

# 接触過程における低電圧放電特性と放射電磁波

大津 孝佳<sup>\*1</sup>, 小林 優作<sup>\*</sup>, 堂山 英之<sup>\*</sup>, 今井 省吾<sup>\*</sup>, 岡田 俊祐<sup>\*</sup>, 藤川 啓道<sup>\*</sup>

(2013年1月28日受付; 2014年7月10日受理)

## Characteristic of Electric Discharge and Radiated Electromagnetic wave in Electrical Contact Processes

Takayoshi OHTSU<sup>\*1</sup>, Yusaku KOBAYASHI<sup>\*</sup>, Hideyuki DOYAMA<sup>\*</sup>, Shogo IMAI<sup>\*</sup>, Shunsuke OKADA<sup>\*</sup> and Hiromichi FUJIKAWA<sup>\*</sup>

(Received January 28, 2013 ; Accepted July 10, 2014)

The robustness of ESD (Electro static discharge) declines caused by the high frequency operation of the electric equipment and that countermeasure is made a pressing need. The electromagnetic radiation caused by ESD is broad-band, and can potentially damage ESD sensitive devices such as Semiconductor, Magnetic head and MEMS. In this paper, we investigated the characteristics of the electromagnetic wave generated by the discharge of a Sub-micron gap in an electrical contact processes by using an electromagnetic relay and a thermal actuator. By the results of the electromagnetic relay, the magnitude of the electromagnetic wave is peaked at 2 V due to trade-offs between voltage, electric field and discharge resistance. Furthermore, to investigate the phenomenon of the micro-gap electric discharge in the electrical contact processes in detail, the distance of electrodes and approach speed were controlled by using the thermal actuator. As for the maximum amplitude of the radiated electromagnetic wave, it found that it depended on an approach speed of electrodes. The applied voltage of it decreases with increase of the approach speed, the amplitude of it increases with increase of the approach speed.

### 1. はじめに

近年、電子デバイスの高集積化・高速化に伴い、その静電気耐力は低下することから、ハードディスク用磁気ヘッドを始めとするナノテクノロジーデバイスの静電気破壊対策や電磁波干渉対策が進められている<sup>1-17)</sup>。2008年に米国アリゾナで開催された半導体デバイスの信頼性技術に関する国際会議である国際信頼性物理シンポジウム (IRPS: International Reliability Physics Symposium) において、Chrvača Duvvur 氏 (TI) を始めとする半導体製造グループから、ESD 耐性レベル見直し提案がなされた。これは、半導体高機能化 (微細化) と ESD 耐性はトレードオフ関係にあり、コンポーネントレベルでの静電気耐力を従来通りのレベルで維持することが困難であるとし、System Level での対策を行うとの重要性を掲げ、Industrial Council や米国 ESD Association の中で White Paper 3 System Level ESD Part I: Common

Misconceptions and Recommended Basic Approaches (2010) 等を作成している。これより、今後の電子デバイスの静電気対策に於いて、システムレベルでの対策が重要とされる。静電気破壊のモードも電圧、電流、磁界、熱、力、電磁波と複雑多岐に渡り、その解析は重要である。特に、静電気放電に伴う電磁波は、高エネルギーで広帯域であることから、電子機器への影響が懸念され、数十マイクロンレベルでの放電と電磁波についての研究や接触過程における放電現象の研究などがなされている<sup>18-21)</sup>。しかしながら、更に狭いサブマイクロン領域での低電圧放電に伴う電磁波についての報告はない。また、静電気力の MEMS 等への応用から、狭ギャップでの Modified Paschen 領域における放電現象への関心も高い。電磁リレーや USB での抜き差しなど、低電圧で狭いギャップでの放電が生じるが、電気接点の閉成時の放電 (ON 放電) と電気接点の開離時の放電 (OFF 放電) による電磁波の違いなど、その詳細は調べられていない。本報告の目的は、接触過程におけるサブマイクロンギャップでのオン/オフの場合に発生する電磁波の特性を調べることにある。

**キーワード:** 接触過程, マイクロギャップ放電, 放射電磁波, 電界放出, ESD, EMI, 電子デバイス, 静電気対策技術

<sup>\*</sup> 鈴鹿工業高等専門学校電気電子工学科  
(〒510-0294 三重県鈴鹿市白子町)

Department of Electrical and Electronic Engineering  
Suzuka National Collage of Technology Shiroko-cho,  
Suzuka, Mie 510-0294, Japan

<sup>1</sup> ohtsu@elec.suzuka-ct.ac.jp

### 2. 実験方法

図1に実験装置を示す。接触過程におけるサブマイクロンギャップでの放電には、図2に示す電磁リレーの接点を用いた (OMRON MY-2ZD 24V DC)。リレーの外形寸

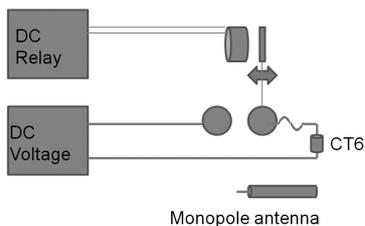


図1 マイクロギャップ実験装置  
Fig.1 Measurement system by relay.

