

令和 2 年 6 月 9 日現在

機関番号：32678

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06680

研究課題名(和文) 高発熱機器からの放射熱量と対流熱量の測定法とその割合に適した換気・空調方式

研究課題名(英文) Measurement Method of Radiative Heat Emitted from High-temperature Equipment and Appropriate HVAC System

研究代表者

近藤 靖史 (KONDO, Yasushi)

東京都市大学・工学部・教授

研究者番号：20267339

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：工場や業務用厨房では、内部での発熱量が多く、表面が高温となる機器や強い熱上昇気流を形成する機器が多く存在する。これらが温熱環境の悪化の原因となっている。高発熱機器からは放射熱伝達と対流熱伝達によって周囲に熱が放散される。放射熱伝達による放散熱量「放射熱量」を測定する方法を検討した。

本研究では高発熱機器の代表例として、数種の業務用調理機器を取り上げ、適切な精度を持った「放射熱量」の測定法を開発した。また、本研究で開発する放射熱成分と対流熱成分の測定法を各種の調理機器に適用し、測定結果を蓄積することにより、調理機器の放熱特性にあわせた熱除去方法、すなわち、空調・換気システムを構築することができる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在は業務用調理機器などの高発熱機器からの放射熱量と対流熱量の測定法が明確ではない。ASHRAE(米国暖房冷凍空調学会)が示している方法には多くの誤差が含まれると思われる。これに対し、本研究を進め、調理機器からの放射熱量と対流熱量の測定法を開発することで調理機器に対する空調負荷の算定法を確立することができる。また、本研究で開発した測定法は業務用厨房だけでなく、工場などにある高発熱機器に適用できるため、社会的意義が大きい。

研究成果の概要(英文)：The inner heat load is remarkably high in factories and commercial kitchens, and high temperature equipment makes emits radiation and thermal plume above it. The high temperature equipment causes thermal problem of workers. In this research, the measurement method of radiative heat was studied.

Several kinds of cooking apparatuses for commercial kitchens are treated as a masterpiece of high temperature equipment and measurement method is developed with appropriate accuracy. The results can be used to find the proper method of heat removal for various high temperature equipment.

研究分野：建築環境工学

キーワード：高温発熱機器 放射熱 業務用厨房 工場 室内温熱環境

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

建築環境・設備工学における主な課題の一つは、「健康で快適な室内環境を効率的に形成する方法」を達成することである。特に、空調・換気に費やすエネルギーが多く、適切な空調・換気計画を行うことが省エネルギー・省CO₂を考える上で非常に重要である。このような観点から空調・換気に関して多くの研究がなされている。しかし、国内においては、住宅やオフィスなどの一般環境に対する研究がほとんどであり、工場などの労働環境に関する研究は少ない。本研究では工場やレストランの厨房(以降、業務用厨房)などの労働環境、特に温熱環境の改善と省エネルギーの達成を目的とする。

工場や業務用厨房の特徴の一つとして、内部での発熱量が多く、表面が高温となる機器や強い熱上昇気流を形成する機器(以降、高発熱機器)が多く存在することが挙げられる。また、これらが温熱環境の悪化の原因となっている。高発熱機器からは放射熱伝達と対流熱伝達によって周囲に熱が放散される。また、機器によっては高温の水蒸気を放出する機器もあり、この水蒸気は対流により拡散する。ここで、放射熱伝達による放散熱量を「放射熱量」と、対流熱伝達による放散熱量を「対流顕熱量」と、対流による水蒸気の移流・拡散に伴う熱量を「対流潜熱量」と呼ぶこととする。

本研究では高発熱機器の代表例として、数種の業務用調理機器を取り上げ、適切な精度を持った「放射熱量」の測定法を開発する。また、「放射熱量」に対する熱除去の方法と、「対流顕熱量 + 対流潜熱量」に対する熱除去の方法は異なるため、調理機器の放熱特性によって適切な熱除去システムが異なる。したがって、本研究で開発する放射熱成分と対流熱成分の測定法を各種の調理機器に適用し、測定結果を蓄積することにより、調理機器の放熱特性にあわせた熱除去方法、すなわち、空調・換気システムを構築することができる。

