

TSUBAME 共同利用 令和 2 年度 産業利用 成果報告書

車載レーダにおけるターゲットからの反射現象と受信特性の FDTD 法による数値解析
Numerical analysis of target reflection and reception characteristics in automotive radar by FDTD method山本 雅史
Masashi Yamamotoマツダ株式会社
Mazda Motor Corporation
<http://www.mazda.co.jp>

RCS(Radar Cross Section)はターゲットからのレーダ反射強度を示す重要な特性であるが、RCS 計算式の適用範囲外である近距離に存在する車両ターゲットに対して、RCS と反射波電力を比較解析した例は少ない。今回、TSUBAME3.0 を活用し、実際の車載レーダ周波数(24GHz)、実物大の 3-D 車両 CAD モデルを用いて、RCS と反射波電力を FDTD 法(Finite Difference Time Domain method)で比較解析した。結果、反射波電力から換算した RCS の角度特性は、計算式から求めた RCS の角度特性と一致しない所があった。ただし、RCS の角度特性の変動幅はほぼ一致していた。これにより、近距離の場合でも車両ターゲットのヨー角を変化させたときの受信電力の変動幅を RCS 変動から見積もることができる可能性を確認した。

RCS (Radar Cross Section) is an important characteristic to estimate intensity of reflected wave from a target, but there are few studies on comparison analysis between reflected power from a target vehicle and RCS for it in the case where the target exists at a short distance from a radar antenna, which means it exists out of the RCS definition. This study addresses comparison analysis between RCS and reflected power by the FDTD method with an actual onboard radar frequency of 24GHz and full-sized 3D vehicle CAD model, using TSUBAME3.0. As a result, the angle characteristics of the estimated RCS from the reflected power calculated by the FDTD was not partially coincident with the one of RCS, but the both fluctuation ranges were almost the same. Therefore, it was confirmed that the fluctuation range of the received power with changes in the yaw angle of the target vehicle could be estimated from the RCS fluctuation even when the target is at a short distance from the radar antenna.

Keywords: Automotive radar, RCS, FDTD, Electromagnetic simulations, vehicle target

1. 背景と目的

自動運転システムや安全運転支援システムにおいて車載レーダは走行環境認識の重要なセンシングデバイスである。レーダ性能向上のためには、アンテナに対する相対角度(ヨー角)が 360 度変化する車両ターゲットにおいて、角度変化に伴う受信電力変動を考慮した上で、アンテナ、信号処理、搭載レイアウト等の車載要件を設計する必要がある。RCS[1]はターゲットからのレーダ反射強度を把握する上で重要な特性であるが、RCS の計算式では送受信アンテナに対してターゲットが無限遠方に存在し、大きさの無い点と見なせることが前提となる。車載レーダの場合、検知ターゲットまでの距離は最大で 200m 程度であり、RCS 計算式の適用範囲外となる。さらに、ターゲットが車両の場合は、ミリ波帯(24GHz、76GHz)車載レーダの波長に比べてサ

イズが大きく複雑な形状であるため、ヨー角変化に対して受信電力や RCS 特性が大きく変動することが分かっている[2]。現状、RCS よりも正確にターゲットからのレーダ反射強度を表現できる指標は確立されていない。また、近距離に存在する車両ターゲットに対して、反射波電力と RCS を比較解析した例[3]は数少ない。

電磁界シミュレーションは、アンテナに対するターゲットの相対位置や相対角度の条件を統制して高い再現性で受信特性を定量解析でき電波伝搬を可視化できるため、車両ターゲットからの反射波の発生と伝搬のメカニズム、及びそれらと受信特性の関係性を解明する上で有効である。一般的に高周波数帯の電磁界解析は、レイトレース法や物理光学近似法(PO 法)、幾何光学近似法(GO 法)が用いられる。しかし、これらの解析手法は電磁波の波動性と粒子性(光線性)のうち粒子性

