

日々の生産活動を支える社会インフラには、交通、通信、電力などがある。これらの社会インフラを支える技術の一つに電波応用技術がある。電波応用技術は、“電波”の持つ“検知”や“通信”といった能力を最大限に引き出し、これを社会インフラの構築に役立てようとする技術である。

当社は、レーダ技術を基盤とした航空保安・管制システムや気象防災システムなどをはじめとした電波応用分野に広くかかわり、社会インフラの整備に貢献している。

Public infrastructure, which supports people's daily productive activities, consists of transportation, communications, power supply, and various other facilities. Among the technologies providing this public infrastructure are radio wave technologies. Radio wave technologies exploit the potential capabilities of radio waves, such as detection and communication, to the greatest possible extent for the construction of public infrastructure.

Toshiba has been making a major contribution to the construction of public infrastructure based on radio wave technologies, including air traffic navigation and control systems, weather radar systems, and other systems.

幅広い“電波応用”分野

一般に、“電波”とは電磁波の呼称である。物理学上では、いわゆる電波以外に光やX線やγ線も電磁波である。この電磁波の中で、周波数300GHz程度のもので電波と呼んでいる。電波の利用形態は幅広く、宇宙科学、航行援助、ラジオ・テレビ放送、無線通信から調理用電子レンジにまで至っている。電波応用の個別分野を概説する前に、この特集で扱う分野を一言で表現するなら、“社会インフラ”を支える“電波応用”というのがもっともふさわしいと言える。

ここで対象とする“電波応用”分野としての社会インフラとは、具体的にどのようなものか。この特集で扱う対象は、次の二つのシステムに大別される。第一は、レーダ技術を基盤とした航空保安・管制システム、第二は同じくレーダ技術を基盤とした気象防災システムである。これらはいずれも“電波”の持つ“検知”能力を最大限に活用したシステムと言える。

以下、これらの分野についてその

動向を概説し、続いて電波応用に関連した要素技術の動向や、新しい応用分野についても触れる。

航空保安・管制システム分野

インターネットに代表される通信社会の発展とは裏腹に、人や貨物の動きもいっそう活発化している。これに伴い、多くの国々で、交通及び物流のインフラである空港や航空保安・管制システムの整備が推進されている。

一方、最新のデジタル技術や衛星通信技術、衛星航法技術、データ通信技術を使い、よりグローバルで低ライフサイクルコスト化を目指したFANS (Future Air Navigation System: 将来航法システム。最近では、通信、航法、監視、及び航空交通管理を略したCNS/ATMという名称で呼ばれることも多い)プロジェクトも研究・開発の段階から、試行あるいは運用の段階へと入っている。次世代航空保安・管制システムの構想を図1に示す。

航空管制レーダの技術動向

航空管制レーダは、PSR (Primary Surveillance Radar: 一次監視レーダ)とSSR (Secondary Surveillance Radar: 二次監視レーダ)に大別される。PSRは、レーダから高周波パルスを発射し、これに対する航空機からの反射信号を検出し、アンテナの方位及び高周波パルスを送信してから反射信号を受信するまでの時間を用いて航空機の二次元位置情報を得る。PSRは、レーダ覆域によりASR (Airport Surveillance Radar: 空港監視レーダ)とARSR (Air Route Surveillance Radar: 航空路監視レーダ)に大別される。

SSRは、アンテナの方位角及び応答信号の受信時間から得られる二次元位置情報に加えて、通常のPSRでは得られない航空機の高度情報や識別コードを取得するためのレーダ装置である。これは、レーダから送信された質問信号に対して航空機に搭載されたトランスポンダが応答する識別コード及び高度情報を受信し、これらの情報を解読することで行われる。

