

令和 5 年 6 月 2 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04326

研究課題名（和文）高温移動固体に衝突する液滴の伝熱評価法の確立

研究課題名（英文）Development of evaluation method of heat transfer characteristics in droplet impact on moving hot solid

研究代表者

藤本 仁 (Fujimoto, Hitoshi)

京都大学・エネルギー科学研究科・教授

研究者番号：40229050

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：鉄鋼材料の冷媒冷却による熱処理では、あらかじめ決められた材料温度履歴を正確に再現することが求められており、冷却現象の物理の解明が望まれている。本研究では、スプレー冷却の基本要素である、「加熱移動固体面と液滴列の衝突」における液体冷媒の沸騰流動を精密観察する実験手法を構築し、学術的に未解明な遷移沸騰や膜沸騰領域の素過程を基礎実験により研究した。また、冷却直後の固体表面温度の復熱過程から伝熱量を算出する新しい評価手法を構築し、その手法の有用性を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発した伝熱評価手法は、冷却に寄与しない冷媒を伝熱面から除去することで冷却直後の復熱現象を測定し、その熱伝導解析により強冷却領域の伝熱量を求める点に学術的な独創性がある。この手法は冷媒の除去が容易な遷移沸騰や膜沸騰領域でのみ適用可能であるが、原理的に固体内部の温度から計算する従来法よりも高分解能かつ高精度な計測が可能である。また、この手法は学術的に未解明な遷移沸騰の物理現象の解明に有用であるだけでなく、実操業の熱処理技術の高度化にも貢献できる。

研究成果の概要（英文）：In the heat treatment of steel materials by liquid quenching, it is required to accurately reproduce the predetermined temperature history of the material, and the construction of thermal control technology based on "science" is strongly desired for the advancement of this technology. In this study, we developed an experimental method to observe the collision behaviors of droplet train with a moving hot solid heated far above the boiling temperature, which is a fundamental element of spray cooling in actual processes. Fundamental flow mechanics of droplets in transition and film boiling regimes were experimentally studied in detail. In addition, we developed a new evaluation method for surface heat flux using the heat recovery phenomena immediately after cooling, and verified the availability of the method.

研究分野：熱流体工学

キーワード：沸騰伝熱 移動体冷却 スプレー冷却 逆解析 赤外線サーモグラフィ

### 1. 研究開始当初の背景

連続かつ大量生産される鉄鋼材料の製造プロセスの一つに、移動する高温材料を水スプレーなどの液体冷媒により急冷強化する「熱処理」がある。高品質材の製造では高度な冷却制御が求められているが、経験則に基づく冷却制御は精度限界に至っている。これを打破するには、冷却における物理現象をより深く理解し、「サイエンス」に基づいた熱制御技術の構築が必要である。静止した高温物体の水冷却については、冷媒の沸騰伝熱の素過程を観察した研究事例が多数存在しているが、移動体に対する研究事例は希少であり、十分な基礎的知見がなかった。また、その伝熱評価手法も確立されていなかった。

### 2. 研究の目的

本研究では、スプレー冷却の基本要素である「加熱移動固体面と液滴の衝突」における冷却特性を基礎実験により深く理解することを目的としている。そのために、冷媒が接触した加熱固体面の温度変化履歴から伝熱量を算出する逆解析手法の開発も目的とした。

### 3. 研究の方法

本研究では、まず液滴変形挙動の評価のための基盤構築を行い、それに引き続いて逆解析手法の構築を行った。ここで提案する逆解析モデルは、「冷媒液滴と固体面との衝突で固体面温度の急峻な低下が生じ、液滴離脱後に熱伝導により温度回復する」という伝熱過程を利用するものである。基盤構築では、冷媒流動(固液接触状況)と固体面温度変化を同時計測可能なラボスケールの実験装置の開発を行った。冷媒は水、加熱金属はステンレス鋼である。冷媒流動は高速度カメラにより動画観察を行い、冷媒衝突により局所的に低下した金属表面温度の復熱過程はサーモグラフィカメラにより計測した。光沢金属表面は放射率が非常に小さく、そのままではサーマルカメラによる高精度温度測定は困難であるため、放射率が高く、600℃の耐熱性があり、母材のステンレスとの付着力が高い AlTiN 黒化膜を物理蒸着させた試験片を使用した。構築した実験装置と代表的な実験条件を図1に示す。

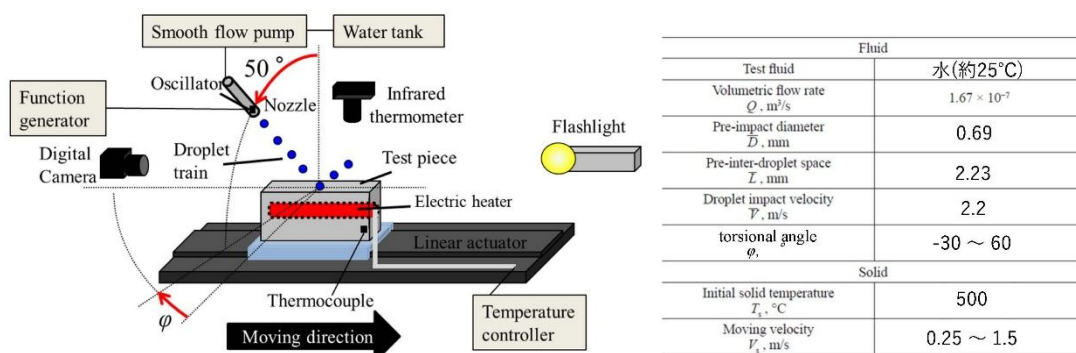


図1 実験装置の模式図(左)と代表的な実験条件(右)

