

平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震による津波で冠水被害を受けた砂質畑の土壤塩分モニタリング

宮本輝仁*・亀山幸司*・塩野隆弘*

目次

| | | | |
|---------------------|----|--------------------------|----|
| I 緒言 | 73 | 2 土壤 EC と塩素濃度の関係 | 75 |
| II 試験方法 | 73 | 3 土壤水分量・土壤水 EC のモニタリング結果 | 76 |
| 1 試験圃場の概要 | 73 | 4 土壤 EC の推定 | 76 |
| 2 試験圃場の土壤調査 | 74 | IV 結言 | 77 |
| 3 土壤水分・電気伝導度のモニタリング | 74 | 参考文献 | 77 |
| III 試験結果 | 75 | Summary | 78 |
| 1 試験圃場の土壤の物理性 | 75 | | |

I 緒言

2011年3月11日の東日本大災害における津波によりおよそ2万4千haの農地が流失や冠水等の被害を受けた。被害を受けた農地の大部分は低平地に分布する水田であるが、畑地も数千ha程度含まれると推定されている。被災農地の復旧のため、海水が冠水した農地の効率的な除塩が求められている。畑地は、水田と比較して排水が問題となる場合が少ないため、降雨による除塩効果が見込まれる。しかし、それらの過程を実測した事例はあまり見られない。

また、実際に除塩対策を行っている現場からは除塩効果の確認のための迅速な塩分濃度の測定や経時的な土壤電気伝導度（EC）モニタリングが求められている。

そこで、津波により海水が冠水した砂質畑において降雨による除塩過程の土壤 EC モニタリングを行える計測システムを構築し、現地への適用性を確認したのでここに報告する。

なお、本報をまとめるにあたり、試験圃場の地権者の伊藤茂樹氏、東北農政局整備部農地整備課の高橋清美係長、宮城県亘理農業改良普及センターの佐藤聖一氏および漆山喜信氏、(財)日本水土総合研究所の仁後祐輔氏をはじめ多くの方々にご協力いただいた。関係者各位に感謝の意を表す。

II 試験方法

1 試験圃場の概要

試験圃場は宮城県亘理郡亘理町長瀨地区内に位置するイチゴ栽培ハウス（横4.5m×縦47m）である（Fig.1, Fig.2）。試験圃場では、津波により海水が1m程度冠水した。津波により排水機場の機能が喪失したため、冠水が5日間程度続いた。海水が引いた後にはヘドロが表層に5-7cm堆積していたが、5月中には除去された。6月上旬にハウスのビニールが取り払われ、降雨による除塩が開始された。6月下旬からは隣接するハウス6棟を使い、東北農政局の農地の除塩実証調査が実施された（仁後と河田, 2011）。なお、地下水位は地表面下3m程度の深さにある（地権者への聞き取りによる）。



Fig. 1 試験圃場の位置図

Location of experimental field for salt removal

* 農地基盤工学研究領域畑地工学担当

平成23年12月15日受理

キーワード: 地震, 津波, 誘電式土壤水分センサー, 土壤溶液, 塩分濃度, 電気伝導度



Fig. 2 除塩対策を行った圃場
View of experimental field for salt removal

2 試験圃場の土壌調査

試験圃場に試掘孔を設け、土壌調査を行ったところ、表層(0-30cm)が黒色のA層であり、下層(30cm以深)が黄色のB層であった。表層と下層から100ccサンプラーにより、それぞれ3サンプルずつ不攪乱試料を採取するとともに、各層から攪乱試料も採取し、土壌の物理性の試験に用いた。土壌の物理性の測定項目は、粒径組成、土粒子密度、乾燥密度、飽和透水係数および土壌水分特性である。

また、土壌の塩分濃度を把握するため、7月8日と8月2日の2回、6試験区から土壌を0-10cm、10-20cm、20-30cmの3深度で採取し、1:5水浸出法によりEC(以下、「土壌EC」と)と塩素濃度を測定した。ECはECメーター(Twin Cond, HORIBA社製)により、塩素濃度はイオンクロマトグラフ法(ICS-1500, Dionex社製)により分析した。

