J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 149, p.55～61 (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 ―

石川洋平 [1]・野口卓朗 [1]・宮本英揮 [2]・徳本家康 [2]

Development of soil moisture and salinity sensor network with Arduino and XBee — Investigation of soil moisture and salinity at a tsunami-affected field in Miyagi —

Yohei ISHIKAWA[1], Takuro NOGUCHI[1], Hideki MIYAMOTO[2] and Ieyasu TOKUMOTO[2]

Abstract: We developed a wireless communication network system with Arduino, XBee, and TDT sensors to investigate soil moisture and salinity. The sensor network system was installed to monitor soil moisture (θ) and bulk soil electrical conductivity (EC_b) at three locations in a soybean field converted from a paddy field of tsunami-damaged farmland, Miyagi. Measured data was available to download through a Web server. Our sensor network system allowed us to collect all data without power supply and communication problems after using sleep power-saving mode. Our finding was local spatial variability of high salinity, influencing soybean growth at the field.
Key Words : sensor network, tsunami-affected farmland, soil moisture, electrical conductivity

1. はじめに

近年の土壌水分・塩分センサや情報通信技術（ICT）の発達に伴い，土壌環境情報を利用した精密農業が急速に普及しつつある．ICT の活用に関する農工連携は盛んで，電子情報通信分野においても，Arduino や Raspberry Pi を制御マイコンとして用いる研究事例が示されており（たとえば，星, 2021; 大山・北宅, 2021），小型の制御マイコンを用いた応用研究の関心は高い．とくに，Arduino では Arduino 言語によるプログラム作成, 書込みを可能とする統合開発環境（IDE: Integrated Development Environment）が提供され，センサを扱うための豊富なライブラリが充実している．また，センサ周りの近距離通信規格（ZigBee）の無線モジュール（XBee）と携帯電話回線を用いた遠距離通信に対応した無線モジュール（3GIM）を Arduino に搭載することにより（Photo 1），無線通信によるデータの収集およびクラウド上へのデータの蓄積を実現できる．これは，土壌物理分野の圃場計測において多用される高額なデータロガーを不要とし，比較的安価な土壌水分計測システムの構築の可能性を示唆する．

Arduino と XBee を利用した土壌水分・塩分計測システムとして，SDI-12 プロトコル対応の土壌水分・塩分センサを利用可能である．1 地点多深度の土壌水分計測の機能を有するこの最小構成システムを，Arduino シリーズの中で最も基本的な Arduino UNO（8 bit マイコン）を用いて構築することで，多地点計測で問題となるコストを抑えた「センサネットワーク」に拡張できる．

国内におけるセンサネットワークの既往研究として，フィールドルータ（FR）を用いた土壌水分計測システムが報告されている（溝口, 2012a; b）．FR は 6 W 程度のソーラーパネルで稼働するインターネット通信装置であり，Bluetooth を介して複数のデータロガーにアクセスし，データロガーに蓄積されたデータをインターネットサーバ上に 1 日 1 回転送・保存が可能である（小島ら, 2016）．ゆえに，FR のシステムではデータロガーの設置数に応じて FR 近傍の多点土壌水分量計測が可能になる．

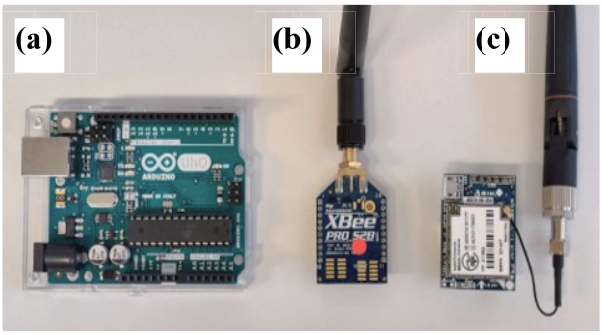


Photo 1 Arduino (a) および無線通信モジュール (XBee (b), 3GIM (c)).
Arduino (a) and wireless communication module (XBee (b), 3GIM (c)).

