

論文・解説

09

## 人体と車両の RCS モデル化の研究

## Research on RCS Modeling of Human Body and Vehicle

藤間 雪乃<sup>\*1</sup> 鶴長 真里絵<sup>\*2</sup> 稲田 貴裕<sup>\*3</sup>  
Yukino Fujima Marie Tsurunaga Takahiro Inada  
谷本 浩昭<sup>\*4</sup> 小林 正寛<sup>\*5</sup> 野村 啓道<sup>\*6</sup>  
Hiroaki Tanimoto Masahiro Kobayashi Hiromichi Nomura

## 要約

自動運転車両の安全性を確保するためには、車載レーダーによるターゲット（人体や車両）の正確な検知が極めて重要である。本研究では、ターゲットの RCS（Radar Cross Section：レーダー反射断面積）を正確に再現したモデルを構築し、シミュレーションによるシステムの事前検証を行うことを目的としている。まず、人体と車両の RCS を計測し、その結果を基にシミュレーション可能なターゲットモデルを構築した。次に、CAE（Computer-Aided Engineering）解析による RCS の予測検討を行い、レイトレーシング法を用いて人体及び車両の RCS 解析を実施した。車両 RCS 解析では、金属ボディー及びホイールのモデル化により高い解析精度を確認した。最後に、RCS 予測モデルを作成し、確率分布を基にした簡易予測モデルを開発した。このモデルは、ADAS（Advanced Driver-Assistance Systems：先進運転支援システム）や自動運転システムの開発において、シミュレーション速度の大幅な改善に寄与する可能性がある。本研究の結果、ターゲットの RCS 特性を高精度に再現するモデルを構築することで、自動運転車両の安全性向上に貢献できることが示された。

## Abstract

To ensure the safety of autonomous vehicles, accurate detection of targets (such as people and vehicles) by onboard radar is extremely important. This study aims to construct a model that accurately reproduces the RCS (Radar Cross Section) of targets and to conduct pre-verification of the system through simulations. First, the RCS of human bodies and vehicles was measured, and a simulation-capable target model was constructed based on the results. Next, a predictive study of RCS using CAE analysis was conducted, and RCS analysis of human bodies and vehicles was performed using the ray tracing method. For vehicle RCS analysis, high analytical accuracy was confirmed by modeling the metal body and wheels. Finally, an RCS predictive model was created, and a simplified predictive model based on probability distribution was developed. This model has the potential to significantly improve simulation speed in the development of ADAS and autonomous driving systems. The results of this study demonstrated that constructing a model that accurately reproduces the RCS characteristics of targets can contribute to improving the safety of autonomous vehicles.

Key words : RCS, CAE, ADAS

## 1. はじめに

CASE 時代において、車載レーダーによるターゲット（人体や車両）の正確な検知は極めて重要である。自動運転車両が安全に運行するためには、周囲の環境をリアルタイムで把握し、瞬時に適切な操作判断を下す機能が求められる。精度の高いターゲット検知機能を開発するためには、シミュレーションによるシステムの事前検証が

不可欠である。このシミュレーション検証を高精度に行うためには、ターゲットの RCS を正確に再現したターゲットのモデル化が重要となる。RCS とは、ターゲットがレーダー電波をどれだけ反射するかを示す尺度であり、以下の式で定義される。

\*1,2,6 電子性能開発部  
Electronic Performance Development Department.

\*3~5 先進安全車両開発部  
Advanced Safety Vehicle Development Department.

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|E_r|^2}{|E_i|^2}$$

$\sigma$  : RCS 値  
 $|E_r|$  : 散乱電界強度  
 $|E_i|$  : 入射電界強度  
 $R$  : 目標とレーダーとの距離

RCS は、ターゲットの形状、大きさ、材質などによって決まり、値が大きいほど、レーダー電波を大きく反射することを意味する。

本稿では、まず人や車両の RCS を計測し、その結果を基にシミュレーション可能なターゲットモデルを構築するための検討を行った。得られた計測・解析結果を基にターゲットの RCS 特性に寄与する要素を抽出し、人体の RCS を定量的に求める近似式を開発した。

## 2. RCS 計測による検証

### 2.1 RCS 計測手法の確立

金属球やコーナリフレクターなどのシンプルな形状の RCS 値は理論的に算出可能である。例えば、理論式から金属球は周波数に依存せず、金属円柱は周波数に比例し、金属平板は周波数の二乗に比例すること等が知られている。一方で、車両や人体などの複雑な形状の RCS 値は理論的に算出することが難しく、実測が必要となる。しかし、これらに関する公開実測データベースや関連文献は少ないため、自社内で RCS 計測手法を確立する必要があった。

