

狭ギャップを有する浮動金属体における誘導ESDについて

Induced ESD on the Floating Metal Objects with a Small Gap

本田昌實

Masamitsu Honda

(株) インパルス物理研究所
Impulse Physics Laboratory, Inc.

Abstract- Discharge phenomenon happens at the small air gap (some 100 μm or less) between a charged floating metal object and grounded metal object due to changing electrostatic fields (E_s). This discharge phenomenon calls "induced ESD". As a result, ultra short impulsive electromagnetic fields are radiated from the metal objects. Power and polarity of the impulsive electromagnetic fields are analyzed using a short monopole antenna ($L=10\text{mm}$) and a small one-turn loop antenna ($\phi=10\text{mm}$).

I. はじめに

地上の電子装置で、最近気になることが起きている。それは、人体からの直接的な放電が起きていないにも拘らず、障害（間欠的な回路誤動作に起因するシステム不調）が発生してしまう事である。状況としては、人が装置に近づく時、或いはその前を通過して遠ざかった時、等に障害が起こる。厳重なESD耐性試験 [1] を実施しても障害は再現できない為、当初は“静電気ではない”とされ、長期化する事が多い。

原因は、①電子装置に存在する浮動状態の金属が静電誘導で帯電する、②これと狭い間隙で隣接している金属フレーム（接地導体）との間で放電が発生し、③この時の高周波ノイズが、ケーブル経由で回路に侵入して、誤動作を誘発した。

静電誘導に起因して放電が発生する状況であり、筆者はこれを“誘導ESD” [2] と称している。この問題は1980年代に大型コンピュータシステムの稼働現場で散見されたが、余り一般化されず、昨今の電子機器／装置のプラスチック化や、半導体デバイスの低電圧／高速動作化に伴い、再び出現する様になった。

II. 誘導ESD事象の成り立ち

2. 1. 非接地浮動金属体の誘導による帯電

絶縁物の留め金、絶縁物の固定用金属、絶縁物中にある金属スリット状型枠、ケーブルコネクタの空きピン、プリント基板（PCA）上の開放トレース、PCA上のICソケットピン、PCA保持金具、等の非接地金属体は、変動静電界に曝されると、静電誘導で帯電する。

変動静電界の生成は、例えば帯電体の運動によるものや、固定位置での電位変動等がある。非接地の金属体は、この変動静電界に曝されると、誘導帯電する。一連の実験 [例えば3] によると、誘導した電荷は単極であり、場所に依らず同極性の静電荷が分布する。図1 帯電体との間に（相対）運動がある場合の誘導電荷の極性は、運動方向により反転（ $+\leftrightarrow-$ ）する。

図2



図1：プラス帯電体が非接地の金属体に近づく（速度 $+v$ ）と、全体がプラスに誘導帯電する

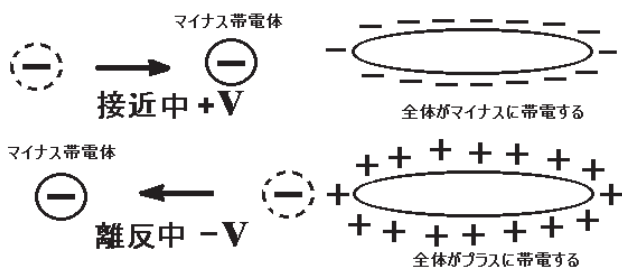


図2：マイナス帯電体が無帯電の非接地金属体に速度 $+v$ で近づく時（上）は、全体がマイナスになるが、遠ざかる（速度 $-v$ ）時は、全体がプラスになる

高抵抗（ $4\text{ M}\Omega$ ）で接地された状態にある銅板（ $110\text{ mm} \times 47\text{ mm}$ 、厚み 1 mm 、静電容量 2.9 pF ）の近くを、マイナス 3 kV に帯電した金属板（ $160\text{ mm} \times 70\text{ mm}$ ）が遠くから接近して来て、 30 mm のところまで 10 秒停止し、元の方へ戻る時の銅板の誘起電圧をペン書き記録計（入力抵抗 $4\text{ M}\Omega$ ）で測定した。接近／離反速度（ v ）は共に毎秒 15 mm 。

