

酸化スケールの断熱性を利用した鋼の高速冷却に対する基礎検討

研究代表者 芝浦工業大学工学部 教授 遠藤 理恵

共同研究者 神奈川大学工学部機械工学科 助教 諸隈 崇幸

共同研究者 佐賀大学理工学部理工学科機械エネルギー工学コース 教授 光武 雄一

1. 緒言

鉄鋼製造における熱間圧延工程では、圧延後の鋼板をいかに冷却するかが、最終製品の組織形態、機械的特性、および板厚方向・面内方向の品質均一性を大きく左右する。特に高温状態にある鋼板を水冷する過程では、鋼板表面に形成される蒸気膜の生成・崩壊を伴う複雑な沸騰現象が生じ、冷却速度は時間とともに大きく変化する。この冷却様式は一般に、蒸気膜により固液接触が遮断された膜沸騰状態から、蒸気膜が不安定化する遷移沸騰を経て、活発な核沸騰へと移行することが知られている。冷却速度が急激に変化するこの転換点はクエンチ点と呼ばれ、鋼板冷却プロセスの制御において重要な指標となっている。

実際の熱延鋼板表面には、高温酸化により酸化スケール（酸化膜）が形成される。酸化スケールは鋼材に比べて熱伝導率が一桁以上低く、鋼板表面における熱抵抗層として作用する^[1,2]。その結果、鋼板と冷却水との熱移動が抑制され、クエンチ開始温度が高温側へ移動し、冷却完了までの時間が短縮されることが報告されている^[3,4]。このように、表面状態は鋼板の冷却に大きな影響を及ぼすにもかかわらず、その影響を定量的かつ機構論的に理解することは依然として困難である。

これまで、浸漬冷却やクエンチ現象に関する研究は数多く行われてきた。特に、金属球や細径試料を用いた実験では、試料内部の温度が一樣であると仮定できる集中熱容量モデルが広く用いられてきた。このモデルでは、試料内部の代表温度履歴から表面の熱伝達特性を比較的容易に評価することが可能であり、膜沸騰領域におけるマクロな冷却過程や、酸化膜の有無によるクエンチ点の変化といった定性的傾向については一定の理解が得られている^[5-10]。一方で、クエンチ点近傍において生じる数ミリ秒スケールの急激な表面温度変動や、局所的な固液接触の発生・消失といった非定常かつ空間的に不均一な現象については、十分な解明に至っていない。

集中熱容量モデルを適用した従来の評価手法では、冷却速度が極めて大きいクエンチ過程において、試料内部に形成される温度勾配を考慮することができない。そのため、表面の熱伝達現象と試料内部の熱伝導現象がどのように相互作用し、冷却の律速機構がどの段階でどのように変化するかといった点については、依然として不明確な部分が多い。特に、表面に存在する熱抵抗層が、クエンチ時の表面温度、熱流束、および内部温度分布にどのような影響を及ぼすのかという機構論的理解は十分とは言えない。

以上の背景から、本研究では、これまで固体の代表温度履歴としてマクロに捉えられてきたクエンチ現象を固体表面での熱移動と内部熱伝導の相互作用という観点から再定義す

ることを目的とする。そのために、本研究では、あえて集中熱容量モデルが成立しない条件を採用し、試料内部に無視できない温度勾配が形成される系を対象とする。これにより、冷却過程における律速機構の変化を表面温度と内部温度の時間応答の違いとして直接捉えることを試みる。

本報告では、上記目的を達成するための第一段階として、鋼および酸化スケール系を模擬する基礎実験として、物性が安定したアルミニウム試料を用いた液体窒素浸漬冷却実験を行う。まず、非集中熱容量条件下における冷却機構を明らかにし、クエンチ前後での表面熱伝達と内部熱伝導の役割の変化を実験的に検証する。これにより、今後、表面改質や酸化膜付与による冷却制御を議論するための基礎的な参照系を確立することを目的とする。