[1]Department of Creative Engineering, National Institute of Technology, Ariake College, 150 Higashihagio-Machi, Omuta, Fukuoka 836-8585, Japan.
[2]Fuculty of Agriculture, Saga University, 1 Honjo, Saga 840-8502, Japan.
Corresponding author: 徳本家康, 佐賀大学農学部.
2021 年 8 月 31 日受稿　2021 年 10 月 7 日受理

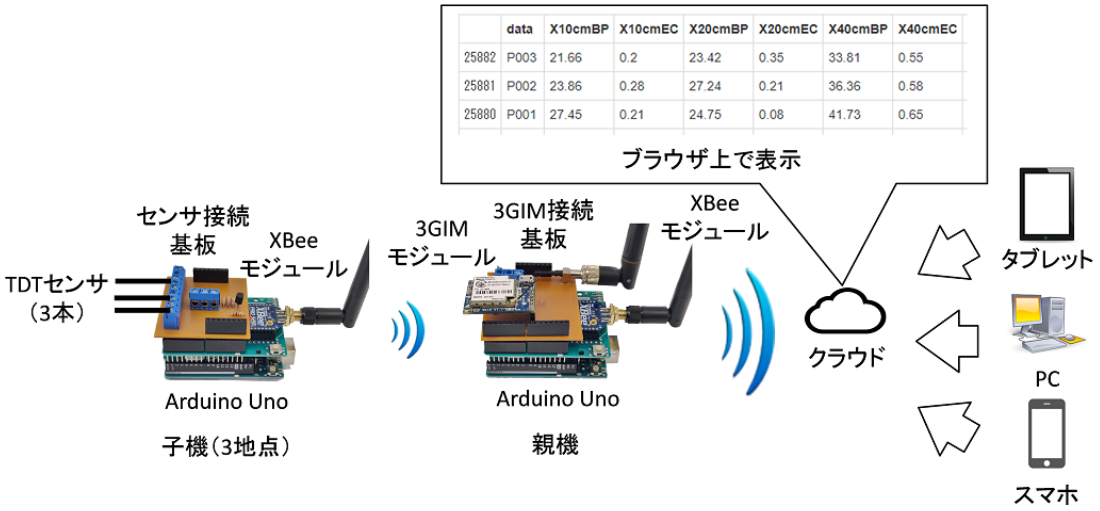


Fig. 1　センサーネットワークシステムの概略図.
Diagram of the sensor network system.

これに対して，Arduino と XBee を用いたシステムは，子機の増設により測定地点を増やすことができ，子機同士の通信を可能とする．すなわち，子機の配置や個数によって，通信距離を拡張できるため，より広範囲な多点計測システムの構築が容易になると考えられる．しかしながら，Arduino と XBee を用いたセンサネットワークシステムの多点計測における通信や供給電源問題などの検証は不十分であり，システムの有効性を圃場試験により明らかにする必要がある．

本研究では，Arduino, XBee と SDI-12 プロトコル対応のセンサを用いて，津波被災した水田転換畑の除塩後の塩分管理に使えるセンサネットワークの構築を目的とした．津波被災農地を対象とするため，高水分, 高塩分量の計測にも対応可能な TDT センサ（Tokumoto et al., 2021）を利用し, 3 地点 3 深度の土壌水分 · 塩分センサネットワークを開発することとした．本稿では，取得データの欠損率と通信方式や電源問題の関連性を検証した上で，圃場の土壌水分 · 塩分の空間的なバラツキを検討した．

2. 方法

2.1 センサシステムの開発

本システムは，センサと繋がるエッジデバイスである子機とそのデータを受け取りクラウド上に送信する親機から構成される（Fig. 1）．Arduino の標準的なプログラム言語である Arduino 言語（C/C++ 言語を基に変更 · 拡張した言語）を用いて，その制御プログラムを作成することとした．Arduino では，SDI-12 ライブラリが利用可能であり，センサの返り値を選択することで，データ長の整形が可能となる．TDT センサを用いた水分 · 塩分計測では，ステップパルス状の透過信号波形を測定し，信号伝播時間および信号強度の減衰量の波形解析に基づき，土壌の誘電率（ε_b）およびバルク電気伝導度（EC_b）をそれぞれ求めることができる（上村ら, 2020）．しかし，波形データの取得 · 保存により，データ通信量が増えるため，本システムでは TDT センサ内でデータ処理された ε_b および EC_b の返り値を読み取る仕様とした．

自作基板（Fig. 2（a））を介して Arduino UNO に接続された TDT センサからのデータを受け取った子機は，近距離無線通信モジュール（XBee）を用いて親機にデータを送信する（Fig. 1）．接続方法に関して，自作基板は Arduino UNO の汎用入出力端子（GP-IO）に接続でき，XBee は XBee シールドを介して Arduino UNO に搭載可能である（Fig. 1）．TDT センサには異なる SDI アドレスを割り振ることにより，各子機の Arduino に複数接

