

# 非接地孤立金属体における周辺電界変化による単極帯電について

## Unipolar Electrification on a Non-grounded Floating Metal Exposed by the Surrounding Fluctuated Electrostatic Fields

本田昌實

Masamitsu Honda

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

概要—衛星構体や内部電子装置等に存在する非接地の孤立金属体の帯電は、高エネルギーの荷電粒子によるものとされる事が多いが、地上の実験では、孤立金属体の周辺で電界の変動があった時にも静電荷が誘導する。実験によれば、この孤立金属体に誘導する電荷は周辺の電界が変化した時にのみ生じ、電荷分布は、金属体全体が同一の極性（単極帯電）になる事を確かめた。更に、電界（印加電圧）の極性が同一であっても、増減の方向によって誘導電荷の極性は反転する事も確かめた。

### I. はじめに

物体が静電気（静電荷）を帯びる理由は、①摩擦剥離、②静電誘導、③イオン注入、等があり、中でも②の静電誘導によるものは、全体像の認識が困難なことが多く、障害原因になっているにも拘らず、報告されるケースは少ない<sup>1)</sup>。

この静電誘導の説明としては、“被誘導物体に生じる電荷は帯電体に近いところには帯電体と反対の極性、遠いところには帯電体と同じ極性の電荷が生じる”とされている。図1

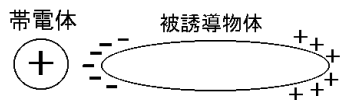


図1：教科書上の静電誘導

帯電体 (+) が被誘導物体 (導体) に近づいた場合、帯電体に近いところには-電荷が、遠いところには+電荷が現れ、それらの数 (電荷量) は等しい。(図では+6q と-6q) この現象の説明の根底には; ア) 異符号の電荷は引き合う、イ) 閉じた系では電荷は保存される、ウ) 導体には自由電子がある、を大前提としている。

しかし、現実の静電誘導の世界では帯電体の大きさや形状は千差万別であり、「帯電体に近いところ」、「帯電体から遠いところ」の様な位置関係が明確にはならない状況も有り得る。例えば、円筒形の導体の内側にある非接地の孤立金属体の電荷誘導である。

今回は銅製の円筒の中に非接地の導体を入れ、銅円筒の電圧 (電界) を変化させて、この時の非接地導体の電荷誘導について実験を行なったので報告する。

### II. 実験と結果

#### 2.1 実験装置構成

実験装置一式は接地してある金属製の机 (幅 1.2m、奥行 0.75m、高さ 0.7m) 表面に導電ゴムマットを敷き、この上に展開している。図2、図3

静電界源：銅円筒 (底面は円板で閉じている) 直径 100mm (外径) 高さ 200mm 厚み 3mm 銅円筒単体の静電容量  $C=10\text{pF}$

被誘導物体（高さ 100mm の塩ビパイプで絶縁）

- ① 銅円板 直径 80mm 厚み 0.1mm  
面積（両面） $S=10053\text{mm}^2$ 、静電容量  $C=9.2\text{pF}$ （表面電位計の誘導板の静電容量を含む）
- ② 鉄板（角型） 50mm x 50mm 厚み 3mm  
面積（両面） $S=5600\text{mm}^2$ 、静電容量  $C=5.1\text{pF}$   
（表面電位計の誘導板の静電容量を含む）

DC 高圧電源：Hamamatsu HTV C448A  
+ - max 1.5kV（今回は-出力のみ使用）

電位測定器：非接触型表面電位計  
春日電機 KSD-0303 (max 9999V)

電荷量測定器：春日電機 ナノクーロンメータ  
NK-1001 (max 99.99nC)

静電容量計：YHP 4332A LCR Meter

高周波電流プローブ：TEK CT-6  
250kHz-2GHz  $Z_t=5\Omega$  (5mV/1mA)

オシロスコープ：①TEK 684C (DC-1GHz)  
②TEK 6606 (DC-6GHz)

