

論文・解説

22

## キーレスエントリー受信感度バーチャル評価技術の開発 Virtual Testing Technique for Remote Keyless Entry Receiving Performance

浜田 康<sup>\*1</sup> 沼元 正樹<sup>\*2</sup> 鶴長 真里絵<sup>\*3</sup>  
Yasushi Hamada Masaki Numoto Marie Tsurunaga

### 要 約

車の利便性を高める商品として、電波を利用したキーレスエントリー（以下、キーレス）が普及している。このキーレスにより車から離れた位置で遠隔操作を行うには、車の中に設置したキーレス受信アンテナで効率よく電波を受信することが重要であるが、金属製のボデーシェルの中で電波を受信するには、ボデーシェル内/外の電波の振る舞いを考慮しなければならない。この車の中での電波の振る舞いにより、電波を受信しやすい位置とそうでない位置が混在していることが経験的に分かっている。従来は、試作車を用いて実験的に受信アンテナ設置場所の設計を行っていたが、試作レス開発に対応すべく、バーチャル評価による受信性能開発が必要となってきた。本研究では、ボデーシェルの中のキーレス電波の電界分布およびボデーシェルの中に設置したキーレス受信アンテナの受信利得・指向特性のシミュレーション解析手法を検討し、バーチャル評価によるキーレス受信アンテナ設置場所決定手法を確立した。なお日本では、主としてキーレスには300MHz帯の微弱電波が使用されている。

### Summary

A keyless entry system ( hereinafter referred to as keyless ) utilizing radio wave has been spreading as a product which enhances vehicle convenience. A weak radio wave of 300 MHz band is mainly used in Japan and it is therefore important to enable a receiving antenna to receive the radio wave efficiently for remote operation. To receive the radio wave inside the metal vehicle body, we need to know how the radio wave behaves inside/outside the vehicle. It is known empirically that the radio wave receiving performance varies depending on reception points inside the vehicle. In the conventional design method, we had determined a reception antenna installation position experimentally by using prototype vehicles but we were required to develop the reception performance by simulation to achieve prototype-less development. In our research, we studied in-vehicle electric field distribution and simulation method for reception sensitivity and directional characteristics of an in-vehicle keyless reception antenna. As a result of the research, we established a design method to determine keyless reception antenna location by virtual evaluation.

### 1. はじめに

電波を利用した自動車電装品は、ラジオ・テレビ・キーレスエントリー・Tire Pressure Monitoring System (TPMS)・GPS・VICS・Bluetooth・レーダ等、年々増えてきており、使用される電波の波長は、km～mmの幅広いレンジである。車の内部への電波伝搬は、金属であるボデーシェルにより大きく影響を受ける。電波の波長が長いほ

ど、ボデーシェルの外からボデーシェルの中に侵入する際の減衰は大きくなる。ボデーシェル開口部のサイズが波長に近づく300MHz（波長1m）前後では、電波はボデーシェルの中に到達し、反射と散乱を繰り返し、電波の干渉が生じる。ボデーシェル形状によってボデーシェルの中の電界分布は大きく変化する。日本国内で主として用いられる300MHz帯の微弱電波を用いたキーレス受信アンテナの設置場所を設計する際は、この特性を考慮する必要がある。

\*1, 2 車両システム開発部  
Vehicle System Development Dept.

\*3 (株)マツダE&T  
Mazda Engineering & Technology Co.,Ltd.

