



静電気対策ハンドブック(電子部品・装置)

2024 年 3 月 29 日 A 改訂

宇宙航空研究開発機構

免責条項

ここに含まれる情報は、一般的な情報提供のみを目的としています。JAXA は、かかる情報の正確性、有用性又は適時性を含め、明示又は黙示に何ら保証するものではありません。また、JAXA は、かかる情報の利用に関連する損害について、何ら責任を負いません。

Disclaimer

The information contained herein is for general informational purposes only. JAXA makes no warranty, express or implied, including as to the accuracy, usefulness or timeliness of any information herein. JAXA will not be liable for any losses relating to the use of the information.

発行

〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1

宇宙航空研究開発機構 安全・信頼性推進部

JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency)

序

静電気は、いろいろな所で発生する自然現象で、予測しえない静電気の帯電や放電が多種多様の災害や障害を引き起こしている。例えば、自然界における落雷、産業界におけるガス爆発などの災害や事故の発生、帯電による紙・繊維の巻取りや折り畳み困難、放電による塗装・印刷でのスタティックマークやカブリ、写真フィルムの感光などの生産性の障害がある。

特に、近年進歩著しい電子産業界においては、半導体デバイスの高集積化に伴い、機能障害や特性低下などの不具合の原因として、静電気放電（ESD）による素子の損傷・劣化が大きな問題になってきた。

ESDにより損傷しやすい半導体デバイスタイプがあることが分かってから、電子部品に対するESDによる損傷が注目され、故障解析や試験などにより、ESDに対する感受性が明らかになってきている。ESD損傷がすぐに顕在化せずに、装置の運用段階において故障を発生させるような潜在故障が起きることも知られてきた。

半導体デバイスの多品種化、故障モードの多様化、新技術の急速な発展などにより故障解析をますます複雑困難なものにしている。問題が発生してからでは、その対策に要する人的資源を含む経費は、非常に大きなものとなり得る。

そこで、ESDを発生させない予防措置がますます重要となってきた。

ESD対策は、(1) 電子システムの部品、組立品、装置などの取扱い時に発生するESDの原因と結果の明確化、(2) ESD対策用の資材及び装置についての理解、(3) ESD保護区域及び接地された作業台の準備及び維持管理、(4) ESD作業手順、取扱要領、包装要領及びマーキング要領の整備、(5) ESD要員訓練プログラムの設定及び履行、などを行うことにより達成される。

本書は、ロケット・人工衛星等に用いる静電気放電に敏感な電子部品・電子装置等の取扱いにおける静電気放電による損傷を防止するために必要な対策のガイドブックの試案作成を平成4年度に財団法人日本電子部品信頼性センターに委託し、その成果を基に作成したものである。

目次

1.	適用範囲	1
2.	関連規格等	1
3.	定義	3
3.1	用語の定義	3
3.1	略語	7
4.	一般事項	11
4.1	ESD管理プログラム	11
4.2	ESD管理の要点	11
4.3	ESD対策	12
5.	詳細事項	13
5.1	静電気の基礎	13
5.1.1	静電気の発生	13
5.1.1.1	摩擦帯電	13
5.1.1.2	誘導帯電	16
5.1.1.3	コロナ帯電	17
5.1.2	電界と電位	18
5.1.3	電荷の再分布と電界緩和	19
5.1.4	電荷の再分布と電気抵抗	20
5.1.5	電気抵抗と抵抗率	21
5.1.6	放電現象と絶縁耐力	22
5.1.7	静電気放電 (ESD)	23
5.2	ESD感受性	25
5.2.1	ESDS部品、組立及び装置の分類	25
5.2.1.1	部品の分類	25
5.2.1.2	組立品及び装置の分類	26
5.2.2	ESD故障のタイプ	28
5.2.3	故障メカニズム	30
5.2.4	ESDに敏感な部品の構成素子	32
5.2.5	MOS構造	35
5.2.6	半導体接合	36

5.2.7	フィルム抵抗	38
5.2.8	金属配線	40
5.2.9	膜形成で保護された電界効果構造	40
5.2.10	圧電素子	41
5.2.11	近接配置電極	42
5.3	ESD破壊試験	43
5.3.1	ESD破壊試験規格の現状	43
5.3.2	ESD破壊モデル	45
5.3.2.1	人体帯電モデル及びマシンモデル	45
5.3.2.2	デバイス帯電モデル(CDM)	47
5.3.3	ESDS部品の感受性の分類とESD破壊耐性の目標値	48
5.3.4	組立品及び装置のESD試験方法	49
5.4	保護ネットワークの設計	50
5.4.1	部品保護回路	50
5.4.2	組立品及び装置に対する保護設計要求	50
5.4.3	組立品のESD保護設計	52
5.4.4	装置のESD保護設計	53
5.4.5	過渡電圧抑制制御	55
5.5	ESD保護区域	56
5.5.1	一般	56
5.5.2	ESD保護区域の設計	56
5.5.3	ESD保護区域の要素	57
5.5.4	接地	57
5.5.4.1	作業者の安全性	57
5.5.4.2	電気を利用する試験機器及び工具類の接地	58
5.5.4.3	作業台の接地	59
5.5.5	工具、材料及び用品	60
5.5.6	取扱手順	62
5.5.7	保護区域の初期及び定期確認	62
5.5.8	集積回路等製造用クリーンルームにおける静電気対策	62
5.6	ESD保護材料の特性と試験	64
5.6.1	概要	64
5.6.2	体積抵抗率及び表面抵抗率	65
5.6.3	不均一構造材料の抵抗測定	68

5.6.3.1	層構造を持つ材料の抵抗測定	68
5.6.3.2	導電性物質を練り込んだ材料の抵抗測定	71
5.6.4	減衰時間	71
5.6.5	静電気シールド	73
5.6.6	摩擦帯電特性	75
5.6.7	ESD保護としての材料分類	78
5.7	ESD保護用品	80
5.7.1	ESD保護袋	80
5.7.2	クッション材料	81
5.7.3	ICマガジン	82
5.7.4	ICキャリヤテープ	82
5.7.5	トートボックス、コンテナ、トレイなどの容器	83
5.7.6	作業者の接地ストラップ	83
5.7.7	保護床	85
5.7.7.1	置き敷きタイプ	86
5.7.7.2	張床タイプ	86
5.7.7.3	塗床タイプ	87
5.7.7.4	床の抵抗測定	87
5.7.8	作業台表面	89
5.7.9	静電気測定器	91
5.7.10	静電気センサーと警報器	95
5.7.11	はんだごて、はんだポット、フローソルダリング装置など	96
5.7.12	組立、試験及び包装装置	96
5.7.13	真空掃除機	96
5.7.14	イオナイザ	97
5.7.14.1	イオナイザの種類	97
5.7.14.2	イオナイザの特性	98
5.7.14.3	イオナイザの用途別分類	98
5.7.14.4	イオナイザの性能試験	99
5.7.14.5	イオナイザの設置にあたっての留意事項	99
5.7.15	スプレー、洗浄、塗装装置	100
5.7.16	シャントバー、クリップ、導電性フォーム	100
5.7.17	作業者の衣服	101
5.7.18	試験機器	103
5.7.19	温度チャンバ	103
5.7.20	相対湿度制御	104
5.7.21	帯電防止剤	104

5.7.21.1	塗布型帯電防止剤	104
5.7.21.2	練り込み型帯電防止剤	105
5.7.21.3	帯電防止剤の選択	105
5.7.21.4	帯電防止剤の成分による分類	106
5.8	表示	110
5.8.1	ESDSアイテム、保護包装及び保護用品の表示	110
5.8.2	ESD保護区域の標識	112
5.8.3	接地点のマーク	113
5.8.4	文書のマーキング	113
5.9	取扱手順	114
5.9.1	ESDSアイテムの取扱いに関する一般的指針	114
5.9.1.1	作業員等	114
5.9.1.2	設計及び図面	114
5.9.1.3	ESDSアイテムの取扱い時	115
5.9.1.4	容器・工具・試験機器など	115
5.9.1.5	ESD保護区域内	116
5.9.1.6	ESD保護用品の管理	116
5.9.1.7	輸送・保管	116
5.9.2	ESD対策関連部門と業務分担	117
5.9.3	資材調達部門	117
5.9.4	設計部門	118
5.9.5	信頼性部門	118
5.9.6	品質保証部門	119
5.9.6.1	品質管理	119
5.9.6.2	受入検査	119
5.9.6.3	工程中の検査と試験	120
5.9.6.4	故障解析	120
5.9.7	製造部門	121
5.9.7.1	製造技術（支援）	121
5.9.7.2	資材受入管理	121
5.9.7.3	資材保管管理	121
5.9.7.4	加工・組立・修理・再加工	121
5.9.8	（装置の）試験・整備部門	122
5.9.9	包装・出荷部門	122
5.9.10	ESD保護区域外での作業要領	122

5.10	教育・訓練	126
5.10.1	一般	126
5.10.2	教育・訓練コース概要	127
5.10.3	教材	134
5.11	ハーネス起因ESD	135
5.11.1	ハーネス起因ESDの基礎	135
5.11.1.1	ハーネス帯電の種類	135
5.11.1.1.1	静電気発生	135
5.11.1.1.2	接触・分離帯電	136
5.11.1.1.3	摩擦帯電	137
5.11.1.1.4	誘導帯電と静電シールド	137
5.11.1.1.5	分極	138
5.11.1.2	ハーネスの静電気放電	139
5.11.1.3	ハーネスの特性	140
5.11.1.4	産業界のケーブルESD事例	142
5.11.2	ハーネス起因ESDの特性	143
5.11.2.1	ハーネスの静電容量及びインダクタンス	143
5.11.2.2	ハーネスの帯電及びリーク	144
5.11.2.3	ハーネスの放電	146
5.11.2.4	ハーネス起因ESDの破壊試験	148
5.11.3	ハーネス起因ESDの対策	152
5.11.3.1	ハーネスの除電と抑制	152
5.11.3.2	ハーネスの放電電流低減	153
付録Ⅰ	ESD損傷防止チェックリスト	Ⅰ-1
付録Ⅱ	参考文献	Ⅱ-1
付録Ⅲ	測定データ集	Ⅲ-1

図5.1-1	静電誘導	17
図5.1-2	分極	17
図5.1-3	コロナ放電	18
図5.1-4	電荷の再分布	20
図5.1-5	静電気容量からの電荷漏洩	21
図5.1-6	物体を流れる電流	22
図5.1-7	平等電界	23
図5.1-8	パッシェン電圧	23
図5.1-9	静電誘導と放電	25
図5.1-10	絶縁導体間の静電気放電	25
図5.3-1	HBMとMMの試験回路規定	44
図5.3-2	HBMの電流波形規定	44
図5.3-3	HBM市販自動試験装置による破壊電圧機差	45
図5.3-4	ESD試験法によるデバイス破壊耐圧の比較	46
図5.3-5	マシンモデル(MM)による破壊電圧とユーザ返却率との関係	46
図5.3-6	デバイス帯電法	47
図5.3-7	パッケージ帯電法	48
図5.4-1	部品保護回路の例	51
図5.4-2	サージ吸収用低電圧ダイオード	52
図5.5-1	ESD保護区域内の代表的な設備	61
図5.6-1	物体を流れる電流	66
図5.6-2	表面抵抗と体積抵抗の分離	68
図5.6-3	二層構造材料	69
図5.6-4	三層構造材料	69
図5.6-5	減衰測定原理	72
図5.6-6	減衰測定器の概要	73
図5.6-7	静電気シールド用保護袋の構造	74
図5.6-8	静電気シールド性能試験方法	74
図5.6-9	静電容量センサー	75
図5.6-10	一般包装材料によるデバイスの摩擦帯電測定装置	76
図5.6-11	ICマガジンによるデバイスの摩擦帯電測定	77
図5.7-1	人体接地ストラップの例	84
図5.7-2	ヒールグラウンドの例	84
図5.7-3	導電性床の電気抵抗測定方法	88
図5.7-4	高絶縁抵抗計による床測定	88
図5.7-5	帯電防止床の電気抵抗測定	88
図5.7-6	象限電位計	92

図5.7-7	回転セクタ型表面電位計	93
図5.7-8	振動容量型表面電位計	93
図5.7-9	振動容量電位計の例	94
図5.7-10	IC-OPアンプの例	95
図5.7-11	ESD保護服の試験の例	102
図5.7-12	帯電防止剤の分類	107
図5.8-1	MIL-STD-1285のESDSシンボル	110
図5.8-2	EIA RS-471のESDSシンボル	111
図5.8-3	ESDSシンボルの簡略化の例	111
図5.8-4	ESDS警告ラベルの例	111
図5.8-5	MIL-STD-1686AのESDSアイテムの注意表示	112
図5.8-6	ESD保護区域の標識の例	112
図5.8-7	接地点の図案例	113
図5.9-1	現場作業でのESDSアイテムの取扱い	124
図5.9-2	現場作業でのESDSアイテムの取扱い（作業台）	125
図5.11.1.1.2-1	ボアの原子モデルでの帯電の説明	136
図5.11.1.1.2-2	接触、分離による静電気帯電	136
図5.11.1.1.4-1	一様な静電場の中に導体球を置く	137
図5.11.1.1.4-2	誘導帯電	137
図5.11.1.1.4-3	静電シールド	138
図5.11.1.1.4-4	静電シールド（帯電した導体Cが入ってきた場合）	138
図5.11.1.1.5-1	分極のモデル	139
図5.11.1.2-1	静電誘導と放電（ケーブル接続前後）	140
図5.11.1.3.1-1	分布定数回路を集中定数回路表現した基本回路	140
図5.11.1.3.1-2	分布定数回路の微小区間の集中定数回路表現	141
図5.11.1.3.2-1	ケーブルの対地静電容量	141
図5.11.2.1.1-1	ハーネスの静電容量の傾向	143
図5.11.2.1.1-2	ハーネスのインダクタンスの傾向	144
図5.11.2.2.1-1	ハーネスの帯電の傾向	144
図5.11.2.2.2-1	リーク特性	145
図5.11.2.3-1	放電電流波形例（帯電方法：持上げ後引伸ばし）	147
図5.11.2.3-2	最初の放電電流波形の傾向（帯電方法：持上げ後引伸ばし）	147
図5.11.2.4.1-1	試験コンフィギュレーションに対するESDモデル	149
図5.11.2.4.1-2	放電電流波形の測定結果とシミュレーション結果	150
図5.11.2.4.2-1	ESD印加装置の波形	151
図5.11.2.4.2-2	ケーブルの放電波形例	152

表5.1-1	物質の帯電列の例	14
表5.1-2	絶縁性物質の帯電列の例	15
表5.2-1	ESDS部品リスト	27
表5.2-2	ESDに敏感な部品の構成素子	33
表5.5-1	電流が人体に及ぼす影響	58
表5.6-1	MIL-HDBK-263A による材料分類	78
表5.6-2	MIL-B-81705C による材料分類	78
表5.6-3	CECC 00 015 による材料分類	79
表5.7-1	導電性床仕上げ材の分類	86
表5.7-2	親水性・親油性原子団の分類	107
表5.7-3	帯電防止剤の分類と化学構造式	108
表5.11-1	ESDモデルの比較	135
表5.11.2.4.1-1	C, L, Rそれぞれの設定	149
表5.11.2.4.2-1	ESDの印加装置とその特徴	151

1 適用範囲

本書は、宇宙航空研究開発機構（以下「JAXA」という）との契約に係わる人工衛星・ロケット等の開発・運用において、静電気放電(ESD: Electrostatic Discharge)に敏感な電子部品及びその組立品・装置の静電気放電による損傷を予防するための手引きとして示すものである。ただし、本書は、部品の製造、及び火工品の取扱いや火工品の静電気による爆発・火災の防止対策については対象としない。

2 関連規格等

ANSI/EIA-541	Packaging Material Standards for ESD Sensitive Items.
ASTM D 257	Standard Test Method for D- C Resistance or Conductance of Insulating Materials.
ASTM D 991	Standard Test Method for Rubber Property - Volume Resistivity of Electrically Conductive and Antistatic Products.
CECC 00 015- 1	Protection of Electrostatic Sensitive Devices Parts, General Requirements.
DOD-STD-100	Engineering Drawing Practices.
EIA RS-471	Symbol and Label for Electrostatic Sensitive Devices.
EIAJ ED-4701	半導体デバイスの環境及び耐久性試験方法 EOS/ESD S3. 1 EOS/ESD Association Ionization Standard FED-STD-101 Test Procedures for Packaging Materials. JIS T 8103 静電気帯電防止用安全・作業靴
JIS T 8118	静電気帯電防止作業服
KSC MMA-1985	Standard Test Method for Evaluation Triboelectric Charge Generation and Decay.
MIL-E-17555	Electronic and Electrical Equipment, Accessories, and Provisioned Items(Repair Parts): Packaging of.
MIL-T-31000	Technical Data Packages, General Specification for.
MIL-M-38510	Microcircuits, General Specification for. MIL-T-47500 Technical Data Packages.
MIL-B-81705	Barrier Materials, Flexible, Electrostatic Protective,

	Heat Sealable.
MIL-W-87893	Workstation, Electrostatic Discharge Control.
MIL-HDBK-263	Electrostatic Discharge Control Handbook for Protection of Electrical and Electronic Parts, Assemblies and Equipment.
MIL-HDBK-773	Electrostatic Discharge Protective Packaging.
MIL-STD-454	Standard General Requirements for Electronic Equipment.
MIL-STD-750	Semiconductor Devices, Test Methods for.
MIL-STD-883	Test Methods and Procedures for Microelectronics.
MIL-STD-1285	Marking of Electrical and Electronic Parts.
MIL-STD-1521	Technical Reviews and Audits for Systems, Equipment, and Computer Programs.
MIL-STD-1686	Electrostatic Discharge Control Program for Protection of Electrical and Electronic Parts, Assemblies and Equipment (Excluding Electrically Initiated Explosive Devices). (Metric)
MIL-STD-1695	Environments, Working, Minimum Standards for.
MIL-STD-2073-1	DOD Materiel Procedures for Development and Application of Packaging Requirements.
MIL-STD-2073-2	Packaging, Requirement Codes.
NFPA99	Health Care Facilities
RAC VZAP-9	Electrostatic Discharge Susceptibility Data 1991.
RCJS-0950-1993	静電気に敏感なデバイス及び装置の取扱いに関するガイドライン
RIIS-TR-87-1	静電気安全指針

3. 定義

本書における用語の定義及び略語を次に示す。

3.1 用語の定義

(1) ESD

Electrostatic discharge の略語。互いに静電位が異なる物体間で直接の接触によって生じるか、又は静電界によって誘起される静電気電荷の移動。「静電気放電」ともいう。

(2) ESDS

ESD sensitive 又は sensitivity の略語。電気／電子部品、装置類の ESD 損傷に対する敏感性（損傷を受けやすい程度）。「静電気放電に敏感な」又は「ESD 感受性 (ESD susceptibility)」ともいう。

(3) ESDS アイテム (ESDS items)

静電気放電に敏感な部品、組立品及び装置の総称。

(4) ESDS アイテムの分類 (Classification of ESDS item)

ESDS アイテムを特定の試験方法による試験電圧に対する ESD 感受性に応じて分類すること。

(5) ESD 保護区域 (ESD protected area)

ESDS アイテムの感受性レベル以下に ESD 電圧を制限するために必要とされる ESD 保護用の材料、用品、手順を備えた区域。

(6) ESD 保護材料 (ESD protective material)

以下に示す能力の内、少なくとも 1 つ以上の特性を有する材料。ESD 防止材料ともいう。

- a. 静電気の発生を抑制する。
- b. 物質の表面又は体積を通じて静電電荷を安全に拡散させる。
- c. ESD や静電界からしゃへいする。

なお、本書では、ESD 保護材料は、表面抵抗率と体積抵抗率により導電性材料と静電気拡散性材料に区分している。

(7) ESD 保護包装 (ESD protective packaging)

ESDS アイテムへの ESD による損傷を防止するために ESD 保護材料を使用した包装。

(8) イオナイザ (Ionizer)

電氣的による方法又は放射性エネルギー源によって、空気の流れの中に＋と－のイオンを発生する装置（帯電空気分子（イオン）発生装置）。正イオン（負イオン）は、負電荷帯電体（正電荷電帯体）に引き付けられ、その結果、電荷を帯びた物質は中和される。（Air ionizer ともいう。）

(9) 厳しさレベル (Severity levels)

静電気放電発生器による試験電圧の値を水準値で表したもの。試験方法別にレベルを定め、低電圧のレベルから試験し、DUT(Device Under Test)が劣化しない最高電圧のレベル。

(10) 組立品 (Assembly)

意図した機能を果たすために結合された複数の部品、サブ組立品(Sub-assembly)又はそれらの組合せで、分解・再組立できるもの。

(11) 減衰時間 (Decay time)

静電気の電圧が、ピーク電圧値の規定された百分率に減少するのに要する時間。

(12) 自己放電式除電器 (Static eliminator induction)

自己放電除電器は、通常導電性繊維を織り込んだ布又は導電性プラスチックフィルムを棒状の支持導体で挟んだ器具であり、帯電物体と導電性繊維等間の電位差により、導電性繊維等に発生するコロナ放電によりイオンを発生し、除電を行う。

(13) 人体モデル (Human body model;HBM)

部品（デバイス）を取扱う人体に蓄えられた静電気が部品端子に放電し、部品破壊を起こすことをシミュレーションするモデル。

(14) 静電界 (Electrostatic field)

静電荷が帯電した表面と、これと異なる静電位の別の表面との間での電位こう配。異なった静電気電位を有する2つの表面間に存在する電位こう配。

(15) 静電気帯電 (Electrostatic charge)

電荷が物質に残留している状態。

(16) 静電気放電発生器 (ESD generator)

静電エネルギー蓄積容量、放電抵抗、放電電極、放電スイッチ及びリターンケーブルで構成される静電気放電を模擬する試験器。

(17) 静電気放電

ESD参照。

(18) 接地 (Ground)

多量の電荷の供給能力又は吸収能力を備えた大地、船舶又は運行体の導体などの物体に接続すること。

(19) 接地ストラップ (Ground strap)

人体の静電電荷を安全に接地放電させ、人体電位と作業表面の電位とが等しくなるようにするもの。リストストラップ、レッグストラップ、アンクルストラップなどがある。

(20) 接触放電試験 (Contact discharge method)

静電気放電発生器の電極をDUTに接触させたまま静電気放電発生器内のスイッチを閉じて放電させる試験方法。

(21) 装置 (Equipment)

組立品の集合体又は部品・サブ組立品・組立品の組合わせの集合体で、通常、さまざまな状態において独立した機能を有する。

(22) ソフト接地 (Soft ground)

作業員に対し安全なレベル（通常5mA）にまで電流を制限するのに十分な大きさのインピーダンスを通した接地。ソフト接地に必要なインピーダンスは、接地付近で作業員が接触し得る電圧レベルによって異なる。

(23) 体積抵抗率 (Volume resistivity)

試料に接触している2つの電極に印加される単位厚み当たりの直流電圧と単位面積当たりの電流との比。測定単位は、 $\Omega \cdot \text{cm}$ が一般的である。

(24) 帯電防止剤 (Antistatic agent)

基材などに練り込むか、局部に塗布することにより、帯電防止性を基材などに付与する化学物質。

(25) 帯電防止性 (Antistatic property)

摩擦帯電の発生を抑え、帯電電荷を低く抑える材料の性質。材料の電気抵抗とは別の性質である。

(26) デバイス (Device)

マイクロサーキット、半導体デバイスなどのような機能を持つ単一部品。

(27) 塗布型帯電防止剤 (Topical antistats)

絶縁性材料の表面に処理し、静電気の発生を抑制する化学物質。（その使用条件が限定されること又は寿命が一般的に短いことから、局部的静電気防止剤と呼ばれることもある。）

(28) デバイス帯電モデル (Charged device model;CDM)

帯電した部品（デバイス）から電荷が短時間に放電することにより起きるESD故障メカニズムをシミュレートするモデル。

(29) 電界誘導モデル (Field induced model;FIM)

部品（デバイス）が静電界にさらされることにより発生する放電、及びその後の導体接触により発生する放電をシミュレーションするモデル。

(30) 電氣的オーバストレス (Electrical over-stress;EOS)

電気／電子部品類の規定値を越える電氣的なストレス。

(31) 電磁適合性 (Electro magnetic compatibility; EMC)

環境や他の機器から発生する電磁気的外乱が存在する環境において、満足に機能できる装置の能力。

(32) ハード接地 (Hard ground)

直接又は低いインピーダンスを通した接地。

(33) 破局故障 (Catastrophic failure)

基本的機能が永久的に作動しなくなる故障。

(34) 表面抵抗率 (Surface resistivity)

物質表面の直流電圧と電流との比。表面抵抗率は、正方形の対辺となる2つの電極の間の表面抵抗に等しく、正方形の寸法には左右されず、測定単位は、 Ω/sq で表すのが一般的である。

(35) 部品 (Part)

一個又は数個を結合したもので、通常、破壊することなく分解することができないもの。本書では、部品、コンポーネント及びデバイスは、同義語である。

(36) 摩擦帯電 (Tribo-electric)

物質の摩擦などの接触により発生する静電気帯電。

(37) マシンモデル (Machine model; MM)

部品（デバイス）近くにある金属筐体などの導体に蓄えられた静電気がその導体と部品端子の接触により放電し、部品破壊を起こすことをシミュレーションするモデル。

(38) ミセルコロイド (Micelle colloid)

界面活性剤溶液などの一定濃度以上で現れる分子又はイオンの集合体であるミセルで形成されるコロイド系。

3.2 略 語

ASTM	: American Society for Testing and Materials	米国材料試験協会
BPM	: Biased Metal Plate Method	金属基板法
CCD	: Charge Coupled Device	電荷結合素子
CDM	: Charged Device Model	デバイス帯電モデル
CECC	: CENELEC Electronic Components Committee	CENELEC 電子部品委員会
CENELEC	: Comite Europeen de Normalisation Electrotechnique (仏語) (European Committee for Electrotechnical Standardization)	欧州電気標準化委員会
CMOS	: Complementary MOS	相補型MOS
CPM	: Charged Package Model	パッケージ帯電モデル
CRT	: Cathod Ray Tube	陰極線管 (ブラウン管)
DIP	: Dual In-line Package	
DOD	: Department of Defense	米国国防省
DUT	: Device Under Test	供試体
EBP	: Earth Bonding Point	接地接続点
EDM	: Electrostatic Voltage Decay Method	静電気電圧減衰法
EIA	: Electronic Industries Association	米国電子工業会
EIAJ	: Electronic Industries Association of Japan	日本電子機械工業会
EMC	: Electromagnetic Compatibility	電磁適合性
EMP	: Electromagnetic Pulse	電磁パルス
EPA	: ESD Protected Area	ESD保護区域
EPRM	: Erasable Programmable Read Only Memory	(書込み消去ができるROM)
EOS	: Electrical Overstress	電氣的オーバストレス
ESD	: Electrostatic Discharge	静電気放電
ESDS	: Electrostatic Discharge Sensitive	静電気放電感受性
EUT	: Equipment Under Test	供試体
FET	: Field Effect Transistor	電界効果トランジスタ
FIM	: Field Induced Model	電界誘導モデル
GND	: Ground	接地
HBM	: Human Body Model	人体帯電モデル
HEPA	: High Efficiency Particulate Air	
HMOS	: High Density MOS (高密度MOSプロセス: 米国インテル社の名称)	

IC	: Integrated Circuit	集積回路
IEC	: International Electrotechnical Commission	国際電気標準会議
IFM	: Ion Flux Method	イオン流法
ISO	: International Organization for Standardization	国際標準化機構
JFET	: Junction Field Effect Transistor	接合型電界効果トランジスタ
JIS	: Japanese Industrial Standard	日本工業規格
KSC	: Kennedy Space Center	ケネディ宇宙センター
LED	: Light Emitting Diode	発光ダイオード
LSI	: Large Scale Integration	大規模集積回路
MM	: Machine Model	マシンモデル
MNOS	: Metal-Nitride-Oxide-Semiconductor	(金属－窒化膜－酸化膜－半導体構造)
MOS	: Metal Oxide Semiconductor	(金属・酸化膜半導体の構造)
NASA	: National Aeronautics and Space Administration	米国航空宇宙局
NEMA	: National Electrical Manufacturers Association	米国電機工業会
NFPA	: National Fire Protection Association	米国消防協会
NMOS	: N-channel MOS	NチャネルMOS
PMOS	: P-channel MOS	PチャネルMOS
PWB	: Printed Wiring Board	プリント配線板
QA	: Quality Assurance	品質保証
RAC	: Reliability Analysis Center	米国信頼性解析センター
RAM	: Random Access Memory	ランダムアクセスメモリ
RCJ	: Reliability Center for Electronic Components of Japan	日本電子部品信頼性センター
RF	: Radio Frequency	無線周波
RFI	: Radio Frequency Interference	電波干渉
RIIS	: Research Institute of Industrial Safety	(労働省) 産業安全研究所
ROI	: Return on Investment	投資効率
SAW	: Surface Acoustic Wave(Devices)	表面弾性波(素子)
SCR	: Silicon Controlled Rectifier	シリコン制御整流素子
SMD	: Surface Mount Device	表面実装部品
SOS	: Silicon on Suphier	(サファイヤ上にシリコンを結晶させた構造)

TC	: Technical Committee(ISO)	専門委員会 (国際標準化機構)
TQM	: Total Quality Management	総合的品質管理 (全社的品質管理)
TTL	: Transistor-Transistor Logic	トランジスタ論理回路
UV	: Ultraviolet	紫外線
VDR	: Voltage-Dependent Resistor	電圧依存抵抗
VDT	: Visual Display Terminal	(視覚用の端末)
VLSI	: Very Large Scale Integration	超大規模集積回路
VMOS	: Vertical Groove MOS	(縦型構造のMOS)
VHSI	: Very High Speed Integration	超高速集積回路

(空 白)

4. 一般事項

4.1 ESD管理プログラム

ESD管理プログラムは、集積回路等の電子部品を使用した装置の保守、運用において、とくに冬期等の乾燥した時期に装置の故障が多発し、その原因の多くがESDによるものであったことにより、その対策の必要性が認識され、システムの信頼性を上げ、コストパフォーマンスを上げるために、導入されるようになった。

電子機器の製造工場においては、製造時の歩留まりを上げるため、ある程度の対策は取り入れられていたが、その後、どんな種類の部品が、どの程度ESDに弱いかというようなデータが整備され、ESD保護ネットワークなどの設計上の対策を含め、ESD管理プログラムとして認識され、その対象とする範囲は拡がり、効果的な対策方法についても明らかになってきた。

ESD管理プログラムとは静電気放電（ESD）の影響を受け易い部品、及びこれらの部品を組み込んだ組立品／機器の設計、製造、試験、運搬、貯蔵梱包等について、それらをESDによる損傷から保護するために効果的な体系、体制を設定し、管理するものでその要点は4.2項に示されている。

4.2 ESD管理の要点

- (1) ESD対策を効果的に実施するためには、その目的、対象作業、対象とするESDSアイテムの感受性レベルなどを明確にして、ESD管理プログラムを設定し、ESDによる障害を防止する対策をとる。
- (2) ESD管理プログラムの内容は、目的としたそれぞれの作業について、予想されるESD障害の発生防止のための具体的なESD対策を、契約別又は作業別の個別仕様書及び手順書に盛り込む。
- (3) ESD管理プログラムを実施するためには、ESD管理プログラム計画書として文書化した上で、担当者がそれぞれの作業において、容易にかつ確実に実施できる体制を作る。
- (4) ESD管理プログラム計画書では、適用範囲、実施項目、活動計画、ESDSアイテムの保護要領、実施体制及び責任者、使用工具、保護用材料・装置、訓練計画などを明らかにする。
- (5) ESD管理プログラム計画書は、下請負業者、供給業者及び専門業者も対象として含め、その要求事項を明確にする。
- (6) ESD管理プログラム計画は、実際の不具合事例に基づいて改定し、継続して維持管理することが重要である。したがって、チェックリストを作成し、適用事業所の審査を定期的実施する。

4.3 ESD対策

効果的なESD対策として、対象とする作業の種類には、製品の設計、製造、検査、試験、包装、輸送、保管、整備、修理などがある。これらの作業に対するESD対策内容として、一般に、次についてESD管理プログラムとして規定し、実施する。

- (1) 対象とする作業におけるESD損傷の不具合事例、故障解析などにより因果関係を明らかにし、試験等によりESDSアイテムの感受性を分類し、分類に応じたESD対策の方法を具体的に規定すること。（5.2 項、5.3 項参照）
- (2) ESD損傷の発生が予想される部品、装置等については、事前にESD保護ネットワークを組込むなど、設計段階から対策を立てること。（5.4 項参照）
- (3) 適切に管理された保護区域及び作業ベンチを設定し、そこにおいて作業すること。（5.5 項参照）
- (4) 所要のESD対策用材料及び装置を選定し使用すること。（5.6 項、5.7 項参照）
- (5) ESD対策は、すべて文書化により実施し、責任者を定め、所要の表示を行うこと。（5.8 項参照）
- (6) ESD損傷の発生が予想される作業について、適切な作業手順、取扱要領などを設定し、それに従って作業すること。（5.9 項参照）
- (7) 前項の作業に従事する作業員に対し、適切な要員訓練プログラムを実施し、作業員の質を確保すること。（5.10 項参照）

5. 詳細事項

5.1 静電気の基礎

5.1.1 静電気の発生

電荷の根本は、物質を構成する元素の電子（－電荷）と原子核の＋の電荷によるものである。

ある分子に所属する電子が何等かの原因で他の分子に移動した場合、電子が抜けた物質は原子核の＋電荷が現れ、電子を受取った分子は－電荷が過剰となる。このような状態を「イオン」と呼んでおり、静電気が発生した物質の最小単位である。静電気が発生した物質状態を帯電と呼び、帯電した物質を帯電体と呼ぶ。

イオン化した物質が空気のようなガス体の場合には、イオン（電荷）が比較的移動しやすいので帯電操作技術に利用されることがある。

大気圧中で起こる通常の静電気現象において、静電気が発生する原因を分類すると次の3つに大別される。

(1) 摩擦帯電（接触はく離帯電、衝突帯電を含む。）

主として絶縁性材料で起こり、最もコントロールしにくい。

(2) 誘導帯電

主として導電性材料で起こり、コントロールできる。

(3) コロナ帯電（コロナ放電現象に付随して起こる。）

絶縁性、導電性どちらの材料でも起こり、3つの中では最もコントロールしやすい。

5.1.1.1 摩擦帯電

2つの物質を接触させると接触面を通じて電子が移動し、片方の物質は電子が不足し、もう一方の物質は電子が過剰になる。その後2つの物質を引き離すとき、一部の電子は元の物質に戻るが、戻りきれない電子を生ずる。すなわち、電子を受取った物質は電子が過剰になり－に帯電し、電子を出した側は電子が不足するので結果的に原子核が持っている＋の電荷が現れてくる。

接触点を著しく増大させたものが摩擦であると考えられる。摩擦が単なる接触と異なる点は、機械的に大きな力が働くため、時には発熱、変形、表面はく離などを伴うこともあり、摩擦帯電現象の元になっている電子（電荷）移動のメカニズムは単純ではない。

摩擦帯電の特徴は、同じ種類の物質を摩擦するとき最も帯電しにくく、同じ物質同士でも摩擦の対称性がくずれてくると帯電するようになる。異なった種類の物質を摩擦するとき、どちらの物質が＋に帯電するか、帯電量が大きい小さいかについては、物質の組合せによって違ってくる。

また、同じ組合せであっても表面の平滑度の違い、汚れ、雰囲気湿度などによって微妙に変化する。繰り返し実験を行うにしても、摩擦熱による表面水分の変化などにより表面状態を一定に保つことが難しく、再現性に乏しくばらつきが大きい。このように不確定な要素が多く、摩擦帯電を定量的に取扱うことは非常に困難である。

色々な物質を組合せて摩擦実験を行い帯電極性を調べて極性の順に並べて一覧表にしたものを「帯電列」という。物質の帯電列の例を表5.1-1及び表5.1-2に示す。この中の任意の2物質を選んで摩擦すると、上位の物質が+に帯電し、互いに遠くにある物質を組合せた場合に帯電量が大きくなる傾向が強い。帯電列にはいくつかの例があるが、各実験者が全く同一の試料を使っていないこともあり、必ずしも順列が一致していない。

表5.1-1 物質の帯電列の例（出典；MIL-HDBK-263A）

極 性	物質名
+	人間の手
	ウサギの皮
	ガラス
	マイカ
	人間の頭髪
	ナイロン
	羊皮
	毛皮
	鉛
	絹
	アルミニウム
	紙
	木綿
	銅
	木材
	コハク
	シーリングワックス
	硬質ゴム
	ニッケル、銅
	金、プラチナ
	硫黄
	アセテート、レーヨン
	ポリエステル
	セルロイド
	オルロン
	ポリウレタン
	ポリエチレン
	ポリプロピレン
	ポリ塩化ビニール
	K E I、ふっ素
	シリコン
-	テフロン

表5.1-2 絶縁性物質の帯電列の例

(出典；J.Henniker：Nature, 196 (1962))

極 性	絶縁性物質
+	石英粉末充填シリコンゴム
↑	溶融ほうけい酸ガラス
	窓用ガラス
	アニリン・ホルマリン樹脂、酸触媒
	ポリホルムアルデヒド
	ポリメチルメタクリレート
	エチルセルロース
	ナイロン11
	ナイロン66
	岩塩
	メラミン・ホルマリン樹脂
	羊毛
	石英
	絹
	こはく酸ポリエチレングリコール
	酢酸セルロース
	アジチン酸ポリエチレングリコール
	フタル酸ポリジアリル
	繊維素スポンジ
	木綿
	ポリウレタンゴム
	スチレンアクリロニトリル共重合
	ポリスチレン
	ポリイソブチレン
	可撓性ウレタンフォーム
	ほうけい酸ガラス、磨き面
	ポリエチレンテレフタレート
	ポリビニルブチラール
	フェノール樹脂
	エポキシ樹脂
	ポリ塩化ブタジェン
	ニトリルゴム
	天然ゴム
	ポリアクリロニトリル
	硫黄
	ポリエチレン
	ポリカーボネート
	塩素化ポリエステル
	ポリ塩化ビニル、25%DOP
	硬質ポリ塩化ビニル
	ポリ三重水素化塩化エチレン
↓	ポリ四フッ化エチレン
-	

5.1.1.2 誘導帯電

誘導帯電は、名のごとく誘導（静電誘導）により起こる現象である。

図5.1-1 に示すように、帯電体が金属などの導体に接近したとき、導体の中にある電子は、帯電体が+のときには引き寄せられ、帯電体が-のときには押しやられ、導体の対向表面に逆極性の電荷が現れる。

この状態で導体を1回接地すると、押しやられたほうの電荷だけアースに逃げてしまい、帯電体に引き寄せられていた電荷は導体に残ったままとなる（帯電体が+帯電の場合は、接地することによりアースから-電荷が流れ込む。）。このように導体の場合には、帯電体の接近→導体接地、という操作をすることで導体上に帯電状態（正味電荷(net charge)の過剰）を作り出すことができる。

なお、接地する前の段階、すなわち帯電体が近づいて静電誘導現象が起こっている状態（正味電荷は±0）でも帯電したものとして扱っている。

図5.1-1 で導体を絶縁体に換えた場合は、図5.1-2 に示すように、帯電体が近づいても絶縁体の中を電子は移動できない。

しかし、吸引力は働くので、絶縁体内の電荷は変位した状態になる。この状態を全体としてみると、絶縁体の両端には電荷が現れているので、図5.1-1 と同じような形になっている。この状態を「分極」と呼んでいる。すなわち、絶縁体における静電誘導は、分極になる。

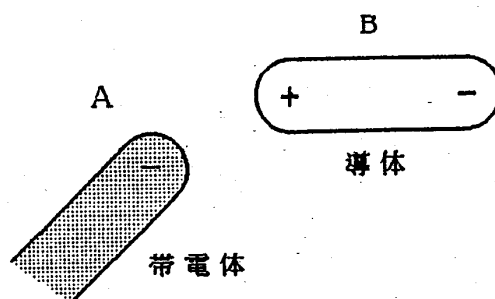


図5.1-1 静電誘導

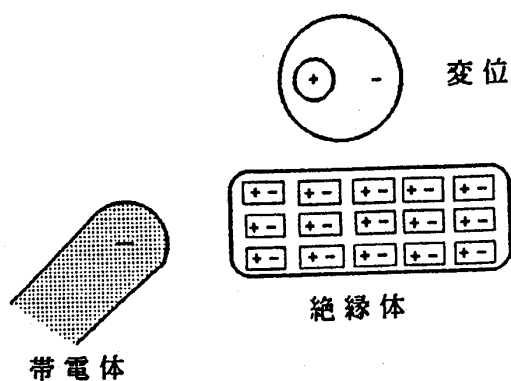


図5.1-2 分極

5.1.1.3 コロナ帯電

針対平板電極のように著しく不平等な電界を形成するような状態において電圧を印加すると、針の先端には静電誘導で電荷が集まってくる。狭い場所に多くの電荷が集まるので針先の電荷密度は極端に高くなる。この状態を電界強度が強いといい、電界の強さがある限度を越すと空気分子が電離（電子が分子の外まで引き出され、空気がイオン化する。）され、絶縁破壊の状態になる。ただし、電界が強いのは針先の近傍だけで、遠ざかるに従い電界は急激に低下するので、絶縁破壊の範囲は局部だけとなる。この放電現象を「コロナ放電」と呼んでいる。

ここで作られた正・負のイオンのうち、針と反対極性のイオンは、針電極に吸引される。イオンが針電極に到達したとき、電極から逆極性電荷が供給され元の分子に戻る。針と同極性のイオンは、反発され平板電極に向かって移動するので、針先からイオンが飛び出していくように見える（図5.1-3 参照）。

このイオンの流れの中に物質を置けば、イオンがこの物質に付着するので、帯電することになる。このような帯電のさせかたを「コロナ帯電」と呼んでいる。

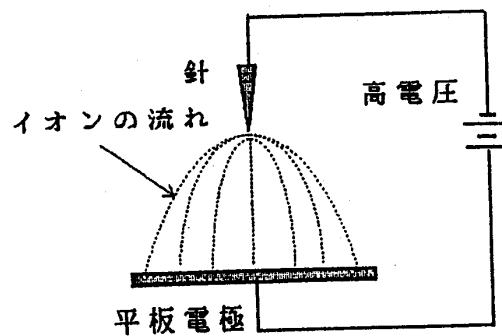


図5.1-3 コロナ放電

5.1.2 電界と電位

(1) 電気力線

帯電体は、周囲に電気の力が作用する場をつくり、その場を電界又は電場といっている。この電界の様子を仮想線で表現したものが電気力線である。電気力線は、密度が高いほど電界が強いことを表している。

(2) 電界の強さ

電界の中に単位量の電荷を持ち込むとクーロンの法則に従って力を受ける。この力の大きさを電界の強さといい、次の式で表される。

$$E = K \frac{Q}{r^2} \quad \dots \dots \text{式5.1-1}$$

ここに、E： 電界の強さ [N/C=V/m]

$$K： \text{比例定数} = \frac{1}{4\pi\epsilon}$$

ϵ ：誘電率 [F/m=C/(V/m)]

Q ：電荷 [C]

r ：電荷からの距離 [m]

(受ける力が大きいほど「電界強い」とか「電界が高い」という。)

(3) 電位

電界の中に持ち込んだ単位量の電荷は、式5.1-1の力を受けるが、この力に逆らって距離 r だけ電荷を動かすと「仕事」をすることになる。この仕事量 [J/C] をボルト [V] と名付けており、次の式で表される。

$$V = E \cdot r = K \frac{Q}{r} \quad [V] \quad \dots \dots \text{式5.1-2}$$

(電界は、力の場になっているので外部に仕事をする能力を持っており、電界内のある位置での外部に仕事ができる量が、その位置の電位である。)

5.1.3 電荷の再分布と電界緩和

一般に絶縁材料は、均一に帯電することは少なく、島状に帯電し帯電模様を形成する。島状帯電においては、帯電部分の実効面積が非常に小さいため、電位の分布は図5.1-4(a)に示すように帯電している部分で高い値を示す。同図(b)のように導体を密接させると導体の内部で静電誘導により電荷が移動する。

導体上ではどの点でも電位は一定であるから、全体として見た場合、導体の全面積に電荷が広がったのと同じ効果が得られる。つまり、電荷密度が下がると電界が弱まり、電位は低下する。これを電界緩和効果又は導体近接効果と呼ぶこともある。

更に、図5.1-4(c)のように導体を接地すると、帯電電荷と同極性の電荷が導体上から消滅するので、全体としての帯電はなくなる。しかし、ミクロに見れば正と負の電荷が至近距離で対向しており、真の意味で帯電が消滅したことになる。導体を引き離せば、元の帯電が顕在化する（引き離しのとき新たに電荷の発生・消滅がないとする。）。

正・負の電荷が帯電島を形成している場合は、図5.1-4(d)のように導体内で（量的に）打消し合うかたちとなり、外部に現れるのは差分だけとなる。

このように帯電体に導体を密着させたり、その導体を接地することにより導体内を電荷が移動し別の安定状態になることを電荷の再分布という。

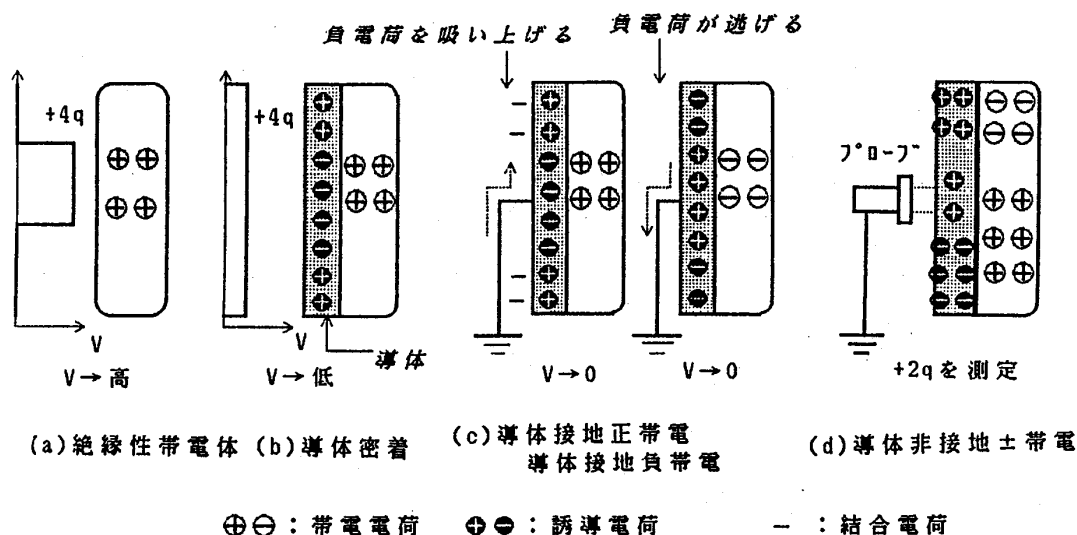


図5.1-4 電荷の再分布

5.1.4 電荷の再分布と電気抵抗

再分布するとき、電荷は物質中を移動する。電荷の単位時間における移動量（電流）は、物質の電気抵抗により違ってくる。したがって、電荷の再分布（電荷の大地漏洩・拡散を含む。）に要する時間は、抵抗値に依存する。

帯電体から電荷が拡散し電位が減衰する様子は、図5.1-5のようにコンデンサと抵抗器の直列回路で説明され、時間 t の関数で次のとおり表される。

$$V = V_0 \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) \quad \dots\dots\dots \text{式5.1-3}$$

ここに、 C ：静電容量〔F〕……電荷を蓄積する能力で、
帯電部分の面積に比例する。

R ：直列抵抗〔 Ω 〕……電荷の移動経路の物質の電気抵抗値

V_0 ：コンデンサの初期電圧〔V〕

V ： t 秒後のコンデンサの電圧〔V〕

式5.1-3のように RC と電荷の減衰時間（再分布） t の間には重要な関係があり、 $RC = t$ となる時間を時定数 τ と呼んでいる。このとき、式5.1-3は、 $V/V_0 = \exp(-1) = 0.37$ となるから、 τ は、コンデンサに蓄えられた電荷又はコンデンサの端子電圧が初期値の37%まで低下する時間である。

半減時間（半減期） $t_{0.5}$ 及び90%減衰時間 $t_{0.1}$ は、次のようになる。

$$t_{0.5} = RC \ln 2 = 0.7 RC \quad \dots\dots\dots \text{式5.1-4}$$

$$t_{0.1} = RC \ln 10 = 2.3 RC \quad \dots\dots\dots \text{式5.1-5}$$

一例として、人体帯電減衰のために必要な人体接地抵抗を算出する。人間がある動作をしたことで帯電し、次の動作までの間に電荷を90%減衰させる場合、1動作の間隔を0.5秒、人体静電容量を200pFとして、式5.1-5を使用し、 $R = \frac{0.5}{2.3 \times 200 \times 10^{-12}} = 1.1 \times 10^8 \Omega$ が得られる。 $1.1 \times 10^8 \Omega$ の抵抗で人体が接地されれば、人体電位は、0.5秒で $\frac{1}{10}$ に低下する。

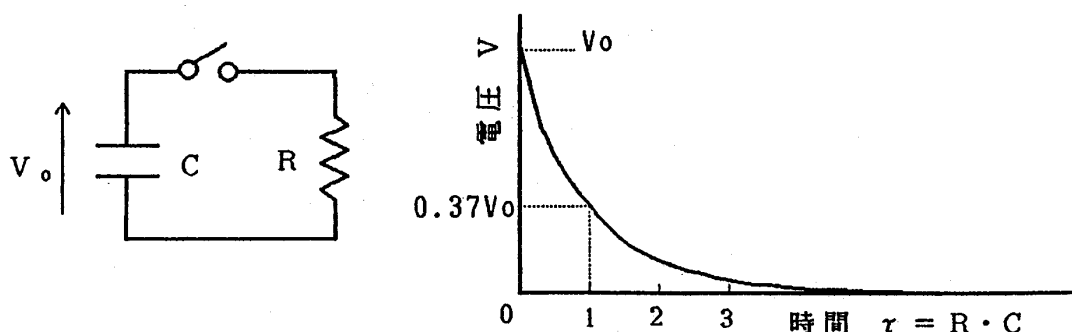


図5.1-5 静電気容量からの電荷漏洩

5.1.5 電気抵抗と抵抗率

図5.1-6のように物質に電圧 V を印加すると、物質の特性に応じた電流 I が流れる。電圧と電流の比を抵抗 R といい、その単位をオーム $[\Omega]$ という。

この電流を詳細に見ると、物質内部を流れる電流（体積電流） I_v と、物質の表面を流れる電流（表面電流） I_s に分けられる。印加電圧と体積電流の比を体積抵抗 R_v 、表面電流との比を表面抵抗 R_s という。

一般の材料では、電圧と電流の関係は比例関係にあり、オームの法則といわれている。

体積抵抗は、材料の長さ l に比例し、断面積 S に反比例する。

$$\text{体積抵抗} \quad R_v = \frac{V}{I_v} = \rho_v \frac{l}{S} \quad [\Omega] \quad \dots\dots \text{式5.1-6}$$

$$\text{体積抵抗率} \quad \rho_v = \frac{S}{l} R_v \quad [\Omega \cdot \text{cm} \text{ 又は } \Omega \cdot \text{m}] \quad \dots\dots \text{式5.1-7}$$

同様に、表面抵抗 R_s は、長さ l に比例し、幅 H に反比例する。

$$\text{表面抵抗} \quad R_s = \frac{V}{I_s} = \rho_s \frac{l}{H} \quad [\Omega] \quad \dots\dots \text{式5.1-8}$$

$$\text{表面抵抗率} \quad \rho_s = \frac{H}{l} R_s \quad [\Omega / \text{sq}] \quad \dots\dots \text{式5.1-9}$$

式5.1-7、-9 で分母、分子を同じ数値にした場合、例えば $l = H = \text{厚さ} = 1 \text{ cm}$ とすれば $S = 1 \text{ cm}^2$ であるから、 $\rho_v = R_v$ 、 $\rho_s = R_s$ となる。

表面抵抗率の場合、 $l = H$ であることは、寸法の単位に関係なく正方形という意味になり、表面抵抗率の単位は Ω だけとなる。そこで単なる抵抗値 $R [\Omega]$ と表面抵抗率 $\rho_s [\Omega]$ を区別するため、表面抵抗率を $[\Omega / \text{sq}]$ 又は $[\Omega / \square]$ のように記述することが一般によく行われている。

なお、抵抗率は、材料が均質等方性であることを前提に定義されている。

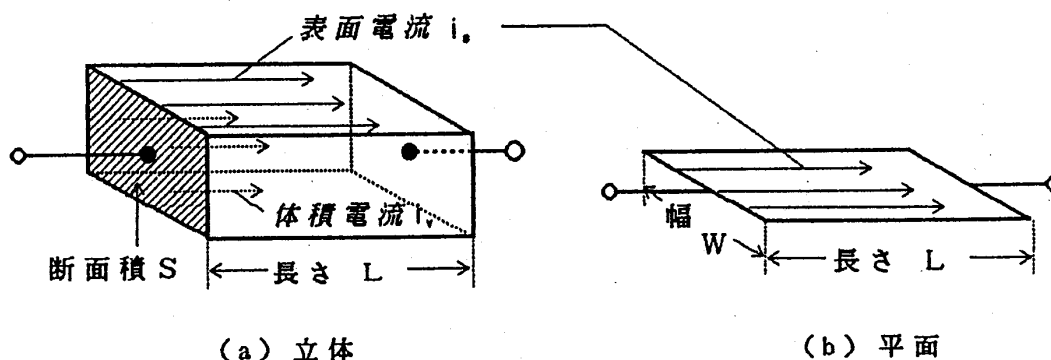


図5.1-6 物体を流れる電流

5.1.6 放電現象と絶縁耐力

5.1.1.3項で示すコロナ放電は、気体中の放電現象の中では比較的穏やかな部類に属している。一方、「火花放電」又は「アーク放電」は、激しい放電であり、静電気放電のような放電電荷量がわずかなものであっても、極く短時間に全電荷を放出するもので、放電電流の瞬時値は大きくなる。一般にESDと呼ばれる静電気放電は、この種のものを指している。

球面ギャップや平行平板電極のように、電気力線の局所集中が起こらない電極構成においては、平等電界とみなされる。この場合には、コロナ放電は起きず、火花放電となる（図5.1-7参照）。

空気の絶縁耐力は、電極間の距離と気体圧力の積の関数になる。気体圧力と絶縁破壊電圧の関係をパッシェン電圧又はパッシェン則という。

パッシェン電圧 V_s は、図5.1-8に示すように最低値 V_{smin} を有するが、空気の場合、 V_{smin} より右の範囲については、次式のように表される。

$$V_s = 23.85 \delta d \left(1 + \frac{0.329}{\sqrt{\delta d}} \right) \quad [\text{kV}] \quad \cdots \text{式5.1-12}$$

$$\text{ここに } \delta : \text{相対空気密度} = \frac{51.5p}{273+t}$$

p : 空気圧力 [Pa]

t : 温度 [°C]

d : 電極間距離 [cm]

なお、固体絶縁材料の絶縁耐力は、大気の10～100倍に達するのが普通である。

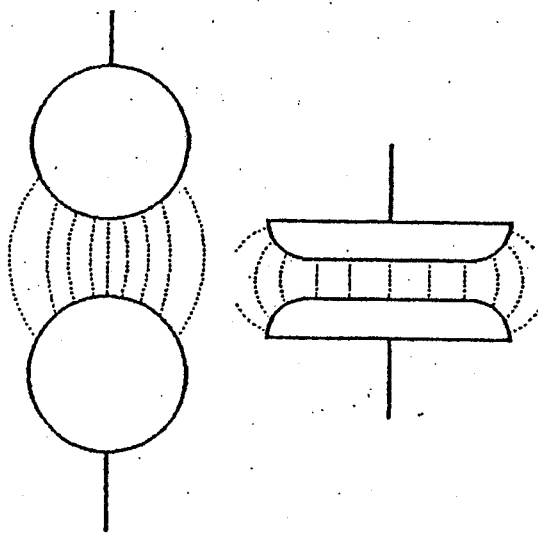


図5.1-7 平等電界

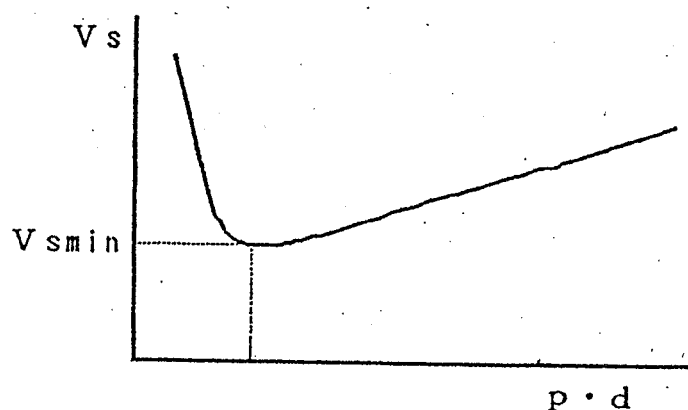


図5.1-8 パッシェン電圧

5.1.7 静電気放電(ESD)

