

帯電銅パイプから放射される電磁パルスの測定と解析

正員 馬 杉 正 男 (NTT)

非会員 村 川 一 雄 (NTT)

非会員 桑 原 伸 夫 (NTT)

非会員 雨 宮 不 二 雄 (NTT)

Measurement and Analysis of Electromagnetic Pulses Radiated from a Charged Copper Pipe

Masao Masugi, Member, Kazuo Murakawa, Non-member, Nobuo Kuwabara, Non-member, Fujio Amemiya, Non-member (NTT)

This paper describes experimental and analytical results of electromagnetic pulses from a charged copper pipe. Electromagnetic pulses from a copper pipe were measured by EMI type antennas (a loop antenna, a biconical antenna, and a double ridged guide antenna). In this paper, electromagnetic energy of the electromagnetic pulses was analyzed by integrating energy spectrums of three frequency domains (1~30 MHz, 30~300 MHz, 300~750 MHz).

As a result, the analysis shows that radiated electromagnetic energy by discharge events does not always increase in proportion to charging voltage. In addition, high speed touch discharges by charging voltage of 7 or 10 kV increase electromagnetic energy especially in the frequency region of 300~750 MHz.

キーワード：静電気放電，電磁障害，充電電圧，電磁パルス，帯電銅パイプ

1. ま え が き

近年のデジタル技術の普及と共に各種の電磁妨害波に起因する電磁障害が問題になっている。とりわけ静電気放電 (Electrostatic Discharge; ESD と略記) の際に放射される電磁パルス (以下、静電気パルスとする) は、立上り時間が数 ns あるいはそれ以下の現象であり、電子装置の誤動作や素子の絶縁破壊などを引き起こす障害原因となる^{(1)~(4)}。半導体素子は、高速度化、低電力化の方向にあることから、過電圧に対する耐力が今後とも弱くなることが予想され、この種の問題はますます重要な課題になってくると考えられる。

静電気放電に伴って発生する電磁障害は、放電電流により電子装置の誤動作や素子の破壊を引き起こす場合や、放電の際に放射された電磁波が周囲の電子装置に

影響を与える場合がある。特に、放電時に放射された電磁波が電磁障害作用を発生させる現象は、間接 ESD として知られており⁽¹⁾⁽²⁾、従来より静電気放電により放射される電磁波の進行状況の測定などの研究が進められてきた^{(3)~(5)}。間接 ESD に関しては、帯電物体が速度を有する場合に、その電磁干渉作用が強くなる現象などが報告されているが⁽⁶⁾、その特性は十分明らかになっていない。

ところで、静電気放電などに伴う電磁パルスを測定する際、ループアンテナなどの電磁界測定用アンテナ (以下、EMI 測定用アンテナ⁽⁷⁾とする) による測定では、(i) 周波数特性が限定されている、(ii) 電界強度を算出するためのアンテナの位相情報が得られない、などの理由により、測定波形を定量的に解析できないという問題点があった。また、広帯域の波形を測定す

ることを目的として、電気光学効果を利用したセンサが報告されているが、現状では 10 V/m 程度の検出感度しかなく、静電気放電などの測定には使用できない状況にある⁽⁹⁾。従って、過渡現象である静電気放電の個々の事象を正確に検出し、その特性を解析することが従来からの重要な課題であった。

本論文では、帯電させた銅パイプを放電させたときに放射される電磁パルスの測定とその解析を通して、静電気放電に伴う電磁波の特性把握を試みた。その際、広い周波数帯域をカバーするように、異なる周波数特性を有する複数の広帯域アンテナを用いて、電磁パルスを時間領域で測定する方法を考案した。更に、電磁パルスのエネルギースペクトルに注目し、使用した各アンテナの周波数帯域別に電磁エネルギー量を解析した。この方法により、従来では困難であった過渡現象である放電時の電磁パルスを定量的に解析することが可能になった。そして本論文では、帯電銅パイプから放射される電磁パルスのエネルギーに関して、充電電圧の差や帯電物体の速度の有無による特性の変化を明らかにした。

