

# 光吸収発熱保温製品の熱移動特性

上垣良信・宮澤航平・中村聖名・安永秀計\*1

## Thermal Transfer Characteristic of Heat Retaining Products with Light Absorbing and Generating Heat

Yoshinobu UEGAKI, Kohei MIYAZAWA, Masana NAKAMURA and Hidekazu YASUNAGA\*1

### 要 約

空気層含有衣料材モデルとした4重布帛試料を用いて、バナジウム(V)処理したウール試料の熱移動特性について、従来品の炭化ジルコニウム(ZrC)含有ポリエステルと比較検討した。布帛に吸着したVはポリエステル中の無機粒子ZrCと同程度の高い光吸収発熱を生じた。またV処理ウール4重布帛試料はZrC含有ポリエステル4重布帛よりも熱伝導率が1.4倍低かった。このことは、高い保温性を示している。したがって、屋外日照条件下の製品を想定した多重状態において、ZrC含有ポリエステル機能製品よりも高い保温効果が期待できる。

### 1. 緒 言

繊維産業の現状と今後の展望によると、高機能繊維は、企業が競争力を持ち、特に中小企業では「ものづくり」力が発揮される分野であると言われている。そしてこの分野は、今後の市場開拓も期待されており、産地企業の販路開拓が進むものと予測されている<sup>1)</sup>。この高機能繊維は、高強度等の「産業用途」と快適機能等の「衣料・インテリア用途」に大別されるが、いずれも今後の市場拡大が期待される素材である。前者にはアラミド繊維<sup>2)</sup>や炭素繊維<sup>3)</sup>等が代表的な素材として挙げられる。後者には吸汗速乾<sup>4)</sup>・紫外線遮断<sup>5)</sup>・蓄熱発熱<sup>6)-14)</sup>等があり、特に、最近の環境問題や節電意識の高まりを背景に、全国的に「WARMBIZ(ウォームビズ)<sup>15)</sup>」が推進されていることから、繊維自体に発熱保温性を付与することが注目されている。従来からの発熱保温機能性素材は、ポリエステル等の化学合成した素材に黒色炭化ジルコニウム(ZrC)等の無機粒子機能性物質を練り込むものである<sup>7)-9),10),16)</sup>。2019年3月には、これらの繊維製品評価方法として、繊維製品の光吸収発熱性評価方法(JIS L 1926:2019)が制定されたところである<sup>17)</sup>。この方法は現時点で対応国際規格が制定されておらず、日本国内で先行して実施されている唯一の機能評価方法である。積極的に発熱させる機能性繊維の評価方法も制定されたばかりで、現時点では、市場に出ている素材が前述した無機粒子練り込みポリエステルがほとんどである。すなわち、風

合いが重視される天然素材への適用は現段階では困難で、色選択自由度も低い(灰色に限定される)という課題がある。最近ではウールの持つ吸湿性・保温性といった天然素材の機能を求め、光吸収発熱材料として火山岩を練り込んだポリエステルとウールを混紡した素材が検討されている<sup>18)</sup>。このことから、天然素材をベースに高い機能を発現させることが、光吸収発熱保温製品の開発において理想的な方向性であると考えられる。我々はこれまでに、これらの課題に対して4価バナジウム化合物である硫酸バナジル水溶液を天然素材の媒染材料として用い、染色工程に光吸収発熱機能材となるバナジウムイオンを組み込むことで、高い光吸収発熱機能を付与したタンパク質系天然素材ウール布帛を開発してきた<sup>19)</sup>。また、近年注目されているセルロースナノファイバー作製技術を応用した改質法によりセルロース系天然素材へVを付与する技術も明らかにしてきた<sup>20)</sup>。加工剤の硫酸バナジル水溶液は、蓄電池の高性能電解質として注目されており<sup>21)</sup>、サプライチェーンが充実しているため、容易かつ安価に入手ができる利点もある。V処理した天然素材ウール布帛は、紫外線や波長1900—2500 nmの短波長赤外線での光吸収発熱性は確認されなかったが、1000 nm付近の近赤外線光を吸収し、高効率な光吸収発熱性を示した<sup>19)</sup>。現在、国内企業によるウォームビズ向け、主に天然素材のみで構成される光吸収発熱保温製品の開発が進んでいる。例えば、寒冷地向け登山用ウール製ニット帽、マフラーである。また、ウィンタースポーツ向けの手袋、天日干しで表面温度を70—80°Cの高温に発熱させ