2. 試料設計と非集中熱容量条件の検討

2.1 集中熱容量モデルとビオ数

固体の冷却過程を解析する際、試料内部の温度分布を無視し、内部温度が一様であると仮定する集中熱容量モデルが広く用いられてきた。この近似は、表面での熱移動に比べて固体内部の熱伝導が十分に速い場合に成立し、その適用条件はビオ数($Bi = hL/k$, h : 表面熱伝達係数, L : 代表長さ, k : 熱伝導率)が 0.1 未満であることが一般的な目安とされている。一方、ビオ数が 0.1 を超える条件では、冷却中に固体内部に無視できない温度勾配が形成され、表面温度と内部温度の時間応答が一致しなくなる。このような条件下では、集中熱容量モデルに基づく代表温度のみの解析は適用できず、表面での熱移動と内部熱伝導を分離して評価する必要がある。本研究では、クエンチ現象を表面伝熱と内部熱伝導の相互作用として捉え直すことを目的としている。そのため、あえて集中熱容量モデルが成立しない非集中熱容量条件 ($Bi \geq 0.1$) を満たす試料設計を行った。

2.2 試料サイズ選定の考え方

非集中熱容量条件を満たすためには、冷却中に試料内部に有意な温度勾配が形成される必要がある。そのためには、材料物性が一定である場合、代表長さすなわち試料寸法を適切に大きく設定することが有効である。本研究では、表面温度が流体との熱移動を反映し、内部温度が材料の熱拡散特性を反映するような温度応答を得ることを意図し、円柱形状の試料を対象としてサイズ検討を行った。また、試料内部の複数位置に熱電対を配置し、半径方向の温度分布を時間的に追跡することを前提とした設計とした。これにより、冷却過程において、表面近傍と中心部の温度応答の差を直接比較できるようにしている。

2.3 既報データに基づく表面熱伝達係数の評価

試料寸法を定量的に決定するため、アルミニウム円柱を液体窒素中で浸漬冷却した既報の実験結果^[1]を基に、表面熱伝達係数の評価を行った。Yamato ら^[1]が報告している冷却曲線に対して、集中熱容量モデルを仮定し、試料温度履歴から以下の関係式を用いると表

面熱伝達係数(h)が求められる^[12]。

$$h = -\frac{\rho CV}{A} \frac{1}{t} \ln \frac{T(t) - T_s}{T_0 - T_s} \quad (1)$$

ここで、 ρ は密度、 C は比熱、 V は体積、 A は表面積、 t は時間、 $T(t)$ はある時間 t における温度、 T_s は表面温度および T_0 は初期温度を示している。式(1)は集中熱容量モデルを仮定したものであり、本研究では主としてビオ数評価のための参考値として用いた。上式に基づいて算出した表面熱伝達係数では、直径 5～20 mm の円柱試料においては、クエンチ点以上の温度域では試料径による顕著な差は認められないことが確認された。一方、クエンチ後の低温域においては、試料径が大きいほど見掛けの熱伝達係数が増加する傾向が見られた。

2.4 ビオ数による試料径の決定

前節で得られた表面熱伝達係数を用いて、ビオ数を算出した^[13]。その結果を Fig. 1 に示す。円柱直径の増加に伴いビオ数は増加し、直径 20 mm 以上の試料では、クエンチ後の冷却過程においてビオ数が 0.1 を超えることが確認された。この結果より、直径 20 mm 以上の円柱試料を用いることで、集中熱容量モデルが成立しない条件を実現できることが分かった。本研究では、非集中熱容量条件を十分に満たすとともに、複数点での温度計測を安定して行うための空間的余裕を考慮し、最終的な試料寸法として直径 40 mm の円柱を採用した。

