

TSUBAME 共同利用 令和元年度 産業利用 成果報告書

車載レーダにおけるターゲット散乱とレーダ反射断面積の FDTD 法による詳細解析
Detailed analysis of target scattering and radar reflection cross section 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>

車載レーダは、自動運転や安全運転支援システムにおいて走行環境認識のための重要なデバイスである。レーダ性能向上のためには、車両ターゲットの様々な位置、角度変化に対する受信電力変動を考慮した上で、アンテナ・車載化要件を設定する必要がある。従来から RCS (Radar Cross Section) はターゲットからの反射波強度を把握する上で重要な特性であるが、車両ターゲットからの反射波の受信電力と比較解析した例は少ない。今回、TSUBAME3.0 を活用した FDTD (Finite Difference Time Domain) 法シミュレーションにより比較解析を行った。その結果、5GHz 周波数帯において、FDTD 法でシミュレーションした車両ターゲットからの反射波の受信電力と、RCS とレーダ方程式から算出した受信電力の相対値がほぼ一致していることを確認できた。

An automotive onboard radar is an important sensing device for autonomous driving systems and ADAS (advanced driver-assistance systems) to realize environment recognition functions. RCS (Radar Cross Section) is an important characteristic to estimate intensity of reflected wave from a target, but there are few examples of studies on comparing the RCS of a vehicle target with the received power of an antenna. In this study, comparison analysis was conducted by a FDTD (Finite Difference Time Domain) simulation using TSUBAME3.0. The received power of the reflected wave from a vehicle target was computed by the FDTD simulation and also calculated from the RCS and the radar equation at the 5GHz frequency band. Both results were compared after normalization. It was confirmed that they were almost the same.

Keywords: Automotive radar, RCS, FDTD, Electromagnetic simulation, Radar equation

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ため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、車両ターゲットの様々な位置、角度変化に対する受信電力変動を考慮した上で、アンテナ、信号処理、車載化条件を設計する必要がある。従来から RCS (Radar Cross Section) [1] がターゲットからの反射波強度を把握する上で重要な特性となっているが、車両ターゲットにおける受信電力と比較解析した例は少なく、受信電力の増減と RCS との関係性やその関係性の要因となるターゲットからの反射波発生と電波伝搬の詳細は十分に説明されていない。

レイトレース法や物理光学近似 (PO) 法を活用して RCS と受信電力を数値解析で求める手法があるが、

電波の波動性と粒子性 (光線性) のうち粒子性を重視した再現のため、近似を含んでおり再現精度に課題があることと、その結果の要因を解明するためのターゲットの反射、散乱、回折現象とアンテナまで到達する過程の電波伝搬の物理現象を精緻に可視化して解析することは困難である。一方、電波の振る舞いを現すマクスウェル方程式を離散化することで高精度に解く FDTD (Finite Difference Time Domain) 法 [2] がある。FDTD 法は、電波の波動性と粒子性の双方を再現し、解析空間全体を時間領域で解く手法のため、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解析して可視化を可能にする。しかし、FDTD 法は波長の 10 分の 1 以下のセルで解析領域を分割して計算するため、車載レーダのミリ波帯の解析には膨大な計算機メモリと計算時間を必要とする問題がある。

マルチノード、マルチ GPU 計算機である TSUBAME3.0 を用いることで FDTD 法が抱える計算資源(メモリ量と計算時間)の問題を解決できる。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)法と実スケール 3D モデルを用いることで、ターゲットからの反射波を波動性と粒子性の双方で高精度に再現、解析することを可能にした。

今回は、アンテナに対する車両ターゲットの距離と角度を変化させた際の RCS と受信電力の関係性を把握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し、受信電力を観測する解析モデルを図 1 に、計算条件を表 1 に示す。今回、車両形状による影響を考慮して RCS 特性と受信電力を解析するために、実車両の 3D CAD データを FDTD 法に取り込み計算した。ただし、車両の金属部からの反射が支配的であるとの仮定のもと、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金属部のみのデータを用いた。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 度として、車両の角度を ±45 度の範囲で変化させた。アンテナとターゲット間の距離は 5.76m、11.1m、25m の 3 条件とした。地面からのアンテナ高さはセダンのレーダ搭載位置を想定して 0.5m とした。受信電力の観測点は、アンテナの直前にアンテナと同じ高さに設定した。周波数はマイクロ波帯の 1GHz と 5GHz の 2 条件でそれぞれ計算し、FDTD 法で求めた受信電力と、RCS とレーダ方程式から算出した受信電力を比較した。レーダ方程式は、直接波と金属床の反射波の干渉を考慮した式 (1) を用いた。

