

圧延トルク測定による冷間圧延の潤滑機構解析

入江 毅*・奥村英典*²・富岡章生*³・長谷川浩*⁴・古賀 守*⁵

Analysis of Lubrication System in Cold Rolling Process by Measuring Rolling Torque

Tsuyoshi IRIE, Hidenori OKUMURA, Akio TOMIOKA, Hiroshi HASEGAWA and Mamoru KOGA

Synopsis : It must be very important to estimate and evaluate the lubrication performance in the cold rolling process in order to improve the productivity and surface quality of the cold rolled strip. The cold rolled strip getting harder and thinner, it is essential to improve rolling lubrication in terms of the lubricant itself and the application system, such as spraying nozzles, pumps, mixing facility, dominating emulsion size and E.S.I..

Various methods to evaluate lubrication performance had been carried out by many engineers and researchers, calculated friction coefficient and forward slip are reported as the most useful methods at present.

In the meanwhile, lubrication performance should be discussed not only on the upper and lower sides but also on the whole width of the strip to realize high productivity and quality in the cold rolling process. However, it is actually very difficult and this seems to be impossible on the production sites. Therefore, it must be important to adequately evaluate lubrication performance between the work roll and the strip surface on the upper and the lower sides, respectively.

The authors studied and proposed a new system that can individually evaluate lubrication performance on the upper and lower sides to directly measure the rolling torque with strain gauges stuck on the spindle shafts in No.2 tandem cold mill.

This paper shows the experimental results and the knowledge of relation between lubricating condition and rolling torque on the both surface sides of the strip. As a result, it is concluded that the direct measuring of rolling torque is very effective to evaluate lubrication performance in the work roll gap.

Keywords : cold rolling, lubrication performance, rolling torque, strain gauge

1. 緒言

近年の冷間タンデム圧延機への要求は、板材の薄肉・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、および生産性の向上の3点に大別される。硬質材あるいは100 μ m以下のスチールフォイルの圧延は2次冷延に頼らざるを得ず、圧延工程の生産性を阻害している大きな要因でもある。そのため冷間タン

デムミルにて、さらなる高圧下、高速圧延の技術開発の必要性が提唱されている¹⁾。

これらの要求に対応するためには、WR小径化を指向したミル型式選定²⁾と、圧延潤滑性の向上^{3~5)}が主な課題となる。特に板表面品位が重要視される現在においては、板表裏面全幅における潤滑効果の均一性が重要な要素となる。しかし、実際の操業現場では板の表裏の潤滑状態が異なる現象があり、最終製品品質、工程歩留向上のためには板上下面における均一な潤滑性の確保とその維持が命題と

* 下松工場 生産技術部

*² 下松工場 生産技術部 グループリーダー

*³ 下松工場 製板部 係長

*⁴ 下松工場 製板部 部長

*⁵ 技術研究所 所長

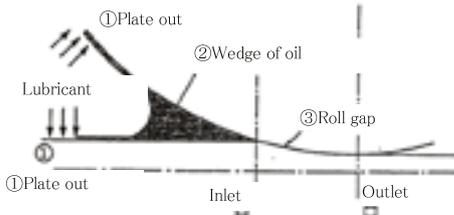


Fig. 1 Schematic view concerning rolling lubrication

なっている。

圧延潤滑のメカニズムは、Fig. 1¹⁾に示すように3つの領域に分けてアプローチがなされ、圧延後の板表面の油膜厚さから潤滑挙動を解明する研究⁶⁾などが報告されている。しかし、圧延潤滑の中心課題であるロールバイト内のWRと板との上下接触面での潤滑状態を解明する研究は少ない。

本報では、圧延油供給条件の変化がロールバイト内の潤滑状態に及ぼす影響について考察を試みた。特に、ロールバイト内でWRと接する板の上下面の潤滑状態を別個に解明するために、上下スピンドルに作用する圧延トルクを測定する方法を採った。この方法による研究は、異周速圧延時の異速比と圧延トルクなどの関係を実験的に求めた報告⁷⁾があるが、ここでは当社のNo.2冷間タンデムミル (No.2 TM) の第5スタンド (シングルドライブ方式、ダイレクトアプリケーション方式) を対象スタンドとして、圧延油供給条件がロールバイト内潤滑に及ぼす影響、チャタリングなどの圧延諸現象と圧延トルクとの関係などを調査した結果を報告する。

