

令和 3 年 6 月 9 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03973

研究課題名(和文)高温固体面のクエンチ時における伝熱面温度分布の高時間分解能直接計測

研究課題名(英文) Direct measurement of temperature distribution of heat transfer surface during quenching of high-temperature wall

研究代表者

大川 富雄 (Okawa, Tomio)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：20314362

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：高温壁の流下液膜冷却では、液膜先端近傍における熱伝達率分布が液膜の流下速度(クエンチ速度)に大きく影響する。しかし、実験データが不足しているため、この基本的な体系における熱伝達率分布については、信頼に足る相関式が存在しない。本研究では、高速度IRカメラを用いて、クエンチ点近傍における伝熱面温度分布の時間変化を、高時間分解能かつ高空間分解能で計測した。さらに、得られた実験データを用いて、熱伝達率分布を予測する無次元相関式を開発した。本相関式を用いれば、実験で計測されたクエンチ速度を高精度で再現できることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高温固体の沸騰冷却(クエンチ)は、日本刀の焼き入れや鉄鋼材料の熱処理で見られる身近かつ重要な熱流動現象である。特に、原子力発電所で冷却材喪失事故が生じた場合、高温となった炉心に冷却水を注入して、燃料棒を再び濡らす(リウエット)させる必要がある。このため、クエンチあるいはリウエット時に、液体によって濡らされた領域が進展する速度(クエンチ速度)を予測することは、日本刀や鉄鋼材料の品質及び原子力発電所の安全性に関する重要な技術である。本研究では、クエンチ速度予測の根幹となる熱伝達率分布データを世界で初めて計測することに成功し、熱伝達率分布データに基づく熱伝達率分布相関式を世界で初めて開発した。

研究成果の概要(英文)：Spatial distribution of the heat transfer coefficient (HTC) in the vicinity of the wetting front is of crucial importance in predicting the wetting velocity during liquid film cooling of a high-temperature solid surface. However, mainly due to the lack of experimental data, no sufficiently reliable model has been developed so far for the HTC distribution in this fundamental thermal-hydraulic situation. In the present work, experiments using a high-speed infra-red camera were carried out to measure the transient of wall temperature distribution during wetting of a high-temperature vertical wall with a falling liquid film. Based on the HTC distributions calculated from the measured temperature data, dimensionless correlations were developed for the HTC distribution near the wetting front. It was confirmed that the propagation velocities of the wetting front (wetting velocity) calculated using the proposed correlations agree with the experimental data accumulated in this work well.

研究分野：伝熱流動

キーワード：クエンチ リウエット 熱伝達率分布 IRカメラ 無次元相関式

1. 研究開始当初の背景

図 1 に示すように、高温に熱せられた固体の表面に液体を供給して、沸騰熱伝達により冷却する問題を考える。この場合、初期の冷却形態は、膜沸騰による「徐冷」だが、伝熱面温度がある値(クエンチ温度)まで低下すると、液体が伝熱面に接触できるようになる。この結果、沸騰様式が膜沸騰から核沸騰に移行するので、熱伝達率が急激に増加して、固体の「急冷」が開始する。このように、高温の伝熱面が冷却液によって濡らされて、急速に温度低下する過程を「クエンチ」または「クエンチング」と呼ぶ。

図 1 の体系では、鉛直伝熱面の下方から冷却液を供給しているので、伝熱面の下端が最初にクエンチし、その後、濡れ領域の先端(クエンチ点)が上方に移動していく。クエンチ点の移動速度(クエンチ速度)は、「原子炉事故時に燃料棒が高温に保持される時間」や「金属材料の焼入れ過程で、材料内部に生じる温度分布の非均一の程度」を決定する重要な物理量である。このため、多くの研究者により検討が行われている。しかし、クエンチ点近傍における熱伝達率の空間分布に関する実験情報は皆無のため、既存研究では、図 2 に示すような h の分布を仮定して、クエンチ速度を算出している。このようにして算出されるクエンチ速度は、実験データと同オーダーにできる程度で、実験データとの一致はまったく十分ではない。このため、例えば原子炉安全解析におけるクエンチ速度の評価では、過大とも思われるほどの、きわめて大きな安全余裕を見込む必要が生じている。