2. 帯電銅パイプからの電磁パルスの測定

帯電物体の放電時に放射される電磁パルスには、立上り時間が数 ns 以下のものが含まれることがあり⁽⁹⁾、波形を精度良く測定するためには、広い周波数帯域にわたって測定する必要がある。ここでは、周波数特性の異なる複数の EMI 測定用アンテナを使用し、分割した複数の周波数帯域別に帯電銅パイプから放射される電磁パルスの測定を行った。

〈2・1〉 電磁パルスの測定系 帯電させた銅パイプから放射される電磁パルスの測定系を図 1 に示す。同図において、長さ 60 cm、直径 15 mm で先端が半球状になっている銅パイプ (L1) を帯電 (極性：正) させ、銅パイプ L1 の下側に設置してある長さ 20 cm、直径 15 mm で先端が半球状になっている銅パイプ (L2) に近づけて放電を発生させた。このとき、図 2 に示す電気的な等価回路で表現できる充電回路の A 部を直接銅パイプ L1 に約 5 秒程度あてて充電させた後に、できる限りすばやく下側の銅パイプ L2 に接触させて放電を発生させる方法をとった。また、帯電銅パイプ L1 を緩やかに銅パイプ L2 に近づけた場合と、銅パイプ L2 の 3 cm および 5 cm 真上の位置から落下させたときの場合について測定を行った。ところで、銅パイプに流れる電流が大地面に対して垂直方向に流れる際に放射される電界は、垂直偏波成分が支配的となると考えられる。ここでは、帯電銅パイプによ

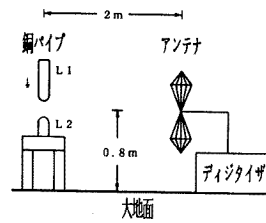


図 1 電磁パルス測定系
Fig. 1. Measurement geometry setup for electromagnetic pulse.

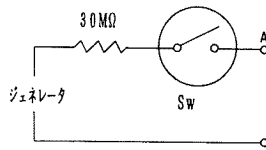


図 2 銅パイプの充電回路
Fig. 2. A charging circuit for a copper pipe.

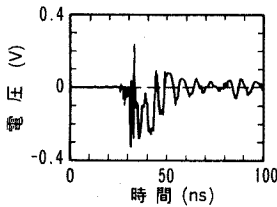
表 1 アンテナの周波数特性と解析対象周波数領域
Table 1. Frequency performance of antennas and frequency domains for analysis.

| アンテナの種類 | 周波数特性 | 解析対象周波数領域 |
|----------------|-------------|-------------|
| ループアンテナ | 10 k~30 MHz | 1~30 MHz |
| バイコニカルアンテナ | 30~300 MHz | 30~300 MHz |
| ダブルリッチドガイドアンテナ | 200 M~2 GHz | 300~750 MHz |

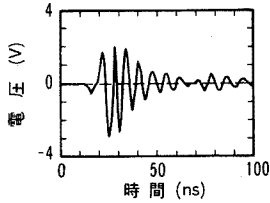
る放電現象を解析するにあたって、対象とする電磁パルスを垂直偏波成分に限定して各アンテナを設定した。

ただし測定器として使用した波形デジタルサイザは上限 750 MHz までの周波数特性が保証されている。また、使用した EMI 測定用アンテナの特性は表 1 に示すとおりである (それぞれのアンテナの外形とアンテナ係数⁽⁷⁾については付録に示した)。なお、測定時の大気温度は 20(±2)°C、相対湿度は 50(±5)%であった。

〈2・2〉 電磁パルスの測定結果と考察 銅パイプ L1 を銅パイプ L2 に緩やかに近づけた場合について、充電電圧 0.5、10 kV の電磁パルスを、ダブルリッチドガイドアンテナにより測定した波形例を図 3 に示す。同図より、充電電圧が 0.5 kV の場合の波形には、充電電圧が 10 kV の場合に比べて立上りが速い振動成分が多く観測されることがわかる。次に、銅パイプ L1 を銅パイプ L2 の上部 3 cm の高さから落下させたときの場合のダブルリッチドガイドアンテナによる充電電圧 10 kV の波形例を図 4 に示す。図 3



(a) 充電電圧=0.5 kV



(b) 充電電圧=10 kV

図3 ダブルリッジドガイドアンテナにより検出した電磁パルス（緩やかに接触時）
Fig.3. Obtained electromagnetic pulses by a double ridged guide antenna (low speed touch).

