

伝導エミッションノイズ自動計測装置の開発

Development of Automatic Measurement System for Conducted Emissions

新井 宏之 *Hiroyuki ARAI*
田中 稔泰 *Toshiyasu TANAKA*
早川 恭弘 *Yasuhiro HAYAKAWA*
原 太一 *Taichi HARA*
花本 秀夫 *Hideo HANAMOTO*



要旨

近年、自動車は安全・快適・環境性能の向上を追求するため、搭載される電子制御機器（以下、ECU）は急速に高機能・高性能・高集積化している。また、GPSやETCをはじめとする無線通信の増加、ECU間を接続する通信ネットワーク（LAN）など技術革新はとどまることがない。

こうした車両技術の進化に伴い、EMC（電磁環境適合性）性能の確保は自動車業界全体において重要な課題となっている。一方、自動車メーカーは車両でのEMC性能確保を目的に、サプライヤに対しECU毎の確認試験を要求しており、評価に関わる工数は年々増加傾向にある。

このような環境のなか、当社では工数増の抑制と製品開発でのEMC品質確保を目的に、07年度よりEMC評価法開発を推進している。今回、測定頻度が高く、多くの工数を要している「伝導エミッション測定」について工数の削減を目的に現在の測定法に変わる測定装置を開発した。その取り組みについて述べる。

Abstract

Recently, in pursuit of improving safety, comfort, and environmental-friendliness, electronic control units (ECUs) in vehicles have been rapidly enhancing their higher function, performance and integration. Wireless communications with GPS, ETC, etc. have been growing and technical innovation such as communication networks (LAN) linking those ECUs will never remain the same.

As the technologies for vehicles progress, EMC (electromagnetic compatibility) performance has become an important challenge that the car industry needs to address. Accordingly, car manufacturers request their suppliers to test each ECU for confirmation to ensure EMC performance, and thus man-hours for evaluation are increasing every year.

In these circumstances, in order to curb the increase in evaluation man-hours and ensure EMC quality in product development, FUJITSU TEN has promoted development of EMC evaluation methods since fiscal year 2007. We developed, for the purpose of reducing the man-hours, the system to measure "conducted emissions" which is frequently measured and requires many man-hours in evaluation. This document describes our development of the measurement system that may replace the conventional method.

1

はじめに

1.1 自動車のEMC環境について

近年、カーエレクトロニクスの発展に伴い、高級車においては、ECUの数は約60種を超え、ハーネス回路数は約2000種に拡大、さらにラジオ・TVなどの受信機に加え、微弱電波応用技術の採用により、受信機の種類は20種以上におよんでいる。

今後はエコカーの普及、ユビキタスITS社会の到来により車々間通信や路車間通信技術の発展が具体化しており、電磁波の相互干渉が懸念され、EMCへの取組みは高まるばかりである。

1.2 評価技術開発への取り組み

当社では、自動車のEMC環境の変化に伴い、以下の方針のもと評価法開発を推進している。

- ・市場／車両の電磁環境の変化を的確に把握し、ECU開発に同期した評価法の開発を推進
- ・効率的で確実なEMC評価環境の構築
- ・ローコスト評価法の開発

1.3 装置開発の背景

EMC試験には、ECUからの不要輻射（ノイズ）を測定する「エミッション試験」と電磁波を照射しECUの耐性を確認する「イミュニティ試験」がある。今回はエミッション試験のうち、現状の評価において多くの工数と手間のかかっている伝導エミッション試験について新たな測定法を開発した。

伝導エミッションとは、ECU内部で発生したノイズがコネクタを通じて接続先の回路に影響を与える、あるいはワイヤハーネス（以下、W/H）を通じ放射し、受信機妨害の原因となるノイズの振舞いをいう。

伝導エミッション試験の現状の測定時間は、エンジン制御ECUで28時間、ナビゲーションシステムでは67時間と多くの測定時間を要している。これは、両者ともコネクタピンが100本以上存在しており、このピン1本1本に対し測定していることが原因となっている。

