

地中レーダ探査技術を用いた圃場内の石礫分布の判定

(一財) 北海道農業近代化技術研究センター ○南部雄二・赤塚脩介
応用地質株式会社 青池邦夫

I. はじめに

北海道内の農地のなかで、作土層内に石礫を多く含む圃場では営農の支障となるため、畑総事業等の土地改良事業によって、石礫除去が実施されてきた。

これまで、圃場内の礫分布状況は、農家聞き取りと数箇所の試掘調査（含礫量調査）により把握しており、除礫区域の特定は大まかである。

また、石礫除去工の実施段階では、整備対象となる圃場内で、1ha 当たり 3 箇所を標準として、縦・横 0.5～1.0m、深さ 0.5m の試孔を掘削し、粒径 30mm 以上の石礫の体積割合から、その圃場の含礫率を算定し、施工深度を決定している。

その結果、それほど石礫が多くない区域も含めて、除礫区域として施工される場合もある。今後、石礫除去工を効率的に実施するには、圃場内に偏在する石礫分布を把握し、除礫区域の絞り込みが重要であり、石礫分布の推定精度の向上が求められる。

これまで、筆者らは、石礫分布の偏在状況を把握するために、けん引式電気探査により平面的な分布状況を推定した¹⁻²⁾が、土性、土壌水分が比抵抗に影響し、推定精度が低下する場合があった。

今回は、土性、土壌水分の影響が少なく、石礫の出現深度を把握するのに適した地中レーダ探査技術を用いて、石礫分布状況と含礫率の推定手法について検討した。

II. 電気探査による含礫率の推定と課題

けん引式電気探査（写真-1）は、従来の電気探査のように電極棒の打設が不要で、けん引方向の比抵抗を連続的に計測することができる。そのため、広範囲の効率的な探査が可能であり、地下構造探査、地下水探査、遺跡探査等に利用されている。

計測時に RTK-GNSS の測位データと同期して、比抵抗データに座標（緯度・経度）データを付与することで、測線上の計測データを用いて等値線図を作成でき、回帰式により含礫率に換算することで、含礫率マップとして表現することができる。

2011 年までの調査圃場（十勝管内の畑地・草地）で、電気探査により計測される比抵抗と含礫率の相関性は、図-1 の事例のように確認しており¹⁾、圃場内の石礫の偏在状況を把握する手法として有効であると判断した。

しかし、多水分条件下では、比抵抗が低下する傾向にあり、礫が分布する場合でも比抵抗が低く計測



写真-1 けん引式電気探査

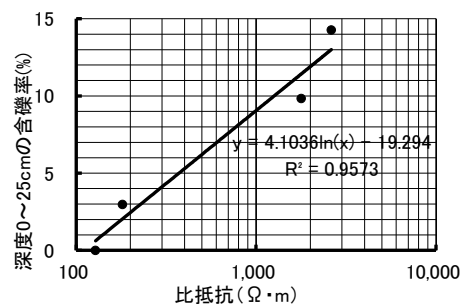


図-1 比抵抗と含礫率の相関性の例

されるので、多水分条件下の圃場での探査は不向きである。

また、土壌条件（砂礫質・粘質）も、比抵抗の測定結果に影響を与えることから、同一圃場内で土壌条件が異なる場合には、含礫率との相関性を悪化させる可能性がある。

このように探査する圃場の土壌条件によって、含礫率および礫分布状況の推定精度は低下することが想定された。

Ⅲ. 地中レーダ探査技術の活用

地中レーダ探査は、地中に電磁波を照射し、地中の反射体からの反射波を捉えるので、石礫の出現深度を把握する手法としては有効であり、巨礫の出現深度調査として試行した実績がある。

これまでの地中レーダ探査の試行実績をもとに、探査方法に改良を加え、探査データと現地含礫量調査データから圃場内の石礫分布状況を面的に判定可能であるかを検討した。

調査解析の要点は、次の①～③のとおりである。

- ①地中レーダ探査により、圃場内の石礫分布状況を把握する。
- ②探査解析データと含礫量調査データから、相関性を確認する。
- ③深度 0～25cm、深度 25～40cm、深度 0～40cm における石礫分布状況の把握、含礫率の推定が可能であるかを確認する。

