

電磁探査と地中レーダー探査による土壌健全性の広域的評価

研究代表者 岩手大学農学部食料生産環境学科 准教授 山本清仁

1. はじめに

植物の根内部の水分の浸透圧より根外部の土壌水の浸透圧が高くなり、植物の水分が外部へ流れることにより植物の枯死が起こるので、土壌水の浸透圧を高くする原因である塩分濃度を測定することが除塩効果を把握する上で重要となる。また、農地や植栽地において土壌水のイオン濃度は植物の生育に大きな影響を与え、例えば硝酸イオンは適切な量であれば生育を増進させる効果が期待できるが、濃度が高過ぎると枯死の原因となるので、適切にイオン濃度を評価することが重要となる。山本ら¹⁾は、津波被災水田において電磁探査により電気伝導度 (EC) 測定を行い、電磁探査による土壌水の電気伝導度評価の有効性を検討したが、体積含水率を大きく評価すると土壌水の電気伝導度を小さく評価してしまうので、より精度の高い塩分濃度測定を行うためには、体積含水率を適切に把握することが課題となった。

本研究は、電磁探査と地中レーダー探査を用いて地下水面より上部の不飽和領域の地中土壌水のイオン濃度を計測する手法について検討する。電磁探査においては、地表から 4m 程度の深さまでの電気伝導度が測定でき、地中レーダー探査においては、地中埋設物の反射を利用して電磁波速度の測定ができる。ここでは、溶液のイオン濃度が高くなると電気伝導度も高くなる性質を利用して土壌水のイオン濃度を測定するが、電磁探査で得られる電気伝導度は、土壌水と土粒子を含む土壌全体の電気伝導度であり、この電気伝導度は体積含水率によって大きく変化する。そこで、地中レーダーにより得られた電磁波速度から比誘電率を求め、体積含水率を推定し、電磁探査結果の電気伝導度分布からイオン濃度の空間分布を求め、広域において土壌が植生の生育に適しているか評価する手法について検討する。

物理探査手法の電磁探査と地中レーダー探査について、電磁探査は、電磁誘導による渦電流の生じ方と地中の比抵抗分布が密接に関係していることを利用し、調査対象に非接触で計測する探査手法で、任意の深さの比抵抗あるいは電気伝導度分布を測定できる。一方、地中レーダー探査は、送信アンテナより電磁波を放射し、受信アンテナにより反射波を受信するものであるが、受信と送信の各アンテナの間隔を変化させ測定することにより、地中内の電磁波速度を得ることができる。光畑²⁾は、九十九里浜平野において実施した電磁探査の調査結果より、地下の間隙水の塩分濃度推定を行っている。また、冠ら³⁾は、津波浸水農地における電磁探査法の計測特性を調査し、見かけの電気伝導度分布が容易に測定できること、土壌 EC センサを併用することで除塩に必要な調査ができることを示している。さらに竹下ら⁴⁾は、砂質土による堤体地盤モデルを用いて実験を行い、地中レーダーによって計測された地下水面の挙動は、他の計測方法によって得られた計測結果と十分な一

致が得られることを示している。斎藤ら⁵⁾は、電磁波の送信と受信の複数のアンテナを内蔵したアレイアンテナ地中レーダーにより地中の浸潤線の変化を捉えられることを示している。

ここでは、岩手大学下台圃場調査地および陸前高田市小友町水田調査地において、地中レーダー探査、電磁探査および土壌イオン濃度測定を行い、結果を検討することにより、土壌イオン濃度の広域的空間分布測定の可能性について検討する。

2. 調査地

2. 1. 下台圃場

調査地は岩手県盛岡市の岩手大学敷地内にある下台圃場の不耕起畑地である。図1に試験地の概要図を示す。2016年6月29日および7月8日に直径60mmと直径114mmの塩化ビニール管(VU-50とVU-100)を図1に示すように深さ0.4mと深さ0.8mに埋設した。塩化ビニール管の埋設状況は図2のようになり、管の上部から地表までの距離を深さとした。また、管の一方の端部に栓をし、もう一方は直角の継ぎ手により地表に管を露出させ、後で水を注入できるようにした。

管に水を注入しない状況において、2016年11月24日に電磁探査、地中レーダー探査、表土の電気伝導度測定および体積含水率測定を行い、管近傍における深さ0.0~1.0mの土壌採取を行った。表土の電気伝導度測定、体積含水率測定は、 $x=2m$ の位置において y 方向に2.5m間隔で実施した。また、地表に露出した管に水を注入し、管全体を水で満たして、2016年11月28日に地中レーダー探査を行った。

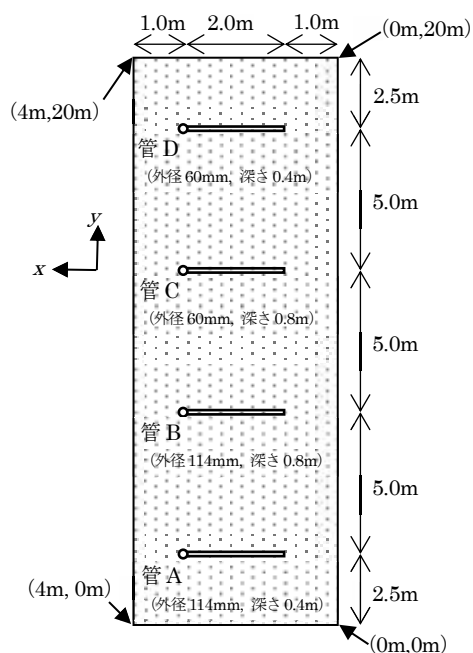


図1 下台圃場試験地概要



図2 パイプ埋設状況

2. 2. 小友町水田

調査地は岩手県陸前高田市小友町の大船渡線跨線橋東部の水田である。広田半島の付け根に位置し、東西の海より津波が押し寄せ、住宅等のガレキが堆積した地域である(図3)。

