

## 間接ESDが電子機器に及ぼす影響

(株)インパルス物理研究所

本田昌實

### 1.はじめに

マイクロエレクトロニクスの実態は何か？ 筆者は唐突かも知れないがそれは単なる「石ころ」であると考えている。そこから辺にいくらかでも転がっている石、その多くは珪素やその酸化物等を多量に含んでいる。つまり大規模集積回路(VLSI)の原始の姿であるとも見ることが出来る。VLSIの原材料は珪石(火打ち石)であり、これから精選され微細加工されている為に、周囲の凡ゆる環境ストレス(熱/機械/化学/電気/宇宙線等)に敏感にならざるを得ない。元々が脆い上に一時的に調和しているに過ぎないからである。エントロピーの増大は決して避けられない事を考えると、この超純粋なシリコンのカケラに支えられた高度情報化社会(又は“シリコン文明”)は真に脆い存在ではなかるうかと思われる。それはCPU(中央処理装置)のみならず、センサーやアクチュエータ制御等、微細化されたシリコンが使われている全ての半導体デバイスと電子装置について言える事である。シリコンのカケラゆえに、いとも簡単に壊れ、何の予兆もなく突然と誤動作を引き起こす。始末の悪い事に、時間空間当たりの密度が向上し、動作責務が増せば増すほど本質的な脆さを露呈してくる。それは例えば航空/輸送インフラでのトラブルに垣間見る事が出来る[1]。高価で少量しか流通していない精密機械部品と比較し、

ICは安く簡単に手に入る為、民生/産業/軍用を問わず、大量使用されている。しかしマイクロエレクトロニクスが持っている本質的な脆弱性の問題に目をつぶってはいけないと思う。シリコンのみならず、あらゆる化合物半導体(例:GaAs素子)も同様に脆弱化の道を辿っている事を認識すべきである。例えるならば、今の状況はまさに“砂上の楼閣”とでも言えよう。

このストレスの一因として静電気(摩擦電気)がある事は専門家の間では常識となっているが、残念ながら研究開発者も含め一般には余り知られていない。“ハイテクの塊”に対し、古色蒼然たる摩擦電気の影響など有る訳がないと決めつけられている。しかも技術が進歩すればする程、改良/改善されて行くから、過去に静電気で問題があったとしても現在は“有り得ない”とされるのも当然であろう。そこから芽生えるのは電子化への過信であり、IT社会(例:ユビキタス)への過剰な期待(=盲信)である。マイクロエレクトロニクスに対する絶大な信頼が有るからこそ成立するパラダイムであるにも関わらず、この超低脆弱性の問題が議論から外され、隠ぺいされている。

以降はマイクロエレクトロニクスを基本構成要素とした電子機器/装置に対する静電気の影響、特に非直撃的な放電による誤動作問題[2]を俯瞰する。

## 2. 電子部品 / 機器に対する静電気障害

静電気の影響は素子 / 部品 / プリント基板等に対するものと、稼働中のコンピュータ機器等に対するシステムレベルの問題に大別される。前者は素子部品の劣化 / 破壊であり、後者は電子回路の誤動作の発生である。何れも静電気が急に放電した時、つまり静電気放電 (ESD : Electrostatic Discharge) による衝撃的な作用が問題となる。

放電により物体に蓄えられていた静電エネルギーは、熱、光、音、イオン等と過渡的な電磁界エネルギーに変換される。高電圧 (例 : 20 kV) の ESD では熱エネルギーに変換される割合が 95% 以上 [ 3 ] であるが、低電圧 (例 : 3 kV) の ESD では熱よりも電磁界エネルギーに変換される割合が増加すると考えられる [ 4 ]。後で改めて説明するが、回路の誤動作の問題はこの過渡電磁界エネルギーが非常に重要な役割を果たす。

## 3. 間接 ESD 現象の顕在化

システムレベルに対する ESD の問題は 1980 年代前半までは「人体帯電モデル (HBM : Human Body Model)」に基づいて解析が行われてきた。このモデルの前提は、帯電した人体 (指先) からの直撃的な放電により回路に放電電流が注入される事であり、結果として誤動作が起こるとされてきた。この考え方は電子機器に対する ESD 耐性試験法において、理論的根拠を与えている [ 5 ]。

1990 年代になり、電子機器の収容ケース (筐体) のプラスチック化が進行した結果、直撃的な ESD は起こりにくい状況になり、一見、ESD 耐性は向上したかの

様に考えられた事もあった。ところが実際には電子機器近辺で発生する ESD 事象に敏感に反応 (誤動作の発生) してしまうのである。VLSI (例 : MPU) の高速化もこの問題に貢献している。従って、90 年代に入り、間接的な ESD による電磁干渉 (EMI : Electromagnetic Interference) 問題が顕在化してきた。例えば [ 6 ]

