

湿潤時と乾燥時の防護服の顕熱伝達係数の比較

佐古井智紀¹⁾, 田中貴浩²⁾, 堀江正知²⁾, 川波祥子²⁾, 門司幸一²⁾

¹⁾信州大学, ²⁾産業医科大学

Comparison of heat transfer coefficients of protective clothing under wet and dry conditions

Tomonori SAKOI¹⁾, Takahiro TANAKA²⁾, Shochi HORIE²⁾, Shoko KAWANAMI²⁾, Kouich MONJI²⁾

¹⁾Shinsu University, ²⁾University of Occupational and Environmental Health Japan

Abstract: We proposed a measurement method to determine the sensible heat transfer coefficient between skin and the surrounding environment for both wet surface thermal manikin and dry surface thermal manikin by use of a sweating thermal manikin. The determined sensible heat transfer coefficient for wet surface thermal manikin wearing Tyvek protective clothing was 4.36 W/m²°C, which was larger than the one for dry surface thermal manikin wearing the same clothing (4.15 W/m²°C). The wet surface caused about 10 % decrease of the intrinsic clothing thermal insulation for the Tyvek protective clothing.

Key words: Clothing thermal insulation, thermal comfort, heat stress, sweating thermal manikin, measurement method

要旨: 発汗サーマルマネキンによる湿潤着衣の顕熱伝達係数の測定方法を提案した。Tyvek 製防護服着用条件での顕熱伝達係数は、乾燥時に 4.15 W/m²°C、湿潤時に 4.36 W/m²°C となり、湿潤時に増加した。着衣基礎熱抵抗は濡れにより約 10%減少した。

キーワード: 着衣の基礎熱抵抗, 熱的快適性, ヒートストレス, 発汗サーマルマネキン, 測定法

1. はじめに

衣服を着た時の人体からの熱移動は、生地自体の熱伝導性に加え、生地内側に形成される空間の形状に大きく依存する。衣服着用時の皮膚・環境間の熱伝達係数、衣服の熱抵抗の測定には衣服内空間の形状を再現できるサーマルマネキンを用いることが多い(ISO 2007)。顕熱伝達特性を扱う場合は、発汗の無いサーマルマネキンを用い、蒸発熱抵抗を扱う場合には発汗させたサーマルマネキンを用いる。他方、空気と水では水の方が熱伝導率は高く、着衣の顕熱伝達係数は着衣が濡れている場合に大きくなると予想される。本稿では、湿潤衣服着用時の皮膚・環境間の熱伝達係数と衣服の熱抵抗を、サーマルマネキンを用いて計測する方法を提案し、濡れに伴い熱伝達係数が変化するかを検討する。

2. 理論

計測中を通じて温湿度を一定かつ均一に調節でき、一定気流の室内で行う。

2.1 皮膚乾燥時の顕熱伝達係数 h_D の測定

マネキン表面温度が T_{sk} で均一、環境温度が T_a で均一のと看、マネキンからの放熱量 Q は式(1)で表される。

$$Q = h_D (T_{sk} - T_a) \quad (1)$$

ここに、 h_D : 皮膚が乾燥時の皮膚・環境間の顕熱伝達

係数 [W/m²°C], Q : マネキンからの放熱量 [W/m²], T_{sk} , T_a : それぞれサーマルマネキン表面温度, 気温 [°C].

式(1)より発汗量をゼロとする定常状態のサーマルマネキンを用いて計測された Q と T_{sk} , 別途計測した環境温度 T_a を用い、 h_D は式(2)で表される。

$$h_D = \frac{Q}{T_{sk} - T_a} \quad (2)$$

2.2 皮膚湿潤時の顕熱伝達係数 h_W の測定

発汗時の放熱量 Q は式(3)で表される。

$$Q = h_W (T_{sk} - T_a) + h_e (P_{sk}^* - P_a) \quad (3)$$

ここに、 h_e : 皮膚と環境間の蒸発に伴う熱伝達係数 [W/m²kPa], P_{sk}^* : T_{sk} における飽和水蒸気圧 [kPa], P_a : 環境の水蒸気圧 [kPa].

