

東日本大震災における津波被災農地の塩害対策

後藤 逸男・稲垣 開生

東京農業大学

1. はじめに

東日本大震災の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は水田 20,151ha、畑 3,449ha、合計 23,600ha で被災 6 県の耕地面積の 2.6%に達する。特に、宮城県では県内耕地面積の 11%にもおよぶ。また、福島第一原発から 30km 圏内と 5,000Bq/kg 以上の放射能汚染農地では 23 年度産水稻の作付けが制限された。まさに、日本農業にとってはこれまで経験したことの無い試練の時を迎え、今こそ農業技術者・研究者が復興に向けて総力を注ぎ込まなければならない。

2011 年 4 月には、東京農業大学東日本支援プロジェクトが立ち上げられた。筆者らは、直ちにこれに参画し、5 月より福島県相馬市と青森県八戸市の津波により甚大な被害を被ったイチゴハウスと水田での除塩支援活動を開始し、2012 年春には営農を再開できる目途がついた。そこで、約半年間における被災農地での除塩状況について報告する。

2. 福島県相馬市における塩害被災農地の分類

5 月の現地調査により、被災農地を次のような 3 種類に分類した。

(1) 海岸部に隣接した地域で大量のがれきが流入し、かつ地盤沈下により未だに湛水状態にある水田

福島県相馬市は、福島第一原発の北約 40km に位置する商工業・農水産業・観光業の盛んな都市である。農業の主体は水稻で、沿岸部の水田の多くは約 100 年前の明治から大正時代に干拓された地域である。そのような干拓地が今回の大津波で甚大な被害を被った。水田表面には 5~10cm の土砂(へドロ)が貯まり、その上を大量のがれきで覆われている(写真 1)。また、地盤沈下と排水機場も壊滅的な被害を受けているため冠水地帯が多い。このような地域では、がれきの除去を待たなければ除塩などの復興対策はかなり先になると思われる。

相馬市柏崎と蒲庭の 2 ヶ所の田と柏崎の隣接する麦畑で土壌採取を行った。

相馬市柏崎の水田で採取した土壌の化学性を表1に示す。



写真1 海岸に近く、がれきの多い激甚被災水田

表1 相馬市柏崎(湛水水田)の土壌化学性

試料	深さ cm	pH(H ₂ O)	電気伝導率 mS/cm	交換性塩基 (mg/100g)			CEC meq/100g	塩基飽和度 %	可給態リン酸 mg/100g	可給態ホウ素 mg/kg	
				CaO	MgO	K ₂ O					
津波土砂水田	10	6.6	10.3	393	370	183	1540	27.6	311	10.6	13.4
作土	20	5.3	2.47	407	131	43.7	287	22.4	139	8.6	1.45
鋤床	30	5.9	0.89	477	124	35.4	86.6	23.5	114	6.9	0.82
下層土	40	6.2	0.26	479	143	35.2	27.3	24.8	104	4.1	0.59
下層土	50	6.6	0.25	467	150	32.4	27.4	23.9	107	4.8	0.54

(2) 海岸線から数 km の距離にあり、津波の被害を被ったが、がれきの流入が少なく、5月の調査時点で表面が乾燥し始めていた水田

沿岸部からやや離れていたために、津波による被害を被ったががれきの少ない水田では、写真2のような状況であった。水田表面には津波で運ばれた厚さ5～10cmの土砂が堆積し、水は完全に引いていた。土砂層は最上部の粘土層とその下部のシルト層、砂層に明瞭に区分され、表面の粘土層では海水の影響でナトリウム型粘土になっているため乾燥により大きな亀裂が発達していた。

相馬市和田の水田では、海からの直接的な津波ではなく、河川から浸入した津波で土砂が堆積した水田。周囲にがれきはほとんど認められず、5月には水田表面は乾燥気味であった。津波土砂表面には塩分が析出し、上記海岸部の水田より大きな亀裂が特徴であった。この水田の土壌化学性を表2に示す。



