報 文

医療従事者用X線防護衣の現状と課題

熊田亜矢子[1]　坂下　理穂[2]　諸岡　晴美[3]　河原　伸雅[4]

Current State and Issues of Medical X-ray Protective Clothing

Ayako Kumada, Riho Sakashita, Harumi Morooka, Nobumasa Kawahara

This study aims to discuss the current state and issues of X-ray protective clothing for medical workers. First, we analyzed the current state of commercial X-ray protective clothing considering their materials, structures, shapes, dimensions, and mass. Then, we measured the clothing pressure in the region around the shoulder while the protective clothing is worn. Because the protective clothing was extremely heavy and its pattern had a planar structure, considerable measurement location-dependent variation in the clothing pressure was observed. In particular, extremely high clothing pressure was noticed in some regions. Flexural uplifts and buckling deformations on the protective clothing were also observed locally. Furthermore, we measured the moisture permeability and found that the material was impermeable to moisture. Therefore, in addition to the issues mentioned above, X-ray protective clothing may also pose the risk of moisture trapping.

1. 緒　言

防護衣とは、危険有害性から身体を防護するために使用する衣服をいう。危険有害因子によって使用する防護衣は異なり、医療用防護衣と産業用防護衣に大別される[1)]。産業用防護衣には、化学防護衣、病原体などによるバイオハザード対策用防護衣、熱・火炎に対する耐熱防護衣、切創・突き刺しに対する耐切創防護衣、放射線防護衣など多くの用途がある。これらの衣服では、防護性能が最も重要であることはいうまでもないが、その上に立って、仕事効率等を左右する着心地も非常に重要な要因であると考える。2011年に発生した東日本大震災時の福島第一原子力発電所の事故による放射線被爆問題では、被災地住民の一時帰宅用防護衣の「蒸れ」や、近年では新型コロナウィルス感染症（COVID-19）に罹患した患者に対応する防護衣についても、その着心地の悪さがマスコミに大きく取り上げられた経緯がある。

松井らは防刃服を用いた着用実験から温熱的快適性について検討しており[2)]、内田らは市販の感染症予防型のカバーオールタイプの防護衣を用いて、その衣服内気候や生体への影響について検討し、中立環境においても衣服内は高湿状態であったと述べている[3)]。竹崎らはX線防護衣の質量が身体に及ぼす影響について、重いことによる身体負荷が大きいことを指摘しているが[4)]、いずれの研究においてもそれらの改善策については言及していない。一方、チェンソー用防護衣のような特殊なものについては、安全性に関する規格すらみられず[5)]、防護衣の用途によって様々な課題がみられるのが現状である。

本研究では、医療従事者用のX線防護衣を研究対象とする。放射線の中でもγ線やX線は、α線β線に比べて透過力が強く、空気中を数10 mから数100 mまで透過し、人体を容易に貫

[1] 本学大学院家政学研究科生活環境学専攻博士後期課程
[2] 本学大学院研修者
[3] 本学教授
[4] 株式会社アドエッグ

通して人体の重要な臓器や正常な細胞に害を及ぼす[6]。医療現場において、X 線は診断用や治療（手術）用など多くの場面で活用されている[7]。医療従事者は、患者に対しては可能な限り局所的に照射し、他の部位を防護して処理に当たっているが、自身が散乱 X 線から被爆を受ける危険性をはらんでいる。そのため、X 線防護具の装着が必要不可欠となっている。

X 線防護具には、体幹部を防護する防護衣、甲状腺防護具、防護眼鏡、防護手袋など様々なものがある。本研究では、防護衣の素材・構造、形状、寸法、質量の観点から、詳細に現状を分析し、それを踏まえて、作業効率に影響を及ぼすと考えられる課題を明らかにすることを目的とした。