盛土前においては、調査地全域にわたり地盤が沈下し、雨水は一時的に田面を覆うが、残存している水路を通じて排水されている状況であった。また、跨線橋より約1km西にある海より、満潮時に排水路を通じ調査地南西に海水が流れ込む場合があり、このような箇所での土壌の塩分濃度が高い状況であった。2013年より盛土が行われ、2014年から営農が再開されている。調査地の盛土高さは、盛土前後のGPS計測より、1.2~2.9mである。

図4に調査地の概要図を示す。地中レーダー探査、表土の電気伝導度測定、体積含水率測定および表土の採取は、小友東調査地(B地区)において2016年11月14日に行い、小友西調査地(A地区)において同年11月22日に行った。電磁探査については、A地区とB地区において同年11月22日に行った。表土の電気伝導度測定、体積含水率測定および表土の採取は、A地区とB地区の各々 $y=40\text{m}$ の位置において x 方向に10m間隔で実施した。図5に調査箇所における暗渠位置の概要図を示し、図6に暗渠の断面図と側面図を示す。図5に示すように暗渠は y 方向に10m間隔で配置されており、その両端に集水渠



図3 陸前高田市小友町水田(水田をはさみ奥に広田半島がある)

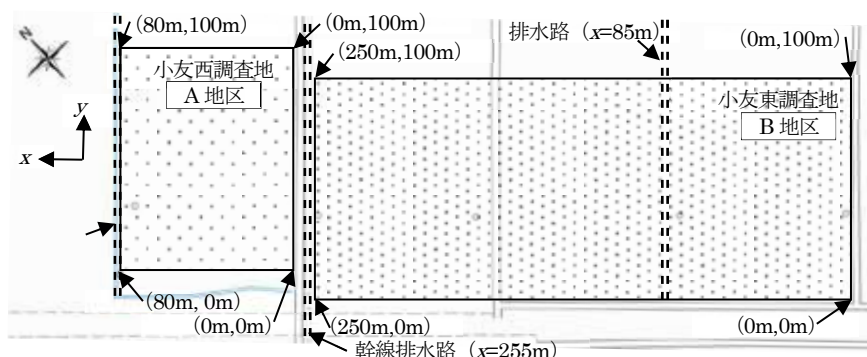


図4 小友町水田調査箇所概要図

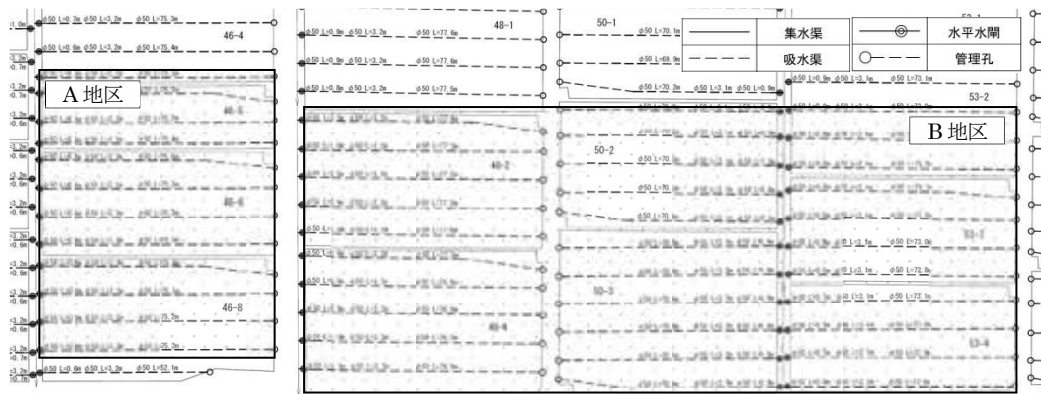


図5 小友町水田調査箇所の暗渠位置概要

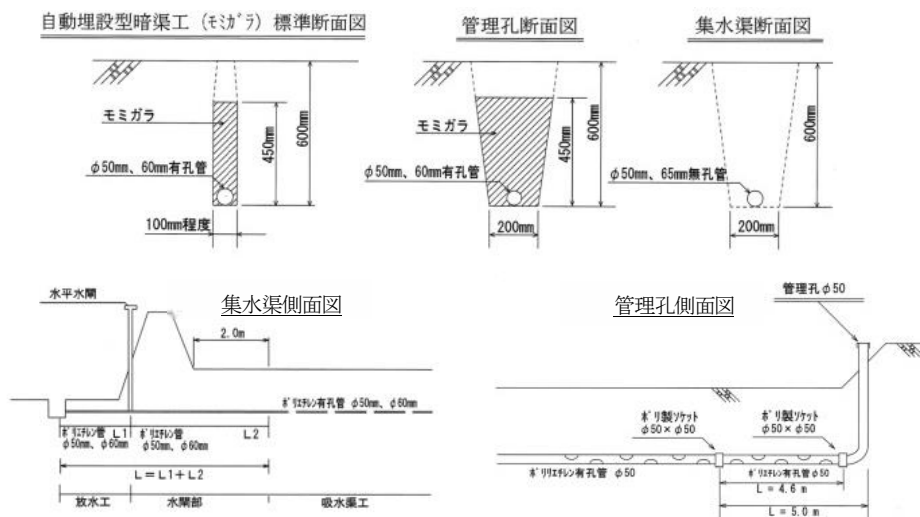


図6 暗渠の断面図と側面図

と管理孔が設置されている。図6のように、暗渠の大部分は直径50mmポリエチレン有孔管であるが、管理孔の一部と集水渠においては孔の空いていない直径50mmポリエチレン管が使用されている。また、設計においてはポリエチレン管の底部は地表から60mmの深さとなっている。

