アウトドア用パーカ前部に設置した換気口が温熱的快適性に及ぼす効果

青柳卓也 [1)]，薩本弥生 [2)]
[1)]横浜国立大学大学院，[2)]横浜国立大学

Effect of installed ventilation hole in front of outdoor parka on its thermal comfort

Takuya Aoyagi[1)], Yayoi Satsumoto [2)]
[1)] *Graduate school of Yokohama National University*, [2)] *Yokohama National University*

Abstract: This study aims to clarify the effects of the ventilation hole installed outdoor parka's front on its ventilation rate, heat and moisture transfer and subjective assessment. Two patterns of the ventilation condition of the outdoor parka, one is open, the other is closed, are compared each other. We conducted two subjective experiments, one in which the ventilation rate was investigated by using tracer gas method, and the other physiological data, heat flux ,skin temperature and sweat rate, were measured to evaluate the heat transfer and evaporative transfer coefficient by using the thermal load test. For both experiments, subjects walk on treadmill at 6km/h. The values of ventilation rate, heat transfer coefficient, evaporative transfer coefficient, subjective assessments of thermal comfort and the ratio of ventilation rate compared to needed ventilation rate of open condition are superior to those of closed condition. Significant differences in those values between open and closed are recognized. The value of open ventilation rate is 1.6 times as high as closed one. The ratio of measured ventilation rate compared to needed ventilation rate indicate 35% at open and 20% at closed. When the ventilation was open, subject's thermal comfort was promoted compare with closed.

Key words: thermal comfort, ventilation rate, needed ventilation rate, heat transfer coefficient, evaporative transfer coefficient

要旨：本研究ではアウトドア用パーカ前部に配置した換気口が換気速度、熱水分移動性、被験者の主観へおよぼす効果を検証することが目的である。アウトドア用パーカ前部に配置した換気口の開口・閉鎖の 2 条件でトレーサガス法による換気計測実験と、トレッドミル歩行による温熱負荷の被験者実験を行った。また必要換気速度を算出し、実測した換気速度との比から開口効果の検証を行った。換気速度は開口時に 1.6 倍向上し、温熱負荷実験では熱通過率、蒸発熱伝達率が開口歩行時に閉鎖条件を上回り、主観申告調査でも開口時の方が快適という結果が得られ、必要換気速度と実測の換気速度から算出した割合でも開口時約 35%、閉鎖時約 20%と開口時に向上し、いずれも有意差が認められた。

キーワード：温熱的快適性，換気速度，必要換気速度，熱通過率、蒸発熱伝達率

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。青柳ら（2014）は素材に透湿防水布を用い背部に換気口を配置した着衣の被験者実験で素材の有用性と限界を示し、デザイン効果の可能性を示した。透湿防水布の効果は発汗が多量でない状況で効果を示すが、運動が進み多量の発汗を伴ったとき、十分な効果が発揮されない。しかし換気口を開口することで熱通過率、蒸発熱伝達率は向上した。

換気口や透湿性の効果を検討した研究として Ruckman ら（1998）は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、この論文では換気速度を実測するのではなく、平均皮膚温や総発汗量で換気速度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速度そのものを定量的に計測して評価を行っていない。

換気速度を定量的に測定するトレーサガス法は Crockford ら（1972）により衣服の換気測定として導入された。今日まで、被服の換気速度の計測の研究が若干行われている。しかし、いずれもサーマルマネキンを用いたモデル実験が多数を占め、被験者を対象とした研究に関しては、筆者は見つけることができなかった。マネキンを用いた実験で得られた結果は再現性が高いという利点はあるが、実際に被服を着用するのは人

間であり、定量的に換気速度の計測行い、放熱量や発汗量、被験者の主観などの生理データを合わせて検証することが必要と考える。換気口の配置について、上田（2004）の背部やRuckman ら(1998)の腋下部のように設置して検証を行った研究は見受けられるが、前部に配置し検証を行った研究は見受けられない。

そこで、本研究ではアウトドア用パーカ前部に配置した換気口の開口・閉鎖の 2 条件でトレーサガス法による換気計測実験と、トレッドミル歩行による温熱負荷の被験者実験を実施し、換気口の開口効果を明らかに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

着衣に換気口を設けそのデザイン効果を検証する際、これまでの研究では換気口を背部に設置する場合が多く、前部に注目した研究は数少ない。そこで、本研究では、胸部周辺の左右に換気口を配置した。素材は通気性のないポリウレタン性のものを使用した。用意したパーカの換気口を開けた状態(open)と閉めた状態(closed)の 2 条件(Fig.1 に示す)にて被験者実験を実施した。

Fig.1 The position of ventilation hole

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.2 に示す。

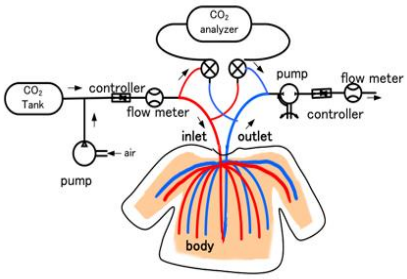

Fig.2 Schematic diagram of tracer gas system.

