

3 地中レーダー技術の調査

本検討会では、測定条件を変えた3種類の測定を郵政省告示第127号（昭和63年2月25日）（以下「告示第127号」という。）に則って実施した。

実験概要は表3-1のとおり。

表 3-1 実験概要

測定	測定方法	測定場所	概要	測定台数 (機種)
1 (3.1 電波暗室 での(告示第127 号)での電氣的 特性測定)	木の台の上に地 中レーダー機器 を置いた測定 (告示第127号 による測定)	電波暗室	被測定器は1.5mの高 さに設置する。	25 機種
2 (3.2 電波暗室 (ITU-R/FCC参 考)での電氣的 特性測定)	吸収体の上に地 中レーダー機器 を置いた測定 (被測定器の置 き方は ITU-R/FCC参考)	電波暗室	諸外国の標準化機関等 で推奨する地中レーダ ーの置き方を参考にし た測定。 80cm、60cmの高さの GPR装置の下に高さ 60cmの吸収体を置く。 (ITU-R SM.1754 1.5 項 (2006年)、FCC 02-48 245 (April 22, 2002年)を参考)	5 機種
3 (3.3 オープン サイト (ITU-R/FCC参 考)での電氣的 特性測定)	<参考測定> 砂の上に地中レ ーダー装置を置 いた測定(被測 定器の置き方は ITU-R/FCC参考+ アスファルト直 置き)	オープン サイト	諸外国の標準化機関等 で推奨する地中レーダ ーの置き方を参考にし た測定。 50cmの砂の上にGPR装 置を置く。(ITU-R SM.1754 1.5項 (2006年)、FCC 02-48 245 (April 22, 2002 年)を参考)	1 機種

3.1 電波暗室（告示第 127 号）での電気的特性測定

3.1.1 測定条件

(1) 測定に使用した機器

測定に使用した機器一覧は表 3-2 のとおり。

表 3-2 測定に使用した機器

品名	仕様等
Bi-log アンテナ	Bi log :Schwarzbeck VULB9160、周波数範囲:30MHz-2GHz
EMI レシーバー	KEYSIGHT N9038A、周波数範囲:20Hz-8.4GHz 内蔵プリアンプ (20dB)
外付けプリアンプ (50dB) ※必要に応じて使用	STACK Electronics EV892 TYP Gain:50dB 周波数範囲:30MHz-6GHz NF:30MHz-100MHz:7.5dB 以下@+25°C 100MHz-6GHz:5.0dB 以下@+25°C
ホーンアンテナ	Schwarzbeck BBHA9120E、周波数範囲:1-6GHz

(2) 測定構成図

測定構成図は図 3-1、図 3-2 のとおり。30MHz を超えて 1GHz 以下の測定は電波暗室の外の測定室で実施し、1GHz を超える周波数は電波暗室内で測定した。

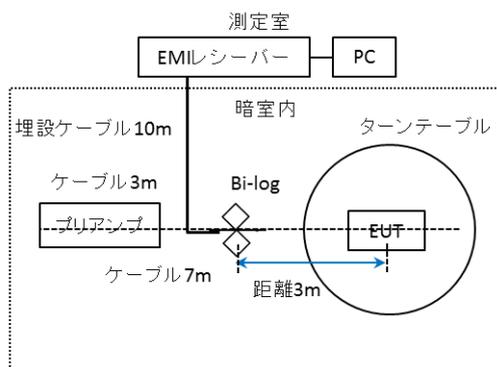


図 3-1 30MHz を超えて 1GHz 以下の測定構成図

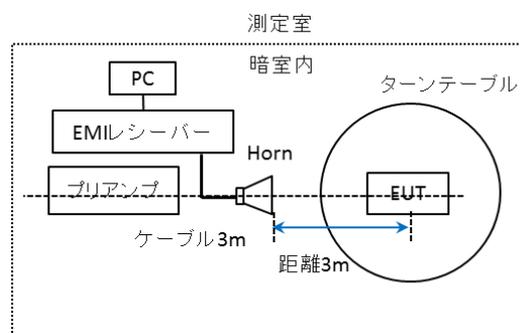


図 3-2 1GHz を超える周波数の測定構成図

(3) 測定した機器

測定した機器は表 3-3 のとおりで、合計 25 機種となる。

表 3-3 測定機器一覧

地中レーダー機器 提供事業者等	装置	
	機器名 (又は製品名)	アンテナ種別又は 使用周波数帯
国立大学法人東北大学 (MALA Geoscience)	RAMAC	100MHz
		250MHz
		500MHz
		800MHz
日本無線 (株)	ハンディサーチ/NJJ-105	1300MHz 帯
	ハンディサーチ/NJJ-200	2200MHz 帯
応用地質 (株) GSSI (Geophysical Survey Systems, Inc)	SIR-4000	400MHz
		900MHz
		1.6GHz
		2.0GHz パーム
	ユーティリティスキャン	DF アンテナ 300/800MHz 帯 350HS アンテナ
日本ヒルティ (株)	Hilti PS 1000	1GHz~4.3GHz 帯
ボッシュ (株)	D-TECT150CNT	1.8GHz~4GHz 帯
(株) パスコ	IDS Stream-X	200MHz 帯
	IDS Hi-Mod	200MHz/600MHz 帯
	IDS RIS Hi-BligHT	2GHz 帯
(株) 光電製作所	GPR-10C	350MHz 帯
日本信号 (株)	グランドシア GN-01 (モード 2 種類)	50~800MHz 帯
	グランドシア GN-02	70~850MHz 帯
三井造船 (株)	MPLA-245A	24 素子アレイアンテナ
	路面下空洞調査用 「地中レーダー」	1.5GHz 帯
(株) RS ダイナミックス・ジ ヤパン	MinPod	200MHz~4GHz 帯
(株) ジオファイブ	3d-Radar	200MHz~3GHz 帯

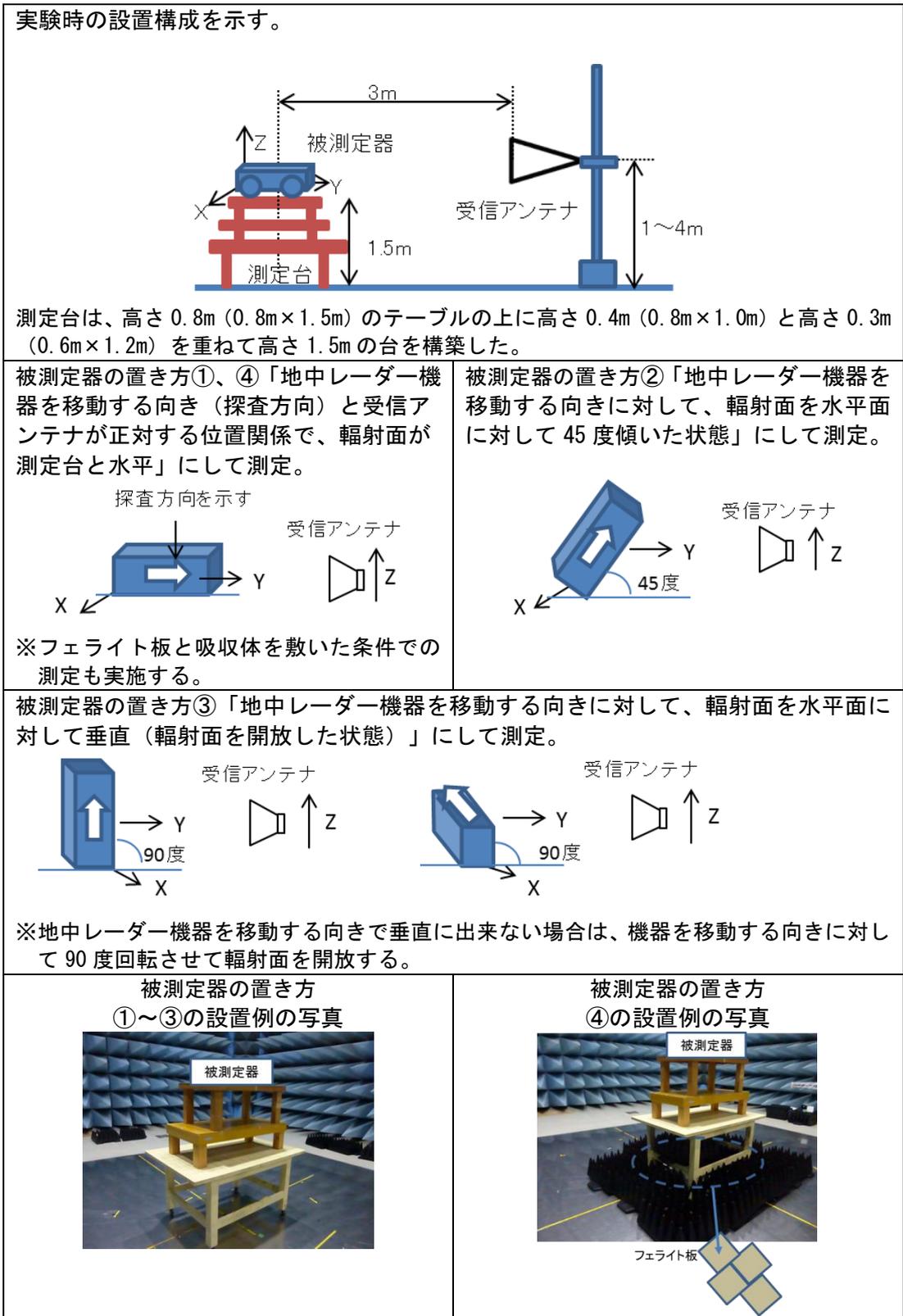
(註) 表中は 24 機種だが、日本信号 (株) グランドシア GN-01 の利用周波数帯域を切替
るモード 2 種類もそれぞれ 1 機種としてカウントしたので 25 機種となる。

3.1.2 設置方法

被測定器の形状は様々なため、実際の測定では以下の点に注意して測定を進めた。

- 被測定器の設置は、「通常利用時の状態（水平）」、「通常利用時（吸収体有）」、「一部が浮いた状態（輻射面を水平に対して45度傾けた場合）」、「輻射面を開放した状態（輻射面を垂直にした場合）」の4つの測定形態の状態とする。ターンテーブルを回す都合上、物理的形状等の制約により固定できない場合は人手で押さえる等とするが、それでも落下する危険性がある場合は測定を実施しないこととした。
- 告示第127号のマージンが確保できない場合、被測定器と受信アンテナの距離を近づけて測定した。測定値は距離3mにおける電界強度に補正した。
- フェライト板及び吸収体の設置について
「通常利用時（吸収体有）」は、金属板からの電波の反射を抑えるのが目的なので、被測定器の真下の床面に、フェライト板4枚（約60cm×60cm）を十字型に置き、その上に吸収体を一番下の机を囲む広さで置いた。およそ、幅2.4m、奥行き1.8mの大きさとなる。

また、地中レーダー機器の探査方向を正対0°方向として基準とした。図3-3に測定形態毎に測定方法をまとめた。



測定に使用した吸収体の特性を以下に示す。

(株)リケン環境システム

PFP-30 W600×D600×H300mm 2.3kg/個

斜入射減衰特性 500MHz～3GHz : 20～30dB、 3GHz～10GHz : 30～50dB

(ポリプロピレンにカーボンを混練し発泡形成した電波吸収体)

使用する吸収体の写真と特性図は図 3-4、図 3-5 のとおり。



図 3-4 吸収体の写真

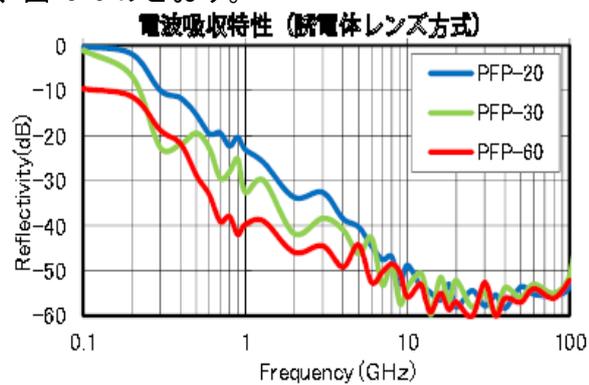


図 3-5 吸収体の特性図

3.1.3 測定結果

(1) 測定データの計算方法

参考資料3に則り最大となる電界強度値を計算した。測定結果は表 3-4 にカートタイプ、表 3-5 にハンディタイプ、表 3-6 に車載・牽引タイプと類型化して示す。

上記、告示第 127 号の測定方法から計算した値であり、30MHz を超え 1GHz 以下の周波数と 1GHz を超える周波数に別けて記載した。

尚、カートタイプ1台は 1.5m の高さに設置できなかったため参考測定とし、結果に記載していない。

表 3-4 電波暗室での測定結果（カートタイプ）

区分	機種	上段：電界強度 (dB μ V/m)				下段：周波数 (MHz)			
		通常利用時 (水平)		通常利用時 (吸収体有)		輻射面を水平面に対し 45 度		輻射面を開放	
		30MHz を超え 1GHz 以下の周波数	1GHz を超える周波数	30MHz を超え 1GHz 以下の周波数	1GHz を超える周波数	30MHz を超え 1GHz 以下の周波数	1GHz を超える周波数	30MHz を超え 1GHz 以下の周波数	1GHz を超える周波数
カートタイプ	A	61.9	41.4	62.1	42.6	—	—	—	—
		354.0	2383.5	324.7	2391.0	—	—	—	—
	B	72.8	46.9	75.0	43.5	—	—	—	—
		322.0	1300.0	322.0	1364.0	—	—	—	—
	C	62.8	47.1	62.3	45.8	67.8	48.4	66.8	48.7
		322.1	1181.5	322.0	1181.0	338.3	1135.5	340.1	1084.0
	D	56.1	51.3	53.9	47.5	57.1	48.4	53.0	48.7
		844.1	1114.0	854.4	1203.5	669.8	1135.5	328.0	1084.0
	E	57.7	41.5	57.2	41.8	—	—	—	—
		322.1	1596.0	322.2	1196.5	—	—	—	—
	F	60.5	47.8	59.5	48.8	63.1	50.7	69.6	51.8
		399.6	1019.0	382.3	1034.5	380.6	1000.0	351.2	1001.0
	G	61.8	56.8	73.9	61.3	65.4	59.8	65.3	63.1
		436.9	1036.0	351.9	1019.5	370.1	1019.0	362.9	1019.0
	H	74.4	61.4	52.5	45.3	76.1	62.6	75.8	65.7
		399.0	1069.5	720.0	1232.0	358.3	1000.0	322.5	1001.5
	I	53.4	46.8	41.5	45.5	57.0	43.4	57.1	44.5
		676.7	1234.5	775.3	1600.5	644.4	1601.0	594.4	1110.5
	J	23.7	38.4	17.6	38.4	26.2	38.0	—	—
		399.2	3999.5	327.0	3999.5	398.6	4000.0	—	—
K	24.3	38.4	24.0	37.5	27.0	38.0	—	—	
	399.2	4000.0	398.9	3999.5	398.4	1000.0	—	—	
L	42.4	38.6	40.3	39.6	42.8	37.2	42.4	42.9	
	432.2	1000.5	395.3	1000.5	338.3	1700.0	459.6	1000.5	
M	42.2	43.2	39.0	42.6	41.5	44.6	43.3	46.1	
	804.8	1475.5	345.2	1632.5	788.6	1601.0	741.1	1600.0	
N	36.1	42.4	57.2	41.8	37.2	43.7	38.2	42.5	
	412.7	1630.0	322.2	1196.5	627.9	1633.0	627.3	1925.5	

