

衣服の近赤外および可視光反射率、透過率の実測

栗原浩平¹⁾, 谷地誠²⁾, 窪田英樹²⁾, 濱田靖弘²⁾, 中村真人²⁾, 長野克則²⁾¹⁾釧路工業高等専門学校, ²⁾北海道大学

Measurement of near-infrared/visible reflectance and transmittance of clothing

Kouhei KUWABARA¹⁾, Makoto YACHI²⁾, Hideki KUBOTA²⁾, Yasuhiro HAMADA²⁾
Makoto NAKAMURA²⁾, Katsunori NAGANO²⁾¹⁾Kushiro National College of Technology, ²⁾Hokkaido University

Abstract: Near-infrared (800~2800nm) reflectance ρ_{cl-NIR} , visible reflectance ρ_{cl-V} , near-infrared transmittance τ_{cl-NIR} and visible transmittance τ_{cl-V} of 100% polyester and 100% cotton T-shirts and 40%polyester/60%cotton trouser were measured by using albedometer and pyranometer covered by IR-80 filters. Mean values of the ρ_{cl-NIR} , τ_{cl-V} and α_{cl-NIR} were around 0.61, 0.28 and 0.11 respectively. Solar operative temperature considering net near-infrared and visible absorptances was derived.

Key words: clothing, near-infrared reflectance, near-infrared transmittance, visible reflectance, visible transmittance

要旨: 100%綿 T シャツ, 100%ポリエステル T シャツ, 40%ポリエステル/60%綿混紡ズボンの近赤外光および可視光の透過率と反射率を屋外日射環境下にて実測した。近赤外光域 (800~2800nm) の透過率・反射率は IR フィルターで日射計を覆うことにより測定した。3つの生地 of 平均近赤外光反射率は 0.61, 平均近赤外光透過率は 0.28, 平均近赤外光吸収率は 0.11 であり, 近赤外光の透過率, 反射率, 吸収率は色に依存せず素材によりほぼ一定値を取ることが示された。衣服, 皮膚表面の正味の近赤外光, 可視光吸収率を考慮した日射作用温度の式を提案した。

キーワード: 衣服, 近赤外光反射率, 近赤外光透過率, 可視光反射率, 可視光透過率

1. はじめに

近年, ヒートアイランド現象や高齢化により熱中症による死亡者数は増加傾向にあり, 厚生労働省 (2010) の人口動態統計によると, 熱中症等の暑熱障害による死亡数, 死亡率共に 90 年代後半から増加傾向にあり, 2010 年には熱中症による死亡者数が 1700 名超という数字を記録している。さらに今後の高齢化社会の進展に伴い熱中症患者は益々増加するものと考えられ, 温熱的な環境安全への配慮が早急に対応されるべき問題となっている。

著者らは熱中症の予防を主な目的として人体モデルを創案し, 無効発汗, 着衣のぬれと日射の影響を考慮した平均皮膚表面温度予測式を提示し, 検証を行ってきた (窪田, 栗原ほか, 2008, 2009)。特に屋外日射環境下においては, 衣服の日射特性 (日射透過率, 日射反射率, 日射吸収率) が平均皮膚温に大きく影響するものと考えられ, 暑熱環境における衣服の日射特性が平均皮膚温に及ぼす影響を定量的に把握しておくことは熱中症予防の方策や衣服の開発に有用である。既往研究 (栗原, 窪田ほか, 2010; 谷地, 栗原ほか, 2011; 南沢, 栗原ほか, 2012) では色と日射特性の関係を実測により明らかにし, 人体影響を定量的に評価してきた。

本研究では, さらに詳細な日射特性を把握するために可視光域と近赤外域の透過率, 反射率の実測を行い, 波長域別の特性を明らかにすることを目的とする。

2. 方法

2.1 実験に使用した衣服

実験には 100%ポリエステル T シャツ A と 100%綿 T シャツ E, 40%ポリエステル/60%綿混紡ズボン F の 3 種類を用いた。A,E,F それぞれの色, 素材, 厚さ, 有孔率を表 1 に示す。厚さは定圧厚み測定器 (FFA-11, 尾崎製作所) を使用して測定した。有孔率は, 蛍光灯光源上に設置した衣服を携帯型顕微鏡 (STV-40M, KENKO) とデジタルカメラで撮影し, 画像を二値化処理することにより得た白の面積割合とした。また, 衣服の表色値を表 2 に示す。表色値は, 色彩色差計 (CR-400, コニカミノルタ) を用いて, マンセル表色系, XYZ 表色系, $L^*a^*b^*$ 表色系の 3 種類で記録した。測定の際は, 衣服の下部に黒画用紙を設置した。

