J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 148, p.39～43 (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

宮本英揮 [1]・中村真也 [2]・平嶋雄太 [1]・大山正巳 [3]・大北昭二 [4]

Integrated IoT platform designed for field monitoring and environmental control

Hideki MIYAMOTO[1], Shinya NAKAMURA[2], Yuta HIRASHIMA[1], Masami OYAMA[3] and Shoji OHKITA[4]

1. はじめに

農業分野における情報通信技術（ICT）の利用がすすむなか，土壌のモニタリング技術が生産現場に急速に普及しつつある．土壌物理学の分野では，古くからモニタリングに用いるセンサやその利用に関する研究開発が行われており，見かけの誘電率，マトリックポテンシャル，バルク電気伝導度，地温等を測定できる多種多様なセンサが，様々な局面で利用されている．近年は，各種センサを統合運用できる Arduino，Raspberry Pi，M5Stack 等の開発ボード，これらとの連携が容易な Google ドライブや Ambient といったクラウドサービス，技術情報を掲載した Web サイトやソーシャル・ネットワーキング・サービス（SNS）等が充実してきている．また，「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」ことを目指す我が国の政策（農林水産省, 2019）を背景に，生産現場へのモニタリング技術の実装が加速している．特に，土壌水分センサの需要が著しく増加しており，2027 年までの土壌水分センサ市場の年平均成長率は，9.1 %（Report Ocean, 2020）あるいは 16.4 %（Stratistics Market Research Consulting, 2020）と試算されており，この急成長市場への新規参入を目指す国内外の企業が後を絶たない．

各種センサやその制御機器をインターネットに接続して利用するモノのインターネット（IoT）が，土壌のモニタリングに利用されている．電源や Wi-Fi 利用環境を整備し易い施設栽培の現場では，いち早く IoT を利用したスマート農業支援サービスが普及したこともあり，ビッグデータを利用した生育診断，栽培環境制御，生育予測等のデータ駆動型農業技術の開発がすすんでいる．一方，野外の露地栽培においても，20 年ほど前から，各種センサやカメラを実装したフィールドサーバによる水田・畑地の監視が実施されている（例えば，深津・平藤, 2003; 溝口・伊藤, 2015）ものの，施設栽培の場合に比べて技術開発は遅れている．

野外において，多点のデータをリアルタイムで収集する際の制約は多い．既存のフィールドサーバを利用する場合，接続できるセンサの種類・数は限られるうえに，用途に合わせてカスタマイズし辛い．そのため，調査・研究には，汎用性の高い海外製の計測・制御システムが利用される場合が多い．しかし，我が国では，そうした輸入品を製造国内の市場価格より高い価格で購入せざるを得ないうえに，「特定無線設備の技術基準適合証明等に関する規則（郵政省令第 37 号）」に規定された技術基準適合証明を取得していない無線通信機器を利用することはできない．ゆえに，高額な費用を負担しつつも，限られた機器を利用してモニタリングを行わざるを得ない状況が常態化している．2018 年から 2023 年にかけて，世界の IoT プラットフォーム市場が 39 %（総務省, 2020）の年平均成長率を示し，ビッグデータを活用したデータ駆動型技術が隆盛を極める新時代の到来が予見され，データ収集手段としてのモニタリングの重要性が高まる今，野外の調査・研究に適した国産 IoT システムを構築することは，フィールド科学の発展を左右し得る課題である．

土壌物理学および地すべり工学を専門とする研究者，メーカー，システムインテグレーターの三者から成る著者らの研究グループは，2018 年 1 月より，野外用の IoT プラットフォームの共同開発に着手し，水田，畑地，山林等における湿害，塩害，潮風害，病害，臭気，微細粒子，鳥獣害，地すべり，社会インフラ等の監視を目的とした実証試験を通じて，IoT プラットフォームの試作と改良を行ってきた．本稿では，開発した IoT プラットフォームの仕様と，現在実施している国内 3 地点における実証試験の事例を紹介する．

[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.
[2]Faculty of Agriculture, University of the Ryukyus, 1 Senbaru, Nishihara-cho, Okinawa 903-0213, Japan.
[3]Smart Logic Ltd., #307, 4-1-6 Kounan, Minato-ku, Tokyo 108-0075, Japan.
[4]CLIMATEC, Inc., 4-2-11 Ikebukuro, Toshima-ku, Tokyo 171-0014, Japan.

