静電塗装用コントローラの放射イミュニティ特性

松 永 武 士^{*1}, 吉 原 俊 輔^{*1}, 鈴 木 善 貴^{*2}
柳 田 建 三^{*2}, 崔 光 石^{*3}

現在、市場で流通している電子機器の多くが、JIS規格やIEC規格で定められた放射イミュニティ試験をクリアしている。しかしながら、IEC規格で定められた10 V/m以上の大きさの電界強度をもつような、予想外の強い電磁波に対する放射イミュニティ性能については未だ十分に検討されていない。そこで本研究ではIEC規格で規定されているイミュニティ試験をクリアした静電コントローラを対象に、規格と同様80 MHz～1000 MHzの周波数帯で水平・垂直偏波両方の条件下で規格の試験条件より強い電界強度の電磁波を放射し、放射イミュニティ試験を行った。結果として、15 V/mの電界強度では正常動作を確認できた。また、約20～30 V/mの電界強度をもつ電磁波を放射させると、一部の周波数で若干の性能低下がみられたものの、IEC規格に定められた評価基準に照らし合わせたところ、誤動作ではないと判断できる。以上の結果は、本研究で用いた静電コントローラが、規格を超えた電界においても放射イミュニティ性能をもっていることを示唆している。

キーワード: 静電塗装, 静電塗装コントローラ, 放射イミュニティ, 誤作動, 安全。

1 はじめに

現在、産業現場においては様々な形で電磁エネルギーを利用している。例えばマイクロ波を利用した加熱装置、あるいは医療装置といった機器が該当する。しかし電磁波によって市場で流通している電気機器、およびその安全装置が予期せぬ誤動作を起こす恐れがある。そのような安全装置の電磁波による誤動作については、過去にも様々な研究が行われている。例を述べると、プレス作業時の挟まれ事故を防止するために広く使用されている光線式安全装置がある。光線式安全装置は、電磁波によって誤動作が発生する可能性が高いことから、国内の7種類の光線式安全装置について、電磁波による誤動作の発生レベルおよび周波数帯などが定量的に報告されている¹⁾。その他に、電子回路を搭載した漏電遮断器の近傍で、無線機の使用による一部の漏電遮断器の誤動作が報告されている²⁾。こうした電磁波により誤動作を起こす恐れのある電子機器に関しては、その試験方法が国際電気標準会議 (International Electrotechnical Commission, IEC) で規格化されている^{3,4)}。このうち放射イミュニティ性能 (Electromagnetic Susceptibility; EMS) に関してはIEC61000-4-3において、表1に示す試験条件が規定されているが、規格外の電界強度を持つ電磁波にさらされた場合の検証はされていないことが多い。近年の先行研究では、日本産業規格 (Japanese Industrial Standards; JIS) で定められた放射イミュニティ試験をクリアした漏電遮断器に対し、あえて規格の電界強度を超えた条件下

で試験を行い一部製品に誤動作がみられたという報告がある⁵⁾。このような背景から、本研究ではIEC規格で定められた試験基準を満たすEMSを有し、塗装作業現場で使用されている静電塗装ガンに電力を供給する静電コントローラを対象に、IEC規格より厳しい条件での試験を行い、動作検証した。

表1 IEC61000-4-3におけるEMS試験条件

周波数範囲 [MHz]	電界強度 [V/m]	偏波面
80～1000	10	水平・垂直

2 試験

2.1. 試験構成及び方法

本研究で使用したEMS試験環境の構成を図1に示す。また試験環境の空間的な位置関係を図2, 3に示す。EMS試験環境は、主に、計測・制御室と3m法電波暗室の2つからなる。計測・制御室においては、PCより信号発生器 (Rohde & Schwarz社製、型式; SMB100 A/02) および電力増幅器を制御し、任意の周波数・強度をもった電界を発生させる。電界は主に電波暗室内のアンテナより、3m離れた被試験機器 (Equipment Under Test; EUT) に放射される。アンテナからの直接波以外の不要な反射波を防ぐため、暗室内は全面に電波吸収体を張り付けている。EUTは事前に電界校正した均一領域内に設置しており、近傍では電界強度計でアンテナより放射された電界強度を計測している。試験中、静電ハンドガンはグリップ部をテープで巻きテンションをかけることで、人の手を介さず動作させている。またEUTのケーブル類は塗装の作業現場で実際に使用している状況を考慮し、円形に巻いた状態で試料台の上に置いた状態とした。静電ハンドガンの先端から30 cm離れたところに設置してある金網は、実際の使用環境に近づけるための仮想被塗物で