表 1 実験に使用した衣服

種類	色	素材	厚さ(cm)	有孔率
A 半袖Tシャツ	白, 灰, 濃灰, 黒	ポリエステル100%	0.067	23%
E 半袖Tシャツ	白, 灰, 黒, 赤, オリーブ	綿100%	0.076	12%
F ズボン	白, ベージュ, 黒	ポリエステル40%, 綿60%	0.054	0%

表 2 衣服の表色値

		Munsell	XYZ		
			X	Y	Z
A	白	9.2PB8.3/0.4	64.22	65.34	78.28
	灰	1.7Y7/0.5	41.56	42.37	46.63
	濃灰	0.2RP2.8/0.9	6.17	5.83	7.65
	黒	8.9P1.7/0.7	2.66	2.5	3.39
E	白	N8.1	60.11	61.27	72.38
	灰	1.6PR5.6/0.3	25.57	25.84	30.79
	黒	7.6P1.9/0.7	3.03	2.9	3.87
	赤	3.5R3/10.4	12.6	6.76	4.12
	オリーブ	1.3Y3.1/0.7	7.01	7.07	7.08
F	白	2.3Y7.9/0.5	56.61	57.81	63.65
	ベージュ	1.7Y6.6/1.7	36.99	37.54	34.17
	黒	1.5R1.5/0.6	2.15	2.02	2.38

2.2 日射透過率, 日射反射率, 日射吸収率の実測

衣服の日射透過率, 反射率の測定には, 全天日射計 (MS-601F, 英弘精機) とアルベドメーター (CM3, Kipp & Zonen) を用いた。図 1 に示す通り, 2 つの全天日射計の一方の受光部を内側が黒色, 外側が白色の紙で囲い, その上部を試験体の生地で覆うことで透過日射量 I_T を測定し, 全天日射量 I_G との比を日射透過率 τ_{cl} とした。もう一方には囲いの上部に近赤外日射のみを透過するフィルター (IR80 フィルター, FUJIFILM) を設置しており, 透過近赤外日射量 I_{T-NIR} を測定し, 全天近赤外日射量 I_{G-NIR} との比を近赤外光透過率 τ_{cl-NIR} とした。日射反射率 ρ_{cl} と近赤外光反射率 ρ_{cl-NIR} は, 全天日射計と同様に受光部に囲いを施した 2 つのアルベドメーター (一方にはフィルターを設置) の下方に生地を置き, 実測した全天日射量 I_G , 反射日射量 I_{RF} , 反射近赤外日射量 I_{RF-NIR} とアルベドメーターから見た生地の形態係数 F を用いて式(1), (2)より算出した。

$$\rho_{cl} \times F + \rho_{gr} \times (1 - F) = I_{RF} / I_G \quad (1)$$

$$\rho_{cl-NIR} \times F + \rho_{gr-NIR} \times (1 - F) = I_{RF-NIR} / I_{G-NIR} \quad (2)$$

生地下部からの反射日射の影響を防ぐために, 黒色銅板 (40×45cm) を設置し, 銅板の上に生地を設置した。衣服の日射吸収率 α_{cl} と近赤外光吸収率 α_{cl-NIR} は日射透過率・日射反射率・日射吸収率の和が 1 となる式(3)より算出した。

$$\tau_{cl} + \rho_{cl} + \alpha_{cl} = 1 \quad (3)$$

また, 全波長域日射から近赤外日射を引いたものを可視光日射とし, 可視光透過率 τ_{cl-V} , 可視光反射率 ρ_{cl-V} , 可視光吸収率 α_{cl-V} を求めた。

