

第4章 既存杭を含む敷地における調査（茨城県猿島郡境町）

4.1 調査の概要

既存杭の再利用や撤去の技術的判断を行う上で、地中における既存杭の位置の把握は重要なポイントとなる。通常の場合、従前建築物の計算書等の図面から把握することになるが、該当する記述のある図書が存在しない場合もある。また、従前建築物の地上部分が撤去済みで、更地の状況で既存杭の存在を確認する必要があることも想定される。

そこで、茨城県猿島郡境町の敷地を対象に、あらかじめ情報を取得済みの既存杭に対し、地中埋設物の探査技術であるボアホールレーダー探査^{4.1)}の適用性を確認するための調査を行った。

敷地の概要を図4.1.1に示す。約南北70m×東西80mの敷地内で、ボアホールレーダーを含む複数の地盤調査が実施されている。事前情報として、図4.1.1中に示す40m四方の区画上辺付近に既存杭（軸径1.60m（深度GL-49.50mまで）、拡底径4.10m（最大深度GL-51.85m）の場所打ち杭）の存在が判明しており、その中心から図面上で約2.15m離れた位置に調査孔を設けて調査を実施した。図4.1.2に示す孔壁測定情報など、杭の施工情報から決定した調査数量を表4.1.1に示す。

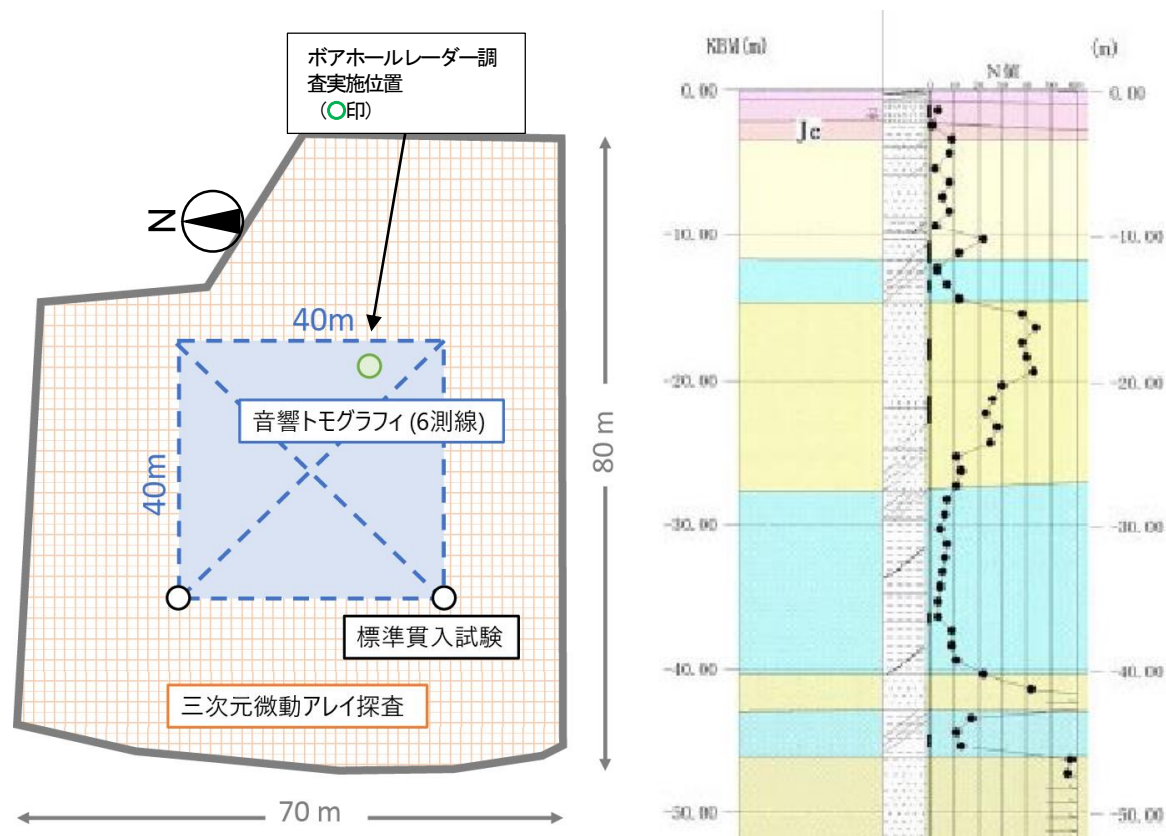


図4.1.1 調査対象敷地の概要

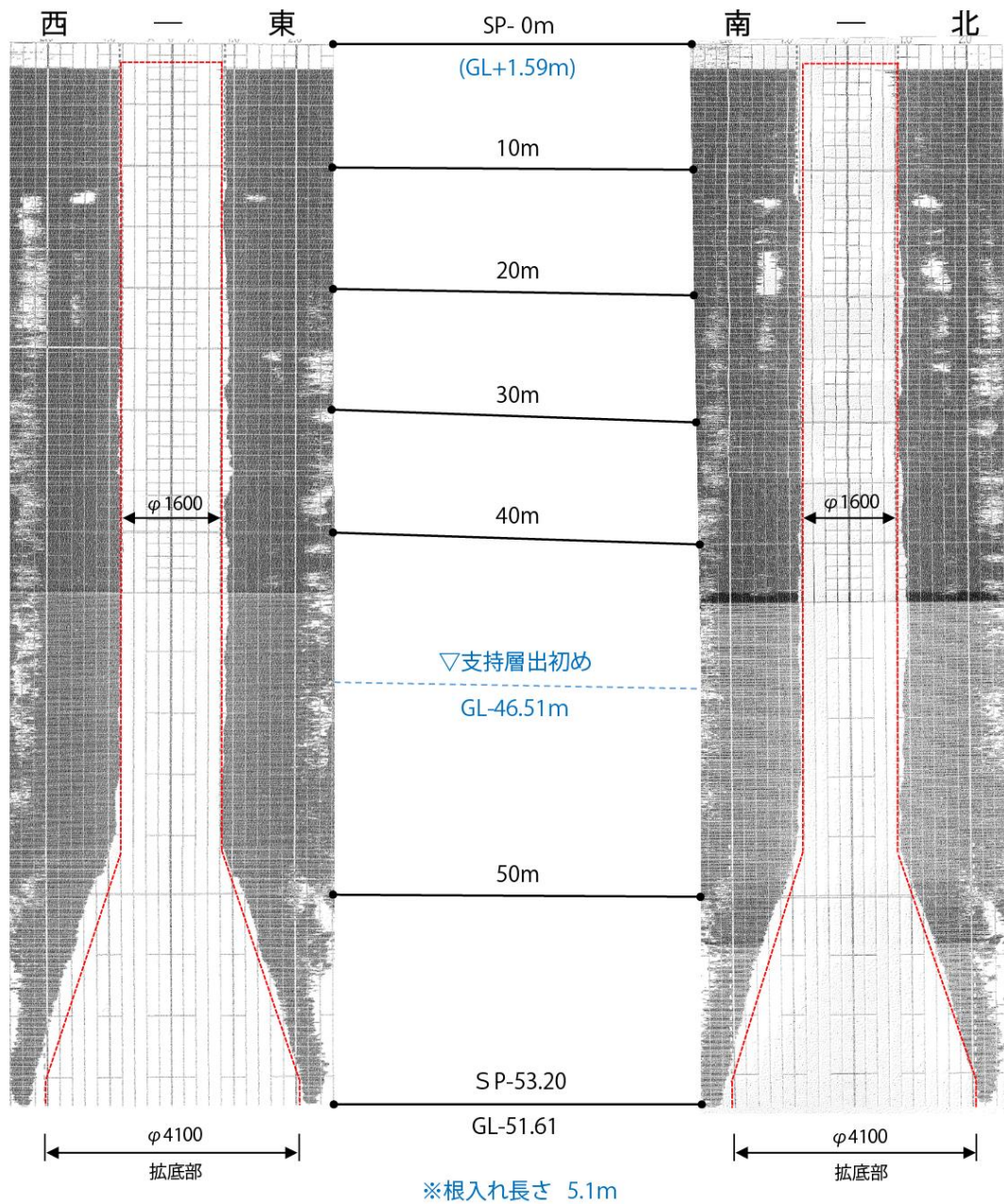


図 4.1.2 杭施工情報（孔壁測定記録）

表 4.1.1 調査数量一覧

調査種目	数量
ボアホールレーダー探査	無指向性ボアホールレーダー：-2.0～-48.0m、測点数：231 指向性ボアホールレーダー：-25.0～-52.4m、測点数：75
孔曲り計測	深度範囲：0.0 ～ -53.0m

