J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 159, p.77～82 (2025)

シンポジウム特集
資　料
Miscellaneous

センサネットワークを活用した多地点土壌センシング

宮本英揮 [1]

Sensor networks for multi-point soil sensing

Hideki MIYAMOTO[1]

1. はじめに

モノのインターネットを意味する IoT（Internet of Things）という語句は，電波を用いて IC タグの情報を非接触で読み書きする自動認識技術「RFID（Radio Frequency Identification）」研究で知られる英国技術者によって提唱された造語である．1999 年頃に誕生し，2016 年頃から我が国でもスマート農業やスマートシティ等の新たな構想とともに本格的に普及し始めた．IoT という語句が誕生する以前は“いつでも，どこでも，何でも，誰でも利用可能な情報が至るところに存在する状況 · 環境”を意味するユビキタスという概念が普及し，モバイル通信技術やデバイス開発の目標として広く注目されていた．近年は，ネットワークを介してモノを操作 · 制御する手段および技術を表す IoT という語句が認知され，様々な分野で注目されるようになった．世界の IoT 市場の成長は目覚ましく，現在も拡大を続けている．

IoT の中核をなす技術の 1 つが，センサネットワークである．センサネットワーク研究は，1980 年代から 1990 年代にかけて軍事利用や環境センシングを目的として始まった．2000 年代初頭までは，有線方式のセンサネットワークが主流であったため，接続できるセンサ数は限られ，用途も限定的であった．つまり，センサネットワークの民生利用には，無線通信技術の進化が必要不可欠であった．

本稿のタイトルにある土壌センシングは，土壌物理学の十八番である．その土壌物理学にも IoT が導入され，リアルタイムで広域から土壌および気象データを収集し，それらを活用できる時代となった．本稿では，著者の研究グループがこれまでに構築した低価格のマイコンボードを活用した遠隔土壌センシングシステムや，その機能と耐環境性能を強化した国産商用センサネットワーク等を紹介する．

[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
2024 年 12 月 19 日受稿　2025 年 1 月 25 日受理

2. 低価格のマイコンボードの利用

オープンソースハードウェアとは，ライセンスに基づいて，誰もが製作，改良，再配布を行える設計図やソースコードが公開された機器を指す．2005 年にイタリアの研究者グループによって開発され，電子工作の火付け役となった Arduino（Fig. 1）がその代表例である．Arduino が広がったのは，それまで非公開であったハードウェア設計情報を無償公開したことに加え，初心者にも扱いやすいプログラミング環境（Arduino IDE）や多くのサンプルコードを提供したことによるところが大きい．各種センサやスイッチ等を動作させるためのソフトウェアライブラリの共通化が可能となったことで，互換デバイスの開発や利用が容易になり，SDI-12 型土壌水分センサをはじめ，各種センサを Arduino に接続して利用できるようになったのである．オンラインストアでは，低価格の Arduino 互換ボードを購入できるうえに，初学

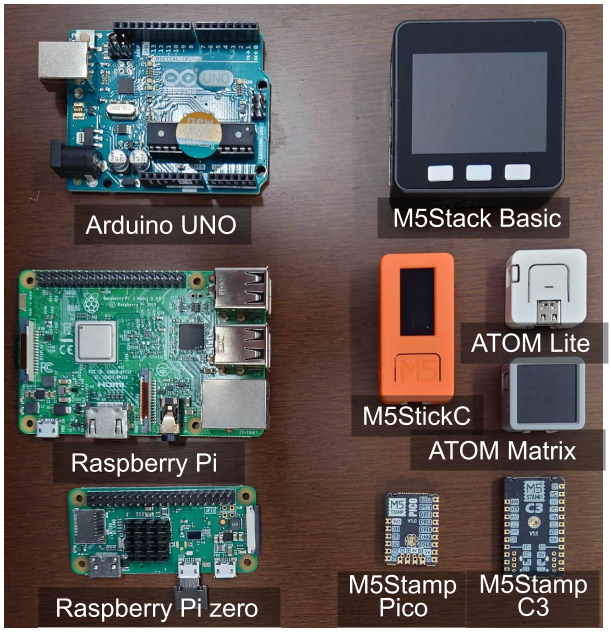


Fig. 1　安価なマイコンボード．

者向けのチュートリアルや書籍等の技術情報が多く提供されている点も，Arduino の魅力である．

土壌の物理性の 148 号（2021）から 150 号（2022）にかけて，Arduino 特集が組まれた．この特集は，6 つの研究ノート · 資料から構成されており，制御装置としての Arduino の利用法に加え，その性能を向上させた互換システムや関連技術の活用を含む幅広い内容となっている．

