ラディエーションプローブの特性と応用について

2021 年 9 月
株式会社ノイズ研究所
商品開発部　石田 武志

1．背景と概要

インパルスノイズ試験器 INS シリーズは、1970 年代の EMC 黎明期のころから電源系ノイズを耐性評価する試験器として用いられてきた。現在の IEC 61000-4 シリーズなどの国際規格が制定される以前の話で、電機メーカーが自主的に試験基準を定め、製品の品質向上に努めていた。ノイズ耐性評価は、国際規格、業界基準の限度値をクリアすることで、一定レベルの社会の安心安全を確保する目的と、市場で発生した不具合現象を確認・再現させて製品の品質改善を向上させる目的がある。インパルスノイズ試験は、基本的に電源系にノイズを注入して製品のノイズ耐性を確認することが主流であるが、ノイズ耐性試験としては、信号線や筐体、また内部の回路基板から入るノイズもある。ここで紹介するラディエーションプローブは、後者の製品やプリント基板の近傍磁界による誤動作箇所を特定する目的で製品化された。当初は、直径 5 cm のサイズだけであったが、その後、直径 30 cm までのものをリリースしている。このラディエーションプローブによるノイズ評価法は、製品の筐体、信号線、電源線に電磁界を与える放射系のノイズ試験になるが、IEC 61000-4-3 の様な遠方界の電磁界ではなく、製品の極近傍で印加となるため、ノイズに弱い部分を特定する目的と、近傍印加による強磁界を与える目的がある。

表 1　ラディエーションプローブの主な仕様とラインナップ

項目	仕様／性能	
最大入力パルス電圧	4000 V	
入力パルス幅	50 ns～1000 ns	
ループ径	01-00006A: Φ50 mm	01-00007A: Φ75 mm
	01-00008A: Φ100 mm	01-00009A: Φ150 mm
	01-00010A: Φ200 mm	01-00031A: Φ250 mm
	01-00050A: Φ300 mm	
ケーブル長	2 m	
質量	約 180 g～220 g	
終端抵抗	内蔵なし	

Copyright © Noise Laboratory Co.,Ltd

図 1 ラディエーションプローブ

2. 構造

先端のループは、太さ Φ6 mm の銅パイプの 1 ターン構造になっていて、同軸ケーブルの HOT とグラウンドが両端に接続された単純な構造となっている。ループの大きさは、それぞれ仕様の直径（パイプの中心径）となっている。直流の見方では短絡状態であるが、高周波パルスであるインパルスノイズ波形では、インピーダンスのある電気回路となる。試験を実施するときは、インパルスノイズ試験器の出力を 50 Ω 終端して接続する。

3. 電流及び発生磁界

パルス発生源となるインパルスノイズ試験器は、2021 年以降、水俣条約により水銀リレーを使用した従来からあるインパルスノイズ試験器が販売できなり、ノイズ研究所では、水銀リレーに代わる半導体リレー方式のインパルスノイズ試験器をリリースしている。出力するインパルスノイズにもそれぞれ特徴があり、ラディエーションプローブから発生する磁界にも違いがでる。本報告では、両方の発生器の違いも含めて報告する。

水銀リレー方式と半導体リレー方式のインパルスノイズ発生器の主な仕様を表 2 に示す。

表 2 水銀リレー方式と半導体リレー方式のインパルスノイズ試験器の違い

項目	水銀リレー方式	半導体リレー方式	備考
パルス幅	50 ns～1000 ns	50 ns～1000 ns	
出力電圧	4 kV max	4 kV max	
立ち上がり時間	1 ns 以下	3 ns 以下	
立ち下り時間	パルス幅に依存	基本的に一定	規定なし

ラディエーションプローブは各種の大きさがあるが、代表として 5 cm (01-00006A)及び 20 cm (01-00010A)のモデルで特性を比較した。

Copyright © Noise Laboratory Co.,Ltd

3.1 電流測定

ループに流れるインパルスノイズのパルス電流を測定した。ループに貫通タイプの電流プローブを取り付けて電流波形を観測した。インパルスノイズ試験器は、パルス出力を終端抵抗(50Ω 系)で終端したものをラディエーションプローブに接続している(図 2)。

