Evaluation of Heat Transfer Characteristics of Textile Goods by Infrared Image Measurement Method

MIYAMOTO Takeshi, ISHIZAWA Hiroaki*, NITTA Yuuki, KANAI Hiroyuki, TOBA Eiji

Faculty of Textile Science and Technology, Shinshu University, 3-15-1, Tokida, Ueda-shi, Nagano 386-8567, Japan

Received 15 July 2005; accepted for publication 8 October 2005

Abstract

This paper describes the infrared image heat measurement system for heat transferences of textile goods. The system consists of heat source, a series of optical apparatus, an infrared camera, and an image processor. This paper also describes that the model samples and several textile goods that were used for the developed measuring system are adequate for testing the time-dependent heat transferences of the materials. It is expected that the sensed information obtained by infrared image could evaluate the quality of the heat transferences more precisely and effectively than that by the conventional test methods.

Key Words: Infrared image, Heat absorption, Heat radiation, Thermal conductivity, Textile goods

赤外画像計測法による繊維製品の熱移動特性評価

宮本文司, 石澤広明*, 新田勇紀, 金井博幸, 鳥羽栄治

1. 緒言

通常、繊維製品の熱移動特性評価として、一般織物試験方法[1] (JIS L 1096) における保温性測定[1]やKES (Kawabata Evaluation System) における定常熱伝導測定、保温性測定が用いられている[2]。これらの測定方法では試験片の温度差、放熱量、熱損失量等を測定し、それらより保温率、熱伝導率を計算することで繊維製品における熱移動特性が評価される。しかしながら、熱の移動の直接的な観察は不可能であり、時間的変化に対応することができない。

本研究ではこれらの問題点を解決するために、赤外画像を用いて様々な繊維製品の熱移動特性について時系列的・定量的に計測を行い、赤外画像熱計測システムの繊維分野への適用を検討した。また、KESによる定常熱伝導性・保温性測定の測定結果と比較を行い、本システムの妥当性について検討した。

2. 実験方法

2.1 測定原理

全ての物質は温度に応じて電磁波として熱エネルギーを吸

収・放射している。この熱エネルギーの波長帯は近～中赤外域に存在するため、その波長帯に対応する画像を撮影することで熱移動に対応した画像を得ることができる[3]。繊維製品の熱移動特性評価として、本研究では波長8～12 μmに感度を有する赤外カメラを用いて画像計測することで、温度に対応した輝度から熱移動特性を評価した。

2.2 赤外画像熱計測システム

本研究で構築した赤外画像熱計測システムの概要をFig. 1に、仕様をTable 1に示す。撮像には赤外カメラ（三菱社製サーマルイメージャ、SR-1）、熱源にはホットプレート（アズワン社製）を用いた。赤外画像は、画像入力ボード（ライブラリー社製、ひまわりPCI）を介してパーソナルコンピュータに入力され、多機能汎用画像解析ソフト（ライブラリー社製、Cosmos32）により解析される。解析に供する赤外画像の画素数は320×240である。計測の際には、実験室内の気流の影響を防ぐため装置全体を遮蔽板で覆った。

2.3 計測方法

繊維製品における熱移動特性評価法として、本研究では吸

* 連絡先：信州大学繊維学部繊維システム工学科 386-8567 上田市常田3-15-1, E-mail: zawa@giptc.shinshu-u.ac.jp, Fax: +81-268-21-5603

Fig. 1 Measuring system and methods.

Table 1 Specification of the measuring system.

Element		Specification
Infrared camera	Thermal imager	SR-1, (MITUBISHI corp.)
	Wave length	$8\mu\text{m}$ ~ $12\mu\text{m}$
Heat source	Hot plate	ND-3 (ASONE corp.)
	Power	1370W
	Temperature	Room temperature+10°C ~350°C

熱性について評価を行うものを、吸熱水平法、放熱性について評価を行うものを、放熱水平法とそれぞれ定義した。

吸熱水平法では、試料を発泡スチロール製の試料台にすき間なく貼り付け、40℃に保ったホットプレート上に置き、上部に配置されたサーマルイメージャによって吸熱に伴う温度上昇を測定することで、熱伝導性について検討した。

放熱水平法では、試料を試料台にすき間なく貼り付け40℃に保ったホットプレートに乗せ、5分間熱を供給した後、試料台をガラスシャーレを用いた試料ステージ上に置き、上部に配置されたサーマルイメージャによって放熱に伴う温度降下を測定することで、放熱性について検討した。

本論文の趣旨は、赤外画像計測の繊維分野への適用を提案

Table 2 Details of woven fabrics.

