

冷間タンDEM圧延におけるヒートスクラッチの 抑制による生産性向上

Productivity Improvement by Reducing Heat Scratches in Cold Tandem Rolling

令和6年6月

東洋鋼鉄株式会社

冷間タンデム圧延におけるヒートスクラッチの抑制による生産性向上

外山 潤哉^{*1}・佐伯 一寛^{*2}・入江 毅^{*3}

Productivity Improvement by Reducing Heat Scratches in Cold Tandem Rolling

Junya TOYAMA, Kazuhiro SAEKI, Tsuyoshi IRIE

Synopsis : Heat scratches that occur in cold tandem rolling not only severely damage steel strip appearance, but also significantly reduce cold rolling process productivity. No. 2 cold tandem rolling mill (No. 2TM) in Kudamatsu plant is composed of five cold rolling mills with a maximum rolling speed of 2137mpm, using a base palm oil and an additive as rolling lubricants. In recent years, steel strips for can materials have become increasingly harder and thinner, and improving productivity by reducing the heat scratches is a major task for rolling engineers. In this study, the authors conducted two types of actual rolling tests for improving the No. 2TM productivity, and obtained the following two findings:

- Heat scratches can be suppressed without lowering productivity by changing the additive, which is used for the base oil, from the type using a flocculating agent to the type using an extreme pressure agent to reinforce the oil film in the roll bites.
- Calculations of strip temperatures and oil film thickness equivalents for each stand reveal that #3STD and #5STD are disadvantageous for heat scratches. Reducing heat scratches in #3STD and #5STD require considerations of an optimal reduction distribution.

Key Words : heat scratch ; rolling lubricants ; additive ; reduction distribution

1. 緒 言

近年、当社における冷間タンデム圧延機への要求は、ストリップの薄肉・硬質化に代表される需要構成の変化への対応、耐モトリング性に代表される板表面品質向上、および生産性向上の3点に大別される。

冷間タンデム圧延機の実産性向上を阻害する大きな要因としてヒートスクラッチが挙げられる。冷間圧延において潤滑や冷却が不足すると、ロールバイト内が高温となり、ある温度を超えると局所的に油膜切れが生じることがある。油膜切れによりワークロール（以下WR）とストリップが金属接触すると、WRとストリップに焼き付きが生じ、そのまま圧延を継続すると焼き付き疵が成長してストリップの表面品質に悪影響を及ぼしてしまう。このような現象により発生した焼き付き疵をヒートスクラッチと呼

ぶ。ラインオペレーターはヒートスクラッチを発生させないようにしつつ生産性を上げる操作を行っているが、ひとたびヒートスクラッチが発生すると生産性が著しく低下してしまう。具体的には、Fig.1に示すようなWRの焼き

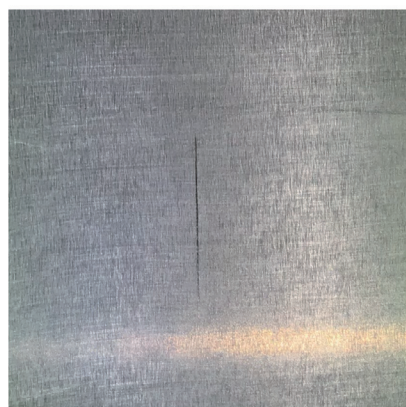


Fig.1 Photo of heat scratch on the WR surface.

*1 生産技術部 圧延技術グループ

*2 冷延鋼板工場 冷延課 冷圧係 係長

*3 生産技術部 圧延技術グループ グループリーダー

付き疵（ヒートスクラッチ）がストリップに転写すると、ストリップ表面外観が大きく損なわれることから、後続コイルへの被害を最小限に抑えるために、ヒートスクラッチが発生した圧延スタンドのWRの手入れやWRの組替を行う必要がある。また、ヒートスクラッチ発生に気づいてからWRの手入れや組替のような対処を行うまでにヒートスクラッチが成長し、有害欠点になることも多いことから、ロールバイト内の温度上昇を抑制するために20～30%程度の減速作業が行われることも多く、これらが生産性を著しく低下させる大きな理由となっている。従って、ヒートスクラッチの発生を防止できれば、生産性向上に寄与できる。なお、ヒートスクラッチはロールバイト内の圧延潤滑状態に強く依存し、仕上げ厚の薄ゲージ化および材料の硬質化が進むと更に顕著になる。

近年、実際の操業現場において仕上げ厚の薄ゲージ化および材料の硬質化が更に進んでおり、生産性向上を継続するのも難しくなっている。この課題に対して、当社No.2冷間タンデム圧延機（No.2TM）において検討を行った。No.2TMはFig.2に示す5基連続の完全連続冷間圧延ラインで、最高圧延速度は2137mpmと高速圧延が可能な薄ゲージ用ラインとなっている。高速ラインのため、ラインスピードの減速や、ライン停止につながるトラブルが発生すると生産性は著しく低下してしまう。