導電ゴムケーブル：（株）コシフジ 約  $3\text{G}\Omega/\text{m}$

## 2.2 高電圧の印加と接地方法

### 導電ゴムの使用

静電界源としての銅円筒（以降「銅筒」）は良好な絶縁を保つ為、発泡スチロール（体積抵抗率  $\rho > 10^{15}\Omega\text{cm}$ ）箱の上に置いている。図3 高圧接触時の火花放電を防止する為、高圧印加及び高圧接地は約  $2\text{G}\Omega$  の抵抗値を持つ導電ゴムケーブル（長さ約 60cm）を用いる。

### 非接触で誘導電位を測定する

銅筒内の円板（非接地孤立金属体）にはテフロン被覆のリード線を取り付け、銅筒底面の小穴を通して表面電位計用の誘導板（真鍮：直径 70mm）に接続して誘導電圧を非接触で測定する。図4 誘導する電荷量は nC オーダかそれ以下の為、入力抵抗の低い接触型の電圧測定器（例：DMM の電圧測定）は使えない。状況に応じ、表面電位計にはペン書きチャートレコーダ（渡辺測器 SR6322）を接続して、誘導電位の変化を記録紙に記録する。

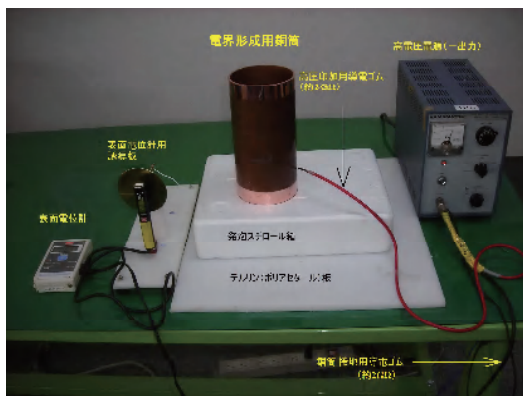


図 2：実験装置の全容

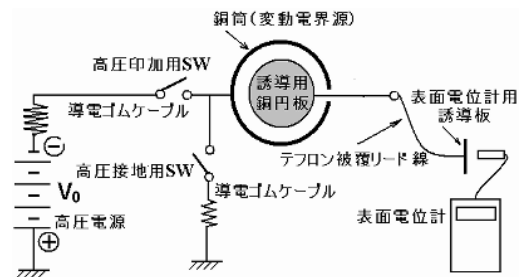


図 4：高電圧の印加／接地と誘導電圧の測定

### 高電圧の印加

高電圧（出力電圧  $V_0$ ）電源に繋がれた導電ゴムを銅筒に数秒間触れる（図4中の高電圧印加用 SW を ON する）事により、銅筒が規定の電圧（ $0\text{V} \rightarrow V_0$ ）に荷電され、負電界（ $-E$ ）を銅筒内外に形成する。

### 高電圧の接地

既に高電圧（ $V_0$ ）に帯電している（図4中の高電圧印加用 SW は OFF）銅筒に、接地された導電ゴムを数秒触れる（図4中の高電圧接地用 SW を ON する）事により、銅筒の電位は降下（ $V_0 \rightarrow 0\text{V}$ ）し、正電界（ $+E$ ）を銅筒内外に放出する。