本学会において Arduino が最初に利用されたのは，近距離無線通信規格 · ZigBee の通信モジュールを実装した Arduino を活用した無線センシングシステムの構築事例（國﨑ら, 2015）である．それ以前は，海外製データロガーが一般的に用いられていたが，Arduino でも複数の SDI-12 型土壌水分センサを制御でき，ZigBee 無線通信を利用して離れた場所からデータを受信できることが示された．この知見に基づく 3 深度 × 3 地点の土壌水分 · 電気伝導度計測ネットワークは，宮城県の津波被災農地における土壌水分 · 塩分の計測に利用されている（石川ら, 2021）．当時，ZigBee が採用された理由は，低価格でランニングコストがほとんどかからないことに加え，スリープモードにおける消費電力が少なく，メッシュネットワークの構築に適したからである．しかし，ネットワーク構築には高度な技能を要するためか，Arduino と ZigBee を利用した事例は増えていない．

Arduino の登場後，一般的になったのは，Wi-Fi や Bluetooth を利用できる Raspberry Pi（ラズベリーパイ）であろう（Fig. 1）．ラズパイと略されるこのマイコンボードは，2012 年に英国で教育用マイコンボードとして誕生した．ラズパイの強みは，OS（Linux）に加え，USB ポートや LAN ポートを標準搭載し，且つ Bluetooth および Wi-Fi 等を利用してインターネット接続できる点にある．近年は，小型の Raspberry Pi Zero（Fig. 1）や Raspberry Pi Pico 等のシングルボードコンピュータが流通しており，Arduino と並んで人気を博している．土壌物理学分野における利用事例は少ないものの，施設園芸学分野では多用されている．

近年，電子工作愛好家の間で急速に普及しているのが，2018 年に国内で販売され始めた M5Stack シリーズのマイコンボード（Fig. 1）である．初期モデルの M5Stack Basic は，Wi-Fi/Bluetooth 等の無線通信機能を備えた ESP32 チップ（Espressif Systems 製マイコン）に加え，液晶ディスプレイ, バッテリー, 操作ボタン, ケース, 入力電源用 USB ポート，SD カードスロット等を含むオールインワンタイプのマイコンボードである．MicroPython に加え，Arduino IDE にも対応しているため，Arduino ユーザーは気軽に移行できる．また，Grove 対応センサを利用できる専用ポート（I^2C）に加え，I^2S や UART にも対応した多機能な Grove 対応センサをそのまま利用できる点等が支持されている．M5Stack シリーズには，音声認識，モーションセンシング，ディスプレイ表示等の様々な機能を搭載した多様なマイコンボードがラインナップされており，ユーザーは用途に合わせて最適な機種を選択することができる．

M5Stack シリーズのマイコンボードは，我が国の電子工作愛好家の間で，いち早く普及した．このマイコンボードを用いた自動灌漑システムや温湿度センシング等の自作事例を，ウェブサイト, SNS, 書籍等を通して知ることができる．有益な情報が認められる一方で，技術仕様や実装手順に関する不正確な情報も散見される．ユーザーは，それらの内容を十分に精査して利用する必要がある．

3. M5Stack マイコンボードを利用した自作センシングシステム

M5Stack シリーズのマイコンボードの中でも，比較的安価で省電力性の高いマイコンボードを活用した遠隔センシングシステムの製作事例を，以下に三つ紹介する．

第 1 は，ATOM Lite（Fig. 1）を用いた遠隔センシングシステム（Fig. 2）である．スイッチサイエンスの EC サイト（https://www.switch-science.com/）より 1,573 円 / 個（2024 年 11 月時点）で購入できる 24 × 24 × 10 mm の ATOM Lite は，必要最低限の機能を搭載した小型マイコンボードである．この ATOM Lite に，SDI-12 プロトコル対応の TDT センサ（Acclima）と I^2C 対応の温湿度センサ（SHT70，Sensirion 社）を接続し，見かけの誘電率，電気伝導度，地温，気温，湿度等の遠隔センシングシステムとなる（Fig. 2）．Wi-Fi ルーターを介して，Ambient（https://ambidata.io/）や Google スプレッドシート等に定期的にデータを送信するようプログラミングすることにより，いつでもデータを確認できる（例えば，平嶋ら, 2021）．この計測システムを利用して，LINE や X（エックス）等の SNS を利用した通知機能を追加することもできる．

