J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 131, p.5 ～ 13 (2015)

論　文
Original Paper

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

小島悠揮[1]・三石正一[2]・溝口　勝[1]

Effectiveness of ICT field monitoring linking field images with soil and environmental data: case of a cold upland cabbage field

Yuki KOJIMA[1], Shoichi MITSUISHI[2] and Masaru MIZOGUCHI[1]

Abstract: The effectiveness of information and communication technology (ICT) monitoring, which links real time field images with soil and environmental data, was evaluated by a case study in a cold upland cabbage field. Soil and weather conditions were measured with the ICT monitoring system in order to understand the water cycle at the cold upland cabbage field. A fieldserver and soil sensors (ECH$_2$O-TE, Decagon Devices) were installed at the cabbage field to measure weather condition, soil temperature, soil moisture, and soil electrical conductivity (EC). Soil moisture at the cabbage field was close to saturation during the cultivation season. Possible reasons for the wet soil conditions are that a hardpan with a small saturated hydraulic conductivity exists at depths of 40–45 cm, and the precipitation rate was much larger than the evapotranspiration rate at the cabbage field. The soil EC revealed that soil solute transfer clearly followed the precipitation pattern. Soil temperature and soil moisture during the winter season showed different diurnal variations depending on snow cover and its melting. The real time field images linked with the soil and weather data provided a more complete description of conditions than could be captured with only soil and weather observations. The ICT monitoring of soil properties and weather conditions was an effective tool for enhancing the understanding of field conditions through the use of real-time field images.

Key Words : information and communication technology (ICT), field monitoring, real time, field image, soil information

1. はじめに

群馬県吾妻郡嬬恋村は，県内の北西部に位置する全国有数のキャベツ産地である．嬬恋キャベツの生産時期は6月下旬から10月下旬までの約4ヶ月間で，農家によっては年2回（夏キャベツ・秋キャベツ）の生産を行っている（丸山，1990）．高冷地でのキャベツ収量は，その年の気象条件に強く影響される．凶作時のみならず，豊作時に価格調整のため大量のキャベツが産地廃棄される問題もあり，安定したキャベツ生産が望まれる（大高，1970；宮地，2006）．この地区のキャベツ栽培は灌漑をしないため，降水量と土壌の保水量が収量変動の大きな要因となっていると考えられる．また多くの圃場が傾斜上に存在しているため，梅雨時，台風期および融雪期の土壌侵食が問題になっている（溝口，2007；溝口・矢吹，2002；須田，2010）．この土壌侵食量は土壌水分量と土壌凍結の有無に強く関係している（Le Bissonnais and Singer, 1992; Cruse et al., 2001）．以上の事象より，嬬恋村キャベツ畑における水循環機構，特に土壌水分量の変動の解明が重要である．

近年，information and communication technology（ICT）を利用した農地のモニタリング（フィールドモニタリング）に注目が集まっている（溝口，2007，2012）．フィールドモニタリングでは，遠隔地においてインターネット経由で圃場の気象・土壌データ，および現地画像などをリアルタイムもしくは準リアルタイムで回収する．圃場にデータロガーを配置し，現場でのデータ蓄積を行う従来の測定法に対して，フィールドモニタリングでは定期的にデータ回収に赴く必要がない．またセンサあるいはロガーの故障により計測が不可能となった際も，従来の計測では検知に時間がかかったのに対し，フィールドモニタリングではそのリアルタイム性から瞬時に検知でき，迅速な対応が可能となる（溝口，2007）．さらに従来の測定項目には無かった現地画像はこれまで数値の土壌・気象データなど個別の物理量から予測されていた現地状況を視覚的に補完できる．例えば，現地作物の生育状態や栽培管理情報などが補完され，結果包括的な現地状況の把握が可能になる．また数値データと現地画像をリンクさせることで，数値データだけでは解析が難しい難解な現象理解に役立つと思われる．

[1]Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo, 1-1-1, Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8657, Japan. Corresponding author：小島悠揮，東京大学大学院農学生命科学研究科
[2]AINEX. Co., LTD. Minami Kamata 2-16-1, Ohta-ku, Tokyo, 144-0035, Japan.
2015年6月19日受稿　2015年9月25日受理

フィールドモニタリングツールの一つにフィールドサーバ（FS）がある．FS は，農林水産省研究プロジェクト「データベース・モデル協調システム」（H13 – H18 年度）の中で，中央農業総合研究センターが開発した小型モニタリングロボットで，複数のセンサ，Web カメラ，無線 LAN モジュールなどの様々な電子機器を搭載したフィールドモニタリング用デバイスである（Fukatsu and Hirafuji, 2005）．FS の研究は主にその開発や改良（Fukatsu et al.，2006；深津ら，2013；深津ら，2014），データ収集や閲覧用アプリケーションの開発（星ら，2007；安川ら，2011；田中ら，2014）など，機能面を焦点としてきた．それに伴い様々な場所に設置・運転されている（Honda et al., 2007; Manzano Jr. et al., 2011）．しかしながら，その有効性, 特に土壌・気象データと現地画像をリンクさせることで得られる情報の有益性について，実際の露地栽培地にて包括的な長期土壌・気象測定事例を用いて検討した例はない．

そこで本研究では，嬬恋キャベツ畑の水循環機構の解析を事例とし，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を検証することを目的とした．

2. 実験方法

群馬県吾妻群嬬恋村のキャベツ畑（E : 138° 28’ 40”, N : 36° 30’ 37”, 標高 1160 m）に FS と土壌センサを設置し，キャベツ栽培期間（夏季）と冬季の 2 回フィールドモニタリングを行った．該当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}）であった．

