

労災疾病臨床研究事業費補助金

労働環境調査に基づく保護具の簡易透過性測定法の開発と透過機構解析

(課題番号：250601-01)

【研究概要】

本研究は、化学物質による経皮ばく露防止対策の強化が求められる中、実作業環境における化学防護手袋の適切な選定および使用を支援することを目的として実施したものである。近年、労働安全衛生法令の改正により、皮膚等障害化学物質等を取り扱う際の保護具使用が義務化・強化されている。一方で、実際の作業現場では複数成分からなる混合溶媒が広く使用されているにもかかわらず、既存の耐透過性評価は主として単一物質を対象としており、混合溶媒条件下での透過挙動に関する知見は十分でない。また、現場では化学防護手袋の選定方法や交換時期の判断に困難を感じている実態も指摘されている。

本研究では、実作業環境に即した化学防護手袋の選定基盤の構築を目的として、①作業現場における化学防護手袋の選定・使用実態調査、②簡易的な透過評価法の開発、③透過メカニズムの理論解析、④多成分分析法の整備、の4つのサブテーマを相互に連携させて検討を行った。

令和7年度は、単一溶媒および混合溶媒条件におけるニトリル製化学防護手袋の透過挙動を評価し、混合溶媒条件下では単一溶媒から予測されない透過の早期化が認められることを確認した。また、Hansen 溶解度パラメータ (HSP) や Flory-Huggins 相互作用パラメータ ( $\chi$ ) に基づく解析および膨潤挙動との比較により、材料と溶媒との親和性が透過挙動に関与することが示された。さらに、デシケーター法や検知剤法について、透過挙動を比較的簡便に把握するための評価系として基礎的知見を得た。加えて、リスクコミュニケーション後アンケートの解析を通じて、現場における手袋選定上の課題や支援ニーズを整理した。

今後は、開発した評価法について JIS 法との比較検証を進め、妥当性および適用範囲を整理するとともに、混合溶媒条件を考慮した実務的評価法および化学防護手袋選定支援手法の構築に向けた検討を進める予定である。

## 目次

統括報告書 …… p.3

分担報告書「作業現場で使用されている化学防護手袋の選定状況・使用状況に関する調査－調査項目の事前調査－」 …… p.6

分担報告書「化学防護手袋における有機溶剤の透過挙動の評価－単一溶媒と混合溶媒の比較－」 …… p.16

分担報告書「化学防護手袋における有機溶剤の透過速度に影響を及ぼす要因の解析」 …… p.24

労災疾病臨床研究事業費補助金 統括研究報告書

労働環境調査に基づく保護具の簡易透過性測定法の開発と透過機構解析

研究代表者 柳場由絵 独立行政法人労働者健康安全機構 労働安全衛生総合研究所  
化学物質情報管理研究センター 生体防御評価研究室 室長  
分担研究者 三宅 祐一 横浜国立大学 大学院環境情報研究院 教授  
分担研究者 津田洋子 帝京大学 講師  
分担研究者 王 齊 独立行政法人労働者健康安全機構 労働安全衛生総合研究所  
化学物質情報管理研究センター 生体防御評価研究室 研究員

A. 研究の背景と目的

労働現場における化学物質ばく露は重篤な健康被害のリスクを伴う場合があり、国内では化学物質による健康障害のうち、経皮ばく露による皮膚障害の報告件数が多く、対策が急務となっている。令和4年の労働安全衛生法改正により、事業者の自律的な管理と保護具の使用が義務化されたが、依然として以下の課題が残されている。

- ・JIS規格に基づく耐透過性試験はコスト、時間、受託機関の不足によりすべての物質について実施することは現実的に困難である。

- ・現場で多用される混合溶媒については、JISに評価規定がなく、成分間の相互作用（共透過現象）によるリスクが十分に考慮されていない。

本研究は、現場における化学防護手袋選定上の課題把握を起点として、簡易的な透過評価法の開発、透過メカニズムの理論解析、および多成分分析法の整備を相互に連携させることで、実作業環境に即した化学防護手袋選定基盤の構築を目指した。

B. 令和7年度の実施体制と概要

本年度は、各サブテーマにおいて以下の活動を実施した。

サブテーマ①作業現場での選定・使用状況に関する調査：作業現場での手袋選定の課題を抽出するための疫学調査および質的研究である。

R7年度進捗：次年度（令和8年度）の本調査に向け、事業所の開拓およびインタビュー・アンケート調査のための準備を行った。

サブテーマ②簡易的な手袋透過性評価方法の開発：従来のJIS法の課題を解決するため、実用性の高い評価系の構築に向け、測定条件および捕集条件の検討を行った。

- ・受託機関向け手法（デシケーター法）：手袋に溶媒を添加し、デシケーター内で空気を吸引（0.1 L/min）、チャコールチューブで5分ごとに捕集する方法について検討した。

- ・事業者向け手法（検知剤法）：検知剤の色調変化を視覚的に観察する方法を検討した。

サブテーマ③化学防護手袋の透過メカニズム

ムの検討：理論（物質移動論，高分子物性）と実験データの統合による解析を行った。

- ・構造的要因の特定：デジタルマイクロスコプを用いた解析により，メーカー公表値と実測厚みの乖離および滑り止め加工層の局所的な薄肉化を確認した。

- ・理論指標による検証：Hansen 溶解度パラメータ（HSP）に基づく RED や Flory-Huggins 相互作用パラメータ（ $\chi$ ）を用いた解析により，親和性が高く膨潤を誘発する溶媒ほど透過が早まることが，理論的にも説明可能であることを確認した。

サブテーマ④網羅的な定量分析方法の開発：現場の多様な化学物質に対応した GC-MS による分析法の確立を行う。

- ・令和 7 年度進捗：活性炭捕集からの脱着後サンプルの GC-MS を用いた多成分同時分析条件の予備検討と最適化を実施した。

## C. 主要な研究成果と詳細解析

### C.1 現場における化学防護手袋選定上の課題

- ・アンケート解析の結果，化学防護手袋の選定について「難しい」「実際の作業現場に適用しにくい」といった意見が多く認められた。また，SDS や既存マニュアルに対して，より具体的な耐透過性情報や実務的な選定指針を求める声が多く，単一物質ベースの情報のみでは現場対応が困難であることが示された。さらに，「厚い手袋は作業しにくい」といった意見も認められ，防護性能と作業性の両立が課題となっていることが明らかとなった。

### C.2 手袋素材と透過挙動の関係

- ・ニトリル手袋において，トルエンなどニ

トリル材料を膨潤させやすい溶媒では，高い膨潤率を示し，ブレイクスルータイム（BT）が短縮する傾向が認められた。

- ・一方，1-ブタノールやエチレングリコールモノブチルエーテルは，単体では膨潤が小さく，測定時間内（60 分）に透過は確認されなかった。

### C.3 混合溶媒における「透過促進」の実証

本年度の重要な成果は，混合溶媒条件下において透過促進を示唆する挙動が認められた点にある。

- ・現象：単独では透過しない 1-ブタノールが，トルエン等の材料との親和性の高い（膨潤を誘発する）成分と混合されることで，透過の早期化が認められた。

- ・メカニズム：材料を膨潤させやすい成分がポリマー内部に拡散経路を形成し，それにより他成分の移動が促進された可能性が考えられる。

- ・組成条件に関する知見：本研究条件下では，トルエンの含有率が低い条件では顕著な透過促進は認められなかった。

### C.4 製造元による性能差

同一素材（ニトリル），同一厚さであっても，製造元によって透過挙動に差異が生じることが確認された。これは配合や製造条件の違いが影響していると考えられ，現場で迅速に透過挙動を把握するための簡易評価の重要性を裏付けている。

## D. 統括と今後の展望

実際の作業現場では混合溶媒が広く使用されている一方で，既存の耐透過性評価は主として単一物質を対象としている。本研究では，そのギャップに着目し，令和 7 年度

の研究により、デシケーター法および検知剤法について、透過挙動を比較的簡便に把握するための評価系としての基盤を構築した。特に「混合溶媒条件下での成分間相互作用」を実験と理論の両面から明らかにしたことは、従来の単一物質データのみに基づく手袋選定の限界を示す重要な知見である。さらに、HSPに基づく相互作用評価と膨潤挙動の解析により、混合溶媒条件下での透過促進を説明しうる理論的に説明可

能であることが示された。

令和 8 年度以降の計画：

- ・開発した評価手法について、JIS 法との比較検証を通じて妥当性および適用範囲を整理するとともに、混合溶媒条件を考慮した実務的評価手法の適用範囲および実用可能性の整理に向けた検討を進める。
- ・実態調査を本格化させ、現場のニーズに即した予測モデルの構築とガイドラインの策定を進める。

労災疾病臨床研究事業費補助金  
(分担) 研究報告書

作業現場で使用されている化学防護手袋の選定状況・使用状況に関する調査

— 調査項目の事前調査 —

分担研究者 津田洋子 帝京大学 講師

研究代表者 柳場 由絵 独立行政法人労働者健康安全機構 労働安全衛生総合研究所  
化学物質情報管理研究センター 生体防御評価研究室 室長

本研究は、化学物質管理に関する法改正により、皮膚障害等を防止するための化学防護手袋の適切な選定・使用が求められるようになった背景のもと、現場での課題や利用者のニーズを明らかにし、より実用的な手袋選定・運用方法の確立を目的として実施されたものである。研究では、厚生労働省のリスクコミュニケーション（意見交換会）後に収集されたアンケート自由記述を対象として、テキストマイニング手法により分析を行い、参加者の意見や課題認識を抽出した。その結果、化学防護手袋の選定や使用について「難しい」と感じる意見が多く、特に SDS や既存マニュアルに対しては、より具体的なデータや実務に直結した情報の充実を求める声が多いことが明らかとなった。また、マニュアルは一定程度活用されているものの、内容の多さや理解の難しさが課題として指摘され、複数化学物質の取扱いや手袋の交換時期など、現場ごとの対応に課題が生じている実態も示された。一方で、リスクコミュニケーションの継続により、手袋選定に関する理解は徐々に広がっていることも確認された。以上より、現行のマニュアルだけでは現場対応が十分とは言えず、より具体的に分かりやすい情報提供や実践的な支援の必要性が示唆された。今後は実際の事業場における調査を通じて課題をさらに整理し、誰もが活用しやすい化学防護手袋の選定・使用方法の提案につなげることが期待される。

