

論 文

静電気放電エネルギーの予測に関する シミュレーション解析

田畠 泰幸*

(1992年2月17日受理)

Simulation Analysis on Estimation of Electrostatic Discharge Energy

Yasuyuki TABATA*

(Received February 17, 1992)

Electrostatic discharges cause to various hazards such as explosions, fires, malfunctions of ICs and static marks on a surface of film. The discharges, especially their energy, have been often discussed in order to prevent the electrostatic hazards. One of the principal technologies for preventing hazards is to estimate the discharge energy before the discharge occurs, but an estimation of the discharge energy has hardly been investigated because the discharge is an indefinite and catastrophic phenomenon. The purpose of this study is to estimate the discharge energy before the discharge. Simulations of the discharges between charged and grounded conductors were tried to solve factors related to the discharge energy. From simply mathematical analyses a few factors for correlating to the discharge energy were deduced and equations for estimating it were introduced. Some kinds of frame concerned with the discharge energy are provided in this paper.

1. はじめに

静電気放電は可燃性物質の着火源となって爆発や火災を誘発したり^{1,2)}、IC、LSIのような大規模集積半導体素子の熱的破壊³⁾、あるいは高分子フィルムの表面に放電痕を作り、品質低下等の原因になる。この静電気放電によって引き起こされる災害や障害（以下、災障害と略記）は、放電エネルギーの熱的作用に起因して発生する。したがって、災障害を未然に防止するには、放電の発生前にそのエネルギーを予測することが出発点となる。

このように、放電エネルギーの予測は災障害防止の基本的な命題である。しかし、静電気放電は帶電物体周辺の電界強度が絶縁破壊電界を超えたときに、不連続に、キャタストロフィックに発生する非線形現象である。そのため放電エネルギーの予測が極めて困難である。換言すれば、線形現象ではないために、一般的の予知理論のよ

うに現状の条件を基礎にして将来が予測できず⁴⁾、帶電状態から放電エネルギーを予測することは一般に不可能である。

現在、災障害防止の分野では、放電エネルギーの予測に代わり、止むを得ず帶電物体に蓄積されている静電気エネルギーが着眼されている。これは、蓄積エネルギーが災障害を誘発するエネルギー以下であれば、放電エネルギーは前者以下であるため、前者に着眼すれば災障害の発生有無が予測できるであろうとする論理である。しかし、放電によって放出されるエネルギーは通常帶電物体に蓄積されているエネルギーの一部であり、これによって災障害の発生有無を予測することは、必ずしも実用的ではない。

以上のような背景から、ここでは、帶電物体と接地導体との間で発生する放電に限定し、この場合の放電エネルギーを放電の発生前に予測する目的で、放電エネルギーに関する簡単なシミュレーション解析を試みた。その結果、放電エネルギーを予測するために着眼しなければならない要因が示唆されるとともに、放電エネルギーは放電の発生前に予測できる見通しが得られたので、それらの結果について報告する。

キーワード：静電気、静電気放電、静電気災障害、放電エネルギー

* 労働省産業安全研究所 (108 東京都港区芝5丁目 35-1)
Industrial Safety Institute, Ministry of Labour,
35-1, Shiba 5-chome, Minato-ku, Tokyo, 108 Japan

2. 放電エネルギーの予測

2.1 シミュレーションの対象

静電気放電には種々のものがある。しかし、災障害を誘発する確率の大きな静電気放電は、通常、帶電物体と接地導体との間で瞬発的に発生するパルス放電である⁵⁾。したがって、ここでのシミュレーションでは、帶電物体と接地導体との間で発生する1個のパルス放電に着眼する。また、帶電物体は、導体、不導体といずれの場合もある。しかし、目的は放電エネルギーに関する主たる要因を解明することであるため、帶電物体は不導体ではなく、解析が簡単である導体を対象とする。

一方、放電エネルギーの予測にあたり、これを放電現象そのものから直接シミュレーションすることは極めて複雑である。したがって、ここでのシミュレーションでは、放電を帶電物体から接地導体への静電荷の移動という単純なモデルに置き換え、以下、このモデルによって放電エネルギーのシミュレーション解析を試みた。

