

帯電体衝突放電現象の 光電界センサによるタイムドメイン測定

Time Domain Measurement of Collision ESD Using Optical E-Field Sensor

大津孝佳¹, 荻島規宏¹, 田代治己¹, 大沢隆二²
Takayoshi OHTSU¹, Norihiro OGISHIMA¹, Haruki TASHIRO¹, and Ryuji OSAWA²

沼津工業高等専門学校¹,
(株)精工技研²

National Institute of Technology, Numazu College¹,
SEIKOH GIKEN Co., Ltd.²

【要旨】

静電気放電は、kV レベルの高電圧かつ GHz までの高周波な帯域を持つ高エネルギーな現象である。特に、帯電体の衝突時の静電気放電では高周波の放射電界が生じる。この放電時に発生する放射電界は電子デバイスの破壊や誤動作の原因となるため、放電現象の詳細な観察が重要である。しかし、従来のモノポールアンテナでは、周波数による感度の依存性から詳細な波形の測定できなかつた。そこで、本研究では光ファイバによるノイズ耐性、GHz 帯域までの周波数特性、5V 以下の高感度特性を有する導波路型光電界センサを用いた測定を行った。特に、移動帯電体の衝突放電現象の観察を行った。その結果、放射電界の減衰波形が観察でき、その減衰時間がピークによらず一定であることなどが明らかとなった。

1. はじめに

電子デバイスの静電気耐力は、高周波化・高性能化とともに低下をしている。この対策として、保護技術の開発が急務とされる。静電気放電は、kV レベルの高電圧かつ GHz までの高周波な帯域を持つ高エネルギーな現象である。特に、帯電体の衝突時の静電気放電では高周波の放射電界が生じる。この放電時に発生する放射電界は電子デバイスの破壊や誤動作の原因となるため、放電現象の詳細な観察が重要である^[1-7]。

しかし、通常アンテナによる測定方法では、測定波形の伝送路が金属の同軸ケーブルであるため、信号の減衰や、周波数による感度の依存性が現れ、放電現象の時間波形としての観察は困難である。測定波形の伝送路に

金属ケーブルを用いない測定方式として光電界センサがある。光電界センサは、光ファイバを用いてセンサヘッドにレーザ光を入射して、その波長の変化によって電界を計測する方式である。このため、伝送路での測定波形の減衰や周波数特性の影響は抑えられるが、従来の光電界センサでは感度が低いことが課題となっている。そこで、本研究では、光導波路型の光電界センサを用いて放電現象の観察を行った。この方式は、従来の光電界センサに比べて高感度である^[8-9]。本研究ではこれらの特徴を活かして、特に帯電体衝突放電現象の観察を行った。放電現象を時間波形として測定することで、詳細な電界変化との関係を明らかにした。

2. 光導波路型光電界センサ

光電界センサによる電界計測では、光ファイバを使用しており、センサヘッドの入出力信号をレーザ光として伝送する点が特徴である。本研究では、光電界センサの光導波路型を用いた。この方式は、光電界センサの特徴である光ファイバによるノイズ耐性と広い周波数帯域を持ち、更に高感度な測定が可能である。このため、微弱な電位変化をとらえることが出来る。Fig.1 に光導波路型光電界センサの概略図を示す。

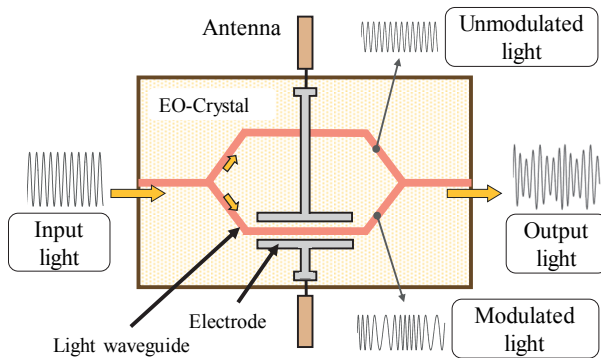


Fig.1 光電界センサ

EO 結晶（電気光学結晶）に電圧が印加されると屈折率が変化するという電気光学現象（ポッケルス効果）を利用する。また、光導波路形光電界センサでは、EO 結晶表面上に光が通過する光導波路が形成されており、一度分岐した後合流するマッハ・ツェンダー干渉計を形成している。光電界センサの動作原理は以下の通りである。