間接 ESD に起因する EMI の症状は多岐にわたるが、共通して言える事は、障害は一過性で間欠的であり、システムの電源を入れ直せば電子回路そのものは正常に動作する。しかし認識の問題があり、この事象 (間接 ESD の発生 電子システムの不調) の全体像を現場 (例 : 大型旅客機の操縦席) で客観的に捉える事は非常に難しい。多くは「原因不明」或は“NTF (no-trouble found)”として葬り去られる事になる。

## 4. 間接 ESD の時系列的展望

間接 ESD による EMI を時系列的に発生、伝搬、侵入、誤動作の各フェーズについて眺めてみる。

### 1 : インパルス電磁界の発生

低電圧 (約 3 kV 以下) に帯電した金属物体 (例 : スチールパイプ椅子、静電容量約 70 pF) に、もう一つの金属物体を接触 / 衝突させると、ESD が発生する。即ち、間接 ESD (現象) である。図 1。

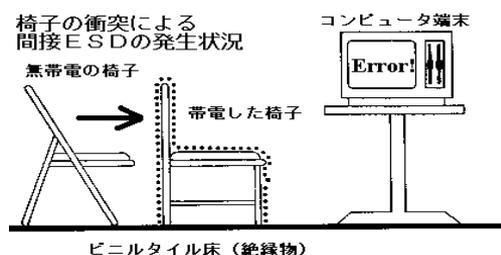


図 1 . 間接 ESD 発生状況

この時、金属物体から近辺の空間に極めて強力なインパルス電磁界が放射される。その強さは概略  $4 \text{ kV/m}$  ( $180 \text{ dB}$  オーダ)にも及ぶ事がある[7]。比較として、携帯電話のアンテナ近傍の電界強度は数  $\text{V/m}$ 以下である。インパルス状電波の継続時間 ( $t$ ) は数十  $\text{ps}$  から数  $\text{ns}$  である。図2は帯域幅  $34 \text{ GHz}$  のサンプリグオシロスコープ (HP54123T) による ESDインパルスの測定例である[8]。パルス幅 ( $t$ ) 約  $40 \text{ ps}$  が得られている。光速を  $c$  とすると  $c \cdot t$  はわずか  $12 \text{ mm}$  しかない。

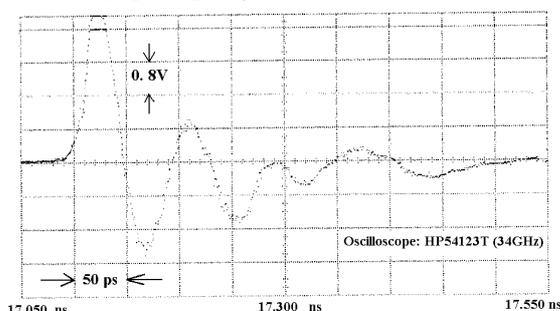


図2. ESDインパルスの例

ESD源：長さ  $200 \text{ mm}$ 、直径  $12.7 \text{ mm}$ 、静電容量  $3 \text{ pF}$  の銅パイプを2本 (A, B) 垂直に配置し、 $+550 \text{ V}$  を導電ゴム (約  $1 \text{ G}$ ) 経由でAに印加。放電間隙は  $30 \mu\text{m}$ 。アンテナ ( $5 \text{ mm}$ ) は銅パイプBから  $10 \text{ mm}$  の位置に垂直に設置。合計  $4.5 \text{ m}$  ( $3 \text{ m} + 1.5 \text{ m}$ ) のマイクロ波用広帯域同軸ケーブル (潤工社 DGM024: DC -  $18.5 \text{ GHz}$ ) と、 $20 \text{ dB}$  の同軸減衰器 (HP33340C: DC -  $26.5 \text{ GHz}$ ) を使用。

理論解析や計算機シミュレーションを行なう際に、この低電圧 ESD の変化の激しさ ( $dV/dt$ ,  $di/dt$ ,  $dE/dt$  等) に留意する必要がある。更に、数  $\text{kV}$  の E

SD では、放電間隙は数  $\mu\text{m}$  から数百  $\mu\text{m}$  オーダであり、条件によってはこの小さな空間で瞬間的に数百  $\text{W}$  から数百  $\text{kW}$  の電力が生じる事もある。従って、低電圧の ESD では時間的な変化の激しさに加え、発生した電磁界の勾配 (例:  $E/x$ ,  $E/x^2$ ) も極めて大きくなる事が予想される。