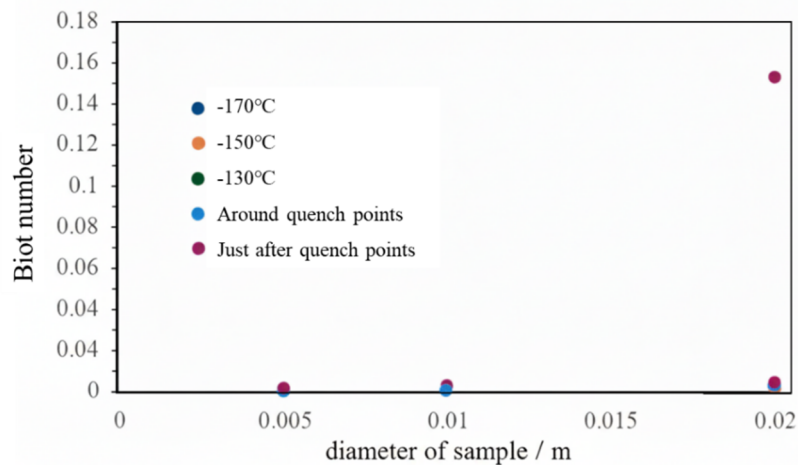


Fig. 1 Calculated Biot numbers as functions of diameter of sample

2.5 非集中熱容量条件を採用する意義

本研究で非集中熱容量条件を採用することにより、以下の点が可能となる。

- ・冷却過程において、表面での熱伝達と試料内部の熱伝導のどちらが熱移動の律速段階となっているかを、表面温度と内部温度の時間応答の差として判別できる。
- ・表面温度の急激な変化に対する内部温度の遅れを観測することで、クエンチを含む沸騰遷移過程を時間的・空間的な温度場として捉えることが可能となる。
- ・試料内部の複数点温度履歴を用いることで、熱伝導方程式に基づく逆解析を適用し、時間および温度に依存する表面熱伝達特性を推定できる可能性がある。

3. 実験

3.1 試料

本研究では、試料としてアルミニウム合金 A5056B を用いた。Fig. 2 に試料の概略図を示す。試料形状は円柱とし、直径 40 mm、長さ 50 mm とした。これは、前章で検討した非集中熱容量条件を十分に満たすとともに、試料内部に複数の温度測定点を設けるための空間的余裕を確保するためである。

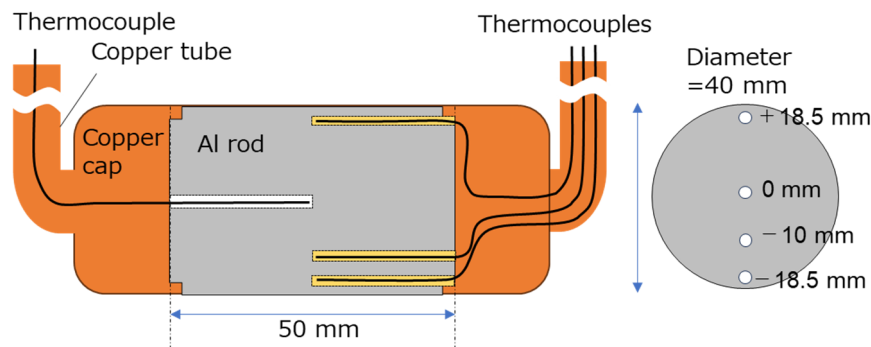


Fig. 2 Schematic diagram sample used in this study

試料内部の温度測定には、T 型シース熱電対（外径 1.0 mm）を 4 本用いた。熱電対は円柱の半径方向に沿って縦に配置した。中央(0 mm)を基準として、上方向に 18.5 mm、下方向に 10 mm および 18.5 mm の位置に熱電対を挿入した。これにより、表面近傍から中心付近までの温度変化を時間的に追跡できる構成とした。熱電対は、ドータイトを介して固定した。キャップには銅製チューブをろう付けし、チューブ内部を通して熱電対を外部へ導出した。これにより、冷却中における熱電対の位置ずれや、冷媒との直接接触による測定誤差を抑制した。