第 2 は，ATOM Lite を用いた先述の遠隔センシングシ

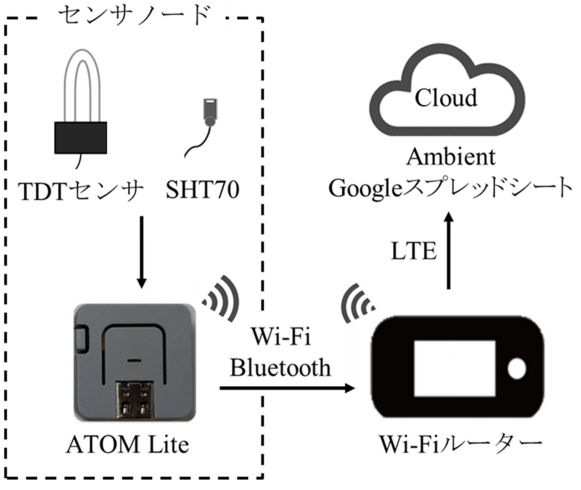


Fig. 2 ATOM Lite を利用した遠隔センシングシステムの概略図.

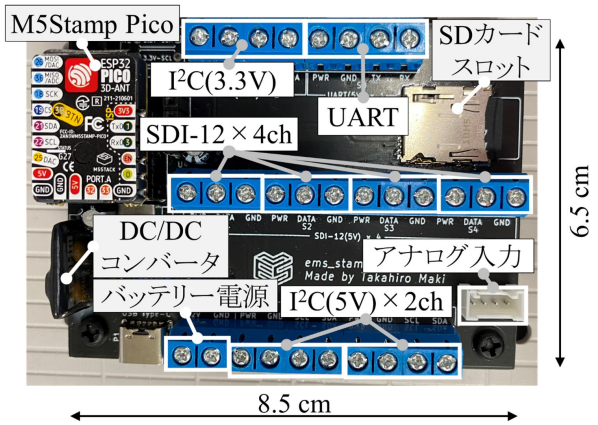


Fig. 3 StampBoard の構造.

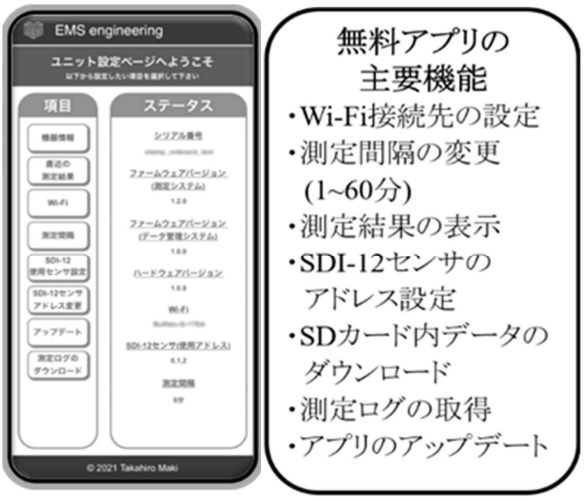


Fig. 4 StampBoard 用無料アプリケーション.

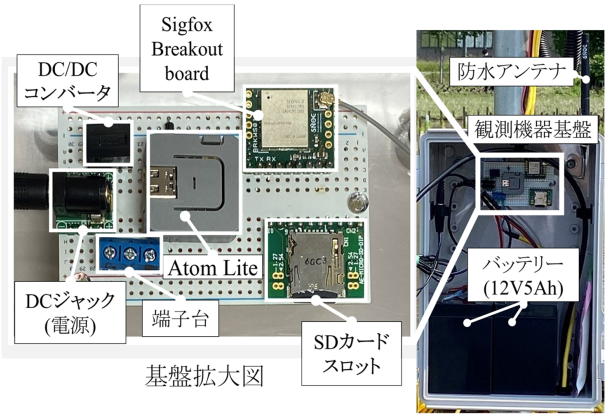


Fig. 5 LPWA を利用した遠隔センシングシステムの構造.

