

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：32708

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14888

研究課題名（和文）自然換気時における低温・局所気流の快適性評価と気流活用空調への応用

研究課題名（英文）Evaluation of comfort of low-temperature local airflow during natural ventilation and its application to air-conditioning using airflow

研究代表者

山本 佳嗣 (YAMAMOTO, Yoshihide)

東京工芸大学・工学部・准教授

研究者番号：50823738

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、気流の温度、影響範囲、風速の変化と快適性の関係について明らかにし、自然換気口からの気流が局所的に人体に当たる場合の快適範囲について明らかにすることを目的とした。人工気候室において自然換気時の室内気流環境を再現した複数の低温・局所気流パターンを決定すると同時に、サーマルマネキンによる人体熱損失量を測定し、局所気流曝露時の人体熱損失量推定式を提案した。被験者実験では、局所気流曝露時において、室温22℃でも寒くて不快側の申告が見られ、室温28℃以上では快適側の申告が見られた。これらの結果を用いて、気流活用空調における局所気流発生時の室温快適範囲を示すチャートを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

自然換気システムはBCP対策やZEB実現を目指す非住宅建築物において近年積極的に採用され、自然風の気流感による快適性向上も期待されている。しかし、機械空調を前提とした現代の建物においては自然換気システムの省エネルギー効果が十分に発揮されていない事例も確認されている。自然換気による省エネルギー効果を最大化するには取り入れ外気の温度を可能な限り低くすることが望ましいが、低温の気流が換気口に近い居住者への不快感に繋がり、運用停止に至る事例も複数見られる。そこで、本研究では、自然換気システムの持続的活用に向けて、自然換気口からの局所的な低温気流と温熱快適性の関係について明らかにすることを目的とした。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to clarify the relationship between local non-isothermal airflow and thermal comfort, assuming natural ventilation. Experiments in an active-controlled multi-fan artificial climate chamber have determined multiple low-temperature and local airflow patterns that reproduce the indoor airflow environment during natural ventilation. Furthermore, we measured the heat loss of the human body using a thermal manikin and proposed a formula for estimating the heat loss of the human body.

In the subject experiment, thermal comfort during local airflow exposure was investigated. Because of local airflow, even at a room temperature of 22℃, subjects reported feeling cold and uncomfortable. Conversely, even when the room temperature was 28℃ or higher, the comfort side was reported. Using these results, we presented a chart showing the room temperature comfort range when local airflow is generated in airflow-utilizing air conditioning.

研究分野：建築環境工学

キーワード：自然換気 サーマルマネキン 非等温気流 気流活用空調

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

自然換気システムは BCP 対策や ZEB 実現を目指す建築において近年積極的に採用されており、自然風の気流感による快適性向上も期待されている。先導的な CO2 削減技術が導入された建築プロジェクトに対する補助事業である「住宅・建築物省 CO2 先導事業」(国土交通省)においても、採択された非住宅建築物のプロジェクトの多くで自然換気システムを導入している。しかし、機械空調を前提とした現代の建物においては自然換気システムの省エネルギー効果が十分に発揮されていない事例も確認され、自然換気併用ハイブリッド空調の開発や適切な運用手法に関する研究へと繋がっていった。自然換気による省エネルギー効果を高めるには取り入れる外気の温度を可能な限り低くすることが望ましいが、低温の気流が換気口に近い居住者への不快感に繋がり、運用停止に至る事例も複数確認されている。

また、先端的空調分野では、従来までの空間全体を均一に保つ環境制御から、人を中心とした環境制御へと移行しつつあり、人の活動に応じて気流や放射環境をコントロールすることにより積極的快適性を創出しようとする空調システムの開発が行われている。その中でもタスク空調のような低温で局所的な気流を用いて積極的な冷涼感を得ようとする気流活用空調の採用事例も増えており、最適設計に向けた研究的知見が求められている背景がある。

2. 研究の目的

本研究では、被験者実験を用いて気流の温度、影響範囲、風速の変化と快適性の関係について明らかにし、自然換気口からの適切な気流条件を示すことを目的とする。また、同時に自然換気時を想定した低温・局所気流の快適性に関する実験結果を気流活用空調へ展開し、設計に有用な知見を得ることを目的とする。

