津波を受けた水田土壌塩分の経時変化

TEMPORAL CHANGES IN SOIL SALINITY IN A TSUNAMI-AFFECTED RICE FIELD

寺崎寛章¹・草間政寛²・藤本明宏³・福原輝幸⁴

Hiroaki TERASAKI¹, Masahiro KUSAMA², Akihiro FUJIMOTO³ and Teruyuki FUKUHARA⁴

¹正会員 工博 福井大学大学院 工学研究科 (〒910-8507 福井県福井市文京3丁目9番1号)

²正会員 工修 株式会社エコ・プランナー (〒918-8026 福井県福井市湊2丁目1811番地 Y2ビル3F)

³正会員 工博 土木研究所寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1番34号)

⁴正会員 工博 福井大学大学院 工学研究科 (〒910-8507 福井県福井市文京3丁目9番1号)

A field test was conducted in a tsunami-affected paddy field in Natori city, Miyagi prefecture to understand temporal changes in soil salinity over the past 27 months and to collect information about the desalinization in the near future. Vertical profiles of the soil salinity and water content were obtained by TDR and four-electrode sensors installed down to a depth of 0.6m below the paddy soil surface near our micrometeorological station. Salt mass in the soil up to 200mm from the soil surface varied greatly due to eluviation of salt from the soil by rainfall and due to re-adsorption by the drying of the soil surface. Salt movement in the soil deeper than 200mm was, however, hardly observed for about one month to two years. Cl^- concentration in the soil was reduced to below the allowable concentration of rice planting about 400 days after the tsunami attack by runoff from the paddy field due to rainfall. It is seen from the above results that the salt removal of saline soil surface layer of 200mm is effective for the desalinization.

Key Words : Salinization, Tsunami, salt movement, paddy soil, Miyagi prefecture

1. はじめに

2011年3月11日の東日本大震災での被害は土木関連分野だけでも、建物倒壊、液状化、地盤沈下および放射能汚染など多方面にわたっている。中でも津波(海水)による農地の塩害(土壌中の過剰な塩類に起因する作物の生育障害)は深刻である。被害面積は岩手県、宮城県および福島県を中心に約2.4万haに達し、耕地面積の約2.6%に相当する(表-1を参照)¹⁾。特に宮城県の被害は最も広範囲で約1.5万ha(当県耕地面積の約11%に相当)に及び、その約85%が水田であった。

現在、塩害水田では除塩のために縦浸透法(淡水によるリーチング)、表土削除および弾丸暗渠の施工など²⁾が進められている。除塩には一般的に多くの時間およびコストを要するために、宮城県では2013年3月時点で復旧工事の着手率が70%を超えたものの³⁾、平成24年度までの営農再開可能面積は全体の約46%に留まる⁴⁾。また、海岸近くの一部の農地では、排水不良、地下水の塩性化、塩性地下水の噴出、作土層の流出および高塩濃度土壌の堆積などが除塩工事を難航させている。これより、沿岸

部での除塩完了および営農再開には、今まで以上の時間および労力を要すると推察される。

例えば、筆者らが2011年8月から定期的に土壌塩害調査⁵⁾を実施している宮城県名取市小塚原南地区では、津波から約2年6ヶ月が経過した2013年9月時点においても、未だ除塩は行われていない。同地区の農家へのアンケート⁶⁾からは、除塩工事の遅れのみならず、営農再開時期、除塩効果に関する情報不足を指摘する声が聞かれた。

過去に遡れば、日本では昭和34年の伊勢湾台風、昭和58年の日本海中部地震、平成11年の台風18号および平成16年の台風16号による高潮で水田土壌の塩性化が報告されている^{7)~11)}。日本以外ではタイ¹²⁾やインド¹³⁾、¹⁴⁾、インドネシア¹⁵⁾において津波による塩害の研究が行われているが、長期にわたって水田土壌中の塩分動態を調べた研究は少ない。今後の営農再開に向けては除塩工事前の農地での塩移動に関するデータ、例えば、除去すべき塩害土壌の厚さや塩性地下水(あるいは海水)による下方からの塩分供給の有無などが、除塩工事の設計や塩害再発防止の観点から重要となる。

そこで本研究では、除塩工事前の名取市小塚原南地区の水田を対象として、今後実施される除塩の効率化に供

表-1 東日本大震災による農地冠水被害

県名	耕地面積 (ha)※2011年	冠水面積 (ha)	面積率 (%)	冠水面積内訳	
				田(ha)	畑(ha)
青森県	156,800	79	0.1	76	3
岩手県	153,900	1,838	1.2	1,172	666
宮城県	136,300	15,002	11.0	12,685	2,317
福島県	149,900	5,923	4.0	5,588	335
茨城県	175,200	531	0.3	525	6
千葉県	128,800	227	0.2	105	122
合計	900,900	23,600	2.6	20,151	3,449

