

地中レーダ

—電磁波による地下計測技術—

佐藤源之 著

コロナ社

ま え が き

電波は「情報伝送」, 「エネルギー伝送」, 「計測」の3分野で利用されてきた。放送・通信など情報伝送が長年電波利用の要であったが, 光通信の発達で, その役割を変えている。レーダ技術を中心とする電波の計測への応用は, ヘルツの検証実験から一貫して研究開発と実用化が進められてきた。電波・光が空間を波動伝搬する物理的な性質に基づくものであることから, 移動体無線通信, 無線電力伝送と並び, 計測への利用は, 他に置き換えることができない。

レーダ技術は, 航空管制, 気象観測などの大型システムから, 自動車衝突防止レーダなど身近な利用が拡大している。こうした目的で小型かつ汎用性の高いハードウェアが利用できるようになり, 人体検知など新しいレーダ技術の応用が広まっている。

一方, 衛星搭載合成開口レーダ (SAR) は 1990 年代に実用化され, 災害時の観測などに威力を発揮し, マスメディアでレーダ画像を見る機会も多い。電波反射の方向と伝搬時間から反射体の位置を特定するのがレーダ技術の基本である。この技術を拡張し, 対象物を画像化するのがイメージングレーダであり, 一般には衛星から地表面を画像化する技術をリモートセンシングと呼んでいる。しかし, 地中レーダは人間が直接目で見ることができない埋設物を電波を利用して遠隔的 (remote) に視る (sensing) という点で, 真にリモートセンシング技術である。また, 地中レーダは移動しながら対象を画像化する SAR 技術を基本とする点で, 衛星搭載 SAR との技術的な点での共通性が高い。

著者は, 環境計測, 遺跡探査, 埋設物検知などの分野で地中レーダ技術の開発に携わってきた。阪神・淡路大震災, 東日本大震災を経て社会インフラの保全管理の重要性が強く謳^{うた}われるようになり, 地中レーダは埋設物の監視を非開

削で行う方法として注目を集めている。

地中レーダはスイッチを入れてレーダ装置を動かすだけで、レーダ画像がディスプレイに表示され、誰でも簡単に使える。その反面、地下媒質中を伝搬した電波で埋設物を計測することから電波の減衰とクラッタが障害となり、空中で数百 m 離れた物体の計測より、地下 30 cm の埋設管検知のほうが難しいという事態にしばしば遭遇する。こうした問題を解決するには、電波の物理的な性質、媒質と電波の相互作用、レーダ計測装置と信号特性などの理解が唯一の方法である。

本書は東北大学大学院環境科学研究科において、著者が社会人を含みリカレント講義として行ってきた内容に加え、物理探査学会・物理探査セミナー、また IEEE International Geoscience and Remote Sensing Society (GRSS) でのチュートリアル・レクチャーなどでの講義ノートを基にしている。読者として電気・情報系の学部学生、工学・理学系大学院学生、また地中レーダを実際に利用する社会人を想定している。電波工学についての基礎的な説明は他に譲り、地中レーダに特有な技術を中心に解説した。遺跡調査、土木・地質調査を目的とする読者には、やや難解な箇所があるかもしれないが、電波工学の本質を捉える道筋を見つける手助けと思っていただきたい。ソフトウェア、GUI などの発達、さらに AI の導入などで、地中レーダのブラックボックス化が今後進んでいくと予想するが、読者に地中レーダ技術が電波科学を基礎とする計測技術であることを理解していただくのが本書の目的である。

2024 年 1 月

佐藤源之

目 次

1. 地中レーダ技術の概要

1.1 地中レーダの利用目的	1
1.2 歴 史	3
1.3 計 測 の 実 際	5
1.4 地中レーダの原理	9
1.4.1 地中電波伝搬	9
1.4.2 電波の反射	9
1.5 岩石・地層の誘電率特性	11
1.6 地中レーダ装置	12
1.6.1 レーダシステムの性能評価	12
1.6.2 地中レーダシステム	14
1.6.3 送 信 波 形	15
1.6.4 受 信 波 形	16
1.6.5 波 形 表 示	17
1.7 計 測 手 法	17
1.7.1 アンテナ配置	17
1.7.2 誘電率分布計測	20
1.8 データ処理技術	20
1.8.1 地下構造とレーダ波形	21
1.8.2 地中レーダ信号処理の特徴	21
1.8.3 電磁界シミュレーション	22