3 土壌水分・電気伝導度のモニタリング

土壌水分、電気伝導度および土壌温度をモニタリングするために、土壌埋設型の誘電式土壌水分センサー(5TE, Decagon社製)を深さ15cm、30cm、45cmの3深度に地表面と平行に埋設した。センサーはデータロガー(Em50, Decagon社製)に接続され、1時間間隔で深さごとの土壌水分、電気伝導度および土壌温度の計測を行った(Fig.3, Fig.4)。観測期間は7月8日-8月2日である。

誘電式土壌水分センサーでは、土壌水分を計測するために70MHzの高周波をセンサーに印加し、その際の電気容量の変化から土壌の誘電率を測定する。測定された土壌の誘電率から土壌水分量を推定するにはToppら(1980)の提案した次式を用いた。

$$\theta = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} \varepsilon_a - 5.5 \times 10^{-4} \varepsilon_a^2 + 4.3 \times 10^{-6} \varepsilon_a^3 \quad (1)$$

ここで、 θ は体積含水率($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)、 ε_a は土壌の誘電率である。(1)式(Topp式)は有機物含量の少ない鉍質土壌の校正式としてよく用いられている。試験圃場は砂分



Fig. 3 誘電式土壌水分センサーの設置状況
Installation of dielectric soil moisture sensors



Fig. 4 データロガーによる観測
Field measurement by using data logger and dielectric soil moisture sensors

の多い土壌であるため、Topp式の適用が可能であると考えた。

用いた誘電式水分センサーでは、交流を2本のロッドに印加し、ロッド間の抵抗の測定から土壌の見かけのEC(EC_b)を測定する(土壌の見かけのECとは、土壌の固相部分と土壌水の両方が反映されるECである)。そして、土壌水のEC(EC_p)は $\theta-EC_b-EC_p$ の関係を用いることにより推定できる。この $\theta-EC_b-EC_p$ 関係については、これまで経験式(Rhoades et al., 1976)や理論式(Mualem and Friedman, 1991; Hilhorst, 2000)が提案されている。その中でモデルパラメータの取得が比較的容易で扱いやすいHilhorstのモデルを用いてセンサー測定値から EC_p を推定した(Miyamoto et al., 2010)。

$$EC_p = \frac{\epsilon_p EC_b}{\epsilon_a - \epsilon_0} \quad (2)$$

ここで、 ϵ_p は土壤水の誘電率、 ϵ_0 は $EC_b=0$ となるとき
の土壤の誘電率であり、センサー製造元の推奨値 $\epsilon_0=6$
(Decagon Devices, 2007) を用いた。さらに ϵ_p は次式に
より土壤温度 (T_{soil}) による補正を行った。

$$\epsilon_p = 80.3 - 0.37 (T_{soil} - 20) \quad (3)$$

また、 EC_p から土壤が水で飽和しているときの土壤溶
液 EC である飽和土壤水 EC (EC_s) を次式により求めた。

$$EC_s = \frac{EC_p \theta}{\left[1 - \frac{\rho_b}{\rho_s}\right]} \quad (4)$$

ここで、 ρ_b は乾燥密度 ($g\ cm^{-3}$)、 ρ_s は土粒子密度 ($g\ cm^{-3}$)
である。

III 試験結果

1 試験圃場の土壤の物理性

土壤の物理性の試験結果を **Table 1** に示す。表層土は
下層土に比べて粘土分やシルト分が多かった。もともと
砂分の多い圃場であり、表層土の土壤改良を行ないなが
らイチゴ栽培に適した土壤条件に変えてきたことが要因
と考えられる。土粒子密度、乾燥密度ともに表層は下層
よりやや低い値となった。これに対して、飽和透水係数
は下層が表層に比べてやや高い値となったが、どちらも
 $10^{-3}\ cm\ s^{-1}$ のオーダーであり、透水性は良好であった。

