

帯電した人体と接地導体間の静電気放電によって ウェアラブル機器が受ける電気的ストレス

難波田 恵*, 吉田 孝博*.1

(2016年3月7日受付; 2016年9月26日受理)

Electrical Stress Induced on Wearable Devices by Electrostatic Discharge from a Charged Human Body to a Grounded Conductor

Megumi NAMBATA^{*} and Takahiro YOSHIDA^{*,1}

(Received March 7, 2016; Accepted September 26, 2016)

In a real environment where wearable devices are used, the conditions under which electrostatic discharge (ESD) occurs are considered to differ from those used in previous test methods because wearable devices are usually held or carried by users on their body.

Therefore, in this study, we measured electrical stress induced by ESD from a charged human's fingertip to grounded objects on wearable devices held by a charged human. The induced voltage and the discharge current were measured using a batterypowered portable oscilloscope and some antennas to provide different line characteristics.

The experimental results revealed different shapes of the induced voltage waveforms, different durations, and different amplitudes for each antenna. In particular, the durations of the induced voltage waveforms varied from on the order of tens of nanoseconds to hundreds of microseconds. These results indicate that electrical stress induced by ESD on wearable devices varies widely and depends on the circuit structure.

1. はじめに

電子機器の開発において,帯電した人体などの帯電物 から機器への静電気放電(ESD: Electrostatic Discharge) による誤作動や故障への耐性を評価,改善するため, IEC 61000-4-2¹¹ などの静電気試験器にて機器へESD を 印加して耐性試験を行っている.しかし,近年普及が進 むスマートフォンをはじめとするウェアラブル機器の実 使用環境では,従来の耐性試験で想定されている,外部 の帯電物から機器へESD が印加される状況に加えて, 機器を所持する人の摩擦や剥離を伴う動作(歩行,椅子 からの立ち上がり,脱衣など)で,人体と共に所持した 機器も帯電する状況が多く存在する.この様な状況下で は,所持するウェアラブル機器に特有の形態として,

(1)帯電した人体が所持する機器が周囲の接地導体へ接近した際に、人体からウェアラブル機器を介して周囲の導体へ直接的に ESD が発生.

キーワード:静電気放電,ウェアラブル機器,帯電人体,誘起電圧

Department of Electrical Engineering, Tokyo University of Science, 6-3-1 Niijuku, Katsushika-ku, Tokyo 125-8585, Japan

¹ yoshida@ee.kagu.tus.ac.jp

(2) 帯電した人体の指先や握った導体などから周囲の導体へ ESD が発生することで、人体及び所持する機器の電位が急激に低下.

などの状況が生じうる、ここで、前者(1)については、 石田氏らにより詳細な検討がなされている²⁻³⁾.一方, 後者(2)の状況下での検討はなされていなかった. そ こで我々の先行研究において、帯電した人体の指先から 周囲の接地導体へ ESD が発生した際に、人体が所持す るウェアラブル機器が受ける電気的ストレスについて. 人体が所持したポータブルオシロスコープに誘起される 電圧波形を実測することで実測調査を行ってきた450. なお,所持したウェアラブル機器の実使用環境では,電 源やアース. 信号線などのケーブルを接続せずに機器単 独でバッテリ駆動する状況が多いため,我々の研究では, この状況下におけるウェアラブル機器を想定して、各チ ャンネル絶縁入力のポータブルオシロスコープを,外部 の電源やアースに接続せずに単独でバッテリ駆動させて いる。また、ウェアラブル機器の回路構成・特性は様々 であるが,検討の第一歩として,ウェアラブル機器の内 部回路と筐体のコネクタまでの線路を想定して、ポータ ブルオシロスコープの絶縁型入力回路と、オープン、シ ョート, ロードなど回路特性が異なる各種アンテナで置 き換えて検討している.