図-1 調査地周辺の津波浸水高

図-2 調査地の水田構造および勾配

表-2 調査地の土壌物性

物性値/分類	堆積層	海砂層	作土層	耕盤層
深さ(土層厚) (mm)	0~30 (30)	30~40 (10)	40~150 (110)	150~600 (450)
飽和透水係数 (cm/sec)	1.52×10^{-4}	4.06×10^{-3}	4.16×10^{-6}	8.51×10^{-6}
50%粒径 (mm)	0.32	—	0.032	0.028
10%粒径 (mm)	—	—	0.0014	0.0024
土壌分類	礫混じり 細粒分質砂	—	砂質細粒土	砂質細粒土

する塩害土壌のデータ蓄積および分析を目的に、約2年3ヶ月にわたって土壌中の塩分動態を調査したので、その結果をここに報告する。

2. 野外塩移動モニタリング調査概要

(1) 津波の被災状況

稲作を中心とした農業が盛んな名取市小塚原南地区は海岸から2~3kmの沿岸域にあり、海拔はおよそ1~2mである。図-1に示すように同地区の津波浸水高¹⁶⁾は約2~3mであり、ほぼ全ての農地では大量の海水が浸入して、汚泥の堆積、多数の瓦礫の残留、地下水の塩性化および排水設備の破損・埋没などが確認された。

(2) 調査概要

野外塩移動モニタリング調査は田畑に囲まれた小塚原汐入の水田(約0.26ha)にて行われた。図-2は調査地の水田構造および勾配を示す。従来、調査地には暗渠管はなく、東南側(海側)に明渠管(直径φ250mm)が設置されているが、津波発生以降は明渠管の約1/2~2/3が土中に埋没し、排水不良に陥っている。なお、津波発生以降の水田は手付かずのままであり、人為的な灌水および排水はない。水田勾配は図中に示すようにバラツキがあるもの

の、約1/600~1/900で明渠に向かって排水されている。また、冠水時を除けば、塩分が試験区画に流入することはない。土壌物性は表-2に示す通り、地表には約40mmの汚泥土砂が堆積し、その下に約110mm厚の作土層、約450mm厚の耕盤層(粘土層)がある。

調査は主として気象観測および土壌データ測定に大別される(図-3を参照)。気象観測では、放射収支計(Kipp&Zonen製)、三杯式風速計(Davis製)、転倒ます型雨量計(竹田計器工業製)、熱電対および気温・湿度センサー(Vaisala製)を用いた。放射収支計および三杯式風速計は地上2.0mに、熱電対および気温・湿度センサーは1.5mに、それぞれ設置した。

土壌データ測定のために、熱電対、TDR方式土壌水分センサー(東北電子製、ロッド長:150mm、ロッド直径:2mm、以下、水分センサー)および塩分4極センサー(サンケイ理化製、ロッド長:50mm、ロッド直径:5mm、以下、塩分センサー)を用いた。水分および塩分センサーは土壌体積含水率 θ (m³/m³)および塩濃度 C (kg/m³)に依存することから、事前に調査地の水田土壌を用いて、井上¹⁷⁾に倣って校正試験を行い、水田土壌の θ および C を測定した。

次に、実験方法を述べる。土壌を縦、横、深さともに0.6mまで掘削し、熱電対、水分センサーおよび塩分センサーをそれぞれ、図-3に示すように地表面下20mm、

図-3 野外塩移動モニタリング調査概要

図-4 2012年7月27日から8月25日における地表近傍(地表面下20mm)の水分および塩分の挙動

60mm, 100mm, 200mm, 350mmおよび600mmの深さに埋設し、1年以上にわたる長期の塩分動態を調べた。また、鋼製土壌採取器(オーガー)を用いて地表面から深さ600mmまでの土壌を定期的に採取し、深度別に θ , C および Cl^- (塩素イオン)濃度(乾燥土壌100g当たりの Cl^- 質量, mg/100g)をそれぞれ測定した。なお、データ収集(30分間隔)には2台のデータロガー(Campbell ScienceおよびMCS製)および4台のカーバッテリーを用いた。