表 3-5 電波暗室での測定結果（ハンディタイプ）

区分	機種	上段：電界強度 (dB μ V/m) 下段：周波数(MHz)							
		通常利用時（水平）		通常利用時（吸収体有）		輻射面を水平面に 対し 45 度		輻射面を開放	
		30MHz を 超え 1GHz 以下の 周波数	1GHz を超える 周波数	30MHz を 超え 1GHz 以下の 周波数	1GHz を超える 周波数	30MHz を 超え 1GHz 以下の 周波数	1GHz を超える 周波数	30MHz を 超え 1GHz 以下の 周波数	1GHz を超える 周波数
ハンディタイプ	O	37.3	40.0	36.4	40.9	39.0	40.7	39.0	42.4
		328.6	1980.0	328.0	1977.5	421.2	1388.5	437.0	1493.0
	P	40.2	42.6	40.2	41.9	41.0	40.1	41.6	44.1
		737.1	1912.0	806.7	2083.5	761.8	2872.0	431.6	3387.5
	Q	24.6	40.0	26.5	36.3	22.2	37.2	27.0	38.6
		399.6	3200.0	399.4	3200.0	349.3	3199.5	399.3	3401.5
	R	28.5	35.3	27.1	34.5	28.8	38.3	29.4	38.2
		373.9	3599.5	398.7	3799.5	423.8	2699.5	398.6	2699.5
	S	63.2	95.0	64.6	93.6	62.0	98.1	61.8	99.5
		830.7	1559.5	796.6	2360.0	937.7	1907.0	938.5	3558.5

表 3-6 電波暗室での測定結果（車載・牽引タイプ）

区分	機種	上段：電界強度 (dB μ V/m) 下段：周波数(MHz)							
		通常利用時（水平）		通常利用時（吸収体有）		輻射面を水平面に 対し 45 度		輻射面を開放	
		30MHz を 超え 1GHz 以下の 周波数	1GHz を超える 周波数	30MHz を 超え 1GHz 以下の 周波数	1GHz を超える 周波数	30MHz を 超え 1GHz 以下の 周波数	1GHz を超える 周波数	30MHz を 超え 1GHz 以下の 周波数	1GHz を超える 周波数
車載 牽引タイプ	T	37.9	49.1	37.9	47.4	38.8	49.1	38.4	49.5
		359.7	1657.5	360.0	1611.0	359.6	1400.5	359.8	1242.5
	U	60.3	67.7	59.3	66.5	61.2	70.3	62.4	74.1
		414.9	1519.0	393.4	1521.0	412.9	1743.5	336.7	1578.0
	V	61.1	64.0	61.7	63.1	60.1	62.3	—	—
		359.6	1069.0	338.7	1000.0	351.5	1582.5	—	—
	W	57.5	66.2	56.7	65.6	61.3	64.1	63.6	66.5
		937.4	2187.5	937.6	2188.0	624.7	3124.5	625.2	2499.5
	X	86.7	88.3	85.7	88.3	—	—	—	—
		402.0	2498.0	322.0	1450.0	—	—	—	—

(2) 最大電界強度値について

告示第 127 号の測定では、1.5m の高さから電波を放射するが、被測定器が下向きの場合には床面が金属板となっている。そのため、反射波と直接波を受信するので大きな電界強度値となっていると思われる。床面にフェライト板と吸収体を置いた場合は、機種によっては大きくなったり、小さくなったりするので機種に依存性があるものと思われる。同じように、輻射面を傾けたり、開放した時の電界強度値は大きくなる傾向が見られるが、機種によりバラツキがある傾向となった。

(3) 区分による傾向の整理

地中レーダー機器の形状からカートタイプ・ハンディタイプ・車載/牽引タイプに区分し、傾向を整理した。区分による傾向は表 3-7 のとおり。

- カートタイプは 15 機種※あり、電界強度値は若干大きい傾向にある。
- ハンディタイプは 5 機種あり、一般的に電界強度値が小さい傾向にある。その中でも、片手で持てる小型機器は電界強度値が小さい傾向であった。
- 車載/牽引タイプは 5 機種あり、電界強度値は大きい傾向にある。これらのタイプは横幅が比較的大きな形状をしているので、アンテナ中心から 3m で測定しているが、実際よりも測定距離が近い為と想定される。

これらのことより、

- ・ 装置の大きさ（部分探査や広域探査といった目的の違い）
- ・ 用途（探査深度や分解能の違い）

により電界強度値の差が現れたと推察される。

表 3-7 区分による傾向の整理

区分	電界強度値	備考
カートタイプ	△	11 機種
	○	3 機種
	□	(参考測定)
ハンディタイプ	○	4 機種
	□	1 機種
車載/牽引タイプ	△	4 機種
	□	1 機種

- ：電界強度値が小さい傾向にある。
- △：電界強度値が若干大きい傾向にある。
- ：電界強度値が大きい傾向にある。

※1 機種は参考測定（1.5m の台に載せられなかった為）、利用周波数帯域切替機器も 1 機種としてカウントしているので合計 25 機種

(4) 利用形態による傾向の整理

実際に地中レーダー機器を使用する状態を想定して測定した結果を、それぞれ利用形態により分類し、傾向を整理した。これらのデータは表 3-8、表 3-9、表 3-10 に示す。利用形態は以下の 4 形態である。放射面が下を向いたとき、斜面等で放射面が浮いたときの電力の関係を予想した。

- ・ 通常利用時（水平）
- ・ 通常利用時（吸収体有）
- ・ 輻射面を水平面に対し 45 度
- ・ 輻射面を開放（垂直）

個々の機種を上記 4 形態毎に電界強度の大きさを比較したが、機種ごとにバラツキがあり、以下の関係になると予想したが必ずしも予想した関係にならなかった。

通常利用時（水平）>通常利用時（吸収体有）

通常利用時（水平）<輻射面を水平面に対し 45 度<輻射面を開放（垂直）

これは、機種による依存性があるものと推察される。

区分毎にまとめ、利用形態毎に電界強度の変化を全体の平均/最小値/最大値としてまとめると、ほぼ、電界強度の値は予想通りの関係となった。

通常利用時（水平）と比較して、

- カートタイプは、
吸収体有で 6dB の電界強度低下、
輻射面を水平面に対し 45 度傾けることにより 5dB の電界強度増加、
輻射面を開放することで 9dB の電界強度増加が見られた。
- ハンディタイプは、
吸収体有で 3.7dB の電界強度の低下、
輻射面を水平面に対し 45 度傾けることにより 3.1dB の電界強度の増加、
輻射面を開放することで 4.5dB の電界強度の増加が見られた。(注:1GHz 以上の帯域)
- 車載/牽引タイプは、
吸収体有で 1.7dB の電界強度低下、
輻射面を水平面に対し 45 度傾けることにより 3.8dB の電界強度増加、
輻射面を開放することで 6.4dB の電界強度増加が見られた。

この事から、吸収体があることにより電界強度値は小さくなる傾向にあり、輻射面が 45 度、90 度と傾くことにより放射電力が大きくなる傾向にあることが確認できた。

本測定値は告示第 127 号で求めた最大値（水平偏波及び垂直偏波のいずれか大きい値）と比較している。その為、上記減算は最大値からの差となるので偏波面は考慮されていない。また、最大値となる周波数は測定形態により異なるので同じ周波数で比較していない。単純に告示第 127 号で求めた測定形態毎の最大値を減算した値である。

表 3-8 カートタイプの利用形態の傾向

区分	機種	通常利用時と通常利用時（吸収体有）の比較		通常利用時と輻射面を45度の比較		通常利用時と輻射面を開放の比較		輻射面を45度と輻射面を開放の比較	
		通常利用時（吸収体有）－通常利用時の値 (dB)		輻射面を45度－通常利用時の値 (dB)		輻射面を開放－通常利用時の値 (dB)		輻射面を開放－輻射面を45度の値 (dB)	
		30MHz を超え1GHz 以下の周波数	1GHz を超える周波数	30MHz を超え1GHz 以下の周波数	1GHz を超える周波数	30MHz を超え1GHz 以下の周波数	1GHz を超える周波数	30MHz を超え1GHz 以下の周波数	1GHz を超える周波数
カートタイプ	A	0.2	1.2	—	—	—	—	—	—
	B	2.2	-3.4	—	—	—	—	—	—
	C	-0.4	-1.3	5.1	1.3	4.0	1.6	-1.0	0.3
	D	-2.1	-3.8	1.0	-2.9	-3.1	-2.6	-4.1	0.3
	E	-1.0	1.0	2.6	2.9	9.1	4.0	6.5	1.1
	F	-0.5	0.9	3.6	3.0	3.5	6.3	-0.1	3.3
	G	-0.5	-0.1	1.7	1.2	1.4	4.3	-0.3	3.1
	H	-0.9	-1.5	3.6	-3.4	3.7	-2.3	0.0	1.1
	I	-0.8	2.3	-0.7	1.4	1.1	2.9	1.8	1.5
	J	2.9	0.2	1.2	1.3	2.1	0.1	0.9	-1.2
	K	-0.5	0.3	—	—	—	—	—	—
	L	-6.1	0.0	2.5	-0.4	—	—	—	—
	M	-0.3	-0.9	2.7	-0.4	—	—	—	—
	N	-2.1	1.0	0.3	-1.4	0.0	4.3	-0.3	5.7
平均値	-0.29	0.00	2.43	0.68	3.67	2.94	1.33	2.16	
最小値	①-6.1	-3.8	-0.7	-3.4	-3.1	-2.6	-4.1	-1.2	
最大値	2.9	2.3	②5.1	3.0	③9.1	6.3	6.5	5.7	

※：マイナスの数値は電界強度の低下を示す。

カートタイプは1GHz以下が主に使用されている。1GHz以下で見ると通常利用時（吸収体有）は、①最小値を比較すると吸収体有は最大で6dBの大きな減衰効果が見られる。②輻射面を45度の場合には通常利用時よりも最大5dB電界強度値が大きくなる傾向が見られた。③輻射面を開放した場合は通常利用時よりも最大9dB電界強度値が大きくなる傾向が見られた。

表 3-9 ハンディタイプの利用形態の傾向

区分	機種	通常利用時と通常利用時（吸収体有）の比較		通常利用時と輻射面を45度の比較		通常利用時と輻射面を開放の比較		輻射面を45度と輻射面を開放の比較	
		通常利用時（吸収体有）－通常利用時の値 (dB)		輻射面を45度－通常利用時の値 (dB)		輻射面を開放－通常利用時の値 (dB)		輻射面を開放－輻射面を45度の値 (dB)	
		30MHz を超え 1GHz 以下の周波数	1GHz を超える周波数	30MHz を超え 1GHz 以下の周波数	1GHz を超える周波数	30MHz を超え 1GHz 以下の周波数	1GHz を超える周波数	30MHz を超え 1GHz 以下の周波数	1GHz を超える周波数
ハンディタイプ	O	-0.9	0.9	1.7	0.7	1.6	2.4	0.0	1.7
	P	0.0	-0.7	0.8	-2.5	1.4	1.5	0.7	4.0
	Q	1.9	-3.7	-2.3	-2.8	2.5	-1.4	4.8	1.4
	R	-1.4	-0.8	0.2	3.0	0.8	2.9	0.6	-0.1
	S	1.4	-1.4	-1.2	3.1	-1.4	4.5	-0.2	1.4
平均値	0.38	-0.90	0.05	1.00	1.17	2.38	1.62	1.89	
最小値	-1.4	①-3.7	-2.3	-2.8	-1.4	-1.4	-0.2	-0.1	
最大値	1.9	0.9	1.7	②3.1	2.5	③4.5	4.8	4.0	

※：マイナスの数値は電界強度の低下を示す。

ハンディタイプは1GHz以上が主に使用されている。1GHzを超える周波数で見ると、①吸収体による電界強度値は3.7dBの大きな減衰効果が見られる。②輻射面を45度の場合には通常利用時よりも最大3.1dB電界強度値が大きくなる傾向が見られた。③輻射面を開放した場合は通常利用時よりも最大4.5dB電界強度値が大きくなる傾向が見られた。

30MHzを超え1GHz以下の周波数は制御装置の漏えい電力と推察される機種もあった。

表 3-10 車載/牽引タイプの利用形態の傾向

区分	機種	通常利用時と通常利用時(吸収体有)の比較		通常利用時と輻射面を45度の比較		通常利用時と輻射面を開放の比較		輻射面を45度と輻射面を開放の比較	
		通常利用時(吸収体有) - 通常利用時の値(dB)		輻射面を45度 - 通常利用時の値(dB)		輻射面を開放 - 通常利用時の値(dB)		輻射面を開放 - 輻射面を45度の値(dB)	
		30MHzを超え1GHz以下の周波数	1GHzを超える周波数	30MHzを超え1GHz以下の周波数	1GHzを超える周波数	30MHzを超え1GHz以下の周波数	1GHzを超える周波数	30MHzを超え1GHz以下の周波数	1GHzを超える周波数
車載/牽引タイプ	T	0.0	-1.7	0.9	0.0	0.5	0.4	-0.3	0.4
	U	-1.0	-1.2	0.9	2.6	2.1	6.4	1.2	3.8
	V	0.6	-0.9	-1.0	-1.7	-	-	-	-
	W	-0.8	-0.6	3.8	-2.1	6.1	0.3	2.3	2.4
	X	-1.0	0.0	-	-	-	-	-	-
平均値	-0.40	-0.84	1.50	0.12	3.59	3.38	1.21	2.42	
最小値	-1.0	①-1.7	-1.0	-2.1	0.5	0.3	-0.3	0.4	
最大値	0.6	0.0	②3.8	2.6	6.1	③6.4	2.3	3.8	