図5.1-9に示すように、絶縁された導体Aが接地導体Bとの間に微小ギャップ g だけ離れて存在している。ここに帯電体Cが接近した場合、導体Aは、誘導帯電し、ギャップ間に電位差が生じる（このとき導体A内の正味の電荷量は、 ± 0 ）。ギャップ間の電位差が絶縁破壊電圧に達したとき放電が起り、誘導電荷の一部が消滅し、放電が消えた後Aの絶縁は回復する。

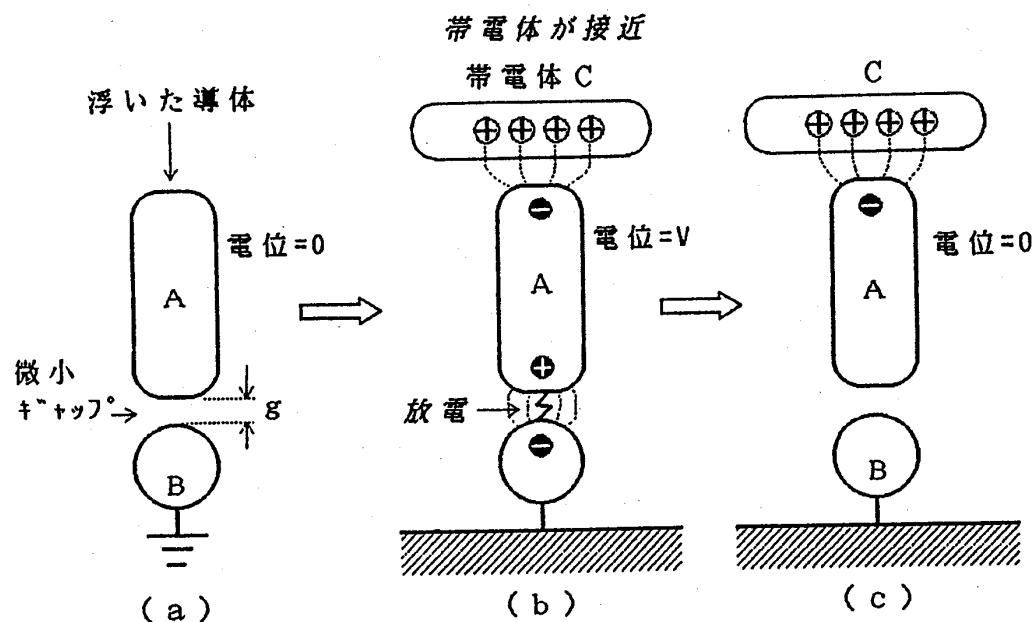
Aは、+電荷が消滅しているので、-電荷が過剰になっている。この間、帯電体Cは電荷の出入りがないので、帯電体C自体は除電されていない。Cが遠ざかれば導体Aと接地導体Bとの電位差は再度上昇し、ギャップの条件によっては2度目の放電が起る。

図5.1-10のように絶縁された導体が2つ以上存在し、静電誘導により電位が V_1 と V_2 になったとすると、A1とA2間の電位差 V_g は、 $V_g = V_1 - V_2$ である。2つの導体間に微小ギャップが形成されていて V_g がギャップの絶縁破壊電圧に達したとき放電が起る。

このように帯電体と接地導体との間に絶縁された導体A（又はA1、A2）が介在し、相互の「動き」が組み合わされると、帯電体の接近→電位上昇→放電発生→放電後の電荷移動など、複雑な電荷の再分布が起る。

静電誘導現象においては、誘導によって生じた電荷の性格に差があることが大きな特長である。すなわち、帯電体に引き寄せられた電荷は拘束性であるため、放電や漏洩・拡散ができない。一方、非拘束性の電荷（静電誘導で現れた電荷の内、帯電体と同極性の電荷）は、逃避性の強い電荷であるから、再分布のために移動する電荷になる。静電気放電が起きるときの電荷も非拘束性電荷である。

また、非拘束性電荷が絶縁体と接していると、電荷が絶縁体内に注入されるので、さらに複雑な静電気現象を生じる可能性がでてくる。例えば、図5.1-9、図5.1-10のギャップ部分が絶縁体で満たされている場合、導体から絶縁体に電荷が注入される。その結果、導体A、A1、A2には正味の電荷が残ることになる。電荷注入後に帯電体を取り除かれたり、外部回路で短絡されたり、接地されることが起った場合、絶縁体の極く薄い層に電界（注入電荷による電界）が形成される。もし、この電界が絶縁耐力を上回ったとしたら絶縁層の一部分が破壊されることになる。



放電後、帯電体 C と導体 A 間の電位差は上昇する。
C の電荷は消滅しない。

図 5.1-9 静電誘導と放電

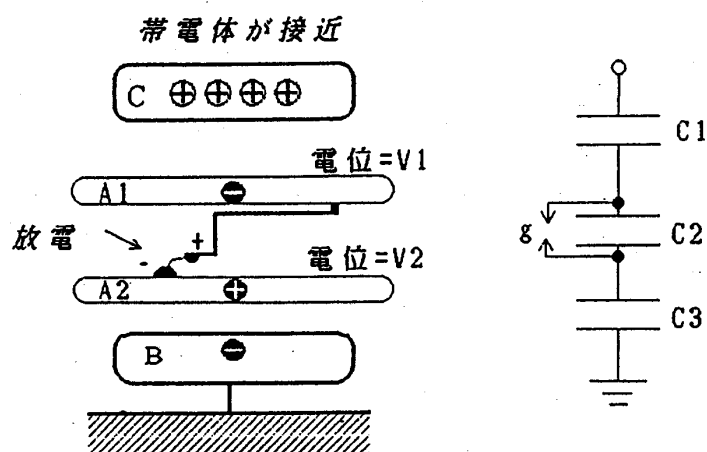


図 5.1-10 絶縁導体間の静電気放電

5.2 ESD感受性

部品、組立品及び装置に対するESD感受性の技術データとして、ESD故障のタイプ、ESDS部品のタイプ、ESDに関連した故障メカニズム及びESDに対して感受性がある部品構成素子について示し、ESDについて検討する際のガイドライン情報とする。

5.2.1 ESDS部品、組立品及び装置の分類

MIL-STD-1686A では、ESDS部品、組立品及び装置をESDに対する感受性に応じて、次の3クラスに分類している。

- クラス1：ESD電圧 0～ 1,999 V で損傷するもの
- クラス2：ESD電圧 2,000～ 3,999 V で損傷するもの
- クラス3：ESD電圧 4,000～15,999 V で損傷するもの

（備考）ここでは上記の電圧が16,000V 以上のものは、静電気放電に対する感受性を考慮しなくてもよいものとして取り扱っている。

MIL-STD-1686Aでは、クラス1及び2の部品、組立品及び装置に対してESD管理プログラムを要求している。ただし、ミッション上クリティカル又はエッセンシャルとして契約により指定された場合、クラス3の部品、組立品及び装置に対しても、ESD管理プログラムを適用することを要求している。

MIL-STD-1686A のクラス分けより細かく分類してもよい。細分化する電圧範囲は任意に設定できるが、MIL-STD-1686A との整合性を確保できるように、クラス1、2及び3をさらに細分化することを推奨する。

5.2.1.1 部品の分類

多くの部品は、ESD現象が発生したとき又は静電界にさらされたとき損傷を受ける。ESDS部品は、電氣的接続や接地の有無にかかわらずESD現象によって破壊される可能性がある。組立品や装置に組み込まれた場合でも、接地、電源又は信号源に接続する端子を有する部品は、ESDによって損傷を受けることがある。

ESDS部品には、表5.2-1（MIL-STD-1686A appendix B による。）に示すタイプのものがある。表5.2-1に示すESD感受性のクラス分けは、MIL-STD-1686A appendix A の試験による結果に基づいている。

なお、MIL-STD-1686Aでは、部品のESD感受性を次の順序で確認することとしている。

- (1) 部品仕様書
- (2) Reliability Analysis Center (RAC) ESD Sensitive Items List (ESDSIL) の Appendix A の試験データによるESD 感受性
- (3) MIL-STD-1686A appendix B (表5.2-1 参照)
- (4) 試験による確認 (MIL-STD-1686A appendix A 参照)

これは、既取得ESDSデータの活用により、費用のかかる試験の重複を避けることを意図している。部品規格である MIL-M-38510 と管理規格である MIL-STD-1686A とともに、ESD試験として MIL-STD-883 を適用し、同じにしている。MIL-M-38510 の認定部品リスト (QPL) 又は Reliability Analysis Center (RAC) ESD Sensitive Items List(ESDSIL)に載っている MIL-M-38510 ESD感受性データは、ESD管理プログラムを実行する上で必要となる集積回路の分類データを提供する。分類化のための試験が費用に対し効率的でない場合、部品を MIL-STD-1686A appendix B に従って分類してもよい。MIL-M-38510 以外の部品に対して試験データが必要な場合には、MIL-STD-1686A appendix A を適用する。RAC のVZAP-90 データベースを分類に利用する場合には、試験回路が MIL-STD-1686A appendix A に規定する試験回路に適合しているか又は契約部門において承認された試験方法に合致していることが必要である。ESD感受性レベルが米軍部品仕様書で規定されている場合には、それによってクラス分けを行うこともできる。

なお、NASDA認定部品のESD感受性試験データは、部品適用データシート (NASDA-ADS) に記載されている。

5.2.1.2 組立品及び装置の分類

組立品及び装置のESD感受性に対する分類は、それらに組み込まれている部品のESD感受性に従ったものとなる。通常、組立品及び装置は、それらに組み込まれている部品のうち最も敏感な部品のクラスとして分類される。MIL-STD-1686A のESDに対する保護設計要求を満足するような保護回路が組立品又は装置に組み込まれている場合には、これらの組立品又は装置は、設計によって達成される電圧保護レベルによって分類される。感受性クラス変更のためには、少なくとも、詳細な回路解析を実施することが必要である。

なお、組立品及び装置に保護回路を組み込んだとしても、強い静電界又は帯電物との直接接触によって誘起されるESDによって損傷を受けやすいので注意を要する。

表5.2-1 ESDS部品リスト (1/3)
 クラス1 (感受性電圧：0～1,999 V)

NO	該当する部品のタイプ
1	マイクロ波素子 (周波数で 1 GHz を超えるショットキバリアダイオード、点接触ダイオード及び他の検波ダイオード)
2	MOS FET
3	SAW (Surface Acoustic Wave) 素子
4	JFET (Junction Field Effect Transistor)
5	CCD (Charged Coupled Device)
6	高精度の電圧レギュレート用ダイオード (電圧レギュレート<0.5%)
7	オペアンプ
8	フィルム抵抗
9	IC
10	クラス1部品を使用したハイブリッド品
11	VHSIC (Very High Speed IC)
12	SCR (Silicon Controlled Rectifier) : $I_o < 0.175 \text{ A at } 100^\circ\text{C}$

表5.2-1 ESDS部品リスト (2/3)
 クラス2 (感受性電圧：2,000～3,999 V)

NO	該当する部品のタイプ
1	MIL-STD-1686A appendix A の試験でクラス2と判定された素子又は IC : ・ MOS FET ・ JFET (Junction Field Effect Transistor) ・ オペアンプ ・ IC ・ VHSIC (Very High Speed IC)
2	高精度のネットワーク抵抗 (RZタイプ)
3	クラス2部品を使用したハイブリッド品
4	低電力バイポーラトランジスタ : $P_T < 100 \text{ mW}$ 、 $I_C < 100 \text{ mA}$

表5.2-1 ESDS部品リスト (3/3)
 クラス3 (感受性電圧：4,000～15,999 V)

NO	該当する部品のタイプ
1	MIL-STD-1686A appendix A の試験でクラス3と判定された素子又は IC : ・ MOS FET ・ JFET (Junction Field Effect Transistor) ・ オペアンプ ・ IC ・ VHSIC (Very High Speed IC)
2	クラス1とクラス2に含まれない他の全てのIC
3	小信号ダイオード： $P_T < 1 \text{ W}$ 又は $I_o < 1 \text{ A}$
4	汎用シリコン整流器
5	SCR(Silicon Controlled Rectifier)： $I_o > 0.175 \text{ A}$
6	低電力バイポーラトランジスタ： $350 \text{ mW} > P_T > 100 \text{ mW}$ 、 $400 \text{ mA} > I_c > 100 \text{ mA}$
7	オプトエレクトロニクス素子 (LED、フォトトランジスタ、フォトカプラ)
8	チップ抵抗
9	クラス3部品を使用したハイブリッド品
10	圧電素子

5.2.2 ESD故障のタイプ

ESDは、電子部品のハード故障以外に、間欠故障又はアプセット故障を引き起こすことがある。間欠故障又はアプセット故障は、LSI記憶素子のような部品に発生する。このような故障は、装置が動作しているときに発生し、情報の欠落又は機能の一時的なひずみといった現象としてよく現れる。この場合、はっきりとしたハードウェア故障は発生せず、ESD終了後又はデジタル装置によっては情報の再入力後、正常な動作が再開される。ESDによるアプセット故障を非常に受けやすい部品としては、状態の切り換えがわずかなエネルギーで済むか、又は高インピーダンスラインでの電圧変化がわずかで済むロジック素子群がある。

ESDに弱い部品タイプには、NMOS、PMOS、CMOS、低電力TTL などがある。高インピーダンス及び高利得のリニア回路と RF増幅器及びその他の RF部品の組み合わせは、装置レベルでも感受性が高い。

RFI耐性用の設計によってESDの高圧火花放電に起因する損傷から部品を保護することができる。ESDの高圧火花放電に対し感受性のある部品を装置レベルで保護するには、良好な RFI/EMC設計、バスのバッファリング、バスの適正な接続、バス導体のシールド及び装置キャビネット内部への侵入を回避する静電気しゃへいが必要である。

(1) アプセット故障

アプセット故障は、装置の近くのESD火花による電氣的ノイズで生じることがある。この電氣的ノイズは、伝導又は放射によって装置に混入する。ESD火花の近くでは、ESD経路のインピーダンスに応じて、容量性又は誘導性結合が支配的である。ESD火花から離れた所では、電磁界結合が存在する。

ESDによって印加される電圧及び／又は電流が電子回路の信号レベルを越える場合、装置の動作にアプセットが生じる。高インピーダンスの回路においては、信号が電圧を基準としているため、容量結合が支配的となり、ESDによって印加される電圧が主たる問題となる。これに対し、低インピーダンスの回路においては、信号が電流を基準としているため、誘導性結合が支配的となり、ESDによって印加される電流が問題を引き起こす。

装置に損傷を与える電圧や電流のレベルは、アプセットを引き起こすに必要な電圧や電流のレベルの10～100倍であるため、装置の損傷は、ESD火花が直接回路に印加されるような伝導性結合の場合に発生する。したがって、放射性結合は、通常、アプセットのみを引き起こす。

(2) ハード故障

アプセット故障が装置作動中に発生するのに対し、ハード（破局：Catastrophic）故障はいつでも発生し得る。ハードウェアのESD故障は、人体又は物体からの放電、静電界、高電圧火花放電などのESDによって生じる電子部品の電氣的過負荷に起因するといえる。ESDを多数回受けて破壊するような場合もある。破壊寸前までの損傷を受けたESDS部品では、動作上のストレスが加わることによって劣化が進み最終的に破局故障に至ることがある。ハードウェアのESD故障のなかには、アプセット故障と誤解されるような故障がある。例えば、ESDによってSiO₂誘電体層を貫通したアルミニウムによって短絡異常が生じた後、その短絡経路に流れた大きな電流によってアルミニウムが蒸発し短絡がしゃ断され、作動が正常に戻る可能性がある。この故障は、装置の作動中に発生した場合、アプセット故障と混同されることがあるが、ESDによる損傷は、その部分の作動寿命を縮める恐れのある潜在的欠陥となる。

5.2.3 故障メカニズム

ESD関連の主な故障メカニズムとしては、一般に次のものがあげられる。

- (a) 熱的 2 次降伏 (thermal secondary breakdown)
- (b) 金属溶融 (metallization melt)
- (c) 絶縁膜破壊 (dielectric breakdown)
- (d) アーク放電 (Gaseous Arc Discharge)
- (e) 表面破壊 (surface breakdown)
- (f) バルク破壊 (bulk breakdown)

(a)、(b)及び(f)の故障メカニズムは、エネルギー依存性があり、(c)、(d)及び(e)の故障メカニズムは、電圧依存性がある。上記の故障メカニズムすべては、マイクロエレクトロニクスデバイスと個別半導体デバイスで起きるものであり、(b)及び(d)が皮膜抵抗で、(f)が圧電素子で確認されている。これらの破局故障メカニズムの他に、未封止チップや MOS LSI チップでは、リッドと基板間のパッケージ内のアーク放電（故障メカニズム (d)）の二次影響として一時的な故障が起きている。

(1) 熱的 2 次降伏

半導体材料の熱時定数がESDパルスの遷移時間に比べ大きいいため、電力消費領域からの熱拡散が少なく温度勾配が大きくなる。接合部温度が局部的材料融点に近づくことにより、次にホットスポットが生じ、溶融により接合部が短絡する。この現象を熱的 2 次降伏といい、単に 2 次降伏 (Second Breakdown)ともいう。バイポーラ (P-N) 接合において接合部の溶融が起きるには、接合部での十分な電力消費が必要である。逆バイアス条件では、印加された電力の大半は接合領域に吸収され、バルク部での消費は最小限に押さえられる。順バイアス条件では、接合部は、低い抵抗を示す。大電流が流れるにもかかわらず、大半の電力は、バルク部で消費される。従って、順バイアス条件では、接合部故障を引き起こすには、逆バイアス条件に比べより大きい電力が要求される。大半のトランジスタの場合、エミッタ・ベース間の接合部は、コレクタ・ベース間の接合部より低い電流値で劣化する。これは、通常、エミッタ・ベース間接合部の面積が回路の他のいずれの接合部より小さいことによる。極性が逆の信号の場合、電圧が接合の降伏電圧を越えるまではごくわずかな電流しか流れない。降伏に達すると、電流が増大し、ホットスポットの発生と電流集中による接合部の過熱が生じる。2 次降伏点に達すると、抵抗率の減少によって電流が急速に増大し、接合部を破壊する溶融経路が形成される。この接合部の故障モードは、電力依存性である。

(2) 金属溶融

ESDによる過渡電流により、金属配線又はボンディングワイヤを溶融させるほどに温度上昇が起きることがある。種々の材料について、面積と電流の持続時間の関数として故障を発生させる電流を計算できる理論的なモデルが存在する。そのモデルは、配線断面積が一定であるという仮定に基づいている。実際には、一定断面積であることは少なく、断面積が小さくなるところで電流が高くなり、ホットスポットが金属配線中に発生することがある。このタイプの故障は、酸化膜の段差部分を横切るところのように金属配線の断面積が小さくなる箇所で発生する。この故障は、接合部に分流が生じるため、低周波より高周波のほうがより高い電力を必要とする。200～500MHz未満では、接合容量は電流を接合部の周囲に分流し、電流に対し依然として高いインピーダンスを示す。

(3) 絶縁膜破壊

絶縁膜にかかる電位差が固有値以上になると、その絶縁膜は破壊する。この破損は、エネルギーより電圧に依存するものである。パルスエネルギーによっては、部品の全体又は部分的に劣化が生じることがある。例えば、パルスエネルギーが電極材料を溶断するほど強くない場合には、即破局的部品破壊とはならないが、破壊電圧の低下やリーク電流の増加を起こすことが多い。この場合は、継続使用によって破局的破壊に至る潜在的欠陥を内在することになる。絶縁膜層の破壊電圧は、絶縁膜材のなだれ現象に時間を要するためパルス立ち上がり時間に関係する。

(4) アーク放電

薄膜電極が近接して配置され、保護膜形成処理されてない部品の場合には、アーク放電によって性能低下が起こり得る。アーク放電状態では、一般に電極間の空間から離れたところで気化と金属移動が生じる。溶融金属は、電極線に沿って流れるか又は断線し、電極間領域内に流れることはない。電極間領域に金属の小球が生じることがあるが、ブリッジを形成するほど多くは発生しない。このため、薄膜電極間が短絡することは考えられていない。金属薄膜の厚さが、約4000Åで電極間距離が3.0μmの表面弾性波（SAW）バンドパスフィルタで、ESDによる動作低下が発生したことがある。

13500Å程度の厚膜金属配線を使用する場合は、通常50μmのアークギャップで、このアーク放電を起こさせ、入力される高圧スパイクを消費することで内部を保護している。

保護膜形成処理の有無にかかわらず、反転に対して敏感な接合や界面を有する LSI及びメモリ IC においては、パッケージ内部でのアーク放電が正イオンをチップ上に堆積させ、表面反転による不良発生を引き起こす。このような現象は、特に非導電性リッドの部品に発生することが報告されている。このような現象の特別な場合として、石英のリッドを通した紫外線により正電荷を中和することによって故障が回復する UV EPROM がある。

(5) 表面破壊

垂直接合の場合、表面破壊は、表面での接合の空間電荷層が狭まることによって生じる局部的電子なだれ増幅過程として説明される。表面破壊は、形状、ドーピングレベル、格子の不連続性、勾配の乱れなど数々の不確定要素に左右されるため、表面破壊の際、消費される過渡的電力を予測することは困難である。表面破壊の破壊メカニズムによって、接合部の周囲に大きな漏れ電流パスが生じ接合部の動作が無効となる。この効果は、絶縁膜破壊のような最も電圧に敏感な効果と同様、パルスの立ち上がり時間に左右され、通常は熱的故障が発生する前に電圧が表面降伏電圧のしきい値を越えたとき発生する。表面に関連した故障のもう一つのモードは、絶縁膜周辺でのアーク放電である。これは、金属配線間のアーク放電に似ているが、この場合は金属配線と半導体との間で放電が起こる点で異なっている。

(6) バルク破壊

バルク破壊は、接合部領域での局部的な高温により接合部のパラメータが変化することをいう。高温によって金属配線の合金化又は不純物の拡散が生じ、その結果、接合部のパラメータが大幅に変化する。これは、熱的2次降伏の発生により、接合部に抵抗を形成することが多い。

5.2.4 ESDに敏感な部品の構成素子

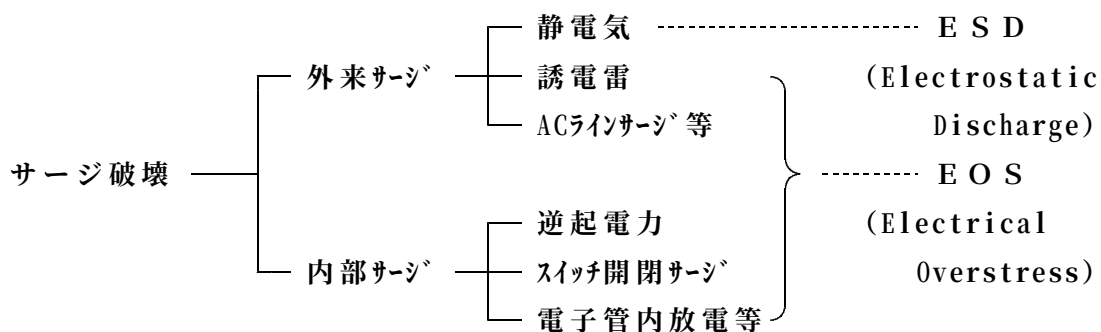
ESDに対する耐性は、部品によって異なる。これは、部品の設計が異なること及び部品に使用される構成素子が異なることに起因する。ESDに対し敏感な構成素子、その構成素子が使用されている部品の種類及び関連する故障メカニズムとモードの概要を表5.2-2に示す。

表5.2-2 ESDに敏感な部品の構成素子

構成素子	部品の種類	故障メカニズム	故障モード
MOS構造	MOSFET (ディスクリート) MOSIC 交差金属配線のある半導体 デジタルIC (バイポーラ、MOS) リニアIC (バイポーラ、MOS) MOSコンデンサ ハイブリッドIC リニアIC	過電圧による絶縁膜破壊	短絡 (高リーク)
半導体接合	ダイオード (PN、PIN、ショットキー) バイポーラトランジスタ 接合形電界効果トランジスタ サイリスタ バイポーラIC (デジタル、リニア) 入力保護回路 (ディスクリートMOSFET、 MOSIC)	過大なエネルギーや熱による2次降伏、マイクロプラズマによるミクロな領域での拡散 シリコンとアルミ間の拡散による電流フィラメントの成長 (エレクトロマイグレーション)	短絡 (ダイオードやトランジスタの不作動)
フィルム抵抗	ハイブリッドIC 厚膜抵抗 薄膜抵抗 モノシリックIC 薄膜抵抗 封止型皮膜抵抗	電圧依存型の絶縁破壊による電流パスの生成 (厚膜のみ) エネルギー依存型のジュール熱による微小電流パスの破断 (厚膜を除く)	抵抗値変動
金属配線	ハイブリッドIC モノシリックIC メッシュ形トランジスタ	エネルギー依存型のジュール熱による金属配線の溶断	開放
非導電性リッドのパッシベイテッド電界効果構造	石英やセラミックなどの非導電性材料のパッケージリッドに封止されたLSIやメモリーIC、特にUVEPROM	ESDによる表面電荷の蓄積 (絶縁層への電荷注入) に起因する界面での反転層の形成やしきい値電圧の変動	動作劣化
圧電素子	水晶発信器 表面弾性波デバイス	過度の電圧印加時の機械的な力の発生による水晶の破壊	動作劣化
近接配置電極	パッシベート処理されてない薄膜電極の集積回路及びSAWデバイス	アーク放電による電極金属の溶融	動作劣化

表5.2-2の〔注記〕

半導体部品やIC等のサージ破壊は静電気が原因となるもの（ESD）が多いが、その他に下記に示すように、誘導雷やスイッチ開閉時のサージ、誘導負荷による逆起電力などの電氣的オーバーストレス（EOS）が原因となるものがある。



これらの電氣的オーバーストレスによる破壊は、その破壊跡が静電破壊による場合と類似して区別することが難しい場合があるが、一般的には静電破壊に比べて頻度が少なく、又エネルギーが大きい点で異なる。

5.2.5 MOS構造

MOS構造は、薄い絶縁膜に分離された導体と半導体から成る。この構造は、一般的には、金属(Metal)・絶縁物(Insulator)・半導体(Semiconductor又はSilicon)の頭文字を取りMISと呼ばれている。絶縁体として酸化物(Oxide)がよく用いられるため、MOS と呼ばれることが多い。この構成素子区分には、MNOS (金属・窒化膜(Nitride)・酸化膜・半導体)などの二層絶縁膜構造のものも含む。

(1) 部品の種類

MOSICには、NMOS (NチャネルMOS)、PMOS (PチャネルMOS) 及び CMOS (相補型MOS) がある。メタルゲートとシリコンゲートの2種類のゲート構造があり、さらに SOS (Silicon on Sapphire: シリコンオンサファイア)の構造のものがある。このような MOS デバイスの耐性の相違は、酸化膜ゲート又は酸化膜・窒化膜ゲートの絶縁破壊強度と外部端子に接続される入力保護回路に依存する。ゲート絶縁膜の絶縁破壊強度は、その厚さによって大きく左右される。通常、ゲート絶縁膜厚1100Å、絶縁破壊強度 $1 \times 10^6 \text{ V/cm} \sim 1 \times 10^7 \text{ V/cm}$ であり、80~100V 破壊することになる。さらに、溝の縁端で高電界のVMOS (垂直溝MOS) やゲート絶縁膜の厚さが薄いHMOS (高密度MOS) などの新しいデバイスでは、破壊電圧が更に低く (25~80 V) なり、入力保護回路の設計に一層の注意が必要となる。

バイポーラリニアICのオペアンプには、モノリシックチップ上にコンデンサを組み込んだものがある。このコンデンサは、MOS構造であり、ESDによる絶縁膜破壊耐性が低い。コンデンサが外部端子と外見上直接接続されていない741などのオペアンプは、コンデンサが外部端子間に直接接続されているHA2520より耐性が高い。

ハイブリッドICには、ESDの損傷を受易い絶縁膜を有するMOS構造のチップコンデンサが組み込まれていることがある。しかし、ハイブリッドICでは、ESD耐性があるチップコンデンサを使用できるので、MOSチップコンデンサを使用すべきではない。

多くのモノリシックICでは、絶縁物としてのフィールド酸化膜を挟む形で活性半導体領域や低抵抗半導体領域と交差する金属配線がある。このような構造は、寄生MOSトランジスタと呼ばれることがある。通常、フィールド酸化膜の厚さは、15000Åであり、破壊電圧は、約1000Vであるが、拡散のため酸化膜がエッチング除去された後、金属配線形成前に成長した酸化膜の厚さは、3000Å未満になることがある。この場合、酸化膜の厚い箇所と薄い箇所の境目で金属配線の段部の下部の縁端部で電界集中が起きるため100Vで破壊が生じる可能性がある。外部端子がそのような金属配線に直接接続されていると、ESDに対する耐性が低下する。

(2) 故障メカニズム

MOS構造の酸化膜は、その絶縁破壊電圧がESDで生じる電圧レベルより低い場合、ESDによる損傷を受けることになる。酸化膜絶縁体の破壊は、回復可能な半導体の破壊と異なり永久損傷となる。極めて短時間の過電圧印加の場合、結晶格子の損傷が発生し潜在故障となり、その後初期の破壊電圧より低い電圧で電子なだれ現象が発生し、破壊することがある。

(3) 故障モード

絶縁物を貫く穴があき、配線金属がその穴に溶け込むと、低抵抗の短絡が生じる。条件によっては、例えば4000 Å程度の特薄金属配線が存在する場合や短絡を通るエネルギーが十分大きい場合には、金属が蒸発し、短絡が無くなることがある。ただし、絶縁体には、クレーター状の穴が残る。この場合には、性能低下は生じるが、破局故障とはならない。環境によっては短絡が再び生じたり、性能が劣化し続けるという意見もある。

5.2.6 半導体接合

この構成素子区分には、PN接合、PIN接合及びショットキーバリア接合が含まれる。ESDに対するこれらの接合部の耐性は、形状、寸法、抵抗率、不純物、接合容量、熱インピーダンス、逆方向リーク電流及び逆方向降伏電圧によって異なる。順バイアス方向で接合部を破壊するためのエネルギーは、逆バイアス方向の場合に比べ一般に10倍のエネルギーを要する。リーク電流が1nA未満と低く破壊電圧が100Vを超える高い接合部の方が、リーク電流が1 Aを超え破壊電圧が30V程度のかかなり小さな接合部に比べ、かえってESDに弱いといわれている。

(1) 部品の種類

バイポーラトランジスタのエミッタ・ベース接合は、ICでも個別トランジスタでも、コレクタ・ベース接合又はコレクタ・エミッタ接合よりもESDに対して弱い。これは、逆バイアスでESDが生じた時、エミッタの側壁のエネルギー密度が高くなる寸法及び形状に主な原因がある。コレクタ・ベース接合及びコレクタ・エミッタ接合は、面積が広いため、エミッタ・ベース接合のエネルギー密度ほど高くはないが、ベース・エミッタ接合に順バイアスが加わり、エミッタ側壁での電流密度が高くなる。

高インピーダンスゲートを有する接合形電界効果トランジスタ（JFET: Junction Field Effect Transistor）は、特にESDに対して敏感である。JFETのゲート・ドレイン間リーク電流及びゲート・ソース間リーク電流は、1nA以下と極端に低く、降伏電圧は、比較的高く50Vを超える。したがって、ゲート・ドレイン間及びゲート・ソース間は、通常最もESD経路に対して敏感であるといえる。

1N5711ダイオードやTTLショットキーICなどのショットキーバリア接合は、接合層が非常に薄く、溶け込む金属が存在するため、特にESDに対し敏感である。

ESDに対し敏感であると考えられている半導体接合が必ずしも全てのダイオード、トランジスタ及びサイリスタに組み込まれているわけではない。過渡抑制ダイオード、ツェナーダイオード、電力用整流器パワートランジスタ及びパワーサイリスタには、ESDに対する感受性が鈍いものがある。ESDに対し感受性がある構成素子としての半導体接合は、ダイオード、トランジスタ及びバイポーラICだけでなく、寄生ダイオードができるMOS及びICに組み込まれた入力保護回路にもみられる。入力保護回路は、ESDによる損傷からのIC本体回路の保護が目的であるが、その大きさは、コストと性能との兼ね合いによって制限を受ける。したがって、ESDパルスのエネルギーが大きいと入力保護回路が損傷を受けることがある。

(2) 故障メカニズム

不純物を含むP型又はN型半導体のような外因性半導体の温度係数は正である。つまり、温度上昇と共に抵抗値が増大する。この特性によって、低温では電流集中及びホットスポットが生じにくい。しかし、逆バイアスモードでは、エネルギーが接合部の比較的狭い空乏層領域での比較的大きな電圧降下によって消費される。形状の影響、抵抗の局部的変動及び結晶欠陥により、接合部を通る電流分布は、完全には均一にならない。ESDが生じ、電流が接合部を流れると、空乏層領域の温度が急速に上昇し、外因性半導体が真性半導体と同じ状態となり、抵抗値が急激に減少し熱的2次降伏が生じる。

放電が急速であればあるほど温度上昇分布がより均一になり、接合部を通る電流分布もより均一になる。これは、10ns未満の短時間放電の場合、その結果生じるフィラメント状の短絡面積がそれより長時間放電した時に比べ広いことを意味する。このことは、ホットスポットが生じてても接合を貫通するほどには増大せず、低バイアス電圧では故障までには至らない。しかし、あるバイアス条件で動作を行っているときに、それ以前に形成されたホットスポット位置に局部的な高い電流密度が生じ、温度が大幅に上昇することがある。その結果、フィラメント状の短絡が継続的に拡大するか、又は200℃を超える温度でのエレクトロマイグレーションによるシリコン及び金属配線が接合部に広がることが起こり得る。低リーク電流高降伏 JFET やショットキー接合では、この故障過程が特に発生しやすいようである。JFETの耐圧試験として、接合部を降伏させるものでなく、リーク試験として実施することを要求しているのは、この故障過程が存在するためである。低リーク接合部の場合、接合部の逆方向降伏の際に非常に局部化した電流が生じることがあり得る。ショットキー接合部では、配線金属が接合部のホットスポットを通る移行が発生する。

(3) 故障モード

電流フィラメントが半導体接合部に生じ、接合部がショートした状態と同様になる。大きなリーク電流が故障モードとしてみられる。

5.2.7 フィルム抵抗

絶縁基板に付着している抵抗材料は、ESDに敏感な構成素子のフィルム抵抗の区分に入れている。感受性の程度は、抵抗の素材成分と調製並びに寸法と電力との間の関係によって異なる。

(1) 部品の種類

ハイブリッドICは、薄膜抵抗又は厚膜抵抗を内蔵していることが多い。精密電圧レギュレータなどのように抵抗値の大幅な変動を許容できないようなハイブリッドICは、ESDに対し感受性が高いといえる。厚膜抵抗は、抵抗素子としての導電性金属の酸化物、電氣的性能を改善するための金属添加物並びに支持マトリックス、基板接着及び抵抗率調整のためのガラスフリットからなる。このような部品は、ESDに対し特に感受性が高い。厚膜の場合、抵抗の変化が減少方向であるため、通常のトリミングで所定の抵抗値の許容範囲を越えたときの追加トリミング方法の一つとして放電が考えられていた。厚膜抵抗の変化量は、エネルギーよりも電圧によって大きく左右されることも判明している。

一方、薄膜抵抗では、よりエネルギーに左右されるが、フィルム破壊に至るまでの抵抗変化は、5 % 未満である。ハイブリッドIC以外にモノリシックICにもポリシリコン抵抗などの薄膜抵抗を入力保護回路として封入したものがある。

個別フィルム抵抗器もESDに対する感受性がある。炭素フィルム抵抗、金属酸化物抵抗及び金属フィルム抵抗は、ESDに対する感受性があり、許容値が狭い小電力定格のものが特に問題になる。抵抗でよく発生するESDの問題としては、抵抗値許容誤差 0.1%を要求された0.05W金属フィルム抵抗器RNC50がある。この部品は、ポリエチレンの袋で摩擦するだけで、この抵抗値許容誤差の範囲外になる。

(2) 故障メカニズム

フィルム抵抗のESD故障メカニズムは十分に理解されていない。この一つの理由は、抵抗の素材成分及び調製がメーカー固有のものになっていることがよくあり、知ることができないためである。

厚膜抵抗の故障メカニズムは、直列・並列抵抗及び金属アイランドを絶縁している極小コンデンサのマトリックス内での新しい分岐路の形成としてモデル化されている。高い電界により、ガラスフリット又はその他の絶縁材料の絶縁破壊を起こすと、金属微粒子が溶融、融着し、導電経路を生成する。このモデルは、絶縁体の破壊を伴っており、電圧依存性である。

ESDに対する抵抗材料の挙動は、並列電流路数又は膜構造の並列電流路間の容量結合数の関数であるかのように見える。材料の中で使用されるガラスの性質は、抵抗素子の分布に影響するため及びそれ自体抵抗素子として働くため、極めて重要である。つまり、ESDに対する挙動は、厚膜抵抗器によって大きく異なってくる。したがって、ESDに対する感受性試験は、抵抗値許容差が重要な厚膜抵抗器に対してのみ規定すべきである。

薄膜抵抗並びに封止型の金属膜抵抗、金属酸化物抵抗及び炭素膜抵抗の場合、故障メカニズムは主に微小分岐路の破断としてモデル化され、熱的エネルギー依存性である。このメカニズムでは、抵抗が増加する。ESD電圧が低い場合、薄膜抵抗及び金属膜タイプ抵抗では負方向への抵抗値の変化が若干生じ、これは、電圧依存性がある。この負方向への抵抗値の変化は、一般的には、大きくても 5 % を超えることはなく、せいぜい1%未満であり、ESD電圧が大きくなると正方向に変化する。

(3) 故障モード

SiO_2 （シリコン酸化膜）基板上に蒸着した窒化タンタルなどの薄膜抵抗には、人体帯電モデルで発生する 5000 V を超えるESD電圧で抵抗が溶断するものがある。しかし、ほとんどの故障モードは、抵抗値の変化である。したがって、抵抗値の大幅な変化に対応できるような回路設計では、この故障が問題とならないことがある。一般に、ESDの印加後、抵抗の安定性は悪化し、抵抗の不安定さが ESD耐圧レベルをさす。ESDの印加によって抵抗の温度係数が変化することが知られている。

厚膜抵抗の場合、抵抗値の変化は小さくなる方向に生じる。厚膜ペーストによっては、抵抗値の変化が容易に 50 % を超えるものがある。例外として、抵抗値が低い場合がある。薄膜、金属膜、金属酸化物及び炭素フィルムは、低いESDレベルで5%未満の抵抗値の低下が生じることがある。高いESDレベルでは、定格電力によっては、10%を超える大きな抵抗増加が生じることがある。

5.2.8 金属配線

端子間配線経路内にエネルギー吸収素子がなく、 SiO_2 などの基板の上の比較的幅の狭い薄膜金属配線は、ESDに対し敏感である。この金属配線は、主にアルミニウム又は金が用いられ、多層のものもある。故障メカニズムは、ジュール熱による断線である。この種の構成素子は、モノリシックIC、ハイブリッドIC並びにスイッチングトランジスタや高周波トランジスタにみられるメッシュ形電極トランジスタ構造によく用いられている。ジュール熱は、ESD発生源の接触抵抗が非常に小さいときの短い時定数により大電流が生じる場合、及び低抵抗大面積のダイオードの接続によってダイオードの順バイアス方向での電圧降下が小さいことにより大電流が生じる場合によく発生する。金属配線材の幅又は厚さを大きくすると ESDに対する感受性が減少する。グラシベーション（回路の不活性化、機械的保護のために使う誘導体層）や配線材・シリコン間の SiO_2 厚さの減少によってもESD耐性が向上する。この故障モードは、断線である。

5.2.9 膜形成で保護された電界効果構造

さまざまな NMOS IC 及び PMOS IC で、チップの保護膜形成の表面に局部的かつ高密度に集積する正イオンによって故障することが分かってきた。厚絶縁膜寄生トランジスタ、層間絶縁膜寄生トランジスタ、EPROMトランジスタ、汎用トランジスタなどのNMOSでは、N+接合間のフィールドの反転による過剰なリーク電流による故障が発生している。フローティングゲート、EPROM、ディプレッション形FETなどのPMOSでは、フローティングゲート上の負電荷がチップの表面の正電荷群によって過剰補償されると故障が発生する。この場合、その部分はオフになりプログラムに無い誤った指示を出す。この反転の発生に必要な正電荷による実効電界は、 $85\text{V}/\mu\text{m}$ を超えることが明らかになっている。この故障モードが発生したことが記録されている気密パッケージは、不透明なセラミック、透明なサファイア及び透明なほうけい酸塩ガラスを用いた絶縁性リッドのものである。この故障は、チップの上をおっているリッドの裏側を接地するか、絶縁性リッドが静電気帯電しないように予防措置をとることにより防ぐことができる。

(1) 部品の種類

この故障メカニズムは、透明なリッドのNMOSとPMOSの UV EPROM で最もよくみられる。セラミックパッケージのNMOSのSRAMにもこのESD故障メカニズムによる故障が報告されている。試験結果によって否定されない限り、絶縁性リッドのLSIは、いずれも、好ましくないフィールド反転及びゲートしきい値電圧の変化による故障が発生しやすい電界効果構造をもつと考えておいた方がよい。

(2) 故障メカニズム

この故障メカニズムは、チップ外表面とパッケージングリッド内表面との間の空気間隙で空気が絶縁破壊してチップ上に正イオン群が集積することによる。リッド内表面の帯電は、取扱方法に応じて生じるが、その一つとして缶入りの冷却剤によるパッケージの冷却噴霧がある。リッド外表面に吹き付けられる冷却用噴霧による正電荷の帯電は、缶からの冷却剤の流量に応じて増加する。冷却剤の流量が少なれば帯電が減少し故障は発生しないが、流量が多いと故障を発生させる量の正電荷が帯電する。パッケージ内の空気間隙にチップからリッドへの局所的なイオンの流れが生じる。リッド内表面の正電荷は、イオンの流れに乗ってチップ表面に移動し、負電荷をリッドに引き寄せる。この結果、非常に局所的な正イオンの集団がチップ表面に生じる。パッケージ内の条件によっては、この電荷は、空気中の正電荷コロナ放電によって生じる大きなイオンと同じ種類とみなせる。

さらに、局所的なこの正電荷は、PMOSディプレッション形トランジスタで N^+ 拡散層間で反転層リーク路を形成し、ゲートしきい値電圧を変化させる。リーク路が形成されゲートしきい値電圧が変化すると、絶縁孤立した回路にも故障が生じることがある。

チップ表面上の正電荷を中和することによって、この故障メカニズムからの元の状態に戻ることができる。リッドが透明な UV EPROM では、最小 4.3eV の光子エネルギーを有する 2537Å の紫外光をチップに 3～5 秒間照射することによって非破壊的に元の状態に戻る。

(3) 故障モード

この故障モードは、いわゆる動作劣化に入る。動作劣化は、機能故障に結びつく。NMOS UV EPROM の場合、ビット反転として現れる。PMOS UV EPROM での故障モードは、記憶素子全体での単一ビット故障としてランダムに発生する。NMOSのSRAMでの故障モードは、不特定のビットが“1”又は“0”の論理状態に固定され、それに隣接する記憶セルがそれと反対の論理状態に固定される故障として現れることが報告されている。

5.2.10 圧電素子

水晶発振器・SAWデバイスなどは、ESDによって故障が発生し、特性が劣化することがある。この部品に内蔵されている圧電素子の電気特性は、過大な駆動電流によって劣化する。さらに高電圧による圧電効果によって、結晶板に機械的応力及び運動が生じ、電圧が過大で機械的応力が結晶の弾性限界を越えて働くと結晶の破壊が起きる。

破壊は、ニオブ酸リチウム製SAW遅延線では小板の持ち上がりとして生じる。そのような破壊が、大量に発生すると、電気的動作特性が変化し、故障に至ることがある。

5.2.11 近接配置電極

例えば、 $13500\text{ \AA}$ の厚膜金属配線を使用し、入ってくる高圧スパイク電圧から保護する目的で $50\text{ }\mu\text{m}$ アークギャップの気体アーク放電を使用することができる。しかし、わずかなギャップを隔てて配置した保護膜のない薄膜電極を備えた部品の場合、気体アーク放電は性能低下を引き起こすことがある。わずかなギャップを隔てて配置された薄膜電極を使用する部品としては、SAWデバイスがある。高周波くし形電極トランジスタなどその他の部品及び超大規模集積回路（VLSI）や超高速集積回路（VHSI）など新技術も金属配線の導体間のアーク放電による故障によって劣化し得る。

アーク放電が、発生すると蒸発及び一般に電極間空間から離れる方向への金属の動きが生じる。溶融及び溶着が生じると、薄膜金属は電極間空間に移動せず互いに引き付けあい電極導体方向へ流れ、断線に至る。ギャップ領域に微小な金属球が生じることがあるがブリッジを生じるほど大量に発生することはない。

したがって、保護膜のない薄膜金属電極では短絡はあまり問題と考えられていない。ESD故障は、 $4000\text{ \AA}$ の厚さの薄い金属電極及び $3.0\text{ }\mu\text{m}$ の電極間ギャップを有するSAWバンドパスフィルタで発生している。

5.3 ESD破壊試験

電子部品のESD損傷は、MOSデバイス開発当初より大きな問題となってきた。特に最近では、デバイスの微細化、試験方法の多様化、組立工程の自動化などによりESD破壊現象も多様化している。このような状況に対応してESD破壊試験方法も変えてゆく必要に迫られている。ここでは、現在までのESD破壊試験方法の変遷、現在検討されている ESD破壊モデルと試験方法について述べる。

5.3.1 ESD破壊試験規格の現状

現在規定されているESD破壊試験方法は、いわゆる人体帯電モデル（HBM: Human Body Model）とマシンモデル（MM: Machine Model）によるESD破壊現象をシミュレートするための試験方法である。試験回路は、図5.3-1に示すように放電容量 C_D に電荷を蓄え、放電抵抗 R_D を介してデバイスに放電する試験方法であり、コンデンサ放電法と呼ばれている。

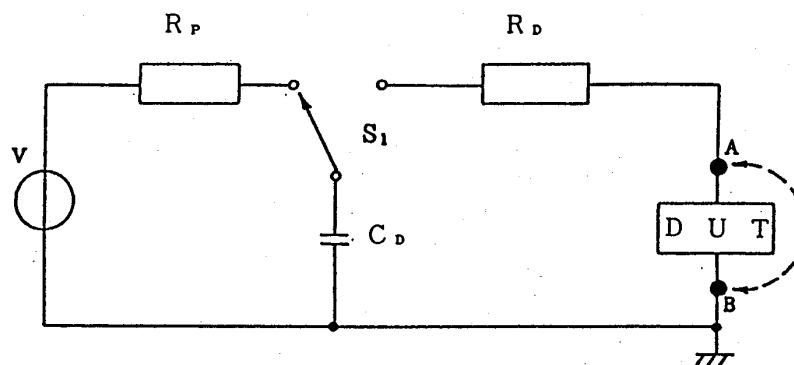
(1) 海外規格

MIL規格の試験方法としては、MIL-STD-883 Method 3015 及び MIL-STD-750 Method 1020 があり、図5.3-1の試験回路において、放電容量 $C_D=100\text{ pF}$ 、放電抵抗 $R_D=1.5\text{ k}\Omega$ を採用している。この試験方法は、HBMによるESD破壊現象をシミュレートする試験方法である。さらに、供試体（DUT: Device Under Test）を $0\text{ }\Omega$ としたときの電流波形を規定している（図 5.3-2 参照）。かつてはDUTを $1.5\text{ k}\Omega$ としたときの電圧波形を規定していたが、市販自動試験装置が普及し、それらの機差が大きく出ることが確認された（図5.3-3参照）ため、変更されている。

(2) 国内規格

国内試験規格としては、EIAJ規格ED-4701試験方法C-111があり、A法、B法の2方式による試験方法が規定されている。

- a. A法は、図5.3-1の試験回路において、放電容量 $C_D=200\text{ pF}$ 、放電抵抗 $R_D=0\text{ }\Omega$ を採用している。この試験方法は、マシンモデル（MM）と呼ばれるESD破壊現象をシミュレートする試験方法である。EIAJにおいて、ED-4701の旧規格であるIC-121方法20として1982年に制定されたもので、国内ではこの試験方法が定着している。しかし、MIL-HDBK-263Aにおいて日本からの提案として紹介されてはいるが、放電波形の規定がないためにばらつきが大きくなることが指摘されている。国際的には定着するまでには至っていない。現在、放電波形規定が検討されているようである。
- b. B法は、1988年にIC-121方法20に追加されたもので、MIL-STD-883と同じ人体帯電モデル（HBM）になっている。



MIL-STD-883C

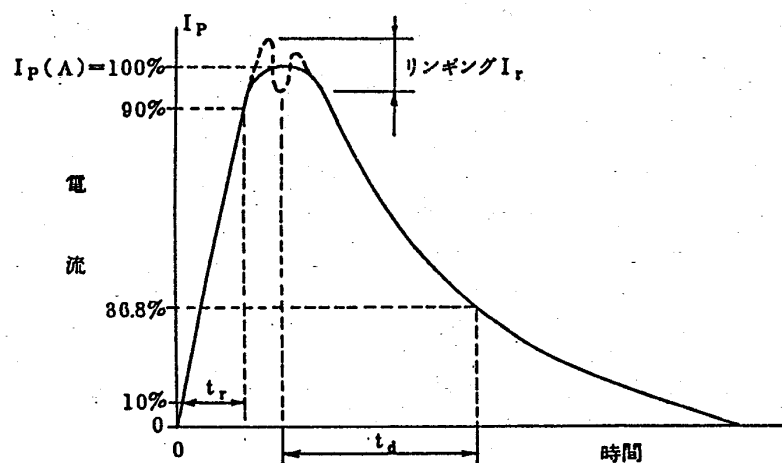
EIAJ ED-4701

Method 3015.7 (HBM)

試験方法 C-111 (MM)

 R_P : 保護抵抗 $0.8 \text{ M}\Omega \sim 3 \text{ G}\Omega$ $1 \text{ M}\Omega \sim 10 \text{ M}\Omega$ R_D : 放電抵抗 $1.5 \text{ k}\Omega$ $0 \text{ }\Omega$ C_D : 放電容量 100 pF 200 pF

図 5.3-1 HBMとMMの試験回路規定



項 目	記号	特 性
立ち上り時間	ns t_r	最大 10
放電時間	ns t_d	150 ± 20
ピーク電流	A I_p	$\overline{I_p} \pm 10\%^{(1)}$
リングング電流	A I_r	$\overline{I_p}$ の 15%

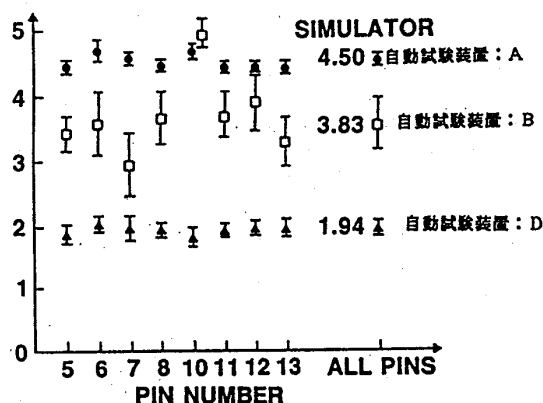
注⁽¹⁾ $\overline{I_p}$ は次式で計算する。

$$\overline{I_p} (\text{A}) = \frac{\text{規定電圧 (V)}}{1500 (\Omega)}$$

(MIL-STD-883 Method 3015.7)

図 5.3-2 HBMの電流波形規定

破壊電圧(kV)

図5.3-3 HBM市販自動試験装置による破壊電圧機差^{5.3-1)}

5.3.2 ESD破壊モデル

5.3.2.1 人体帯電モデル及びマシンモデル

人体帯電モデル・マシンモデルともに、外部帯電物体の蓄積静電荷が半導体デバイス端子から挿入されたときに破壊するモデルをいう。この外部帯電物体がデバイスを取扱う人間を想定したものを人体帯電モデル（HBM）といい、金属筐体を想定したものをマシンモデル（MM）という。現在、ほとんどの半導体デバイスは、ESD保護回路がデバイス内に設置されているため、これらのモデルによる破壊現象としては保護抵抗の溶断現象、保護ダイオードのPN接合破壊現象となる場合が多い。試験方法としては外部物体に帯電した静電気と等価な静電容量をコンデンサーとし、その蓄積された静電気を各モデルに応じた放電抵抗を介して試験デバイス端子に放出することによってシミュレートする方法が採用されている。

(1) 人体帯電モデル（HBM）

人間は、ESDの主な発生源であり、MIL規格でのESDS部品のクラス分けのモデルとして採用されている。

人体の帯電は、複雑な要因・環境などによって大きく変わるが、通常、静電容量は、50～250pFであり、その約80%が100pF以下であり、抵抗は、1～5kΩといわれている。1.5kΩの値は、人間だけの抵抗としては、かなり小さいほうといえるが、ピンセットを持った場合に近いと考えられている（図5.3-4参照）。

^{5.3-1)} 出典／D.L.Lin, M.S.Strauss and T.L.Welsher: "On the Validity of ESD Threshold Data Obtained Using Commercial Human Body Simulators", IRPS, 25th proc., 1987.4

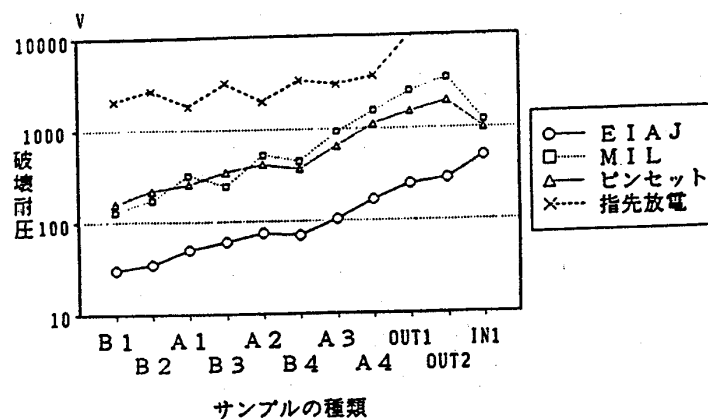


図5.3-4 ESD試験法によるデバイス破壊耐圧の比較^{5.3-2)}

(2) マシンモデル (MM)

日本国内で普及したもので、MIL規格の人体帯電モデルと比較し低電圧で破壊電圧を確認できるため、人体帯電モデルの簡易的試験として使用されたこともある。マシンモデルという用語は、国外において称され、ジャパンモデルと呼ぶ人もいる。MM試験法による半導体デバイスの静電気耐性と市場における故障発生指数との関係が示され、意義を持つようになった。(図5.3-5参照)

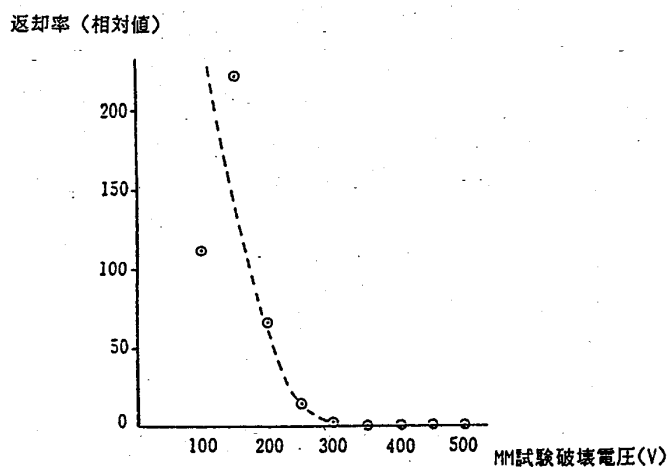


図5.3-5 マシンモデル (MM) による破壊電圧とユーザ返却率との関係^{5.3-3)}

^{5.3-2)} 出典／植野、山崎、桧崎、沼尻：“人体帯電によるデバイスの静電気障害に関する一考察”，第17回日科技連信頼性・保全性シンポジウム，1987.6

^{5.3-3)} 出典／松岡：“半導体デバイスの静電破壊と対策”，エレクトリックマンスリー（新光商事），1985.2

5.3.2.2 デバイス帯電モデル (CDM)

