

木材チップ塩成土壌改良工法による塩害農地の土壌修復の実証試験

杉本 英夫 三好 悟

Examination of Soil Remediation by Salt Removal through Improvement Technology using Woodchip-mixed Materials for Saline Soil

Hideo Sugimoto Satoru Miyoshi

Abstract

The soil in farmland has undergone damage by salt because the tsunami carried sea water, mud, etc. This causes an increase in the cost of restoration and management of a farm. Then, the soil improvement technology developed in this study can reduce such salt damage by using woodchip-mixed materials and the chemical fertilizers with rain water. This paper presents the characteristics of developed technology and the case of using tsunami-affected seaside woods at an investigation site. The results are summarized as follows. (1) An improved soil structure developed in wet-dry cyclic condition, and its water permeability improved too. The efficiency of the technology will increase, if a wood chip is mixed with an improvement material and also the underdrain function is combined cultivation work. (2) The technology that prevents the swelling of the colloid was effective in reducing the sodium chloride content of seawater and also the amount of exchangeable sodium.

概要

東北地方太平洋沖地震による津波の影響により、海水や泥などが農地を覆ったため、塩害が発生した。そこで、この対策のために、被災木材と雨水を利用して除塩する、木材チップ塩成土壌改良工法を開発した。本報では、本工法を適用した塩害農地における実証試験で得られた結果を報告する。(1) 土壌改良に乾燥と湿潤を繰り返す条件で土壌構造が発達し、透水性が高くなることを確認した。木材チップと改良材を混合して、暗渠や耕うんを組合せると塩類の減少効率が進む。(2) 土壌改良材で土の分散を抑制する対策により、塩化ナトリウムは減少し、土に吸着している交換性ナトリウムも減少することを確認した。

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震の津波被害を受けた農地は、海水や泥などで覆われ、塩害が発生する土壌に変わった¹⁾。地域の再生・復興を進めるため、一刻も早い除塩が望まれ、国や自治体による復旧事業が行われている²⁾。

降水に恵まれた日本では、農地からの排水が確保できれば、除塩が可能になる。農地に灌漑水を入れて湛水して、土を掘り起こすなどの浸透性を高める対策を行うと、土の間隙に含まれる塩化ナトリウムなどが減少する。しかし、溶存塩類は減少しても、土に吸着している交換性ナトリウムは、減少しにくいなどの課題がある。

一方、農地を守っていた海岸林は津波でなぎ倒され、生き残った木も塩害によって枯れた。これらは、大量の震災廃棄物になるため、木質系の資源として有効活用の課題があった。

そこで、降水および、震災で発生した被災木材を利用する、木材チップ塩成土壌改良工法(以下本工法という)を開発した³⁾。本工法の効果を検証するため、2011年11月から試験準備に着手し、排水路が復旧したのを確認した後、2012年4月から9月まで実証試験を行った。本報では、実証試験で得られたデータに基づき、津波で被災した農地土壌(以下農地土壌という)の修復効果を述べる。

2. 試験地の地勢および土壌の理化学性

2.1 地勢

Fig. 1 試験地の位置, Photo 1に試験地を示す。試験地は、宮城県岩沼市早股地区の水田で、数mの津波をかぶった。海岸から2kmほど内陸にあり、阿武隈川河口近くで、氾濫が繰り返された場所である。試験地とその周辺の農地は、被災から8カ月経っても、雨が降れば水が溜まり、排水不良になっていた。



Fig. 1 試験地の位置

(左図:国土地理院¹⁾, 右図:農林水産省²⁾)

Investigation Site of Tsunami-Affected Farmland

2011年11月16日に行った土壌断面調査では、津波で運ばれた堆積層が厚さ5cmで、表面には塩類の結晶らしきものも確認した。農地土壌は緻密な粘性土であるが植物根の痕が地中に確認できたこと、そして農地に隣接する排水路は埋まっていたが地下水位が深さ50cm以下のため、地下への水の移動は期待できる判断した。