※：マイナスの数値は電界強度の低下を示す。

車載/牽引タイプは、変化量が少ない。①吸収体による電界強度値は1GHzを超える周波数が1.7dBの減衰効果が見られる。②輻射面を45度の場合には通常利用時よりも最大3.8dB電界強度値が大きくなる傾向が見られた。③輻射面を開放した場合は通常利用時よりも最大6.4dB電界強度値が大きくなる傾向が見られた。

3.1.4 まとめ

測定時に以下の不確定要素が見込まれ、測定結果にレベルの変動が含まれると思われる。

- ① 大地面の反射の影響
電界強度値が小さいので、被測定器と受信アンテナの距離を 1.5m に近づけた場合があり、3m に距離換算しているが、大地面の反射により測定値がさらに 3dB 大きい可能性がある。
- ② 木製の測定台の影響
被測定器が重量物（最大 100kg）で大きい（長さ 180cm）装置もあるので、発泡スチロールの台では壊れる可能性があるので木製の台を 3 台に積んで高さ 1.5m のテーブルを構成した。この上に被測定機器を載せたが、広帯域のシステムのため木の干渉によるディップや共振が発生した。
- ③ アンテナ形状の影響
被測定器の中心から受信アンテナまでの距離を 3m としているが、長尺な機器（例えば、牽引タイプ：幅 180cm、車載タイプ：幅 76cm、カートタイプ：幅 125cm）においては、被測定器が大きい為より近い距離で測定した可能性がある。
- ④ 人体による影響
電波を発射するため、被測定器の車輪を人手で回す等の作業員が補助することによる影響がある可能性がある。
- ⑤ 制御装置の影響
電波を発射するため、制御装置に接続する必要があり、制御装置の漏えい電力による干渉等の副次発射の影響がある可能性がある。
- ⑥ 距離補正
被測定器と受信アンテナの距離 1.5m で測定した場合は 6dB の補正を行った。

上記不確定要素を考慮しても、輻射面を下向きにして 1.5m 高で測定することは、電界強度値が大きくなる傾向が見られることと、輻射面が傾いたり開放した利用をするとさらに強い電波が空間に発射される可能性が高いことが確認できた。

3.2 電波暗室（ITU-R/FCC 参考）での電气的特性測定

告示第 127 号の測定方法を参考に、被測定器の置き方を諸外国の標準化機関等で推奨する地中レーダー機器の置き方で電界強度を測定した。

- (1) ITU-R SM.1754 1.5 項 (2006 年) を参考にする。
80cm の高さの GPR 装置の下に高さ 60cm 以上の吸収体を置く。吸収体で固体ブロックを構成する為に、他の吸収体の上に逆さに置いても良い。
- (2) FCC 02-48 245 (April 22, 2002) を参考にする。
接地平面に RF 吸収性材料の使用が出来る。この吸収性材料を使った場合、4.7dB を測定結果に加える。

3.2.1 測定条件

- (1) 測定に使用した機器
測定に使用した機器一覧は表 3-11 のとおり。

表 3-11 測定に使用した機器

品名	仕様等
Bi-log アンテナ	Bi log :Schwarzbeck VULB9160、周波数範囲:30MHz-2GHz
EMI レシーバー	KEYSIGHT N9038A 、周波数範囲:20Hz-8.4GHz 内蔵プリアンプ (20dB)
外付けプリアンプ (50dB) ※必要に応じて使用	STACK Electronics EV892 TYP Gain:50dB 周波数範囲 : 30MHz-6GHz NF : 30MHz-100MHz : 7.5dB 以下@+25°C 100MHz-6GHz : 5.0dB 以下@+25°C
ホーンアンテナ	Schwarzbeck BBHA9120E、周波数範囲 : 1-6GHz

(2) 測定構成図

測定構成図は図 3-6 のとおり。30MHz を超えて 1GHz 以下の測定は電波暗室の外の測定室で実施し、1GHz を超える周波数は電波暗室内で測定した。

機器の設置は金属のターンテーブルの上ではなく、フリーアクセス上を測定点とした。

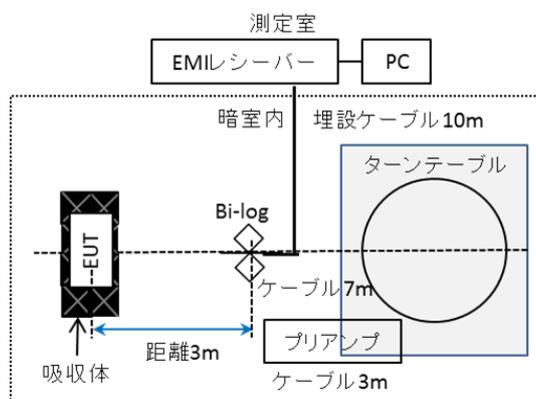


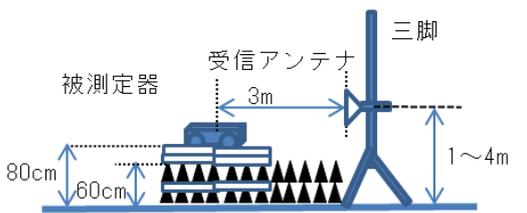
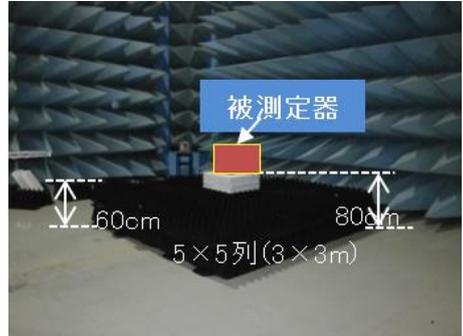
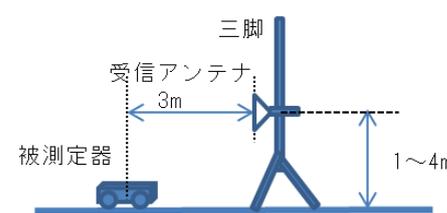
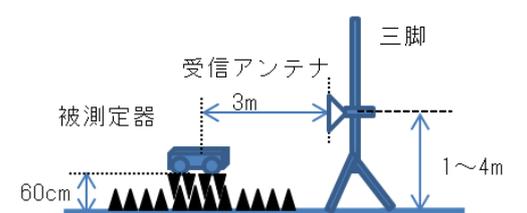
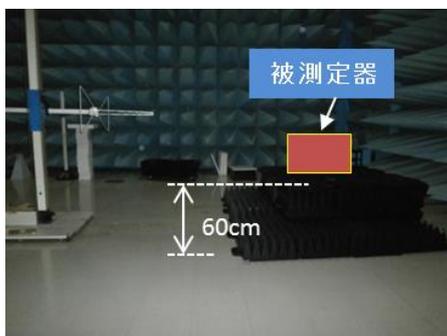
図 3-6 測定構成図

3.2.2 設置方法

被測定器の設置例を以下に示す。

被測定器の下に吸収体を置いた例は図 3-7、図 3-8 のとおり、被測定器を直置きにした例は図 3-9、図 3-10 のとおり、吸収体を噛み合わせた場合の例は図 3-11、図 3-12 のとおり。

また、ホーンアンテナを用いる場合は、アンテナをチルトさせて被測定器側に向けて測定をしている。

<p>①被測定器の真下に吸収体 (h=60cm) を置き、被測定器の高さを 80cm、60cm にする。</p>	<p>②被測定器を床面に直置きとする。</p>
 <p>図 3-7 吸収体の上に被測定器</p> <p>※①a は被測定器の高さ 80cm①b は被測定器の高さ 60cm。保護用発泡スチロールを使い高さを調整した。吸収体は、地中レーダー機器からの床面反射を抑える広さに適時置いた。</p>  <p>図 3-8 吸収体の上に被測定器を置いた例</p>	 <p>図 3-9 被測定器直置き</p> <p>※床面下は金属が敷かれている</p>  <p>図 3-10 被測定器直置きの例</p>
<p>③吸収体を噛み合わせて置き、被測定器の高さを 60cm にする。</p>	
 <p>図 3-11 噛み合わせた吸収体の上に被測定器</p> <p>※吸収体を噛み合わせて置く。他の部分は床面反射を抑える広さに適時置いた。</p>	 <p>図 3-12 噛み合わせた吸収体の上に被測定器を置いた例</p>

3.2.3 測定結果

測定結果を以下に示す。

(1) 機種 A

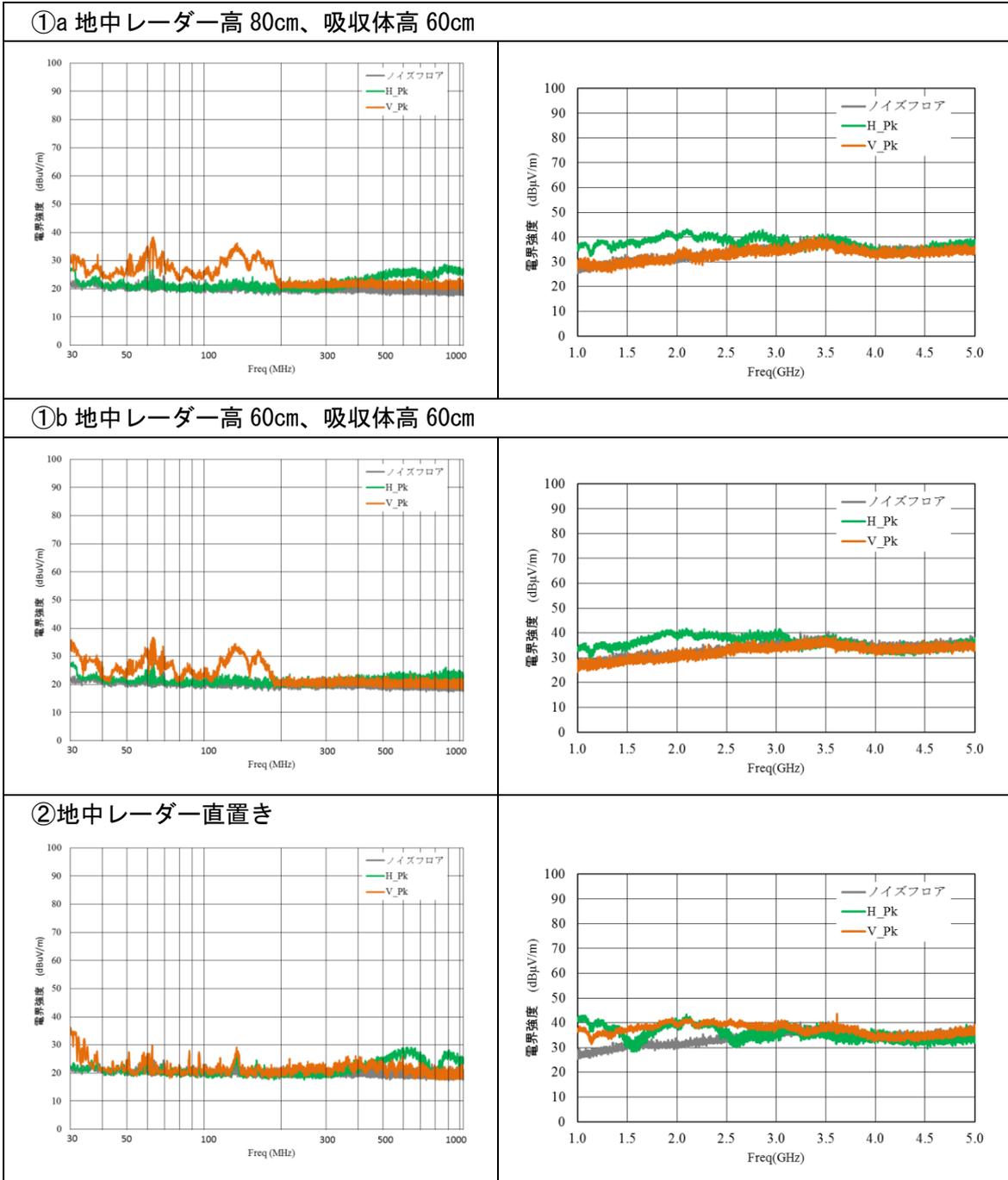


図 3-13 機種 A の測定結果その 1

③吸収体を噛み合わせた場合
 地中レーダー高 60cm、吸収体高 60cm

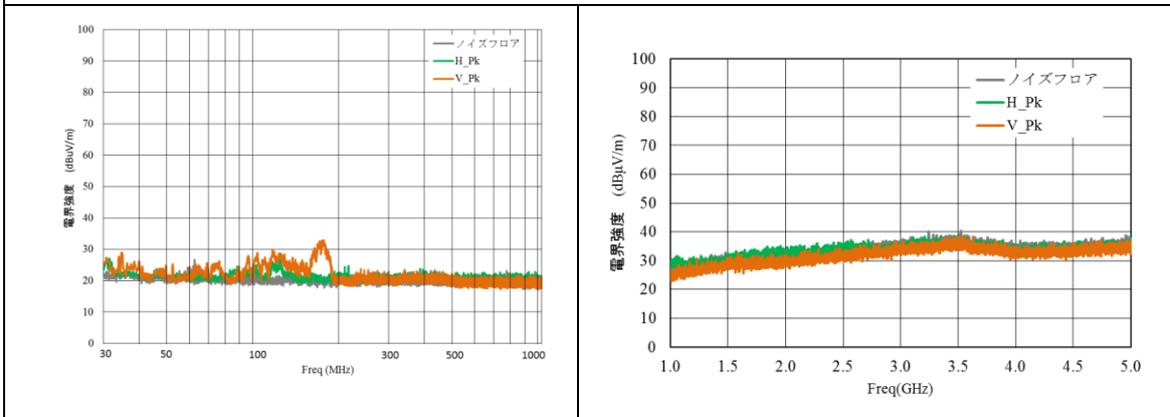


図 3-14 機種 A の測定結果その 2

①a、①b、②の 30MHz を超え 1GHz 以下の電界強度値は十分に低い傾向にあるが、1GHz を超える周波数帯では若干高い電界強度値となる傾向にある。③の吸収体を噛み合わせて固体ブロックで構成した場合は、いずれも十分低い電界強度値となる傾向がある。特に、1GHz を超える周波数帯は、ほぼノイズレベルとなった。