2. 圧延トルク測定システム

Fig. 2に圧延機駆動系、Fig. 3に圧延トルク測定システムの概要を示す。Fig. 4がスピンドルに取り付けたシステム外観写真である。上下スピンドルに貼り付けた歪ゲージからスピンドル振り歪を検出し、その出力をテレメータ送受信機を使い、記録装置に出力させた。圧延トルクは歪ゲージ出力から次の換算式により算出した。本報では、歪ゲージにて検出したスピンドル軸の圧延トルクを「スピンドル歪トルク」とよぶ。

$$T = (G \cdot \pi \cdot D^3 / 8) \cdot \varepsilon' \cdot 10^{-6} \dots\dots(1)$$

ここで、

T：スピンドル軸の圧延トルク (N・mm)

G：スピンドルの横弾性係数 (7.92・10⁴ N/mm²)

D：スピンドル直径 (φ280mm)

4枚ゲージを使用したため、 $\varepsilon' = \varepsilon / 4$ として

$$T = 0.683 \cdot 10^6 \cdot \varepsilon / 4 = 0.171 \cdot 10^6 \cdot \varepsilon \text{ となる。}$$

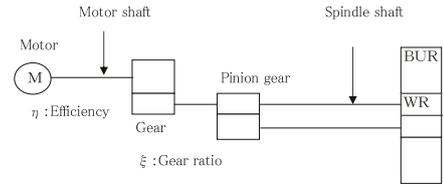


Fig. 2 Schematic model of mill drive system

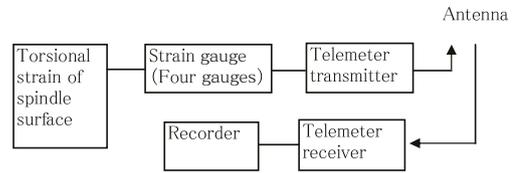


Fig. 3 Rolling torque measurement system

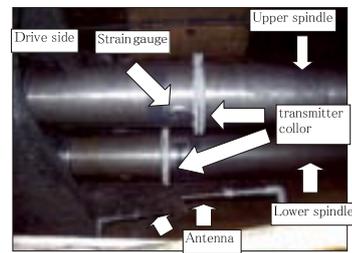


Fig. 4 Over-view of rolling torque measurement system

3. 圧延油供給設備

圧延油供給はパーム油を用いたダイレクト方式で、板表面に直接噴射するストリップパームと下ワークロールバイト部に直接噴射するロールパームから構成されている。上下ストリップパーム、ロールパームの配管に流量調整バルブと流量計を、上下ストリップパームノズル部に圧力計を設置し、流量を任意に調整できるようになっている。Fig. 5に圧延油供給設備を示す。

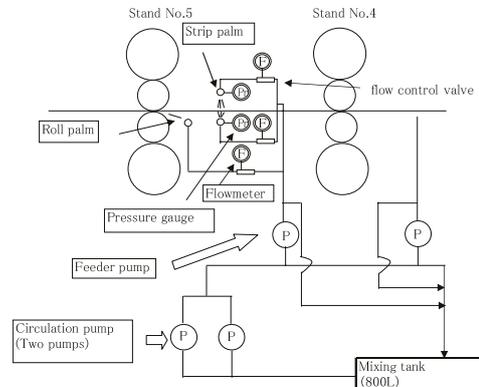


Fig. 5 Lubrication system of stand No. 5

4. 通常圧延における圧延トルク挙動分析

4. 1 板圧延時の圧延トルク特性

4. 1. 1 圧延トルク測定条件

現状のNo.2 TM第5スタンドにおける潤滑状態を把握することを目的とし、Table 1 に示す圧延条件での圧延トルク特性を調査した。

Table 1 Condition to measure rolling torque

Index	Condition
Material size	2.0mm ^t -750mm ^w →0.256mm ^t
Lubricant application	Proportional to rolling speed (Direct application)
Oil concentration	1.4%(RBD palm oil)

4. 1. 2 圧延トルク測定結果

Fig. 6～10に板圧延時の圧延トルク特性測定結果を示す。これにより下記の基本特性が明らかになった。

- (1) 低速部では、下スピンドル歪トルクが上スピンドル歪トルクよりも大きい (200mpmで1.37倍, Fig. 7)。このことは潤滑性が上面より下面が悪いことを示している。
- (2) 増速に伴い、上スピンドル歪トルクは上昇し、下スピンドル歪トルクは低下する (Fig. 7)。このことは増速に伴い上面の潤滑性が劣化し、下面の潤滑性が向上していることを示している。
- (3) 上下のスピンドル歪トルクの合計値は圧延速度1000mpm程度までは一旦減少するが、更に増速すると若干増加する (Fig. 7)。
- (4) スピンドル歪の変動幅が圧延速度1400mpm前後で極大となる (Fig. 8)。トルク変動の周波数分析は圧延速度によらず13Hz前後である (Fig. 10)。この現象はWRの回転周波数とスピンドルのねじり振動数が一致する圧延速度で共振が発生することによるものと推測される。
- (5) 圧延荷重の圧延速度に対する挙動は、上下のスピンドル歪トルクの合計値と同様な挙動を示す (Fig. 9)。

