

論文・解説

35

磁界 CAE を用いたアドバンストキーレス開発

Development of Advanced Keyless System Using Magnetic Field CAE

吉田 俊秀^{*1}

Toshihide Yoshida

稲田 貴裕^{*4}

Takahiro Inada

浜田 康^{*2}

Yasushi Hamada

沼元 正樹^{*3}

Masaki Numoto

要約

車の利便性を高める商品として、アドバンストキーレスシステムやイモビライザシステムなどの、磁界通信を用いたシステムの導入をマツダは進めてきた。これらシステムの通信性能を確保するためには、磁界送信用のコイルアンテナ（以下 LF アンテナ (LF: Low Frequency)）を、車両の適切な場所にレイアウトする必要がある。従来は、試作車を用いて実験的に LF アンテナのレイアウト設計を行ってきたが、試作車レス開発に対応すべく、バーチャル評価による通信性能開発が必要となってきた。今回、磁界シミュレーション（以下 CAE）技術を用いて、これらシステムの通信性能を机上で検証可能な技を開発した。

Summary

Mazda has been promoting the introduction of systems using magnetic field communications, such as an advanced keyless system and immobilizer system, as products that enhance vehicle convenience. To ensure the communication performance of these systems, it is necessary to lay out the coil antenna for the use of magnetic transmission (hereinafter referred to as LF antenna) in an appropriate place of the vehicle. In the conventional design method, the layout of the LF antenna is determined experimentally by use of a prototype vehicle. To realize prototype-free development, however, it became necessary to develop the communication performance through virtual evaluations. This time, with use of the magnetic field simulation technology (hereinafter referred to as CAE), we have developed a technology to theoretically verify the communication performance of these systems.

1. はじめに

車の利便性を高める商品として、マツダはアドバンストキーレスシステムの導入を進めてきた。アドバンストキーレスとは、ユーザが Fig.1 に示すようなアドバンストキー（以下キー）をポケットやバッグから取り出すことなく、車両のロック、アンロックや、エンジン始動を可能とするシステムである。これを実現するために、車室内外にキーを検知するための検知エリアを形成する。この検知エリアは、LF アンテナに高周波電流を流し、LF アンテナを中心に磁界を発生させることで形成している。この形成した検知エリア内にキーがあれば、車両はキーと無線通信を行い、

キーを持ったユーザが車室内もしくは車室外のどちらに居るかを判別できる。ここで、LF アンテナのレイアウトが悪いと検知エリアが不適切となり、誤検知を引き起こす要因となる。これは、高周波磁界の振る舞いが金属により大きく影響を受け車両の構成物により複雑に変化するためである。従来の LF アンテナレイアウト活動は、試作車を用いた開発が中心であり、試作車評価後の設計変更を前提とした開発となっていた。更なる開発の効率化が必要とされる昨今では、試作車中心の開発は回避する必要がある。

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

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

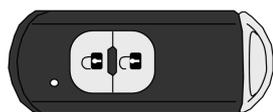


Fig.1 Advanced Key

本技術開発では、車室内にレイアウトされる 125kHz の周波数を使用した LF アンテナの磁界分布特性を、CAE により予測する技術を開発し、高精度な机上検証を可能としたので、これを報告する。

2. アドバンストキーレス開発の現状

2.1 アドバンストキーレスの性能開発における問題

車両に搭載されるアドバンストキーレス用 LF アンテナのレイアウト例を Fig.2 に示す。

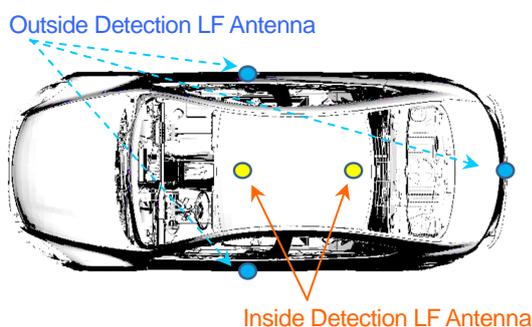


Fig.2 Layout of LF Antennas

LF アンテナは、車室外送信用と車室内送信用に分けられ、1 本当たりの検知エリアは半径約 1~2m である。車室外送信用の LF アンテナは、運転席と助手席のアウトハンドル内や、リヤバンパ内にレイアウトすることで、十分な検知エリアを確保できる。一方、車室内送信用の LF アンテナはダッシュボード内部やリヤフロア上にレイアウトする 경우가多く、車両のボデー形状をはじめとした様々な金属部品により影響を受け、検知エリアが複雑に変化する。そのため、車内の検知エリアを十分に確保できず、キーが車内にあるにも関わらずエンジン始動ができないという問題や、車内の検知エリアが車外に漏れることにより、キーが車外にあるにも関わらずエンジン始動ができてしまうなどの問題を引き起こす。