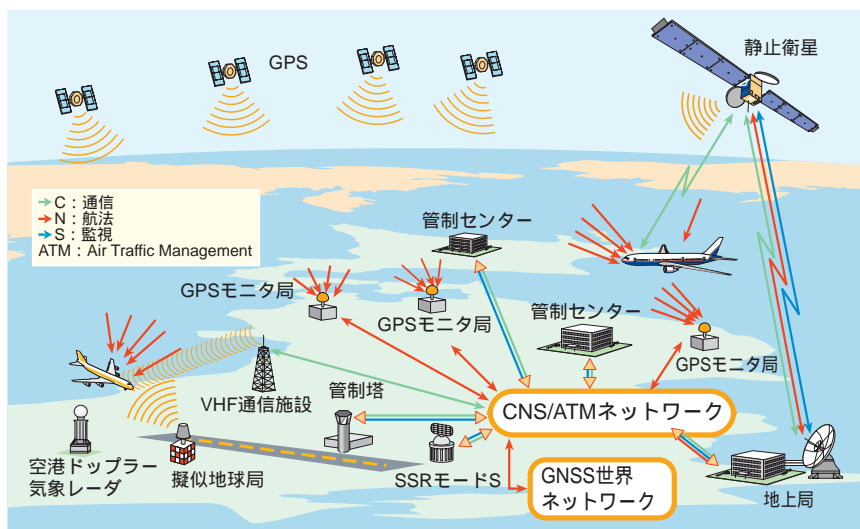


図1. 次世代航空保安・管制システムの構想 FANSは、航空衛星を利用した通信、航法、監視の技術、並びに航空交通管理という運用技術により実現される。
Image of Future Air Navigation System (CNS/ATM)

ASRは、空港に設置され、レーダサイトから半径約110～130km以内の航空機を探知する。ASRは、送信周波数2,700～2,900MHz、送信出力500～1,000kWの電波を約700Hzの繰返し周期で送信する。送信管としては、一般的には、マグネトロン又はクライストロンなどの電子管を使用している。しかし、近年のマイクロ波トランジスタの高出力化に伴い、トランジスタ出力合成による固体化送信機が採用されつつある。固体化送信機では、パルス圧縮技術が取り入れられ、近距離の覆域確保のため長短パルスを組み合わせて送信される。

ARSRは、見通しの良い山頂などに設置され、半径約370km以内の航空機を探知する。ARSRは、送信周波数1,200～1,300MHz、送信出力2MWの電波を約300Hzの繰返し周期で送信する。現在、送信管として用いられているクライストロンは、近い将来保守の容易な固体化送信機に移行すると考えられる。

PSRの反射信号には、航空機だけでなく、山や建物、雨や雲といった様々な物体から反射してくる“クラッタ”と呼ばれる不要な信号も混じっている。このクラッタやノイズなどが混

じった信号の中から航空機の反射信号だけを抽出する必要がある。従来、これらの信号処理は、MTI(Moving Target Indicator)などのフィルタ処理や、空間領域における積分処理や相関処理を中心に行われていた。近年は、信号処理プロセッサの高性能化に伴い、高速フーリエ変換(FFT)を用いていったん周波数領域に変換した後、その中で高速移動体である航空機、低速移動体である雲や雨滴、及び固定物体である山や建物などの分離検出を行う方式も実用化されている。この技術はMTD(Moving Target Detector)と呼ばれている。

SSRは、送信周波数1,030MHz、送信出力約1.5kWの電波を放射し、航空機に搭載されているトランスポンダから送信される1,090MHzの応答信号を受信する。SSRは、半径約370kmの覆域を持っている。長い間、航空機の位置情報はPSRがとらえ、SSRは補足情報を提供するという位置づけであったが、近年ではSSRへの期待が増し、SSR単独局としても運用されている。この背景には、プリントダイポール型アンテナ^(注1)に代表されるアンテナ技術の進歩により、地面や

(注1) 基板上にプリントされた1/2波長の線状アンテナ。

建物からの反射で実際とは異なった位置に航空機が表示されるゴーストと呼ばれる現象が減ったことや、モノパルス測角方式の採用による方位精度の格段の向上が挙げられる。現在の主流はMSSR(モノパルスSSR)であるが、今後の航空交通量の増加やデータ通信にも対応できるSSRモードSへの展開が予想される。

