

工具と素材間の熱間接触熱伝達特性

Characteristics of Heat Transfer Between Die and Material in Hot Working

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)
木島 秀夫 KIJIMA Hideo 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 (部長)・博士 (工学)
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

熱間圧延や熱間鍛造工程において、高温の被加工素材は、圧延ロール、搬送ロール、プレス金型等の低温物との接触により温度が低下する。高温加工を行う実際の工程では、さらに被加工材の表面に酸化物皮膜が生成する。熱延加工工程の温度は素材の機械的特性に影響も与えるため工具と素材間の熱伝達は重要である。そこで、本検討では、酸化物皮膜厚みや表面粗度の変化による工具と被加工素材との接触熱伝導について基礎的な調査を行った。

Abstract:

In hot rolling and forging processes, temperature of the material being processed is decreased by the contact with work rolls or dies. In addition, the scale layer, which is thermal insulation material, was formed on the surface of material. Temperature in the working process can be crucial to the mechanical property of the product. It is important to evaluate contact heat transfer quantitatively. In this study, the contact heat transfer coefficient was investigated in two materials with different surface roughnesses and scale layers.

1. はじめに

近年、鋼板の高強度化・高朝化のニーズに対応するため、鋼の結晶組織の微細化を目的として、熱間加工時の温度を高精度に制御する必要性が増している。熱間圧延や熱間鍛造工程において、高温の被加工素材は、圧延ロール、搬送ロール、プレス金型等の低温物との接触により温度が低下する。目標の加工温度に制御する点から、あらかじめ温度を推定することが多く、その計算時に接触熱伝達を考慮する必要がある。接触熱伝達は、Tachibana¹⁾ や Sanokawa²⁾ の検討があり、その支配因子として、接触荷重、表面粗さ、接触固体の硬度、熱伝導率、表面酸化が挙げられており、粗さを矩形突起と仮定することでそのメカニズムが定性的に説明されている。また、Fukuoka ら³⁾ は、異なる金属素材間での接触熱伝達率の測定を実験的に行い、接触荷重、表面粗さ、硬度、接触固体の熱伝導率の関数として実験式を提案している。

熱間加工では、被加工素材の温度は 1 000~1 300℃程度まで加熱されることが多く、例えば熱延圧延時に被加工素材の表面には数 10 μm 程度の厚みを持つ酸化物皮膜が生成している⁴⁾。上記¹⁻³⁾ は、常温で生成する厚みの薄い酸化物皮膜について検討しているが、熱間加工プロセスを想定した厚い酸化物皮膜の影響を考慮したものはない。この点に着目して、Nakashima ら⁵⁾ は鍛造工程を想定して、鋼材を大

気酸化することで、酸化物皮膜を生成させて、接触熱伝達の検討を行っている。酸化物皮膜の厚みの増大により、接触熱伝達率が減少することを確認するとともに、酸化物皮膜自体の熱抵抗と固体接触部の熱抵抗の和で、接触熱伝達率を算出する手法を提案しているが、酸化物皮膜の表面粗さの影響に関して検討されていない。

そこで、本研究では熱間加工中の材料の接触熱伝達の特性に関して、特に酸化物皮膜と表面粗さの影響について、酸化物を溶射することで酸化物皮膜を模擬することにより基礎的な調査を行った。酸化物皮膜は熱伝導率が異なる FeO、Al₂O₃ とすることで、熱物性値の影響を確認した。また、皮膜がなく表面粗さを変更した試験片と比較することで、酸化物皮膜の表面粗さの影響を考察した。表面粗さの影響に関して過去の検討では真実接触点の数や粗さの標準偏差などの測定困難なパラメータが含まれることから、実際のプロセスに適用するのは容易ではない。そこで、弾性変形範囲における金属間接触と酸化物皮膜/金属間の接触についての実験結果と、工業的な適用が容易であると共に表面粗さの影響を考察しやすい Tachibana が提案した矩形突起モデルによる接触伝熱機構¹⁾ との比較から、酸化物皮膜を含めた接触熱伝達率の支配因子を考察した。