1. 探査システムの概要

地中レーダ探査システムのイメージおよび写真は、図-2 に示す。

地中レーダアンテナ（900MHz）4 台を自作のそり（幅 1.4m）の上に配置し、人力でけん引した。その後方に設置した計測輪で移動距離を測定し、30mm 以上の礫を捉えるために 2cm の移動で探査データを記録することとし、けん引する間隔（探査ライン間隔）はそり幅の 1.4m とした。

また、そり中央には GNSS アンテナを設置し、RTK-GNSS 測位データと同期することで、探査データに座標を付与できるので、空間情報として処理することが可能になる。

レーダ測定器（SIR-30）、GNSS 受信機、バッテリー等の機器類は、市販のそりに搭載し、アンテナ搭載そりと並走した（写真-1）。

今回は試行であったため、アンテナ搭載そり、機器類搭載そりとも人力

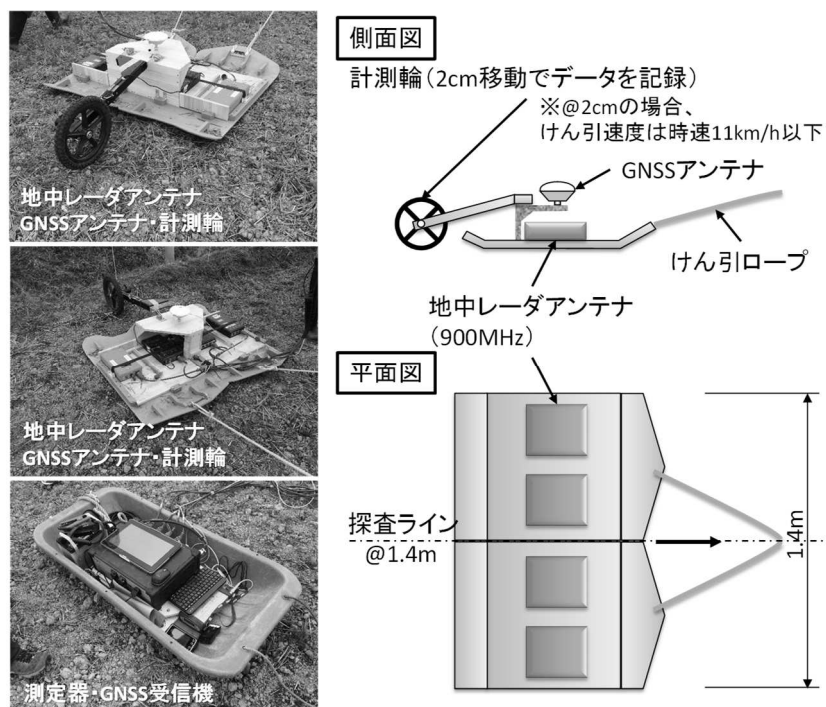


図-2 探査システム

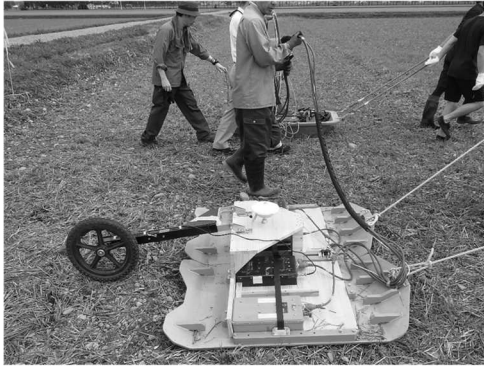


写真-1 探査システムのけん引状況



図-3 車両による探査システムのけん引イメージ

でけん引したが、今後は、探査効率を向上するために、機器類（SIR-30・受信機等）を車両に搭載し、アンテナ搭載そりをけん引する手法を想定している（図-3）。

2. 探査圃場の条件と含礫率

(1) 探査圃場の条件

調査圃場は、水田地帯で石礫除去工の要望がある地域で、圃場表面（表層）に礫が多い「圃場①」、圃場全体に礫が多い「圃場②」、礫なしの「圃場③」を選定した。