2. 統合型 IoT プラットフォーム

2.1 統合型 IoT プラットフォームの全体像

野外用の IoT システムに求められる性能は，施設栽培用のそれと異なる．野外の調査・研究手法としてのモニタリングは，電源を確保できない，アクセスし辛い，防風雨にさらされ得るといった悪条件下で行われる場合が多い．そのため，IoT システムには，高い水準の汎用性，実用性，省電力性，堅牢性等が求められる．著者らは，施設園芸用モニタリングシステム（スマートロジック株式会社）をベースとして，ハードウェア，ソフトウェア，クラウドシステムの一体的開発を行うことによって，野外向けの統合型 IoT プラットフォーム（Fig. 1）を新たに構築した．親機を中心として，最大で半径 500 m 以内の通信圏内に配置された子機による各種データは，無線通信（IEEE802.15.4 準拠）により親機に集約された後，携帯電話通信網を利用してデータセンターに送信され，ユーザーはそれをコンピュータやスマートフォン等で閲覧する仕組み（Fig. 1）である．この仕組みは，従前の技術と類似するものの，後述する 3 点の特徴を有する．

2.2 インターフェイスの特徴

第 1 の特徴は，各種センサを 1 つの子機（Fig. 2）で運用できる豊富なインターフェイスを備えている点である．利用実績が認められる各種センサを利用できるよう，子機に搭載した基盤上には，6 種類のインターフェイス（SDI-12，I2C，A/D（24 ビット），RS-232C，RS-485，Modbus）に対応したソケットを配置している．SDI-12 は風向風速計や多機能土壌水分センサ（例えば，TDT センサ（Acclima 社），True TDR センサ（Acclima 社），TEROS-12（Meter Environment 社），WD-5（A·R·P））等に，I2C は温湿度センサ，照度センサ，加速度センサ，ガス（CO_2，アンモニア，雑ガス）センサ等に，A/D（24 ビット）は水位センサ，測距センサ，日射センサ，pH/EC センサ，重量センサ等に，RS-232C は海塩粒子センサ，風量センサ，SDI-12 非対応土壌水分センサ等に，RS-485 は pH/EC センサや風速風向計等に，Modbus は電流・電圧センサや各種機器の制御等に，それぞれ対応している．これらのインターフェイスに対応するものであれば，センサを追加実装することも可能である．なお，雨量計については，雨量計－子機間のケーブル長の制約を受けることなく最適な場所に設置できるよう，雨量計側面に小型の専用子機を取り付ける仕組みとしている（Fig. 2）．

SDI-12 対応センサの簡易設定キットおよびアプリケーション（牧・宮本, 2021）を，別途，構築した．SDI-12 対応のセンサを利用する際，メーカーが提供する治具・ソフトウェアやデータロガー等を利用して，0 ～ 9 の SDI アドレスを各センサに事前に割り振る必要がある．初学者にとって，この作業は煩雑であるため，IoT 機器の自作用モジュールとして急速に普及する，Wi-Fi/Bluetooth 対応の ESP32（ESPRESSIF 社）を搭載した M5Stack 開発ボード（M5Stack 社）を利用した簡易設定キットおよびアプリケーションを自作した．これを利用すれば，プログラミングを行うことなく，スマートフォンやタブレットを利用して SDI-12 対応センサの設定・動作確認を行うことができる（牧・宮本, 2021）．

2.3 実用的な Web アプリケーションの開発

第 2 の特徴は，実用的なユーザーインターフェイスを実装している点である．Web ブラウザを利用できるスマートフォンやタブレット等を利用して，Web アプリケーション（Fig. 3）上でデータセンター（クラウド）に蓄積された全データを閲覧可能である．子機・親機の動作設定，各データのグラフ化・ダウンロード，アラートメールの設定，3 段階のアクセス権の設定等も，この



Fig. 1　統合型 IoT プラットフォームの仕組み．



Fig. 2　子機および雨量計専用子機．

Web アプリケーション上で全て実行できるため，プログラミングを行う必要は一切ない．また，親機（Fig. 4）に搭載した赤外線防水カメラによる画像確認機能や，GPS モジュールによる Google マップ上へのデータ表示機能（Fig. 5）も備えている．これらは，アクセスすることが容易でない遠隔地のモニタリングの実施状況や，異常な事象の発生場所・発生状況をリアルタイムで把握するために必要不可欠となるユーザー支援機能である．