土壤水分特性曲線を **Fig.5** に示す。表層土と下層土の
間隙量はそれぞれ 0.54、0.50 と近い値であったが、圃場
容水量 ($100\ cmH_2O$) 付近では、表層土は下層土に比べて、
体積含水率で $0.11\ m^3\ m^{-3}$ 高くなっており、イチゴ栽培に
適した土壤条件になるよう、土壤の保水性を向上させる
土壤改良が成されてきたことがうかがえる。

一般的に、除塩の効率が高いのは、連続的に水分（降
雨）が供給され、飽和水分状態で下方への水分移動が起
こる場合と考えられる。降雨終了後、圃場容水量よりも
低いマトリックポテンシャル（土壤水分圧力）で保持され
ている水分は重力によって速やかに下方へ移動するため、
塩分の下方移動に大きく関与する。また、圃場容水量
相当のマトリックポテンシャル以上で保持されている水分
は下方へあまり移動せず、土層内に保持され、蒸発
等で失われることが多い。 $100\ cmH_2O$ 以上のマトリック

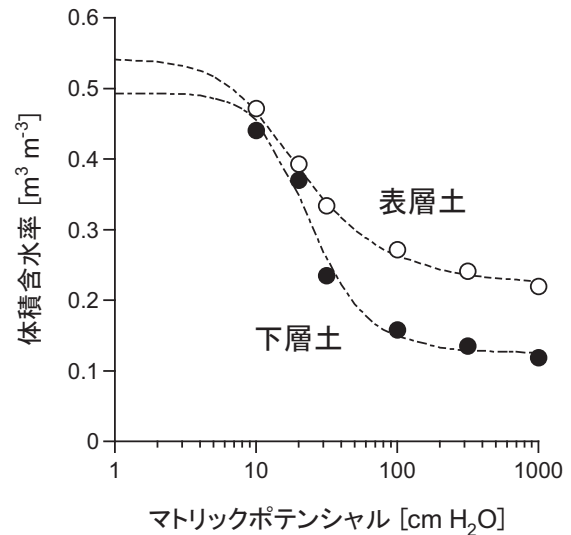


Fig. 5 試験圃場の土壤水分特性曲線
Soil water retention curves for experimental field

ポテンシャル領域における土壤水分量は表層土では下層
土に比べて高く、試験圃場の表層土では降雨終了後に下
方移動せずに土層内に保持される水分が多い状況が発生
していると推察された。

2 土壤 EC と塩素濃度の関係

土壤 EC と塩素濃度の関係を **Fig.6** に示す。土壤 EC
と塩素濃度は強い正の相関を示した。このため、土壤
EC から回帰直線により塩素濃度の推定が可能と考えら
れた。得られた回帰直線は

$$Cl(mg\ 100g^{-1}) = 128.85 EC_{1.5} - 19.649 \quad (R^2=0.98) \quad (5)$$

ここで、 $EC_{1.5}$ は土壤 EC である。

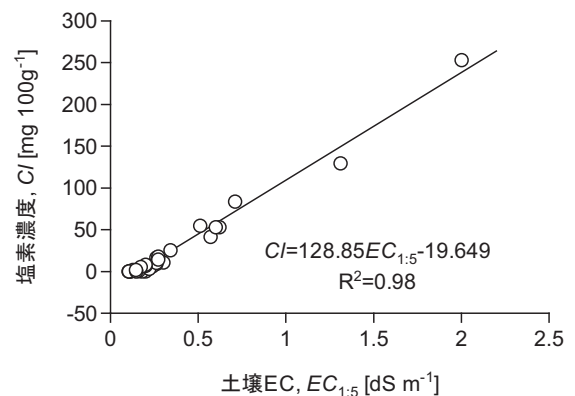


Fig. 6 土壤溶液 EC と塩素濃度の関係
Linear calibration results for salts concentration vs. soil solution
electrical conductivities

Table 1 試験圃場の土壤の物理性
Soil physical properties for experimental field

| | 粒径組成 | | | 土性 | 土粒子の密度 (g/cm^3) | 乾燥密度 (g/cm^3) | 飽和透水係数 (cm/s) |
|----------------|------|-----|------|-----------|------------------------|----------------------|----------------------|
| | 砂 | シルト | 粘土 | | | | |
| 表層土 (0 ~ 30cm) | 81 % | 7 % | 12 % | 砂土壤 (SL) | 2.70 | 1.24 | 2.8×10^{-3} |
| 下層土 (30cm ~) | 91 % | 2 % | 7 % | 壤質砂土 (LS) | 2.78 | 1.38 | 6.9×10^{-3} |