圃場①～③の一部分を調査区画として設定し、区画内でレーダ探査と含礫量調査を実施した（図-4）。

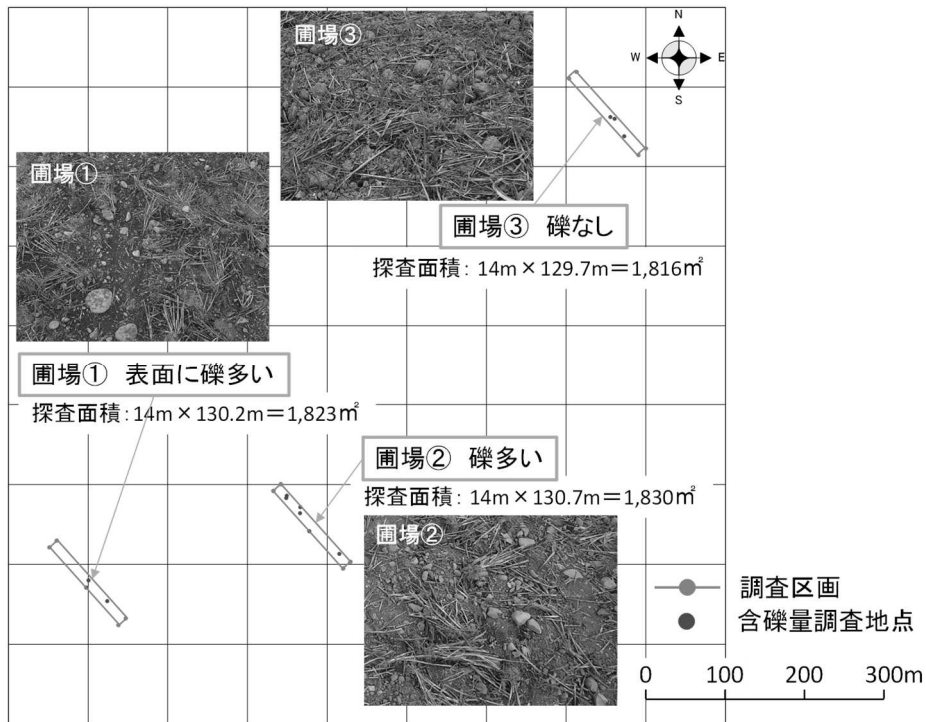


図-4 調査圃場内における調査区画と含礫量調査位置

(2) 含礫量調査結果

含礫量調査は、圃場①、③は3箇所、礫が多い圃場②は6箇所を実施した。

調査対象深度は40cmとし、作土層0～25cm、心土層25～40cmに区分して、含礫率を求めた（表-1）。

表層に礫が多いとされた圃場①でも、心土層にも礫が確認された。一方、圃場全体に礫が多いとされた圃場②の作土層内の含礫率は0.3～3.5%であり、石礫除去工の対象となる5%には達しなかった。

礫なしの圃場③の含礫率は、含礫量調査地点全て0%であった。

3. 地中レーダ探査結果(地中レーダ測定波形の例)

地中レーダ測定波形の例を図-5～6に示す。

地中レーダの送信アンテナから照射される電磁波による断面画像では、石礫の位置を山形波形として捉えることができ、山形波形のピーク位置を石礫出現深度として求めることができる。

表層に礫が多い圃場①では、表層の山形波形が多く、圃場全体に礫が多い圃場②では、心土層(深度25～40cm)において山形波形が確認できる。

これらの波形データをもとに解析し、探査解析データを作成し、マップ化処理と含礫率との相関性を検討した。

4. 探査解析データによるマップ化処理

各圃場の探査データから、深度0～25cm、深度25～40cm、深度0～40cmの3パターンで単位面積当たりの振幅極大値をカウントした数を求め、数の大小をもとに色分けマップを作成した(図-7～15)。

