パーソナルふく射暖房パネルの熱的快適性*

田辺新一**, 木村建一***

The purpose of this study is to investigate thermal comfort requirements in the space with personal radiant heating system. During winter season warm air heating system often provides vertical temperature gradient. To create thermal comfort conditions and minimize individual differences, the personal radiant heating system may be one of the powerful tools. First, indoor thermal environments with warm air and radiant heating systems were compared. Secondly, 24 college-age female subjects wearing 0.67 clo standard clothing were exposed under office work activity (1.2 met) for 3 hours to four different thermal conditions. Experimental room is heated by totally 720 W energy. Type 1 is heated only by 720 W of warm air system. Type 2 is 480 W of warm air and 240 W of personal radiant heating. Type 3 is 240 W of warm air and 480 W of radiant panel. Type 4 is only 720 W of radiant panel. Results shows that radiant heating system can create rather uniform temperature profile. However, when surface temperature become around 60°C, natural convection along the panel is increased and make around 0.3 m/s air movement at sitting position and subjects may feel draught. Combination of warm air and personal radiant system with the view of thermal comfort was also discussed here.

OA化に伴う熱負荷の偏在化、オフィスワーカーの個人差のため、均一温熱環境をつくりだすのみで快適環境を実現することは難しくなっている。本研究では、オフィスや居住空間において温風暖房によって発生した上下温度分布による不快を減少させることを目的として、パーソナルふく射暖房パネルの体感効果に関して報告する。体感実験の結果、パーソナルふく射パネルは下肢の冷えを解消する効果があるが、パネル表面温度が高くなると気流速が増加し、局部温冷感による不快感を生じる可能性があることが明らかになった。また、パネル表面温度が高温にならないように注意し、他の暖房方式との併用によって、より快適な居住空間を形成することが必要であることがわかった。

(キーワード：快適性、暖房、ふく射、オフィス)

1. はじめに

本研究の目的は、温風暖房と併用するパーソナルふく射暖房パネルの体感評価を行い、適切な使用方法を検討することである。

暖房を行ったオフィスや居住空間での熱的快適性は、

空気温度のみならず、気流、ふく射温度、湿度、人体の代謝量、着衣量に影響される。近年、オフィスなどの快適性評価に用いられている PMV¹⁾、SET²⁾では、人体の熱的快適感に影響を与える6要素を含めて評価を行えるが、そこでは上下に均一な空気温度分布を仮定している。しかし、暖房室内では建物の断熱程度、暖房システムによって上下温度分布を生じており³⁾、また、オフィスのOA化に伴って室内で熱負荷が偏在化し、全体的な暖房・空調システムでは在室者すべての快適性を満足させることが難しくなっている。加えて、在室者は常に同じ活動量、着衣量でオフィスワークを行っているわけではないため、均一な温熱環

* 平成元年12月18日受付

** お茶の水女子大学 家政学部

Dept. of Textile and Clothing, Ochanomizu Univ.

*** 早稲田大学 理工学部

Dept. of Architecture, Waseda Univ.

境をつくりだすのみでは個人の快適性を実現することも難しい。特に冬季オフィスでは、女性は男性に比較して一般に着衣量が少ないこと、活動量が低いことにより、下肢の冷えによる不満を訴える場合が多い⁴⁾。

エネルギー的側面からオフィスや居住空間の暖房に関して考えてみると、暖房室温を下げれば省エネルギーは実現できる。しかし、省エネルギーによって在室者に不快感を与えては意味がない。忙しく立ち回り働いている代謝量の高い在室者には、低い空気温度のアンビエント空調を行い、デスクに座っている在室者には、照明のタスクライティングのようにパーソナル化を行えば、エネルギー的側面からも有効であると思われる。

本報では、オフィスや居住空間において温風暖房によって発生した上下温度分布がもたらす下肢の冷えによる不快を減少させることを意図して、パーソナルふく射暖房パネルの適切な使用方法、体感効果について検討した結果を報告する。

2. 室内温熱環境

2-1. 測定方法

図1に本実験に使用したふく射パネルの構造を、図2に実験室の断面図および平面図を示す。実験室は $4 \times 3.3 \times 3.0 \text{ m}$ (h) = 13.2 m^2 , 40 m^3 の大きさで、鉄筋コンクリート建造物の3階西向きの部屋である。断熱性はあまりよくない。実験中、窓側以外にはカーテンを施した。実験に使用したのはカーテンを施した部分で、 10 m^2 , 33 m^3 の大きさである。窓部分には外側に

図1 実験に用いたふく射パネルの構造

Fig.1 Structure of experimental personal radiant panel.