なお電流プローブの周波数帯域の上限は 1 GHz となっている。インパルスノイズ試験器として水銀リレー方式は、INS-4040 を用い、半導体リレー方式は、INS-S220 をそれぞれ用いた。インパルスノイズ試験器の出力電圧は、+1 kV の設定とし、50 ns, 100 ns, 200ns、400 ns、1000 ns の各パルス幅で測定した。

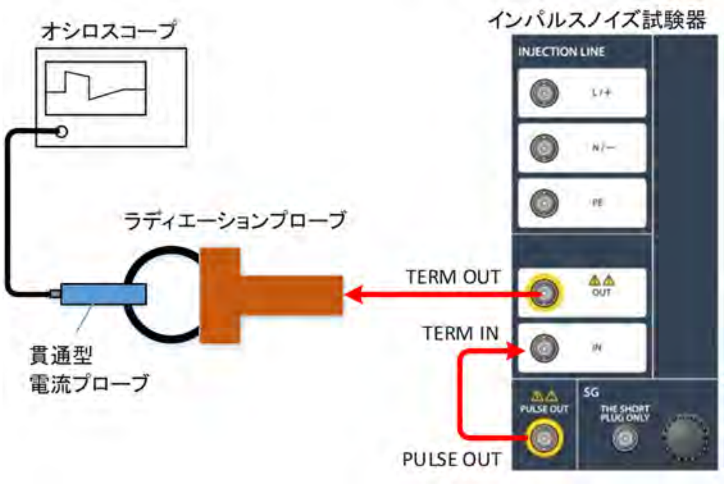


図 2 ラディエーションプローブの接続と電流測定

1) 水銀リレー方式のインパルスノイズ試験器

水銀リレー方式のインパルスノイズ試験器を用いた Φ5 cm ラディエーションプローブの電流波形を図 3 に、Φ20 cm を図 4 にそれぞれに示す。

水銀リレー方式のインパルスノイズ試験器では、電流波形が減衰振動波となっている。右の時間軸を拡大した電流波形を見ると、水色の波形が 1000 ns パルス幅のインパルスを印加したときのもので、1 μs の半周期で正極、負極を繰り返していることが分かる。他のパルスも設定したパルス幅で振動が発生している。これは、インパルスノイズの出力インピーダンスとラディエーションプローブのインピーダンスが一致していないことから反射が発生し、そのエネルギーがインパルスノイズ試験器の同軸ケーブルに戻って充電し、また放電する動作を繰り返すことによって発生している。