2.2 土壌の理化学性

土壌断面調査で層位を区分し、堆積泥層0~2cm、堆積砂層2~5cm、作土層5~50cmから採取した試料を用いて、物理性・化学性、粘土鉱物の同定、分散凝集性を調べた。土の塩類濃度が低下し、粘土が分散状態になると、透水性が低下して除塩が遅れる場合がある。分散凝集性が分かれば、多量の水が加わった土の挙動が推測できるため、土壌改良材（以下改良材という）の検討に役立つ。

また、実証試験では津波の堆積層を残した状態で除塩を行うため、被災から1年後の2012年4月19日に、耕うんにより堆積泥層、堆積砂層、作土層を混合した土を採取して、交換性ナトリウム率（以下ESPという）を調べた。一般的にESPが下がれば、土に吸着していたナトリウムイオンが減り、除塩が進んだことを判断できる。さらに、改良材を混ぜて土を凝集状態にすると、ESPを下げる効果が期待されるため、試験の評価に役立つ。

2.2.1 物理性・化学性 物理性の分析は土質試験の方法と解説⁴⁾、化学性の分析は土壌標準分析・測定法⁵⁾に準拠した。なお、pHと電気伝導度（以下ECという）の試料は、フルイ径2mm通過の未風乾土を用いた。水溶性イオンの検液は、フルイ径2mm通過の風乾土を用い、土：水比=1：5で1時間振とう、遠心分離後にろ過（ろ紙No.6）した。陽イオン交換容量（以下CECという）と交換性陽イオンの試料は、水溶性イオン検液作成時の遠心分離残渣を風乾し、フルイ径2mm通過分を用いた。ESPの値は、CECに対する交換性ナトリウムイオンの割合で求めた。

Table 1 に物理性・化学性を示す。堆積泥層では、EC 6.9 dSm⁻¹、水溶性ナトリウムイオン1.0gL⁻¹、水溶性塩化物イオン2.5gL⁻¹を示した。堆積砂層では、EC 1.1dSm⁻¹で水溶性ナトリウムイオン0.3 gL⁻¹、水溶性塩化物イオン0.6gL⁻¹、作土層では、EC 1.9dSm⁻¹、水溶性ナトリウムイオン0.5 gL⁻¹、水溶性塩化物イオン1.1gL⁻¹を示した。これらは、普通畑土壌の改善目標値⁶⁾のEC0.1~0.2 dSm⁻¹より高く、水溶性塩化物イオンも多いため、海水の影響が残っている。ESPが堆積泥層38%、堆積砂層22%、作土層19%を示し、塩類土壌の指標値⁷⁾の15%を超えており、多量の交換性ナトリウムが土に吸着している。pHは、堆積泥層pH6.6の中性で、堆積砂層と作土層はpH5以下の酸性を示した。pHが酸性を示した理由として、硫化物由来の硫酸生成の影響が考えられた。Fig.2に粒径加積曲線を示す。堆積泥層では、堆積砂層と同様に砂を含むが、粘土・シルト50%以上、作土層は同じく80%以上を示した。

これより、農地土壌は、海水の影響が残る、粘土が多く、ESPも高いため、除塩が難しい状態と考えられた。



Photo 1 試験地（2011年11月16日）
Investigation Site of Tsunami-Affected Farmland

Table 1 物理性・化学性
Physical and Chemical Characteristics of Soil

採取深度		0~2cm	2~5cm	5~50cm
分析項目	単位	堆積泥層	堆積砂層	作土層
含水比	-	0.30	0.29	0.60
真比重	-	2.67	2.66	2.62
粒形	砂	39	56	13
	シルト	35	28	30
	粘土	26	17	57
50%粒径	mm	0.04	0.111	0.003
強熱減量		6	5	8
全炭素	%	0.8	1.0	1.9
全窒素		0.07	0.08	0.17
全硫黄		0.06	0.05	0.13
pH	-	6.6	4.9	4.5
EC(電気伝導度)	dSm ⁻¹	6.9	1.1	1.9
水溶性イオン (土：水=1：5)	Na ⁺	1.0	0.3	0.5
	K ⁺	0.04	0.01	0.01
	Ca ²⁺	0.3	0.0	0.1
	Mg ²⁺	0.2	0.0	0.1
	Cl ⁻	2.5	0.6	1.1
	SO ₄ ²⁻	0.2	0.1	0.1
	NO ₃ ⁻	<0.0001	0.009	0.003
交換性陽イオン	Ca ²⁺	12	5	9
	Mg ²⁺	5.6	3.0	5.3
	K ⁺	1.0	0.6	0.8
	Na ⁺	6	3	4
CEC(陽イオン交換容量)		16	12	24
ESP(交換性ナトリウム率)	%	36	22	19