2.1 夏季モニタリング

2008 年 8 月 3 日から 2008 年 10 月 22 日まで，実験圃場におけるキャベツの播種から収穫に合わせて，夏季のフィールドモニタリングを行った．測定項目は，気象条件（気温・相対湿度・日射量・風速・気圧・降水量），土壌特性（体積含水率・地温・電気伝導度（EC））および現地画像である．気象データは FS に接続された Weather transmitter WXT510（Vaisala, Vantaa, Finland）で測定した．土壌特性の測定には ECH$_2$O-TE（Decagon Devices, Inc., Pullman, WA, USA）を用いた（ECH$_2$O-TE は 2008 年時のセンサで生産終了しており，現在は耐久性と EC 測定精度が向上した 5TE へと改良されている）．埋設深度は 2.5 cm，5 cm，10 cm，20 cm，30 cm，40 cm，50 cm，60 cm である．また，同箇所の地表面から 10 cm の高さに葉濡れセンサ（Dielectric Leaf Wetness Sensor, Decagon Devices, Inc.) を設置し，結露水の発生の測定を行った．気象条件と現地画像は 2 分ごとに，土壌特性と葉濡れは 15 分ごとに測定した．土壌特性および葉濡れデータ回収にはデータロガー Em50（Decagon Devices, Inc.）を用いた．気象データと現地画像は FS によってインターネットサーバ上に保存され，東京大学国際情報農学研究室内にて回収した．夏季モニタリングでは土壌データはデータロガーで保存，回収を行ったが FS を用いて測定した土壌データを遠隔地で回収することも可能である．ECH$_2$O-TE で測定される EC は土壌の見かけの EC（EC$_b$）である．そのため EC$_b$ は Hilhorst et al.（2000）の方法で土壌溶液 EC（EC$_w$）へと換算した（式（1））．

$$\mathrm{EC_w} = \frac{\kappa_p \mathrm{EC_b}}{\kappa_b - \kappa_{\mathrm{EC_b}=0}} \tag{1}$$

ここで，κ_p は水の比誘電率（20°C のときに 80.3），κ_b は土壌の比誘電率，$\kappa_{\mathrm{EC_b}=0}$ は EC$_b$ が 0 となるときの土壌の比誘電率で，乾燥土壌の比誘電率とみなすことができる．ここでは Decagon Devices Inc.（2007）が推奨する $\kappa_{\mathrm{EC_b}=0} = 6$ を使用した．κ_b は ECH$_2$O-TE によって測定されるものを使用した．

また，夏季モニタリング開始前の 2008 年 8 月 2 日に土壌 100 cc コアの採取を行った．100 cc コアの採取はそれぞれ 0 – 5 cm，2.5 – 7.5 cm，7.5 – 12.5 cm，以降 5 cm ずつ 62.5 cm までの深さで行った．採取した土壌コアは研究室に持ち帰り，変水位法にて飽和透水係数を，炉乾にて乾燥密度を測定した．

2.2 冬季モニタリング

2007 年 11 月 19 日から 2007 年 12 月 20 日まで冬季のフィールドモニタリングを行った．冬季モニタリングは土壌凍結融解の発生，それに伴う土壌水の挙動を観測するため春先まで行う予定であった．しかし FS への電源供給が不安定となり 12 月 20 日に機能停止に陥ったため，観測はそれまでとした．測定項目は，夏季モニタリングと同様である．また測定機器も夏季と同様のものを用いたが，ECH$_2$O-TE は異なる深さに埋設した（4 cm, 8 cm，16 cm，32 cm）．また裏返した自作日射計を FS に取り付け，その測定値を日射量で除すことにより地表面の反射係数を推定した．冬季のデータは土壌特性を含む全てを FS によってインターネットサーバ上に保存し，同研究室内で回収した．

2.3 夏季の熱収支および蒸発散量の推定

測定された気象および土壌データを用いて夏季キャベツ畑の熱収支と蒸発散量を，Noborio et al.（1996）の方法により推定した．純放射量 R_n，顕熱輸送量 H，潜熱輸送量 LE は，それぞれ以下のように計算できる．

$$R_n = (1-\alpha)R_s + \varepsilon_s\varepsilon_a\sigma T_a^{\,4} - \varepsilon_s\sigma T_s^{\,4} \tag{2}$$

$$H = -C_a(T_s - T_a)/r_h \tag{3}$$

$$LE = -L(\rho_{vs} - \rho_{va})/(r_v + r_s) \tag{4}$$

ここで，α は地表面の反射係数，R_s は日射量，ε_s と ε_a は地表面と大気の射出率，σ はステファンボルツマン定数（5.26×10^{-8} W m^{-2} K^{-4}），T_a と T_s は大気と地表面の温度（K），C_a は大気の体積熱容量（J m^{-3} K^{-1}），L は水の蒸発潜熱（J kg^{-3}），ρ_{vs} と ρ_{va} は地表面と大気の水蒸気