3.2 実験方法

実験装置の概略図を Fig. 3 に示す。冷媒には、大気圧下における飽和液体窒素（沸点

-195.8 °C) を用いた。液体窒素は、ガラスおよびアクリルからなる二重構造のデュワー瓶 (外径 210 mm, 内径 150 mm) に保持した。沸騰冷却に伴う気泡の生成を観察するため、高速度カメラを用いて沸騰状態の可視化を行った。撮影には最大 5000 fps の撮影が可能な高速度カメラを用い、バックライトとして LED 光源を配置するとともに、試料正面から補助光を照射した。これにより、試料表面近傍で生じる気泡を明瞭に観察できる条件を整えた。温度計測系については、熱電対出力をデータロガーにより取得し、試料内部温度の時間変化を同時に記録した。温度計測のサンプリング間隔は 20 ms とした。

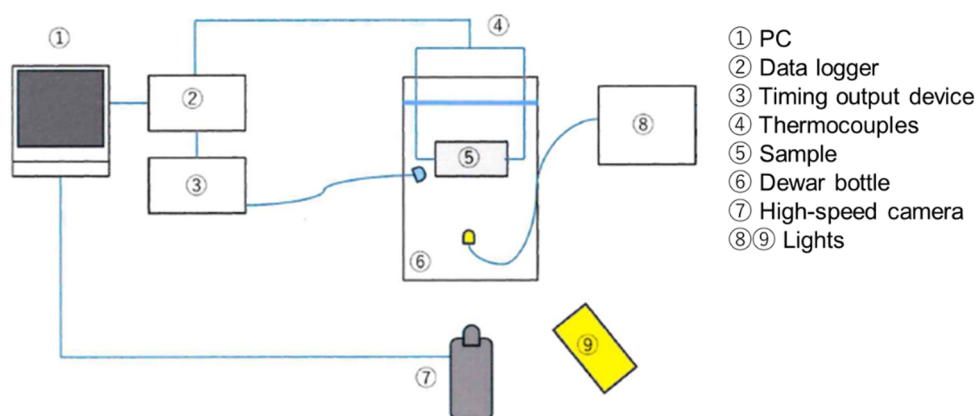


Fig. 3 Schematic diagram for the measurement system

3.3 実験手順

実験は、以下の手順で実施した。まず、試料を室温状態で所定の治具に固定し、熱電対および計測系が正常に動作していることを確認した。その後、試料を液体窒素中へ静かに浸漬し、試料全体が完全に液体窒素に浸かるように固定した。浸漬後、試料内部の温度変化を熱電対により連続的に測定するとともに、高速度カメラによる沸騰状態の撮影を行った。温度測定は、試料温度が液体窒素の飽和温度付近に達するまで継続した。

4. 実験結果と考察

4.1 試料内部の温度履歴とクエンチ点の確認

Fig. 4 にアルミニウム円柱試料を液体窒素中に浸漬した際の、各測定位置における温度の時間変化を示す。試料を浸漬した直後から温度は緩やかに低下し、その後、ある時刻において急激な温度低下が観測された。本研究では、この急冷開始点をクエンチ点とした。クエンチ点に至るまでの温度低下は比較的緩慢であり、試料内部の各測定位置における温度差は小さい。一方、クエンチ点以降では、測定位置によって温度低下の開始時刻や低下速度に差が生じていることが分かる。このことは、冷却過程の途中で、試料内部に無視できない温度勾配が形成されていることを示している。