そこで、ベクトルネットワークアナライザーに高ゲインの送受信アンテナとアンプを組み合わせた空間法による RCS 計測システムを開発し、計測システムの各種パラメーターと電波暗室内のミリ波電波計測環境を適切に整えた (Fig. 1)。このシステムを用いて、24GHz 帯と 76GHz 帯での人や車両などの RCS 計測を行う仕組みを構築した。

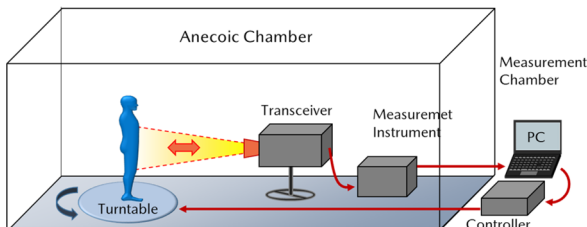


Fig. 1 RCS Measurement Method

### 2.2 RCS 計測結果

人体や車両などの複雑な形状の RCS 値には強い角度依存性がありバラツキも非常に大きいことが分かった。車両の場合は車両のボディ形状などにより、車ごとに特徴的な角度依存性をもつが、人体の場合は RCS 値の角度

特性の再現性は乏しいという特徴があることも分かった。Fig. 2 にその一例を示す。これは、計測するミリ波の波長が mm 単位であるのに対して人体を mm 単位で同じ状態に維持するのが困難なためと推測される。

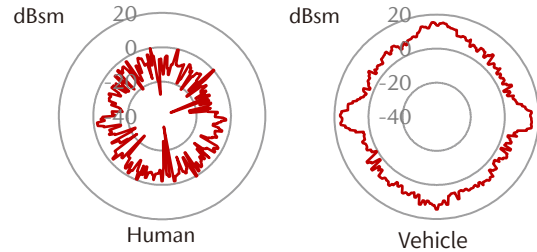


Fig. 2 Human & Vehicle RCS Measurement Result

今回、複数の人体とダミー人形の RCS 値を計測し、バラツキの分布を明らかにした。その結果、人体の RCS 分布に対してダミー人形の RCS 分布は低い値になっていることが判明し、現在入手しているダミー人形の位置付けが明らかになった。

今回、人体とダミー人形の RCS 値の分布を計測した結果、金属球と同様に 24GHz と 76GHz で RCS 値の分布に大きな差が見られないことが判明した (Fig. 3)。

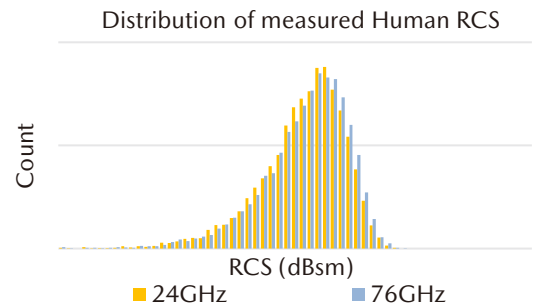


Fig. 3 Comparison of RCS Distribution of People

### 2.3 RCS 計測の効果と課題

RCS 値のデータベース化を行うことで、ターゲットの机上モデル化が可能となった。更に、各種ターゲットの RCS 分布が明らかになることで、レーダー単品で保証できる最小の RCS 値を決めれば、どのターゲットがどの程度の検知確率となるかを定量的に表すことが可能となり、レーダー単品性能とシステムの性能保証の関係をより定量的に表すことが可能となった。

一般的に、RCS 値は遠方界では一定値だが近傍界では値が変化する。この遠方界と近傍界の境界は理論上ターゲットの距離と大きさによって決まる。電波暗室が遠方界条件を満たす大きさを確保できず、ターゲットとの距離が不足する場合は、RCS 値の適切な補正が必要となる。

### 3. CAE 解析による RCS の予測検討

#### 3.1 RCS 解析ソルバーの選定

計測結果より、24GHz と 76GHz の結果に大きな傾向の違いがないことが確認されたため、CAE 解析では、より波長が短く精度検証の難易度が高いと予測される 76GHz における RCS 解析検証を実施することとした。