1.4 伝導エミッションの受信機への影響

伝導エミッション評価について解説する。

ECUから発生した伝導ノイズは、接続されたW/Hから妨害波を放射し、受信機に妨害を与える（図1）。これが、伝導エミッションによるノイズ干渉の仕組みである。

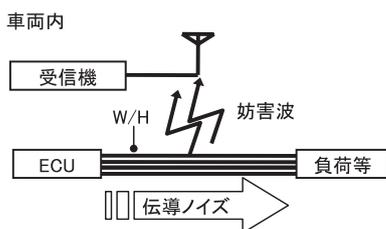


図1 ノイズ干渉の仕組み

Fig.1 Mechanism of Noise Interference

2

開発のねらい

2.1 現行測定法の問題と課題

国際基準であるIEC CISPR25（車両、小型船舶および内燃機関－無線妨害特性－搭載受信機の保護のための限度値および測定方法）で示される伝導エミッション測定には二つの方法があり、いずれもEMIレシーバやスペクトラムアナライザを基本測定器としている。測定方法は、擬似回路網を用いて電源線に重畳したノイズを測定する「電圧法」と信号線および電源線W/Hに電流プローブをクランプして測定する「電流プローブ法」に分類される。いずれも、測定帯域は100kHz～108MHz程度を測定範囲とし、W/H 1本毎に擬似回路網を接続又は電流プローブをクランプするため、多くの時間を要する。現行測定法の問題点と課題について表1に示す。

表1 問題点と課題

Table 1 Problems and Objectives

	問題点	課題
①	W/H 1本1本を測定 ⇒段取り作業が多い 実測定時間が長い	段取り作業の削減 測定時間の短縮
②	電源線に限定される (電圧法)	信号線に対する電圧測定 の実現
③	測定周波数帯域が狭い (～108MHz)	測定周波数の拡大 (～1GHz)

2.2 新たな方法のねらいと目標

課題を解決するにあたり、本測定法でのねらいと目標を以下に示す。

- ①測定時間の短縮：ノイズ検出技術を確立し、装置を自動化する（表2）

表2 評価工数削減目標

Table 2 Reduction Targets of Evaluation Man-hours

ECU	評価法	測定時間 (H)	詳細	
			W/H 1本あたりの測定時間 (S)	付帯作業時間 (H)
エンジン制御 コンピュータ	現行	27.8	280.6	15.3
	開発	5.7	37.3	4.0
	目標	▲ 22.1		
ナビゲーション システム	現行	66.9	1970.0	10.6
	開発	8.2	146.7	4.0
	目標	▲ 58.7		

- ②被測定信号の制約解除：電源線、信号線を問わず全てのW/Hを測定できる装置とする

- ③測定周波数の拡大：1GHzまで測定可能な装置とする

3

開発体制

今回の開発は、国立大学法人横浜国立大学とマイクロウェーブ ファクトリー株式会社および当社の三者で開発

体制を構築した。各社の役割は図2に示すように、横浜国立大学にて理論解析とシミュレーションを、マイクロウェーブ ファクトリーにて装置のハード/ソフトの具体化を行い、当社は装置仕様の明確化、測定条件の選定を行った。

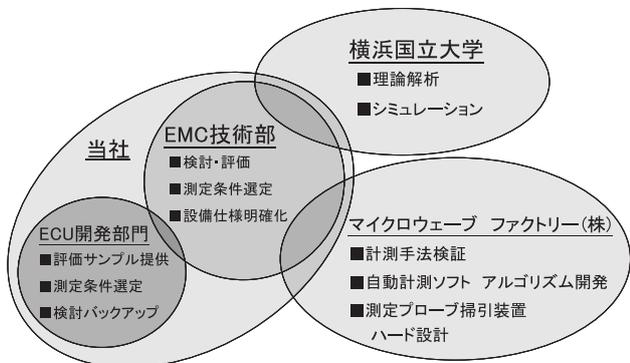


図2 開発体制
Fig.2 Cooperative Development

4 ノイズ検出手法

4.1 測定理論

本装置は非接触型のアンテナにより各W/H上での電圧を測定し、各W/Hのノイズ電流を導出する。このとき、アンテナに誘起される電圧は、アンテナ下のW/Hだけではなく、当然その左右のW/Hからも干渉を受けることとなる。

