

TSUBAME 共同利用 令和 3 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表面電流分布の FDTD 法による数値解析  
Numerical analysis of surface current distribution for an 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>

レーダ電波が照射された車両の表面電流分布は、車両のどの箇所からレーダ電波が強く反射しているかを把握する上で重要な物理量である。表面電流分布の数値解析は、時間領域でマクスウェル方程式を解く FDTD 法 (Finite Difference Time Domain method) により可能である。しかし、車載レーダのミリ波・準ミリ波帯で車両を対象にした FDTD 計算を実施するためには、大規模な計算リソースと数値分散誤差の問題があった。今回、TSUBAME3.0 と FDTD(2,4)法を活用することで問題解決でき、実物大のターゲット車両の表面電流分布を解析できた。これにより、車両からのレーダ反射波の発生メカニズムおよび受信電力の変動メカニズムを解明する手掛かりを得ることができた。

Surface current distribution is an important physical index for understanding from which part of a target vehicle radar waves will be strongly reflected. Surface current can be calculated by FDTD method. However, FDTD method requires large-scale calculation resources and has large numerical dispersion errors in millimeter-wave and quasi-millimeter-wave bands analyses. These problems could be solved by using TSUBAME3.0 and FDTD(2,4) method, to analyze the surface current distribution on a target vehicle. This method will make us able to be obtained clues to elucidate mechanisms of reflected waves generation and fluctuation of received power for a vehicle target.

*Keywords:* automotive radar, surface current, FDTD, electromagnetic simulations, vehicle target

## 1. 背景と目的

車載レーダは、自動運転システムや安全運転支援システムにとって走行環境を認識する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、自車の先行車両を検知する場合や、自車の前方交差点を横断する車両を検知する場合など、あらゆる走行シーンを想定する必要がある。つまり、アンテナに対するターゲット車両の相対角度(ヨー角)が 360 度変化することを想定し、角度変化に伴う受信電力の変動を考慮してアンテナや信号処理などを開発する必要がある。

RCS[1]はターゲット車両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 の計算式ではターゲットがアンテナに対して無限遠方に存在し、大きさの無い点と見なせることが前提である。車載レーダの場合、ターゲット車両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、ミリ波帯・準ミリ波帯(周波数: 76GHz、24GHz)車載レーダの波長(4mm、12mm)に比べて、ターゲット車両のサイズが大きく形状が複雑であるため、

ヨー角変化に対して RCS 特性と受信電力が大きく変動することが分かっている[2]。現状、ターゲット車両のヨー角変化に伴う RCS 特性の変動メカニズムや車両特有の反射波の発生メカニズム、受信電力の変動メカニズムは解明できていない。

電波がターゲットに入射すると、電磁誘導によりターゲット表面に電流が流れ、その電流により周囲に磁界と電界が発生して反射波となる。したがって、ターゲット上の表面電流の生じ方を知ることができれば、照射されたレーダ電波がどのようにターゲットで反射するのかを把握できると考えられる。

そこで我々は、ターゲット車両からのレーダ反射波の発生メカニズムおよび受信電力の変動メカニズムを解明する手掛かりを得るために、車両の表面電流分布の数値解析に取り組んだ。

## 2. 車両の表面電流分布数値解析の課題

車載レーダの電波伝搬シミュレーションは、幾何光学近似を用いたレイトレース法や PO 法、GO 法が一般的に用いられる。しかし、上記の数値解析手法は、電波

の波動性を厳密に再現できないことと時間領域の解析ではないことから、電磁誘導による表面電流を計算できない。FDTD 法(Finite Difference Time Domain method)[3]は、電波の支配方程式であるマクスウェル方程式を差分化して、時間領域で電界と磁界を解く手法である。この計算原理より、ターゲット表面の電界と磁界の時間変動から表面電流を計算できる。

しかし、FDTD 法でターゲット車両の表面電流を解析する上で 2 つの問題点がある。1 つ目の問題点は、FDTD 法では、波長の 1/10 以下のサイズのセルで解析空間全体を分割して、時間ステップを進めながら繰り返し計算するため、大規模な計算リソース(メモリ量、計算時間)を必要とすることである。具体的には、ミリ波帯(周波数:76GHz、セルサイズ:0.4mm)・準ミリ波帯(周波数:24GHz、セルサイズ:1.2mm)で車両を対象にした解析では、セル数が数十億セルから数千億セルとなり、所要メモリ量は数百 GB から数 TB 程度、CPU 計算は数百時間を所要する見積りである。

