

# 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

本田 昌實<sup>\*1</sup>, 磯福 佐東至<sup>\*\*</sup>

(2011年9月12日受付; 2011年12月8日受理)

## Measurements of Transient Noise on Information Cable Exposed by Induced ESD

Masamitsu HONDA<sup>\*1</sup> and Satoshi ISOFUKU<sup>\*\*</sup>

(Received September 12, 2011; Accepted December 8, 2011)

Some 0.1 mm or less small gap exists between a floating metal and a neighbor metal, voltage difference is generated between the gap by static induction depending upon surrounding static field variations, then a spark discharge ("Induced ESD") may occurs at the gap if conditions meet. We report and analyze the measurement results of induced noise waveform on different type of information cables closely exposed by this induced ESD. It was found that a double-shielded SHF coaxial cable picked up high-level noise. Enough noises that would cause malfunctions of the logic circuit were measured. This phenomenon cannot be reproduced or tested by standard IEC 61000-4-2 or ESD Gun test.

### 1. はじめに

セキュリティ関連の電子装置において、毎年冬季になると、発生頻度は非常に低いが、重大なトラブル（自己回復不能な CPU 停止）が発生した。状況から、人が電子装置のそばを通り過ぎるタイミングで起こる為、人体からの静電気放電 (ESD) が原因ではないかと考えられたが、装置表面はプラスチックで覆われており、直接的な火花放電は起こりにくい状況にあった。この装置は、ESD 耐性に関する IEC 規格 (61000-4-2)<sup>1)</sup> を完全にクリアしているが、改めて装置近辺での ESD 発生を想定し、間接 ESD<sup>2)</sup> (放電による過渡電磁界の輻射) 試験を厳重に行なったが、同種トラブルは再現出来ず、結局静電気説は否定された。

数年にわたる調査解析の結果、原因は装置上部プラスチック (ABS: 厚さ約 5 mm) の裏面に非接地浮動状態の金属部品があり、ここで静電誘導による放電が発生し、この時輻射される過渡電磁界が、金属部品のすぐ近くを通る信号ケーブルに結合してバースト状の高周波雑音を誘起させ、

CPU 動作に影響を与えていた事がわかった。

この誘導 ESD 事象<sup>3)</sup>は、1980 年代に ECL 等の高速論理素子を使う大型コンピュータシステムで散見されたが、最近、再び出現する様になった。機器装置のプラスチック化、半導体デバイスの高速/低振幅動作化等が背景にある。

今回は、誘導 ESD による過渡電磁界の各種情報ケーブルに対する結合メカニズムを調べる実験を行ない、その一端が明らかになったので報告する。

### 2. 実験方法

#### 2.1 誘導 ESD 発生源及びプラスチック筐体内部への変動電界の付与方法

誘導 ESD を再現良く発生する為の浮動金属体 (誘導 ESD 発生源) の配置を図 1 に示す。銅板 A は 110 mm × 47 mm、同 B は 50 mm × 10 mm で共に厚さは 1.0 mm。静電容量 (対接地) は夫々 2.9 pF, 0.6 pF である。これらをアクリル板

キーワード: 非接地浮動金属体, 誘導 ESD, 過渡電磁界, 情報ケーブル, 過渡雑音

\* (株) インパルス物理研究所 (206-0823 東京都稲城市平尾 2-56-8)

Impulse Physics Laboratory, Inc., 2-56-8 Hirao, Inagi, Tokyo 206-0823, Japan

\*\* 東京電子交易 (株) (190-0023 東京都立川市柴崎町 5-16-30)

Tokyo Electronics Trading Co., Ltd., 5-16-30 Shibasaki-cho, Tachikawa, Tokyo 190-0023, Japan

<sup>1</sup> maxhonda@impulse-physics.com

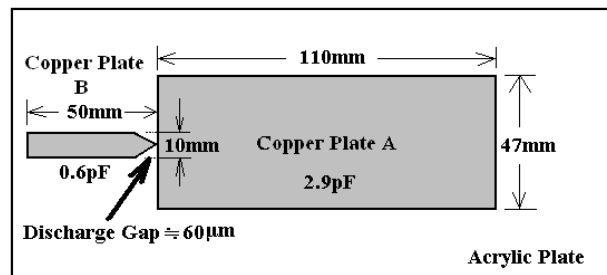


図 1 誘導 ESD 発生器

Fig. 1 Floating copper plates (A and B) with a gap (60  $\mu$ m) as an induced ESD generator.