2.2 性能予測技術の必要性

車室内における磁界強度分布の事例を示す。Fig.3 は、車両を簡易的なモデルとして模擬した計算モデルである。Fig.3 の計算モデルをベースとして、LF アンテナを X 軸方向に±20mm 移動した場合の磁界強度分布を、CAE で計算した結果を Fig.4 に示す。この結果からわかるように、LF アンテナのレイアウトが数十 mm 移動すると、磁界強度分布が大きく変化する。このように、磁界はボデーの構造物など様々な金属形状の影響を受けやすく、検知エリアも同様に、LF アンテナのレイアウト変更やボデー形状の変更で複雑に変化する。そのため、量産形状と同等の試作車が

できる開発の後期で初めて問題が発覚する場合があります、LF アンテナのレイアウト変更などが必要となる。そこでこれらレイアウト変更をなくすべく、机上で LF アンテナのレイアウト設計を可能とする技術開発を行った。

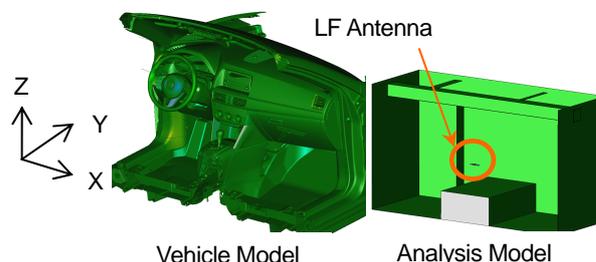


Fig.3 Vehicle Model and Analysis Model

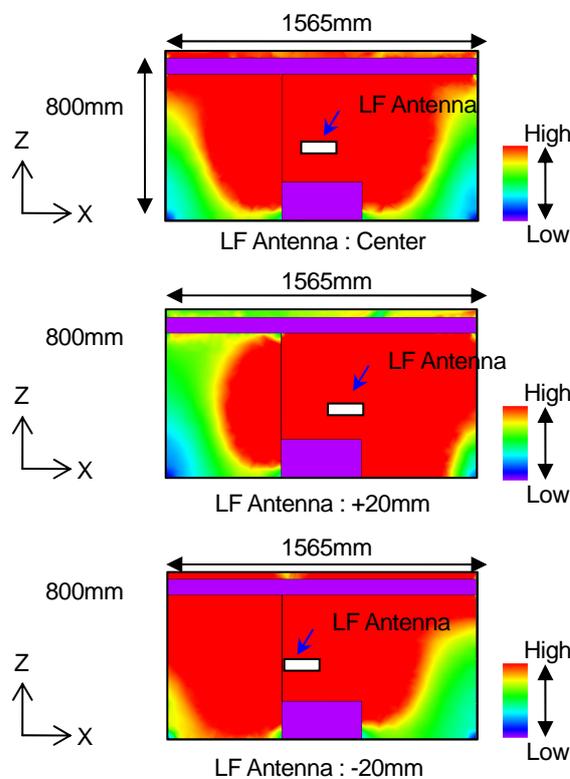


Fig.4 Magnetic Field Strength Distribution vs. LF Antenna Layout

3. 磁界 CAE 開発

車室内の検知エリアを机上で検証可能とするために、磁界 CAE 技術開発に取り組んだ。最初に簡易モデル検証を行い、次に実車モデル検証を行った。最終的には、磁界通信を応用した他のシステムの検証を行った。

3.1 簡易モデル検証

CAE に必要な LF アンテナや実車モデルの材料特性、メッシュサイズを明確化するために、(1) 自由空間における LF アンテナ単品の磁界強度分布、(2) 車両ボデー相当の簡易金属モデルにおける磁界強度分布について、実測と

