J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 133, p.19 ～ 27 (2016)

論　文
Original Paper

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

小島悠揮[1]・山下彩香[2]・伊藤 哲[3]・三石正一[4]・溝口 勝[5]

Multipoint soil moisture measurements in an agricultural field with a sensor network system using a FieldRouter

Yuki KOJIMA[1], Ayaka YAMASHITA[2], Tetsu ITO[3], Shoichi MITSUISHI[4] and Masaru MIZOGUCHI[5]

Abstract: A FieldRouter (FR) is equipment which wirelessly connects a variety of sensors and dataloggers, collects measured data, and transfers the data to a webserver via mobile telephone communication. The FR has an advantage of having a small power requirement so that it can work stably in harsh environments. The FR and adequate multiple soil moisture sensors work as a sensor network system to measure multipoint soil moisture in a small farm field. In this study, multipoint soil moisture in a cold upland cabbage field during winter season were measured with a sensor network system using the FR that included eight dataloggers and thirty soil moisture sensors. The effectiveness of the system was evaluated. Dynamic changes in soil moisture due to soil freezing and thawing, and different trends of soil moisture at each point due to different freezing and thawing rates were observed with the sensor network system using FR. The overall data collection rate was 86 % since some data were lost because of power supply problem of the datalogger and the network adapter. The FR sensor network system was found to be enough effective for multiple soil moisture monitoring, however, the improvement is in progress for precise water management in small scale farmlands.

Key Words : soil moisture, sensor network system, FieldRouter, soil freezing and thawing

1. はじめに

近年の情報技術の発達に伴い，日本の農業は精密農業へと移行しつつある．精密農業の要素の一つに圃場内の各種ばらつきへの対策が挙げられる（渋沢, 2003）．様々なセンサによって作物の生育状況や圃場の環境状況が測定され，それらの面的なばらつきが把握される．そして得られたばらつきの情報に基づいて局所的な作物の生長不良の予測とそれへの対応が行われる．ここで圃場の環境とは，気温や湿度などの気象環境や，土壌水分量や地温，肥料濃度などの土壌環境である．特に土壌水分量は作物成長の制御因子であるため重要である．

日本の圃場は，1 ha 未満の小規模なものが大勢を占める（Shibusawa, 2003）．このような小規模圃場内でも土壌水分量にばらつきが生じることが報告されている（砂田ら, 1995）．土壌水分量のばらつきの把握に対して，平均 450 ha の大規模な圃場が多いアメリカ（MacDonald et al., 2013）などでは，人工衛星による圃場内の水分分布測定が進められている（Entekhabi et al., 2010）．しかし，人工衛星で土壌水分量を精度よく推定するためには，その分解能は 1 km より粗くなる（Fang et al., 2013）．このような分解能は，日本の小規模圃場群に適応するには粗すぎる．細かいスケールでの土壌水分量のばらつきを把握するためには，土壌水分センサを多数圃場内に設置する多点測定が有効である．

このような多点土壌水分測定では，無線技術を利用したセンサネットシステムの活用が注目されている．センサネットシステムは対象範囲の圃場にセンサを散布し，センサあるいはロガーに通信機能を持たせることで，多点測定データの取得を効率的に行う技術である（Delin et al., 2005; Pierce and Elliott, 2008; Vellidis et al., 2008）．溝口（2012a, b）は 2009 年頃からフィールドルータ（FR）（株式会社クロスアビリティ，東京）とそれを用いた遠隔地の圃場における気象・土壌情報モニタリングシステム開発を続けている．FR は 6W 程度の太陽電池パネルで稼働するインターネット通信装置である．FR は Bluetooth などの通信機能を付随した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現地画像とともにインターネットサーバ上に 1 日 1 回転送・保存する．FR を用いれば，土壌水分センサを接続したデータロガーを圃場に多点設置することでセンサネッ

[1]Faculty of Engineering, Gifu University, 1-1 Yanagido, Gifu city, Gifu, 501-1193, Japan, Corresponding author:小島悠揮, 岐阜大学工学部.
[2]EDAYA ARTS CORDILLERA Corp., Tuding proper, Tuding, Itogon, Benguet 2604, Philippines.
[3]X-ability Co., Ltd., 4-1-5 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-0033, Japan.
[4]AINEX Co., Ltd., 2-16-1 Minamikamata, Ota-ku, Tokyo, 144-0035, Japan.
[5]Graduate school of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo, 1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8657, Japan.
2016 年 2 月 4 日受稿　2016 年 6 月 20 日受理

トシステムとして多点土壌水分量の準リアルタイムモニタリングが可能になる．

FR と似た機能を持つ装置として，溝口ら（2003）は Soil Information Monitoring System using Cellular Phone（SIMS-CP）を，Fukatsu and Hirafuji（2005）はフィールドサーバ（FS）を開発した．特に FS は現地画像と各種気象および土壌データを，インターネット回線を通じてリアルタイムでサーバ上に転送するといった FR とほぼ同じ機能を持っている．小島ら（2015）は，2008 年に FS を用いた高冷地キャベツ畑における気象環境と，ある一地点の土壌環境（土壌水分量，地温，土壌電気伝導度）のモニタリングを行い，現地画像が数値データに付与されることの有益性とリアルタイムモニタリングの利便性を実証している．一方で，FS は消費電力が大きいこと，またデータ通信にインターネット回線を用いるため，現地にインターネット回線を引く必要があることが問題であった．小島ら（2015）も FS へ安定した電源供給ができず，機能停止に陥りデータが欠損したことを述べている．FS および SIMS-CP と比較して，FR は消費電力が少ないため太陽電池パネルで安定して稼働できる点，様々なデータロガーに接続可能である点，システムのセットアップが簡単である点，携帯電話回線を用いるため現地にインターネット回線を引く必要がない点などの特徴があり，海外を含む遠隔地での設置・運用に適していると考えられる．