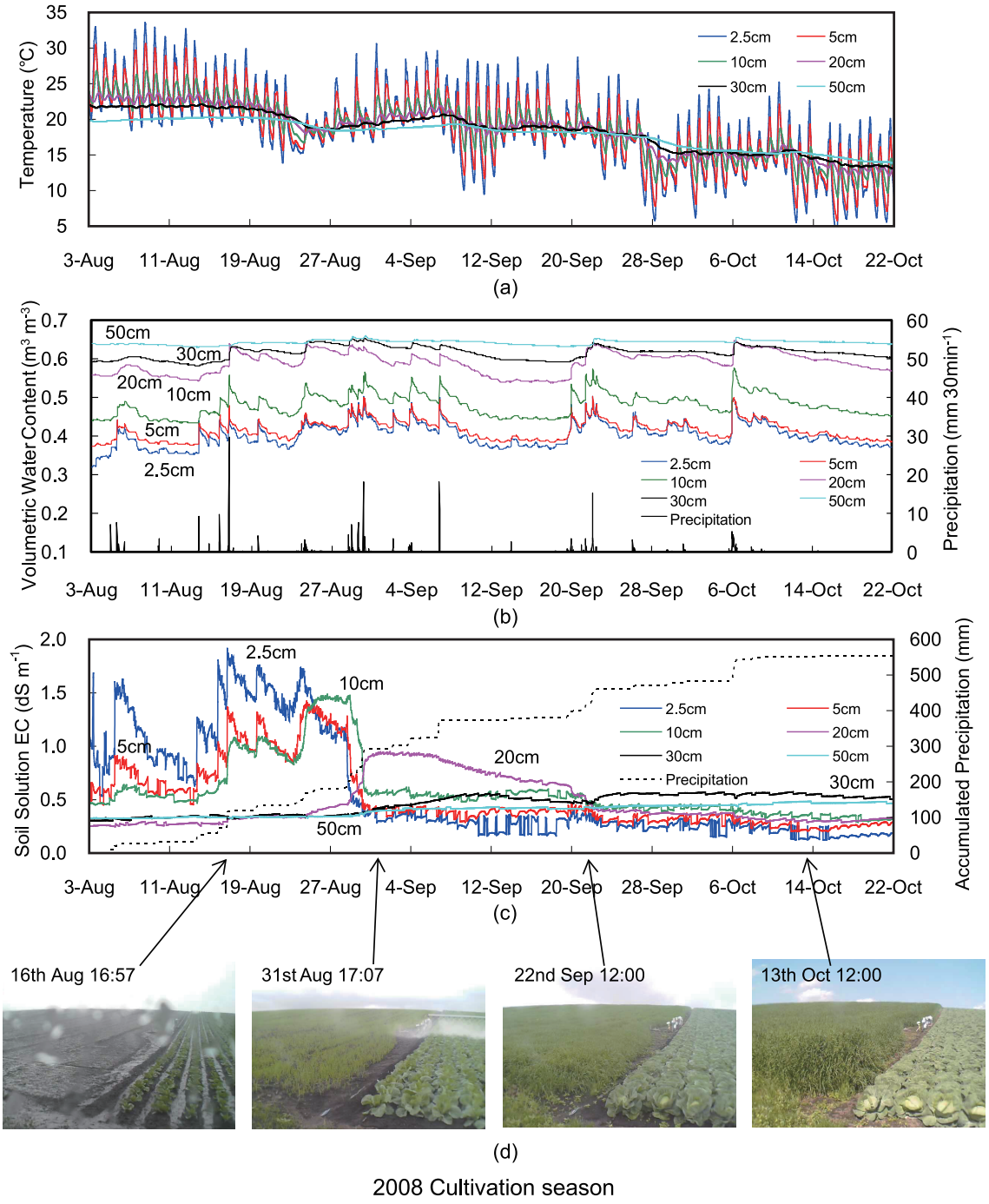


Fig. 1 キャベツ栽培期間の (a) 土壌温度，(b) 体積含水率と降水量，(c) 土壌溶液電気伝導度 (EC_w)，(d) 現地画像．
Soil temperature(a), soil moisture(b), soil solution electrical conductivity (c), and landscape images (d) during the summer season.

密度（kg m^{-3}），r_h，r_v，r_s はそれぞれ熱輸送への空気力学的抵抗，水蒸気輸送への空気力学的抵抗，地表面の水蒸気輸送に対する抵抗である（s m^{-1}）．地中熱流量 G は地温と土壌水分量の鉛直分布より温度積分法（Sauer and Horton, 2005）にて決定した．各熱収支項は地表面の熱収支式によって関連付けられる．

$$R_n + LE + H + G = 0 \qquad (5)$$

式（2），（3），（4）では地表面温度 T_s が未知であるが，式（5）を満たす T_s を求めることで，R_n，H，LE をそれぞれ決定した．決定した LE を体積当たりの水の蒸発潜熱 $\rho_w L$（25°C のとき 2.45 ×10^9 J m^{-3}）で除して蒸発散量 E（m s^{-1}）を推定した．

3. 結果と考察

3.1 夏季モニタリング

Fig. 1 は栽培期間 2008 年 8 月 3 日から 10 月 22 日までの地温，体積含水率，土壌溶液 EC（EC_w）の変化であ

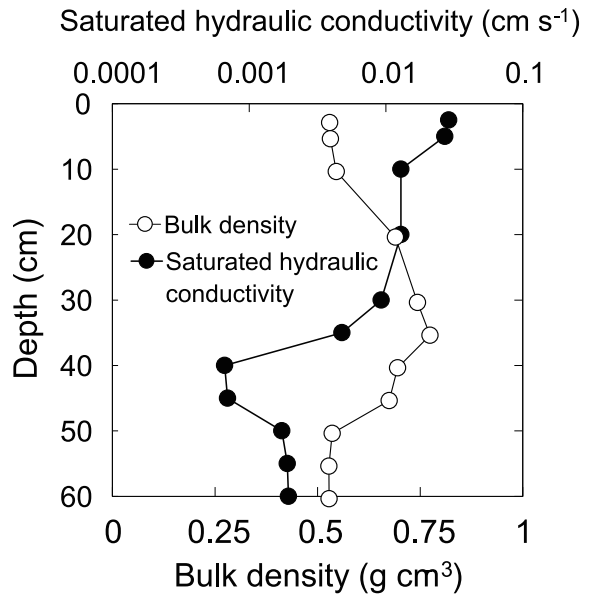


Fig. 2 乾燥密度と飽和透水係数の鉛直分布.
Distribution of bulk density and saturated hydraulic conductivity.

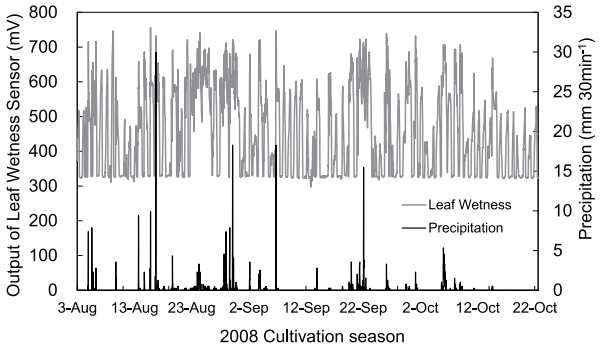


Fig. 3 葉濡れセンサ出力と相対湿度.
Output of leaf wetness sensor and relative humidity.