(2) 機種B ※制御装置との通信に2.4GHz帯無線LAN使用

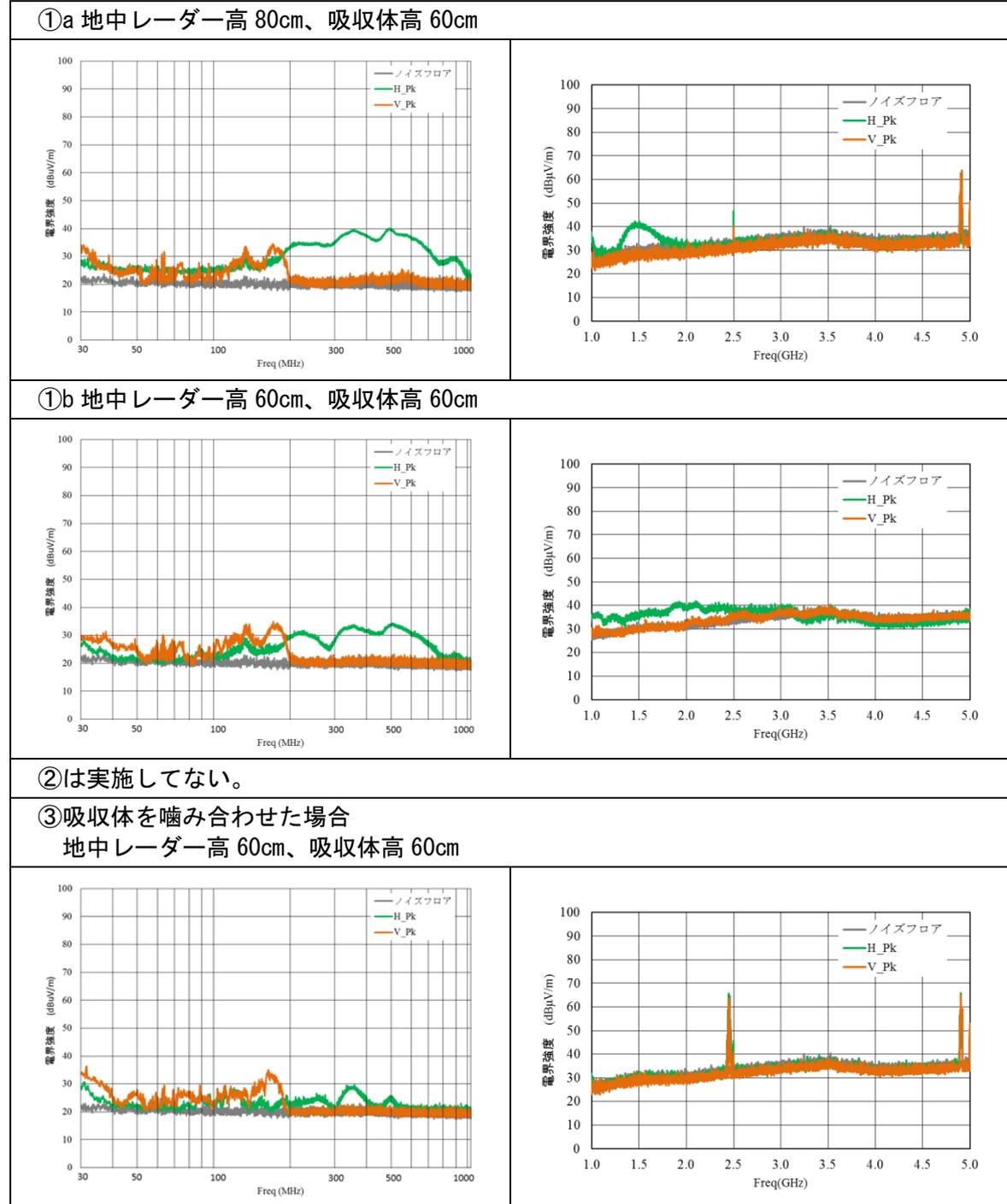
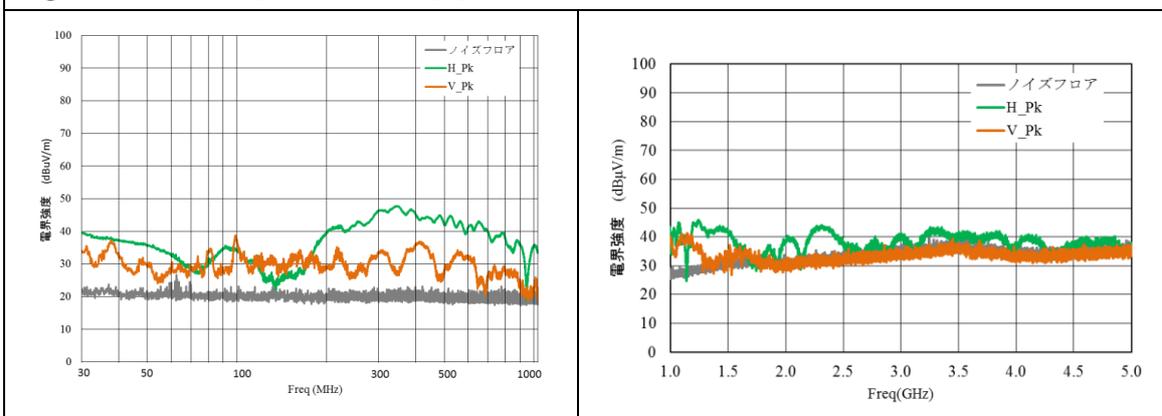


図 3-15 機種Bの測定結果

①a、①b、②はいずれも電界強度値が若干高い傾向であるが、③の吸収体を噛み合わせて固体ブロックで構成した場合は、いずれも十分低い電界強度値となる傾向がある。特に、1GHzを超える周波数帯は、ほぼノイズレベルとなった。

(3) 機種C

①a 地中レーダー高 80cm、吸収体高 60cm



①b、②は実施していない。

③吸収体を噛み合わせた場合
地中レーダー高 60cm、吸収体高 60cm

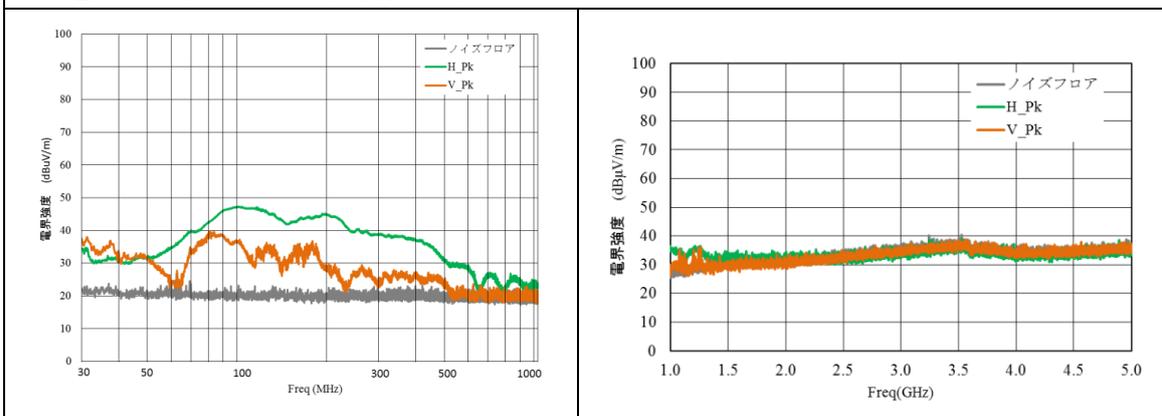
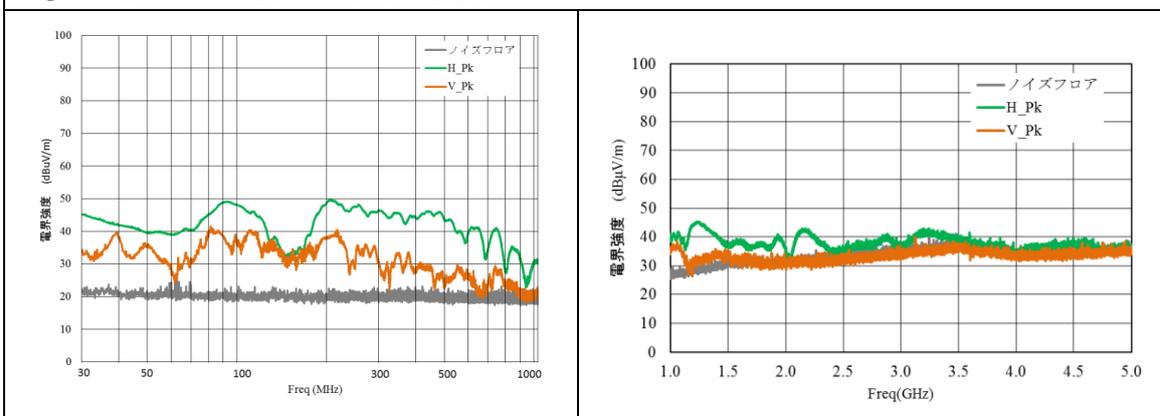


図 3-16 機種Cの測定結果

①a はいずれも若干高い電界強度値となる傾向にある。③の吸収体を噛み合わせて固体ブロックで構成した場合は、十分低い電界強度値となる傾向がある。特に、1GHz を超える周波数帯は、ほぼノイズレベルとなった。

(4) 機種D

①a 地中レーダー高 80cm、吸収体高 60cm



①b、②は実施していない。

③吸収体を噛み合わせた場合
地中レーダー高 60cm、吸収体高 60cm

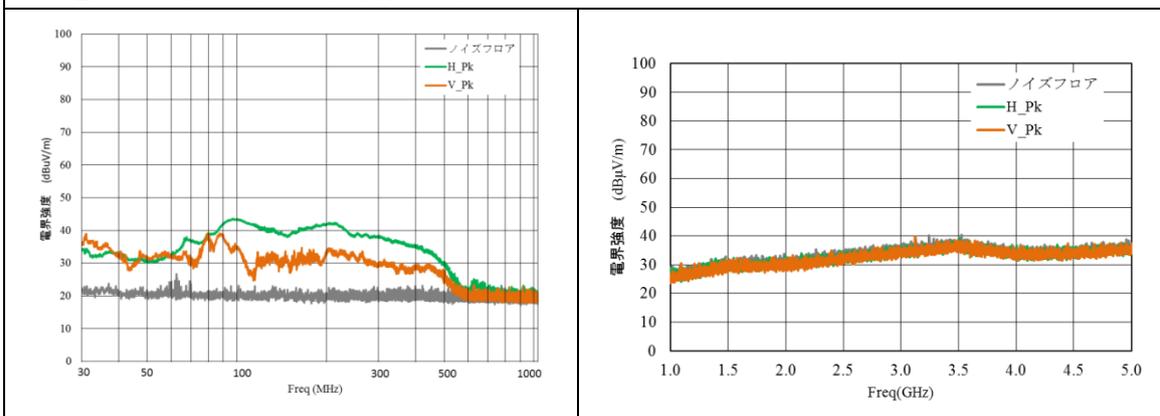


図 3-17 機種Dの測定結果

①a はいずれも微若干高い電界強度値となる傾向にあるが、③の吸収体を噛み合わせて固体ブロックで構成した場合は、いずれも十分低い電界強度値となる傾向がある。特に、1GHzを超える周波数帯は、ほぼノイズレベルとなった。

(5) 機種 E

①a、①b、②は実施していない。

③吸収体を噛み合わせた場合。地中レーダー高 60cm、吸収体高 60cm

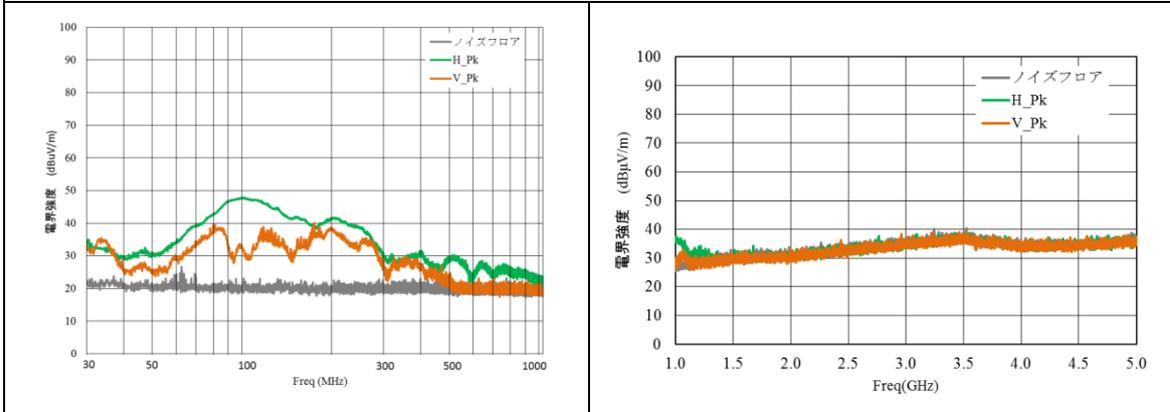


図 3-18 機種 E の測定結果

③の吸収体を噛み合わせて固体ブロックで構成した場合は、十分低い電界強度値となる傾向がある。

(6) 吸収体の置き方による電界強度値の違いについて

図 3-19 に示す通り、図中 (1) は吸収体の吸収特性に期待した構成で、①は吸収体の保護用発泡スチロールを使用して高さ 80cm の尖頭値検波した電界強度のスペクトラムで、②は同じ構成で高さ 60cm とした場合の尖頭値検波した電界強度のスペクトラムである。発泡スチロールを使用して高さを調整しており、高さに依存した電界強度となっていると思われる。