ミリ波帯の RCS 特性を求めるために、有限要素法、モーメント法、FDTD (Finite-Difference Time-Domain) 法といった一般的な数値解法を適用することは困難である。その理由として、解析規模の大きさが挙げられる。一般的に解析精度を確保するためには、どの電磁界解析手法でもモデルを波長の 1/10 以下の大きさのメッシュサイズで作成する必要がある。メッシュとは、3D モデル形状データを離散化して要素分割したものを指す。電波の波長は空気中と比較して人体 (誘電体) の中では短くなるため、人体をモデル化するためには更に小さなメッシュサイズが必要となる。結果として、メッシュ数は膨大となり、解析資源の制約から解析が困難となる。したがって、マクスウェルの方程式を解く一般的な電磁界解析手法に代わり、レイトレーシング法を活用することとした。

レイトレーシング法は光線追跡法とも呼ばれ、光や電磁波の進行方向を追跡し、物体の形状や材質による反射や屈折をシミュレーションする手法である。この手法は、解析精度を確保するために、モデルを波長より大きなメッシュサイズで構成することが推奨されており、ミリ波帯の大規模解析に有用である。しかし、光の振る舞いを電磁波の振る舞いとして近似する光学近似であるため、電磁界解析よりは精度が劣るという課題がある。そのため、解析結果と測定結果の精度検証を行った。

#### 3.2 人体 RCS モデルの検討

人体のモデル化にあたり、人体組織をどこまでモデル化する必要があるか検討した。車載ミリ波レーダーから出力される電波は、体内で減衰し内部までは侵入しない。皮膚表面での第一次反射が再現されれば RCS においては現象を再現できる。参考までに、物質内部における電波の浸透と減衰を示す指標である Skin Depth を皮膚に対して求めた結果を示す。なお、生体組織の電気定数は、国立研究開発法人情報通信研究機構 (NICT) のデータベース<sup>(1)</sup>を参考に計算を行った。Skin Depth の各数値を考慮し、表皮 (Epidermis) と真皮 (Dermis) までをモデル化することとした (Fig. 4)。

	Conductivity (S/m)	Relative Permittivity	Skin Depth (mm)
Epidermis (0.1-0.3mm)	34.0	8.5	0.3
Epidermis+Dermis (1-3mm)	11.5	4.1	0.5

$$\text{skin depth} = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}}$$

f: frequency  
 μ: Permeability  
 σ: Conductivity

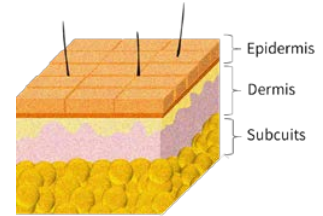


Fig. 4 Skin Structure and Physical Properties

#### 3.3 人体 RCS モデルのメッシュサイズ最適化

レイトレーシング法の特長上、高精度に反射の方向・大きさを計算するためには、波長の 10 倍以上のメッシュサイズでモデルを構成することが望ましい。しかし、人体モデルを 76GHz の波長の 10 倍である 40mm 以上のメッシュサイズで作成すると、形状が一部正しく再現できない。逆に、形状を詳細に再現させるためにメッシュを細かくすると、光線追跡が過剰に複雑化し、計算精度が低下する。形状再現性と反射波の解析精度を両立するメッシュサイズを検証するため、メッシュサイズを変化させ計測結果とレイリー分布を用いて比較した。Fig. 5 に子供ダミー人形の RCS を、Fig. 6 にメッシュサイズごとの RCS 分布を示す。なお、解析には乳児ダミー人形及び子供ダミー人形と大人ダミー人形の形状を詳細に再現したモデルを用いた。