A.研究目的

「労働安全衛生規則等の一部を改正する省令（令和 4 年厚生労働省令第 91 号）」（令和 4 年 5 月 31 日交付）により、化学物質管理は自律的管理に移行し、皮膚・眼刺激性、皮膚腐食性または皮膚から吸収され健

康障害を引き起こしうる化学物質とその製剤を製造・取扱う際には、労働者に障害等防止用保護具を使用させることが義務もしくは努力義務となった。

法令改正前は化学防護手袋の選定について詳細に規定されておらず、経皮吸収の可能

性を示す研究報告や経皮吸収による生体影響の可能性を示す研究報告等を参考に個別具体的にばく露防止措置が定められている。平成 28 年に発生したオルトトルイジンなどの芳香族アミンを取扱う事業場における労災事例では、手袋を装着していたにもかかわらず経皮吸収の影響と推察される健康障害が発生している<sup>1)</sup>。

化学防護手袋は素材の種類により特定の化学物質の透過を防止するが、どの素材が耐透過性があるのか明確でない化学物質も多い。化学防護手袋の素材の耐透過性は JIS T 8030 で試験しクラス分けされるが、近年の研究では簡易試験装置を用いた化学防護手袋の耐透過試験報告も多い。

しかし、一般の利用者は研究報告等を検索する機会も少なく、厚生労働省より公開されている「皮膚障害等防止用保護具の選定マニュアル」<sup>2)</sup>を参考に化学防護手袋を選定している。マニュアルでは、対象となる化学物質の取扱い方法や取扱い時間、また、単一物質に対する「耐透過性能一覧表」<sup>3)</sup>を用いて、使用している化学物質に対する耐透過性を有する化学防護手袋の素材を調べ、その素材を用いた化学防護手袋の商品を選定する手順が示されている。

一方、実際の作業現場においては複数の化学物質を同時に使用することが多く、前述のマニュアルでは複数の化学物質が混在する場合の化学防護手袋素材の選定方法も示している。

法令改正により、皮膚等障害化学物質を取扱う際には耐透過性のある手袋（化学防護手袋）を使用するように義務付けられている。これらの化学物質は SDS 交付対象物質でもある。現在は、SDS 対象物質を取扱

う際に保護具を着用する場合には、保護具着用管理責任者を選任することとなっており、保護着用管理責任者の講習においては、前述のマニュアルに沿った化学防護手袋の選定方法が指導されている。しかし、保護具着用管理責任者が実際に化学防護手袋を選定する際には、複数の化学物質の混在や、リストには無い素材や厚み、交換時期の設定など、具体的方法に迷うことも多い。

保護着用管理責任者やそれらを管理する人々が、化学防護手袋を正しく選定・使用・廃棄するためには、彼らがどのようなことに不安や疑問を持っているのかを明確にし、それらの解決する事が大切である。本研究では、利用者の視点に立ち、化学防護手袋の選定・使用・廃棄方法における課題を整理し、実務的な支援方法の検討につなげることを目的とした。そのために、事業所における化学防護手袋の選定課題や、化学防護手袋メーカーとの円滑な意思の疎通に資する項目を明らかにすることを目的としている。初年度にあたる 2025 年度は、これらの調査を進めるための現状把握と今後の事業所への調査項目検討のための検討を行った。

## B.研究方法

令和 6 年度厚生労働省「皮膚障害等防止用保護具の適切な選択に係る普及・啓発事業」の一環として開催された「化学物質等の皮膚障害防止に有効な保護具の選択等に関するリスクコミュニケーション（意見交換会）」（第 1 回：令和 6 年 9 月 4 日，第 2 回：令和 6 年 10 月 24 日，第 3 回：令和 7 年 2 月 13 日）の事後アンケートの自由記

載欄の内容をテキストマイニング手法により、単語の出現頻度、共起関係および特徴語を解析した。

テキストマイニングは、ユーザローカル社のAIテキストマイニングを使用した<sup>4)</sup>。

第1回リスクコミュニケーションの終了時アンケートの自由記載は2種類あり「皮膚障害及び保護関連の自由記載」と「その他の個別意見」、第2回リスクコミュニケーションの終了時アンケートの自由記載も2種類あり「皮膚障害物質及び保護関連の自由記載」「その他の個別意見」、第3回リスクコミュニケーションの終了時アンケートの自由記載は4種類あり「マニュアル個別意見」「マニュアル要改善点」「マニュアル記載希望事項」「その他のコメント」の自由記載である。解析は、質問項目ごとと、各回の自由記載をまとめた「第1回自由記載全意見」「第2回自由記載全意見」「第3回自由記載全意見」「第1回から第3回自由記載全意見」について行った。

解析では、テキストマイニングにより、出現頻度の高い単語を図式化するワードクラウド、単語出現頻度、文章中出现する単語の出現パターンから類似したものを線で結んだ共起キーワード解析を行った。ワードクラウドでは出現頻度の高い単語は大きな文字で表され、青色が名詞、赤色が動詞、緑色が形容詞、灰色が感動詞を表している。単語出現頻度は、文章中に現れる単語の出現頻度を表すとともに、「スコア」としてその単語の重要度を解析し、そのテキストを特徴づける単語として表す。共起キーワードはテキスト内に含まれる出現パターンの類似した単語を線で結んでおり、共起の強さを三段階に分け、強い方から順

に「太い実線」「細い実線」「破線」で表している。

### C.研究結果

各回のアンケートは令和6年度厚生労働省「皮膚等障害防止用保護具の適切な選択に係る普及・啓発事業」事務局であったテクノヒル株式会社が実施し、アンケートデータのうち自由記載部分のみを入手した。第1回終了後アンケートには自由記載質問項目が2つあり、①皮膚障害及び保護具関連（回答91件）、②その他個別意見（回答59件）であった。第2回終了後アンケートには自由記載質問項目が2つあり、①皮膚障害物質&保護具関連（回答93件）、②その他個別意見（回答53件）だった。第3回終了後アンケートには自由記載質問項目が4件あり、①マニュアル個別意見（回答22件）、②マニュアル要改善点（自職場で活用するために）（回答11件）、③マニュアル記載希望事項（回答62件）、④その他コメント（回答97件）だった。

図1～3に第1回事後アンケートのワードクラウド、図4～6に共起キーワードの相互関係図を示した。

①皮膚障害及び保護関連、では、「難しい（出現頻度10、スコア0.8、以下同じ）」「行い難い（1, 7.65）」「考えにくい（1, 1.39）」など否定的な形容詞の単語頻出度スコアが多かったが、「し易い（1, 1.96）」と肯定的な形容詞もあった。共起キーワードでは、「し難い」「分厚い」「行い難い」のは共起の程度が強く、太い実線で示されていた。

②その他個別意見、では、

「厚労省 (34.94, 9)」 「選定 (25.53, 9)」 「SDS (85.16, 8)」 「有害性 (55.11, 7)」 「し易い (1.96, 1)」 「手厚い (0.69, 1)」 「乏しい (0.51, 1)」 などの単語出現頻度のスコアが高かった。また、共起キーワードは、「SDS・GHS・記載・有害性・製品・良い」「マニュアル・選定・皮膚・障害」などであった。

図 7～9 に第 2 回事後アンケートのワードクラウド、図 10～12 に共起キーワードの相互関係図を示した。

- ① 皮膚障害物質&保護具関連、では、「難しい (2.26, 17)」 「乏しい (3.58, 3)」 などの語の出現頻度が高く、化学防護手袋の選定に対する困難感が示された。また、共起キーワードは、「SDS・記載・作成・欲しい」「データ・欲しい」「対応・難しい・感じる」などであった。
- ② その他個別意見、では、共起キーワードとして「パネルディスカッション・資料・頂く」は共起が強く、回答文章にも「パネルディスカッションの資料が欲しい」や「後日、質問の回答欲しい」などの要望が複数あった。

図 13～17 に第 3 回事後アンケートのワードクラウド、図 18～22 に共起キーワードの相互関係図を示した。

- ① マニュアル個別意見、では、「活用 (6.47, 8)」 や「乏しい (0.51, 1)」 「難しい (0.39, 7)」 「落とし込む (0.83, 1)」 などの単語出現頻度スコアが高く、回答文章にも「いざ実践するとなると難しい」「活用するまでには時間がかかりそ

う」など、内容を理解して活用するまでには時間がかかるとする表現が多くみられた。② マニュアル要改善点 (自職場で活用するために)、では、「マニュアル (8.31, 6)」 「読み解く (4.62, 2)」 の単語出現頻度スコアが高かった。③ マニュアル記載希望事項、では「マニュアル (28.19, 13)」 「事例 (18.03, 9)」 「選定 (29.68, 10)」 「満たせる (1.04, 1)」 「盛り込む (0.66, 1)」 「起こりやすい (2.06, 1)」 「好ましい (0.81, 1)」 の単語出現頻度スコアが高かった。また、「化学・防護・満たせる・手袋」の共起キーワードが強く関係していた。

#### D. 考察

3 回開催されたリスクコミュニケーションの自由記載の内容をテキストマイニングの手法を用いて解析を行った結果、第 1 回のリスクコミュニケーションでは化学防護手袋の使いにくさに関連する記載が多いと考えられたが、第 2 回では化学防護手袋の選定基準等を SDS に記載することを求めた意見や、対応の難しさ、化学防護手袋選定のためのデータの必要性など、化学防護手袋の選択や使用に関するより具体的な項目を求める記載が増えたと考えられた。

第 1 回の①皮膚障害及び保護関連、においてスコアの高い単語のうち「し易い」と肯定的な形容詞は「選択」とともに出現し、原文を確認すると「代表的な化学物質と使用保護具の適合表があれば使用者にとって選択し易いと感じた」という文章であり、化学防護手袋の選択をやりやすくする方法の提案であった。また、共起キーワードからは、厚い手袋は取扱いにくい、つまり使

用しにくい、という意見が持たれていることを示唆していた。

第1回②その他個別意見、でスコアの高かった単語から類推すると、厚生労働省より公開された化学防護手袋の選定方法や化学物質のSDSなどの情報が充実すると、手袋を選び易くなると考えられていることが推察された。