CAEの相関検証を行った。

(1) 自由空間の検証

まずは、自由空間におけるLFアンテナ単品の磁界強度分布を、メッシュサイズを変化させながら検証した。自由空間におけるLFアンテナの磁界強度は、測定距離(r)が数mに対し、波長(λ)が数kmと長く、近傍界(r < λ/2)となるため、式(1)で表される。磁界強度は、rと比較し十分長く、式(1)に示す1/r³項が支配的となるため、距離の3乗に反比例する。Fig.5に、LFアンテナの自由空間における磁界強度の測定結果と、CAE計算結果、距離の3乗で反比例する理論式のグラフを示す。グラフは、Fig.6に示すようにLFアンテナ中心を原点とし、原点からX軸方向に離れた場合の磁界強度をFig.5にプロットした。Case1とCase2は、CAEの計算結果であり、それぞれメッシュサイズが異なる。この結果より、Case2が測定結果と理論式に一致しており、LFアンテナのメッシュサイズ条件としては、Case2を用いることとした。

$$H(t) = \frac{A}{4\pi} i(t) \left(\frac{1}{r^3} + \frac{2\pi}{\lambda} \frac{j}{r^2} - \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \frac{1}{r} \right) \quad (1)$$

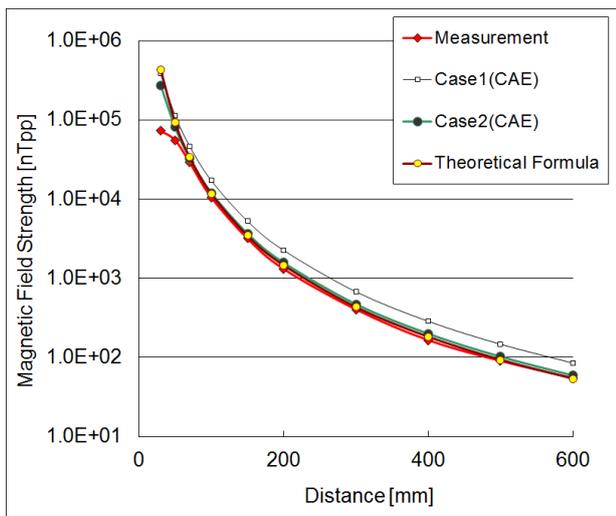


Fig.5 Magnetic Field Strength in Free Space

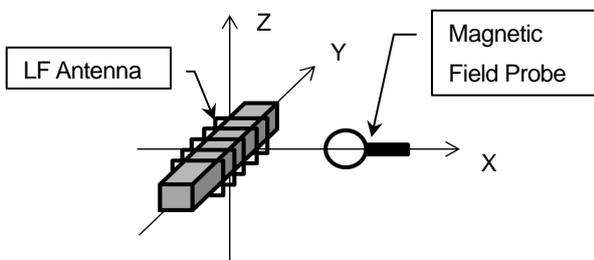


Fig.6 Measurement Conditions

(2) 簡易金属モデルの検証

次に、簡易金属モデルを作成し、実測値とCAEの比較検証を行った。実測用の簡易金属モデルは、車両ボデー同等の材質を使用し、CAE上の簡易金属モデルは、Table 1に示すように、計算結果に影響を与えると予想される金属

の磁気特性やメッシュ条件、計算条件などを変化させ検証を行った。パラメータは、Material (材質の磁気特性)、Eddy current (渦電流)の適用、Skin depth layer (表皮深さ)層の数、SIBC (表面インピーダンス法)を適用の4種類である。Fig.7に簡易金属モデルの形状と磁界強度の測定条件を示す。LFアンテナは金属モデルの底面より20mm離れており、磁界はLFアンテナの中心を原点とし、原点からX軸方向に離れた場合の強度を測定している。Fig.8に実測値とCase1~Case5のCAE計算結果を示す。

Table 1 Analysis Condition

Case	Material	Eddy Current	Skin Depth Layer	SIBC
Case1	Material1	✓	4	N/A
Case2	Material2	✓	4	N/A
Case3	Material3	✓	4	N/A
Case4	Material3	N/A	4	N/A
Case5	Material3	✓	1	✓

