

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 5 日現在

機関番号：17201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26511009

研究課題名(和文) 津波被災農地の暗渠排水による除塩機構解明と予測対策システムの開発

研究課題名(英文) Development of prediction-desining system and study on the mechanism of desalination using tile-drain for tsunami-hit farmland

研究代表者

徳本 家康 (Tokumoto, Ieyasu)

佐賀大学・農学部・助教

研究者番号：80445858

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：2014年から2016年において、宮城県津波被災農地の除塩過程を調査した。主な観測項目として、土中の水分量および土壌塩分濃度の指標となる電気伝導度を計測した。圃場の観測システムは、比較的安定して稼働し、リアルタイムにおける除塩過程の把握に大きな役割を果たした。

人工的な湛水除塩に加えて、自然降雨による除塩によって、水田栽培では問題のない程度まで土壌中の塩分は減少した。一方で、水田から転換畑(大豆栽培など)に切り替えた場合に、沿岸部からの塩水侵入により、局所的に塩害が発生するなどの問題が発生した。今後は、沿岸部からの塩水の侵入を防止するための潮受け水路が建設されるため、その評価が重要となる。

研究成果の概要(英文)：After the 2011 Tohoku earthquake, thirteen thousand hectares of farmlands were damaged by massive Tsunami near coastal sites in Miyagi, Japan. Some eighty percent of the damaged farmlands have been recovered in 2014, but subsidence and high salinity groundwater make it difficult to completely remove salinity from the soil. We monitored soil moisture and electrical conductivity (EC) with the sensor network system at tsunami damaged paddy fields. The effects of leaching on desalination due to rainfall and underdrain were investigated in paddy fields. However, salinity problems occurred locally in soybean fields because of salinity intrusion from the costal side. To facilitate the desalination in the tsunami affected areas, the levee and watercourse is constructing. For the future work, the evaluation of watercourse would be important.

研究分野：土壌物理

キーワード：津波被災農地 塩害 バルクEC TDTセンサー

1. 研究開始当初の背景

(1) 津波被災農地の塩害問題

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震によって、津波による被害を受けた農地面積は約24,000haと報告されており(平成23年3月29日農林水産省)、土壌中の残留塩分による作物の生育障害が懸念されるために営農再開に向けた除塩が緊急の課題となっていた。被災地域では、農地の除塩と圃場整備の迅速かつ円滑な進行が要求されるが、排水機場の能力が震災前よりも低下しているために灌漑水による除塩ができず、雨水に頼らざるを得ない地域もあった。とくに、被災地の塩害問題は、津波や高潮などによる海水の浸水だけでなく、海水が混入した塩分濃度の高い地下水でも発生した。

(2) 土壌環境モニタリングの必要性

津波被災による塩害および海水が混入した塩分濃度の高い地下水の状況を把握は、井戸水の地下水位や電気伝導度(EC)の観測により、行われていた。リーチングによる除塩は、一時的に余剰塩分を下方浸透させるために効果があるが、その後大豆などの栽培した結果、土壌塩分農が再度上昇するなどの問題が生じた。したがって、除塩効果の検証には、除塩後の栽培作物の収量で判断する場合にはリスクも生じるので、土壌の塩分濃度や土壌環境のリアルタイムの観測が重要と考えられた。

2. 研究の目的

本研究では、除塩を促進する効果的な暗渠施工技術の向上及び確立のために、以下の2つを目的とした。

(1) リアルタイムに観測している水分量、EC、気象データを活用した除塩の要因解明および高濃度塩による透水性変化の把握を行った。

(2) 実測データに基づき、土壌水分・溶質移動の予測を行った。また研究分担者 藤巻教授が開発したWash 2Dを利用することで、各農地の除塩にも対応した暗渠施工技術の支援および開発を試みた。

3. 研究の方法

(1) 被災農地における雨水と弾丸暗渠排水による除塩観測
[調査地と暗渠による除塩効果の検証]

