

フェライト系ステンレス鋼の熱間圧延時に鋼板に生じる肌荒れの発生機構

Sticking in Hot Rolled Sheet of Ferritic Stainless Steel

松原 行宏 MATSUBARA Yukihiko 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)
木村 幸雄 KIMURA Yukio JFE スチール 知的財産部 知財技術室 主任部員(副部長)・博士(工学)
宇都宮 裕 UTSUNOMIYA Hiroshi 大阪大学大学院 工学研究科 教授

要旨

フェライト系ステンレス鋼板の熱間圧延において、鋼板に肌荒れと呼ばれる表面欠陥が生じやすい。肌荒れは次工程の生産性を阻害する重要な課題であるが、その発生機構は十分に明らかにされていない。本研究では、トライボシミュレータを用いた熱間すべり圧延実験を行い、その発生機構を調査した。鋼板に生じる肌荒れ欠陥は、ロールバイト内での高面圧によりワークロールとステンレス鋼間で凝着が生じ、その後、ワークロールが鋼板よりも先進するため、凝着部が母材よりも先進しようとし、鋼板表層部がせん断応力により母材から剥離して折れ重なることによる欠陥であると推定した。また、肌荒れ欠陥の抑制には、硫黄系添加剤を含有した潤滑油の供給が有効であることを確認した。

Abstract:

In hot rolling of ferritic stainless steel, prevention of sticking is very important from the viewpoint of productivity. However, the formation mechanism of sticking has not been clarified sufficiently. Therefore, in this work, rolling experiments were carried out using a tribo-simulator. The results clarified the following points: Sticking occurs more easily on ferritic stainless steel than on high strength steel. On ferritic stainless steel, the work roll sticks with the hot-rolled sheet at the entrance of roll-bite, and the work roll then moves forward on the hot-rolled sheet. Therefore, it is thought that the surface layer of the hot-rolled sheet is fractured by large shear strain, and the work roll stuck to the fractured layer advances further on the sheet, forming a defect on an accumulated fractured surface layer of the hot-rolled sheet. Applying a lubricant oil is effective for prevention of sticking between the work roll and hot-rolled sheet.

1. 緒言

ステンレス鋼の熱間圧延においては、肌荒れや焼き付きと呼ばれる表面欠陥が発生しやすく、特にクロムを多量に含有するフェライト系ステンレス鋼で顕著に発生することが知られている^{1,2)}。このような欠陥が発生すると、ワークロールの原単位が悪化するとともに、次の脱スケール工程で欠陥を除去する負荷が大きくなり、生産能率の低下や鋼板歩留りの悪化を招く。このため、フェライト系ステンレス鋼熱間圧延時の肌荒れや焼き付きの発生機構解明や防止技術に対する要望は大きい。

Kato ら³⁻⁵⁾ は、アムスラー型のころがりすべり式高温摩耗試験機を用い、ステンレス鋼熱間圧延時のワークロールへの焼き付き現象の研究を行い以下のとおり報告している。ロールとの摩擦によりステンレス鋼表層が破断して生じるミクロンオーダーの薄片状粒子がロール表面に移着、この繰り返しによって同様の粒子が層状に積み重なるように移着

し、肉眼で観察される焼き付きに成長する。さらに、焼き付きにより生じた層状の移着物が生成と脱落を繰り返し、ワークロールの肌荒れが生じる。また、焼き付きの抑制には、黒鉛の添加量を増加したワークロールが有効であると報告している。一方、Toriumi ら⁶⁾ は、すべり式の熱間圧延潤滑評価試験装置^{7,8)}を用いて、焼き付きに及ぼす潤滑油の効果を評価し、硫黄添加剤の添加が有効であると報告している。

近年、省資源の観点からオーステナイト系ステンレス鋼の代替として高クロムフェライト系ステンレス鋼のニーズが高くなるに伴い、熱間圧延時の表面欠陥を防止し、製造コストを削減して安定生産することが重要視されている。ワークロールに生じる肌荒れに関しては発生原因とメカニズムが報告されているが、鋼板表面に生じる焼き付きや肌荒れ欠陥に関しては一切報告されていない。これは、後述するように、ロール肌荒れは主に仕上げ圧延の前段スタンドで発生するが、鋼板を観察できるのは最終スタンドまで圧延された後であり、肌荒れの発生するスタンドで圧延された直後の鋼板を観察できないことが大きな要因である。また、鋼板

