

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：17201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420584

研究課題名(和文)省エネルギー型局所放射暖房システムの開発

研究課題名(英文)Development of energy saving type radiant heating system

研究代表者

小島 昌一 (KOJIMA, SHOICHI)

佐賀大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：90305029

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：指向性の強い熱放射により効率的なタスク暖房を実現することを試みた。まず、放射暖房機器の放熱実験により放射の指向性を把握した。次に、追加の反射板を放熱方向に長くし、反射率の高い材料を用いることで指向性を高められることを確認した。また、数値シミュレーションにより、タスク暖房には放射の指向性が強い方が適しているを明らかにした。一方で、最も熱的快適性が得られる受熱部位を被験者実験により検討した。アンケートによる調査の結果、男性は下半身や胸部を、女性は下腿を温めた時が快適となった。しかし、心拍数に基づくストレス指数による評価では、腹部等への照射が最も快適感が得られる結果となった。

研究成果の概要(英文)：We tried to realize efficient task heating by radiant heating with strong directivity. First, radiation directivity of radiant heating appliances was used to ascertain the radiation directivity. Next, it was confirmed that the directivity can be increased by making the additional reflector longer in the heat radiation direction and using a material with high reflectance. Moreover, by numerical simulation, it is revealed that it is better to have strong directivity of radiation for task heating. On the other hand, the heat receiving part which can obtain the most thermal comfort was examined by human subject experiment. As a result of the questionnaire survey, it became comfortable for men to warm the lower body and chest and women to warm the lower legs. However, in the evaluation by the stress index based on the heart rate, the most comfortable feeling was obtained by irradiation on the abdomen etc.

研究分野：建築環境工学

キーワード：放射暖房 放射の指向性 熱的快適性 タスク暖房 グローブ温度 ストレス指数

1. 研究開始当初の背景

オフィス空調においては、各要素機器の高性能化とともに、機器の選定・運転方法の最適化により、エネルギー消費の削減と在室者の熱的快適性のさらなる向上が望まれる。例えば従来から指摘されている、オフィスの空調エネルギーの室内混合損失の問題がある。申請者も以前からこの問題に取り組んでおり、実際のオフィスビルにおいて実測により室内混合損失の発生状況を把握している。室内混合損失は、冬季あるいは春季・秋季において、一つのオフィス空間内のペリメータゾーン（窓付近の外周部、以降ペリメータ）では暖房、インテリアゾーン（窓から離れた内部、以降インテリア）では冷房という冷暖房併存状態時に発生するエネルギー損失の問題である。

室内混合損失の低減策としては、空調制御用温度センサ設置位置と設定温度の最適化、ペリメータレス化がこれまでの研究から考えられる。また、現在はこれらに暖房時の熱的快適性の改善を加えて、冷暖房併存時や暖房時の空調エネルギー消費量低減と室内熱環境の改善を実現するために、対流暖房の代替として放射暖房の効果的な使用方法を開発すべきであると考えている。また、それに伴って空調制御も単なる室温を制御対象にするのではなく、放射の影響も考慮した在室者の体感温度を対象とすべきであると考えた。

ヒートポンプを利用した対流式暖冷房の場合、現在一般的にオフィス空調で使われるシステムとしては、ビルマルチ方式やヒートポンプ等で発生させた冷温水による暖冷房が挙げられる。しかし、これらの方式では、ヒートポンプ等の熱源機器自身の高効率化は期待できるものの、二次側機器（室側）から空調対象室への放熱に関する性能を向上させることは、加熱された空気を在室者の近傍に適切に分配することの困難さから、これまで以上の性能向上を期待するのは困難であると考えられる。

本研究が開発を目指す放射暖房システムは、次の2点の特徴がある。

(1) 指向性が強い放射暖房

一般的に放熱面からの放射は拡散放射である。しかし、放熱部が高温で反射材料との組合せによりその放射に強い指向性がある場合、暖房が不要な空間や部位への放熱がなくなり、放熱対象への効率的に放射暖房を行うことができる。既存のシーズヒータについても、放射の指向性の強さを確認している。本研究では、放射の指向性が強くなる様に放熱源、放熱面周囲の反射板の材料および形状を検討する。

(2) 採暖のようなタスク暖房

高温の放熱面から熱放射を在室者が受熱することにより、昔の囲炉裏端で暖を採る様に暖まる快感が期待できると考えられる。一種のタスク暖房なので、インテリア側の空調

制御系との協調により在室者の熱的快適性に応じた放熱量の調整が可能となる。

以上の2点により、放熱面から放熱対象への放射が効率的に行われ、更にはこれまでの対流式暖房にはない暖を採るという熱的な快適感を得ることが期待できると考えられる。また、放射暖房の制御には本研究で開発する体感温度制御を使用する。従来の対流式暖房に空気温度制御を行っていたことと対応して、本研究において放射暖房に対して小型グローブ温度計による放射を考慮した制御を行うことは、極めて合理的な空調制御であると考えている。