① 岩沼市 研究圃場

調査地は太平洋から約4km西に位置する名取市内の2筆の水田である(図1)。千葉ら



図1 研究圃場と観測システム

の事前調査(千葉, 2012)によると、海水が5日間程度湛水したが、ガレキや土砂の流入はなかった。土壌は有機物の多い黒泥土である。弾丸暗渠の除塩効果を検討するため、弾丸暗渠未施工区と弾丸暗渠施工区を設定した。両区とも作土の透水性が高く、深度15cm程度に難透水性層(耕盤)が発達していた。これらの試験区では雨水と弾丸暗渠による除塩効果が確認されているが(千葉ら, 2012)、観測データに基づき、より除塩効果の高い暗渠排水特性を逆解析的に求めることは新たな暗渠施工設計に有用である。

東松島市大曲地区 研究圃場

津波被災農地の問題には、津波による塩害だけでなく、地震による地盤沈下により、海水側から農地へ塩水が侵入することが予想された。そのため、試験区として、地盤沈下が50~60cm生じたとされる観測圃場を東松島市にも設けた。

以上の観測地には、フィールドモニタリングシステム(FMS)を用いて、高水分・高塩分状況下でも高精度で計測可能とされているTDT(時間領域透過法)センサーの導入を検討した。図2は、FMSにTDTセンサーを用いた概略図(溝口ら, 2013)である。TDTセンサーを土壌深さ10、20、40cmの3深度に

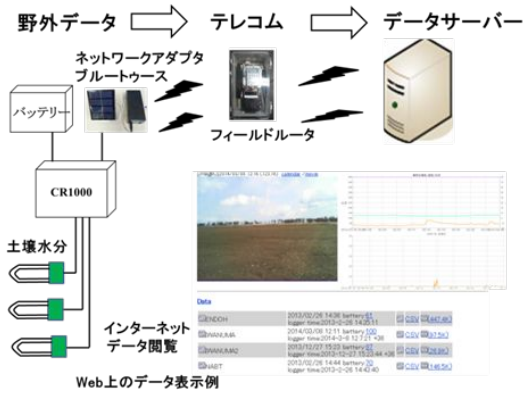


図2 圃場におけるFMSの概略図

埋設することで、体積含水率およびバルク電気伝導度（バルク EC）の連続計測を行った。また、土壤環境要因として、地下水位および地下水の EC 計測も行った。

(2) 土壤水分移動のシミュレーションでは、Hydrus 2D/3D を用いて、土壤水分・塩分移動について解析を行った。除塩復旧事業により、本研究プロジェクト期間に潮受け水路の建設が開始された。潮受け水路の概略を図3に示す。潮受け水路は、農地と沿岸堤防の間に設けられ、海岸から流入する塩水を淡水層で防ぐ役目を果たす。淡水層の維持に必要な潮受け水路への流入量 Q は、以下の式で求められる（佐々木，2014）（図3を参照）。

$$Q = \frac{N \cdot H^2 \cdot L}{2d}$$

N: 透水係数 (m h^{-1})

L: 潮受け水路の長さ (m)

本研究では、暗渠施工技術の支援および開発の一環として、潮受け水路が建設後の水分・塩分移動について検討した。

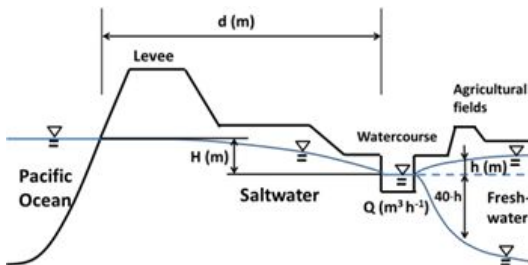


図3 潮受け水路の概略図

4. 研究成果

(1) TDT センサーの校正

津波の被害にあった宮城県東松島市大曲の農地の土壌（2014 に採取した土壌）を使用して TDT センサーの比誘電率（ ϵ ）と体積含水率（ θ ）の校正式を求めた。Young ら（1997）が鉛直方向埋設型を用いて TDR センサーの校正式を求めており、実験期間の短縮化や簡便化などの利点があったため、Young らの実験方法を参考に本実験を行った（図4）。また、同じ津波被災土を水道水で洗浄し、同様の実験を行った。

2 つの土壌条件で計測した $\theta - \epsilon$ 関係では、どちらも類似しており、Topp 式の θ を多少過大評価していることが明らかとなった（図5）。そこで、津波被災農地の土壌に対する校正式を推定した。TDT センサーの EC 計測では、バルク EC がおよそ 6 dS m^{-1} まで測定可能であることも実証できた。なお、TDT センサーの EC の補正に関しては、塩水を用いて別途実施した。