■次世代航空保安・管制システムの技術動向

次世代に向けて、より多くの航空機をより安全に効率良く運航させるために、ICAO(International Civil Aviation Organization:国際民間航空機関)はFANSという概念を提唱している。この概念は、航空という本質的にグローバルな世界において、その象徴とも言える人工衛星を積極的に利用することに基づいている。FANSは、通信、航法、監視という三つの切り口、及び、洋上、エンルート、ターミナルという三つの飛行空域に分けて概観することができる。

まず、通信分野である。現在、洋上ではVHF(Very High Frequency:超短波)が届かないため、HF(High Frequency:短波)を用いて音声通信がされている。しかし、HFは電離層での電波の反射を利用した通信のため、通信品質が悪く、航空機の安全運航を確保するためには、航空機相互の間隔を十分に取る必要がある。

FANSでは、次世代システムとして極地を除いて良好な通信品質を期待できる、静止衛星を利用したAMSS(Aeronautical Mobile Satellite Service:航空移動衛星サービス)を提唱している。AMSSでは、パケットデータ通信及び音声通信の両方をサポートしている。

エンルート及びターミナルでは、コストや通信遅延時間の面でVHFデジタルリンクやSSRモードSのデータ

リンク使用が主になると考えられる。

次に、監視分野である。監視分野では、洋上監視において大きな変化が期待される。従来の洋上監視では、HFを用いたパイロットの音声による30分ごとの位置通報及び飛行前に提出される飛行計画を基に管制が行われている。将来は、後述するGNSS (Global Navigation Satellite System : 全地球的航法衛星システム) で得られる位置情報をAMSSで航空機から自動的かつ定期的に地上管制機関に送信し、あたかもレーダ監視をしているかのような管制が可能になる。この監視システムは、航空機から自動送信される位置情報を基に管制を行うため、ADS (Automatic Dependent Surveillance : 自動従属監視) と呼ばれている。

エンルート及びターミナルについては、レーダによる監視が今後も継続的に行われると予想される。特に、交通量が増えても航空機による応答干渉の問題がないSSRモードSが監視機能の主流になると予想される。

最後に、航法分野であるが、この分野の次世代システムはGNSSと呼ばれている。GNSSは、米国が運用しているGPS (Global Positioning System) やロシアが運用しているGLONASS (GLOBAL NAVIGATION Satellite System) といった航法衛星を用いて現在の飛行位置を算出し、航法を行う。しかし、着陸時はこれらの航法衛星だけでは精度や信頼性が不足するため、この欠点を地上に設置した補強システムにより補完しようとするシステムである。

広範囲な地上監視ネットワークにより航法衛星を観測し、得られた補正情報を静止衛星から広範囲に放送するシステムをSBAS (Satellite-Based Augmentation System) と呼ぶ。一方、空港周辺の地上監視局により航法衛星を観測し、得られた補正情報を地上からVHFデジタルリンクで空港近辺に放送するシステムをGBAS

(Ground-Based Augmentation System) と呼ぶ。SBASは、広範囲にサービスを提供できるが、補正後の測位精度は7m程度である。これに対して、GBASは空港への精密着陸支援に利用され、補正後の測位精度は1m以下を実現することができる。また、放送源があたかも航法衛星であるかのような距離・時間情報を提供すれば、システムの信頼性や有効性も高めることができる。

■ 気象防災システム分野

ここで述べる“気象防災システム”とは、レーダを用いた雲・雨・雪・霧などの気象現象の観測システムのことである。レーダの電波が雨や雲などの気象目標によって反射されることが確認されてからちょうど50年が過ぎた。この間に、気象レーダの信号処理技術、レーダ気象学に基づいたデータ処理・解析技術、また、ネットワークを通じたデータの配信技術、更には、レーダの専門家以外の一般ユーザーにも容易に理解できる表示技術などは目覚ましい進歩を遂げてきた。最近では、単に気象目標からの反射エコーの強弱だけではなく、気象目標の形状や動きを捕える二重偏波気象レーダやドップラー気象レーダも開発され、目的に応じて様々な分野で気象レーダを利用した気象防災システムが活用されるようになった。

