

目 次

序 文

第1章	レーダの概要	1
1.1	レーダの基本	1
1.2	簡易型のレーダ方程式	6
1.3	レーダのブロック図	8
1.4	レーダの周波数	13
1.5	レーダの応用	15
1.6	レーダの起源	17
	演習問題	31
第2章	レーダ方程式	34
2.1	概 要	34
2.2	雑音中の信号検出	35
2.3	受信機雑音と信号対雑音比	37
2.4	確率密度関数	40
2.5	探知確率と誤警報確率	45
2.6	レーダパルスの積分	52
2.7	目標のレーダクロスセクション	56
2.8	レーダクロスセクションの変動	74
2.9	送信電力	85
2.10	パルス繰り返し周波数	86
2.11	アンテナのパラメータ	88
2.12	各種のシステムロス	93
2.13	レーダ方程式に関するその他の考慮事項	102
	演習問題	110
第3章	MTI とパルスドップラレーダ	119
3.1	ドップラと MTI レーダの概要	119
3.2	ディレイラインキャンセラー	129
3.3	スタガードパルス繰り返し周波数	144

3.4	ドップラフィルターバンク	151
3.5	デジタル MTI 処理	157
3.6	移動目標探知装置	164
3.7	MTI 性能の限界	174
3.8	移動プラットフォームからの MTI (AMTI)	190
3.9	パルスドップラレーダ	202
3.10	ドップラレーダに関するその他のトピックス	216
	演習問題	235
第 4 章 追尾レーダ 242		
4.1	レーダによる追尾	242
4.2	モノパルス追尾	245
4.3	コニカルスキャンとシーケンシャルロービング	258
4.4	追尾精度の限界	264
4.5	低仰角追尾	275
4.6	距離追尾	285
4.7	追尾レーダに関するその他のトピックス	287
4.8	追尾装置の比較	296
4.9	監視レーダによる自動追尾	298
	演習問題	310
第 5 章 雑音中の信号検出 315		
5.1	はじめに	315
5.2	整合フィルター受信機	315
5.3	探知基準	324
5.4	検波器	328
5.5	自動探知	332
5.6	積分器	333
5.7	一定誤警報率(CFAR)受信機	338
5.8	レーダオペレータ	346
5.9	信号マネージメント	346
	演習問題	350
第 6 章 レーダ信号から得られる情報 355		
6.1	はじめに	355

6.2	レーダによる基本計測	355
6.3	理論上のレーダ計測精度	360
6.4	アンビギュイティ・ダイアグラム	376
6.5	パルス圧縮	387
6.6	目標認識	424
	演習問題	447
第7章 レーダクラッタ 455		
7.1	レーダクラッタの概要	455
7.2	表面クラッタのレーダ方程式	457
7.3	グランドクラッタ	463
7.4	シークラッタ	479
7.5	表面クラッタの統計モデル	494
7.6	気象クラッタ	501
7.7	大気中のその他の反射信号源	509
7.8	クラッタ中の目標探知	518
	演習問題	534
第8章 レーダ波の伝播 539		
8.1	はじめに	539
8.2	平らな地面からの前方散乱	540
8.3	球状の地表からの散乱	548
8.4	大気屈折 — 通常の伝播	552
8.5	異常伝播	562
8.6	回折	581
8.7	大気ガスによる減衰	585
8.8	環境、つまり外部からの雑音	587
8.9	伝播に影響を与えるその他の要素	591
	演習問題	594
第9章 レーダアンテナ 598		
9.1	レーダアンテナの機能	598
9.2	アンテナのパラメータ	600
9.3	アンテナの放射パターンと開口分布	607
9.4	リフレクタアンテナ	616