本項では、この相互干渉を考慮し、各W/Hのノイズ電流を導出する手法について理論を述べる。

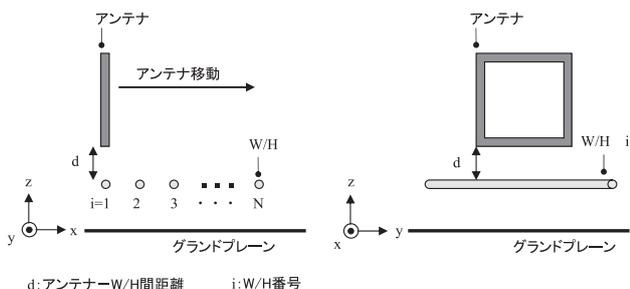


図3 ノイズ検出測定システム
Fig.3 Noise Detection and Measurement System

図3のようなノイズ検出システムを考えた場合、W/H i でのノイズ電流 I_i は、W/H i 上で測定された電圧 E_0^i とアンテナ-W/H間の相互インダクタンス M_{0i}^i を考慮し、式 (1) の方程式を解くことにより導出できる。

$$\begin{bmatrix} E_0^1 \\ E_0^2 \\ \vdots \\ E_0^N \end{bmatrix} = -j2\pi f \begin{bmatrix} M_{01}^1 & M_{02}^1 & \cdots & M_{0N}^1 \\ M_{01}^2 & M_{02}^2 & & M_{0N}^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{01}^N & M_{02}^N & \cdots & M_{0N}^N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで、 M_{0i}^j はアンテナがW/H j 上に位置したときのアンテナとW/H i 間の相互インダクタンスである。

このとき相互インダクタンス M_{0i}^j は、ノイマンの公式により、式 (2) のように計算することができる。

$$M_{ij} = \frac{\mu_0}{4\pi} \iint \frac{ds_i ds_j}{d} \quad (2)$$

4.2 理論検証

本項では、前項の理論に従いノイズの導出を行った結果について述べる。

4.2.1 検証内容

検証では、図4に示すように信号発生器 (以下、SG) により各W/Hへ異なるレベルの信号を入力し、各W/H上のアンテナ誘起電圧を測定、この値からそれぞれのW/Hにおけるノイズ電流を算出した。このとき、W/H数 N は $N=5$ とし、各W/Hへの入力値は表3に示す値とした。

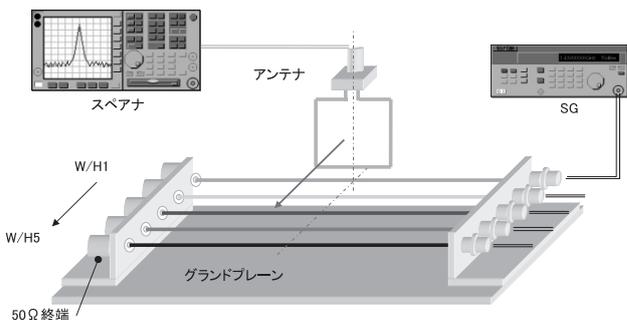


図4 測定環境
Fig.4 Measurement Environment

表3 各W/Hへの入力値
Table 3 Value Input to Each W/H

W/H番号	1	2	3	4	5
入力値 [dB]	0	-6	-20	-10	0

測定周波数: 100kHz、20MHz、300MHz、500MHz、700MHz、1000MHz

今回、インダクタンス行列を理論式 (2) から算出した場合とキャリブレーションから算出した場合の二通りの方法で算出し、この行列式を用いてそれぞれの線路に流れるノイズ電流を計算した。