原稿受付 2021年2月5日 (Received date: February 5, 2021)

原稿受理 2021年4月28日 (Accepted date: April 28, 2021)

J-STAGE Advance published date: June 3, 2021

*1 産業安全技術協会

*2 旭サナック株式会社

*3 労働安全衛生総合研究所電気安全研究グループ

連絡先: 〒204-0024 東京都清瀬市梅園1-4-6

労働安全衛生総合研究所電気安全研究グループ 崔 光石

E-mail: choiks@s.jniosh.johas.go.jp

doi: 10.2486/josh.JOSH-2021-0003-TA

図1 試験構成図

図2 EMS試験環境（電波暗室内）

図3 EMS試験環境（電波暗室内、EUT周辺）

あり、接地されている。静電ハンドガンの設定電圧は-60kVで、ガン先端の放電電極近傍では、コロナ放電が発生し、マイナスイオンが生成される。マイナスイオンは金網方向に移動し、イオン電流が流れるため、ガン先端電圧は-46kV前後に降下する（注：イオン電流は実測していないが、ガン先端の電位降下より約50 μ A程度と推算できる）。試験中、EUTの動作状況は、暗室内のカメラにより監視している。監視対象は、静電ハンドガン先端の電圧を測定している電圧計の表示部である。

試験条件については、2段階の条件で行った。1段階目の周波数はIEC61000-4-3で規定されている、80MHzから1000MHzの範囲でスイープしている。周波数スイープでは、始点として設定した周波数から1%のステップで連続的に変化させている。電界強度の設定値はIEC規格の試験条件より強い電界強度である15V/mとした。このときアンテナとEUTの距離は3mである。2段階目は、1段階目でEUTが正常動作していた場合、さらに電界強度が大きい電磁波を放射したときのEUTの動作を確認するため、アンテナとEUTの距離を2mとして試験を行った。それでも正常動作していた場合、同様の目的でア

ンテナとEUTの距離を1mとして試験を行った。こちらも周波数は80MHzから1000MHzの範囲でスイープしている。

どの条件下においてもアンテナから放射する妨害波は通常の放射免疫試験と同様、1kHz正弦波で80%の振幅変調がかけられたものを使用する。また偏波面は水平・垂直偏波両方で電界を放射し、放射時間は2秒間としている。以上をまとめ、今回の試験条件を表2に示す。

表2 EMS試験条件（放射時間：2秒）

周波数範囲 [MHz]	電界強度 [V/m]	偏波面
80～1000	15	水平・垂直

（備考）誤動作・性能低下がなかった場合、アンテナとEUTの距離を3mから2m、1mと近づける。

2.2.EUTの選定と性能評価基準について

本研究で使用したEUTは、図4に示す静電ハンドガン（旭サナック（株）、型式HB5000）及び静電コントローラ（旭サナック（株）、型式BPS 130 EN）である。静電

図4 被試験機器 (EUT)

ハンドガンは、溶剤系液体塗料を使って静電塗装を行うためのものである。静電コントローラは、安全機能として定電流保護回路、絶対値電流検出機能、送電線異常検出機能等を有している。また静電コントローラは、静電ハンドガンに電源を供給し、高電圧の荷電を制御する制御装置である。

またEUTに誤動作があったかどうかは、IEC61000-6-2にある性能判定基準を用いて評価している。性能判定基準を表3に示す。性能判定基準はA, B, Cの三段階評価であり、各段階の評価の内容については製造者が定めている。本研究では表3中のBに相当する事象を性能低下、Cに相当する事象を誤動作として評価する。