2.4 野外長期運用を可能とする省電力性・堅牢性

第 3 の特徴は，ソーラー発電システムによる長期連続稼働を可能とする省電力性・堅牢性を備えている点である．使用条件や通信環境によって消費電力に差異が認められるが，無電源環境で無線通信機器を作動させるためには，一般に大型ソーラーパネルを利用する必要がある．しかし，たびたび暴雨風に見舞われる我が国において，野外に設置した大型ソーラーパネルを安全に管理する労力・費用を考慮すると，野外用の子機・親機の消費電力は，小型ソーラーパネルを利用して賄える水準に留める必要がある．また，気象庁の気象観測データと連携運用し易いよう，気象観測所のデータ更新頻度と一致させられるようにすることも望ましい．そこで著者らのグループは，測定およびデータセンターへの全データのアップロードの最短間隔を 10 分とすること，そしてソーラー発電システムの不具合により電源供給が滞っても 3 日間の動作を可能とすること等を前提として，子機・親機の省電力化を図った．その結果，子機は 5 W 程度，親機は 15 W 程度のソーラーパネルを用いることによって，両者の長期連続稼働を実現した．なお，雨量計専用子機の側面には小型ソーラーパネルが実装されているため，外部電源は不要である．

省電力性の追求に加え，欠測対策も強化している，統合型 IoT プラットフォームのベースとなった施設園芸用のモニタリングシステムは，電源を利用できる施設内での利用を前提としたものである．消費電力を気にすることなく，高頻度の測定とデータのアップロードを行うことができる施設内では，測定間隔を小さく設定することにより，たびたび発生する欠測を測定回数でカバーする合理的運用がなされている．一方，調査・研究を目的とした野外のモニタリングでは，利用できる電力が有限であるうえに，欠測が発生しないことが望ましい．測定に一定の時間を要する各種センサを子機側で作動させつつ，複数の子機－親機間および親機－データセンター間の通信が安定化するよう，電波環境向上のための指向性アンテナの利用，電波中継器の設置，親機へのデータの集約方法の改良に取り組んできた．その結果，最新ファームウェアを実装した 2020 年 12 月以降の欠測率（全観測項目の 1 つでも欠測した場合は，欠測としてカウントする事象の発生確率）は 0.1 ～ 0.5 % に低下した．なお，機器の不具合により全データが消失しないよう，バックアップ用フラッシュメモリーを親機に搭載している．

