

論文・解説

16

## 後側方レーダの電波伝搬可視化技術の開発 Development of Method for Visualizing Radio Propagation of Side to Rearward Sensing Radar

稲田 貴裕\*<sup>1</sup> 浜田 康\*<sup>2</sup> 鶴長 真里絵\*<sup>3</sup> 花田 充基\*<sup>4</sup>  
Takahiro Inada Yasushi Hamada Marie Tsurunaga Yoshitsugu Hanada  
西田 史彦\*<sup>5</sup> 遠藤 靖之\*<sup>6</sup> 中畑 洋一朗\*<sup>7</sup>  
Fumihiko Nishida Yasuyuki Endo Youichiro Nakahata

### 要 約

マツダは、利便性向上と交通事故低減に貢献するため運転支援・予防安全技術の開発を進めているが、その一つとして、障害物警報システムを各市場に導入してきた。

この障害物警報システムの開発では、市場適合性評価のために様々な道路環境での走行評価とチューニングが必要となる。障害物警報システムに使われるセンサとしては、車両前方を検出する前方レーダや、車両後方や側方を検出する後側方レーダなどがあるが、本論文では主に24GHz帯の電波を利用した後側方レーダについて述べる。

この、後側方レーダに関して、車両走行時に観測される環境ノイズに着目し、その発生メカニズムを電磁界シミュレーションによる電波伝搬可視化技術で明らかにした。解明したメカニズムを基に環境ノイズ低減技術を検討し、効率的な評価手法を開発した。

### Summary

As part of the development of driver support/active safety technology to contribute to enhancing convenience and reducing traffic accidents, Mazda has been introducing obstacle warning systems into various markets.

In the development of obstacle warning systems, in order to assess the market compliancy, parameter tuning based on vehicle driving test in wide variety of environment is required. For obstacle warning systems, various types of radars are used; forward radar to detect frontal obstacles, adjacent rear radar to detect obstacles in adjacent rear areas, and so on. This paper describes the study results on 24GHz rear adjacent radar.

For the adjacent rear radar, focusing on clutter observed during driving, we developed an electromagnetic simulation method for visualizing radio propagation. Based on the mechanism defined, technology for reducing clutter was studied and efficient evaluation methods were developed.

### 1. はじめに

車両後方や側方の障害物警報システムに利用される後側方レーダ<sup>(1)</sup> (以下、レーダ) には準ミリ波の電波が多く用いられている。このレーダ電波は、周囲の車両構造物や市場環境の影響を大きく受ける傾向がある。そのため、レーダ単体性能から車両搭載時のレーダ送受信性能を完全に予

測することは難しい。

そこで、電磁界シミュレーション (以下、CAE) 解析等による各種の技術検証を重ね、車両搭載時の、車両構造物や市場環境を考慮した電波伝搬可視化技術を開発することで、車両搭載時の環境ノイズ発生時の電波伝搬メカニズムを解明した。

加えて、解明したメカニズムを基に、開発の机上検証段

\*1~3 電子開発部  
Electrical & Electronics Development Dept.

\*4~7 車両システム開発部  
Vehicle System Development Dept.