2. 接触熱伝達の実験方法

実験装置を図 1 に、実験条件を表 1 に示す。純銅(タフピッチ銅)とステンレス鋼(SUS304)を素材とする直径 20 mm、

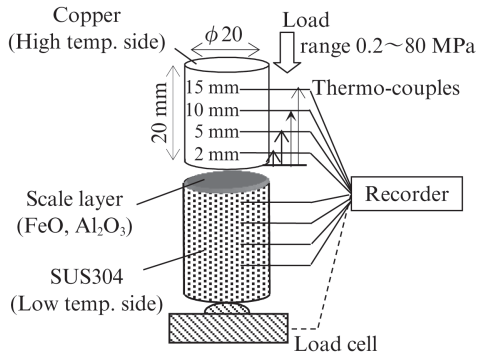


図1 実験装置概要

Fig. 1 Experimental apparatus

表1 実験条件

Table 1 Test-pieces condition in laboratory test

High temperature side	Specimen	Tough-Pitch Copper 20 φ × 20 h
	Heating temp.	500 K
	Layer	No-layer
Low temperature side	Specimen	SUS304 20 φ × 20 h
	Initial temp.	Room temp. (303 K)
	Layer	No-layer Layer (FeO, Al ₂ O ₃)
Contact load		0.2~80 MPa

表2 試験片の表面状態

Table 2 Surface treatment conditions of test-pieces

	Name	Surface Layer	Process	Ra (μm)	Hardness (Hv)
High temperature side (Copper)	No-Layer1	No layer	Lapping	0.29	113
	No-Layer2	No layer	Lathing	1.09	
Low temperature side (SUS304)	No-Layer1	No layer	Lapping	0.15	340
	No-Layer2	No layer	Lathing	3.35	
	Layer1	FeO (80 μm)	Lapping	0.22	-
	Layer2	Al ₂ O ₃ (80 μm)	Lapping	0.35	-

高さ 20 mm の円筒状の試験片を準備し、それぞれの試験片の中心軸上深さ方向に 4ヶ所（接触面から 2, 5, 10, 15 mm の位置）に直径 1.0 mm の K 型シース熱電対を挿入した。試験片の接触面における表面処理方法と粗さを表 2 に示す。ステンレス鋼試験片は、模擬酸化皮膜を付けたものと付けていないものを準備した。模擬酸化皮膜は、FeO 及び Al₂O₃ 粉末を溶射により付着させ、表面研磨により厚さ 80 μm に厚みを調整後、ラッピング研磨を施した。酸化皮膜がない試験片は、ラッピング研磨及び旋盤加工を施して表面粗さを変更した。試験片の表面粗さは、接触式表面粗さ計（東京精密 HANDYSURF E-35B）を用い、算

術平均粗さ Ra は JIS 0601 に基づき、λ_c=0.8 mm L_c=4.0 mm で計測した。また、レーザー顕微鏡（KEYENCE VX100）を用いて、局所的なプロフィールの測定も行った。高温側の試験片は、加熱時に試験片の周方向及び軸方向の温度差を少なくするために、熱伝導率が高い銅を素材とした。低温側の試験片は、熱流束の計算精度を確保することを目的に、中心軸深さ方向にある程度の温度差を付けるために、銅よりも熱伝導率の低いステンレス鋼とした。

実験では、銅試験片をヒーターにより 500 K まで加熱後、スクリー機構によりステンレス鋼試験片に接触させ、最大 80 MPa まで垂直荷重を付与した。銅およびステンレス鋼の 500 K でのヤング率はそれぞれ 130 GPa, 210 GPa であり、低ヤング率側の銅における歪は 0.062% となることから、素材全体は弾性変形範囲内と推察される。なお、高温にすると、高温酸化の進行により表面の状態が変化することから、加熱温度を 500 K とした。本実験は非定常で行うので、接触面の熱伝達率を求めるためには、各時刻における熱流束と 2 つの試験片の表層温度が必要になる。高温側の銅試験片は、内部の実測温度分布から最小二乗法を用いて外挿することにより銅試験片の表層温度を算出した。

