

内22-48

早稲田大学大学院理工学研究科

博士論文概要

論文題目

Evaluation of Thermal Comfort in
Semi-Outdoor Environment

半屋外環境における熱的快適性評価
に関する研究

申請者

中野 淳太

Junta Nakano

建設工学専攻 建築環境研究



2002年12月

本研究は、積極的な自然導入を目的とした建築環境として現代建築に取り入れられている半屋外環境の熱的快適性を、通過空間及び短期滞在空間の視点から評価することを目的とする。近年、都市空間において光、風、植栽等、自然の要素を建築環境に取り入れる手法としてアトリウムやテラスといった空間がオフィスビルや商業施設に多く計画されている。これらの空間には意匠的、視覚的意義以外に、熱的快適性の観点から、屋内外を移動する際の熱的緩衝空間や一定の温度に保たれた室内空間とは異なる環境を享受するための空間としての役割があると考えられる。環境計画を行う上で、長期滞在を目的とした居住空間の温熱環境に関する基準は整備されているものの、それ以外の指針は存在しないのが現状である。現在の室内温熱環境設計・評価手法には、滞在者が暑くも寒くも感じない、熱的中立環境条件を空気温度、放射温度、気流速度、湿度、着衣量、代謝量の6要素の組み合わせで指定する熱的快適性基準、ASHRAE 55-92（米国冷凍暖房空調学会）及びISO 7730（国際標準化機構）が広く用いられている。基準の根幹をなしているのがPMV（予想温冷感申告）及びET*（新有効温度）に代表される定常温熱環境指標であるが、これらの指標は人体を静的な発熱体として扱い、周囲の熱環境との熱収支により理論的に熱的快適性を予測・評価するものである。任意の環境条件に制御された人工気候室に被験者を数時間滞在させて熱的定常状態を作り出し、その時の被験者申告を得ることにより熱授受の結果定まる生理的状态と暑さ・寒さの感覚（温冷感）の相関を導いている。それゆえ空調により均一かつ一定に保たれた環境に長時間滞在する人間の熱的快適性を予測するには適しているが、複数の空間を遷移するような非定常状態には適用できない。また一方で、人間を与えられた熱環境に対して積極的に適応しようとする動的な存在として扱うAdaptive Modelという概念が提唱されている。行動の自由が大幅に制限される被験者実験に対して、着衣・代謝量の調節、窓の開閉、滞在環境の選択といったAdaptation（環境適応）の自由度が高いほど快適環境範囲が広く、熱的中立条件も温熱環境指標の予測結果と異なることが自然換気ビルでの実測調査結果から示されている。室内環境では温熱環境が滞在者に合わせて調整されているのに対して、半屋外環境では滞在者が自らを適応させることが前提となる。滞在者が期待する環境も室内とは異なることが予測され、半屋外環境の滞在空間としての評価には環境適応の特性を把握しておくことが重要であるといえる。

第1章では、半屋外環境の環境工学的な位置づけを明確にし、既存の研究を踏まえた上で本研究における熱的快適性評価のアプローチについて解説した。通過空間として評価する場合、半屋外環境を経由した屋内外の移動は連続的な環境のステップ変化とみなすことができる。熱環境は各々定常として扱い、内部を遷移する人間の生理的・心理的な非定常特性に着目することとした。短期滞在空間としては環境の疑似定常状態を仮定し、温熱環境以外に環境適応を考慮に入れて心理反応及び人間の行動に着目することとした。

第2章では、実空間での環境測定結果を境界条件とした数値体温調節シミュレーションにより、半屋外環境を通過する人間の非定常生理学的応答を評価した。解析に用いた数値体温調節モデル(65MN)はStolwijkモデルをもととして、人体を4層構造の16部位に分割している。人体各部位別着衣量、代謝量、温熱環境4要素と、各環境条件下の曝露時間を入力することによって、非定常状態の生理量及びSET*(標準新有効温度)を数値計算により推定した。実測調査は兵庫県に位置するアトリウム空間をエントランスに持つ複合施設を対象とし、屋外環境条件の異なる1997年夏季、秋季、1998年冬季に分けて行った。来館者の最終目的地を想定して複数のルートを設定し、動線上の代表点にて環境計測を行うことにより数値体温調節シミュレーションの境界条件とした。人の動きを想定して人体周辺の温熱環境を連続的に測定するため、移動計測カートを開発した。動線上のアトリウム空間の有無をシミュレーションにより比較した結果、内外温度差の大きくなる夏季と冬季に屋外から入室した後の平均皮膚温の変化を緩和する効果が認められた。しかし、環境のステップ変化に伴い最大蒸発熱損失量が急激に変化するため、定常温冷感指標SET*を用いた心理量評価は行えないことが確認された。