る．また，FS で撮影された現地画像のうち，特徴的なものを記した．

3.1.1 夏季地温の変化

栽培期間の地温変動では，測定期間を通して地温が低下してゆく様子が確認できた．また，20 cm よりも浅い層では激しい日変動が起きているが，30 cm 以深では顕著な日変動は見られず，ゆるやかに低下していた．2.5 cm の層では，1 日の最高地温が測定初期では 35°C 前後，最低地温が 20°C 前後で，その差が 15°C から 20°C ほどあり，表層近傍では激しい日変動をしていた．

3.1.2 夏季体積含水率の変化

体積含水率は，表層 2.5 cm，5 cm，10 cm までは降雨と蒸発散による激しい水分変動が見られた．一方で下層の 30 cm 以深では激しい変動は見られず，蒸発散と地下浸透によるゆるやかな減少と，時折降雨による若干の上昇が見られた．20 cm 以深の層では，体積含水率が栽培期間を通して 0.55 から 0.75 の大きな値を示した．キャベツ畑土壌の間隙率が 70 % 程度であることを考えると，これは飽和に近い高水分量である．Fig. 2 は圃場で採取した土壌コアから測定した飽和透水係数と乾燥密度の鉛直分布である．Fig. 2 から深さ 20 cm から 45 cm 付近で乾燥密度が上昇し，また飽和透水係数も 30 から 45 cm で低下することから硬盤層が存在しているのがわかる．荒川・東（1995）は嬬恋のキャベツ圃場ではこのような硬盤層が一般的に存在していることを報告しており，この硬盤層によって降雨の地中浸透がはばまれて深度 20 cm から 50 cm 付近の土層が高水分量を維持していると考えられる．また地表面付近の 2.5 cm と 5 cm の体積含水率は，降雨が無い日でも夜間に増加する傾向が見られた．これについては後述の 3.1.4 項内にて考察する．

3.1.3 夏季土壌溶液 EC の変化

土壌溶液 EC は，土壌中の硝酸態窒素など溶質濃度と線形関係があり，溶質の存在量の指標とすることができる（登尾ら，2002）．測定開始から 8 月下旬まで，深さ 2.5 cm，5 cm，10 cm の EC_w は高い値を維持し，降雨や蒸発散に伴う変動を繰り返していたが，8 月 29 日から 8 月 31 日の間に急激に低下した．それに伴い，深さ 20 cm の層の EC_w が増加した．この期間，深さ 20 cm 層の EC_w は積算雨量と同様の挙動をしていることから，降雨によって地表面付近に存在していた溶質が下層に流されたと考えられる．この際の降雨パターンは断続的に高強度であり，このことから降雨の強度と頻度が溶質の移動の重要な要因であると考えられる．

また，8 月 23 日から 8 月 26 日頃まで低強度の降雨が断続的に発生しており，表層の EC_w の急激な低下が起こった 8 月 29 日から 8 月 31 日は，表層土壌の体積含水率が高い状態で維持されていた．このことから，8 月 29 日以前は表層土壌の保水機能が高く，地表面から侵入した降雨は表層土壌に保水され，溶質の押し出しが抑制されていたと推察される．一方で，8 月 29 日から 8 月 31 日は表層土壌の保水機能が小さかったため，押し出し流が発生し，溶質の下層への移動が誘発されたと考えられる．

3.1.4 葉濡れの変化

Fig. 3 にキャベツ栽培期間（2008 年 8 月 3 日 ～ 10 月 22 日）の葉濡れセンサ出力と降水量を表した．葉濡れは降雨の無い日でも 1 日周期で激しく変動していた．Fig. 4 は，降雨が起こらなかった 2008 年 9 月 7 日 12:00 から 2008 年 9 月 11 日 12:00 までの葉濡れと相対湿度の変化である．葉濡れは 18 時から 20 時頃の日没後に上昇を始め，夜間を通して上昇を続ける．そして，日出後の 5 時から 7 時頃に減少に転じ，以降日没まで最低値を維持していた．相対湿度が上昇した後に停滞する時間に葉濡れが上昇していることから，地表面近傍大気の湿度が飽和水蒸気圧近傍に達した際に結露が誘発されていると考えられる．このように嬬恋キャベツ畑では栽培期間を通して夜間に結露が発生していた．Fig. 5 に 2008 年 9 月 9 日から 2008 年 9 月 12 日までの葉濡れセンサ出力，2.5 cm と 5 cm 深における地温と体積含水率を表した．

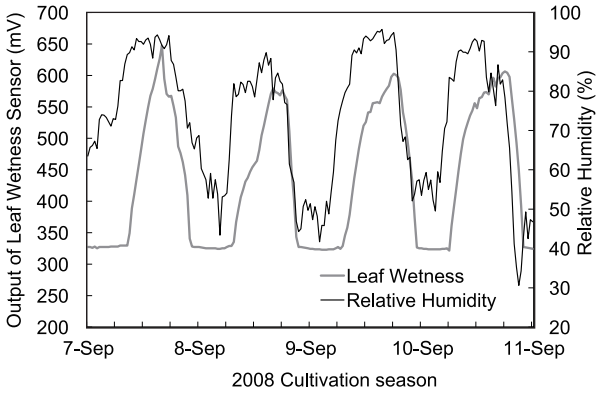


Fig. 4　9 月 7 日から 9 月 11 日まで無降雨期間の葉濡れセンサ出力と降水量.
Output of leaf wetness sensor and precipitation during no rainfall days (9/7/2008 – 9/11/2008).