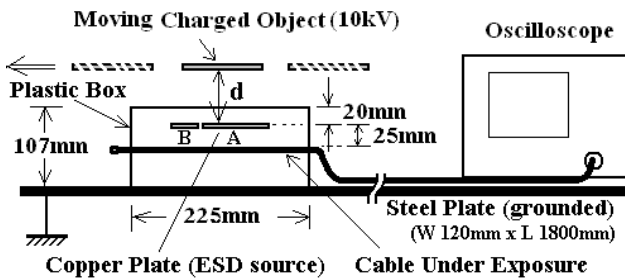


図2 実験見取り図

Fig. 2 Front view of the floating metals and an exposed cable go through the plastic box.

(200 mm × 100 mm × 3 mm, 絶縁抵抗  $> 10^{13} \Omega$ ) 上に、ギャップ間隔約60  $\mu\text{m}$ で固定している. このギャップ幅での絶縁破壊電圧は約750 Vである.

誘導 ESD 発生源を, 長さ 225 mm × 幅 104 mm × 高さ 107 mm のプラスチック (ポリプロピレン製) の箱の中に上面から 20 mm の位置に水平に配置した (銅板 B が図 1 にある様に左側に位置する) 更に, このプラスチック箱を接地した鉄板 (1.8 m × 120 mm, 厚さ 3 mm) 上に置いた.

静電誘導により, 銅板 A と銅板 B に電荷が誘導し, これらの電位差が概略 750 V を超えると, 火花放電 (誘導 ESD) を生じる. この放電によって過渡電磁界が銅板 A 及び B より輻射される. 銅板 AB の直下 25 mm の所に, 試験すべき情報ケーブル (C1-C4) を水平に張って過渡電磁界に曝し, このケーブルの一端をオシロスコープ (テクトロニクス, 684 C, 帯域 1 GHz, 5 GS/s, 同 6604 B, 帯域 6 GHz, 20 GS/s) に接続した (図 2).

## 2.2 帯電人体の歩行による変動静電界の生成と放電の確認

帯電した人の歩行により生じた変動静電界による金属体の静電誘導<sup>4)</sup>を調べる為,  $-10 \text{ kV}$  に帯電したテフロン・シート (65 mm × 180 mm, 厚さ 0.8 mm,) を水平に保持しながら, プラスチック箱の直ぐ上を銅板 A の方から, B の方向 (図 2 で右から左) へ, 約 30 cm/秒の速度で移動させた. この状況では, テフロン・シートと銅板 A, B との間隔は 20 mm ( $d = 20 \text{ mm}$ ) になる. この時, 近辺に配置してある ESD 検出器 (ES-98P) が反応する事から, 放電 (誘導 ESD) が起きている事がわかる. 但し, ESD 検出器はテフロン・シートが運動中にのみ反応し, 停止した場合は, 全く反応しない.

テフロン・シートをプラスチック箱の上面より 30 mm 上を移動 ( $d = 50 \text{ mm}$ ) させる実験も行なったが, 20 mm と同様, 運動中にのみ ESD 検出器 (ES-98P) は反応した. また, 正の帯電物体の移動に関する影響を見るために, 90 mm ×

250 mm のアクリル板 (厚さ 1.5 mm, 帯電電位約 +10 kV) を使った実験も同様に実施した. この場合は, 誘導するインパルスの極性が反転する以外は, テフロン・シートと同じ効果が認められた.

## 2.3 ケーブル誘起ノイズの測定方法と評価ケーブルの種類

誘導 ESD 発生器 (銅板 A, B) の下部 25 mm の位置に, 評価ケーブル (C1-C4) を水平に敷設し, これの一端をオシロスコープ (50  $\Omega$  又は 1 M $\Omega$  入力インピーダンス) に接続し, 誘起波形を測定した. ただし, C4 の USB ケーブルに関しては, 誘導電流を測定する為, 電流プローブ (テクトロニクス, CT-6, 250 kHz-2 GHz) を用いた.