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）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 4 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)濃度を計測し換気速度を計測した。導入・排出経路各々分割した 4 つのチューブは被験者の前身頃部 2 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。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 10mm 間隔で先端から 500mm まで片側 50 か所の貫通する直径 0.5mm 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)濃度を計測し換気速度を計測する。換気の指標である ventilation rate (VENT) は equation (1)で算出される。

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

ここで、VENT: 換気速度（L/min）, 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 CO_2 濃度(ppm), V: inlet と outlet の流量 (L/min.).

2.3 被験者

被験者の諸元を Table.1 に示す。

Table.1 Characteristics of subjects

subject	age	hight	weight	BMI
A	19	1.83	66	19.71
B	23	1.73	56	18.71
C	19	1.65	60	22.04
D	21	1.72	64	21.63
E	23	1.75	66	21.55
F	24	1.68	53	18.78
G	23	1.85	61	17.82
average	21.7±2.1	1.74±0.07	60.9±5	20.0±1.7

換気計測実験に参加した被験者は D を除いた 6 名、温熱負荷実験に参加した被験者は 7 名である。身長、体重とも日本人の平均を大きく外れず、BMI もやや痩せ型の G を除き標準体型の被験者であることがわかる。

2.4 実験手順

両実験とも横浜国立大学IAS棟内の人工気候室内で25℃、50%RHに設定し実施した。トレーサガス法による換気計測実験と温熱負荷実験の実験手順をそれぞれ以下に示す。

2.4.1 換気計測実験

被験者は人工気候室内に入室後、身体にチューブを貼付され、Tシャツ(綿100%)を着用、その上から実験着を重ね着し、トレッドミルで10分間6km/hの早足歩行を行ったのち5分の座位安静をとった。その間にinlet, outlet, environmentのCO_2濃度の計測を5分間ずつ行った。openとclosedをそれぞれ3回繰り返し、計6回繰り返し実験を行った。

2. 4. 1 温熱負荷実験

人工気候室内のトレッドミル上で早足歩行を行わせた。計測項目は皮膚温7点(前額・手甲・前腕・腹部・大腿・下腿・足甲)、直腸温、衣服内温湿度3点(胸部・上背部・下背部)、放熱量6点(胸部・脇・上腹部・下腹部・上背部・中背部)、心拍、代謝量、発汗量2点(腹部・背部)、実験前後の重量変化を計測し、実験中被験者の主観の聞き取り調査(5項目:快適感・温冷感・湿潤感・べとつき感・蒸れ感)を行った。被験者は人工気候室内に入室後、トレッドミル上で各種センサを貼付され、Tシャツ(綿100%)を着用し、その上からパーカを重ね着した。その後、スポーツドリンクを200ml摂取し、実験を開始した。計測時間は計50分間で、10分間トレッドミル上で座位安静(rest)を取った後、20分間6km/hの早足歩行(walk)を行い、再びトレッドミル上で20分間の座位安静(recovery)をとる。実験開始0分時から終了の50分時まで5分毎に計11回被験者の主観の聞き取りを行った。人体のホメオスタシスを考慮し、被験者は2条件を同じ時間帯、異なる日に実験を実施した。

2. 5 算出方法

換気速度は換気計測実験で得られた CO_2 濃度を equation(1)に与え算出される。

熱通過率は equation(2)で算出される。

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

ここでh_t：熱通過率(W/m²/℃)、q_d：放熱量(W/m²)、T_s:皮膚温(℃)、T_e：環境温(℃)

蒸発熱伝達率は equation(3)で算出される。

$$h_w = \frac{q_w}{C_{sk} - C_e} \cdot\cdot\cdot\cdot\cdot\cdot (3)$$

ここでh_w：蒸発熱伝達率(W・m/g)、q_w：蒸発放熱量(W/m²)、C_{sk}:衣服内絶対湿度(g/m³)、C_e：環境の絶対湿度(g/m³)

必要換気速度は equation(4)で算出される。

$$V_n = \frac{S_o}{C_{sk} - C_e} \cdot\cdot\cdot\cdot\cdot\cdot (4)$$

ここでV_n：必要換気速度(L/min)、S_o：総発汗量(g)

必要換気速度と実測値の割合は equation(5)で算出される。

$$V_r = \frac{VENT}{V_n} \cdot 100 \cdot\cdot\cdot\cdot\cdot\cdot (4)$$

ここで、V_r：必要換気速度と実測値の割合(%)