3. 調査方法

表土の電気伝導度は、土壤ECセンサ（ハンナ社 HI 98331(Soil Test)）を用いて、直接センサを地面に深さ0.1m程度挿し込むことにより電気伝導度と地温を測定した。また、体積含水率はTDR土壤水分計(Spectrum Technologies社 フィールドスコート TDR100)を用いて、長さ7.5cmのロッドによりスタンダードモードで測定した。

電磁探査は、Geophex社製GEM-2を用いて推測航法により行った。下台圃場調査地(図

1) において、測線長は y 方向に 20m、測線間隔は x 方向に 4 m であり、計 5 本の測線となる。小友町水田調査地 (図 4) において、測線長は y 方向に 100m、測線間隔は x 方向に 10m であり、A 地区においては計 9 本の測線、B 地区においては計 26 本の測線となる。測定周波数は 2025 Hz, 3675 Hz, 6525 Hz, 11625 Hz, 20625 Hz, 36625 Hz 及び 65025Hz の 7 つであり、得られたデータは (独) 産業技術総合研究所による比抵抗断面分布推定 1 次元逆解析プログラム⁶⁾ (gem2_inv_prof.exe (Ver.8)) を用いることにより深さ方向の比抵抗分布を算出 (逆解析条件: 0m~25m で 28 層, 反復計算数最小 2 回~最大 50 回, 比抵抗範囲最大 3000 Ω m~最小 0.1 Ω m) し、表土に相当する深さ 0.025m の電気伝導度分布を求めた。ここで、ノイズ除去を目的に下台圃場調査地では 100mS/m 以上、小友町水田調査には 1,000mS/m 以上の算出値を除外した。測定の状況を図 7 に示す。

地中レーダー探査は、GSSI 社製 SIR-3000 と 200MHz アンテナを用いて測定した。下台圃場調査地 (図 1) において、 $x=2$ m において y 方向に 20m の測線を 1 本設定した。小友町水田調査地 (図 4) について、A 地区において測線長は y 方向に 100m、測線間隔は x 方向に 40m であり、計 3 本の測線となる。また、B 地区においては測線長が y 方向に 100m、測線間隔が x 方向に 50m であり、計 6 本の測線となる。1 スキャンあたりのサンプル数は 2048、ビット数は 16、レンジは 65ns、増幅はオートであり、得られたデータは GSSI 社製の解析ソフト RADAN を用いて時間ゼロと距離の正規化の処理を施して図化した。図 8 のようにアンテナを引きずり測定を行い、下台圃場調査地においては 2.5m 毎に、小友町



図 7 下台圃場 (左) と小友町水田 (右) における電磁探査測定状況



図 8 下台圃場 (左) と小友町水田 (右) における地中レーダー探査測定状況

水田調査地においては 5.0m 毎に、データにマークを入れた。ここで、下台圃場の地中レーダー探査と電磁探査は、再現性を確認するために同一箇所を 2 回測定した。

採取した土壌においては、室内において 1:5 水浸出法による溶液を作製し、ナトリウムイオン (Na⁺)、カリウムイオン (K⁺)、カルシウムイオン (Ca²⁺)、硝酸イオン (NO₃⁻) の 4 種類のイオン濃度と pH および電気伝導度 (EC) を HORIBA 社製 LAQUA twin コンパクトイオンメータを用いて測定した。

4. 結果

4. 1. 現地表土の EC と体積含水率測定および採取土壌のイオン濃度測定

表 1 に下台圃場調査地における電気伝導度 (EC) と温度、体積含水率の結果を示す。表 1 より体積含水率の最大値は $y=5.0\text{m}$ で 48% と高い値であるが、EC の最大値は 24mS/m と低い値を示している。表 2 に含水比の鉛直分布を示す。 $y=2.25\text{m}$ 地点においては、0~0.75m の範囲で含水比が高いが、他の地点においては表土の含水比が高く、深くなるにしたがい含水比が低くなっている。体積含水率あるいは含水比が高いほど EC も高くなる傾向になることから、下台圃場においては表土の EC が最も高く、深度が大きくなるに従い EC が減少すると推定される。

表 3 と表 4 に小友町水田調査地の A 地区と B 地区の電気伝導度 (EC) と温度、体積含水率およびイオン濃度測定の結果をそれぞれ示す。

ここで、現地表土の EC は土壌全体の見かけの EC であり、1:5 法溶液の EC は、含水比を 500% に調整した土壌溶液を 30~60 分間振盪させて濾過した溶液の EC である。まず、表 3 と表 4 の現地表土の EC と体積含水率を見ると、A 地区と B 地区それぞれの EC の最大値の箇所において、体積含水率は最大値となっておらず、EC と体積含水率是对応していない。また、下台圃場と比べると体積含水率は低いが、EC は高い傾向にある。次に、表土採取土壌の EC について A 地区の最大値は $x=80\text{m}$ で 23mS/m、B 地区は $x=120\text{m}$ で 34mS/m となっている。一方、イオン濃度を見ると、A 地区のカルシウムイオン (Ca²⁺) 濃度の最大値が $x=80\text{m}$ で 58mg/L、B 地区が $x=120\text{m}$ で 58mg/L となっていることから、小友町水田の EC はカルシウムイオン濃度と良好に対応するものと考えられる。

表 1 下台圃場の EC と体積含水率

$x=2\text{m}$ y (m)	現地における表土の測定		
	EC (mS/m)	温度 (°C)	体積含水率 (%)
0.0	3	6.1	43
2.5	10	4.0	48
5.0	24	3.6	48
7.5	13	4.4	40
10.0	15	4.2	40
12.5	17	4.1	34
15.0	16	3.9	45
17.5	11	3.8	33
20.0	12	3.5	28

