

地中レーダー技術に関する調査検討会報告書 概要版

平成29年3月

地中レーダー技術に関する調査検討会事務局

【背景】

地中レーダー技術は、地中又は地表面の状況など電波を利用することにより把握することが可能なレーダーシステムである。近年、機器の小型化や信号処理技術の向上等により、様々な目的や形態での利用が進んでいる。道路面の損傷などの効率的な把握や公共インフラの老朽化等に伴うメンテナンス分野等、今後の利用拡大が期待されている。

【目的】

地中レーダー技術の利用拡大に備え、空間に放射する電波が微弱である事から無線局免許を不要とされている機器を含め、多様な製品の諸元や形状、使用方法等で類型化、各モデル毎の電波強度等の電気的特性を調査・分析し、他の無線局との周波数共用等について必要な要件の検討を行う。

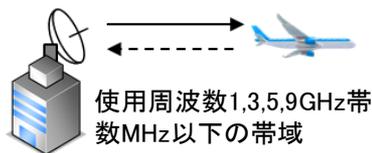
【検討項目】

- (1) 地中レーダー技術の利活用動向調査
 - ・ 国内で使用されている機器について、使用実態等を調査し、類型化する。
- (2) 地中レーダー技術の検討
 - ・ 測定方法を整理する。
 - ・ 類型化したモデル毎に個々の電気的特性を測定し整理する。
- (3) とりまとめ

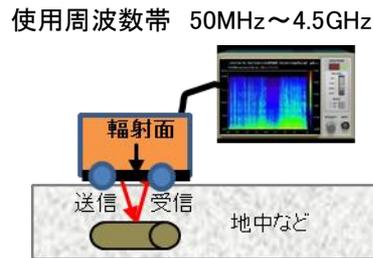
2. 地中レーダー技術の現状(原理)

一般的なレーダーは目標物に向けて電波を発射し、電波を発射してから反射波が戻ってくるまでの往復時間と電波照射方向から目標物の位置、また反射波の強さから目標物の形状や速度を知る装置である。雨や雲などを計測する気象レーダーや船舶や航空機の位置を検知する目的で多くのレーダー装置が利用されている。地中レーダーは電波を空中ではなく地面や構造物に輻射面を向けて発射し、内部からの反射波を計測(周波数毎の時間、強度、波形)することで埋設物の検知や内部構造物を計測する手法である。

【一般的なレーダー】



【地中レーダー】



地中レーダー(GPR : Ground Penetrating Radar)は電波の地下物体からの反射を利用した地下計測法であり、地下構造を高速、高精度に可視化できる手法である。

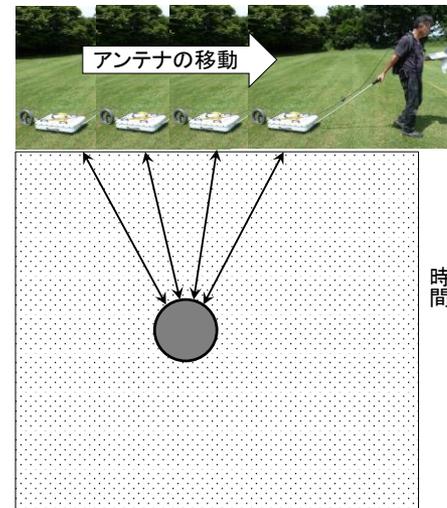
【地中レーダー技術の特徴】

- 媒質中の電波伝搬は主として誘電率で定まり、電波と媒質の相互作用を考慮する必要がある。
- 媒質は電波の速度、減衰に影響を及ぼす。
- アンテナ近傍の媒質によってアンテナの特性、特に放射指向性が大きな影響を受ける。
- 近距離で高分解能を要求されるため50MHz～4.5GHz程度にわたる広帯域の周波数を利用している。
- 広帯域システムを実現するためにインパルスレーダーシステムその他、多様な変調方式が利用されている。