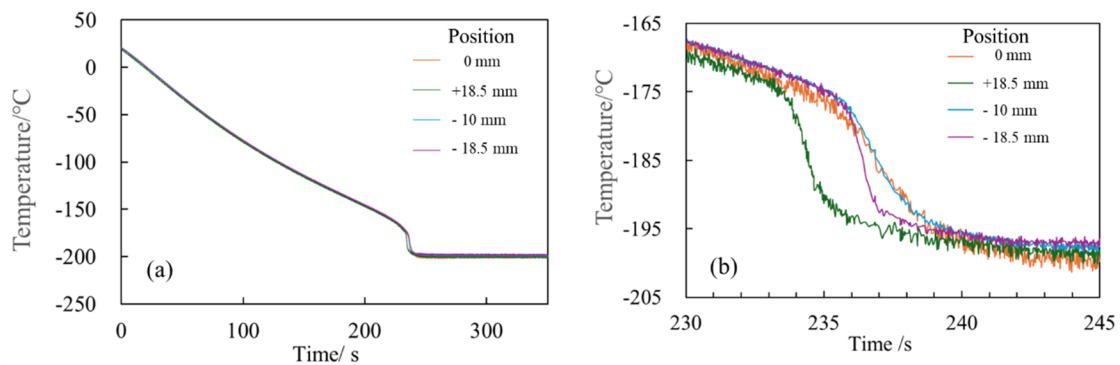


Fig. 4 (a) Cooling curve for measured in this study and (b) temperature changes in the time range between 230 s and 245 s in (a)

4.2 クエンチ近傍における温度差の時間変化

Fig.5 に、試料内部の異なる位置間における温度差の時間変化を示す。表面近傍（-18.5 mm）と内部（-10 mm）の温度差($T(-10\text{mm}) - T(-18.5\text{mm})$)は、クエンチ点付近において一時的に大きくなり、その後短時間で再び小さくなる傾向を示した。一方、内部（-10 mm）と中心部の温度差($T(0\text{ mm}) - T(-10\text{ mm})$)は、クエンチ点以降も一定の値を保っている。これらの結果から、クエンチ点付近では、表面近傍の温度低下が内部に先行して進行していることが分かる。すなわち、冷却の進行に伴い、表面と内部の熱応答に時間的なずれが生じ、内部熱伝導の寄与が顕在化していることが示唆される。また、試料上部において温度低下が先行して観測された点については、沸騰によって生成された気泡が上方へ集積しやすく、蒸気膜の崩壊が局所的に促進されたためと考えられる。

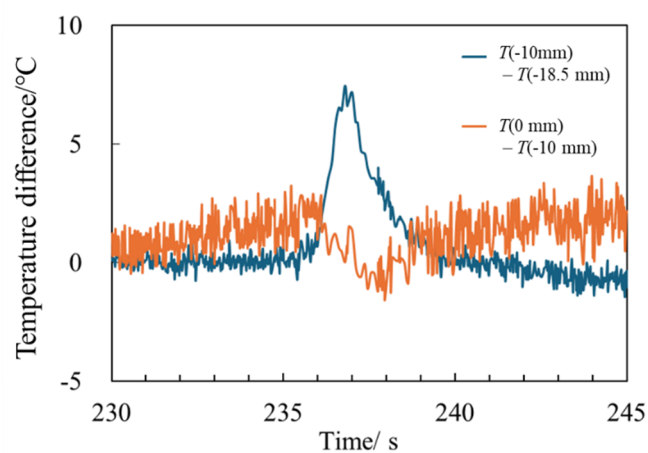


Fig. 5 Variation in temperature difference between different locations within the sample

4.3 表面温度および熱流束の推定

試料内部に形成される温度分布を定量的に評価するため、本研究では、半径方向の温度分布を時間依存の 2 次関数として近似した。すなわち、温度 T を半径 r の関数として、

$$T(r, t) = A(t) + B(t)r^2 \quad (2)$$

と表し、内部 2 点 (−18.5 mm および −10 mm) の温度データから係数 $A(t)$ および $B(t)$ を求めた。得られた係数に対して移動平均処理を施すことで時間変動を平滑化し、表面位置 (−20 mm) における温度を算出した。この表面温度勾配からフーリエの法則を用いて表面熱流束を算出し、さらに液体窒素の飽和温度との差を用いて見掛けの表面熱伝達係数を評価した。