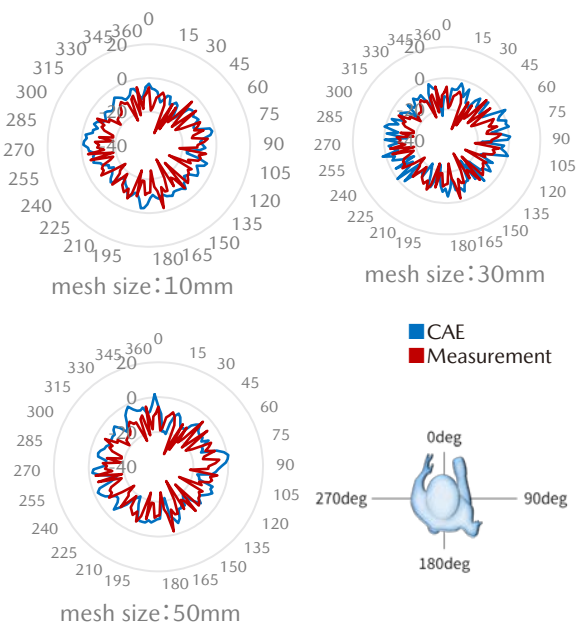


Fig. 5 RCS of Child Dummy

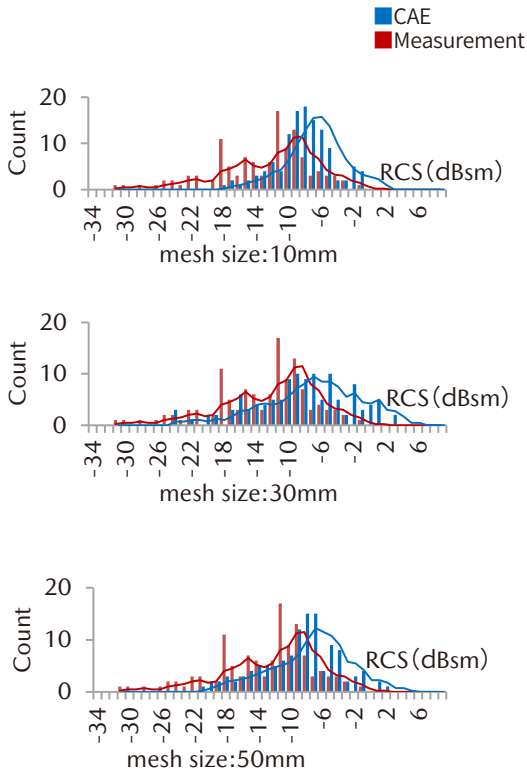


Fig. 6 Distribution of Measured Human RCS

Fig. 6 の RCS 分布より、人体のように複雑な形状をしたモデルについては、形状の再現性も考慮すると、波長の約 8 倍である 30mm のメッシュサイズが、より実測に近い RCS 特性を再現できていることが確認できた。人体及びダミー人形の RCS 計測結果及び CAE 解析結果と、身長との関係を図示した (Fig. 7)。なお RCS の値は 360 度分の値を平均化している。

計測結果と CAE 解析結果を比較すると、身長と RCS の平均値の大きさが比例関係にあり、身長が RCS 特性への寄与度が高い要素であると判明した。また、比例係数もほぼ一致していることが確認できた。

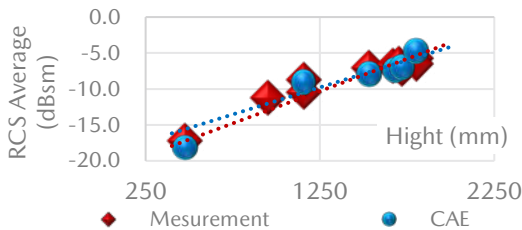


Fig. 7 RCS Average Height Comparison

3.4 車両 RCS への応用

車両 RCS 特性検証の題材として、車体が小さく、非金属部分が多いため RCS が小さく検知条件が厳しいと推測されるロードスターを選定した (Fig. 8)。



Fig. 8 Roadster

まずは、モデル化部品を明確にするため、以下のカテゴリに分けて RCS 特性を確認し、各モデルの RCS 特性への寄与度の確認を行った。

- ①金属ボディー
- ②金属ボディー, 窓ガラス
- ③金属ボディー, 窓ガラス, ソフトトップ
- ④金属ボディー, 窓ガラス, ソフトトップ, ホイール
- ⑤金属ボディー, ホイール

計測結果と CAE 解析結果の 360° (3°ピッチ) の RCS 特性の相関係数を比較した図を以下に示す (Fig. 9)。

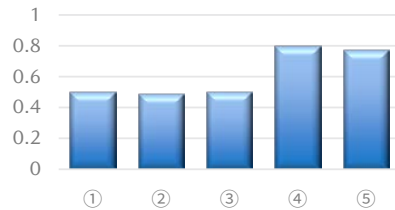


Fig. 9 Correlation Coefficient of RCS for Cars

上図より、窓ガラスやソフトトップモデルの有無は RCS 特性に対する寄与度は低いことがわかった。しかし、ホイールモデルを追加することで、計測結果と CAE 解析結果の相関係数は約 0.3 向上し、ホイールモデルの寄与度が高いことが確認できた。下図に、①金属ボディーのみの場合と、⑤金属ボディーとホイールをモデル化した場合の RCS 特性の計測結果と CAE 結果の比較を示す (Fig. 10)。