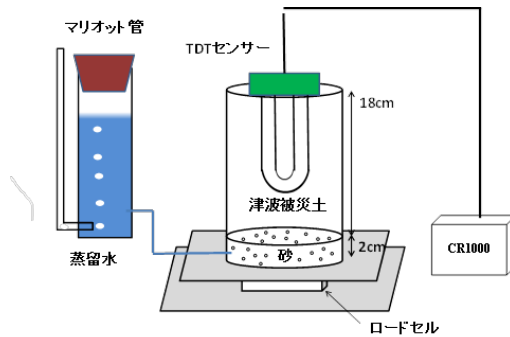


図4 TDT センサーの校正実験の概略図

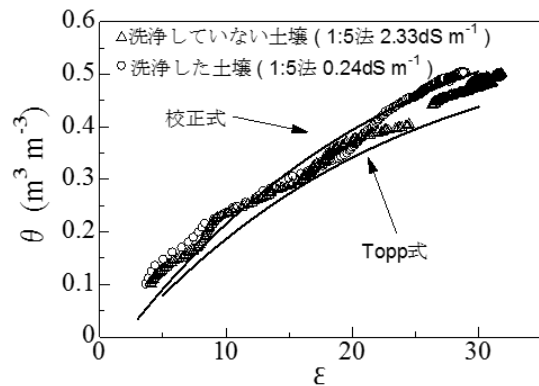


図5 TDT センサーの $\theta - \epsilon$ 関係

(2) 岩沼市圃場における土壌水分・塩分観測

ここでは、2014年の岩沼市圃場における土壌水分・塩分観測例を示す。図5で求めた校正式を用いて、体積含水率の測定を行った。2014年9月に、FMSを圃場に設置後、FMSによる圃場データの連続測定は可能になった。圃場の様子に関して、FMSに設置したWebカメラを通じて、栽培状況の把握を可能にした。

2014年には、圃場の排水整備が十分に整っておらず、降雨直後には地表面まで地下水が上昇し、飽和に達することが多かった(図5(b))。バルクECは、土壌水分量の関数であり、土中の塩分量を判断するのに判断が難しかった。ただし、土壌深さ40cmのバルクECは、 3 dS m^{-1} 程度と高く、畑地圃場として大豆などを栽培するには困難であることが明白であった。

実際に、同年度における大豆栽培では、塩害が生じて、生育不良となった。これは、津波被災農地の除塩後にも、まずは畑地栽培よりも水稻栽培による土壌塩分のリーチングを継続する重要性を示唆した。

一方で、土壌塩分による透水係数の低下について、室内実験で検証実験を行った。飽和透水係数 2 cm d^{-1} の試験圃場の土壌に対して、塩分濃度が上昇するとともに、飽和透水係数は1/10程度減少した(データ未発表)。

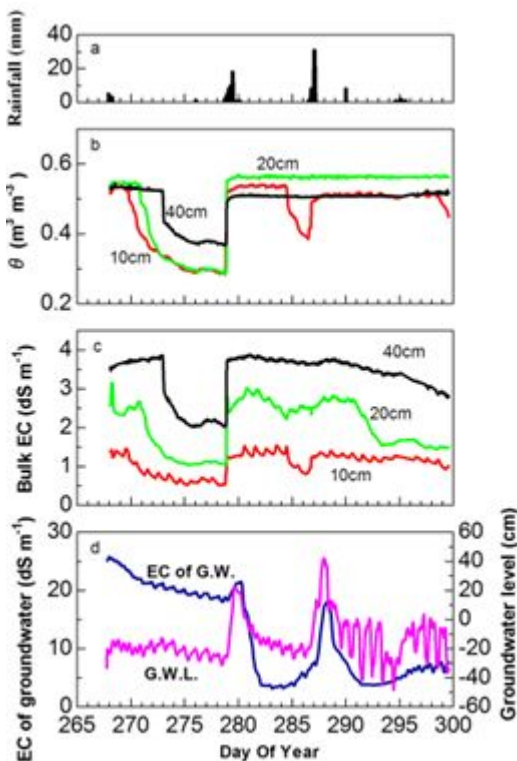


図6 2014年の岩沼市における観測例: 降水量(a), 体積含水率(b), バルク EC (c), 地下水位および地下水の EC (d).