このような特徴から、キーレス受信性能を経験則により予測することは難しく、従来は試作車を用いて実験による性能開発を進めてきた。しかしながら、試作レス開発が主流となる中で、バーチャル開発への対応が必要となってきた。

本研究では、ポデーシェルの中に設置される300MHz帯を使用したキーレス受信アンテナの受信利得をシミュレーションにより予測する技術を開発し、測定値と計算値の相関を検証したので報告する。

## 2. ポデーシェル内/外の電波の振る舞い

### 2.1 波長と振る舞い

キーレス受信アンテナ設置場所の設計を行うに際し、ポデーシェル形状と電波の振る舞いとの関係を把握するために、電波の波長を変化させ、ポデーシェル中の電界強度分布の大まかな特徴を計算により調べた。Fig.1は、3MHz (波長100m)、30MHz (波長10m)、300MHz (波長1m) および3GHz (波長0.1m) の電波 (水平偏波) を、ポデーシェル後方から照射した際のポデーシェル内/外の電界分布の計算結果である。これから、以下のことが分かる。

- ① 30MHz以下の波長の長い電波は、ポデーシェルの外から中へ侵入する際の減衰が大きい
- ② 3GHz以上の波長の短い電波は、ポデーシェル開口部から内部に直線的に侵入する (光に似た特性を示す)

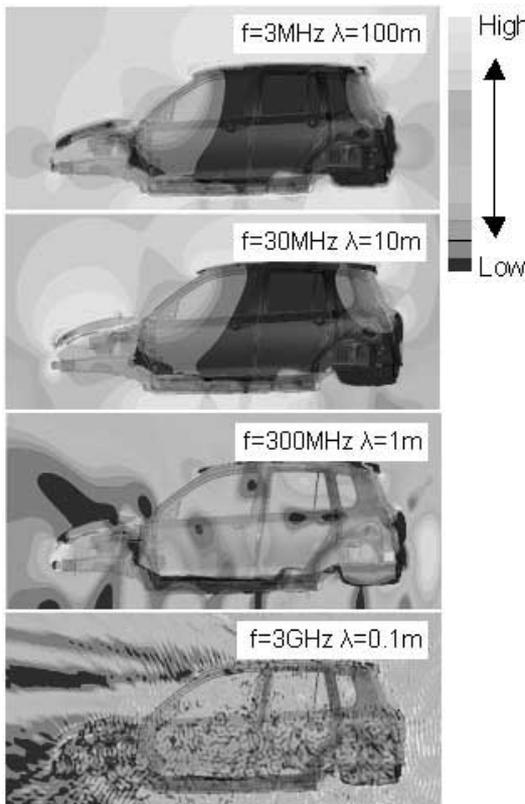


Fig.1 Wave Length vs. Field Strength

これは、電波の波長が金属筐体 (ポデーシェル) の開口部 (窓枠) に対し十分に大きい場合、電波は遮蔽され、十

分に小さい場合、電波はポデーシェルの中に到達することを示している。

ところで、300MHz (波長1m) の結果に着目すると、①と②の中間的な振る舞いとなっていることが分かる。電波は、ポデーシェルの中で、強い箇所と弱い箇所が多数存在する複雑な挙動を示す。これは、波長を徐々に短くしていき、窓枠等のポデーシェルの開口部が電波の波長程度になると、ポデーシェルの中に電波が侵入し、回折、散乱および反射干渉を繰り返す、定在波を生じることによる。

### 2.2 300MHz帯電波の電界分布の特徴

日本国内で主にキーレスに使用されている300MHz帯の電波は、前項で説明したように、ポデーシェルの中で複雑な分布となる。

Fig.2は、300MHz帯の電波をポデーシェルの後方から照射した場合の、ポデーシェル形状による電界分布の違いをシミュレーションにより計算した結果である。300MHz帯の電波のポデーシェル中の電界分布は、ポデーシェル形状によって大きく異なることが分かる。

