

人間のアダプティブ性を考慮したパーソナル空調システムの開発 (その 7) 活動変化が温熱生理・心理に及ぼす影響とその緩和時間の検討

Study on the Personal Air-conditioning System Considering Human Thermal Adaptation (Part7)

- Thermal comfort and response time to thermal stimulus given from change of activity -

正 会 員 須藤 美音(総合設備コンサルタント) 正 会 員 村上 周三(慶應義塾大学)
 正 会 員 加藤 信介(東京大学生産技術研究所) 正 会 員 宋 斗三(成均館大学)
 Mine SUDO*¹ Shuzo MURAKAMI*² Shinsuke KATO*³ Doosam SONG*⁴
 *1 SOGO SETSUBI Consultant Co.,Ltd. *2 Keio University
 *3 Institute of Industrial Science, University of Tokyo, *4 Sungkyunkwan University

In this study, a personal air-conditioning system considering the human thermal adaptation is analyzed. In an office, the thermal environment doesn't change strikingly. Therefore changing of activity affects well the thermal comfort. Here we define response time as the time to ease thermal stimulus due to change of activity by the personal AC. In this paper, we examine response time by subjective experiment. As the result, thermal discomfort with walking exercise is eased within 5 to 10 minutes under the personal AC. But, after further 2-3 minutes, subjects feel discomfort because of dry eyes or cold.

1. はじめに

従来型パーソナル空調は快適性・省エネ性に様々な問題があることから、現在日本では普及に至っていない¹⁾。本研究は、人の熱的適応性を空調制御論理に組み込むことにより、従来型パーソナル空調より快適かつ省エネ的な新たなパーソナル空調システムの開発を目的としている。本報では、制御論理の基礎データを構築するため、熱的不快感を緩和するまでに費やす時間「緩和時間」の検討を行う。

オフィスでは物理的環境変化が少ないことや着衣に社会的な制約があることから、室内での活動変化が人の快適性に及ぼす影響は少なくないと考えられる²⁾。従来の全般空調では個人の活動変化に対応することが困難であり、室内を快適温度に設定していたとしても、活動変化に伴う熱的刺激により不快を感じることもある。一方パーソナル空調の場合、個別制御が可能であるため、熱的不快感を効率よく緩和させることができると考えられる。本報では、特に活動変化に伴う熱的刺激に着目して、パーソナル空調により緩和時間を検討することを目的とする。

2. 被験者実験による活動変化が人間の生理・心理に及ぼす影響の検討

オフィス勤務者は1日のうち多くの時間を室内で費やす。既往の研究²⁾の研究者を対象とした活動調査では、オフィス勤務者は1日のうち約9割の時間を室内で費やし、大きな温熱環境の変化に曝されることは少ないことが明らかになった。しかし、室内でもデスクワークの合間に大小様々なレベルの活動がなされていることが同調査で明らかになり、このことから、オフィスでは特に活動変化が人間の温熱快適性に大きな影響を及ぼすものと考えられた。本章では室内の活動変化が人間の生理・心理に及ぼす影響について検討を行う。

2.1 被験者実験概要

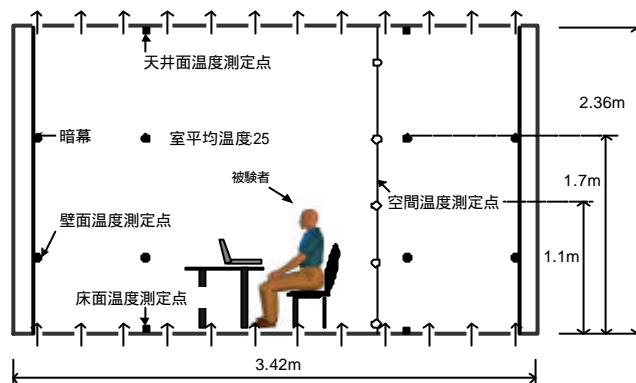


図1 実験室

表1 実験室の条件

空気温度	吹き出し風速	相対湿度
25	0.05 m/s	50~60%

本実験は東京大学生産技術研究所内の恒温チャンパーにて行われた(図1)。実験室は床全面吹出し、天井全面吸込み。チャンパーの内壁に暗幕を設置し、平均放射温度と空気温度が等しくなるようにしている。実験条件を表1に示す。床全面吹出しの風速は0.05m/s、乱れの強さ33.3%以下の静穏気流とした。実験室の温度は一般的なオフィス空間を想定した25とした。実験中の相対湿度は約50~60%であった。