しかし、先行研究では、現象の一例は示したものの定

^{*} 東京理科大学工学部電気工学科

^{(〒125-8585} 東京都葛飾区新宿6-3-1)

量的かつ詳細な解析,ならびに現象の発生要因の検討が 不足していたため、本研究では、追実験を行い、より定 量的かつ詳細に解析を行った.なお、人体から ESD が 発生する帯電電位は主に数百 V から十数 kV まで幅広い が、本実験では、その範囲の中で中程度の電位であり、 人体からの ESD に関する研究の主流である、IEC 61000-4-2 の気中放電の試験レベル 1 とレベル 2 に相当する人 体帯電電位 ± 2 kV~± 4 kV において行った。

本稿では,機器の線路インピーダンスの高低に依存し た特徴的な誘起電圧波形の一例を示すと共に,指先から のESDの放電電流のピーク電流値や第1ピークの立ち 上がり峻度と,ウェアラブル機器の誘起電圧の振幅や時 定数との関係について述べる.さらに,高インピーダン ス条件下特有の長時間誘起電圧の発生メカニズムの解明 に向けた第一段階として,当現象に関わる回路要素の特 定も行ったので,その検討結果も併せて述べる.

2. 装置及び方法

帯電した人体から周囲の接地導体への ESD 発生時に ウェアラブル機器が受ける電気的ストレスの測定方法を, 図1に示す.厚さ2mmの接地金属板に重ねた厚さ13 mmの絶縁板の上に立った被験者(20代女性1名,文献[®] の方法で測定した人体静電容量192pF・指先の皮膚抵抗 7.7 MΩ)を,5GQの抵抗を介して高電圧電源から電圧(± 2kV,±3kV,±4kV)を印加することで帯電させる. その後,指先を0.5~1 cm/s 程度を目安にゆっくりと接 地金属半球電極(曲率半径10mm,真鍮)に接近させる ことで,指先と接地導体間で ESD を発生させる.

ESD 発生時にウェアラブル機器が受ける電気的ストレ スは、被験者が所持したポータブルオシロスコープ (FLUKE, 190-204, 帯域 200 MHz, 入力1 MΩ, 各入力 チャネルは絶縁型)に誘起される電圧波形で調査した. なお、ポータブルオシロスコープの背面 (PC/ABS 樹脂) とアンテナは、衣類 (薄手のシャツ1枚)を介して被験 者の体 (胸部・腹部)と接触している状態になるように、 布ベルトで被験者に固定した. この時のポータブルオシ ロスコープ表面と放電箇所の接地金属電極の水平距離は 20 cm とした.

ウェアラブル機器の高インピーダンス状態の入力回路 の一例として、1 MΩの入力抵抗と線路等の浮遊容量が 存在し、入力端子が開放状態にある回路を想定して、ア ンテナの Hot・GND 間が開放状態であるスタブアンテ ナ(ELECTRO-METRICS, EM-6997, 全長 108 mm, ス タブ長 3 mm, 帯域 1 GHz, 特性インピーダンス 50 Ω)を、 ポータブルオシロスコープの入力(1 MΩ)に接続、も



- (b) 被験者と放電箇所とポータブルオシロスコープ の位置関係
- (b) Relationship of positions between the subject and discharge points and portable oscilloscope.
- 図1 ESDによってウェアラブル機器が受ける電気的ストレス の測定装置図
- Fig.1 Schematic view of the apparatus used to measure electrical stress induced on wearable devices by ESD.

しくは,アンテナを接続せずポータブルオシロスコープ の入力端子のBNC型コネクタが開放の状態(非接続) で測定を行った.

一方,ウェアラブル機器の低インピーダンス状態の入 力回路の一例として,1 MΩの入力抵抗と線路等の浮遊 容量が存在し,入力端子が短絡もしくは終端されている 回路を想定して,Hot・GND間の抵抗値が54.3 Ωであ る球状ダイポールアンテナ(同,EM-6996,全長145 mm,球の直径35 mm,帯域1 GHz,特性インピーダン ス50 Ω),もしくはHot・GND間が導通状態のループア ンテナ(同,EM-6994,全長116 mm,直径10 mm,帯 域1 GHz,特性インピーダンス50 Ω)のいずれか1本 を接続して測定を行った.なお,これらのアンテナは, BNCP-BNCP(オス・オス)ストレートコネクタにより, ポータブルオシロスコープに直接接続した.アンテナは 床面に対して垂直向きであり,かつ被験者の胸部表面と



図2 アンテナの反射の周波数特性(リターンロス)

Fig.2 Frequency response of reflection characteristics of each antenna (Return loss).

平行する向きである. ループアンテナはループが被験者 の胸部・腹部と平行する向きとした.