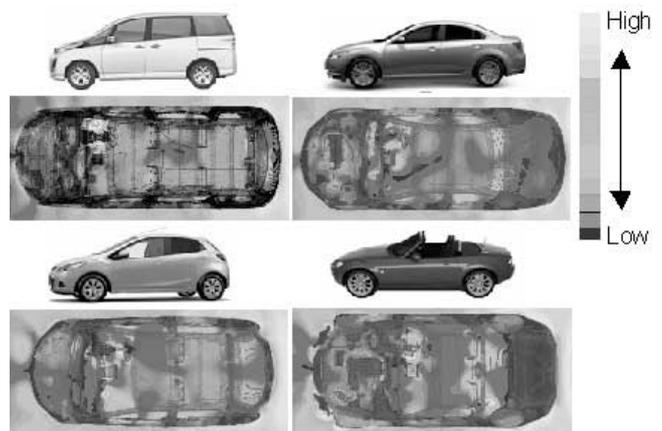


Fig.2 Distribution of Field Strength

Fig.3は、300MHz帯の電波を同一ポデーシェルに対し様々な角度から照射した場合の、ポデーシェル中の電界分布を計算した結果である。電波を照射する角度によって電界強度分布が異なる。キーレス送信機を操作する方向によって作動可能距離が変化するのはこのためである。

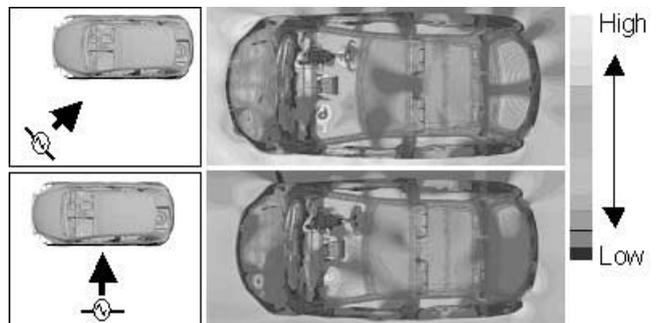


Fig.3 Distribution of Field Strength

Fig.4に、キーレスの作動可能距離指向性の一例を示す。

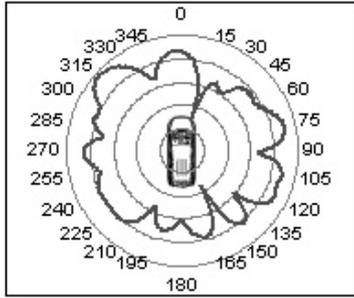


Fig.4 Directivity of the Keyless Operation Range

以上の結果より，300MHz帯を使用するキーレス受信アンテナの設置場所は，所定の性能を確保するために，車種毎に最適化設計が必要であることが分かる。

### 3. ボデーシェルの中の電界分布数値解析精度検証

#### 3.1 簡易車両モデルを用いた基礎検証

基礎研究として，実際のボデーシェルの1/3サイズの金属製簡易車両モデルを用いて，実験値と計算値との相関を検証した。評価には315MHzの3倍である945MHzを用いた。検証に用いた解析モデルの一例をFig.5に示す。水平に設置したダイポールアンテナに945MHz，120dB $\mu$ Vの正弦波電圧を給電し，金属箱内部の電界分布を実験および計算により求め，比較を行った。

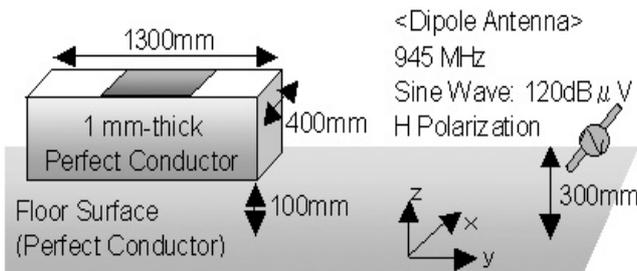


Fig.5 Condition of the Analysis with One-third Scale Vehicle Model

#### (1) 測定技術の検討

実験値と計算値との相関を検討する上で，信頼性のある測定結果を得るために，レーザー光を使って電界強度測定アンテナ給電点と測定装置とを光ファイバでつなぐ装置<sup>\*1</sup>を用いた（\*1：ニオブ酸リチウム結晶のポッケルス効果を利用した光導波路を有する光変調器を用いた装置）。これにより，測定アンテナと測定器とをつなぐ同軸ケーブルによって生じる電界の乱れをなくし，車室内の電界を精度良く測定することを可能とした。