被験者は、標準的な体格で健康な大学生男性2名、女性2名の計4名を対象とした。夏のオフィスを想定した着衣とし、男性は0.70clo(半袖シャツ・長ズボン・ネクタイ・靴下・下着)、女性は0.55clo(半袖シャツ・スカート・ストッキング・下着)と統一した。また、実験中の着衣の変更は許可しなかった。

実験は被験者が実験室環境及び測定器に十分慣れた状態で行った。被験者は実験開始の合図により表2に示す活

表2 活動スケジュール

行動	relax	reading (monitor)	typing (mail)	writing (book)	reading	typing (work)	talking	walking	talking (phone)	typing (work)	relax
時間(分)	5	5	5	5	5	10	5	5	5	10	5
ASHRAEの表による代謝量(met)	1.0	1.0	1.1	1.0	1.0	1.1	なし	2.0	なし	1.1	1.0

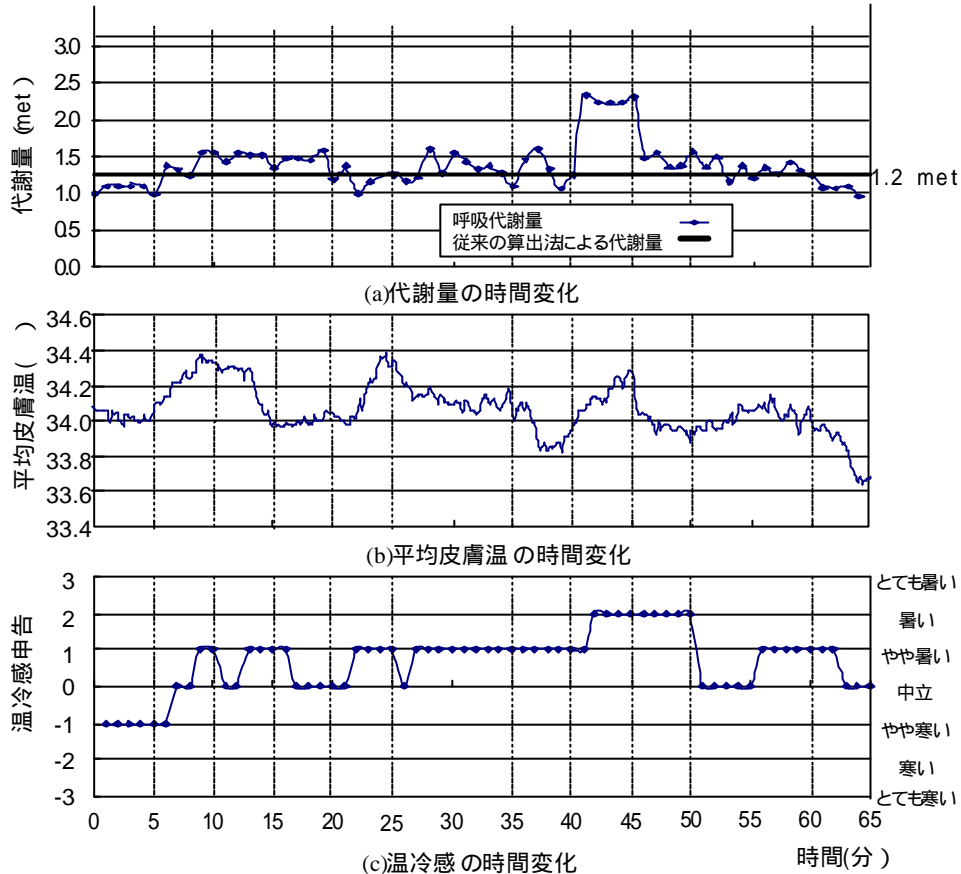


図2 代謝量の変化に対する人間の生理・心理の変化

動項目を順に行った。活動項目は既往の研究より²⁾オフィス活動の中で頻度の高い項目を約1時間分抜粋した。活動項目を表中の代謝量¹⁾と時間をもとに時間平均すると約1.2 metとなる。これは従来の定常を仮定するオフィス活動1.2 metと一致し、従来の代謝量の与え方が今回の実験と整合することが確認された。測定項目は人間の生理量として代謝量及び皮膚温、心理量として温冷感とした²⁾。代謝量は間接測定法に基づき、呼吸代謝測定装置により測定を行った。また、皮膚温は熱電対を用いてHardy-DuBoisの7点法(頭、上腕、手、足、下腿、大腿、胴)に準じて測定をした。温冷感はASHRAEの7段階スケールを用い、1分間に1回申告をさせた。

2.2 実験結果と考察(図2)

図2に代謝量の変化に対する人間の生理・心理の変化を示す。ここでは男性被験者1名の結果を例として示す³⁾。

図2(a)に呼吸代謝量(呼吸代謝測定装置により代謝量を連続的に測定した結果)を示す。呼吸代謝量は1.0met~2.3metの範囲に及んだ。図2(b)に平均皮膚温、(c)に温冷感