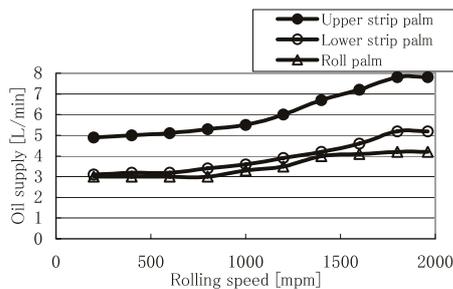


Fig. 6 Flow rate of lubrication application

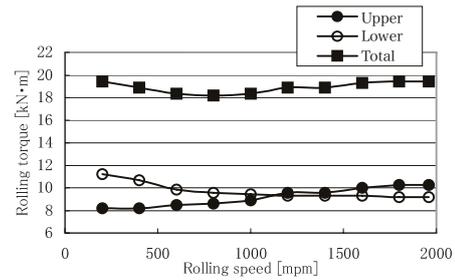


Fig. 7 Characteristic of rolling torque

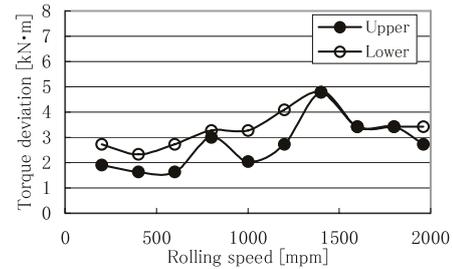


Fig. 8 Characteristic of torque deviation

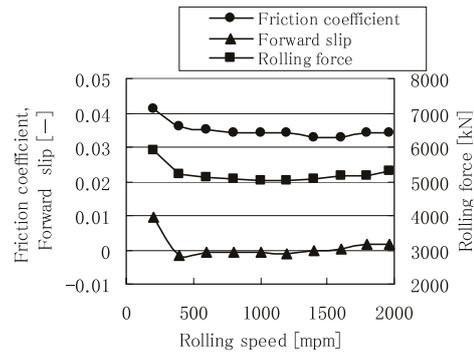


Fig. 9 Characteristic of rolling condition

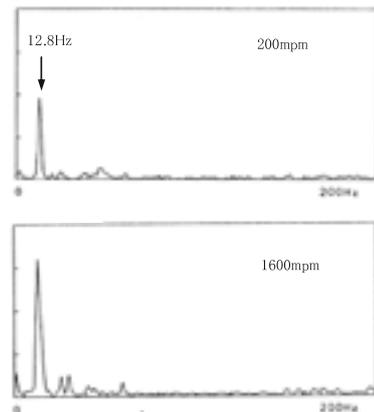


Fig. 10 FFT analysis of spindle torque

4. 1. 3 駆動系の固有振動解析

板圧延時における圧延トルク測定結果において、スピンドル歪トルク変動の周波数は圧延速度によらず約13Hzであったことから、この周波数がスピンドルの固有周波数であると考えられる。以下にその解析結果を示す。

圧延機駆動系のねじり固有振動数解析は御園生⁸⁾によって厳密な計算が行われた経緯があるが、ここでは計算を簡素化するために、Fig. 11に示すような片側固定端で1自由度系の等価モデル化を行い固有振動数計算を実施した。すなわち、駆動系のGD²は、操作側のGD²の20倍と大きいため、本モデルで近似できる。ばねのねじり固有振動数は式(2)で表すことができる。