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \left| 1 + \gamma \frac{R_1}{R_2} \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} (R_2 - R_1)\right) \right|^4 \quad (1)$$

ここで、 P_r : 受信電力、 P_t : 送信電力、 R : ターゲットまでの距離、 R_1 : 直接波の伝搬距離、 R_2 : 金属床反射波の伝搬距離、 G : アンテナ利得、 λ : 波長、 σ : RCS、 γ : 金属床の反射係数である。

車載レーダで用いられている周波数である、76GHz 帯や 24GHz 帯での大規模解析シミュレーションは、1 条件の計算でおおよそ 50 時間以上要すると見込む。

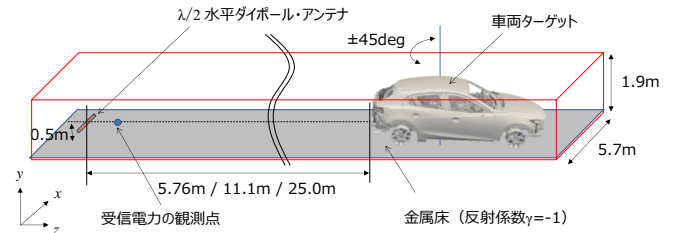


図 1. 車両ターゲットの反射解析モデル

表 1. FDTD 法の計算条件

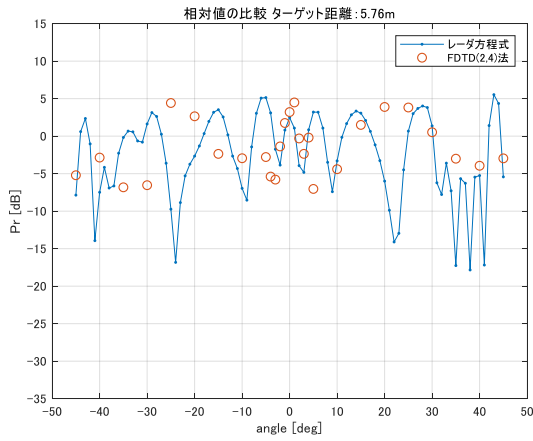
周波数	1.0 [GHz] / 5.0 [GHz]
解析空間	192x64x1024 [cell] / 768x320x5120 [cell]
セルサイズ	2.998x10 ⁻² [m] / 5.996x10 ⁻³ [m] (≒ 1/10 λ)
計算手法	FDTD (2,4)
クーラン数 CFL	1.3632x10 ⁻¹
時間ステップ	1.36x10 ⁻¹¹ [sec] / 2.73x10 ⁻¹² [sec]
放射源	λ/2波長ダイポールアンテナ+連続正弦波
送信電力	7.614 [dBm] / 7.575 [dBm]
計算ステップ数	80,000 [回] / 200,000 [回]
吸収境界	PML 32 層、R ₀ =1.0 ⁻³² 、M=4
変数の型	float (GPU)

そこで今回は、計算負荷が小さい 1GHz と 5GHz の 2 つの周波数帯で距離と角度の多様条件で RCS と受信電力の関係の傾向を事前に把握することで、今後行う 76GHz 帯や 24GHz 帯での受信特性と伝搬特性の仮説を立て、計算条件の絞り込みを行いたいと考えた。

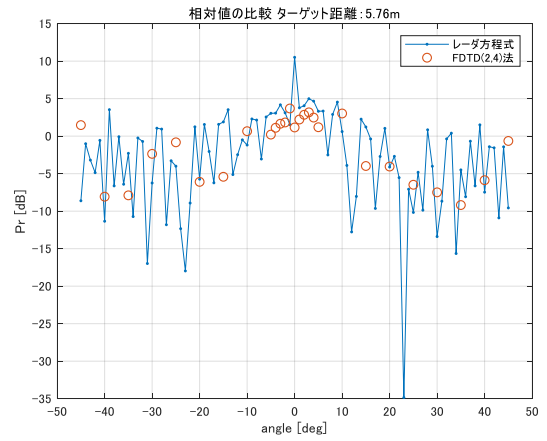
3. 結果および考察

FDTD 法シミュレーションにより求めた受信電力と、RCS とレーダ方程式から求めた受信電力をターゲットまでの距離別に比較した。比較に際して、角度が ±45 度の範囲で平均値を求め、平均値が 0dB となるように正規化した相対値を用いた。この理由は、FDTD 法とレーダ方程式で、アンテナ特性である送信電力とアンテナゲインの相違の影響を無くすためである。

