着衣の熱移動性や換気性能に素材の物性やデザインがおよぼす効果

薩本弥生 [1)]，劉雨 [1)]，青柳卓也 [1)]，上野哲 [2)]
[1)]横浜国立大学，[2)]労働安全衛生総合研究所

Effect of material property and design of clothing on its heat transfer and ventilation rate

Yayoi Satsumoto[1)], Liu Yu[1)], Takuya Aoyagi[1)], Satoru Ueno[2)]
[1)]*Yokohama National University*, [2)]*National Institute of Occupational Safety and Health, Japan*

Abstract: This study aims to clarify the effect of material property and the design of clothing on its heat transfer coefficient and ventilation rate by using the walking manikin and the tracer gas method. It also aims to verify the validity of the indirect method to measure heat transfer coefficient from the ventilation rate. Under the wind condition, there were little effect of ventilating opening on heat transfer in both rest conditions and the walking conditions. When walking the ventilating opening was effective for the improvement of heat transfer, but it was not effective at the rest under the calm environment. As for local heat transfer, ventilating effect was significantly seen at the abdomen and the back. It was clarified that the ventilation rate and the heat transfer coefficient had the correlation (r=0.54).
Key words: Thermal comfort, ventilation rate, heat transfer coefficient, ventilating opening, outdoor parker

要旨：歩行による着衣のふいご作用の換気は人体からの熱移動性を促進させるため環境の風の効果以上に着衣の温熱快適性向上に重要であるが、現状ではきちんとした定量法が規定されていない状況である。そこで、本研究では暑熱に効果的な着衣の条件を検討するため、歩行サーマルマネキン、トレーサガス法を用いた実験によりアウトドア用のパーカ着装時の熱通過率や換気速度にパーカの特性、歩行、環境がどのように影響するかを明らかにすることを目的とした。さらに、熱通過率と換気速度評価を同期して行い、両者を比較することで、着衣の熱移動性の評価法として換気速度からの間接的評価法の妥当性を検証することを第 2 の目的とした。有風時には安静・歩行時とも換気口は放熱に有効でなかった。無風環境で換気口は安静時には熱通過率向上に有効でなかったが、歩行時にはそれは有効であった。部位毎に熱通過率を見てみると開口部付近の腹部と背部で開口による有意差が認められた。換気速度と熱通過率には相関係数 0.54 で相関関係があることが明らかになった。
キーワード：温熱的快適性，換気速度，熱通過率, 換気口，アウトドア用パーカ

1．はじめに

着衣の温熱的快適性のためには着衣の熱水分移動特性が重要な役割を果たす。熱水分移動性には素材特性と着衣の構成要因が複合的に影響する。着衣の構成要因として換気口の開口条件等が影響を与える。アウトドア用のパーカでは、人体からの不感蒸散や発汗などの水分を衣服外に放出するとともに外部からの雨を防ぐ必要がある。最近は透湿防水布が用いられるため、快適性は顕著に向上したが、運動が長期で大量な発汗が生じた場合は、透湿性だけでは賄いきれない。この場合、効果的に汗を放出するためには換気を促す開口部を設けるとよい。

換気口や透湿性の効果を検討した研究として Ruckman ら（1998）ら換気口を設け改良したジャケット着用時のトレッドミル実験を行い、運動中は平均皮膚温に差がみられ、換気口によるふいご効果がみられることを明らかにした。しかし、この論文では換気量を実測するのではなく、平均皮膚温や総発汗量で換気量を推測するに留まっていた。手足の揺動による着衣のふいご作用による換気は、人体からの熱水分移動性を促進させるため、着衣の温熱快適性向上に重要であるが、現状では、上記の論文の例のように多くの論文では換気量そのものを定量的に計測する方法が規定されていない。

換気量を直接計測するトレーサガス法はCrockfordら（1972）によって衣服の換気測定として導入された。Havenithら（2000, 2010）は窒素と炭酸ガスの 2 つのトレーサガス法で比較実験した。結果、どちらでも換気速度の計測値の精度に遜色がないことを明らかにした。また、Havenith ら（2000）はトレーサガス法の過渡法と定常法で比較実験を行い、過渡法は換気速度を算出するためにおむつ内の空気の容積の計測が必要であり、トレーサガス法の実験と同時に容積を計測することは困難で別途計測するとしても、計測は高価で時間がかかると指摘している。昨年度著者らは被験者実験でトレーサガス法を用いた結果を報告したが（薩本ら､2012）、動的な着衣の換気量や伝熱性能を精度良く評価するためには、被験者実験では人体の運動は個人差、時間変動が生じるため、着衣の周期的な動作を模擬する装置を用いることが重要となる。そこで着衣の熱抵抗、蒸発熱抵抗が直接計測できる発汗歩行マネキ

