

鋼板の表面性状がスプレー冷却特性に及ぼす影響に関する研究

福田, 啓之

<https://hdl.handle.net/2324/7443408>

出版情報 : Kyushu University, 2025, 博士 (工学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :



氏 名 : 福田 啓之

論文名 : 鋼板の表面性状がスプレー冷却特性に及ぼす影響に関する研究

区 分 : 甲

論文内容の要旨

様々な産業分野において要求される複雑な仕様の鋼板を製造するにあたり、所望の組織を得るためには、水冷設備を用いた冷却速度の精密な制御が求められる。鉄鋼製造プロセスにおける水冷却では、通常、膜沸騰が発生する温度域から冷却が開始されるため、鋼板表面温度に応じて膜沸騰から遷移沸騰、核沸騰へと沸騰様式が変化し、その挙動が冷却制御に大きく影響する。特に、膜沸騰から遷移沸騰へ移行することで急激な温度低下を生じる現象をクエンチと呼び、意図しないクエンチが発生すると、冷却ばらつきにより品質低下を招く場合がある。そのため、沸騰現象に基づく冷却特性を理解することは不可欠である。鋼板の冷却特性に影響を及ぼす因子は、冷却側と被冷却側に大別されるが、本論文では、被冷却側の因子である表面性状に着目し、スケールの厚さ、スケールの種類、および表面粗さがスプレー冷却特性に及ぼす影響を調査した。本論文は全 5 章で構成されており、各章の内容は以下の通りである。

第 1 章は序論であり、研究の背景を述べた後、冷却特性に及ぼす影響因子について、冷却側（冷却水および冷却装置側）と被冷却側（鋼板側）に関する従来研究を整理し、本研究の目的および構成を示している。

第 2 章では、スケール厚さがスプレー冷却特性に及ぼす影響について述べている。SUS304 鋼を母材とし、金属酸化物を表面に溶射することで厚さの異なる擬似スケール層を形成した試料を用いて、スプレー冷却実験を実施した。各沸騰状態における熱流束やクエンチ温度などの冷却特性への影響を評価した結果、膜沸騰時の冷却速度はスケール厚さに依存せず、温度計測位置であるスケールと母材の界面におけるクエンチ温度は、スケール厚さの増加とともに上昇することが明らかとなった。また、冷媒の相変化を伴わない衝風冷却実験も併せて行い、スケールが厚いほど冷却速度が低下することから、スケールが熱抵抗層として作用していることを確認した。衝風冷却実験で得られた冷却特性データから、スケール層である Al_2O_3 の熱伝導率を同定し、スケールを含めた伝熱解析を実施した。その結果、膜沸騰時の冷却速度はスケール厚さに依存せず、スケールが厚いほどスケールと母材界面におけるクエンチ温度が高くなるという実験結果の傾向を定性的に再現できることを示した。

第 3 章では、スケールの種類がクエンチ開始条件に及ぼす影響について述べている。前章と同様に金属酸化物を表面に溶射することで擬似スケール層を形成した試料を用い、スプレー冷却の素過程である単一液滴衝突挙動の観察を行った。様々な温度に加熱した試料表面に微小液滴を衝突させ、高速度カメラによりその挙動を観察し、クエンチ開始に対応する液体と固体の安定接触条件について検討した。液滴挙動は、液滴温度および固体表面温度に依存し、高温では跳ね返り、低温では蒸発するまで表面に存在し続けることが確認された。衝突挙動の遷移条件を固体表面温度で整理した場合には、スケール種類の影響は明瞭ではなかった。一方、2 つの半無限物体の接触に関する非定

常問題を想定して得られた液滴と固体表面との界面温度で整理すると、スケールの種類や厚さ、液滴温度に依らず、界面温度が約 250 °C の際に遷移が生じることが示された。また、スプレー冷却における実験結果を液体と固体表面との界面温度で整理した結果、スプレー冷却においても単一液滴の実験結果と同様に、液体と固体表面との界面温度が 250 °C 近傍にてクエンチが生じていることを示した。

第 4 章では、表面粗さがスプレー冷却特性に及ぼす影響について述べている。ショットブラスト加工およびレーザー加工の 2 種類の加工方法により表面粗さを付与した試料を作製し、スプレー冷却実験および衝風冷却実験を実施した。ショットブラストで加工された試料は表面形状がランダム構造となる一方で、レーザーで加工された試料は表面形状がマイクロスケールの周期的なピラー構造である。ショットブラスト加工材では、衝風冷却において流量密度が高い条件下で、表面粗さが大きいほど熱伝達率が高くなる傾向が認められた。スプレー冷却においても同様の傾向が見られたが、熱伝達率の変化はスプレー冷却の方がより顕著であった。この結果と表面粗さによって液体と固体表面の接触状況が場所ごとに異なることを考慮すると、液滴が衝突・接触している間の局所的な熱伝達率は、測定から得られる平均的な熱流束よりも大きいと考えられ、最大で平均値の約 6.4 倍に達することを示した。また、レーザー加工材を用いたスプレー冷却実験では、マイクロピラーの存在により、冷却過程において二段階のクエンチが発生することを確認した。マイクロピラー高さの増加に伴い、第 1 段階のクエンチが発生するピラー底部の温度は上昇した。一方、ピラー高さが低い場合には、第 1 段階のクエンチは不明瞭となり、冷却速度の増加も緩やかであった。モデル化した伝熱解析より、スプレー冷却水とマイクロピラー上面における液体と固体表面の界面温度が 277 ± 61 °C に達した時点で第 1 段階のクエンチが開始することが示され、クエンチの発生はマイクロピラー上面での安定した濡れに起因する可能性が示唆された。その後、濡れ領域はピラーに沿って底部へと進展し、ピラー底部での液体と固体表面の界面温度が 238 ± 20 °C に達した際に、第 2 段階のクエンチが発生することを示した。

第 5 章では、本研究で得られた成果を総括し、鋼板表面性状がスプレー冷却特性に及ぼす影響について体系的に整理している。スケール厚さ、スケール種類、表面粗さはいずれも冷却特性を支配する重要因子であり、それらの影響が相互に関連していることが示されている。