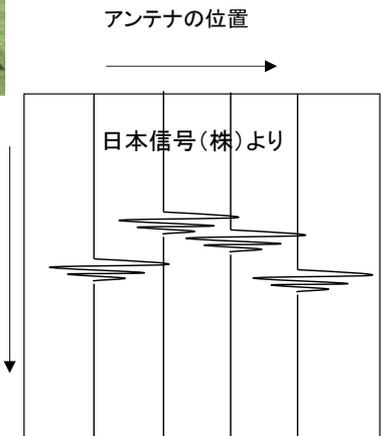
【地中レーダー機器の計測の特徴】

地中に送信する電波の照射方向を制御することはできない。その代わりにレーダー装置を移動させながら計測することで、送受信アンテナと目標物との相対距離が変わるのでレーダー波形に目標物の形状を捉えることができる。

計測した波形は目標物の形状とは異なる散乱波形である。散乱波形から目標物の元の形状を推定するために信号処理(マイグレーション)を施すこともある。



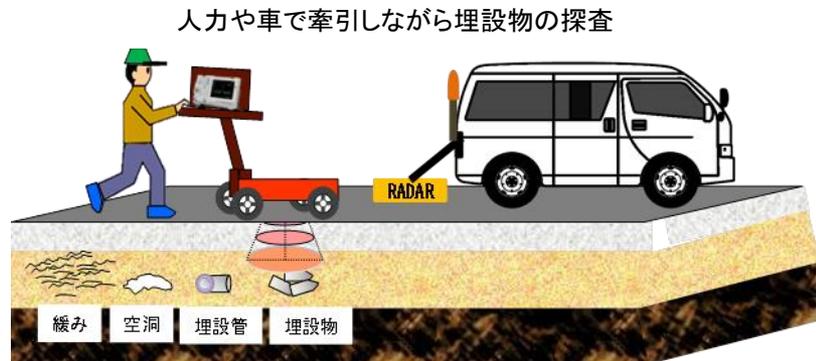
記録されるレーダー波形



2. 地中レーダー技術の現状(利用シーン)

【地中レーダーの主な利用目的】

利用分野	主な対象物
埋設物検知	パイプ・ケーブル 埋設投棄物
非破壊検査	コンクリート 建造物 トンネル
路面保全	舗装状態 空洞検出
土木・建設	地盤調査 掘削前方監視
環境・農業	地下水 土壌水分 樹木、根の計測
地質・資源調査、 遺跡探査	埋設物 構造物内部可視化
社会安全	地雷検知



コンクリート構造物の探査



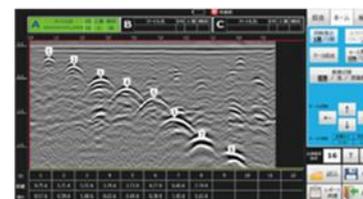
【主な利用シーン】

埋設物探査に多く利用されている他、以下の利用がある。

- 地下インフラの埋設工事における先行埋設物の検知
- 壁のボーリングにおける鉄筋位置の確認
- 人工構造物のメンテナンス、路面下空洞調査
- トンネル等のコンクリート内部(天井部含む)の空洞の調査
- 橋床検査
- 構造物(堤防、ダム、道路)、土壌、岩盤内の水分モニタリング等
- 地殻変動調査、活断層調査、地震履歴調査等の地震地質学等の分野
- 沖積低地、地すべり堆積物、河川氾濫原の浅層地下構造の可視化



日本信号(株)より

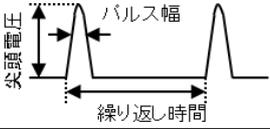
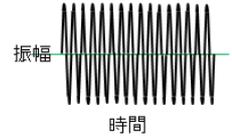
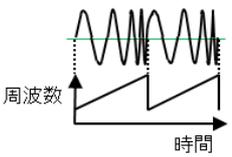
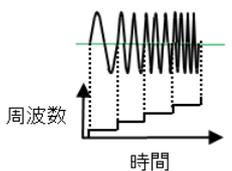
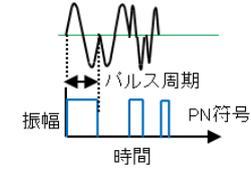
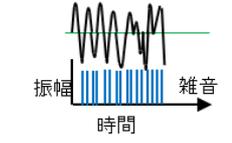