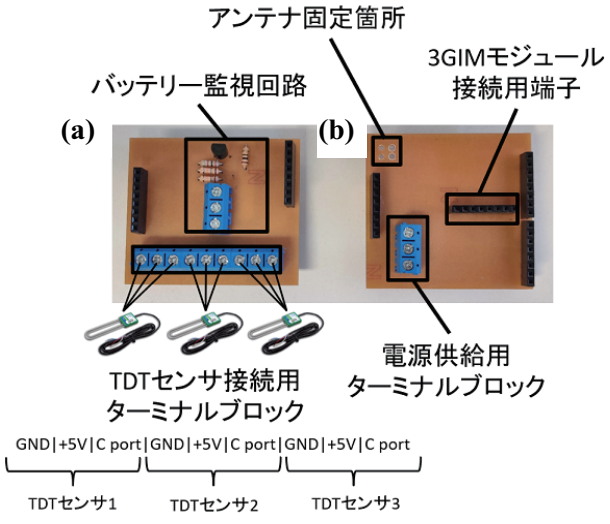


Fig. 2　Arduino UNO に搭載する自作基板の概略図：子機の TDT センサ接続用基板（a），親機の 3GIM 接続用基板（b）.
Self-made printed circuit board (PCB) mounted on Arduino UNO: PCB for the extension unit to connect with TDT sensor (a) and PCB for the base unit to connect with 3GIM (b).

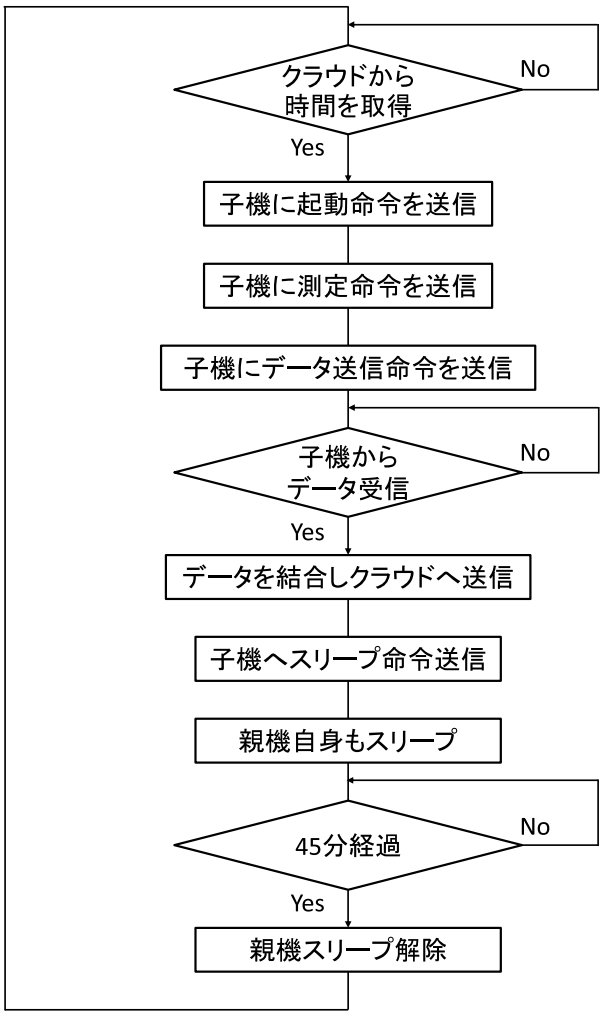


Fig. 3　親機におけるデータ送受信手順のフローチャート．
Flowchart of the operating command for data communication between the extension unit, the base unit, and the cloud server in our developed sensor network system.