本報における生産性向上の手段として、2つの手段を用

いることとした。初めに圧延機全体の潤滑性を向上させるため、圧延油添加剤の変更を行った。次にヒートスクラッチの発生しやすいスタンドの圧延負荷を軽減するような圧延負荷配分の調整を行った。

2. 圧延油添加剤の変更による生産性向上

2.1 圧延油添加剤の一般性状および性能

圧延油添加剤は、圧延潤滑性や耐焼付き性向上などを目的としてベース油に対し添加されるもので、目的に応じた成分が配合される。No.2TMで従来使用される添加剤Aには、凝集タイプのカチオン系界面活性剤が配合されている。ノズルから噴射されてストリップに付着したエマルションは、界面活性剤の凝集効果によってストリップへの付着直後に水と分離して凝集し、圧延油膜となってストリップ上に形成されることを特徴としている。一方で調査に用いた添加剤Bは、乳化タイプのアニオン系界面活性剤が配合されている。エマルション粒径が小さく均一に保持され、圧延油をストリップに均一にプレートアウトさせることができ、耐モトリング性に優れる。また、添加剤Bには油性向上剤、極圧添加剤を配合することで、幅広い温度域で油膜強度を向上できるため、硬質材等の難圧延材作業において耐焼付き性を向上することが可能となる。

添加剤Aと添加剤Bの耐焼付き性能を比較するた

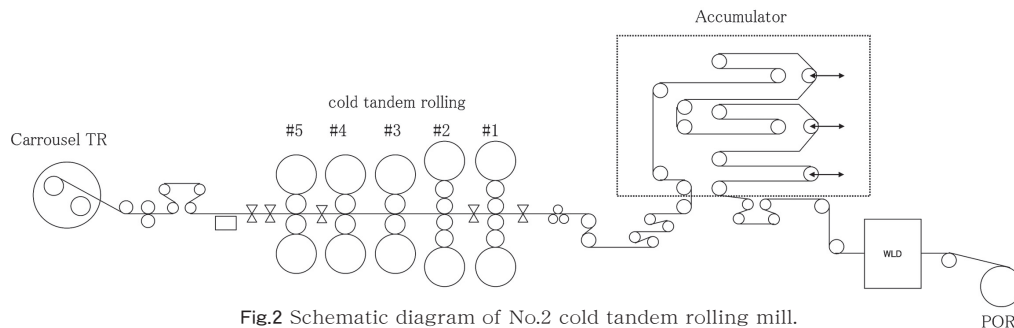


Fig.2 Schematic diagram of No.2 cold tandem rolling mill.

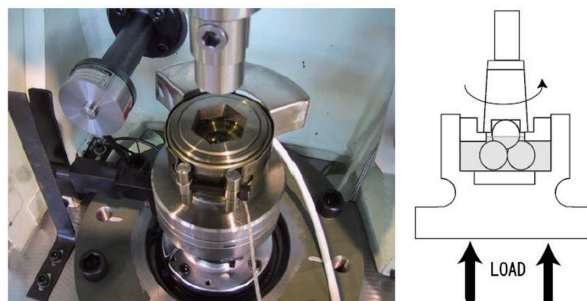


Fig.3 Four-ball extreme-pressure lubricant tester.

Table 1 Test condition for lubricant tester.

Experimental oil	Oil temperature	Rotational speed	Initial load	Load speed	Test steel balls
Neat	50℃	500rpm	200N	20N/sec	1/2inch SUJ2

め、高速四球式摩擦試験機 (Fig.3) を用いた耐圧荷重測定試験を実施した。実験条件をTable 1 に示す。実験の結果、添加剤A が低い荷重で焼き付いたのに対し、添加剤B は装置限界荷重 (添加剤A の約7 倍) まで焼き付くことはなく、良好な耐焼き付き性を示した。

2.2 圧延油添加剤の変更結果

ラボ試験において良好な耐焼き付き性を示した添加剤B を用いて、No.2TM で実機圧延を行い、ヒートスクラッチ発生率および生産性について、添加剤A との比較を行った。

2.2.1 供試材

ヒートスクラッチ発生率および生産性の評価を効率的に行うため、Table 2 に示すヒートスクラッチの発生しやすい硬質かつ薄ゲージ仕上げを供試材とした。

2.2.2 試験結果 (少量試験)

No.2TM の第5 スタンドの圧延荷重と第4/5 スタンド

Table 2 Specification of rolling material.