日本信号(株)より

日本無線(株)より

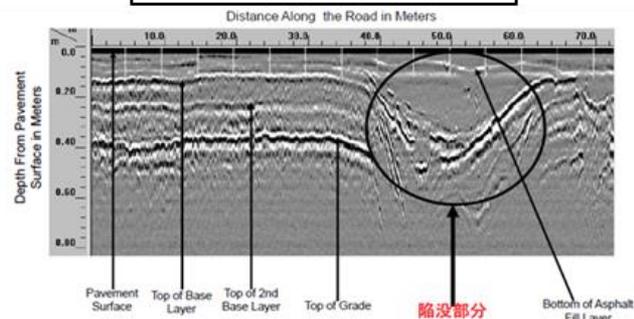
参照元: 応用地質(株)、日本信号(株)、日本無線(株)のホームページより

2. 地中レーダー技術の現状(技術)

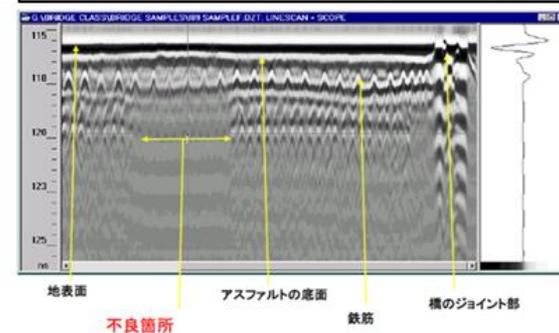
レーダー方式	変調方式	送信波形	動作原理
インパルスレーダーシステム	無変調		変調をかけない直流パルスを送信し、受信波を時間領域で計測する。
無変調連続波方式レーダーシステム	CW (continuous wave)		単一周波数を用いたシステム。
変調連続波方式レーダーシステム	FM-CW (チャープ)		連続的に周波数を掃引しながら電磁波を送信し、反射波と送信波のビート周波数(差周波数)から、反射波までの距離を検出。
	SF-CW (ステップ周波数)		離散的に変化する多周波数において、各周波数毎の送信波に対する反射波の振幅・位相を計測する。
疑似雑音レーダーシステム	符号化パルス		PN (Pseudorandom Noise) 符号を用いて離散的に位相変調を行い、受信時に符号系列の相互相関処理により計測する。
	疑似雑音		雑音を用いて離散的に位相変調を行い、受信時に符号系列の相互相関処理により計測する。

実際の測定例

道路の陥没データ例



橋梁デッキの鉄筋不良データ例

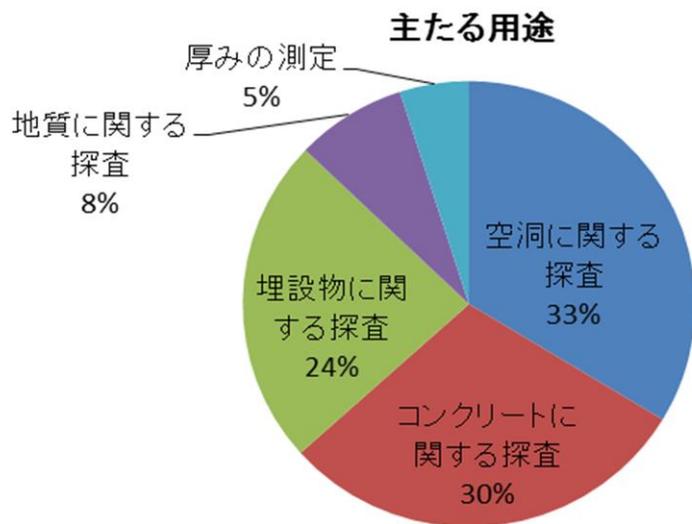


参照元: 応用地質(株)
地下レーダー探査装置の紹介資料より

2. 地中レーダー技術の現状(アンケート結果より)

国内の地中レーダー機器の使用実態を調査するため、26社にアンケートを実施した。アンケート内容は、使用しているメーカー名、レーダー方式、使用周波数帯、送信出力、出力を制御する機能、輻射対策、探査可能深度、分解能、利用形態、計測時のアンテナと地面の距離、主たる用途、利用状況等について設問した。

