

平成 23 年度

3.11 東日本大震災津波浸水被害農地における
非湛水除塩対策手法実証試験

報告書

平成 24 年 3 月

NTC コンサルタ ンツ株式会社

西松建設株式会社

山崎農業研究所

目次

1. 初めに -----	1
2. 実証試験圃場及び周辺の概要 -----	2
2-1 試験圃場の概要 -----	2
2-2 津波浸水被害状況 -----	3
2-3 地盤沈下と排水機場の被災状況 -----	9
3. 土壌塩害と除塩対策の一般的知見 -----	11
3-1 塩害の発生機構 -----	11
3-2 土壌塩分濃度管理目標 -----	12
3-3 湛水除塩 -----	12
3-4 湛水除塩以外の除塩方法 -----	16
4. 実証試験概要 -----	25
4-1 試験タイプ -----	25
4-2 試験圃場の配置計画 -----	27
4-3 試験圃場の土壌 -----	29
4-4 塩化物イオン濃度と電気伝導度の関係 -----	32
5. 対策手法別除塩効果 -----	34
5-1 各試験区・対照区の電気伝導度 -----	34
5-2 雨水の除塩効果 -----	35
5-3 土木的対策による除塩効果 -----	37
5-4 除塩作物の除塩効果 -----	39
5-5 雑草(ヒエ)の除塩効果 -----	43
5-6 土壌改良材(珪藻土焼成粒)の効果 -----	46
5-7 塩分吸着材(ゼオライト系、活性炭)の除塩効果 -----	47
6. その他の考察 -----	48
6-1 土壌改良効果 -----	48
6-2 表面流出や縦浸透による除塩効果について -----	49
6-3 植物体の有効利用について -----	50
6-4 各除塩対策の工事費 -----	51
写真集 -----	53
添付資料-1 試験圃場電気伝導度測定値 -----	59
添付資料-2 試験圃場土壌試験結果 -----	60
添付資料-3 植物体塩分吸収分析結果 -----	60
添付資料-4 日降雨量 -----	61
添付資料-5～7 電気伝導度グラフ -----	62

湛水による除塩対策手法実証試験結果報告

渡邊博・後藤秀樹（NTC コンサルタンツ）

1. はじめに

3.11 東日本大震災では、津波の浸水により多くの農地が塩害を被った。高塩分濃度の土壌では作物生育に障害をきたすために、農地の速やかな除塩対策は緊急の課題である。しかし、仙台平野では排水機場が壊滅的被害を受けたことに加え、地盤沈下で排水機能が低下しているため、一般的な除塩対策方法である湛水除塩ができない農地が広範囲に出現した。また、浸水被害を受けていない農地でも、排水機場の排水系統に入っている区域では下流に排水することができないので、作付けを断念せざるを得ない農地も少なからず発生した。一度荒廃した農地を元に戻すのは容易でないため、除塩が終了するまで農地を放置しておくことに農家は抵抗を覚える。湛水除塩の実施が当面難しい農地において、少しでも早く除塩を促進する方法は無いか、あるいは本格的な営農再開までのつなぎとして何か栽培できないかと考えるのは当然の成り行きであった。

このような地域の要望に応えるために、NTC コンサルタンツ（株）と西松建設（株）は、津波による塩害被害を受けた宮城県亘理郡山元町において、湛水によらない除塩方法について実証試験を実施した。実証試験圃場は、排水ポンプ場が津波の被害を受けているため、湛水除塩を実施することができず、2011 年の作付けを断念した地区である。また、試験圃場の周辺区域は泥炭を基盤としているため、湛水除塩のために行う代掻き作業による耕盤破壊のリスクが大きい。そのため、除塩のための代掻き作業はできる限り 1 回で済むように、湛水除塩実施前に、ある程度まで塩分濃度を低下させることが求められていた。

この農地において、湛水除塩の実施が困難なエリアにも適用可能な非湛水方式による各種除塩対策の効果を実証する試験を実施し、今回の試験結果をもとに関係各方面に積極的に塩害対策を提案していく取り組みを行った。

なお、実験にあたっては、東京シンコール（株）及びイソライト工業（株）両社から除塩促進資材を提供していただいた。ここに謝意を表したい。

NTC コンサルタンツ（株） 開発事業部・東北支社
西松建設（株） 東北支店
山崎農業研究所

平成 24 年 3 月

2. 実証試験圃場及び周辺の概要

2-1. 試験圃場の概要

実証試験の概要及び試験圃場位置は宮城県山元町小平地区の約 0.5ha の津波浸水被害を受けた農地である。本地区は基幹の排水施設である排水機場が損壊したことに加え、土壌は泥炭が卓越し、標高も TP3.0m と低く、排水条件はかならずしも良好とはいえない地区である。そのために、応急的な湛水除塩対策を講ずることができず、湛水によらない除塩対策が模索されていた地域である。

表-1 実証試験ほ場の概要

項目	内容
実証試験圃場の位置	宮城県山元町小平地区 約 0.5ha の津波浸水水田
試験期間	平成 23 年 7 月 15 日～平成 23 年 11 月 25 日
試験の目的	用水を用いない（非湛水）除塩手法の効果確認
試験圃場の特長	泥炭を基盤とする水田で、排水性はあまり良くない
津波の浸水状況	40 cm～60cm 程度の浸水深
津波による堆積物の厚さ	2～4 cm

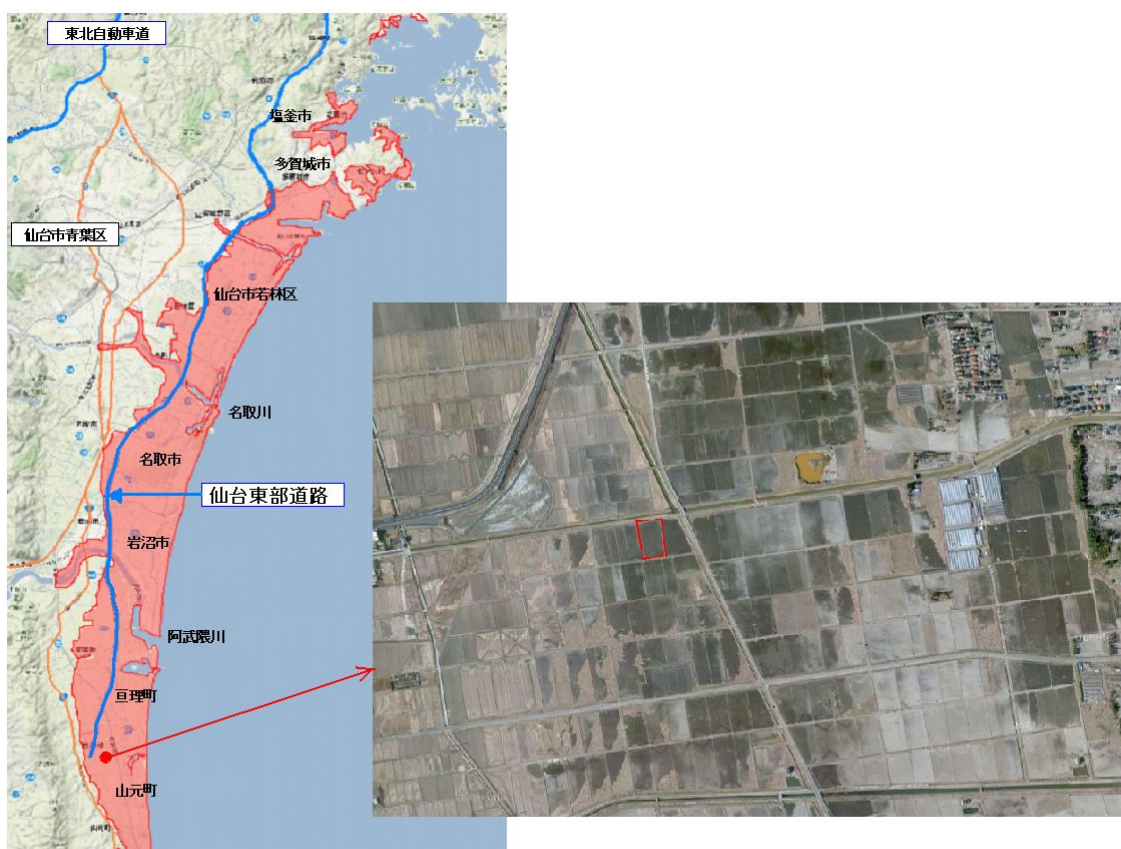


図-1 非湛水除塩実証試験圃場位置

2-2. 津波浸水被害状況

(1) 浸水深さ

試験圃場付近の浸水深さは、現地聞き取りによると 40~60cm 程度と推定される。圃場の標高はおおよそ TP3.0m なので、津波高さは TP3.40~3.60m 程度と推定される。

津波の浸水深さや津波堆積物の状況については、各種の機関、団体が実施しているが、試験圃場に最も近いデータとして、東北大学・ユネスコ国際津波調査団による仙台空港付近のデータが公開されている。これによると、沿岸部の津波高さは TP10m を超えるが、沿岸部から 1.5km 以上では TP3~4m 程度までに減衰している。試験圃場のある山元町とは土地利用や地形の条件が多少異なるので、単純比較はできないものの、図-2 に示すように、浸水高さは概ね傾向は一致している。

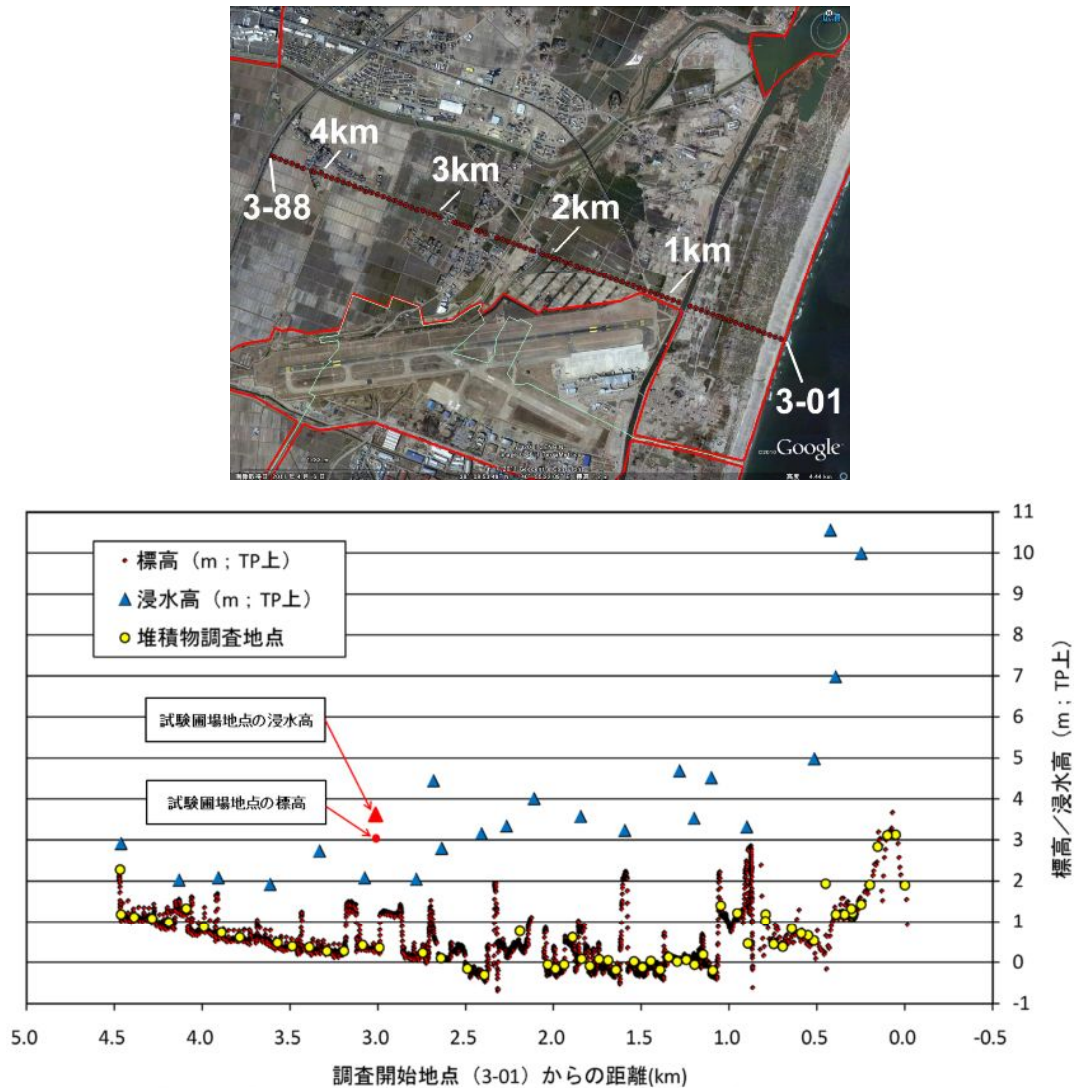


図-2 仙台空港周辺の津波浸水高 (東北大学・ユネスコ国際津波調査団)

(2) 津波堆積物（ヘドロ）

津波による堆積物の海岸からの距離別厚さは、図-3 に示すとおりで、海岸部で厚く、内陸部に行くにつれて薄くなる。実験圃場地点周辺の堆積物厚さは2～4cm、平均3cm程度の厚さで、東北大学・ユネスコ国際津波調査団の調査結果とほぼ一致している。

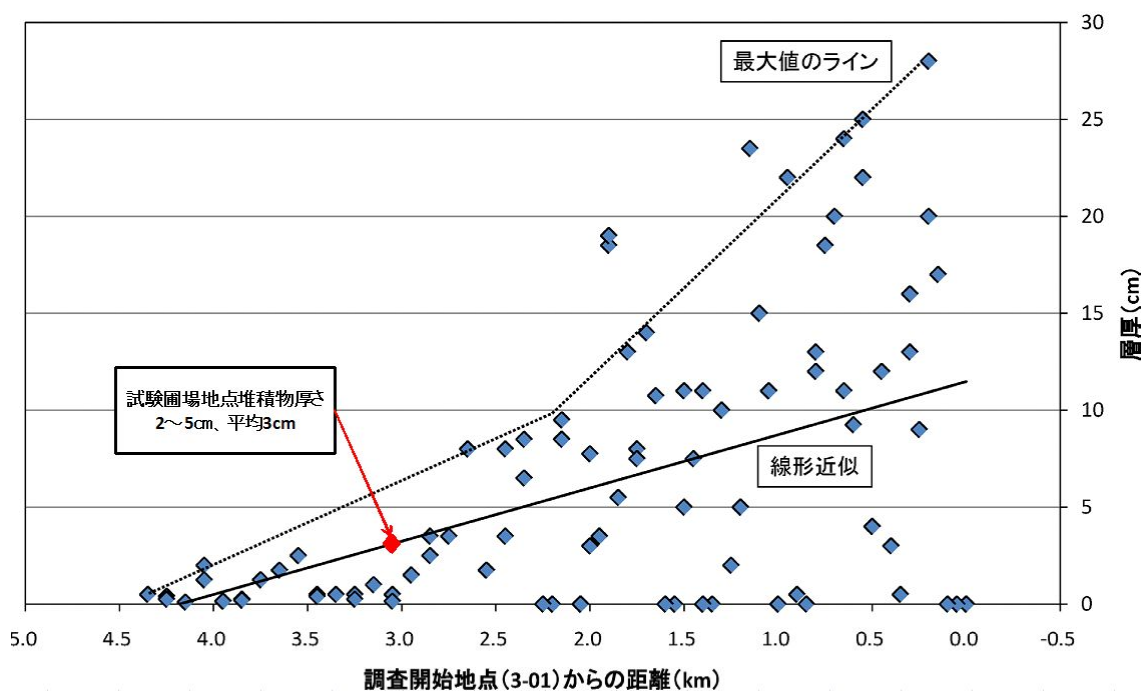


図-3 仙台空港周辺の津波による堆積物の厚さ（東北大学・ユネスコ国際津波調査団）

一般に、津波によって運ばれるヘドロは、嫌気性環境下で硫酸還元菌が繁殖し、生成した硫化水素が鉄と結合して硫化鉄を生じ、黒色化する。津波が黒いと表現されることが多いのも硫化鉄を大量に含んだヘドロが津波に混じっているからである。また、沿岸部や河川流域の地質や事業所に由来する重金属などの有害物質が沿岸部海底に蓄積し、それらが津波によって運ばれてくる恐れも否定できない。

一方、ヘドロは有機物が豊富で、農地土壌として有益な性質も持っていることが少ないため、有害物質がヘドロ中に含まれていない場合は、ヘドロを原土壌に鋤き込んでから除塩対策を講じた方が、コスト面からも有益であると考えられる。そこで、試験圃場及び圃場に接する水路に堆積したヘドロの有害物質の含有について試験を実施した結果、農地土壌として有害な物質は検出されない、あるいは基準値以下であったため、試験にあたっては、ヘドロ剥ぎ取り方式とヘドロ鋤き込み方式の両タイプを実施することにした。

ちなみに、ヒ素（溶出と含有）とフッ素（溶出）は定量下限値以上で検出されたが、いずれも許容基準値を大きく下回っており、問題がないことを確認している。

表-2 試験圃場及び水路の津波堆積物 (ヘドロ) の重金属等の分析結果

別紙-1 土壌試料分析結果

計量証明発行NoA-38196-2/2

件名：平成23年度津波被害土壌調査

項目名		試料名		110503NTC 水路	110503NTC 水田	定量下限値	計量方法
		単位					
溶出試験	(第2種特定有害物質) 重金属等	鉛、镉及びその化合物	mg/L	<0.001	<0.001	0.001	JIS K 0102 55.2
		六価クロム化合物	mg/L	<0.01	<0.01	0.01	JIS K 0102 65.2.1
		シアノ化合物	mg/L	不検出	不検出	0.1	JIS K 0102 38.3
		水銀及びその化合物	mg/L	<0.0005	<0.0005	0.0005	S46環告59号付表1
		メチル水銀	mg/L	不検出	不検出	0.0005	S46環告59号付表2
		セレン及びその化合物	mg/L	<0.002	<0.002	0.002	JIS K 0102 67.2
		鉛及びその化合物	mg/L	<0.005	<0.005	0.005	JIS K 0102 54.2
		砒素及びその化合物	mg/L	0.002	0.001	0.001	JIS K 0102 61.2
		ふっ素及びその化合物	mg/L	0.1	0.2	0.1	JIS K 0102 34.1
		ほう素及びその化合物	mg/L	<0.1	<0.1	0.1	JIS K 0102 47.3
含有量試験	(第2種特定有害物質) 重金属等	鉛、镉及びその化合物	mg/kg	---	---	1	JIS K 0102 55.1
		六価クロム化合物	mg/kg	---	---	2	JIS K 0102 65.2.1
		シアノ化合物	mg/kg	---	---	1	JIS K 0102 38.3
		水銀及びその化合物	mg/kg	---	---	0.1	S46環告59号付表1
		セレン及びその化合物	mg/kg	---	---	1	JIS K 0102 67.2
		鉛及びその化合物	mg/kg	---	---	10	JIS K 0102 54.1
		砒素及びその化合物	mg/kg	1.9	1.2	0.5	JIS K 0102 61.2
		ふっ素及びその化合物	mg/kg	<40	<40	40	JIS K 0102 34.1
		ほう素及びその化合物	mg/kg	---	---	10	JIS K 0102 47.3
土壌試験		pH (H ₂ O) (pH (H ₂ O) 測定時温度)	- (℃)	5.9 (22.7)	3.1 (22.8)	-	土壌環境分析法
		硫化物	mg/g	<0.1	<0.1	0.1	土壌養分分析法6

※ 「不検出」とは、環境庁長官が定める方法により測定した場合において、その結果が当該計量方法の定量下限値を下回ることをいう。
 ※ 溶出試験の検液の作成は、「土壌溶出量調査に係る検定方法を定める件」(平成15年3月6日環境省告示第18号)に定められた方法による。
 ※ 含有量試験の抽出液の作成は、「土壌含有量調査に係る測定方法を定める件」(平成15年3月6日環境省告示第19号)に定められた方法による。

【検出された有害物質と基準の関係】

■ヒ素

- ・溶出試験；土壌汚染に係る環境基準

基準値 0.010mg/l > 試験結果 0.002 mg/l (水路)、0.001 mg/l (水田)

- ・含有試験；農用地土壌汚染地域指定要件

基準値 15mg/kg > 試験結果 1.9 mg/kg (水路)、1.2 mg/kg (水田)

■フッ素

- ・溶出試験；土壌汚染に係る環境基準

基準値 0.8mg/l > 試験結果 0.1 mg/l (水路)、0.2 mg/l (水田)

表-3 土壌に関わる有害物質の溶出・含有量基準

重金属等	区分	単位	天然 貯存量	基準			
				底質除去 基準	土壌環境 基準	農用地土壌 汚染地域指 定要件	肥料取締法
カドミウム	溶出	mg/l			0.01		
	含有	mg/kg	0.295		150		5
六価クロム	溶出	mg/l					
	含有	mg/kg	なし		0.05		
シアン	溶出	mg/l			検出されな いこと		
	含有	mg/kg			50		
水銀	溶出	mg/l			0.0005		
	含有	mg/kg	0.28	25	15		
アルキル 水銀	溶出	mg/l			検出されな いこと		
	含有	mg/kg					
セレン	溶出	mg/l			0.01		
	含有	mg/kg	0.05		150		
鉛	溶出	mg/l			0.01		
	含有	mg/kg	1.72		150		100
ヒ素	溶出	mg/l					
	含有	mg/kg	10.3		150	15	50
フッ素	溶出	mg/l			0.8		
	含有	mg/kg	249		4000		
ホウ素	溶出	mg/l			1.0		
	含有	mg/kg	20		4000		

※天然貯存量；我が国の土壌に自然に含まれている含有量の平均値

【カドミウム、六価クロム、水銀、鉛、ヒ素】

「土壌中のカドミウム、アンチモン、ビスマスなど重金属元素の自然界値」（日本土壌肥料学会誌 1988）

【セレン、フッ素、ホウ素】

環境庁平成 12 年 3 月

【pH、硫化物】

pH、硫化化合物については土壌に係る環境基準による規定はないが、作物生育に関する適正条件から判断することができる。pHについては、水田の場合 5.5～6.5 が望ましいとされているが、圃場に堆積したヘドロの pH は 3.1 とかなり低い値となっている。稲作の場合 pH が大きな問題になることは少ないが、湛水により土壌を還元状態にすれば pH は上昇し、また石灰投入により改良は比較的容易なので、ヘドロ鋤き込みが悪影響を及ぼすこと

は無いと考えられる。なお、津波によるヘドロには硫化物が多く含まれることが多いとされているが、実証試験圃場では硫化物は定量下限値以下であり、問題は無かった。

(3) 電気伝導度

実証試験に先立ち、周辺部（亶理町、山元町）の土壤塩害の状況について概略把握を行うために、塩分濃度と強い相関がある電気伝導度について、ヘドロ堆積物の下の原土壌 0-5 cmの表層で計測した（4月 22-23 日）。その結果は、図-4 及び表-4 に示す通りである。調査は震災後 40 日以上を経過した時点であるが、塩分濃度は浸水農地で 2~9mS/cm、平均 6.3mS/cm と非常に高い値を示し、当面の許容値とされる 0.3mS/cm を大きく超える状態にあった。一方、非浸水農地は 0.05~0.20mS/cm と正常な値を示している。水路内水質は、非浸水農地横の水路でも高い伝導度を示し、津波は水路内を遡上して内陸部深くまで侵入したと推察される。

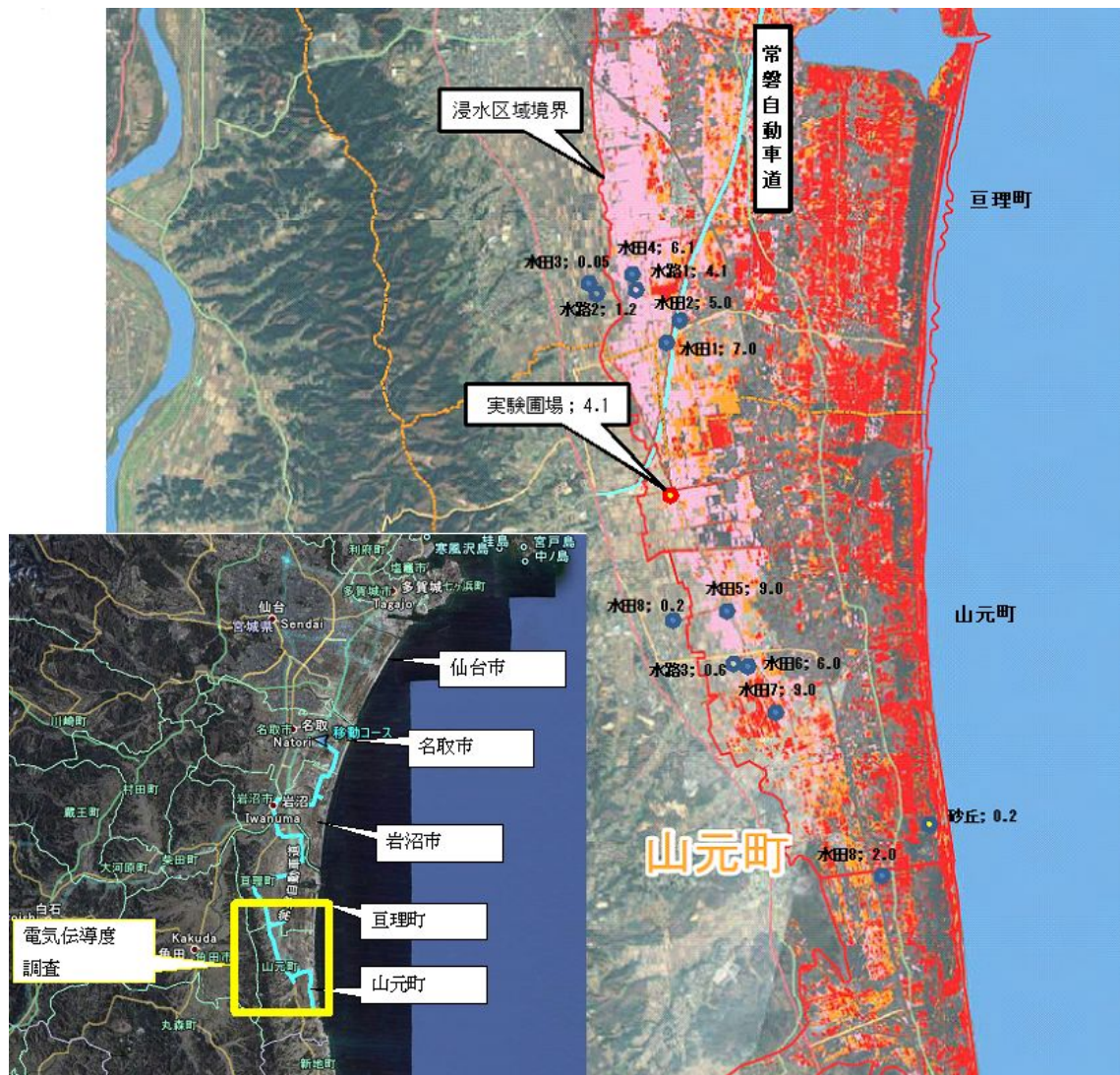


図-4 亶理、山元町の電気伝導度（平成 23 年 4 月 22-23 日調査）

表-4 現地測定結果（平成 23 年 4 月 22-23 日調査）

町名	N0	特徴	電気伝導度
亶理町	水田-1	東部道路より内陸側の非浸水水田	7mS/cm
	水田-2	東部道路より海岸側の浸水水田	5mS/cm
	水田-3	非浸水水田	0.05mS/cm
	水田-4	浸水水田（塩の結晶が観測）水田	6.1mS/cm
	水路-1	浸水域の排水路水質	4.1mS/cm
	水路-2	非浸水域の排水路水質	1.2mS/cm
山元町	水田-5	浸水水田	9mS/cm
	水田-6	浸水水田	6mS/cm
	水田-7	浸水水田	9mS/cm
	水田-8	浸水水田	2mS/cm
	水田-9	非浸水水田	0.2mS/cm
	砂丘	浸水砂丘	0.2mS/cm
	水路-3	浸水域の排水路水質	0.6mS/cm