同軸ケーブルを用いた場合と光ファイバを用いた場合の，簡易車両モデル内部の電界分布を計算した結果をFig.6に示す。同軸ケーブルにより電界分布の乱れが生じていることが分かる。

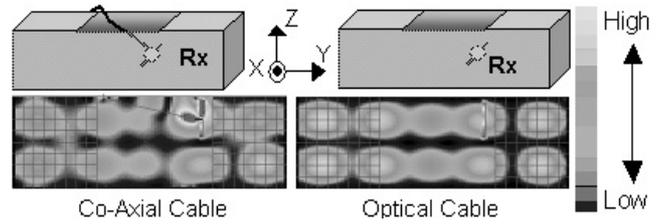


Fig.6 Turbulence of the Field Strength Distribution by the Co-Axial Cable

#### (2) 計算設定と精度検討

次に 数値解析手法の概要と解析精度について説明する。

電磁界数値解析にFDTD法（Finite Difference Time Domain Method）を用いた。FDTD法とは，マクスウェルの微分方程式(1)・(2)を差分化し，時間領域で解く手法である。電場と磁場を時間軸・空間軸ともに半ステップずれて差分化し，電場と磁場を交互に計算する。

磁場は， $H$ の $n+1/2$ を $H$ の $n-1/2$ と $E$ の $n$ から求める 式(3)

電場は， $E$ の $n+1$ を $E$ の $n$ と $H$ の $n+1/2$ から求める 式(4)

これを繰り返すことで，空間領域と時間領域の計算を行う。

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2)$$

$E$ ：電場                       $B$ ：磁束密度                       $H$ ：磁場

$J$ ：電流密度                       $D$ ：電束密度

$$H^{n+1/2} = H^{n-1/2} - \frac{\Delta t}{\mu} \nabla \times E^n \quad (3)$$

$$E^{n+1} = \frac{1 - \frac{\sigma \Delta t}{2\epsilon}}{1 + \frac{\sigma \Delta t}{2\epsilon}} E^n + \frac{\Delta t / \epsilon}{1 + \frac{\sigma \Delta t}{2\epsilon}} \nabla \times H^{n+1/2} \quad (4)$$

Fig.7にFDTD法の計算構造を示す。

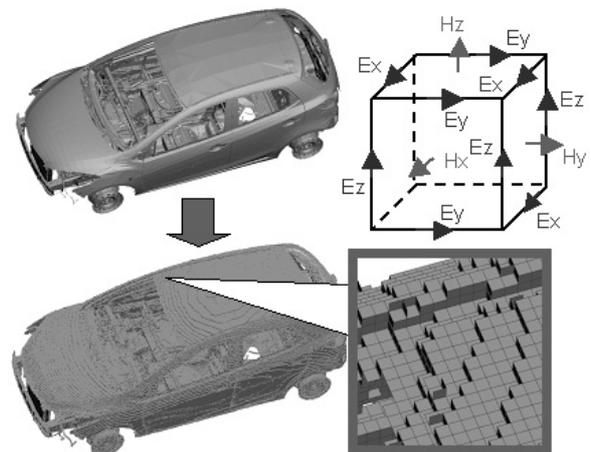


Fig.7 Structure of the FDTD Method

FDTD法は、モデル規模と計算時間とに線形の関係があり、大規模かつ複雑な構造のモデル解析に適している。しかし、Fig.7に示すように、計算の構造上六面体のメッシュを用いるため、曲面の解析を精度良く行うためには、メッシュサイズの設定に工夫が必要となる。また、解析空間はメモリ、解析時間および解析精度を考慮して、解析結果に影響を与えず最小の領域となるよう最適化と境界条件設定を行う。更に、解を収束させるためにタイムステップ数と計算回数の最適化を図った上で、必要最小限の計算回数で解析を打ち切る。