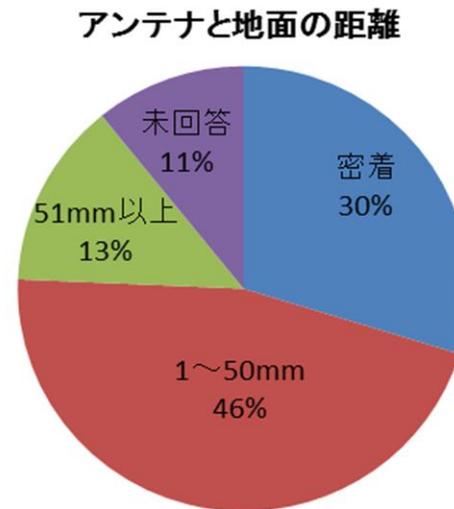
回答のあったメーカーの業務内容は、製造7社、販売8社、業務委託(コンサルタント調査等)10社、開発(ハードウェア/ソフトウェア)2社、マーケティング1社のアンケート結果であった。※重複回答あり



インフラに関連する、

- ・空洞に関する探査(路面下空洞探査等)
- ・コンクリートに関する探査(コンクリート内部や配筋・鉄筋調査等)
- ・埋設物に関する探査(埋設管等の探査)が88%を占める。

※アンケート対象に製造・販売会社が多いのでユーザーの用途を十分反映していないことが想定される。



- ・50mm以下での使用が全体の76%を占める。
- ・51mm以上は牽引・車載タイプやトンネル内の壁面を探査する製品である。

2. 地中レーダー技術の現状(類型化1/2)

アンケート回答などに基づき、メーカーのホームページ、カタログ等の情報も収集し、主な地中レーダー機器を下記のとおり類型化した。

※不明または開示不可は「－」としている。

形状	製造元	メーカー	製品名	変調方式	使用周波数	主たる用途
カー ト タ イ プ	国内	(株) 光電製作所	GPR-10C	インパルス	350MHz	地中の埋設管、空洞、構造物
		日本信号(株)	グランドシアGN-01	チャープ	50~800MHz	埋設物探査、空洞探査
			グランドシアGN-02	チャープ	70~850MHz	埋設物探査、空洞探査
		日本無線(株)	NJJ-640	インパルス	10~1000MHz	地中の埋設管、空洞、構造物
	海外	GSSI (Geophysical Survey Systems, Inc)	SIR-3000 SIR-4000	インパルス	300/400/900MHz 1.6GHz	埋設物、路面下空洞、地層構造
			ユーティリティ スキャンDF	インパルス	2周波方式 300MHzと800MHz	地下埋設管、空洞探査
			ストラクチャスキャン	インパルス	1.6/2/2.6GHz	コンクリート中の密集鉄筋や配管・空洞等
		Mala Geoscience	RAMAC	インパルス	100/200/500/800/ 2000MHz	埋設管(埋設物)、空洞(トンネル)の検出、考古学調査
		GEOSCANNERS	AKULA9000	－	300/400MHz	路面下空洞
		Sensors & Software	NOGGIN Plus	－	100/250/500/1000MHz	鉄筋コンクリート、空洞、配管・埋設物探査
			Pulse EKKO PRO	－	12.5/25/50/100/200/ 250/500/1000MHz	埋設物探査、遺跡物探査

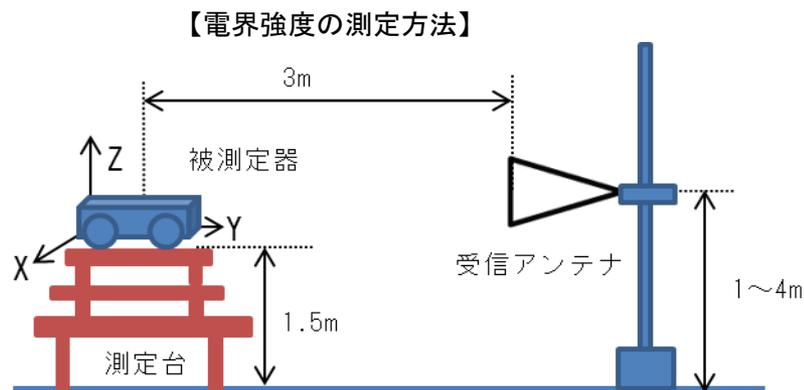
2. 地中レーダー技術の現状(類型化2/2)

