

素材布の通気性、衣服の開口部とゆとりが衣服換気に 及ぼす影響：身体部位差に着目して

大阪信愛女学院 上 田 博 之
短期大学
(共同研究者) 大阪国際大学 井 上 芳 光

The Influences of Air Permeability of Fabric, Open Apertures and Fitting of Clothes on Clothing Ventilation in Different Body Regions

by

Hiroyuki Ueda
Osaka Shin-ai College
Yoshimitsu Inoue
Laboratory for Human Performance Research
Osaka International University

ABSTRACT

The aim of this study was to explore the influence of fabric air permeability, open apertures and fit (tight/loose) of clothes on the clothing ventilation. To examine the effect of air permeability of fabric on clothing ventilation, the ventilation rate of four jackets and pants with identical design but with different air permeability (air resistance : 1.1, 2.0, 2.5, ∞ kPa·s/m) was determined for a subject under conditions of standing in still air and walking in air moving at 1 m/s. In addition tests were performed with the smaller and larger jackets and pants with their openings at neck, jacket hem, wrist cuffs, and pants cuffs both opened and closed, under the same conditions, to examine the effect of the openings on the ventilation. The ventilation was influenced by three factors: fabric air permeability, open apertures and fit (tight/loose) of clothes. Furthermore, the ventilation was modified by wind and body movement. As a result, the modification in the clothing microclimate ventilation differed from one region of the body to another. The ventilation

was significantly increased in the back, upper arms and legs region by the improvement of fabric air permeability, in the upper and lower limbs by a loose fit, and in the trunk and upper limbs region by openings at neck, jacket hem, wrist cuffs and pants cuffs under the walking condition. The results indicated the possibility of adjusting the clothing ventilation in various body regions by fabric air permeability, open apertures and looseness of fit for realistic designing of sportswear.

要 旨

本研究では、温熱的機能性を考慮した衣服設計に向けての基礎的資料を得ることを目的とし、素材の通気性、衣服の開口部とゆとりが衣服換気量に及ぼす影響を身体多部位で検討した。ピンホール密度の違いによる通気性が異なるアウターウェア4種（1.1, 2.0, 2.5, ∞ kPa·s/m）及び同じ通気性素材から作ったアウターウェアの襟・袖口・裾の開閉を可能にした大小2サイズの実験用衣服を同一被験者に着用させ、歩行時と立位時の衣服換気量を部位別（胸・背・上腕・前腕・大腿・下腿）に測定した。素材布の通気性、衣服開口部の開閉およびゆとり量の相違で衣服換気量に差が認められる部位が存在した。そして、この差の程度は歩行や風にも影響された。たとえば、歩行時には、素材布の通気性の改善により背、上腕、下腿で、襟・袖・裾の開口により躯幹、上肢で、ゆとり量の増加により上・下肢でそれぞれ衣服換気量が有意に増加した。以上の結果から、素材布の通気性、開口部やゆとりにより衣服換気量を部位ごとに意図的に調節することが可能であることが示唆された。

緒 言

スポーツウェアは、種目特性に応じて温熱的機能性、運動機能性、軽量性など様々な観点から設計されている。発汗を伴う条件下の衣服設計には、温熱的機能性、とくに優れた水分移動特性が求め

られる。これまで我々は、ヒトの発汗反応には身体部位差が存在し、運動強度の増大に伴う発汗量の増加の程度は前額部で顕著であること、さらに躯幹部と四肢部の身体部位差の程度が小さくなること、また老若男女の発汗反応特性にも身体部位差が存在することを明らかにしている¹⁻⁴⁾。これらの結果は、温熱的機能性を考慮した衣服を効率的に設計するためにはスポーツ場面での着用者の発汗量から必要な衣服換気量を身体部位毎に予測し⁵⁾、それに応じて素材布の開発・選択、衣服の開口部やゆとり量などのデザインを考慮する必要性があることを示唆している。