ここで、キャリブレーションによるインダクタンス行列の算出について以下に解説する。

W/H 1のみ信号を入力 ($I_1=1$) し、その他のW/Hを $I_j=0$ ($j \neq 1$) とする。また、このときアンテナにより測定された値を V_j とすると、式 (1) のインダクタンス行列の成分 M_{01}^j は $M_{01}^j = V_j / I_1$ により得られる。これをそれぞれのW/Hについて繰り返すことでインダクタンス行列を得る。

4.2.2 検証結果

4.2.1の条件でのノイズ電流算出結果を表4、5にそれぞれ示す。なお、算出データはW/H 1もしくは5のいずれか高い値を基準 (0dB) とした。

この結果より、どちらの方法においても、ある程度精度の高い結果（6dB以内）を導くことができることを確認した。しかし、レベルの低いノイズに関しては検出の精度が低下してしまうことが確認された。これは、周囲のW/Hからの放射を測定ケーブルが受信し、測定結果に影響を与えてしまうことが原因と考えられる。そこで、今回はアンテナに図5のようにフェライトコアを設け、ケーブルによる影響の改善を図った。

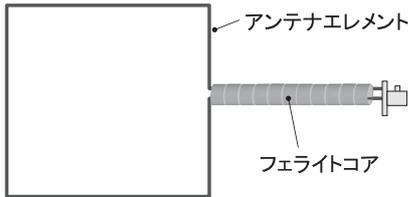


図5 アンテナ構造
Fig.5 Antenna Structure

表4 ノイズ算出結果（理論式の場合）

Table 4 Noise Calculation Results (Theoretical Formula)

W/H番号	1	2	3	4	5
入力値 [dB]	0	-6	-20	-10	0
100kHz	0	-6.5	-16.1	-12.3	0
20MHz	-1.3	-6.2	-14.2	-10.3	0
300MHz	0	-4.8	-13.8*	-8.5	-0.2
500MHz	0	-11.5	-16.3	-12.9	-0.6
700MHz	-0.8	-10	-21	-20.1*	0
1000MHz	0	-21.6*	-24.1	-17.5*	-3.7

表5 ノイズ算出結果（キャリブレーションの場合）

Table 5 Noise Calculation Results (Calibration)

W/H番号	1	2	3	4	5
入力値 [dB]	0	-6	-20	-10	0
100kHz	-2.9	-8.1	-18.9	-13.1	0
20MHz	-3	-8	-27.3*	-13.6	0
300MHz	-0.3	-4.5	-18.7	-9.2	0
500MHz	-1.3	-10.8	-17.9	-12.9	0
700MHz	-3.2	-8.3	-13*	-12	0
1000MHz	0	-5.7	-8.3*	-6.3	-0.9