ンを用いてトレーサガス法の計測システムによる換気計測を同時に行い、換気速度、着衣の熱通過率の関係を明らかにし、それらの物性に着衣のデザインや歩行、環境の風速等がどのように影響するかを評価することを目的とする。

2．方法

2.1 アウトドア用パーカの素材と換気口の開口条件

アウトドア用パーカの換気口のデザインはこれまでの研究により換気に効果があると考えられる配置になるよう、換気口を前面には胸部と胴部、背面には全面と同様の高さの背中と腰部に設置してあるものを帝人株式会社に依頼して 3 段階の透湿性レベルの素材を用いて試作いただいた（Fig.1 参照）。実験に用いた 3 種のパーカの素材と模擬皮膚の諸元を Table1 に示す。素材はいずれも防水性で通気性はなく、ゴアテックスラミネートタイプの高透湿性布（High Permeable : HP）と極細繊維高密度織物タイプの中透湿性布（Middle Permeable:MP）と塩化ビニル製の不透湿布（Impermeable:IM）である。実験に用いたアウトドア用パーカの透湿性をカップ法ウォータ法(A-2 法)（JIS-L1096,1990）により計測し、素材の剛軟性をカンチレバー法（A 法）（JIS-L1096,1990）により計測し、その結果も Table 1 に示す。着衣の換気への換気口の開口条件を検討するため、比較のために各素材の試作パーカの換気口を閉鎖条件では閉じた（Fig.1 下段）。着衣の換気口の条件として、開口（OP と略す）、閉鎖（CL と略す）を条件とした。

Fig.1 Variation of outdoor parker used in experiments

2.2 トレーサガス法

トレーサガス法（定常法）を用いてアウトドア用パーカの換気性能を評価した。システムの概念図を Fig.3 に示す。

トレーサガスとして炭酸ガス（99.95%の純度）を用い、マスフローコントローラー兼流量計（山武式会社製、型式：MQV）

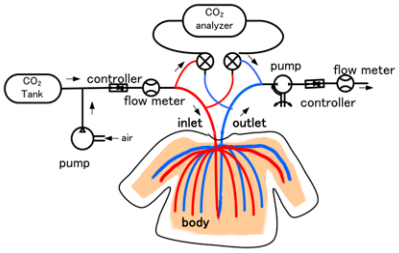

Fig.3 Schematic diagram of tracer gas system.

により外気とミックスしたガスを一定炭酸ガス濃度でアウトドア用パーカ内に導入する。アウトドア用パーカ内で均等に導入されるように Inlet チューブは 8 つに分岐させ、一定の流量（0.5ml/min）で流し、それと同様の流量で同じように分岐させ均等に配置した outlet チューブでサンプリングし、アウトドア用パーカ内と環境の炭酸ガス(CO_2)濃度を計測し換気量を計測した。導入・排出経路各々分割した 8 つのチューブはマネキンの前身頃部 2 箇所、腕部 4 箇所、後身頃部 2 箇所である。サージカルテープで身体に留めつけた（Fig.4 参照）。

Fig.4 Position of tracer gas tubes

アウトドア用パーカ内に挿入する部分のチューブはできる限り着衣内空隙を乱さないように均等分布させるためチューブの径は外径 2.0mm、内径 1.0mm の硬質チューブを用いた。また、出口から 1cm 間隔で先端から 50cm まで片側 50 か所の孔をチューブにドリルで開けてアウトドア用パーカ内でさらに均等に炭酸ガスが分布するように工夫した。トレーサガス法（定常法）ではトレーサガスをチューブで着衣したアウトドア用パーカ内の衣服内空間に分岐させた Inlet チューブで均等に分布するように一定の流量で流し、それと同様の流速で同じように分岐させ均等に配置した outlet チューブでサンプリングし、各々の位置と環境の炭酸ガス(CO_2)濃度を計測し換気量を計測する。換気の指標である ventilation rate (VENT) は equation (1)で算出される。

$$\mathrm{VENT} = V\frac{CO_{2in}-CO_{2out}}{CO_{2out}-CO_{2e}} \quad \cdots\cdots (1)$$

ここで、CO_{2in} : inlet に流入する CO_2 の濃度 (ppm), CO_{2out}: outlet に流出する CO_2 の濃度 (ppm), CO2e: 環境の CO2 濃度(ppm), V: inlet と outlet の流量 (l/min.).

