

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) 間欠的な活動量の変化が人間の温熱生理・心理に及ぼす影響の検討

学生会員 ○須藤 美音(慶應義塾大学大学院)
正 会 員 加藤 信介(東京大学生産技術研究所)

正 会 員 宋 斗三(東京大学生産技術研究所)
正 会 員 村上 周三(慶應義塾大学)

1. 研究の概要

従来の室内空間の温熱快適性評価において、物理的環境及び着衣量、活動量などは定常状態を想定している。しかし、温熱快適性評価に人間の空間移動に伴う温熱環境体験履歴及び適応行動などを考慮するアダプティブモデルを導入する場合、物理的環境及び人間側の要素(着衣量、生理量など)の時間変化を考慮する必要がある。

本研究では、これらの諸要素の非定常的な変化が人間の温熱快適性に及ぼす影響を検討する。本報では、上記の諸要素のうち代謝量についての検討を行う。代謝量は人の温熱生理に及ぼす影響が大きく、特に、物理的な環境の変化が少ないオフィス環境において、代謝量の変化と人の熱快適性との相関は大きいと考えられる。しかし、従来の温冷感評価では、他の諸要素に関しては比較的綿密な検討が行われる反面、代謝量の変化については簡易法(ASHRAEより提案された表による評価)などによりラフに評価されるのが現状である。そこで、本報では実測・実験により、①オフィス環境における人間の活動変化を解明し、また、②活動の時間変化が温熱生理・心理に及ぼす影響を検討する。

2. 代謝量の測定方法の検討

2.1 ISO8996—代謝量による熱生産の測定

ISO8996では代謝量の測定に、6つの方法を提案している。この6つの方法は評価の手段により3つのタイプに分類される。最初の評価のタイプ(Level IのA,B、Level IIのA,B)は、1) 活動記録に基づき、簡易表を用いて代謝量を評価する方法である。これは、活動を単純に強度(Resting, Low, Moderate, High, Very High)による記述、職業(例えば大工、農業など)による記述等、作業を構成する要素の記述から代謝量を①基礎代謝+②姿勢+③作業強度+④行動などのように合計して算出する方法などである。2つめのタイプは(Level II C)は、2) 心拍数を用いて算出する方法である。これは心拍数が120回/分以上のとき、心拍数と代謝量との間にみられる線形関係を利用した方法である。しかし、日常のオフィスワークでは心拍数が120回/分を超えることが殆どないため、この方法は事務作業を前提とする室内温熱環境の快適性評価には適していない。3つめのタイプの方法(Level III)は、3) 人間と環境の熱収支を直接測定する直接測定法と人間の呼吸によるO₂消費量、CO₂排出量から代謝量を求める間接測定法である。

表1 ISO8996による代謝量測定方法

Level	Method
I	A: Classification according to kind of activity B: Classification according to occupation
II	A: Use of tables of group assessment B: Use of estimation tables for specific activities C: Use of heart rate under defined conditions
III	Measurement

Level I: Rough information where the risk of error is very great
Level II: High error risk
Level III: Risk of error within the limits of the accuracy of the measurement and of the time study

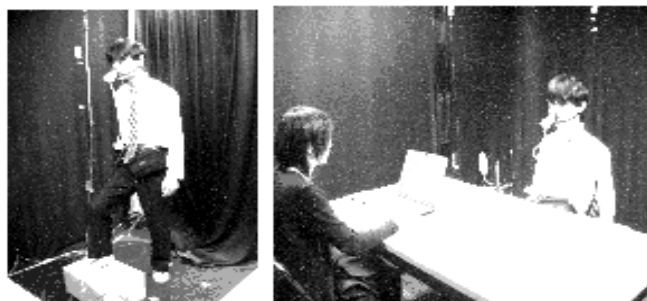


図1 呼吸代謝測定の様子

2.2 呼吸代謝量測定(間接測定法): O₂消費量とCO₂排出量より代謝量の測定

呼吸代謝量測定法は、人間の活動の変化と呼吸の変化の相関関係に基づき、例えばある期間にダグラスバッグという袋を用い呼吸によるO₂消費量とCO₂排出量より代謝量を算出する方法である。ここで、人間の呼吸のO₂消費量とCO₂排出量により代謝量を求める実験式(1)^(注1)がASHRAEより提案されている^(文1)。

