

過渡接地電圧による静電気放電の検出

大澤 敦*1 市川 紀 充*2

静電気放電 (ESD) が発生すると、それに伴い、放電の瞬間に接地電圧が過渡的に変動する。本報告は、産業プロセスで起こるすべての ESD (コロナ放電、火花放電、ブラシ放電、沿面放電およびコーン放電) の過渡接地電圧 (TEV) を測定し、TEV が ESD の検出方法として有効であるか調査している。コーン放電では、明確な TEV 信号を測定できなかったが、コロナ放電、火花放電、ブラシ放電および沿面放電では、よく用いられている ESD 検出器 (ESD に伴う電磁波検出) が検出できないときでも明確な TEV 信号を測定することができた。さらに、TEV 信号の波形形状が、放電タイプによって異なることから、TEV によってどの放電タイプが起きているのかも同定できることを示した。つまり、TEV による ESD 検出は、放電の可能性だけでなく着火性放電の生起ハザードも同定できるので、事前の静電気リスクアセスメント、特に ESD によるハザード同定に有効である。

キーワード: 静電気放電, 放電検出, 過渡接地電圧, リスクアセスメント, ハザード同定

1 はじめに

ESD (Electrostatic discharge) は産業分野ではハザードとなっていることがあり、たとえば、電子装置の誤動作、電子デバイスの破壊、可燃性雰囲気での着火源など生産障害や火災・爆発の原因となっている。多くの ESD がそうであるように ESD が物体と接地間で起こるとき、接地電圧が、その瞬間、過渡的に変化する。これを過渡接地電圧 (Transient earth voltage: TEV) という。したがって、TEV のモニタリングは ESD 検出、そして、ESD ハザードを同定し、障害や火災・爆発を防止するためのリスクアセスメントに有効であると考えられる。

電力プラントでは、部分放電の検出法として、その電流を検出する方法が主であるが、この他に音波、UHF (Ultra-high frequency)、TEV を用いて、電力プラント設備の絶縁の保守管理をしているところもある^{1,2)}。電子産業では、ESD 管理のためのモニターとして、放電に伴う電磁波を検出する方法を用いており、ESD 検出器として市販もされている。しかしながら、電磁波による検出は、ESD からの距離に依存するので、検出できないこともある。さらに、カーゴタンカーのジェット水洗浄において電磁波による検出を用いた報告^{3,4)}があるが、電磁波による ESD 検出が現実的に妥当でないことを立証している。

本報では、産業現場で起こりうるすべての ESD (コロナ放電、火花放電、ブラシ放電、沿面放電およびコーン放電) に伴う TEV を測定し、TEV による ESD 検出の可能性を調査した^{5,6)}。

2 実験

コロナ放電、火花放電、ブラシ放電および沿面放電を接地した (接地線: 幅 1 cm, 長さ 1 m のすずメッキ平編線) 金属 (銅) ディスク (直径 1 m) 上^{5,6)}で発生させて、それに伴う TEV を電圧プローブ (Tektronix P2220,

200 MHz) を用いてデジタルストレージオシロスコープ (Tektronix TPS2024, 200 MHz) で観測した。なお、TEV 測定には、直接に接地電圧を測定する方法のほかに、絶縁性シート (PVC: polyvinyl chloride, 厚さ 0.3 mm) を介した容量結合で測定する方法も調査した (元来、電力プラント応用では後者の方法が用いられているが、接地電圧を測定し、ESD の電流は直流分がない、または、ほとんどないので、容量結合の必要はない)。TEV 測定と同時に、先の電子産業でよく用いられている電磁波による ESD 検出器 (Trek Model 900) も用いた。コーン放電は、実規模の空気輸送充電装置を用いて、TEV によるコーン放電検出の可能性を調査した。

