水滴の蒸発速度を利用したスケールを有する鋼板表面からの 拔熱流束の評価

大杉 祐人¹⁾・上田 光敏²⁾・遠藤 理恵²⁾・須佐 匡裕^{2)*}

Evaluation of Heat Flux Extracted from Steel Surface with Oxide Scale Utilizing Evaporation Rate of Water Droplet

Yuto OHSUGI, Mitsutoshi UEDA, Rie ENDO and Masahiro SUSA

Synopsis : The present work has proposed a new method to evaluate heat flux extracted from steel surface with iron oxide scale using the mass change of a water droplet and the standard enthalpy of evaporation for water at 100°C. The apparatus was composed of a furnace, an electronic balance, a water droplet supplying device, a combination of a thermocouple and a digital multi-meter, in addition to a video camera. Ultra-low carbon steel plate samples were oxidised in air at 850°C in the furnace so as to have iron oxide scale (mainly FeO) with desired thicknesses, and then moved onto the electronic balance. About 3 g of water was supplied onto the sample, and the mass change of water and temperature inside the sample were measured by the balance and the thermocouple, respectively. In addition, boiling behaviour of water was also recorded by the video camera. The mass and temperature changes well corresponded to the video images which recorded film boiling and nucleate boiling of water. The quench temperatures obtained in experiments using the samples with scales 40, 58, 77 and 103 µm thick were 131, 167, 121 and 182°C, respectively, and the respective heat fluxes just before quench were estimated to be 31, 35, 33 and 43 kWm⁻². Assuming that the present system is at a quasi-steady state, Fourier's law has been applied to estimate the thickness of water vapour film during film boiling; resultantly, the thickness decreases from *ca* 100 µm to *ca* 20 µm with cooling of steel.

Key words : iron oxide scale; droplet film boiling; evaporation rate; extracted heat flux; vapour film thickness.

1. 緒言

鉄鋼生産プロセスにおいて、所定の材質を有する鋼板を製造するためには、熱延プロセス後の水スプレーなどによる冷却を厳密に制御し、均一に冷却することが非常に重要である¹⁾。鋼板は高温の状態では空気を搬送されるために、その表面には酸化スケールが生成する。このスケールは高圧水により何度も除去されるが、鋼は高温で容易に酸化するために、仕上げ圧延後においても数10 µm厚のスケールが存在する。すなわち、水冷却プロセスでは、鋼板からの拔熱はスケールを介して行われることとなる。問題は、そのスケールの厚さが場所によって異なることであり、それが鋼材冷却の不均一を招く一因となっている。この不均一な冷却により、鋼板内部に残留応力が発生して加工後の変形に繋がり、さらに鋼表面に混在する硬さの違う相が圧延時の表面疵や圧延ロールの劣化を招く原因ともなっている。

スケールを介した拔熱を議論する場合にまず重要となるファクターはスケールの熱伝導率／熱拡散率である。ス

ケールの成分は主にFeOであり、その熱伝導率／熱拡散率についてはいくつかの報告がある²⁻⁷⁾。測定方法、試料の作製方法などに違いがあるが、700°Cの熱伝導率の値としては概ね3～10 W/mKの範囲にある。一方で、鉄の熱伝導率については同温度で約28 W/mKと報告されている⁸⁾。スケールの熱伝導率のほうが小さいことから、スケールは鋼板冷却において熱抵抗となると考えられる。しかしながら、そのスケールが厚いほど、鋼板の冷却がより早く起こるという現象があり、これが鋼板の冷却速度の制御を困難にしている。この現象は、水の沸騰形態が膜沸騰から核沸騰に遷移する温度(クエンチ点)が、スケールが厚いほど高くなることに起因している。このクエンチ点のスケール厚さ依存性に関しても、従来、研究が行われている⁹⁻¹⁴⁾。たとえば、Shojiらは⁹⁾、厚さ5～100 µmのスケールを有する鋼板に水スプレー冷却を行った際の鋼板内部の温度変化を測定し、クエンチ点は、スケール厚さが5 µmの場合に約300°Cであるのに対し、100 µmの場合には約500°Cまで上昇することを見出している。Katoらは¹⁰⁾、Niを0～4.9 mass%含有する鋼を大気酸化させて厚さの異なるスケール

平成29年8月2日受付 平成29年9月28日受理 (Received on Aug. 2, 2017 ; Accepted on Sep. 28, 2017)

1) 東京工業大学大学院理工学研究科材料工学専攻 (Department of Metallurgy and Ceramics Science, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 S8-7 Ookayama Meguro-ku Tokyo 152-8552)

2) 東京工業大学物質理工学院材料系 (Department of Materials Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology)