1.9 ま と め	23
-----------	----

2. レーダシステム

2.1 レーダの基本特性	24
2.1.1 レーダ方程式	24
2.1.2 最大探査深度	26
2.1.3 レンジ分解能	33
2.1.4 地中レーダ信号波形モデル	36
2.1.5 地中レーダにおけるレンジ分解能	39
2.1.6 方位（アジマス）分解能	43
2.1.7 周 波 数	50
2.2 レーダ方式	51
2.2.1 インパルスレーダ	51
2.2.2 連続波レーダ	55
2.2.3 FM-CW レーダ	56
2.2.4 ステップ周波数（SF-CW）レーダ	57
2.2.5 その他のレーダ方式	59
2.3 アンテナ配置	60
2.3.1 モノスタティック・レーダ	60
2.3.2 バイスタティック・レーダ	61
2.3.3 マルチスタティック・レーダ	63
2.3.4 アレー型地中レーダ	63
2.4 ボアホールレーダ	65
2.5 測 位 技 術	67
2.6 ま と め	69

3. 媒質の性質

3.1 導電性媒質中の電波伝搬	70
3.1.1 無損失媒質中での電波	71
3.1.2 わずかに導電性をもつ媒質中の電波	72
3.1.3 高導電率媒質中での電波	72
3.2 地下媒質の電気・磁気特性	74
3.3 地下媒質の電氣的性質の計測手法	75
3.3.1 平行平板法	75
3.3.2 同軸プローブ法	76
3.3.3 同軸管法	77
3.3.4 TDR 法	77
3.3.5 地中レーダ計測を利用する方法	79
3.4 水の誘電特性	79
3.5 混合媒質	80
3.6 土壌水分と比誘電率	82
3.7 地下媒質の弾性波による計測	83
3.8 ま と め	84

4. アンテナと電波放射

4.1 地中レーダアンテナからの電波放射	85
4.1.1 線状アンテナからの電波放射	85
4.1.2 パルス励振されたアンテナからの過渡放射電磁界	87
4.1.3 地中レーダの送信波形	91
4.1.4 地中レーダ用アンテナに求められる特性	92
4.1.5 アンテナ中心周波数と周波数帯域幅	93

4.2 地中レーダ用アンテナ	94
4.2.1 基本的なアンテナ	95
4.2.2 地中レーダに特化したアンテナ	98
4.2.3 アンテナシールド	99
4.2.4 バラン (平衡-不平衡回路)	100
4.3 媒質と地中レーダアンテナ	101
4.3.1 媒質近傍に置かれたアンテナ	101
4.3.2 アンテナの設置形態	103
4.4 ま と め	105

5. 信号処理と表示

5.1 信号処理の目的	106
5.2 レーダ信号の情報と表示	107
5.3 1次元信号処理	112
5.3.1 1次元波形モデル	112
5.3.2 周波数フィルタリング	113
5.3.3 パルス圧縮	114
5.4 2次元信号処理	122
5.4.1 2次元波形モデル	122
5.4.2 2次元信号としての信号処理	125
5.4.3 空間-時間周波数領域におけるフィルタリング	126
5.5 基本的な信号処理アルゴリズム	129
5.5.1 平均値除去	131
5.5.2 振幅処理	132
5.5.3 移動平均	134
5.5.4 NMO補正	135
5.6 速度解析	136