申告値を示す。代謝量の変化に対し皮膚温・温冷感の変化は時間遅れが生じた。例えば(talking)から(walking)へ活動が変化した時、呼吸代謝量は急激に上昇するが、皮膚温は徐々に上昇し、しばらくすると温冷感が上昇した。また、同じ活動でもその前に行った活動が影響して、代謝量はほぼ同じ値だが皮膚温・温冷感申告値は異なる値となった。例えば、(typing work)と(talking work)の場合、その前に行った活動の影響により、皮膚温・温冷感申告値は若干異なった。

以上に示されるように代謝量の変化に対し、皮膚温・温冷感が時間遅れで変化し、その後の活動の快適性に影響を及ぼすことが確認された。

3 被験者実験による人間の活動変化に伴う熱的刺激緩和時間の検討

前章により確認されたように温熱生理・心理的な変化は活動変化に対し時間遅れを生じる。様々な活動レベルの変化が予想されるオフィスにおいて、この時間遅れはたとえ室内温度が一定であり快適域に設定されていたとしても

熱的不快感を与え、作業効率の低下を招く可能性がある。熱的不快感を緩和するために要する時間を“緩和時間”と定義し、本実験ではパーソナル空調によって活動変化による熱的不快感の緩和時間の検討を行う。実験はタスク・アンビエント空調によりアンビエント域は気温 28、相対湿度 50%に制御し、タスク域ではパーソナル空調よりアンビエント域より低温の吹出し気流を提供して行う。

3.1 被験者実験概要

本実験は慶應義塾大学理工学部環境実験室にて行った(図3)。実験室には暗幕を設置し、平均放射温度と空気温度が等しくなるようにしている。表3にアンビエント空調及びパーソナル空調の設定条件を示す。アンビエント空調は床3箇所から吹出し、天井より吸込む。アンビエント空調は吹出し温度は28、風量90m³/h(吹出し口1個あたり)相対湿度50%とした。ここでは、パーソナル空調を使用するためアンビエント域の温度を比較的高く設定した。パーソナル空調は市販品(米国製)で机上の両端に設置され人体方向に吹出した。パーソナル空調は吹出し温度26、風量は26m³/h(吹出し口1個あたり)で平均吹出し風速2.5m/s、相対湿度40%、吹出し風向は水平吹き出しとした。また、机上にはパソコンを設置することによって熱放射の影響を加えた。

