J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 149, p.63～68 (2021)

M5Stack IoT 開発ボードを利用した栽培環境の遠隔モニタリング

平嶋雄太[1]・牧 貴広[2]・古藤田信博[1]・徳本家康[1]・宮本英揮[1]

Agro-environmental telemonitoring using M5Stack IoT development board

Yuta HIRASHIMA[1], Takahiro MAKI[2], Nobuhiro KOTODA[1], Ieyasu TOKUMOTO[1] and Hideki MIYAMOTO[1]

1. はじめに

モノのインターネット（IoT）やビッグデータを活用したデータ駆動型農業への関心が高まるなか，生産環境情報の収集と利用を支援する IoT 技術の開発が盛んになりつつある．なかでも，オープンソース・ハードウェアとして広く知られる Arduino ボードは，これまで電子工作用開発ボードのデファクトスタンダードとしての地位を盤石にしてきた．Arduino の成功は，企業にとって門外不出とされがちなハードウェアの設計情報を完全公開したこと，すなわち，互換デバイスの開発を容易にし，各種センサやモーターやスイッチ等のアクチュエータを動作させるためのソフトウェアライブラリの共通化をすすめたことによるところが大きい．初学者向けのチュートリアルや書籍等の技術情報が充実し，誰もが容易に利用できる Arduino は，農業および土木関連分野において利用されている（例えば，森, 2015; 河原, 2020）．

近年，M5Stack 社の IoT 開発ボード（Photo 1）の人気が急上昇している．この開発ボードは，ESP32（Espressif Systems 社）と呼ばれる Wi-Fi/Bluetooth 機能を有する高性能マイコンに加え，液晶ディスプレイ，バッテリー，操作ボタン，ケース等が実装されたオールインワンタイプの開発ボードである．Arduino 言語による統合開発環境（Arduino IDE）にも対応しているため，既存の Arduino ボードの利用者にとってこのボードの導入障壁は低いだけでなく，コードを記述せずにブロックを組み合わせてプログラムを作成できるビジュアルプログラミング言語にも対応しているため，初学者でも比較的容易に利用しやすい．Grove ポート（Seeed studio 社）を介して，安価な Grove 対応センサをそのまま利用することもできる．このように，初学者からハイエンドユーザーにいたる多様なユーザーのニーズを満たす仕様となっている点が，M5Stack 社の IoT 開発ボードの最大の魅力である．

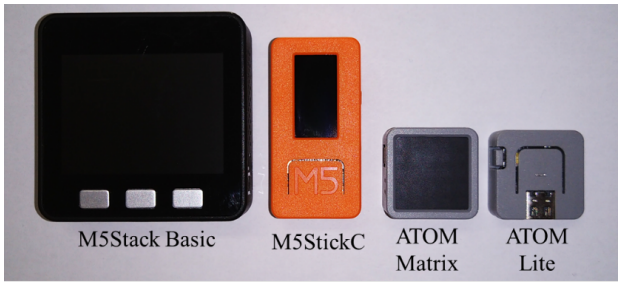


Photo 1　M5Stack 社製の IoT 開発ボード．

IoT の利用拡大とともに，M5Stack 社の IoT 開発ボードが電子工作における新たなデファクトスタンダードの地位を確立しつつある．令和 2 年版情報通信白書（総務省, 2020）によれば，世界の IoT プラットフォーム市場は，2018 年から 2023 年にかけて年平均成長率 39 % という急成長の最中にある．我が国でも，「2025 年までに農業の担い手のほぼ全てがデータを活用した農業を実践する」ことを目指す政策（農林水産省, 2019）が推進されており，農業生産現場への IoT の導入が加速している．M5Stack 社の IoT 開発ボードの将来性に着眼した一部の研究者は，既に農業情報教育やビッグデータ研究への導入に着手しているものの，利用のノウハウやその有効性に関する情報の蓄積および公開が待たれる状況にある．

著者らの研究グループは，これまでに調査・研究向けの統合型 IoT プラットフォームの開発（宮本ら, 2021）を手掛ける傍ら，Arduino ボードを利用した農業環境計測を通して獲得した知見をベースに，M5Stack の開発ボードを利用した安価なセンサネットワークの開発と応用に取り組んでいる．本稿では，その取り組みの概要について，熱帯果樹の栽培環境計測事例とともに紹介する．