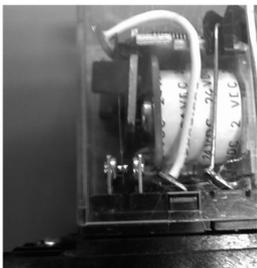


図2 電磁リレーによるマイクロギャップ実験  
Fig.2 Sub-micron gap by relay.

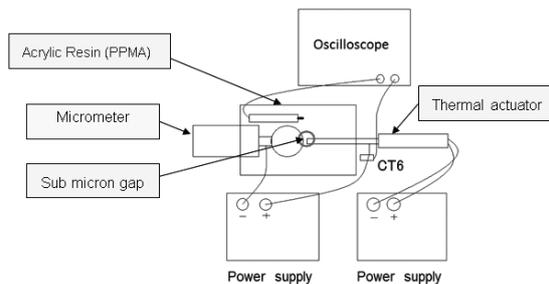


図3 サーマルアクチュエータを用いた実験装置  
Fig.3 Measurement system by thermal actuator.

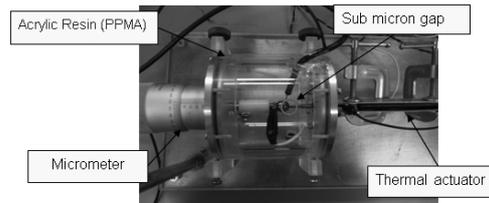


図4 サーマルアクチュエータによるマイクロギャップ実験  
Fig.4 Sub- micron gap control by thermal actuator.

法は幅 21.5 mm, 奥行 28 mm, 高さ 36 mm である。後述する印加電圧と放電電圧の関係 (図 13) から、放電電圧 1~10 V の場合、放電間隔は 10~100 nm である。本研究では移動電極を用いて接触過程におけるサブミクロン放電の実験を行う。電磁リレーの出力側の電気回路に 10 Ω の抵抗と電圧電源を直列に繋ぎ、電磁リレーの入力側に繋いだもう一つの外部電源により電磁リレーを ON/OFF させた。電気接点の閉成時の放電と電気接点の開離時の放電した場合に発生する電磁波を電気接点から 10 mm の位値に配置したモノポールアンテナ (長さ 5 mm) に誘起された電圧として観察した。また、放電電流はカレントトランス (CT-6: 帯域 2 GHz) により測定した。実験は、温度 23~28 度, 湿度 30~50% の条件で行った。更に、図 3, 図 4 にサブミクロンギャップのギャップ間隔をサーマルアクチュエータにより制御する実験装置を示す。図 3 は直径 8 mm の真鍮球 (固定電極) と先端が半径 5 mm の真鍮棒 (移動電極) を備え、移動電極はセラミックヒーター部に接続されている。このヒーターに外部電源から電圧印加し、その熱膨張により電極を移動させることで、電極間隔と移動速度を変化させることができる。電極の周りは外気の温度の影響を少なくするためアクリルのパイプで覆われている。また、放電時に発生する電磁波をギャップから 10 mm の位値に設置したモノポールアンテナ (長さ 5 mm) により観察した。図 4 は実験装置の外観である。低帯域のオシロスコープは、Lecroy 社 9354AL (500MHz 2G サンプルング), 高帯域のオシロスコープは、Lecroy 社 wavepro 760zi (6 GHz 20G サンプルング) を用いた。

3. 実験結果及び考察

3.1 ON/OFF放電の印加電圧依存性 I

図 5 に印加電圧が 2 V の場合の典型的な放電電流波形とモノポールアンテナへの誘起電圧波形を示す。大きさは、全体の中で最大振幅 (最大値 - 最小値) 波形の振幅であり、立ち上がり時間は、最大振幅波形の最小値から最大値までの時間である。図 6 に電源電圧を 1, 2, 4 V とし、電気接点の閉成時の放電 (ON 放電) と電気接点の開離時の放電 (OFF 放電) とともに 50 回の放電による誘起電圧の大きさの測定結果を示す。誘導電圧の大きさは接点から 10 mm の位値に設置したモノポールアンテナ (長さ 5 mm) に誘起された電圧であり、帯域補正は行っていない。上段は ON 放電の場合、下段は OFF 放電の場合である。ON 放電のみならず、OFF の場合も放電し、電磁波が発生していることが分かる。ON 放電は印加電圧による電界強度に起因し、OFF 放電の場合はインダクタンスの逆起電力 (Ldi/dt) による電界強度に起因するものと考えられる。この誘起電圧波形の立ち上がり時間は放電によるものであり、その後、電気接点の動作により接点を含めた系全体に過渡的な電圧・電流の変



図5 放電電流波形と誘起電圧波形  
Fig.5 Wave form of Discharge current and Electromagnetic wave.

