

医療従事者用 X 線防護衣の開発と  
その性能評価に関する研究

2023 年度

京都女子大学大学院  
家政学研究科 生活環境学専攻

熊田 亜矢子



# 目次

	頁
序論 .....	1
目的と意義 .....	1
本研究に関連する内外の研究 .....	4
本研究の概要 .....	9
本論 .....	14
第1章 医療従事者用 X線防護衣の現状と課題 .....	14
1. 緒言 .....	14
2. 医療用 X線防護衣の現状 .....	16
2-1 素材と構造 .....	16
2-2 形状 .....	18
2-3 寸法 .....	20
2-4 質量 .....	22
3. 現状からみられる課題 .....	25
3-1 身体拘束性の観点から .....	25
3-1-1 衣服圧測定 .....	25
3-1-2 肩周辺部にかかる衣服圧 .....	26
3-1-3 温熱的特性の観点から .....	31
1)透湿度測定 .....	31
2)防護衣内の「蒸れ」の実態 .....	31
3-1-4 防護衣寸法の観点から .....	32
1)カタログ等からの調査 .....	32
2)市販防護衣寸法の実態 .....	34
4. 結語 .....	36

第2章 身体負荷軽減を目的とした医療従事者用X線防護衣材料の開発とその温熱的性質および力学的性質 .....	37
1. 緒言 .....	37
2. 新防護衣の遮蔽材の開発と表面の選定 .....	39
3. 新遮蔽材および表面材の温熱的性質の測定 .....	42
3-1 透湿度測定 .....	42
3-2 熱物性の測定 .....	44
3-3 不感蒸散シミュレーション実験 .....	44
4. 力学的特性の測定 .....	46
4-1 圧縮特性の測定 .....	46
4-2 ドレープ係数の測定 .....	46
4-3 応力緩和特性の測定 .....	46
5. 結果および考察 .....	47
5-1 温熱的観点からの新防護衣材料の性質 .....	47
(1)透湿度 .....	47
(2)熱伝導率,熱コンダクタンスおよび $q_{max}$ .....	49
(3)不感蒸散シミュレーション時の衣服内温湿度 .....	51
5-2 可憐性および身体適合性の観点からの新防護衣材料の性質 .....	54
(1)圧縮特性 .....	54
(2)ドレープ係数 .....	56
(3)応力緩和特性 .....	58
6. 結語 .....	60

第3章 透湿機能をもつ医療従事者用新X線防護衣の温熱的着用性能 .....	61
1. 緒言 .....	61
2. 実験方法 .....	63
2-1 着用実験用防護衣素材の構造と透湿度 .....	63
2-2 着用実験 .....	64
(1)被験者 .....	64
(2)プロトコル .....	65
(3)測定項目 .....	67
2-3 統計処理 .....	67
3. 結果 .....	68
3-1 以内温湿度 .....	68
3-2 皮膚温 .....	71
3-3 発汗量 .....	72
3-4 耳内温 .....	73
3-5 心拍数 .....	75
3-6 主観評価 .....	77
4. 考察 .....	78
4-1 新防護衣が人体生理量に及ぼす影響 .....	78
4-2 各測定項目および主観評価間の相関関係 .....	79
5. 結語 .....	82
結論 .....	83
今後の課題 .....	86
本論文に関する研究発表論文 .....	87
文献 .....	88
謝辞 .....	93

# 序論

## 目的と意義

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、有害化学物質の暴露や接触から身を守る化学防護衣、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などがある<sup>1)</sup>。また、放射線被曝から身体を守る放射線防護衣があり、放射線の中でもγ線やX線は透過力が強く、空気中を数10 m から数100 m まで透過し、人体を容易に貫通して人体の重要な臓器や正常な細胞にも害を及ぼす<sup>2)</sup>。

医療現場では、X線検査やカテーテル治療など、放射線発生装置を利用する診断・治療が数多く行われている。放射線検査は、身体各組織のX線の通りやすさの違いを利用し、骨や臓器を画像として映し出すことができ、がんの診断や心筋梗塞のためのカテーテル手術に有用である。血管造影による診断や患者への負担が少ないカテーテル治療（手術）においては、多方向からのX線照射が行われ、また検査や治療に要する時間がかなり長時間に及ぶことから、放射線利用による診断や治療には、医療従事者の散乱X線被曝による健康被害が問題視されている。そのため、医療従事者は、X線検査やカテーテル治療において、放射線から防護するためのX線防護具を装着すること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が、本研究では医療従事者用X線防護衣（以下、防護衣とする）を研究対象とした。

防護衣は、X線遮蔽材（以降、遮蔽材とする）とその表裏両面を表面材で挟んだ3層の積層構造で構成されている。遮蔽材は、1950年代の開発当初より、X線の減弱割合（線減弱係数）の大きい鉛を混入したゴム製（含鉛タイプ）が主流であった。含鉛タイプは安価であるが、鉛を使用しているため硬く高質量であり、着用後の大きな疲労感が報告されている。そのため、現在では、軽量化を目的として、鉛より原子番号が小さい多元素の金属を塩化ビニルなどの合成樹脂に混入した無鉛タイプが開発され、日本の製造の70%以上を占めている。無鉛タイプは、含鉛タイプより約30%軽量化されたとの報告がなされている<sup>3)</sup>。

一方、防護衣の表面材については、外部からの汚れに対して、表面を洗浄・消毒できるように<sup>4)</sup>耐水性のある主にポリ塩化ビニルまたはポリウレタン樹脂等のシートで構成されている。含鉛タイプおよび無鉛タイプの遮蔽材とともに透湿性がほとんどないのが現状である。

また、防護衣の形態については、防護衣の前面に縫い目や部品を留め付ける孔などを設けることで、遮蔽性能が低下することが懸念されるため、JIS規定においては平面構成となっている。ダーツやいせ込みなどの立体手法が行えないため、当然のことながら三次元構造をもつ身体の形状には沿わない。特に、動作時や作業時には座屈変形を生じやすく、たわみが破れやひび割れの原因となっているようである<sup>5)</sup>。

2017年に全国循環器撮影研究会が医療従事者を対象とした『放射

線防護衣アンケート報告』によると，無鉛タイプの防護衣の使用によっても，「臭い（汗）」「汚れ」「重い」などの不快感が報告されている<sup>6)</sup>．防護衣の温熱的着用性能や着心地の観点からは，未だ高質量であることや，透湿性がないことから，身体から放出される不感蒸散や発汗による水蒸気を透過できないため，潜熱による放射が抑制され，体温調節の面からも身体負荷が大きいであろうことが容易に想像されるなど，多くの課題を抱えているのが現状である．

以上のような状況から，近年，防護衣内部の快適性の向上を目指して，防護衣背面にメッシュ生地を取り付けたものや，背部に小型ファンを取り付けた防護衣などが開発されている．しかしながら，十分な着心地の向上には至っていない．防護衣の快適性は，医療従事者の作業効率を向上させるためにも，早急な改善が望まれる．

本研究は，現在市販されている防護衣の現状を多面的観点から分析し，開発された新規素材の力学的性能および温熱的性能の観点から従来品と比較検討した．さらに着用実験により，人体生理・心理に及ぼす影響を検討した．このような医療用具と衣服科学との融合的・学際的研究は，今後の防護衣改良における具体的な設計指針を示すものであり，非常に意義があるものと考えられる．

## 本研究に関する内外の研究

一般的に、防護衣に要求される重要な役割として、有害な化学物質や放射線（X線）などから身体を守る防護性能、制御があげられ、気密性が高く、着心地の観点から様々な問題点がある。

本研究対象である医療用X線防護衣（防護衣）については、X線を遮るために相当量の鉛が必要となり、鉛当量が多いほど防護効果は高くなるが、質量は増加する。防護衣の重さと防護性能における研究について、井ノ上ら<sup>7)</sup>の防護衣の鉛当量試験における最適線質の検討に関する研究などがあり、防護衣の軽量化に関する研究が数多くみられる。

防護衣の軽量化に関する研究では、1950年代にレントゲンの普及とともに、国内初のX線防護衣「JIS前掛」が開発された。1980年代には、遮へい材の表裏を2枚の表面材で挟み、積層構造にする製法が開発された。1995年には、新素材である無鉛タイプの遮へい材を導入し、軽量化がすすめられてきた。1997年時点においては、従来からの材料である鉛のみでは、防護衣の軽量化は難しかったため、散乱X線から身体を防護するための放射線防護具（防護板）を開発<sup>8)</sup>することで防護性能を補っていた。同年、1995年に開発された多元素複合材料を用いた防護衣を、約1年半にわたり臨床使用に近似した方法で使用した結果、神崎ら（1997年）<sup>3)</sup>は従来 of 防護性能を保持しながら約30%の質量を軽減でき、着用感と仕事効率が大幅に向上したと報告している。栗井ら（1998年）<sup>9)</sup>の学術調査研究報告においても、医療従事者の被曝問題を解決するためには、放射線防護性能を保持し、長時間の着用における疲労を軽減するために軽量化が望まれているとし、鉛以外の材質の検討が必要であると述べている。

2005年に、越田ら<sup>10)</sup>は、術者の立つ位置における散乱X線の分布および防護衣のX線透過率を解析し、軽量化を実現するためには防護性能を不均一にした防護衣が必要であるとして研究を行っている。高野ら（2005年）<sup>11)</sup>の放射線防護効果に関する研究では、含鉛タイプのエプロンと同等の防護効果を維持しながら、無鉛タイプのエプロンが身体負荷を軽減し、仕事効率の向上に大きな影響を及ぼすと述べている。竹崎ら（2017年）<sup>12)</sup>も、衣服重量の増加は遮蔽効果を高めるが、長時間の着用は衣内湿度と心拍数、肩部の圧迫感が増加し、快適性が低下するために、衣服重量の軽量化が望ましいと述べている。

防護衣に使用されている遮蔽材は、防護性能が高く安全を確保するために、高質量の鉛を含んだ重く堅いものが多い。徳島赤十字病院の放射線科部<sup>5)</sup>では、自重によるしわや堅さによるたわみを生じ、これらが破損原因となり防護性能の低下に繋がると報告されている。放射線防護分科会の防護衣の破損による防護能力の低下が原因となった被爆事故に関する報告<sup>13)</sup>を基に、防護衣の管理指針<sup>14)</sup>が示され、防護衣に付着した汗などの汚れは、放置すると劣化する原因となるかび等が発生し、防護性能の低下に繋がるため清拭するように述べている。

近年、江崎ら（2021年）<sup>15)</sup>は、防護衣の破損部分の検出と破損面積の測定を自動化し、医療従事者の被曝低減と管理時間の短縮を試みている。また、磯邊ら（2019年）<sup>16)</sup>は、アプリケーションを用いた管理体制により、点検記録を効率化し品質管理の見える化を実現している。

防護衣の着用性能に関して、医療従事者対象のアンケート調査結

果<sup>6)</sup>によると，遮蔽性能だけでなく着心地に関する「臭い（汗）」「汚れ」「重量」に対する不満が多く報告されている．野戸ら（2013年）<sup>17)</sup>の研究では，放射線物質による汚染状況下での傷病者の受け入れを想定し，防護衣を着用したシミュレーションにおいて，防護衣着用時の快適性や活動性の評価は低く，「暑い」「蒸す」などの不快感があり，支障をきたしていると報告している．これらの着用性能を高めるためには，適切なアンダーウェアを着用することにより衣内気候を調整し，適正なサイズの防護衣を選択することにより活動を妨げないと提案している．しかし，この提案は防護衣の改善に関わるものではなく，防護衣素材の抜本的な改良には至ってはいない．2004年に鈴木ら<sup>18)</sup>は，防護性能を保持した，鉛以外の高原子番号元素を使用して高密度化した防護シートを作成し，防護衣の前面内側にメッシュ生地を使用して軽量化した，最軽量X線防護衣「NEW-EXシリーズ」を開発している．現在では，それらを支援する防護衣として，空調システムを内蔵しているもの<sup>19)</sup>が販売（2008年）されている．

一方，X線防護衣以外の防護衣に焦点を移してみると，快適性の改善についての研究が進められている．小柴ら（2004年）<sup>20)</sup>の着用実験では，素材特性の異なる使い捨て型化学防護衣（つなぎ式感染防護衣）3種を用いて，衣内温湿度や心拍数，発汗量，官能評価，素材物性値などを測定し快適性を評価しており，防護衣の形状や素材の薄さが，作業時の快適性に大きく影響していると述べている．上村ら（2012年）<sup>21)</sup>はチェーンソー用防護衣について，厚いために通気性の確保が難しく，換気を促す機能を備えたデザインが必要であると述べ，非作業時において立体編物素材による通気性の改善の効果

を検証している。また、大釜ら（2019年）<sup>22)</sup>のつなぎ式感染防護衣の着用実験においても、防護衣内の温度の上昇による着用の不快感から、注意力や作業効率が低下する可能性について述べ、精神的疲労が大きいことを報告している。暑熱対策化学防護衣において、時澤ら（2019年）<sup>23)</sup>は、ベストにチューブを縫い付け、その中の水を循環させたベスト型水循環スーツの併用による遮熱負担の軽減効果について検討している。林ら（2022年）<sup>24)</sup>も、防護衣素材は、衣内水蒸気量（蒸れ）を抑えるために、通気性や透湿性に優れていることが重要であると述べ、商品開発を進めている。また、栃原ら（2000年）<sup>25)</sup>は、外部からの有害物質の侵入を防ぐために着用する密閉型防護服着用時において、汗で衣内気候は高温多湿状態になり、生理的負荷が高いと指摘している。そのため、防護衣の内側に空気を送る冷房服の開発や、防熱ベストのポケットにドライアイスを入れるなど、直接身体の冷却を行う方法について述べている。しかしながら、いずれの方法も医療用X線防護に活用できる方法ではない。

さらに、身体負荷を軽減するためには、身体に沿った作業のしやすい防護衣の形状や衣服型の設計を提案することも重要であろう。現在の市販防護衣は、JISによる規定<sup>4)</sup>により、縫製による針孔からの放射線による被曝を防ぐために、衣服縫製の基本的な三次元形状を形成するためのダーツやタックなどを用いることができないため、平面的な構成で作られている。

また、医療従事者と患者の心理的な疲労や手術への不安感を解消するための手法に関する研究においては、西沢ら<sup>26)</sup>が、視覚的にデザイン性の高い防護衣であることが必要であると述べている。海外では無地だけでなく、チェック柄や迷彩柄、花柄などのプリント柄

と色を組み合わせる選択することができ、注文後に製造・販売されている<sup>27-29)</sup>。しかしながら、日本の医療現場では、防護衣は個人所有よりも院内において共有で使用していることが多い。異なる色については、サイズや購入年度を区別するためだけに用いられており、視覚的に認識する指標としてのみに活用されている。日本において、柄物の流通には至っていないのが現状である。

以上、現在の防護衣は様々な観点からの課題を抱えている。防護衣着用時における不快感の解消には、温熱的性能や力学的性能の観点からの改善が重要であると考えられる。市販防護衣の質量、形状、素材、サイズ、温熱的性質である透湿度や熱伝導率、力学的性能である衣服圧や圧縮特性、ドレープ係数などの測定による温熱的快適性が着心地に及ぼす影響についての防護衣の改良に関する研究は少なく、特に衣服研究の観点からの改良についての研究には至っていない。しかしながら、防護衣に関する研究において、身体負荷軽減による温熱的快適性の改善は、医療従事者および患者の健康を保持し、作業効率を向上するために非常に意義のあるものと考えられる。

## 本研究の概要

本研究では，着用性能の向上による温熱的快適性の改善を目的とし，はじめに防護衣の現状を分析し，着心地に影響を及ぼすと考えられる課題を明らかにしている．また，透湿機能をもつ新規防護衣を開発し，その力学的特性および温熱的特性を測定し，温熱的観点から人体生理量に及ぼす影響を明らかにしている．