評価したケーブルの種類.

C1: 遮蔽無しツイストペア線, 長さ 1.9 m, 遠端 780  $\Omega$  終端.

C2: 遮蔽付多芯ケーブル, 長さ 1.7m, 遠端 220  $\Omega$  終端, 遮蔽層は両端で接地.

C3: SHF Coax ケーブル (DC-6GHz, 50  $\Omega$ ) 長さ 1m, 遠端 50  $\Omega$  終端.

C4: USB ケーブル長さ 2 m (1 m + 1 m), 遠端 100  $\Omega$  終端, 近端は D+, D-からのリード線約 1 cm を CT-6 (電流プローブ) に貫通.

## 3. 実験結果

### 3.1 遮蔽無しツイスト線 (C1)

低速の信号線として用いられる, 長さ 1.9 m のツイスト線 (UTP, AWG20 × 2, 10 ピッチ/250 mm) を誘導 ESD 発生源の下方 25 mm の位置で銅板に対してこれの真下で平行に配置した (水平状態). このツイスト線の端部 (遠端) は 780  $\Omega$  で終端してある. (公称特性インピーダンス: 600  $\Omega$ ) 近端の線の片側はオシロスコープの BNC コネクタの hot 側に接続し, 他方は BNC コネクタのグランド側に接続した. このオシロスコープは 1 M $\Omega$  又は 50  $\Omega$  の入力インピーダンスが選択出来るようになっている.

テフロン板を右から左へ移動させた時の放電による誘導電圧波形の一例を図 3 に示す. オシロスコープが 1 M $\Omega$  の入力インピーダンスの場合, 尖頭値 (p-p 電圧値  $V_{pp}$ ) は 4.4-5.6V であった. 入力インピーダンスを 50  $\Omega$  にしても  $V_{pp}$  は 3.7-5.5V であった. 振動周期は約 3ns 前後で, 波束の終息には約 20-30 ns かかっている.

遮蔽無しツイスト線 (C1) の誘導電圧波形は, 初期部分に 3-5Vpp のインパルスを持つバースト状ノイズになり, ケーブルの特性インピーダンス, 終端抵抗値, 測定系の入力インピーダンス等にはあまり関係しない事がわかる.

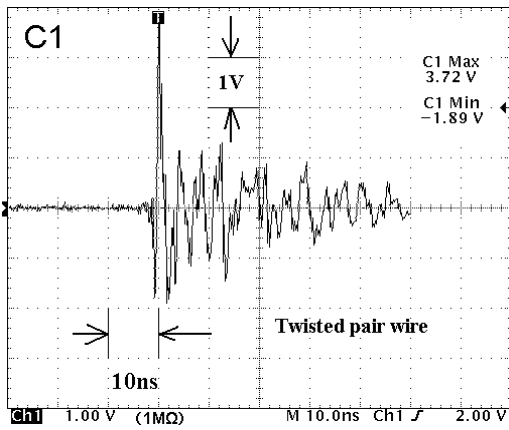


図3 ツイスト線に誘起した過渡雑音波形

$d = 20$  mm, 縦軸: 1 V/div 横軸: 10 ns/div, オシロスコープ入力インピーダンス  $1\text{ M}\Omega$ ,  $V_{pp} = 5.61\text{ V} = (\text{Max } 3.72\text{ V} + \text{Min } -1.89\text{ V})$

Fig. 3 Induced noise on the twisted pair wires  $d = 20$  mm, 1 V/div, 10 ns/div,  $V_{pp} = 5.61\text{ V}$ .

### 3.2 遮蔽付き多芯ケーブル (C2)

発生源の下方 25 mm の位置で平行に配置した長さ 1.7 m の遮蔽付き多芯ケーブルの 2 線間 (遠端  $220\ \Omega$  終端) をオシロスコープ ( $50\ \Omega$ ) に接続して誘起電圧波形を計測した. 遮蔽層の接地条件と誘起電圧 ( $V_{pp}$ ) の関係は下記の通りであった.