4.2 ボアホールレーダー探査による地中構造物の確認

4.2.1 ボアホールレーダー探査

ボアホールレーダー探査は、図 4.2.1 に示すように、調査孔に挿入した送信アンテナから電波を放射し、調査孔周辺に存在する対象物からの反射波を受信アンテナで受信する手法である。各アンテナが格納された送信ゾンデと受信ゾンデを調査孔へ挿入し、任意の深度までゾンデを移動させる。測定する深度にてゾンデを停止させ、電波の送受信をおこなう。なお、測定中にゾンデが回転することが考えられるが、内蔵する3次元姿勢センサによってゾンデの姿勢状況を把握し、解析時に姿勢補正を行なう。

本システムには無指向性受信アンテナと指向性受信アンテナの2種類があり、以下に特徴を述べる。

I. 無指向性受信アンテナ

対象物からの反射波の観測と土壌の電気的な特性（比誘電率）を把握できる。

II. 指向性受信アンテナ

取得した対象物からの反射波より、対象物で電波が反射する点（反射点）を推定できる。

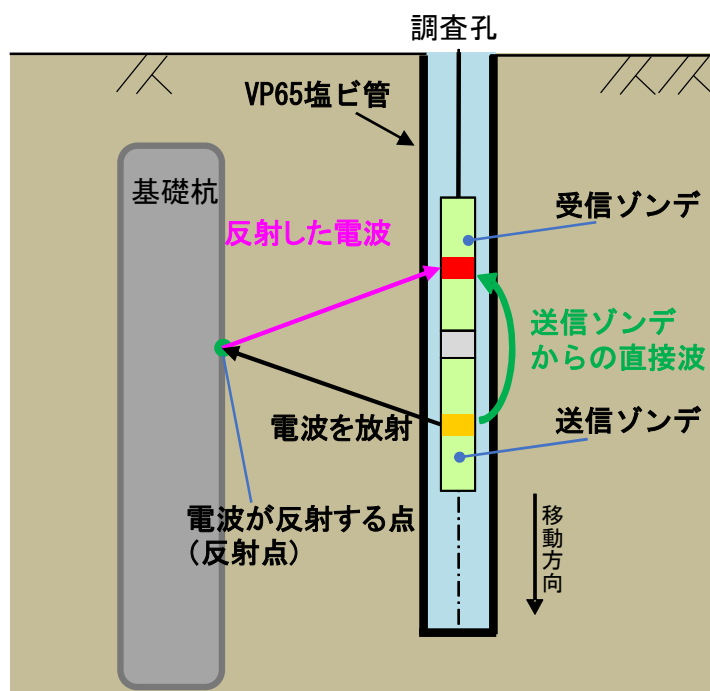


図 4.2.1 ボアホールレーダー探査の模式図

4.2.2 測定作業

測定作業では、はじめに調査対象の存在する深度の把握と土壌中の電波速度を決定する比誘電率の推定を行うための事前調査として、無指向性ボアホールレーダーによる測定を一定の深度にて行ない、次に、調査対象の位置推定を目的として、指向性ボアホールレーダーによる測定を実施した。

深度の基準は地表面を深度0.0mとし、測定深度の基準となる位置は各受信ゾンデに内蔵されている受信アンテナの中心位置とした。なお、公衆無線等への電波障害を考慮し、ボアホールレーダーが完全に調査孔内に挿入されている状態で測定を行った。

図4.2.2に使用した機器⁴¹⁾の外観を、表4.2.1に機器の仕様を示す。



(a) ゾンデ



(b) 地表部

図4.2.2 ボアホールレーダーの機器一式

表4.2.1 ボアホールレーダーの機器仕様

部位	機器名称	主な仕様
ゾンデ	送信ゾンデ	サイズ：全長1,849mm、径57mm、重量：約8.3kg
	無指向性受信ゾンデ	サイズ：全長1,850mm、径57mm、重量：約8.3kg
	指向性受信ゾンデ	サイズ：全長2,520mm、径57mm、重量：約13.4kg 3次元姿勢センサ内蔵
地表部	測定機器 VNA Master MS2026C (アンリツ社製)	サイズ：縦315mm、横78mm、高さ315mm、重量：4.5kg 測定周波数帯域：5k-6GHz、掃引数：2-4,001 掃引速度：350μ秒/ポイント
	地上制御装置	サイズ：縦480mm、横38mm、高さ190mm、重量：約12kg 搭載機能：電気/光信号変換、信号レベル調節等

4.2.3 基礎杭を対象とした調査事例

図4.2.3に、埋設基礎杭を対象とした調査事例を示す。図4.2.3(a)に示す波形記録において、緑色枠で示す反応が基礎杭からの反応である。調査孔と基礎杭の距離が一定のため、波形記録上においても一定時間の深度方向に連続する反応を示す。一方、基礎杭が存在しない深度では、上述のような顕著な反応は認められない。

