 °C 以内であり（Fig. 4a），RH の測定差は条件に関係なく 2 % ～ 6 %（全センサー平均 3.6 %）であった（Fig. 4b）．この測定差をシールドを用いた野外の結果と比べると，RH を過大評価する点は一致し，他は異なった．ちなみに，標準的な温度帯（たとえば，25 °C 付近）における T と RH のメーカー公称の測定精度は，HMP110 の ±0.2 °C と ±1.5 %（Vaisala, 2020）に対し，SHT71 では ±0.4 °C と ±3 %（Sensirion, 2011）であり，上記の測定差は公称精度と概ね整合した．

よって，野外の T の測定差は，センサーの保護フィルターとラジエーションシールドのカスタマイズに起因し得る．室内実験とメーカー公称精度のデータから，SHT71 の T センサーの性能は HMP110 と比べて実用上遜色はなく，T の測定差が両センサーの性能差のみによって生じたとは考えにくい．これに対し，ラジエーションシールドが T に及ぼす影響として，日中に T を過大評価し測定差が増大することが知られており（浜田,

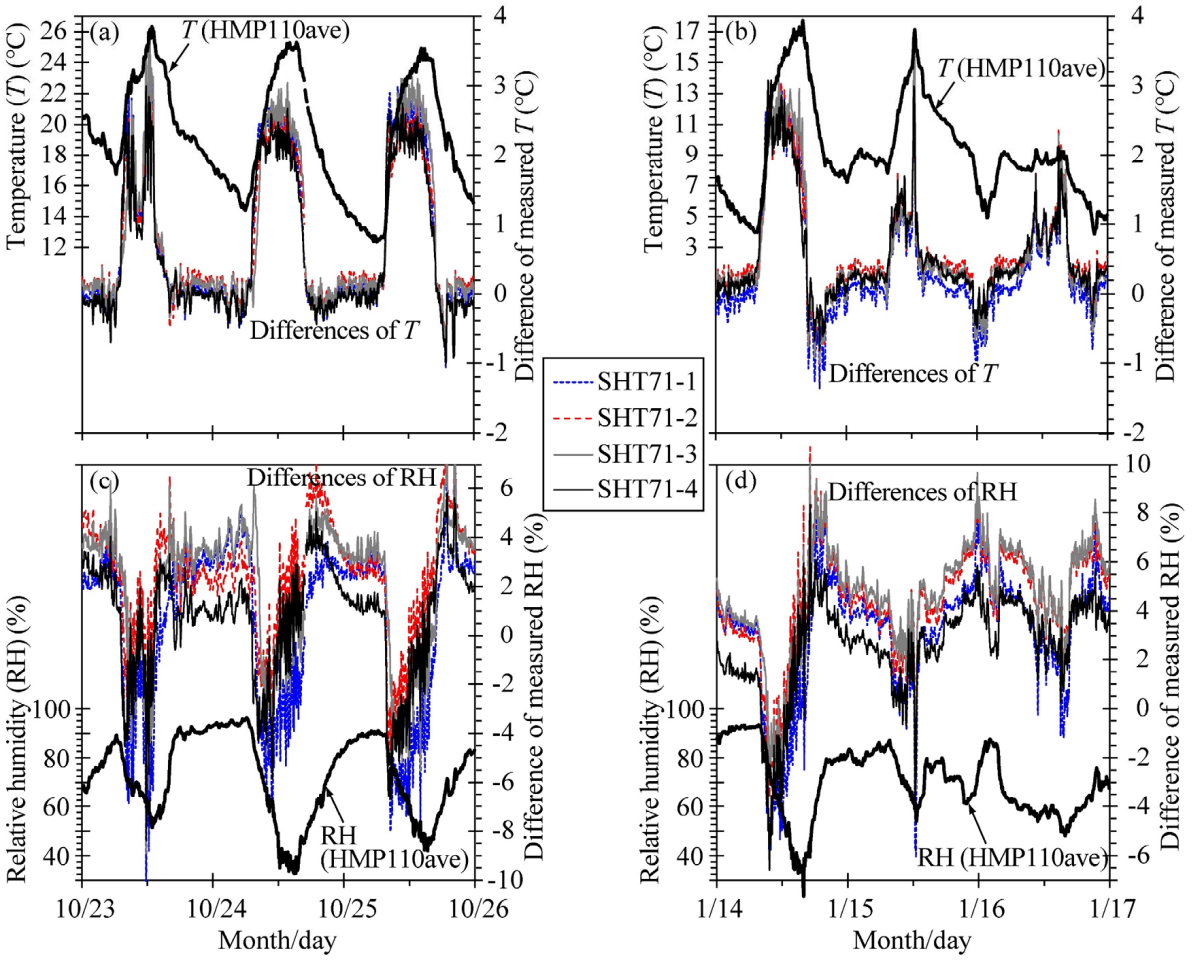