ステムの上位互換である StampBoard（EMS engineering）である．消費電力性が高い切手サイズの M5Stamp Pico Mate（Fig. 1），センサ取付け用のコネクタ，データ記録用 SD カードスロット等を，基盤作成サービス（JLCPCB 社）を利用して一体化した 85 mm × 65 mm のオールインワン自作データロガーである（Fig. 3）．モバイル Wi-Fi ルーターを利用して，屋外において 10 分間隔で土壌水分や温度等を計測する場合，3 W 程度のソーラーパネルで長期連続稼働できる．1 年間の運用試験においてデータが欠測した割合は 1 % 未満であり（宮本ら，2022），それが許容される用途に限れば，十分に利用できる水準にある．プログラミングが苦手な計測初学者でも利用できるよう無料アプリケーション（Fig. 4）も提供されている．これを利用すれば，スマートフォンを利用して，SDI-12 センサのアドレス設定，測定間隔の設定，データの閲覧等を手軽に行うことができる．StampBoard の詳細は，EMS engineering の WEB サイト（https://sites.google.com/view/emsengineering/ホーム）を参照されたい．

第 3 は，LPWA（Low Power Wide Area）通信を利用した野外用の遠隔センシングシステムである（Fig. 5）（森永ら, 2022）．省電力で広範囲のデータ通信を実現する LPWA は，携帯電話キャリアが展開する LTE（Long Term Evolution）通信網を用いたライセンス系あるいはセルラー系と呼ばれるものと，無線免許を不要とするアンライセンス系と呼ばれるものに大別される．Fig. 5 は，後者に分類される Sigfox（UnaBiz）を利用したものである．Sigfox の月額使用料は 100 円程度であるため，ランニングコストを抑えることができる．しかし，1 回に送信できるデータ量（ペイロードサイズ）は約 12 byte に制限されており，1 日に最大で 140 回しか通信できない．つまり，10 分以上のインターバルで小さなデータを定期的に収集する場合に適した遠隔センシングシステムである．高解像度の画像データや，複数のセンサを接続して大量のデータをリアルタイムで送信する場合には，他の通信方式を検討する必要がある．

以上の 3 種の自作遠隔センシングシステムを組合せることにより，初期費用とランニングコストを抑えたセンサネットワークを野外に構築することが可能である．ただし，電子工作初学者の場合，技術的な問題が発生することが多いため，取扱いに習熟するまでは，数台程度の小規模センサネットワークの運用から始めることを推奨する．

4. 進化する国産商用センサネットワーク

Campbell Scientific をはじめとする欧米の企業は，無線通信を利用した多種多様なセンサネットワーク機器やデータロガーを提供している．しかし，電波法の制約がある我が国では，技術基準適合証明を受けていない海外製品を無線機器として国内で利用できない．欧米のセンサネットワーク技術に過度に依存すると，国内 IoT 関連産業の成長が阻害され，国産技術を用いた調査・研究の幅が制限される可能性がある．昨今のスマート農業ブームを背景に，ファーモ（株式会社 farmo），みどりクラウド（株式会社セラク），MIHARAS（二シム電子工業株式