FR を用いたセンサネットシステムを用いれば，適切な土壌センサにより圃場内の地温，土壌水分や肥料濃度のばらつきなどが準リアルタイムで把握でき，局所的な作物の生長不良の予測やそれへの対応が可能となると思われる．また撮影される現地画像により，作物の生長や地表面状態などの圃場環境をより詳細に把握できると考えられる（小島ら, 2015）．しかしながら，これまで FR を用いたセンサネットシステムの多点土壌水分量測定のデータの質や，問題点についての議論はされてこなかった．そのため，FR を用いたセンサネットシステムの有効性を，実際の測定結果に基づいて検証する必要がある．そこで本研究では，2009 年に冬季の高冷地キャベツ圃場において行った実証実験を事例とし，FR を用いたセンサネットシステムの有効性および問題点を検証することにした．特に FR を用いたセンサネットシステムが，多地点における土壌水分動態を把握するのに十分なデータの質とデータ回収率を保持しているか，という点に注目して検証を行った．

2. 実験方法

2.1 試験地

2009 年 12 月 4 日に群馬県吾妻群嬬恋村のキャベツ畑（N: 36°30’49.42”, E: 138°27’36.71”）に FR を用いたセンサネットシステムを導入した．2009 年 12 月 5 日からキャベツ播種前の 2010 年 4 月 24 日まで，FR を用いたセンサネットシステムの実証試験を行った．対象圃場は約 257 m × 55 m の長方形で，南方向に緩く傾斜し（傾斜角 1.5°），北西側長辺は道路に接し，その他の辺は切土された法面になっている（Fig. 1（a））．また対象圃場は 2009 年秋のキャベツ収穫後，11 月に耕起後整地されていた．実験開始前に対象圃場の中央（Fig. 1（a）の FR 設置箇所）付近で土壌を採取し，土性，強熱減量，乾燥密度を測定した．また同箇所で土壌水分センサの校正用土壌も採取した．このとき，圃場中心部の土壌特性が圃場全体の土壌特性を代表すると仮定した．対象圃場の土壌は，黒ボク土（砂質ローム；砂 69 %，シルト 22 %，粘土 9 %，有機物含量 0.26 kg kg^{-1}）で，乾燥密度は 0.59 Mg m^{-3} であった．

2.2 センサネットシステム

Fig. 2 に本研究で用いたセンサネットシステムの概要を示す．FR は小型 PC（Linux），USB モデム，USB Bluetooth ドングル，小型バッテリ，チャージコントローラー，太陽電池パネル，タイマー，ステータスランプ，Bluetooth カメラで構成されている．FR には結露対策としてフィルター付き換気口が取り付けられていた．土壌水分センサとデータロガーは Decagon Devices Inc.

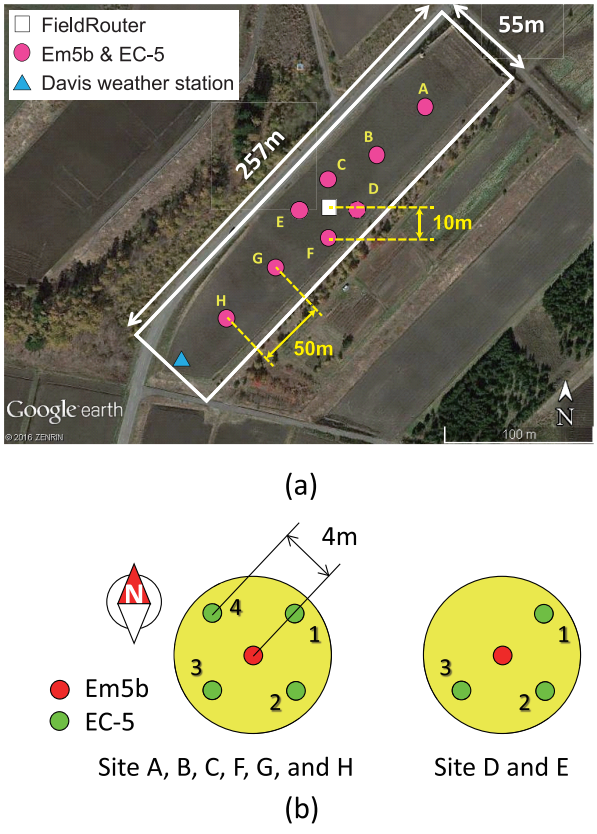


Fig. 1 （a）圃場内の各機器設置箇所（Google Earth に加筆），（b）Em5b と EC-5 の位置関係．A，B，C，F，G，H 地点の Em5b には 4 本の EC-5 を，D と E 地点の Em5b には 3 本の EC-5 を用いた．
(a) Locations of equipment in the experimental field (information added on Google Earth), and (b) locations of EM5b and EC-5 at each site. Four sensors were used at sites A, B, C, F, G, and H, and three sensors were used at sites D and E.