パッケージ表面の摩擦などによるデバイス自身の静電気帯電又は周囲に存在する静電気帯電物体によるデバイスの誘導帯電により、外部の接地導体などにデバイス端子が接触又は近接するときに発生するESD現象で破壊するモデルである。このESD破壊モデルでは、電界的破壊現象（例えば、MOSデバイスのゲート酸化膜破壊現象）になることが多いため、メモリー製品に代表されるような微細化の進んだVLSI等で問題となってきた。このモデルは、パッケージ容量の充放電現象であるため同じデバイス（チップ）でも封入パッケージが変れば破壊耐性も変化する。一方、組立工程の自動化は、デバイスのしゅう動機構工程の増加を招きこのモデルによる ESD破壊現象を急増させている。

代表的な試験方法として、次が提案されている。

(1) デバイス帯電法 (図5.3-6参照)

パッケージ表面を接地電位にして試験端子に試験電圧を印加し、チップ、リードフレーム、パッケージなどに静電気を蓄積（直接帯電）し、試験端子をリレー等の使用により印加電源から切り離し、接地することによってその蓄積された静電気を放出する方法。

(2) パッケージ帯電法 (図5.3-7参照)

デバイスパッケージ表面の電位を上昇させ、試験端子に接地導体を接触、気中放電させる方法。

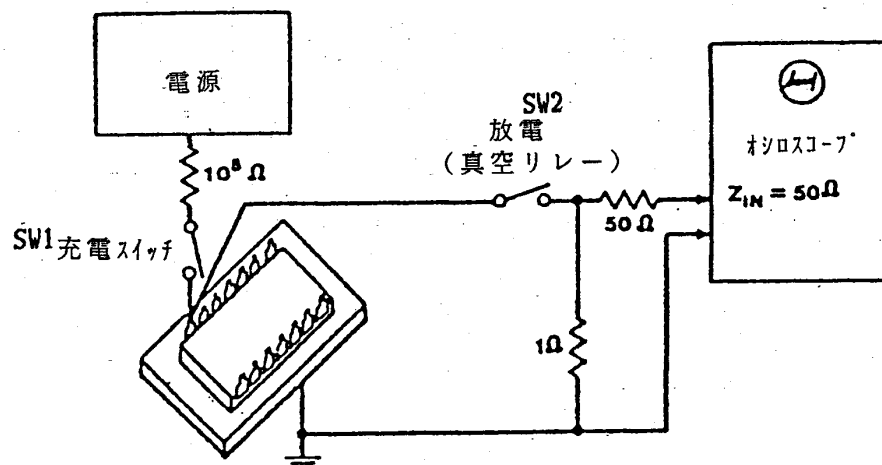
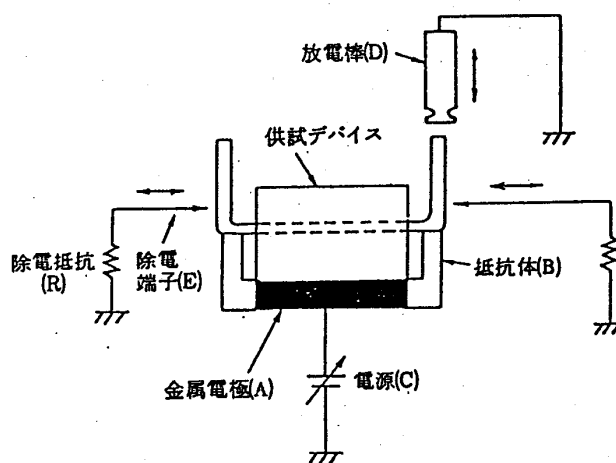


図5.3-6 デバイス帯電法^{5.3-4)}

^{5.3-4)} 出典/E.W.Chase, "ESD Damage Susceptibility of Thin Film Resistors and Capacitors", EOS/ESD Symp. 4th proc., 1982.9

図 5.3-7 パッケージ帯電法^{5.3-5)}

5.3.3 ESDS部品の感受性の分類とESD破壊耐性の目標値

米国におけるESD管理は、基本的にMIL-STD-1686が適用されている。ESDS部品のクラス分類は、MIL-STD-1686初版では独自に規定していたのに対し、改訂AにおいてはMIL-STD-883とリンクし、更にMIL-STD-750に同じ試験が追加され、MIL規格としての統一がとられた。

国内では、従来、ESD破壊耐性は明確にされてこなかった。EIAJ規格ED-4701/C-111では、A法(MM)の試験電圧として150Vがコメントされている。現状としては、ESD故障強さは、メーカーとユーザの間で折り合いをつけており、200Vがひとつの目安とされているようである。B法(HBM)の試験電圧として1000Vがコメントされているが、海外ではMIL-STD-883クラス2の下限である2000Vが一つの目標になりつつある。しかし、半導体デバイスの静電気保護回路設計においてA法、B法における破壊耐性はトレードオフの関係になる場合が多く、どちらの破壊耐性もデバイス機能に支障なく強くすることは困難な場合が多い。

^{5.3-5)} 出典/EIAJ ED-4701/C-111

5.3.4 組立品及び装置のESD試験方法

MIL-STD-1686Aでは、組立品 2 kV、装置 4 kV の設計保護要求がある。MIL-STD-263Aにおいて、組立品及び装置の設計保護要求の評価としては、試験規格として制定されたものはないこと、組立品や装置を試験供試体とすることのコストなどを考慮して、回路分析によることを推奨している。試験による場合は、MIL-STD-883 Method 3015 をベースにした試験方法を推奨している。

国際規格としては、EMCシリーズの一環として IEC Publication 801-2 が提案されている。1991年発行の Second Edition では、試験回路として静電容量 $C_D=150\text{pF}$ 、抵抗 $R_D=330\Omega$ を採用している。推奨試験法である接触放電法の厳しさレベルとして、2、4、6、8 kV 及び特殊が設けられている。

5.4 保護ネットワークの設計

本項では、主にESDS部品を使用する組立品及び装置の保護設計についてのガイドラインを示す。

5.4.1 部品保護回路

ESDS部品において、ESDに対する耐性向上のためのさまざまな内蔵保護回路が開発されてきている。例えば、MOSデバイスの多くは、電氣的性能に悪影響を与えることなく、ゲート酸化膜にかかるESD電圧を低くするような保護回路を内蔵し、ESDに対し最大800Vまで保護できるようになり、MIL-M-38510によるCMOSのVZAP試験電圧が150Vから800Vに高められている。製造工程、設計思想及び回路の特質によってさまざまな回路が作られており、その例を図5.4-1に示す。さらに、ESD耐性向上に向かって、デバイス保護回路の改良が進んでいる。

ESDS部品の保護回路は、最大電圧及び最小パルス幅に限界があり、この限界を超えたESDが発生すると、本体回路又は保護回路の障害を受ける恐れがある。保護回路が障害を受けると、デバイスの性能が劣化するか又はESDに対してさらに敏感になり、故障しやすくなる。デバイスが劣化すると、応答特性の変化又は漏洩電流の増加となることが多い。単一パルスではデバイスに障害を及ぼさないESD電圧・エネルギーレベルでも、多数のESDが同時に又は連続して印加すると、ESDSデバイスの性能劣化又は保護回路の障害が生じることもある。この保護回路の障害は、機能上に現れないこともある。

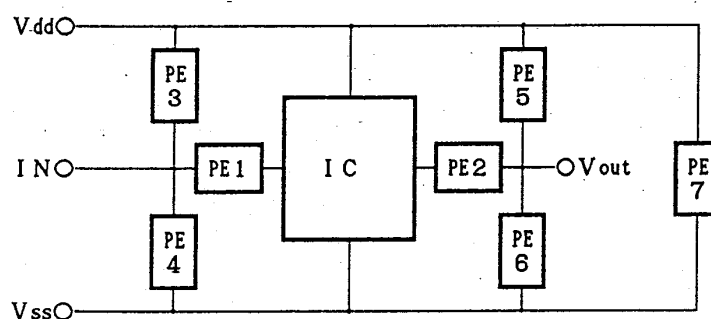
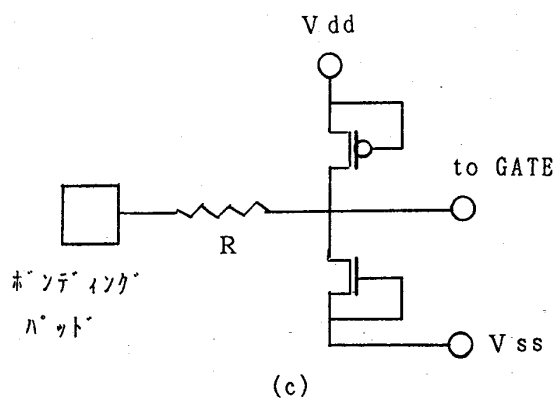
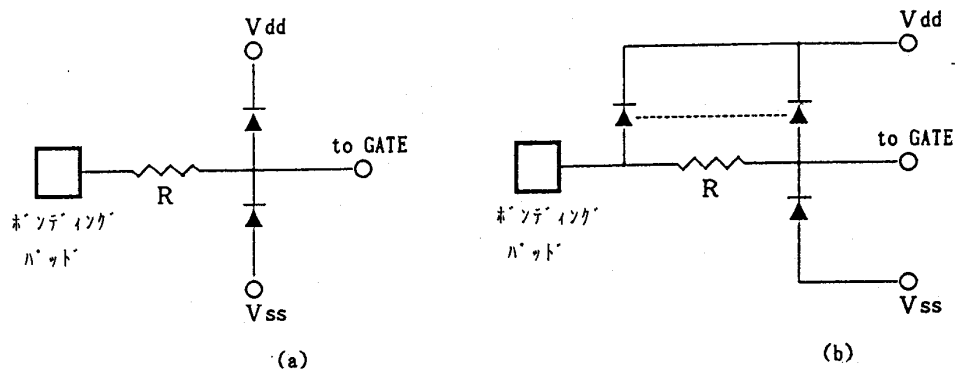
デバイスの保護回路は、ESDに対する感受性をなくすわけではないが、鈍くすることによって、デバイスが障害を受ける危険を小さくする。

なお、デバイスの敏感性は、保護回路の設計や製造業者によって異なるので、デバイスの選定や故障解析の際には考慮する必要がある。

5.4.2 組立品及び装置に対する保護設計要求

MIL-STD-1686Aでは、ESDS部品を組み込む場合、組立品に対しては2kV以上、装置に対しては4kV以上のESDSレベルとなるように設計することを要求している。

設計に当たっては、性能要求を満足でき、かつESD耐性の強い部品を選定することをまず検討すべきである。弱いESDS部品の使用が避けられない場合には、保護設計を行う。保護設計は、組立品及び装置への外部接続点又は経路に関する検討が主体となる。



PE1~PE7: Protection Elements (保護素子)

PE1~PE2: LTH type (正常時低インピーダンス状態で、ESDトランジェント印加時、高インピーダンス状態になる。)

PE3~PE7: HTL type (正常時高インピーダンス状態で、ESDトランジェント印加時、低インピーダンス状態になる。)

(d)

図5.4-1 部品保護回路の例

5.4.3 組立品のESD保護設計

組立品の設計上において考慮すべき事項を次に示す。

- (1) CMOSデバイスを使用している場合は入出力端子、電源端子にESDサージによるラッチアップ現象が発生するため注意が必要である。ラッチアップ防止設計方法は基本的にはESD保護設計と同様である。一つの方法は、各入出力端子に抵抗を設置することによりケーブルラインと分離し、二つの高速スイッチングダイオードをその全ラインの V_{OL} と V_{OH} に挿入する方法がある。長い入力ケーブルを使用するとノイズを拾う恐れがあるので、その場合はフィルタネットワークを使用する。
- (2) MOSデバイスでは、チップ内に保護回路を持っているか否かにかかわらず各出力端子に外部直列抵抗を接続することによってESD保護を強化することができる。
- (3) バイポーラデバイスの入力のように比較的大きな抵抗と100pF以上のコンデンサからなるRCネットワークを使用することが可能であればESDの影響を少なくすることができる。しかし、回路性能上この対策がとれない場合は、いずれのESD極性に対しても中間電位にクランプされる2つの並列ダイオードを設置することにより入力を接地へ分岐させ、ESDの影響を少なくできる。これにより対入力特性の変動を少なくできる。
- (4) プリント配線板に搭載するクラス1部品のリード線は、ESD保護なしでコネクタ端子に直接接続してはならない。ESDS部品を含む組立品の設計では、保護回路が組み込まれていることを確認する。
- (5) ICの保護用として、主に装置間の接続コネクタを抜き差しする際に発生するESD又はノイズを吸収するための、サージ吸収用低電圧ダイオードが開発されている（図5.4-2参照）。
- (6) キーボード、制御パネル、手動制御又は手動キーロック部を組込むシステムは、作業者の静電気帯電をシャーシ接地に直接逃すように設計し、ESDS部品にかからないようにする。

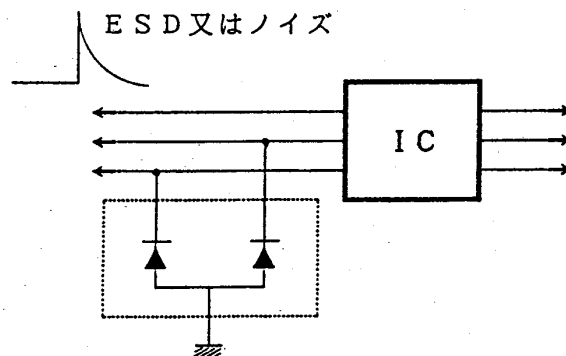


図5.4-2 サージ吸収用低電圧ダイオード

5.4.4 装置のESD保護設計

各々の故障メカニズムに対処するための設計を推奨する。

(1) 直接接触

綿密な保護設計により、直接的な接触の可能性を低減させる。内蔵されたESDS部品と外部との接続部の間に高電圧クランプ回路、フィルタ及びバッファを設けること。接続部においてESDS部品のリードを外側に設置しなければならない場合は、指先が接触しない又は接触しにくいように、内側に引っ込める。

(2) 間接接触

ESDS部品に直接的又は間接的に電氣的接続している内部の導電部分や回路と外界との間を十分絶縁又は物理的空間を設けることが効果的である。絶縁対策として、非導電性フィルム又はテープの取付、囲いのすき間やネジ穴のシール、及びESDS部品から放電エネルギーをそらすための導電性ガード線やシールドがある。

(3) 伝導（ラインノイズ／配線ノイズ）及び放射ノイズ

ロジックスレッシュホールド、シールド、低インピーダンス回路、良好な接地設計、細心の回路レイアウトは、慎重に選定すれば、伝導性及び放射ノイズを少なくする方法となる。特に、導電性の金属バリヤによりその回路を完全に囲い込めれば、放射ノイズから回路をシールドすることができる。しかし、導電性カップリングによって、シールドから回路への二次的アークを誘発する恐れがある。これを防ぐには、シールド自体を回路から離す必要がある。絶縁された囲いでは、カップリングによる回路への放射ノイズを防ぐことはできない。ある種の囲いの設計では、絶縁された囲い内に金属性シールドを施して放射ノイズを防いでいる。

ほとんどの囲いは、完全にはできず、例えば、穴や空気口やバリヤに通されたネジのような導電性アイテムは、ESDノイズの透過や回り込みを許してしまう。これらの穴等は、回路から離して設置すべきである。穴を通るノイズは、一つの大きな穴よりも小さな数個の穴の方が、少なくなる。他の方法は、穴の深さに対して、その直径を5分の1以下にすることである。これにより、放射ノイズを十分減衰させることができる。

プリント配線板の設計は、ESDに対する装置の耐性を改善する重要な部分である。プリント配線板の配線は、ESDによって発生した電磁界のアンテナとなる。高インピーダンスデバイスに接続された配線は電界に対してアンテナとなり、低インピーダンス回路のループは磁界のアンテナとなる。これらのアンテナへのカップリングを少なくするため、配線の長さはできるだけ短くし、ループの面積はできるだけ狭くする。配線が数cm長くなったり、ループ面積が数 cm^2 広くなれば、相当のESDノイズを受けることとなる。

ほとんどのシステムでの最も大きなアンテナであるケーブルは、放射ノイズにより大電圧や電流の誘導を生じることがわかっている。ただし、ケーブルが、システムから電荷を逃がす低インピーダンスの逃げ道となっていれば、間接的に導電性カップリングを防げる。ケーブル内での最大径の外部導体であるケーブルシールドは、接地経路として使用し、直接金属シャーシに接続するべきである。

ケーブルはできるだけ短くし、ケーブル中の回路ラインはそのリターンラインに物理的に接近した配置とする。例えば、リボンケーブルでは、どの信号ラインもそれぞれ隣接して接地ラインを設ける。ループ面積が狭くなればコモンモードカップリングもまた少なくなる。

ケーブルは、よく回路設計で用いられるフィルタとして使用されることがある。ある種のケーブルコネクタは、シャントコンデンサやクランプサプレッサを組込んでいたり、またあるものは誘導性フェライトリードをシリーズに入れているものもある。

ハードウェアによる対策と共にソフトウェアの方でもESDの対応策を講じておくことが、システムの停止を招くような誤動作の防止に有効である。

(4) 誘導電荷

ESDS部品やその入力リードの周囲には、静電界による誘導電荷効果を最小にするため、シールドを行う。低インピーダンス回路や他のノイズ減少法もまた電荷の減少に効果的である。

5.4.5 過渡電圧抑制器

各種の過渡電圧抑制器（トランジェントサプレッサ）は、ESDパルスの幅や形状により異なるが、電気回路へ流れ込む電圧やエネルギーを十分下げることができるものであり、組立品レベルの部品の損傷を避けるために使用される。

過渡電圧抑制器には、二つのタイプがあり、市販されている。一つは金属酸化物バリスタであり、もう一つはシリコンPN接合アバランシェダイオードである。両タイプとも、電圧と電流の非線形特性を利用し、低電圧では電流がごくわずかであるが、クランプ電圧を超えると電流は急激に増加する。どちらも、デバイスの端子にかかるピーク電圧を減少させるため、ソースインピーダンスを通した大きな電圧降下特性を利用している。クランプ電圧は、PN接合の不純物濃度やバリスタの厚さ（境界層の数）に依存する。接合領域やバリスタの容積は、その電圧抑制器がESDのエネルギーをどれだけ安全に吸収できるかを決定する。これら電圧抑制器の応答時間は、ナノ秒以下が望まれている。この他に、同じような動作をするものに、ガス封入エアギャップ放電管があるが、一般に応答速度が遅いのでESDの吸収には使用されない。

電圧抑制器としては、金属酸化物バリスタ、シリコン電圧リミッタ、RCネットワーク及びセレンスタックが知られているが、錫、亜鉛又はビスマスの酸化物の電圧依存性の抵抗も用いられている。過渡電圧抑制器の選定にあたっては、最終的に、印加する電圧レベル、電圧抑制器の応答時間、ピーク電流、リーク電流、吸収エネルギー、動作温度範囲、耐用寿命、寸法、コスト、保護電圧レベルについて考慮する必要がある。

5.5 ESD保護区域

5.5.1 一般

ESD保護区域は、静電気電圧レベルを制御又はその発生を最小とするために必要となる工具、材料、用品などにより構成される。保護区域には、製造・整備・修理などの施設内の恒久的な常設区域と、装置のすぐ近くに一時的に設置する臨時区域とがある。ESD対策としては、保護区域内においてESD保護取扱手順を遵守することにより完全なものとなる。

ESD保護区域を考える場合、二つの要素に注意する必要がある。その第一は、常に人体の安全（電氣的に）を維持することである。これは、保護区域で使用する資材（導電性又は拡散性）とその接地方法が適切かどうかということである。区域内では、以下に説明するようにESDSアイテムの保護のために、人体の絶縁が難しくなる。第二の要素は、保護区域の基本的な目的、すなわち保護区域で扱われるESDSアイテムを適切に保護することである。保護区域の目的は、保護区域内で扱う部品・組立品の最低電圧感受性レベルを超えるような電位差が発生する可能性をなくすようにすることにある。

5.5.2 ESD保護区域の設計

ESD保護区域の設計の複雑さは、作業工程、配置、環境又は物理的な制約がかかっていることにある。例えば、野外整備作業での保護区域は、静電気発生材料を除去し、人体リストストラップ、携帯型保護作業用マット、適切な保護カバー又は包装材料を装備した一時的な区域として構成される。製造工場での保護区域では、湿度管理、保護材料と適切な接地を備えたESD保護作業台、局部的にイオナイザを使用すること、ヒールストラップ又は導電性の履物を併用する導電性床を採用することができる。

ESD保護区域の設計では、取扱手順とアイテムの感受性を十分に留意する必要がある。保護区域内での取扱手順は、保護区域がより充実した設備になるにつれてより簡単になる。貧弱な設備の保護区域では、保護の希望レベルを確実に達成するために、より複雑な取扱手順が必要となる。設備と手順のトレードオフを検討すべきである。

ESD保護区域は、単純化のために設備全体を通じて全てのESDSアイテムが同じレベルの保護を受けられるように設計する。この画一化にあたっては、その施設で扱う全てのアイテムのうち、最も低いESDSレベルに対応する保護レベルを設定する。施設内をESDSアイテムの保護レベルに応じた保護区域に分けることもできる。保護区域の設定当初においては、作業者の訓練、プログラムの履行、監査、経費効率などの点から、施設内を同じレベルの保護区域と保護手順に設定することを推奨する。

ESD保護材料、ESD対策用品などは、5.6項及び5.7項に示す。保護区域内で使用する材料の選択と設計は、ESD管理プログラムを履行する組織の実施業務となる。5.5～5.7項に示す情報は、強制的なものではなく、任意の材料、技術の使用を否定するものではない。ただし、選択する材料又は技術は、技術的に適切で、経済効率がよいものとする。

5.5.3 ESD保護区域の要素

ESD保護区域は、効果的なESD管理の中心となるものである。保護区域の概念は、ESDS部品、組立品、装置をそれらの保護カバーや包装から外に取り出して取扱うことを想定したものである。カバー又は包装により技術的に適切に保護されたESDS材料は、保護カバーや包装の特性が完全に維持されている限り、特別な取扱いや貯蔵手段を必要としない。保護区域の概念は、次のような要素により構成される。

- (1) 接地
- (2) 工具、材料及び用品
- (3) 作業手順

5.5.4 接地

5.5.4.1 作業者の安全性

ESD保護区域を設置する場合や作業台を接地する場合は、人体への電氣的ショックの可能性を軽減するために、MIL-STD-454の個別要求1に規定する安全性要求を考慮すること。

- (1) 電氣的ショックの強さに関する基準で最も重要な要因は、電圧ではなく電流である。電流が人体に及ぼす影響の一般的なガイドを表5.5-1に示す。ESD保護区域内では、表5.5-1に示す「痛みを感じるほどではない」電流に押さえるようにすることが望ましい。

電氣的なショックの激しさは、電流を含め、次の三つの要素により決定される。

- a. 人体を通じて流れる電流の大きさ
- b. 人体を通じて流れる電流経路
- c. 人体を通じて流れる電流の持続時間

表5.5-1 電流が人体に及ぼす影響

(MIL-STD-454Mより)

電 流 値 (mA)		電 撃 の 程 度
AC 25～400 Hz	DC	
0～ 1	0～ 4	痛みを感じるほどではない。
1～ 4	4～ 15	痛みを感じて驚く。
4～ 21	15～ 80	電源によるショックのために手足に反射動作が生じる。
21～ 40	80～160	筋肉がしびれて動けなくなる。
40～100	160～300	呼吸困難
100 以上	300 以上	致命的（死にいたる可能性が高い。）

(2) 致命的な電流を発生させる電圧は、人体の抵抗値、接触条件、及び人体を流れる電流経路により変化する。人体のどの部分でも大電流が流れるとひどい火傷や出血が生じる。電流経路に心臓や肺のような生命維持上、重要な部分が含まれている場合には、比較的低い電流でも致命的となることがある。電気的な火傷は、通常人体が高電圧回路に接触した際に発生するアーク放電の熱により生じるものである。電気的な火傷は、皮膚や人体の組織を通じて電流が流れた場合にも生じる。4～21mAの交流電流では、人体が反射動作を生じることがあり、これ自体の危険性は低いものの、他の装置类等へ接触したり、装置に巻き込まれるなどの労働安全上の危険を発生する可能性がある。

(3) 電撃ショックの主要要因は電流であるが、MIL-STD-454の人体保護要求としては、管理上の容易さを考慮して、電圧としている。

5.5.4.2 電気を利用する試験機器及び工具類の接地

ESD保護区域や接地作業台を設計・設置する場合には、電気を利用する試験機器及び工具類の外部表面やシールド表面が、通常作業で常時共通の接地電位となるようにする。設計にあたっては、接地の不具合及び危険な電圧が存在する可能性を考慮し、対策する。さらに、次のことに注意する。

(1) 携帯用工具類や用品の金属ケースに使用するプラグとコンセントは、接地端子付きのものとし、プラグをコンセントに差し込むだけで金属ケース等が接地されるようにする。接地端子は、装着時には最初に接触し、脱着時には最後に切り離される構造のものをを用いる。

- (2) 接地が回路の一部となる個所の外部及び内部接続ケーブルには、接地専用ワイヤを組み込み、その両端を他の導線と同じ方法で接続する。同軸ケーブルを除き、電流を逃がすための接地用接続として、シールドのみに依存しない。
- (3) 金属又はその他の導電性カバーで覆われた接地作業台上で携帯用工具や試験機器の金属ケースを使用する場合には、作業台接地ケーブルの保護抵抗をシャントすることがあるために、置き場所に注意する。
- (4) 高電圧を使用する場合には、作業員への安全対策の強化手段として、装置に接地不良遮断器を取付けることも有効である。接地不良遮断器は、接地不良が発生した装置からのリーク電流を感知し、リーク電流が危険なレベルに達すると瞬時に回路を遮断するものである。
- (5) 人体の接地回路が並列となる場合には、接地に対する人体の等価抵抗が安全なレベルよりも小さくなることがあるので、十分に注意すること。作業員がリストストラップ、作業台及び床マットを併用した場合、そのような並列回路を生じることがある。

5.5.4.3 作業台の接地

作業台表面は、ESD保護材料で被覆し接地する。接地接続は、不注意により接続が外れる可能性を最小限にするために、十分な機械的引張強度があるものとする。内部又は表面層の下に、表面層よりも導電性が高い材料を含む場合には、導電性が最も高い部分を接地接続する。

ESD対策用作業台の規格として MIL-W-87893 があり、表面マットの電気抵抗、静電気減衰時間、接地、リストストラップなどについて要求している。リストストラップとその接地コードの接続には、結合型スナップコネクタを、また接地コードの他方の端の接続は、緊急時の脱着が容易となるようにバナナプラグを使用する。バナナプラグ等のソケット類は、抜け易いので接地不良を防止するために、使用中、常時接地状態を監視できる警報システムなどを使用することが望ましい。ワニグチクリップは、現場作業等の携帯用を除き使用すべきではない。結合型スナップコネクタは、ESD保護材料メーカーにより指定されたものを使用し、専用の取り付け工具を使用して取り付ける。

ESD保護区域及び接地作業台の安全性と接地に関して考慮すべき事項は、次のとおりである。

- (1) 接地ケーブル及び保護抵抗は、十分な電流容量を有することが望ましいが、作業台の接地においては電荷を逃すことが目的であるため、通常、抵抗器は、0.5Wで十分である。
- (2) 接地ケーブルの接続は、連続したものであり恒久的なものとする。

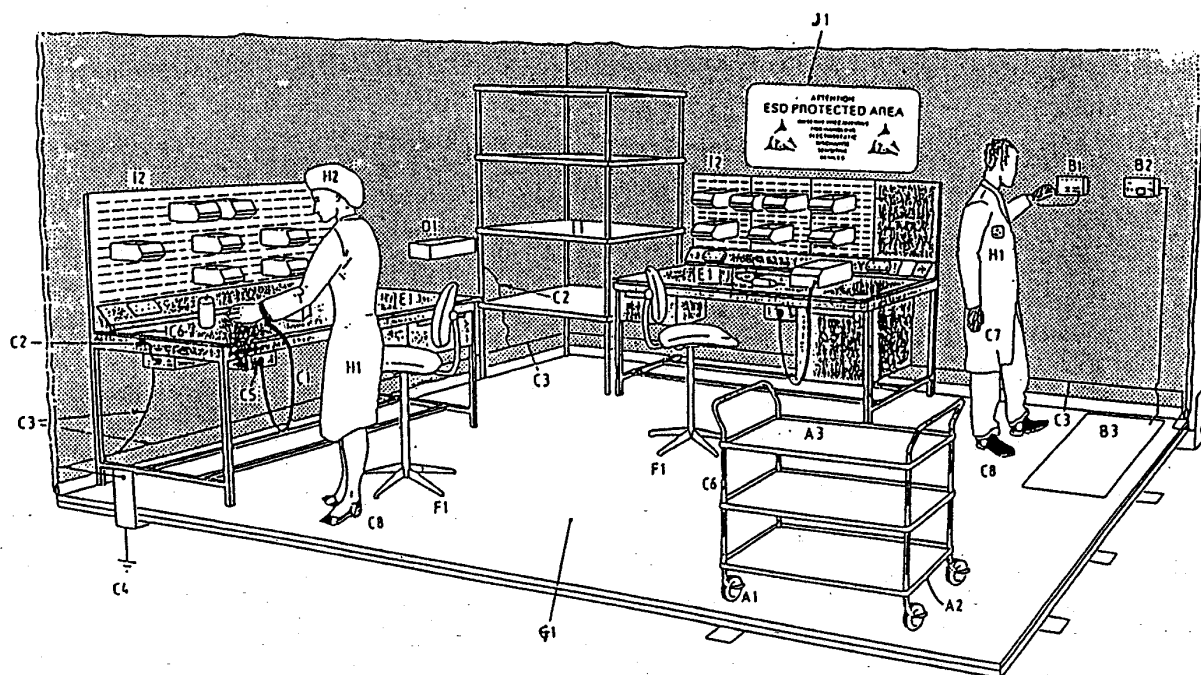
- (3) 接地抵抗は、接地した作業者が接触するおそれのある最も高い電圧源を想定し、すべての並列回路を考慮した上で、作業者のリーク電流を5mA以下に抑えるようにする。そのような電圧源には、電源や試験機器などがある。
 - (4) 不注意による接地しゃ断の危険性を最小限とするために、接地ケーブルや接続材料は、十分な機械的強度を持つこと。特に電撃による人体の反射動作によって問題が生じる場所では、5mA未満に保護することを推奨する。
 - (5) 静電気を拡散させるために使用する作業台、床、マット、接地ストラップ及びその他のESD保護区域の接地は、電流制限抵抗を通じて大地、電源システム、又はその他のハード接地設備へ接続する。
 - (6) リストストラップの接地ワイヤに対して装備した接地接続点は、各作業区域又は作業台に隣接して設置すること。それは作業の妨げとならず、危険性がないように簡単に取り付けられるものであること。
 - (7) 作業台を接地ケーブルで直列に接続することは、それぞれの抵抗値が加算され、静電気電荷の拡散時間が長くなるために、これらは、互いに直列に接続すべきではない。また、直列に接続すると1個所の接地ケーブルの断線が他の作業台の接地ケーブルの断線ともなるので避けるべきである。
 - (8) 人体接地ストラップ及び作業台表面等の保護作業台表面からの接地ケーブル抵抗は、それぞれ 5.7.6項及び5.7.8項に示すように取り付ける。
 - (9) 人体安全性の点から最小接地抵抗を設定すると同時に、静電気の減衰時間を考慮した最大接地抵抗を設定する必要がある。減衰時間は、電荷が発生する速度よりも電荷が拡散する速度の方を十分に早くする必要がある。
- 5.1.4項の式5.1-3及び5.6.4項を参考とすること。
- (10) 作業台表面にステンレスのような金属を使用する場合には、作業者の電氣的安全性を図るために、注意深い設計と十分な評価が必要である。

5.5.5 工具、材料及び用品

ESD保護区域で使用する工具、材料及び用品は、ESD保護作業表面やリストストラップのような簡単なものから、イオナイザ、保護床材料、静電気電圧の連続モニタなどのような複雑な構造のものまでである。資材の選択は、保護区域の設計者の実施業務ではあるが、基本的な電荷発生源を保護区域より排除することに心掛ける。図5.5-1にESD保護区域内の代表的な設備を示す。

ESD保護区域は、警告表示により識別する。例えば、MIL-STD-263Aでは、"ESD PROTECTED AREA" と表示するとしている。

(詳細は5.7項参照)



記号	グループ名称	記号	名称	記号	グループ名称	記号	名称
A	トロリーカート ワゴン	1	接地車輪	D	イオナイザ	1	イオナイザ
		2	接地ワイパー				
		3	接地表面				
B	人体接地器具試験装 置類	1	リストバンド試験器	E	作業表面	1	作業表面
		2	ヒールグラウンダ試験器	F	椅子	1	脚とパッドが接地されて いる椅子
		3	ヒールグラウンダ フットプレート	G	床	1	作業者接地のための床
C	接地関係	1	リストバンドとコード	H	衣服	1	着衣
		2	接地コード			2	帽子
		3	ESD接地設備	I	棚/部品入れ	1	表面が接地されている棚
		4	接地			2	接地された部品入れ
		5	接地接続ポイント	J	EPA表示	1	EPA表示
		6	接地ポイント				
		7	手袋				
		8	トゥ/ヒールストラップ				

図5.5-1 ESD保護区域内の代表的な設備
(IEC/TC47(S)1197)

5.5.6 取扱手順

ESD保護区域への立ち入りは、関連する教育を受けた者に限定すべきである（5.10項参照）。ESDSアイテムの取扱いに関する一般ガイドライン及び各関連部門の業務例を5.9項に示す。

5.5.7 保護区域の初期及び定期確認

恒久的保護区域の設置時に初期確認を行い、その後定期確認を行う。初期確認は、保護区域が設計通り施工されていることを保証する。定期確認は、保護区域が継続的に維持されていることをモニタする。

5.5.8 集積回路等製造用クリーンルームにおける静電気対策

電子部品の信頼性と歩留まりの向上を目的として、それらの製品の製造施設から塵埃を取り除く手段として、クリーンルームが使用されている。

クリーンルームは、空調設備にHEPA(High Efficiency Particulate Air) フィルタと呼ばれる高効率ダスト補集効果のあるフィルタを装備し、これにより外気のちり・ほこりを取り除き、製造施設内部を高清浄化するものである。クリーンルーム内では温湿度管理し、恒温恒湿環境となっている。

電子部品特に半導体電子部品の製造工程では、薬品や熱による基板処理が数多く行われているため、耐薬品性及び耐熱性を有する高分子樹脂（主に、PTFE; Poly-Tetra-Fluoro-Ethylene）や石英容器が常用されている。薬品の洗い落としのため、異物やイオンを取除いた純水も使用されている。これらの高分子樹脂・石英・純水は、抵抗値が高く、摩擦・はく離による静電気の発生が顕著である。

物体が静電気により帯電すると、ESDや静電気による吸着現象が生じることになる。静電気による微粒子の吸着現象としては、ウエハが帯電した場合、処理中のウエハ表面に微粒子が付着し、パターン欠陥となり、部品の不良原因となる。

クリーンルーム内での静電気の発生及び帯電を制御する方法としては、現在、接地、加湿及びイオナイザが用いられている。

(1) 接地

接地は、導電性又は拡散性のESD保護材料（5.6項参照）で構成された壁面、間仕切り、床材料及び各種用品の導電性部分に使用し、静電気電荷を大地に拡散させることを目的とする。さらに、作業者の作業服、作業靴を導電化し、人体に発生する静電気の帯電を速やかに大地に拡散する。しかし、接地が有効に機能するためには、接地する材料が導電性材料や静電気拡散性材料のようにある程度導電性を有したものでなければならず、先に説明したように絶縁材料が比較的多く存在するクリーンルーム環境では必ずしも有効な静電気対策とならないこともある。

導電性材料、拡散性材料とも、材料にある程度の導電性を付与するために使用する導電性エレメント（金属フィラ、導電性カーボン、その他導電性材料）が二次的な汚染を引き起こす可能性も否定できないため、使用を制限される場合も多い。

(2) 加湿

室内の湿度を高めることにより、空気中の水分子を電荷のリーク経路として使用する方法である。静電気抑制の機構上、クリーンルームの全ての材料に対して有効であるが、静電気の拡散を速やかに行うためには、環境を比較的高湿度にする必要がある。半導体製造の前処理工程、例えば、フォトリソグラフィ工程では、レジストのはく離又は結露を防止するために、低湿度に環境を制御する必要があり、加湿による静電気対策を行うことができない。また、作業者の不快感、発汗による汚染、結露による錆の発生やバクテリアの増殖など二次汚染の問題もある。高湿度を維持するためのランニングコストは、一般的には、イオナイザに比較するとかなり大きいといわれている。

(3) イオナイザ

帯電物が絶縁体や絶縁された導体でも有効であること及び低湿度の環境下でも効果に著しい変化がないことから、接地又は加湿することが実用上不可能な場合に他の静電気対策の補完的な方法として使用する。

5.6 ESD保護材料の特性と試験

5.6.1 概要

ESD保護材料としては、次に示す代表的な特性が要求される。

- a. 帯電した人間又は帯電した物体との接触等による直接放電の防止
- b. 摩擦電気の発生防止
- c. 静電界からの保護

これらの特性をすべて満たす材料を見つけることは困難である。希望する目的を満たすためにさまざまな保護材料を組み合わせ使用しなければならないことがある。ESDSアイテムを保護するのに必要とされる材料の性質は、抵抗率、減衰時間、摩擦帯電特性などの要因によるものである。

(1) 摩擦帯電防止

ESDを抑制する最善の方法は、静電気電荷の発生を防ぐことである。しかし、静電気の発生そのものを防止することは、難しい。電荷が発生すれば、その電荷の拡散はその材料の抵抗率及び面積により異なる。材料の導電性が高ければ高いほど電荷の拡散が早くなる。

(2) 電荷の拡散

導電性は、ESD保護材料の重要な特性である。電荷は、材料全体に分布し接地へ拡散する。ESD保護材料（導電性材料と拡散性材料の両方）は、この特性を保持している。材料の導電性が高くなると材料の電荷の拡散がより早くなる。

(3) シールドイング

アイテムを静電界又はESDによる高電圧スパークにより誘導された電磁パルス（EMP: Electromagnetic Pulse）から完全にシールドし、希望の減衰レベルを得るためには、アイテムを導電性材料で包囲することが必要となる。

(4) ESD保護材料測定パラメータ

ESD保護材料の特性評価に使用する測定パラメータは、通常、次のとおりである。

- a. 体積抵抗率及び表面抵抗率
- b. 減衰時間
- c. 摩擦帯電特性
- d. 静電気シールド特性
- e. その他

5.6.2 体積抵抗率及び表面抵抗率

(1) 体積抵抗率

体積抵抗率 ρ_v は、バルク抵抗率とも呼ばれ、均質な材料に対する定数であり、次のように誘導される。

電気理論から、ある材料の抵抗 R は、電流の流れに対して垂直な断面の面積 S に逆比例し、電流の流れに対し並列な方向の材料の長さ L に比例する。この時の比例定数は、材料の体積抵抗率 ρ_v として知られている。

$$R = \rho_v \cdot \frac{L}{S} \quad \cdots \cdots \text{式5.6-1}$$

体積抵抗率 ρ_v は、さまざまな材料についてのデータが得られており、その単位として $[\Omega \cdot \text{cm}]$ がよく用いられている。

(2) 表面抵抗率

表面抵抗率 ρ_s は、比較的絶縁性の高い基材上の薄い導電層の抵抗率の尺度として用いられる。 ρ_s は、正方形の相対する2つの辺の間の表面抵抗値で、単位は $[\Omega]$ となるが、通常の抵抗と区別するために、 $[\Omega / \text{sq}]$ として表すことが慣例的に行われている。 $[\Omega / \text{sq}]$ という値は、測定に使用する正方形の大きさには、無関係である。この抵抗は、材料表面における非常に薄い厚みを通じての平均抵抗を示している。

2つの抵抗率パラメータで、表面抵抗率は、表面導電性材料での抵抗率指標を示す傾向が強く、体積抵抗率は、体積導電性材料での抵抗率指標を示すものである。表面抵抗率 ρ_s と体積抵抗率 ρ_v の関係は、次式で表わされる。

$$\rho_v = T \rho_s \quad \cdots \cdots \text{式5.6-2}$$

ここに、 T : 表面導電層の厚さ

この関係は、材料が非常に薄い表面導電層の場合には有効であり、薄い拡散層を発見するために、半導体産業で広く使用されている。しかし、これは、ESD保護材料では、 ρ_s と ρ_v の関係を適切に示すものではない。

表面抵抗率は、絶縁基体上に薄い導電性面を有するラミネート材料の抵抗の測定パラメータとして広く使用されている。このようなラミネート材料としては、吸湿性ESD保護用ポリエチレン、ナイロンと天然木綿の混紡、金属又はカーボンをコートした紙、プラスチック、その他の導電材をコート又はラミネートした絶縁材料がある。これらの材料の導電層の厚さは、ほぼ一定であり、吸湿性ESD保護材料の発汗層も同様である。

表面抵抗率 ρ_s は、ASTM D 257 に従って測定し、測定抵抗を単位のないファクター W/l で補正する。測定抵抗と表面抵抗率との関係は、次の式で示される。

$$\rho_s = R \frac{W}{L} \quad \dots\dots \text{式 5.6-3}$$

ここに、 ρ_s = 表面抵抗率 [Ω/sq]

R = 測定抵抗 [Ω]

l = 測定電極（以下「プローブ」という。）間距離

W = プローブ幅

一般的には、ASTM D 257 の要求に適合し、電極端の影響を避けるために、長方形構造と同じ結果を得ることができる円プローブを使用することが多い。

(3) 抵抗率測定

導体と拡散材料の抵抗率を測定するための試験規格としては、ASTM D 991 及び ASTM D 257 の 2 つがある。

前述の 2 つの抵抗率の説明では、具体的な測定方法を示していないが、抵抗の測定は、図 5.6-1 に示すように、評価する材料に電圧 V を印加し、流れる電流 I との関係より求めることになる（オームの法則）。しかし、ESD 保護材料には、イオン成分等を導電機構として使用しているものが多く、オームの法則に従わないことがある。つまり、印加電圧が変化すると、導電キャリアの量も変化する。言い換えれば、このような材料では、測定時の電界強度が変化すると、電流密度も変化するということになる。従って、材料間の相関を厳密に得るためには、測定時の電界強度を併せて測定することが必要となり、実用状態の電荷拡散性能を推定するのであれば、帯電時の電界強度をシミュレートする必要がでてくる。

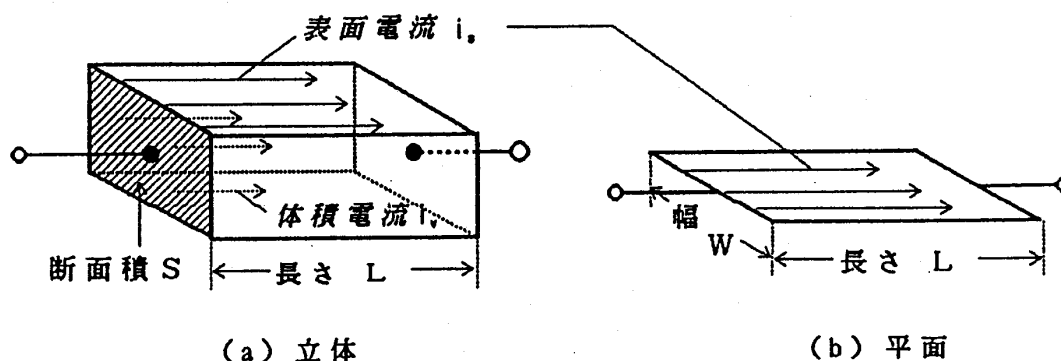


図 5.6-1 物体を流れる電流

(4) 表面抵抗と体積抵抗の分離

先に説明したように、材料の電気的な抵抗は、体積抵抗と表面抵抗の2つにより構成される。しかし、材料の表面は、材料の内部からのブリードアウト物質、酸化被膜、付着した水蒸気層、汚れなどのさまざまなもので構成されたものと考えられ、どのような材料であれ、基材を構成する物質とは異なったものとするべきである。このような考え方を採ると、表面抵抗とは、基材物質の汚れや水蒸気などへの親和性を示すものといえる。表面の物性が、2物体間接触時の電荷移動と密接に関係することを考えると、ESD対策における表面抵抗率の重要性がさらに認識されるであろう。

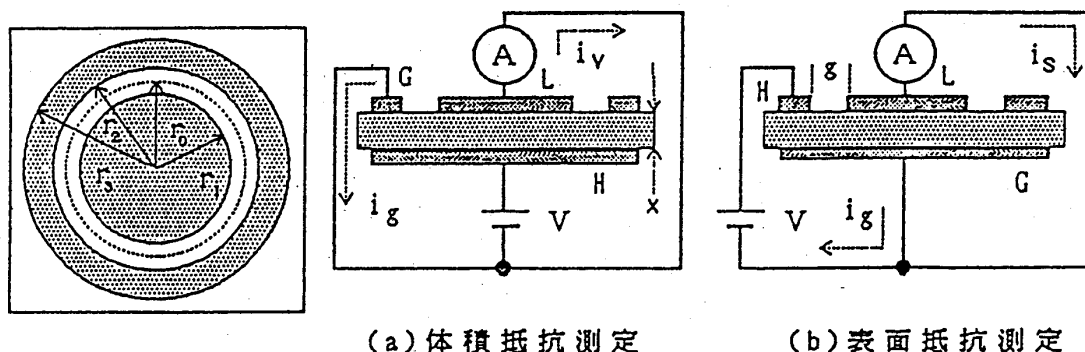
さて、このような表面抵抗の性質上、表面抵抗の値は、比較的高抵抗領域にあると考えられる静電気拡散性材料や絶縁材料では重要な特性となる。逆に、導電性の高い材料においては、電流の大部分が体積的な電流となるので、表面抵抗を測定する意味は薄れることになる（測定できない。）。

表面抵抗と体積抵抗を分離して測定するには、フラットな材料の表裏に図5.6-2に示すように3つの電極を配置して行う（ASTM D 257）。

体積抵抗測定では、図5.6-2(a)の配置において、電圧 V は、電極H-L間及びH-G間に印加する。電流計Aには、Lに流れ込んだ電流だけが測定され、G電極に流れ込んだ電流は測定されない。電極Lと電極Gの寸法に対してギャップ g が十分に狭ければ、H-L間の電界はほぼ平等電界となり、測定にかかる材料の面積と電極Lの面積がほぼ一致するので、単位面積当たりの電流（体積電流）が正確に測定される。

表面抵抗測定では、図5.6-2(b)に示すように、リング状電極をH電極とする。H電極から材料の内部に入った電流は、G電極に導かれて電源に戻され、材料表面近傍を流れた電流だけがL電極を通じて測定装置に入る。ここでG電極とL電極は同じ電位であるので、材料厚さに対してギャップ g を大きくすればするほど相対的にH-G間の電界が強くなり、材料の内部に入った電流は、Gに流れ込むようになる。つまり、L電極に流入する表面電流の測定値がより正確になる。

抵抗測定の誤差は、主に機械的なもの（先のギャップ g によるものや電流測定の誤差）と材料そのものに起因するもの（サンプリング等）がある。測定データのばらつきは、このような誤差がさまざまに影響して発生することが大きいので、材料の相関を求めるためには極力試験条件を合わせるように心掛ける。



(a) 体積抵抗測定

(b) 表面抵抗測定

$$r_0 = \frac{r_1 + r_2}{2}$$

図5.6-2 表面抵抗と体積抵抗の分離

5.6.3 不均一構造材料の抵抗測定

ESD保護材料の多くは、要求されるさまざまな特性を兼ね備えるために、不均一な構造を持っていることが多い。抵抗測定は、本来均一な材料を測定するためのものであるから、非常に無理がかかってくることになる。次に実際の測定で必要となる諸注意を示す。

5.6.3.1 層構造を持つ材料の抵抗測定

層構造を持つ材料の種類は多く、シート・マット類、袋等のフィルム材料、タイル・カーペット等の床材料などがある。各層の厚みはさまざまであるが、多い場合には4層以上となることもある。

層構造材料の抵抗測定は、表裏どちらかの面を測定したかにより結果が異なったり、原理上測定が成立しないこともある。さらに、各層の抵抗値レベルにより変化が見られ、測定者や測定器により差を生じることもある。

(1) 二層構造材料

高抵抗の板材料に帯電防止剤を塗布したものは、塗膜の厚みが数 μm 以下であり、導電性塗料を塗布した場合は1回塗布で数～数十 μm である。また、2種類のフィルムをラミネートした場合や床材料の一部のものは、表面材料と基材の厚みの比が1:1～1:3程度となる。図5.6-3に示すように、表面材料が低抵抗の材料では、表面材料の抵抗測定は、表面・体積共に比較的容易であるが、基材の測定は多少工夫が必要となる。

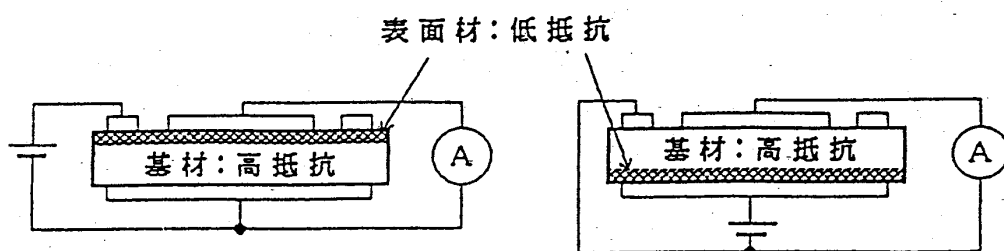
この材料を通常の均一材料として表面材料側で表面抵抗率測定を行えば、表面材料の中を流れる体積電流を測定することになる。したがって、見かけの表面抵抗率測定とするのがより正確な表現であろう。次にそのまま体積抵抗率測定を行うと、低い表面抵抗で測定器の入力端を短絡する形になり、大きな誤差を生じることになる。表裏の区別がつかないまま抵抗測定を実施した場合には、実態と大幅にかけ離れた結果を生じてしまう。

(2) 三層構造材料

三層以上の多層構造になると問題はさらに複雑になるが、各層の抵抗値により扱い方が異なる。図5.6-4に三層構造材料を示す。

a. 中間層が高抵抗の場合

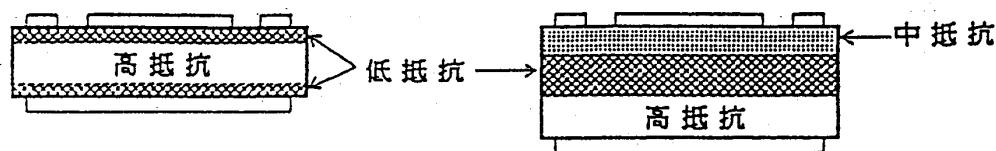
厚さ方向の抵抗を測定するには、図5.6-4(a)のリング電極を浮かせ、二端子測定を行う以外ない。ただし、この測定では、中間層の高抵抗部分が測定される。その他は、二層構造材料測定と同様であり、表面材料、裏面材料で個々に体積抵抗を測定するか、又は表裏の見かけの表面抵抗率を求める。



(a) 見掛け表面抵抗測定

(b) 基材の体積抵抗測定

図5.6-3 二層構造材料



(a) 中間層高抵抗

(b) 中間層低抵抗

図5.6-4 三層構造材料

b. 中間層が低抵抗の場合

図5.6-4(b)の場合、特に加工を加えずに外側から中間層の抵抗を測定する手段はない。何かの方法で外層を取り除くか、外部から特殊電極を差し込む、又は中間層の素材単独でサンプルピースを作成する方法が考えられるが、具体的には、中間層の厚さ・強度などを考慮し、個別に対応すべきである。これらの材料で抵抗率測定を行う場合には、さらに上下層の抵抗値の違いにより測定結果が変化する可能性もある。

c. 上層抵抗<下層抵抗の場合

図5.6-4(b)の電極構成で体積抵抗測定を行うと、測定器の入力端子には、表面の中抵抗層と中間の低抵抗層でショートに近い状態になり接地電位となる。測定電圧は、裏の高絶縁層を通じて電極前面を覆うように印加される。つまり、電源と測定器は、絶縁層で切り離された形となるので測定にならない。表面抵抗測定では、表面中抵抗層と中間低抵抗層の合成体積抵抗電流を測定するので、見掛けの表面抵抗率が得られる。

d. 上層抵抗>下層抵抗の場合

この場合には、上層材料（高抵抗層）についての表面抵抗・体積抵抗が測定できる。

また、高抵抗層が、金属蒸着層の上に処理された保護膜のように非常に薄い膜であった場合には、測定電圧が高すぎると絶縁破壊が発生し、中間層の抵抗層と電極間がショートするので、測定できなくなる。さらに、蒸着層の低い抵抗層には大きな電流が流入することになり、発熱により被膜の溶解が発生し、測定器の入力回路の破損まで引き起こす恐れがあるので十分に注意しなければならない。ただし、測定器の破損は、零チェックボタンをONにしておけば避けられる。また、通常は高抵抗測定用電極の内部抵抗が高いので、電流が大きくなると出力電圧が急激に低下する。このような状態で測定を行うと、本来高抵抗であるべきものが低抵抗として測定されることもあり得る。特に、極薄の絶縁層を測定する場合には、測定電圧を10V以下に下げることが必要となる。

5.6.3.2 導電性物質を練り込んだ材料の抵抗測定

電氣的抵抗を下げる手段として、導電性材料を基材に練り込む方法がある。この方法では、一般に基材の絶縁性が高く、練り込む材料の配合率を調節することにより材料の導電経路の量を調節する。一般的には、このような導電経路は、多かれ少なかれキャパシティブ結合をしていると考えられ、その量により抵抗値が変化すると考えられている。導電材料が比較的多量に含まれている材料は、抵抗性の結合が優先する材料と見ることができ、抵抗測定では比較的安定した結果を得ることができる。一方、導電材料が少ない場合には、キャパシティブ性の結合が優先となり、電極荷重などの測定条件や印加電圧により、抵抗測定で測定値が突然上昇したり、下降したりすることがある。

5.6.4 減衰時間

減衰時間は、ESD保護材料特性を示すための抵抗率とは別の測定パラメータである。減衰時間は、材料の一部に特定の電圧を加え、この電圧に対して一定レベルまで電圧が減衰する時間を測定するものである。吸湿性のESD保護材料は、相対湿度により減衰時間が変化する。

(1) 減衰時間測定

減衰時間の測定方法としては、FED-STD-101, Test Method No. 4046 "Electrostatic Properties of Material"がある。

ESD対策を行う上で最も基本的な事項は、対象とする物質が摩擦、はく離、その他の原因によっても静電気帯電しないことである。しかし、実際には、物質が存在すれば、その物質がたとえESD対策を施されていたにしろ、ある程度、静電気により帯電することは避けることができない。そこで、一般的にESD対策を行うために、この静電気の発生をできる限り小さく抑え、障害となる静電気現象の継続時間を可能な限り短くするために、発生した静電気を何らかの方法で拡散するような手段を取っている。この拡散性の能力を示す指標の一つとして、一般的には、前項に述べた抵抗率と共に減衰時間が使用されている。

(2) 評価基準

FED-STD-101は、試験方法の規格であるために基準値が定められていない。そこで、実際に材料を評価する場合には、一般的には、MIL-B-81705、NFPA 99、ANSI/EIA 541、CECC 00 015などの規格に規定される基準値が使用される。MIL-B-81705は包装材料の仕様書、NFPA 99は病院内で使用される着火の危険のある材料の取扱い、ANSI/EIA 541はESDSアイテムのための包装標準、CECC 00 015はESDSアイテムの取扱い標準である。この中で、ANSI/EIA 541とCECC 00 015は、厳密にはこの測定基準を使用していない。