2 つ目の問題点は、FDTD 法が差分近似を用いた計算原理であるため、数値分散誤差(位相誤差)が生じることである。波長に対する伝搬距離が長くなるほど位相誤差は累積するため、高周波数帯の大規模空間解析では伝搬波形が崩れる。

今回、上記 2 つの問題点に対して、TSUBAME3.0 を活用し、我々が開発した高精度差分スキームの FDTD(2,4)法プログラムを用いてターゲット車両の表面電流分布の数値解析に取り組んだ。

### 3. TSUBAME3.0 による計算リソース問題の解決

FDTD 法の計算アルゴリズムは、リープフロッグアルゴリズムで、時間ステップを進めながら 1 ステップ過去の電界と磁界から現在の電界と磁界を交互に計算する。そして、空間領域を分割したセルに対して当該セルと隣接したセルの 1 ステップ過去の電界と磁界を用いて、当該セルの電界と磁界を計算する。したがって、1 ステップ過去の計算結果を保持することで空間領域全体を一括して並列計算ができる。ただし、セル毎の電界と磁界データをメモリから読み込みと書き出しをするため、計算速度はメモリ・バンド帯域幅(メモリ・データ転送速度)に律速される。

TSUBAME3.0 は、540 台の計算ノードで構成され

た大規模クラスタ型スーパーコンピュータである。1 台の計算ノードには、NVIDIA 製 GPU Tesla P100(単精度浮動小数点演算性能:9.3 TFLOPS、GPU メモリ:16GB)を 4 機搭載している。全計算ノードの GPU メモリ量は約 34.6TB である。また、GPU P100(CUDA コア数:3,584 コア、メモリ・バンド帯域幅:720 GB/s)は、ハイパフォーマンス CPU と RAM メモリ(CPU: Intel Xeon E5-2680 14 コア、RAM: DDR4-2400 メモリ帯域幅 19.2GB/s)と比較して、数百倍の並列計算コア数と数十倍のメモリ帯域幅を有する。

以上のような TSUBAME3.0 のマルチ計算ノードのマルチ GPU を用いることで、FDTD 法の計算リソースの問題を解決できた。今回取り組んだターゲット車両の表面電流分布解析のための FDTD 計算は、約 20 億セルの解析規模で 8 ノードの 32GPU を必要とした。計算実施の結果、所要メモリ量は 458GB、計算時間は約 50 分であり、有効性を検証できた。

### 4. FDTD(2,4)法による位相誤差の解決

一般的な FDTD 法は、マクスウェル方程式の時間微分と空間微分を 2 次精度で差分近似した Standard-FDTD 法である。この計算手法は、自由空間中で位相速度が光速とならず、伝搬距離が長くなるほど位相が遅れる。セルサイズをより小さくすることで位相誤差を低減できる。しかし、セルサイズを波長の 1/20 と設定した場合で 1 波長分の距離の伝搬で約  $1^\circ$  の位相誤差が生じ、50 波長分の伝搬では約  $50^\circ$ 、100 波長分の伝搬では約  $100^\circ$  の誤差が生じることとなり、許容できない。またセルサイズをより小さくした場合、計算リソースが指数関数的に増大するため計算リソースの問題を誘発する。

一方、FDTD(2,4)法は、時間微分を 2 次精度差分で、空間微分を 4 次精度差分で近似する。この計算手法は、時間領域で位相が進み、空間領域で位相が遅れる。この特徴から、時間領域の計算分解能(時間ステップ)に作用するクーラン条件 CFL を最適化することで、時間領域と空間領域で生じる位相誤差を相殺できる。

セルサイズを波長の 1/10 に設定した場合のクーラン条件 CFL と位相誤差の関係を図 1 に示す。この結果から、FDTD(2,4)法で CFL を 0.1363212 に設定することで 1 波長分の伝搬の位相誤差が  $1.09 \times 10^{-5}^\circ$  とな