3. 野外塩移動モニタリング調査結果

(1) 蒸発・乾燥および降雨・浸透に伴う水分および塩移動

図-4は2012年7月27日から8月25日における蒸発・乾燥および降雨・浸透に伴う地表近傍(地表面下20mm: 深さ $z=-20mm$)の水分および塩分の挙動を示す。プロット(○および◇)は θ および C を、縦棒は気象庁(名取)¹⁸⁾の時間降水量 $R(mm/hr)$ をそれぞれ示す。以下、論文中的下添え字の数字は測定深さ(mm)を示す。

日最高気温33.9℃, 日最大日射量884W/m²を記録した

期間A(7月28日9:00から31日21:00)において、蒸発・乾燥により θ_{20} は時間とともに0.55から0.37まで急激に低下した。一方、 C_{20} は θ_{20} と逆相関を示し、期間内で急上昇し、最高4.8%を記録した。期間B(8月6日13:00から同日17:00)では月間最大時間降水量(29.5mm/h)を記録し、水田に数cmの冠水が観られた。この期間、 θ_{20} は0.34から0.52まで上昇する一方で、 C_{20} は6.0%から1.0%まで急激に低下した。

以上より、土壌表面近傍では蒸発・乾燥に伴う塩分濃縮と降雨・浸透に伴う塩分希釈が確認できた。

図-5は代表的な蒸発・乾燥期間(2012年7月27日12:00から8月3日12:00)および降雨・浸透期間(2012年8月6日12:00から8月7日20:00)における土壌塩濃度鉛直分布の経時変化を示す。7月27日12:00には、 C_{20} が最も高く、0.62%であった。その後、蒸発・乾燥に伴い C_{20} は24時間で最大約1.5%増加し、8月3日に約6.0%に達した。 C_{60} は同期間中に僅か0.24%増加したが、それ以深で殆ど変化は見られなかった。これは表-2からも分かるように、150mm以深では粒径が小さく、透水性が非常に低い粘土で構成されていること、および塩濃度勾配が十分小さい結果、塩分

図-5 代表的な蒸発・乾燥期間(左)および降雨・浸透期間(右)における土壌塩濃度鉛直分布の変化の一例

は殆ど移動しなかったと推察される。

その後、8月6日の降雨・浸透期間において C_{20} は初め約6.0%であったが、降雨(13:00)直後から急激に低下し、5時間後(18:00)には半分以下の2.6%となった。降雨後も C_{20} が低下した理由は、排水不良によって残存した貯留水への土壌塩の溶脱が原因と推察される。結果、図-5における $z=-20\text{mm}$ の塩分希釈速度は塩分濃縮速度の約6倍であった。これより、浸透による塩の下向きフラックスは蒸発に伴う塩の上向きフラックスよりも大きいことは明らかである。なお、降雨に伴う水分浸透は地表面下100mmに達しておらず、塩移動の範囲は蒸発のそれと大差無い。

以上、1週間程度の短期的な観察によると蒸発および降雨に伴う塩移動は地表から60mmまでであり、これは相対的に大きな透水係数を有する表層の範囲(表-2を参照)にほぼ対応する。

(2) 土壌含塩量の季節変化特性

次に、長期的な土壌中の塩分動態を考察する。図-6は2012年8月、12月および2013年4月、8月における土壌含塩量 M_{salt} (mg/cm^3)鉛直分布を示す。シンボル(○)および(—)は M_{salt} の月間平均値 $M_{\text{salt}}^{\text{ave}}$ および各深さで測定された値の範囲をそれぞれ示す。2012年8月の乾期には $z=-20\text{mm}$ の M_{salt} ($M_{\text{salt}20}$)が稲作許容値(= $1.3\text{mg}/\text{cm}^3$ 、稲作限界 Cl^- 濃度 $\text{Cl}^-_{\text{al}}=100\text{mg}/100\text{g}$ 乾土¹⁹⁾および乾燥密度 $0.8\text{g}/\text{cm}^3$ に対する値)の約1.8倍の $2.3\text{mg}/\text{cm}^3$ を記録したのに対して、降雨時の $M_{\text{salt}20}$ は検出限界以下となり、 M_{salt} の変動幅は他のどの月よりも大きくなった。一方、100mm以深における M_{salt} の変動幅は小さい。

4ヵ月後の12月には降雨による土壌塩分の溶脱および明渠から水田外部への排水に伴う塩の流出によって、 $M_{\text{salt}20}$ は最大 $0.58\text{mg}/\text{cm}^3$ となり、8月のその約1/4となった。その後の2013年4月の分布を見ると、12月のそれと大差無い。これは1月から3月の間の降水量が僅か