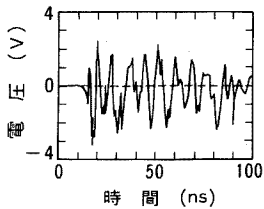


図4 帯電銅パイプを3 cm高からの落下時に検出した電磁パルス（ダブルリッジドガイドアンテナによる）
Fig.4. Obtained electromagnetic pulse when the charged copper pipe was dropped from 3 cm high point (by a double ridged guide antenna).

(b)と図4の測定波形を比較すると、銅パイプを落下させた図4の波形のほうに、立上りが急なひげ状の振動成分が増加していることが観測される。

続いて、銅パイプL1を銅パイプL2に緩やかに接触させた場合、3 cm上から落下させた場合、5 cm上から落下させた場合の3通りについて、充電電圧と波形のピーク・ピークの振幅値の関係をまとめた結果を図5に示す。同図において、実線は銅パイプL1を緩やかに接触させた場合、破線は3 cm上より落下させた場合、一点鎖線は5 cm上より落下させた場合である。そして、ばらつきを考慮する意味から充電電圧

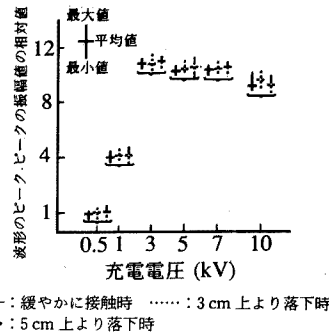


図5 充電電圧と検出波形のピーク・ピークの振幅値の関係（ダブルリッジドガイドアンテナによる）

Fig.5. Relation between charging voltage and amplitude of peak-peak value of obtained waves (by a double ridged guide antenna).

0.5, 1, 3, 5, 7, 10 kVの各場合について5回ずつ測定し、充電電圧0.5 kVで銅パイプを緩やかに接触させた場合の平均値を1として規格化してある。同図より、波形の強度は充電電圧に伴って必ずしも増加しないことがわかる。また、波形のピーク・ピークの振幅値は、銅パイプL1を落下させた場合とそうでない場合について顕著な差はみられないこともいえる。

なお、銅パイプL1の落下の有無により、電磁パルス波形の振動成分などが変化している現象については、放電形成時における放電電流の立上り率などの変動が作用しているものと推定される⁽¹⁰⁾。すなわち、放電電流が流れ始める際の立上り時間の変化が、空間に放射される電磁パルスの特性に影響していると考えられる。

更に、銅パイプL1を銅パイプL2に緩やかに近づけた場合について、充電電圧0.5 kVの電磁パルスをループアンテナとバイコンカルアンテナにより測定した波形例を図6(a), (b)に示す。同図より、使用したアンテナの周波数特性が低下するほど、緩やかな振動成分の波形が支配的となり、図3(a)に観測された立上りが急なひげ状の振動成分が観測されないことが確認できる。

続いて、図5と同様に、ループアンテナとバイコンカルアンテナについて、銅パイプL1を銅パイプL2に緩やかに接触させた場合、3 cm上から落下させた場合、5 cm上から落下させた場合の充電電圧と波形のピーク・ピークの振幅値の関係をまとめた結果を図7(a), (b)に示す。同図において、実線は銅パイプ

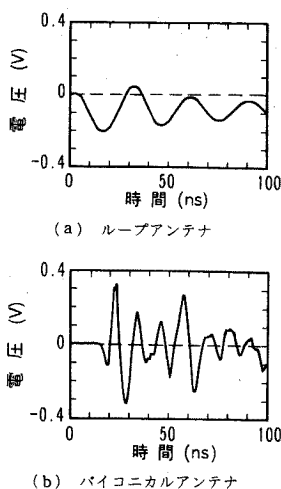


図 6 ループアンテナとバイコニカルアンテナにより検出した電磁パルス (緩やかに接触時, 充電電圧=0.5 kV)
 Fig. 6. Obtained electromagnetic pulses by a loop antenna and a biconical antenna (low speed touch, charging voltage=0.5 kV).