実験場所は, 北海道大学工学部 (6 階建) 屋上の塔屋と転落防止柵に囲まれたスペース内である。測定は 2012 年 6~8 月に行われ, 測定時の太陽高度は 60~70° の範囲内にあった。実験日はいずれも晴天日で直達日射のある状況である。また, 実験日とは別に 2 台のアルベドメーターと日射計の日射量補正係数を決定するために測定日を設け, 衣服とフィルターを設置せずに日射量の測定を行った。この結果よりアルベドメーターと全天日射計の日射量の補正を行っている。実験手

順として, まず生地を設置しない状態で屋上表面の反射率を測定した。その後 T シャツ等の透過率と反射率を 5 分毎に同時測定することを繰り返した。なお黒銅板の反射率はほぼ 0 に近いことを確認している。

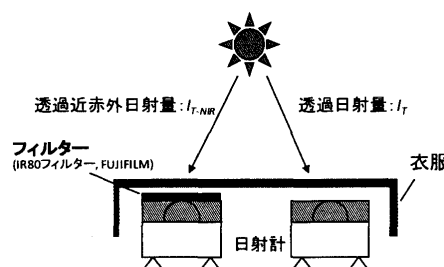


図 1 日射透過率測定概要

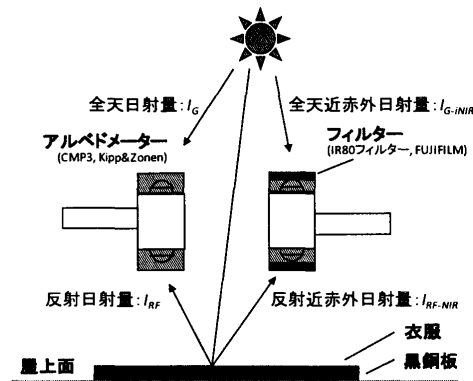


図 2 日射反射率測定概要

3. 結果

図 1 に視感反射率と全波長域日射反射率 ρ_{cl} の関係を示す。既報において全域日射反射率の測定を行った際には視感反射率との間に正の相関関係がみられた。今回の実験でも同様の傾向を示している。

図 2 に視感反射率と近赤外反射率 ρ_{cl-NIR} の関係, 図 3 に視感反射率と可視光反射率 ρ_{cl-V} の関係を示す。近赤外光反射率 ρ_{cl-NIR} は衣服素材や色によらず 0.6 程度でほぼ一定の値であった。一方, 可視光反射率 ρ_{cl-V} は視感反射率が大きくなるにつれて増加しており, 衣服の日射反射率の増加は可視光反射率の増加の影響によるものと考えられる。

図 4 に視感反射率と近赤外光透過率 τ_{cl-NIR} の関係を示す。衣服 F は A や E よりもやや低い値であるが, 近赤外光日射量のうち 2~3 割程度が透過している。

図 5 に視感反射率と近赤外光吸収率 α_{cl-NIR} の関係を示す。衣服 F がやや高い値を示しているが概ね 1~2 割程度を吸収していることがわかる。図 6 に黒服のみの有孔率と各波長の透過率との関係を示す。衣服 F (ズボン) は有孔率が 0 のため, 可視光透過率はほぼ 0 であった。どの波長域においても有孔率が高い (編目が粗い) ほど透過率は高くなるようである。

