

令和 2 年 5 月 22 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H03133

研究課題名(和文)紫外線ばく露が防護服の機械的強度・耐熱性低下に与える影響とその予測手法の確立

研究課題名(英文) Development on evaluation method of aging on protective clothing with high performance fiber

研究代表者

若月 薫 (WAKATSUKI, KAORU)

信州大学・学術研究院繊維学系・准教授

研究者番号：60408755

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 7,200,000円

研究成果の概要(和文)：高機能繊維を使用する防火服を例にとり、実際に使用される上でどの程度の紫外線に曝されるのかを見極め、市販の試験片を用いた促進劣化作業を行い、引張及び着火性試験を行った。織物や糸構造に対する関係を明らかにするため、混紡比・織物構造・糸構造という3つのパラメータから劣化原因を突き詰めた。引張強度は、織物構造より糸構造に依存した。動的引き裂き強度は、リップストップ及び糸数が影響を与えた。各生地と比較し強度を見ると、初期段階では大きな差がない。紫外線ばく露量の割合(Q/Q0)と強度保持率(I/I0)の関係から、紫外線ばく露による防火服生地の機械的強度劣化をモデル化できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、実際の消防・警察等の活動現場における防護服の使用状況の実態調査を直接反映し、防護服の経年使用に対する強度・耐熱性の機能低下を評価する耐候性試験手法を確立し、現在使用されている防火服・防弾チョッキなどの個人防護服の機能性の劣化過程をモデル化するものである。現在、製品基準は防護服の性能は出荷時の性能だけ決められているが、経年劣化による余剰安全度を踏まえていない。最終年度で行う、余剰安全度を踏まえた防護服設計手法の研究は、本研究で予定する一連の課題のすべての成果に基づくことなしに実施できない価値のあるものである。ゆえに、本研究は今後の高機能繊維を使用する防護服設計に一石を投じる意義がある。

研究成果の概要(英文)：Taking firefighter clothing using high-performance fiber as an example, determine how much ultraviolet light is exposed during actual use, perform accelerated deterioration work using commercially available test pieces, and perform tensile and ignitability tests. In order to clarify the relationship with the woven fabric and the yarn structure, we investigated the cause of deterioration from three parameters: blended ratio, woven structure, and yarn structure. The tensile strength depended on the yarn structure rather than the woven structure. The dynamic tear strength was affected by the ripstop and the number of threads. Looking at the strength of each fabric, there is no big difference in the initial stage. From the relationship between the ratio of the amount of UV exposure (Q / Q0) and the strength retention rate (I / I0), it was shown that the mechanical strength deterioration of fireproof clothing fabric due to UV exposure could be modeled.

研究分野：労働安全

キーワード：防護服 高機能繊維 引張強度 促進劣化試験

## 様式 C-19, F-19-1, Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

現在、各種の高機能繊維は、繊維一本の紫外線に対する性能劣化特性を示しているが、織物・編物・不織布などから構成する防護服に対する機械的強度・耐熱性の劣化度は具体的に示されていない。使用状況は地域における実情なども含め、把握しきれておらず、喫緊の課題として、現在使用されている高機能性布地を使用した防護服が紫外線にばく露する時間・強度・波長などを調査・整理し、試験評価を実施する必要がある。

### 2. 研究の目的

近年紫外線吸収の抑制剤が導入され、耐紫外線劣化をうたった高機能性繊維が市場にでてきている。これらは、抑制剤を繊維に後加工したものであり、時間とともに抑制剤が消失する。抑制剤は高機能繊維の化学構造を根本から耐紫外線にしているわけでないため、根本である高機能繊維及びその繊維布地に対する耐紫外線評価方法を原理から追及する必要がある。

特に、防護服の使用状況は地域における災害活動・日ごろの防護服の維持メンテナンス（洗濯・乾燥等）なども含め、全く把握しきれていないのが実情である。それゆえに、本研究は、研究協力者である消防・警察等機関との活動現場における防護服の使用状況の実態調査を踏まえた耐候性試験条件・試験方法を決定する。次に、確立した試験手法による防護服の経年使用に対する強度・耐熱性の機能低下を評価し、現在使用されている防火服・防弾チョッキなどの個人防護服の機能性の劣化過程のモデル化を行う。