L1 を緩やかに接触させた場合, 破線は 3 cm 上より落下させた場合, 一点鎖線は 5 cm 上より落下させた場合であり, 充電電圧 0.5, 1, 3, 5, 7, 10 kV について各 5 回ずつ測定し, 充電電圧 0.5 kV で銅パイプを緩やかに接触させた場合の平均値を 1 として規格化してある。同図より, ループアンテナとバイコニカルアンテナに関しても, ピーク・ピークの振幅値は充電電圧と必ずしも比例せず, 充電電圧 3~10 kV 付近で頭打ちとなっていることがわかる。また, 銅パイプ L1 を緩やかに接触させた場合と落下させた場合で大きな差は見られないことも確認できる。

3. 電磁パルスの解析

本章では, 図 1 の測定系で得られた電磁パルスの特性把握を試みる。ここでは, 測定波形の解析方法を示すと共に, 帯電銅パイプから放射された電磁パルスのエネルギー量の解析結果を示す。

〈3・1〉 電磁パルスの解析方法 まず, 測定した電磁パルスの解析方法を示す。測定波形の解析には, 測定器と EMI 測定用の各アンテナの周波数特性を考慮し, 得られた時間波形の周波数成分を複数の周波数帯域別に分割して計算する方法をとる。ところで, 電磁パルスの周波数スペクトルを求める際に, 時間領域において測定波形の打ち切りを行うと, 鋭い不連続が発

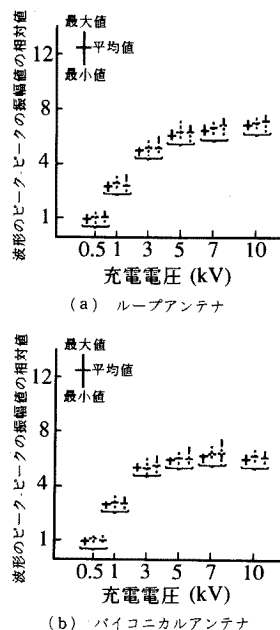


図 7 充電電圧と検出波形のピーク・ピークの振幅値の関係 (ループアンテナとバイコニカルアンテナによる)
 Fig. 7. Relation between charging voltage and amplitude of peak-peak value of obtained waves (by a loop antenna and a biconical antenna).

生し, 周波数領域においてサイドローブが生じる。この打ち切りによる誤差を小さくするため, 本論文ではハニング関数⁽¹⁾を窓関数として使用した。

いま, アンテナ端子で検出した電圧波形を $v(t)$ とし, 窓関数 $W(t)$ としてハニング関数を使用した場合, 時間波形の処理時間領域を $T_1 \sim T_2$ とすると, 周波数スペクトル $V(f)$ は次式で与えられる。

$$V(f) = \int_{T_1}^{T_2} v(t) W(t) \exp(-2\pi jft) dt \dots\dots\dots (1)$$

$$W(t) = 0.5 [1 - \cos\{2\pi t / (T_2 - T_1)\}] \dots\dots\dots (2)$$

また, 測定に使用するアンテナのアンテナ係数を $A(f)$ とする。ここで, アンテナ係数とは, アンテナで検出した端子電圧から電界強度を計算する際の変換係数のことである⁽⁷⁾。そして, アンテナ係数は振幅成分を $a(f)$, 位相成分を $\exp\{j\phi(f)\}$ とすると,

$$A(f) = a(f) \exp\{j\phi(f)\} \dots\dots\dots (3)$$

と与えることができる。このとき、検出した電磁パルスの電界強度の周波数スペクトル $E(f)$ は

$$E(f) = V(f)A(f) \\ = V(f)a(f)\exp\{j\phi(f)\} \dots\dots\dots (4)$$

となる。ただし、現状では、アンテナ係数の位相成分は把握できないことから、実際の計算では振幅成分だけを用いることになる。

次に、銅パイプからの電磁パルスのエネルギースペクトルに注目する。なお、エネルギースペクトル $P(f)$ は、周波数スペクトル $E(f)$ の関数として次式で与えられる⁽¹²⁾。

