

令和 6 年 6 月 18 日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2023

課題番号：19K04197

研究課題名(和文)加熱条件下における流下水膜の形状および膜内速度分布の計測と乾き面発生機構の解明

研究課題名(英文) Shape measurement and dry-out mechanisms of a falling liquid film on a wall under thermal radiation

研究代表者

丹下 学 (Tange, Manabu)

芝浦工業大学・工学部・准教授

研究者番号：70549584

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：建築物の延焼防止を目的とした壁面上流下水膜の輻射熱遮蔽現象の解明を背景に、輻射加熱壁面上の流下液膜を研究対象として、液膜形状・液膜内速度分布が乾き面発生に与える影響を解明することを目的とした。具体的には、ガラス壁面にさまざまな流量で水膜を形成し、放射パネルによって水膜側からガラス壁面を加熱した。水膜にはトレーサ粒子が含まれ、トレーサ粒子の3次元位置と速度を加熱とは反対側から計測することで、液膜厚さ分布・液膜内速度分布を計測する手法を開発した。非点収差PTVにより、水膜内部流速分布計測の可能性を示した。輻射過熱による液膜破断条件が平板過熱による条件と異なる可能性も示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでマイクロ流路などで用いられていた流速の三次元計測手法を水膜内部の流速計測に適用した。これによって、壁面上の流下水膜が延焼防止に与える影響について、詳細に調査することができ、安全を確保しながらも使用水量を節約できる延焼防止システムの開発に寄与できるものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：To investigate the radiation heat shielding phenomenon of the wall surface downward water film for preventing the spread of fire in buildings, we studied the falling liquid film on a radiation-heated wall surface to clarify the effects of the liquid film shape and velocity distribution within the liquid film on the occurrence of dry patches. Specifically, a water film was formed on a glass wall surface at various flow rates, and the glass wall surface was heated from the water film side by a radiation panel. We develop a method to measure the thickness distribution and velocity distribution within the liquid film by measuring the three-dimensional position and velocity of the tracer particles. The possibility of measuring the internal flow velocity distribution of the water film by astigmatism PTV was demonstrated. It was also suggested that the liquid film rupture condition due to radiation overheating may differ from that due to wall overheating.

研究分野：伝熱工学

キーワード：伝熱工学 火災安全

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

2016年の糸魚川市大規模火災や2017年のアスクルの物流センター火災など、建築物間・建築物内区画間での延焼を防止することは、火災による被害を低減する上で重要である。特に近年の建築物の大規模化に伴い、災害時において建築物内での延焼を防止し、安全な避難区画を確保することが喫緊の課題となっている。しかし、商業施設などで多用される大型のガラス壁は、火災によって高温にさらされることで強度が低下するだけでなく、熱応力による割れや隣接区画への輻射の影響が懸念される。ドレンチャと呼ばれる散水システムは、火災時に天井や軒先から壁面へ放水することで水膜を形成し、建築部材が火災から受ける熱を低減できる(初期火災消火が目的のスプリンクラーとは異なる)。これまでもドレンチャの有効性は実験的に実証されてきているが、適切な水膜生成手法や必要な流量についての基準は未整備であり、熱工学の観点から、流下液膜の防耐火性能を定量的に解明した上で、理論的な裏付けを持って火災安全性能評価指針を示すことはできていない。大宮らはこれまでに、壁面への散水システムによる鋼板への加熱強度低減効果について実験的研究を行い、理論解析によって加熱強度と流量が鋼板温度上昇に与える影響を評価している[1, 2]。

しかし、加熱量を増加するに伴い、流下方向に平行な筋状の乾き面が発生することが報告されている[3]。このため、Nusseltの層流理論のような時空間平均を取った議論では、安定した液膜を維持する流量を求めることはできない。申請者はこれまでに、壁面上の水膜を加熱し壁面温度分布を計測するところで筋状の乾き面の発生を捉えている[4]。さらに、界面波による乾き面形状の変化や温度分布への影響を考察し、乾き面発生機構の解明には、液膜形状および液膜内部速度分布が重要な役割を果たしていることがわかった。既存の液膜研究でも、液膜厚さ・界面波速度の計測などがされているが、点計測がほとんどであり、いつ、どこに現れるか不明な乾き面の検出などには非定常な分布計測が望まれ、プローブを用いた計測では厚さ1 mm以下の液膜の形状・速度場を乱してしまうため、非接触な計測手法が求められる。