低温側のステンレス鋼の試験片は、熱伝導率が低く、高い熱伝達率で冷却した場合、温度分布が平衡状態になるまで時間がかかるため、中心軸方向の熱の流れのみを考慮した熱伝導方程式を用い 1 次元差分によりステンレス鋼試験片の表面温度を計算した。なお、本研究において酸化皮膜が付与している場合も、ステンレス鋼および銅試験片の表面温度を基準に、実験時の熱伝達率を算出した。

3. 実験結果

3.1 接触熱伝達率におよぼす表面粗さの影響

図 2 に酸化皮膜がない場合の荷重 p と接触熱伝達率 h の関係を示す。接触熱伝達率は荷重に対して増加するが、荷重が高くなるにつれ、接触熱伝達率が上昇する勾配は小さくなっている。接触熱伝達率は、荷重が高い時にばらつきがあるが、銅試験片の表面粗さには依存しておらず、ステンレス鋼試験片の表面粗さによる変化が支配的である。表面粗さの小さいラッピング研磨では、表面粗さの大きい旋盤加工よりも接触熱伝達率が大きくなっている。

3.2 接触熱伝達率におよぼす酸化皮膜の影響

図 3 に、銅試験片の表面をラッピング研磨した条件について、ステンレス鋼試験片の表面に溶射した酸化皮膜の種類を変更した場合の荷重 p と接触熱伝達率 h の関係を示す。比較として酸化皮膜がない条件も記載している。

接触熱伝達率は、皮膜無し、FeO 皮膜、Al₂O₃ 皮膜の順に小さくなり、酸化皮膜が熱抵抗層であることが確認された。

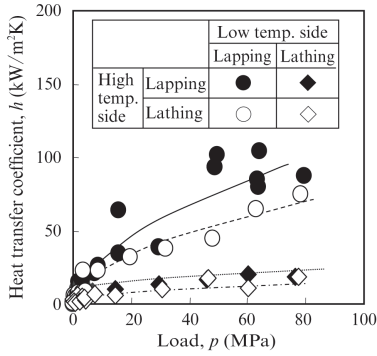


図2 荷重と接触熱伝達の関係（酸化皮膜なし）

Fig. 2 Relationship between load and calculated heat transfer coefficient without scale layer

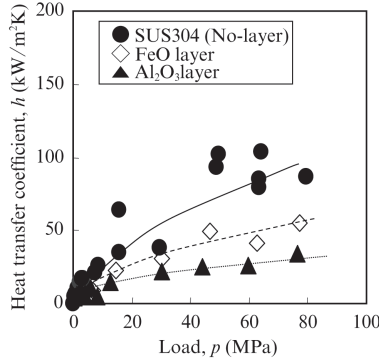


図3 荷重と接触熱伝達の関係（酸化皮膜あり）

Fig. 3 Relationship between load and calculated heat transfer coefficient for different oxide layer (High temp. side: No-Layer1)

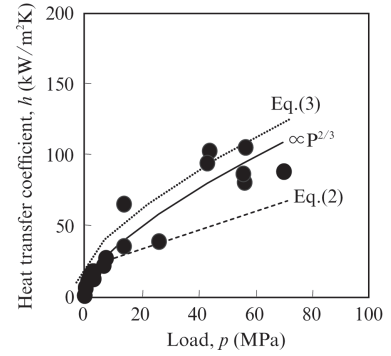


図4 接触熱伝達の文献値比較関係（酸化皮膜なし）

Fig. 4 Comparison with past knowledge between load and calculated heat transfer coefficient (High temp. side: No-Layer1, low temp. side: No-Layer 1)

