

火花放電による電磁ノイズの発生現象
— 火花電圧と放電電流及び誘導電圧との相関性 —*

富田 一**

Electromagnetic Noise generated by Spark Discharge
— Dependence of Spark Current and Induced Voltage on Sparking Voltage —*

by Hajime TOMITA**

Abstract: Recently, electronic equipment, such as industrial robot, is commonly used for enhancement of productivity and reduction of labor. Semiconductor devices used for those equipment are susceptible to electromagnetic noise because signal level and current are several volts and mA, respectively. Among many electromagnetic noise sources, electric discharge which is generated, for example, due to surge is considered to be one of the main noise sources. Spark discharge, which has a significant influence on electronic equipment, occurs at the beginning of electric discharge as a transition phenomenon. Before the occurrence of spark discharge, an electric dipole is formed at a discharging point and the neutralization of the charge occurs through the spark discharge thereafter. But this spark discharge phenomenon is not fully understood because conventional current sensors are not available without disturbing the spark discharge generated in the air.

In this report, one method for measuring spark current generated by the spark discharge for neutralization of the charge was proposed by devising the grounding of a discharging part. Spark discharge of static electricity charged on a metal object was used to simplify electric discharge. Dependence of spark current and voltage induced by magnetic field due to the spark discharge on sparking voltage was measured to understand the fundamental characteristics of electromagnetic noise generated by the spark discharge. As the result, the peak and maximum time change of spark current due to the spark discharge decreased with sparking voltage. Voltage induced on a load of a loop antenna due to the spark discharge decreased with discharging gap length and almost coincided with that calculated by measured spark current. One reason for the difference of strength of electromagnetic noise generated between when a charged matter and a grounded matter are fixed and when a charged matter approaches a grounded matter after charging with the same potential as the former one was considered by paying attention to discharging gap length.

Keywords; EMI, Spark discharge, Sparking voltage, Magnetic field, Induced voltage

1. ま え が き

産業ロボット等の機器には制御用の半導体素子、マイクロプロセッサが一般的に使用されている。マイク

ロプロセッサ等の信号レベルは数 V、信号電流も mA と低電圧、低電流であり、動作速度も数百 MHz である。このため、アーク放電、雷放電、静電気放電などの放電現象によって発生した電磁ノイズでマイクロプロセッサ等の信号レベルが反転し、誤動作する可能性が高まっている。誤動作を引き起こす恐れのある電磁ノイズ源には、この他、遮断器の開放時などに過渡的に発生する放電もある。

* 平成 10 年 9 月 29 日、電子情報通信学会ソサイエティ大会で一部発表した。

**物理工学安全研究部 Physical Engineering Safety Research Division

問題となる電磁ノイズの一つとして、火花放電が最初に発生し、続いてアーク放電などに移行する場合がある。火花放電直前に、放電が発生する箇所に、異符号の電荷の相対する電気双極子が形成され、放電の開始とともに双極子間の電荷の中和に伴う火花放電が発生する。放電ノイズの周波数スペクトルは、時間的に変動の激しい火花放電初期が広帯域となるため影響も大きいとみられる。しかし、電荷の中和による放電現象については、放電に影響を及ぼすことなく電流を測定する方法が確立されていないために十分に解明されていないことが指摘されている^{(1),(2)}。

放電初期の異符号の電荷の中和に伴う放電現象を調べることは、放電によって発生する電磁ノイズの基礎現象の把握だけでなく、イミュニティ(耐性)試験方法を確立する技術的な参考資料ともなる。

本研究では放電初期に発生する異符号の電荷が火花放電によって中和される現象を把握するため、放電電流測定の一手法を考案し⁽³⁾、その方法によって、放電電流と火花電圧との関係等を実験的に調べた。

2. 実験方法

サージ等による初期の火花放電現象を明らかとするには、放電初期の火花放電のみを観測することが現象解明を容易にする。そのため、火花放電に続くアーク放電などが発生しないように、金属に帯電させた電荷の中和による火花放電現象を用いた。

模擬帯電物体と対向する接地系の電極を Fig. 1 に示す。模擬帯電物体は半径 15 mm、厚さ 3 mm の真鍮製円板であり、上下に移動可能である。対向する固定された接地側の真鍮製円板電極(以下、接地側電極という)の中心には半径 2.5 mm の穴を明け、その穴には半径 2 mm の真鍮製球電極(以下、球電極という)を取り付けた。球電極は接地側の円板電極の表面より 0.8 mm 上方の位置に固定した。接地側電極と球電極とを

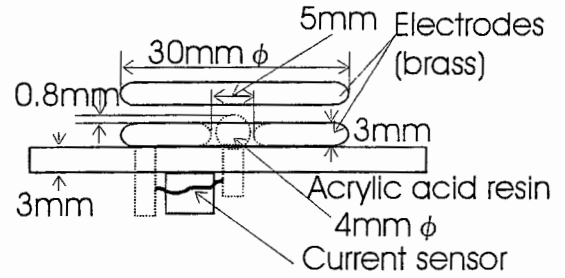


Fig. 1 Discharging electrodes.
放電電極

結ぶ約 5 cm の導線には、帯域 4.5 GHz のデジタイザが接続された電流検出用のセンサ(周波数帯域: 25 kHz ~ 1 GHz)を取り付けた。接地側電極は、Fig. 2 に示すように、体積抵抗率が $3\Omega \cdot \text{cm}$ の約 40 k Ω の導電性ゴムひもを介して接地した。高圧側の真鍮製円板電極(以下、高圧側電極という)は、体積抵抗率が $3\Omega \cdot \text{cm}$ の約 25 k Ω の導電性ゴムひもと 1,000 M Ω の高耐圧抵抗を介して直流高電圧電源に接続した。

