

変動静電界による非接地金属体の単極電荷誘導と隣接金属体への 放電事象について

Unipolar Charge Induction on a Floating Metal caused by Fluctuated Electrostatic Fields and Discharge Phenomena to the Adjacent Metal Object

本田昌實
Masamitsu Honda

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

概要—非接地（電氣的浮動）状態の小型金属体に変動静電界を暴露し、電荷誘導と電荷分布を調べた。その結果、この金属物体には全体に単極電荷が誘起する事がわかった。この金属物体と接地（または大容量）金属体が狭いギャップ（数百 μm 以下）で隣接している時、ここで火花放電が起こる事を確かめた。放電によって生じた過渡電磁界は非常に強力で、近辺にある一回巻きのコイル（磁界センサー）にボルトオーダーのノイズを誘導させる事もわかった。

I. はじめに

高信頼化の為に二重化された電子装置（2台並列）が両方同時に誤動作を起こし、大きな問題になった。原因は、片側の装置表面パネル（プラスチック）の留め金が静電誘導で帯電し、微小ギャップを介して金属フレームへ放電した時の放電雑音（ESDノイズ）であった。

浮動（非接地）金属体に動的な誘導で静電荷が生じ、微小ギャップを介して隣接金属体との間で放電が発生する状況を筆者は“誘導ESD”（induced ESD）[1]と称しているが、未だに一般化されておらず、原因として認められる事は少ない。厳重なESD耐性試験[2]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。

非接地金属体の静電荷発生条件としては；

①「帯電体（静電界源）と非接地金属体間に相対運動がある時」—前回（2011年）の宇宙環境シンポジウムで報告[3]

②「帯電体と非接地金属体が共に固定静止していて、帯電体の電位が変動する時」

の二つがあり、誘導電位は何れの条件であっても数百Vから数kV程度になる。更に、非接地金属体と非常に狭い間隙（数 μm ～数百 μm ）で接地金属体が隣接している場合は、ここで放電が発生する。今回は後者②についての実験結果を報告する。

II. 誘導実験

2. 1 実験装置（図1）

電界放出板

電界放出板は、机上の接地板（450mm x 450mm）から高さ88mmの4本の塩ビパイプ（直径40mm、内径32mm、絶縁抵抗 $10^{14}\Omega$ オーダー）で支えている。塩ビパイプの絶縁抵抗は、少なくとも $10^{14}\Omega$ オーダーはあり、電荷漏洩は短時間（数分以内）であれば問題にならない。

材料：アルミ（厚み 1 mm）、エッジ部は # 4000 相当の磨き粉で平滑仕上げ（高圧印加時のコロナ放電防止の為）

静電容量：23.5 pF（接地板から高さ 88 mm）寸法：400 mm x 400 mm

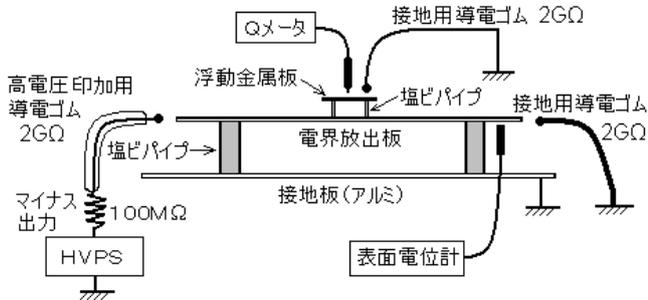


図 1：実験装置見取り図

電荷誘導用小型浮動金属板

小型浮動金属板は電界放出板の中央部に高さ h mm の支持棒（塩ビパイプ、直径 18 mm、内径 13 mm）4 本で支えている。塩ビパイプの絶縁抵抗は、少なくとも $10^{14} \Omega$ オーダはあり、ここからの電荷漏洩は問題にならない。

材料：鉄板（厚み 3 mm）、エッジ部は # 4000 相当の磨き粉で平滑仕上げ

寸法：50 mm x 50 mm (#1)、75 mm x 75 mm (#2)、100 mm x 100 mm (#3)、100 mm x 150 mm (#4)、100 mm x 200 mm (#5)、5 種類