$$M = 352(0.23RQ + 0.77)Vo_2/A_D \quad (1)$$

ただし、M^(注2): 代謝量(W/m²)、RQ:呼吸商(消費されたO₂の体積)/(排出されたCO₂の体積)、Vo₂:酸素摂取量(L/min)、A_D:体表面積

2.3 代謝量評価の問題点

従来の熱快適性の評価において、代謝量の評価はISOやASHRAEより提案された人間の活動量をいくつかの代表代謝量としてまとめた表^(文2)により一定値を与える評価方法や、同表による代謝量に対して時間の重み付けを行い平均化する(一定時間に対して一定値をあたえる)方法により評価されることが多い^(注3)。このような従来の代謝量の評価法には以下のような問題点が指摘される。

1) 測定者の偏差: 表からの代謝量の評価における判

断（例えば、被験者の活動の種類や活動に要した時間）は、測定者の主観によるものが大きい。そのため、同じ活動に対しても測定者の主観に基づく偏差により判断が異なる場合が発生する。

- 2) **体温調節における熱生産を無視**：体温が高くなると人体細胞内の化学反応が著しく加速され、熱生産の割合は増加する。体温が低くなった場合は震えが代謝による熱生産をもたらす。呼吸代謝量測定法はこのような体温の変化による代謝量の変化を捉えることができるが、表による評価ではこれらの影響を考慮することができない。
- 3) **定常の代謝量の評価**：定常環境での評価を行うのであれば表をもとに代謝量に一定値をあたえる方法も大きな問題はないといえる。しかし実際人間の代謝量は非定常に変化しており、それに伴い人体温冷感も大きく変化するものと考えられる。そのため、瞬間的な代謝量の変化あるいは空間移動に伴う温熱環境体験履歴及び適応行動などを考慮するアダプティブモデルの構築においては、従来の代謝量評価法の利用は適切でないと考えられる。

上記の従来の代謝量評価法の問題点を踏まえた上、非定常の温冷感評価に適切な代謝量の評価を行うためには、評価の目的に応じて代謝量を実際に測定する必要があると思われる。しかし、直接測定法は人間の基礎代謝のような静的代謝を求めるには最も適しているが、人間の日常の活動スペースで測定を行うことができない。間接測定法については、測定機器に対する違和感などから、被験者にとって大きなストレスとなり、そのストレスによる呼吸の乱れが原因で正しい代謝量の測定を行うことができない可能性がある。そのため測定にあたり被験者及び測定者は測定器具の十分な訓練が必要となる。また、呼吸による代謝量は実際の代

謝量(筋代謝)との時間遅れによる誤差が生じることも注意する必要がある。

3. 日常における人間の活動変化の解明 (実測)

