歩行移動に伴う連続した温度変化と温熱感評価

—歩行者空間における現場実験—

THERMAL SENSATION WITH CONTINUOUS TEMPERATURE CHANGE
IN WALKING CONDITION

—Field experiment at pedestrian spaces—

全 貞ユン*, 田村明弘**

Chungyoon CHUN and Akihiro TAMURA

The objective of this experiment is to validate and confirm, by field evaluation, the results of the previous report. The experiment was conducted in an underground shopping mall, department store, and station. All of these places were connected, and the walking course was approximately 500m long. Subjects simulated a typical walk that a commuter or shopper might take in their daily life. Instead of entering a chamber room, subjects stopped at 18 points and evaluated. 15 subjects wore same clothing ensembles and were polled for thermal sensation and skin temperatures measured at 18 points along the walking course. The experiment was conducted in summer, fall, and winter. As a result, 'Relative Evaluation Tendency' was shown same to chamber at the field also. And skin temperature of back of hand in the final point and an overall thermal sensation to the entire course showed a positive correlation. Same to chamber experiment, temperature variance is an important factor to evaluate thermal sensation. Small temperature variance makes a difficult decision of thermal sensation.

Keywords: thermal comfort, walking condition, temperature variance, field experiment

温熱感、歩行移動、温度変化、現場実験

1. はじめに

人間の温熱感評価に関する研究は前の世紀を通して盛んに行われてきた。中でも定常状態時の人間と周りとの熱のやりとりによる熱収支モデル（静的モデル）はその計算結果が実験室での実験値とよく一致していることから、ASHRAEやISOなどの建物空調制御のためのStandardの基幹になってきた¹⁾²⁾。しかし、これらの予測値を現場に適用した際に、予測と実際の居住者の評価が合わないという指摘が出て、これは熱収支モデルに人間の適応能力が考慮されていないためであるという内容のAdaptive TheoryがイギリスのMichael HumphreysやFergus Nicolらによって発表され、幅広い共感を得てきている³⁾。これらと一連の脈のもとにあるのがRichard de DearやGail Bragerらによって行われたASHRAEのデータベースRP884のProjectがあり⁴⁾、彼らは空調されたビルではモデルによる予測値と実際の居住者の評価が良く合うが、自然換気型建物では予測値より幅が広い快適域を実際の現場では示していること

を指摘した。この結果はその後、自然換気型建物のためのStandardを過去のASHRAE Standard 55に新しく加える結果に繋がった⁵⁾。

これら一連の研究の根元に共通しているのは実際の建物での人間の温熱感評価は単なる周りとの熱収支だけによって決まるのではなく、暴露される物理環境に合わせて居住者が行動性調節を行ったり、建物内部環境に対する期待感を変化させるなどの心理的調節をして、実験室で予測された快適域より広い快適域を示す、ということである。そしてそのような心理的調節の背景にある一つの変数として我々は人間の移動による温熱環境暴露履歴に注目した。人間は歩く動物であり、建物中の物理環境が定常状態であっても、人間の経験という時間軸を中心として考えれば、非定常的温度変化の連続の中にあると言える。

このような背景から出発した本研究は大きく分けて二つの目的を持つ。一つ目は、移動履歴は人が環境を評価するに際して重要な影響要因であると考えられるが、本研究では数ある環境評価の中で、温熱環境評価-温熱感

* 延世大学校生活科学部住居環境学科 助教授・工博

** 横浜国立大学大学院工学研究院システムの創生部門
教授・工博Assistant Prof., Dept. of Housing & Interior Design, College of Human Ecology,
Yonsei Univ., Dr. Eng.
Prof., Dept. of Architecture, Graduate School of Engineering, Yokohama National
Univ., Dr. Eng.

評価を取り上げ、移動に伴う温熱環境の連続変化とその中で生起する人間の温冷感評価構造を探ることにより、一つの建物の室内環境を評価する際に前の履歴が評価結果にどのように影響を及ぼしているかを明らかにする。ある場所の温冷感評価に前の暴露履歴が影響を及ぼすことは我々の日常経験からも容易に推察できることであるが、このような定性的事実をまず科学的に確認し、今後の定量的表現に結び付ける。