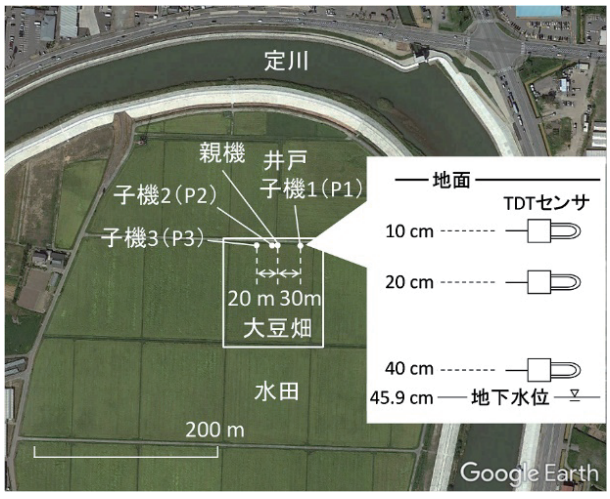


Fig. 4　宮城県津波被災農地における計測システムの概略図．
Schematic figure of our measurement system at a tsunami-affected field in Miyagi.

続可能となる．また本システムでは，自作基板上部の回路により，バッテリー残量の低下をアラートとして送信できるようにした．予備実験において，システム動作時に数百 mA の電流の消費を想定して，5 W のソーラーパネルを利用した場合，充電が不十分となり 1 週間程度でシステムダウンする事象が頻発した． その対策として，本システムで利用したソーラーシステムの電力見積もりを参考に（東京デバイセズ, 2012），独立電源として 20 W のソーラーパネルと 20 Ah の鉛蓄電池を用いることとした．さらに，スリープモードを導入することで，データ送受信時以外の低消費電力化を図った．

通信デバイスとして XBee を用いた理由は，遮蔽物が無く設置位置が高ければ数百メートルの通信が可能なためである．XBee 設定ソフトウェアである XCTU を用いて，親機に PC を直接接続していれば子機の通信経路を確認できる．また，メッシュネットワークを構成することにより，子機を中継機として利用できる．つまり，親機と各子機の 1 対 1 の通信ではなく，子機間におけるデータ通信を可能とする 1 対 n（子機数）の通信により，データ取得の安定性向上が望める．しかし，雑草の茂りや台風等の自然環境の変化による親機 · 子機間の通信トラブルも考えられる．適切なシステム配置や現場監視によるフィールドシステムの堅牢性 · メンテナンス性の担保は重要な課題である．

子機と同様に，Arduino UNO を親機として採用した．子機からのデータを受ける XBee モジュールを持ち，自作基板（Fig. 2（b））に接続された 3G 通信モジュール（3GIM）を介して NTT ドコモの FOMA 回線に接続し，クラウド上のサーバにデータを蓄積する仕組みとした（Fig. 1）．

3 地点 3 深度の計測を行うために，本システムを構成する計 3 台の子機にノード番号を P1，P2，P3 と付し，それぞれ 3 つの TDT センサを接続した．親機からセンサデータ取得命令を子機に送ることにより（Fig. 3），3 つの子機から集約された 3 深度の ε_b および EC_b の値を取得できるようにした．Arduino は時計機能を有していないため，まずはサーバ上の実時間を取得し，子機へのデータの送受信を行った．データ送受信後には，スリープモードによる低消費電力化を図った．

基本的なセンサシステムの開発には Arduino UNO を十分に利用できるが，その際，用途に適した通信モジュールの選定やシステム全体の消費電力の見積もりが重要となる．コロナ禍における半導体不足も考慮し，供給量が潤沢な Arduino UNO でプロトタイプを作るということは概念実証（Proof of Concept）の観点からも重要になることを記しておきたい．