簾をとりつけ、室内入射日射を極力避けた。また、窓下部分には10 cm厚のフォームポリスチレンを施し腰壁とした。

実験室内の東側床上2.5 mに設置した3台の温風暖房器による暖房時と、図1に示したパーテーションに組み込まれた4枚のパーソナルふく射パネル暖房時について、室内温度分布、PMV、平均ふく射温度、外気温度の経時変化を測定した。温風暖房器およびふく射パネル4枚に投入される電力量は各々720 W一定になるように、マイコンでサイリスタ制御を行った。PMV(設定: 0.8 clo, 1.2 met)、前面および後面の微小面半球ふく射温度⁵⁾は、着座時の体中心である床上60 cmにおいて測定した(図2)。測定期間は、温風暖房器については1月30日18:00~31日18:00、パーソナルふく射パネルについては2月4日18:00~5日18:00の各々24時間である。

実験中、室内空気温度、床表面温度、外気温度、気流速度、電力消費量などを、データロガー(アドバンテスト-TR 2731, 2741, 2724)を用いて5分ごとに測定、収録した。各温度は、ふく射よけをとりつけた0.3 mmφの銅-コンスタンタン熱電対により測定した。

2-2. 測定結果

図3に温風暖房時の、図4にパーソナルふく射パネル暖房時の外気温、PMV、エネルギー消費量の24時

図2 実験室断面図・平面図

Fig.2 Section and plan of experimental room.

図3 温風暖房時の外気温、PMV、エネルギー消費量の24時間経時変化

Fig. 3 Durative changes of ambient air temperature, PMV, and energy consumption in the space with warm air heating system.

図4 パーソナルふく射パネル暖房時の外気温、PMV、エネルギー消費量の24時間経時変化

Fig. 4 Durative changes of ambient air temperature, PMV, and energy consumption in the space with personal radiant panel heating system.

間の経時変化を示す。両者の外気温はほぼ似た値を示しているが、PMVはふく射パネルによる暖房のほうが一日を通して約0.5~0.8程度高い。図5、6に12:00~12:55の各測定点での空気温度の平均値を示す。図は室内を鉛直断面でみたもので、左側が外壁、右側が内壁側である。室内各位置での上下方向5点の空気温度平均値には差はあまりみられないが、温風暖房時は上下温度分布が大きい。すなわち、ふく射パネルによるパーソナル暖房時は床上2.0mよりも低い居住域において温風暖房による暖房よりも2.0~2.5°C程度空気温度が高くなっている。

2-3. 考 察

本実験結果より、居住域の空気温度分布、PMVでみるとパーソナルふく射パネル暖房のほうが、温風によ

る暖房方式よりも快適性という点で優れていると考えられる。しかし、ふく射パネルのみを用いたパーソナル暖房ではパネルの表面温度が60°C近くになり、着座位置床上60cmにおいて前後方向の微小面半球ふく射温度の差が12°C近くになった。このため在室者に局部温冷感による不快感を生じさせるおそれがある⁶⁾。また、被験者近傍の気流速がふく射パネルを用いることにより0.1 m/sから0.3 m/s近くまで増加した。すなわち、このようなシステムでは、熱的中立を得るためにパネル温度を高くしすぎると、ふく射の不均一、ドラフトによる不快が生じるおそれがある。したがって、周囲の空気温度とパネル温度の適切な組み合わせを考えることが、快適性を得るためには必要である。このような背景をもって被験者実験を行った。

図5 温風暖房時の室内空気上下温度分布。室内を鉛直断面でみたもので、左側が外壁、右側が内壁側

Fig. 5 Vertical air temperature profiles in the space with warm air system. Figure shows a section. Left side is outside wall and right side is inside wall.

図6 パーソナルふく射パネル暖房時の室内空気上下温度分布。室内を鉛直断面でみたもので、左側が外壁、右側が内壁側

Fig. 6 Vertical air temperature profiles in the space with personal radiant heating system. Figure shows a section. Left side is outside wall and right side is inside wall.