(3) 数値実験による潮受水路の塩害抑制効果の予測

潮受水路の除塩効果の評価や予測には、体積含水率に依存しない土壌溶液EC (EC_w)の推定が重要である。これは、土壌溶液中の塩素濃度を推定する上でも必要不可欠である。本研究では、津波被災農地の土壌を用いて、Rhoadseモデルによる EC_w の推定を行った。津波被災農地における体積含水率、土壌バルクEC (EC_b)などの実測値に基づき、不飽和帯における高水分・高塩分条件下の EC_w を求めることで、潮受水路から水を浸潤させる場合の除塩過程を数値実験で予測した。

① Rhoadseモデルによる EC_w の推定

Rhoadseモデルでは、電気抵抗のアナロジーを適用して、高水分から低水分領域において非線形曲線で EC_w が求められる。

$$EC_b = T\theta EC_w + EC_s$$

ここで、 EC_s は土壌固相の電気伝導度である。一方で、Rhoades et al. (1976)は、土壌の高水分領域において、 $(EC_b - EC_s)/EC_w$ と θ は直線関係で表される。本研究では、津波被災直後の $\theta \geq 0.3 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ の条件を仮定して、以下に示す線形モデルで EC_w の推定を行った。

$$(EC_b - EC_s)/EC_w = A\theta + B$$

ここで、AとBは土壌に依存する実験定数である。本実験では、最小二乗法により、推定式のパラメータ $A=8.99$, $B=-1.78$ を決定した ($r^2=0.91$)。

Hydrus 2D/3Dによる水分・塩分移動予測

潮受け水路を想定した2次元における土壌水分・塩分の初期および境界条件を図7に示す。これは、図6の実測値に基づく条件であり、この結果を図8に示した数値実験では、地下水位が25cmで維持され、海側からは塩の流入がある状態において、潮受け水路からの流入量で如何に塩の侵入が抑制されるか検討したものである。

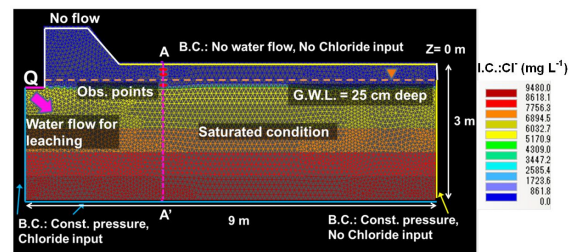


図7 潮受け水路を想定した2次元における土壌水分・塩分の初期および境界条件(図7は、図3の潮受け水路の水路から農地側の水分塩分移動を計算した)。

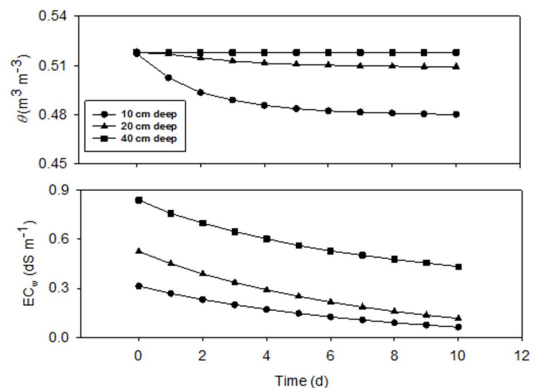


図 8 数値計算で求めた土壌深さ 10, 20, 40 cm における土壌水分量および土壌溶液濃度

数値実験の結果では、海側からの塩の侵入に関わらず、流入量 Q によって土壌溶液濃度が減少する効果が明らかになった。

(4) 津波被災圃場における土壌水分・塩分観測による潮受け水路の評価

FMS を用いて、津波被災農地のバルク EC が 2014 年から 2016 年にかけて、 1.0 dS m^{-1} を下回るほど除塩が進んだ（未発表データ）。これは、降雨によるリーチングに加えて、人工的なリーチング効果によるものであった。以上の結果を Wash 2D で計算できるように、現在検討中である。