$$f_{sp} = \sqrt{(K_{sp}/I)} / (2 \cdot \pi) \dots\dots(2)$$

式(2)において、Iは操作側回転系の慣性モーメント、K_{sp}はスピンドルのねじりによるばね定数で、それぞれ式(3)、(4)によって計算される。

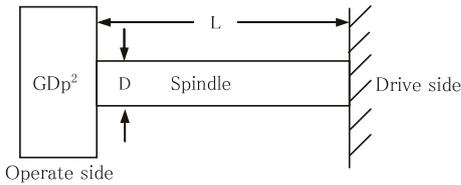


Fig. 11 Equivalent torsional spring of spindle

$$I = GDp^2 / (4 \cdot g) \dots(3)$$

$$K_{sp} = \pi \cdot D^4 \cdot G / (32 \cdot L) \dots(4)$$

ここで、GD²：操作側回転系のGD²

g：重力加速度

D：スピンドル直径

G：横弾性係数

L：スピンドル長さ

以上の式からf_{sp}を計算すると17.9Hzとなり、実測された振動数13Hzとほぼ同一波数であり、駆動系のねじり固有振動数と一致することが確認された。

5. 各種圧延条件変更時の圧延特性

スピンドル歪トルクより、圧延油のノズルからの供給量、濃度、ノズル位置、ノズル角度、およびワークロール表面の摩耗による経時変化が、ロールバイト内の圧延潤滑状態に及ぼす影響に関して推察した結果について述べる。

5. 1 圧延油供給量の影響

Table 2に示す材料、及び圧延油濃度条件にて、圧延油供給量の影響について調査した。

Table 2 Test conditions(1)

Index	Condition
Material size	2.0mm ¹ -750mm ² →0.32mm ¹
Oil concentration	14%(RBD palm oil)

5. 1. 1 圧延速度一定条件下の潤滑挙動

上ストリップパームの供給量を2.0L/minから5.5L/minまで変化させた (Fig. 12)。圧延速度は1,500mpmに固定した。

(1) 上面の圧延油供給量を増量させると、上スピンドル歪トルクは6.3% (摩擦係数は4.9%) 減少する。Fig. 13に圧延油供給量と板表面状態との関係を示す。圧延油供給量増量に対し、オイルピット数の増加が見られる。ただし、圧延油供給量の増加とともに潤滑効果が向上するが、その効果には限界がある。ロールバイト内に引き込まれる油量に限界があるためと推測される。

(2) 圧延油供給量が一定である下面のスピンドル歪トルクは変化せず、下面の潤滑状態は変化していない。

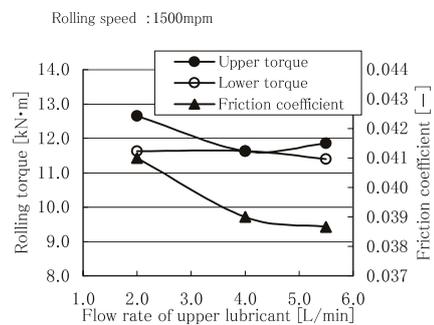


Fig. 12 Influence of upper side lubrication on rolling torque

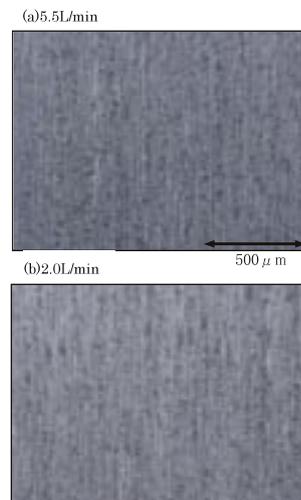


Fig. 13 Microscopic observation of top strip surface

5. 1. 2 圧延速度が潤滑状態に及ぼす影響

圧延油供給量を圧延速度に無関係に一定量とした場合 (圧延油供給パターン1) と圧延速度に比例して増量させた場合 (圧延油供給パターン2) の2条件について比較した。圧延油供給量と圧延速度の関係をFig. 14に、スピンドル歪トルクとの関係をFig. 15に、摩擦係数との関係をFig. 16に示す。

- (1) 上面が下面に比べて潤滑性は良く、特に低速部において顕著である。低速時、ロールバイト内に引き込まれる油量が上面が多いためと推測される。
- (2) 増速するにつれ、上面は潤滑性が悪くなるが、下面は向上する。
- (3) 圧延油供給パターン 1, 2 において、圧延荷重から逆算した摩擦係数 (Fig. 16) に差が見られないが、スピンドル歪トルクを測定することにより、上、下面ともに、圧延油流量変化による潤滑状態を表現し得ることがわかる。