2.2 単一帶電導体からの放電エネルギー

最初は、最も単純な条件である单一の帶電導体から接地導体へ放電が発生したときの放電エネルギーに関する解析を試みる。

いま、放電は、図1に示されているように、帶電した導体Fに接地導体Mが接近したとき、それらの間にパルス的に発生したとする。このときの放電エネルギーWは次式によって与えられる。

$$W = \frac{1}{2}C(V_b^2 - V_a^2) \quad (1)$$

$$C = C_0 + C_m$$

ここで、 V_b 、 V_a はそれぞれ帶電した導体から放電が発生する前と後における電位であり、 C は放電が発生したときの静電容量で、これは上式のように帶電した導体の対地間静電容量 C_0 と接地導体とのそれである C_m との和である。

式(1)は、この式の中に放電発生後の電位が含まれて

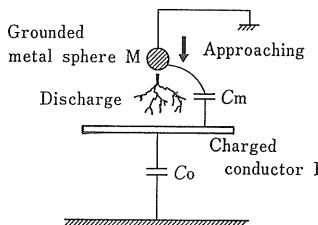


図1 帯電した導体と接地金属球との間で発生する放電

Fig. 1 Electrostatic discharge occurring between charged conductor and grounded metal sphere.

いるため、この式からは放電の発生前に放電エネルギーが予測できないことは申しまでもない。したがって、放電によって帶電した導体から接地導体へ移動する電荷量である放電電荷量 Q_t に着眼すると、これは次式によつて与えられる。

$$Q_t = Q_b - Q_a = C(V_b - V_a) \quad (2)$$

ここで、 Q_b 、 Q_a はそれぞれ帶電した導体の放電発生前と後における帶電電荷量である。

式(2)から V_a を Q_t で表し、これを式(1)に代入すると、式(1)は次式のように表される。

$$W = Q_t V_b - \frac{Q_t^2}{2C} \quad (3)$$

式(3)によると、放電エネルギーは放電発前の電位、静電容量、放電電荷量に依存している。したがって、仮に、これらが放電の発生前に得られれば、放電エネルギーは式(3)によって放電の発生前に予測される。換言すれば、放電エネルギーの予測は、これらの諸量が放電の発生前に得られるかどうかの成否によつている。

上記の諸量の中で、電位と静電容量は、放電の発生前に測定等によって求められ、それらを求める手段は皆無ではない。あるいは、後者の静電容量は、放電の発生前まで帶電電荷量が保存されているため、放電発前の電位が測定等によって得られると $C = Q_b/V_b$ からも求められる。

問題は放電電荷量が放電の発生前に推定できるかどうかであり、これが放電エネルギーを予測するための一つの鍵となる。

過去の研究成果によると、放電電荷量は主として接地導体の形状に依存している^{6,7)}。換言すれば、放電電荷量は主として帶電物体と接地導体との間に形成される電界分布に依存しているよう、これらの成果は、放電の発生前に帶電物体、接地導体の形状に着眼すると、精度は決して高くはないかもしれないが、放電電荷量も放電の発生前に推定できることを示唆している。

以上のように、放電エネルギーは、帶電物体、接地導体の形状等に着眼し、放電電荷量が放電の発生前に推定されると、これと放電発前の電位、静電容量によって式(3)から予測されることになる。

2.3 複数帶電導体からの放電エネルギー

帶電物体が不導体であると、先の導体とは異なり、電位が均一になるように静電荷が分布しない。しかし、実際には電位が均一である不導体からの放電エネルギーを予測しなければならない場合にしばしば直面する。

このように、電位の異なる不導体からの放電エネルギーを予測するため、ここでは電位の異なる不導体の帶電を、電位の異なる複数の導体から構成された帶電と見な

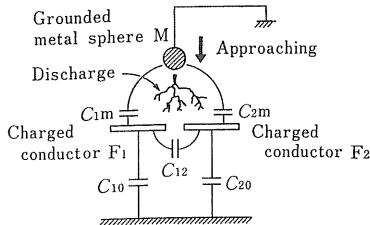


図 2 帯電した複数導体と接地金属球との間で発生する放電
Fig. 2 Electrostatic discharge between two charged conductors and grounded metal sphere.