5.6.1	透過波の利用	136
5.6.2	点反射体の利用	137
5.6.3	平板状反射体の利用	137
5.6.4	ラテラル波の利用	139
5.7	埋設物の形状推定	140
5.7.1	埋設物位置検知	141
5.7.2	マイグレーションによるレーダイメージング	141
5.7.3	レーダ対象物からの電波散乱モデル	142
5.7.4	逆問題としてのマイグレーション	144
5.7.5	時間領域でのレーダイメージング	146
5.7.6	ディフラクションスタック	146
5.7.7	f-k マイグレーション	149
5.7.8	リバースタイム・マイグレーション	153
5.7.9	3次元マイグレーション	155
5.7.10	トモグラフィ	155
5.8	電磁界シミュレーション	156
5.8.1	波線追跡法	157
5.8.2	モーメント法	158
5.8.3	FDTD 法	158
5.9	ま と め	160

6. 計測の設計

6.1	地表計測の設計	162
6.2	測線の設定と測位	163
6.3	ボアホールを利用した計測	164
6.4	ま と め	169

7. 電 波 法

7.1 無線局としての地中レーダ	171
7.2 微弱無線局	171
7.3 地中レーダからの電波放射計測	172
7.4 ま と め	175

8. 計 測 事 例

8.1 埋 設 管	177
8.1.1 埋設管計測の意義	177
8.1.2 Bスキャン画像	178
8.1.3 アンテナ位置制御と地中レーダプロファイル	180
8.2 舗 装 道 路	181
8.3 空 港 舗 装 体	181
8.4 樹 木 の 根	183
8.5 ま と め	184

9. 偏 波 計 測

9.1 偏波の利用	185
9.2 偏波基底変換	186
9.3 埋設管計測への利用	188
9.4 反射体識別への利用	190
9.5 ま と め	193

10. アレー型地中レーダ

10.1	アレー型地中レーダ「やくも」	194
10.2	計 測 例	197
10.3	津波被災者搜索活動	198
10.4	CMP 計 測	200
10.5	舗装面計測への利用	202
10.6	偏波計測可能なアレー型地中レーダ	203
10.7	ま と め	206

11. 人道的地雷除去活動

11.1	人道的地雷除去活動とは	207
11.2	従来の地雷検知・除去技術	209
11.3	電磁界を利用した地雷検知センサ	210
11.4	デュアルセンサ ALIS の開発	212
11.5	カンボジアでの評価実験	216
11.6	カンボジアでの実用化	217
11.7	ウクライナを含む地雷被災国での運用	219
11.8	ま と め	220

付録	レーダ断面積	221
----	--------	-----

引用	参考文献	224
----	------	-----

あ と が き		235
---------	--	-----

索 引		236
-----	--	-----

1

地中レーダ技術の概要

電波を利用する計測法であるレーダ技術は、航空管制、気象観測、自動車衝突防止など身近な分野でも普及が進んでいる。地中の埋設物の検知や可視化を目的とする地中レーダは、通常のレーダ技術に加えて、近傍電磁界、媒質との相互作用などを考慮しなければ実際の応用に結びつかない。本章では地中レーダ技術を俯瞰し、2章以降で詳細な説明を行う。

1.1 地中レーダの利用目的

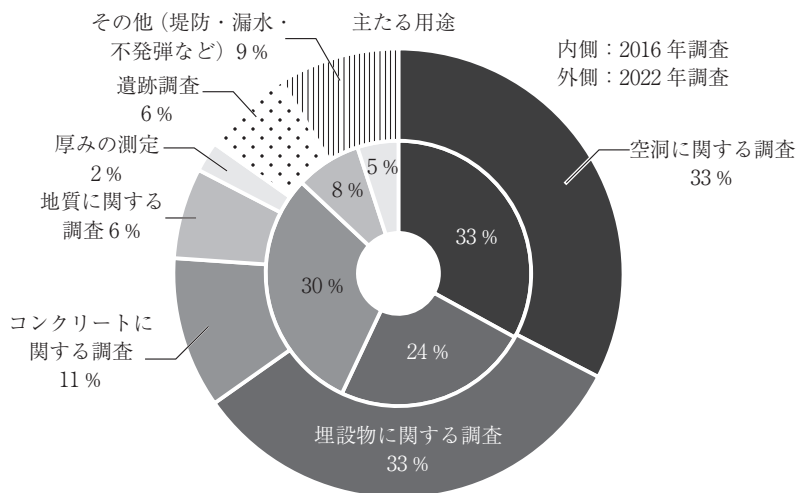
電波の反射往復時間から対象物の検知と距離を推定する手法がレーダ (radio detection and ranging : radar) であり、これを地下計測に応用したのが地中レーダ (ground penetrating radar : GPR) である。地中レーダは送受信アンテナを走査 (scan) して 100 MHz～数 GHz の電波からの反射データを取得し地下構造のイメージングを行う。