* Corresponding author : E-mail : susa.m.aa@m.titech.ac.jp

DOI : <http://dx.doi.org/10.2355/tetsutohagane.TETSU-2017-070>

ルを形成した試料を作製し、水スプレー冷却を行っている。スケールが厚くなるほどクエンチ点が上昇すること、またそれはスケール層の断熱効果により、鋼板表面温度がより低下することによると述べている。一方で、Fukudaらは¹³⁾、スケールの厚さだけでなく、表面粗さの影響にも着目している。彼らは、SUS304の表面に Al_2O_3 の粉末を擬似スケールとして溶射し、スケール厚さを50～210 μm の範囲で調整している。また、未溶射の母材表面にショットブラスト加工を施し、表面粗さを3～20 μmRa の範囲で調整している。これらの試料を用いて水スプレー冷却を行い、スケールが厚いほど、また表面粗さが粗いほどクエンチ点が高温側に移行し、より早く核沸騰が起こることを見出している。以上のように、従来の研究で、スケール厚さや粗さのクエンチ点への影響は実験的に明らかにされていると考えられる。

しかしながら、従来の研究においては、鋼材冷却時の熱流束や熱伝達係数の導出には熱伝導逆問題解析法が適用されており、スケール層はきわめて薄い、またその熱伝導率が明らかになっていないという理由で、その存在を無視した取り扱いがなされている¹³⁾。スケールの熱伝導率とともに、他の必要なパラメータの値が仮定されている場合もある¹⁰⁾。今後スケールを介した水冷却の問題をより精緻に扱うためには、熱酸化により鋼板上に生成した FeO などの熱伝導率を測定するとともに^{6,7,14)}、水の蒸発による放熱流束を直接評価する方法を確立することが必須であると考えられる。

水が鋼板上で沸騰する場合、水自身の温度は概ね100℃に保たれていると考えてよい。一般に水の物性値は正確に測定されており、100℃における水の標準蒸発エンタルピーの値($\Delta H_{\text{water}}^\circ$)も報告されている¹⁵⁾。したがって、水の蒸発にともなう質量変化と、水と鋼板の接触面積が計測できれば、水の蒸発にともなう放熱流束の評価が可能である。本研究は、まずこのような原理に基づいた評価の可能性を調査するために、水滴の蒸発にともなう放熱流束評価法を開発し、本方法を用いて、スケール厚さの水のクエンチ点への影響について調査して、本法の妥当性について検討することを目的とする。

2. 実験方法

2・1 実験装置の概略と原理

Fig.1に本実験装置の概略図を示す。実験装置は、鋼試料を加熱・酸化させるための電気炉、電子天秤、水滴滴下装置、試料温度測定用の熱電対とデジタルマルチメータおよび水滴の沸騰状態を記録するビデオカメラから構成されている。電子天秤の上には、試料台として耐火レンガが設置されている。まず試料を電気炉に装入し、所定時間酸化させて試料表面にスケールを形成させる。その後、耐火レン

ガ上に移動させ、所定量の水を滴下する。滴下直後は、試料系は水の質量分だけ重くなるが、蒸発が起こり、質量は減少していく。この質量変化を電子天秤で測定する。また試料の温度変化を熱電対で測定する。この実験結果に基づいて、水滴の蒸発にともなう放熱流束(Q)を以下の式で計算する。

$$Q = \Delta H_{\text{water}}^\circ \times (\Delta m \Delta t^{-1}) / S \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\Delta H_{\text{water}}^\circ = 2257 \text{ J/g}$ である¹⁵⁾。また、 $\Delta m \Delta t^{-1}$ は水滴の蒸発速度であり、水の質量変化の結果より求める。 S は水と鋼板の見かけの接触面積であり、ビデオカメラによって記録された画像から推定する。なお、今回は実施していないが、天秤上の試料台に水の容器も設置すると、断続的に水を滴下して冷却する実験にも対応できる可能性がある。

2・2 試料

試料として極低炭素鋼板(40×40×5 mm³)を用いた。その化学組成をTable 1に示す。水滴の試料からの落下を防ぐために、Fig.2に示すように、試料中央部に $\phi 30 \text{ mm}$ 、深さ3 mmの円形の凹みを作製した。凹部底面は精密研磨を施し、表面粗さを統一した。また、熱電対を設置するために、底面に孔($\phi 1.5 \text{ mm}$ 、深さ1.5 mm)を開けた。実験に用いる前に、機械油を除去するために、エタノールで超音波洗浄を行った。

2・3 実験手順

まずFig.1に示した電気炉で試料の酸化を行った。高温では、試料表面に形成する酸化鉄が炉中のセラミックス製試料台と反応し、接着してしまう可能性がある。これを防ぐために、試料はSUS310S板(厚さ0.2 mm)の上に設置した。なお、このSUS板は予め1200℃、大気中で十分に酸化し、その表面にクロミア皮膜を形成させたものを用いた。

Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus. (Online version in color.)