2.2 現場観測

実験圃場は，宮城県東松島市大曲の津波被災農地である（Fig. 4）．二級河川定川の右岸に位置した地盤沈下区域であり，また津波により海岸堤防と排水機場が損壊し

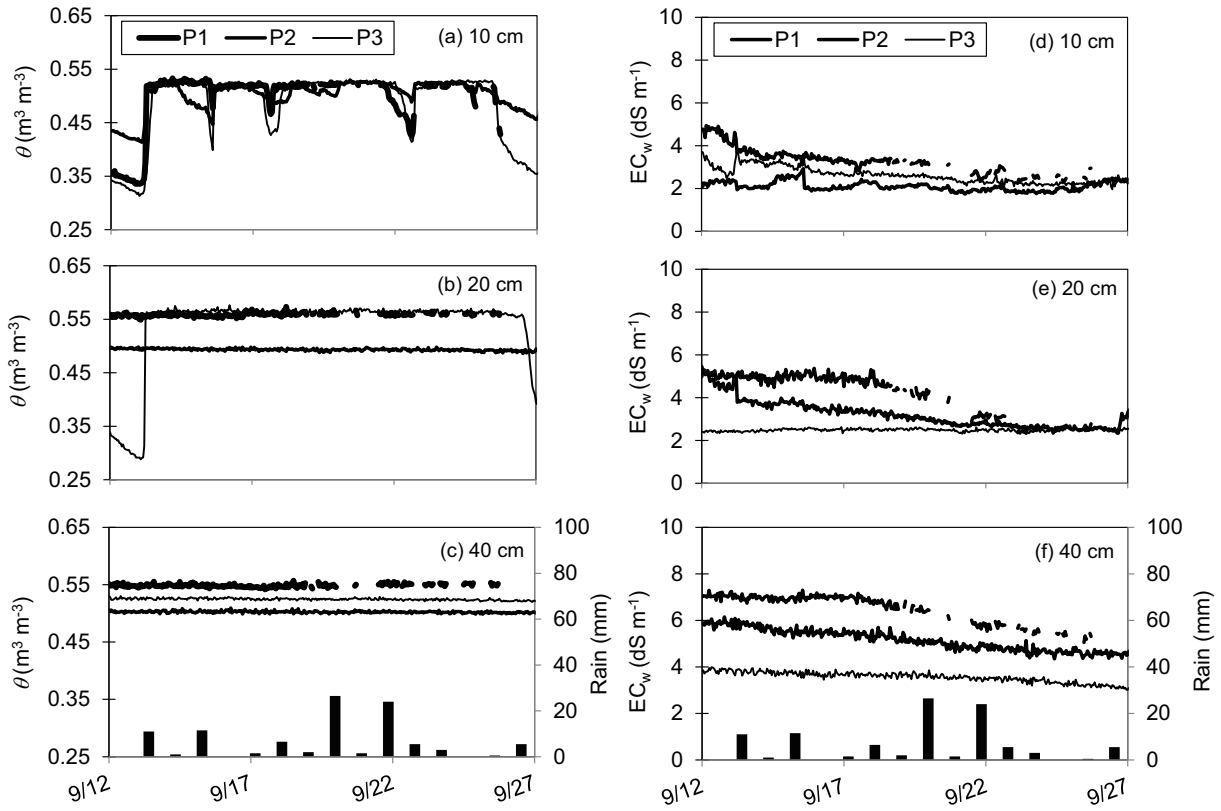


Fig. 5 3 地点 3 深度における θ および EC_w の経時変化.
Temporal changes of θ and EC_w at the three different depths of three locations (P1, P2, and P3).

たことによって海水の長期浸水区域に，この圃場は位置する．圃場整備により，海岸堤防，排水機場，排水路等が復旧し，2014 年 9 月には津波堆積土の上に盛土 30 cm の嵩上げ工事が施工された．盛土下層の水田土壌の塩分濃度を下げるため，2014 年 12 月に縦穴浸透による除塩が行われた後，2015 年 3 月には深さ 50 cm の位置に暗渠が埋設された．水田転換畑として，2016 年に大豆が栽培された圃場区画（約 1 ha）を本実験の対象とした．盛土の土性，乾燥密度（ρ_b）および飽和透水係数（K_s）は，粘土質ローム，1.2 g cm^{-3}, 12 cm d^{-1} であった．水田土壌は，それぞれ砂質ローム，1.1 g cm^{-3}, 1 cm d^{-1} であった．

先述の親機を農道の法面に設置し，各子機を 20 ～ 30 m 程度の間隔で 3 箇所に設置した（Fig. 4）．各子機に接続した計 3 つの TDT センサを，それぞれ土壌深さ 10 cm, 20 cm, 40 cm に水平方向に埋設して，転換畑後の ε_b と EC_b を 1 時間間隔で計測した．サーバに蓄積されたデータを，Web 上から随時ダウンロードした後，Young et al.（1997）の校正法を参考にして，独自に求めた $\varepsilon_b - \theta$ 関係式（Tokumoto et al., 2021）に基づき ε_b を θ に変換した．また，計測した ε_b および EC_b を次式（Hilhorst, 2000）に代入することにより土中水の電気伝導度（EC_w）を推定した．

$$EC_w = \frac{\varepsilon_w EC_b}{\varepsilon_b - \varepsilon_0} \quad (1)$$

ここで，ε_w は水の誘電率（25 °C の場合は 78.5），ε_0 は EC_b が 0 のときの ε_b である．本研究では，実験圃場の土壌を供試材料として，別途，求めた 3.46 を ε_0 として，（1）式に与えた．

