

## 5. 電波伝搬からみる空港面監視技術と航空機散乱電力について

監視通信領域 ※本田 純一， 大津山 卓哉， 角張 泰之， 古賀 禎  
宮崎 裕己， 島田 浩樹， 松永 圭左， 二瓶 子朗

### 1. まえがき

電磁波散乱問題を含む電波伝搬問題における種々の問題解明は、無線通信を使用した多くのシステム開発・設計において避けては通れない重要な研究となっている。特に地形形状や建物等から発生した反射・回折現象及び空間及び時間に密接に関係して発生するフェージング現象の解明は、機器回路設計、受信機配置等を含めたシステム構成を考える上で常に求められる部分である。

本稿では、これら電磁波の振る舞いに関して電磁波散乱問題を含む電波伝搬問題から見たレーダ技術、特に空港面監視システムと新レーダシステムとして注目されるマルチスタティックレーダ(MSPSR: Multi-Static Primary Surveillance Radar)[1]に対して数値的な観点から議論を展開する。

空港面監視システムでは、安定的にまた効率よく開発を進めるために電磁波の振る舞い、つまり電波伝搬特性を把握しておくことが重要となる。この解析により安定的に信号が得られる地点を算出し受信機を設置することができ、また現状の測位計算が出来ない場所の問題点を物理的な側面から明らかにすることも可能となる。一方、一次レーダ(PSR: Primary Surveillance Radar)等の航空機からの反射信号を利用するシステムでは、航空機からの散乱電力を航空機形状や姿勢などを考慮して数値解析することが、システム設計において求められる。更には航空機散乱に限らず、地形からの反射や遮蔽が発生することによって信号検出が困難な場合もある。よって、航空機問題を含めると広義としては電磁波散乱問題を含む電波伝搬特性に関する問題であると位置づけることが出来る。

このような種々の問題に対して、数値解析の観点から議論を行い、システム設計等へ応用することがこの研究の目的となる。本稿では、電磁波解析の一手法を用いて商用のソフトと発表者の開発した数値計算法に基づいて空港面監視

システムと航空機散乱電力を数値解析したのでその結果について報告する。

### 2. 空港面監視における電波伝搬問題

#### 2.1 空港面監視システムについて

羽田空港や成田空港に導入されたマルチラレーション(MLAT)は、トランスポンダからの応答信号を複数の受信機で受信し、それぞれの到達時間差から測位計算することにより航空機の位置推定を行う。しかし実際には、電波の性質上、ターミナルビル等の周囲の構造物からの反射等により、信号波形が崩れてしまい位置検出ができない等の問題が生じる他、遅延波を誤って検出するなど、結果として測位計算に誤りを生じる原因となっている。つまり、マルチパスに対して脆弱性があるともいえる。そのため、従来の MLAT では多くの受信機を配置することでこれらの問題に対処していた。このような問題を解決し、より少ない受信局数で且つ精度良く解析できるように開発が進められているものが光ファイバ接続型受動監視システム(OCTPASS: Optically Connected Passive Surveillance System)[2]である。

以下、OCTPASS の特徴について簡単にまとめる。基本的な MLAT 測位は航空機から受信機までの到達時間(TOA: Time of Arrival)から、その時刻差を求めて測位計算を実行する。この時、各航空機の信号をデコードし、航空機の識別番号等の情報を得ることができる。従来手法では、マルチパスにより信号波形が崩れてしまった場合に、送信元の特定が出来ず測位計算が成立しないことがある。一方、OCTPASS は航空機識別番号等のデータを含むデータブロック部分を読みだすことができなくても、中央処理装置においてすべての信号を一括で処理するため、信号間の相関関係から同一航空機からの信号であると判断し、得られた信号により測位計算を実行できる。MLAT では特に TOA が重要となるが、正確な時刻検出を行うために、遅延・減衰比較(DAC: Delay Attenuate and Compare)法

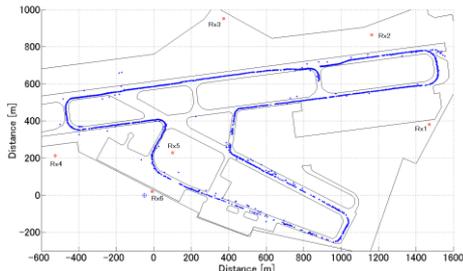


図 1 : OCTPASS による測位計算結果.