二つ目は都市の連絡空間や地下街など、完全に閉ざされても、また開いてもいない半開放空間の空調制御方式に関して考えていきたい。これらの空間は開口部が多くあるにもかかわらず、空調制御を行っているため、単位面積当たりのエネルギー使用量が一般ビルの3倍近くになる⁹⁾。しかし、閉じる設計にすることは安全上の問題からも、良い解決策であると考えられない。そこで、温度変化を伴う歩行移動時の人間の温冷感評価が定常時のそれと違うことを利用すれば新しい省エネルギー的空調制御方式が可能ではないかと考えた。

我々はこのような目的達成のための初ステップとして、前回の報告⁷⁾で、3つの連結された実験室を用いた実験の結果から温度変化を伴う歩行移動中の温冷感評価における相対的性質を明らかにし、瞬時評価とともに総合評価という概念を提示して、それらの評価構造の差を示した。本報では同様の実験を実際の歩行者空間で行い、前回の実験結果を現場で確認するとともに、歩行者空間で生じる温度変化を伴う連続的歩行移動時の温冷感評価構造をより深く探った。

歩行時の温冷感に関する既往の研究は非常に少なく、国内の研究としては、Nagaraらが大阪の地下街と駅、そして屋外で歩行時温冷感評価と物理環境測定を同時に行い、その結果から屋外と屋内を連結するBuffer Zoneのデザインが歩行者の温冷感に重要であることを結論している⁸⁾。この研究はさらにある場所における温冷感評価に前の暴露履歴が影響を及ぼすことを指摘していて興味深い。他には梅干野らが都市空間における移動物理環境実測を歩行移動という概念にもとづいて行った研究がある⁹⁾。また、田辺らは「半屋外を含む連続空間における温熱環境の研究」¹⁰⁾で、物理条件の実測とシミュレーション計算を行っている。海外ではANDRÉ POTVINがヘッドホンに似た移動実測キットを頭部に装着して屋外を含んだ都市の歩行者空間を歩くことによって歩行者空間における気温と風速、照度を測定している¹¹⁾。しかしこれらの研究は物理的環境要因の実測や予測に止まるもので、歩行移動時の人間の温冷感評価構造を心理的側面から深く探った研究は今までにはない。

本報では以上の背景と既往研究の分析を踏まえた上で、前回実験室実験で得られた瞬時評価と総合評価の心理的評価構造を実際の歩行者空間で検討し、今後の定量的分析につなげていくための科学的基礎データを得た。

2. 実験方法

歩行実験は横浜駅を中心とした地下街、半屋内歩行者通路、デパートなどを結んだ3つのコースで行われた。屋外では日射が大きな温冷感決定要因になるため^{9), 10)}、日射が遮蔽されている空間を実験場所として選んだ。図1に実験場所とコースを示す。コースAは空調されていない地上1階の歩行者通路から地下1階の駅のコナコースを通過してデパートの地下2階にある最終ポイントに到着するコース、コースBは比較的空調運転が行われている地下街やデパートの地下2階をメインにしたコースである。コースCは地下街や駅のコナコース、デパート間を比較的複雑に結んだコースである。これらの3つのコースの経路長はいずれも約500mであり、到着場所

(最終ポイント)はすべて同じである(図1のGポイント)。被験者は事前にランダムに割り当てられた一つのコースを歩行移動しながら、途中の18ヶ所の決まった評価ポイントで立ち止まって温熱感の評価をした。評価ポイントと次のポイントの間にかかる時間は歩行と評価を含めておおよそ50秒であった。1回の実験にかかる時間は着替えや皮膚温測定用熱電対装着を含む準備が20分、最初のポイント(図1のSポイント)での安静が15分、歩行移動及び評価が15分、実験後の着替えが10分、と一人当たり約1時間であった。被験者は1季節あたり15名ずつで、夏、秋、冬、の3季節で同じ実験を繰り返し行ったので総45名(内訳、男性26名、女性19名)で、全て健康な大学生と大学院生であった。なお一人の被験者は全実験中1回のみの参加に制限した。実験期間は夏が1998年8月12・13・28日、秋が1998年10月28・29日と11月2日、冬は1999年1月11・12・13日であった。実験実施時間は10時から17時の間である。1日に一つのコースに実験が集中しないよう、ランダムに実験順番を振り分けた。各季節別に、全被験者に同じ服装を配給した。各季節の被験者服のクロー値は夏が約0.5clo、秋が約0.8clo、冬が約1.2cloであった²⁾。左の胸、左の上腕、左の手の甲、および左の太腿の4ヶ所の皮膚表面温が温熱感評価と同時に測定・記録された。皮膚温は0.2mmφT型熱電対を利用し2秒間隔で測定され、これらの熱電対はバッテリー付小型データロガー(THERMIC MODEL 2100A)に連結された。被験者はロガーを入れたリュックを実験中背負って歩いた。このリュックは上のclo値の計算には含まれていない。被験者は実験場所(横浜駅)に到着してまず公衆トイレに行き、服を着替えながら皮膚温センサーを装着したあと、最初のポイントに案内される。被験者は最初のポイントの所で、立位状態で15分間安静したあと出発し、決められたコースを順番通りに歩行しながら評価をする。実験者の一人が一緒について、コースと評価ポイントを案内した。約15分間一つのコースを歩くようになるが、その歩行の中で18ヶ所の決まったポイントに立ち、その時の温冷感などを評価してもらった。これを移動中瞬時評価と呼ぶ。評価はできるだけすばやく行うよう指示した。この時に使われたアンケートの一部を図2に示す。また、最終ポイントではその場所に関する瞬時評価とともに歩いてきたコース全体を振り返って総合した評価をしてもらった。これをそれぞれ移動後瞬時評価と移動後総合評価と呼ぶ。総合評価用の質問と尺度は図3の通りである。また各ポイントにおける空気温度(THERMIC MODEL 2100A)、相対湿度(THERMO RECORDER RS-10)、気流速度(CLIMOMASTER 6511)を案内役以外の別の実験者が評価が行われている同じ時間帯に測定・記録した。