接近中はマイナスの電荷が誘起する（誘導電圧： -1120 V ）が、運動が停止（ $v=0$ ）すると、誘起電圧はゼロ V になる。ここから離れる方向に動き出すと、今度はプラスの電荷（誘導電圧 $+940\text{ V}$ ）が誘起する。図3

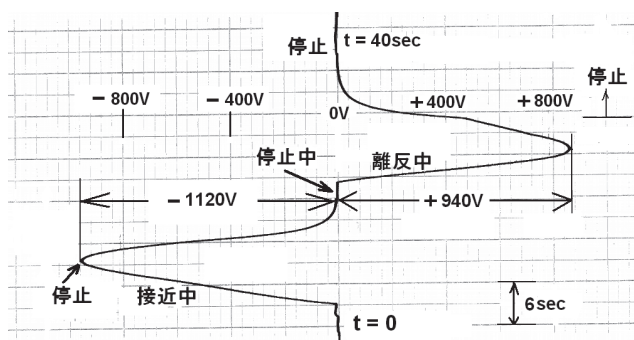


図3：高抵抗で接地された金属体に帯電体（ -3 kV ）が接近／離反する時の誘導電荷の極性
 接近中の速度： $v = +15\text{ mm/s}$
 最大誘起電圧： -1120 V
 運動停止時間： 10 秒
 離反中の速度： $v = -15\text{ mm/s}$
 最大誘起電圧： $+940\text{ V}$

次に、帯電体（ -3 kV ）が一定の速度（ 15 cm/s ）でこの銅板の近く（ 30 mm ）を通過して行く時の誘起電圧を測定した。その結果、接近時はマイナス電荷（最大 -960 V ）が誘導するが、遠ざかり始めると誘起電荷の極性は急にプラスに転じ、最大で $+880\text{ V}$ になった。そして直ちに減衰を初め、運動が停止（ $v=0$ ）すると、誘起電圧はゼロ V になった。図4

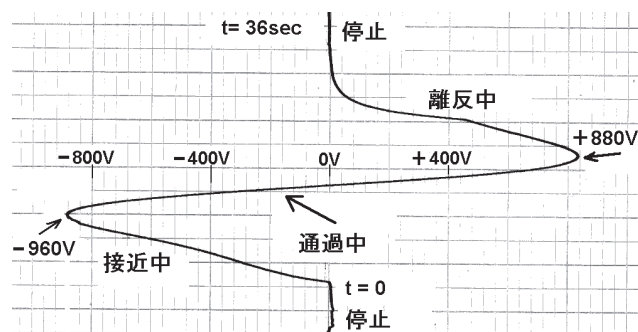


図4：高抵抗で接地された金属体の近くを帯電体（ -3 kV ）が通過する時の誘導電荷の極性
 接近中の速度： $v = +15\text{ mm/s}$
 最大誘起電圧： -960 V
 通過／離反中の速度： $v = -15\text{ mm/s}$
 最大誘起電圧： $+880\text{ V}$

変動静電界による浮動金属体の誘導電荷量は、ア）帯電体の電圧 V （電界 E ）、イ）相互の距離 d 、ウ）相対運動速度 v 、エ）夫々の表面積 $S_1 S_2$ 、等の諸条件に関係する事が実験によりわかってきている。この中で特に速度 v の項は支配的で、 v がゼロだと電荷は誘導しない。例えば図3の停止中（ 10 秒間）では、金属体から 30 mm の所に -3 kV の帯電体があるが、この金属体の誘起電圧はゼロ V になっている。

電子装置の使用環境で、非接地金属体の誘導電圧を測定すると、概略数百 V から数 kV は誘導している事が多い。この誘導電圧は厳密には、環境の温湿度、帯電体の運動履歴、帯電体と非接地金属体との位置関係、非接地金属体の形状、非接地金属体と周辺部（接地体）との位置関係、非接地金属体と接している絶縁部の材質（電荷漏洩パス）、放電（コロナ含む）有無、大気イオン、測定系との電界結合、等の影響を受ける。