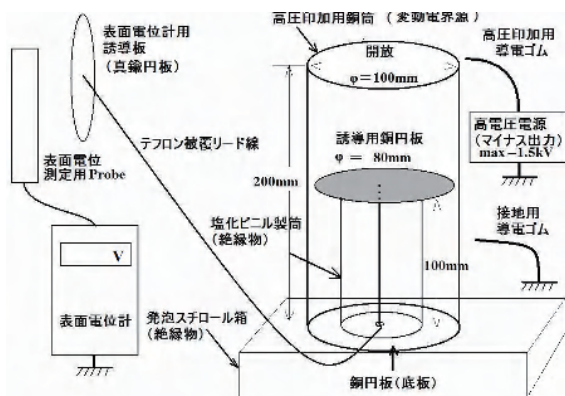


図 3：実験見取り図（被誘導物体＝銅円板）

2.3 高電圧印加／接地時の誘導電圧

高電圧印加（電界増大）時の測定手順

- ①誘導用の銅円板と銅筒を同時に接地してゼロ電位にする。
- ②銅筒へ高電圧 ( $V_0$ ) の導電ゴムを数秒触れ、荷電する。以降この操作を“ON”と称する。
- ③直後に銅円板に誘導した電圧 ( $V_i$ ) を表面電位計で読み取る。

接地（電界減少）時の測定手順

- ①銅筒へ高電圧を印加する前に、銅円板に接地用導電ゴムを触れたままにして接地状態を保つ。
- ②高電圧 ( $V_0$ ) の導電ゴムを銅筒に数秒触れて荷電する。（接地用導電ゴムは触れたまま）
- ③銅円板から接地用導電ゴムを離してから、改めて銅筒を接地用導電ゴムで接地する。以降この操作を“OFF”と称する。
- ④直後に表面電位計の数値 ( $V_i$ ) を読み取る。

予備実験結果の概要

- i) 高電圧 ( $V_0 = -500V$ ) が加わった導電ゴムを銅筒の何れの場合（上部、底部、内側）に触れても、表面電位計には数百Vの表示が出る。
- ii) 接地用導電ゴムを銅円板、リード線、表面電位計用の誘導板、などの何れの箇所に触れても表示電圧はゼロになる。
- iii) 銅筒への印加電圧 ( $V_0$ ) を  $-1kV$  にして“ON”を5回試行した結果、銅円板の誘導電圧 ( $V_i$ ) は  $-560V$  が最小で、最大は  $-880V$  が得られた。指示極性はすべてマイナスであった。
- iv)  $V_0$  を  $-1kV$  のままで“OFF”を5回試行した結果、銅円板の誘導電圧  $V_i$  は  $+450V$  が最小で、最大は  $+700V$  が得られた。極性はすべてプラスであった。

印加電圧と誘導電圧の関係：銅円板

銅筒に対して高電圧（マイナス極性）を印加した時（ON）と、高電圧に帯電している銅筒を接地した時（OFF）の誘導電圧 ( $V_i$ ) を調べた。印加電圧 ( $V_0$ ) は、 $-500V, -750V, -1000V, -1250V$  とした。測定の結果、銅円板の誘導電圧は、概ね印加電圧に比例することがわかった。図5 高電圧印加時（ON）の銅円板の誘導電圧極性は全てマイナス、接地時（OFF）の誘導電圧極性は全てプラスであった。

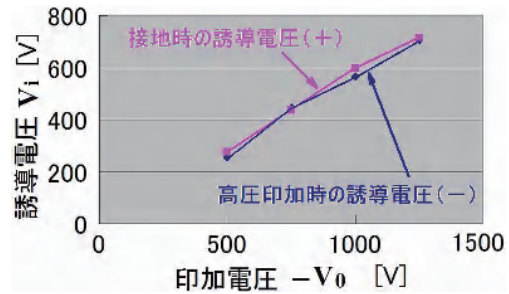


図5：印加電圧と銅円板の誘導電圧の関係  
印加電圧 ( $V_0$ ) を  $-500V, -750V, -1000V, -1250V$  とした時の ON 時、OFF 時の銅円板に誘導した電圧をプロットした。誘導電圧 ( $V_i$ ) の極性は、ON 時は全てマイナス、OFF 時は全てプラスになるがグラフ上では、区別していない。

印加電圧と誘導電圧の関係：角型鉄板

銅筒内部に鉄板（角型： $50mm \times 50mm$  厚み  $3mm$ ）を入れ、銅円板と同じ方法で高電圧印加時（ON）、接地時（OFF）の角型鉄板の誘導電圧を調べた。図6