なお，本稿において紹介した IoT 開発ボードの基本的な取り扱いについては，市販の書籍（例えば，高馬, 2020; 下島, 2019）を参考にされたい．

2.　材料および方法

2.1 M5Stack 社製の IoT 開発ボードの性能

M5Stack 社の IoT 開発ボードは，IoT デバイスの開発

[1]Faculty of Agriculture, Saga University, 1 Honjo-machi, Saga city, Saga 840-8502, Japan. Corresponding author: 宮本英揮, 佐賀大学農学部.
[2]Graduate school of Agriculture, Saga University, 1 Honjo-machi, Saga city, Saga 840-8502, Japan.

Table 1　Arduino UNO，M5Stack Basic，Atom Lite の性能の比較．

	Arduino UNO	M5 Stack Basic	ATOM Lite
MCU/MPU	ATmega328P（シングルコア，8 ビット，16 MHz）	ESP32（デュアルコア，32 ビット，240 MHz）	ESP32-PICO（デュアルコア，32 ビット，240 MHz）
SRAM	2 KB	520 KB	520 KB
フラッシュメモリ	32KB	4 MB	4 MB
通信	–	Wi-Fi, Bluetooth	Wi-Fi, Bluetooth
位置情報	–	GPS	–
SD カードスロット	–	≤16 GB	–
LCD	–	320×240 カラー液晶	–
バッテリー	–	3.7 V/150 mAh	–
スピーカー	–	1W	–
インターフェイス	GPIO, UART, SPI, I2C, PWM, ADC	GPIO, UART, SPI, I2C, I2S, PWM, ADC, DAC	GPIO, UART, SPI, I2C, I2S, PWM, ADC, DAC
プログラミング言語	Arduino (C++)	Arduino (C++), MicroPython, Blockly	Arduino (C++), MicroPython, Blockly
価格（税込）*	3,300 円 *	4,565 円 *	1,287 円 *

* スイッチサイエンスの HP（https://www.switch-science.com/）より転載

に適している．社名であり，製品名でもある M5Stack という名称は，「Modular, 5 cm×5 cm, Stackable」の 3 つ単語の頭文字に由来するように，標準型の M5Stack Basic は，5 cm×5 cm ほどの本体に複数の拡張モジュールを接続して利用できる仕様となっている（Photo 1）．Arduino UNO は，8 ビット · 16 MHz のシングルコアのマイコンを実装しているのに対して，M5Stack Basic は，32 ビット · 240 MHz のデュアルコアの高性能マイコンを実装しており，float 型データの処理時間を大幅に短縮できる能力を有することが，IoT デバイス開発における強みとなる（Table 1）．また，Arduino UNO と比べ，M5Stack Basic に実装されたフラッシュメモリや SRAM は大きいため，メモリ不足に起因する動作不良が発生しにくいうえに，Wi-Fi/Bluetooth モジュールによる無線通信機能も備えている．IoT 開発ボードのラインナップは充実しており，加速度センサを実装したモデルやウェアラブル端末用モデル等も発売されている．このように，M5Stack 社の開発ボードは，データの高速演算と無線通信を安定的に行い，且つ，幅広いユーザーのニーズに応えるための必要最低限の機能を備えている．

現在，M5Stack 社は，個性豊かな複数の開発ボードを供給している．なかでも，2020 年 4 月に発売された小型の ATOM Lite（Photo 1, Table 1）は，バッテリーや GPS を実装していないものの，ESP32-PICO（Espressif Systems , 2021）を実装した開発ボードとして，驚異的なスピードで利用者が増えており，電子工作の市場を席捲している．本稿では，この ATOM Lite を用いて試作したセンサネットワークの概要および利用状況を後述する．