(3) 測定環境

a. コンディショニング：サンプルを3つのグループに分割して以下の処理を行う。

- ・ 12日間、 $71 \pm 3^{\circ}\text{C}$ 環境下に放置
- ・ 24時間のシャワーリング
- ・ $23 \pm 3^{\circ}\text{C}$ 、 $50 \pm 5\% \text{RH}$ 環境下に放置

b. 全てのサンプルを24時間、 $23 \pm 3^{\circ}\text{C}$ 、15% RH以下の環境下に放置し、その環境で試験を行う。

ただし、最近では環境条件をさらに厳しくする傾向がある。

(4) 測定概要

測定は、図5.6-5に示すような原理を使用し、測定サンプルに直接 $\pm 5\text{kV}$ の電圧を加え、サンプルの電圧が、最高許容電圧に達した後、電圧印加を停止し、接地回路に切り替え、測定サンプルの電荷減衰を測定する。測定器の概要を図5.6-6に示す。図のようにこの測定器規格では、サンプルを2つの電極間に挟み電圧を加える。高電圧を使用するため、センサーの周囲のシールドにも注意する必要がある。

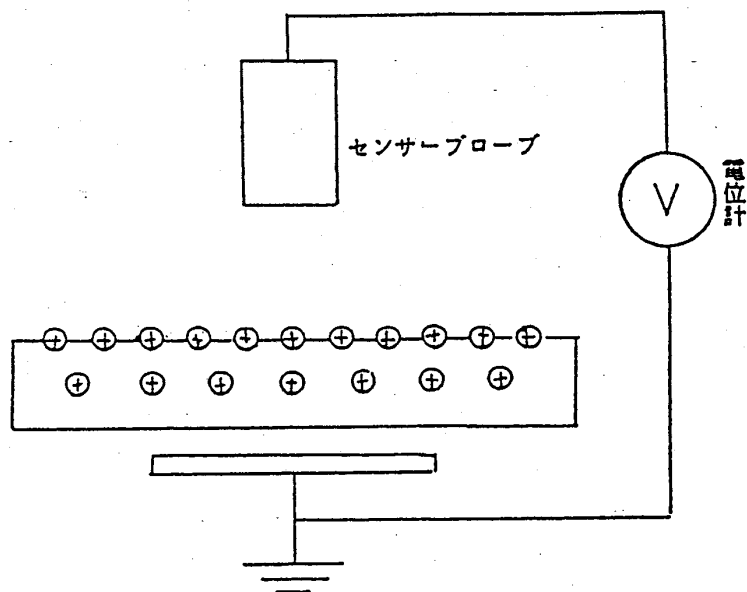


図5.6-5 減衰測定原理

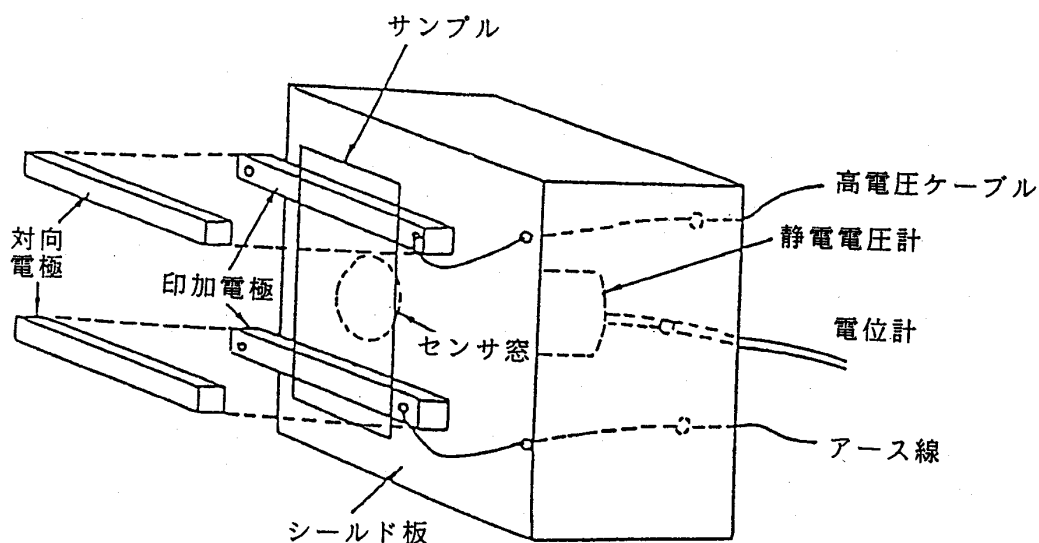


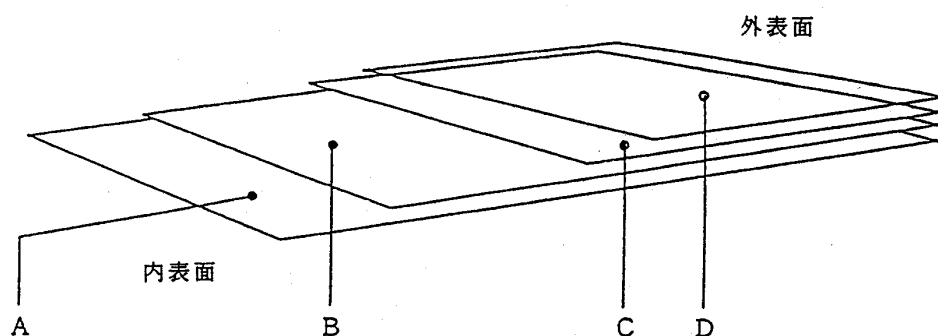
図5.6-6 減衰測定器の概要

5.6.5 静電気シールド

図5.6-7に示すような金属蒸着層を保持する多層フィルムの静電気シールド特性は、現在、図5.6-8に示すような試験方法で評価されている。

- (1) 材料の外側に所定の電圧を印加した場合に、内部に誘起される過渡電圧及びパルスの持続時間を測定する。
- (2) 測定は、図5.6-8及び図5.6-9により、コンデンサ C_1 （静電容量=200pF）に充電した電圧（1000V）を、放電抵抗 R_1 （400k Ω ）を介して、材料外側に密着した接触プレートに印加する。その時の材料内部に取り付けられた静電気キャパシティブセンサーに誘起される過渡電圧とパルスの持続時間をプローブを介して、オシロスコープにより測定する。

備考：袋の構造の差異により、ANSI/EIA 541の試験方法（ C_1 = 200pF、 R_1 =400k Ω 、印加電圧=1000V）より、従来測定を開発した企業が行ってきた方法（ C_1 =100 pF、 R_1 =1.5 k Ω 、印加電圧=2000V）の方が、データの相関性が得られることがある。



A : 非常電性ポリエチレンフィルム

B : ① Al or Ni

② ポリエステル

③ 導電性フィラー

C : ① ポリエステル

② Ni

③ ポリエステル/P. P

D : ① 帯電防止コーティング

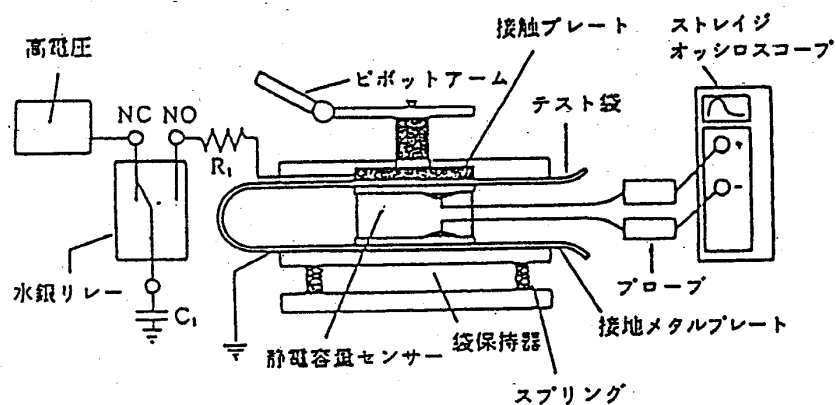
② 耐摩耗コーティング

なし

(ないものもある)

図5.6-7 静電気シールド用保護袋の構造

テスト装置：



テスト条件：

E I A 法

3 M 法

印加電圧 : 1000 V

2000 V

C_1 : 200 pF

100 pF

R_1 : 400 k Ω

1.5 k Ω

図5.6-8 静電気シールド性能試験方法

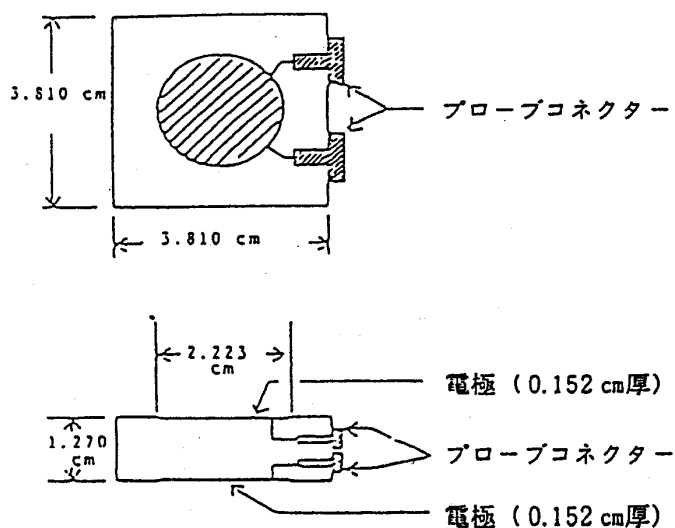


図5.6-9 静電容量センサー

5.6.6 摩擦帯電特性

導電性や拡散性のESD保護材料は、摩擦起電による静電気発生を抑制したり、静電気放電を抑制したりするものである。吸湿性のESD保護材料は、通常、静気を発生しにくい。しかし、金属では、摩擦帯電系列で示されるように、摩擦起電により大きな電荷を発生するものがある。例えば、アルミニウムと一般プラスチックを摩擦すると大きな静電気帯電が発生する。

(1) 摩擦帯電測定

NASAのKSC材料試験部門は、"Standard Test Method for Evaluating Triboelectric Charge Generation and Decay" (MMA-1985-79 Revision 2, July 15, 1988)を発行している。この試験方法は、制御された環境条件下において、材料サンプル上に発生する摩擦帯電と放電速度を評価するものである。材料の合否判定基準は、KSCが行うが、必要に応じて適宜修正されるものである。このKSCの試験方法は、薄いプラスチック材料、圧着テープ、床材料の特性評価に使用されている。表面又は体積抵抗率との相関関係は、はっきりしない。

(2) 一般包装材料によるデバイスの摩擦帯電の測定

図5.6-10に示す装置を使用して次の手順によりデバイスに発生する摩擦帯電を測定する方法が IEC TC47(S)1197 に情報として示されている。

- 14ピンDIP型プラスチックパッケージデバイス（又はESD対策が要求される同様のデバイス）をヘッドに取り付ける。このとき、デバイスを裏返して設置し、ヘッドがパッケージの導電部に接触しないようにする。
- 接地されたキャリッジ上に試験材料をクランプする。
- ヘッドに $0.25 \pm 0.01\text{N}$ の定常的な力を加える。
- キャリッジを1分間に 100 ± 5 回の速度で、100mm以上前後に20回移動させる。その後、デバイスをファラデーケージに落とし、発生した電荷量を測定する。
- 試験後の包装材料にイオン化した空気を吹き掛け、残留電荷が $\pm 0.01\text{nC}$ と未満となるようにする。
- デバイスを再び取り付ける。

以上の操作を10回繰り返す。

備考；電荷量は、 nC/cm^2 で表示し、この試験結果をESD保護を要求するデバイスの破壊電圧と相関する最大許容電荷量の計算に使用する。

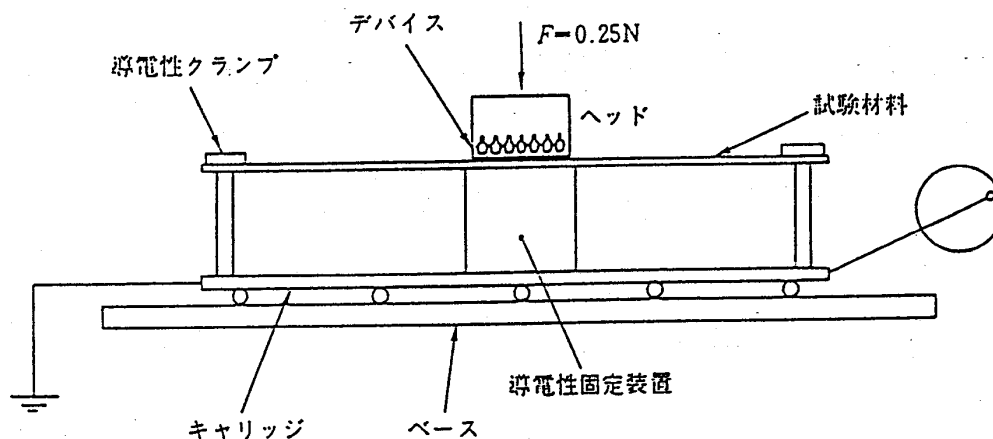


図5.6-10 一般包装材料によるデバイスの摩擦帯電測定装置
(IEC TC47(S)1197)

(3) ICマガジンによるデバイスの摩擦帯電の測定

図5.6-11に示す概要手順でデバイスに発生する摩擦帯電を測定する方法がANSI/EIA-541に示されている。

- 竹のピンセットを使用してICマガジンにデバイスを挿入する。次いで、マガジンの両端にストッパをつける。
- デバイスをマガジンの端から端まで滑らせるようにマガジンを水平から上下45°つまり傾斜90°の回転を行う。
- これを6回行い、試験デバイスをマガジンの端に移動させ、ファラデーケージに落として発生電荷量を測定する。
- 試験後のマガジンにイオン化空気を吹き掛け、残留電荷 $< \pm 0.01 \text{ nC}$ となるようにする。
- デバイスを再びマガジンに挿入する。

この操作を10回繰り返す。

備考；電荷量は、 nC/cm^2 で表示し、この試験結果をESD保護を要求するデバイスの破壊電圧と相関する最大許容電荷量の計算に使用する。

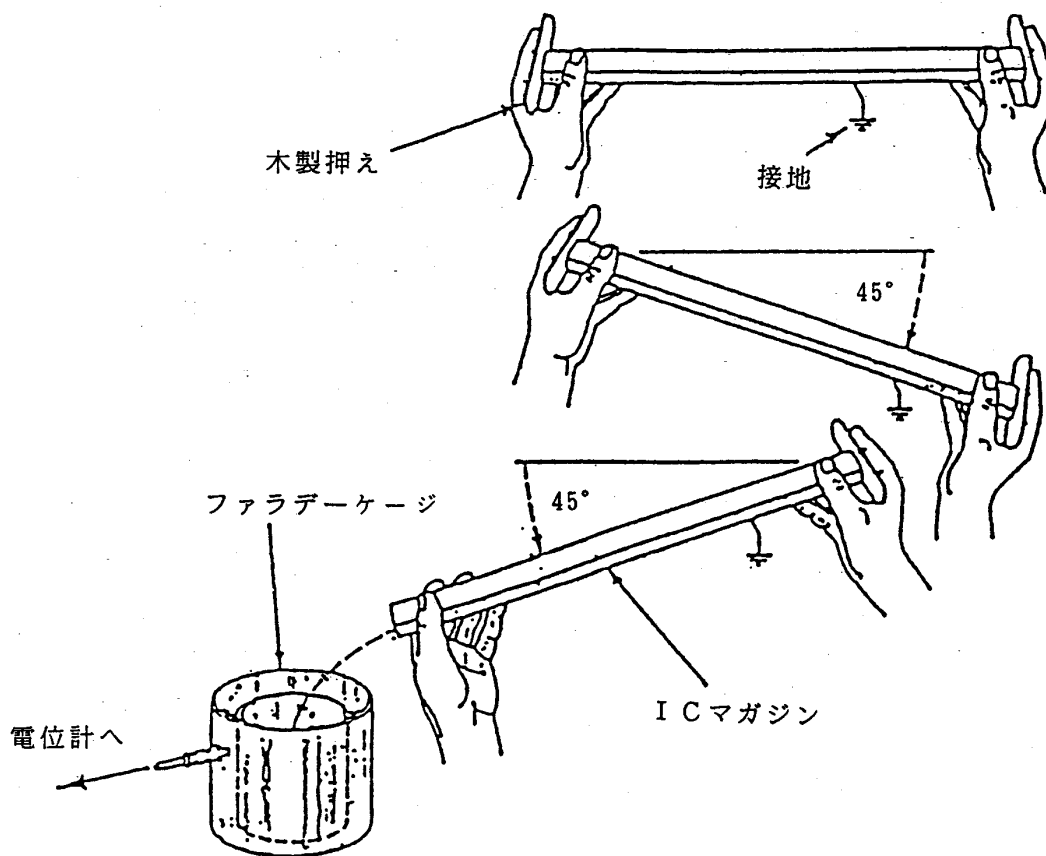


図5.6-11 ICマガジンによるデバイスの摩擦帯電測定
(ANSI/EIA-541)

5.6.7 ESD保護としての材料分類

抵抗率による分類の他に、帯電性や静電界シールド性によって分類しており、規格によって差異がある。代表的な規格における分類を表5.6-1～5.6-3に示す。

表5.6-1 MIL-HDBK-263A による材料分類

導電性材料	表面導電性保護材料は、表面抵抗率が $10^5 \Omega / \text{sq.}$ 未満の材料。体積導電性保護材料は、体積抵抗率が $10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ 未満の材料。
拡散性材料	表面拡散性保護材料は、表面抵抗率が $10^5 \Omega / \text{sq.}$ 以上 $10^{12} \Omega / \text{sq.}$ 未満の材料。体積拡散性保護材料は、体積抵抗率が $10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ 以上 $10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ 未満の材料。
絶縁材料	導電性又は拡散性保護材料として区分されないもの。
帯電防止材料	摩擦帯電による電荷の発生を抑制する性質を持つ材料。この性質は、抵抗率とは関係しない。

表5.6-2 MIL-B-81705C による材料分類

区分	特性等
タイプ I	識別名称：EMI/STATIC SHIELD 特性：非透湿性、静電気保護、静電気・電磁シールド 構造：金属ラミネート 備考：マイクロ波素子、電界効果型トランジスタ、薄膜抵抗などの静電気・電磁波からの保護。
タイプ II	識別名称：STATIC DISSIPATIVE 特性：透明、耐漏水性、静電気保護、静電気拡散 構造：透明（無色又は薄い色）、コンタミの発生防止 備考：透明性を必要とし、オイル・グリスが直接接触しない環境で使用。
タイプ III	識別名称：STATIC SHIELD 特性：透明、耐漏水性、静電気保護、静電シールド 構造：透明（無色又は薄い色） 備考：EMIシールド効果がタイプ I（25dB min）より弱い（10dB min）。

表5.6-3 CECC 00 015 による材料分類

I. 帯電防止材料：同一又は異種の材料を摩擦・剥離した際の電荷発生を抑制する特性を有するもの。	
II. 抵抗特性による分類	
静電気シールド材料	静電気を減衰する能力を保持する材料。 表面抵抗率が $10^4 \Omega / \text{sq.}$ 未満の層を保持するか、 又は体積抵抗率が材料の厚み 1 mm 当たり $10^3 \Omega - \text{cm}$ 未満の材料。
静電気導電性材料	表面抵抗率が $10^3 \Omega / \text{sq.}$ を超え $10^6 \Omega / \text{sq.}$ 未満の材料で体積導電性材料は、体積抵抗率が $10^2 \Omega - \text{cm}$ を超え $10^5 \Omega - \text{cm}$ 未満の材料。
拡散性材料	表面抵抗率が $10^5 \Omega / \text{sq.}$ 以上で $10^{12} \Omega / \text{sq.}$ 未満の材料、又は体積抵抗率が $10^4 \Omega - \text{cm}$ 以上で $10^{11} \Omega - \text{cm}$ 未満の材料。
絶縁材料	表面抵抗率が $10^{12} \Omega / \text{sq.}$ 以上の材料、又は体積抵抗率が $10^{11} \Omega - \text{cm}$ 以上の材料。

5.7 ESD保護用品

効率的なESD管理プログラムの設定と履行において、ESD保護用資材、器材、機器などの適切な選択、調達及び使用が重要である。更に、調達にあたっては、選択した用品が要求された保護レベルを満足しているか否かを確認すること、及び使用にあたっては、ESD保護用品が公表されている仕様を満足していることを試験等により確認することが必要である。

静電気発生の抑制と監視用に、さまざまな用品が使用されており、代表例を次に示す。

5.7.1 ESD保護袋

ESD保護袋は、一般的に静電気に敏感な電子部品の包装用に使用されている。そのため、帯電防止特性以外の特性も必要とされている。例えば、(a) 袋に使用されている物質が内容物を腐食したり、汚染を発生させたりしないこと、(b) 再使用にも耐えられるものであること、(c) 長期間の使用でも、材料に含有する化学物質が変化したり、形が崩れたり、性能劣化したりしないこと、(d) 内容物の確認が袋を開封せずに行えるようにある程度の透明性を持つこと、などがある。更に、防湿性が必要とされることがある。

ESD保護袋は、一般的には、次の4つに分類することができる。

(1) 導電性プラスチック袋

基材に導電性カーボン等を添加し、その導電性により素材に帯電防止性能を保持させたもの。理論上は、添加する導電性カーボンの量により導電特性を調節することができるが、実際には、導電性カーボンの添加量が多すぎると基材の特性が失われ、少なすぎれば効果がなくなるために、特性に上限と下限がある。一般的には、この帯電防止材料でプラスチックを使用する全ての分野をカバーできると考えられていた時代もあったが、最近では、色がカーボンの黒色のために黒に近い色となるために、包装材料としては、開封せずに内容物の確認が行えないことから、使用が減少している。また、作業台表面や床材料としては、黒色による美観の問題や導電性カーボンの脱落の問題から、単体での使用は避けられ、他の材料とのラミネート製品が増加してきている。

(2) 帯電防止剤練り込みプラスチック袋

帯電防止剤を基材に添加したり、表面処理したりしたもので、表面層において電荷の発生を防ぐ。このタイプのほとんどのものは湿度依存性を持ち、低湿度環境下では当初の帯電防止効果が発揮できないものもある。この材料は、袋やコンテナの他、作業台表面、床材料にも一部使用されている。

(3) 静電気シールドタイプ袋

この型の袋の使用目的は、次の3点である。

- a. 内容物と静電気を帯びた物体との直接放電を防ぐ
- b. 内容物との間に摩擦帯電を発生させない。
- c. 外部の静電界や放電から内容物を保護する。

この型の帯電防止袋の大部分は、ラミネート構造を取っている。古くから使用されているものとしては、MIL-B-81705タイプIがある。

(4) 導電性ポリマータイプ袋

ケミカルドーピングや共重合体、電子ビーム処理された材料等がある。耐久性、腐食、汚染などの他のタイプの袋に見られる欠点はないといわれているが、現在なお開発中であり、価格が高い。

5.7.2 クッション材料

ESD防止用クッション材料は、導電性タイプと帯電防止タイプがあり、用途により使い分けている。また、1次／2次包装及び静電気シールド効果を持たせるために、何種類かのフィルムをクッション材料に張り合せたものもある。

(1) 導電性フォーム

導電性カーボンを使用した黒色のフォーム材料で、一般には、ポリエチレンかうレタン樹脂を使用する。表面導電性のフォーム材料で、スチロール性のものもある。

- a. 低密度：一般的なフォームの使用、つまり、物理的な衝撃の緩衝のために使用する。
- b. 高密度：IC等のリードを折り曲げずに保管、輸送し、シャント効果によりESDを防止するものである。

過去には、水蒸気の存在下で高密度導電性フォームの塩素イオンと硫黄イオンによりICリードが腐食することが報告された。原因は、添加された難燃処理剤及びベーキング時間が不十分であったためである。このタイプの保護材料は、取扱中に導電性カーボンの脱落が起こるために、クリーンルーム等のクリティカルな環境での使用は禁止されている。

(2) 帯電防止クッション材料

帯電防止クッション材料と称されるものは、バブルラップや発泡ポリエチレン、ポリスチレンで帯電防止処理されたものである。これらの材料は、ESDSアイテムの貯蔵、輸送、取扱い中にアイテムの物理的な保護を完全に行うために、MIL-B-81705等の袋類と合わせて使用される。ただし、これらの材料の帯電防止特性は、帯電防止タイプの袋類と同様に環境の相対湿度に依存している。

5.7.3 ICマガジン

一般的にDIP型ICの貯蔵／輸送に使用される特殊なICマガジンと呼ばれる包装材料は、次の3種類に分類されている。ICマガジンは、その形状のために、次の3種類のどれを使用しても等電位結合とならず、完全なESD対策を行うことはできない。また、いずれのタイプを使用しても、使用時に発生する摩擦帯電によるデバイス損傷の危険性を完全に回避することは難しい。

(1) 金属製

一般には、アルミニウム製のマガジンが代表的なものである。アノードイック処理されていないアルミニウム製マガジンは、全てのICについて発生電荷量が最小である。しかし、このマガジンは、高導電性であるために、ESDSアイテムを取り出す瞬間にマガジンよりアイテムの金属リード部にESDが発生する可能性がある。そのために、作業者がアルミニウム製マガジンを直接取扱う場合には、リストストラップの着用が必須となる。また、アノードイック処理されたアルミニウム製マガジンの表面は、絶縁体となり上記の問題は発生しにくくなるが、静電気の発生は多くなる。

(2) 導電性カーボン練り込み型

導電性カーボンを練り込んだこのタイプのものは、一般に不透明で内部確認のために、スリット又は透明な窓がついている。このタイプのスティックは、高い導電性を持ってはいるが、摩擦帯電の発生も大きく、その意味ではデバイスを損傷させる可能性が三つの種類のマガジンの中で一番大きい。

(3) 静電気拡散型

練り込み型と塗布型のものがあるが、一般には塗布型のものを使用する。帯電防止処理されて時間の経過していないマガジンは、摩擦帯電の発生が非常に小さい。しかし、時間の経過とともにその効果は、薄れていくのが一般的である。そのため、上記(1)と(2)のタイプは、ある程度再使用できるのに比べ、このタイプは、ほとんど再使用することはできない。ただし、このタイプは、透明性に優れ価格が非常に安いために一般には広く使用されている。

5.7.4 ICキャリアテープ

SMDタイプのICの包装には、キャリアテープを使用する場合がある。ESDSアイテムをキャリアテープを使用して適切に保護するためには、キャリアテープそのものとカバーテープを帯電防止材料で作成する必要がある。また、ESDSアイテムをテープに貼り付けるための接着剤には、はく離時の帯電が最小となるものを選択する。この種の包装材料には、構造上あまり多くのESD対策を行うことは難しいので、外装材料を考慮するようにする。

5.7.5 トートボックス、コンテナ、トレイなどの容器

ESDSアイテムを包装、輸送、貯蔵するトートボックス、コンテナ、トレイ類は、ESD保護材料の中でも重要度が高い。これらは、比較的大きな静電容量を持つために、ESD対策を施していない場合には、作業区域で大きな静電気発生源となる可能性を持つ。また、非導電性材料製の場合には、そこからの除電が非常に難しくなる。これらの材料のESD対策は、近くの帯電物質が内容物に影響を与えない程度の導電性を持ち、帯電した場合に接地時に内容物へESDが発生しない程度の絶縁性を持つことである。その目的のために市場には、さまざまなタイプの製品が出されているが、使用目的に合わせてそれらを選択することが重要となる。

なお、導電性カバー付きのESD保護用コンテナ等のふたを外して使用する（ファラデーケージ機能がなくなる。）場合のように、製品設計仕様と異なる使用には特に注意を要する。

5.7.6 作業者の接地ストラップ

ESDSアイテムを取扱う作業者は、皮膚に接触するように手首又は足首に接地ストラップを着用する必要がある（図5.7-1参照）。このストラップの機能は、作業者の静電気電荷を接地に逃すことにある。作業者用接地ストラップの代わりに、ヒールグラнда（図5.7.-2参照）又は導電性靴（規格としては、JIS T 8103 がある。）に、導電性椅子及びESD保護床で構成する作業者接地を使用してもよい。

人体接地ストラップは、人体安全性のため、通常、接地間に1 MΩ程度の抵抗を挿入する。接地ストラップは、表5.5-1に示す「痛みを感じるほどではない。」程度に電流を制限するために、接地との間に十分な抵抗を組み込む。人体接地ストラップの例には、次のものがある。

- a. カーボン練り込み体積導電性プラスチック接地ストラップ
- b. 体積導電性プラスチック接地ストラップ
- c. 伸縮金属接地ストラップ
- d. 伸縮金属接地ストラップ絶縁外部表面付き
- e. 導電性ワイヤ又は導電性ケーブルが組込まれた伸縮性布接地ストラップ

これらの接地ストラップは、人体の安全のために、それぞれの接地ストラップ自身又は接地コードのどちらかに保護抵抗を組み込む。保護抵抗は、ケーブルのストラップ抵抗をシャントし、ケーブルと接地のショートの可能性を減少させるために、皮膚との接触点の近くに設置する。外部表面が金属又はカーボン練り込みの接地ストラップは、人体の偶発的なハード接地を避けるために、絶縁性の外部表面を追加する。

作業者の接地ストラップは、保護抵抗を介して直接接続する。作業者の接地ストラップは、ストラップを危険時に取り外せるように、素早く脱却できる機構を持つこと。作業者の接地ストラップは、人体の安全性と接地ストラップによる粒子やその他の汚染の発生の可能性の両方について十分調査して選ぶこと。カーボンや金属のワイヤが練り込まれた材料は、導電性の粒子を落とすことがある。同じように、金属めっきされた合成繊維の接地ストラップでもそのような汚染が発生することがある。

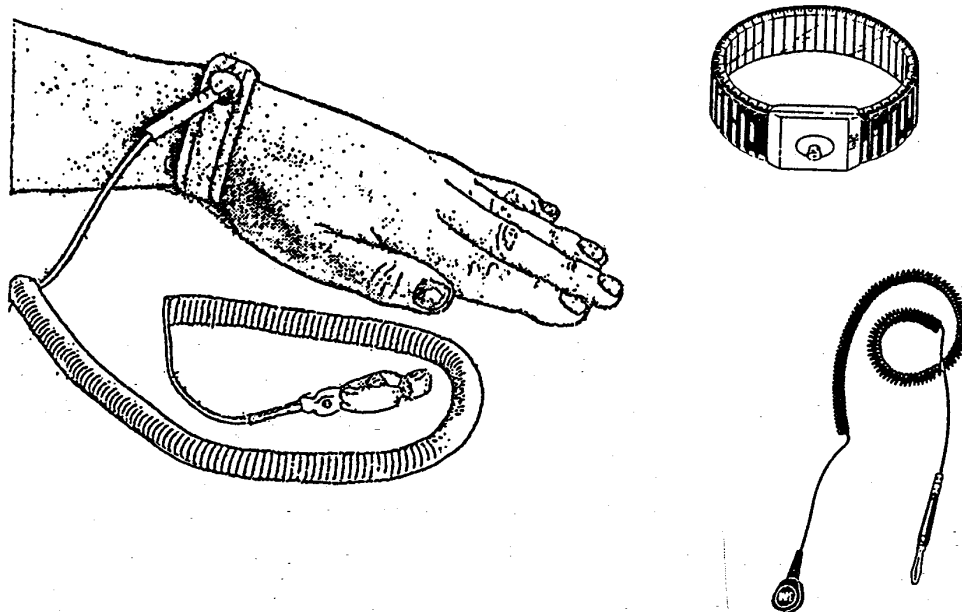


図5.7-1 人体接地ストラップの例

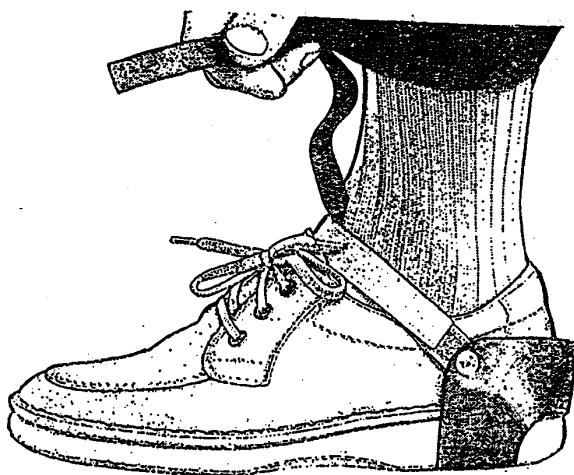


図5.7-2 ヒールグラウンドの例

5.7.7 保護床

- (1) ESD保護床材料は、導電性又は拡散性のあるもので、カーペット、ビニールシート、ビニール床タイル、テラゾなどの形状がある。導電性ビニール床には、導電性の接着剤を使用する。
- (2) 硬面仕上の床材にワックスをかけると、表面の抵抗が非常に高くなり、静電気の発生を起しやすくなるので、ワックスの使用は避けること。
- (3) 導電性の靴、導電性の靴カバー又はかかとの接地器具を使用して人間の静電気を導電性床に逃がす。これらは、ESD保護区域でのみ着用し、汚染物質がこれらの床との間の導電性を阻害しないように清潔に保つ。
- (4) ESD保護区域の作業台に着席している人間は、脚を床から作業椅子に持ち上げ、床材の利点が失なわれることがよくある。したがって、接地した導電性作業椅子を、ESD保護床材と併用することが必要となることが多い。
- (5) 保護床は、表5.5-1に示す「痛みを感じるほどではない」程度に電流を制限するために、接地との間に十分な抵抗を組み込む。
- (6) 塗装又はシールしたコンクリート床及び仕上げ塗りした木の床は、通常、静電気の主な発生源となるので、ESD保護床材料又は床マットで被覆するか、ESD保護用の処理を行う。床材は、床を歩く作業者によって生じる電荷量を静電界メータによって定期的に測定し試験する。
- (7) ある区域では、電氣的な安全性のために、保護床の使用を禁止することがある。これらの場合には、人体接地ストラップで、ESD保護要求を達成する。
- (8) 各床材料に共通した注意点は、次のとおり。
 - a. 使用する目的により接地抵抗を選択する。人体安全のため、通常、接地間に1 MΩ程度の抵抗を挿入する。
 - b. 導電性を持たせるためには、特殊な施工方法や材料が必要になる。したがって、材料メーカーの施工方法を工事業者にも理解させ、正しい施工を行う必要がある。
 - c. カーボンや金属の粉・繊維で導電性を発揮しているもので、表面層にこれらが露出している場合には、汚染の原因となる可能性がある。
 - d. 床材料の導電化と合わせて靴の導電化や台車の接地を取るなどの対策も必要となる。
 - e. 施工後も床表面の洗浄等を行い導電性の維持と電気抵抗値の定期的な測定による管理が必要である。
- (9) ESD保護床は、施工面からは、表5.7-1のように分類される。

表5.7-1 導電性床仕上げ材の分類

1.置き敷き	—	シートタイプ	… ゴム、塩ビ、ポリオレフィン
	—	ブロックタイル	… ポリオレフィン
	—	(タイルカーペット)	… 各種繊維
2.張 床	—	タイルカーペット	… 各種繊維
	—	ビニル床タイル	… 硬質塩ビ
	—	ビニル床シート	… 軟質塩ビ
3.塗 床	—		… エポキシ、ウレタン、アクリル

5.7.7.1 置き敷きタイプ

カーペットタイルも含める場合もあるが一般的には、ESD保護マットやスノコタイプがほとんどである。通常は、施工、移動、除去が容易なので、部分的な対策やレイアウト変更の多い個所に適するが、張床用途ではないので台車走行や荷重のかかる用途には向かないこともある。一般の静電気対策がされていない床材料の上に置き敷きされる場合には、接地を確実にを行う必要がある。

5.7.7.2 張床タイプ

タイル状やシート状のもので、コンクリート床面等に直接施工され半恒久的な接着工法が用いられる。ただし、寿命は床上の通行量、荷重、負荷などにより大きく変化するので施工前に十分検討を行う必要がある。

(1) タイルカーペット

OAルーム、コンピュータールームなどのように台車走行性や耐荷重性よりも、美観、歩行性などの人体の要因を重要視する環境で多く使用されている。人体帯電を抑制することが主な目的であるので、通常は帯電防止グレードとして分類する。一部に金属ファイバーを密に混入し、パッキング材料に導電性材料を使用したものもあるが、静電気電荷の拡散は、他の導電性床材料に比較すると十分ではない。したがって、これらをESDSアイテム保護やEMCのノイズ抑制に使用すべきではないとの考えもある。

(2) ビニール床タイル

帯電防止／導電性Pタイルと呼ばれるもので、硬質ビニール樹脂に導電性材料を混入して作成する。最近のものは、アスベストは使用されていない。硬質材料であるために、台車の走行性、耐荷重性に優れているが、シームレス加工を行わない場合には、接続部にゴミ等がたまり設計性能がでないこともある。さらに、接続部より水が侵入した場合には、床材料の本来の特性も失われることがある。帯電防止剤を使用したタイプのものは、導電性材料を混入したものに比較すると寿命が短い。

(3) ビニール床シート

長尺ビニールシートと呼ばれ、一般的には軟質ビニールを原料としている。施工性、耐久性に優れているが、耐荷重、耐熱性などでタイル、塗床に劣る場合もある。通常は、シームレス加工を行う。

5.7.7.3 塗床タイプ

従来よりある床用樹脂コーティング材料に導電性フィラーを混入して導電性を持たせた床材料である。平滑なシームレス表面が得られ、耐荷重性、耐薬品性に優れている。材質的には、アクリル、ウレタン、エポキシ樹脂などである。施工方法は、コンクリート下地の上に数層のプライマー塗装を行い表面材料を塗布する。このようにあくまでも現場施工となるために、施工によるバラツキや割れの発生、材質からくる硬さやすべり易さなどの問題もある。最も大きく問題とされるのは、施工上一部の塗り直しや修理が難しい場合があるということがある。

5.7.7.4 床の抵抗測定

床関係の電気抵抗測定で、床材料及びマット類の材料については、試験用チャンバーで試験を行えるので他の材料と同じ取り扱いができるが、施工後の床では、抵抗測定で多少注意が必要となる。

NFPA99、RIIS-TR-87などに示された測定方法の概念図を図5.7-3に示す。どちらも材料としての表面抵抗率を厳密に測定しようとするものではなく、単に、2点間の抵抗値又は接地抵抗値を測定するものである。

これらの測定器としては、携帯用のメガーが用いられる。帯電防止床材料では、測定抵抗が $1 \times 10^6 \sim 10^9 \Omega$ 程度であるから測定電流がnA近くになり、高抵抗部分は、メガーでは正確な測定ができなくなる。そのため高絶縁抵抗計を使用することになるが、図5.7-4に示すように施工床の接地の関係で測定ができなくなることがあるので十分に注意する。図5.7-5の場合、電池駆動の測定器であれば、測定器を完全に絶縁し、測定系全体をシールドすることにより測定が可能となる。しかし、いずれにしても微小電流の測定では、電氣的なノイズに対して十分に考慮する必要がある。

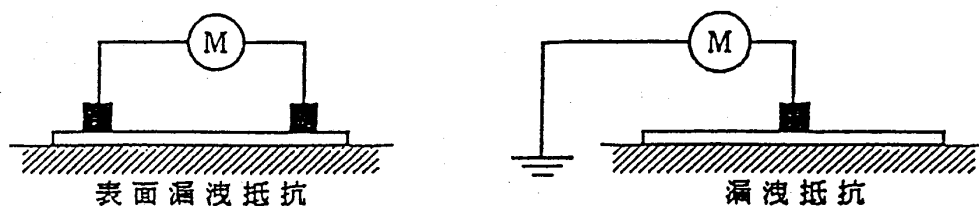
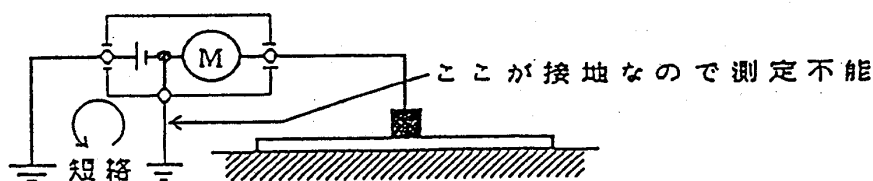
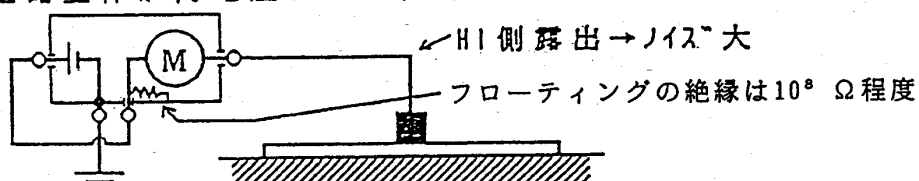


図5.7-3 導電性床の電気抵抗測定方法



(a) 商用電源動作型抵抗計

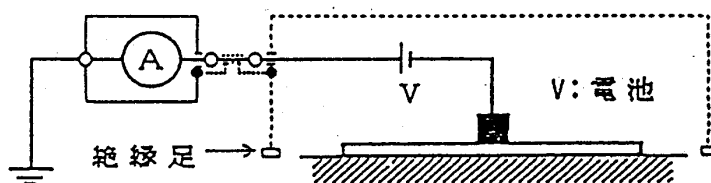
メータ回路全体が高電圧になる(測定器として動作しない)



(b) メータ回路フローティング型

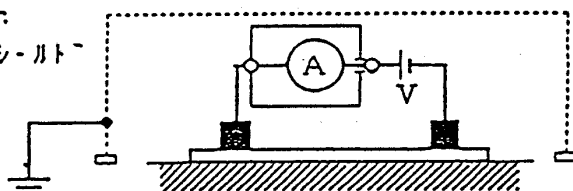
図5.7-4 高絶縁抵抗計による床測定

Vをフローティングしメータ入力回路はシールドする。



(a) 漏洩抵抗測定

V, A共にフローティング
測定箇所全体をシールド
(メータ: 電池動作)



(b) 表面漏洩抵抗測定

図5.7-5 帯電防止床の電気抵抗測定

5.7.8 作業台表面

ESD保護作業台表面を使用する第一の目的は、作業者が発生する静電気や作業台表面上に置かれる材料の電荷が、ESDSアイテムに有害な影響を与える前に、その静電気電荷を接地に拡散させることにある。つまり、ESD保護作業台表面は、ある意味では部分的に又は全体的に導電性を持っていなければならないことになる。また、その意味から作業台表面は、できる限り接地する必要がある。

ESDSアイテム及び作業者が接触する作業台には、ESDSアイテムを置く範囲にESD保護作業面を設ける。作業台の表面は、接地ケーブルで接地する。リストストラップ、作業台表面、導電性床などすべての並列回路を考慮し、作業台表面用接地ケーブルの抵抗は、作業台表面との接続点又はその近くに設け、表5.5-1に示す「痛みを感じるほどではない」程度に電流に制限できるような大きさの抵抗値とする。ESD保護作業台表面には、さまざまな材料のものがある。これらの材料には、導電性又は拡散性のものがあり、作業台上に一時的又は恒久的に設置する。作業台表面で使用される材料の例を次に示す。

- a. ステンレススチールのような金属製材料
- b. カーボン練り込みプラスチック
- c. 表面処理したプラスチック
- d. ラミネート
- e. 導電性又は拡散性となるような方法で製造又は構成されたその他の材料

ESD保護作業台の選択では、次のような点に注意する。

(1) 導電性

電氣的な導電性を考慮する必要性は、帯電したコンテナを設置した場合の減衰時間の長さ、及び通電機器の検査での作業者の安全の確保を目的とするものである。つまり、導電性が低すぎると、作業台表面が帯電している時間が相対的に長くなり、ESDSアイテムの取扱い上問題を引き起こす可能性があり、逆に導電性が高すぎると作業者が感電する可能性を持つことになる。そのため、導電性の高い作業台表面では、リストストラップと同様に人体安全のために、通常、接地間に1MΩ程度の抵抗を挿入する。

作業台表面は、次項(2)で説明するような別の目的により、最近では層構造を持つ物が多くなり、抵抗の測定は、床の場合で説明したように簡単ではなくなる。

抵抗の測定方法は、5点測定による表面抵抗の測定とリーク抵抗の測定を行うのが一般的である。最近では、この他に表面の2点間の測定や減衰測定も合わせて行っている。測定抵抗による分類は、袋類と同様の抵抗領域で導電性、拡散性の分類を行っている。減衰測定の方法は、袋やシート類と同様にサンプルを切り出して行う他、作業台表面上に置いたコンテナ（静電容量と抵抗が既知）に規定電圧を印加して行う方法、一定面積の作業台材料に規定電圧を印加してサンプルの表面を電圧プローブにより減衰測定を行う方法などがある。

(2) 寿命・耐久性・摩耗強度

作業台表面の寿命に特に影響する要因としては、作業台表面上に乗せる物体と表面との摩擦・摩耗が考えられる。そこで、そのための試験を行う必要がある。これらの耐摩耗性で最も優れた特性を持つものとしては、ラミネート材料であるといわれている。ただし、帯電防止剤や導電性カーボン粒子を練り込んだ層が外部に露出しているものは、摩擦や摩耗によりそれらの材料が抜け落ちたりはがれたりして汚染を発生する可能性がある。

(3) 耐溶剤性

作業台表面は、使用される溶剤等全てに対し耐性がある必要がある。耐溶剤性試験は、通常の方法で行うことができるが、測定指標には一般物性の他に抵抗測定を取入れる必要がある。溶剤による汚染には、一時的に汚染される場合と恒久的に汚染される場合とがある。帯電防止剤練り込み型の材料において、水、アルコールなどによる汚染は一時的なものといえるが、表面の帯電防止層の回復には、1～2週間程かかる。有機溶剤などで作業表面が浸されてしまった場合には、仮に抵抗特性に変化がなくても耐久性等が著しく劣化するために交換を要する。また、シリコンなどのように表面に吸着してしまう汚染では、塗布型帯電防止剤で表面を処理することで一時的に特性を回復することはできても、完全に元にもどすことは難しい。溶剤汚染は、表面の基材と帯電防止剤との反応にも注意する必要がある。更に、電解質溶液では、導電性材料との間で起電力が生じるものもある。

(4) 表面物理強度

この条件は、通常の作業台表面と変わらないが、作業内容がESDSアイテムなどの取扱いのみであれば、部品の物理的な損傷を防ぐ意味から、表面強度を考慮すべきである。はんだ等の熱処理のある作業区域では、熱に対する考慮も必要とされる。

(5) 使いやすさ

作業者の使用時の快適さ、美観等の他は、あまり重要ではないが、作業者が独自に作業台表面を改良したりしないようすべきである（設計特性が、得られなくなる恐れがある。）。

(6) 接地方法

作業台表面は、できる限り個別に接地を行う。設備上の問題などで個別接地が難しい場合には、並列の合成抵抗が許容値を越えないように注意する。リストストラップの接地点を作業台表面に設けてもよいが、接地点は必ず作業台表面材料の最も導電性の良い層に接続する。クリティカルな環境では、リストストラップモニタ等を使用する関係から、リストストラップの接地点は、作業台表面には設置しない。

(7) 洗浄、保守

汚れ等の洗浄は、作業台表面の保守上、比較的重要な項目である。汚れの原因としては、マーカ、ペイント、マスキングテープの切れ端、シリコンなどさまざまなものがあるが、一般にこれらは絶縁性又は作業台表面より抵抗値が高い。そこで、放置しておくとな作業台表面の設計特性が失われることになるので、定期的に洗浄する必要がでてくる。洗浄剤、洗浄方法等は、使用する作業台表面の材質により異なるので一般的な表現をすることができないが、耐溶剤性の項で考慮した内容を参考にする。

5.7.9 静電気測定器

静電気測定の種類としては、電位・静電電圧・静電界の測定及びはく検電がある。広く使用されている測定器としては、電池で駆動する携帯用の静電気測定器がある。静電気測定器は、非接触プローブ又はセンサにより帯電体から生じる静電界の値を示し、帯電体からある補正された距離で静電界の強さ又は静電気電圧の値を示す。静電気測定器によっては、放射線イオナイザの放射線源に似た放射線を使用するものがある。放射線使用の計器は、放射線検出フィルムバッジにベータ線による曇りを生じ、放射線暴露の表示が不正確になることがある。この種の静電気測定器は、放射線源使用の輸送体上又は放射線源機器が設置された区域内で使用しないことが望ましい。静電気測定器は、人間の運動及び摩擦電気によって生じる静電荷のだいたいの大きさを測定するのに使用する。

簡単な静電気測定器の基本的な限界は、その応答時間である。大半の計器は、立ち上がりの早い幅の狭いパルスに応答することができない。計器の応答時間より短い時間で発生及び拡散する静電荷を測定するためには、高速記憶オシロスコープを使用する。過渡的なESD電圧を測定する場合、アナログメータより早い応答時間のデジタルメータを使用する。

静電気測定器の種類を次に示す。

(1) 静電形高電圧計（象限電位計）

静電気の力をそのまま利用して指針を駆動する測定器で、図5.7-6に示すような構造のものが多く使用されている。円形の固定電極を4象限に分けて配置する。この中に扇型の可動電極を弾性糸で吊し回転力を得る。

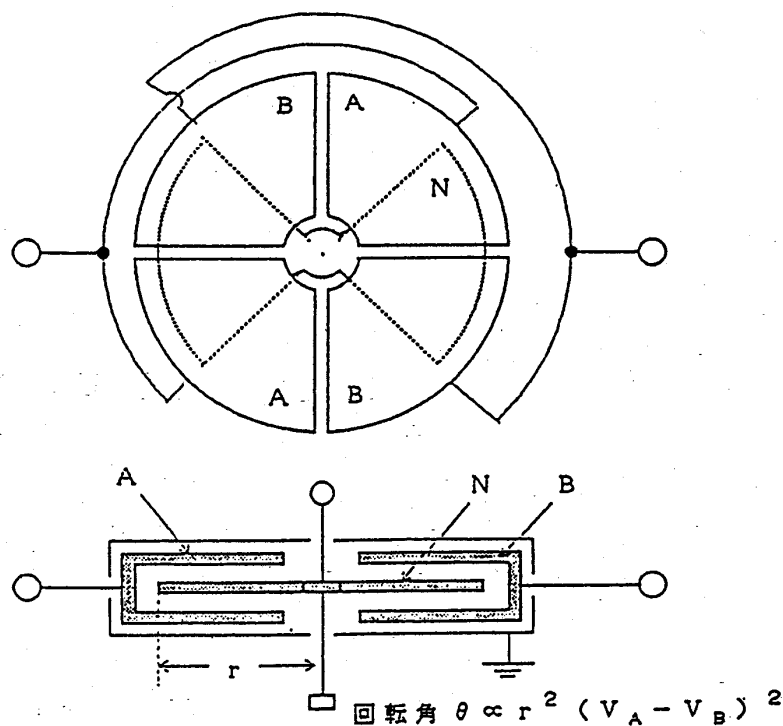


図5.7-6 象限電位計

(2) 非接触式電位計

帯電体に電極（検出用電極）を接近させると静電誘導により電位が上昇する。この電位は帯電体の電位に対応しているので検出用電極の電位を測定することにより帯電体の電位を知ることができる。検出用電極は小さい程分解能が増加するが、誘導電圧は小さくなり計測困難になる。そこで、アンプにより増幅した後の電位を測定している。非接触式電位計は、増幅器の方式によりいくつかのタイプに分類できる。

a. 回転セクタ型表面電位計

図5.7-7に示すように接地した回転翼（回転セクタ）の後に検出電極を設け帯電体から到達する電気力線をシャ断すると、検出電極の電位はセクタの回転周期に応じた交流信号となる。交流信号は、比較的増幅しやすく、またこの方式は増幅器の入力インピーダンスを低くできるので、携帯用小型測定器に应用されている。増幅器出力は、セクタの回転数に同期させて整流（同期検波）し、帯電体の極性を判断する。

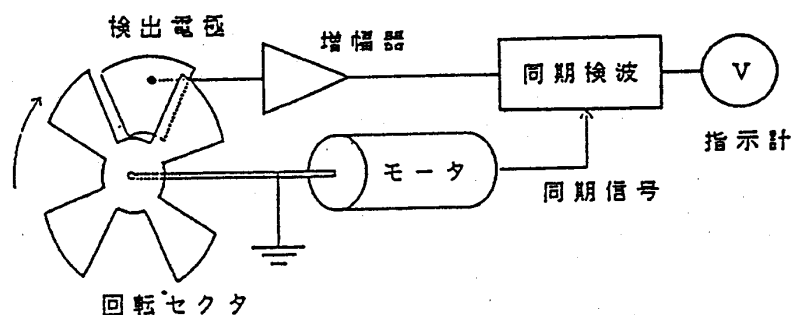


図5.7-7 回転セクタ型表面電位計

b. 振動容量型表面電位計

帯電体からの電気力線により電位が上昇した検出電極を機械的に振動させると、電極の振動容量が周期的に変化するので、電極の電位も周期的に変化する。すなわち、交流電圧となる。以下、回転セクタ型電位計と同様にして測定電圧を指示させる（図5.7-8参照）。

電極の駆動方式には、電磁パイプレータ式、圧電式、音叉（叉）式があり、また振動方向も帯電体面に対して縦振動、横振動のものがあて工夫されている。

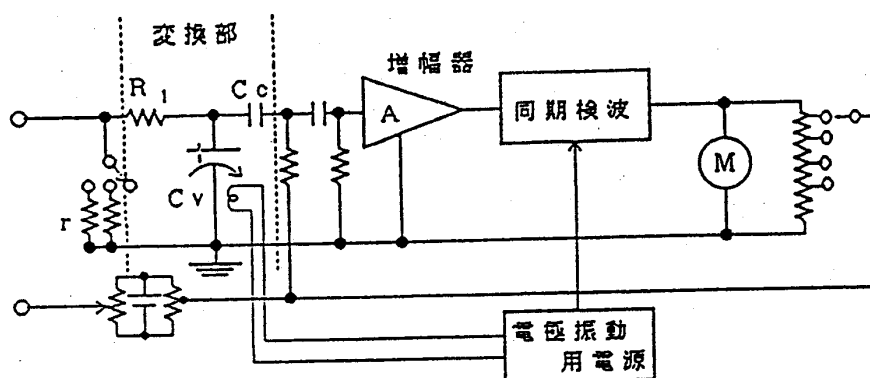


図5.7-8 振動容量型表面電位計

c. 振動容量型電位計

電極を振動させて静電容量が変化するキャパシタを入力回路に使用した測定機器である。b. の測定器と類似した構成となっているが、入力方式がプローブ形式ではなく端子式であることが異なる。入力を変更して使用することが可能であり、エレクトロメータに分類される。 $Q=CV$ より静電容量が周期的に変化すれば、キャパシタの端子電圧もそれに応じて変化し交流信号が得られる。入力回路が、キャパシタで構成されるので入力インピーダンスを非常に高くすることが可能である。入力回路以降は、回転セクタ型電位計と類似の方式で信号電圧を増幅、検波し電位を測定する。振動容量型電位計の原理図を図5.7-9に示す。

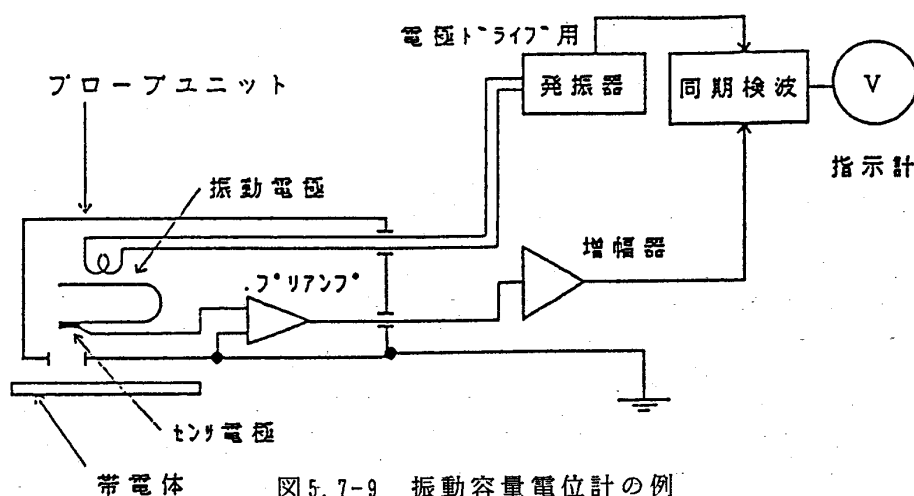


図5.7-9 振動容量電位計の例

d. エレクトロメータ型電位計

静電気測定にエレクトロメータと呼ばれる電位計が幅広く使用されてきている。MOS-FETの進歩により、現在は性能の良い直流増幅器を購入することができるようになった。直流増幅器は、回転セクタや振動型などのメカニカルな要素を持つコンバータを使用せずに、検出電極の電位を直流増幅するもので、アンプの入口に入力抵抗が非常に高いMOS-FETを使用している。この測定器は、高入力抵抗を有するOPアンプで、電子回路技術を駆使することにより電位測定、微小電流測定、電荷量測定、高抵抗測定などの測定を行うことのできる直流マルチメータである。エレクトロメータのOPアンプは、入力段階にMOS-FETを使用した差動アンプで、2つの入力電圧 V_1 、 V_2 の差を A 倍に増幅して、 V_0 として出力するものであるが、 A 値が、通常、10 000～100 000以上の非常に大きい値を持つ（図5.7-10参照）。入力抵抗が非常に高いという特性を生かして、アンプを電圧計として作動させると、静電形電圧計になり100 V以下の低電圧まで測定可能となる。