階で車両搭載時の性能および環境ノイズを予測し、この環境ノイズを低減することで、より信頼性の高い警報システムを効率的に実現する手法を開発したので報告する。

## 2. 後側方レーダ開発の現状

### 2.1 レーダの性能・信頼性

Fig.1に、後側方の障害物警報システム用レーダのレイアウト場所の例を示す。

レーダを左右のリヤ・バンパ部の内側にそれぞれ一つずつ装着し、後側方のターゲット車両を検出する。

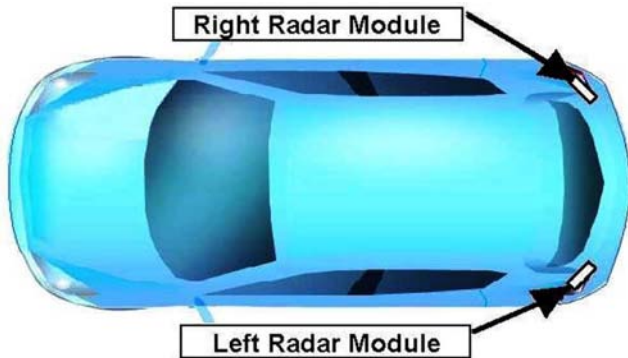


Fig.1 Side to Rearward Sensing Radar

このレーダの距離計測には、Fig.2に示すような、周波数を変調し送信波と受信波の位相差で距離を検出するFMCW (Frequency Modulated Continuous Wave) 技術、角度計測には、Fig.3に示すような、二つの受信アンテナで受ける受信波の位相差から角度を検出するモノパルス (Monopulse) 技術を採用することで、ターゲット車両検出に必要な性能を確保した。

また、過警報の発生頻度を最小限にチューニングすることで警報の信頼性を確保している。これらにより、高性能かつ信頼性の高い障害物警報システムを実現している。

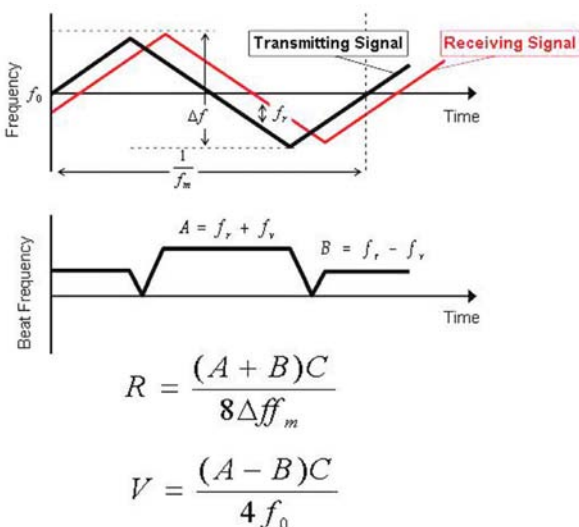
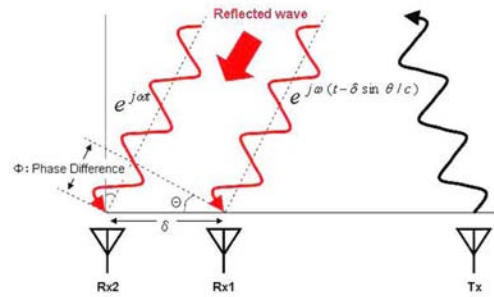


Fig.2 FMCW System



$$\begin{aligned} \Sigma &= e^{j\alpha x} + e^{j\omega(t - \delta \sin \theta / c)} \\ &= 2e^{j\alpha x} \cdot e^{-j\pi \delta \sin \theta / \lambda} \cdot \cos(\pi \delta \sin \theta / \lambda) \\ \Delta &= e^{j\alpha x} - e^{j\omega(t - \delta \sin \theta / c)} \\ &= 2je^{j\alpha x} \cdot e^{-j\pi \delta \sin \theta / \lambda} \cdot \sin(\pi \delta \sin \theta / \lambda) \\ \Delta / \Sigma &= \tan(\pi \delta \sin \theta / \lambda) \end{aligned}$$

Fig.3 Monopulse System

### 2.2 開発の現状

後側方の障害物警報システムとしての検出性能を確保しつつ、過警報の発生頻度を最小限にチューニングするために、様々な市場環境下でレーダの評価を繰り返している。

過警報には発生しやすい場所などの条件があるため、レーダを実際の車両に搭載し、複数の場所で実車評価することで、検出性能と過警報の最適なバランスを取るよう、制御パラメータのチューニングを繰り返している。