気象データとして，実験圃場に最も近い石巻地域気象観測所の降水量データを活用した．なお，本稿では，塩害が生じた大豆栽培時期（センサ設置後の 2016 年 9 月 12 日 ～ 9 月 27 日）における水分 · 塩分分布に着目した．センサ設置前後を含め，合計 4 つの台風の到来により，降雨が多く，このような気象条件下でセンサネットワークが正常に作動するかについても併せて検討するためである．測定対象期間における地下水位の平均値は 45.9 cm（標準偏差 8.8 cm）であった．

3. 結果と考察

3.1 データ通信および供給電源の課題と対応

実験圃場において，3 地点 3 深度で取得した θ と EC_b の経時変化を Fig. 5 に示す．計測期間中は降雨イベントが連続的に生じ，とくに，9 月 20 日の 18 時以降からの

Table 1　本センサネットシステムの地点および深度別におけるデータ欠損率.
Percentages of data missing at observed depths and locations in the sensor network system.

データ欠損率		地点　P1			地点　P2			地点　P3		
		深さ 10 cm	深さ 20 cm	深さ 40 cm	深さ 10 cm	深さ 20 cm	深さ 40 cm	深さ 10 cm	深さ 20 cm	深さ 40 cm
9/20	18 時以前（%）	2.9	2.9	2.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9/20	18 時以降（%）	74.4	74.4	74.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0



Photo 2　実験圃場の P1 地点の区画における大豆の生育状況.
Growing conditions of soybeans at the sensor location P1.

6 時間降雨強度が 20 mm に達した．それ以降から，子機 P1 の XBee モジュールにおけるデータの欠落が生じた．その降雨イベント前後における各計測地点および深度別のデータ欠損率（＝データの欠落数 / 対象期間のデータ数）を Table 1 に示す．子機 P2，P3 ではデータ欠落が全くなかったのに対して，P1 の欠損率は降雨前後でそれぞれ 2.9 %，74.4 % であった（Table 1）．また，P1 の深度別のデータ欠損率は同じであり，この原因として，XBee モジュールの腐食や同期不良が考えられた．なお，本計測期間外において，子機 P1 のモジュールを交換し，同じセンサ接続基板および Arduino を用いて安定したデータ取得が可能になった．目視による XBee モジュールの腐食を確認できなかったが，データ欠落の原因は XBee の動作不良と特定された．

センサネットワークの予備試験や圃場設置時には，XBee 設定ソフトウェアである XCTU を用いて，子機による 1 : n 通信経路を確認した．XBee はメッシュネットワークの通信経路を自動的に変更するため，一部の子機が故障しても親機との直接通信や別の子機を経由した迂回通信ができる機能を有する．この機能により，子機のデータ欠落時においてもデータ取得の安定性向上に寄与したものと推察された．また，本実験では，見通しの良い圃場条件において，親機と子機の無線通信の距離は 300 m ほどであったが，センサ周囲の植生状況によっては，通信経路の自動変更によるデータ欠損のリスク低減効果も期待される．

消費電力の課題に関して，ソーラーパネル（20 W）とバッテリー（20 Ah）を用いた場合，圃場の日照条件においても安定した連続稼働が可能であった．スリープモード導入前の予備実験により，5 W のソーラーパネルでの運用は困難であったが，現状ではオーバースペックの電源システムとなっている．スリープモードの導入により，当初想定した 5 W 以下のソーラーパネルでの運用が可能になれば，本システムの小型化，すなわち，圃場における機器設置の利便性向上が見込まれる．ただし，システム設計では動作 · 静止 · 無線送信時に瞬間的な電力消費が異なる点と天候によるソーラーパネルの発電量の不確実性が高いため，バッテリー容量の更なる検証が必要である．また，メッシュネットワークの拡張に伴う，土壌水分 · 塩分センサの個数および計測頻度の増加により，消費電力量が大きくなるため，適当な計測間隔の確認が必要である．

3.2 水分 · 塩分計測の結果

実験圃場では，2014 年に縦穴浸透による除塩および 2015 年の排水整備事業が完了したにも関わらず，2016 年 9 月上旬には部分的な大豆の生育不良が確認された（Photo 2）．とくに，対象圃場の P1 の区画（Fig. 4）では大豆は立ち枯れ状態であったことから，更なる除塩の必要性が推察された．