静電容量：電界放出板上の高さ h (mm) での平均値 表 1

表 1：金属板の高さ (h) と静電容量

金属板	面積 [mm ²]	静電容量 [pF]		
		$h = 8$ mm	$h = 29$ mm	$h = 48$ mm
#1	2500	6.0	2.9	2.4
#2	5625	10.8	5.1	4.1
#3	10000	15.5	7.5	6.0
#4	15000	21.0	10.5	7.9
#5	20000	25.8	13.0	9.7

高圧 DC 電源（マイナス出力）

【-1 kV 出力電源】

形式：HTV-C665 Hamamatsu TV

出力電流 5 mA

出力部に $100 M\Omega$ の抵抗を直列に入れている（感電防止）。100 V ステップで出力可能。

最大 -1.1 kV、電圧精度は 1% 以下。

【-21 kV 出力電源】

形式：HPSB-21N Bellnix

出力電流 $430 \mu A$

出力部に $100 M\Omega$ の抵抗を直列に入れている（感電防止）。出力電圧は制御抵抗で連続的に変化（-100 V ~ -21 kV）。

測定器

電圧：①静電電圧計（最大測定電圧 2.0 kV、享和 ST-3）、②静電電圧計（5 kV、横河電機 T-2064）、③非接触型表面電位計（10.00 kV、春日電機 KSD-0101）

電荷量：ナノクーロンメータ（99.99 nC、春日電機 NK-1001）

静電容量：LCRメータ（100 pF、YHP 4332A） ESD：高感度 ESD 検出器

（ES-98P、IPL 製）オシロスコープ：TEKTRONIX TDS 684C（1GHz、5GS/s）

2.2 電荷誘導／測定方法

電界放出板に対する電圧印加（電界上昇）方法

小型浮動金属板を一旦接地して残留電荷を除去してある状態で、高電圧電源（ $-V_0$ ）に接続された導電ゴム（概略 $2 G\Omega$ ）の先端を電界放出板に触れ、表面電位計の指示値が V_0 になったら離す。導電ゴムの抵抗値によるが、電界放出板は数秒程度で V_0 になる。→ “ON”

（ $V_0 =$ 電圧振幅）

電圧減衰（電界降下）方法

予め、小型浮動金属板の残留電荷を除去しておく。接地系に接続している導電ゴム（概略 $2 G\Omega$ ）の先端を、既に高圧（ $-V_0$ ）に帯電している電界放出板に触れる。表面電位計の指示値は数秒程度でゼロ V になる。→ “OFF”

誘導電荷測定方法

【電界上昇 (ON) 時】

予め小型浮動金属板と電界放出板の双方を同時に接地して、残留電荷の影響を除外しておく。高電圧 (V_0) の導電ゴムを電界放出板に触れて一定電圧になったらこれを離し、その後直ちに電荷量計のプローブを浮動金属板に触れ、誘導電荷量 (単位[nC]) を読み取る。測定は合計12回行ない、最大値と最小値を除いて10回の平均値を求める。尚、表面電位計のプローブ (金属ケース入り) を小型浮動金属板に近づけると、静電容量が変わる為、正確な電位測定は出来ない。

【電界降下 (OFF) 時】

小型浮動金属板の誘導電荷を予め除去しておく。高電圧に帯電している電界放出板を導電ゴムで接地した後に、電荷量計のプローブを小型浮動金属板に触れ、誘導電荷量 ([nC]) を読み取る。測定は12回行ない、最大値と最小値を除いて10回の平均値を求める。

2.3 実験結果

電界放出板からの距離 h と誘導電荷量

電界放出板から距離 h (8mm, 48mm) にある浮動金属板 (50mmx50mm:#1) の誘導電荷量を調べた。

【 $h = 8 \text{ mm}$ 】表2

静電容量 $C = 6.0 \text{ pF}$ (対電界放出板)

(静電容量計のL側リード線を電界放出板に、H側リード線を50mmx50mmの浮動金属板に接続)