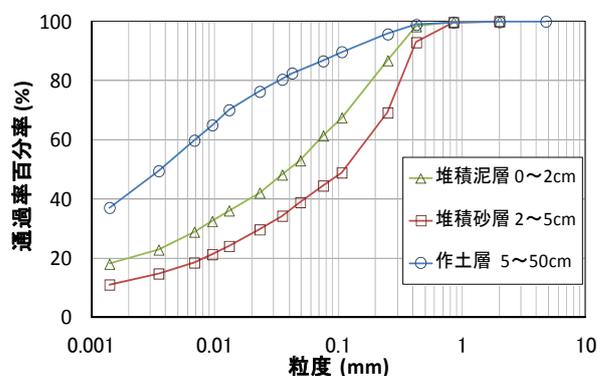


Fig. 2 粒径加積曲線
Distribution Curve of Particle Size

2.2.2 粘土鉱物の同定 Fig.3に堆積泥層のX線回折図を示す。試料は、粒径0.002mm以下に沈降分離したもので分析した。定方位法の8.8°のピークは、エチレングリコール (EG) 処理で低角側へ移ったため、スメクタイトを確認できた。他の鉱物は、石英、緑泥石、長石、雲母粘土鉱物、カオリン鉱物を確認した。堆積泥層と堆積砂層、作土層からは、同じ鉱物が確認された。

これより、この農地で除塩を行う場合は、津波堆積層に含まれるスメクタイトの吸水膨潤の影響で、透水性の低下が予想されるため、その対策が必要と考えられた。

2.2.3 分散凝集性 Fig.4に分散凝集性を示す。試験は、風乾土20gを200mL有栓シリンダーに量り取り、全体の容量を200mLとして1時間水平攪拌した後、24時間静置後の沈定容積、上水濁度、ECとpHを測定した。次に、上液100mLを純水と置換し、容量を200mLとして攪拌と測定の操作を7回繰り返した。

堆積泥層と堆積砂層では、水置換3回で濁り始め、水置換4回で見通せなくなった。作土層では、水置換1回で濁り始め、水置換2回から濁度が上昇して、見通せなくなった。いずれもECが 1dSm^{-1} 以下に下がった状態で分散した。土が分散した状態のpHは、堆積泥層では水置換4回でpH7.5に上昇し、中性を保った。堆積砂層と作土層では、pH6の弱酸性を示した。

これより、水置換による塩濃度低下に伴って、土が分散状態になることから、農地土壌に多量の水が加わると濁水の発生や透水性の低下が起きることが予想された。そこで、カルシウムを含む改良材などを混ぜて、土を凝集状態にする対策が有効と考えられた。

2.2.4 混合土のESP(交換性ナトリウム率) 試験は、フルイ径2mm通過の風乾土を用い、ショウレンベルガー法に準拠して水溶性イオンを抽出後、酢酸アンモニウム液で交換性イオンを抽出し、CECおよび交換性陽イオンを求めた。水溶性イオンの測定に使った試料は、塩類が洗い流されているため、交換性陽イオンを正確に測定できる。pHとECは、フルイ径2mm通過の未風乾土を用いて、土：水比=1：5の検液で測定した。

Table 2に堆積層と作土層の混合土の化学性を示す。混合土は、pH5.1、 $EC0.3\text{dSm}^{-1}$ 、水溶性ナトリウムイオン $1.2\text{cmol}_c\text{kg}^{-1}$ 、交換性ナトリウムイオン $0.7\text{cmol}_c\text{kg}^{-1}$ を示した。水溶性ナトリウムイオンおよび交換性ナトリウムイオンは、一般の畑地土壌⁸⁾にはほとんど含まれないのに比べて、やや高い値であった。しかし、ESPは3%で、塩類土壌の指標値の15%を下回った。交換性および水溶性イオンを合計して、土のイオン交換にかかわる全てのナトリウムイオンで求めた最大ESPでも9%と低かった。