2. 医療用 X 線防護衣の現状

2.1 素材と構造

防護衣は、X 線遮蔽材（以降、遮蔽材とする）の表裏両面を 2 枚の表面材で挟んだ積層構造となっている（図 1）。

遮蔽材は、1950 年代の開発当初より、X 線防護衣における有効な材質として、X 線やγ線の減弱割合（線減弱係数）の大きい鉛を混入したゴム製が主流であったが、現在は、鉛を使用しない遮蔽材が用いられるようになっている。前者は含鉛タイプ、後者は無鉛タイプと呼ばれている。鉛の原子番号は 82 であり、高質量であるため、含鉛タイプの防護衣を長時間着用する医療行為においては身体負荷が大きいことが容易に想像される。そのため、鉛より原子番号が小さく、放射線遮蔽能力を有する原子番号 47 以上の多元素の重金属を用い、塩化ビニルなどの合成樹脂に混入している無鉛タイプが多くなっている。無鉛タイプは、含鉛タイプより高価であるが、現在、国内で作られている防護衣は無鉛タイプが主流となっている[8]。

遮蔽性能としては鉛当量（mmPb）が用いられており、0.25 mmPb、0.35 mmPb の遮蔽材が一般的である。鉛当量とは、X 線を遮蔽する性能を鉛の厚さに換算したものである。

一方、表面材については、防護衣が洗濯できないために、汗や血液等の汚れをアルコールで拭き取ったり、簡単に洗い流したりできるように、耐水性材料で覆わなければならないと JIS T 61331-3: 2016[9] に規定されている。そのため、塩化ビニル樹脂やポリウレタン樹脂からなる表面シート材が用いられているのが現状である。

2.2 形状

現在市販されている防護衣の形状は、図 2 に示すようなエプロン型、コート型、セパレート型（ハーフコートおよび巻きスカートから成る）の 3 種である。

エプロン型は、肩から伸びたストラップを背面で交差させて留め付ける設計になっており、着用者の体型に合わせて長さを調整することが可能である反面、身体前面からの X 線しか防護できず、看護師などの補助者の使用に限られている。これに対して、コート型やセパレート型は、身体の全方位からの X 線を防護することができ、X 線操作者が使用していることが多い。コート型は、ワンピースタイプであり、着丈が長い。セパレート型は、ハーフコートの着丈を短くして、腰にスカートを巻きつけるツーピースタイプとなっている。

また、縫目や部品を留め付ける孔などは、その部分の遮蔽性能がなくなるため、前面にあっては

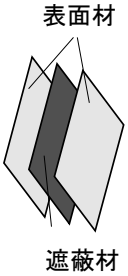

図 1　防護衣の積層構造

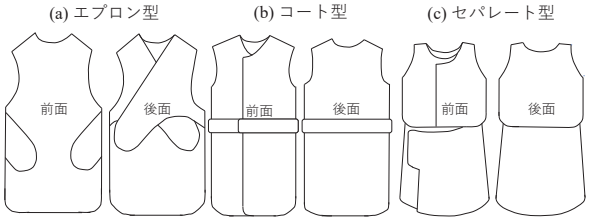

図 2　市販防護衣の形状

ならないとJISに規定されており、通常の衣服設計のようにダーツやいせ込みなどの立体化手法を用いることができない。そのため、首回りと袖ぐり以外は直線的であり平面的な型紙設計となっている。

どの形状の防護衣においても、胸部全体と両肩、生殖器を覆うように設計されており、甲状腺を防護するためには、さらに甲状腺防護具（ネックガード）を装着する必要がある。

2.3　寸法

防護衣の標準寸法は、図3に示すように、JIS[9]に定められており、小（S）、中（M）、大（L）、特大（LL）の4サイズが展開されている。標準寸法は、エプロン型では肩線の首付け根側から裾線までの前面の着丈寸法Aと着幅寸法Bのみが定められ、コート型ではA、Bに加え、さらに後面の着丈寸法A'および胴回り寸法Cが定められている。

