

## 飛行機模型を用いた RCS の計算値と測定結果

千坂 忠司<sup>†</sup> 道下 尚文<sup>†</sup> 山田 吉英<sup>†</sup>  
南波 英昭<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> 防衛大学校電気電子工学科 〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20

<sup>‡</sup> 日本電気株式会社 パブリックビジネスユニット ナショナルセキュリティ・ソリューション事業部  
〒162-0055 東京都新宿区余丁町 10-10 新宿余丁町ビル 2階

E-mail: <sup>†</sup> {em51010, naobumi, yyamada}@nda.ac.jp, <sup>‡</sup> h-nanba@ce.jp.nec.com

**あらまし** 計算機ハードウェア及びシミュレーションアルゴリズムの発達により、電磁界シミュレーションを適用してレーダ断面積 (RCS) を求めることが容易となってきている。シミュレーション値の計算精度を確認するためには、測定値による検証が必要である。本報告では、周波数 18 GHz でシミュレーションした飛行機の縮尺模型のモノスタティック RCS 値と電波暗室における測定値を比較する。測定では、ベクトルネットワークアナライザを使用して、周波数変調信号を送信し、受信信号をフーリエ変換して時間領域信号とし、適切なタイムゲートをかけることにより不要波を除去した。その結果、シミュレーション値と測定値の詳細な比較が可能となった。

**キーワード** RCS, 測定法, 時間領域

## Calculated and Measured RCS Values of a Scale Model Airplane

Tadashi CHISAKA<sup>†</sup> Naobumi MICHISHITA<sup>†</sup> Yoshihide YAMADA<sup>†</sup>  
and Hideaki NAMBA<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> Department of Electrical and Electronic Engineering, National Defense Academy  
1-10-20 Hashirimizu, Yokosuka-shi, 239-8686 Japan

<sup>‡</sup> National Security Solution Division, NEC Corporation  
10-10 Yochomachi Shinjyuku-ku Tokyo, 162-0055 Japan

E-mail: <sup>†</sup> {em51010, naobumi, yyamada}@nda.ac.jp, <sup>‡</sup> h-nanba@ce.jp.nec.com

**Abstract** In accordance with advances of calculation abilities of personal computer and simulation algorithms, the radar cross section (RCS) calculations become convenient. It is very important to verify the accuracy of a calculated value by measurement. In this paper, calculated monostatic RCS values at 18 GHz are compared with measured results. As a study object, a small airplane model with approximately 300 mm length is employed. In measurements, frequency modulation signal is transmitted and received signal is Fourier transformed. Then, time domain signal are obtained and the objective signal can be easily distinguished from unwanted interferences. As a result, highly detailed comparisons between calculated results become possible.

**Keyword** RCS, Measurement, Time domain

### 1. まえがき

近年、計算機の高性能化や電磁界シミュレーションのアルゴリズムの改良により、飛行機等のレーダ断面積(Radar Cross Section ; RCS)の研究が身近なものになってきた[1]-[3].

RCS 計算では、金属等の表面電流が散乱源となるた

め、電流計算を正確に行うことができるモーメント法 (Method of Moments : MoM) が主に利用される。最近では高速演算を行うために、高速多重極法 (Multilevel Fast Multipole Method : MLFMM) [4]や高次基底関数 (Higher Order Basis Functions : HOBF) [5][6]のアルゴリズムが開発されている。

RCS 計算値の計算精度を確認するためには、測定値による検証が必要である。ただし、実物の飛行機等の RCS を測定することは、多大な困難を伴う。なぜなら、巨大な実大模型、広大な測定場所及び大掛かりな測定装置などを用意する必要があるからである。従って、飛行機や船舶等の大きな構造物は、RCS 測定の容易さから、相似則を利用して縮尺模型が用いられることが多い[7]。縮尺模型であれば、通常の電波暗室での測定が可能であり、計算値と測定値の比較検証が可能となる。

本報告では、まず、飛行機の縮尺模型を対象として、周波数 18 GHz における計算アルゴリズム (MLFMM 及び HOBf) の性能比較を行う。次に、ベクトルネットワークアナライザのタイムドメイン機能を用いた RCS 測定について述べる。そして、計算値及び測定値、更に概算値を加えて比較することで計算精度を検証する。

## 2. 飛行機縮尺模型

図 1 に飛行機模型の計算モデルを示す。形状は単純化しているが、飛行機の主な構造は備えている。材質は完全導体である。電波暗室で測定するために、模型の全長は実機の 1/48 スケールの約 300 mm である。この計算モデルを基にして、測定用飛行機模型を製作した。測定用飛行機模型の構造を図 2 に示す。模型の材質は、胴体は木製であり、主翼、水平尾翼及び垂直尾翼はアルミ製である。胴体部はこのままでは電波を反射しないため、胴体表面に導電塗料 (三菱油化 MCP-1000) を塗装している。