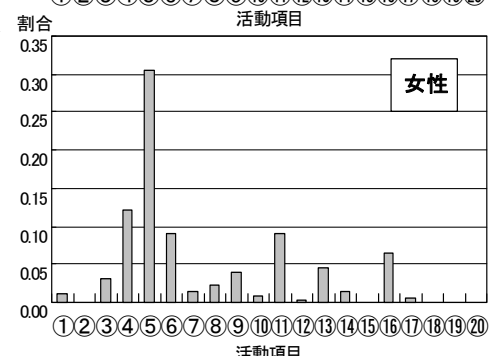
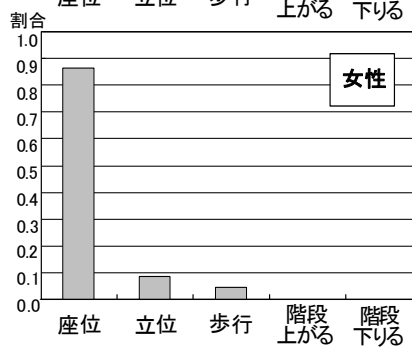
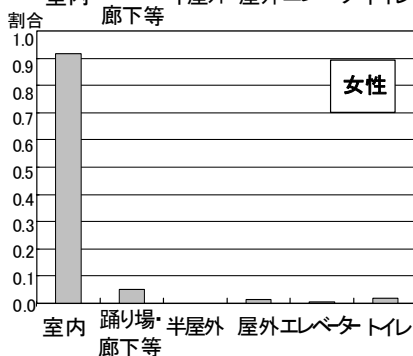
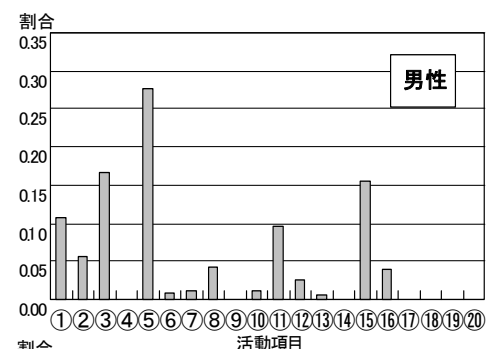
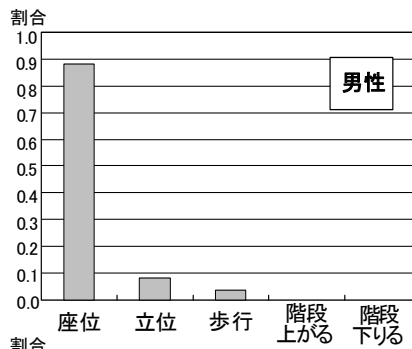
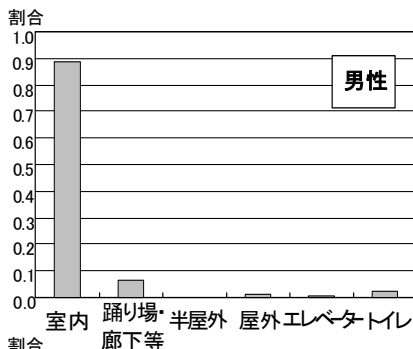
人間はオフィスにて座業に就いている時においても、1時間程度の時間スケールで観察すれば、用便や休息その他の理由により間欠的な空間移動を繰り返している。そのため、オフィス等のワークステーション空間の温熱環境を考える際、大きな時間スケールでは自宅から職場への通勤、小さな時間スケールでは用便などに伴う間欠的な空間移動などを考慮することが望ましい。

3.1 実測の概要

実測は実際のオフィス空間で執務している被験者が間欠的な空間移動を繰り返している間も含めて、午前

表2 日常の活動変化の分類項目

1. 場所	2. 状態
i. 室内 ii. 踊り場・廊下等 iii. 半屋外 iv. 屋外 v. エレベーター vi. トイレ	a. 座位 b. 立位 c. 歩行 d. 走行 e. 階段上る f. 階段下りる
3. 行動	
① 静止 (研究中) ② 静止 (休憩中) ③ 読書 (研究中) ④ 読書 (休憩中) ⑤ タイピング (研究中) ⑥ タイピング (休憩中) ⑦ パソコンのディスプレイ読む ⑧ 書く (研究中) ⑨ 書く (休憩中) ⑩ 話す (研究中)	⑪ 話す (休憩中) ⑫ 話す (電話) ⑬ ファイルの整理 ⑭ 携帯のメールをする ⑮ 眠る ⑯ 食べる ⑰ 飲む ⑱ コピーをする ⑲ タバコを吸う ⑳ ストレッチをする



(a) 1日に体験する空間の割合

(b) 室内における人間の状態の割合

(c) 室内における人間の行動の割合

図2 日常の活動の結果例

9時30分～午後5時まで行った。実測期間は2002年4月15日～16日である。被験者は男子2人、女子1人であり、年齢は22～28歳、研究所での勤務者を対象とした。被験者には活動や服装など制限を与えず、日常と変わらない活動を行わせた。観測者は被験者1名に対して1名につき、被験者の空間移動、状態、行動などを連続的に記録した。被験者の活動を特定する詳細な項目に関しては表2を参照。