$$P(f) = |E(f)|^2 \\ = |V(f)a(f)|^2 \dots\dots\dots (5)$$

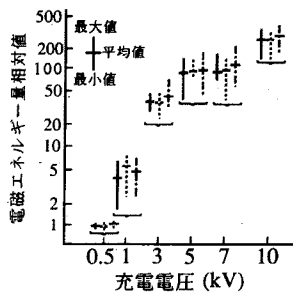
本論文では、(6)式に示すようにエネルギースペクトルを周波数 f_1 から周波数 f_2 の領域にわたって積分した値により電磁エネルギー量 E_n を定義する。これにより、EMI 測定用アンテナで検出した電磁パルスのエネルギー成分の評価を複数に分割した周波数帯域別に行うことができる。

$$E_n(f_1, f_2) = \int_{f_1}^{f_2} P(f) df \dots\dots\dots (6)$$

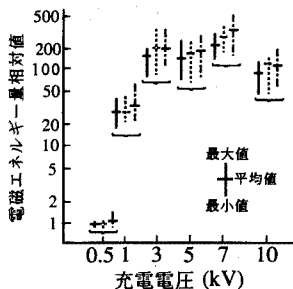
〈3・2〉 電磁パルスの電磁エネルギー量の比較

ここでは表 1 に示した各周波数帯域別に、銅パイプから放射される電磁パルスの電磁エネルギーと充電電圧の関係を解析した。解析にあたっては、離散的に与えられる 1,024 個の時間波形データ $v(t)$ と各アンテナのアンテナ係数(付録参照)の特性をもとに、(1)~(5)式より電磁パルスのエネルギースペクトル $P(f)$ を求める。なお、電磁パルスの周波数スペクトル $V(f)$ の計算では、解析対象とする周波数帯域と時間処理する際の周波数分解能も考慮して、ループアンテナ、バイコンカルアンテナ、ダブルリッチドガイドアンテナそれぞれに対して、波形の立上り部から 1,000, 100, 100 ns の時間幅にハニング関数を適用した。また、周波数帯域 1~30 MHz については 1,200 個、周波数帯域 30~300 MHz については 900 個、周波数帯域 300~750 MHz については 500 個のエネルギースペクトル $P(f)$ をワークステーション上のサブルーチンプログラム SSL II を使用して計算し、それぞれの周波数帯域別に電磁エネルギー量 E_n を求める。

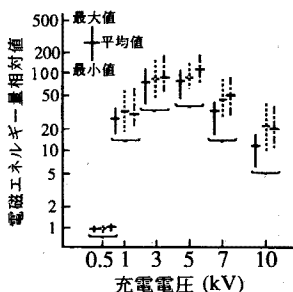
解析対象とする電磁パルスは、図 1 に示す測定系において、銅パイプ $L1$ を緩やかに銅パイプ $L2$ に近づけた場合と銅パイプ $L1$ を銅パイプ $L2$ の上方 3 cm および 5 cm の高さから落下させたときのそれぞれの場合について測定した。充電電圧を 0.5, 1, 3, 5, 10 kV とし、ばらつきを考慮する意味から各々 5 回ずつ



(a) 周波数帯域=1~30 MHz



(b) 周波数帯域=30~300 MHz



(c) 周波数帯域=300~750 MHz

— : 緩やかに接触時 - - - : 3 cm 上より落下時
 : 5 cm 上より落下時

図 8 電磁エネルギー量と充電電圧の関係
 Fig. 8. Relations between electromagnetic energy and charging voltages.