深さ方向の電気伝導及び pH については、地権者の了解が得られた亶理町下大畑地先の浸水水田と非浸水農地で計測した（4 月 22-23 日時点では試験圃場位置は未定であった）。その結果を表-5 に示す。表層 5 cm では塩分濃度は 4mS/cm 以上と非常に高い値を示すが、深さ 25 cm の層では 1.28mS/cm、50 cm では 0.50mS/cm と急激に低下し、pH は 50 cm の層でほぼ正常値を示した。これから見ると、浸水による塩害は作土層全体に及んでいることがわかる。なお、50 cm 以下では塩害の影響は見られない。これは、調査地点の基盤土壌が難透水性の泥炭であり、耕盤の下層までには塩分が浸透していないためと考えられる。仙台平野は、黒泥土、強グライ土、泥炭土などの難透水性土壌が卓越しており、この傾向はこの地域の一般的な傾向とではないかと思われる。

表-4 非浸水農地と浸水農地の電気伝導度と pH（宮城県亶理町）

層	非浸水農地			浸水農地		
	土壌	pH	EC	土壌	pH	EC
5cm	砂壤土	5.5	0.23	砂壤土	4.7	4.14
25cm	泥炭	6.5	0.32	泥炭	4.6	1.28
50cm	泥炭	6.5	0.25	泥炭	6.1	0.50

■ 測定には、土壌ダイレクト測定用電気伝導度計を用いた。



写真-1 浸水農地土壌断面（宮城県亶理町）

表-5 電気伝導度計の諸元

項目	内容	項目	内容
測定器具名	HI98331 土壌ダイレクト測定用 EC/°C計	測定範囲	EC:0.00~4.00mS/cm 温度:0.0~50.0°C
メーカー	ハンナインスツルメンツ・ジャパン株式会社	精度 (20°C)	EC : ±0.05mS/cm (2mS 以下) ±0.30mS/cm (2~4mS/cm)
温度補償	自動	標準液	HI7031L 1413 μS/cmEC 標準液 500ml

2-3. 地盤沈下と排水機場の被災状況

地震後、各地で20~80cmの地盤沈下が起きた。図-5は仙台平野の地震前と地震跡の地盤標高を比較したものであるが（国土地理院）、平均海面（海拔0m）以下の区域、および大潮満潮位以下の区域が大幅に増加している。平均海面以下の区域は常時でもポンプ排水が必要であり、大潮満潮位以下の区域では大潮時に浸水が見られるが、仙台平野の排水機場は壊滅状態であり、平成23年中は排水機能を喪失状態が続いている。実験圃場のある山元町は比較的地盤沈下量は小さいが、この地域の排水はポンプ排水に全面的に依存しているため、排水機場が復旧するまでは用水を引き込めないため、かんがいは無論、湛水による除塩も着手できない状況にあった（平成23年11月から湛水除塩が開始されている）。

地盤沈下は地下水の塩水化にも大きな影響を及ぼしていると考えられ、地下水に大きく依存しているイチゴ等の施設園芸作物の水源確保に大きな影を落としている。地下水の塩害は現在でも継続しており、水田かんがいが復活すれば、地下水の淡水化を促すのではないかと期待されている。ただし、地盤沈下が大きいところでは塩水が遡上しやすいので予断を許さない状況にある。

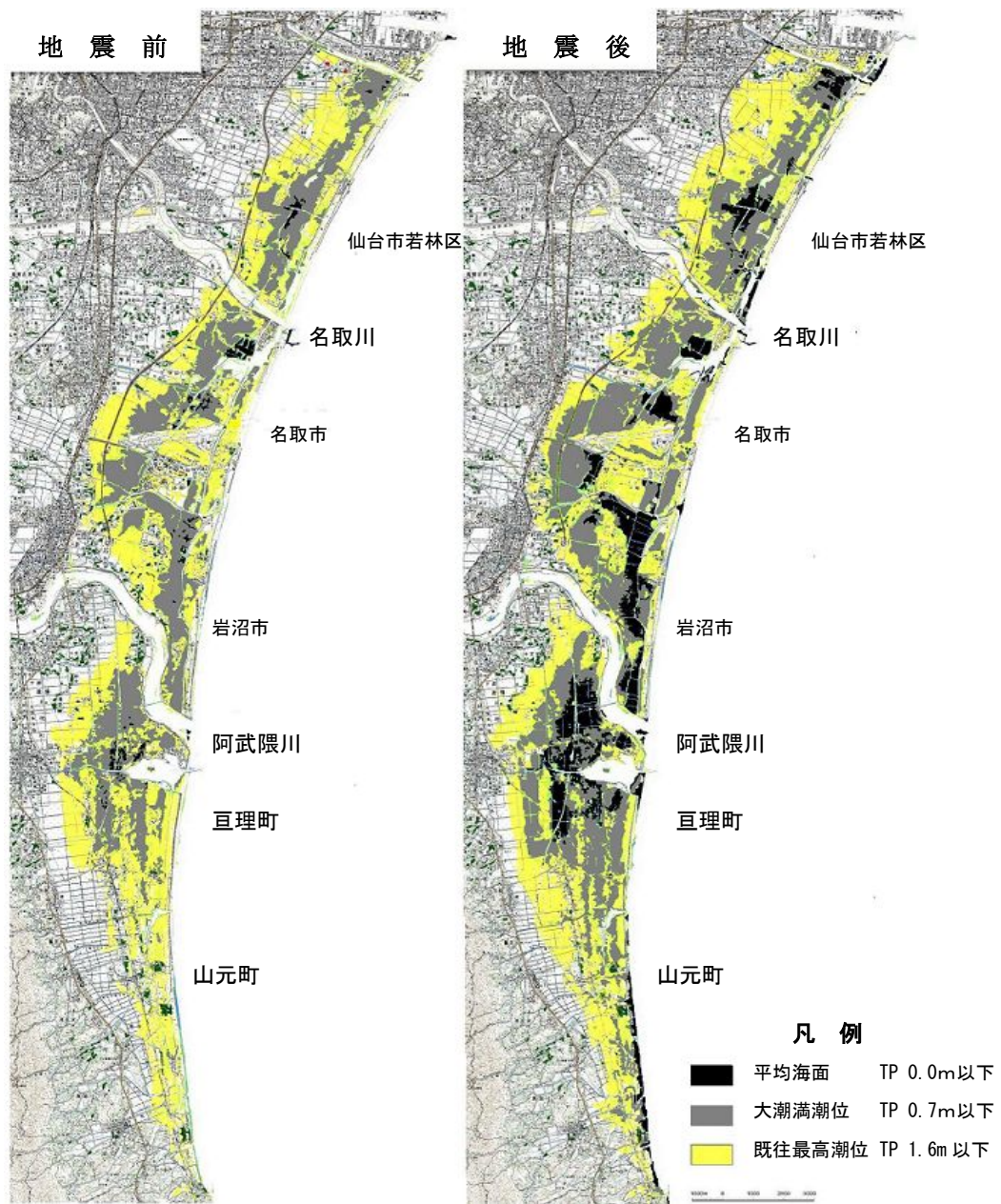


図-5 仙台平野の地震前後の地盤標高 (国土地理院)

3. 土壌塩害と除塩対策の一般的知見

3-1 塩害の発生機構

塩分による作物生育障害は、①塩分含有水の高浸透圧による脱水症状（しおれ）と、②作物の生育機能低下による生育障害、③土壌物理性の悪化による根腐れによるものがある。

① 浸透圧が上昇する事による根傷みの発生

土壌に海水が流れ込む事により、土壌水分中の塩類（水溶性物質）濃度が上昇する。水分は、塩類濃度の低いところから高いところへ移動し、平衡状態（同じ塩類濃度）になろうとする性質があり、このために塩類濃度の高い土壌では根の水分吸収が阻害される。その結果、根傷みが発生し、植物体全体が萎凋する。

② 濃度障害

海水が流入する事により、負の電荷を持つ土壌粒子に陽イオンであるナトリウム、マグネシウムなどが結合し、これらの濃度障害、塩基バランスの悪化が起こる。ナトリウム、マグネシウム、カリウム、カルシウムの塩基類は、ナトリウムを除いて植物の必須元素であるが、絶対量よりもバランスが大事になるため、どれかの元素が突出して多い状態は植物にとって良くない。また、陰イオンでは主に塩素などが濃度障害を起こす。土壌中の塩素濃度が 0.1% (100mg/乾土 100g) を超えると根圏への浸透圧の影響が大きくなり、生育阻害が懸念される。灌漑水では塩素濃度が 200~250ppm を超えると生育抑制が見られるようになる。また、海水由来の元素ではホウ素も濃度障害を起こしやすい。

③ 土壌物理性の悪化による根腐れ

土壌が海水に浸った場合に、NaCl 中のナトリウムが土壌に吸着され、土壌粒子が分散して粘土化する現象が起きる。このような状態では土壌表面が皮膜状になり、土壌の団粒構造が破れて単粒化し、水・空気の浸透性が悪化して還元状態となり、根の活性化が低下する。

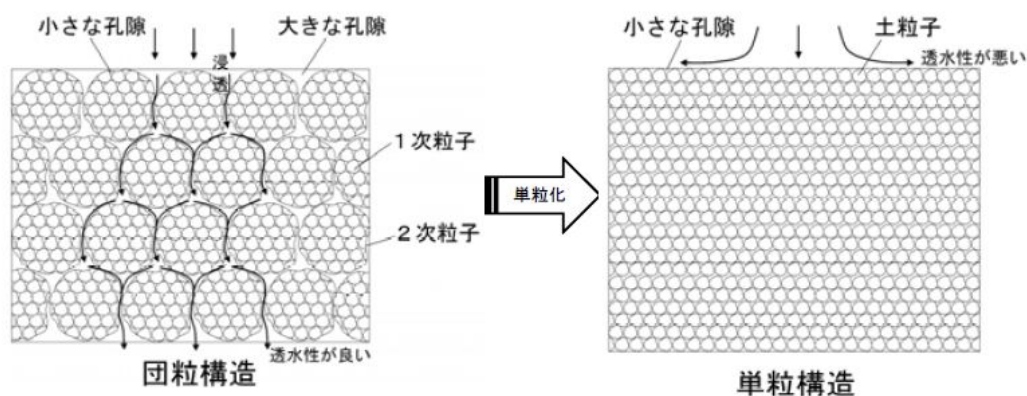


図-6 土壌構造

3-2. 土壌塩分濃度管理目標

土壌の許容塩素濃度は作物によって異なるが、一般に、水田では0.05%、畑では0.025%以下が正常の値であるが、かんがい用水や雨水によって塩素は洗い出されるので、水田土壌では塩素濃度が0.1%、畑地では0.05%を超える場合に除塩対策を講じる必要があるとされており、国の除塩対策事業採択要件もこれに準じている。

土壌の塩分濃度を簡易にモニタリングするには、塩素濃度と強い相関のある電気伝導度を指標にするのが効率的であり、既往の経験から一般的な電気伝導度による管理目標は以下ようになる。

水田 除塩対策必要水準 0.10% (100mg/100g) 以上→ 0.6mS/cm 以上
 土壌管理水準 0.05% (50mg/100g) 以上→ 0.3mS/cm 以上

なお、参考までに作物別の栽培限界塩素濃度、電気伝導度を表-6 に示す。

表-6 各作物の栽培限界電気伝導度、塩素濃度

作物名	EC mS/cm	土壌中 Cl mg/100 g	作物名	EC mS/cm	土壌中 Cl mg/100 g
イチゴ	0.3	30	ハクサイ	0.8	60
メロン	0.4	40	ホウレンソウ	1.0	70
インゲン	0.6	50	キャベツ	1.0	70
ニンジン	0.6	50	トマト	1.0	70
レタス	0.6	50	ブロッコリー	1.0	70
タマネギ	0.8	60	ダイコン	1.0	70
ソラマメ	0.8	60	ねぎ	1.0	70
バレイショ	0.8	60	水稲	1.5	100
エンドウ	0.8	60			

3-3. 湛水除塩

(1) 除塩の基本的考え方

除塩は、真水で洗い流すか除塩作物によって塩分を吸収させるかしか方法はない。客土による対策は土地利用の改変や排水改良等、他の目的を伴う場合に有効であるが、除塩のみを対象とする場合には一般的な手法ではないので、応急対策としては考慮しない。海水浸水のような高濃度の塩分除去の場合は、除塩作物の効果は余り高くないので、原則として真水による水洗が基本的な対策手法である。

高塩分濃度の場合、塩化ナトリウム (NaCl) をナトリウム (Na) と塩素 (Cl) に分けて

対策を講ずることが必要である。陰イオンである塩素（Cl）は水に流れやすい性質を持ち、50mm/日の灌水で1日当たり約30mg/100gの塩素を洗い流すことができる（佐賀県農業研究センター）。一方、ナトリウム Na は土壤に吸着しやすいので、その除去には長期間（降雨で700mm程度）必要である。ナトリウムは土壤の粘土化を促すが、作物に直接影響を与えるものではないので、塩素の除去を優先し、ナトリウムの除去は時間をかけて対応するのが効果的である。

表-7 真水による除塩効果（佐賀県農業研究センター）

灌水量 (mm)	pH (H ₂ O)	EC (mS/cm)	Na (%)	Cl		NaCl (%)
				(%)	(mg)	
除塩前	5.9	2.33	0.11	0.09	90	0.20
50mm	6.1	1.56	0.09	0.06	60	0.15
100mm	6.4	0.98	0.07	0.03	30	0.11
150mm	6.7	0.68	0.07	0.02	20	0.09
200mm	6.6	0.53	0.06	0.01	10	0.07

なお、除塩は圃場の排水性が大きく関わり、排水が悪い圃場では塩素 Cl が下層に集積し、夏期やハウス等の乾燥環境下で塩分が表層に染みあがる危険性があるので、十分な排水改良を施すことが重要である。また、ナトリウムで粘土化した土壤では、石灰資材によって Na と Ca を交換吸着し、透水性を高めておくことが必要となる。

表-8 土壤中塩化ナトリウム含量と作物生育（愛知県土づくり資料）

作物	塩害の危険性少	塩害発生
水稲 移植期	NaCl < 200mg/100 g	300mg/100 g < NaCl
水稲 その他の時期	NaCl < 200mg/100 g	500mg/100 g < NaCl
ダイコン、ホウレンソウ、カーネーション	NaCl < 100mg/100 g	300mg/100 g < NaCl
キュウリ、トマト、レタス、キク	NaCl < 50mg/100 g	200mg/100 g < NaCl
イチゴ、ミツバ、ゆり	NaCl < 25mg/100 g	50mg/100 g < NaCl

※ Cl = 0.6066 × NaCl

※ Na = 0.3934 × NaCl

(2) 一般的な湛水除塩対策

湛水除塩を基本とし、1) 十分な除塩用水を確保、2) 排水性の確保、3) 酸度（pH）調整、4) 流失肥料分の補充といった事項に留意し、除塩対策を施す。特に以下の点に留意して対策を実施することが望ましい。

① 除塩用水

200-250ppm 以下の水が 10a 当り 100m³ 以上必要である（塩分濃度により最終確認する）。

② 排水性の確保

圃場では縦浸透性の確保が重要で、粘性土では心土破碎や暗渠排水の施工が望ましい。砂質土の場合は特に必要ない。排水路や排水機場が機能していない場合は、これらの復旧が前提となる。

ナトリウムで土壌が粘土化している場合は 150~200 kg /10a の石灰資材投入し、耕起して土壌を混和する。ただし、砂地や縦浸透性の高い土壌では施用しない方がよい。石灰資材としては、弱酸性やアルカリ性（pH6 以上）土壌では硫酸カルシウム（石膏系）を用いると効果が高い。炭酸カルシウムは水溶性が低いので湛水除塩の効果が薄れる。強酸性（pH6 未満）土壌ではカルシウムが溶出しやすく効果が薄いので、そのまま湛水除塩を実施したほうが良いという報告もある。特に、ハウス土壌では硫酸根の影響が懸念されるので、石灰資材は投入せず、暗渠排水などで排水機能を強化し、湛水除塩するのがよい。

なお、機場、水路等の基幹的排水施設が機能していない場合は、その復旧が前提である。

③ ヘドロの堆積

水田に流入した土砂や泥のうち、黒っぽい泥が堆積している場合は、硫黄化合物である硫化鉄（FeS）を含んだ海底堆積土の可能性がある。硫黄化合物は作土土壌と混和すると酸性化や根腐れの原因となるので、その除去が必要である。有害金属や硫化化合物が含まれていない場合は、原土壌に鋤き込む方法が有効である。一時的には塩分濃度が高くなるが、湛水除塩が可能であり、農地土壌として肥沃な場合も少なくないので検討に値する。

- 硫酸イオン（SO₄²⁻）が還元され底泥の鉄と結合して硫化鉄（FeS）や二硫化鉄（FeS₂）が堆積する。
- 硫化物の酸化 硫酸 H₂SO₄ が生成され、土壌 pH が低下
- 水田で還元されると、硫化水素（H₂S）が生成され、根腐れを起こす

④ 粘土質土壌の乾燥

粘土質の場合、湿潤状態では除塩効果が劣るので、耕起後に十分に乾燥してから湛水除塩するのが望ましい。

⑤ 湛水

耕起後に、土の表面が完全に隠れるまで湛水し、自然減水で落水する。塩分含量にもよるが、目安として 100mm/回程度の湛水を行う。水田の場合、目安として田面残留水電気伝導度 EC2.2mS/cm 以下、土壌 EC0.3mS/cm 以下になるまで湛水除塩を繰り返す。

湛水の目的はあくまで除塩なので、縦浸透が機能するように代かきを行わない方が効果が高い場合もあるので、注意を要する。代かきはある程度まで作付け時に行う。暗渠がある圃場では、暗渠排水が機能するように強制排水を行うのがよい。必要に応じて弾丸暗渠を組

み合わせるのも良い。

⑥ 除塩作物の作付け

次作までに除塩作物を作付けると除塩効果が高まる。除塩効果が高い作物として、大麦、エン麦等（年内刈り取り）、イタリアン（来年春刈り）等がある。また、除塩作物の根の伸張により、圃場の排水機能が高くなる効果も期待できる。

⑦ 施肥等

塩害により土壌の団粒構造が不安定になっている可能性があるため、有効微生物補給の意味から、有機資材の施用が望ましい。また、除塩により硝酸態窒素などの肥料分も流失してしまう可能性があるため、作付け前の残肥を確認し、適宜肥料を施用することに心がける。電気伝導度やpHだけで土壌塩分を推定すると、硝酸態窒素の含有と塩素含有の違いがわからないので、施肥後のEC再上昇が塩素含有なのか硝酸態窒素含有なのかを精査することが必要である。

⑧ ハウス土壌管理

ハウスやマルチでは表層に塩類集積が進みやすいので、元肥は少なめにし、追肥で補い、灌水は少なめにするなどの対応が必要である。

耕起 → 湛水 → （代かき；場合によって行わない） → 1－2日静置 → 落水
→ 土壌ECの確認

3-4. 湛水除塩以外の除塩方法

排水環境が整うまでの間、除塩の促進と土壌環境の維持、回復を行う有効な方法として、以下のような対策が考えられる。もちろん雨水以外の水は使わないことが前提である。

表-9 湛水除塩以外の除塩方法

方法		内容
土壌排水性の改良	弾丸暗渠	排水の縦浸透促進
	土壌改良材	土壌の排水性改良（セラミック系等）
塩分の吸着	塩分吸着材	塩分の吸着（ゼオライト系等）
	除塩作物	耐塩性作物による塩分吸収

(1) 弾丸暗渠による排水改良

弾丸暗渠は、水分の縦浸透を促進させて塩分を排除しようというものである。湛水除塩が可能な農地でも、代掻き作業が難しい場合にも採用可能な手法である。

弾丸暗渠は、20～30cm の深さの耕盤に亀裂を入れ、排水溝や本暗渠に土壌水を排水するもので、牽引機（トラクター）と弾丸暗渠用の破砕機があればよく、特に資材を必要としない。

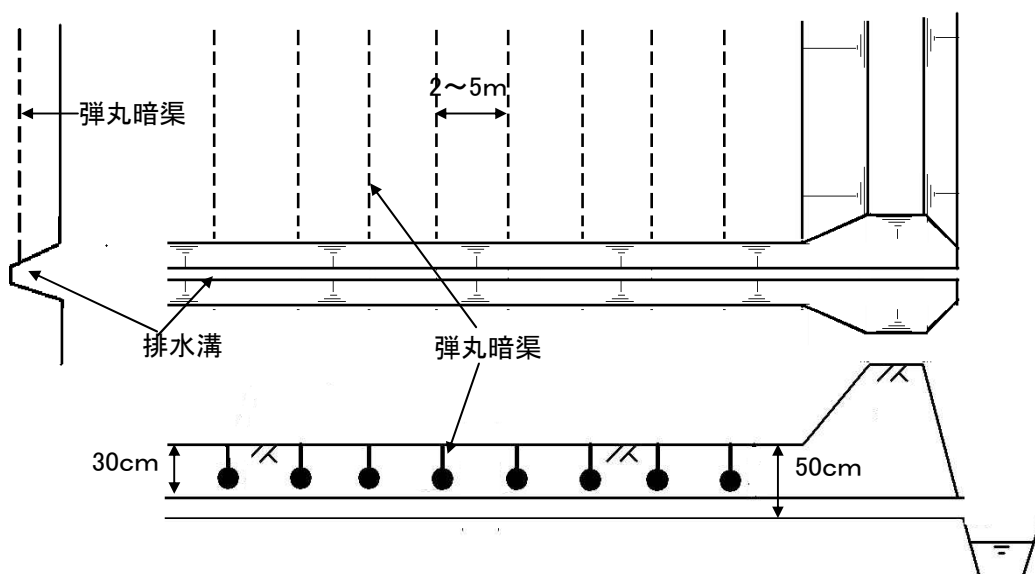


図-7 弾丸暗渠施工イメージ

(2) 反転耕起、心土破碎等の通常営農技術を活用した除塩技術

①概要

高塩分濃度の表層と低塩分濃度の下層度を天地替えすることで、除塩のためだけの湛水をすることなく、通常の代掻きステージで除塩を実現できれば、通常営農体系の中で対応できる可能性がある。ヘドロを除去せず、一緒に反転耕起すれば、より省力化が図ることが可能である。塩分濃度が高く、湛水除塩を実施しなければならない場合でも、この方法であれば、少ない回数での湛水除塩が可能である。

②. 施工方法

施工方法は、心土破碎とスタブルカルチ耕（表土を粗く耕し、堆積物を土と混和させ、乾燥させる）を組み合わせ、これに反転耕起を加える。



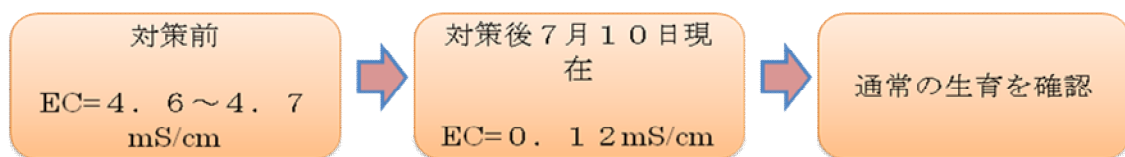
サブソイラによる心土破碎作業

プラウによる反転耕起

写真-2 宮城県東松島市での実施例（スガノ農機）

この手法は、スガノ農機が宮城県東松島市で実証試験を行っている。詳しいデータについては不明であるが、単年度で除塩を終了し、作付を実施している（同社 HP による）。山元町の実証試験でも試験タイプとして検討したが、反転耕起用の機械の手配の関係で、試験は実施していない。

- ヘドロを剥ぎ取らないで本工法を採用する場合は、ヘドロ堆積厚さが 20cm 以上では困難で、できれば 5cm 未満であることが望ましい。
- 代掻きにロータリーを使用すると暗渠の目詰まりを起こしやすいので、粗目の耕起を行うスタブルカルチを使用した方が、暗渠排水が効きやすく、除塩効果が高い。



(2) 土壤改良材（珪藻土焼成粒）

①珪藻土焼成粒の概要

重粘土や泥炭のような排水性の悪い土壤を土壤改良材により団粒構造にし、排水性を高める。堆肥等の有機資材も有効であるが、即効性が劣るので、市販の土壤改良材を用いる。

塩害に対応した様々な土壤改良材があるが、ここではイソライト工業（株）により開発されたけい藻土焼成粒（イソライトCG）を取り上げる。けい藻土焼成粒は、けい藻土を均一な粒状にし、1000℃以上の高温で焼成して製造するセラミックス化した硬質の多孔質粒子で、容積重が約 0.6、孔隙率が 70%以上の多孔質である。ケイ酸、アルミニウム、鉄が主要成分となっている。