2.2 ATOM Lite を利用したセンサネットワーク

熱帯果樹温室内の土壌 · 大気環境のための IoT 開発ボードとして，M5Stack のラインナップの中から小型で安価な ATOM Lite を利用することとした．ATOM Lite 上で利用できる SDI-12（Serial Digital Interface at 1200 baud）センサの簡易設定アプリ（Photo 2）（牧 · 宮本, 2021）を用いて，事前に 0 ～ 9 のいずれかの SDI アドレスを割り当てた TDT（時間領域透過法）センサ（ACC-SEN-SDI，Acclima 社）を ATOM Lite に接続し，これをセンサノードとした．このセンサノードを計 3 組自作し，そのうちの 1 組に I2C（アイ · スクエアド · シー）対応温湿度センサ（SHT70，Sensirion 社）を追加実装した（Fig. 1）．これらのセンサノードを利用することにより，土壌の見かけの誘電率（ε），Topp 式（Topp et al., 1980）に基づく体積含水率（θ），バルク電気伝導度（σ_b），地



Photo 2　SDI-12 対応センサ用の簡易設定アプリケーション（牧 · 宮本, 2021）．

温（T_{soil}）の計 4 項目，または，それらに気温（T_{air}）および相対湿度（RH）の 2 項目を加えた計 6 項目を計測することができる．

全計測データをいつでも閲覧できるよう，無料で利用できる 2 種類のクラウドサービスの活用を試みた（Fig. 1）．

第 1 のクラウドサービスは，利便性の高いユーザーインターフェイスとして知られる IoT データ可視化サービス「Ambient （https://ambidata.io/）」である．この Ambient は，IoT 開発ボードが収集した各種データの受信 · 蓄積 · 可視化（グラフ化）することに特化したクラウドサービスである（下島, 2020）．ひと通りの機能を無料で利用できるうえに，ハイエンドユーザー向けの追加機能を有料で提供する，いわゆる，フリーミアム型のクラウドサービスに分類される．ただし，センサノードあたりの計測項目が 8 つを超えると設定が非常に煩雑になり得ること，データの保存期間は最長 1 年であること，ダウンロードした各データの受信時刻は協定世界時（UTC）として表示されること等に留意する必要がある．計測初学者は，センサノードあたりの計測項目数を 8 以下と定めて，このサービスを利用することを推奨する．本研究では，5 分間隔で各センサノードにより計測されたデータを，モバイルルータ（FS030WMB1，富士ソフト）を介した LTE 通信により Ambient に送信するための ATOM Lite 用スケッチ（プログラム）を作成した．そして，各 ATOM Lite 上でそれを実行することにより，計測された全データを Ambient 上でグラフ化（Fig. 2）し，スマートフォンやコンピューター上で閲覧できるようにした．

第 2 のクラウドサービスは，Google Apps Script（GAS）を用いてカスタマイズできる Google スプレッドシート（https://docs.google.com/spreadsheets/u/0/）である．Google スプレッドシートを利用する利点は，①先述の Ambient と違いデータ保存期間の定めがないこと，②センサノードあたりの計測項目数が 8 つ以上でも容易に取り扱えること，③関数やグラフ作成機能を活用して，演算やグラフ化を自由に行うことができること等にある．本研究では，Google ドライブ上に Google スプレッドシート用のファイルを作成し，スクリプトエディタを利用して，そのシート内にデータの受信用コードを埋め込んだ．そして，前述の ATOM Lite 用スケッチに，URL エンコードをかけた計測データを Google スプレッドシートに送信するためのコードを追記した．つまり，送信側のスケッチと受信側の Google スプレッドシートとを一対となるように設定することによって，Ambient に加え，Google スプレッドシートにおいても計測データを閲覧できるようにした．ただし，Google スプレッドシートの利用環境を構築するには，一定のプログラミングスキルを必要とするため，計測初学者には Ambient の利用を推奨する．

2.3 熱帯果樹の栽培環境の遠隔モニタリング

電源および Wi-Fi 通信設備を有する佐賀大学農学部の熱帯果樹栽培用のガラス温室を，試作したセンサネットワークの実証試験サイトとした．このガラス温室は，北側（間口 8.0 m，奥行 7.6 m，高さ 7.2 m）と南側（間口 7.0 m，奥行 7.6 m，高さ 5.4 m）の 2 区画に分かれており，カビや病害虫による被害防止のための循環扇（P2400092, フルタ電機）と，冬季用の暖房設備を備えている．各区画では，パパイヤ，パッションフルーツ，マンゴー等の熱帯果樹が試験的に栽培されている．

