

運動発汗時の肌着の熱水分移動

薩本弥生¹⁾、遊佐美穂²⁾、竹内正顯³⁾

1:横浜国立大学教育学部、2:元横浜国立大学教育人間科学部生、3:元桐蔭横浜大学工学部

Heat and Water vapor transfer of underwear during sweating in exercise

SATSUMOTO Yayoi¹⁾, YUSA Miho²⁾, TAKEUCHI Masaaki³⁾

1: College of Education, Yokohama National University, 2: Former student of College of Education and human sciences, Yokohama National University, 3: Former Toin University of Yokohama

1. 緒言

肌着は従来木綿がよいとされてきた。これは、木綿が、吸水・吸湿性に優れていること、手入れが容易であること、安価であることなどが理由である。しかし、木綿は吸湿性が高いがゆえに繊維内部まで水分を吸収し、放湿性に乏しく、一度ぬれるとべたつきなどの不快感を引き起こし、さらにそのまま冷環境へ移動すると、ぬれた肌着が体温を奪ってしまう。肌着や着衣の快適性に関して、素材の吸湿性に注目した研究が多くなされている。

平田¹⁾は、綿とPETの衣服を着用して吸湿に伴う吸着熱が生体に影響するメカニズムについて明らかにすることを試みた結果、不感蒸散レベルでは吸湿性が高い綿の方が快適だが発汗後は吸着熱の発生が皮膚温をより上昇させ、ひいては皮膚血流量増加をもたらす綿衣服の方が不快になると報告している。諸岡²⁾は、下衣にポリエステルとキュプラ、それぞれに吸水化工を施したものの4種類のパンティストッキングを、上衣に綿100%、ポリエステル100%、綿50%と多孔性中空ポリエステル50%混紡の3種類の半袖スポーツシャツで被験者実験を行った。吸湿性が大きい素材は、汗を迅速に吸収し、衣服内湿度を低く保つため、吸水性よりも吸湿性がより重要であると報告している。

最近では吸水・速乾性を高めたポリエステル(以下PETと略す)などの合成繊維(以下合繊と略す)に、高い吸水性だけでなく、吸湿性も付与した素材の肌着が商品として出回っている。平林ら³⁾は、半袖のTシャツの素材にポリエステルフィラメント(ESF)とポリエステルステープル(ESS)、ESFと綿(C)、ESS

とCをそれぞれ混紡したスポーツウェアで被験者実験を行い、大量発汗時の素材の生体への効果を検討した。この実験で、多量発汗時ではウェアの吸湿性よりも吸水・蒸発特性および通気性の関与が大きいことを示唆している。

平田の報告¹⁾では汗を大量にかいた場合、綿の吸湿による発熱がかえって不快感につながるとあり、諸岡²⁾の報告では吸湿性が高い素材では衣服内を低湿に保つため有利としている。また、平林³⁾らの研究では大量発汗時に吸水速乾性の方が吸湿性よりも快適性に寄与するとし、各々結果の傾向が異なる。その原因は肌着素材の種類のみでなく布構造や、布地のゆとり等構成要因に関する条件、運動負荷、環境の条件等が異なるためと思われる。

そこで本研究では吸水・速乾性を高めたPET、及びPETに吸湿性合繊を混紡し、その混紡率の異なる2種および綿の計4種類の素材で布構造をなるべく同一にしたものを試作し、着衣の熱水分移動性への素材要因の寄与を見るために肌着を作成し、濡れ広がり性に関する材料実験を行った。さらに着衣の構成要因の1つとして身体へのフィット性の違いの寄与を見るためにルーズ・タイトの2つの形態で肌着を作成し被験者実験を行い、温熱特性の差や快適性の違いを検討し、夏場の肌着として適切な着衣への素材要因、構成要因の寄与を検討することを目的とした。