これより、農地土壌は、堆積層と作土層を混合すれば、ESPが低下することが確認された。理由は、ESPが低い作土層の土の影響で、物理的に希釈されることが考えられた。しかし、交換性ナトリウムを吸着している土粒子は除かないため、土の分散による透水性の低下への対策は必要である。

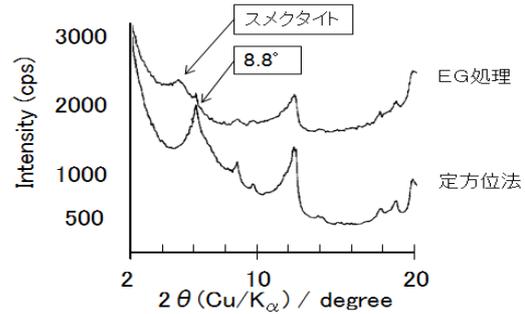


Fig. 3 堆積泥層のX線回折図
X-Ray Diffraction Pattern of a Mud Layer

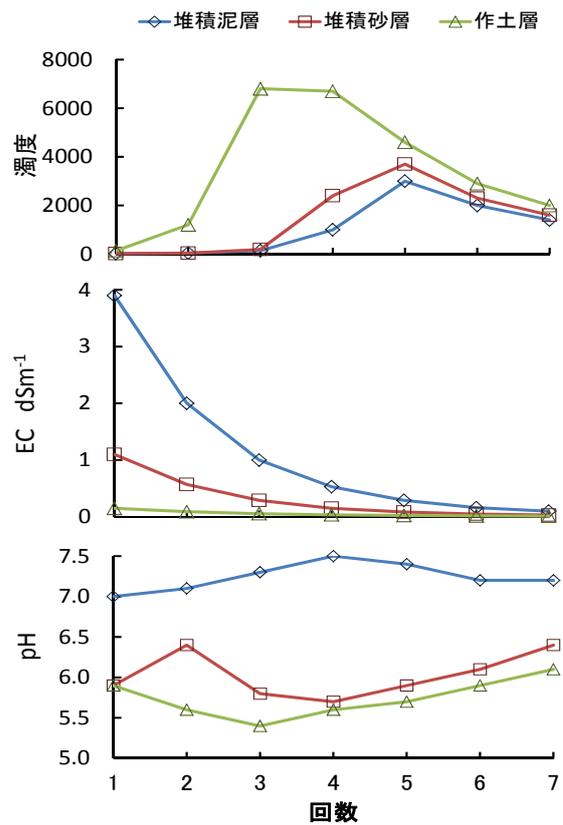


Fig. 4 分散凝集性
Character of Dispersion-Flocculation

Table 2 堆積層と作土層の混合土の化学性
Chemical Character of a Mixed Soil in the Sedimentary Layers, a Cultivated Layer

pH	-	5.1	
EC(電気伝導度)	dS m^{-1}	0.3	
水溶性陽イオン	Ca^{2+}	0.2	
	Mg^{2+}	0.1	
	K^{+}	0.1	
交換性陽イオン	Na^{+}	1.2	
	Ca^{2+}	$\text{cmol}_c\text{ kg}^{-1}$	7.0
	Mg^{2+}	3.2	
	K^{+}	0.7	
CEC(陽イオン交換容量)		20.4	
塩基飽和度		57	
ESP(交換性ナトリウム率)	%	3	
最大ESP(全交換性ナトリウム率)		9	

3. 実証試験

3.1 試験区

Table 3に試験区の設定, Fig.5に試験区の配置, Fig.6に畝および暗渠の配置を示す。試験は, 土壌改良とそれに関わる作業の組合せを比較した。面積は2,500m²で, 試験区A1~E2を各200m²(25m×8m), 試験区X 100 m²(25m×4m), 未処理区 (以下CTLという) 180m²とした。

試験区からの排水を促すために, 各区の外周に深さ30cmの開渠を設けた。暗渠は設置が容易な弾丸方式で, 畝の間に設置した。木材チップおよび改良材の散布作業は2012年4月19日に行い, 混合作業を4月20日に終えた。

