Assessment of Static Electrical Propensity for Work Clothes Using Human Body Voltage Measuring Methods

KIMURA Hirokazu^{*}, YAMAMOTO Ryotaro, SAKAGUCHI Akio

Faculty of Textile Science and Technology, Shinshu University, Ueda, Nagano 386-8567, Japan

Received 9 April 2018; accepted for publication 5 July 2018

Abstract

Safety quality on the static electrical propensity of work clothes in Japan is confirmed by electrical resistivity or frictional electric charge obtained from the results of test methods specified by International Electrotechnical Commission standard (IEC) or Japanese Industrial Standard (JIS). In practical use, we consider that the hazard related to static electrical charge is dependent on human body voltage caused by various movement of worker during working hours as well as electrical resistance or electric charge amount of work clothes. We thought up two trial movements for determination of human body voltage: one is taking off movement after performing frictional action between work clothes and inner wear during 20 seconds at speed of 90 times per one second, and the other is standing up from the seat of popular use chair quickly after performing frictional action between the back part of work clothes and the back of a chair during 60 seconds at speed of 90 times per one second. Experimental works were performed by using four types of unprotected commercial work clothes and six types of static protected commercial work clothes. As the experimental results, standing up movements from the seat of chair were recorded higher human body voltages than taking off movement. From the almost all work clothes including static protected work clothes, the human body voltage above 3000 voltage which many human felt static electrical shock were detected by the standing up from the chair quickly after performing frictional action.

Key Words: Static electrical propensity, Human body voltage, Work clothes, Safety quality of static electrical propensity

人体帯電圧による作業服の静電気帯電性評価

木村裕和^{*}, 山本涼太郎, 坂口明男

信州大学繊維学部

1. 緒 言

静電気帯電現象が様々な障害や災害を引き起こすことは周知のとおりである [1,2]. 静電気帯電を原因とするトラブルには、静電気引力による埃の付着や日常的に経験する静電気放電時に受ける痛み、不快感、冬季の乾燥期に発生する脱衣時の静電気放電音など比較的軽微なものから静電気帯電を原因とする爆発や火災事故のように極めて深刻な事例に至るまで実に多くの事象が報告されている [3-6]. 今から 10 年以上前のことになるが、製油所の原油貯蔵タンクで静電気帯電が原因と考えられる火災が発生し、7 名の作業員のうち 5 名が

死亡、2 名が軽傷を負う大事故となった [7]. 当時の新聞報道から作業員は静電気帯電防止作業服を着用していたものと推測される [7].

日本工業規格では JIS T 8118 に静電気帯電防止作業服の規格値とその試験方法が規定されている [8]. JIS では作業服の静電気的安全性を確認するために作業服生地と作業服一式を試料として摩擦帯電電荷量を求める方法が定められており、前者が $7\mu\text{C}/\text{m}^2$ 以下、後者が作業服上下一式で $0.6\mu\text{C}/\text{点}$ でなければならぬと規定されている. また、国際電気標準会議では IEC 規格、IEC 61340-5-1 に電気抵抗値による規格値が規定されており、作業服生地の電気抵抗値が $1.2 \times 10^{12} \Omega$

^{*} 連絡先: 信州大学繊維学部 386-8567 長野県上田市常田 3-15-1
E-mail: hiro@shinshu-u.ac.jp, Tel: +81-268-21-5362

以下であることが要求されている [9]。しかしながら静電気帯電防止作業服を着用して作業していたにもかかわらず、静電気が原因と疑われる不幸な事故は現実に発生した。

著者らは作業服着用時の動作や着脱衣時に人体に生じる静電気帯電量を知ることが極めて重要であると考えている。

そこで、人体帯電圧による作業服の静電気帯電性評価の可能性を探索する目的ならびに市販の作業服から実際にどの程度の人体帯電圧が生じるのかを確認する目的から2通りの試技を考案した。1つの試技は作業服を着用した実験者が静止起立状態で作業服とインナーウェアを一定の速度で一定時間摩擦し、素早く脱衣する所作で、脱衣動作試技である。もう1つは、汎用的な事務椅子に作業服を着用した実験者が深く座り、作業服背部と椅子の背もたれ部分を一定角度で一定の速度、一定の時間摩擦し、直ちに立ち上がる動作で、椅子からの立ち上がり動作試技である。この2種類の試技から得られた実験結果を報告する。