推定した基礎杭の位置を、図4.2.3(b)中にて緑丸で示す。これらの緑色は想定される基礎杭の位置近傍にあり、存在する深度まで連続した分布が得られる。

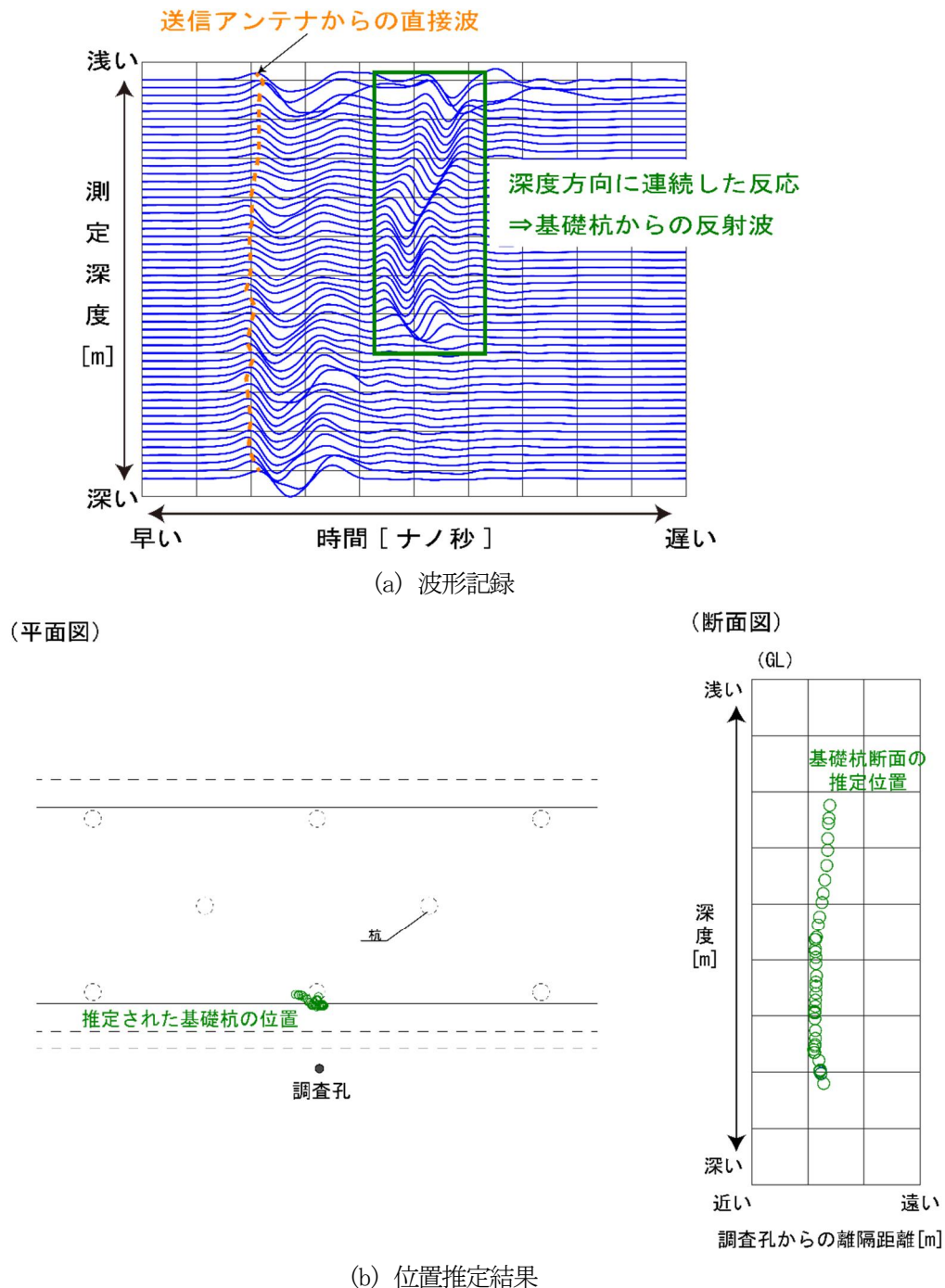


図4.2.3 基礎杭を対象とした波形記録と位置推定結果の例

4.2.4 調査結果

i) 孔曲がり測定結果

ボアホールレーダー調査に先立って、調査に用いる孔の施工精度を確認するため、孔曲がりの計測（応用計測サービス製の測定装置を使用）を実施した。結果を図 4.2.4 および表 4.2.2 に示す。図には参考として各層の土質を併記した。深度 25m 程度までは鉛直性が保たれているが、徐々に孔曲がりが生じ、最終的には最深部（深度約 53m）で中心から 2m 程度のずれを生じていた。後述する結果の評価にあたっては、この影響を考慮した解析を行った。