2021 年 1 月 25 日受付

に生じる肌荒れを再現する圧延シミュレータも開発されていない。

鋼板に生じる肌荒れ欠陥は、脱スケール能率を大幅に低下させ、生産能率や製造コストに大きく影響することから、その発生メカニズムの解明と防止策の提案は非常に重要である。そこで本研究では、生産ラインで圧延された熱延鋼板に生じる肌荒れ欠陥を観察するとともに、すべり式の熱間圧延潤滑評価試験装置を用いて鋼板に生じる肌荒れ欠陥の再現を試み、鋼板の肌荒れ発生メカニズムを検討した⁹⁾。

2. 肌荒れの実態調査

生産ラインにおけるワークロールと鋼板の肌荒れの実態を調査した。フェライト系ステンレス鋼の熱間圧延における肌荒れの発生レベルにはバラツキが大きいが、顕著な肌荒れが発生した場合について、**図1**に仕上げ前段スタンドのワークロール外観、**図2**にロール凹凸をレプリカに転写させてプロフィールを測定した結果を示す（レプリカ測定値の正負を反転して表示しており、正がロールの凹みを意味する。）。Kato らの報告⁵⁾と同様、ロール凹凸は1~2 mm程度の幅で周方向に伸びた筋状の欠陥であり、20~40 μm程度の深さでロール素地が脱落していることが分かる。最終スタンドまで圧延され、さらに酸洗された鋼板表面の外観を

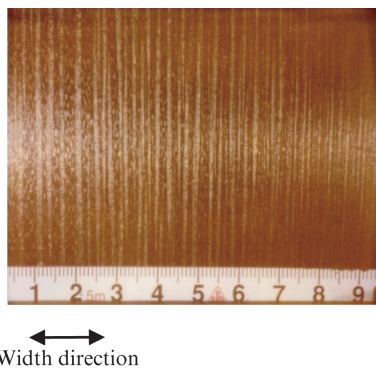


図1 フェライト系ステンレス熱延後のワークロール表面外観⁹⁾
Fig. 1 Photograph of work roll surface after hot rolling of ferritic stainless steel strip⁹⁾

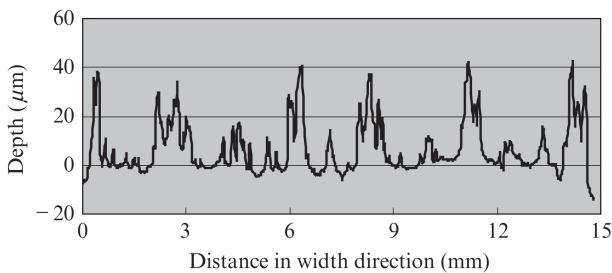


図2 ワークロールレプリカの断面プロフィール⁹⁾
Fig. 2 Profile of work roll replica⁹⁾

図3に示す。ワークロールの肌荒れ形態に対応した長手に伸びた筋状の欠陥である。**図4**に表面欠陥部の断面観察結果、**図5**に欠陥部のEPMA分析結果を示す。押し込まれた異物は鋼板と同一の成分であり、鋼板表面の酸化被膜（スケール）と鋼板そのものが鋼板に押し込まれた欠陥と言える。ワークロールの肌荒れは仕上げ前段スタンドで発生することから、中段スタンド以降で5~10倍に延ばされたと考え

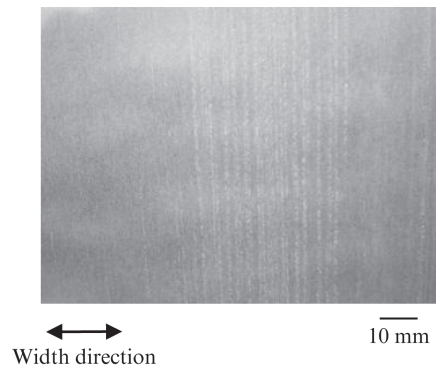


図3 熱延、酸洗されたフェライト系ステンレス鋼板の表面外観⁹⁾
Fig. 3 Photograph of ferritic stainless steel strip surface after hot rolling and pickling⁹⁾