Fig. 3　高度 1 m に設置した 2 台の HMP110 センサーの平均値（HMP110ave）に対する 4 台の SHT71 センサー（たとえば，センサー 1 は SHT71-1 と表記）の温湿度測定差.
Differences between temperature-humidity measurement by four SHT71 sensors (e.g., SHT71-1 denotes sensor 1) and mean values (HMP110ave) by two HMP110 sensors.

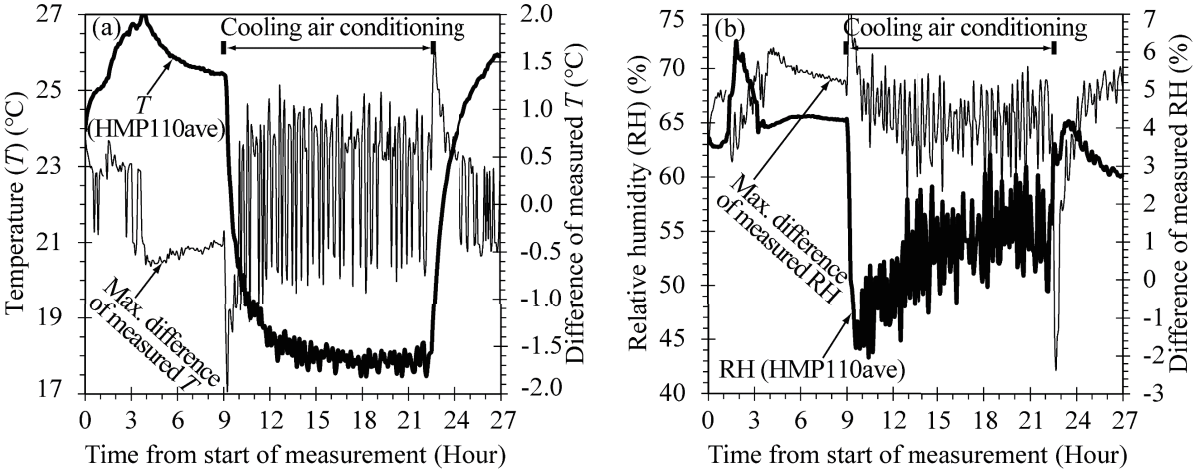


Fig. 4　2 台の HMP110 センサーの平均値（HMP110ave）に対する 6 台の SHT71 センサーの実験室内における最大の温湿度測定差.
Maximum differences between temperature-humidity measurement by six SHT71 sensors and mean values (HMP110ave) by two HMP110 sensors in laboratory.