9.5	電子的にビーム走査するフェイズドアレイアンテナ	624
9.6	移相器	633
9.7	周波数スキャンアレイ	650
9.8	フェイズドアレイの放射器	659
9.9	フェイズドアレイの構成方法	666
9.10	機械走査式の平面アレイアンテナ	691
9.11	放射パターン合成	698
9.12	放射パターンにおける誤差の影響	707
9.13	低サイドローブアンテナ	719
9.14	フェイズドアレイレーダのコスト	730
9.15	フェイズドアレイのその他のトピックス	735
9.16	フェイズドアレイレーダのシステム側面	744
9.17	アンテナのその他のトピックス	748
	演習問題	761
第10章 レーダ送信機 770		
10.1	概要	770
10.2	直線ビーム電力管	775
10.3	半導体タイプのRF電力ソース	785
10.4	マグネトロン	794
10.5	クロスフィールド増幅器	798
10.6	その他の電力ソース	802
10.7	レーダ送信機に関するその他の事項	808
	演習問題	811
第11章 レーダ受信機 814		
11.1	レーダ受信機	814
11.2	受信機の雑音指数	817
11.3	スーパーヘテロダイン受信機	820
11.4	デュプレキサと受信機保護装置	836
11.5	レーダ指示器	845
	演習問題	852
	事項索引	855
	訳者あとがき	873

序 文

本書の2版が1980年に出版された以降も、レーダの技術とそれを応用する技術は進化を続け、その後、以下の新しいタイプのレーダシステムが出現した。

- 機能強化タイプの気象用レーダ（Nexrad、Terminal Doppler Weather Radar、Wind Profiler、TRMM satellite weather radar、and airborne wind-shear detection radar）
- 惑星探査用レーダ（Magellan for Venus、Cassini for Titan、a moon of Saturn）
- 背景の3次元イメージの取得や地表の低速移動目標検出のための干渉合成開口レーダ（干渉 SAR）
- 逆合成開口レーダ ISAR（APS-137 船舶識別用）
- 地中レーダ
- フェイズドアレイレーダの量産（Patriot、Aegis、Pave Paws、B-1B 爆撃機用）
- 開口面アクティブ・フェイズドアレイ
- 弾道ミサイル防衛用レーダ（GBR、Arrow）
- 短波帯超水平線レーダ（ROTHR、Jindalee）
- 戦場監視レーダ（JSTARS）
- 各種の遠隔環境監視レーダ
- 改良型の空域管制レーダ
- 非常に高度なドップラ信号処理を行う新型の戦闘機搭載用多機能レーダ

これに加え、信号処理やデータ処理、レーダ制御の分野におけるデジタル技術の活用に大きな進歩があったこと、高クラッタ内の移動目標検出処理におけるドップラ信号の活用に著しい発展があったこと、地表や海面からのレーダ反射信号に関して多くのことが判ってきたこと、信号の検出確定や信号抽出が自動化されてきたこと、目標の認識技術が向上してきたこと、送信用電力管やソリッドステート型送信機に技術進歩があったこと、そして無人化や高信頼化したレーダが開発されてきたこと、などが2版以降の変化として挙げられる。更には、ステルス技術（低レーダクロスセクション化）の進展や低高度・高高度における戦闘機の高速度運用、電子戦能力の向上などもあって、これが軍用レーダの大きな発展を促がしてきた。

初版や2版と同じく、この3版の「レーダシステム入門」は、基本的に1年コースの教科書として使用できるようになっており、レーダの基礎とレーダシステムの概要が学べるようになってきている。また、同時に、本書は独学の書としても使用でき、且つレーダやレーダ関連システムの開発、調達、製造或いはその応用分野で活躍している技術者や管理者のための参考書としても利用できる。

多くの技術専門学校の入学案内書に目を通して見ると、電気工学の存在理由であるシステムに関連したコースの掲載がほとんどないことに気づく。工学の中心は、何らかの機能を実現すべく設計されたシステムである。レーダは、電気工学系システムの中でその典型的な例と言える。レーダには、信号処理、データ処理、波形設計、電磁波散乱、探知、パラメータ推定、情報抽出、アンテナ、電波伝搬、送信機、受信機など、広範な分野の技術者によって実用されてきた数多くの専門の要素技術が活用されているからだ。本書では、こうした各要素技術について、レーダシステムと関連をつけて説明をしている。幾つかの要素技術は簡単な説明に止めたが、それ以外のものは詳しく説明をしている。

レーダを理解する上での基本事項であり、レーダシステムの設計ツールとしても使用されるレーダ距離方程式、MTIレーダやパルスドップラレーダにおけるクラッタ反射波内の移動目標信号分離のためのドップラ周波数シフトの活用、モノパルスレーダやコンカルスキャンレーダによる目標の追尾、監視レーダによる目標の追尾、レーダ信号の検出、S/N比を最大化するマッチドフィルタ、レーダ計測におけるその精度、およびレーダ性能に影響を及ぼす自然界からの反射信号の特性・性質、等についても本書で解説をしている。