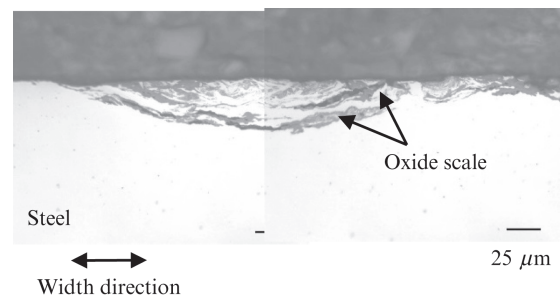


図4 表面欠陥の断面観察⁹⁾
Fig. 4 Photograph of cross section of surface defect⁹⁾

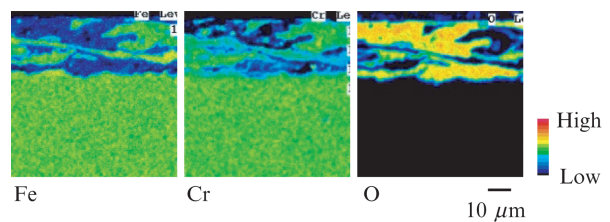
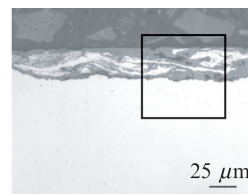


図5 表面欠陥部の元素分析結果⁹⁾
Fig. 5 Element mapping of surface defect by EPMA⁹⁾

えられるが、深さ $30\mu\text{m}$ を超える欠陥である。

以上により、フェライト系ステンレス鋼熱延鋼板に生じた線状の肌荒れ欠陥は、酸化被膜と鋼板そのものが鋼板に押し込まれた欠陥であることを初めて明らかにした。

3. 実験方法

鋼板に生じる肌荒れ欠陥を再現し、発生メカニズムと防止策を議論するためには、肌荒れの発生するスタンドで、圧延された直後の鋼板を観察することが重要と考える。Kato^ら³⁻⁵⁾の研究はころがり滑り試験機を用いたため、ロール肌荒れは再現できているが、鋼板を圧延できず、鋼板に生じる肌荒れ欠陥を再現できていない。そこで、本研究では、Azushima^ら^{7,8)}が開発した熱間圧延潤滑評価試験機を用いて滑り圧延を行い、鋼板に生じる肌荒れ欠陥の再現を試みた。この試験機は、ワークロールと鋼板の相対すべり速度差を仕上げ圧延の前段スタンドと同程度に大きくすることができるため、ワークロールと鋼板間に生じる激しい変形状態を再現できると考えた。

図6に試験機外観を示す。主スタンド(①)はワークロール直径100mm、最高速度207m/min、耐荷重200kN、許容トルク800kN・mmであり、上ワークロールのみ駆動方式である。サブスタンド(②)は上下ワークロール駆動式であり、材料を8~32m/minで搬送する。主スタンドとサブスタンドのロール速度比率は、無段変速機により6.3~24の間に設定できる。主スタンドとサブスタンド間の距離は1400mmである。加熱炉(③)は定格48kWの赤外線イメージ炉であり、1373Kまで加熱可能である。出側張力付与装置(④)はエアシリンダにより最大3.5kNの張力を付加できる。また、主スタンド上ワークロールのトルク、圧延荷重を測定できる。

供試材には、フェライト系ステンレス鋼として19.4mass%のクロム、1.8mass%のモリブデン、0.4mass%のニオブを含有するSUS444鋼、比較のため0.2mass%のケ

①Main-stand, ②Sub-stand
③Furnace, ④Tension device

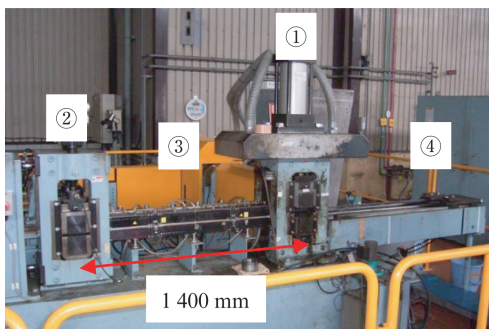


図6 熱間圧延潤滑評価試験機外観⁹⁾
Fig. 6 Photograph of tribo-simulator⁹⁾

イ素、1.8mass%のマンガンを含有する590MPa級高張力鋼(HSS)の2種を用意した。寸法は、板厚9mm、板幅22mm、板長さ3000mmである。いずれも、真空溶解で所定の成分に溶製したインゴットを熱間圧延により薄く延ばし、レーザ切断と表面研削により供試材を作製した。ワークロールには、表面粗さを $0.2\mu\text{mRa}$ 程度とした高速度鋼を用いた。