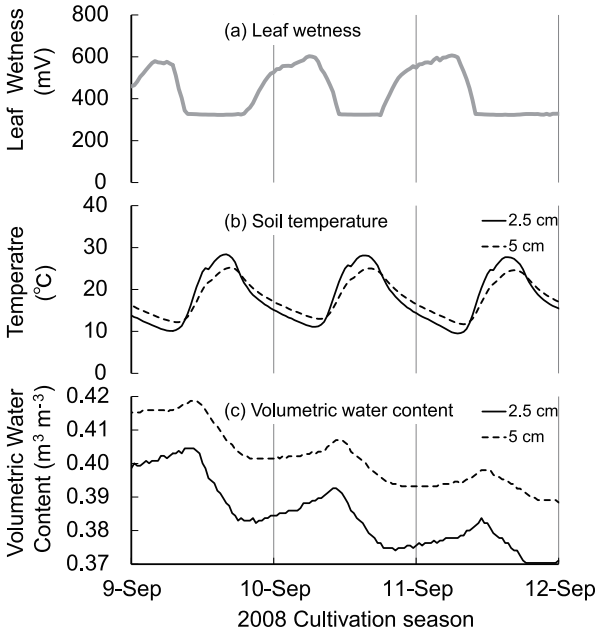


Fig. 5　9 月 9 日から 9 月 12 日まで葉濡れセンサ出力，地温と体積含水率（2.5 cm と 5 cm 深）.
Output of leaf wetness sensor, soil temperature, and volumetric water contents at 2.5 cm and 5 cm depths during 9/9/2008 – 9/12/2008.

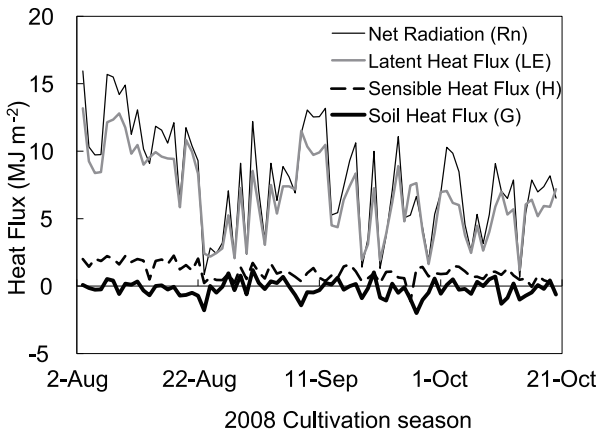


Fig. 6　計算した地表面の熱収支項.
Estimated surface energy balance.

夜間，葉濡れセンサの出力上昇に伴ってそれぞれの深さの体積含水率が若干の時間遅れと共に上昇している．今回使用した Decagon Devices Inc. 製の土壌水分センサには，温度依存性が指摘されている（齊藤ら，2008）．しかしながら，体積含水率の増加開始時刻および増加停止時刻と地温のピーク時刻が異なっていたため，表層土壌の夜間の体積含水率の上昇は，結露によって水分が土壌に供給されていると考えられる．

3.1.5 夏季キャベツ畑における熱収支・水収支

Fig. 6 にキャベツ栽培期間の 1 日あたりの熱収支の変化を表した．栽培期間を通して R_n の値は減少傾向にあった．また G は正の値よりも負の値をとる日のほうが多く，期間を通して土中から地表面方向へのエネルギーの流れが優位であった．また，LE と H では，H に対して LE の値がかなり大きな値を示し，栽培期間を通して R_n の 70 ～ 90 % が LE に分配されていた．土壌が湿潤状態の場合，R_n の LE への分配率は 70 ～ 80 % 程度になる（石渡・小林，2003）ことから，栽培期間を通して土壌が湿潤状態を維持していたことがわかる．

地表面の熱収支から推定された栽培期間の積算蒸発散量は 201.4 mm であった．栽培期間の積算降水量は 332.7 mm で，蒸発散量を大きく上回っていた．これは 30 cm という浅い土層が飽和に近い水分量を保っていたことをよく表している．気象庁アメダスの田代観測点に基づくと，2008 年は例年よりもやや降水量の少ない年であった．また栽培期間（8 月 – 10 月）の田代の積算降水量 432 mm に対し 2000 年以降の平均は 539 mm であり，栽培期間中についても同様のことが言える．比較的乾燥していた 2008 年に降水量が蒸発散量を大きく上回っていたことから，灌漑無しでもキャベツ栽培が可能であることがわかる．その一方で，高い水分量が維持されていたことは，湿害の観点からは好ましくない．キャベツは土中の空気要求量が高い作物であり（中野ら，2014），嬬恋村でのキャベツ栽培は干ばつよりも湿害への注意が重要となる．また高水分土壌中では浸透に伴う硝酸態窒素の溶脱が起こりやすいと考えられる．嬬恋村では地下水中の窒素濃度が高く（熊谷ら，2009），原因と考えられる窒素肥料の溶脱にこの高い土壌水分量が影響を及ぼしていると考えらえる．この硝酸態窒素の溶脱は 3.1.3 の EC_w の変化（高 EC 値が降雨とともに下層に移動）からも推測できる．さらに嬬恋村で問題とされる土壌侵食についても土壌の高水分量維持が関与している．高水分量を保つ土壌への浸潤量は土壌の吸水度が低いために乾燥土壌に比べて小さくなる（Smith, 1999）．結果降雨が地表面流となり易く，土壌侵食量が増えると考えられる．

3.2 冬季モニタリング

3.2.1 冬季地温の変化

Fig. 7 に冬季モニタリングによって得られた土壌温度と地表面の反射係数を示した．反射係数は地表面の状態や土壌水分量によって変化する．黒ボク土など黒色の土であれば 0.08 から 0.13 程度で，新雪の反射係数は 0.75 から 0.95 程度と非常に高くなる（Campbell and Norman,