図中 (2) は、吸収体を噛み合わせて構成し、同じ尖頭値検波した電界強度のスペクトラムを③、④に示している。④は②と同じ高さだが、吸収体を噛み合わせた場合にスペクトラムが大きく変わり、電界強度値も小さくなることが確認できた。③は吸収体を噛み合わせて吸収体の上に発泡スチロールで高さ調整し、高さ 80cm としたスペクトラムで、同じ 80cm の高さの①と比較して大きくスペクトラムが変化したが、最大電界強度値は大きく変わらなかった。

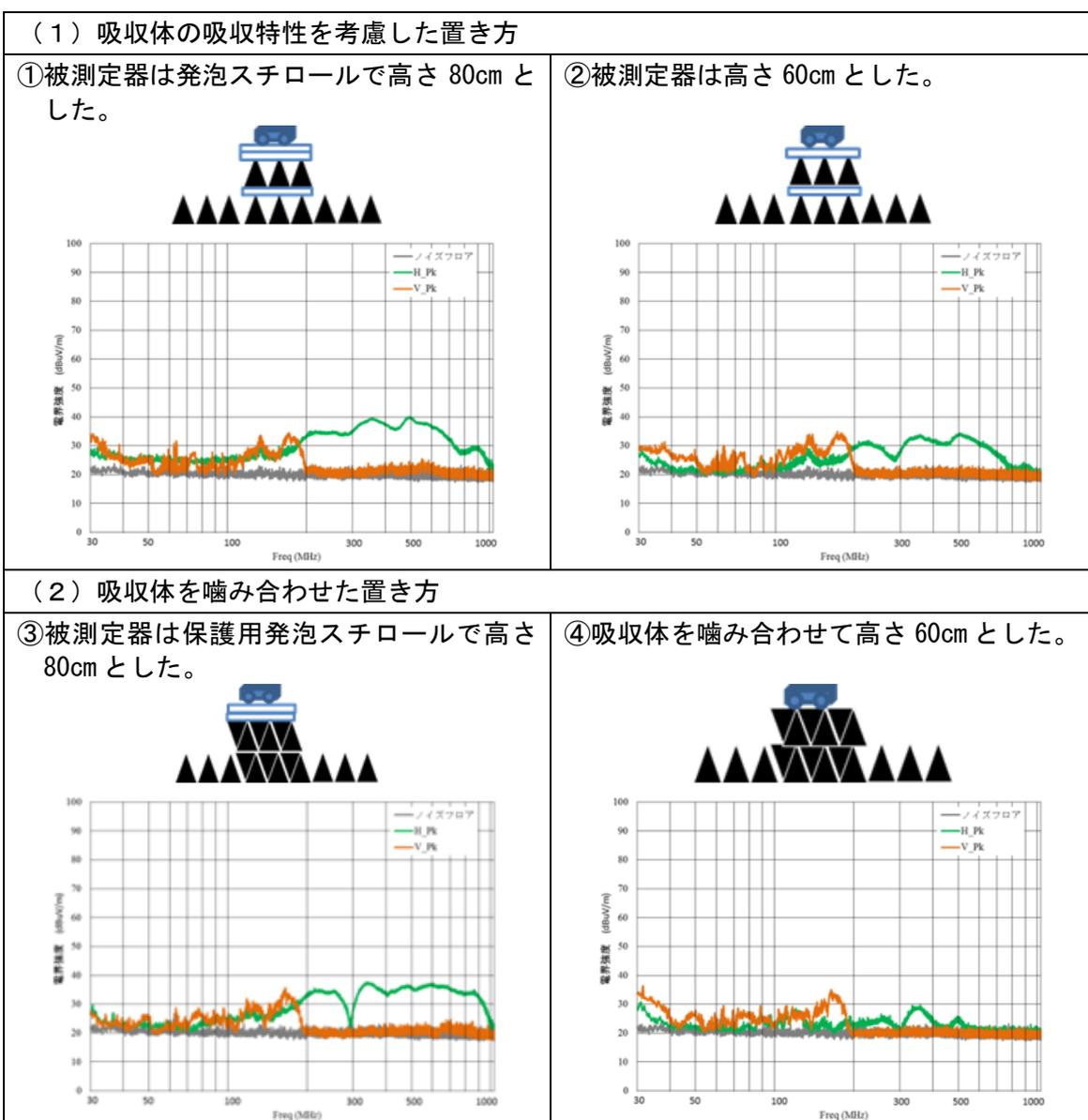


図 3-19 吸収体の構成による電界強度の違い

3.2.4 まとめ

吸収体を使用しない測定と比較し吸収体の特性である吸収特性を活かした置き方では、被測定器からの電波を吸収することで反射波が抑えられていると思われる。吸収体を重ねた測定では、吸収特性よりも吸収体と密着することによる誘電率・導電率の変化により、アンテナの放射パターンが媒質側に鋭くなり、空間への放射が少なくなるとされる。

被測定器の輻射面近傍に吸収体を置く事で電界強度値が小さくなる傾向にあることが確認できた。

3.3 オープンサイト（ITU-R/ FCC 参考）での電气的特性測定

告示第 127 号の測定方法を参考にして、諸外国の標準化機関等で推奨する地中レーダー機器の置き方を参考にオープンサイトで参考測定を行った。

(1) ITU-R SM.1754 1.5 項 (2006 年) を参考とする。

GPR の放射は 50cm の深さの Sand bed に向ける。

(2) FCC 02-48 245 (April 22, 2002) を参考とする。

GPR の放射は Dry Sand pit へ向ける。

現実的に砂場を構築するのは困難なので、砂袋を重ねた砂場とアスファルトの上に直置きにて測定を行った。一般的に、オープンサイトでは外来波と妨害波の切り分けが非常に難しい。今回は、電界強度測定器 (Test Receiver) を用いて周波数を探索して電界強度値を測定している。

3.3.1 測定条件

(1) 測定に使用した機器

測定に用いた機器は、
表 3-12 のとおり。

表 3-12 測定に用いた機器一覧

品名	仕様等
アンテナ	Biconical Antenna:Schwarzbeck BBA9106、 周波数範囲：30-300MHz Log-Periodic Antenna:Schwarzbeck UHALP9108-A、 周波数範囲：300~1000MHz
EMI レシーバー	Rohde & Schwarz ESIB7、周波数範囲：20Hz~7GHz
外付けプリアンプ (41dB)	R&K : LA151-RS 周波数範囲：1~6.5GHz、 Gain+41dB、Po=+12dBm@4GHz
ホーンアンテナ	EATON 91888-2、周波数範囲：1~2GHz、 91889-2、周波数範囲：1.7~3.6GHz

(2) 測定構成図

オープンサイト実験場所の風景は図 3-20 のとおり。



図 3-20 オープンサイト実験場所写真

3.3.2 設置方法

(1) 設置条件

設置方法は図 3-21 のとおり。ホーンアンテナを使用する場合は、アンテナをチルトさせて被測定器に向けて測定している。

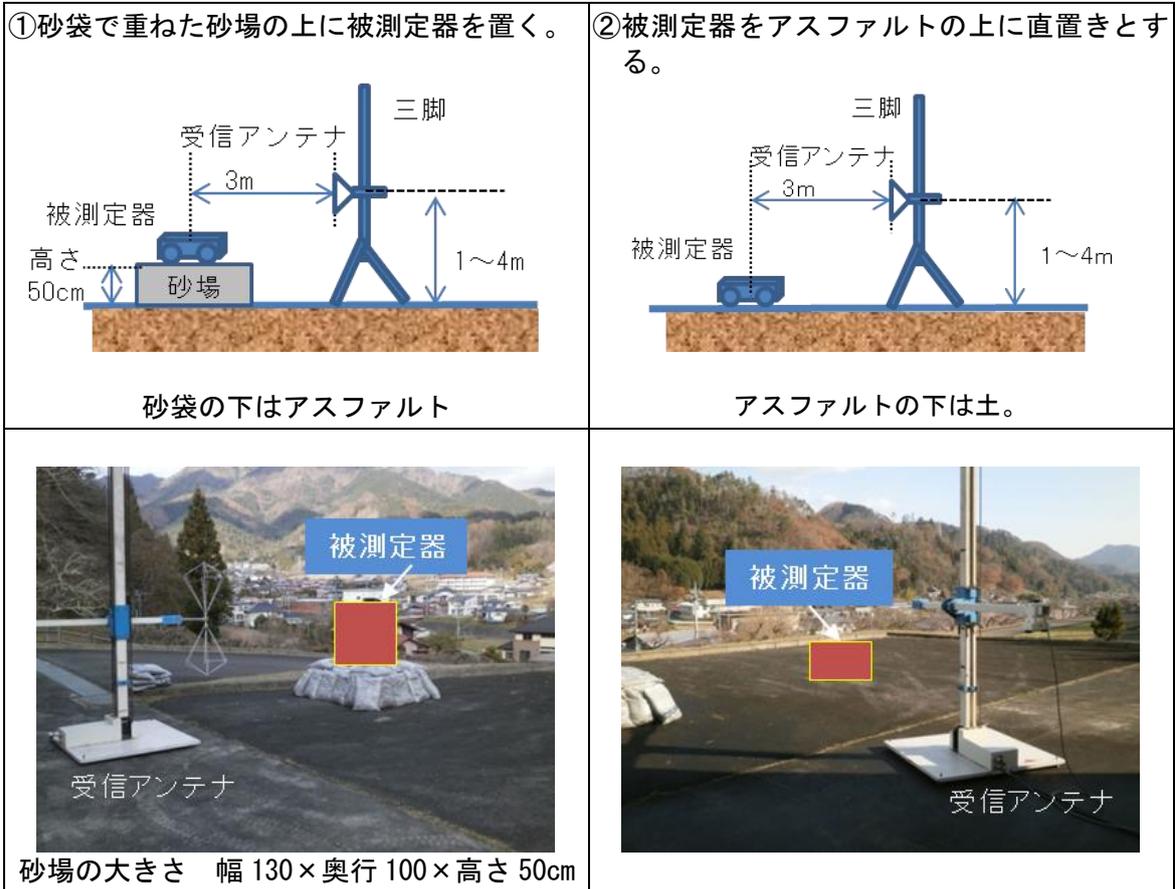


図 3-21 オープンサイトでの測定

(2) 砂場の設置について

当初、砂袋が梱包されているビニール袋の上に直接置いて測定したがアスファルトよりも電界強度値が大きかったので中心の 1 袋を破いて、砂面を露出させ、その上に地中レーダー機器を置いた。7dB 程電界強度が小さくなったので、さらに両端の袋を破いて、計 3 袋の砂面を露出させて測定することとした。(ごみ袋に砂を詰めかえた。深さは 5cm である)

砂袋は実験 3 日前に積み上げて砂場を構築した。その為、夜露等で砂が濡れてしまい、かなり水分を含んでしまった状態であった。電界強度値が変化した要因は、現状明確ではないが以下の 2 点が考えられる。一つは水の面がビニールの表面に出来てしまい、かなり高い導電性の反射面が出来てしまった。もう一つは、地面から持ち上げているので、放射波が隙間から出てきて非常に強く空中に放射されるような状況になった事が考えられる。ここでは、砂を他の袋に詰めかえることで電界強度値が下がった。その時の写真は図 3-23 のとおり。砂場の露出状態による電界強度値は図 3-25 のとおりで、電界強度が小さくなる図 3-24 の状態で測定を実施した。

実験に用いた砂は図 3-22 のとおり。



図 3-22 川砂

ホームセンターで販売されている川砂を積み上げて、高さ 50cm の砂場を構築して実験を行った。実験で使用したのは 80 袋で、1.6 t の重さになる。砂場の大きさは、幅 130cm × 奥行 100cm × 高さ 50cm となる。



図 3-23 当初の砂袋の設置状況



図 3-24 最終的な砂場の写真

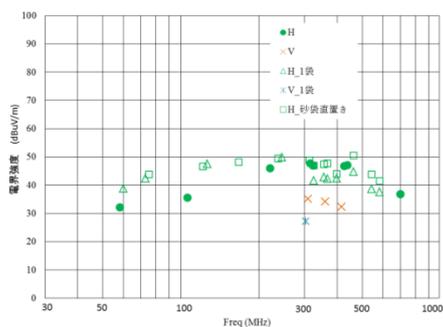


図 3-25 砂袋の露出状況による電界強度の差

- 3袋露出した砂面
- △ 1袋だけ露出した砂面
- 砂袋の上に直置き

(3) 砂場の大きさについて

砂場がもっと大きい場合を疑似的に確認するため、砂場の周辺に吸収体を置いて電界強度の変化を確認した。図 3-26 のとおり、吸収体を置いてみると電界強度が 10dB 程度下がることが確認できた。これは、反射波の影響であると思われる。

このことから、砂場は受信アンテナまで面的に大きい事、地表からかさ上げしないことが必要条件と思われる。

ITU-R SM.1754 では Sand bed、FCC 02-48 245 では Sand pit と記載されており、どちらの勧告でも深さ 50cm となっているが、大きさについては記載されていない。

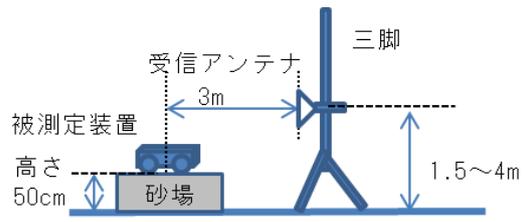
また、袋の状態だと夜露の影響で砂袋の中に水分が溜まってしまい誘電率が変化する可能性もある。その為、砂の品質管理が必要となり、屋外で管理するのは困難であると思われる。



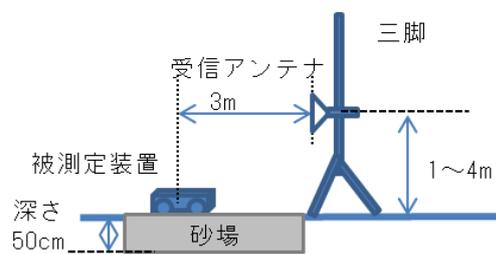
本実験の砂場での測定写真例



反射の影響を確認するため、受信アンテナと砂場の上に吸収体を横に置いてみたが電界強度値に変化はなかったが、砂袋に近づけて吸収体を縦に置いてみたところ、10dB程度電界強度値が下がった。このことから、受信アンテナまで、面的に砂場である必要があることが確認できた。



※アスファルトの上に砂袋を重ねた砂場 (Sand bed)



※地面に穴を掘って砂をまいた砂場 (Sand Pit)