遮蔽層を接地しない : 5.5–8.4 V 例 図 4

遠端のみ遮蔽層を接地 : 4.2–5.4 V

遮蔽層の両端を接地 : 4.8–6.6 V 例 図 5

上記より, 遮蔽層を接地した場合の誘起電圧は, それ程小さくならない事がわかる. 今回の実験では, 遠端接地の方が全体として良い結果が得られたが, 条件によっては別の結果も有り得る.

### 3.3 同軸ケーブル (C3)

発生源の下方 25 mm の位置で平行に配置した長さ 1 m の SHF 同軸ケーブル (潤工社 DSF040, DC-6GHz,  $Z_0 = 50\ \Omega$ ) をオシロスコープ (帯域 1 GHz,  $50\ \Omega$ ) に接続して中心導体と遮蔽層間の誘起電圧波形を計測した.  $d = 20$  mm の時の pp 電圧: 7.1–9.6 V  $d = 50$  mm の時の pp 電圧: 6.8–9.1 V 誘起電圧は他のケーブルに比べて高く, 銅板 A, B と帯電シート間の距離 ( $d$ ) には大きく依存しない. 図 6 はテフロン・シートを右から左へ移動させた時に生じた誘起電圧波形である.

### 3.4 USB ケーブル (C4)

発生源の下方 15mm の位置に長さ 2 m (1 m + 1 m) の USB ケーブルを波源と平行に配置した. このケーブルの信号線 ( $D+$ ,  $D-$ ) の片側 (近端) を長さ 10 mm の電線で短絡し, ここに電流プローブ (テクトロニクス, CT-6, 250 kHz–2 GHz) を貫通させ, 誘導電流をオシロスコープ (テクトロニクス,

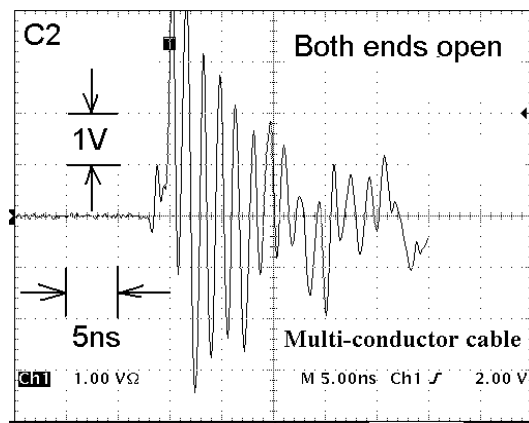


図4 遮蔽層両端を開放 (非接地) した多芯ケーブルに誘起した過渡雑音波形

Fig. 4 Induced noise on the multi-conductor cable  $d = 20$  mm, both ends open (no-shield), 1 V/div, 5 ns/div,  $V_{pp} = 8.37\text{ V} (4.94\text{ V} + 3.43\text{ V})$ .

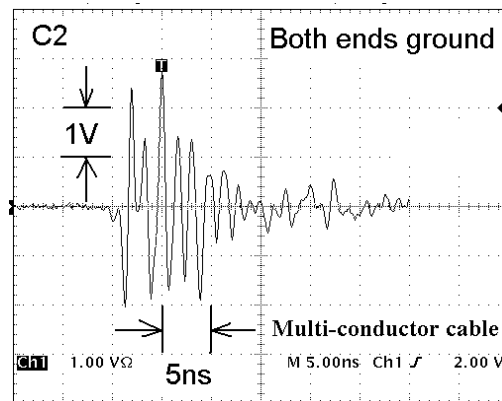


図5 多芯ケーブル (接地) に誘起した過渡雑音波形

Fig. 5 Induced noise on the multi-conductor cable  $d = 20$  mm, both ends ground (shielded), 1 V/div, 5 ns/div,  $V_{pp} = 4.79\text{ V} (2.76\text{ V} + 2.03\text{ V})$ .