縦軸は、電流値(A)であり、Φ5 cm の方が僅かに高い電流値になっている。

Copyright © Noise Laboratory Co.,Ltd

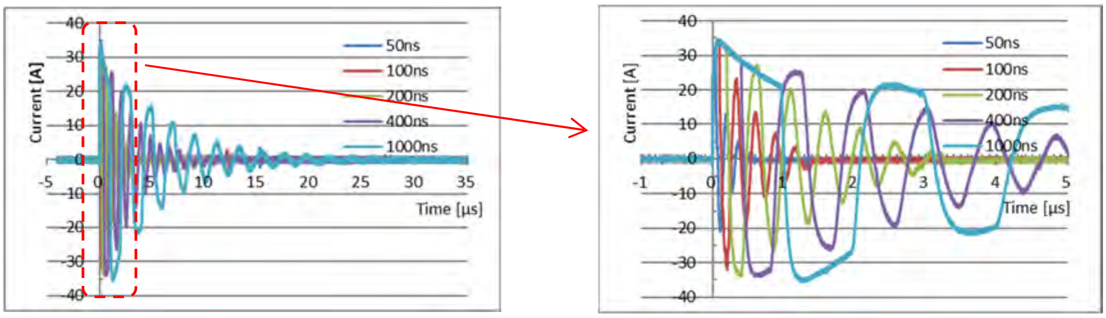


図 3　Φ5 cm ラディエーションプローブの接続と電流測定（水銀リレー）

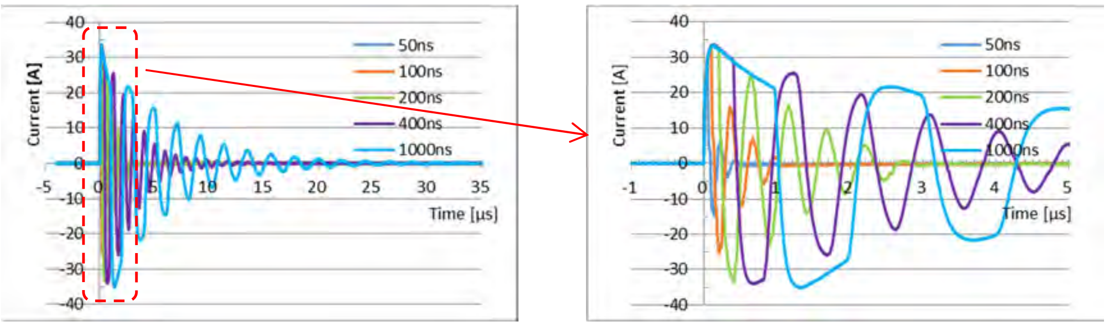


図 4　Φ20 cm ラディエーションプローブの接続と電流測定（水銀リレー）

2）半導体リレー方式のインパルスノイズ試験器

半導体リレー方式のインパルスノイズ試験器を用いた Φ5 cm と Φ20 cm の電流波形を図 5 及び図 6 にそれぞれ示す。半導体リレー方式の場合には、インパルスノイズのパルス幅がそのまま電流となっている。方形波波形の平坦部にサグが発生しているのと、立ち下り部のアンダーシュートが出ているが、すぐに収束している。半導体リレー方式は、指定のパルス幅を出力後、半導体スイッチをオフにしているので、アンダーシュートが発生した後に振動が発生せず収束する。Φ5 cm と Φ20 cm のラディエーションプローブのピーク電流は、それぞれ 36 A 程度で同じとなっている。

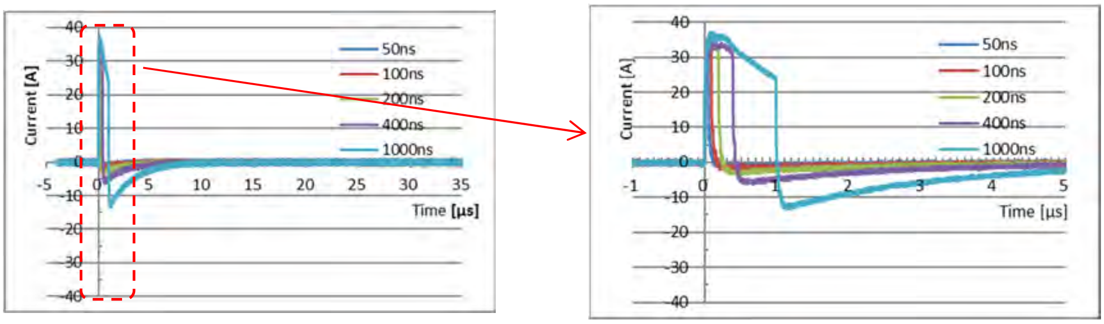


図 5　Φ5 cm ラディエーションプローブの接続と電流測定（半導体リレー）

Copyright © Noise Laboratory Co.,Ltd

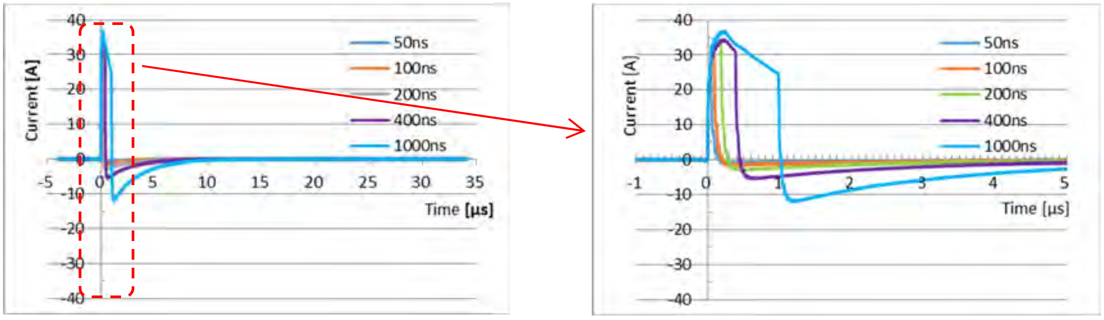


図 6　Φ20 cm ラディエーションプローブの接続と電流測定（半導体リレー）

3.2　磁界測定

3.2.1 先端部磁界測定

ラディエーションプローブの先端部を ETS-LINDGERN 7405-901 の磁界プローブを用いて測定した。この磁界プローブは、電界成分をキャンセルして磁界だけを検出する 5 cm のワンターンシールデッドループ構造で、EUT に印加する距離を想定して 1 cm の距離をおいて誘起電圧を測定した（図 7）。