2. 2 狭いギャップの存在と放電の発生

電子装置の外装取り付け部（勘合機構）には、設計上の理由で狭い間隙が必要となる場合と、保守作業や経年変化等で、不本意ながら浮動状態になってしまう場合がある。

この様な狭い間隙 g を持つ非接地の金属体の電圧が上昇すると、ある電圧で放電が起こる。この放電は、放電部の電極となる双方の金属体表面の形状や、間隙近傍の絶縁物の配置状況にも因るが、放電形態は主として火花放電である。電極形状を平行平板とみなし、大気中（760torr、20°C）でのパッシェン則を適用すると、間隙 g と火花電圧 V_s の関係は以下の簡易式* [4] で求める事が出来る。

$$V_s = 23.85 g \left(1 + \frac{0.329}{\sqrt{g}} \right) \quad [\text{kV}]$$

V_s : 火花電圧 [kV]

g : 間隙幅 [cm]

$g = 50 \mu\text{m}$ では $V_s = 675 \text{V}$ 、
 $g = 100 \mu\text{m}$ では $V_s = 1023 \text{V}$ 、
 $g = 150 \mu\text{m}$ では $V_s = 1319 \text{V}$ 、
 になる。

誘導電圧は、概略数百Vから数kVに達する事があるので、間隙 g が数十 μ から数百 μ の範囲にあれば、ここで放電が起こる事が考えられる。

* : この式は高電圧機器の絶縁設計等で使うもので、間隙 g が上記の様なマイクロメートルオーダーでは誤差が大きくなる。

III. 誘導ESDによって発生する過渡

電磁界の性質

非接地/浮動状態にある金属体に誘導した電荷が放電すると、通常の静電気放電（ESD）と同様に、雑音電波（過渡電磁界 [5]）が放出される。この過渡電磁界の性質を調べる為、以下の如き実験を行なった。

3. 1 誘導ESD源及びその発生方法

誘導ESD発生源

2つのワッシャー（真鍮製、直径21mm、厚み2mm、静電容量約1pF）AとBを約0.1mmの間隔（gap）を取って、アクリル板（60mm x 150mm、厚み2mm、絶縁抵抗約 $10^{14} \Omega$ オーダ）にエポキシ系の接着剤（絶縁抵抗約 $10^{13} \Omega$ オーダ）で貼り付けた。従って、ワッシャーAは非接地浮動状態にあり、変動電界に曝す事により、誘導帯電する。ワッシャーBは銅箔（45mm x 85mm）に接続してあり、指を常時この銅箔に触れる事により、接地する。図5

この間隙（約0.1mm）では、ワッシャーA（図5の上側）の電圧が約1.1kVを越えると、放電が発生する事を別途確認している。

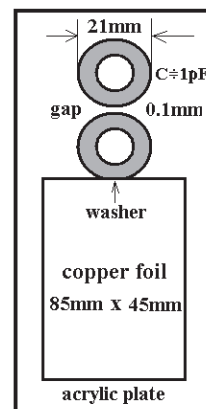


図5 : 誘導ESD発生源

上のワッシャー（非接地浮動金属体）が誘導で帯電すると、下のワッシャー（銅箔経由で接地されている）との間にある狭い間隙（約0.1mm）で、放電が発生する

誘導ESD発生方法 図6

帯電体接近時の放電発生

マイナスに帯電したテフロンシート（例：-5kV）、またはプラスに帯電したアクリル板（例：+5kV）を規定の位置（例：25cm）から誘導ESD発生源に近づけて行き、これの手前（例：5cm）で止める。放電は帯電体が接近中のみ起こり、ワッシャーの寸前で、停止している状態では起こらない。接近速度（+v）は毎秒数センチ～数十センチ。

帯電体離反時の放電発生

同様にテフロンシート（-帯電）、またはアクリル板（+帯電）を、規定の位置（例：誘導ESD発生源の手前5cm）から遠ざけて行くと、運動中にのみ放電が発生する。運動を停止すると、放電は起こらないが、再び離反運動を開始すると、放電が発生する。離反速度（-v）は毎秒数センチ～数十センチ。

