

令和 6 年 5 月 30 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01264

研究課題名(和文) 急冷開始を決定づける高温固体面上の固液接触の動的物理

研究課題名(英文) Dynamics of liquid-solid contact on a hot solid surface that determines quenching point

研究代表者

河野 正道 (KOHNO, MASAMICHI)

九州大学・工学研究院・教授

研究者番号：50311634

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：スプレー冷却は急速冷却技術の本命であり、この冷却プロセスの制御性は急冷開始温度(クエンチ点)をいかに自在に制御できるかにかかっている。このため、本研究では、環境制御型スプレー冷却装置を開発し、環境雰囲気(圧力・気体種)の各種制御因子がクエンチ点温度や液滴蒸発挙動に及ぼす影響を中心に検討した。雰囲気圧力を変化させたスプレー冷却では、圧力が高くなるにつれて冷却速度が高くなり、クエンチ温度も圧力が高くなるにつれて上昇した。また上向き平板のプール膜沸騰を想定したモデルからクエンチ温度を良好に推算できることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スプレー冷却は急速冷却技術の本命であり、この冷却プロセスの制御性は急冷開始温度(クエンチ点)をいかに自在に制御できるかにかかっている。特に鉄鋼製造プロセスでは、冷却速度によって材質の微細構造を制御し、その材質の特性を決定するため、スプレー冷却の高精度制御が望まれている。

本研究にて、上向き平板のプール膜沸騰を想定したモデルからクエンチ温度を良好に推算できることが分かったため、今後このモデルを行動することで、鋼板製造プロセスのさらなる発展に貢献することが期待される。また得られた知見は半導体装置および電子機器の冷却など、広範な冷却プロセスへの応用も可能である。

研究成果の概要(英文)：Spray cooling is the leading technology for rapid cooling, and the controllability of this cooling process depends on how freely the quench temperature (quench point) can be controlled. Therefore, in this study, we developed an environment-controlled spray cooling device and focused on examining the effects of various control factors of the ambient environment (pressure and gas types) on the quench point temperature and droplet evaporation behavior.

In spray cooling with varying ambient pressure, the cooling rate increased as the pressure increased, and the quench temperature also rose with higher pressure. Additionally, it was found that the quench temperature could be accurately estimated using a model that assumes upward-facing pool film boiling.

研究分野：熱工学

キーワード：相変化伝熱 スプレー冷却 液滴蒸発 鋼板冷却

### 1. 研究開始当初の背景

沸騰や凝縮など気液相変化を伴う現象は液体の蒸発潜熱を利用することにより大量のエネルギーを伝達することが可能であるため、我々の研究対象となっている鋼板や合金製造プロセスにおける急速冷却<sup>1)</sup>、スマートフォンやパソコンからパワーデバイスまでに至る広範な電気機器の除熱デバイス<sup>2,3)</sup>、原子炉の緊急冷却<sup>4)</sup>などに利用されているが、鉄鋼製造プロセスにおける高品質化をはじめとして、電子機器の高発熱密度化などの要求に対応して、その高度化が望まれ続けている。鉄鋼製造プロセスでは、冷却速度によって材質の微細構造を制御し、その材質の特性を決定するため、冷却速度の制御が重要な課題の1つになっている。スプレー冷却は文字通りスプレー状の液滴を被冷却対象に噴霧することで冷却する手法であるが、冷却特性に影響を及ぼす因子は冷却水側(スプレーにおける液滴のサイズ、液滴射出速度、単位時間および単位面積あたりの流量、液滴温度など)と被冷却側(表面の濡れ性、粗さ、熱物性値など)双方で多くあるため、これらの各因子が冷却過程に及ぼす影響を理解し、スプレー冷却を制御することが長年の課題となっている。

### 2. 研究の目的

スプレー冷却における水量密度、液滴速度や液滴温度に加えて環境雰囲気圧力を制御因子として、冷却側(液体)および被冷却側(固体)の各種条件がスプレー冷却熱伝達特性に及ぼす影響の定量的(冷却速度やクエンチ点)な知見を得る(クエンチ温度予測モデルなど)こと、加熱履歴による表面の濡れ性の変化を調査し、クエンチ現象の素過程である単一液滴の衝突・蒸発過程の詳細な観察を行うことを目的とした。また、これからの実験を可能とする実験装置の開発も重要な目的となる。