被験者は、標準的な体格で健康な大学生男性6名、女性6名の計12名を対象とし、着衣は3章の実験と同様⁴⁾。

図4に実験手順を示す。被験者は実験室環境及び実験器具に十分慣れさせた状態で実験に望ませた。はじめに被験者には実験室(図3)の左側で約30分間リラックス(雑誌の読書)をさせた。この時パーソナル空調はOFFとした。次に、オフィス内での歩行を想定し、ルームランナー(被験者に向かって右側)により歩行をさせた(10分間)。歩行終了後すぐに着席、パーソナル空調をONにさせ、再びリラックスをさせた(40分間)。

実験ケースを表4に示す。case1は歩行速度1.8m/s(高速)とし、歩行後にはパーソナル空調を使用した。これを基本ケースとして設定し、case2では歩行速度を0.9m/s(低速)とし、歩行後にはパーソナル空調を使用した。case3では歩行速度1.8m/s(高速)とし、歩行後にはパーソナル空調を使用しないケースの全3ケースの検討を行った⁴⁾⁵⁾。被験者は生理量として皮膚温・代謝量、心理量として全身温冷感・快適感申告及び実験後アンケート調査を行った²⁾。皮膚温はQRECの10点法(頭、胸、背、上腕、前腕、手、大腿(2点)、下腿、足)に準じて10秒間隔で測定を行った。代謝量は呼吸代謝測定装置を用いて10秒間隔で測定を行った。温冷感申告はASHRAEの7段階スケールに準じて行い、快適感は6段階スケールとした。

3.2 実験結果と考察

図5に(a)平均皮膚温偏差、(b)温冷感申告、(c)快適感申告の男性6名の平均値を示す⁹⁾。ここで皮膚温の偏差とは

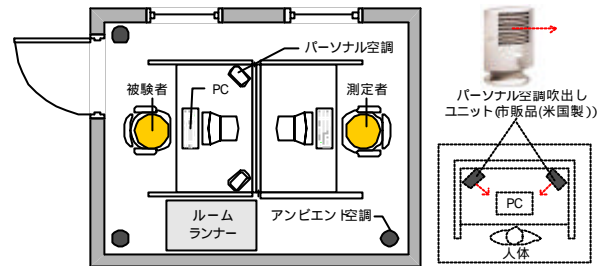


図3 慶應義塾大学理工学部環境実験室

表3 アンビエント空調・パーソナル空調設定条件

アンビエント空調	温度	28
	風速	0.7 m/s
パーソナル空調	温度	26
	風速	2.5 m/s
	風向	水平吹出し

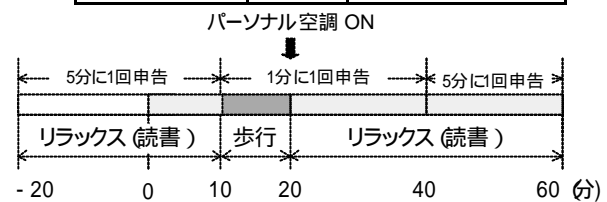


図4 実験手順

表4 実験ケース

	歩行速度	代謝量	パーソナル空調
case1	1.8 m/s (高速)	約 3.8 met	あり
case2	0.9 m/s (低速)	約 2.0 met	あり
case3	1.8 m/s (高速)	約 3.8 met	なし

前半10分のリラックス時の皮膚温の平均値に対する偏差とする。

①平均皮膚温 全3ケースともに歩行を開始すると平均皮膚温が低下した。これは、歩行により生じた対流の影響から、肌が露出している手や前腕の皮膚温が低下したことや大腿部の発汗による蒸発潜熱の影響が主な原因である。15分頃になると皮膚温は上昇した。

歩行終了後(20分) case3(高速、パーソナル空調なし)では40分で皮膚温は安定し始めるが、前半のリラックス時に比べて男性は約0.3、女性は約0.2皮膚温が高かった。この主な原因は下半身の皮膚温の上昇である。これに対し case1(高速、パーソナル空調あり)と case2(低速、パーソナル空調あり)では、歩行終了後平均皮膚温が急激に低下した。case1では40分頃になると平均皮膚温は安定し、前半のリラックス時と比べて、男性では約0.1、女性では約0.2低い。case2はすぐに皮膚温は安定せず、実験終了時(60分)までなかなか低下した。これは特に手の皮膚温の低下が影響している。