北側区画の 2 株のパパイヤと，南側区画のパッションフルーツの鉢植えの株元付近に，それぞれセンサノードを配置した．2 株のパパイヤのうちの 1 株とパッションフルーツの株元にはそれぞれ点滴灌漑用チューブを取り付けており，パッションフルーツには 8 時から 5 分間，パパイヤには 8 時 30 分から 4 分間，それぞれかん水される仕組みとなっている．その株元付近に TDT センサ

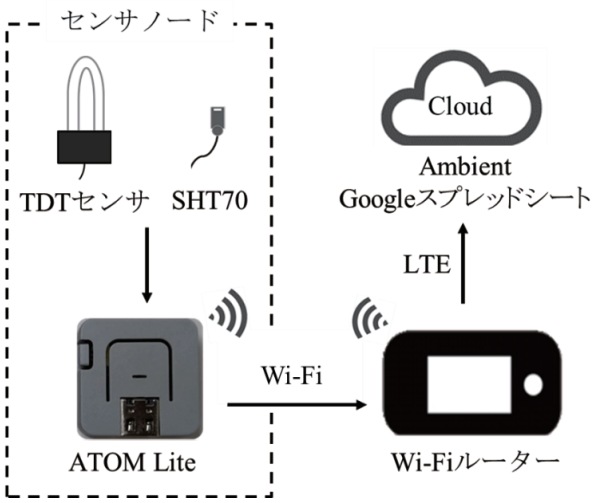


Fig. 1 Atom Lite を利用したセンサネットワークの仕組み．

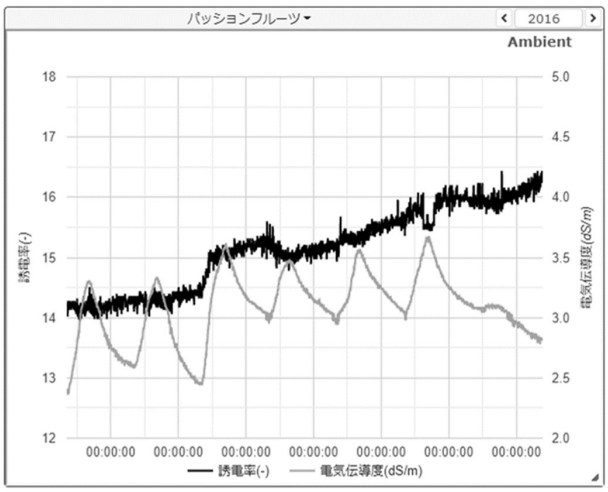


Fig. 2 Ambient 上で表示されるグラフの一例．



Photo 3 ネットワークカメラで撮影した温室内の様子.

を鉛直方向に埋設し，それを Atom Lite に接続したものをセンサノードとした．北側と南側の区画の境界点に設置したストーンペーパー製百葉箱内に温湿度センサを取り付け，パッションフルーツ用センサノードにそれを接続した．2020 年 9 月 30 日（DOY273）より，各センサノードによる ε，θ，σ_b，T_{soil} の計 4 項目またはそれらに T_{air} と RH を加えた計 6 項目を 5 分間隔で計測し，先述の Ambient および Google スプレッドシート上で全計測データを可視化した．温室内部の様子を観察できるよう受動型赤外線（PIR）人感センサを搭載したネットワークカメラ（ZS-GX6S, YESKAMO）を南側区画の温室側壁面に併設し，昼夜を問わず温室（Photo 3）を監視できるようにした．なお，本稿では，温室内の暖房開始前後の 1 週間分，すなわち，DOY328 ～ DOY342 の計測結果を紹介することとする．

3. 結果および考察

3.1 温室環境

季節の変わり目においても，温室内の温度および湿度環境は概ね同一水準に保たれたことを確認した．T_{air} は日中に高く，夜間に低くなる一般的な日変化を繰り返した（Fig. 3（a））．T_{soil} は，T_{air} 比べ応答が約 2 時間遅延したが，T_{air} と類似した変化を示し，なかでも，パッションフルーツ株元の変化が顕著であった（Fig. 3（b））．RH は，T_{air} と真逆の日変化を示した（Fig. 3（a））．低温環境下では熱帯果樹が枯死する可能性があるため，計測期間最低値（3.4 °C）を示した DOY335 に，T_{air} が 10 °C 以下に低下した場合に暖房設備が作動するよう設定したところ，DOY336 以降の T_{air} の最低値を 9.4 °C とすることができた．このことから外気の温度が著しく低下する冬期においても，温室内の温度環境を暖房利用前と概ね同一の水準に保つことができたことを確認した．