また、図2と同様、接触熱伝達率は荷重に対して増加し、荷重が高くなるにつれ接触熱伝達率が上昇する勾配が小さくなっている。

3.3 接触熱伝達率におよぼす荷重の影響

図4に、銅およびステンレス鋼試験片の表面をラッピング研磨した条件について、荷重 p と接触熱伝達率 h の関係を示す。同図の通り、近似線は荷重 p の $2/3$ 乗に比例する結果となった。図中には代表的な実験式^{2,3)}も記載しているが、荷重 p の $2/3$ 乗に比例するとしたFukuokaら³⁾の実験式と同様の傾向となった。

4. 考察

4.1 接触熱伝達率におよぼす因子の整理

接触熱伝達の因子を模式的に説明した図を図5に示す。粗さを持つ2つの接触面では、表面の突起が局部的に接触していると考えられる。接触熱伝達を構成する項目として、

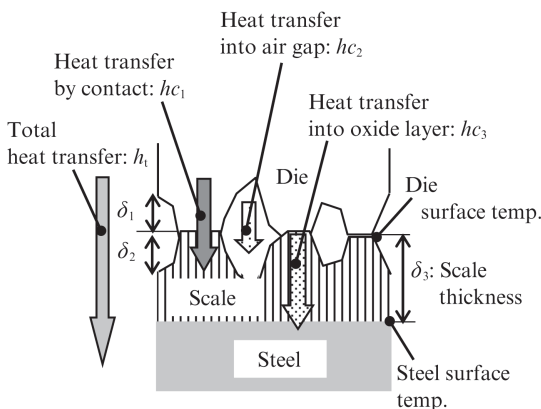


図5 実接触面熱伝達の模式図

Fig. 5 Schematic illustration of factors of contact heat transfer

真実接触部における接触熱伝達 hc_1 、非接触部に介在する物質中の熱伝達 hc_2 、酸化皮膜を介した熱伝達 hc_3 が考えられる。接触界面におけるモデルの模式図を図6に示す。

Tachibana¹⁾の考え方に基づき、図6(a)のように粗さを矩形突起と仮定する。また、積層平板の伝熱理論⁶⁾から固体間における定常状態の接触熱伝達は、図6(b)に示すような電気回路と等価になる。

そのため、各因子に基づいた接触熱伝達率、 hc_1 、 hc_2 、 hc_3 は、(1)~(3)の関係式となる。

$$hc_1 = \frac{1}{R_1} = \frac{A_0}{\delta_1/\lambda_1 + \delta_2/\lambda_2} \dots\dots\dots (1)$$

$$hc_2 = \frac{1}{R_2} = \left[\frac{\lambda_i}{\delta_1 + \delta_2} + \sigma(T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2) \right] (1 - A_0) \dots (2)$$

