

2 地中レーダーの現状

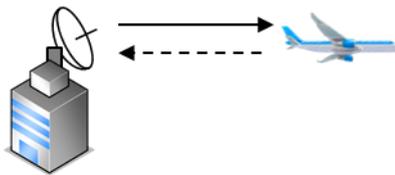
2.1 地中レーダー技術について

(1) レーダーとは

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]

主な使用周波数帯は、1/3/5/9GHz 帯
使用周波数帯域幅は数 MHz 以下である。



[地中レーダー]

使用周波数帯 50MHz~4.5GHz

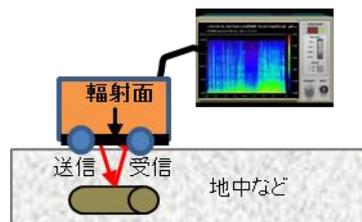


図 2-1 レーダーの原理

レーダーはその用途によって、航空管制用、海上監視用、気象用、防衛用等に分類される。これらは、無線航行陸上局、無線航行移動局（あわせて無線航行局）、無線標定陸上局、無線標定移動局等がある。

電波法施行規則第 2 条第 1 項第 32 号では、「レーダー」とは、決定しようとする位置から反射され、又は再発射される無線信号と基準信号との比較を基礎とする無線測位の設備をいう、と定義されている。

レーダーには船舶・航空機の航行のための無線航行用とそれ以外の気象観測や速度測定や物体検知などのための無線標定用がある。

また、自動車の障害物検知用レーダーや防犯用侵入者検知センサーなどもミリ波レーダー一用又は移動体検知センサー用として特定小電力無線局として運用されている。

(2) 地中レーダーとは

地中レーダー（GPR：Ground Penetrating Radar）は、電磁波（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。

図 2-2 に実際の地中レーダー機器の写真を示す。



図 2-2 実際の地中レーダー機器

(註) 応用地質 (株)、日本信号 (株)、日本無線 (株) のホームページより抜粋

(a) 原理

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。図 2-3 に地中レーダーの計測の原理を示す。

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。

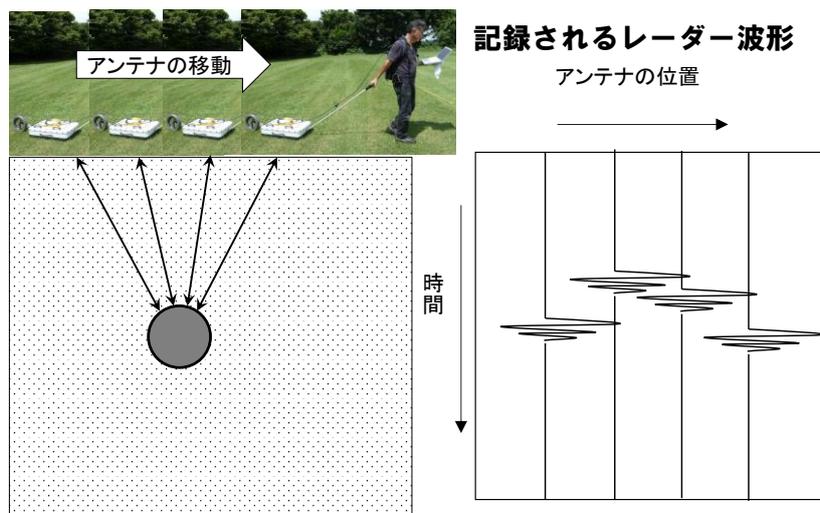


図 2-3 地中レーダー計測の原理

- ア 地中での電磁波速度は媒質の電氣的性質、つまり導電率、誘電率、透磁率によって定まる。地中レーダーは電波の波動的性質を利用した計測法である。周波数 f (Hz) の電磁波に対する波長 λ (m) と電磁波速度は次式で関係付けられる。

$$\lambda = vT = v/f \quad (\text{m})$$

また電波の速度は

$$v = c / \sqrt{\epsilon_r}$$

であるがここで c は真空中の電波速度、 ϵ_r は媒質の比誘電率である。

- イ 地中レーダーでは電磁波パルスを地表に置かれた送信アンテナから地中に放射し、受信アンテナで受信する。送信アンテナから放射された電波は地中を伝搬し、地層境界面などによって反射を受ける。レーダー波の反射強度は地中媒質と対象物の誘電率の比で決まる。受信アンテナが捉えた反射波を記録する。地中の電波速度がわかっている場合、送信電波が反射波として戻ってくる時間 τ (s) を計測することで反射体の深度 d (m) は次式で推定できる。

$$d = v\tau/2 \quad (\text{m})$$

電波が地中から反射するのは地中に不均質な物質が存在することによる。電波を反射する不均質物体は金属のような導体が最も顕著であるから、パイプやケーブルの地中レーダーによる検出は容易である。