2. 実験方法

2.1 実験肌着の諸元

実験試料の吸水・速乾性、吸湿性が着衣中の熱水

分移動、ひいては温熱的快適感にどのように寄与するか検討するため、合成繊維メーカーに吸湿性の高い合成繊維であるアクリレート系合成繊維を、混率を変えて吸水速乾性の PET に混紡した布試料を試作してもらった。なお、アクリレート系吸湿合成繊維（には強力な親水基がある。つまり繊維の分子構造を化学的に変えることによって繊維の中まで水分を大量に吸い込み、綿の3倍、ウールの約2.5倍もの吸湿性を実現している。ただし、この合繊単独での布素材化は風合い面、物性面（強度）、吸湿発熱性、速乾性の面から問題があり通常、ポリエステルと混紡されている⁴⁾。力学的に今回試作した30%混紡が混合比として上限という。PET100%、PET85%吸湿合繊15%、PET70%吸湿合繊30%、綿100%の4素材（以下、PET100、PET85、PET70、COT100と略す）を用いた。組織は全て同じ天竺の編地で布の厚さや編み密度など布構造はできる限り同一になるように試作した。試料の諸元を Table 1 に示す。

表に示すMR(regain)は吸湿性の指標でPETと吸湿合繊の混紡素材では吸湿合繊の混紡率に比例し表の下段に行くほど吸湿性が高くなる。なお、PET70はCOT100すなわち綿100%と同等の吸湿性をもつ。

Table 1 試料の諸元

Fiber	Loop/cm		T	λ	η	R	MR	H
	wa	we						
PET100	16	26	384	31.8	21.3	82.8	1.1	11.6
PET85	15	26	374	33.6	22.0	82.7	4.4	12.2
PET70	18	28	397	34.2	22.3	78.9	8.5	14.3
COT100	15	28	402	46.6	18.3	66.2	8.5	11.4

T: 厚さ (μm), λ : 熱伝導率 (mW/m/K), η : 充填率 (%), R: 透湿抵抗 (s/m), MR:水分率; (%), wa: warp(経), we: weft(緯)の略, H: パイレック法吸い上げ高さ(10分時) (cm)

肌着は伸縮性のニットで身体サイズより小さいものを伸ばして着装する。身体とのフィット性を、バスト寸法に対し-15%のルーズと-40%のタイトの2種で試作した4種の素材を用いて肌着を作成し着装実験に使用した。各フィット性を以下本論文では各々ルーズ、タイトと略す。下衣は綿100%の膝

上丈のトレーニングパンツとした。

2.2 濡れ広がり乾燥モデル実験について

ぬれ広がり乾燥の実験は竹内発案の方法⁶⁾で発汗初期の身体皮膚が部分的に濡れた状態を模擬している。温度20°C湿度65%の人工気候室で行った。40×70cmのヒータ上に同寸法の試料を身体程度に加熱したヒータの上に置き、10mlの水を注入滴下し、試料の質量とヒータの温度を連続測定した。Fig.1は実験の様子である。同時に濡れ広がりの様子をサーモグラフィで可視化した。

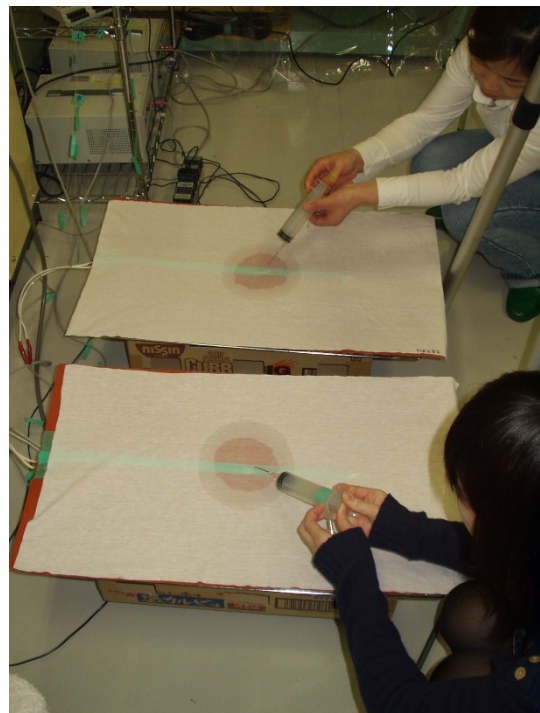


Fig.1 濡れ広がり実験様子

2.3 被験者実験について

被験者実験は Fig.2 に示す実験スケジュールで横浜国立大学 VBL 棟の前室・主室の2室連結型の人工気候室で行い、前室は温度30°C湿度65%RH,風速0.1m/sに、主室は温度24°C湿度65%RH,風速0.1m/sに設定した。被験者は健康な成人女子3名である。身体特性は年齢24±3.6歳、身長157±7cm,