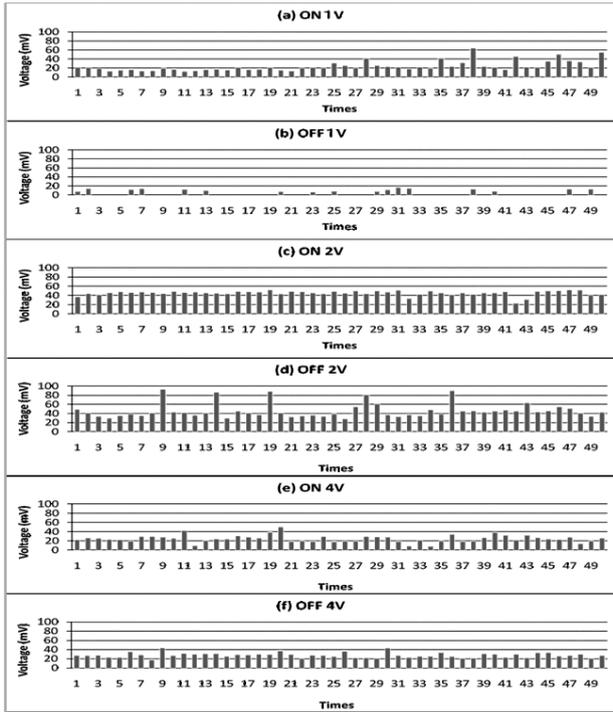


図6 放射電磁波の観察 (1, 2, 4V)  
Fig.6 Observation of Electromagnetic wave.

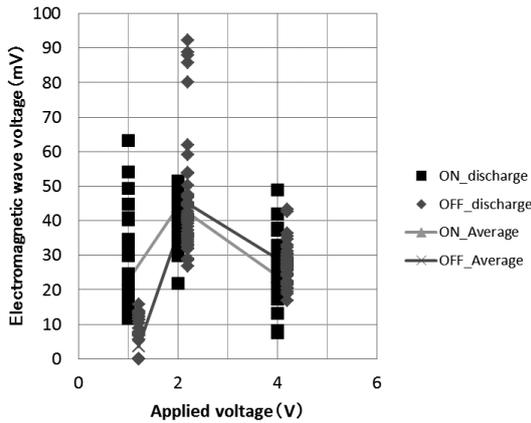


図7 放電印加電圧と誘起電圧の大きさ  
Fig.7 Strength of Electromagnetic wave vs. Discharge voltage.

動が発生して、回路(電源、配線、接点)全体あるいは一部の放射要素が含まれるものと考えられる。図7に印加電圧と誘起電圧の大きさを示す。電気接点の閉成時の放電(ON放電)と電気接点の開離時の放電(OFF放電)ともに50回の誘起電圧の大きさの測定結果である。測定には帯域500MHzのオシロスコープを用いた。誘起電圧の大きさはオン/オフの場合ともに1Vよりも2Vの方が大きい。しかし、4Vの場合はオン/オフの場合ともに2Vの場合よりも低くなっている。この4Vより2Vの方が、誘起電圧の大きさが大きくなる現象は、低電圧での電子機器の誤動作等の障害となり得る要素をもつことからその理由の解明が必要である。

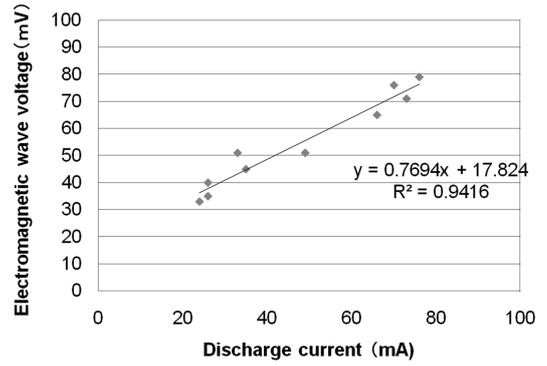


図8 放電電流と誘起電圧の大きさ  
Fig.8 Strength of Electromagnetic wave vs. Discharge current.