## 2: インパルス電磁界の伝搬

金属物体の形状によっては、ここから出たインパルス電磁界は偏波面が強く現われたり、特定方向へビーム状になって伝搬する事がある。低電圧 ESD によるインパルス状電磁界は周波数成分が静電界 (DC 界) からマイクロ波やミリ波領域まで及ぶ為、ESD 波源近辺にある導体や誘電体 (例: 人間) は反射・導波・吸収・散乱作用を示す事もある。特に細長い金属の構造体は、相当遠方までインパルス状電磁エネルギーを伝達する媒体となる。また OA 室の金属上げ床 (例: アルミダイキャスト) と本来の床面は一種の導波管になり、床板間の ESD によって発生したインパルス状電磁界の良好な伝搬路になる。妨害を受けるシステムが、ESD 波源に極めて近接している時で尚且つ、波源と受信回路 (システム) が比較出来る程度の大きさの場合 (図3) には、通常の電磁場解析理論を修正する必要があると考えられる。これは単に無限媒質近似 (infinite-medium approximation) や無限時間経過近似 (infinite-duration process approximation) を行なう為の境界条件の変更 [9] に留まらず、近接界にさらされた有限長伝送線路 (静止または運動) の問題を提起させることになる。

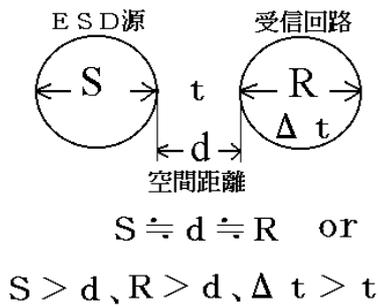


図3 . 現実の間接ESDの状況

図3に現実の間接ESDでは波源の大きさ ( S ) と受信回路の大きさ ( R ) と空間距離 ( d ) がともに比較し得る状況を示す。 S d R ESD源から出たインパルス電磁界 ( パルス信号 ) の空間伝搬時間 ( t ) よりも受信回路の中を伝達する時間 ( Δ t ) の方が大きい事も有り得る。

t < Δ t 更に、低電圧 ( 狭ギャップ ) の放電ではパルス信号の継続時間 ( Δ t ) は空間伝搬時間 ( t ) よりも短い事があり得る。

$\Delta t < t$     または     $\Delta t < t < t$

波源 S からはあらゆる方向にインパルス電磁界 ( パルス信号 ) が放出され、受信回路 R には複数個所から異なった時刻にこの信号が到達する。波源 S からの電気力線は直線ではなく、曲線的に受信回路 R に到達する。

3 : インパルス電磁界の侵入

収容ケース / キャビネットにある空気取り入れ口等の細長い隙間は、インパルス電磁界の “ 受信アンテナ ” ( slot antenna ) として作用する [ 10 ]。例えば金属ケースの繋ぎ目に垂直の隙間 ( 長さ 50 mm、幅 1 mm ) が有ると、この隙間はインパルス電磁界の垂直成分の磁界を受信し、今度はこの隙間が内部に水平成分のインパルス電界

を送信するアンテナになる。主たる周波数成分は理論上 3 GHz である。収容ケース / キャビネットに出入りする電線類も当然侵入を助ける。大型計算機の設置環境のように金属上げ床構造が使われている場合、この床下に配線されている信号ケーブルは TM や TE モードのインパルス電磁界を拾うことになる。信号ケーブルに遮蔽層がある場合、この表面をインパルス状電流が流れ、ケーブルのコネクタ取付け部のわずかな隙間から内部に侵入する。低電圧 ESD に含まれる電磁スペクトラムは数十 GHz ( 例 : 33 GHz ) にも及ぶ為、導体表面を好んで伝搬する性質が強まる。

4 : デジタル回路の誤動作

このインパルス電波 ( 水平の電界成分 E が主 ) はケース内部にある水平方向に長さがある導体に移る。磁界成分 H であればループ状の導体 ( 例 : プリント基盤上の接地パターン ) に対してインパルス状電流を誘導する。実際には細長い隙間があれば内部のあらゆる導体にインパルス状雑音を誘起させる事になる。そして布線やプリント基板等に分布する LC の共振系で周波数が減速され、振動の時間幅は増大する。図 4 .

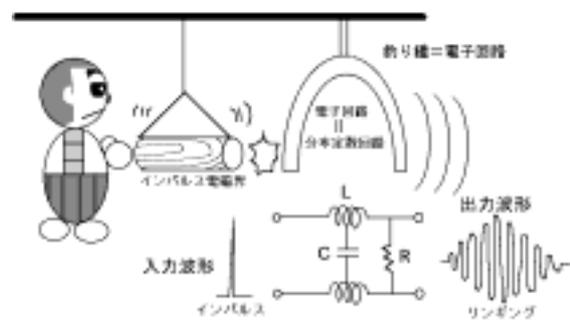


図4 . 電子回路のインパルス応答

適度な大きさの金属収容ケースはマイクロ波領域で“空胴共振器”として働く場合もある（概略数百MHzから数GHzの範囲）。更に、半導体素子のPNジャンクションや他の非線形素子により、“包絡線検波”が行われ、そこで使用されているデジタル回路にとって十分に意味のあるパルス幅になる。つまり原波形は数十ピコ秒の極短インパルスであっても、そのパルス幅は回路の中で必ず伸展（pulse stretching）される。その結果、回路の一部に論理上有り得ない“信号”（glitch）が生じ、その回路、又は次段の回路で意図しない動作が一瞬起きてしまう。たとえ低速のCMOS回路を使用している場合でも、条件によってはこのような極短インパルスに反応（誤動作）してしまう可能性がある [ 11 ]。