$$hc_3 = \frac{1}{R_3} = \frac{\lambda_2}{\delta_3} \dots\dots\dots (3)$$

また、総括接触熱伝達率 ht は、(4)式の関係式となる。

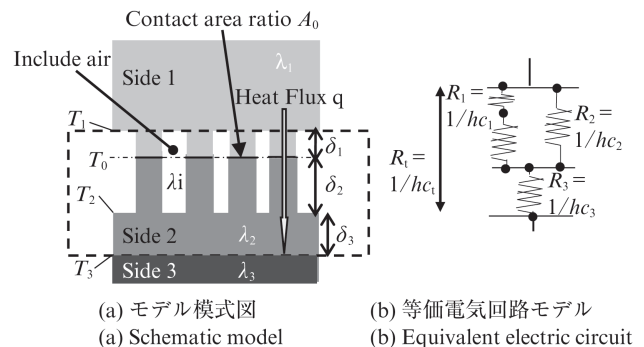


図6 接触熱伝達の伝熱モデル

Fig. 6 Schematic illustration of theoretical model of contact heat transfer

$$\frac{1}{h_t} = R_t = \frac{1}{1/R_1 + 1/R_2} + R_3 \dots\dots\dots (4)$$

ここで、総括熱抵抗 R_t 、真実接触部における熱抵抗 R_1 、非接触部に介在する物質中の熱抵抗 R_2 、酸化皮膜を介した熱抵抗 R_3 、矩形突起の高さ $\delta_1 \cdot \delta_2$ 、酸化皮膜厚み δ_3 、接触面の熱伝導率 $\lambda_1 \cdot \lambda_2$ 、介在物質の熱伝導率 λ_i 、ステファン・ボルツマン定数 σ 、真実接触面積 A_0 である。(2) 式の介在物質中の熱伝達率 hc_2 は、熱伝導と輻射伝熱を考慮した。固体間の接触熱伝達率を示す (1) 式を計算するには、矩形突起の高さ δ を表面粗さから算出する必要がある。また、真実接触面積率 A_0 の算出も必要である。(4) 式から、真実接触面積率 A_0 が微小の場合では、介在物質による熱伝達率 hc_2 の影響を受けやすくなることが示唆される。本実験は、大気雰囲気で行ったことから、介在物質は空気となる。本実験では、試験片加熱温度が 500 K と低く、表面粗さ Ra は数 μm 程度であり、ギャップも同程度と推定されることから、熱伝導項に対して輻射項は微小となり、省略することができる。

4.2 接触熱伝達率におよぼす荷重の影響

図 2、図 3 に示された荷重の増大による接触熱伝達率の上昇は、(1) 式から真実接触面積率 A_0 若しくは変形による矩形突起の高さ δ の変化と考えられる。弾性変形の場合、矩形突起の高さ変化は式 (5) で表すことができる。

$$\frac{\delta'}{\delta} = 1 - \frac{p}{E} \dots\dots\dots (5)$$

ここで、ヤング率 E 、負荷後の矩形突起高さ δ' である。本実験の範囲では軟質側の銅のヤング率 E は 130 GPa、荷重 p は 80 MPa であり、負荷後の矩形突起の高さ δ' は、負荷前に対して 99.94% となることから、その変化は微小である。このため、真実接触面積率 A_0 の変化が主な原因と推定される。粗さプロフィールが塑性変形すると真実接触面積率 A_0 は、ビッカース硬度 Hv の定義から、(6) 式の通り荷重に比例すると考えられる¹⁾。

$$A_0 = \frac{p}{Hv} \dots\dots\dots (6)$$

一方、弾性変形時には、粗さを cos 波と仮定した場合の解析結果から真実接触面積率 A_0 は、(7) 式で表されることが知られている⁷⁾。

$$A_0 \propto p^{2/3} \dots\dots\dots (7)$$

図 5 に示したように、本実験結果は荷重 p の 2/3 乗と定性的に弾性変形時の理論と一致していることから、接触部においても弾性変形が支配的であったと推定される。

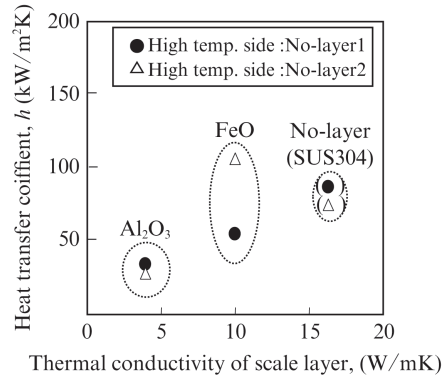


図 7 酸化皮膜の熱伝導率と接触熱伝達率

Fig. 7 Relationship between thermal conductivity of scale layer and calculated heat transfer coefficient ($p = 80 \text{ MPa}$ Low temp. side lapping process)