衣服内では温められた空気が上昇し襟口から流出する煙突効果や動作にともない生じるふいご効果が起こることが知られている。薩本⁶⁾は、ふいご効果による対流が、開口部から測定部までの距離に反比例し、それは衣服のゆとりによっても影響されることを、モデル実験から見出している。また、衣服の開口部が衣服内の対流に影響することが示されているもの⁷⁾、動作を伴うヒトの着衣実験においてゆとりや開口が身体各部位の衣服換気量に及ぼす影響は定量的に示されていない。我々は、軽運動時において衣服素材が衣服換気量に影響し、その影響の程度には身体部位差が存在することを報告している⁸⁾。熱放散に優れた衣服設計のためには、衣服の熱移動特性に関わる要因が衣服換気量に及ぼす影響を着用実験で検討する必要がある。

そこで本研究では、温熱的機能性を考慮した衣

服設計に向けての基礎的資料を得ることを目的とし、素材布の通気性、衣服の開口部とゆとりが衣服換気量に及ぼす影響を身体多部位で検討した。

1. 方法

1.1 衣服条件

実験1：素材の通気性が衣服換気量に及ぼす影響を検討するため、同型、同一サイズの通気性のないタイベック製（ポリエチレン100%、米国デュポン社）ジャケットとパンツ（以下P0とする）およびこれらにミシン目を3cm, 2cm, 1cmの間隔で入れて通気性を持たせたもの（以下P1, P2, P3とする）の合計4着を準備した。P1, P2, P3の通気抵抗は、それぞれ2.5, 2.0, 1.1 (kPa·s/m)であった。

実験2：衣服の開口部とゆとりが衣服換気量に及ぼす影響を検討するため、通気性のないタイベック生地に1cm間隔のミシン目を開けて通気性（通気抵抗:1.1kPa·s/m）を持たせた生地から被験者に適合する範囲内でサイズの異なる同型の2種類のジャケットとパンツを作成した。また、襟・袖・裾の開閉が衣服換気量に及ぼす影響を検討するために、ジャケットの襟・袖・裾の3ヶ所とパンツの裾を開閉できるようにした。開口条件は襟・袖・裾を自然に着用した状態で、閉口条件は襟ぐりを布テープで皮膚に接着し、袖口と裾（ジャケット、パンツとも）は極細ゴムとマジックテープバンドを用いて開口部を絞って塞いだ。

なお、実験1, 2とも、実験用衣服内の気流に影響を及ぼさないように、実験用衣服の下にゆとりのないエアロビックダンス用ウェアをアンダーウェアとして着用した。

1.2 被験者および環境条件

本実験の被験者は、22歳の女性2名（Subj. No1, 2）であり、Subj. No1が実験1に、Subj. No2が実験2にそれぞれ参加した。両被験者とも標準的体

型であった（Subj. No1:身長158cm,体重52kg; Subj. No2: 160cm,体重53kg）。各衣服条件下において、立位と歩行時の衣服換気量を測定した。立位条件は無風下（0.5m/s以下）で、歩行条件は無風環境下での歩行を想定して安定した1.0m/sの向かい風の中で1.0m/sに設定したトレッドミル上で被験者が歩行した。全ての実験は、環境温度 $22 \pm 1^\circ\text{C}$ ・相対湿度 $50 \pm 5\%$ に設定した環境制御室に設置した風洞（いずれも（株）ナガノ科学機械製作所製）内のトレッドミル上で実施した。なお、風洞は、長さ2.5m×幅1.0m×高さ2.1mで直径80cmの2基の吸引ファンと整流パネルによってほぼ均一の安定した風速下で実験できるように設計されている。

1.3 測定項目

本実験では、前述した条件下において換気率（ $R \text{ min}^{-1}$ ）を測定し、それに衣服内気候量（V litre [L]）を乗じて、換気係数（ $VI \text{ L/min}$ ）⁹⁾を求めた。

換気係数（VI）＝換気率（R）×衣服内気候量（V）

各条件における換気率の測定は、測定ごとに実験用衣服を着用しなおして、それぞれ5回実施し、それらの平均値を求めた。なお、換気率と衣服内気候量の測定方法は、以下のとおりである。

換気率（R）の測定：アンダーウェアを着用した被験者の身体6部位（胸、背、上腕、前腕、大腿、下腿）の皮膚面に、衣服内へ窒素ガスを供給するチューブと衣服内の空気を吸引するチューブをテープと極細ゴムを用いて固定した。これらのチューブを装着した後、被験者に前述した実験用衣服を着用させた。そして、窒素ガス供給用チューブシステムを介して胸、背、上腕、前腕、大腿、下腿の衣服気候（実験用衣服と皮膚面の間）に窒素ガスを送入した。その際、すべての部位の酸素濃度がほぼ同時に自然環境濃度の20.9%から10%以下に減少するように、窒素送入流量を身体部位ごとに調整した。衣服内の酸素濃度が10%