### 3. 研究の方法

従来のスプレー冷却実験は大気雰囲気で行われていたため、実験中における酸化皮膜の成長の影響を排除することが困難であった。我々は実験中における酸化皮膜の成長を避けることや、逆に厚みや組成を制御して酸化皮膜を成長させ、皮膜の性状・熱物性が冷却プロセスに及ぼす影響を検討するため、チャンパー内にスプレー冷却装置を設置して、雰囲気ガス種(実験では N<sub>2</sub> もしくは Ar を使用)や圧力(0.1 MPa~0.5 MPa)を制御することが可能な実験装置を構築した。また試料の加熱から冷却実験まで一貫して環境雰囲気を制御するために、試料の加熱はチャンパー外に設置された放射型ランプヒーターにより行う仕様となっている。図1は環境制御型スプレー冷却装置の概略図である。スプレー冷却実験用のノズルが装置上部に示されているが、このノズルを単一液滴射出用ノズルに変更することで、固体表面に衝突する単一液滴の挙動も観測することが可能である。実験に用いる試料は直径 50 mm、高さ 10 mm の円柱状金属試料等であり、試料上面から 1 mm の位置に温度計測用の熱電対(直径 0.5 mm)を挿入している。試料表面温度は熱電対から得られる情報から算出した。

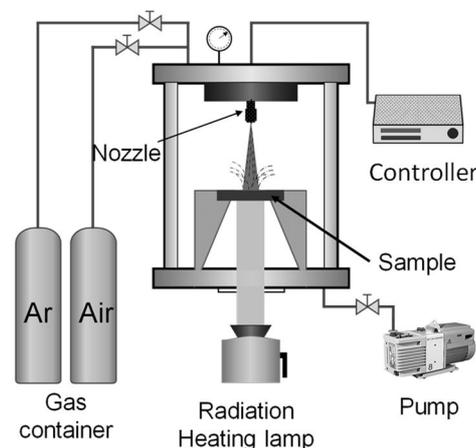


図1 環境制御型スプレー冷却装置の概略図。

### 4. 研究成果

環境制御型スプレー冷却装置は加熱される試料における酸化皮膜成長を防ぐ目的で導入されたが、雰囲気圧力を制御できる特徴を生かして、実験中における雰囲気圧力を変化させて行ったスプレー冷却実験を紹介する。図2は純鉄試料のスプレー冷却における雰囲気圧力を 0.1 MPa ~ 0.5 MPa で変化させて得られた冷却曲線である<sup>5)</sup>。前述したようにすべての圧力にて膜沸騰領域および核沸騰領域が観測され、冷却速度の大きな違いは膜沸騰領域で顕著に見られた。圧力が 0.1 MPa の場合はクエンチ点に到達するまでの冷却時間が約 80 秒であるのに対して、圧力が 0.2 MPa の場合は約 55 秒に短縮され、圧力が高くなるにつれて冷却速度が高くなることが分かる。クエン

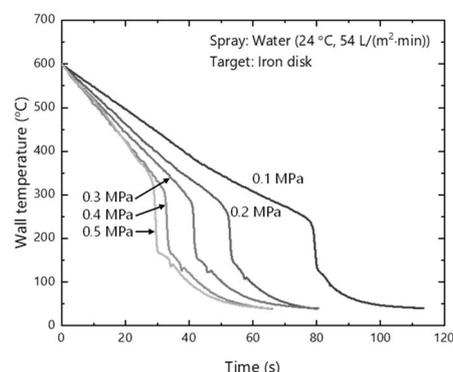


図2 雰囲気圧力を 0.1 ~ 0.5 MPa で変化させて得られた冷却曲線。

チ温度も圧力が高くなるにつれて上昇したが、クエンチを経て核沸騰領域となると圧力による冷却速度の差は見られない。図 3 に今回の実験から得られたクエンチ温度と雰囲気圧力の関係を示す<sup>5)</sup>。クエンチ温度はスプレー冷却における体積流量密度が 54 L/(m<sup>2</sup>·min)および 79 L/(m<sup>2</sup>·min)の際のデータから見積もった。なお参考として水の熱力学的過熱限界温度(ある圧力において、液体のみの状態を保てる最高温度)と飽和温度の推算値も記載している。熱力学的過熱限界温度( $T_{TLS}$ )は Lienhard によって提案された臨界点までの圧力範囲に適用できる次の式(1)を用いた<sup>6)</sup>。