以上の結果より近赤外光の反射率, 透過率, 吸収率の衣服別平均値を求めると表 3 のように示された。近

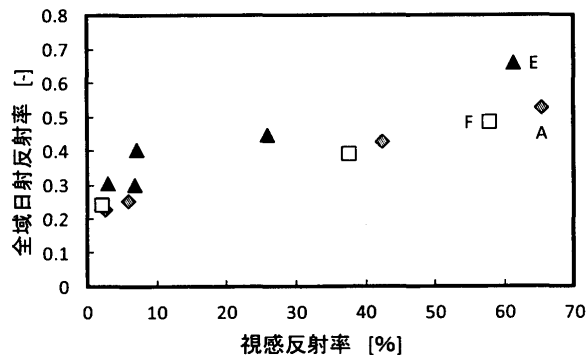


図1 視感反射率と全波長域日射反射率の関係

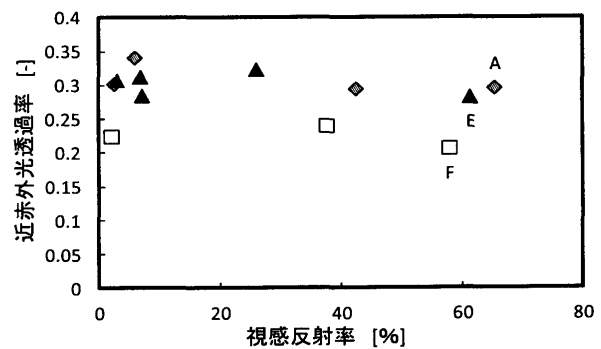


図4 視感反射率と近赤外光透過率の関係

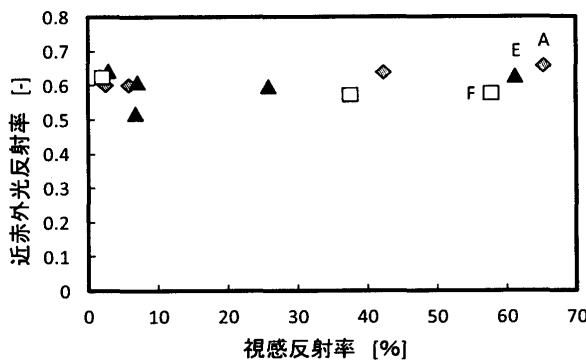


図2 視感反射率と近赤外光反射率の関係

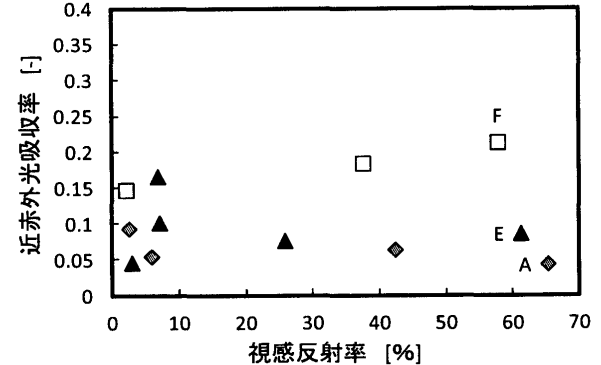


図5 視感反射率と近赤外光吸収率の関係

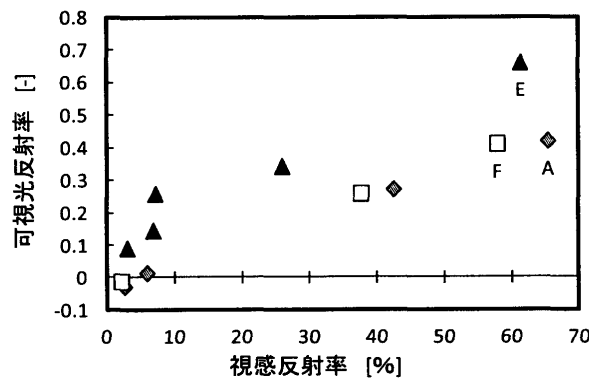


図3 視感反射率と可視光反射率の関係

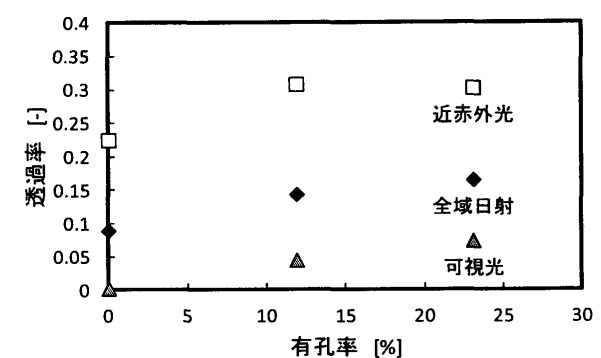


図6 有孔率と各波長の透過率との関係（黒色のみ）

赤外光反射率、透過率は編目が密になるほど低くなり、吸収率は高くなることが示された。

4. 日射作用温度への導入

著者らは、皮膚表面と衣服表面の正味の日射吸収率を加味した日射作用温度を提案している。人体の日射受熱量を可視光域と近赤外域にわけて考慮するために、日射作用温度を正味の近赤外光吸収率と可視光吸収率に分けて記述することを試みる。近赤外光、可視光とも同様に衣服と皮膚の間を多重反射すると仮定すると、皮膚表面における正味の近赤外光吸収率 $\alpha_{skm-NIR}$ と可視光吸収率 α_{skm-V} は以下のように表わされる。

$$\alpha_{skm-NIR} = \frac{\tau_{cl-NIR} \alpha_{sk-NIR}}{1 - (1 - \alpha_{sk-NIR}) \rho_{cl-NIR}} \quad (4)$$