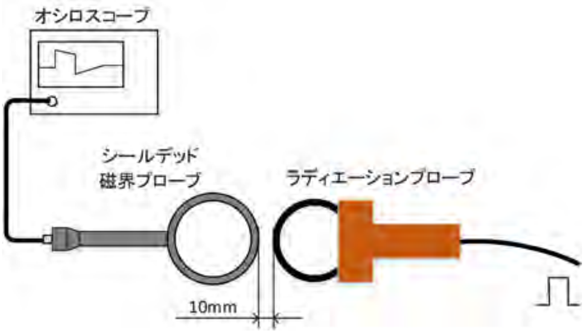


図 7　先端磁界の測定

1）水銀リレー方式のインパルスノイズ試験器

測定した誘導電圧の波形を図 8 及び図 9 に示す。グラフの縦軸は、この磁界プローブの出力をオシロスコープで 50 Ω 終端した測定電圧で相対値となる。図 8 の Φ5 cm のラディエーションプローブでは、インパルスの立ち上がりで、各パルス幅とも 10 V 弱のピーク電圧を検出し、その後若干の振動波形となって減衰している。各パルス幅とも立ち下りの時点で、マイナス方向のパルスが観測されている。このマイナス方向のパルスのパルス幅は、パルス幅が短いほど大きい振幅となっている。これは水銀リレー方式のインパルスノイズ試験器の立下り時間が、パルス幅の増加に伴って鈍化するために発生する現象で、発生磁界はラディエーションプローブの電流の微分波形となり、立ち下がりの鈍化で発生磁界の振幅が小さくなっている。