本実験における誘起電圧の波形や振幅 V_{PP} は、オシロ スコープの帯域200 MHzで制限された結果である.また、 このポータブルオシロスコープの絶縁入力チャネル間や 制御回路などは絶縁された構造であるが、各チャネルの 入力基準部とその周辺部の間や、入力基準部間は寄生容 量にて結合されているため、オシロスコープの本来の計 測法であれば、接地もしくは基準電位に接続する必要が あるⁿ.しかし、本実験では、ポータブルオシロスコー プとアンテナ自体を所持しており、機器を接地せず絶縁 状態で使用していることで観測波形へ影響を及ぼしてい る可能性はあるが、本実験では、ウェアラブル機器で生 じうる現象を調査することが目的の一つであるため、第 一段階の検討として、この影響も含めてウェアラブル機 器が受けうる電気的ストレスとしている.

本実験に用いた3種類のアンテナの周波数特性は,デ ータシート等に記載が見つからなかったため,文献^{®)}の 方法に従い,ベクトルネットワークアナライザ(Agilent Technology, E5071C)を用いて簡易的に測定した.アン テナの反射の周波数特性(リターンロス)の測定結果を, 図2に示す.

また,接地金属電極からグラウンドに流れ込む放電電 流を,もう1台のディジタルオシロスコープ(Tektronix, DPO4104,帯域1GHz,入力50Ω)と電流プローブ (Tektronix, CT-1,帯域1GHz)にて測定した.実験時 の気温は24.5~24.8℃,相対湿度は52~53%であった. 測定回数は各条件10回である.

3. 測定・解析結果及び考察

本章では、本実験における ESD の放電特性の概要を 示した後に、ウェアラブル機器の低インピーダンス線路 と高インピーダンス線路を想定した各アンテナ条件にお ける誘起電圧波形に関する測定結果ならびに全測定デー タを用いて ESD と誘起電圧との関係を分析した結果に ついて述べる.

3.1 本実験におけるESDの放電特性

指先からの ESD では特に、同条件下であっても放電 毎に放電ギャップ長が異なり、電流値や波形形状がその 都度異なる現象である^{6,9}.同一の帯電電位(±3 kV)で 出現した放電電流波形の一例として、人体が正極性に帯 電した場合の ESD(正放電)を図3(a)に、負放電を 図3(b)に示す.図3に示されるように,鋭い単一ピ ークを持つ1ピーク波形や、第1ピーク後に緩やかな第 2ピークが存在する2ピーク波形等. 放電のたびに波形 形状も異なり、これらのピーク電流値や立ち上がり峻度。 も様々である.この様に、機器のノイズ源となる ESD 自体の特性が毎回異なることで、ウェアラブル機器が受 ける電気的ストレスもその都度異なる可能性があるが. 指先からの ESD の特性(放電電流のピーク電流値や第 1ピークの立ち上がり峻度)と、ウェアラブル機器の誘 起電圧との関係を調査するため、次節以降では、全測定 データを用いて、測定毎の放電電流のピーク電流値やピ ークの立ち上がり峻度と、その測定における誘起電圧の 振幅や時定数との関係で整理し、分析した.

3.2 低インピーダンス条件における誘起電圧

本節では、低インピーダンス条件として、所持したポ ータブルオシロスコープ(入力1 MΩ)に球状ダイポー



図 3 同一帯電電位(±3 kV)における放電電流波形の例 Fig.3 Discharge current waveforms at ±3 kV.

ルアンテナ(Hot・GND間の抵抗値 54.3 Ω) もしくは 10φループアンテナ(Hot・GND間が導通状態)を用い た際の誘起電圧波形,及びESDとの相関性について述 べる.

i)誘起電圧波形

球状ダイポールアンテナと10φループアンテナを用いた際に誘起された電圧波形の一例として,正放電(+3 kV)時を図4に,負放電(-3 kV)時を図5に示す.アンテナの感度や特性によって振幅や波形形状は異なるも



- 図4 低インピーダンス条件のポータブルオシロスコープに 誘起した電圧波形(正放電 +3 kV)
- Fig.4 Induced voltage waveforms, as measured using a portable oscilloscope under the low-impedance condition (+3 kV).