表3 近赤外反射率、透過率、吸収率の衣服別平均値

	近赤外光		
	反射率 ρ_{cl-NIR}	透過率 τ_{cl-NIR}	吸収率 α_{cl-NIR}
A	0.63	0.31	0.06
E	0.60	0.30	0.10
F	0.59	0.22	0.18

$$\alpha_{skm-V} = \frac{\tau_{cl-V} \alpha_{sk-V}}{1 - (1 - \alpha_{sk-V}) \rho_{cl-V}} \quad (5)$$

同様に衣服表面の正味の近赤外光吸収率 $\alpha_{clm-NIR}$ と可視光吸収率 α_{clm-V} も以下のとおり表わされる。

$$\alpha_{clm-NIR} = \alpha_{cl-NIR} \left\{ 1 + \frac{\tau_{cl-NIR} (1 - \alpha_{sk-NIR})}{1 - (1 - \alpha_{sk-NIR}) \rho_{cl-NIR}} \right\} \quad (6)$$

$$\alpha_{clm-V} = \alpha_{cl-V} \left\{ 1 + \frac{\tau_{cl-V}(1 - \alpha_{sk-V})}{1 - (1 - \alpha_{sk-V})\rho_{cl-V}} \right\} \quad (7)$$

著者らは、着衣のぬれと日射を考慮した顕熱流密度 q_{rc} として以下の式を得ている（柴原，窪田ら，2009）。

$$q_{rc} = k_{rc} \left\{ t_{sk} - t_{ope} - \left(\alpha_{clm} R_s + \frac{f_{cl} \alpha_{skm}}{k_{rc}} \right) I_{sun,cl} \right\} \quad (8)$$

ここで、 k_{rc} : 顕熱流率 [$W/(m^2K)$]、 t_{sk} : 平均皮膚温 [$^{\circ}C$]、 t_{ope} : 環境作用温度 [$^{\circ}C$]、 R_s : 衣服外表面の顕熱抵抗 [m^2K/W]、 f_{cl} : 衣服面積率 [-]、 $I_{sun,cl}$: 衣服外表面に到達する日射量 [W/m^2]。

式(8)の $\alpha_{clm} I_{sun,cl}$ が衣服表面の正味の日射受熱量、 $\alpha_{skm} I_{sun,cl}$ が皮膚表面の正味の日射受熱量を表している。ここで日射受熱量を近赤外光受熱量と可視光受熱量の和として考えると、式(8)は式(9)のように表わされる。

$$q_{rc} = k_{rc} \left\{ t_{sk} - t_{ope} - R_s \left(\alpha_{clm-NIR} I_{sun,cl-NIR} + \alpha_{clm-V} I_{sun,cl-V} \right) - \frac{f_{cl}}{k_{rc}} \left(\alpha_{skm-NIR} I_{sun,cl-NIR} + \alpha_{skm-V} I_{sun,cl-V} \right) \right\} \quad (9)$$

$I_{sun,cl-NIR}$ と $I_{sun,cl-V}$ は人体表面に到達する近赤外、可視光日射量を表し以下のように表わされる。

$$I_{sun,cl-NIR} = \frac{A_{p,cl}}{A_{cl}} I_{DN-NIR} + \frac{A_{ef,cl}}{A_{cl}} \left(I_{SH-NIR} F_{p-sky} + I_{RH-NIR} F_{p-gr} \right) \quad (10)$$

$$I_{sun,cl-V} = \frac{A_{p,cl}}{A_{cl}} I_{DN-V} + \frac{A_{ef,cl}}{A_{cl}} \left(I_{SH-V} F_{p-sky} + I_{RH-V} F_{p-gr} \right) \quad (11)$$