図 9 の Φ20 cm では 15 V 程度のピーク電圧が発生し、全体的に振幅が大きくなっている。また立ち上がりが急峻となっている。

Copyright © Noise Laboratory Co.,Ltd

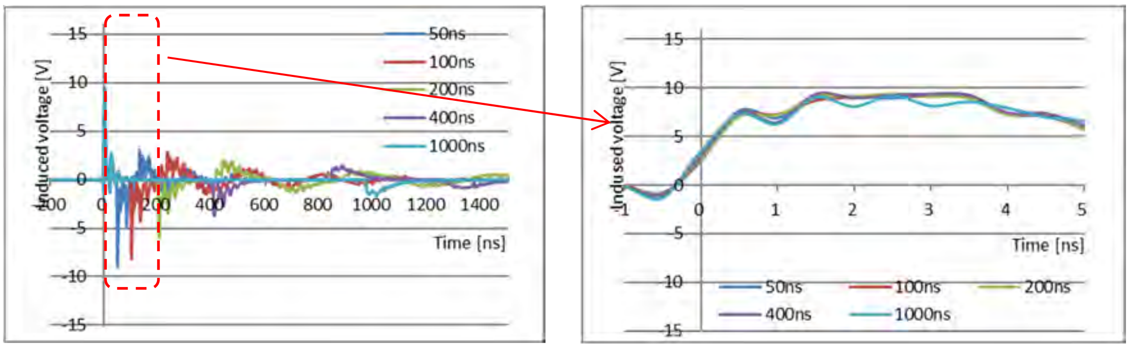


図 8　Φ5 cm ラディエーションプローブの先端磁界誘導電圧波形（水銀リレー）

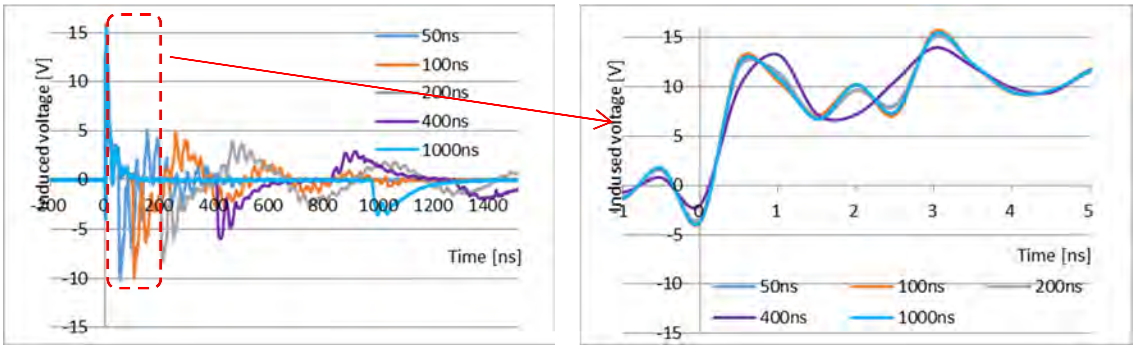


図 9　Φ20 cm ラディエーションプローブの先端磁界誘導電圧波形（水銀リレー）

2)　半導体リレー方式のインパルスノイズ試験器

半導体リレー方式の Φ5cm のラディエーションプローブの誘導電圧を図 10 に、Φ20cm を図 11 に示す。半導体リレー方式の特徴は、パルスの立ち下がり部分の振幅がパルス幅に依存せず一定の振幅になっている。これは半導体リレー方式の立ち下り特性が一定なことが理由となる。立ち上がり部のピーク振幅の傾向は、水銀リレー方式と似ている傾向となる。

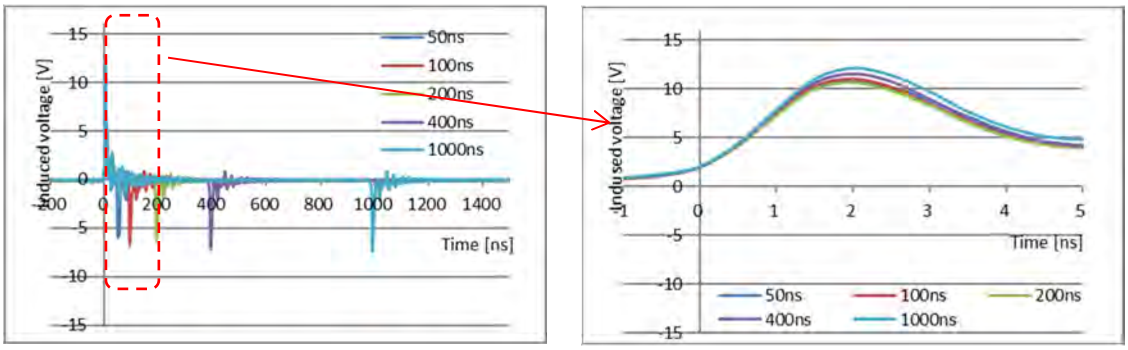


図 10　Φ5 cm ラディエーションプローブの先端磁界誘導電圧波形（半導体リレー）

Copyright © Noise Laboratory Co.,Ltd

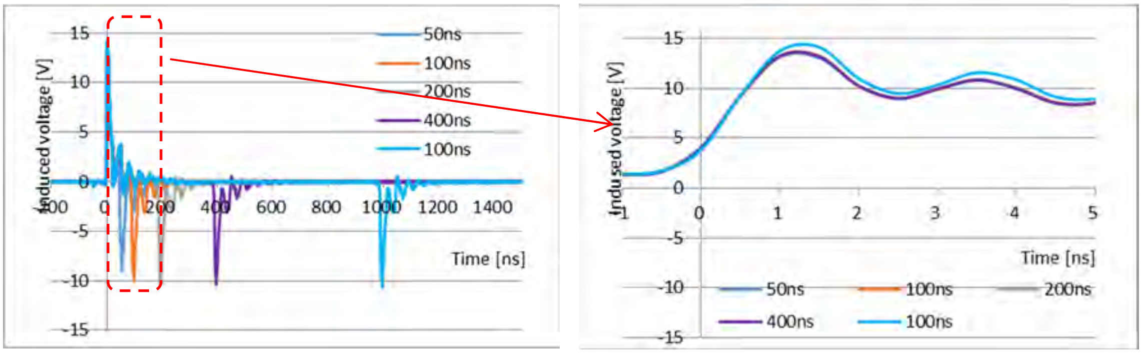


図 11　Φ20 cm ラディエーションプローブの先端磁界誘導電圧波形(半導体リレー)