形状	製造元	メーカー	製品名	変調方式	使用周波数	主たる用途
ハンディタイプ	国内	(株)光電製作所	KSD-20	インパルス	800MHz	コンクリート空洞厚さ
			KSD-8-20W	インパルス	1000MHz	コンクリート構造物背面空洞
		日本無線(株)	NJJ-105	インパルス	300MHz~2.3GHz	コンクリート内部の埋設物(鉄筋、電配管、等)探査
			NJJ-200	インパルス	800MHz~3.4GHz	コンクリート内部の埋設物(鉄筋、電配管、等)探査
		三井造船(株)	MPLA-245A	FM-CW	100MHz~4.5GHz	コンクリート内埋設物調査
	海外	GSSI (Geophysical Survey Systems, Inc)	StructuerScan mini	インパルス	1.6GHz	コンクリート中の密集鉄筋や配管・空洞等
		ボッシュ(株)	D-TECT 150CNT	インパルス	1.8GHz~4GHz	コンクリート探知機、鉄筋、電気配線、金属、水の入ったプラスチック管、木材
		HILTI	PS 1000 X-scan	インパルス	1GHz~4.3GHz	コンクリート内埋設物調査
Sensors & Software		Conquest System	-	1000MHz	コンクリート探知機、鉄筋探査	
車載・牽引タイプ	国内	川崎地質(株)	車両牽引型マルチアレイチャープ式地中レーダー	チャープ	50MHz~800MHz	路面下空洞探査
			ステップ式FM-CW方式地中レーダー	ステップ	5~160MHz	防空壕調査、河川堤防内部構造調査、地質構造調査(断層など)
		三井造船(株)	路面下空洞調査用「地中レーダー」	FM-CW	100MHz~1.5GHz	道路下空洞
	海外	RPS (Radar Portal Systems Pty Ltd)	道路用ハイスピード3Dレーダーシステム MiniPod GPR	符号化パルス+疑似雑音	200MHz~3GHz	堤防や道路メンテナンス、広範囲の地下探査、高速道路の調査
		GSSI (Geophysical Survey Systems, Inc)	SIR-30	インパルス	300/400/900MHz	路面下空洞
		IDS (Ingegneria Dei Sistemi)	RIS Hi-Bright	インパルス	2GHz	コンクリートスラブ舗装・アスファルト厚
			Stream EM	インパルス	200MHz/600MHz	地下埋設物
		3D-RADAR	3d-Radar	ステップ周波数方式	200MHz~3GHz	路面下空洞、床板健全度、埋設管探査、遺跡調査

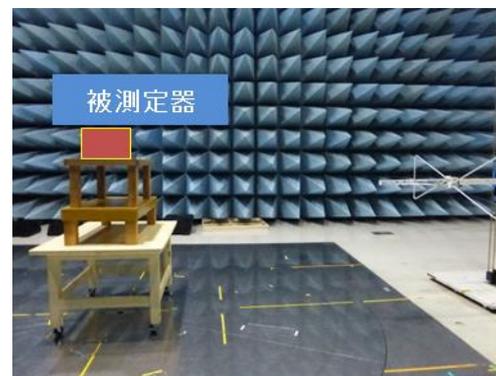
3. 地中レーダー技術の検討

(1) 測定1 電波暗室(郵政省告示第127号)での電気的特性測定

目的: 地中レーダー機器の電気的特性を確認するため、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。)に則った測定を実施した。(25機種)

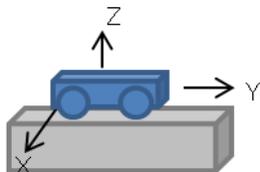


【測定例の写真】

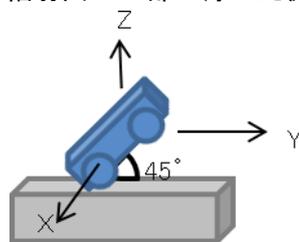


地中レーダー機器は被測定物に密着して使用することが多いので、被測定器の輻射面が下向きの時と、浮いた時の条件も考慮して以下の4形態で測定した。

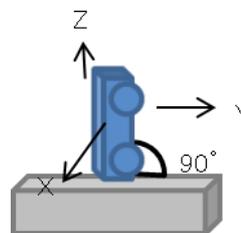
① 輻射面が被測定対象物に
正対した場合
(通常利用時)



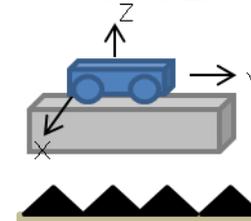
② 輻射面の一部が浮いた状態



③ 輻射面を開放した状態



④ 輻射面が被測定対象物に
正対した場合
(通常利用時で床面にフェライト板
と吸収体を置く)