Steel grade	Hot coil gauge	Finish gauge	Reduction ratio	Width	Number of coils
Medium carbon steel	1.8mm	0.2mm	88.9%	950mm	10

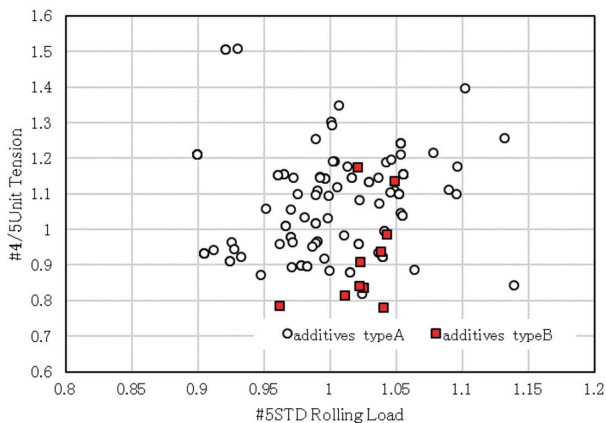


Fig.4 Relationship between #4/5tension and #5STD rolling load.

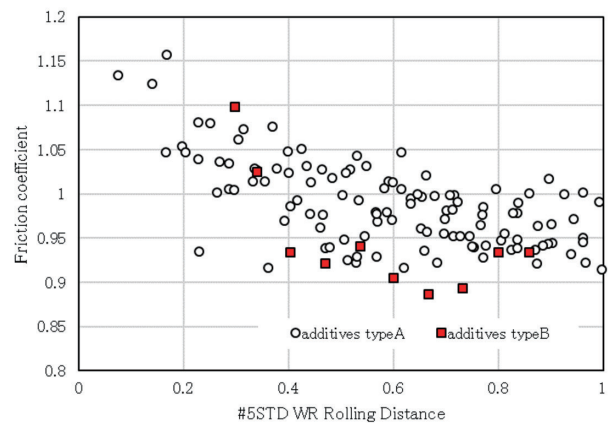


Fig.5 Variation of friction coefficient in #5STD.

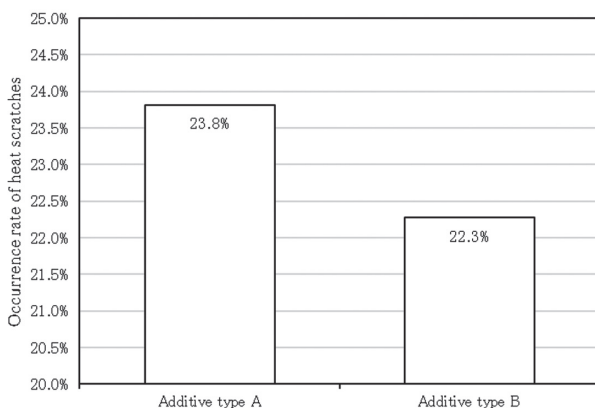


Fig.6 Effect of additive type on heat scratch.

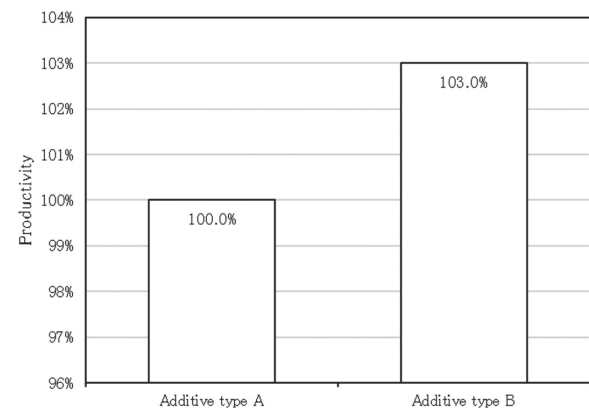


Fig.7 Effect of additive type on productivity.

剤Bを用いることで生産性が3.0%向上している。高速ラインであるNo.2TMにとって3.0%の生産性向上は大きな成果である。以上より、添加剤Bを用いることでヒートスクラッチを抑制しつつ、生産性を向上できることが確認された。

3. 圧延条件の変更による生産性向上

3.1 ヒートスクラッチに不利なスタンドの特定

圧延条件の変更を検討するにあたり、より効果的な変更を行うためにヒートスクラッチに不利なスタンドを特定し、当該スタンドの圧下率を軽減することとした。なおヒートスクラッチは圧延機の後段に行くほど発生率は高くなると推察され、No.2TMでは実際に第5スタンドのヒートスクラッチ発生率が最も高くなっているが、単純に第5スタンドの負荷を低減して他のスタンドのヒートスクラッチ発生率を悪化させることは避けた。ここでは各圧延スタンドにおける潤滑状況を把握する上で、どのスタンドがヒートスクラッチに不利なスタンドであるかを推定する一つの手段として、中島ら¹⁾の冷間タンデム圧延における熱的挙動シミュレーションと水野²⁾の油膜厚み当量の試算を行った。

