

スケール厚さがスプレー冷却特性に及ぼす影響

Effect of Scale Thickness on Spray Cooling

福田 啓之 FUKUDA Hiroyuki JFE スチール スチール研究所 圧延・加工プロセス研究部 主任研究員 (課長)
上岡 悟史 UEOKA Satoshi JFE スチール スチール研究所 圧延・加工プロセス研究部 主任研究員 (副部長)
中田 直樹 NAKATA Naoki JFE テクノリサーチ 取締役西日本ソリューション本部長・博士 (工学)

要旨

スケール厚さがスプレー冷却特性および衝風冷却特性に及ぼす影響を実験的に調査した。厚さ 20 mm の SUS304 鋼を母材として用い、人工スケールとして、 Al_2O_3 の粉末を溶射した。 Al_2O_3 の皮膜厚さは 50~210 μm である。

実験結果として、スプレー冷却時および衝風冷却時に人工スケールは熱抵抗層として作用した。スプレー冷却では、表面温度に依存する特性である膜沸騰時の冷却速度および界面での見かけのクエンチ点温度が Al_2O_3 の皮膜厚さとともに増大した。

Abstract:

The influence of surface conditions such as scale thickness on water spray cooling and air jet cooling characteristics was investigated by laboratory experiment. SUS304 stainless steel with the thickness of 20 mm was used as a sample. An artificial scale layer was formed on the sample surface by thermal-spraying using Al_2O_3 powder. The thickness of the Al_2O_3 layer varied from 50 μm to 210 μm .

The artificial scale layer showed a thermal resistance function in both water spray cooling and air jet cooling. In water spray cooling, the cooling rate during film boiling, which depends on surface temperature, and the apparent quench point temperature at the interface increased with Al_2O_3 scale thickness.

1. はじめに

近年の自動車の燃費向上および衝突安全性に対する規制強化から、各自動車メーカーは、車体に使用する鋼板への高張力鋼板の適用拡大を進めている。また、エネルギー資源需要の増大から、パイプラインにおいては、高圧操業化、高深海化に伴う厚板の高強度化が進んでいる。海外鉄鋼メーカーとの競争が激化している中で、国内鉄鋼メーカーは価格競争力を維持するために TMCP (Thermo Mechanical Control Process) 技術を開発、適用している。所望の材質を得るためには、熱延のランアウト冷却や厚板の加速冷却などの製造プロセスにおいて、水冷による温度制御が重要となる。冷却方法としては、熱延ランアウトの上面に使用されるラミナー冷却や下面のスプレー冷却などがある。

熱延後の鋼板を水冷して造り込むマイクロ組織は、多くの場合、フェライト-パーライト組織である。近年は、ベイナイト組織や複合的な組織を持つ高張力鋼板を造り込む技術の進歩が著しい。例えばベイナイト組織からなる熱延鋼板では、ランアウトテーブルで 450~500°C 程度まで水冷して造り込むが、膜沸騰の途中で遷移沸騰に移行する場合がある。

膜沸騰から遷移沸騰に移行すると、鋼材表面から流出す

る熱量が加速度的に増大するため、冷却水量や水冷時間を調節して鋼材を所定の温度まで高精度で均一に冷却するためには、膜沸騰、遷移沸騰、核沸騰それぞれの冷却能力、すなわち水冷熱伝達率や、膜沸騰から遷移沸騰に移行する温度 (以下、クエンチ点温度と呼ぶ) を正確に把握することが重要となる。

こうした背景から、鋼材の水冷において、膜沸騰から遷移沸騰に移行する現象についての研究は、これまで数多くなされてきた^{1,7)}。三塚らは、炭素鋼を用いたスプレー冷却実験を行い、冷却能力の指標である水冷熱伝達率を流量密度と鋼板表面温度で整理した式で表せることを明らかにしたが¹⁾、スケール厚さや表面粗さの影響は定量的に示してはいなかった。