\*1 国立大学法人 京都工芸繊維大学

ることで殺菌し、速乾性を付与する靴下等も検討している。しかしながら、布帛1枚で製品化される例はマフラー・ストールしか想定されず、製品化の幅を広げるためには、空気層を含む多重繊維層における熱的快適性を考慮する必要がある。そこで、本研究では、次年度製品設計に役立てるため、生地から製品評価に至る中間評価として、空気層を含む複合体熱伝導率の算出を試みた。

## 2. 実験方法

### 2-1 パナジウム処理

硫酸バナジル ( $\text{VOSO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , V) を  $5.0 \times 10^{-2} \text{ mol L}^{-1}$  になるように調製し、ウール布帛を V 処理した。水和水については、絶乾重量から算出 ( $105^\circ\text{C} \cdot 4$  時間乾燥後の重量と比較) した実験値 ( $n = 5.8$ ) より  $n = 6$  とした。V 処理は小型回転式ポット染色試験機である MINI COLOUR (株) テクサム技研) を用い、ウール布帛 10 g (染色堅ろう度試験用添付白布, 単一試験布, 毛 1-1 号, 日本規格協会 (JSA)) を処理した (浴比 1: 20,  $100^\circ\text{C}$ , 60 分間)。V 処理後、これらの布帛を  $2 \text{ g L}^{-1}$  のマルセルセッケン溶液でソーピングし (浴比 1: 20,  $50^\circ\text{C}$ , 20 分間), その後 1 分間流水で洗った。

### 2-2 光照射方法

4 重布帛の光吸収発熱性は、BOKEN BQE A 036 法<sup>22)</sup> を準用した。恒温恒湿室の湿度を 65% RH とし、室内温度  $20^\circ\text{C}$  で実施した。この方法では、測定試料設置箇所に裏面から熱電対温度センサーを取り付けた発砲スチロール製試料台の上に 15 cm 四方の大きさの布帛試料を置き、試料から 30 cm の距離に設置した写真用レフランプ (PRF-500WD, 岩崎電気 (株)) を用いて光を照射する。そして、光照射中、一定時間毎に熱電対温度センサーで温度を測る。また、10 分間の光照射後、ただちにレフランプを消灯し、その状態でさらに 10 分間温度を測定する。本研究では、4 重布帛の表裏面温度分布における最高温度を測定するために、熱電対温度センサーではなく非接触小型放射温度計 (赤外線サーモグラフィ InfReC Thermo GEAR G100, NEC Avio 赤外線テクノロジー (株)) を用い、放射率 0.94 で測定した。

### 2-3 空気層含有 4 重繊維試料の作製

空気層含有 4 重繊維試料は、ZrC 含有ポリエステル布帛 (ZrC 含有ポリエステル糸 (サーモトロン<sup>12)</sup>, 250 D / 1 本, ユニチカトレーディング (株)) を緯糸に使用して製織した; 経: ポリエステル, 75 D / 2 本, 緯: ZrC / ポリエステル, 250 D / 1 本, 密度:  $188 \times 67$  本 / インチ, 組織: 16 枚縹子軽口) および濃度  $5.0 \times 10^{-2} \text{ mol L}^{-1}$  で V 処理したウール布帛をそれぞれ 4 重にすることで作製した。対照は未処理ウール布帛とポリエステル布帛 (染色堅ろ

う度試験用添付白布, 単一試験布, ポリエステル 8-1 号, JSA) で作製した。これら試料の厚み (mm) は精密計器 (QUADRA-CHECK II, メトロニクス (株)) 付の測定顕微鏡 (ZKM-260D, カール・ツァイス・イエナ社) で側面方向からの最も厚い部分について測定した。試料厚みは、それぞれ ZrC 含有ポリエステル布帛が 22 mm, ポリエステル布帛が 4 mm, V 処理ウール布帛とウール布帛は 13 mm であった。