を再現することを重視した近似を含んでいる為、再現精度に課題がある。また、時間領域の解析ではないためターゲットからの反射波の発生と伝搬を時間経過とともに観察して解析することはできない。一方、時間領域で解析する手法として、電磁波の支配式であるマクスウェル方程式を基に解析空間全体の電磁界を、時間ステップを進めながら解く FDTD 法 (Finite Difference Time Domain method) [4] がある。FDTD 法は、電磁波の波動性と粒子性の双方を高精度に再現でき、時間ステップを進めながら繰り返し解く手法であるため、ターゲットへの入射からアンテナまでの伝搬過程を詳細に定量解析でき可視化観察も可能である。しかし、FDTD 法は波長の 10 分の 1 以下のセルで解析空間を分割して計算するため、ミリ波帯レーダの解析には膨大な計算資源 (メモリ量、計算時間) を必要とする問題がある。これをマルチノードでマルチ GPU を有する Tsubame3.0 を用いることで解決した。本プロジェクトでは、Tsubame3.0 上で高次精度差分スキームの FDTD (2,4) 法と実物大の 3-D 車両 CAD モデルを用いることで、高精度な定量解析を可能とした。

今回は、近距离に存在する車両ターゲットのヨー角を変化させ、(1) ターゲット表面電流分布と Poynting Vector 空間分布の分析から反射波電力の形成要因を解析すること、(2) 反射波電力と RCS を比較解析することを目的とした。

2. 計算条件

FDTD 法で車両ターゲットからの反射波を再現するためのアンテナとターゲットの位置関係及び伝搬環境条件を図 1 に、その他の計算条件を表 1 に示す。今回、車両形状による反射波発生と伝搬を正確に解析するために、実物大の 3-D 車両 CAD データを FDTD 計算に用いた。ただし、車両の金属部からの反射が支配的であると考え、タイヤのゴムやウィンドウのガラス等の誘電体材料は取り除いたデータを用いた。車両ターゲットはレーダアンテナ送信軸上に配置し、アンテナに対して車両背面が正対する角度を 0° として、ターゲットのヨー角を $\pm 25^\circ$ の範囲で変化させた。アンテナからターゲット重心までの距離は、8.0m とした。地面からのアンテナ高さはセダンの搭載位置を想定して 0.5m とした。反射波電力の観測点は、ターゲット重心からアンテ

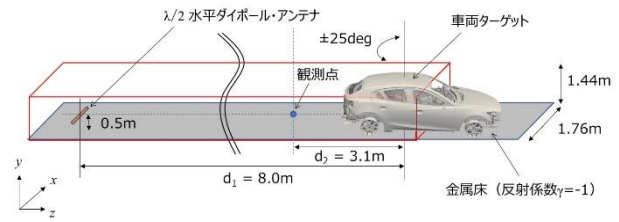


図 1. 車両ターゲットからの反射波の解析条件

表 1. FDTD 法の計算条件

周波数	24.0 [GHz]
解析空間	1408 x 1152 x 5568 [cell]
セルサイズ	1.249×10^{-3} [m] ($\approx 1/10 \lambda$)
計算手法	FDTD(2,4)
クーラン数 CFL	1.3632×10^{-1}
時間ステップ	5.68×10^{-13} [sec]
放射源	1/2 波長ダイポールアンテナ + 連続正弦波
送信電力	7.575 [dBm]
計算ステップ数	45,000 [回]
吸収境界	PML 32 層、 $R_0 = 1.0^{-32}$ 、 $M = 4$
変数の型	float (GPU)

ナ方向へ 3.1m の位置とした。アンテナ放射周波数はミリ波帯車載レーダで用いられている 24GHz とした。リファレンスとして用いる RCS 角度特性は、同一の車両 CAD データを用いて Remcom 社製のレイトレース法 (PO 法と GO 法のハイブリッド) CAE で計算した。