高耐圧抵抗は、円板電極間の静電容量との積で決定される時定数(本実験では数 ms 程度)で電極間に間欠的に放電を発生させるために用いたものであり、その放電は直流の高電圧で充電された平等電界から生じたものとなる。導電性ゴムひもは、火花放電時に流れる電流を抑制して、電極間での電荷の中和現象のみを捉える目的で使用した。

また、火花放電時に発生する磁界によって生じる誘導電圧を測定するループアンテナの中心は、放電部を原点とし、放電電流が z 軸方向に流れているとしたときに、最大の磁界を受信するように極座標表示で P(10 cm, $\pi/2, \phi$) の距離に固定した。ループアンテナはセミリジッドシールドドケーブルを用いた直径 25.6 mm のものである。ループアンテナは帯域 500 MHz のデジタルオシロスコープに接続し、サンプリング周波数 2.5 GHz で誘導電圧を測定した。

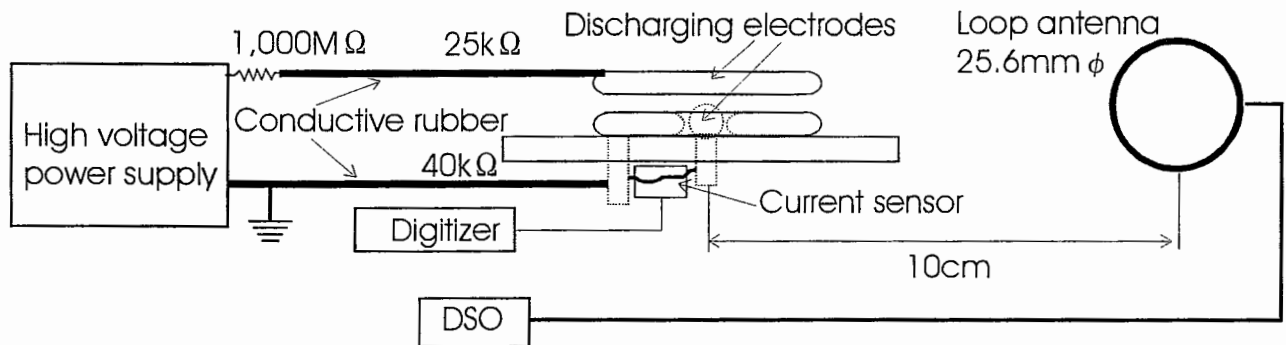


Fig. 2 Experimental setup.
実験装置

3. 実験結果および考察

3.1 静電容量

放電電極の間隔を変化させて放電を発生させた。高圧側電極と球電極との間隔（以下、放電ギャップ長という）は、0.2, 0.7, 1.2, 2.35 mm の4通りの場合について実験を行った。

Table 1 Dependence of the capacitance of discharging electrodes on discharging gap length.
放電電極の静電容量

Discharging gap length (mm)	Measured (pF)	Calculated (pF)	
		With sphere	Without sphere
0.2	6.35	6.92	6.74
0.7	4.38	4.92	4.85
1.2	3.25	—	3.86
2.35	2.18	2.77	2.76

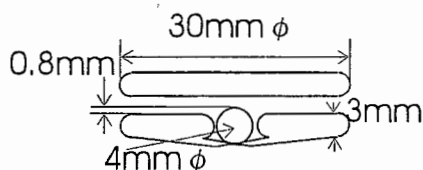


Fig. 3 A model of discharging electrodes for finite element method.
解析に用いた放電電極モデル

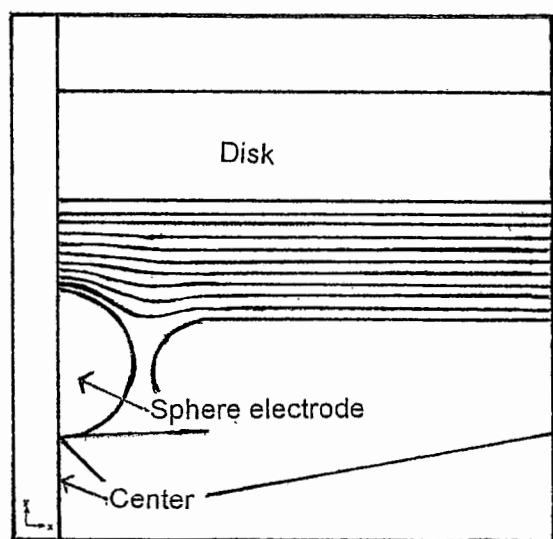


Fig. 4 Equipotential distribution between discharging electrodes (discharging gap length=2.35 mm).
放電電極間の等電位分布 (放電ギャップ長=2.35 mm)

まず各放電ギャップ長での静電容量をエレクトロメータで測定した結果を Table 1 の (Measured) に示す。また、放電電極をモデル化した Fig. 3 に有限要素法を用いて静電容量を計算した結果を Table 1 の (With sphere) に示す。測定値は計算値より 0.54~0.59 pF 程小さいが、大きな違いはない。高圧側電極と球電極間の電界は、今回の実験で最大の放電ギャップ長である 2.35 mm においても、Fig. 4 に示すように、ほぼ平等電界である。さらに、Fig. 3 で球電極を除いたモデルに有限要素法を用いて静電容量を計算した結果を Table 1 の (Without sphere) に示す。球電極が無い場合とある場合の比は 0.975~0.997 であり、球電極の有無は電極間の静電容量にほとんど影響していない。

