

令和 6 年 4 月 18 日現在

機関番号：11501

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14087

研究課題名（和文）ふく射伝熱と対流熱伝達の複合問題の解明と熱中症対策低環境負荷ミスト冷却技術の創成

研究課題名（英文）Coupling Calculation for Radiative and Convective Heat Transfer and Development of Mist Cooling Technology to Prevent Heat Stroke

研究代表者

江目 宏樹（Gonome, Hiroki）

山形大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：80785551

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、ウォーターミストによるふく射熱の遮蔽及び流動場の能動的制御の実現を目的とした。ふく射性媒体の非灰色吸収、非等方散乱特性を記述できるふく射伝熱解析コードを確立し、ウォーターミストが混入した対流-ふく射の複合伝熱解析を行った。ミストの混入が壁近郊での温度の乱流変動を抑制し、ふく射熱伝達の抑制に貢献することを示した。また、ウォーターミストの噴霧実験を行い、ミスト層の水滴の粒度分布測定及びふく射遮蔽性能の実験的評価を行った。ミスト層のふく射遮蔽率は水滴径の依存性をもち、ふく射遮蔽には水滴径を小さくすることがより効果的であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ミスト冷却装置は都市環境技術としての用途のみならず、高温環境が日常の製造現場（製鉄所等）での導入が考えられる。高温環境ではふく射伝熱が支配的になるので、それを防ぐ商品を開発し、過酷な環境での労働負荷を軽減できる可能性がある。また、同じくふく射伝熱が支配的になる環境として火災現場が挙げられる。目に見える炎に加え、目に見えない熱ふく射も消火活動において多大な影響を持つ。この熱ふく射による延焼や火傷等を防ぐ消防設備の実現が望まれており、スプリンクラー等の消火設備に本研究知見を応用することでふく射熱遮断機能も持つ防火設備が実現できる。

研究成果の概要（英文）：The objective of this study was to realize active control of the flow field and shielding of thermal radiation by water mist. A heat transfer analysis code that can describe the non-gray absorption and non-isotropic scattering characteristics of the scattering medium was established, and a combined convection-radiation heat transfer analysis with water mist was performed. It was shown that the inclusion of mist suppresses the turbulent fluctuation of temperature near the wall and contributes to the suppression of the radiative heat transfer. In addition, water mist spraying experiments were conducted to measure the particle size distribution of water droplets in the mist layer and to experimentally evaluate the radiative shielding performance. The results showed that the radiative shielding rate of the mist layer is dependent on the water droplet diameter, and that a smaller droplet diameter is more effective for radiative shielding.

研究分野：ふく射伝熱

キーワード：消防装置 ふく射 ミスト

1. 研究開始当初の背景

東京五輪の開催準備に伴い、環境負荷の低い都市環境サーマルマネジメント技術が注目を集めている。地球温暖化やヒートアイランド現象の影響からか、近年、熱中症の患者数・死者数は増加傾向にあり、「SDGs No.11:包摂的で安全かつ強靱(レジリエント)で持続可能な都市及び人間居住を実現する」の実現のため、有用な熱中症対策の確立は急務である。その中で有効な手段として注目されているのがミスト冷却装置である。ミスト冷却装置は、水を微細な霧の状態にして噴射し、蒸発する際の気化熱の吸収を利用して冷却する装置である。一部、大規模な商業施設などでは導入が進められているが、未だその普及は十分ではない。ミスト冷却装置が抱える問題として以下が挙げられる。

A) 装置が与える冷涼感が十分でない

B) 対流(風)の影響が無視できない

A)に対し、研究代表者は屋外における最も重要な熱源である太陽光ふく射を遮蔽することで、有効な熱中症対策を確立できると考えた。すなわち、ミスト冷却装置の性能向上のため、気化熱のみならずミスト層に太陽光の遮蔽性能を付加することを着想した。まず、ミスト層内のふく射伝熱を理論計算し、ミスト層のスペクトル特性を評価した。そして、最適粒径を同定し、既存のミスト装置の噴霧粒径よりも小さい水滴がふく射遮蔽に有効であることを見出した。しかし、実際の太陽光照射下におけるミスト層のスペクトル熱遮断を評価できておらず、実用化での有用性を確認する必要がある。

B)に対し、研究代表者と共同研究者は、対流の影響によってふく射性媒体である水滴の粒径が変動する可能性を検討するため、ふく射伝熱と対流熱伝達の複合伝熱解析を行った。そこで、空間場におけるふく射の吸収量の違いは対流の駆動力となることを明らかにし、境界層中のふく射性媒体の吸収係数を制御することによって対流場を制御できる可能性を見出した。ふく射性媒体の吸収係数制御は本研究で提案している液滴粒径の制御に対応する。すなわち、ミスト噴霧によるスペクトルふく射駆動の対流制御が可能か(核心をなす学術的「問い」)を明らかにする必要がある。