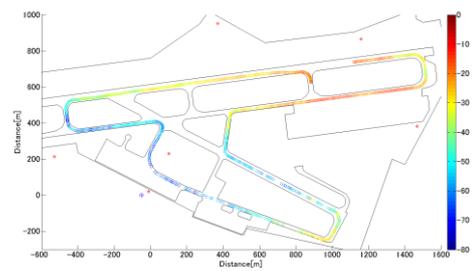


図 2 : 航跡上の受信電力(Rx1).

を使っている。これも測位計算精度を上げる特徴の一つである。本稿では開発中の OCTPASS により得られた測位データについて検証する。OCTPASS の詳細については参考文献を参照願いたい[2].

## 2.2 空港面電波伝搬特性

OCTPASS は従来の MLAT と比較して信号検出能力が高く、マルチパス環境に強いため少ない受信局数で高精度の測位計算を可能とする。しかし、電波干渉が強くなるような場所に受信機を設置した場合には、測位計算に誤差を生じる結果となる。そこで、OCTPASS でも受信機配置については設置環境における電磁環境を考慮しなければならない。この節では特に、仙台空港における OCTPASS 性能評価試験で得られた成果をもとに、空港面の伝搬問題について調査したのでその結果について述べていく。

まず現在、仙台空港にて行っている OCTPASS 評価装置によって得られた測位結果を示す。図 1 に仙台空港における受信局配置と OCTPASS による測位計算結果を示している。受信機は、仮設のものも含め 6 局となっている。実験結果は、仙台空港内をトランスポンダを搭載した実験用車両を用い約 30km/h にて走行し得られた結果である。ところどころ測位誤差が見られるが、少ない受信局にも関わらず良好な測位結果であることが示されている。EUROCAE にて定められている MLAT の測位精度は、滑走路 7.5m 以内、エプロンエリア 20m 以内である。OCTPASS では、これを滑走路で約 4m、エプロンエリアで約 9m と少ない局数にも関わらず非常に良い精度で測位計算できることを確認した。さて、本稿では測位計算に誤差が発生した一原因について次に説明する。

測位計算に誤差が現れる原因は、信号処理等

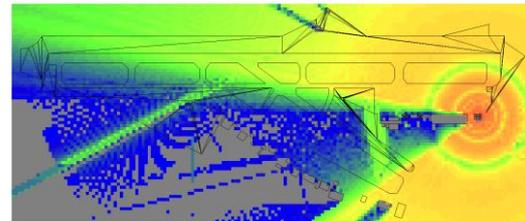


図 3 : 受信電力分布(数値計算結果: 送信局 1).

のシステムに起因するものも考えられるが、本稿では物理的な観点からこれらの問題点を検証することとする。図 2 は受信局 1 が受信した信号強度を航跡データと併せて示している。航跡上の空白のポイントは受信出来なかった地点を指している(正確には信号を受信しているが雑音レベルで認識できないほど弱い信号という結果である)。続いてレイ・トレース法によって計算して得られた受信局 1 からの送信電波による空港面全体の受信電力分布を示している。この数値計算では空港のモデリングを簡単に行うことが出来るシミュレーションソフト 'RapLab' を使用した[3]。電磁波の相反性定理を利用し、実験とシミュレーションでは送受信を逆としている。図からターミナルビルの後方では非常に弱い受信強度となっていることが分かる。これらのエリアは、実験結果において航跡誤差や測位計算できない部分と一致する。また、送信局から見通し内であっても地面からの反射により大きく受信強度が低下する箇所も見受けられる。この部分においても実験結果において受信強度が弱くなっているなど、数値計算と実験結果が一致する結果となった。

以上の数値計算と実験結果を比較するとおよそ空港面における電波伝搬状況を視覚的に把握することが可能となる。特に数値計算では、送受信間のマルチパスの状況や受信強度の算出ができるため、このような数値計算に基づいて