### 3. 研究の方法

#### ■研究計画・方法

##### 【平成 28 年度】

紫外線波長・強度と各種高機能繊維の吸収波長帯の関係整理を行った。次に、高機能布地を用いた防護服・産業布地の使用年数・使用環境の調査を当大学の交流機関である消防庁、警察庁、防衛省、(公財)日本防災協会、(公社)日本保安用品協会などの関連団体の協力のもと実施し、個人防護服の使用期間と一年当たりの①紫外線強度、②紫外線ばく露時間を整理し、次年度への促進劣化試験の条件設定へ向けた足がかりとした。

##### 【平成 29 年度・平成 30 年度】

(1) さまざまな使用環境を再現可能な促進劣化試験条件・技術の確立 (H29 年度上期)

28 年度において整理した条件に基づく、光源の選定、促進劣化試験技術の確立を行った。

促進劣化試験については、太陽光の分光放射照度分布がほぼ等しく、プラスチック材料の促進劣化試験で使用されているスーパーキセノンウェザーメーター (SX75 スガ試験機 (株) 製、消防研究センター所有) を使用し、本研究で必要な光源の選定、促進劣化試験の条件設定を行う。繊維製品の促進劣化試験を行っているカケンテストセンター・スガ試験機 (株) と環境実態調査と促進劣化試験時間の設定時間の関係について技術的議論を繰り返し、設定条件を導いた。

(2) 防護服で使用する高機能布地の機能低下の評価 (H29 年度下期- H30 年度)

(1) において確立した促進劣化試験方法を利用し、①紫外線分光による高機能繊維の化学構造変化・物理的観察②試料の力学物性 (材料力学)・伝熱特性を測定し、現在販売されている防護服の製品出荷時及び促進劣化後の機能劣化の関係を見出した。実験で用いる具体的な高機能繊維の防護服としては、防火服 (メタアラミド・パラアラミド混紡, PBI・パラアラミド混紡) を用いた。高機能繊維を用いた防護服の使用年数は、用途・活動における地域特性・使用頻度によって異なり、一概に何年と規定されていない。ゆえに、本研究では 10 年を最大使用年数と想定し、初期劣化特性を 3 か月ごと、長期劣化特性を 1 年ごとと分け設定し、促進劣化試験を実施する。紫外線の総ばく露量 (ばく露強度×時間) を制御し、サンプル作成を実施した。

##### 【平成 31 年 (令和元年) 度】

使用年数に対する機能低下の予測モデルの確立 (H31 年度上期)

平成 30 年度までに行った実験結果をもとに、紫外線強度・ばく露時間をパラメータとする長期間使用における機能低下の予測モデルを確立した。また、この予測モデルから、現状品の製品規格等で求められている性能が何年後に基準値を下回るかの予測および実際の使用品との整合性調査を実施し、予測モデルの妥当性を確認した。

### 4. 研究成果

##### 【平成 28 年度】

防護服が使用される作業現場の状況と具体的な装備 (防護服) の紫外線に対する現状の問題点について調査・ヒアリングを進めた。その中で、各省庁・関係団体への調査の中で、消防活動が最も使用環境に関する情報の提供が多いこと、また使用される材料が国内外問わず比較的容易に手に入れられること、具体的な性能数値の規定が公開されていることが明らかになった。そこで、本研究の防護服のターゲットを消防で使用される防火服・活動服へ集約し、その結果をベースに各省庁で使用されている服の性能劣化の解釈へ利用できることと考えた。H28 年度後期において、実際の現場で使用される防火服の劣化を再現するために、各都道府県に所在する消防学校や各消防本部個々への協力をお願いし、防火服の使用環境の聞き取り調査を行い、防火服が 1 年間使用される上でどの程度の紫外線に曝されるのかを見極めた。

##### 【平成 29 年度】

本年度 (H29 年度) は、防火服防護性能の機械的強度・耐熱性・耐火性に着目し、引張試験、熱伝達性試験、表面着火性試験を行った。図 1 に示す平成 28 年度の研究成果を元に、防火服が 1

年間使用される上でどの程度の紫外線に曝されるのかを見極めた紫外線曝露量の設定を行い、市販の試験片を用いた促進劣化作業を図2に示すスーパーキセノンウェザーメーターを用いて実施した。