試算には第5スタンドでヒートスクラッチの発生しやすい圧延条件を用いた。使用される材料仕様をTable 3に示す。なお、使用されるロール径などの寸法や圧下率、速度等、本シミュレーションに使用する他の情報については割愛する。

3.1.1 ミル内のストリップ温度状態

本モデルでは圧延中のストリップ温度を各スタンドにおけるロールバイト内での加工および摩擦発熱、スタンド間と第5スタンド出側の冷却によって表現できる。ロールバイト内での加工による熱量は式3-1-1、摩擦熱量は式3-1-2となる。式3-1-1は単位時間あたりに発生する熱量を表しており、式3-1-2は単位長さあたりに発生する熱量を表している。

$$q_k = \frac{1}{J} * V * K_m * \ln \varepsilon \quad \dots(3-1-1)$$

$$q_f = \frac{2}{J} * K_m * R * \Delta h(0.07 + 1.32r) * \mu * \sqrt{\frac{R}{h_1}} \quad \dots(3-1-2)$$

ここで、 q_k :加工熱量 (cal/sec), q_f :摩擦熱量 (cal/m), J :

熱の仕事当量 (J/cal), V :板体積速度 (m^3/sec), K_m :平均変形抵抗 (N/mm^2), $\ln \varepsilon$:対数ひずみ, R :WR半径 (mm), R' :扁平WR半径 (mm), $\Delta h = h_1 - h_2$:板厚変化量 (mm), h_1 :入側板厚 (mm), h_2 :出側板厚 (mm), r :圧下率, μ :摩擦係数を表す。

次に、熱容量 $C = m c$ を用いて各式を変形すると加工発熱を表す式 3-1-3、摩擦発熱を表す式 3-1-4 となる。

$$T_k = \frac{1}{J} * \left(\frac{1}{m \cdot c} \right) * V * K_m * \ln \varepsilon * s \quad \dots(3-1-3)$$

$$T_f = \frac{2}{J} * \left(\frac{1}{m \cdot c} \right) * K_m * R * \Delta h(0.07 + 1.32r) * \mu * \sqrt{\frac{R}{h_1}} * l \quad \dots(3-1-4)$$

ここで c :材料比熱 ($\text{cal}/\text{g} \cdot ^\circ\text{C}$), m :圧延重量 (g), T_k :加工発熱 ($^\circ\text{C}$), T_f :摩擦発熱 ($^\circ\text{C}$), s :ロールバイト内の圧延時間 (sec), l :接触弧長 (mm) を表す。

また、対数ひずみ、および板体積速度を導出するために用いた式は以下の通りである。

$$\ln \varepsilon = \ln \frac{h_1}{h_2}$$

$$V = h_2 * w * V_R$$

ここで w :板幅 (mm), V_R :WR周速 (mpm) を表す。

なお、摩擦係数 μ は Bland&Ford の圧延荷重式から逆算し、扁平ロール半径 R' は Hitchcock の式を用いて導出した。平均変形抵抗 K_m は、加工硬化特性・歪速度依存性・温度依存性に関し実験的に求められた回帰式を用いロールバイト内の平均値として表すことができる。

スタンド間および第5スタンド出側での冷却はニュートンの冷却法則より式 3-1-5 となる。

ここで T , T_a :板温度 ($^\circ\text{C}$), T_c :クーラント温度 ($^\circ\text{C}$),

$$T = T_a + (T_c - T_a) * e^{-\alpha(\Delta t)} \quad \dots(3-1-5)$$

$$\alpha = 2\alpha/\rho ch$$

α :熱伝達係数 ($\text{cal}/\text{mm}^2 \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$), ρ :材料密度 (ton/m^3), Δt :時間増分 (sec) を表す。また、 $\Delta t = t - t'$ とすると、 T_a は t' 時の板温度である。

以上のモデル式とTable 3のコイル条件から各スタンドにおける加工発熱、摩擦発熱による板温度上昇および、スタンド間と第5スタンド出側における冷却状態を計算した。第1スタンド入側からテンションリールまでのスト

Table 3 Specification of rolling material for evaluating heat scratch occurrence.

Steel grade	Hot coil gauge	Finish gauge	Reduction ratio	Width
Medium carbon steel	1.8mm	0.171mm	90.5%	835mm

リップ温度変化をFig.8に示す。なお、第1スタンド入側からテンションリールまでの距離とストリップ温度は最大値を1、最小値を0として無次元化した。

熱的挙動シミュレーションを用いて圧延中のストリップ温度を解析した結果、以下のことが明らかになった。

- ヒートスクラッチが発生した第5スタンドと、ヒートスクラッチが発生していない第3スタンドのストリップ温度が相対的に高い。

以上のストリップ温度の解析から、ロールバイト内で高温になることで発生するヒートスクラッチは、第3スタンドおよび第5スタンドで発生しやすい傾向にあることが示唆された。