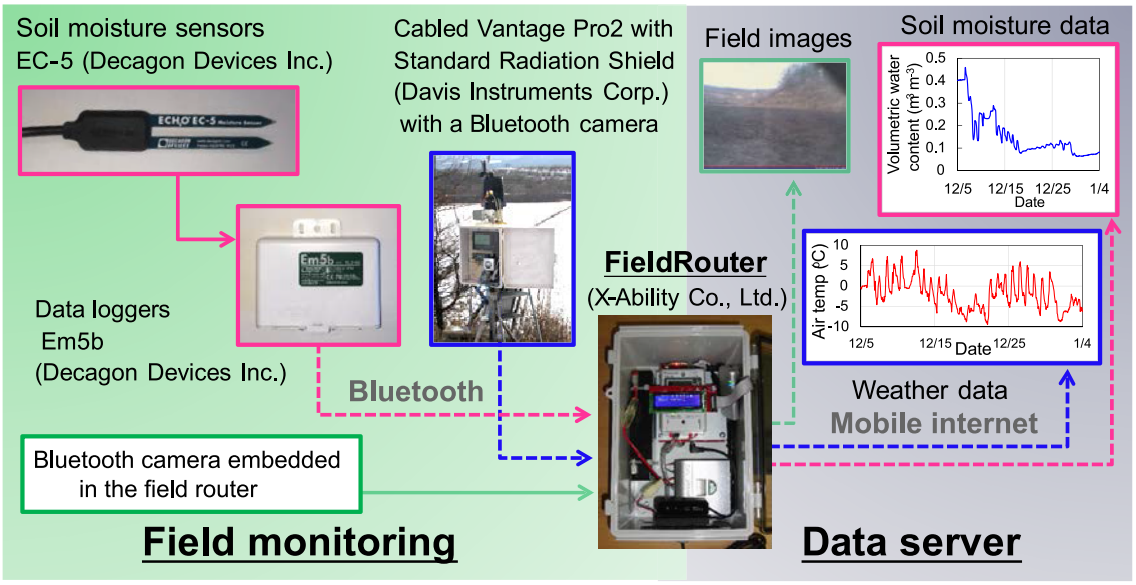


Fig. 2　本研究で使用したフィールドルータを用いたセンサネットシステム．破線は無線通信を表す．
The sensor network system with the FieldRouter applied in this study. The broken lines indicate wireless communication.

(Pullman, WA, USA) の EC-5 (プローブ長 5 cm) と Em5b を採用した．対象圃場の形状とセンサネットシステム設置個所 8 地点（A，B，C，D，E，F，G，H）を Fig. 1 (a) に示す．圃場の中央に FR を設置し，そこを中心に長辺方向に 50 m 間隔で 4 台，FR から 10 m の位置に 4 台の計 8 台の Em5b を設置した．それぞれの Em5b には Bluetooth を搭載したネットワークアダプタ（株式会社クロスアビリティ，東京）が接続されており，FR と無線通信ができる．FR とネットワークアダプタは見通し 300 m まで通信可能である．ネットワークアダプタには小型バッテリーと太陽電池パネルによって電源が供給される．Fig. 1 (a) の A，B，C，F，G，H 地点の Em5b には 4 本の，D と E 地点の Em5b には 3 本の EC-5 を接続した．Em5b を中心に 4 m 離れた，北の方角から 45°，135°，225°，315° の位置を EC-5 の設置場所とした (Fig. 1 (b))．それぞれの EC-5 は，プローブ部分が地表面から 4 cm から 9 cm の深さに設置されるように鉛直方向に挿入された．EC-5 では出力値 RAW が 1 時間ごとに測定され，Em5b に記録される．Em5b と同様にネットワークアダプタを接続した気象計，Cabled Vantage Pro2 with Standard Radiation Shield（Davis Instruments Corp., Hayward, CA, USA, 以降 Davis 気象計）を圃場南西脇に設置し，気象データ（気温，湿度，降水量，気圧，風速，風向）を 1 時間ごとに測定した．Davis 気象計設置箇所にはネットワークアダプタを接続した Bluetooth カメラ（Optieyes, FD Digital Pte. Ltd., Singapore）を設置し，毎日正午に圃場を撮影するように設定した．また，FR の Bluetooth カメラも毎日正午に圃場を撮影した．Optieyes は北東方向を，FR 内蔵のカメラは南西の方向をそれぞれ撮影した．これらの圃場画像と土壌水分のデータは 1 日 1 回 FR によって回収され，CSV 形式でインターネット上に保存された．また，FR によるデータ回収時に，データロガー Em5b のバッテリー残量が記録された．

ここで，FR によるデータ回収方法の詳細を説明する．FR は，毎日正午から 30 分間のみ電源が入るようにタイマーで設定されている．電源が入った FR は，圃場内のネットワークアダプタの信号を探索し，発見したデータロガーと Bluetooth カメラの中から，前回のデータ転送日時が古いものから順番にインターネット上へ転送する．このとき，各データロガー内に蓄えられた全データを転送するように設定されている．これにより 30 分以内に全データを回収できない場合でも，数日単位で見れば安定して各データロガーのデータを回収できる．また，FR を用いたセンサネットシステムでは，通信によるデータの回収に失敗した場合でも，データロガー内に測定データが残るため，後日フィールドにてデータロガーから直接データを回収することが可能である．

FR によって回収された EC-5 の出力値 RAW は，次の校正式によって体積含水率 θ に換算した．

$$\theta = 0.0008\mathrm{RAW} - 0.2426 \qquad (1)$$

この校正式は，圃場で採取した攪乱土壌を 2 mm 篩を通過させ，乾燥密度 0.59 Mg m^{-3}，体積含水率 θ = 0.16 ～ 0.71 m^3 m^{-3} に調整して容積 160 cm^3 の円筒容器（内径 4.9 cm，高さ 8.5 cm）に充填し，その上から EC-5 を鉛直に挿入して RAW を測定することで得た．

