

# 車内レーダー向けの電波伝搬解析

Radio Wave Propagation Analysis for In-Cabin Radar

\*三菱電機㈱ 先進応用開発センター  
†同社 情報技術総合研究所  
‡三菱電機モビリティ㈱

## 要 旨

車の安全性を評価するアセスメントであるEuro NCAP(The European New Car Assessment Programme)の評価基準に幼児置き去り検知が追加される<sup>(1)</sup>など、車内に取り残された幼児に対する熱中症などの事故リスクを軽減する取り組みが進んでいる。車内用センサーの一つとして60GHz帯ミリ波レーダーが有力視されているが、その検知性能は車内の構造物による透過・反射等の影響を受けるため、製品開発前段階でセンサー仕様、搭載条件、車内レイアウト等が適切であるかの見極めが重要である。この開発では、三菱電機の“電波見える化技術<sup>(2)</sup>”を車内レーダーに適用し、実測した人体の散乱データとの比較によって実験的検証を行う。さらに、車内の検知可否マップを作成し、電波伝搬解析が製品開発前段階でのレーダー検知性能の見極めに有効であることを示す。

## 1. ま え が き

近年、屋外での利用が主であったミリ波レーダーが屋内や車内といった閉じた空間でも使われるようになってきており、特に、自動車の車内モニタリングでの需要が高まっている。その背景として、車の安全性を評価するアセスメントであるEuro NCAPの評価基準に幼児置き去り検知が追加されたことが挙げられる。幼児置き去り検知は、図1に示すように、車内に取り残された幼児の存在を検知し、使用者や第三者に知らせることで、幼児の熱中症などの事故リスクを軽減するためのものである。

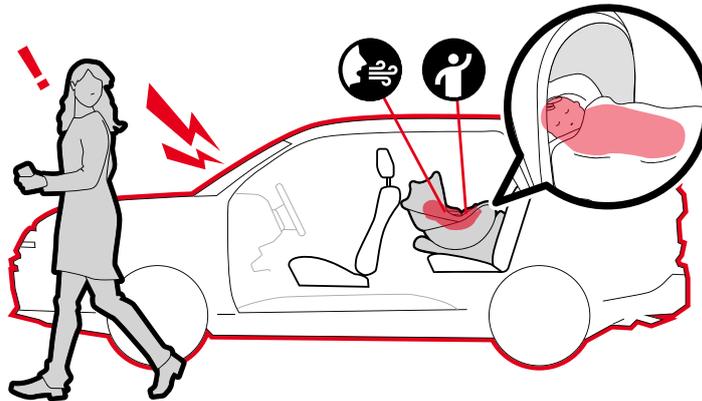


図1-幼児置き去り検知システム

Euro NCAPでは、日よけ付きの後ろ向きチャイルドシートで睡眠中の乳幼児に毛布がかかっている条件や、幼児が座席の足元領域に入り込んだ条件でも、幼児の存在を検知することが求められる。このような条件下では、カメラのような光学系センサーでは幼児を捉えることは困難で、レーダーのような電波系センサーの方が適しており、三菱電機では、60GHz帯ミリ波レーダーを活用した幼児置き去り検知システムの開発を進めている<sup>(3)</sup>。電波系のセンサーは、金属以外であればある程度物体を透過するため、先に述べたようなシナリオでも幼児の存在を検知することが可能である。

車内レーダーの検知性能は、レーダー本体の仕様だけでなく、位置や角度などの搭載条件や、車内レイアウトなどによる電波伝搬状態の変化に伴い変化する。このため、車種ごとに搭載条件の最適化が必要不可欠である。このような最適化を実現する方法の一つとして、全ての車種で様々なレーダー搭載条件でのデータを取得し、設置条件及び各種パラメータを最適化する方法が挙げられるが、開発に要する時間・コストを考えると現実的ではない。