#### 5：障害/誤動作の連鎖的波及

不具合が局部的に留まる場合（例：主記憶装置でのパリティエラー）は他の回路（保守診断専用回路）がこの異常を察知し、診断プログラムの介入によりシステム側（OS含む）で障害を認知する事ができる。この場合は直ちに再起動がかかり、負荷分散や一部機能を切り離して「縮退モード」で業務を続行する事が出来る。しかしシステムの中核部（CPU、緩衝記憶機構等）にインパルス状雑音が入ると、システム全体が停止してしまう事もある。心臓の鼓動に相当するマスタークロック（パソコンは単相だが超大型機は4相又は16相が使われている）を強制的に停止させることによって、仕掛り中の各種レジスタを凍結（freeze）させ、回復時の手がかりを保存しておく為である。しかしこのようにハード上の障害回復処理が充分行なえず、中核部

に異常が波及（伝播）してしまい、結果的にシステム全体が麻痺状態に陥ってしまう場合もある。システム側の仕掛（例：CPU系の多重構成）が大規模で複雑になればなる程、全体の回復処置は困難になる。時間・空間的に離れているシステム間における通信機能の強化（密結合化）は結果的に他のインフラ（例：地球規模の金融情報システム）に対しても重大なインパクトを与える事になる。

#### 5．まとめ

電子機器に対する間接ESDの影響（EMI作用）について概観した。直接ESDよりもEMI作用が強い割りには、研究が遅れている。パルス幅が極端に短いインパルス（電磁界）の測定が困難である事もその理由の1つである。極短/超強力インパルス源としての低電圧（数μから数十μmの狭ギャップ）ESDの性質、ESD源と被妨害機器との間に運動があった場合のEMIの強調効果、等についての深耕探索が必要である。

#### 参考文献：

- [1] NASA: Aviation Safety Reporting System Data (ASRS Reports) as of July 31, 1998. “Controlled Flight Toward Terrain”, “Multi-Engine Turbojet Aircraft Upsets Incidents”, “Passenger Electronic Devices”. 等に航空航法電子装置の不調/誤動作が多数報告されている。
- [2] M. Honda and T. Kawamura, “EMI Characteristics of ESD in A Small Air Gap”, 1984 EOS/ESD Symposium Proc., pp.124-130. 1984.

- [3] W. Roth, P.G. Guest, G. Elbe and B. Lewis, pp.29-33, 1991 年 12 月  
“Heat Generation by Electric Sparks and Rate of Heat Loss to the Spark Electrodes”, Journal of Chemical Physics, Vol.19, No.12. pp.1530-1535. Dec. 1957.
- [4] M. Honda, “Characteristics of Low-voltage ESD and its Threat”, EOS/ESD Symposium Proc., pp.18-25. 1991.
- [5] IEC 1000-4-2, Electromagnetic Compatibility for Industrial-Process Measurement and Control Equipment, Part 2: Electrostatic Discharge Requirements. 1993. (現在は IEC 61000-4-2 になっている)
- [6] 馬杉、村川、桑原、雨宮、 “間接 ESD に伴う電磁パルスの測定と解析”、電子情報通信学会、論文誌、Vol. J75-B-II, No.9, pp.647-654, 1992 年 9 月.
- [7] P. Wilson, M. Ma and A. Ondrejka, “Fields Radiated by Electrostatic Discharges”, IEEE/EMC Symposium 1988, Proc., pp.179-183, Aug. 1988.
- [8] M. Honda, “Indirect ESD Measurement Using A Short Monopole Antenna”, IEEE/EMC Symposium 1990, Proc., pp.641-645, Aug. 1990.
- [9] M.J. Neatrou, “Comments on [Correction of Maxwell’s Equations for Signals I, II and Propagation Velocity of Electromagnetic Signals]”, IEEE/EMC Trans., Vol EMC-29. No.3. P.258. Aug., 1987.
- [10] 本田、川村、 “ESD の特徴と計算機に対する影響 (その 1 ) ” 電子通信学会、技術研究報告 (環境電磁工学)、EMCJ83-75, pp.25-30, 1983 年 12 月
- [11] 本田、 “ESD の特徴と計算機に対する影響 (その 9 ) ” 電子情報通信学会、技術研究報告 (環境電磁工学)、EMCJ91-69,