Estimation of Water Transfer in Woven Fabrics Using Near-Infrared Spectral Image

ISHIZAWA Hiroaki, YOTSUDA Toyokazu, KANAI Hiroyuki, NISHIMATSU Toyonori and TOBA Eiji

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

Received 11 December 2003; accepted for publication 17 May 2004

Abstract

This paper describes the near-infrared spectral image measurement system for water transferences of woven fabrics. The system consists of a pair of near-infrared light source, a series of optical apparatus, a near infrared camera, and an image processor. This paper also describes that the developed measuring system is adequate for testing the time-dependent water transferences of the materials by using the model samples and several woven fabrics. It could be expected that the sensed information obtained by the spectral image could control the quality of the water transferences more precisely and effectively than the conventional test methods.

Key Words: Near-infrared spectral image measurement; Water absorbency; Woven fabrics

近赤外分光画像計測による織物の水分移動特性の評価

石澤広明*, 四田豊和*, 金井博幸*, 西松豊典*, 鳥羽栄治*

1. まえがき

織物の吸水性は、被服の着心地あるいは快適感に影響を与え、非常に重要な性能のひとつである。従来、織物の吸水性は、主に日本工業規格 (JIS) で標準化された方法により評価されてきた[1]。これらの方法は、非常に簡便であり広く用いられてきているが、測定者の目視によることに起因する精度や再現性に関する課題が未解決であった。また、実時間測定によって織物品質を管理したいという要望には対応できないことが指摘されてきた。さらに、吸水された水は織物中を毛管作用によって浸透しながら乾燥する。このような織物中の水分移動も被服の着心地に大きな影響を及ぼすものと考えられる。そのため、水分吸収、浸透、および乾燥など織物中の水分移動を目視によらず迅速に測定できる計測法の開発が必要となる。

本研究では、水分が近赤外領域に特性吸収を持つことに着目し[2-4]、近赤外分光画像計測システムを構築した。さらに、モデル試料を用いて本計測システムの特性を評価した。そして、実試料としてドレスシャツ地に本計測

システムを適用し、吸水現象ならびに浸透・乾燥現象を観測するとともに、従来の JIS 法による測定値との対応関係を検討した。また、観測した水分の分光画像の時間変化から、本計測法による織物の水分移動特性の迅速測定の可能性を考察した。

2. 実験方法

2.1 近赤外分光画像計測システム

本研究で構築した近赤外分光画像計測システムの概要を Fig.1 に、仕様を Table 1 に示す。一對のハロゲンランプ (ウシオ電機 JCR15V-150W) から発した近赤外光は、試料ステージ上の試料を照射する。試料面の照度を一様にするため、ランプの照射角度、位置および出力は独立に調整可能である。撮像系は、近赤外カメラ (Electro Physics 社 Micron Viewer7290A)、レンズ、狭バンドパスフィルタ、および可視光カットフィルタから構成される。このうち狭バンドパスフィルタは、Table 1 に示す 8 種類の中心波長のものをそれぞれ装着して測定した。分光画像は、画像入力ボード (ライブラリー社製、ひまわり PCI)

* 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: 0268-21-5603

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。解析に供する分光画像の画素数は 640×480 であった。

2.2 計測方法

水分に対する分光画像測定の特性を評価するため、モデル試料の水分率を変化させ分光画像を測定した。セルロース粉末（メルク社・アビセル）を基材とし、加水なし、水分率（重量%）9%，33%，50%，60%，67%，75%，および80%に調製したものを作成し直径50mmのプラスチックカップに入れモデル試料とした[5-6]。モデル試料の分光画像全体にわたる輝度値の平均値を試料の輝度値とし、同一条件で測定した直径50mmの標準反射板（反射率99%、Labsphere製SRS-99-010）の分光画像の輝度値に対する試料の輝度値の比を相対輝度値とした。相対輝度値と水分率の関係から回帰直線を求め、その傾き、相関係数、変化幅などを本計測システムの水に対する特性とし比較検討した。繊維物試料を用いた分光画像は、JIS法[1]のバイレック法に準じた垂直法および滴下法に準じた水平法によって測定した。垂直法および水平法をFig.1(b)および(c)に示す。画像測定方向は、垂直法および水平法ともに試料に対して垂直方向である。垂直法では、蒸留水で満たしたシャーレーに試料の一端を浸漬させ、一方の端を把持し、たて糸方向の水分上昇の画像を5秒間隔で測定した。そして、水分上昇の最先端の高さの時間変化を求めた。水平法では、試料ステージ上に試料を置き、0.1mlの蒸留水を滴下して水分が移動する画像を2秒間隔で測定した。蒸留水滴下前の試料の輝度を境界値とし、境界値以下の輝度の領域を水分領域と見なし、この面積の2秒ごとの時間変化を求めた。なお、すべての測定は温度 $25 \pm 3^\circ\text{C}$ 、湿度 $60 \pm 5\% \text{RH}$ の実験室内において行った。

Table 1 Specification of the measuring system element.