3.2 木材チップの条件と機械作業

塩害の要因となる塩分は, 土の間隙に保持されている。微細な土粒子が集まった土塊の状態では, 水が通らないため, 塩分が抜けない。そこで, 土塊に間隙を作り, 水と空気が流れる状態にするため, 木材チップを利用した。

木材は, 津波の影響で立ち枯れた, 海岸林のマツの原木を利用した。農地に利用するため, 葉害などの懸念がないものを選んだ。マツは樹皮を除いた幹を破碎し, 2インチのフルイを通して粒形を整えたものを使用した。

Photo 2に作業機械を示す。木材チップの加工は, タブグラインダーを用いた。木材チップの混合は, 肥料散布に用いるマニアスプレッターで一定量を散布した後, トラクターを用いて混合した。土との混合は, 容積比10%以上を目標とした。試験区の津波堆積物の層厚は5cmのため, 散布量は1 m²当たり10Lとした。耕うんの深度は15cmで, 津波の堆積層と作土層も一緒に混ぜた。耕うんと畝立は, 土の状態を均等化する目的で行った。その作業は, 降水量20mm/日以上雨が降った後で, 土の練返しを防ぐため, 開渠に水が無くなり, 土が乾き始めた状態で作業した。また, 開渠は, 木材チップおよび改良材を混合する前に, 大型トラクターに溝掘り機を取付けて作業した。暗渠は, 試験区E1とE2に設置した。

3.3 改良材の利用

2.2土壌の理化学性の結果から, 塩類濃度が低下すると土が分散状態になり, 透水性の低下が予想された。その要因のナトリウムイオンは, 土の表面に吸着している。そこで, ナトリウムイオンを化学的に土粒子表面から脱着させるため, カルシウムイオンを含む改良材を利用する。改良材は, 一般に入手可能な改良材SuPh, 改良材Gyp, 炭酸カルシウムの3種類とした。使用量は, 事前に採取した試料を用いて, 2.2.3分散凝集性の試験方法で凝集条件を調べ, 農地土壌の凝集に必要な量を求めた。

改良材SuPhおよび改良材Gypは, 2g/kg-wetで凝集したが, 炭酸カルシウムは5g/kg-wetでも凝集しなかった。そこで, 改良材SuPhおよび改良材Gypは, 基準値を参考に深さ30cmまで土壌改良する量を使用した。炭酸カルシウムは, 改良材SuPhおよび改良材Gypと同量を使用した。

Table 3 試験区の設定条件
Conditions of Comparative Experiment

条件 試験区	耕うん	耕うん 畝立	木材 チップ	堆肥 (木質)	改良材 SuPh	改良材 Gyp	炭酸 カルシウム	暗渠
CTL								
X							○	
A1	○							
A2		○						
B1		○	○					
B2		○		○				
C1		○			○			
C2		○				○		
D1		○	○		○			
D2		○	○			○		
E1		○	○		○			○
E2		○	○			○		○

※CTL (Control, コントロール 未処理)