果樹の株元付近の土壌水分環境は，かん水の有無にかかわらず，同一水準で推移した．かん水を行ったパパイヤおよびパッションフルーツの株元の ε は，無かん水のパパイヤのそれと比べ高かったことから（Fig. 3（c）），両者の θ は，より高い水準にあったと考えられる．ただし，かん水を行った株元の ε の日変化は小さく，かん水による θ の上昇効果は，パッションフルーツにおいてわずかに認められる程度であった．ただし，かん水したパッションフルーツの ε は，23 時頃から漸増し，かん水を行う 8 時にピークを迎えた後に漸減に転じた．一般に，水の ε は，高温ほど小さい．計測された ε の変化は，（i）土壌面における水分の蒸発と果樹の蒸散による θ の減少（ε の低下），（ii）かん水に伴う θ の上昇，（iii）Wraith and Or（1999）の報告にもある T_{soil} による ε の変化等の相乗効果に因るものである．23 時から翌朝まで θ の増加につながるイベントはないため，23 時以降の ε の漸増は T_{soil} の低下による ε の上昇効果に因るところが大きかったと考える．このような軽微な ε の日変化は認められたが，かん水を行ったパパイヤおよびパッションフルーツ株元の ε の変化が小さかった理由は，TDT センサを埋設した場所が点滴によるかん水地点から離れており，3 次元的に広がる浸潤前線による θ の上昇効果が小さかったためであろう．果樹の根はセンサ感知部の存在する深さよりも深い領域まで伸長している可能性が高い．換言すれば，20 cm 以浅に存在する TDT センサの感知部の位置と根の分布が一致しない可能性がある．ゆえに，センサの計測データに基づく果樹のかん水制御を行う場合には，土壌水分センサの設置場所 · 深さに関する詳細な検討が必要である．

計測した σ_b から，施肥管理に資する有益な知見を得ることができなかった（Fig. 3（d））．σ_b は，土中水の電気伝導度と θ に加え，T_{soil} の関数である．σ_b に及ぼす θ の効果は，他の 2 つの要素による影響と比して相対的に大きいため，かん水を行った 2 地点の σ_b は，無かん水のそれと比べ高い水準にあった．また，パッションフルーツの σ_b は T_{soil} と連動しており，17 時頃にピーク点が認められた（Fig. 3（b），（d））．かん水を行ったのは 8 時頃であり，17 時頃に θ が増大する理由がないこと，また地温が 1 °C 上昇すると σ_b は約 2 % 大きくなること等から，σ_b の日変化は T_{soil} の影響を強く反映したものと考える．TDT センサを利用して得られる ε および σ_b に基づき，土中水の電気伝導度を推定可能である（Hilhorst, 2000; 平嶋ら, 2020）．しかし，無かん水のパパイヤの株元の σ_b は常にゼロを示したことから，施肥の管理の目安となる土中水の電気伝導度を得るためには，TDT センサよりも低電気伝導条件において高い精度が期待される True TDR-315 シリーズに置換するか，別途，高精度電気伝導度センサを埋設する必要があろう．

3.2 センサネットワークの安定性

Atom Lite と無料のクラウドサービスを利用した場合でも，全計測データの欠測率は比較的低く，実用上の支障は小さいと判断された．計測期間内の全計測回数（27,016 回）に占める各センサノードの欠測率は，0.09 ～ 0.32 % であった（Table 2）．LTE の電波環境に加え，ルーターとセンサノード間の無線通信環境の変化やセンサノードの数により欠測率は変化し得るが，欠測率をゼ