このような課題を解決するため、今回の開発では三菱電機の電波見える化技術を車内レーダーに適用し、開発の効率化を図る。本稿では、車内レーダーの電波伝搬環境とモデル化の方法を述べた後、開発した車内レーダー向け電波伝搬解析の評価結果として、電波暗室内で測定した人体の散乱データを用いた実験的検証、及び車内の検知可否マップ作成による搭載条件検討例を示し、電波伝搬解析が製品開発前段階でのレーダー検知性能の見極めに有効であることを示す。

## 2. 車内レーダーへの電波見える化技術の適用

この章では、車内レーダー向けに三菱電機の電波見える化技術を適用する考え方を述べる。

### 2.1 車内レーダーの電波伝搬環境

自由空間中でミリ波レーダーの送受信アンテナから距離 $R$ だけ離れた位置にある物体からの反射波の受信電力 $P_r$ は、送信電力を $P_t$ 、送信アンテナ利得を $G_t$ 、受信アンテナ利得を $G_r$ 、波長を $\lambda$ 、レーダー反射断面積(Radar Cross Section : RCS)を $\sigma$ として、一般にレーダー方程式で次のとおり表す。

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

しかし、実際の車内の電波伝搬環境は自由空間ではなく非常に複雑である。例えば、レーダーには指向性があり、方向ごとに異なる強度で電波が放射されている。すなわち、式(1)の送信アンテナ利得及び受信アンテナ利得は方向ごとに異なる。また、車内の場合、電波は幼児に直接届くだけでなく、シートなどを透過して届く場合や、車内の構造物に反射して(マルチパス)届く場合もある。このため、車内レーダーの設計には、単純なレーダー方程式ではなく、車種や搭載条件ごとに、車内に網羅的に電波が届いているかを評価、可視化する方法が必要になる。その方法が、電波伝搬解析技術、すなわち電波見える化技術である。

三菱電機の電波見える化技術はレイトレーシング法を採用しており、車内レーダー向け電波伝搬解析にもこの手法を用いている。レイトレーシング法では、図2に示すように、電波を光線で表現し、送信アンテナから光線を発射し、その軌跡を追跡する。また、車内構造物で電波が反射、回折する物理現象は、光線の反射、回折に近似して計算される。さらに、車内構造物の電気特性や形状を考慮して電磁界の変化を算出しており、多様な実環境を反映した計算が可能である。

レイトレーシング法の特長としては、電波の波長に比べて十分大きな物体や空間に対して幾何光学近似に基づき電界強度を高精度に計算できることが挙げられる。60GHz帯のミリ波レーダーの場合、波長は約5mmであるため、車内の構造物に対しては十分に波長が短いと言える。また、レイトレーシング法は、FDTD(Finite-Difference Time-Domain)法などの厳密な電磁界解析と比べて高速に演算可能であるという特長がある。