その後、スケール厚さの影響を調査するために、玉利らは炭素鋼の加熱時間を、また加藤らは炭素鋼の Ni 含有率を変えてスケール厚さを変化させ、スプレー冷却実験を行った。いずれの実験でも、スケールが厚いほどクエンチ点温度が高くなるという結果になった^{6,7)}。しかし、これらの実験では、スケール厚さが異なるとそれにもなって表面粗さも変化してしまった可能性があり、スケール厚さや表面粗さなどの影響が複合的に現れた結果を示したものと考えられる。

本研究では、スケール厚さのみを単独に変化するパラメータとした冷却実験を行い、膜沸騰、遷移沸騰および核沸騰

での熱伝達率やクエンチ点温度などの冷却特性に及ぼす影響を個別に評価した。

SUS304 鋼を母材として、 Al_2O_3 粉末を表面に溶射して厚さの異なる擬似的なスケール層を形成させた試料を用いて、スプレー冷却を行った。

また、水の沸騰現象を伴わない衝風冷却を行い、スプレー冷却での結果と比較することで、スケール厚さがスプレー冷却特性に及ぼすメカニズムについて検討を行った。

2. 実験方法および実験条件

2.1 冷却実験試料

表 1 に、実験に使用した試料の一覧を示す。母材は、実験時の変態やスケール生成・剥離による不安定要素を排除するために SUS304 鋼とした。寸法は板厚 20 mm、板幅 140 mm、長さ 130 mm とした。

スケール厚さの影響を調査するため、SUS304 鋼の母材表面に Al_2O_3 の粉末を溶射して、厚さの異なる擬似スケールが付着した試料を作製した。擬似スケール厚さは、溶射時間を変更することで 50~210 μm の範囲で変化させた。溶射後、表面粗さが 1.5 μmRa 程度にそろえるように研磨を施した。

試料には加熱温度や冷却時の温度変化を測定するために、冷却面中央の表層から 2 mm の深さに $\phi 0.5$ の K シース熱電対を埋め込んだ。

2.2 スプレー冷却実験

図 1 にスプレー冷却実験装置を、表 2 に実験条件を示す。水温を 30℃ に保った貯水槽から冷却水をポンプで供給し、試料上方に取り付けた広がり角 50° で噴射領域がほぼ正方形となるスプレーノズルから、所定の流量密度で冷却面全面に噴射した。冷却水温はスプレーノズル出口で 30℃ であったが、試料表面に衝突する時点では 28~29℃ に低下していた。スプレー液滴の大きさおよび噴射速度を同じ条件とするため、ノズル流量は 24 L/min で一定とし、噴射距離を 530 mm とし、流量密度を 100 L/m²min に調整した。流量密度は、ノズル流量を広がり角度 50° で計算される正方形の噴射面積で除した値として算出した。なお、このノズルの流量密度分布は、噴射距離 265 mm の条件で、20 mm 角の正方形の受水口をもつ柵を幅方向に並べて測定し、幅

表 1 試料の表面性状¹³⁾

Table 1 Surface conditions of specimen¹³⁾

Coating layer	Thickness (μm)	Roughness (μmRa)
Al_2O_3	50	1.6
	100	1.5
	170	1.3
	210	1.4

Base material: SUS304 20^t × 140^w × 130^l mm

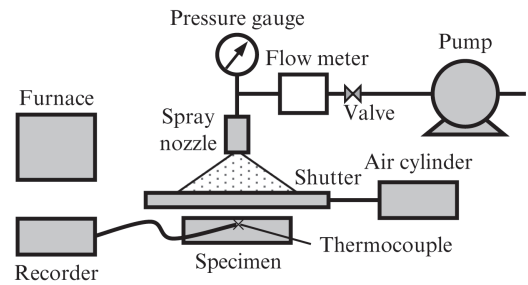


図 1 スプレー実験装置概略¹³⁾

Fig. 1 Experimental apparatus of spray cooling¹³⁾

表 2 スプレー冷却実験条件¹³⁾

Table 2 Experimental conditions in spray cooling tests¹³⁾

Reheating temperature	620℃
Cooling start temperature	560℃
Water temperature	30℃
Water flow rate	0.00167, 0.00667, 0.0117 m ³ /m ² s
Injection distance	530, 265, 200 mm
Mean droplet diameter	330 μm
Mean droplet velocity	10 m/s