3. 結果および考察

(1) 反射波電力の形成要因の解析

FDTD 法シミュレーションで求めたターゲット表面電流分布を図 2 に示す。ターゲットのヨー角違いの 4 条件の結果を示す。ターゲット表面電流分布の強弱を見ることで、反射波の強弱を把握することができ、ターゲットからの反射波発生メカニズムを知る手掛かりとなる。図 2 より、ターゲットのヨー角によらず表面電流分布は水平方向に帯状に分布し、垂直方向に幾層もの強弱の分布があった。これは、ターゲットに入射する電波がアンテナからの直接波と路面からの反射を経て到達する 2 つの伝搬パスがあり、その 2 つの電波成分の位相差により干渉縞が現れた結果と考える。また、この干渉縞とは別に、バンパーフレーム縁やウィンドウ枠縁、リア

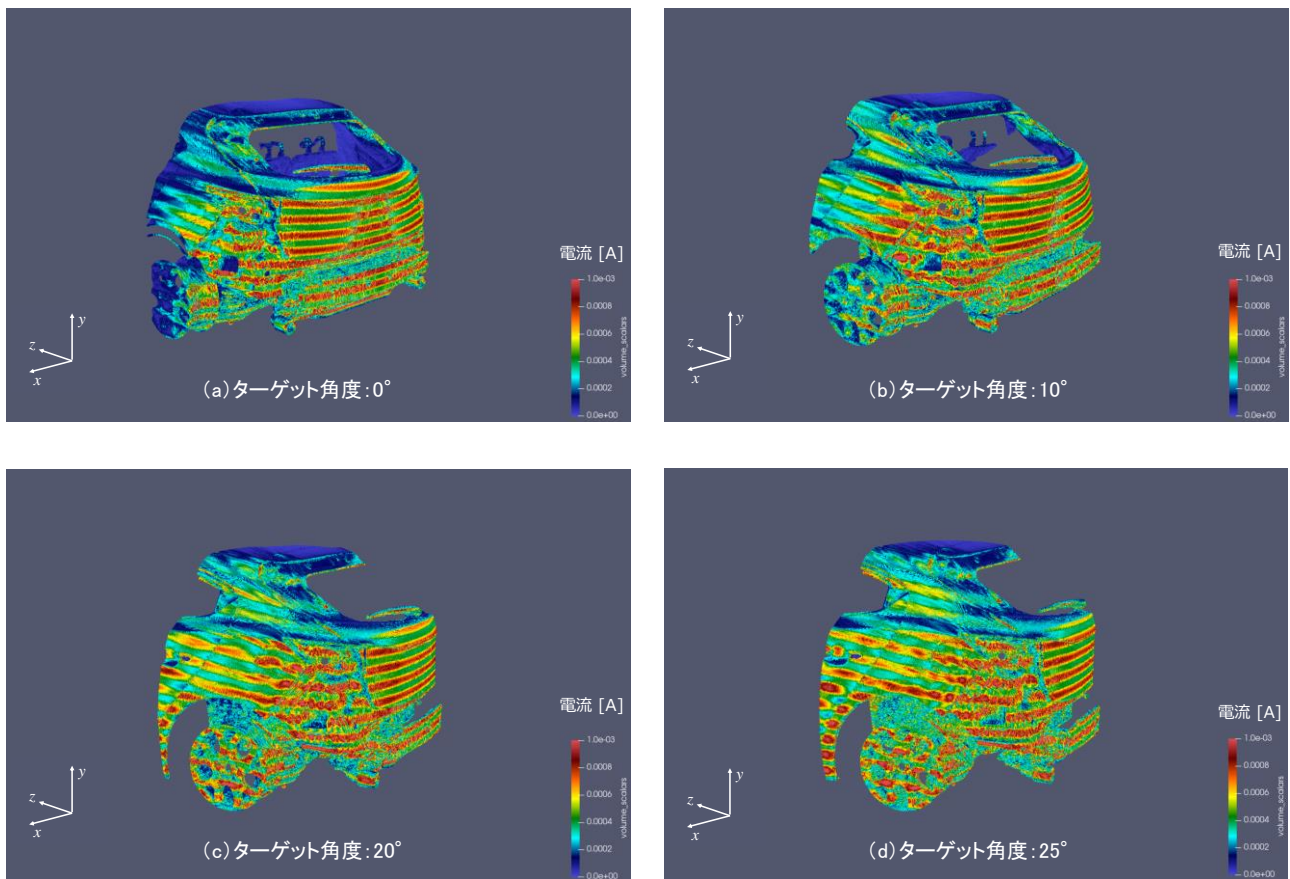


図 2. ターゲット表面電流分布

ワイパーなどのエッジ部で高い表面電流を観測した。ターゲットのヨー角が変わった場合、これらの電流値は変化するが、ターゲット全体の中では相対的に高い強度であり、強い反射波が発生していることを確認できた。

ターゲット近傍における反射波の電力分布(X - Z 面と Y - Z 面)を図 3 に示す。カット断面はアンテナ位置中心を原点とする直行座標系軸の断面である。 Y - Z 面(垂直面)での反射波の電力分布を見ると、大きく 2 つの成分に分類でき、アンテナ方向に強く反射する成分と上空方向に反射する成分である。