3.2 放電電流

火花放電による放電電流をデジタイザで測定した。各放電ギャップ長で 5 回測定し、その平均した波形を Fig. 5 に示す。放電ギャップ長が 1.2 mm 以上では極性の依存性がみられ、高圧側電極の極性がマイナスの方がプラスに比較して電流のピーク値が大きくなる。また、Fig. 6 に示すように、放電ギャップ長が拡がるとともに、ピーク値の 10% から 90% まで変化するに要する放電電流の立ち上がり時間は長くなる。放電電流のピーク値は、Fig. 7 の (Measured) に示すように、放電ギャップ長が拡がるとともに減少している。これら測定時の火花電圧として、放電ギャップ長設定後に放電を開始する電源電圧とみなせば、その値は Table 2 の (Measured) となる。同表には式 (1) で計算された火花電圧値 (Calculated) も併記したが、ほぼ測定値と一致した。

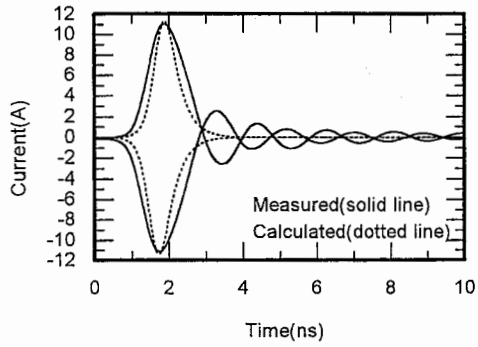
$$V_s = 23.85\delta\ell(1 + 0.329/\sqrt{\delta d}) \quad [\text{kV}]$$

$$d : \text{放電ギャップ長 (cm)} \quad (1)$$

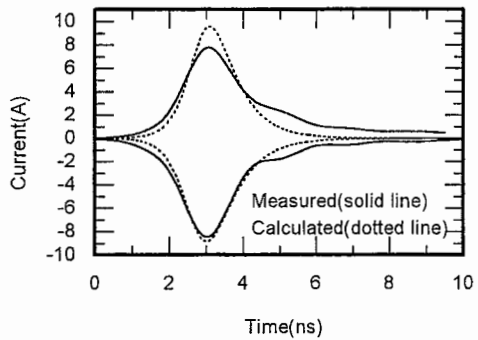
$$\delta = 1 : \text{相対空気密度 (気温 } 20^\circ\text{C)}$$

放電時の放電電荷量を、Fig. 5 の放電電流の時間積分によって求めた結果が Fig. 8 の (Measured) である。また、測定した静電容量と電源電圧の表示値から得た火花電圧の積によって求めた結果が Fig. 8 の (Calculated) である。これら両者の結果は、放電ギャップ長が 0.7 mm 以下ではほぼ一致するものの、1.2 mm 以上では差が大きくなっている。この一因としては電流センサの特性が考えられる。

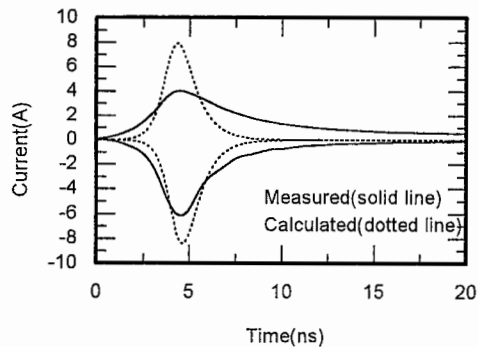
Fig. 5 の放電電流波形について、Rompe, Weizel の両氏が提案した火花放電抵抗に基づいて藤原ら⁽⁴⁾によって導出された電流の式 (2) と比較検討する。藤原らが導出した式に代入した静電容量は Table 1 に示した測定値を、また、火花電圧は Table 2 に示した放電開



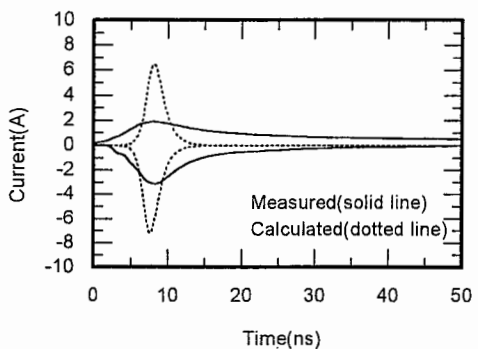
(a) discharging gap length = 0.2 mm
放電ギャップ長=0.2 mm



(b) discharging gap length = 0.7 mm
放電ギャップ長=0.7 mm



(c) discharging gap length = 1.2 mm
放電ギャップ長=1.2 mm



(d) discharging gap length = 2.35 mm
放電ギャップ長=2.35 mm

Fig. 5 Spark current wave forms.
放電電流の波形

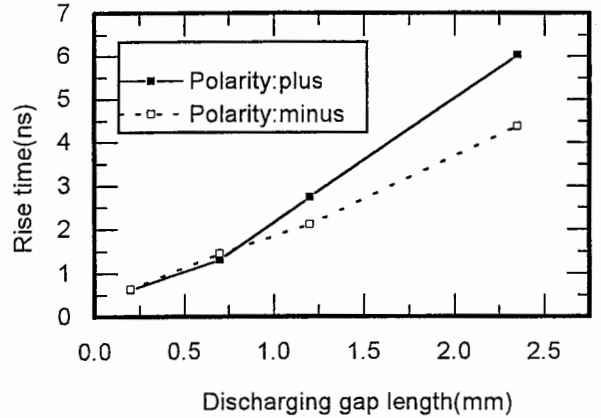


Fig. 6 Relation between rise time of spark current and discharging gap length.
放電電流の立ち上がり時間と放電ギャップ長の関係