3. 実験結果

3.1 各コースの暴露温度

図4は各コースごとに各ポイントにおける暴露温度の実験期間中の平均を各季節別に示したものである。コース内の温度の変化は冬にもっとも大きく、秋は小さい。コース間ではいずれの季節もCコースでもっとも温度変化が大きい。最大温度変化幅は夏が約9℃、秋が7℃、冬が13℃であった。以上の結果から、同じ場所に到着するまでコースによりそれぞれ異なる温度履歴を被験者に経験させることができたと同時に、日頃これら歩行者空間で利用者が経験する温度変化範囲が非常に広いことがわかる。

3.2 移動中瞬時評価と温度の相関

図5は移動中各ポイントにおける空気温度と瞬時温冷感の平均値との相関をコースごとに示したグラフである。また、温度以外の物理的要因やク

図1 実験場所と3つのコース

No. _____						
1. 現在、あなたの温冷感について次の項目の中でもっとも当てはまるところに○を付けてください。						
暑い (1)	暖かい (2)	やや暖かい (3)	どちらでもない (4)	やや涼しい (5)	涼しい (6)	寒い (7)
..... 省略						
3. 現在、あなたの温熱的な快適感について次の項目の中でもっとも当てはまるところに○を付けてください。						
非常に快適 (1)	快適 (2)	やや快適 (3)	どちらでもない (4)	やや不快 (5)	不快 (6)	非常に不快 (7)
..... 省略						
..... 時 分 秒						

図2 瞬時評価用質問

No. _____						
6. 歩きだしてからここまでのコースを全体的に評価すると？						
暑い (1)	暖かい (2)	やや暖かい (3)	どちらでもない (4)	やや涼しい (5)	涼しい (6)	寒い (7)
..... 省略						
7. 歩きだしてからここまでのコースの全体を温熱的に評価すると？						
非常に快適 (1)	快適 (2)	やや快適 (3)	どちらでもない (4)	やや不快 (5)	不快 (6)	非常に不快 (7)
..... 省略						

図3 総合評価用質問

図4 各コース、各ポイントにおける平均暴露温度

ロー値の影響を総合して捉える意味で各ポイントのSET*を参考として計算した。各ポイントにおけるSET*に対する移動中瞬時温冷感の相関を図6に示す。空気温度に対する瞬時温冷感の相関係数とSET*に対する瞬時温冷感の相関係数はあまり変わらず、一貫した違いの傾向も見られなかった。この図5と図6から相関係数が比較的に小さかったコースは、移動中温度の変化が少ないコースであった。例えば、夏のコースB、秋のコースAとB、冬のコースAは図4から確認できるように、移動中の温度変化が小さいコースである。これは歩行移動中の瞬時温冷感には現在を前や全体と比較しながら温冷感を評価する相対的評価の傾向が強いいため、ポイント間にあまり温度変化がなく判断対象域が狭くなる場合は、温冷感の判断が難しくなるためであると思われる。逆に温度変化が大きくなると相関係数も高くなる。しかし、冬のコースCは温度変化が比較的に大きかったにもかかわらず、相関係数が低い。その理由は出発地点 (First) の温度が他のポイントに比べて非常に高く、また次のポイント1との温度差が非常に大きかったため、温冷感を決める基準の設定が最初難しかったからであると思われる。