気象レーダは、見通しの良い山頂に設置されるものが多いが、空港や都市部にあるビルの屋上に設置されるものもある。観測範囲は用途により様々である。半径240～300kmの覆域を持つレーダが多いが、都市型の小型レーダでは半径40～100kmといった狭い観測範囲となっている。気象レーダは、細いアンテナビームを使用し、そのビーム内の気象エコーを定量的に測定する。アンテナ走査は、仰角をステップ的に変化させながら各仰角ごとに360°の方位回転

を行うものが多い。このアンテナ走査をCAPPI (Constant Altitude Plane Position Indication) 走査と呼ぶ。気象レーダの送信周波数は、国内では5GHz帯と9GHz帯が使用されている。送信出力は200～250kWが多いが、小型タイプでは70kWで電波を送信する。送信管としてはマグネトロンが主流であったが、近年のドップラー化に伴い位相安定度に優れたクライストロンも使用されている。

従来から、気象レーダでは、信号処理部において地形エコーの除去や平均化処理を行い、気象目標の平均強度を抽出している。最近では、信号処理技術の進歩によりドップラー速度及び速度幅をリアルタイムで算出できるようになった。このため、雨量の定量観測や気象エコーの最高高度観測などに加えて、ウィンドシヤと呼ばれる風の急変領域や、雷雲などに見られる気象現象の特徴抽出に対する要求も高まっている。更に、気象レーダのデータを気象モデルの初期値として与え、気象予測を行う研究も進められている。気象防災システムの全体像を図2に示す。

■ 航空気象における技術動向

航空分野において使用される気象レーダは、気象庁や防衛庁によりその整備が進められてきた。航空分野において気象観測が重要視されるのは、気象に起因する事故が数多く発生するためである。事故の1/4、重大事故の1/3は気象に起因するとも言われている。特に、離着陸時の雨・雲による視程低下、風の急変による機体制御の不安定化などは、多くの乗員・乗客の命を左右する事故を引き起こす可能性がある。したがって、航空機の安全運航を確保するために、雨域や降雨量、風の強さや乱れの状況を短時間で高精度に検知できる気象レーダシステムが必要となる。

最近の空港気象レーダでは、航空機の安全運航に大きな影響を及ぼす

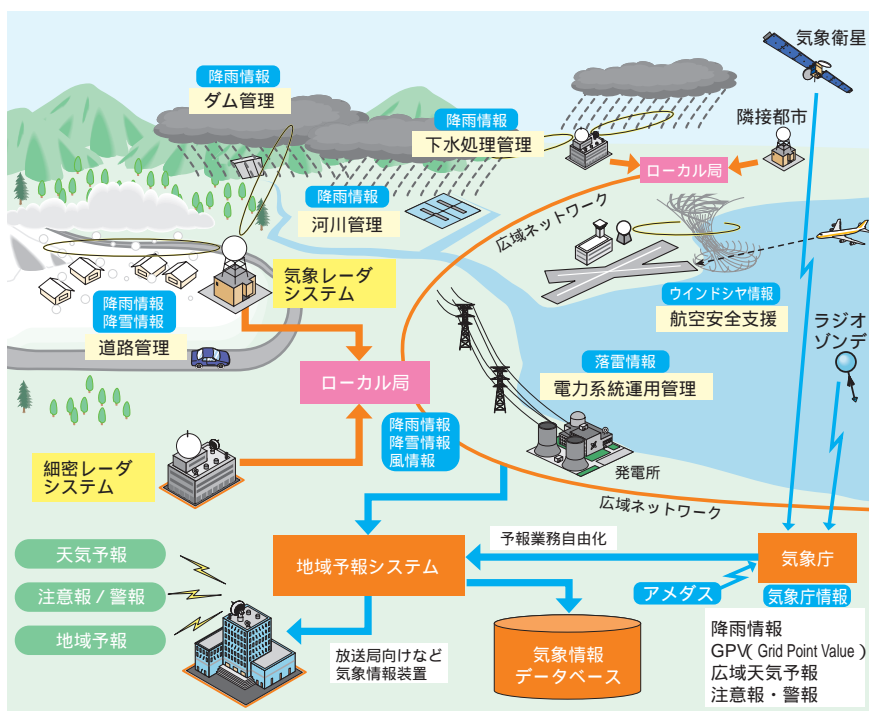


図2 気象防災システムの全体像 気象レーダを用いた気象防災システムは、様々な分野で利用されている。
Image of future meteorological system