3. 被験者を用いた体感実験

3-1. 実験方法

(1) 測定室

被験者実験は、前節の温熱環境を測定した実験装置と同じものを用いた。本実験では、室内のインテリア側（東側）の床上2.5 mに設置した3機の温風暖房機とパーテーションに組み込まれたパーソナルふく射パネルに供給する電力量の和が同じ組み合わせのときの室内温熱環境の変化を求め、その体感効果について把握することを目的とする。

図7は実験概念図である。電力供給および制御に関しては、温風暖房器のファン部分とヒーター部分は別系統とし、ファン部分にはたえず48 Wの電力を供給した。温風暖房器およびふく射パネル4枚に投入される電力量は、合計で常に720 W一定になるようにマイコンでサイリスタ制御を行った。実験は2月1日～4

図7 実験概念図

Fig. 7 Experimental scheme.

日の午前、午後、合計8回行った。

(2) 被験者

被験者は公募による女子24名を用い、正当な報酬を支払った。曝露時間は3時間とし、着衣は上下別の下着、Tシャツ、ストッキング、長袖シャツ、スカート、トレーナーの同一被服とした。また、実験には被験者の心理的側面が含まれるので、本実験関係者は被験者として使用しないようにした。実験中、被験者には読み書きなどの軽事務作業をしてもらい、代謝量は1.2 metと推定される。図8にユニホーム着衣後の被験者および実験風景を示す。被験者の着衣は、お茶の水女子大学のサーマルマネキンにより測定した結果0.67 cloであった。今回の実験は、上下温度分布のある室内での下肢の“冷え”に着目したため、特に被験者を女性に絞り、スカートを着用させた。表1に被験者の体軀などのデータを示す。被験者はすべて女子大学生で

図8 ユニホーム着衣後の被験者

Fig. 8 Subject during the experimental session.

表1 被験者の体軀などのデータ

Tab.1 Anthoropometric data for the subjects.

Group	College-age
Sex	Female
Number	24
Age (ys.)	20.5±1.3*
Height (m)	1.58±0.041
Weight (kg)	49.9±3.0
Body surface Area (m ²)**	1.50±0.06
Ponderal Index (kg ^{0.33} ・m ⁻¹)	2.30±0.05

* Standard Deviation.

** Calculated by Takahira's Equation $A=72.46 W^{0.425} \cdot H^{0.725}$

あり、平均年齢は20.5歳であった。健康な被験者のみが実験に参加した。実験開始前に腋下温を測定し37℃以上の者は実験に参加させないようにした。1回の実験において被験者3名を曝露した。

(3) 測定項目および測定方法

図9に実験手順を示す。測定項目は①空調学会温冷感小委員会案に基づく温熱環境調査⁷⁾、②体温(腋下温)、③温冷感・快不快感申告、④室内空気温度、室内表面温度、被験者の皮膚温度、PMV、平均ふく射温度、供給電力量である。被験者による温冷感、快不快感、unacceptabilityの申告は、入室後55分後より5分ごとに行った。また、入室時から5分ごとに室温、室内表面温度、被験者の皮膚温度、PMV、平均ふく射温度、供給電力量の測定を行った。PMV、平均ふく射温

度、気流速度は、被験者の座っていない座席の床上60cmの位置で測定した。

3-2. 実験結果

図10に実験に用いた温冷感申告スケールを示す。図中に示したカテゴリー尺度の中間申告も許した。実験中、温風暖房器およびパーソナルふく射パネルに供給する電力量を4段階に変化させたため、温冷感申告の解析は実験開始から55、60分後、その後の各設定変更から35、40分後のデータを用い、合計192データで行った。

図11、12に2月2日午前および午後の外気温度、温風暖房器およびパーソナルふく射パネル4枚への供給電力量、床上60cmの位置で測定したPMV値(設定:0.8 clo, 1.2 met)の経時変化を示す。外気温度は毎日異なるため、典型的な2月2日の実験結果を示した。午前中の実験では外気温度は上昇していく傾向にあり、午後の実験では下降する傾向にある。しかし、測定したPMVは午前、午後両方の実験を通して上昇している。これは、ふく射パネルに投入する電力量の割合を高くすると、同じ電力消費量であるにもかかわらず、PMVも上昇していくことを示している。図中の○印は3人の被験者の温冷感申告の平均値である。平均温冷感申告値も、測定したPMV同様、ふく射パネルに供給される電力量の割合が増えるに従って上昇している。

表2に全被験者の平均温冷感申告値を示す。4日間

図9 実験手順

Fig.9 Experimental procedure.

図10 実験に用いた温冷感申告スケール

Fig.10 Thermal sensation scale for experiment.