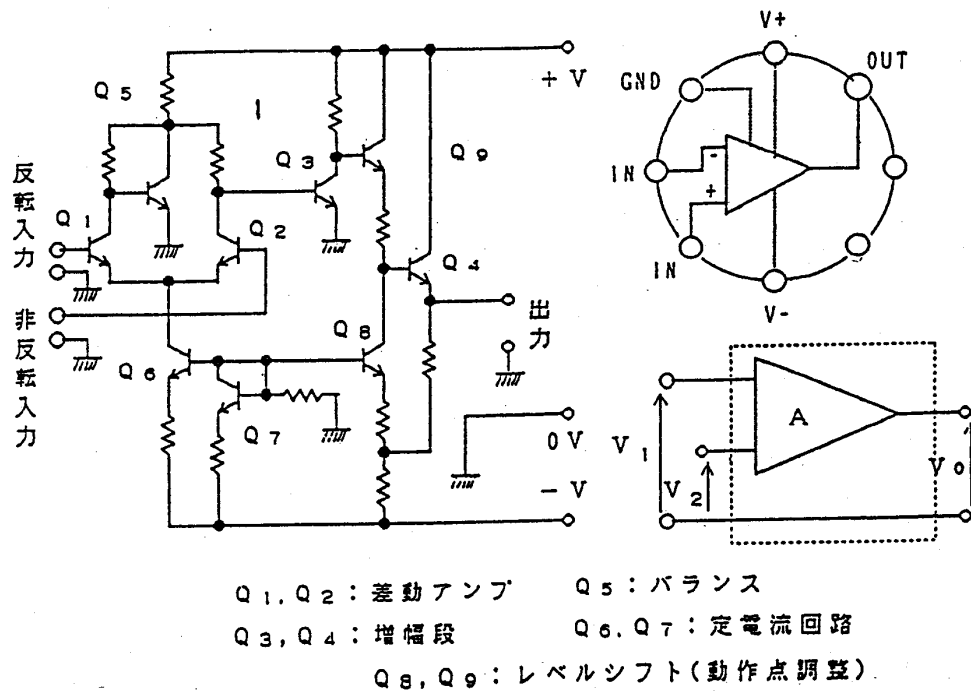


図5.7-10 IC-OPアンプの例

5.7.10 静電気センサと警報機

保護区域で発生する静電気のレベルを定期的に監視するためには、静電気センサと静電気警報システムを使用する。システムによっては、数か所を同時に監視することができる複数のリモートセンサを備えたものがあり、他のシステムでは、区域内の静電気のレベルを永久に記録する帯型記録計を備えているものがある。

ユーザが保護区域の材料をモニタし、保護区域を設置する手助けとなる様々な補助的な装置がある。このような装置は、初期に設定された電圧レベルで警報がなるように設定した小型の静電気電圧検出器、ダイオードの点滅で抵抗領域を表示する表面抵抗率検査器、リストストラップの連続モニタユニットなどである。これらのユニットの選択と使用には、それらの装置が正確にどのような機能を持つのかを完全に知ることが原則となる。さらに、ESD管理プログラムの履行や調査で使用する検出器、モニタ、アラーム、その他の機器を校正する能力も非常に望まれるところである。

5.7.11 はんだごて、はんだポット、フローソルダリング装置など

はんだごて、はんだポット、はんだフロー装置は、適切に接地する。はんだごてと接地との抵抗値は、 2.0Ω 未満とする。加熱時のはんだごて先と接地間の電位差は、 2mV_{RMS} を越えないこと。ESDSアイテムと接触するその他の電源内蔵機器も適切に接地する。はんだ吸い取り器は、ESD保護用を使用する。

5.7.12 組立、試験及び包装装置

ESD管理プログラムの設計と履行において、組立、試験、包装のための装置を原因とするESD損傷を見落としやすい。例えば、電子部品の組立時に用いる真空ピックアップ及びはんだ除去装置は、空気の流れを伴い、摩擦帯電を発生させることがある。SMDをピックアップ、配置及びはんだ付するために用いる自動及び半自動の部品実装機は、ESDSアイテムを損傷させる程度のESD電圧の発生源となり得る。その他、ICマガジン・キャリアテープなどを用いる部品自動供給装置、基板組立品を取扱うロボットアームや治具の動きによるもの、自動試験機、自動包装装置なども、ESD電圧発生源となり得る。

半自動・自動・ロボットの組立、試験及び包装装置は、広く多様化しており、装置や方法について分類してESD損傷に関する定性的な特性を示すことすら難しく、定量的データとして示すことは不可能に近い。このため、それぞれのユーザは、取扱われる製品の敏感性レベルと使用する個々の自動・半自動・ロボット装置の操作に対して評価すべきである。

5.7.13 真空掃除機

真空掃除機の使用を必要とする清掃作業では、ESDSアイテムを損傷する静電気電圧を発生する危険性が高い。現在では、ノズル先から電源コネクタまでを電氣的につながつた接地経路とするために、ESD保護材料で作られた真空掃除機を入手することができるようになっている。さらに、ある種のユニットは、ノズルの端に天然の剛毛が組み込まれたものがある。例え真空掃除機が導電性の経路を保持し、静電気電荷を拡散するとしても、使用に際しては注意する必要がある。微粒子を含んだ汚染された空気流により、清掃対象物に摩擦帯電が発生することがある。そこで、これらを使用する前には、注意深く製品について技術的な評価を行う必要がある。

5.7.14 イオナイザ

ESD対策を行う上で、接地又は加湿による対策方法が不適当な場合がある。接地による除電が可能な帯電物は、導電性材料又は拡散性材料に限られる。高分子樹脂やガラス、石英などの無機絶縁材料は、接地により静電気の電荷をリークし、除電することは不可能である。また、加湿により空気中の相対湿度を上げ、静電気の電荷を空気中の水分子をリーク経路として除電を行う方法も広く使用されている。しかし、高湿度環境下では作業者の不快感をまねき、作業効率の低下や結露等による錆やかびの発生にも注意を払う必要がある。また、作業工程によっては、高湿度環境が禁止されているものもある。

このような場合に、イオナイザを使用して帯電物を除電することが静電気対策上有効となる。イオナイザとは、空気分子を電離し、正イオンと負イオンを発生させる装置の総称である。正イオンは、負電荷帯電体に吸着して帯電体の電荷を中和し、負イオンは、正電荷帯電体の電荷を中和し、除電を行う。空気イオンによる静電気電荷の中和減衰効果は、絶縁材料や絶縁された導電体に有効であり、湿度の影響もほとんど受けない。

5.7.14.1 イオナイザの種類

イオナイザは、イオンの発生原理により、放射線型イオナイザ、自己放電型イオナイザ、高電圧印加型イオナイザの3種類に大別される。

(1) 放射線型イオナイザ

放射線の空気電離作用により、空気イオンを発生させる装置である。放射性崩壊により放出された α 粒子により空気は、正イオンと負イオンが等量のイオンペアとなる。

(2) 自己放電型イオナイザ

導電性針状電極を接地し、尖鋭部を帯電体に接近させ、帯電体の電界が尖鋭部に集中し、高電界による電離作用により、空気をイオン化する装置である。

(3) 高電圧印加イオナイザ

高電圧を先尖電極に印加し、コロナ放電を発生させ空気を電離し、空気イオンを発生させる装置である。装置は、昇圧部、制御部、イオン発生部（発生電極）から構成されている。電極に印加する高電圧電源の違いにより、交流型、直流型、パルス直流型に大別される。

5.7.14.2 イオナイザの特性

(1) 放射線型イオナイザ

放射線源として一般には、ポロニウム210(^{210}Po)のような線量の小さな放射性同位体物質を使用している。ポロニウムの放射性崩壊により放射された α 粒子が原子核に衝突し、イオンペアを発生させた空気をイオン化する。このイオンにより静電気の電荷を中和する。線源が小さいためにイオンの発生量が少なく、イオンを強制的に搬送する送風が必要となる。イオン発生時の電源が不要であるので、着火の危険性がなく、装置の寸法も小型である。放射能汚染を防止するために、容器及び取扱いについては、関係法令に定める規則を遵守し管理する必要がある。線源の半減期が短いため、短期間でイオンの発生量が低下するので、線源の定期的な交換が必要となる。

(2) 自己放電型イオナイザ

電源部を必要としないため、構造が簡単で取り付けが比較的容易であり、着火源となることが少ない。除電能力は、目的とする帯電体の電位に依存し、低電位では、空気を電離するほどの電解が得られずにイオンが発生しないために、除電できないこともある。

(3) 高電圧印加型イオナイザ

尖鋭電極に昇圧した高電圧を印加し、電極先端の電界強度を増大させ、空気を電離しイオンを発生させる装置である。電極が正極に印加された場合には、空気分子から電子が電極に流れ、空気は正イオンとなり、負極に印加された場合には、電極から空気分子に電子が流れ、空気は負イオンとなる。電極に印加する高電圧電源の極性を制御する方法として、商用周波数50/60Hzを使用した方式が、交流型イオナイザである。交流を直流交換し、正負電極に常時印加する方式が、直流イオナイザである。正負電極への印加を交互に行う方式がパルス直流型と呼ばれる。

5.7.14.3 イオナイザの用途別分類

各印加方式を利用し、用途に応じたイオナイザが市販されている。用途から分類したイオナイザは、次の4種類に大別される。

(1) ルームイオナイザ

作業室内天井にイオン発生部（発生電極）を配置し、広範囲に空気イオンを供給する装置である。

(2) 層流型イオナイザ

層流型クリーンルームやクリーンベンチに使用される。層流によりイオンを搬送する。

(3) 作業台用イオナイザ

作業台上での静電気対策に使用されるイオナイザであり、卓上型イオンブロー、つり下げ型イオンブロー、クリーンベンチ用イオナイザなどがある。

(4) イオンガン

圧縮空気を利用し、空気イオンを高速に帯電物に供給する装置である。

5.7.14.4 イオナイザの性能試験

各種のイオナイザの性能試験を行う場合には、各々イオナイザの特性を考慮する必要がある。代表的な試験項目としては、次がある。

(1) 減衰時間試験

金属板を帯電させ、既知の初期電位から1/10まで電位が減衰する時間を測定する。電位の減衰は、正負両極にて行い、減衰に要した時間を減衰時間として記録する。

(2) オフセット電位試験

金属板を一旦接地し、電荷を除去し表面電位計を使用して金属板の電位が 0 V であることを確認の上、空気イオン雰囲気内で金属板の電位を測定する。

(3) ピーク電位試験

パルス直流型イオナイザの場合には、正負電極の金属板の最大電位を測定し記録する。

これらの試験方法としては、次が提案されている。

(1) RCJS-0950-1993 付録A6

(2) EOS/ESD S3.1-1991

5.7.14.5 イオナイザの設置にあたっての留意事項

イオナイザの設置は、製造業者の推奨条件を確認し、評価試験を行った上で決定するのが望ましい。製造業者の仕様には、イオナイザから帯電物までの距離、角度、風速に応じた減衰時間のデータが通常記載されているので、工程に応じ最適な種類のイオナイザを選択する。イオナイザによる静電気の電荷減衰時間は、帯電電荷量とイオナイザから帯電物への距離により異なり、おおよそ数秒から数分かかり、帯電物の電荷を中和するためには、イオナイザを数分間以上作動させることが必要となる。

帯電物の表面電荷を中和した後、イオナイザの有効範囲外に帯電物が置かれた場合、内部電荷の表面への移動により再帯電現象が生じる可能性があると共に、移動・搬送などにより摩擦帯電が発生し再度帯電することが想定される。工程での静電気再帯電を考慮しイオナイザの設置を決定する。

(1) イオンバランス

静電気の帯電極性には正負があり、絶縁物の帯電電荷分布は、正負両極の電荷が混在していることが多い。このため、イオナイザからの空気イオンは、正負イオンが大体等量含まれている必要がある。正負イオンの量が異なった場合には、イオン化区域に電位が残留し、ESDSアイテムを損傷する可能性がある。そのため、イオナイザを選択する場合には、正負イオンのバランスを調節することができる機能を有する機種を選択すべきである。イオナイザ設置後、適切な測定器によりイオンバランスの測定や残留電位の測定を定期的に行い、ESDSアイテムの静電気の感受性レベルとの比較を行うことが望ましい。

(2) 人体安全性

高電圧印加型イオナイザでは、高電位による人体への電撃が生じる可能性がある。電撃防止のため、イオナイザの電極は、過電流防止回路とすること。また、高電圧配線を必要とするイオナイザは、関連法令に定める安全基準を満足し設置する必要がある。

オゾンの発生による人体への影響を考慮する。オゾンは強い酸化反応を起こすために、オゾンに敏感な部品又はオゾンと反応する可能性のある材料は、イオナイザから遠ざけること。

放射線型イオナイザの使用は、放射線源による被曝を予防するために、関連法令及び規則を守ること。

5.7.15 スプレー、洗浄、塗装装置

イオン化エアブローは、ESDSアイテムをスプレー、洗浄、塗装する場合、作業区域内の静電気電荷を拡散するために使用することもできる。

5.7.16 シェントバー、クリップ、導電性フォーム

ESDSアイテムの端子は、金属製シェントバー、金属クリップ又は非腐食性導電性フォームにより互いに短絡する。十分にシェントとして動作するためには、シェント用材料の抵抗値は、ESDS部品の任意の2つの端子間のインピーダンスのうち最も低いインピーダンスを下回る大きさとする。シェントによってもアイテムがESDから保護されないこともある。非導電性ケースのESDS部品又は静電界若しくは直接ESDにさらされる組立品では、誘導電流がシェントに流れ障害が発生することがある。金属ケースの部品の場合、シェントはケースにも接続する必要がある。非導電性ケース部品及びESDS組立品の場合、ESDSアイテムをシェント材料で囲む。

5.7.17 作業者の衣服

ESDSアイテムを取扱う作業者は、木綿のような非合成繊維製のESD保護用の作業服を着用する。指サックを使用する場合、指サックもESD保護材料で構成されていること。保護服は、定期的に（特にクリーニング後）、適切な特性を保持していることを確認する。

現在までのところESD保護専用の作業服は、市場でほとんど販売されていない。一般的にESD保護服と呼ばれているものは、クリーンルーム用の無塵服等に導電性繊維を適当に混入したものや着火などの危険性を防止するために人体の帯電電位を危険のないレベルに下げするために考案されたものである。したがって、ESDSアイテムを取扱う環境では、問題が発生することがあり得る。そこで、クリティカルな環境で使用するESD保護服等については、購入時及び洗浄時に帯電防止剤でリンスし、規定の特性を確保するようにすべきである。

(1) 測定方法

ESD保護服の特性を評価する方法としては、抵抗値、摩擦電荷測定、減衰測定などが行われているが、現在では減衰特性が一般に採用されてきている。抵抗値は、生地には混入している導電性繊維の割合、単位面積当りの導電性繊維の表面積などが、記述されていればそれなりの評価を行うことができる。摩擦電荷測定は、着用して試験するのが一般的であるが、作業者の個人差や床、靴、測定環境など要因が多いために、測定の再現性ができないことが多い。減衰測定については、生地を切り出して測定する方法（例えば、JIS T 8118）と、定期的な管理を考慮して衣服全体に電圧を印加して試験を行う方法（例えば、EOS/ESD Draft Standard No.2、又は図5.7-11に示すような方法）とがある。

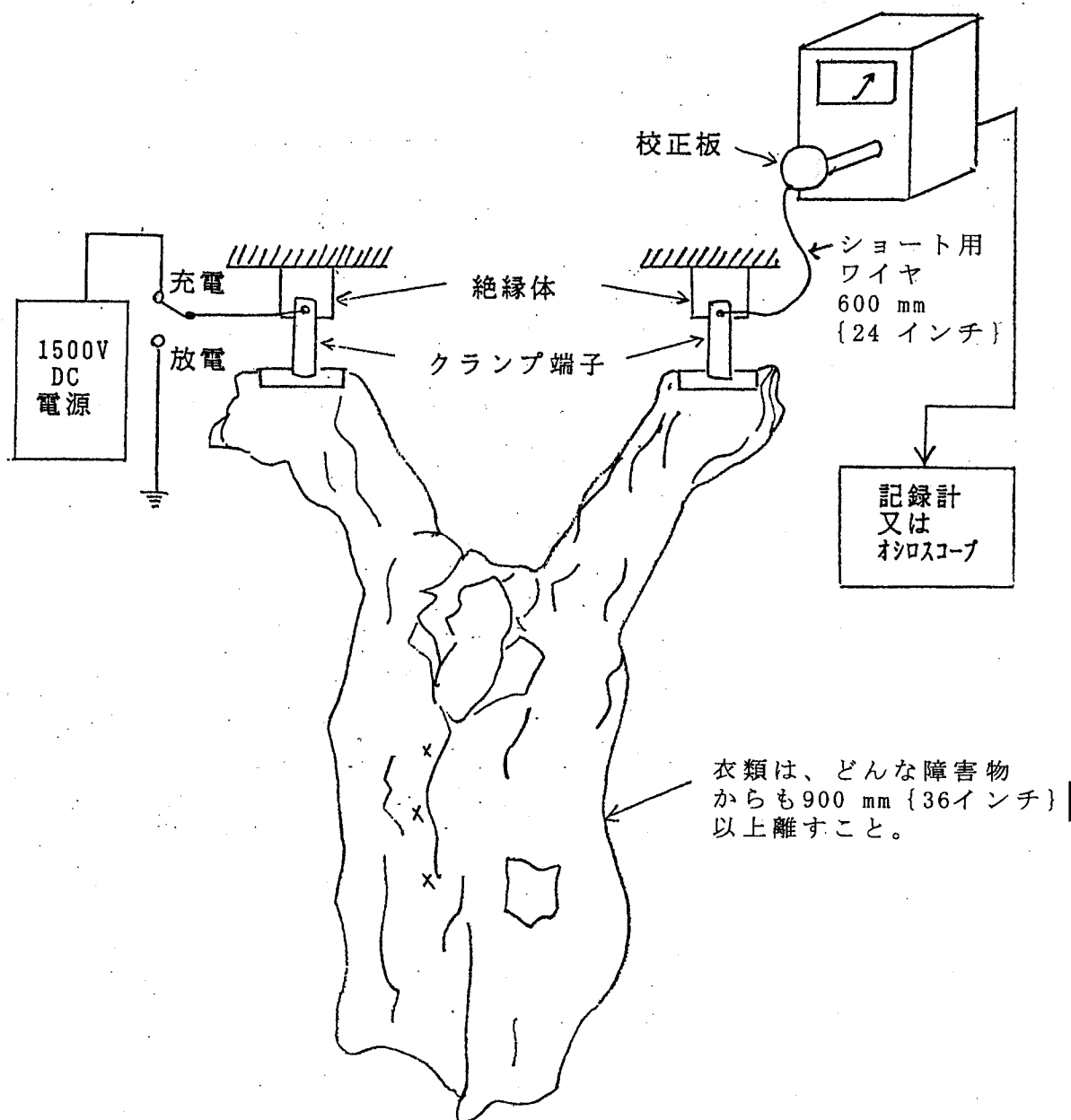
(2) 生地の種類

一般的にESD保護服として販売されている生地は、次のように分類できる。

- a. 木 綿
- b. ポリエステル
- c. 木綿／ポリエステル（混紡）
- d. 不織布（タイベック等）
- e. 木綿／ポリエステル／金属繊維
- f. ナイロン
- g. テトロン

上記の生地には導電性繊維を混紡したものもある。

非接触型静電気ボルト計
(記録用出力端子付)



備考：クランプ端子は、衣類の寸法に応じ絶縁体から150～900 mm
{6～36インチ} 離してつり下げることができるものとする。

図5.7-11 ESD保護服の試験の例

(3) 注意事項

木綿は、50%の相対湿度があれば、静電気電荷の発生をある程度抑制することができるが、使用につれ繊維が抜け落ち汚染の原因となることがある。木綿の静電気特性は、湿度依存性が高いためにクリティカルな環境での使用は避ける。

ポリエステル等の化学繊維は、単体では絶縁体で静電気の大きな発生源となる。そこで、通常は導電性カーボン等の導電性繊維を生地に混紡して、静電気の発生を抑制する。しかし、実際には、ESDSアイテムの保護を行うための特性を得ることは難しく、帯電防止剤などで処理を行うことが多い。不織布のESD保護服の中には、帯電防止剤で処理を行った使い捨てのタイプもある。

導電性繊維には、導電性カーボン、金属繊維、金属系イオン処理繊維などがあるが、洗濯特性や劣化特性は、製造企業によりまちまちであり一般的な表現はできない。導電性繊維の生地への混紡方法は、一般的には格子状、ストライプ状などの方法があるが、つなぎ目の部分での導電経路の確保が重要となる。リストストラップ及びグラウンドストラップなどの人体接地器具は、皮膚に直接行うのが基本であり、これらの衣服の上より着用してはならない。

5.7.18 試験機器

試験機器は、製造企業の勧告に従って適切に接地する。ESD保護区域内又はESD保護作業面に試験装置を置く場合には、人体の安全性について妥協していないことを注意深く評価する必要がある。接地不良しゃ断器を人体保護のために試験機用電源コンセントに内蔵すること。

5.7.19 温度チャンバ

温度チャンバは、静電気電荷の発生を最小又は制御するために、事前の技術的注意を必要とする。温度チャンバに使用されるESD保護材料の耐熱性は、試験温度範囲以上であること。

5.7.20 相対湿度制御

湿度を帯びた空気では、表面が湿度を保ち表面導電性が増加して帯電しにくくなる。帯電電圧は、相対湿度が低いほど蓄積しやすい。一方、90%程の湿度になっても帯電電圧が発生することもある。ESD保護区域では、錆の発生やはんだ付けによるPWBの層間はく離などの他の要因を考慮しなければ、湿度40～60%が望ましい。高い湿度を維持できない場合には、イオン化空気を静電気拡散のために使用する。

MIL-STD-1695は、特に静電気保護の範囲の相対湿度管理について規定している。MIL-STD-1695では、電子部品とハイブリッドマイクロサーキット(MIL-STD-1695、作業区域 5と6)の取扱い又は製造する区域は、30～70%RHの湿度範囲を指定している。MIL-STD-1695は、アイテムがカバー又は保護されている場合を除き、取扱いと貯蔵区域(MIL-STD-1695、作業区域 13)に対しても同じレベルの相対湿度管理を要求している。

5.7.21 帯電防止剤

帯電防止剤は、主として界面活性剤からなる。界面活性剤は、界面作用を改めるために使用する。洗浄用製品は、界面活性剤を「水ぬれ性改善」に使用している。つまり、処理された表面にわたって活性化成分が広がりやすくするものである。静電気管理のための界面活性剤として、塗布型帯電防止剤と内部への練り込み型帯電防止剤とがある。

5.7.21.1 塗布型帯電防止剤

塗布型帯電防止剤とは、材料の表面に使用した場合に静電気制御機能を材料に与えるものである。塗布型帯電防止剤は、一般にキャリア及び帯電防止剤からなる液体である。キャリアは、帯電防止剤の溶媒として働き、水、アルコール又はその他の適合剤である。帯電防止剤は、キャリアが蒸発した後に材料の上に堆積したまま残る薬品である。ある種の帯電防止剤は、帯電防止剤で処理した表面を湿らすために、空気中の水分と結合するものである。この帯電防止剤は、吸湿性として分類され、その有効性は相対湿度に依存する。湿度依存性ではない帯電防止剤もある。一般に、帯電防止剤とキャリアの比率を変化させることにより、導電性又は静電気拡散能力を変化させることができる。帯電防止剤は、床・カーペット・天井・壁・工具・作業台表面・部品トレイ・部品運搬台・椅子などに、ESD保護の程度に応じて、ブラシ・スプレー・ロール・浸漬・モップ・ワイパなどにより塗布処理する。

塗布型帯電防止剤は、導電性を増加し、リーク経路の形成による回路の異常が発生するので、電子部品やPWBに直接使用すべきではない。塗布型の帯電防止剤を使用した作業者は、帯電防止剤の残さにより部品や回路基板の汚染をさけるために、手を十分に洗う。精密な光学機器やミニチュアベアリングなどの表面が敏感な物品は、蒸発や濃縮されたものの移転、接触移転、溶媒の移転などにより汚染する恐れがあるので、塗布型帯電防止剤に接触させたり、ESD保護材料で包装したりしない。塗布型帯電防止剤は、洗浄で取り除かれるので、再塗布する必要がある。

帯電防止剤の効果は、塗布面をポリエチレンなどで摩擦し、発生電荷を静電界計で測定することにより、定期的に点検する。定期的に帯電防止剤を塗布する必要があるESD保護材料を用いた製品には、測定と再塗布の期日を表示するラベルを貼る。

5.7.21.2 練り込み型帯電防止剤

ESD保護区域で使用すると想定される製品は、後に塗布型帯電防止剤を使用する必要がないように、製品に練り込み型帯電防止剤を用いてもものを選定する。練り込み型帯電防止剤をPSやPVCなどの熱可塑性プラスチックの製造工程で加えた材料は、恒久的に表面抵抗率が低くなり、静電気拡散性が改善されるものがある。

5.7.21.3 帯電防止剤の選択

帯電防止剤の選択にあたっては、ESD保護特性の他に、次の事項を考慮する。

- a. 付着性
- b. 汚染要因
- c. 寿命と摩耗特性
- d. 減衰特性と調整しやすさ
- e. 使い勝手
- f. 経済性
- g. 抗菌性
- h. クリティカルな使用での導電性
- i. 人体と環境への危険性がないこと
- j. 非腐食性

5.7.21.4 帯電防止剤の成分による分類

一般的な帯電防止剤は、高分子材料に対しての親和性（親油性、疎水性）を持った化学基（親油基）と水に対する親和性（親水性）を持った化学基（親水基）を同一分子内に保持する化学物質で、一般には界面活性剤といわれるものが主流を占めている。

親油基は、油脂類より誘導されるもので、主に樹脂との相溶性や親和性に関する部分で、親水基は、主に大きな極性を持った水になじみやすい原子団である。表5.7-2にその分類を示す。

帯電防止剤は、親油性、親水性のそれぞれの部分が適当なバランスを持つことにより、油溶性のものも水溶性のものも自由に作成することができる。親水基が電離する場合の符合によって帯電防止剤をアニオン性、カチオン性、非イオン性、両性、その他に分けられる（図5.7-12参照）。その分類による代表的な種類と化学構造式を表5.7-3に示す。水で解離する帯電防止剤は、濃度が臨界ミセル濃度以上になるとイオンが集合して形成するミセルコロイドにおいて帯電防止機能を発揮する。しかし、帯電防止剤は、材料表面で理想的な単分子膜を形成することは難しく、帯電防止剤がある程度重なりランダム配列をとり、親水基が等方性をとるためには10分子以上の層が必要であるとする報告もある。イオン性を有する帯電防止剤の作用機構は、その分子が親油性部と親水性部のバランスにより樹脂に対して適度の相溶性を持ち、空気中の水分を吸湿することにより、表面層に形成される水の被膜により帯電防止を行うものである。

(1) アニオン系帯電防止剤

アニオン系としては、表5.7-3に示すものがあるが、特に高級アルコールのリン酸エステルやアルキルサルフェート系のものなどは、耐熱性、帯電防止特性に優れている。ただし、樹脂との相溶性は悪く、透明性に劣るため、内部練り込み用に実用化されているものは少ない。一般に、硫酸エステル化、リン酸エステル化される脂肪属基の炭素数、エステル化の程度、導入される位置などが帯電防止機能に影響を及ぼす。

(2) カチオン系帯電防止剤

カチオン系は、一般に帯電防止効果が大きく第4級アンモニウム塩がよく使用されている。耐熱性はさほどなく、また、有害なものもあり使用上注意が必要な場合もある。

(3) 非イオン系帯電防止剤

樹脂の練り込みに多く使用されるものでポリエチレングリコールのソルビタン型とエーテル型誘導体やジエタノールアミン誘導体などがあり、耐熱性や樹脂との相溶性に優れている。この薬品は、他のタイプの帯電防止剤と併用することも可能である。

(4) 両性系帯電防止剤

アルキルベタイン型、アルキルイミダゾリン型が主体である。特性はカチオン系のものに類似している。イミダゾリン誘導体は、ポリエチレンやポリプロピレンなどのポリオレフィン系の練り込み剤によく使用される。

(5) その他の帯電防止剤

- a. 官能基を持つポリマ
- b. 一般有機化合物／無機化合物

表5.7-2 親水性・親油性原子団の分類

親油性原子団	わずかに親水性	親水性	強親水性
$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n-$ (パラフィン)	$-\text{CH}_2-\text{O}-\text{CH}_3$	$-\text{OH}$	$-\text{C}_6\text{H}_4\text{SO}_3\text{H}$
C_6H_5- (フェニル基)	$-\text{C}_2\text{H}_4\text{OCH}_3$	$-\text{COOH}$	$-\text{SO}_3\text{HC}-\text{SO}_3\text{Na}$
$\text{C}_6\text{H}_{11}-$ (シクロヘキシル基)	$-\text{COOCH}_3$	$-\text{CN}$	$-\text{COONa}$
C_{10}H_7- (ナフチル基)	$-\text{CS}$	$-\text{NH}\cdot\text{CO}\cdot\text{NH}_2$	$-\text{COONH}_4$
$(\text{CH}_2\cdot\text{CH}_2\cdot\text{CH}_2\text{O})_n-$	$-\text{CSSH}$	$-\text{CONH}_2$	$-\text{Cl}$
$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n-$ 	$-\text{CHO}$	$-\text{COOR}$	$-\text{Br}$
$(\text{CH}_3)_2\text{Si}(\text{CH}_2)_n-$	$-\text{NO}_2$	$-\text{OS}_3\text{H}$	$-\text{I}$
$(-\text{CH}_2-\text{CHO}-)_n$ CH_3		$-\text{NH}_2$	

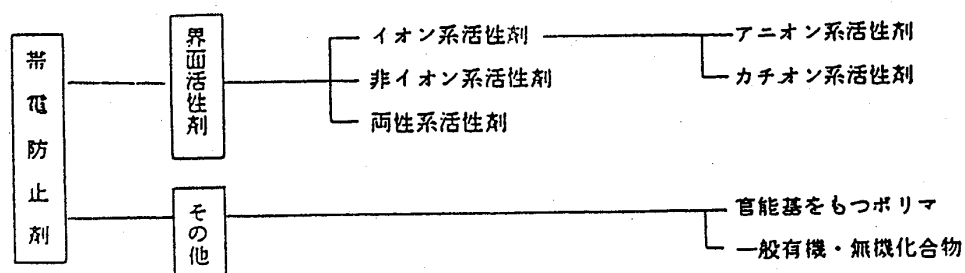


図5.7-12 帯電防止剤の分類

表5.7-3 帯電防止剤の分類と化学構造式 (つづき)

非 イ オン 系 活 性 剤	アミンまたは アミド型	ポリオキシエチレンアルキルアミン $\text{RN} \begin{cases} (\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O})_n \text{H} \\ (\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O})_m \text{H} \end{cases}$ ポリオキシエチレンアルキルアミド $\text{RCON} \begin{cases} (\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O})_n \text{H} \\ (\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O})_m \text{H} \end{cases}$
	エタノールアミド型	$\text{R}_{17}\text{CONH}(\text{C}_2\text{H}_4\text{OH})_2$
	脂肪酸 グリセリンエステル	$\begin{array}{c} \text{CH}_2\text{OOCR} \\ \\ \text{CHOH} \\ \\ \text{CH}_2\text{OH} \end{array}$
	アルキルポリエチレンイミン	$\text{RNH}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{NH})_n \text{H}$
両 性 活 性 剤	アルキルベタイン型	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{R}_{16}-\text{N}^{\oplus}-\text{CH}_2\text{COO}^{\ominus} \\ \\ \text{CH}_3 \end{array} \quad \text{R}-\text{N}^{\oplus} \begin{cases} (\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O})_n \text{H} \\ (\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O})_m \text{H} \end{cases} \text{CH}_2\text{COO}^{\ominus}$
	アルキルイミダゾリン 誘導体	$\begin{array}{c} \text{R}-\text{C} \begin{array}{l} \nearrow \text{N}-\text{CH}_2 \\ \searrow \text{N}-\text{CH}_2 \end{array} \\ \quad \\ \text{OH} \quad \text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH} \\ \\ \text{CH}_2\text{COOX} \end{array} \quad \text{R}-\text{C} \begin{array}{l} \nearrow \text{N}-\text{CH}_2 \\ \searrow \text{N}-\text{CH}_2 \end{array} \\ \\ \text{CH}_2\text{CH}_2\text{OSO}_3\text{X}$
	N-アルキル β-アラニン型	$\text{RNH}-\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COOX}$ $\text{RN} \begin{cases} \text{CH}_2\text{CH}_2\text{COOX} \\ \text{CH}_2\text{CH}_2\text{COOX} \end{cases}$

5.8 表示

5.8.1 ESDSアイテム、保護包装及び保護用品の表示

個別仕様書等でESD保護のための表示指定がある場合には、個別仕様書等に従う。個別仕様書等で特記がなく、追加表示ができる場合には、次により表示することを考慮する。

- (1) ESDSアイテム及びESD保護用品に、図5.8-1～図5.8-5に示すような指定シンボル、簡略化したような相当シンボル、注記、又はシンボルと注記の組み合わせを表示する。
- (2) シンボルは、次のような見やすい位置に表示する。
 - a. 組立品では、次段階の組立品又は装置に組み込んだときに見えるような位置
 - b. 装置では、ESDS部品又は組立品に近接する前にシンボルに気付くような位置の装置外表面、及び装置内部のESDS部品や組立品に接続するコネクタ端子近辺
- (3) 装置のようにスペースがある場合には、図5.8-3のラベル、又はシンボルの近くに図5.8-4のような注記を表示する。
- (4) MIL-M-38510Hでは、部品本体に次の表示要求がある。
 - a. クラス1 1999 V 以下 △
 - b. クラス2 2000～3999 V △△
 - c. クラス3 4000 V 以上 なし
- (5) 接着剤付きラベルやマーキングの利用は、静電気電荷を発生させる可能性がある。したがって、このような材料は、ESDSアイテムを直接包装する包装材には使用せず、その外装材又はシールディング包装材にのみ使用すべきである。接着剤付きラベルをESDSアイテムが置かれる可能性のある環境では使用しないこと。

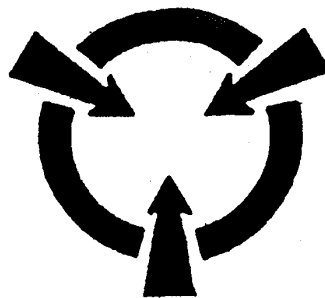
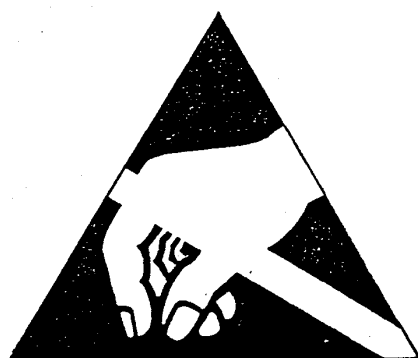
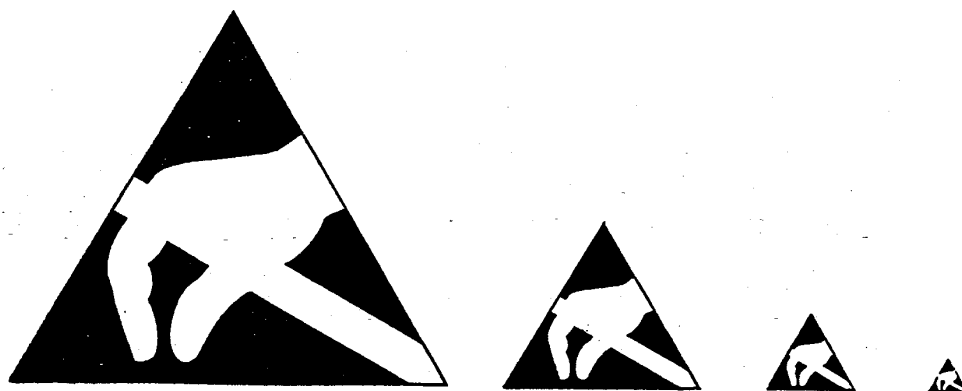


図5.8-1 MIL-STD-1285のESDSシンボル



白ぬき部分は黄色

図5.8-2 EIA RS-471のESDSシンボル



備考：実用上の最小寸法は、1辺 4 mm 程度

図5.8-3 ESDSシンボルの簡略化の例

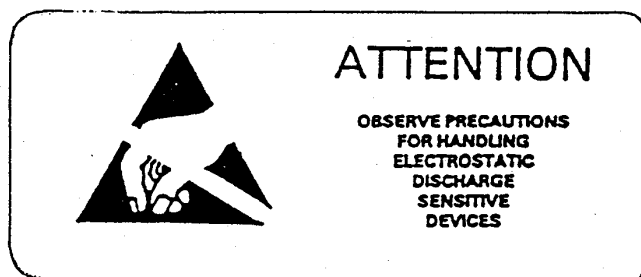


図5.8-4 ESDS警告ラベルの例

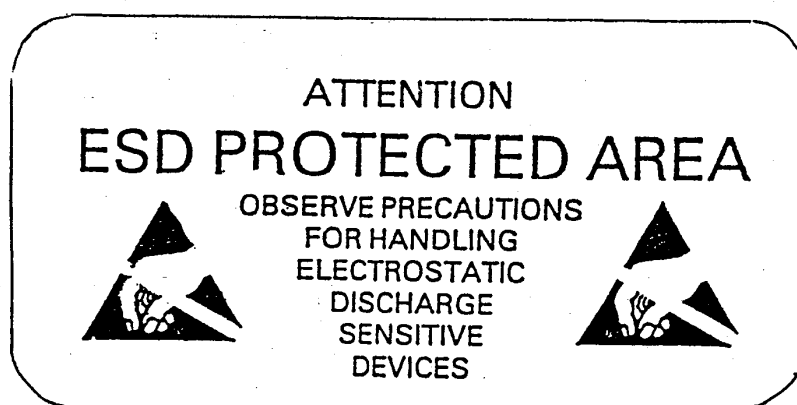
"CAUTION
CONTAINS PARTS AND
ASSEMBLIES SUSCEPTIBLE TO DAMAGE BY
ELECTROSTATIC DISCHARGE (ESD)."

「注意
静電気放電（ESD）によって
損傷しやすい部品・組立品が
入っています。」

図5.8-5 MIL-STD-1686AのESDSアイテムの注意表示

5.8.2 ESD保護区域の標識

ESD保護区域へ人が立入る前にわかりやすい所に図5.8-6のような標識を掲示する。保護区域の一般作業位置のどこからでも、1つ以上の標識が見えるように掲示すること。標識は、300mm×150 mm以上の大きなものがよい。標識には、必要に応じて、追加の情報を加える。



備考：白ぬき部分は、黄色

図5.8-6 ESD保護区域の標識の例
(IEC TC47(S)1197)

5.8.3 接地点のマーク

ESD保護区域内の接地点の表示を統一する検討も行われており、図案例を図5.8-7に示す。

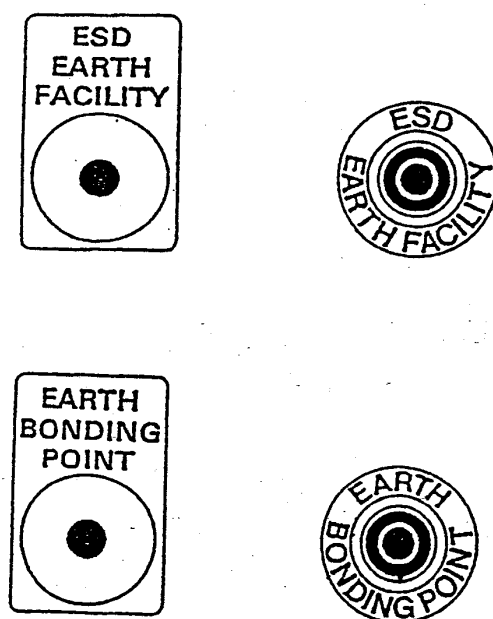


図5.8-7 接地点の図案例
(IEC TC(47)1197)

5.8.4 文書のマーキング

ESDSアイテムの使用、入手、規格化、設計、移動に関係するすべての文書は、文書受領者が内容にESDSアイテムが含まれているものであることを注意又は警告するために表示することが望ましい。

5.9 取扱手順

ESDSアイテムの取扱いに関する原則的な指針について示す。

5.9.1 ESDSアイテムの取扱いに関する一般的指針

ESDSアイテムを適切に取扱うことは、ESDによる損傷を回避する上で重要なことである。ESDSアイテムの取扱手順を確立の上、実行することが重要である。詳細な手順については、取扱うESDSアイテムの感受性、ESD保護区域のレベルなどに合わせる必要がある。取扱上の一般的な指針を次に示す。

5.9.1.1 作業員等

- (1) ESD保護されてないESDSアイテムを取扱う作業員・検査員などは、ESDSアイテム取扱いの教育・訓練を受け、検定試験に合格した者に限定する。
- (2) ESDSアイテムを取扱う作業員等は、ESDSアイテムの近くで、脚を拭うことや作業服の着脱など、摩擦による静電気を生じる可能性のある行動を避ける。
- (3) ESDSアイテムを取扱う作業員は、静電気帯電防止作業服などを着用する。通常の合成繊維服を着衣していると、ESD発生の危険性が高いので、不注意にESDSアイテムに近付くことのないような作業習慣の徹底を図る。
- (4) 作業員等は、リストストラップ・ヒールグランダ・レッグストラップなどを装着する。作業用の接地ストラップが使用できない場所では、ESDSアイテムを保護包装から取り出す直前に作業員等自身を接地する。

5.9.1.2 設計及び図面

- (1) ESDSアイテムに関する図面には、ESDSシンボルや警告を表示し、必要な場合は関連する取扱手順を指示する。
- (2) 製造、加工、組立及び検査の作業指示書では、ESDSアイテムを識別しておくこと。また、ESD保護包装されていないときには、その取扱いは、ESD保護区域内でかつ検定を受けた作業員に限定することを明示する。

5.9.1.3 ESDSアイテムの取扱い時

- (1) ESDSアイテムをESD保護包装から取り出すとき及び保護包装されていない状態での取扱いは、ESD保護区域内で行う。
- (2) ESDS保護用の包装・容器の外にあるESDS組立品を取扱うときは、ESD S部品又は導線部に直接触れないように注意して取扱う。
- (3) ESDSアイテムの取り外し又は取り付けは、装置電源を切った状態で行う。ただし、電力供給状態で取り付け交換ができるように特別に設計されている場合を除く。
- (4) ESDSアイテムが入った保護包装を開封又は保護容器をあけるときは、開封前に包装をESD保護作業台面に置いて電荷を中和する。そのかわりに、接地した作業員が包装又は容器に接触して電荷を除去してもよい。
- (5) 試験槽内でESDSアイテムの試験を行う場合は、静電気の発生を抑える方法で慎重に行うことに特に注意する。
- (6) ESDSアイテムを手を持ったブラシで清掃するとき、天然の剛毛ブラシだけを使用し、静電気を拡散させるためにイオン化空気を清掃面に吹き付けながら行う。すべての自動清掃装置は、接地できる場合は接地し、清掃作業中は、ESDSアイテムのリード線どうし及びコネクタピンどうしを互いに短絡しておく。ESDSアイテムの清掃で、溶剤等（水系洗浄剤、アルコールなど）を使用する場合、他の問題がなければ、導電性の溶剤が好ましい。

5.9.1.4 容器・工具・試験機器など

- (1) 試験機器のプロブは、ESDSアイテムに接触させる直前に接地する。
- (2) ESD保護区域で使用する電気を使用する工具、試験機器、治具などは適切な接地を行う。電氣的試験機器の接地は、ESD保護作業面を利用するのでなく、接地プラグにつなげる。
- (3) 自動化装置を使う場合
 - a. ESDSアイテムの表面をバキュームでピックアップする場合は、ピックアップの先端に導電性ゴムなどを使用する。
 - b. ESDSアイテム表面への摩擦はできるだけ小さくする。装置の機構上避けられない場合は、摩擦面を小さくし、摩擦係数の小さな素材及びイオナイザの使用を検討する。
- (4) ESDS保護区域内のCRT表面は、VDTフィルタなどで帯電防止し、作業中のオン・オフはできるだけ避ける。
- (5) はんだごては、こて先を接地し、低電圧用のものを使用する。
- (6) ESDSアイテムと接触する可能性のあるピンセットなどは、ESD保護用のものを使用する。

5.9.1.5 ESD保護区域内

- (1) ESD保護区域内で使用する全ての容器は、使用前及び使用中には直接又はESD保護面に接地しておく。
- (2) ESD保護区域内で使用する作業指示書、試験手順書、図面などの書類を入れる袋類は、ESD保護材料でできているものを使用する。また、書類などの素材は、ESD保護を配慮する。

5.9.1.6 ESD保護用品の管理

- (1) ESD保護服は、定期的に点検する。
- (2) ESDSアイテム取扱い時に使用する手袋・指袋は、ESD保護対策用のものとする。
- (3) ESD保護材料の清掃にアセトン、アルコール、洗浄剤などの溶剤を使用するときは注意事項を守る。溶剤を使用すると、ESD保護材料（特に、表面に浸出し空気中の水分と共に発汗層を形成するタイプの帯電防止剤を使用しているESD保護材料）の効果が弱まることもある。

5.9.1.7 輸送・保管

- (1) ESDSアイテムを運ぶときは、輸送台、ホルダー又は容器を互いに電氣的に接続しておく。
- (2) ESDSアイテムに対する作業を行っていないときには、ESDSアイテムは、金属製シャントバーや金属製クリップでの短絡、非腐食性の導電性フォーム、保護容器又は保護包装による保護を行う。
- (3) ESDSアイテム又はその保管容器は、高電界発生部（CRTなど）の近くには置かない。
- (4) ESDSアイテムを実装した基板は、直接重ね合わせない。

5.9.2 ESD対策関連部門と業務分担

効果的なESD対策プログラムの作成には、事業所内でのさまざまな部門又は機能の協調・協力及びチェックアンドバランスのシステムが必要である。

ESD対策の業務分担の例として、MIL-HDBK-263Aに示された内容を以下に紹介する。事業所によって組織体制、組織名称などは、さまざまであるが、参考にするとよい。

- (1) 関連する部門としては、通常、次の組織がある。

資材調達
設計
信頼性
品質保証
製造
試験・検査・保守
包装・出荷

- (2) 機能的な観点から分類すると次の各機能段階でのESD保護対策の実施が考えられる。

設計・製図
検査
試験
製造・組立
整備
包装・表示
搭載
輸送
故障解析

5.9.3 資材調達部門

資材調達部門が実施すべき業務例を次に示す。

- (1) ESDSアイテムの設計及び取扱いに係わるすべての資材について、ESD管理プログラムを反映すること。
- (2) 品質管理の観点から下請業者及び供給業者に対してもESD管理プログラムの実行を要求すること。
- (3) ESD保護機器及び材料の供給元の一覧表を維持すること。

5.9.4 設計部門

設計部門が実施すべき業務例を次に示す。

- (1) ESDSアイテム及びその感受性レベルを確認すること。
- (2) ESDに対して強くかつ性能要求を満足する部品を選ぶこと。
- (3) 組立品・装置に保護回路を組み込むように設計すること。保護回路は、組立品のもっとも低いESD耐性レベルを対象に設計すること。
- (4) ESDSアイテムを使用する組立品が十分に保護されているか否かを判定するための回路分析を行うこと。
- (5) ESDS部品図、組立図面及び関連技術文書にESDS識別をすること。
- (6) 装置やキャビネットレベルの図面に、
 - a. ESDSアイテムが内蔵されている場合には、5.8 項に示すシンボルを図面上に表示すること。
 - b. 5.8 項に示すシンボル及び注意書きを製品にラベル表示する指示を行うこと。
- (7) 故障解析及び是正措置に対する支援を行うこと。
- (8) ESD管理プログラムへの適合性及び設計検討事項を設計審査で説明すること。

5.9.5 信頼性部門

信頼性部門が実施すべき業務例を次に示す。

- (1) ESDSアイテムを識別するための部品リストの見直しを行い、ESDSレベルを確認し、設計技術者が使用するためのESDS部品データを維持すること。
- (2) ESD試験を計画すること。
- (3) ESD関連不具合又は性能劣化の恐れについての事前点検及び区分を設計部門と共に実施すること。
- (4) ESD関連不具合又は性能劣化の恐れについての事前点検として、製造情報及び現場情報の分析を行うこと。
- (5) 潜在的な不具合に結びつくESDによる部品の性能劣化についての注意を促すこと。
- (6) ESD保護の設計要求が十分にハードウェアの設計に反映されていることを確認すること。
- (7) 故障解析でESD故障モードが正しく考慮されているか否かを確認すること。

5.9.6 品質保証部門

品質保証部門が実施すべき業務例を次に示す。

5.9.6.1 品質管理

- (1) 保護区域及び接地作業台の接地要求を確認すること。保護区域及び接地作業台を使用する前にその適合性を認定すること。認定試験手順及びデータを文書化すること。
- (2) ESDSアイテムを保護包装から取り出して扱う場所では、作業員用保護衣類が使用されていることを確認すること。更に、すべての必要箇所に作業員の接地が正しく実施されていることを確認すること。
- (3) ESDSアイテムを扱うすべての作業員等が必要な検定を受けるための教育・訓練プログラムを設定し、実行すること。
- (4) ESD保護区域とESD接地作業台、作業員用接地設備、工具類・試験機器の接地並びに取扱手順、包装手順及びラベル表示手順の実施が適切であることを定期的に監査すること。ESD対策用資材がその効果を維持していることも監査すること。
- (5) 該当する図面、仕様書及び作業指示書にESDシンボル、注意及び取扱手順が記載されていることを確認すること。
- (6) ESDSアイテムに該当するESDマーキングが設けられていることを調査すること。
- (7) 該当する購入仕様書にESD管理プログラムが要求されていることを確認すること。
- (8) 下請業者及び供給業者のESD管理プログラムの監査及び審査を行うこと。

5.9.6.2 受入検査

- (1) 納入されるすべてのESDSアイテムに注意を払うこと。
- (2) 出荷コンテナからESDSアイテムを個装の状態で取り出すこと。契約要求に従ったESD保護包装及びラベル表示であることを検査すること。検査は、次のように行う。
 - a. ESDS表示のある包装
ESDSアイテムの包装について、ESDSラベル及びESD保護包装に関する契約の要求に適合していることを検査する。

b. ESDS表示のない包装

供給者は、ESDSアイテムを収めた包装に正しい表示を設ける責任があるが、ESDS表示なしで引き渡されたESDSアイテムの取扱いは、次の事項に従って行う。

(a) ESDS表示はないが保護包装に入っているESDSアイテム

包装に正しい表示を追加し、ESDSアイテムとして取扱う。供給者に今後の出荷品に正しい表示を設けよう注意する。

(b) ESDS表示もESD保護包装もないESDSアイテム

そのESDSアイテムを欠陥品として返却し、そのESDSアイテムの再納入を禁止する。

c. 保護区域内において、個装を開き、ESDSアイテムの試験を行う。

d. 試験したESDSアイテムをESD保護包装材料で再包装し、包装に正しい表示が設けられていることを確認する。

e. 保管又は輸送に対しては、個装をESD保護用通い箱の中に入れる。

5.9.6.3 工程中の検査と試験

(1) 保護取扱手順が守られていることを確認すること。

(2) 保護区域内の接地された作業台でのみESDSアイテムの個装を開くこと。

(3) 検査及び試験後、ESDS組立品をESD保護包装材料で再包装し、個装に正しい表示が設けられていることを確認すること。次の作業台に運ぶ場合、ESDS組立品を保護通い箱又はトレイの中に置くこと。

5.9.6.4 故障解析

故障解析用として受け取ったすべてのESDSアイテムがESD保護包装材料で正しく包装されていることを確認すること。そのような物品が正しく包装されていない場合は、その物品の送り主に今後故障解析用のESDSアイテムを保護包装なしで送らないよう通知すること。

5.9.7 製造部門

5.9.7.1 製造技術（支援）

- (1) ESD保護区域を設計し、設置すること。
- (2) 品質保証部門と協力して、保護手順及び保護対策を設定、維持すること。
- (3) 製造中に発生し得るESD関連故障の傾向、問題となる区域などを信頼性及び品質保証部門と協力して調査すること。

5.9.7.2 資材受入管理

ESDSアイテムが入っている包みを開封しないこと。保護包装が不透明なためなどによりESD保護包装の開封しないと数量が勘定できない場合には、納入数量の確認を受入検査まで延期すること。

5.9.7.3 資材保管管理

- (1) ESDSアイテムを、ESD保護用材料で覆うか又は包装して、保管室区域に搬出入すること（保護包装なしで保管室において受領されるアイテムについては、信頼性部門に申し入れること。）。
- (2) 必要のない限り、数量の勘定、払出し又はキット化のために、ESDSアイテムの保護包装を開封しないこと。ESDSアイテムの保護包装の開封が必要な時には、取扱手順を遵守して、保護区域内で行うこと。その後、ESDSアイテムをESD保護用材料で再包装すること。
- (3) ESDSアイテムが収められ、保管室から出されるすべての包み及びキットにはESDSシンボル及び注意を表示すること。
- (4) キットリストでESDSアイテムを識別すること。

5.9.7.4 加工・組立・修理・再加工

- (1) 保護取扱手順を遵守し、ESD保護を必要とする製品はESD保護区域の中で作業するか、又はこれができない場合は5.9.10項に従って作業を行うこと。
- (2) 帯電防止性の清掃用液体又は溶剤を使用して清掃すること。
溶剤を空気噴霧する場合には、イオン化空気を使用すること。
スプレーコーティング時は、コーティング材によっては帯電することもあると考えられるので、予め別のサンプルで帯電状況を確認し、クリティカルな帯電状況の際には、適切な方法により中和して帯電を抑制すること。
- (3) ESDS組立作業が完了したならば、直ちに、ESD保護用材料で再包装し、ESDSシンボル及び注意を表示すること。

5.9.8 (装置の) 試験・整備部門

次に示す手順は、現場における試験にも適用すること。

- (1) ESDSアイテムの試験は、可能な限りESD保護区域の中でのみ行うこと。
- (2) 取扱手順及び次の事項を遵守すること。
 - a. ESDSアイテムに触れる前に、作業用グラウンドストラップを手首にはめ、そのもう一方の端を接地すること。作業用グラウンドストラップが使えない場合には、ESDSアイテムを挿入したり又は取外したりする前に、少しの間接地点に体を触れること。
 - b. 障害のあるESDSアイテムを現場で取外した時は、直ちに、それをESD保護用材料で覆うか又は包装すること。
 - c. ESD保護包装からESDSアイテムを取出して、それを機器に取付けるとき、周辺の部品、コネクタ、電気端子及び回路へ身体を接触させないようにすること。

5.9.9 包装・出荷部門

- (1) 出荷用として渡された全てのESDSアイテムがESD保護包装され、また適切な表示がなされていることを確認すること。
- (2) ESDSアイテムを仮包装から取り出す場合は、取扱手順に従ってESD保護区域内で行うこと。
- (3) ESDSアイテムの保護包装は、契約に規定された要求事項に従って行うこと。

5.9.10 ESD保護区域外での作業要領

恒久的なESD保護区域が設定されていない現場において、保護されていないESDSアイテムを取り扱う作業についての注意事項を次に示す。このような現場とは、装置のサービス・保守、装置の設置作業・検査、ESDSアイテムの出荷・包装・開封などの作業を行う場所が考えられる。

- (1) 現場での作業は、ESD保護用資材、作業用訓練、ESDS保護管理の責任体制、ESD識別のラベル・表示、ESDSアイテムの包装・開封などに関し、原則として恒久的なESD保護区域と同レベルの要求条件を適用すること。
- (2) 必要な場合は、一時的なESD保護用の作業台表面、作業床を使用すること。また、作業者と作業台表面、床との等電位接続を行うこと。
- (3) 作業台表面とリストストラップは、以下のどちらかに接続すること。
 - a. 接地接続点
 - b. 保守・設置中の装置類

