J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 129, p.23 ～ 29 (2015)

復旧した津波被災水田の畑利用時における土壌塩分の変動

冠　秀昭[1]・関矢博幸[1]・平　直人[2]・千葉克己[3]・大谷隆二[1]

Salt distributions for upland fields of multipurpose paddy fields recovered from the tsunami disaster

Hideaki KANMURI[1], Hiroyuki SEKIYA[1], Naoto TAIRA[2], Katsumi CHIBA[3] and Ryuji OTANI[1]

1. はじめに

東日本大震災で被災した宮城県内の約 14,000 ha の農地では復旧作業が進み，2014 年 8 月には 10,447 ha が営農可能となった（阿蘇ら, 2014）．除塩作業は農地復旧の最終段階に行われ，復旧後は主に水稲の作付けが再開される．除塩直後の水稲作の場合，かんがい期間中の湛水に伴う下方浸透によって除塩が進むため，塩害が再発する心配はほとんどない．しかし，除塩直後の水田を畑に転換する場合には，下層に残留した塩分が作土層に上昇することがあるため，塩害が生じる危険性がある．実際に復旧後の水田のダイズ栽培時において塩害が発生した報告（星・遊佐, 2012）もあり，津波で被災した水田は，復旧後の汎用利用が困難になることがある．宮城県におけるダイズの作付け面積は，震災前の 2010 年度に約 10,000 ha に達しており，そのほとんどが水田転換畑で作付けされていた．被災した宮城県沿岸の平野部では水田の汎用化が進み，ダイズの作付けが積極的に行われていた地域であった．しかし，このような津波被災水田の復旧後における畑転換時の問題点や作物への影響とその対策についての情報は少ない．今後，農地の復旧作業および新たな農地整備（吉田ら, 2014）が完了すれば，これまで以上に水田の汎用利用が求められる．また宮城県の沿岸部には元々海抜 0 m 以下の農地が存在し，これまでも塩害が問題とされてきた．震災に伴う地盤沈下により海抜 0 m の面積は 3.4 倍（雫石ら, 2012）に増加した．沿岸部の農業を再興するためには，このような地域の水田の汎用利用を可能とする塩害対策も行っていかねばならない．

そこで津波被災水田の畑利用時の問題点と対策を明らかにするため，除塩作業直後のダイズ転換畑において，圃場内の塩分の動態を電磁探査法により把握し，ダイズ生育への影響について検討した．特に除塩作業直後ではダイズが枯死するなどの影響が見られたため，除塩促進と湿害回避のために暗渠を施工し，その後の塩分動態とダイズ生育への影響について検討した．

2. 方法

2.1 調査圃場

宮城県亘理郡山元町内の 3 筆の水田（N37°57’35”, E140°53’25”）において調査を行った．調査水田は海岸から約 2 km に位置し，震災時に海水が浸水した．Fig. 1 に示すように調査した圃場 A，圃場 B および圃場 C は

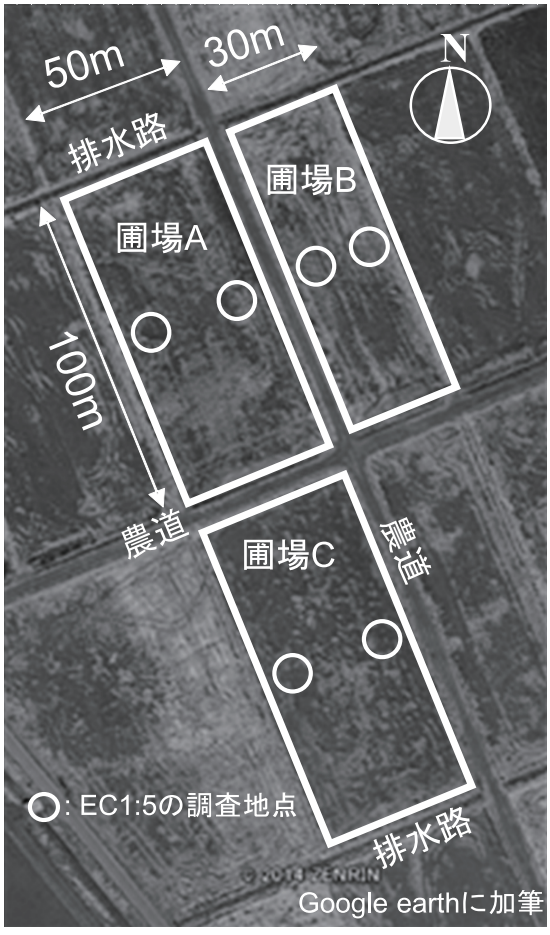


Fig. 1　調査圃場.