3.2 実測結果及び考察

図2に男女各1名の被験者における日常の活動の変化を示す。図2(a)に被験者が1日のうち体験する空間の滞在時間の割合を示す。男女ともに約9割が室内空間に滞在していることが分かる。図2(b)では室内空間での人間の状態の割合を示す。およそ85%が着席状態であり、立位は約9%、室内歩行も約5%となる。図2(c)に室内空間での人間の活動の割合を示す。タイピング(⑤)が男女ともに高い割合であった。このようにオフィスでの1日の活動は低い活動レベルで大部分が占められている。よって、オフィス空間での快適性評価には2met以下の代謝量についての詳細な測定が必要であることが確認される(文³)。また、オフィス内における活動は主としてパソコン作業であるが、パソコン作業の合間にも立つ、歩く、話すなど種々の活動がみられる。このパソコン作業の合間に行われる活動はどれも短い時間であるが、人間の快適性に大きな影響を与える。

次に、同被験者の1日活動の変化による代謝量を一定時間に対する平均化による代謝量評価により求めた結果を図3に示す。図3に示すように人間はオフィス空間にいる時においても間欠的な空間移動、活動の変化により、例えば、図3(a)の男性被験者の場合、代謝量は0.8～1.25metの範囲にある。今回の実測の結果、女性被験者の場合、代謝量の変化が少なく、特に男性被験者と比べ、その変化は小さい。この結果(特に男性の事例)は、室内オフィス空間での作業において一定の代謝量(ASHRAE基準では1.2met)を与えるのは、たとえ室内空間での熱的快適性に関し定常に仮定する場合であっても、不適切な代謝量の評価を与え、誤った快適性の評価をする可能性が少なくないといえる。

4. 代謝量の時間変化が人間の温熱生理・心理に及ぼす影響の検討(実験)

4.1 実験の概要

ここでは、上記3節の実測のより確認された室内オフィス空間での被験者の活動を実験室環境で再現し、活動の時間変化が代謝量、温熱生理・心理に及ぼす影響を検討する。これにより、従来の定常的な代謝量評価と、それに基づく温冷感評価の妥当性を検討する。本実験は東京大学生産技術研究所内の恒温チャンバー(3.5m×3.0m×2.5m)にて行われた。図4に実験室の様子を示す。実験室は床全面吹出し、天井全面吸込み。チャンバ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設計している。床全面吹出しの風速は0.05m/s、乱れの強さ33.3%以下の静穏な