Table 1 Characteristics of parker material.

Material	Thickness (mm)	Thermal conductivity (W/m/K)	Thermal resisitance (K・mm²/)	Air resisitance (kPa・s/m)	Vapor resistance (s/m)	Bending resistance (mm) Warp	Bending resistance (mm) weft
High permeable	0.170	0.205	3.14	∞	85.72	26.5±0.9	21.0±0.5
Middle permeable	0.270	0.175	5.02	∞	113.7	33.3±1.2	19.5±2.6
Impermeable	0.164	0.349	2.37	∞	∞	32.2±1.3	28.3±1.0
Simulated skin	0.574	0.130	7.90	∞	70.35		

2. 3 歩行サーマルマネキン

マネキンの総体表面積は 1.8m^2 で 26 分割されており、各々温度センサと発熱抵抗線が埋め込まれている。制御ソフトでゾーン毎に表面温を±0.1℃で精密に制御できる。サイズはアジア人男性の平均の体格である（Table 2）。両手・両足に棒をつけ、歩行動作の模擬が可能である。本研究では歩行時には歩行速度 1m/s（4km/h）に設定した。

Table 2 Characteristics of manikin. (unit: cm)

Height	Bust girth	Waist girth	Hip Girth	Shoulder width	Length of the leg
169	91	75	91	40	72

2. 4 実験手順

実験は26℃、65%RHの人工気候室で行った。トレーサガス法による換気速度計測と同期してマネキンの皮膚温、放熱量および環境温を計測し、熱通過率を算出した。実験条件は素材の物性の異なる3素材（HP,MP,IM）、換気口の開口の有無、歩行の有無（歩行時1m/s）、風速の有無（有風時1m/s）の24条件とし、3回の繰り返しを行い、全72回の実験を行った。

2. 5 解析方法

熱通過率は equation(2)で算出される。

$$h_t = \frac{T_s - T_e}{q} \cdot\cdot\cdot\cdot\cdot\cdot (2)$$

ここでh_t：熱通過率、T_s:皮膚温、T_e：環境温、q：放熱量

熱通過率や換気速度に風速、素材、歩行、開口の 4 要因が有意に寄与するかを SPSSVer.20 を用い、平均値の差の検定あるいは分散分析で解析した。

３．結果

3. 1. 1 換気口が換気速度におよぼす効果

換気口が換気速度におよぼす効果について、Fig.5 に示す。

有風・安静条件においては、開口の効果は MP だけ有意に開口時に換気速度が増加した。素材の違いとして、閉鎖時の HP と MP、HP と IM で有意に素材により差があり、HP が有意に換気速度が増加していた。他の条件においてほぼ開口時が閉鎖時の換気速度を上回っていた。他の条件においての素材の効果に関しては HP の換気速度が有意に増加する結果となった。

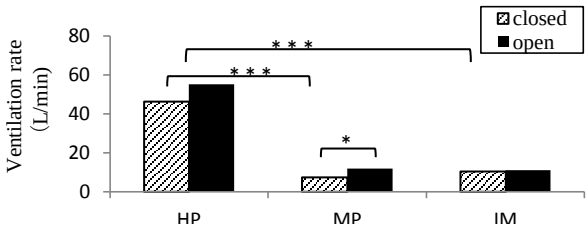

Fig.5 Effect of ventilating opening on ventilation rate in rest at 1m/s wind environment (* : p<0.05、***:p<0.001)

3.1.2 歩行が換気速度におよぼす効果

歩行が換気速度におよぼす効果について素材別に、無風・閉鎖条件においての結果を Fig.6 に示す

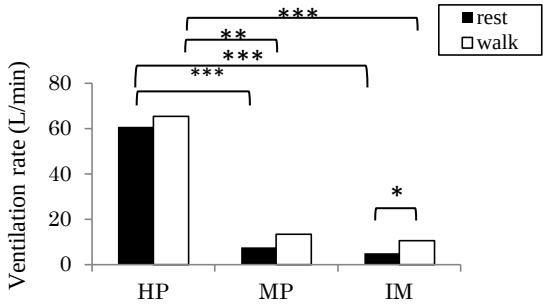

Fig.6 Effect of walking on ventilation rate at calm environment when the ventilating opening was closed (* : p<0.05,**:p<0.01,***:p<0.001)