AおよびA'ともに、SからLサイズまでは1サイズごとに10 cm刻みで大きく設定されており、LLはLより5 cm増となっている。BではSからM、LからLLサイズで5 cm刻みに大きく設定され、MとLサイズは同寸となっている。Cでは、S、M、Lまでが98 cmからの10 cm刻みとなっており、LLはLと同寸に定められている。

なお、セパレート型については、JIS規定で標準サイズが定められていないのが現状である。

大きさ	A	A'	B	C
小（S）	88	73	53	98
中（M）	98	83	58	108
大（L）	108	93	58	118
特大（LL）	113	98	63	118

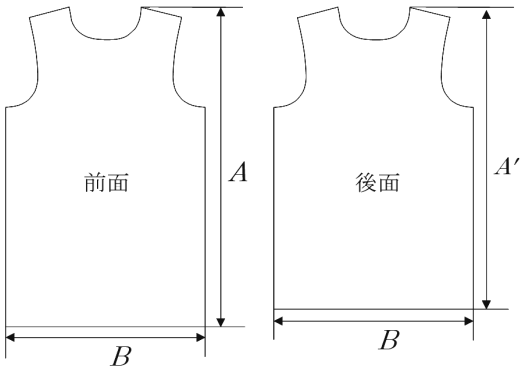

図3　防護エプロン・防護コートの形状と防護衣の標準サイズおよび寸法（JIS T61331-3より引用）[9]

A：防護エプロン、防護コート前面の肩上端から下端までの着丈寸法
A'：防護コート後面の肩上端から下端までの着丈寸法
B：防護エプロンおよび防護コートの着幅寸法
C：防護コートの胴回りの寸法

2.4　質量

現在の主要な防護衣メーカ2社[10,11]の市販防護衣3〜9種を例にとり、エプロン型、コート型の含鉛タイプおよび無鉛タイプの0.25 mmPb、0.35 mmPbについて、サイズ別に平均質量と標準偏差を図4、図5に示す。

エプロン型はSサイズ無鉛0.25 mmPbで最も軽く1.7 kg、LLサイズ含鉛0.35 mmPbで最も重く3.5 kgであった。同様にみると、コート型では2.6 kg〜5.6 kgの範囲にあり、後身頃がある分だけ重く、エプロン型の1.5〜1.6倍の質量であった。