175 mm、長さ 175 mm の領域（広がり角 37° に相当）で均一であることを確認している。位相ドップラー法によりノズルから 200 mm 離れた位置で測定したスプレー冷却水のザウター平均粒子径は 330 μm 、平均流速は 10 m/s であった。

電気炉内を窒素封入しながら試料を 620℃ まで加熱した後、炉から取り出して架台に固定した。この後、シャッターを閉じた状態でスプレーノズルから冷却水を噴射し、熱電対が示す試料温度が 560℃ になった時点でシャッターを開放し、ほぼ常温になるまで冷却した。

2.3 衝風冷却実験

図 2 に衝風冷却実験装置を示す。コンプレッサにて加圧したエアをヘッダに供給し、幅 150 mm、長さ 250 mm のヘッダ噴射面に幅方向 20 mm、長手方向 17 mm ピッチ、直径 $\phi 2.5$ の噴射孔から 20℃ のエアを放出した。エアの噴射距離は 15 mm とし、バルブの開度を調整することで流量密度は

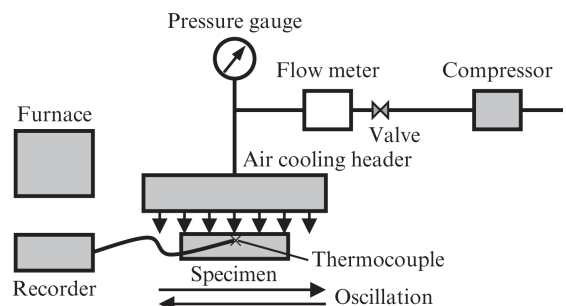


図 2 衝風実験装置概略¹³⁾

Fig. 2 Experimental apparatus of air jet cooling¹³⁾

表 3 衝風冷却実験条件¹³⁾

Table 3 Experimental conditions in air jet cooling tests¹³⁾

Cooling area	150 mm × 250 mm
Injector hole	φ2.5 20 × 17 mm pitch
Reheating temperature	620 °C
Cooling start temperature	560 °C
Air temperature	20 °C
Air flow rate	230 Nm ³ /m ² min
Injection distance	15 mm
Transferring speed	0.05 m/s

230 Nm³/m² min とした。噴射孔出口でのエアの平均噴射速度は 243 m/s である。実験中は、冷却の強弱が平滑化されるようにヘッダの噴射範囲内で試料を長手方向にオシレーションした。

表 3 に実験条件を示す。加熱は 2.2 節で示した条件と同じとした。試料は、炉から取り出して搬送台車に固定した後、速度 0.05 m/s、ストローク 120 mm、周期 4.8 秒でヘッダの噴射範囲内をオシレーションさせ、熱電対温度が 560 °C になった時点でバルブを開放してエアを噴射し、ほぼ常温になるまで冷却した。

2.4 母材表面での温度履歴の解析

表面性状が冷却特性に及ぼす影響を定量的に把握するため、熱電対で測定したデータをもとに温度解析を行い、母材表面での温度履歴を求めた。

試料の搬送方向および幅方向ではある程度均一な冷却が行われていると考え、板厚方向の一次元の伝熱問題として解析した。母材内部の温度 T は、板厚中心からの距離を Y (m) として、熱伝導方程式 (1) で表せる

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho} \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 t は時間 (s)、 λ は熱伝導率 (W/m K)、 c は比熱 (J/kg K)、 ρ は密度 (kg/m³) である。熱伝導率、比熱および密度には、母材である SUS304 鋼について報告されている値⁸⁾を用いた。