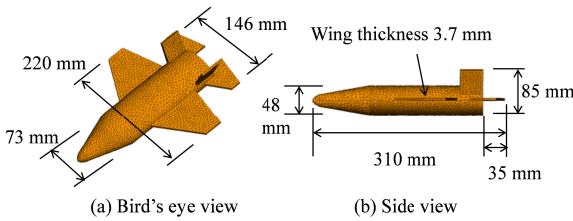


図 1 飛行機模型 計算モデル

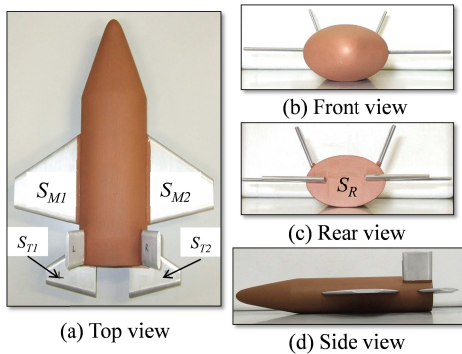


図 2 測定用飛行機模型

## 3. 計算アルゴリズムの比較

周波数 18 GHz におけるモノスタティック RCS を求めるため、MLFMM 及び HOBf でシミュレーションを行った。MLFMM や HOBf は、MoM による RCS 計算の計算負荷を減少させるアルゴリズムである。MLFMM は、離れたメッシュをグループ化して取り扱うことにより、電流を求める行列計算を簡略化する手法である。HOBf は、高次の基底関数を導入することにより、大きなメッシュでも計算精度を維持しながら電流分布を求めることができる手法である[3]。計算周波数が高くなるほど、限られたリソースで問題を解決するためには、これらの手法を適用する必要がある。

シミュレーション環境を表 1 に示し、計算負荷の比較を表 2 に示す。MLFMM で計算する場合、メッシュ寸法は  $0.1\lambda$  が必要であり、計算メモリ量は 5.4 GB、総計算時間は 5.6 時間必要であった。HOBf の場合、メッシュ寸法は  $1\lambda$  が許容される。その結果、MLFMM と比較して、計算メモリ量は 1/3、総計算時間は 1/5 に減少した。

表 1 シミュレーション環境

PC SPEC	CPU Xeon E5-2687W 3.1 GHz, Memory 256 GB
Simulation tool	FEKO Suite 6.3

表 2 計算負荷の比較

Algorithm	Mesh size	Mesh number	Unknown number	Memory amount	Calculation time
MoM	$0.1\lambda$	83,160	124,740	116.336 GB	282,293 seconds (78 hours)
MLFMM	$0.1\lambda$	83,160	124,740	5.430 GB	19,999 seconds (5.6 hours)
HOBf	$1\lambda$	790	14,207	1.527 GB	4,168 seconds (1.2 hours)

## 4. RCS 測定法

RCS 測定系の構成を図 3 に示す。図 3 において、RCS 測定に用いる送受信ホーンはオフセットパラボラ反射鏡の焦点位置に配置されている。送信ホーンからの電波は反射鏡により平面波に変換されるため、測定目標物を反射鏡近くに置いて、遠方条件を満たしていることになる。通常測定における遠方界条件の  $R > 2L^2/\lambda$  の距離よりも小さい距離で遠方界測定と同じ測定が行えるため、コンパクトレンジと呼ばれている。

系の測定は、制御 PC による指示の下で実施される。まず、ターンテーブルを回転させ、 $\theta_1$  の角度で停止する。ここで、ベクトルネットワークアナライザに指示を出し、周波数を  $\Delta f$  の範囲で変化させて送信ホーンから電波を発射させる。同時にベクトルネットワークアナライザで受信ホーンの出力を  $\Delta f$  の範囲に応じて記録する。次に、制御 PC の指令により、ベクトル