セパレート型の質量を図6に示す。セパレート

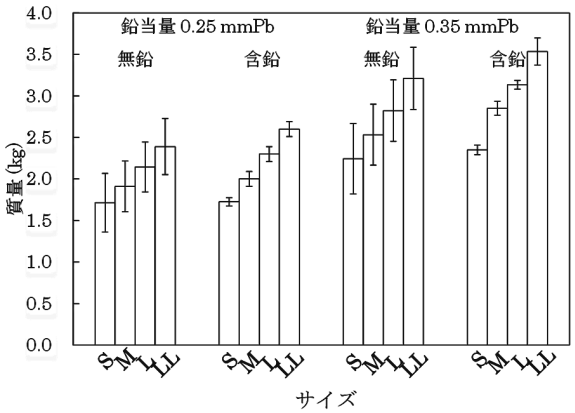

図4　エプロン型X線防護衣のサイズ別の平均質量

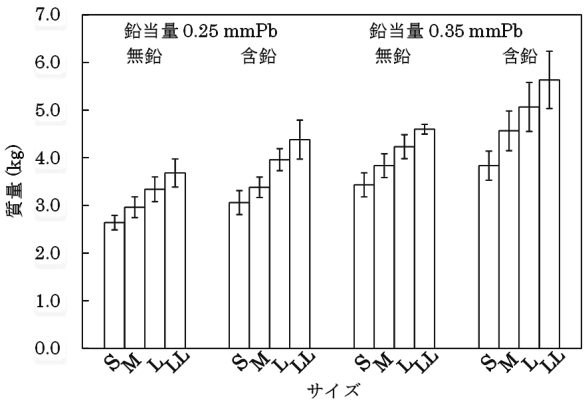

図5　コート型X線防護衣のサイズ別の平均質量

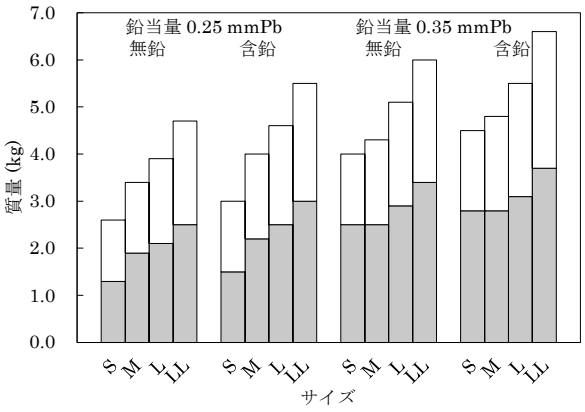

図 6　セパレート型 X 線防護衣のサイズ別の平均質量
（□：ハーフコート、■：巻スカート）

型はハーフコートと巻スカートのセットとなっており、標準寸法が JIS に規定されていないためか種類が少なく、また総重量でしか示されていないものがあったため、標準偏差を算出できなかった。総質量は、コート型より重く、3 種の中で最も重かったが、ハーフコートのみでみると、エプロン型とほぼ同様の質量か、それよりもやや軽く、全方位型であるが肩への質量負荷が軽減されることがわかった。

また当然のことながら、サイズが大きくなるほど重くなり、S と LL の差は、エプロン型で 0.7～1.1 kg、コート型で 0.9～1.8 kg、セパレート型の総質量で 2.5～3.0 kg であった。肩への質量負荷を考えると、コート型が最も大きい。そのため、コート型には内ベルトや腰ベルトをコートに付帯させており、これによって肩にかかる質量負荷を軽減される手法がなされている。

なお、無鉛タイプは含鉛タイプに比べて、平均で約 10％軽量であり、鉛当量における差では 0.25 mmPb が 0.35 mmPb より平均で約 20％軽量であったが、いずれにおいても防護衣の質量は重く、医療行為時の身体負荷を大きくしていると推察された。

3. 現状からみられる課題

前項において防護衣の現状を検討した結果、身体拘束性の観点や温熱的特性の観点、寸法からの観点など様々な問題点が示唆された。そこで、今後解決すべき課題を明らかにすることを目的として、既存防護衣を用いた実験を行い、その結果から考察を行った。

3.1　身体拘束性の観点から

3.1.1　衣服圧測定

前述したように、防護衣は非常に重く、その質量のほとんどが肩にかかる。そこで、エアパック式接触圧計 AMI3037 型（㈱エイエムアイ・テクノ製）を用いて、肩周辺の衣服圧を 1 人の被験者を用いて測定した。用いた防護衣は、エプロン型およびハーフコート型の 2 タイプである。衣服圧測定位置を図 7 に示す。No.1～ No.9 は ϕ 20 mm の丸型センサとした。肩線の中央を No.2 とし、その左右の端までの中点を No.1、No.3 とした。また、センサ中心間距離を 35 mm として、後身頃側に No.4～ No.6、前身頃側に No.7～ No.9 を配置した。また、首付け根周辺には、8 mm × 28 mm の T 型センサをネックラインに沿わせて No.10～ No.12 を配置した。

測定時の姿勢を表 1 に示す、a：立位で上肢を自然に下方に垂らす姿勢、b：立位で上肢を約 45° 前挙し肘を約 90° 屈曲する姿勢、c：体幹を約 20° 前傾して上肢を約 45° 前挙し肘を約 90° 屈曲する姿勢の計 3 種とした。これらの姿勢は、検査や治療時の腕の動きを模擬したものである。また、エプロン型のみ背部のストラップの締めを 2 段階として、ちょうどよいストラップの締めである前述の a、b に対して、a' および b' ではややきつめに締めて測定を行った。