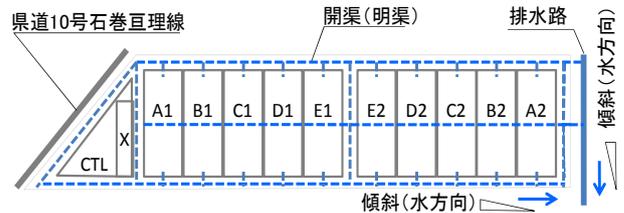


Fig. 5 試験区の配置
Experimental Plots

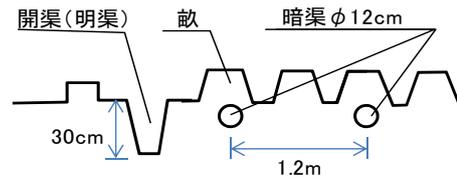


Fig. 6 畝および暗渠の配置
Arrangement of Under-drain, Furrow Ridges



タブグラインダー
木材チップの加工



マニアスプレッター
木材チップの散布



中型トラクターとロータリー
木材チップ等混合・耕うん



中型トラクターと畝立て機
畝立て作業



大型トラクターと溝掘り機
開渠 (明渠) の設置



サブソイラーと弾丸暗渠
弾丸暗渠の設置

Photo 2 作業機械
Experimental Works and Machines

3.4 除塩過程の調査

雨水の浸透と除塩の関係性を明らかにするため、4月から9月に調査を行った。項目は、気象、土壌水分動態、土壌塩類、土壌構造とした。降水量は現地で毎時データを記録し、アメダスも利用した。土壌水分動態は、試験区A1～E2にテンシオメータを深さ10cmに設置して、測定した値を水ポテンシャルpFで示した。土壌塩類は、土を耕うん前に表層0～20cmの深さで採取して、ECとESPを測定した。測定方法は2.2.4 ESPと同じで、試料採取は、耕うん作業の前日に行い、試験区内の5か所で、直径5cmの円筒管を深さ10cmに打込む作業を3回繰り返す作業を行った。採取日は、試験開始後の20日、58日、90日、117日となった。

土壌構造は、4カ月後に試料を採取して、三相分布を調べた。試料は、直径10cm程度の土塊があるため、直径30cmの円筒シリンダーを利用して、深さ30cmまで採取した。なお、除塩状況の評価のため、この試料で塩化物イオン濃度を測定した。方法は、農地の除塩マニュアル⁹⁾を参考にして、土壌環境分析法¹⁰⁾に準拠して分析した。

4. 実証試験の結果と評価

4.1 降水量と土壌水分動態

4.1.1 降水量 Fig. 7に試験期間中の降水量を示す。毎月の雨量の平均値は5mm/日で、1日の雨量が20mmを超える日があった。試験期間中に雨が定期的に降っていて、蒸発量を上回る降水量があった。

これより、試験期間は、農地土壌に浸透に必要な降水量があり、除塩が進む状態であることを確認した。

4.1.2 土壌水分動態 Fig. 8に降雨後の土壌水分動態を示す。2012年5月3日～4日の降雨は、1時間当たり10mm以上の状態が断続的に続き、総量が100mmを超えた。この時、全ての試験区でpF0.1以下を示した。

pF0.1以下が連続した期間は、試験区A2が6日間、試験区B2とC2が2日間、試験区D2が9時間、試験区E2が5時間であった。試験区D2とE2は、pFの変動が大きく、降水直後から土壌水分が移動する状態であった。

これより、農地土壌は、木材チップと改良材が混じり乾湿を繰り返す条件で土壌構造が発達し、毛細管隙の水分移動が進む。暗渠が加わることで透水性がさらに改善されることを確認した。

4.2 土壌塩類

4.2.1 ECとESP Fig. 9にECと最大ESPを示す。最大ESPは、水溶性と交換性のナトリウムイオンを合計して求めた。試験区A1は、ECおよび最大ESPの急激な低下はないが、時間の経過とともに徐々に低下した。試験区B1,C1,D1,E1は、4カ月後にEC0.3～0.4dSm⁻¹、最大ESP7～13%へと低下して、塩類土壌の範囲外の状態になった。