第2回事後アンケートでは、SDS記載や選定データに関する要望が多く、化学防護手袋の選定において、より具体的な情報提供を求められていることが示された。

第3回事後アンケートの②マニュアル要改善点（自職場で活用するために）、からは、公開されたばかりのマニュアルを読み込んでから、自職場に活用しようと考えていることが伺えた。また、第3回のリスクコミュニケーションでは、マニュアルに対する個別意見として「活用」や「参考」を想起させる記載に加え、マニュアル内容の難しさを指摘するコメントも多いと推察された。化学防護手袋使用者のニーズを満たす選定方法について、マニュアルへの具体的な記載を求める意見が多く認められた。これは、第3回の自由記載を全てまとめて解析した結果、マニュアルの内容の多さを想起させる回答が多かったことや、参加者からの質問に対する回答が欲しいことを想起させる記載が多いことを反映したものと考えられた。

事後アンケートの結果より、3回開催されたリスクコミュニケーションにより段階的に化学防護手袋の選定方法に対する認識が広がりつつあることが明らかとなったが、同時に、マニュアルの量の多さや理解の難しさも指摘されることとなった。また、現

場における化学物質の多様な使い方に対応する化学防護手袋選定方法を既存のマニュアルのみで対応することが難しく、参加者からの質問への回答を強く求められていることが示唆された。第3回のリスクコミュニケーションの事後アンケートにおいてこれらの要望が出ることは、皮膚障害等防止用保護具の選定マニュアルは化学物質を取り扱う事業所において活用がなされていると推察された。

本マニュアルには概要版も存在するが、今後は、複数の化学物質を取り扱う作業場における化学防護手袋の選定方法について、より詳細な具体例や説明がなされることで活用できる事業場が広がると考えられた。今年度の研究は、次年度の事業場における化学防護手袋の選定・使用に関するアンケートの質問項目を探索する目的も含んでいる。次年度の調査ではマニュアルの活用度合いや活用方法、その他の選定方法の調査、実際の交換時期の管理の方法、複数の化学物質を取り扱う作業における化学防護手袋の選定方法及びその課題、化学防護手袋の製品情報の入手方法、等について調査を進める予定である。これらをまとめて一般化することにより、さらに活用しやすい化学防護手袋の選定・使用方法を提案できるものと考えている。

## E. 結論

本年度の研究では、リスクコミュニケーション後アンケートの自由記載を対象としてテキストマイニング解析を行い、化学防護手袋の選定・使用に関する現場課題を整理した。その結果、化学防護手袋の選定に対する困難感が依然として大きいこと、また

特に、複数化学物質を取り扱う場合の選定方法や交換時期など、現場で判断に迷いやすい事項への支援ニーズが大きいことが示された。一方で、リスクコミュニケーションを通じて、化学防護手袋の選定に関する理解が段階的に浸透していることも確認された。

取る しい 創い しく 聞く  
 懐い ぬめ る 対応 安全 し 易い みる 対策 少ない いらい  
 行う 適合 選す 障害 コスト 皮膚 メーカー 考える いただく  
 大きい 保護 多い 取扱う 選定 着用 懐しい  
 可能 し 耐 化学物質 sds 非常 聞く  
 事例 物質 透過 手袋 リスクアセスメン... 浸透  
 ありあたい 守る 情報 分厚い 性能 防護 行い 難い 使用 対策 必要 わかりやすい  
 できる 考えにくい 要する 思う  
 ありあたい しい 懐しい

[illegible]

考える 感じる たい  
 方法 具 場合 厚労省 作業 正しい  
 無い 遅く 必要 対策 適切 取扱う リスクアセスメント...  
 採い いた できる 多い ほしい  
 有難 浸透 阻害 し 易い 着用 対応 使う  
 行う 耐 皮膚 手袋 化学物質 sds いた いく  
 しづかり おる 悪い 多い 選定 物質 製品 保護 取り扱う 教える  
 大きい 出る 使用 記載 基づく 扱う 触れる なるほど  
 わかりやすい 細かい 無い 少ない ありがたい 取扱い ありがたい

The graph displays a dense web of connections between Japanese verbs and related concepts. Key clusters include:

- Top Left:** A linear chain of red nodes: "いいただける" → "ありがたい" → "思う".
- Bottom Left:** A cluster starting with "思える" (blue), connecting to "思ふ" (blue), "ASD" (blue), "対面" (blue), and "いたたく" (red).
- Middle Left:** A vertical sequence of blue nodes: "出来る" → "コスト" → "覚める" → "知覚" → "想像".
- Center:** A large hub-and-spoke structure centered around "知る" (blue). It connects to "知る" (green), "感じ" (green), "覚しい" (green), "守る" (red), "多い" (green), "保護" (blue), and "運送" (blue).
- Top Right:** A cluster involving "化学物質" (blue), "無害" (blue), "薬品" (blue), "危険" (blue), and "保護員" (large blue node).
- Bottom Right:** A cluster starting with "考える" (red), connecting to "思い" (red), "行方" (green), "いい" (green), and "いい" (red).