- (4) 保守・設置しようとするもの又はESDSアイテムが組み込まれていて移動できない装置類に以下の処置を行うこと。
 - a. 結合用のESDSアイテムの接地設備を取り付ける。
 - b. 接地抵抗が1MΩ以下の抵抗器が組み込まれた専用接地取り付け点を設ける。
- (5) 作業者は、ESDSアイテムからESD保護区域に特別に要求された事項が無効となる位置（少なくとも1m）までを一時的な保護区域とするように、作業区域を設定すること。
- (6) 現場作業中は、一時的な作業区域の境界上にESD保護区域の警告表示を掲示すること。
- (7) 一時的なESD保護区域内で作業する者は、ESD防止用の作業服を着用すること。
- (8) 一時的なESD保護区域で作業者が歩行又は移動する必要がある場合は、その区域の床は恒久的なESD保護区域の要求事項と同等の対策を施すこと。
- (9) 現場作業で、ESDSアイテムを装置から外し一時的な作業面に置く場合、一時的な作業面とシステム・作業者が等電位接続されていること。その作業面と作業者との等電位結合が維持出来ないときは、ESDSアイテムを保護包装しておくこと。（図5.9-1参照）
- (10) 作業者は、ESDSアイテムを取り扱う場合、常時等電位結合されていること。ESDSアイテムを装置から取り外す場合には、直接保護包装に入れること。交換用のESDSアイテムは、装置に組み込む直前まで保護包装に入れておくこと。（図5.9-2参照）
- (11) 現場作業が、保護されていないESDSアイテムの取り扱いを含む場合には、現場作業員は、ESD保護区域を維持・管理するために必要な資材、工具類を使用すること。
- (12) 現場作業用の一時的なESD保護用の作業台表面と床材料は、それぞれの要求事項に適合したものとする。

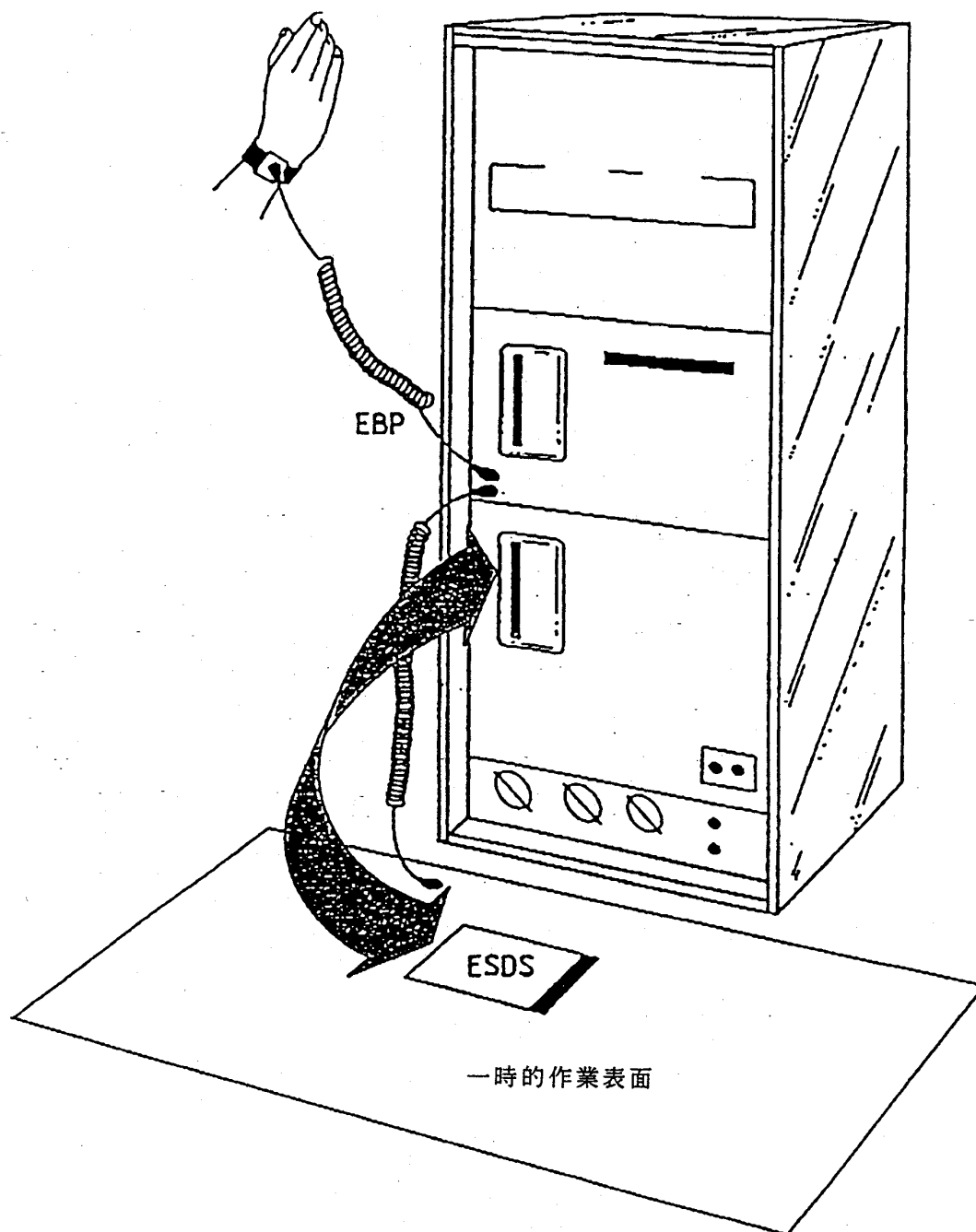


図 5.9-1 現場作業でのESDSアイテムの取扱
(CECC 00 015-01)

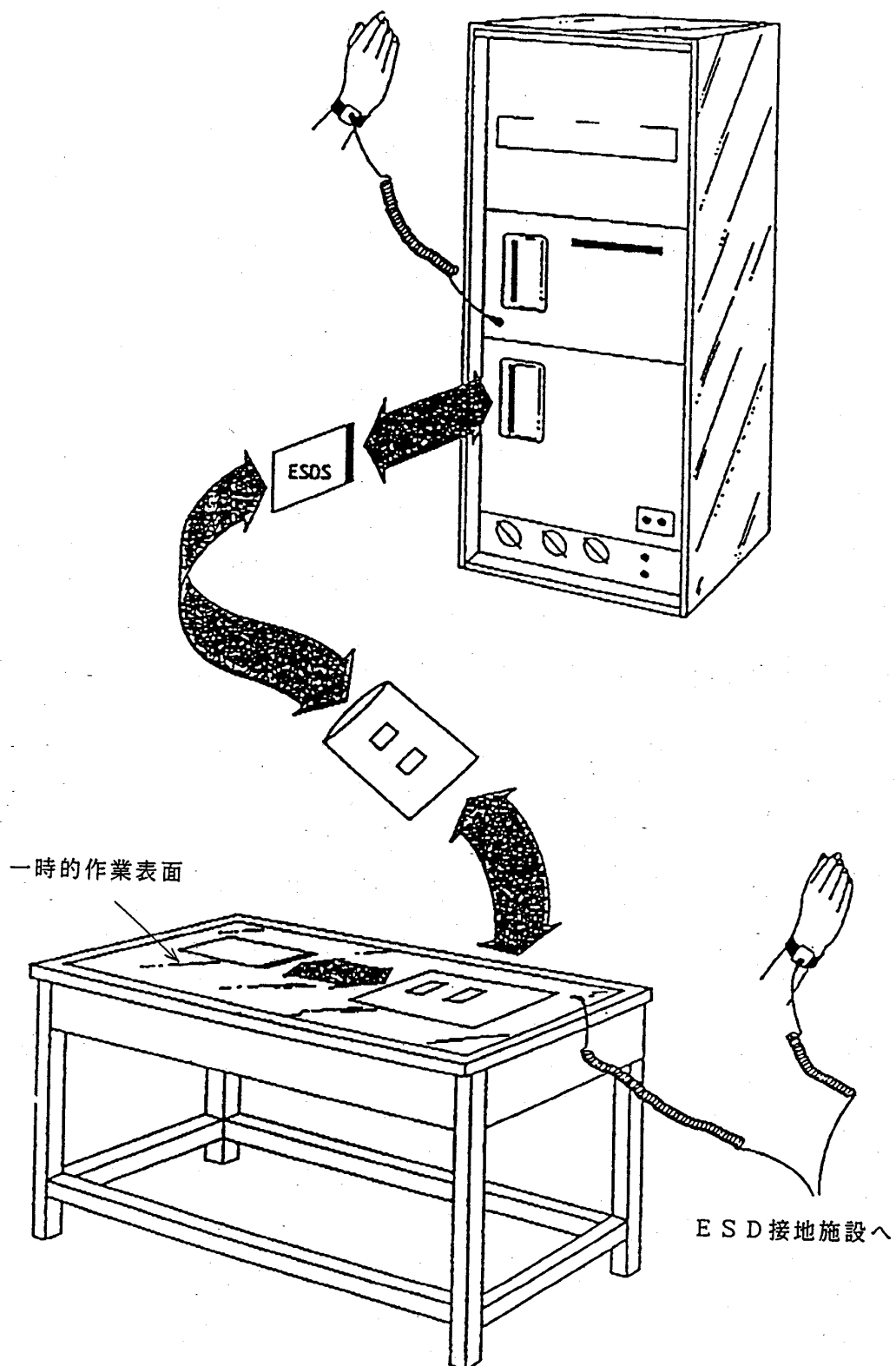


図5.9-2 現場作業でのESDSアイテムの取扱（作業台）
（CECC 00 015-1）

5.10 教育・訓練

5.10.1 一般

ESDに関する教育は、ESDSアイテムの指定、認定、設計又は取扱いを行うすべての関係者に対して実施する。どのようなESD保護区域及びESDSアイテム取扱手順であれ、正しい使用法を関係者に教育・訓練することなしに、必要とされる保護を得ることは難しい。

教育・訓練プログラムは、各工場の状況に応じて効果的なものとして導入したESD保護資材・機器に対応するように作成する。

教育・訓練は、ESD保護資材・機器に有効に活用できるようにすること並びにESDSアイテム取扱手順及び接地に関する安全上の注意事項の背後にある理念を理解させることを目指して実施する。

教育・訓練は、受講者の知識水準、理解力及び業務内容を考慮して行う。例えば、静電気の理論に関する講義内容は、受講者の能力及び業務内容に応じて決めるもので、ESDSアイテムをキット化する保管室の作業員より保護回路を設計する技術者の方が、理論を指向した教育が必要である。

教育・訓練の終了認定は、教育コースの各単元に出席し、理解したことが証明された人間に対し文書で行う。

なお、ESDに関する教育は、納入装置の使用者を対象とする訓練コースの一部にも組み込む。その教育には、機器内のESDSアイテムの識別、基本的なESD理論、ESDSアイテムの取扱に関する注意事項、ESD保護包装の必要性・使用法・種類、及びESDSアイテム取扱手順の一部として接地作業を行う場合における安全への考慮事項などを含める。

5.10.2 教育・訓練コース概要

教育・訓練コースの具体的なテーマの例として、MIL-HDBK-263Aに記載されている項目を次に示す。教育コースは、受講者の従事する業務に応じて、単元の設定、説明の程度などを調整する。

(1) 導入

教育コース概要

用語の定義

歴史的背景

ESD問題の原因と結果

ESDに対する認識の水準

ESDSアイテム

ESDの関与の識別が容易でない故障

ESD対策の効用

ケースヒストリー1. ESD問題の原因となる製造工程

ケースヒストリー2. 不適切な取扱・包装に起因するESD故障

(2) 静電気及び静電気放電の理論

用語

静電容量

ESDにおいて問題となる静電容量の種類

物質の誘電率

〔例〕 平行板コンデンサ

物質の絶縁強度

コンデンサ内部の蓄積エネルギー

〔例〕 コンデンサにおける電荷とエネルギー

最大電荷と最大電圧

電荷の減衰

物質の帯電電荷の緩和時間

人体モデル

人体等価要領

人体モデルパラメータの実験的決定

ESDパルス

〔例〕 ESDパルスのオシロスコープ写真

ESDパルスの周波数スペクトル

人体モデル試験回路の検討

静電界

静電界の数学的表現

〔例〕 2つの電荷間の静電界

ガウスの法則の適用例

静電界の電界強度

MOSFETデバイスの損傷に対する静電気電圧

静電気シールド

〔例〕 絶縁性袋の内部にあるデバイスに生じる誘導電圧

帯電過程

接触帯電

〔例〕 接触帯電による起電

摩擦帯電の発生に影響を及ぼす諸要因

代表的な摩擦帯電列

〔例〕 固体の帯電

誘導帯電

〔例〕 接触された導電性物体の点電荷による静電誘導

イオンビーム又は電子ビームによる帯電

その他の帯電過程の種類

静電電荷の分布

静電気の除電方法

〔例〕 電荷の拡散に要する接地抵抗

静電気電圧へのイオン化の効果

空間電荷の中和

静電気電圧への湿度の効果

(3) 静電気の発生源

作業環境における主な静電気発生源

一般に見落とされやすい静電気発生源

工場内における典型的な静電気電圧

静電気を発生する製造工程1・・・プリント配線板に関わる工程の作業

静電気を発生する製造工程2・・・液体が流動する工程

静電気発生源としての人体

作業員の衣服から発生する静電気

静電気発生源としての包装材

静電気発生源に対する湿度の影響

(4) ESDS部品及びESDS試験

ESDS部品

ESDSの分類

クラス 1 ESDS部品

クラス 2 ESDS部品

クラス 3 ESDS部品

ESDにより影響を受ける部品の電氣的パラメータとその具体例

バイポーラトランジスタのカーブトレサ波形

JFETのカーブトレサ波形

GaAsFETのカーブトレサ波形

取扱作業中におけるバイポーラデバイスの入力特性の進行性劣化

バイポーラオペアンプのカーブトレサ波形

ショットキーダイオードの逆方向電流曲線

TTLのカーブトレサ波形

LSTTLのカーブトレサ波形

ECT RAMのカーブトレサ波形

部品のESDSに影響を与えるパラメータ

ハイブリッド薄膜抵抗・コンデンサの故障

ESDS試験に用いる人体モデル等価回路

ESDS試験に用いる部品のピン接続

M I L -STD-883 方法 3015 試験

ESDS分類試験

ESDSの決定に用いるその他のモデル

デバイス帯電モデル

誘導帯電モデル

マシンモデル

チップ帯電モデル

その他のESDS試験技術

(5) ESDが関与する故障メカニズム

部品の故障

機器レベルの故障

54L04 TTLゲートにおける熱的ブレイクダウン

バイポーラオペアンプの入力トランジスタの損傷部のSEM写真

MOS構造における絶縁破壊

MOSデバイスの絶縁破壊損傷部のSEM写真

帯電している物体の静電界により損傷したMOSFETデバイスの事例

現在のMOS技術に対するゲート酸化膜寸法とブレイクダウンの関係

帯電後(1000 V)接地放電したバイポーラデバイスの損傷部のSME写真
ESDSアイテムにおける損傷経路

(6) デバイスのESD感受性の決定に用いる分析計算

デバイスのESD感受性の計算に用いる故障モデル

Wunsch-Bellモデル

代表的な Wunsch-Bellモデル曲線

ESD感受性の計算に用いる Wunsch-Bellモデル曲線の妥当性

個別のデバイスパラメータからの Wunsch-Bell定数の算定

ダイオード及びトランジスタに用いるWunsch-Bell損傷定数の数値例

Wunsch-Bellモデルに基づいたEB接合のESD感受性の計算

ESD感受性の計算手順

〔例〕 パワートランジスタのESD感受性の計算

CMOS保護ダイオードのESD感受性の計算

金属配線故障モデル

集積回路に用いる経験的故障モデル

〔例〕 TTL ICのESD感受性の計算

リニアICのESD感受性の計算

MOS ICのESD感受性の計算

数種のESD感受性に関する計算値と実測試験データの関係

VZAP故障電圧に関する人体モデルパラメータの効果

(7) ESDS部品・組立品の設計保護

設計の手引き及び基準

バイポーラ型及びMOS型ESDSアイテムに用いる代表的な保護回路

バイポーラトランジスタ及びリニアICに用いるファントムエミッタ

ダイオードと抵抗／ダイオードの接続

スパークギャップ／ダイオードとツェナーダイオード

MOS ICに用いる保護回路の比較

高密度NMOS ICに用いる保護回路の比較

組立品／機器のESD保護

プリント配線板の領域区分化、シールド化及び接地

ESD保護デバイスとしてのトランジェントサプレッサ

(8) ESD保護材料

体積抵抗率

表面抵抗率

ESD保護材料の抵抗率範囲

減衰時間

静電気発生特性

静電気シールド特性

ESD保護材料の特性に用いる試験方法

表面及び体積抵抗率の測定法・・・ASTM D 257

ASTM D 257の測定に用いる試験器材

体積抵抗率の測定法・・・ASTM D 991

減衰時間の測定法・・・FED-STD-101 方法 4046

減衰時間の測定に用いる試験器材

摩擦帯電の測定法

静電気シールドの測定法・・・ANSI/EIA-541-1988

ESD保護材料のESD対策に関する諸特性間の関係

ESD保護材料の選択における基礎的考慮事項

作業表面とその見本（対策された作業台）

部品／組立品コンテナとその見本（コンテナ、接地バー／クリップ）

フォーム材とその見本

包装用緩衝材とその見本

袋とその見本

その他の柔軟性材料

作業員の衣服

グラウンドストラップとその見本（リストストラップ）

床材及びカーペットとその見本

液状及びスプレー状薬剤

帯電防止剤とその見本（液状タイプ及びスプレータイプ）

ESD保護包装に関する考慮事項

ESD保護包装材の比較

ESD保護包装と表示ラベルの選択

ESD保護材料の特性の耐環境性

帯電防止性袋についての加速エージングの結果

ESD保護材料のMIL規格

(9) ESD管理及び試験装置

ESD保護工具とその見本

プラシチック製はんだ除去器

高電圧印加型イオナイザの動作原理

イオナイザとその見本

(ブロー、バー、ガン、ノズル、グリッド、放射線式イオナイザ)

イオナイザに対する試験方法

バイパスプレート法 (BPM)

静電気電圧減衰法 (EDM)

イオン流法 (IFM)

卓上型イオナイザの比較

静電気メータ／検出器とその見本 (静電気レベル警報システム)

ESDシミュレーション装置

市販で有用なESDシミュレータとその見本

ESD保護材料の特性の測定に用いる試験機器・装置とその見本

(静電気減衰計、抵抗率測定プローブ／メータ、

センサ付ESDアナライザ、

リストストラップ／接地システムテスター)

(10) ESD保護区域の設計及び認定

基本原理及び経済的考慮事項

ESD保護作業場に対する最小限の要求事項及び付加的な要求事項

ESD保護作業場の基本的設計図

ESD保護材料／装置の選定

ESD保護作業場における代表的な諸問題

装置に対するESD保護区域の設計

接地と安全に関する考慮事項

作業場の有効性と安全性のチェック手順

ESD保護区域の認定

(11) ESD管理手順

ESD管理が関連する機能／部門

取扱作業上の一般的な事前注意事項

作業、中間及び倉庫レベルでのESD管理維持に関する考慮事項

機器レベルのESD予防的保守手順

ESD保護包装／表示方法

(12) 工場におけるESD管理プログラムの評価

このハンドブックの指針

ESD管理プログラムに関する一般的考慮事項

工場内においてESD管理が関連する機能／部門

次の機能／部門におけるESD管理プログラム上の責務

資材調達

資材受入

受入検査

搬出

倉庫及びステージング

設計技術

製造

試験技術

品質保証

信頼性技術

ESD教育・訓練プログラム

ESD管理・訓練プログラムのモニタ

ESD管理・訓練プログラムの審査／評価チェックリスト

作業場と保護区域

包装、表示及び出荷

手順及び教育・訓練

その他ESD管理プログラムの要求事項

5.10.3 教材

(1) 教育用ビデオテープ

さまざまな教育用ビデオテープが出版されているが、使用にあたっては、技術的な正確性及び教育用としての適用性を注意深く吟味する必要がある。

(2) ESD保護材料及び装置の見本

受講者に関係がある代表的なESD保護材料・機器の見本を教材として使用するとよい。一例を以下に示す。

a. ESDSシンボル

EIA RS-471に規定されているシンボル

MIL-STD-1285に規定されているシンボル

b. 各種ESD保護材料

c. ESD保護工具及び装置

d. 静電気メータ、抵抗計、メガー

(3) ビジュアルエイド

その他、ビジュアルエイドとして以下のものも教材として使用するとよい。

a. 作業台の接地配線図

b. ESD保護工具及び装置の写真及び小冊子

c. 損傷したESDSアイテムの顕微鏡写真

5.11 ハーネス起因ESD

機器組み立て・試験工程におけるハーネスの引き回し・接続によってESD現象(CDE : Cable Discharge Events)が発生し、それらは一般的にハーネス起因ESDとして報告されている。(Ref01, 02)

ハーネス(機器・スライスのケーブルおよび試験ハーネス)の被覆は、作業机、床、衣服、作業面(構体パネル等)などの表面を、ハーネスが接触しながら移動することにより、容易に摩擦帯電する。またはハーネスが表面から離れることによりハーネス被覆に帯電する。この帯電により、ハーネスの導体が誘導帯電する。帯電したハーネスを機器に差し込むと、コネクタの設計によっては、ハーネスの導体と機器のコネクタピンの1つ以上の間でESDが発生する。ESDによって流れる電流パルスは、ハーネスの長さ、インピーダンス、コネクタのタイプに大きく依存する。ESDにより、インターフェース・デバイスを損傷させる可能性がある。(Ref02)

ESDモデルの特徴について比較した結果を表5.11-1に示す。なお、表中のパルス幅は、LAN ケーブルを前提としたものであり、ハーネス起因ESDのパルス幅やピーク電流値はハーネス長や束線数により変わる。CDEは立ち上がり時間が速く、ESD保護回路のターンオンより速い可能性があり注意が必要である。

表5.11-1 ESDモデルの比較 (Ref03)

Parameter	HBM	CDM	IEC 61000-4-2	CDE 注)
Rise time	2 to 10 ns	100 to 500 ps	~ 0.8 ns	100 to 300 ps
Pulse duration	150 ns,	~ 2 ns	~ 80 ns	up to several milliseconds (depends on the cable length)
Peak current	0.7A/kV	1- 16A (depends on the size of IC)	3.75 A/kV	Peak: ~5A/kV Plateau: ~3A/kV

注)CDE: Cable Discharge Event

5.11.1 ハーネス起因ESDの基礎

5.11.1.1 ハーネス帯電の種類

5.11.1.1.1 静電気発生

静電気の発生については、5.1.1項に示す通りである。

大気圧中で起こる通常の静電気現象において、ハーネスの静電気が発生する原因を分類すると次の4つに大別される。

- (1) 接触・分離帯電
- (2) 摩擦帯電
- (3) 誘導帯電と静電シールド
- (4) 分極

5. 11. 1. 1. 2 接触・分離帯電

物体が他の物体と接触すると静電気は必ず発生する。その物体が金属で、かつ接地されていれば静電気はすぐに除去されるが、そうでなければ帯電する。接触による静電気の発生メカニズムを図5. 11. 1. 1. 2-1 ボーアの原子モデルで説明する。原子にはマイナス電荷の電子が軌道上に存在し、原子核にはプラス電荷の陽子が電子数と同じだけ存在して、電氣的には中性を保っている。原子には、電子を受け取りやすい（電子親和力が大きい）原子と、電子を放出しやすい（イオン化傾向の大きい）原子が存在する。両者が接近することで電子の移動が起きる。その結果、電子を受け取った原子はマイナスに帯電して、電子を放出した原子はプラスに帯電する。このような電子の移動が接触した物体同士の界面で起きている。

図5. 11. 1. 1. 2-2に、物体同士が接触、分離することで静電気帯電過程を示す。まず物体Aと物体Bが接触することで電子の移動が起きる。物体が離れるときには、電荷の戻りや気中放電によって電荷の一部は消滅する。最終的に残った電荷によって静電気帯電する。(Ref04)

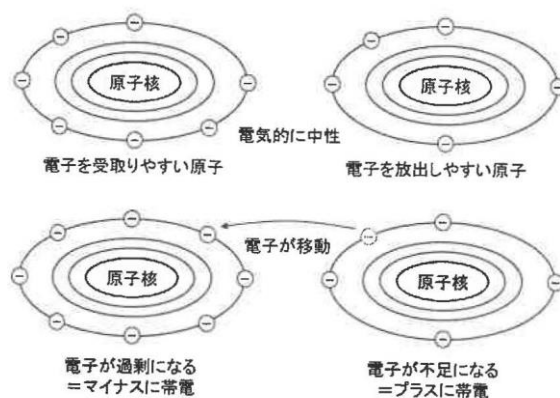


図5. 11. 1. 1. 2-1 ボーアの原子モデルでの帯電の説明

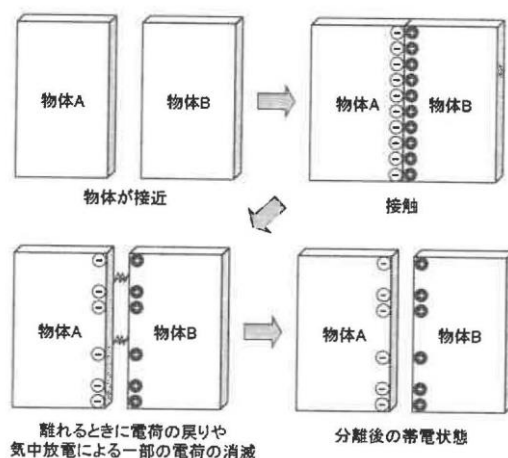


図5. 11. 1. 1. 2-2 接触、分離による静電気帯電

5. 11. 1. 1. 3 摩擦帯電

2つの異なった物体が互いに接近し接触すると、一方は正極性に、他方は負極性に帯電し、表面が分離されると静電気として認識される。接触によって発生する電荷の量は接触面を擦り合わせると多くの場合増加する。この帯電様式を摩擦帯電という。

摩擦によって接触している表面の変形が起こらない場合、摩擦を繰り返すたびに毎回同程度の面積 S_0 が擦りあうが、その時に擦りあわされた面積の内ある割合で、その前の擦りあわせまでに少なくとも1度は擦られた面積 S が存在する。この割合、すなわち S/S_0 は摩擦回数が増加するにしたがって増加し、多数回の摩擦後には $S=S_0$ になる。摩擦可能な面が1度摩擦されると、この状態で電荷の増加はほとんど起こらなくなる。(Ref05) 摩擦帯電現象の詳細は、5. 1. 1. 1 摩擦帯電を参照のこと。

5. 11. 1. 1. 4 誘導帯電と静電シールド

導体を電界中に置くと、導体内の伝導電子は電場に引かれて一方の側に動き、その結果導体の表面には図5. 11. 1. 1. 4-1のように正負の電荷が生じる。このように静電界中に置かれた導体の表面に電荷が現れる現象を静電誘導という。また、この時に誘導される電荷を誘導電荷という。(Ref06, Ref07)

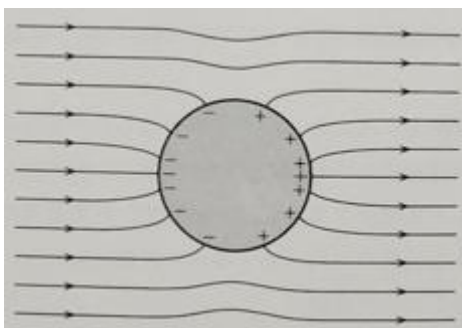


図5. 11. 1. 1. 4-1 一様な静電場の中に導体球を置く

正に帯電した絶縁体Aからの電場内に、導体Bを置いた時、導体B内の負の電荷がその電場により導体B内でA側に向かって移動し、BのAに面した表面は負に帯電し、反対側の面は正に帯電する。(図5. 11. 1. 1. 4-2に示すように、導体Bが帯電する。)(Ref08)

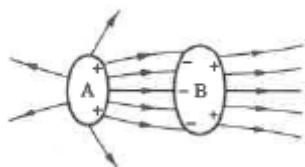


図5. 11. 1. 1. 4-2 誘導帯電

導体を用いて空間をかこみ、外部の電界をさえぎることを静電シールド(静電遮蔽)という。図5.11.1.1.4-3に示すように、シールド物(導体A)の内側に電場は侵入せず、導体Bは誘導帯電しない。

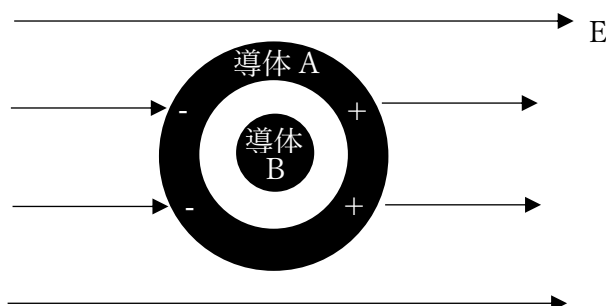


図5.11.1.1.4-3 静電シールド

また、正に帯電した導体Cが入ってきたときに、シールド物(導体A)で導体Bをかこむと、導体Aは誘導帯電するが、対象の導体Bはシールド効果で誘導帯電しない。(図5.11.1.1.4-4参照)

なお、シールド物(導体A)を設置する際のハンドリング時に導体Aが帯電してしまうと、導体Bは誘導帯電するので注意が必要である。従い、シールド物(導体A)はGNDに接地するなど、ニュートラルな状態を維持することが重要である。

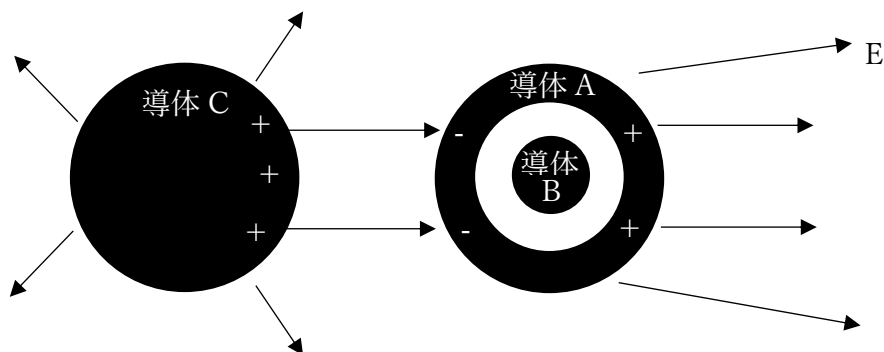


図5.11.1.1.4-4 静電シールド(帯電した導体Cが入ってきた場合)

誘導帯電は帯電物が導体以外の絶縁体でも起きるので注意が必要である。ケーブルやハーネスの場合、被覆が絶縁体で心線が導体であり、被覆が分離・摩擦帯電した時に、副次的に心線が誘導帯電する。

5.11.1.1.5 分極

帯電体を絶縁体に近づけると、図5.11.1.1.5-1のように絶縁体内部で電気双極子が帯電体の方に向かって整列し分極という状態になる。電気双極子は微小距離を隔てた正負電荷の一对である。実体は原子であったり、分子であったり、イ

オン結晶であったりするが、そのもの自体は電氣的に中性でかつ絶縁体のため電子の授受はない。つまり電荷の出入りが無いため、接地を外して帯電体を遠ざけても分離している状態から元に戻るだけとなる。(Ref04)

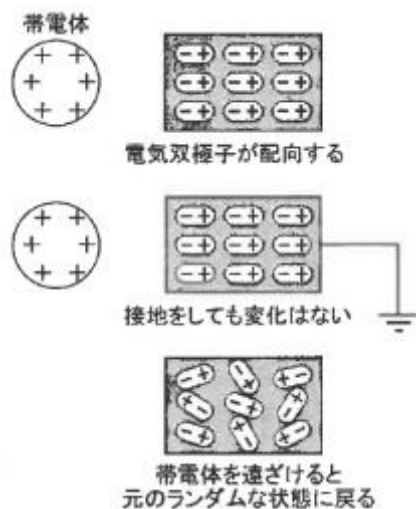


図 5. 11. 1. 1. 5-1 分極のモデル

5. 11. 1. 2 ハーネスの静電気放電

静電気放電や放電原理は5. 1. 7項と同様であり、ここではハーネス接続時の静電気放電について説明する。

図5. 11. 1. 2-1に示すように、絶縁被覆で覆われた導体A(ケーブルの心線)が接地導体B(機器側コネクタ)と離れて存在している。ここで絶縁体C(ケーブルの被覆)が帯電した場合、導体Aは、誘導帯電し、接地導体Bとの間に電位差が生じる(このとき導体A内の正味の電荷量は、 ± 0)。ギャップ間の電位差が絶縁破壊電圧に達したとき放電が起こる。Aは、一電荷が消滅しているので、+電荷が過剰になっている。この間、帯電体Cは電荷の出入りが無いので、帯電体C自体は除電されていない。

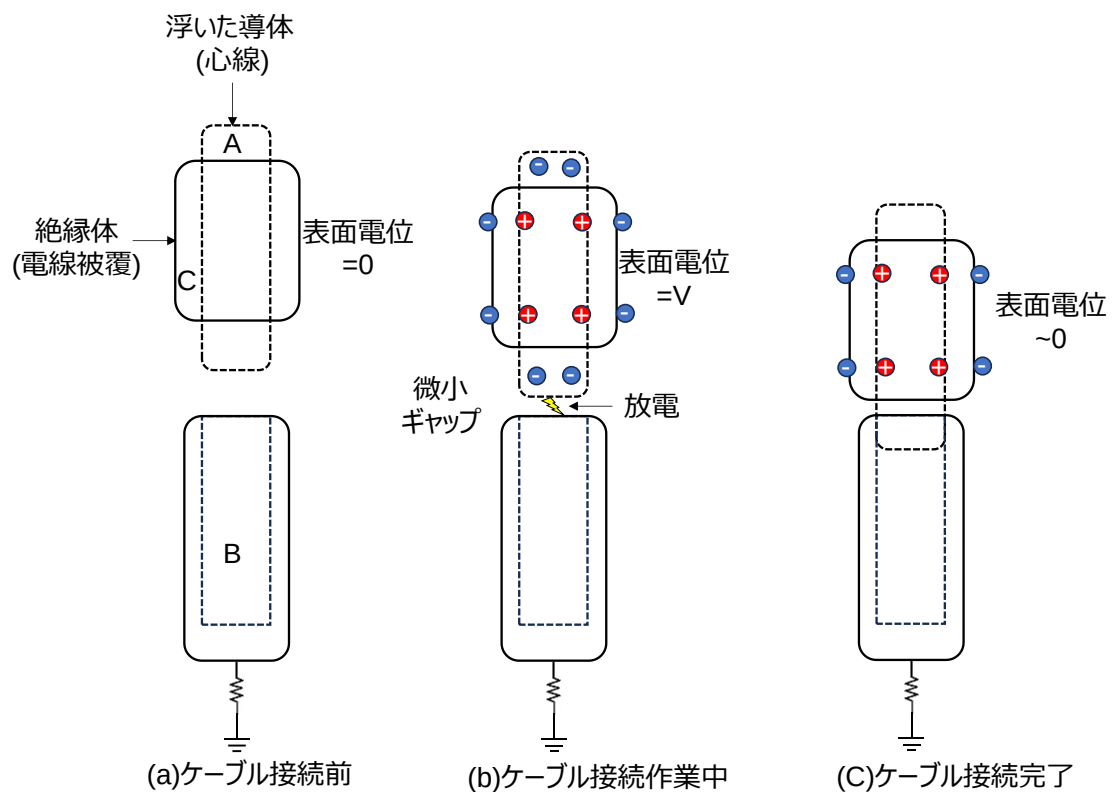


図5.11.1.2-1 静電誘導と放電（ケーブル接続前後）

5.11.1.3 ハーネスの特性

(1) 回路

ケーブルの伝送線路の長さが波長に近くなるか波長より長くなると、伝送線路上の任意の地点の電圧や電流を求めるときに、分布定数回路で考える必要がある。電圧及び電流は、時間(t)と回路上の位置(x)の変数で表現される。分布定数回路を集中定数回路表現した基本回路を図5.11.1.3.1-1に、分布定数回路の微小区間の集中定数回路表現を図5.11.1.3.1-2に示す。電圧と電流の式は以下となる。(Ref09, Ref10)

$$\begin{aligned} \cdot \text{電圧} : -\frac{\partial}{\partial x} v(x, t) &= ri(x, t) + l \frac{\partial}{\partial t} i(x, t) \\ \cdot \text{電流} : -\frac{\partial}{\partial x} i(x, t) &= gv(x, t) + c \frac{\partial}{\partial t} v(x, t) \end{aligned}$$

微小区間 Δx における R, L, C, G

- ・抵抗 $R=r \Delta x$
- ・インダクタンス $L=l \Delta x$
- ・キャパシタンス $C=c \Delta x$
- ・コンダクタンス $G=g \Delta x$

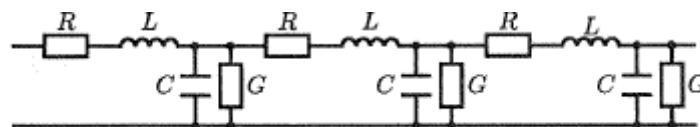


図 5.11.1.3.1-1 分布定数回路を集中定数回路表現した基本回路

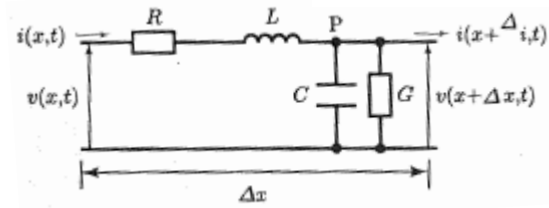


図 5. 11. 1. 3. 1-2 分布定数回路の微小区間の集中定数回路表現

帯電したケーブルを接続した時、ケーブル心線に誘導帯電した電荷が放電する。この時、ケーブル心線の電荷は高速に移動し、寄生インダクタンスや寄生キャパシタンスの効果によって線路上には場所により異なる電位が発生する。したがって、放電時のケーブル端の電流は、ケーブルを分布定数回路として扱うことで、表すことができる。ケーブルを集中定数回路として扱う場合、微小区間に分けずに寄生インダクタンスや寄生キャパシタンスを考えるため、単純な LCR 回路の放電電流となる。

分布定数回路の性質を以下に示す。

- ・ ケーブルには寄生成分がある。
- ・ 放電時、ケーブル上の電圧は場所により異なる。
- ・ 伝送線路上の信号伝達に遅延が生じる。

(2) 対地静電容量

ケーブルの対地静電容量は、ケーブル心線と大地との間の静電容量を指す。なお、シールド線が接地されている場合、静電容量は、ケーブルの心線とシールド線との間に生じる静電容量となる。ケーブルがグラウンドから高い位置にあると、対地容量によってケーブルの静電容量が小さくなり、同じ帯電電荷量でも、ケーブルの電位は高くなる。

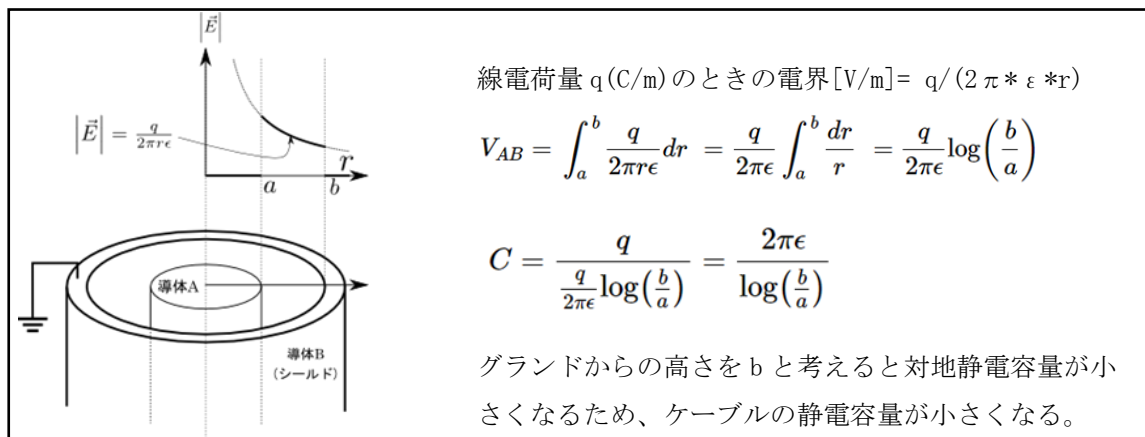


図 5. 11. 1. 3. 2-1 ケーブルの対地静電容量 (Ref11)

5.11.1.4 産業界のケーブルESD事例

事例1：テープケーブルの端ピン接続しているLSI故障（Ref12）

事例名称	テープケーブルの端ピンに接続しているLSIが静電気による放電で破損した。
事例概要	テープケーブルの端ピンに接続しているLSIに、破損事故が多発した。組立作業時にテープケーブルをコネクタに挿入する際、テープケーブルの表面（テフロン）に帯電した静電気が、信号線に0.2KV～2KVの電圧を誘起してすぐに放電したため、LSIを破壊してしまった。対策として、イオンブローワーで除電しながらの組立作業方法に変更した。
状況	テープケーブルの端ピンに接続しているLSIに、破損事故が多発した。
原因	組立作業時にテープケーブルをコネクタに挿入する際、テープケーブルの表面（テフロン）に帯電した静電気が、信号線に0.2KV～2KVの電圧を誘起してすぐに放電したためである。
対策	イオンブローワーで除電しながらの組立作業方法に変更した。

事例2：LANケーブル布設時の静電気帯電問題（Ref13）

事例名称	LANケーブル布設時の静電気帯電問題
事例概要	展示会場で布設中のLANケーブルをスイッチングHUBに接続したとき故障が発生した。 念のため、未接続LANケーブルのRJ45プラグのピンに低電圧用の検電ドライバで触れてみたところ“両端が接続されていない状態なのに帯電していた。”
状況	LANケーブルの使用が個人ユースから産業・業務用に多く使用されることで、LANケーブルの接続本数が多くなりトラブル発生件数が目立ってきたこと、そして、LANケーブルの 布設距離が長くなってきたことからLANケーブルの静電容量（C:キャパシタンス）が大きくなり、それに比例して静電気帯電による放電エネルギーも大きく、ESDでネットワーク機器を損傷する危険性が高くなってきた。
原因	☆自然に帯電 新しくLANケーブルを購入したときの包装の多くが、アルミ蒸着された導電性の袋などで帯電防止されている通り、LANケーブルは未使用の状態でも静電気帯電する。これは、摩擦による静電気の発生のほか、ケーブルが置かれている場所において周囲からの高電圧源や高周波機器からの誘導などによる帯電と考えられる。 ☆他の帯電体に接触して帯電 既に帯電しているポリ容器や樹脂製の袋からの取り出し、作業机や椅

	子・工具類のケーブルやホース・梱包のパッキンやシートなどとの接触のほか、稼働中の 複写・印刷機械やコンベヤなど、普段あまり静電気帯電を意識していない物体に瞬時でも接近や接触することでLANケーブルに静電気帯電が発生する。
対策	静電気除去ツールにLANケーブルを接続し、1MΩ の抵抗を介しアース端子に接続し、LANケーブルの心線とシース（外装）が接する面間の電位を下げる。

5. 11. 2 ハーネス起因 ESD の特性

5. 11. 2. 1 ハーネスの静電容量及びインダクタンス

(1) ハーネスの静電容量

ハーネスの静電容量は、被覆が同じでも、電線の状態、長さ、束数、グラウンドからの高さによって異なる。ハーネスの静電容量の傾向を図5. 11. 2. 1. 1-1に示す。

	小さい	静電容量	大きい
電線の状態	巻取 (とぐろ)		展開 (まっすぐ)
電線の長さ	短い		長い
電線の束数	少ない		多い
グラウンドからの高さ	高い		グラウンドと同位置

図5. 11. 2. 1. 1-1 ハーネスの静電容量の傾向

なお、電線の種類(UTP, STP, ストレート)による、ハーネス静電容量の傾向については、測定ばらつきが大きく、明確に表すことは難しい。ばらつきの原因として以下が挙げられる。

- ・電線を束ねているため、電線同士の重なり状態がハーネス引き回しのたびに変わる。特に、巻取状態の時は、電線同士の重なり状態の変化が顕著となる。
- ・ハーネスと静電マット(GNDに接地)の間の接触状態がハーネス引き回しのたびに変わる。

このため、測定したハーネスの静電容量を、放電特性等の評価や解析に利用する場合、ハーネスの引き回し作業ごとにハーネスの静電容量が変わる（つまり、かなりばらつく）ことを考慮する必要がある。

(2) ハーネスのインダクタンス

ハーネスのインダクタンスは、電線の状態や長さによって異なるが、束線数、電線の被覆、グラウンドからの高さに大きな差異はない。ハーネスのインダクタンスの傾向を図5.11.2.1.1-2に示す。

	小さい	インダクタンス(*1)	大きい
電線の状態	展開 (まっすぐ)		巻取 (とぐろ)
電線の長さ	短い		長い
電線の束数	大きな差異無し		
電線の被覆(*2)	大きな差異無し		

(*1)電線1本を測定

(*2)PVCとETFEの比較

図5.11.2.1.1-2 ハーネスのインダクタンスの傾向

このため、測定したハーネスのインダクタンスを、放電特性等の評価や解析に利用する場合、ハーネスの引き回し方により（巻取状態の有無により）インダクタンスが変わることを考慮する必要がある。

5. 11. 2. 2 ハーネスの帯電及びリーク

(1) ハーネスの帯電

ハーネスの帯電は、電線の種類、長さ、束線数、及び被覆の種類によって異なる。また、帯電方法によっても異なる。ハーネスの帯電の傾向を図5. 11. 2. 2. 1-1に示す。なお、電線の被覆による帯電傾向は、被覆と静電マット等の接触する材料の組み合わせ（表5. 1-1 帯電列表参照）で異なるため、使用する施設や状況により確認が必要である。

帯電方法：帯電ガン

	少ない	帯電電荷量	多い
電線の種類	STPでシールド 未接地	UTP	ストレート
電線の長さ	短い		長い
電線の束線数	少ない		多い
電線の被覆	XETFE		PVC

図5.11.2.2.1-1 ハーネスの帯電の傾向（1/2）

帯電方法：持上げ

	少ない	帯電電荷量	多い
電線の種類	UTP	STPでシールド 未接地	ストレート
電線の長さ	短い		長い
電線の束線数	少ない		多い
電線の被覆	PVC	注 1	XETFE

帯電方法：持上げ後引伸ばし

	少ない	帯電電荷量	多い
電線の種類	有意差無し (ストレート, STP, UTP)		
電線の長さ	短い		長い
電線の束線数	少ない		多い
電線の被覆	PVC	注 1	XETFE

注1) 静電マット上にハーネスがあるときの結果である。帯電電荷量の大小は、被覆と静電マット等の接触する材料の組み合わせにより、変わる

図5. 11. 2. 2. 1-1 ハーネスの帯電の傾向 (2/2)

(2) 帯電したハーネスのリーク

ハーネス被覆に帯電した電荷のリークは、空気中へのリークと設置場所(静電マットや床等)へのリークが考えられる。被覆の種類(PVC、XETFE)によるリーク特性を図5. 11. 2. 2. 2-1に示す。XETFE被覆は静電マット上でリーク特性が高い。

	低い	電荷リーク	高い
空気中	ほぼ無し (PVC,XETFE)		
静電マット上	PVC		XETFE

図5. 11. 2. 2. 2-1 リーク特性

(3) ハーネスの帯電とリークのまとめ

図5. 11. 2. 2. 1-1及び図5. 11. 2. 2. 2-1に示す傾向をもとに、ハーネスの帯電とリーク特性について整理した結果を以下に示す。

- ・ハーネスの束線数を少なく、長さを短くすると、帯電電荷量が少なくなる。
- ・ハーネスを静電マットから持上げた時に大きく帯電(付図3-3参照)する。電線被覆と被覆に接触する材料の帯電列に近い組み合わせを選定すると、帯電電荷量が少なくなる。
- ・帯電したハーネス被覆は、空気中で放置しても電荷リークがほとんど見込まない場合がある。XETFEのようにハーネスの被覆によって、静電マット上にハーネスを寝かせることで電荷リークする場合がある。

ハーネスの帯電の取得データ

ハーネスの帯電電荷量と表面電位を測定した際の測定コンフィギュレーション

ンを付図1-2(持上げ時)及び付図3-1に、帯電電荷量の帯電方法を付表3-1 (①帯電ガンを用いた方法、②持上げ時、③ハーネス引伸ばし時)に示す。

また、ハーネス表面電位の測定結果を付図3-3に示す。

5. 11. 2. 3 ハーネスの放電

ハーネス起因 ESD の放電電流波形は、電線の種類、長さ、束線数、及び被覆の種類によって異なる。静電マット上にあるハーネスを持上げ、ハーネスを静電マット上に引伸ばした後の放電電流波形例を図 5. 11. 2. 3-1 に示す。図 5. 11. 2. 3-1 に示す最初の放電電流パルス形状の電流ピーク及びパルス幅に着目したときの放電電流波形の傾向を図 5. 11. 2. 3-2 に示す。

放電電流波形形状は、少なくとも、以下により変わることには注意が必要である。

- ・ハーネスの状態(巻取状態か引伸ばし状態等)
- ・ハーネスの設置状態(空中か静電マット上か等)
- ・帯電方法(帯電ガンか持上げ/引伸ばし等)

上記状態で放電波形形状が変わる理由として、ハーネスの状態が変化した場合、ハーネス・グラウンド間の設置状態やハーネスの重なり状態が変わり、5. 11. 1. 3(1)に示す分布定数回路のCやLが変わることが挙げられる。また、帯電方法(帯電ガンか持上げ/引伸ばし等)が変わった場合は、帯電状況(例、ハーネス被覆表面に一樣に帯電しているか部分的な帯電か等)や、帯電部位(ハーネス被覆表面のみか他部位もあるか等)が変わることが挙げられる。

また、ハーネスの大半が巻取状態のまま接続したときの放電波形形状は、巻き線状態によるコイルの効果(自己インダクタンスの効果)が現れる。(付図 4-7 参照)

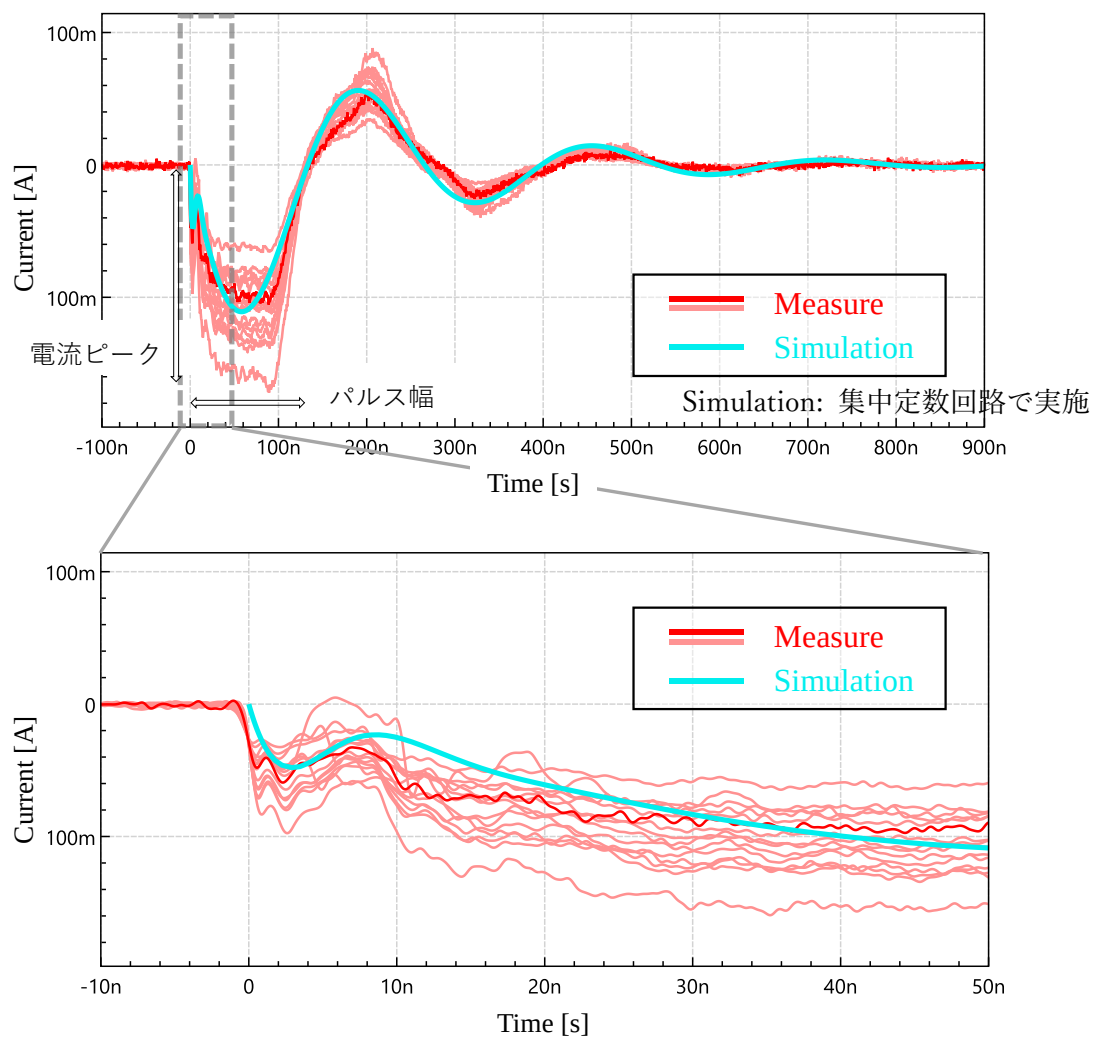


図 5. 11. 2. 3-1 放電電流波形例（帯電方法：持上げ後引伸ばし）

	低い 電流ピーク 高い			低い パルス幅 高い	
電線の長さ	短い	長い	電線の長さ	短い	長い
電線の束線数	少ない	多い	電線の束線数	少ない	多い
電線の被覆	PVC	注 1) XETFE	電線の被覆	有意差無し (PVC, XETFE)	
電線の高さ	有意差無し		電線の高さ	有意差無し	
コネクタの形状	丸形(9pin) μDsub(9pin)	Dsub(9pin)	コネクタの形状	有意差無し (丸形(9pin), μDsub(9pin), Dsub(9pin))	

注1) 被覆と静電マット等の接触する材料の組み合わせにより、帯電電荷量の大小が変わり、電流ピーク値の関係が変わる

図 5. 11. 2. 3-2 最初の放電電流波形の傾向（帯電方法：持上げ後引伸ばし）

ハーネス起因 ESD の放電波形の取得データ

ハーネス引伸ばし後にコネクタ接続した時(負荷抵抗=50Ω)の放電状況を測定した際の測定コンフィギュレーションを付図4-1に、各条件で確認/測定した結果(放電波形)を付図4-2～付図4-7及び付表4-2～付表4-6に示す。また、ハーネス(巻取状態)を持上げた時の放電波形も取得した。測定コンフィギュレーションを付図4-6に、測定結果(放電波形)を付図4-7に示す。

付図4-2、付表4-2 ハーネス束線数/長さの影響(引伸ばし状態)

付図4-3、付表4-3 ハーネス被覆の影響(引伸ばし状態)

付図4-4、付表4-4 ハーネス高さの影響(引伸ばし状態)

付図4-5、付表4-5 コネクタタイプの影響(引伸ばし状態)

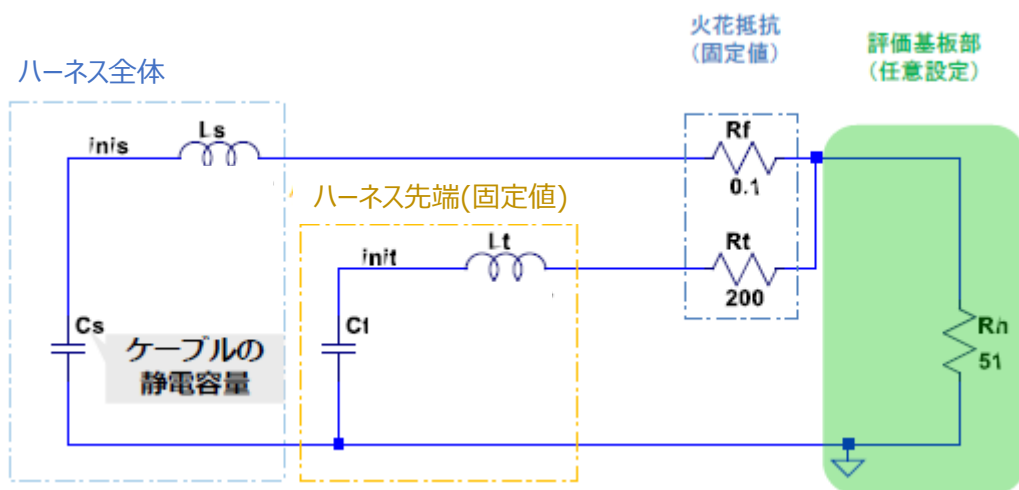
付図4-7、付表4-6 ハーネスを持上げた時の影響(巻取状態)