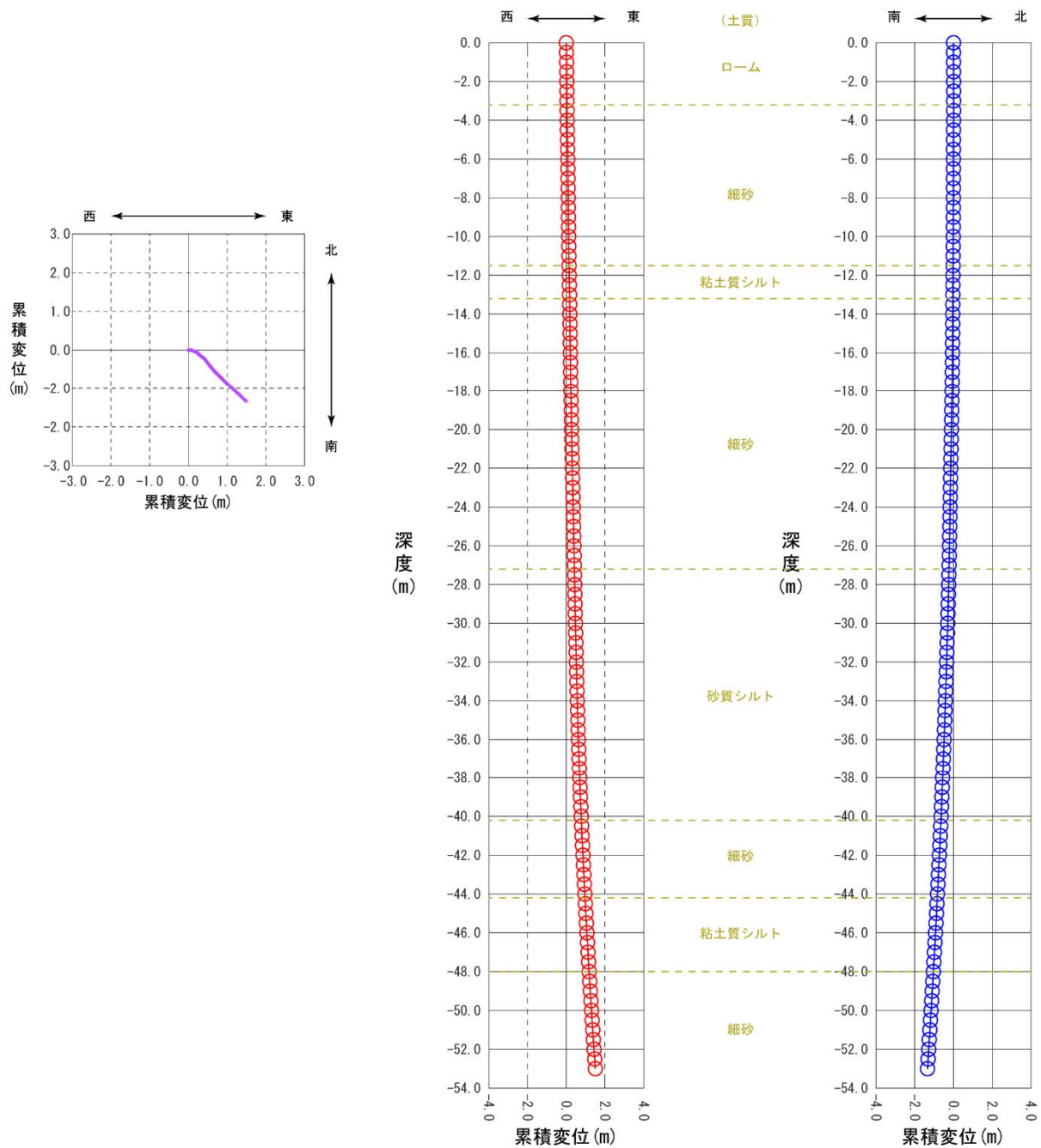


図 4.2.4 孔曲がり計測結果

第Ⅱ編

表 4.2.2 孔内累積変位一覧表

番号	測定 深度(m)	累積変位(m) 【東西方向】	累積変位(m) 【南北方向】	番号	測定 深度(m)	累積変位(m) 【東西方向】	累積変位(m) 【南北方向】
1	0.00	0.00	0.00	55	27.00	-0.23	0.42
2	0.50	0.00	0.01	56	27.50	-0.24	0.43
3	1.00	0.00	0.01	57	28.00	-0.25	0.44
4	1.50	0.00	0.02	58	28.50	-0.26	0.44
5	2.00	0.00	0.03	59	29.00	-0.28	0.45
6	2.50	0.01	0.03	60	29.50	-0.29	0.46
7	3.00	0.01	0.04	61	30.00	-0.30	0.47
8	3.50	0.01	0.04	62	30.50	-0.32	0.48
9	4.00	0.00	0.05	63	31.00	-0.33	0.50
10	4.50	0.00	0.06	64	31.50	-0.34	0.51
11	5.00	0.00	0.06	65	32.00	-0.36	0.52
12	5.50	0.00	0.07	66	32.50	-0.37	0.53
13	6.00	0.00	0.08	67	33.00	-0.39	0.54
14	6.50	-0.01	0.08	68	33.50	-0.40	0.56
15	7.00	-0.01	0.09	69	34.00	-0.42	0.57
16	7.50	-0.01	0.10	70	34.50	-0.44	0.58
17	8.00	-0.01	0.10	71	35.00	-0.45	0.60
18	8.50	-0.01	0.11	72	35.50	-0.47	0.61
19	9.00	-0.01	0.11	73	36.00	-0.49	0.63
20	9.50	-0.01	0.12	74	36.50	-0.51	0.64
21	10.00	-0.01	0.12	75	37.00	-0.53	0.66
22	10.50	-0.02	0.13	76	37.50	-0.54	0.68
23	11.00	-0.02	0.14	77	38.00	-0.56	0.69
24	11.50	-0.03	0.14	78	38.50	-0.58	0.71
25	12.00	-0.03	0.15	79	39.00	-0.60	0.73
26	12.50	-0.03	0.16	80	39.50	-0.62	0.75
27	13.00	-0.04	0.17	81	40.00	-0.64	0.77
28	13.50	-0.04	0.18	82	40.50	-0.66	0.79
29	14.00	-0.04	0.18	83	41.00	-0.69	0.81
30	14.50	-0.04	0.19	84	41.50	-0.71	0.84
31	15.00	-0.05	0.20	85	42.00	-0.73	0.86
32	15.50	-0.05	0.20	86	42.50	-0.76	0.88
33	16.00	-0.05	0.21	87	43.00	-0.78	0.91
34	16.50	-0.06	0.22	88	43.50	-0.81	0.94
35	17.00	-0.06	0.22	89	44.00	-0.83	0.96
36	17.50	-0.07	0.23	90	44.50	-0.86	0.99
37	18.00	-0.08	0.24	91	45.00	-0.88	1.01
38	18.50	-0.08	0.25	92	45.50	-0.91	1.04
39	19.00	-0.09	0.25	93	46.00	-0.93	1.07
40	19.50	-0.10	0.26	94	46.50	-0.96	1.10
41	20.00	-0.11	0.27	95	47.00	-0.99	1.12
42	20.50	-0.12	0.28	96	47.50	-1.02	1.15
43	21.00	-0.13	0.29	97	48.00	-1.04	1.18
44	21.50	-0.14	0.30	98	48.50	-1.07	1.21
45	22.00	-0.14	0.31	99	49.00	-1.10	1.24
46	22.50	-0.15	0.33	100	49.50	-1.13	1.27
47	23.00	-0.16	0.34	101	50.00	-1.16	1.31
48	23.50	-0.17	0.35	102	50.50	-1.19	1.34
49	24.00	-0.18	0.36	103	51.00	-1.22	1.37
50	24.50	-0.19	0.37	104	51.50	-1.25	1.40
51	25.00	-0.19	0.38	105	52.00	-1.28	1.43
52	25.50	-0.20	0.39	106	52.50	-1.31	1.47
53	26.00	-0.21	0.40	107	53.00	-1.34	1.50
54	26.50	-0.22	0.41	表中の正の値：東方向、北方向			

ii) 無指向性ボアホールレーダー測定結果

無指向性ボアホールレーダーを用いた測定は、測定深度-2.0～-48.0m 区間で実施した。図 4.2.5 に測定された波形記録を示す。なお、本波形記録の解釈の参考として、画像処理によるレーダープロファイルの実施例を本章の末尾（4.4 節）に付録としてまとめた。

同図の時間 18～24 ナノ秒にかけては、一定の時間に深度方向へ連続した反応がみられた。これらは、送信アンテナからの直接波である（図中橙色枠部）。

直接波の到達時間以降では、時間 60～92 ナノ秒に測定深度-2.0～-41.6m にかけての顕著な反応が認められた（図中マゼンタ色枠部）。なお、これら反応の時間の変動は送信アンテナからの直接波と同様に、土質の違いや不均質さによるものである。

上述の反応が深度によって微弱な反応を示す要因は、各層の土質より、粘土質シルト層（-11.5～-13.2m）や砂質シルト層（-27.2～-40.2m）に対応する。これらの地層はN値が低いことから、相対的に高い水分率（高い比誘電率）となり、地中における電波の減衰が大きいことが推測される。

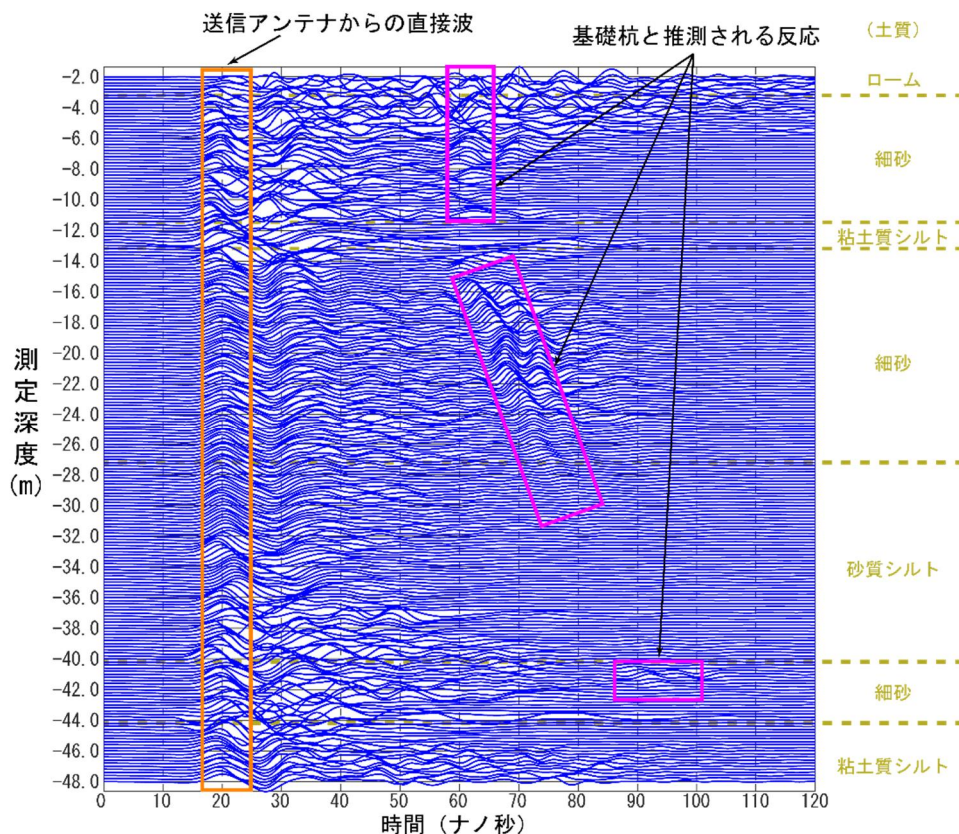


図 4.2.5 無指向性ボアホールレーダーにより取得された波形記録
(送信パルス：中心周波数 150MHz、帯域幅 300MHz)

iii) 土壌の比誘電率推定結果

各深度における送信アンテナからの直接波の到達時間より、推定された比誘電率の深度分布を図 4.2.6 に示す。この比誘電率の深度分布は調査孔周囲の土質や水分率を反映している。平均比誘電率は 28.38 であったため、本調査地の土壌条件は湿潤状態の砂質やシルト質（比誘電率は概ね $10 \sim 20^{4.3)}$ よりも水分量や不均質性が大きい土壌状況であったと推測される。