無風・閉鎖条件では、歩行の効果は IM で有意に歩行で換気速度が増加していた。素材の違いとして、安静時と歩行時の HP と MP、HP と IM、歩行時の MP と IM で有意差がみとめられ、HP、MP、IM の順で換気速度が増大している。他の条件においても同様の傾向が見られた。

3.2.1 換気口が総熱通過率におよぼす効果

換気口が総熱通過率におよぼす効果について Fig.7 に示す。

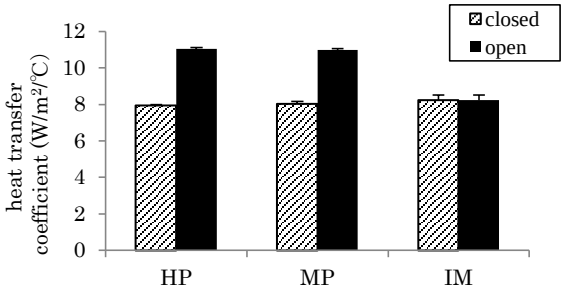

Fig.7 Effect of ventilating opening on over all heat transfer coefficient in walking at calm environment

有風条件においては、安静条件、歩行条件ともに開口と閉鎖条件においてほとんど差がなく開口の効果はみられなかった。無風条件においては安静時には差がほとんどみられなかったものの歩行時において熱通過率の増幅傾向がみられたが、有意差は認められなかった。

3. 3. 1 部位別にみた換気口が熱通過率におよぼす効果

トレーサガス法によるアウトドア用パーカの熱通過率に開口部開口条件がおよぼす効果に関する部位別の熱通過率の結果を Fig.8 に示す。

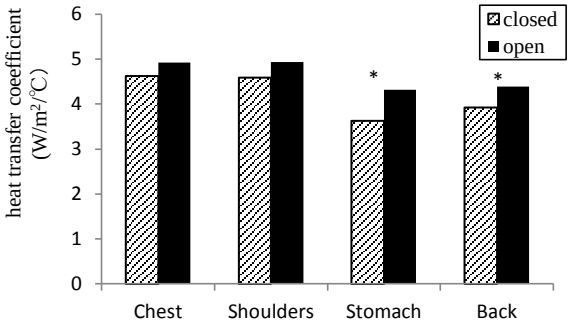

Fig.8 Effect of ventilating opening on local heat transfer coefficient in walking at calm environment (* : p<0.05)

熱通過率は腹部と背部に有意差が認められた。換気口による効果は腹部において大きく、閉鎖条件と比べ 1.25 倍、次いで背部では 1.12 倍、熱通過率が増幅した。その他の部位に関しても、開口が閉鎖を上回る結果となった。

3. 4　換気速度と熱通過率の関係

換気速度と熱通過率の関係を Fig.9 に示す。HP では換気速度と熱通過率の相関関係が明確でなく特異であったため、HP を除いて MP,IM のみの結果を示した。図より換気速度と熱通過率に相関関係が成り立つことが明らかになった。着衣の熱移動性に着衣のデザインが影響し、換気速度により熱抵抗値の代用が可能となる可能性が示唆される。