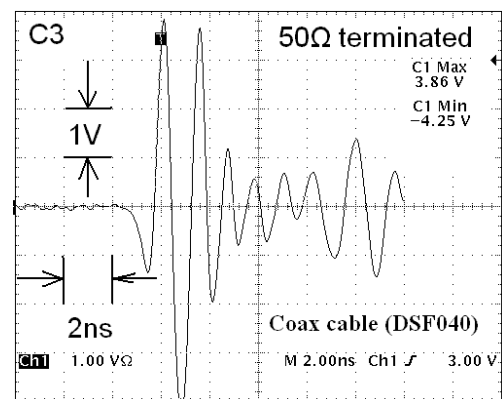


図6 同軸ケーブルに誘起した過渡雑音波形

Fig. 6 Induced noise on the coaxial cable (DSF040)  $d = 20$  mm, far end terminated ( $50\ \Omega$ ), 1 V/div, 2 ns/div,  $V_{pp} = 8.11\text{ V} (3.86\text{ V} + 4.25\text{ V})$ .

6604 B, 帯域 6 GHz, 20 GS/s) で測定した. 信号線は, 遠端で終端 ( $100\ \Omega$ ) している. 電源ライン ( $V_{bus}$ , GND) も

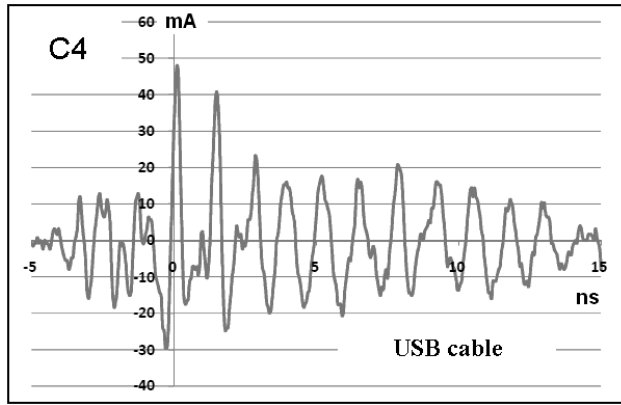


図7 USBケーブルに誘起した過渡雑音波形  
Fig. 7 Induced noise current on the USB cable  $d = 15$  mm, far end terminated ( $100 \Omega$ ),  $10$  mA/div,  $5$  ns/div,  $I_{pp} = 78$  mA.

遠端を  $100 \Omega$  で終端しているが、近端（測定側）は開放している。このケーブルの遮蔽層（二重）は測定側のコネクタで接地している。測定電流波形の一例を図7に示す。

尚、発生源から距離  $25$  mm にこのケーブルを配置すると、電流プローブの S/N が確保できず、この距離（ $15$  mm）にした。USB の差動線路は定電流（公称値  $17.78$  mA）駆動であり、このケーブルに関しては、電流波形を測定した。

## 4. 検討

### 4.1 遮蔽無しツイスト線 (C1)

$25$  mm ピッチのツイスト線に数 V オーダ（例  $3.5$  V）のインパルス状過渡電圧が誘起する事から、誘導 ESD による過渡電磁界の大きさは、少なくとも  $3.5$  V/ $0.025$  m ( $140$  V/m) 以上になっていると考えられる。しかも隣接する  $25$  mm のピッチ（ループ）間で誘起電流がキャンセル出来ない事から、過渡電磁界は少なくとも  $25$  mm の場所（空間）ごとに変っており、その違い方（空間勾配  $\partial E/\partial x$ ）は少なくとも  $140$  V/m/ $0.025$  m のオーダになっていると考えられる。実際にはツイスト線は放電を引き起こす金属体（波源）と極めて接近しているため、近接界（静電界+誘導電界+誘導磁界）による結合メカニズムを考える必要がある。（平面波と十分に長い分布定数線路との結合問題は確立されている）より詳細な解析を行なうには、ツイスト線のピッチ 1 セクションを 2 本の有限な長さ（ $L$ ）の分布定数線路とみなし、これと近接界との結合を調べれば良いが、 $c\Delta t$  と、 $L$  が比較可能か、又は  $c\Delta t$  の方が  $L$  よりも小さくなる状況も織り込む必要がある。

$c$  (光速) :  $3 \times 10^8$  [m/s]

$\Delta t$ : 放電開始から終了までの時間[s] 微小ギャップ（数百 V）、低容量（数 pF）の ESD では数十 ps～数百 ps。放電電流の立ち上がり時間は数 ps～数十 ps オーダ<sup>5)</sup>になる。