板厚 h (mm) の母材表裏面 ($Y = \pm h/2$) での熱流束 q (W/m²) は (2) 式で表せる。

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial Y} \quad \dots\dots\dots (2)$$

放冷、水冷および衝風冷却での q は (3)~(5) 式で与えた。

$$q = q_{rad} + q_1 \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$q_{rad} = \sigma \varepsilon (T_s^4 - T_a^4) \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$q_1 = \alpha (T_s - T_a) \quad \dots\dots\dots (5)$$

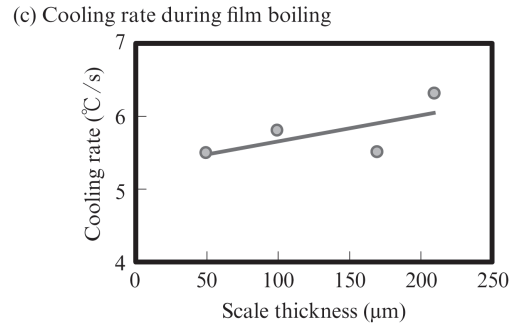
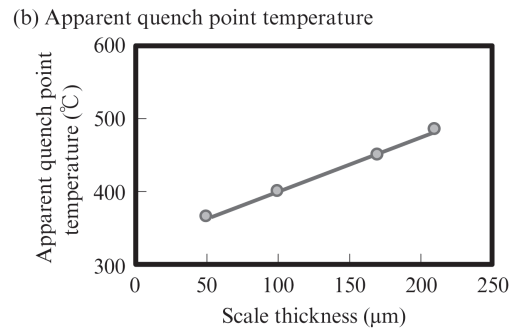
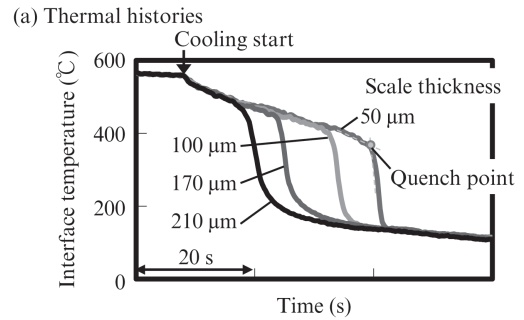


図 3 スケール厚さが界面でのスプレー冷却特性に及ぼす影響¹³⁾
Fig. 3 Effects of scale thickness of spray cooling characteristics at interface¹³⁾

ここで、 q_{rad} は輻射熱流束 (W/m²)、 q_1 は放冷、水冷および衝風冷却の熱流束 (W/m²)、 σ はステファン・ボルツマン定数 (5.67×10^{-8} W/m²K⁴)、 ε は輻射率、 α は放冷、水冷および衝風冷却での熱伝達係数 (W/m²K)、 T_s は母材表面温度 (K)、 T_a は冷却媒体 (エアまたは水) の温度 (K) である。

上記のモデルを用いて、冷却面表層 2 mm の温度履歴が熱電対で測定した値と一致するように、門出らの非定常熱伝導逆問題解析法⁹⁾を用いた伝熱計算を行った。スケール層が極めて薄く、その熱伝導率も明らかになっていないため、加藤らが行ったのと同じように、スケール層を無視して計算を行い⁷⁾、冷却面での熱伝達率を求めた。

3. 実験結果

3.1 スプレー冷却実験結果

図 3 に、流量密度 100 L/m² min における Al₂O₃ の擬似スケールの厚さを変化させた場合の結果を示す。図 3 (a) に、解析で求めた母材表面とスケール層との界面の温度履歴を