ネットワークアナライザで受信ホーン出力にフーリエ変換が行われ、指定した時間位置での出力が選択される。

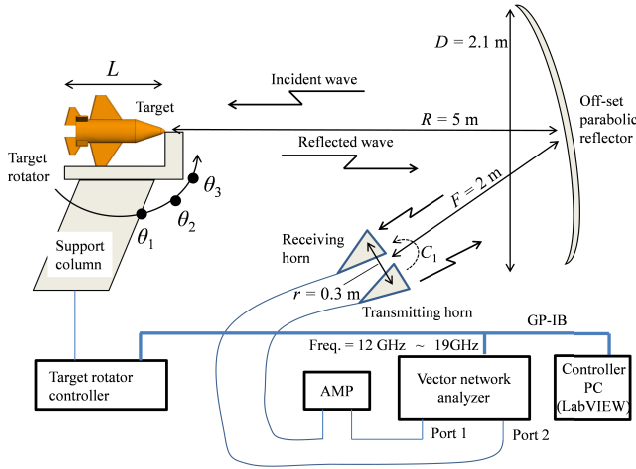


図3 RCS測定系

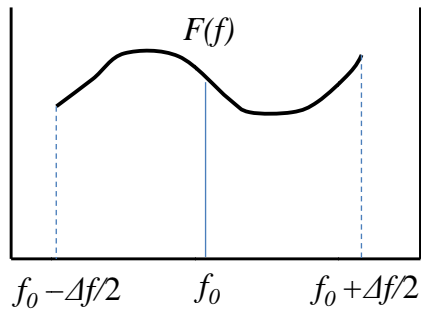
ベクトルネットワークアナライザ内で実行されるフーリエ変換の内容を図4に示す。周波数掃引が図4(a)のように、 $-\Delta f/2$ と $\Delta f/2$ の間で行われたとする。各周波数の出力を $F(f)$ としているが、これはほぼ一定で $F(f) \approx F_c$ と考えて良い。すると、 $F(f)$ のフーリエ変換は以下の式で表される。

$$A(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(f)e^{j2\pi ft} df \quad (1)$$

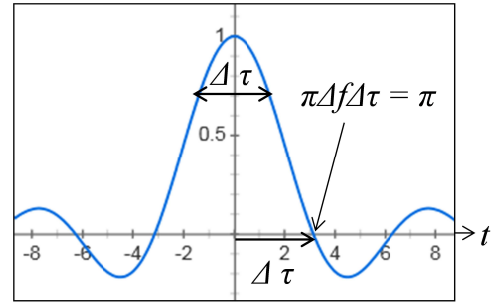
これを $F(f) = F_c$  (一定)として計算すると以下の式となる。

$$\begin{aligned} A(t) &= F_c \int_{f_0 - \Delta f/2}^{f_0 + \Delta f/2} e^{j2\pi ft} df \\ &= F_c e^{j2\pi f_0 t} \Delta f \frac{\sin(\pi \Delta f t)}{\pi \Delta f t} \end{aligned} \quad (2)$$

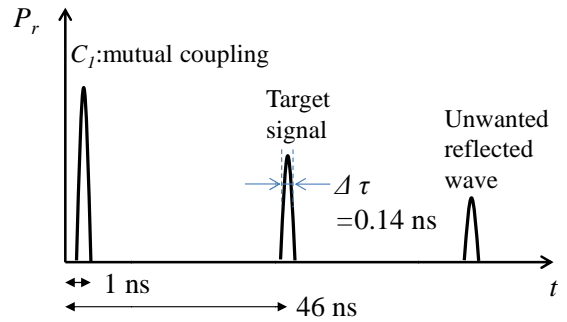
式(2)の時間波形を求めると図4(b)となる。



(a) 回転位置  $\theta_1$  での周波数掃引



(b) タイムドメイン波形



(c) 各タイムドメイン信号の関係

図4 フーリエ変換によるタイムドメイン波形生成

ここで、 $\Delta \tau$ はタイムドメイン波形の-3 dB 時間幅を表しており、図示した関係を有する。したがって、 $\Delta \tau$ は $\Delta f$ により以下の関係で表される。

$$\begin{aligned} \pi \Delta f \Delta \tau &= \pi \\ \therefore \Delta \tau &= \frac{1}{\Delta f} \end{aligned} \quad (3)$$

今回の測定では、 $\Delta f = 7$  GHzなので、 $\Delta \tau = 0.14$  nsとなる。図4(c)に各タイムドメイン信号の関係を模式的に示す。1 nsの位置にある信号は、送信ホーンから受信ホーンへの直接波であり、相互結合を表している。2番目の信号が飛行機模型からの反射波である。電波が送信ホーンから飛行機模型に反射して受信ホーンまで戻る伝搬距離は14 mであり、46 nsの位置に信号が表れることになる。適切にタイムゲートをかけることにより、測定対象物からの反射波のみを精度良く抽出することができる。

### 5. 計算値と測定値の比較

モノスタティック RCS の MLFMM によるシミュレーション値と測定値の比較を図5に示す。両者は、垂直面及び水平面共に良く一致している。RCS の値 ( $\sigma$ ) を検証するため、縮尺模型の特定の方向の理論値を求

めて比較した. 特定の方向とは, 電波の垂直入射面が, 平板が支配的と見なせる方向である. 垂直入射時, 面積  $S$  の平板の  $\sigma$  の理論値は次式で求められる.

$$\sigma = \frac{4\pi S^2}{\lambda^2} \quad (4)$$

図 2 の測定用模型において, 模型の直上方向から見た主翼及び水平尾翼は平板とみなすことができる. また, 後方からみた尾部も平板と見なすことができる. 各部位の面積と  $\sigma$  を表 3 に示す.