4.3 接触熱伝達率におよぼす酸化皮膜の影響

3.2 節で示したように、酸化皮膜が FeO の時よりも、Al₂O₃ の時の方が、接触熱伝達率が小さくなった。FeO と Al₂O₃ の酸化皮膜の厚みは、いずれも 80 μm であることから、接触熱伝達率の変化は、酸化皮膜の熱伝導率の違いに起因していると推察される。酸化皮膜の熱伝導率として、FeO では焼結体の測定結果⁸⁾ から、Al₂O₃ では溶射物の測定値⁹⁾ から引用した。最大荷重 80 MPa における、酸化皮膜の熱伝導率と接触熱伝達率の関係を図 7 に示す。なお、酸化皮膜が無い条件は厚み 80 μm のステンレス鋼皮膜が付着しているとみなし、参考のため図中に、皮膜無しの結果も記載している。接触熱伝達率は、酸化皮膜の熱伝導率に比例しており、酸化皮膜を付与した場合は、その皮膜の熱伝導率に比例して接触熱伝達率が低下することが実験的に確認できた。

4.4 接触界面熱伝達率に及ぼす表面粗さの影響

接触面の熱伝達率 ($hc_1 + hc_2$) の推定を試みる。本実験で算出した熱伝達率は、酸化皮膜と接触界面を含んだ総括熱伝達率 h_t である。酸化皮膜の影響は (3) 式から求められるため、(8) 式により皮膜厚みの影響を除いた接触面の熱伝達率を算出することができる。

$$\frac{1}{hc_1 + hc_2} = \frac{1}{h_t} - \frac{1}{hc_3} \dots\dots\dots (8)$$

最大荷重 80 MPa における、矩形突起モデルの接触部分の熱伝達率を表す (1) 式と酸化皮膜の影響を除去した接触部の熱伝達率 ($hc_1 + hc_2$) との関係を図 8 に示す。矩形高さ δ は、算術平均粗さ Ra を用いて計算した。また、真実接触面積率 $A_0 = 1.0$ とした。矩形高さ δ を Ra の 1800 倍とした時の (1) 式を破線で併記した。

酸化皮膜のない実験値は、矩形高さ δ を Ra の 1800 倍

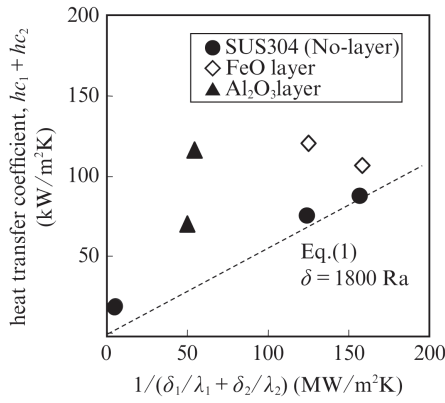


図8 接触伝熱項 (式 1) と界面接触熱伝達率の関係

Fig. 8 Relationship between theory and calculated heat transfer coefficient at $p = 80 \text{ MPa}$

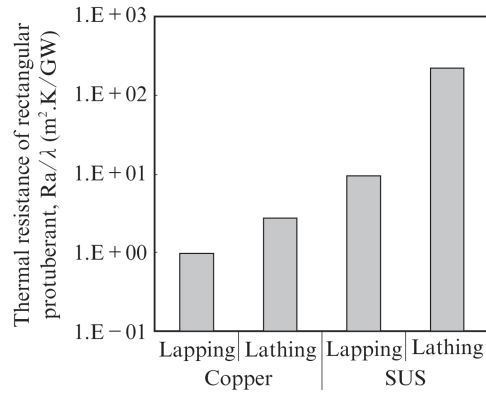


図9 矩形突起モデルの接触熱抵抗

Fig. 9 Comparison of thermal resistance of rectangular protuberant without scale layer

とした時の理論値と良い相関が得られ、矩形突起モデルは定性的に正しいといえる。算術平均粗さ Ra に補正係数を乗じることで本モデルにおける矩形突起の高さ δ を求められると考えられる。次に 3.1 節で示したステンレス鋼試験片の表面粗さによって接触面の熱伝達率が大きく変化した現象を考察する。