以上を踏まえ、Fig.5の簡易車両モデルを用いて測定および計算の比較検証を行った。測定には945MHzのダイポールアンテナを用いた。Fig.5のモデル内部に形成される電界成分において支配的となるZ成分について、Fig.8に測定結果と計算結果を示す。解析面は、床面から300mmの高さの平面である。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。

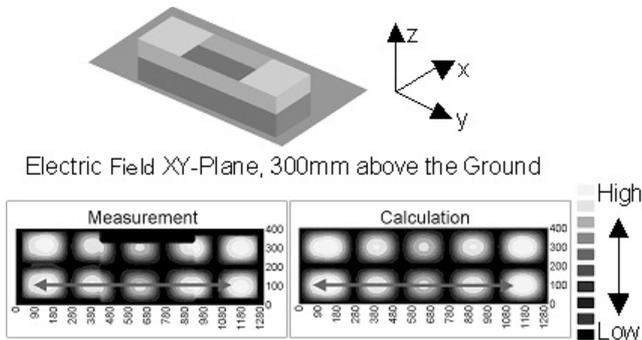


Fig.8 Validation with Simplified Vehicle Model

測定値と計算値との一致性を確認するために、Fig.8の矢印部における電界値の偏差を比較した結果をFig.9に示す。これより、測定結果と計算結果とがほぼ一致していることが分かる。

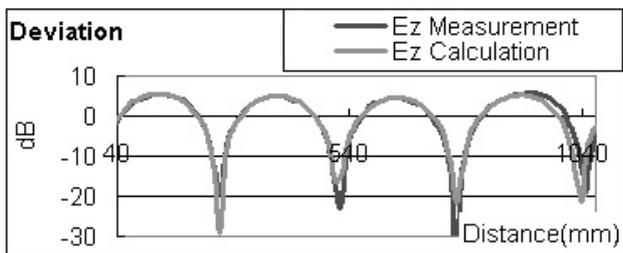


Fig.9 Comparison of Deviation for Measurement Value and Calculation Value

### 3.2 ボデーシェルでの検証

次に、ボデーシェルを用いた測定結果と計算の比較検証を行った。測定には315MHz用の電界測定用短縮ダイポールアンテナを用い、ボデーシェルの正面から315MHz水平偏波を送信した場合の、ボデーシェルの中に形成されるボデーシェルの中の床面から600mmの高さの平面上で、X・

