

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 3月 31日現在

機関番号：17201

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21580299

研究課題名（和文）圃場における面的土壌水分に関する測定法の開発及び物理的推定法の提案

研究課題名（英文）A multiple-rod TDR probe development with a view to measure water content and electrical conductivity (EC) of surface soil.

研究代表者

長 裕幸 (CHO HIROYUKI)

佐賀大学・農学部・教授

研究者番号：90136599

研究成果の概要（和文）：大型多線式 TDR プローブについて、同プローブによる体積含水率とバルク電気伝導度の面データに関する評価について検証を行った。多線式 TDR プローブは、隣接する2つのプローブがアース用ロッドを共用することで、水平面上の比誘電率と電気伝導度 \square を隙間なく測定することが可能なプローブである。大きさ $1\text{m} \times 0.8\text{m} \times 0.2\text{m}$ のコンテナに砂をつめ、最初に、感知部長 1.0m の3線式プローブ(ロッド間隔 0.1m 、径 0.005m)を、多線式プローブの基本単位として実験を行い。次に7本ロッドのプローブについて実験を行った。埋設深を変えてキャリブレーションを行った結果、誘電率に関しては、深さ 0.1m 以下の浅いところでは深度依存性がみられたが、埋設深ごとに校正式を求めれば3次多項式での評価が可能であることが明らかになった。また、EC に関しては埋設深の影響が少ないことが明らかになった。また、室内において、 0.88m^2 の面積における地表面蒸発実験を行った結果、この面積に対する水分量及び EC の面データ測定が可能であることを示すことができた。

研究成果の概要（英文）：A multiple-rod TDR probe was developed with a view to measure water content and electrical conductivity (EC) of surface soil. The probe consisted of several three-rod probes in which the outer rods of each three-rod probe were the common electrical earth guides for the adjacent probes. There was thus no extra space between the adjacent three-rod probes. This probe configuration enabled the TDR measurement to extend over a large area in the field. The characteristics of the multiple-rod probe were examined in sand in a container of $1.1\text{m} \times 0.81\text{m} \times 0.20\text{m}$. First, a one unit of probe consisting of three 1-m long steel rods of 0.5 cm diameter with a spacing of 10 cm between the rods was tested for its detective performance for water and EC in sand. Then, a multiple-rod probe consisting of seven rods and with the same probe specifications was inserted horizontally in the sand of the container at 10 cm below the surface. The dielectric constant and EC of the sand were measured with during an evaporation test. Since TDR measurement depended on the air volume in the sampling volume of a probe, the unit probe test revealed the dependency of dielectric constant on the insertion depth of the probe. A cubic expression, such as the Topp's one, provided a good relation between the average water content and dielectric constant of the surface soil. The insertion depth did not however affect the EC measurement. Moreover, the multiple-rod probe, through the evaporation test, accurately measured the change in water content and EC over 0.88m^2 in the surface region. Our results thus showed the

possibility of extending the multiple-rod TDR measurement system to a larger area to make the remote sensing data more accurate.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
総計	3,800,000	1140,000	4,940,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：農業工学・農業土木学・農村計画学

キーワード：土壌圏現象，モニタリング，水循環，農業工学

1. 研究開始当初の背景

近年，リモートセンシング技術の進歩により，衛星データを解析し地球規模における土壌水分観測が行われている。その観測精度は，センサーの解像度の進歩により，面積的には1.5 m×1.5 mに達しようとしている。しかし，地上観測においては，従来同様，点データつまり鉛直1次元の観測が行われており，ある面積内の測点の数を増やしても，それらの平均値を面代表値とし，衛星データに対するキャリブレーションを行っている。このような点から面への変換においては，物理的な脈絡は欠如しており，アップスケールングの問題として，過去，議論が繰り返されてきた所である。著者は，2002年～2006年，CRESTプロジェクトの「水の循環系モデリングと利用システム」に参加し，中国黄河流域において農地圃場における点観測を行ってきた。その際，流域水文モデルへの貢献に対する難しさを経験した。従来，土壌物理的な鉛直1次元の観測は，点で行われており，地上側の気象観測も基本的に鉛直1次元である。しかし，広域水文モデルが要求するデータはリモートセンシングデータが基礎となっており面データである。これは，どのようにダウンスケールングの精度が増加しても同じである。従って，この状況に対応するためには，圃場側で何とか面データを求めない限り，両者の接点を見いだすことはできない。そこで，何とか，精度良く，面的に水分量や塩分量を測定できる方法を開発することがもともとめられている。