2. 実験

2.1 試料作業服

実験に用いた試料作業服は上下一対の市販の作業服である。いずれも一般的な作業服である。Table 1 に試料作業服の帯電防止加工の有無と春夏用、秋冬用の別、試料作業服の素材、厚さおよび重量を記載した。帯電防止未加工作業服は試料作業服 No.1 から試料作業服 No.4 の4点で、春夏用2点、秋冬用2点である。素材はポリエステル 65%、綿 35% およびポリエステル 100% がそれぞれ2点である。試料作業服 No.5 から試料作業服 No.8 の4点が JIS 規格適合作業服で、春夏用と秋冬用がそれぞれ2点である。素材はポリエステル 65%、綿 35% およびポリエステル 100% がそれぞれ2点である。試料作業服 No.9 および試料作業服 No.10 が IEC 規格適合作業服で、春夏用、秋冬用が各1点、素材はポ

リエステル 100% である。なお、試料作業服の厚さは背中部分の生地厚さを Thickness Gauge（大栄科学精器製作所社製 Fs-60DS）により求め、試料作業服の重量は秤（OHAUS 社製 NAVIGATOR XL）を用いて計測した。

脱衣動作試技および椅子からの立ち上がり動作試技ともにインナーウェアには一般的な綿 100% の長袖 T シャツを選定した。

2.2 表面電気抵抗測定

実験に用いた 10 種類の試料作業服の表面電気抵抗率を高抵抗計（三菱化学アナリティック社製ハイレスター UX）を用いて測定した。印加電圧は 1000V とし、電圧印加後 300 秒経過後の電気抵抗率を測定した。ただし、試料作業服 No.9 および試料作業服 No.10 については印加電圧を 50V とした。なお、測定は温湿度環境を $20\pm2^{\circ}\text{C}$ 、 $(20\pm2)\% \text{R.H.}$ に調整した恒温恒湿実験室内で行った。

2.3 着衣動作試技

実験は温湿度環境を $20\pm2^{\circ}\text{C}$ 、 $(20\pm2)\% \text{R.H.}$ に調整した恒温恒湿実験室内で行った。予備実験の結果から履物裏面からの電荷の漏えいを防ぐため、床面には JIS L 1021-16.6.1.4 に規定の絶縁版の上に生産方向に対して平行に 300mm、直角に 300mm の大きさのウール 100% のウィルトンカーペットを重ね敷いた床材の上で次の手順で試技を実施した。

最初に試料作業服上下一対を着用した実験者が人体帯電圧測定器（日本スタテック社製 SV-82A）に接続されているプローブを作業ズボンのポケットに入れ、恒温恒湿実験室内の床面に設置した床材上に起立状態で静止する（Fig.1 a）。その後、試料作業服を脱ぐ動作を行う。その際、試料作業服とインナーウェア間を速さ 90 回/min. で 20 秒間摩擦運動を行った（Fig.1 b）。所定時間の摩擦運動が終了後、素早く試料作

Table 1 Details of work clothe used as experimental sample.

Sample No.	Unprotected or static protected	For season	Material(s)	Thickness (mm)	Weight (gf)
1	Unprotected	Spring and summer	Polyester 65%, Cotton 35%	0.47	707.0
2	Unprotected	Autumn and winter	Polyester 65%, Cotton 35%	0.68	978.4
3	Unprotected	Spring and summer	Polyester 100%	0.41	647.8
4	Unprotected	Autumn and winter	Polyester 100%	0.74	945.9
5	Static protected specified by JIS	Spring and summer	Polyester 65%, Cotton 35%	0.44	641.5
6	Static protected specified by JIS	Autumn and winter	Polyester 65%, Cotton 35%	0.66	1059.3
7	Static protected specified by JIS	Spring and summer	Polyester 100%	0.29	582.0
8	Static protected specified by JIS	Autumn and winter	Polyester 100%	0.59	1178.5
9	Static protected specified by IEC	Spring and summer	Polyester 100%	0.35	625.9
10	Static protected specified by IEC	Autumn and winter	Polyester 100%	0.62	893.7

Fig. 1 Photographs of taking off test method after performing frictional action between work clothes and inner wear.

業服を脱衣し、床面に放置する動作を行った (Fig.1 c). 実験は1 試料作業服につき3 回行い、メモリーハイログャー (日置電機社製 LR8431) に記録された人体帯電圧の最大値を測定データとして採用し、その平均値を求めた. なお、実験終了後、1 回ごとに除電装置 (春日電機社製 APKF) を用いて試料作業服上下一対およびインナーウェアを入念に除電した.