11

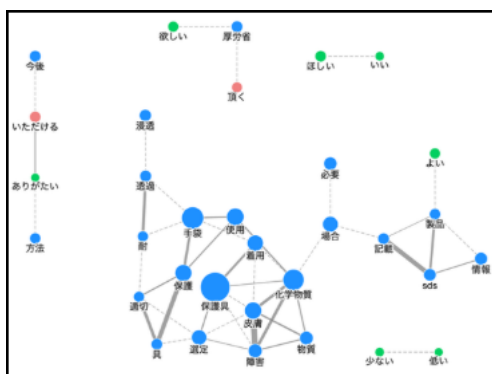


図6 第1回終了後アンケート 自由記載  
全意見 共起キーワード

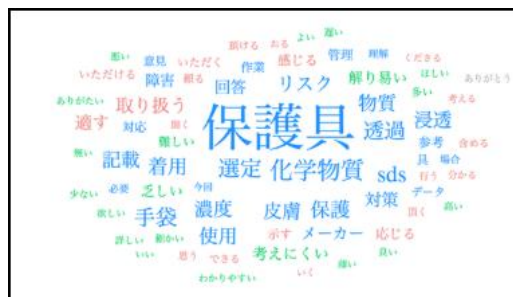


図9 第2回終了後アンケート 自由記載  
全意見 ワードクラウド

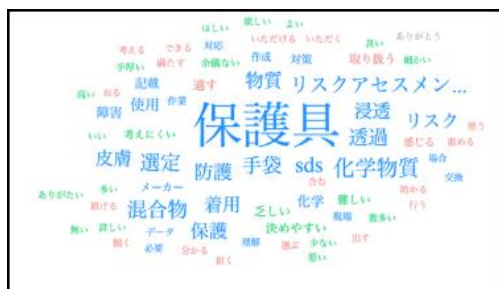


図7 第2回終了後アンケート ①皮膚障  
害物質&保護具関連 ワードクラウド

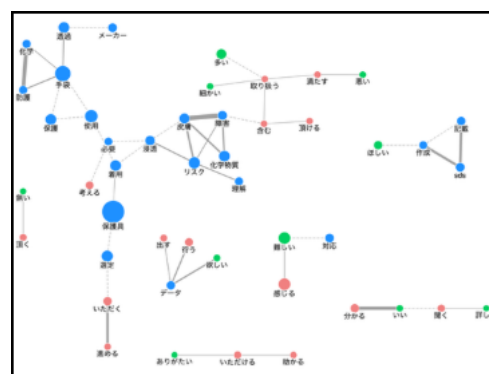


図10 第2回終了後アンケート ①皮膚  
障害物質&保護具関連 共起キーワード

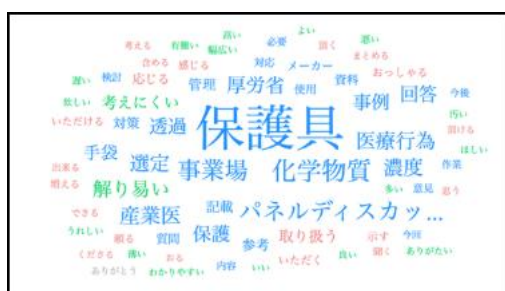


図8 第2回終了後アンケート ②その他  
個別意見 ワードクラウド

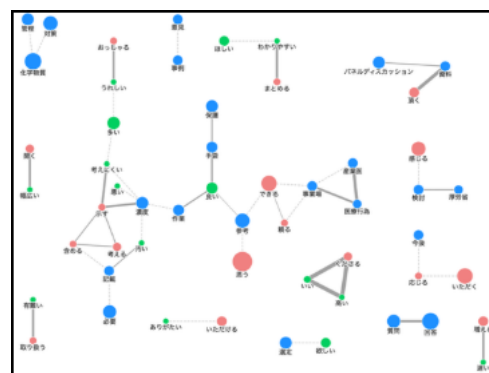
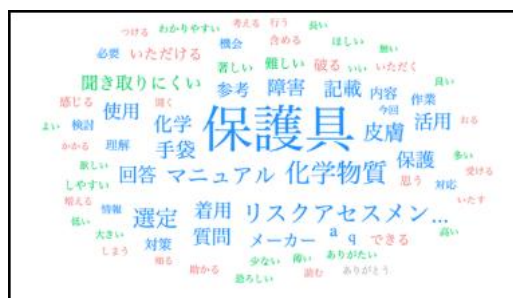
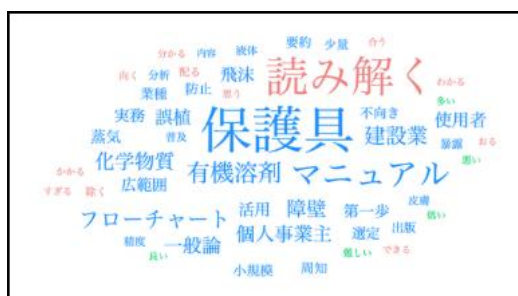
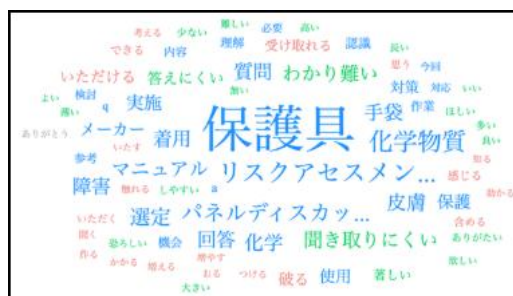
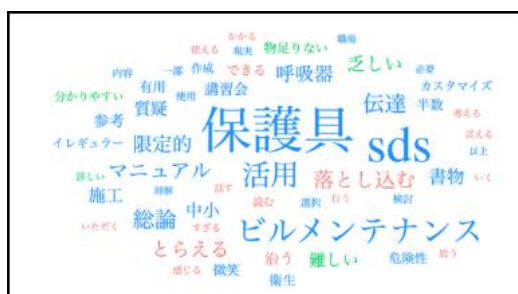
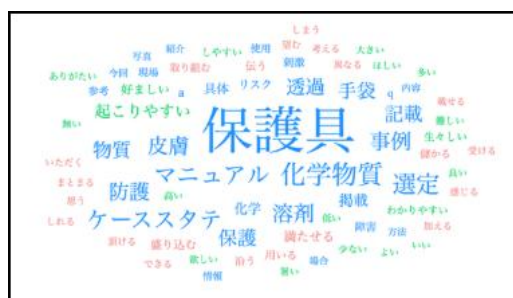
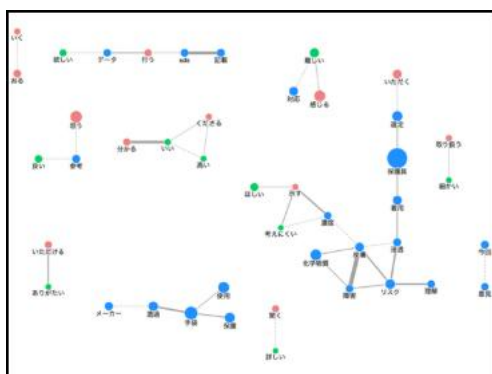


図11 第2回終了後アンケート ②その  
他個別意見 共起キーワード



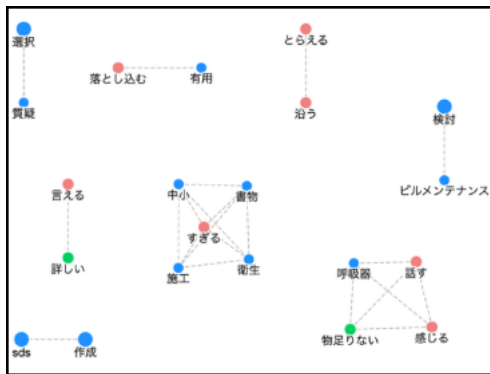


図 18 第 3 回終了後アンケート ①マニ  
ュアル個別意見 共起キーワード



図 21 第 3 回終了後アンケート ④その他コメント 共起キーワード

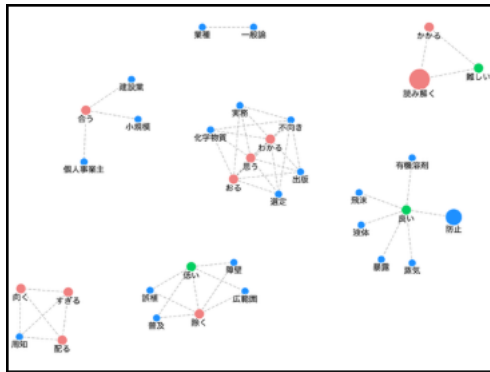


図 19 第 3 回終了後アンケート ②マニュアル要改善点 共起キーワード

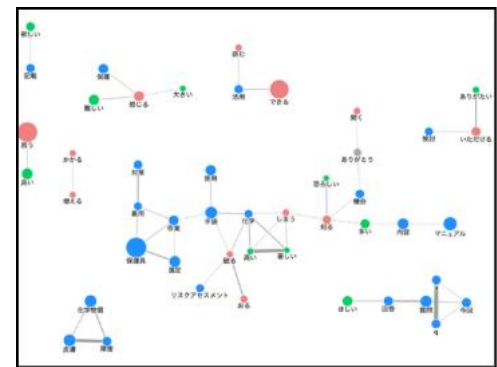


図 22 第 3 回終了後アンケート 自由記  
載全意見 共起キーワード

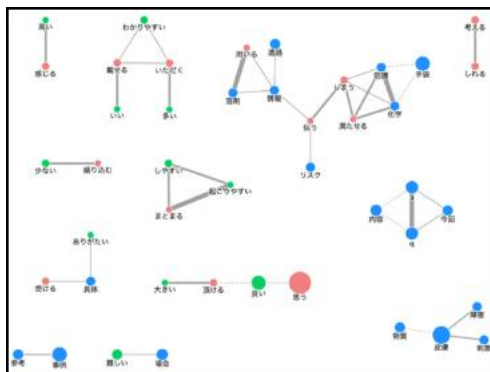


図 20 第 3 回終了後アンケート ③マニ  
ュアル記載希望事項 共起キーワード

## 引用文献

1) 災害調査報告書 A-2015-07 福井県内の  
化学工場で発生した膀胱がんに関する災害  
調査, 独立行政法人労働者健康安全機構労  
働安全衛生総合研究所, 平成 28 年 5 月,  
<https://www.mhlw.go.jp/file/04->

Houdouhappyou-11305000-

Roudoukijunkyokuanzeneiseibu-

Kagakubushitsutaisakuka/0000126164.pdf

2) 厚生労働省 皮膚障害等防止用保護具  
の選定マニュアル, 報告書作成時は第 3  
版, 令和 8 年 3 月,  
<https://www.mhlw.go.jp/content/11300000/001670143.pdf>

3) 厚生労働省 厚生労働省 皮膚障害等防  
止用保護具の選定マニュアル 参考資料

2: 耐透過性能一覧表

4) ユーザーローカル AI テキストマイ  
ニング。 <https://textmining.userlocal.jp/>

## G. 研究発表

### 1. 論文発表

なし

### 2. 学会発表

なし

## H. 知的財産の出願・登録状況（予定を含む。）

### 1. 特許取得

なし

### 2. 実用新案登録

なし

### 3. その他（受賞）

なし

## F. 健康危険情報

なし

労災疾病臨床研究事業費補助金

(分担) 研究報告書

化学防護手袋における有機溶剤の透過挙動の評価

— 単一溶媒と混合溶媒の比較 —

研究代表者 柳場 由絵 独立行政法人労働者健康安全機構 労働安全衛生総合研究所  
化学物質情報管理研究センター 生体防御評価研究室 室長

研究分担者 王 斉 独立行政法人労働者健康安全機構 労働安全衛生総合研究所  
化学物質情報管理研究センター 生体防御評価研究室 研究員

小野恵美 独立行政法人労働者健康安全機構 労働安全衛生総合研究所  
化学物質情報管理研究センター 生体防御評価研究室 研究員

本研究では、ニトリル製化学防護手袋に対する有機溶剤の透過挙動について、単一溶媒および混合溶媒条件における違いを明らかにすることを目的とした。対象溶媒としてトルエン、酢酸エチル、酢酸ブチル、1-ブタノール、エチレングリコールモノブチルエーテルを用い、混合溶媒としてこれらを含むラッカーシンナーを使用した。膨潤試験およびJIS法を参考にした気相捕集法による透過試験を実施し、Hansen溶解度パラメータ(HSP)に基づく親和性評価と併せて解析した。さらに、検知剤を用いた簡易的な評価方法についても検討した。単一溶媒条件では、Relative Energy Difference (RED)が小さい溶媒ほど膨潤率が高く、膨潤率が高いほどブレイクスルータイム(BT)が短くなる傾向が認められ、透過挙動はHSPに基づく評価により概ね説明可能であった。一方、混合溶媒条件では、単一溶媒から予測される挙動とは異なり、透過早期化が認められた。特に、単独では透過しにくい成分においても透過が促進される傾向が確認された。

これらの結果は、混合溶媒における透過挙動が溶媒間相互作用により変化することを示しており、単一溶媒に基づく評価のみでは実作業環境におけるリスクを十分に評価できない可能性を示唆する。また、検知剤を用いた透過挙動の把握を目的とした評価では、透過挙動の変化を視覚的に把握できる手法として、現場における透過リスクの把握および安全教育への応用が期待される。

## A. 研究目的

化学防護手袋は、有機溶剤などの有害化学物質による経皮ばく露を防止するために広く使用されている。しかし、実際の作業現場では複数の成分からなる混合溶媒が多く使用されており、単一溶媒に基づく耐透過性評価のみでは実際の透過挙動を十分に評価できない可能性がある。

特に、混合溶媒条件では、各成分間の相互作用や材料の膨潤状態の変化により、単一溶媒から予測される透過挙動とは異なる現象が生ずる可能性が指摘されている。しかしながら、混合溶媒条件下における化学防護手袋の透過挙動については、十分な知見が蓄積されていない。

本研究では、ニトリル製化学防護手袋を対象として、単一溶媒および混合溶媒条件における透過挙動を比較し、Hansen 溶解度パラメータ (HSP) に基づく親和性評価および膨潤挙動との関係について検討した。さらに、検知剤を用いた簡易的な透過挙動の評価についても検討し、現場における透過リスクの把握手法としての有用性について評価した。

## B. 研究方法

本研究では、ニトリル製化学防護手袋を対象とし、透過挙動および膨潤挙動の評価と、現場での簡易評価法の検討を行った。

### (1) 対象手袋

透過挙動および膨潤試験には、ニトリル製化学防護手袋 1 種類 (平均厚さ約 0.4mm) を使用した。

一方、簡易評価手法 (検知剤による評価) では、製造元の異なるニトリル製化学防護手袋 2 種類を用い、手袋間の透過挙動の違

いについても比較検討を行った。

### (2) 対象溶媒

対象溶媒は、トルエン、酢酸エチル、酢酸ブチル、1-ブタノール、エチレングリコールモノブチルエーテルとし、混合溶媒としてこれらを含むラッカーシンナーを用いた。トルエン (試薬特級)、酢酸エチル (試薬特級)、酢酸ブチル (試薬特級)、1-ブタノール (試薬特級)、エチレングリコールモノブチルエーテル (試薬特級) は、富士フィルム和光純薬株式会社より購入した。