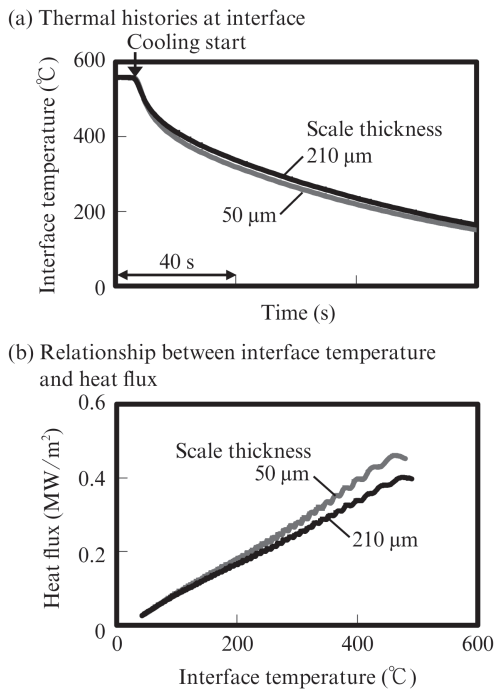


図4 スケール厚さが界面での衝風冷却特性に及ぼす影響
Fig. 4 Effects of scale thickness of air jet cooling¹³⁾ characteristics at interface¹³⁾

示す。例えば、スケール厚さが50 μm の場合、冷却開始後36sの間は膜沸騰が発生し、365 $^{\circ}\text{C}$ までは緩やかな温度降下となった。その後、遷移沸騰へ移行して急激な温度降下となり、130 $^{\circ}\text{C}$ 程度で再び緩やかな温度降下へと変化した。膜沸騰から遷移沸騰へ移行する温度、すなわち母材表面での見かけのクエンチ点温度はスケールが厚いほど高くなり、その値は365~485 $^{\circ}\text{C}$ の範囲で変化した。図3(b)に、クエンチ点温度の比較を示す。クエンチ点は、スケール厚さに対して線形的に表され、加藤らが行った実験の結果⁷⁾と同じ傾向を示した。図3(c)に、膜沸騰初期の530 $^{\circ}\text{C}$ から490 $^{\circ}\text{C}$ まで冷却される間での母材表面の冷却速度の比較を示す。膜沸騰初期の冷却速度は、ほぼ一定か、スケール厚さともにごくわずかに上昇した。この結果は、玉利らが行った実験の結果⁶⁾と同じ傾向を示した。

3.2 衝風冷却実験結果

図4に Al_2O_3 の擬似スケールの厚さが50 μm と210 μm の場合で、母材表面温度の履歴(a)とその熱流束(b)を比較した結果を示す。母材表面温度は、図4(a)に示すように緩やかに降下したが、冷却速度は、スケールが厚い210 μm の条件の方が若干低かった。伝熱解析で求めた熱流束は、図4(b)に示すように、冷却開始後が最も高く、その後は冷却が進むとともに減少した。また、熱流束は母材表面温度が高いほど、ほぼ線形的に増加していたことから、熱伝達率は表面温度によらずほぼ一定であったといえる。