つ放電させた。そして、充電電圧 0.5 kV で銅パイプを緩やかに接触させた場合の平均値を 1 として他充電電圧の平均値を相対化し、各充電電圧の電磁エネルギー量 E_n の分布を求めた結果を図 8 (a)~(c) に示す。ここで、同図において、実線は銅パイプ $L1$ を緩やかに接触させた場合であり、破線と一点鎖線はそれぞれ 3 cm および 5 cm 上より落下させた場合である。同図より、帯電させた銅パイプ $L1$ の放電に伴って



放射される電磁パルスの電磁エネルギー量 E_n の相対値に注目したとき、それぞれのエネルギーの最大値を与える充電電圧が、解析対象とする周波数帯域によって異なることがわかる。すなわち、充電電圧 0.5~10 kV の範囲において、平均値と比較した場合、(a) 図については充電電圧 10 kV 付近、(b) 図については 7 kV 付近、(c) 図については 3, 5 kV 付近で電磁エネルギー量 E_n が最大になっていることがいえる。

更に、(a)、(b) 図に関しては、銅パイプ L1 を緩やかに接触させた場合と落下させた場合で、エネルギー量の平均値あるいはばらつきを比較したときにそれほど明確な差を見いだすことができないが、(c) 図の充電電圧 7 kV と 10 kV に注目した場合、銅パイプ L1 が落下した際には、平均値において、それぞれ 1.3~1.9 倍程度エネルギーが増加していることがわかる。

4. むすび

本論文では、帯電銅パイプから放射される電磁パルスの時間領域における測定とその解析を行った。

まず、ループアンテナなどの EMI 測定用アンテナによる測定結果は、帯電銅パイプの放電時に放射される電磁パルスの強度が、充電電圧に必ずしも比例しない現象等を示すものであった。

続いて、測定した時間波形から求まるエネルギースペクトルを複数の周波数帯域別に積分して、その比をとる手法に基づいて、銅パイプから放射される電磁パルスのエネルギー量と充電電圧の関係を解析した結果、その電磁エネルギー量は充電電圧に必ずしも比例しないことを示すことができた。そして、充電電圧 0.5~10 kV の範囲において、周波数帯域 1~30 MHz に対しては充電電圧 10 kV 付近、周波数帯域 30~300 MHz に対しては充電電圧 7 kV 付近、周波数帯域 300~750 MHz に対しては充電電圧 3, 5 kV 付近で放射される電磁エネルギー量が最大となる結果となった。更に、帯電銅パイプを落下させた場合に、周波数帯域 300~750 MHz に関して、空間に放射される電磁エネルギー量が、緩やかに接触させた場合に比べて平均値レベルにおいて、1.3~1.9 倍程度増加する結果となった。

本論文の測定および解析結果は、静電気放電現象に対して、電子装置の障害発生メカニズム要因の一つを示唆するものであると考えられる。こうした放電現象の把握は、電磁障害対策を進めていくうえでも極めて重要な課題であり、その意義は大きい。今後は、本論文で得られた解析結果を踏まえて、より理論的な検討

も加えながら研究を行っていく予定である。

最後に本研究を行うにあたり、NTT 通信網総合研究所通信品質研究部浅谷部長、徳田グループリーダーを始めとする通信 EMC グループの皆様へ感謝します。

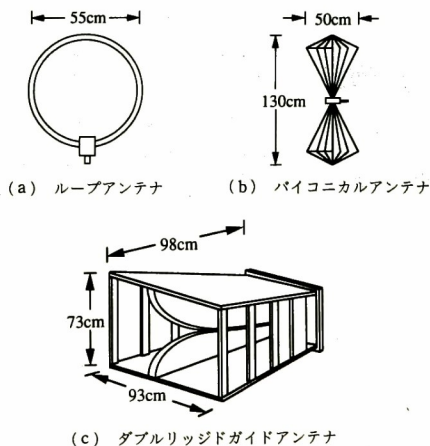
(平成 4 年 2 月 25 日受付, 同 4 年 6 月 26 日再受付)