図 3-26 砂場の大きさの検討

3.3.3 測定結果

オープンサイトでの測定結果は以下のとおりです。

図 3-27 オープンサイトのノイズレベル測定例

図中の「測定不可」は、レベルが低くて測定出来なかった事を示す。

準尖頭値検波により探し出した周波数と電界強度値を示すが、参考として尖頭値検波したスペクトラムを示す。

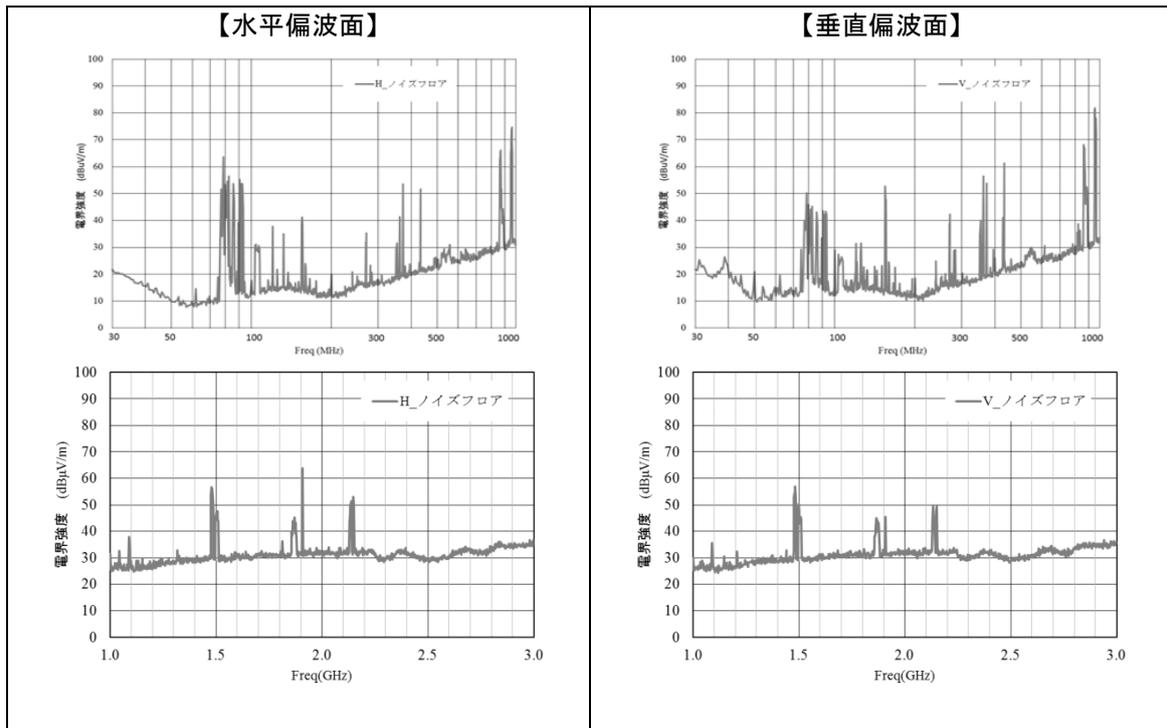


図 3-27 オープンサイトのノイズレベル測定例

(1) 機種 A

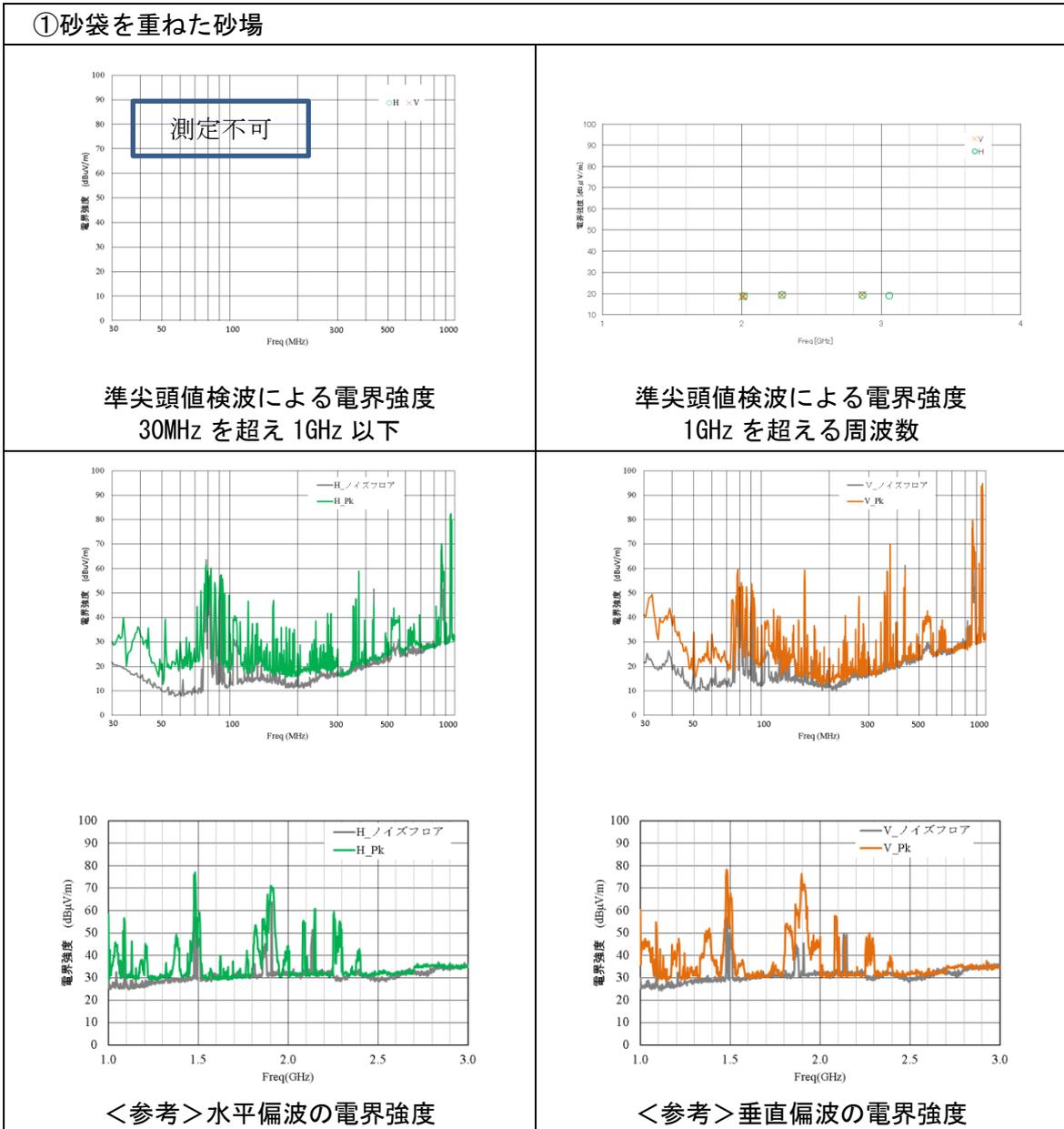


図 3-28 機種 A のオープンサイト測定結果 (砂場)

②アスファルト直置き

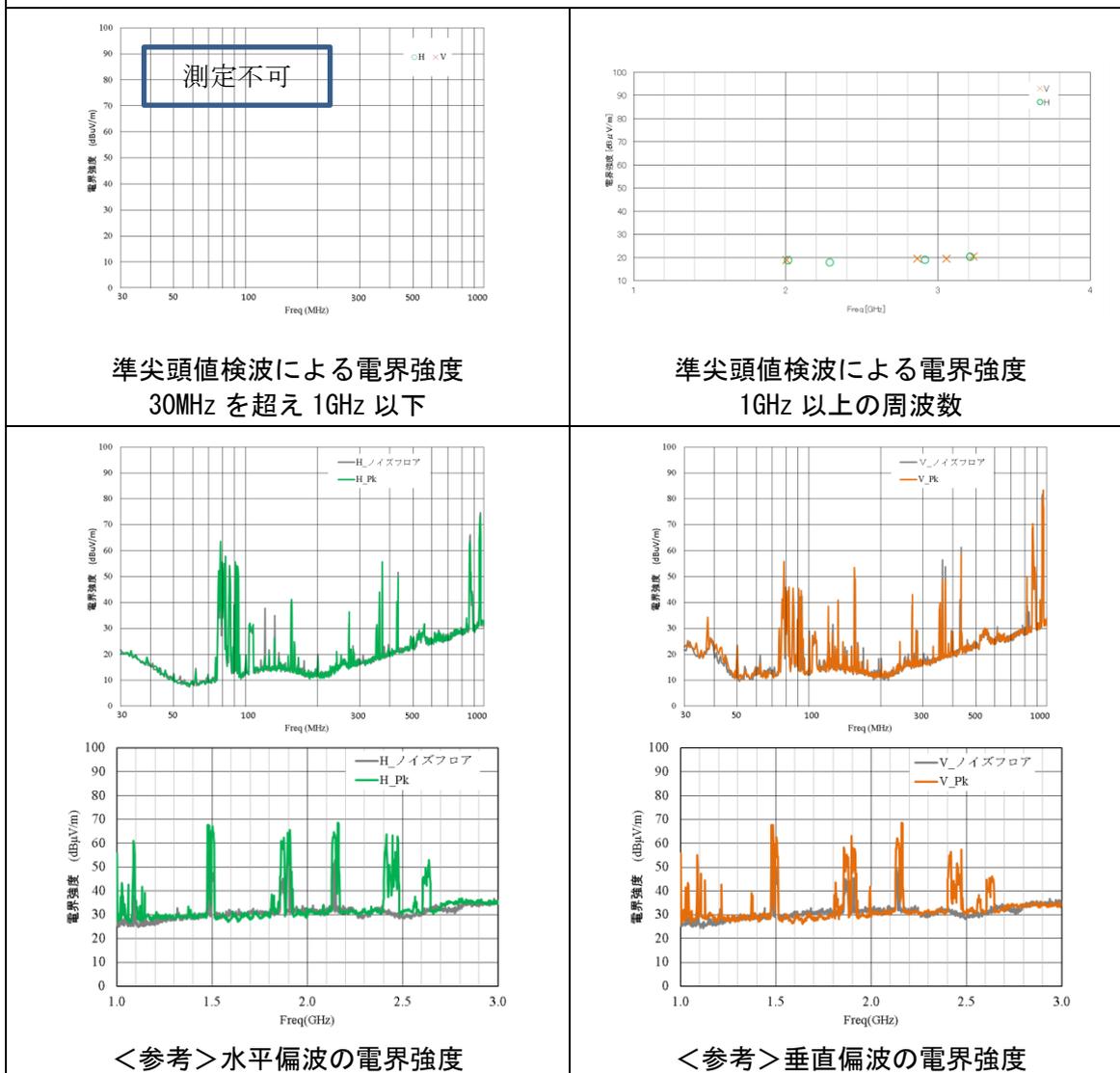


図 3-29 機種Aのオープンサイト測定結果（スファルト）

①砂場、②アスファルトの上直置きは、30MHz を超え 1GHz 以下では地中レーダー機器からの電波が弱く測定できなかった。1GHz を超える周波数帯では十分小さい電界強度値である傾向である。

3.3.4 まとめ

- (1) オープンサイトでは外来雑音が大きく、一般的に準尖頭値検波した電界強度値を用いており、広帯域に電波を利用する無線設備の測定には適さない。
- (2) オープンサイトでは外来波と妨害波の切り分けが非常に難しい。今回は、電界強度測定器（Test Receiver）を用いて周波数を探索して電界強度値を測定しており、豊富な測定経験と高度な測定技術を要する。
- (3) 砂袋で構築した砂場は、かさ上げすることなく、受信アンテナの近くまで面的に大きく、砂の乾燥状態を保つ為の管理が必要である。