温度30°C・湿度65%RH 風速0.1m/s(前室)		温度24°C・湿度65%RH 風速0.1m/s(主室)	
安静	トレッドミル歩行 (3.4km/hr)	冷房環境で安静	
アンケート	アンケート	アンケート	
0 5 10	12 17 22 25	26 30 40 50 60 70	

Fig.2 実験手順 (数字は主観申告のタイミング)

体重 $49.7 \pm 6.5\text{kg}$, BMI 20.1 ± 0.9 である。



タイトフィット肌着装着 ルーズフィット肌着装着
Fig.3 試作肌着を着装した被験者の様子

被験者は Fig.3 に示すようにセンサを装着し肌着を着用し前室で 10 分間安静を保った後、 3.4km/hr の速度で 15 分間のトレッドミル歩行を行った。その後、主室の冷房環境で 45 分間安静を保った。運動後の安静時は、体重変化の経時変化をみるため、電子体重計の上で、椅座位、安静とした。実験中は 4 点の皮膚温(胸、上腕、大腿、下腿)と、3 点の衣内温湿度、体重、心拍数、皮膚血流量を測定した。また、温冷感、湿潤感、快適感の主観申告を次の間隔尺度を用いてアンケートを行った。温冷感:暑い(2)、やや暑い(1)、どちらでもない(0)、やや寒い(-1)、寒い(-2)、湿潤感:飽和状態(6)、とても濡れている(5)、濡れている(4)、湿っている(3)、やや湿っている(2)、乾いている(1)、快適感:どちらでもない(0)、やや不快(-1)、やや不快(-2)、非常に不快(-3)

3. 研究結果

3.1 濡れ広がり乾燥モデル実験

濡れ広がり乾燥モデル実験の結果を Fig.4 に各条件の質量変化について示す。

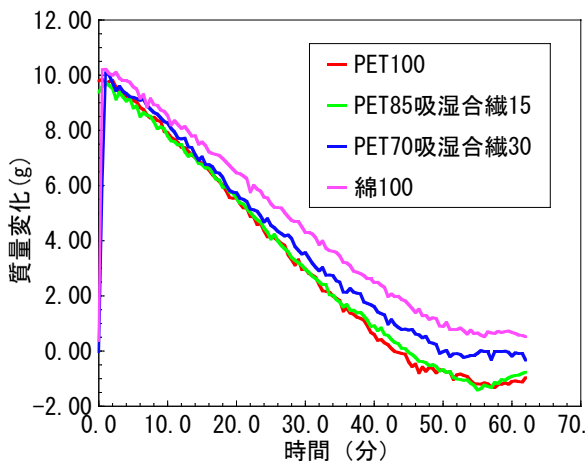


Fig.4 発熱平板の質量変化

Fig.4に示すように 40 分くらいまでは直線的に質量低下し、その傾きが乾燥速度であり、PET100 および PET85 において乾燥速度が速く、ついで PET70 > COT100 の順となった。すなわち PET100 \approx PET85 >> PET70 > COT100 の順で乾きが早いことが明らかとなった。

濡れ面積はサーモグラフィで 1 分毎に撮影した画像から割り出した。Fig.5 に濡れ面積変化について示す。濡れ面積変化において PET100 \approx PET85 >> PET70 > COT100 の順で濡れ広がり早く、20 分くらいにピークとなり、その後の乾きも早かった。PET70 は綿と同様の吸湿性があるにも関わらず、吸水速乾性合繊が混紡されているため乾燥速度が綿よりも速い。吸湿性を持つことの欠陥が若干改善されている。肌着が濡れ始める環境を想定すると、吸湿性が高く吸水速乾でない綿などの素材は乾きが遅いことが明らかにされた。