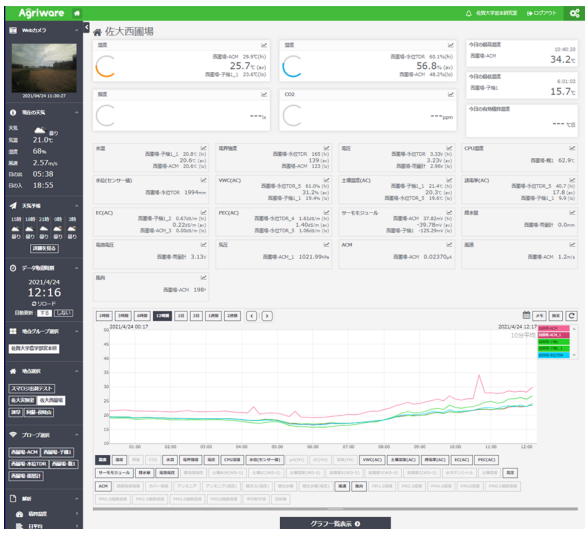


Fig. 3 Web アプリケーション．

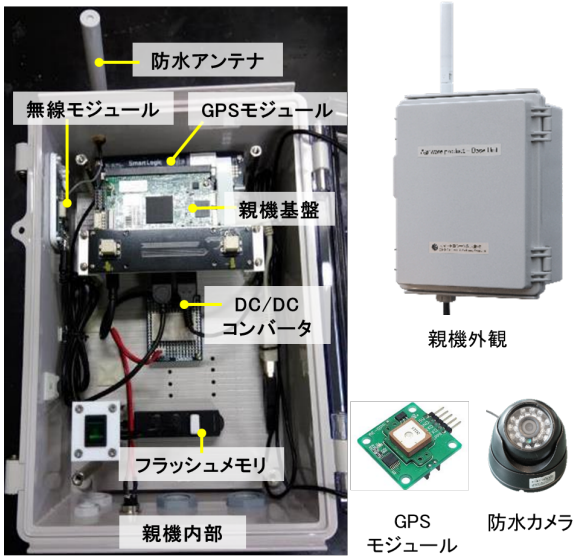


Fig. 4 親機の構造．

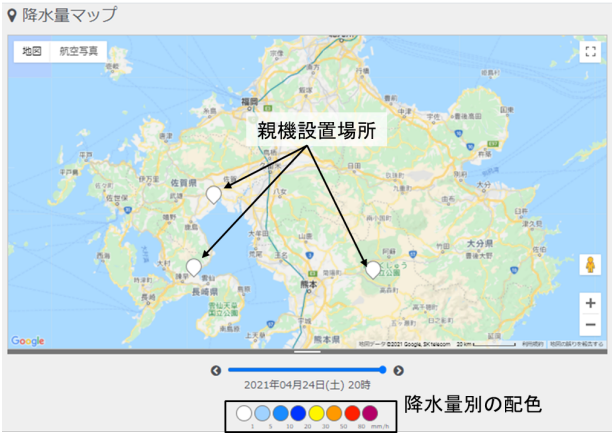


Fig. 5 Google マップへのデータの表示機能．

3. 実証試験

これまでの実証試験を通じて，改良を重ねてきた統合型 IoT プラットフォームの特徴を生かして，過酷な野外条件においてモニタリングに取り組んでいる 3 つの事例を紹介する．第 1 は，降水量が比較的少ない，いわゆる，風台風が通過する際に，潮風害 · 塩害の影響を受けやすい干拓農地におけるモニタリングの事例である．第 2 は，熊本地震の発生以降，斜面崩壊の発生が危惧され，立ち入りが制限されてきた火山灰土斜面のモニタリングの事例である．第 3 は，台風や熱帯低気圧等に伴う暴風雨が発生しやすい島嶼地域で行っている丘陵地のモニタリングの事例である．

3.1 干拓農地の統合環境モニタリング

有明海沿岸地域に広がる干拓農地には，粘土分を多量に含む土壌が堆積している．干天日が続いて土壌が乾燥すると，作土層の土中水圧力が著しく低下し，作物に強い乾燥ストレスが作用し得る（平嶋ら, 2020）うえに，下層に存在する高塩分濃度層からの塩分の遡上や，台風 · 強風等によって飛来する海塩粒子による潮風害（山本ら, 2008）にも留意しなければならない宿命を背負っている．塩分の遡上や潮風害による農作物への被害を軽減するための農地管理技術を構築するために，True TDR センサ（Acclima 社）を利用して 100 cm 以浅の体積含水率 · バルク電気伝導度の鉛直プロファイルデータを，また ACM（Atmospheric Corrosion Monitor）型腐食センサ（押尾, 2018）を利用して海塩粒子付着量の経時変化を計測できる IoT システム（Fig. 6）を，有明海沿岸地域の計 3 ケ所に設置した．そして，各地点から送信される各種データに基づき，大気－土壌－地下水間の塩分輸送形態を明らかにするとともに，塩分の土壌中の移動および飛来の予測に取り組んでいる．

3.2 火山灰土急斜面のモニタリング

2013 年 8 月の特別警報の運用開始以降，特別警報が 4 回発表された北部九州では，平野部では浸水被害，山間部では土砂災害がそれぞれ多発している．なかでも，2016 年 4 月の熊本地震により大規模な斜面崩壊が多発した熊本県の阿蘇地域では，不通となった国道の復旧や斜面崩壊対策が推進されてきたが，地震動によって山体に形成された大規模な亀裂は現在もなお残っており，豪雨を誘因とする大規模な斜面崩壊の発生が危惧されている．そこで，熊本地震によって大規模な地割れが形成され，且つ周辺で斜面崩壊が発生している火山灰土急斜面に，TDT センサ（Acclima 社）と三軸加速度センサを実装した WD-5（A·R·P）とを分散配置し（Fig. 7），土壌水分量の増減に加え，斜面内部の異常な兆候の検知および予測に取り組んでいる．