以下に達した時点で窒素ガスの送入を遮断し、吸引チューブシステムを介し衣服内の身体6部位からサンプリングした空気の酸素濃度を酸素濃度計 (Biopack社製 O₂100A) で測定した。測定は、酸素濃度が20.9%に回復するまで部位毎に行って、パーソナルコンピュータ (DELL社製 Optiplex GX110) に1秒毎に取り込んだ。なお、衣服内からの空気の吸引速度は90ml/minに規定し、吸引した空気は酸素濃度測定後に窒素ガス供給用チューブで元の部位に戻した。得られた衣服内酸素濃度の回復曲線の漸近線から次式を用いて換気率 (R) を算出した。

$$O_2(t) = A - B(0) \cdot e^{-Rt}$$

O₂(t) : 時間tの酸素濃度 (%)

A : 自然環境の酸素濃度 (%)

B(0) : 20.9 - O₂(t), t=0

t : 時間

R : 換気率

衣服気候量 (V) の測定 : 円筒モデルに従って¹⁰⁾、アンダーウェア着用後の上腕、前腕、肩、胴、大腿、下腿の周囲長と長さを柔らかいテープメジャーを用いて部位ごとに数箇所測定し、それらの平均値から部位ごとの体積を算出した。同様の方法を用いて、実験用衣服着用時における各部位の体積を計測した。各部位の衣服気候量は、実験用衣服着用前後の体積差から推定した。

衣服気候量 (V)

= 実験用衣服着用時の体積 - 実験用衣服着用前の体積

1. 4 統計処理

全てのデータは、平均値±標準偏差で表示した。素材布の通気性による部位別換気係数の差は分散分析を用いて、また、ゆとりの大小、開口と閉口、立位と歩行条件による差はt検定を用いて検定した。検定における有意水準は5%に設定した。

2. 結果

衣服気候量 : 実験1における衣服気候量は、躯幹部、上腕部、前腕部、大腿部、下腿部でそれぞれ16.8, 1.5, 1.5, 6.7, 3.7Lであった。なお、立位時、歩行時とも被験者が直立姿勢をできるだけ維持したために、胸部と背部の衣服気候量は同等とみなし、便宜上躯幹部の衣服気候量のそれぞれ1/2 (8.4L) とした。

同様に実験2における胸部、背部、上腕部、前腕部、大腿部、下腿部の衣服気候量は、襟、袖、裾の開口した場合のゆとり量の大きい衣服でそれぞれ9.0, 9.0, 2.6, 2.5, 7.0, 5.3L、ゆとりの小さい衣服でそれぞれ6.9, 6.9, 1.1, 1.0, 4.1, 3.1Lであった。同じ衣服を用いて行った開口部の開閉条件による実験では、襟、袖、裾を閉じることにより大腿以外の部位で衣服気候量が減少した。この減少により胸部、背部、上腕部、前腕部、下腿部の衣服気候量は、ゆとりの大きい衣服でそれぞれ40, 40, 82, 32, 89% (閉口条件/開口条件 [%])、ゆとりの小さい衣服でそれぞれ40, 40, 94, 62, 89%になった。

換気係数 (衣服換気量) : 図1は、通気性の異なるジャケットとパンツを着用した場合における立位時と歩行時の換気係数を身体部位ごと (胸、背、上腕、前腕、大腿、下腿) に示す。立位時の換気係数は、大腿でP3がP0より (47%増加 : 以降、数値は (P3 - P0)/P0 [%]を示す)、下腿でP3がP0, P1, P2より (P3 vs. P0では91%)、P2がP0より、それぞれ有意に増加した (p < 0.05)。しかし、立位時の胸、背、上腕、前腕では、素材の通気性の影響は認められなかった。歩行時では、背でP1, P2, P3がP0より (P3 vs. P0では61%)、上腕でP3がP0, P1, P2より (P3 vs. P0では18%)、下腿でP3がP0より (24%)、それぞれ有意に増加した (p < 0.05)。しかし、歩行時の胸、前腕、大腿には、通気性の影響は認められなかった。