従って、 $c\Delta t$  は数センチに満たない場合もある。現状の電磁界の解析手法は、波源が少なくとも観測時間内では振幅（ $A$ ）が一定で、連続振動（一定角速度  $\omega$ ）しており、尚且つ波源の大きさ（ $D_{TX}$ ）と、受信回路の大きさ（ $D_{RX}$ ）は途中にある空間媒質の大きさ（ $d$ ）に比べて無視出来るほど小さい（ $D_{TX} \ll d$ ,  $D_{RX} \ll d$ ）必要があり、現実の ESD 状況と異なっている。

### 4.2 遮蔽付き多芯ケーブル (C2)

低速の信号伝送線路や制御信号伝送線路としての遮蔽付き多芯ケーブルの利用は多いが、このケーブルも至近距離での ESD 事象に対しては脆弱である。遮蔽層の両端を接地しても数ボルト、繰り返し周期約  $1.6$  ns（約  $600$  MHz）、継続時間約  $20$  ns のバースト状雑音が誘起する為、使用状況によっては、信号品質に重大な影響を与える可能性がある。特に振幅が大きいバースト状の雑音は、回路にある非線形素子によって（包絡線）検波され、適度な幅のパルス信号に化ける為、“信号”と誤認されてしまう可能性もある。

### 4.3 同軸ケーブル (C3)

SHF 帯等で使われる同軸ケーブルは、高周波においても低損失の線路を構成する為、外部導体や中心導体は銀メッキが施されており、誘電体も損失角の小さなもの（例：PTFE）が使われている。外部導体を 2 重にし、遮蔽効果を高めたケーブル（例：RG142/Bu）もある。しかし、このような構造の伝送線路であっても、近辺で発生する ESD では大きな振幅の雑音が誘起する事がわかった。ケーブルの終端が  $50 \Omega$  であっても、誘起電圧は  $8$  V を越える場合もあり、これは数百 mA オーダのパルス状の雑音電流に匹敵する。

外部導体に誘起したインパルス状雑音が、表面波として外部導体を伝播し、ケーブルの端（コネクタ部）まで来るところで反射が起こり、その一部は中心導体に結合してノーマルモードになる。更に、外部導体（メッシュ状）から直接的に中心導体への結合も起こり、波長短縮率（ $k$ ）に応じた伝播速度（ $kc$ ）でケーブルの端に現れる。

従って、オシロスコープ（ $50 \Omega$ ）で観測される波形は、これらが合成されたものになる。

$$k = 1/\sqrt{\epsilon} \quad \epsilon: \text{比誘電率}$$

$$c = 3 \times 10^8 \text{ [m/s]}$$

同軸ケーブルの信号の伝播速度（ $v_1$ ）は、中心導体を取り囲む誘電体の比誘電率（ $\epsilon_1$ ）で決まるが、外部導体に誘起したインパルス状雑音の伝播速度（ $v_2$ ）は、外部導体を保護する被覆の比誘電率（ $\epsilon_2$ ）と、中心導体を取り囲む誘電体の比誘電率（ $\epsilon_1$ ）の両方が関係してくるので、結果として速度差（ $\Delta v$ ）が生じる事になる。

$$|\Delta v| = v_2 - v_1$$

一般に、高周波用同軸ケーブルの波長短縮率は  $0.7$  (=光

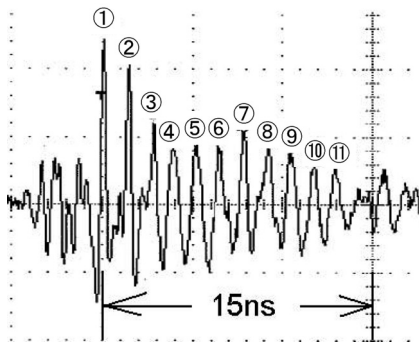


図 8 バースト周波数を知る為に図 7 から抽出した波形とピーク位置の番号付け

Fig. 8 Extracted waveform from the Fig.7 for the analysis of burst noise repetition period.