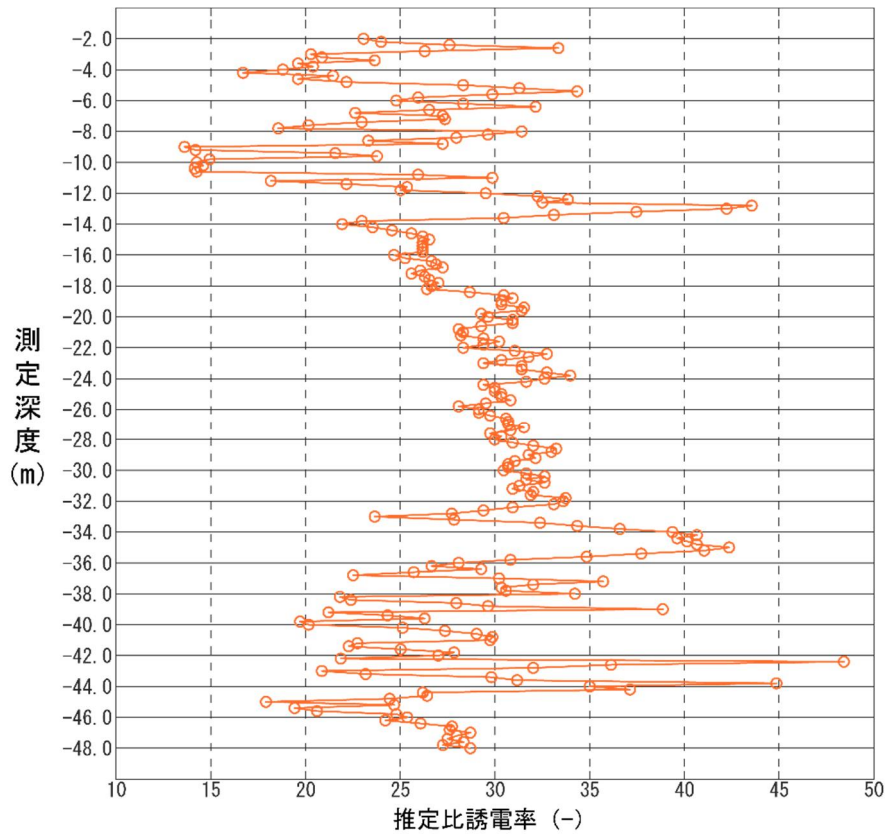


図 4.2.6 推定された比誘電率分布

iv) 指向性ボアホールレーダー測定結果

指向性ボアホールレーダーを用いた測定は、測定深度-25.0～-52.4m 間で実施した。なお、先述の結果より、-25.0～-30.0m 区間（区間A）、-40.0～-44.0m 区間（区間B）、-47.0～-52.4m 区間（区間C）に区分した。

図 4.2.7～図 4.2.9 には、各区間における指向性ボアホールレーダーによる波形記録を示す。各図中の時間 10～20 ナノ秒付近には送信アンテナからの直接波が認められた（図中橙色実線）。また、直接波の到達時間以降では、表 4.2.3 に示すとおり、無指向性ボアホールレーダー測定結果と同様な反応が認められた。なお、無指向性ボアホールレーダーの波形記録にて、時間60～92ナノ秒間に顕著な反応が認められたことから、先述の時間範囲にて各反応を抽出し、土質による振幅の減衰を考慮した。

表 4.2.3 反応一覧表

反応名	到達時間範囲 (ナノ秒)	測定深度範囲 (m)	図中表記
反応①	69 ～ 77	-25.0 ～ -30.0	緑色実線
反応②	81 ～ 90	-40.2 ～ -41.8	赤色実線
反応③	85 ～ 91	-47.0 ～ -47.8	青色実線
反応④	84 ～ 85	-49.6 ～ -50.8	黒色実線

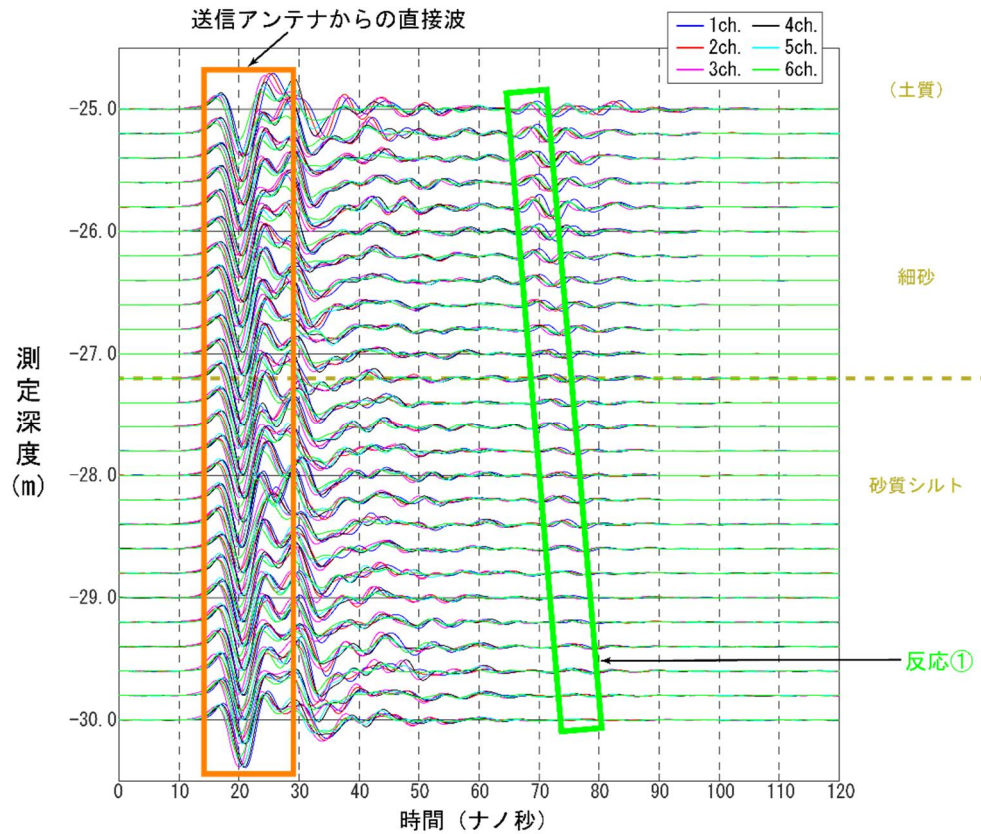


図 4.2.7 指向性ボアホールレーダーにより取得された波形記録 (区間A)

(送信パルス：中心周波数 150MHz、帯域幅 300MHz)