2. 研究の目的

本研究はミスト冷却装置の性能向上を目指し、散乱性媒体中におけるふく射と対流の複合現象を明らかにし、ミスト層のスペクトル選択性と対流場の同時制御技術の確立を目的とした。ミスト冷却装置はすでに実用化されているが、気化熱のみが考慮され、どれだけ効率よく水を供給するかという散水性能に特化し、設計されてきた。本研究は、ふく射のナノマイクロスケール現象から問題を検討し、それを応用するふく射伝熱制御の実現を目指した。

3. 研究の方法

本研究では、ミスト層のスペクトル選択性と対流場の同時制御技術の確立に取り組んだ。本研究は、数値解析、及び実験を複合的に活用し、研究を遂行した。

ふく射伝熱と対流熱伝達のカップリング解析

本研究ではミストの水粒子直径を一定とし、対流-ふく射の複合伝熱解析を行った。解析領域のアスペクト比は $x : y : z = 4 : 1 : 4$ に設定し、 x 及び z 方向に周期境界条件を適用した。下部の加熱壁温度は 1200K、上部の冷却壁温度は 300K に一定に設定した。解析領域内には吸収-散乱性媒体であるミストが一様分散しており、蒸発は考慮しない。また、計算コスト削減のため、Plank-mean approximation(PMA)により黒体エネルギーが均等になるように4バンドに分割されたウォーターミストのスペクトル特性を使用した。

ふく射性媒体の非灰色吸収、非等方散乱特性を記述できるふく射伝熱解析コードを用いて、精度検証を行った。灰色非等方散乱性媒体を含んだ系のふく射伝熱解析との比較を行った結果、先行研究と概ね一致した結果が得られ、光線数が800本で精度を担保できることを示した。また、Band数が4 Bandsでも高精度のふく射伝熱解析が可能であることを示した。疑似非等方散乱式を適用した場合、HG位相関数のそれとほぼ同じ温度場とふく射熱伝達を示したため、計算コストを大幅に削減できることを示した。

さらに、その結果をもとにウォーターミストが混入した対流-ふく射の複合伝熱解析を行った。ミストの混入が壁近郊での温度の乱流変動を抑制し、ふく射熱伝達の抑制に貢献することを示した。冷却壁近郊でのNusselt数を計算し、ふく射熱伝達特性はミストのある系が、ミストがない系と比べて約27%熱ふく射遮蔽に貢献していることを見出した。

ふく射熱抑制の要因の1つとして水粒子の異方性散乱特性が挙げられる。粒子の散乱特性は粒子が大きいほど前方散乱成分が支配的となり、ふく射熱遮蔽に寄与しない。一方、ミストを用いた系の対流熱伝達特性はミストのない系と比べて2倍以上促進されている。ふく射Nusselt数は減衰係数と幾何学的距離の積で表される光学厚さの増加に伴い減少傾向を示すのに対し、対流Nusselt数は対流伝熱による影響が大きいレイリー数において光学厚さの増加に伴い増加傾

向を示すことが知られている。ウォーターミストの光学厚さを検証したところ、高温場で支配的となる近赤外線領域での光学厚さの違いが大きく、本研究ではミストのふく射熱吸収によって駆動される自然対流が対流熱伝達促進の要因であると考えられる。

水滴径に対するふく射遮蔽性能評価

ウォーターミストの噴霧実験を行い、ミスト層の水滴の粒度分布測定及びふく射遮蔽性能の実験的評価を行った。粒度分布測定にはレーザー回折式粒度分布計を用いた。ノズルにはポンプとコンプレッサー、水流量計、空気流量計を接続した。ミスト層によるふく射減衰量の測定において、熱源には、1000 °C に設定した黒体炉を用いた。受光部にはレーザーパワーメータを用いた。そして、ミスト層のふく射輸送解析を行い、実験結果との比較し、評価を行った。ミスト層のふく射遮蔽率は水滴径の依存性をもち、ふく射遮蔽には水滴径を小さくすることがより効果的であることを示した。また、粒度分布の広域化は様々な水滴径を有するミスト層であること示し、黒体放射光の様々な波長に干渉する要因となる。そのため、ふく射遮蔽に多分散水滴分布が有効である可能性が示唆された。

太陽光波長域へのウォーターミストの影響評価

太陽光において支配的な可視光、近赤外光波長のふく射を遮蔽するミスト層の透過スペクトルによる水滴粒径の影響を実験と解析から評価した。ミスト層のスペクトル透過率を調べるため、実験装置を構築した。光源には重水素タングステンハロゲン光源を用いた。分光器には波長範囲 0.32 - 1 μm の分光器と波長範囲 0.9 - 2.55 μm の分光器の二種類を用いた。太陽光波長領域でも、粒径が小さい粒子で形成されているミスト層はふく射遮蔽にはより効果的であることを示した。