このマップでは、カウント数が大きいと含礫量が多く、カウント数が少ないと含礫量が少ないこと表現することになる。

圃場①は、「深度0～25cm」のカウント数が多く、圃場の北西側で多い傾向がみられた。「深度0～40cm」では、圃場中央付近のカウント数が多い傾向にあり、「深度25～40cm」の影響を受けているのがわかる。

圃場②は、「深度0～25cm」のカウント数が多く、圃場の北西側と南東側で多い傾向がみられた。「深度25～40cm」も北西側と南東側で多い傾向にあるので、「深度0～40cm」のマップでも同様の傾向を示した。

圃場③は、他の2圃場に比べ、明らかにカウント数が少ないことがわかる。しかし、礫が存在しない「深度0～25cm」で数は少ないがカウント数が確認された。この要因として、

表-1 含礫量調査地点の含礫率

		[単位:%]		
圃場番号	地点番号	対象深度		
		0～25cm	25～40cm	0～40cm
①	1	2.3	4.9	3.3
	2	2.0	13.1	6.3
	3	0.3	0.1	0.2
②	1	1.5	4.8	2.7
	2	3.3	11.1	6.3
	3	0.4	0.7	0.5
	4	3.0	5.5	3.8
	5	0.3	0.3	0.3
	6	3.5	7.5	5.0
③	1	0.0	0.0	0.0
	2	0.0	0.0	0.0
	3	0.0	0.0	0.0

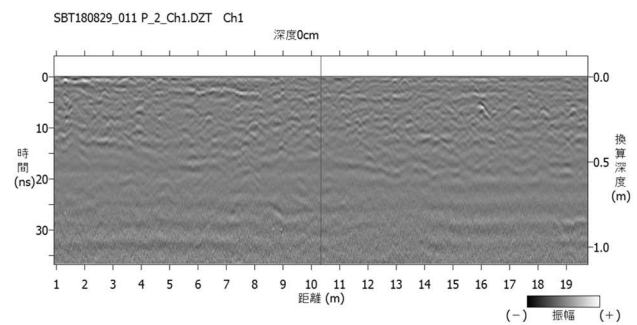


図-5 地中レーダ測定波形の例 圃場①

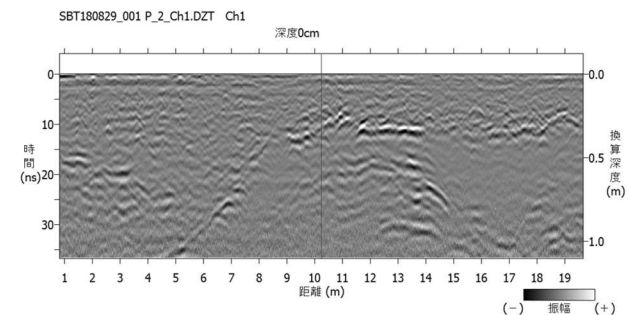


図-6 地中レーダ測定波形の例 圃場②

表層の耕起により固まった粘性土の塊（土塊）（写真-2）が反射体となっている可能性が想定される。

圃場③では、石礫の分布は確認されないが、深度 10cm ごとの反射強度をマップ化すると、深度 20~30cm から深度 50~60cm までの区間で、暗渠排水の疎水材を確認することができた。小粒径の礫でも疎水材のように幅を持って分布する場合には探査可能であることが確認された。