3.3　面の磁界測定

同じ磁界プローブを用いて 1cm 離した平行した面での誘導電圧を測定した(図 12)。Φ20 cm のラディエーションプローブは、中心に磁界プローブを設置した。

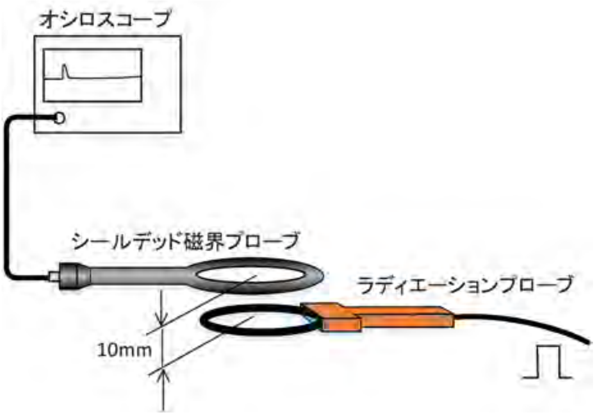


図 12　面磁界の測定

1) 水銀リレー方式のインパルスノイズ試験器

図 13 の Φ5 cm のラディエーションプローブでは 60 V のピークを示している。図 14 の Φ20cm のラディエーションプローブでは、28 V 程度と低くなっている。これは、Φ5 cm のラディエーションプローブでは発生磁界の全面を磁界プローブでカバーしているが、Φ20cm のラディエーションプローブでは、発生磁界の中央部の Φ5 cm の領域しか測定していないことが理由となる。

Copyright © Noise Laboratory Co.,Ltd

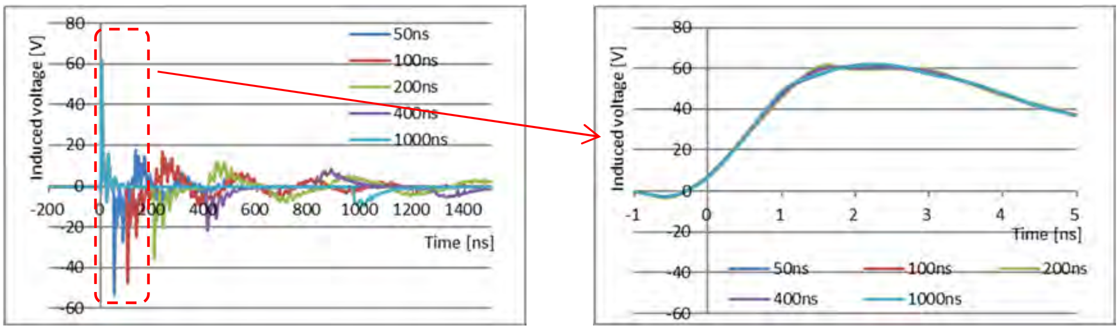


図 13　Φ5 cm ラディエーションプローブの面磁界の誘導電圧波形（水銀リレー）

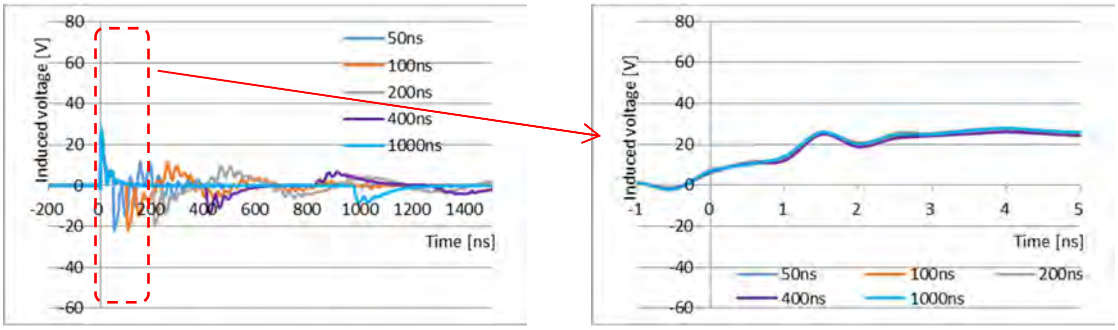


図 14　Φ20 cm のラディエーションプローブの面磁界の誘導電圧波形（水銀リレー）

2）半導体リレー方式のインパルスノイズ試験器

半導体リレー方式の Φ5 cm のラディエーションプローブの誘導電圧を図 15 に、20 cm のラディエーションプローブを図 16 に示す。Φ5 cm では、70 V 程度のピーク電圧となって水銀リレー方式より若干高い値となっている。Φ20 cm では、28 V と水銀リレー方式と同等となっている。