[1]NARO Tohoku Agricultural Research Center, 4 Akahira, Simokuriya-gawa, Morioka Iwate, Japan. Corresponding author: 冠　秀昭, (独) 農研機構　東北農業研究センター.
[2]Miyagi Prefecture Furukawa Agricultural Experiment Station, 88 Fukoku, Furukawa-Osaki, Osaki, Miyagi, Japan.
[3]School of Food, Agriculture and Enviromental Sciences, Miyagi University, 2-2-1 Hatadate, Taihaku-ku, Sendai, Miyagi, Japan.
2015 年 1 月 27 日受稿　2015 年 3 月 6 日受理

Table 1 調査圃場の利用状況.

時期		圃場状況	調査内容
2011 年	3 月 11 日	津波浸水	
		休耕	
2013 年	3 月	除塩作業	
	5 月 21 日		EC 調査
	6 月 12 日	大豆播種	
	8 月 12 日		EC 調査
	11 月 7 日	暗渠施工	EC 調査
2014 年	1 月 23 日		EC 調査
	5 月 9 日	除塩作業	EC 調査
	6 月 20 日	大豆播種	
	9 月 24 日		EC 調査

農道を挟んで隣接しており，長辺が 100 m，短辺が 50 m または 30 m である．土壌は泥炭土であり，圃場整備の際に田面に客土されている．また圃場には 5 m 間隔で暗渠が整備されている．

震災以降の圃場の利用状況と調査時期を Table 1 に示した．本地区では震災後 2 年間休耕し，2013 年の 3 月に農地復旧事業での除塩作業が行われた．除塩作業後は多くの水田で水稲が作付けされたが，圃場 A，圃場 B，および圃場 C ではダイズを栽培した．しかし圃場 A，圃場 B でのダイズの生育が正常ではなかったため，ダイズ栽培終了後の 2013 年 11 月に，圃場 A，圃場 B において暗渠を施工した．暗渠施工後の 2014 年 5 月に圃場 A，圃場 B において水田に入水し，暗渠を利用した除塩作業を行った．その後再びダイズを栽培した．

2.2 暗渠の施工

すべての調査圃場には暗渠が備わっていたが，水田の湛水時に暗渠からの排水がほとんど確認されず，暗渠排水機能が著しく低下していた．また暗渠の吸水管周辺に疎水材や吸水管に達する水みちが確認できなかった．そのため圃場 A，圃場 B において，湿害回避と縦浸透による除塩を促進させるため新たな暗渠を施工した．暗渠の施工には農業用トラクタで簡易に施工できる浅層暗渠施工器（冠ら, 2014）を使用した．暗渠の配置は圃場中央部に 1 本とし，吸水管には内径 50 mm のポリエチレンコルゲート管を使用した．吸水管の布設深度を管頂で 0.5 m とし，疎水材にはもみ殻を使用した．暗渠の施工後に暗渠に直行して弾丸暗渠を深度約 0.4 m，間隔 3 m で施工した．

2.3 調査内容

2.3.1 土壌の電気伝導度の測定

土壌中の塩分量を判断する指標を，除塩作業時に利用されている土壌の電気伝導度（EC）とした．土壌の EC は乾土 1 に対して蒸留水 5 を加えた懸濁液の EC を計測する 1 : 5 水抽出法により測定した（以下, EC1 : 5）．土壌の採取については，圃場内の鉛直方向の EC 分布とその変化を確認するために，内径 30 mm のオーガを用いて地表から 0.7 m まで 0.1 m 毎に土壌を採取した．採取した土壌を炉乾燥し含水比を測定した後，EC1 : 5 をポータブル電気伝導率計（東亜 DKK, CM-31P）により計測した．土壌は各調査圃場において圃場中央部の東側と西側の 2 地点を選定して採取した．土壌の採取は Table 1 に示した時期とし，ダイズの播種前，ダイズの生育時期および暗渠施工時と施工後の合計 6 回行った．

EC1 : 5 は圃場内の点的な情報となるが，圃場全体の塩分分布を把握するため，電磁探査法により見かけの電気伝導度（ECa）を測定した．電磁探査装置として EM-38MK2（Geonics）を使用した．本装置では測定時における本体の設置方向（鉛直または水平方向）と，内蔵されている計測コイル間隔（0.5 m と 1 m）の選択により探査深度の目安が 0.38 m，0.75 m，1.5 m の 3 種類となる．今回は心土層からの塩分移動や暗渠の深さを考慮して，探査深度が 0.75 m となるように，本体を水平方向に設定し，コイル間隔 1 m で測定されたデータを使用した．ECa の測定は本体を地表からおよそ 10 cm の高さに所持し歩行しながら行った．圃場外周および圃場内を長辺方向に約 10 m 間隔で歩行して測定した．また歩行しながら GPS を用いて地理座標値を同時に取得した．

ECa と EC1 : 5 の関係を把握するため，土壌のサンプリング地点で電磁探査装置を 30 秒間静置して ECa を測定した．調査は EC1 : 5 の調査時期と同じく合計 6 回行った．