Table 1 Chemical compositions of samples. (mass%)

Components	Fe	C	Si	Mn	P	S
Mass%	Bal.	0.001	0.01	0.14	0.019	0.007

試料の酸化温度は850℃とした。この温度は鉄の $\alpha \rightarrow \gamma$ 変態温度よりも50℃以上低いために、鉄の相変態にともなう体積変化によるスケールの剥離は起こらなかった。また、試料の酸化時間を10, 15, 20, 30 minと変化させて、それぞれ厚さ40, 58, 77, 103 μm のスケールを形成させた。この厚さは3・1で述べる観察結果によるものである。

スケールを形成させた後、石英棒を用いて高温の試料を電子天秤上の試料台に移動させるとともに、試料にK型熱電対を設置した。K型熱電対は $\phi 1$ mmのステンレスシース型のものであり、その先端部約3 mmを90°曲げ加工し、Fig.1に示すように、横方向から試料底面に開けた測温用の孔にとり付けた。ついで、試料凹部の表面温度が600℃となったときに、水滴約3 gを凹部に滴下した。試料を取り出してから表面温度が600℃となる時間は、予備実験で試料表面に溶接した熱電対を用いて46 sと決定した。なお、3 gの水は凹部全体を覆うことができるが、試料から零れ落ちない程度の量であった。

その後、水の蒸発にともなう質量変化、試料内部の温度変化および水滴が沸騰する様子をそれぞれ電子天秤、熱電対およびビデオカメラを用いて記録した。水滴の質量は電子天秤から約0.2 sごとに出力し、PCに記録した。PC上の表計算ソフトには、それぞれの質量を測定した時間を0.001 s単位まで記録した。ビデオカメラは試料直上に設置した。なお、水の沸騰が激しい場合、その蒸気でビデオカメラのレンズが曇ってしまうため、カメラは試料から50 cm以上離して設置した。

2・4 試料の分析

実験後の各試料について、試料凹部の表面粗さをレーザー顕微鏡で測定した。5視野(1視野の走査範囲: 256.0 $\times$ 256.0 μm^2)についてステップ幅0.10 μm ごとに走査したのち、各視野から任意の3本を選び、断面曲線を得た。これら合計15本の断面曲線から算術平均粗さ R_a 、二乗平均

平方根粗さ R_q 、最大高さ粗さ R_z (最低部と最高部の高さの差)の3種類を表面粗さのパラメータとして算出した¹⁶⁾。

スケールの相同定にはXRDを用いた。測定は試料の凹部に対して行った。X線源としてはCoを用い、走査角度範囲は20~80°で、サンプリング幅は0.02°毎、測定速度は1° s⁻¹とした。

さらに測定後の試料断面をSEMで観察するために、試料を樹脂埋め・切断した。この切断による影響を避けるため、切断面を1 mm以上研磨し、鏡面に仕上げた。試料は研磨後洗浄し、十分に真空引きしたのち、表面に金コーティングを施し、FE-SEM/EDS観察に供した。撮影した画像のスケール/鋼板界面とスケール/樹脂界面に直線を引き、その間の距離を画像解析ソフトで算出することによって、酸化スケールの厚さを決定した。また、BSE像のコントラストの違いから層構造を観察し、加えてEDSで組成分析をすることでスケール各層の構成相の推定を行った。最終的にはXRDおよびFE-SEM/EDSの結果を用い、各実験条件において試料表面に形成したスケールの構成相および層構造の決定を行った。

2・5 鋼板/水滴の接触面積の推定

ビデオカメラによって記録した動画から静止画を1~5 sごとに切り出し、画像解析ソフトを用いて水滴および試料凹部の各領域のピクセル数(p_{water} および p_{concave})を求めた。これらの値を用いて、接触面積(S)を式(2)から求めた。

$$S = \pi \times (d_{\text{concave}} / 2)^2 \times p_{\text{water}} / p_{\text{concave}} \quad (2)$$

ここで、 d_{concave} は凹部の内径であり、 π は円周率である。1~5 sごとに決めた接触面積を任意の関数で近似し、接触面積の時間変化を得た。

3. 実験結果

3・1 試料の特徴

表面粗さ

Fig.3に、酸化前の試料および厚さの異なるスケールを有する4試料の表面粗さパラメータ R_a 、 R_q および R_z をスケール厚さに対して示す。酸化の前後で表面粗さが変化しているものの、スケールの厚さによる差は見られず、いずれも $R_a = 3 \mu\text{m}$ 、 $R_q = 3.5 \mu\text{m}$ 、 $R_z = 24 \mu\text{m}$ 程度である。スケール厚さ58 μm および77 μm の試料で R_z の値が少し大きいように見えるが、ばらつきを考慮すると、4者は一致しているといえる。これより、スケールの厚さによって表面粗さが変化することはない、スケールの厚さのみを変化させた試料を作製していたといえる。なお、レーザー顕微鏡での観察の結果、酸化前の試料表面には、機械加工による周期的な表面の起伏が観察された。このため、本研究の測定では、加工痕に対して常に垂直に粗さ測定のための断面曲線を取った。しかしながら、酸化後の試料では、結晶粒

Fig. 2. Dimensions of sample (in mm).