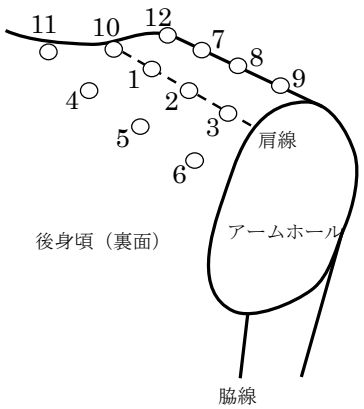

図 7　衣服圧測定位置

表1　衣服圧測定時（エプロン型）の姿勢

ストラップの締め具合	ちょうどよい	a	立位で上肢を自然に下方に垂らす
		b	立位で上肢を約45°前挙し肘を約90°屈曲する
		c	体幹を約20°前傾して上肢を約45°前挙し肘を約90°屈曲する
	強め	a'	ストラップを締め付けて上肢を自然に下方に垂らす
		b'	ストラップを締め付けて体幹を約20°前傾して上肢を約45°前挙し肘を約90°屈曲する

*a、b、cはセパレート型着用時の姿勢と同じ

3.1.2　肩周辺部にかかる衣服圧

エプロン型着用時の衣服圧の結果を図8に示す。

はじめに姿勢a、b、cについてみてみると、測定位置No. 1、2、5、8、9、10で10〜25 hpaの衣服圧が検出され、No. 3、4、6、11ではほぼゼロであるなど、測定位置によるバラツキが大きかった。また、やや前傾姿勢であったcの衣服圧がaやbよりも高い傾向がみられた。一方、筆者らはエプロンのストラップを締め付けた時の方が、防護衣の質量の一部を腰にもたせることができるため、衣服圧は低くなると予想していたが、逆に特にb'においては25〜35 hPaとさらに衣服圧が増大する傾向がみられた。これは、不釣り合いを誘引した結果であろうと考察され、適切でないストラップの締めは、肩への負荷軽減に繋がらず、逆に負荷を増大させることが明らかとなった。

次に、ハーフコート着用時の衣服圧の結果を図9に示す。ハーフコートにはストラップやウエストベルトがないため、a〜cの3種の姿勢としている。測定位置No. 1、4、7、11で衣服圧が高く、特に、測定位置No. 11ではすべての姿勢で約30 hPaの高い衣服圧が検出され、エプロン型よりもややネック側の衣服圧が高いことがわかった。

コート型を着用した時の写真を図10に示す。これは、やや前傾になり上肢を前挙した姿勢cの場合である。後身頃がほとんど身体に沿っておらず、後ろ肩先側で浮きが観察される。被験者からは、ネックに当たる部分や腕付け根前部が痛いとの申告があった。また写真より、腕付け根部分や胸部分に座屈変形が観察される。この撓みが破れを誘引し、遮蔽性能の低下に繋がるであろうことが予想され、このことを指摘した報告もみられる[12)]。防護衣の遮蔽材の厚さを6 g荷重下で測定したところ、含鉛タイプで0.771 mm、無鉛タイプで0.952 mmと厚く、しかも素材がゴムシートや塩化ビニルシートであることから、非常に曲げ剛性が大きかったことがその要因の一つであると考えられる。