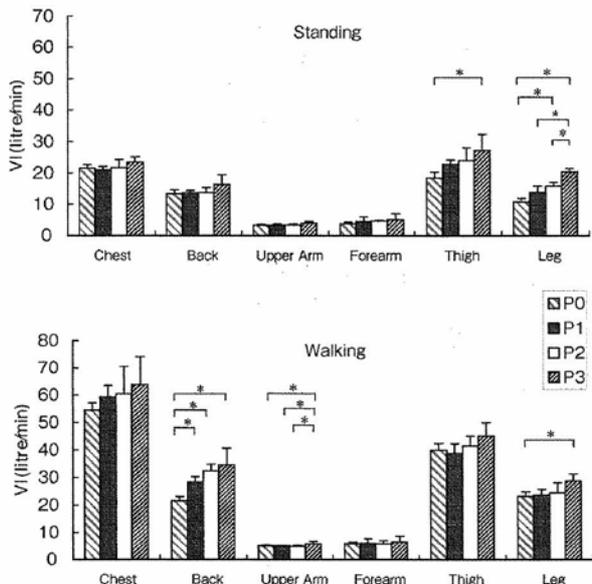


図1 The Ventilation Index for the impermeable (P0) and the permeable wear (P1, P2, P3) with the closed or open apertures while standing still and walking. * p < 0.05

身体各部位の換気係数は立位時に比べて歩行時に増加したが、その程度は身体部位や衣服の通気性により異なった。P0ではすべての部位で、P1, P2, P3では前腕以外の部位で有意な増加が認められた (p < 0.05)。歩行 (向い風) により P0,

P1, P2, P3の換気係数は、それぞれ胸部において152, 187, 178, 172%, 背において60, 107, 134, 111%, 上腕において53, 50, 45, 45%, 大腿において116, 70, 73, 69%, 下腿において117, 71, 55, 41%増加した。なお、前腕におけるP0の換気係数は59%増加した。

図2は、立位・歩行時における開口部の開閉時の換気係数をゆとりの大小で比較したものである。ゆとりの小さい衣服に比べて大きい衣服の換気係数は有意に大きくなる部位が認められた (p < 0.05)。これらの部位は、襟・裾・袖を開口した衣服の場合、立位時に上腕 (73%増加:以降、数値は (ゆとり大-ゆとり小)/ゆとり小 [%]を示す)、前腕 (154%), 下腿 (17%)、歩行時に上腕 (130%), 前腕 (76%), 大腿 (30%), 下腿 (20%)であった。また、閉口した衣服の場合、立位時の換気係数にはゆとりの影響は認められなかったが、歩行時において大腿 (21%), 下腿 (24%)に有意な増加が認められた (p < 0.05)。