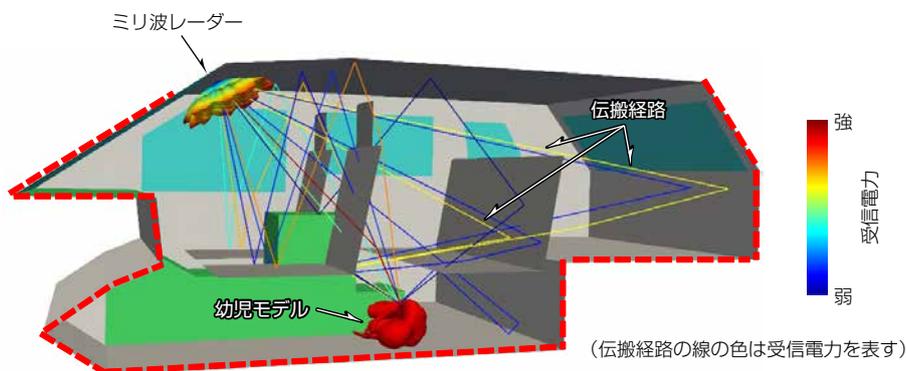


図2-レイトレーシング法のイメージ

### 2.2 車内レーダー向け電波伝搬解析用のモデル化

車内レーダー向け電波伝搬解析では、図3に示すとおり、アンテナ特性、車内構造、人体の反射強度のモデル化が必要である。次にそれぞれのモデル化の手法を示す。

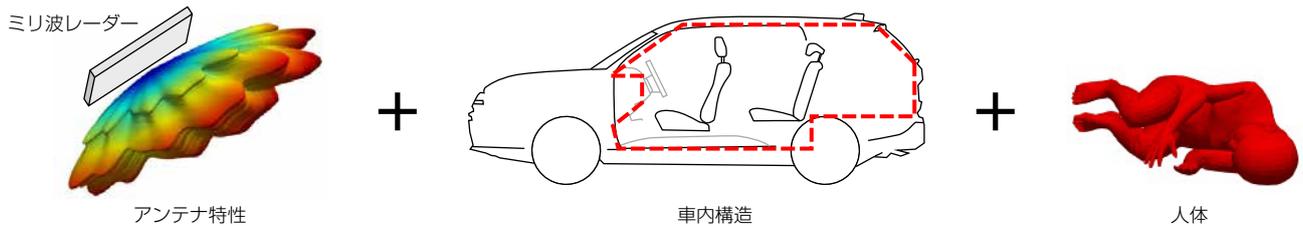


図3-車内レーダー向け電波伝搬解析のモデリング要素

(1) アンテナ特性のモデル化

アンテナ特性は三菱電機のレーダー設計要素であり、実測値や電磁界解析値を用いて数値化が可能である。なお、レーダー設置位置の近傍に構造物が存在する場合は、必要に応じてレーダーとその周辺構造物を含むアンテナ特性を導出する。

(2) 車内構造のモデル化

車内構造のモデル化は、各パーツの位置関係を実測してモデル化する方法が挙げられる。近年では3Dスキャナーを活用することで詳細な形状を反映することも可能である。また、実測だけでなく、車内3Dモデル(サーフェスモデルで可)をベースにすることも可能であり、試作前段階の車両に対しても適用が可能である。なお、細かいパーツは解析時間を延ばすだけで解析結果への影響は小さい場合があるため、解析時間や解析精度を考慮しながら、3Dモデルの形状修正を行う。車両シートなどの構造物の電気特性は、実測データなどを基に合わせ込みを行う。

(3) 人体のモデル化

人体の形状は波長に対して細かい形状をしており、単純なレイトレーシング法では正しく受信電力が計算できない。そこで、①人体モデル全体の反射の合成波として受信電力を計算する方法、②人体の代表的なRCSを点ターゲットとして与える方法、という二つの方法を用いた。

①は、人体モデルの姿勢や大きさに応じたレーダーの受信電力を計算可能になるが、その分計算量は増加する。なお、人体から得られる受信電力の計算方法としては、レイトレーシング法と物理光学近似を組み合わせる方法もあるが、今回の開発ではより簡易な計算方法として、人体表面上に仮定の散乱点を配置し、それらまでの伝搬損と散乱特性からレーダー方程式に従ってレーダーでの受信電力を求め、それらを合成する方法を採用した。

②は、人体のRCSが設定したRCSに固定されるが、点ターゲットとなるため単純なレイトレーシング法で計算が可能であり、車内の各エリアに十分な電力が届いているか網羅的に評価する際に適している。