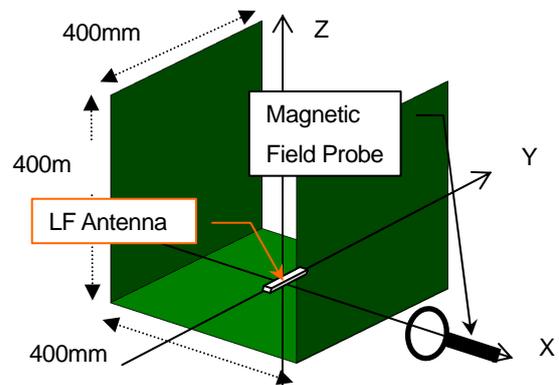


Fig.7 Measurement Conditions in Simplified Model

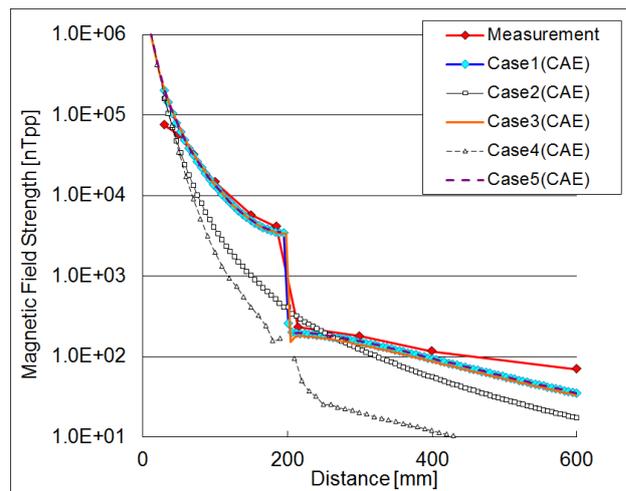


Fig.8 Magnetic Field Strength in Simplified Metal Model

Fig.8からわかるように、Case1、Case3、Case5の結果は同等であり、これらを実測値と比較すると、金属内側(Fig.8のX < 200mm エリア)においてほぼ一致している。これは、金属で囲まれた車室内における磁界強度を、CAEで高精度に解析可能であることを示している。ここで、

Case1 と Case3 は、金属の磁気特性が異なり、磁化特性が線形もしくは非線形であるかによって異なる。本結果からこれら磁化特性が計算結果に影響を与えないことが判明した。モデルの物性値を車両ポデー相当とし、渦電流による影響を考慮することで、簡易金属モデルにおいても、磁界強度は実測値と一致することが判明した。

次に、Case3 と Case5 の結果を比較する。磁場解析では、式(2)に示すように、金属モデルの表面を表皮深さ分、複数の層に分けてメッシュを作成する必要があるが、Case3 の簡易金属モデルでは、4 層のメッシュを作成している。一方、Case5 は SIBC を適用し、簡易金属モデル表面のみに電流が流れるように計算を行うことで、メッシュの層構造を1層としている。Case5 の結果より、SIBC を用いることで、表皮効果を考慮した場合と同等の結果が得られ、モデルのメッシュ層を複数考慮する必要がないことが判明した。これにより、数十万のメッシュ数を削減でき、モデル作成時間や計算時間の短縮が可能となった。

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi\mu\sigma f}} \quad (2)$$

δ : Skin Depth
 μ : Magnetic Permeability
 σ : Electrical Conductivity
 f : Frequency

3.2 実車モデル検証

(1) 実車簡易モデル

計算時間を短縮化するために、Table 1 の Case5 の計算条件と材料条件を用いて、実車を実物大に模擬した簡易モデルを作成し、メッシュサイズを変更した場合の計算コスト（使用メモリ、計算時間）と計算精度の関係を明確化した。Fig.9 に今回 CAE で用いた計算モデル、Fig.10 にモデルの計算範囲、Table 2 に計算条件と計算コスト、Fig.11 に磁界強度の計算結果、Fig.12 に計算に使用したメモリ数と計算時間の関係を示す。

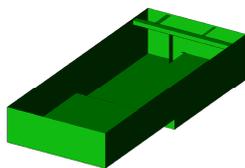


Fig.9 Analysis Model

Fig.11 からわかるように、磁界強度減衰は、メッシュサイズによらず同等である。また、Fig.12 からわかるように、Mesh3 ~ Mesh5 は計算コストがほぼ同等である。計算精度と計算コスト、更には計算結果の後処理を考慮すると、Mesh3 ~ Mesh5 が、解析モデルとして適している。しかしながら、Mesh4, Mesh5 では、メッシュサイズが大きく、一部車両形状を保持しない。以上の結果より、車両形状を適切な形に保ち、精度よく、そして計算コストを抑える条件として、Mesh3 の条件を用いて実車モデルを計算することとした。

