

別紙 1 (博士論文の審査結果の要旨)

専攻名 システム創成科学専攻

氏名 仁井谷 洋

連続鋳造（以下連続と記す）プロセスは、鉄鋼生産の上工程、すなわち溶鋳炉で鉄鉱石を還元・溶解した銑鉄を成分調整する製鋼工程の最後で溶融鋼をスラブ等の半製品形状に凝固・成形する工程である。連続鋳造プロセスでは、水冷銅型枠での一次冷却で1500°Cの溶鋼の表層部のみを凝固させた後、型枠から鉛直下向きに連続的に引き出しながら搬送ロール間からスプレー散水を用いた二次冷却で中心部まで凝固を完了させる。設備レイアウトの制限のため長尺スラブは、二次冷却の途中で曲げ矯正を行い水平方向に引き出される。900~600°Cの高温脆化温度域で曲げ矯正を行うと表層部に横割れを生じ、下工程での最終製品の欠陥の原因となる。このため連続速度などの操業条件制限下で冷却温度制御が行われている。冶金学的には γ 相の高温域から α 相の析出温度以下に急速冷却した後、内部からの凝固潜熱で γ 相まで急速に復熱させて割れの起点となるフィルム状の α 相析出を抑制するSSC(Surface Structure Control)冷却が知られている。しかし、900°Cを超える移動高温面上で間欠的に生じる沸騰伝熱特性の知見が不十分のため、実プロセスへの導入は進んでいない。SSCが実現できれば、鋼片品質改善に加えて冷却能力増加による連続速度の増加で鉄鋼生産の国際競争力の向上も期待されている。

本研究では、連続鋳造プロセスの二次冷却でSSC冷却手法を実現するため、冷却能力のターンダウン比に優れた気水混合二流体フラットスプレーによる移動高温面上の非定常沸騰特性について実験的研究を実施した。従来の研究による知見の蓄積が乏しく、これまで利用されていなかった核沸騰伝熱領域の高い熱伝達率に注目し、急速冷却を実現するために必要な移動高温面上で核沸騰領域が実現される冷却条

件とその冷却能力を明らかにすることが目的である。

本論文は、全5章で構成されている。

第1章では、研究対象となる連続二次冷却プロセスの制御冷却の技術的課題について文献調査に基づき概説した。さらに、鉄鋼非定常冷却特性を実験での評価に不可欠な非定常熱伝導逆問題解析について、従前のラプラス変換を用いた線形解析手法での推定精度を検討し、冷却速度が速く温度変化範囲が大きな条件では、熱物性の温度依存性の影響のため、誤差が大きいことを明らかにした。

第2章では、第1章で述べた連続プロセスの二次冷却および鉄鋼冷却の実験評価手法における技術課題について整理し、本研究の目的について述べた。

第3章では鉄鋼材料の冷却伝熱評価での材料の熱物性の温度依存性を線形解析で厳密に取り扱うため、熱伝導率で重みづけする変換温度法を変物性熱伝導方程式の非線形項に適用し、線型方程式に変換する手法について述べた。変物性材料に対するシミュレーション評価により、変換温度法による境界条件の標準推定誤差が80%以上の大幅な低減が得られ非常に有効であることを明らかにした。

第4章では、連続二次冷却プロセスの二流体フラットスプレー非定常冷却特性の実験評価手法と得られた結果について述べた。連続機での冷却を模擬したSUS304製中空円筒ローター試験片を用いた移動式冷却評価装置を用いて、0.5~8 m/minの連続速度に対応した周速で試験片を回転させながら二流体フラットスプレーによる冷却温度履歴を操業条件に合わせた幅広い水量、水温に亘り測定した。試験片内部の熱電対から得られた冷却温度履歴より、提案した逆問題解析手法を用いて表面温度と表面熱流束を評価した。膜沸騰領域に限定されていた従前の研究に対し、本研究では二流体スプレー直下を移動中の高温面上の局所の表面温度・表面熱流束分布を膜沸騰から遷移沸騰域を経て核沸騰に至る沸騰熱伝達の全領域に亘り取得し、各沸騰伝熱モードでの冷却特性に対するスプレー水量密度分布、スプレー水量、

水温、移動速度などの影響を明らかにした。本研究で注目している核沸騰領域の特性については、核沸騰冷却伝熱が実現される条件を定めた他、移動方向にぬれ面の拡大の効果でスプレー直下の1パス当たりの冷却熱量が増大し、非常に効率の高い急速冷却が実現可能であることが分かった。また、実験データに基づき SSC 冷却設備設計に必要な伝熱評価式についても提案を行っている。

第5章では、本研究で得られた結果の総括を行い、結論について述べた後、今後研究成果を連铸プロセスに適用するにあたっての展望について述べた。

以上述べたように本論文は、鉄鋼製造プロセスでの高温冷却特性評価に不可欠となる非定常熱伝導逆問題解析について、従前手法に対して大幅な精度改善が得られる変換温度法を提案した。そして、連続鑄造二次冷却プロセスにおける二流体フラットスプレーによる非定常冷却特性について、従前の研究では知見が不十分であった移動高温面上での間欠冷却条件での局所の伝熱特性を沸騰伝熱の全範囲に亘り提案した解析評価手法を用いて明らかにでき、今後連铸プロセスでの SSC 冷却の実現に不可欠な知見が示されている。

令和4年2月8日に実施した博士論文公聴会においても種々の質問がなされ、いずれも著者の説明により質問者の理解が得られた。

また、本研究は、審査付学術論文3編、学会発表1件で報告されており、著者は研究者としての十分な能力を有していると言える。

以上の審査結果に基づき、本論文は博士（工学）の学位を授与するに値すると判断され、審査員全員一致で合格と判定した。