2. 研究の目的

工場や業務用厨房には、発熱量が大きい機器が存在し、作業空間の温熱環境悪化の原因となっている。省エネルギーや作業者の快適性維持の観点から高発熱機器からの熱を効率的に除去することが重要である。高発熱機器は 対流熱量が大きい機器と 放射熱量が大きい機器に大別でき、 については局所排気装置による熱除去が効率的であるが、 については効率的ではない。すなわち、効率的な熱除去を行うためには、高発熱機器からの放射熱量と対流熱量を知る必要がある。欧米ではこれらに着目した研究があるが、日本では見られなかった。また、欧米の研究で示されている放射熱量の測定法には精度に課題があると考えられる。本研究では高発熱機器からの放射熱量の測定法を開発し、機器の放熱特性に応じた空調・換気方式を提案につなげる。

3. 研究の方法

2017年度は、東京都市大学が所有する実験室内中央に高発熱機器として業務用のグリドル(鉄板焼き器)を設置し、グリドルから周囲物体表面への放射熱量を測定する。4.0m×4.0m×2.5mhの実験室に置換換気用給気口を2か所設け、排気フードを天井中央部に設ける。この実験室内に断熱材の壁を設け(以降、内壁と呼ぶ)、形態係数が容易に求められるように2.5m×2.5m×2.5mの単純な立方体の空間を作る。この内壁内側空間の表面には放射率が既知である黒体塗料を塗る。また、内壁の下部に0.1mの隙間を開け、この隙間から内壁内側空間に0.1m/s程度の低風速で給気することにより内壁内側空間を静穏な状態にし、グリドル上の熱上昇流に対する排気フードの捕集率を100%にする。この状態で、グリドルおよび内壁内側空間の表面温度を測定し、グリドルからの放射熱量を算出するためのデータを

取得する。内壁内側空間の表面は 200 点程度を熱電対により測定し、温度分布が大きいグリドル表面はサーモカメラにより測定する。

また、形状が複雑な高発熱機器と床・壁・天井などの周囲物体との放射熱授受を計算するために必要となる形態係数をモンテル口法により求める。さらに、複数回の相互反射を考慮した形態係数(吸収係数)を算出し、放射熱授受の詳細を検討する。

2018 年度には 2017 年度の成果を基にして、測定結果に矛盾がないことを確認した。特に、熱収支が合っているかを検討した。また、実験室内での簡易的な測定方法を検討し、さらに工場や厨房などの現場測定法について検討した。2017 年度の詳細測定結果と今年度の簡易測定結果とを比較した。電気グリドルとガスグリドルの放射熱量の測定結果では、簡易測定法による結果は 2017 年度の詳細測定結果に比べ、約 10%の差異はあるものの概ね対応する値が得られた。

4. 研究成果

2017 年度は先ず ASHRAE の放射熱量の測定方法に関する問題点を整理した。すなわち、ASHRAE Research Project 1362 待機状態のフード付き機器の熱取得の値は概算値でしかないと記述されている。その理由の一つは放射熱が間接的な手法で測定されていることである。実験室では、調理機器からの放射熱は実験室の壁体に当たり壁体の温度を上昇させ、放射熱が対流熱となり、これがフードに捕集される。この状況で算定した放射熱量は実際よりも少なく見積もられてしまう。

次に、放射熱量を直接的に測定する方法を検討した。すなわち、高温発熱機器を設置した実験室において、高温発熱機器と機器を取り囲む物体の表面温度を測定し、放射熱授受の式により放射熱量を算出した。高温発熱機器として 4 種類の業務用調理機器(電気グリドル、ガスグリドル、電気フライヤ、ガスフライヤ)を測定対象とした。4.0m×4.0m×2.5m の実験室内の側面下部 2 か所に給気口を、天井中央部に排気フードを設ける。実験室内に断熱材(厚さ 45mm、 $\lambda=0.021\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)を用いて内壁を設け、2.5m×2.5m×2.5m の空間を作り、内壁の下部に 0.1m の隙間をあける。また、内壁の内側空間の天井・床・壁を放射率 0.94 の艶消し黒色ペイント(黒体スプレーTA410KS)で仕上げた。