3.4 電气的特性的まとめ

3.4.1 スペクトラムの比較

測定条件を変えた3種類の測定を行った。機種毎のスペクトラムを以下のとおり示す。

(1) 機種A

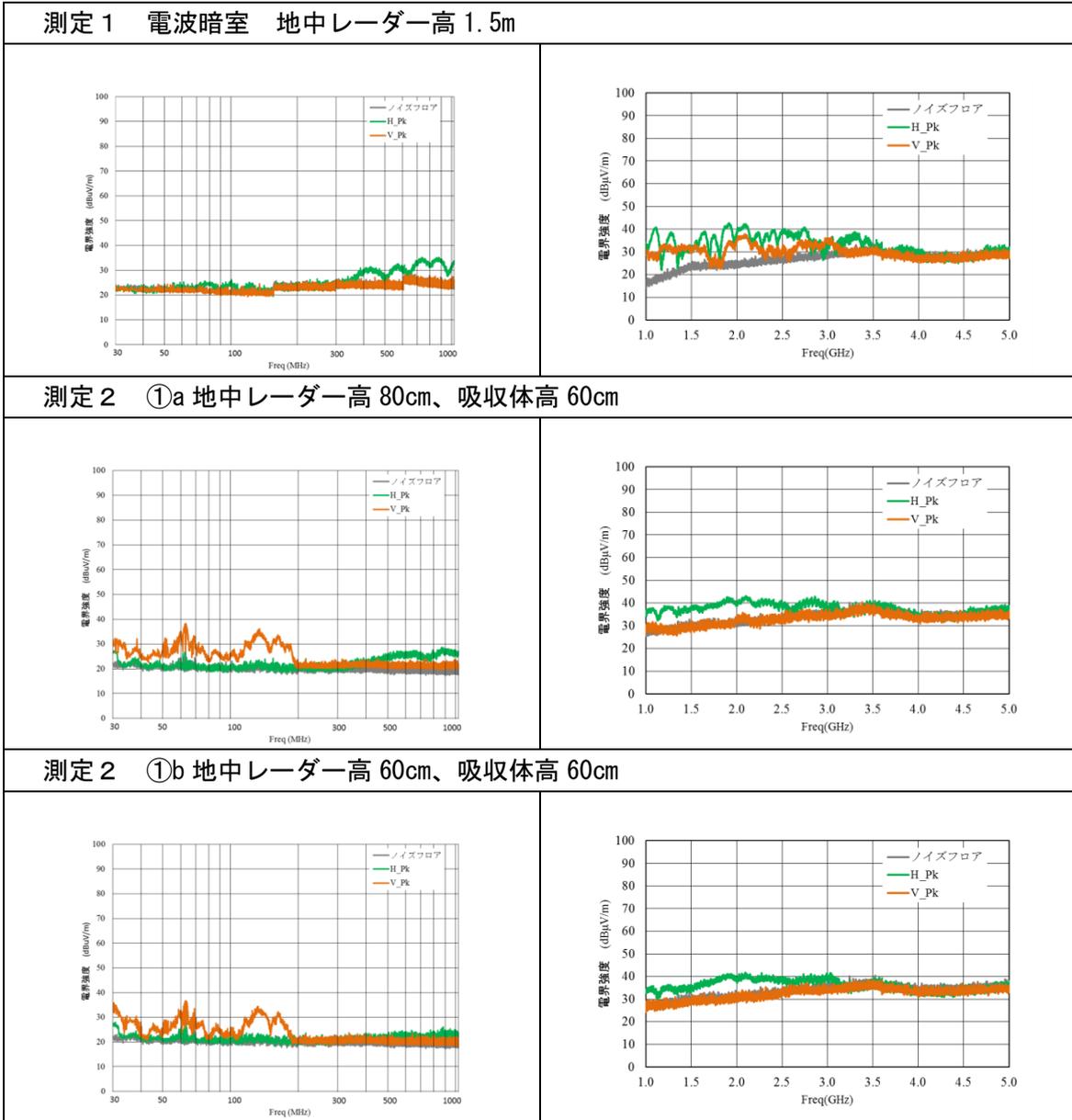


図 3-30 機種Aの測定結果一覧その1

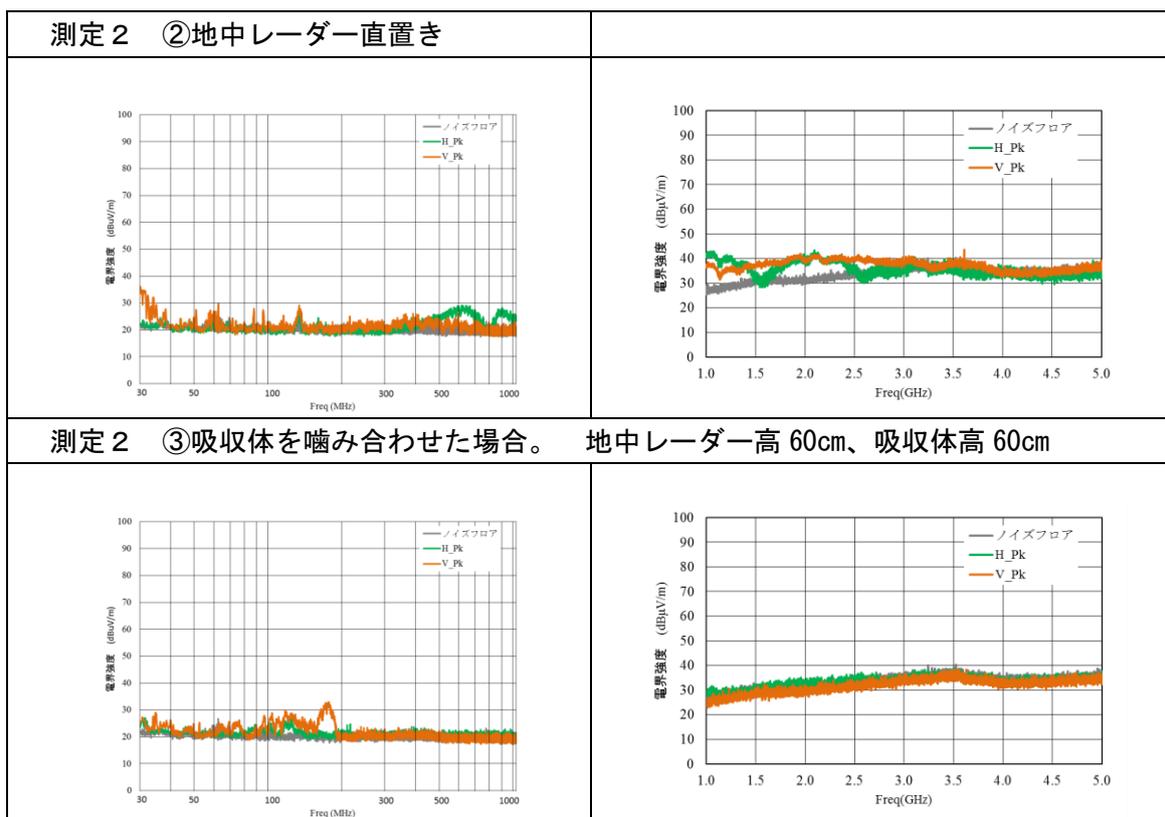


図 3-31 機種 A の測定結果一覧その 2

30MHz を超え 1GHz 以下の帯域では、

- ・測定 1 よりも測定 2 で吸収体に向けて電波を放射することで電界強度値が小さくなる傾向にある。さらに、被測定器 80cm よりも 60cm の設置高が電界強度値が小さくなる傾向にある。また、測定 2 ③の吸収体の置き方を変えた場合にはさらに電界強度値が小さくなる傾向がある。

1GHz を超える帯域では、

- ・測定 1 よりも測定 2 で吸収体に向けて電波を放射することで電界強度値が小さくなる傾向がある。
- ・測定 2 ③の吸収体の置き方を変えた場合は、さらに電界強度値が小さくなりほぼノイズレベルとなった。

(2) 機種B

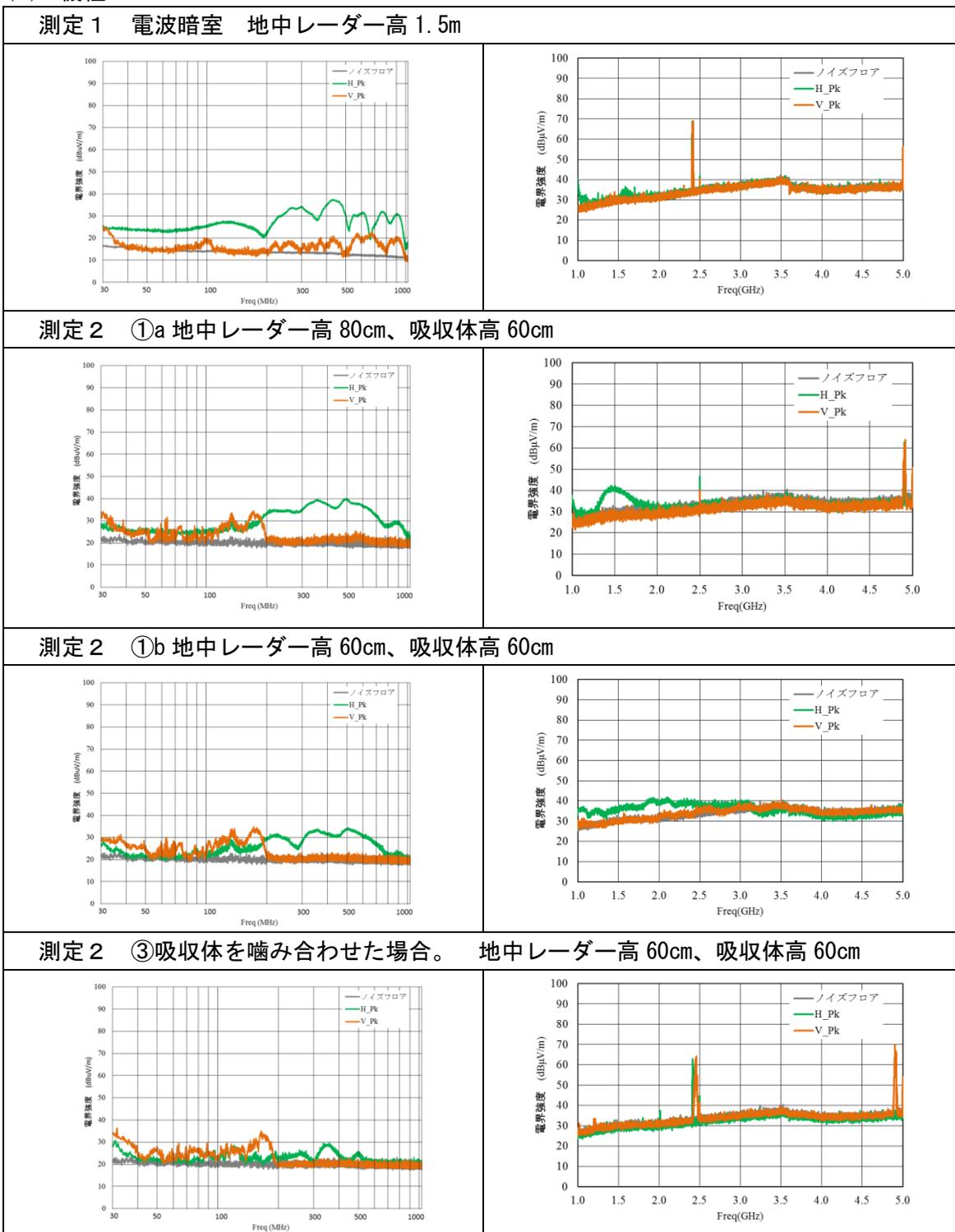


図 3-32 機種Bの測定結果一覧

30MHz を超え 1GHz 以下の帯域では、

- ・ 測定 1 よりも測定 2 で吸収体に向けて電波を放射することで電界強度値が小さくなる傾向がある。さらに、被測定器 80cm よりも 60cm の設置高が電界強度値が小さくなることが判った。また、測定 2 ③の吸収体の置き方を変えた場合にはさらに電界強度値が小さ

- くなる傾向がある。
- 1GHz を超える帯域では、
- ・測定 1 よりも測定 2 ①は、電界強度値が一部大きくなっている。
 - ・測定 2 ③の吸収体の置き方を変えた場合は、電界強度値が小さくなり、ほぼノイズレベルとなった。
- ※測定 2 ②は実施してない。

(3) 機種C

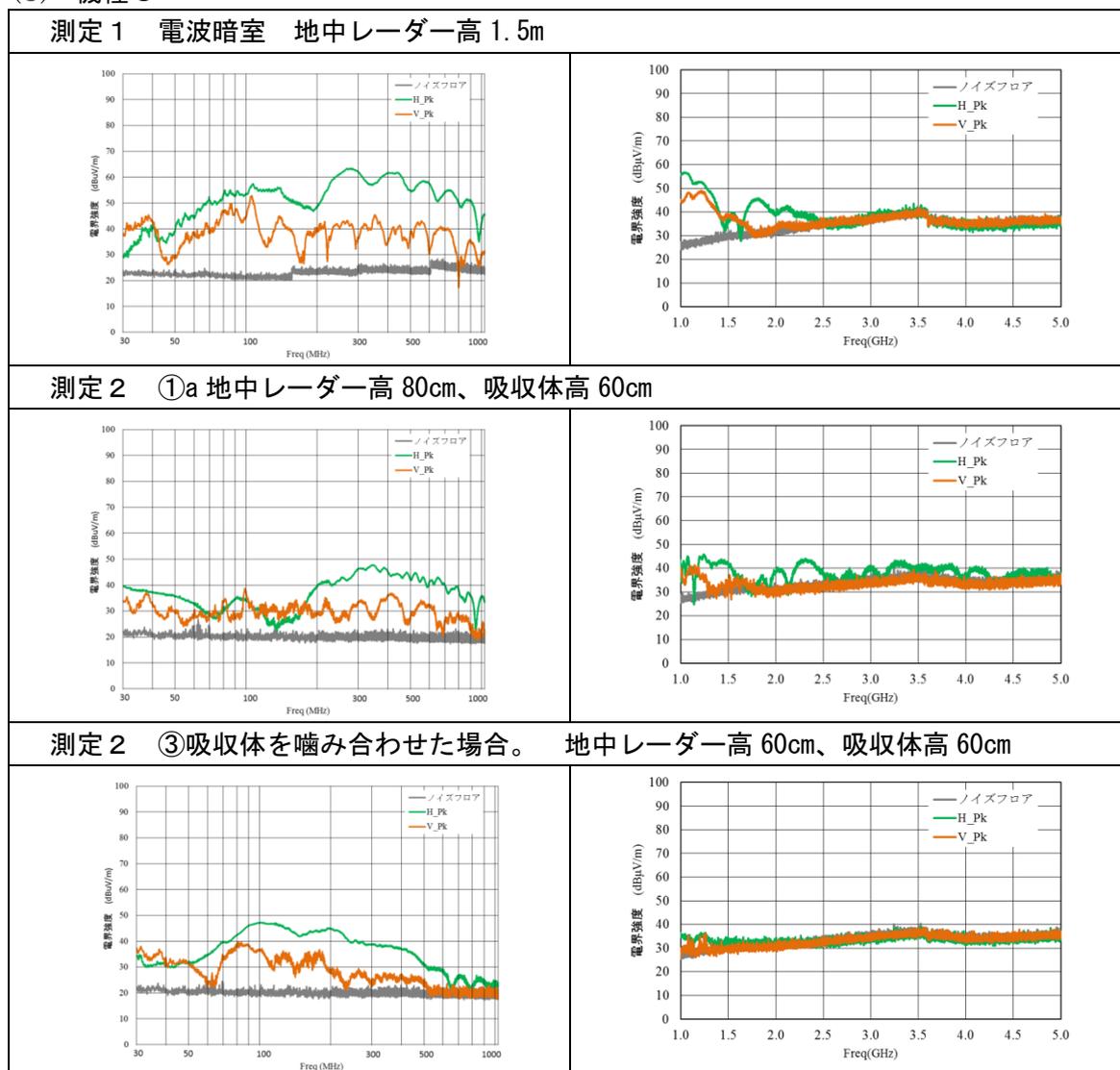


図 3-33 機種Cの測定結果一覧

30MHz を超え 1GHz 以下の帯域では、

- ・ 測定 1 よりも測定 2 で吸収体に向けて電波を放射することで電界強度値が小さくなる傾向がある。また、測定 2 ③の吸収体の置き方を変えた場合にはさらに電界強度値が小さくなる傾向がある。

1GHz を超える帯域では、

- ・ 測定 1 よりも測定 2 で吸収体に向けて電波を放射することで電界強度値が小さくなる傾向がある。
- ・ 測定 2 ③の吸収体の置き方を変えた場合は、電界強度値は小さくなり、ほぼノイズレベルとなった。