一方で、本研究を通して、潮受け水路後の除塩効果の評価は必要であると考えられた。潮受け水路の施工段階において、流入量 Q が工学的に求められたのに対して、土壌条件などの異なる農地で十分効果があるか検討すべき課題と推察されるためである。そのため、本研究による観測技術が今後も活用されることを期待したい。

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 9 件)

①丸山佳太・徳本家康 (2016): 局所耕うん栽培による人工マクロポア周囲の水分移動に関する実験的研究, 佐賀大学農学部彙報, Vol. 101. (査読無)

郷古雅春・菅原喜久男・大場喬・千葉克己 (2016): 宮城県の沿岸低平地における復興農地整備の取組みと維持管理問題, 農業農村工学会誌 84 巻 7 号, 11-14

千葉克己・冠秀昭・加藤幸・郷古雅春 (2016): 津波被災地域の確実な農地復旧のために必要な塩害対策, 農業農村工学会誌 84 巻 6 号, 23-26, (査読有)

千葉克己ほか 2 名 (2015): 津波被災農地の復旧に貢献する農業土木技術, 土壌の物理性 129 号, (査読有)

郷古雅春・千葉克己・富樫千之・林貴峰・菅野将央・加藤徹 (2015): 東日本大震災で津波被害を受けた農地・農業用施設の復旧・復興の現状と課題, 水利科学誌 No.342, (査読有)

冠秀昭・関矢博幸・平直人・千葉克己・大谷隆二 (2015): 復旧後の津波被災農地の畑利用時における土壌塩分の変動と塩害, 土壌の物理性 129 号, (査読有)

Tokumoto, I., J.L. Heilman, K.J. McInnes, and C.L.S. Morgan (2014): Hydraulic properties of rocky soils for a semi-arid savanna on the Edwards Plateau, TX, J. of Arid Land Studies, 24-1, 77 - 80. (査読有)

Tokumoto, I. ほか 6 名 (2014): Small-scale variability in water storage and plant available water in shallow, rocky soils. Plant Soil, DOI 10.1007/s11104-014-2224-4. (査読有)

藤巻晴行・柴田雅史・徳本家康・井上光弘・齊藤忠臣 (2014): 植物成長の数値モデルと天気予報を利用した灌漑水量の決定, 畑地農業 (2014・671 号) (査読有)

〔学会発表〕(計 3 件)

① 徳本家康・道脇幹雄・千葉克己・宮本英揮・溝口勝 (2016): 津波被災農地の高水分・高塩分における土壌溶液 EC の推定: 数値実験による潮受け水路の塩害抑制効果の予測, 土壌物理学会, 京都大学

Tokumoto, I., H., Miyamoto, and K. Chiba (2015): Simulation of leaching and rootzone salinity control at Tsunami affected rice fields in Miyagi, Japan., Wageningen Soil Conference, Wageningen University, Netherland

永野一輝・徳本家康・千葉克己・長裕幸 (2014): TDT センサーによる高水分・高塩分測定の評価 -津波被災農地への適用と課題-, 土壌物理学会, 宮城大学

〔図書〕(計 1 件)

1. Fujimaki, H., I. Tokumoto, T., Saito, M. Inoue,

M. Shibata, T. Okazaki, K. Nagaz, Fathia El-Mokh (2014): Determination of irrigation depths using a numerical model and quantitative weather forecast and comparison with an experiment. Laj R. Ahuja, Series Editor in Practical Applications of Agricultural System Models to Optimize the Use of Limited Water, Advances in Agricultural Systems Modeling, Vol. 5. (査読有)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

徳本 家康 (TOKUMOTO, Ieyasu)

佐賀大学・農学部・助教

研究者番号：80445858

(2) 研究分担者

溝口 勝 (MIZOGUCHI, Masaru)

東京大学・農学生命科学研究科・教授

研究者番号：00181917

千葉 克己 (CHIBA, Katsumi)

宮城大学・公私立大学の部局等・准教授

研究者番号：00352518

宮本 英揮 (MIYAMOTO, Hideki)

佐賀大学・農学部・准教授

研究者番号：10423584

藤巻 晴行 (FUJIMAKI, Haruyuki)

鳥取大学・乾燥地研究センター・教授

研究者番号：90323253