$$T_{TLS} = T_c \left[ 0.905 + 0.095 \left( \frac{T_{sat}}{T_c} \right)^8 \right] \quad (1)$$

ここで  $T_c$  は臨界温度 (K) で  $T_{sat}$  は飽和温度 (K) である。

雰囲気圧力とクエンチ温度の関係をみると、0.1 MPa では約 220°C であるが、圧力が上昇すると共にクエンチ温度も上昇し、0.5 MPa では約 310°C であった。スプレー冷却における体積流量密度が 54 L/(m<sup>2</sup>·min)から 79 L/(m<sup>2</sup>·min)に増加すると水量が増えた分、クエンチに達するまでの時間は短縮されるが、クエンチ温度は大きく変化しなかった。

クエンチ温度に関しては上向き平板のプール膜沸騰(プール沸騰:液体をポンプなどにより強制流動させない場合の沸騰。プール膜沸騰とは加熱面が蒸気膜に覆われ、その上部に液体が存在する沸騰様相)における整理式にて推算可能かを検討した。これまでに提案されているいくつかの整理式から推算されるクエンチ温度と実験結果を比較検討した結果、Caiらのモデルが良好にクエンチ温度を推算

できることが分かった。Cai のモデルは固体表面上に形成される蒸気膜の形状を考慮する際に、テラー不安定波長の考えを導入すると同時に蒸気膜における気液界面に働く力のバランスを考慮し、蒸気膜が薄くなり液体が固体表面に接触した際の温度をクエンチ温度としている<sup>7)</sup>。なお液体が固体表面に接触する際の温度は以下の式(2)から推算される。

$$T_{MHF} = T_{sat} + 0.1223 \left( \frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{-0.2029} \frac{\rho_v L_{lv}}{Nuk_v} \left[ \frac{\sigma^3}{g \rho_v^2 (\rho_l - \rho_v)} \right]^{1/4} \quad (2)$$

ここで、 $T_{MHF}$  は極小熱流束点温度でありクエンチ温度に相当する。 $L_{lv}$  は蒸発潜熱 (J/kg)、 $\sigma$  は表面張力 (N/m)、 $\mu$  は粘度 (Pa·s)、 $g$  は重力加速 (m/s<sup>2</sup>) であり、添字  $v$  は蒸気である。ここで  $Nu$  はヌセルト数で Klimenko によって提案された推算式から求めている<sup>8)</sup>。Cai のモデルは上向き平板のプール膜沸騰を想定しており、スプレー実験とは状況が異なるが、良好にクエンチ温度を推算できているため、重要な物理パラメータはある程度妥当に考慮されていると考えられる。

スプレー冷却は水によって試料を冷却する手法であるが、試料は水への伝熱( $Q_{spray}$ )以外に雰囲気ガスによる自然対流( $Q_{nc}$ )やふく射( $Q_{rad}$ )によっても冷却が進むため、冷却される試料の全放熱量( $Q_{tot}$ )は  $Q_{tot} = Q_{spray} + Q_{nc} + Q_{rad}$  となる。図 4 に実験および液滴衝突モデルに基づく解析によって得られた、試料の全放熱量に対する各伝熱形態が占める割合を示す<sup>5)</sup>。縦軸は伝熱量であり横軸は表面温度である。水への伝熱が全体の 80%以上を占め、試料は想像される通り幅広い温度領域にて、主に水によって冷却されることが分かる。雰囲気圧力の影響を見ると、雰囲気圧力が 0.1 MPa から 0.5 MPa に増加すると、伝熱量の合計は約 2 倍に向上している。また雰囲気圧力が増加しても、自然対流およびふく射による伝熱量はそれほど増加しておらず、主に水への伝熱が増加していることが分かる。これは主に、雰囲気圧力が高くなることで飽和温度