### 2-4 光照射時における熱伝導率評価

試料の光照射時における熱伝導率評価方法を記す。500 W のレフランプ (PRF-500WB/D, パナソニック (株)) から 30 cm の距離に 1 試料ずつ設置した。レフランプを用いて光を照射した状態で、約 10 分後の試料表面および裏面温度を  $45^\circ$  の方向から 70 cm の距離にてサーモグラフィを用いて記録した (実験室温度  $20^\circ\text{C}$ , 湿度 65% RH)。試料表面および裏面のサーモグラフィによる熱画像のうち、それぞれ最も高い 3 点を選び 3 点平均値の差を空気層含有繊維試料間の温度差  $\Delta T$  (K) ( $T_h - T_c$ : h = high, c = cold) とした。レフランプ正面から 30 cm の位置における熱流束  $q$  ( $\text{W m}^{-2}$ ) は照度測定器 (SOLAR POWER METER TM-207, TENMARS) で求めた。 $q$  は、レフランプ放射照度の平均値 ( $n = 10$ ) を用い、 $842 \text{ W m}^{-2}$  とした。熱伝導率  $\lambda$  ( $\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ) は、 $q$ , 試料の厚み  $\Delta x$  (m),  $\Delta T$  (K) を用いて次式 (1) で算出される。

$$\lambda = q \times \Delta x / \Delta T \quad \dots \dots \dots (1)$$

光源であるレフランプの個体差および配光特性により光源直下約 30 cm における放射照度は、レフランプを交換するとそれぞれ約  $800\text{—}1000 \text{ W m}^{-2}$  で一定値には定まらなかった (同一規格 10 個)。そのため、レフランプ放射照度は平均値  $842 \text{ W m}^{-2}$  とした。4 試料を同時比較するとレフランプ配光特性による試料配置差が及ぼす放射照度差が無視できないと考え、4 試料比較は、光源直下約 30 cm において 4 回それぞれ測定した。

## 3. 結果および考察

### 3-1 空気層含有 4 重ウール布帛試料を用いた V と ZrC の光吸収発熱保温性比較

図 1 から図 4 に V 処理ウール 4 重布帛と ZrC 含有ポリエステル 4 重布帛の表・裏面温度の光吸収発熱保温性試験結果を示す。V 処理ウール 4 重布帛の表面平均温度は  $59.1^\circ\text{C}$ , ウール 4 重布帛の表面平均温度は  $44.1^\circ\text{C}$  で V 処理ウール 4 重布帛の光源側最表面は  $15.0^\circ\text{C}$  の高い光吸収

発熱を示している（図1, 2）. 裏面温度はそれぞれV処理ウール4重布帛が39.4°C, ウール4重布帛が30.4°Cであった. 両者の表裏温度差  $\Delta T$  (K) はそれぞれV処理ウール4重布帛が19.7°C, ウール4重布帛の13.7°Cとなった（図1, 2）. ZrC含有ポリエステル4重布帛の表面平均温度は58.9°C, ポリエステル4重布帛の表面平均温度は38.9°CでZrC含有ポリエステル4重布帛の光源側最表面は20.0°Cの高い光吸収発熱を示した（図3, 4）. ウールはポリエステルよりも光吸収発熱により温まりやすく, ポリエステル4重布帛の光源側最表面が5.2°C低い. この温度差がV処理ウール4重布帛とZrC含有ポリエステル4重布帛の表裏温度差  $\Delta T$  (K) に影響していると考えられる. ポリエステル系の裏面温度は, それぞれZrC含有ポリエステル4重布帛が34.9°C, ポリエステル4重布帛が31.5°Cであった. 両者の表裏温度差  $\Delta T$  (K) はそれぞれZrC含有ポリエステル4重布帛が24.0°C, ポリエステル4重布帛の7.4°Cとなった（図3, 4）. ZrC含有ポリエステル製4重布帛の方が布帛の表面から裏面に熱が伝わる過程で温度の低下がより生じていると考えられる. 図5に図1から4を基にして算出した光照射中における4重布帛試料毎の熱伝導率  $\lambda$  ( $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ) を示す. V処理ウール4重布帛・ウール4重布帛・ZrC含有ポリエステル4重布帛・ポリエステル4重布帛の  $\lambda$  平均値はそれぞれ0.556, 0.772, 0.797, 0.453であった. また文献値<sup>23)</sup>によると空気は0.0257 (20°C), ウール素材は0.0390 (25°C), ポリエチレンテレフタレート (PET) は0.310 (25°C) である. 文献値熱伝導率の低い空気とウール素材は断熱能が高く, 文献値熱伝導率の高いPETは熱移動が生じやすい素材であるといえる. 光吸収発熱機能材を有しないウールとポリエステルを4重にした空気繊維複合体ではウールの  $\lambda$  平均値が0.797で最も高く, ポリエステルの  $\lambda$  平均値0.453よりも約1.8倍高い. V処理ウール4重布帛・ZrC含有ポリエステル4重布帛においては両者ともに同程度の59.0°Cに発熱しているため, 裏面温度の高いV処理ウール4重布帛の  $\lambda$  平均値0.556はZrC含有ポリエステル4重布帛の  $\lambda$  平均値0.772よりも約1.4倍低い値となっていると考えられる. これはV処理ウール4重布帛が光照射継続中の環境下, ZrC含有ポリエステル4重布帛よりも1.4倍優れた保温力を持っていることを示している.