4.4 表面熱伝達係数とビオ数の時間変化

Fig. 6 に、算出した表面熱伝達係数の時間変化を示す。クエンチ点以前では、表面熱伝達係数は比較的小さな値を示しており、冷却は主として表面での熱移動によって制限されていると考えられる。一方、クエンチ点を境に、表面熱伝達係数は急激に増加し、その後も大きな値を示した。

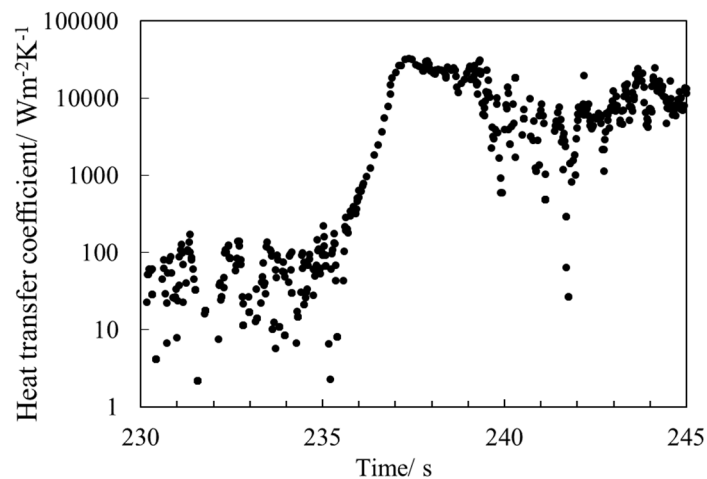


Fig. 6 Change of heat transfer coefficient

この表面熱伝達係数を用いて算出したビオ数の時間変化を Fig. 7 に示す^[13]。クエンチ点以前では、ビオ数は 0.1 未満であり、集中熱容量モデルが成立する条件に近い状態であったことが分かる。しかし、クエンチ点以降では、ビオ数は急激に増加し、最大で 10 程度の値を示した。この結果は、クエンチ点を境として、冷却過程の律速機構が変化していることを明確に示している。すなわち、クエンチ点以前の膜沸騰状態では、冷却は主として表

面での熱伝達によって支配されているのに対し、クエンチ点以降では、試料内部の温度勾配が顕在化し、内部熱伝導が冷却を制限する主要因となっている。なお、クエンチ後の低温域において表面熱伝達係数が非常に大きな値を示す点については、試料と冷媒との温度差が小さくなることで、見掛け上、熱流束が過大に評価される影響を含んでいるためである。

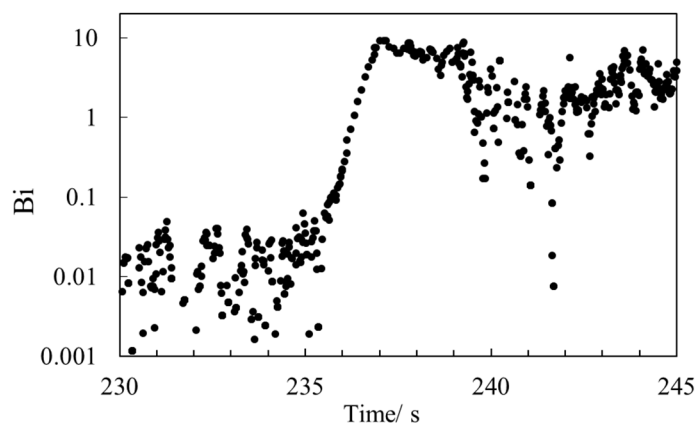


Fig. 7 Change in Biot number

4.5 律速機構の転換としてのクエンチ現象

以上の結果より、本研究で観測されたクエンチ点は、単なる温度低下の開始点ではなく、冷却過程における律速機構が「表面熱伝達支配」から「内部熱伝導支配」へと切り替わる転換点として解釈できる。このように、非集中熱容量条件下で表面温度と内部温度を同時に評価することで、クエンチ現象を熱移動機構の変化として明確に捉えることが可能となった。本結果は、今後、表面改質や酸化膜付与による冷却制御を検討する際の基礎的な指標を与えるものと考えられる。