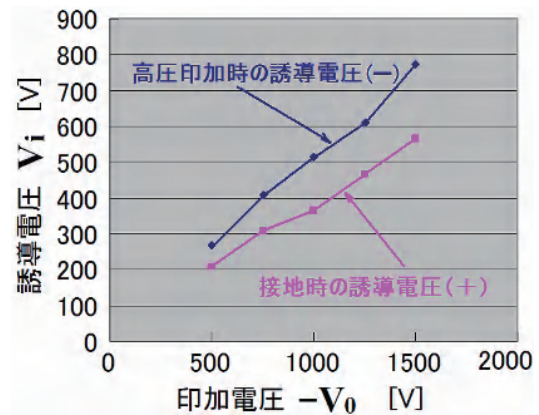


図6：印加電圧と角型鉄板の誘導電圧の関係  
印加電圧 ( $V_0$ ) を  $-500V, -750V, -1000V, -1250V, -1500V$  とした時の ON 時、OFF 時の角型鉄板に誘導した電圧をプロットした。誘導電圧 ( $V_i$ ) の極性は、ON 時は全てマイナス、OFF 時は全てプラスになるがグラフ上では、区別していない。

2.4 印加電圧と放電電流の関係

誘導帯電した銅円板に  $50\Omega$  で終端した接地導体（真鍮球）を触れた時に流出する（放電）電流を高周波電流プローブ（TEK CT-6 図7）で測定した。図8～図11

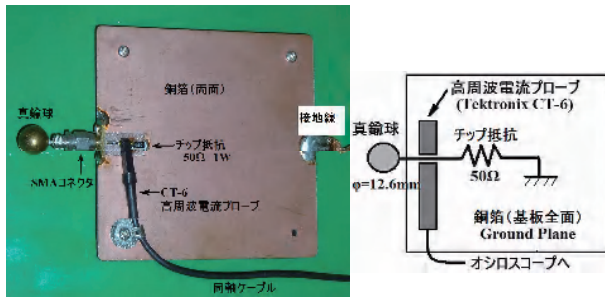


図7：放電電流測定基板  
両面基板 (FR-4, 100mmx100mm, t=1.6mm,) に装着した高周波電流プローブ (TEK CT-6) と等価回路。放電電流は 50Ω のチップ抵抗を通して接地された銅箔 (基板の両面) に流れ込む。