### (3) 膨潤試験

手袋試験片を各溶媒に 30 分間浸漬し、重量、厚みおよび面積の変化から体積膨潤率 (Vol%) を算出した。

### (4) 透過試験

透過挙動の評価としては、手袋試験片を用い、JIS 法<sup>3)</sup>を参考にし、一定流量下で気相側を連続捕集し、ブレイクスルータイム (BT) を測定した。透過した溶媒は気相側からチャコールチューブで捕集し、二硫化炭素で抽出後、GC-MS により分析した。BT は、透過物質の濃度が連続して検出限界を超える濃度が確認された時点をも BT と定義した。

### (5) 親和性評価

各溶媒の Hansen 溶解度パラメータ (HSP) から Relative Energy Difference (RED) を算出した。混合溶媒については、各成分の含有率に基づき加重平均により算出した。

### (6) 検知剤を用いた評価

現場でも実施可能な検知剤を用いた透過挙動の傾向把握を目的とした評価手法として、手袋試験片をガラス瓶に固定し、検知

剤を入れたガラス瓶に手袋試験片を固定し、ドナー側に各溶媒または混合溶媒を添加し、検知剤の色調変化を観察することで透過開始の確認を行った。本試験では、製造元の異なるニトリル製化学防護手袋2種類を対象とし、手袋間における透過挙動の違いを比較した。検知剤には、トルエン用、酢酸ブチル用、酢酸エチル用およびエチルセルソルブ（エチレンジグリコールモノブチルエーテル）用検知管（株式会社ガステック製、光明理化学工業株式会社製）を使用し、色調変化を視覚的に確認することで透過開始の傾向を評価した。

### C. 研究結果および考察

単一溶媒条件において、各溶媒に対するニトリル製化学防護手袋の膨潤率および透過挙動を評価した結果、溶媒の種類により明確な差異が認められた。特に、トルエンおよび酢酸エステル系溶媒（酢酸エチル、酢酸ブチル）では比較的高い膨潤が認められ、これに対応してブレイクスルータイム（BT）は短い傾向を示した。一方、アルコール系（1-ブタノール）およびエチレンジグリコールモノブチルエーテルでは、膨潤は比較的小さく、測定時間内に透過が確認されなかった。膨潤率とBTの関係を解析した結果、膨潤率が高いほどBTが短くなる負の相関傾向が認められ、材料の膨潤挙動が透過挙動に影響を与えている可能性が示された（図1）。また、各溶媒のHansen溶解度パラメータに基づくREDと膨潤率との関係においては、REDが小さい溶媒ほど膨潤率が高くなる傾向が確認された（図2）。これにより、溶媒と材料との相互作用が膨潤を介して透過挙動に関与しているこ

とが示唆された。一方、混合溶媒条件では、単一溶媒条件から予測される透過挙動とは異なる結果が得られた。芳香族成分およびエステル系成分では単体条件と大きな差は認められなかったが、アルコール系およびグリコールエーテル系成分においては、単体条件では透過が未検出であったにもかかわらず、混合溶媒中では透過早期化を示唆するBT短縮が認められた。この結果は、混合溶媒中において材料の膨潤状態が変化し、拡散経路が形成されやすくなった可能性を示唆している。また、混合溶媒における透過挙動は、単一溶媒から算出されるRED値のみでは十分に説明できない結果となった（図3）。

さらに、検知剤を用いた評価では、混合溶媒添加後に色調変化が比較的早期に確認され、単一溶媒条件と比較して透過開始が早まる傾向が認められた（図4）。また、製造元の異なる手袋間においても、色調変化の発現タイミングに差異が認められ、同一素材および同一厚さであっても透過挙動の違いが生ずる可能性が示された（図5）。

### D. 考察

本研究では、ニトリル製化学防護手袋に対する有機溶剤の透過挙動について、単一溶媒および混合溶媒条件における比較を行った。その結果、単一溶媒条件においては、Hansen溶解度パラメータに基づくREDが小さい溶媒ほど膨潤率が高く、さらに膨潤率が高いほどBTが短くなる傾向が認められた。これらの結果は、溶媒と手袋材料との親和性が膨潤を介して透過挙動に影響をするという従来の知見と整合するものである<sup>2)</sup>。一方、混合溶媒条件では、

単一溶媒条件から予測される透過挙動とは異なる結果が得られた。特に、アルコール系およびグリコールエーテル系成分では、単体条件では透過が確認されなかったにもかかわらず、混合溶媒条件では透過の早期化が認められた。この結果は、混合溶媒条件下では単一溶媒条件から予測される透過挙動とは異なる現象が生じる可能性を示している。このような挙動は、芳香族成分やエステル成分によるポリマー内部に形成された拡散経路により、他成分の透過が促進されたためと考えられる<sup>4)</sup>。また、このような現象は、溶媒による材料の膨潤やバリア構造の変化により拡散経路が形成され、他成分の透過が促進される機構として整理することができ、皮膚透過に関する研究において報告されている共透過現象と類似した機構であると考えられる<sup>4)</sup>。特に、混合溶媒中では、単独条件では透過が確認されなかった成分においても、混合条件下では透過早期化を示唆する挙動が認められた。また、単一溶媒条件では RED と膨潤率および BT との間に一定の関係が認められた。一方、混合溶媒条件では、単一溶媒条件で認められた RED と透過挙動との関係は明瞭ではなく、透過挙動を単一の親和性指標のみで説明することは困難であった。このことは、混合溶媒系における透過挙動が、溶媒間相互作用や膨潤の時間依存性、さらには各成分の拡散速度の違いなど、複数の要因により規定されていることを示唆している。

さらに、検知剤を用いた透過挙動の傾向把握を目的とした評価においても、混合溶媒条件での色調変化が早期に確認され、透過挙動の変化を視覚的に捉えることが可能

であった。また、製造元の異なる手袋間の色調変化のタイミングに差異が認められたことから、同一素材・同一厚さであっても、配合や製造条件の違いにより透過挙動に違いが生じる可能性が示された。この点は、実際の作業現場における手袋選定において重要な示唆を与えるものと考えられる。なお、本評価は定量的な透過試験を代替するものではなく、透過挙動の変化を把握することを目的としたものである。

本研究にはいくつかの限界がある。まず、透過試験は限られた手袋および溶媒条件で実施しており、すべての混合溶媒系に一般化できるものではない。また、透過挙動の評価は主として BT に基づいており、透過フラックスなどの詳細な定量評価までは行っていない。さらに、混合溶媒における膨潤挙動の時間依存性についても十分な検討には至っていない。しかしながら、本研究は単一溶媒に基づく評価では捉えきれない混合溶媒特有の透過挙動を実験的に示し、特に透過しにくい成分の透過促進という現象を明確に示した点に意義がある。今後は、混合溶媒における各成分の透過フラックスおよび時間依存的な膨潤挙動を定量的に評価することで、透過機構のさらなる解明が期待される。

また、検知剤を用いた評価により、現場において透過リスクを直感的に把握できる可能性を示したことは、実務的にも有用であると考えられる。

## E. 結論

本研究では、ニトリル製化学防護手袋に対する有機溶剤の透過挙動について、単一溶媒および混合溶媒条件で検討した。単一

溶媒条件では、Hansen 溶解度パラメータに基づく親和性と膨潤挙動を介して透過挙動が説明可能であった。一方、混合溶媒条件では、単一溶媒から予測されない透過の早期化が認められ、特に通常は透過しにくい成分において透過が早期化する傾向が確認された。これらの結果は、混合溶媒における透過挙動には溶媒間相互作用が関与する可能性を示しており、単一溶媒に基づく評価のみでは実作業環境におけるリスクを

十分に評価できない可能性を示唆する。さらに、検知剤を用いた評価は、透過挙動の変化を直感的に把握できる手法として、現場における透過リスクの把握および安全教育への応用可能性が示された。