※測定 2 ①b と測定 2 ②は実施してない。

(4) 機種D

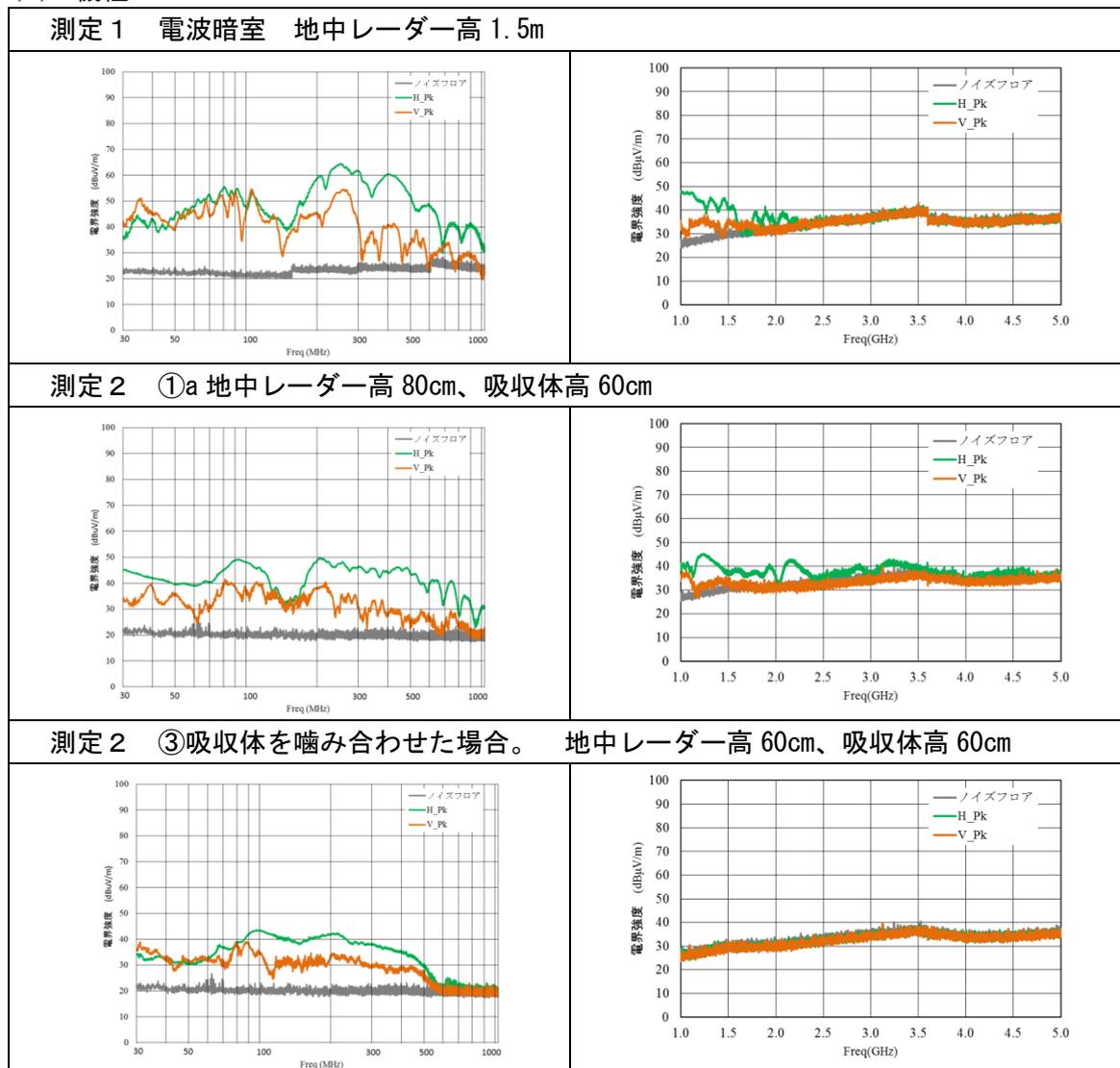


図 3-34 機種Dの測定結果一覧

30MHz を超え 1GHz 以下の帯域では、

- ・ 測定 1 よりも測定 2 で吸収体に向けて電波を放射することで電界強度値が小さくなる傾向がある。また、測定 2 ③の吸収体の置き方を変えた場合にはさらに電界強度値が小さくなる傾向がある。

1GHz を超える帯域では、

- ・ 測定 1 よりも測定 2 で吸収体に向けて電波を放射することで電界強度値が小さくなる傾向がある。
- ・ 測定 2 ③の吸収体の置き方を変えた場合は、電界強度値は小さくなり、ほぼノイズレベルとなった。

※測定 2 ①b と測定 2 ②は実施してない。

(5) 機種E

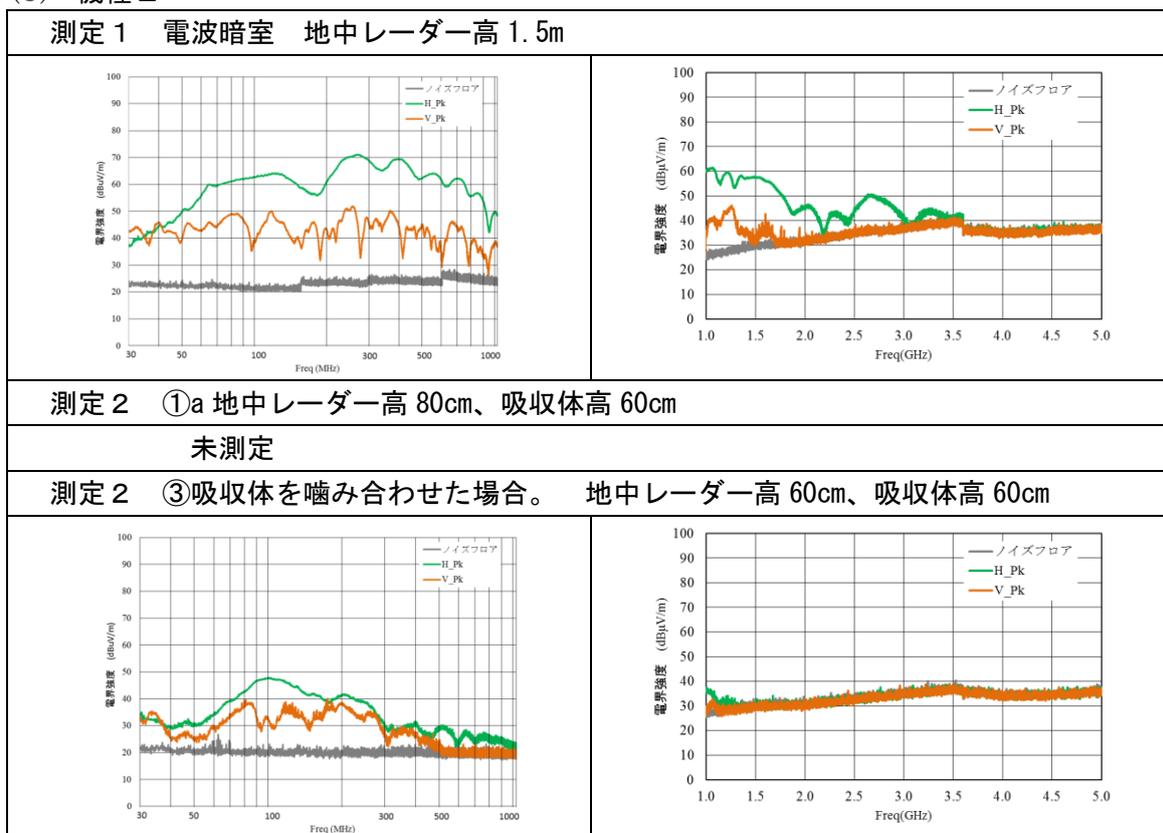


図 3-35 機種Eの測定結果一覧

30MHz を超え 1GHz 以下の帯域では、

- ・測定 1 よりも測定 2 ③で吸収体の置き方を変えた場合には電界強度値が小さくなる傾向にある。

1GHz を超える帯域では、

- ・測定 1 よりも測定 2 ③で吸収体の置き方を変えた場合には電界強度値が小さくなる傾向にある。

※測定 2 ①と測定 2 ②は実施してない。

測定 1 を基準に電界強度値を比較すると、測定 2 の電界強度値は小さくなる傾向が確認できた。電界強度値が変動するのは、設置条件（主に媒質）によってアンテナ放射パターンが媒質側に鋭くなり、空間への放射が小さくなっている為と想定され、媒質の誘電率により、その差が顕著に現れたと思われる。また、誘電率だけでは無く、被測定器の設置高が高いほど直接波・反射波の影響を受けていると思われる。

3.4.2 地中レーダー機器の放射パターンについて

FDTD (Finite-difference time-domain) シミュレーションによる電磁界数値シミュレーションによる、媒質からの距離の影響と比誘電率の変化による放射パターンについて参考文献の情報を記載する。

(註) 媒質近傍に置かれたアンテナからの電磁波放射 —地中レーダーへの応用—
佐藤 源之、高橋 一徳、麻谷 由香、飯塚 泰
信学技報 IEICE-EMT2015-20

周波数 500MHz、ダイポールアンテナ長 30cm、比誘電率 $\epsilon_r=9$ 、媒質上 $d=5/10/200\text{mm}$ に置かれた半波長ダイポールアンテナについて、アンテナから 700mm 離れた位置での E 面放射電界強度を示す。シミュレーションの計算モデルを図 3-36 に示す。

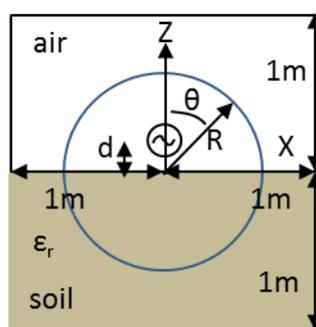


図 3-36 FDTD シミュレーションの計算モデル

アンテナを損失の無い誘電体、この場合は電波吸収体では無くて完全に乾燥した砂とかを考えている。その上に置いた時の放射パターンを考えると、これは本来、上側と下側は空中であれば対称になるが、媒質があることによって、媒質側に引っ張られる効果がある。これは、純粋に誘電体の効果だけを考えた場合のことだけ示している。

一般的に吸収体を置くと電波を吸収する効果が吸収体にあるから、それによって不要輻射は低減される。

電磁界解析による放射パターン例を図 3-37 に示す。

(a)、(b) は同じ比誘電率であるが、媒質からの距離が異なる例で、距離が小さいほど媒質側に放射パターンが広がり、空間への放射が小さくなる。媒質から距離が離れると、空間の放射が大きくなることシミュレーション結果として示されている。

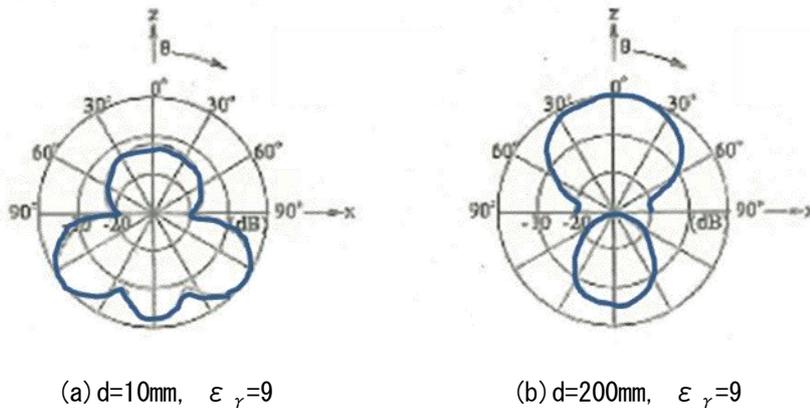


図 3-37 電磁界解析による放射パターン例 (a)、(b)

電磁界解析による放射パターン例を図 3-38 に示す。

(c)、(d) は、媒質と距離が同じ条件で、比誘電率が異なる場合の例を示しており、比誘電率が高いほど媒質側の放射パターンが鋭くなり、空間の放射パターンも小さくなること示されている。

このことから、地中レーダー機器の電気的特性を評価するには、誘電率がある程度一定であり、媒質に近づけて測定することが必要である。

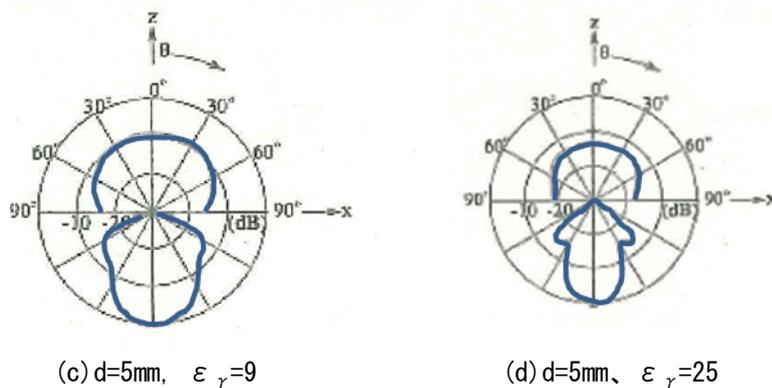


図 3-38 電磁界解析による放射パターン例 (c)、(d)

3.4.3 電気的特性測定結果の考察

- (1) 地中レーダー機器の輻射面の方向、媒質との距離、媒質の誘電率等により電界強度値が大きく変動する傾向が確認出来たので、実利用状況に近い状態での測定が望ましい。
 - 測定1における輻射面の状況の違い（輻射面を開放した場合と地表等へ正対させた場合）による測定結果では、他の無線局への影響を考慮すると、実利用状況が地表等の媒質に向けて電波を発射することから、輻射面を媒質に向けた状態で測定することが望ましい。
 - 測定2の結果から、地中レーダー機器と媒質の間の空間量により電界強度値が異なる傾向があり、これは直接波と反射波の影響によるもの及び媒質の誘電率等でアンテナ放射パターンが変わることによるものと思われる。したがって、地中レーダー機器の実利用状況に近い状態で媒質である吸収体等と密着した測定が望ましい。
- (2) 安定した測定環境が望ましい。
 - オープンサイトでは外来雑音が大きく、一般的に準尖頭値検波した電界強度値を用いており、広帯域に電波を利用する無線設備の測定には適さないため、電波暗室等で行うのが望ましい。
 - 安定した測定を行うには、屋内などで誘電率などが一定に保てる媒質としての吸収体等を活用する測定環境が望ましい。