表 2 下台圃場の含水比の鉛直分布

深さ (m)	含水比 (%)			
	$y=2.25\text{m}$	$y=7.25\text{m}$	$y=12.50\text{m}$	$y=17.40\text{m}$
0-0.25	47.0	41.1	40.3	36.2
0.25-0.50	48.6	39.8	38.1	25.0
0.50-0.75	46.5	30.3	34.7	24.2
0.75-1.00	36.3	35.7	33.7	19.0

表3 小友町水田の EC と体積含水率 (A 地区)

y=40m x (m)	現地における表土の測定			表土採取土壌の 1:5 法溶液による測定					
	EC (mS/m)	温度 (°C)	体積含水率 (%)	Na ⁺ (mg/L)	Ca ₂ ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	pH	EC (mS/m)
1	22	15.4	21	5	21	2	11	6.5	11
10	15	12.5	12	8	29	1	15	7.3	16
20	31	11.8	12	5	29	1	31	7.2	14
30	16	15.4	31	9	39	1	18	7.4	18
40	12	13.0	17	8	31	1	24	7.5	14
50	29	10.7	13	8	34	1	15	7.5	16
60	18	12.5	14	8	36	1	17	7.4	16
70	13	11.2	17	13	33	1	45	7.4	19
80	16	14.2	22	7	58	1	28	7.5	23

表4 小友町水田の EC と体積含水率 (B 地区)

y=40m x (m)	現地における表土の測定			表土採取土壌の 1:5 法溶液による測定					
	EC (mS/m)	温度 (°C)	体積含水率 (%)	Na ⁺ (mg/L)	Ca ₂ ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	pH	EC (mS/m)
0	43	9.6	38	5	18	1	4	7.2	11
10	39	9.6	20	5	14	2	9	6.9	12
20	41	10.1	23	23	35	1	12	7.1	30
30	42	9.4	34	7	43	2	15	7.3	23
40	55	9.7	33	7	42	1	23	7.3	21
50	55	9.3	33	6	26	1	23	7.2	15
60	45	9.9	34	3	47	1	8	7.5	19
70	29	10.0	33	3	29	1	72	7.3	13
82	37	9.7	37	3	23	1	13	7.2	11
90	28	9.9	26	12	33	1	10	7.3	21
100	42	10.7	21	8	30	1	13	7.2	17
110	21	9.2	27	13	43	1	22	7.3	25
120	26	9.9	27	17	58	1	19	7.4	34
130	21	11.1	23	21	25	1	9	7.2	23
140	27	10.1	30	15	19	1	10	7.4	24
150	21	10.2	21	13	17	1	11	7.0	16
157	21	11.7	29	5	12	0	7	6.9	9
170	35	9.6	23	9	34	1	13	7.2	17
180	17	10.1	14	11	28	1	10	7.3	18
190	21	11.0	22	10	29	1	21	7.2	18
200	16	10.2	18	10	41	1	21	7.3	22
210	26	10.4	27	16	30	1	22	7.3	23
220	24	10.1	21	12	40	1	28	7.4	24
230	32	10.6	21	12	44	1	30	7.4	27
240	17	11.1	29	8	26	0	23	7.3	16
250	42	10.4	30	6	38	1	24	7.5	23

4. 2. 地中レーダー探査

図9に下台圃場の地中レーダー探査結果を示す。ここで、図中の横軸は、図1の y 座標と上下逆の対応になっており、図9における2.5mの箇所には図1の外形60mm深さ0.4mの管Dが埋まっており、7.5mの箇所に管C、12.5mの箇所に管B、そして17.5mに管Aが埋設されている。よって、図9の17.5m地点に太い管が浅い位置にあるので、地中レーダー探査の結果である反射波は、その箇所で明瞭に観察されることが期待される。また、図9の縦軸は反射時間(ns)である。図9(a)と(b)を比べると似た分布になっており、図9(c)と(d)においても似た反射波になっている。よって、本測定の実験再現性はあるものと考えられる。