Y・Zの各電界成分の測定と計算を行った。結果をFig.10に示す。

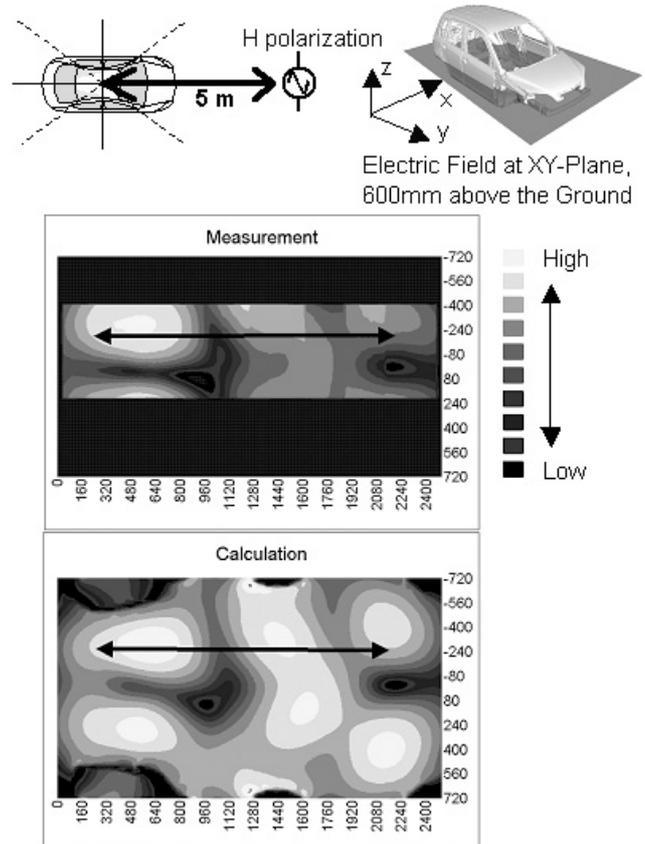


Fig.10 Validation with Actual Vehicle

Fig.10より、測定結果と計算結果の電界分布のピークとディップの位置には相関のあることが分かる。Fig.10中の矢印で示した部位に沿って電界の数値をプロットした結果をFig.11に示す。電界はX・Y・Z各成分を合成したものをを用いた。

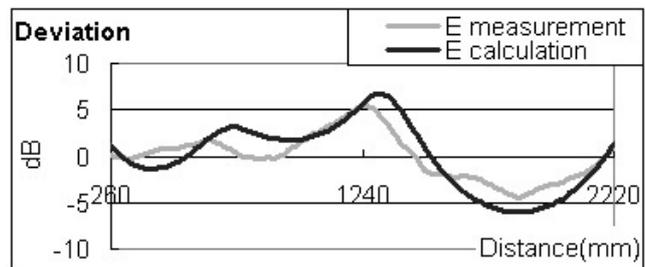
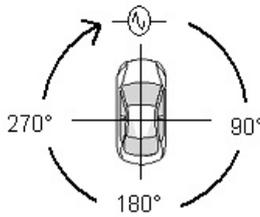


Fig.11 Comparison of Deviation for Measurement Value and Calculation Value

上記比較を、車両の正面を0°とし、送信アンテナを45°ピッチに配置し、各々の測定および計算を行い、偏差から式(5)を用いて平均誤差を導き出した結果をFig.12に示す。

ボデーシェルに対して全方向から電波を送信した際のボデーシェル中の電界分布の平均誤差は2.5dB以下となった。ボデーシェルにおいても測定結果と計算結果がほぼ一致した結果を得ることができた。



$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m}) - (c_i - \bar{c}) \quad (5)$$

$$\bar{m} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i \quad \bar{c} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_i$$

$\bar{\varepsilon}$ : Average Error                      m: Measurement Value  
 c: Calculation Value                    n: Number of the Data Points

Average Error (dB)							
0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
1.48	2.14	1.21	1.65	2.32	1.24	1.64	2.01

Fig.12 Average Error with Measurement Value and Calculation Value

### 4. キーレス受信アンテナのモデル化

#### 4.1 ボデーシェルモデルとアンテナモデルの融合

以上の検証により、ボデーシェルの中に形成される電界分布を実用レベルの精度で計算できることを示した。しかし、ボデーシェルの中の電界分布を知るだけでは、キーレス受信アンテナ設置場所の最適化を行うことはできない。

電界強度が大きい場所であっても、キーレスアンテナの利得および指向性によっては電波をうまく受信できない、あるいは、アンテナ付近の金属構造物によってアンテナの特性が著しく変化する場合があり、これらを考慮する必要がある。つまり、キーレス受信アンテナの設置場所最適化を行うには、ボデーシェルの中に設置されたキーレス受信アンテナのモデル化を行い、その特性を考慮した上でボデーシェル全体の大規模モデル解析を行わねばならない (Fig.13)