Element		Specification
Light source	Lamp	Halogen lamp (USHIO JCR15V-150WBAU x 2)
	Wavelength	450nm - 2000nm
	Power	maximum 80W
	Brightness	3000 lx. (sample surface)
Filter	Near infrared	740nm, 770nm, 785nm, 950nm, 1000nm, 1200nm, 1450nm, 1900nm FWHM: 10nm (CVI Laser Corp.)
	Visible	Long wave pass filter (CVI Laser Corp.) Cut-off wavelength: 600nm
Lens		25mm, F/1.4 (Electrophysics corp.)
Near-infrared camera		Micron viewer 7290A, 450nm-2200nm (Electrophysics corp.)

(a) Near infrared spectral image measurement apparatus.

(b) Vertical method.

(c) Horizontal method.

Fig.1 Measuring system and methods.

Table 2 Details of woven fabrics (plain, 0.25mm thick).

	Yarn count (s)		Yarn density (Number/inch)		Weight (g/m ²)	Material (%)
	Warp	Weft	Warp	Weft		
A	30	30	45	45	115	C (100)
B	50	50	154	81	125	C(100)
C	45	40	135	76	115	T(55), P(20), C(15), K(10)
D	40	40	110	80	105	T(40), C(40), K(20)
E	45	45	136	76	113	T(65), C(35)

C: cotton, T: polyester, P: polynosic, K: kenaf

2.3 試料繊維

近赤外域では、試料の化学的組成によって吸収が大きく異なることが考えられるので、本研究ではセルロース系の繊維を対象とし、ドレスシャツ地に利用される5種類の平織り白布を用いた。試料で、ケナフ繊維は、最近ドレスシャツ地として検討されているセルロース系繊維材料である[7]。試料の糸番手、織密度、目付および組成をTable 2に示す。画像測定時の試料寸法は垂直法および水平法で、 $150\text{mm} \times 40\text{mm}$ 、および $100\text{mm} \times 100\text{mm}$ とした。

3. 実験結果および検討

3.1 計測システムの特性

水は近赤外域の 1450nm, 1920nm および 2400nm に特性吸収が存在することが知られている[2-4]. セルロース粉末に加水したモデル試料における 1450nm の分光画像の相対輝度値と水分率の関係を Fig.2 に示す. また, 8 種類のフィルタを用いた各波長における分光画像の相対輝度値と水分率との回帰直線の相関係数, 回帰直線の傾きで表した感度, および相対輝度の最大変化幅を Table 3 に示す. 中心波長 1450nm のフィルタを使用した場合, 直線性で最も優れ, 感度および相対輝度の変化幅が大きかった. これは, 水分の吸収帯に合うフィルタを使用したこと, および 1900nm 以上の波長帯において, 本実験で用いた近赤外カメラの感度が急激に低下することに対応していると考えられる. また, 試料表面の照度を 3000 lx 一定に調整することで試料の温度上昇は, 最大 5℃程度に抑えることができ, ヒト一般の体温以上には上昇しないことが判明したため, 以後この条件で測定した.

以上より, 本計測システムの水分計測に関する妥当性が確認でき, 水分の分光画像を測定するには, 1450nm の狭バンドパスフィルタが最適であると考えられる.

Fig.2 Relation between the relative brightness of the 1450nm spectral image and moisture content.

Table 3 Characteristics of the measurement system.

Filter (nm)	Correlation coefficient ^{a)}	Sensitivity ^{b)} ($\pm 4 \times 10^{-4}$)	Range ^{c)} ($\pm 5 \times 10^{-3}$)
740	0.94	0.001	0.07
770	0.74	0.002	0.14
785	0.93	0.002	0.15
950	0.88	0.003	0.25
1000	0.95	0.003	0.27
1200	0.92	0.003	0.24
1450	0.99	0.006	0.44
1900	0.26	0.002	0.13

a): The correlation coefficient of the linear regression between the relative intensity and moisture contents .

b): The absolute value of the slope of the linear regression.

c): The largest variation of the relative brightness.

