

令和 6 年 6 月 4 日現在

機関番号：17102

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2022～2023

課題番号：22K20411

研究課題名（和文）高温面の超高速冷却実現に向けたクエンチ現象予測モデルの構築

研究課題名（英文）Development of Quench Phenomenon Prediction Model for Ultrafast Cooling of High Temperature Surfaces

研究代表者

梅原 裕太郎（Umehara, Yutaro）

九州大学・工学研究院・助教

研究者番号：80961755

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：高温物体を冷却する際、冷却初期段階において、高温物体が蒸気膜に覆われる膜沸騰が生じる。膜沸騰においては、固液接触が制限されることで、熱伝達率が非常に低い。この膜沸騰から核沸騰への遷移をクエンチ現象という。このクエンチ現象を早期に起こすことが急速冷却の実現に向けて大きな課題であった。本研究では、冷却材として液体窒素を用いて、冷却実験を実施した。その際、銅ブロック表面に電解析出法を用いて作製した金属多孔質体を用いて高温体の急速冷却を行った。金属多孔質体を装着することで、装着しない場合に比べて、冷却時間を十分の一にすることに成功した。また、金属多孔質体により急速冷却が生じるメカニズムを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高温物体を急速冷却するニーズは、様々な産業分野で見られる。鉄鋼業界では、高温に熱した鉄を急速冷却することで鉄本来の性能を向上する焼入れが実施されている。ロケットに利用される液体燃料は、極低温流体であるため、ロケット構成物のすべての流路を極低温環境に冷却しなければならない。急速冷却できれば、極低温使用量の削減などコスト削減に寄与できる。以上のことから急速冷却技術の確立は、広く社会に貢献することができる。

研究成果の概要（英文）：When cooling a high temperature sample, film boiling occurs during the initial stage of cooling, in which the high temperature sample is covered by a vapor film. The vapor film causes the deterioration of heat transfer. The transition from film boiling to nucleate boiling is called the quench phenomenon. The early onset of this quench phenomenon has been a major issue for rapid cooling. In this study, cooling experiments were conducted using liquid nitrogen as the coolant. The rapid cooling of a high-temperature sample was performed using a porous material fabricated by electrodeposition on the surface of a copper block. The cooling time with the porous material block was reduced to one-tenth of that without. The mechanism of rapid cooling by the porous material was also clarified.

研究分野：熱工学

キーワード：沸騰 クエンチ現象 金属多孔質体 液体窒素

### 1. 研究開始当初の背景

液体による高温面の急速冷却は、鋼材の材質改善（熱処理）、液体燃料ロケットの予冷や原子炉の緊急冷却など極めて重要な事象である。一般的に、高温面の冷却速度は高温面で生じる沸騰現象に支配されており、図1の実線に示すように、冷却初期段階において遅く、ある地点（点A）で急激に速くなることが知られている。これは、冷却初期段階において、伝熱面温度が冷却材の飽和温度よりも極めて高い場合に、固液接触が制限され、膜沸騰現象が生じることで冷却速度が極めて遅くなるためである。その後、冷却の進行に伴い、固液接触が開始されることで、核沸騰現象が生じ、冷却速度が速くなる。この冷却速度の遷移（点A）をクエンチ現象と呼ぶ。冷却時間を短縮するには、このクエンチ現象を早期に生じさせる（点A'）ことが重要であり、メカニズムの解明は不可欠である。本研究実施者は、クエンチ現象のメカニズム解明のために、クエンチ現象を伝熱・流動の両側面から詳細観察を実施し、冷却速度の予測精度が極めて高い現象論的クエンチモデルを提案した[1]。しかし、クエンチ現象促進（急速冷却）を予測するためには、促進因子を考慮したモデルを構築しなければならず、現モデルでは不十分である。

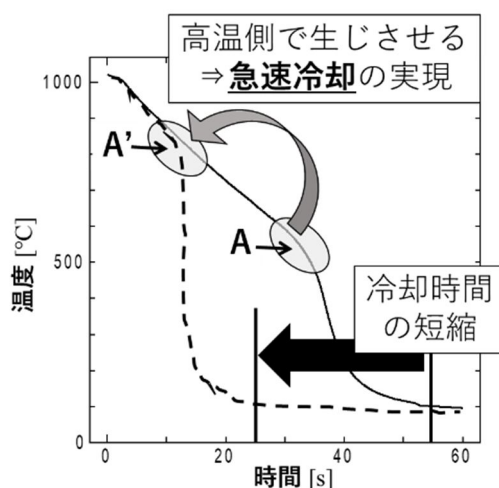


図1 高温物体の冷却曲線

[1] Umehara, Yutaro, and Tomio Okawa. "Phenomenological modeling of quenching during falling liquid film cooling of high-temperature wall." Applied Thermal Engineering 225 (2023): 120210.