$V_0 = 1250V$  ON 図 1 0

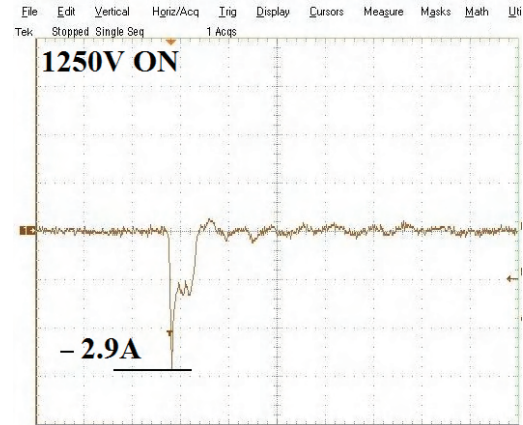


図 1 0 :  $V_0 = 1250V$  ON  $i_p = -2.9A$   
 $V : 1A/div, H : 10ns/div$

放電電流波形

$V_0 = 500V$  ON 図 8

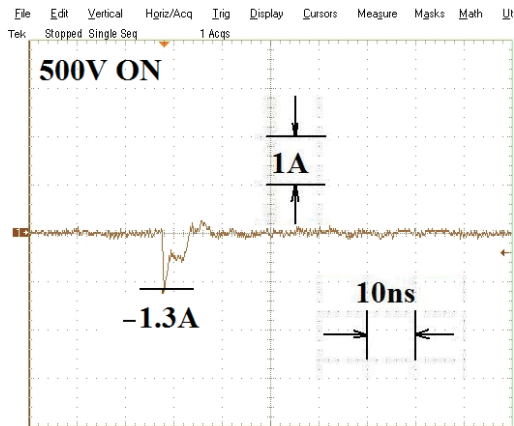


図 8 :  $V_0 = 500V$  ON  $i_p = -1.3A$   
垂直軸 (V) : 1A/div, 水平軸 (H) : 10ns/div

$V_0 = 1250V$  OFF 図 1 1

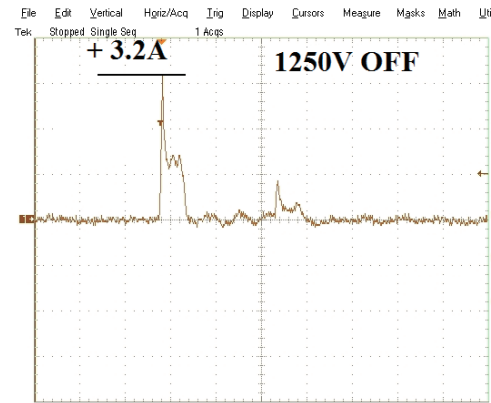


図 1 1 :  $V_0 = 1250V$  OFF  $i_p = +3.2A$   
 $V : 1A/div, H : 10ns/div$

$V_0 = 500V$  OFF 図 9

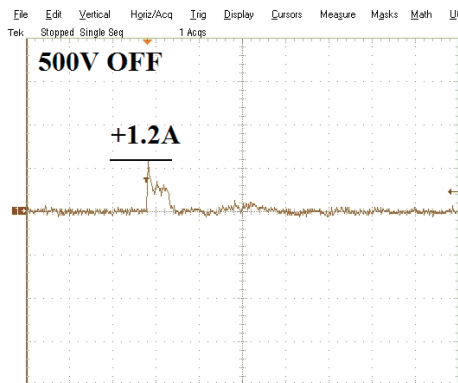


図 9 :  $V_0 = 500V$  OFF  $i_p = +1.2A$   
 $V : 1A/div, H : 10ns/div$

2.5 プリント基板 (PCA) の誘導電荷量

高周波回路用のテフロン基板 (107mm x 138mm t=0.8mm、部品未実装) を高さ 29mm の塩ビパイプ (直径 18mm) を介して電界放出板 (銅板、300 mm x 250mm, t=1mm) に載せて、誘導電荷量を調べた。高電圧を印加/接地する銅板 (電界放出板) は発泡スチロール箱 (絶縁物) に載せている。図 1 2

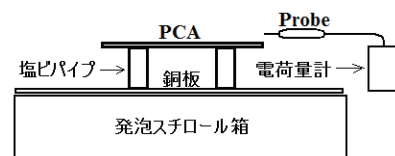


図 1 2 : PCA の誘導電荷量測定見取り図

プリント基板の誘導電荷量

このプリント基板 (PCA) の裏面 (図 1 3) は 6 個に分割されたグランドプレーン (GRD PLN #1~#6) があり、夫々の銅板 ON (高電圧印加) 時、OFF (高電圧接地) 時に誘導する電荷を電荷量測定器 (ナノクーロンメータ) で調べた。