は観察されたものの、機械加工の跡は認められなかった。したがって、スケールには、酸化前の表面性状の影響はないといえる。

XRDによるスケールの相特定

Fig.4にスケール厚さ40 μm の試料で測定したXRDプロファイルを示す。このプロファイルには、FeOおよび Fe_3O_4 のピークが認められる。他の試料についても測定を行ったところ、全ての試料でFeOおよび Fe_3O_4 のピークが測定された。よって、本実験条件で形成したスケールはFeOおよび Fe_3O_4 の2相から構成されていると判断できる。

FE-SEM/EDSによる断面観察および組成分析

Fig.5にスケール厚さ103 μm の試料のBE像を示す。スケールは2層構造となっていることがわかる。BSE像は、原子量の小さい元素が多く含まれる領域ほど暗く映る。すなわち、このスケールは、表層に近い側が酸素の濃度の高い酸化物から形成されている。XRDの結果を考慮すると、本スケールは表面から順に Fe_3O_4 、FeOであるといえる。同様の結果は他のスケールについても観察された。この結果は、既往の研究報告と一致している^{17,18)}。また、Fig.5のスケール内部には多くのボイドが観察される。これらのボイドは、厚さ方向に並んでおり、FeOの結晶粒に沿って生成

Fig. 3. Relation between surface roughness parameters and oxide scale thickness. (Online version in color.)

Fig. 4. XRD profile of sample with oxide scale 40 μm thick (Target: Co). (Online version in color.)

したと考えられる。ボイドは、銅板の近くのほうが大きい傾向にある。さらに、スケール／銅板界面には、大きさが1 μm 以下のボイドや不純物の濃化層が確認できる。後者は、試料に用いた極低炭素鋼に含まれているFe以外の不純物元素が濃化してできた層であり、スケール内部よりも多くのボイドを含んでいる。同様のことが他のスケール試料についても確認できた。

3・2 ビデオカメラで記録した水沸騰の様子

Fig.6 (a)～(e)は、スケール厚さ40 μm の試料において沸騰の様子を記録した動画から時系列で5枚を取り出したものである。水滴は、Fig.6 (a)に示すように、滴下直後は試料凹部全体を覆っていたが、(b)のように、激しく踊るような不安定な沸騰を示しながら蒸発し、(c)のように、一滴の水滴となり、安定な膜沸騰状態となった。その後も、水は複数の水滴に分解することなく、一滴のままで膜沸騰を維持しながら、(d)のように、小さな水滴に変化し、最終的に核沸騰を起こし、その直後に (e) のように、ほとん

Fig. 5. BE image of cross section of sample with oxide scale 103 μm thick.

Fig. 6. Boiling behavior of water observed in experiment for oxide sample with scale 40 μm thick; (a) just after water was dropped, (b) before film boiling was stable, (c) after film boiling was stable, (d) just before nucleate boiling happened, and (e) just after nucleate boiling happened.

ど全て蒸発した。このような沸騰形態の変化は、他の試料においても同様に観察された。

これらの画像をもとに試料／水滴の接触面積を推定した。その推定結果をFig.7に示す。なお、今回の実験では、クエンチの瞬間に水が一気に蒸発するとともに湯気も発生したため、水滴の画像が取得できず、接触面積の推定ができなかった。そのため、接触面積の値としてはクエンチ直前までの結果を示している。滴下直後の接触面積は、いずれの試料についても、上下に振動しているように見える。ここでの状態は、膜沸騰ではあるが、試料凹部全域を水滴が覆っているために、蒸気の離脱が行われにくく、そのために上下に振動していると考えられる。約50 s以降は、いずれの試料でも接触面積はほぼ同じであり、緩やかに減少している。ここでは、接触面積が試料凹部の面積より小さくなっており、蒸気の離脱が液滴周辺から行われるために、膜沸騰が安定したと推定される。今回の実験では、膜沸騰中の水と試料の接触面積は、スケール厚さの影響を受けていないといえる。また、接触面積の減少速度は徐々に小さくなっていく様子がわかる。これは試料の冷却にともない、試料から水へ伝達される熱量が小さくなっていることに対応すると考えられる。