受信機配置などの事前推定を実施することが可能となり、冗長的な部分を排し効率的な配置等への応用が可能となる。

### 3. 航空機散乱電力推定

#### 3.1 マルチスタティックレーダ

レーダは、地上の送信機から放出された電波が航空機に当たり、反射してきた電波を受信機側で受信して、航空機の位置推定を行う。電波は光速(≒  $2.998 \times 10^8 \text{m/s}$ )となることから、電波を放出して戻ってきた時間から、地上装置と航空機間の距離を推定することができる。

ここで重要となるのは航空機からの反射波を受信側が検出できるかどうかにある。航空機からの反射波は、航空機の高さ、形状、姿勢などによって大きく変化し、場合によっては反射波を得ることができない。また地形などの自然環境によっても信号が遮られ検出率が悪化する要因の一つとなっている。これらについては新たなレーダシステムを導入することで改善を図ることができると期待されている。その一つの技術が最近注目を集め始めている PSR を応用した MSPSR[1]である。

MSPSR は民間航空機の位置検出に応用できるかどうかの議論が始まったばかりであり、海外でも具体的なシステム構成等については議論が進んでいない。国際民間航空機関(ICAO: International Civil Aviation Organization)でも、このレーダシステムが航空機監視に利用できるかどうかの意見が求められている。先に述べたように、受信機は航空機から反射した微弱な電波を受信しなければならない。常に安定した信号が入るわけではないことから、複数の受信機を最適に配置する必要がある。よってこれらをおおまかに推定することが必要となる。このような解析は実験的に得られたレーダ断面積(RCS: Radar Cross Section)を用いられることが一般的ではあるが、その方法では逐次、航空機の高さ、形状、姿勢そして速度等を考慮することは難しい。そこで、本節では MSPSR のシステム構成に当たり、航空機からの散乱電力を高速にまた精度よく数値解析できる手法を提案する。

#### 3.2 電磁界計算結果と実験結果の比較

本稿の計算手法について、簡単にその特徴を

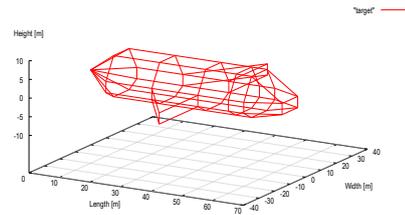


図 4：簡易な航空機モデル。

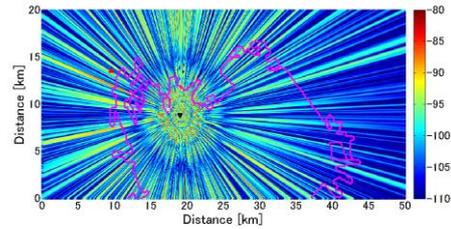


図 5：航空機散乱電力強度の計算値。

を述べておく。解析手法にはレイ・トレーシング法(RTM)を採用する。通常この手法は、携帯電話等における電磁界強度の推定や到来方向推定に利用される場合には、数キロ平方メートル程度の解析領域となり、広範囲に散乱する電波を受信するような MSPSR への応用は難しい。そこで、電磁界を計算するまでの一連の手順を大幅に単純化することにより、従来手法に比べて大幅に計算時間を短縮する方法を開発した[1]。この手法を用いることにより数百平方キロメートルに及ぶ電磁界の解析を短時間で行えるようになった。

最終的に航空機(もしくは複数の物体)から得られる散乱電界強度について次式に示す。式中の  $\mathbf{E}_0$  は  $n$  番目の電磁界航跡(レイ)における電界強度、二つのダイアディック  $\mathbf{D}$  は反射を含む回折係数である。

$$\mathbf{E} = \sum_{n=1}^N \left[ \sum_{m=1}^{M_n^i} (\mathbf{D}_{nm}^i) \cdot \sum_{k=1}^{M_n^s} (\mathbf{D}_{nk}^s) \cdot \mathbf{E}_0 \right] \frac{e^{-j}}{r_n} \quad (1)$$

例として図 4 のような航空機モデルがあったときの東京湾周辺における電磁波散乱の様子を図 5 に示す。送信電波は東京タワーから放出されるものと仮定している。この数値計算では、送信周波数 520MHz, 送信出力 10kW とし、受信点は解析領域内に 100m 間隔で地上 5m の位置に設定している。図中から送信点から放出された電波がターゲットで散乱し、受信場所によ