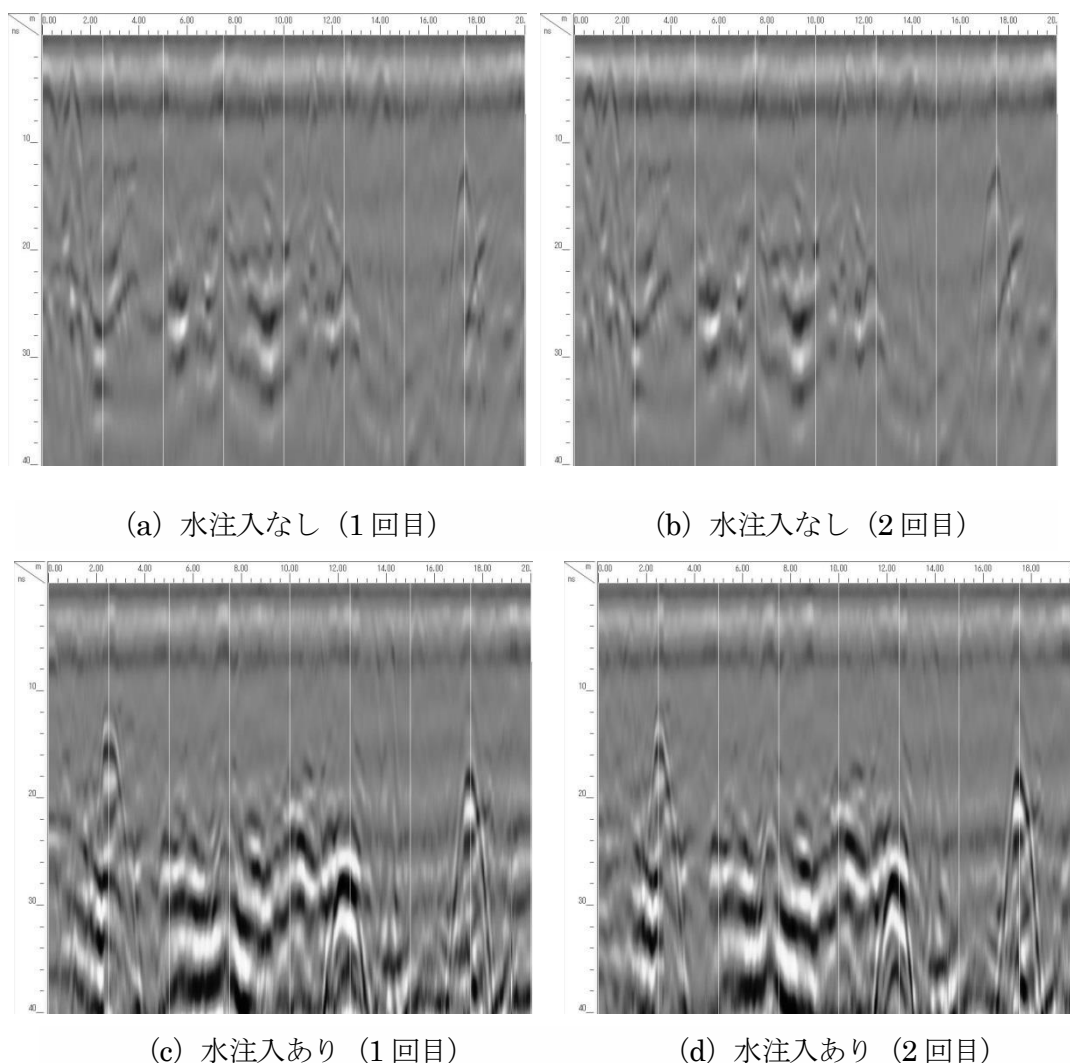


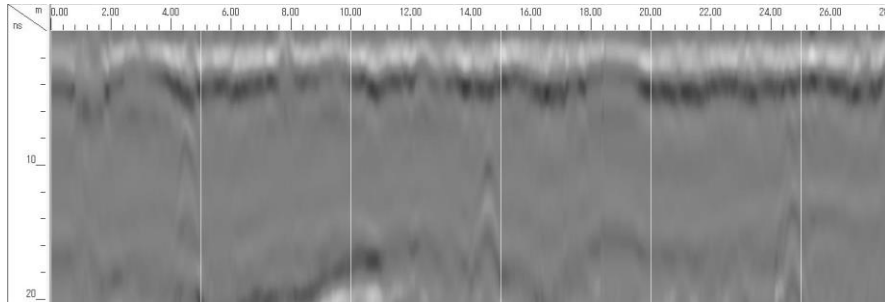
図9 下台圃場の地中レーダー探査結果
(横軸の0mは図1の $y=20$ m, 横軸の20mは図1の $y=0$ mであり、逆の対応になっている)

水注入なしの図 9 (a) と (b) を見ると管 A と管 B の上に凸の放物線状の反射波が確認できるが、細い管 C と管 B の反射波は確認できない。一方、水注入ありの図 9 (c) と (d) を見るとすべての管の反射波を確認することができる。下台圃場の体積含水率は高い状況で、水分により電磁波を減衰させることが反射波を不明瞭なものにしているものと考えられるが、管の径が大きいと反射が大きくなり地中レーダー探査で検知しやすいと考えられる。反射時間について、図 9 (c) と (d) を見ると、同じ深さに埋設したにもかかわらず、管 A と管 D の反射時間が異なっている。表 2 の $y=2.25\text{m}$ が図 9 の 17.5m の管 A 付近、表 2 の $y=17.40\text{m}$ が図 9 の 2.5m の管 D 付近に対応しているが、高含水比の管 A の反射時間は長く、比較的低含水比の管 B の反射時間は短い。このことは、反射時間と埋設深さより電磁波速度を求め、比誘電率を算出することにより、体積含水率を推定できる可能性があることを示唆している。

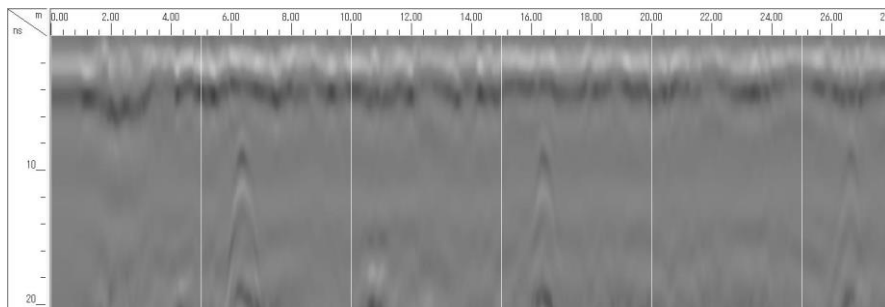
図 10 に小友町水田の地中レーダー探査結果を示す。ここで、図 10 (a) ~ (c) の横軸は図 4 の y と対応しているが、(d) においては横軸の 0m は図 4 の $y=100\text{m}$ 、横軸の 20m は図 4 の $y=80\text{m}$ であり、図 4 の y と上下逆の対応になっている。図 10 (a) と (c) は、図 5 の管理孔近傍の測線であり、図 10 (b) と (d) は、集水渠近傍の測線となっており、図 6 の断面図と側面図のように無孔のポリエチレン管の近くである。それら以外の測線においては、有孔管の上を測定しており、明瞭な反射を確認することができず、管の孔部分が電磁波の反射を低減させているものと推定される。このことは、暗渠が設置されている水田において、土壌を通過する電磁波の反射時間を測定したい場合は、孔の空いていない管の上部で測定することが必要であることを示している。