図5 低インピーダンス条件のポータブルオシロスコープに 誘起した電圧波形(負放電-3kV)

Fig.5 Induced voltage waveforms, as measured using a portable oscilloscope under the low-impedance condition (-3 kV).

のの,数十ナノ秒オーダの時間長の減衰振動波形となっ ており,ESDにより放射される電磁ノイズを放電箇所 周囲のアンテナで観測した際の放射電磁ノイズ波形[™] と類似している.

なお,誘起電圧波形の極性は,機器の位置関係やルー プアンテナの向きによっても変化するため,アンテナの 向きを統一して極性の関係性を検討することは,今後の 課題である.

ii) ESDとの相関性

誘起電圧の最大振幅 V_{PP} と放電電流のピーク電流 I_p と の関係を図 6 に、V_{PP} と放電電流の第 1 ピークの立ち上 がり峻度の関係を図 7 に示す.図より、帯電電位により 傾きは異なるが、両アンテナ共に、放電電流の立ち上が り峻度と誘起電圧の振幅には、ばらつきはあるものの相 関が見られることから、低インピーダンス条件では主に、 放電電流の変化に伴い発生する放射電磁ノイズが間接的 に機器の線路に誘起されるストレスだと考えられる.な お、ESD のピーク電流値と立ち上がり峻度の結果で近 い傾向が見られるのは、ピーク電流値が大きいと立ち上 がり峻度も大きくなる傾向があるためと考えられる.

3.3 高インピーダンス条件における誘起電圧

本節では,高インピーダンス条件として,所持したポ ータブルオシロスコープ(入力1 MΩ)にスタブアンテ



図 6 誘起電圧の最大振幅 V_{PP} と放電電流のピーク電流値の 関係(低インピーダンス線路)

Fig.6 Relationship between the discharge current I_{p} and the induced voltage amplitude V_{pp} (low-impedance condition).



図7 誘起電圧の最大振幅 V_{PP}と放電電流の第1ピークの立 ち上がり峻度の関係(低インピーダンス線路)

Fig.7 Relationship between the rising speed of the first peak current of the discharge current and the induced voltage amplitude V_{pp} (low-impedance condition).

ナ(Hot・GND間が開放状態)を用いた場合とアンテナ 非接続(入力端子が開放状態)の場合に,特徴的な長時 間誘起電圧が観測されたので,この誘起電圧波形及び ESDとの相関性について述べる.

なお、低インピーダンス条件で観測された、ESDによ る放射電磁ノイズを観測したと思われる数十 ns オーダ のノイズは、高インピーダンス条件においても長時間誘 起電圧の発生開始付近で観測されていることを、オシロ スコープの時間軸を数十 ns オーダで観測した予備実験 により確認している.

i)誘起電圧波形

スタブアンテナとアンテナ非接続時に誘起された長時 間誘起電圧波形の一例として,正放電(+2 k~+4 kV) 時を図8に,負放電(-2 k~-4 kV)時を図9に示す. 条件によりピークの大きさや鋭さは異なるが,波形形状 は放電極性に依らず,ピーク後に数十~数百マイクロ秒 オーダの長時間で指数関数的に減衰する波形が観測され た.この様に誘起されている時間は,今回のポータブル オシロスコープとスタブアンテナでは110 µs 程度,ア ンテナ非接続時は 60 µs 程度となり,前節で示した低イ ンピーダンス時の数十ナノ秒オーダの誘起電圧や,1マ



- 図8 高インピーダンス条件のポータブルオシロスコープに 誘起した電圧波形(正放電)
- Fig.8 Induced voltage waveforms, as measured using a portable oscilloscope under the high-impedance condition (positive discharge).



図9 高インピーダンス条件のポータブルオシロスコープに 誘起した電圧波形(負放電)

Fig.9 Induced voltage waveforms, as measured using a portable oscilloscope under the high-impedance condition (negative discharge).

イクロ秒程度の放電電流と比べて、非常に長時間であり、 高インピーダンス条件で特有の誘起電圧波形となった. この様な電気的ストレスがウェアラブル機器の信号ライ ンに誘起された場合、例えば、動作クロックの複数周期 に渡りディジタル回路がHレベルとして誤判定されて 誤動作につながる可能性が考えられる.