本論文は，序論，本論，結論から構成されている．

序論では，本研究の目的と意義，関連する国内外の研究および本研究の概要を述べている．

本論は 3 章で構成されている．

第 1 章では，主要メーカーのカatalogを用いて，市販防護衣の素材・構造，形状，寸法，質量の観点から，詳細に現状を分析している．また，市販防護衣（コート型，ハーフコート型，エプロン型）を用いて，肩周辺にかかる衣服圧を測定するとともに，透湿度測定を行い，着心地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ている．

防護衣は非常に重く，前面にはミシン目による針穴があってはならないと JIS に規定されていること，現状の素材にあっては，一般的な衣服設計のような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，防護衣のパターンは平面構成であり，三次元構造をもつ身体に沿わず，着用時に撓みや座屈変形が生じ，肩周辺にかかる衣服圧のばらつきが大きく，首付け根付近への局所圧が高いことを指摘している．

防護衣素材については，透湿度が「蒸れ」に影響を及ぼすと考え，高い透湿度をもつ素材へ変更する必要があることを提起している．

サイズについては、サイズ展開を調査・整理した後、既存の防護衣素材は、一般的な衣服素材のように伸長変形やせん断変形等を伴わないため、身体寸法に適した防護衣サイズについても再検討する必要があることを指摘している。

第2章では、医療従事者用 X 線防護衣の温熱的快適性および可撓性・身体適合性の観点から、着用性能を改善するための新規防護衣材料の提案と、その温熱的性質および力学的性質を明らかにすることを目的としている。

新規防護衣では、合成繊維からなる織布を基材として鉛メッキ処理にて開発された X 線遮蔽材を用いた。X 線遮蔽性能を JIS に準じて測定した結果、鉛当量が 0.25 mmPb 以上であることを確認した。なお、鉛メッキを保護することを目的に接着布で覆ったものを新規遮蔽材とした。また、遮蔽材の表裏を覆う表面材については、血液や薬品の洗浄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 JIS に定められていることから、前述の新規遮蔽材の特徴を阻害しないように、適切な性能をもつ透湿防水布の選定について検討、着用性能の向上を目指した新規防護衣を提案している。

新規遮蔽材および表面材の透湿度測定を行い、熱物性測定装置サーモラボを用いて熱流束最大値および熱伝導率等の熱物性を測定した。また、防護衣素材の透湿性が放熱に及ぼす影響を明らかにするために、前述した熱物性測定装置を用いて不感蒸散シミュレーション実験を行っている。

また、着用時の防護衣内の温湿度を推測するために、模擬皮膚面（熱板）と防護衣との間の温度および湿度（以降、衣内温湿度とす

る) の変化挙動を測定している。可撓性や身体適合性に関わる力学的特性については、圧縮特性、ドレープ係数、応力緩和特性の測定を行っている。

新規遮蔽材の質量については、既存の無鉛タイプとほぼ同程度であったが、含鉛タイプに比べてやや軽量であることを明らかにしている。また、新規遮蔽材および表面材の透湿度は非常に高く、不感蒸散シミュレーション実験においては衣内温湿度が既存のものよりも有意に低くなることを明らかにしている。圧縮特性、ドレープ性の測定から、新規遮蔽材および表面材の柔らかさと可撓性の向上に及ぼす影響について検証している。さらに、応力緩和特性の測定から、新規遮蔽材と表面材の粘弾性的性質について明らかにし、着用時や保管時の破れや永久ひずみが少ないであろうことを示唆している。

第 3 章では、透湿機能をもつ新規防護衣が人体生理および着用感に及ぼす影響について明らかにすることを目的として、健康的な 20 歳代女性 13 人を被験者とし、歩行を含む着用実験を行っている。測定項目は、衣内温湿度のほか、人体生理量として皮膚温、発汗量、耳内温、心電図等の測定および着用感評価を行い、既存防護衣と比較検討している。

新規防護衣着用時の衣内温度および皮膚温は、既存防護衣よりも有意に上昇が抑制されることがわかった。その要因として、前章において両防護衣素材の熱物性値がほぼ同程度であったことが確認されていることから、潜熱放散量の増大によると考えた。また、新規防護衣着用時における発汗量や心拍数においても、既存防護衣よりも有意に上昇が抑制され、耳内温はほぼ一定であり、作業中の恒体温

を維持できることが示唆された。主観評価においても、新規防護衣は既存防護衣よりも涼しく蒸れないと評価されるなど、生理的・心理的負荷を有意に低減できることがわかり、これらの関係性については、測定項目間の相関分析により明らかにしている。

結論では、論文全体を総括し、新規防護衣素材は身体に沿う粘弾性的性質と透湿性の機能を付与した表面材が、防護衣の温熱的快適性と着用性能の向上に繋がり効果的であると結論づけている。

また、防護衣の腰ベルトを締めた時の衣内温湿度や各生理項目への影響について測定し、腰ベルト利用による影響についても検討している。主観評価では、人体生理量と生理的・心理的負荷との関係について考察している。

なお、各章の関連を図 1 に示している。

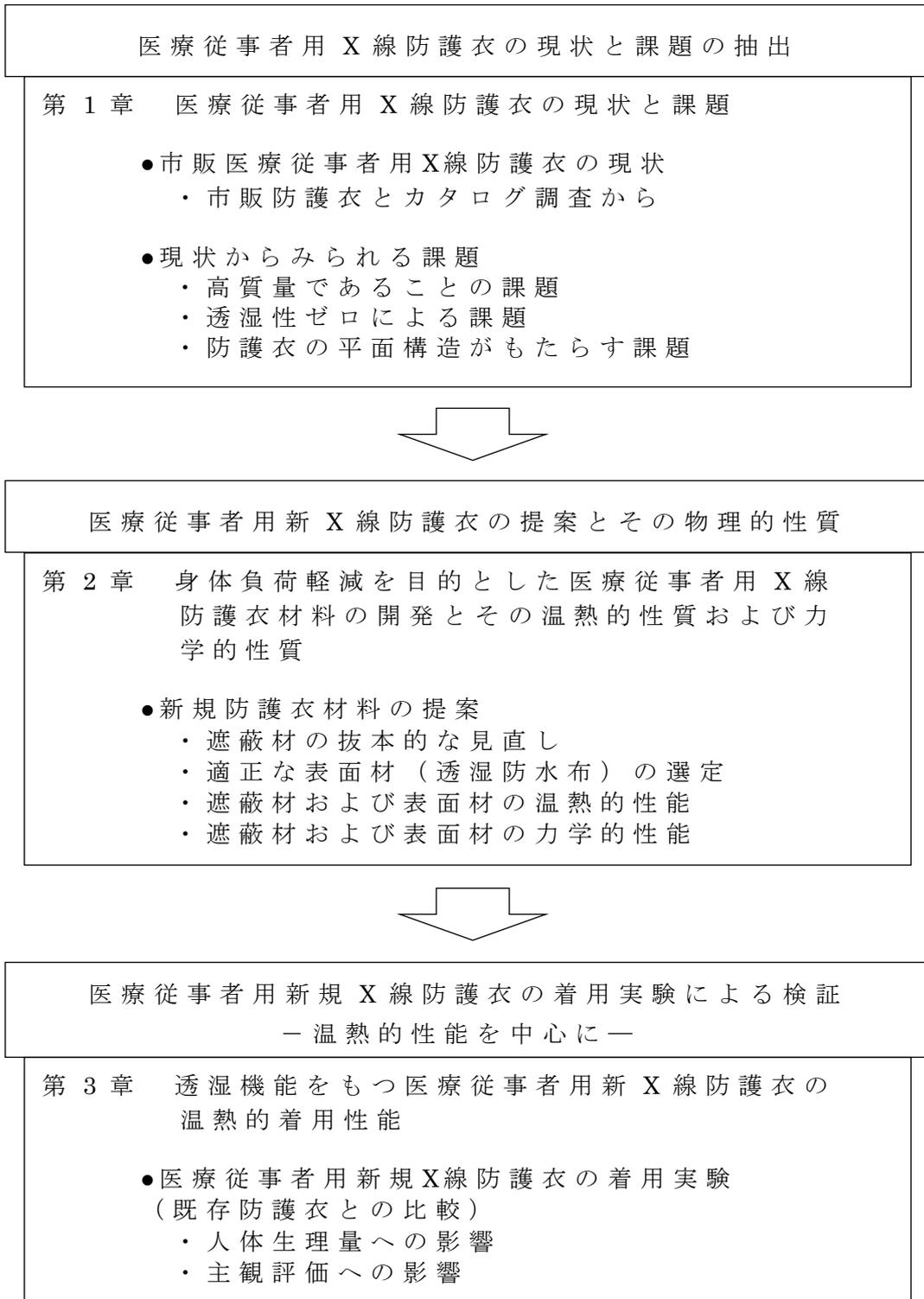


図 1 本論文の構成

# 本論

## 第 1 章 医療従事者用 X 線防護衣の現状と課題

### 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<sup>30)</sup>。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イルス感染症（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<sup>31)</sup>、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<sup>32)</sup>。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、重いことによる人体負荷が大きいことを指摘しているが<sup>12)</sup>、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<sup>33)</sup>、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。

第1章では、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  $\gamma$  線や X 線は、 $\alpha$  波  $\beta$  波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、人体を容易に貫通して人体の重要な臓器や正常な細胞に害を及ぼす<sup>34)</sup>。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<sup>35)</sup>。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 1-1）．

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 Y 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<sup>11)</sup>．

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<sup>4)</sup>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。

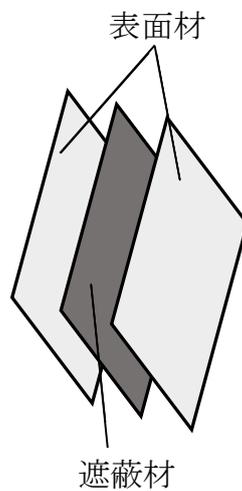


図 1-1 防護衣の積層構造

## 2.2 形状

現在市販されている防護衣の形状は，図 1-2 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．

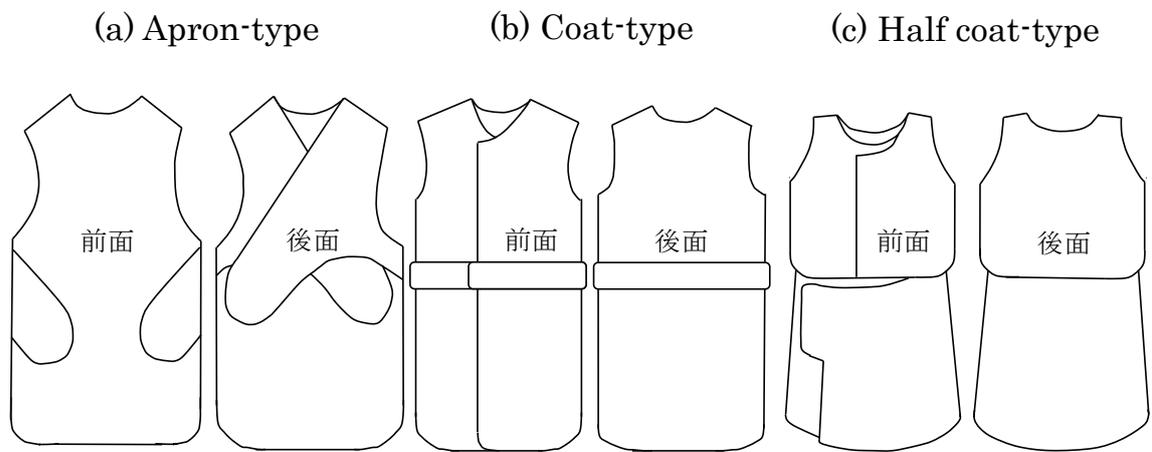


図 1-2 市販防護衣の形状

## 2.3 寸法

防護衣の標準寸法は、図1-3に示すように、JIS<sup>4)</sup>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

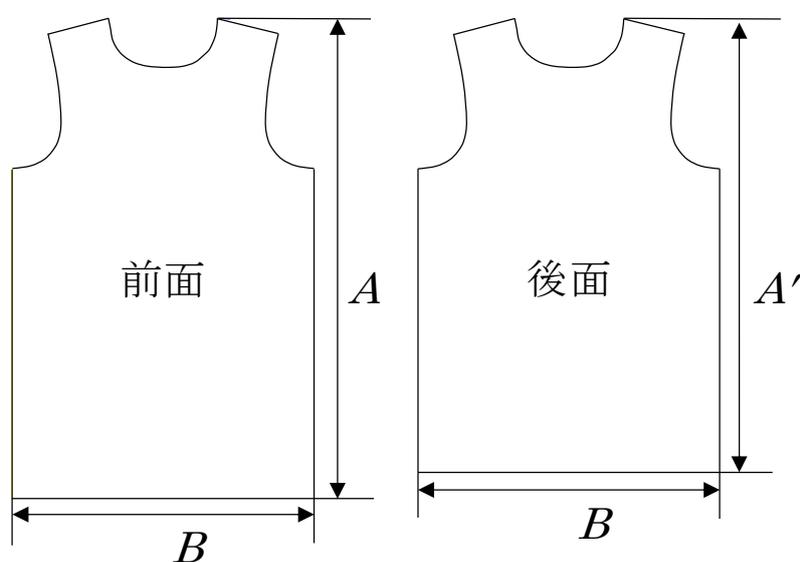


図 1-3 防護エプロン・防護コートの形状と防護衣の標準サイズおよび寸法 (JIS T61331-3 より引用) 4)

- $A$  : 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ー2社<sup>36),37)</sup>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1-4，図1-5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1-6に示す。セパレ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。