今後は、混合溶媒条件を考慮した実務的な化学防護手袋選定および簡易的な評価方法としての適用可能性について、さらに検討を進める予定である。

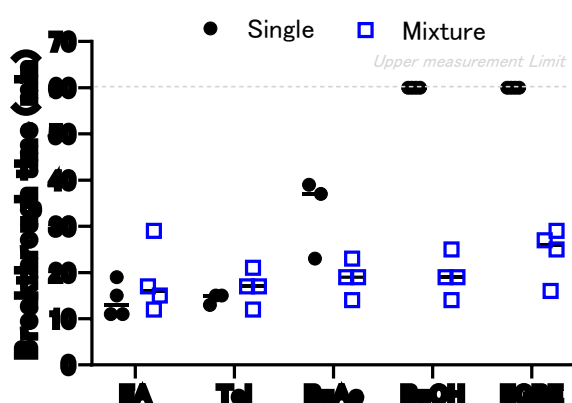


図 1. 単体溶媒および混合溶媒条件下におけるニトリル製化学防護手袋のブレイクスルータイム (BT) の比較

単体溶媒および混合溶媒条件下におけるニトリル製手袋の BT を示す。

酢酸エチル(EA)、トルエン(Tol)、酢酸ブチル(BuAc)、1-ブタノール(BuOH)、エチレングリコールモノブチルエーテル(EGBE)。

破線は測定上限 (60 分) を示す。

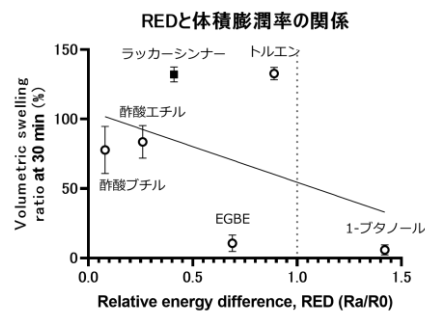


図 2. RED と体積膨潤率の関係

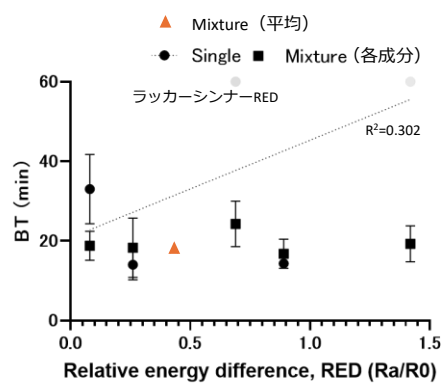


図 3. 単体および混合条件における RED と BT の関係

Mixture (平均) は混合溶媒組成から算出した平均 RED を示す。Mixture (各成分) は各構成成分の RED を示す

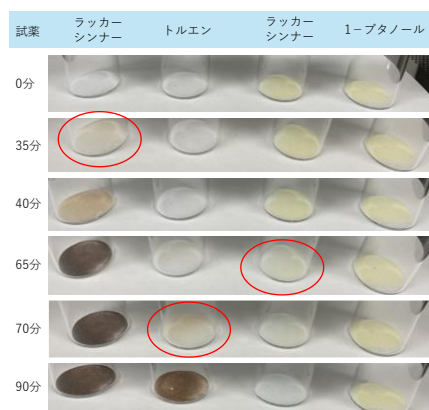


図 4. 検知剤による色調変化の観察例

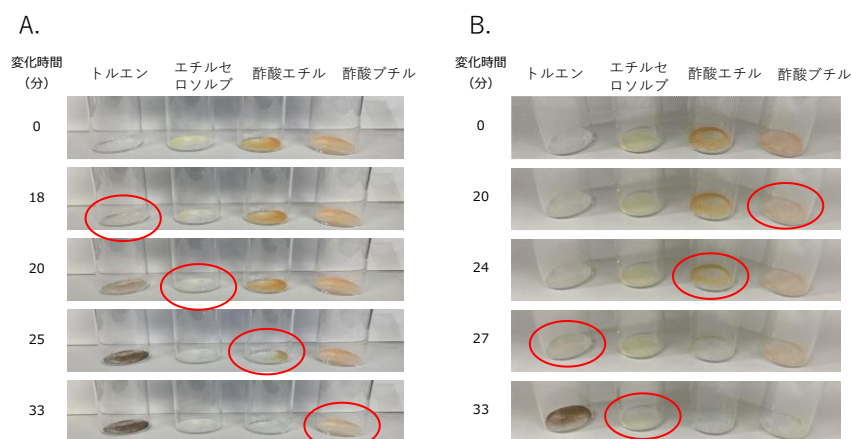


図 5. 製造元による性能差 (同じ素材・厚さの手袋の透過性)

A. メーカーA, ニトリル製化学防護手袋, 厚み 0.4 mm

B. メーカーB, ニトリル製化学防護手袋 厚み 0.4 mm

## E. 参考文献

1. Hansen CM. Hansen Solubility Parameters: A User's Handbook, Second Edition. CRC Press; 2007.
2. Forsberg K, Mansdorf SZ. Quick Selection Guide to Chemical Protective Clothing, 6th ed. Wiley; 2014.
3. JIS T 8116: 化学防護手袋
4. Jim E. Riviere. Dermal Absorption Models in Toxicology and Pharmacology. CRC Press; 2005.

## F. 健康危険情報

なし

## G. 研究発表

### 1. 論文発表

なし

## 2. 学会発表

- 1) 柳場由絵(2025)化学物質の経皮ばく露対策における保護具の重要性, シンポジウム/ 労働衛生保護具を科学する～労働衛生保護具の基本的研究と実装～, 産衛誌, 67 巻, p195.
- 2) 小野 恵美, 王 斉, 柳場 由絵, 化学防護手袋の透過挙動を現場で迅速に確認するための簡易評価法, 日衛誌第 81 巻第 96 回学術総会講演集号, 2026 年 3 月, S220.
- 3) 柳場由絵, 小野恵美, 王 斉, 単一・混合溶媒に対するニトリル手袋の溶媒透過リスク評価, 日衛誌第 81 巻第 96 回学術総会講演集号, 2026 年 3 月, S235.

H. 知的財産の出願・登録状況（予定を含む。）

1. 特許取得

なし

2. 実用新案登録  
なし

3. その他（受賞）  
なし

労災疾病臨床研究事業費補助金

(分担) 研究報告書

化学防護手袋における有機溶剤の透過速度に影響を及ぼす要因の解析

研究分担者 三宅 祐一 横浜国立大学 大学院環境情報研究院 教授

研究分担者 王 齊 独立行政法人労働者健康安全機構 労働安全衛生総合研究所  
化学物質情報管理研究センター 生体防御評価研究室 研究員

研究代表者 柳場 由絵 独立行政法人労働者健康安全機構 労働安全衛生総合研究所  
化学物質情報管理研究センター 生体防御評価研究室 室長

一般的な化学防護手袋の選定方法は、単一物質の破過時間に基づいて選定することであるが、透過メカニズムに関する研究は十分ではない。また、混合溶液の場合、物質の相互作用により、破過時間が変化する可能性があり、手袋の保護効果を正確に評価できない恐れがある。本研究では、簡易的な耐透過性試験方法を開発し、化学物質の透過メカニズムを議論したうえで、化学防護手袋の耐透過性に影響を与える要因を検討した。また、混合溶液の組成が耐透過性に及ぼす影響を評価した。

評価対象手袋は市販の3種類のもの（Glove 1・Glove 2：ニトリル製，Glove 3：ニトリル・ネオプレン製）である。対象物質はトルエンと1—ブタノールとし、その単物質または1：9，2：8，3：7，4：6，5：5 の比率で調製した混合溶液を添加液として実験を行った。経時的な分析に基づき、化学物質の透過開始時間および最大透過速度により耐透過性評価を行った。

構造観察に基づいて手袋の厚さを実測した結果、メーカーによる手袋の厚さを用いて手袋耐透過性を評価する妥当性について検討する必要があることがわかった。また、熱力学における相溶性理論に基づき、単一溶媒（トルエン）の場合では、素材において膨潤の程度の違いが透過開始時間および透過速度に影響を及ぼす一因であることが示唆された。また、実験結果と理論の相互検証を行った結果、手袋の耐透過性を予測することが可能であることが示唆された。さらに、混合溶媒の場合、透過性の低い物質（1—ブタノール）は透過性の高い物質（トルエン）の影響を受け、透過速度が高くなることが確認された。しかし、透過性の高い物質の含有率が一定以下であれば、その影響が無視できることが示唆された。これらの結果から、実際の作業環境において手袋を選択するときに、混合物による耐透過性への影響を考慮する必要があることが示された。把握および安全教育への応用が期待される。

## A. 研究目的

揮発性有機化合物（VOCs）は幅広い作業環境で用いられるが、そのばく露による労働者の健康被害が多数報告されている。日本では、化学物質による健康障害事案の中で経皮ばく露による皮膚障害が最も多く、吸入・経口ばく露の約4倍となっている<sup>1)</sup>。このような作業員へのばく露を防止するために、皮膚等障害化学物質等を使用する際に「不浸透性の保護具の使用」が義務化された<sup>1)</sup>。一般的な化学防護手袋の選定方法は、単一物質の破過時間に基づいて選定することであるが、透過メカニズムに関する研究は十分ではない。また、混合溶液の場合、物質の相互作用により、破過時間が変化する可能性があり、手袋の保護効果を正確に評価できない恐れがある。本研究では、簡易的な耐透過性試験装置を構築するとともに、素材の異なる化学防護手袋の耐透過性に影響を与える要因を検討した。また、混合溶液の組成が耐透過性に及ぼす影響を評価した。

## B. 研究方法

### B.1 試薬および物品

トルエン（試薬特級）および1-ブタノール（試薬特級）は、富士フィルム和光純薬株式会社より購入した。抽出溶媒は二硫化炭素（作業環境測定用、富士フィルム和光純薬株式会社）を、内標準物質は重水素ラベル化したトルエン-d8（Cambridge Isotope Laboratories, Inc.）を使用した。実験において使用したサンプラー（カーボンビーズアクティブジャンボ）、ミニポンプ（MP-W5P）、およびデシケーターは柴田科学株式会社（埼玉、日本）より購入し

た。

### B.2 対象化学防護手袋

評価対象の化学防護手袋は、ニトリルゴム製手袋（Glove 1, 2）とニトリル・ネオプレンゴム製手袋（Glove 3）であり、合計3種類とした。これらの詳細情報は表1に示す。対象手袋の素材と厚さなどの情報はメーカーにより公開されているが、化学物質の透過性に影響を及ぼす要因を検討するために、本研究ではデジタルマイクロスコープ（VHX-8000, KEYENCE）を用い、対象手袋の構造を観察し、厚みを実測した（n=5）。

### B.3 透過実験

本研究では、トルエンおよび1-ブタノールを対象物質として、これらの単物質および混合溶液に対して透過実験を行った。混合溶液の組成比を表2、実験装置を図1に示す。まず、評価対象手袋を裏返して、指部を切りだした。指部は、人差し指・中指・薬指のいずれかとした。そこに500  $\mu$ Lの添加液を添加し、ダブルクリップで密封した後、直ちにデシケーター内に設置した。設置後、デシケーターに連結したミニポンプを用いて、デシケーター内の空気を捕集した。ポンプの流速を0.1 L min<sup>-1</sup>、捕集時間を120 minまたは180 minとした。物質の透過量を時系列分析するために、サンプラーは15 minごとに交換した。実験中において、室内空気中に含まれる対象物質を除去するため、デシケーターの入口に活性炭の捕集管を取り付けた。捕集後のサンプラーから活性炭を取り出

し、内標準物質入り (1  $\mu\text{g mL}^{-1}$ ) の二硫化炭素 (2 mL) を加えて 15 分間の振とう抽出を行った。遠心分離 (3000rpm, 15 min) した後、1 mL の上澄み液を分取し、分析液とした。