実験手順は以下である。内壁内側空間の中央に高温発熱機器を設置する。実験室側面下部の給気口から 25 L/s 、1080 m^3/h の空気を給気する。その空気は内壁下部を介して排気フードから排気される。T 型熱電対で測定した給気温度、排気温度と風量より算出した顕熱量と電気やガスの消費量から算出した顕熱発熱量を比較して熱収支を確認する。給気温度は給気口 2 点、内壁下部 4 点の測定値の平均を、排気温度は排気フード内 9 点の測定値の平均を用いた。電気グリドルとガスフライヤと電気フライヤは周期的に運転と停止を繰り返すため、運転時間と停止時間を合わせて一周期とし、周期毎に熱収支を確認した。T 型熱電対を内壁 4 面に各 23 点、床に 17 点、天井に 12 点設置した。調理機器表面温度は赤外線サーモグラフィにより測定する。電気グリドルは運転が安定した周期的状態となった後に測定を行う。熱画像の撮影はグリドル各面に対し 1 周期分(約 600 秒)を 30 秒間隔で行う。表面の汚れなどにより熱画像の結果に分布があったグリドルの背面、側面、前面は正確に表面温度を測定するためにグリドルの表面に放射率 0.94 の黒体スプレーを吹いたアルミテープ(以下黒体アルミテープ)を一部に貼り、赤外線サーモグラフィで撮影する。熱画像の黒体アルミテープを貼りつけた箇所を一周期分面毎に平均化し、表面温度を求める。その後黒体アルミテープを剥がして撮影した熱画像と比較し放射率を決定する。温度が一樣なグリドルの上面は設置した K 型熱電対の温度測定値 1 周期分を平均化し表面温度を

求め、熱画像と比較して放射率 を決定する。熱画像の撮影はフライヤ各面に対し1周期分(約480秒)を30秒間隔で行う。グリドルと同様にフライヤの背面、側面、前面は表面に放射率0.94の黒体アルミテープを一部に貼り、赤外線サーモグラフィで撮影する。熱画像の黒体アルミテープを貼りつけた箇所を一周期分面毎に平均化し、表面温度を求める。その後黒体アルミテープを剥がして撮影した熱画像と比較し放射率 を決定する。

次に、放射熱を算定する際に必要となる形態係数やGebhartの吸収係数を算出し、放射熱量を求める。高温発熱機器を設置した実験室において、高温発熱機器と機器を取り囲む物体の表面温度を測定し、次式により、放射熱量を算出する。

$$Q_{1 \rightarrow 2} = \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot \sigma \cdot \varphi_{12} \cdot (T_1^4 - T_2^4) \cdot A_1 \quad (1)$$

ここで、 $Q_{1 \rightarrow 2}$:面1から面2への放射熱量[W]、 ε :放射率[-]、 σ :ステファン・ボルツマン定数(=5.67×10⁻⁸W/(m²・K⁴))、 φ_{12} :形態係数[-]、 T :絶対温度[K]、 A_1 :面1の面積[m²]。ただし、式(1)では各面間の相互反射を考慮していない。そこで、本研究ではGebhart(1959)の吸収係数を用いて相互反射を考慮する。なお、本研究では形態係数はモンテカルロ法(ソフトウェアクレイドル社製SCRYU/Tetra)を用いて算出する。以上のように、2017年度の研究では高温発熱機器と周囲の壁との形態係数と吸収係数を計算し、機器の表面温度の測定結果から放射熱量を算出した。