また、一般的な衣服設計では、男女問わず、胸部のふくらみや後ろ肩のふくらみに対しては、ダー

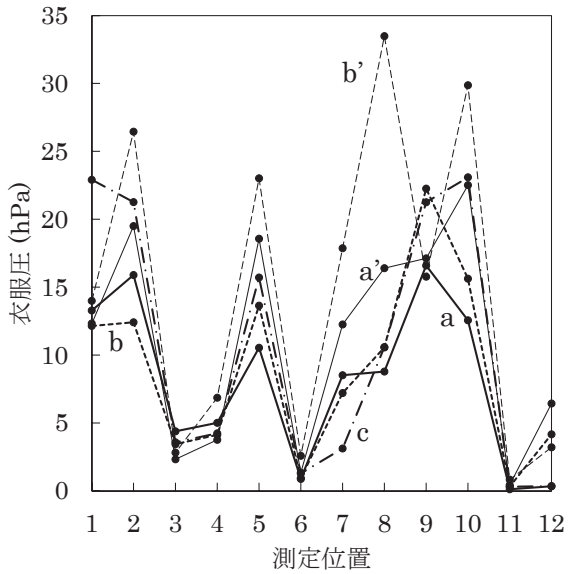

図8　エプロン型着用時の衣服圧
（記号は表1参照）

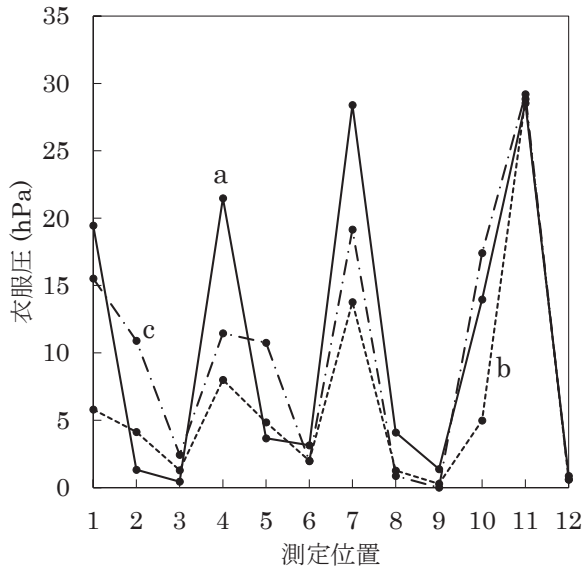

図9　セパレート型着用時の衣服圧
（記号は表1参照）

図 10　セパレート型着用時の姿勢 c における写真

ツやいせ込みなどの立体手法がなされているが、防護衣素材においては平面構造のパターン設計にしていることが撓みや座屈変形を生じさせる原因となっていると考えられる。さらに、このことが衣服圧のばらつきが大きく、局所的に大きな衣服圧が発生する要因となっていることが指摘される。前面に縫目があってはならないとの JIS 規定に則りながらも解決すべき課題であると考えられる。

3.1.3　温熱的特性の観点から

1）透湿度測定

医療従事者の着用アンケートにおいて、防護衣の「臭い（汗）」が指摘されている[13]。前述したように、防護衣の表面は、清掃および消毒が容易にできるように耐水性材料で被覆しなければならないと定められており、遮蔽材を塩化ビニルシートなどの表面材で覆う積層構造となっている。そこで、現在製造されている既存防護衣の遮蔽材（含鉛・無鉛）と表面材、参照として、カレンダー加工や多孔性膜を挟んだ 2 層あるいは 3 層構造の透湿防水布 3 種、一般的衣料布である綿ブロード、ポリエステルタフタを参照試料として透湿度を測定した。測定は、JIS A-2 法（ウォータ法）に準拠し、25℃、50% RH の恒湿恒温槽で行った。この温湿度条件は、手術室の温湿度条件を夏期 23～26℃、50～60% RH、冬期 22～26℃、45～60% としていることを参考に設定したものである[14]。

2）防護衣内の「蒸れ」の実態

透湿度測定の結果、遮蔽材では、含鉛・無鉛を問わずほぼゼロであり、表面材では約 7.5 $g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ であった。綿ブロードやポリエステルタフタではそれぞれ 60.5 $g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ および 58.6 $g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ であり、既存表面材の透湿度はこれらの約 1/10 と少なかった。また、3 種の透湿防水布については、耐水圧の程度により異なったが、27.7～43.8 $g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ であり、これらと比べても、既存防護衣の遮蔽材および表面材の透湿度は極めて少ないことがわかった。人の身体からは、常に水蒸気が放散されており、その量は約 24 $g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ であることが知られている[15]。防護衣内を高湿にさせないためには、透湿性は非常に重要な要因であり、現在の防護衣素材を抜本的に改善する必要があると考えられる。