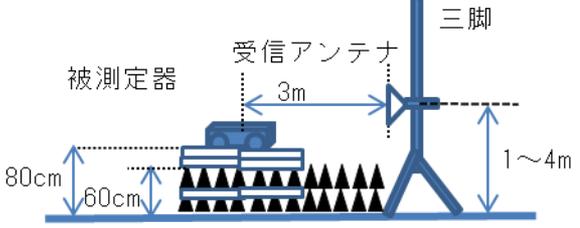
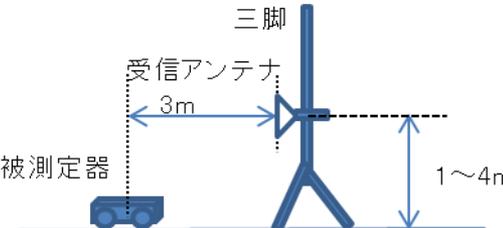
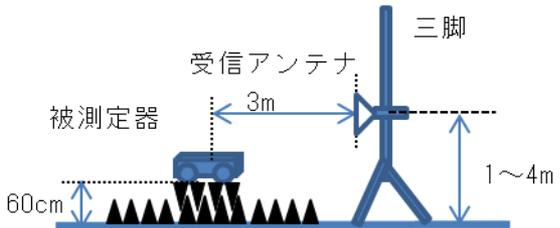


3. 地中レーダー技術の検討

(2) 測定2 電波暗室 (ITU-R/FCC参考) での電気的特性測定

目的: 吸収体の上に地中レーダー機器を置いた測定を行い、測定1と比較した。(5機種)

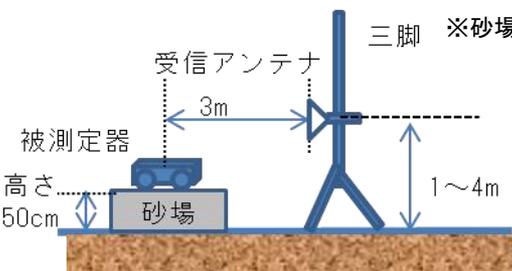
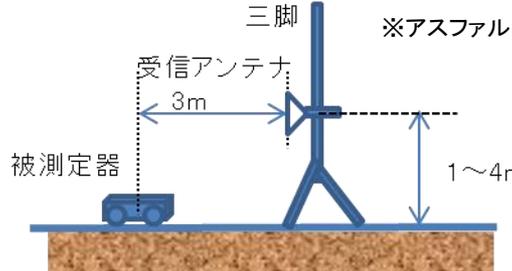
【被測定器の置き方】

<p>測定2①被測定器の真下に吸収体(h=30cm)を2段に重ねて置き、被測定器の高さを80cm、60cmにする。</p>	<p>測定2②被測定器を床面に直置きとする。</p>	<p>測定2③吸収体を噛み合わせて重ねて、被測定器の高さを60cmにする。</p>
 <p>※測定2①aは保護用発泡スチロールで20cm高くした。 測定2①bは保護用発泡スチロールを1枚置いた。 その上に被測定器を置いて測定。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>※床面下は金属が敷かれている。</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>

(3) 測定3 オープンサイト (ITU-R/FCC参考) での電気的特性測定

目的: 参考のため、砂の上に地中レーダー機器を置いた測定を行った。また、アスファルトの上に直置きして測定を行った。(1機種)

【被測定器の置き方】

<p>測定3①砂袋で重ねた砂場の上に被測定器を置く。</p>  <p>※砂場の大きさ 幅130×奥行100×高さ50cm</p>	<p>測定3②被測定器をアスファルトの上に直置きとする。</p>  <p>※アスファルトの下は土</p>
--	--

※ホーンアンテナ使用時は被測定器に向けてチルト。

※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。

(註) FCCとは、連邦通信委員会 (FCC: Federal Communications Commission) で、アメリカ合衆国議会の法令によって創設された独立機関である。アメリカ国内の電気通信・放送分野における規則制定、行政処分の実施を行う。