し、これらと接地導体との間で発生する放電のエネルギーについて解析する。ただし、目的は放電エネルギーの骨格を把握することであるため、導体の数は最も簡単な場合である二つの導体を取り上げる。

いま、放電は図 2 に示されているように、帯電した二つの導体 F_1, F_2 から接地導体 M に向かって同時に発生したとする。このときの放電エネルギー W は、前項と同様に、放電の発生前と後における蓄積エネルギーの差として次式によって与えられる。

$$\begin{aligned} W = & \frac{1}{2} [\{C_1 V_{1b}^2 + C_2 V_{2b}^2 \\ & + C_{12}(V_{1b} - V_{2b})^2\} - \{C_1 V_{1a}^2 \\ & + C_2 V_{2a}^2 + C_{12}(V_{1a} - V_{2a})^2\}] \quad (4) \end{aligned}$$

$$C_1 = C_{10} + C_{1m}$$

$$C_2 = C_{20} + C_{2m}$$

ここで、 V_{1b}, V_{2b} と V_{1a}, V_{2a} は、それぞれ放電の発生前と後における二つの導体の電位である。また、 C_1, C_2 は、放電が発生したときの図 2 に示されている静電容量それぞれの和であり、 C_{12} は二つの導体の間のそれである。ただし、添え字の数字は帯電した二つの導体それぞれに対応している。

一方、放電電荷量 Q_t は次式によって与えられる。

$$Q_t = (Q_{1b} - Q_{1a}) + (Q_{2b} - Q_{2a}) \quad (5)$$

ここで、 Q_{1b}, Q_{2b} と Q_{1a}, Q_{2a} は、それぞれ二つの導体における放電の発生前と後の帯電電荷量である。いま、放電電荷量を二つの導体それぞれに対して求めるとき、それらは次式で表される。

$$\begin{aligned} Q_{1t} &= Q_{1b} - Q_{1a} \\ &= \{C_1 V_{1b} + C_{12}(V_{1b} - V_{2b})\} \\ &\quad - \{C_1 V_{1a} + C_{12}(V_{1a} - V_{2a})\} \quad (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{2t} &= Q_{2b} - Q_{2a} \\ &= \{C_2 V_{2b} + C_{12}(V_{2b} - V_{1b})\} \\ &\quad - \{C_2 V_{2a} + C_{12}(V_{2a} - V_{1a})\} \quad (7) \end{aligned}$$

式(6)と(7)から V_{1a}, V_{2a} を求め、これらを式(4)に代入すると、放電エネルギーの式(4)は次式のように整理される。

$$\begin{aligned} W &= Q_{1t} V_{1b} + Q_{2t} V_{2b} - \frac{C_2}{2A} Q_{1t}^2 \\ &\quad - \frac{C_1}{2A} Q_{2t}^2 - \frac{C_{12}}{2A} (Q_{1t} + Q_{2t})^2 \quad (8) \\ A &= C_1 C_2 + C_2 C_{12} + C_{12} C_1 \end{aligned}$$

式(3)と(8)を比較すると、後者は多少複雑になっているが、この場合も式(3)と同様に、放電エネルギーは放電発生前の電位、静電容量、放電電荷量によって表される。したがって、これらが放電の発生前に得られれば、同様に放電エネルギーは式(8)によって予測されることになる。

注目すべきことは、式(8)の主として第5項に関係したエネルギーである。これについては次節で考察されるが、これが電位の異なる帯電物体から放電が発生したときの放電エネルギーへの影響であって、この項が負であることは、電位が均一である場合のそれに比較して、放電エネルギーは小さくなる場合も起こり得ることを示唆している。

3. 放電エネルギーの考察

前節の解析は、静電気放電という物理現象を直接取り扱ったものではなく、導体に帯電している静電荷の接地導体への移動を放電と見なし、これによる数学的解析から導かれた結果である。しかし、この解析によって導かれた二つの式(3)と(8)は、放電エネルギーの予測にあたって、着眼しなければならない幾つかの示唆を与えていている。したがって、考察にあたっては物理現象との対応について十分に考慮されなければならないが、以下、これらの式から放電エネルギーに関する考察を試みる。