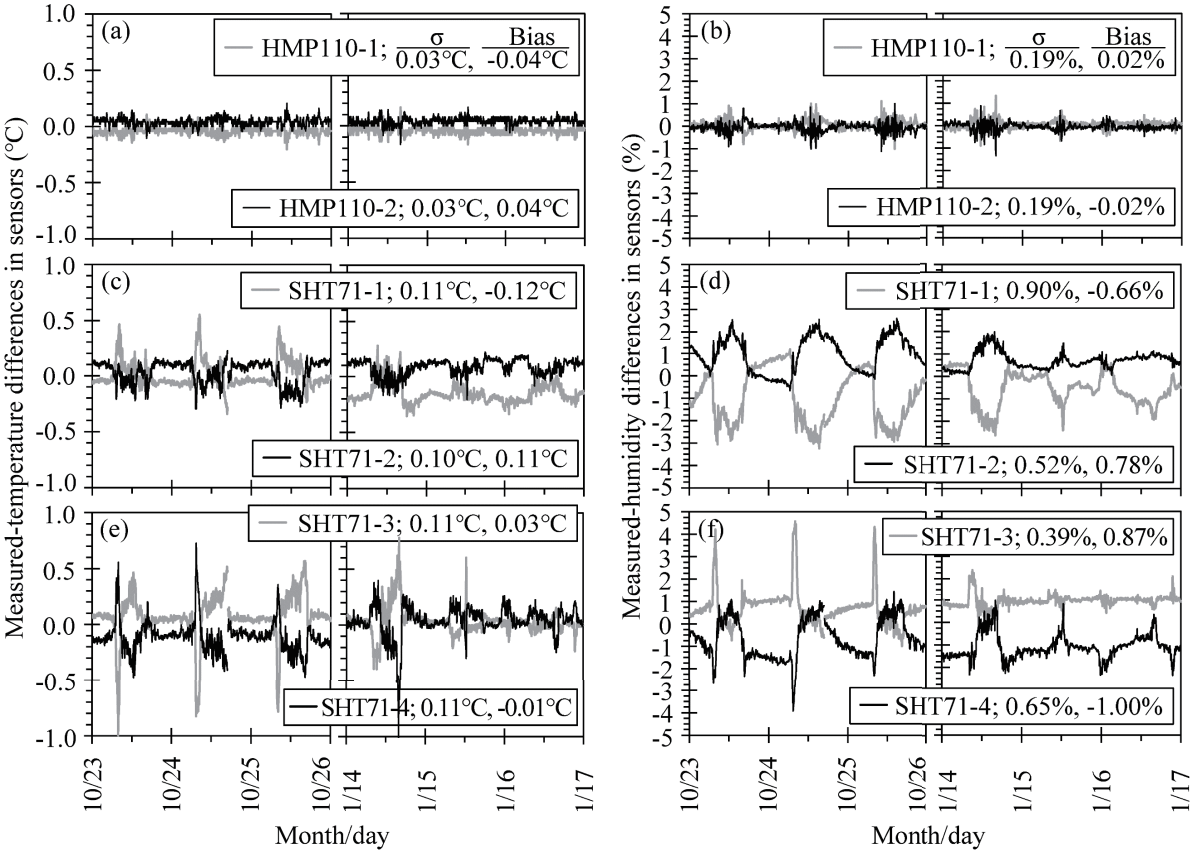


Fig. 5 高度 1 m に設置した HMP110 センサーおよび SHT71 センサーの器差．HMP110 と SHT71 の器差は，それぞれ 2 台と 4 台の測定値の平均値に対する各センサーの測定差として評価される．ハイフンの番号はセンサー番号，σ は標準偏差を表す．
Individual specificities of HMP110 and SHT71 sensors. Specificities of HMP110 and SHT71 sensors are calculated as differences between each measurement and averages of two and four sensors, respectively. Hyphen numbers and σ represent sensor numbers and standard deviation, respectively.

2000），今回生じた測定差（Fig. 3a, b）はその特徴と一致する．2.2 節で述べたように，SHT71 には自作の円筒フィルターと市販の汎用シールドを用いたが，通風 · 通気条件が比較的悪かった可能性がある．つまり，T の過大評価は，高温となる日中に円筒内に熱が滞留したことが主な原因である．

一方，RH の測定差は，T の測定差および RH センサーの性能の違いによって生じた可能性が高い．野外および室内実験のデータより，SHT71 で得られる RH は一般に過大となる．よって，T の影響が小さい夜間では RH センサー自体の性能差によって測定差は 4 % 前後であった（Fig. 3c, d）．これに対し，高温条件の日中では円筒フィルター内の飽和水蒸気圧が高くなるため RH が低下し，測定差が縮小または負になった．このように，ラジエーションシールド内に設置した SHT71 の温湿度測定差は同センサーの公称精度と比べると大きかったが，本論の冒頭で述べたように，ET の算定を目的とするうえで，BREB 法では 2 高度間の温湿度差の測定精度が重要であるため，以下ではセンサーの器差を比較 · 検討する．