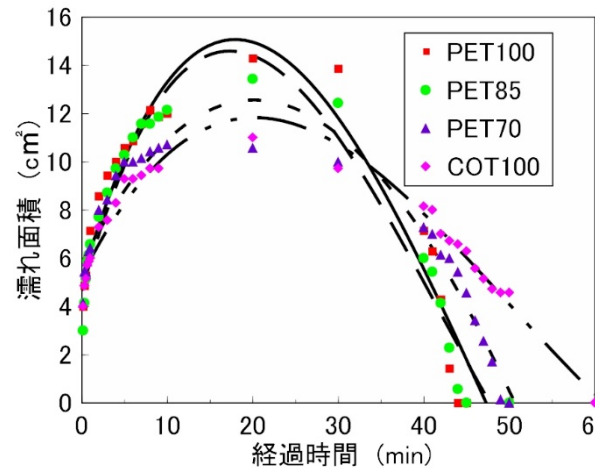


Fig.5 発熱平板の濡れ面積経時変化

最も濡れ広がった 20 分と早い素材は乾燥している 45 分のサーモグラフィの画像を Fig.6 に示す。

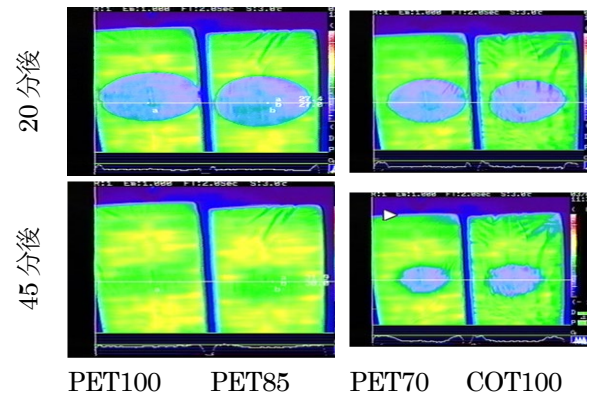


Fig.6 開始 20 分と 45 分後のサーモグラフィ画像

開始 20 分時点で PET100 と PET85 が PET70 や

COT100 と比較してより濡れ面積が大きいことがわかる。45分後にはPET100とPET85はすでに乾いていて、PET70とCOT100はまだ、濡れている。

Fig.4の質量変化から蒸発速度を算出した。Fig.7に結果を示す。

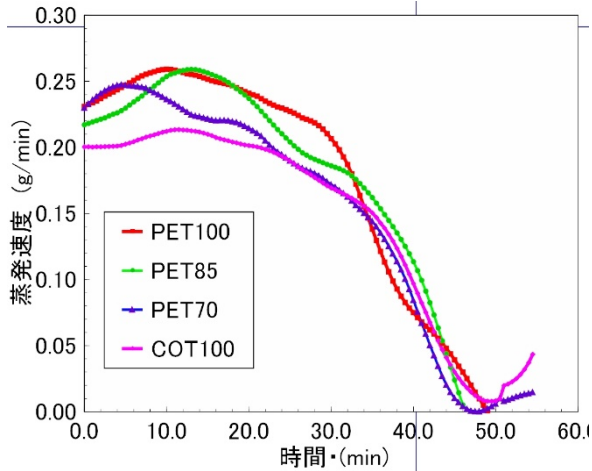


Fig.7 各素材の蒸発速度経時変化

濡れ面積が増加する20分前後までは蒸発速度が大きく、それ以降の乾燥過程では蒸発速度が徐々に小さくなる。PET100>PET85>PET70>COT100の順に蒸発速度が速く、その期間が長く維持されている傾向が見られる。

Fig.5とFig.7から濡れ面積と蒸発速度の関係を素材ごとにプロットしてFig.8に示す。

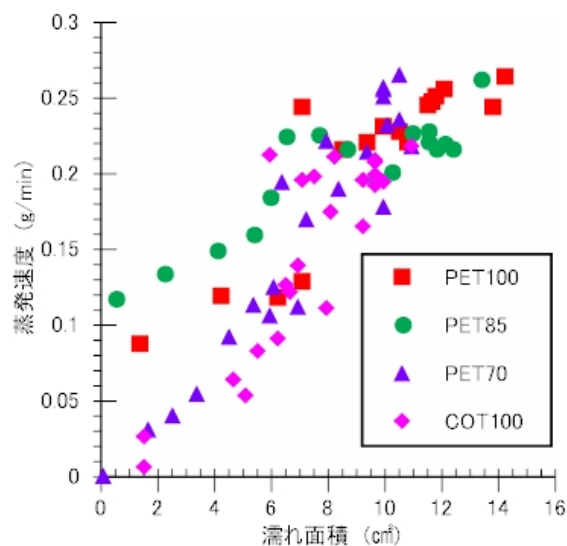


Fig.8 濡れ面積と蒸発速度の関係

どの素材においても濡れ面積に比例して蒸発速度が大きくなる傾向がみられた。竹内らの報告⁵⁾と一致するが、今回の素材では傾きは素材により異なった。PET100やPET85では濡れ広がって蒸発面積