珪藻土焼成粒（商品名イソライト）は、藻類の一種である珪藻の殻の化石よりなる堆積物（堆積岩）である珪藻土を焼いて、人工的に多孔質の物を作った物で、その多孔を利用して通気性を確保しながら保水性も向上させた、どちらかと言うと物理性を重視した土壤改良材である。珪藻の殻には小孔が多数開いている為、珪藻土は体積あたりの重さが非常に小さい。吸着能力は低く、溶液中に溶解している成分はそのまま通し、不溶物だけを捕捉する性質がある。また、珪藻土は水分や油分を大量に保持することができる。このため乾燥土壤を改良する土壤改良材や、流出した油を捕集する目的で使用される。

主に粘土質の物理性改善に効果を発揮する。硬質で劣化しにくいので改良効果が継続し、客土に混入が容易で利用しやすいという特長がある。一般には 10～20%程度混合して利用する。同社のイソライトCGは、政令指定土壤改良材地力増進法施行例 5 号の資材に指定されている。



写真-2 珪藻土焼成粒

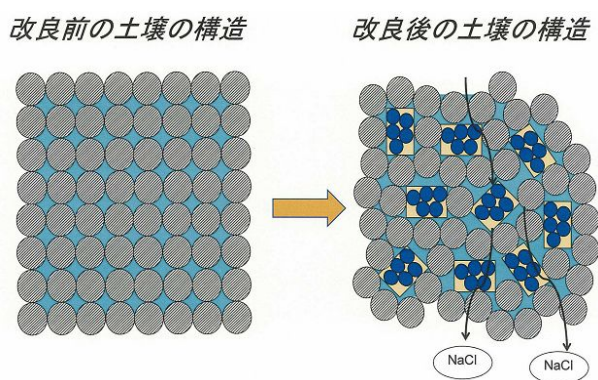
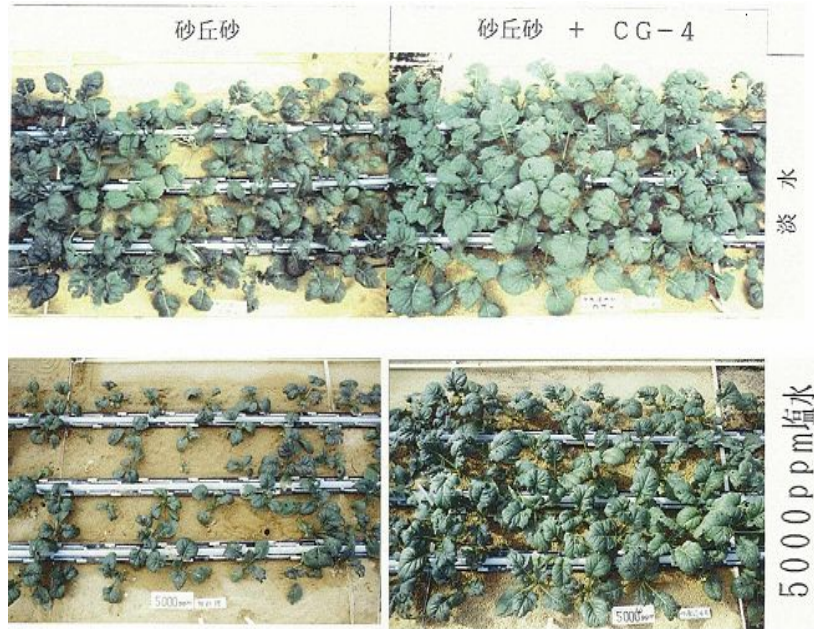


図-8 珪藻土焼成粒による土壤構造の改良

②高塩分濃度農地での利用例

土焼成粒の特性に着目し、鳥取大学では、高塩分砂丘の緑化対策利用のための実験を行っている（1987年）。実験は、砂丘と砂丘に 1 : 1 の割合で珪藻土焼成粒（CG-4）を混入した土壤に、それぞれ淡水、塩分濃度 1000、2000、5000 p p m のかんがい用水を灌水し、珪藻土焼成粒の塩害防止効果を確認した。作物は小松菜（グリーンデビュー）を使用してい

る。その結果、珪藻土焼成粒 CG-4 を混入した試験区では、かなりの高塩分濃度の灌漑用水でも一定の収量を上げていることが確認されている。



砂丘砂 塩分濃度5000ppm

砂丘砂+CG 塩分濃度5000ppm

写真-3 土壤改良材土焼成粒を使用した場合としない場合の作物生育状況

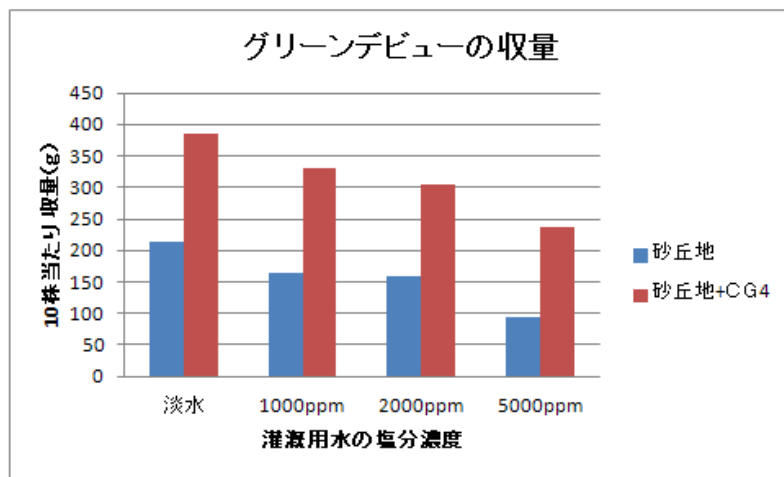


図-9 珪藻土焼成粒（CG4）塩害防止効果実験（鳥取大学）

③. 塩害 用性

農地への適

珪藻土焼成粒は、土壤の排水性を高め除塩を促進すると同時に、通気性と保水性の両方を改善するので、作物生育環境も向上する。除塩作物と混用すれば除塩効果はより高くなると推察される。珪藻土焼成粒による除塩を行う方法として、圃場を反転耕起（30c

m程度)して比較的塩分濃度の低い土壌を表面に起こし、このとき土壌改良材として土焼成粒を混入する(深さは20cm程度)。これにより表層土の塩分を低下させ、中下層は土焼成粒で通気性、排水性を高めておく。ナトリウムと塩素を分離し、除塩しやすいようにするために、石灰(石膏系カルシウム等)を投入するのが効果的ではないかと考えられる。

珪藻土焼成粒による除塩は、土壌の排水性を高めることにより、雨水だけで除塩を促進することに着目したものであるが、同時に珪藻土焼成粒自体の保水性が高いため、除塩後の農地土壌保全を同時に実現することが期待される。

(3) 塩分吸着材(ゼオライト系や活性炭系)

① 概要

塩分を吸着する資材としてゼオライト系や活性炭系の土壌改良材がある。これらは非常に小さい細孔を有し、正イオンに帯電しているため、他の分子との吸着性が非常に高いという性質を持っている。このような性質を活かし、脱臭剤、水質浄化材、吸湿材などのほか、窒素、リン、カリを吸着し土壌の保肥力を高めるので、土壌改良材としても使われている。他の土壌改良材に対して特長的なことは、重金属や塩分、放射性物質も吸着する性質があり、除塩材として使用できる可能性がある。

本検討では、(独)農業環境技術研究所、東京シンコール(株)等の共同研究により開発された活性炭ペレットとゼオライト(人工ゼオライト50%、硬質天然ゼオライト25%、軟質天然ゼオライト25%)の資材を用いて検討する。

東京シンコール株式会社は独立行政法人農業環境技術研究所との共同研究で有害物質の植物への移行低減の研究を行ってきた。その研究成果を生かし、有害物の植物への移行低減しながら、陽イオンの交換性の高いゼオライトを用いて除塩を促進でき、通常農作業に類似した工程を検討した。津波により有害性の高い貯蔵施設などが破壊されたり、ヘドロに含まれる重金属類等の有害物質含む土壌が押し寄せ農地堆積物に蓄積している懸念がある。農業にとっての有害物質の対象は複数あり、残留農薬や重金属類ほか、対象範囲が広い。しかも黒ボク土、グライ土等の土壌の種類によっても塩分を吸着する能力や水はけ等の性質が異なる。

今回、塩害対策のためにイオン交換機能を有するカルシウム置換型人工ゼオライトと天然ゼオライトの組み合わせで検討した。人工ゼオライトは、多孔質な部分に物質を吸着する機能(吸着機能)とマイナス電荷部位に結合しているナトリウムやカルシウムイオンとが重金属などの別のプラスイオンと交換する機能(イオン交換機能)を有している。

② イオン交換体の基本的特性(原理)

イオン交換とは、「イオン交換体に存在するイオン」と「水溶液中のイオン」の入れ替わりを選択的に行うことである。この反応は電荷の差し引き0になるように行われ、吸着さ

れたイオンの代わりに、それまでイオン交換体に存在した同符号（陽イオンなら陽イオン、陰イオンなら陰イオン）の別のイオンが放出される。

(2)イオン交換がイオンを交換吸着する強さ（イオンの選択性）

イオン交換体によって、何を選択的に吸着するか変わってくる。しかし一般的な傾向として、イオンの原子価が高いものほど結合が強く、同じ原子価なら原子番号が大きいものほど強く選択的に吸着される。

陽イオン……～ >Ca²⁺>Cu²⁺>Zn²⁺>Mg²⁺>K⁺>NH₄⁺>Na⁺> H⁺

陰イオン……～ >SO₄²⁻>I⁻>NO₃⁻>CrO₄²⁻ >Br⁻>Cl⁻>OH⁻>F⁻

※左ほど離れにくく、右ほど離れやすい

※イオン化傾向が弱いものほど吸着されやすいと考えて良い。

ただしイオン交換性が低いイオンが大量に存在する場合(Na 型やCl 型ならNa⁺やCl⁻)、選択性の優先度を無視して吸着していたイオンを放出し、選択性が低いにも関わらず高濃度に存在するイオンと結合することが知られている。今回この原理を用いている。

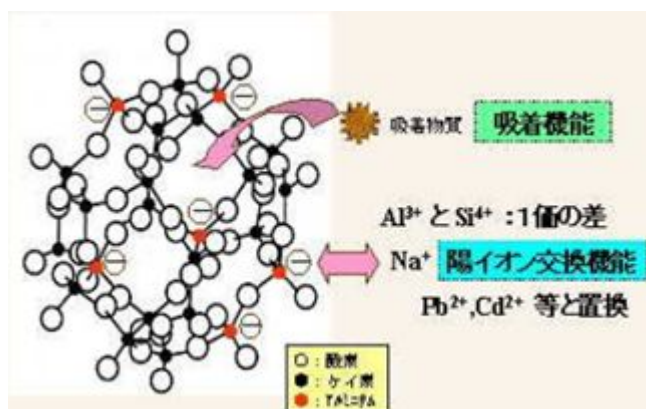


図-10 ゼオライト分子構造

③効果

効果として下記の機能を持つことが知られている。

- 人工ゼオライトに 30 分以上接触させれば鉛の除去率 90%以上 (300 分では 99%可能)
- その他の重金属の吸着能力(ゼオライト濃度 5%の水溶液にて)
- 亜鉛・カドミウム:良く吸着する(99%)
- 水銀:10%濃度で良く吸着する(99%)

このゼオライトの機能を生かし、ナトリウムイオンや重金属の吸着交換と放出されるカルシウムイオンにより土壌の団塊化を促進し、水はけのよい土壌を促進することを目的としている。活性炭も多孔質であり、有機性の有害物質を吸着する作用とともに土壌の通気性や通水性を促進し、除塩効果を高める。上記ゼオライト、活性炭を微細化することにより、土壌によく吸着し、使用量を低減している。これら粉じん対策のため、セルロースを用い固めたものが独立行政法人と共同研究を行った「蒔いて環炭?」である。

④既往の実験検討の内容

残留農薬の吸着抑制の内容は独立行政法人農業環境技術研究所のHPで公開されている。

プレスリリース

<http://www.niaes.affrc.go.jp/techdoc/press/091119/press091119.html>

研究成果集第26集「水浄化を目的とした微粉末活性炭タブレットの開発」

http://www.niaes.affrc.go.jp/sinfo/result/result26/result26_02.html

蒔いて環炭?の金属イオンのカルシウム置換型ゼオライトの検討 (韓国水資源公社評価)

サンプルA : カルシウム置換型ゼオライト70%+セルロース30%

サンプルB : 活性炭25%+カルシウム置換型ゼオライト25%+セルロース50%

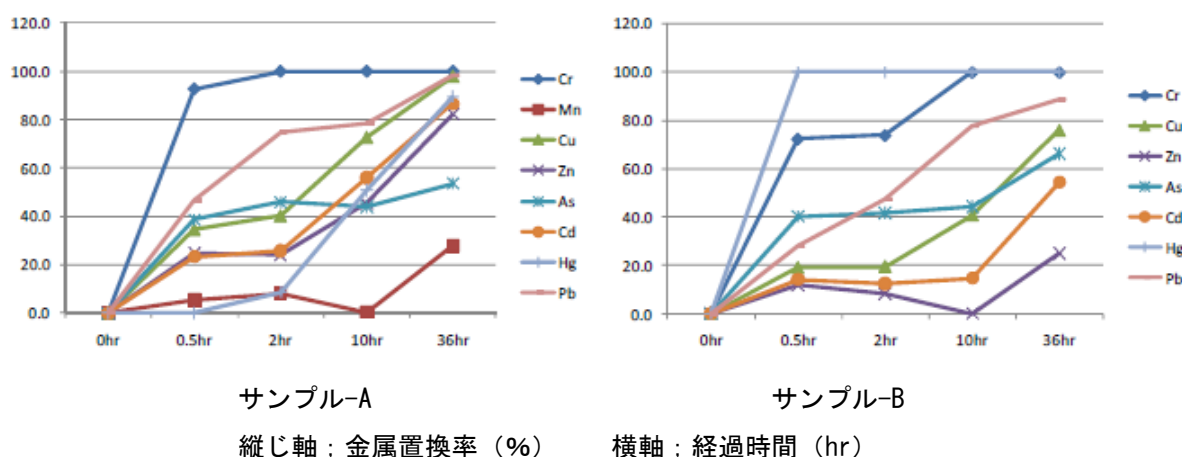


図-11 金属イオンのカルシウム置換型ゼオライトの検討 (韓国水資源公社評価)

(4) 除塩作物

除塩作物は、過湿に強く、耐塩性があり、資材費がかからないことを満たす必要がある。また、当地区では排水の問題があるので、天水のみで栽培可能な作物であることが求められる。

耐塩性作物としては、トウモロコシ、ソルガム（イネ科モロコシ属）、キャベツ（アブラナ科）、ビート（アカザ科）が代表的である。また、湿害、塩分には弱いが高畦にして砂丘等でマクワウリ、露地メロンなどのウリ科の野菜が栽培されている事例がある。

比較的労力がかからない作物では、除塩効果はトウモロコシやソルガムが最も高いとされている。例えば、火山灰土壌でトウモロコシを夏季に 55 日程度栽培し、土壌の EC は 2.5mS/cm から約 1mS/cm まで低下したという例がある（小野、1994）。デントコーンおよびソルガムはカリの吸収量が多く、一作で 10a 当たり、30kg 以上である（中嶋、1986）。スマトラ地震のときはラッキョウ栽培の実績がある。

ウリ科の野菜は塩分に弱いので、塩害を起こしている農地での栽培は敬遠されているが、佐賀県の干拓地では高畦（約 50 cm）にして栽培している実績がある。高畦にすることで湿害を避けることができるが、佐賀県の試験では下層からの塩分補給はほとんど見られず、問題なかったとしている。

これらの他に、耐久塩性が高く、商品価値のある作物としてアイスプラント、菜の花、塩トマトなどが注目されている。アイスプラントは、塩分だけでなく、土壌中のミネラル分も大量に吸収するので、土壌管理には十分注意を払う必要があるが、水耕栽培で海水と同程度の塩分濃度でも生育するといわれるほど耐塩性は非常に高い。栽培開始時期が春先であるため、今回の試験では見送ったが、今後検討されても良い作物であると考えられる。

塩トマトは、熊本県八代地域など土壌塩分濃度が高い干拓地などで栽培される特別栽培のトマトで、果物並みに甘い。収穫時期は 11～5 月頃、3 月がピークである。栽培地域が限定されるので、希少価値があり超高級品として贈答用などにも使われる。宮城県では岩沼で導入の計画がある。

菜の花も除塩効果が高いといわれ、油を抽出できることから商品価値も高い。東北大学のチームが中心となり、仙台市などで栽培計画がある。

本試験では、耐塩性が高く、かつ栽培管理が容易なソルガム（農業以外ではソルゴーということもある；商品名スタックス緑肥用）を採用した。ソルガムは、一般的には、線虫抑制や土壌の耕盤破碎、除塩、防風に利用され、除塩以外の目的の場合、栽培後、トラクターで鋤き込み、有機肥料として活用される。この品種は、耐暑性、耐旱性が極めて強く、播種後、約 2 ヶ月で草丈 2m に達する。また、植物性のバイオエタノールが抽出できるので、燃料作物としても注目されている。

表-10 野菜目別の土壌および水中の限界塩素(Cl)濃度の目安

耐塩性	作物名	土壌中 Clmg/100g	水中 Clppm
弱	メロン イチゴ インゲン ニンジン レタス	40~50mg を目安 (NaCl 70~80) メロン 50mgCl 内が安全 104、160mg 不可 白石分場 Na 1me 健全	200ppm 以内を目安 (NaCl 350 以内) EC0.6~0.7ms 以内を目安 イチゴ 400ppm 以内 NaCl メロン 400ppm 以内 NaCl イチゴ活着後一時 2000NaCl 一般河川 3~15 Clが多い
中	タマネギ コショウ サツマイモ ソラマメ パレイショ ショウガ ゴボウ エンドウ ナス	50~60mg を目安 (NaCl 80~100) ナス品質 50~60Cl 安全 収量 70~80Cl 安全 タマネギ 167NaCl 健全	250ppm 以内を目安 (NaCl 450 以内) EC 0.8~0.9ms 以内を目安 ナス 500ppm 以内 NaCl アオジソ 170ppmNa で障害 (Cl で 280ppm 程度)
強	ハウレンソウ キャベツ スイカ カボチャ サトイモ トウモロコシ トマト ブロッコリー アスパラガス ダイコン ネギ ハクサイ	60~70mg を目安 (NaCl 100~120) トマト 60~70Cl 以下 EC 0.6~0.7ms 以下がよい	300ppm 以内を目安 (NaCl 500ppm 以内) EC 1.0~1.1ms 以内を目安 ミニトマト 133ppm Na 健全 (Cl で 210ppm 程度) トマト、スイカ、ピーマンは NaCl が 20me/l で障害 (NaCl で 1170ppm 程度) (Cl で 700ppm 程度)
極強	ササゲ ダイズ アズキ インゲン ラッキョウ ソルゴー トウモロコシ デントコーン	80~90mg を目安 (NaCl 130~150)	350ppm 以内を目安 (NaCl 600ppm 以内) EC 1.2~1.3ms 以内を目安 多くの作物が 10me/l の NaCl で 障害を受けた (NaCl で 580ppm 程度) (Cl で 23ppm 程度)

※1mg/100g = 10ppm

4. 実証試験概要

4-1 試験タイプ

非湛水による除塩方法としては、これまで述べたように、①土壌の排水性の改良（雨水による除塩の促進）、②塩分の吸収、③土層の改良が考えられる。このうち、排水性の改良として弾丸暗渠の効果は他の試験でも認められているが、本地区は承水路の深さが耕地面から 20 cm 程度しかないため、弾丸暗渠の排水先が確保されないため、心土破碎と圃場周囲に排水溝を設置するにとどめた。土壌改良材には、排水改良タイプとして珪藻土焼成粒（イソライト工業(株)）、塩分吸着タイプとして微粉末活性炭タブレット（(独)農業環境技術研究所と東京シンコール(株)の共同研究）の 2 種を、除塩作物として緑肥用のソルガムを選定した。土層改良方式は今回の試験では検証していないが、条件が合えば効果的な対策手法の一つと考えられる。

試験は、表-11 の対策をベースとし、さらに津波堆積物（ヘドロ）を剥ぎ取ったケースと鋤き込んだケースを加え、9 タイプについて実施した。無対策の対象区は、雑草早期除去区と雑草繁茂区について測定を行った。

表-11 湛水除塩以外の除塩方法

方法		内容	実施の有無
土壌排水性の改良	弾丸暗渠	排水の縦浸透促進	実施せず
	心土破碎	〃	実施
	土壌改良材（排水改良）	土壌の排水性改良	実施
塩分吸着	土壌改良材（塩分吸着）	塩分の吸着	実施
	除塩作物	耐塩性作物による塩分吸収	実施
土層改良	天地換え、客土等	健全土層との天地返し、あるいは客土	実施せず

各試験区の条件は次表に示すとおりである。除塩作物は、栽培管理が比較的簡単で、栽培時期が試験期間と一致する耐塩性の高い緑肥用ソルゴー（スタックス）を採用した。

ヘドロは原則として除去するよう指導されているが、除去作業やヘドロの搬出場所の確保の問題があり、重金属や硫化化合物等の有害物質が含まれていない場合は農地に鋤き込んだ方が効率が良い。当該ほ場の堆積ヘドロには有害物質が含まれていなかったことから、ヘドロを農地に鋤き込んだ場合の影響を検証するために、本実験ではヘドロを圃場に鋤き込むブロックと、除去するブロックを設け、その比較を行うこととした。

なお、承水路が浅くて弾丸暗渠による排水改良ができないため、代替手法として心土破碎を行った。

表-12 試験区の条件

試験区	心土破碎※-1	排水溝※-2	ヘドロ処理	改良材	除塩作物※-3
雑草区※-4	×	×	×	×	×
対照区	×	×	×	×	×
試験区-1	×	×	鋤き込み	×	○
	×	×	剥ぎ取り	×	○
試験区-2	×	○	×	×	×
試験区-3	○	○	×	×	×
試験区-4	×	○	鋤き込み	珪藻土	×
	×	○	剥ぎ取り	珪藻土	×
試験区-5	○	○	鋤き込み	珪藻土	×
	○	○	剥ぎ取り	珪藻土	×
試験区-6	○	○	鋤き込み	珪藻土	○
	○	○	剥ぎ取り	珪藻土	○
試験区-7	×	○	鋤き込み	ゼライト	×
	×	○	剥ぎ取り	ゼライト	×
試験区-8	○	○	鋤き込み	ゼライト	×
	○	○	剥ぎ取り	ゼライト	×
試験区-9	○	○	鋤き込み	ゼライト	○
	○	○	剥ぎ取り	ゼライト	○

※-1 深土破碎 ; 弾丸暗渠の代わりに深土破碎を実施

※-2 排水溝 ; 試験区周囲を溝切り（土水路）

※-3 除塩作物 ; 耐塩性で栽培管理が比較的容易なソルガム（商品名 ; スダックス緑肥用）を採用した（散布面積 945 m²、施用量 5kg）

※-4 雑草区 ; 試験圃場の隣の放置圃場を雑草区とした。

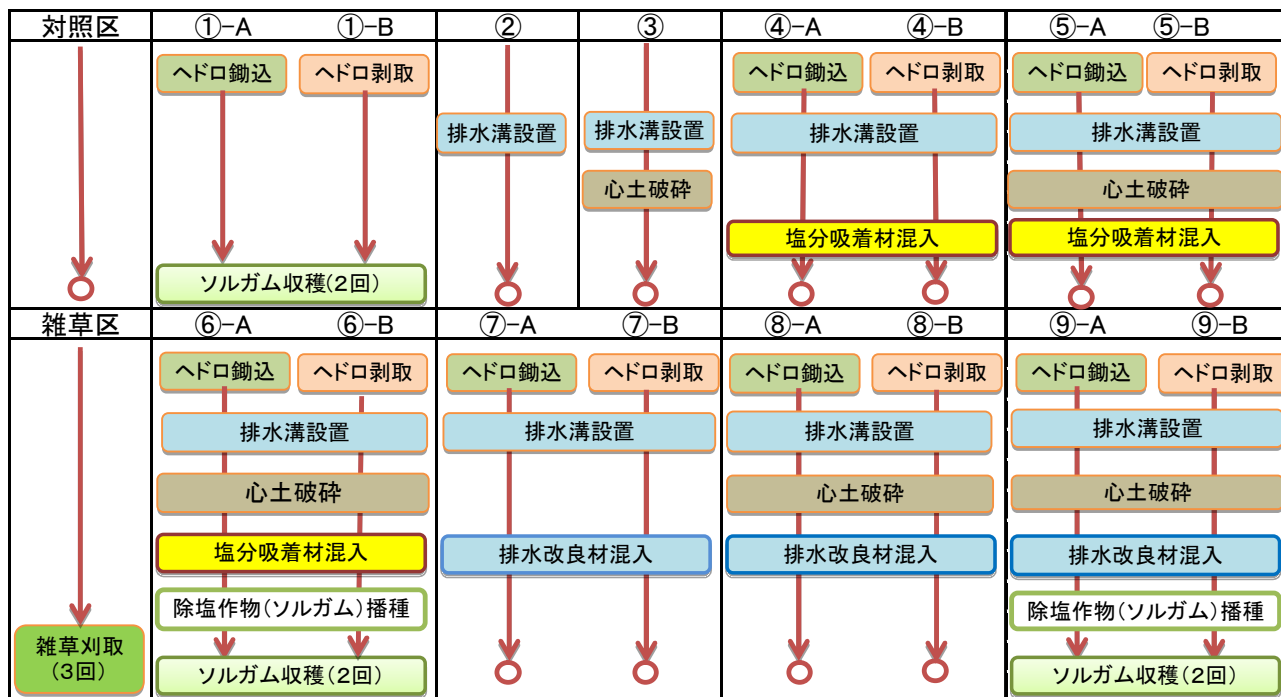


図-12 試験タイプと工程

4-2. 試験圃場の配置計画

試験圃場は下図のように配置した。なお雑草区は試験圃場隣 (図の左側) の圃場とした。

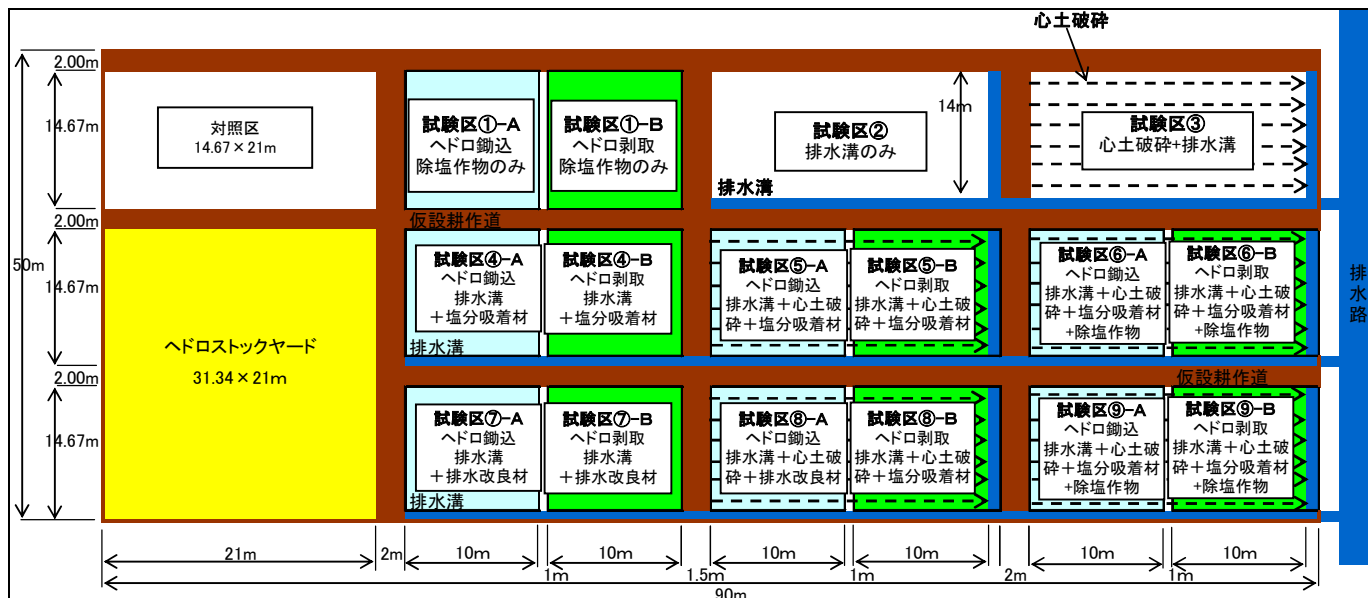


図-13 試験圃場の配置

(着工前全景)