1) コロナ放電

図 1(a)のように銅ディスク上にステンレス製の針電極 (先端の曲率半径 0.02 mm) を置いて (間隔 5, 10, 15 mm)、これに放電開始する負の高電圧 (Max-Electronics HV α -30K1R/10: 正負切換可) を印加して負コロナ放電を発生させて、これに伴う TEV を観測した。

2) 火花放電

火花放電は、図 1(b)に示すように、先の高電圧電源 (2.0 kV) によって抵抗 (60 G Ω) を介してキャパシタ (7, 20 または 40 pF) を充電し、これを金属球 (直径 30 mm; SUS 304) と接地銅ディスク間 (間隔 0.3, 0.6 または 0.9 mm) で放電させることによって発生させた。これにより、放電開始電圧を超えれば、周期的に火花放電が生じることになる。このときの TEV を観測し、キャパシタ (放電エネルギー) と放電ギャップの影響も調査した。

3) ブラシ・沿面放電

ブラシと沿面放電は、図 1(c)に示すように、絶縁性シート (厚さ 0.2 mm の PTFE: polytetrafluoroethylene または厚さ 0.1 mm のポリエステル) を接地した銅ディスク上に置いて、これを帯電させて、接地した、先と同じ金属球をこの絶縁性シートに近づけることによって発生させて、これに伴う TEV を測定した。なお、ブラシ放電では、乾燥させた紙でシートを擦ることによる摩擦帯電、また、沿面放電では、-20 kV のコロナ放電 (直列抵抗 3 M Ω) によるコロナ帯電を用いてシートを帯電