3. 結果と考察

3.1 センサネットシステムにより観測された気象条件と土壌水分の経時変化

各地点の土壌体積含水率を気温，日射量，降水量とともに Fig. 3 に示す．Fig. 3 の日射量は，Davis 気象計に

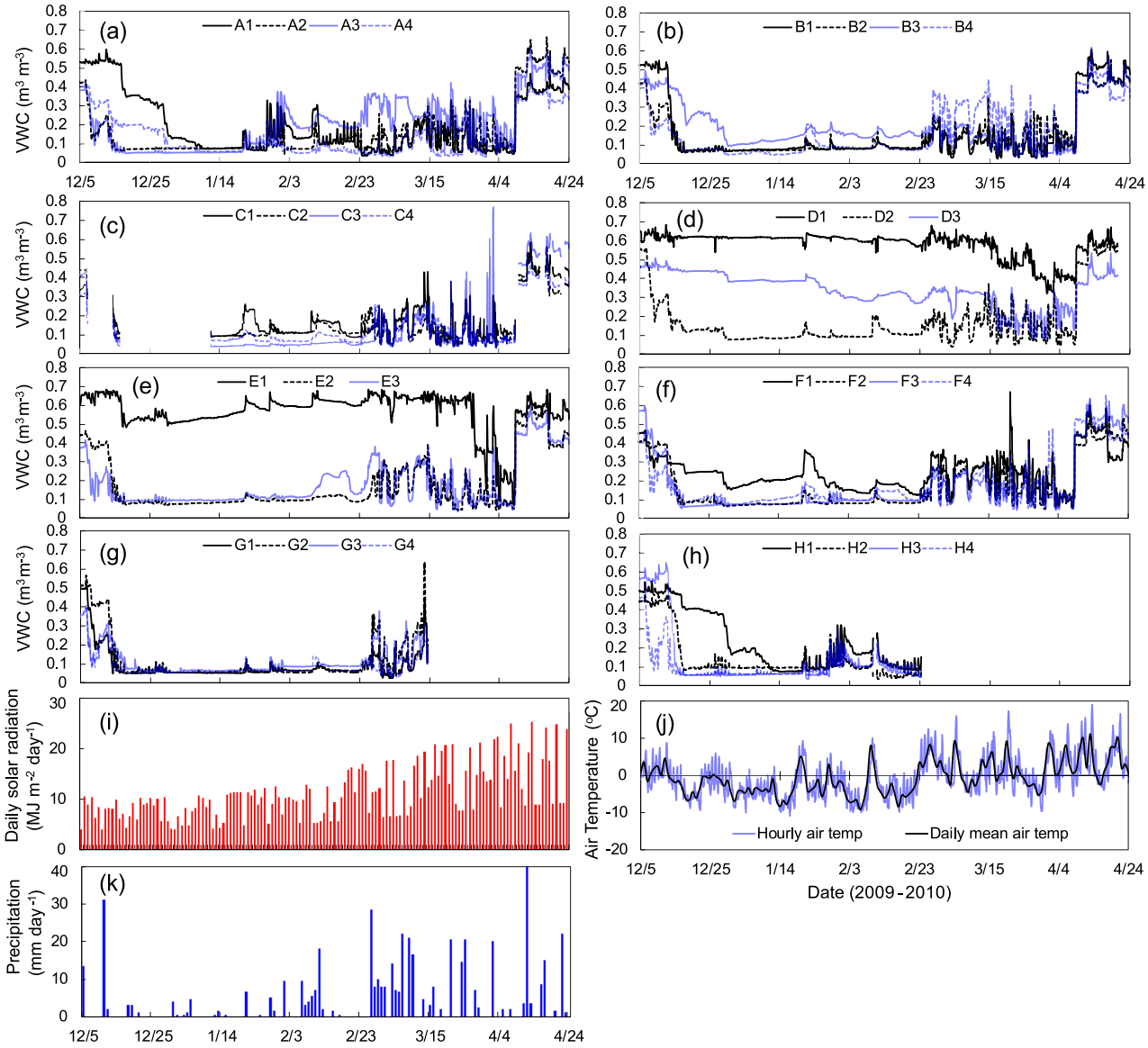


Fig. 3 （a）～（h）それぞれ地点 A から H の体積含水率（VWC），（i）アメダスデータから推定した日積算日射量，（j）Davis 気象計によって測定された気温と日平均気温，（k）降水量（アメダスデータ）．
(a-h) volumetric water contents (VWC) at site A–H, (i) Daily cumulative solar radiation estimated from sunshine duration provided by the AMeDAS, (j) air temperature measured with a Davis weather station , and daily mean air temperature, and (k) daily precipitation (AMeDAS).

搭載された日射量センサが測定期間を通して故障していることが見つかったため，圃場近くに位置するアメダス田代気象観測代の日照時間から，Allen et al. (1998) に従い推定した．また，降水量も Davis 気象計のデータではなくアメダス田代気象台のデータを用いた．これは，Davis 気象計には融雪用のヒーターが内装されておらず，降雪量および降雪時期を正確に測定できなかったためである．測定期間中，気温が 0 ℃を下回ったため，土壌凍結が起こっていたと考えられる．氷の比誘電率は 3 で，液状水の比誘電率 80 に対して極めて小さい（Noborio, 2001）．そのため，土壌が凍結すると，土壌の比誘電率は小さくなる．凍土中にもわずかに液状水が存在するため，土壌が凍結した場合 EC-5 が測定する体積含水率は体積当たりの液状水量となる．氷の比誘電率の影響も多少存在するため（Watanabe and Wake, 2009），式（1）を適用すると，液状水量は若干過大評価されると考えられるが，今回は観測期間全てに式（1）を適用した．これ以降，体積含水率は単位体積当たりの液状水量を意味することとして議論を進める．

ほとんどの地点で共通して測定開始後 2 週間から 3 週間ほどで体積含水率は 0.10 m^3 m^{-3} 付近まで落ち込み，A 地点と H 地点では 2010 年 1 月 20 日を境に，それ以外の地点では 2010 年 2 月 23 日を境に激しい増減を示した．その後，2010 年 4 月 8 日以降，全地点で高い体積含水率を維持した．測定開始 2 ～ 3 週間後の体積含水率の急激な低下は，土壌凍結によるものと思われる．