②温冷感申告結果 前半のリラックス時(0~10分)は熱的中立状態よりわずかに高い値を示した。歩行を開始(10分)すると、case1・case3(高速)ではすぐに『やや暑い(+1)』に、歩行終了時には『とても暑い(+3)』に達した。case2(低速)では歩行終了時に『やや暑い(+1)』に達した。女性の場合、男性に比べて勾配が急であり、女性の方が歩行に対し大きな負荷があり、より暑く感じていた。

歩行終了後(20分) case1 ではパーソナル空調を ON にすると急激に温冷感が低下した。歩行終了後から熱的中立状態に達するまで要する時間を“緩和時間”と定義すると、男性・女性ともに緩和時間は約 10 分。緩和時間に達した後、男性は熱的中立状態のまま安定するが、女性は 40 分になると寒い側の申告になった。case2 では男性の緩和時間は約 5 分、女性の緩和時間は約 3 分。緩和時間に達した後は、男性は 35 分、女性は 30 分頃になると寒い側の申告となった。case3 ではパーソナル空調を使用していないため、徐々に温冷感が低下し、緩和時間は約 20 分である。歩行により温冷感が上昇するが、デスクワークに戻ってもしくは熱的不快感を覚えている。

(3)快適感申告結果 前半(0~10分)のリラックス時では『やや快適(4)』となった。歩行を開始すると、熱的不快感や疲労から快適感が低下し、歩行終了時(20分)になると case1・case3(高速)では『とても不快(1)』に近づき、case2(低速)では『やや不快(3)』に達した。

歩行終了後、パーソナル空調を ON にすると case1(高速)・case2(低速)では急激に快適感が上昇し、緩和時間に到達する頃に『やや快適(4)』に達した。しかし、その後しばらくは快適を保つが、2、3分程度経過すると快適感は徐々に低下し、case2では実験終了時(60分)になると『やや不快(3)』まで達した。case3では歩行終了後、快適感は徐々に上昇した。男性は60分(実験終了時)、女性は約40分で『やや快適』に達した。

(4)人体不快項目 パーソナル空調の長時間の使用により不快を感じた被験者に対し、その原因に関するアンケート調査を行った。その結果、最も多かった回答は『目が乾く』であった。他には特に着衣の覆われていない顔面や腕等の部位で『気流感』に対する不満や、『汗がひいた後に寒い』、『息苦しい』等の回答が多く見られた。

3.3 考察

本章で示した結果はアンビエント空調 28、相対湿度 50%、パーソナル空調吹出し 26、40%の限られた条件で行ったものであり、必ずしも緩和時間に関する一般的な結論を導くものではない。しかし、温熱環境の時間変化に対する温冷感変化の関係に関する検討結果と大きく矛盾するものではなく、温熱環境調節をパーソナル空調という人体を局所的に冷却する方式で行っても、人体の温冷感変化に“緩和時間”という概念設定を可能とするところを示す結果となっている。緩和時間の定量的評価に関して、今後多くの検討が行われる必要があることは無論である。

4. まとめ

1)活動の変化に対して、人間の温冷感・皮膚温は時間的に遅れて変化し、その後の活動の快適性に影響を及ぼす可能性がある。2)アンビエント空調を 28、相対湿度を 50%に調節した室内で 26、相対湿度 40%の吹出しのパーソナル空調使用した場合、0.9m/s 歩行時の緩和時間は男性は 5 分、女性は 3 分。1.8m/s 歩行時の緩和時間は約 10