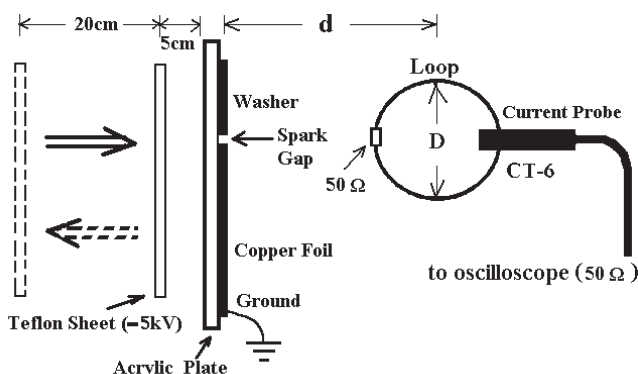


図6：誘導ESD発生方法と、放電時に放出される過渡電磁界の測定（過渡磁界の受信例）

誘導ESD発生源を固定してマイナスに帯電したテフロンシート（-5kV）、またはプラスに帯電したアクリル板（+5kV）を運動させる。過渡電磁界の測定の為、距離dの所に一回巻きループアンテナ、またはショートモノポールアンテナ [6] を配置する。

上記の放電発生は、誘導ESD発生源を固定静止している状況であるが、帯電体（テフロンシート、アクリル板）を固定し、誘導ESD発生源を運動（帯電体に接近/帯電体から離反）させても全く同様の状況を示す。即ち、放電は相対運動があった時のみ起こり、静止時には全く起こらない。

3. 2 過渡電磁界の測定方法

誘導ESD時に発生する過渡電磁界を測定する為、以下の方法を用いた。

過渡磁界

磁界の受信には直径（D）10mmの一回巻きのループアンテナを用いた。高速立ち上がりの

パルス状誘導電流を終端する為、このループに50Ωのチップ抵抗（1/8W）を直列に入れた。パルス状誘導電流を測定する為、ループに小型の貫通型電流プローブ（Tektronix CT-6 Current Probe、250kHz-2GHz）を通し、この出力（5mV/1mA）はオシロスコープ（Tektronix TDS 684C 1GHz、5Gs/s 50Ω）に接続した。このループアンテナは波源から距離（d）のところに波源と直角（図6）に配置した。

過渡電界

電界の受信には長さが10mmのショートモノポールアンテナを用い波源と平行に垂直に配置した。このアンテナ出力は、そのままオシロスコープ（Tektronix TDS 684C 1GHz、5Gs/s 50Ω）に接続した。（アンテナ長さが25mmを越えると、誘起電圧が大きくなり20dbアッテネータを使わないと測定出来ない）

3. 3 測定結果

帯電体の運動方向と誘導電流極性の関係

マイナス約5kVに帯電したテフロンシートをワッシャーに近づける時と、ワッシャーから遠ざける時では、ループ誘導電流（インパルス状）の極性は反転する。図5、図6

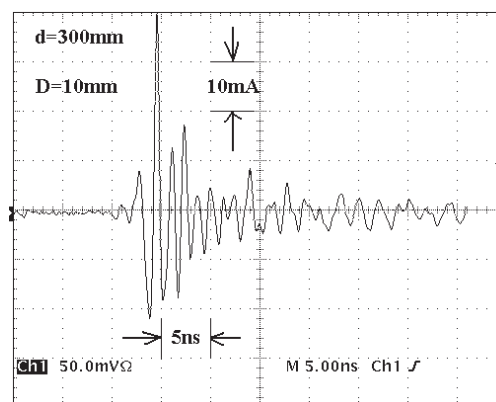


図7：ループアンテナ誘起電流（+）波形
テフロンシートをワッシャーに近づける時
距離（d）= 300mm
縦軸：10mA/div 横軸：5ns/div
電流のゼロピーク値 $I_{0p} = +40mA$