一方、防護衣内の「蒸れ」を解消しようとする試みとして、背部裏面にメッシュ素材が配されている。また、後身頃下部に 2 個の小型ファンを組込み、強制対流による放湿を目指したものも開発されているようであるが、さらに重くなることなど課題が多く、必ずしも普及していないように思われる。この課題については、素材の改善など抜本的な解決策が望まれる。

3.1.4　防護衣寸法の観点から

1）カタログ等からの調査

市販防護衣サイズの現状を調査するために、国内の主要防護衣製造メーカ 2 社の各種市販カタログから抽出した各防護衣サイズの寸法範囲[14, 15]を表 2 に示す。JIS の標準サイズに対して、表のような防護衣寸法で展開されていた。サイズは、S～LL まで展開され、寸法の融通が利きにくいコートのみ 3L まで展開されていた。

2）市販防護衣寸法の実態

多くの防護衣サイズ表記では、着丈寸法 A を「丈」または「着丈」と表記され、着幅寸法 B を「幅」または「前幅」と表記されていた。市販カタログでは、前丈 A と後丈 A' の区別はされていなかった。また、胴回り寸法 C は「胸囲」あるいは「着用者胸囲（着衣寸法）」と表記されていた。一方、市販カタログには、着用者の適応身長が表記されているものもあった。スカートではウエストまた

表2　各サイズの防護衣の寸法

型		サイズ	幅	丈	胸囲
コート		S	~55	85~90	~90
		M	51~60	90~95	70~100
		L	55~61	95	80~120
		LL	60~65	100~110	90~120
		3L	70	105	125~135
エプロン		S	55~58	88~100	75~90
		M	58~60	90~110	70~100
		L	58~63	100~115	85~110
		LL	63	123	115~130
セパレート	ハーフコート	S	45~48	48~50	~90
		M	50~53	52~55	75~100
		L	50~58	58~63	80~110
		LL	55~63	62~67	90~120
	スカート	サイズ	幅	丈	ウエスト
		S	85	35	50~65
		M	100	45	65~80
		L	115~116	45	75~95
		LL	129~130	50	90~110

（単位：cm）

は適応ウエストと記載されていた。

これらの寸法をJISの標準寸法（図3参照）と比較してみると、JISの標準寸法では、AはA'よりも15 cm長く設定されているが、表記ではコート型のAとA'が区別されておらず、AとA'の間の寸法に設定されていることがわかった。しかし、実寸を測定してみると、前丈は後丈よりやや長く設計されていることがわかったが、全体にJIS寸法より短い傾向がみられた。長くするほど重くなるための現実的な措置とも考えられる。Bに相当する幅や胸囲については、規定寸法よりも小さいものがみられ、C（胴周りの寸法）はBの2倍の寸法より小さく、また胸囲よりも小さいものが多かった。これについては、前開き部分に面テープが配置されており、調整できることを見込んでいるものと推察された。また、Cについては、JISでは、防護コートの胴回り寸法と規定されているが、図3のどこを指すのかが非常にあいまいである。

エプロン型では、AとBのみJISで規定されており、丈については、コート型と同様であった。幅については、コート型のような面テープによる調整がないために、JIS寸法を満たしていた。

一方、セパレート型ではJIS規定はなく、コート型が準用されるものと考えられ、胸囲はコートと同様であった。しかし、幅については、コートの最小寸法からさらに5 cm程度短かった。これについては、ハーフコートが最も太い腰囲部分にかからないためと考えられ、これもできるだけ小さくすることで軽量化を図っているものと推察された。総着丈については、ハーフコートの着丈の最小値とスカート丈を足すとコート丈を満たすものの、ウエストの重なり分が非常に少ないことがわかった。筆者らが防護衣の質量を測定した結果、含鉛タイプでは3686 g·m^{-2}、無鉛タイプでは3442 g·m^{-2}と重く、軽量化の観点からできるだけ小さく設計したいという実態がみられた。