(註) ITU-Rとは、電気通信分野における国際連合の専門機関である国際電気通信連合 (ITU: International Telecommunication Union) の無線通信部門 (ITU-R: ITU Radiocommunication Sector) で、無線通信に関する国際的規則である無線通信規則 (RR: Radio Regulations) の改正、無線通信の技術・運用等の問題の研究、勧告の作成及び周波数の割当て・登録等を行っている。

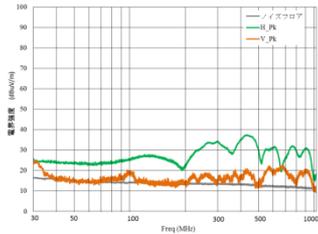
参照元: 総務省 電波利用ホームページ <http://www.tele.soumu.go.jp/j/adm/inter/itu-r/> より

4. 地中レーダー技術の電気的特性測定まとめ

測定1

被測定器は高さ1.5m

地中レーダー高1.5m

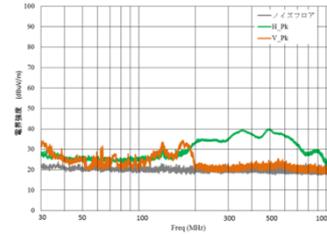


告示第127号の測定は尖頭値検波した最大となる電界強度値を測定することになり、輻射面を開放した条件となるが、ここでは輻射面が下向きの使用形態で同じ条件で比較した。

測定2

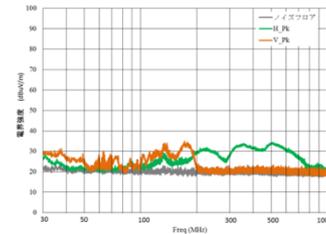
①被測定器は発泡スチロールで高さ80cm

地中レーダー高80cm
吸収体高60cm



②被測定器は高さ60cm

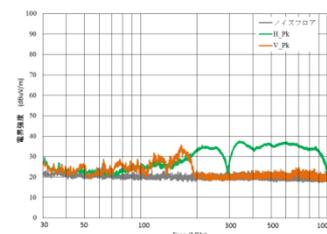
地中レーダー高60cm
吸収体高60cm



(③参考)

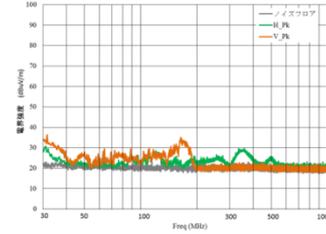
被測定器は発泡スチロールで高さ80cm

地中レーダー高80cm
吸収体高60cm



③被測定器は高さ60cm

地中レーダー高60cm
吸収体高60cm

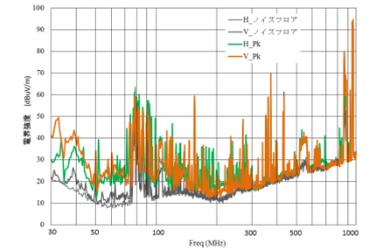


測定3

①砂袋で重ねた砂場の上に被測定器を置く。



砂場高50cm



外来ノイズが大きく、尖頭値検波した電界強度値から最大値を探すのは難しい。また、準尖頭値検波して電界強度値を探すことになるが、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い場合もあった。

- (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。
- (2) 電波暗室等など安定した測定環境が望ましい。

5. 検討とりまとめ(1/2)

今回の調査を踏まえ、技術的、制度的な検討及び測定方法、測定条件の検討を行ったところ以下のとおりである。

(1) 技術的、制度的検討

地中レーダーは前述のとおり、地面や壁面に密着した状態で電波を発射して地中や壁中の対象物を計測(検知)するものであり、地面や壁面以外の方向へ電波を発射する必要性はないため、電波の輻射は特定の方向に限定され、それ以外の方向に輻射面が向いた場合には電波発射を抑制することが肝要である。

また、地中レーダーは広範囲の周波数帯を使用することから、広範囲に渡る多数の無線局に混信を与えずに運用する必要があるため、通常の運用状態であってもできるだけ空間へ輻射される電波を抑制することで他の無線システムとの周波数共用を図ることが肝要である。

このため、輻射面が被測定物の方向以外に向いた場合には、自動的に電波の発射を停止する機能やロック機能を備えることが適当であり、例えばこの機能としては、地中レーダーの輻射面にスイッチを取り付け、輻射面が地面等に密着している場合にのみ送信機の電源が入る仕組みなどが考えられる。

