

研究責任者 宮内博幸

産業医科大学 産業保健学部 作業環境計測制御学講座 教授

I 研究目的

本研究は化学防護手袋の性能評価の一つとして、手袋装着時の手全体の疲労を含めた作業性を客観的に評価する方法を確立すること、かつ、現場において使用されている有害な化学物質全てについて、皮膚障害等を防止できる性能を有する手袋を開発することを目的とした¹⁾。具体的な方法として以下の4つのテーマによりアプローチすることとした。

検討テーマⅠ：化学防護手袋に係る作業性および疲労感を評価するため、手指作業等について、人間工学的な機能・動作解析を用いた定量化方法の検討を行う。令和7年度は、実際の労働現場における手指作業について人間工学的な機能・動作解析の観点より、手・指の具体的な問題点の洗い出し、分類・解析を行うとした。

検討テーマⅡ：定量方法を汎用とするためにはハンドロボットを開発し、ロボットによる疲労を含めた作業性を客観的に評価する方法を確立することである。令和7年度は、工学的な視点も踏まえて試験評価指標の検討、評価システムの構築とシステムのシミュレーションの構築、装置の基本的な設計を実施した。

検討テーマⅢ：化学防護手袋の性能として重要な耐透過性と耐劣化性に優れる材料を用い、使用時の疲労が少なく、かつ、複数の化学物質に対して480分を超える耐透過性能を有する安価な新材料を用いた化学防護手袋を開発する。令和7年度は開発された新材料について、各化学物質に対する480分以下の耐透過性試験を実施するとした。

検討テーマⅣ：一般的に使用されている化学防護手袋全体の耐透過性能について、実際の使用状況を踏まえ、手指動作による材料伸縮の有無による違いや連続接触や間欠接触により480分を超える接触時の耐透過性能の解明を行う。令和7年度は、手袋材料について実際の作業条件を考慮した連続480分を超える液体接触時の耐透過試験を実施した。

2 研究方法

令和7年度に行った具体的な研究方法は以下である。検討テーマⅠは、まず国際規格、公的機関の資料、人間工学および産業保健学関連の国際誌を中心に学術文献を検索し、作業性および疲労感に関する実験的検討に向けた基礎資料を収集した。規格についてはISO 21420:2020を参照し、防護手袋におけるdexterity評価の位置づけと限界を確認した。

さらに手指作業についての工学的な機能・動作解析による定量化の方法において、手指および手腕の器用性に着目し、その試験方法の一つとして厚生労働省による一般職業適性検査(General Aptitude Test Battery: GATB)の器具検査を対象とした。検査方法は、化学防護

手袋装着の有無時における試験作業の成績解析の他、手袋作業性に関する主観評価、および手袋装着有無時のハンドモーションキャプチャによる手指動作データの取得と解析を行った。

検討テーマⅡに対しては、設計をするに当たり、デジタル空間上で人間の手の挙動を精密に再現可能なシミュレーション基盤の構築を試みた。ハンドロボットによる手袋装着時の物理的な負荷を定量評価する基盤を作るため、3Dモデルによる指の姿勢制御と、順運動学に基づく指先座標算出プロセスの確立として、指先座標算出にシュンク社製5指ロボットハンド「SVH」の3次元CADモデルを用いた。また、有限要素解析（Finite Element Method：FEM）による接触状態評価に向けた解析モデル構築手法の体系化と、制約条件の明確化を行った。

検討テーマⅢに対して、エチレンビニルアルコール共重合体（Ethylene-vinylalcohol copolymer：EVOH）材料を対象とした。EVOHはやや硬い性状のため、作業性において問題があり、対処としてEVOHを含む多層フィルム材料の厚さの異なる二種類とした。5種類の有機溶剤であるトルエン、ジクロロメタン、アセトン、エタノール、メタノールに対する耐透過試験を実施し、その耐透過性能を評価した。

検討テーマⅣは、複数の化学防護手袋材料について長時間連続してJIS T8116：2005の耐透過性試験の実施が可能な試験系システムを開発し、EVOH多層フィルム材料について、480分を超える透過時間の試験を実施した。試験対象化学物質はトルエンとした。複数の試験セルを自動でサンプリングするために、試験系システムにオートガスサンプラーを組み込んだ。