- ウ 分解能と探査距離は周波数に対して相反するため、周波数の選択は計測の特性を支配するもっとも重要な要因である。通常地中レーダーでは 50MHz~4.5GHz 程度の周波数が利用されている。周波数と特性の関係は表 2-1 のとおり。

表 2-1 周波数と特性の関係

周波数	低い	—	高い
波長	長い	—	短い
減衰量	小さい	—	大きい
分解能	低い	—	高い
探査距離	大きい	—	小さい

尚、代表的な媒質の比誘電率を参考資料 5 に示す。

(b) 構成

地中レーダーの基本的な構成は図 2-4 のとおり。装置は送信機、受信機、それぞれに接続された送受信アンテナ、ならびに波形表示装置などから構成される。これらすべてが一体化された装置と、それぞれの部分が分離している装置がある。

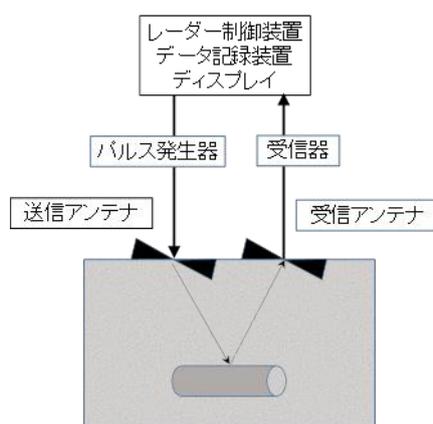


図 2-4 地中レーダー装置の原理図

地中レーダー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。

(註) レーダーの基礎. [コロナ社, (2017)] (大内和夫 編著) ISBN978-4-339-00894-4
第 8 章 地中レーダー (佐藤 源之) より抜粋

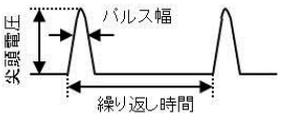
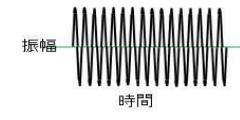
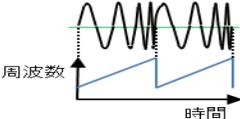
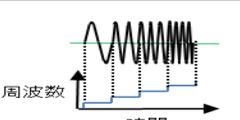
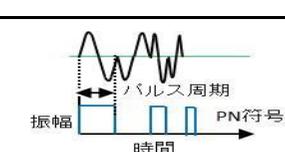
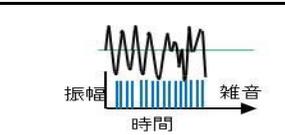
(c) 地中レーダー技術の特徴

- 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。

(d) レーダー方式と特徴

地中レーダー技術の特徴であ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他、多様な変調方式が利用されている。現状で商用の地中レーダー機器のほとんどがインパルスレーダーシステムであるが、他の変調方式を利用する装置もある。地中レーダーで利用されるレーダー方式、変調方式、特徴は表 2-2 のとおり。

表 2-2 レーダー方式と特徴

レーダー方式	変調方式	送信波形	動作原理	特徴
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。	反射波形が反射体位置・形状に対応するから信号処理を経ずに受信信号から直接反射体の深度や位置を特定できる。
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。	アンテナに対して固定された物体までの距離情報が特定できない。
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。	反射対距離検出のための帯域フィルタあるいは FFT アルゴリズムなどの信号処理を必要とする。
	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。	反射体までの距離や反射係数を求めることができ、実際の測定したスペクトルから時間領域波形を得るために FFT アルゴリズムなどの信号処理を必要とする。
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。	反射対距離検出のための FFT アルゴリズムなどの信号処理を必要とする。
	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。	反射対距離検出のための FFT アルゴリズムなどの信号処理を必要とする。