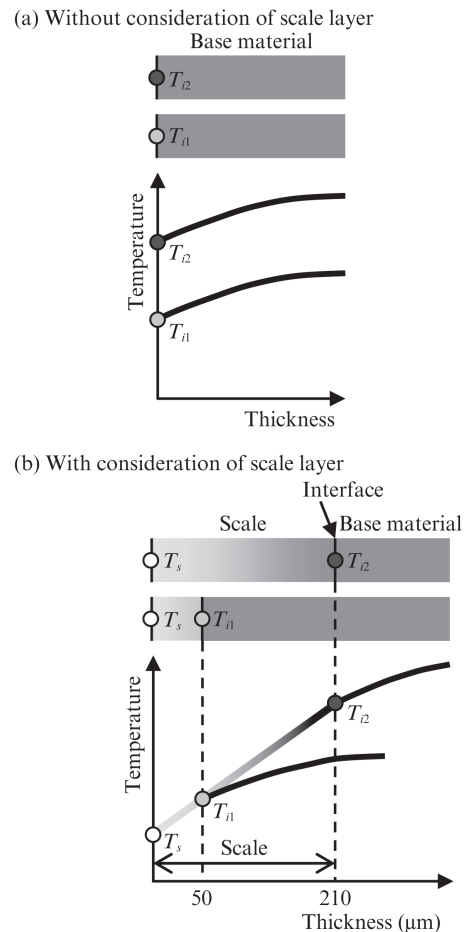


図5 クエンチ時の温度分布概略¹³⁾
Fig. 5 Schematic illustration of temperature distribution at quench point¹³⁾

4. 考察

スケール厚さがスプレー冷却特性に及ぼすメカニズムを衝風冷却特性と比較して考察する。

図3(b)に示したように、母材-スケール界面(以下、単に界面と呼ぶ)での見かけのクエンチ点温度はスケールの厚さによって変化した。西尾らは銅の表面に低熱伝導率材料を表面付加層として接着し、液体窒素プール中で浸漬冷却する非正常実験を行い、付加層が薄い条件では、その厚さの増大に伴って付加層表面でのクエンチ点温度が増大するが、ある厚さ以上でクエンチ点温度が一定の値となることを示した¹⁰⁾。そこで本実験においても、スケール層がある程度厚いため、スケール表面でのクエンチ点温度はスケール厚さに関わらず一定と仮定した。すなわちクエンチ開始時の厚さ方向温度分布の模式図として図5(b)に示すように、スケールが熱抵抗層として作用することで、スケール厚さの増大とともに界面での見かけのクエンチ点温度が上昇したと考えた。このため、スケール表面や界面の温度を各条件で比較することが重要であり、スケールも含めた伝熱計算を新たに行った。

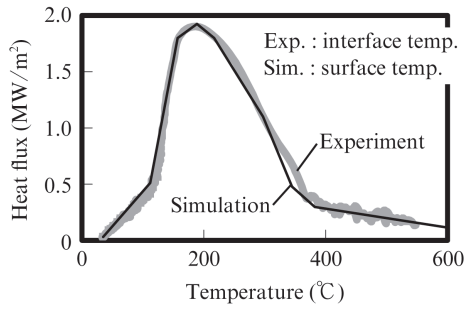


図6 表面または界面温度と熱流束の関係のモデル化¹³⁾

Fig. 6 Modeling of relationship between surface or Interface temperature and heat flux¹³⁾

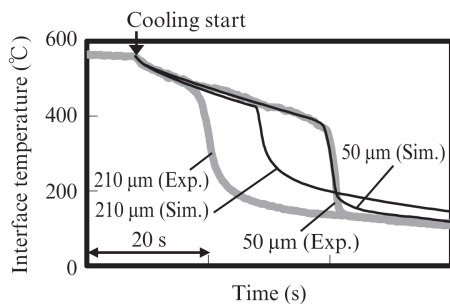


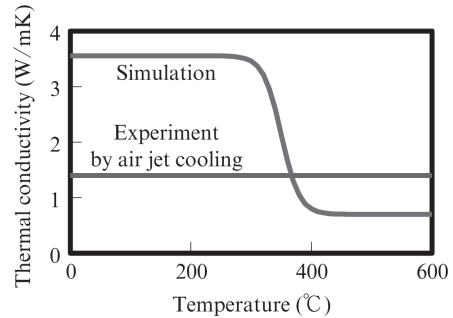
図7 界面での解析と実験の熱履歴比較¹³⁾

Fig. 7 Comparison of thermal histories at interface between simulations and experiments¹³⁾