3. 研究の方法

研究目的の達成のため、以下の3つの研究課題に取り組んだ。

課題1) 人工気候室内での人体への冷却量を同等とした低温・局所気流パターンの再現

人体からの除去熱量が同等となる気流速度、温度、ゆらぎ波形について発汗サーマルマネキンを用いて整理を行い、被験者実験の気流パターンの導出を行った。

課題2) 被験者実験による低温・局所気流時の快適性評価

自然換気時の外気下限温度と温熱許容範囲との関係を各気流パターンにおいて明らかにし、気流の温度変化により積極的快適性へと移行する過程を被験者実験により確認した。被験者実験は事務所内での事務作業を想定した被験者実験を行った。また、快適性の評価はアンケート申告によって行い、物理量として皮膚表面温度・熱流量などの計測を行い、総合的な評価を行った。

課題3) 気流活用空調の設計手法への応用

気流活用空調での吹出口を想定した追加実験を行い、気流活用空調において積極的快適性を得られる気流条件について明らかにした上で、気流と快適性に関するチャートを提案した。

研究初年度には、人工気候室とサーマルマネキンを用いて、室内を一定の温湿度に制御した上で、自然換気時を模擬した局所非等温気流をサーマルマネキンに暴露させ、人体からの部位別の冷却熱量を測定した。本実験を実施するため、室内気流の制御が可能なアクティブ制御マルチファン人工気候室に対して、吹出温度制御型のスポットエアコンを組み合わせることによって、吹出温度の制御も可能なシステムを構築した。

2年目は、人工気候室とサーマルマネキンを用いて、自然換気時を模擬した局所非等温気流をサーマルマネキンに曝露させ、部位別の冷却熱量を測定した。それらのデータを分析し、室内気流速度と気流温度・室内作用温度から部位別の人体冷却熱量を算出する予測式を求めた。更に予測式に関する精度検証を行った。また、人工気候室において被験者実験を行い、22 と 29 の室温における様々な局所低温気流の快適性について確認した。

更に、局所気流活用空調への応用についても実験を行った。局所気流活用空調の評価軸として、新型コロナウイルス感染拡大の現状を考慮し、顔付近への局所気流による感染対策と快適性の両立について検討を行った。具体的には人工気候室内にデスクを設置し、顔付近に局所気流を暴露した場合のエアゾル低減効果を確認した。

最終年度においては、決定した気流条件に対して、被験者実験による低温・局所気流時の快適性評価を行った。これらの知見を元に、局所気流発生時の室温快適範囲を示すチャートの作成を試みた。

4. 研究成果

(1) 自然換気時の局所非等温気流による冷却効果

実験は図1に示すように、通風型人工気候室において行い、上半身に対して横から部分的に気流を当てた不均一な温熱気流状態における人体冷却熱量、快適性を評価した。

自然換気時には一般的に室温よりも低い温度の外気が導入されることが想定されるため、室温より低い温度の場合も検討を行っている。図2に吹出風速を0.8m/sとした場合の、気流性状について可視化した例を示す。室温と等温の場合は乱れが少なく、2m程度離れたマネキンの肩の位置においても気流速度は0.8 m/s前後、乱れ度は17.4%であるが、室温より3℃低い気流の場合は0.3m/s前後まで低下し、乱れ度は51.8%となった。等温と非等温では気流性状が大きく変化するために、人体部位への暴露状況も変化すると考えられる。また、乱れ度の大きな気流は対流熱伝達率が増加し、気流の変動によって各部位の温冷感の感じ方が敏感になる可能性がある。