### 3. 車内レーダーの電波伝搬解析を用いた評価

この章では、三菱電機の電波見える化技術を車内レーダーに適用した評価結果を示し、その有効性を検証する。

#### 3.1 人体の散乱データを用いた実験的検証

開発した車内レーダー向け電波伝搬解析について、電波暗室内で測定した人体の散乱データとの比較によって妥当性の検証を行う。図4に、2.2節で述べた人体モデル化方法①(人体モデル全体の反射の合成波として受信電力を計算する方法)を適用した場合の受信電力と距離の関係について、電波伝搬解析結果と実測結果の比較の例を示す。人体モデルは、実際の人体を3Dスキャナーで取り込んで、姿勢及び形状が同等になるよう生成した。シミュレーションでは、人体表面上に仮定の散乱点を28,796点配置し、それらまでの伝搬損と散乱特性からレーダー方程式に従ってレーダーでの受信電力を求めている。なお、縦軸の電力は、頭部付近の受信電力を0 dBとして規格化しており、実測データは2回分の平均値を0 dBとしている。図4から、実測と解析は完全には一致していないが、実測も解析も頭部や肩付近で電力が高くなる傾向が確認できており、電波伝搬解析で、実測と類似した受信電力の傾向が得られることを確認した。誤差の要因としては、人体モデルと実測が完全には一致していないことや、実測中の人体がデータ取得中もある程度揺らぎを持っていることが挙げられる。今後、様々な姿勢での検証や、車内の乗員での検証などを行い、より実環境に近い環境での有効性を確認していく。

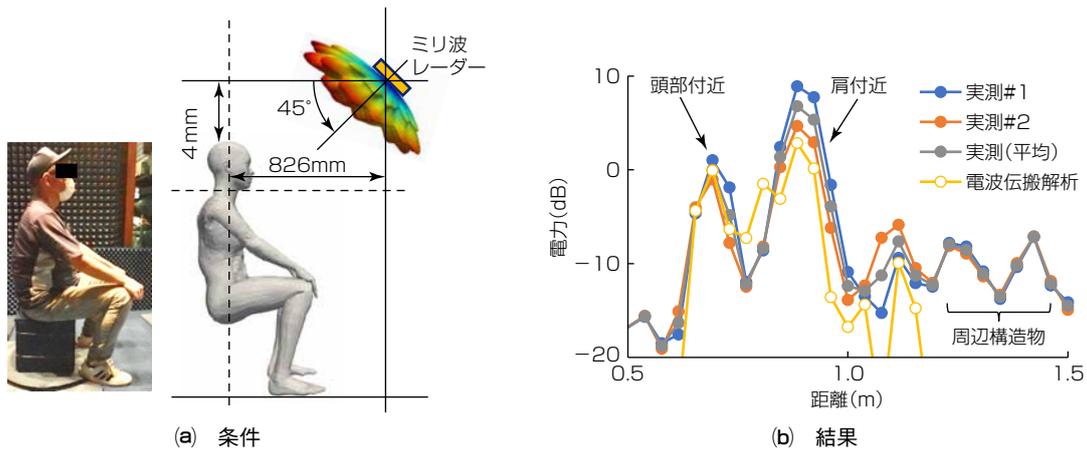


図4-人体から観測される受信電力の電波伝搬解析結果と実測結果の比較

### 3.2 車内の検知可否マップ作成による搭載条件の検討

車内の幼児の検知可否について、搭載角度を変えながら電波伝搬解析を行った場合の例を示す。レーダーは車のルームミラー上部のオーバーヘッドコンソール付近に搭載しており、搭載位置は2.1節に述べた図2に相当する。このシミュレーションでは、人体のモデル化方法②(人体の代表的なRCSを点ターゲットとして与える方法)を使用した。

図5(a)に搭載位置・角度の条件を示し、図5(b)に搭載角度45°、60°での足元付近の受信電力マップとレーダー検知可否マップを示す。受信電力マップは、車内の各地点に幼児相当の反射物が存在した場合の受信電力の強さを色の濃淡で表現しており、車内の各領域にどの程度の電波が届いているかを把握するのに用いる。レーダー検知可否マップは、レーダーのハードウェア及び信号処理性能も考慮して、受信電力が、幼児を検知可能なSNR(Signal-to-Noise Ratio)以上である範囲を白、それ以外を黒で可視化しており、検知したい範囲を網羅できているかを直感的に把握するのに用いる。なお、図には参考のため、1列目及び2列目の座席足元に幼児相当のオブジェクトを重畳して描画しており、また、車内を見やすくするため図には車両ボディ部分は描画していない。