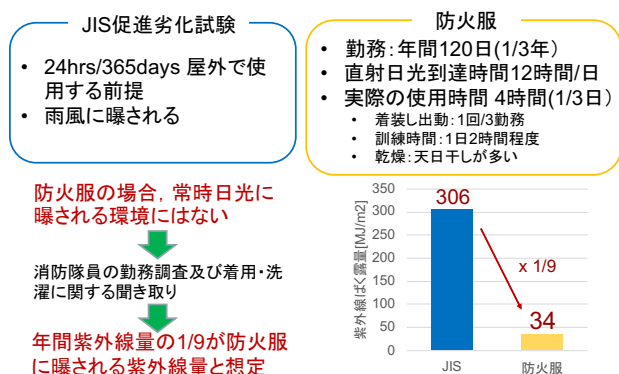


図1 使用環境調査に基づく紫外線曝露量の設定

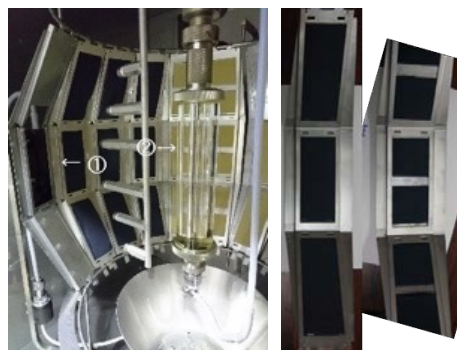


図2 スーパーキセノンウェザーメーターを利用した促進曝露試験

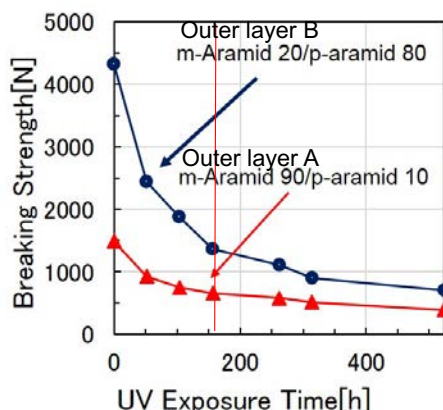


図3 平成29年度で使用した表地A, B引張強度の比較

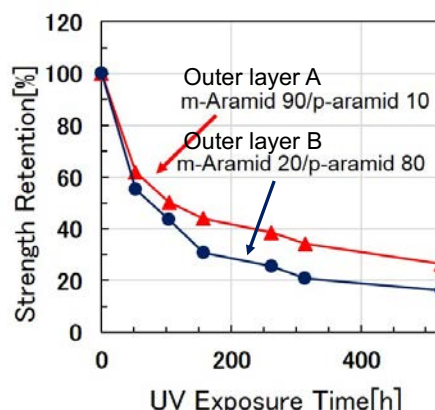


図4 平成29年度で使用した表地A, B強度保持率の比較

引張試験では、図3に示す防火服生地を表地の引張強度及び図4に示す強度保持率を指標として用いることにより評価を実施した。

熱伝達性試験では、防火服生地3層に放射熱熱流束 20kW/m<sup>2</sup>で加熱を行い、人体への熱傷評価指標として用いる HTI (熱伝達性指数) により引張試験で用いた表地 A, B を評価をした。図5と図6に示すように、紫外線曝露による熱傷への影響は非常に少なかった。しかしながら、図4に示すとおり、紫外線劣化により強度が低下し、生地に割れ・破断が起きた際には、その部分より熱は侵入するため、熱傷リスクは少ないと言い切ることは難しいと考える。

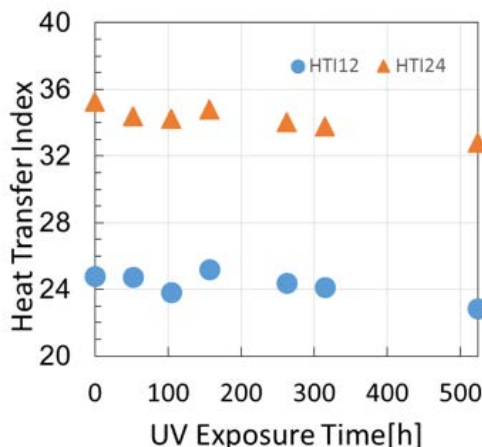


図5 熱伝達性試験 (HTI, 試験片 A)

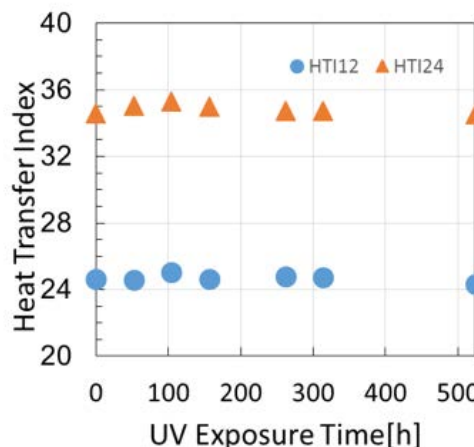


図6 熱伝達性試験 (HTI, 試験片 B)