が大きくなるため、その分、蒸発速度が速くなり、乾きが早くなったと考えられる。

Fig.9に各条件のヒータ温の経時変化について示す。

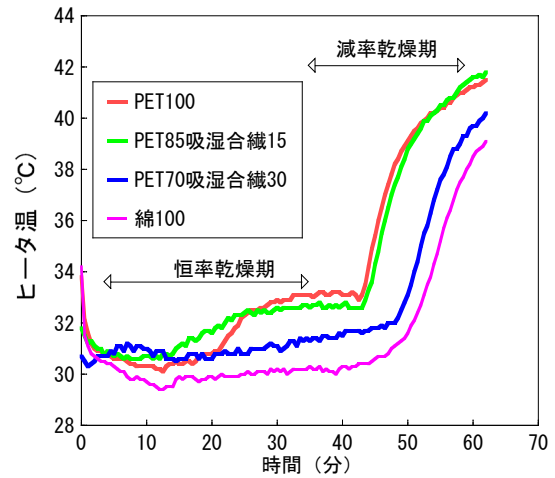


Fig.9 発熱平板のヒータ温の経時変化

どの素材でも最初から40分くらいまではヒータ温は大きな上昇はなく最大2°Cの温度変化で40分から50分の間に温度が急激に上昇し始める。その変曲点が生じる時間はPET100≒PET85<PET70<COT100に早く上昇する時の温度は逆の順番であった。

3.3 被験者実験について

平均皮膚温をラマナサンの4点法で算出したところ、実験開始時において差が生じたため、運動開始前安静時10分の平均値を基準として相対値を算出した。タイトフィットの場合の平均皮膚温相対値の経時変化を、Fig.10にルーズフィットの場合をFig.11に示す。

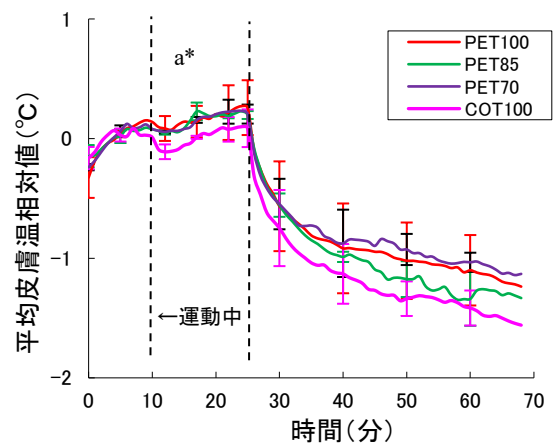


Fig.10 平均皮膚温安静時からの相対値の経時変化
タイトフィットの場合 (a*: $P<0.05$,PET85 VS COT100)

タイトフィットの場合、運動中17分でPET85とCOT100間に有意差があり、COT100の温度上昇が有意に小さかった。一方、冷房環境移動後、COT100以外の3素材の平均皮膚温は徐々に回復に向かっていく。COT100では皮膚温が下がり続けた。これは綿の高い吸湿性のため繊維内部まで吸収され、放湿できず繊維内に残った水分のためと考えられる。しかし、有意差は見られなかった。