注(*) 入力値との差分が6dB以上あるデータ

5

装置の開発

5.1 管理パラメータの見極め

再現性のよい測定を行えるよう、品質工学を適用し、①W/H高さ、②アンテナ-W/H間距離に対し仕様の見極めを行った（図6）。

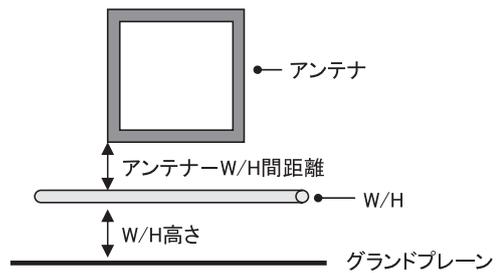


図6 パラメータ管理
Fig.6 Parameter Control

最終仕様は、この結果と各開発ステップで行った検証結果を踏まえて決定した。

以下にそれぞれの検討結果を示す。また、表6に品質工学で用いた制御因子、図7に要因効果図を示す。

表6 制御因子

Table 6 Control Factors

	因子名	水準1	水準2	水準3
A	プリアンプ位置	アンテナ	測定器	—
B	アンテナ高さ	5mm	10mm	20mm
C	アッテネータ位置	アンテナ	測定器	中間
D	アッテネータ	3dB	6dB	10dB
E	W/H高さ	15mm	30mm	50mm
F	アンテナ位置	中心	入力側	出力側
G	GNDプレーン幅	500mm	150mm	300mm
H	ケーブル長	5000mm	7000mm	8500mm

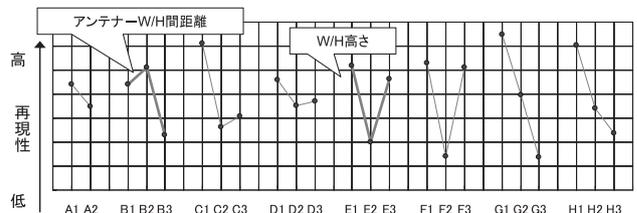


図7 要因効果図
Fig.7 Factor-Effect Chart

①W/H高さ

W/H高さは、当初、国際規格などで採用されている50mmに設定することで検討を進めていたが、品質工学の結果からグランドプレーンに近接したときのほうが安定したデータが取得できる結果となった。また、検証においても、グランドプレーンから距離が離れてしまうと、グランドプレーンとW/H間の結合からノイズがまわり込み、試験対象製品からの放射ノイズの影響を受けやすくなることがわかったため、限りなくグランドプレーンに近づける構造とした。

②アンテナ-W/H間距離

品質工学の結果から、距離10mmの場合が最も再現性があることを確認した。しかしながら、アンテナの感度は距離が離れることにより低下してしまう。これを踏まえ、よ

り距離が近く10mmの場合とほぼ同等の再現性のある5mmとした。

5.2 仕様

表7に装置仕様を示す。また、本装置において特徴的な部分について選定の背景を述べる。

表7 装置仕様
Table 7 Specifications of System

アンテナ	方形ループ 100kHz~140MHz: 200 × 200mm 140MHz~1GHz: 25 × 25mm
アンテナ移動時間	最大20mm/sec
周波数帯域	100kHz~1GHz
測定器	スペクトラムアナライザ
プリアンプ	利得50dB
被測定W/H数	最大50本(間隔: 10mm)
キャリブレーション治具	W/H 5本 50Ω線路
グランドプレーン(台)	L2000 × W1000 × t5 mm (L2000 × W1000 × H800)
シールドカバー	L745 × W1000 × H600 mm

5.2.1 構造

本装置は、製品からの放射ノイズの影響を受けないように、また、シールドルームでない一般的な部屋においても周辺ノイズの影響を受けず測定が実現できるように、アンテナ、測定W/Hおよびキャリブレーション治具をシールドカバー内に取めた。これにより、伝導ノイズのみを正確に測定でき、また、シールドルームがない環境でも測定が可能となる。

ベースとなるグランドプレーン台は折りたたみ構造を採用し、使用しない場合には折りたたむことにより周囲のスペースを確保でき、設備の移動の際も従来に比べ容易に行えるものとした。

5.2.2 計測部

本装置の受信アンテナは、受信感度と再現性の関係から2種類の大きさの方形微小ループアンテナを採用した。さらに、平行に配置する被測定W/Hの両側にフェライトコアをクランプすることで、大きな共振点の発生を最小限におさえ、より平坦な周波数特性とした(図8)。各アンテナの受持つ測定周波数は表7に示す通りである。なお、図8に示す1種類の場合とは、200×200mmの方形アンテナを採用した場合である。