3.2 温湿度センサーの器差

基準として用いた HMP110 の器差は比較的小さく，メーカー公称精度と同等であった（Fig. 5a, b）．HMP110 の器差を，使用した 2 台のセンサーの平均出力値と各出力値の差として評価した結果，T の器差は約 ±0.1 °C であり，器差の標準偏差（σ）と Bias は 0.03 °C と ±0.04 °C であった（Fig. 5a）．RH では，器差は約 ±1 %，器差の σ と Bias は 0.19 % と ±0.02 % であった（Fig. 5b）．これらの結果をメーカー公称精度（前節参照）と比較すると，T と RH の器差は各公称精度の範囲内にあった．よって，検討したセンサーは 2 台に限定されるものの，HMP110 から出力される T と RH には高い再現性があり，ET 算定では高い精度が期待された．

HMP110 に比べ，SHT71 の器差は大きく，特に RH の器差の Bias は極めて大きかった（Fig. 5c–f）．HMP110 と同様に，SHT71 の器差も 4 台のセンサーの平均出力値と各出力値の差としてそれぞれ評価した．全器差の σ の平均値および Bias の絶対値の平均値をそれぞれ求め，HMP110 のそれらと比較すると，T では 3.4 倍と 1.7 倍，RH では 3.2 倍と 39 倍ほど大きかった．前節で記したメーカー公称精度より，SHT71 の T と RH の測定誤差は理論上 HMP110 の 2 倍になるが，器差もこれと同様に SHT71 の方が大きく，RH の器差の Bias については

理論値を大きく超過した．以上より，SHT71 を用いて BREB 法で ET を算定した場合，HMP110 を用いた場合に比べて精度が劣る可能性が高い．

3.3 ET の算定誤差とその補正

SHT71 では，2 高度に設置するセンサーの組み合わせによって ET の算定精度が異なった（Fig. 6a）．センサーの組み合わせの中で，センサー 1 と 4（SHT71-14）によって求めた ET の精度は最も高く，RMSD = 0.43 mm day^{-1} および Bias = 0.16 mm day^{-1} であった．センサー 1 と 2（SHT71-12）およびセンサー 3 と 2（SHT71-32）による ET は，RMSD と Bias は拡大したが HMP110 の ET に対する線形性は高く（$R = 0.93$ と 0.98），1 : 1 線近辺に分布した．センサー 3 と 4（SHT71-34）では，RMSD = 1.14 mm day^{-1} および Bias = 0.42 mm day^{-1} であり，ET 算定精度が低かった．式（1）で ET を求める際，R_n と G には同じデータを使用しているため，ET 算定精度の差異は，各センサー間の器差，すなわち各センサーの温湿度測定誤差に伴う β 計算値の差異に起因する．しかしながら，3.1 節と 3.2 節で明らかにした T と RH の測定差および比較的大きな器差の問題にもかかわらず，センサーの組み合わせによっては SHT71 によって ET をある程度の精度で算定することが可能であることがわかった．

ET の算定精度を改善するために，T と RH の Bias 補正を検討した．器差の 1 つの指標として評価した SHT71 の各センサーの Bias を，ET 算定時の T と RH のデータから減じてそれぞれ補正し，各補正値を用いて ET を再計算した．Bias 補正前後の ET 算定精度を比較した結果（Fig. 6b），SHT71-32 と SHT71-34 に対する ET 算定精度はさほど変わらなかったが，SHT71-12 と SHT71-14 の算定誤差はそれぞれ RMSD で 53 % と 28 %，Bias で 47 % と 81 % の改善が認められた．ちなみに，T と RH の器差と T，RH，R_n，風速，日射量（約 2 km 離れた気象台より入手）の関係を回帰分析に基づいてそれぞれ検討したが，効果的な σ/Bias 補正は見出せなかった．