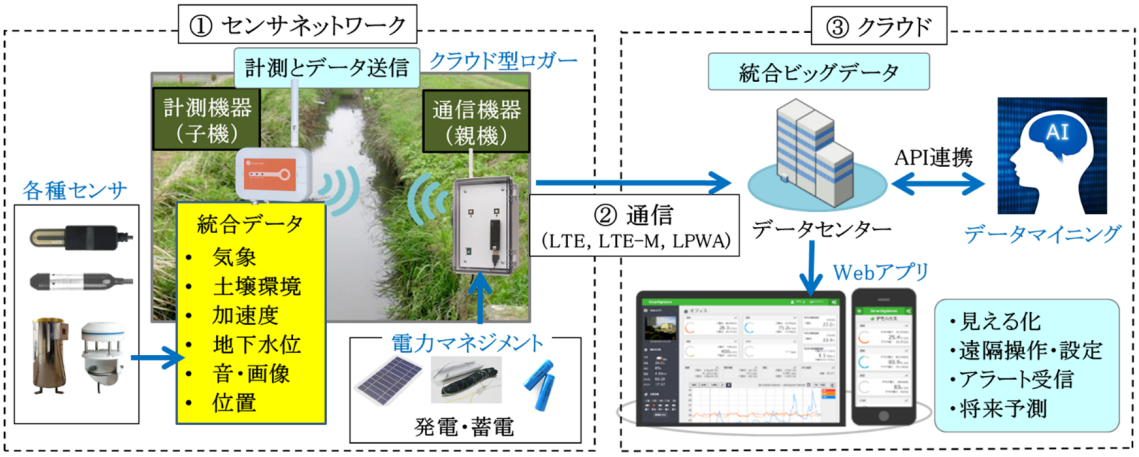


Fig. 6　統合型 IoT プラットフォームの概略図.

Table 1　国産商用センサネットワークの中核となるクラウド型ロガー.

通信方式	(a) LTE または LAN（有線／無線）	(b) LTE-M		(c) ELTERS
ロガー外観				
外形寸法	160×210 × 100 mm	125×175 × 75 mm	125×175 × 100 mm	87.5×225 × 75 mm
運用方法	親機と子機（最大 40 台）の組合せ	親機単独運用		親機単独運用
電源	AC アダプタ（100V） 太陽電池＋外部電池（12V 系）	太陽電池＋内蔵蓄電池（3.2V）		太陽電池＋内蔵蓄電池（3.2V）， 外部電池（単一電池）
GPS モジュール	内蔵	内蔵		内蔵
カメラ	選択式	無し	標準実装	無し
野外運用時の ソーラーパネル *	親機：10 ～ 15 W（12V 系） 子機：5 W 以上（12V 系）	3 W 以上（6V 系）		0.6 W 以上（6V 系）

* 著者の利用実績に基づく数値であり，使用方法や使用環境によって異なることに留意すること

会社），Agriware（スマートロジック株式会社）等の国内企業による IoT 利用サービスが広がりつつあり，これらの国産技術への関心が高まっている．

野外長期運用のためのセンサネットワークには，施設園芸用のそれとは異なる性能が求められる．野外では，施設のように電源を利用できないうえに，高温・湿気，暴風雨，獣害等への対策が必要となる．そのため，野外用センサネットワークには，高い省電力性，耐環境性，堅牢性等が求められる．著者の研究グループは，スマート農業向けの計測技術を基盤として，2018 年 1 月より，統合型 IoT プラットフォーム（Fig. 6）を構成するセンサネットワーク，通信，クラウドの三要素の一体的開発に取り組んできた（宮本ら, 2021）．本稿ではセンサネットワークの中核を担う 3 種類のクラウド型ロガー（Table 1）の特長について，以下に紹介する．

第 1 は，親機とそれに従属する複数の子機から成るセンサネットワークである（Table 1 の（a），Fig. 6）．親機を中心とし，半径 500 m 以内の通信圏内に配置した最大 40 台の子機が収集した各種データを，無線通信（IEEE802.15.4 準拠）により親機に集約する．その後，LTE，有線 LAN，無線 LAN（Wi-Fi）等を介して，集約したデータをデータセンターに送信する仕組みとなっている．子機には SDI-12, I^2C, A/D（24 ビット），RS-232C, RS-485, Modbus に対応したソケットが配置されており，土壌および気象計測用センサを接続可能である．見通しが悪い場所でも，親機と子機の間に中継器を設置するこ

Table 2　代表的な LPWA 通信の特徴.