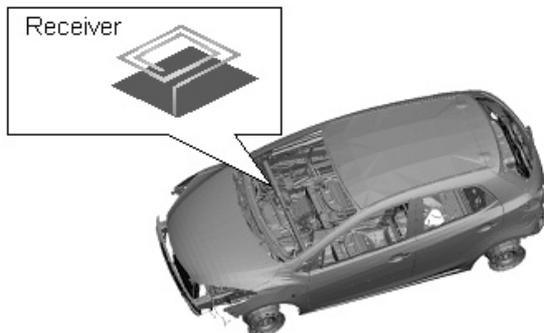


Fig.13 Precision Antenna Model in the Large Scale Vehicle Model

#### 4.2 キーレスアンテナ性能数値解析モデル

キーレス受信アンテナに用いられる小型アンテナの特性を数値解析するには、1mm程度の細かいメッシュでアン

テナ形状を忠実に再現した解析モデルを作成する必要がある。しかし、FDTD法において、ボデーシェルとアンテナ全てを1mmのメッシュで解析モデル化すると、計算に必要なメモリと計算時間が膨大となり、現実的ではない。そこで、Fig.14に示す3つのステップを用いて、大規模ボデーシェルモデルのメッシュサイズを維持した状態で、精度良いキーレス受信アンテナモデルを組み込み、大規模モデル中にある小型キーレス受信アンテナモデルの特性解析を行った。

まず、アンテナ解析精度の良いモーメント法を用いて、実際のアンテナ形状 (Real Model) を忠実に再現したモデル (Precision Model) で特性を解析し、測定値との相関を確認する。次に、モーメント法を用いて、Precision Modelと同じ特性となるワイヤーで構成されたモデルを作成する (Wire Model Mom)。このワイヤーアンテナ形状をFDTDモデルで再現し、(Wire Model FDTD) サブグリッド法等を用いてボデーシェルFDTD解析モデルに組み込む (Wire Model FDTD)。

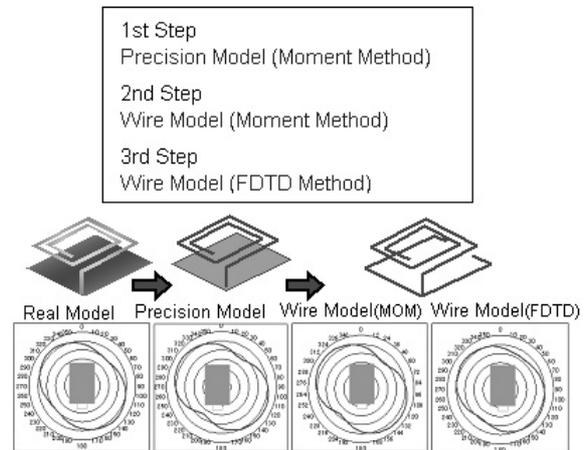


Fig.14 Modeling of the Keyless Receiving Antenna

### 5. ボデーシェル&アンテナモデル数値解析

#### 5.1 簡易車両モデルを用いた基礎検証

まず、Fig.5に示す簡易車両モデル内部に受信アンテナを設置し、ターンテーブルを用いてアンテナに誘起される高周波電圧の指向性を測定した (送信アンテナの設置条件は3章と同じ)。次に、4章で示した手順により受信アンテナのモデル化を行い、これを簡易車両解析モデルに組み込み、アンテナ受信部での受信電圧指向性を計算した。

Fig.15には、簡易モデル内部に設置したアンテナの指向性の測定値と計算値を示した。二つのグラフのスケールは同じである。感度の高い角度、低い角度がほぼ一致している。