Material	Weight (g/m ²)	Yarn density (ends/5cm)		Yarn count (tex)	
		Warp	Weft	Warp	Weft
Wool	100	142	136	19	15
Silk	53	264	190	2.3×3	2.3×4
Cotton	97	141	135	20	16

することである。そのため、主に衣服に用いられる天然繊維3種類を試料に用い、熱移動特性評価の可能性・妥当性について検討した。Table 2に試料の詳細を示す。各試料の色について、絹、綿は白色であり、ウールは薄いベージュ色のものを用いた。なお、絹番手の“2.3×3”は、番手数2.3の絹単糸が3本撚り合わせられていることを表す。実験に用いる試料片は100 mm×100 mmとし、試料片中央50 mm×50 mm部分を測定範囲とした。実験環境は25±1℃であり、各試料につき10回ずつ測定を行い、毎秒10コマの撮影間隔で1分間撮影した後、得られた平均輝度を温度換算し、放射率補正を行うことで、各試料の熱伝導性・放熱性について検討した。

3. 実験結果および検討

3.1 赤外画像における温度換算

Fig. 2に25℃、40℃における蒸留水の赤外画像を表す。画像中央の円形部分が蒸留水の存在する部分であり、温度が低い領域は輝度が低いため画像は暗く、温度が高い領域は輝度が高く明るくなっていることが確認できる。

Fig. 3はサーマルイメージャにおける温度と相対輝度の関係を表したものである。モデル試料には蒸留水を用い、同一画像内で異なる温度の蒸留水の輝度を比較することで、様々な温度における蒸留水の相対輝度を得た。温度の測定範囲は日常生活を考慮して25～40℃とした。また、相対輝度は25℃の場合を1に規格化してある。図中のエラーバー[4]は蒸留水の平均輝度の標準偏差をとったものであり、 R^2 は決定係数を表す。

温度と相対輝度の間には高い相関が得られ、直線的比例関

Fig. 2 Thermal images of the distilled water.

Fig. 3 Property of thermal imager.

係が見られたことから、相対輝度から温度を求めることが可能であると考えられる。

3.2 放射率測定

サーマルイメージャによって得られた画像は赤外線放射量を表示しており、温度を直接表現しているわけではない。そのため、試料の温度を求めるには各試料の放射率を求め、放射率補正を行う必要がある。

放射率を測定するため、同じ温度の蒸留水と試料を同一画像内に取り込み、輝度の比較を行った。そして蒸留水の放射率0.96を基準として、各試料における放射率を算出した。25, 30, 35, 40℃で測定を行い、各温度における放射率がほぼ同じ値を示したため、その平均値を採った。Table 3に各試料における25, 30, 35, 40℃の放射率の平均値を記す。以下の実験では、この平均値を用いて放射率補正を行った。

3.3 熱伝導性評価

吸熱水平法によって熱の吸収を測定した赤外画像の例をFig. 4に、画像から算出した吸熱性の時間変化をFig. 5に示す。Fig. 4ではモデル試料として綿試料を用いた。画像上の黒枠は処理領域を表し、温度は、相対輝度を温度換算し、放射率補正を行った値である。また、吸熱に伴う温度上昇において、各瞬間毎に直前のサンプリングとの差分を取ることで、各瞬間における吸熱速度が得られ、これをFig. 6に示す。これはKESのq-max測定（冷温感測定）における熱吸収速度と対応している。Fig. 6より、吸熱速度は試料に熱が供給され始めた後、一瞬遅れてピークを迎えた後ゆるやかに減少してゆく。このピーク値は各試料の最大吸熱速度を表し、KESにおけるq-max値に対応した値である。ピークが現れる理由として、試料をホットプレートに乗せた瞬間は熱が伝わりきっていない

Table 3 Average of radiant ratio in sample.