#### B.4 分析方法

ガスクロマトグラフ質量分析計 (GC-MS, 7890B-5977A MSD, Agilent) により定量分析を行った。分離カラムは DB-HeavyWAX (60 m  $\times$  320  $\mu\text{m}$   $\times$  0.5  $\mu\text{m}$ , Agilent) を使用した。注入量は 1  $\mu\text{L}$  とし、注入モードはスプリットであり、スプリット比は 10 : 1 であった。カラムオーブンの昇温条件は、70 $^{\circ}\text{C}$  で 5 min 保持、8 $^{\circ}\text{C min}^{-1}$  で 110 $^{\circ}\text{C}$  まで昇温し、その後 30 $^{\circ}\text{C min}^{-1}$  で 220 $^{\circ}\text{C}$  まで昇温し、1.5 min 保持とした。トルエン-d8, トルエンおよび 1-ブタノールの保持時間は、それぞれ 8.2, 8.3 および 10.3 min であった。イオン源温度は 230 $^{\circ}\text{C}$ 、四重極温度は 150 $^{\circ}\text{C}$  とした。定量イオンおよび参照イオンは、それぞれ m/z 98 と m/z 100 (トルエン-d8), m/z 91 と m/z 92 (トルエン), および m/z 56 と m/z 43 (1-ブタノール) であった。

#### B.5 精度保証および精度管理

トルエンと 1-ブタノールの検量線濃度は 1.25, 2.5, 5, 10  $\mu\text{g mL}^{-1}$  であり、良好な直線性が示された ( $r^2 > 0.99$ )。各サンプルにおけるピークの S/N 比が 3 以上であったことかつ標準液中におけるピークの保持時間と比較することで、そのピークを分析対象物質としてアサインし、定量イオンと参照イオンの比が理論値の 15%以内

であった場合に定量した。本研究で使用したサンプラーは、2 層の活性炭に充填され、後層と前層における物質の量を比較し、捕集中において破過の有無を評価した。後層から検出された物質の量が前層の 3%未満であったため、実験では破過が生じていないことを確認した。

#### B.6 耐透過性の評価方法

手袋の耐透過性は、対象化学物質の透過開始時間および最大透過速度を用いて評価した。デシケーター内の濃度が 1  $\mu\text{g L}^{-1}$  を超え、かつブランク値の 2 倍以上となった時点を透過開始時間とした。また、式

(1) により、捕集時間内での透過量から透過速度 ( $v_n$ ,  $\mu\text{g min}^{-1}$ ) を算出し、透過速度が最大となった時間における平均値を最大透過速度とした。

$$v_n = m_n/t_n = \frac{(m'_n + m''_n) - m'_{n-1}}{t_n} \dots (1)$$

ここで、 $mn$  は  $n$  本目のサンプラーで捕集している間に手袋を透過した物質 ( $\mu\text{g}$ )、 $mn'$  は  $n$  本目のサンプラーで捕集している間のデシケーター内の物質質量 ( $\mu\text{g}$ )、 $mn''$  は  $n$  本目の活性炭チューブに吸着した物質質量 ( $\mu\text{g}$ )、 $tn$  は活性炭チューブ 1 本あたりの捕集時間 (min) と示す。

#### C. 研究結果および考察

##### C.1 手袋構造の観察結果

化学防護手袋の観察結果を表 1 に示す。Glove 1 は単層のニトリルゴム製で内側に綿フロック加工を施した構造を有する手袋である。Glove 2 は二重構造のニトリルゴムと内側の綿フロック加工を有する手袋で

ある。Glove 3 は外側がニトリルゴムで内側がネオプレンゴムの手袋である。メーカーによる製品情報を確認したところ、各手袋の厚さがそれぞれ 0.38 mm (Glove 1), 0.58 mm (Glove 2) と 0.20 mm (Glove 3) であった (表 1)。一方、本研究において手袋の詳細構造を検討するために、手袋の厚さを実測した。Glove 1 の綿フロック層を除いて、ニトリルゴム層の厚さは  $0.308 \pm 0.002$  mm であった。Glove 2 については、外側のニトリルゴム (黒) が滑り止め加工の層であり、表面にクレーター状の凹みを確認した。この層は局所的に薄肉化しており、底面において部分的に下層素材 (緑色のニトリルゴム) が露出していることが観察された。そのため、Glove 2 の厚さは緑色のニトリルゴムのみとして実測し、 $0.272 \pm 0.012$  mm であった。Glove 3 については、外側のニトリルゴム層と内側のネオプレンゴム層の厚さが、それぞれ  $0.148 \pm 0.011$  mm と  $0.100 \pm 0.002$  mm であった。素材と厚さは化学防護手袋の耐透過性の影響要因であることは明らかである。Glove 2 および Glove 3 において、メーカーによる製品情報と実測した情報には乖離があり、メーカーによる製品情報のみを用いて手袋の耐透過性を評価することの妥当性について検討する必要がある。

## C.2 単物質に対する耐透過性の評価および透過メカニズムの解析

トルエンおよび 1-ブタノールの単物質を用いて実験を行ったときのデシケーター内濃度の経時変化は図 2 に示す。トルエン (図 2 左) について、Glove 1 と Glove 2

ではいずれも実験開始後約 30 分～45 分の間に透過開始し、Glove 3 では実験開始直後から 15 分の間に透過開始がみられた。また、Glove 3 におけるトルエンの最大透過速度は  $3460 \pm 778 \mu\text{g min}^{-1}$  であり、Glove 1 ( $1660 \pm 97 \mu\text{g min}^{-1}$ ) および Glove 2 ( $1220 \pm 170 \mu\text{g min}^{-1}$ ) より有意に大きかった (Welch の t 検定, 両側,  $p < 0.05$ ) (図 3)。これらの結果から、Glove 1 および Glove 2 より、Glove 3 においてトルエンが透過しやすいことがわかった。一方、いずれの手袋においても、デシケーター内の 1-ブタノール濃度はブランク値レベルであり、手袋を透過しなかった。

溶媒がゴム系ポリマーを透過する挙動は、溶媒とポリマーの熱力学的相溶性によって支配される<sup>2)</sup>。溶媒とポリマーとの熱力学的相溶性を定量的に評価する指標としては、Hansen 溶解度パラメータ (HSP) および Flory-Huggins 相互作用パラメータ ( $\chi$ ) が広く用いられている<sup>3)</sup>。 $\chi$  の値が小さいほど、溶媒とポリマーの相互作用が強く、溶媒吸収および膨潤が生じやすことが示され、さらに  $\chi$  の値が小さくなるとともに、膨潤比が指数関数的に大きくなる<sup>3)</sup>。膨潤が発生した場合、ポリマー内の自由体積が増大し<sup>2)</sup>、溶媒分子が透過しやすくなることが報告されている<sup>4)</sup>。本研究では、式 (2) と (3)<sup>3)</sup> を用い、評価対象物質と手袋の素材との  $\chi$  値を算出し、透過実験により得られた結果を検証した。

$$R_a = \left[ 4(\delta_d^s - \delta_d^p)^2 + (\delta_p^s - \delta_p^p)^2 + (\delta_h^s - \delta_h^p)^2 \right]^{1/2} \dots (2)$$

$$= \frac{V}{4RT} R_a^2 \dots (3)$$

ここで、 $R_a$  はポリマーと溶媒の相溶性の

距離 ( $\text{MPa}^{1/2}$ ),  $\delta d$  は分散項 ( $\text{MPa}^{1/2}$ ),  $\delta p$  は極性項 ( $\text{MPa}^{1/2}$ ),  $\delta h$  は水素結合 ( $\text{MPa}^{1/2}$ ),  $V$  は溶媒のモル体積 ( $\text{cm}^3 \text{mol}^{-1}$ ),  $T$  は絶対温度 (K),  $R$  は気体定数 ( $\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$ ) である。 $\chi$  の計算結果は表 3 に示す。いずれの素材においても、1-ブタノールよりトルエンの  $\chi$  値が低いこと、トルエンの透過性が高いことが示され、本研究の実験結果と一致した。また、ネオプレンゴムにおけるトルエンの  $\chi$  値が 0.167 であり、ニトリルゴムと比較して約 1/10 程度であったため、ネオプレンゴムはトルエンに対する耐透過性が低いことが示された。これらの結果から、単一溶媒の場合では、各素材において膨潤の程度の違いが透過開始時間および透過速度に影響を及ぼす一因であることが示唆された。

### C.3 混合溶液の耐透過性の評価

すべての対象手袋において、1-ブタノールの透過性が低いことにもかかわらず、トルエンと 1-ブタノールの混合溶液を用いて透過実験を行った場合、トルエンの含有率の増加とともに、1-ブタノールの最大透過速度が上昇したことが確認された (図 4)。C.2 において検討した透過メカニズムから、混合溶液中のトルエンによる手袋の膨潤が生じることが知られており、その場合にポリマー内部の自由体積が増大し、1-ブタノールが透過しやすくなると考えられた。

一方、Glove 1 と Glove 2 ではトルエンの含有率が 40% 以下、Glove 3 ではトルエンの含有率が 20% 以下の場合、1-ブタノールはほとんどトルエンの影響を受けずに、最大透過速度が求められなかった。つま

り、透過性が高いトルエンが共存する場合においても、一定の含有率以下であれば、透過性が低い 1-ブタノールへの影響が無視できることが示された。

### D. 結論

本研究では、透過実験を行い、3 種類の化学防護手袋におけるトルエンと 1-ブタノールの透過開始時間と最大透過速度を求め、これらの化学物質に対する手袋の耐透過性を評価した。また、物質の速度論、移動論と熱力学的相溶性理論に基づき、トルエンと 1-ブタノールの手袋透過メカニズムを検討したことで、実験結果と理論の相互検証を行った。本研究で検討した方法を用い、手袋の耐透過性を予測することが可能であることが示唆された。

混合溶媒の場合、透過性の低い物質 (1-ブタノール) は透過性の高い物質 (トルエン) の影響を受け、透過速度が高くなることが確認された。しかし、透過性の高い物質の含有率が一定以下であれば、その影響が無視できる可能性があった。したがって、実際の作業環境において手袋を選択する場合、混合物による耐透過性への影響を考慮する必要がある。