表3 EUTの性能判定基準

性能判定基準	内容	試験時の判定
A	試験中、試験後ともに正常動作する。	試験中、試験後ともに静電ハンドガン先端の電圧が -46 ± 2 kVの範囲内。
B	試験後、正常に動作すること。ただし、試験中の性能低下は許容される。	試験中、静電ハンドガン先端の電圧がA判定の -44 kVを下回る。試験後は -46 ± 2 kVの範囲内。
C	試験中の一時的な機能喪失は許容されるが、自己回復、または制御装置の操作により回復可能なこと。試験後、正常に動作すること。	試験中、一時的に静電ハンドガンが動作しなくなる。

3 試験結果および考察

1段階目の試験として、電界強度を15 V/mと設定した以外はIEC規格と同様の周波数でスイープさせたときの結果を表4に示す。偏波方向に関わらず、EUT機器は正常に動作していた。このとき試験条件として設定した80～1000 MHzにおいてEUT近傍に設置した電界強度計で実測値は20 V/m程度であり、IEC試験規格で規定される最大電界強度の2倍である。この条件においてもEUTは正常に動作していることから、規格を超える電界強度においても放射性イミュニティがあることが示唆された。

表4 スイープ周波数における実験結果 (1段階目)

周波数範囲 [MHz]	偏波方向	性能判定基準
80～1000	垂直	A
	水平	A

(備考) 電界強度の設定値は、15 V/mで実施

EUTに性能低下が見られなかったため、2段階目の試験としてアンテナとEUTとの距離を2 m, 1 mと近づけて試験を行った試験結果を表5に示す。アンテナとEUTとの距離を垂直偏波に対しては2 m, 水平偏波に対しては1 mとした際、一部周波数において静電ハンドガン先端の電圧に正常動作時から6 kVの低下が見られた(-40 kV)。一部周波数とは垂直偏波において90 MHz付近、水平偏波において170 MHz付近である。その電圧低下は塗装中における作業員でさえ気がつかず作業への支障がなく、また、労働災害を引き起こすレベルではない。そして、該当周波数から外れると再び正常動作に復帰したことから、誤動作ではなく試験中の一時的な性能低下(判定基準B)にあたると判断できる。

表5 スイープ周波数における実験結果 (2段階目)

周波数範囲 [MHz]	偏波方向	アンテナ-EUT間距離 [m]	性能判定基準
80～1000	垂直	2	B
		1	B
	水平	2	A

(備考) 電界強度の設定値は、15 V/mで実施。

性能低下がみられた電界強度の大きさについて考察する。試験環境はIEC規格に基づきアンテナとEUTの距離を3 mとし電界均一面の校正を行っている。それゆえ距離を2 m, 1 mとした場合はその均一性は保証されない。したがって事前準備として、試験時に電界強度計を設置する位置とEUTの設置する位置の電界強度をそれぞれ実測し、どの程度の差があるかを確認した。実測した電界強度は、水平偏波・垂直偏波ともにアンテナとEUTの距離を2 mとしたとき、試験時にEUTの設置位置は電界強度計を設置する位置に比べ1 dB程度、1 mとしたときは2 dB程度小さいことを確認している。性能低下時に計測された電界強度は垂直偏波において22 V/m, 水平偏波において40 V/mであったことを考慮すると、今回の試験では垂直偏波において18 V/m, 水平偏波において32 V/m程度の電界強度であったと推定される。いずれにせよ、IEC規格にある10 V/mより強い電界が実際にEUTに放射されたと考えてよい。

次に結果の一般性について言及する。通常EMS試験ではEUT各面に所定条件の電磁波が放射されるよう複数回試験を行うが、今回使用したEUTの大きさは電界均一

面に対し十分小さく、電磁波の放射方向よりアンテナから実際に放射される電界強度の影響が大きいため、図2および3に示すようにアンテナに対し静電コントローラを側面方向に対してのみに試験した。また、今回は一社の製品をEUTとして選定したが、一般に市場に流通している静電ハンドガン、静電コントローラは他メーカー製であっても形状・大きさ・装置内に有する電気回路に大きな違いはないため、今回の試験で得られた結果はある程度一般性を有していると考えられる。