なお、図8と図9では、長時間誘起電圧に着目し、ポ ータブルオシロスコープの時間軸を数百µsオーダで測 定したため、低インピーダンス条件で観測された様な数 十 nsオーダのノイズは、低速なサンプリングレートの 関係で観測波形に現れていないが、過去の報告⁵⁰で示し た観測波形の様に、長時間誘起電圧波形と同時に観測さ れたこともあった.

また,今回の結果では,誘起される電圧の極性は,正 放電時には負極性にピーク,負放電時には正極性となっ たが,この極性の関係は今回の装置及び装着方法におけ る結果であり,装置の回路構造や装着の向きなどの要因 で極性が反転することもあった.

ii) ESDとの相関性

誘起電圧の最大振幅 V_{PP}と放電電流のピーク電流 I_pと



図 10 誘起電圧 V_{PP} と放電電流のピーク電流値の関係(高インピーダンス線路)

Fig.10 Relationship between the peak discharge current I_{p} and the induced voltage amplitude $V_{\text{p-p}}$ (high-impedance condition).



図 11 誘起電圧 V_{PP} と放電電流の第1ピークの立ち上がり峻 度の関係(高インピーダンス線路)

Fig.11 Relationship between the rising speed of the first peak current of the discharge current and the induced voltage V_{PP} (high-impedance condition).

の関係を図 10 に、V_{PP}と放電電流の第 1 ピークの立ち上 がり峻度の関係を図 11 に示す.図より、ばらつきはあ るものの、スタブアンテナ接続時もアンテナ非接続時も、 近似直線に傾きが見られない傾向となり、誘起電圧と放 電電流との相関が見られなかった.このことから、高イ ンピーダンス条件において特有の誘起電圧は、低インピ ーダンス条件時の様な、ESD で生ずる放射電磁ノイズ を受信する間接 ESD とは異なる現象であるといえる.

高インピーダンス条件下の長時間誘起電圧の発生 要因の検討

前述の高インピーダンス条件に特有の,数十~数百 µsオーダに渡る長時間誘起電圧の発生メカニズムの解 明に向けた第一段階として,当現象の誘起電圧が関わる 回路要素の特定を行った.その際,測定された誘起電圧 波形の時定数に着目して分析し,ポータブルオシロスコ ープの入力回路の時定数と比較したところ相関性が見ら れたので,本章ではその分析結果について述べる.

スタブアンテナとアンテナ非接続時の誘起電圧の時定 数 τ は,誘起電圧波形のピークからピーク電圧の 36.8% になるまでの時間を各波形から計測した.この誘起電圧 波形の時定数と放電電流のピーク電流値の関係を図 12 に示す.この図より,本実験においては ESD の帯電電 位や放電電流のピーク電流値に依らず,アンテナ非接続 時は平均約 16 μ s であった.一方,ポータブルオシロス コープの入力回路の時定数は,オシロスコープの仕様(入 力インピーダンス R = 1 MΩ,入力容量 C = 14 pF)から 次式で算出すると,理論値 14 μ s となり,アンテナ非接 続時の誘起電圧から算出した 16 μ s と近い値となった.

$$\tau = \mathbf{R} \times \mathbf{C} [s] \tag{1}$$



また、スタブアンテナ接続時の誘起電圧波形から算出

図 12 誘起電圧波形から算出した時定数と放電電流のピーク電流値の関係

Fig.12 Relationship between the discharge current I_p and the time constant of the induced voltage waveform.

した時定数は平均約 29 μs と大きくなったが, これは, ポータブルオシロスコープの入力容量 14 pF と並列にス タブアンテナの浮遊容量 12.8 pF(LCR メータ(安藤電気, AG-4304) による実測値)が付加された結果の時定数 26.8 μs に近い値であった.

このことから,高インピーダンス条件に特有の長時間 誘起電圧の時定数は,オシロスコープの入力回路の内部 抵抗と浮遊容量,そして入力回路に接続される外部の浮 遊容量で決まる現象であることが判明した.なお,各入 カチャネルや制御回路が絶縁されていないポータブルオ シロスコープ(Pico Technology, PicoScope 5244B,帯域 200 MHz)を,WindowsタブレットPC(Acer, Aspire Switch 10)とUSB2.0で接続し,タブレットの内蔵バッ テリで駆動した状態で人体が所持して同様の実験を行っ た結果,同様の長時間誘起電圧が生じ,その時定数も同 様にオシロスコープの入力インピーダンスで定まる時定 数と一致したことを確認している.