*1 労働安全衛生総合研究所電気安全研究グループ

*2 工学院大学工学部電気電子工学科

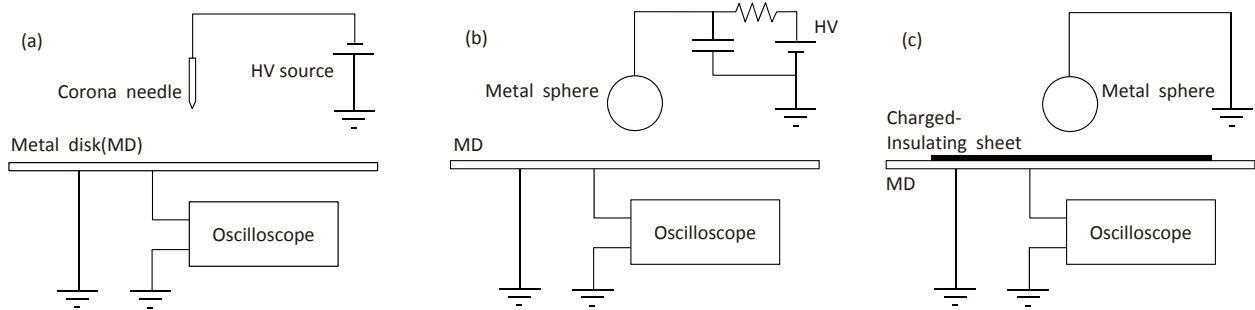


図1 TEV信号を測定する実験装置 (a) コロナ放電, (b) 火花放電, (c) ブラシ・沿面放電

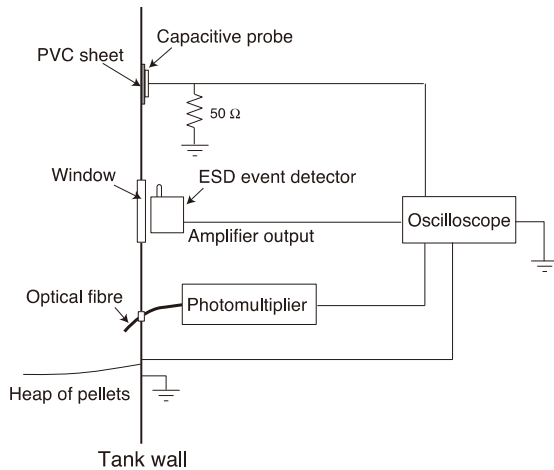


図2 コーン放電検出の実験装置

させた。さらに、ブラシ放電では、帯電したフィルムを接地銅ディスクから剥がすときの放電についても調査した。

4) コーン放電

コーン放電に伴う TEV 信号は、循環型の空気輸送充てん装置^{7,8)}を用いて調査した。接地したタンク（直径 1.5 m）に PP (polypropylene)ペレット（平均粒径約 3 mm）を循環させてタンク内に蓄積された PP ペレットの堆積層表面で、コーン放電を発生させた。TEV 信号は、直接にタンクの電位を測定するほかに、先の絶縁性シートを介した容量結合でも測定した。同時に、放電の生起を確認するために、タンク内に光ファイバーを挿入し、タンク表面の放電発光を光電子増倍管（Hamamatsu Photonics R928, Spectral response 165–900 nm）にて測定した。また、先の ESD 検出器をタンク窓近傍に配置し、この検出器の高周波アンプの出力をオシロスコープで観測した（図 2）。

3 結果および検討

種々のタイプの典型的な TEV 信号を図 3 に示す。すべての TEV の波形は減衰振動し、波形形状の特徴は放電タイプに大きく依存した。このような減衰振動する波形は、火花、ブラシ、および沿面放電の電流にも観測されている^{9,10)}。TEV は接地に流れる放電電流の結果の現象と解釈できるので、放電を RLC 直列回路で表現すると、

TEV 信号 V_{TEV} は、減衰振動のエンベロープを表す減衰係数 α

$$\alpha = \frac{R}{2L} \quad (1)$$

と振動周波数 ω_d

$$\omega_d = \omega_0 \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (2)$$

を用いて

$$V_{TEV}(t) = Ae^{-\alpha t} \sin \omega_d t \quad (3)$$

で表される。ただし、

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (4)$$

$$\zeta = \frac{\alpha}{\omega_0} = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (5)$$

ここで、 R は放電抵抗、 L は接地のケーブルのインダクタンス、 C は放電ギャップのほかに火花放電では接続したキャパシタ、また、ブラシ・沿面放電では絶縁性シートのキャパシタンスも含まれる。係数 A は放電前の帯電電荷によって生ずる電位、正確には放電開始電圧に関連する。さらに、(3)式の時間積分は、放電電荷に関連する量となる。つまり、TEV 信号は、生じた放電の情報が含まれていることを示している。振幅、減衰係数、振動周波数を用いて、放電タイプを定量的に同定するためにはさらなる調査が必要であるが、生起条件が異なる種々の放電タイプの放電電流の波形形状にその特徴が現れるので^{9,10)}、観測された TEV 波形にも放電タイプの特徴が反映している。

さらに、放電が接地に対して起きるとき、その放電電流は必ず接地に流れるので、よく用いられている電磁波による ESD 検出器では検出できなかった弱い放電でも TEV 信号を確実に観測できた。この結果は、TEV による検出が、この ESD 検出器の補助的手法としても有効であることを示唆している。