若干の性能低下が見られた原因は、静電コントローラの電子部品であると推察できる。静電コントローラ内部の基板に実装された電子部品のうち、静電ハンドガンへ供給する電圧を制御する回路の部品か、あるいはDCをACに変換する高周波発振回路の部品が影響を受けたと考えられる。今回の試験で、若干の性能低下が見られた周波数は、総務省が公開している電波使用状況⁶⁾によると、FM放送・コミュニティ放送及び運輸交通等公共機関の公共業務、船舶通信、一般私企業の各種業務などで使用されている。これらの用途では基地局（放射点）の電界強度はかなり大きいですが、一般生活環境では十分距離が離れているため減衰しており、電波防護指針⁷⁾に示されている通り、人体、静電コントローラなどへの影響はないと思われる。

4 おわりに

本研究では、IEC規格の放射イミュニティ性能試験基準を満たしたEUT（市販の静電ハンドガン及び静電コントローラ）に、規格外の強い強度をもつ電磁波を放射し、動作確認を行った。主な試験結果をまとめると次のとおりである。

- (1) 電界強度を15 V/mとし、それ以外はIEC規格に準拠した試験を行った際、EUTは正常に動作した。
- (2) 電界強度をさらに上げるため、アンテナとEUTの距離を規格で定められている3mから2m,1mと近づけ試験を行った際、垂直偏波において90 MHz付近、水平偏波において170MHz付近の周波数において一時的に性能低下がみられたが、労働災害を引き起こすようなレベルではない。しかし、それ以外の周波数では正常に動作した。

これらのことから、本研究で使用した静電コントローラは、規格を超える電界強度においても放射イミュニティ性能をもっていることが示唆された。

文 献

- 1) 富田一. プレス用光線式安全装置の伝導性ノイズに対するイミュニティ. 産業安全研究所研究報告, NIIS-RR-96. 1997 : 57-62.
- 2) 盤標準化協議会分電盤技術部会. 分電盤設備トラブル・対応事例 平成23年5月制定. 2011.
- 3) IEC 61000-4-3: Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-3: Testing and measurement techniques – Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test. 2010.
- 4) 上青木大, 瀧川雄介, 瀬上慎悟: 低圧遮断器のEMC試験規格. 電磁環境工学情報EMC.2018 ; No. 367, November : 100-107.
- 5) 横田英範, 松永武士, 吉原俊輔, 崔光石. 漏電遮断器における放射イミュニティ性能とその対策例について. 労働安全衛生研究. 2021 ; (印刷中).
- 6) 総務省. 我が国の電波の使用状況. 2019.
- 7) 総務省. 電波利用における人体の防護指針. 電波防護指針諮問第38号. 1990.

Electromagnetic Susceptibility of Controller for Electrostatic Coating with Safety Functions

by

Takeshi MATSUNAGA^{*1}, Shunsuke YOSHIHARA^{*1}, Yoshiki SUZUKI^{*2}

Kenzo YANAGIDA^{*2} and Kwangseok CHOI^{*3}

There is an incentive in the market to design and develop electronic devices and components, especially safety controllers, which are resistant to malfunctioning when exposed to unexpected electromagnetic noises. This paper describes the experimental results of EMS (electromagnetic susceptibility) of an electrostatic controller that supplies electrical power to an electrostatic spray gun (equipment under test: EUT). The high voltage applied to the needle electrode of the spray gun was approximately -46 kV and was monitored during the entire testing. In this study, EMS tests were carried out in the 3 m method anechoic chamber. The values of electromagnetic noise (electric field strength, V/m) applied to the EUT were 2 to 4 times stronger than those mentioned in the IEC standard test (frequency range: 80 MHz to 1000 MHz, emission time; 2 s). As for the results, no malfunctioning was observed under the experimental conditions. To be precise, the applied voltage on the needle electrode was slightly dropped to -40 kV when applying 90 MHz and 170 MHz; however, such a drop cannot be representative of a malfunction. This implies that the EUT used in this experiment is made to withstand field strengths that exceed the IEC standard in terms of noise immunity.

Key Words: Electrostatic coating, Safety controller, Electromagnetic Susceptibility, Malfunction, Safety

*1 Technology Institution of Industrial Safety

*2 Asahi Sunac Corporation

*3 Electrical Safety Research Group, National Institute of Occupational Safety and Health