### 4. 研究成果

得られた研究成果は下記のとおりである。

#### (1) 移動高温固体と液滴列の衝突変形挙動に関する研究

図1の実験装置を用いて、移動加熱ステンレス試験片に液滴列を衝突させ、その際の液滴の変形衝突挙動の観察を行った。加熱面の移動速度および温度、液滴列の衝突速度、衝突角度および液滴間隔などの諸因子を変化させた基礎実験により、液滴同士の合体が発生する場合と、発生しない場合があることを見出した。

図2は液滴間の合体が発生しない場合の衝突変形挙動の一例である。液滴は鋼板に衝突後、分裂することなく反発しており、単一液滴の衝突と同様の挙動を示す。そこで、単一液滴衝突の過去の知見に基づき、液滴直径、衝突速度、衝突角度、液滴間隔の緒因子を含む合体が発生する臨界条件の予測式を構築し、それが実験結果と良好に対応することを確認

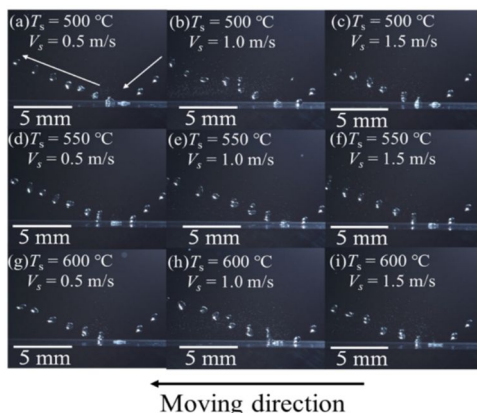


図2 実験結果の一例

した。この成果は、日本鉄鋼協会学会誌「鉄と鋼」に掲載された。

(2) 移動高温固体に傾斜衝突する柱状水噴流の沸騰熱伝達特性に関する研究

図1の実験装置において、液滴列を衝突させる代わりに柱状水噴流を衝突させる冷却実験を実施し、伝熱評価手法の構築に取り組んだ。

図3は実験結果の一例であり、冷却水は各図の中央部下端から上端に向けて噴射され、鋼板と衝突後、上方に反発・離脱する。冷却水の衝突点では鋼板表面温度が低下し、鋼板の移動により水平方向に半直線状の低温領域が形成される。噴流衝突点の温度降下量は、鋼板の移動速度および初期温度の影響を受ける。また、低温領域では鋼板内部からの熱伝導による復熱が発生する。

図4は本研究で構築した解析モデルの概要である。伝熱評価手法は、楕円状の噴流衝突部の伝熱量を仮定して3次元熱伝導解析を行い、図3で得られた復熱過程を良好に再現できる最適値を探索するもので、非常に独創的である。解析結果と過去知見を比較し、妥当な沸騰熱伝達を示すことを確認し、提案する手法が噴流衝突部の熱伝達量評価に有効であることを示した。この研究成果は、日本鉄鋼協会学会誌「鉄と鋼」に掲載された。