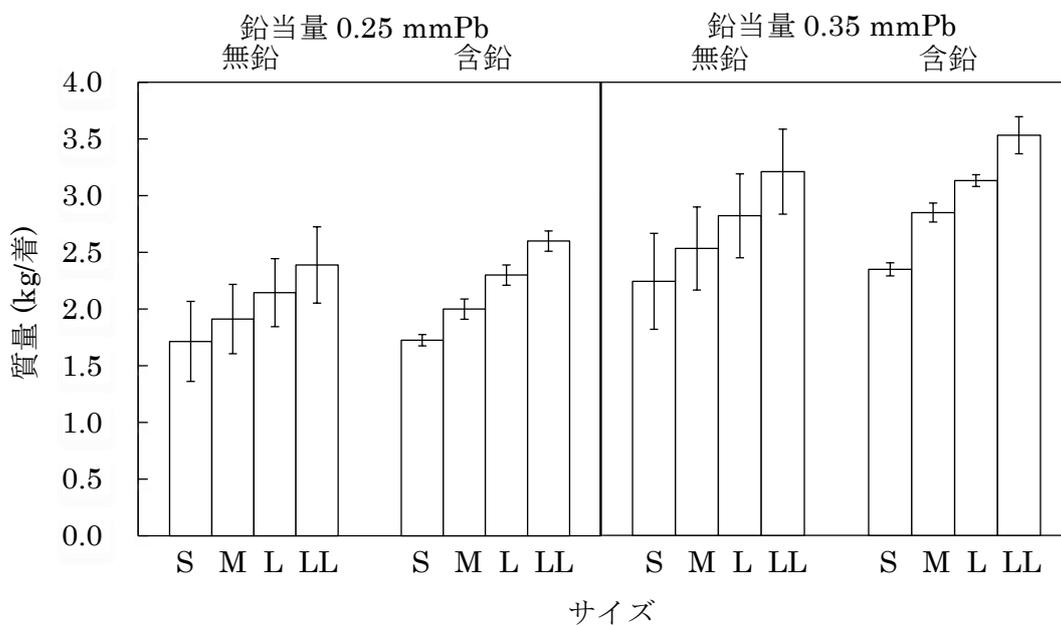


図 1-4 エプロン型 X 線防護衣のサイズ別の平均質量

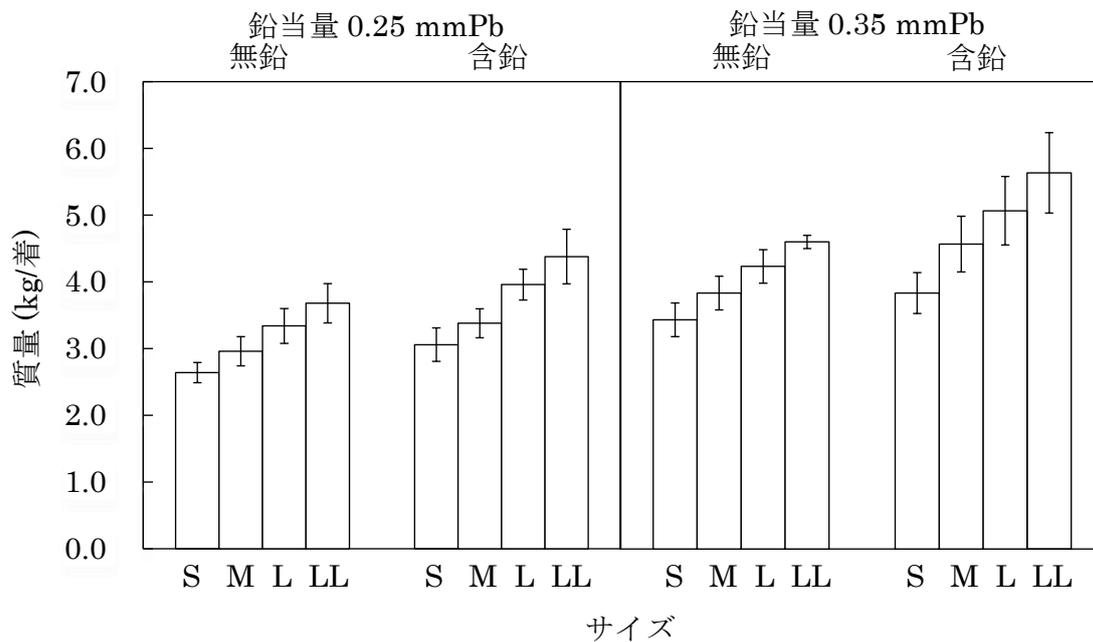


図 1-5 コート型 X 線防護衣のサイズ別の平均質量

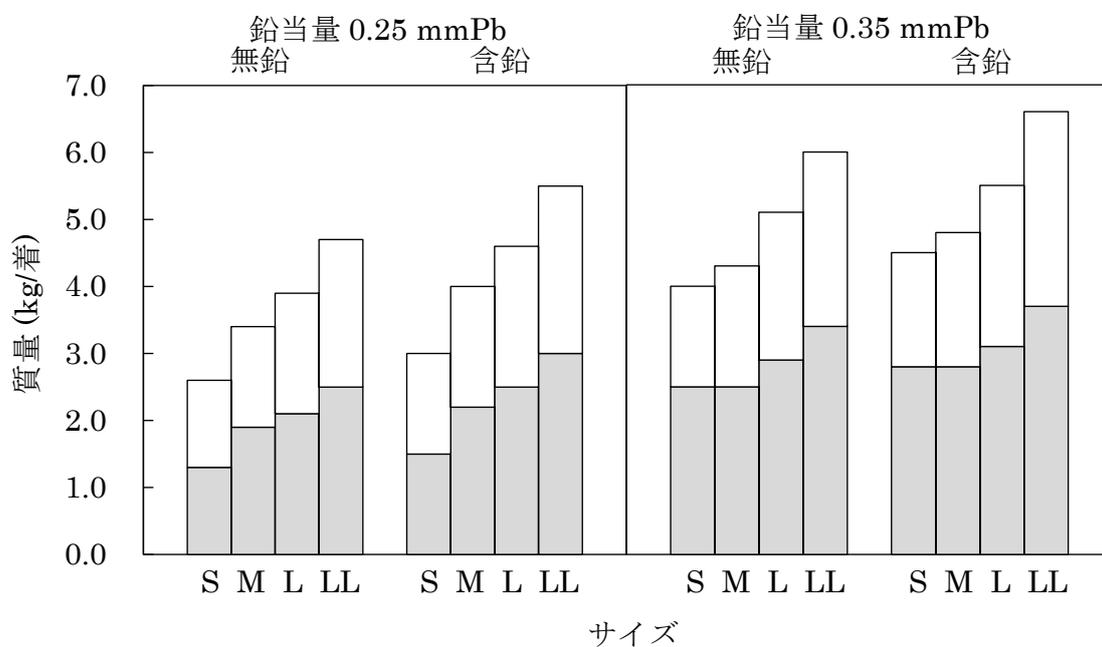


図 1-6 セパレート型 X 線防護衣のサイズ別の平均質量 (□: ハーフコート, ■: 巻スカート)

### 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φ20 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1-1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。

### 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 1-8 に示す。

はじめに姿勢 a, b, c についてみると、測定部位 1, 2, 5, 8, 9, 10 で 10~25 hPa の衣服圧が検出され、3, 4, 6, 11 ではほぼゼロであるなど、測定部位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 1-9 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。測定部位 1, 4, 7, 11 で衣服圧

が高く，特に，測定部位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1-10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<sup>5)</sup>．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

考えられる。

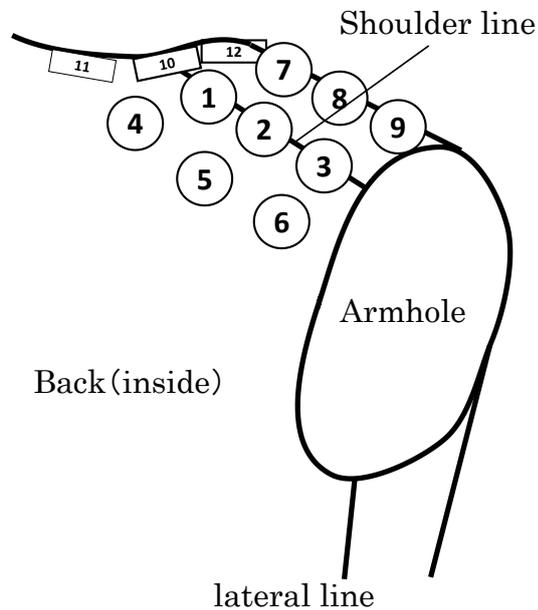


図 1-7 衣服圧測定位置  
 [エアパック式接触圧センサ貼付位置 ○: 丸型 □: T型]

表 1-1 衣服圧測定時（エプロン型）の姿勢

ストラップの締め具合	ちようどよい	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 体幹を約20°前傾して上肢を約45° c 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

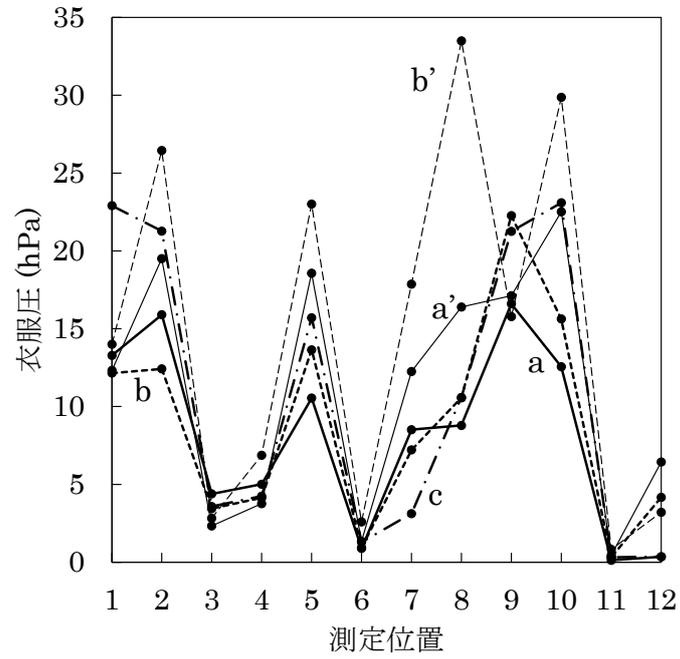


図 1-8 エプロン型着用時の衣服圧（記号は表 1-1 参照）

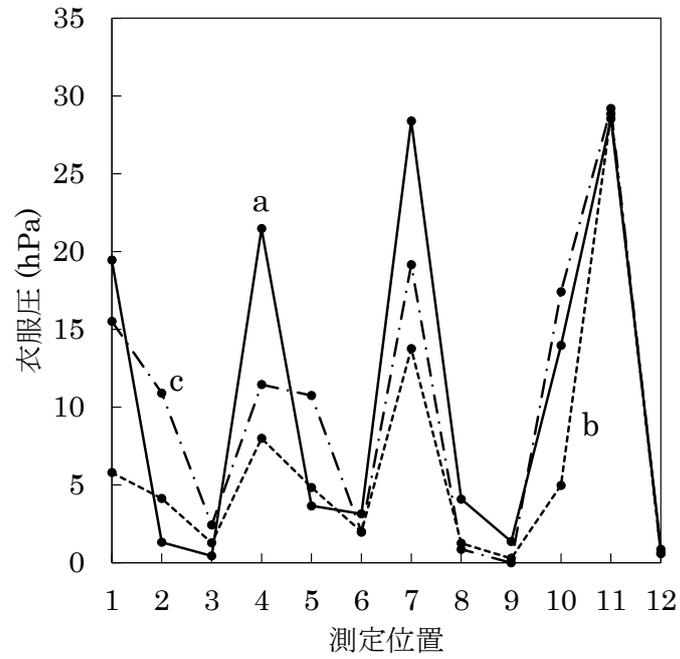


図 1-9 セパレート型着用時の衣服圧（記号は表 1 参照）

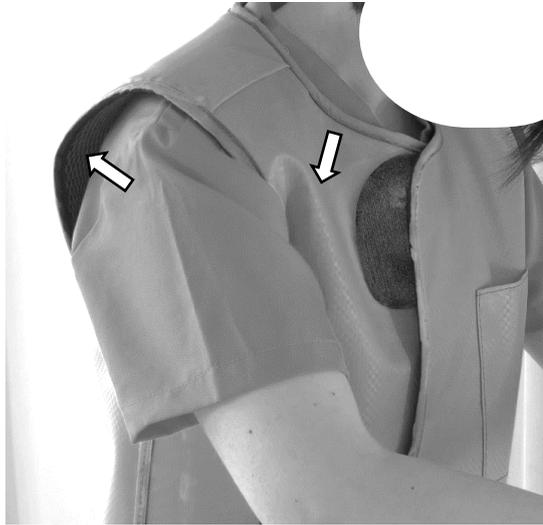


図 1-10 セパレート型着用時の姿勢 c における写真

### 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<sup>6)</sup>。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 °C、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 °C、50~60%RH、冬期22~26 °C、45~60%としていることを参考に設定したものである<sup>38)</sup>。

#### (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 $7.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 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 $60.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ および $58.6 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 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、 $27.7 \sim 43.8 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 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  $24 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  であることが知られている<sup>39)</sup>．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ー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<sup>36),37)</sup>を表1-2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．

表 1-2 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)

## (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 1-3 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 1-3 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 $3686 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ ，無鉛タイプでは $3442 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 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，オーダーメイ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

第1章では、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イドとする必要性があることも示唆された。

## 第 2 章 身体負荷軽減を目的とした医療従事者用 X 線防護衣材料の開発とその温熱的性質および力学的性質

### 1. 緒 言

19 世紀末以降，医学診断や治療における放射線利用の進展がめざましい．近年，放射線発生装置等を利用する診断や治療が数多く行われている<sup>35)</sup>．放射線検査は非侵襲で高度な診断が可能であり，がんの治療にも有用である．

しかし，放射線の中でも  $\gamma$  線や X 線は，空气中を数 10 m から数 100 m まで透過し，人体を容易に貫通して人体の重要な臓器や正常な細胞にも害を及ぼす<sup>34)</sup>．血管造影による診断や患者への負担が少ないカテーテル治療（手術）においては，多方向からの X 線照射が行われ，また検査や治療に要する時間がかかり長時間に及ぶことから<sup>9)</sup>，放射線利用による診断や治療には，医療従事者の散乱 X 線被爆による健康被害が問題視される．

医療従事者は X 線検査や治療を行う際の被爆を低減・防止するために，X 線防護衣を着用する．X 線防護衣は，1950 年代に開発されて以来，鉛入りのゴム製（含鉛タイプ）が主流であったが，例えばコートタイプでは 4~5 kg と非常に重く，身体的負荷が大きいという理由から，原子番号 47 以上で，鉛より原子番号の小さい放射線遮蔽能力を有する重金属を塩化ビニル樹脂等の合成樹脂に混和してシート化した無鉛タイプが開発され，軽量化に向けた取り組みが行

われている。

一方、X線防護衣に対する医療従事者の着用感アンケートでは、「臭い（汗）」「汚れ」「重い」などの不満が報告されている<sup>6)</sup>。

人体からは常に水分が放散（不感蒸散）されており、これらの水分（水蒸気）が人体－防護衣間から外部に透湿しなければ、結露が生じて、防護衣裏面に液体水が付着する。また、蒸発放熱が減少することによって体温が上昇し、発汗へと繋がるのが懸念される。さらに、防護衣への汗の付着により細菌が増殖し臭いの発生原因となっていることが、前述のアンケート結果<sup>6)</sup>からも容易に想像される。「汗」や「蒸れ」に対しては、背面にハニカムメッシュを配したり、防護衣背面に小型ファンを取り付けたりするなどの試みがみられるものの、人体からの水蒸気を円滑に放出させ、抜本的に「蒸れ」を解消させることを目標とした防護衣はみられないのが現状である。

一方、含鉛タイプ・無鉛タイプともに防護衣が人体の動きに沿わず、座屈変形を生じやすい。そのため、破れやひび割れの原因の一つとなり、X線遮蔽効果の低減が課題となっている<sup>5)</sup>。

本章においては、医療従事者用X線防護衣（以後、防護衣とする）の温熱的快適性および可撓性・身体適合性の観点から、着用性能を改善するために新防護衣材料を開発し、その温熱的性質および力学的性質を明らかにすることを目的とした。

防護衣に関する先行研究では、感染症防護<sup>32)</sup>などの密閉性の高いもので「蒸れ」や「暑さ」による生理的負荷が高いと指摘する研究<sup>25),40)</sup>が多くみられるものの、X線防護衣については竹崎らの研究

12)以外にはみられないのが現状である。

## 2. 新防護衣の遮蔽材の開発と表面材の選定

本章で提案する新防護衣の最も大きな特徴は、ポリエステルからなる織布を X 線遮蔽材の基布として用いた点である。はじめに、金属パラジウムを吸着させ触媒とした。触媒と置換反応して銅を析出させ表面を導体化した。その後、鉛を電氣的に付着させた。鉛膜の厚さは、通電時間および通電量により最適な条件で行うことができる<sup>41),42)</sup>。

X 線遮蔽性能を表す鉛当量の測定条件を、X 線管電圧 110 kV, 12.5 mA, 付加ろ過板 2.5 mmAl, X 線管焦点-試料間距離 1500 mm, 空気衝突カーマ, 散乱放射線を含む逆ブロードビームとし, 1m<sup>2</sup> 当たり 13 か所の測定を JIS T 61331-1: 2016<sup>43)</sup> に準じて行った。その結果, 鉛当量が 0.25 mmPb であることが確認された。電子顕微鏡による断面写真を図 2-1 に示す。鉛の粒子が基布を覆い尽くしていることが確認される。

防護衣用遮蔽材については、軽量化を目指した錫メッキ膜による試みもみられるが<sup>44)</sup>, 有効メッキ厚の材料の大きさが約 17 cm×16 cm と小さく, 防護衣を作製するには多くの枚数を接合しなければならない点に問題がみられる。これに対して, 本研究における鉛メッキ膜は, 布幅約 100 cm 可能であり, 防護衣の作製に問題はない。以降, 鉛メッキを保護することを目的に接着布で覆ったものを最終的な遮蔽材として用い, これを新遮蔽材とする。

遮蔽材の表裏を覆う表面材については、血液や薬品の洗浄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 JIS T 61331-3: 2016<sup>4)</sup>に定められている。一般的に表面のコーティング材あるいは積層シートとしてポリウレタン樹脂あるいは塩化ビニル樹脂などが用いられていることが多い。本章においては、新遮蔽材の基布として織布を使用していることから透湿性が期待されるため、表面材が透湿性を阻害しないように透湿防水布（以降、これを新表面材とする）を用いることにした。

既存防護衣の遮蔽材（含鉛タイプ・無鉛タイプ）および表面材、新防護衣の遮蔽材および表面材の質量および厚さを表 2-1 に示す。測定はすべて 20 °C 65%RH の恒湿恒温室で行った。なお、厚さ測定は KES-G5 ハンディ圧縮試験機（カトーテック(株)製）を用い、0.59 kPa 下での値とした。含鉛タイプは無鉛タイプよりも約 12%軽量であり、新遮蔽材の質量は無鉛タイプとほぼ同様であった。厚さについては、鉛メッキ膜を保護する目的で接着した布を含むため、新遮蔽材が既存品よりも厚くなった。しかし、表面材については既存のものより薄かった。

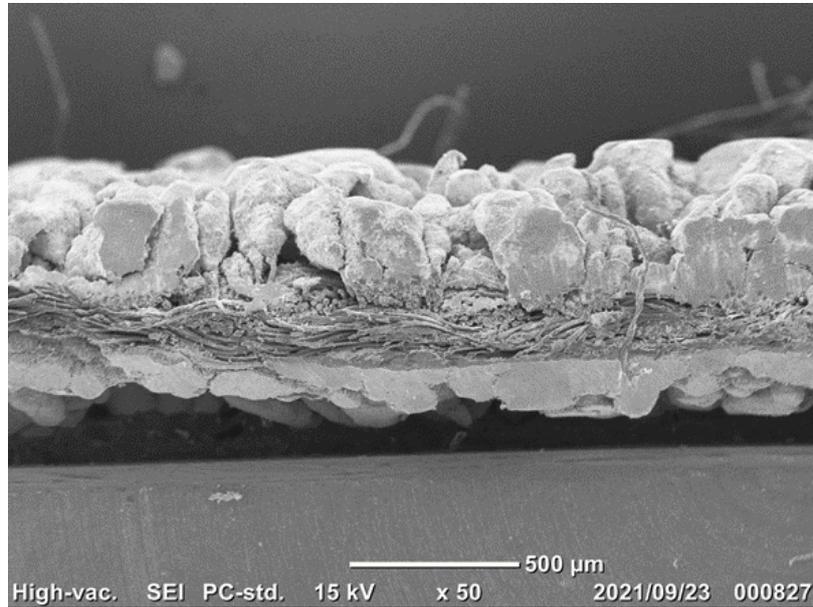


Fig. 2-1 A scanning electron microscopy image of the newly developed shielding material.