20mm(2012年8月から2013年7月の一年間の降水量(782mm)の約2.6%に相当)であり、降雨に伴う水田外への塩分流出や下方への塩移動が無視できるほど小さかったためと推察される。結果として2012年8月から2013年8月までの1年間で、地表から深さ600mmまでの $M_{\text{salt}}^{\text{ave}}$ の積分値(ΣM_{salt})は $10.5\text{mg}/\text{cm}^2$ から $5.7\text{mg}/\text{cm}^2$ となり、約半分となった。また、深さ600mmの M_{salt} の顕著な増加はなく、600mm以深からの塩分供給はないと思われる。

土壌表層で M_{salt} が大きく変動する原因を説明するために、図-7に長期にわたる土壌内部への塩分浸透の代表例(2012年8月と2013年5月の約1ヶ月間の代表的な M_{salt} 鉛直分布)を示す。5月30日と8月27日は降雨によって表層土壌が高含水状態にあった時の M_{salt} 鉛直分布を、5月5日と8月6日は逆に低含水状態にあった時の M_{salt} 鉛直分布をそれぞれ表す。図-7より、降雨による土壌塩分の溶脱と塩の下方移動および蒸発による溶脱塩の再付着と塩の上方移動が原因となって、深さ200mmまでの土壌で M_{salt} は大きく変動した(図中の⇄で示す)。しかしながら、200mm以深においては9ヶ月の時差があるものの分布形の違いは殆どなく、200mm以深への塩分浸透は無視できることが分かる。

以上より、1ヶ月から2年程度の長期観測から、当該調査地における明瞭な鉛直方向の塩移動は、地表から深さ200mmまでに限られるとともに、1週間程度の短期の塩移動範囲(地表から深さ60mmまで、図-5を参照)よりも約3倍拡大することが分かった。

(3) 根域 Cl^- 濃度の長期変動

次に稲の生育の観点から、稲の根域(地表から深さ300mm程度²⁰⁾)における土壌中の総 Cl^- 濃度 ΣCl^- の経時変化を図-8に示す。プロット(○)は土壌サンプリングの値を示し、曲線(実線)はプロットの近似を示す。なお、塗り潰しのプロット(●)は根域稲作許容値 $\Sigma \text{Cl}^-_{\text{al}}$ を

a) 2012年8月

b) 2012年12月

c) 2013年4月

d) 2013年8月

図-6 土壌塩濃度鉛直分布の月間変化(2012年8月～2013年8月)

図-7 土壌内部への塩分浸透

図-8 稲の根域における総Cl濃度の経時変化

超えたことを示す。ここで、 ΣCl_{al}^- は次式で与えられる。

$$\Sigma Cl_{al}^- = \int_{-300}^0 Cl_{al}^- dz \quad (1)$$

よって、 $\Sigma Cl_{al}^- = 3.0 \times 10^4 \text{ mm} \cdot \text{mg} / 100\text{g}$ となる。

津波による浸水から約170日後の ΣCl^- は ΣCl_{al}^- のおよそ2.7倍となった。その後、 ΣCl^- は指数関数的に低下した。また、浸水から約400日後の ΣCl^- は全て ΣCl_{al}^- を下回った。なお、 ΣCl^- の減少は前節で述べたように、降雨による水田からの排水に伴う塩分流出に起因すると推

察される。

以上の結果を踏まえて、図-9は当該水田土壌の除塩深さの考え方を示す。図-5および図-6より、海水の冠水期間が短いほど除塩対象となる土壌層厚は薄くてすむことが知れる。除塩の目安として、海水の冠水から1週間以内であれば、地表面下60mmまでの土壌を対象に、1ヶ月以上の長期になると地表面下200mmまでの土壌を対象に、排土あるいは耕起や弾丸暗渠設置後の縦浸透法や溶出法を実施することで、除塩効果が期待できる。

図-9 水田土壌中の塩移動を考慮した除塩深さ

4. おわりに

本研究では、今後始まる沿岸部の除塩工事の設計や塩害の再発防止を最終目標に、除塩工事前の排水不良水田土壌中の塩分動態を調べることを目的として、約2年3ヶ月にわたって野外塩移動モニタリング調査を行い、土壌塩分動態を調べた。