3・3 質量および温度変化

Fig.8および9に、電子天秤で測定した試料上の水滴の質量およびK型熱電対で測定した試料内部温度の経時変化を示す。横軸は水を滴下して冷却を開始してから時間である。スケール厚さ40 μm の試料のデータを例に取り説明すると、水滴の滴下 ($t=0$ s) と同時に質量は約2.7 g増加し、温度は約70°C急激に減少している (Fig.6 (a) に対応)。不安定な沸騰 (Fig.6 (b) に対応) を経た後、 $t\sim 40$ sにおいて質量変化の速度が変化し、その後滑らかな減少を示している。ここで不安定な沸騰から安定な膜沸騰に移行したと考えられる (Fig.6 (c) に対応)。さらに、 $t\sim 270$ sまでは膜沸騰が続き、質量、試料温度ともに緩やかに減少している。膜沸騰中に水滴が凹部の中を移動し、熱電対直上の位置か

Fig. 7. Contact area between sample and water as function of time, taken from video images. (Online version in color.)

らずれることがあったが、それによる温度の急激な変化は観測されなかった (Fig.6 (c) ~ (d) に対応)。 $t\sim 270$ sにおいては、質量および試料温度はともに急激に減少している。この時点で、水滴は急激に蒸発し、試料上の水はほぼ全て蒸発した (Fig.6 (e) に対応)。本研究では、この時点で膜沸騰から核沸騰への遷移が起こったと判断し、このときの試料内部温度をクエンチ点として求めた。スケール厚さが異なる他の試料においても、同様の変化が観測され、スケール厚さ40, 58, 77, 103 μm の各試料のクエンチ点を、Fig.9より、それぞれ131, 167, 121, 182°Cと求めた。スケール厚さが40, 58, 103 μm の3つを比較した場合には、スケールが厚いほどクエンチ点が上昇しているが、全てを比較した場合には、そのように断定することは難しい。

4. 考察

4・1 テイラー不安定性と膜沸騰状態における水滴の安定性

Fig.8に示したように、水の質量変化はいずれのスケール厚さの試料の実験でも、水滴下後40~50 sにおいて滑らか

Fig. 8. Mass change with time of water droplet: the arrows represent the respective quench points. (Online version in color.)

Fig. 9. Temperature change with time at sample inside: the arrows represent the respective quench points. (Online version in color.)

な減少へと移行し、この時点で安定した膜沸騰を示した。ビデオカメラによる画像を見ると、滴下直後は約30 mmであった水滴の直径は、膜沸騰に移行するときにはいずれも15 mm程度となっていた。ここでは、この現象をテイラー不安定性の観点から考察する¹⁹⁾。膜沸騰とは、水滴よりも密度の小さい蒸気膜が水滴の下に潜り込んだ状態であり、そのような状態においては、水滴が安定して存在できる臨界直径が存在する。その臨界直径 d_{limit} は式(3)で計算することができる。

$$d_{\text{limit}} = 2\pi \left(\frac{\sigma}{g(\rho_L - \rho_G)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

ここで、 g は重力加速度、 σ は100℃における液体の水の表面張力、 ρ は100℃における密度であり、添え字LとGはそれぞれ液体の水と水蒸気を表している。 $\sigma = 58.84 \times 10^{-3} \text{ Jm}^{-2}$ 、 $g = 9.8 \text{ ms}^{-2}$ 、 $\rho_L = 0.9583 \times 10^3 \text{ kgm}^{-3}$ 、 $\rho_G = 0.598 \text{ kgm}^{-3}$ を式(3)に代入すると²⁰⁾、 $d_{\text{limit}} = 15.7 \text{ mm}$ が得られた。すなわち、鋼板上の水滴直径が15.7 mm以下になると、膜沸騰中の水滴は安定することになる。この結果はビデオカメラでの観察結果とよく一致している。

4・2 蒸発速度、接触面積および試料温度の近似

ここから先の考察では、Fig.7～9で示した水滴の質量変化、接触面積変化および試料温度変化のデータを用いるが、これらのデータには、ノイズが大きい部分がある。また、これらのデータはそれぞれ独立の装置で測定されているために、滴下からの時間 t にわずかなずれが生じている。そこで、電子天秤で得られた質量に対応する時間に他の結果の時間を合わせた上で、蒸発速度、接触面積および試料温度を以下のように近似した。