### 3. 新遮蔽材および表面材の温熱的性質の測定

#### 3-1 透湿度測定

透湿度測定は、JIS L 1099 A-2 法（ウォータ法）に準拠して行い、温湿度条件においては、40 °C、50%RH ではなく、25 °C、50%RH に設定した恒温恒湿室内で行った。これは、「病院設備設計ガイドライン（空調設備編）HEAS-02-2013」（日本医療福祉設備協会）によると<sup>38)</sup>、手術室の温湿度設計条件を夏期 23~26 °C、50~60%RH、冬期 22~26 °C、45~60%としていることを参考に設定したものであり、より実際の着用条件に近似したものとして今回の測定条件とした。なお、表 2-1 の試料に加えて、参考として、防護衣と併用する市販のガウン（ポリエチレン不織布）およびスクラブ（ポリエステル織布）の透湿度を測定した。

Table 2-1 List of samples.

Type	Sample	Weight <sup>1)</sup> (g·m <sup>-2</sup> )	Thickness <sup>2)</sup> (mm)
Existing	Shielding material (Leaded)	3560	0.771
	Shielding material (Lead-free)	3119	0.952
	Surface material	184	0.251
Developed	New shielding material	3143	1.325
	New surface material	128	0.151

1) Under an ambient environment with 65%RH at 20 °C

2) Under a pressure of 0.59 kPa

### 3-2 熱物性の測定

25 °C, 50%RH に設定した恒温恒湿室内で, 熱物性測定装置サーモラボ (KES-F7-II, カトーテック (株) 製) を用いて, 熱伝導率および熱コンダクタンスを測定した. また, 10 °C 差における熱流束最大値  $q_{max}$  を測定した.

### 3-3 不感蒸散シミュレーション実験

前項と同様の測定機を用いて, 図 2-2 に示すように, 熱板上にろ紙 (水分率約 200 %に湿潤), さらに水分放散を抑制するために孔を開けたビニルシート (3 mm  $\phi$ ×32 個), 試料に液相水が付着しないように透湿防水布を順次設置し, 水蒸気のみが透過する系を作り (以降, Wet 系とする), これを模擬皮膚とした. 模擬皮膚を人の平均皮膚温に近似した 33 °C に設定するように熱板温度を調節した. 実験は, 25 °C, 50%RH の環境条件下で行った. 試料として, 各遮蔽材のみを用いての放熱量に加えて, 実際の防護衣を想定して, 遮蔽材を 2 枚の表面材で挟んだ 3 層での測定を行った. 既存防護衣の想定では, 含鉛の遮蔽材を用いた. なお, 防護衣素材の透湿性の影響を明らかにするために, 熱板上に設置したろ紙を湿潤させない場合 (以降, Dry 系とする) についても放熱量の測定を行った.

また, 着用時の防護衣内の温湿度を推定するために, 模擬皮膚面と既存および新防護衣との間の温度および湿度 (以降, 衣内温度および湿度とする) の変化挙動を測定した.

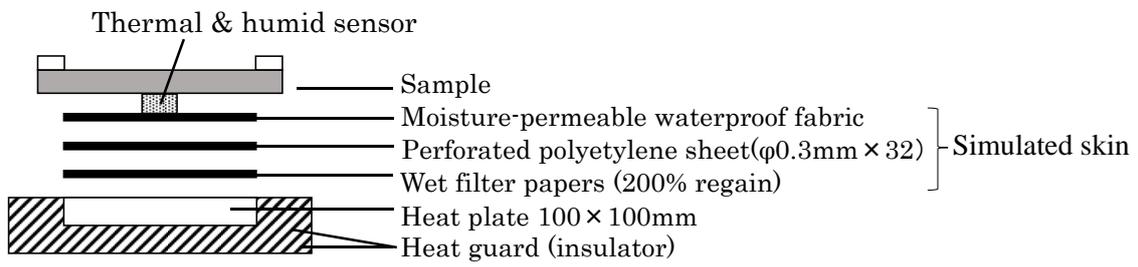


Fig. 2-2 A schematic of the measurement of the heat loss and the temperature and humidity between sample and simulated skin.

〔 The temperature of the simulated skin surface:  $33\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  
 ambient environmental condition:  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $50\% \text{RH}$  〕

## 4. 力学的特性の測定

表 2-1 に示す既存防護衣と新防護衣の各遮蔽材および各表面材を試料として、可撓性や身体適合性に関わる以下の力学的特性を測定した。

### 4-1 圧縮特性の測定

KES-G5 ハンディ圧縮試験機（カトーテック株式会社製）を用いて、面積  $4 \text{ cm}^2$  の円盤型圧縮子にて測定した。測定条件は、最大圧力  $4.9 \text{ kPa}$ 、圧縮スピード  $0.01 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  とした。

### 4-2 ドレープ係数の測定

ドレープテスター（DRP-200、株式会社大栄科学精器製作所製）を用いて、ドレープ係数を測定した。防護衣を着用した際に手でしごくことを想定して、支持台より半径  $20 \text{ mm}$  大きい円環を厚紙にて作製し、試料を支持台に設置後に円環を通して一定のしごきを加えた後にスタートボタンを押した。この測定機は、スタート後に支持台が数回転してから測定が開始される。

### 4-3 応力緩和特性の測定

定速伸長形引張試験機（AG-1kNXplus、株式会社島津製作所製）を用いて、引張速度  $10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 、最大応力  $10 \text{ N}$  として、300 秒ホルドして応力緩和特性を測定した。有効試料幅  $25 \text{ mm}$ 、有効試料長  $100 \text{ mm}$  とし、防護衣の長さ方向および周方向について測定した。

## 5. 結果および考察

### 5-1 温熱的観点からの新防護衣材料の性質

#### (1) 透湿度

結果を図 2-3 に示す。既存防護衣の表面材の透湿度は、 $5.9 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ であったが、遮蔽材の透湿度はほぼゼロであった。これに対して、新遮蔽材および新表面材の透湿度は、各々  $54.6 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $54.1 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ であった。これらの相違は、既存防護衣を構成する遮蔽材および表面材が無孔のシート状であるのに対して、新防護衣の遮蔽材の基布および表面材が織布であることに起因する。防護衣と併用するガウンおよびスクラブの透湿度は、約  $60 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ であったことから、これらの透湿度と比べても新防護衣材料の透湿度は十分に大きいことが確認された。

ヒトの不感蒸散量は約  $24 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$  と報告されていることから<sup>39)</sup>、新防護衣を構成する遮蔽材および表面材の透湿性能は、不感蒸散のみでなく汗に起因する水蒸気を透湿するに十分な性能をもっていると考えられる。

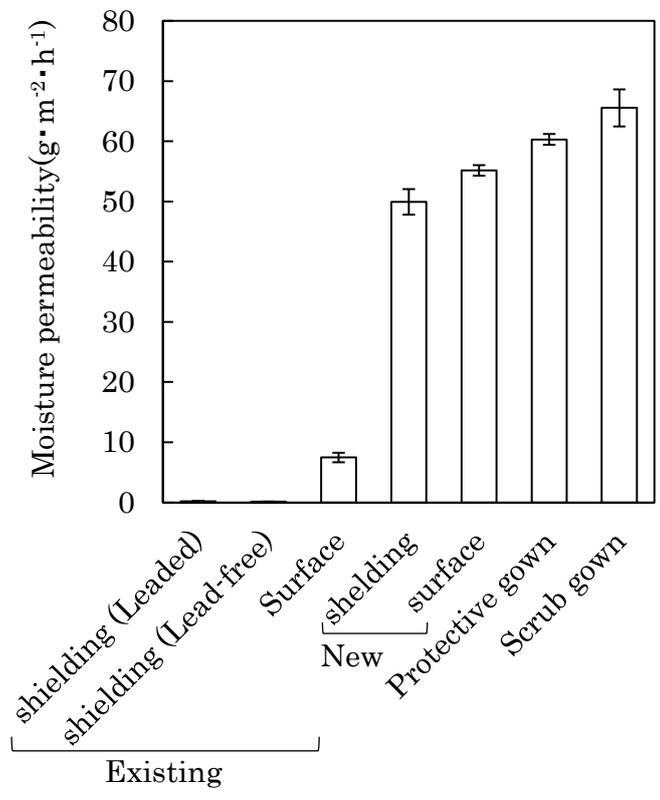


Fig. 2-3 The moisture permeability of each sample using the method of JIS L 1099 A-2-compliant (water method) in ambient environment with 50% RH at 25 °C.

## (2) 熱伝導率，熱コンダクタンスおよび $q_{max}$

結果を表 2-2 に示す。遮蔽材については，既存遮蔽材（含鉛タイプ）の熱伝導率が最も小さく，次に無鉛タイプであり，新遮蔽材が最も大きかった。しかし，新遮蔽材の熱コンダクタンスについては，含鉛タイプとほぼ同様であった。また，新遮蔽材の  $q_{max}$  においては，既存遮蔽材の約 1/3 であり，着用時の冷感が低い素材であった。これは，既存遮蔽材が平滑なシート状であったのに対して，新遮蔽材の表面が鉛粒子により微小に凸凹しているという理由によると考えられる。表面材については，新表面材の熱伝導率が既存のものよりも小さかったが，薄かったため熱コンダクタンスは既存のものよりも大きかった。また，既存表面材の基布の表面のみに塩化ビニルコーティングがなされていたため，表面の  $q_{max}$  が大きかった。皮膚に触れる部分は表面であることから，既存防護衣では，着用瞬時の冷感が高いと推察される。

Table 2-2 The thermal properties of each of the existing and newly developed shielding and surface materials of protective clothing. The standard error is shown in parenthesis.

Sample	Thermal conductivity ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{k}^{-1}$ )	Thermal conductance ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{k}^{-1}$ )	$q_{max}$ ( $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ )		
			Face	Back	Mean
Shielding (Leaded)	0.184 (0.003)	238.93 (3.30)	0.313 (0.020)	0.337 (0.015)	0.325 (0.012)
Shielding (Lead-free)	0.210 (0.002)	220.40 (2.23)	0.271 (0.013)	0.327 (0.014)	0.299 (0.028)
Surface	0.041 (0.000)	164.20 (1.00)	0.192 (0.006)	0.112 (0.006)	0.152 (0.040)
New shielding	0.312 (0.003)	235.20 (2.40)	0.072 (0.027)	0.092 (0.004)	0.082 (0.010)
New surface	0.034 (0.000)	223.00 (2.60)	0.135 (0.001)	0.130 (0.002)	0.133 (0.003)

### (3) 不感蒸散シミュレーション時の衣内温湿度

Dry系およびWet系における遮蔽材，遮蔽材を2枚の表面材で挟んだ3層（以降，これを防護衣と称する）の熱損失量を図2-4に示す．Dry系での試料間の相違が小さいのに対して，Wet系では新遮蔽材および新防護衣の熱損失量が既存に比べて大きい．これは，新遮蔽材および新表面材の透湿度が高かったことにより，潜熱移動が増加したことによると考えられる．

衣内温湿度の挙動を図2-5に示す．衣内温度については，実験開始約3分後には新防護衣で約0.5℃低くなった（ $p<0.001$ ）．衣内湿度については，湿度センサーが結露により湿潤する可能性があり7分で測定を停止したが，新防護衣は実験開始2分で有意に（ $p<0.001$ ）既存防護衣よりも低くなり，5分後には約40%と大きな差異が認められた．

以上のことより，新防護衣着用においては，既存のものに比べて，衣内温湿度が低く，温熱的快適性の改善が期待された．

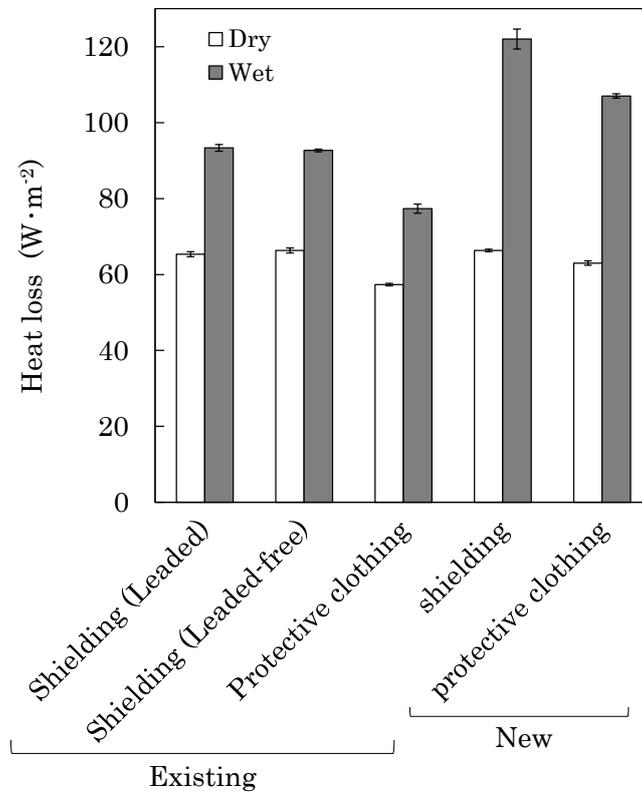


Fig. 2-4 The heat loss from the existing shielding material (leaded & lead-free) and protective clothing and the newly developed shielding material and protective clothing upon drying and wetting. Protective clothing means a shielding material covered on both sides with the surface material.