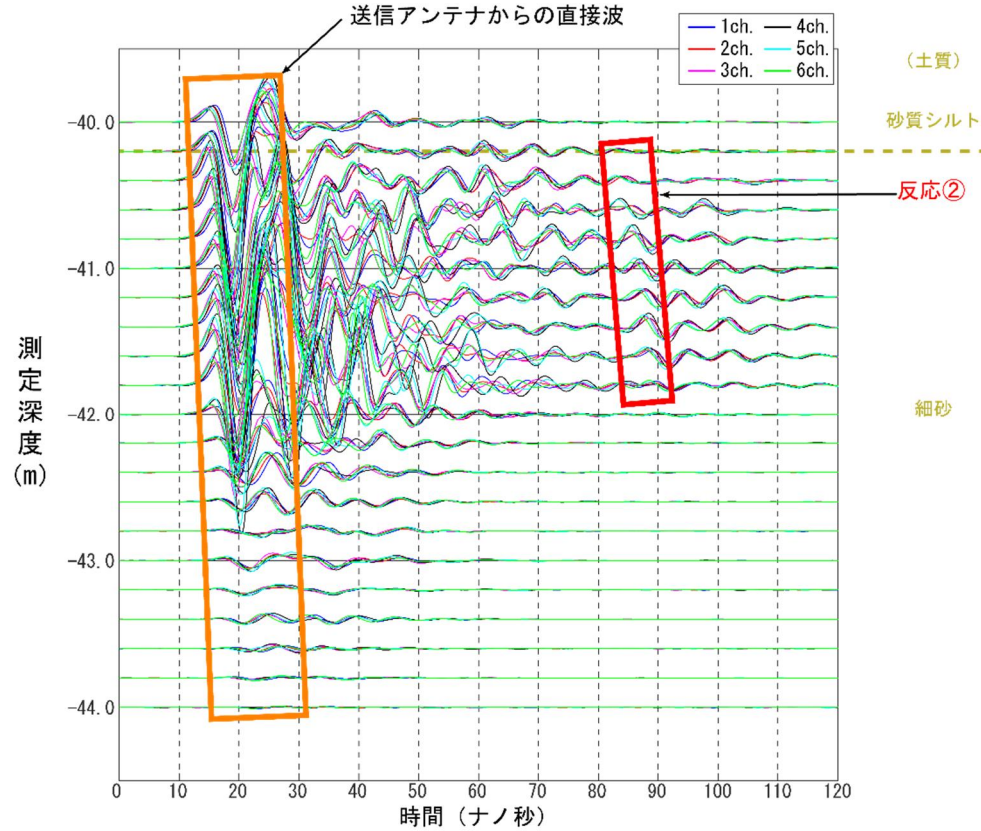


図 4.2.8 指向性ボアホールレーダーにより取得された波形記録 (区間B)

(送信パルス：中心周波数 150MHz、帯域幅 300MHz)

第Ⅱ編

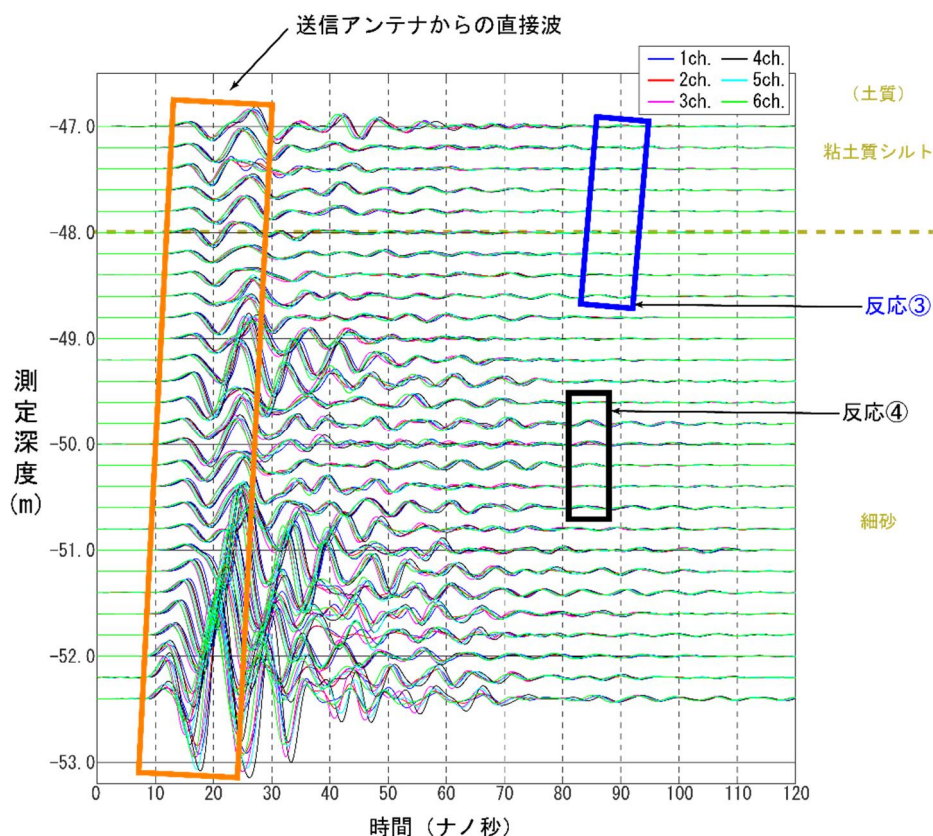


図 4.2.9 指向性ボアホールレーダーにより取得された波形記録（区間C）
（送信パルス：中心周波数 140MHz、帯域幅 280MHz）

v) 3次元位置推定結果

各区間で得られた反応（波形記録）を用い、これらの反応がどの方向から到来してきたかを把握するため、反射点の3次元位置推定手法^{4.2)}に基づく既存杭位置の解析を実施した。図4.2.10に、既存杭の推定位置（孔曲がりの補正結果後）を示す。図中の丸印は先述の波形記録における各反応に対応し、対象物の大きさを示すものではない。また、丸印のゆらぎは、調査孔周辺の不均質さによって生じる。

各反応の位置推定結果を表4.2.4にまとめた。表中の方向や調査孔からの離隔距離は、各反応におけるすべての位置情報を算術平均した値である。

表 4.2.4 位置推定結果一覧表

反応名	方向	調査孔からの 離隔距離 (m) 【東西方向】	調査孔からの 離隔距離 (m) 【南北方向】	図中 表示
反応①	N21° E	0.63	1.68	緑色丸印
反応②	N21° E	0.62	1.62	赤色丸印
反応③	N23° E	0.50	1.16	青色丸印
反応④	N147° E	2.10	-3.24	黒色丸印