2.3.2 暗渠排水量と排水の EC の測定

施工した暗渠の排水効果を確認するために，圃場 A において暗渠排水量を電磁流量計（愛知時計電気, SA65GSM）により 1 時間毎にデータロガーに記録した．暗渠の集水範囲が弾丸暗渠の施工により圃場全体と想定されるため，暗渠排水量は圃場面積（5000 m^2）で除して mm で表した．暗渠からの塩分の流出を確認するため，暗渠排水の EC を測定した．電磁流量計の排出口内に EC センサー（Decagon Devices, 5TE）を設置し，データロガーを用いて 1 時間毎の EC を記録した．排水の成分は海水とほぼ等しいと仮定し，これらの EC 値から，兼子ら（2002）による希釈した海水の EC と塩素イオン濃度の関係式（塩素イオン濃度（ppm）＝270.86×EC（dS m^{-1}））を用いて，塩素イオン濃度を算出した．求めた塩素イオン濃度と暗渠排水量の関係から塩素イオン排出量を算出した．

3. 結果および考察

3.1 EC の変化

3.1.1 EC1:5 の鉛直分布

Fig. 2 に各調査地点における EC1 : 5 の鉛直分布の推移を示した．EC1 : 5 は各調査地点とも 2013 年 5 月 21 日または 2013 年 8 月 12 日に最大値を示し，その後減少した．各調査地点において最も高い値を示す深さは，時期により異なっていたが，0.3 m 以深の心土層内にみられた．EC1 : 5 の圃場毎の違いについては，圃場 A，圃場 B の EC1 : 5 が圃場 C より高い傾向にあった．特にダイ

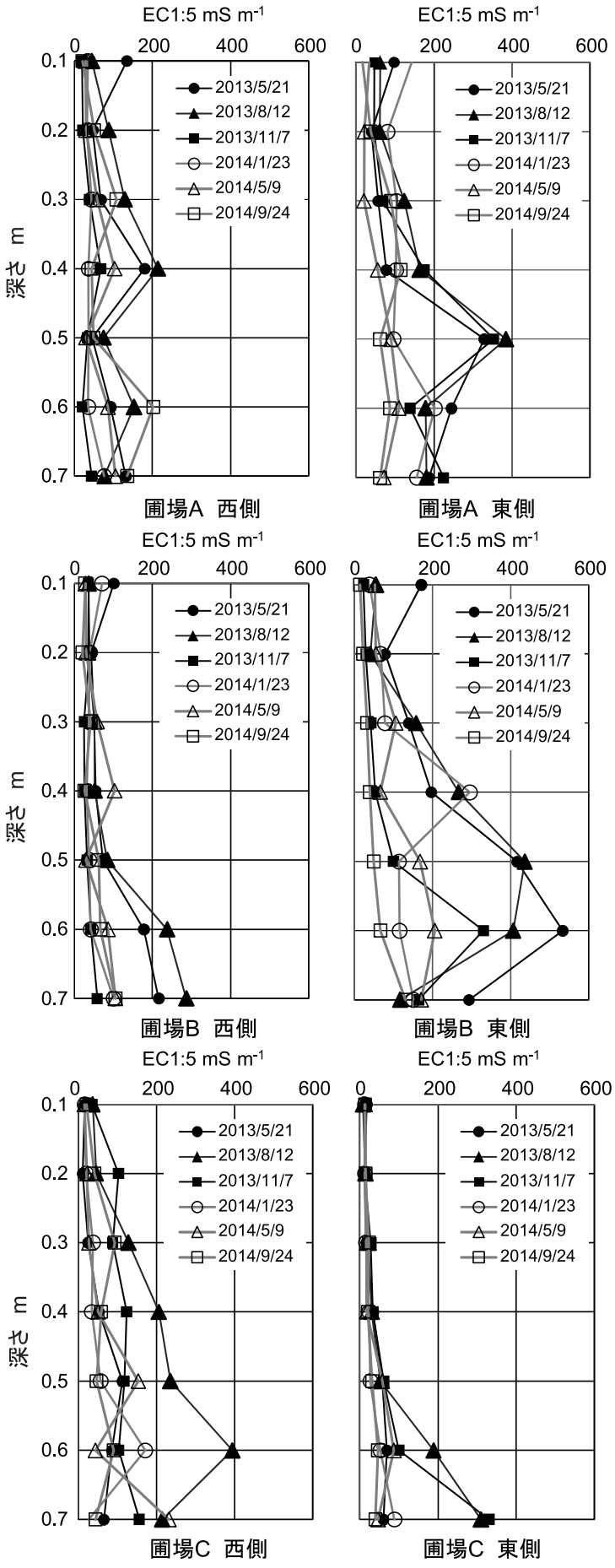


Fig. 2　EC1 : 5 の鉛直分布.