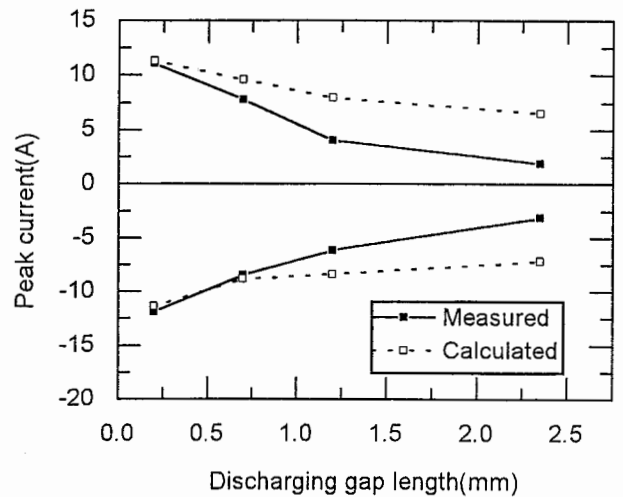


Fig. 7 Relation between peak spark current and discharging gap length.
放電電流のピーク値と放電ギャップ長の関係

Table 2 Dependence of sparking voltage on discharging gap length.
火花電圧の放電ギャップ長依存性

Discharging gap length (mm)		Sparking voltage (kV)	
		Measured	Calculated
0.2	+	1.5	1.59
	-	-1.5	-1.59
0.7	+	3.7	3.75
	-	-3.6	-3.75
1.2	+	5.5	5.58
	-	-5.6	-5.58
2.35	+	9.2	9.41
	-	-9.5	-9.41

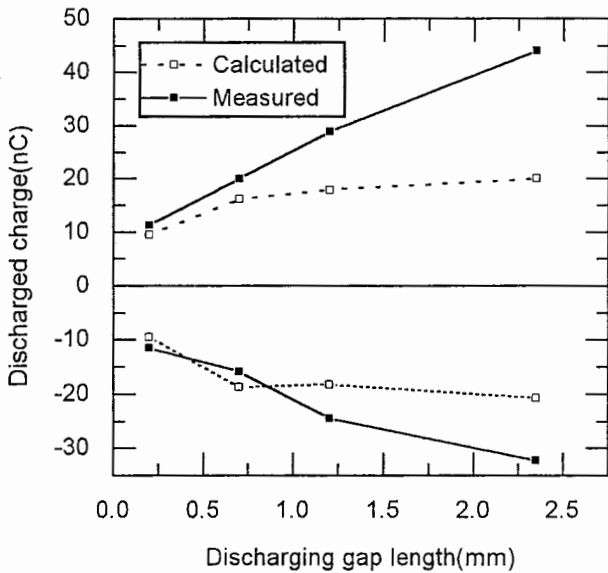


Fig. 8 Relation between discharged charge and discharging gap length.
放電電荷量と放電ギャップ長の関係

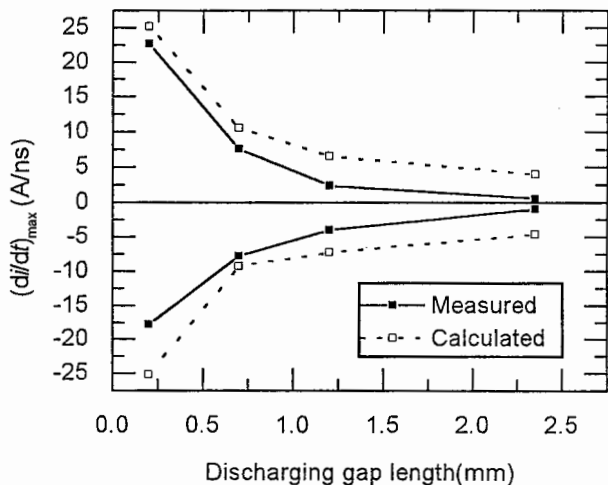


Fig. 9 Relation between maximum time change of spark current and discharging gap length.
放電電流の時間微分値の最大値と放電ギャップ長の関係

始時の電源電圧を用いた。なお、接地側に使用された球電極の有無による静電容量の計算結果は、その差が2.5%以下であったので、球電極の影響を無視した。

$$i(t) = I_m \cdot F(t/\tau) \quad (2)$$

$$F(x) = (3\sqrt{3}/2) \exp(3\sqrt{3}(x - x_0)) \cdot (1 + \exp\{3\sqrt{3}(x - x_0)\})^{-1.5} \quad (3)$$

ここで、 x_0 は積分定数を表す。

$$I_m = C_0 V_s / \tau = C_0 V_s (\alpha/p) (V_s/\ell)^{2/3} / 3\sqrt{3} \quad (4)$$