地中レーダは地下構造を高速、高精度に可視化できる手法である。地震探査など他の地下計測手法と比較して計測対象である地層中の水分率に変化がある、例えば岩体と土壌の地層境界面判別、土壌の水分率分布、岩体中の水みち、地下き裂検出、人工的な埋設物や遺物等の検出などで特に有効である。また電波が空気中も伝搬できることから、破碎帯や空洞など地震波、超音波が伝搬できない対象も計測可能であり、アンテナが地面に非接触でも送受信できることから、自動車への搭載などによる高速な計測ができる。

地中レーダの特徴を活かした応用範囲は広く、わが国では埋設物検出 (パイ

2 1. 地中レーダ技術の概要

ブ、ケーブル) や路面空洞調査, コンクリート保全調査などで活用されている。これに対して国外では地質調査, 氷床, 地下水, 凍土計測など環境問題への応用例も多く, また近年遺跡探査への利用や地雷検知などへの応用も盛んである。地中レーダは非常に簡便な計測であるため, 実用的な目的で使われた計測回数を把握することは難しい。図 1.1 は国内の地中レーダに関連する企業を対象として 2016 年と 2022 年にアンケート調査を行った地中レーダによる計測目的の集計である^{1), 2) †}。限られた数の調査であることを念頭においても, ある程度の傾向は読み取ることができる。全体として埋設管を主とする埋設物検知が多い。埋設管検知は日常的な業務として実施されるため, アンケートに延べ回数が反映されておらず実際の割合はこれよりさらに多いと思われるが, 2016 年と比較し 2022 年でもその割合は増加している。この間, 道路陥没やインフラメンテナンスの重要性が社会的に認識され, 道路検査用のレーダ装置が多数導入されたことを反映していると思われる。



国内の地中レーダに関連する企業を対象とした
2016年と2022年のアンケート調査^{1), 2)}

図 1.1 地中レーダによる計測目的

† 肩付き数字は巻末の引用・参考文献を示す。

電波を利用した地下計測は地中レーダ以外に種々の方法が実用化されているが、主として電磁探査法のように地下深部の計測のために減衰の小さい数 MHz 以下の周波数が利用されている。100 MHz 以上の電波は地中での減衰が大きいため、地下計測手段としての利用は 1970 年代までほとんど見られなかった。しかし地中レーダは地下数 m 程度の浅層での計測需要が増加するとともに、簡便性、高速性、再現性のよさに加え、弾性波では計測の困難な空気層や砂層などを含む状況でも利用できるなど、その特徴が注目され実用化が進んだ。

コラム

電磁波は時間的に変動する電界と磁界によって形成される波動であるが、わが国の電波法では 3 THz (3×10^{12} [Hz]) 以下の電磁波を電波と定義し、それより高い周波数の光と区別してきた。しかし電波としてのテラヘルツ波技術の発達は、従来は光の領域であった赤外線との境界をなくしつつある。

1.2 歴 史

レーダ技術は 1904 年にドイツのヒュールシュマイアー (Hülsmeier) によって電波を利用した金属物体の検出法が提案され、1910 年に同じくドイツのライムバッハ (Leimbach)、レヴィ (Löwy) らによって地中に埋められたアンテナを利用した地下埋設物の位置検出法に関する特許が申請された³⁾。これらの発明は連続波を利用した手法であったが、ドイツのヒュールゼンベック (Hülsenbeck) は 1926 年にパルスを利用した埋設物探査に関する研究を行っており、これらが地中レーダに関する最も初期の研究と考えられている。