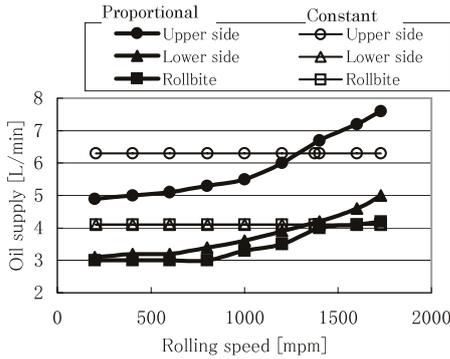


Fig. 14 Characteristic of lubrication control

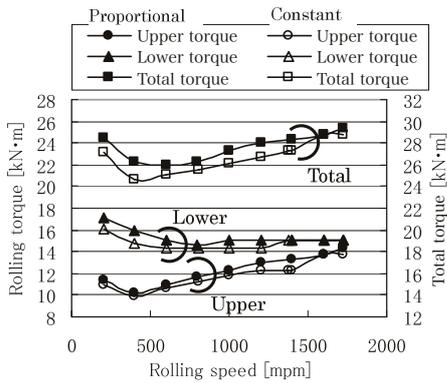


Fig. 15 Influence of lubrication on rolling torque

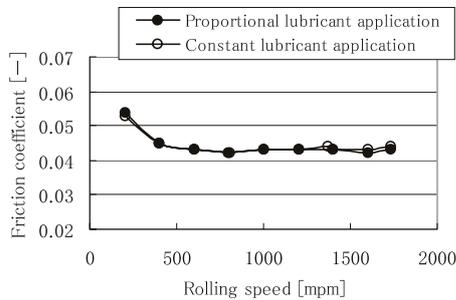


Fig. 16 Influence of lubrication on friction coefficient

5. 2 圧延油濃度の影響

Table 2 に示す材料, および圧延油供給パターン 2 にて、圧延油濃度の異なる 2 条件 (6%, 15%) について潤滑状態を比較した。スピンドル歪トルクとの関係を Fig. 17 に、摩擦係数との関係を Fig. 18 に示す。

- (1) 全体として圧延油濃度上昇により、潤滑性が向上しており、摩擦係数による評価と同様、圧延油濃度による潤滑性向上を表現し得ることがわかる。
- (2) 上下面を個別に評価すると、圧延油濃度上昇の影響は、下面の潤滑性向上に顕著に現れており、上面はほぼ見られない。下面は濃度上昇により、プレートアウト性が向上していると推測される。

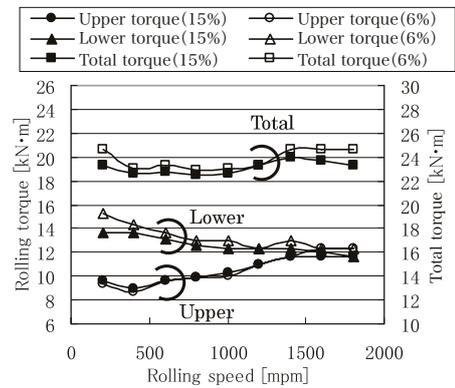


Fig. 17 Influence of oil concentration on rolling torque

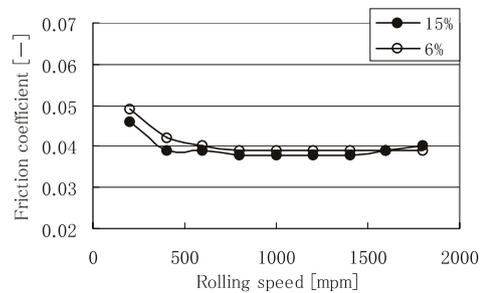


Fig. 18 Influence of oil concentration on friction coefficient

5. 3 圧延油噴射位置, および噴射角度の影響

Table 2 に示す材料, 圧延油濃度, および圧延油供給パターン 2 にて、上面の圧延油噴射位置, および噴射角度を変更したときの潤滑状態を調査した。また、圧延油の噴射位置, および噴射条件を Table 3 に示す。

試験の実施順序は A → B → C → D の順である。

Table 3 Test conditions(2)

Index	Distance from stand #5	Spraying angle
A	1.9m	45° to rolling direction
B	0.9m	45° to rolling direction
C	2.9m	45° to rolling direction
D	1.9m	90° to rolling direction

5. 3. 1 圧延油噴射位置が潤滑性に及ぼす影響

圧延油噴射位置により、潤滑性は低速域では変化が見られないが、高速域においては変化が見られ、最適な圧延油噴射位置が存在していることを示唆している (Fig. 19).