2. 研究の目的

以上のような背景をふまえ本研究課題では、輻射加熱壁面上の流下液膜を研究対象として、液膜形状・液膜内速度分布が乾き面発生に与える影響を解明することを目的とする。具体的には、ガラス壁面にさまざまな流量で水膜を形成し、放射パネルによって水膜側からガラス壁面を加熱する。水膜にはトレーサ粒子が含まれ、トレーサ粒子の3次元位置と速度を加熱とは反対側から計測することで、液膜厚さ分布・液膜内速度分布を計測する。液膜厚さ分布を計測できれば、同時に乾き面(液膜厚さ0)の発生を捉えることもできる。

3. 研究の方法

(1) APTV(非点収差を用いた粒子追跡流速測定)を水膜内部流速測定に用いるための基礎実験
トレーサ粒子の3次元位置を非接触で計測するために、APTV(非点収差を用いた粒子追跡流速測定)[5]という手法を採用した。これは、粒子撮影の光学系にシリンドリカルレンズを用いることで縦横に異なる焦点位置を設け、粒子像の縦横比から粒子の奥行方向位置を推定する手法である。この手法は主にマイクロ流路内の流れを計測することに用いられ、水膜計測に応用された例はない。本研究では、組み合わせレンズの幾何光学を解析し、水膜測定に適した光学系を設計し、粒子像の計測を行った。

(2) 水膜加熱装置の設計製作

流下水膜を形成し、水膜表面側から輻射熱で加熱する実験装置を設計製作した。これまでの水膜加熱実験は、壁面の加熱によるものがほとんどで、水膜表面からの加熱は例が少ない。本来の背景を踏まえると垂直平板に流下させるべきであるが、既存の撮影系で流下を測定できる流速を実現するため、傾斜平板を使った実験装置とした(図1)。

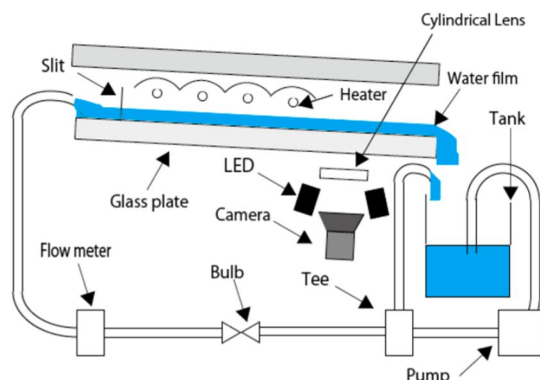


図1: 流下水膜加熱実験装置

4. 研究成果

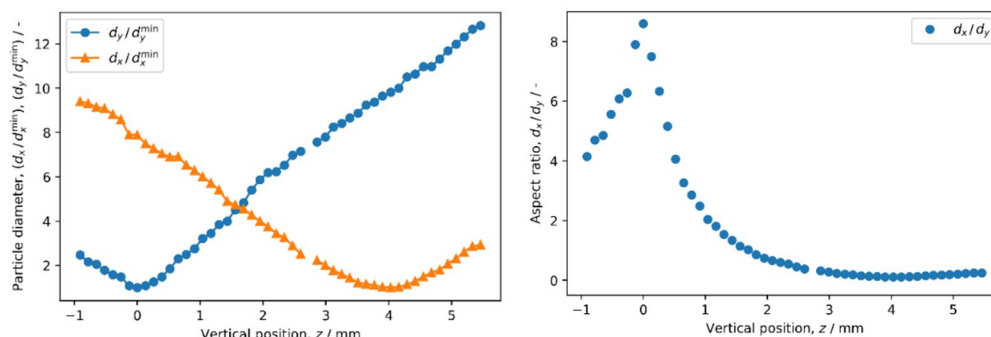


図 2：粒子像寸法（左）と縦横比（右）[6]

(1) APTV（非点収差を用いた粒子追跡流速測定）を水膜内部流速測定に用いるための基礎実験
 図 2 には、奥行方向ごとの粒子像寸法（左）と縦横比（右）を示す．光学系の設計に合致する粒子像形状の変化が見られた．また，0 mm から 4 mm の間で，縦横比が単調減少になっているため，縦横比と奥行きが一对一对応になっていることがわかる．これにより粒子の奥行きが粒子の縦横比から計測できることを示すことができた．