図3に襟・裾・袖を開口した衣服と閉口した衣

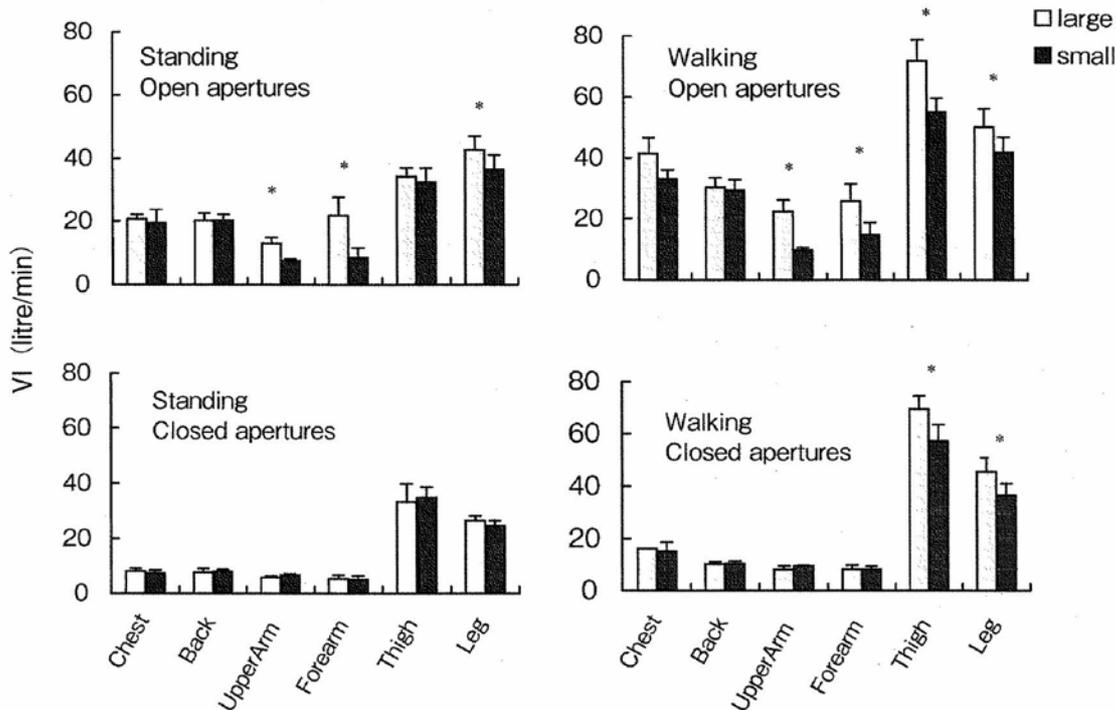


図2 Ventilation Index for the large and the small wear with the closed or open apertures while standing still and walking. * p < 0.05

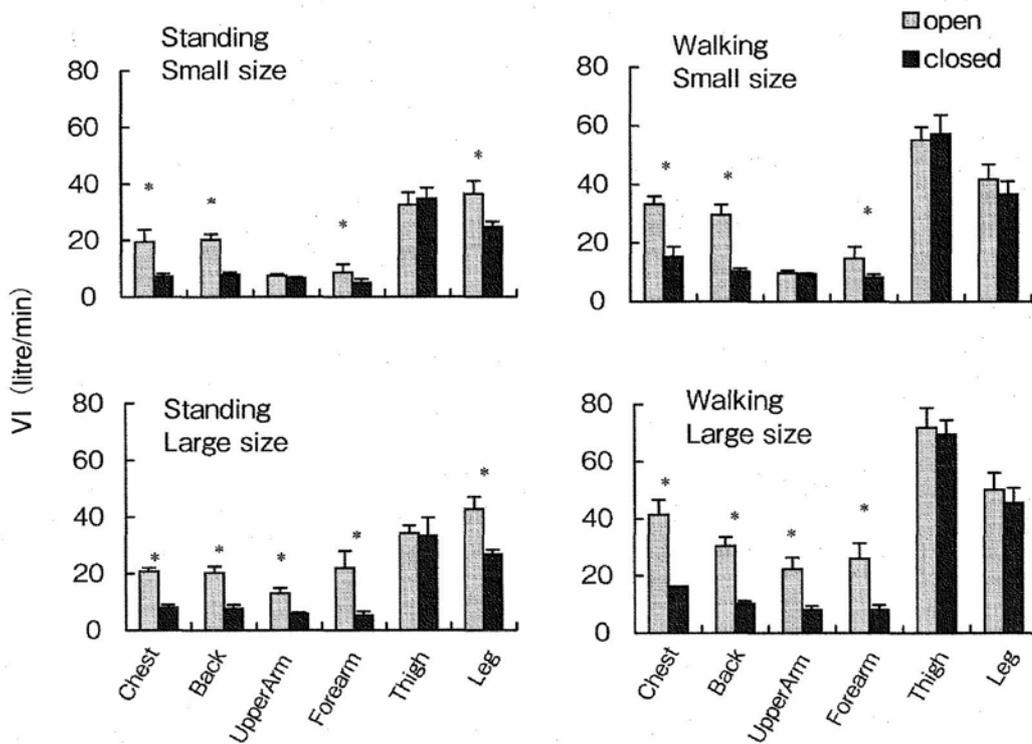


図3 Ventilation Index for the closed or open apertures with large and small size wear while standing still and walking. * $p < 0.05$

服の換気係数を部位ごとに示す。換気係数は閉口した衣服に比べて開口した衣服で有意に大きくなる部位が認められた ($p < 0.05$)。それらの部位は、ゆとりの大きい衣服の場合、立位時に胸 (157%増加：以降、数値は (開口-閉口)/閉口 [%]を示す)、背 (166%)、上腕 (126%)、前腕 (316%)、下腿 (61%)、歩行時に胸 (156%)、背 (198%)、上腕 (176%)、前腕 (218%) であった。また、ゆとりの小さい衣服の場合、立位時に胸 (167%)、背 (157%)、前腕 (73%)、下腿 (48%)、歩行時に胸 (118%)、背 (185%)、前腕 (81%) であった。