換気速度や熱通過率など、条件ごとに有意差が認められるか、SPSSVer.22 を用い、平均値の差の検定を行い解析した。

3．結果

様々な項目を計測したが紙面の都合上、差が見られた項目について抜粋し結果を示す。

3. 1. 1 換気口が換気速度におよぼす効果

換気計測実験で得られた CO_2 濃度を equation (1)に与え、換気速度を算出し比較した結果を Fig.3 に示す。

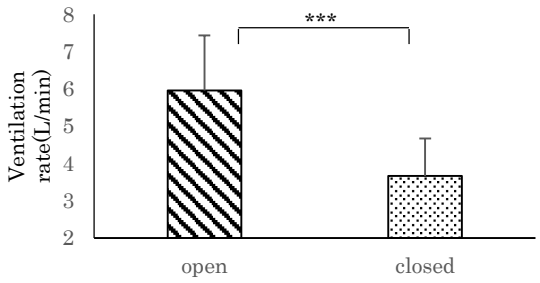

Fig.3 Effect of ventilating opening on ventilation rate (***:p<0.001)

Closed 時約 3.6L/min、open 時約 5.8L/min となり、open 時で 1.6 倍換気速度が向上し、有意差が認められた。

3.2.1 換気口が熱通過率におよぼす効果

換気口が熱通過率におよぼす効果について、運動開始 10 分時から実験終了の 50 分時までの平均熱通過率の推移を Fig.4 に、差のみられた部位の 15 分時における比較を Fig.5 に示す。

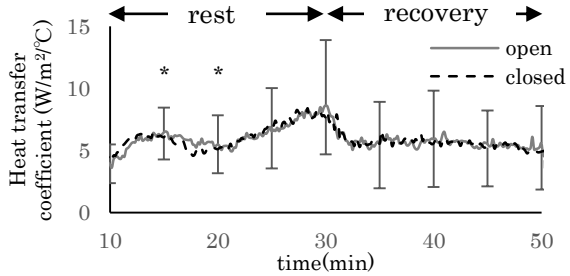

Fig.4 Effect of ventilation opening on overall heat transfer coefficient (*:p<0.05)

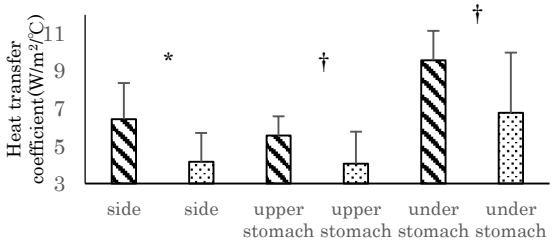

Fig.5 Effect of ventilation opening on heat transfer coefficient of side, upper stomach, and under stomach at 15min(*:p<0.05　†:p<0.1)

Fig.4 より、両条件とも熱通過率は運動時に緩やかに上昇し、運動終了とともに下降、回復時にはほぼ横ばいの推移をすることがわかる。そして運動時に open の熱通過率が closed を上回り、15 分時、20 分時に有意差が認められた。

Fig.6 より、部位ごとに見てみると、換気口付近の脇では有意差が認められ、上下腹部に傾向がみられた。他の部位ではみられず、3 部位とも前面であった。

3.2.2 換気口が蒸発熱伝達率におよぼす効果

換気口が蒸発熱伝達率におよぼす効果について、値が比較的安定し始めた 15 分時から運動終了の 30 分時までの結果を Fig.6 に示す。Fig.6 より、両条件とも値の変動はあるものの、運動中に値が上昇している。また、運動中は安定的に open の蒸発熱伝達率が closed を上回っていることが見てとれ、運動時には有意差が認められた。

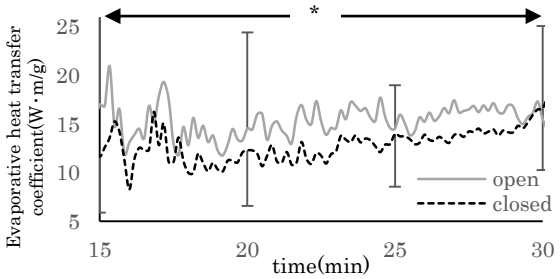

Fig.6 Effect of ventilating opening on evaporative heat transfer coefficient in walk (p<0.05)