って散乱電力強度が異なることが示されている。この図では赤で示された領域に近いほど強い散乱波が届き、そして青の領域では微弱な電波しか届かないことが示されている。そのため、仮に青い領域に受信機を設置したとしても反射波を得ることができない。つまり、このような地域に受信機を設置しても位置検出はできないということになる。

この数値計算結果は汎用の PC を用いて計算しており、その計算時間は 5 分程度である。通常、このように広大な解析領域を数値計算することはなく、事実商用のソフトでの計算は不可能であった。また、仮に計算できたとしても優に数時間はかかることから、提案手法の利点が如何に素晴らしいかということが分かる。

提案手法の精度検証および信号環境調査のために、東京湾周辺を飛行する航空機を対象に実験を実施した。この際、東京タワーから放出される地上デジタル放送波(方式: ISDB-T)を使って実験を行った。図 6 は実験環境を示している。測定場所は若洲海浜公園で、1000~1500 フィートを飛行する航空機をターゲットとした。図 7 は実験結果を示している。図に示されている最も高い数値は、測定場所から一番近く、目の前を通過する航空機からの反射電力であり、その強さは約-77dBm である。使用した八木アンテナの利得が 11.7dBi であることから、実際の受信電力は約-88.7dBm となる。図 5 で示した数値計算結果において、実験と同じ場所の数値は約-90dBm となる。以上の結果から、数値計算で得られた結果と実験で得られた数値はほぼ同程度の値を示しており、提案手法により精度良く解析できていることが分かる。

散乱波が得られる地域は本計算手法によって推定された結果であり、その検証として行った実験結果は数値計算結果と同等の値を示した。航空機からの散乱電力の推定は難しく、散乱波を利用するシステムとしてはその配置が要になる。本提案手法のように簡潔に且つ高速に計算することによって、MSPSR 等で重要となる受信機配置等への応用が期待できる。

#### 4. あとがき

本稿では、航空機の散乱電力と空港面における電波伝搬問題について数値解析結果を示した。

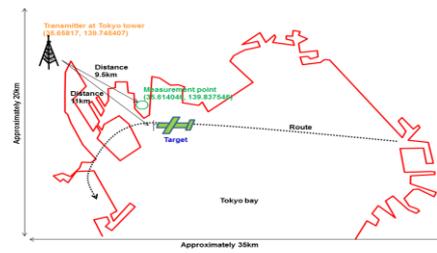


図 6 : 実験環境.

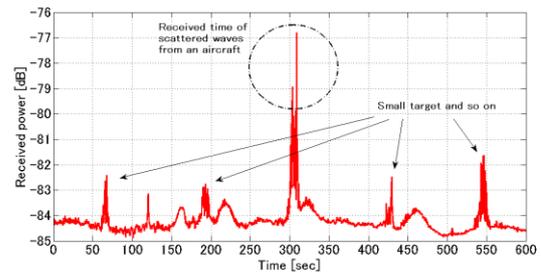


図 7 : 東京湾における航空機散乱電力の実験値.

まず、空港面監視システムとして開発中の OCTPASS の評価実験結果を示し、空港面の伝搬環境について数値計算結果との比較を行った。実験で測位出来ない場所はマルチパスによって発生した受信電力の弱い領域であることが分かった。航空機散乱については、開発した電磁界計算アルゴリズムに基づいて数値解析を行った。従来手法に比べて広大な解析領域を短時間で計算できるにも関わらず、実験との比較では良好な結果を示すことが分かった。

これらの数値解法に基づいた結果は、今後開発フェーズにあるシステムにおいて、効率的なシステム設計および機器の設置作業などにおいて一つの参考資料になるものと期待できる。

#### 参考文献

- [1] J. Honda, T. Otsuyama, "An Algorithm for Analysis of Reflected and Diffracted Fields from a Polyhedron Type of Target above a Plane-Ground," Proc. NBS-2012, Sept. 2012.
- [2] 角張, 古賀, 宮崎, 島田, 二瓶, "空港面用航空機受動監視システムの高性能化", 電気学会論文誌 C, pp. 1088-1093, July, 2012.
- [3] RapLab, Kozo Keikaku Engineering Inc., Tokyo, <http://www4.kke.co.jp/network/rap-lab/>