名称	ライセンス系	アンライセンス系		
	LTE-M	LoRaWAN	Sigfox	ELTRES
推進団体	3GPP	LoRa アライアンス	UnaBiz（国内では KCSS）	ソニーグループ
周波数	LTE 帯	920.6 ～ 923.4 MHz	上り：923.2 MHz 下り：922.2 MHz	923.6 ～ 928.0 MHz
通信速度	300 kbps ～ 1 Mbps	250 bps ～ 50 kbps	上り：100 bps 下り：600 bps	上り：6 kbps 下り：なし
通信距離	–	～15 km	～50 km	～100 km
通信圏	基地局エリア内	2 ～ 15 km	基地局エリア内	基地局エリア内
通信方向	双方向	双方向	双方向	上り一方通行
ペイロードサイズ	–	30 byte ～	12 byte	16 byte
理論接続数（3 分間送信時）	–	1,205	28,500	64,791
GPS	–	–	–	標準搭載

※ソニーセミコンダクタソリューションズ株式会社の提供資料を一部改変して作成

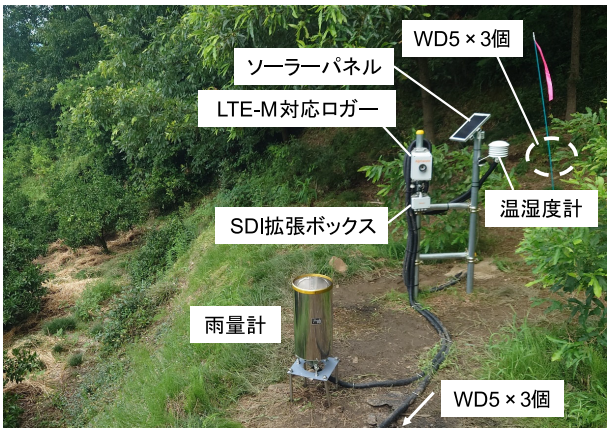


Fig. 7　LTE-M 対応ロガー（佐賀県武雄市）.

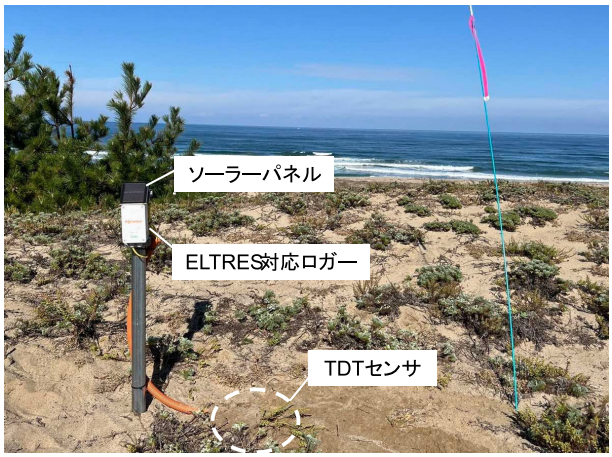


Fig. 8　ELTRES 対応ロガー（鳥取砂丘）.

とにより，ネットワークを拡張できる．親機を中心とした半径 500 m 圏内の多地点において，多項目の計測を行う場合に適したセンサネットワークである．

第 2 は，前節で述べたライセンス系 LPWA 通信のうち，IoT デバイス向けに最適化された低消費電力通信規格 LTE-M（Table 2）に対応したクラウド型ロガーである（Table 1 の（b），Fig. 7）．通信機能を備えたロガー本体に，各種センサを接続して利用するタイプであり，リン酸鉄リチウム電池を搭載し，3 W 程度のソーラーパネルで連続運用できる．LTE-M の強みは，上り / 下りとも最大 1 Mbps の双方向性通信を実現している点にあり（Table 2），遠方からの操作やカメラ画像の受信等が可能である．各通信キャリアに割り当てられた専用 LTE 帯で通信を行うため，他の無線通信との電波干渉のリスクが低く，電波状況が複雑な都市部においても安定した通信が可能である．クラウド型ロガー単体で運用できるため 1 点のみの計測や，観測点間の距離が大きい多点計測を行うのに適する．

第 3 は，アンライセンス系の LPWA 通信の 1 つである ELTRES（ソニーセミコンダクタソリューションズ株式会社）に対応した超省電力型ロガーである（Table 1 の（c），Fig. 8）．基地局を中心として見通し 100 km という世界最長の伝送性能に加え，GPS を標準搭載とするため位置 · 時刻情報も併せて取得できる点が，他の LPWA と一線を画す．0.6 W の小型ソーラーパネルで長期連続稼働できるほか，日照がない場所でも，単一電池で約 1 年間稼働できる．ただし，ELTRES のペイロードサイズは 16 byte（128 bit）であるため，前節で紹介した Sigfox の場合と同様，大きなサイズのデータを取り扱うことはで