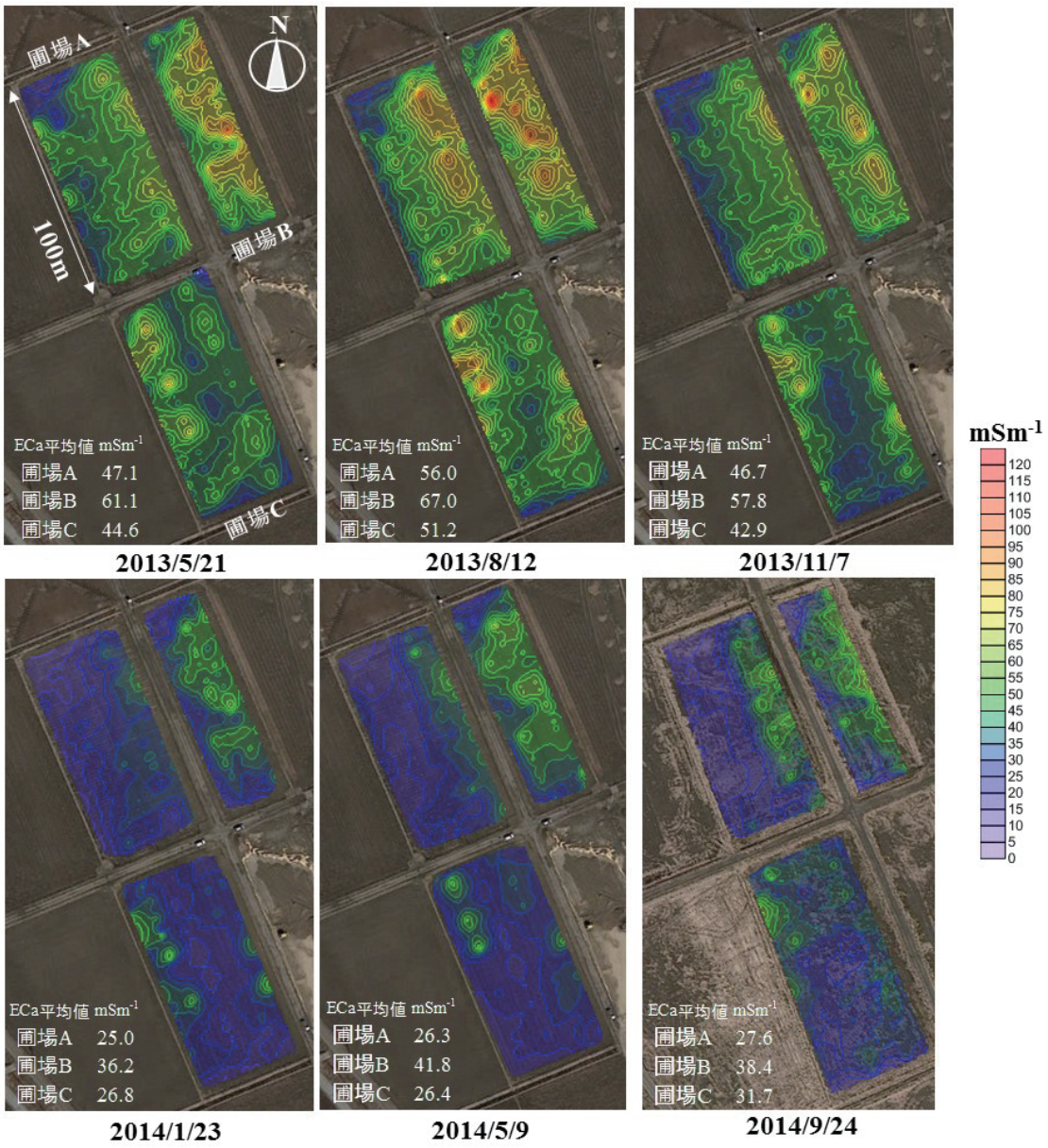


Fig. 3 ECa の推移.

ズの出芽や初期生育に影響する作土層（0.2 m 以浅）の EC1 : 5 は 2013 年 5 月 21 日において，圃場 A で 40 ～ 130 mS m^{-1}，圃場 B で 40 ～ 170 mS m^{-1} であり，畑地における除塩作業の目標値である 30 mS m^{-1}（星 · 遊佐, 2012）より高く，圃場 C では 12 ～ 17 mS m^{-1} であり 30 mS m^{-1} 以下であった.

3.1.2 ECa の変化

Fig. 3 に各調査時期の ECa を示した．ECa は 2013 年 8 月 12 日が最も高く，その後減少する傾向にあり，この変化は EC1 : 5 の変化とほぼ同様の傾向であった．相対的な ECa の分布には期間を通じて変化がほとんどなく，圃場 A および圃場 B では圃場の東側，圃場 C では圃場の北西部が高い傾向にあった．しかし各圃場の平均的な ECa は一様に低下していることが確認された.

各圃場の ECa の平均値は，調査期間を通じて圃場 B が圃場 A，圃場 C よりも 10 mS m^{-1} 前後高かった．2013 年 5 月 21 日の作土層（0 ～ 0.2 m）における EC1 : 5 は圃場 A より圃場 C が低かったが（Fig. 2），両圃場の ECa の平均値は調査期間を通じて大きな違いが見られなかった．ECa は作土層のみならず下層土を含めた土層全体の影響を受けるため，下層土の状態を反映した結果，圃場 A と圃場 C の ECa が比較的近い値を示したと考えられる.