5. 結言

本研究では、浸漬冷却過程におけるクエンチ現象を、固体表面での熱移動と内部熱伝導の相互作用として捉え直すことを目的とし、非集中熱容量条件下での冷却実験を行った。基礎検討として、アルミニウム合金円柱試料を用いた液体窒素浸漬冷却実験を実施し、表面および内部の温度変化を同時に評価した。

試料設計では、ビオ数に基づく検討から、冷却中に試料内部に有意な温度勾配が形成される条件を満たす寸法として直径 40 mm の円柱試料を採用した。実験の結果、クエンチ点以前では冷却が主として表面熱伝達によって制限されているのに対し、クエンチ点以降では内部の温度勾配が顕在化し、内部熱伝導が冷却を制限する主要因となることが示された。表面熱伝達係数およびビオ数の評価から、クエンチ点を境として冷却過程の律速機構

が転換していることを定量的に確認した。

以上より、クエンチ現象は単なる急冷開始点ではなく、冷却の律速機構が切り替わる転換点として解釈できることを明らかにした。本研究で用いた非集中熱容量条件下での評価手法は、今後、酸化膜付与試料における冷却制御機構の解明に有効であると考えられる。

謝辞

本研究の一部は、「公益財団法人 JFE21 世紀財団」の研究助成による支援を受けて実施したものです。関係各位に謝意を表します。本研究の遂行にあたり、玉川大学名誉教授・大久保英敏先生ならびに佐賀大学名誉教授・門出政則先生より、多大なるご助言を賜りました。ここに記して深く感謝の意を表します。本研究で使用した装置の一部は有限会社アリモテック取締役・有本亨三博士にご提供いただきました。厚く御礼申し上げます。また、実験の実施に際しては、芝浦工業大学工学部材料工学科の学生である武藤直士君、米田和真君、渋谷里沙君、古澤由成君、二俣航大君、岡部悠伸君に多大なるご協力をいただきました。心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1 R. Endo, T. Yagi, M. Ueda, and M. Susa: *ISIJ International*, 2014, vol. 54, pp. 2084–8.
- 2 M. Li, R. Endo, M. Akoshima, and M. Susa: *ISIJ Int.*, 2017, vol. 57, pp. 2097–106.
- 3 N. Shoji, Y. Haraguchi, and M. Hariki: *Proceedings of the National Heat Transfer Symposium of Japan*, 1997, vol. 34, pp. 737–8.
- 4 Y. Osugi, M. Ueda, R. Endo, and M. Susa: *Tetsu-to-Hagané*, 2018, vol. 104, pp. 72–80.
- 5 M. Monde and Y. Mitsutake: *Thermal Science and Engineering*, 2023, vol. 31, pp. 51–68.
- 6 H. Ohkubo and S. Nishio: *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series B*, 1989, vol. 55, pp. 2846–51.
- 7 S. Nishio and Y. Serizawa: *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series B*, 1987, vol. 53, pp. 1061–4.
- 8 S. Nishio, M. Uemura, and K. Sakaguchi: 生産研究, 1987, vol. 39, pp. 103–106.
- 9 H. Ohkubo and S. Nishio: *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series B*, 1988, vol. 54, pp. 934–7.
- 10 H. Fukuda, N. Nakata, H. Kijima, T. Kuroki, A. Fujibayashi, Y. Takata, and S. Hidaka: *Tetsu-to-Hagané*, 2014, vol. 100, pp. 1514–22.
- 11 D. Yamato, K. Shigematsu, H. Ohkubo, and M. Akinaga: *Bulletin of University of Teacher Education Fukuoka*, 2016, vol. 65, pp. 15–2.
- 12 T.L. Bergman and A.S. Levine: *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, John

Wiley & Sons, Inc., 2019.

- 13 B. Baudouy and A. Four: *Cryogenics (Guildf)*, 2014, vol. 60, pp. 1–4.