表 3 平板の  $\sigma$  理論値

Position	Symbol (Fig. 2.)	Area [m <sup>2</sup> ]	$\sigma$ [dBsm]
Main wing + Tail wing	$S_{M1}+S_{M2} + S_{T1}+S_{T2}$	0.01352	9.18
Rear end	$S_R$	0.00275	-4.65

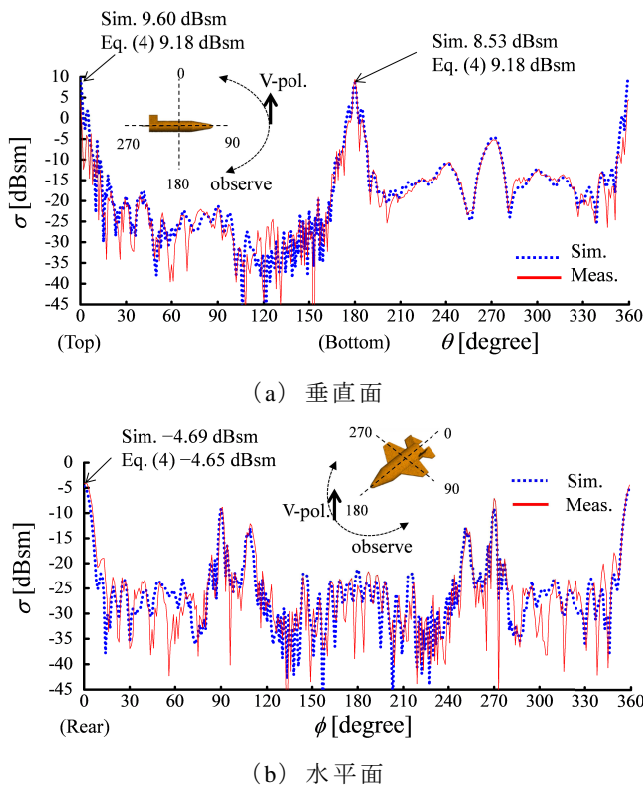


図 5 計算値と測定値の比較

図 5(a)より, 上面及び下面方向において, シミュレーション値と理論値はほぼ一致していることがわかる. 上面と下面でシミュレーション値が異なるのは, 垂直尾翼及び胴体からの反射の違いによるものと考えられる. 図 5(b)より, 尾部のシミュレーション値と理論値はとても良く一致している. 理論値, シミュレーション

値及び測定値の比較より, シミュレーション値と測定値の良好な精度を確認できた.

## 6. まとめ

飛行機模型を用いて, 電磁界シミュレーションによる RCS 計算を行い, 測定値との比較を行った. 測定においては, ベクトルネットワークアナライザーを使用して, 時間領域における信号処理を行った. この結果, 計算値と測定値の詳細な比較が可能となり, 両者は良く一致し, 良好な精度を確認できた.

## 謝辞

RCS 測定は, 防衛省技術研究本部電子装備研究所飯岡支所のご支援の下に実施したものである. 測定器材の操作方法, 測定データの処理方法等をご教示頂いた伊藤敏晴室長及び松林一也技官並びに関係者の皆様に厚く感謝します.

## 文 献

- [1] C. Uluksik, G. Cakir, M. Cakir, L. Sevgi, "Radar cross section (RCS) modeling and simulation, part 1: a tutorial review of definitions, strategies, and canonical examples," *IEEE Antennas Propagat. Magazine*, vol. 50, Issue: 1, pp. 115-126, February 2008.
- [2] A. B. Gorji, R. C. Janalizadeh, B. Zakeri, "RCS computation of a relatively small complex structure by asymptotic analysis," in *Proc. of 2013 URSI Int. Symp.*, pp. 1066-1069, Hiroshima, Japan, May 2013.
- [3] R. J. Burkholder, A. N. O'Donnell, W. O. Coburn, C. J. Reddy, "Sparse basis expansions for compressive sensing of electromagnetic scattering patterns computed using iterative physical optics," *Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)*, pp. 434-437, Cape Town, South Africa, Sept. 2012.
- [4] J. Song, C.-C. Lu, W. C. Chew, "Multilevel Fast Multipole Algorithm for Electromagnetic Scattering by Large Complex Objects," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 45, No. 10, pp. 1488-1493, October 1997.
- [5] B. Kolundzija, M. Tasic, D. Olcan, D. Zoric, S. Stevanetic, "Full-wave analysis of electrically large structures on desktop PCs," *Computational Electromagnetics International Workshop*, pp. 122-127, Izmir, Turkey, Aug. 2011.
- [6] FEKO suite 6.3 comprehensive Electromagnetic Solutions, [www.feko.info](http://www.feko.info)
- [7] E. F. Knott, *Radar Cross Section Measurements*, pp. 482-488, Raleigh, NC: SciTech Publishing, 2006.