4. 研究成果

- [1] Hiroki Gonome, Yuto Takagi, Taichi Nagao, and Mizuho Ono, "Effect of soot on thermal radiation shielding performance of water mist", *Fire Safety Journal*, Vol. 123, p. 103363, 2021.
- [2] 江目 宏樹、鷹木 勇人、長尾 太一、小野 泉帆、古川 琢磨、守谷 修一、岡島 淳之介, "火災現場におけるふく射熱伝達-ウォーターミストによるふく射熱遮蔽-", *エアロゾル研究*, Vol. 36, No. 3, pp. 170-175, 2021.
- [3] 鷹木 勇人, 古川 琢磨, 江目 宏樹, "火災流動場の能動的制御に向けた散乱性媒体の熱対流解析", 第 58 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, p. BPA1401, 2021.
- [4] 鷹木 勇人, 古川 琢磨, 岡島 淳之介, 江目 宏樹, "ウォーターミストによる乱流場制御の検討", *日本機械学会熱工学コンファレンス 2021 講演論文集*, 2021.
- [5] Yuto Takagi, Takuma Kogawa, and Hiroki Gonome, "Active Control of Thermal-Flow Field by Thermal Radiation in Participating Medium", *Proceedings of the 18th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2021)*, pp. 819-820, 2021.
- [6] Hiroki Gonome, Yuto Takagi, Takuma Kogawa, and Junnosuke Okajima, "Radiation and convection coupling calculation for development of thermal barrier fire extinguishing devices", *Proceedings of the 21st International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI2021)*, pp. 2-3, 2021.
- [7] Hiroki Gonome, Yuto Takagi, Kaito Suzuki, Junnosuke Okajima, and Takuma Kogawa, "Radiation and Convection Coupling Calculation in a Direct Numerical Simulation for Misting Fire Extinguishing Devices", *Proceedings of the 22nd International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI2022)*, pp. 24-25, 2022.
- [8] 江目 宏樹, "散乱性媒体によるふく射熱制御", *伝熱*, Vol. 62, No. 259, pp. 8-13, 2023.
- [9] Hiroki Gonome, Kaito Suzuki, Yuto Takagi, Shuichi Moriya, Junnosuke Okajima, and Takuma Kogawa, "SPECTRAL TRANSMITTANCE MEASUREMENT OF WATER MIST FROM DUAL FLUID NOZZLE IN INFRARED REGION", *Book of Abstracts of the 10th International Symposium on Radiative Transfer, RAD-23*, pp. RAD-23 P02, 2023.
- [10] Hiroki Gonome, Masato Jono, Kaito Suzuki, Shuichi Moriya, Junnosuke Okajima, and Takuma Kogawa, "Spectral Shielding Evaluation of Mist for Heat Stroke Prevention against Thermal Radiation from the Ground Surface", *Proceedings of the 23rd International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI2023)*, pp. 89-90, 2023.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 江目 宏樹	4. 巻 62
2. 論文標題 散乱性媒体によるふく射伝熱制御	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 伝熱	6. 最初と最後の頁 8-13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Hiroki Gonome, Kaito Suzuki, Yuto Takagi, Shuichi Moriya, Junnosuke Okajima, and Takuma Kogawa	4. 巻 -
2. 論文標題 SPECTRAL TRANSMITTANCE MEASUREMENT OF WATER MIST FROM DUAL FLUID NOZZLE IN INFRARED REGION	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the 10th International Symposium on Radiative Transfer, RAD-23	6. 最初と最後の頁 RAD-23 P02
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1615/RAD-23	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Gonome Hiroki, Takagi Yuto, Nagao Taichi, Ono Mizuho	4. 巻 123
2. 論文標題 Effect of soot on thermal radiation shielding performance of water mist	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Fire Safety Journal	6. 最初と最後の頁 103363 ~ 103363
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.firesaf.2021.103363	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 江目 宏樹、鷹木 勇人、長尾 太一、小野 泉帆、古川 琢磨、守谷 修一、岡島 淳之介	4. 巻 36
2. 論文標題 火災現場におけるふく射熱伝達?ウォーターミストによるふく射熱遮蔽?	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 エアロゾル研究	6. 最初と最後の頁 170 ~ 175
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11203/jar.36.170	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 H. Gonome, Y. Takagi, K. Suzuki, T. Kogawa, J. Okajima
2. 発表標題 Radiation and Convection Coupling Calculation in a Direct Numerical Simulation for Misting Fire Extinguishing Devices
3. 学会等名 Twenty-second International Symposium on Advanced Fluid Information (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鷹木 勇人, 古川 琢磨, 江目 宏樹
2. 発表標題 火災流動場の能動的制御に向けた散乱性媒体の熱対流解析
3. 学会等名 第58回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鷹木 勇人, 古川 琢磨, 岡島 淳之介, 江目 宏樹
2. 発表標題 ウォーターミストによる乱流場制御の検討
3. 学会等名 日本機械学会熱工学コンファレンス2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Gonome, Y. Takagi, T. Kogawa, and J. Okajima
2. 発表標題 Radiation and convection coupling calculation for development of thermal barrier fire extinguishing devices
3. 学会等名 21st International Symposium on Advanced Fluid Information (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Takagi, T. Kogawa, and H. Gonome
2. 発表標題 Active Control of Thermal-Flow Field by Thermal Radiation in Participating Medium
3. 学会等名 18th International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

江目研究室HP http://gonome-lab.yz.yamagata-u.ac.jp/research.html
--

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

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------