(1) 式から異なる素材が接触したときの熱伝達率は、熱抵抗の和の逆数となる。そこで、酸化物皮膜が無い条件における各試験片の矩形突起部の熱抵抗を **図 9** に示す。

ステンレス鋼の熱伝導率は 15.9 W/mK であり、銅の 400 W/mK に対して 3.7% と低い。熱抵抗は、ステンレス鋼側は $9 \sim 210 \text{ m}^2 \text{ K/GW}$ に対して、銅側では $0.7 \sim 2.7 \text{ m}^2 \text{ K/GW}$ となり、相対的にステンレス鋼側の熱抵抗が大きいので、銅とステンレス鋼の熱抵抗を合計すると、ステンレス鋼側の熱抵抗が支配的になる。

次に **図 8** において酸化物皮膜の有無で接触熱伝達に差異が出た理由について詳細に確認するために、レーザー顕微

鏡で測定したステンレス鋼側の表面プロフィールの例を **図 10** に示す。**図 10 (a)** の酸化物皮膜が無いラッピング研磨では、ランダムに微小な突起が存在し、**図 10 (b)** の酸化物皮膜の無い旋盤加工では、周期的なピッチで突起が存在するが、**図 10 (c)** および **図 10 (d)** の酸化物皮膜のラッピング研磨では、ボイドに相当する部位で大きな窪みが存在し、ボイド部分を除くと、ほぼ平滑な面となっている。以上から、 FeO や Al_2O_3 の酸化物皮膜の表面における Ra はボイドの影響を受け大きな値として測定されることが考えられる。JIS に規定される算術平均粗さ Ra は、測定長 $Lc = 4 \text{ mm}$ の区間での平均的な値のため、ボイドの影響により接触部のそれに対して大きめの値となり、実際の接触部の表面粗さを示すパラメータとして適切でないと考えられる。そのため、接触熱伝達率の評価を行うためには、ボイドを除いた実質的に接触に関与する粗さを表すパラメータが重要となると思われる。また、本検討の範囲では弾性変形的な接触となっていることは確認できたものの、接触面積率 A_0 については、明確になっ