ここで、 $A_{p,cl}$: 人体投影面積 [m^2]、 A_{cl} : 着衣表面積 [m^2]、 $A_{ef,cl}$: 有効放射面積 [m^2]、 F_{p-sky} : 人体から見た天空の形態係数 [-]、 F_{p-gr} : 人体から見た地面の形態係数 [-]、 I_{DN} : 直達日射量 [W/m^2]、 I_{SH} : 天空日射量 [W/m^2]、 I_{RH} : 反射日射量 [W/m^2]。

日射作用温度 t_{opsun} は以下のとおりである。

$$t_{opsun} = t_{ope} + R_s \left(\alpha_{clm-NIR} I_{sun,cl-NIR} + \alpha_{clm-V} I_{sun,cl-V} \right) + \frac{f_{cl}}{k_{rc}} \left(\alpha_{skm-V} I_{sun,cl-V} + \alpha_{skm-NIR} I_{sun,cl-NIR} \right) \quad (12)$$

この式より、波長別の日射量が人体に与える影響を評価することが可能となる。例として、高反射塗料の有無による日射作用温度の違いや近赤外光透過率を抑えた衣服の遮蔽性能の評価などに利用できる。

今回実測した衣服 A と F を着用した場合の正味の近赤外光、可視光吸収率を試算した。衣服表面の反射率、透過率の全身平均値は、露出部の透過率を 1、反射率を

0 として算出した。可視光の正味吸収率は上下白色、黒色の 2 色を試算した。皮膚の吸収率は Jacques ら (1955) による黒人と白人の実測結果の平均値を用いた。近赤外光は衣服表面での吸収がほとんど無いものの、衣服透過率が高いため皮膚表面における正味の吸収率は高い。一方、可視光の正味吸収率は衣服の色により異なり、黒っぽい衣服ほど衣服表面での正味の吸収率が高くなることが見て取れる。

表 4 衣服の正味の近赤外光、可視光吸収率の試算

	正味の吸収率		皮膚	全身平均衣服	
	衣服表面	皮膚表面	吸収率	反射率	透過率
	α_{clm}	α_{skm}	α_{sk}	ρ_{cl}	τ_{cl}
近赤外光	0.07	0.33	0.80	0.51	0.44
可視光(上下白)	0.27	0.27	0.64	0.40	0.37
可視光(上下黒)	0.70	0.18	0.64	0.09	0.28

5. まとめ

衣服の波長別の透過率、反射率を実測し、衣服表面、皮膚表面における正味の吸収率を試算した。今後は、平均皮膚温を用いて衣服の遮蔽性能の評価を行う。

謝辞 本研究の一部は、財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団学術研究助成によった。記して謝意を表す。

6. 文献

- 窪田英樹，柴原浩平，濱田靖弘ほか，2008，無効発汗と着衣のぬれを考慮した人体皮膚表面温度の予測，空気調和・衛生工学会論文集，137:9/17。
- 柴原浩平，窪田英樹，濱田靖弘ほか，2009，無効発汗と着衣のぬれを考慮した屋外環境における平均皮膚表面温度の予測，空衛学会論文集，144:1/10。
- 柴原浩平，窪田英樹，濱田靖弘，長野克則，2010，表色値と衣服の日射透過率，日射反射率，日射吸収率の関係，建築学会環境系論文集，75(654):691/696。
- 厚生労働省大臣官房統計情報部，1997/2010，人口動態調査，政府統計の総合窓口，<http://www.e-stat.go.jp/>
- Jacquez, JA., et al., 1955, Spectral reflectance of human skin in the region 0.7-2.6 μ , J. Appl. Physiol., 8:297/299。
- 南沢慶一，柴原浩平，窪田英樹ほか，2012，熱中症の予防等暑熱環境評価のための体温予測モデル（第 12 報），空気調和・衛生工学会大会，913/916。
- 谷地誠，柴原浩平，窪田英樹ほか，2011，熱中症の予防等暑熱環境評価のための体温予測モデル（第 11 報），空気調和・衛生工学会大会，1075/1078。

<連絡先>

柴原浩平
 釧路市大楽毛西 2 丁目 32-1
 釧路工業高等専門学校建築学科
 kuwabara@archi.kushiro-ct.ac.jp