3.1.2 各スタンドの油膜厚み当量の試算

油膜厚み当量は、実際の油膜の厚みと、ロールバイトにおける平均圧力との関係を示す値であり、具体的には以下のように定義される。

油膜厚み当量 = 油膜の厚み / 平均圧力

油膜厚み等量が大きいくほど油膜が厚く、WRとストリップの接触を減少させる効果が強くなり、摩擦や熱への耐性が向上し、耐ヒートスクラッチ性を向上することができる。

ここでは油膜厚みを圧延油の粘度、ロールとストリップの速度、および噛み込み角を用いて近似し、各スタンド油膜厚み当量 t_d は式3-2-1より算出した。ロールバイトへの噛み込み角 θ は式3-2-2より算出した。

$$t_d = \frac{\eta_0(V_R + V_M)}{\theta \cdot p} \quad \dots(3-2-1)$$

$$\theta = \frac{180}{\pi} \cdot \sin^{-1} \frac{1 - (h_1 - h_2)}{2 \cdot R} \quad \dots(3-2-2)$$

ここで、 t_d :油膜厚み当量（無次元）、 η_0 :圧延油動粘度 (mm^2/sec)、 V_R :ロールの速度 (mpm)、 V_M :ストリップの速度 (mpm)、 θ :ロールバイトへの噛み込み角 (rad)、 p :荷重 (kN)、 h_1 :入側板厚 (mm)、 h_2 :出側板厚 (mm)、 R :WR半径 (mm)を表す。

以上のモデル式とTable 3のコイル条件から各スタンドにおける油膜厚み当量を計算した。計算結果をFig.9に示す。

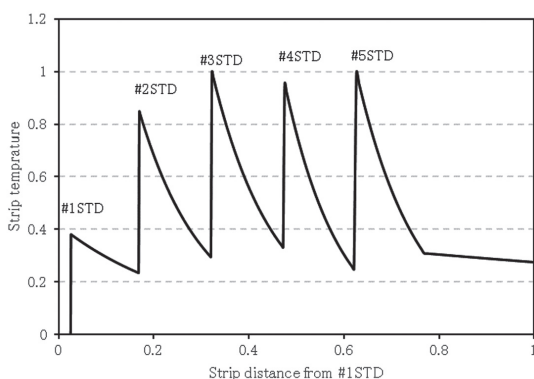


Fig.8 Simulation result of strip temperature in No.2 TM.

油膜厚み当量を計算した結果、以下のことが明らかになった。

- Fig.9の第2スタンドの頂点から第5スタンドの頂点へ補助線を引くと、第3スタンドの油膜厚み当量が相対的に少ない。

以上の油膜厚み当量の解析から、耐ヒートスクラッチ性の指標とも言える油膜厚み当量が比較的少ない第3スタンドでヒートスクラッチが発生しやすい傾向にあると考える。

3.1.3 小括

熱的挙動シミュレーションを用いたストリップ温度の試算の結果、第3スタンドおよび第5スタンドが相対的に高温であることが分かった。また油膜厚み当量の試算の結果、第3スタンドの油膜厚み当量が相対的に少ないことが分かった。したがって当社のNo.2TMにおけるヒートスクラッチに不利なスタンドはヒートスクラッチが発生していない第3スタンドも該当すると考えられる。

3.2 圧延条件の変更方法

前節より第3スタンドもヒートスクラッチに不利なスタンドであることが分かったため、第3スタンドの圧延負荷低減を検討した。

一方で先述の通り、No.2TMでは第5スタンドのヒートスクラッチ発生率が最も高い。そこで本報告では、中間スタンドである第2～4スタンドの圧下率配分を変更し、第5スタンドのヒートスクラッチ発生率を悪化させることなく生産性向上が可能かを評価することとした。中間スタンドの圧下率配分の変更においては、第3スタンドの圧下率を従来比で5%低下するように設定を行った。各スタンドにおける圧下率の設定計算結果を従来比でFig.10に示す。設定計算において、第3スタンドの圧下率が第2、第4スタンドに分配されていることを確認した。

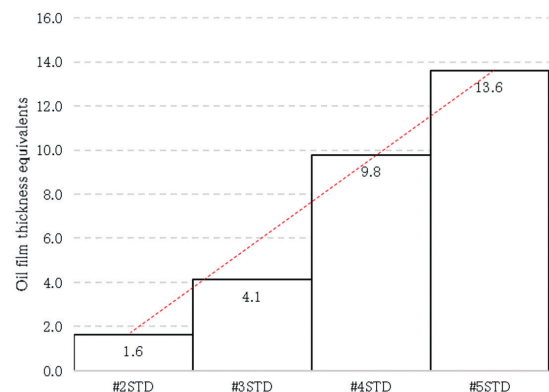


Fig.9 Oil film thickness equivalents in each rolling stand.