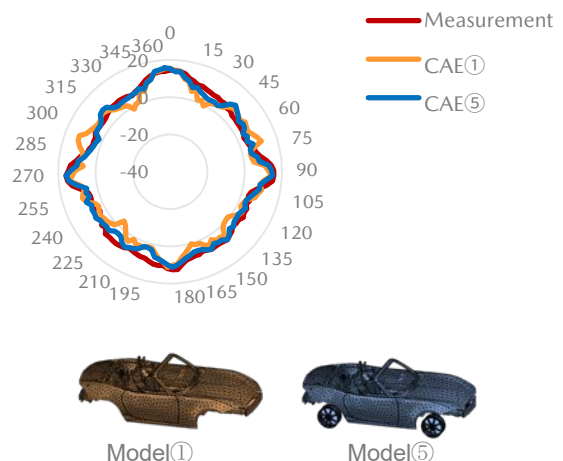


Fig. 10 Roadster RCS CSE Result

ホイールモデルがない場合、計測結果と比較して約25°, 155°, 205°, 335°方向の特性が5dB以上小さい値となっている。以上の結果より、車両 RCS 特性のモデル化には金属ボディーだけでなく、ホイールのモデル化も重要であることが確認できた。

## 4. RCS 予測モデルの作成

### 4.1 人体とダミー人形の RCS 簡易予測モデル化

今回、人体とダミー人形の計測結果を統計処理した結果、これらの RCS 確率分布はレイリー分布で近似できることが判明した。レイリー分布の確率式により近似モデル化し、RCS 値を机上で算出可能にした。また、その際のメインのパラメータは身長であることも判明した (Fig. 7)。RCS 値に対する身長と体重の相関の比較では、相関係数が3倍以上違う結果となっている。

実測値とレイリー分布で近似した簡易モデルで生成した人体 RCS 値を比較した (Fig. 11)。

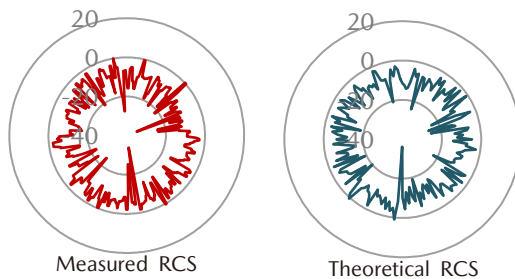


Fig. 11 Measured RCS Comparison with Theoretical RCS

ただし、計測のサンプル数を増加させると、一部でこの相関から外れる特異な人が存在することも分かってきており、身長を主なパラメータとしたこの確率式による人体とダミー人形のモデルは簡易モデルの位置付けとなる。

この特異な RCS 値となる要因は表面形状の違いなどが考えられるが、定量的にパラメータを特定できておらず、今後の検討課題となる。

### 4.2 人体とダミー人形の RCS 予測モデルの効果

ADAS や自動運転システムでは、机上シミュレーション活用が重要であるが、電波伝搬解析に使われるレイトレースなどは、解析精度と解析時間の両立が大きな課題となっている。今回の RCS 値を確率的に瞬時に算出可能なモデルは、実データと等価の RCS 値をリアルタイムで生成可能なことから、レーダーシミュレーター等と組み合わせた簡易解析で、解析速度の大幅改善に貢献できる可能性が出てきた。

## 5. おわりに

本研究では、人体及び車両の RCS の計測手法を確立し、

人体 RCS のターゲット分布を明らかにした。更に、CAE 解析による RCS の予測検討を行い、人体/車両におけるモデル作成手法を確立し、レイトレーシング法を用いて人体及び車両の RCS 解析を実施し、計測結果の再現を可能にした。最後に、確率分布を基にした RCS 簡易予測モデルを開発した。

今後の取り組みとしては、計測環境の制約に合わせた結果補正手法の確立やモデルの精度向上が挙げられる。本研究の成果は、車載レーダーシステムの精度向上と自動運転車両の安全性向上に寄与することが期待される。今後も、計測手法やモデルの精度向上に向けた研究を継続し、子供の置き去り検知などの新たな応用分野にも本研究を活用したい。

## 参考文献

- (1) NICT: Data of Dielectric Measurements (nict.go.jp)

### ■ 著 者 ■



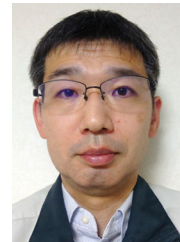
藤間 雪乃



鶴長 真里絵



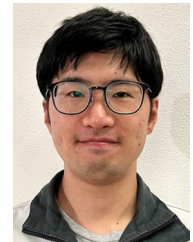
稲田 貴裕



谷本 浩昭



小林 正寛



野村 啓道