3.1 放電電荷量と放電エネルギー

まず、式(3)に着目すると、この式は、式(2)の関係から次のように変形される。

$$W = Q_t V_b - \frac{Q_t^2}{2C} = Q_t V_b \left(1 - \frac{Q_t}{2Q_b}\right) \quad (9)$$

ここで $Q_t \leq Q_b$ であるが、仮に放電電荷量は帯電電荷量のごく一部であったとする ($Q_t \ll Q_b$)、式(9)は近似的に次式となる。

$$W \approx Q_t V_b \quad (10)$$

すなわち、式(10)は、仮に放電電荷量が放電発生前の電位とは独立で、 $Q_t \ll Q_b$ であるならば、放電エネルギーは放電電荷量にほぼ比例することを示している。

放電現象として、 $Q_t = Q_b$ なる放電の生起する確率は小さい。また、 $Q_t \ll Q_b$ なる条件は常時成立するとも限らない。しかし、帯電物体が不導体で、それからの放電にみられるように、帯電している一部分の静電荷が放電し、 $Q_t \ll Q_b$ なることは導体の場合でも少くない^③。

後者のような場合は、式(10)によると、放電エネルギーは放電電荷量とほぼ比例関係になっており、たとえ放電エネルギーの近似値であれ、放電電荷量は放電エネルギーを予測するために主要な物理量の一つになっている。

3.2 帯電電位と放電エネルギー

次に、放電発生前の電位が異なる場合の放電エネルギーである式(8)について考察する。考察の基本条件としては、ただ単純に比較するにしろ、できるだけ同じ尺度に基づいて考察することが望ましい。そのため、ここではその尺度の一つとして、放電が発生する前の電位に、全帯電電荷量を二つの導体のそれぞれの静電容量の和で除した以下の見かけの電位 V_f を導入する。

$$\begin{aligned} V_f &= \frac{Q_{1b} + Q_{2b}}{C_1 + C_2} \\ &= \frac{\{C_1 V_{1b} + C_{12}(V_{1b} - V_{2b})\}}{C_1 + C_2} \\ &\quad + \frac{\{C_2 V_{2b} + C_{12}(V_{2b} - V_{1b})\}}{C_1 + C_2} \\ &= \frac{C_1 V_{1b} + C_2 V_{2b}}{C_1 + C_2} \end{aligned} \quad (11)$$

上式(11)を式(8)へ代入して整理すると、式(8)は次式に変形される。

$$\begin{aligned} W &= Q_t V_f - \frac{Q_t^2}{2(C_1 + C_2)} \\ &\quad - \frac{4}{2(C_1 + C_2)} \{(V_{1a} - V_{2a})^2 \\ &\quad - (V_{1b} - V_{2b})^2\} \end{aligned} \quad (12)$$

$$Q_t = Q_{1t} + Q_{2t}$$

一方、参考までに式(8)の第5項のみを、上式の第3項のように電位と静電容量によって表すと、それは次式のようになる。

式(8)の第5項

$$\begin{aligned} &= -\frac{4}{2(C_1 + C_2)} \{(V_{1b} - V_{2b}) \\ &\quad - (V_{1a} - V_{2a})\}^2 < 0 \end{aligned} \quad (13)$$

改めて繰り返すことではないが、式(8)の第5項は上式(13)のように恒等的に負となる。また、式(8)の第5項である上式と式(12)の第3項とは多少相違しているものの、いずれもこれらの項は、電位が異なることによって生じた放電エネルギーへの影響である。したがって、ここでは式(12)に着眼し、帯電した二つの導体の放電発生前の電位が等しい場合と、異なる場合のそれぞれの放電エネルギーへの影響について考察する。

いま、帯電した二つの導体から放電が発生したとき、放電発生前の二つの導体の電位が等しい、あるいは異なるにかかわらず、放電電荷量の和である全放電電荷量

$(Q_t = Q_{1t} + Q_{2t})$ が同じであったとする。この全放電電荷量が同じになるという条件は、放電現象として確率が零ではないために成立する。