詳細にみると，測定開始直後から気温は 0 °C 付近で停滞し，夜間には −5°C 近くまで下がっていたため，多

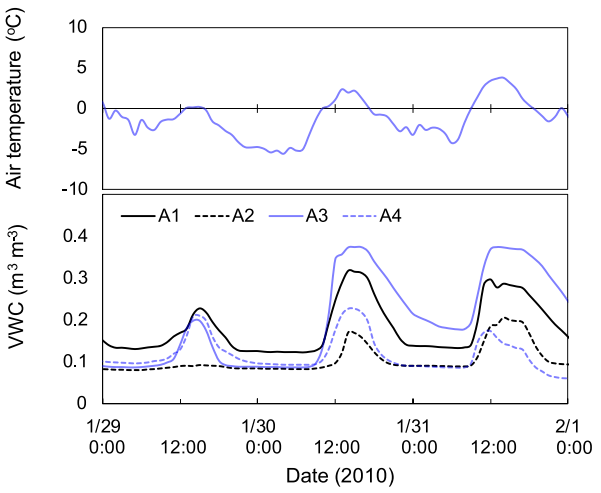


Fig. 4　2010 年 1 月 29 日から 2 月 1 日までの気温と地点 A の体積含水率（VWC）変化.
Air temperature and volumetric water content (VWC) at site A from 1/29/2010 to 2/1/2010.

くの地点で部分的な土壌凍結による体積含水率の落ち込みが生じたと考えられる．また、日平均気温が負の値になる 2009 年 12 月 13 日以降は、土壌凍結に起因する体積含水率の落ち込みが一気に進行した．しかし体積含水率の落ち込みの進行具合は各地点，各センサ埋設位置によって異なり，例えば A 地点では A2，A3 が 12 月 15 日に体積含水率が 0.1 付近まで低下したのに対し，A4 は 12 月 30 日まで，A1 では 2010 年 1 月 11 日まで体積含水率 0.1 付近への低下が見られなかった．一方、B 地点では A 地点よりも全体的に体積含水率の落ち込みの進行が速いが、B3 では 12 月 30 日頃まで体積含水率 0.1 付近への低下が見られなかった。このように A1、A4、B3 のセンサで体積含水率が 0.2 ～ 0.3 付近の値で停滞したのは、凍結前線が 3 月後半まで鉛直に挿入した EC-5 のセンシング部の深度（4–9 cm）内で停滞したことが原因と考えられる．また，D3 や E1 では，体積含水率の急激な落ち込みは 2010 年の 3 月後半まで見られなかった．このことから，これらの地点では凍結前線が EC-5 のプローブ設置深度である 4 cm まで達していなかったと考えらえる．

A，H 地点の 2010 年 1 月 20 日以降，および B，C，D，E，F，G 地点の 2010 年 2 月 23 日以降の体積含水率の激しい増減は，日中の地温上昇に伴う土壌融解と夜間の再凍結の繰り返しによるものと思われる．Fig. 4 に 2010 年 1 月 29 日から 2 月 1 日までの A 地点の体積含水率を気温と共に示す．この 3 日間の気温は，夜間は氷点下だったが，昼間は 0 °C を超えていた．また，降雪はほとんどなく，ポテンシャル日射量に近い 10 MJ m^{-2} d^{-1} 程の日射が毎日あった（Fig. 3（i））．降雪はなかったものの，Davis 気象計設置箇所にある Bluetooth カメラ画像では，積雪があったことが確認できた（Fig. 5（a））．よって，雪面に十分に日射が与えられ，融雪と地温の上昇が起こっていたものと思われる．このことから，各地点で 1 月もしくは 2 月から見られた激しい体積含水率の増減は，溝口・矢吹（2002）の解釈と同様，地温の日変動に伴う土壌水の凍結・融解の連続および融雪水の浸潤によるものと判断した．

最後に，2010 年 4 月 8 日以降の急激な体積含水率の上昇は，日射量の上昇に伴って日平均気温が正の値を維持しはじめたことにより土壌融解が一気に進行したためと思われる．土壌凍結期間中，土壌は凍結によって透水性が低くなり（McCauely et al., 2002），またマトリックポテンシャルが低下することから凍結層付近に液状水が移動する（Gieselman et al., 2008）．そのため，土壌融解時にはどの地点でも高い体積含水率が見られたと考えられる．FR の Bluetooth カメラにより撮影された地表面画像も，2010 年 2 月まではほとんどの期間圃場は積雪で覆われていたのに対して，3 月以降は圃場全体が積雪に覆われた状態と融雪により土壌が露出した状態が交互に繰り返されていたことを示しており（Fig. 5（b–e）），土壌の融解が 3 月から 4 月初旬にかけて進んだことを裏付けている．なお，今回 FR を用いたセンサネットシステムで測定された全データはインターネット上で閲覧可能である（http://data01.x-ability.jp/cgi-bin/FieldRouter/FRReport.cgi?dir=/FieldRouter/vbox0005/）．

このように，各測定地点，さらには数メートル離れたセンサ間であっても，体積含水率とその変化傾向は大きく異なることがわかった．また，土壌凍結・融解による体積含水率の落ち込み時期や落ち込みの進行具合も地点によって大きく異なることが示された．FR の Bluetooth カメラによって撮影された 2010 年 3 月 27 日から 4 月 3 日までの圃場の地表面画像からも，積雪が 4 月 3 日に向かってパッチ状に徐々に融解する様子が確認できた（Fig. 5（e–h））．各地点の位置関係を基に体積含水率を整理すると，圃場中央付近にある D3，E1，F1 などにおいて，他地点と比べて高い含水率が観測されていたことがわかる．この原因として，センサ設置作業による土壌の圧縮が挙げられる．センサ設置時，圃場中央に集中して多くのセンサを設置したため，中央付近の往来頻度が高くなり，このことで土壌が圧縮されたと考えられる．土壌は圧縮されると熱伝導率が高くなる．このため，圃場中央付近では地中の熱が地表面近くに伝わりやすくなり，土壌凍結が軽減されたと考えられる．