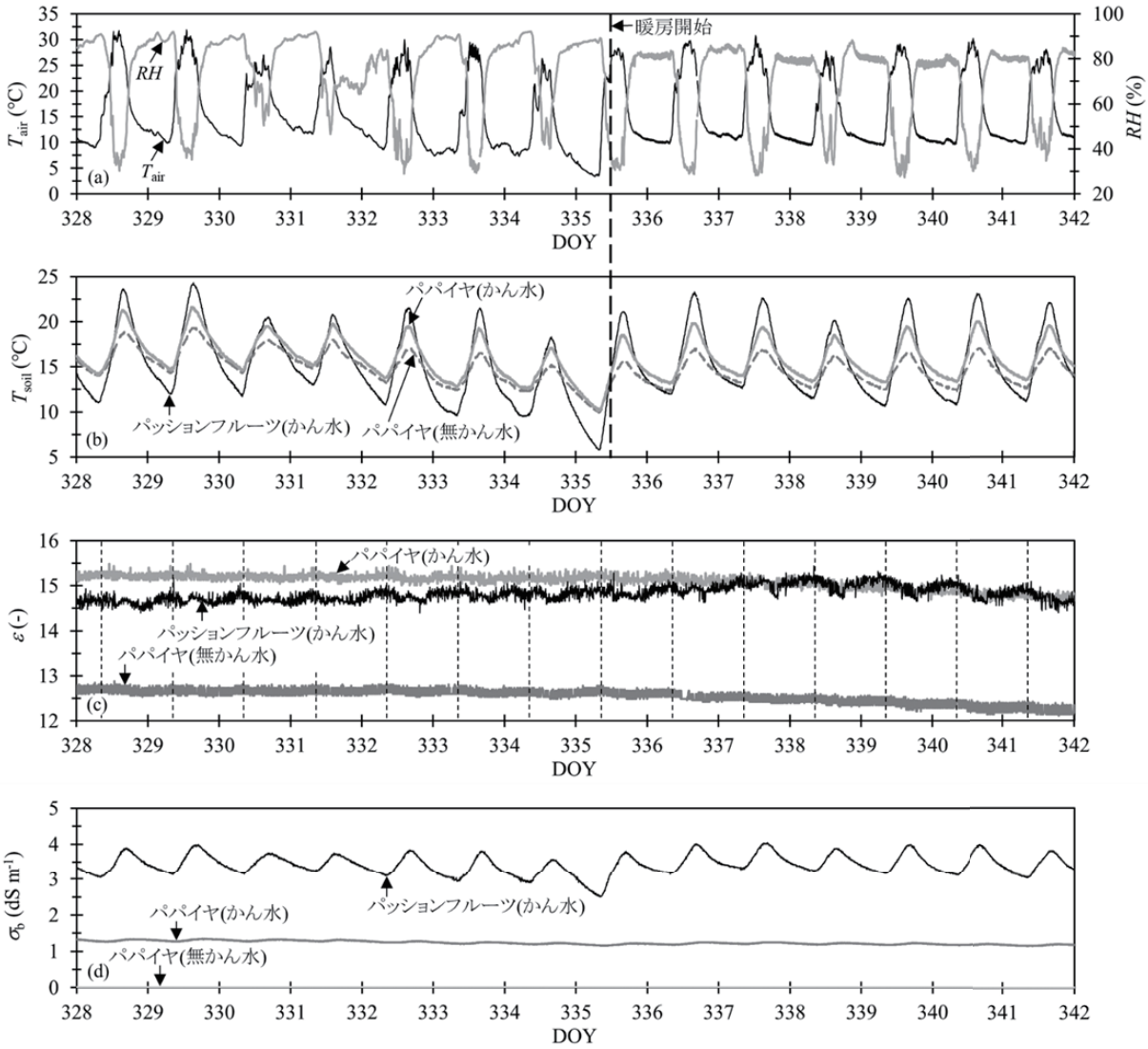


Fig. 3 2020 年 11 月 24 日（DOY329）から同年 12 月 8 日（DOY343）までの（a）気温（T_{air}）および相対湿度（*RH*），（b）地温（T_{soil}），（c）見かけの誘電率（ε）（図中の破線は，灌漑を行った時間を示す），（d）バルク電気伝導度（σ_b）の経日変化．