図8に印加電圧2Vの場合の誘起電圧の大きさと放電電流の関係を示す。これより、誘起電圧の大きさy、放電電流xの回帰式は $y = 0.7694x + 17.824$ で表され、標準偏差R2は0.9416であり、誘起電圧の大きさは放電電流に比例している。2Vでのピークの原因を詳細に解析することを目的に、オシロスコープの帯域によるものか、ばらつきによるものか等を調べるため誘起電圧波形の高帯域オシロスコープ(6GHz)での観察を行った。これは、数Vでの放電は立ち上がり急峻であり、帯域がGHzに及んでいるためである。

### 3.2 ON/OFF放電の印加電圧依存性II

図9、図10に高帯域のオシロスコープ(Lecroy社 wavepro 760zi : 6GHz 20G サンプリング)を用いて測定を行った結果を示す。図6と同様に、2Vがピークとなっている。2Vでのばらつきは、速度依存性等今後検討する。更に、5V、6Vと大きくしても誘起電圧の大きさは増加しないことが分かった。

### 3.3 誘起電圧波形の立ち上がり時間

図11に電気接点の閉成時の放電(ON放電)と電気接点の開離時の放電(OFF放電)場合の印加電圧と誘起電圧波形の立ち上り時間の平均値を示す。立ち上がり時間とは、最初の立ち上がり波形の0点からピークまでの時間である。上段がON放電の場合、下段がOFF放電の場合である。これより、印加電圧を変えても立ち上り時間は大きく変わらない。

図12に印加電圧と誘起電圧波形の立ち上り時間の関係を示す。これより、ON放電よりもOFF放電の方が、誘起電圧波形の立ち上り時間が短い。

### 3.4 電圧・電界強度・放電抵抗の関係

図13(上図)に著者等が行ったギャップ長と放電電圧の関係の実験結果を示す。このデータはハードディスクでのヘッドとディスクの間隔と放電電圧の関係をプロットしたものである。各プロットは機種異なるものの

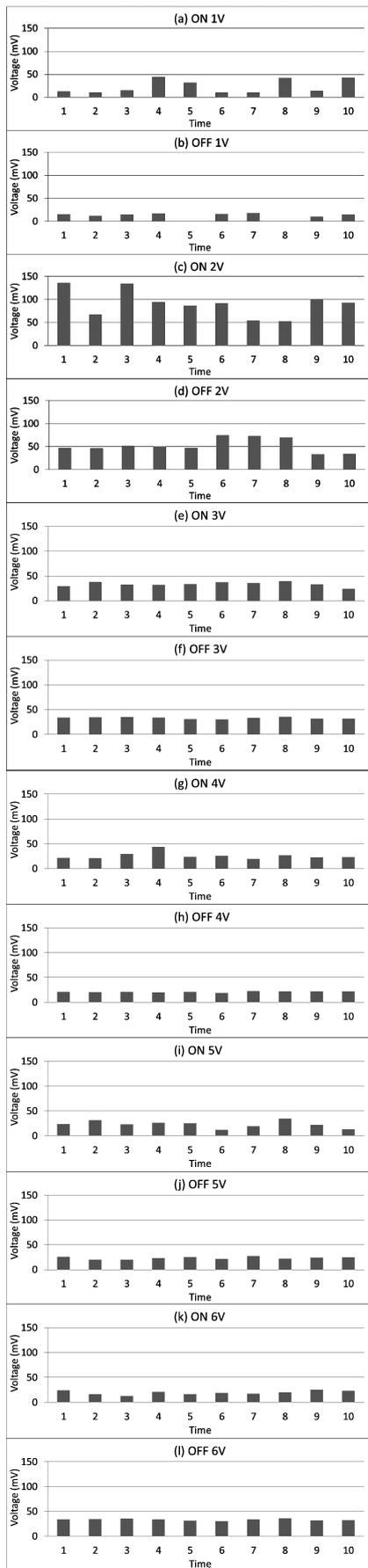


図9 放射電磁波の観察 (1, 2, 3, 4, 5, 6 V)  
Fig.9 Observation of Electromagnetic wave.

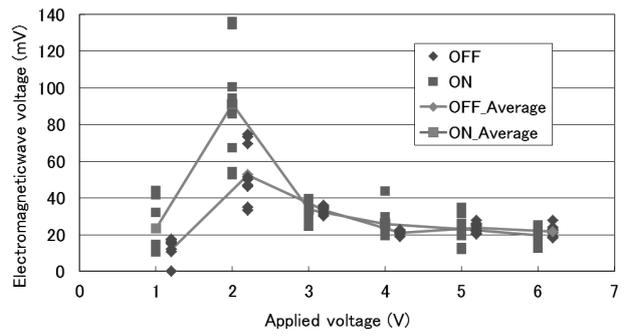


図10 放電印加電圧と誘起電圧の大きさ  
Fig.10 Strength of Electromagnetic wave vs. Discharge voltage.