写真-2 圃場②表面の土塊

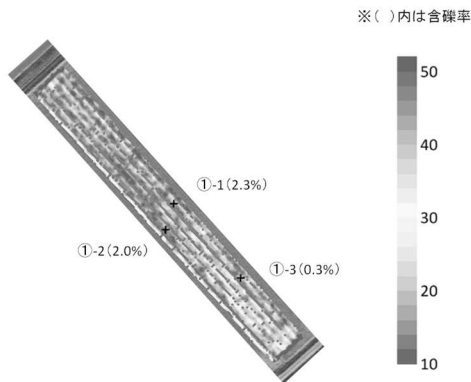


図-7 解析データによる色分けマップ
圃場①：深度 0~25cm

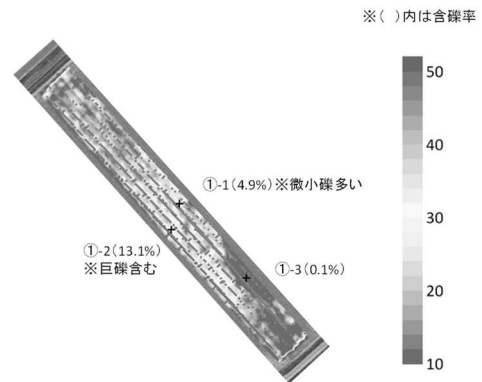


図-8 解析データによる色分けマップ
圃場①：深度 25~40cm

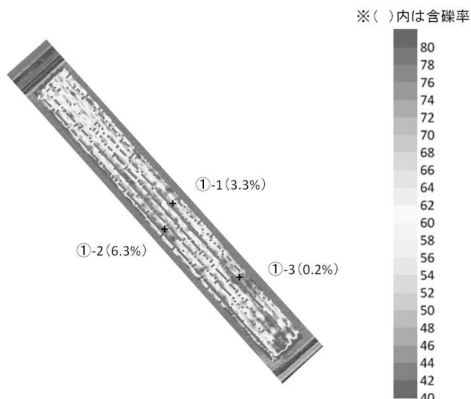


図-9 解析データによる色分けマップ
圃場①：深度 0~40cm

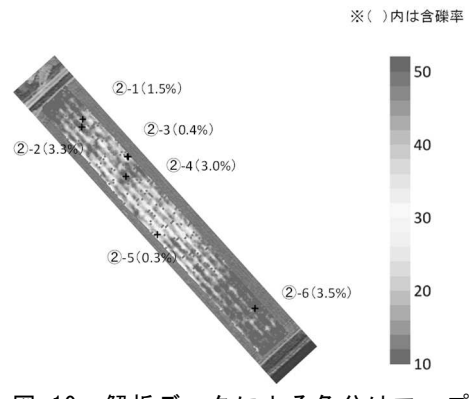


図-10 解析データによる色分けマップ
圃場②：深度 0~25cm

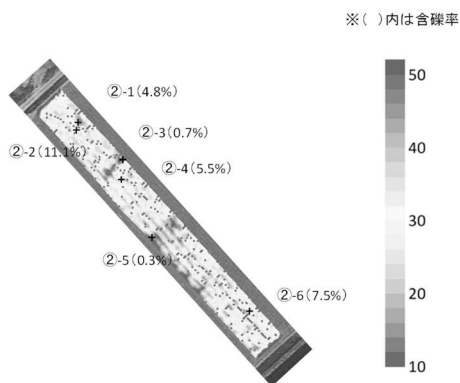


図-11 解析データによる色分けマップ
圃場②：深度 25~40cm

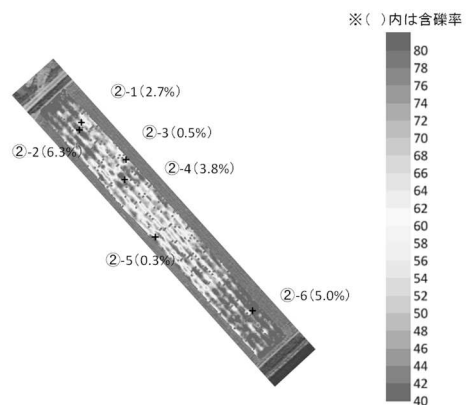


図-12 解析データによる色分けマップ
圃場②：深度 0~40cm

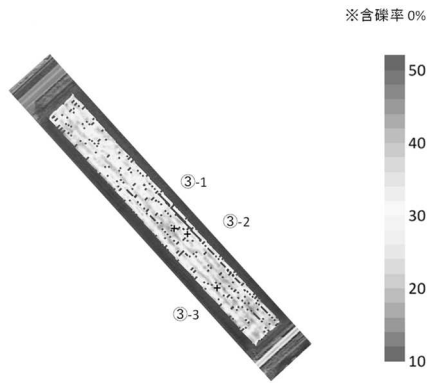


図-13 解析データによる色分けマップ
圃場③：深度 0～25cm

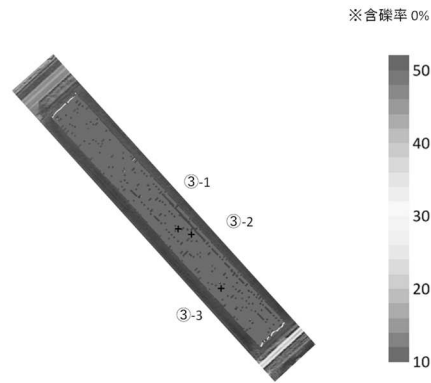


図-14 解析データによる色分けマップ
圃場③：深度 25～40cm

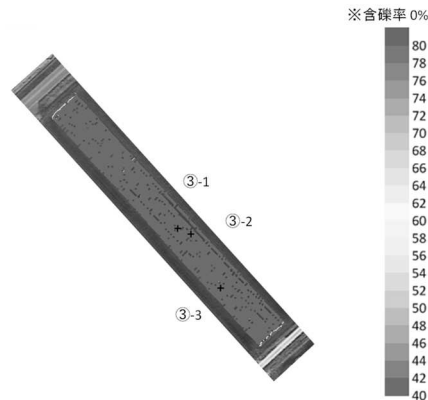


図-15 解析データによる色分けマップ
圃場③：深度 0～40cm

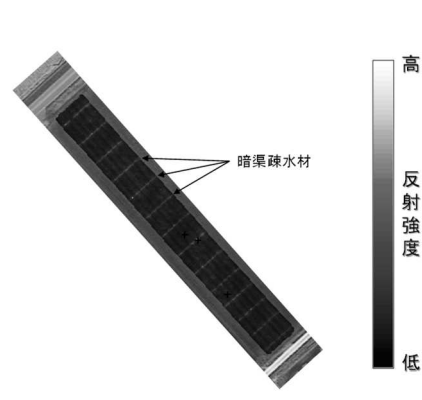


図-16 深度 10cm 区間ごとの反射強度分布
圃場③：深度 20～30cm

※図-7～15 のスケールバー：単位面積当たりの振幅極大値をカウントした数、+：試掘地点

このように、カウント数（探査解析データ）のマップ化により、石礫の偏在状況を可視化することができた。さらに、探査解析データと含礫率の相関性が良好であれば、深度別の含礫率マップとして表現することが可能である。