写真2 海岸から約3kmのがれきが少ない水田

表2 相馬市和田(非湛水水田)の土壌化学性

試料	深さ cm	pH(H ₂ O)	電気伝導率 mS/cm	交換性塩基(mg/100g)				CEC meq/100g	塩基飽和度 %	可給態リン酸 mg/100g	可給態ホウ素 mg/kg
				CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O				
津波土砂	5	6.8	18.0	659	537	288	2500	34	403	10.5	20.2
水田作土	20	4.8	2.90	538	186	72.4	436	34.5	128	18.1	3.12
水田鋤床	30	5.1	0.82	765	175	31.2	75	34.2	114	12.3	0.77

(3) 津波被害を被った野菜ハウス・露地畑で、がれきが流入していない農地

相馬市和田地区には10数軒のイチゴ農家があり、河川から浸入した津波による被害を受けた。調査を行ったイチゴハウスでは、約1mの深さで冠水し、収穫間際であったイチゴは完全枯死・壊滅していた(写真3)。

このイチゴハウスでは高さ約40cmの畝でイチゴが栽培されていたため、畝部の表面には1cm程度しか津波土砂が堆積せず、大部分は畝間部に約10cmの厚さに堆積していた。その津波土砂とその下層の30cmまでの土壌化学性を表3に示す。



写真3 海岸から約3kmのイチゴハウスの内部

表3 相馬市和田(イチゴハウス畝間部)の土壌化学性

試料	深さ cm	pH(H ₂ O)	電気伝導 率 mS/cm	交換性塩基(mg/100g)				CEC meq/100g	塩基飽 和度 %	可給態リン 酸 mg/100g	可給態ホウ 素 mg/kg
				CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O				
津波土 砂	10	7.5	19.90	774	710	402	3120	37.9	454	11.4	20.5
畝間土 壤	20	7.2	1.34	691	151	99.3	212	30.4	135	71.7	1.92
畝間土 壤	30	6.5	0.75	723	140	54.7	61.7	30.2	119	15.2	0.81

3. 塩害被災農地の表面に堆積した津波土砂の土壌化学性

5月1～3日の現地調査で採取した津波土砂の土壌化学性を要約すると、以下のとおりである(表1～3)。

- ①塩類濃度の指標となる電気伝導率(EC)は12～24mS/cmと高く、交換性ナトリウム含有量から算出される塩化ナトリウム含有量は2.9～5.7%に達した。海水中の塩化ナトリウム含有量は約3%であるので、そのほぼ2倍におよぶ津波土砂(表3)も認められた。ただし、塩分含有量が高い部分は津波土砂表面の粘土に限定され、その下の砂層では急激に低下する。
- ②津波土砂の粘土部分の陽イオン交換容量(CEC)は30meq/100g程度と水田あるいは畑・ハウスの土壌より大きい傾向にあった。
- ③津波土砂には多量の交換性マグネシウムとカリウムが含まれていた。
- ④津波土砂には、10～20mg/kgの可給態ホウ素が含まれていた。ホウ素は植物生育に不可欠な微量元素のひとつであるが、過剰障害が出やすい成分でもある。一般的な適正範囲は0.5～2.0mg/kgである。

1999年に熊本県八代地域で高潮により農地表面に堆積した土砂では、電気伝導率が2.0～12.8mS/cmであったことが報告されている¹⁾。今回の津波による土砂ではそれらをはるかに上回る値を示した。特に、表面が乾燥し始めていた水田やイチゴハウスでは被災以降約2ヶ月の間に塩分が表面に濃縮され、20mS/cm程度にまで上昇したと考えられる。塩分濃度に換算する3～6%となる。