イチゴは塩害に弱く、土壌中の限界塩素濃度の目安は $40\text{--}50\text{ mg }100\text{g}^{-1}$ と言われていること（佐賀県農業技術防除センター, 2008）等を考慮し、東北農政局では除塩による塩素濃度の目標値を $30\text{ mg }100\text{g}^{-1}$ としている（東北農政局, 2011）。そのため、(5)式から除塩の目標値は $EC_{1.5}$ で表記したとき 0.38 dS m^{-1} 程度になると考えられる。

3 土壌水分量・土壌水 EC のモニタリング結果

観測期間中の降水状況を Fig.7(A) に示す。7月中下旬にまとまった降水があったことがわかる。土壌水分は表層に近いほど降雨に反応して高くなっていること、表層のほうが下層に比べて水分保持能が高いことがわかる (Fig.7(B))。観測開始以前の6月25日から28日までに 73.0mm の降雨があり、これに伴い観測開始時の下層の土壌水分も高い状況にあった。その後、下層では徐々に土壌水分が減少し、圃場容水量付近で変動していた。

土壌水の EC の経時変化を Fig.7(C) に示す。表層

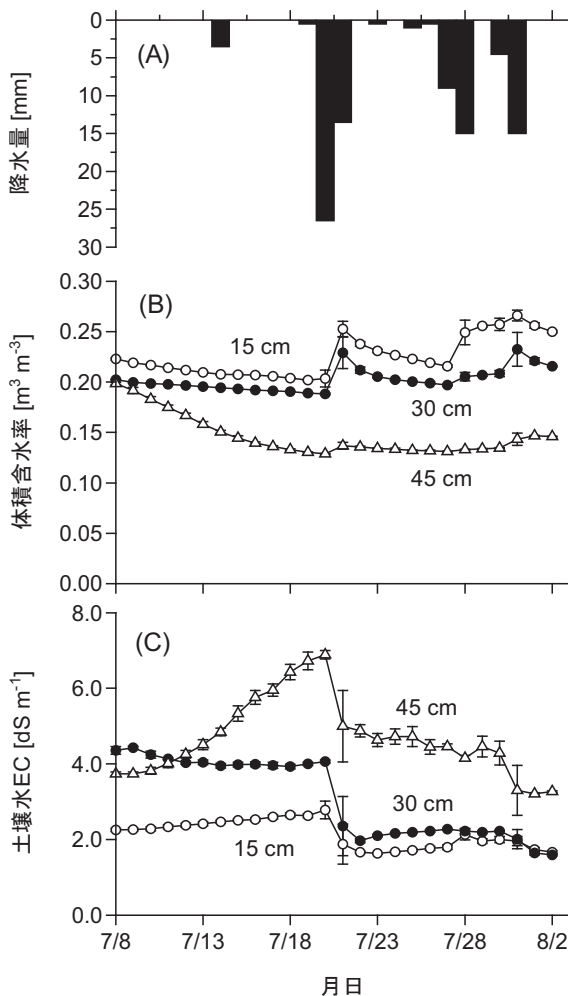


Fig. 7 降水量 (A), 土壌水分量 (B) および土壌水 EC (C) の経時変化 (2011/7/8-8/2) 各観測値は日平均値で表わし、縦棒は標準偏差を示している

Temporal changes in precipitation (A), volumetric water contents (B), and pore water EC (C) during the observation period. Vertical bars indicate standard deviations of the data

15cm の土壌水 EC は観測期間を通じて大きな変化はなく低い値を示した。観測開始時には既に除塩が進行していたことが伺える。30cm, 45cm 深さの土壌水 EC は7月20日から21日までのまとまった降雨 (約 40mm) によって低下したこともわかる。除塩対策終了時 (7月下旬) には土壌水 EC の値が表層土では約 2 dS m^{-1} , 下層土では 3.3 dS m^{-1} まで低下した。このため、試験圃場では6月から7月の降雨により順調に除塩が進んだと考えられた。