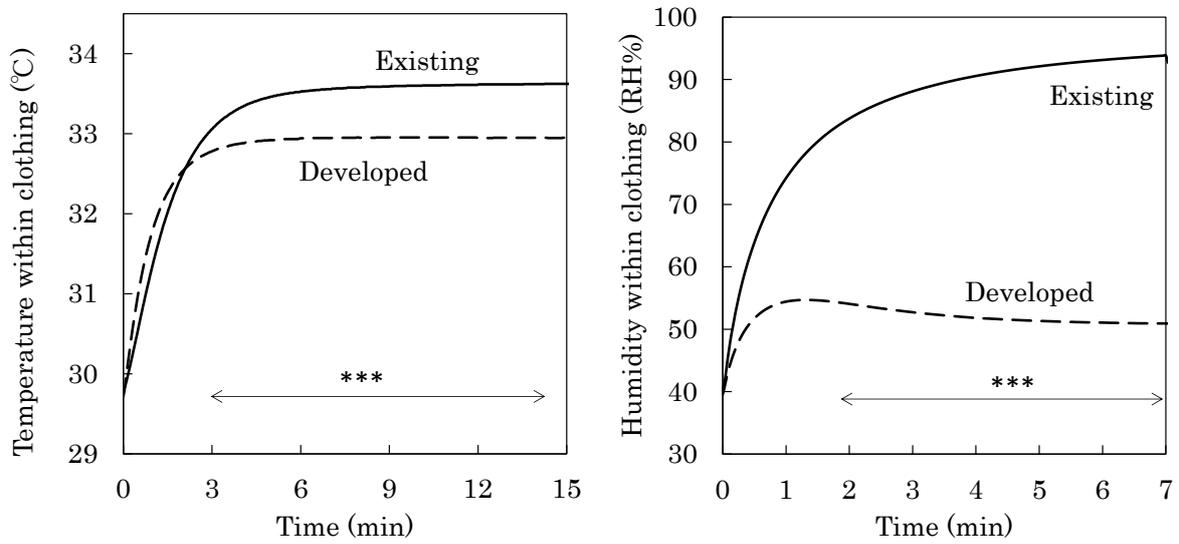


Fig. 2-5 The temperature and humidity within the existing and newly developed protective clothing. Where protective clothing means a shielding material covered on both sides with the surface material. These are the average curves for three measurements. (\*\*\*)  $p < 0.001$

## 5-2 可撓性および身体適合性の観点からの新防護衣材料の性質

### (1) 圧縮特性

圧縮線形性  $LC$ , 圧縮エネルギー  $WC$ , 圧縮レジリエンス  $RC$ , 圧縮変形量  $\epsilon$  を表 2-3 に示す. 表面材については, 既存と新表面材で大きな差異はみられなかった. これは, 両者ともに布を基布として用いていることによると思われる. 遮蔽材では,  $LC$  および  $\epsilon$  からみて, 含鉛タイプに比べて無鉛の方がやや柔らかい傾向がみられた. 新遮蔽材の  $\epsilon$  は無鉛タイプよりも大きく,  $WC$  は無鉛タイプの約 4 倍と非常に大きく, 圧縮方向に柔らかい素材であることがわかった.  $RC$  については, 新遮蔽材および新表面材で既存よりもやや高く, 圧縮変形からの回復性に優れていることがわかった.

以上のことより, 新防護衣着用においては, 既存のものに比べて, 衣内温湿度が低く, 温熱的快適性の改善が期待された.

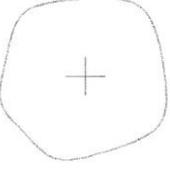
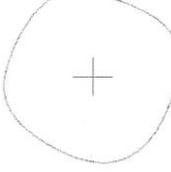
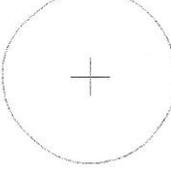
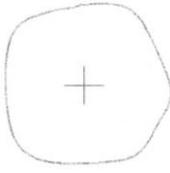
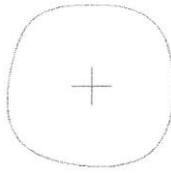
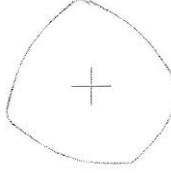
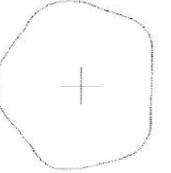
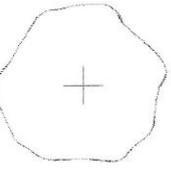
Table 2-3 The compression properties of the shielding and surface materials of the existing and newly developed protective clothing The standard error is shown in parenthesis.

$\left[ \begin{array}{l} LC : \text{linearity, } WC : \text{compression energy,} \\ RC : \text{Resilience, } \varepsilon \text{ compression strain} \end{array} \right]$

Sample	<i>LC</i>	<i>WC</i> (N·m·m <sup>-2</sup> )	<i>RC</i> (%)	$\varepsilon$ (mm)
Shielding(Leaded)	0.617 (0.046)	0.0585 (0.0114)	37.1 (3.9)	0.040 (0.011)
Shielding(Lead-free)	0.255 (0.067)	0.0581 (0.0054)	34.4 (1.1)	0.111 (0.036)
Surface	0.341 (0.078)	0.0738 (0.0072)	39.4 (4.1)	0.098 (0.021)
New shielding	0.395 (0.079)	0.2406 (0.0279)	40.1 (1.9)	0.177 (0.123)
New surface	0.407 (0.034)	0.0601 (0.0014)	42.6 (3.8)	0.061 (0.004)

## (2) ドレープ係数

表裏のドレープ形状と各々のドレープ係数  $D$  を図 2-6 に示す。既存遮蔽材のドレープ係数では、無鉛タイプが含鉛よりも大きく、むしろ可撓性が劣っていた。既存表面材においては、表面(F)ドレープ係数が 92.8% と非常に大きく、裏面(B)では 74.2% とやや小さかった。これは、ドレープ形状からもわかるように、下垂したからではなく、表面に施された塩化ビニルコーティングにより表側にまくれ上がったことによるものであった。すなわち、既存の遮蔽材および表面材は非常に下垂性の低い素材であることがわかった。これに対して、新遮蔽材および新表面材のドレープ係数は既存のものより小さく、双方のドレープ形状にはわずかながらもノードが認められ、既存防護衣に比べて可撓性に優れることが確認された。これらのことから、新防護衣は身体に沿いやすく、動作適応性にも優れるであろうことが推察された。

	Shielding (lead)	Shielding (lead-free)	Surface	New shielding	New surface
F	 $D=82.6\pm 2.1$	 $D=88.8\pm 1.5$	 $D=92.8\pm 0.9$	 $D=78.7\pm 1.0$	 $D=78.8\pm 1.3$
B	 $D=82.1\pm 2.5$	 $D=87.9\pm 1.3$	 $D=74.2\pm 3.1$	 $D=78.5\pm 2.4$	 $D=76.5\pm 1.9$

Mean  $\pm$ SE, Unit : %

Fig. 2-6 The drape coefficient values (D) of the shielding and surface materials when stroked with a ring 2cm larger than the radius of the pedestal of the tester. (F: face, B: back)

### (3) 応力緩和特性

結果を図 2-7 に示す。既存遮蔽材では含鉛，無鉛ともに長さ方向・周方向での応力緩和が大きく，粘性が低いことがわかる，しかしながら，既存表面材の応力緩和は小さく，遮蔽材との粘弾性的性質の相違が顕著であった。このことは，繰り返しの着用やハンガーに掛ける際の保管において破れの原因の一つになると考えられた。これに対して，新防護衣では遮蔽材と表面材の粘弾性的性質は類似しており，また粘性が高く，着用－保管の繰り返しによる永久ひずみが小さいであろうと推察された。このことは，新遮蔽材の基布および表面材が共に合成繊維からなることに起因すると考えられる。

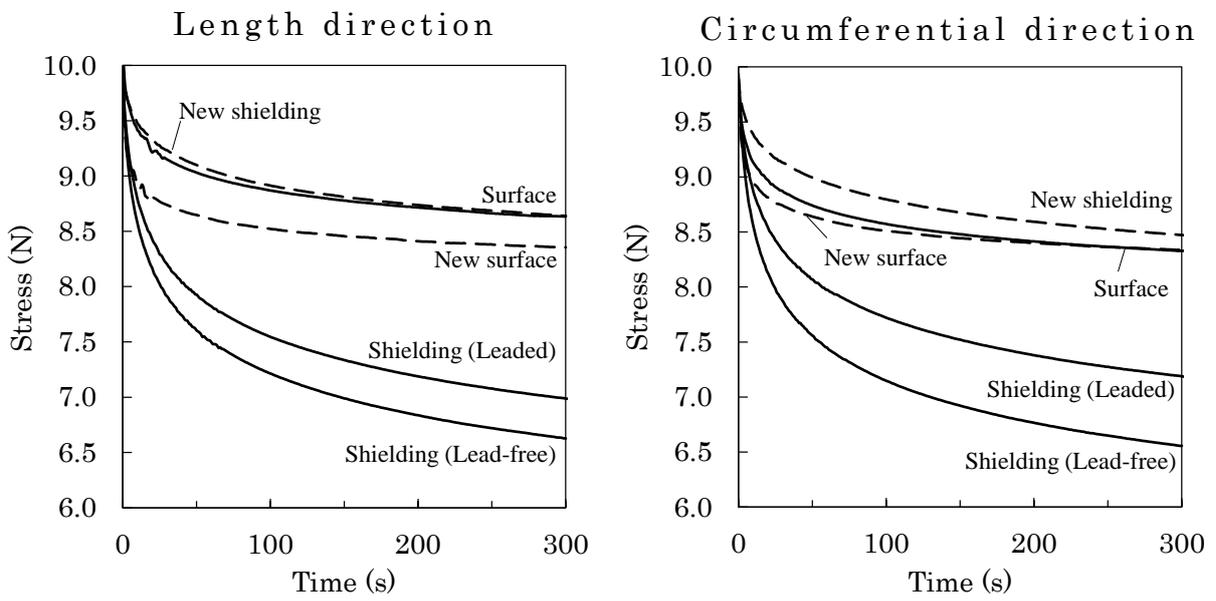


Fig. 2-7 The stress relaxation curve (maximum stress: 10N). These are the average curves for three measurements.

## 6. 結 語

本章では，X線防護衣着用による医療従事者の身体負荷を軽減することを目的として開発された新防護衣の遮蔽材および表面材の温熱的特性および力学的特性を，既存防護衣に用いられている遮蔽材（含鉛あるいは無鉛タイプ）および表面材と比較検討した．新防護衣の遮蔽材はポリエステルからなる織布を基材として鉛メッキ処理を行うことによって実現されている．また，遮蔽材の両面を覆う表面材には透湿防水布が用いられている．

新遮蔽材の質量については，既存の無鉛タイプとほぼ同様であり，含鉛に比べてやや軽量であった．新遮蔽材および新表面材の透湿性は格段に高くなり，不感蒸散シミュレーション実験においては防護衣内の温湿度が既存のものより有意に低くなることがわかった．また，圧縮特性，ドレープ性の測定結果から，新遮蔽材および新表面材の柔らかさと可撓性の向上が認められた．さらに，応力緩和特性の測定から，新遮蔽材の粘性が高いこと，新遮蔽材と新表面材がほぼ同様の粘弾性的性質をもつことがわかり，着用時や保管時の永久ひずみが少ないことが期待された．

以上のことより，新防護衣は温熱的快適性，柔軟性および身体適合性の観点から優れていることが期待され，今後は，本章で開発された新遮蔽材および新表面材からなる防護衣を作製して着用実験を行い，身体負荷軽減効果について検証する計画である．

### 第 3 章 透湿機能をもつ医療従事者用新 X 線防護衣 の温熱的着用性能

#### 1. 緒 言

近年,放射線は病気の検査や治療に欠かせないものとなっている。放射線の多くは X 線であり, X 線は一般的なレントゲン検査の他,造影撮影, CT (断層撮影) 検査, 透視など血管や臓器, 骨格の検査と診断において重要である。また, がん治療や血管の狭窄改善・修復などの外科的手術の代替としてメスを用いない局所療法としても非常に有用である。しかしながら, 多方向からの X 線照射や長時間に及ぶ検査・治療に携わる医療従事者は, 散乱線による被ばくに曝され, 健康被害を受ける危険性をはらんでいる。そこで, 被ばく線量を低減するために, 医療従事者用 X 線防護衣 (以降, 防護衣とする) が用いられている。

従来の防護衣は, ゴムシートや塩化ビニル樹脂などの合成樹脂に鉛あるいは原子番号 47 番以上の金属を含む遮蔽材と, それを覆う表面材から成り, 表面材にも塩化ビニル樹脂あるいはポリウレタン樹脂などのシートが用いられているため, 重くて, 蒸れるという問題が指摘されている<sup>12,31,32)</sup>。

筆者らは, 第 1 章において<sup>45)</sup>, 防護衣の素材, 構造, 形状, 寸法, 質量などの観点から課題を整理・分析した。さらに, 着心地を改善するための抜本的方策として, 河原らが開発した新遮蔽材<sup>42)</sup>に透湿性を損なわない表面材を選定して新防護衣を作製し, その素材性能

を力学的観点および温熱的観点から検討した<sup>46)</sup>。その結果、新防護衣の高い透湿性に起因する優位な潜熱移動特性をもつことを着用シミュレーション実験により明らかにした。

そこで第3章では、第2章<sup>46)</sup>において提案した透湿機能をもつ医療従事者用新X線防護衣（以降、新防護衣）が人体生理および着用感に及ぼす影響について、被験者実験を通して検証することを目的とし、既存のX線防護衣（以降、既存防護衣とする）と比較検討した。

## 2. 実験方法

### 2-1 着用実験用防護衣素材の構造と透湿度

対照試料として市販の既存防護衣を用いた。市販防護衣には、遮蔽材が無鉛タイプのもものと含鉛タイプのもものがあるが、第3章では、近年主流となっている無鉛タイプのもものとし、表面材に塩化ビニル樹脂シートが使用されているものを用いた。新防護衣は、合成繊維の織布に鉛メッキしたものを遮蔽材とし、透湿性と防水性を併せもつ透湿防水布を表面材として作製されたものである。新防護衣および市販の既存防護衣の構造と透湿度については、第2章前報で報告している通りであるが<sup>46)</sup>、その概要を以下に示す。

新防護衣と既存防護衣の遮蔽材および表面材の質量を 20 °C 65%RH に設定した恒温恒湿室内で測定し、厚さを 0.59 kPa 圧力下で測定した結果、新防護衣の遮蔽材および表面材の質量は、それぞれ 3,143 g m<sup>-2</sup> および 128 g m<sup>-2</sup> であり、既存防護衣では、各々 3,119 g m<sup>-2</sup>, 184 g m<sup>-2</sup> であった。防護衣は遮蔽材の表裏両面が表面材で覆われているため、新防護衣の質量は 3,399 g m<sup>-2</sup>、既存防護衣は 3,487 g m<sup>-2</sup> であった。

厚さは、新防護衣の遮蔽材および表面材で、各々 1.325 mm, 0.151 mm、既存防護衣ではそれぞれ 0.952 mm, 0.251 mm であり、防護衣全体としての厚さは、既存防護衣で 1.454 mm、新防護衣では 1.627 mm であった。すなわち、新防護衣の質量は既存の無鉛タイプとほぼ同じであったが、やや厚かった。

透湿度測定は、JIS L 1099 A-2 法（ウォータ法）に準拠して行っ

たが、実際に着用することを考慮して、病院内環境に近似した 25 °C 50%RH の環境下で測定した。既存防護衣の遮蔽材の透湿度は、ほぼゼロであったが、新遮蔽材の透湿度は  $54.1 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  と大きく、また、遮蔽材を覆う表面材においても、新防護衣では  $53.6 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  と、高い透湿度をもつものであった<sup>46)</sup>。