## 3. 過警報発生要因と技術課題

### 3.1 環境ノイズ調査

実車による繰り返し評価を最小限にするためには、車両を使った様々な市場環境下での走行評価を、CAE等を使った電波伝搬メカニズム解明により、バーチャルな机上評価へと変えて行く必要がある。

レーダは電波を外部に放射しターゲットからの反射波を観測することで隣接車両などを検出するが、車両による市場評価時にターゲット以外からの不要な反射波がノイズとして観測されることがある。

そこで、このターゲット以外からの不要なノイズを環境ノイズと定義し、この環境ノイズと過警報に相関があるとの仮説を立て、様々な市場環境や車両装備の変化によりこの環境ノイズがどのように変化するかを調査した。

#### (1) 特定道路環境

特定の道路で不要な環境ノイズがどのように変化するかを、レーダ受信波モニタ装置を実車に搭載して検証した。その結果ノイズレベルは道路ごとに差があり、更にトンネルや橋といった特定の道路構造物とノイズ増加の相関が強いことが確認できた。

Fig.4は車両走行状態で環境ノイズを測定した一例で、Fig.5に示すようなトンネル内で環境ノイズが増加する様子を示している。

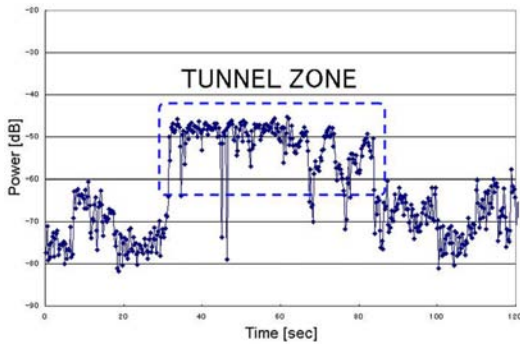


Fig.4 Environmental Noise



Fig.5 Tunnel Zone

(2) 特定装備

上記環境ノイズは、バンパなどの車両装備によって変化することを確認した。具体的にはボデー形状やバンパ形状などによって、上記環境ノイズは大きく変化することが明確になった。

これは、バンパ内にレイアウトしているレーダの性能が、ボデーやバンパの何らかの影響を受けているためと推定され、その原因の解明が必要であった。

3.2 環境ノイズ伝播経路

(1) 電波伝搬経路確認ツール

電波伝搬経路を確認するツールとして、Fig.6に示すような回転型の小型反射器 (Mini-Reflector) を採用した。

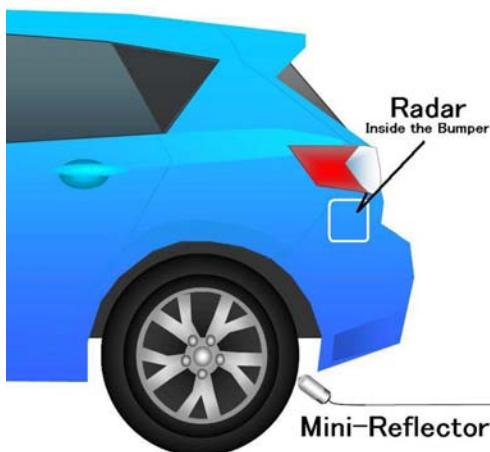


Fig.6 Mini-Reflector

回転によって発生するドップラー信号を検出することで、小型でも感度良く反射波を検出することが可能となる。

従来のコーナリフレクタなどの反射器では、サイズが大きく車室外エリアの測定しかできなかったが、小型反射器を使うことで狭い車両構造物間の測定も可能となり、レーダから放射された電波がバンパやボデー間などで反射・回折しながら車室外へ伝播する様子の概略を、実験的に確認することができるようになった。

(2) 不要反射波の伝播と技術課題

上記小型反射器により車両周辺の電波伝搬経路を測定した結果、車両構造物内の反射や回折により想定外の方法に電波が伝播され、地面や車両構造物などに対して電波の伝播経路が形成される場合があることが確認できた。