反射箇所について、図 10 の (a) においては 4.4m 、 14.6m 、 24.5m 付近に反射波が確認される。(b) においては 6.4m 、 16.4m 、 26.6m 付近に反射波が確認される。(c) においては不明瞭ながら 3.0m 、 13.0m 、 22.8m 付近に反射波が確認される。そして、(d) においては他の箇所より反射時間が長い 16ns ~ 19ns 付近の 1.8m 、 11.2m 、 21.2m 付近に反射波が確認される。図 6 のような設計通りの深さに管が埋設されていない可能性もあるが、水を行き渡らせるために田面の均平は極力保たれるので、施肥等により深さが変わっても、同一の田面であれば管の相対的な埋設深さは変化しないと考えると、同一測線上において管の深さが同じと考えると、図 10 の (b) 以外は反射時間に違いがあり、前述の下台圃場の地中レーダー探査の知見より、含水比の違いが反射時間の差異の原因である可能性も考えられる。

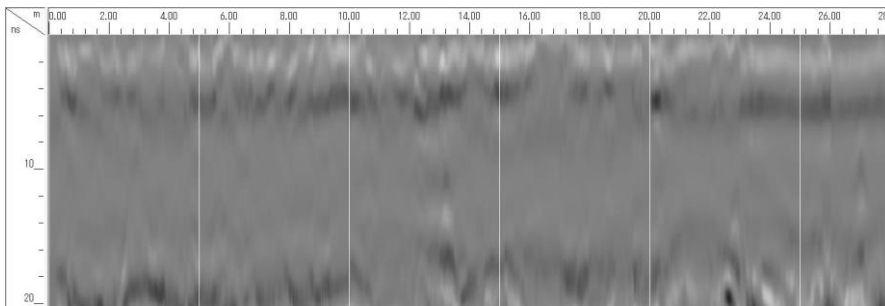
図 10 の (b) の管の反射が明瞭であるが、これは図 6 の集水渠側面図の示すように無孔管の長さが長く、反射時間が短いためであると考えられる。



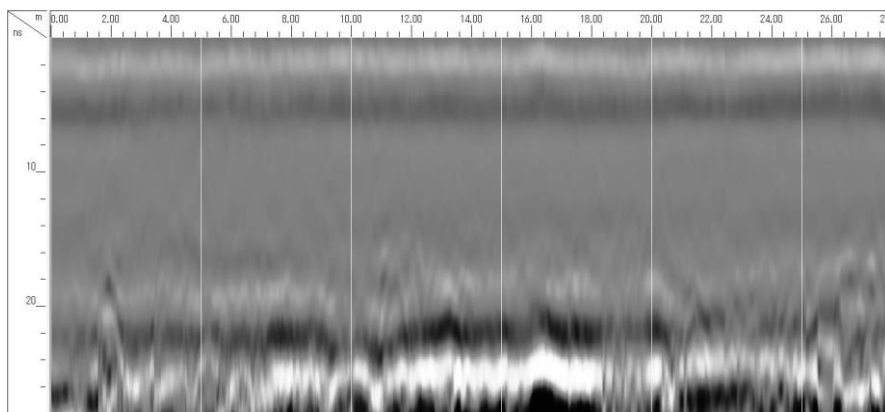
(a) $x=0\text{m}$ (A 地区)



(b) $x=80\text{m}$ (A 地区)



(c) $x=0\text{m}$ (B 地区)



(d) $x=250\text{m}$ (B 地区)

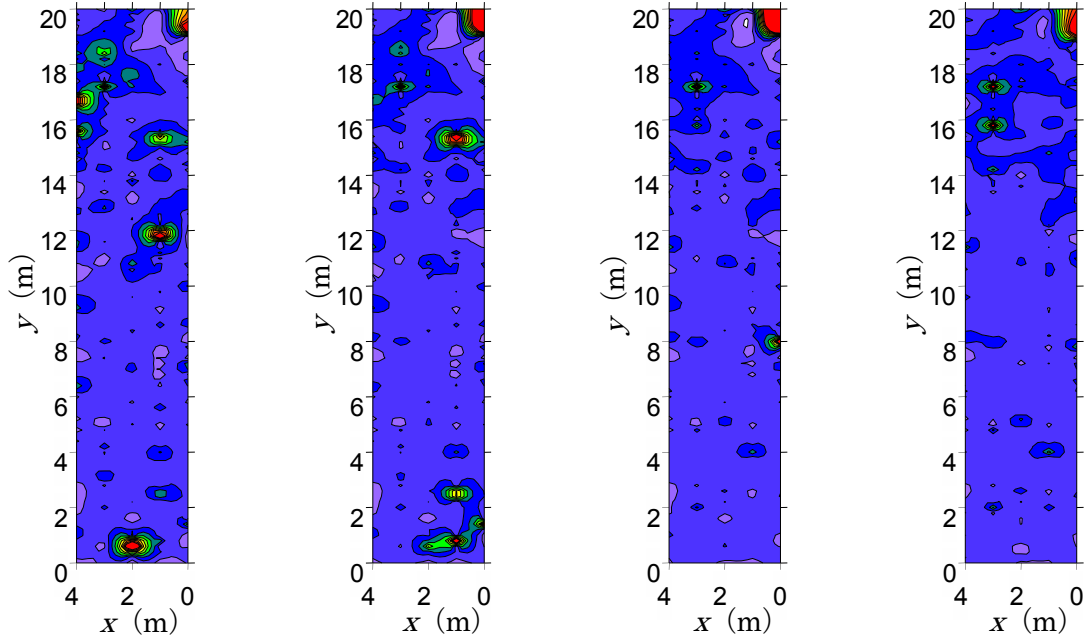
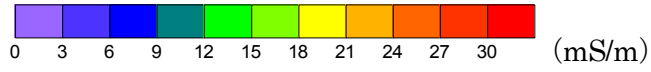
図 10 小友町水田の地中レーダー探査結果