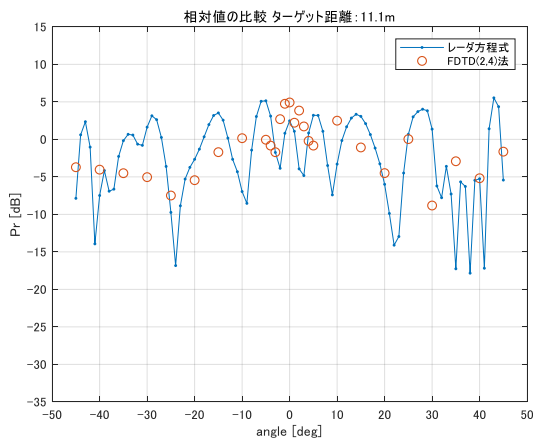
1GHz でターゲットまでの距離別の結果を図 2(a) ~ (c) に、5GHz の結果を図 3(a) ~ (c) に示す。この結果より、1GHz ではターゲットまでの距離に関わらず FDTD 法とレーダ方程式の結果は、極端な信号レベルの相違ではないが、ピークおよび落ち込みの現れる角度や、ターゲット角度に対する信号レベル変化に一致



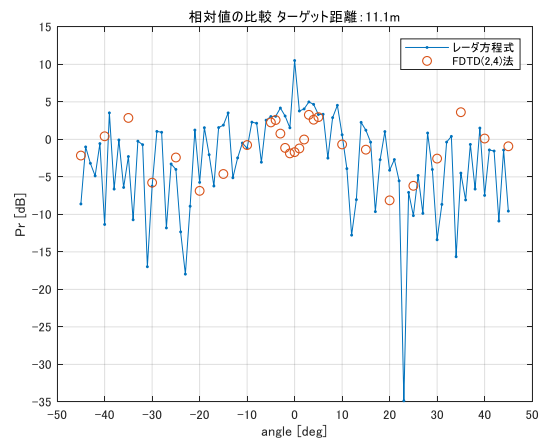
(a) ターゲットまでの距離: 5.76m



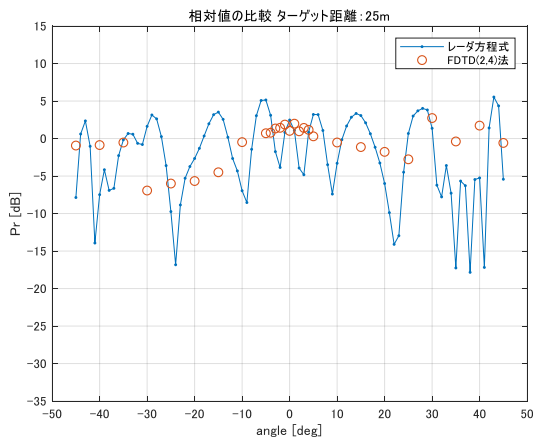
(a) ターゲットまでの距離: 5.76m



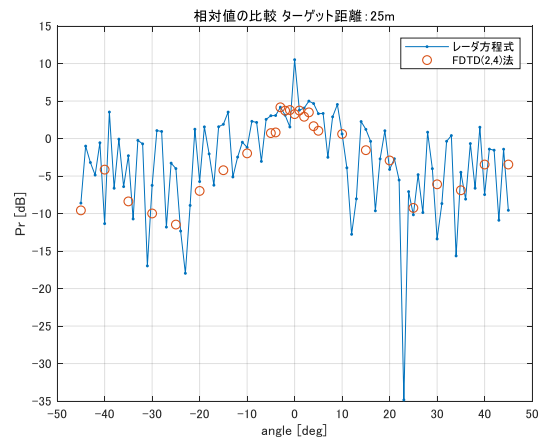
(b) ターゲットまでの距離: 11.1m



(b) ターゲットまでの距離: 11.1m



(c) ターゲットまでの距離: 25.0m



(c) ターゲットまでの距離: 25.0m

図 2. 1GHz の受信電力の相対値の比較

図 3. 5GHz の受信電力の相対値の比較

は見られなかった。一方、5GHz ではいずれのターゲットまでの距離でも、ターゲット角度変化に対する信号レベルおよび増減変化の特徴がほぼ一致していることを確認した。

FDTD 法で求めた受信電力と、RCS とレーダ方程

式から算出した受信電力の間の相関を評価するため、相関係数を条件ごとに求めた結果を表 2 に示す。5GHz では 5.76m と 25m の条件でかなり強い相関があり、11.1m で相関があった。1GHz では弱い相関が相関がないことを確認した。