5. 探査解析データと含礫率の相関性

(1) 相関性の評価

圃場①・②の含礫率調査地点の座標から、探査解析データを抽出し、含礫率との相関性を確認した。

各調査地点の探査解析データと含礫率は表-2、深度別の相関性検討グラフは図-17～19に示す。

表-2 探査解析データと含礫率

圃場①・②の探査解析データと含礫率の相関性（決定係数）は、深度 0～25cm で $R^2=0.63$ 、深度 25～40cm で $R^2=0.87$ 、深度 0～40cm で $R^2=0.95$ となり、良好な相関性が確認された。ここで、深度 0～25cm で、1 データ棄却してみると $R^2=$

圃場番号	礫分布の特徴	地点番号	対象深度 0～25cm		対象深度 25～40cm		対象深度 0～40cm	
			探査データ	含礫率 (%)	探査データ	含礫率 (%)	探査データ	含礫率 (%)
①	表層に礫多い	1	42.9	2.3	28.7	4.9	71.6	3.3
		2	52.8	2.0	28.6	13.1	81.5	6.3
		3	41.2	0.3	3.0	0.1	44.2	0.2
②	圃場全体に礫多い	1	59.3	1.5	21.3	4.8	80.6	2.7
		2	58.2	3.3	28.8	11.1	87.0	6.3
		3	37.6	0.4	18.0	0.7	55.6	0.5
		4	50.5	3.0	22.1	5.5	72.5	3.8
		5	39.7	0.3	11.7	0.3	51.5	0.3
		6	54.9	3.5	30.7	7.5	85.6	5.0

0.74、深度 25～50cm で、①-2 の巨礫を控除した含礫率を採用すると $R^2=0.88$ となった。

さらに、深度 0～40cm の決定係数は、 $R^2=0.95$ で高い相関性が得られた。よって、調査深度 25cm の境界にこだわらなければ、礫の分布状況と含礫率は、より高い精度で評価可能と考えられる。