暗渠施工状況



改良材A・・・東京シンコール株式会社

活性炭 = 10kg(20kg)/箱 × 10箱

ゼオライト = 20kg/箱 × 6箱



改良材B・・・イソライト工業株式会社

炭酸カルシウム = 25kg/袋 × 4袋

イソライト(CG2号(珪藻土)) = 20kg/袋 × 1,000袋



散布面積 945m²(21m × 15m × 3面)

活性炭 0.1kg/m²

散布面積 945m²(21m × 15m × 3面)

イソライト 21.2kg/m²



圃場区画完了(平成 23 年 7 月 12 日)、種子散布終了全景(平成 23 年 7 月 15 日)



土壤改良材 (ゼオライト系)

排水改良材 (珪藻土系)

除塩作物 (ソルガム)

写真-4 実証試験圃場

4-3. 試験圃場の土壌

(1) 三相分布

試験圃場の土壌性状は、下表に示すように、固層率と液層率が高く、気層率が極めて少ない。

表-13 試験圃場試験開始前の土壌性状

分析項目		単位	対象区	試験区-6	試験区-9	
物理性	三相分布	固相率	Vol%	49.4	44.4	46.7
		液相率	Vol%	44.6	44.7	47.8
		気相率	Vol%	6.0	10.9	5.5
	最大容水量	g/kg	434	485	490	
化学性	pH (H ₂ O)			4.7	4.8	4.7
	pH (KCl)			4.4	4.4	4.3
	塩化物イオン		mg/kg	1000	1400	1300
	陽イオン交換容量		me/100g	20.0	16.6	19.3

固相は鉱物を主とする無機質と有機質で構成され、根系の発達により植物体を支持し、ミネラルや養分の保持、供給機能を持つ。液相は土壌水分で構成され、植物に水分や養分を供給する。気相は植物根系に酸素を供給し、また雨水の貯留や排水、土壌微生物の生活圏として有機質の無機質化（植物は無機質を吸収する）といった重要な役割を持っている。

農地土壌として理想的な三相分布は、固相 40%、液相 30%、気相 30%とされているが、作物によって適正な三相分布は異なり、特に気相の適正範囲は大きく異なる。水稻が求める酸素量は他の作物に比べて少なく、気相率は 10%程度あればよい。試験圃場の気相率は 5.5~10.9%で、適正範囲に比べて低い値を示している。本地区は泥炭地域であるため、元来気相率が低いことに加え、震災後、耕起などが行われていないことも影響していると考えられる。塩害を受けた土壌は Na イオンにより粘土化するので、放置しておくこと三相分布のバランスが崩れ、元の農地に戻すのに時間がかかるので、本格的な湛水除塩が始まるまでの間、暫定的な除塩の促進と合わせて、土壌の保全を進めていくことが重要である。

表-14 作物と適正な気相率の目安

作物が求める酸素量	必要な気相率	代表的な作物
最も多く要求	24%以上	キャベツ、菜豆
比較的多く要求	20%以上	きゅうり、かぶ、小麦
比較的少ない	15%以上	えん麦、ソルゴー
最も少ない	10%	水稻、たまねぎ

(2)最大容水量(飽和容水量)

土壌が重力に反対して保持できる水の最大量のこと、ほぼ空隙量に相当する水分量である。試験圃場の最大容水量は乾土比で 434~490 g/kg の範囲にある。畑地土壌は一般に 800~1200g/kg 程度の高い水準が求められるが、水田の場合は最大容水量が大きな問題になることは少ない。ただし、転作対応等で乾田化を進めるには低すぎる値なので、除塩作物や土壌改良材によってどの程度改善可能かを確認することとした。

(3)pH

pH は H₂O 溶液と Kcl 溶液（kcl 溶液を使用すると、土壌中に隠れた酸性物質も抽出するので一般に H₂O 溶液よりも低い pH となる）とも水田土壌として適正な 5.5~6.5 を大きく下回っている。これは津波浸水の影響であると考えてよい。

(4)塩化物イオン(塩素イオン)

水田の適正な塩化物イオン濃度は 500 mg/kg 以下であり、500~1000mg/kg の範囲であれば、代掻き等の通常営農体系の中で除塩が可能である。1000 mg/kg を超える場合は、通常営農とは別に、湛水除塩等の対策を別途講じる必要がある。

(5)陽イオン交換容量

土壌中の粘土及び腐植などは、マイナスに荷電しており、陽イオンを引き付ける力がある。そのため、陽イオン（カルシウム、マグネシウム、カリウム、ナトリウム、アンモニウム、水素など）を吸着し保持する。一般的に、この容量が大きいほど養分の保持力が大きいといわれ、肥沃土の高い土壌である。

適正な陽イオン交換容量は、塩基飽和度やカルシウム、マグネシウム、カリウムの交換容量都のバランスから決まるので、陽イオン交換容量だけで適正地値は断定できないが、一般に、適正な塩基飽和度は 60~90%程度と言われており、これに対応するイオン交換容量は 20 me/100g 前後となるので、試験圃場の土壌は適正な肥沃度を持っていると考えられる。

表-15 陽イオン交換容量と適正塩基飽和度

陽イオン 交換容量 (me/100g)	塩基飽和度 (%)	カルシウム 飽和度 (%)	マグネシウム 飽和度 (%)	カリウム 飽和度 (%)
10 以下	100 ~ 170	80 ~ 150	16	6
10 ~ 20	80 ~ 100	60 ~ 80	16	6
20 以上	75 ~ 80	50 ~ 60	16	6

出典：細谷・山口（農業技術体系 土壌施肥編 農文協 1988）

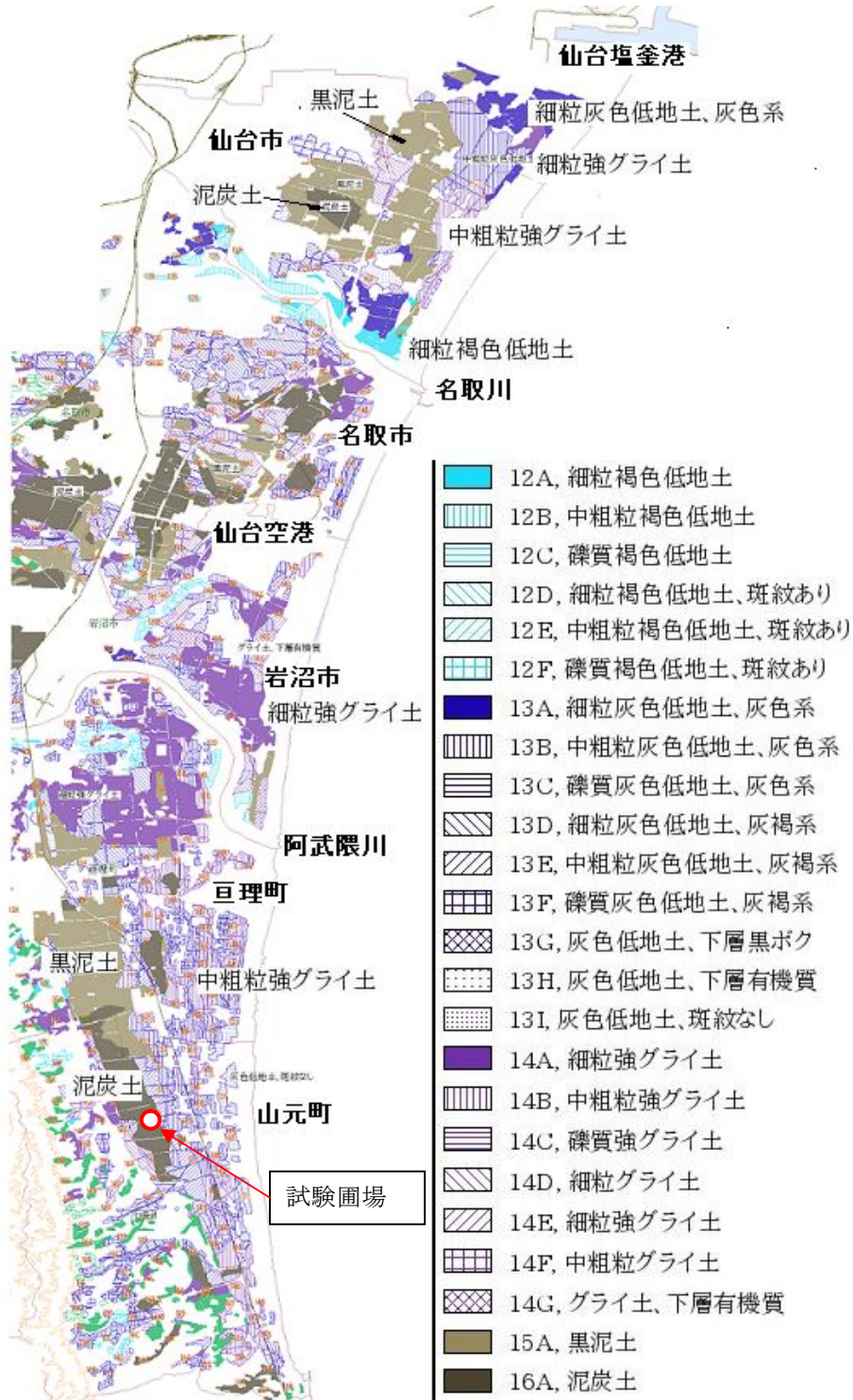


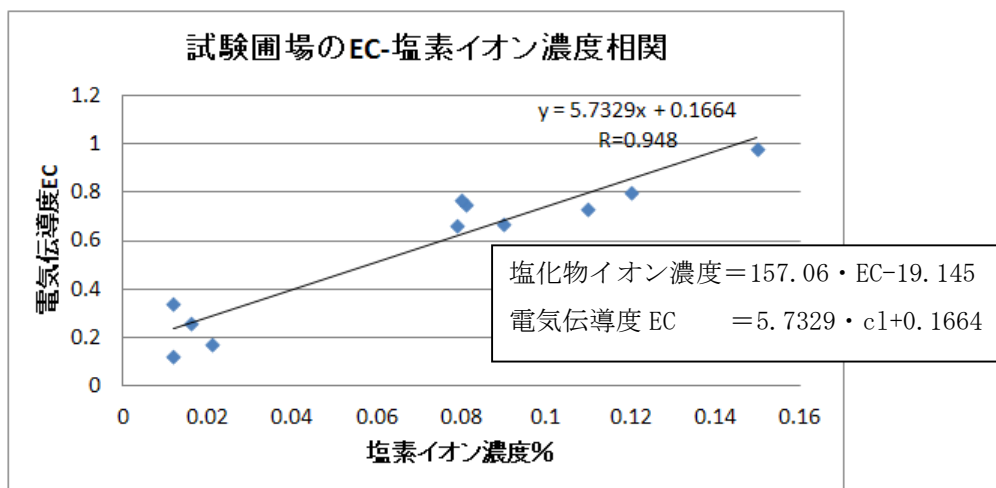
図-14 仙台平野の土壌分布

4-4. 塩化物イオン濃度と電気伝導度の関係

土壌の塩害は塩化物イオン濃度（塩素イオン濃度）が判断基準になるが、測定労力、時間の面から、現地モニタリングとしてはより簡便な電気伝導度を用いるのが便利である。そこで、当該圃場の塩化物イオン濃度と電気伝導度の関係を測定し、その相関を求めた。その結果は図-15 に示す通りである。

塩分濃度分布のより広いレンジの相関に関しては、東北農政局・日本水土総研の調査結果が報告されている（図-16）。両方を比較するとほぼ同様の結果となっており、相関も非常に高いので、電気伝導度から塩分濃度を推定しても実用上問題ないことがわかる。

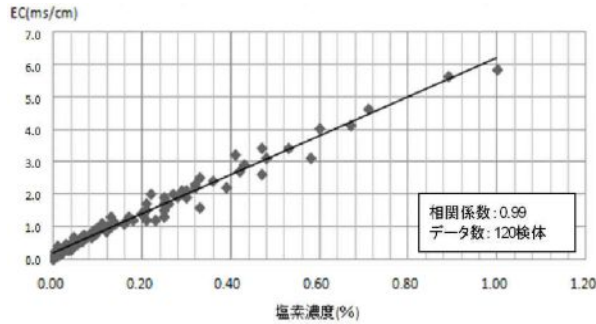
なお、暫定的な判断基準として、塩化物イオン濃度 0.05%（500mg/kg）に対応する電気伝導度を 0.3mS/cm としているが、これは九州などの事例から求められたもので、仙台平野では 500mg/kg 相当の電気伝導度は 0.45ms/cm 程度になる。



No	塩素イオン濃度		電気伝導度 mS/cm
	m g /100 g	%	
1	110	0.11	0.73
2	81	0.081	0.75
3	120	0.12	0.8
4	90	0.09	0.67
5	80	0.08	0.77
6	79	0.079	0.66
7	16	0.016	0.26
8	150	0.15	0.98
9	12	0.012	0.12
10	12	0.012	0.34
11	21	0.021	0.17

図-15 試験圃場における電気伝導度と塩素イオン濃度の相関

1. 水田 : 塩素濃度CL (%) = 0.17 × EC (ms/cm) - 0.03



2. 畑 : 塩素濃度CL (%) = 0.16 × EC (ms/cm) - 0.03

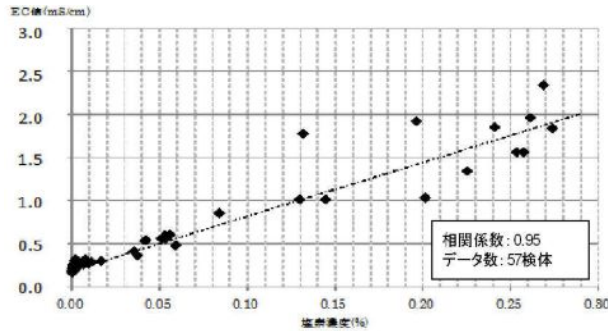


図-16 宮城県亶理町における電気伝導度と塩素イオン濃度の相関
(東北農政局・日本水土総研)

この結果、許容電気伝導度は 0.30mS/cm から 0.45mS/cm に上方修正することが考えらる。しかし、電気伝導度測定は一定の誤差を含んでおり、測定のばらつきを考慮して、本検討では、従来通り電気伝導度 0.3mS/cm を許容値として用いる。

因みに、現地測定結果の検証として、採取した土壌の電気伝導を測定した結果を下表に示す。これによれば試料-1 では 6.22-11.07mS/cm、試料-2 では 0.16-0.22mS/cm の測定ばらつきがみられ、電気伝導度が高いほどばらつきが多い結果となった。

表-16 電気伝導度室内測定による測定ばらつき

項目	試料-1		試料-2	
電気伝導度	9.26	平均 8.54mS/cm 標準偏差 2.16mS/cm	0.18	平均 0.17mS/cm 標準偏差 0.03mS/cm
	5.78		0.22	
	6.22		0.14	
	11.07		0.17	
	10.39		0.16	
温度	22.2℃		22.2℃	

5. 対策手法別除塩効果

5-1. 各試験区・対照区の電気伝導度

各試験区と対照区の測定日別電気伝導度を以下に示す。5月3日時点で4.0mS/cm強の電気伝導度であったが(試験圃場代表地点で、各試験区ごとには計測していない)、震災後4か月を経過した7月13日時点では、その間に雨水のみが除塩に作用していることになるが、0.08~1.76mS/cmとデータ幅はあるものの、かなり塩分濃度が低下していることがわかる。

図-17を概観すると、ヘドロ鋤き込み試験区(A)は試験開始後一時的に電気伝導度が上昇し、剥ぎ取り区(B)は全体として電気伝導度が低下している。対照区や心土破砕、排水溝切り等の土木的対策のみの試験区2、3は、土壤改良材、塩分吸着材、除塩作物等の対策を講じた試験区に比べて、明らかに電気伝導度の低下が鈍い。ただし、試験区5-A(ヘドロ鋤き込み+塩分吸着材)、6-A(ヘドロ鋤き込み+塩分吸着材+除塩作物)の電気伝導度も低下が鈍く、塩分吸着材のみの試験区4が十分に電気伝導度が低下していることを考えると、除塩対策手法の違いよりも、土壤条件や排水条件などの試験区圃場の条件の違いが影響しているかもしれない。

因みに、試験区間で試験開始直前のデータにも大きなばらつきがみられるので、試験結果を考察する際に、各試験区の間で土壤や排水のバックグラウンド差が前提として存在することを考慮する必要がある。

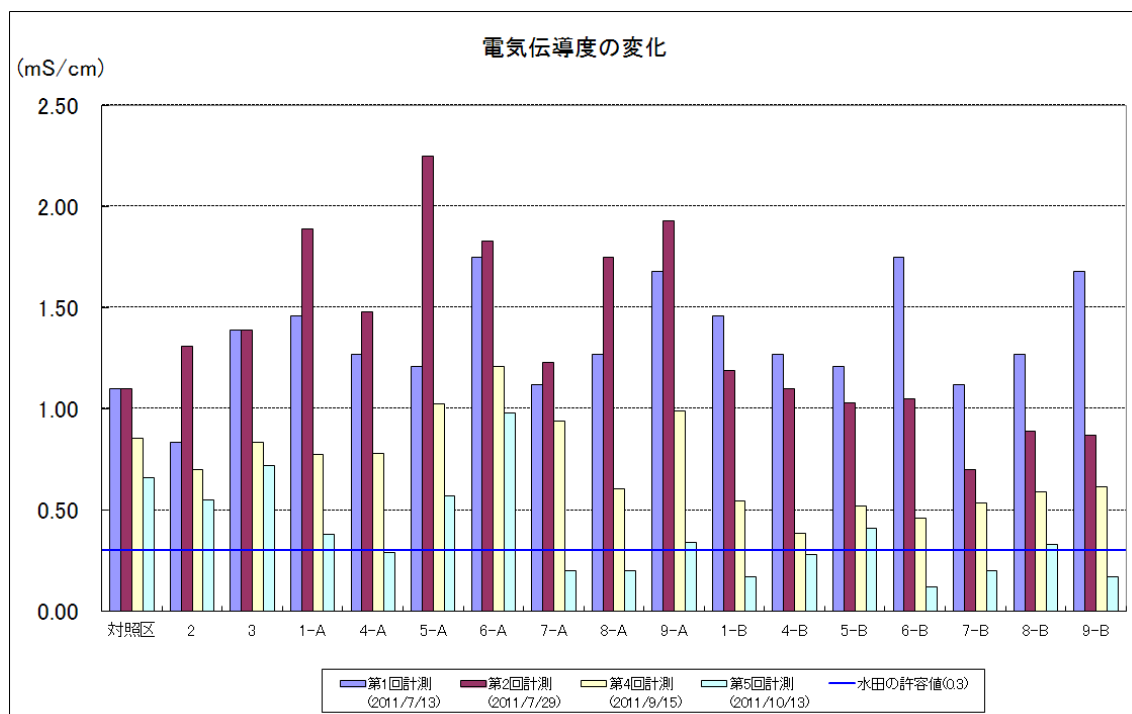


図-17 各試験区・対象区における電気伝導度の変化

5-2. 雨水の除塩効果

(1) 雨水の除塩効果概要

特段の対策を講じていない対照区と雑草区の電気伝導度の時系列変化をみると、降雨だけでもかなりの除塩効果があることがわかる。ある程度まで電気伝導度 (0.6~0.8mS/cm) が低下するとそれ以下にはなかなか下がらないが、通常の代掻きだけで十分対応可能な水準までは低下する。地盤沈下等で地下水排除が難しい低地では雨水のみによる除塩には限界があると思われるが、地下水排除が効いているところでは十分効果があることが確認された。なお雑草区は対照区よりも除塩が進行しており、植物体による塩分吸収が有効であることをうかがわせる。

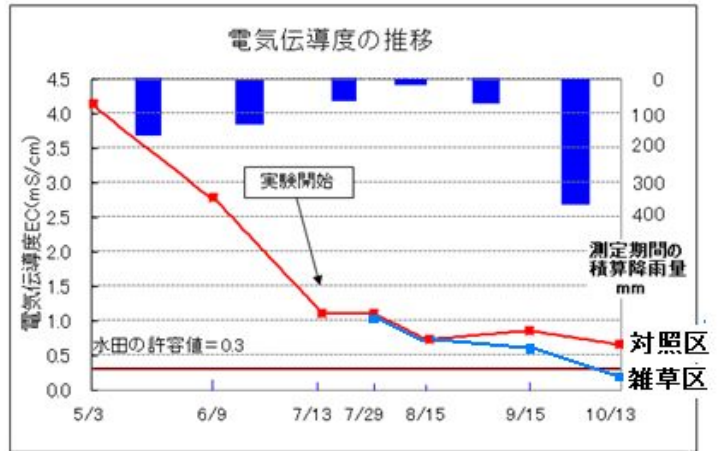


図-18 雨水及び雑草による電気伝導度変化 (対照区；赤、雑草区；青)

(2) 降雨量が電気伝導度に及ぼす影響について

震災直後から電気伝導度測定開始の5月中旬までの総雨量は96.5mmと少なく、この間の電気伝導度の低下量は不明であるが、5月中旬から7月下旬の間は398mmの雨量があり、こ間の降雨が電気伝導低下に大きく寄与したのではないかと考えられる。8月から10月までは464.5mmで、5月~7月期よりも多い降水量があったが、電気伝導度の低下はほとんど見られない。

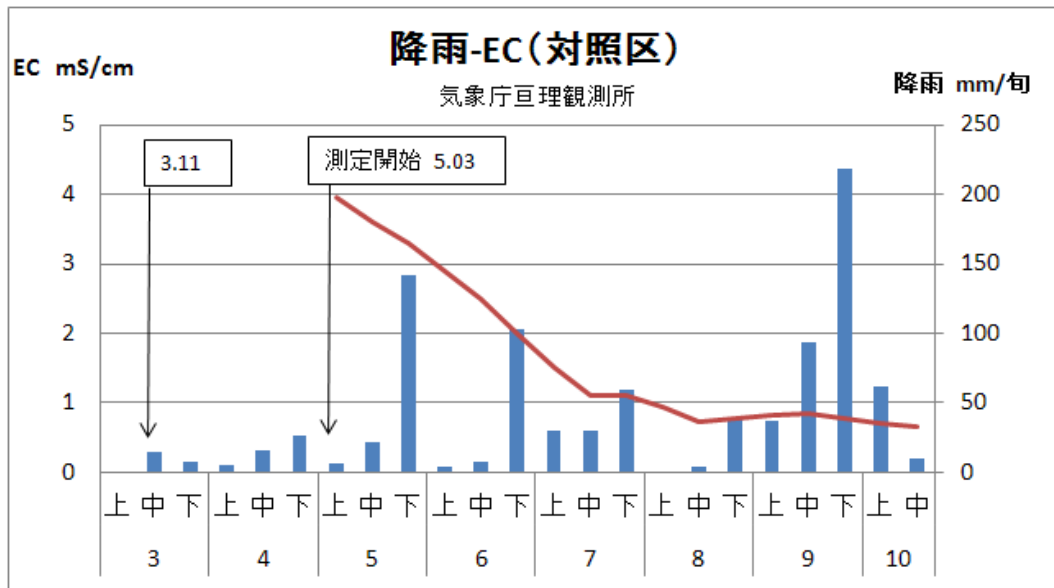


図-19 降雨量と電気伝導の関係 (対照区)

これから、概ね電気伝導度 1.0mS/cm までは降雨の影響を強く受けるが、それ以下に電気伝導度を低下させるには、降雨以外の人為的な対策が必要であることを示唆している。なお、電気伝導 1.0mS/cm は、通常の営農体系の中で代掻き湛水をすることで十分に塩分を除去できる水準なので、営農再開が早期に可能な農地では雨水による除塩だけでも対応可能であるが、排水施設の機能喪失など他の要因で早期の営農再開が難しい農地では、土壤の維持保全を兼ねた除塩対策が必要である。

(3) 深さ別電気伝導度

降雨の影響を受けやすい対照区、試験区-2（排水溝）、試験区-3（排水溝+心土破碎）の深さ別電気伝導を図-20 に示す。5/3～7/12 までは表層 5 cm のみの計測で、10 cm、20 cm は 7/13 日の試験開始日から実施している。

どの試験区も、表層 5 cm と 10 cm の電気伝導の推移はほとんど差が見られないが、20 cm の深さ（作土の厚さは 15 cm～20 cm）では 7/13 時点では上層より若干低い値であったが、7/29 時点では急激に上昇し、その後低下していく傾向となっている。表層を覆った海水は、一部は表面排水となって流出し、土壤内に侵入した塩分は下方に浸透して地下水となって排除されるので、最初は表層ほど塩分濃度が高く、やがて中層、下層の順に濃度が高まり、その後全層の塩分濃度が低下すると考えられる。20 cm の層の変化は、このような塩分の挙動を表したものと考えられる。