表 2. FDTD 法とレーダ方程式の結果の相関係数

ターゲットまでの距離	周波数: 1GHz	周波数: 5GHz
5.76m	0.006	0.663
11.1m	0.256	0.381
25.0m	0.107	0.772

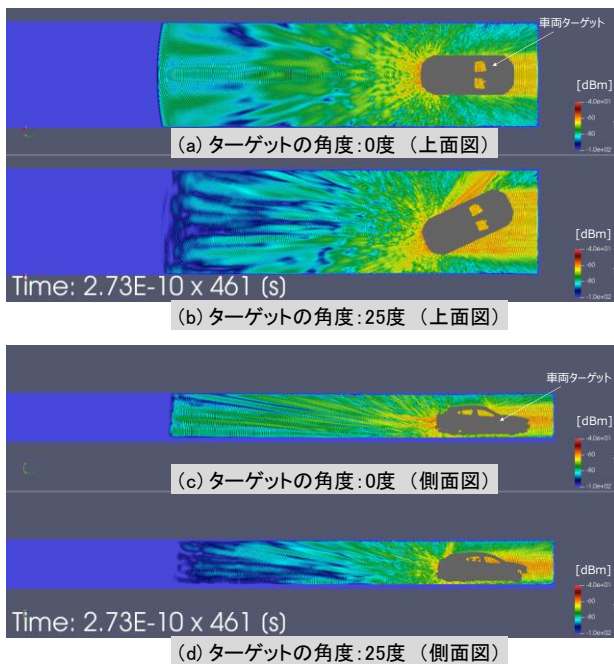


図 4. 5GHz、距離 25m の散乱界による電力空間分布

5GHz 連続正弦波の車両ターゲットからの散乱界の過渡状態における電界強度を受信電力に換算して可視化した結果を図 4(a)～(d)に示す。受信電力の空間分布はコンター表示しており、赤色になるほど電力が高く、青色になるほど電力が低いことを表している。ターゲットまでの距離は 25m の条件である。図 4(a)と(b)は、車両ターゲットが 0 度と 25 度の条件で同一時刻の電力分布の上面図であり、図 4(c)と(d)は側面図である。

車両ターゲットが 0 度の場合では、車両のリアパネルとバンパー付近で強い反射が起こり、その強い反射波がアンテナ方向に伝搬していることを確認できる。また、25 度の場合は車両の側面で強い反射が起こり車両ボディに沿って強く伝搬しているのに対して、アンテナ方向への反射は全体的に弱く、特にアンテナ送信軸上は反射波が干渉して信号レベルが落ち込むヌルとな

っていることを確認できる。この結果は、図 3 で示した、車両ターゲット角度が 0 度で信号レベルが高く、25 度で大きく落ち込み、その差が 15dB～20dB であった要因を示唆している。つまり、車両ターゲット角度が 25 度で受信電力が大きく低下したのは、車両ターゲットでのアンテナ方向への反射が弱いことに加えて、反射波が干渉したためと推察する。

4. まとめ、今後の課題

車両ターゲットに 1GHz と 5GHz の連続正弦波を照射する条件で、ターゲットからの反射波の受信電力を FDTD 法によりシミュレーションした結果と、RCS とレーダ方程式から算出した結果を相対値で比較した。その結果、5GHz 周波数帯では、ターゲット距離と角度変化によらず 2 者がほぼ一致していることを確認できた。また、5GHz ではアンテナに対する車両ターゲットの角度変化により、受信電力で 15dB～20dB 程度の差異が生じており、車両ターゲットからアンテナ方向への反射の強さの違いに加えて反射波の干渉が影響していることが分かった。

今回の 1 条件の計算には、最大で 2 ノードの 8GPU を使用し、メモリ量は 115GB、計算時間は 2.6 時間であった。

今後、車両ターゲットの形状と大きさが異なる場合と、周波数が実際の車載レーダの 76GHz や 24GHz の場合において、RCS と受信電力の関係性の解明に取り組む。

参考文献

- [1] Eugene F. Knott, 他, Radar Cross Section (2nd Edition), scitech publishing, (2004)
- [2] 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)
- [3] 園田 潤, 大規模電波伝搬解析に適した波動方程式に基づく FDTD(2,M)法の数値分散と並列計算特性, 信学技報, AP2009-12, p.7-12(2009)
- [4] 園田 潤, 高次 FDTD 法とクラスタを用いた並列計算による大規模電波伝搬解析に関する研究, 東北大学博士学位論文, p.78-83(2005)