表 1. 評価対象手袋の情報

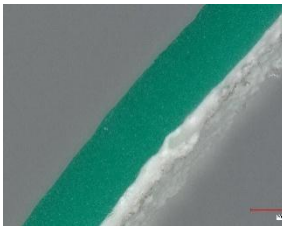
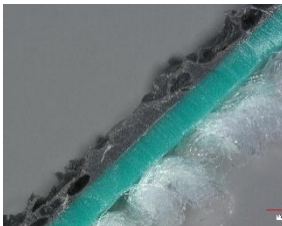
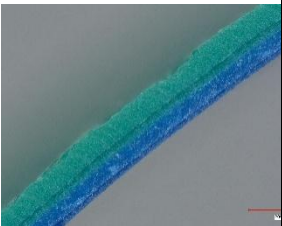
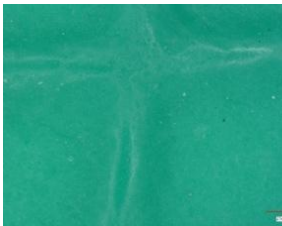
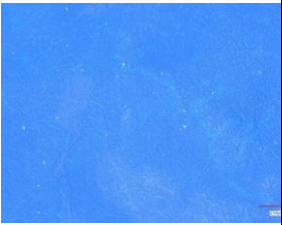
|            |                | Glove 1                                                                                      | Glove 2                                                                                       | Glove 3                                                                               |
|------------|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 素材         |                | ニトリル                                                                                         | ニトリル                                                                                          | ニトリル／ネオプレン                                                                            |
| 厚さ<br>(mm) | メーカー情報         | 0.38                                                                                         | 0.58                                                                                          | 0.20                                                                                  |
|            | 実測データ<br>(n=5) | 0.308±0.002<br>(ニトリル)                                                                        | 0.272±0.012<br>(緑色のニトリル部分)                                                                    | 0.148±0.011<br>(ニトリル)<br>0.100±0.002<br>(ネオプレン)                                       |
| 外観         |                |            |            |   |
| 横断面        |                |           |           |  |
| 外側         |                |           | <br>滑り止め  |  |
| 内側         |                | <br>綿フロック | <br>綿フロック |  |

表 2. 透過実験におけるトルエンと 1-ブタノールの混合比

| 混合溶液の組成 (%) |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|-------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| トルエン        | 90 | 80 | 70 | 60 | 50 | 40 | 30 | 20 | 10 |
| 1-ブタノール     | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 |

表 3. 評価対象物質と手袋の素材における  $\chi$  の値

| 手袋の素材   | トルエンと各素材の $\chi$ | 1-ブタノールと各素材の $\chi$ |
|---------|------------------|---------------------|
| ニトリルゴム  | 1.50             | 2.41                |
| ネオプレンゴム | 0.167            | 1.72                |

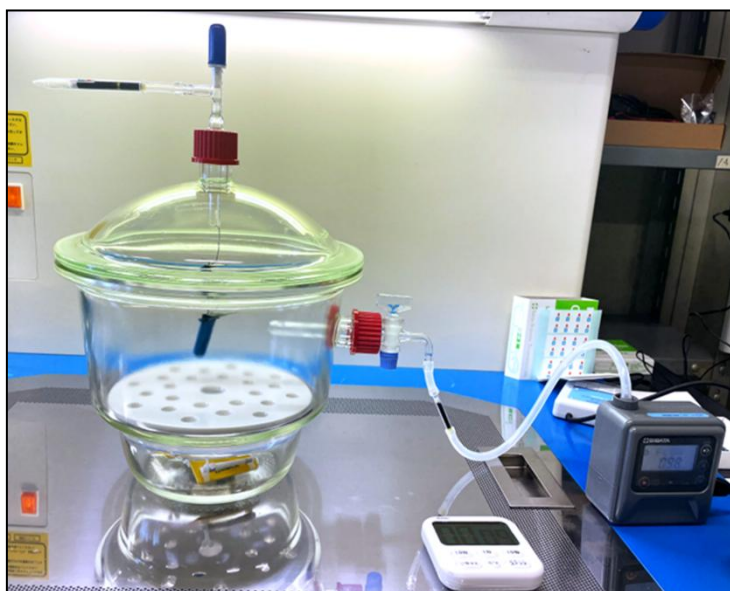


図 1. 透過実験

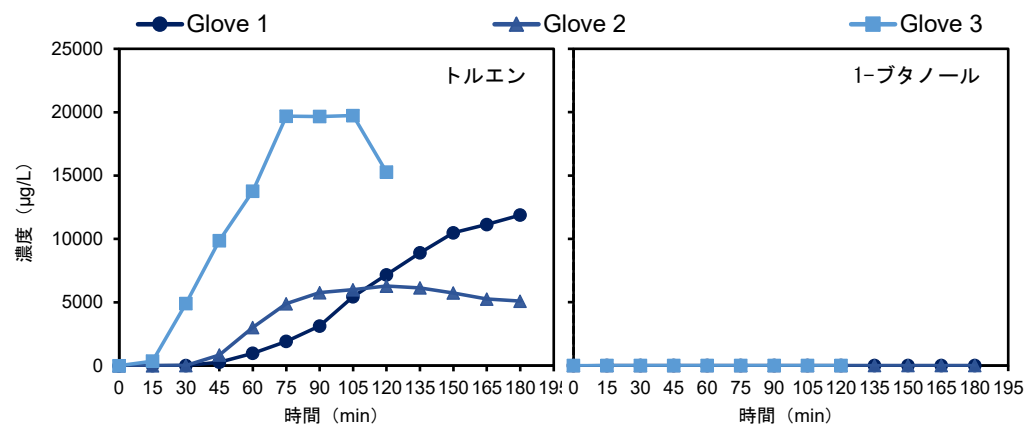


図 2. 単物質添加実験においてデシケーター内のトルエンおよび 1-ブタノール濃度の経時変化

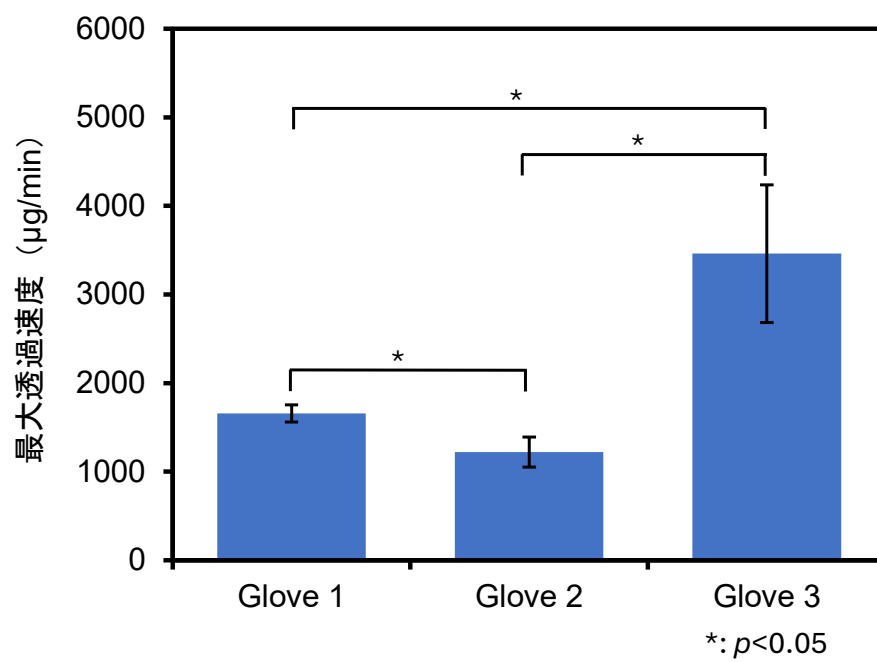


図 3. 対象手袋におけるトルエンの最大透過速度

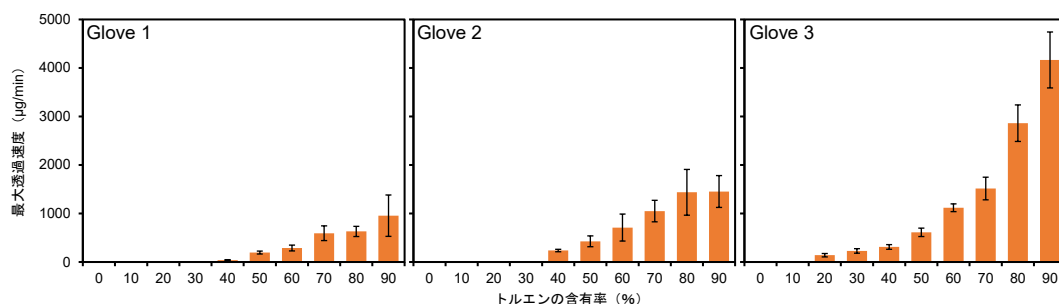


図 4. トルエンの含有率による 1—ブタノールの最大透過速度の変化

#### E. 参考文献

1. 厚生労働省：皮膚障害等防止用保護具の選定マニュアル第 3 版. (2026)
2. Flory, P. J.; Rehner, J. Statistical mechanics of cross-linked polymer networks I. Swelling. The Journal of Chemical Physics, 1943, 11, 512–520.
3. Liu, S. et al. Systematic investigation on the swelling behaviors of acrylonitrile-butadiene rubber in various fuels with the second component. Journal of Applied Polymer Science, 2022, 139, e52172.
4. Hansen, C. M. Hansen Solubility Parameters: A User's Handbook, 2nd ed., CRC Press, 2007.

柳場由絵, 三宅祐一：速度論解析に基づく化学防護手袋の素材による混合揮発性有機化合物の耐透過性への影響, 第 4 回環境化学物質合同大会, 要旨集, pp379-380, 2025.

2. 楊舒涵, 田川瑛梨, 王齊, 小野恵美, 柳場由絵, 三宅祐一：各化学防護手袋における混合揮発性有機化合物の耐透過性に関する速度論解析, 2025 年室内環境学会学術大会, 講演要旨集, pp76-77, 2025.

#### H. 知的財産の出願・登録状況（予定を含む。）

1. 特許取得  
なし

#### F. 健康危険情報

なし

#### 2. 実用新案登録

なし

#### G. 研究発表

1. 論文発表  
なし

#### 3. その他（受賞）

#### 2. 学会発表

1. 楊舒涵, 田川瑛梨, 王齊, 小野恵美,

1. 楊舒涵, 田川瑛梨, 王齊, 小野恵美, 柳場由絵, 三宅祐一：2025 年室内環境学会学術大会優秀ポスター賞（ウェリントンラボラトリーズジャパン賞）。各化学防護手袋における混合揮

発性有機化合物の耐透過性に関する速

度論解析, 2025 年 12 月.