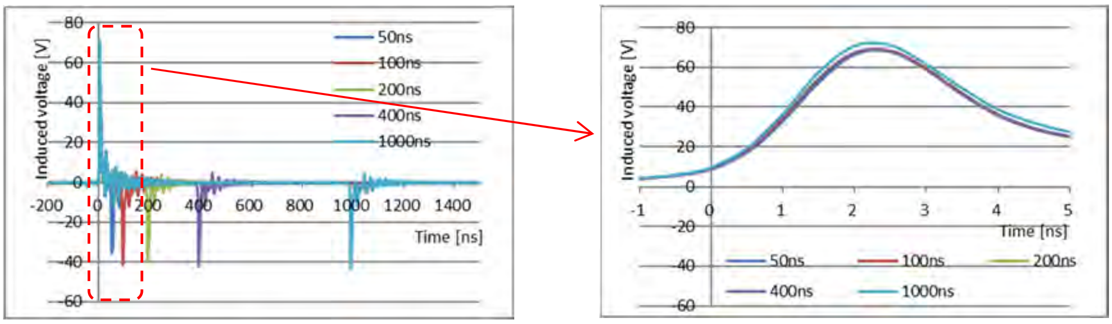


図 15　Φ5 cm ラディエーションプローブの面磁界の誘導電圧波形（半導体リレー）

Copyright © Noise Laboratory Co.,Ltd

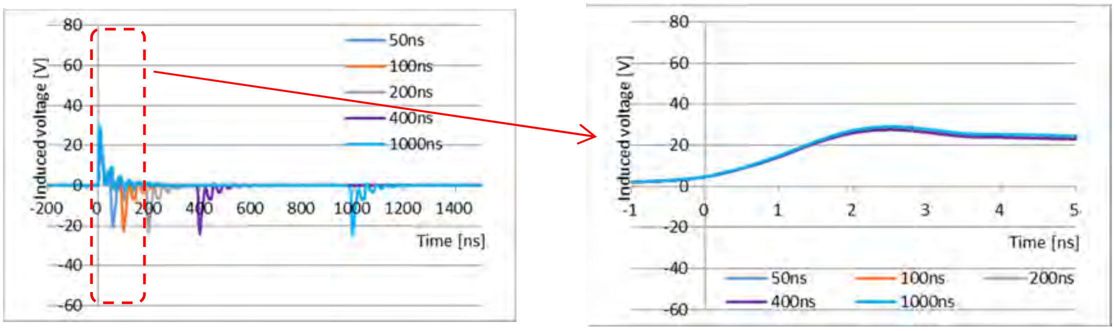


図 16　Φ20 cm のラディエーションプローブの面磁界の誘導電圧波形（半導体リレー）

3.4　磁界強度と磁界分布

ワンターンループの磁界強度をループに流れるピーク電流から算出してみた。図 3～図 6 のピーク電流は、およそ 35A 程度となり、Φ5cm の中心のピーク磁界は、約 350 A/m、Φ20 cm では約 87.5 A/m となる。

弊社空間電磁界可視化装置 EPS-02 を用いて Φ20 cm のラディエーションプローブの磁界分布を測定した。磁界プローブは、ETS-LINDGREN の 7405-902B（プローブループ径 3cm）を使用して測定した。インパルスノイズ試験器で発生するパルス磁界は、スペクトラムアナライザでは一度に検出できていないため、繰り返し測定を行い、マックスホールド状態でスペクトラムが一定レベルに飽和するまで測定した結果である。

図 17 にその測定結果を示す。測定条件は、測定周波数範囲 10 MHz～1 GHz、インパルスノイズのパルス幅 1000 ns、出力電圧 0.5 kV とした。磁界プローブは、ラディエーションプローブと平行にしているので、面に対して垂直の磁界を測定している。ループの内側の磁界は、均一で強度が強くループの外側は弱くなっている。周波数スペクトラムは、500 MHz 程度で減衰している。