3.2 織物の吸水性

1450nm のフィルタを使用し垂直法によって水分の吸収を 5 秒ごとに測定した分光画像の例および画像から算出した吸水高さの時間変化を Fig.3 および Fig.4 に示す. バイレック法[1]による測定値は, Fig.4 の 600 秒後の値に対応している. 垂直法における吸水現象を一次遅れ系のステップ応答[8]と見なし, バイレック法による値を最終値としたとき, Fig.4 の結果から得られた過渡特性を Table 4 に示す. 試料 C と試料 D では, バイレック法による値に差異はないが, 遅れ時間および立上がり時間には差が見られる. また, 試料 B と試料 E では, バイレック法による値の変動よりも過渡応答特性の変動のほうが大きく計測され, 差が確認できる. このように, 本計測システムの垂直法によれば, 各試料の吸水特性が詳細に比較評価可能である.

また, 吸水開始から 5 秒間の吸水速度とバイレック法による値と間の対応関係を Fig.5 に示す. バイレック法による値と初期吸水速度との間には, 比例関係が存在する. これは, 水分吸収を一次遅れ系のステップ応答と見なせることとよく対応していると考えられる[8]. このことは, バイレック法による吸水性を数秒以内で測定できることを示している. また, この結果をもとに, 迅速でより簡便な評価手法に発展できることが考えられる. しかしながら本研究では, セルロース系の平織試料 5 点を検討したのみである. 今後試料点数を増やし, 多様な織物組織に本手法を適用すること, さらにセルロース系以外の化学組成の織物に適用してバイレック法値との相関関係を確認することが必要である. これらの検討により本手法はバイレック法の代替法として利用可能であると考えられる.

Fig.3 Spectral images in the horizontal method.

さらに、本計測システムは、近赤外域における水の吸収を利用し、可視光カットフィルター (Table 1) により色柄の影響を除いているので、試料の色柄に影響されず、水に色素を溶かして測定する必要はないことが考えられる。また、本測定はバイレック法に用いる器具をそのまま使用できるので、同時に複数の試料を測定可能である。さらに、画像は自動で格納され解析される。したがって、本手法はバイレック法と比較して簡便で迅速であり再現性に勝っていると考えられる。

Fig.4 Time-dependence of the water absorbance by the vertical method. (●: A, ◆: B, ▲: C, ○: D, ◇: E)

Table 4 The properties of the transient response in the vertical method.

	t_c [s] ^{a)}	t_d [s] ^{b)}	t_r [s] ^{c)}	Final value [mm] (± 0.5 mm)
A	118	50	364	113
B	108	63	336	62
C	83	58	257	70
D	79	48	272	69
E	88	42	256	55

a) Time constant: time for reaching 63.2% of the final value.

b) Delay time: time for reaching a half of the final value.

c) Rise time: time from 10% to 90% of the final value.

Fig.5 Relations between the water absorbance velocity and Byreck method values.

3.3 織物中の水分浸透・乾燥

1450nm のフィルタを使用し水平法によって水分の浸透および乾燥の分光画像を測定した。Fig.6 に、蒸留水 0.1ml を滴下 5 秒後の画像を比較して示す。また、蒸留水滴下前の試料の輝度を境界値として、境界値以下の輝度領域を水分領域とし、得られた水分領域面積の 2 秒ごとの時間変化を Fig.7 に示す。水分は織物中を浸透し、水分領域の面積は最大値を示した後、乾燥に伴って減少した。Fig.6 より、滴下 5 秒後には試料 A および試料 C、試料 D および試料 E が同程度の水分領域面積を示すことが判明した。しかしながら、Fig.7 より、これら 5 種類の試料がそれぞれ同一でない時間変化を示すことが明らかとなった。試料 B では、水分は滴下直後から 20 秒後まで非常にゆっくりとした速度で浸透し平衡に達した。その後、急激な浸透および乾燥の後に、水分領域は緩慢に減少した。これは、他の 4 試料とは大きく異なった点である。試料 A と試料 B の比較から、試料 B の水分移動が他の試料と異なる特徴を示すのは、主に織密度に起因すると考えられる。

また、試料 A および試料 C は、織密度や組成が異なっているが、最大水分領域面積、および最大に達する所要時間は同程度であり、ともに 20 秒程度で乾燥が終了している。したがって、これらの試料の水分移動は類似したものと考えられる。試料 E は、発散終了まで 60 秒程度要しており、最大水分領域面積が同程度の試料 D の約 40 秒とは異なった結果となっている。これは、試料の組成の違いに起因するものと考えられ、試料 D を使用したドレスシャツが清涼感に優れているとした報告[7]に対応したものと考えられる。今後、同じ糸番手および織密度の織物試料を用いた検討が必要である。