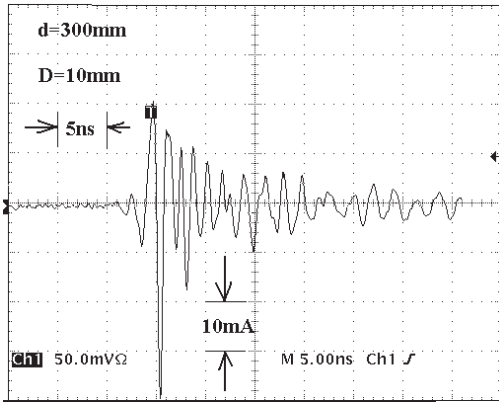


図 8 : ループアンテナ誘起電流 (-) 波形
テフロンシートをワッシャーから遠ざける時
距離 (d) = 300 mm
縦軸 : 10mA/div 横軸 : 5ns/div
電流のゼロピーク値 $I_{0p} = -40 \text{ mA}$

ループアンテナによる過渡磁界測定のみとめ：
[テフロンをワッシャーに近づけた時]
⇒ プラス極性パルスが放出される
[テフロンをワッシャーから遠ざけた時]
⇒ マイナス極性パルスが放出される
注：テフロン (-) の代わりにアクリル (+)
を使うと、パルス極性は全て反転する。

帯電体の運動方向と誘起電圧極性の関係

プラス約 5 kV に帯電したアクリル板を、ワッシャーに近づける時と、ワッシャーから遠ざける時では、ショートモノポールアンテナの誘起電圧極性は反転する。図 9、図 10

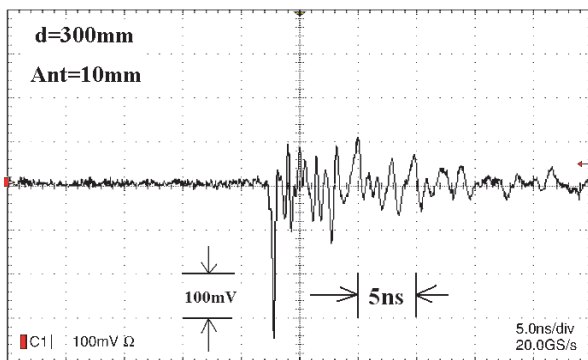


図 9 : モノポールアンテナ誘起電圧波形 (-)
アクリル板をワッシャーに近づける時
d=300mm 縦軸 : 100mV/div 横軸 : 5ns/div
電圧のゼロピーク値 $V_{0p} = -350 \text{ mV}$

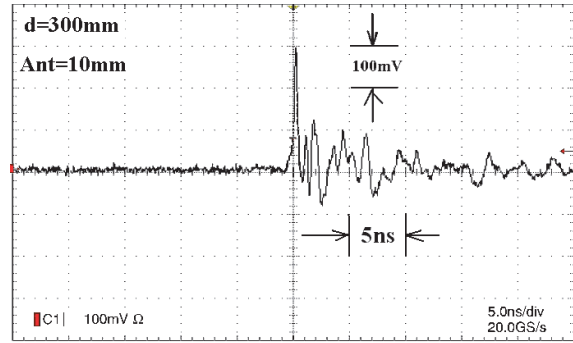


図 10 : モノポールアンテナ誘起電圧波形 (+)
アクリル板をワッシャーから遠ざける時
d = 300 mm
縦軸 : 100mV/div 横軸 : 5ns/div
電圧のゼロピーク値 $V_{0p} = +300 \text{ mV}$

ショートモノポールアンテナによる過渡電界測定のみとめ：
[アクリルをワッシャーに近づけた時]
⇒ マイナス極性パルスが放出される
[アクリルをワッシャーから遠ざけた時]
⇒ プラス極性パルスが放出される
注：アクリル (+) の代わりにテフロン (-)
を使うと、パルス極性は全て反転する。

帯電体の運動方向と論理回路 (F/F) の反応
誘導 ESD 発生源 (垂直) から水平距離 50 m の所に論理回路 (74LCX74, Dual "D" type flip flop、図 11、表 1) を配置して、放電時の過渡電磁界に暴露し、帯電体 (テフロンシート、アクリル板) の運動方向と論理回路の反応 (F/F の "Set") を調べた。その結果を表 2 に示す。

表 1 : 74LCX74 の論理表

74LCX74 FUNCTION TABLE				OUTPUTS	
INPUTS					
PRE	CLR	CLK	D	Q	\bar{Q}
L	H	X	X	H	L
H	L	X	X	L	H
L	L	X	X	H↑	H↑
H	H	↑	H	H	L
H	H	↑	L	L	H
H	H	L	X	Q ₀	\bar{Q}_0