((a) ~ (c) は図 4 の y と対応するが, (d) においては横軸の 0m は図 4 の $y=100\text{m}$, 横軸の 20m は図 4 の $y=80\text{m}$ であり, 逆の対応になっている)

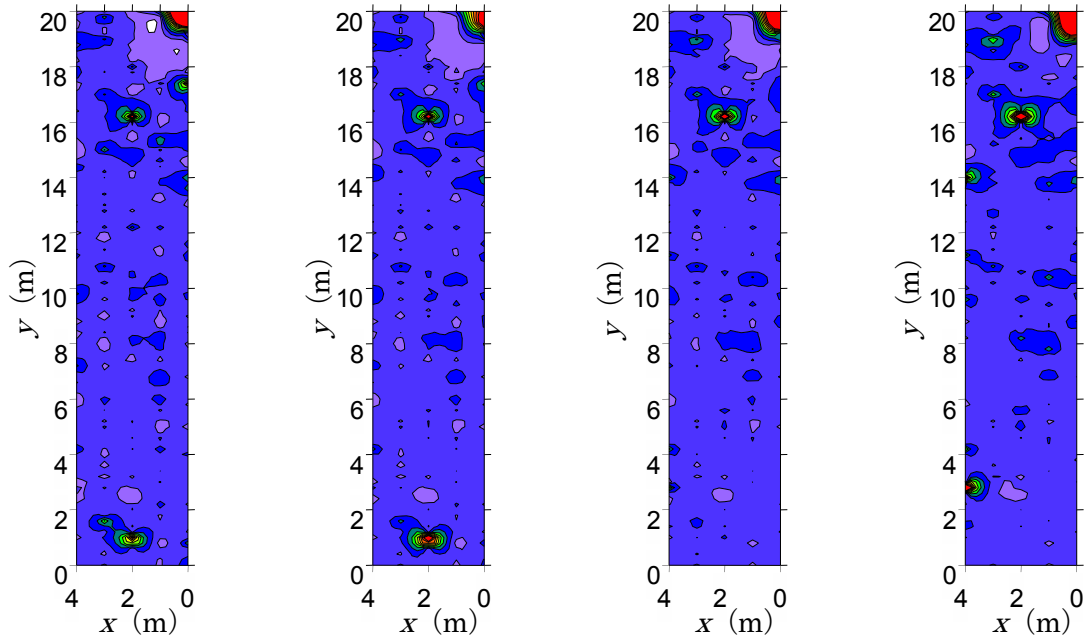
4. 3. 電磁探査

図 11 に下台圃場の電磁探査による EC 分布を示す。図 11 の全図を通して EC の値が 9mS/m 以下の領域がほとんどであり、表 1 と表 2 の現地測定 of EC と体積含水率および含水比の鉛直分布との比較については、低 EC であることは共通しているが、計測箇所との対応は認められなかった。また、埋設管との対応も認められなかった。1 回目と 2 回目の測定の共通点について、図 11 の (1) と (2) を見比べると、 $(x, y) = (0\text{m}, 20\text{m})$ 付近に高い EC の領域があり、それらを囲むように低い EC の領域が分布している。また、図 11 の (a) と (b) の $(x, y) = (2\text{m}, 1\text{m})$ の付近に高い EC の領域が分布している。その箇所に何があるかは不明であるが、金属等の EC が高い物質があるものと推定される。このことから、EC の値に大きな高低差がある空間において、電磁探査の検知能力は発揮されるものと考えられる。

図 12 に小友町水田の電磁探査による EC 分布を示す。4. 1. において下台圃場と比べて小友町水田の EC は高い傾向にあると考察したが、図 11 と図 12 を比べると、電磁探査結果においてもその傾向が確認できる。しかし、暗渠との対応は認められなかった。電磁探査は広範囲の EC 分布を推定できる利点がある一方、EC に大きな違いがない場合、極めて局所的な EC の変化については感度的に不利であると考えられる。4. 1. の小友町水田の EC とカルシウムイオン濃度の対応が良いことから、測定方法により空間的な測定範囲の差があり、さらなる検証が必要であるが、電磁探査により水田のカルシウムイオン濃度を広範囲に推定する手法の可能性があると考えられる。



(1) 1回目測定



(2) 2回目測定

図 11 下台圃場の電磁探査による EC 分布測定結果 (コンタースケールは全図同一)