文 献

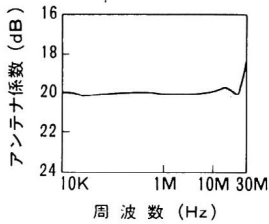
- (1) 馬杉・村川・桑原・雨宮: 「間接 ESD の時間領域における測定」, 信学技報, EMCJ90-55, 83 (平 2)
- (2) 川村: 「静電気放電による電磁ノイズの OA 機器に対する影響とその防止対策」, 静電気学誌, 13, 31 (平元-1)
- (3) 増田・園部・伊藤: 「静電気火花によるノイズの電磁界の伝搬特性」, 同上, 7, 272 (昭 58)
- (4) W. T. Rhoades: "Achieving ESD equipment protection with emission controls", Symp. Record IEEE 1985 International Symp. on EMC, p. 232 (1985)
- (5) 関: EOS/ESD ハンドブック, 第 4 章 (平元) トリケップス
- (6) 本田: 「ESD の特徴と計算機に対する影響 (その 5)」, 信学技報, EMCJ86-91, 33 (昭 61)
- (7) 赤尾: 環境電磁工学の基礎, 第 4 章 (平 3) 情報通信学会
- (8) 桑原・田島・雨宮: 「LiNbO₃ 光変調器を用いた高感度電界センサの感度特性」, 信学技報, EMCJ91-6, 37 (平 3)
- (9) 馬杉・村川・桑原・雨宮: 「帯電した銅パイプから放射される電磁パルスの波形解析結果」, 平 3 年信学春季全大, SB-3-1
- (10) 伏見・川村: 「衝突電極と過電圧放電」, 信学技報, EMCJ88-22, 53 (昭 63)
- (11) 三上: デジタル信号処理, 第 3 章, 初版 (平元) CQ 出版社
- (12) 日野: スペクトル解析, 第 11 版 (昭 59) 朝倉書店
- (13) M. Honda: "A New Threat-EMI Effect by Indirect ESD on Electronic Equipment", IEEE/IAS 1987, Annual Meetings, IUSD-87-97, 1674 (1987)

付 録

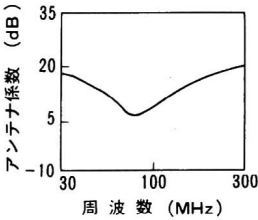
使用した 3 種類の EMI 用アンテナの外形およびアンテナ係数を以下の付図 1, 付図 2 に示す。



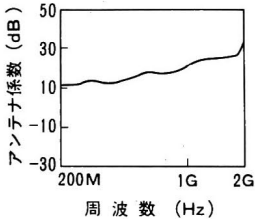
付図 1 アンテナの外形
app. Fig. 1. Outlooks of antennas.



(a) ループアンテナ



(b) バイコニカルアンテナ



(c) ダブルリッジドガイドアンテナ

付図 2 アンテナのアンテナ係数
app. Fig. 2. Antenna factor of antennas.



村川 一雄 (非会員)

昭和 35 年 9 月 7 日生。61 年 3 月熊本大学大学院修士課程修了。同年 4 月日本電信電話(株)茨城電気通信研究所入所。以来、EMC 計測に用いる放射アンテナの特性解析、局舎内の電磁界シミュレーションなどに関する研究・開発に従事。現在、NTT 通信網総合研究所研究主任。電子情報通信学会員。平成 2 年度同学会篠原記念章受賞。



桑原 伸夫 (非会員)

昭和 27 年 6 月 1 日生。52 年 3 月静岡大学大学院修士課程修了。同年 4 月日本電信電話公社茨城電気通信研究所入所。以来、通信システムの雷防護、光ファイバの信頼性評価、通信システムの EMI 評価および対策などに関する研究・開発に従事。現在、NTT 通信網総合研究所主任研究員。工学博士。電子情報通信学会員、IEEE 会員。



馬杉 正男 (正員)

昭和 37 年 6 月 9 日生。平成元年 3 月慶応義塾大学大学院修士課程修了。同年 4 月日本電信電話(株)通信網総合研究所入所。以来、電磁パルスの特性解析や電磁環境モニタリング方法などに関する研究・開発に従事。現在、NTT 通信網総合研究所に勤務。平成 3 年電気学会論文発表章受賞。電子情報通信学会員。



雨宮 不二雄 (非会員)

昭和 24 年 2 月 19 日生。48 年 3 月東北大学大学院修士課程修了。同年 4 月日本電信電話公社武蔵野電気通信研究所入所。以来、デジタル電話の研究・実用化、通信装置の EMC の試験評価方法の研究・開発に従事。現在、NTT 技術協力センタ主幹技師。電子情報通信学会員。