これより、農地土壌は、木材チップ、改良材などに加え、耕うん作業の効果でも除塩が進むことを確認した。

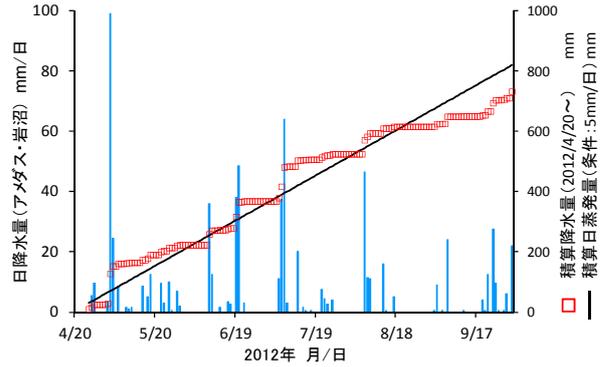


Fig. 7 試験期間中の降水量
Precipitation of Rainy Season

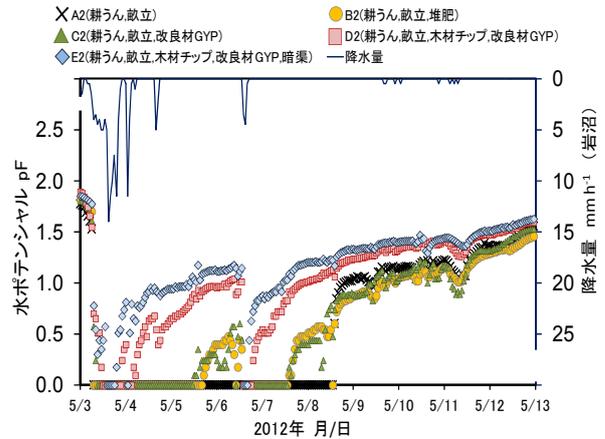


Fig. 8 降雨後の土壌水分動態
Soil Water Potential after Rain

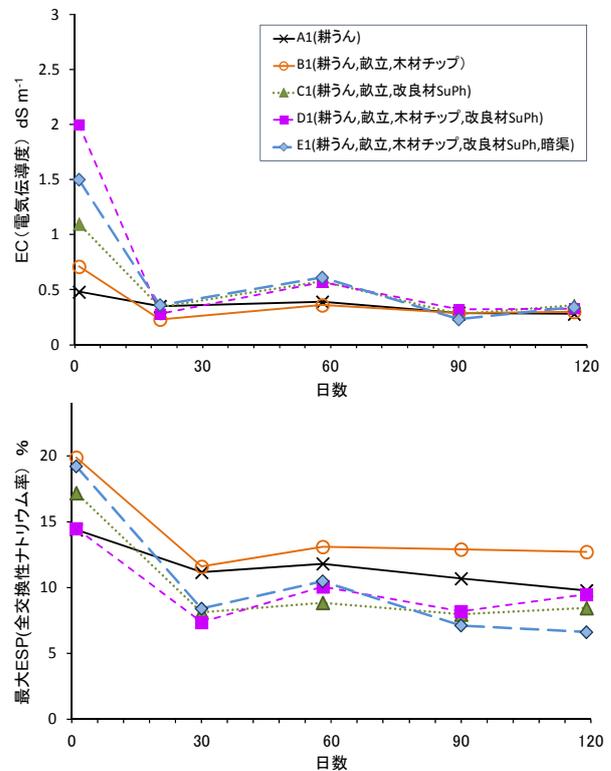


Fig. 9 ECと最大ESP
EC (Electrical Conductivity)
and ESP (Rate of Exchangeable Sodium)