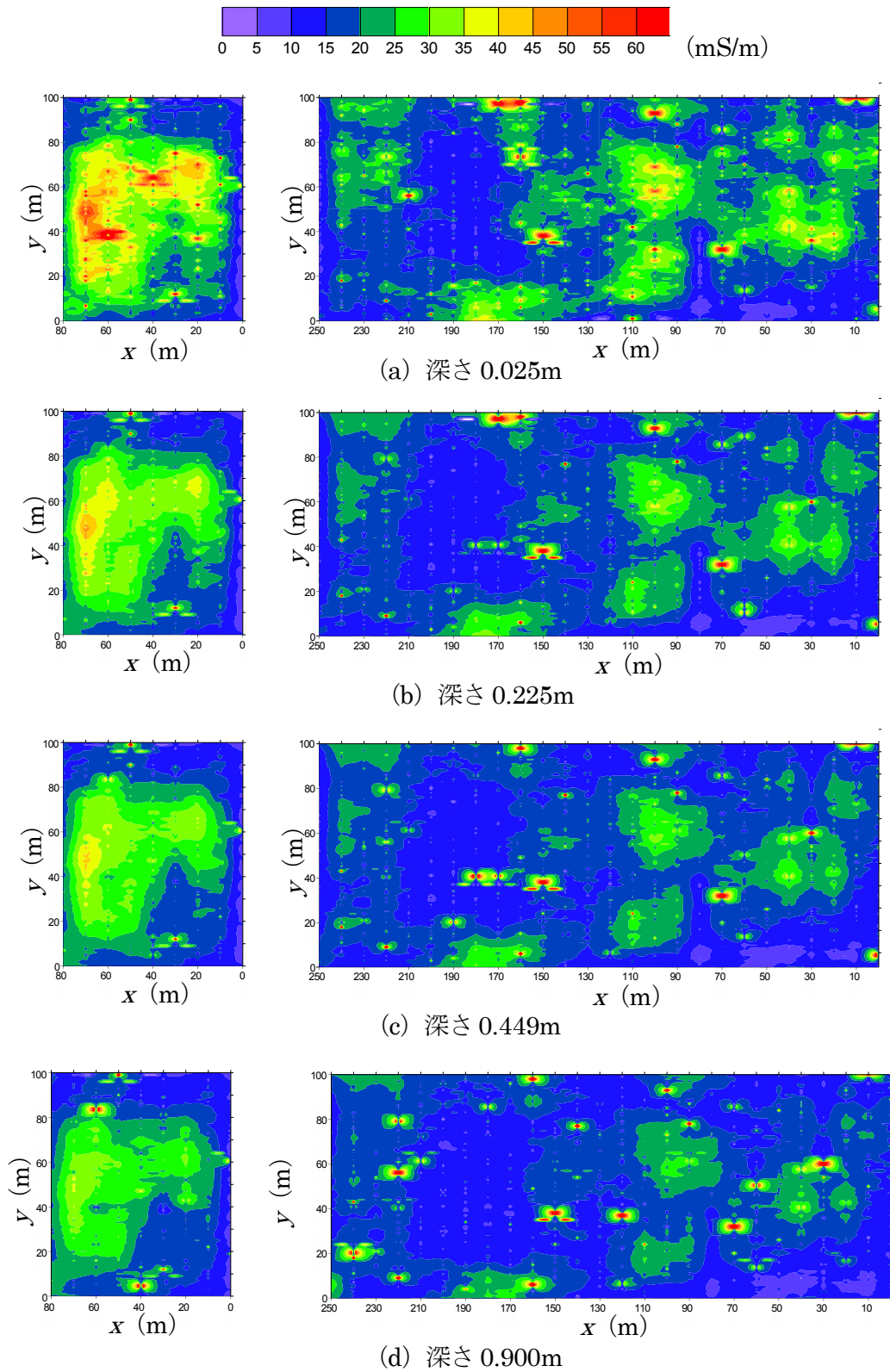


図 12 小友町水田の電磁探査による EC 分布測定結果
 (左図が A 地区, 右図が B 地区コンタースケールは全図同一)

5. まとめ

岩手大学下台圃場調査地および陸前高田市小友町水田調査地において、地中レーダー探査、電磁探査および土壌イオン濃度測定を行い、それら測定結果を統合した土壌健全性の広域的評価手法について検討した。また、地中レーダー探査による体積含水率の測定手法について検討した。その結果、以下の知見が得られた。

- 1) 小友町水田土壌の1:5法溶液の電気伝導度(EC)とカルシウムイオン濃度の対応が良好であった。このことは、地域の土壌のECと良好に対応するイオンの種別を見つけ出し、電磁探査により特定のイオン濃度を広範囲に推定できる可能性を示唆している。
- 2) 地中に埋設した塩化ビニール管において、水で満たした管は空洞の管よりも電磁波を反射しやすい。
- 3) 同じ深さに埋設したにもかかわらず、含水比の鉛直分布が異なる管の電磁波の反射時間が異なっている。このことは、反射時間と埋設深さより電磁波速度を求め、比誘電率を算出することにより、体積含水率を推定できる可能性があることを示唆している。
- 4) 暗渠が設置されている水田において、土壌を通過する電磁波の反射時間を測定したい場合は、孔の空いていない管の上部で測定することが必要であると考えられる。

謝辞

本研究は、公益財団法人JFE21世紀財団の2015年度技術研究助成により実施されました。ここに謹んで謝意を表します。

参考文献

- 1) 山本清仁, 小林晃, 原科幸爾, 倉島栄一, 武藤由子, 塚田泰博: 電磁探査による津波被災水田の土壌水電気伝導度分布の評価, 第11回環境地盤工学シンポジウム発表論文集(2015)
- 2) 光畑裕司: 電磁探査法による海岸平野における高塩分地下水調査-九十九里浜平野における例-, 地学雑誌, 115(3), pp.416-424, 2006
- 3) 冠秀昭, 関矢博幸, 遊佐隆洋, 大谷隆二: 電磁探査法による津波浸水農地の土壌電気伝導度迅速調査法, 土壌の物理性, 121, pp.19-28, 2012
- 4) 竹下祐二, 小林弘明, 田中謙次, 田尾一憲, 開発一郎: 地中レーダによる地盤の水分動態の非破壊計測方法, 土木学会論文集, No.729/III-62, pp.169-176, 2003
- 5) 斎藤広隆, 黒田清一郎, 永井延史, Jacopo Sala: アレイアンテナ地中レーダーによる不飽和地盤中水分動態の評価, 地盤工学会誌, 65-2(708), pp.28-31, 2017
- 6) Mitsuhata, Y., Uchida, T., Matsuo, K., Marui, A., and Kusunose, K.: Various-scale electromagnetic investigations of high-salinity zones in a coastal plain, Geophysics, 71, pp.B167~B173, 2006