図 11 2月2日午前の外気温度、温風暖房器およびパーソナルふく射パネルのエネルギー消費量、床上60 cmの位置で測定したPMV値（設定：0.8 clo, 1.2 met）の経時変化

Fig. 11 Durative changes of ambient air temperature, energy consumption, PMV (0.8 clo, 1.2 met) at 60 cm above the floor on Feb. 2nd in the morning.

図 12 2月2日午後の外気温度、温風暖房器およびパーソナルふく射パネルのエネルギー消費量、床上60 cmの位置で測定したPMV値（設定：0.8 clo, 1.2 met）の経時変化

Fig. 12 Durative changes of ambient air temperature, energy consumption, PMV (0.8 clo, 1.2 met) at 60 cm above the floor on Feb. 2nd in the afternoon.

の外気温は異なるが、ここでは午前、午後に分けて平均値を示した。ふく射パネルに供給する電力量割合を増すと、平均温冷感申告は上昇する傾向にある。

表3に実験中の床上60 cmで測定した気流速度の平均値を示す。パネルへの電力供給量が720 Wのときにパネル表面温度は60°C近くになり、上昇気流が生じている。気流速度が0.15 m/sを超えており、被験者にドラフトを生じさせる可能性がある³⁾。

図13に、温冷感の6要素を含むModified Temperature (MT)^{8,9)}と温冷感申告の関係を示す。MTは被験者が座っていない位置での温熱環境測定結果より計算した。図中では申告結果をタイプ別に示した。図中の直線は最小二乗法による回帰直線、点線は空気温度と平均ふく射温度が等しい環境における被験者実験から求めた冬季日本人の回帰直線である¹⁰⁾。

表4に体のどこかが“寒く感じる”と答えた人の割

表2 被験者の平均温冷感申告値

Tab. 2 Average thermal sensation votes.

Time (min)	55, 60 Type 1	95, 100 Type 2	135, 140 Type 3	175, 180 Type 4
AM	-0.46 (tp=20.6°C)	-0.17 (tp=34.9°C)	0.07 (tp=47.6°C)	0.47 (tp=58.9°C)
PM	-0.03 (tp=22.3°C)	0.24 (tp=36.6°C)	0.42 (tp=48.8°C)	0.39 (tp=59.4°C)
Mean value	-0.24 (tp=21.4°C)	0.04 (tp=35.8°C)	0.25 (tp=48.2°C)	0.43 (tp=59.1°C)

tp : panel surface temperature.

表3 床上60 cmにおける平均気流速度

Tab. 3 Mean air velocity at 60 cm above the floor level.

Warm air	720 W	480 W	240 W	0 W
Radiator	0 W	240 W	480 W	720 W
Mean air velocity	0.11 m/s	0.12 m/s	0.13 m/s	0.26 m/s

図 13 Modified temperature (MT) と温冷感申告の関係

Fig. 13 Relationship between modified temperature and thermal sensation.

合を示す。被験者は体のどこかが寒く感じますか、暑く感じますかと質問され、その部位を答えた。ふく射パネルによる暖房方式により局部温冷感は徐々に解消されていくことがわかる。また、体の冷えを訴える人のほとんどは“下肢の冷え”を訴えていることも、実験により確認された。

3-3. 考 察

実験結果からわかるように、室内に投入された暖房用エネルギーが同じであっても、パーソナルふく射パネルを併用すると温冷感申告が増加し、下肢の冷えを解消する効果があった。しかし、環境測定、被験者実験にみられるように、ふく射パネル表面温度が高くなると気流速度が増加し、ドラフト、ふく射の不均一などの局部温冷感による不快感を生じる可能性がある。

従来、この種のパーソナルふく射パネルは、他の暖房装置と併用されるのではなく、単体で人体が熱的中立状態を得られるように意図したものが多かった。し

かし、その場合にはパネル表面温度は高く設定されることになり、上昇気流による不快感が生じる可能性がある。今後のオフィス空間では、パネル表面温度が高温にならないように注意し、他の暖房方式との併用によって建物全体のエネルギー消費量を増大させないように、快適な居住空間を形成することが必要であると考えられる。

また、被験者実験の結果は冬季における日本人の快適直線とほぼ一致し、ふく射パネルによる暖房への依存度が高くなるにつれ、MT も温冷感申告も高くなった。しかし、その傾きは冬季の日本人のものよりも多少急になっていた。この理由として次のことが考えられる。

パネル表面温度が高くなると、全身温冷感は部分的に着衣量の低い脚部の温冷感に左右される。

気流の増加により、タイプ 4 の MT がタイプ 3 の MT よりも低く計算されているが、この気流はパネルからの対流成分の上昇気流であり、PMV = 0 付近での

表 4 体のどこかが“寒く感じる”と答えた被験者の割合

Tab. 4 Percentage of subjects who felt cold at the body.