7

2.2 利用目的

(1) 利用分野

地中レーダーは表 2-3 のような分野での実用的利用が進んでいる。

表 2-3 利用分野

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

(2) 利用シーン

主な利用シーンとして、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

などで利用されている。利用シーン例は図 2-5 のとおり。

実際の測定例を図 2-6 に示す。



図 2-5 利用シーン

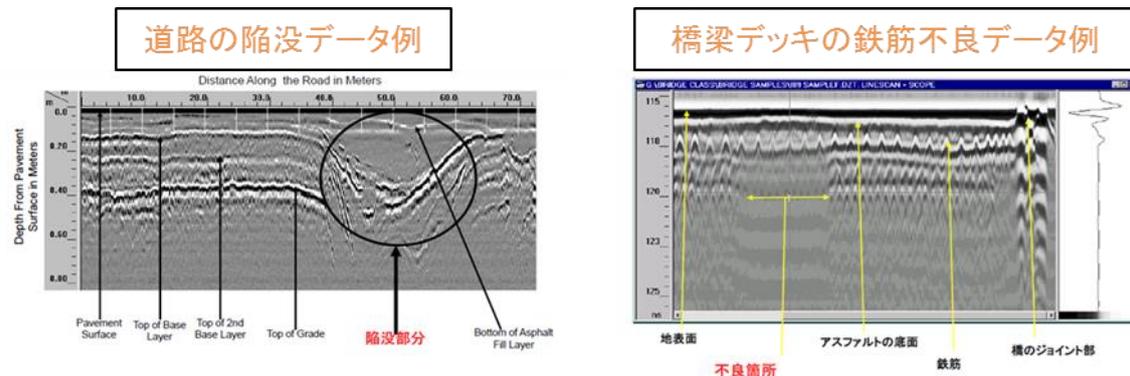


図 2-6 実際の測定例

(註) 応用地質 (株) の紹介資料より抜粋。

(3) 利用動向

ア 社会的背景

高度経済成長期に整備された公共インフラ（道路、トンネル、鉄道、港湾、空港、上下水道等）の多くが、設置後 30 年を経過、老朽化への対応が国家的課題になっている。公共インフラの高齢化が進む中、地中レーダー技術等の更なる活用、新技術との複合により、インフラの効率的な維持管理・更新に向けたメンテナンス分野での利用拡大が求められる。

建設後 50 年以上経過する割合は図 2-7 のとおり。

以下にインフラ老朽化の社会的課題の研究会の開催例と概要を示す。



図 2-7 建設後 50 年以上経過する割合

(註) 国土交通省インフラの老朽化の現状より抜粋。

(a) 平成 24 年 2 月 総務省行政評価局 「社会資本の維持管理及び更新に関する行政評価・監視 結果報告書」

1960 年代の高度経済成長期に一齐建設した社会インフラが法定耐用年数（40～50 年）を超え、更新時期を迎えている。老朽化が進行、財政的な制約が厳しくなり、効率的かつ計画的な維持管理・更新が課題。港湾施設、空港施設、上下水道、河川管理施設等の公共インフラ施設の維持管理及び更新等の実施状況を調査。

(註) 総務省 行政評価局ホームページより抜粋。

http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/54058.html

(b) 平成 25 年 10 月 関係省庁申合せインフラ老朽化対策の推進に関する関係省庁連絡会議の設置

インフラの老朽化対策に関し、関係府省庁が情報交換及び意見交換を行い、連携を図るとともに、必要な施策を検討・推進するため、「インフラ老朽化対策の推進に関する関係省庁連絡会議」を設置。

同年 11 月、政府、地方公共団体等、あらゆるインフラを対象とした今後の取り組みの全体像を示す「インフラ長寿命化基本計画」を決定、平成 28 年度までに公共インフラの着実な老朽化対策を実施に向けた「インフラ長寿命化計画」を作成することとされた。

(註) 内閣官房ホームページ より

http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/infra_roukyuuka/dai2/index.html