きない．よって，通信エリア（https://eltres-iot.jp/area/）内の多地点に配置したうえで，各点から小さなサイズのデータを一括収集する用途に適している．

以上の 3 種のクラウド型ロガーについては，プログラミング技術を持たない初学者でも利用できる．スマートフォンやタブレット等で利用できる Web アプリケーション（Fig. 6）上で，データセンターに蓄積された全データの閲覧，動作設定，任意の閾値に基づく e メールや LINE によるアラート機能，データ共有や権限管理等を行うことができる．センシングの全工程を 1 台のスマートフォンを用いて，いつでもどこでも実施できる点に魅力がある．

5. おわりに

本稿では，著者らが開発に関わった自作および国産商用センサネットワークについて，開発初期から現在に至る経緯と成果物を紹介した．冒頭でふれた通り，土壌センシングは，土壌物理学における重要な研究手法である．IoT の普及とビッグデータ活用の進展とともに，土壌センシングに関する知見の価値が向上するため，その恒常的な蓄積と情報発信量が，土壌物理学という学術領域の存在意義を左右するであろう．新たなセンサや運用技術が続々と開発 · 導入される昨今，それらの誕生を見逃したり，その価値を見出して活かせない場合，調査 · 研究の幅や柔軟性が損なわれる可能性がある．新技術に対する情報感度を高めて，関連する展示会や論文等から情報を収集したり，その活用や検証を試みた後に一連の取組みを発信したりする姿勢が，これまで以上に重要になる．

全国各地で開催される ICT 関連展示会では，実際に新製品に触れたり，その開発者と議論を交わしたりすることができる．IoT によるビッグデータの統合運用には，計測手法およびデータ形式の標準化が必要不可欠であり，これによりデータの相互運用や効率的な解析が可能となる．これらの標準化において，土壌物理学会が重要な役割を果たすことが期待される．また，個人としても，新たなアイディアやビジネスの創出の場である展示会を，研究者と実務者の情報交換や新たな研究課題の発見の場として，大いに活用すべきである．土壌物理学の新たな方途は，人や新技術との出会いを通じて見いだされる可能性があることを強調したい．

謝辞

佐賀県，長崎県，熊本県，沖縄県，九州地方整備局 · 宮崎国道河川事務所等の行政機関，スマートロジック株式会社，クリマテック株式会社，株式会社 A·R·P，日本地研株式会社，ソニーセミコンダクタソリューションズ株式会社等の企業グループ，琉球大学農学部の中村真也教授，宮崎大学工学部の末次大輔教授，佐賀大学農学部の平嶋雄太技術員および学生諸氏等の支援に加え，科学研究費（課題番号：20K06299, 23K18065）および鹿児島大学大学院連合農学研究科 · 先進的研究推進事業の助成を得て獲得した知見に基づいて本稿を記した．ここに記して関係各位に謝意を表す．

引用文献

平嶋雄太, 牧 貴広, 古藤田信博, 徳本家康, 宮本英揮 (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. 土壌の物理性, 149: 63–68.

石川洋平, 野口卓朗, 宮本英揮, 徳本家康 (2021): Arduino と XBee を用いた土壌水分 · 塩分センサネットワークの開発 — 宮城県津波被災農地における土壌水分 · 塩分の計測事例 —. 土壌の物理性, 149: 55–61.

國﨑恒成, 近藤一輝, 大塩悠貴, 野口卓朗, 中島正寛, 荻島真澄, 堀田孝之, 徳本家康, 宮本英揮, 石川洋平 (2015): Arduino と Xbee を用いた土壌水分センサネットワークの検討. 土壌物理学会大会講演要旨集, 56–57.

宮本英揮, 森永竜希, 升田直希, 平嶋雄太 (2022): M5Stamp Pico を利用した安価な遠隔観測システム. 土壌物理学会大会講演要旨集, 48–49.

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.

森永竜希, 升田直希, 平嶋雄太, 宮本英揮 (2022): LPWA 通信を利用した遠隔土中観測システム. 土壌物理学会大会講演要旨集, 50–51.