

様式 I

博士学位論文調査報告書

論文題目

水冷媒による移動高温鋼板の冷却特性解明を目的とした

高分解能熱伝達評価手法の構築と検証基礎実験

申請者

建部 勝利

最終学歴

令和 5 年 3 月

京都大学大学院エネルギー科学研究科エネルギー応用科学専攻博士後期課程
(研究指導認定見込)

学識確認

令和 年 月 日 (論文博士のみ)

調査委員
(主査)

京都大学大学院エネルギー科学研究科
教授 藤本 仁

調査委員

京都大学大学院エネルギー科学研究科
教授 白井 康之

調査委員

京都大学大学院エネルギー研究科
教授 浜 孝之

(続紙 1)

京都大学	博士 (エネルギー科学)	氏名	建部 勝利
論文題目	水冷媒による移動高温鋼板の冷却特性解明を目的とした 高分解能熱伝達評価手法の構築と検証基礎実験		
(論文内容の要旨)			
<p>鉄鋼製造プロセスの一つである熱間圧延工程では、高速移動する高温鋼板に対し、急冷と緩冷を組み合わせた熱処理により材料の組織制御を行っている。高靱性・高強度鋼板の製造には高度な熱処理技術が必要であるため、移動体冷却の熱流束分布を高分解能で計測し、熱伝達特性を解明することが求められている。本論文は、高温移動鋼板を柱状水噴流やスプレー流で冷却するときの熱伝達評価手法を構築し、それによる基礎実験結果をまとめたもので、7章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、本論文の工学的かつ学術的背景と、研究目的および内容が述べられている。現在、広く利用されている熱電対による熱伝達評価手法は、移動体の冷却特性を高分解能で計測することがほぼ不可能であることを指摘し、その問題点を解決する2種類の新評価手法を提案した。これらは、赤外線サーモグラフィカメラによる温度計測値を3次元熱伝導解析するものである。非冷却面温度分布から冷却面熱流束を算出する薄鋼板冷却に適用可能な手法と、冷却に寄与しない冷媒を除去し冷却面の復熱現象から伝熱量を算出する厚鋼板冷却のための評価手法の概要が説明されている。</p> <p>第2章では、薄鋼板の冷却を対象とする熱伝達評価手法の詳細を記述し、その提案手法を水平移動する鋼板上面に単一柱状水噴流で冷却する基礎実験に適用した結果を報告している。鋼板温度、移動速度、冷却水流量が、伝熱特性に及ぼす影響を研究し、評価手法の妥当性と有効性を確認した。また、核沸騰領域の冷却水流動を観察し、そのときの伝熱特性を良好に予測できる整理式を提案している。</p> <p>第3章では、水平移動する薄鋼板の下面を幅方向に均等配置した3本の水噴流で冷却する実験を実施し、提案手法により沸騰伝熱特性を研究した結果が記述されている。強い核沸騰、遷移沸騰および膜沸騰を呈する条件では、噴流衝突点近傍にのみ高熱流束領域が発生すること、そこでの最大熱流束値は鋼板温度に対してプール沸騰に類似なS字状の曲線を描くことを見出した。また、噴流間距離が小さい場合、幅方向に比較的均一な冷却特性が得られるが、噴流当たりの冷却能は低下するという実操業のプロセス技術上有用な知見も得ている。</p> <p>第4章では、移動厚鋼板の冷却を対象とする熱伝達評価手法の詳細を記述し、その手法を水平移動する厚鋼板上面に単一柱状水噴流を傾斜衝突させて冷却する基礎実験に適用した結果を報告している。鋼板温度と移動速度を変化させた一連の実験により、提案手法が遷移沸騰および膜沸騰領域で適用可能であることを明らかにした。また、噴流衝突点近傍の熱伝達特性を過去の知見と比較することにより、評価手法の有効性を確認した。</p> <p>第5章では、厚鋼板に対する熱伝達評価手法を、スプレー冷却を理想化した液滴列衝突に応用するための予備検討として、移動高温固体に衝突する液滴列の変形挙動を研究した結果を報告している。静止画像から液滴速度、直径、液滴間距離などの衝突条件を決定する計測法を</p>			

確立し、種々の条件下で液滴と移動固体との接触時間や面積を測定した。その結果、膜沸騰領域の液滴変形挙動は、静止固体に対する単一液滴衝突の過去知見とおおよそ一致し、移動速度の影響は小さいことを明らかにした。また、液滴干渉の発生条件を予測する整理式を構築した。

第 6 章では、移動厚鋼板にスプレー液滴列が衝突するときの膜沸騰熱伝達特性を研究した結果を記述している。移動固体面上に形成される局所的な冷却領域の形状や温度降下量は、液滴列の方向ベクトルや固体移動速度の影響を受けることを基礎実験によって見出した。そこで、冷却領域の形状を個々の液滴が描く接触領域の重ね合わせで表現する数値モデルを提案し、そのモデルが実験結果を良好に再現できることを実証した。さらに、その数値モデルと第 4 章で得られた結果を組み合わせることにより、スプレー液滴列衝突による温度降下量が予測可能であることを示した。

第 7 章は、本研究で得られた知見のまとめるとともに、移動高温固体での水冷現象の解明を進めていく上での課題と今後の取り組みを記載している。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、柱状水噴流やスプレー流で移動高温物体を冷却するときの熱流束分布を高分解能で計測する 2 種類の評価手法の構築と、それによって得られた基礎実験の結果をまとめたもので、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 移動薄鋼板を水噴流冷却する際の熱流束分布を、非冷却面の温度分布と 3 次元熱伝導方程式から算出する評価手法を構築し、その有効性を基礎実験により確認した。強い核沸騰、遷移沸騰および膜沸騰条件では、噴流衝突点近傍にのみ高熱流束領域が発生し、その領域の最大値は鋼板温度に対して S 字状の曲線を描くことを見出した。さらに、噴流間距離が小さい場合、幅方向に比較的均一な冷却特性が得られるが、噴流当たりの冷却能は低下することを明らかにした。
2. 移動厚鋼板の水噴流冷却に適用可能な熱伝達評価手法を構築し、その妥当性を基礎実験と過去の知見との比較により確認した。この手法は、冷却に寄与しない冷媒を冷却面から除去し、鋼板の復熱現象から伝熱量を算出するところに独創性があり、遷移および膜沸騰領域で適用可能である。
3. スプレー冷却を理想化した液滴列を移動高温物体に衝突する基礎実験により、その変形挙動を研究した。膜沸騰領域の液滴変形挙動は、静止固体に対する単一液滴衝突の過去知見とおおよそ一致し、移動速度の影響は小さいことを明らかにした。また、液滴干渉の発生条件を予測する整理式を構築した。さらに、液滴列衝突により発生する鋼板の温度降下領域の形状は、個々の液滴変形挙動の重ね合わせによる数値モデルで予測可能であることを示した。
4. 項目 2 で得られた結果と、項目 3 で構築した数値モデルとを組み合わせることにより、スプレー液滴列衝突による鋼板温度変化を予測可能であることを示した。

以上のように、本研究で構築された熱伝達評価モデルは、移動体の水冷却における沸騰熱伝達の研究に大きく寄与するものである。また、本研究で得られた知見は学術的にも工業的にも有用である。よって、本論文は博士（エネルギー科学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和 5 年 2 月 21 日に実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。

論文内容の要旨、審査の結果の要旨及び学位論文の全文は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。ただし、特許申請、雑誌掲載等の関係により、要旨を学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日： 年 月 日以降