試験前の約 1 ヶ月間の降雨が比較的多く、この間に塩化物の縦浸透が活発化したのではないかと考えられる。また深さ 20 cm の層は作土と耕盤の境界に相当するので、横浸透も含めて高塩分濃度の水分が一時的に滞留しやすいのかもしれない。

なお、比較的排水路に近い試験区-6、7、8、9 では急激な上昇が見られないので（巻末添付グラフ参照）、地下水排除が利いているところでは 20 cm の層でも比較的速やかに塩分が排除されていると考えられる。

いずれにせよ、5、6 月の土壤調査データが得られてないので明確な答えは出せないが、降雨による縦浸透の効果はかなり高い。

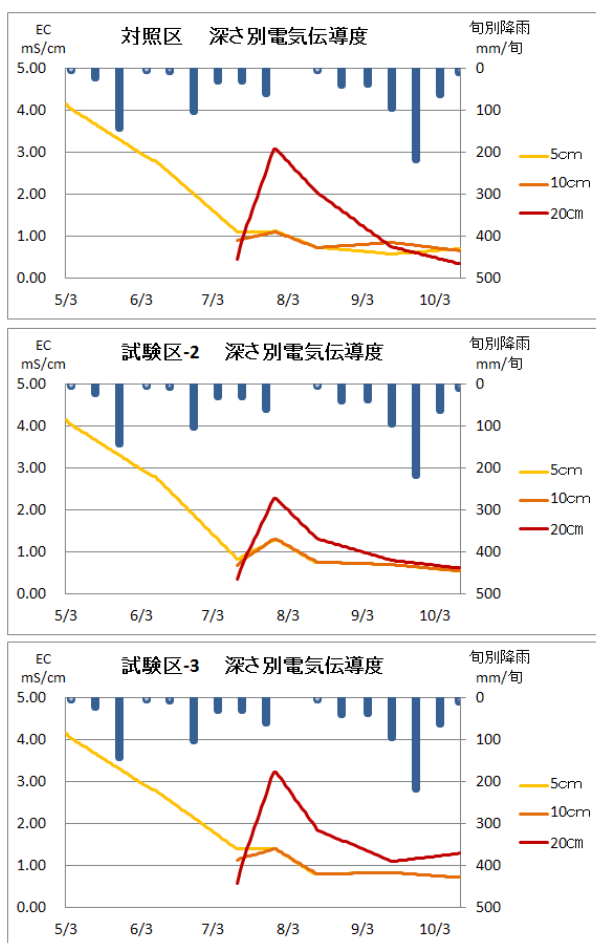


図-20 深さ別電気伝導度の推移

5-3. 土事的対策による除塩効果

(1) 表層の除塩効果

ヘドロの剥ぎ取り、心土破碎、排水溝等の設置による土事的対策は、試験区-2、試験区-3 で実施した (図-21)。この場合、無対策の対象区とほとんど同じ傾向を示し、電気伝導度が 1mS/cm 以降は非常に緩慢な低下しかせず、心土破碎や排水溝による効果はほとんど確認されなかった。

その理由として、当該圃場の排水施設である排水路の深さが田面より 20 cm しかなく、地下水排除が利きにくいためであると考えられる。また、表面排水は湛水による塩分容脱が生じなければ効果がないので、雨水だけにたよる排水溝では限界がある。

一般に排水条件の良い圃場では弾丸暗渠の効果が高いことが知られている。湛水を前提とした試験なので単純比較はできないが、亘理町での試験 (図-22；東北農政局・日本水土総研) では弾丸暗渠の効果認められており、湛水除塩効果を促進させる有効な手法であると位置づけられている。本地区のように湛水ができない圃場でも、弾丸暗渠が施工できるような排水環境があれば、雨水だけでも十分効果があるのではないかと考えられる。

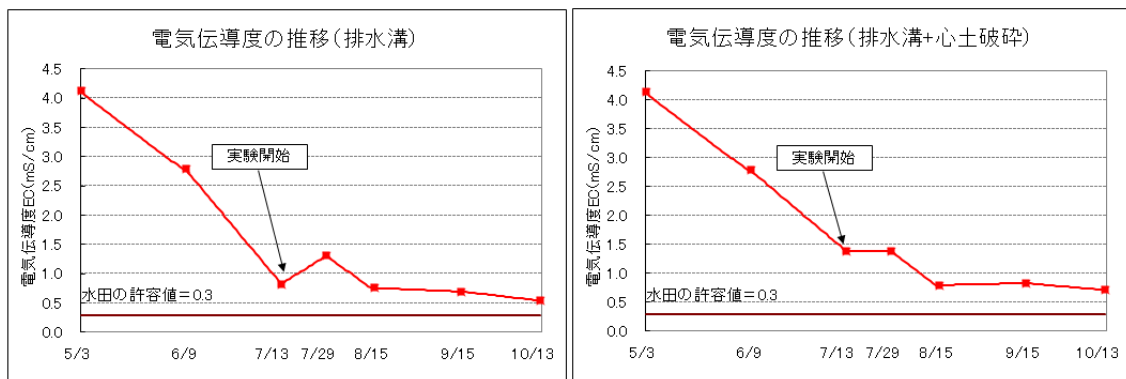
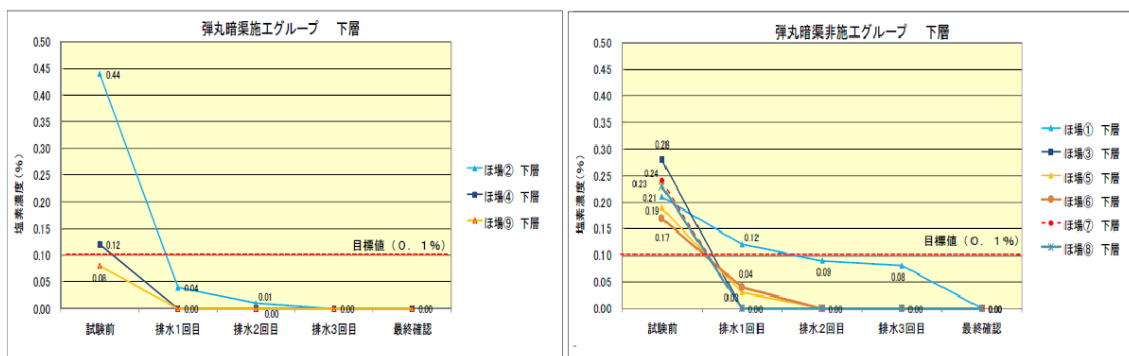


図-21 土事的対策による電気伝導度の推移



弾丸暗渠施工

弾丸暗渠無し

図-22 湛水除塩の弾丸暗渠効果 (亘理町；東北農政局・日本水土総研)

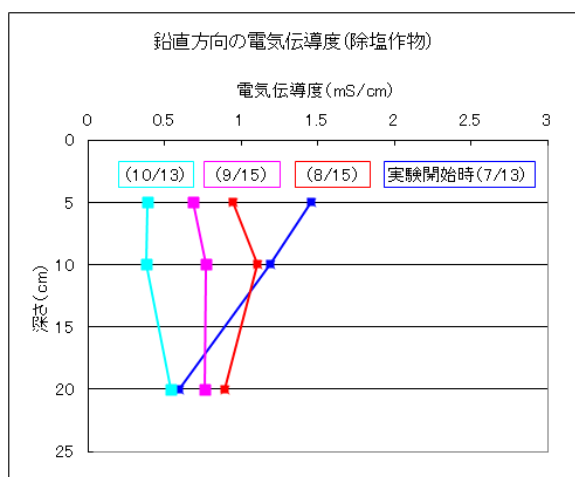
(2) 深さ方向の除塩効果

土木的対策の深さ別電気伝導度分布は図-23 に示すとおりであるが、特長的なのは、試験開始 2 カ月後の 8/15 時点で、深さ 20 cm における電気伝導が大きく上昇している（正確には、7/29 時点で急上昇しているが 8/15 時点で下がり切れていない）。

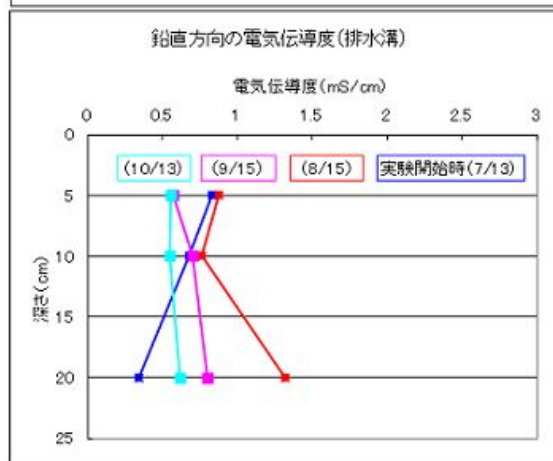
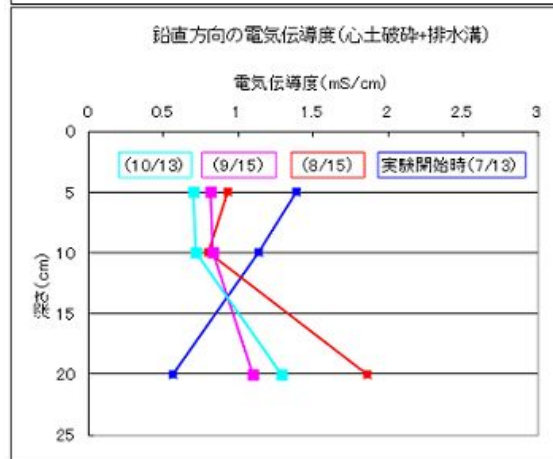
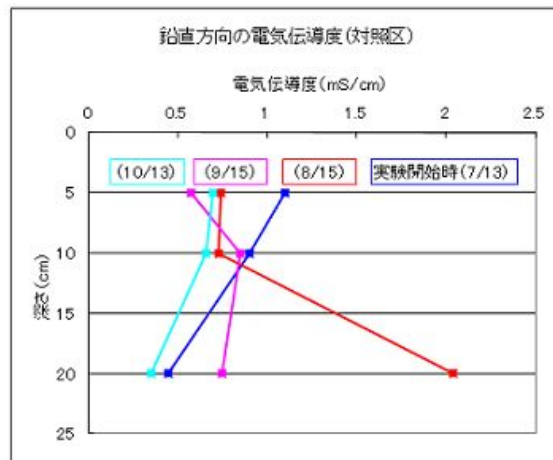
除塩作物や土壌改良材、塩分吸着材の施用した場合は 8/15 時点で電気伝導度は大きく低下しているに比べて際立った特徴である。図-23 に、土木的対策以外の代表例として除塩作物栽培区のグラフを示したが、その後も概ね同様の傾向を示す。

このことから、排水条件の悪い本試験圃場では縦浸透を促すような土木的対応がとりにくいので、作土層と耕盤の境界付近に高塩分濃度の水分が溜まりやすい。

因みに、湛水除塩には、代掻きにより土壌塩分を容脱させて表面排水する方法と、縦浸透を促し暗渠等から排水する方法の 2 通りがあるが、本地区のような暗渠排水が難しい圃場では前者の手法を採用する必要がある。



除塩作物 (試験区-1)



土木的対応 (上から対照区、試験区-2.3)

図-23 土木的対策と除塩作物栽培の電気伝導度鉛直方向分布の比較

5-4. 除塩作物の除塩効果

(1) 電気伝導度の低下

ソルガムの播種量は、ほぼ標準の 5.4kg/10a とした。生育障害がなければ、予想草丈は 2m 以上、収量は 10a 当り 4~5kg で、乾燥重量は 10a 当り 900~1200kg である

試験区-1 は除塩作物栽培、試験区-6 区は塩分吸着材都の併用、試験区-9 は土壤改良材との併用である (図-23)。除塩作物だけの試験区-1 の結果をみると、ヘドロを剥ぎ取った場合は、電気伝導度が 1 mS/cm 以下になっても除塩速度が落ちずに、速やかに許容値以下まで下がっている。これは土壤改良材や塩分吸着材併用区も同様の傾向を示している。

ヘドロを鋤き込んだ場合でも、除塩作物区では 10 月中旬時点で許容値付近まで低下し、その効果が確かめられた。

なお、塩分吸着材を併用した試験区-9 では、ヘドロを鋤き込んだ場合、電気伝導度の低下が緩慢であった。

除塩作物と併用していない場合は効果が確認されているので、この結果によって塩分吸着材の効果を断定することはできない。同一圃場であっても、土壤や排水条件にバラツキがあるので、何らかのローカルな条件が作用して電気伝導度が低下しなかった可能性も否定できない。

深さ方向の電気伝導をみると、深さ 5~10cm の浅い層では、土壤改良材、塩分吸着材の効果と除塩作物の効果の差は見られなかったが、深さ 20cm の層では、実験開始 1 カ月後 (8/15) で除塩作物試験区の電気伝導度は大きく低下している。試験開始 3 カ月後ではほとんど差がなくなるが、除塩作物は比較的深い層までの除塩を速める効果があることが確認された。

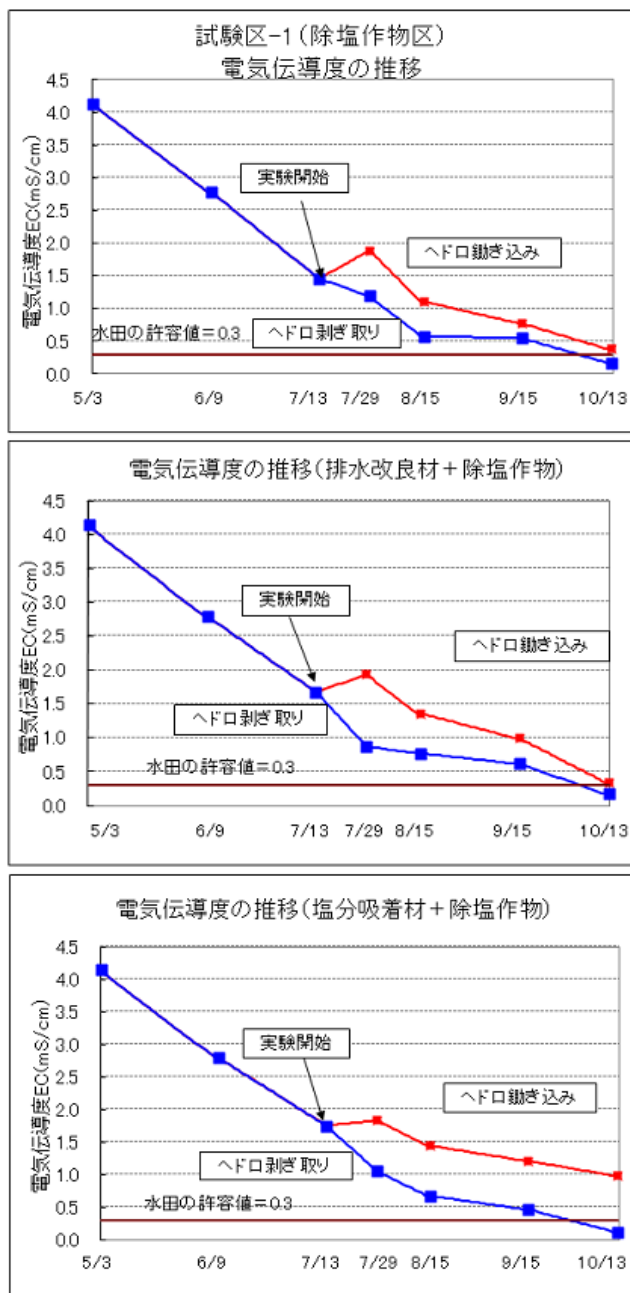
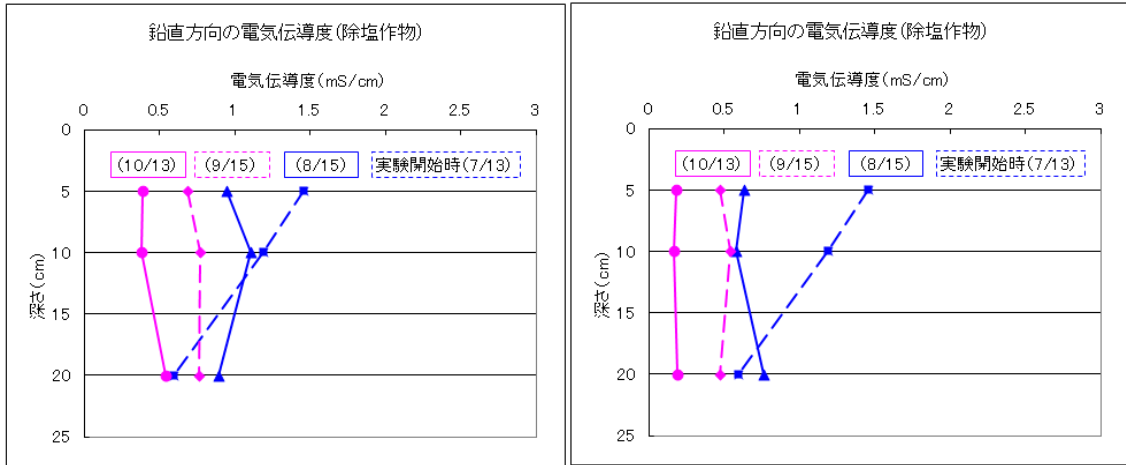


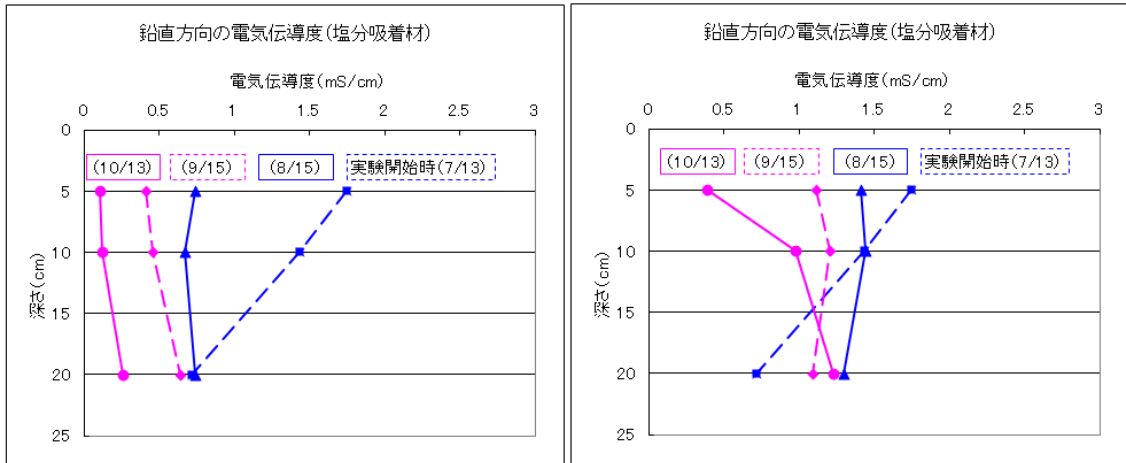
図-24 除塩作物の効果



へドロ剥ぎ取り

へドロ鋤き込み

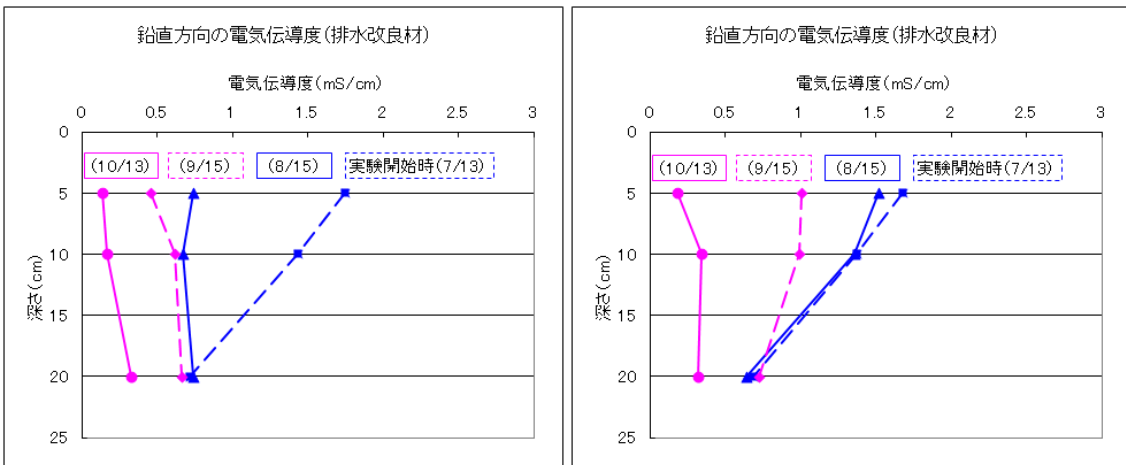
図-25 除塩作物の鉛直方向除塩効果 (試験区-2)



へドロ剥ぎ取り

へドロ鋤き込み

図-26 除塩作物+塩分吸着材の鉛直方向除塩効果 (試験区-6)



へドロ剥ぎ取り

へドロ鋤き込み

図-27 除塩作物+土壌改良材の鉛直方向除塩効果 (試験区-9)

(2) ソルガムの生育と塩分吸収量

①根群域調査の結果

作土厚 15-20 cm に対し、表-17 のとおり、各試験区における根群域の深さは、ほぼ 30 cm 程度であり、作土だけでなく耕盤など深い層からも塩化物イオンやナトリウムイオンを吸収することが可能であることが判った。

表-17 根群域の深さ

試験区	根群域の深さ
対照区	30cm
試験区①-A	30cm
試験区①-B	30cm
試験区⑥-A	40cm
試験区⑥-B	30cm
試験区⑨-A	30cm
試験区⑨-B	30cm

②生育状況について

各試験区の草丈は、表-18 のとおり、播種から 3 ヶ月で一般的な草丈 (2m 以上) を下回る 1.3~1.6m 程度であった。

表-18 10/14 時点の草丈

試験区	草丈平均	草丈最高	茎径
試験区①-A	1.3m	2.6m	1~2cm
試験区①-B	1.3m	2.6m	1~2cm
試験区⑥-A	1.3m	2.1m	1~2cm
試験区⑥-B	1.6m	2.3m	1~2cm
試験区⑨-A	1.3m	2.1m	1~1.5cm
試験区⑨-B	1.5m	2.7m	1~1.5cm

③乾燥重量

各試験区共に、ヘドロを剥ぎ取った試験区の乾燥重量の方が多。また、播種後 3 ヶ月より播種後 4.4 ヶ月の方が多く、ヘドロを剥ぎ取った試験区の乾燥重量は 1,078~1,394kg/a で一般的な乾燥重量 (900~1200 kg/a) 相当である。

表-19 採取時期別の乾燥重

採取時期	試験区	ヘドロ処理	乾燥重量	
			g/2m ²	kg/a
10/14 (播種後 3ヶ月)	試験区-1	鋤込	1,120	560
		剥取	1,675	838
	試験区-6	鋤込	1,019	510
		剥取	1,442	721
	試験区-9	鋤込	1,178	589
		剥取	1,444	722
11/25 (播種後 4.4ヶ月)	試験区-1	鋤込	1,683	842
		剥取	2,227	1,114
	試験区-6	鋤込	2,604	1,302
		剥取	2,787	1,394
	試験区-9	鋤込	1,398	699
		剥取	2,155	1,078

③ソルガムの塩分吸収量

ソルガムの刈り取りは、表-20 のとおり 2 回実施した。ソルガムは、塩化物イオンの吸収量が多く、除塩効果を期待できることが判った。しかし、ナトリウムイオンの吸収に関しては期待できない。そのため、ナトリウムは土壤に吸着したまま残存して土壤を固結化したりするので、最終的には湛水等で洗浄することが必要となる。本試験圃場程度の塩分濃度であれば、通常の湛水代掻きでも十分対応可能と思われる。

表-20 試験区別の除塩作物による効果

種別	工区名・ヘドロ処理	塩化物イオン	ナトリウムイオン	左記合計	塩化ナトリウム換算値	備考	
		kg/ha	kg/ha	kg/ha	kg/ha		
ソルガム	試験区-1	鋤込	61.6	4.1	65.7	10.8	青刈り時(10/14採取)
		剥取	100.5	2.6	103.1	6.9	〃
	試験区-6	鋤込	66.2	2.6	68.9	7.0	〃
		剥取	31.7	0.5	32.2	1.3	〃
	試験区-9	鋤込	82.5	1.1	83.5	2.8	〃
		剥取	86.6	1.0	87.7	2.7	〃
ソルガム	試験区-1	鋤込	66.5	2.7	69.2	7.1	立ち枯れ時(11/25採取)
		剥取	105.8	4.0	109.8	10.6	〃
	試験区-6	鋤込	143.2	7.6	150.8	20.0	〃
		剥取	83.6	4.3	87.9	11.4	〃
	試験区-9	鋤込	56.6	2.2	58.8	5.7	〃
		剥取	76.5	1.6	78.1	4.3	〃



写真-5 除塩作物ソルガム (8/15)

5-5. 雑草（ヒエ）の除塩効果

(1) 電気伝導度の低下

本地区を含め、仙台平野では放置された水田にヒエを主とした雑草が大量に繁茂したが、この取り扱いについては地域によって異なり、早期に刈り取ったところ、秋まで繁茂させてから刈り取ったところ、雑草を鋤き込んでいるところなど様々である。雑草は瓦礫処分の障害になるので、瓦礫処分を急いだ地域では早期に雑草を刈り取っているようである。

ところで、ヒエ等の雑草は非常に耐塩性が強く、土壌から大量の塩分を吸収していることが期待されるので、試験圃場隣の雑草派が繁茂している圃場について、試験圃場と同様に電気伝導度および塩分含有量の計測を実施した。