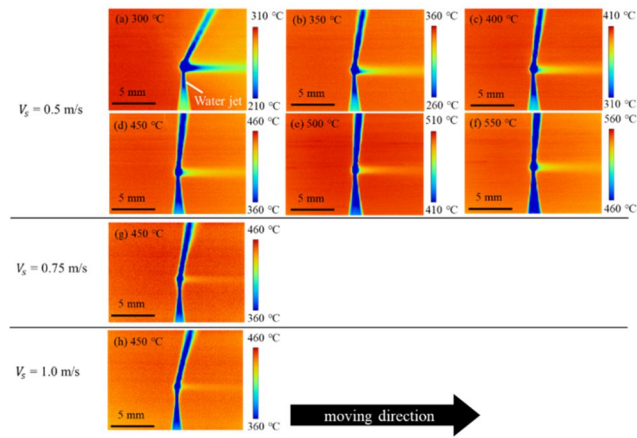


図3 種々の柱状噴流冷却条件下での鋼板温度分布

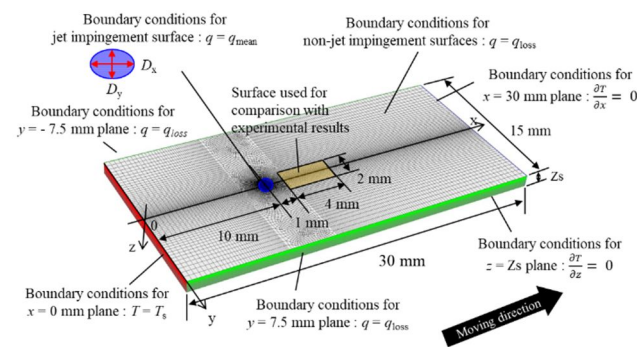


図4 解析モデルの概要

(3) 移動高温固体に傾斜衝突するスプレー液滴列の衝突挙動と沸騰熱伝達特性に関する研究

研究成果(1)で得られた結果を踏まえ、移動高温固体に液滴列が合体することなく離散的に傾斜衝突するときの表面温度分布を測定し、熱伝達特性を研究した。

図5は液滴列が移動固体表面に離散衝突することで形成される表面温度分布の実験結果である。鋼板移動速度が大きい場合は、個々の液滴衝突による温度降下領域が離散的に発生するが、小さくなると温度降下領域が重なり合うことが分かった。この実験結果は、単一液滴衝突を重ね合わせた力学モデルにより、良好に予測することができた。

また、個々の液滴が固体面に接触している時間の平均的な抜熱量を実験結果から推定し、過去知見との比較を行い、提案する手法の妥当性を検証した。この成果は、日本鉄鋼協会学会誌「鉄と鋼」に掲載が決定している。

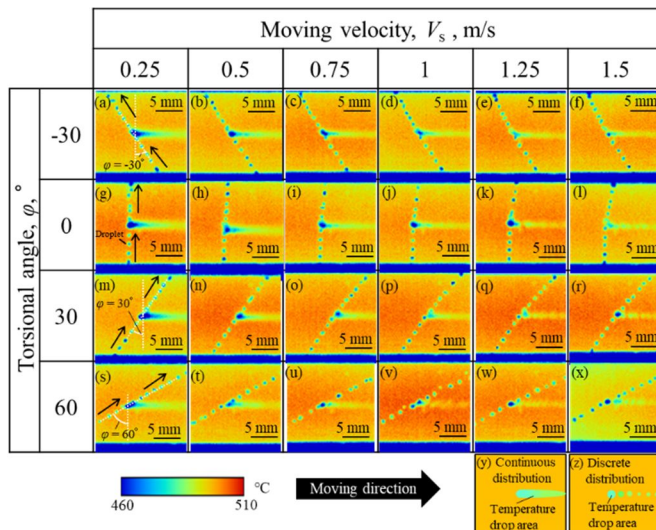


図5 種々のスプレー液滴列衝突条件下での鋼板温度分布

一連の研究により、独創性の高い伝熱評価手法が構築でき、さらにスプレー液滴列の沸騰伝熱の素過程が解明できた。本研究の所期の目的は、おおむね達成できたと考えている。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 建部 勝利, 塩入 悠太, 藤田 俊輔, 藤本 仁	4. 巻 108
2. 論文標題 移動平板へ衝突する円形水噴流の熱伝達特性の評価手法の構築	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 鉄と鋼	6. 最初と最後の頁 823-834
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2355/tetsutohagane.tetsu-2022-051	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 建部 勝利, 藤田 俊輔, 藤本 仁	4. 巻 109
2. 論文標題 移動高温固体へ傾斜衝突する液滴列の流動可視化および熱伝達特性	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 鉄と鋼	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2355/tetsutohagane.tetsu-2022-131	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Katsutoshi Tatebe, Hiroaki Takeshita, Yoshihiro Serizawa, Hitoshi Fujimoto	4. 巻 62
2. 論文標題 Development of Flow Visualization Measurement Method of Droplet Train Obliquely Impinging on Moving Hot Solid	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ISIJ International	6. 最初と最後の頁 542-549
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2021-427	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Tatebe Katsutoshi, Takeshita Hiroaki, Serizawa Yoshihiro, Fujimoto Hitoshi	4. 巻 107
2. 論文標題 Development of Flow Visualization Measurement Method of Droplet Train Obliquely Impinging on Moving Hot Solid	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Tetsu-to-Hagane	6. 最初と最後の頁 128-136
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2355/tetsutohagane.TETSU-2020-091	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Katsutoshi TATEBE, Yuta SHIOIRI, Hitoshi FUJIMOTO, Yoshihiro SERIZAWA
2. 発表標題 Development of evaluation method of heat transfer characteristics for water jet cooling to moving hot solid
3. 学会等名 The 2nd Asian Conference on Thermal Sciences (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Deformation behavior of droplet-train vertically or obliquely impinging on moving hot solid
2. 発表標題 Katsutoshi TATEBE, Hiroaki TAKESHITA, Yoshihiro SERIZAWA, Hitoshi FUJIMOTO
3. 学会等名 The 2nd Asian Conference on Thermal Sciences (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 建部勝利, 藤田俊輔, 藤本仁
2. 発表標題 移動高温固体に傾斜衝突する円形水噴流の沸騰流動と熱伝達特性
3. 学会等名 日本鉄鋼協会第183回春季講演大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 建部勝利, 塩入悠太, 藤本仁
2. 発表標題 移動高温固体へ傾斜衝突する円形水噴流の熱伝達特性
3. 学会等名 第181回日本鉄鋼協会講演大会
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
---------	---------