わが国では第二次大戦後の食料難を克服する対策の一つとして、児島湾や八郎潟など、最近では諫早湾で干拓事業が進められてきた。干拓とは遠浅の海に堤防を築きその内海を干しあげて農地を造成する工事である。すなわち、海底の土砂を農地として利用することになるが、土砂を空気にさらすとその中に含まれるパイライト(硫化鉄： FeS_2)が酸化して硫酸を生成し、 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ 4以下のきわめて強い酸性土壌を示す²⁾。そのため、大量の石灰資材を施用して硫酸を中和することが行われてきた。このような特殊な酸性土壌は酸性硫酸塩土壌と呼ばれる。津波土砂は津波により海底から運ばれた物質であるので、干拓地土壌と同様な酸性化が起こることが懸念される。そこで、採取した土砂の全イオン含有量と $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2)$ を測定した。その結果、表4のように、津波土砂中には1%程度の全イオンが含まれ、 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2)$ は2.2～2.6を示した。 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2)$ 3以下の土壌が酸性硫酸塩土壌と定義されることから、津波が運んだ土砂は潜在的な酸

性硫酸塩土壌と判定された。

表4 津波土砂の全イオン含有量とpH

試料	全イオン(%)	pH(H ₂ O)	pH(H ₂ O ₂)
水田(柏崎 1)	1.27	6.6	2.3
水田(柏崎 2)	1.19	6.5	2.5
水田(蒲庭)	0.34	5.9	2.6
水田(和田)	1.11	7.3	2.2
ハウス(和田)	1.14	7.5	2.3

表5 津波土砂とイチゴハウス土壌の重金属含有量(mg/kg)

地目	地区	試料	深さ (cm)	カドミウ ム	ヒ素	亜鉛	銅	ニッケル	クロム
水田	相馬市柏崎	津波土砂	10	0.65	8.62	162	33.2	20.6	60.0
畑(ムギ)	相馬市柏崎	津波土砂	3	0.48	8.19	124	24.6	19.0	50.3
水田	相馬市蒲庭	津波土砂	5	0.32	6.81	46.1	10.7	32.2	26.7
イチゴハウス	相馬市和田	津波土砂	0.7	0.39	4.30	110	19.9	21.0	71.5
イチゴハウス	相馬市和田	畝土壌	20	0.35	4.81	96.7	18.5	21.5	63.9
イチゴハウス	相馬市和田	畝土壌	30	0.32	4.40	92.8	19.8	22.6	55.9
イチゴハウス	相馬市和田	畝土壌	45	0.39	5.67	181	38.6	49.4	72.3
イチゴハウス	相馬市和田	畝土壌	50	0.35	6.61	109	26.1	30.3	108
イチゴハウス	相馬市和田	津波土砂	10	0.46	8.82	130	37.1	27.8	52.8
イチゴハウス	相馬市和田	畝間土壌	30	0.23	3.38	133	32.5	45.2	61.9
水田	相馬市和田	津波土砂	5	0.43	8.97	113	32.2	22.2	47.6
水田	相馬市和田	水田作土	20	0.34	3.99	107	38.5	35.8	58.3
水田	相馬市和田	鋤床	30	0.28	4.31	93.7	36.1	44.1	59.1

4. 塩害被災農地の表面に堆積した津波土砂の重金属含有量

上記各調査地点から採取した津波土砂とその下の土壌についてカドミウム、ヒ素などの重金属含有量を分析した(表5)。なお、分析方法は、硝酸分解-ICP 質量分析法によった。

津波土砂中のカドミウムは 0.32~0.65mg/kg、平均 0.39mg/100g であった。一方、その下層土では、0.28~0.39mg/kg、平均 29mg/100g であり、津波土砂中のカドミウムは土壌より高い値を示したが、わが国の農耕地土壌の中央値は 0.39mg/100g であるので、ほぼ同等と見なすことができる。

津波土砂および土壌中のヒ素はいずれも 10mg/kg 未満で、土壌中のバックグラウンド値と同等あるいはそれ以下であった。津波土砂中の亜鉛・銅・鉛・ニッケル・クロムについては土壌とほぼ同等であった。