このような条件のもとに、式(12)に着眼すると、その第3項から明らかなように、放電エネルギーについて以下のことが示される。

1) 放電発生前の電位が等しいと ($V_{1b} = V_{2b}$)、式(12)の第3項は負となるため、放電エネルギーは小さくなり、二つの導体が電気的に接続されていて、放電発生前後における電位が等しくなる場合の放電エネルギーを超えることはない。すなわち、放電発生前の電位がたとえ等しくても、放電発生後に、二つの導体の間では電位が等しくなるように静電荷が移動できないために、それらの間にはエネルギーが蓄積され、放電エネルギーは二つの導体が電気的に接続されて一体になっている場合の放電エネルギーを越えることがない。

2) 放電発生前の電位が異なると ($V_{1b} \neq V_{2b}$)、放電エネルギーは $(V_{1b} - V_{2b})^2$ と $(V_{1a} - V_{2a})^2$ の大小関係によっている。すなわち、放電が発生する前後における二つの導体の間の電位差の大小関係 ($|V_{1b} - V_{2b}|, |V_{1a} - V_{2a}|$) によっており、放電発生前の電位差の方が発生後のそれよりも小さいと、放電エネルギーは小さくなる。この特別な場合が先の 1) に相当する $V_{1b} = V_{2b}$ の場合である。しかし、その逆であると放電エネルギーは大きくなる。換言すれば、放電の発生前後における二つの導体の電位のはらつきによっており、放電発生前の電位のはらつきの方が発生後のそれよりも大きいと、放電エネルギーは大きくなるが、逆であると放電エネルギーは小さくなる。

このように、単なる数学的解析から導かれた結果である式(12)に着眼して放電エネルギーを考察すると、この式の第3項は、正あるいは負にもなることがあり、その生起確率は数学的にいざれも $1/2$ である。したがって、放電エネルギーは、条件によって大きくなり小さくなるようである。

注目すべきことは式(12)と物理現象との対応であり、放電エネルギーが大きくなり小さくなる一因は、上述されたように、二つの導体が電気的に絶縁され、同電位になるように静電荷が移動できないからである。すなわち、電位が均一になるように静電荷の移動がなく、そのため電位にはらつきが生じる結果、それらの間に、電位差に応じたエネルギーが蓄積されるからである。これが放電エネルギーに影響を及ぼし、单一導体あるいは導体の間が電気的に接続されている場合に比較して、放

電エネルギーは小さくもなり大きくもあるようである。これが式(12)の第3項に示唆されており、この項はまさしく二つの導体の間に蓄積されるエネルギーに関与している。しかし、式(12)の第3項についてさらに考察すると、この項はここで対象にしている放電エネルギーには、必ずしも直接関与していないようである。

例えれば、いま仮に、放電現象とは切り放して、図2に示されている帶電した二つの導体 F_1 と F_2 との間だけで、何らかの原因によって静電荷の移動があったものとする。すなわち、二つの導体の間で静電荷の移動はあつたものの、この系全体の電荷量は不变であったと仮定する。この場合、静電荷の移動に伴って生ずる系のエネルギー変化 ΔW は、静電荷が接地導体に移動していないことから、式(12)の放電電荷量は零であって、式(12)において $Q_t=0$ と置けばよく、結果的には式(12)の第3項に一致する次式が導かれる。

$$\Delta W = -\frac{4}{2(C_1+C_2)} \{(V_{1a} - V_{2a})^2 - (V_{1b} - V_{2b})^2\} \quad (14)$$

ただし、上式の V_{1b} , V_{2b} ならびに V_{1a} , V_{2a} は、帶電した二つの導体の放電発生前後における電位ではなく、この場合は静電荷の移動の前後における導体それぞれの電位である。