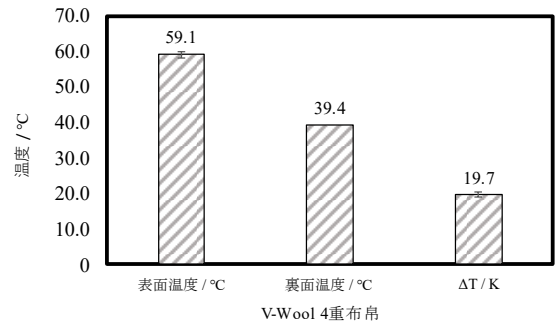


図1 V処理ウール4重布帛の表・裏面温度

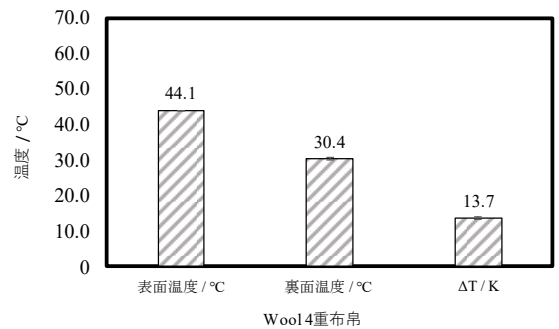


図2 ウール4重布帛の表・裏面温度

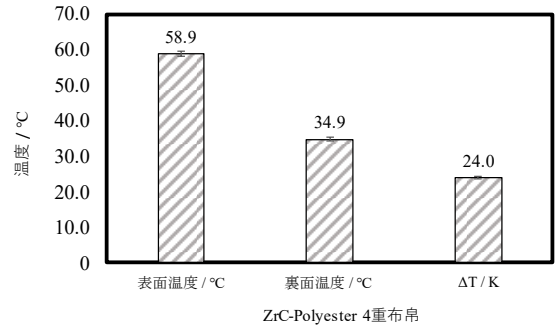


図3 ZrC含有ポリエステル4重布帛の表・裏面温度

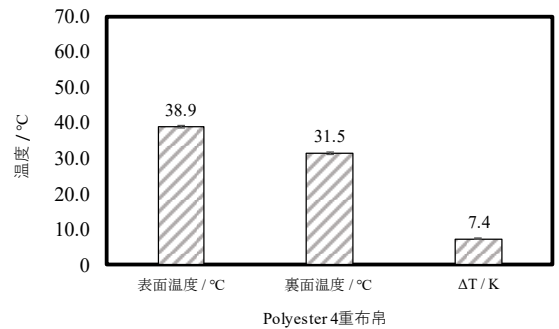


図4 ポリエステル4重布帛の表・裏面温度

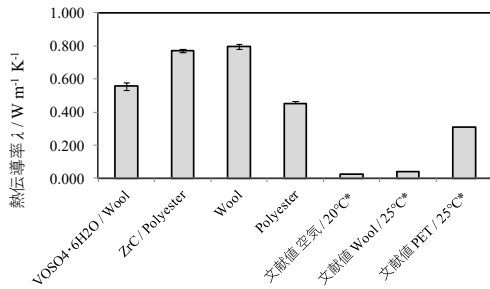


図5 4重布帛の熱伝導率(図2のb) \*参考文献<sup>23)</sup>

#### 4. 結 言

空気層含有衣料材モデルとした4重布帛試料を用い、V処理したウール試料の熱移動特性について、ZrC含有ポリエステル従来機能製品と比較検討を行なった。布帛に吸着したVは、市販製品ポリエステル中ZrCと同程度の高い光吸収発熱を生じ、光源側表面温度が高くなった。布帛が重なる製品を想定する場合は空気層が影響してくるため、多重繊維試料による光吸収発熱保温性を評価する必要があった。V処理ウール4重布帛試料は、光照射下において、ZrC含有ポリエステル4重布帛よりも1.4倍熱伝導率が低かった。従って光吸収によって発熱を生じた結果、ウール表面温度が高くなり、4重複合体構造が熱伝導率の小さいウールで保温されて裏面温度を高く保っていると考えられる。本研究は、保温力の高い天然繊維素材での光吸収発熱保温製品の熱移動特性の参考とし、冬季に身に着ける衣類などへの応用として、天然素材の持つ特性に加え、温熱機能を付与した材料開発に役立つことが期待できる。