本測定において、ハーネスコネクタ接続時に放電電流が数百mA以上発生したこと、及び目視にて、ハーネスコネクタを接続する前(ピンが接触する前)に放電しており気中で火花放電が発生していること・持続放電には至っていないことを確認している。

5. 11. 2. 4 ハーネス起因ESDの破壊試験

(1) ハーネス起因ESDモデル

試験コンフィギュレーションと、ハーネスを引伸ばした時の等価回路(ESDモデル)を図5. 11. 2. 4. 1-1に示す。ハーネスの等価回路は、ハーネス先端部(高さ80cm)と残りのハーネス全体(床面設置部)のそれぞれに分け、静電容量(C)、インダクタンス(L)、抵抗(R)でモデル化している。C、L、Rそれぞれの設定を表5. 11. 2. 4. 1-1に示す。



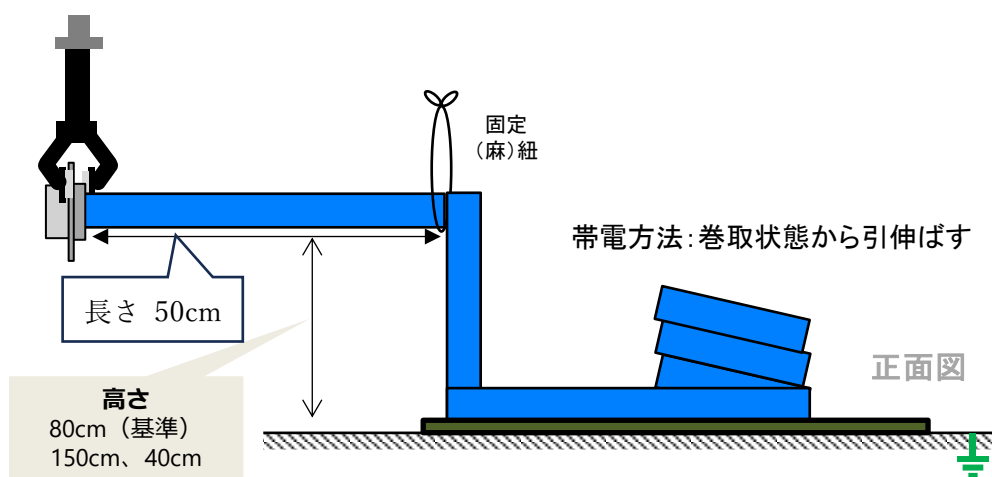


図5. 11. 2. 4. 1-1 試験コンフィギュレーションに対するESDモデル

表5. 11. 2. 4. 1-1 C, L, Rそれぞれの設定

	C	L	R
ハーネス先端	測定値	測定値	200 Ω (火花抵抗値)
残りのハーネス全体	測定値	測定値	0.1 Ω

なお、残りのハーネス全体を引伸ばした状態の場合、C, L回路部は分布定数回路でモデル化できる。ハーネス全体部（床面設置部）の等価回路は、ハーネスを引伸ばした時、分布定数回路を使用したモデルの方が、測定した放電電流波形（第1放電電流波形がパルス状）に一致する。

- ・分布定数回路を使用したシミュレーション結果（図5. 11. 2. 4. 1-2）
- ・集中定数回路を使用したシミュレーション結果（図5. 11. 2. 3-1）

ハーネス全体部が巻取状態の時、5. 11. 2. 3項に示すように、放電波形形状は、巻き線状態によるコイルの効果（自己インダクタンスの効果）が現れ（付図4-7参照）、放電電流の立上り速度が速くなる等異なるため、ハーネス全体の状態を考慮することが重要となる。

本モデルを使用するにあたっての注意事項を以下に示す。

- ・ハーネス持上げ後引伸ばした時の帯電電荷量のばらつきが大きく、測定した放電電流波形のピーク電流値もばらつきが大きくなる。（帯電電荷量のばらつき：付図3-2，放電電流ピーク値のばらつき：付図4-2～付図4-5参照）
- ・帯電電荷量のばらつき要因は、以下が考えられる。
 - ・摩擦や分離帯電した個所にばらつきがある。
 - ・手でハーネスを持つ箇所（帯電に影響）が1か所である。
 - ・上記のようにハーネス取扱いのばらつきにより、ハーネス上で帯電した個所や帯電量が様でなく、帯電分布が出来る。

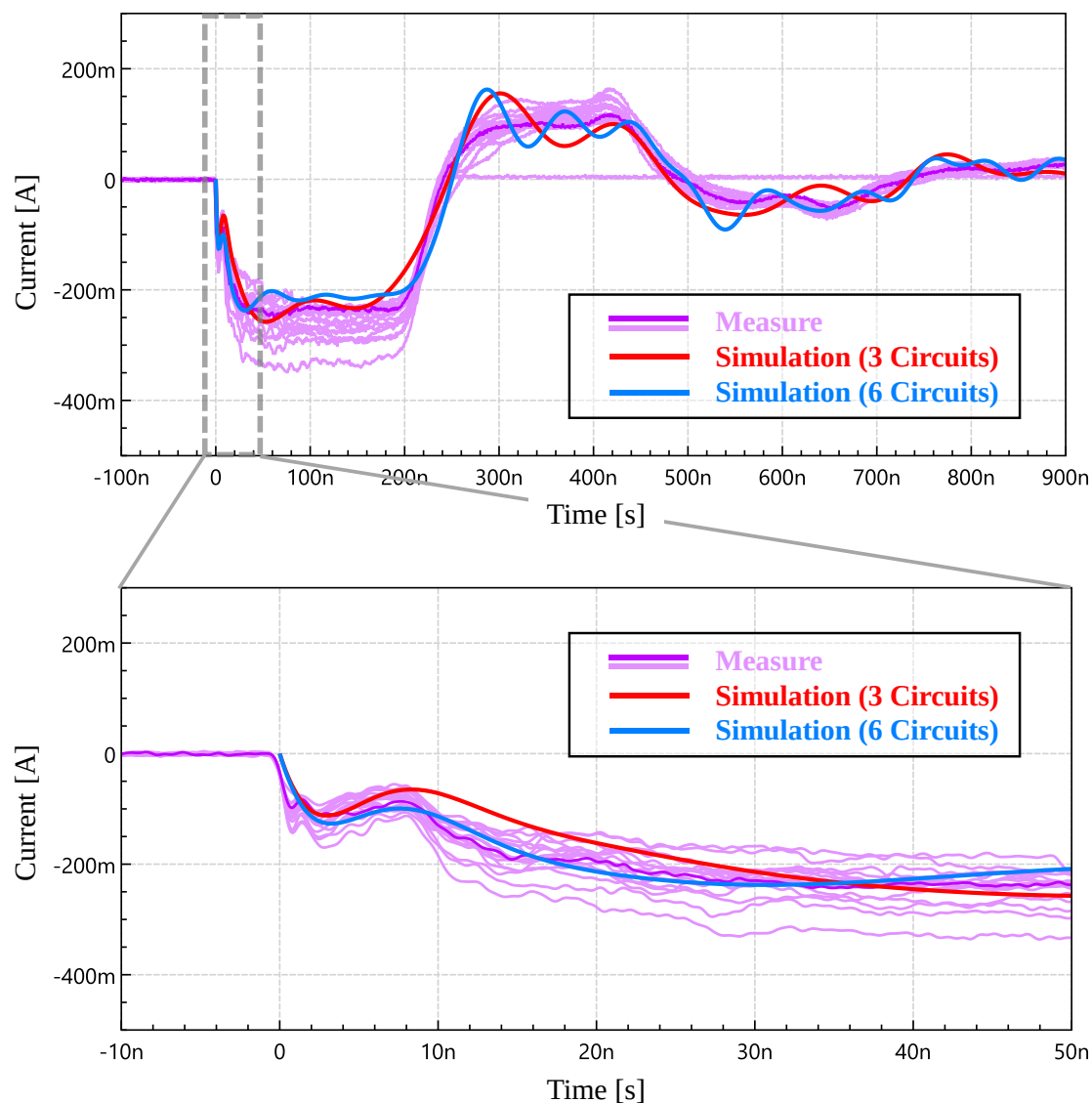


図5. 11. 2. 4. 1-2 放電電流波形の測定結果とシミュレーション結果

シミュレーション結果と実測した放電波形を比較した結果、実測した放電波形と同等の結果であることを確認した（付録Ⅲ（5）ハーネス起因ESDモデルによるシミュレーション結果と測定結果参照）。

(2) ハーネス起因ESD印加装置

現在利用可能なESD印加装置は、ESDガンとTLP(Transmission Line Pulse)のみであり、それぞれの放電電流波形（規定の負荷（ターゲット）に対してパルス電圧を印加した時の波形）を図5. 11. 2. 4. 2-1に示す。また、負荷(50Ω)に対し放電させた時のESDガンとハーネス起因ESDの放電電流波形を図5. 11. 2. 4. 2-2に示す。図

5. 11. 2. 4. 2-2に示す測定結果から、ESDガンによる放電とハーネス起因ESDの間の差異は以下である。

- ・放電の立上がり : 大きな差異はない。
- ・初期パルスの期間 : ハーネスESDの方が長い。なお、ハーネスESDの場合、パルス期間はハーネス長に依存する。
- ・全体波形 : ESDガンの方が数百nsまでの間、放電電流が流れ続けている。なお、ハーネスESDの場合、ハーネス長が長いと初期パルス期間が長くなるため、放電電流が流れる時間も長くなる。

現在利用可能なESD印加装置の特徴は表5. 11. 2. 4. 2-1に示す通りであり、どちらの装置を利用してESDの影響評価をするにしても、使用する側がその違いを理解した上でESD印加装置の選定や評価検討を行うことが必要となる。

表5. 11. 2. 4. 2-1 ESDの印加装置とその特徴

ESD装置	特徴
ESDガン	TLP 装置と比べ連続波形として生成可能である。CRユニットの変更にて、各ESDモデルに対応できる点がメリットである。
TLP 注)	HBMに似せた矩形波を、ESD保護素子に印加して保護素子の特性を取得する試験装置である。なお、立上り速度の速い緩急ある波形を連続的に生成することが難しい。

注) TLP : Transmission Line Pulse

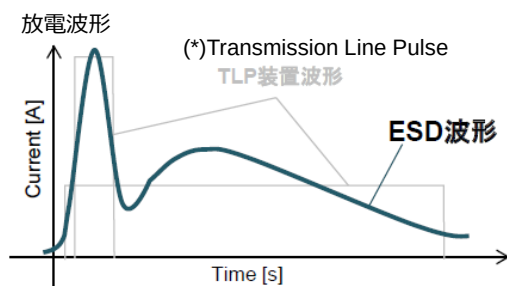
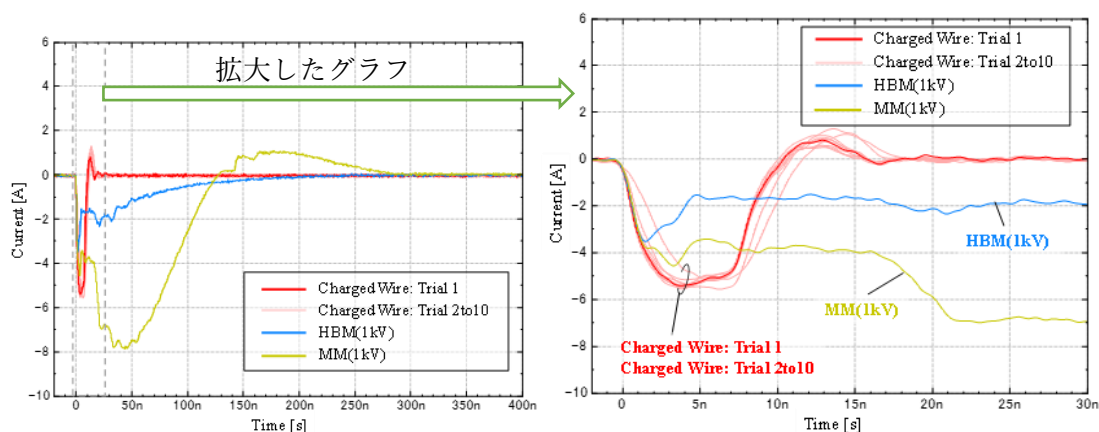


図5. 11. 2. 4. 2-1 ESD印加装置の波形



注)Charged Wire：ケーブル長 1mの単線，ケーブルの高さ 5cm，1kV

図5. 11. 2. 4. 2-2 ケーブルの放電波形例

5. 11. 3 ハーネス起因ESDの対策

5. 11. 3. 1 ハーネスの除電と抑制

(1) 除電

5. 11. 1項にハーネスの帯電メカニズムを示した通り、一般的にハーネスは被覆（絶縁体であることが多い）と心線（導体）で構成されているので、ハーネス帯電はハーネス被覆が帯電することで心線が静電誘導し、心線が帯電する。このため、ハーネス被覆の除電と心線の除電が重要となる。ハーネス被覆の除電方法及び心線の除電方法の代表は、以下である。なお、以下はあくまで代表例であり、以下方法に限定しない。

a. ハーネス被覆の除電方法

- ・被覆に直接接触：静電マット等
- ・被覆に非接触：イオナイザ

b. 心線の除電方法>

- ・ハーネス心線の接地

注意点：被覆と心線両方を除電するのが肝要である。片方の除電では対策が半減する。特に被覆の除電をせずに、心線だけ除電した場合は、除電された極性と反対の帯電分が残るので、もう一度放電するリスクは残る。

(2) 抑制

ハーネス被覆の帯電は、5. 11. 1項にハーネスの帯電メカニズムを示した通り、被覆の分離帯電や摩擦帯電を引き金とした、被覆と心線との間の誘電帯電の抑制が重要となる。また、5. 11. 2. 2(3)に示すハーネスの帯電とリーク特性をもとに、帯電

抑制することが重要となる。

ハーネス帯電の抑制方法の代表は、以下である。なお、以下はあくまで代表例であり、以下方法に限定しない。

- ・電線の選定 : 電線被覆とハーネスの設置場所の材料(静電マットや導電床等)間の接触/分離帯電量が少ない組合せ(帯電列が近い組合せ)となるよう電線被覆を選定する。
- ・ハーネス設計 : 束線数を少なくする。ハーネス長を短くする。
- ・ハーネス引伸ばし作業 : 電線被覆に帯電した電荷をリークさせることが、ハーネス心線の帯電抑制に効果がある。なお、被覆によっては、空气中に放置しても電荷リークが見込めない場合がある。
- ・シールド設計 : シールド線の使用。シールド化した外部ジャケットや編組線の着用。

5. 11. 3. 2 ハーネスの放電電流低減

ハーネスの放電(5. 11. 2. 3項)特性は次の通り整理できる。次の特性を考慮し、ハーネスの放電電流を低減させ、接続する機器の損傷防止につなげることが重要である。

- ・最初の放電電流パルス形状のパルス幅(静電マット上に引伸ばした時(図5. 11. 2. 3-1参照))
 - ・ハーネスの束線数: 多くなるとパルス幅が長くなる
 - ・ハーネス長: 長くなるとパルス幅が長くなる
 - ・帯電電荷量: 帯電量でパルス幅はほとんど変わらない
- ・最初の放電電流パルス形状の電流ピーク(静電マット上に引伸ばした時(図5. 11. 2. 3-1参照))
 - ・ハーネスの束線数: 多くなると電流ピークが高くなる
 - ・ハーネス長: 長くなると電流ピークが高くなる
 - ・帯電電荷量: 多くなると電流ピークが高くなる
- ・放電電流波形形状
 - ・ハーネスの状態(巻取状態か引伸ばし状態等)
 - ・ハーネスの設置状態(空中か静電マット上か等)
 - ・帯電方法(帯電ガンか持上げ/引伸ばし等)

Reference

- Ref01 : 平成30年度 基板・モジュール静電気対策検討委員会調査報告書, 一般財団法人 日本電子部品信頼性センター
- Ref02 : Electrostatic Discharge (ESD) Technology Roadmap, Electrostatic Discharge Association, Published October 2020
- Ref03 : System Level ESD Part III: Review of IEC 61000-4-2 ESD Testing and Impact on System-Efficient ESD Design (SEED)
- Ref04 : 事務で扱う静電気対策の理論と実践 (日本興業)
- Ref05 : 帯電現象と材料表面, 表面技術, vol. 56, no. 8, pp. 436-436, 2005
- Ref06 : 電磁気学I (岩波書店)
- Ref07 : 工学の基礎 電気磁気学 (裳華房)
- Ref08 : 静電気対策マニュアル (オーム社)
- Ref09 : 電気磁気測定の基礎 第3版 (昭晃堂)
- Ref10 : 電気回路 (数理工学社)
- Ref11 : https://as76.net/saku/saku_c.php
- Ref12 : <https://www.shippai.org/fkd/cf/CA0000519.html>, 特定非営利活動法人 失敗学会
- Ref13 : <http://asahimusen-p.com/idoutoseidenki.html>, 有限会社旭無線パーツセンター

付録 I ESD損傷防止チェックリスト

この付録は、MIL-HDBK-263Aのチェックリストを紹介するものであり、参考として示す。広範囲に渡り網羅されており、初期のチェックに有用と思われる。審査としてのチェックリストとしては、ESD管理プログラムを反映したものとする必要がある。

ページ

10.1 管理	I-1
10.2 教育・訓練	I-6
10.3 エンジニアリング	I-9
10.4 資材調達	I-11
10.5 資材受入地区	I-13
10.6 保管地区	I-16
10.7 作業地区	I-19
10.8 搬出地区	I-22
10.9 工場内及び工場間の移動	I-25
10.10 ESDS保護区域	I-27
10.11 品質機能	I-33

10.1 管理

10.1.1 ESDポリシーがあるか？ はい／いいえ

ポリシーの文書No. _____

- (1) 個別区域に適用する複数の文書又は全てのプログラムを
包含する全体的な計画となっているか？ はい／いいえ
- (2) 対象とする製品に対応できるようにしているか？ はい／いいえ
- (3) TQMの一部として、履行のための責任分担を明確にしているか？ はい／いいえ
- (4) 履行のために権限を与えているか？ はい／いいえ
- (5) 監査を行なうことになっているか？ はい／いいえ
- (6) 点検と試験の記録を整理保管するようにしているか？ はい／いいえ
- (7) 試験用の標準フォームが示されているか？ はい／いいえ
- (8) 全てのESDSアイテムが、同じレベルの保護を受けられるよ
うにしているか？ はい／いいえ
- (9) MIL-STD-1686の要求を反映しているか？ はい／いいえ
- (10) ESDSアイテムを、組立品に組み込んだ後でも保護することが
示されているか？ はい／いいえ

10.1.2 個別契約要求に適合させるためにポリシーを修正した文書があ
るか？ はい／いいえ

- (1) その文書は、MIL-STD-1686に適合しているか？ はい／いいえ

10.1.3 ESDS部品の供給業者が、MIL-STD-1686に従って、適切に保護包装、
マーキング・ラベル表示するように、購入仕様書に記述があるか？ はい／いいえ

- (1) もし、そのような包装、マーキング・ラベルを供給業者が履行
しなかった場合、その製品を不合格とするか？ はい／いいえ

10.1.4 部品の供給業者・納入業者・製造業者が適切にESD保護を行っ
ていることを確認するために、各業者の施設での現地監査を行っ
ているか？ はい／いいえ

- (1) これらの監査を行う人間は、ESD監査のための適切な教育・訓練
及び認定を受けているか？ はい／いいえ
- (2) これらの監査結果は、業者の認定又は認定取消の根拠記録とし
て十分な内容が含まれているか？ はい／いいえ

10.1.5 ESD保護用の材料・用品について、有効な製品リス
トを維持することが、組織のポリシーの一部となっているか？ はい／いいえ

- 10.1.6 ESD保護用の材料・用品は、それらが仕様書等通りの性能であることを確認する受入検査に合格しているか？ はい／いいえ
- 10.1.7 ESD保護袋、トートボックス、トレイは再使用しているか？ はい／いいえ
- (1) それらを再使用する前に、試験を行っているか？ はい／いいえ
- (2) 再使用の前に洗浄しているか？ はい／いいえ
- 10.1.8 ESD保護手順が遵守され、必要な是正措置が行われていることを確認する責任者を定めているか？ はい／いいえ
- (1) 問題・疑問に対処するためのESD委員会があるか？ はい／いいえ
- (2) この委員会は、上級の管理者の支援を受けているか？ はい／いいえ
- (3) 問題に遭遇した場合、ESDの問題を解決する担当者又は相談窓口担当者はいるか？ はい／いいえ
- (4) 問題が解決した場合、このような組織に報告するフィードバック計画はあるか？ はい／いいえ
- 10.1.9 監査を要求しているか？ はい／いいえ
- (1) 規則としてか？ はい／いいえ
- (2) 自主的な改善活動としてか？ はい／いいえ
- (3) QAグループによる内部監査を行っているか？ はい／いいえ
- 10.1.10 ESD保護区域は認定を受けているか？ はい／いいえ
- (1) これらの区域にESD教育・訓練を受けていない者が入室することに対して対策をたてているか？ はい／いいえ
- (2) QAグループによりこれらの区域は、定期的に再認定されているか？ はい／いいえ
- (3) 保護区域を点検する管理責任者を設置しているか？ はい／いいえ
- 10.1.11 部品をESD感受性に応じて分類しているか？ はい／いいえ
- (1) 部品のESD感受性を確認するために、分類試験を行っているか？ はい／いいえ
- (2) MIL-STD-883 Method 3015 と等価のHBMを使用しているか？ はい／いいえ
- (3) 使用している全ての電子部品タイプのサンプルに分類試験を行っているか？ はい／いいえ
- (4) 部品のESD感受性を確認するために、VZAPデータベースのようなデータベースを利用しているか？ はい／いいえ

- (5) ESDSアイテムを識別するために有効な資料等について、
ESDSアイテムを取扱う者に教えているか？ はい／いいえ
- 10.1.12 ESD保護包装されて受領される全てのものが、ESDSアイテムとして取り扱われているか？ はい／いいえ
- 10.1.13 ESD保護区域内では、個人的な衛生用品の使用、飲食、喫煙、一般的なプラスチックの使用を禁じているか？ はい／いいえ
- 10.1.14 ESDSアイテムを取扱う区域の湿度を制御しているか？ はい／いいえ
- (1) 湿度レベルをモニタしているか？ はい／いいえ
- (2) 日々の湿度レベルを示す記録を保持しているか？ はい／いいえ
- (3) 維持されるべき最低レベルが決められているか？ はい／いいえ
- (4) そのレベルが維持されていない場合、どのようにしたらよいのかを説明した手順書はあるか？ はい／いいえ
- 10.1.15 ESD教育・訓練計画はあるか？ はい／いいえ
- (1) 計画に、従業員の周期的な教育・訓練が用意されているか？ はい／いいえ
- (2) 教育を受ける従業員を誰が決めているか？
- a. 上級管理者？ はい／いいえ
- b. プログラム責任者？ はい／いいえ
- c. ESDコーディネータ？ はい／いいえ
- d. 直接の上司？ はい／いいえ
- e. その他 _____ はい／いいえ
- (3) 再教育・訓練は、次の場合に要求されているか：
- a. 職種変更のとき？ はい／いいえ
- b. 半年ごと又はその他の定期間隔で？
定期間隔 _____ はい／いいえ
- (4) ESDSアイテムの指定、資材調達、設計、組立、試験、検査、再加工、設置、整備を行う全ての作業者に教育を行っているか？ はい／いいえ
- 10.1.16 ESD保護区域内の適切な清掃手順を特別に教育・訓練された清掃作業者はいるか？ はい／いいえ
- (1) ESD保護床には特別なワックスを使用することを理解しているか？ はい／いいえ
- (2) ごみ箱やライナーなどはESD保護材料で作られているか？ はい／いいえ

10.1.17 損傷を受けた部品といえども、それ以上の劣化を防ぎ、
故障解析を難しくしないように、良品と同じ手順で取り扱うよう
にしているか？

はい／いいえ

(1) 故障解析設備が利用できるか？

はい／いいえ

(2) 故障解析としての別のアプローチがあるか？

はい／いいえ

10.1.18 ESD損傷を避けるための設計基準と保護回路が実用に供されて
いるか？

はい／いいえ

10.2 教育・訓練

- 10.2.1 教育・訓練計画はあるか？ 計画書番号_____ はい／いいえ
- (1) ESDに関する教育・訓練を関係者全員が受講しているか？ はい／いいえ
- (2) 教育・訓練コースの所要時間はどれくらいか？ _____
- (3) 教育・訓練の実施はどれくらいの頻度で計画されているか？ _____
- (4) 教育・訓練受講者を決定するのは、
- a. 監督者か？ はい／いいえ
 - b. プロジェクト管理者か？ はい／いいえ
 - c. 品質保証部門か？ はい／いいえ
 - d. 上記以外 _____
- (5) 試験の形式は複数設定しているか？ はい／いいえ
- a. 口頭形式の種類は、 _____
 - b. 筆記形式の種類は、 _____
- (6) 教育・訓練の記録は、維持管理されており、検査時に確認可能か？ はい／いいえ
- (7) ESDSアイテムを取り扱わない間接的な人間に対する教育・訓練コースは用意されているか？ はい／いいえ
- (8) 反復教育・訓練を実施しているか？ はい／いいえ
- (9) 反復教育・訓練の所要時間及び実施頻度はどれくらいか？ はい／いいえ
- (10) ESDSアイテムに関わる次の業務担当者に対して教育・訓練を実施しているか？ はい／いいえ
- a. 規格作成業務？ はい／いいえ
 - b. 資材調達業務？ はい／いいえ
 - c. 設計業務？ はい／いいえ
 - d. 組立業務？ はい／いいえ
 - e. 試験業務？ はい／いいえ
 - f. 検査業務？ はい／いいえ
 - g. 包装業務？ はい／いいえ
 - h. 補修業務？ はい／いいえ
 - i. 据付業務？ はい／いいえ
 - j. 保守業務？ はい／いいえ
 - k. フィールドサービス業務？ はい／いいえ
 - l. ESDSアイテムを取扱う従業員の監督及び管理業務？ はい／いいえ

10.2.2 教育・訓練コースの講師はだれか？ _____

(1) 講師が教育・訓練を受講したのはどのようなところか？

10.2.3 教育・訓練修了者に認定証を発行しているか？

はい／いいえ

(1) 認定証に有効期限が記載されているか？

はい／いいえ

(2) ESD関連の不適切な行為をする人間に対して、補充教育・訓練を要求しているか？

はい／いいえ

10.2.4 教育・訓練の中で次の事項に言及しているか？

(1) 全体的な方針？

はい／いいえ

(2) 局所的な方針？

はい／いいえ

(3) 理論？

はい／いいえ

(4) 取扱時の予防措置？

はい／いいえ

(5) 包装時の考慮事項？

はい／いいえ

(6) 作業者の安全？

はい／いいえ

(7) 契約の要求事項？

はい／いいえ

(8) TQM？

はい／いいえ

10.2.5 ESD保護区域の入室者全員が、教育・訓練を受けているか？

はい／いいえ

10.2.6 保護包装の内外部に関わらず、ESDS部品を取扱う人間は、教育・訓練を受けているか？

はい／いいえ

10.2.7 受講者の業務内容に応じた教育・訓練を実施しているか？

はい／いいえ

10.2.8 教育内容に、静電気拡散性及び導電性についての用語解説があるか？

はい／いいえ

10.2.9 教育内容に、ESDSアイテムかどうか分かる資料が示されているか？

はい／いいえ

(1) 上記資料の利用の手引きについて説明しているか？

はい／いいえ

10.2.10 教育内容に、部品のラベル、表示及び包装が不適切な場合における処置の仕方があるか？

はい／いいえ

10.2.11 教育内容に、識別表示がないが、ESDSアイテムに該当する恐れがある場合の手順があるか？

はい／いいえ

- 10.2.12 教育内容に、ESD保護区域における衛生用品・一般プラスチック類等の私物の持込み及び飲食・喫煙を禁止する理由があるか？ はい／いいえ
- 10.2.13 教育・訓練プログラムのなかに、ESD対策用衣類及び履物について示されているか？ はい／いいえ
- 10.2.14 教育内容に、ESD保護回路の動作及び機能についての説明はあるか？ はい／いいえ
- 10.2.15 教育内容に、次の場合、どのように処置すべきか、又は誰（どの部署）に問い合わせるかの説明はあるか？
- (1) 所定手順では対応しきれない問題が発生した場合 はい／いいえ
 - (2) 所定手順のなかに誤りがある場合 はい／いいえ
- 10.2.16 イオナイザの動作及び静電気電荷除去原理についての説明はあるか？ はい／いいえ
- 10.2.17 特別な予防処置が施されていない限り、噴霧スプレー（例えば、回路冷却剤のようなもの）のESDSアイテムに対する使用又はESD保護区域内での使用が禁止されている理由に関する説明はあるか？ はい／いいえ
- 10.2.18 包装、図面、部品及び組立品上のESD警告表示及びシンボルに対する認識の増進を、教育のなかで図っているか？ はい／いいえ
- 10.2.19 教育内容に、承認されているESD警告表示及び警告文についての説明はあるか？ はい／いいえ
- 10.2.20 ESD保護区域の清掃作業に対して、適切な手順に関する特別な教育・訓練を実施しているか？ はい／いいえ
- (1) ESD対策用床材には専用ワックスを使用しなければならないことを心得ているか？ はい／いいえ
 - (2) ESD保護区域におけるごみ箱及びライナーとしてはESD対策用のものだけを使用しなければならないことを心得ているか？ はい／いいえ
- 10.2.21 教育・訓練課程について公式に監査が行われているか？ はい／いいえ
- (1) 実施頻度はどれくらいか？ _____

10.3 エンジニアリング

10.3.1 エンジニアリングに関わる全ての人間が、ESD教育・訓練を受けているか？

はい／いいえ

10.3.2 設計で使用する全ての電子部品が、次のいずれかの区分に分類されているか？

はい／いいえ

(1) クラス 1 : 0～ 1 999 V

(2) クラス 2 : 2 000～ 3 999 V

(3) クラス 3 : 4 000～15 999 V

10.3.3 ESD設計ガイドラインがあるか？

はい／いいえ

10.3.4 ESDに最も耐性のある部品を設計のために選択しているか？

はい／いいえ

10.3.5 ESDSアイテムへのESD損傷を防ぐために最も低い回路レベルの設計で保護回路を組み込んでいるか？

はい／いいえ

10.3.6 保護回路の適正を確認するために回路分析を行っているか？

はい／いいえ

(1) 保護回路の有効性を試験で証明しているか？

はい／いいえ

10.3.7 ESDSアイテムを含む全ての図 (DOD-STD-100 402.16.8 項 参照) が、ESDSアイテム識別があり、適用するESD注意手順について指示し、次についての敏感なピン又は端子を識別しているか？

(1) 部品？

はい／いいえ

(2) プリント配線板？

はい／いいえ

(3) モジュール？

はい／いいえ

(4) サブ組立品？

はい／いいえ

(5) 組立品？

はい／いいえ

(6) 引き出し？

はい／いいえ

(7) 外部コネクタ？

はい／いいえ

(8) 装置？

はい／いいえ

10.3.8 図面にESDSマーキングの位置を示してあるか？

はい／いいえ

(1) それらは、アイテムに近づこうとする者が気づきやすいようになっているか？

はい／いいえ

- 10.3.9 設計エンジニアは、故障解析と是正措置を支援しているか？ はい／いいえ
- 10.3.10 ESD設計概念とESD要求への適合性が、全ての設計審査の対象となっているか？ はい／いいえ
- 10.3.11 承認されたESDS注意書きとシンボルは、MIL-STD-1686と同等のものであるか？ はい／いいえ
- 10.3.12 監査で次のことを確認しているか？
- (1) 手順、指示、ポリシーなどは；
 - a. 最新か？ はい／いいえ
 - b. 適切か？ はい／いいえ
 - c. 使用されているか？ はい／いいえ
 - (2) 作業員訓練が十分かどうか、取扱い操作中の監査で評価しているか？ はい／いいえ
 - (3) 技術的なESD障害予防テクニックが適切か？ はい／いいえ
 - (4) ESD障害予防作業員の行動が、適切に実施されているか？ はい／いいえ

10.4 資材調達

10.4.1 資材受入地区でのESD損傷予防要求は、次により定められている。

- (1) 手順書番号? _____
- (2) 指示書番号? _____
- (3) その他の文書番号? _____
- (4) これらの文書の置き場所を全員が知っているか? はい／いいえ

10.4.2 ESDSアイテムを調達する全ての関係者が、ESD教育・訓練を受けているか?

はい／いいえ

10.4.3 調達契約文書にESD管理を要求するための標準ESD要求書はあるか?

はい／いいえ

10.4.4 下請業者が有効なESD管理プログラムを設立したことを確認するために、下請業者に対する事前監査と定期監査を行っているか?

はい／いいえ

(1) ESDSアイテムの供給業者に対してもESD管理プログラムを設定していること監査しているか? はい／いいえ

(2) 適切なESD管理プログラムを持っている下請業者及び供給業者のリストが監査結果を反映しているか? はい／いいえ

10.4.5 認定供給業者に適切なESD管理プログラムの設定を要求しているか?

はい／いいえ

10.4.6 調達される全てのESDSアイテムは、購入注文書にESD管理プログラム要求条項が含まれるようにするために、資材調達担当者が分かるように、エンジニアリングによって識別表示されているか?

はい／いいえ

(1) アイテムは、クラス1、クラス2又はクラス3のどれに該当するか区分されているか? はい／いいえ

10.4.7 調達ESDSアイテムの調達書類に、ESD管理プログラムが要求されているか?

はい／いいえ

10.4.8 ESDSアイテムがESD管理のもとに製造、取扱い、包装されていることを保証することを下請業者、供給業者、専門業者に要求しているか?

はい／いいえ

- 10.4.9 供給業者や下請業者が是正措置プログラムにおけるフィードバックを履行させるようにしているか？ はい／いいえ
- 10.4.10 社内における製品不具合報告書の配布先に資材調達部門が含まれているか？ はい／いいえ
- 10.4.11 監査で次のことを確認しているか？
- (1) 手順書、指示書、方針書などは、
 - a. 最新か？ はい／いいえ
 - b. 適切か？ はい／いいえ
 - c. 使用されているか？ はい／いいえ
 - (2) 作業員訓練が十分かどうか、取扱作業に立会って監査しているか？ はい／いいえ
 - (3) 技術的なESD損傷防止手法が適切か？ はい／いいえ
 - (4) ESD損傷防止のための作業員の行動が適切に行われているか？ はい／いいえ

10.5 資材受入地区

10.5.1 資材受入地区での損傷防止要求は、次により定められている。

- (1) 手順書番号？ _____
- (2) 指示書番号？ _____
- (3) その他の文書番号？ _____
- (4) これらの文書の置き場所が知られているか？ はい／いいえ

10.5.2 ESDSアイテムを識別するため、特有のマーキングを使用しているか？

- (1) もしそうでなければ、他の方法で識別できるか？ はい／いいえ
- (2) ESDSアイテムのマスターリストはあるか？ はい／いいえ
- (3) リストの最新版をこの職場で受取っているか？ はい／いいえ

10.5.3 部品の包装を解かずに、輸送書類だけでESD感受性がある部品であることが分かるか？

- (1) 内装及び外装としての輸送容器にESD注意ラベルが貼付けられていることを点検しているか？ はい／いいえ

10.5.4 次の場合にどうするかを示す手順書はあるか？

- (1) 不適当な包装がなされたESDSアイテムをどのように取扱うか？ はい／いいえ
- (2) 不適当なラベルが貼られたESDSアイテムをどのように取扱うか？ はい／いいえ
- (3) 作業の交替時及び中断時、ESDSアイテムをどのように処置すればよいか？ はい／いいえ

10.5.5 ESDS部品は、保護容器の中に収納されているか？

- (1) 保護容器内の充てん材や詰め物は、静電気拡散性又は導電性か？ はい／いいえ
- (2) これらの材料が要求を満たしていることを確認するため、そのサンプル検査を行っているか？ はい／いいえ

10.5.6 ESD保護包装された物品を受取ったとき、それがESDアイテムでないことが確認されるまで、ESDSアイテムとして取扱っているか？

はい／いいえ

10.5.7 ESDSアイテムの保護包装が輸送時のESD保護として適切なものかどうかを点検しているか？

はい／いいえ

- 10.5.8 受取った部品にESDSとしてのマーキングがなくても、その部品がESDS部品と思われる場合、その感受性を確認するための手順はあるか？ はい／いいえ
- 10.5.9 この地区の中では、ESDS部品は保護包装の中に入ったままか？ はい／いいえ
(1) 保護が外されるのはESD保護区域か？ はい／いいえ
- 10.5.10 検査又は試験のためにESDSアイテムが保護包装から取出されている場合、この区域から持ち出す前にESD保護材料で再度包装を行っているか？ はい／いいえ
- 10.5.11 この地区内にESD保護区域はあるか？ はい／いいえ
- 10.5.12 保護区域では次の使用が要求されているか？
- (1) 導電性の運搬台車？ はい／いいえ
 - (2) 帯電防止作業服？ はい／いいえ
 - (3) 導電性の靴？ はい／いいえ
 - (4) イオナイザ？ はい／いいえ
 - (5) 導電性の床？ はい／いいえ
 - (6) 静電気検知器及びモニタ？ はい／いいえ
 - (7) ヒール又はレグストラップ？ はい／いいえ
 - (8) リストストラップ？ はい／いいえ
 - (9) 導電性の椅子又はシートカバー？ はい／いいえ
 - (10) 帯電防止 I C マガジン？ はい／いいえ
 - (11) 作業台用カバー？ はい／いいえ
 - (12) 静電気発生防止工具？ はい／いいえ
 - (13) ESD保護袋？ はい／いいえ
 - (14) ESD注意ラベル及び掲示？ はい／いいえ
 - (15) 帯電防止フォーム？ はい／いいえ
 - (16) 帯電防止バブルラップ？ はい／いいえ
 - (17) 帯電防止のトートボックス又はトレイ？ はい／いいえ
- 10.5.13 ESD保護区域内では、飲食、喫煙、私用の衛生用品や一般プラスチックの使用を禁止しているか？ はい／いいえ

- 10.5.14 ESD保護区域の相対湿度を、規定値内に制御しているか？ はい／いいえ
- (1) 定期的にモニタしているか？ はい／いいえ
- (2) その点検記録はあるか？ はい／いいえ
- (3) 維持しなければならない最小レベルはあるか？ はい／いいえ
- (4) 適確なレベルを維持できない場合、是正処置手順はあるか？ はい／いいえ
- 10.5.15 ESD不具合を報告するシステムはあるか？ はい／いいえ
- (1) この報告書の受取りを指名されている人はいるか？ はい／いいえ
- (2) 発見不具合及び是正処置の記録はあるか？ はい／いいえ
- 10.5.16 監査で次のことを確認しているか？
- (1) 手順書、指示書、方針書などは、
- a. 最新か？ はい／いいえ
- b. 適切か？ はい／いいえ
- c. 使用されているか？ はい／いいえ
- (2) 作業者訓練が十分かどうか、取扱作業に立会って監査しているか？ はい／いいえ
- (3) 技術的なESD損傷防止手法が適切か？ はい／いいえ
- (4) ESD損傷防止のための作業者の行動が適切に行われているか？ はい／いいえ

10.6 保管地区

10.6.1 保管に対するESD損傷防止要求が次により定められている。

- (1) 手順書番号? _____
- (2) 指示書番号? _____
- (3) その他の文書番号? _____
- (4) これらの文書の置き場所が知られているか? はい／いいえ

10.6.2 ESDS部品がこの地区に入荷する際、適切な保護材料で包装されているか?

はい／いいえ

10.6.3 ESDSアイテムを識別するため、特有のマーキングを使用しているか?

はい／いいえ

- (1) ESDSアイテムのマスターストはあるか? はい／いいえ
- (2) リストの最新版をこの職場で受取っているか? はい／いいえ

10.6.4 次の場合にどうするかを示す手順書はあるか?

はい／いいえ

- (1) 不適当な包装がなされたESDSアイテムをどのように取扱うか? はい／いいえ
- (2) 不適当なラベルが貼られたESDSアイテムをどのように取扱うか? はい／いいえ
- (3) 作業の交替時及び中断時、ESDSアイテムをどのように処置すればよいか? はい／いいえ

10.6.5 ESDSアイテムは書類を調べることなしに、すばやく識別できるようになっているか?

はい／いいえ

- (1) ESDSアイテムの表示は、保護包装を開封しなくても分かるようになっているか? はい／いいえ

10.6.6 ESD不具合を報告するシステムはあるか?

はい／いいえ

- (1) この報告書の受取りを指名されている人はいるか? はい／いいえ
- (2) 発見不具合及び是正処置の記録はあるか? はい／いいえ

10.6.7 この作業地区にESD保護区域があるか?

はい／いいえ

10.6.8 保護区域では次の使用が要求されているか？

- | | |
|-------------------------|--------|
| (1) 導電性の運搬台車？ | はい／いいえ |
| (2) 帯電防止作業服？ | はい／いいえ |
| (3) 導電性の靴？ | はい／いいえ |
| (4) イオナイザ？ | はい／いいえ |
| (5) 導電性の床？ | はい／いいえ |
| (6) 静電気検知器及びモニタ？ | はい／いいえ |
| (7) ヒール又はレグストラップ？ | はい／いいえ |
| (8) リストストラップ？ | はい／いいえ |
| (9) 導電性の椅子又はシートカバー？ | はい／いいえ |
| (10) 帯電防止 I C マガジン？ | はい／いいえ |
| | |
| (11) 作業台用カバー？ | はい／いいえ |
| (12) ESD保護袋？ | はい／いいえ |
| (13) ESD注意ラベル及び掲示？ | はい／いいえ |
| (14) 帯電防止バブルラップ？ | はい／いいえ |
| (15) 帯電防止のトートボックス又はトレイ？ | はい／いいえ |
| (16) その他 _____ | |

10.6.9 ESD保護区域内では、飲食、喫煙、私用の衛生用品や一般プラスチックの使用を禁止しているか？

はい／いいえ

10.6.10 ESDSアイテムは、直接取扱う必要があるときを除き、ESD保護カバーや包装の中に収納しているか？

はい／いいえ

- (1) 作業区域を移動する部品には、ESD保護包装があるか？

はい／いいえ

10.6.11 この地区から搬出するESDSアイテムは、適切なESD注意を表示した荷造りとしているか？

はい／いいえ

- (1) 分割して搬出される場合でも、保護カバーや保護包装の中に収納しているか？

はい／いいえ

- (2) ESDSアイテムは、ESD保護区域内でのみキット化しているか？

はい／いいえ

10.6.12 ESD保護区域の相対湿度を、規定値内に制御しているか？

はい／いいえ

- (1) 定期的にモニタしているか？

はい／いいえ

- (2) その点検記録はあるか？

はい／いいえ

- (3) 維持しなければならない最小レベルはあるか？

はい／いいえ

- (4) 適確なレベルを維持できない場合、是正処置手順はあるか？

はい／いいえ

10.6.13 監査で次のことを確認しているか？

- | | |
|--|--------|
| (1) 手順書、指示書、方針書などは、 | |
| a. 最新か？ | はい／いいえ |
| b. 適切か？ | はい／いいえ |
| c. 使用されているか？ | はい／いいえ |
| (2) 作業者訓練が十分かどうか、取扱作業に立会って監査して
いるか？ | はい／いいえ |
| (3) 技術的なESD損傷防止手法が適切か？ | はい／いいえ |
| (4) ESD損傷防止のための作業者の行動が適切に行われているか？ | はい／いいえ |

10.7 作業地区（受入れ、受入検査、保管、組立、試験、修理、品質検査、 据付け、チェックアウト、故障解析）

10.7.1 この地区にESD作業手順書があるか？ はい／いいえ

手順書番号 _____

(1) 作業者が作業手順書の所在と入手方法を知っているか？ はい／いいえ

(2) ESD保護コンテナの内に書類が入れられているか？ はい／いいえ

(3) 作業指示書は、各工程に該当するESD作業手順書を引用して
いるか？ はい／いいえ

(4) 各作業の交替時や休憩時にESDSアイテムをどう処置すべ
きか明確になっているか？ はい／いいえ

10.7.2 この地区内にESD保護区域があるか？ はい／いいえ

10.7.3 保護区域では次の使用が要求されているか？

(1) 導電性の運搬台車？ はい／いいえ

(2) 帯電防止作業服？ はい／いいえ

(3) 導電性の靴？ はい／いいえ

(4) イオナイザ？ はい／いいえ

(5) 導電性の床？ はい／いいえ

(6) 静電気検知器及びモニタ？ はい／いいえ

(7) ヒール又はレグストラップ？ はい／いいえ

(8) リストストラップ？ はい／いいえ

(9) 導電性の椅子又はシートカバー？ はい／いいえ

(10) 帯電防止 I C マガジン？ はい／いいえ

(11) 作業台用カバー？ はい／いいえ

(12) 静電気発生防止工具？ はい／いいえ

(13) ESD保護袋？ はい／いいえ

(14) ESD注意ラベル及び掲示？ はい／いいえ

(15) 帯電防止フォーム？ はい／いいえ

(16) 帯電防止バブルラップ？ はい／いいえ

(17) 帯電防止のトートボックス又はトレイ？ はい／いいえ

(18) 帯電防止はんだ吸取り？ はい／いいえ

(19) はんだこて先の接地？ はい／いいえ

10.7.4 ESD保護はんだ吸取りを使用しているか？ はい／いいえ

(1) 静電気の発生がないことを確認しているか？ はい／いいえ

- 10.7.5 工具の把手に絶縁材が使用されているか？ はい／いいえ
(1) すべての工具は金属性又は導電性か？ はい／いいえ
(2) はんだごての先端は接地されているか？ はい／いいえ
- 10.7.6 ESDSアイテムのクリーニングに使用するブラシは、天然繊維
すなわち合成繊維でないものか？ はい／いいえ
- 10.7.7 ESD保護区域内では、飲食、喫煙、私用の衛生用品や
一般プラスチックの使用を禁止しているか？ はい／いいえ
- 10.7.8 ESD保護区域の相対湿度を、規定値内に制御しているか？ はい／いいえ
(1) 定期的にモニタしているか？ はい／いいえ
(2) その点検記録はあるか？ はい／いいえ
(3) 維持しなければならない最小レベルはあるか？ はい／いいえ
(4) 適確なレベルを維持できない場合、是正処置手順はあるか？ はい／いいえ
- 10.7.9 ESD保護区域に立入る人は、ESD対策の教育・訓練を受けて
いるか？ はい／いいえ
(1) 教育・訓練を受けていない人がESDS保護区域に立入るこ
とを制限しているか？ はい／いいえ
- 10.7.10 ESD不具合を報告するシステムはあるか？ はい／いいえ
(1) この報告書の受取りを指名されている人はいるか？ はい／いいえ
(2) 発見不具合及び是正処置の記録はあるか？ はい／いいえ
- 10.7.11 この区域内の電気装置は、操作盤をハード接地しているか？ はい／いいえ
(1) これらの操作盤は、ESD保護作業面から絶縁されているか？ はい／いいえ
- 10.7.12 静電気を除去するためにこの区域でイオナイザが使用されてい
るか？ はい／いいえ
(1) イオナイザに装備されているエアーガンとヒートガンは、
イオンバランスが良好に保たれており、逆帯電はないか？ はい／いいえ
- 10.7.13 ESDSアイテムは、この区域で受取るときに適切にカバー又は包
装されているか？ はい／いいえ

10.7.14 ESDSアイテムは、直接取扱うとき以外は、保護カバー又は包装されているか？

はい／いいえ

(1) ESDSアイテムは、作業待ちの間、ESD保護用のキャビネット又はふた付の箱に収納しているか？

はい／いいえ

(2) ESDS回路基板の上に識別記号がついているか？

はい／いいえ

(3) ESDSアイテムは、組立又は試験完了後ESD保護材料の中に入れているか？

はい／いいえ

(4) 露出したコネクタ、ピン、端子、テストピンなどは、全工程を通じ、ESDの発生から保護されているか？

はい／いいえ

(5) 不良品のそれ以上の品質低下を防ぐために良品と同じ保護が施されているか？

はい／いいえ

10.7.15 監査で次のことを確認しているか？

(1) 手順書、指示書、方針書などは、

a. 最新か？

はい／いいえ

b. 適切か？

はい／いいえ

c. 使用されているか？

はい／いいえ

(2) 作業者訓練が十分かどうか、取扱作業に立会って監査しているか？

はい／いいえ

(3) 技術的なESD損傷防止手法が適切か？

はい／いいえ

(4) ESD損傷防止のための作業者の行動が適切に行われているか？

はい／いいえ

10.8 搬出地区

10.8.1 ESDSアイテムの取扱いに関するこの地区の手順書は準備されているか？

はい／いいえ

手順書の番号は？ _____

(1) 取扱手順書の保管場所が知られており、利用できるようなっているか？

はい／いいえ

(2) 文書類はESD保護容器に入れているか？

はい／いいえ

(3) 各工程で必要となるESD取扱手順は全ての作業指示書に指示されているか？

はい／いいえ

(4) 手順書には、ESD保護包装に関する要求は明記されているか？

はい／いいえ

(5) 手順書には、適切な保護包装・識別がなされていない部品を受け入れる時の作業要領についての指示があるか？

はい／いいえ

(6) 手順書では、休憩・交替時のESDSアイテムの処置が示されているか？

はい／いいえ

10.8.2 ESDSアイテムは、直接取扱うときを除き、保護包装等で保護されているか？

はい／いいえ

(1) 出荷前に、全てのESDSアイテムは適切なESD保護包装及び適切な表示がなされているか？

はい／いいえ

(2) 部品類を仕分けする時にはESD保護区域で作業しているか？

はい／いいえ

(3) 露出したコネクタ、ピン、端子、テストポイントなどは全工程を通してESDから保護されているか？

はい／いいえ

(4) 不良品に対しては、それを更に劣化させないため良品と同等のESD保護対策を施しているか？

はい／いいえ

10.8.3 内装・外装として使用する出荷用コンテナの外側には、規定の警告表示がなされているか？

はい／いいえ

10.8.4 包装は、次の対して防護しているか？

(1) 摩擦帯電の発生？

はい／いいえ

(2) 瞬時放電？

はい／いいえ

(3) 静電界？

はい／いいえ

(4) 出荷工程で導電性のコンテナは使用されているか？

はい／いいえ

(5) 導電性コンテナ内部に使用される詰め物等は、ESD保護材料でできているか？

はい／いいえ

- 10.8.5 この作業地区にはESD保護区域が設定されているか？ はい／いいえ
- (1) ESD保護区域に立ち入る人間はESD対策の教育・訓練を受けているか？ はい／いいえ
- (2) 外来者のためのリストストラップはすぐに用意できるか？ はい／いいえ
- (3) ESD保護区域では、飲食、喫煙、私用の衛生用品及び一般プラスチックの使用を禁止しているか？ はい／いいえ
- 10.8.6 作業区域では次の使用が要求されているか？
- (1) 導電性の運搬台車 はい／いいえ
- (2) 帯電防止作業服？ はい／いいえ
- (3) 導電性の靴？ はい／いいえ
- (4) イオナイザ？ はい／いいえ
- (5) 導電性の床？ はい／いいえ
- (6) 静電気検知器及びモニタ？ はい／いいえ
- (7) ヒール又はレグストラップ？ はい／いいえ
- (8) リストストラップ？ はい／いいえ
- (9) 導電性の椅子又はシートカバー？ はい／いいえ
- (10) 帯電防止 I C マガジン？ はい／いいえ
- (11) 作業台用カバー？ はい／いいえ
- (12) 静電気発生防止工具？ はい／いいえ
- (13) ESD保護袋？ はい／いいえ
- (14) ESD注意ラベル及び掲示？ はい／いいえ
- (15) 帯電防止フォーム？ はい／いいえ
- (16) 帯電防止バブルラップ？ はい／いいえ
- (17) 帯電防止のトートボックス又はトレイ？ はい／いいえ
- (18) その他 _____
- 10.8.7 ESD保護区域の相対湿度を、規定値内に制御しているか？ はい／いいえ
- (1) 定期的にモニタしているか？ はい／いいえ
- (2) その点検記録はあるか？ はい／いいえ
- (3) 維持しなければならない最小レベルはあるか？ はい／いいえ
- (4) 適確なレベルを維持できない場合、是正処置手順はあるか？ はい／いいえ
- 10.8.8 ESD不具合を報告するシステムはあるか？ はい／いいえ
- (1) この報告書の受取りを指名されている人はいるか？ はい／いいえ
- (2) 発見不具合及び是正処置の記録はあるか？ はい／いいえ

10.8.9 監査で次のことを確認しているか？

- | | |
|--|--------|
| (1) 手順書、指示書、方針書などは、 | |
| a. 最新か？ | はい／いいえ |
| b. 適切か？ | はい／いいえ |
| c. 使用されているか？ | はい／いいえ |
| (2) 作業者訓練が十分かどうか、取扱作業に立会って監査して
いるか？ | はい／いいえ |
| (3) 技術的なESD損傷防止手法が適切か？ | はい／いいえ |
| (4) ESD損傷防止のための作業者の行動が適切に行われているか？ | はい／いいえ |

10.9 工場内及び工場間の移動

10.9.1 ESDSアイテムを移動するときの取扱いについて示した文書はあるか？

はい／いいえ

(1) 工場から工場への移動？

はい／いいえ

(2) その文書には、工場内移動と工場間移動の相違について示されているか？

はい／いいえ

(3) ESD対策のための包装方法及びラベルの貼り方について説明されているか？

はい／いいえ

(4) 交替／休憩時のESDSアイテムの処置についての説明はあるか？

はい／いいえ

10.9.2 次のESDSアイテムが工場内の同一建物内又は建物間を輸送されるとき、保護カバーか保護包装がされるか？

はい／いいえ

(1) 個別部品？

はい／いいえ

(2) プリント配線板？

はい／いいえ

(3) モジュール？

はい／いいえ

(4) サブアセンブリ？

はい／いいえ

(5) アセンブリ？

はい／いいえ

(6) 完成装置？

はい／いいえ

10.9.3 ESDSアイテムに施すべき保護についての指示に責任をもつ部署はあるか？

はい／いいえ

(1) 露出したコネクタ、ピン、端子、テストポイントなどはESDから保護されているか？

はい／いいえ

(2) 不良品に対しては、それを更に劣化させないため良品と同等のESD保護対策を施しているか？

はい／いいえ

(3) 常時ESDSアイテムは保護包装等で保護されているか？

はい／いいえ

(4) ESDSアイテム用のコンテナには、コンテナを開けなくてもESDSアイテムが入っていることが分かるように、ESDSシンボル貼付と警告表示が十分になされているか？

はい／いいえ

10.9.4 ESDSアイテムは、それらが移動される前に、適切な表示と保護包装が施されているか？

はい／いいえ

10.9.5 ESD保護材料の使用可否のチェックに関する責任を持つ部署はあるか？

はい／いいえ

10.9.6 保護区域では次の使用が要求されているか？

- | | |
|-------------------------|--------|
| (1) 導電性の運搬台車 | はい／いいえ |
| (2) 帯電防止作業服？ | はい／いいえ |
| (3) 導電性の靴？ | はい／いいえ |
| (4) イオナイザ？ | はい／いいえ |
| (5) 導電性の床？ | はい／いいえ |
| (6) ヒール又はレグストラップ？ | はい／いいえ |
| (7) リストストラップ？ | はい／いいえ |
| (8) 導電性の椅子又はシートカバー？ | はい／いいえ |
| (9) 帯電防止 I C マガジン？ | はい／いいえ |
| (10) ESD保護袋？ | はい／いいえ |
| (11) ESD注意ラベル及び掲示？ | はい／いいえ |
| (12) 帯電防止フォーム？ | はい／いいえ |
| (13) 帯電防止バブルラップ？ | はい／いいえ |
| (14) 帯電防止のトートボックス又はトレイ？ | はい／いいえ |