表2：電圧振幅 (V_0) と誘導電荷量 Q @ $h=8\text{mm}$

電圧振幅	ON	OFF
200V	-798pC (-133V)	+810pC (+135V)
400V	-1.62nC (-270V)	+1.90nC (+316V)
600V	-2.43nC (-405V)	+2.95nC (+492V)
800V	-3.51nC (-585V)	+3.54nC (+590V)
1000V	-3.83nC (-639V)	+5.01nC (+836V)

()内は計算上*1の誘導電圧 V_i

* 1 : $V_i = Q / C$

【 $h = 48 \text{ mm}$ 】表3

静電容量 $C = 2.4 \text{ pF}$ (対電界放出板)

表3：電圧振幅 (V_0) と誘導電荷量 Q @ $h=48\text{mm}$

電圧振幅	ON	OFF
200V	-285pC (-118V)	+432pC (+178V)
400V	-608pC (-251V)	+926pC (+382V)
600V	-917pC (-378V)	+1.22nC (+506V)
800V	-1.32nC (-544V)	+1.71nC (+704V)
1000V	-1.76nC (-724V)	+2.22nC (+915V)

()内は計算上*1の誘導電圧 V_i

【測定結果のポイント】

- ①電界が変化した時だけ、浮動金属板に電荷が誘起する。高圧電源に接続された導電ゴムを電界放出板に触れたまま、浮動金属板を一旦接地すると、その後は電荷量計はゼロを示す。更に、この後高圧電源の出力スイッチを切ると、再び電荷量計の指示値が増大する。
- ②電荷量計と表面電位計で調べたところ、誘導した電荷極性は金属板の場所 (裏面、角、等) を問わず全て同一であった。試みに、薄い銅板で作った“メビウスの輪”を電界放出板の上に乗せ (塩ビパイプで支持)、同様に調べたが、異種極性は測定出来なかった。
- ③誘導電荷極性はON時 (電界上昇プロセス) がマイナス、OFF時 (電界降下プロセス) はプラスになる。高電圧電源の出力は一極性。
- ④誘導電荷量は電圧振幅 (上昇: $0 \text{ V} \rightarrow V_0$ 、降下: $V_0 \rightarrow 0 \text{ V}$) に概略比例して大きくなり、誘導電圧 V_i は電界放出板の電圧振幅 V_0 の6割から9割近くになる。
- ⑤誘導電圧 V_i は電界放出板からの距離 (高さ h) には依存しない。
 $h = 8 \text{ mm}$ 1000V OFF時 $V_i = +836 \text{ V}$
 $h = 48 \text{ mm}$ 1000V OFF時 $V_i = +915 \text{ V}$
- ⑥誘導電圧 V_i は静電容量 C に依存しない。
 $C = 6.0 \text{ pF}$ 200V ON時 $V_i = -133 \text{ V}$
 $C = 2.4 \text{ pF}$ 200V ON時 $V_i = -118 \text{ V}$

浮動金属板の大きさ（面積、静電容量）と誘導電圧

電界放出板から距離 $h = 48\text{mm}$ に面積の異なった4種の浮動金属板（表4）を配置し、電界降下（OFF）時の誘導電荷量（誘導電圧 V_i ）を調べた。（誘起する電荷極性はプラス）図2

表4：金属板の寸法、面積、静電容量*2

金属板	寸法 [mm]	面積 S [mm ²]	静電容量 C [pF]
#1	50x50	2500	2.4
#2	75x75	5625	4.1
#3	100x100	10000	6.0
#4	100x150	15000	7.9

* 2 : @ 距離 $h = 48\text{mm}$

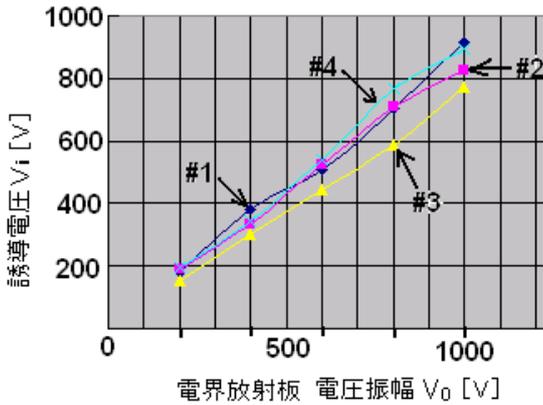


図2：異なった面積の浮動金属板（#1～#4：表1参照）における電界放射板の電圧振幅 V_0 と誘導電圧 V_i の関係 @ $h=48\text{mm}$ 電界降下（OFF）時