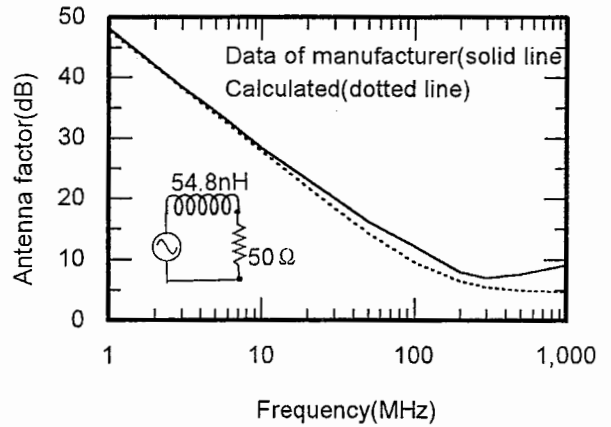


Fig. 10 An antenna factor of a loop antenna.
ループアンテナのアンテナファクタ

ここで、 C_0 :電極間の静電容量、 V_s :火花電圧、 ℓ :放電ギャップ長、 $\alpha/p \approx 1.1 \text{ atm} \cdot \text{cm}^2 / \text{V}^2 \cdot \text{s}$ (圧力、火花の温度及び気体の種類によって決定される定数で、大気圧の空気中での値)である。

式(2)より求めた電流波形はFig. 5に点線で示した。電流波形の計算による形状は、放電ギャップ長が0.2, 0.7 mmでは測定結果とほぼ一致したもの、放電ギャップ長が1.2, 2.35 mmでは形状の相違が大きくなった。計算による放電電流のピーク値と放電ギャップ長の関係を求めると、Fig. 7の(Calculated)を得た。放電電流の時間微分値の最大値 $[(di/dt)_{\max}]$ については、Fig. 9の(Calculated)を得た。Fig. 7, 9の結果からも、計算値と測定値とは放電ギャップ長が0.2, 0.7 mmの場合に一致性が高い。

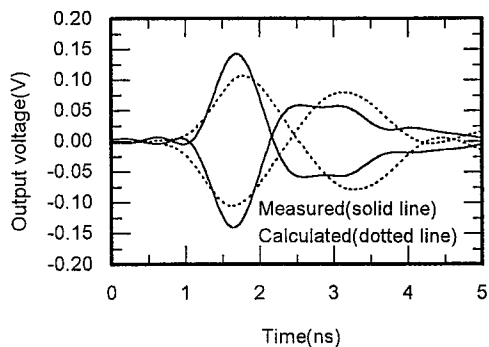
3.3 誘導電圧

火花放電時の磁界によってループアンテナに誘導される電圧をオシロスコープで測定した。このときのオシロスコープの入力インピーダンスは50Ωである。また、ここで、ループアンテナに誘導される電圧を計算するために、ループアンテナのインダクタンスを求める。ループアンテナに使用されているセミリジッドシールドケーブルの外径は2.2 mm、芯線は直径が0.92 mmであり、低周波でのインダクタンスは次式で与えられる⁽⁵⁾。

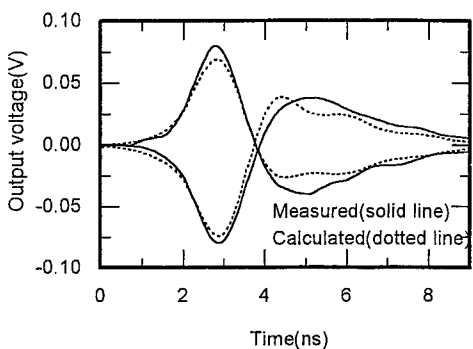
$$L = \mu_0 \cdot b \{ \ln(8b/a) - 2 \} \quad (5)$$

ここで、 μ_0 , a, b は、それぞれ真空の透磁率、アンテナ芯線の半径、アンテナの半径を表す。

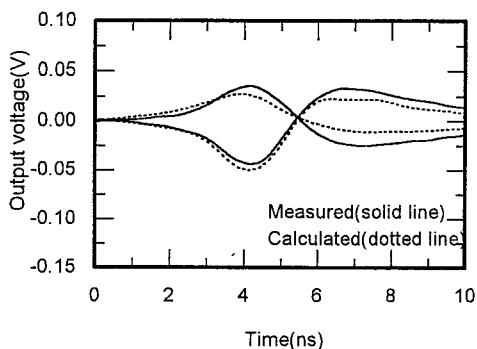
式(5)に $a = 0.46 \text{ mm}$, $b = 12.8 \text{ mm}$ を代入すると、インダクタンスは54.8 nHとなった。よって、ループアンテナと、これに接続されたオシロスコープで構成された回路の低周波での等価回路は、Fig. 10に示す。



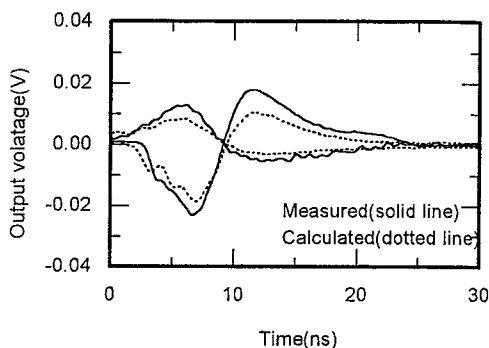
(a) discharging gap length = 0.2 mm
放電ギャップ長 = 0.2 mm



(b) discharging gap length = 0.7 mm
放電ギャップ長 = 0.7 mm



(c) discharging gap length = 1.2 mm
放電ギャップ長 = 1.2 mm



(d) discharging gap length = 2.35 mm
放電ギャップ長 = 2.35 mm

Fig. 11 Relation between induced voltage due to spark and discharging gap length.
火花放電による誘導電圧と放電ギャップ長の関係