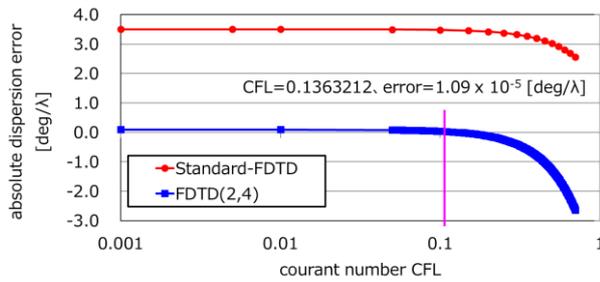


図 1.1 波長分の伝搬における位相誤差と CFL の関係

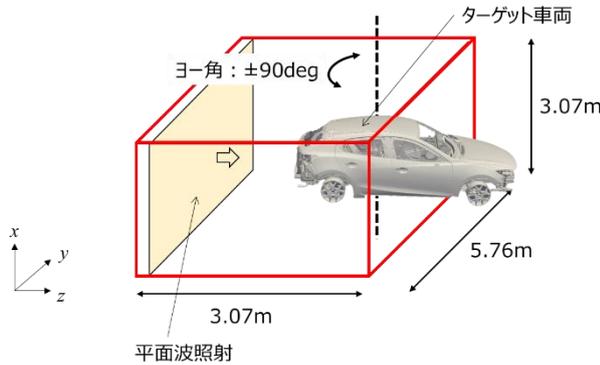


図 2. ターゲット車両の表面電流分布の解析条件

り、ほぼ無視できるレベルに低減できた。これより、FDTD 法の位相誤差の問題を解決できた。

#### 5. ターゲット車両の表面電流分布の数値解析

実物大のターゲット車両を対象に、準ミリ波帯(周波数: 10GHz、波長: 30mm)レーダが照射されたときの表面電流分布を FDTD(2,4)法で解析した。図 2 に、ヨー角が変化した際のターゲット車両の表面電流分布を解析するための平面波照射とターゲット車両の条件を示す。表 1 にその他の計算条件を示す。ヨー角は、ターゲット車両の中心を通り、水平面に対して垂直な直線を回転軸として回転させた角度である。ターゲット車両の真後ろを  $0^\circ$  に設定して、左右  $\pm 90^\circ$  の範囲で回転させた。

ターゲット車両の表面電流分布の数値解析結果を図 3 に示す。濃い赤色の所のほど表面電流が大きく流れていることを示している。このように、TSUBAME3.0 と我々が開発した高精度差分スキームの FDTD(2,4)法プログラムで、ターゲット車両の表面電流分布を数値解析することができた。

#### 6. まとめと今後の課題

ターゲット車両からのレーダ反射波の発生メカニズム、および受信電力の変動メカニズムの解明に向けて、ターゲット車両の表面電流分布の数値解析に取り組んだ。

表 1. FDTD 法の計算条件

周波数	10.0 [GHz]
解析空間	3.07 x 5.76 x 3.07 [m] (1024 x 1920 x 1024 [cell])
セルサイズ	2.99x10 <sup>-3</sup> [m] (≒ 1/10 λ)
計算手法	FDTD(2,4)
クーラン条件 CFL	0.1363212
時間ステップ	1.36x10 <sup>-12</sup> [sec]
放射源	平面波+ガウスパルス波
計算ステップ数	7,200 [回]
吸収境界	PML 32 層、R <sub>0</sub> =1.0 <sup>-32</sup> 、M=4
変数の型	float (GPU)

ターゲット表面電流は、時間領域でマクスウェル方程式を解く FDTD 法で計算可能である。しかし、ミリ波帯・準ミリ波帯で車両を対象にした FDTD 解析を行うためには、大規模な計算リソースが必要となることと、解析規模に応じて位相誤差が大きくなる問題があった。

上記の問題に対して、マルチ計算ノードのマルチ GPU を搭載した TSUBAME3.0 を活用し、我々が開発した高精度差分スキームの FDTD(2,4)法プログラムを用いて表面電流分布の数値解析を行った。その結果、実物大のターゲット車両を対象に、準ミリ波帯レーダを照射したときの表面電流分布を実用的な計算時間で解析可能であることを示すことができた。