【測定結果のポイント】

①誘導電圧 V_i は浮動金属板の面積 S に依存しない。

50mmx50mm (#1) $S=2500\text{mm}^2$ 600V OFF 時 $V_i = +506\text{V}$

75mmx75mm (#2) $S=5625\text{mm}^2$ 600V OFF 時 $V_i = +525\text{V}$

100mmx150mm (#4) $S=15000\text{mm}^2$ 600V OFF 時 $V_i = +539\text{V}$

50mmx50mm と 100mmx150mm は面積比で6倍の違いがあるが、誘導電圧は6%の増加に過ぎない。

（測定誤差と考えられる）

②誘導電圧 V_i は静電容量 C に依存しない。

50mmx50mm (#1) $C=2.4\text{pF}$ 1000V OFF 時 $V_i = +915\text{V}$

75mmx75mm (#2) $C=4.1\text{pF}$ 1000V OFF 時 $V_i = +826\text{V}$

100mmx150mm (#4) $C=7.9\text{pF}$ 1000V OFF 時 $V_i = +895\text{V}$

これらのデータを総合すると、浮動金属板の誘導電圧 V_i は、面積 S や静電容量 C に依存せず、電界放出板の電圧振幅 (V_0) に近い値になると考えられる。 $V_i = k V_0$ [V]

k : 0.5 ~ 0.9 (今回の実験条件)

2.4 検討

電圧印加時の測定等価回路

浮動金属板と電界放出板の間には静電容量 C_0 があり、“ON” 時の電界上昇により、電荷がこれに誘導/蓄積される。この状況を図3の等価回路で表す。

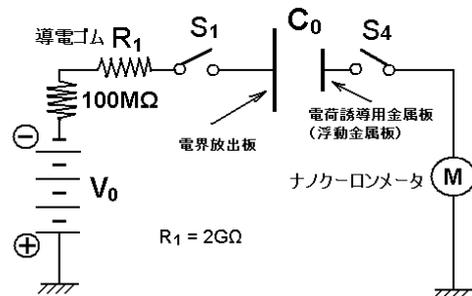


図3：電圧印加時（“ON”）の等価回路

S_4 が切れている状態で S_1 を入れると、 C_0 が $-V_0$ に充電される。その後、 S_1 を切り、 S_4 を入れ誘導電荷量を測定する。（誘導電荷極性：-）

電圧降下時の測定等価回路 図4

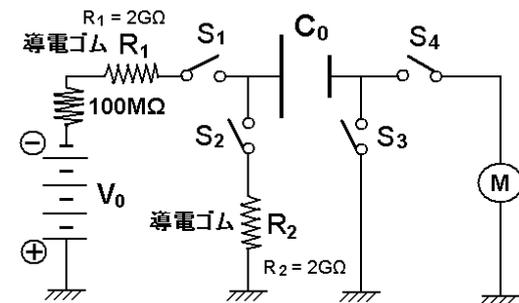


図4：電圧降下時（“OFF”）の等価回路

図4において、 S_2 、 S_4 を切っておき、 S_3 を入れてある（浮動金属板を接地）状態で、 S_1 を入れて C_0 を $-V_0$ に充電する。次に S_1 と S_3 を順次切り、 S_2 を入れて電界放出板を接地する。（この段階で浮動金属板はマイナス電界が急変してゼロに戻る）その後、 S_4 を入れて誘導電荷量を測定する。（誘導電荷極性：+）