10.9.7 ESD不具合を報告するシステムはあるか？

- | | |
|-----------------------------|--------|
| (1) この報告書の受取りを指名されている人はいるか？ | はい／いいえ |
| (2) 発見不具合及び是正処置の記録はあるか？ | はい／いいえ |

10.9.8 監査で次のことを確認しているか？

- | | |
|------------------------------------|--------|
| (1) 手順書、指示書、方針書などは、 | |
| a. 最新か？ | はい／いいえ |
| b. 適切か？ | はい／いいえ |
| c. 使用されているか？ | はい／いいえ |
| (2) 作業員訓練が十分かどうか、取扱作業に立会って監査しているか？ | はい／いいえ |
| (3) 技術的なESD損傷防止手法が適切か？ | はい／いいえ |
| (4) ESD損傷防止のための作業員の行動が適切に行われているか？ | はい／いいえ |

10.10 ESDS保護区域

10.10.1 ESDS保護区域のコンフィギュレーション管理

の文書はあるか？ はい／いいえ

文書番号？ _____

- (1) 保護区域の構成品の性能チェックの実施に関する記録を規定されているか？ はい／いいえ
- (2) 保護区域は、認定されるべきであることが明記されているか？ はい／いいえ
- (3) 保護区域には警告を表示することが明記されているか？ はい／いいえ
- (4) 保護区域に立ち入る人間は、最低限のESDに対する認識についての訓練を受ける必要のあることが明記されているか？ はい／いいえ
- (5) 休憩／交替時のESDSアイテムの処置について説明されているか？ はい／いいえ

10.10.2 ESD損傷防止は、次のESD管理を通して、実施されているか？ はい／いいえ

- (1) ESD保護材料・用品の選定、適用についての検討？ はい／いいえ
- (2) ESD保護区域の認定？ はい／いいえ
- (3) その他？ _____

10.10.3 ESD保護材料の選定に際して、次の保護特性を考慮しているか？

- (1) 摩擦帯電の発生に対する保護特性？ はい／いいえ
- (2) 静電界に対する保護特性？ はい／いいえ
- (3) 直接放電に対する保護特性？ はい／いいえ

10.10.4 ESD保護区域の相対湿度を、規定値内に制御しているか？ はい／いいえ

- (1) 定期的にモニタしているか？ はい／いいえ
- (2) その点検記録はあるか？ はい／いいえ
- (3) 維持しなければならない最小レベルはあるか？ はい／いいえ
- (4) 適確なレベルを維持できない場合、是正処置手順はあるか？ はい／いいえ

10.10.5 次の作業地区にはESD保護区域が設定されているか？

- | | |
|-----------------|--------|
| (1) 資材受入れ？ | はい／いいえ |
| (2) 受入検査？ | はい／いいえ |
| (3) 保管？ | はい／いいえ |
| (4) 組立？ | はい／いいえ |
| (5) ウェーブソルダリング？ | はい／いいえ |
| (6) 製造？ | はい／いいえ |
| (7) 試験？ | はい／いいえ |
| (8) 修理？ | はい／いいえ |
| (9) 品質検査？ | はい／いいえ |
| (10) 包装？ | はい／いいえ |
| (11) 据付け？ | はい／いいえ |
| (12) 故障解析？ | はい／いいえ |
| (13) その他 _____ | |

10.10.6 保護区域では次の使用が要求されているか？

- | | |
|----------------------------|--------|
| (1) 導電性の運搬台車？ | はい／いいえ |
| (2) 帯電防止作業服？ | はい／いいえ |
| (3) 導電性の靴？ | はい／いいえ |
| (4) イオナイザ？ | はい／いいえ |
| (5) 導電性の床？ | はい／いいえ |
| (6) 静電気検知器及びモニタ？ | はい／いいえ |
| (7) ヒール又はレグストラップ？ | はい／いいえ |
| (8) リストストラップ？ | はい／いいえ |
| (9) 導電性の椅子又はシートカバー？ | はい／いいえ |
| (10) 帯電防止 I C マガジン？ | はい／いいえ |
| (11) 作業台用カバー？ | はい／いいえ |
| (12) 静電気発生防止工具？ | はい／いいえ |
| (13) ESD保護袋？ | はい／いいえ |
| (14) 接地した保管用キャビネット又はふた付き箱？ | はい／いいえ |
| (15) ESD注意ラベル及び掲示？ | はい／いいえ |
| (16) 帯電防止フォーム？ | はい／いいえ |
| (17) 帯電防止バブルラップ？ | はい／いいえ |
| (18) 帯電防止のトートボックス又はトレイ？ | はい／いいえ |
| (19) こて先を接地したはんだこて？ | はい／いいえ |
| (20) 静電気を発生しないはんだ吸取り？ | はい／いいえ |
| (21) 空気ホースやスプレー器用イオナイザ？ | はい／いいえ |
| (22) その他 _____ | |

- 10.10.7 ESDSアイテムの運搬に運搬車を使用する場合、ESD保護材料でできたものを使用しているか？ はい／いいえ
- (1) 運搬車は、ESDSアイテムを出し入れする前に接地しているか？ はい／いいえ
- (2) 良好な接地を得るために、接地端子を頻繁に点検しているか？ はい／いいえ
- (3) 電荷の発生の有無を確認するために、運搬車の表面を頻繁に点検しているか？ はい／いいえ
- 10.10.8 ESD保護服の着用を要求しているか？ はい／いいえ
- (1) 電荷の発生の有無を確認するために、衣類を点検しているか？ はい／いいえ
- (2) 衣類のクリーニングを定期的実施しているか？ はい／いいえ
- (3) クリーニングの方法は？ _____
- (4) クリーニング及び点検の記録を維持管理しているか？ はい／いいえ
- 10.10.9 導電性作業靴、ヒールストラップ又はレッグストラップの使用を要求しているか？ はい／いいえ
- (1) 電荷の発生の有無を確認するために、それらの点検を行っているか？ はい／いいえ
- (2) 汚れたときに交換又はクリーニングしているか？ はい／いいえ
- (3) クリーニング後のテストは実施しているか？ はい／いいえ
- 10.10.10 使用せざるを得ない材料からの電荷の発生を最小とするためにイオナイザを使用しているか？ はい／いいえ
- (1) 保護区域でのイオンブローによる空気の流れはスムーズか？ はい／いいえ
- (2) 放射線タイプを使用する場合は、製造者のリコールプログラムによっているか？ はい／いいえ
- (3) 電気型イオナイザの場合は、次の要求について点検する。
- a. 少なくとも6か月毎にオゾンレベルを点検しているか？ はい／いいえ
- b. 正負イオンがバランスよく出ていることを点検しているか？ はい／いいえ
- c. 電磁干渉に対して感受性の高い作業で使用しているか？ はい／いいえ
- (4) イオナイザを空気ホースやスプレー器に使用しているか？ はい／いいえ

- 10.10.11 ESD保護区域の床は、ESD保護材料でカバーされているか？ はい／いいえ
- (1) 床の状態の維持には特別の要求があるか？ はい／いいえ
- (2) 保護床にはワックスをかけてはならないことは理解されているか？ はい／いいえ
- (3) 製造者の仕様に合致していることを保証するため、床の抵抗測定は実施しているか？ はい／いいえ
- (4) それらの点検記録は維持保管しているか？ はい／いいえ
- 10.10.12 この保護区域には静電気検知器は配置されているか？ はい／いいえ
- (1) それは連続モニタができるタイプか？ はい／いいえ
- (2) スポットチェックタイプか？ はい／いいえ
- (3) それは50Vの静電界の検知感度を持っているか？ はい／いいえ
- 10.10.13 リストストラップには絶縁された外カバーがあるか？ はい／いいえ
- (1) リストストラップの両端は、作業員の行動の自由を妨げないように、スイベルコネクタになっているか？ はい／いいえ
- (2) 一端は容易に外れるコネクタになっているか？ はい／いいえ
- (3) 短絡防止用の抵抗が、コードの中に入っているか？ はい／いいえ
- (4) リストストラップは、使用にあたって毎日点検しているか？ はい／いいえ
- (5) それらの点検記録は維持保管しているか？ はい／いいえ
- (6) 故障したリストストラップは調査しているか？ はい／いいえ
- (7) 外来者のための余分なリストストラップを用意しているか？ はい／いいえ
- 10.10.14 ESD保護用の椅子又はシートカバーを使っているか？ はい／いいえ
- (1) それらをテストしたか？ はい／いいえ
- (2) 良好な接地を保証するために接地端子を点検しているか？ はい／いいえ
- (3) それらはESD保護材料でできているか？ はい／いいえ
- 10.10.15 作業台上面は、静電気保護材料でできているか？ はい／いいえ
- (1) 短絡回路にならないように接地コードの中に抵抗が入っているか？ はい／いいえ
- (2) 作業台上面は定期的に清掃しているか？ はい／いいえ
- (3) 電荷が発生しないことや電荷を拡散することを確認するために、作業台上面を点検しているか？ はい／いいえ
- (4) それらの点検記録は維持保管しているか？ はい／いいえ

- 10.10.16 ESD保護区域で使用する全ての手持ち工具は、
静電気を発生しない材料でできているか？ はい／いいえ
(1) 電荷を発生しないことを確認するために試験しているか？ はい／いいえ
- 10.10.17 ESD保護区域で使用するはんだごては、先端
が接地されたものか？ はい／いいえ
(1) 毎週チェックしているか？ はい／いいえ
(2) 電荷の発生のないことを確認するために試験しているか？ はい／いいえ
- 10.10.18 ESD損傷防止用品及び材料は、
(1) 仕様書によって購入しているか？ はい／いいえ
(2) 適切な受入検査によって確認されているか？ はい／いいえ
- 10.10.19 要求されたESD損傷防止用品及び材料は、認定された専門業者
又は購買リストから選定しているか？ はい／いいえ
- 10.10.20 ESD対策の教育・訓練を受けていない人間は、ESD保護区域に立
ち入ることを禁止しているか？ はい／いいえ
- 10.10.21 ESD関連のルールが遵守され、不具合の是正処置が完了した
ことを確認するための責任者はいるか？ はい／いいえ
(1) その責任者は、ESD保護区域への立入禁止を命令する権限を
持っているか？ はい／いいえ
(2) その責任者は、ESD保護方針や手順に従わない場合、ESD
保護区域での作業を中止させることができるか？ はい／いいえ
(3) その責任者は、ESDの問題を解決するために、区域管理者を
通さずに上位の管理レベルに直接報告することができるか？ はい／いいえ
- 10.10.22 ESD保護用のゴミ箱は使用されているか？ はい／いいえ
(1) そのゴミ箱の内敷きは静電気を発生しないものでできて
いるか？ はい／いいえ
- 10.10.23 ESD保護区域は、袋類、シャントバー、ヒールストラップ、
ラップ類、ラベル類等のESD保護材料の消耗品を補給しているか？ はい／いいえ

10.10.24 袋類、箱、リストストラップなどESD保護材料の交換を決定する
のはだれか？

- | | |
|----------------|--------|
| (1) 区域管理者？ | はい／いいえ |
| (2) 品質保証部門検査員？ | はい／いいえ |
| (3) ESDのモニタ員？ | はい／いいえ |
| (4) エンジニア？ | はい／いいえ |
| (5) その他 _____ | |

10.10.25 ESD保護用品、材料が予想通りの機能を持っていることを確
認するために、受入検査を実施しているか？

- | | |
|-------------------------|--------|
| (1) この作業の責任者はいるか？ | はい／いいえ |
| (2) 受入れに際しての基準は確立しているか？ | はい／いいえ |
| (3) これらの点検記録は管理されているか？ | はい／いいえ |

10.10.26 監査で次のことを確認しているか？

- | | |
|--|--------|
| (1) 手順書、指示書、方針書などは、 | |
| a. 最新か？ | はい／いいえ |
| b. 適切か？ | はい／いいえ |
| c. 使用されているか？ | はい／いいえ |
| (2) 作業員訓練が十分かどうか、取扱作業に立会って監査して
いるか？ | はい／いいえ |
| (3) 技術的なESD損傷防止手法が適切か？ | はい／いいえ |
| (4) ESD損傷防止のための作業員の行動が適切に行われているか？ | はい／いいえ |

10.11 品質機能

- 10.11.1 検査員と品質管理担当者は、ESD教育・訓練を受けているか？ はい／いいえ
- 10.11.2 ESDSアイテムを取扱う又は試験する全ての検査地区を
ESD保護区域であるとみなしているか？ はい／いいえ
- 10.11.3 ESD注意手順を品質管理担当部門に配布し、品質保証マニュアルに記述してあるか？ はい／いいえ
- 10.11.4 品質管理担当者が、ESD保護作業区域を認定しているか？ はい／いいえ
- 10.11.5 品質管理担当者が、図面、文書、組立品、装置のESDマーキング及び注意書きの適正さを審査しているか？ はい／いいえ
- 10.11.6 品質管理担当者は、ESD管理が契約と購入注文書にあることを確認するために、調達仕様書を審査する責任を持つか？ はい／いいえ
- 10.11.7 品質管理担当者は、ESD管理実施状況の事前審査を次に対して確認しているか？
- (1) 契約者？ はい／いいえ
 - (2) 下請業者？ はい／いいえ
 - (3) 供給業者？ はい／いいえ
- 10.11.8 品質管理担当者は、社内のESD保護作業区域を監査しているか？ はい／いいえ
- (1) これらの監査の記録は利用できるか？ はい／いいえ
- 10.11.9 信頼性のあるESD管理プログラムが維持されていることを確認するために、品質管理担当者は、次を定期的に監査しているか？
- (1) 契約者？ はい／いいえ
 - (2) 下請業者？ はい／いいえ
 - (3) 供給業者？ はい／いいえ
- 10.11.10 品質管理担当者は、適切なESD注意方法が含まれていることを確認するために図面や手順を審査しているか？ はい／いいえ
- 10.11.11 品質管理担当者は、ESD故障がデータバンクに納められ、原因、傾向、是正処置のデータが保持されていることを確認しているか？ はい／いいえ

付録II 参考文献

20.1 一般

参考文献を次に示す。目録は、発表年代順としているが、シリーズ化されているものについてはまとめている。本文2項に示されているものについては、省略している。

20.2 目録

- (1) "Electrical Overstress/Electrostatic Discharge Symposium Proceedings" (1979-1983 /Yearly), Reliability Analysis Center
- (2) "Electrical Overstress/Electrostatic Discharge Symposium Proceedings" (1984- /Yearly), EOS/ESD Association Inc.
- (3) Don Yenni, "Basic Electrical Considerations in the Design of a Static-Safe Work Environment", Nepcon/West Conference (1979)
- (4) Cubera M., "Antistatic Agents", Plastics Compounding (1983)
- (5) Fuqua N.b., "Testing the Effectiveness of ESD Protective Bags", Microcontamination Magazine (1.1983)
- (6) 福田 保裕・目黒 茂, "MOS DEVICEの静電気破壊評価方法", 電子情報通信学会 信頼性研究会 R83-88 (10.1983)
- (7) 松岡, "半導体デバイスの静電破壊と対策", エレクトリックマンスリー (2.1985)
- (8) 静電気学会編, "静電気ハンドブック" (1986), オーム社
- (9) Ross B., "Static Dissipative Flooring System Protects Microelectric Components from their Nemesis-Static Electricity", Evaluation Engineering (2.1986)
- (10) R-61-ES-01, "半導体デバイスの静電気破壊現象とその評価方法に関するガイドライン" (3.1987), 日本電子部品信頼性センター
- (11) 福田 保裕・平間 淳一, "デバイス帯電モデルによる半導体デバイスの静電気破壊試験方法の検討", 電子情報通信学会 信頼性研究会 R86-69 (3.1987)
- (12) D.L.Lin, M.S.Strauss and T.L.Welsher, "On the Validity of ESD Threshold Data Obtained Using Commercial Human Body Simulators", IRPS, 25th proc. (4.1987)
- (13) 植野 高秀・山崎 孝志・松崎 浩・沼尻 敬明, "人体帯電によるデバイスの静電気障害に関する一考察". 第17回日科技連信頼性・保全性シンポジウム (6.1987)

- (14) MIL-HDBK-419A, "Grounding, Bonding, and Shielding for Electronic Equipments and Facilities Basic Theory" (12.1987)
- (15) R-62-ES-01, "静電気対策用資材評価のための測定方法に関する調査研究成果報告書" (3.1988), 日本電子部品信頼性センター
- (16) R-62-ES-02, "半導体デバイスの静電気破壊現象とその評価方法に関するガイドライン 附属書" (3.1988), 日本電子部品信頼性センター
- (17) 西岡 利晃, "クリーンルームにおける静電気障害", 静電気学会誌 (12.4.1988)
- (18) 平川 董, "半導体デバイスの静電気破壊と人体帯電防止", 静電気学会誌 (12.4.1988)
- (19) 鈴木 政典, 早川一也, "クリーンルームにおける静電気対策", EOS/ESD 対策ハンドブック (1989), P.207-222, トリケプス
- (20) 二澤 正行, "静電気対策マニュアル" (1989), オーム社
- (21) 二澤 正行, "静電気管理用のルームイオナイザ、選択と使い方が毒か薬かを定める", 日経エレクトロニクス No.484(10.16.1989)
- (22) R-63-ES-01, "静電気対策用資材評価技術に関する研究成果報告書 II" (3.1989), 日本電子部品信頼性センター
- (23) R-1-ES-02, "静電気対策用資材評価技術に関するガイドライン" (3.1990), 日本電子部品信頼性センター
- (24) 二澤 正行, "静電放電管理の現状と課題", 包装技術 (4.1990)
- (25) 二澤 正行, "米国の静電気管理にかかわる基本規格に大幅な変更、日本のメーカーにも影響", 日経エレクトロニクス No.496(4.2.1990)
- (26) 二澤 正行, "米国の部品包装材料規格が装い新たに、静電気以外の特性も規定 MIL-B-81705C", 日経エレクトロニクス No.506(8.6.1990)
- (27) "EOS/ESD シンポジウム予稿集" (1991 ~ /Yearly), 日本電子部品信頼性センター
- (28) R-2-RS-02, "静電気(ESD)対策調査研究成果報告書" (3.1991), 日本電子部品信頼性センター
- (29) 中村 恒久・二澤 正行, "静電気シールドバッグの評価", プラスチックスエーヂ (9.1991)
- (30) R-3-ES-01, "静電気放電(ESD)対策調査研究成果報告書" (3.1992), 日本電子部品信頼性センター
- (31) O.J.McAteer(村崎 憲雄ほか訳), "エレクトロニクスの静電気対策" (1992), マグロウヒル出版
- (32) 二澤 正行, "ESD関連規格-CECC00 015解説", EMC No.56(12.1992)
- (33) 二澤 正行, "米国の静電気管理手引き、基本規格変更に伴い改訂 MIL-HDBK-263A の概要", 日経エレクトロニクス (12.7.1992)

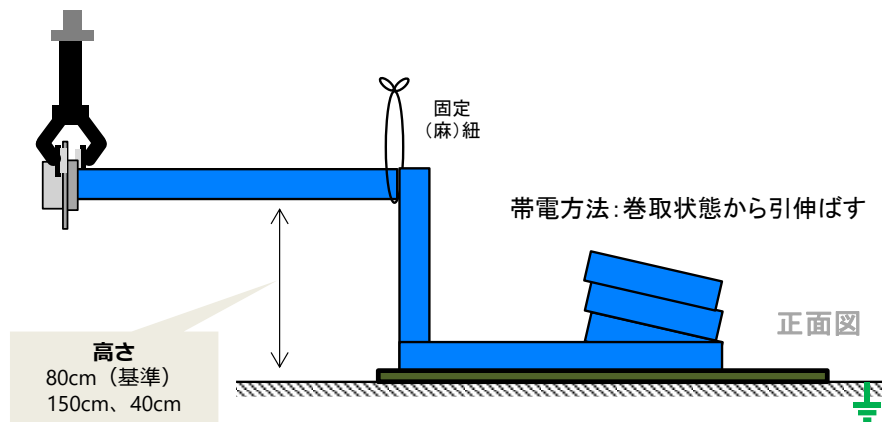
- (34) 中村 恒久・二澤正行, "静電気シールドバッグの評価 (第二報)",
プラスチックエージ (4.1992)
- (35) R-3-ES-01, "平成3年度静電気放電(ESD)対策調査研究報告書" (3.199
2), 日本電子部品信頼性センター

測定データ集

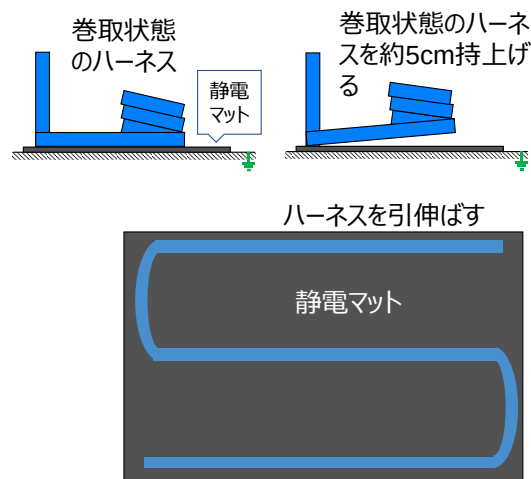
- (1) ハーネスの静電容量
- (2) ハーネスのインダクタンス
- (3) ハーネスの帯電（帯電電荷量と表面電位）
- (4) ハーネス起因ESDの放電波形
- (5) ハーネス起因ESDモデルによるシミュレーション結果と測定結果

(1) ハーネスの静電容量

測定コンフィギュレーション



付図1-1 巻取状態時の測定コンフィギュレーション



付図1-2 ハーネス持ち上げ時及び引伸ばし時のコンフィギュレーション

測定結果

付表1-1 測定サンプル

電線の種類	コネクタ	被覆 (注1)	束線数	長さ	備考
ストレート	Dsub(9pin)	PVC	8本	10m	
				20m	
			37本	10m	
		XETFE	8本	10m	Spec55電線
STP(注2)	μ Dsub(9pin)	XETFE	8本	10m	Spec55電線, 4pair
UTP(注3)	Dsub(9pin)	XETFE	8本	10m	Spec55電線, 4pair

注1)PVC: polyvinyl chloride(ポリ塩化ビニル), XETFE: Cross linked Ethylene Tetra Fluoro Ethylen

注2) Shielded Twisted Pair 注3) Unshielded Twisted Pair

付表1-2 測定結果（電線の種類）

被覆 XETFE(注 1)

電線の状態	巻取	展開	巻取(注 2)	備考
ストレート	217.2pF	259 pF	81.5 pF	
STP	169.2 pF	334.2 pF	102.6 pF	シールド未接地
UTP	118.1 pF	223.3 pF	101.1 pF	

注1)束線数8本, 電線長10m 注2) 5cm持上げ

付表1-3 測定結果（電線の長さ）

被覆 PVC(注 1)

電線の長さ	10m	20m	備考
ストレート	188.8 pF	461 pF	巻取状態
ストレート	367.8 pF	812.4 pF	展開状態

注1)束線数8本

付表1-4 測定結果（電線の束数）

被覆 PVC(注 1)

電線の束数	8 本	37 本	備考
ストレート	188.8 pF	274.3 pF	巻取状態
ストレート	367.8 pF	458 pF	展開状態

注1)電線長10m

付表1-5 測定結果（電線の床からの高さ）

被覆 PVC(注 1)

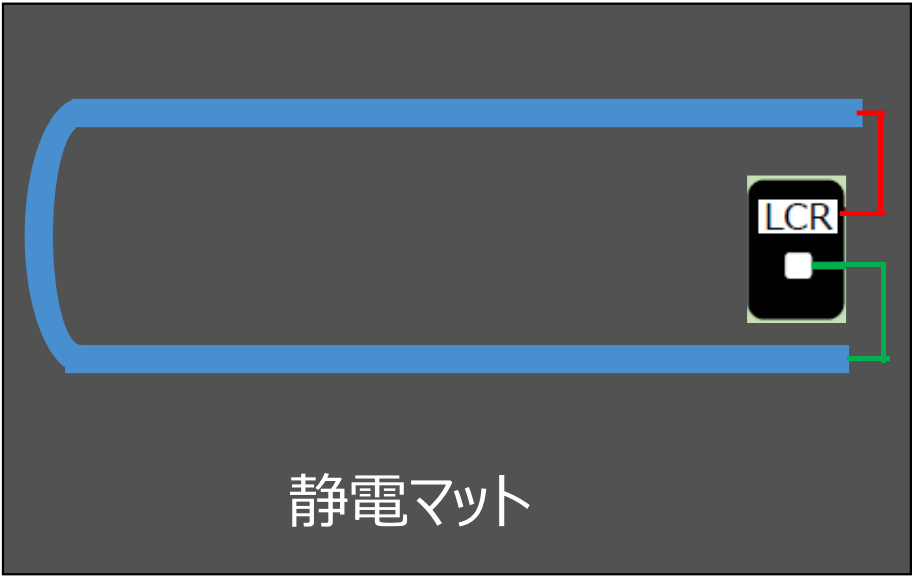
床からの高さ(注 2)	40cm	80cm	150cm	備考
ストレート	197.5 pF	188.8 pF	133.2 pF	巻取状態

注1)束線数8本, 電線長10m

注2)付図1-1の「高さ」を指す

(2) ハーネスのインダクタンス

測定コンフィギュレーション



付図2-1 引伸ばし時のコンフィギュレーション

測定結果

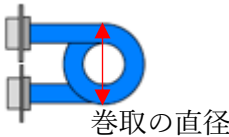
●ケーブル状態：ストレート（長さ 10m）

被覆	インダクタンス(μH)
PVC	13.9
XETFE	13.4

●ケーブル状態：巻取（長さ 10m）

被覆	インダクタンス(μH)
PVC	33.1

注)巻取の直径：200mm



(3) ハーネスの帯電（帯電電荷量と表面電位）

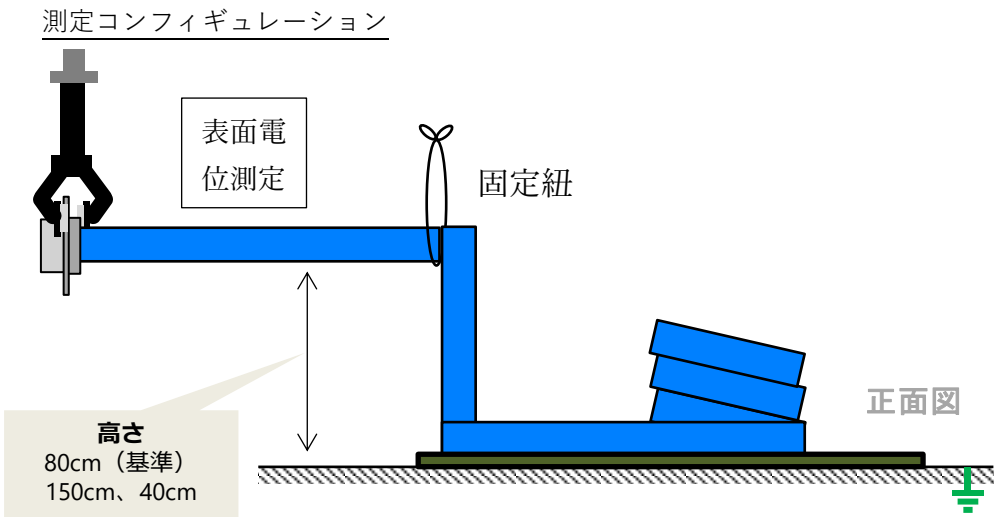
帯電方法

ハーネスの帯電電荷量と表面電位について、付表3-1にまとめたように①帯電ガンを用いた方法、②持上げ時、③ハーネス引伸ばし時それぞれについて測定した。持上げ時の測定コンフィギュレーションを付図1-1に、巻取状態の測定コンフィギュレーションを付図3-1にそれぞれ示す。なお、各帯電測定前には、ハーネス被覆及び心線の除電を実施した。

付表3-1 帯電方法

帯電方法	内容	備考
帯電ガン	帯電ガン(-1kV)を用い、巻取状態のハーネスに一様に帯電させる。	
持上げ時の帯電	静電マット上にある巻取状態のハーネスを持上げたときの帯電を指す。	コンフィギュレーションは付図1-2
ハーネス引伸ばし時の帯電	持上げたハーネスを静電マット上に引伸ばしたときの帯電を指す。	コンフィギュレーションは付図1-2

注)帯電試験前に、ハーネス被覆及び心線の除電を実施



注) ハーネス巻取状態の図を示す。ハーネスの持上げ状態及び引伸ばし状態は付図1-2に示す。

付図3-1 電荷量及び表面電位測定時のコンフィギュレーション

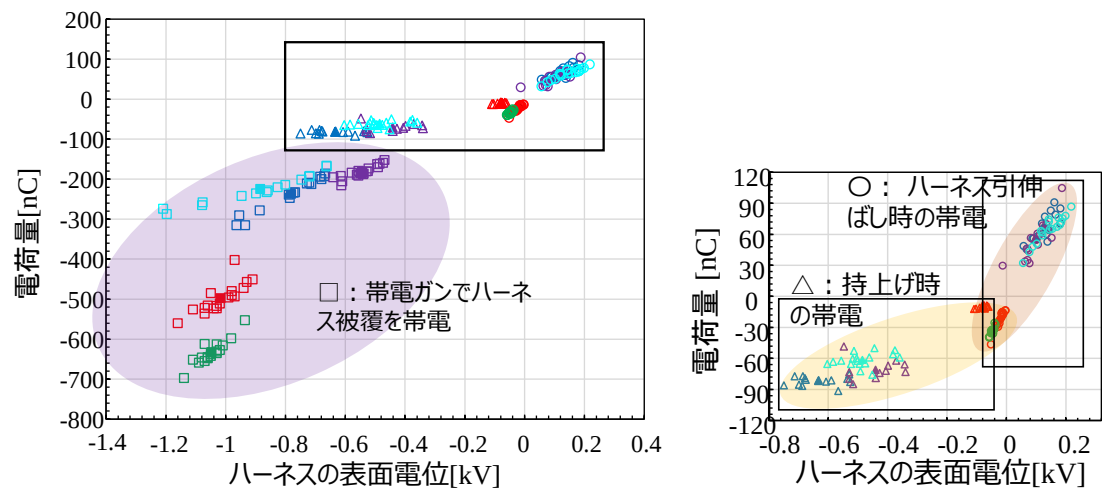
測定結果

ハーネスの帯電電荷量測定結果を付図3-2に示す。各コンフィギュレーションの差異による帯電電荷量の比較結果は次のとおりである。

- (1)束線数（8本/37本）の差異：束線数が多いほど帯電電荷量が多い
 - (2)ハーネス形状の違い(Straight/STP/UTP)：帯電方法により、帯電電荷量の傾向が異なる
 - ・ハーネス持上げ帯電：若干の差だが、帯電電荷量の関係は「UTP<STP<ストレート」
 - ・ハーネス持上げ後引伸ばしによる帯電：帯電電荷量に有意な差はない
 - ・帯電ガンによる帯電：若干の差だが、帯電電荷量の関係は「STP< UTP<ストレート」
 - (3)ハーネスの種類の違い（PVC/XETFE）：帯電方法により、帯電電荷量の傾向が異なる
 - ・ハーネス持上げ帯電：帯電電荷量の関係は「PVC<XETFE」
 - ・ハーネス持上げ後引伸ばしによる帯電：帯電電荷量の関係は「PVC<XETFE」
- なお、XETFEの方が帯電電荷量のばらつきが大きい
- ・帯電ガンによる帯電：帯電電荷量の関係は「XETFE<PVC」

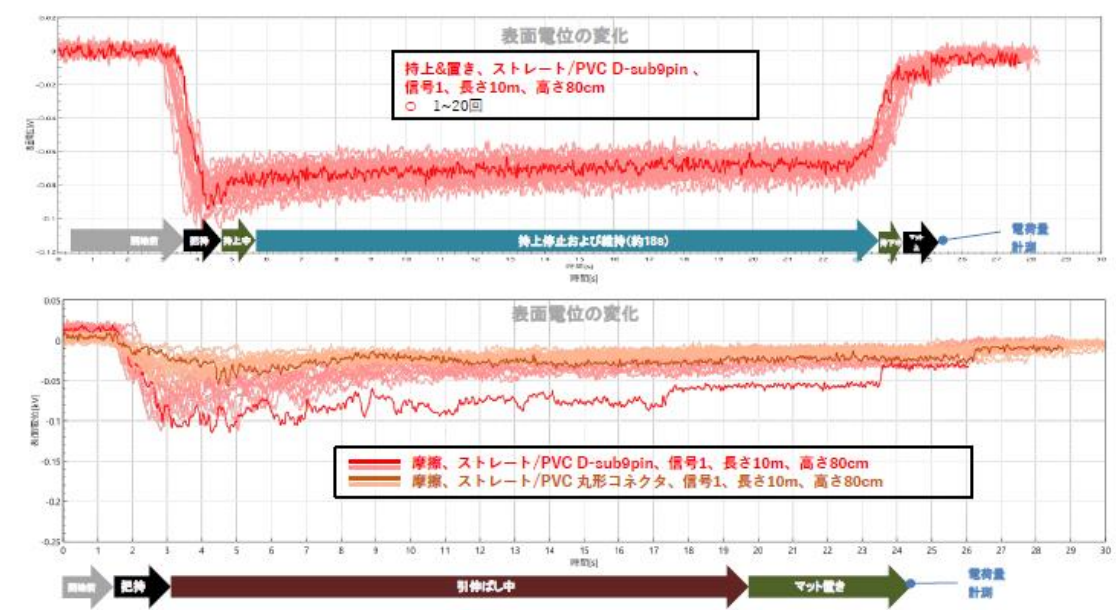
ハーネスの表面電位測定推移を付図3-3に示す。付図3-3より確認できた事項を以下に示す。

- (1)表面電位：PVC,XETFE共に、ハーネス持上げ時に表面電位が高くなる
- (2)電荷のリーク：空気中と静電マット上でリーク傾向が異なる。
 - ・空気中：PVC,XETFE共に、表面電位の変化はほぼ見られない。つまり、電荷リークはほぼ見られない。
 - ・静電マット上：PVCは、表面電位が若干減衰している。ただし、表面電位がマイナスの状態を維持している。XETFEは、表面電位が即減衰し、極性がプラスに変化した。
- (3)PVCとXETFEの差：PVCは、静電マット上から持上げたときの表面電位が低く、帯電電荷量は小さいが、静電マット上にハーネス引伸ばして設置しても、大きな減衰効果はない。XETFEは、静電マット上から持上げたときの表面電位がPVCと比較して高く、帯電電荷量は大いだが、静電マット上にハーネス引伸ばして設置したときに大きな減衰効果がある。

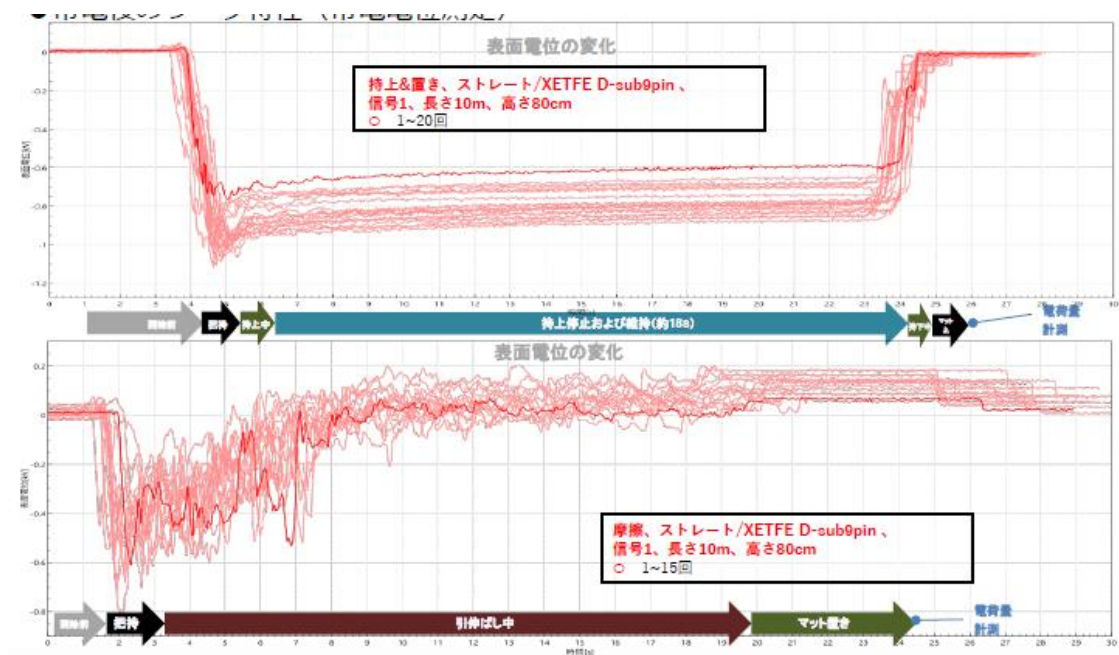


	Harness	Insulation	Number of wires	Connector	Length	Height
Red	Straight	PVC	8	Dsub 9	10m	80cm
Green	Straight	PVC	37	Dsub 37	10m	80cm
Blue	Straight	XETFE	8	Dsub 9	10m	80cm
Purple	STP	XETFE	8	Dsub 9	10m	80cm
Light Blue	UTP	XETFE	8	Dsub 9	10m	80cm

付図3-2 帯電電荷量の測定結果



付図3-3 ハーネス表面電位の測定結果(1/2)

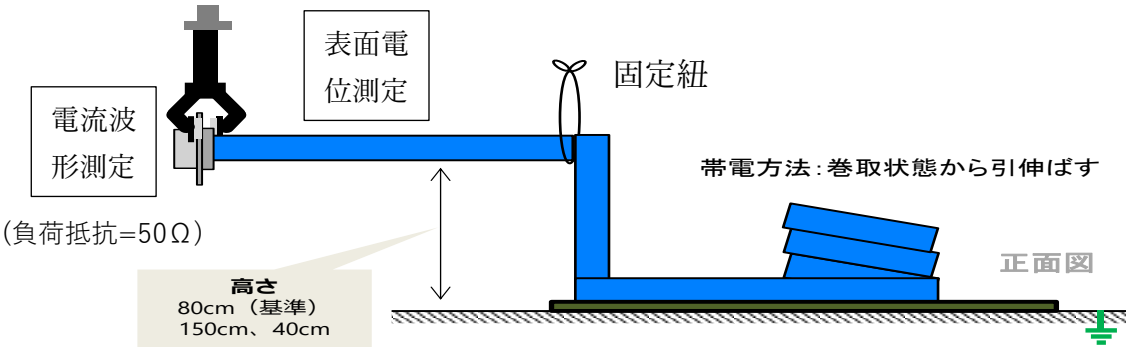


付図3-3 ハーネス表面電位の測定結果(2/2)

(4) ハーネス起因 ESD の放電波形

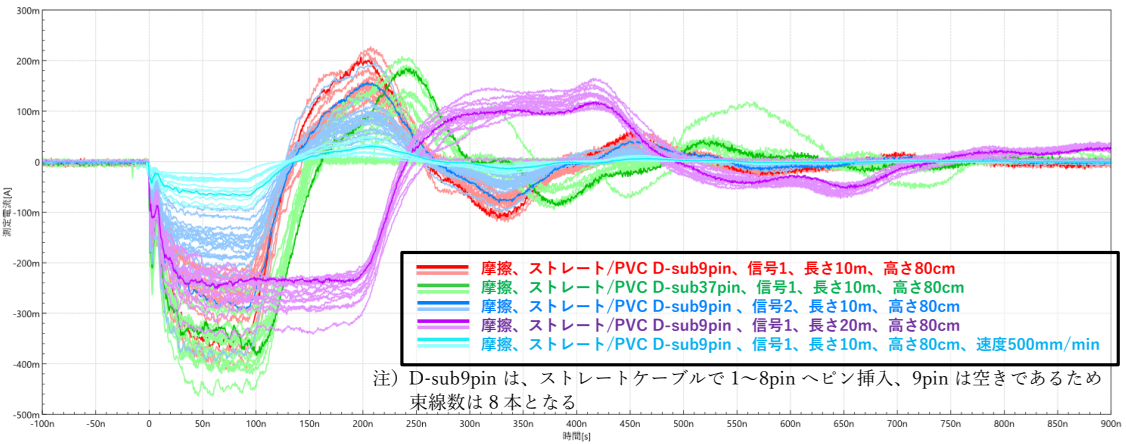
ハーネスコネクタ接続時(負荷抵抗=50Ω)の放電状況を測定した際の測定コンフィギュレーションを付図4-1に、各条件で確認／測定した結果(放電波形)を付図4-2～付図4-7及び付表4-2～付表4-6に示す。

本測定において、ハーネス接続時に放電電流が数百mA以上発生したこと、及び目視にて、ハーネスを接続する前（ピンが接触する前)に放電しており気中で火花放電が発生していること・持続放電には至っていないことを確認している。



付図4-1放電電流測定時のコンフィギュレーション (負荷抵抗=50Ω)

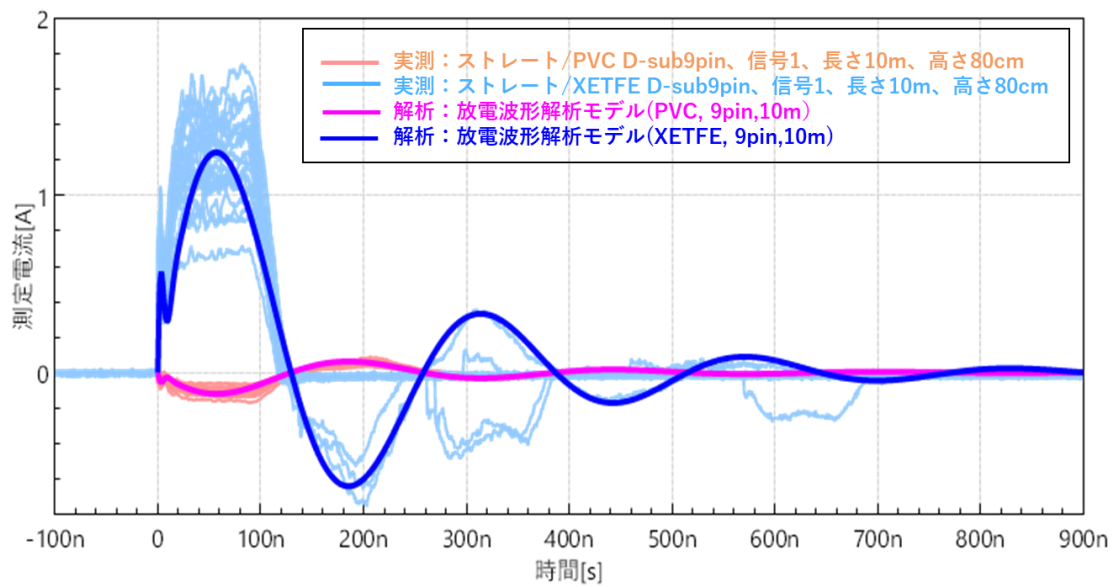
測定結果



付図4-2放電波形 (ハーネス束線数/長さの影響)

付表4-2 ハーネス束線数/長さの影響

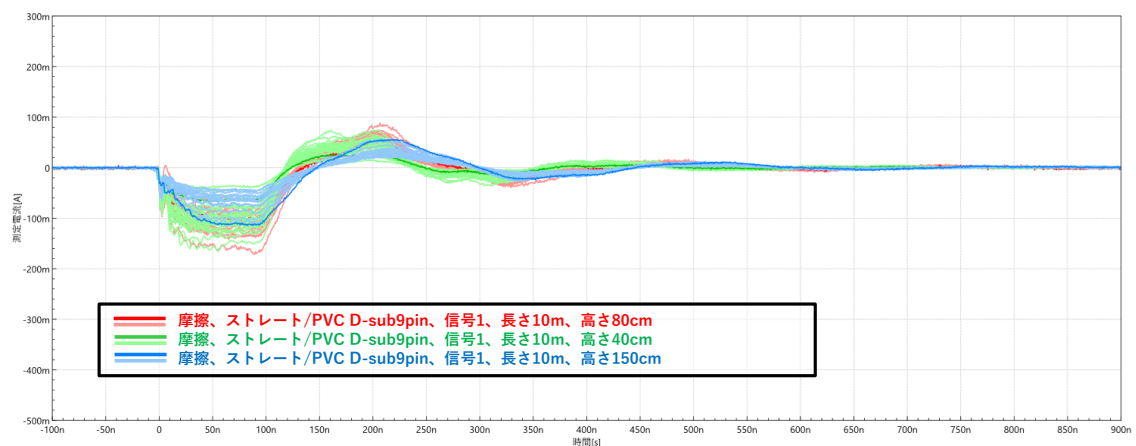
パラメータ	影響	考察
電流ピーク	束線：37本＞8本	帯電電荷量の差異が、電流ピーク値に影響している。
	ハーネス長：20m＞10m	
パルス幅	束線：37本＞8本	電線束線数の差異が、静電容量に現れ、パルス幅に影響している。
	ハーネス長：20m＞10m	



付図4-3 放電波形（ハーネス被覆の影響）

付表4-3 ハーネス被覆の影響

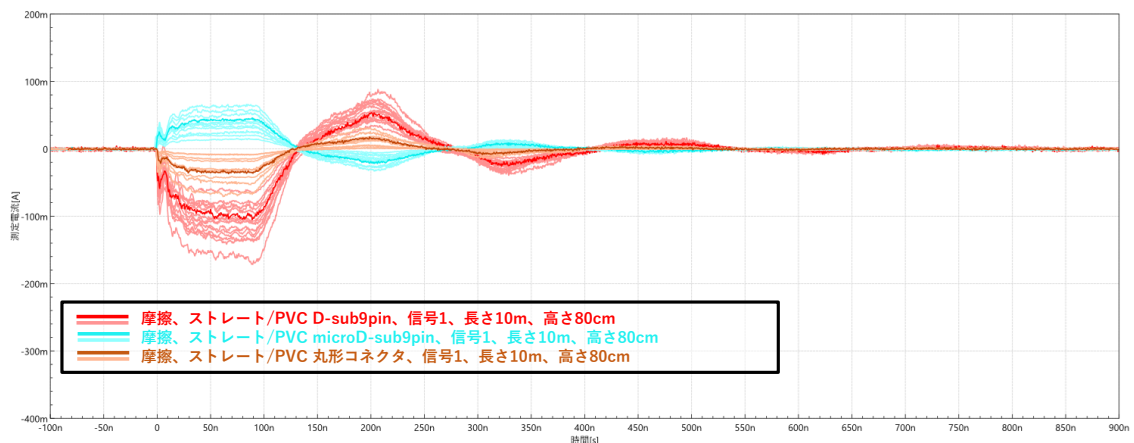
パラメータ	影響	考察
電流ピーク	被覆：PVC < XETFE	帯電電荷量の差異が、電流ピーク値に影響している。
パルス幅	被覆：PVC ≒ XETFE	電線被覆による静電容量の差異は、影響していない。 (付録(1)ハーネスの静電容量 参照： PVC:367.8pF, XETFE:259.0pF)



付図4-4 放電波形（ハーネス高さの影響）

付表4-4 ハーネス高さの影響

パラメータ	影響	考察
電流ピーク	高さ：有意差なし	高さが高くなると電位が高くなるため、火花放電する時の電界が高くなるが、バラツキの範囲内で、有意な差は無い。
パルス幅	高さ：有意差なし	同上

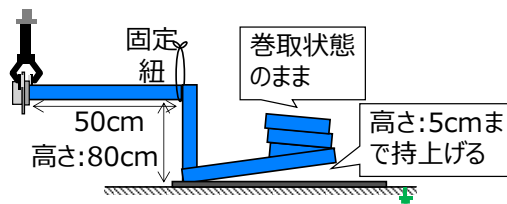


付図4-5 放電波形（コネクタタイプの影響）

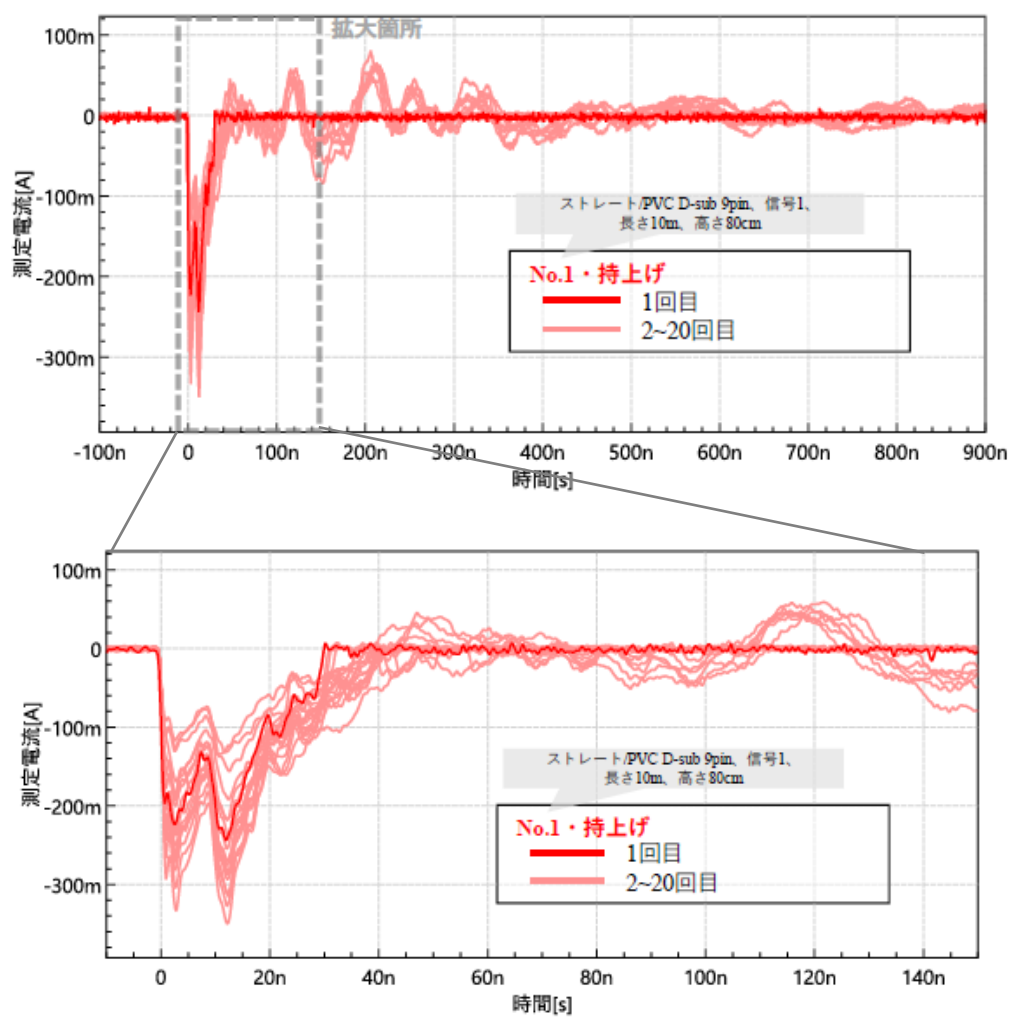
付表4-5 コネクタタイプの影響

パラメータ	影響	検討考察
電流ピーク	丸形≡ μ Dsub < Dsub	帯電電荷量の差異が、電流ピーク値に影響している
パルス幅	有意差なし	コネクタによる影響なし

また、ハーネス(巻取状態)を持上げた時の放電波形も取得した。測定コンフィギュレーションを付図4-6に、測定結果(放電波形)を付図4-7及び付表4-6に示す。なお、使用したハーネスは、「ストレート(8本)/PVC/10m」である。



付図4-6 ハーネス(巻取状態)持上げた状態で放電電流測定した時のコンフィギュレーション（負荷抵抗=50Ω）



付図4-7 放電波形（ハーネスを持上げた時の影響）

付表4-6 ハーネスを持上げた時の影響

パラメータ	影響	考察
帯電電荷量 (付図2-2)	持上げ時の方が引伸ばし時より若干帯電電荷量が少ない	持上げ、引伸ばし共に、電線被覆表面については接触/分離による帯電となる。引伸ばし時の帯電電荷量の方が若干多い理由に、接触/剥離する面積が関係していると考えられる。(5.11.1.1.3 摩擦帯電 参照)
電流ピーク	持上げ時の方が引伸ばし時より若干小さい	上記帯電電荷量の差異と放電電流波形の差異(持上げ時はパルス状ではない)が電流ピーク値の差異の理由と考えられる。 なお、電流ピークまでの立上り速度は、数nsで-300mAであり、引伸ばし時(数nsで-100mA)よりも速い。
パルス幅	パルス状ではない。 また、放電電流がプラスになるまでの時間は30ns~40nsであり、引伸ばし時の半分以下の時間となった。	巻き線状態によるコイルの効果(自己インダクタンスの効果)が現れたと考えられる。

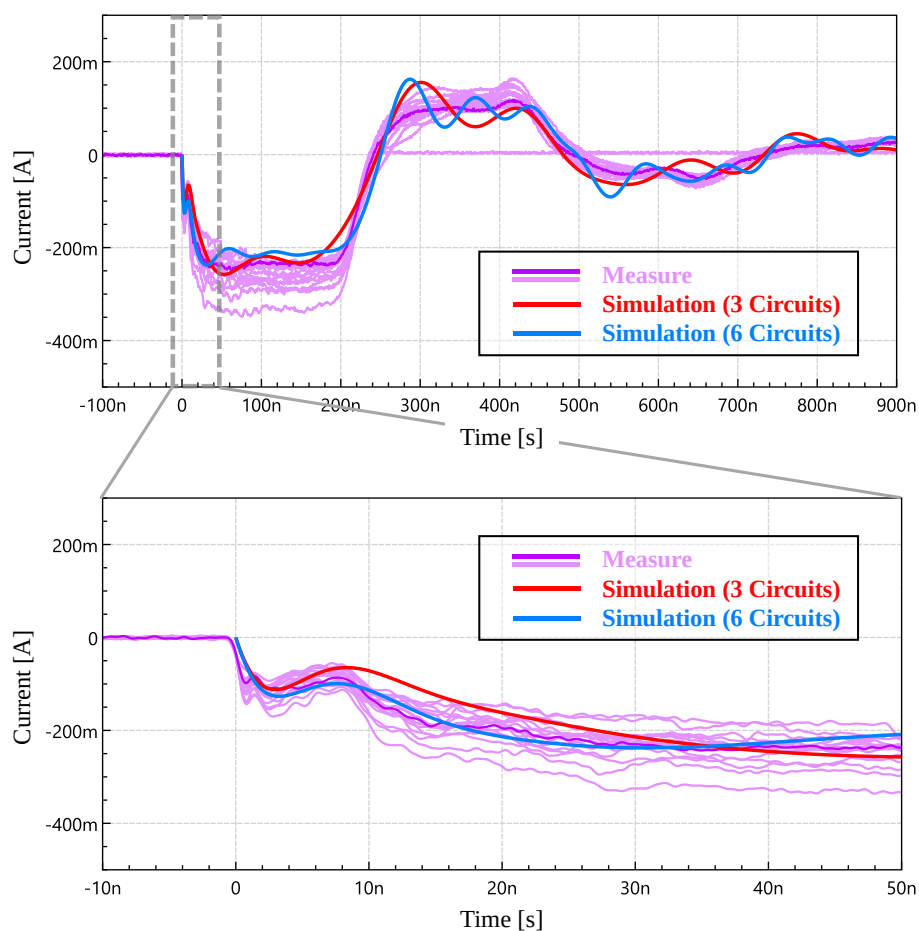
(5) ハーネス起因ESDモデルによるシミュレーション結果と測定結果

モデル



付図5-1 ハーネス起因ESDモデル（20mのXETFEハーネスの例）

シミュレーション結果と測定結果



付図5-2 放電電流波形の測定結果とシミュレーション結果（20mのXETFEハーネスの例）

放電電流波形の測定結果とシミュレーション結果の比較を行い、全体波形形状、初期放電拡大波形形状及び放電電流のモデル化の観点から確認できた事項を次に示す。

(1)全体波形；

- ・最初に発生した負のパルス長，パルス高さ，パルス形状が同等
- ・次に発生した正のパルス長，パルス高さ，パルス形状が同等
- ・約 $1\mu\text{s}$ までの放電波形が同等

(2)初期放電拡大波形；

- ・立上り速度がモデルより実測の方が速い
- ・パルス形状になるまでの全体波形形状は同等

(3)放電電流のモデル化；

シミュレーション結果と実測した放電波形を比較した結果、モデルの CL 回路を 6 Circuits にしたときのシミュレーション結果のほうが 3Circuits より実測に近い波形であることを確認した。