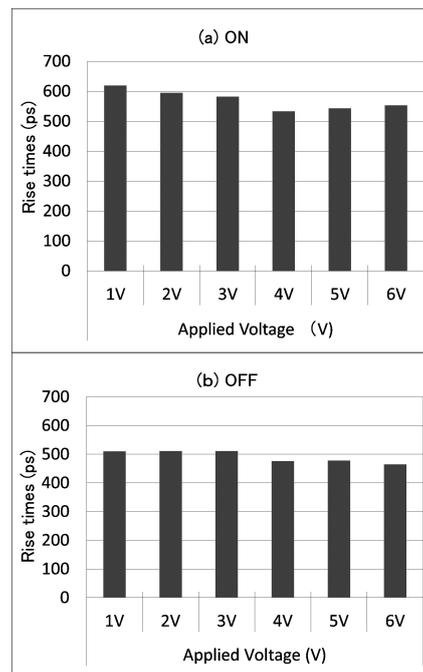


図11 誘起電圧波形の立ち上がり時間  
Fig.11 Rise time of Electromagnetic wave.

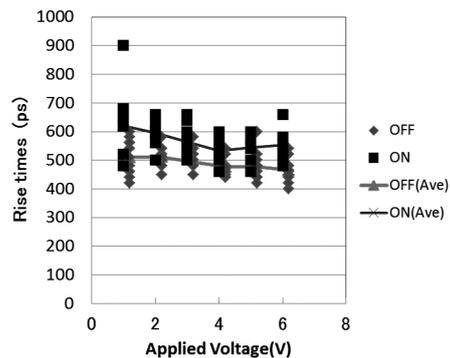


図12 放電印加電圧と誘起電圧波形の立ち上がり時間  
Fig.12 Rise time of Electromagnetic wave vs. Discharge voltage.

実験結果である。

また、曲線は空気の場合の Paschen curve である。Paschen curve では 10~100 nm の領域での放電は生じ

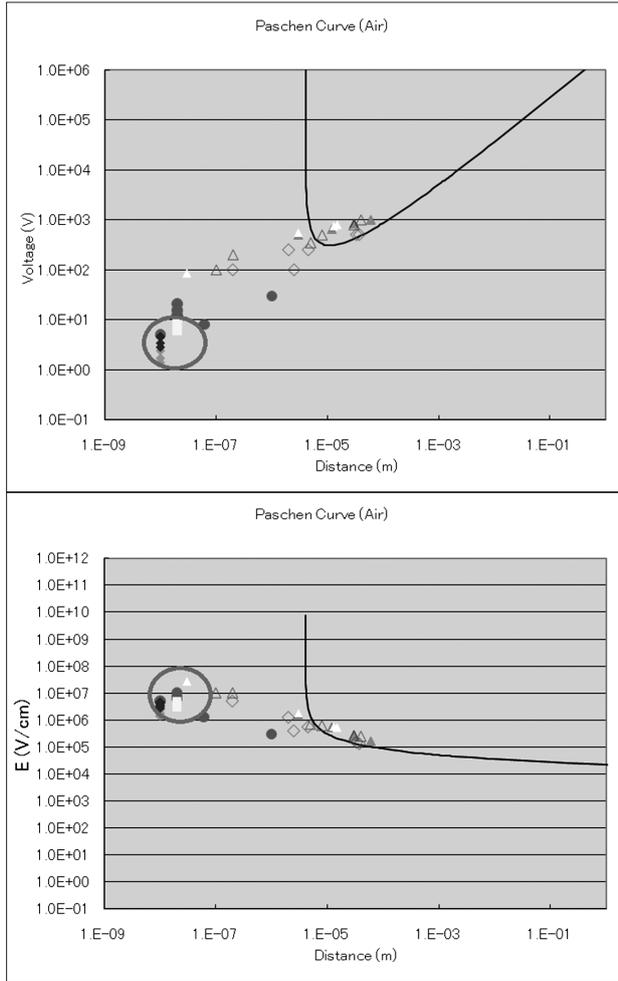


図13 電極間隔と放電電圧 (上図), 電界強度 (下図)  
Fig.13 Discharge voltage and Electric Field vs. Discharge distance.

ないとされているが, 実験結果からは 1 V~10 V 程度の電圧で放電している。よって, 本実験での 1 V~8 V は, 10 nm~100 nm 程度のサブミクロン領域での放電であることが分かる。図 13 (下図) に Paschen curve と実験結果より求めたギャップ長と電界強度の関係を示す。電界強度は放電電圧と放電間隔より求めた。ギャップ長が狭くなると電界強度が増加している。10 nm ~100 nm 程度のサブミクロン領域での電界強度は 1 MV/cm を超えており, 電界放出が生じる領域であることが分かった。放電電流  $I_d$  は, 電圧  $V$  と放電抵抗  $R(d)$  で決まる電流  $I_o = V/R(d)$  と, 電界で決まる電流  $I_f = I(E(d))$  からなり,  $I_d = I_o + I_f$  である。ここで, 図 14 に示すように, 電圧が高い程, 放電するギャップ間隔  $d$  が広がることから, 放電抵抗  $R(d)$  は大きくなる。これより, 電圧が高くなると, 放電抵抗が増大するとともに, 電界強度が下がり, 放電電流は小さくなる。また, 電圧が低くなると, 電界強度は上がり, 放電抵抗が小さくなり, 放電電流が増加し, 誘起電圧の大きさは大きくなる。更