また、この伝播経路に放射された電波がターゲットに当たり不要反射波としてレーダに戻ってくると、レーダ性能に大きな影響を及ぼす場合があることが実験的に分かってきた。この電波の伝播経路はボデー形状やバンパ形状ごとに違い様々な経路を取る。

これらから、試作車のない設計段階で電波伝播経路を予測できる、電波伝搬可視化技術の獲得が、評価最小化を実現する上での重要な課題となる。

4. CAEによる電波伝搬可視化と予測技術

上述のような、複雑な電波伝搬経路を持つレーダシステムの性能を効率良く解析・予測するために、Fig.7に示すようなCAEを活用した。



Fig.7 CAE Analysis

4.1 CAE方式の検討

CAEの解析手法として、Fig.8に示すようなFDTD法 (Finite Difference Time Domain Method) を用いた。

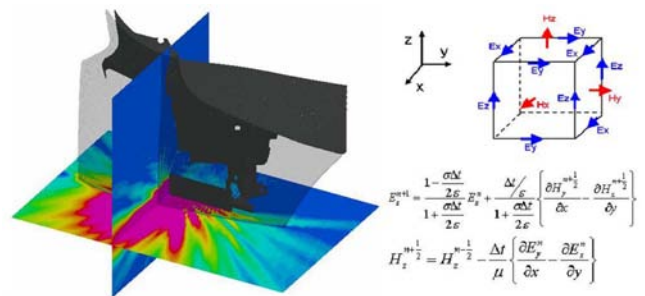


Fig.8 FDTD Analysis



FDTD法ではレーダ解析のような大規模モデルを扱う際、計算資源面から解析領域をあまり大きくはできない。そこで、Fig.9, 10に示すような遠方界の電界を理論的に演算可能なヘルツダイポール電磁界理論 (Hertz Dipole Electromagnetic Theory) および、Fig.11に示すようなターゲットからの反射波を考慮した解析が可能なPO法 (Physical Optics) を組合せた独自の方式を採用することで、ターゲットからの反射波を考慮した精度の高いCAE解析を、より広いエリアで実現することが可能となった。

$$\begin{aligned}
 \mathbf{B} &= k^2 p(\hat{\mathbf{p}} \times \hat{\mathbf{r}}) \times \hat{\mathbf{r}} \frac{\cos(kr - \omega t)}{r} + p \left[ 3(\hat{\mathbf{p}} \cdot \hat{\mathbf{r}}) \hat{\mathbf{r}} - \hat{\mathbf{p}} \right] \left[ \frac{\cos(kr - \omega t)}{r^3} + \frac{k \sin(kr - \omega t)}{r^2} \right] \\
 \mathbf{H} &= k^2 p(\hat{\mathbf{p}} \times \hat{\mathbf{r}}) \left[ \frac{\cos(kr - \omega t)}{r} + \frac{k \sin(kr - \omega t)}{kr^2} \right] \\
 \hat{\mathbf{r}} &= \mathbf{r}/r \quad \hat{\mathbf{p}} = p \hat{\mathbf{p}} \quad \omega = 2\pi f \quad k = \omega/c
 \end{aligned}$$