よって，ここで適用した Bias 補正法は，センサー器差の特性にもよるが，以下の仮定の下では有効である．つまり，4 台のセンサー測定値の平均値は測定時の T または RH の最確値を表し，Bias は様々な T- RH 条件で一定と仮定する．こうした仮定が成立すれば，上述の Bias 補正によって，ET 算定時の各高度の温湿度測定値は，理論上，それぞれの最確値に近似するため，ET 算定値は補正される．提示した Bias 補正法は，野外の ET 算定時と同じ機器を利用でき，かつ単純な算術平均値として Bias を評価できる利点がある．複数組の温湿度センサーから算定した ET の偏差を軽減するために，ここで示した T と RH の Bias 補正法を簡便な ET 補正法として提案する．なお，高額であっても HMP110 のような高性能のセンサーが利用できる場合は，その測定値をより正確な温湿度の最確値として用いることを推奨する．

性能が不十分な複数のセンサーを使用したとしても，可能な限り精度よく ET を算定する方法を考察する．まず，センサー購入後に複数のセンサーを比較し，極端に性能の低い粗悪なセンサーを排除することを考える．この要点は，ET を算定する野外の設置状況と可能な限り同じ条件でセンサーの器差を調べることである．検討した 4 台の SHT71 の場合，SHT71-34 による ET 算定精度が最も低く，SHT71-32 と SHT71-34 による ET 計算値に対する Bias 補正の効果は低かった．よって，両方で共通する SHT71-3 を最も性能の低いセンサーとしてあらかじめ排除したいところであるが，先述の器差の σ や Bias の統計値（Fig. 5c–f）から SHT71-3 を排除する根拠は不明確である．ただし，原因は不明であるが，SHT71-3 の器差は 1 時間程度の間に急変する状況が多く認められた（Fig. 5e, f）．こうした原因不明の出力値の大きな変化は補正するのも困難であるため，そうした状況があらかじめ確認されるセンサーは使用しない方がよい．

他の方法として，データの平均が考えられる．SHT71 による ET 算定では，Bias 補正前後のいずれにおいても使用するセンサーによって ET 算定値にばらつきが見ら

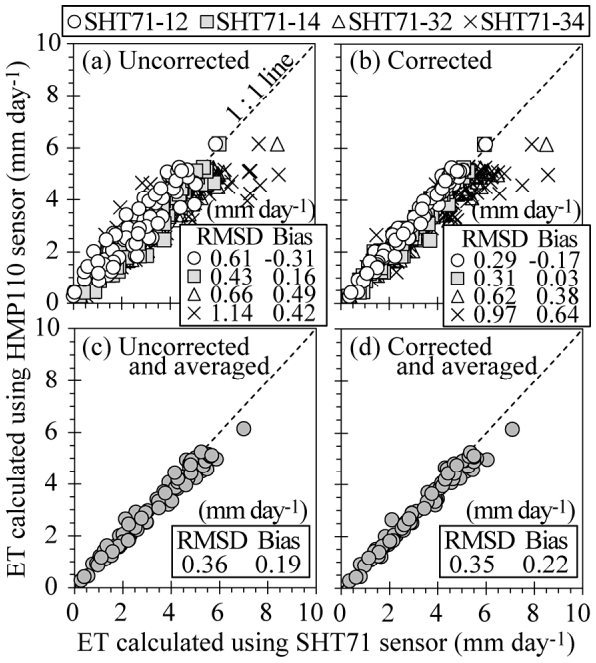


Fig. 6　HMP110 センサーと SHT71 センサーを用いた BREB 法による蒸発散量（ET）算定値の比較．ハイフンの番号は 2 高度に設置した 2 台のセンサーの組み合わせを表す（たとえば，センサー 1 と 2 の組み合わせは SHT71-12 と表記）．(b) と (d) は SHT71 センサーの器差補正後の結果を示す．(c) と (d) は (a) と (b) の各 4 組の SHT71 センサーによる ET を平均した結果を示す．
Comparison of evapotranspiration (ET) estimated by BREB method using HMP110 sensors and SHT71 sensors. Hyphen numbers represent couples of two sensors installed at different heights (e.g., SHT71-12 denotes a couple of sensors 1 and 2). (b) and (d) show results corrected for individual specificities of SHT71 sensors. (c) and (d) show results averaged for ET by four couples of SHT71 sensors in (a) and (b), respectively.