なお、保温性の指標である乾熱損失量は、第 2 章で述べた通り、両防護衣はほぼ同程度であった。

## 2-2 着用実験

### (1)被験者

被験者の着衣を、ブラジャー（被験者の私物）の上にスクラブ（ポリエステル 100%）、ショーツ（被験者の私物）の上にスウェットパンツ（綿 49%、ポリエステル 49%、ポリウレタン 2%）、くるぶし丈のソックスとし、デッキシューズを履かせた状態を基本着衣とした。基本着衣の上に、既存防護衣または新防護衣を着用させ、さらにその上からサージカルガウンを着用させて実験を行った。被験者は、健康的な 20 歳代女性 13 人（年齢  $22.2 \pm 1.83$  歳，身長  $157.5 \pm 3.76$  cm，体重  $54.2 \pm 6.74$  kg，体脂肪率  $28.9 \pm 5.10\%$ ，BMI  $21.8 \pm 2.02$ ）である。被験者には、実験開始 2 時間前までに飲食を済ませるように要請し、サーカディアンリズムおよび生理周期を考慮して、同一被験者/同一時間帯とし、すべての被験者が卵胞期に実験を行った。なお、第 3 章を実施するにあたっては、京都女子大学臨床研究審査を受けて承認を得た（許可番号 2019-18）。

## (2) プロトコル

一般社団法人日本医療福祉設備協会の発行する「病院設備設計ガイドライン(空調設備編) HEAS-02-2013」<sup>38)</sup>による手術室の設定条件を参考にし、着用実験の実験環境を温度  $25\pm 1$  °C、湿度  $50\pm 5$  %RH として人工気象室内で行った。

プロトコルを図 3-1 に示す。被験者は、基本着衣で椅座位安静 20 分間後に防護衣とサージカルガウンを着用させた後、測定を開始した。はじめに、防護衣のベルトを締めた状態で 5 分間立位安静、その後、15 分間トレッドミル上を歩行(時速 4.5 km)させた。その後、ベルトを外し、さらに 15 分間歩行を継続させた後に 10 分間立位安静とした。

既存防護衣の腰ベルトは、防護衣素材が座屈変形しないので<sup>46)</sup>、防護衣の上からベルトを締めることができず、防護衣の内側から締めるようになっている。これに対して、新防護衣では、座屈変形が容易であるため、着用者の利便性を考慮して防護衣の上から腰ベルトを締める形態になっている。ベルト位置を示す写真を図 3-2 に示す。

実験は、被験者毎に新防護衣と既存防護衣を 1 着/日とし、着用順序をランダムとして 2 日間連続で行った。

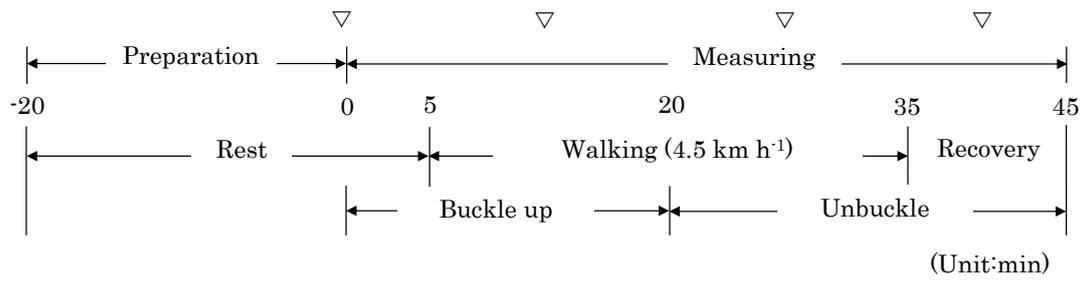


Fig.3-1 Protocol for wearing experiments.  
(▽: Subjective evaluation)

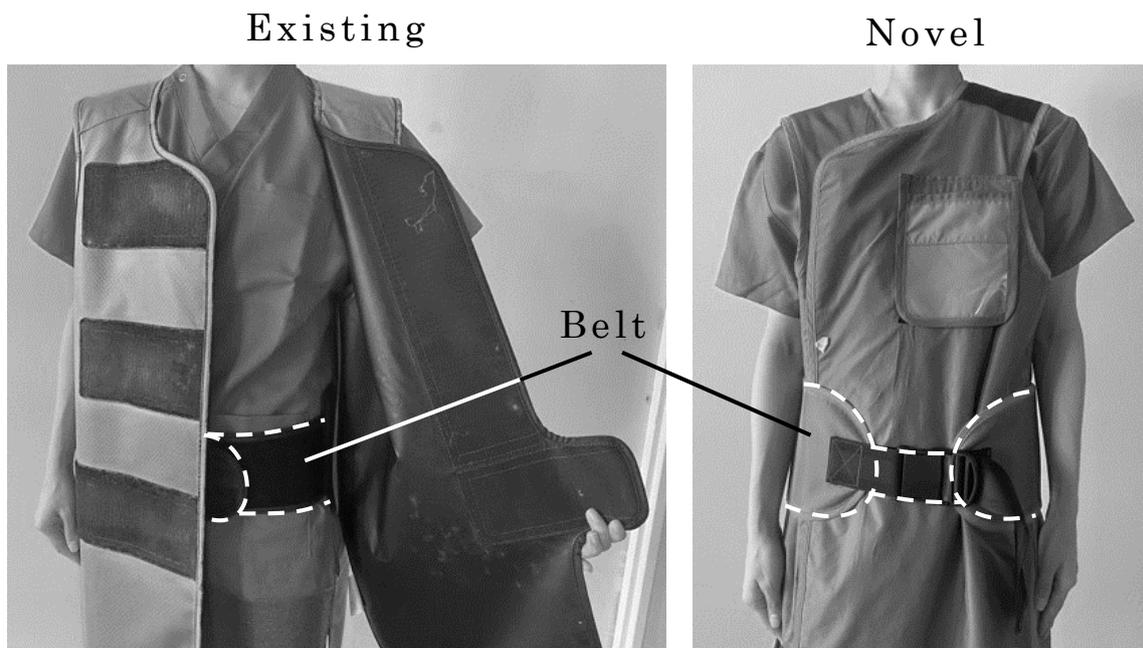


Fig. 3-2 Belt position of the existing and novel protective clothing.

### (3)測定項目

測定項目を発汗量，衣内温湿度，皮膚温，耳内温，心電図とした．発汗量の測定は，流量補償方式換気カプセル型発汗計 SKN-2000(株式会社キノス)を用い，背部にて 0.1 秒間隔でデータを取得した．衣内温湿度はサーミスタ型温度センサおよび湿度センサ（日機装サーモ株式会社）を用い，皮膚温は熱電対型温度センサ（安立計器株式会社）を用いて，背部にて 2 秒間隔でデータを取得した．耳内（鼓膜およびその周辺組織）の温度を赤外線式により，最小出力 0.1 °C の CE サーモ連続測定型耳式体温計（ニプロ株式会社）を用いて，データロガーにて 1 秒間隔でデータを取得した．心電図は MQ16（キッセイコムテック株式会社）を用い，1000 Hz で測定し，R-R 間隔から心拍数を算出した．

被験者には，歩行開始直後，12 分，27 分，40 分の計 4 回，温熱感，湿潤感，疲労感について評定尺度法を用いて 7 段階で主観評価させた<sup>47)</sup>．温熱感は「暑くも寒くもない 1 点 - 非常に暑い 7 点」，湿潤感は「乾いている 1 点 - 非常に蒸れている 7 点」，疲労感は「疲れていない 1 点 - 非常に疲れている 7 点」とした．

### 2-3 統計処理

着用実験結果については，衣内温湿度，皮膚温，発汗量，耳内温，心電図データを 1 分毎に平均した後に被験者平均を算出し，標準誤差を 5 分毎に図示した．しかし，発汗量のみ欠損データがあり，有効被験者数は 12 人であった．また，5 分毎の測定値を用いて，繰り返しありの二元配置分散分析（試料因子と時間因子）を行い，有意であった場合に多重比較を行い，ボンフェローニにて検定を行った．

### 3. 結 果

#### 3-1 衣内温湿度

衣内温度  $T_{cl}$  の経時変化を図 3-3 に示す。既存防護衣では、実験終了時まで  $T_{cl}$  が  $3.9\text{ }^{\circ}\text{C}$  上昇したが、新防護衣では、 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  程度の上昇に抑えられ、時間因子、試料因子、交互作用ともに有意 ( $p<0.001^{***}$ ) であった。ベルトを外した後の挙動については、新防護衣で  $T_{cl}$  の上昇は認められず、多重比較において実験開始 20 分以降で試料間に有意差がみられた。

衣内湿度  $H_{cl}$  の経時変化を図 3-4 に示す。上述したように、 $T_{cl}$  の両防護衣間の相違は大きかったことから、 $H_{cl}$  を温度依存のある相対湿度ではなく絶対湿度で示している。 $H_{cl}$  は、両防護衣ともに時間経過に伴って有意に上昇し ( $p<0.001^{***}$ )、交互作用はみられなかった。しかし、試料因子は有意であり、新防護衣は既存防護衣よりも  $H_{cl}$  が低かった。なお、ベルトの取り外しによる変化は、ほとんどみられなかった。

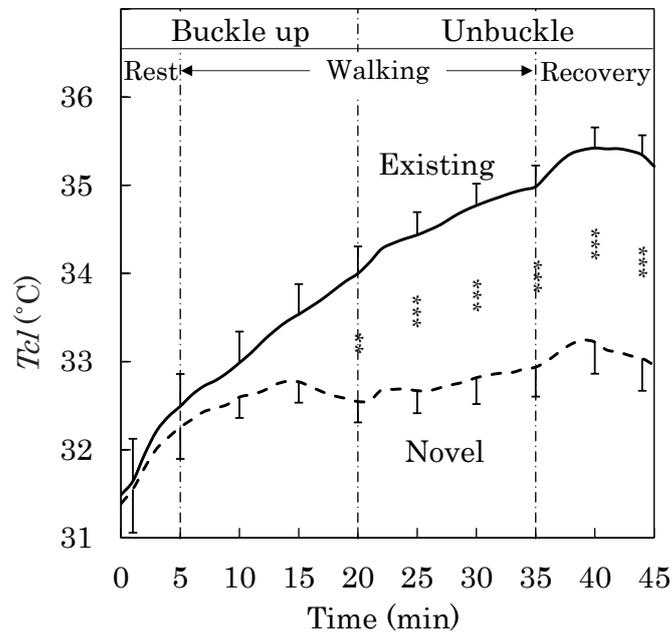


Fig. 3-3 Changes in the temperature within protective clothing ( $T_{cl}$ ) over time.

( Time factor A:  $p < 0.001^{***}$ ,  
 Sample factor B:  $p < 0.001^{***}$ , A×B:  $p < 0.001^{***}$  )

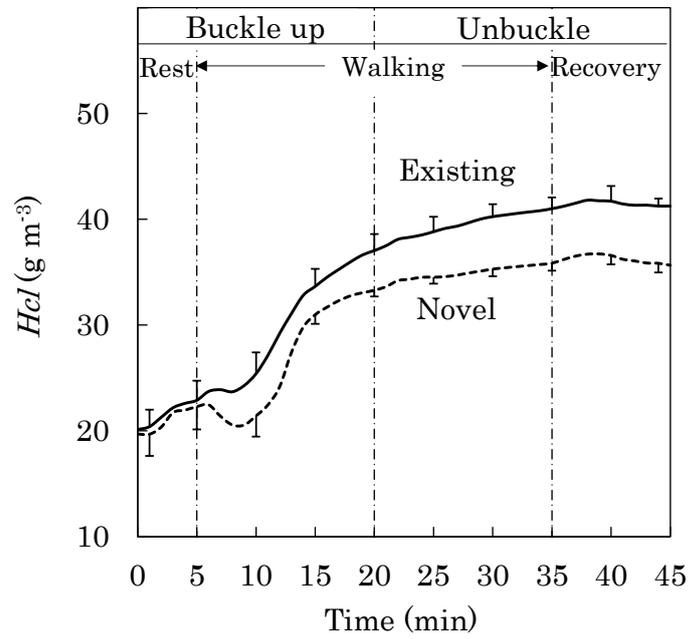


Fig. 3-4 Changes in the humidity within protective clothing ( $H_{cl}$ ) over time.

( Time factor A:  $p < 0.001^{***}$ ,  
 Sample factor B:  $p < 0.001^{***}$ , A×B: n.s. )

### 3-2 皮膚温

皮膚温  $T_{sk}$  の結果を図 3-5 に示す。皮膚温は，時間因子，試料因子ともに有意 ( $p<0.001^{***}$ ) であった。交互作用も有意であった ( $p<0.05^*$ )。既存防護衣の  $T_{sk}$  は， $2.5^{\circ}\text{C}$  と大きく上昇し，実験終了時には約  $36^{\circ}\text{C}$  にまで到達した。これに対して，新防護衣では，実験前後で  $1.1^{\circ}\text{C}$  の上昇に抑えられ，実験終了時には  $34.6^{\circ}\text{C}$  であった。両防護衣間に有意差がみられ，多重比較においては，実験開始 20 分以降で有意差がみられたが，ベルトの取り外しによる影響は少なかった。

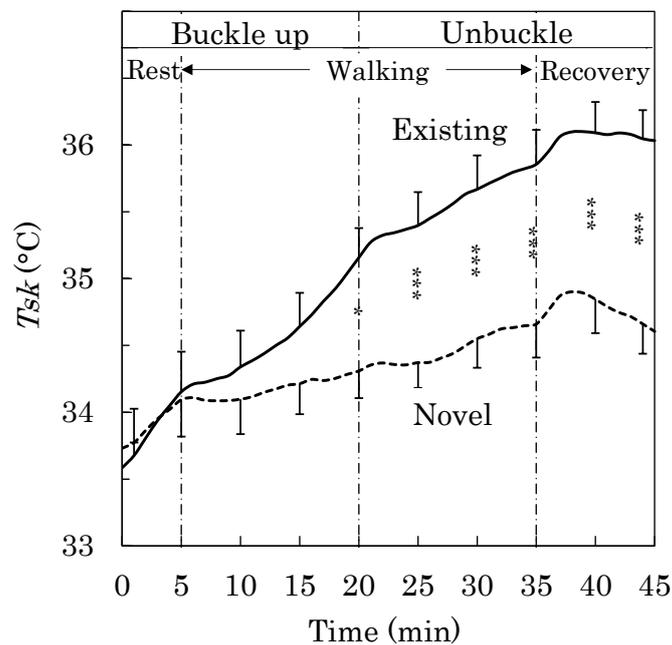


Fig. 3-5 Changes in the skin temperature ( $T_{sk}$ ) over time.

Time factor A:  $p<0.001^{***}$ ,  
Sample factor B:  $p<0.001^{***}$ , A×B:  $p<0.05^*$

### 3-3 発汗量

発汗量  $Sw$  の結果を図 3-6 に示す．交互作用はみられず両防護衣ともに歩行開始後，時間経過とともに増加したが ( $p<0.001^{***}$ )，両防護衣間に有意差がみられ ( $p<0.01^{**}$ )，新防護衣において発汗量が少ないことがわかった．ベルトを外した時，両防護衣ともに  $Sw$  はわずかに減少傾向を示したが，その影響は少なかった．

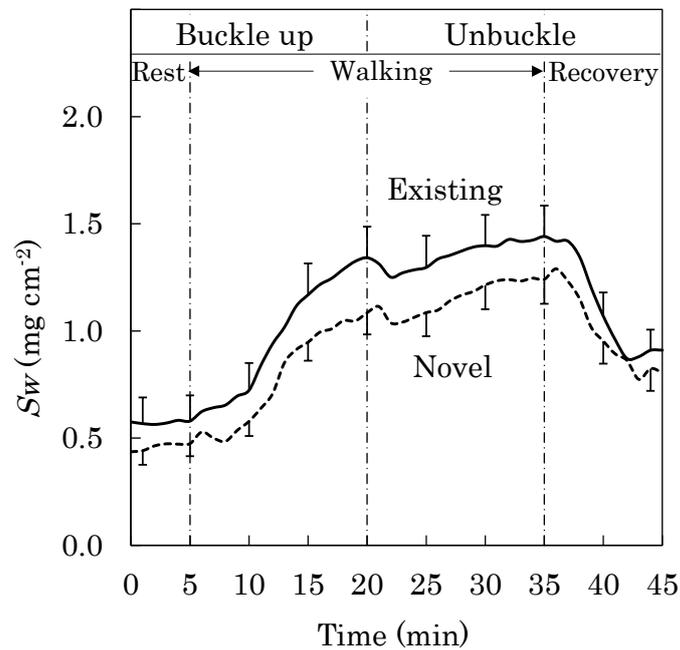


Fig. 3-6 Changes in the sweat rate ( $Sw$ ) over time.