また、輻射面以外の筐体のシールドを強化するなどして筐体から発射される電波を可能な限り抑制することや、RRで分配されている電波発射禁止帯域は電波を発射せずに計測可能とする技術的能力を備えることも必要と考えられる。

なお、他の無線システムとの周波数共用にあっては、電波法施行規則第6条第1項にある微弱無線設備の規定値以下であれば一定程度の周波数共用が可能と考えられることから、基本的には地中レーダーから輻射される電波はこの規定値を満足することが適当と考えられる。しかし、今後の利用ニーズから高出力の地中レーダーが求められる場合も想定され、この場合には他の無線システムとの運用を調整しながら周波数共用を図ることから、地中レーダーの運用者の特定、運用状況の把握などを可能とするために無線局制度面における対処も必要と考えられる。

(註) RR (RR: Radio Regulations) で、ITU-Rにより定められている。

5. 検討とりまとめ(2/2)

(2)測定方法、測定条件の検討

地中レーダーは対象物の探査距離や分解能を確保する為に、前述のとおり広範囲の周波数を使用するシステムであり、使用する周波数は、地中レーダーの特性を決める上で非常に重要となり、50MHz～4.5GHzの広範囲な周波数を使用している。

この様に地中レーダーの周波数が広帯域を使用するものであり、他の無線システムとの円滑な共用を図るためには前述のとおり微弱規定値以下が望ましい。このため電波法施行規則第6条第1項に規定する「発射する電波が著しく微弱な無線局の電界強度の測定方法」(告示第127号)による測定方法が定められている。

しかしながら、地中レーダーが地面や壁面に密着して電波を発射する特殊な利用をする装置であること、密着した媒質によりアンテナ放射パターンが変わる等から、現在の告示による測定方法は、地中レーダーの実利用状態とは異なる状態での測定になっている。

従って今後の地中レーダーの電界強度測定については、ITU-RやFCC等の測定方法(輻射面の媒質への密着、砂場や吸収体の使用の推奨等)を参考とし、実際の利用状態を考慮して地中レーダーに相応しい測定方法、測定条件の検討が望ましい。

また、これまでの測定結果及び考察より、安定した測定を行うには、誘電率等を一定に保った電波暗室等の屋内での測定環境の確保が肝要であり、電波暗室等における吸収体等を使用した場合の詳細な測定方法、測定条件の検討が望ましい。

【五十音順、敬称略】 17名

	団体名	役職	氏名
座長	国立大学法人東北大学 東北アジア研究センター	教授	佐藤 源之
副座長	国立研究開発法人情報通信研究機構 電磁波研究所 電磁環境研究室	主任研究員	後藤 薫
	ボッシュ株式会社 電動工具事業部マーケティング部	ゼネラルマネージャー	岡田 成弘
	日本無線株式会社 通信機器事業部 オートモーティブ企画グループ	担当部長	佐藤 忠
	株式会社トーキンEMCエンジニアリング	主任	佐藤 稔
	応用地質株式会社 計測システム事業部	副事業部長 兼 開発部長	佐野 康
	一般財団法人テレコムエンジニアリングセンター 電磁環境・校正事業本部	電磁環境試験部長	佐野 康二
	川崎地質株式会社 戦略企画本部 技術企画部	課長	鈴木 敬一
	株式会社光電製作所 産機営業部		鈴木 盛雄
	株式会社RSダイナミクス・ジャパン 営業技術課	課長	進 正明
	日本信号株式会社 ビジョナリービジネスセンター EMS事業推進部		千賀 敦夫
	株式会社ジオファイブ	専務取締役	永井 延史
	三井造船株式会社 機械・システム事業本部 社会インフラ総括部 営業グループ	主管	馬場 聡
	日本ヒルティ株式会社 技術本部 東日本プロジェクト開発課	キープロジェクトグループマネージャー	(H28.7.20から9.30まで) 久富 真悟 (H28.10.1より) 水落 潤
	一般社団法人日本非開削技術協会 地下探査技術委員会 委員 (株式会社NTEC 東日本営業所)	テクニカルマネージャー	増田 順一
	ジェイアール東日本コンサルタンツ株式会社	取締役 防災計画部長	森島 啓行
株式会社パスコ パスコ総合研究所	上級主任研究員	吉村 充則	