3.2.3 主観申告

実験開始から5分毎に聞き取りを行った主観申告について、快適感の項目について比較を行った結果を Fig.7 に示す。

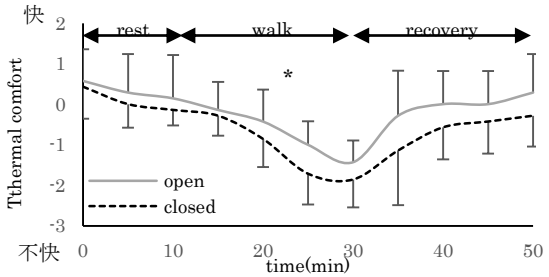

Fig.7 Effect of ventilation opening for subject's sense of comfort(p<0.05)

Fig.7 は値が正値で大きいほど快適で負値が大きいほど不快を示している。どちらの条件も同じように推移し、運動が進むほど不快に感じ、運動終了してから回復していることが見てとれる。また実験全体を通しても、open が closed の値を上回り、25 分時には有意差が認められた。

3.2.4 必要換気速度と実測の換気速度における割合

equation(4)で算出された必要換気速度の比較を Fig.8 に、equation(5)で算出された割合の比較を Fig.9 に示す。

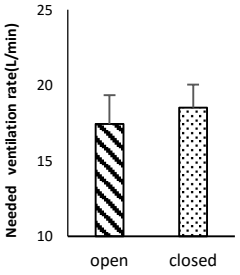

Fig.8 Effect of ventilation opening for the needed ventilation rate

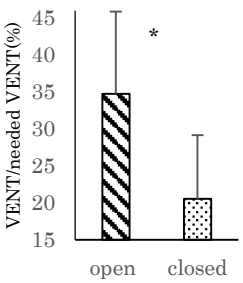

Fig.9 Effect of ventilation opening for the rate ventilation rate to the needed ventilation rate (p<0.05)

Fig.8 より、必要換気速度は closed の方が多いことがわかる。Fig.9 より、必要換気速度と実測値の割合は open が closed を上回り、open では約 35%、closed では約 20%必要換気速度を満たすという結果となり、2 条件間で有意差が認められた。

4．考察

本研究では、アウトドア用パーカ前部に配置した換気口の温熱的快適性に効与える影響を検証するため 2 種類の被験者実験を実施し、換気速度や熱通過率、蒸発熱伝達率から評価を行った。換気口を開口し、歩行を行うことで熱通過率や蒸発熱伝達率が向上し、その効果を発揮した。このことは歩行を行い強制対流が生じる際に、換気口があることで対流放熱を向上させ、被服内環境の換気を促していることを示唆している。また、被験者の熱的快適性に関する聞き取り調査でも open の方が快適域に近い数値を示し歩行中には有意差が認められていたことから、人にも知覚できる効果があると言える。実測した換気速度と被験者の発汗量と絶対湿度から算出される必要換気速度の割合では、open では 35%、closed では 20%程度と、換気口を開口することが効果的である。

快適性は向上したが、割合では必要換気速度を十分満たしているとは言えず、熱通過率に関しても部分的に見ると換気口付近の脇をはじめ上腹部、下腹部にのみ有意差やその傾向が認められず、背部にまで影響を及ぼすことはなかった。今回は人工気候室内の静穏気流下で実験を行った。今後は有風下での検証や換気口を背部にも設置し前後の換気口効果を複合的に検証し、より快適な条件を探ることが課題である。

5．まとめ

本研究ではパーカ前部に配置した換気口の効果を明らかにするため、換気口の開口・閉鎖の 2 条件でトレーサガス法による換気計測実験と、トレッドミル歩行による温熱負荷の被験者実験を実施し検証を行った。以下に結論をまとめる。

① 換気速度は開口時に 1.6 倍向上した。
② 開口・歩行時に熱通過率・蒸発熱伝達率・主観申告が閉鎖条件と比較し高値を示し、有意差が認められた。
③ 換気速度は開口時に必要換気速度の 35%、閉鎖時に 20%となる。

謝辞

実験用パーカを試作いただいたミズノ株式会社川端洋明氏に感謝する。本研究は文部科学省科学研究費(A) No. 23240099 (2011-2014)の助成を受け実施した。ここに記して謝意を示す。

文献

J.E. Ruckman and R. Murray, 1998. Engineering of clothing systems for improved thermophysiological comfort The effect of openings. International Journal of Clothing Science and Technology. vol. 11

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

青柳卓也, 薩本弥生, 2014. アウトドア用パーカのデザイン・素材特性が温熱的快適性におよぼす効果. 繊維学会予稿集

上田博之, 2004. レインウェアの背部ベンチレーションが部位別衣服換気速度に及ぼす影響. 大阪信愛女学院短期大学紀要 第 38 集

＜連絡先＞
連絡先氏名：青柳卓也
住所：240-8501　神奈川県横浜市保土ヶ谷区 79-2
所属：横浜国立大学大学院教育学研究科
E-mail アドレス：aoyagi-takuya-rd@ynu.jp