3 研究成果

化学防護手袋に係る作業性および疲労感を評価するための学術文献検索により、化学防護手袋装着時の手全体の疲労を含めた作業性を客観的に評価するためには、指先器用性のみではなく、触覚感度、把持力・力発揮、可動域・姿勢、疲労・作業負担など、複数の側面からの評価が重要であることが確認された。また、作業影響の現れ方は、精密な指先課題と比較的粗大な課題とで異なり、課題特性の違いを考慮した評価が必要であることが解明された。作業性を十分に把握するためには、更に多様な操作要素を含む課題構成が必要と考えられた。GATB器具検査により基礎的かつ再現性の高い指標の可能性が示唆された。しかし、手腕作業と、指先作業の双方を含む検査課題に、主観指標、姿勢評価、表面筋電図、自律神経系活動指標を組み合わせることで、手袋装着時における作業の効率性、作業負担や疲労をより多面的に計測できる可能性も解明された。ハンドモーションキャプチャによる自動計測結果より、ピン把持タイミングにおけるピンチ距離（親指・人差し指間距離）の計測精度は、手袋タイプ（形状）や透明度による僅かな差は認められたが、概ね計測は可能である結論を得た。化学防護手袋の指先巧緻性についてISO 21420:2020の方法に準じて行った試験の結果、摘まめるピンの最低直径と手袋の厚みの関係においては、手袋材料が薄手であるほど巧緻性が高まる傾向が確認された。しかし、厚みのみでなく材料や形状、サイズ等も複合的に作用していると推定され、巧緻性の評価基準策定の一つとして寄与すると考えられた。作業性評価用ハンドロボットを開発において、指の各関節における順運動学モデルを定義し、数値入力によ

る姿勢制御及び指先座標の算出システムが確立された。これにより 5 指ハンドロボットを用いた作業性評価のための幾何学的な動作シミュレーション基盤が構築された。新規開発された厚みが薄い EVOH フィルムについて、作製した実験系システムを用い耐透過試験を行った結果、メタノールにおいて耐透過性能の向上したことが解明された。市販されている汎用な EVOH 多層型フィルム材料に対してトルエンによる測定を行った結果、2,400 分経過時においても透過速度は $0.1(\mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{min})$ を超えない結果が示された。

4 結論

実施した作業性および疲労感を評価するための学術文献検索の結果において、作業性は指先の巧緻性試験のみでなく、触覚感度、把持力、可動域・姿勢、疲労や作業負担試験などを加えることで、手袋装着による作業効率や身体への影響を詳しく評価できる結果が得られた。また、指先巧緻性に関する試験方法として既存である ISO 21420: 2020 に準じた試験を行った結果、行ったピンの摘み試験は巧緻性の評価基準の一つとして活用できるものの、巧緻性は厚み・材料・形状等も複合的に作用していることが推測された。また、GATB 器具検査では、被験者の装着した手袋内にハンドモーションキャプチャを装着することで、異なる手袋形状タイプ間による作業性差の評価として活用できる可能性が明らかとなった。GATB にさらなる指標も加えることで、作業動作に与える影響をより深く解明できる可能性も示された。評価方法の汎用化を図るため、人を介さずに行うハンドロボットを用いた作業性評価構築の結果では、作成した動作シミュレーションによりは良好な結果が得られ、ハンドロボットを用いた作業性評価の有効性が推定された。

5 今後の展望等

本年度の研究結果から得られた改善点等を踏まえ、ハンドモーションキャプチャによる画像解析による評価、ハンドロボットによる評価方法の構築、新材料開発、長時間の透過試験結果等を統合させ、相互連携させることで引き続き新規手袋材料の開発を行い、その作業性も含めた良好な評価方法を確立する。

1) 宮内博幸, (2026), 化学物質の皮膚接触による健康障害防止 (皮膚吸収促進作用のある化学物質を中心に), 産業医学レビュー, 38(3), 188-200.