その後、氷厚計測、淡水、岩塩、砂漠など比較的電気抵抗の高い媒質を対象とする地中レーダの研究が続けられ、1970 年代に入り、一般の土壤など、より高い電気導電率をもつ媒質への適用が始まった。

地中レーダ装置の基本構成は 1970 年代から 1980 年代前半期にはほぼ確立し、アメリカ、カナダ等で開発された地中レーダ装置が地質調査などに利用され始めた⁴⁾。わが国では、1980 年代前半からパイプやケーブルなどの埋設物検知へ

の応用を目的とした装置開発が行われ^{5)~9)}、実用化が進んだ。

コラム

GPRは地中レーダ (ground penetrating radar) の略称である。技術の揺籃期には用語が定着するまで時間を要する。GPRは1980年代初期からすでに世界的に使われていたが、その原語の定義として ground penetrating radar, ground probing radar の二つが唱えられていた。おそらく両方の用語がそれぞれ使われてきて、それがGPRに統一されたのだろう。1988年にトロントで開催された地中レーダの国際会議に参加した際、用語を統一する発議がなされ、多数決の結果 ground penetrating radar が選ばれた。この会議にはカナダ地質調査所で初期の地中レーダ開発に貢献したアナン (Annan) 博士、オルフォート (Olhoeft) 博士らも参加しており、その後 ground probing radar はほとんど使われなくなった。著者は地中レーダの歴史が始まる現場に立ち会えた気がしている。ただし、欧州を中心に Georadar, Beton radar (コンクリートレーダ)、またわが国でも地下探査レーダなどの用語も見かける。

1980年代中期まで、現場でCRT画面に映し出した地中レーダ信号は、写真や熱転写プリンタで記録するしかなかった。その後1990年代からのPCと周辺機器の高性能化はめざましく、これによりデータ取得は高速化、デジタル記録が普通となり、データの信号処理が可能となった。こうした進歩により装置の小型化と、より判読のしやすい画像表示が行えるようになった。

わが国において応用面では鉄筋コンクリート構造物の内部検査に地中レーダが使用され、非破壊検査技術の標準となりつつある。また道路舗装、舗装下の空洞検知技術への利用も広まっている。

一方、地中レーダを掘削したボアホール中で利用するボアホールレーダの研究が1970年代に岩塩ドームを対象として始められた¹⁰⁾。岩塩中では電波の減衰がきわめて小さく、計測範囲が数百mにも及ぶことから地層境界面の計測など、広域な計測の実用化が進んだ。そのため、地表での地中レーダ利用より先進的な技術も積極的に導入され、指向性ボアホールレーダなどの研究も始められている。1980年代に入り、岩塩と同様、電波に対して損失の少ない花崗岩を主体とする硬岩中でのボアホールレーダ計測技術が広く認識され、

STRIPA, NAGRA など核廃棄物地下貯蔵の国際プロジェクトで、地下き裂検出技術としての実用性が確認されてきた¹¹⁾。さらに地熱地域などでは、地下き裂、破碎帯地域での地下計測に応用されている。ボアホールレーダでは複数のボアホールを利用するクロスホールによる計測も盛んで、トンネル検出について多くの成果が報告されている。またクロスホール計測によるトモグラフィについても研究が精力的に進められている¹¹⁾。

1.3 計測の実際

図 1.2[†] は 2016 年に香港で開催された地中レーダ国際会議（GPR2016）で展示された地中レーダ装置である。この写真ではカート型と呼ばれる地中レーダ装置が並んでいるが、いずれも車輪のついたカートに送受信アンテナと電子回路が収納された筐体と、信号処理、画像表示のついた制御盤が操作者が見やすい位置に配置されている。実際の計測は操作者がカートを押しながら通常の歩行速度で行い、図 1.3 に示すような垂直断面図（B スキャン）をリアルタイムで操作者が確認できる。