この結果から推測すると、アンテナ方向に強く反射する成分の伝搬パスは、アンテナからターゲット直線に入射する直接パスと路面を經由してターゲットに入射してその反射波がアンテナに戻るパスの複合であると考えられる。一方、上空方向に強く伝搬する成分の伝搬パスは、アンテナからの直接波がターゲットで散乱して上空方向に伝搬するパスと路面反射波がターゲットでスネルの法則に従い反射して伝搬するパスの複合と考える。 X - Z 面(水平面)での反射を見ると、ターゲットのヨー角によってアンテナ方

向へ伝搬する反射波の強度は大きく異なっていた。ターゲットのヨー角が 0° のときに反射波電力は最も大きく、角度が大きくなるほどに電力が低下する傾向であった。ただし、ヨー角が 20° から 25° のときは、若干反射波電力が大きくなっていた。

Poynting Vector の X - Z 面(水平面)空間分布を図 4 に示す。Poynting Vector を見ると、ターゲット角度が 0° の場合は、平面に近いバンパーフレームからの反射波がアンテナ方向に強く伝搬していた。ただし、反射波の一部はアンテナ方向以外の四方にも散乱していることを確認できた。この要因は、入射波が平面波ではなく円筒波に近い形でターゲットに到達して反射が起こっていたことと、バンパーフレームも完全な平面ではなく、僅かに曲面となっていることから伝搬方向に角度を有したと考える。また、ターゲットのヨー角が大きくなるとアンテナ方向への反射波は弱くなっていた。これは、バンパーフレームの平面がアンテナに対して傾斜したことと、アンテナの送信軸上に車体コーナー部が位置して、丸みの付いたコーナー部に入射した電波が拡散して反射