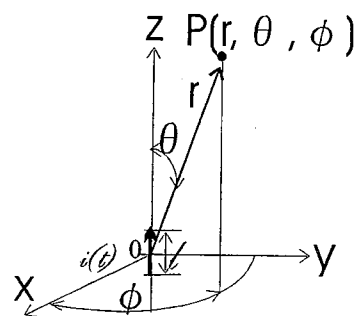


Fig. 12 Electric dipole model.
電気ダイポールモデル

ように、ループアンテナに鎖交する磁束によって電磁誘導された電圧源とインダクタンス、抵抗が直列に接続された回路となる。同回路に基づいてアンテナファクタを計算すると、Fig. 10 に示すように、メーカーの測定値と比較して、周波数が 1~500 MHz では最大 2.7 dB の差があった。

放電時に誘導された電圧を 10 回測定した平均の波形を Fig. 11 に示す。その結果は、放電ギャップ長が拡がるとともに誘導電圧が低下した。なお、このとき接地側電極と球電極とを接続する導線から電流センサを取り外して、最短の導線で接地側電極と球電極の間を短絡し、また、接地側電極の取り付けられた厚さ 3 mm のアクリル板より下部の導線部分を電磁シールド材で被覆した。Fig. 11 の測定結果を、Fig. 5 に示す測定した放電電流からの数値によって求めた誘導電圧（数値解）と比較検討する。まず、放電部分を Fig. 12 に示す微小な電気ダイポールとしてモデル化する。この電気ダイポールの電流を $i(t)$ とすると、極座標表示によって観測点 $P(r, \theta, \phi)$ における磁界の ϕ 方向の成分 H_ϕ は次式となる。また、磁界の r, θ 方向成分は 0 となる。

$$H_\phi = (\ell \sin(\theta) / 4\pi) \cdot [i(t - r/c) / r^2 + (1/cr) \partial i(t - r/c) / \partial t] \quad (6)$$

ここで、 c は光速を表す。

式 (6) の磁界の計算で、電気ダイポールの長さ ℓ を定める必要がある。電流は球電極と、接地側電極に流れていて複雑であるため、ここでは放電ギャップ長が 0.7 mm の時に数値計算と測定結果が一致するように、放電時の高圧側電極と接地側電極の間隔に 2 mm を付加した長さを ℓ とした。具体的には、放電ギャップ長が 0.2, 0.7, 1.2, 2.35 mm における式 (6) での ℓ には、それぞれ 3.0, 3.5, 4.0, 5.15 mm を用いた。ループアンテナに誘

導される電圧計算時の鎖交磁束は、ループアンテナの中心点での磁束密度とアンテナの面積との積によって求めた。これによる計算結果も Fig. 11 に点線で併記した。計算結果は、ほぼ測定値と一致した結果となり、電極間での放電電流が Fig. 1 の測定系で捉えられているものと考えられる。

3.3 考察

火花放電現象による電磁ノイズについては、雷の誘導等によるサージ電圧を原因とした放電現象に加えて、静電気の放電によっても発生している。特に静電気の放電では、帯電物体がある速度をもって接地体に接近するときによく発生する。この時の放電現象は、静止した物体間での放電に比較して、発生する電磁ノイズの周波数スペクトルが広帯域になるなどの特性が報告されている⁽⁶⁾。そこで、ここでは、帯電した金属物体が徐々に接地体に接近するとき発生する火花放電について検討する。

まず、電極が静止した状態での放電電流を観測するため、電源電圧を±8 kV とし、火花放電を開始する放電ギャップ長で高圧側電極を固定した。そのときの放電電流を 5 回測定し、その平均の波形を Fig. 13 に示す。その波形は、放電ギャップ長が 2.35 mm の放電電流の波形に類似した結果となった (Fig. 5(d) 参照)。

一方、帯電した高圧側電極が接地体へ接近するときの火花放電現象を観測するため、最初に高圧側電極と球電極の間隔を 2.35 mm、電源電圧を±8 kV として高圧側電極を充電後、同電極を球電極に徐々に接近させながら放電させた。放電電流波形の再現性は低かったものの、電源電圧を+8 kV に設定したときは 3 回の測定値を平均し、-8 kV に設定したときは 4 回の測定値を平均した波形を Fig. 14 に示す。高圧側電極を固定したときの放電電流に比較して、高圧側電極を充電後に球電極に徐々に接近させながらの火花放電による電流の最大値は大きな値となるとともに、立ち上がり時間も短くなった。

この理由について検討する。半径が 15 mm の円板が平行に対向している空気コンデンサと単純化して静電容量を計算した値 (Calculated) と、Table 1 の測定値 (Measured) との比は、Table 3 に示すように、0.95~0.98 であった。この結果を踏まえ、今回用いた放電電極を単純な円板空気コンデンサと考えることとした。Fig. 15 に、高圧側電極と球電極の間隔を 2.35 mm に設定して+8kV に充電後に、高圧側電極を移動させて、これらの電極間隔を狭めたときの電極間隔と帯電電位との関係、及び式 (1) より求めた火花電圧の計算値を示す。帯電電位が約+4kV で火花電圧に達している。こ