2018年度の研究では実験室内での簡易的な測定方法を検討した。東京都市大学建築学科棟1階環境実験場内の4.0m×4.0m×2.5mの実験室で測定する。実験室内の側面下部2か所に給気口を設け、排気フードを天井中央部に設ける。なお、排気フードによる対流熱の捕集を確実にするため、前年度に比べ、グリドルを実験室の中心から入り口側に0.35m移動させている。捕集状況は煙による可視化により確認した。床・壁それぞれ3×3=9面に分割し、給気口各3点、天井12点、フード4点、合計67点の温度をT型熱電対で測定した。調理機器を運転させ、実験室内の温度が定常状態に達した後、1時間測定を行う。床・壁・天井の表面温度は1時間で平均化した値を放射熱量の計算に用いる。

グリドル高温発熱機器の表面を19面に分割し、機器を囲む上面・側面・下面との形態係数と吸収係数を算出した。2018年度の簡易測定法による結果は2017年度の詳細測定結果に比べ、約10%の差異はあるものの概ね対応する値が得られた。

2019年度の研究では、今までの知見に基づいて厨房現場での放射熱量の測定方法を検討し、業務用厨房ショールームと社員食堂用厨房の2箇所の現場で測定を行った。また、前年度の結果や全天球カメラにより形態係数を求めてより簡易的な測定方法の結果と比較した。以下に得られた知見を整理する。

- (1) ステンレス面では高温の調理機器が映り込むという問題があり、黒体テープを使って対応するなどの調整を行い、現場測定方法を検討した。
- (2) 業務用厨房ショールームでの測定結果は2018年度の実験結果と対応した。
- (3) 全天球カメラによる形態係数の算定法を検討し、これを用いた結果と数値解析でGebhartの吸収係数を用いた結果と比較した。
- (4) 社員食堂用厨房の現場測定結果では全天球カメラによる結果と対応した。
- (5) 調理機器近傍に放射遮蔽板を設置することは厨房内温熱環境の向上や冷房負荷低減に有効である。
- (6) 調理機器以外の床・壁・天井などの温度による放射熱量への影響は比較的小さく、より簡易な測定ではこれらの温度測定を省略できると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 近藤靖史、吉野一、島貫友貴、川添智之
2. 発表標題 高温発熱機器からの放射熱に関する研究 その1 ASHRAEによる高温発熱機器からの放射熱量の測定方法とその課題
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 毛利亮太、近藤靖史、吉野一、島貫友貴、川添智之
2. 発表標題 高温発熱機器からの放射熱に関する研究 その2 高温発熱機器からの放射熱量の測定方法の検討
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川添智之、近藤靖史、吉野一、島貫友貴
2. 発表標題 高温発熱機器からの放射熱に関する研究 その3 高温発熱機器と周囲壁面間の形態係数と吸収係数の解析
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 近藤 靖史、吉野 一、浅輪 泰久、山下 真示
2. 発表標題 高温発熱機器からの放射熱に関する研究 その4 放射熱量の簡易測定方法と現場測定法の検討
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉野 一、近藤 靖史、浅輪 泰久、山下 真示
2. 発表標題 高温発熱機器からの放射熱に関する研究 その5 簡易測定方法と現場測定法による放射熱量の算出結果
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 近藤 靖史、吉野 一、浅輪 泰久、山下 真示
2. 発表標題 高温発熱機器からの放射熱に関する研究 その6 放射熱量の簡易測定方法と現場測定法の検討
3. 学会等名 空気調和・衛生工学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 近藤 靖史、吉野 一、浅輪 泰久、植野 甲史郎
2. 発表標題 高温発熱機器からの放射熱に関する研究 その7 放射熱量の現場測定法の検討および厨房ショールームでの測定結果
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 浅輪 泰久、吉野 一、植野 甲史郎、近藤 靖史
2. 発表標題 高温発熱機器からの放射熱に関する研究 その8 実厨房での測定結果および放射遮蔽板の効果の検討
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 近藤 靖史、吉野 一、浅輪 泰久、植野 甲史郎
2. 発表標題 高温発熱機器からの放射熱に関する研究 その9 放射熱量の現場測定法の検討および測定結果
3. 学会等名 空気調和・衛生工学会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考