4 土壌 EC の推定

わが国の塩害被害調査等では 1:5 水浸出法が標準的な土壌の EC 測定方法となっている (土壌環境分析法編集委員会, 1997)。そのため、今回の観測値を土壌 EC に換算する経験式を求めた。本研究では、比較的土壌 EC と相関が高いと考えられた飽和土壌水 EC をもとにした。Fig.8 に飽和土壌水 EC (センサーによる推定値) と土壌 EC (測定値) の関係を示す。これらの測定値をもとに対象土壌の土壌 EC の推定式を求めた。

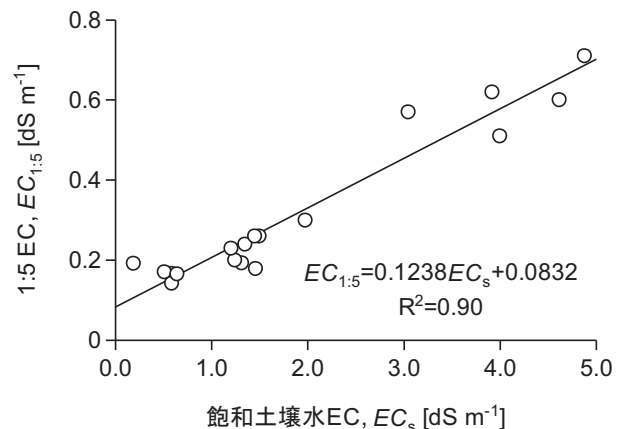


Fig. 8 飽和土壌水 EC と土壌 EC の関係

Linear calibration results for 1:5 soil solution electrical conductivities vs. saturated soil solution electrical conductivities

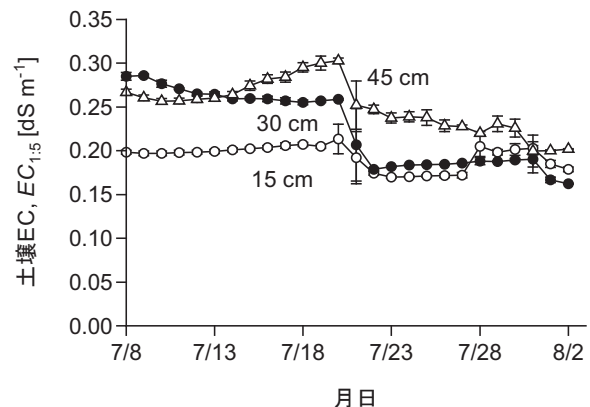


Fig. 9 土壌 EC の経時変化 (2011/7/8-8/2) 各観測値は日平均値で表わし、縦棒は標準偏差を示している

Estimated 1:5 soil solution electrical conductivities using dielectric soil moisture sensors. Vertical bars indicate standard deviations of the data

$$EC_{15} = 0.1238EC_s + 0.0832 \quad (R^2=0.90) \quad (6)$$

(6)式を用いて推定した試験圃場の土壤ECの経時変化をFig.9に示す。除塩の土壤ECの目標値は0.35 dS m⁻¹程度である。表層15cmでは0.2 dS m⁻¹前後の値で推移しており、既に目標値を下回っていたことがわかる。30cm, 45cm深さでは、0.3 dS m⁻¹前後の値を示し、観測開始時には除塩の土壤ECの目標値をやや下回っていたと推定された。その後30cm深さでは徐々に土壤EC値が減少し、7月20日から21日の降雨で15cm深さの値に近い土壤EC値まで低下したことがわかる。これに対して、45cm深さでは表層からの塩分の移動により、わずかながら土壤EC値が増加傾向にあったが、7月20日から21日の降雨で除塩が進み、その後の降雨により更に土壤EC値が下がっていったことがわかる。