Sample	Radiant ratio
Wool	0.91 (±0.01)
Silk	0.88 (±0.03)
Cotton	0.89 (±0.01)

Fig. 4 Thermal images in the heat absorption.

Fig. 5 Time-dependence of the heat absorption.

Fig. 6 Time-dependence of the heat absorption rate.

いため、一瞬遅れて吸熱速度が最大となる。そして吸熱が進むにつれてホットプレートと試料との温度差が小さくなり、吸熱速度が小さくなっていく。そのため、吸熱開始から一瞬遅れてピークが現れると考えられる。

吸熱過程において、繊維密度・番手・目付けにおいてほぼ同じ値を持つウールと綿の間に、明確な差が確認することができた。この差は、素材そのものに起因するものと考えられる。しかし、今回の研究では素材の比較だけでなく、繊維製品の熱移動特性評価への適用が可能か否かという広い観点において熱移動計測を行ったため、今回の3試料を用いた実験結果のみから素材の差を述べることは無理があると考えられる。そのため、今後、システムの実用性を検討する上で、より多くの様々な繊維製品を試料に用いて計測を行い、布の表

面構造、空気の含有構造といった要素が熱伝導率にどのように関連しているかを検討した上で、改めて素材間の比較を行う必要がある。

また、同一試料を用いてKESにおける熱吸収速度測定を行った。測定には精密迅速熱物性測定装置（カトーテック社製KES-E7 THERMO LABO II）を用いた。その結果、絹、ウール、綿の順にq-max値が大きいという結果が得られた。絹のq-max値がウール、綿に比べて大きく、ウールと綿のq-max値が近い値であるという点において、本手法の結果（Fig. 6）とKES法の結果で同様の傾向を得ることができた。さらに、本システムでは時系列的に吸熱速度を求めることができた。

吸熱性は熱の伝わり易さを表すため、このことから、熱伝導性の時系列的な定性・定量評価の可能性が見出せた。

3.4 放熱性評価

放熱水平法によって熱の放射を測定した赤外画像の例および画像から算出した放熱性の時間変化をFig. 7およびFig. 8に示す。Fig. 7ではモデル試料として綿試料を用いた。画像上の黒枠は処理領域を表し、温度は、放射率補正を行い、相対輝度から算出された値である。また、放熱に伴う温度上昇において、各瞬間毎に直前のサンプリングとの差分の絶対値を取ることによって得られる、各瞬間における放熱速度をFig. 9に示す。

ウールが高い放熱性を持つ理由として、ウール表面のクリンプにより、空気が蓄積しやすく熱が保たれるためと考えられる[5]。また、吸熱性の良い試料が放熱性が良いとは限らないことから、必ずしも熱伝導性・放熱性の間に関連性はないと考えられる。

Fig. 7 Thermal images in the heat radiation.

Fig. 8 Time-dependence of the heat radiation.

Fig. 9 Time-dependence of the heat radiation rate.

4. 熱移動特性に関するパラメータ

繊維製品における熱移動特性の一つの指標として、各試料の熱伝導性、放熱性におけるパラメータ（伝熱係数）を検討した。すなわち、熱伝導性実験結果より得られた、吸熱直後1, 5, 10秒間の温度変化量をもとに、温度変化量をもとに、(1)式のフーリエの法則[6]を用いて伝熱係数を算出した。

$$\frac{q}{A} = -k \frac{dx}{dt} \quad (1)$$

ここで、kは熱伝導率、qは熱移動量、Aは測定領域の面積、Tは温度勾配、xは試料厚さとする。

Table 4に各試料の吸熱開始後1, 5, 10秒間の熱伝導性に関するパラメータ（熱伝導性に関する伝熱係数）を記す。熱移動量は、25℃の際の水の熱伝導率0.52[7]を用いて蒸留水10 mlの温度変化より算出したものであり、面積は100 mm²、試料厚さは各試料を構成している糸の太さの2倍の値とした。この値が大きいほど熱伝導性が良く、絹、ウール、綿の順に熱伝導性が良いことがわかる。

また、Table 5に放熱開始後1, 5, 10秒間の放熱性に関するパラメータ（放熱性に関する伝熱係数）を記す。放熱性実験結果より得られた、放熱直後の1, 5, 10秒間の温度変化

Table 4 Parameter concerning thermal conductivity(W/mK).