Fig. 5 は，目視により，大豆の立ち枯れが生じた区画（P1, P3）と生じていない区画（P2）における，3 深度の θ および EC_b の経時変化である．計測期間中には連続的な降雨イベントが生じ，合計降水量は 100 mm に達した．計測された深さ 10 cm の θ は 0.32 ～ 0.52 $m^3\ m^{-3}$（水分特性曲線による pF 換算で pF 2.5 ～ pF 1 に相当）の範囲で変動する一方（Fig. 5a），深さ 20 cm 以深ではほとんど一定の θ 値を示した（Figs. 5b, 5c）．EC_b は，計測地点に関わらず，深さ 10 cm から 40 cm へと土壌が深くなるにつれ，増加した（Figs. 5d, 5e, 5f）．とりわけ，計測開始直後，3 地点（P1, P2, P3）における深さ 40 cm の EC_b は，それぞれ 4 dS m^{-1}，1.8 dS m^{-1}，3 dS m^{-1} であり，大豆の生育状態の良しあしと一致した．なお，本稿では降雨が多い時期の除塩過程に着目するが，降雨のない期間にはすべての観測深さで θ は 0.2 $m^3\ m^{-3}$（水分特性曲線による pF 換算で pF 3.0 に相当）まで減少することが観察されている．

自然降雨による除塩量を検討するため，土中の塩分

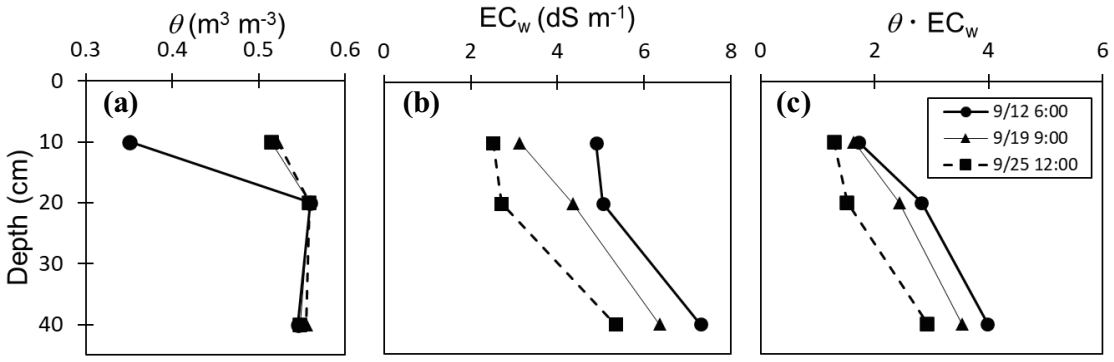


Fig. 6 P1 地点における $\theta(a)$, $EC_{\mathrm{w}}(b)$ および $\theta \cdot EC_{\mathrm{w}}(c)$ の鉛直分布.
Vertical distribution of $\theta(a)$, $EC_{\mathrm{w}}(b)$, and $\theta \cdot EC_{\mathrm{w}}(c)$ at the location P1.

量が高かった P1 地点に着目し，塩分量の鉛直分布を示す（Fig. 6）．土壌の塩分量は土壌単位体積当たりの塩分量（g m^{-3}）であり，土壌の塩分濃度と θ の積で表される（Radcliffe and Šimůnek, 2010）．塩分濃度は溶液 EC（EC_{w}）と正の相関を示すので，「$EC_{\mathrm{w}} \times \theta$」を塩分量の指標としても良いと考えられる（安中, 花山, 2014）．降雨前（9/12）から降雨後（9/25）において，深さ 20 cm および 40 cm において土壌塩分量の顕著な減少傾向が認められた（Fig. 6c）．しかし，大豆の良好な生育が認められた P2 の区画のように，大豆の良好な生育には「$EC_{\mathrm{w}} \times \theta$」を 1 程度までに低下させる必要があると推察される（Tokumoto et al., 2021）．圃場の空間的な土壌塩分量のバラツキを明らかにするには，より詳細な検討を要するが，更なる除塩量の把握やリーチング計画・策定において，本研究で開発したセンサネットワークは有用であると考えられる．