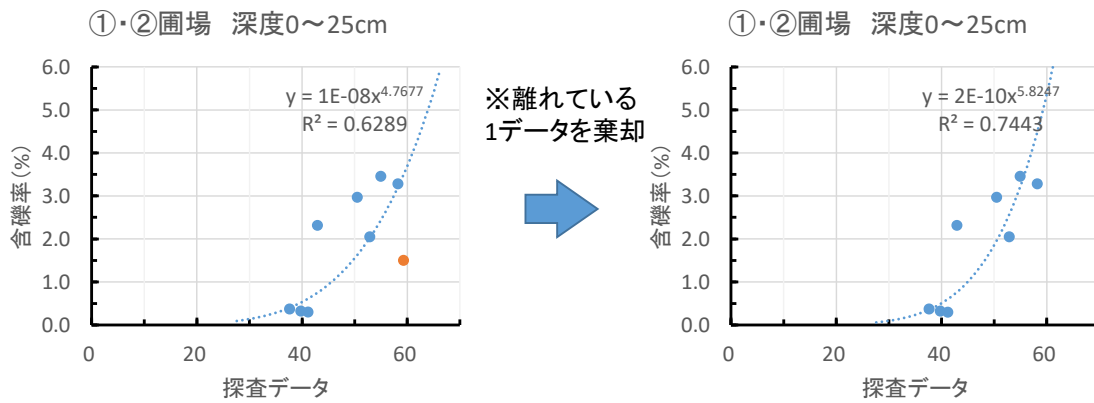


図-17 探査解析データと含礫率の相関性（深度 0～25cm）

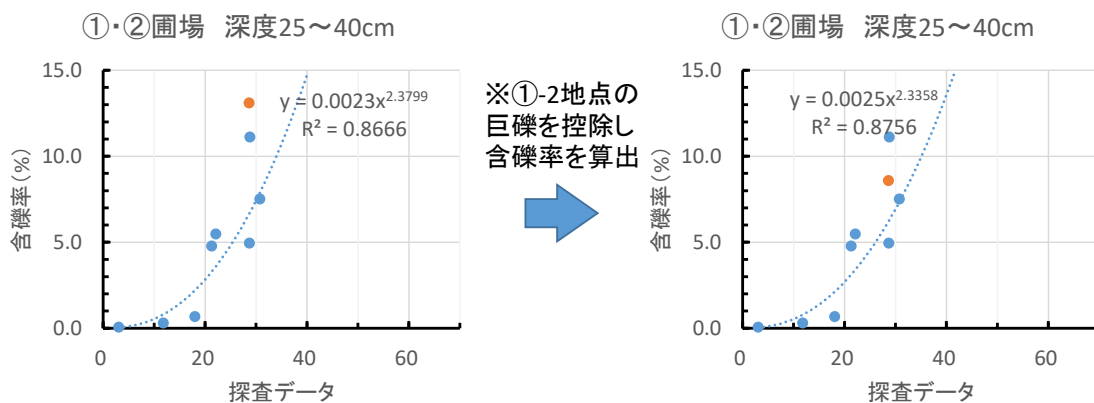


図-18 探査解析データと含礫率の相関性（深度 25～40cm）

このように、決定係数 (R^2) からみて、探査解析データと含礫率の相関性は認められるが、今回の調査では、深度 0～25cm で含礫率が 5%を超える地点はなく、表層における 5%以上の推定精度は確認できなかった。

しかし、深度 25～40cm、0～40cm で含礫率 5%を超える場合に相関性が良好であることから、深度 0～25cm で含礫率が増加した場合でも、相応の相関性が得られると考えられる。