“マイクロバースト”と呼ばれる強い下降流や発散性を持った風の領域を検出したり、風向・風速の急変する“シヤライン”と呼ばれる領域を検出することに大きな期待が集まっている。これらは、ドップラー気象レーダとそのデータに対する高速・高精度な処理技術によって実現される。

■国土保全・管理における技術動向

ダムや河川の管理には、特定の地点の雨量ではなく、流域全体の面的な雨量の把握が重要である。また、道路のがけ崩れなどを予測し、交通規制などを行う場合にも、道路に沿った周辺の雨量を面的に把握する必要がある。しかし、従来の地上雨量計は、設置した地点の雨量しか観測できないために、雨量の面的な把握には難点があった。

建設省では、この問題を解決するために、レーダの優位性に着目し、面的な雨量を把握するための“レーダ雨量計”を世界に先駆けて1972年に

実用化し、現在全国に20余台を配備している。このシステムは、従来から気象現象の定性的な把握のために使われていた気象レーダの信号をデジタル処理し、降雨量を定量的に把握できるという点で当時では画期的であった。最近では、二重偏波レーダ雨量計システムが評価のために試験運用されている。このシステムは、発射パルスごとに偏波面を水平及び垂直方向に交互に変化させて、その受信電力の違いから雨滴粒子の形状及び種類を判別し、その分布状況から降雨観測の精度を向上させることを目的としている。

空中でとらえた雨滴が地上に落下するまでに風によって流される移流量を把握し、降雨観測の精度向上を図るために、ドップラーレーダ雨量計についても検討、評価が行われている。また、近年多発する土砂災害に対応するために、砂防分野でもレーダシステムの導入が検討されている。

一方、地方自治体においても、地域

管理・保全のために小型気象レーダによる気象防災システムが一部で導入され、ダム・河川管理、下水道管理、除雪管理などで活用されている。特に、近年、都市型洪水が多発するなかで、下水道管理用気象レーダの重要性が高まっている。

■電力送電システム運用における技術動向

電力会社においても、気象レーダシステムが積極的に利用されている。その主な目的は、電力設備に対する落雷による停電などの被害を最小限に抑えることにある。気象レーダを用いて雷情報を事前に得ることができれば、送電を安全なルートへ事前に切り換えることもできる。

気象レーダの主要機能は、積乱雲を検知し、時系列にデータを処理することで、雷発生の可能性を持つ領域を判定することである。リアルタイムの観測データから、現在の雷発生の可能性を判断すると同時に、履歴データを用いて雷雲の移動予測も実施している。これらを精度良く行うためには、雷雲の発生、成長、衰退に関する気象学的な理論の裏づけが必要である。最新のデータ処理ソフトウェアには、この理論に基づいたアルゴリズムが実装されている。

また、最近ではドップラー気象レーダの導入も進んでいる。ドップラー技術を用いることで、雨だけでなく風のデータも同時に取得することができ、雷雲の発達や衰退の状況をより正確にとらえることができる。

■要素技術の動向と新しい電波応用分野

航空保安・管制システムや気象防災システムの発展は、半導体技術の進歩により出現した高性能DSP(Digital Signal Processor)や大容量FPGA(Field Programmable Gate Array)を用いたデジタル信号処理技術の著しい進歩に支えられている。

レーダ関連技術

・パルス圧縮技術⁽¹⁾

せん頭送信電力に制約のあるパルスレーダにおいて、探知距離の増大(送信パルス幅を広くすること)と距離分解能の向上(送信パルス幅を狭くすること)という相矛盾する要求を解決するための技術である。パルス内に特殊な変調(周波数変調/符号変調)を施した幅広のパルスを送信し、受信後復調して幅を狭く変換する方式である。