図7を用いて、すべり圧延の実験方法について述べる^{7,8)}。まず供試材を主スタンドとサブスタンドの間にセットし、サブスタンドの上下のワークロールで供試材を圧下し、さらに、供試材先端を出側張力付与装置に取り付けることにより、実験開始時に供試材を一定速度で送り出し安定して圧延できる状態とする。続いて、赤外線イメージ炉で供試材を1073Kまで加熱して7分間保持する。この後、前方張力を加えながらサブスタンドを速度 V で回転させて、供試材均熱部分を主スタンドに移動させる。この際、主スタンドの上ワークロールを速度 U で回転させておき、供試材均熱部が主スタンドの直下に到達した際、ワークロールを所定の荷重になるように圧下すると、供試材の搬送速度 V に対し、ロール回転速度 U のすべり圧延状態となる。主スタンドの下ワークロールは従動回転している。このように、一定の圧延条件で一定距離をすべり圧延することにより、主スタンドの圧延荷重 P と上ワークロールのトルク G から、主スタンドのワークロール半径 R を用いて、(1)式より、摩擦係数 μ を算出できる。

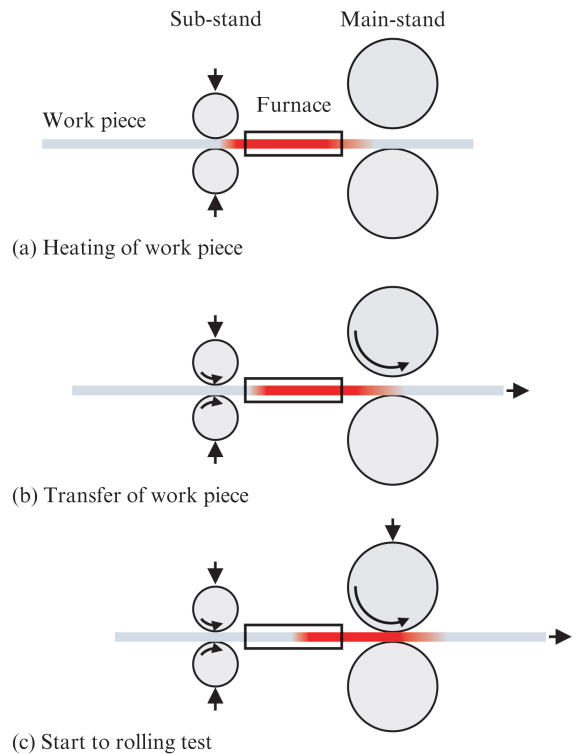


図7 すべり圧延の実験手順⁹⁾
Fig. 7 Schematic illustration of experimental procedure⁹⁾

$$\mu = G/PR \quad \dots\dots\dots (1)$$

本実験では、サブスタンド速度 V を 2 m/min、主スタンド速度 U を 12, 24 m/min で設定し、速度比率 γ を 6, 12 と変化させた。圧下量は 0.3 mm とし、ロールと鋼板間に冷却水を供給しながらすべり圧延を行った。各条件で、摩擦係数 μ を評価するとともに、圧延後の供試材の断面観察を行った。

4. すべり圧延実験と肌荒れ発生メカニズムの推定

4.1 すべり圧延実験

フェライト系ステンレス鋼を、 $V=2$ m/min、 $U=24$ m/min ($\gamma=12$) の条件ですべり圧延を行い、比較のため高張力鋼のすべり圧延も行った。図 8 にすべり圧延時のチャートを示す。フェライト系ステンレス鋼は、圧延中大きな異音が生じ、摩擦係数は 1 を超え、正常に圧延することができなかった。高張力鋼では、摩擦係数 0.5 程度であった。図 9 に断面観察結果を、図 10 にフェライト系ステンレス鋼圧延後の外観を示す。フェライト系ステンレス鋼では、凹凸が大きく顕著な焼き付きが発生した。このように、フェライト系ステンレス鋼は高強度鋼に比べ著しく焼き付きが生じやすい。