着火性試験は、JIS T 8022 を参考に着火性試験を行った。実験は防火服生地3層にマイクロバーナーによる火炎を10秒間接炎させ、ビデオ映像を用いた残じん・残炎時間の測定をした。評価は残じん・残炎時間の長さによって行った。機械的強度は紫外線曝露によって顕著な劣化を示した。熱伝達性はメタアラミドの混紡率の高い表地 A の試験片で上がる傾向にあったが、パラアラミドの混紡率の高い表地 B では変化はみられなかった。この原因は今回の実験方法では把握できなかったため、検証を行う必要がある。着火性試験では残じん・残炎時間への影響は無か

ったが、図7に示す火炎接炎後の焦げ範囲に暴露時間の依存性が確認されたため、耐熱性への影響があったと考えられる。

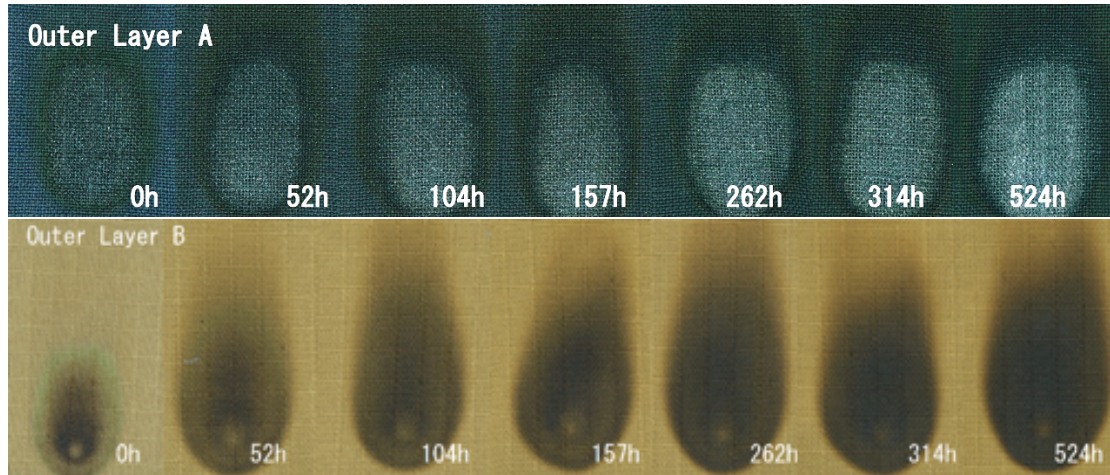


図7 10秒間接炎後の各試験片表地の焦げ付きの様子

【平成30年度】

H30年度は、この織物構造や糸構造と紫外線ばく露の関係を明らかにするため、混紡率の同じアラミド繊維の織物構造及び糸構造を変化させた生地を製作し、図8と図9に示す混紡比・織物構造・糸構造という3つのパラメータから劣化に関する原因を突き詰めた。具体的には、織り方における「リップストップ構造」や「糸構造の特殊化」を中心とした検討を行った。

図10と図11に示すとおり、双糸から織られた生地は、リップストップ構造が異なるにも関わらず、524時間ばく露（10年相当）では同等の引張強度を示した。しかし、二重構造糸を用いた生地は524時間ばく露の際にも顕著に高い引張強度を保持した。つまり引張強度では、織物構造より糸構造に依存していた。

試験片

Table Textile structure of fabric samples

試験片	目付 (g/m <sup>2</sup> )	選紡比 m/p	糸構造
A	252.1	90/10	双糸
B	255.6	80/20	双糸
C	230.6	75/23/静電繊維2	双糸
D	276.7	80/20	二重構造糸

目付: 単位面積当たりの質量値が大きいほど重い生地となる

織物構造-糸構造

内側の糸を外側の糸で覆うことで紫外線ばく露を妨げられる二重構造糸に着目

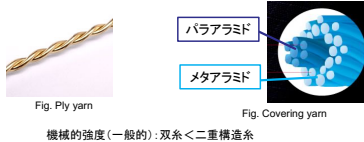


図8 平成30年度で使用した試験片及び織物構造(仕様)