- ① コントローラから光ファイバを通してレーザ光をセンサに入射させる。
- ② 入力光はセンサチップ上の光導波路により二分され、一方のみアンテナと接続した電極間を通過する。
- ③ 電極間に生じた電圧に対応して、レーザ光はポッケルス効果による位相変調を起こす。
- ④ 分岐して位相変調されたレーザ光と無変調光を再び合成することで、振幅変調光として出力される。
- ⑤ センサ出力光をコントローラへ戻し、電気信号に変換して測定波形を出力する。

3. 実験方法

本実験には、Fig.2 に示す光電界センサとモノポールアンテナを用いて下記の実験を行った。

- (1) 光電界センサとモノポールアンテナの周波数特性の比較
- (2) 帯電体衝突放電現象の観察

光電界センサは光導波路型を使用し、アンテナとして平板アンテナ（49×74 mm）を用いた。センサは 10 m の光ファイバにより接続されている。また、モノポールアンテナは 5 mm とし、長さ 1.0 m の同軸ケーブルを用いている。これらを用いて周波数感度特性の比較と衝突 ESD の観察を行った。



(a) 光電界センサ

(b) モノポールアンテナ

Fig.2 光電界センサとモノポールアンテナ

衝突放電現象（以下、衝突 ESD）の観察は光電界センサとモノポールアンテナを Fig.3 に示すように固定し、同時計測した。Fig.4 に衝突 ESD の観察に使用した放電発生モデルを示す。このモデルでは、アクリルパイプ（内径φ8 mm）の中に 2 本の真鍮棒（長さ 15 cm）を入れている。一方の真鍮棒はパイプ内を自由に移動でき、アクリルパイプと摩擦帯電する。もう一方はパイプの端に固定されており、これと帯電した真鍮棒が接近することにより放電を発生させる。

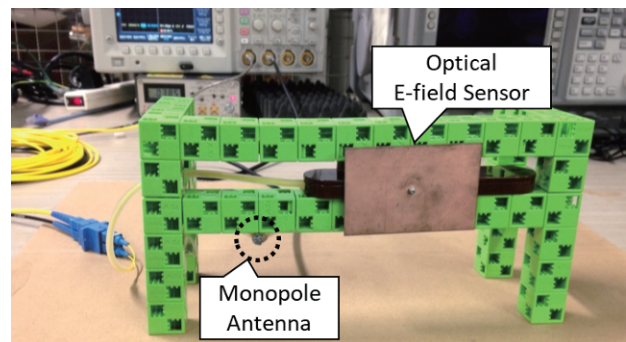


Fig.3 実験システム

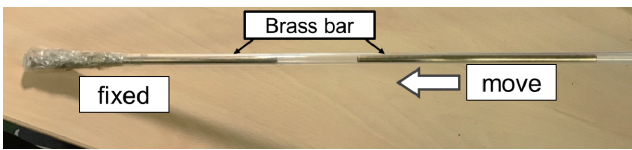


Fig.4 衝突 ESD の発生モデル

4. 実験結果及び考察

4.1 アンテナ感度の周波数特性

Fig.5 に光電界センサとモノポールアンテナのアンテナ感度を示す。モノポールアンテナは同一形状の 4 本での実験を行った。これより、モノポールアンテナでは低周波帯域ほど減衰し、高周波帯域が強く現れるのに対し、光電界センサでは 0.1 [MHz]~1 [GHz] の範囲の周波数に対して概ね一定な周波数特性を持つことが確認できた。また、その感度はモノポールアンテナの高周波帯域に比べても、高感度であり、広帯域で高感度な電界計測が可能なが分かった。