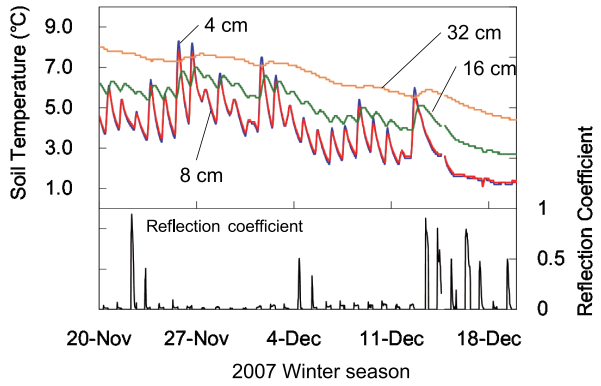


Fig. 7 2007 年冬季の地温と地表面の反射係数の変化.
Soil temperature and reflection coefficient during the winter season 2007.

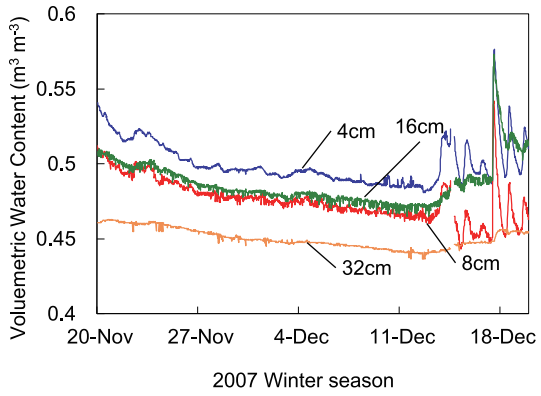


Fig. 8 2007 年冬季の体積含水率の変化.
Soil moisture during the winter season 2007.

1998). よって Fig. 7 中の反射係数の上昇は積雪の存在を示している. 表層近くの土壌温度は 2007 年 12 月 12 日までは大きく日変動をしていたが, それ以降は日変動が見られず緩やかな減少を示した. それと同時に反射係数が急激に増加し, 積雪が起こったことがわかる. よって日変動の収束は高い反射係数を持つ雪面によってほとんどの日射が反射されたためとみられる.

3.2.2 冬季体積含水率の変化

Fig. 8 には冬季モニタリング中の体積含水率の変化を示した. 土壌水分量の傾向とは対照的に, 積雪の起こる 12 月 12 日までは日変動は見られず緩やかに減少していた. しかし 12 月 12 日を過ぎると激しい日変動を示した. この現象については 3.3 節内にて考察する.

3.3 現地画像と土壌・気象データのリンク

栽培期のフィールドモニタリングでは, 地表面被覆率の変化, 結球の生育状況などのキャベツ生長や, 降雨に伴う地表面流の発生 (Fig.1d, 8 月 16 日画像), 施肥や農薬散布などの栽培管理 (Fig.1d, 8 月 31 日画像) などを現地画像から確認することができた. 現地圃場の植生の生育状況は, 一般に使用されるセンサ類からは把握が難しい要素のひとつである. この FS 画像を解析することで生長量の定量化が可能である (柴田ら, 1993). また, これらの画像を土壌水分量や土壌溶液 EC などのデータと照らし合わせることで現地の状況をより詳細に把握することができた. たとえば, 8 月 16 日の高強度の降雨の際には, 激しい地表面流が目測でき, 土壌水分量の増加は確認できるものの, 降雨の全てを土壌が保持してないことがわかる. また 8 月 31 日から 9 月 22 日の間にキャベツの結球が始まるのが画像から確認できる. 同時期に土壌中の EC_w は減少し, 9 月 22 日以降はほぼ一定となることから, 単純に窒素の溶脱のみではなく, 結球に伴い急激にキャベツに硝酸態窒素が吸収された可能性も考えられる.

冬季モニタリング中においては, 土壌水分変動の解明に現地画像が大いに貢献した. Fig. 9 は Fig. 8 中で激しい日変動を記録した 12 月 13 日から 12 月 20 日までの体積含水率を, 地表面の反射係数, 現地画像とともに表したものである. 現地画像から, 昼間に融雪し地表面が露出, そして夜間にまた積雪していることがわかった. この現象の繰り返しにより体積含水率の日変動が起きていた. 日の出後に高い値を示した反射係数が昼間に減少していくことからも同様のことがわかる. このようにフィールドモニタリングで記録される現地画像は数値データだけでは理解しがたい現地の状況を解釈するために非常に有効であった.

Table 1 に現地画像の存在の有無によるデータ解釈の変化について Case I 夏季モニタリング中の高強度の降雨時と Case II 冬季モニタリング中の土壌水分量の日変動についてまとめた. Table 1 から現地画像が利用可能な際に解釈がより詳細になっていることがわかる. Case I では画像がない場合, 土壌水分量から直接的には地表面流出の有無は把握できない. しかし現地画像が激しい地表面流を捉えているため, 実際には土壌中には浸透せず流出している降雨があることが新たな解釈として得られる. Case II では現地画像なしでは土壌水分量データの変動を解釈することは難しく, センサもしくはデータロガーの故障という誤った解釈を導いてしまい, 興味深い土壌水分変動現象を見落としてしまう可能性がある. しかし現地画像が存在することによってこれがセンサの故障ではなく, 融雪と降雪によって実際に起こっている現象であることがわかる. このように現地画像は土壌水分センサ等では把握できない水の挙動が画像によって確認できる際に特に威力を発揮した. また, フィールドモニタリングのリアルタイム性は, 現場の臨場感を伝えるという面で効果的であった. 2 分毎に計測され転送されるリアルタイム画像は現場の臨場感を観測者に与える. Table 1 に示した両 Case とも動画に近いリアルタイム画像だからこそ現場で観測を行っているかのようなライブ感を持った現象把握ができた. 例えば Case I では 2 分おきの降雨と地表面流の強弱のダイナミックな変化が, Case II では徐々に溶けてゆく積雪と露出してゆく地表面が視覚的に動画を見ているかのように把握できた.