その結果を以下に列挙する。

- (1) 土壌体積含水率と塩濃度は逆相関を示し、今回の事例では、降雨による塩分希釈速度は蒸発による塩分濃縮速度よりも約6倍速い。
- (2) 蒸発および降雨に伴う塩移動範囲は1週間以内であれば地表から深さ60mmまでの表層に限られる。
- (3) 塩分の鉛直移動範囲は時間とともに拡大するが、1ヶ月から2年間程度では地表から深さ200mmまでに限られ、それ以上の塩移動は無視できる。
- (4) (2)と(3)より海水の冠水から1週間以内であれば、地表面下60mmまでの土壌が、1ヶ月以上の期間になると地表面下200mmまでの土壌が、それぞれ排土や耕起による除塩対象となる。
- (5) 本調査地においては天水(雨水)除塩により、津波から約400日後に稲の根域(地表から深さ300mmまでの範囲)における総Cl⁻濃度が根域稲作許容値(3.0×10⁴mg・mm/100g)を下回った。

今後は除塩前の塩害水田土壌を対象に土壌中の熱・水分および塩移動モデルを構築し、除塩シミュレーションを行い、除塩の効率化を図る。

謝辞：本研究は小塚原南農業復興組合代表 遠藤清氏の多大なご協力と、平成24年度 JSPS科研費(23860024)を受けて行われた。ここに記して深甚の謝意を表す。

参考文献

- 1) 農林水産省：津波により流失や冠水等の被害を受けた農地の推定面積(<http://www.maff.go.jp/j/press/nousin/sekkei/pdf/>)

110329-02.pdf), 2013.

- 2) 農林水産省：農地の除塩マニュアル(<http://www.maff.go.jp/j/press/nousin/sekkei/110624-01.pdf>), 2011.
- 3) 宮城県：復興の進捗状況(平成25年3月11日), 2013.
- 4) 農林水産省：農業・農村の復興マスタープラン(http://www.maff.go.jp/j/kanbo/joho/saigai/higai_taio/pdf/plan_2505.pdf), 2013.
- 5) 寺崎寛章, 草間政寛, 福原輝幸：宮城県名取市, 岩沼市および亘理町における津波後の水田土壌塩害調査, 土木学会第67回年次学術講演会講演概要集, CS10-017, pp. 33-34, 2012.
- 6) 寺崎寛章, 草間政寛, 福原輝幸：東日本大震災後の宮城県名取市における除塩事業に関するアンケート, 土木学会第68回年次学術講演会講演概要集, VII-006, pp. 11-12, 2013.
- 7) 米田茂男：伊勢湾台風による冠潮塩害土壌について, 岡山大学農学部学術報告, Vol. 18, pp. 51-60, 1961.
- 8) 三浦昌司, 児玉徹, 金田吉弘：日本海中部地震による津波被害, 農業技術, Vol. 39, No. 2, 1984.
- 9) 河田直美, 有和利典, 大内英司：平成11年台風18号による塩害対策—38年ぶりの実施—, 水と土, Vol. 121, pp. 10-17, 2000.
- 10) 熊本県八代農業改良普及センター：台風18号技術対策資料集, pp. 1-51, 2001.
- 11) 香川県農業経営課：農地への海水の流入が農作物に及ぼす影響とその対策, pp. 1-14, 2004.
- 12) 中矢哲郎, 丹治肇, 桐博英：2004年インド洋津波によるタイ南部農村地帯の長期的被害調査, 海岸工学論文集, Vol. 53, pp. 1381-1385, 2006.
- 13) 久米崇, 梅津千恵子, K. Palanisami：2004年12月の巨大津波によるインドタミルナドゥ州の農地における塩性化被害と回復評価, 農業農村工学会論文集, Vol. 78, No. 2, pp. 83-88, 2010.
- 14) Raja, R., Chaudhuri, S. G., Ravisankar, N., Swamam, T. P., Jayakumar, V. and Srivastava, R. C. : Salinity status of tsunami-affected soil and water resources of South Andaman, India. *Current Science*, Vol. 96, pp. 152-156, 2009.
- 15) Agus, F., Rachman, A., Wahyunto, Ritung, S., Mcleod, M. and Slavich, P.: The dynamics of Tsunami affected soil properties in Aceh, Indonesia, *Journal of Integrated Field Science*, Vol. 9, pp. 11-20, 2012.
- 16) 原口強, 岩松暉：東日本大震災津波詳細地図 上巻 [青森・岩手・宮城], 古今書院, pp. 76, 2011.
- 17) 井上光弘：塩分を含んだ砂に対する誘電率水分計の測定精度の評価, 水文・水資源学会誌, Vol. 11, No. 6, pp. 555-564, 1998.
- 18) 気象庁：気象統計情報(<http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html>), 2012.
- 19) 千葉県農林部農業改良課：千葉県農林公害ハンドブック 千葉県農林部農業改良課編, 1989.
- 20) 川田信一郎：写真図説イネの根, 農山漁村文化協会, 1982.

(2013. 9. 30受付)