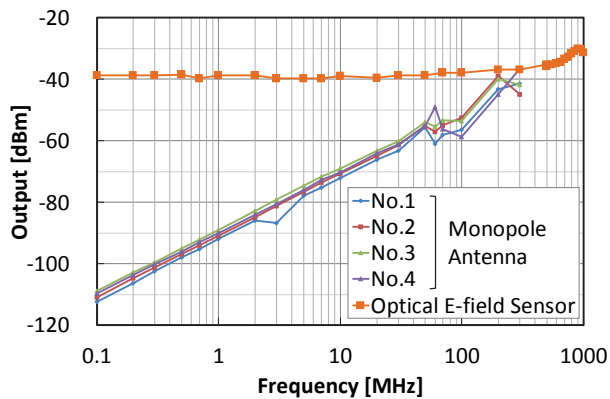


Fig.5 アンテナ感度の周波数依存性

4.2 衝突 ESD の観察

Fig.6 に移動帯電体の衝突 ESD について光電界センサとモノポールアンテナでの測定結果を示す。光電界センサによる測定では波形が減衰する様子が確認できるが、モノポールアンテナによる測定では確認できない。この差は、Fig.5 に示したアンテナ感度の違いによるものである。モノポールアンテナでは低周波帯域でアンテナ感度が低く、オシロスコープには本来の波形と異なる形で現れる。Fig.7 は Fig.6 の -0.2 μ s~0.8 μ s の間を拡大したものである。光電界センサの波形より、メイン電界変動の前にコロナ放電に起因する小さな変動がみられることがわかる。

ここで、光電界センサの急峻な電界の立ち上がり時間とモノポールアンテナでノイズ発生時間の差の 0.05 μ s は光ファイバの長さによる時間遅れに起因するものである。モノポールアンテナの波形は主放電に於ける電界の急峻な立ち上がりに対応していることが分かる。

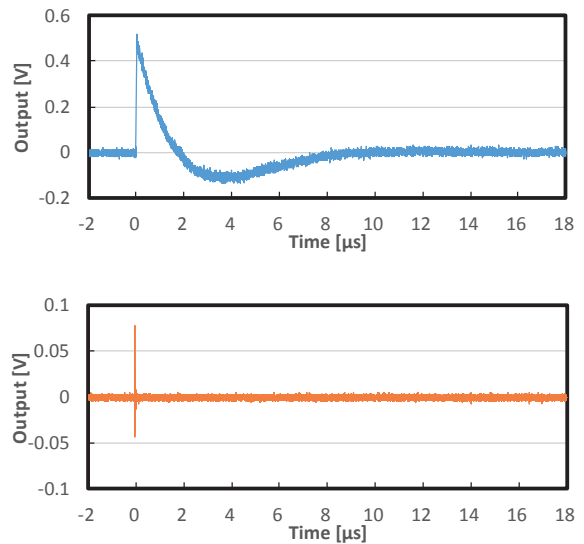


Fig.6 衝突 ESD の観察結果
上が光電界センサ、下がモノポールアンテナ

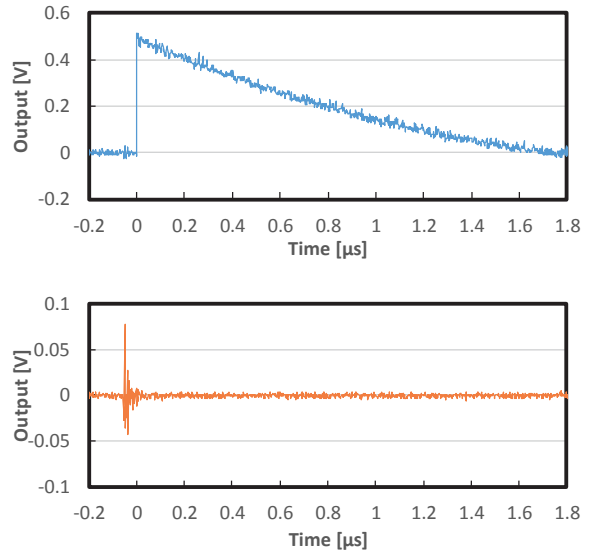


Fig.7 衝突 ESD の観察結果(-0.2~0.8 μ s)
上が光電界センサ、下がモノポールアンテナ

Fig.8 に衝突 ESD の代表的な放電波形を示す。波形サンプル No.1 は振幅の大きいもの、波形サンプル No.2 は平均的なもの、波形サンプル No.3 は振幅の小さいものである。また、