Applied Voltage	Low	↔	High
Distance	Narrow	↔	Wide
Electrical field	High	↔	Low
Discharge Resistance	Low	↔	High

図 14 印加電圧, 電極間隔, 電界強度, 放電抵抗の関係  
Fig.14 Trade off of voltage, distance, Electric field and discharge resistance.

に, 電圧を低くすると  $I_o, I_f$  とともに電流密度が上がらないことから放電電流は小さくなる。以上のことから, 電圧, 電界強度, 放電抵抗のトレードオフにより, 2V が最大となると考えられる。

### 3.5 サーマルアクチュエータによるサブミクロンギャップの制御

更に詳細にサブミクロンギャップでの放電現象を調査するため, サーマルアクチュエータにより電極間隔の制御を行った。図 15 にヒーターに 5 V の一定の電圧をかけ, 10  $\mu\text{m}$  毎の熱膨張の時間を計ることにより, 熱膨張による金属の膨張速度の観察結果を示す。これより, 一定の速度で移動することが分かり, 移動速度を変化させることができる。各プロットは 10 回の測定結果であり, 回数による差は見られない。

図 16 にヒーターに一定電圧 (4, 5, 6 V) をかけ, 十

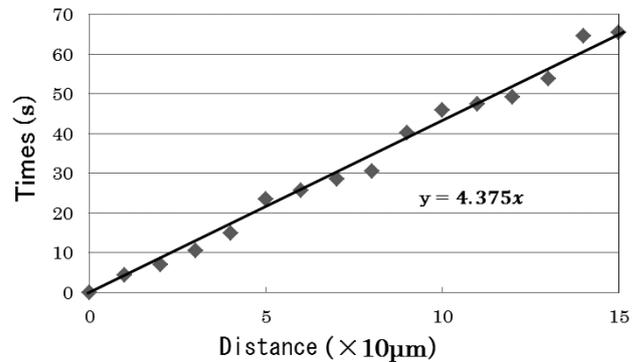


図 15 サーマルアクチュエータの動作  
Fig.15 Performance of thermal actuator

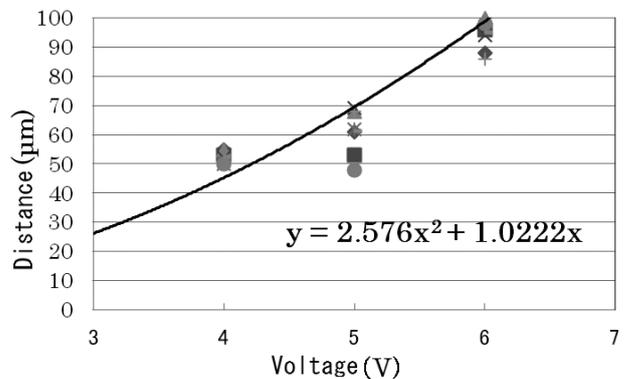


図 16 ヒーター印加電圧と移動距離  
Fig.16 Heater voltage dependence of thermal actuator.

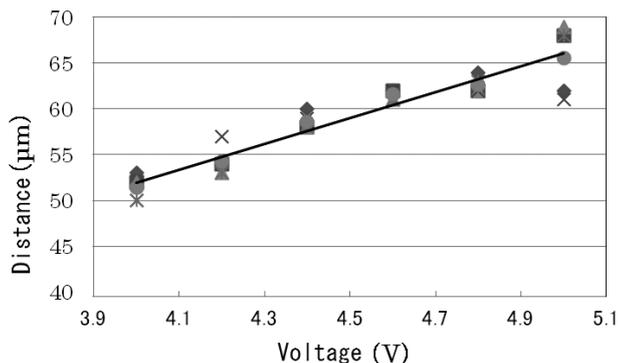


図 17 ヒーター印加電圧と移動距離  
Fig.17 Heater voltage dependence of thermal actuator.

分な時間 (5 分程度) が経った後の移動距離より, 熱膨張により制御の可能な距離を調べた結果を示す. これより, ヒーターへの印加電圧により, ギャップ間隔の制御が可能であることが分かる. そこで, 4 - 5 V 間の詳細な結果を図 17 に示す. 時間と距離は比例の関係にある. また, 各プロットは 10 回の測定結果であり, 回数による差は見られない. 時間に対し一定の速さで熱膨張しており, 4 - 5V 間で 12 μm, つまり 0. 1V で 1.2 μm の制御が可能である. 更に, 測定領域を狭めることにより, 10 mV で 120 nm の制御が可能であることが分かった.