図5 移動中瞬時温冷感の空気温度に対する相関

図6 移動中瞬時温冷感のSET*に対する相関

実際、出発地点のデータを除いて相関係数を計算した結果、0.91 という高い相関係数になった。一方、他の季節や他のコースの場合は出発地点のデータを除いて計算しても差はほとんどなかった。

3.3 歩行移動中瞬時温冷感評価における相対的評価の傾向

まず本研究で使っている「相対的評価」の言葉の定義を再度行う。本研究での「相対的評価」とは、前に暴露された環境が基準になり現在の環境をそれらと比較して温冷感を評価する特性を意味する。ただし、本研究は連続的移動・歩行中の評価を研究対象としているため、ここでの「前の環境」とは一つの場所ではなく、連続した一連のコースになり、歩いてきたそれまでのコース全体におけるある場所の温度の相対的位置をもって評価されることを示す。詳しい内容は前報⁷⁾を参照していただきたい。

今回の実験結果から以下のような分析を行い、相対的評価の特性を現場で得られたデータから確認した。図7は一番目の行に各季節・各コースの移動中暴露温度の平均・最高・最低を示し、2行目に同じく各季節とコースの移動後総合温冷感の平均値±標準偏差を、3行目に移動後瞬時温冷感の平均値±標準偏差を表したグラフである。各季節の空気温度で、中央にある横線の位置が表しているのは、最終ポイントの温度である。全てのコースの最終ポイントは同じ場所であるため、各コースの最終ポイントの温度は同一季節では同じになる。移動後温冷感グラフの中央の横線は中立温冷感(4)を示している。

このグラフからまず、各コースの平均温度と各コースに対する総合温冷感が対応している(同じ傾向の線になっている)ことが分かる。すなわち、平均暴露温度が高かったコースでは暑い側の総合温冷感を、平均暴露温度が低かったコースでは寒い側の総合温冷感を評価していた。

他方、最終のポイントが全く同じ場所、同じ物理条件であったにもかかわらず、その場所に対する移動後瞬時温冷感がコースによって大きく違う結果となった。平均値を結んだ直線が総合温冷感や暴露温度の平均値を結んだ直線と逆の向きと形を示しており、コース全体が最終ポイントより比較的に高温度のコースでは涼しい側の瞬時温冷感を、コース全体が最終ポイントより比較的に低温度のコースでは暖かい側の瞬時温冷感を示し、最終ポイントの温度を全コースの平均温度と比較してその相対的位置から瞬時温冷感を判断したことが分かる。このことは移動後の瞬時温冷感評価では暴露温度の平均の位置にどちらとも言えないという中立判断を移動させ、最終ポイントの温冷感を判断したとも見られる。

以上の結果から実験室実験で見られた瞬時温冷感評価における相対的評価の性質を現場でも確認することができた。

3.4 皮膚温と心理量の関係

前報で移動終了直後の皮膚温と移動後総合温冷感評価の間には正の相関があり、移動後瞬時温冷感評価とは負の相関があることを述べた。そして、このことは衣服内皮膚温では明確ではないが露出部皮膚温からは明らかであると述べた。今回も衣服内3点(上胸、上腕、上腿)とともに露出部の代表として手の甲の表面温度を計った。衣服内3点の皮膚温はRobertらの式¹²⁾を用いて平均皮膚温を算出した。

その結果、現場でも実験室と同様の結果が得られた。その結果を図8に示す。図8から実験室と同様、衣服内皮膚温では明確でないが、手甲温では移動後総合温冷感とは正の相関関係を、移動後瞬時温冷感とは負の相関関係を見せていることが分かる。総合評価で冬の場合、夏や秋に比べて、手甲温は低くても同様の温冷感を示している理由としては、冬が夏や秋に比べてclo値が高いことが原因と考えられる。また、手甲温がその季節の低い環境温度に日ごろから慣れているためとも考えられる。秋の場合は夏場とほぼ同じ傾向を手甲温と心理量の間で示した。以上の結果から、移動後総合温冷感を予測するには最終ポイントでの露出部の皮膚温が有効な指標の一つとなると思われる。