Sample	1s	5s	10s
Wool	0.17	0.11	0.10
Silk	0.32	0.13	0.10
Cotton	0.14	0.09	0.08

Table 5 Parameter concerning heat radiation(W/mK).

Sample	1s	5s	10s
Wool	0.04	0.06	0.07
Silk	0.08	0.15	0.16
Cotton	0.07	0.08	0.09

量をもとに、(1)式のフーリエの法則[6]を用いて放熱係数を算出した。熱移動量は、40℃の際の水の熱伝導率0.54[7]を用いて蒸留水10 mlの温度変化より算出したものであり、面積は100 mm²、また試料厚さは各試料を構成している糸の太さの2倍の値とした。この値が大きいくほど放熱性が良く、絹、綿、ウールの順に放熱性が良いことがわかる。また、同一試料を用いてKESによる定常熱伝導性測定、保温性測定を行った。測定には精密迅速熱物性測定装置（カトーテック社製 KES-E7 THERMO LABO II）を用いた。その結果、絹、ウール、綿の順に熱伝導性が良く、絹、綿、ウールの順に放熱性が良いといった結果が得られ、本システムにおける実験結果と同じ傾向が見られた。したがって、本手法はKESと比較して簡便かつ迅速であり、KESでは得られない熱移動のメカニズムについて観測することができるため、繊維製品における熱移動特性評価として、本システムの妥当性が確認できた。

以上より、本計測システムを用いて、繊維製品の定量的かつ時系列的な熱伝導性評価、放熱性評価が可能である。すなわち、スポーツによる体温上昇、急激な被服の温度降下など、日常での温度変化における被服の熱移動特性を推定することができ、熱移動に伴う着心地などを事前に評価する上で有用な計測システムと考えられる。

5. 結 言

本研究では、繊維製品における熱移動特性を評価するための赤外画像熱計測システムを提案し、ウール、絹、綿といった被服の材料となる試料を用い、吸熱・放熱現象を観測し、熱伝導性・放熱性について計測することで、計測システムの妥当性および有用性を考察した。

本研究の主な結果は、以下のとおりである。

- (1) 蒸留水における温度変化と輝度との間に直線的な比例関係が確認できた。また、各試料の熱伝導性・熱保持性について定量的な評価が行えた。
- (2) 吸熱性が良い試料が放熱性が良いとは限らなかったことから、熱伝導性と放熱性の間には必ずしも関連性がないと考

えられる。

- (3) 吸熱性には熱伝導性が関連しており、熱伝導性・放熱性をパラメータ化することによって、端的に繊維製品の熱移動特性を評価することができた。
- (4) KESにおけるq-max測定、定常熱伝導性測定、保温性測定の実験結果と同じ傾向が見られた。また、KESでは得られない情報を得ることができ、時系列的かつ定量的な評価を行うことができたとともに、本システムの妥当性が確認できた。

以上のように、本システムによれば、熱移動のメカニズムを観測できるとともに、JIS、KESの評価方法では得られない情報が入手できると考えられる。また、吸熱性には熱伝導性が関連しており、放熱性とともに時系列的な定性・定量評価が可能である。そして、熱伝導性、放熱性をパラメータ化することによって、端的に繊維製品の熱移動特性を評価することができた。従って、赤外画像熱計測システムを用いた繊維製品の熱移動特性の評価方法としての可能性・妥当性が拓かれた。

References

- [1] JIS L 1096-1999 "Test methods for ordinary woven fabrics (Heat insulation)", pp48-49
- [2] Kawabata S (1984) J Text Mach Soc Japan, **37**, T130-T141
- [3] Hisano H (1994) "Infrared rays engineering", pp22-23, Electronic information communications society
- [4] Hayashi S, Baba R (2000) "An introduction to error analysis in the measurement", pp109-110, Tokyo chemical coterie
- [5] Nakazima T (2001) "Outline of the clothing material", pp114-123, Kouseikan
- [6] Houzawa M (1996) "Diffusion and movement phenomenon", pp50-51, Chemical engineering association
- [7] Hagi H (1978) "Basis and practice of the heat transmission", pp66-78, Toukai University publication society