室温、気流風速、気流温度、着衣を変化させ、皮膚温度33℃を一定制御でサーマルマネキンを稼働させた際の発熱量から等価温度を求めた結果を図3に示す。等価温度とは不均一な温熱環境における人体発熱量(顕熱損失量)を均一な温熱環境で静穏気流の状態に置き換えた場合の室温である。この値を比較することによって自然換気を模擬した気流の人体冷却効果を評価する。室温29℃の半袖条件においては静穏気流時の29℃から室温-4℃、気流速度0.8m/sの気流によって26.6℃まで等価温度は低下し、気流の冷却効果が大きいことが分かる。図4にはマネキンによって得られた各部位の顕熱損失量を示す。室温が下がることによって、衣服に覆われていない露出部の熱損失が顕著になり、衣服による差も確認できる。上半身のみ気流を当てる条件であるが、人体表面での気流の乱れ等により室温22℃では下半身の熱損失も大きくなり、下半身の冷却効果も増加することが分かる。

$$t_{eq,whole} = t_{s,whole} - R_{t,cal,whole} * Q_{t,whole} \quad (1)$$

$$R_{t,cal,whole} = (t_{s,cal,whole} - t_{a,cal}) / Q_{t,cal,whole} \quad (2)$$

$R_{t,cal,whole}$: 標準環境の皮膚表面から環境までの全熱抵抗 [(m ² · K)/W] = 半袖条件0.166 [(m ² · K)/W], 長袖条件0.203 [(m ² · K)/W]
$Q_{t,cal,whole}$: 標準環境の体表面積当たりの全身顕熱損失量 [W/m ²]
$Q_{t,whole}$: 体表面積当たりの全身顕熱損失量 [W/m ²]
$t_{eq,whole}$: 全身等価温度 [℃], $t_{s,whole}$: 平均皮膚温度 [℃]=33
$t_{a,cal}$: 標準環境の室温 [℃]



(1) 発汗サーマルマネキン (2) 被験者実験

図1 通風型人工気候室の実験風景

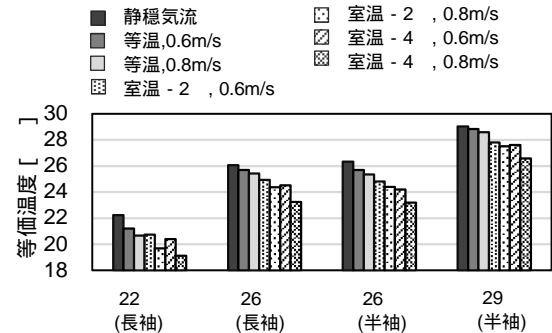


図3 等価温度の比較



(1) 非等温気流 (気流温度 23℃),



(2) 等温気流, (気流温度 26℃)

図2 気流の可視化 (室温: 26℃, 気流速度: 0.8 m/s)

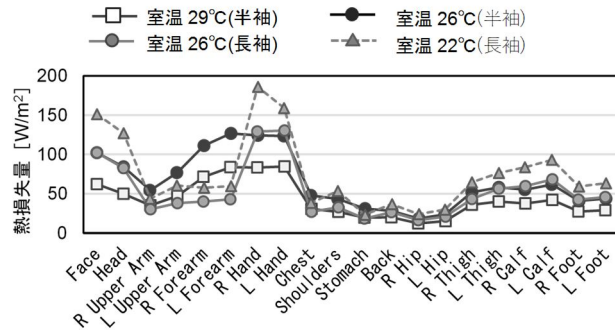


図4 部位別熱損失量の比較 (気流速度 : 0.8m/s , 気流温度 : 室温 - 4)

全身熱損失量 $\hat{Q}_{t,whole}$ の回帰式 (予測式)

a. 長袖条件 (0.76clo)

$$\begin{aligned} \hat{Q}_{t,whole} &= 0.08(33 - t_{0.1})\sqrt{v_{0.1}} + 1.45(33 - t_{0.6})\sqrt{v_{0.6}} \\ &+ 0.18(33 - t_{0.9})\sqrt{v_{0.9}} + 0.50(33 - t_{1.1})\sqrt{v_{1.1}} \\ &+ 4.80(33 - t_o) \end{aligned} \quad (3)$$

b. 半袖条件 (0.49clo)

$$\begin{aligned} \hat{Q}_{t,whole} &= 0.08(33 - t_{0.1})\sqrt{v_{0.1}} + 2.16(33 - t_{0.6})\sqrt{v_{0.6}} \\ &+ 0.55(33 - t_{0.9})\sqrt{v_{0.9}} + 0.52(33 - t_{1.1})\sqrt{v_{1.1}} \\ &+ 5.60(33 - t_o) \end{aligned} \quad (4)$$