3. 考察

実験1では、素材布の通気性が衣服換気量に及ぼす影響を身体多部位で検討するために、通気性を不通気性から段階的に改善した4種の素材布から作製した衣服を用いて立位および歩行動作とそれに伴う風を考慮した条件下で換気係数を身体多部位 (胸、背、上腕、前腕、大腿、下腿) で求め

た。素材布の通気性が換気係数に及ぼす影響が認められる部位と認められない部位がいずれの条件においても観察された。立位時には大腿と下腿で、歩行時には背、上腕、下腿で通気性の影響が認められた。また、換気係数は歩行動作とそれに伴う風の影響で増加したが、この増加の程度にも身体部位差が存在した。これらのことは、スポーツウェアを設計する際に素材布の通気性の改善を介して衣服換気量を調節できる部位が存在することを示唆している。

衣服の換気は素材布を貫通する空気と衣服の開口を通して出入りする空気により生じる。風による気流や歩行動作により生じた衣服内外の気流はこれらの空気移動量を増加させる。素材布の通気性の改善は主に布を貫通する空気量を増加させるが、本実験ではこの通気性の影響の程度が立位と歩行条件で部位により異なると考えられる。歩行およびそれに伴う風による換気量増加は、P0においてすべての部位で、P1, P2, P3において前腕以外の5部位で認められた。このように素材

布に通気性があっても歩行動作と風による前腕部の換気量増加が認められなかったことは、布の通気性がふいご作用に影響する程度には身体部位差が存在することを示す。立位時において大腿・下腿の換気量は布の通気性の改善による差が認められたが、歩行時の大腿ではこの差がみられなく、下腿でも P3 vs. P0 以外の衣服条件間の差はみられなくなった。これは、布の通気性による換気量の増加に比べて歩行動作やそれに伴う風の影響が大きいために通気性の影響が隠されたものと考えられる。歩行動作やそれに伴う風による換気量の増加は、いずれの衣服条件においても各部位で認められ、胸において顕著であった。素材布の通気性に関わらず胸で換気量が多いことは、布を貫通する空気量に比べて襟や裾から出入りする空気量が多いためと考えられる。これに対して、背や上腕で布の通気性による換気係数の差が認められたことは、これらの部位では換気が布を貫通する空気量により依存することを推察させる。

実験2では、襟・袖・裾の開口やゆとりの増加に伴い、衣服換気量が増加する部位が認められたが、その増加の程度には身体部位差が存在した。本実験における襟・袖・裾の開口は、煙突効果やふいご効果による衣服外部への空気の流出と衣服外部からの空気の流入を容易にしたと推定される。衣服の襟・袖・裾を開口することは、胸、背の上・下端や前腕の下端を開放することになり、これらの気流が起りやすい部位で衣服換気量が増加した。しかし、下肢ではズボン上端のウェスト部が閉じているために衣服内の上昇気流は起りにくく、裾を開口してもその影響は大腿にまではおよばず下腿のみにとどまったものと推察される。

本実験では、開口した衣服では上肢・下肢、閉口した衣服では歩行時の下肢でゆとり量の影響が認められた。モデル実験により皮膚と衣服の距離(間隙量)により気流の状態が変わることが報告されている⁶⁾。この結果に基づけば、間隙量は

きすぎても小さすぎても上昇気流は減少することが推察される。本実験用衣服はオーバージャケットのデザインで、身体に密着するものではなかった。そのため、躯幹では小さいサイズでもゆとり量は適当であったために、さらなるゆとりの増加が衣服換気量に影響を及ぼさなかったものと推測される。また、上肢・下肢は歩行時に躯幹に比べて動作が大きい部位である。ゆとり量が大きいことにより、ふいご作用がさらに助長されたと考えられる。