3.2 システムの稼働状況とデータ欠損の原因

FR は測定期間を通して比較的安定して稼働していたが，データの欠損，カメラ撮影の不具合などがしばしば発生した．体積含水率のデータでは最小で 1 時間分のデータ欠損から，最大で丸一日ほどのデータ欠損までが見られた．FR を用いたセンサネットシステムでは，データの回収に失敗した場合でも，翌日以降のデータ回収時に再度全データが回収されるよう設定されている．よって頻繁に見られたデータ欠損は，通信エラーによるものではないと考えられる．FR を用いたセンサネットシステムでは，データ回収時に Em5b のバッテリー残量も

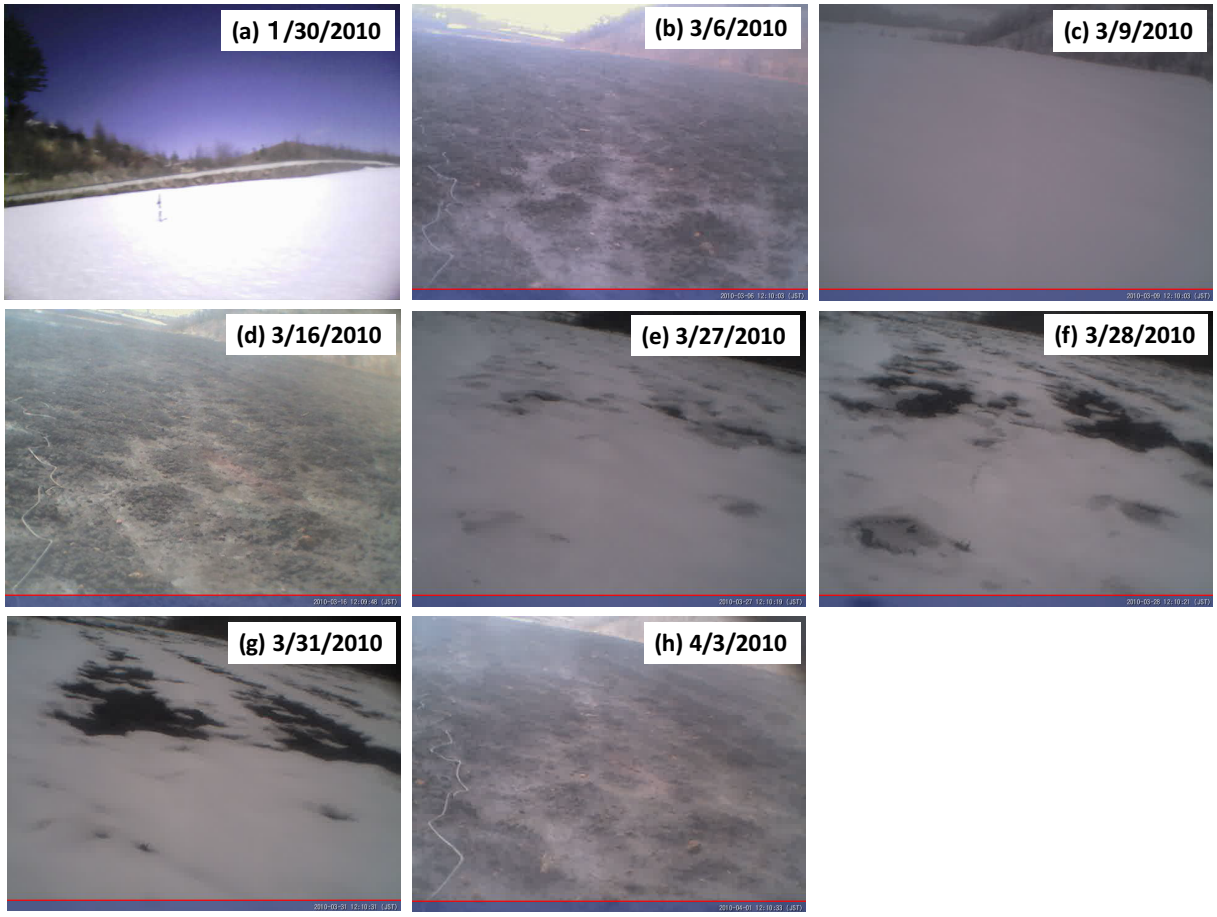


Fig. 5　FR を用いたセンサネットシステムによって撮影された現地画像．（a）は Davis 気象計設置付近にある Bluetooth カメラで撮影した圃場，（b）～（h）は FR の Bluetooth カメラで撮影した地表面．白色は雪面，黒色は露出土壌．
Selected images of the (a) field and (b–h) soil surface captured with the sensor network system using the FieldRouter. The image (a) was taken with the Bluetooth camera with the Davis weather station, and the others were taken with the Bluetooth camera with the FR.

記録される．各 Em5b のバッテリー残量を確認したところ，どの Em5b も十分な残量を示していたため，バッテリーの消耗による欠損ではないことがわかった．C 地点の Em5b では 1 週間から 3 週間程度（2009 年 12 月 6 日 ～ 12 月 14 日，12 月 16 日 ～ 2010 年 1 月 11 日，4 月 8 日 ～ 4 月 9 日など）の，他地点と比較して長期間のデータ欠損が高い頻度で見られた．C 地点の Em5b では乾電池と測定回路の接触不良が発見されたため，Em5b への電力供給が不安定になっていたと思われる．よって同様に他の地点の欠測部分でも乾電池による電力供給が一時的に不安定になったため欠測したと考えられる．接触不良の主な原因は，Em5b の電池ボックスの腐食の可能性が高い．一方で，D 地点では 2010 年 4 月 20 日以降，G 地点では 2010 年 3 月 14 日以降，そして H 地点では 2010 年 2 月 23 日以降データが欠損した．実験終了日までデータが再度回収されることがなかったため，この 2 地点ではネットワークアダプタに問題が生じたと思われる．可能性として，太陽電池パネル上の積雪などにより，ネットワークアダプタのバッテリーが長期間の無充電状態に陥り，過放電となったことが挙げられる．過放電になると，再度太陽電池パネルによる発電が行われたとしても，内部バッテリーが充電されなくなる．Em5b のネットワークアダプタには，FR に搭載されていたようなチャージコントローラーが入っていなかったため，この過放電が発生したと思われる．