1) コロナ放電

コロナ放電に伴う典型的な TEV 信号を図 3(a)に示す。このときの針電極と接地銅ディスクの間隔は 15 mm、印

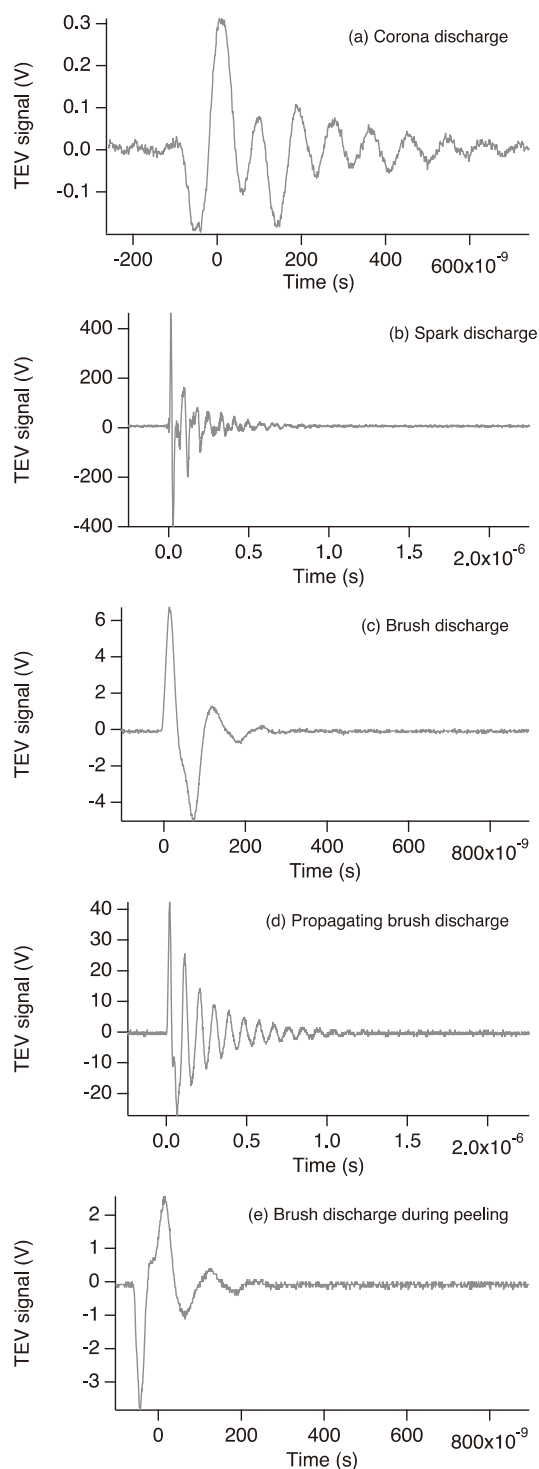


図3 ESDに伴うTEV信号 (a) コロナ放電, (b) 火花放電, (c) ブラシ放電, (d) 沿面放電, (e) ブラシ放電 (引き剥がし: ポリエステル)

加電圧は-3.6 kVでコロナ開始電圧に相当する。負電圧が放電する負コロナであるため、TEV信号の最初のピークの極性は負となっており、TEVは放電極性の情報も含有していることを示す。他の放電タイプに比較して、振幅が最も小さく、エンベロープの時間も短い。TEVは、コロナ放電の低い放電エネルギーと非着火性に相関があることを示している。つまり、後にも述べるように、TEV信号には放電の着火性の情報が含まれていることを示し