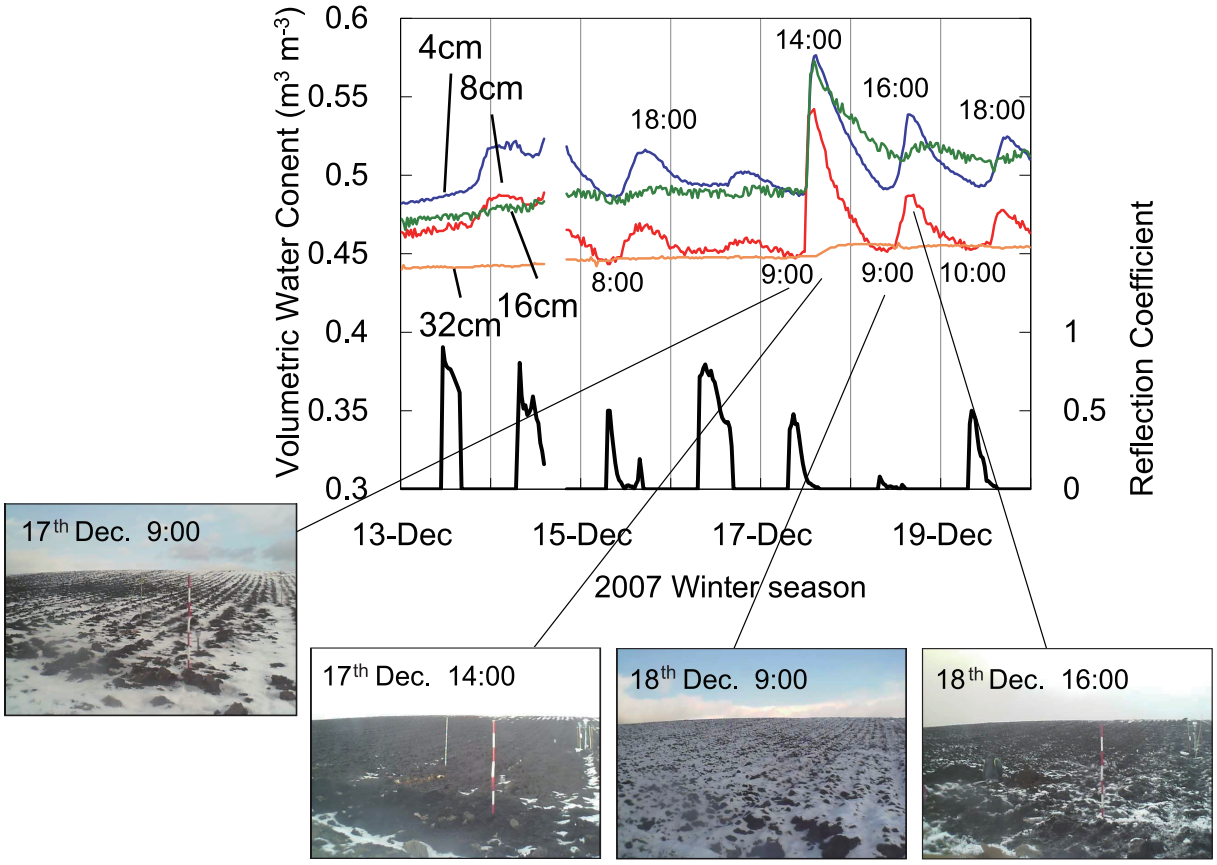


Fig. 9 2007 年 12 月 13 日から 12 月 20 日の体積含水率変化と圃場画像.
Soil moisture and field images during Dec. 13 to Dec. 20, 2007.

Table 1 現地画像の有無によるデータ解釈の可能性.
Potential data interpretation with and without field images.

	画像なし	画像有り
Case I 夏季地表面流 	表面流出の有無は水分量変化からは直接わからない	地表面流出が確認でき，降水量より少ない水が土中へ浸透していることがわかる
Casa II 冬季水分量変動 	融雪や降雪の時期を特定できず，水分量変化を異常値として判断する可能性大	融雪と降雪の時期を特定でき，水分量の変動を正しく評価できる

4. おわりに

嬬恋村のキャベツ栽培期間の土壌状態の把握と，水循環の傾向把握ができた．嬬恋村キャベツ畑では，栽培期間を通して比較的表層土壌であっても高水分量が維持されていることが明らかになった．これは硬盤層の存在と栽培期間の雨量が蒸発散量を大きく上回っていることに起因していた．また降雨に伴う土壌中の溶質の移動もモニタリングできた．今回の測定結果は土壌中の溶質の移動特性の解明に向けた基礎的知見となる．冬季の地温，体積含水率は積雪と融雪に伴い興味深い挙動を示した．ICT を用いた農地のモニタリングは，従来の測定に対し，現地画像とリアルタイムでのデータ確認が付属された非常に有効なツールであった．これまで数値で形成されたデータのみから現場の現象を解釈していたが，データと現地画像をリンクさせることにより，解釈の信頼性が格段に上がると思われる．

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．記して感謝の意を表する．

引用文献

荒川祐介, 東　照雄 (1995): 嬬恋村の黒ボク土傾斜侵食畑における耕作・管理に伴う土壌物理性と微細形態の変化. 土肥誌, 66: 116–126.

Campbell, G.S. and Norman, J.M. (1998): An introduction to environmental biophysics. 2nd ed., p.172, Springer, New York.

Cruse, R.M., Mier, R. and Mize, C.W. (2001): Surface residue effects on erosion of thawing soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 65: 178–184.

Decagon Devices Inc. (2007): ECH_2O-TE/EC-TM operator's manual.