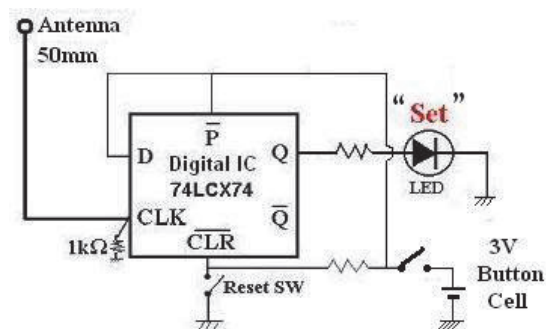


図 1 1 : 誘導 E S D に暴露した論理回路 (F / F)

I C : 74LCX74, Dual "D" type flip flop
 供給電圧 : 3 . 3 V ボタン電池
 リード線 (受信アンテナ) : 5 0 mm
 リード線接続先 : クロック (CLK) 入力部
 F / F 反転の確認 : L E D ("Set") の点灯

表 2 : 帯電体の運動方向と F / F の反応

	接近	離反
テフロン (-)	"Set"	反応せず
アクリル (+)	反応せず	"Set"

実験によると、この論理 I C (74LCX74) は、テフロンシートをワッシャーに近づける時は反応 (F / F が "Set") するが、遠ざける時は反応しない。一方、アクリル板の場合は、ワッシャーに近づける時は反応しないが、遠ざける時は反応 (F / F が "Set") する。表 2

論理表 (表 1) によれば、この回路条件では、クロック (CLK) 入力パルスの立ち上がり部 (leading edge) が、正方向 (positive going) の時に Q 出力が H i になる。

以上の実験結果を総合して眺めると、誘導 E S D に伴って発生する過渡電磁界は幅の狭いインパルス状であり、その極性は帯電体の静電気極性 (例 : アクリル +、テフロン -) と、波源 (非接地浮動金属体狭ギャップ接地導体) に対する帯電体の運動方向 (+ v、- v) の双方に従う事がわかる。即ち、受信されるインパルス極性は、①帯電体の静電気極性、②帯電体の波源に対する運動方向、によって決定される。

IV. まとめ

狭ギャップを有する浮動金属体における誘導放電事象 ("誘導 E S D") について概説した。非接地 (または電荷漏洩が少ない) 金属体は、近くにある帯電体との相対運動により、簡単に数百 V から数 k V に帯電する。この帯電した金属体が、非常に狭い間隙 (例 : 1 0 0 μ m) で他の金属体に接近している時、ここで放電が発生する事がある。この放電により発生する過渡電磁界は、高速立ち上がりのインパルス状で、しかも明確な極性があり、これに曝された電子回路は、誤動作 (E M I) を引き起こす可能性がある。

あとがき

この報告は浮動金属体と帯電体の間に相対運動がある事を前提にしているが、両者が静止している状況でも、誘導 E S D が発生する事がある。それは、帯電体の電圧 (電界) が変動する場合で、この問題については改めて報告したい。

参考文献

- [1] IEC 61000-4-2 Electromagnetic compatibility (EMC) - Testing and measurement techniques - Electrostatic discharge immunity test. 1998.
- [2] M. Honda and Y. Nakamura, "Energy Dissipation in Electrostatic Spark Discharge and Its Distance Effects", EOS/ESD Symposium Proceedings, EOS-9, pp.96-103. 1987.
- [3] M. Honda, "Impulsive Fields Generated By Low-voltage ESD", IEEE Industry Applications Conf. Rec., pp. 1901-1904, 1991.
- [4] 「放電ハンドブック」、電気学会、改定新版、昭和 6 2 年、オーム社
- [5] 本田、「E S D 現象の基本的な捉えかた」、放電と EMC、pp.79-86、第 3 1 回東北大学電気通信研究所シンポジウム論文集、1994 年。
- [6] M. Honda, "Indirect ESD Measurement using a Short Monopole Antenna", IEEE, Proceedings of the 1990 International Symposium on EMC, pp. 641-645, 1990.