単極電荷の誘導

孤立浮動状態にある金属物体が、変動電界に曝される状況を等価回路で表すと図5の様になる。電界放出板（a）から出た電気力線は浮動金属板（b）のみならず、周辺の接地金属体（c）にも向かっている。従って電界放出板（a）と浮動金属板（b）の間には静電容量 C_1 があり、浮動金属板（b）と周辺接地導体（c）の間には C_2 がある。 C_1 の極板と C_2 の極板間を結ぶ導体が浮動金属板（b）であるから、ここには同一極性の電荷、即ち単極電荷が分布する事になる。

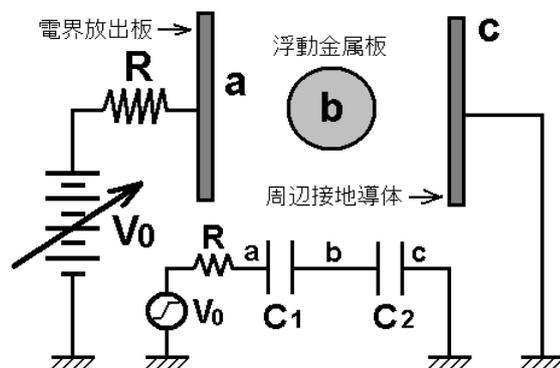


図5：電界放出板（a）と周辺接地導体（c）の間に挟まれた浮動金属板（b）及びその等価回路

III. 放電実験

3. 1 実験装置

変動静電界によって非接地の浮動金属板に単極電荷が誘導する事がわかった。電界放出板の印加電圧（ V_0 ）が1 kVの時、誘導電圧（ V_i ）は計算上で600Vから1 kV近くになる。この程度の電圧であっても、仮に数十マイクロン

の狭い間隙 g で接地導体と隣接していれば、火花放電[4]が起こる筈である。これを確かめる為、放電間隙を精密に制御出来る放電実験装置を製作した。図6

厚みが5 mmの鉄板（60 cm x 30 cm）の上に浮動金属板を高さ30 mmの塩ビパイプ（絶縁抵抗 $10^{14} \Omega$ オーダ）で支持固定した。浮動金属板と接地導体間の間隙 g を精密に保つ為、三軸精密位置決め装置と共にダイヤルゲージ型マイクロメータ（最小目盛り $10 \mu\text{m}$ ）を放電実験装置に装着した。

浮動金属板に対し、変動電界を暴露する為、高電圧電源（-出力）に接続された電界放出板（170 mm x 60 mm x 5 mm）を浮動金属板の上方10 mmの位置にセットした。

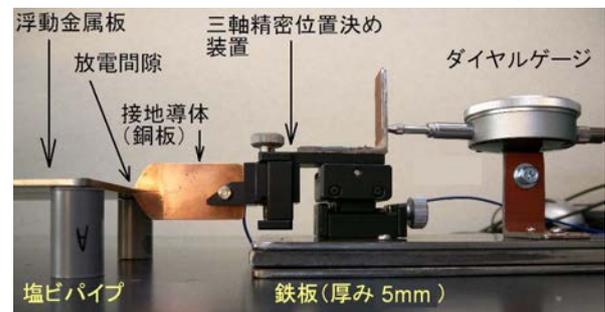


図6：放電間隙を精密に制御出来る実験装置

3. 2 放電の確認方法

放電の確認は目視による他、AMラジオとESD検出器（ES-98P、IPL製）を用いた。放電時の過渡磁界の検出は、高周波磁界センサー（電界遮蔽付きの直径25 mmの一回巻きコイル、50 Ω 出力、TET製）を用いた。

3. 3 実験結果

浮動金属板の面積と放電発生有無

4種の浮動金属板（#1～#4：表1参照）に対し、間隙（ g ）が $50 \mu\text{m}$ で接地導体に隣接している時の放電発生有無を調べた。電界放出板に900Vの電圧を印加すると、全ての浮動金属板で火花放電が発生した。この間隙（ $g = 50 \mu\text{m}$ ）状態で、浮動金属板（#4：100mmx150mm）に直接高電圧を印加した場合、700Vから750Vで火花放電が発生する事も確認している。