2. 研究の目的

近年における表層土壌水分の観測は，測定機器の進歩に伴い，より広域へとその観測範囲

を広げている。しかし，観測面代表値としては，依然として面内に設置した複数の土壌水分センサーの測定値の平均値を用い，校正に利用する場合が多い。この点における平均値を面代表値として扱うことの是非や面代表値の測定手法については，これまで繰り返し議論されてきたが，今のところ決定的な解決策は見いだされていないように思われる。そこで，著者らは，大型多線式 TDR プローブを開発し，同プローブによる体積含水率(□□)とバルク電気伝導度(□□)の面データの評価が，可能であることを明らかにする。また，実際に，多線式プローブを用い，砂質土において，均質な初期水分条件からの蒸発過程による土層内水分変化に伴う出力の時間的变化を測定し，面的土壌水分量(□□)と電気伝導度(□)の値と3カ所で測定した点データ平均値との比較を行い，観測の可否やその精度について検討を行い，実用性の検証を行う。

3. 研究の方法

多線式プローブは，隣接する TDR プローブがアース用ロッドを共用することで，プローブ設置面上の体積含水率(θ□□)を隙間なく測定するものである。本研究では，0.96 mの感知部長(ロッド間隔 0.1 m，直径 5□mm)を有する3組の TDR プローブを配した大型多線式プローブを自作した。電場シミュレーションから推定された同プローブの鉛直方向の影響範囲は，上下 0.05 m 程度であった。

縦 0.81 m，横 1.10 m，高さ 0.20 m の木箱に，砂(粒径 0.15 ~ 0.6 mm)を高さ 0.10 m まで充填し，多線式プローブを深さ 0.05 m に水平に埋設した。また，Campbell Scientific 社(CS 社)の SDMX50 型マルチプレクサー(CS 社)を介して TDR100 ケーブルテスター(CS 社)に接

続した CS640 型小型プローブ(ロッド長 0.075 m, 間隔 0.006 m, 直径 0.0016 m, CS 社)を 3ヶ所の深さ 0.01, 0.03, 0.05, 0.07, 0.09 m に埋設した。木箱の四隅に設けた縦穴から蒸留水を注入することにより, 地下水面を地表面までゆっくりと上昇させた後, 2 台の扇風機で砂表面に送風し, 砂中の水分の蒸発をうながした。

CR10X データロガーを利用して, 蒸発過程における砂の比誘電率 (ϵ) を 15 分間隔で測定した。多線式プローブで測定した ϵ 値を, 別途, 求めたキャリブレーション式に, また小型 TDR プローブで測定した ϵ 値を Topp 式にそれぞれ代入し, θ 値を求めた。アース用ロッドで挟まれたロッド上下の 0.05 m の空間を, 多線式プローブを構成する 3 つのプローブの測定領域とみなし, 各プローブが示す θ 値にその体積を乗じて得られる水分量の合計値を求めた。そして, その合計値を多線式プローブの影響領域の全体積で除したものを, 面的土壌水分量とした。

4. 研究成果

埋設条件で取得した TDR 波形には, 埋設深によらず, プローブ先端における反射地点が観測され, その位置(時間)は, 低 θ ほど波形の左方に位置した。一方, 類似した θ 値における各条件の波形を比較すると, θ が高いほど表面近傍に埋設した条件の反射地点が左方に位置し, その点から算出される θ 値も小さくなる傾向が認められた。そのため, $z = 0.01$ m の場合には, 測定された $\epsilon - \theta$ 関係に Topp 式は適合せず, 同式から θ 値を得ることはできないものの, $\epsilon - \theta$ 関係を 3 次多項式で近似して得た校正式に基づき, 各条件の θ 値を高精度(RMSE = 0.004 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)で評価することができた (Fig.1)。