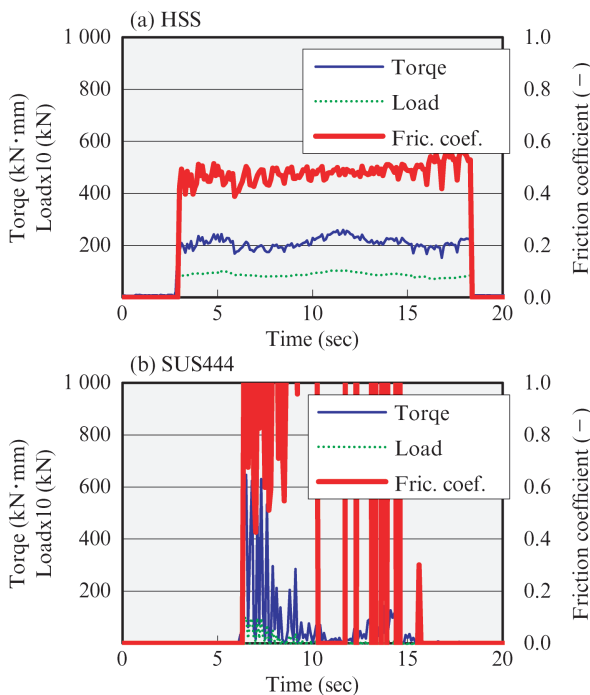


図 8 すべり圧延実験の結果比較⁹⁾
(a) HSS, (b) SUS444

Fig. 8 Comparison of experimental results⁹⁾
(a) HSS, (b) SUS444

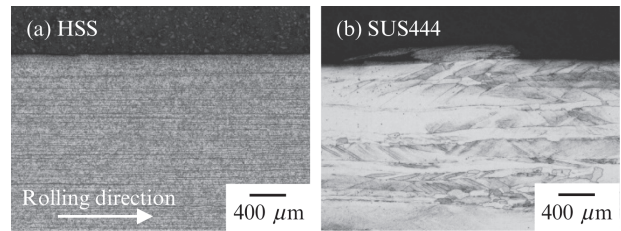


図 9 圧延材の断面観察の比較⁹⁾
(a) HSS, (b) SUS444

Fig. 9 Comparison of cross section of work piece⁹⁾
(a) HSS, (b) SUS444

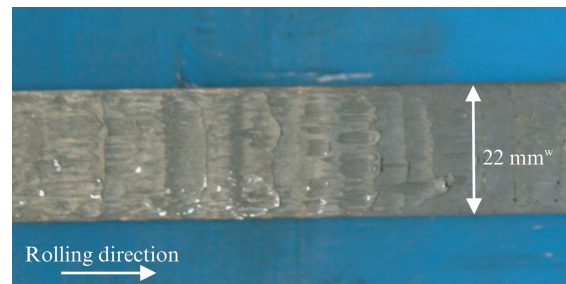


図 10 フェライト系ステンレス鋼圧延材の外観⁹⁾

Fig. 10 Photograph of SUS444 surface after hot rolling⁹⁾

原因として、フェライト系ステンレス鋼では潤滑効果のある酸化被膜が非常に薄いこと、 Cr_2O_3 はコランダム型の塑性変形能に乏しい酸化被膜であること、さらにワークロールと鋼板の“とものがね”効果により凝着が生じやすいことなどが推定される。

フェライト系ステンレス鋼の焼き付き発生部に関し、図 11 に長手方向断面の拡大写真、図 12 に EPMA による元素マッピングの結果を示す。鋼板表層の厚さ 80 μ m 程度の層が母材から剥離し、その前方で折れ重なるように倒れ込んでいる様子が分かる。この表層の剥離は、粒界ではなく粒内で破壊していると考えられる。EPMA 分析結果から、折れ重なっている部分はワークロール成分ではなく、供試材と同じ成分であることが分かった。

4.2 肌荒れ発生メカニズムの推定

以上の観察結果に基づき、酸化被膜が押し込まれた欠陥形成の推定メカニズムを、図 13 に示す模式図を用いて説明する。ロールバイト内での高面圧によりワークロールと供試材間で凝着が生じる。その後、ワークロールが鋼板よりも先進するため、凝着部が母材よりも先進しようとし、鋼板表層部に破壊応力を超える非常に大きなせん断応力が生じ、表層部分が母材から剥離して鋼板前方に折れ重なった欠陥となる。この際、鋼板表層の酸化被膜も剥離部とともに巻き込まれて折れ込み欠陥となり、この部分は次スタンド以降の圧延で長手に延ばされるため、図 4 に示したように酸化被膜が鋼板に押し込まれ、長手に伸びた欠陥が形成されると