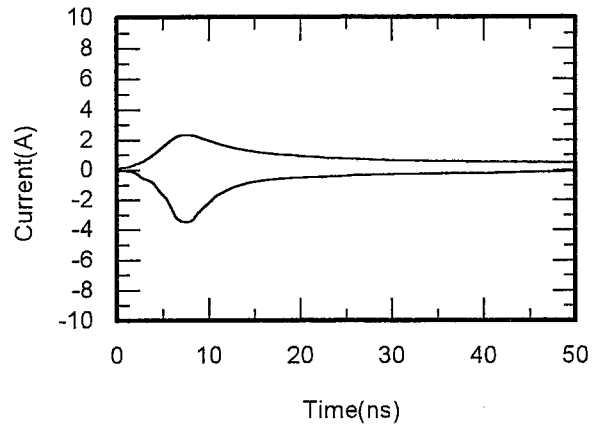


Fig. 13 Spark current wave forms (sparking voltage=±8 kV).
放電電流波形 (火花電圧=±8 kV)

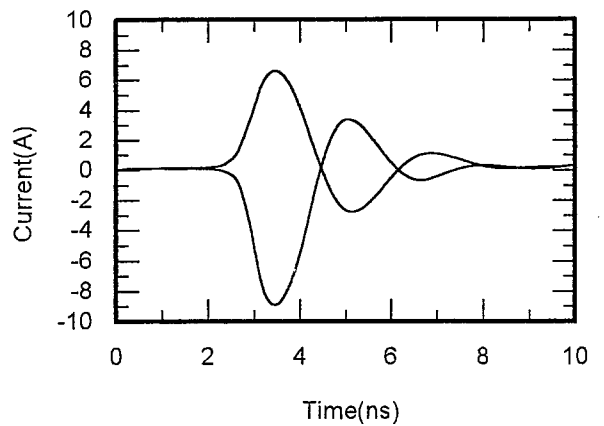


Fig. 14 Spark current wave forms due to a charged disk approaching a sphere electrode after the disk was charged with ±8 kV at the gap length of 2.35 mm.
高圧側電極を球電極へ接近させた時の放電電流 (放電ギャップ長が 2.35 mm での充電電圧=±8 kV)

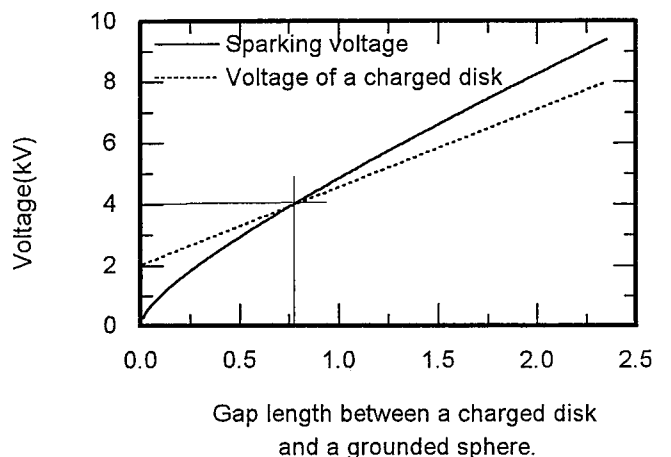


Fig. 15 Relation between voltage of a charged disk and gap length after the disk was charged with ±8 kV at the gap length of 2.35 mm.
高圧側電極と球電極との間隔と帯電電位との関係 (間隔が 2.35 mm の充電電圧=±8 kV)

Table 3 Dependence of the capacitance between discharging electrodes on discharging gap length.
放電電極間の静電容量

Discharging gap length (mm)	Capacitance (pF)		B/A
	Measured (A)	Calculated (B)	
0.2	6.35	6.25	0.98
0.7	4.38	4.17	0.95
1.2	3.25	3.12	0.96
2.35	2.18	2.085	0.96

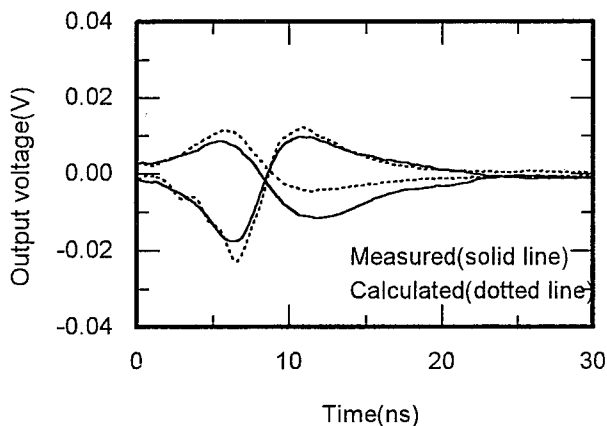


Fig. 16 Induced voltage due to spark discharge (spark-ing voltage=±8 kV).
火花放電による誘導電圧 (火花電圧=±8 kV)

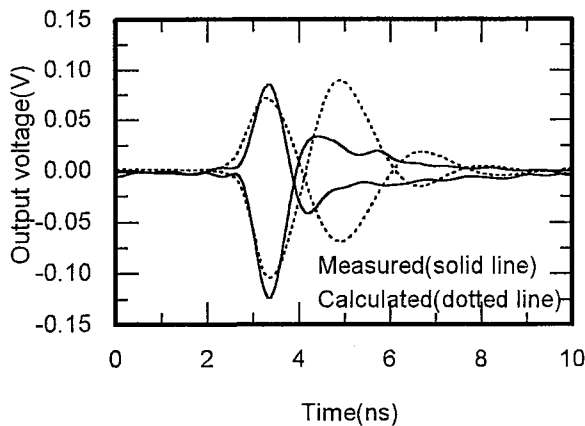


Fig. 17 Induced voltage generated by a charged disk approaching a sphere electrode after the disk was charged with ±8 kV at the gap length of 2.35 mm.
帯電金属円板の球電極に接近時の火花放電による誘導電圧 (間隔が 2.35 mm での帯電電位=±8 kV)