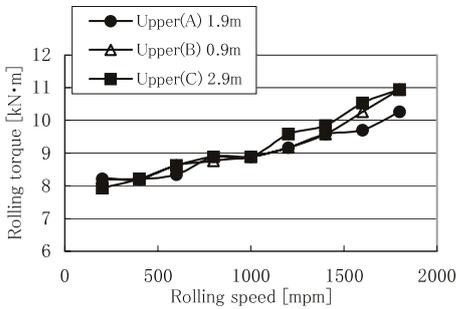


Fig. 19 Influence of nozzle position on rolling torque

5. 3. 2 圧延油噴射角度が潤滑性に及ぼす影響

Fig. 20に圧延油噴射角度と圧延トルクの関係を示す。

圧延油噴射角度45°の方がスピンドル歪トルクが低く、圧延油噴射角度により潤滑状態が変化する。

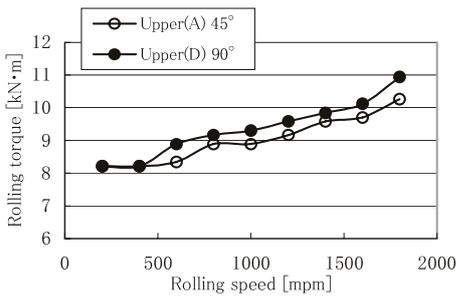


Fig. 20 Influence of spraying angle on rolling torque

5. 4 ワークロール表面の摩耗による経時変化の影響

Table 2に示す材料、圧延油濃度、および圧延油供給パターン2にて、第5スタンドWR組み込み後の圧延距離の経時変化 (19~153km) による潤滑状態を調査した。

- (1) 圧延距離が長くなれば、ワークロール摩耗の進行により、摩擦係数は低減する (Fig. 21).
- (2) 同様に、上下面において摩耗による圧延負荷低減が確認できる (Fig. 22).

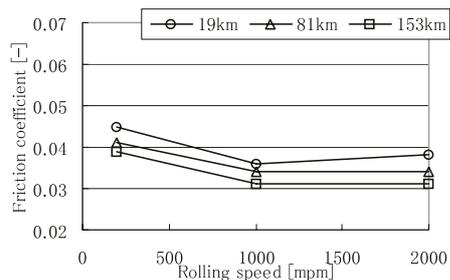


Fig. 21 Influence of rolling length on friction coefficient

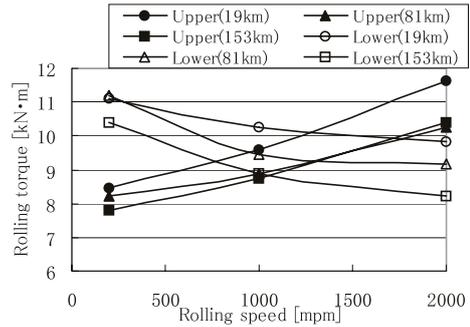


Fig. 22 Influence of rolling length on rolling torque

6. 結 言

圧延トルクを上下のスピンドル歪から実測することにより、潤滑状態を解析した。本方法によれば、圧延荷重から逆算した摩擦係数の値以上に、ロールバイト内の潤滑状態を把握しえる。

また、この上下面の潤滑状態を別個に見ると、当社No.2 TMでは、上面においては増速に伴い潤滑性が劣化し、下面においては低速部で潤滑性が低いという結果が得られた。この現象は上下面それぞれのロールバイト内に引き込まれる圧延油量の変化に起因して発生しており、全速度域での安定した圧延潤滑状態を阻害する要因の一つであると考えられる。

引 用 文 献

- 1) 鈴木 弘: 圧延百話—圧延の疑問と基本常識, 養賢堂 (2000)
- 2) 西村邦雄, 古賀 守, 福山 敏, 井原信之, 奥村英典, 野村政功: 東洋鋼鋳, 31 (1998), 15
- 3) 岡本隆彦, 山口一男, 松本忠之, 山内一忠: 材料とプロセス, 13 (2000), 310
- 4) 金子智弘, 齊藤輝弘, 川島浩治, 竹澤幸平, 長南富雄, 岡本 謙: 材料とプロセス, 13 (2000), 322
- 5) 田中健一: 材料とプロセス, 13 (2000), 318
- 6) 小豆島 明, 長井 大, 稲垣 訓, 菅井哲也: 鉄と鋼, 86 (2000), 47
- 7) 塩崎宏行, 新谷定彦, 三上昌夫, 小出誠二: 塑性と加工, 23 (1982), 1080
- 8) 御園生一長, 中島 厚: 塑性と加工, 23 (1982), 658