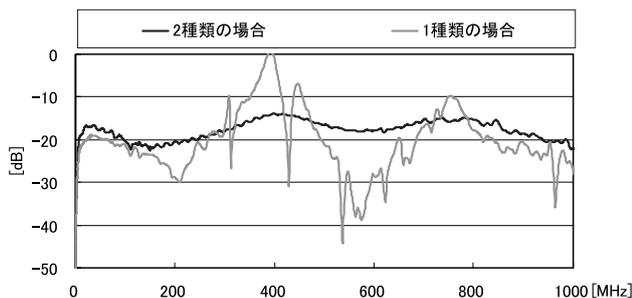


図8 周波数特性の比較

Fig.8 Comparison of Frequency Characteristics

次に、測定できるW/Hの本数は、一度の測定でより多くのW/Hが測定できるように、最大で50本とした。

また、このデータを基に特定のW/Hに対し4章で示した解析を適用できるW/H数は5本とした。これは、10mm間隔でW/Hを並べた場合にノイズレベルの高いW/Hが左右へ与える影響を調査した結果、影響を受けるのは2~3本隣のW/Hまでであったためであり、これ以上離れたW/Hへの干渉は少ない。

5.3 測定手順

本装置では、最大50本のW/Hを一度に測定し、これらのW/H上で測定したデータにアンテナファクタを加えることで、それぞれのW/Hに発生するおおよそのノイズレベルを把握することができる。図9に測定プロセスを示す。

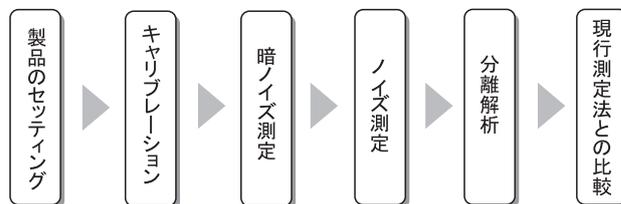


図9 測定プロセス

Fig.9 Measurement Process

「ノイズ測定」の結果は、各W/Hに隣接したW/Hのノイズ影響を受けたものであり、より正確なノイズレベルを把握するため「分離解析」のプロセスを加えた。「分離解析」は、全測定周波数帯域、全W/Hを対象に実施するには、解析規模が多く解析時間を要することから、ノイズが限度値を超えるような特定のW/Hについて隣接したW/H(左右2本)を解析対象として精度の高いノイズレベルが把握できるものとした。

また、「現行測定法との比較」のプロセスを加えるため、現行測定法との差分補正機能を設け、測定結果の相関性を持たせた。

6

検証結果と今後の課題

6.1 検証結果

本章では、擬似信号発生器(以下、コムジェネレータ)をもちいて測定を行い、装置としての妥当性を確認した結果について述べる。ここで、コムジェネレータとは発振器により一定間隔ごとの周波数成分を持つ信号を発生させることができる装置である。

今回、W/Hの引き回しなどによる影響をなくすため、5本のW/Hを平行に配置したキャリブレーション治具に擬似信号を入力し検証した。30MHzから1GHzの結果を示す。

6.1.1 測定結果

図10に実際の入力波形(以下、理論値)を示す。

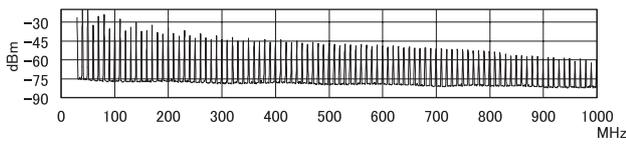


図10 理論値
Fig.10 Theoretical Values

図11 (a) ~ (e) にそれぞれのW/H上での測定結果を示す。この結果、入力したW/H 5に対して理論値とほぼ同じ結果を導くことができている。一方、信号が入力されていないW/H 5以外について信号が観測されている。特にW/H 4についてはこの影響が顕著に現れていることが確認できる。この解決策として「分離解析」を実施する。