具体例としてスケール厚さ77 μm の試料の結果を取り上げて近似の方法を説明するが、他の試料のデータについても同様の手順で近似を行っている。まず、Fig.8の水滴の質量変化から算出した蒸発速度 $\Delta m / \Delta t$ をFig.10に黒色のプロットで示す。その結果は非常にノイズが大きい。これは、実験に用いた電子天秤は0.001 gの変化をおおよそ0.2 sごとに測定しているために、0.005 gs^{-1} 以下の蒸発速度の変化は検知できないことによる。このため、Fig.8の水滴の質量変化を時間の関数 $m(t)$ に最小二乗法により近似して、その近似式を時間で微分することで蒸発速度を得ることとした。 $t < 50 \text{ s}$ の時間域では、5点ずつ移動平均をとって近似した。 $t > 50 \text{ s}$ の領域では膜沸騰が安定した部分について対数近似を用いたところ、式(4)が得られ、その R^2 値は0.999であった。

$$m(t) = 5.1788 - 7.5001 \ln(t) \quad (4)$$

また式(4)を t で微分すると、蒸発速度は式(5)のように得られる。

$$dm/dt = -7.5001/t \quad (5)$$

Fig.10にはこのような近似によって得られた蒸発速度も赤色のプロットで示している。

つぎにFig.7に示した接触面積についても近似を行った。水が蒸発して接触面積が減少し始めた $t = 15 \text{ s}$ 以降の値については、以下のような近似式が得られた。

$$S(t) = 1.6194 - 2.3823 \ln(t) \quad (6)$$

この R^2 値は0.996であった。この近似式による接触面積と初めに求めた実験値の比較をFig.11に示す。

試料内部温度に関しては、測定間隔が0.1 sと短かったため、近い時間の値を引用し、不足するところは線形近似することで補完した。補完前後の試料内部温度をFig.12に示す。この場合は、補完前後でほとんど差は見られない。

4・3 水滴の蒸発による鋼板試料からの抜熱流束

Fig.13に、近似した蒸発速度および接触面積を用いて、式(1)から算出した鋼板からの抜熱流束 Q の計算結果を

Fig. 10. Comparison between experimental and approximated evaporation rates of water for sample with oxide scale 77 μm thick. (Online version in color.)

Fig. 11. Comparison between experimental and approximated contact areas between sample and water for sample with oxide scale 77 μm thick. (Online version in color.)

時間に対して示す。なお、今回の実験では、Fig.8に示したように、クエンチ点での水の質量変化は測定できたが、先に述べたように、接触面積の推定ができなかった。そのため、熱流束の値としてはクエンチ直前までの結果を示している。滴下直後から約50 sの領域では、拔熱流束の値は、ばらつきは大きいものの、比較的大きな値 ($100 \sim 200 \text{ kWm}^{-2}$) を取っている。この領域では、水が激しく踊るような不安定な沸騰を示したため蒸気膜が安定せず、ばらつきが大きくなったものと考えられる。また、不安定な激しい沸騰から安定な膜沸騰に至るまでの遷移域にあったため、拔熱流束が大きな値となったと考えられる。約50 s以降では、沸騰形態が安定した膜沸騰状態へと移行し、拔熱流束は緩やかに減少している。拔熱流束の値は、いずれのスケール厚さの試料でも $30 \sim 50 \text{ kWm}^{-2}$ で概ね横ばいとなり、その後、クエンチに至り蒸気膜が崩壊する。クエンチの直前の熱流束の値は、スケール厚さ 40, 58, 77, 103 μm の試料において、それぞれ 31, 35, 33, 43 kWm^{-2} となり、大きな差はなく、またスケール厚さに対して系統的な傾向も見られない。

Fig. 12. Comparison between experimental and approximated temperatures at sample inside for sample with oxide scale 77 μm thick. (Online version in color.)

Fig. 13. Heat flux extracted from steel surface by evaporation of water. (Online version in color.)

4・4 蒸気膜厚の推定

Fig.14に本実験系のモデルを示す。同図には、銅板試料から水滴に至る領域における温度分布も描いている。この系が擬定常状態にあると仮定すると、拔熱流束 Q はフーリエの法則を用いて式 (7) により表せる²¹⁾。

$$Q = \frac{T_{\text{steel}} - T_{\text{water}}}{d_{\text{steel}}/k_{\text{steel}} + d_{\text{scale}}/k_{\text{scale}} + d_{\text{film}}/k_{\text{film}}} \quad (7)$$

ここで、 T , d , k は、それぞれ、添え字で示された部分の温度、厚さおよび熱伝導率である。なお、各界面における熱抵抗は無視している。式 (7) を d_{film} について解くと、式 (8) が得られる。

$$d_{\text{film}} = \left(\frac{T_{\text{steel}} - T_{\text{water}}}{Q} - (d_{\text{steel}}/k_{\text{steel}} + d_{\text{scale}}/k_{\text{scale}}) \right) \times k_{\text{film}} \quad (8)$$

ここでは、式 (8) を用いて蒸気膜厚の推定を行う。その結果をFig.15に蒸気膜厚の経時変化として示す。この推定においては、 T_{steel} には実験値を用い、また、 T_{water} は100℃と仮定している。実験中の水滴にK型熱電対を挿入したとこ

Fig. 14. A model of present experimental system with temperature distribution. (Online version in color.)

Fig. 15. Vapour film thickness as function of time. (Online version in color.)