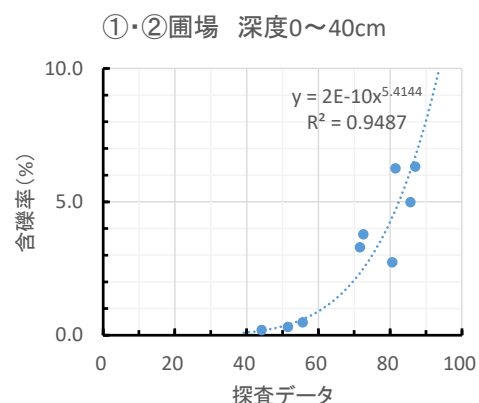


図-19 探査解析データと含礫率の相関性（深度 0～40cm）

(2) 含礫率マップの作成

含礫率が高かった圃場②の深度 25～40cm を対象に、探査解析データ（データのグリッド間隔≒0.5×0.5m）から含礫率マップを作成した（図-20）。

含礫率は、探査解析データ（x）と含礫率（y）から求めた回帰式（ $y=0.0025x^{2.3358}$ ）を用いて算出した。

このマップから、圃場の北西側に含礫率の高い区域があること、圃場中央部の含礫率が低いことなど、石礫の偏在状況を把握することが可能である。

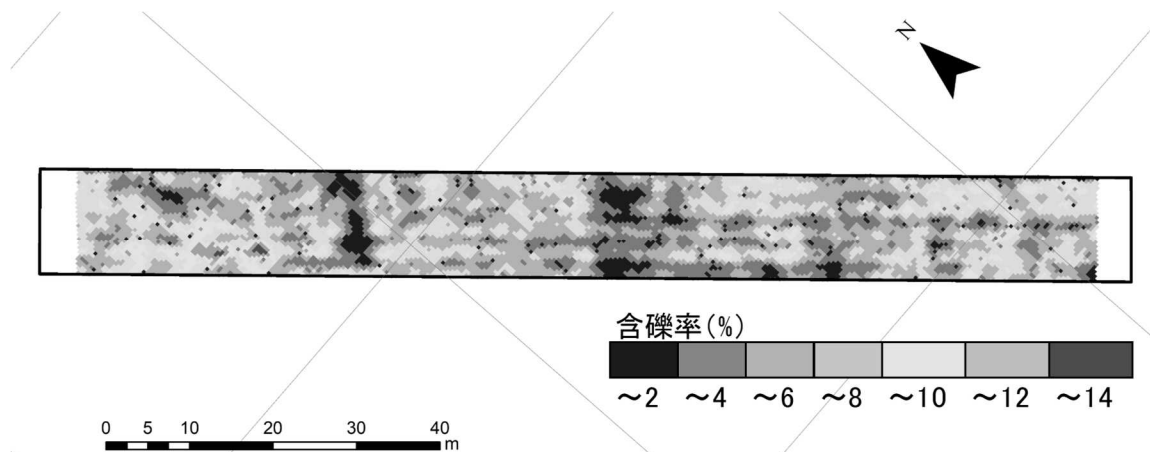


図-20 含礫率マップ 圃場②（深度 25～40cm）

IV. おわりに

今回の調査結果から、地中レーダ探査解析データと含礫率の相関性を確認でき、石礫分布状況の把握、含礫率の推定は可能と考えられる。

今後、実用化するうえでの課題点は、次のとおりである。

- ①探査ライン間隔 1.4m、進行方向の探査間隔 2cm の探査データ量は膨大であるため、解析にはハイスペックの PC が必要であり、探査面積が大きくなるほど処理時間を要するため、即時処理には不向きである。
- ②これまでのけん引式電気探査に比べ、探査密度は高く、使用機器類も高額であるため、探査費用、解析費用が高額になる。

石礫の偏在状況を把握することで石礫除去工事面積を縮小できれば、工事費用の削減につながる。しかし、探査した結果、探査区域の全てで工事を実施する場合は、探査費用＋工事費となり、投資額が大きくなるので、探査解析費用削減の検討が必要である。

【引用文献】

- 1) 山村航也ら：畑地帯における地下探査技術を活用した区画整理の設計～草地整備の障害物除去・畑地帯の区画整理への応用～、第 30 回農業土木新技術検討会要旨集、pp.41-50 (2013)
- 2) 山村航也・南部雄二・中島睦：草地整備における電気探査技術を活用した石礫分布の把握、水土の知 82 (3)、pp.54-55 (2014)