$\hat{Q}_{t,whole}$: 体表面積当たりの全身顕熱損失量 [W/m ²]
t_o	: 室内の作用温度 []
v_x	: 高さ x [m] の風速 [m/s]
t_x	: 高さ x [m] の気流温度 [m/s]

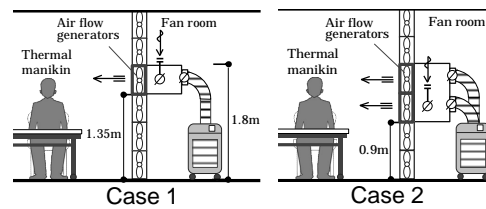
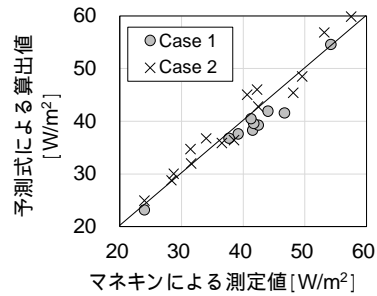


図5 予測式の精度検証

(2) 被験者実験による低温・局所気流時の快適性評価

初年度に行った、予備的な被験者実験により、変動気流は一定気流と比較して、気流感を知覚させやすい効果があることが確認された。これは、気流暴露部分の皮膚温度が風速変動に応じて変化する非定常状態が継続されることが原因と考えられ、定常風では皮膚温が低下した後は、ほぼ一定となるために馴化によって気流を感じにくくなるものと思われる。そのため、全身がやや涼しい状況において、同一部分に気流を暴露した場合においては、定常風に比べて変動風の方が時間経過と共に不快感が上昇する傾向にあった。しかし、風速を変動することによって、気流の当たる位置が変化するケースに関しては、時間経過による不快感の上昇は見られなかった。

次に自然換気時の快適性評価として、被験者による温熱感申告結果を図6に示す。被験者実験の結果と物理的な冷却量の比較として、マネキンにより得られた発熱量データより等価温度を求め、更に等価温度を用いてPMVを算出した。Dry Modeとは顕熱損失のみを測定したものである。Wet Modeとはマネキンに模擬皮膚を装着し、発汗させた状態で測定したものであり、潜熱蒸発による熱損失を考慮した条件である。室温 29 70%では、被験者の申告とマネキンのデータから求めたPMVの値は比較的一致するが、潜熱蒸発の効果が大きくなる相対湿度 40%の条件ではDry Modeの値とは一致せず、発汗させたWet Modeとの値が比較的近い値を示す。結果より、室温 29 においても低い温度の気流が当たることによって暑い側から中立に近づいていくことが分かる。また、室温 22 においては、マネキンで求めたPMV以上に寒さを感じていることが分かる。これは、局所的な不快感などが影響していると考えられ、皮膚温度との温度差が大きい気流で、非等温により乱れが大きい場合は更に寒さを感じやすいと言える。

図7に全身及び気流に対する快適感を示す。室温 29 40%条件では、快適性が比較的高く、室温 22 ではやや不快という申告結果となった。気流に対する快適感と全身の快適感とはここでは良く一致した。