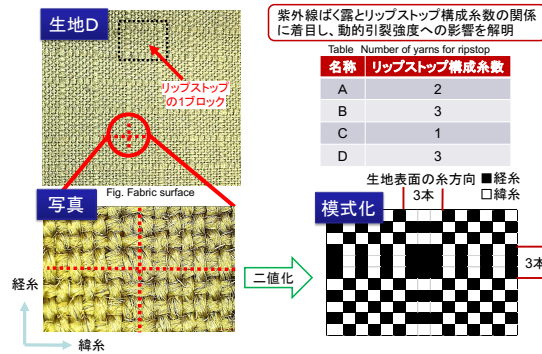


図9 平成30年度で使用した試験片のリップストップ仕様

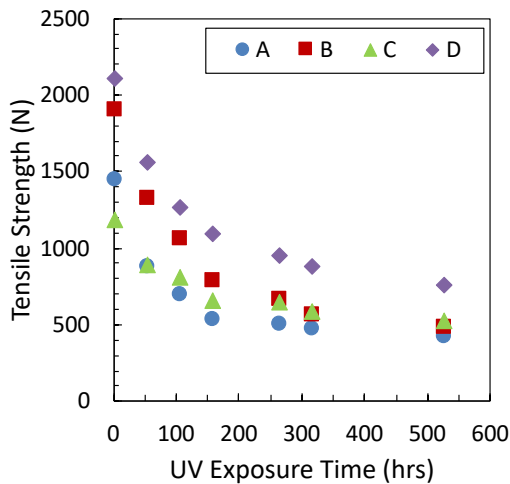


図10 織物構造・糸構造の違いによる引張強度の比較

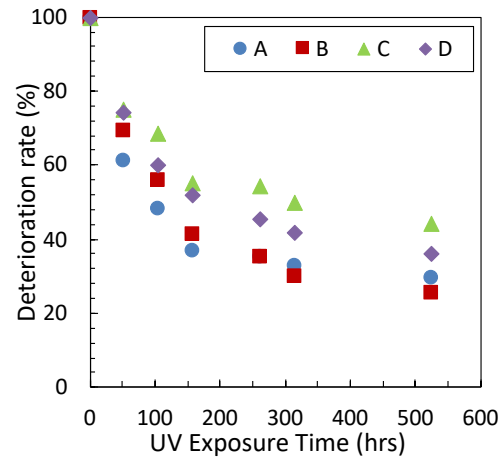


図11 織物構造・糸構造の違いによる強度保持率の比較

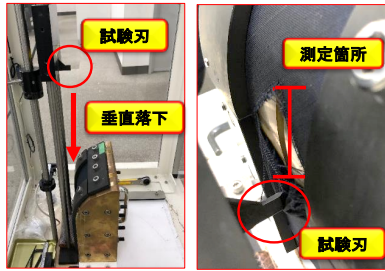


図 1.2 動的引裂強度試験装置詳細

レベル(Lv)	衝撃エネルギー(J)
4	13.6~14.0
3	6.6~7.0
2	3.3~3.5
1	1.6~1.8

図 1.3 動的引裂強度のエネルギーレベル

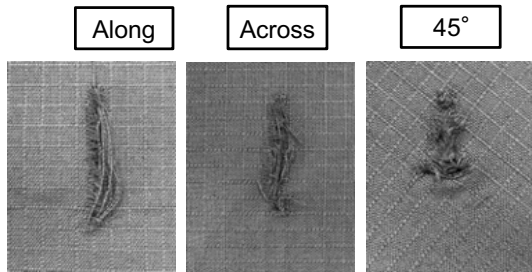


図 1.4 動的引裂評価試験写真(試験片 D)

Sample	Direction	0 hr	52 hrs	104 hrs	157 hrs
A	Along	2	1	1	Fail
	Across	2	1	1	1
	45°	3	2	1	1
B	Along	2	1	1	1
	Across	2	2	1	1
	45°	3	3	2	1
D	Along	2	2	1	1
	Across	2	2	2	2
	45°	3	3	2	2