3.6 放電電流と誘起電圧波形の観察

図 18 に電極間に一定電圧 (2 V, 3 V, 5 V, 7 V) を印加し, ヒーターに 15 V を印加し, 対抗電極への移動速度 6.413 μm/s で電極間隔を接近させ放電を起こした. その際に発生した誘起電圧の大きさをモノポールアンテナで, 放電電流値の波形は CT6 を用いてオシロスコープにより測定した結果を示す. これより, 誘起電圧と電流には比例の関係があることが分かる. この関係は図 7 に示す電磁リレーでの測定結果と同様であり, 放射電磁波は放電電流に比例していることがわかる.

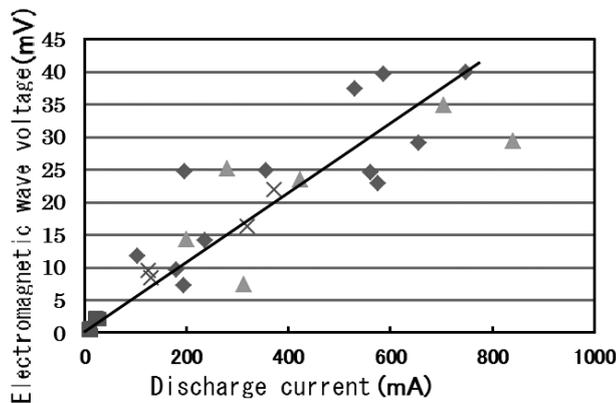


図 18 放電電流と放射電磁波強度  
Fig.18 Strength of Electromagnetic wave vs. Discharge current.

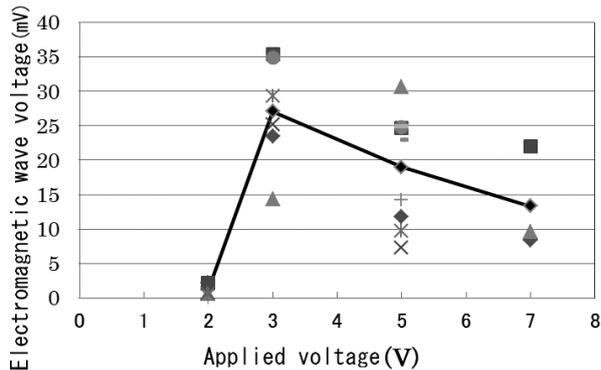


図 19 印加電圧と誘起電圧の大きさ  
Fig.19 Strength of Electromagnetic wave vs. Discharge voltage.

図 19 に印加電圧と誘起電圧の大きさの関係を示す. 各電圧に於いて 10 回の測定結果であり, 回数による差は見られない. 直線は平均値である. これより, 誘起電圧の大きさは 3 V で最高となり以降は下がっていくことがわかる. 図 6 の電磁リレーでは 2 V がピークであり, サーマルアクチュエータは 3 V がピークとなっている. いずれの場合も低電圧の放電現象の方が誘起電圧に伴う電磁障害の原因となりうることを示している.

3.7 誘起電圧のピークの数依存性

リレーでは 2 V にピークがあり, サーマルアクチュエータでは 3 V がピークとなったことから, 誘起電圧の大きさの電極間隔の移動速度依存性の実験を行った.

移動速度はサーマルアクチュエータへのヒーターへの印加電圧を 3 V, 11 V, 12 V, 15 V と変えて, 対抗電極への移動速度を夫々 0.137, 1.776, 2.108, 6.413 μm/s に変化させた. 図 20 に電極への印加電圧と誘起電圧の大きさの関係を示す. 各プロットは 10 回の測定の平均値である. これより, 移動速度が速いほど低い印加電圧でピークが現れている. つまり, 移動速度が速い程, 2V に近づくことが分かった. また, 誘起電圧の大きさも移動速度が速い方が高くなっている. 6.613 μm/s では

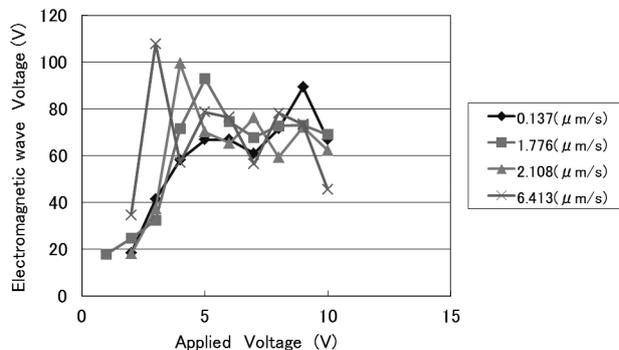


図 20 電極接近速度と誘起電圧の大きさ  
Fig.20 Strength of Electromagnetic wave dependence of approaching speed of electrode.