ロとすることは技術的に難しい．その改善のために膨大な手間をかけるより，一定の欠測を前提とした運用，例えば，一定の欠測を容認する代わりに計測頻度を高く設定したり，SD カードを実装できる M5Stack Basic（Photo 1）に置換してバックアップをとったりするのが，現実的な対処方法であろう．ただし，計測頻度を高くするほどセンサノードの消費電力量が大きくなるため，電源のない屋外でソーラー発電装置を利用して計測する場合は，ユーザーには，Atom Lite の消費電力量を抑えるためのディープスリープモードの活用はもとより，発電量と消費電力とのバランスを考慮して適当な計測間隔を見出すことが必要となろう．

4. おわりに

本稿では，M5Stack 社の IoT 開発ボードを利用事例として，ATOM Lite（Photo 1）を用いたセンサネットワークによる熱帯果樹の栽培環境計測事例を紹介した．ATOM Lite は発売から 1 年半ほどしか経過していないものの，センサネットワークの構築に適した標準仕様となっていることが，多くの電子工作愛好家に支持されており，今後，この開発ボードの農業環境計測への利用拡大が期待される．土壌を含む栽培環境のモニタリングは，古くから土壌物理学が最も得意とする研究手法である．計測機

Table 2 各センサノードの欠測率．

センサノード	欠損率（%）*
パッションフルーツ（かん水）	0.32 %
パパイヤ（無かん水）	0.09 %
パパイヤ（かん水）	0.19 %

* 全測定回数は 27,016 回

器は，日々，進化していることから，土壌に関係する周辺分野に向けて新たな機器の利用に関する知見を発信することが，土壌物理学に期待される役割の一つであろう．

上述の試作品の試験を踏まえ，TDT センサ（2 個），温湿度センサ，照度センサ，CO_2 センサ等を ATOM Lite に接続した多項目計測用センサノードを新たに構築し，2021 年 7 月より，同一温室内にて実証試験を行っている．今後，計測された温室環境データと生産管理情報とを照合し，生産管理・予測や病害虫対策等に利用することを目指す予定である．

引用文献

Espressif Systems (2021): ESP32PICOD4 Datasheet (Version 1.9). https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-pico-d4_datasheet_en.pdf （2021. 6. 18）

Hilhorst, M.A. (2000): A pore water conductivity sensor. Soil Sci. Soc. Am. J., 64: 1922–1925.

平嶋雄太, 宮本英揮, 弓削こずえ (2020): 時間領域透過法（TDT）センサを活用した干拓農地の土壌水分および塩分の観測. 農業農村工学会論文集, 310: I_21– I_28.

河原和好 (2020): 地盤沈下観測における IoT の適用. 新潟国際情報大学経営情報学部紀要, 3: 1–12.

牧 貴広, 宮本英揮 (2021): SDI-12 センサの簡易設定キットの開発. 2021 年度土壌物理学会大会 講演要旨集, 36–37.

宮本英揮, 中村真也, 平嶋雄太, 大山正巳, 大北昭二 (2021): フィールド計測と環境制御のための統合型 IoT プラットフォームの開発. 土壌の物理性, 148: 39–43.

森 慎太郎 (2015): Arduino およびクラウド統合型センサネットワークシステムの開発. 情報システム学会誌, 11(1): 57– 64.

農林水産省 (2019): 農業新技術の現場実装推進プログラム. https://www.maff.go.jp/j/press/kanbo/kihyo03/attach/pdf/190607-2.pdf （2021. 6. 18）

下島健彦 (2019): みんなの M5Stack 入門, pp. 1–233. リックテレコム, 東京.

下島健彦 (2020): IoT データ可視化サービス「Ambient」について. https://tkrel.com/13832 （2021. 8. 28）

総務省 (2020): 令和 2 年版情報通信白書. https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r02/pdf/02honpen.pdf （2021. 8. 28）

高馬宏典 (2020): M5Stack & M5StickC ではじめる IoT 入門, pp. 1–232. シーアンドアール研究所, 新潟.

Topp, G.C., Davis, J.L. and Annan, A.P. (1980) : Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. Water Resour. Research, 16: 574–582.

Wraith, J.M. and Or, D. (1999): Temperature effects on soil bulk dielectric permittivity measured by time domain reflectometry: Experimental evidence and hypothesis development. Water Resour. Res., 35: 361–369.