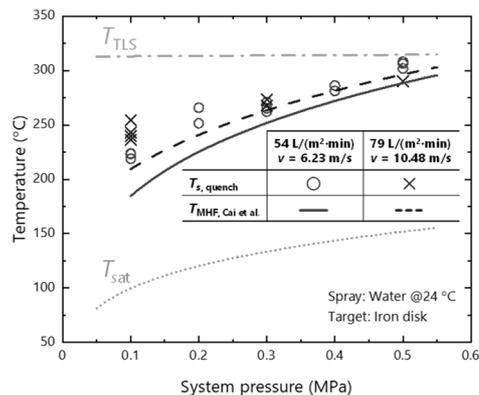


図 3 クエンチ温度と雰囲気圧力の関係

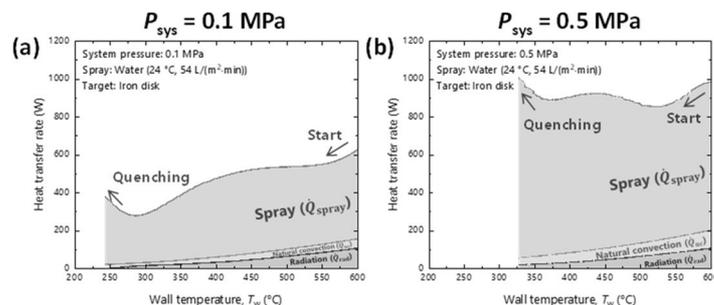


図 4 実験および液滴衝突モデルに基づく解析によって得られた、試料の全放熱量に対する各伝熱形態が占める割合

が上昇して蒸気膜が薄くなることに起因すると考えられる。さらに膜沸騰領域における単一の液滴による伝熱量を検討すると、実際には液滴と表面が蒸気膜で完全に分離された状態で無く、膜沸騰領域でも一時的に局所的な固液の接触が生じており、この接触が表面から水への伝熱にそれなりに寄与していると考えられる結果が得られている。

#### 参考論文

- 1) Hall, D.D. and Mudawar, I.: Predicting the Impact of Quenching on Mechanical Properties of Complex-Shaped Aluminum Alloy Parts, *J. Heat Transfer*, **117**, 479–488 (1995)  
doi:10.1115/1.2822547.2
- 2) Fabbri, M. Jiang, S. and Dhir, V.K.: A Comparative Study of Cooling of High Power Density Electronics Using Sprays and Microjets, *J. Heat Transfer*, **127**, 38–48 (2005)  
doi:10.1115/1.1804205
- 3) Lohrasbi, S. Hammer, R. Essl, W. Reiss, G. Defregger, S. and Sanz, W.: A Comprehensive Review on the Core Thermal Management Improvement Concepts in Power Electronics, *IEEE Access*, **8**, 166880–166906 (2020)  
doi:10.1109/ACCESS.2020.3021946
- 4) Sagawa, N.: An Experimental Study of Spray Cooling in Nuclear Reactor Containers, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **5**, 419–426 (1968)  
doi:10.1080/18811248.1968.9732485
- 5) Kita, Y. Nakamatsu, M. Hidaka, S. Kohno, M. and Takata, Y.: Quenching Mechanism of Spray Cooling and the Effect of System Pressure, *Int. J. Heat Mass Transf.*, **190**, 122795 (2022)  
doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.122795
- 6) Lienhard, J. H.: Correlation for the Limiting Liquid Superheat, *Chem. Eng. Sci.*, **31**, 847–849 (1976)  
doi:10.1016/0009-2509(76)80063-2
- 7) Cai, C. Mudawar, I. and Liu, H.: Mechanistic Method to Predicting Minimum Heat Flux Point Wall Temperature in Saturated Pool Boiling, *Int. J. Heat Mass Transf.*, **156**, 119854 (2020)  
doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119854
- 8) Klimenko, V.V.: Film Boiling on a Horizontal Plate - New Correlation, *Int. J. Heat Mass Transf.*, **24**, 69–79 (1981)  
doi:10.1016/0017-9310(81)90094-6