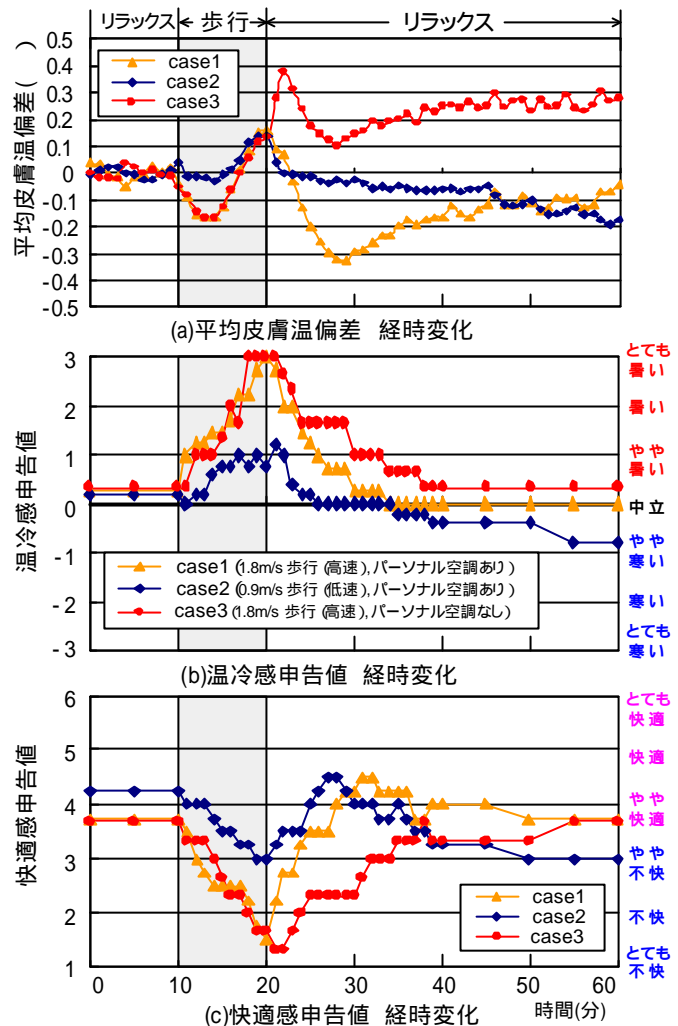


図5 活動変化における生理・心理的变化(男性)

分。それに対し、パーソナル空調を使用しなかった場合、1.8m/s 歩行時の緩和時間は約 20 分であった。3)緩和時間には男女差が見られ、女性は男性より緩和時間が短い。4)緩和時間到達後 2.3 分に快適感申告値が最大値を示すが、その後は低下傾向にある。その原因は、目の乾燥の影響や寒さによる不快感が原因となる。そのため、緩和時間到達後はパーソナル空調を消す、または弱める必要がある。

[謝辞] 本研究の一部は文部科学省の科研費の助成を得ている。

[注] 1) 代謝量は ASHRAE の表を参考とした。ただし、ASHRAE の表では会話時の代謝量は示されていないため、測定値を代用し、talking: 1.32met、talking phone 1.67met とした。2) 熱電対呼吸代謝測定装置は被験者に大きな負荷を与えることから併用は避け、代謝量の測定のみ別の日にを行った。3) 例としてあげた被験者は身長 175 cm、体重 68kg で標準的な体型。被験者数が十分ではないので今回の結果の一般性については今後更に検討を要する。4) 歩行速度は ASHRAE の代謝量の表による一般的な歩行速度を参考とする。5) 各被験者は同一の時間帯に実験した。概日リズムより実験の時間帯によって人間は生理的・心理的な変動を生じるが、本実験ではそれらの有意な差は確認されていない。6) 女性の結果は男性とほぼ同じ傾向を示すため、図は省略する。

[参考文献] 1) 須藤ら：人間の熱的適応特性を考慮したパーソナル空調システムに関する研究 - 第 1 報 従来型パーソナル空調の使用状況及び問題点の解明 -、空気調和・衛生工学会論文集、(投稿中) 2) 須藤ら 高温多湿気候におけるアダプティブ空調システムに関する研究 (その 7)、空気調和・衛生工学会学術講演論文集、(2002.9)、pp1669-1772、3) 須藤ら 人間のアダプティブ性を考慮したパーソナル空調システムの開発(その 6)、日本建築学会大会学術講演梗概集、(投稿中)