図5(a)から、シートなどの遮蔽物の影響や距離の減衰によって受信電力が低下することが分かる。さらに、図5(b)から、搭載角度45°と60°の両方で、図5(a)の電波減衰領域でも、おおむね幼児を検知可能であることが分かる。ただし、搭載角度60°の場合、1列目の足元にいる幼児を一部検知しにくい領域があることも確認でき、この条件下では搭載角度は45°にする方が適切であると言える。以上のように、電波伝搬解析を活用することで、試作前段階で“レーダー本体仕様”“レーダー設置位置・角度”などの設計パラメーターの適切性を確認できる。これによって、設計の最適化を早期に図ることが可能になり、開発効率の向上が期待できる。

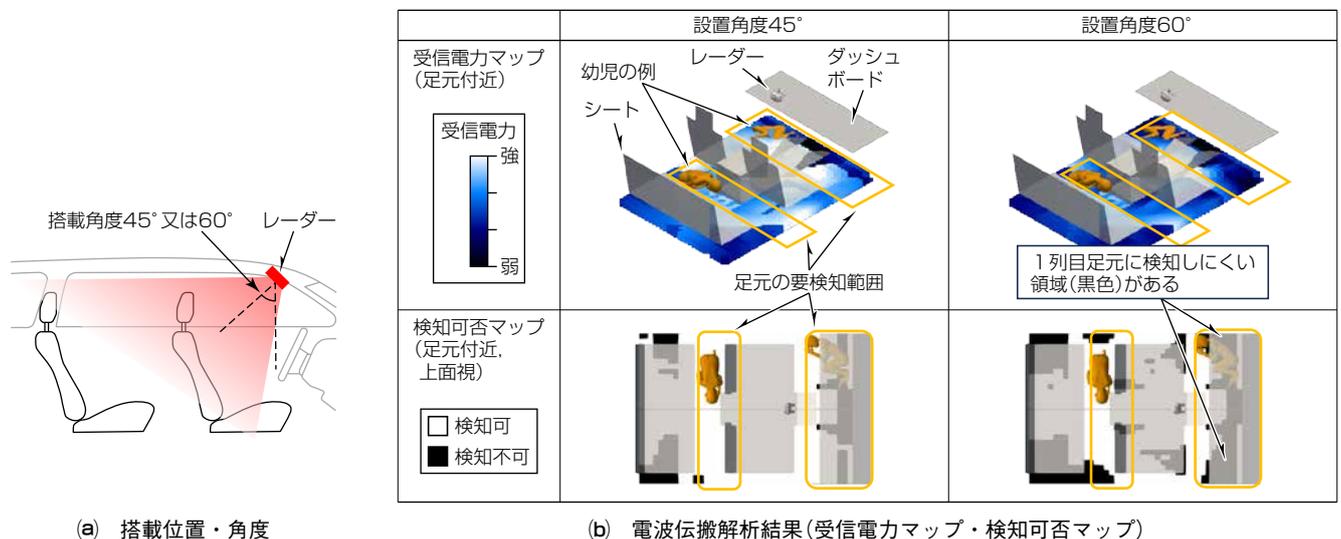


図5-搭載条件と電波伝搬解析結果の例

## 4. む す び

三菱電機の電波見える化技術を車内レーダーに適用し、その有効性を示した。

今後は、実車での解析結果の妥当性評価などを行い車内レーダー向けの電波伝搬解析技術を確立するとともに、電波伝搬解析技術だけでなく、三菱電機が持つ様々なレーダー技術を活用して、車内に取り残された幼児をより確実に検知可能な幼児置き去り検知システムの実現に貢献する。

## 参 考 文 献

- (1) Euro NCAP : Child Presence Detection Test and Assessment Protocol Ver.1.3 (2024)  
<https://www.euroncap.com/media/83740/euro-ncap-cpd-test-and-assessment-protocol-v13.pdf>
- (2) 三菱電機：無線機器の最適配置を支援 IoTを支える「電波見える化技術」を開発 (2017)  
<http://www.mitsubishielectric.co.jp/news/2017/pdf/0524-c.pdf>
- (3) カメラとミリ波レーダを用いた車内乗員検知技術, 三菱電機技報, 97, No.1, 71 (2023)