2.4 椅子からの立ち上がり動作試技

実験は2-3 に記述した恒温恒湿実験室内で行い、装置、器具、道具は2-3 と同じものを用いた.

試技は、次の手順で実施した. Fig.2 に示したように試料作業服の上下一対を着用した実験者が人体帯電圧測定器に接続されているグローブを握り、静かに市販の汎用椅子 (ニトリ社製ワークチェアベリー 2BK) に深く座る. この椅子の座面および背もたれ部はポリエステル 100% の織物生地で構成されている. その後、椅子の背もたれ部を試料作業服の背中中部で実験者の座骨結節部を中心に左右約 20° の角度となるよ

うに速さ 90 回 /min. で 60 秒間往復摩擦運動を行った. 所定時間の摩擦運動が終了後、素早く椅子から立ち上がる動作を行った. 実験は1 試料作業服につき3 回行い、立ち上がり直後にメモリーハイログャーに記録された人体帯電圧の最大値を測定データとし、その平均値を求めた. なお、実験終了後、1 回ごとに除電装置を用いて試料作業服上下一対および椅子の背もたれ部ならびに座面を入念に除電した.

なお、着衣動作試技および椅子からの立ち上がり動作試技ともに標準的体格 (身長 172cm, 体重 65kgf) の成人男性 1 名が実施した.

3. 結果と考察

Fig.3 には脱衣動作試技から得られた人体帯電圧のチャートの一例を、Fig.4 には椅子からの立ち上がり動作試技から得られた人体帯電圧のチャートの一例を示した. Fig.3 に示した脱衣動作試技においては試料作業服とインナーウェア間で摩擦を行っている 20 秒間に人体帯電圧は 1.5kV 程度に上昇している. そして、試料作業服を脱いだ瞬間に急激な上昇

Fig. 2 A photograph of standing up test method from the seat of chair quickly after performing frictional action between back part of work clothes and back of a chair.

Fig. 3 Body voltage curve obtained from taking off test method after performing frictional motion.

Fig. 4 Body voltage curve obtained from standing up test method from the seat of chair quickly after performing frictional motion.

が認められ、数秒間で 7kV 弱にまで達している。その後、60 秒間の静止起立状態時において人体帯電電圧の減衰が認められ、60 秒後にはおよそ 4kV を示していることがわかる。

一方、Fig.4 に示した椅子からの立ち上がり動作試技においては椅子の背もたれ部と試料の背中部との間で摩擦運動を行っているときには、静電気帯電はほとんど生じていない。しかし、立ち上がり動作を行うと同時に人体帯電電圧は急激に上昇し、6kV 程度の帯電電圧が検出されている。その後、60 秒間の静止起立状態において帯電電圧の減衰が認められる。この例では Fig.3 の減衰速度よりも早く、60 秒後には半減している。

なお、脱衣動作試技および椅子からの立ち上がり動作試技

ともに Fig.3 および Fig.4 に矢印で示した人体帯電電圧の最大値をデータとして採取した。

ここで、Table 2 に示した試料の表面電気抵抗率測定の結果に注目する。IEC 規格適合作業服である試料作業服 No.9 および試料作業服 No.10 の電気抵抗率は 10^7 のオーダーである。帯電防止未加工作業服および JIS 規格適合作業服に比べ、 10^6 から 10^9 低い値である。これは先述したように IEC 規格では作業服の静電的安全性を表面電気抵抗で管理しているためであると考えられる。印加電圧 1000V では試料作業服 No.9 および試料作業服 No.10 は Under range の表示となり、計測不能であった。そこで、印加電圧を下げ、50V で測定した。一方、帯電防止未加工作業服の表面電気抵抗率は 10^{13} から 10^{16} のオーダーを示し、JIS 規格適合作業服は 10^{13} または 10^{14} のオーダーである。したがって、JIS 規格適合作業服の電気抵抗値自体はそれほど低いものではないことがわかる。

仮に人体帯電現象が単純に試料作業服の電気抵抗のみに依存するのであれば、脱衣動作試技および椅子からの立ち上がり動作試技においては検出される人体帯電電圧は、IEC 規格適合作業服 < JIS 規格適合作業服 ≤ 帯電防止未加工作業服となるはずである。Fig.5 には、よこ軸に表面電気抵抗率、たて軸に脱衣動作試技から得られた人体帯電電圧および椅子からの立ち上がり動作試技から得られた人体帯電電圧のデータを示した。○で示した脱衣動作試技においては IEC 規格適合作業服である試料作業服 No.9 および試料作業服 No.10 の人体帯電電圧は、-0.6kV および -0.5kV と小さく、電気抵抗率が低い試料作業服の人体帯電電圧が低いことがわかる。しかし、電気抵抗率が 10^{13} から 10^{16} のオーダーの試料群からは電気抵抗率と人体帯電電圧との間に関連性は認められない。一方、●で示した立ち上がり動作試技では IEC 規格適合作業服を含め、すべての試料作業服において表面電気抵抗率が低いほど人体帯電電

Table 2 Body voltage and electrical resistance obtained from taking off test method after performing frictional action between work clothes and inner wear and standing up test method from the seat of chair quickly after performing frictional motion.