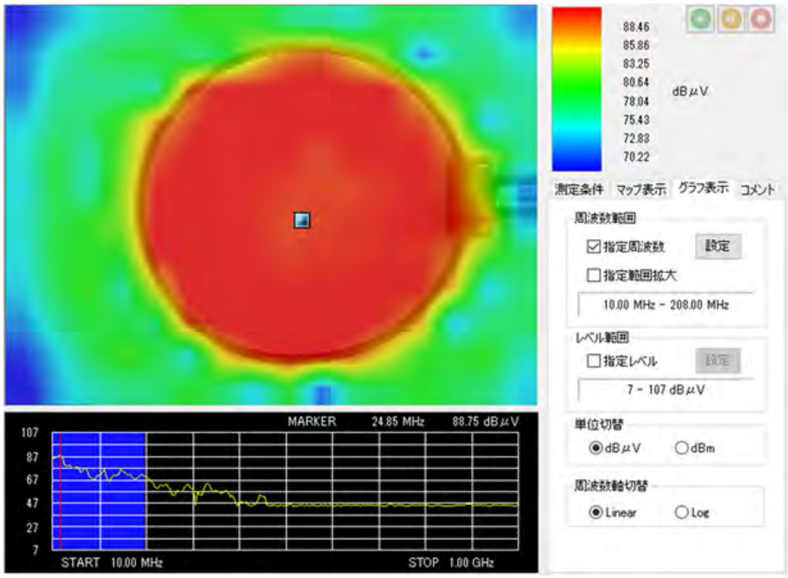


図 17　Φ20 cm ラディエーションプローブの磁界分布図

Copyright © Noise Laboratory Co.,Ltd

4. ラディエーションプローブのまとめ

ラディエーションプローブの概要とデータを示した。これまでのデータを次にまとめる。

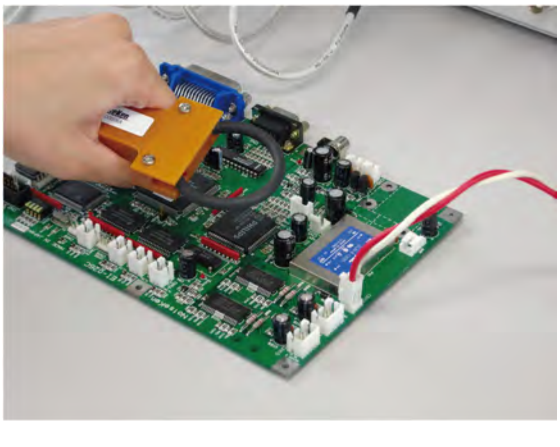
- 水銀リレー方式と半導体リレー方式のインパルスノイズ試験器では、発生磁界特性が異なる。
- インパルス波形の立ち上がり部に大きな磁界が発生し、立ち下がり部にも反対極性の磁界が発生する。インパルスノイズのパルス幅によって、この両極性の磁界の発生時間間隔が異なる。
- ラディエーションプローブの先端部よりループの面に大きな垂直磁界が発生する。
- 大きいループ面のラディエーションプローブは、全体に均一磁界を与えるが、小さいループ径は、強磁界を部分的に与える。
- 周波数スペクトラムは、500 MHz 程度が上限となる。

5. ラディエーションプローブを用いた試験

国際規格に従った基本的なノイズ試験をクリアした製品がフィールドで不具合が発生した場合、更に試験レベルを上げて再試験を実施し、再現ができればその試験の現象を元に原因検討することができるが、通常の試験では製品の弱い部分を特定することはできない。このためラディエーションプローブを用いて弱い部分を特定することが一つの目的となる。また筐体の中のプリント基板、ワイヤーハーネスなどの一部分に印加することで、回路の弱い部分を特定することができる。

もう一つの目的は、部分的に強磁界を発生することができることから、通常の放射イミュニティ試験では再現できない強い試験レベルの印加をして不具合再現を試みることである。近傍での印加なので、磁界の絶対強度など定量性は求められないが、高周波の強磁界を部分的に実施することができる。なおラディエーションプローブは、シールデッド構造ではないので、電界成分も発生している。

ここに示したラディエーションプローブの特性を把握したうえでトラブル対策に役立てることを期待する。



ラディエーションプローブの使用例

Copyright © Noise Laboratory Co.,Ltd