前2版の時と同様、本3版においても、内容を大幅に見直し、ほとんど全ての節で変更している。あるいは、その節の内容を全面的に入れ替えている。また、章の並び順も、筆者が1年コースで取り扱う順を反映して並び替えている。1学期で学ぶ1章から4章においては、とても重要で各種場面で使用されるレーダ方程式に関してのその導出、大地や海面からの強いクラッタ信号の中から微弱な移動目標信号を抽出するためのドップラ周波数シフトの活用法、移動目標追尾のためのレーダの使用法、などを通して多くのレーダの基本的なコンセプトについて説明している。レーダ電波の伝搬を扱う8章はその大部分が1学期での学習範囲であるが、レーダ方程式を扱う2章においても、その一部としてこの章を学習するようにしている。2学期の学習範囲である5章～7章と9章においては、雑音中の信号検出、レーダ信号やその波形からの情報抽出、雑音よりもクラッタの方がより支配的にレーダ性能を制約している時の目標の検出、それと各種のレーダ用のアンテナについて学習する。また、時間に余裕がある場合は、大規模レーダの応用例（本書には含ま

れていない)の説明と合わせて、レーダ送信機あるいは受信機についても学習する。送信機か受信機かのどちらかで、ある項目に関して簡単なレポートを学生に提出させ、このレーダサブシステムの導入を1学期中に行うこともある。

2版で取り扱った多くのトピックスについて、その後、これらに関連して新たな知見や情報が得られたこと及びその重要性がより増してきたことなどから、3版ではこの記述を拡充している。そのままでは頁数が大幅に増えるため、これを適切な範囲に収めるべく、いくつかのトピックスについての説明は止むを得ず削除した。例えば、陳腐化して時代に合わなくなったトピックスで、フェイズドアレイアンテナの移相器の移相方法に関するものや、FMパルス圧縮に使われる分散型ディレイラインの種類に関するもの等がこの対象になった。また、CW及び周波数変調型CWレーダがあまり使用されなくなってきたことを反映し、これを取り扱っていた2版の3章は削除した。しかし、低出力のCWレーダと周波数変調型CWレーダは、特殊な用途にはまだ使用されているため、今版の3章の最後で少しだけ触れている。アンテナが送信用と受信用とで別設置が必要な長距離用の高出力CWレーダは、今やアンテナ1つで可能なパルスドップラレーダにほとんど置き換わっている状況である。この他、2版の最後の章についてもこれをすべて削除した。この章では、合成開口レーダや短波帯超水平線レーダ、空域監視レーダ、高度計測3Dレーダ、対電子妨害用レーダ、バイスタティックレーダそれとミリ波レーダに関する簡単な概要が記述されていた。こうしたレーダのトピックスは今でも重要であることに変わりはないが、他の進化のあったレーダの記述の取入れを考えると、これの削除は止むを得なかった。また、他にもレーダシステムの応用例など、記述価値のあるものもあったが、これら全てを一冊の中に取り込むことはできなかった。

初版で1つの章にまとめられていたレーダアンテナは、続く2版では2つの章に分かれていた。一方がリフレクタアンテナで、もう一方がフェイズドアレイアンテナの章。この3版ではこれを再び1つの章にまとめた。このため、この本の中でもっとも分量の多い章となったが、2つを1つの章にまとめたことで、リフレクタアンテナとアレイアンテナの両方に共通する事項がとて扱い易くなった。やはりアンテナの章が一番ボリュームのある章になったが、それはアンテナがレーダの中で際立った存在であり、重要な役目を果たしているからである。

本書は、通常の2学期コースで学習する内容よりも多くの内容を含んでおり、この本を参考書として使用する現役のエンジニアや管理者にとっても大変役立つものになっている。内容量が増えているため、教える側でもコースの目的を考慮して省略すべきトピックスを選別して欲しい。

大学のコースでもそうだが、今は、世界中でMKS単位系が使用されている。し

かし、本書では混合単位を使用した。特に米国において、技術者の現場ではそれが実際的であるからだ。（例えば、国際航空管制システムでは、距離の単位はカイリ、高度の単位はフィートを使用している。）本書では、ある単位の量を公開された文献などから引用した場合は、それを別の単位に置き換えず元のままの単位で使用している。いつかはすべての単位が MKS 系になると思われるが、その時までには、技術者はこの混合単位系に馴染んでおく必要がある。実際の現場でもこれが実態であるから。