5. 塩害被災農地の復興支援方針

(1) 津波による土砂を除去・処分せず混層する

津波による被災農地の表面には数~10 cmの土砂が堆積していた。2011年6月に出された農水省の除塩マニュアル³⁾によれば、除塩に際してはこの土砂を除去・処分することを基本としている。津波土砂の最表面に塩分が多いので、それらを除去すれば除塩効率が高まることは間違いないが、除去やその処分にはあまりにも多大な労力を要する。また、被災現地では土砂を取り除いて地盤沈下地域に客入し、嵩上げ資材として利用する、あるいは堤防の基盤資材として利用することなども検討されているようである。しかし、硫酸の生成により強酸性を示すと共に、その硫酸により土砂や土壌中の鉄が溶出し、黄色い水が流れ出す可能性も考えられる。

上記のように、津波土砂には 10~20mS/cm に及ぶ塩分と 20mg/kg に達する多量のホウ素が含まれ、塩分と同様植物生育に大きな支障となる。その一方、陽イオン交換容量(CEC)は作土より大きく、土壌養分となる多量の交換性マグネシウムやカリウムが含まれていた。また、懸念されたカドミウム・ヒ素などの有害元素含有量に関しても土壌に比べて高い値は認められなかった。

土砂中の塩分とホウ素は水で流すことができる、パイライトの酸化による土壌酸性化は石灰資材で対処できる。そこで、土砂を取り除くことなく元の土壌と混層した上で、除塩対策を講じることにした。

(2) 除塩のための石灰資材として転炉スラグを施用する

塩分中の塩素イオンは陰イオンであるため土壌には吸着されない水溶性とし

て存在するが、ナトリウムイオンは塩素イオンの対イオンとしての水溶性ナトリウムと土壤コロイドに吸着された交換性ナトリウムとして存在する。前者は雨水や灌水により容易に下層に移動する(畑)、あるいは代かきにより溶出する(水田)。しかし、後者は溶出しにくい。

そこで、石灰資材を施用して、土壤とよく混層することが不可欠となる。その理由は、カルシウムイオンと交換性ナトリウムとの間で陽イオン交換反応を起こさせて、交換性ナトリウムを水溶性ナトリウムに変換させるためである。そのための石灰資材としては石こう(CaSO₄)、消石灰(Ca(OH)₂)、炭酸カルシウム(CaCO₃)などが一般的で、施用量は150~200 kg/10a程度である。熊本県八代地域では、土壤のpHにより資材が選択されるようであるが、石灰資材の選択は除塩効果や土壤pHだけではなく、石灰補給持続効果、石灰と苦土のバランスなどを考慮して決めるべきである(表6)。演者らが選択した石灰資材は、製鉄所の製鋼工程で副生される転炉スラグである。転炉スラグの原料は鉄鉱石・石炭・石灰岩で、有害成分を含んでいない。主成分はケイ酸カルシウムで、副成分としてフリーライム(生石灰)・マグネシウムの他に鉄・マンガン・ホウ素などの微量元素を含む。そのため、転炉スラグを土壤に施用してpH(H₂O)を7.5程度以上まで高めても、作物に微量元素欠乏をきたしにくい。炭酸カルシウムや苦土石灰などより緩効的な土壤酸性改良資材であるので、津波土砂中のパイライトの酸化による土壤酸性化にも対応できる。また、転炉スラグ中には1~2%のリン酸が含まれ、最近では枯渇が懸念されるリン鉱石の代替資源として注目されている。

表6 除塩効果を高めるための石灰資材の選択

石灰資材	除塩効果	持続性	跡地pH	塩基バランス
消石灰	◎	×	×	×
炭カル	△	○	○	×
苦土カル	△	○	○	◎
石こう	◎	×	×	×
転炉スラグ	○	◎	○	○

6. 福島県相馬市のイチゴハウスにおける除塩状況

海岸から約 3km に位置するイチゴハウスの畝間には約 10cm の厚さで津波土砂が堆積していた。6 月 16 日にこの津波土砂を除去することなく、元の土壌と混層した。なお、その際に除塩を促進する石灰資材として転炉スラグ(標品名：副産石灰肥料「てんろ石灰」)を 1t/10a 施用した。作業終了後の表層では EC 約 2mS/cm、pH(H₂O) 約 7 であった。それ以後 1 ヶ月毎にソイルオーガーで深さ 1m まで 10cm 毎に土壌を採取した。経時的な電気伝導率と交換性ナトリウムの経時変化は図 1 のとおりである。