3.1.3 ECa と EC1:5 の関係

深さ 0 ～ 0.7 m の EC1 : 5 の平均値と ECa の関係を Fig. 4 に示した．ECa の増加に伴い EC1 : 5 が直線的に増加し，ECa と EC1 : 5 には有意な正の相関関係が認められた．今回の条件では ECa を用いて圃場全体の EC1 : 5 が推定可能であり，0.7 m までの情報を平均した水田の面的な塩分量の評価が可能と考える．ただし ECa は土壌の体積含水率の影響を受ける．久米ら（2003）は EM-38 による測定において均質な土壌条件で圃場容水量

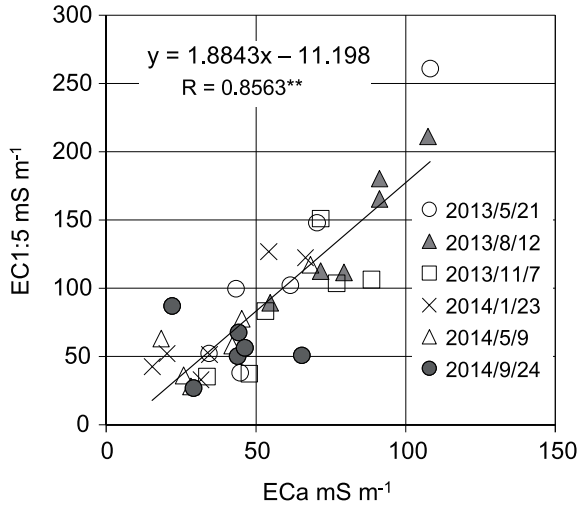


Fig. 4　深さ 0～0.7 m の EC1 : 5 の平均値と ECa の関係.

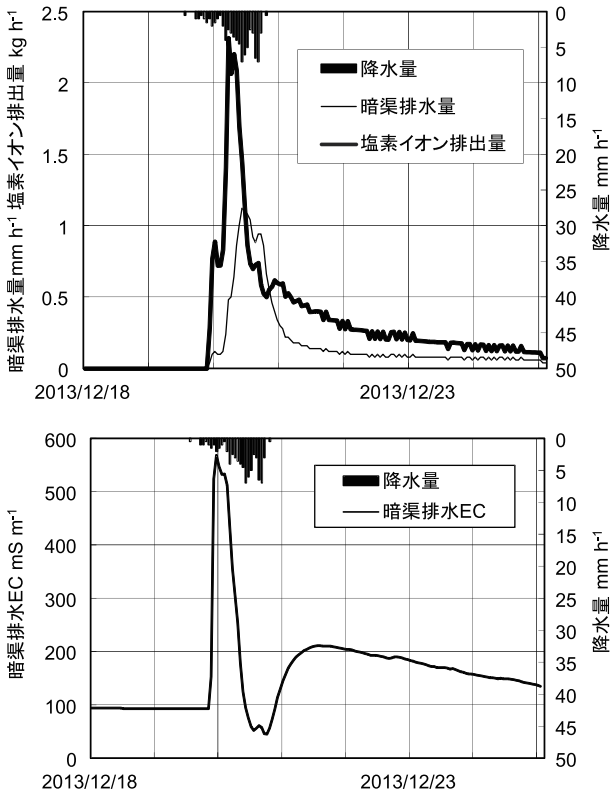


Fig. 5　暗渠排水量，暗渠排水の EC，塩素イオン排出量の推移.

以上の水分状態であれば ECa と EC1 : 5 が線形関係にあることを示している．また宮本ら（2012）は，津波で被災した砂質畑における誘電式土壌水分センサーを用いた調査において，土壌が飽和しているときの EC と EC1 : 5 の間に高い相関が見られることを示している．今回の調査では体積含水率の測定は行っていないが，各水田の地下水位が地表下 30 cm 以浅となる時期が多いなど比較的高かったこと（平ら, 2014），また泥炭層の含水比が測定期間を通じて高かったことなどから，土層全体として圃場容水量以上の高い水分状態であったと推察される．そのため測定時期によらず一つの直線で近似できる条件にあったと考えられる．

3.2 暗渠排水量および排水の EC

Fig. 5 に暗渠施工後の最初の降雨イベント前後の暗渠排水量と排水の EC 値および塩素イオン排出量を示した．降雨開始後，水田土層を通過した余剰水が暗渠に集まり，暗渠排水量が徐々に増加するとともに，排水の EC が上昇した．塩素イオン排出量は時間当たり最大で 2 kg h^{-1} を示し，この降雨による 12 月 19 日から 12 月 25 日までの総塩素イオン排出量は約 50 kg，面積当たりで 0.01 kg m^{-2} に達した．Table 2 に 2014 年のダイズ播種後の降雨毎の総降水量と総暗渠排水量，塩素イオン排出量および塩素イオン排出量を総降水量で除した塩素イオン排出率を示した．降雨毎に排出される塩素イオン量は減少する傾向にあった．塩素イオン排出率も降雨毎に低下する傾向にあり，降雨毎に圃場内に残留する塩素イオンが減少し，暗渠の効果により除塩が進んだとみられる．