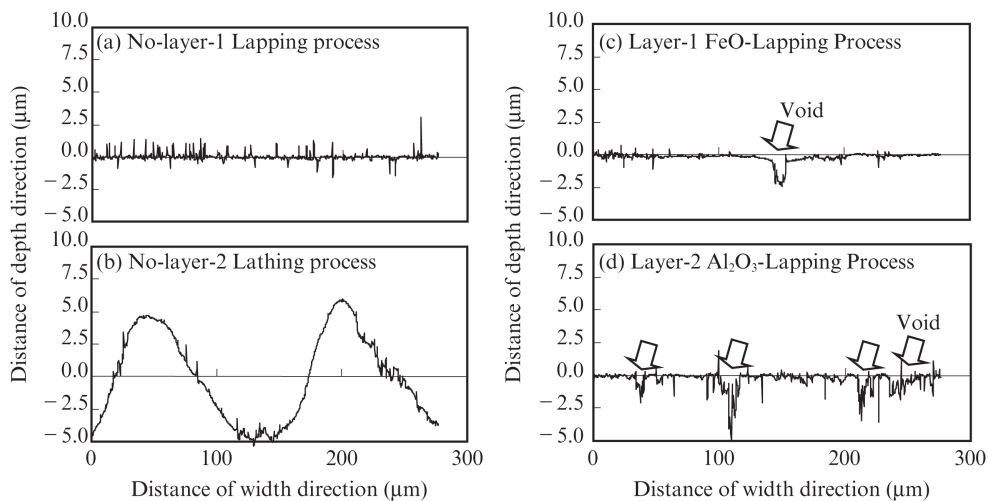


図 10 各試験片の表面プロフィール

Fig. 10 Comparison of sectional profile for each test pieces

ていない。以上から、ポイド以外の部分の粗さと、荷重による接触面積率 A_0 の変化を考慮することで、接触熱伝達率の予測が可能となると推察される。

5. おわりに

熱間圧延や熱間鍛造工程における、圧延ロール、搬送ロール、プレス金型等の低温物と高温の被加工物の接触に伴う熱伝達に対して、弾性変形域の荷重範囲について、基礎的な検討を行った。異なる表面粗さと酸化皮膜を持つステンレス鋼と銅を接触させたときの熱伝達率を測定して、荷重、酸化皮膜、表面粗さの影響を明らかにした。さらに、表面粗さを矩形突起と仮定して、積層平板の伝熱理論に基づいた接触熱伝達率の理論式と実験結果との比較を行い、以下の知見を得た。

- (1) 本実験範囲は低ヤング率側の銅において、ヤング率と荷重から求めたひずみが0.062%であることから、素材全体は弾性変形範囲と推察される。さらに、接触熱伝達率は荷重 p の2/3乗に比例し、定性的に弾性変形時の接触理論と一致していることから、接触熱伝達率の上昇は荷重 p の上昇によって、弾性変形的に接触面積率 A_0 が増大することに起因したと推定される。
- (2) 酸化皮膜のないステンレス鋼と銅を接触させた場合、熱伝導率の高い銅試験片の表面粗さは、接触熱伝達率に対する影響が小さい。ステンレス鋼の熱伝導率は、銅に対して3.7%程度であることから、ステンレス鋼側の熱抵抗は9~210 m² K/GWとなり、銅側の0.7~2.7 m² K/GWと比較して相対的に高いためと推定される。
- (3) 酸化皮膜のない試験片では、荷重80 MPaにおける接触部熱伝達率 (hc_1+hc_2) は、Tachibanaのモデル¹⁾に対して、真実接触面積率 $A_0=1$ 、矩形高さ δ をRaの1800倍とした時の理論値と良い相関が得られた。酸化皮膜がある場合は上記の接触熱伝達率の理論値よりは過小となる。レーザー顕微鏡で観察した結果、溶射

により作製した酸化皮膜には多数のポイドが生成しており、接触に直接関与する粗さを適切に把握することが重要であると示唆された。

- (4) 接触熱伝達率の表面粗さおよび接触固体の熱伝導率の影響は、等価電気回路で記載できる。今後、塑性変形を伴う熱間加工に拡張するには、本手法を用いて塑性変形域における接触熱伝達率を定量的に評価することが重要である。その際、素材表面に存在するポイド以外の実際に接触する部分の粗さと、荷重による真実接触面積率 A_0 の変化の検討が特に重要になると考えられる。

参考文献

- 1) 橘藤雄. 日本機械学会誌. 1952, vol. 55, p. 102-107.
- 2) 佐野川好母. 日本機械学会論文集. 1967, vol. 33, p. 1131-1137.
- 3) 福岡俊道, 野村昌孝, 山田章博. 日本機械学会論文集 (A編). 2010, vol. 76, p. 344-350.
- 4) 岡田光, 橘久好, 野村茂樹, 焼田幸彦, 杉本純, 高橋裕之. 材料とプロセス. 2011, vol. 24, p. 81-84.
- 5) 中島芳宏, 石黒太浩, 阿部英嗣, 湯川伸樹, 石川孝司, 長田 卓. 材料とプロセス. 2014, vol. 27, p. 80-83.
- 6) JSME テキストシリーズ 伝熱工学, 日本機械学会編, 丸善出版, 東京, 2014, p. 31.
- 7) Johnson, K. L. Contact Mechanics, Cambridge university press, Cambridge, 1987, p. 402.
- 8) Takeda, M.; Onishi, T.; Nakakubo, S.; Fujimoto, S. Mater. Trans. 2009, vol. 50, p. 2242-2246.
- 9) 竹内純一, 山崎良, 谷和美, 高橋康夫. 日本機械学会論文集 (C編). 2011, vol. 77, p. 2932-2939.



上岡 悟史



木島 秀夫



中田 直樹