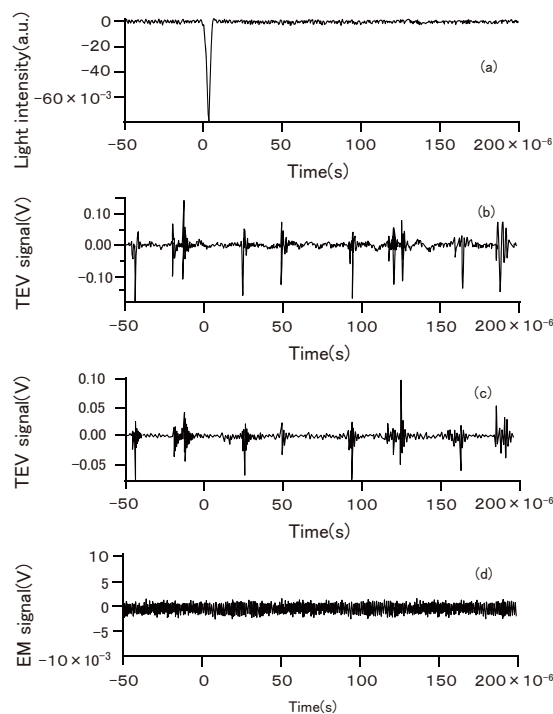


図4 コーン放電の検出 (a) 放電発光, (b) TEV, (c) 容量型TEV, (d) 電磁波信号

している。

2) 火花放電

火花放電に伴う典型的なTEV信号を図3(b)に示す。その波形は、比較的に高いピークと長いエンベロープを持つ減衰振動波形である。数百ボルトの最大ピークは、放電ギャップ（球電極と接地銅ディスクの間隔）が長くなるとともに増加する。0.3 mmから0.9 mmの変化で、そのピークは約400 Vから900 Vまで増加した。これはギャップが長くなると、放電開始電圧が高くなってしまいうからである。また、このピークの振幅は、充電したキャパシタにも依存する。同じ放電開始電圧でも、それに充電されている電荷は、キャパシタが大きいほど高くなるからである。さらに、正の高電圧を用いた火花放電であるので、最初のピークは正になっている。また、TEVのピーク電圧は、他のタイプの放電と比較して火花放電が最も高い。これらの結果は、TEV信号には、火花放電の特徴、特にエネルギー（着火性）に関連する情報が含まれていることを示している。

3) ブラシ放電

図3(c)に示すように、ブラシ放電に伴うTEV信号も検出可能である。他の放電タイプのTEVと比較して、信号の期間が短く、現れるピークの数もより少なく、振幅の小さな減衰振動となった。これらは、放電エネルギーが小さく着火性が低いブラシ放電の特徴を表している。

帯電したシートを接地銅ディスクから引き剥がすときに生じるブラシ放電のTEVも観測した(図3(e))。TEVの最初のピークの極性が、シートの帯電の極性に依存していることが示された。たとえば、摩擦帯電では、ポリエステルは正に帯電、PTFEは負に帯電するが、これを

引き剥がすときのブラシ放電に伴う TEV の初めのピークの極性は、ポリエステルで負、PTFE で正となった。帯電した電荷が接地から離れることから、逆の極性となっている。この結果は、TEV によって帯電物体の極性の見積も可能であることを示している。

4) 沿面放電

沿面放電 (Propagating brush discharge) に伴う TEV 信号は、図 3(d) に示すように、他の放電タイプの TEV と比較して、はっきりとした減衰振動となり、ピーク電圧も比較的高く、エンベロープも長い。TEV 信号の振動周波数 ω_d は、使用したシート材料に依存し、ピークの振幅 (ポリエステルのピーク電圧: 約 100 V, PTFE: 約 40 V) も、シートの帯電電位 (ポリエステルのコロナ帯電電位は-6 kV, PTFE のそれは-3.5 kV) に依存した。これらの結果は、TEV 信号が沿面放電の特徴である高い着火性の情報を含んでいることを示している。

5) コーン放電

しかしながら、コーン放電に伴う明確な TEV 信号を観測することはできなかった。コーン放電に伴う TEV、容量型 TEV、放電発光および電磁波信号の測定結果を図 4 に示す。ここで、光電子増倍管とオシロスコープとの接続に 1 m の同軸ケーブルを用いているが、このケーブルによる遅延時間 5.6 ns (1 V パルス電圧による測定値) は無視できるほど短い。

コーン放電の着火性 (数百 kV の帯電による放電; 放電電荷は数百 nC; エネルギーは数十 mJ^{11,12)}) はブラシ放電よりも高いことから、図 3 で観測されたブラシ放電の TEV 信号レベルと同等あるいはそれ以上の信号が観測されると予測したが、発光のみ明確な信号が観測され (発光ではコーン放電検出できることを示している)、他の方法では放電 (発光信号) に同期した明確な信号を観測できなかった。

なお、TEV 信号に含まれるパルスは、PP ペレットを輸送しないで、装置を稼働しても現れ、調査した結果、空気輸送システムの制御系回路からのノイズであることが判明した。