(4) 利活用の実態

実際に、国土交通省 東北地方整備局では、以下のとおりの実績がある。同じように、他の整備局でも空洞調査として地中レーダー機器を用いた調査を定期的実施している。

ア 路面地下空洞調査の実績

[車道部]H6～H27 調査延長：約 6,923km

[歩道部]H6～H27 調査延長：約 768km

空洞発見箇所：約 572 カ所

イ 路面下空洞調査

道路に突然に陥没が発生した場合は、重大な事故に直結するので、道路陥没の事故防止のために、電磁波レーダーを搭載した車両などにより、路面下の空洞調査を実施している。

ウ 路面下空洞調査の状況

路面下の空洞を以下の流れによって確認する。調査の流れは表 2-4 のとおり。

(註) 国土交通省 東北地方整備局 東北技術事務所ホームページより抜粋。

<http://www.thr.mlit.go.jp/tougi/kensetsu/hozen/kudou.html>

表 2-4 路面下空洞調査の流れ

一次調査	二次調査（詳細調査）
<p>電磁波レーダー探査車などを用いて調査を実施、取得したレーダー信号を解析して空洞の可能性のある異常信号を抽出する。</p>	<p>一次調査により空洞の可能性のある箇所について、詳細調査を実施。 位置特定調査：空洞の広がりや位置を特定 削孔調査：空洞の深さを特定</p>
 <p>車道部は 50km/h で走行しながら非破壊で空洞の可能性のある信号を抽出。</p>	 <p>カート型地中レーダー装置を用いて位置と広がり特定。</p>
 <p>歩道部は手押し式探査車を用いて空洞の可能性のある信号を抽出。</p>	 <p>位置確認後、道路を削孔し、空洞の深さを調査。</p>

(5) 期待される活用方法

インフラ等の分野の他に、埋設物の探査に多く利用されている。また、遺跡探査、環境計測、防災・減災等を目的としても利用されている。例えば、遺跡探査では、遺構や遺物と周囲との誘電率の違いが地中レーダー探査の対象となり、空洞遺構や金属の遺物は顕著な反射構造として検出できる。また、遺構の土壌と周囲土壌との間に空隙率や含水率等の違いがあれば探査として有効で、遺跡の発見や保護に役立っている。

その他に、地雷探査や遺留品探査への有効性が確認されている。今後、インフラの保守点検分野を中心に、様々な用途への活用が期待される。

2.3 地中レーダー機器の形状による類型化

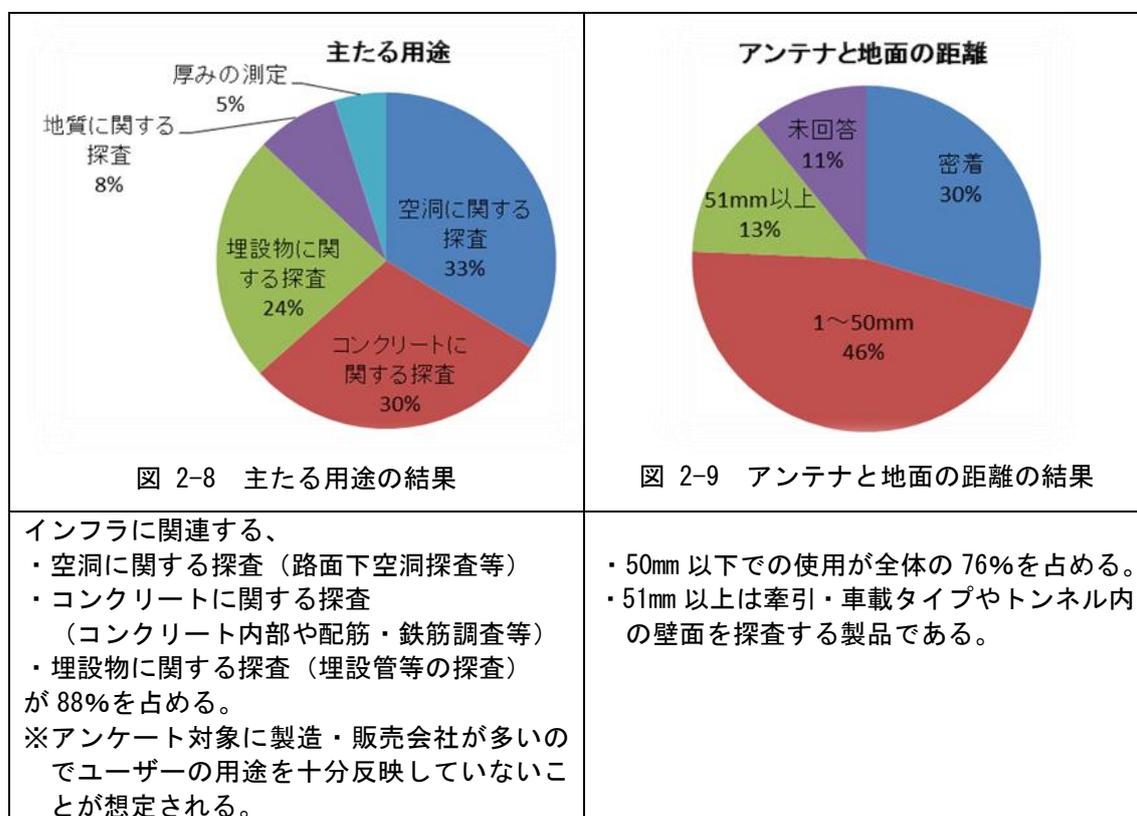
国内の地中レーダー機器の使用実態を調査するため、構成員の協力を得て J-GPR 会員にアンケートを実施した。対象は 26 事業者で回答は 19 事業者であった。回答のあった事業者から地中レーダー機器の類型化を行った。