このように、導体に帶電している静電荷は、これがたとえ接地導体へ移動しなくとも、これが導体間で相互に移動すれば、これに伴って当然のことながら上式(14)によって示される系のエネルギー変化が起こる。式(12)の第3項は、この静電荷の移動に伴うエネルギー変化に対応している。したがって、式(12)は放電による静電荷の接地導体への移動と、これに伴って生起される導体間相互における見かけの静電荷の移動、それらの両者に起因して生ずるエネルギー変化を表している。

実際の放電では、図2に示されている帶電した二つの導体と接地導体との間で放電が発生したとき、それと同時に、時にはこれら二つの導体の間でも放電が発生するかもしれない。換言すれば、二つの導体の間では、後者の放電によって実際に静電荷の移動が起り、見かけの静電荷の移動だけではないかも知れない。しかし、ここで対象にしている放電は、冒頭にも述べられているように、導体に帶電している静電荷の接地導体への移動と置き換えており、この条件のもとで放電エネルギーが考査されている。したがって、導体の間でも放電が起るかもしれないが、この放電は災障害の発生に影響を及ぼさないと仮定すれば、式(12)の第3項は放電エネルギーとして直接に関与しないことになる。すなわち、放電エネルギーは主として式(12)の第1項と第2項によって

おり、電位が異なる導体から接地導体へ放電が発生した場合も、放電エネルギーは見かけの電位、放電電荷量、対地間の静電容量によって予測されることになる。

4. 結 言

放電エネルギーの予測は災害防止の基本であるため、帶電物体と接地導体との間で発生する静電気放電に着眼し、ここでは静電気放電現象そのものではなく、これを帶電物体から接地導体への静電荷の移動という単純なモデルに置き換え、放電エネルギーの簡単な解析が試みられた。その結果、放電エネルギーに関与する骨格が解明されるとともに、放電の発生前にそのエネルギーを予測するために考慮されなければならない主たる要因が解明された。

以下、得られた結果を要約すると次のとおりである。

- (1) 放電発生前の帶電物体の電位が均一、不均一にかかるらず、これらから放電が発生したときの放電エネルギーは、近似値ではあるものの、主として放電発生前の電位、放電電荷量、対地間の静電容量に依存する。したがって、放電の発生前に放電エネルギーを予測するには、これらの諸量が放電の発生前に把握されなければならない。
- (2) 帯電物体の電位とこれから放電が発生したときの放電電荷量とは必ずしも独立ではない。しかし、放電電荷量が帶電電荷量のごく一部であると、放電エネルギーは放電電荷量にはほぼ比例し、近似値ではあるが放電電荷量と放電発生前の電位によって放電エネルギーが予測される。
- (3) 複数の帶電導体と接地導体との間で放電が発生したときの放電エネルギーは、放電発生前の電位がたとえ同電位であったとしても、それらの間が絶縁されて静電荷の移動がないと、電位が均一になるように静電荷が移動できる場合のエネルギーを超えることがない。
- (4) 複数の絶縁された帶電導体と接地導体との間で放電が発生したときの放電エネルギーは、電位が均一になるように静電荷が移動できず、その電位差に応じたエネルギーが導体間に蓄積されるために、それが放電エネルギーに影響を及ぼす。

参 考 文 献

- 1) B. Lewis and G. von Elbe : *Combustion, Flames and Explosions of Gases*, p. 323, Academic Press Inc., New York and London (1961)
- 2) Y. Tabata, T. Kodama and T. Kotoyori : J. Hazardous Materials, 17 (1987) 47
- 3) C.E. Jowett : *Electrostatics in The Electronic Environment*, p. 63, The Macmillan Press Ltd., New

- York (1976)
- 4) A. Halanay : *Differential Equations, Stability, Oscillations, Time Lags*, p. 11, Academic Press, New York (1966)
 - 5) Y. Tabata and S. Masuda : IEEE Trans. Ind. Appl., IA-20 (1984) 1206
 - 6) 田畠泰幸：産業安全研究所技術資料 RIIS-TN-74-2, 労働省産業安全研究所 (1974)
 - 7) H. Kraemer and K. Asano : J. Electrostat., 6 (1979) 361
 - 8) 田畠泰幸：第 18 回静電気研究発表会講演要旨集, p. 55, 高分子学会 (1973)