また、設定計算結果を用いてストリップ温度を計算し、従来の圧下率配分と比較した。比較には先述したTable 3のコイル条件を用いた。比較結果をFig.11に示す。Fig.11より予測できる第3スタンドの圧下率低減による影響は下記の通りである。

- 圧下率低減によって、変形抵抗と摩擦係数は小さくなるため、第3スタンドの加工発熱 T_k および摩擦発熱 T_f は減少し、第3スタンドにおけるストリップ温度は低下する。よって第3スタンドの耐ヒートスクラッチ性を向上できる。
- 一方で、第4スタンドは圧下率増加によってストリップ温度は上昇し、圧延潤滑性は悪化してしまうが、前章の添加剤Bを用いることで耐ヒートスクラッチ性は向上させることで補うことができると考える。
- 第5スタンドの圧下率およびストリップ温度は変化がなく、耐ヒートスクラッチ性も変化はないと考える。

以上より、目標の圧下率配分が得られることを確認したため、実機圧延試験を進めることとした。

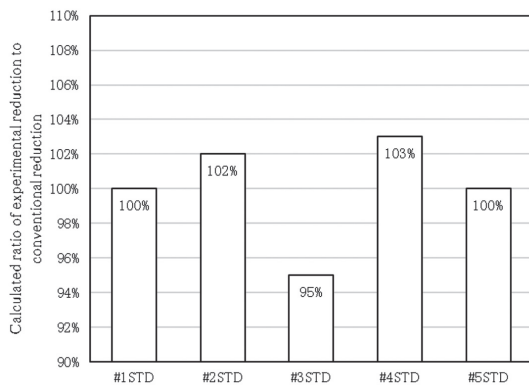


Fig.10 Calculated ratio of experimental reduction to conventional reduction.

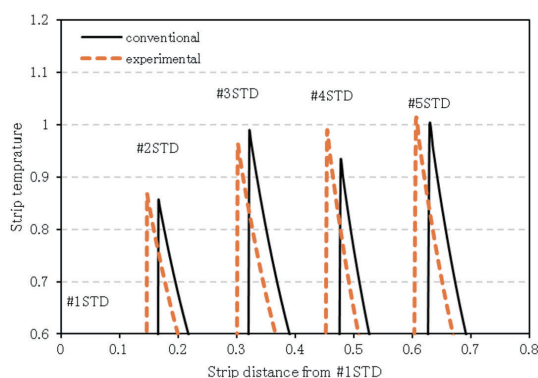


Fig.11 Comparison of simulation results for strip temperature.

3.3 実機圧延試験による生産性向上効果の確認

3.3.1 供試材

実機圧延試験に移行できる条件が整ったため、Table 4に示す硬質かつ薄ゲージ仕上げを供試材として実機試験を行うこととした。供試材の選定は2.2.1の記載と同じ理由による。なお、以下の試験では、すべてのコイルで添加剤Bを用いた。

3.3.2 圧下率の変更試験（少量試験）

実機圧延において中間スタンドの圧下率が計算通りに変化したかを確認するため、供試材と同一仕様の材料にて従来条件と試験条件における各スタンドの平均圧下率を比較した。実機試験における平均圧下率の比較を従来比でFig.12に示す。また、第2～5スタンドの後方ユニット張力と線荷重の関係をFig.13～16に示す。なお圧延荷重および張力は実績値を無次元化した。

まずFig.12より、狙い通り第3スタンドの圧下率が軽減されていることが分かる。一方で中間スタンドの圧下率配分のみを変更する設定を行ったにも関わらず、第5スタンドの圧下率の実績値が増加する結果となった。第5スタンドの圧下率の増加により圧延荷重および張力も増加してしまうため、ヒートスクラッチが発生することが懸念されるが、Fig.16より本試験においては第5スタンドの圧延荷重および張力の増加は確認できなかった。

次にFig.14より、圧下率を軽減した第3スタンドの圧延荷重および張力が軽減されていることが分かる。またFig.13, Fig.15より、第2スタンドおよび第4スタンドに

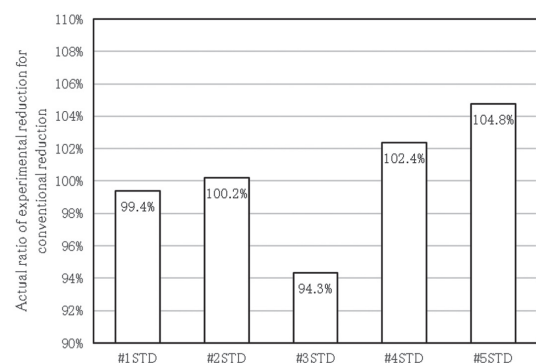


Fig.12 Actual ratio of experimental reduction to conventional reduction.

Table 4 Specification of rolling material.