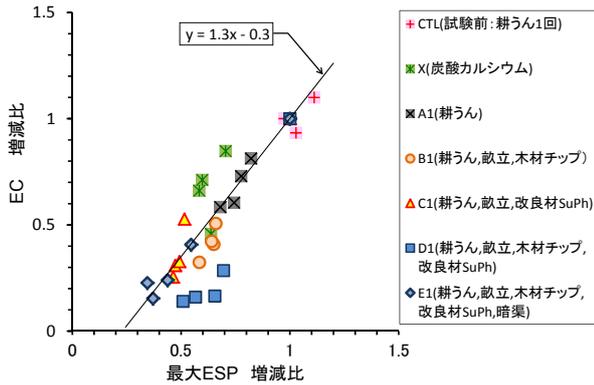


Fig. 10 初期値を基準にしたECと最大ESPの増減比
Ratio of Increase and Decrease about EC and ESP

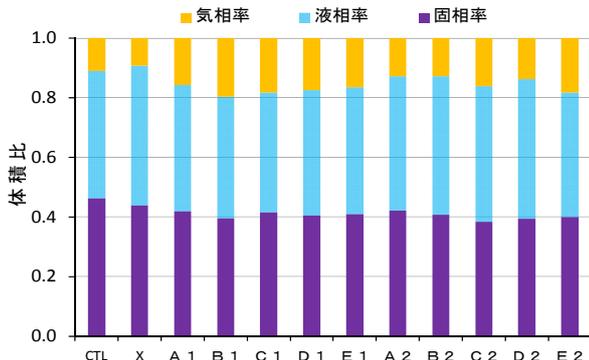


Fig. 11 大型シリンダーによる三相分布
Three Phase by Large-size Cylinder

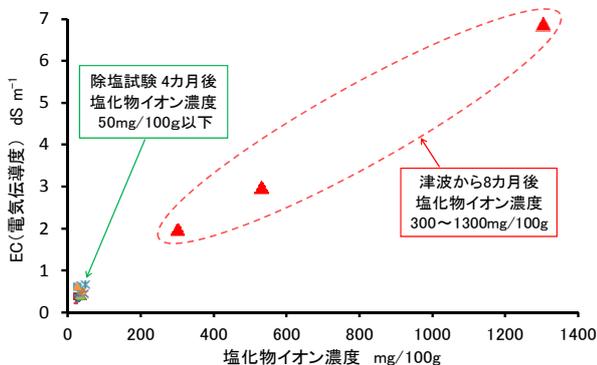


Fig. 12 ECと塩化物イオン濃度
Comparison of EC and Chloride concentration,
Before or After an Examination

4.2.2 土壌改良の効果 Fig. 10に初期値を基準にしたECと最大ESPの増減比を示す。数値は、4.2.1で求めたECと最大ESPを利用した。値が小さくなるほど減少比が大きく、除塩が進んでいると判断できる。

CTL区の増減比は微増の傾向を示したが、CTL区以外の区の増減比はすべて減少した。CTL区を除く各試験区の増減比は、A1>X>B1>C1>D1>E1の順にであった。試験区B1は、4カ月後にECが7割減少、最大ESPは4割減少して、試験区A1より減少の割合が大きかった。この差は、木材チップを混ぜた効果と考える。

これより、農地土壌の除塩には、木材チップおよび改良材の添加に加え、暗渠、耕うん作業を組み合わせると塩類減少の効率が高まることを確認した。

4.3 土壌構造の変化と除塩状況の評価

4.3.1 土壌構造の変化 Fig.11に大型シリンダーによる三相分布を示す。木材チップを混ぜた試験区B1,D1,D2,E1,E2は、固相率39~41%を示し、CTL区比べて固相率が減り、気相率と液相率のバランスが改善された。固相率が減った理由は、木材チップが生分解して土壌の間隙が増え、団粒化が進んだためと考える。

これより、農地土壌は、土の間隙が増えて、土壌構造が発達したことを確認した。

4.3.2 除塩状況の評価 Fig.12にECと塩化物イオン濃度を示す。除塩対象となる農地土壌の基準値は、水田0.1%(CL 100mg/100g)、畑0.05%(CL 50mg/100g)である。4カ月後の試料は、全ての試験区で0.05%以下を示した。

これより、農地土壌は、除塩事業の対象にならない状態であることを確認した。

5. まとめ

農地土壌には津波堆積土が5cm程度あり、塩害が生じる状態であった。実証試験の結果、木材チップおよび改良材の効果で土壌構造が発達して、間隙に降水が十分に浸透したため、交換性ナトリウムイオンが減り、除塩が進んだことを確認した。成果は、灌漑水が不十分な地域などの塩害農地の土壌修復に役立てていきたい。

謝辞

貴重な助言及び分析データをいただいた共同研究者の東北大学大学院農学研究科 教授 南條正巳氏、助教 菅野均志氏、博士課程前期1年 新井大介氏、そして被災農地における試験の支援をいただいた農家 平塚静隆氏に深謝致します。

参考文献

- 1) 国土地理院：東北地方太平洋沖地震10万分1浸水範囲概況図, (2011)
- 2) 農林水産省：農業・農村の復興マスタープラン, 平成25年5月29日版, (2013)
- 3) 杉本英夫, 三好悟：塩害農地の対策技術, 大林組技術研究所報, No.76, (2012)
- 4) 地盤工学会：土質試験の方法と解説, (1990)
- 5) 日本土壌肥料学会 土壌標準分析・測定法委員会：土壌標準分析・測定法, 博友社, (1986)
- 6) 地力問題研究会：地力増進法解説, 地球社, (1985)
- 7) 農用地整備公団：塩類集積に関する基礎的情報・昭和62年度海外農業開発技術情報整備調査事業, (1988)
- 8) 杉本, 他：建設発生土の緑化利用に関する研究(その2) 武蔵野台地に分布する雑木林の土壌特性, 大林組技術研究所報, No.50, (1995)
- 9) 農林水産省：農地の除塩マニュアル, (2011)
- 10) 日本土壌肥料学会 土壌環境分析法編集委員会：土壌環境分析法, 博友社, (1997)