図4に示した衝風冷却実験結果をもとに、 Al_2O_3 の擬似スケールの熱伝導率を同定した。冷却中の熱伝達率を $1100 \text{ W/m}^2\text{K}$ と仮定し、 Al_2O_3 の熱伝導率は温度およびスケール厚さによらず一定とし、スケール厚さ $50 \mu\text{m}$ 、 $210 \mu\text{m}$ の条件で、冷却面表層 2 mm の温度履歴が実験結果と一致するようにスケールの熱伝導率を見積もった。その結果、 Al_2O_3 の熱伝導率は 1.4 W/mK であった。文献値にある焼結材についての値¹¹⁾の 32 W/mK より非常に小さいが、溶射皮膜についての値¹²⁾(3 W/mK)にはいくらか近い。これは、竹内らが述べたように、溶射皮膜中の Al_2O_3 粒子の結合率が焼結材よりも低いためであり、また同じ溶射皮膜でも溶射条件によって皮膜形成の状況が異なることも考えられる。本実験の溶射皮膜の熱伝導率が竹内らの溶射皮膜の値より低いのは、皮膜中のポーラスの比率が異なるためであると推定される。

Al_2O_3 の擬似スケールについて同定した熱伝導率 1.4 W/mK を用いて、スプレー冷却におけるスケール厚さが界面での見かけのクエンチ点温度に及ぼす影響を解析した。図6に解析で使用した熱流束の条件を示す。まず、スケール厚さを $50 \mu\text{m}$ とした時の温度測定値をもとに、スケールがないものとして逆問題解析を行った結果(以下、実験結果と呼ぶ)における界面温度と熱流束の関係を太線で表した。熱流束は、膜沸騰の間、微小な変動を繰り返しながら徐々に増大するが、界面温度が 365°C になった時点で急激に上昇

(a) Boundary condition of conductivity of scale layer.



(b) Comparison of thermal histories at interface between simulations and experiments.

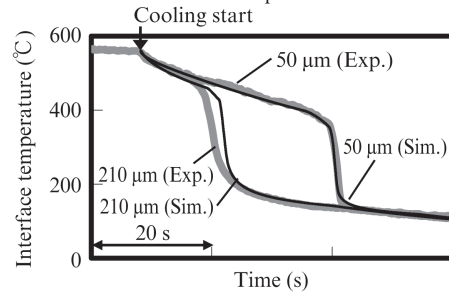


図8 スケール層の熱伝導率の温度依存性を考慮した場合の界面での熱履歴の解析結果¹³⁾

Fig. 8 Simulated results of thermal histories at the interface considering varying conductivity of scale layer¹³⁾

し、 192°C の時に最大となった。これを図6に示す細線のように、スケール表面と熱流束の関係を折線近似でモデル化し、新たに厚さ $50 \mu\text{m}$ のスケール層も考慮して解析を行った。このとき、界面の温度が、前述の逆問題解析の結果、すなわち図3(a)に示す界面温度の履歴と概ね一致するようにした。

図7に、スケール厚さ $50 \mu\text{m}$ 、 $210 \mu\text{m}$ の条件で界面温度履歴を求めた結果を実験結果と比較して示す。実験結果では、スケール厚さ $50 \mu\text{m}$ 、 $210 \mu\text{m}$ でのクエンチ点が始まった時の界面温度はそれぞれ 365°C 、 485°C であった。これに対し、熱流束をモデル化して解析を行った結果では、クエンチ開始時の界面温度はそれぞれ 365°C 、 410°C となった。この時のスケール表面温度が同等であると仮定すれば、熱抵抗層として作用するスケール層が厚いほど、クエンチ開始時の界面温度が高くなるという前述の傾向を説明できる。ただし、スケール厚さ $210 \mu\text{m}$ の場合には、実験結果と解析結果の間に大きな差があった。この誤差は、計算の仮定として、スケール厚さ $50 \mu\text{m}$ の条件での平均的な熱流束を用いているためであると考えられる。スプレー冷却は液滴群による断続的な冷却であるから、液滴が衝突する間の局所的な熱流束は、図6で示した値よりもはるかに高い。したがって、クエンチ開始の温度は、そうした微視的な見方で議論する必要がある。