今後、ターゲット車両にレーダ電波を照射したときの反射箇所を把握して、反射波の発生メカニズムおよび受信電力の変動メカニズムを解明する。

#### 参考文献

- [1] Eugene F. Knott, 他, Radar Cross Section (2<sup>nd</sup> Edition), scitech publishing, (2004)
- [2] Emna Bel Kamel, 他, RCS modeling and measurements for automotive radar applications in W band, HAL, (2018)
- [3] 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)

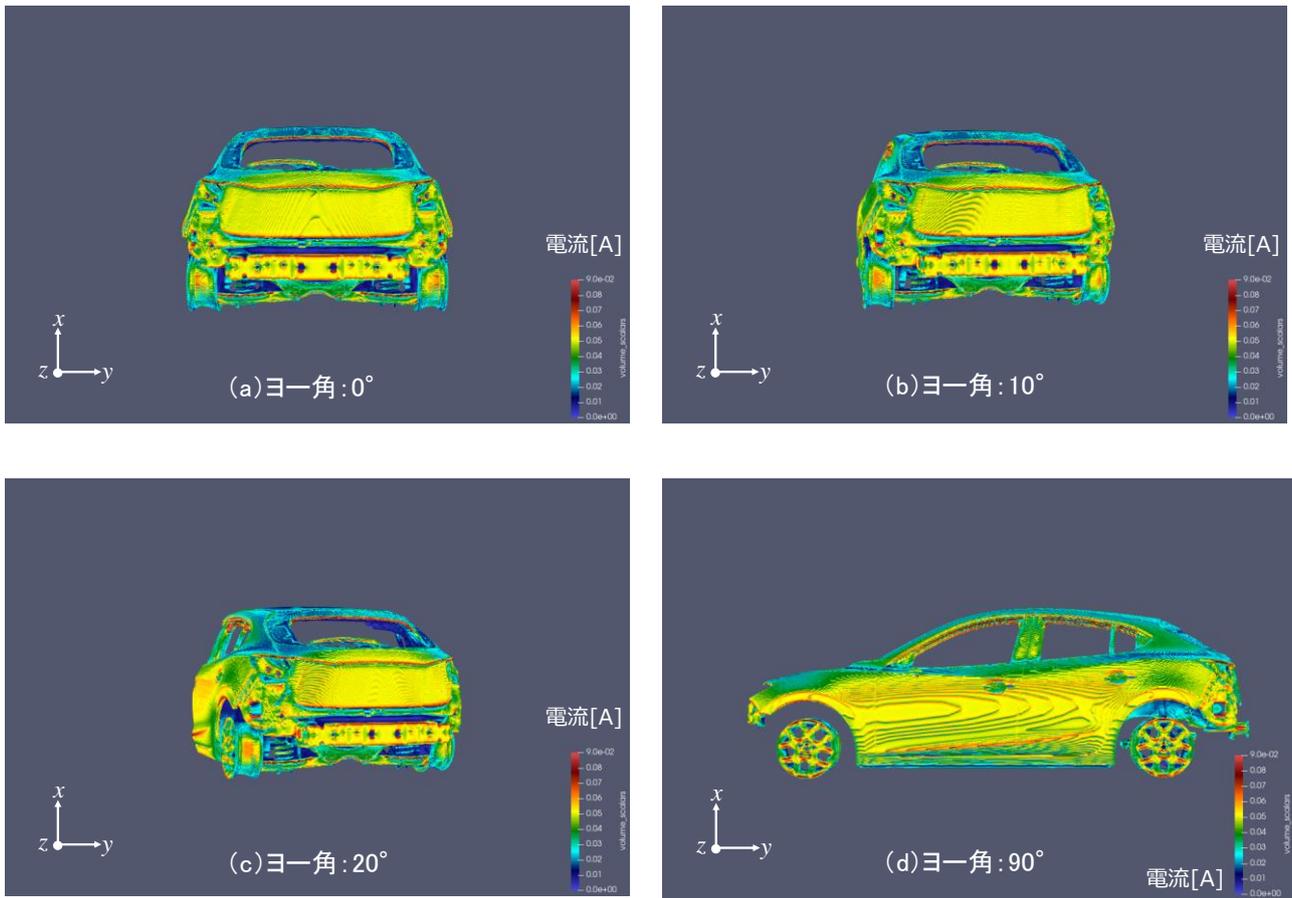


図 3. ターゲット車両の表面電流分布