二つの Bluetooth カメラで撮影した現地画像も，時折 1 日から数日単位での欠損が見られた．Davis 気象計設置箇所にある Bluetooth カメラの画像欠損の理由としては，太陽電池パネルの発電量不足に由来する FR の電力不足もしくは Bluetooth カメラのネットワークアダプタの電力不足の 2 つが考えられる。データを詳しく見ると、この画像欠損には画像損失のみが単独で発生している場合と FR によるデータの未回収も同時に発生している場合の双方が確認できた。前者は Bluetooth カメラのネットワークアダプタの電力不足、後者は FR の電力不足であると思われる。また、FR に搭載された Bluetooth カメラは FR 起動時に FR と同期して起動するようになっているが、その起動が不安定であったことが分かった。よって，FR の Bluetooth カメラの画像欠損は起動の失敗もしくは FR の電力不足によるものであると思われる．Davis

気象計は測定期間を通してデータが欠損することはなかった．

Table 1 に実験期間中のデータ取得率と，原因別のデータ欠損率についてまとめた．Bluetooth カメラはデータ送信ができなかった場合に画像データを保存するシステムが搭載されていなかったため，50 % 付近の低い取得率となった．FR に搭載された Bluetooth カメラは，全欠損が FR に由来していた．一方で Davis 気象計と同箇所に設置した Bluetooth カメラ（Optieyes）は，欠損データの約半分に当たる 28 % がネットワークアダプタの電力不足に由来し，残り半分に当たる 23 % が FR に由来していた．一方で，Em5b データロガーのデータ取得率および欠損原因は，個体差が大きく出る結果となった．A，B，D，E，F 地点のデータロガーでは乾電池の電力供給に由来するデータの欠損が 1 % 未満の割合で起きていたが，期間中のほぼ全てのデータを回収できた．また，G と H 地点でもそれぞれ 3 % と 2 % の小さな割合でデータロガー由来の欠損が起きていた．一方で，乾電池と回路の接触不良が見つかった C 地点では，31 %と大きな割合で，データロガー由来の欠損が見られた．また，ネットワークアダプタが過放電によって機能停止したと思われる D，G，H 地点では，ネットワークアダプタ由来のデータ欠損がそれぞれ 3 %，29 %，43 % となった．このことから乾電池の接触とネットワークアダプタの安定稼働が FR を用いたセンサネットシステムには重要であると考えられる．

3.3 システムの信頼性向上に向けた今後の対策

3.2 で明らかになった問題点を基に，フィールドルータの改良が進められている．今回ネットワークアダプタが機能停止に陥った過放電対策に，チャージコントローラーの搭載を進めている．本研究ではデータロガーのバッテリー残量のみをモニターしていたが，ネットワークアダプタと FR のバッテリー残量もインターネット上で知ることができるようシステムを変更中である．また，ネットワークアダプタの機能停止をいち早く検出するために，数日間通信が途絶えた場合に，警告を発するシステムを FR に搭載予定である．さらに，今回のような積雪地帯での冬季測定には，太陽電池パネルの発電量が小さくなる問題が挙げられる．これに対しては，より大きな太陽電池パネルを使用する，太陽電池パネルを二枚付けにする，また積雪対策で雪面に向けた太陽電池パネルを併設するなどの対策が可能である．乾電池による電力供給が原因で Em5b の欠測が生じた問題に対しては，Em5b の上位互換にあたる Em50 を使用することで回避することが可能である．Em5b と Em50 では，電池ボックスの構造に違いがあり，Em5b ではコイルばねを，Em50 では板ばねを電池接点用に使用している．板ばねはコイルばねと比較して接触抵抗が低く腐食に強い．同様のシステムで Em50 を使用した場合では，このような現象は見られていない．

4. おわりに

本研究では，FR を用いたセンサネットシステムの有効性と問題点を検討するために，2009 年冬季に裸地圃場にて行われた実証試験を事例に分析を行った．FR を用いたセンサネットシステムによって，冬季の多点の土壌水分量の変動を捉えることができていた．特に土壌の凍結・融解による土壌水分量の変化は圃場内において，土壌特性と地表面特性の影響によって非常に複雑になることが明らかとなった．

FR を用いたセンサネットシステムでは，データロガーの乾電池による電力供給が不安定になった際に欠測が起こること，またネットワークアダプタがバッテリーの過放電によって機能停止すること，の二つの要因でデータ欠損が起きることが分かった．データの回収率は二つの Bluetooth カメラ，また Em5b データロガーの各個体によって異なったが，平均すると Bluetooth カメラで 53

Table 1　FR を用いたセンサネットシステムの機器毎のデータ収集率と各要因による欠損率．
ハイフンは該当項目が存在しないことを意味する．
Percentages of data collection and missing of each equipment in the sensor network system using the FieldRouter. The missing rates are listed with the causes. Hyphens indicate that there is no corresponding content.