Fig.9 に測定数 24 回の放電波形の上ピークから下ピークまでの時間間隔(t_{p-p})を示す。これより、ピーク電圧によらず減衰に要する時間は、ほぼ一定($3.8\mu\text{s}$)であることが分かった。

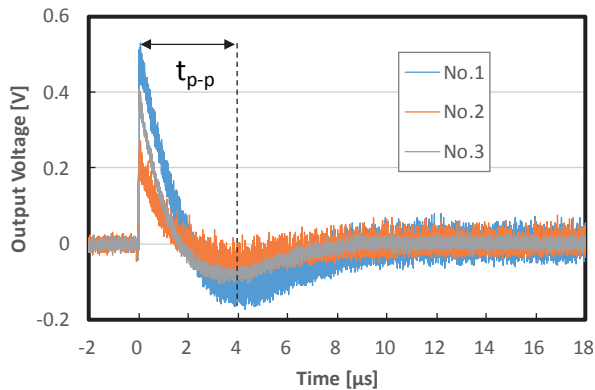


Fig.8 衝突 ESD 波形の観察

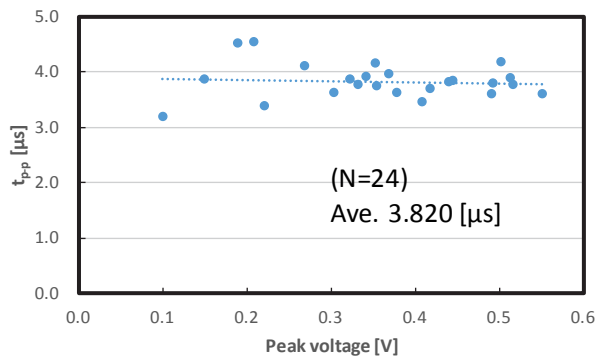


Fig.9 衝突 ESD 波形の減衰時間

5. まとめ

光電界センサとモノポールアンテナを用いて、アンテナ感度の比較および帯電体衝突放電現象の観察を行い以下のことが明らかとなった。

- (1) 周波数特性が平坦であるため、広い帯域の周波数成分を持つ波形が測定できる。
- (2) 衝突 ESD ではメイン電界変動の前にコロナ放電に起因する小さな変動がみられる。
- (3) 衝突 ESD の減衰波形の減衰時間はピークによらず一定であることが分かった。
- (4) 静電気放電は高帯域であるため、光電界センサを用いることは有効である。

参考文献

- 1) H.Tian and J.K.Lee: IEEE Trans. Magn., Vol.31, No.5, 2624, 1995.
- 2) Takayoshi Ohtsu, Hitoshi Yoshida and Noriaki Hatanaka: EOS/ESD Symposium Proceedings, EOS-23, 173, 2001.
- 3) Takehiko Hamaguchi, Takayuki Ichihara and Takayoshi Ohtsu: EOS/ESD Symposium Proceedings, EOS-24, 119, 2002.
- 4) A. Wallash and M. Honda: EOS/ESD Proceedings, EOS-19, pp.382-385.1997.
- 5) M. Honda and Y. Nakamura: EOS/ESD Proceedings, EOS-9, pp.96-103. 1987.
- 6) Takayoshi Ohtsu, "Study on ESD/EMI Phenomena for Magnetic Reproducing Head", IEEJ Trans.FM, Vol.130, No5, 473-478 (2010)
- 7) Takayoshi Ohtsu, "Study on ESD Phenomena of Magnetic Head by 1ns Pulse ESD", APEMC, Beijing, China (2010)
- 8) 大沢隆二:「光電界センサによる電波測定の技術と実測例」, pp. 33-47, RF ワールド No.12, CQ 出版社, 2010.
- 9) 大沢隆二:「光電界センサを用いた新しい計測技術－ESD 電界/電圧の精密測定－」, 静電気学会誌, Vol.39, No.4, pp. 142-147, 2015.