れた（Fig. 6a, b）．そこで，日単位の各 ET 算定値を算術平均してみると，補正前後の両 ET 平均値は，精度が比較的高かった Bias 補正後の SHT71-12 または SHT71-14 による ET 算定値と同等の精度を示した（Fig. 6c, d）．また，2 台の SHT71 による T および RH のデータをそれぞれ高度別に算術平均して 2 高度間の温湿度差を求め，それらを用いて ET を計算した結果（図示していない），RMSD = 0.41 mm day^{-1} および Bias = 0.32 mm day^{-1} となり，この場合もある程度良好な精度を示した．植生や気象などの蒸発条件，センサーの設置高度やラジエーションシールドの性能などの測定条件の違いについて更なる検討は必要であるものの，上記の 3 パターンの平均法は，いずれも SHT71 と同程度の性能を有する 4 台のセンサーからより精度の高い ET を得る手法として有効である．なお，器差が極端に大きいセンサーをあらかじめ取り除いたうえでデータを平均すれば，さらに高い精度で ET を算定することができる．

最後に，異常値の処理の違いが ET 算定値の比較に及ぼす影響について考察する．HMP110 を用いた場合，Ohmura（1982）の評価基準で判定した ET の異常値の多くが日の出と日没近傍を含む夜間に集中し，全 ET データの 45.3 % を異常値と判定して ET の算定から除去した．SHT71 でも同様の異常値の発生状況が確認され，その除去率は 48.3±2.0 % であった．方法は異なるものの，類似の概念に基づく丸山 · 伊藤（2019）の評価基準でも，異常値は夜間に集中し，その除去率は 46.7 % であったことが報告されており，本研究結果と一致する．HMP110 と SHT71 の異常値の発生条件は概ね一致していたため，異常値の処理の違いが両センサーによる ET 算定値の比較に及ぼす影響は小さい．ただし，SHT71 では，ε_{T} に実際のセンサー分解能である 0.01 °C を使用すると，異常値の除去率がすべて 30 % 台まで低下し，ET を適切に算定することができなかった．この原因として，まず適用した評価基準では異常値の数が ε_{T} に敏感に応答する特徴を示し，加えて 3.1 節で論じた通風 · 通気条件の悪化が ε_{T} に影響を及ぼしたため，より条件の厳しい本来の ε_{T} が適用できなかったと考える．

4. おわりに

本稿では，CMOS 温湿度センサー SHT71 を Arduino 互換ボード Keyestudio Mega で制御するシステムを構築し，畑地の蒸発散量（ET）算定への有効性を検討した．システムは数千円程度で構築できる安価なものであったが，野外で使用した約半年間で異常や破損は生じず，耐久性はそれなりに高かった．従来の高額 · 高性能の Vaisala 製センサー HMP110 で構成したシステムよりも温湿度測定精度は劣るのに加え，保護フィルターとラジエーションシールドのカスタマイズにより測定差とセンサー間の器差は拡大した．しかし，SHT71 のような安価なセンサーでも複数を比較して器差の大きいセンサーを事前に排除し，ET の異常値判定率 45 ～ 50 % を目安に BREB 法の異常値判定条件である温湿度測定分解能を調整すれば，従来と同等の水準で ET を算定し得ることを確認した．また，器差の大きいセンサーを使用したとしても，データの平均や野外で評価可能な器差の Bias 補正によって精度を改善できることを明らかにした．

今日，高速データ通信や AI などの技術を基にした新たなデータサイエンス時代の黎明期を迎え，本稿の冒頭で述べたようなセンサーネットワークやフィールドサーバーの技術は今後益々重視され活用され得る．こうした技術をより効率的 · 効果的に発展させ社会に実装するうえで，販売 · 開発企業の専門家，研究者，専門外の利用者の各業界間で共通の測定用プラットフォームは必須であり，Arduino をはじめとする低コストオープンソースシステムはその有力なツールである．最近，その利点を生かした各業界ユーザーによる積極的な利用とシステム自作の重要性が指摘されている（深津 · 平藤, 2020; 岡山, 2020）．こうした理念に沿って，社会の多様なニーズへの対応が求められる農学のような研究分野では，今後，オープンソースシステムの積極的な活用ならびにそれに伴う計測に関する情報の公開と蓄積が望まれる．

※SHT71 は生産を終了しており，現在はより高精度のセンサー（たとえば SHT85）が販売されている．

引用文献

ASCE (The American Society of Civil Engineers) (1996): Hydrology handbook second edition, pp. 160–163. ASCE, New York, USA.