第3章では、被験者実験により非定常時の生理量と心理反応の相関に着目した被験者実験を行った。オフィス執務者が室内から屋外に出て戻って来るというプロセスを想定し、中間に設けられた緩衝空間の環境が歩行移動後の空間における熱的快適性に与える影響について検討した。屋外環境の条件は、着衣量の少なさや発汗により環境変化が人体に及ぼす影響が大きいと考えられる夏季を想定した。実験は2000年9月に延べ120名の男女被験者を用いて行った。人工気候室内を「室内空間」、「緩衝空間」、「屋外空間」の3室に分け、室内を25℃50%rh、屋外を32℃70%rhに制御した。緩衝空間は室温を22、25、28℃、通過時間を3、5、10分として全ての組み合わせについて実験を行った。緩衝空間の設定条件は、そこを通過する人間の平均皮膚温と胸部衣内水蒸気圧といった生理量に大きく作用しており、温度設定が高く、通過時間が長いほど入室時の衣内水蒸気圧は高く、皮膚温も高かった。また、定常に至るまでにより長い時間を要した。しかし生理量に見られた環境設定条件の差は必ずしも心理量には現れず、入室直後を除き、30分以上の長い時間帯で見ると緩衝空間の環境条件が熱的快適性に与える影響は小さいことがわかった。

第4章では半屋外環境の比較対象として、長時間の滞在を強いられる室内にて温熱環境が滞在者の快適性に与える影響について検討を行った。1997年夏季から1998年春季にかけて日本人、外国人執務者の混在する都内オフィスの実測調査を行った。温熱環境及び室内空気環境測定と同時に居住快適性に関するアンケートを配布し、全実測を通じて406の回答を得た。執務者による頻繁な設定室温変更のため不安定な温熱環境が形成されおり、温冷感指標により指定される快適範囲

を大きく外れていなかったにもかかわらず、オフィスを不快と感じている執務者の割合は74%と非常に高かった。快適感と温冷感申告値に強い相関が見られ、日本人女性と外国人男性の間では3.1℃の中立温度差が確認された。日本人執務者と外国人執務者の中立温度は、他の実測結果より得られた各国オフィスの平均的な室温とほぼ一致した。着衣量や仕事内容の違いに加え、オフィスに期待する環境が異なるため中立温度に差が見られたと考えられる。熱的快適性は執務環境の総合的な快適性に大きな影響を及ぼしていたが、オフィスの執務者は熱的中立を得るのに環境に依存していた。そして、中立温度差のある執務者が混在している場合は室温調整がさらなる不快の要因となる実態が明らかになった。室内環境でも着衣調節などによる執務者自身の環境適応の重要性が示唆された。

第5章では、用途が等しく環境制御レベルの異なる半屋外環境にて、自由意志短期滞在の視点から実際の使用状況、滞在者の環境適応、熱的快適特性の違いについて調査を行った。都内の空調されたアトリウム2箇所と空調されていない半屋外環境2箇所を対象とし、2001年夏季より2002年春季の期間、10～18時の時間帯で各個所各季節4日間、計64日間の実測調査を行った。滞在状況を把握するため、滞在時間及び滞在者数を記録した。実際の滞在者を対象としたアンケートと同時に回答者周辺の詳細な温熱環境を測定するため、放射計を改良した移動計測カートを用いた。全調査を通じて得られたアンケート及び対応する温熱環境は延べ2248セットであった。80%以上の滞在者が自由意志による滞在であり、平均滞在時間は非空調空間で10分、空調空間で18分であった。空調空間では環境の温度と滞在状況が無相関であったのに対し、非空調空間では日平均外気温が下がるにつれて滞在人数、時間共に線形に減少する有意な相関が見られた。また、日平均着衣量はいずれの空間でも滞在環境よりも日平均外気温と高い相関が見られた。定常温冷感指標PMVにより導かれた年間中立温度は空調空間、非空調空間共に概ね一致したが、80%の滞在者が満足する快適環境範囲は空調空間ではPPD（予想不満足者率）予測値の約2倍、非空調空間では約3.5倍広いことが確認された。

第6章では、各章の結果を要約した。通過空間としての半屋外環境はそこを通過する人間の生理量には大きな影響を与えるものの、通過後30分以降の熱的快適性に与える心理的影響は無視できることがわかった。熱的中立状態を環境調整に依存した室内環境では温熱環境指標により予測される快適環境範囲よりも環境評価がシビアになる場合がある反面、強制されない短期滞在空間としての半屋外環境では2倍から3.5倍広い範囲で快適が得られることが示された。また、着衣の調節や滞在環境の選択といった行動的環境適応が外気温の関数となっていることが確認された。以上により半屋外環境では環境要素そのものを任意の条件に制御するのではなく、滞在者の環境適応を考慮して、木陰や風防壁など多様な滞在環境を選択肢として用意する環境計画を行うのが適切だと考えられる。