ϵ と類似した埋設深依存性は σ_b にも認められたが, 埋設深ごとに決定した校正式に基づき, σ_b を評価した。

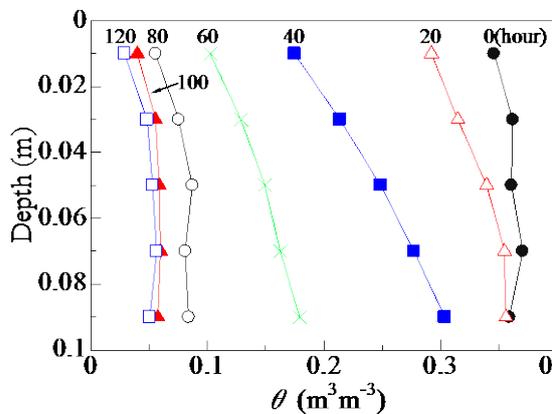


Fig. 1 体積含水率(θ)分布の経時変化。

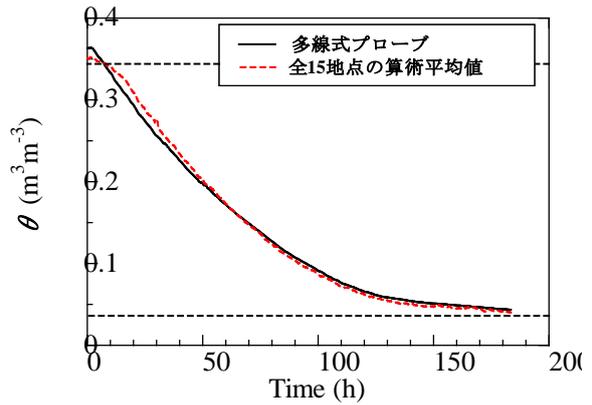


Fig.2 体積水分率 θ の経時変化

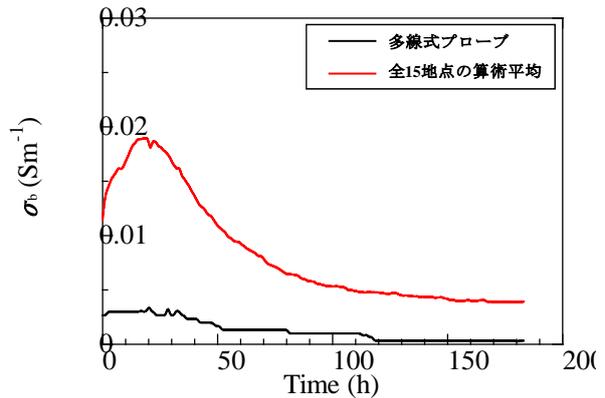


Fig.3 多線式プローブで測定した電気伝導度

まず, Fig.2 に求めた比誘電率から水分量に変換した値の多線式プローブと 3 点 5 深度における点鉛直分布測定値の全点平均値との比較を示す。この結果, 両者の値は非常に良く一致した。次に Fig.3 に, 同様にして求めた σ_b の値について多線式プローブの値と 15 地点の算術平均値の比較を示すが, 両者は大きく異なった。これは, 電気伝導度に関しては, 単純に面積平均値として点データの平均値を使用することの問題点を提起していると思われる, この理論的解析に関しては今後の課題である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 20 件)

- ①中国黄河上流域の乾燥地域に位置するトウモロコシ畑圃場に関する土壌水分移動解析, 田川 堅太, 長 裕幸, 小林 哲夫, 森, 牧人, 王 維真, 佐賀大学農学部彙報, 査読無, 第 96 号, p1-13, 2011
- ②伊藤祐二, 郡山益実, 宮本英揮, 梅谷知弘, 筑紫二郎, マイクロ波を利用した淡水の水位・電気伝導度および淡塩水境界位の計測システム, 水文・水資源学会誌, 査読有,