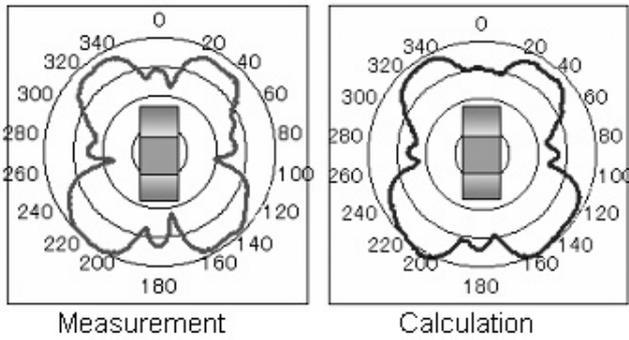


Fig.15 Receiving Directivity of 1/3 Vehicle Model

5.2 ボデーシェルでの検証

次に、ボデーシェルにキーレス受信アンテナを設置し、5.1節と同様、測定値と計算値との比較を行った（送信アンテナの設置条件は3章と同じ）

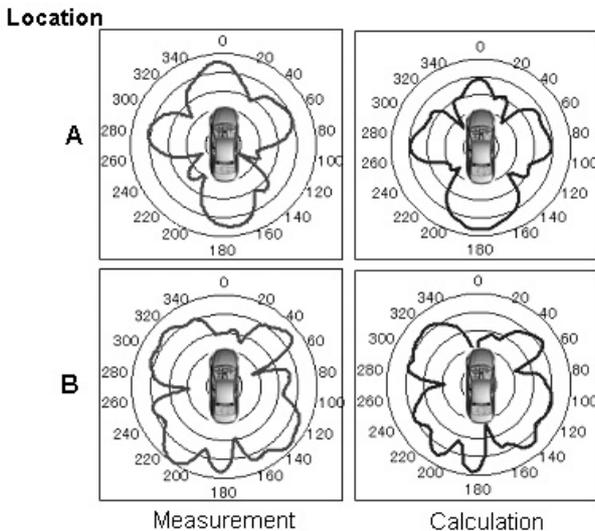


Fig.16 Receiving Directivity of Actual Vehicle Model

Fig.16は、ボデーシェルの中の2ヶ所に設置したアンテナの指向性の測定値と計算値の例である。四つのグラフのスケールは同じである。感度の高い角度、感度の低い角度の傾向は一致している。指向性グラフ上の細かい凹凸には若干の乖離がみられるが、これは、ボデーシェルの中の金属構造物（シートフレーム等）の微妙な位置変化で車両内部の電波の反射・干渉状態が変化すること等によって生じる測定および計算誤差分であると推定される。

キーレスの商品性を考慮すると、アンテナ設置場所を選定する上で重要となるのは、①受かりにくい方向（指向性グラフの急峻な落ち込み）が少ないこと、②平均受信感度が高いこと、の2点である。そこで、ボデーシェルの中の4ヶ所にアンテナを設置し、測定値と計算値の平均感度の偏差を求めた。Fig.17に結果を示す。

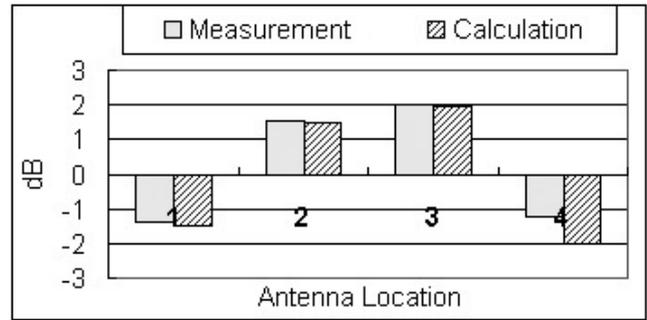


Fig.17 Average Gain at Four Antenna Locations

Fig.17から、平均受信感度についても実験値と計算値とに相関のあることが分かる。

以上より、コンピュータ上で、ボデーシェルの中に設置したキーレス受信アンテナの指向性と平均感度を実用レベルの誤差で計算できることが検証できた。

6. おわりに

キーレスの受信性能（通信距離）の絶対値を決定するパラメータで、一意的に決定できる設計値（送信出力、空間減衰、偏波、変調方式、伝送レート、受信機フィルタ帯域およびチューナIC入力感度）以外の不確定要素であった受信アンテナ構造とアンテナ設置場所による感度・指向性について、従来の試作車での実験評価に基づく設計を、CAEによるバーチャル評価に基づく最適化設計へと移行し、試作レス開発を実現した。

著者



浜田 康



沼元正樹



鶴長真里絵