Time(min)	55, 60	95, 100	135, 140	175, 180
Warm air	720 W	480 W	240 W	0 W
Radiator	0 W	240 W	480 W	720 W
AM	79.2 % (tp=20.6°C)	70.8 % (tp=34.9°C)	58.3 % (tp=47.6°C)	45.8 % (tp=58.9°C)
PM	66.7 % (tp=22.3°C)	33.3 % (tp=36.6°C)	16.7 % (tp=48.8°C)	37.5 % (tp=59.4°C)
Mean value	72.9 % (tp=21.4°C)	52.1 % (tp=35.8°C)	37.5 % (tp=48.2°C)	41.7 % (tp=59.1°C)

tp : mean panel surface temperature.

熱的中立付近での暖かい非等温気流の増加は、温冷感申告の低下には直接結びついていないと考えられる。非等温気流の体感に及ぼす影響については、今後さらに研究が必要である。

4. まとめ

- (1) パーソナルふく射パネル暖房は温風暖房に比べて上下温度分布が生じにくく、居住域空気温度は温風暖房時よりも2～2.5℃程度高かった。ふく射パネルを用いる暖房は上下温度分布、エネルギー消費量の点で有効性をもつと考えられる。
- (2) パーソナルふく射パネルは下肢の冷えを解消する効果がある。しかし、パネル表面温度が高くなると気流速度が増加し、ドラフト、ふく射の不均一などの局部温冷感による不快感を生じる可能性がある。
- (3) パーソナルふく射パネルの使用にあたっては、パネル表面温度が高温にならないように注意し、他の暖房方式との併用によって、より快適な居住空間を形成することが必要である。

謝 辞

本研究にご協力いただいた早稲田大学理工学部名誉教授 井上宇市先生、当時、早稲田大学理工学部大学院生 藤野健治君、秋元孝之君、岩下剛君、田宮建司君に感謝いたします。なお、本研究は昭和63年度、平成元年度文部省科学研究費補助金試験研究（研究代表者：木村建一、63850130）、早稲田大学理工学研究so暖房研究会（研究代表者：井上宇市）の補助による。

参考文献

- 1) Fanger, P. O.: Thermal Comfort, Danish Technical Press, 1970.
- 2) Gagge, A. P., Nishi, Y., Gonzales, R. R.: Standard Effective Temperature—A Single Temperature Index of Temperature Sensation and Thermal Discomfort, Proc. of the CIB Commission W45 (Human Requirements) Symposium, Thermal Comfort and Moderate Heat Stress, Building Research Station, 229～250, 1973.
- 3) 木村建一, 井上宇市, 田辺新一, 秋元孝之, 藤野健治, 岩下 剛, 田宮建司: 低温ふく射暖房, 温風暖房, 床暖房の快適性とエネルギー消費量に関する研究(その1, 2, 3), 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, 325～336, 1988.
- 4) 成瀬哲生: 人間-熱環境系, 第5章 現場実態の例 事務所, 日刊工業新聞社, 273～276, 1989.
- 5) McIntyre, D. A.: The Thermal Radiation Field, Building Science, Vol. 9, 247～262, 1974.
- 6) ISO 7730: Moderate Thermal Environments Determination of the PMV and PPD Indices and Specification of the Conditions for Thermal Comfort, 1984.
- 7) 空気調和・衛生工学会温冷感小委員会編: 温冷感に関する調査方法, 空気調和・衛生工学, 58(8), 67～74, 1979.
- 8) Tanabe, S., Kimura, K., Hara, T.: Thermal Comfort Requirements during the Summer Season in Japan, ASHRAE Trans., Vol. 93, Part I, 564～577, 1987.
- 9) 田辺新一, 木村建一: 夏季の成人の温冷感と快不快感に関する試行実験, 日本建築学会計画系論文報告集, 第368号, 31～41, 1986.
- 10) Tanabe, S.: Thermal Comfort Requirements of Sedentary College-Age Subjects during the Winter Season in Japan, J. Home Econ. Jpn., 41(5), 437～445, 1990.