3.3 ダイズの生育状況

2013 年のダイズ生育については，Fig. 6（a）に示したように圃場 A，圃場 B において出芽直後に枯死するなど，出芽期から生育が著しく不良となった．圃場 A，圃場 B では成熟期までにほとんどが枯死し収穫に至らなかった．圃場 C では生育量は少なかったが，成熟するまでに至った．2014 年は暗渠を施工した圃場 A，圃場 B で生育障害は確認されず，順調に生育した（Fig. 6（b））．暗渠を施工しない圃場 C では生育障害は確認されなかったが，畦間が茎葉で覆われていないなど，生育量は圃場 A，圃場 B にやや劣った．生育状況の目視による評価として良，やや良，不良と 3 段階で評価すると，圃場 A，圃場 B，圃場 C はそれぞれ 2013 年が不良，不良，やや良，2014 年が，良，良，やや良と判定された．

3.4 EC の変化とダイズ栽培への影響

2013 年のダイズの生育状況は圃場 A，圃場 C においてそれぞれ不良，やや良と異なった．理由として作土層の EC1 : 5 は Fig. 2 に示されたように圃場 A で 40～130 mS m^{-1} と高かったためと考える．震災後に宮城県古川

Table 2　各時期における降水量，暗渠排水量，暗渠排水の EC，塩素イオン排出量および塩素イオン排出率.

降水時期	総降水量 (A) mm	総暗渠排水量 mm	塩素イオン排出量 (B) kg	塩素イオン排出率 (B/A)
2013/12/25	70.0	25.4	50.3	0.72
2014/ 6/13	128.0	27.6	58.3	0.46
2014/ 7/ 1	77.0	11.6	17.4	0.23
2014/ 7/11	35.5	6.1	6.7	0.19
2014/ 7/21	45.0	6.5	5.5	0.12
2014/ 8/ 9	15.0	1.1	1.8	0.12
2014/ 8/11	21.5	7.3	8.2	0.38
2014/ 8/13	6.5	0.7	0.9	0.14
2014/ 8/29	38.5	4.2	4.1	0.11
2014/10/ 8	94.0	18.4	10.0	0.11
2014/10/16	136.5	10.5	5.7	0.04