- 24(3), 170 - 176, 2011
- ③ Root Absorptive Functions Drive Salt Accumulation in Crop Fields under Desertification I Effects of Leaf Transpiration and Soil Evaporation, K. Ebihara, A. Marui, H. Cho (11 名, 8 番目), *Eco Engineering*, 査読有, 22(3), 93-99, 2010
- ④ Multi-TDR probe designed for measuring soil moisture distribution near the soil surface, Y. Ito, J. Chikushi and H. Miyamoto, *Proc. of 19th World congress of soil science, Brisbane, Australia*, 査読無, 2010
- ⑤ マクロベントスの生息環境調査のための底質観測手法の開発, 宮本英揮, 伊藤祐二, 梅谷知弘, 筑紫二郎, 水土の知(農業農村工学会誌), 査読無, 78(5), 51 - 52, 2010
- ⑥ 生物環境調節学分野における ECH₂O プローブの適用事例, 伊藤祐二, 宮本英揮, 安永円理子, 江口壽彦, 筑紫二郎, 土壌の物理性, 査読有, 114: 33 - 36, 2010
- ⑦ マイクロ波のエネルギー吸収特性を利用した淡塩水境界面の計測, 伊藤祐二, 宮本英揮, 郡山益実, 筑紫二郎, 瀬口昌洋, 土木学会論文集 B, 査読有, 66(2): 189 - 195, 2010
- ⑧ マイクロ波を利用した沿岸帯水層の水質および淡水量の同時評価システムの開発, 伊藤祐二, 宮本英揮, 郡山益美, 梅谷知弘, 筑紫二郎, 水土の知(農業農村工学会誌), 査読無, 78(5): 49 - 50, 2010
- ⑨ 気象変化が深い湖の湖面蒸発量, 水温, 熱収支に及ぼす影響—鹿児島県池田湖の事例—, 伊藤祐二, 初井和朗, 農業農村工学会論文集, 査読有, 269, 93-103, 2010
- ⑩ 乾燥土壌への散水に伴う浸潤の不安定化に関する研究, 長 裕幸, 井上光弘, 土壌の物理性, 査読有, 111:53-60, 2009
- ⑪ Identification of the composite parameters of the BBH-B model specifying the effects of biohydrologic processes on the water balance of crop fields, T. Kobayashi, J. Teshima, M. Mori, H. Cho, (6 名, 6 番目), *Biologia*, 査読有, 64/3: 478-482, 2009
- ⑫ Water and salt movement in soil driven by crop roots: a controlled column study, M. Kitano, K. Urayama, Y. Sakata, H. Cho, (11 名, 10 番目), *Biologia*, 査読有, 64/3: 474-477, 2009
- ⑬ Analysis of salts transport affected by root absorption capacity in surface - irrigated fields in the upper Yellow River basin, D. Yasutake, T. Araki, W. Wang, H. Cho, (7 名, 5 番目), *Biologia*, 査読有, 64:570-574, 2009
- ⑭ 時間領域反射法による水中の堆積土砂表面位および電気伝導度の同時計測, 伊藤祐二, 宮本英揮, 筑紫二郎, 農業農村工学会論文集, 査読有, 263: 81 - 90, 2009
- ⑮ 時間領域反射法による水中堆積土砂表面位の評価法, 伊藤祐二, 宮本英揮, 筑紫二郎, 農業農村工学会論文集, 査読有, 262: 75 - 81, 2009
- ⑯ 種々の電気伝導度条件に対する静電容量式土壌水分センサーの校正モデル, 宮本英揮, 長裕幸, 伊藤祐二, 筑紫二郎, 江口壽彦, 植物環境工学, 査読有, 21(2): 86 - 91, 2009
- ⑰ 水分移動特性に基づく有機・無機培地内水分環境の評価, 宮本英揮, 吉田 敏, 筑紫二郎, 江口壽彦, 伊藤祐二, 植物環境工学, 査読有, 21(2): 72 - 78, 2009
- ⑱ 固形培地耕装置における地下水位がニンジン生育に与える影響, 江口壽彦, 鈴木健彦, 宮本英揮, (7 名, 3 番目), 植物環境工学, 査読有, 21(2): 65 - 71, 2009
- ⑲ Coupled measurements of water content and electrical conductivity in dielectrically lossy clay slurry using a coated TDR probe, H. Miyamoto, J. Chikushi, and M. Kanayama, *Soils and Foundations*, 査読有, 49(2): 175 - 180. 2009
- ⑳ TDR による表層土壌水分計の開発とその有効性の評価, 伊藤祐二, 筑紫二郎, 宮本英揮, 土壌の物理性, 査読有, 111: 35 - 41, 2009
- [学会発表] (計 13 件)
- ① Analysis of soil-water movement in a maize field in the arid region of China, Kenta Tagawa, Hiroyuki Cho, Masaharu Kitano, Weizhen Wang, 2011, Annual meeting of Soil Science Society of America, San Antonio TX., U.S.A.
- ② Two dimensional measurement of water content and electrical conductivity of surface soil with a multiple-rod TDR probe, Hiroyuki Cho, Mitsuhiro Inoue, Daisuke Kodama, Kenta Tagawa, Hideki Miyamoto, 2011, Annual meeting of Soil Science Society of America, San Antonio TX., U.S.A.
- ③ 大型多線式 TDR プローブによる面的土壌水分計測, 児玉大輔, 長 裕幸, 宮本英揮, 田川堅太, 井上光弘, 2011, 農業農村工学会, 福岡
- ④ 圃場の実蒸発散量の推定による土中水分移動モデルの検証, 田川 堅太, 長 裕幸 2011, 農業農村工学会, 福岡
- ⑤ 阪本大輔, 高田元気, 野見山綾介, 海老原健二, 佐合悠貴, 安武大輔, 荒木卓哉, 長裕幸, 小林哲夫, 大槻恭一, 北野雅治. 土壌の塩類化に及ぼす蒸発散と植物のイオン吸収の影響. 日本農業気象学会 2011 年大会, 2011 年 3 月, 鹿児島市.
- ⑥ Yasutake, D., Kitano, M., Mori, M., Cho, H.