のときの放電ギャップ長は、高圧側電極と球電極間の電界が Fig. 4 に示すように平等電界であるため、火花電

圧が式 (1) で決定されると考えると、火花電圧が+8kV での放電ギャップ長に比較して狭くなる。したがって、火花電圧が低いほど放電電流のピーク値が大きくなる Fig. 5 の実験結果を踏まえると、火花電圧が+8kV の場合に比較して、+8kV に充電後に高圧側電極を接地側電極に接近させて火花放電を発生させたときの放電電流のピーク値も、火花電圧が低下するために、大きくなると考えられる。

次に放電時に発生する磁界によってループアンテナに誘導された電圧をオシロスコープ (入力インピーダンス: 50Ω) で測定した。Fig. 16 は火花電圧が±8kV で、高圧側電極が固定された場合の測定結果であり、10 回測定した平均の波形を示している。Fig. 17 は、放電ギャップ長を 2.35 mm に設定して±8 kV で充電後に高圧側電極を球電極に徐々に接近させて放電させた場合の測定結果を示す。同図で、電源電圧の極性をプラスとした場合は、4 回測定した平均の波形を示し、マイナスとした場合は 3 回測定した平均の波形を示す。高圧側電極を固定して放電させた時の誘導電圧に比較して、高圧側電極を帯電後に球電極に接近させながら放電させたときの誘導電圧の方が、発生する電圧の最大値が大きくなった。

これらの測定値との比較のため、式 (6) に Fig. 13, 14 の電流を代入して Fig. 11 での数値計算と同様に求めた。高圧側電極を固定したときに式 (6) で用いる電気ダイポールの長さ l は、平等電界での±8 kV での火花電圧の放電ギャップ長である 1.91 mm と球電極の高さ (0.8 mm) 及び 2 mm を加えた 4.71 mm とした。また、高圧側電極と球電極の間隔を 2.35 mm として高圧側電極を±8 kV で充電後に、高圧側電極を球電極に徐々に接近させて放電させた場合には、平等電界での 4 kV の火花電圧の放電ギャップ長である 0.77 mm と球電極の高さ (0.8 mm) 及び 2 mm を加えた 3.57 mm を l とした。計算結果を、Fig. 16, 17 に点線で示した。実験の再現性が不十分であるが、測定と数値計算は立ち上がり時間及び第一ピーク値は近い値を示した。

4. むすび

サージ等による放電時に発生する電磁ノイズの基礎的な現象の実験的な把握を目的として、おもに放電の初期に放電が発生する部分に形成される電気双極子間で発生する火花放電現象による放電電流と誘導電圧の火花電圧依存性を実験的に調べ、計算による推定値と比較し次の結果を得た。

- (1) 放電ギャップ長が拡がり火花電圧が高くなるとともに放電電流のピーク値、放電電流の時間微分値の最大値は減少し、放電電流の立ち上がり時間は長

くなった。

- (2) 文献(4)で導出された放電電流の式は、今回の実験では放電ギャップ長が0.7 mm以下では測定した放電電流とほぼ一致するが、放電ギャップ長が1.2 mm以上では測定電流との相違が大きい。
- (3) 火花放電時に発生する磁界によってループアンテナに誘導される電圧は、放電ギャップ長が拡がるとともに減少した。この測定結果は、測定によって得られた放電電流を式(6)に代入して計算した磁界から求めた電圧と概略一致した。
- (4) 放電現象の一つである帯電物体からの火花放電について、初期帯電電位が同一であるときに、帯電物体が接地体へ接近しながら放電が発生する場合と、静止した帯電物体からの放電との現象を比較検討した。静止した帯電物体での接地体との放電ギャップ長に比較して、帯電物体が接地体に接近することによる静電容量の増加が初期の帯電電位を低下させ、結果的に静止した帯電物体からの放電時の放電ギャップ長に比較して短くなると考えられる。むすび(1)の結果を踏まえると、初期帯電電位が同一であるとき、帯電物体が接地体に接近しながら火花放電が発生するときの方が、静止した帯電物体と接地体の場合に比較して、放電電流のピーク値、電流の時間微分値も大きくなるために、発生

する電磁界も大きくなると考えられる。

今後の課題としては、ループアンテナの位相特性も含めたアンテナファクタを用いての磁界測定の計算精度の向上が挙げられる。

参考文献

- (1) S.Ishigami and T.Iwasaki, "Evaluation of charge transition in a small gap discharge", IEICE Trans. commun., E79-B, 474~482, (1996-4).
- (2) 石上, 岩崎: "静電気放電による過渡電磁界の二放射源モデル", 信学ソサエティ大会, B-4-23, 223, (1997-9).
- (3) 富田: "帯電金属円板からの放電電流と磁界の一測定", 電気学会論文誌, 118-A, 5, 575~576, (1998-5).
- (4) O.Fujiwara: "An Analytical Approach to Model Indirect Effect Caused by Electrostatic Discharge", IEICE Trans. Commun., E79-B, 4, 483~489, (1996-4).
- (5) M.Kanda: "Standard Probes for Electromagnetic Field Measurements", IEEE Trans. Antennas and Propagation, 41, 10, 1349~1364, (1993-10).
- (6) M.Honda: "The Characteristics of low-voltage ESD and its threat", Proceedings of EOS/ESDsymposium, EOS-13, 18~25, (1991-9).

(平成 11 年 2 月 20 日受理)