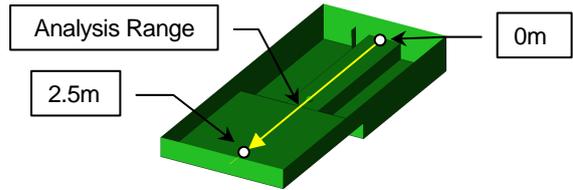


Fig.10 Analysis Range

Table 2 Analysis Condition

	Mesh1	Mesh2	Mesh3	Mesh4	Mesh5
Count of Mesh	6,750,365	768,319	418,297	315,978	224,796
Size of Memory [Mbyte]	7053.1	969.1	535.1	427.9	305.4
Analysis Time [sec]	3790	260	96	86	73

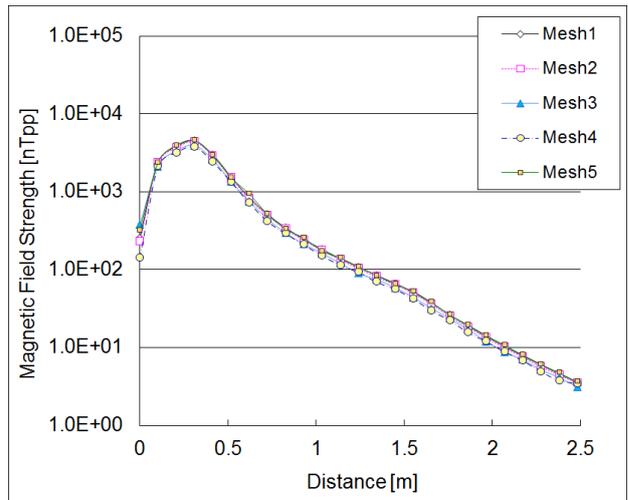


Fig.11 Magnetic Field Strength in Simplified Vehicle Model

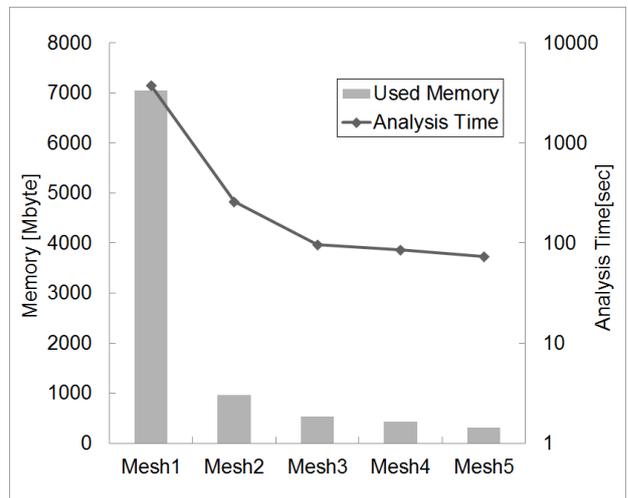


Fig.12 Used Memory and Analysis Time

(2) 実車モデル

前述のメッシュサイズで作成した実車モデルを用いて、CAE 計算結果と、実車の測定結果を磁界強度分布に表し、比較した図を Fig.13 に、実車における各測定ポイントの磁界強度を Fig.14 に示す。また、Table 3 に、各測定ポイントにおける磁界強度の測定結果と、CAE 計算結果の誤差比率 [dB]と、検知エリアの大きさ [mm]に換算した結果を示す。

Fig.13 より、磁界強度分布の傾向は、測定結果と CAE

計算結果でほぼ一致しているのがわかる。また、Table 3より、検知エリアの絶対値誤差の平均は 30mm であり、キー1 個分の大きさに相当する精度であることが判明した。