・SSRモードS⁽²⁾

現用のSSRの性能改善及び機能向上を目的としたシステムである。近年の航空交通量増大に伴い、干渉によるターゲットの欠落、過剰質問によるシステム飽和など、現用SSRでは信頼性の高い情報が得られなくなっている。現

用SSRが一齐呼出し方式であるのに対し、SSRモードSは個別呼出しを基本とする。すべての航空機に個別アドレスを割り当て、個別呼出し・個別応答を行う。これにより、電波環境は改善され、信頼性の高い情報が得られ、更に地上-機上間のデータリンクも可能となる。

・二重偏波技術⁽¹⁾

偏波面を水平、垂直に交互に切り換えながらパルスを送信すると、空気抵抗によって変形しながら落下する降水粒子によって、反射波が水平(ZH)、垂直(ZV)により差を生ずる。この"反射因子差ZDR = 10log(ZH/ZV)"の値により、目標とする雲の中の降水粒子の種別、構成、存在量を判定するこ

とができる。雲の中の降水粒子の構成を判定することで、降雨の量、継続時間などを推定し、水管理に利用する。

・ドップラー速度検出技術⁽¹⁾

信号処理における目標物のドップラー速度検出処理として、パルスペア法とFFT法がある。パルスペア法は、二つの受信信号の位相差をドップラー速度に変換するもので、ハードウェア構成の容易さから広く利用されている。また、FFT法は、受信信号を周波数領域に変換して平均速度と標準偏差を算出するもので、不要なスペクトルの除去などは容易に行えるが処理の規模が大きく、最近のデジタル処理技術の進歩によってようやく実現されたものである。

これは、ハードウェア指向からソフトウェア指向への大きな考え方の変化であるとも言える。

ソフトウェア処理は、ハードウェア上でソフトウェアの入替えだけで種々の機能に対応できるという特長を持っている。この特長を生かした応用の一つとして注目を浴びているのが、従来ハードウェアで対応してきた無線通信処理をソフトウェア化したソフトウェア無線機である。ソフトウェア無線機は、単なる無線通信機能だけでなく、ETC(Electronic Toll Collection : 自動料金収受システム)やGPSといった機能を組み込んだり、あるいは電波の到来方向の推定機能や電波諸元の測定機能などを組み込むことで電波監視応用にも適用できる。

最後に、近年当社が取り組んでいる電波応用の新分野について述べる。

その一つは電波監視分野、特に衛星からダウンリンクされる電波を監視する宇宙電波監視分野である。電波

監視は広い意味では測定器であり、衛星の軌道位置の測定や衛星から放射される微弱電波の検出、高精度測定をはじめとして、アンテナから受信機、計測ソフトウェアに至るまで高度な制御技術とアルゴリズムが要求される。

他の一つは、成層圏プラットフォームである。これは、郵政省と科学技術庁によって進められている国家プロジェクトで、高度約20 kmの成層圏に飛行船を停留させ、それを中継器として通信や放送サービスを提供したり、また地球観測を約20 kmという低高度から実施しようとするプロジェクトである。ここでは、飛行船の管制技術や飛行船を安全に打ち上げ、回収するための高度な気象観測・予測技術などが要求される。

この論文の限られた紙面の中ではとても紹介しきれないくらいに、電波応用分野は多岐にわたっている。当社は、“電波”の持つポテンシャルを最大限に引き出し、信号処理技術や

情報通信技術、情報処理技術を駆使し、今後も社会に貢献していきたい。

文献

- (1) 吉田 孝 . 改訂 レーダ技術 . 東京 (社) 電子情報通信学会 . 1996 , 370p.
- (2) 航空宇宙電子システム委員会 . 航空宇宙電子システム . 東京 (社) 日本航空技術協会 . 1995 , 481p.



大谷 之則
OTANI Yukinori, D.Sc.

情報・社会システム社 小向工場 電波応用システム技術部部長、理博。各種電波応用システムの開発に従事。電子情報通信学会会員。
Komukai Operations



篠永 充良
SHINONAGA Mitsuyoshi

情報・社会システム社 小向工場 レーダ技術第二部部長。各種レーダ機器の開発に従事。電子情報通信学会会員。
Komukai Operations