図 1.2 商用地中レーダ（GPR2016 香港）*

[†] 図のキャプションに*をつけた図は、コロナ社の本書籍詳細ページ (<https://www.coronasha.co.jp/np/isbn/9784339009797/>) にカラー図を掲載している。

あ　と　が　き

著者は電波工学を東北アジアを対象とした地域研究に応用することを目的に、モンゴル、中国、韓国そしてロシアでのフィールド環境計測に地中レーダを利用してきた。9.11 アメリカ同時多発テロ以降は、人道的地雷除去への地中レーダ研究に取り組んだ。東日本大震災は研究のうえで大きな契機となり、防災・減災への地中レーダの利用を強く指向するようになった。

書きためた講義ノートを定年前に書籍としてまとめておきたいと、整理を始めた。2022年2月に勃発したロシアによるウクライナ侵攻は、著者を含め地雷除去に携わる関係者に衝撃を与えた。人道的地雷除去は紛争終結後に行われるはずであるのに、戦争と並行して地雷除去を行わなければならない。コロナ禍で海外での地雷除去への技術指導を行えなかった空白を取り戻すべく、海外出張を繰り返した時期にウクライナの人道的地雷除去活動への協力を要請され、予想以上に慌ただしくなり、原稿の整理は定年を過ぎてしまった。

わが国ではレーダ技術に関する学会活動が少ないうえ、地中レーダでは装置開発の主体である電気・電子・情報工学と、応用分野である土木・地質関係の研究者が交流する機会も少なかった。西村 康先生は遺跡分野への地中レーダの普及を精力的に進めただけでなく、学際科学として分野融合を進め、著者が遺跡調査にかかわる契機を作ってくくださった。わが国に早い時期に地中レーダを紹介された鈴木 務先生にはレーダ分野の討論はもちろん、電波法を含め広い分野への地中レーダの利用について相談に乗っていただいた。現場計測を含め、研究室卒業生の協力なしに研究は進められなかった。深く感謝いたします。

人間社会の活動に密接にかかわる地中レーダ技術の普及に、本書が少しでも役立つことを願っている。

2024年1月

地雷国際会議に参加したクロアチア・ヴォディツェにて

索引

【あ】		【く】		【せ】	
アイソレーション	93	クラッタ	8, 27, 215	整合フィルタ	119
アジマス分解能	44	グレースケール	107	【そ】	
アレーアンテナ	45	グレーチングローブ	46	双曲線	7, 124
アレー型地中レーダ	63	クロスホール法	136	走査	8
アンテナ指向性	46	【け】		走時	6, 156
アンテナシールド	99	減衰定数	71	測距輪	67
アンテナ中心周波数	31	【こ】		測線	67, 163
【い】		合成開口長	45	速度スペクトル	138, 201
位相速度	127	合成開口レーダ	63	【た】	
位相定数	71	合成開口レーダ処理	109	体積水分率	12, 82
インバースフィルタ	116	コロンビア	220	ダイポールアンテナ	85, 95
インパルスレーダ	52	【さ】		多重反射	40
【う】		最大探査深度	12, 27	弾性波計測	83
ウイグル表示	107	サンプリング回路	52	【ち】	
ウィナーフィルタ	120	サンプリング定理	52	地下き裂	190
ウクライナ	219	【し】		地中レーダ国際会議	5
【お】		直達波	16	中心周波数	33, 93
奥の山古墳	31	磁気探査法	210	【つ】	
【か】		実開口長	44	津波	198
拡散場	71	周波数帯域幅	36, 93	【て】	
画像再構成	140	周波数分散性	97	抵抗装荷	99
過渡放射電界	88	樹木の根	183	ディフラクションスタック	146, 214
カンボジア	217	信号波形モデル	36	デコンボリユーション	122
【き】		人道的地雷除去	207	デュアルセンサ	212
起電力法	91	【す】		電磁誘導センサ	211
逆問題	125	スパイラルアンテナ	97	電波暗室	173
逆問題	140	【せ】		電波速度	6
金属探知機	210	【そ】			