以上のように、本計測システムを用いた水平法によって、織物の水分移動が観測可能であることが明らかとなった。水平法によって得られた Fig.7 のパターンは、前半部分（フロントカーブ）は主に水分の浸透に対応し、後半部分（バックカーブ）は、主に乾燥に対応すると考えられる。したがって、浸透と乾燥を分離してそれぞれ特長を比較検討することも可能である。さらに、水分の滴下操作を織物へのインパルス入力として近似できれば、本法の分光画像から、織物のインパルス応答に対応する情報が得られると考えられる。このことは、発汗など任意の水分変化に対する織物の水分浸透・乾燥の二次元の応答を予測する可能性を示すものである。このため今後の課題として、滴下する水分量を変化させ、浸透と乾燥の特徴を明らかにするとともに、最適なサンプリング周期の決定、広範な試料への適用などが考えられる。

以上より、本計測システムを用いて、垂直法により織物の吸水性を簡便に再現性良く測定可能であり、水平法によって発汗・乾燥など、実際に装着した被服の水分移動に関して、二次元情報として性能を推定可能である。

すなわち、日常生活のさまざまな発汗量にもとづいて、織物の段階で被服の水分移動を推定でき、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。

Fig.6 Spectral images at 1450nm band 5 sec. after titrating the distilled water.

Fig.7 Time-dependence of the water diffuse area.

4. 結論

本研究では、織物の水分移動を評価するための近赤外分光画像計測システムを提案し、モデル試料および綿織物を主体としたドレスシャツ地の実試料を用い、吸水現象ならびに浸透・乾燥現象を観測し、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) 本計測システムによる水分観測に最適な狭バンドパスフィルタは、中心波長 1450nm のものであった。
- (2) 本計測システムの垂直法では、従来のパイレック法と比較して迅速かつ簡便に良好な再現性で試料の吸水性を評価可能である。
- (3) 本研究で用いた試料は、水分吸水に関して一次遅れ系の応答を示した。これらの織物試料では、パイレック法による値は、本計測システムの垂直法を用いた場合、測定開始 5 秒後の吸水高さを求めることにより、推定可能である。
- (4) 本計測システムの水平法によって、水分滴下後の試料中の水分浸透および乾燥が観察でき、試料の水分移動に関する性能評価が可能である。

以上のように、本計測システムの妥当性および有効性を実験的に検証した。被服材料の、吸水、浸透、および乾燥を精度よく推定するなどの実用計測を図るため、今後、分光画像の最適なサンプリング周期決定し、広範囲の試料に適用することなど、詳細で規格化した解析を加えることが必要である。

なお、本研究は文部科学省 21COE プログラムの助成を受けた。また、本実験の織物試料は、フレックスジャパン(株)より提供された。

References

- [1] JIS L 1907-1994 Test methods for Water Absorbency of Textiles.
- [2] B. G. Osborne, T. Fearn, Chemical assignments of some observed near infrared absorption bands, *Near Infrared Spectroscopy in Food analysis*, p.36-40, Longman Scientific & Technical (1986).
- [3] W. R. Hruschka, K. H. Norris, Least-squares Curve Fitting of Near Infrared Spectra, *Applied Spectroscopy*, **36**, No.3, p. 261-265 (1982)
- [4] M. Iwamoto, C. R. Kwang, T. Suzuki, J. Uozumi, Near Infrared Reflectance Analysis for Determining Moisture, Protein and Ash Contents in Home-grown Wheat Flours, *Nippon Shokuhin Kogyo Gakkaishi*, **31**, No.1, p.50-53 (1984)
- [5] Ishizawa Hiroaki, Takeuchi Masahiko, Nishimatsu Toyonori and Toba Eiji, Diffuse Reflectance Near Infrared Spectral Image measurement for the Field Monitoring of Agricultural Products, *Proceedings of the 19th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, p. 3-6 (2002)
- [6] Hiroaki Ishizawa, Kenji Miyamoto, Toyonori Nishimatsu,

Eiji Toba, Masayoshi Kamijou and Setsuko Tsuchiya: Measurement of Taste and Related Chemical Ingredients of the Agricultural Products (Lettuce) Based on the Near Infrared Spectral Imaging for the Field Server, 20th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, p. 27-30 (2003)

- [7] Makoto Oshiba, Yoshinobu Kamidate, Toru Kamoi, Masayoshi Kamijou, Eiji Toba, and Toyonori Nishimatsu: Clothing Comfort of Shirt made from Kenaf blended Yarn, Fiber Reprints, Japan, Vol. 56, No.1, p.295 (2001)
- [8] T. C. Wherry: Process Control, Chemical Engineers' Handbook Fifth Edition, McGraw-Hill International Book Company, Section 22-9 (1983)