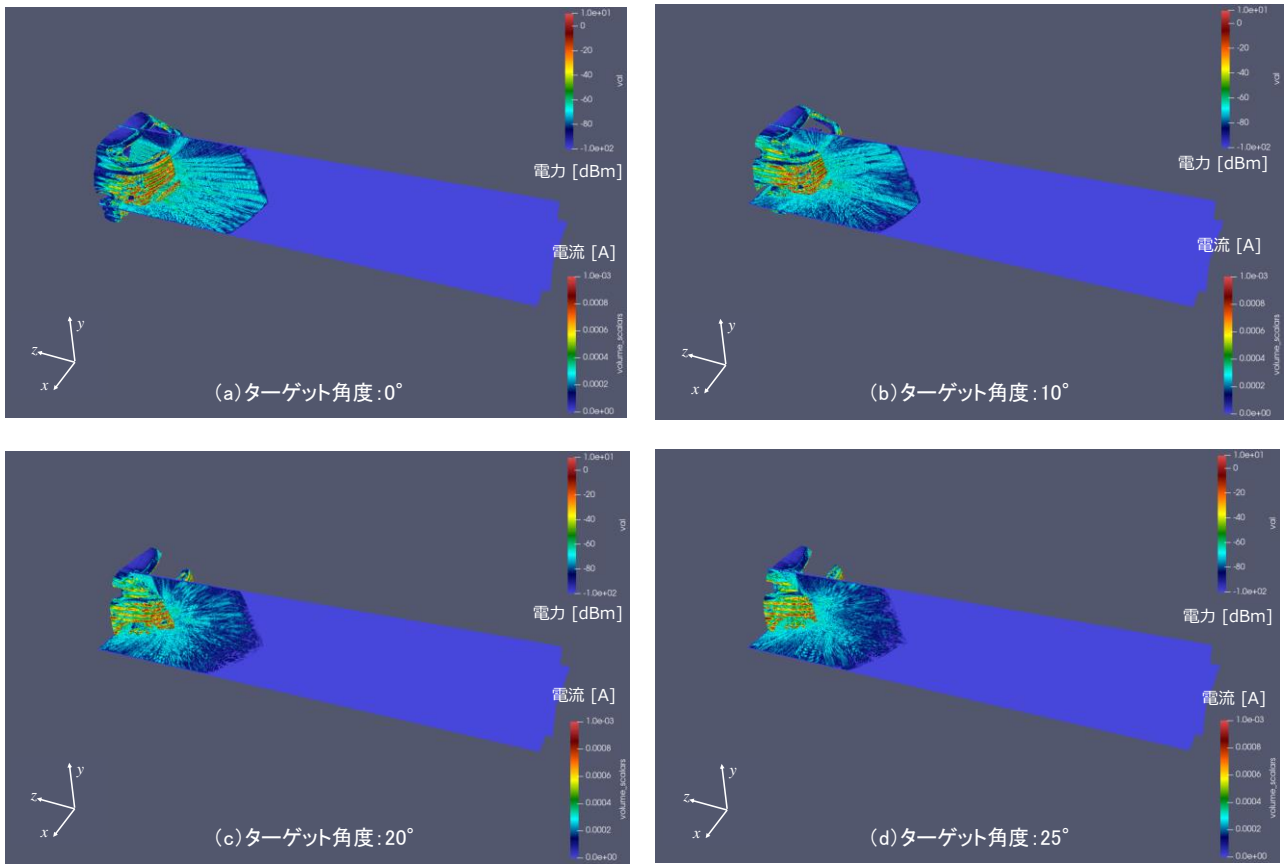


図 3. ターゲット近傍の反射波の電力空間分布 (X-Z 面と Y-Z 面)