また、日本では防護衣は個人用ではなく共有して使用されることが多いようである。軽量化のために、不要に大きく作製しないことを考えるなら、防護衣を個人対応とし、オーダーメードとすることも今後視野に入れるべき課題であると考えられた。

4. 結　語

本研究では、防護衣の素材・構造、形状、寸法、質量の観点から現状を分析した。また、市販防護衣を用いて、肩周辺にかかる衣服圧を測定するとともに、防護衣素材の透湿度測定、カタログからの寸法調査を行い、防護衣の作業効率に影響を及ぼすと考えられる課題を明らかにした。

防護衣は非常に重く、最も重いものでは約5.6 kgにも及んだ。前面にミシン目による針穴があってはならないとのJIS規定から、防護衣のパターンや仕立てが平面的であるため、身体に沿わず、撓みや座屈変形が観察された。また、肩周辺にかかる衣服圧は測定箇所により大きくばらつき、ハーフコートでは局所的に約35 hPaの高い衣服圧が観察された。

防護衣素材については、透湿度の非常に少ない遮蔽材や表面材が用いられており、「蒸れ」を改善するためには、抜本的な改善が必要であると考えられた。

サイズについては、SからLLまでサイズ展開

がなされていたが、一般的な衣服素材のように伸長変形等の力学的変形を伴わない防護衣素材にあっては、個人身体寸法によるオーダーメードとする必要性があることも示唆された。

参考文献

1) 篠原克明；感染防護用の防護具について、日本繊維製品消費科学会誌、62（1）：6-16（2021）
2) 藤琴美、佐藤真理子、前田理佳、塩原みゆき；防刃性能を有する衣服の温熱的快適性、日本家政学会被服衛生学、38：2-7（2019）
3) 内田幸子、小柴朋子、傳法谷郁乃ほか；感染症防護服着用時の生理・心理反応に関する研究、日本繊維製品消費科学会誌、62（1）：44-53（2021）
4) 竹崎泰子、多屋淑子；衣服重量から見る放射線遮蔽衣の快適性向上に関する検討、日本女子大学大学院紀要、家政学研究科・人間生活学研究科、23：45-54（2017）
5) 鹿島潤、今冨裕樹、陣川雅樹；チェーンソー用防護衣の耐切創性、日本林学会大会発表データベース、日本林学会大会 114（114）：383（2003）
6) 放射線医学総合研究所；医学教育における被ばく医療関係の教育・学習のための参考資料、“2 放射線等の基礎”、14（2012）
7) 舘野之男；放射線治療―倹約と豊穣の 100 年―、放射線医学物理、15（3）：181-209（1995）
8) 高野嘉久、岡崎敬一郎、小野孝二、甲斐倫明；軽量な無鉛防護エプロンの放射線防護効果に関する実験的・理論的検討、日本放射線技術学会雑誌、61（7）：1027-1032（2005）
9) 日本工業規格 JIS T 61331-3、診断用 X 線に対する防護用具―第 3 部：防護衣、防護眼鏡及び患者用防護具（2016）
10) 保科製作所　X 線防護用品総合カタログ 2020 http://www.hoshina.co.jp/2020_catalog/
11) 株式会社マエダ　HAGOROMO 総合カタログ No.2021.08 https://maeda-hagoromo.com/catalogue.html
12) 福永愛、他；当院における診断用 X 線防護衣の保守管理と、遮蔽シートの破損による防護能力の低下について、徳島赤十字病院放射線科部、19：122-127（2014）
13) 全国循環器撮影研究会放射線防護衣アンケート報告（2007）
14) 一般社団法人日本医療福祉設備協会；病院設備設計ガイドライン（空調設備編）HEAS-02-2013（2013）
15) 久野寧；汗の話、光生館（1963）