また、レーダ技術の世界ではデシベル (dB) が使われており、本書でもこれを多用している。生徒の中にはこれにうまく慣れていない者がいるようだ。参考までに記しておくが、dB は電力比 (又は電力単位に関連したパラメータ、例えば、アンテナの利得など) の \log をとってそれを 10 倍したものである。dB を、いつも電力比との考えで使用すれば 10 倍するのか 20 倍するのか、それに迷うことは無い。常に、10 倍でよいのだ。ある数式の中のパラメータで、それが dB 単位で与えられている場合、dB の数値をそのまま数式の中に入れることはできないので注意を要する。dB の値を真数に変換して、それを数式の中に代入しなければいけない。

本書では、章の最後に演習問題が用意されている。大学のレーダコースで使用するテキストとして、生徒に (先生にも) 役立つようにするためである。これは、また、勤めている技術者が自学する場合にも役立つはずである。システム志向のコースのため、技術専門学校の問題解決型のコースでよく見られるような問題は用意していない。問題や設問のいくつかは、その回答に必要となる手法や数式が本書の中に用意されているため、問題に向き合うことで、教科書に書かれた内容の理解が更に深まることになる。しかし、他の問題ではその解答が本書に書かれたことだけでは不十分で、更に思考・検討の範囲を広げなければならないようになっている。本問題と設問の回答マニュアル書は、McGraw-Hill 社から発行されることになっている。

私は、自分のレーダコースを受け持ってみて分かったが、学期末に生徒に課している総括レポートの提出は、学ぶ上でとても大事なものである。そこでは他の出版書籍には見られない、比較的簡単なコンセプトデザインの宿題を出すようにしている。(しかし、年月と共にレーダが進歩してき、これも難しくなってきた。)

いつも、期末レポートは 2 学期中の実施としているが、時には 2 学期で出すトピックより簡単なトピックについて、1 学期中に提出させることもある。過去の期末レポートに使った提出テーマも、上記の回答マニュアル書に掲載されている。

これまでの 2 つの版と同様、私の得た情報の出典元を明確にするためと、読者が特定のトピックスについてのさらなる掘下げを行う時の必要情報の在処を明らかに

するため、十分な参考文献のリスト作成にも努めた。同じく McGraw-Hill 社から出版されている Radar Handbook は、ここに取り上げた多くのトピックスの最新情報の出典元となっている。この Radar Handbook の各章はそれぞれ、その章を扱う分野において定評のある多くのエキスパートによって執筆されている。

本書「レーダシステム入門」の初版の刊行時（1962 年）には、その参考文献のほとんどが“最新”であった。それは、当時、レーダそのものが比較的新しいものだったからである。レーダに関する書籍は、1940 年代の中ごろからその末にかけて出始めたわけであるが、それはこの「レーダシステム入門」の初版の刊行を遡ること 15、6 年も前になる。そのために、初版において参考にした文献には“最新”のものが多かった。この 3 版では、以前のもものと併せて、最近の参考文献もそれが在る限り用意するよう努めた。しかし、常にそうできるわけではなかった。と言うのは、幾つかのテーマは、それは今でも重要なのだが、その技術がすでに成熟していて、文献の世界で近年まで引き続いているということがなかったからである。それで、本書には、30 年も 40 年も前の古い参考文献も多く掲載されている。幾つかのものは初版や 2 版にも載っているが、少し古いものでどちらの版にも載っていないものも少なからずある。それはその文献が扱っているテーマが、技術やニーズが追いついて来るまで、何年ものあいだ休眠状態に置かれていたからである。

レーダに関して幅広く記述したこの本の出版は、レーダ技術者によって著され公にされた技術刊行物に依るところが極めて大きい。私はこの本の執筆にあたって、公開されたこれらの文献等を大いに参考にした。現存するレーダに関した膨大な文献等から多大な恩恵を受けたことに対し、深く感謝の意を表したい。