ここで、理論値とレベルが異なるのは、アンテナファクタ補正前のデータのためである。

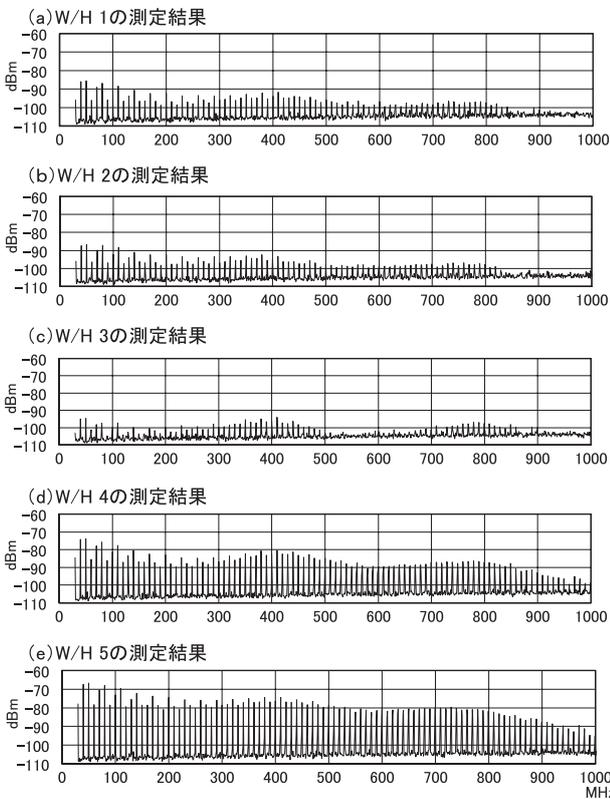


図11 実測値 (W/H 1~5)
Fig.11 Measured Values (W/H 1 to W/H 5)

6.1.2 分離解析結果

図12 (a) ~ (e) にそれぞれのW/H上での解析結果を示す。W/H 5以外での信号の観測が解析によって分離できていることが確認できる。また、W/H 5について理論値と解析結果では、ほぼ同等の結果を示している。

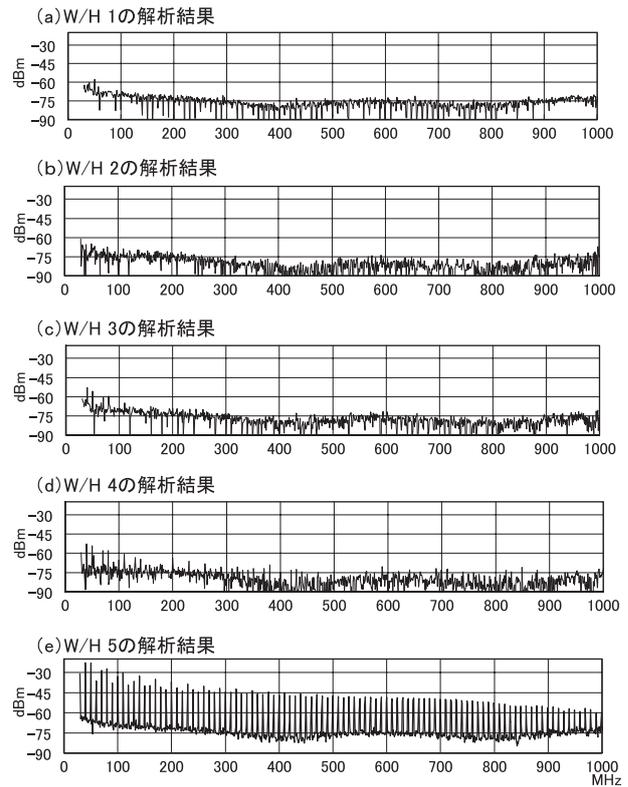


図12 解析結果 (W/H 1~5)
Fig.12 Analyzed Results (W/H 1 to W/H 5)