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Nag S., Tomo Y., Takahashi K., Kohno M.	4. 巻 37
2. 論文標題 Mechanistic Insights into Nanobubble Merging Studied Using in Situ Liquid-Phase Electron Microscopy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Langmuir	6. 最初と最後の頁 874-881
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1021/acs.langmuir.0c03208	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nag S., Tomo Y., Teshima H., Takahashi K., Kohno M.	4. 巻 23
2. 論文標題 Dynamic interplay between interfacial nanobubbles: oversaturation promotes anisotropic depinning and bubble coalescence	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Chemistry Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 24652-24660
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1039/d1cp03451k	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yutaku Kita, Mikiya Nakamatsu, Sumitomo Hidaka, Masamichi Kohno, Yasuyuki Takata	4. 巻 190
2. 論文標題 Quenching mechanism of spray cooling and the effect of system pressure	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 INTERNATIONAL JOURNAL OF HEAT AND MASS TRANSFER	6. 最初と最後の頁 122795
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.122795	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 1件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 河野正道, 仲松幹弥, 日高澄具, 喜多由拓, 高田保之
2. 発表標題 高温面のスプレー冷却における急冷開始点の決定因子に関する研究
3. 学会等名 第58回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木田健介, 喜多由拓, 仲松幹弥, 日高澄具, 河野正道, 高田保之
2. 発表標題 スプレー冷却の急冷開始点に及ぼす雰囲気圧力の影響
3. 学会等名 日本機械学会熱工学コンファレンス2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 河野 正道
2. 発表標題 熱処理における“熱科学・熱技術”
3. 学会等名 第59回日本伝熱シンポジウムプログラム（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 喜多 由拓, 木田 健介, 高山 翔, 日高 澄具, 河野 正道, 高田 保之
2. 発表標題 温度履歴による濡れ性変化が及ぼす液滴衝突挙動およびクエンチ点への影響
3. 学会等名 第59回日本伝熱シンポジウムプログラム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 河野正道
2. 発表標題 高温固体面のスプレー冷却における急冷開始点決定因子の探究
3. 学会等名 日本冷凍空調学会調査研究プロジェクト「カーボンニュートラルに向けた先進熱交換技術に関する調査研究」
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 尾上 樹, 木田 健介, 有吉 隆晃, 河原 朋美, 日高 澄具, 喜多 由拓, 高田 保之, 河野 正道
2. 発表標題 濡れ性の加熱履歴依存性と液滴衝突挙動に関する研究
3. 学会等名 鉄鋼協会 創形創質部会冷却フォーラム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 加熱履歴による表面性状変化が液滴蒸発時間に及ぼす影響
2. 発表標題 尾上 樹, 木田 健介, 有吉 隆晃, 河原 朋美, 日高 澄具, 喜多 由拓, 高田 保之, 河野 正道
3. 学会等名 第60回日本伝熱シンポジウム講演論文集
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 河野 正道
2. 発表標題 表面性状および雰囲気圧力が急冷開始点に及ぼす影響
3. 学会等名 鉄鋼協会 創形創質部会冷却フォーラム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Masamichi KOHNO, Yutaku KITA, Mikiya NAKAMATSU, Sumitomo HIDAKA, Yasuyuki TAKATA
2. 発表標題 Effect of Surrounding Pressure on Spray Cooling of Hot Surface
3. 学会等名 11th Int. Conf. Boiling Condensation Heat Transfer 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 竹崎 悠晟, 有吉 隆晃, 史 正崎, 喜多 由拓, 高田 保之, 河野 正道
2. 発表標題 環境雰囲気が高温面上の液滴蒸発挙動に及ぼす影響
3. 学会等名 日本機械学会九州支部 第55回学生員卒業研究発表講演会
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
研究分担者	高田 保之  (Takata Yasuyuki)  (70171444)	九州大学・工学研究院・教授    (17102)	

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
---------	---------