放電による過渡磁界

変動静電界によって、非接地の浮動金属板に単極電荷が誘導し、隣接接地導体との間で放電が発生する場合のある事がわかった。(誘導電圧 V_i と間隙 g の関係)更に、電界が上昇する(“ON”)時と、電界が降下する(“OFF”)時では、誘導電荷極性が反転する事もわかった。これらの事実を裏付ける為、放電時の磁界を調べる事にした。

浮動金属板：100mm x 150mm (#4)

電圧振幅 $V_0 = -5$ kV

放電間隙 $g = 30 \mu\text{m}$ (+/- $5 \mu\text{m}$)

磁界センサー位置：放電間隙部から150mm

オシロスコープ入力：20dbアッテネータ

“ON”時：図7 “OFF”時：図8

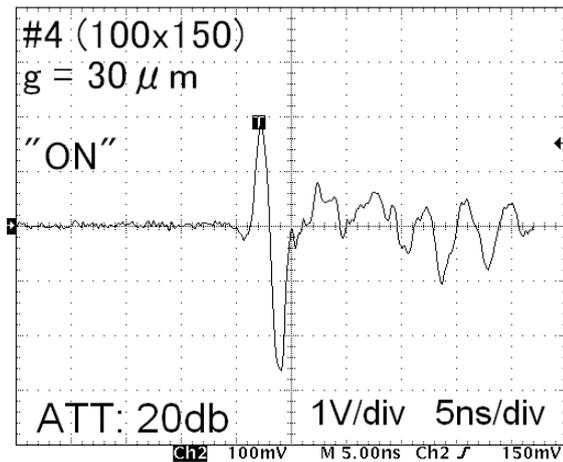


図7：“ON”時の過渡磁界波形

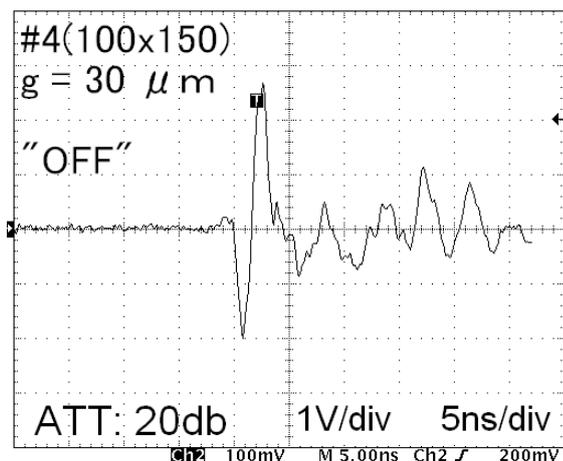


図8：“OFF”時の過渡磁界波形

【測定結果のポイント】

- ①放電は電界が変動(上昇/下降)している間、多数回発生する。
- ②放電が起こると、極短時間(5ns<)ではあるが、非常に強力な過渡電磁界[5]が発生する。例えば、波源から150mmの位置にある直径25mmの一回巻きのコイルに、全振幅(V_{pp})で5V近い電圧が誘起する。
- ③放電電流は振動せず、一方向にのみ流れる。
- ④“ON”時と“OFF”時では、磁界(放電電流)の向きが反転する。

IV. まとめ

非接地金属体が変動静電界に曝されると、単極電荷が全体に誘導する。誘導電圧は静電容量や面積に依らず、変動電界源の電位に比例する。この非接地金属体と非常に狭い間隙(数十 μ ~数百 μ)で接地導体が近接していると、ここで火花放電(“誘導ESD”)が発生する事がある。放電により発生した過渡電磁界は非常に強力で、近辺にあるループ状導体にボルトオーダーのノイズを誘起させる。

参考文献

- [1] 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.
- [2] IEC 61000-4-2 Electromagnetic compatibility (EMC) - Testing and measurement techniques - Electrostatic discharge immunity test. 2008.
- [3] 本田, “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”, 第8回「宇宙環境シンポジウム」論文集, pp.191-196. 2011年10月
- [4] 武田進, 「気体放電の基礎」, 東京電機大学出版局, 1990年.
- [5] 本田, “ESD現象の基本的な捉えかた”, 第31回東北大学電気通信研究所シンポジウム論文集—放電とEMC—, pp.79-86, 1994年.