Bowen, I.S. (1926): The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. Physical Review, 27: 779–787.

Brutsaert, W. (1982): Evaporation into the atmosphere, pp. 209–212. D. Reidel Publishing Company, London, England.

深津時広 · 平藤雅之 (2020): 個人によるモノづくりの視点から見た農業センサネットワークの課題と改善手法の提案. 農業情報研究, 29: 1–13.

Ham, J.M. (2005): Useful equations and tables in micrometeorology. In Hatfield, J.L. and Baker, J.M. (ed) Micrometeorology in agricultural systems, pp. 542–543. Agronomy Monograph No.47, Madison, Wisconsin, USA.

浜田 崇 (2000): 第 1 部観測編 1.1 気温. 牛山素行編 身近な気象 · 気候調査の基礎, pp. 7–13. 古今書院, 東京.

Heilman, J.L., Brittin, C.L. and Neale, C.M.U. (1989): Fetch requirements for Bowen ratio measurements of latent and sensible heat fluxes. Agricultural and Forest Meteorology, 44: 261–273.

Irmak, S., Skaggs, K.E., and Chatterjee, S. (2014): A review of the Bowen ratio surface energy balance method for quantifying evapotranspiration and other energy fluxes.

Transactions of American Society of Agricultural and Biological Engineers, 57: 1657–1674, doi: 10.13031/trans.57.10686

伊藤祐二, 籾井和朗, 吉満由佳, 面髙みさき, 中川 啓, 竹内真一 (2008): Bowen 比法による畑地の蒸発散量の推定に関する考察. 鹿児島大学農学部学術報告, 58: 21–28.

神崎康宏 (2012): Arduino で計る，測る，量る, p. 263. CQ 出版, 東京.

丸山利輔 · 伊藤浩三 (2019): 蒸発散推定のための逆解析法とボーエン比法及び渦相関法との比較. 農業農村工学会論文集, 309: I_169–I_178.

溝口 勝 · 伊藤 哲 (2015): 農業 · 農村を変えるフィールドモニタリング技術. 水土の知. 農業農村工学会誌, 38: 93–96.

Ohmura, A. (1982): Objective criteria for rejecting data for Bowen ratio flux calculations. Journal of Applied Meteorology, 21: 595–598.

岡山 毅 (2020): 低コストオープンソースハードウェアを用いたスマート農業推進の提言. 農作業研究, 55: 169–172.

Sensirion (2011): データシート: SHT7x（SHT71, SHT75）, p. 13. Sensirion, 東京.

高本孝頼 (2014): みんなの Arduino 入門, p. 181. リックテレコム, 東京.

Vaisala (2020): Vaisala カタログ Humicap HMP110 温湿度プローブ, p. 2. Vaisala, 東京.

山岡 賢, 高野粋史, 嶺田拓也, 吉永育生, 渡部恵司 (2020): 用水路内での水草刈機の簡易な自律航行方法の開発 — 模型実験による検証 —. 農業農村工学会論文集, 311: I_323–I_331.

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: 247–255.

要　　旨

Arduino を用いた計測事例として，安価な CMOS 温湿度センサーを制御するシステムを構築し，畑地の蒸発散量（ET）算定への有効性を検討した．ライトユーザーを想定し，Arduino をデータロガーとして利用する場合の基本的なシステムやその取り扱い方を紹介し，温湿度測定システムを構築するうえで最低限必要なカスタマイズについても記した．従来の高額 · 高性能システムと比べて，構築したシステムは ET 算定精度が低く，それはセンサー性能に加え，ハードウェアのカスタマイズにも起因することを示した．しかし，器差の大きいセンサーの選別，ET 算定法の異常値判定条件の適切な設定，データの平均，器差の Bias 補正のいずれもが従来と同水準の ET を算定し得る有効策であることを論じた．こうした計測情報の蓄積は，低コストのオープンソースシステムの利活用を進めるうえで重要である．

キーワード：オープンソース, 低コストシステム, Bias 補正, センサー器差, 異常値除去