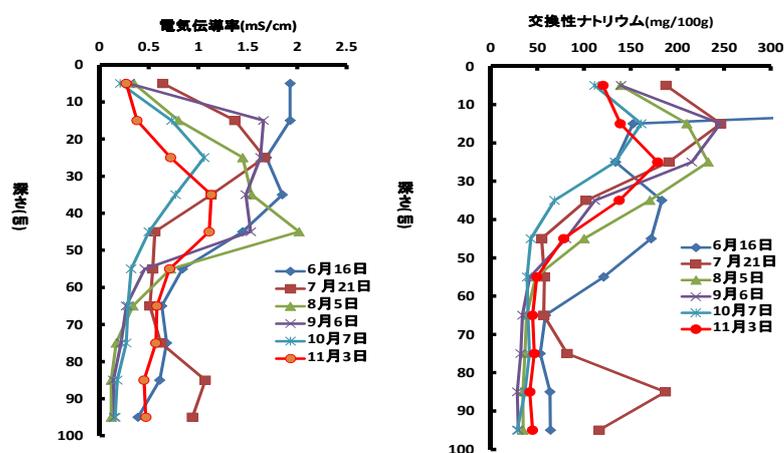


図1 イチゴハウス土壌の電気伝導率と交換性ナトリウムの経時変化

表層 10cm の EC は、7 月に 0.64mS/cm、8 月には 0.35mS/cm まで低下したが、10~50cm では 1.5mS/cm 程度に留まった。また、交換性ナトリウムも 139mg/100g、ナトリウム飽和度は 16.6% と高かった。そのため、イチゴの作付は次年度からとして、2012 年 9 月まではイチゴ栽培復興のための土づくり期間とすることにした。8 月 5 日にソルゴーを播種し、9 月 6 日に全量を緑肥として鋤き込むことにより有機物補給と土壌団粒化の促進を図った。鋤き込み前のソルゴーの草丈は約 1.5m、生草収量は約 4t/10a であった。

その後、10 月 7 日には、下層の EC が 1.1mS/cm 以下、交換性ナトリウムも 111mg/100g にまで減少した。現在、現地ハウスではハウレンソウ・コマツナなどの野菜が作付けられ、2012 年秋のイチゴ作付け復興を目指している。図 2 の相馬市における平年および 2011 年の月別雨量から明らかなように 6 月から 10 月に多くの降雨があり、2011 年のこの間における雨量は 844mm であった。こ

のように、雨水のみでも予想以上の除塩を果たすことができた。

10月には、3棟のハウスの1棟のみを被覆し、下層に移動した塩分の上昇程度を調べることにした。その被覆棟と無被覆棟1棟にはスナップエンドウ、ホウレンソウ、コマツナなどの換金野菜、もう1棟のハウスにはライムギを作付けた。2012年春には、換金野菜を作付け、9月には、イチゴ苗を定植してイチゴ栽培を復興させる計画である。

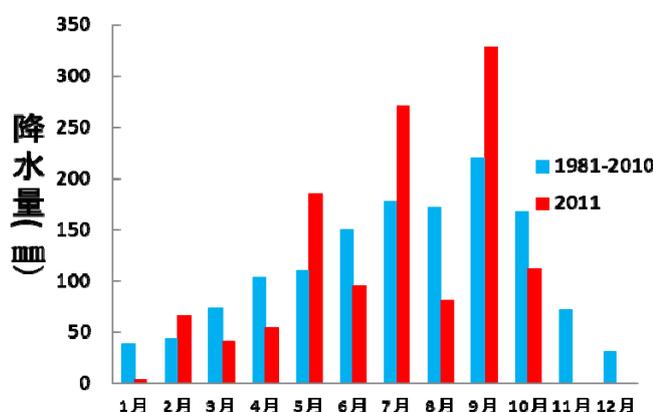


図2 相馬市における平年と2011年の月別降水量

7. 福島県相馬市の水田における除塩状況

(1) がれきの流入がなかった水田(相馬市和田)