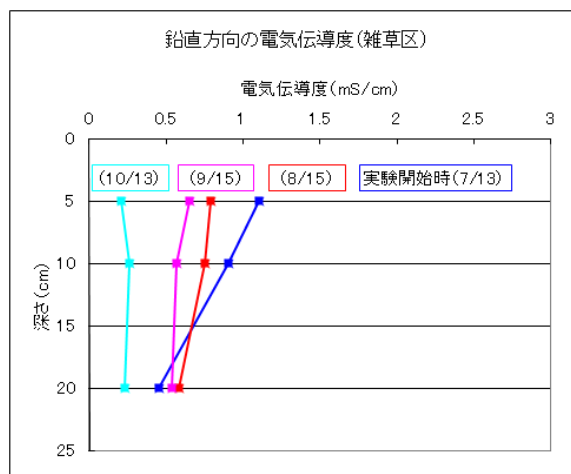


図-28 除塩作物鉛直方向 EC

表層部の電気伝導度については、図-18に示したように、対象区に比べて明らかに電気伝導度の低下効果があり、全体として除塩作物と同程度の効果が認められる。

(2) 雑草（ヒエ）の塩分吸収量

ヒエの採取は、青刈り時（8/16）、立ち枯れ時（9/15）、倒伏時（10/14）の3回行った。ヒエに含まれる塩化物イオンとナトリウムイオンの単位当り重量は、表-13の通り、立ち枯れ時が最も多い。また、倒伏時の塩化物イオンとナトリウムイオンの合計を立ち枯れ時と比較すると、1/5程度であることから、各イオンは土壌に戻っていることが考えられる。単位面積当たりの除塩効果に関しては、表-14の通り、ヒエのナトリウムイオン含有量は、ソルガムと比較すると10倍程度であり、塩化物イオン量が減少する際に生じる団粒構造の破壊をある程度予防できる可能性がある。また、ヒエとソルガムは、塩化物イオンの吸収量にあまり違いはないが、ヒエの各イオン量の合計値はソルガムより多いことから、ヒエはソルガムより除塩効果が高いと言える。

表-21 ヒエの採取時期別の除塩効果

種別	採取時の状況と採取日	塩化物イオン	ナトリウムイオン	塩化ナトリウム換算値	塩化ナトリウム換算値	乾燥重量	備考
		mg/kg	mg/kg	mg/kg	kg/ha		
ヒエ	青刈り時(8/16採取)	15,000	3,000	7,944	36	900	
	立ち枯れ時(9/15採取)	18,000	6,500	17,211	68	794	除草剤散布
	倒伏時(10/14採取)	3,100	1,900	5,031	15	595	"

表-22 ヒエとソルガムの除塩効果の比較

種別	工区名・ヘドロ処理	塩化物イオン	ナトリウムイオン	左記合計	塩化ナトリウム換算値	備考
		kg/ha	kg/ha	kg/ha	kg/ha	
ヒエ	雑草区	67.5	13.5	81.0	35.7	青刈り時(8/16採取)
		71.5	25.8	97.3	68.3	立ち枯れ時(9/15採取)
		9.2	5.7	14.9	15.0	倒伏時(10/14採取)
ソルガム	10/14鋤込平均	70.1	2.6	72.7	6.9	
	11/25鋤込平均	88.8	4.1	92.9	11.0	
	上記平均	79.4	3.4	82.8	8.9	
	10/14剥取平均	74.7	1.8	76.5	4.9	
	11/25剥取平均	53.4	2.0	55.3	5.2	
	上記平均	64.0	1.9	65.9	5.0	

ヒエの除塩効果が判った時点で、仙台市の仙台東部地区以外のほとんどの周辺農地では、除草剤散布が中心で、刈り取る予定がなかった。しかし、仙台東土地改良区に今回の試験結果の中間報告を事前に伝えていたところ、その情報が東北農政局と仙台市に伝わり、除塩工事の準備作業としてヒエの刈り取りと撤去が実施された。

仙台東部地区の津波被害にあった農地（2.120ha）のヒエが、雑草区の立ち枯れ時と同等のイオン量と植生密度であると仮定した場合、ヒエの刈り取りと撤去によって排除する塩化物イオンとナトリウムイオンの合計は、約206(t)に及ぶ。

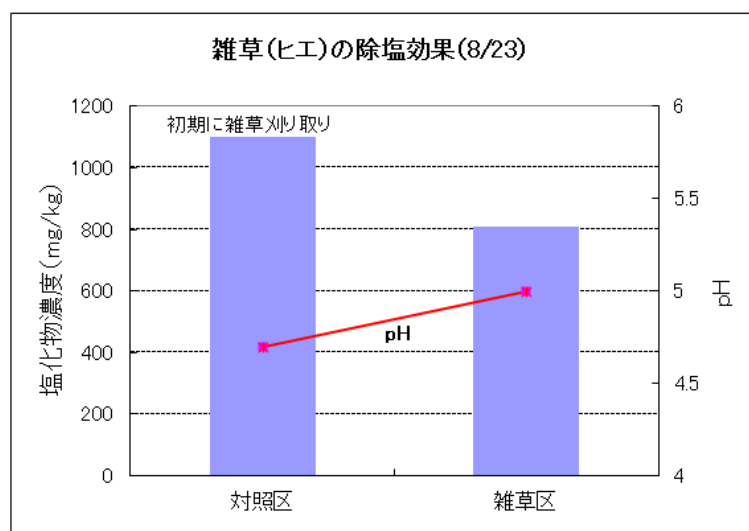


図-29 雑草（ヒエ）区と対照区の土壌塩化化合物濃度比較



写真-6 ヒエの刈り取り状況（仙台平野）

5-6. 土壤改良材（珪藻土焼成粒）の効果

土木的対策との併用区（試験区 7, 8）、除塩作物との併用区（試験-9）とも土壤改良材（石灰併用）を施用した試験区は対象区（図-18）や土木的対策（図-21）に比べて除塩が促進されている。土木的対策は除塩効果がほとんど見られなかったことから考えて、図-30 に示す電気伝導度の低下は土壤改良材による除塩効果と考えるとよい。

ところで、本試験で施用した土壤改良材珪藻土焼成粒は、土壤水の排水を物理的に改良する方法なので、本地区のような排水があまり良くない圃場では効果があまり出ない可能性も考えられた。しかし、本資材と石灰を併用してナトリウムを塩素と分離することで、多少排水条件が悪いところでも、土壤の排水性を改良することで高い除塩効果が得られることを示している。

なお、除塩作物併用区と土木的対策併用区の鉛直方向の電気伝導度を比較すると、やや除塩作物併用区の方が深さ 20 cm 地点の除塩効果が上回っているものの、土木的対策併用区でも除塩作物によって十分に電気伝導度を低下させることが認められた。

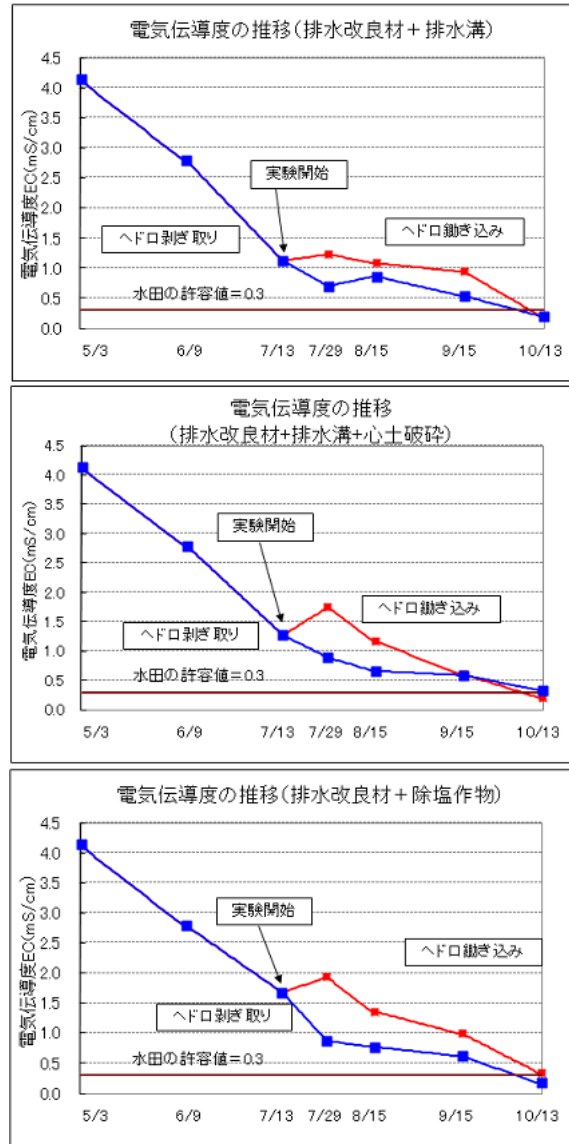


図-30 土壤改良材の効果

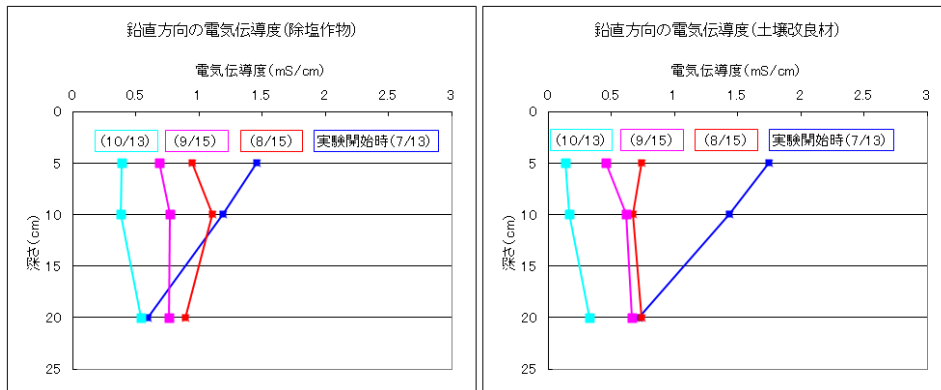


図-31 除塩作物区と珪藻土焼成粒施用区（除塩作物併用）の鉛直方向電気伝導度

5-7. 塩分吸着材 (ゼオライト、活性炭) の除塩効果

塩分吸着材として、活性炭素 (環炭) 100 k g、ゼオライト 80 k g を 840 m² に施用した。10 m² 当りで、活性炭素 11.9 k g、ゼオライト 9.5 k g である。

土木的対策 (試験区 4, 5) ではその効果が認められたが、除塩作物併用区 (試験区 -6) ではヘドロ鋤き込みをした場合の効果が表れなかった。深さ別の電気伝導度 (図-33) でも除塩作物併用区では下層でも電気伝導度はあまり低下していない。

より効果が低いと考えられる土木的対策併用区では効果が表れていることを考えると (図-33・a)、これは塩分吸着材の効果有無とは関係なく、試験圃場の何らかの条件の違いが影響したものと考えられる。

除塩作物併用の試験区-6A は、試験開始当初から最も電気伝導度が高い試験区であった (図-17)。このことから、当試験区は他の試験区に比べて土壤の気相率が低く極端に排水性が悪化していた、あるいは陽イオン交換容量が小さく、ナトリウムが分離せずに NaCl のまま土壤に吸着しやすい状況にたまたま置かれていたこと等が考えられる。

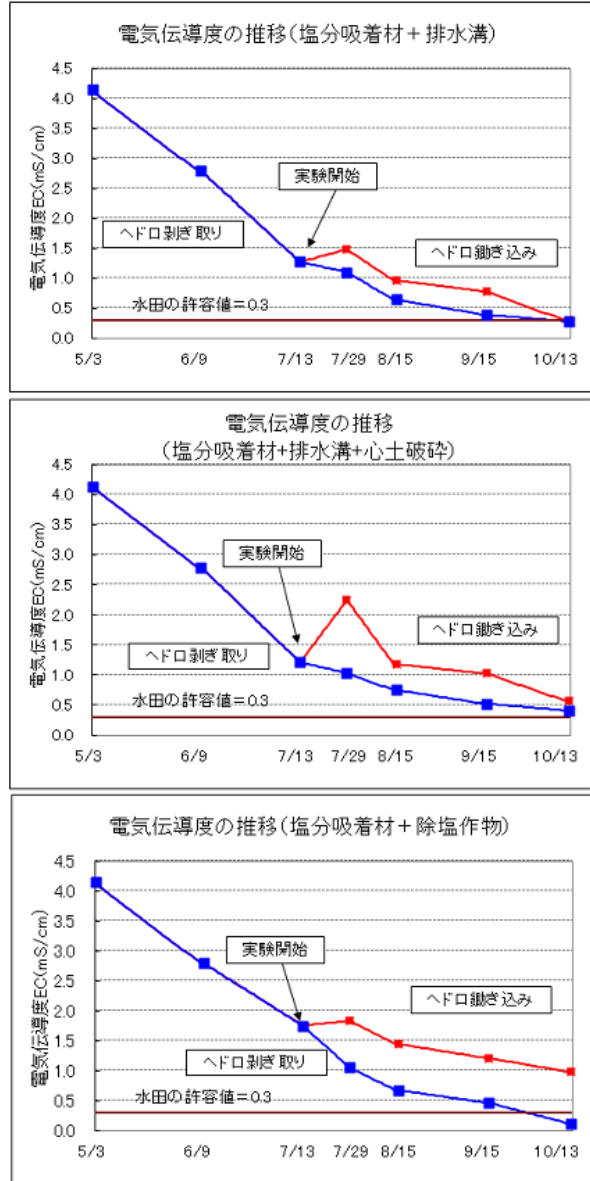
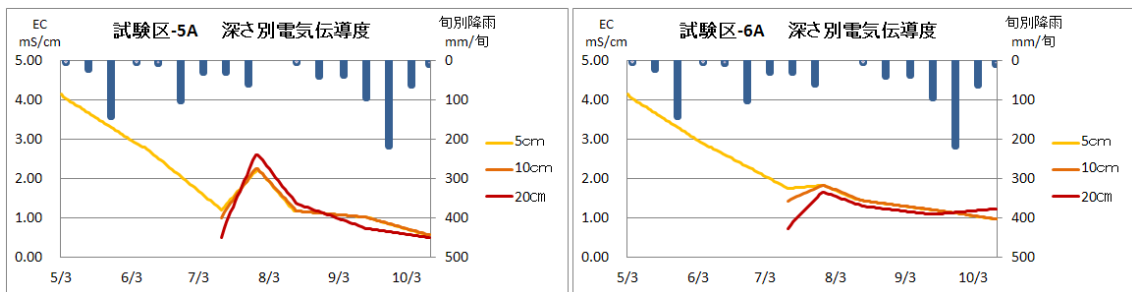


図-32 塩分吸着材の効果



a 土木的対策併用

b 除塩作物併用

図-33 塩分吸着材の深さ別電気伝導度推移

6. その他の考察

6-1. 土壌改良効果

除塩作物及び土壌改良材、塩分吸着材施用による土壌改良効果を把握するために、試験区-6、試験区-9の土壌三相分布と最大容水量について試験開始前と終了後の比較を行った。

(1) 三相分布の変化

塩分吸着材と除塩作物併用区（試験区-6）は、試験開始前と終了後で気相率がわずかに増加しただけで大きな変化は無いが、土壌改良材と試験作物併用区（試験区-9）は、試験終了には、試験前（気相率 5.5%）を大きく上回る値（鋤込：24.6%、剥取：19.8%）であり、透水性が改善され、土壌中の水分移動が容易になっている。土壌改良材は土壌構造の改良が本来の機能であるので、この結果は当然であると考えられる。一方、除塩作物と併用した塩分吸着材区ではわずかな改善にとどまっている。これは、土壌改良材区では石灰を投入しているが、塩分吸着材区では石灰を施用しなかったため、ナトリウムが土壌に残存していた可能性が高い。

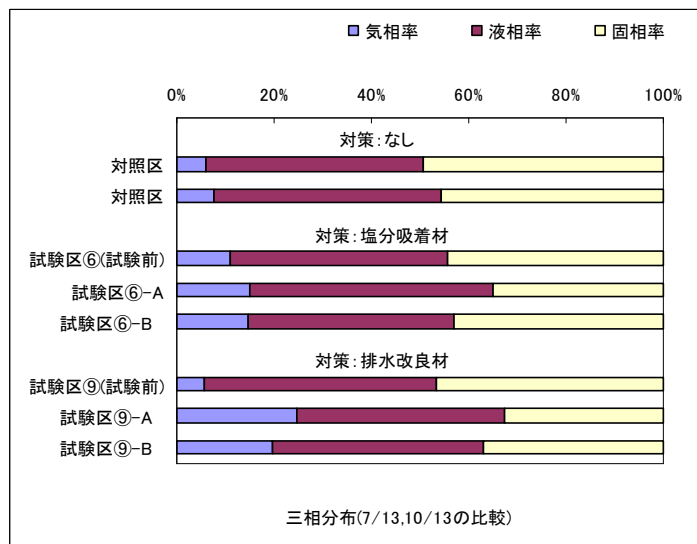


図-34 土壌三相分布の変化
(対照区・試験区-6、試験区-9)

いずれにせよ、浸水農地は残存ナトリウムにより土壌が固結化したり、湛水除塩でミネラルや有機物が流失するので、除塩実施後は土壌改良を行うことが必要である。

(2) 最大容水量の変化

試験開始前（7/13）と試験終了時（10/13）の最大容水量は、表-23の通り、塩分吸着材、排水改良材を使用した試験区-6、9共に大きくなっている。特に、ヘドロを鋤き込んだ方が大きい。津波堆積物は有機物を豊富に含んでいる場合が多く、有害物を含んでいなければ、むしろ土壌改良材と同等の効果を期待できるのではないかと考えられる。

表-23 最大容水量の変化

単位 (g/kg)

	対照区	試験区-6(鋤込)	試験区-6(剥取)	試験区-9(鋤込)	試験区-9(剥取)
2011/7/13	434	485		490	
2011/10/13	454	729	536	803	685

6-2. 表面流出や縦浸透による除塩効果について

9/20~21の降雨(293 mm)の影響と考えられる土壌中の塩化物濃度の低下量とソルガムの塩化物イオン量は、以下のとおりである。

(1) 対照区

降雨による表流水と縦浸透による塩化物濃度の低下量は、以下のとおりである。

8/15~10/13の塩化物濃度変化

$$1,980 - 1,422 = 558 \text{ (kg/ha)}$$

(2) 試験区 1-B

ソルガムにより、縦浸透が増加したほ場における表流水と縦浸透による塩化物濃度の低下量は、以下のとおりであり、約 2.4 倍の塩化物がほ場から流出している。

対照区と比較したソルガムの効果は、約 2.4 倍である。

$$1,348/558 = 2.4$$

(3) 試験区 9-B

排水改良材とソルガムにより、縦浸透が増加したほ場における表流水と縦浸透による塩化物濃度の低下量は、以下のとおりであり、約 1.9 倍の塩化物がほ場から流出している。

4) 試験区 9-B

ヒエにより、縦浸透が増加したほ場における表流水と縦浸透による塩化物濃度の低下量は、以下のとおりであり、約 2.1 倍の塩化物がほ場から流出している。

$$1,170/558 = 2.1$$

表-24 対照区の塩化物濃度変化

No.	採取日	単位	8月15日	10月13日	備考
①	塩化物濃度	mg/kg	1100.0	790.0	分析値
②	単位面積	m ²	1.0	1.0	
③	深さ	m	0.20	0.20	耕土厚
④	単位体積重量	t/m ³	0.9	0.9	乾土仮比重より
⑤	土の重量	kg	180.0	180.0	=②×③×④
⑥	塩化物濃度	kg/m ²	0.198	0.142	=①×⑤×10 ⁻⁶
⑦	"	kg/ha	1,980	1,422	=⑥×10 ⁴
⑧	塩化物の低下量	kg/ha		558	=1980-1422

表-25 試験区 1-B の塩化物濃度変化

No.	採取日	単位	8月15日	10月13日	備考
①	塩化物濃度	mg/kg	839.9	91.2	回帰式による推定値
②	単位面積	m ²	1.0	1.0	
③	深さ	m	0.20	0.20	耕土厚
④	単位体積重量	t/m ³	0.9	0.9	乾土仮比重より
⑤	土の重量	kg	180.0	180.0	=②×③×④
⑥	塩化物濃度	kg/m ²	0.151	0.016	=①×⑤×10 ⁻⁶
⑦	"	kg/ha	1,512	164	=⑥×10 ⁴
⑧	塩化物の低下量	kg/ha		1,348	=1512-164

表-26 試験区 9-B の塩化物濃度変化

No.	採取日	単位	8月15日	10月13日	備考
①	塩化物濃度	mg/kg	800.0	210.0	分析値
②	単位面積	m ²	1.0	1.0	
③	深さ	m	0.20	0.20	耕土厚
④	単位体積重量	t/m ³	0.9	0.9	乾土仮比重より
⑤	土の重量	kg	180.0	180.0	=②×③×④
⑥	塩化物濃度	kg/m ²	0.144	0.038	=①×⑤×10 ⁻⁶
⑦	"	kg/ha	1,440	378	=⑥×10 ⁴
⑧	塩化物の低下量	kg/ha		1,062	=1440-378

表-27 雑草区の塩化物濃度変化

No.	採取日	単位	8月15日	10月13日	備考
①	塩化物濃度	mg/kg	810.0	160.0	分析値
②	単位面積	m ²	1.0	1.0	
③	深さ	m	0.20	0.20	耕土厚
④	単位体積重量	t/m ³	0.9	0.9	乾土仮比重より
⑤	土の重量	kg	180.0	180.0	=②×③×④
⑥	塩化物濃度	kg/m ²	0.146	0.029	=①×⑤×10 ⁻⁶
⑦	"	kg/ha	1,458	288	=⑥×10 ⁴
⑧	塩化物の低下量	kg/ha		1,170	=1458-288

6-3. 植物体の有効利用について

表-28 試験区別の除塩効果

(1) ソルガムの発熱量の検討

ソルガムの発熱量は、ほぼ 16.8 (MJ/kg) であり、「木質ペレット品質規格原案財団法人 日本住宅・木材技術センター」示されて

	高位発熱量		刈取重量	乾燥重量	含水率
	MJ/kg	kcal/kg	g	g	%
試験区1 鋤込	16.8	4.0	5,522	1,120	79.7
試験区1 剥取	16.8	4.0	7,279	1,675	77.0
試験区6 鋤込	17.1	4.1	4,310	1,019	76.4
試験区6 剥取	16.8	4.0	5,683	1,442	74.6
試験区9 鋤込	16.7	4.0	5,571	1,178	78.9
試験区9 剥取	16.8	4.0	6,068	1,444	76.2

る品質基準の 16.9 (MJ/kg い) に近い値である。また、含水率は、74.6~79.7 で、「燃料用木材チップ品質・規格ガイドライン案」に示されている標準含水率チップの基準値 (40~80%未満) 内である。これらの試験結果から、ソルガムは、バイオマス燃料として使用が可能である。

6-4. 各除塩対策の工事費

各除塩対策の工事費は、①材料費 (材料費、輸送費)、②人件費 (普通作業員の人件費)、③機械賃貸料金 (全ての試験区は耕運機の賃貸料金、排水改良材のみバックホウの賃貸料金) の合計とした。表-11 は、試験区の工事費であり、表-12 は、試験区の工事費を基に算出した ha 当りの工事費である。

経済性では、最もソルガムが経済的であるが、土壌中の気相率を上げて縦浸透を向上させたい場合や水田を畑地にする場合においては、排水性の改良も同時に実施する必要がある。本試験圃場のように土木的な排水改良対策が難しいところでは、塩分吸着材や排水改良材の使用が考えられるが、コスト面では課題が多いので、ある程度除塩が進行した段階での土壌改良としてこれらの対策を導入するのが現実的であろう。

表-15 除塩対策別の工事費 (1)

単位 (円)

項目	ソルガム	塩分吸着材	排水改良材
材料費	6,000	516,000	2,200,000
人件費	2,775	33,300	27,750
機械賃貸料金	575	1,150	4,688
合計	9,350	550,450	2,232,438

表-16 除塩対策別の工事費 (2)

単位 (円/ha)

項目	ソルガム	塩分吸着材	排水改良材
材料費	64,935	5,583,147	23,804,114
人件費	30,032	360,390	300,325
機械賃貸料金	6,223	12,443	50,719
合計	101,190	5,955,979	24,155,157

7. おわりに

津波による農地の浸水は、畦畔の損傷、瓦礫の流入堆積、津波堆積物、塩害という形で被害が表れている。特に塩害は農地土壌や地下水に悪影響を及ぼし、早期に除塩を実施すれば、農地土壌の劣化を伴い、早期の営農再開に支障を及ぼすことが懸念される。

除塩対策手法については、わが国ではこれまで台風被害や干拓技術等で幾多のノウハウを積み重ねてきた。その基本は、湛水による塩分の容脱排除（代掻きによる表面排水）と降下浸透による地下水排除である。しかし、今回の震災では、多くの排水機場が損傷し、除塩用水の確保や排水不能により、これらの対策が採用できない水田が数多く出現した。中には、地盤沈下や本地区のように十分な排水が期待できない農地も少なくなく、用水を用いない除塩主峰の採用も重要な課題となっている。

本実証試験では、このような条件不利な農地での除塩対策手法に一つの方向性を見出すことができたのではないかと考えている。本試験の結果を受けて、除塩対策手法を簡単に以下に整理しておく。

- 1) 用水、排水が機能している農地では降下浸透による湛水除塩が最も効果的であり、地下浸透が難しい場合でも代掻きによる容脱が効果が高い。
- 2) 用水、排水機能に問題がある農地では、ある程度雨水だけでも除塩が可能であるが、電気伝導度 1 mS/cm (1000 ppm) 程度からは雨水だけでは除塩がなかなか進まないため、湛水除塩が早期にできない農地では別途対策が必要である。早期に湛水除塩が可能などころでは通常営農体系の中で1～2回の代掻きで十分対応可能である。
- 3) 当面の対策としては除塩作物の栽培が有効である。雑草繁茂農地は、雑草が塩分を吸収するので、秋口に刈り取れば有効であるが、次年度以降も雑草を繁茂させておくことは土壌保全上好ましくない。
- 4) 導入する適正な除塩作物は農家の事情によって異なるので、営農労力や換金性等について個別に検討する必要がある。
- 5) 津波堆積物は土壌を肥沃化させるので、有害物質を含まなければ鋤き込んで活用することも可能である。
- 6) 除塩作物栽培だけではナトリウムが土壌に残存するので、長期化する場合は肥培管理を行くことが望ましい。
- 7) 過度の湛水除去塩は土壌の有機物やミネラルを流失させるので、除塩作業後の土壌改良に留意する必要がある。その意味では事前に除塩作物や雑草の有効利用、土壌改良材や塩分吸着材などの併用などである程度まで塩分を低下させ、湛水除塩会集を可能な限り最小化することが望ましい。

【引用文献】

- 1) 原口 暢朗(2011)：平成 23 年度 農研機構東北農業研究センターシンポジウム「津波被害農地の塩害対策技術」 除塩の基礎－除塩方法と土壌 EC 測定－（うち、「除塩方法」） pp8～9
- 2) 東江 栄(2004)：アイズプラントを用いた土壌脱塩技術の可能性 熱帯農業 48(5)
- 3) 佐賀県ホームページ 農業技術防除センター 塩害対策野菜
- 4) 宮城県農林水産部農産園芸環境課(2011)：東日本大震災に伴う農作物の技術情報（第 2 報）
- 5) 上川農試土壌肥料科(1991)：水稻の海水混入灌漑水による塩害とその対策
- 6) 遊佐 隆洋、鈴木 和裕、菅原 強(2011)：農業農村工学会東北支部 第 54 回研究発表会 講演要旨集 東北地方太平洋沖地震による塩害ほ場の代掻きによる除塩効果の考察 pp4～5
- 7) 東北大学大学院工学研究科附属災害制御研究センター、ユネスコ・政府間海洋学委員会国際津波調査団：東日本大震災による津波浸水域における学術調査報告書 2011 年 5 月 28 日
- 8) 東北農政局：農地の除塩実証試験結果について 平成 23 年 9 月

写真-1 仙台平野被害状況踏査

<p>岩沼町の浸水農地(4/28)</p>	<p>亶理町の浸水農地(4/27)</p>
	
<p>試験圃場付近イチゴハウス跡(4/27)</p>	<p>試験圃場付近電気伝導度測定(4/27)</p>
	
<p>亶理町の浸水農地(4/28)</p>	<p>JA 亶理聞き取り調査(5/3)</p>
	

写真-2 試験前の事前調査







<p>巨理町非浸水農地土壌調査(5/3)</p>	<p>巨理町浸水農地土壌調査(5/3)</p>
	
<p>巨理町非浸水農地土壌断面調査(5/3)</p>	<p>巨理町浸水農地土壌断面調査(5/3)</p>
	
<p>山元町試験圃場(5/3)</p>	<p>仙台市岩切・排水可能農地は代掻実施(5/5)</p>
	

写真-3 試験圃場

<p>試験圃場造成前(7/12)</p>	<p>試験圃場造成前(7/12)</p>
	
<p>試験圃場土壌断面調査(7/12)</p>	<p>試験圃場土壌断面調査(7/12)</p>
	
<p>土壌試料サンプリング(7/12)</p>	<p>土壌試料サンプリング(7/12)</p>
	

写真-4 試験圃場(7/12-13)

<p>試験圃場</p>	<p>試験圃場土壌サンプリング</p>
	
<p>耕起作業</p>	<p>石灰投入</p>
	
<p>活性炭、ゼオライト散布</p>	<p>珪藻土混入</p>
	

写真-5 室内土壌試験分析



写真-6 試験圃場途中経過

<p>ソルガム生育状況(7/29)</p>	<p>心土破碎、溝切り(8/9)</p>
 A wide view of a field with rows of young sorghum plants. A person is visible on the left side of the field.	 A close-up view of a field where the soil has been broken up and furrows have been opened, showing a dark, textured surface.
<p>ソルガム生育状況(8/9)</p>	<p>雑草区(左)と試験区(右) (8/9)</p>
 A close-up view of a field with rows of young sorghum plants, showing their green leaves and stems.	 A view of a field with a dirt path. On the left is a weed area, and on the right is a test area. A person is standing on the path.
<p>ソルガム生育状況(8/26)</p>	
 A view of a field with rows of young sorghum plants. A sign is visible in the foreground, and a concrete channel is on the left.	