以上より,長時間誘起電圧は,機器内部の高インピー ダンスとなっている箇所の静電容量に充電された電荷 が,内部抵抗へ流れた過渡電流によるストレスだと考え られる.

また,この現象が生ずる高インピーダンス条件におい ても,ESDの放射電磁ノイズと思われる数十 ns オーダ のノイズも同時に観測されることから,波形観測装置と してのオシロスコープとアンテナの通常の動作に加え て,帯電した人体の電位が急速に低下した場合にウェア ラブル機器の高インピーダンスの回路部分で生ずる可能 性がある現象であると考えられる.

現段階では、この現象の発生メカニズムとして、帯電 人体からの静電誘導によって所持した機器の線路や内部 回路の浮遊容量が充電状態となった後に、浮遊容量に充 電された電荷が ESD による急速な電位低下で内部抵抗 へ流れた過渡電流による電圧波形ではないかと推測して いるが、どの部分からどのように電荷が誘導されている のかなども不明なため、今後は、機器内部の浮遊容量の 充電メカニズムの解明のための追実験を行っていく予定 である.

5. まとめ

本研究では、帯電した人体の指先から周囲の接地導体 へ ESD が発生した際に、ウェアラブル機器が受ける電 気的ストレスをより詳細に解明するため、放電電流波形 とポータブルオシロスコープにおける誘起電圧波形を測 定し、ウェアラブル機器の異なる線路特性における電気 的ストレスの調査を行ったところ、以下の結論を得た.

- (1)低インピーダンス条件における誘起電圧は、数十ナ ノ秒オーダの減衰振動波形となった.この誘起電圧の 振幅と、放電電流の第1ピークの立ち上がり峻度には 相関が見られた.
- (2)高インピーダンス条件における誘起電圧は、単一の ピークを持ち、数十~数百マイクロ秒オーダの長時間 にわたり指数関数的に減衰する波形となった.この誘 起電圧の振幅と、ESDの諸条件・特性(帯電電位,放 電電流のピーク電流・立ち上がり峻度)との相関は見 られなかったが、誘起電圧波形の時定数は、オシロス コープの入力回路の時定数と同等であった.

(本研究の一部は, JSPS 科研費 26289078 の助成を受けたものです.)

参考文献

- IEC: IEC 61000 Ed. 1.2: Electromagnetic compatibility (EMC) Part 4-2 Electrostatic discharge immunity test (2001)
- 石田武志,肖 鳳超,上 芳夫,藤原 修,仁田周一: ウエアラブル機器への ESD イミュニティ試験の検討. 信学技報,114 [304] (2014) 31-35
- 3) T. Ishida, S. Nitta, X Fengchao, Y. Kami, O. Fujiwara: An experimental study of electrostatic discharge immunity testing for wearable devices, Proc. of 2015 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp.839-842 (2015)
- 4) 吉田孝博:ウェアラブル携帯機器が受ける ESD ストレス,信学会ソサイエティ大会依頼シンポジウム,BI-1-4 (2015)
- Takahiro Yoshida: A Study on Electrical Stress Induced by Electrostatic Discharge on Wearable Devices, Proc. of CEEM2015 (2015)
- 6) 吉原 宏,吉田孝博,増井典明:人体からの静電気放電
 に及ぼす接地電極形状の影響(III).静電気学会誌,34[1]
 (2010) 37-43
- 7) Fluke Corporation: ScopeMeter® Test Tool 190 Series II ユー ザーズ・マニュアル, Rev. 2 (2011)
- 8) 市川裕一:はじめての高周波特性, 第22章, pp.281-292, CQ 出版 (2010)
- 9)吉田孝博, 久保田啓吾, 澤井丈徳, 増井典明:帯電した 人体からの放電電流波形の時間-周波数解析. 静電気学 会誌, 31 [3] (2007) 113-118
- 10)河崎健太郎,田中一壮,吉田孝博,増井典明:金属間放 電及び人体-金属間放電における放射電磁ノイズの影
 響.静電気学会春季講演会,2a-3 (2008) 55-58