海岸線から3km地点の被災水田には約5cmの厚さで津波土砂が堆積していた。しかし、流木などがれきはなく田面は乾いていた。5月1日時点における津波土砂のECは約20mS/cmで、その下の水田作土では3mS/cmであった。その後、全くの放置状態であったが、雨に当てただけでも6月16日には土砂のECが約10mS/cmにまで半減した。その時点では水田表面にほとんど植生が認められなかったが、7月21日にはヒエなどの雑草が繁茂し始め、8月には水田が「稗田」に一変してしまった。この現象を見ただけでも、「雨」の除塩効果が一目瞭然であるにもかかわらず、現地被災地では全く対策が進められなかった。

そこで、耕作者に津波土砂の混層と転炉スラグの施用(200 kg/10a)を勧めた。

耕作者は直ちにに応じて8月6日にロータリー耕による混層を行った。その結果、図3のように9月6日には混層した作土のECが1.1mS/cmとなり、10月7日には、0.6mS/cmにまで低下した。すなわち、混層後3ヶ月で雨水のみによる除塩が達成できた。今後さらに除塩が進むと期待でき、来春には水稻の作付けが可能と判断される。

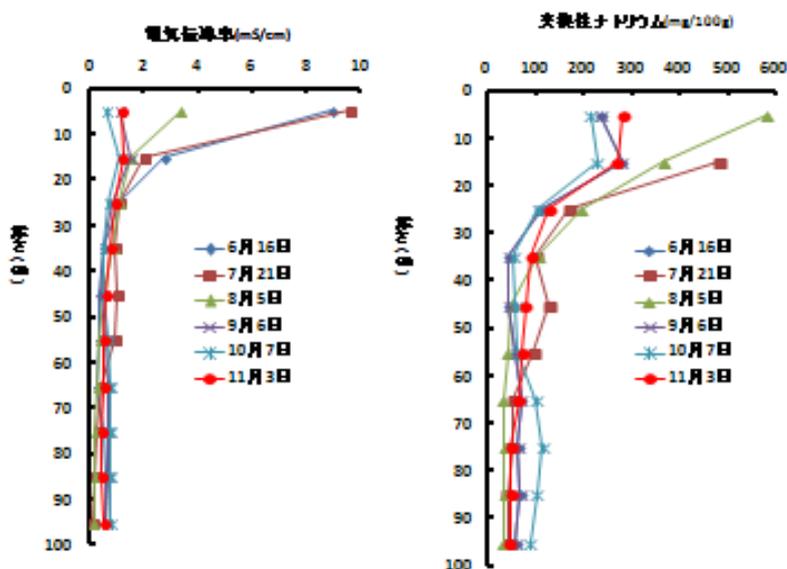


図3 水田(相馬市和田)土壌の電気伝導率と交換性カリウムの経時変化

(2)がれきが大量に流入した水田(相馬市岩子)

津波による激甚被害を被った岩子地区の水田では、ほぼがれきの撤去が進み、7月まで冠水していた田面が乾き始めた9月6日に現地調査を行った。いずれの水田でも約5cmの厚さで津波土砂が一面に堆積し、その土砂自体の電気伝導率は4~6mS/cmであった。水田表面に雑草の繁茂はほとんど認められず、状況は6月の和田水田に類似していた。

この地域の水田ではこれまでのがれき除去のためユンボーなどの大型重機が出入りして、水田内にわだちができていた。そのわだちの部分には写真4のように雑草が繁茂する光景が数多く見られた。そこで、わだち部と無植生部の土壌を比較した結果、表7のようにわだち部では電気伝導率と可給態ホウ素の顕著な低下が認められた。すなわち、津波土砂を混層するだけで除塩が進むことが示唆された。被災農家はこの現象を目の当たりにして、津波土砂を混層する