	Bluetooth camera		Soil moisture logger（Em5b）							
	FR	Optieyes	A	B	C	D	E	F	G	H
	%									
Collection rate	55	49	99	99	69	96	100	99	68	55
missing due to datalogger	-	-	1	1	31	1	0	1	3	2
missing due to Network Adapter	-	28	0	0	0	3	0	0	29	43
missing due to FieldRouter	45	23	-	-	-	-	-	-	-	-

%，データロガーで 86 % だった．FR を用いたセンサネットシステムは，今回明らかになった問題点を基に改良が進められている．なお，今回は寒冷地で実験を行ったため，バッテリーの速い消耗や，積雪による太陽電池パネル発電量の減少などの障害が生じやすかったと考えられる．よって，夏季や平野部ではより安定した測定が可能であると思われる．

FR を用いたセンサネットは本研究の成果に基づいて現在フィールドモニタリングシステム（FMS；溝口・伊藤, 2015）として，日本各地や海外に展開中である．今後、圃場の精密水分管理手法として大いに役立つと期待される．

謝辞

本研究は科学研究費補助金 基盤研究 B（8380140）およびデータ統合・解析システム DIAS（文部科学省）の補助を受けた．

引用文献

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M. (1998): Crop evapotranspiration — Guidelines for computing crop water requirements — FAO irrigation and drainage paper 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

Delin, K.A., Jackson, S.P., Johnson, D.W., Burleigh, S.C., Woodrow, R.R., McAuley, J.M., Dohm, J.M., Ip, F., Ferré, T.P.A., Rucker, D.F. and Baker, V.R. (2005): Environmental studies with the sensor web: Principles and Practice. Sensors, 5: 103–117.

Entekhabi, D., Njoku, E.G., O'Neill, P.E., Kellogg, K.H., Crow, W.T., Edelstein, W.N., Entin, J.K., Goodman, S.D., Jackson, T.J., Johnson, J., Kimball, J., Piepmeier, J.R., Koster, R.D., Martin, N., McDonald, K.C., Moghaddam, M., Moran, S., Reichle, R., Shi, J.C., Spencer, M.W., Thurman, S.W., Tsand, L. and Van Zyl, J. (2010): The soil moisture acture passive (SMAP) mission. Proc. IEEE, 98: 704–716.

Fang, B., Lakshmi, V., Bindlish, R., Jackson, T.J., Cosh, M. and Basara, J. (2013): Passive microwave soil moisture downscaling using vegetation index and skin surface temperature. Vadose Zone J., 12(4). doi: 10.2136/vzj2013.05.0089

Fukatsu, T. and Hirafuji, M. (2005): Field monitoring using sensor-nodes with a web server. J. Rob. Mechatron., 17: 164–172.

Gieselman, H., Heitman, J.L. and Horton, R. (2008): Effect of hydrophobic layer on the upward movement of water under surface freezing conditions. Soil Sci., 173: 297–305.

小島悠揮, 三石正一, 溝口 勝 (2015): 気象・土壌観測データと現地画像をリンクした農地 ICT モニタリングの有効性 — 高冷地キャベツ畑における解析事例. 土壌の物理性, 131: 5–13.

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.

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): 3–6.

溝口 勝, 三上正洋, 石井 悟 (2003): 携帯電話を利用した土壌情報モニタリングシステム. 土壌の物理性, 92: 25–30.

溝口 勝, 矢吹裕伯 (2002): 積雪寒冷地における地温変化と土壌の凍結融解過程. 農土誌, 70: 321–324.

MacDonald, J.M., Korb, P. and Hoppe, R.A. (2013): Farm size and the organization of U.S. crop farming. Economic Research Report. No. 152.

McCauley, C.A., White, D.M., Lilly, M.R. and Nyman, D.M. (2002): A comparison of hydraulic conductivities, permeabilities, and infiltration rates in frozen and unfrozen soils. Cold Reg. Sci. Technol., 34: 117–125.

Noborio, K. (2001): Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review. Comput. Electron. Agr., 31: 213–237.

Pierce, F.J. and Elliott, T.V. (2008): Regional and on-farm wireless sensor network for agricultural systems in Eastern Washington. Comput. Electron. Agr., 61: 32–43.

Shibusawa, S. (2003): Precision farming Japan model. Agr. Info. Res., 12(2): 125–133.

澁沢 栄 (2003): 精密農業の研究構造と展望. 農業情報研究, 12: 259–274.

砂田憲吾, 伊藤 強, 宮野裕二 (1995): 裸地表層土壌水分の空間分布特性. 水文・水資源学会誌, 8: 210–216.

Vellidis, G., Tucker, M., Perry, C., Kvien, C. and Bednarz, C. (2008): A real-time wireless smart sensor array for scheduling irrigation. Comput. Electron. Agr., 61: 44–50.

Watanabe, K., and Wake, T. (2009): Measurement of unfrozen water content and relative permittivity of frozen unsaturated soil using NMR and TDR. Cold Reg. Sci. Technol. 59: 34–41.

要　　旨

多点土壌水分測定法として，フィールドルータ（FR）を用いた土壌水分センサネットシステムが注目されている．FR は，消費電力が少なく，携帯電話回線を使って安定稼働し，多様な機器・センサに接続できる．本研究では群馬県嬬恋村キャベツ圃場で FR センサネットシステムの実証試験を行い，その有効性を検討した．2009 – 2010 年の冬季に，圃場内に FR，データロガーを 8 カ所，土壌水分センサを 30 カ所に設置し，土壌水分を測定した．その結果 FR を用いたセンサネットシステムにより，凍結と融解によって体積含水率が激しく変化する様子が確認できた．また，凍結融解速度の違いによって小規模圃場内においても体積含水率のばらつきが生じることが把握できた．FR を用いたセンサネットシステムでは，乾電池の不安定な電力供給に起因したデータロガー由来の欠測とネットワークアダプタの機能停止に由来する欠測が見られたが，土壌水分量測定では 86 % のデータを回収でき，システムの有効性をある程度実証できた．本研究の結果を基に FR の改良が進められており，圃場の精密水分管理に向けた利用が期待される．

キーワード：土壌水分，センサネットシステム，フィールドルータ，土壌凍結融解