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

Fukatsu, T., Hirafuji, M. and Kiura, T. (2006): Agent system for operating web-based sensor nodes via the internet. J. Rob. Mechatron., 18: 186–194.

深津時広, 遠藤　玄, 伊藤祐太, 小林一樹, 斎藤保典 (2014): 広域・精細モニタリングのための移動作業型フィールドサーバの開発. 農業情報研究, 23: 140–153.

深津時広, 平藤雅之, 竹澤邦夫 (2013): 長期野外計測時の湿度センサ劣化を回避する外気湿度推定手法. 農業情報研究, 22: 50–59.

Hilhorst, M.A., Dirksen, C., Kampers, F.W.H. and Feddes, R.A. (2000): New dielectric mixture equation for porous materials based on depolarization factors. Soil Sci. Soc. Am. J., 64: 1581–1587.

Honda, K., Shrestha, A., Witayanglurn, A., Chinnachodteeranun, R. and Shimamura, H. (2007): Fieldservers and sensor service grid as real-time monitoring infrastructure for ubiquitous sensor networks. Sensors, 9: 2363–2370.

星　岳彦, 塩沢栄地, 新間恵太, 高市益行, 平藤雅之 (2007): 施設園芸における生産履歴情報の収集と活用のためのフィールドサーバ用アプリケーションプログラムの開発. 農業情報研究, 16: 1–8.

石渡輝夫, 小林信也 (2003): 北海道中札内村の畑圃場における熱収支, 地温および土壌水分の変化 — 測定結果を中心として —. 土壌の物理性, 93: 13–20.

熊谷喜美代, 富岡　淳, 小澤邦壽 (2009): 群馬県における地下水への窒素負荷分布の推定. 全国環境研会誌, 34: 29–35.

Le Bissonnais, Y. and Singer, M.J. (1992): Crusting, runoff, and erosion response to soil water content and successive rainfalls. Soil Sci. Soc. Am. J., 56: 1898–1903.

Manzano Jr., V.J.P., Mizoguchi, M., Mitshushi, S. and Ito, T. (2011): IT field monitoring in a Japanese system of rice intensification (J-SRI). Paddy Water Environ., 9: 249–255.

丸山浩明 (1990): 浅間火山北麓における耕境の拡大と農家の垂直的環境利用. 地理学評論, 63(A-2): 74–99.

宮地忠幸 (2006): 市場環境の変化に対する野菜主産地の対応とその課題 — 群馬県嬬恋村を事例として —. 日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要. 41: 51–63.

溝口勝 (2007): フィールドサーバによる農地情報モニタリング. ARIC 情報, 86: 27–34.

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

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.

中野有加, 東野裕広, 村岡健一, 中西一泰, 柳井洋介, 岡田邦彦 (2014): 地下水位制御システム (FOEAS) 設工ほ場における設定水位が秋まきキャベツの生育に及ぼす影響. 園学研, 13: 125–133.

Noborio, K., McInnes, K.J. and Heilman, J.L. (1996): Two-dimensional model for water, heat, and solute transport in furrow-irrigated soil: I. Theory. Soil Sci. Soc. Am. J., 60: 1001–1009.

登尾浩助, 颯田尚哉, 古賀　潔, 馬場秀和, 向井田嘉朗 (2002): ふん尿還元草地における土壌のフィルター効果. 農土誌, 70: 631–634.

大高修一 (1970): 廃棄より安定を — 夏秋キャベツの嬬恋村をたずねて —. 労働・農民運動, 54: 187–193.

齊藤忠臣, 藤巻晴行, 安田　裕 (2008): 誘電率水分計の温度依存性の校正. 土壌の物理性. 109: 15–26.

Sauer, T.J. and Horton, R. (2005): Soil heat flux. In Hatfield, J.L. and Baker, J.M. (ed.) Micrometeorology in Agricultural Systems, pp. 131–154. Agronomy Monograph No. 47, Madison.

柴田孝信, 岩尾憲三, 高野泰吉 (1993): 画像処理による自動成長計測装置の開発. 生物環境調節, 31: 29–35.

Smith, R.E. (1999): Technical note: rapid measurement of soil sorptivity. Soil Sci. Soc. Am. J., 63: 55–57.

須田功一 (2010): 群馬県における夏秋キャベツ生産の機械化最前線. 農業機械学会誌, 72: 207–210.

田中　慶, 深津時広, 平藤雅之 (2014): FS-DIVA: フィールドサーバによる観測データと撮影画像のための表示用 Web アプリケーション. 農業情報研究, 23: 1–11.

安川雅紀, 絹谷弘子, 溝口　勝, 木浦卓治, 喜連川優 (2011): PDBFM: フィールドモニタリングのためのデータブラウザ. 情報処理学会論文誌, 52: 3682–3698.

要　　旨

土壌・気象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を，高冷地キャベツ栽培畑における水循環の把握を事例として検証した．このモニタリングはフィールドサーバーと Decagon Devices 製のセンサおよびデータロガーを用いて夏季と冬季に分けて行われた．その結果，対象畑の表層土壌では栽培期間を通して高水分が維持されていることがわかった．これは硬盤層の存在と蒸発散量を大きく上回る雨量に起因していた．また降雨に伴う土壌中の溶質の移動も確認できた．現地画像によってキャベツの生長，降雨に伴う地表面流，積雪とその融解などが視覚的に把握できた．また土壌・気象データとリンクさせることで，従来の数値データのみでは理解できなかった現象の解釈が可能となり，より合理性の高い考察ができた．例えば冬季の地温と体積含水率が積雪と融雪に伴い異なる日変動を示すことは現地画像がなければ解明できなかった．このように本研究により，ICT を用いた農地モニタリングは従来の測定に対し，現場をより詳細に包括的に把握できる有効なツールであることが実証された．

キーワード：ICT，フィールドモニタリング，リアルタイム，現地画像，土壌情報