$\left[ \begin{array}{l} \text{Time factor A: } p<0.001^{***}, \\ \text{Sample factor B: } p<0.01^{**}, \text{ A}\times\text{B: n.s.} \end{array} \right]$

### 3-4 耳内温

耳内温  $Tty$  の結果を図 3-7 に示す．時間因子は有意ではなかったが，既存防護衣の  $Tty$  は，実験開始以降，徐々に上昇傾向を示し，実験前後で被験者平均  $36.45\text{ }^{\circ}\text{C}$  から  $36.75\text{ }^{\circ}\text{C}$  と約  $0.30\text{ }^{\circ}\text{C}$  上昇した．これに対して新防護衣では，実験前後で  $36.37\text{ }^{\circ}\text{C}$  から  $36.41\text{ }^{\circ}\text{C}$  でほぼ平衡を維持した．早瀬らによると<sup>50)</sup>，本測定器で測定した耳内温（鼓膜温）は食道温（核心温）と非常に強い相関性を示し， $+0.06\text{ }^{\circ}\text{C}$  とほぼ一致した推移を示したと述べている．すなわち，実験期間を通して体温の上昇は抑制され，恒体温がほぼ維持された状態にあった可能性が示唆された．両防護衣間に有意差（ $p<0.01^{**}$ ）がみられた．時間因子および交互作用は，n.s.であり有意でなかった．

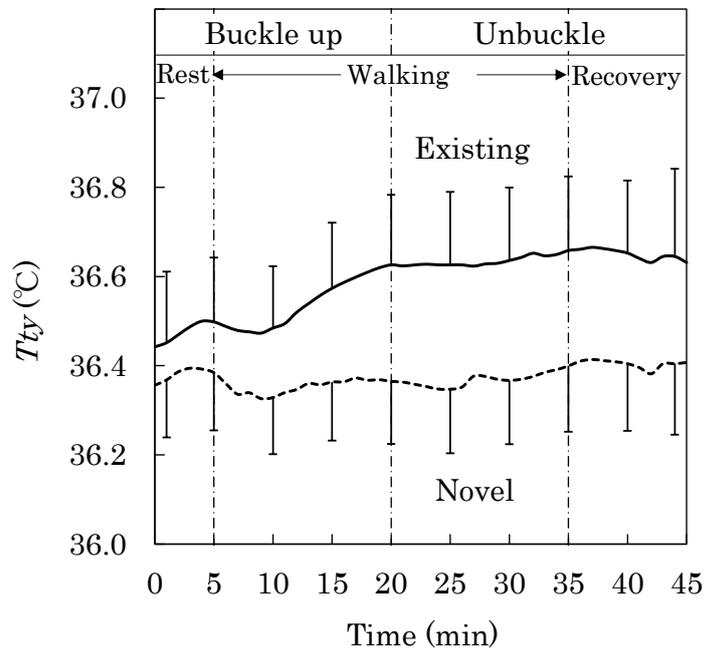


Fig. 3-7 Changes in the tympanic temperature ( $T_{ty}$ ) over time.

( Time factor A: n.s.  
 Sample factor B:  $p < 0.01^{**}$ , A×B: n.s. )

### 3-5 心拍数

心電図の R-R 間隔より算出した心拍数  $HR$  を図 3-8 に示す。  $HR$  は、歩行開始後両防護衣ともに 5-10 分で有意に増加し、回復期においては有意に減少し ( $p < 0.001^{***}$ )、交互作用は n.s.であった。新防護衣の  $HR$  は既存防護衣に比べて実験期間を通して有意に低かった ( $p < 0.001^{***}$ )。両防護衣ともにベルトを外した実験 20 分後に  $HR$  がやや減少傾向を示したものの、その影響は少なかった。

また、心電図を用いて、1 エポック 32 秒、エポック間隔 16 秒として周波数解析を行った。  $LF$  を 0.04~0.15 Hz,  $HF$  を 0.15~0.4 Hz とした。  $HF$  は副交感神経の活性度を、  $LF$  は交感神経と副交感神経の両方の活性度を反映しているといわれており、一般に、  $LF/HF$  は交感神経の活性度を示す指標<sup>51),52)</sup>とされているが、被験者平均のグラフからは、両防護衣間に有意差はみられなかった。

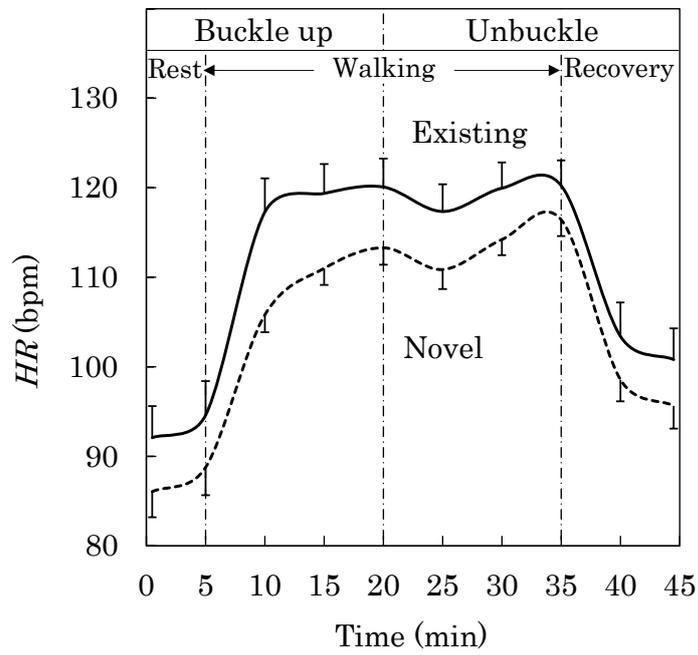


Fig. 3-8 Changes in the heart rate ( $HR$ ) over time.

( Time factor A:  $p < 0.001^{***}$ ,  
 Sample factor B:  $p < 0.001^{***}$ , A×B: n.s. )

### 3-6 主観評価

主観評価における温熱感, 湿潤感, 疲労感の結果を図 3-9 に示す. 全ての項目において, 両防護衣ともに時間因子は有意であり ( $p < 0.001^{***}$ ), 歩行開始とともに評価点数が上昇した. また, 温熱感 ( $p < 0.01^{**}$ ) および湿潤感 ( $p < 0.001^{***}$ ) において, 防護衣間に有意差がみられ, 新防護衣は既存防護衣より有意に点数が低く, 「暑くない」, 「蒸れが少ない」という主観評価が得られた. しかし, 疲労感において有意差はみられなかった.

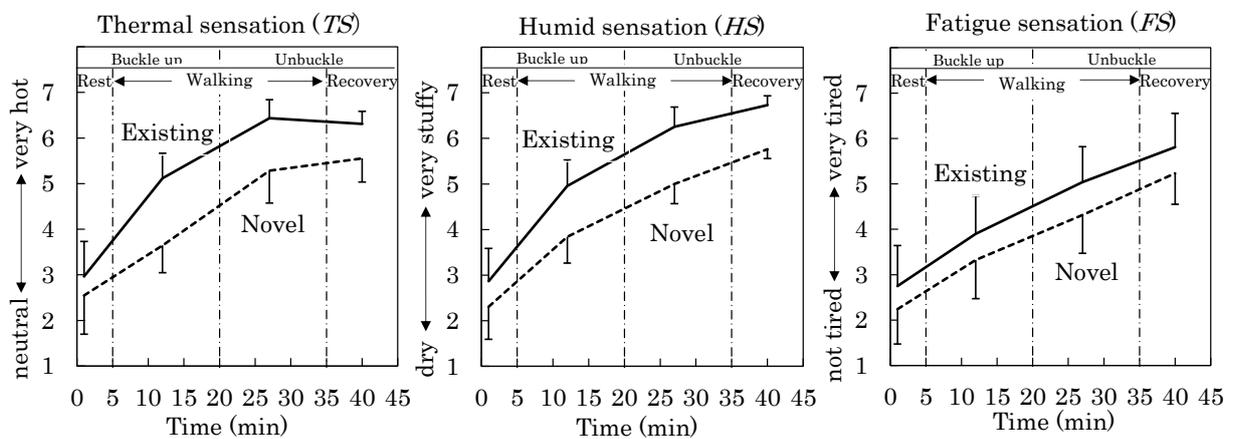


Fig. 3-9 Changes in the subjective evaluations over time.

$TS$ : Time factor A,  $p < 0.001^{***}$ ,  
 Sample factor B,  $p < 0.01^{**}$ , A×B: n.s.,  
 $HS$ : A,  $p < 0.001^{***}$ , B,  $p < 0.001^{***}$ , A×B, n.s.,  
 $FS$ : A,  $p < 0.001^{***}$ , B, n.s., A×B, n.s.

## 4. 考察

### 4-1 新防護衣が人体生理量に及ぼす影響

両防護衣素材の熱コンダクタンス並びに乾熱損失量がほぼ同程度であったにもかかわらず，実験終了時における既存防護衣の衣内温度  $T_{cl}$  が  $35.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，皮膚温  $T_{sk}$  が  $36.0\text{ }^{\circ}\text{C}$  とかなり高かったのに対して，新防護衣ではそれぞれ  $32.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ， $34.6\text{ }^{\circ}\text{C}$  と，温度上昇がかなり抑えられることがわかった．前述したように，既存防護衣素材の透湿度はほぼゼロであったのに対して，新防護衣素材の透湿度がスクラブ(ポリエステル織布)の透湿度と同程度に大きかったことから<sup>46)</sup>，新防護衣着用時には，不感蒸散や汗に起因する水蒸気透過が大きく，十分な潜熱放散量が得られたものと考えられる．このことが， $T_{cl}$  や  $T_{sk}$  の有意な低下となり，さらには発汗量  $S_w$  が有意に低くなった理由と考えられる．

一方，第3章での着用実験では両防護衣ともに衣内の相対湿度が90%RHを超えた．第2章において報告したサーモラボIIを用いた不感蒸散シミュレーション実験結果<sup>46)</sup>では，実験終了時において新防護衣素材と熱板との間の相対湿度が約50%RHと低かったのに対して，本実験では高い相対湿度が観察された．この理由として，歩行による産熱の増大が発汗を生じさせたためと考えられる．透湿度は防護衣内外の水蒸気濃度差に比例するため，透湿度抵抗の低い新防護衣においては，発汗による相対湿度上昇に関わらず，大きな潜熱移動量に繋がったと考えられる．なお，衣内湿度を絶対湿度として検討した結果，新防護衣の  $H_{cl}$  (絶対湿度) が既存防護衣より有意

に低いことがわかった。

また、直腸温（核心温）との相関が強いとの報告<sup>9)</sup>がみられる耳内温  $T_{ty}$  においても既存防護衣では、実験前後で約  $0.30\text{ }^{\circ}\text{C}$  上昇したが、新防護衣では耳内温の上昇にまで至らず、恒体温を維持できる可能性が示唆された。なお、前述した被験者平均からみた場合には、自律神経活動への影響はみられなかったが、新防護衣着用時の心拍数  $HR$  の上昇は既存防護衣より有意に低いなど、医療従事者の身体負荷軽減にとって有用であろうという結果が示された。

腰ベルトの締めの影響については、ベルトにより対流放熱が阻害されると予想したが、ベルトの影響は少なかった。したがって、約  $3,500\text{ g m}^{-2}$  ある防護衣の質量を肩のみでなく腰部にも分散させるための腰ベルトの利用を検討できると推察された。

#### 4-2 各測定項目および主観評価間の相関関係

各被験者の測定項目が時間経過とともにどのように推移し、項目間にどのような関係性があるのかを分析するために相関分析を行った。主観評価を行った時間における各被験者の測定項目データを用いて分析を行った。主観評価回数 4 回、試料 2 種、被験者数 13 人であるが、発汗量および主観評価において各々 1 人ずつ欠損データがあったため、データ数は 88 であった。

結果を表 3-1 に示す。 $p < 0.001$  の高度に有意な相関係数を太字で示している。人の生理反応は環境の温湿度に依存するところが大きい。衣服を着用している場合においては、衣内温湿度の影響をよ

り強く受けると考えられる。  $Tcl$  と  $Hcl$  の相関係数  $r$  は 0.71 と大きく、相関の高い生理項目は類似している。しかし、  $Sw$  および  $HR$  との関係においては、  $Tcl$  よりも  $Hcl$  で相関係数がやや高い傾向がみられる。

また、  $HR$  と  $HF$  との間に  $r = -0.65$ 、  $HF$  と  $LF/HF$  との間に  $r = -0.42$  の有意な相関があり、  $Tty$  と  $HF$  との間には負の相関がある ( $r = -0.44$ )。  $HF$  および  $LF/HF$  については個人差が大きく、被験者平均では両防護衣間に有意差はみられなかった。しかし、個々人の経時的な推移からの生理応答でみた場合には、耳内温や心拍数と自律神経活動との間に有意な相関がみられた。すなわち、新防護衣着用時においては、  $LF/HF$  が低く、  $HF$  が高く、  $HR$  が低い傾向がみられたことから、医療従事者における作業時の高いストレス状態を低減できる可能性があることが示された。

さらに、温熱感  $TS$  や湿潤感  $HS$  においても衣内湿度  $Hcl$  の影響を最も強く受け、次に、衣内温度  $Tcl$ 、皮膚温  $Tsk$  の順に主観評価に及ぼす影響が高いことが明らかとなり、透湿機能を有する新防護衣の着用性能における有用性を確認することができた。

Table 3-1 Correlation coefficients between the measurement items (number of data = 88)

	<i>Tcl</i>	<i>Hcl</i>	<i>Tsk</i>	<i>Sw</i>	<i>Tty</i>	<i>HR</i>	<i>HF</i>	<i>LF/HF</i>	<i>TS</i>	<i>HS</i>
<i>Tcl</i>										
<i>Hcl</i>	<b>0.71***</b>									
<i>Tsk</i>	<b>0.75***</b>	<b>0.51***</b>								
<i>Sw</i>	0.33**	<b>0.52***</b>	0.27*							
<i>Tty</i>	0.22*	0.21*	0.36**	0.07						
<i>HR</i>	<b>0.41***</b>	<b>0.45***</b>	0.36**	0.36**	0.29**					
<i>HF</i>	-0.32**	-0.34**	-0.35**	-0.25*	<b>-0.44***</b>	<b>-0.65***</b>				
<i>LF/HF</i>	0.18	0.30**	0.19	0.17	0.15	0.22*	<b>-0.42***</b>			
<i>TS</i>	<b>0.59***</b>	<b>0.68***</b>	<b>0.49***</b>	<b>0.46***</b>	0.17	<b>0.43***</b>	<b>-0.45***</b>	0.34**		
<i>HS</i>	<b>0.69***</b>	<b>0.69***</b>	<b>0.53***</b>	<b>0.46***</b>	0.16	<b>0.37***</b>	<b>-0.43***</b>	0.32**	<b>0.93***</b>	
<i>FS</i>	<b>0.51***</b>	<b>0.47***</b>	<b>0.54***</b>	0.30**	0.22*	0.26*	<b>-0.37***</b>	0.25*	<b>0.79***</b>	<b>0.79***</b>

\*\*\*  $p < 0.001$ , \*\*  $p < 0.01$ , \*  $p < 0.05$

## 5. 結 語

第 3 章では，第 2 章<sup>46)</sup>において提案した透湿機能をもつ医療従事者用新 X 線防護衣（新防護衣）が人体生理および着用感に及ぼす影響について，着用実験を通して検証することを目的とし，既存防護衣と比較検討した．

新防護衣着用時の衣内温度および皮膚温の変化挙動において有意に上昇が抑制されることがわかった．その要因として，両防護衣素材の保温性がほぼ同程度であることが前報<sup>46)</sup>において確認されていることから，潜熱放散量の増大に起因すると考えられた．また，新防護衣着用時における発汗量や心拍数においても，既存防護衣より有意に上昇が抑制され，耳内温が実験前後でほぼ一定であることがわかった．主観評価においても，新防護衣着用時に暑くなく，蒸れが少ないと評価されるなど，既存防護衣に比べて有意に生理的・心理的負荷を低減できることがわかった．なお，これらの関係性については，測定項目間の相関分析からも確認された．