IV 結 言

東日本大震災における津波で冠水被害を受けた砂質畑において、除塩過程の土壤ECモニタリングを行える計測システムを構築するとともに、現地への適用性を検討した。誘電式土壤水分センサーを用いて土壤水分、電気伝導度および土壤温度のモニタリングを行うとともに土壤ECへの換算式を求めておくことにより、現地で除塩過程を監視するために有用な情報を提供できることが確認できた。今後は、一旦、除塩対策により作土層内の塩分低下が確認できた圃場で施設栽培を再開したとき、下層からの塩分上昇の有無について同様のモニタリングを行うことにより、作土層内の塩分濃度コントロールに役立てていく予定である。

今回の塩分モニタリングは砂質土壌であったため、土壤水分量の計測にはTopp式を用いたが、一般的には精度の高い土壤水分計測には対象土壌ごとにキャリブレーションが不可欠である。また、対象が粘質土の場合、保水性が高く透水性が低いため、除塩対策がスムーズに進まない可能性があること等に留意する必要がある。

参考文献

- 1) Decagon Devices (2007) : 5TE water content, EC and temperature sensors operator's manual, 7-9
- 2) 土壤環境分析法編集委員会 (1997) : 電気伝導度 (1:5水浸出法), 土壤環境分析法, 202-204, 博友社, 東京
- 3) Hilhorst M. A. (2000) : A pore water conductivity sensor. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **64**, 1922-1925
- 4) Miyamoto, T., Kameyama, K., and Shinogi, Y. (2010) : Electrical conductivity and nitrate concentration in an Andisol field using time domain reflectometry. *Proceedings of 19th World Cong. Soil Sci.*, 1-6 August 2010, Brisbane, Australia, Published on DVD, 54-57
- 5) Mualem, Y., and Friedman, S. P. (1991) : Theoretical prediction of electrical conductivity in saturated and unsaturated soil. *Water Resour. Res.*, **27**, 2771-2777
- 6) 仁後祐輔・河田直美 (2011) : 塩害を受けた畑地の除塩実証試験について. *畑地農業*, 635, 2-12
- 7) Rhoades, J. D., Ratts, P. A. C., and Prather, R. J. (1976) : Effects of liquid-phase electrical conductivity, water content, and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **40**, 651-655
- 8) 佐賀県農業技術防除センター (2008) : 塩害対策野菜 (ホームページ : http://www.pref.saga.lg.jp/web/shigoto/_1075/_32933/ns-nousisetu/boujocenter/_10660/kisyougai/enngai/enngaiyasai.html, 2011年11月閲覧).
- 9) 東北農政局 (2011) : 東日本大震災について-農地の除塩実証試験結果について (ホームページ : <http://www.maff.go.jp/tohoku/press/seibi/bousai/110929.html>, 2011年11月閲覧)
- 10) Topp, G. C., Davis, J. L., and Annan, A. P. (1980) : Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resour. Res.*, **16**, 574-582

Assessing Salt Concentrations in the Root Zone of the Farm Land Covered with Seawater during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

MIYAMOTO Teruhito, KAMEYAMA Koji, and SHIONO Takahiro

Summary

A huge earthquake hit the north-eastern region of Japan on March 11, 2011. Subsequently, a tsunami caused by the huge earthquake struck the coastal areas causing serious damage to many towns and farm lands. Many farm lands were covered with seawater, so leaching of excess salts from the root zone was an essential process for restoration of agriculture in these areas. To assess the salt concentrations in the root zone of farm land covered with seawater, soil water content, electrical conductivity of bulk soil and soil temperature were monitored in the field with dielectric soil moisture sensors. Simple calibration methods were used to estimate temporal variations in electrical conductivity of 1:5 soil solutions. The results showed that salts in the root zone were sufficiently removed by rain water during the summer following the tsunami and the electrical conductivities of 1:5 soil solutions at depths of 0.15 and 0.30 m were reduced to approximately 0.2 dS m^{-1} by the end of July. These dielectric sensor techniques provide useful information for salt control in farm lands.

Keywords : earthquake, tsunami, dielectric soil moisture sensor, soil solution, salts concentration, electric conductivity.