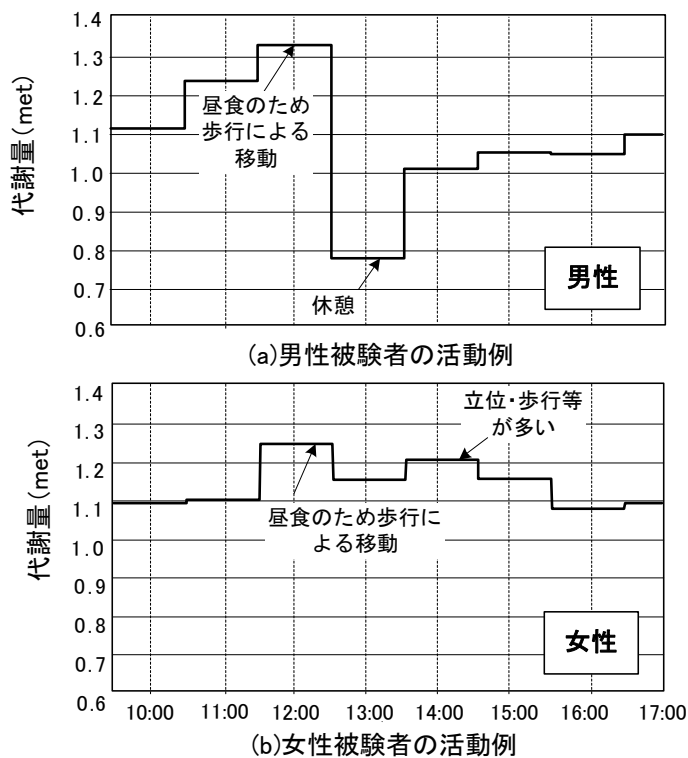


図3 定常に評価を行ったときの代謝量変化の例

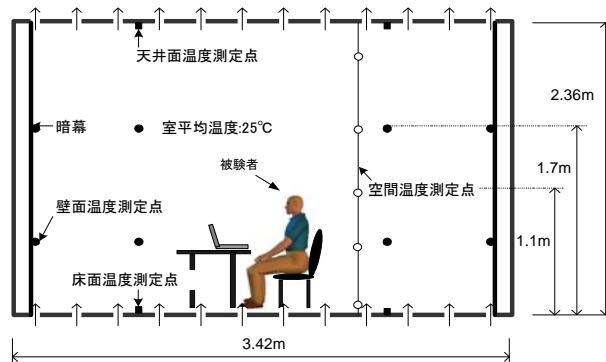


図4 実験室

表3 実験室の条件

空気温度	相対湿度	吹き出し風速
25 °C	50～60 °C	0.05 m/s

気流となっている。実験室の温度は一般的なオフィス空間を想定した25°Cとした(表3)。被験者は男女各1名の大学生で、夏季におけるオフィス勤務者を想定した着衣とした。被験者は実験室の環境及び代謝量測定装置・皮膚温測定器具(熱電対)に十分慣れた状態で実験に臨んだ。実験室内において被験者は表4に示す活動を連続的に行う。ここで表4に示す活動の項目は、前記した実測により得られた結果から人間の日常的な活動の中からモデル化により1時間分を取り出したものである。測定は1日3回行い、1回目は代謝量のみを測定し、2、3回目は皮膚温及び温冷感の測定、記録を行った(注4)。代謝量は呼吸代謝量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点法に準じて測定をした。また、被験者の温冷感についてはASHRAEの7段階スケールを用い1分間に1回申告をさせた。

4.2 実験結果及び考察

表4 活動スケジュール

行 動	① relax	② reading (monitor)	③ typing (mail)	④ writing	⑤ reading	⑥ typing (work)	⑦ talking	⑧ walking	⑨ talking (phone)	⑩ typing (work)	⑪ 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5に表4の活動による被験者の代謝量・皮膚温・温冷感の変化を連続的に測定した結果を示す。ここで示す図5の結果は被験者1名の結果である。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(注5)。

図5(a)に代謝量を連続的に測定した結果と従来の代謝量の評価法から求めた代謝量を示す。連続的に測定した結果、代謝量は1.0met~2.3metの範囲に及んでいる。それに対して定常法に基づいた評価の場合、表4に示す活動の代謝量は約1.2met(注6)となる。この値は従来の定常を仮定するオフィス活動1.2metと一致、従来の値の与え方が今回の活動調査と整合することが確認された。また、定常評価を行う場合の代謝量は今回の実験値(非定常の代謝量の変化を計測値)より低い値を示す。これは、代謝量を単純に項目当りの時間重み平均する従来の評価法は、連続的な代謝量の変化、すなわち、前に行った行動の影響が後の行動による代謝量に与える影響を反映しないためと考えられる。図5の(b)、(c)に代謝量の連続的な変化が人間の皮膚温・温冷感に及ぼす影響を示す。被験者の皮膚温・温冷感の変化と代謝量の変化の間に時間遅れが生じている。例えば①(relax)から②(reading monitor)へと活動の変化があった時、代謝量の急激な上昇に対して、皮膚温は徐々に上昇している。また、同じ活動を行ったとき、代謝量はほぼ同じ値を示すが、それにもなう皮膚温・温冷感申告値は異なる値を与えることが確認される。例えば、⑤(typing work)と⑩(typing work)の場合、その間に挟んでいる活動の影響により、活動⑩における皮膚温は⑤による皮膚温より低く、また温冷感申告も異なる。これらの結果は非定常の熱快適性を評価する場合には、オフィス内で行う種々の活動における代謝量の変化を十分反映する必要があることを示す。

5. まとめ

- 1) 従来温冷感評価に用いられる代謝量の評価法をレビューし、その問題点を検討した。
- 2) 日常的な人間の活動における実測を行い、オフィス空間での活動の類型化を行った。オフィス空間で座業をしている間にも連続的に種々の活動が行われることを確認した。
- 3) 日常における活動の連続的な変化を実験により再現し、代謝量の時間変化が人の皮膚温及び温冷感に大きく影響を与えることを確認した。