本研究の放射暖房機器は、当面は実在するシーズヒータの様な高温による発熱が可能なものを想定している。シーズ線による発熱は単に電力を熱に変換することであり、機器の効率はヒートポンプ暖房機器の足下にも及ばない。しかし、暖房機器から放熱対象まで効果的に放熱することにより、暖房の総合的な効率を高めることを目指している点が、従来の機器効率の向上に関する着眼点と大きく異なる点である。

また、シーズヒータによる放射暖房の他に、ミラー体型のハロゲンヒータやカーボンファイバーヒータ等の更に高温の熱放射が可能な熱放射源を放射暖房機器に組み込むことにより、指向性が強い放射暖房機器を開発できることが考えられる。既存の放射暖房機器より指向性が強い放射が可能となれば、実質的なエネルギー利用効率が高くなり、従来の対流式暖房よりエネルギー消費量の点でも有利になることが期待できる。

2. 研究の目的

(1) 強い指向性を有する放射暖房システムの開発

ペリメータゾーンにおいて放射暖房を採用することにより、ペリメータ空調機吹き出し気流のインテリアゾーンへの流出がなくなり、室内混合損失が防止出来ることを実証する。また、上下温度分布の減少や窓面付近からの冷放射を放射暖房により相殺し、在室者の熱的快適性を向上させる放射暖房システムを開発する。放射暖房機器については、ハロゲンヒータ、カーボンファイバーヒータ、シーズヒータ等の比較的高温の発熱源からの熱放射を、効果的に指向性を持たせる反射材の設置条件を解明する。

(2) 体感温度制御方法の開発

在室者の体感温度を放射暖房システムの制御対象として組み込むことにより、在室者の熱的快適性を満足しつつ、既存の対流暖房に比べても総合的なエネルギー消費の観点から省エネルギー的に劣らない制御方法を開発する。また、制御用センサとして使用する小型グローブ温度計の寸法と形状の検討ならびに寒冷状態から暖房状態への変動時の動特性を解明する。さらに、人体におけるグローブ温度検知の最適部位や、熱放射照射

の最適部位を在室者の熱的快適性の観点から検討する。

3. 研究の方法

(1) 既存の放射暖房機器の熱放射の指向性の解明と指向性の強化

現在入手可能な放射暖房機器の放射の指向性を把握するために、以下の実験を実施する。恒温室内に放射暖房機器を設置し、小型グローブ温度計によりグローブ温度を測定する。小型グローブ温度計は放熱面に対して平行に並べ水平方向10×垂直方向5×奥行き方向6の合計300点でグローブ温度の分布を測定する。測定したグローブ温度の分布から、放射暖房機器の放射の指向性を推定する。放射暖房機器の放射の指向性を変更するために、暖房機の側面ならびに上下面にアルミ板を取り付け、角度を調整して再度グローブ温度の分布を測定する。

以上の測定結果から推定した放射暖房機器の放射の指向性データを基にして、指向性の観点から必要な改良のポイントを抽出し、後の放射暖房機器の新規開発の方針に供する。なお、小型グローブ温度計はピンポン球に黒体塗料を塗布したものをグローブ球として、それにT型熱電対を挿入してデータロガーに接続して使用する。

実測による放射暖房機器の放射の指向性の結果を参考にして、各種反射板の最適な取り付け位置を検討し既存の放射暖房機器より放射の指向性が強い新たな放射暖房機器を作製する。

(2) 放射の指向性を強化した放射暖房機器の数値モデル化とシミュレーションによるケーススタディ

前述の結果を基に開発した放射暖房機器の放射の指向性を把握し、それを数値モデル化する。最終的には、後述のSET*（計算方法改良版）と放射暖房機器の放射の指向性を考慮した放射伝熱計算をゾーンモデル（室内空気を複数のゾーンに分割する計算モデル）に組み込んだ室温変動計算プログラムを作成する。このプログラムにより、在室者の体感温度（例えば標準新有効温度SET*）を制御対象とした室温変動計算および空調エネルギーシミュレーションを行い、ペリメータ放射暖房による室内混合損失防止策を検討する。シミュレーションによる検討項目は以下の通りである。

- ・放射暖房機器の配置個所、台数、放熱温度、放熱面積最適化
- ・制御用グローブ温度計の設置位置・数量の最適化

(3) 熱的快適性に基づく最適な熱放射照射部位の解明

放射暖房時に在室者が効果的に暖まることが出来る熱放射の照射部位について検討する。恒温室において放射暖房機器からの放

熱を被験者に曝露して、様々な部位への照射による体感を推定する。この実験では熱放射の照射部位の違いにより放射受熱時の体感の違いを把握するために、皮膚表面各部に熱電対を貼り付けて表面温度を測定する。また、皮膚表面および着衣表面温度分布を面的に把握するために赤外線カメラにより温度分布を測定する。これらの測定と合わせて、被験者の快適性と温冷感に関するアンケートを実施する。また、心拍数に基づいたストレス指数による評価により、最適な熱放射照射位置を提案する。