また，防護衣の腰ベルトを締めても衣内温湿度や各生理項目への影響は少ないことが示された．このことから，防護衣の質量を肩だけでなく腰部にも分散させるために，腰ベルトの利用を検討できると推察された．

## 結論

本研究では，着用性能の向上による温熱的快適性の改善を目的とし，はじめに防護衣の現状を分析し，着心地に影響を及ぼすと考えられる課題を明らかにした．また，透湿機能をもつ新規防護衣を開発し，その力学的特性および温熱的特性を測定し，温熱的観点から人体生理量に及ぼす影響を明らかにした．

第1章では，防護衣が着心地に影響を及ぼすと考えられる課題を明らかにするために，防護衣の現状を把握した．はじめに，主要メーカーのカタログを用いて，防護衣の質量，素材・構造，形状，寸法，質量の観点から詳細に調査・分析した．また，市販防護衣（コート型，ハーフコート型，エプロン型）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を行い，防護衣の着心地に関する課題を抽出した．

その結果，防護衣の質量は，コート型防護衣では質量の高いもので約 6 kg にも及び，軽量なエプロン型でも約 2 kg あり，非常に重いことがわかった．また，防護衣の前面には，ミシン目による針穴があってはならないと JIS に規定されていること，さらに現状の防護衣素材にあっては，一般的な衣服設計のようなダーツやいせ込みなどの立体手法を用いることが不可能であることなどから，防護衣のパターンは平面構成である．そのため，三次元構造をもつ身体に沿わず，撓みなどの座屈変形が生じることがわかり，肩周辺には浮きが生じ，衣服圧のばらつきが大きく，首付け根など局所的な部分において衣服圧が高くなる傾向がみられた．

防護衣素材については，透湿度ゼロの遮蔽材や表面材が用いられ

ており、着用時の「蒸れ」による不快感が大きいことが容易に推察され、抜本的な素材の見直しが必要であることを指摘した。

防護衣サイズについては、S から LL まで展開されていたが、一般的な衣服素材のように伸長変形やせん断変形等を伴わないシート材が用いられていることから、身体形状を考慮したパターン展開や着用者に適した防護衣サイズを再検討する必要があることなどを指摘した。

第 2 章では、合成繊維からなる織布を基材として鉛メッキ処理を行った遮蔽材を採用し、表面材については、十分な透湿性能をもつ透湿防水布を選定して新規防護衣を作製・提案した。新規防護衣の温熱的性質および力学的性質を既存防護衣との比較から明らかにした。

その結果、新規遮蔽材の質量については、既存の無鉛タイプとほぼ同程度であったが、含鉛タイプに比べてやや軽量であることが明らかになった。新規遮蔽材および表面材の透湿度は非常に高く、不感蒸散シミュレーション実験において、潜熱放散量の増大が衣内温度および皮膚温の上昇を抑制するため、衣内温湿度が既存のものよりも有意に低くなることがわかった。また、圧縮特性、ドレープ性の測定結果から、新規遮蔽材および表面材の柔らかさと可撓性の向上が認められ、応力緩和特性の測定においても、新規遮蔽材と表面材が類似した粘弾性的性質をもつことがわかり、着用時や保管時の破れや永久ひずみが少ないであろうことを指摘した。

以上のことより、新規防護衣は温熱的快適性に優れ、柔軟性や可撓性においても、立体手法を用いた縫製が可能であることから、身体適合性にも優れることがわかった。

第 3 章では，前章において提案した透湿機能をもつ新規防護衣が人体生理および着用感に及ぼす影響について明らかにすることを目的として，歩行を含む着用実験を行った．衣内温湿度のほか，人体生理量として皮膚温，発汗量，耳内温，心電図等の測定および着用感評価を行い，既存防護衣と比較検討した．

その結果，新規防護衣着用時の衣内温度および皮膚温は，既存防護衣よりも有意に低くなることがわかった．また，新規防護衣着用時における発汗量や心拍数においても，既存防護衣より有意に上昇が抑制されることがわかり，耳内温はほぼ一定であり，作業中の恒体温を維持できることが示唆された．主観評価においても，新規防護衣は既存防護衣よりも涼しく蒸れないと評価されるなど，生理的・心理的負荷を有意に低減できることがわかった．なお，これらの関係性については，測定項目間の相関分析からも確認された．

また，防護衣の腰ベルトを締めても衣内温湿度や各生理項目への影響は少なく効果的であることがわかった．このことから，腰ベルトの使用は，防護衣の質量を肩だけでなく腰部にも分散させることにより，高質量による身体負荷および局所的な高い衣服圧の軽減に繋がることが示された．

以上の結果から，動作適合性と透湿性機能をもつ新規 X 線防護衣は，着用性能を大きく向上させ得ると結論づけた．

## 今後の課題

本研究では、身体負荷軽減を目的とした新規防護衣の提案と、それを構成する素材の力学的性質および温熱的性質を明らかにし、着用実験により人体生理・心理への影響を温熱的観点から明らかにし、温熱的快適性の向上を検証した。しかし、防護衣素材の単位面積当たりの質量については、無鉛タイプと同程度であり、新規防護衣においても軽量化には至らなかった。

今後の課題としては、防護衣の質量が肩に与える負荷を軽減するために、腰ベルトの使用の在り方を検討する必要があると考えられる。有効な腰ベルトは、肩にかかる高い局所圧を腰部に分散させることができ、身体負荷を抑制しうると推察される。

本研究において、防護衣の腰ベルトを締めても衣内温湿度や各生理項目へのネガティブな影響は少ないと推察されたことから、高質量による身体負荷を軽減するためには、防護衣の質量を肩だけでなく腰部にも分散させるために、腰ベルトの利用方法について引き続き、検討することが重要であると考えられる。

さらに、肩への負荷を抑制する方法として、肩パッド素材としての種々のウレタンフォームやハニカム構造体の圧縮特性および粘弾性的性質を明らかにし、防護衣用肩パッドの適正を検討する必要がある。また、三次元計測による肩形状の把握から、肩パッド形状についても検討する必要があると考えられ、引き続き、研究を続行したいと考える。

# 本論文に関する研究発表論文

## 第1章

「医療従事者用X線防護衣の現状と課題」

熊田亜矢子，坂下理穂，諸岡晴美，河原伸雅

京都女子大学生生活造形，Vol.67，pp.58-65（2022）

## 第2章

「身体負荷軽減を目的とした医療従事者用X線防護衣材料の開発  
とその温熱的性質および力学的性質」

熊田亜矢子，河原伸雅，坂下理穂，小林彩絵，諸岡晴美

日本繊維製品消費科学会誌，Vol.63，No.5，pp.44-51(2022)

## 第3章

「透湿機能をもつ医療従事者用新X線防護衣の温熱的着用性能」

熊田亜矢子，坂下理穂，諸岡晴美，河原伸雅

日本繊維製品消費科学会誌，Vol.64. No.6，pp.23-30(2023)

## 文献

- 1) 村山定光；【連載】〈業界マイスターに学ぶ せんい産業資材の基礎講座－30〉第4編 産業用途への応用(9) 防護服用途，繊維学会誌，79(2)：72-85(2023)
- 2) 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”，p.14(2012)
- 3) 神崎竜二，大塚昭義，岡山昭雄，他；多元素複合材料を使用した X 線防護衣の有用性，日本放射線技術学会雑誌，53(1)：25-28(1997)
- 4) 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)
- 5) 福永愛，福居壽人，赤川拓也，長尾好浩，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)
- 6) 全国循環器撮影研究会；放射線防護衣アンケート報告(2007)
- 7) 井ノ上信一，松本光弘，松澤利絵；X 線防護衣の鉛当量試験における最適線質の検討，日本放射線技術学会雑誌，60(12)：1682-1687(2004)
- 8) 才田壽一，吉岡孝之，奥西孝弘，宇都文昭，越智保；新しい血管撮影用放射線防護具の開発，日本放射線技術学会雑誌，53(1)：1-7(1997)
- 9) 栗井一夫，青木雄二，伊藤敏夫，他；学術調査研究報告 最近の X 線診断領域における従事者の被曝の問題点と防護衣の在り方検討班報告，日本放射線技術学会雑誌，54(5)：687-696(1998)
- 10) 越田占郎，曾田卓実，能登公也，福田篤志，他；腹部血管造影検査における X 線防護衣の遮へい評価，日本放射線技術学会雑誌，61(7)：989-996(2005)

- 11) 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)
- 12) 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)
- 13) 放射線防護分科会, 診断用 X 線防護衣の破損事故に関する報告と管理指針; 日本放射線技術学会雑誌, 56 (4) : 552-555 (2000)
- 14) 放射線防護分科会, 診断用 X 線防護衣管理に関する指針 (2000.4); 日本放射線技術学会雑誌, 56 (4) : 556-557 (2000)
- 15) 江崎徹, 石原寛明; 深層学習による放射線防護衣の破損検出と破損面積測定 of 自動化, 日本放射線技術学会雑誌, 77 (10) : 1153-1164 (2021)
- 16) 磯邊哲, 木暮陽介, 池田裕貴, 芳士戸治義; 診断用 X 線防護衣の管理アプリケーションを用いた管理体制の構築, 日本放射線技術学会雑誌, 75 (6) : 546-552 (2019)
- 17) 野戸結花, 西沢義子, 北宮千秋, 會津桂子; 放射線防護衣の機能性に関する研究, 日本看護研究学会雑誌, 36(8) : 398 (2013)
- 18) 鈴木信之; 最軽量 X 線防護衣「NEW-EX シリーズ」の開発, 第13回秋季学術大会放射線防護管理関連演題発表後抄録; 放射線防護分科会会誌, 18 : 47 (2004)
- 19) 保科製作所, 空調システム付き X 線防護衣, X 線防護用品総合カタログ2020, 11-12; [http://www.hoshina.co.jp/2020\\_catalog/](http://www.hoshina.co.jp/2020_catalog/)
- 20) 小柴朋子, 田村照子, 鄭明姫, Shin-JungrSook, 朴順子, 小西武四; 着用実験による防護服の快適性評価, 人間-生活環境系シンポジウム報告集, 11 (1-8) : 29-32 (2004)
- 21) 上村巧, 中澤昌彦, 佐々木達也, 今富裕樹, 鹿島潤; 特集「新規参入者の安全を考える」チェーンソー防護服の通気性改善対策について, 森林利用学誌, 27 (1) : 25-29 (2012)

- 22) 大釜恵, 柳栄治, 橘深恵, 渡部節子; つなぎ式感染防護服の2時間着用による防護服内温度・着用感と改善策の検討, 日本健康医学会雑誌, 28 (4) : 414-419 (2019)
- 23) 時澤健, 岡龍雄; 防護服着用時の暑熱負担軽減対策—手足プレクーリングと水循環ベストの併用効果—, 労働安全衛生総合研究所特別研究報告, 49 : 31-34 (2019)
- 24) 林祐一郎; 暑熱対策科学防護服の商品開発, 日本繊維製品消費学会誌, 75 (12) : 662-664(2022)
- 25) 柄原裕; 密閉型防護服着用時の生理的負担, 日本繊維製品消費学会誌, 41(10) : 801-804 (2000)
- 26) 西沢義子, 野戸結花, 北宮千秋, 會津桂子, 看護学生と看護師が受ける放射線防護服のイメージ, 日本放射線看護学会誌, 2 (1) : 29-34(2014)
- 27) Universal Medical 製品紹介  
<https://www.universalmedicalinc.com/all-products/radiation-protection.html>
- 28) ムラナカ総合カタログ2023 ; コートエプロン「KRYPTOLiTE (クリプトライト)」;  
[https://www.muranaka.co.jp/digital\\_catalog/index.html#target/page\\_no=1](https://www.muranaka.co.jp/digital_catalog/index.html#target/page_no=1)
- 29) HAGOROMO 総合カタログ No.2023.05 <2023年5月発行> ;  
[https://maeda-hagoromo.com/pdf/catalog/hagoromo/202305/hagoromo\\_all.pdf](https://maeda-hagoromo.com/pdf/catalog/hagoromo/202305/hagoromo_all.pdf)
- 30) 篠原克明; 感染防護用の防護具について ; 日本繊維製品消費学会誌, 62 (1) : 6-16 (2021)
- 31) 松井有子, 佐藤琴美, 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)
- 32) 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, 日本繊維製品消費学会誌, 62(1) : 44-53 (2021)
- 33) 鹿島潤, 今富裕樹, 陣川雅樹; 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 14-1(114) : 383 (2003)

- 34) 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)
- 35) 舘野之男 ; 放射線治療—儉約と豊穡の100年—, 放射線医学物理, 15(3) : 181-209 (1995)
- 36) 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/](http://www.hoshina.co.jp/2020_catalog/)
- 37) 株式会社マエダ HAGOROMO 総合カタログ No.2021.08  
[http://www.hoshina.co.jp/2020\\_catalog/](http://www.hoshina.co.jp/2020_catalog/)
- 38) 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)
- 39) 久野寧 ; 汗の話, 光生館 (1963)
- 40) 上野哲ほか ; 防護服着用時の暑熱ストレス評価をめぐる最近の知見, セイフティダイジェスト, 52(12) : 2-10 (2006)
- 41) 河原伸雅 ; 特許第5997717 放射能防護服用布帛の製造方法 (2016)
- 42) 河原伸雅 ; 特願第2019-208588 放射線遮蔽材
- 43) 日本工業規格 JIS T 61331-1 ; 診断用 X線に対する防護用具—第1部 : 材料の減弱特性の決定方法 (2016)
- 44) 吉玉精鍍株式会社 ; 特開2017-3576 X線防護材料及びそれを用いた X線防護服とその製造方法, X線遮蔽道具
- 45) 熊田亜矢子, 坂下理穂, 諸岡晴美, 河原伸雅 ; 医療従事者用 X線防護衣の現状と課題, 京都女子大学生生活造形, 67 : 58-65 (2022)
- 46) 熊田亜矢子, 河原伸雅, 坂下理穂, 小林彩絵, 諸岡晴美 ; 身体負荷軽減を目的とした医療従事者用 X線防護衣材料の開発とその温熱的性質および力学的性質, 日本繊維製品消費科学会誌, 63(5) : 44-51 (2022)

- 47) 谷口高士;心理評価実験における尺度構成の方法,日本音響学会誌, 73:774-782 (2017)
- 48) 早瀬知, 山蔭道明, 木谷友洋;術中体温モニターとしてのイヤホン型赤外線式持続鼓膜温測定の有用性, 麻酔, 56:459-463 (2007)
- 49) 林博史;心拍変動の臨床応用, 医学書院 (1999)
- 50) 志鎌瑤, 早坂恵里, 赤塚清矢, 真壁寿;若年者の運動耐容能と副交感神経活動との関係, 東北理学療法学, 31:27-32 (2019)

## 謝辞

本研究を遂行し博士論文にまとめるにあたり，終始，懇篤なる御指導と御鞭撻を賜りました京都女子大学大学院家政学研究科教授，諸岡晴美先生に謹んで深甚なる感謝の意を表します．

御指導いただきました5年間，研究の基礎知識や実験方法からデータ整理，まとめ方等多岐にわたり御教示いただきました．先生のもとで探求する姿勢や研究の難しさを改めて知ることができ心より感謝いたします．

また，本論文を完成するに際し，ご精読いただきご助言をくださいました京都女子大学家政学部教授，榎本雅穂先生，成実弘至先生に深く感謝いたします．

本研究を遂行するに際し，試料の提供をはじめ，数々の御協力を賜りました株式会社アドエッグ河原伸雅様に深く感謝申し上げます．また，本研究に関して，試料の作成や実験等に御協力いただきました元京都女子大学の坂下理穂氏に心から感謝申し上げます．

おわりに，元京都女子大学の小林彩絵氏，京都女子大学家政学部生活造形学科諸岡研究室の皆さま，およびご協力を賜りました被験者の方々に併せて厚く御礼申し上げます．