添付資料-1 試験圃場電気伝導度測定値

年月日	対照区			2			1-A		
	5cm	10cm	20cm	5cm	10cm	20cm	5cm	10cm	20cm
2011年7月13日	1.10	0.90	0.45	0.83	0.68	0.34	1.46	1.19	0.60
2011年7月29日	1.12	1.10	3.07	1.52	1.31	2.28	1.62	1.89	1.52
2011年8月15日	0.74	0.73	2.04	0.88	0.76	1.32	0.95	1.11	0.89
2011年9月15日	0.60	0.85	0.75	0.57	0.70	0.80	0.69	0.77	0.77
2011年10月13日	0.70	0.66	0.35	0.56	0.55	0.62	0.39	0.38	0.54

年月日	雑草区			3			1-B		
	5cm	10cm	20cm	5cm	10cm	20cm	5cm	10cm	20cm
2011年7月13日	1.10	0.90	0.45	1.39	1.14	0.57	1.46	1.19	0.60
2011年7月29日	1.19	1.13	0.87	1.62	1.39	3.23	1.29	1.19	1.56
2011年8月15日	0.79	0.75	0.58	0.93	0.80	1.86	0.63	0.58	0.76
2011年9月15日	0.65	0.57	0.54	0.81	0.83	1.10	0.47	0.55	0.47
2011年10月13日	0.21	0.26	0.23	0.70	0.72	1.29	0.18	0.17	0.19

年月日	4-A			5-A			6-A		
	5cm	10cm	20cm	5cm	10cm	20cm	5cm	10cm	20cm
2011年7月13日	1.27	1.04	0.52	1.21	0.99	0.50	1.75	1.43	0.72
2011年7月29日	1.51	1.48	2.48	2.29	2.25	2.61	1.83	1.83	1.65
2011年8月15日	0.98	0.96	1.61	1.20	1.18	1.37	1.41	1.44	1.30
2011年9月15日	0.70	0.78	0.83	1.04	1.02	0.74	1.11	1.21	1.09
2011年10月13日	0.34	0.29	0.84	0.38	0.57	0.50	0.39	0.98	1.23

年月日	4-B			5-B			6-B		
	5cm	10cm	20cm	5cm	10cm	20cm	5cm	10cm	20cm
2011年7月13日	1.27	1.04	0.52	1.21	0.99	0.50	1.75	1.43	0.72
2011年7月29日	1.20	1.10	2.87	1.04	1.03	2.13	1.16	1.05	1.16
2011年8月15日	0.72	0.64	1.67	0.76	0.75	1.55	0.74	0.67	0.74
2011年9月15日	0.68	0.39	0.76	0.56	0.52	0.83	0.41	0.46	0.64
2011年10月13日	0.22	0.28	0.26	0.28	0.41	0.35	0.11	0.12	0.26

年月日	7-A			8-A			9-A		
	5cm	10cm	20cm	5cm	10cm	20cm	5cm	10cm	20cm
2011年7月13日	1.12	0.92	0.46	1.27	1.04	0.52	1.68	1.37	0.69
2011年7月29日	1.34	1.23	1.05	1.73	1.75	1.42	2.16	1.93	0.91
2011年8月15日	1.18	1.08	0.92	1.15	1.16	0.94	1.52	1.36	0.64
2011年9月15日	1.06	0.94	0.92	0.68	0.61	0.73	1.01	0.99	0.73
2011年10月13日	0.15	0.20	0.62	0.14	0.20	0.30	0.18	0.34	0.32

年月日	7-B			8-B			9-B		
	5cm	10cm	20cm	5cm	10cm	20cm	5cm	10cm	20cm
2011年7月13日	1.12	0.92	0.46	1.27	1.04	0.52	1.68	1.37	0.69
2011年7月29日	0.61	0.70	0.66	0.97	0.89	1.08	0.85	0.87	0.73
2011年8月15日	0.75	0.86	0.81	0.72	0.66	0.80	0.75	0.77	0.65
2011年9月15日	0.29	0.54	0.57	0.49	0.59	0.56	0.46	0.62	0.67
2011年10月13日	0.10	0.20	0.23	0.17	0.33	0.56	0.14	0.17	0.33

年月日	補足調査	
	代表点	ヘドロ
2011年5月3日	4.14	
2011年6月9日	2.79	
2011年7月13日		3.98
2011年7月29日		
2011年8月15日		4.48
2011年9月15日		3.29
2011年10月13日		2.44

※5/3、6/9は試験圃場区画決定前なので圃場代表点
(概ね試験—6付近)で1点計測
※ヘドロは対照区のもの

添付資料-2 試験圃場土壌試験結果

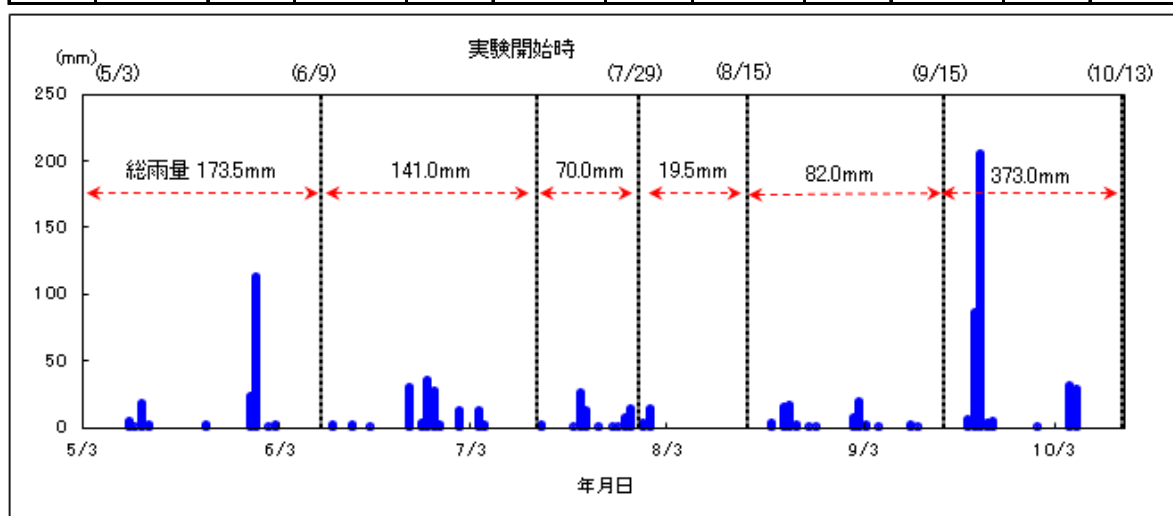
2011/7/13										
試料名		対照区	試験区-3	試験区-6		試験区-9		雑草区		
				試験区-6(鋤込)	試験区-6(剥取)	試験区-9(鋤込)	試験区-9(剥取)			
物理性試験	固相率	49.4			44.4		46.7			
	液相率	44.6			44.7		47.8			
	気相率	6.0			10.9		5.5			
	最大容水量	434			485		490			
化学性試験	pH(Kcl)	4.4			4.4		4.3			
	塩基置換容量	1000			1400		1300			
	塩化物イオン	20.0			16.6		19.3			
2011/8/15										
		対照区		試験区-3	試験区-6(鋤込)	試験区-6(剥取)	試験区-9(鋤込)		試験区-9(剥取)	雑草区
化学性試験	pH(H2O)	4.7	4.7	4.4	4.8	4.9	4.9	5.0		
	pH(Kcl)									
	塩化物イオン	1100	1200	1500	900	1600	800	810		
2011/10/13										
		対照区	試験区-3	試験区-6(鋤込)	試験区-6(剥取)	試験区-9(鋤込)	試験区-9(剥取)	雑草区		
物理性試験	固相率	45.8	33.5	35.0	43.1	32.8	37.0	50.1		
	液相率	46.5	61.5	50.0	42.2	42.6	43.2	44.3		
	気相率	7.7	5.0	15.0	14.7	24.6	19.8	5.6		
	最大容水量g/kg	454	849	729	536	803	685	375		

添付資料-3 植物体塩分吸収分析結果

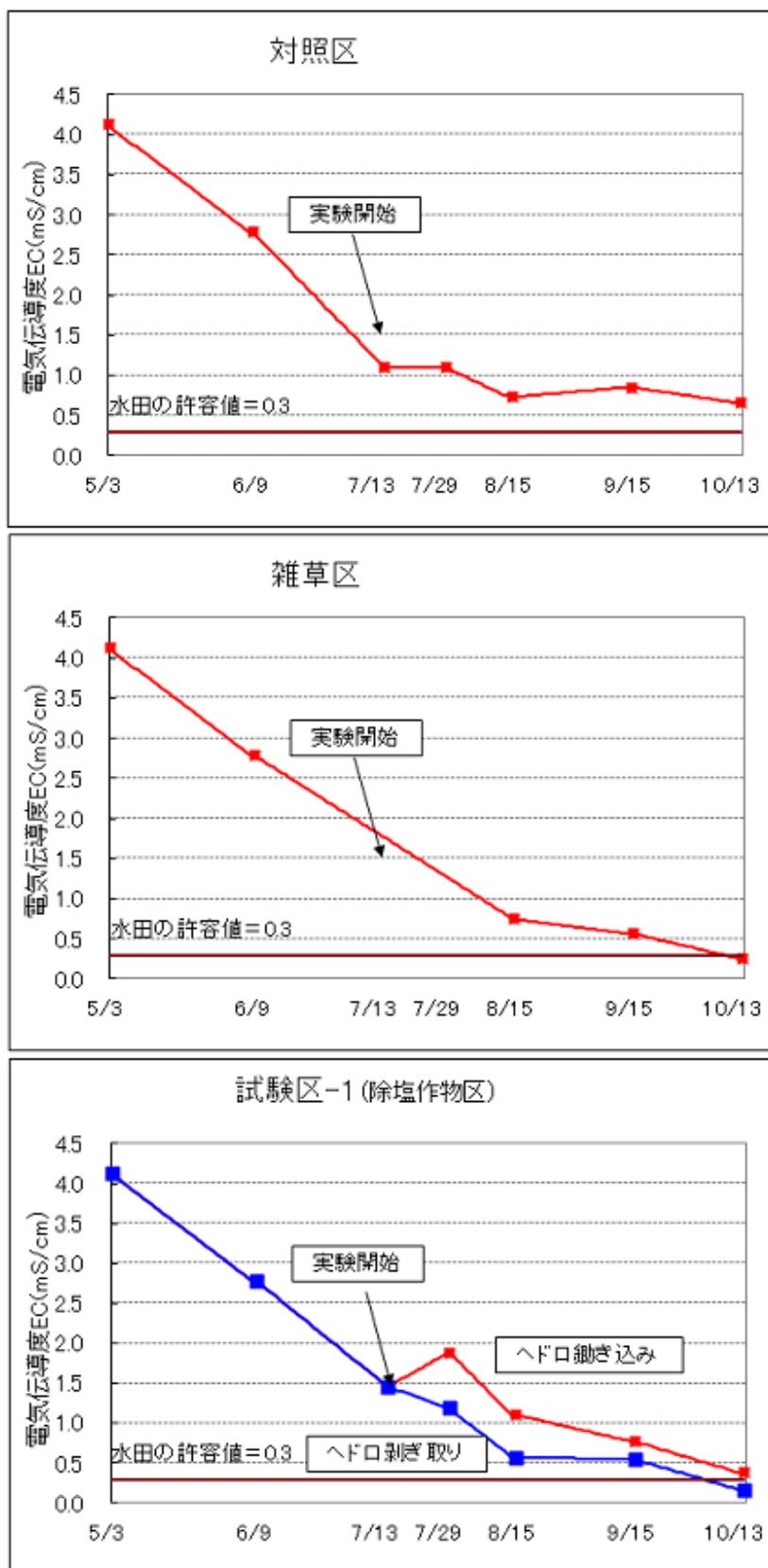
種別	採取時の状況と採取日	塩化物イオン	ナトリウムイオン	左記合計	塩化ナトリウム 換算値	塩化ナトリウム 換算値	乾燥重量	備 考	
		mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	kg/ha	g		
ヒエ	青刈り時(8/16採取)	15,000	3,000	18,000	7,944	36	900		
	立ち枯れ時(9/15採取)	18,000	6,500	24,500	17,211	68	794	除草剤散布	
	倒伏時(10/14採取)	3,100	1,900	5,000	5,031	15	595	〃	
ソルゴー	試験区-1	鋤込	11,000	730		1,933	11	1,120	10/14採取
		剥取	12,000	310		821	7	1,675	〃
	試験区-6	鋤込	12,000	310		1,313	7	1,118	〃
		剥取	4,400	67		177	1	1,442	〃
試験区-9	鋤込	14,000	180		477	3	1,178	〃	
	剥取	12,000	140		371	3	1,444	〃	
ソルゴー	試験区-1	鋤込	7,900	320		847	7	1,683	11/25採取
		剥取	9,500	360		953	11	2,227	〃
	試験区-6	鋤込	11,000	580		1,536	20	2,604	〃
		剥取	6,000	310		821	11	2,787	〃
	試験区-9	鋤込	8,100	310		821	6	1,398	〃

添付資料-4 2011年 日降雨量(気象庁亙理観測所)

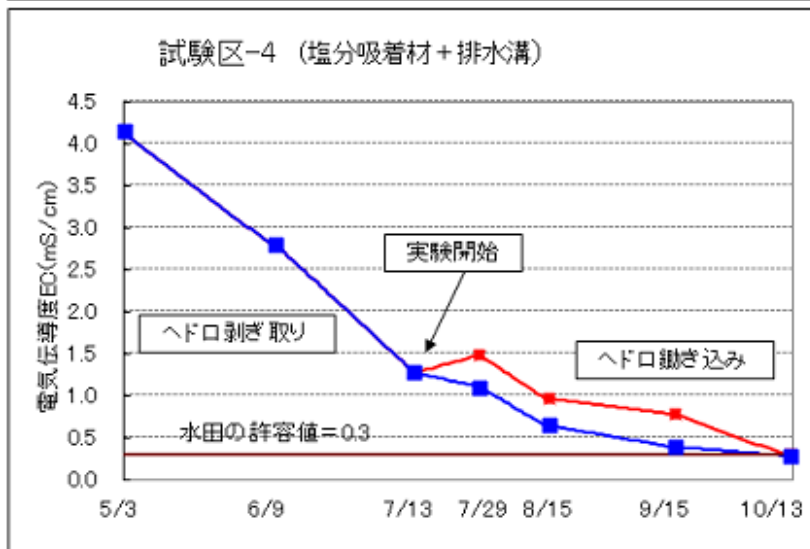
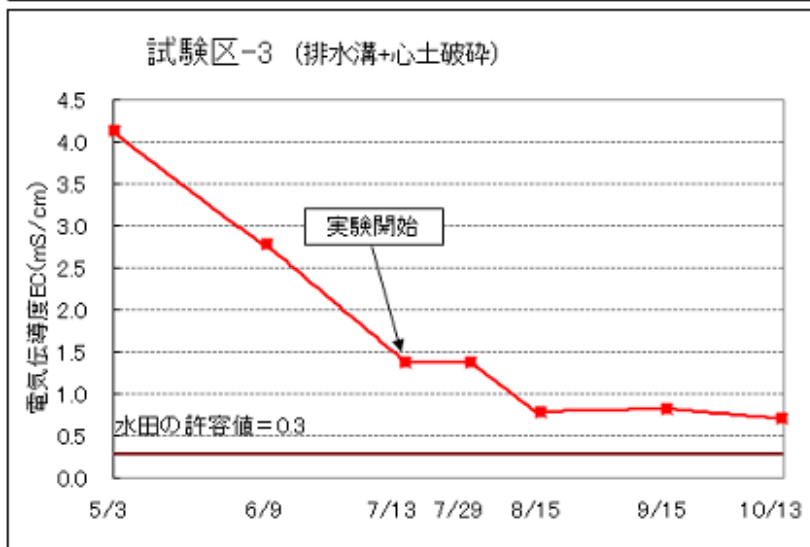
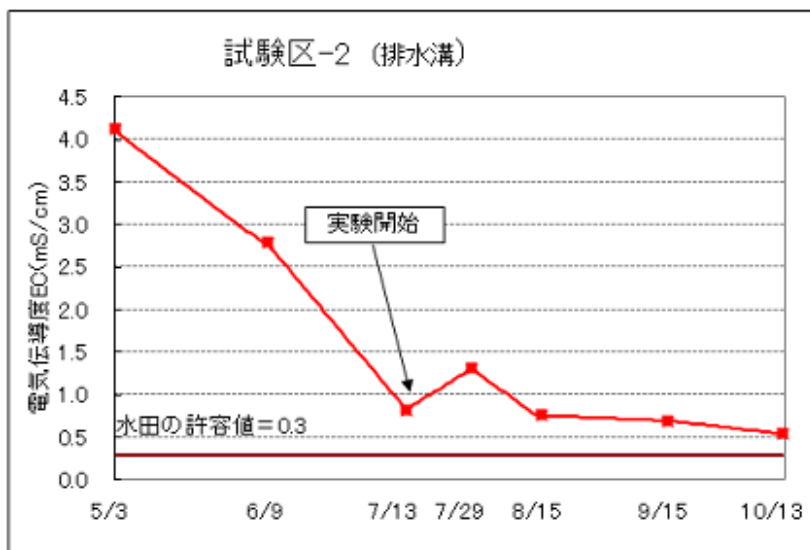
月日	降水量	月日	降水量	月日	降水量	月日	降水量	月日	降水量	月日	降水量
		6/1	1.5	7/1	14	8/1	0	9/1	8.5	10/2	0
		6/2	3	7/2	0	8/2	0	9/2	20.5	10/3	0
5/3	0	6/3	0	7/3	0	8/3	0	9/3	3	10/4	0
5/4	0	6/4	0	7/4	13.5	8/4	0	9/4	0	10/5	32.5
5/5	0	6/5	0	7/5	3	8/5	0	9/5	2	10/6	29.5
5/6	0	6/6	0	7/6	0	8/6	0	9/6	0	10/7	0
5/7	0	6/7	0	7/7	0	8/7	0	9/7	0	10/8	0
5/8	0	6/8	0	7/8	0	8/8	0	9/8	0	10/9	0
5/9	0	6/9	0	7/9	0	8/9	0	9/9	0	10/10	0
5/10	6	6/10	0	7/10	0	8/10	0	9/10	3.5	10/11	0
5/11	0.5	6/11	2.5	7/11	0	8/11	0	9/11	1	10/12	0
5/12	18.5	6/12	0	7/12	0	8/12	0	9/12	0	10/13	0
5/13	2.5	6/13	0	7/13	0	8/13	0	9/13	0		
5/14	0	6/14	3.5	7/14	3.5	8/14	0	9/14	0		
5/15	0	6/15	0	7/15	0	8/15	0	9/15	0		
5/16	0	6/16	0	7/16	0	8/16	0	9/16	0		
5/17	0	6/17	1	7/17	0	8/17	0	9/17	0		
5/18	0	6/18	0	7/18	0	8/18	0	9/18	0		
5/19	0	6/19	0	7/19	0.5	8/19	4.5	9/19	6.5		
5/20	0	6/20	0	7/20	26.5	8/20	0	9/20	86.5		
5/21	0	6/21	0	7/21	13.5	8/21	16.5	9/21	206.5		
5/22	3	6/22	0	7/22	0	8/22	17.5	9/22	5		
5/23	0	6/23	30.5	7/23	0.5	8/23	3	9/23	6		
5/24	0	6/24	0	7/24	0	8/24	0	9/24	0		
5/25	0	6/25	4.5	7/25	1	8/25	1	9/25	0		
5/26	0	6/26	36.5	7/26	0.5	8/26	1	9/26	0		
5/27	0	6/27	28.5	7/27	9	8/27	0	9/27	0		
5/28	0	6/28	3.5	7/28	15	8/28	0	9/28	0		
5/29	25	6/29	0	7/29	0	8/29	0	9/29	0		
5/30	113.5	6/30	0	7/30	4.5	8/30	0	9/30	0.5		
5/31	0			7/31	15	8/31	0	10/1	0		



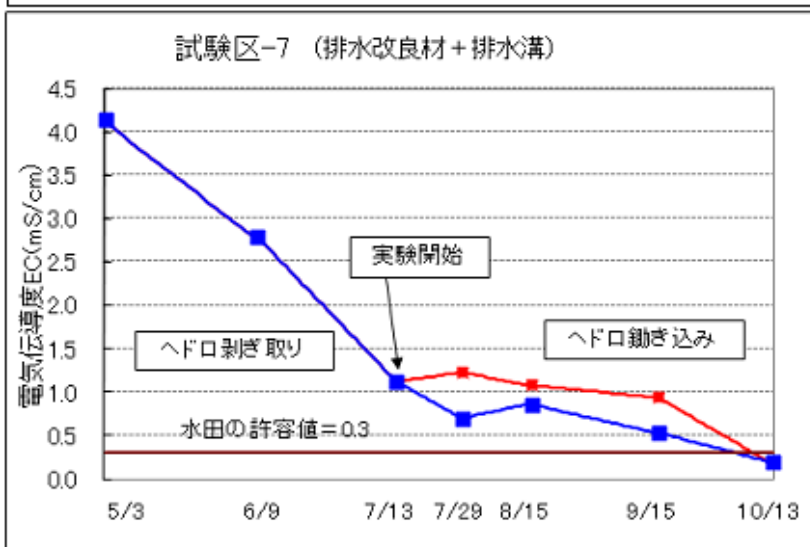
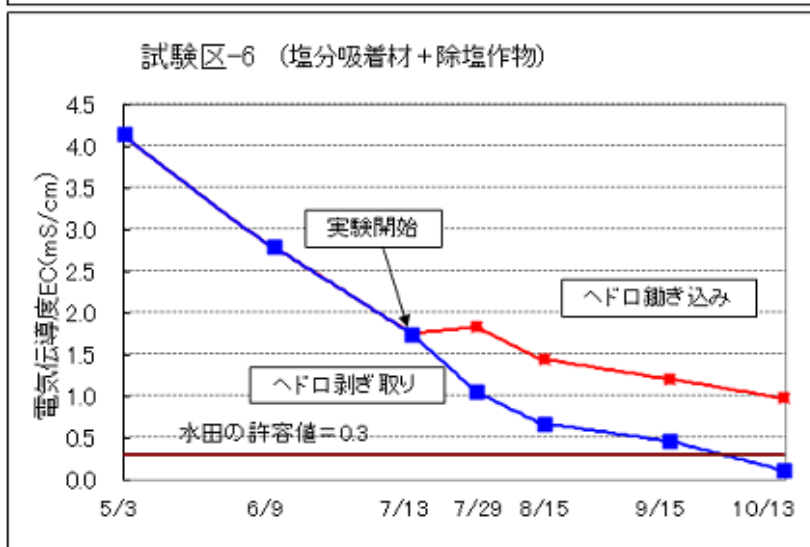
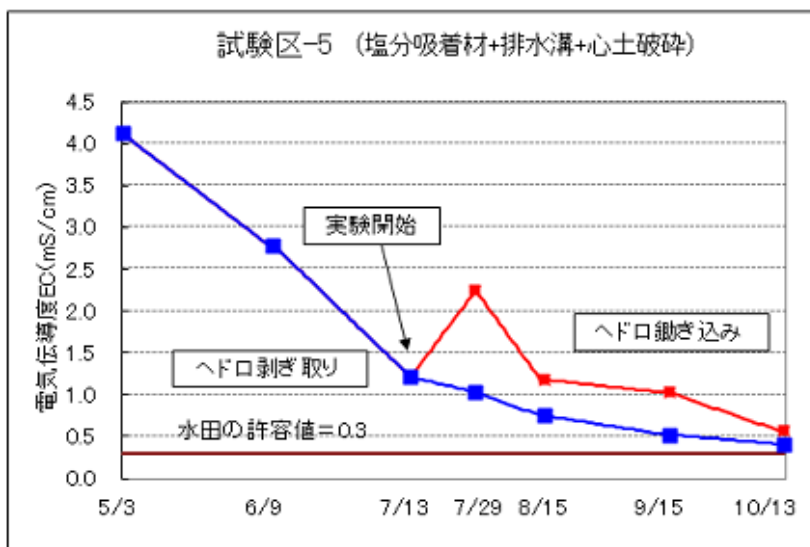
添付資料-5 試験区別電気伝導度(表層 5 cm)-1