決意を固めた。

そこで、9月に60アールの水田で津波土砂を混層し、下層への排水性を高めるため弾丸暗渠耕を行った。約1ヶ月経過後にその水田と隣接する津波土砂無混層水田(写真5)から10cm毎に1mまで土壌を採取した結果、図4のように無混層水田での土砂層の電気伝導率が7mS/cmであったのに対して、混層水田では1.5mS/cmにまで低下した。また、下層への塩類の移動も確認された。

8. 津波被災農地の除塩対策への提言

相馬地域における津波被災農地の除塩対策として、次のことを提言する。

(1)津波土砂の除去・処分を基本とする必要はない。

土砂中にカドミウムなどの有害成分が含まれていないこと、放射能による高線量汚染を受けていないことを確認すれば、津波土砂を作土と混和して、雨水などによる除塩対策を講じる。

(2)津波土砂中には、1%程度の全イオンが含まれ、かつ $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2)$ 3以下を示すことから、パイライトを含有する酸性硫酸塩土壌と見なされる。そのため今後、経時的に土壌が酸性化する可能性があるので、除塩促進と土壌酸性化対策資材として、石灰資材を施用する。推奨する資材は転炉スラグ(副産石灰質肥料)である。なお、石灰資材を施用するタイミングは、津波土砂の混層時ではなく、作土の電気伝導率が1mS/cm程度以下にまで低下した時点とすることが望ましい。石灰資材の施用量は、その種類や津波土砂と作土の性質により異なるが、転炉スラグでは200~300kg/10aと思われる。

(3)水田での除塩促進対策として、弾丸暗渠工を併用する。

(4)相馬市岩子地区のように2011年11月現在で除塩対策が施されていない水田で、効率的除塩を進めるため、直ちに除塩対策試行を進めることを提案する。

(5)津波により被災した農地では用排水設備が復旧していない地域が多い。今後それらが復旧すれば、直ちに代かきによる除塩を数回行えば、2012年には水稻の作付けが可能になると判断される。用排水設備の復旧が遅れたら、2011年春以降の降雨による除塩を行う。無作付として放置すると雑草が繁茂するので、ミレット・ヒマワリ・ソルゴーなどの緑肥作物を作付け、鋤き込む。塩害農地における緑肥の作付けは、除塩状況の把握と共に、下層への根の伸長による土壌物理性の改善に役立つ⁴⁾。また、それらを鋤き込めば、土壌有機物の補給と土壌団粒化を促進することができる。2013年春から、水稻・大豆など換金作物を作付

け、津波被災からの復興を目指す。

参考文献

- 1) 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、熊本県（2001）
- 2) 久馬一剛他：特集「酸性硫酸塩土壌」、アーバンクボタ No.25、(1986)
- 3) 農水省農村振興局：農地の除塩マニュアル、
<http://www.maff.go.jp/j/press/nousin/sekkei/pdf/110624-01.pdf>（2011）
- 4) 山田寧直他：諫早湾干拓干陸初期における緑肥作物並びに堆肥による早期土壌改良、長崎総農林試験報、33、27-63（2007）



写真4 津波土砂堆積水田におけるわだちに生えた雑草

表7 重機による土壌混和が化学性におよぼす影響

採取ヶ所	EC mS/cm	交換性Na ₂ O meq/100g	可給態-B mg/kg
無処理部	4.0	806	8.3
わだち部	1.9	275	1.1



写真5 混層水田(上)と未混層水田(下)

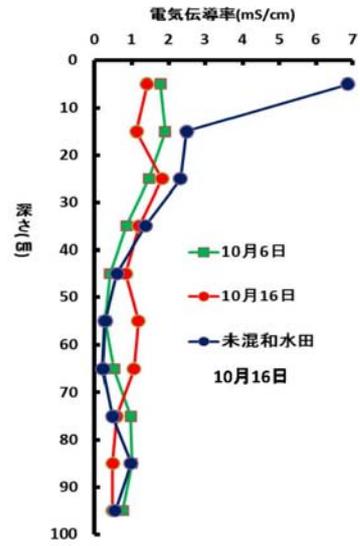


図4 重機による土壌混和がECにおよぼす影響