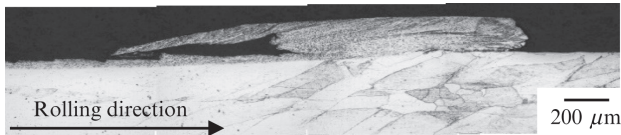


図 11 焼き付き発生部の長手断面⁹⁾
Fig. 11 Photograph of cross section of SUS444⁹⁾

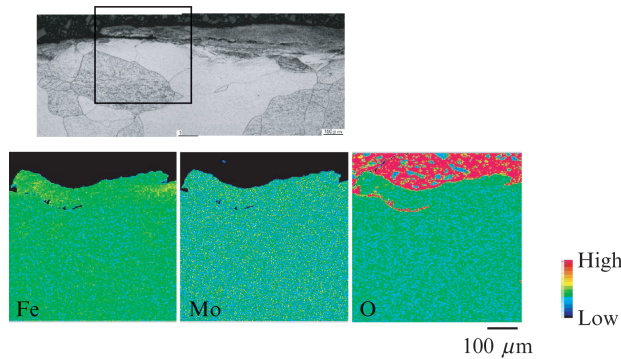


図 12 焼き付き発生部の元素分析結果⁹⁾
Fig. 12 Element mapping of SUS444 by EPMA⁹⁾

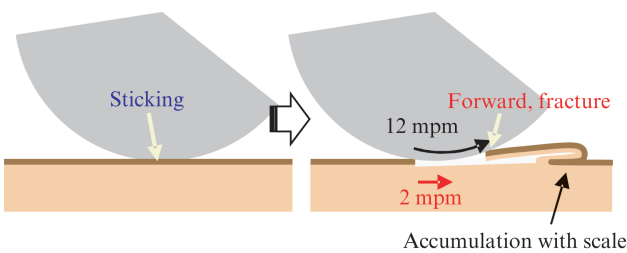


図 13 表面欠陥発生メカニズムの推定図⁹⁾
Fig. 13 Schematic illustration of sticking formation mechanism⁹⁾

考えられる。なお、今回のすべり圧延の速度差 10 m/min は、実生産ラインでも容易に生じる速度差である。

以上のとおり、フェライト系ステンレス鋼の熱間圧延において、実際の生産ラインで製造された鋼板で観察された、酸化被膜が押し込まれた筋状の肌荒れ欠陥が鋼板に生じる様子を初めて再現し、その形成メカニズムを推定した。

5. 鋼板に生じる肌荒れの抑制技術

上述した鋼板の肌荒れ発生機構を考慮すると、肌荒れを抑制するためには、ワークロールと鋼板の速度差を小さくする、面圧を小さくするなどの対策が有効と考えられる。しかしながら、上記の対策は生産性を低下させるため、実現には限界がある。そこで、潤滑油を供給することによる、鋼板の肌荒れ抑制効果を検証した。

潤滑剤には、Toriumi ら⁶⁾と同じ硫黄添加剤を含有した潤滑油を用い、10%のエマルジョンとしてワークロールと鋼

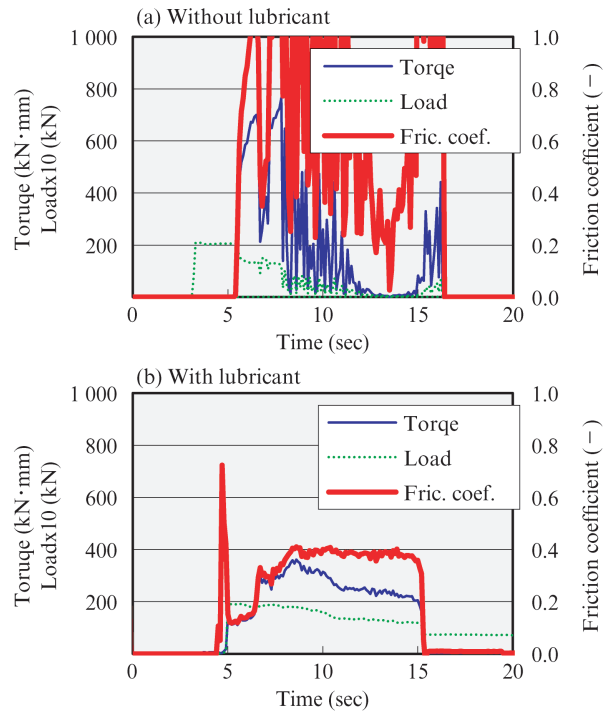


図 14 すべり圧延実験の結果比較⁹⁾
(a) Without lubricant, (b) With lubricant
Fig. 14 Comparison of experimental results⁹⁾
(a) Without lubricant, (b) With lubricant