方向の基準 (0°) は、真北とする。

第Ⅱ編

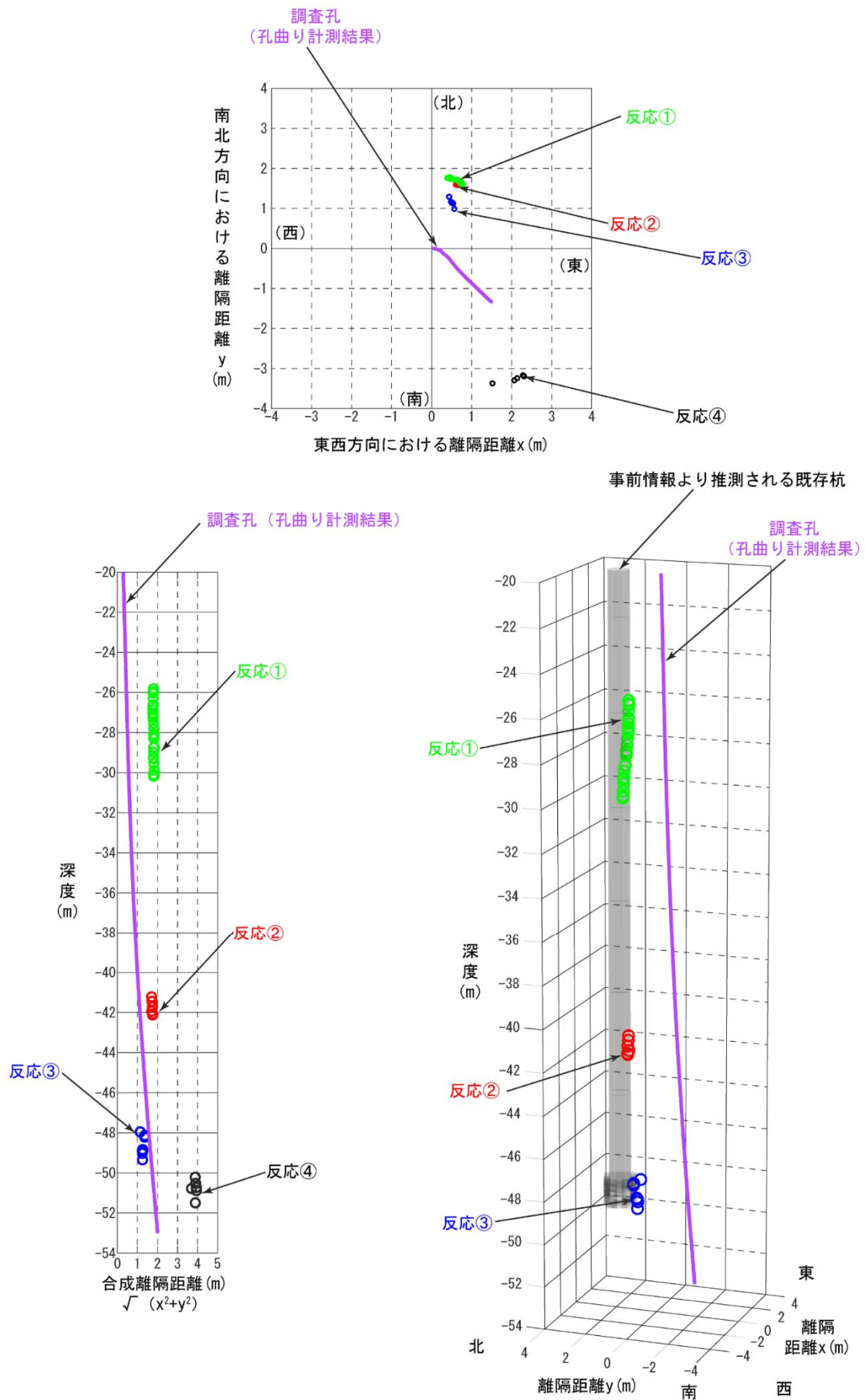


図 4.2.10 位置推定結果

図 4. 2. 10 に事前情報からの杭位置（軸部及び拡底部径）を重ねたものを図 4. 2. 11 に示す。

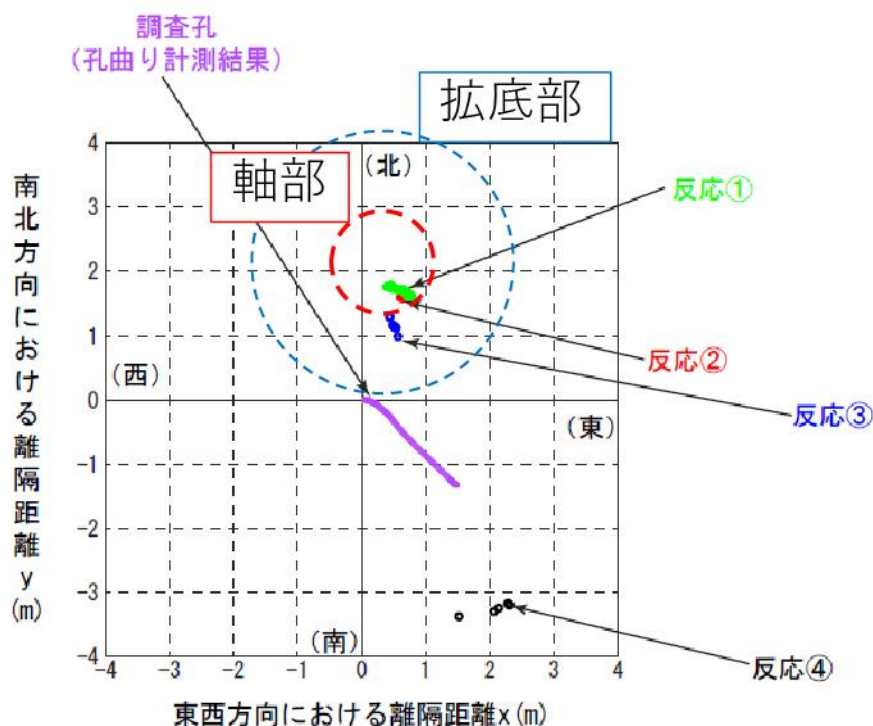


図 4. 2. 11 杭施工位置（事前情報）との重ね合わせ

4.3 まとめ

茨城県猿島郡境町の敷地内で、1本の調査孔より無指向性および指向性ボアホールレーダーの測定を実施し、以下の結果が得られた。

- ・ 無指向性と指向性ボアホールレーダーの両波形記録より、基礎杭と推測される反応（反射波）が複数の箇所に認められた。
- ・ 位置推定結果より、反応①、反応②および反応③はほぼ同様の方角（調査孔から真北から東に $21 \sim 23^\circ$ ）に推定され、想定される基礎杭の方向に対応した。
- ・ 反応④については、基礎杭が存在する方向と異なる方向を示した。
- ・ 離隔距離 $1.26 \sim 1.80 \text{m}$ の位置に、反応①は $\text{GL}-25.8 \sim -30.2 \text{m}$ 、反応②は $\text{GL}-41.2 \sim -42.1 \text{m}$ 、反応③は $\text{GL}-48.0 \sim -49.3 \text{m}$ にて連続的な分布を示した。

ボアホールレーダー探査により高い精度を有する既存杭の位置推定結果が得られた。また、シルトを含む地層内においても、反射波の振幅が微小ながら、有用な位置推定結果が得られた。ただし、既存杭の拡底部については、想定と異なる位置に反応があった。これは、コンクリートの厚みなどの要因のほか、孔曲がりがある既存杭から遠ざかる方向となったことなど、相対的な位置関係等の諸条件の影響が考えられる。

4.4 (付録) 無指向性ポアホールレーダーによるレーダープロフィール

4.4.1 距離換算

図 4.2.4 において、無指向性ポアホールレーダーの波形記録を時間—深度の 2 軸で表示している。この時間（到達時間）から離隔距離を換算するにあたり、送信アンテナと受信アンテナに一定の距離（送受信アンテナ間距離 $L=1.89\text{m}$ ）があることから、図 4. 付 1 に示す通り、土壌の比誘電率を用いた式を用いた。また、深度については、緑矢印位置に対応するよう、地表面下を基準にして表記した。