Fig.9 Hertz Dipole Equations of Electromagnetic Field

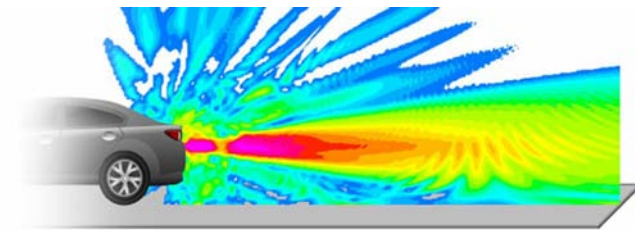


Fig.10 FDTD with Electromagnetic Theory

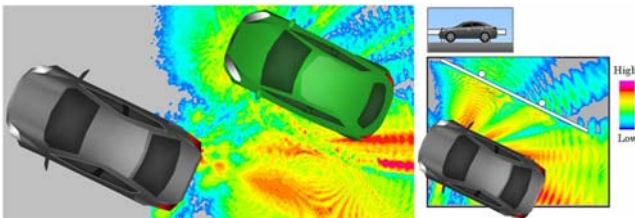


Fig.11 FDTD with Physical Optics

また、ターゲットの位置精度に影響を与える塗装膜については、薄膜のためモデル化が難しいことから、サブセル法とマロニー&スミス理論を用いモデル化を行った。

これらの手法を全てを組み合わせることで、レーダ電波の車両搭載状態における複雑な振る舞いを視覚的に確認することが可能となった。

4.2 CAE精度の検証

CAE精度の検証を行うために、CAE結果と実測結果の比較を行った。Fig.12は車両構造物の影響による地面への漏れ電波の電界分布をCAE解析と実測で比較した結果であり、Fig.13はFig.12の矢印部における電界値の偏差を比較した結果である。測定データ上の黒く一様な部分は、測定装置の制約から計測できなかった領域を示す。

Fig.13からCAE解析結果は実測結果とほぼ同様の結果となっていることが分かる。これにより、CAE解析による机上予測検証が可能であることが確認できた。

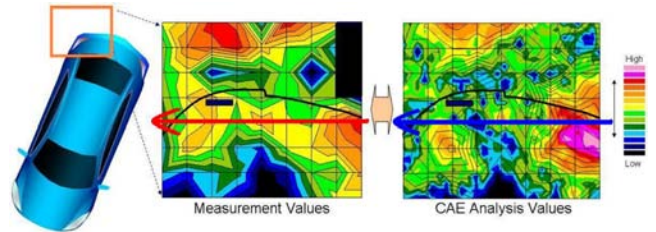


Fig.12 Comparison between Measurement Values and CAE

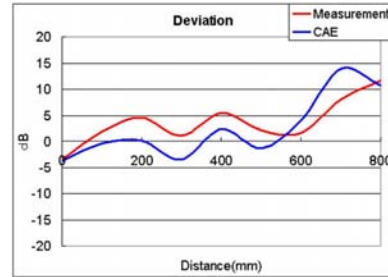


Fig.13 Comparison of Deviation between Measurement Values and CAE

4.3 CAEによる環境ノイズ電波伝搬可視化

車両搭載状態の環境ノイズがどのように伝播するかという電波の振る舞いや伝播経路を解析するために、CAE上でFig.14に示すような極短パルス状の電波を放射することで、バンパ内の反射波や回折波が路面や道路構造物などに当たり、不要な環境ノイズとしてレーダに戻ってくる様子を視覚的に確認できるようにした。

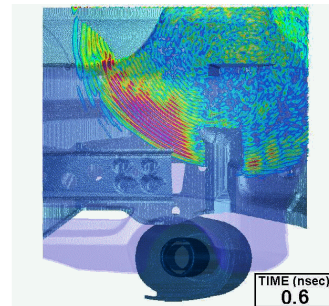


Fig.14 Analysis by Single Pulse

また、CAE上で連続的に電波を放射しながら、特定のポイントに、どんな強さの電波が何ns後に到達したかを計算し、その結果をFig.15のようにグラフで示すことで、電波の時間的な振る舞いがより定量的に確認できるようになった。これらによりCAEによるレーダの定量的な電波伝搬机上予測が可能となってきた。