図 1.5 動的引裂強度評価試験結果

図 1.2 と図 1.3 に動的引き裂き強度の手法を示す。図 1.4 と図 1.5 の評価結果が示すとおり、リップストップの間隔及び糸数が結果に影響を与えることが分かった。各生地で比較し強度を見ると、初期段階では大きな差がない。しかし、紫外線ばく露を重ねるうちに各生地間で、二重構造糸 > 双糸と優劣が生じた。ばく露時間が少ない期間では、生地には織り込まれているリップストップの構成に依存していることを示していることから、使用時間の早いうちはリップストップを構成している糸の本数が、引き裂き防止には重要である。一方、使用期間が長くなる際(紫外線ばく露を重ねると)、糸の構造は、引き裂き強度に影響を与えることが明らかになった。引張強度において、紫外線をばく露した生地の強度は、糸構造に依存するものが多く、特に二重構造糸は、紫外線劣化を妨げるため高い強度を保持するために有効な手段と考える。

【平成 31 年(令和元年)度】

過去 3 年間の実験結果をもとに、紫外線強度・ばく露時間をパラメータとする機能低下の予測モデルを確立した。式 1 に示すとおり紫外線ばく露量の割合( $Q/Q_0$ )と強度保持率( $I/I_0$ )の関係から、紫外線ばく露による防火服生地の機械的強度劣化を比較的シンプルにモデル化できることを示した。過去 3 年間はアラミド繊維を主とした高機能繊維生地であったが、応用例として表 1 に示す PBI (ポリベンゾイミダゾール) とアラミド繊維の混紡生地の劣化について評価を実施した。図 1.6 に示すように過去 3 年と同様の結果が得られた。 $Q_0$  は、初期紫外線ばく露量を示し、34 MJ/m<sup>2</sup> とした。強度保持率は、図 1.7 示すとおり紫外線ばく露量の割合の<sup>-3/5</sup>乗で減衰し、図中の 3 つの破線に示すように、 $I/I_0$  は  $(Q/Q_0)^{-3/5}$  に比例することを示した。

$$\frac{I}{I_0} = \alpha \left( \frac{Q}{Q_0} \right)^{-\frac{3}{5}} \quad (1 \leq \frac{Q}{Q_0} \leq 10) \quad (1)$$

$\alpha$  は、繊維種類の影響を受けるとともに、生地密度及びリップ本数と共に大きくなる知見を得た。

表 1 平成 31 年度で使用した試験片及び織物構造(仕様)

生地	繊維と混紡率[%]	生地密度 [g/m <sup>2</sup> ]	リップ本数
A	PBI 40 % + p-Aramid 60 %	207	2
B	m-Aramid 40 % + p-Aramid 60 %	210	2
C	m-Aramid 40 % + p-Aramid 60 %	235	3

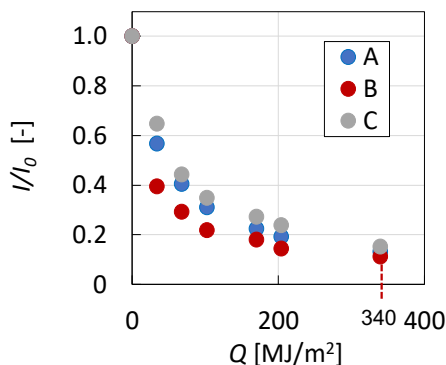


図 1.6 構成繊維及び織物構造の違いによる強度保持率の比較

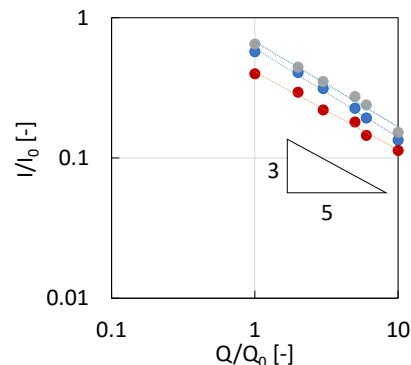


図 1.7 紫外線ばく露量の割合と強度保持率との関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 K. Wakatsuki
2. 発表標題 Effect of UV and Thermal Degradation on Mechanical Strength of Firefighter Clothing
3. 学会等名 The 11th Textile Bioengineering and Informatics Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岡村網太, 若月 薫, 渡邊憲道, 鮑 力民, 森川英明 (信州大), 尾川義雄 (消防研)
2. 発表標題 高機能繊維を用いた防火服に対する紫外線ばく露と機械的強度・耐熱性劣化のモデル化
3. 学会等名 日本繊維機械学会 第70回年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 松原 南, 若月 薫, 森川英明
2. 発表標題 放射熱及び紫外線に起因する防火服生地のパフォーマンス変化と構成繊維による傾向
3. 学会等名 日本繊維機械学会第73回年次大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	森川 英明  (Morikawa Hideaki)  (10230103)	信州大学・学術研究院繊維学系・教授    (13601)	