Sample	Body voltage obtained from taking off test method (kV)	Body voltage obtained from standing up test method from the seat of chair (kV)	Electrical resistance ($\Omega/\square$)
1	-6.8	8.1	5.9×10^{13}
2	-8.1	9.0	1.6×10^{13}
3	4.0	3.1	5.8×10^{15}
4	8.0	-5.7	1.4×10^{16}
5	0.8	3.9	9.7×10^{13}
6	0.9	-0.9	5.7×10^{13}
7	-2.5	5.2	8.3×10^{14}
8	-2.1	6.0	4.7×10^{14}
9	-0.6	6.0	3.5×10^7
10	-0.5	6.9	4.0×10^7

Fig. 5 Relationship between electrical resistance and body voltage obtained from taking off test method after performing frictional motion (○) and standing up test method from the seat of chair quickly after performing frictional motion (●).

が小さくなるという傾向は認められない。この結果は、床材試料の電気抵抗値と歩行動作により生じる人体帯電圧との関係を検討した先行研究の結果と類似している [10]。したがって、実際の作業時に人体に発生する静電気帯電量を電気抵抗の測定結果からだけで推測することは困難であるといえる。

次に、Table 2 に示した脱衣動作試技の結果に注目する。帯電防止加工作業服である試料作業服 No.5 から試料作業服 No.10 の 6 点の試料作業服から検出された人体帯電圧の平均値は絶対値で 0.5kV から 2.5kV の範囲にある。帯電防止未加工作業服である試料作業服 No.1 から試料作業服 No.4 の 4 点の試料作業服から得られた人体帯電圧の絶対値は 4.0kV から 8.1kV の範囲である。人体帯電圧の絶対値が 3kV を超過すると静電気放電ショックを感じ、5kV 以上で放電火花が生じることはよく知られた事実である [11]。脱衣動作試技においては、すべての帯電防止未加工作業服が静電気放電ショックを感じるレベルにある。一方、JIS 規格適合作業服および IEC 規格適合作業服の 6 点の試料作業服においては、そのすべてが 3kV 未満の帯電圧である。静電気放電ショックを感じるレベルではないことがわかる。したがって、帯電防止加工作業服は脱衣のような通常、普通に行う動作であれば、静電的な危険性は低く、制電加工効果は認められるものといえる。

一方、椅子からの立ち上がり動作試技から得られたデータをみると帯電防止未加工作業服である試料作業服 No.1 から試料作業服 No.4 の人体帯電圧の絶対値は 3.1kV から 9.0kV の範囲である。JIS 規格適合作業服である試料作業服 No.5 から試料作業服 No.8 の人体帯電圧の絶対値は 0.9kV から 6.0kV の範囲であり、IEC 規格適合作業服の試料作業服 No.9 および試料作業服 No.10 の人体帯電圧は、それぞれ 6.0kV、6.9kV である。全体的に脱衣動作試技に比べて椅子からの立ち上がり動作試技の方が高い人体帯電圧を示している。帯電防止加

Fig. 6 Relationship between body voltages obtained from taking off test method after performing frictional motion and standing up test method from the seat of chair quickly after performing frictional motion.

工作業服 6 点中 5 点が 3kV を超過しており、そのうちの 4 点が 5kV を超過している。実に、帯電防止作業服の 2/3 が静電気による火花放電の危険性がある。したがって、帯電防止作業服を着用していても激しい摩擦をとまなうような動作や作業の後に、急速に立ち上がるような動作は危険をとまなう所作であることが実験的に示されたものと考えている。

なお、脱衣動作試技においては低い帯電圧を示した IEC 規格適合作業服でも立ち上がり動作試技ではかなり高い人体帯電圧が検出されている。これは、試料作業服生地 of 電気抵抗が低いために椅子の背もたれ部分と作業服の背中部を促進的に摩擦した後に直ちに素早く立ち上がるというダイナミックな動作にともなっては離時に急激な電荷の移動が大面積で発生した結果生じた現象であると推察している。