- Araki, T., Kobayashi, T. and Wang, W. Sustainable control of soil salinity in irrigated crop fields under desertification. 1. Seasonal change in soil salinity of a field in the Yellow River basin. CIGR 2011, 19-23 September 2011, Tokyo.
- ⑦ Kitano, M., Ebihara, K., Takata, M., Sakamoto, D., Sago, Y., Yasutake, D., Mori, M., Cho, H., Araki, T., Kobayashi, T., Wang, W., Wu, Y., Ma, Y., Yamanaka, N. and Otsuki, K. Sustainable control of soil salinity in irrigated crop fields under desertification. 2. Salt transport driven by roots and proposal for salinity control technologies. CIGR 2011, 19-23 September 2011, Tokyo.
- ⑧ Wang, W., Wu, Y., Mori, M., Yasutake, D., Araki, T., Cho, H., Kobayashi, T. and Kitano, M. Sustainable plant production with salinity control in the upper Yellow River basin under desertification. The 5th International Symposium on the East Asia Environmental Problems EAEP 2011, 14-15 November 2011, Fukuoka.
- ⑨ Yasutake, D., Wang, W., Kobayashi, T., Wu, Y., Araki, T., Cho, H., Mori, M. and Kitano, M. Seasonal change in soil salinity of irrigated fields in the upper Yellow River basin. The 5th International Symposium on the East Asia Environmental Problems EAEP 2011, 14-15 November 2011, Fukuoka.
- ⑩ Mori, M., Wang, W., Kobayashi, T., Cho, H., Yoshikoshi, H., Wu, Y., Yasutake, D. and Kitano, M. Estimation of evaporation for analyzing the water balance of a field in the Yellow River basin, China, during a dormant season.
- ⑪ Kitano, M., Ebihara, K., Rakata, M., Sakamoto, D., Sago, Y., Marui, A., Yasutake, D., Mori, M., Cho, H., Araki, T., Kobayashi, T., Wang, W., Wu, Y., Ma, Y., Yamanaka, N. and Otsuki, K. A kinetic model of root ion absorption integrated with evapotranspiration for estimating salt accumulation in crop fields. The 5th International Symposium on the East Asia Environmental Problems EAEP 2011, 14-15 November 2011, Fukuoka.
- ⑫ Wu, Y., Wang, W., Mori, M., Yasutake, D., Cho, H., Kobayashi, T. and Kitano, M. Quantitative monitoring on soil salinization degree in the middle stream of Heihe River basin based on the TM image. Proceedings of The 5th International Symposium on the East Asia Environmental Problems EAEP 2011, 14-15 November 2011, Fukuoka. 203-208
- ⑬ Analysis of soil-water movement by using HYDRUS-1D in a maize field in the arid region of China. Kenta Tagawa, Hiroyuki Cho,

Masaharu Kitano, Weizhen Wang
 Proceedings of The 5th International Symposium on the East Asia Environmental Problems EAEP 2011, 14-15 November 2011, Fukuoka. 227-233

〔図書〕 (計 2 件)

- ① Yellow River –water and life-, H. Cho (共著), edited by T. Kusuda, *World Scientific Publishing Co.*, 査読無, 2010
- ② Biohydrology of Farmland under Desertification., H. Cho(共著), Edited by T. Kobayashi and M. Kitano, *SPM & Water Press.*, 査読無, 2010

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長 裕幸 (CHO HIROYUKI)
 佐賀大学・農学部・教授
 研究者番号 : 90136599

(2) 研究分担者

宮本 英揮 (MIYAMOTO HIDEKI)
 佐賀大学・農学部・准教授
 研究者番号 : 10423584

(3) 連携研究者

無し