これらのデータから装置における測定から解析までの結果の妥当性を確認することができた。

6.1.3 現行測定法との比較

W/H 5について、現行測定法と比較した結果を図13に示す。現行測定法（電流プローブ法）は、グラウンドプレーンより50mmの高さで計測しており、開発した装置では20mmであることから測定環境の違いによって周波数特性に差がみられる。

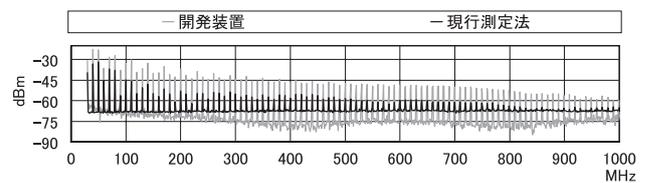


図13 現行測定法との比較結果
Fig.13 Comparison Results to Conventional Measurement Method

6.2 効果の確認

2.2 項のねらいと目標値について効果を示す。

- ①測定時間の短縮：自動測定により段取り作業の削減を実現させた。例えば、W/H 50本の測定を行った場合、現行測定法では電流プローブの付け替え時間が約15分（900秒）であるが、本装置の測定ではアンテナの移動時間を30秒程度に抑え約30分の1を実現した。
- ②被測定信号の制約解除：非接触型の方形ループアンテナを採用することで信号種を問わない測定を実現した。

- ③測定周波数の拡大：アンテナを2種類もちいることで100kHzから1GHzまでの測定を実現した。
- ④その他：計測部をシールド化し、周辺ノイズの影響を受けない装置を実現し、シールドルームではない一般の部屋での測定を可能にした。

6.3 今後の展開

実用化の目処付けは完了した。今後、安定した測定条件を確保できるよう、製品、W/Hおよび負荷のセッティング条件などについて運用面のルール化を行う。また、ECUでの試行評価を重ね、製品設計段階での検討評価に活用できる装置として運用を開始していく。

参考文献

- 1) Hiroyuki Arai : Wire Harness Current Measurement System by Square Loop Antenna, ICONIC, (2009)
- 2) CISPR 25 (第3版) : 車両, 小型船舶および内燃機関 - 無線妨害特性 - 搭載受信機の保護のための限度値および測定方法, IEC (国際電気標準会議), (2008)
- 3) 山田直平 : 電気磁気学, 電気学会大学講座, (2001)

7

おわりに

今回の開発は製品設計におけるEMC品質の早期確保の見極めを従来の評価法に比べ、安価な設備投資で、より試験工数を短縮した形で実現できる環境を構築できるものとなった。

最後に本装置の開発にご協力頂いた関係者の方に厚く感謝の意を表します。

社外執筆者紹介



新井 宏之
(あらい ひろゆき)

1982年 東工大・工・電気電子助手、1989横浜国大講師、1991同助教授、現在、横浜国大大学院・教授。電磁波加熱用マイクロ波回路、移動体通信用アンテナおよび電波伝搬、EMC/EMIなどの研究に従事。工博。



田中 稔泰
(たなか としやす)

2003年 マイクロウェーブ ファクトリー株式会社を設立。以来、電波暗室・シールドルームなどの設計施工、高周波検査装置の設計など電波関連業務全般に従事。現在、代表取締役社長。

筆者紹介



早川 恭弘
(はやかわ やすひろ)

1984年入社。以来、中津川工場製造関連業務を経て1998年より中津川テクノセンターにて社内EMC試験設備の導入、評価技術開発に従事。現在、共通技術本部EMC技術部に在籍。



原 太一
(はら たいち)

2005年入社。以来、EMC評価技術開発に従事。現在、共通技術本部EMC技術部に在籍。



花本 秀夫
(はなもと ひでお)

1978年入社。以来、自動車用電子機器の開発、品質管理、試作を経て、事業企画業務に従事。現在、共通技術本部EMC技術部長兼 中津川テクノセンター長。