Steel grade	Hot coil gauge	Finish gauge	Reduction ratio	Width	Number of coils
Medium carbon steel	1.8mm	0.183mm	89.8%	885mm	5

においても圧延荷重および張力が軽減されている。ここで従来条件と試験条件は同一仕様の材料を用いたため、圧延に必要なエネルギーも同じはずである。よって圧下率配分を変更することで圧延潤滑性が変化し、これまで摩擦や熱に変換されていたエネルギー損失が少なくなったことで、第2スタンド、第4スタンドの荷重および張力が軽減されたとも考えられる。したがって第3スタンドの圧延負荷軽減を目的に行った圧下率配分の変更は、圧延荷重および張力の関係から、ヒートスクラッチの発生が低減する可能性および生産性の向上に寄与できる可能性がある。また他スタンドの圧延荷重および張力の軽減にもつながることも示された。

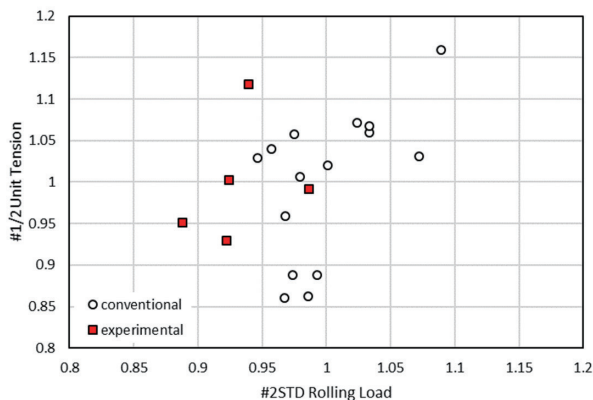


Fig.13 Relationship between #1/2tension and #2STD rolling load.

3.3.3 ヒートスクラッチ発生率と生産性の確認 (大量試験)

前項に示す少量試験において、第5スタンドの圧下率が増加したにも関わらずヒートスクラッチの発生率に変化がなかったことから、同様の中間スタンド圧下率配分を用いて1週間の連続した実機圧延を行った。なお実機圧延はTable 4に示す供試材以外の仕様も多く含んでおり、生産性を向上するための検証も合わせて計画したことから、製品品質に有害なヒートスクラッチを発生させない範囲で圧延速度を増加させた。

本試験におけるヒートスクラッチ発生率比較をFig.17に、生産性比較をFig.18に示す。なお、生産性はT/Hである。Fig.17より、試験条件を用いたことでヒートスクラッ

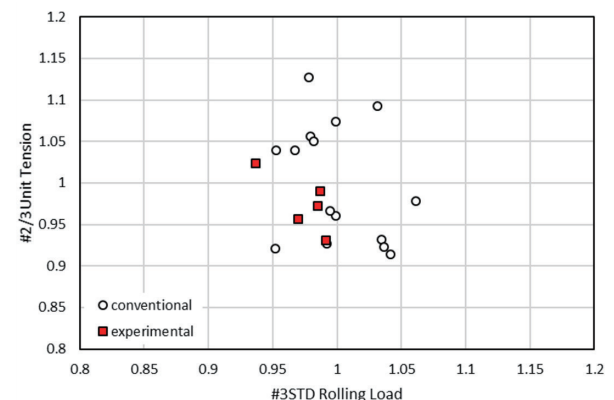


Fig.14 Relationship between #2/3tension and #3STD rolling load.

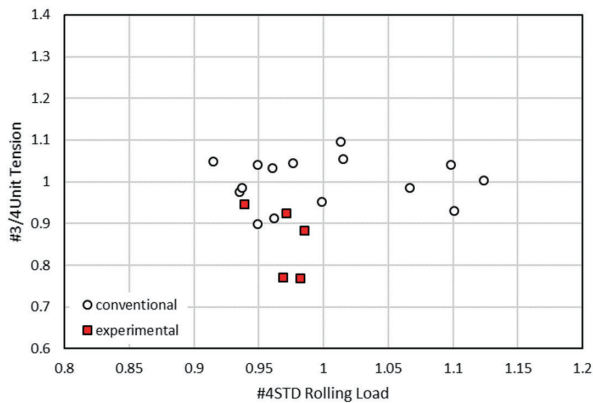


Fig.15 Relationship between #3/4tension and #4STD rolling load.

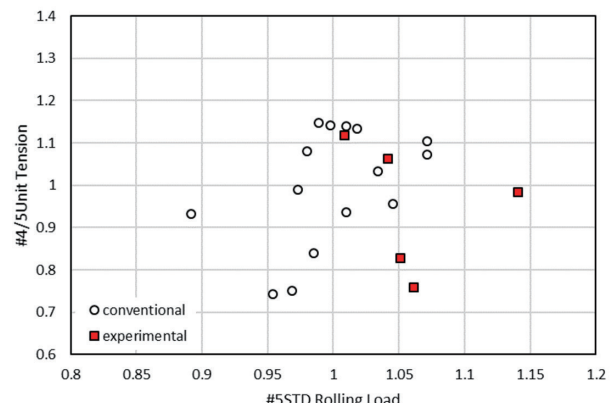


Fig.16 Relationship between #4/5tension and #5STD rolling load.