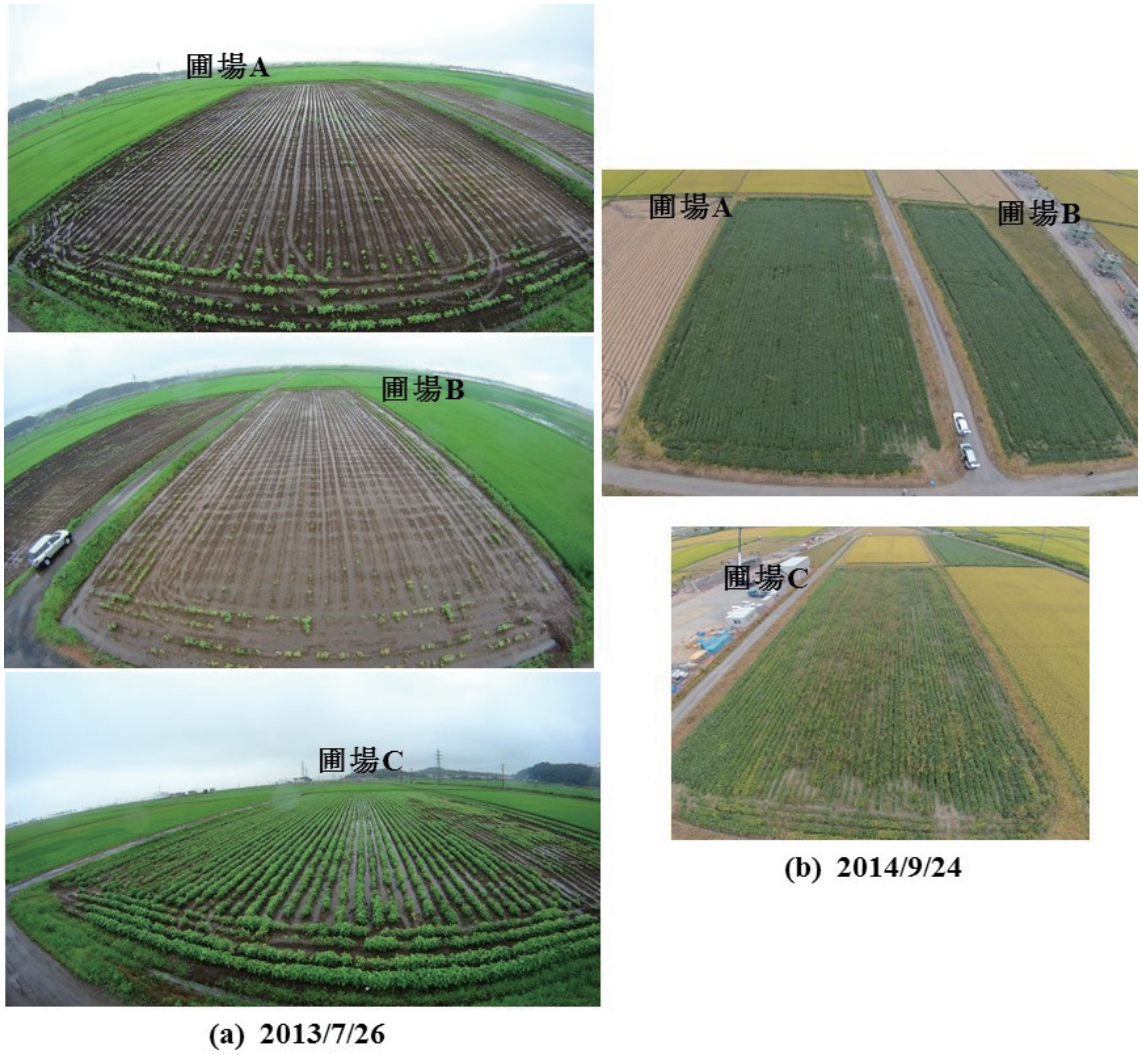


Fig. 6　ダイズの生育状況.

農業試験場（2012）が行ったダイズの耐塩性を調査した試験では，土壌の EC が 34 mS m^{-1} であれば無処理と同等の出芽率を示すが，土壌の EC が 52 mS m^{-1} で出芽率が 93 %，88 mS m^{-1} で 40 % と大きく低下することが確認されている．この結果と同様に今回，作土層の EC1 : 5 が 40 mS m^{-1} 以上であったことが，ダイズの生育に影響したと考える．津波被災水田の畑利用時には，除塩後であっても播種直前の作土層の EC を確認することが不可欠である．

除塩作業では EC1 : 5 が 60 mS m^{-1} 以下となったことを確認して完了となる．2013 年 5 月に圃場 A，圃場 B で作土層の EC1 : 5 が 60 mS m^{-1} 以上の地点がみられたのは，圃場の排水機能が低かったために下層に塩分が残留し，乾燥によりそれが作土層に上昇したためと考えられる．圃場 C は圃場 A，圃場 B に比べ排水機能が比較的良好であったため，除塩作業後も自然の降雨により徐々に作土層の除塩が進み，ダイズへの影響が小さく，湿害の影響も軽微であったと考えられる．一方，地下排水機能が低下していた圃場 A，圃場 B では，EC が高かったことに加えて，湿害の影響も加わったため圃場 C に比べ生育が劣ったと考えられる．圃場の排水機能の違いが，作土層の EC の高低に影響し，ダイズの生育に影響したとみられる．

Fig. 3 の ECa は 2013 年 5 月から 8 月にすべての圃場で上昇した．これは電磁探査法での ECa の測定領域を考えると，水田一筆全体で少なくとも地表から深さ 0.7 m の範囲内に塩分が流入したことを示している．この塩分の流入元を把握するために，EC1 : 5 の動態をみると，Fig. 2 の EC1 : 5 は同時期の 2013 年 5 月から 8 月に多くの地点において 0.3 m 以深で上昇傾向にあった．0.3 m 以浅の EC1 : 5 は圃場 A と B で減少傾向にあり，EC1 : 5 が低かった圃場 C では大きな変化はなかった．よってこの期間では塩分が心土層から作土層には移動していないことから，水田内への塩分の流入は心土層で生じていると考えられる．塩分の流入元としては，深度 0.7 m 以深の土層，または周囲の水田が考えられる．前者については，心土層から作土層への鉛直方向の塩分移動が生じていないことから，この流入は限定されるとみられる．一般的に水田に囲まれた転換畑では水田からの入水による湿害が問題になる場合がある．今回もそのような状況と同様であり，加えて除塩直後の水田であるため，調査水田と同様に下層には多くの塩分が残留している可能性が

あり，これら隣接する水田から塩分が流入したと考えられる．水田位置と調査圃場の位置関係からみると，特に水稲作と隣接している圃場 A 西側，圃場 C 西側では 0.3 m 以深の EC1 : 5 が増加しており，圃場 B の東側は深度 0.3 ～ 0.5 m において EC1 : 5 が増加した（Fig. 2）．よって，隣接する水田に残留していた塩分が下層から流入したことが，この時期に ECa と EC1 : 5 が増加した一要因と考えられる．除塩作業後には隣接する水田からの流入を防ぐことも重要であり，津波被災水田の畑利用時には暗渠の新設や補助暗渠の施工などにより圃場の排水機能を高めることが湿害回避と塩分排除のために必要となる．