ろ、約98℃の温度が記録されたが、水滴が浮揚しているという事実より、水蒸気圧は1 atmよりは高めであり、水滴の下面は100℃以上になっていると考えられるためである。 k_{scale} , k_{steel} および k_{film} には、それぞれ、 $6.5 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ²²⁾, $45 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ²³⁾, および $0.0259 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ の値を用いている¹⁵⁾。なお、 k_{steel} については、キルド鋼の値を参考に仮定した。最後に、 d_{steel} の値は、鋼板厚2 mmから熱電対用の孔の深さとスケール厚さを差し引いた値としている。Fig.15より、膜沸騰中の蒸気膜厚は20~100 μm であることがわかる。滴下直後から約50 sの領域の蒸気膜厚には意味はないが、膜沸騰中の蒸気膜厚は鋼板の冷却にともなって徐々に薄くなっていることがわかる。クエンチ直前における蒸気膜厚は、いずれのスケール厚さの試料でも45 μm 以下であった。なお、クエンチ直前における蒸気膜厚にも、スケール厚さと間に明瞭な相関関係は見られていない。ただし、20~100 μm という膜厚の値は、膜沸騰中の水滴を水平方向から観察した報告から読み取れる蒸気膜厚と同じオーダーである^{24,25)}。このことから、本装置による放熱流束の測定やここで行った蒸気膜厚の推定には合理性はあると判断できる。より精緻な考察を行うためには、より正確な熱伝導率の値とその温度依存性、界面熱抵抗を与える必要がある。

4・5 本実験系の律速段階

Fig.14に示した本実験系のモデルにおいて、鋼板からスケール表面までの領域における熱伝導を考える。この領域にフーリエの法則を適用すると、式(7)は式(9)のようになる。

$$Q = \frac{T_{\text{steel}} - T_{\text{surface}}}{d_{\text{steel}}/k_{\text{steel}} + d_{\text{scale}}/k_{\text{scale}}} \quad (9)$$

ここで T_{surface} はスケール表面の温度である。 $T_{\text{steel}} - T_{\text{surface}} = \Delta T$ と定義して、式(9)を ΔT について解くと、

$$\Delta T = Q \times (d_{\text{steel}}/k_{\text{steel}} + d_{\text{scale}}/k_{\text{scale}}) \quad (10)$$

式中の $(d_{\text{steel}}/k_{\text{steel}} + d_{\text{scale}}/k_{\text{scale}})$ 項は定数であるとしているので、 ΔT は放熱流束 Q によって変化する。Fig.13に示したスケール厚さ40 μm の試料の結果を用いて計算した ΔT の値をFig.16に示す。これより、 ΔT は全範囲において2℃以下であることがわかる。一方Fig.9からは、鋼板と水の間には約300℃から20℃の温度差があることが分かる。これらのことから、厚さ数10 μm の蒸気膜の中に大きな温度勾配が存在し、この部分の熱伝導が律速段階であるということが本熱流束測定からも裏付けられたといえる。すなわち、スケールは鋼板の冷却において熱抵抗として作用するが、本測定条件における膜沸騰においては、その効果は小さく、そのために、スケール厚さのクエンチ点への影響が捉えられなかったと考えられる。

水スプレー冷却など現実の水冷却プロセスでは、運動量

をもった水が断続あるいは連続的に鋼板表面に供給される。その運動量によって、水蒸気膜厚が本実験の推定値よりも小さくなる。そのような場合には、律速段階がスケール中に移る、あるいは混合律速となり、スケール厚さがクエンチ点に影響する可能性がある。2・1で述べたように、本実験系において電子天秤上に水の滴下装置も設置して、断続的に水を滴下して冷却する実験を行うと新たな知見が得られる可能性があると考えられる。

5. 結言

100℃における水の標準蒸発エンタルピーの値を利用して、鋼板上の一滴の水の蒸発にともなう放熱流束を評価する装置を開発し、その方法を用いて、極低炭素鋼の表面に形成したFeOを主体とするスケール厚さのクエンチ点への影響について調査した。

- ・ビデオで撮影された膜沸騰および核沸騰の様子と水の質量および鋼板の温度変化はよく対応していた。スケール厚さ40, 58, 77, 103 μm の各試料のクエンチ点はそれぞれ131, 167, 121, 182℃であった。また、クエンチ直前での放熱流束の値は、それぞれ31, 35, 33, 43 kWm^{-2} と推定できた。しかしながら、いずれについても、スケール厚さとの相関関係は見られなかった。
- ・膜沸騰時に本実験系が擬定常状態にあったと仮定し、フーリエの法則を適用して蒸気膜厚を推定したところ、鋼板の冷却にともなって約100 μm から約20 μm まで薄くなることがわかった。この膜厚の値は、実験的に蒸気膜の存在を観察した報告から推定される値と同じオーダーであるため、本装置による放熱流束の評価や蒸気膜厚の推定には合理性はあると結論できる。
- ・本実験系の律速段階について考察したところ、たとえば厚さ40 μm のスケール内には2℃以下の温度差しかないのに対し、鋼板と水の間には約300から20℃の温度差があると推定された。すなわち、蒸気膜中の熱伝導が全体の熱伝達を支配している可能性があり、そのために、ス

Fig. 16. Difference between T_{steel} and T_{surface} (ΔT) as function of time, for sample with oxide scale 40 μm thick.