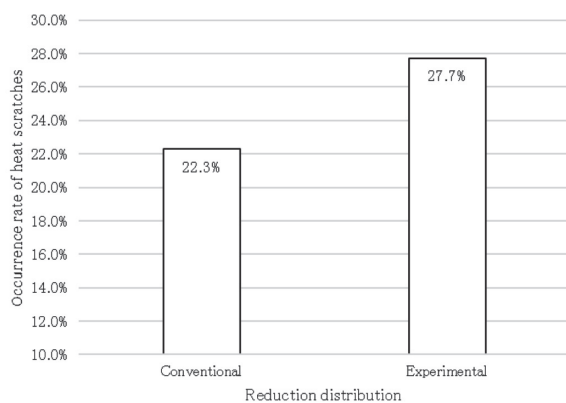


Fig.17 Effect of reduction distribution on heat scratch.

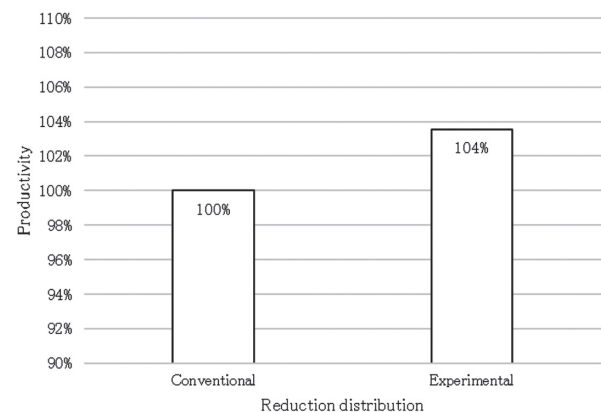


Fig.18 Effect of reduction distribution on productivity.

チの発生頻度が5.4%増加した。ヒートスクラッチは第5スタンドから発生しており、ヒートスクラッチ発生率の増加原因は下記2点およびこれらの組合せによると推察している。

1) Fig.12 のように、第5 スタンドの圧下率が増加したことによる。

2) 生産性向上を図るため、従来よりも圧延速度を増加したことによる。

一方で圧延速度を増加させたことで、Fig.18 より、試験条件を用いた実機圧延の生産性は4%向上した。

3.3.4 実機試験結果のまとめと今後の方針

1 週間の連続した実機圧延を実施した結果、中間スタンドのみの圧下率変更は、第5 スタンドの圧下率増加を招き、結果的に第5 スタンドのヒートスクラッチを増加させることが明らかとなった。ただし、第5 スタンドのヒートスクラッチの発生を現状もしくはそれ以下に抑えることができれば圧延速度および生産性の向上は可能と考えられる。第5 スタンドの圧下率を従来条件に維持したまま中間スタンドの圧下率配分を変更し、ヒートスクラッチの発生を抑制しつつ生産性向上を図ることができないか、検証を進めていくことを今後の課題としたい。

4. 結 言

当社No.2 冷間タンデムミルにおいて、生産性向上の阻害要因であるヒートスクラッチの発生を抑制し、生産性の向上を図るため、圧延油添加剤の変更および圧延負荷配分の変更に取り組んだ。これら2つのヒートスクラッチ抑制に対する取り組みは、圧延油と圧延条件の最適化の重要性を示し、冷間圧延における耐ヒートスクラッチ性向上および生産性向上の手段として有効であることを示した。最後にこの取り組みによって得られた知見を以下に示す。

- 適切な圧延油添加剤を使用することで摩擦係数が低減し、圧延潤滑性を向上できる。さらにヒートスクラッチ発生率の低減も可能となる。
- 各スタンドにおけるストリップ温度の数値解析を行った結果、第3 スタンドおよび第5 スタンドが相対的に高温となることが分かった。
- 油膜厚み当量の試算を行った結果、第3 スタンドの油膜厚み当量が相対的に少ないことが分かった。
- 第3 スタンドの圧下率を低減させることで、第3 スタンドのみならず第2 スタンド、第4 スタンドの圧延荷重および張力を低減できる可能性がある。ただし第5 スタンドの圧下率が上昇し、ヒートスクラッチが増加する懸念があるため、第5 スタンドの圧下率を維持したまま中間スタンドの圧下率配分を変更する必要がある。

引用文献

- 1) 中島浩衛, 井浦輝生, 浜渦修一, 井上直温, 古野英樹 : 第48 回圧延理論部会 (1973), 1-8.
- 2) 水野高爾 : 塑性と加工, 66 (1966), 383-388.