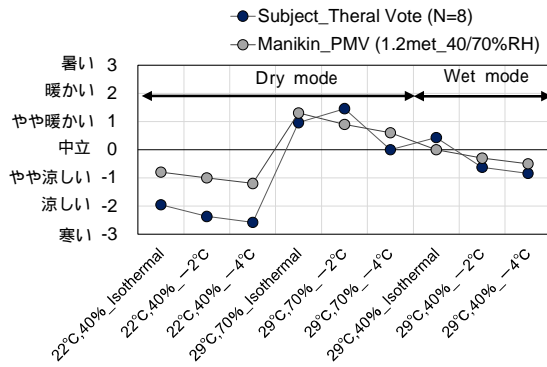


図6 温冷感申告とマネキン測定データによるPMV

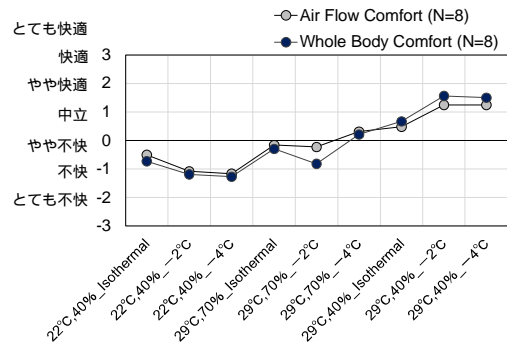


図7 全身と気流の快適性申告

(3) 気流活用空調の設計手法への応用

シーリングファンやタスク空調吹き出し口、微気流ファンなどを用いた気流活用空調への応用に取り組んだ。このような気流活用空調を用いた場合、均一な空間を前提としたPMVやSET*などの温熱快適性指標を用いて制御や性能評価を行うことは難しい。また、このような気流活用空調はアンビエント(全体空間)の温度設定をどの程度緩和できるかによって省エネ効果に大きな違いが発生する。そのため、サーマルマネキンの実験結果及び被験者実験の結果を用いて、図8に示すような局所非等温気流を用いた場合の、室内温度快適範囲についてチャートを作成し、提案した。被験者の人数や被験者実験の実施ケースに関しては、今後の追加が必要であるが、室温22~25においても不快となるケースや快適性を保ちながら室温設定を緩和できる可能性があることを示した。

研究期間においては新型コロナの感染拡大の影響を受け、被験者実験が実施できない期間が発生した。そのため、気流活用空調の活用法として、感染性エアロゾルの曝露に対するリスク低減効果についても評価した。その結果、気流活用空調使用時にはエアロゾルの曝露量が低減する傾向が見られたが、気流の吹き出し口と利用者の距離が離れると、気流によって室内を漂うエアロゾルを誘引し、呼吸域に供給されるケースも見られた。これらの検討により、気流活用空調を用いた感染対策という新たな利点と、その課題について明らかにした。

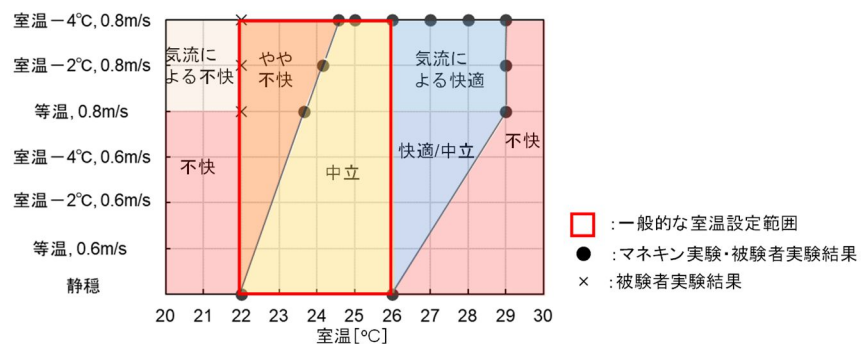


図8 局所気流曝露時の快適域の変化

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 山本 佳嗣, 伊藤 志歩	4. 巻 87
2. 論文標題 自然換気時における局所非等温気流の人体冷却効果 サーマルマネキンを用いた人体顕熱損失量の測定	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本建築学会環境系論文集	6. 最初と最後の頁 302 ~ 311
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aije.87.302	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 山本 佳嗣, 森上 伸也, 大風 翼, 丸山 裕恒, 吉村 奈津江	4. 巻 96
2. 論文標題 自然換気・通風の快適性に関する最新研究	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 空気調和・衛生工学会学会誌	6. 最初と最後の頁 11 ~ 18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yoshihide Yamamoto	4. 巻 -
2. 論文標題 Human Body Cooling Effect of Local Non-Isothermal Airflow During Natural Ventilation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of REHVA 14th HVAC World Congress CLIMA 2022	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.34641/clima.2022.427	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------