板間に供給した。フェライト系ステンレス鋼を対象に、 $V=2$ m/min, $U=12$ m/min ($\gamma=6$) の条件で潤滑油供給の効果と比較した。図 14 にチャートを示す。水潤滑の場合大きな異音が生じるほどの焼き付きが発生するのに対し、潤滑油を供給することにより、安定して圧延することができ、 $\mu=0.39$ であった。また、潤滑油を供給した場合、鋼板表面に肌荒れ欠陥は生じなかった。このように、フェライト系ステンレス鋼の熱間圧延時の摩擦係数を低減し、肌荒れ欠陥を防止するには、潤滑油の供給が非常に有効であることが分かった。

6. おわりに

フェライト系ステンレス鋼の、熱間圧延の際に鋼板に生じる肌荒れ欠陥について調査し、以下を明らかにすることにより、フェライト系ステンレス鋼の生産能率向上や歩留り向上に有益な知見を得た。

- (1) 実生産ラインで製造された熱延鋼板の肌荒れ欠陥は、鋼板そのものが酸化被膜とともに鋼板表面に押し込まれ、長手に伸びた欠陥である。
- (2) すべり圧延実験により、鋼板に生じる肌荒れ欠陥を再現することができた。ロールバイト内での高面圧によりワークロールとステンレス鋼間で凝着が生じ、その後、ワークロールが鋼板よりも先進するため、凝着部が母

材よりも先進しようとし、鋼板表層部がせん断応力により母材から剥離して折れ重なった欠陥になると推定される。

- (3) 硫黄添加剤を含有した潤滑油を供給することにより、鋼板に生じる肌荒れ欠陥を抑制できる。

参考文献

1) 加藤治, 菊間敏夫. ステンレス鋼熱延ロールの焼付き実験結果. 昭和63年度 塑性加工学会春季講演会. 1988, p. 285-288.
 2) Jin, Won.; Choi, Jeom-Yong.; Lee, Yun-Yong. Nucleation and Growth Process of Sticking Particles in Ferritic Stainless Steel. ISIJ International. 2000, vol. 40. no. 8, p. 789-793.
 3) 加藤治, 川並高雄. ステンレス鋼板の熱間圧延におけるロールへの焼付き実験方法. 塑性と加工. 1987, vol. 28. no. 314, p. 264-276.
 4) 加藤治, 川並高雄. ステンレス鋼板の熱間圧延におけるロールへの焼付き成長過程. 塑性と加工. 1989, vol. 30. no. 336, p. 103-109.
 5) 加藤治, 内田秀, 菊間敏夫. ステンレス鋼熱間圧延におけるロールへの焼付き現象の解明. 製鉄研究. 1989, vol. 335, p. 35-42.
 6) 鳥海貴大, 小豆島明. ステンレス鋼板の熱間圧延における焼付きの発

生および硫黄添加剤の評価. 鉄と鋼. 2011, vol. 97. no. 7, p. 388-392.

7) Azushima, A.; Xue, W. D.; Yoshida, Y. Lubrication Mechanism in Hot Rolling by Newly Developed Simulation Testing Machine. Ann. CIRP. 2007, vol. 56, p. 297-300.
 8) 小豆島明, 薛衛東, 吉田良明. 熱間圧延の摩擦係数に及ぼす潤滑油因子の影響と潤滑メカニズムの解明. 鉄と鋼. 2007, vol.93. no.11, p.681-686.
 9) 松原行宏, 木村幸雄, 宇都宮裕. フェライト系ステンレス鋼の熱間圧延時に鋼板に生じる肌荒れの発生機構. 鉄と鋼. 2018, vol. 104. no. 11, p. 640-645.



松原 行宏



木村 幸雄



宇都宮 裕