図 3 には，実験結果をもとに作成した人工画像を用いて作成した水膜内流速分布の解析結果を示す．粒子の追跡には 4 時刻法を用いている．壁面（ $z=0$ mm）付近で流速が 0 に近く，水面付近で流速が大きくなっていることが見て取れる．また，画像を作る際に用いた流速分布に，各粒子の速度を重ねると（図 3 右），ほとんどの計測点で設定どおりの流速が計測されていることが分かった．これにより，APTV による流速計測が有効であることを示すことができた．

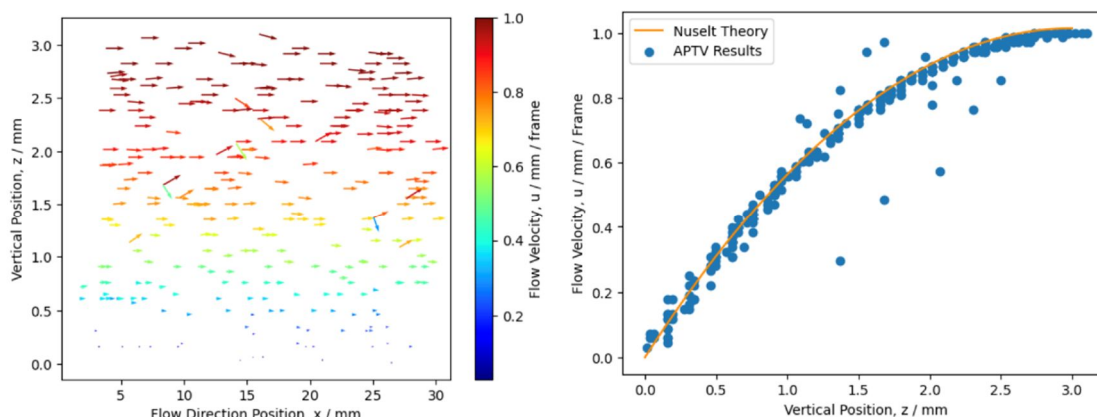


図 3：人工画像を用いた APTV による水膜内部流速分布計測の検証

(2) 水膜加熱装置の設計製作

水膜加熱装置を製作し，流下水膜の加熱実験を行った．平板加熱による流下水膜の形状不安定発生条件を参考にして加熱量を設計したが，輻射加熱では同様の条件で形状不安定は発生しなかった．形状不安定は表面張力の温度依存性に伴う温度マランゴニ対流に起因するものと考えられるが，加熱方向によって発生条件は大きく異なることが確認された．流量や平板の傾斜角度を様々に変えることで，加熱による水膜破断を再現することはできたが（図 4），表面張力不安定性由来の筋状の膜厚分布を捉えることはできなかった．加熱量の増加や流速の増加が必要であると予想される．



図 4：加熱による液膜破断と乾き面発生

参考文献

- [1] 大宮喜文, 野秋政希, 鈴木淳一, 小林武雅, 太田充, 日本火災学会論文集, 60, 29 (2010).
- [2] 大宮喜文, 小林武雅, 鈴木淳一, 増田秀昭, 日本建築学会環境系論文集, 612, 7 (2007).
- [3] C. Li et al., Heat Mass Transfer, 10.1007/s00231-017-2141-1 (2017).
- [4] A. Kono et al., The Second Pacific Rim Thermal Engineering Conference (2019)
- [5] C. Cierpka et al., Meas. Sci. Technol., 22, 015401 (2011).
- [6] Z. Wei et al., The 2nd Asian Conference on Thermal Sciences (2021)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Zhixiong WEI, Tatsuya YAMAGUCHI, Manabu TANGE
2. 発表標題 Astigmatic PTV for thickness and flow measurement of falling liquid film
3. 学会等名 The 2nd Asian Conference on Thermal Sciences (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yichao Bo, Manabu Tange, Aoshi Kono, Yoshifumi Ohmiya
2. 発表標題 HEAT REMOVAL CHARACTERISTICS OF A WATER FILM FALLING ON A VERTICAL WALL UNDER RADIANT HEATING
3. 学会等名 The 31st International Symposium on Transport Phenomena (国際学会)
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
研究分担者	大宮 喜文 (Ohmiya Yoshifumi) (10287469)	東京理科大学・創域理工学部建築学科・教授 (32660)	
研究分担者	小野 直樹 (Ono Naoki) (20407224)	芝浦工業大学・工学部・教授 (32619)	

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
---------	---------