暗渠施工後である 2013 年 11 月以降については ECa が減少傾向にあり（Fig. 3），2014 年のダイズ播種前には 2013 年の ECa の水準より低くなった．作土層の EC1 : 5 も圃場 B の一部を除き 30 mS m^{-1} 以下となり（Fig. 2），ダイズ生育に影響しない水準にまで低下した．その結果，圃場 A，圃場 B ではダイズの生育障害が見られず，順調に生育した．しかし圃場 C では暗渠を施工していないため，排水機能が圃場 A，圃場 B よりも劣ったため，生育が若干低下したとみられる．

4. おわりに

津波被災水田の畑利用時の問題点と対策を明らかにするため，除塩促進のために暗渠を施工し，その前後の土壌の塩分動態を電磁探査法により調査した．電磁探査法により測定した ECa と深さ 0 ～ 0.7 m の EC1 : 5 の平均値との間に相関関係がみられ，ECa により EC1 : 5 の推定が可能であり，圃場一筆全体の作土層と心土層を含めた ECa の変化を示すことが可能であった．また暗渠の新設により塩分が圃場外に排除されていることが確認され，除塩後の転換畑における地下排水の強化が畑作物栽培に有効であることが明らかになった．2013 年におけるダイズの生育不良の要因としては，作土層の EC 値が基準値より高かったこと，圃場の地下排水機能が低下していることから，湿害が生じる条件であり，かつ降雨による除塩が進まなかったことが大きく影響したと考えられた．除塩作業後に水田を畑地として利用する場合には，播種直前に作土層の EC を再確認すること，および暗渠の新設等により地下排水機能を強化し，降雨による除塩を促進することが必要である．

謝辞

本研究結果の一部は復興庁・農林水産省の「食料生産地域再生のための先端技術展開事業」で得られたものである．暗渠の施工には宮城県古川農業試験場農場業務職員のご協力を頂いた．ここに記して謝意を表します．

引用文献

安蘇政樹, 石川吉廣, 宮部志郎 (2014): 宮城県における農地復旧の取り組み．農業農村工学会東北支部第 57 回研究発表会講演要旨集, 32–35.

星　信幸, 遊佐隆洋 (2012): 宮城県における津波による水田への影響と除塩. 日本海水学会誌, 66(2): 74–78.

兼子健男, 村川雅己, 小財　伸, 身次幸二郎 (2002): 塩類が集積した水田の暗渠排水を利用した急速除塩技術. 農業土木学会誌, 70(7): 611–614.

冠　秀昭, 大谷隆二, 関矢博幸, 千葉克己 (2014): 農業用トラクタで利用できる浅層暗渠施工器の開発と排水効果. 農業農村工学会論文集, 292: 275–283.

久米　崇, 長野宇規, 渡邉紹裕, 三野　徹 (2003): 電磁誘導法による均質土壌の塩分濃度測定法. 農業土木学会論文集, 227: 105–111.

宮城県古川農業試験場 (2012): 土壌塩分濃度が作物生育に及ぼす影響評価 (大豆). 宮城県農業・園芸総合研究所ホームページ, http://www.pref.miyagi.jp/soshiki/res_center/revival2-2-2.html (2015 年 1 月 14 日アクセス)

宮本輝仁, 亀山幸司, 塩野隆弘 (2012): 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震による津波で冠水被害を受けた砂質畑の土壌塩分モニタリング. 農村工学研究所技報, 213: 73–78.

雫石和男, 佐々木秀夫, 廣野　修 (2012): 東日本大震災による宮城県の被災状況と対応. 農業農村工学会誌, 80(4): 261–264.

平　直人, 鈴木辰也, 冠　秀昭, 関矢博幸 (2014): 除塩後転換畑の土壌塩分の上昇と排水対策. 平成 26 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集, 508–509.

吉田克生, 林　貴峰, 三浦元康, 大里有巨 (2014): 復興交付金の「農地整備事業」で行う「新たな標準区画」の整備について ～ 競争力のある農業経営体の育成を目指して ～ . 農業農村工学会東北支部第 57 回研究発表会講演要旨集, 64–65.

要　　旨

津波被災水田の畑利用時の問題点とその対策を明らかにするため，除塩促進のための暗渠を施工し，その前後の土壌の塩分動態を電磁探査法により調査した．電磁探査法により測定した見かけの電気伝導度（ECa）と除塩作業の指標に用いられる固液比 1 : 5 水抽出法で測定された EC1 : 5 との間に相関関係がみられ，ECa により EC1 : 5 の評価ができることが示唆された．暗渠の新設により塩分が圃場外に排除されていることが確認され，除塩後の転換畑における地下排水の強化が畑作物の栽培に有効であることが明らかになった．除塩作業後に水田を畑として利用する場合には，播種直前に作土層の EC を再確認すること，暗渠の新設等により地下排水機能を強化し降雨による除塩を促進することが必要である．

キーワード：津波被災水田，除塩，電気伝導度，暗渠，電磁探査法