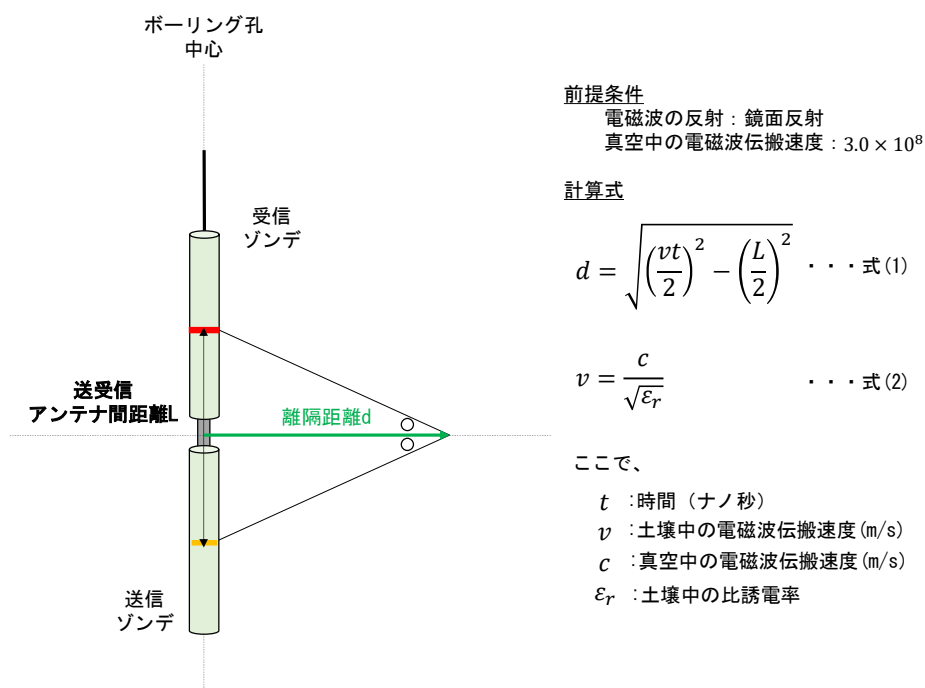


図 4. 付 1 距離換算の方法

4.4.2 カラー変換

得られた波形について、各記録中における振幅の強弱に合わせて、図 4. 付 2 に示す通りカラー変換を行う。なお、振幅が正の場合を赤色、負の場合を青色とする。

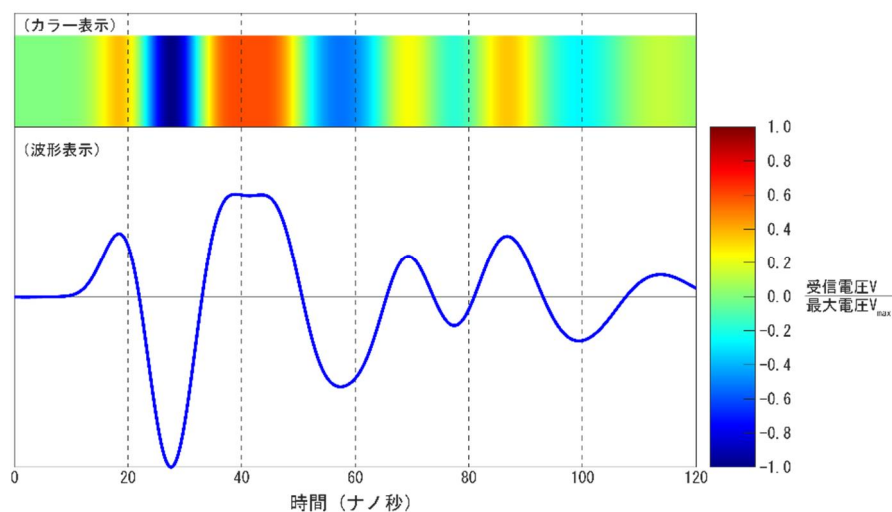


図 4. 付 2 カラー変換の方法

4. 4. 3 波形のカラー化に基づくレーダープロフィール

カラー化した波形を深さに応じて重ね書きしたもの（レーダープロフィール）を図4. 付3に示す。同図に基づき、基礎杭と思われる反応を抽出した。

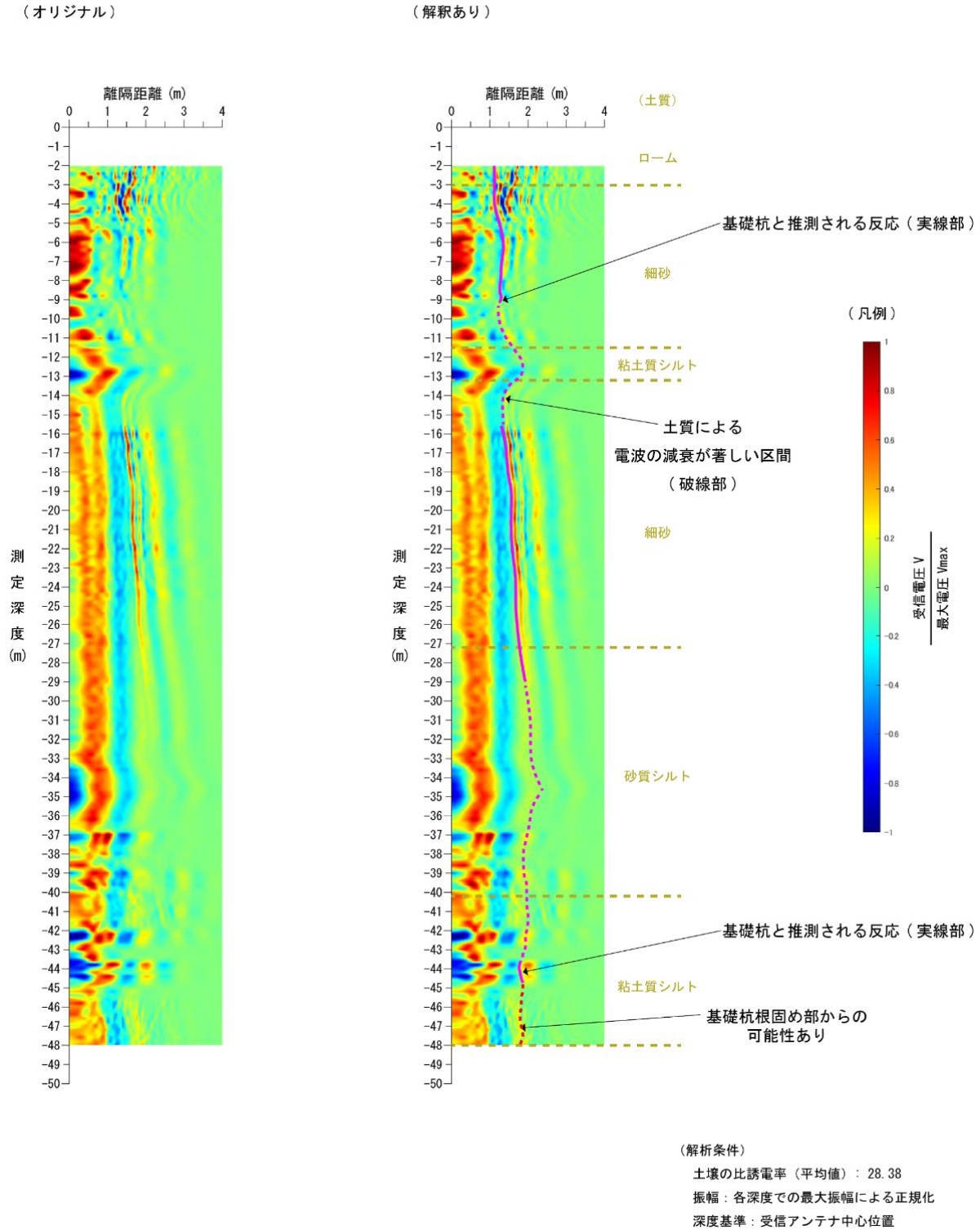


図4. 付3 無指向性ポアホールレーダーによるレーダープロフィール

第Ⅱ編

(参考文献)

- 4.1) 和田一成他 : 小口径3次元指向性ボアホールレーダシステム, 第130回物理探査学会学術講演会, pp.99-102, 2014
- 4.2) Ebihara et.al : Estimating 3-D Position and Inclination of a Planar Interface with Directional Borehole Radar, Near Surface Geophysics, vol.11, pp.185-195, 2013
- 4.3) 佐藤源之 : 物理探査ハンドブック, 第7章 地中レーダ, p.404, 物理探査学会編, 1998