電波法 170

【と】

同軸管法 77

同軸プローブ法 76

導電電流 71

道路舗装体 39

土壌水分計 78

土壌水分率 82

トップ (Topp) の式 12

トモグラフィ 155

【に】

2次元スペクトル 126

【の】

ノイズレーダ 60

【は】

バイスタティック・レーダ 24, 61

波数 71

バック・プロジェクション 142

波動場 71

波動方程式 73

バラン 100

パルス圧縮 115

半波長ダイポールアンテナ 92

【ひ】

光ファイバ 65

微弱無線局 171

ビバルディアンテナ 96

【ふ】

フォワードモデリング 159

複素誘電率 79, 82

符号化レーダ 60

フルウェーブインバー
ジョン 159

フレネルの反射係数 10

プロファイル計測 17

分散性 73

【へ】

平均値除去 131

ベクトルネットワーク
アナライザ 58

変位電流 71

変調方式 14

偏波 185

偏波基底 187

偏波計測 203

【ほ】

ボアホールレーダ 65, 164

方位分解能 43

ボウタイアンテナ 98

ボスニア・ヘルツェゴビナ 219

舗装体 181, 203

ホーンアンテナ 95

【ま】

マイグレーション 47, 63, 109, 125, 142, 215

埋設管 177, 188

マルチスタティック・
レーダ 63, 194

【み】

みちびき 68

【も】

モノスタティック・レーダ 60

モーメント法 158

【や】

やくも 195

【ゆ】

誘電正接 71

【ら】

ラテラル波 16, 101, 139

【り】

リバースタイム・マイグ
レーション 153

リングング 89

【れ】

レイトレーシング 157

レーダイメージング 144

レーダシステム指標 29

レーダ断面積 25, 221

レーダ方程式 25

レーダ・ポーラリメトリ 185

レンジ分解能 12, 35

連続波レーダ 55

【ろ】

ログペリアンテナ 93

【わ】

ワイドアングル計測 18

【A】

A-D 変換器 53

AGC 133

ALIS 207

A スキャン 16, 107

【B】

B スキャン 16, 107, 215

【C】		【G】		【R】	
CMP	18, 200	GNSS	68	RTK-GNSS	69, 180, 205
CMP 法	137	GNSS 測距	163	【S】	
CRIM モデル	80	GPS	68	SAR	109
C スキャン	17, 107, 215	【I】		SDR	69
【F】		ITU	172	SF-CW	205, 213
FDTD	22	【M】		SF-CW レーダ	58
FDTD 法	158	MIMO レーダ	64, 197	Stoltz マイグレーション	149
FFT	58, 113	【N】		【T】	
f-k スペクトル	127	NMO	135	TDR	20, 78
f-k フィルタリング	129	NMO 補正	19	TEM ホーンアンテナ	95
f-k マイグレーション	149	【V】			
FM-CW レーダ	56			VRP 法	136, 166

— 著者略歴 —

1980年 東北大学工学部通信工学科卒業
1985年 東北大学大学院工学研究科博士課程修了（情報工学専攻），工学博士
1985年 東北大学助手
1990年 東北大学助教授
1997年 東北大学教授
2023年 東北大学名誉教授

地中レーダ

—電磁波による地下計測技術—

Ground Penetrating Radar

— Subsurface Measurement Technology by Electromagnetic Waves —

© Motoyuki Sato 2024

2024年3月21日 初版第1刷発行



検印省略

著者 佐藤 源之
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来真也
印刷所 新日本印刷株式会社
製本所 有限会社 愛千製本所

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844・電話 (03)3941-3131(代)

ホームページ <https://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-00989-7 C3055 Printed in Japan

(齋藤)



JCOPY <出版者著作権管理機構 委託出版物>

本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は、そのつど事前に、出版者著作権管理機構（電話 03-5244-5088, FAX 03-5244-5089, e-mail: info@jcopy.or.jp）の許諾を得てください。

本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めていません。落丁・乱丁はお取替えいたします。