3.3 地すべり地域のモニタリング

沖縄島では，豪雨を誘因とする地すべりが多発しており，その大部分は丘陵地形が発達した沖縄島南部の島尻層群泥岩分布地域に集中している．この地域では，地すべり防止区域や地すべり危険個所が都市およびその近郊に設定されているものの，特別警戒区域を指定することによる地域社会への影響は甚大であるうえに，人為的地形改変が地すべりの発生形態に影響を及ぼし得ることから，地すべり危険度を正確に把握することが重要な課題になっている．この地域の地すべり危険度をリアルタイムで評価するために，気象観測用センサおよび地下水位センサに加え，土壌水分センサとして TEROS-12（Meter Environment 社）を，また地盤の異常を検知するための MEMS（Micro-Electro-Mechanical Systems）傾斜計等を実装した IoT システムを設置した（Fig. 8）．そして，表層および深層の土中水の降雨応答と地すべりとの関係を明らかにすることにより，リアルタイム地すべり危険度診断技術の確立を目指している最中である．

4. おわりに

本稿では，著者らの研究グループが開発した統合型 IoT プラットフォームと，それを利用して新たに取り組み始めたモニタリング事例を概説した．この技術には，野外におけるデータ収集を容易にするアイディアと技術が伴っており，学術調査 · 研究への利用を目的とした仕様としている．



Fig. 6　干拓農地の統合環境モニタリング．



Fig. 7　火山灰土急斜面のモニタリング．



Fig. 8 地すべり地域のモニタリング.

ICT の急速な発展と農業現場への実装に伴って，モニタリングに関する知見を求める生産現場の声が高まるなか，土壌物理学を専門とする研究者が貢献できる場面は多くなってきている．特に土壌のモニタリングは，土壌物理学の研究者が最も得意とするところであり，研究者個人として，また学術団体として，ビッグデータを利用したフィールド研究を先導する好機が到来している．このビッグデータを利用した新たなフィールド研究を展開するためには，多くの利用者や情報工学の専門家等と連携・協力して，データ駆動型の技術基盤を構築する必要があるものの，農業・環境・防災関連分野において土壌物理学が貢献できる部分は多いと考える．

本稿において紹介した統合型 IoT プラットフォームの商用流通が始まり，この技術の利用拡大が期待される．今後は，更なる機能の充実を図るとともに，人工知能（AI）によるビッグデータ解析機能をクラウドに実装したり，ユーザーインターフェイス開発を得意とする IT 企業との分野横断型連携を加速したりして，統合型 IoT プラットフォームの普及と新たなサービス・製品・技術の創造を目指す予定である．

謝辞

本研究は，長崎県，熊本県，沖縄県の助力と，科学研究費（課題番号：17K19311，20K06299）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実施した．ここに記して謝意を表す．

引用文献

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.

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測定. 農業農村工学会論文集, 310: I_21–I_28.

牧 貴広・宮本英揮 (2021): Atom Lite/Matrix を利用した SDI-12 センサの簡易設定. Available at http://soillab.ag.saga-u.ac.jp/note/note00.pdf. (2021.5.1)

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, 83(2): 93–96.

農林水産省 (2019): 農業新技術の現場実装推進プログラム. Available at https://www.maff.go.jp/j/press/kanbo/kihyo03/attach/pdf/190607-2.pdf. (2021.5.10)

押尾 渡 (2018): 各種環境での電気化学測定 — ACM センサー. 材料と環境, 67: 273–279.

Report Ocean(2020): Soil moisture sensor market by product (tensiometric, volumetric, and solid-state sensor), type (analog and digital), and application (agriculture, research, and others): Global opportunity analysis and industry forecast, 2020–2027. Available at https://reportocean.com/industry-verticals/sample-request?report_id=AMR1200. (2021.5.10)

総務省 (2020): 令和 2 年版情報通信白書. Available at https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r02/pdf/02honpen.pdf. (2021.5.13)

Stratistics Market Research Consulting (2020): Soil Moisture Sensor–Global Market Outlook (2019–2027). Available at https://www.strategymrc.com/report/soil-moisture-sensor-market. (2021.5.10)

山本晴彦・高山 成・岩谷 潔・古賀敦子 (2008): 農業気象から見た潮風害の特徴 — 佐賀県における水稲の事例解析を中心に —. 日本海水学会誌, 62(4): 194–201.