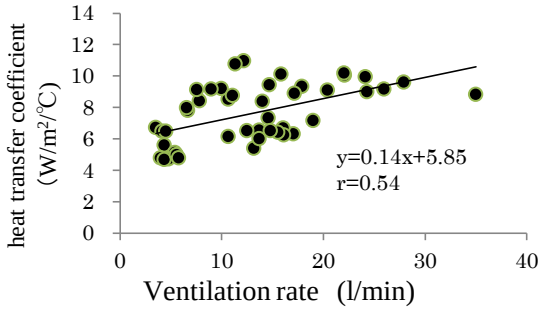

Fig.9 Relationship between ventilation rate and heat transfer coefficient

4．考察

本研究では、アウトドア用パーカの温熱的快適性に効果的な条件を検討するため歩行サーマルマネキンとトレーサガス法を用いて検証を行った。着衣の熱通過率、換気速度を各条件で計測し、着衣の熱通過率、換気速度、デザイン、環境の風速の関係を明らかにし、それらがどのように影響するか実験で評価した。換気口は、無風・安静時には換気速度に有効でなく、歩行動作をすることで有効であることがわかった。熱通過率に関しても同様であり、無風・歩行条件時の部位毎に熱通過率を見てみると開口部付近の腹部と背部で開口による効果が認められた。これは、換気口を設けることで歩行動作におけるふいご効果が増大し、着衣内に生じる対流が向上した結果と言える。素材の効果が換気速度では認められ、熱通過率ではほとんど認められなかった。それに関して、著者らの先行研究で（薩本ら、2013）剣道着の換気速度に 2 つの素材で差が出た理由として、素材の通気性のみならず力学物性に差があり、素材のたわみやすさが原因として考えられた。本研究において、Table.2 に示したように、HP、MP と比べ IM が硬い素材であり、歩行動作をしても IM が最も揺れにくく、MP、HP の順で揺れやすい傾向が見られることが予想され、そのことが換気速度の差に反映していると推察される。

換気速度と熱通過率には正の相関があり（r=0.54）換気速度により熱通過率の代用ができる可能性が示唆された。しかし、着衣の熱移動性に着衣・動作・環境の因子がおよぼす効果に関して細かく見ると、異なる傾向を示すところもある。よって換気速度を熱通過率の代用するためには課題が残る。

5．まとめ

着衣のデザインや環境の風速、歩行などが熱通過率におよぼす効果を定量化することができた。暑熱環境でアウトドア用パーカとしては、換気口の配置は、無風・安静時には有効ではなく、歩行動作をすることで初めて有効であることが明らかとなった。換気口の開口が熱通過率におよぼす効果を部位別にみると腹部、背部において有意に熱通過率が向上した。その他の部位に関しても、同様の傾向が見られた。熱通過率と換気速度の比較により、両者に r=0.54 で相関がみられ、換気速度により熱通過率の代用ができる可能性が示唆されたが、細かく見ると異なる傾向を示すところもあった。今後の課題として乾性放熱条件のみでなく蒸発放熱条件の実験を行い熱水分同時移動系で素材の透湿性の影響がある条件で同様の結果が得られるか検証する必要がある。

謝辞

本研究は科学研究費補助金一般研究 A(23240099),平成 23-26 年の助成により実施した。お礼申し上げます。また，本実験の遂行のため重要な位置を占める歩行サーマルマネキンの使用に当たりご助力いただきました労働安全衛生総合研究所の奥野勉様および澤田晋一様に感謝いたします。実験の遂行に当たり様々な助言をいただいた桐蔭横浜大学の竹内正顯先生に感謝いたします。

文献

Satsumoto, Y., and Havenith，G., 2010, Evaluation of overall and local ventilation in diapers, Textile Research Journal, 80(17): 1859/1871.

Crockford, G.W., M. Growder, and S.P. Prestidge, S.P., “A tracer gas technique for measuring clothing microclimate air exchange rates”, Brit, J. Indust. Med. 29, 378-386 (1972)

Berglund, L.G. and Akin, F. J., “Measurement of air exchange in diapers by tracer gas methods”, TAPPI J., 80(9), 173-178 (1997)

Havenith, G. and Zhang, P., “Comparison of Different Tracer Gas Dilution Methods For The Determination of Clothing Vapour Resistance”, EPSRC Report on Project GR/N10509/01 (2000)

Havenith, G. Ping Zhang, Kent Hatcher and Hein Daanen, “Comparison of two tracer gas dilution methods for the determination of clothing ventilation and of vapour resistance”, submitted to ergonomics (2010).

薩本弥生，劉雨，福山照芳，尾川晃一，山本晃、レインコートの換気性能に素材の透湿性や換気口がおよぼす効果、HES36 要旨集(2012)

薩本弥生，川村友希，杉本千佳：暑熱環境下で熱中症予防に適した剣道用稽古着の検討服装と熱中症，繊維製品消費科学会，第 54 巻 3 月号,20-30(2013)

＜連絡先＞
連絡先氏名：薩本弥生
住所：240-8501　神奈川県横浜市保土ヶ谷区 79-2
所属：横浜国立大学教育人間科学部
E-mail アドレス： satumoto@ynu.ac.jp