Fig.6 には、よこ軸に椅子からの立ち上がり動作試技から得られた人体帯電圧をとり、たて軸に脱衣動作試技から得られた人体帯電圧をとり、各データをプロットした結果と相関係数 (r) を示した。○で示したデータは帯電防止加工作業服から、●は帯電防止未加工作業服から得られたデータである。なお、Fig. には椅子からの立ち上がり動作試技と脱衣動作試技から得られた人体帯電圧との相関係数と回帰線を記入した。両者間には相関係数 -0.86 の負の相関関係が認められる。試料数が 10 点であるため断言はできないが、脱衣動作試技と椅子からの立ち上がり動作試技から得られる人体帯電圧との間には逆極性で良好な関係性が成立している可能性がある。静電気帯電現象は帯電量の絶対値が問題になるので、考案した 2 種類の試技のいずれによっても作業服の静電気帯電性を人体帯電圧によって評価することが可能であるものと考えている。

4. 結 言

人体帯電圧による作業服の静電気帯電性を評価する目的ならびに市販の作業服から実際にどの程度の人体帯電圧が生じるのかを確認する目的から 2 種類の試技を考案した。試技は、

作業服を着用した実験者が静止起立状態で作業服とインナーウェアを一定の速度で一定時間摩擦し、素早く脱衣する試技（脱衣動作試技）および汎用的な事務椅子に作業服を着用した実験者が座り、作業服の背部と椅子の背もたれ部分を一定の角度で一定の速度で一定時間摩擦し、直ちに急速に立ち上がる試技（椅子からの立ち上がり動作試技）の2通りである。実験には上下一対の市販の帯電防止未加工作業服4点ならびに帯電防止加工作業服6点の合計10点の試料作業服を選定した。

脱衣動作試技においては試料作業服を脱いだ瞬間に人体帯電圧の急激な上昇が認められ、椅子からの立ち上がり動作試技においては立ち上がり動作を行うと瞬時に人体帯電圧は急激に上昇し、相当の人体帯電圧が検出されることがわかった。また、椅子からの立ち上がり動作試技から得られる人体帯電圧は脱衣動作試技から得られる人体帯電圧よりも高いことが確認された。脱衣動作試技においてはすべての帯電防止作業服が3kV未満の範囲内に収まっており、JIS規格適合作業服およびIEC規格適合作業服を着用すれば、脱衣のような通常の動作であれば、静電的な危険性は低く、制電加工効果は認められることが確認された。しかし、椅子からの立ち上がり動作試技により生じる人体帯電圧からは帯電防止加工作業服であっても6点中5点が3kV以上の人体帯電圧を示し、そのうちの4点から5kV以上の人体帯電圧が検出された。帯電防止作業服の2/3が静電気による火花放電の危険が懸念されるレベルにあることがわかった。したがって、帯電防止作業服を着用していても激しい摩擦をとまなうような動作や作業の後に、急速に立ち上がるような動作は静電気災害発生の原因となり得る所作であるものと考えられた。

なお、試料作業服の表面電気抵抗率と2種類の試技から得

られた人体帯電圧の関係を検討した結果、両者間には明確な関連性は認められなかった。

謝 辞

本研究はJSPS科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）課題番号15K00750の助成を受けて実施したものである。ここに、謝意を表する。

References

- [1] Nambata M, Yoshida T (2016) Journal of the Institute of Electrostatics Japan, **40**, 295–301
- [2] Ishida T (2017) Journal of the Institute of Electrostatics Japan, **41**, 169–172
- [3] Yamaguma M (2012) Journal of the Institute of Electrostatics Japan, **36**, 116–121
- [4] Kodama T, Yamaguma M (2012) Journal of the Institute of Electrostatics Japan, **36**, 122–127
- [5] Yanagida K (2012) Journal of the Institute of Electrostatics Japan, **36**, 128–132
- [6] Choi K S, Mogami T (2012) Journal of the Institute of Electrostatics Japan, **36**, 133–137
- [7] Mainichi Shinbun (in Japanese) (2006) 2006.01.18, 1,23
- [8] JIS T 8118 (2001)
- [9] IEC 61340-5-1 (2016)
- [10] Pailthorpe M T (1988) Textile Research Journal, **58**, 335–337
- [11] Kimura H, Matsuoka T, Kanai H, Morishima M, Hasegawa M (2011) Journal of the Institute of Electrostatics Japan, **35**, 183–188