水蒸気圧、マネキン表面温度、気流、着衣条件を固定し、皮膚が完全にぬれている条件下で、環境温度を T_{a1} または T_{a2} で与える 2 通りの下で計測を行う。マネキン表面温度、水蒸気圧、気流と着衣は 2 通りの計測で同一であるので、環境温度 T_{a1} での放熱量を Q_1 , 環境温度 T_{a2} での放熱量を Q_2 とすると、 Q_1 と Q_2 の差は次式で表される。

$$Q_1 - Q_2 = \left[h_w (T_{sk} - T_{a1}) + h_e (P_{sk}^* - P_a) \right] - \left[h_w (T_{sk} - T_{a2}) + h_e (P_{sk}^* - P_a) \right] = h_w (T_{a2} - T_{a1}) \quad (4)$$

式(4)より、 h_w は次式で与えられる。

$$h_w = \frac{Q_1 - Q_2}{T_{a2} - T_{a1}} \quad (5)$$

3. 実験

実験は産業医科大学内の幅 6400mm×奥行 4400mm×高さ 2700mm の壁面上部吹き出し、壁面下部吸い込みの人工気候室で行った。空気との熱のやり取りに加えて壁面との熱放射による熱交換の影響も含むグローブ温度 T_g を人工気候室内の環境温度 T_a 、 T_{a1} 、 T_{a2} とみなした。発汗サーマルマネキン Newton に Tyvek 製防護服を着用させた。実験に用いた Tyvek 防護服を図1に掲げる。計測は5回ずつ行った。着方に一般性を持たせるため計測ごとに全ての衣服を着せ直した。

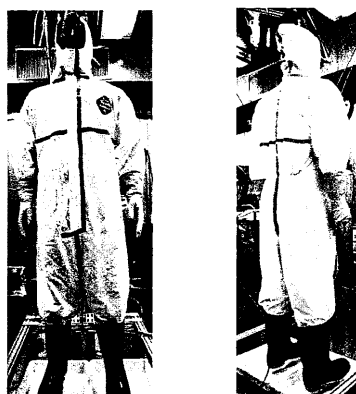


図1 実験に用いた Tyvek 防護服

3.1 乾燥時実験

1 実験は5時間である。実験環境条件を表1に、サーマルマネキンの設定条件を表2に示す。室温が十分に安定し、かつ、サーマルマネキンの発熱と放熱が等しくなる定常条件でのデータのみを分析対象とした。

表1 乾燥時実験の環境条件

室温(=グローブ温度) T_a [°C]	24
相対湿度 ^{注2} RH [%]	50

表2 乾燥時実験のサーマルマネキンの設定

表面温度 T_{sk} [°C]	34
水分供給量 FL [ml/(h·m ²)]	0

3.2 湿潤時実験

表3の環境条件で測定した。計測中、衣服内空間を同

一の形状に保つため、最初の着せ付け以後は一切、サーマルマネキンに触れないものとした。表4にサーマルマネキンの制御条件を示す。予備実験によりこの環境下においてサーマルマネキン表面が完全に濡れ、水分供給を増やしてもサーマルマネキンからの放熱量が増えない水分供給量を決定した。

表3 湿潤実験の環境条件

	前半4時間	後半18時間
環境温度 T_g [°C]	24	34
相対湿度 RH [%]	89	50

表4 湿潤時実験のサーマルマネキンの設定

	皮膚温 T_{sk} [°C]	発汗量 FL [ml/(h·m ²)]
前半4時間	34	皮膚を飽和させる量 (予備実験で決定)
後半18時間		

4. 結果

表5に h_D 、 h_w および、着衣表面と環境間の熱抵抗を0.7 clo、衣服面積率を(1+0.28 I_{cl})とした時の着衣の基礎熱抵抗 I_{cl} を記す。湿潤時の h の増加、 I_{cl} の減少を確認できた。

表5 乾燥時と湿潤時の Tyvek 防護服の伝熱特性

	h [W/m ² °C]	I_{cl} [clo]
乾燥時	4.15	1.01
湿潤時	4.36	0.92

5. まとめ

発汗サーマルマネキンによる湿潤着衣の顕熱伝達係数の測定方法を提案し、乾燥時と比べて湿潤時に Tyvek 製防護服着用条件での顕熱伝達係数が増加し、着衣基礎熱抵抗が約10%減少することを確認した。

謝辞 本研究は、旭・デュポン フラッシュスパン プロダクツ株式会社からの受託研究の一部です。

6. 文献

ISO 2007. ISO 9920, Ergonomics of the thermal environment -- Estimation of the thermal insulation and evaporative resistance of a clothing ensemble.

<連絡先>

佐古井智紀

〒386-8567 長野県上田市常田 3-15-1

信州大学学術研究院繊維学系

t-sakoi@shinshu-u.ac.jp