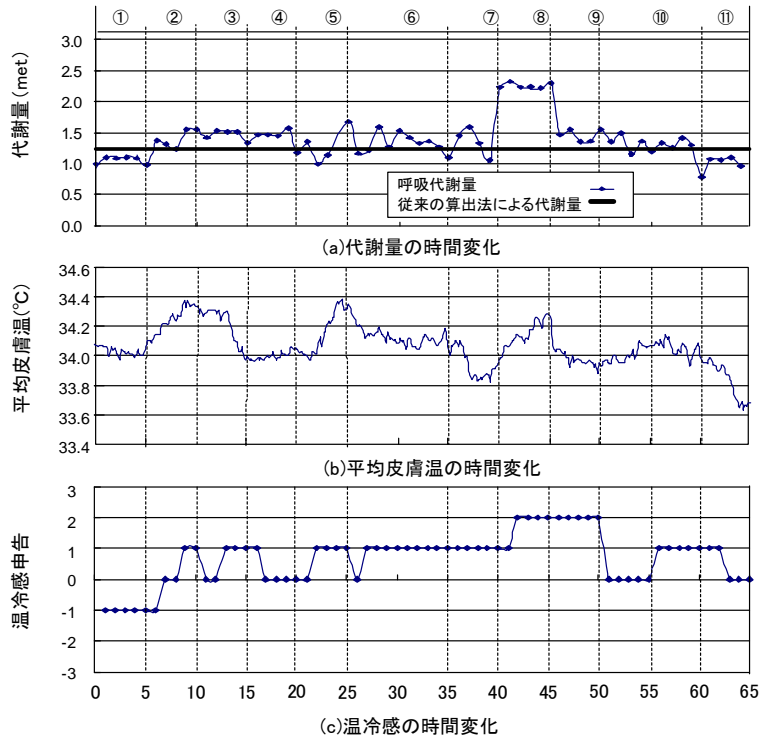


図5 代謝量の変化による皮膚温・温冷感の変化 (男性被験者の例)

【謝辞】 本研究は、日本学術振興会の未来開拓学術研究推進事業「環境負荷の影響評価と軽減」研究推進委員会(委員長:鈴木基之傘下の研究プロジェクト「高温多湿気候に適応する環境負荷低減型高密度居住区モデルの開発」(プロジェクトリーダー:加藤信介)の一環として行ったものである。本研究を遂行するにあたり、上記推進事業、研究プロジェクトのメンバーの方々には甚大な御協力と御助言を頂きました。記して謝意を表します。

【注】 (1) 式(1)には、代謝と人間の体表面積との関係のみ考慮しているが、人の代謝は体重との関係が高く、今後これに関して検討を要する。(2) 式(1)からさらにASHRAEに準じて、 $1\text{met}=58.1\text{W}/\text{m}^2$ -(2)によりエネルギー代謝率に変換するが、これは一定の条件に基づく場合に用いる式である。式(2)の妥当性については今後の課題となる。(3) 一定時間内に行われる各活動に時間の重みをつけて平均化を行うことにより一定時間内の代謝量を評価。(4) 皮膚温および代謝量の測定機器は被験者にとって大きなストレスとなる。ここでは被験者のストレスをできるだけ減らすために、皮膚温と代謝量測定装置の併用は避けた。(5) 例としてあげた被験者は身長175cm、体重68kgで標準的な体型である。(6) 注(2)で記した算法により代謝量の時間平均を求める。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、ここでは実験により得られた代謝量の平均値を代用し、⑦talking1.32met⑨talking1.67metとした。

【参考文献】 (1) Nishi,Y.Measurement of thermal balance of man,1981 (2) ASHRAE,ASHRAE Handbook Fundamentals (SI), 2001 (3) George Heavenith,Personal factors in thermal comfort assessment: clothing properties and metabolic heat production, Energy and Building,2002 (4) 中山昭雄, 温熱生理学, 理工学社,pp.10~26. (5) 快適な温熱環境メカニズム、空気調和・衛生工学会 (6) 須藤美音ら, 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6),日本建築学会大会学術講演梗概集,2002.9