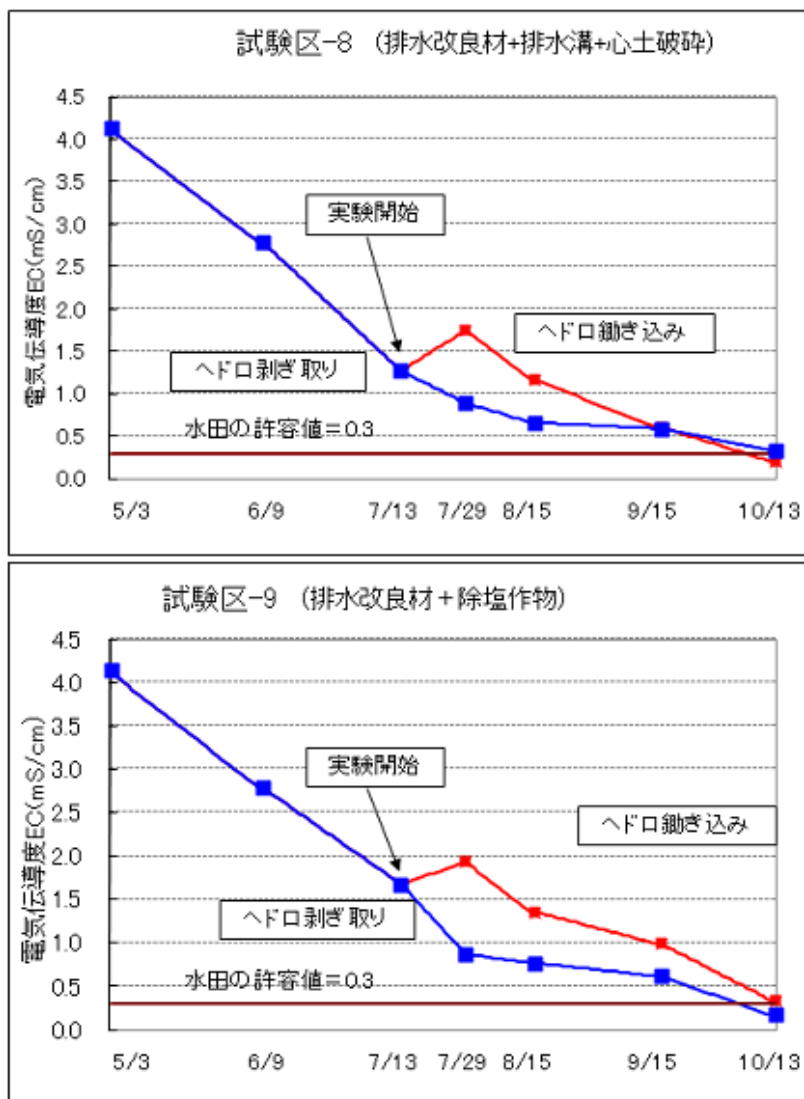
添付資料-5 試験区別電気伝導度(表層 5 cm)-2



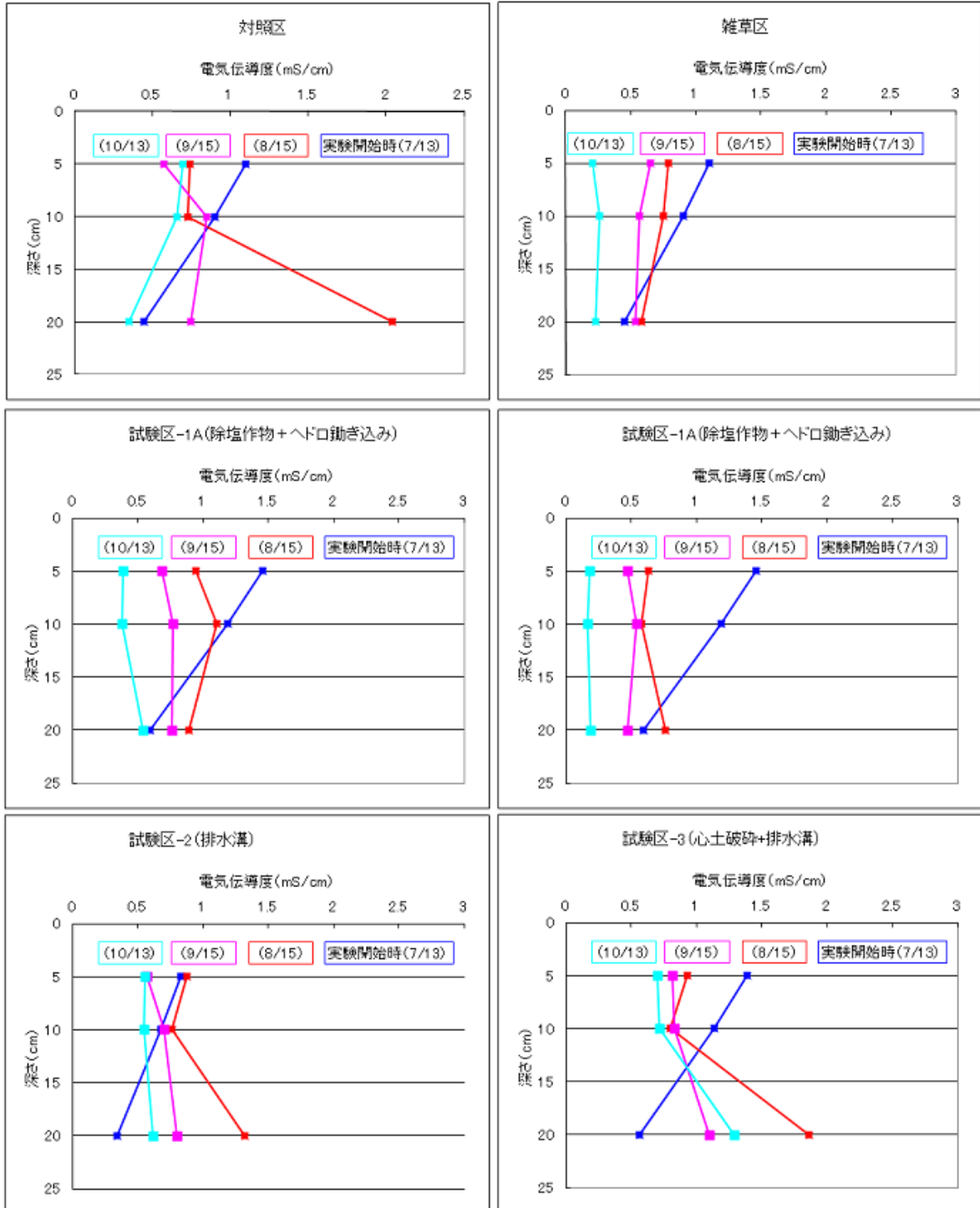
添付資料-5 試験区別電気伝導度(表層 5 cm)-3



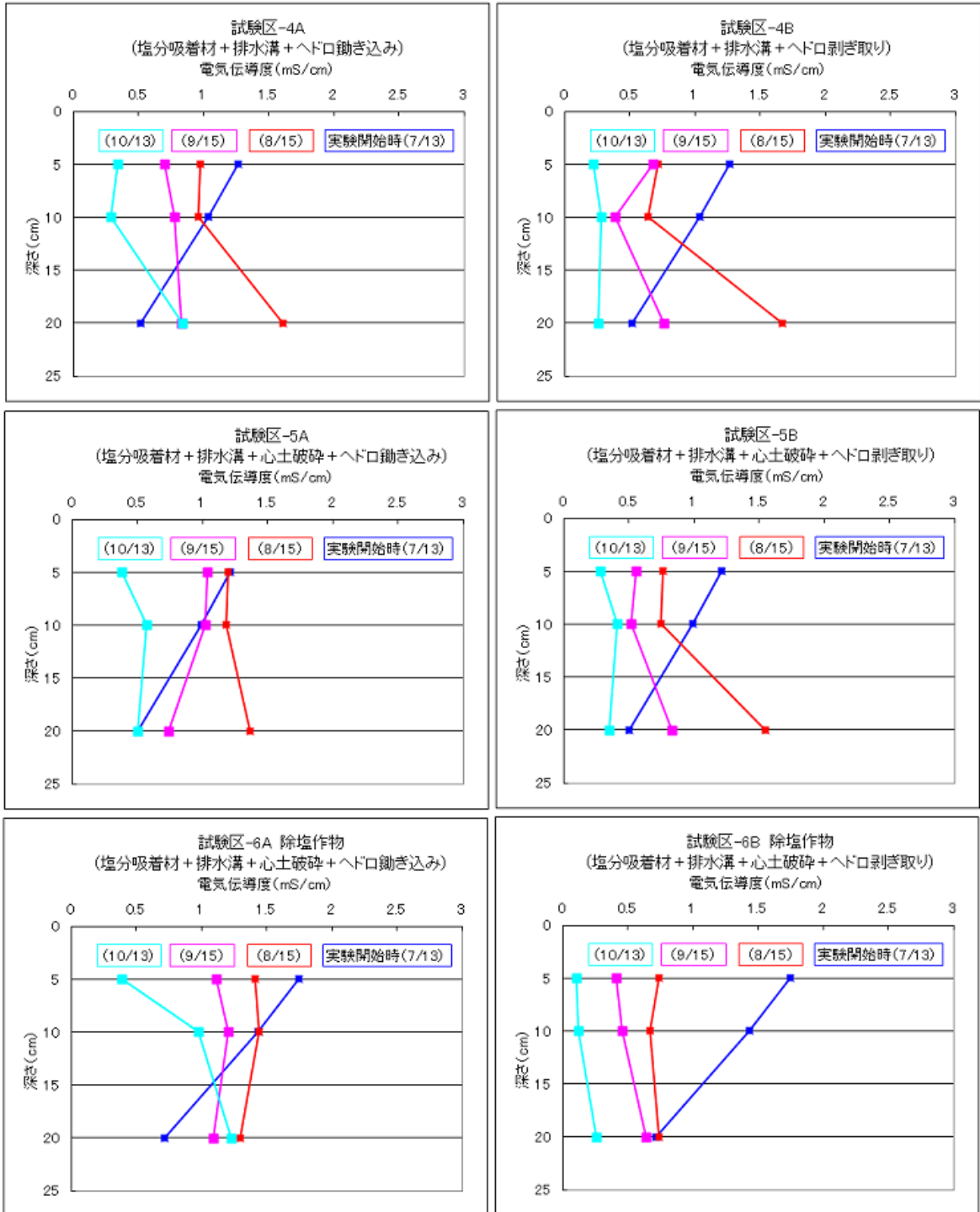
添付資料-5 試験区別電気伝導度(表層 5 cm)-4



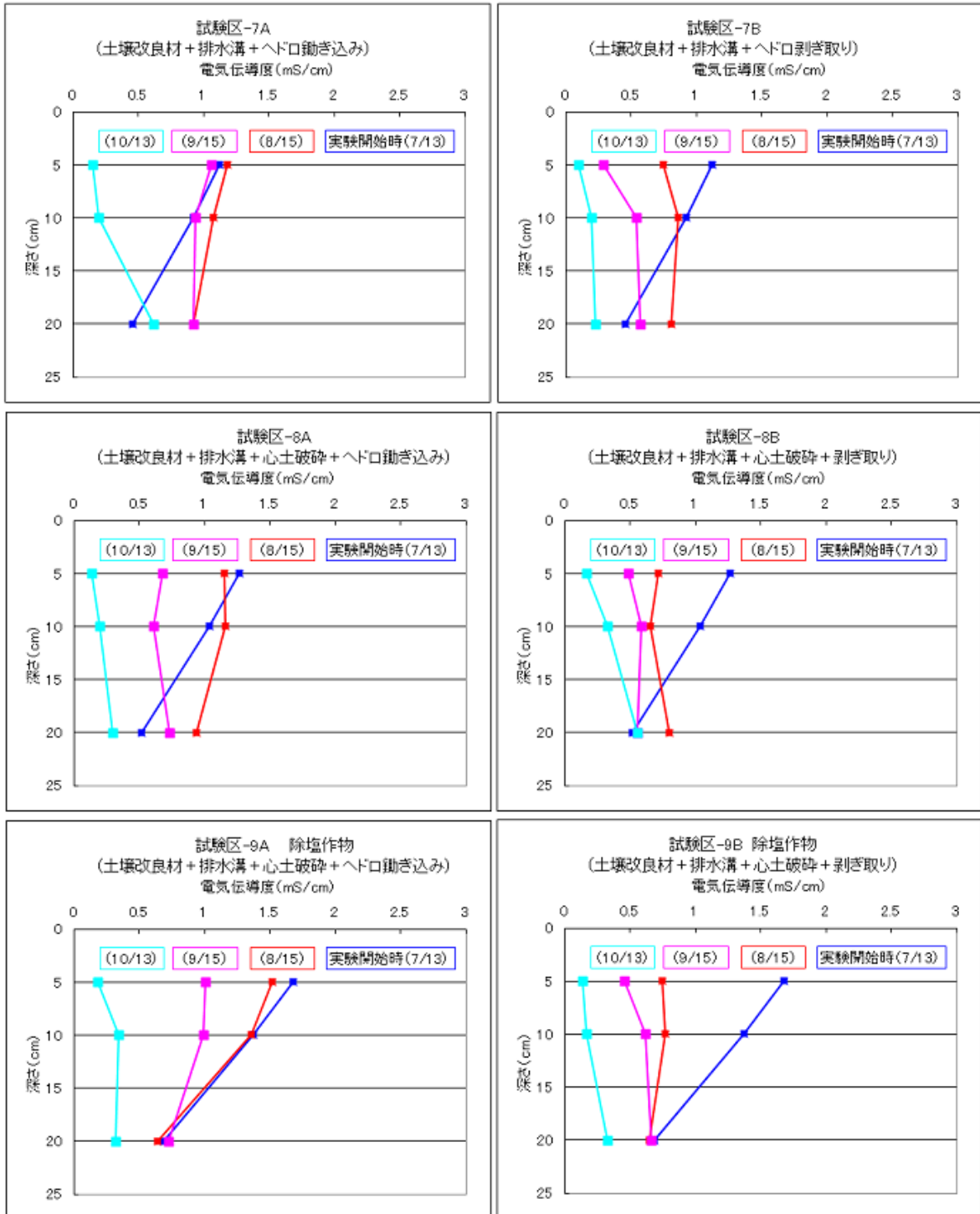
添付資料-6 鉛直方向電気伝導度-1



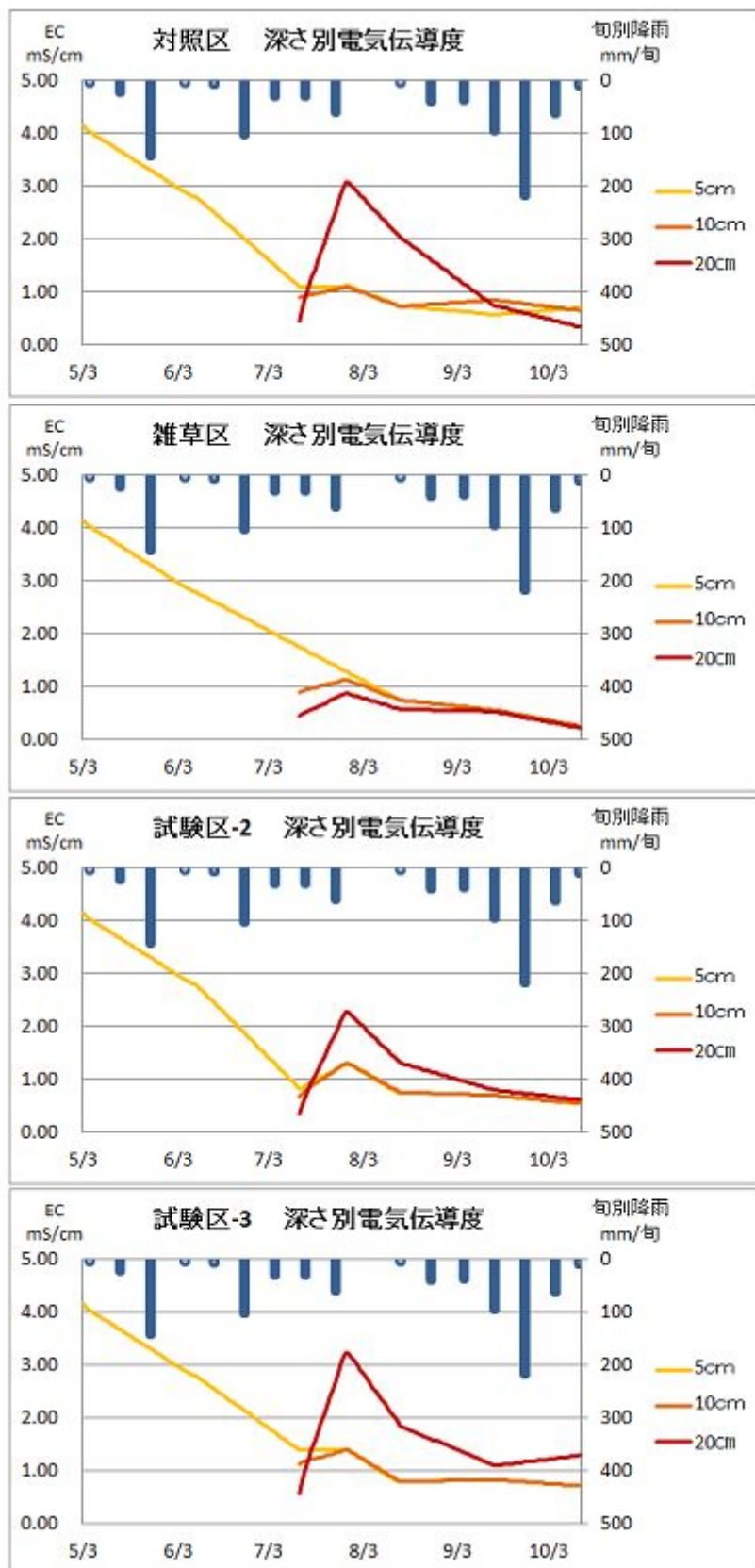
添付資料-6 鉛直方向電気伝導度-2



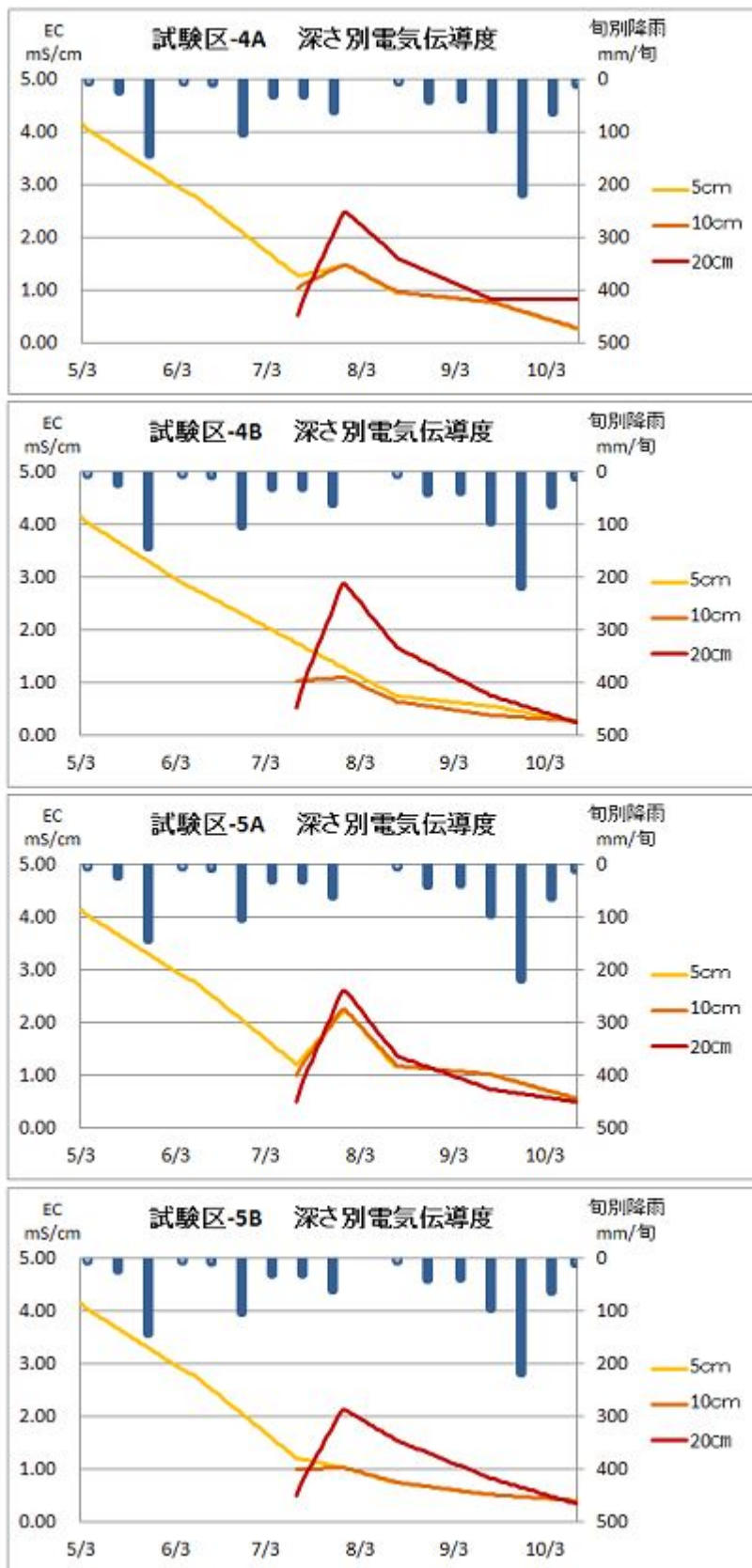
添付資料-6 鉛直方向電気伝導度-3



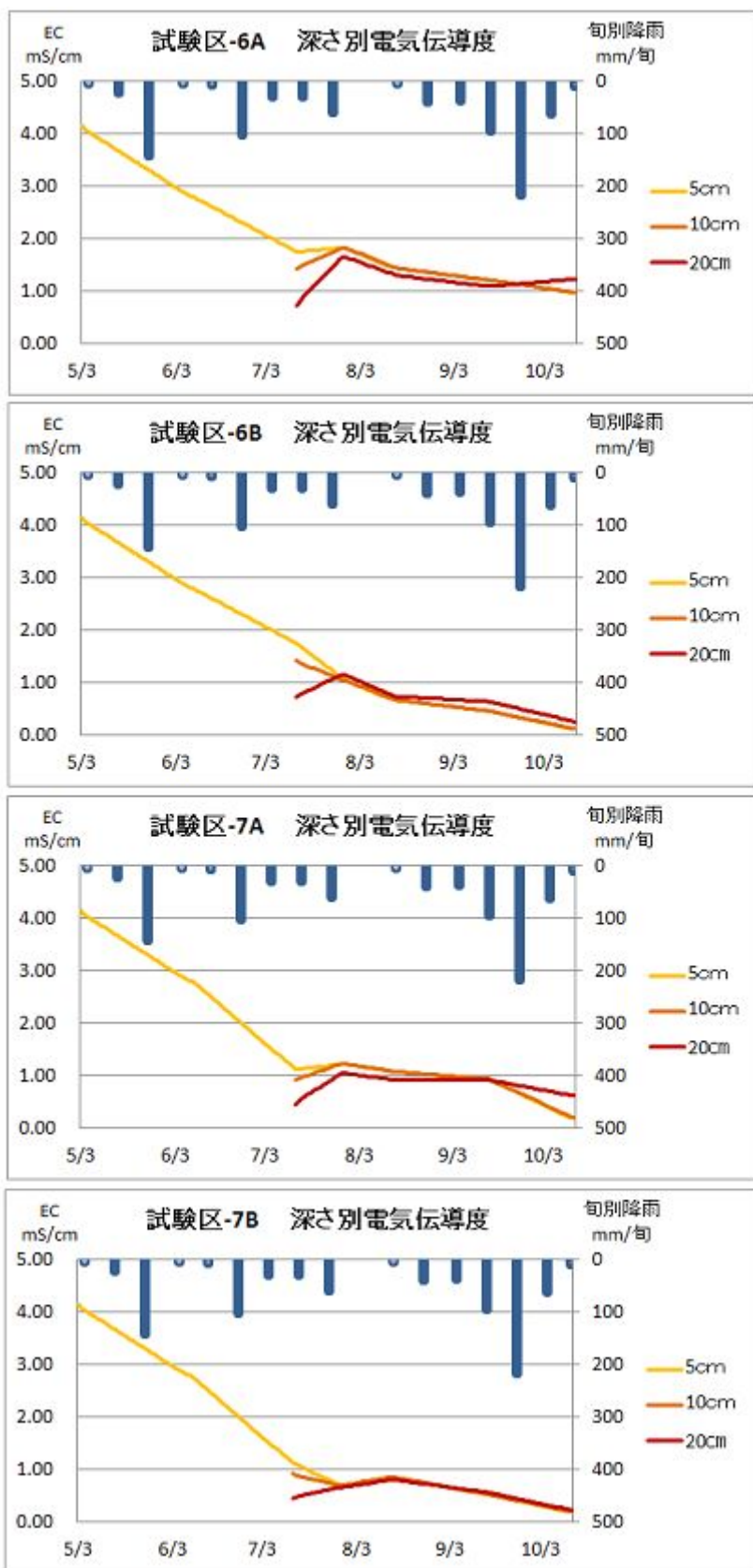
添付資料-6 深さ別電気伝導度-1



添付資料-6 深さ別電気伝導度-2



添付資料-6 深さ別電気伝導度-3



添付資料-6 深さ別電気伝導度-4