熱放散の改善を望む衣服設計を行う場合、汗を衣服外に移動させるために最低限必要な換気量(衣服換気必要量)に基づいて衣服を評価する方法が提案されている⁵⁾。衣服内において汗が理想的に蒸発し、さらに衣服気候から環境へ理想的な水分移動がなされることを前提にして、換気必要量は次式で算出できる。

$$\text{換気必要量} = \frac{\text{発汗量}}{\text{衣服内の絶対湿度} - \text{環境の絶対湿度}}$$

例えば、軽運動時の発汗開始後10分目の発汗量⁸⁾、このときの衣服内外の温・湿度、本実験の被験者の推定背部皮膚面積を適用して、この評価法により本実験で認められた背部における衣服換気量の増加の評価を試みる。本実験で背部の衣服換気量は、布の通気性を P0 から P3 に改善することにより 13.0L/min、襟・袖・裾の開口によりゆとりの大きい服で 20.2L/min、ゆとりの小さい服で 19.1L/min 増加した。これらは軽運動時背部発汗量⁸⁾ から求めた換気必要量のそれぞれ 13%、22%、19%にあたる。

以上の結果より、スポーツウェア設計において、布の通気性改善により背、上腕、下腿で、襟・袖・裾の開口により胸、背、上腕、前腕で、さらに、ゆとり量の増加により上肢・下肢で、それぞれ衣服換気量の増加が可能となることを見出した。スポーツウェア設計においては、素材やデザインに様々な制約要因が存在する。そのため、素材の

通気性, 開口部, ゆとりなどのなかで制約されない設計要因を組み合わせることで衣服換気量を部位ごとに意図的に調節することが可能であり, それにより熱放散反応に応じた衣服設計を効率化できるものと考えられる. 今回は素材, デザインの要素として通気性, 開口, ゆとりを取り上げて, それらが身体多部位の衣服換気量に及ぼす影響を検討し, 軽運動時の部位別発汗量から求めた必要換気量と比較した. 今後, 様々な着用場面での部位別発汗量から衣服換気必要量を求め, それに基づく評価をフィードバックすることができれば, さらに効率的な衣服設計が可能になるものと考えられる.

謝 辞

稿を終えるにあたり, 本研究に対し助成いただいた(財)石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます. また, データの収集・解析に協力頂いた阪東真希さん, 石岡美生さん(元大阪国際女子大学)に深謝いたします.

文 献

- 1) Inoue Y., Kuwahara T., Araki T.: Maturation- and aging-related changes in heat loss effector function. *J. Physiol. Anthropol. Appl. Human Sci.*, 23, 289-294 (2004)
- 2) Inoue Y., Tanaka Y., Omori K., Kuwahara T., Ogura Y., Ueda H.: Sex- and menstrual cycle-related differences in sweating and cutaneous blood flow in response to passive heat exposure. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 94, 323-332 (2005)
- 3) Kondo N., Takano S., Aoki K., Shibasaki M., Tominaga H., Inoue Y.: Regional differences in the effect of exercise intensity on thermoregulatory sweating and cutaneous vasodilation. *Acta Physiol Scand*, 164, 71-78 (1998)
- 4) Takano S., Kondo N., Shibasaki M., Aoki K., Inoue Y., Iwata A.: The Influence of work loads on regional differences in sweating rates. *Jap. J. Physiol.*, 46, 183-186 (1996)
- 5) Havenith G., Ueda H., Hayet S., Inoue Y.: Required clothing ventilation for different body regions in relation to local sweat rates. Proceedings of 2nd European Conference on Protective Clothing (ECPC), "Challenges for Protective Clothing", No 46 (6 pages), (2003)
- 6) 薩本弥生: 着衣の bellows action (ふいご効果) の着衣の放熱性能への効果. *デサントスポーツ科学*, 20, 66-77 (1999)
- 7) 山田晃也, 久次米正弘: 身体各部位における衣服内気流の速度の相違. *J. Text. Mach. Soc. Japan*, 56, 49-55 (2003)
- 8) Ueda H., Inoue Y., Matsudira M., Araki T., Havenith G.: Regional microclimate humidity of clothing during light work as a result of the interaction between local sweat production and ventilation. *Int. J. Clothing Science and Technology*, 18, 225-234 (2006)
- 9) Birnbaum R.R., Crockford G.W.: Measurement of the clothing ventilation. *Appl. Ergonomics*, 9, 194-200 (1978)
- 10) Daanen H., Hatcher K., Havenith G.: Determination of clothing microclimate volume. *Environmental Ergonomics*, X, 665-668 (2002)