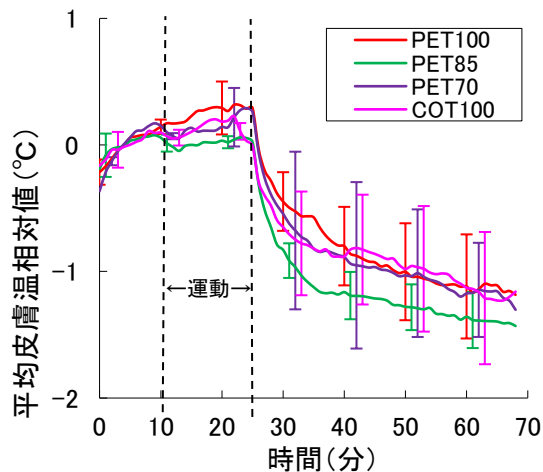


Fig.11 平均皮膚温安静時からの相対値の経時変化
ルーズフィットの場合

ルーズフィットの場合、PET85の場合に温度低下が大きくなった。しかし、有意差は無かった。

フィット性の影響を見るため、素材を平均してフィット性で比較した結果を Fig.12 に示す。

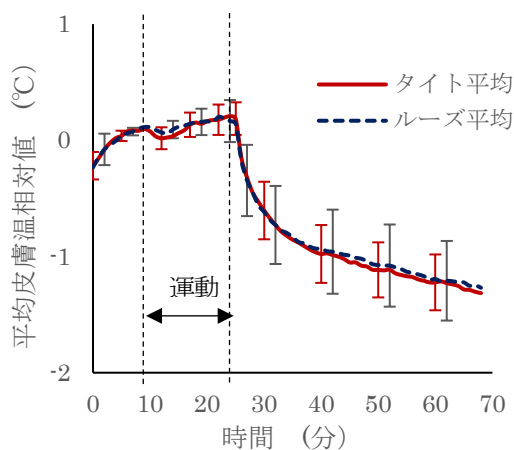


Fig.12 平均皮膚温安静時からの相対値の経時変化
フィット性の比較

時間毎に平均値の差の検定を行ったが、本研究の範囲ではフィット性による有意差は無かった。

タイトフィットの場合の胸の衣服内絶対湿度の結果を Fig.13 に示す。

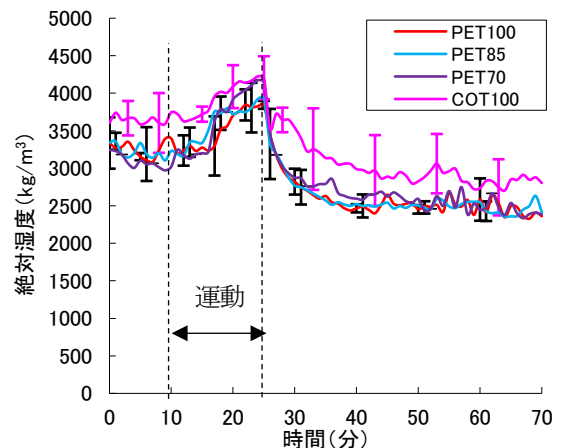


Fig.13 胸の衣服内絶対湿度の経時変化

タイトフィットの場合

タイトフィットの場合の胸の衣内絶対湿度は、安静時、運動中とも COT100 が一番高く、次いで PET70>PET85>PET100 となった。冷房環境移動後も COT100 の場合、回復が一番遅くなった。

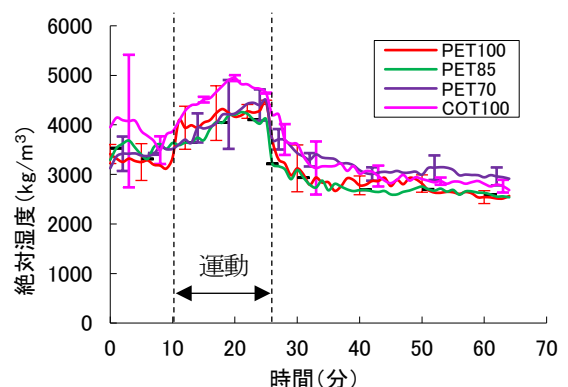


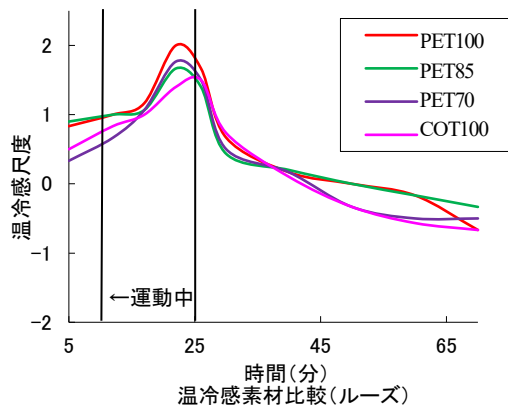
Fig.14 胸の衣服内絶対湿度の経時変化

ルーズフィットの場合

ルーズフィットの場合の胸の衣内絶対湿度は、安静時、運動中とも COT100 が一番高く、後の素材は差が無かった。しかし、冷房環境移動後は素材による差はあまり見られなかった。ルーズフィットの場合、素材と皮膚の距離が大きくなるため、素材の吸湿性の影響が小さくなるためと考えられる。

以上のような綿の場合に平均皮膚温が回復期に回復が遅れ、絶対湿度の回復が遅れる傾向がルーズよりもタイトで顕著にみられるのは、タイトの場合、布が身体に密着しているという形態の違いによるもので、素材の性質が出やすいからと考えられる。