その他の質問や回答結果は参考資料 1 に示す。

(註) J-GPR とは、GPR 技術に関する 20 社程のコンソーシアム
事務局：東北大学 東北アジア研究センター 佐藤源之教授

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

図 2-8 に主たる用途、図 2-9 にアンテナと地面の距離に関するアンケート結果を示す。



地中レーダー機器等の類型化は、形状（カートタイプ、ハンディタイプ、車載/牽引タイプ）と、国内外製品で細分化した、合計 15 社（国内メーカー 5 社、海外メーカー 10 社）で取り扱っている 28 製品を分類した。分類した結果を、

表 2-5 にカートタイプ、

表 2-6 にハンディタイプ、

表 2-7 に車載・牽引タイプでまとめた。

尚、不明または開示不可は「-」としている。

参考資料 2 に開示可能な範囲で地中レーダー機器の諸元を示す。

表 2-5 地中レーダー機器の類型化（カートタイプ）

形状	製造	メーカー	製品名	変調方式	周波数	主たる用途
カート 式 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

表 2-6 地中レーダー機器の類型化（ハンディタイプ）

形状	製造	メーカー	製品名	変調方式	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

表 2-7 地中レーダー機器の類型化（車載・牽引タイプ）

形状	製造	メーカー	製品名	変調方式	周波数	主たる用途
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～4GHz	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

2.4 諸外国（米国、欧州等）での規格・認証制度

諸外国(米国、欧州等)の規格、認証制度を抜粋し以下に示す。

(1) 米国

主要内容以下のとおりであり、免許不要である。

- FCC 02-48 244
 - 準尖頭および平均エミッション測定に於いて GPR と壁面イメージングシステム (wall imaging systems) の放射は Dry Sand pit へ向けると指定している。
 - 20 インチの乾燥した砂に向けられる。乾燥砂は、コンクリート/砂利の試験台よりも確立するのが簡単で、8 インチ毎の不連続を含まない。(深さは約 50cm であるが幅についての記述は無い)
- FCC 02-48 245
 - 接地平面に RF 吸収性材料の使用できる。この吸収性材料が使われた場合、4.7dB を測定結果に加える。
- 47 CFR 15 Subpart F (Section 15.509)
 - GPR はハンドヘルド型及び壁面探査の装置は、送信を停止する手動スイッチを備え、スイッチがリリースされてから 10 秒以内に送信を停止する。

(註) FCC 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。

(2) 欧州

(a) 経緯

R&TTE (Radio and Telecommunications Terminal Equipment) directive 1999/5/EC 指令の範囲に GPR/WPR を含む。これにより、CE マークが必要となる。

ETSI EN 302 066-1 V1.2.1 (2007/12) 及び ETSI EN 302 066-2 V1.2.1 (2008/02) で技術基準が定められている。

(b) 主要内容

- ETSI EN 302 066-1 、 EN 302 066-2
 - Sand pit 上での測定と指定されている。(深さは約 50cm であるが幅についての記述は無い)
 - 手動操作の GPR/WPR (Wall Probing Radar) は、送信を停止する手動スイッチを備える。スイッチがリリースされてから 10 秒以内に送信を停止する。
 - GPR/WPR は、探査面から 1m 以内で操作するように設計されていること。
 - 車両に搭載している場合は 60 秒以内に送信停止する。(Annex B)

(註) ETSI 欧州電気通信標準化機構 (ETSI:European Telecommunications Standards Institute) で、ヨーロッパ圏の電気通信全般の標準仕様を策定する非営利団体のこと。

(3) ITU-R

➤ ITU-R SM.1754 1.5 項

Measurement techniques of ultra-wideband transmissions (2006 年)

- 50cm の深さの Sand bed に向ける。もう一つは、80cm の高さの GPR 装置の下に 500MHz より下のフェライト吸収体を置くか、または、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構わない。

(註) ITU-R 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。