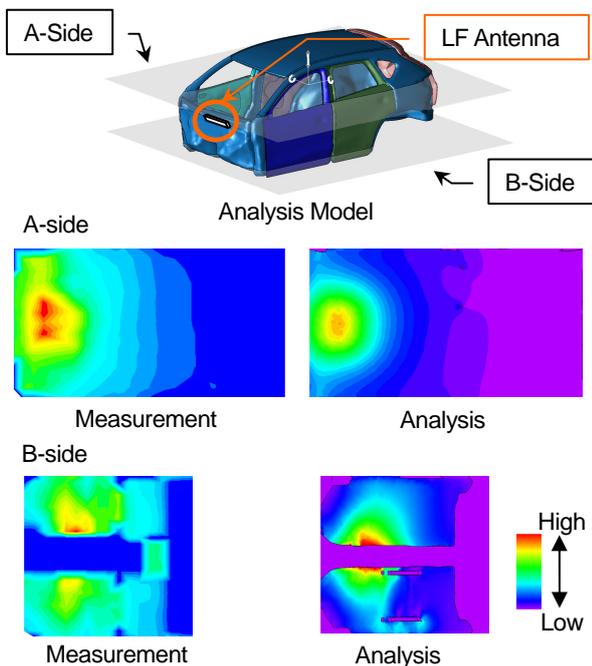


Fig.13 Comparison of Magnetic Field for Measurement and Analysis Value

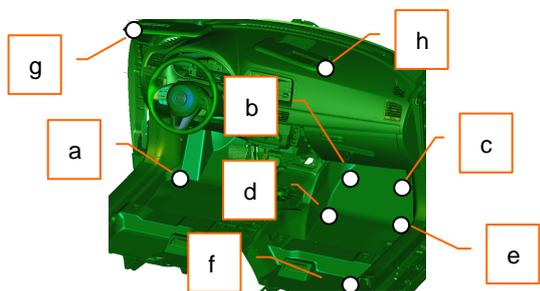


Fig.14 Measurement Point

Table 3 Comparison of Measurement and Analysis Value

Point	Measurement [nTpp]	CAE [nTpp]	Error [dB]	Error [mm]	Absolute Error [mm]	
Floor	a	80.0	73.2	0.8	-30	30
	b	86.5	94.7	0.8	50	50
	c	42.4	37.6	1.0	-40	40
	d	76.6	78.0	0.2	50	50
	e	63.9	54.7	1.4	-30	30
	f	47.3	36.5	2.3	-40	40
Visor	g	48.6	48.8	0.0	0	0
	h	52.5	52.8	0.0	0	0
Average→					30	

3.3 その他システムへの応用

磁界通信を応用したシステムの事例として、キーに電池なしで信号の送受信可能なトランスポンダを内蔵し、あらかじめ登録されたキー以外ではエンジン始動ができない、イモビライザ（盗難防止）システムが挙げられる。Fig.15 に示すように、CX-5 のイモビライザシステムは、プッシュボタンスタートのスイッチ内に、コイルアンテナがレイアウトされており、キーが電池切れなどの際、登録されたキーの裏面

がプッシュボタンスタートに触れることで、コイルアンテナとトランスポンダ間で認証通信を無線で行い、イモビライザシステムが解除され、エンジン始動を可能とする。

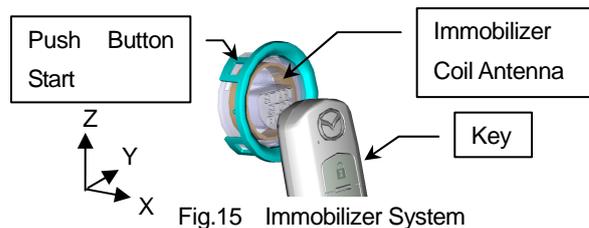


Fig.15 Immobilizer System

イモビライザの通信可能距離の測定結果と、本解析手法で計算した結果を Fig.16 に示す。測定結果と計算結果はほぼ一致し、他の磁界通信を用いたシステムの通信性能も、検証可能であることが判明した。今後更に、無線充電システムの充電効率予測などの解析が、机上検証可能となると考える。

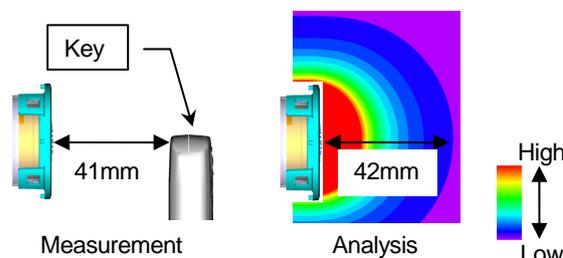


Fig.16 Communication Performance of Immobilizer System

4. おわりに

本技術開発により、アドバンストキーレスの検知エリアを机上で検証する技術を開発し、他の磁界通信を用いたシステムへの適用も可能であることを明らかにした。これにより、試作車レス開発が実現可能となってきた。

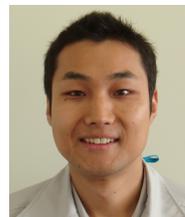
著者



吉田 俊秀



浜田 康



沼元 正樹



稲田 貴裕