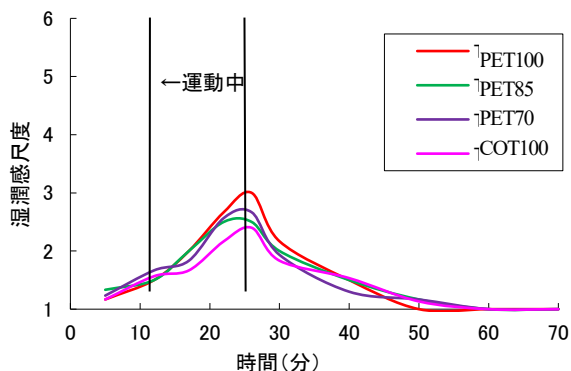
Fig.15 にルーズ着用時の温冷感の結果を示す。



Fi.g.15 温冷感の経時変化 (ルーズの場合)

温冷感は運動を開始して5分経ってから暑い側に変化し、運動後急激に下がり始めその後、緩やかに回復していった。素材による有意差は無かったが運動中の温冷感の上がり方はCOT100で小さく、PET100が最も高まった。吸湿性が高いほど、暑さを和らげる効果があることが示唆された。

Fig.16 にルーズ着用時の湿潤感を示す。



Fi.g.16 湿潤感の経時変化

運動を開始すると湿潤感が増す側に変化し、運動後にすぐに下がり始め45分間で最初と同じレベルに下がった。素材による有意差は無かったが運動中の湿潤感の上がり方はCOT100で小さく、PET100もっとも大きかった。吸湿性が高いほど、暑さを和らげる効果があることが示唆された。

Fig.17 にルーズフィットの場合の快適感の結果を示す。運動の後半でのPET100の不快感が強い。一方、回復期の後半でCOT100の回復が遅い。

分散分析の結果、素材・フィット性による主観申告の有意差はいずれも見られなかった。心拍数、皮膚血流量、発汗量、温冷感、湿潤感についても、素材・フィット性による有意差はみられなかった。

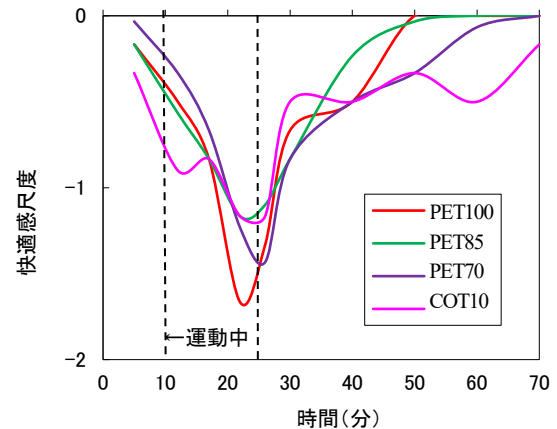


Fig.17 快適感素材比較 (ルーズ)

4.考察

モデル実験において一定量の模擬汗で模擬皮膚が部分的に濡れた状態を模擬した濡れ広がり乾燥実験で4素材の濡れ広がりおよび乾燥の挙動は異なり、濡れ面積で20分頃最も濡れ広がり、その後、乾燥していく様子が観察された。蒸発速度は濡れ面積と比例関係があった。吸水速乾性の素材の混率が大きいほど、より濡れ広がり蒸発面積を稼いでいた。水が乾燥する過程には効率乾燥期と減率乾燥期とがある⁶⁾。恒率乾燥期とは、布表面が十分に液体で飽和した状態での布内部からの水分の拡散速度が布表面からの蒸発に比べて速く行われている期間をいう。恒率乾燥期は、繊維間の水分が乾いていく段階なので、素材による影響は受けない。減率乾燥期とは、質量変化が緩慢になり、布内部からの水分の拡散速度が漸次遅くなる期間をいう。ここでは、繊維の内部までしみ込んだ水分が乾くので、吸湿性が寄与し、吸湿性のないものは速く乾いたと考えられる。Fig.9において温度の急上昇し始めるところが減率乾燥期の開始点と考えられる。PET100とPET85はほぼ同じ挙動で明確な変曲点があり、PET70とCOT100よりも早く減率乾燥期に移行した。PET70とCOT100は吸湿性が高いため、繊維の中まで水が入るためその結合を解いて乾燥するため乾きが遅くなったと考えられる。水分率が同じPET70とCOT100ではPET70の方が乾きが早かった。70%含まれる吸水速乾性素材が乾燥速度を速めるのに寄与したと考えられる。