4. 研究成果

(1) 既存の放射暖房機器の熱放射の指向性の解明およびシミュレーションによるケーススタディ

市販の放射暖房機器の放射の指向性を把握するために、十分に広い室内空間（佐賀大学理工学部大講義室）に放射暖房機器を設置し、小型グローブ温度計によりグローブ温度を測定した。実験期間中は空調機により常時20℃設定とし、放射実験時のみ空調機を止めて吹出し気流の影響を受けないようにした。また日射を防ぐために遮光ブラインドをした。測定機器には小型グローブ球を用い、放射面に対して水平方向に3点、奥行方向に4点、高さ方向に5点の計60点を設け測定した。また、市販の放射暖房機器の通常の熱放射だけでなく、より指向性を強めるために反射板を用いた場合についても実験を行った。以上の測定結果を基に、各測定条件の熱放射のモデル化を行った結果を示す。

放射の指向性には反射板の影響が大きく作用し、反射板の長さが長くなるにつれ放射の指向性が高まる。放射の指向性を高める効果は反射率の高い材料を用いた場合の方が高い。放射発散度推定式によるモデル化はほとんど相違なく再現できているが、高温領域を中心に再現を行ったため放熱面から離れた位置では多少再現率が低い。

次にこれらの結果を検証し、グローブ温度の測定精度を向上するための工夫を施し、再度既存の放射暖房機器の熱放射の指向性の解明を試みた。測定精度の向上のために、放熱器と測定点の関係を見直し、測定点位置の変更、測定点間隔を狭くすることで局所的な温度分を測定できるように変更した。また、更に反射板の出口側を狭めた反射装置による実験を行った。その結果、新しい反射装置により、熱放射のより強い指向性が得られることを解明した。

これらの結果を基に、反射板により熱放射の指向性を強めた場合の放熱特性を推定する計算モデルを作成した。作成した計算モデルを用いて数値シミュレーションを実施した。その結果、タスク暖房には熱放射の指向性が強い放熱方法が適しているが、単に快適域を広げるだけであれば床暖房が他の放射暖房に比べて最も省エネルギーとなること

も判明した。

(2)熱放射照射の最適な人体部位の解明

気温が安定した室内において、放射暖房機器からの放熱を被験者の様々な部位へ照射した。また、人体各部に熱電対を貼り付けた表面温度の測定と、被験者の快適性と温冷感に関するアンケートを実施した。定常熱環境においては、男性は下半身や胸部を暖めたとき、女性は腹部を暖めた時が快適となった。不均一放射場（近くに冷放射熱源あり）においては、男性は腹部や腰部を暖めたとき、女性は下腿を暖めたときが快適となった。また、冷放射の影響を受けにくい場合、男性は腹部や胸部を暖めたとき、女性は腹部や胸部を暖めたときが快適となった。快適な照射部位が男女で異なるのは、筋肉や脂肪の量の違いによるものであるといえる。

次に、心拍数の変動に基づくストレス指数の変動で被験者の快適性を推定する方法を試みた。その結果、前のアンケートによる結果とは違い、男女の性差はあるものの腹部等への熱放射の照射が最も快適感が得られる結果となった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計3件)

Kazuho Kurisaki, Erika Oda, Shoichi Kojima, Influence on Sensible Temperature of the Thermal Radiation with the Radiant Heating Apparatus in the Room, International Graduate Research Conference 2015, ST, 2015, pp.259-262

Shigeru Imai and Shoichi Kojima, Comparison of Thermal Comfort Between Radiant Heating and Convective Heating in Heating Room, Journal of Engineering, Project, and Production Management, vol.5, No.1, 2015, pp.26-35

Shigeru Imai and Shoichi Kojima, Examination of Optimal Operation of Radiant Heating in Consideration of Directivity and Convective Heating, The Yellow Sea Rim International Exchange Meeting on Building Environment and Energy 2014, 2014, pp.261-267

[学会発表](計3件)

今井 滋, 小島昌一, 指向性を考慮した放射暖房と対流暖房の最適運用方法の検討, 空気調和・衛生工学会九州支部研究報告, 第21号, 2014, pp.53-56

今井滋, 小島昌一, 指向性を考慮した放射暖房の最適運用方法の検討, 日本建築学会九州支部研究報告, 第54号・2, 2015, pp.157-160

栗崎和歩, 小島昌一, 指向性を考慮した放射暖房機器の放熱特性に関する検討, 日本建築学会九州支部研究報告, 第55号・2, 2016, pp.417-420

6. 研究組織

(1)研究代表者

小島 昌一 (KOJIMA, Shoichi)
佐賀大学大学院工学系研究科・教授
研究者番号: 90305029