ケール厚さのクエンチ直前での抜熱流束への影響が捉えられなかったと考えられる。

謝辞

本研究は、2014～2017年に一般社団法人 日本鉄鋼協会・圧延理論部会に設置された研究会Ⅱ「スケールの伝熱特性支配因子調査」のプロジェクトの1つとして実施されたものである。日本鉄鋼協会からの研究費の支援ならびに研究会委員の皆様からの有益なご助言に感謝の意を表します。また、修士課程学生の六岡諒介氏には一部の図面の準備に協力をいただきました。

文 献

- 1) I.S.Park: *ISIJ Int.*, **53**(2013), 71.
- 2) J.Slowik, G.Borchardt, C.Kohler, R.Jeschar and R.Scholz: *Steel Res.*, **61**(1990), 302.
- 3) T.Akiyama, H.Ohta, R.Takahashi, Y.Waseda and J.Yagi: *ISIJ Int.*, **32**(1992), 829.
- 4) M.Takeda, T.Onishi, S.Nakakubo and S.Fujimoto: *Mater. Trans.*, **50**(2009), 2242.
- 5) R.Endo, T.Yagi, M.Ueda and M.Susa: *ISIJ Int.*, **54**(2014), 2084.
- 6) R.Taylor, C.M.Fowler and R.Rolls: *Int. J. Thermophys.*, **1**(1980), 225.
- 7) M.Li, M.Akoshima, R.Endo and M.Susa: *CAMP-ISIJ*, **29**(2016), 720, CD-ROM.
- 8) V.Y.Zinoviyev, V.F.Polev, S.G.Taluts, G.P.Zinoviyeva and S.A.Ilinykh: *Phys. Met. Metallogr.*, **61**(1986), 85.
- 9) N.Shoji, Y.Haraguchi and M.Hariki: *Proc. Natl. Heat Transf. Symp.*, **34**(1997), 737.
- 10) T.Kato, Y.Haraguchi, M.Kawamoto and T.Watanabe: *Tetsu-to-Hagané*, **83**(1997), 611.
- 11) R.Wendelstorf, K.-H.Spitzer and J.Wendelstorf: *Int. J. Heat Mass Transf.*, **51**(2008), 4892.
- 12) J.Lee: *ISIJ Int.*, **49**(2009), 1920.
- 13) H.Fukuda, N.Nakata, H.Kijima, T.Kuroki, A.Fujibayashi, Y.Takata and S.Hidaka: *ISIJ Int.*, **56**(2016), 628.
- 14) Y.Serizawa: *CAMP-ISIJ*, **30**(2017), 63, CD-ROM.
- 15) 新編 熱物性ハンドブック, 日本熱物性学会編, 養賢堂, 東京, (2008), 42.
- 16) JIS B 0601: 2013, Geometrical product specifications (GPS) - surface texture: profile method - terms, definitions and surface texture parameters.
- 17) M.Sugiyama: *J. Met. Finish. Soc. Jpn.*, **10**(1959), 323.
- 18) W.Sun, A.K.Tieu, Z.Jiang and C.Lu: *J. Mater. Process. Technol.*, **155-156**(2004), 1307.
- 19) L.S.Tong and Y.S.Tang: *Boiling Heat Transfer and Two-Phase Flow* 2nd edition, CRC Press Taylor & Francis Group, New York, (1997), 52.
- 20) 理科年表, 第79冊, 国立天文台編, 丸善, 東京, (2006), 369.
- 21) R.B.Bird, W.E.Stewart and E.N.Lightfoot: *Transport Phenomena*, John Wiley and Sons, New York, (1960), 283.
- 22) M.Li, M.Akoshima, R.Endo, M.Ueda and M.Susa: *CAMP-ISIJ*, **29**(2016), 172, CD-ROM.
- 23) 新編 熱物性ハンドブック, 日本熱物性学会編, 養賢堂, 東京, (2008), 209.
- 24) A.-L.Biance, C.Clanet and D.Quere: *Phys. Fluids*, **15**(2003), 1632.
- 25) N.R.Geraldi, G.McHale, B.B.Xu, G.G.Wells, L.E.Dodd, D.Wood and M.I.Newton: *Mater. Lett.*, **176**(2016), 205.