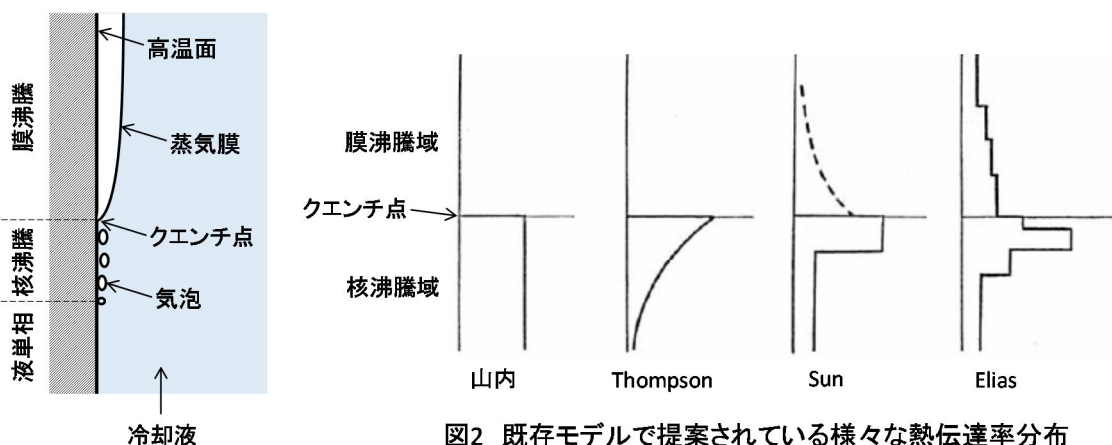


図1 高温面の液冷

図2 既存モデルで提案されている様々な熱伝達率分布

2. 研究の目的

本研究では、高温かつ激しく温度変動するクエンチ時の過酷な環境下で、クエンチ点近傍における伝熱面温度分布の高時空間分解能計測を、世界に先駆けて実施する。得られた温度分布実験データから熱伝達率分布を算出するとともに、これに基づいて、クエンチ速度を正確に予測可能な機構論的クエンチモデルを開発することを主な目的とする。

3. 研究の方法

実験装置の基本構成を図 3 に示す。高温に熱したシリコンウェハまたは金属薄膜に沿って液膜を供給し、このときの伝熱面温度分布の時間変化を IR カメラ、液膜の流動状況を高速カメラにより同期撮影する。IR カメラにより得られた温度分布データを熱伝導方程式に代入して熱伝達率分布を算出するとともに、得られた熱伝達率分布データを基に無次元相関式を開発する。

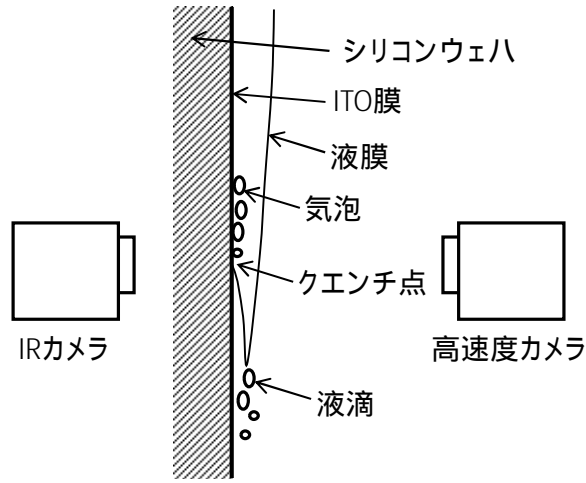


図3 実験装置の構成

4. 研究成果

熱伝達率分布の計測例を図4に示す。熱伝達率分布は、流下液膜の先端近くで最大になり、高温の乾き域と低温の濡れ域に向かって減少する傾向となる。パラメーター依存性を調べたところ、熱伝達率のピーク値は伝熱面初期温度とともに減少するが液膜流量の影響は小さいこと、熱伝達率がピークなる位置での伝熱面過熱度は伝熱面初期温度とともに上昇するがピーク値と同様に液膜流量の影響は小さいことがわかった。また、乾き域と濡れ域における熱伝達率の減少率は、局所過熱度を Berenson の相関式により計算されるクエンチ温度でスケージングした無次元過熱度を用いてよく相関できることを示した。以上の結果に基づいて、高温固体面のクエンチ時における熱伝達率分布に関する無次元相関式を開発した。本相関式を用いて液膜の流下速度(クエンチ速度)を計算したところ、図5に示すように、実験値とよく一致することを確認した。