また、スケール厚さ $210 \mu\text{m}$ の解析結果での冷却速度は、界面温度が 380°C となった時点でピークに達して、低下に転

じた。その後の冷却曲線は、スケール厚さ $50\mu\text{m}$ の条件での冷却曲線と交差している。実験では、図 3 (a) に示したように、スケール厚さ $50\sim 210\mu\text{m}$ の全ての条件で、界面が 130°C 以下となった後の冷却曲線が重なっている。実際の現象としては、スケールに空隙が存在し、その一部あるいは途中まで冷却水が侵入して、スケールの熱抵抗層としての作用が小さくなったと考えられる。これはスプレー冷却の途中で見かけ上熱伝導率が大きくなった現象に相当する。図 8 に示すように、スケールの温度がある値を下回るとその熱伝導率が增大すると仮定して解析した結果は実験結果とほぼ一致する。

5. おわりに

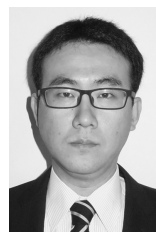
鋼板の表面性状として挙げられるスケール厚さがスプレー冷却特性に及ぼす影響を検討するため、スプレー冷却実験と衝風冷却実験を実施した。

板厚 20 mm の SUS304 鋼を試料母材として用い、擬似スケールを溶射することでスケール厚さを変更して、得られた冷却特性を比較することで、以下の知見を得た。

スプレー冷却および衝風冷却とも、スケールは熱抵抗層として作用する。熱伝達率が表面温度によらずほぼ一定である衝風冷却では、スケールが厚いほど鋼板の冷却速度が低下する。しかし、熱伝達率に表面温度の依存性があるスプレー冷却では、膜沸騰時の界面での冷却速度はスケール厚さによらずほぼ一定、もしくはごくわずかに増加する傾向を示し、クエンチ開始時の界面温度も高い。

参考文献

- 1) 三塚正志. 鉄と鋼. 1968, vol. 14, p. 1457-1471.
- 2) 大久保英敏, 西尾茂文. 日本機械学会論文集. 1988, vol. 54 B, p. 934-937.
- 3) 大久保英敏, 西尾茂文. 日本機械学会論文集. 1989, vol. 55 B, p. 2846-2851.
- 4) 村田杏坪, 西尾茂文. 鉄と鋼. 1992, vol. 79, p. 55-61.
- 5) Wendelstorf, R; Spitzer, K.-H; Wendelstorf, J. Int. J. Heat and Mass Transfer. 2008, vol. 51, p. 4892-4901.
- 6) 玉利孝徳, 吉田博. CAMP-ISIJ. 1995, vol. 8, p. 444.
- 7) 加藤徹, 原口洋一, 川本正幸, 渡部忠男. 鉄と鋼. 1997, vol. 83, p. 611-616.
- 8) 連続鋼片加熱炉における伝熱実験と計算方法. 日本鉄鋼協会編. 東京. 1971.
- 9) 門出政則, 光武雄一, 志岐隆浩, 西本友哉. 日本機械学会論文集. 2000, vol. 66 B, p. 519-527.
- 10) 西尾茂文, 芹沢良洋. 日本機械学会論文集. 1987, vol. 53 B, p. 1061-1064.
- 11) 荒井雅嗣, 有働竜二郎, 古瀬宗雄. 日本機械学会論文集. 2006, vol. 72 A, p. 691-696.
- 12) 竹内純一, 山崎良, 谷和美, 高橋康夫. 日本機械学会論文集. 2011, vol. 77 C, p. 2932-2939.
- 13) 福田啓之, 中田直樹, 木島秀夫, 黒木高志, 藤林晃夫, 高田保之, 日高澄具. 鉄と鋼. 2014, vol. 100, p. 1514-1522.



福田 啓之



上岡 悟史



中田 直樹