図 1 4、図 1 5

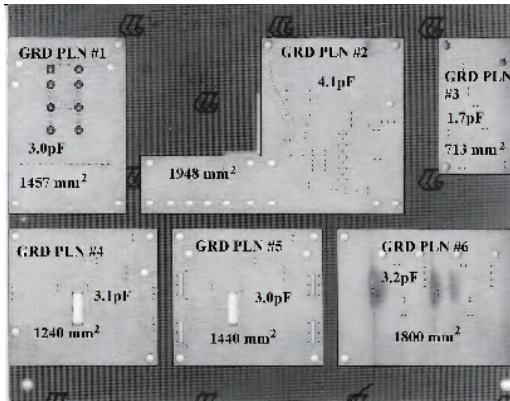


図 1 3 : グランドプレーン配置

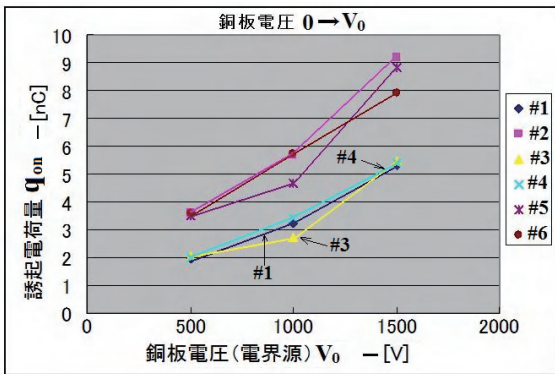


図 1 4 : 印加電圧と誘導電荷量の関係---ON 時

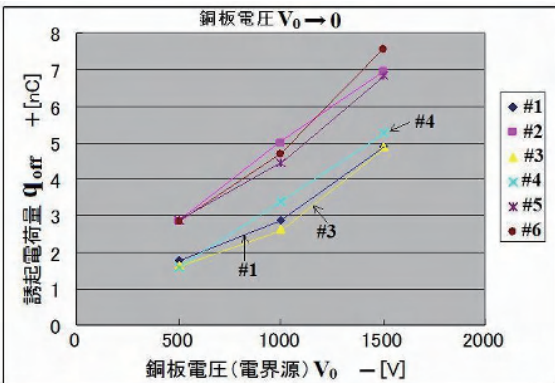


図 1 5 : 印加電圧と誘導電荷量の関係---OFF 時

PCA 電荷誘導実験のまとめ

1) グランドプレーン (孤立金属体) に誘導する電荷は、異なった場所であっても同一極性の電荷 (単極電荷) が分布する。この極性支配要因はこれまでの実験結果と同様、電界の増減の方向にのみ依存する<sup>2)</sup>。

2) グランドプレーンの誘導電荷量は概略、面積に比例する。

2.6 PCA の放電電流波形

部品搭載側の信号トレース (Signal Trace 1, 面積 S=68mm<sup>2</sup>, C=1.3pF) と、裏面のグランドプレーンの一番面積の大きい部分 (Ground Plane #2, S=1948mm<sup>2</sup>, C=4.1pF) に誘導した電荷を放電させた時の電流波形を調べた。図 1 6

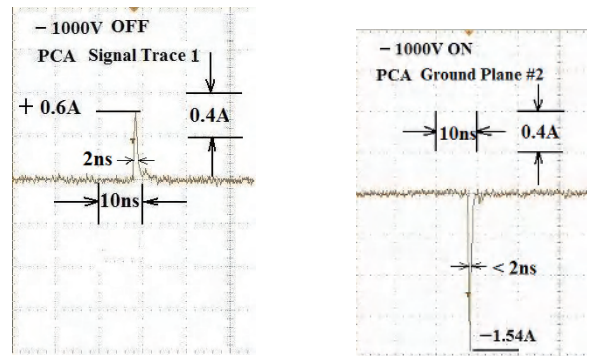


図 1 6 : 左 信号トレース -1000V OFF  
右 グランドプレーン -1000V ON

III. まとめ

非接地の孤立金属体の周辺で静電界が変動すると、同一の極性の電荷が金属体全体に誘導する→“単極帯電”。この誘導電荷の極性は変動電界の増減の方向に一致する。

参考文献

- 1) 本田、磯福、“誘導 ESD に曝された情報ケーブルにおける過渡雑音の測定”. 静電気学会講演論文集 Vol.12, pp. 20-26, 静電気学会、2011 年.
- 2) 本田、“変動静電界による非接地状態にある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” 第 9 回「宇宙環境シンポジウム」論文集、JAXA-SP-12-017、2012 年.