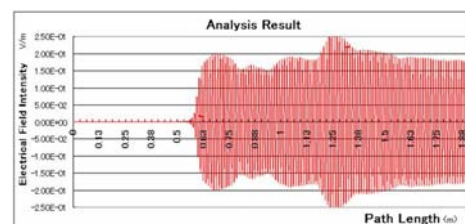


Fig.15 Time Domain Analysis

## 5. CAE可視化技術によるメカニズム解明と開発への適用

### 5.1 過警報状態の再現と発生メカニズム

#### (1) 車両構造物の影響

前述のCAEによる電波伝搬可視化技術を活用すると、道路構造物への電波伝搬経路とともに、車両構造物内での反射点を推定することができる。

そこでその反射点の一つをCAE上で選択し、実際の車両で強い反射波が道路構造物などへ伝播するよう、その反射点での反射率が意図的に大きくなる構造としたところ、3.1での仮説の通り、道路構造物からの環境ノイズが増加し、結果として過警報状態が再現することを実験的に確認した。

Fig.16は、実際の車両での実験結果である。

選択した反射点の反射率を意図的に大きくし環境ノイズを増加させることで、実際の車両の左後方に偽のターゲット車両が発生させ、過警報 (Excessive Alarm) 状態を再現している。

これより過警報状態を抑えるためには、バンパなどの車両構造物の構造およびレーダとの位置関係の設計が重要なポイントとなることが分かってきた。

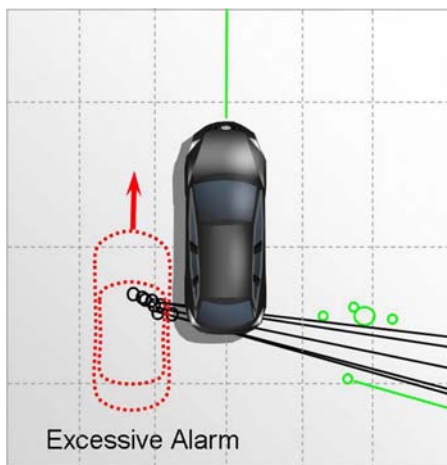


Fig.16 Reproduction of Excessive Alarm

#### (2) 道路構造物の影響

同様に、道路構造物への電波伝搬経路がある場合に、道路構造物側の反射率を意図的に大きくし強制的に強い反射波が戻ってくるように設定したところ、環境ノイズが増加し過警報状態が再現することを確認した。

Fig.17に示す「最悪条件再現あり」が、強制的に強い反射波が戻ってくるように設定した時のデータで、強い反射波により偽のターゲット車両が発生し、過警報 (Excessive Alarm) 状態となっていることが分かる。

これにより道路構造物の最悪条件を明らかにすることができるようになってきた。

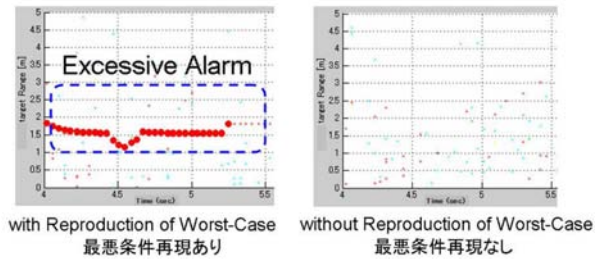


Fig.17 Reproduction of Worst-Case

#### (3) 環境ノイズと過警報発生メカニズム

従来、後方レーダを活用した警報システムでは、過警報の発生を最小限とするよう車両を使って開発を進めてきたが、上記の結果から「バンパ内の反射波などによる電波伝播経路が車両構造物内に形成されており、その伝播経路が道路構造物などへ到達し、強い反射波が戻ってくる市場環境下」で、環境ノイズが極端に増加し過警報につながる可能性があることが判明した。

CAEによる複雑な電波伝搬の可視化により、環境ノイズ要因の過警報発生メカニズムの一つを明らかにすることができた。

### 5.2 ノイズ低減手法の検討と設計要件化

上記メカニズムから、バンパ内の不要反射波を低減し、道路構造物への不要な電波伝搬量を軽減することが、環境ノイズを低減する手法として有効であることが分かってきた。CAE等を使った検証結果から、具体的な手法として、バンパ内部の反射波を低減させる手法や、適切なカバー構造を設けて反射波をコントロールする手法などが有効な手段として考えられる。