4. まとめ

駅、歩行者通路、デパートなどで構成された3つのコースで歩行時の温冷感に関する現場実験を行った。結果は以下の通りであった。

- 1) 今回の実験で3つのコースにおいての最大温度変化幅は夏が約9℃、秋が7℃、冬が13℃であった。

図7 各コースの平均温度、平均移動後総合温冷感、平均移動後瞬時温冷感 (温冷感の場合±SD)

図8 移動直後の皮膚温と移動後温冷感評価の関係

- 2) 空気温度と SET*に対する移動中瞬時温冷感の相関係数が比較的に大きかったコースは、移動中温度が比較的に変化したコースであった。
- 3) 各コースの平均温度とそのコースに対する移動後総合温冷感が対応していて、平均温度が高かったコースでは暑い側の総合温冷感を、平均温度が低かったコースでは涼しい側の総合温冷感を示した。
- 4) 移動後到着する最終ポイントは全く同じ場所、同じ温熱条件であったにもかかわらず、歩いてきたコースによって大きく違う移動後瞬時温冷感を示した。
- 5) 移動後瞬時温冷感は最終ポイントの温度を全コースの平均温度と比較してその相対的位置から瞬時温冷感を判断していた。
- 6) 移動終了後の手甲温は移動後総合温冷感とは正の相関関係を、移動後瞬時温冷感とは負の相関関係を見せた。

以上の結果から、温度変化を伴う歩行移動時の温冷感には暴露温度条件や温度変化の幅が深く関係していることが明らかになり、前報の実験室実験と同様の結果が得られた。また、歩行時瞬時温冷感評価には相対的評価の傾向が強いことが実験室と同様に現場でも確認された。この相対評価の傾向とは、心理学において知覚や認知の仕組みを考える時しばしば引用される文脈効果(context effect)の一つと考えられる¹³⁾。文脈は知覚者がそれまでの経験によって学習したものであり、その文脈によって知覚が規定される。今後前回の実験室実験の結果と本現場実験の結果、そしてこの後行った補足実験の結果を合わせて、歩行移動時の温冷感評価の定量的表現に結び付けていきたいと考えている。

参考文献

- 1) ASHRAE, ANSI/ASHRAE Standard 55 - 1992, Atlanta : American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc., 1992
- 2) ISO 7730, Moderate Thermal Environments - Determination of the PMV and PPD Indices and Specification of the Conditions for Thermal Comfort, International Organization for Standardization, Geneva, 1994
- 3) Humphreys, M., Nicol E.: Understanding the Adaptive Approach to Thermal Comfort, Field Studies of Thermal Comfort and Adaptation, ASHRAE Technical Data Bulletin Vol.14, No.1, pp. 1-14, January 1998
- 4) de Dear R., Brager G., : Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference, Field Studies of Thermal Comfort and Adaptation, ASHRAE Technical Data Bulletin Vol.14, No.1, pp. 27-49, January 1998
- 5) Brager G., de Dear R., : Climate, comfort and natural ventilation : A new adaptive comfort standard for ASHRAE standard 55, Proceedings of Moving Thermal Comfort Standards into the 21st Century, pp.60-77, April 2001
- 6) 三浦秀一、尾島俊雄、地下街の熱環境とエネルギー消費に関する調査研究、日本建築学会計画系論文報告集、pp.13-22、1991年12月
- 7) 全貞ユン、田村明弘：歩行移動に伴う連続した温度変化と温熱感評価—相互移動可能な3つの部屋を用いた実験的研究、日本建築学会計画系論文集 第532号、pp.65-72、2000年6月
- 8) Nagara, K., Shimoda, Y., & Mizuno, M. : Evaluation of the thermal environment in an outdoor pedestrian space, Atmospheric Environment, Vol.30 No.3, pp. 497-505, 1996
- 9) 豊住朝子、梅干野晃、宮永俊之：都市における生活空間を対象とした移動実験による熱環境調査、日本建築学会関東支部研究報告集、pp.205-206、1997
- 10) 中野淳太、金政秀、磐田靖子、堤仁美、高山真、堀川晋、大高一博、田辺新一、木村建一：半屋外を含む連続空間における温熱環境評価の研究-その1 実測方法と冬季実測結果、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.375-376、1998
- 11) Potvin, A. : Assessing the microclimate of urban transitional spaces, Proceedings of PLEA 2000, Cambridge, UK, pp. 581-586, July 2000
- 12) 中山昭雄、「温熱生理学」、理工学社、1981 p25
- 13) 大山正・東洋編、「認知心理学講座1 認知と心理学」、東京大学出版会、1984 pp.86-87

(2001年6月8日原稿受理、2002年1月24日採用決定)