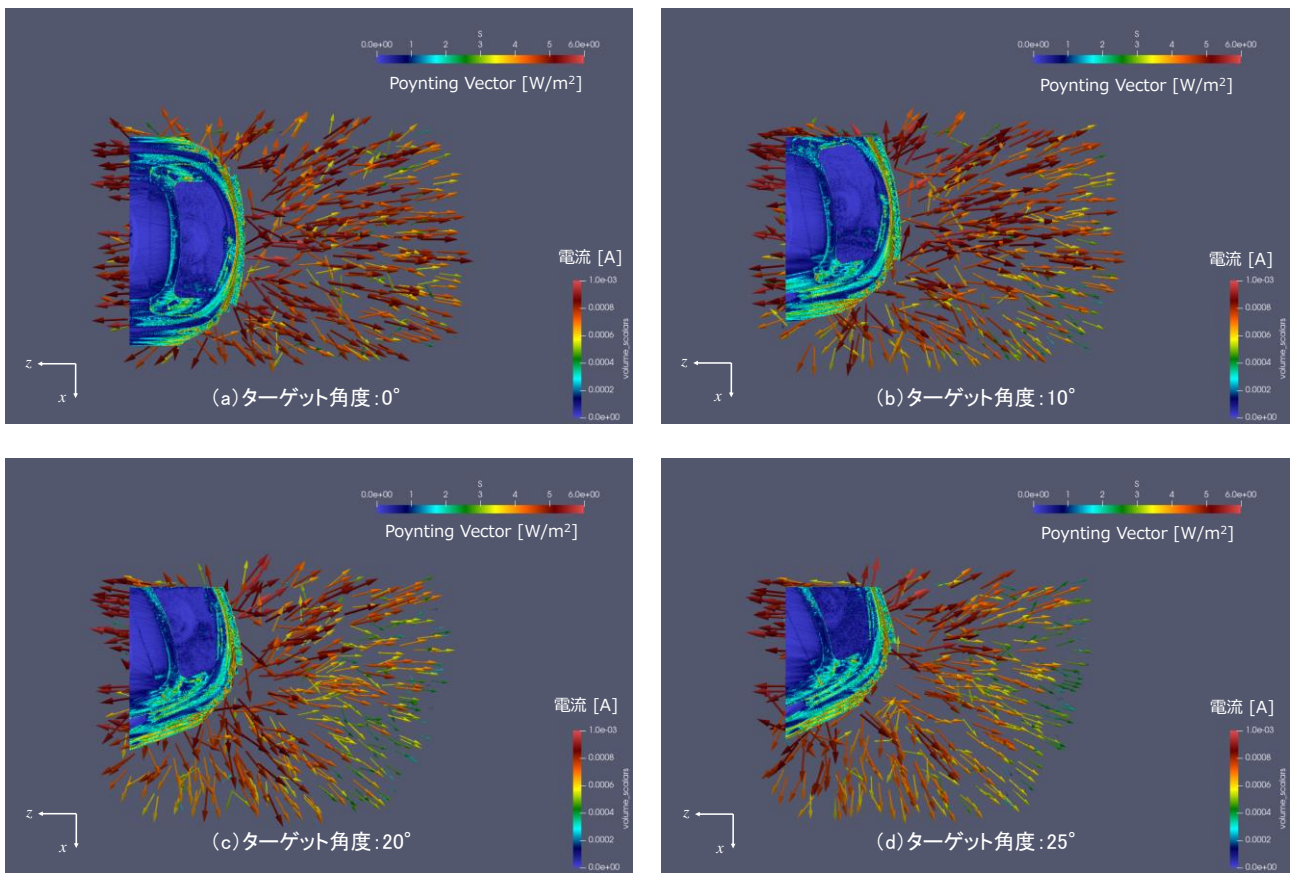


図 4. ターゲット近傍の反射波の Poynting Vector 空間分布 (上面図、X-Z 面)

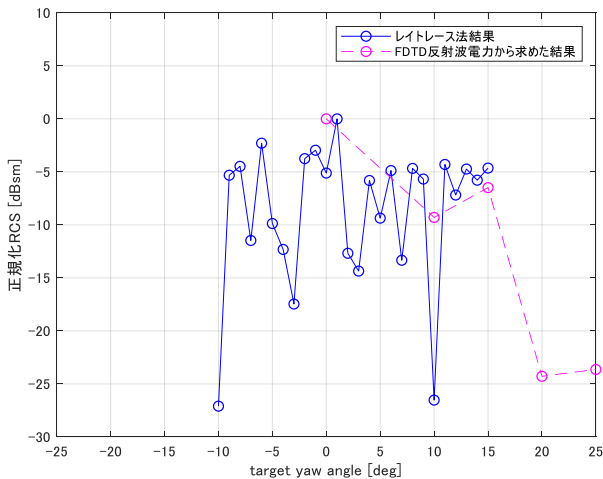


図 5. RCS 角度特性の計算結果

したためと考える。ヨー角が 25° の場合は、バンパーフレームと車体ボディとのつなぎ目がコーナーリフレクタのようになってアンテナ方向に向き、周囲よりも強い反射波が伝搬していることを確認できた。また、ホイール部のエッジからの反射波がアンテナ方向に伝搬している成分があることも確認できた。これらの要因により、ヨー角が 20° よりも 25° の方が、僅かに反射波電力が大きくなったと考える。