Fig.18は、前述の強い反射波が伝播するように反射点での反射率が意図的に大きくなる構造とした上で、Fig.19に示すような適切なガイド構造 (ADJUST PLATE) を設けて、この反射波をコントロールするガイド構造あり/なしで環境ノイズがどのように変化するかを実測した結果であるが、この構造により環境ノイズが低減していることが分かる。

今後この手法を活用し、更なるシステムの信頼性向上を図るべく設計要件化を進めてゆく。

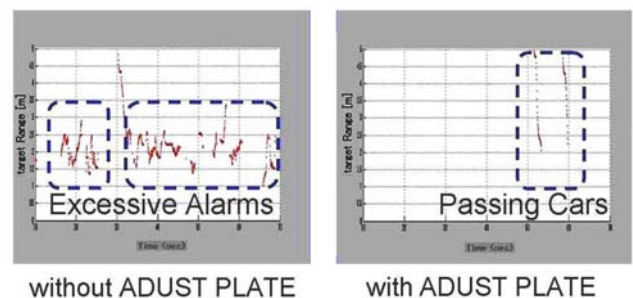


Fig.18 Control of Reflected Wave



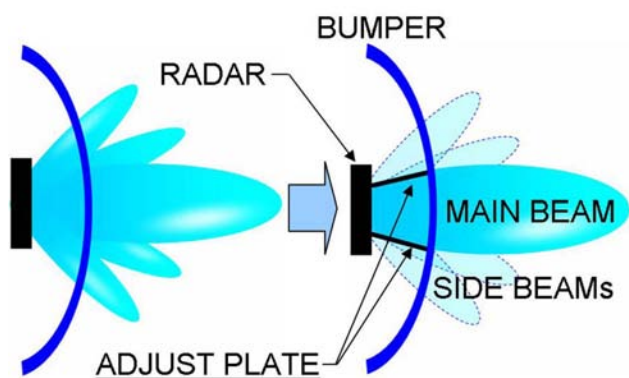


Fig.19 Adjust Plate

### 5.3 市場最悪条件の再現と評価効率化

従来の、実際の市場環境での走行評価を、解明したメカニズムを基にして、テストコース上に最悪条件を再現させることで、開発効率が大幅に改善する可能性が出てきた。

Fig.18に示した、テストコースで強制的に道路構造物側から強い反射波が戻ってくるように設定した時のノイズ発生状況では、様々な市場環境下での走行評価で観測される最大ノイズと同等以上のノイズが発生しており、走行評価がテストコースでの評価に置き換え可能であることが分かった。

### 5.4 開発への適用

上記結果から、CAEを活用することにより、机上検証段階で信頼性の高いシステムの構築が可能となることが分かった。また、様々な市場環境下での評価を、最悪条件を模擬したテストコースでの評価に置き換えることで、評価・チューニングを最小限にできることが分かった。

これらより、CAEによる電波伝搬可視化技術は、開発の効率化に適用できる技術であることが明らかになった。

## 6. おわりに

車両搭載状態でのレーダの電波伝搬メカニズムを明らかにすることで、効率的な開発に必要な設計要件や評価条件が明らかになってきた。

今後この検討結果を基に、実車主体の開発を設計要件化やバーチャル評価等に置き換えることで、より効率的な開発を実現するとともに、お客様に満足していただける商品を提供してゆけるよう、高性能で信頼性の高いシステムの開発を進めて行く。

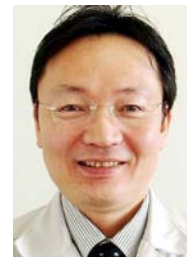
## 参考文献

- (1) 信時ほか：後側方障害物警報システムの開発，マツダ技報，No.26，p.124-130（2008）

## ■ 著 者 ■



稲田貴裕



浜田 康



鶴長真里絵



花田充基



西田史彦



遠藤靖之



中畑洋一郎