速の 7 割の伝播速度) 前後であり, 1m 当たりの伝播遅延時間は 4.5 ns から 5 ns 程度になる. 至近距離で発生した誘導 ESD による誘起波形はインパルス状であり, ケーブル端部でのナノ秒オーダーの到来時間差は, 新たなパルスを生じる原因にもなる.

#### 4.4 USB ケーブル (C4)

USB ケーブルは情報メディア機器を接続する際の(差動)伝送線路として多用されており, その使用環境では ESD と遭遇する機会は少なく無い. 特に, “プラグアンドプレイ”の様に, ケーブルの頻繁な抜き差しを伴う場合は, 帯電人体からの直接的な放電や, ケーブルの引きずり/折り曲げに伴う CDE (cable discharge events) 等も起こり, 機器本体以上に ESD の存在が問題となる. この為, USB ケーブルは外乱の影響を最小化する為, 嚴重な遮蔽構造が取られている.

今回の実験では, 1m の USB ケーブルを 2 本 (タイプ B+延長ケーブル) 接続して, 近くで誘導 ESD が発生した場合のデータ線 (D+, D-) に誘導する雑音電流を測定した. その結果, 図 7 に示す様な大振幅 (78 mA) のバースト状雑音が生じる事がわかった.

図 7 のバースト状波形について, 最初の振幅の大きいパルスから 15 ns までに含まれる各パルス (位置) に番号を振り (図 8), それらの時間間隔 (繰り返し周期) を EXCEL データ (50 ps ステップ) を基に調べた結果, 表 1 が得られた. 平均繰り返し周期は約 1.29 ns で, これは約 775 MHz に相当する (バースト周波数  $\approx$  775 MHz). 但し, バースト初期の時間間隔は 1.1 ns と短く, 約 910 MHz の振動に相当する. 測定系の周波数特性を考慮すると, バースト周波数は GHz 帯に及んでいると思われる.

注: USB2.0 のハイスピードモード<sup>6)</sup>では, 転送速度が 480 Mbit/s まで許されており, ESD によって生じた 700 MHz から 900 MHz 程度の周波数成分を含むバースト状

表1 ピーク位置と時間間隔 (ns)

Table 1 Peak position and time interval (ns) of the burst noise appeared on Fig. 7.

ピーク位置	時間間隔 (ns)
1-2	1.4
2-3	1.35
3-4	1.1
4-5	1.25
5-6	1.25
6-7	1.4
7-8	1.35
8-9	1.25
9-10	1.35
10-11	1.2

雑音は, 受信回路にとって “正常信号” として受け止められる可能性がある.

#### 5. まとめ

装置内に非接地の浮動金属体があると, ここで誘導 ESD が発生する. 各種の情報ケーブルがこれによって輻射された過渡電磁界に曝されると, 大振幅の過渡雑音が生じる. その波形は立ち上がり数が数百ピコ秒オーダーのインパルス状, 或いは, 繰り返し周波数が UHF 帯に及ぶバースト状であり, 容易に回路に結合/伝導する. その為, 人体から装置に直接的な放電事象が起きていないにも拘らず, この装置で重大な電磁妨害 (EMI) が発生してしまう.

この事象は従来の ESD 耐性試験では評価, 再現出来ず, 新たな試験方法 (例: 誘導 ESD 耐性試験) を早急に確立する必要がある.

誘導 ESD による過渡電磁界と情報ケーブルとの結合, インパルス雑音が重畳したケーブルとこれに隣接している情報ケーブル間のクロストークの問題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: A new threat-EMI effect by indirect ESD on electronic equipment. IEEE Trans. Ind. Appl., **25** (1989) 939
- 3) M. Honda and Y. Nakamura: Energy dissipation in electrostatic spark discharge and its distance effects. EOS/ESD Symposium Proceedings, EOS-9, p.96 (1987)
- 4) M. Honda and S. Isofuku: Experimental analysis of EMI caused by charged human walking near by electronic System", EMC Europe 2010, Session ESD, p.753, (2010)
- 5) M. Honda: Impulsive Fields caused by Low Voltage ESD, PIERS 2006-Tokyo, Session 4A8, ESD and Transients, (2006)
- 6) Universal Serial Bus Specification Revision 2.0, April 27, (2000)