コーン放電は、閉ざされた金属タンク内で起こる放電であるので、ファラデーカップ (ケージ) の測定原理と同じで、カップ (タンク) 内の放電や電荷分離は、正と負の電荷 (放電の場合、電子・負イオンと正イオン) が同じだけ発生するので、打ち消しあって、放電が起きてもその電荷を測定することができない。このため、ノイズがないとしても TEV が観測できなかったとも考えられる。つまり、コーン放電の TEV に依る検出は、原理的に不可能なのかもしれない。しかしながら、放電が、タンク内にもともとあった電荷の一部を中和し、残った反極性のイオンがタンク壁に到達することがあれば、それでも、すべての反極性イオンが一瞬に輸送されることはないので信号レベルはかなり小さくなるが、これを TEV として観測できるかもしれない。これを確認するためには、ノイズを軽減した上で信号の増幅が必要であるが、放電の発光信号に同期した明確な TEV 信号がない

ことからわかるように TEV によるコーン放電検出は困難と推測される。

本結果は、潜在するノイズによる誤検出を避けるため、接地電圧に含まれるノイズを予め調査しておく必要があることも示唆している。

4 結論

ESD が接地に対して起こるとき、TEV によって ESD 検出が可能であることを示した。TEV 観測またはモニタリングは、接地電圧をオシロスコープで測定するという極めて簡単な方法であり、さらに、その信号波形が ESD の特性を含んでいることから、放電検出のみではなく、放電タイプ (着火性放電ハザード) の同定までもが可能である。TEV 観測は、事前の静電気リスクアセスメント、特に ESD に起因したハザードを同定するときに有効である。

文 献

- 1) Renforth L, Seltzer-Grant M and Mackinlay R. On-line partial discharge testing of outdoor HV plant - Applying experiences from 10 years of PD testing indoors. 19th Int. Conf. Electricity Distribution 2007 Paper 0675.
- 2) Makalous S, Tenbohlen S and Feser K A. Detection and location of partial discharges in power transformers using acoustic and electromagnetic signals. IEEE Trans. Diels. El. Insul. 2008; 15: 1576-1583.
- 3) Chubb J N. Practical and computer assessments of ignition hazards during tank washing and during wave action in part-ballasted OBO cargo tanks. J. Electrostat. 1975; 1: 61-70.
- 4) Butterworth G J. The detection and characterization of electrostatic sparks by radio methods. Inst. Phys. Conf. Ser. 1979; No. 48 97-105.
- 5) Ichikawa N. Study on detection of negative corona discharge generated in rod-plane air gap by using external electrode method. Plasma Sci. Technol. 2007; 9: 686-689.
- 6) Ohsawa A, Ichikawa N. ESD detection by transient earth voltage. J. Phys. Conf. Ser. 2013; 418: 012054 (6pp)
- 7) Kodama T, Suzuki T, Nishimura K, Yagi S and Watano S. Static charge elimination on pellets in a silo using a new nozzle-type eliminator. J. Electrostat. 2002; 55: 289-297.
- 8) Mogami T, Suzuki T, Choi K-S and Ikehata T. Control of electrostatic charge for powder by using feedback control-type ionizer system. J. Loss Prev. Proc. Ind. 2010; 23: 237-241.

- 9) Norberg A, Szedenik N and Lundquist S. On the pulse shape of discharge current. *J. Electrostat.* 1989; 23: 79–88.
- 10) Greason W D, Kucerovsky Z, Bulach S and Flatley M W. Investigation of the optical and electrical characteristics of a spark gap. *IEEE Trans. Ind. Applicat.* 1997; 33: 1519–1526.
- 11) Glor M and Schwenzfeuer K. Occurrence of cone discharges in production silos, *J. Electrostat.* 1997; 40 & 41: 511–516.
- 12) Ohsawa A. Computer simulation for assessment of electrostatic hazards in filling operations with powder, *Powder Technol.* 2003; 135–136: 216–222.