被験者実験ではタイトフィットの場合、運動中に

有意にCOT100の場合にPET85よりも平均皮膚温の上昇が小さかった。回復期の平均皮膚温や衣服内絶対湿度の回復も遅くなった。しかし、有意差は見られなかった。また、フィット性も有意差が無かった。被験者実験からは有意差はみられる項目が少なかったのは被験者数が3名と少なかったことで個人差にマスクされた可能性がある。

濡れ広がり乾燥実験の結果から、部分濡れした時に、素材により濡れ広がりやすさや乾きやすさの傾向が明確に示された。暑熱環境から冷房環境へ移動する状況では、吸湿性のある素材は、その吸湿性のよさがゆえに冷えを引き起こす原因となり、不快感を与えるのではないかと考えられる。

以上より、多量の汗をかく状況では吸湿性よりも吸水速乾性に優れた肌着の素材が有用であると考えられる。また、重ね着などをして水分が出にくい環境でのバッファ効果として吸湿性を必要とする場合、吸湿合繊と吸水速乾性合繊を混紡することで吸湿性は綿と同程度でも乾燥性が改善できる可能性が見出された。

4. まとめ

本研究では、暑熱環境で軽度の運動後、冷房環境に移動するという、夏場によく見られる状況を想定して、被験者実験を行った。その素材として、吸水速乾性を高めたポリエステル、ポリエステルに吸湿合成繊維を混紡し、その混紡率が15%、30%と異なる2種、そして綿の4種類を用いた。材料実験により、素材の濡れ広がり性乾燥性への吸湿性、吸水速乾性の素材の寄与を明らかにし、被験者実験により、肌着の熱水移動特性や快適性を検討した。また、材料実験、被験者実験で得られた結果から、夏の肌着として適切な着衣を検討した。被験者実験における結果から、吸湿性の高い綿では、冷房環境移動後、衣服内湿度、平均皮膚温の回復が遅い傾向がみられた。しかし、素材による差、ルーズ・タイトの形態の違いに関して主観申告や生理量で有意差は見られなかった。心拍数、皮膚血流量、発汗量、主観申告についても、素材・フィット性による有意差はみられなかった。

濡れ広がり乾燥性を比較する材料実験によると質量および濡れ面積変化においてPET100≒PET85>>PET700>COT100の順で濡れ広がり早く乾きも早かった。PET70はCOT100と同様の吸湿性があるにも関わらず、吸水速乾性合繊が混紡されているため乾燥速度が綿よりも速かった。吸湿性が高いと放湿性が低くなることが若干改善されている。肌着が濡れ始める環境を想定すると、吸湿性が高く吸水速乾でない綿などの素材は乾きが遅いことが明らかにされた。多量の汗をかく状況では吸湿性よりも吸水速乾性に優れた肌着の素材が有用である。また、重ね着などをして水分が出にくい環境でのバッファ効果として吸湿性を必要とする場合、吸湿合繊と吸水速乾性合繊を混紡することで吸湿性は綿と同程度でも乾燥性が改善できる可能性が見出された。

謝辞

材料実験・被験者実験ともに試料となる素材を提供していただきました東洋紡総合研究所の石丸園子様にお礼申し上げます。

引用文献

- 1) 平田耕造, 温熱生理学からみた快適肌着の未来展望, 42(5),296-298(2001)
- 2) 諸岡晴美, 衣料素材の吸湿・吸水性と着用性能, SENI GAKKAISHI(繊維と工業), 56(12),352-357(2000)
- 3) 平林由果, 菅屋潤彦, 鈴木一乃, 石丸園子, 西山哲成, 西村直記, スポーツウェア用編地の放熱特性、および肌離れ性に関する研究—第2報: 運動時の体温変化に及ぼす影響—, 日本生理人類学, 5(1), 23-30(2000)
- 4) T. Ogino, T. Sumitani, T. Sakamoto, Sen'i Gakkaishi, 57(12),320-323. (2001)
- 5) 竹内正顕, 塩見将人, 一部分が濡れた吸水速乾Tシャツの乾燥, 第15回繊維連合研究発表会講演要旨集,137 (2002)
- 6) 中島利誠, 進藤緑, 布の乾燥機構, 織学誌.37(9) T347-T353(1981)