### 2. 研究の目的

本研究では、クエンチ現象を促進する因子を操作し、急速冷却が実現された際の冷却速度を正確に予測するクエンチモデルの構築を目的とする。具体的には、高温面側の促進因子を変更し、クエンチ現象の発生メカニズムからクエンチ現象の促進メカニズムを明らかにすることで、新たなクエンチモデルを提案する。本研究により、クエンチ現象の促進メカニズムが明らかになれば、普遍的な急速冷却手法を実現できる。また、それらを予測することでできれば、広く社会で急速冷却を利用することができる。

### 3. 研究の方法

高温物体表面に電解析出法を用いて作製した多孔質層を高温面側の促進因子として利用した。電解析出法とは、金属表面に他の金属層をめっきする手法として用いられている。本研究では、この手法を応用し、電流密度を向上させることで、水素気泡を発生させ、多孔質層を基板上に形成させた。電解液に硫酸銅水溶液ならびに基板には、銅板を用いた。作製された多孔質体は、銅製である。この銅製多孔質層を高温物体表面に装着し、急冷実験を実施した。冷却材には液体窒素を用いた。図2に実験に用いた実験装置を示す。

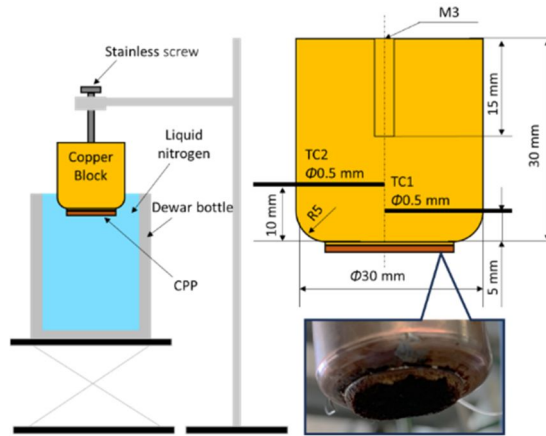


図2 実験装置

高温物体は、銅製で製作されており、底面のみが液体窒素に接触するようにしている。その際の底面の表面温度および表面熱流束は、銅ブロック内に挿入された熱電対を用いて、逆問題解析を実施することで、算出した。また、電解析出面と銅ブロックは、はんだを用いて接合した。

#### 4. 研究成果

図3・4に冷却実験により得られた冷却曲線および沸騰曲線を示す。銅多孔質体を用いることで、銅多孔質体を使用しない場合に比べて、冷却時間を約90%短縮することに成功した。ここで、銅多孔質体による急速冷却現象が銅多孔質体の装着による厚さの影響でないことを確認するため、厚さ1.5mmの銅板を装着したものでも急冷実験を実施した。この結果、銅多孔質体は、厚みの影響だけでなく、他の要因により、急速冷却を実現していることがわかる。この要因を沸騰曲線から考えると、銅多孔質体は、冷却開始直後から熱流束が高く、冷却初期段階からクエンチ現象が生じていることが考えられる。これは、多孔質体の低熱伝導率による接触面温度の低下から早期の固液接触が実現されたためだと考えられる。また、非常に高い熱流束を高過熱度領域で確認できる。これは、多孔質体部が固液接触可能になったことで、吸水現象が生じ、伝熱面に液を強制的に供給することができたためと考えられる。

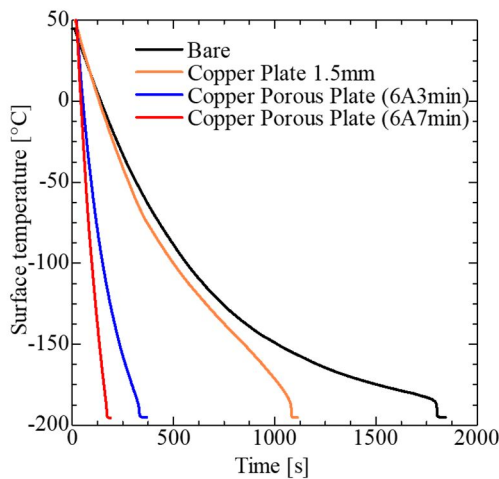


図3 冷却曲線

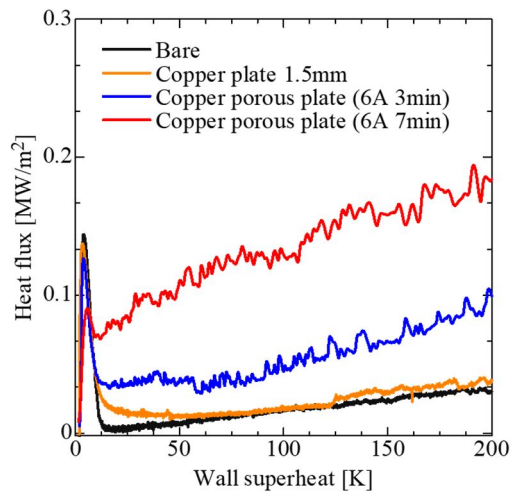


図4 沸騰曲線

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 1件）

1. 発表者名 YUTARO UMEHARA
2. 発表標題 Liquid nitrogen quenching of copper surface with porous structure
3. 学会等名 The 11th International Conference on Multiphase Flow (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 梅原裕太郎, 定石鈴木, 森昌司
2. 発表標題 電解析出法による銅多孔質体の液体窒素中における急冷特性
3. 学会等名 第61回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2024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
---------	---------