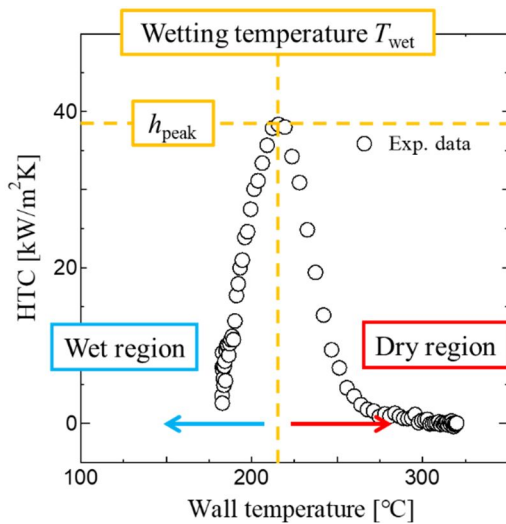


図4 熱伝達率分布の計測例

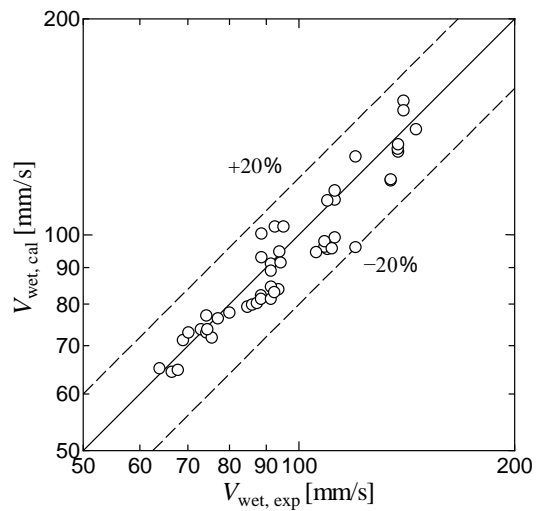


図5 クエンチ速度の計算値と実験値の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Tomio Okawa, Keisuke Yamagata, Yutaro Umehara	4. 巻 363
2. 論文標題 Measurement of heat transfer coefficient profile during quenching of a vertical hot wall with a falling liquid film	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nuclear Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.nucengdes.2020.110629	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6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Tomio Okawa, Keisuke Yamagata, Koji Enoki
2. 発表標題 Temperature Distribution Measurement During Quenching of High-Temperature Wall with a Falling Liquid Film
3. 学会等名 18th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-18) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 梅原裕太郎、山形圭祐、大川富雄、榎木光治
2. 発表標題 リウエッティングフロント近傍における流動挙動と熱伝達特性
3. 学会等名 日本原子力学会「2020年春の年会」
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山形圭祐、榎木光治、大川富雄
2. 発表標題 高温面液体冷却時におけるリウエッティングフロント近傍での熱伝達に関する研究
3. 学会等名 第56回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山形圭祐, 大川富雄, 榎木光治
2. 発表標題 高温面液体冷却時におけるリウエットングフロント近傍での熱伝達率計測
3. 学会等名 熱工学コンファレンス2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yutaro Umehara, Tomio Okawa
2. 発表標題 Microscopic Heat Transfer Characteristics During Cooling of High Temperature Surface by a Falling Liquid Film
3. 学会等名 28th International Conference on Nuclear Engineering (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 梅原裕太郎, 大川富雄
2. 発表標題 高温面液膜冷却時のクエンチ点近傍における現象論的熱伝達率分布の開発
3. 学会等名 日本原子力学会「2021年春の年会」
4. 発表年 2021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

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