Merrill I. Skolnik

訳者注： 本書の本文中で上付き文字で示した数字は、原著の各章末に掲載された参考文献リストの番号に対応しているが、本書では頁数の関係から、この参考文献リスト（全部で約 70 頁分）を割愛し、これを出版社のホームページに載せた。

訳者あとがき

残念なことに、わが国ではレーダに関する専門書の数が極めて少ない。レーダについて、より深く勉強するにはどうしても洋書に頼らざるを得ない。私が企業に入り、レーダ関連の仕事に就いた時分はこのような状況にあった。その後、30年近くを経ても、この状況はほとんど変わらなかった。ところが、レーダ技術の発達と共にレーダの応用・活用分野が広がって来、レーダがより身近になってきたこともあってか、近年、レーダに関する技術を扱った専門書が少しずつ見られるようになってきた。とても喜ばしいことである。しかし、それでもその数はごく僅かなものである。

今回、あることが契機になり、レーダ技術に関する洋書の翻訳に取り組むことにした。長年、レーダの仕事に携わることができ、その恩返しにもなると考えたのである。そこで対象に選んだのが本書である。私自身もこの書で啓発され、レーダシステムの参考書としては、うまくまとめられた素晴らしい書だと思っていたからである。

著者は、「Radar Handbook」や「Radar Applications」の主幹編集者としても知られた、米国の著名なレーダ専門家の Merrill I. Skolnik 氏である。氏は、大学を卒業後、MIT Lincoln 研究所に入り、そこでレーダの研究に従事。もとより、教育に強く関心のあった彼は、研究所で働く傍ら、学士を対象とした Northeastern 大学のレーダ・コースで教える機会を得た。ここでの教科書用にまとめたプリントが、後に、McGraw Hill 出版社の関係者の目に留まり、このプリントを元にレーダ専門書出版の話を持ち掛けられ、これに応じて生まれたのが本書である（初版 1962 年）。

その後、彼は民間会社の研究所、国防省関係のシンクタンクでレーダに関係した仕事に就いた後、1965 年に米海軍の研究所 (Naval Research Laboratory) のレーダ部門に移り、以後 30 年以上に亘って、ここで、様々な種類のレーダの研究開発に従事した。この間に、当時のレーダ技術の進展やレーダ活用技術の変遷などを反映して、これを書き改めて出版したのが本書の第 2 版 (1980 年) である。

本書の第 3 版が出版されたのが 2001 年。前版が出版された以降、レーダ技術やレーダを応用する技術は大きく進化をし、新しいタイプのレーダも多く出現した。これらのレーダ技術の進化には、デジタル技術の進歩に伴ったレーダ信号処理やデータ処理技術、レーダ制御技術、それにドップラ信号活用技術などが含まれる。詳しくは、本書の序文にも述べられている。これらの反映を含め、第 3 版では全体的

に内容が大幅に見直され、ほぼすべての節が変更されている。中でも、3章の「MTIとパルスドップラレーダ」、8章の「レーダ波の伝搬」はページ数を大幅に増やして改訂されている。また、第3版では、新たに、各章末に演習問題が用意された。この問題に向き合うことで、本書の内容の理解が更に深まるはずである。中には、本書に書かれたことだけでは不十分で、更に思考・検討の範囲を広げなければならないような問題も含まれている。

レーダやレーダシステムに関する専門書の邦訳本は、本書が我が国では初めてのものではないかと思う。今回、翻訳をしてみて工学の専門書の翻訳本の少ない理由が解ったような気がした。初めての翻訳であったが、その作業には長時間を要した。3年に近い。大学や研究所、会社で働く現役の人ではとてもこんな時間は取れない。幸いに、退職してフリーになった身には時間の制約はなかった。不案内なことも多々あったが、時間をかけ、調べを重ね、誤訳のないよう努めたつもりである。

本書が、邦書の専門書と並んで、大学や研究機関でレーダを学び研究する学生や研究者、そして企業でレーダ関連の研究・開発・設計に従事する技術者にとって、少しでも役立つ書になれば、訳者にとってこの上ない喜びである。

最後に。本書の原書は800頁に近い大部の書である。A5判の訳書にしたら優に900頁を越えた。製本の関係上、止むを得ず、各章末に掲げられた参考文献のリスト（全部で70頁弱）は割愛し、これを出版社のホームページにアップすることにした。ご理解を賜りたい。

2023年4月

小椋 賢紀