#### 参考文献

- 1) 経済産業省繊維課：繊維産業の現状と今後の展望，第4回消費科学シンポジウム，pp.2-21 (2012)
- 2) 栗橋祐介，坂井秀敏，岡田泰一，斎藤智久，小室雅人：アラミド繊維シート接着による木材の耐衝撃性向上効果，構造工学論文集，Vol.64，pp.855-864 (2018)
- 3) 田邊大貴，西藪和明，倉敷哲生：炭素繊維を発熱体として用いたCF/PPS積層板の電気式融着接合に及ぼす影響因子，日本機械学会論文集，Vol.81，pp.1-13 (2015)
- 4) 池田武彦：ユニチカガーメンテックにおける最近の機能性評価について，繊維製品消費学会誌，Vol.58，pp.569-573 (2017)
- 5) 高橋哲也：ヘルスケア関連の機能性繊維，日本家政学会誌，Vol.69，pp.548-556 (2018)
- 6) 桑原里実，上甲恭平，高橋勝六：赤外線吸収染料の染色による衣服の保温性の向上，*Journal of*

*Textile Engineering*, Vol.62, No.3, pp.43-50 (2016)

- 7) 古田常勝：蓄熱保温繊維素材，繊維学会誌，Vol.49，pp.399-404 (1993)
- 8) 藤本昌則：積極保温性ウィンターウェア「モバイルサーモ」の開発，繊維製品消費学会誌，Vol.40，pp.31-36 (1999)
- 9) 稲垣達彦：最新のアクリル繊維開発状況，機能紙研究会誌，Vol.51，pp.23-27 (2012)
- 10) 楠幹江：冷え性緩和対策としての高機能繊維製品の保温効果について，安田女子大学紀要，Vol.44，pp.267-276 (2015)
- 11) 平坂雅男：機能性保温繊維（遠赤外線，蓄熱，吸湿発熱），繊維のスマート化技術大系，pp.21-29 (2017) .
- 12) 八木優子：遠赤外線保温素材「サーモトロンラポジカ®」，繊維のスマート化技術大系，pp.24-29 (2017) .
- 13) 小寺芳伸：第1章 光吸収発熱及び導電機能を有する短繊維，繊維のスマート化技術大系，pp.323-327 (2017)
- 14) 古田常勝：新しいスポーツ素材 太陽光蓄熱保温素材，繊維学会誌，Vol.45，pp.134-136 (1989)
- 15) 環境省，ウォームビズ (WARMBIZ) とは。  
<https://ondankataisaku.env.go.jp/coolchoice/warmbiz>，(参照2019-10-04)
- 16) 馬場俊之：蓄熱加工繊維「エスサンプル」，繊維学会誌，Vol.66，pp.2-4 (2010)
- 17) 日本規格協会：繊維製品の光吸収発熱性評価方法 JIS L 1926:2019. (2019) .
- 18) ダイセン株式会社：蓄・発熱にウールの機能追加，繊維ニュース 2 (2019)
- 19) 上垣良信，塩澤佑一朗，安永秀計：バナジウム処理と染色による布帛への光発熱と保温効果の付与，繊維製品消費学会誌，Vol.60，pp.52-62 (2019)
- 20) 上垣良信，佐藤哲也，長谷川達也，安永秀計：バナジウム媒染法の改質セルロースへの適用，繊維製品消費学会誌，Vol.58，pp.412-419 (2017)
- 21) Yamamura, T. *et al.* : VANADIUM BATTERY, US 9,419,2, U. S. Patent (2016)
- 22) 一般財団法人ポーケン品質評価機構：太陽光蓄熱，機能性素材の評価試験方法，Vol.4，pp.6-7 (2017)
- 23) WIKITECH Engineering and Chemical Technology. <https://wikitech.info/>，(参照 2019-10-29)