0.137  $\mu\text{m/s}$  の場合の 1.2 倍である。これより、誘起電圧の大きさの最大値は印加電圧と移動速度に依存することが分かった。

#### 4. まとめ

電磁リレー及びサーマルアクチュエータを用いた接触過程におけるサブミクロンギャップでの低電圧放電による誘起電圧の特性を調べ、次のことが明らかになった。

- (1) オフ放電においても電磁波が発生する。
- (2) 2 V の場合の電磁波強度が一番高く、1 V 及び 4~6 V では低くなる。
- (3) 誘起電圧の大きさは電流値が大きいほど強い、誘導電圧波形の立ち上がり時間の電圧依存性は小さく、オフ放電の方が短い。
- (4) 印加電圧・電界強度・放電抵抗とのトレードオフにより、2 V が最大となっていると考えられる。
- (5) 電極間の接近速度が速いほど低い印加電圧で誘起電圧の大きさの最大値（ピーク）が現れる。
- (6) 誘起電圧の大きさの最大値は移動速度が速い程小さくなる。

#### 謝辞

本研究を進めるにあたり、インパルス物理研究所の本田昌實氏のご協力に感謝致します。測定にあたり、Lecroy 社に感謝致します。実験に協力頂いた岡 亮太氏、谷辻和幸氏、高井太郎氏、伊藤翔太氏に感謝致します。

#### 参考文献

- 1) H.Tian and J.K.Lee: IEEE Trans.Magn., **31** [5] (1995) 2624
- 2) A.Wallash: IEEE Trans.Magn., **33** [5] (1997) 2911
- 3) Lam C., Salhi E., and Chim S.: EOS-19, 386 (1997)
- 4) A.Wallash and Y.K.Kim: IEEE Trans.Magn., **34** [4] (1998) 1519
- 5) M.Takahashi, T.Maeda, M.Sakai, H.Morita, and M.Matsuzaki: IEEE Trans.Magn., **34** [4] (1998) 1522
- 6) Chung F.Lam, Caleb Chang, and Rahmat Karimi: EOS/ESD Symposium Proceedings, EOS-20, 360, 1998.
- 7) A.Wallash: EOS/ESD Symposium Proceedings, EOS-22, 349 (2000)
- 8) Yong Shen, RingoLeung, and Jennifer ZF Sun: EOS/ESD Symposium Proceedings, EOS-22, 355 (2000)
- 9) Takayoshi Ohtsu, Hitoshi Yoshida and Noriaki Hatanaka: EOS/ESD Symposium Proceedings, EOS-23, 173 (2001)
- 10) Takehiko Hamaguchi, Takayuki Ichihara and Takayoshi Ohtsu: EOS/ESD Symposium Proceedings, EOS-24, 119 (2002)
- 11) Chris Moore and Albert Wallash: EOS/ESD Symposium Proceedings, EOS-21, 309 (1999)
- 12) A.Wallash, :, IDEMA Symp. (1998)
- 13) A.Wallash and M.Honda: EOS/ESD Proceedings, EOS-19, pp.382-385 (1997)
- 14) M.Honda and Y.Nakamura: EOS/ESD Proceedings, EOS-9, pp.96-103 (1987)
- 15) Akira Morinaga, Chiaki Ishikawa, Takayoshi Ohtsu, Norifumi Miyamoto and Shinji Narishige: IEEE Trans.Magn., **38**, [5] (2000) 2262
- 16) Takayoshi Ohtsu, "Study on ESD/EMI Phenomena for Magnetic Reproducing Head", IEEJ Trans.FM, **130** [5] (2010) 473-478
- 17) Takayoshi Ohtsu, "Study on ESD Phenomena of Magnetic Head by 1ns Pulse ESD", APEMC, Beijing, China (2010)
- 18) T.Oda, H.Miyasaka, R.Ono, "Basic Research on Low Voltage Electrostatic Discharge Phenomena," Industry Applications Society Annual Meeting, IAS, IEEE (2008)
- 19) Ken Kawamata et al, "Influence of the Surface Condition of Electrodes on Radiated EM Field Intensity due to Micro Gap Discharge", APEMC, Beijing, China (2010)
- 20) Takahiro Yoshida et al, "Effect of the Shapes of Metal Electrodes on ESD Current and Radiation Noise" APEMC, Beijing, China (2010)
- 21) T.Oda, H.Miyasaka, R.Ono, "Basic Research on Low Voltage Electrostatic Discharge Phenomena," Industry Applications Society Annual Meeting, IAS, IEEE (2008)