4. おわりに

宮城県津波被災農地の水田転換畑における研究事例として，Arduino と XBee を用いたセンサネットワークの開発と高水分・高塩分における計測の事例を紹介した．水田転換畑後には，局所的に生育不良の区画が生じ，圃場内の塩分分布の不均一性が明らかとなった．センサネットワークを利用することで，圃場全体の水分・塩分量分布を把握し，生育不良の区画を減少させる水分・塩分量の遠隔管理および予測の可能性が示唆された．今後，通信距離がより長い新たな通信機器の普及も予想されるが，本システムの更なる多点化の検討により，圃場内における水分・塩分量の不均一性の原因究明や除塩過程の把握が期待される．

本稿では，電子・情報分野の教員と学生が農学分野の教員と共に取り組んだシステム開発と実証実験を紹介した．本研究を通じて「圃場での実証イメージを想像できる電子・情報系技術者」や「電子・情報システム要件を意識できる農業土木技術者」の育成も肝要であることを伝えたい．様々な電気・電子技術の栄枯盛衰が激しい VUCA（Volatility, Uncertainty, Complexity, Ambiguity）な時代において，Arduino-XBee プロジェクトが土壌の水分・塩分計測システム開発の一助となれば著者一同望外の喜びである．

謝辞

本研究は JSPS 科研費 15K11960,18K02973 および 26511009 の助成を受けたものです．圃場の選定や利用にあたり宮城大学の千葉克己准教授に心より感謝申し上げます．また，システム構築にあたりご支援・ご助言いただいた有明高専技術部の堀田孝之氏，荻島真澄氏，池上勝也氏，中島正寛氏，古賀つかさ氏，仙台高専名取キャンパス教育研究技術支援室の小山真二郎氏に心より感謝申し上げます．

引用文献

安中武幸, 花山 奨 (2014): メロンがトンネル栽培された砂丘畑における土壌水分・溶質量変動の 5TE センサーを用いた測定. 日本砂丘学会誌, 61(1): 1–9.

小島悠揮, 山下彩香, 伊藤 哲, 三石正一, 溝口 勝 (2016): フィールドルータを用いたセンサネットシステムによる畑表層の多点土壌水分測定. 土壌の物理性, 133: 19–27.

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

星 岳彦 (2021)：施設植物生産現場におけるセンシング・環境制御・AI 応用の歴史・現状・課題. 電子情報通信学会誌, 104(6): 526–531.

溝口 勝 (2012a): フィールドモニタリングシステム. 水土の知, 80(9): 50.

溝口 勝 (2012b): SRI の決め手は間断灌漑 — 土壌水分の制御 — にあり. 熱帯農業研究, 5: 175–178.

大山克己, 北宅善昭 (2021): 農園芸分野における情報通信技術（ICT）の導入状況と今後の展望. 電子情報通信学会誌, 104(2): 110–114.

Radcliffe, D.E. and Šimůnek, J. (2010): SOIL PHYSICS with HYDRUS, p. 249. CRC Press, Boca Raton, London and New York.

Tokumoto, I., Chiba, K. and Mizoguchi, M. (2021): Soil salinity management with the Field Monitoring System (FMS) at tsunami-affected farmlands in Miyagi, Japan. International Agrophysics, 35(3): 227–234.

東京デバイセズ (2012): ソーラー USB 電源システムキット. https://tokyodevices.com/items/28

上村将彰, 宮本英揮, 登尾浩助 (2020): TDR と TDT による豊浦砂の水分 · 電気伝導度計測の性能比較. 農業農村工学会論文集, 310: 117–124.

Young, M.H., Fleming, J.B., Wierenga, P.J. and Warrick, A.W. (1997): Rapid laboratory calibration of time domain reflectometry using upward infiltration. Soil Sci. Soc. Am. J., 61: 707–712.

要　　旨

本研究では，土壌水分 · 塩分をモニタリングするためのセンサネットワークの構築を目指し，マイコン（Arduino）と無線通信モジュール（XBee），SDI-12 プロトコル対応の TDT センサを用いた無線通信ネットワークシステムを開発した．宮城県津波被災した水田転換畑の 3 地点 3 深度において，土壌水分量やバルク電気伝導度を測定し，クラウド上で随時，データを取得した．圃場計測では，スリープモードの導入などにより，データ送受信時以外の低消費電力化を図ったことで安定的なデータ受信を実現できた．また，圃場内の塩分濃度のバラツキが大豆生育に影響を及ぼしたことが明らかとなった．

キーワード：センサネットワーク，津波被災農地，土壌水分量，電気伝導度