(2) 反射波電力と RCS の比較解析

レーダ方程式を変形した式(1)により FDTD 法で計算した反射波電力を換算した RCS と、レイトレース法 CAE で計算した RCS 角度特性を比較した。この結果を図 5 に示す。ただし、図 5 の RCS は、最大値が 0 dBsm となるように正規化した。

$$\sigma = \frac{P_r (4\pi)^3 d_1^2 d_2^2}{P_t G_t G_r \lambda^2} \quad (1)$$

ここで、 σ は RCS、 $P_t \cdot P_r$ は送・受信電力、 $G_t \cdot G_r$ は送・受信アンテナゲイン、 $d_1 \cdot d_2$ はアンテナからのターゲット距離とターゲットからの観測点の距離を示す。

この結果では、ヨー角が 0° (1° 付近) のときに双方の RCS は最も大きくなっていった。また、レイトレース法の結果では 10° (または -10°) のときは大きく低下しており、 1° の数値と比べると 25 dB 程度の差があった。一方、反射波電力から求めた RCS の結果では 10° で、低下傾向にあるがレイトレース法の結果ほど急峻な RCS 低下は見られなかった。この要因は、レイトレース法計算では平面波照射による入射波と反射波の比で RCS を計算するのに対して、今回の FDTD 法計算で

はダイポールアンテナからの放射に加えて、ターゲットまでの距離が近いために円筒波に近い波形が入射して反射したことで、入射波の位相が揃っていないことが考えられる。また、アンテナからターゲットまでの距離が近いことでターゲットの形状とサイズの影響を大きく反映した反射波が観測点に到達しており、RCS 計算式の条件と異なったためと考える。ただし、 $0^\circ \sim 25^\circ$ の範囲で見ると、双方の結果には最大値の RCS に比べて約 25 dB の変動があり、変動幅はほぼ一致していた。

4. まとめ、今後の課題

TSUBAME3.0 を活用し、実際の車載レーダ周波数 (24 GHz)、実物大の 3-D 車両 CAD モデルを用いて、RCS と反射波電力の関係を FDTD 法で数値解析した。結果、反射波電力から換算した RCS 角度特性とレイトレース法 CAE で計算した RCS 角度特性は、一致しない所があったが、変動幅はほぼ一致していた。これにより、近距離の場合でも車両ターゲットのヨー角を変化させたときの受信電力の変動幅を RCS 変動から見積もることができる可能性を確認した。

今回の FDTD 法の 1 条件の計算には、 29 ノードの 116 GPU を使用し、メモリ量は 3 TB、計算時間は 11.8 時間であった。

今後の課題は、異なる形状とサイズの車両ターゲットに対して、実際の車載レーダ周波数の 76 GHz や 24 GHz の条件で、RCS と受信特性の関係解明に取り組むことである。

参考文献

- [1] Eugene F. Knott, 他, Radar Cross Section (2nd Edition), scitech publishing, (2004)
- [2] Emna Bel Kamel, 他, RCS modeling and measurements for automotive radar applications in W band, HAL, (2018)
- [3] Shigeki Ohshima, 他, A Method for Accomplishing Accurate RCS Image in Compact Range, IEICE TRANS. Vol.E79-B No.12 p.1799-1805, (1996)
- [4] 宇野 亨, FDTD 法による電磁界およびアンテナ解析, コロナ社, p.22(2009)