

が盛んに行われており、熱的効果を考慮したレイノルズ方程式からの入口油膜厚みの数値計算⁴⁻⁶⁾や、混合潤滑モデルによる圧延圧力分布の計算⁷⁾が行われた。一方、1970年代後半には現場においては高速度、高圧下率によりロールと材料界面が苛酷な条件に直面するようになり、油膜破断による焼付き(ヒートストリーク、フリクションピックアップ、ヒートスクラッチ)問題が多発するようになった。そのため、焼付きに対する基礎的研究やシミュレーション方法の確立への可能性についての検討が始まった。

1980年代に入ると、圧延速度が一段落したのを受け、圧延油の改良に眼が向けられるようになり、ミルクリー性、高潤滑性、冷却性などの優れた潤滑油の開発に関する報告が圧延メーカーと圧延油メーカーとの共同で行われるようになった。焼付きの研究に関しては、優れたシミュレーション方法の開発へと進み、さらにシミュレーション試験から得られた結果の実機への適用へと研究は進展してきた。1980年代後半になると、鉄鋼メーカーのステンレス鋼のタンデムミルによる圧延に伴い、表面性状問題がクローズアップされ、新たな進展を見た。ロールにおいても冷間圧延のための新しいロール材質の発展を見た。

3 冷間圧延プロセス技術におけるトライボロジー

3.1 高速圧延時の摩擦係数

1970年代に入ると、図1に示すように2000 m/minを越えるタンデム圧延機が鉄鋼会社に設置されたのを受け、筆者らは高速圧延時の摩擦係数の定量的な値を得るための研究を実験室用高速圧延機を用いて行った⁸⁾。つづいて、筆者らは日本鉄鋼協会圧延理論部会における共同研究にも参加した。図2にその共同研究の結果を示す⁹⁾。この共同研究においては、圧延材料を低炭素アルミキルド鋼板、圧延油をパーム油と一定とし、摩擦係数をBland & Fordの式から逆算したも

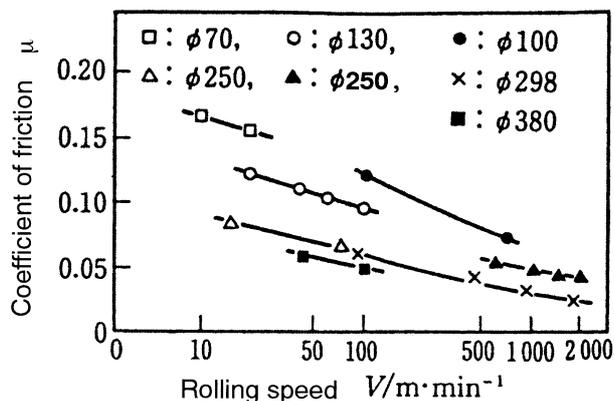


図2 各種ロール径における摩擦係数と圧延速度の関係⁹⁾

ので、摩擦係数は圧延速度の増加とともに減少し、ロール径の増加に伴って減少することを示した。

これらの高速圧延時の摩擦係数の値は、コンピューターによる圧延制御のための正確なデータを与えることができたとともに、高速圧延時のロールと材料界面での潤滑メカニズムの解明への扉を大きく開けることとなった。

3.2 ロールと材料間の入口油膜厚み

筆者らは熱的効果を考慮したレイノルズ方式から入口油膜厚みの数値計算を行った⁶⁾。入口油膜厚みの計算に必要なレイノルズ方程式、エネルギー式、粘度式、

$$\frac{dp}{dx} = 6\eta(U_1 + U_2) \left(\frac{h - h_1}{h^3} \right) \dots\dots\dots (1)$$

$$K \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \eta \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 = 0 \dots\dots\dots (2)$$

$$\eta = \eta_0 \exp \{ \alpha p + \beta (T - T_0) \} \dots\dots\dots (3)$$

を用いた。ここでpは圧力、U₁は入口部での材料速度、U₂は入口部でのロール速度、hは油膜厚み、h₁は入口油膜厚み、Tは温度、T₀は周囲の温度、ηは潤滑油の粘度、η₀は常圧、常温での粘度、α、βは粘度の圧力および温度係数並びにKは潤滑油の熱伝導率である。図3にη₀を変化させたときの入口油膜厚みの計算結果を示す¹⁰⁾。圧延速度が高くなると熱的効果により入口油膜厚みが増加することなく低下することを示した。

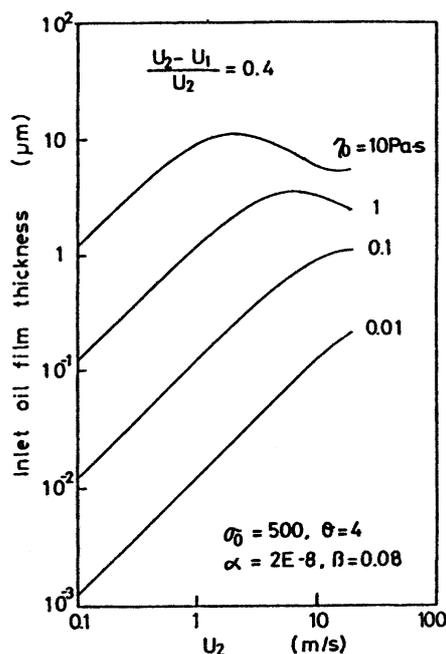


図3 入口油膜厚みに対する圧延速度の影響¹⁰⁾

これらの入口油膜厚みの値は高速圧延において焼付きが発生しやすいことを認識させ、当時定量的な値がわからなかったロールと材料界面に介在する圧延油の油膜厚みに対して定量的な数値を与えることができた。ロールと材料界面での接触状況の定量的なモデルを把握できるようになった。この入口油膜厚みの計算モデルは、ロールおよび材料の表面粗さを考慮した入口油膜厚みの計算モデルの提案¹¹⁾ およびエマルジョン潤滑における入口油膜厚みの計算モデルの提案¹²⁾ へと発展させることができた。

3.3 冷間圧延後の表面性状

ステンレス鋼薄板の冷間圧延において生産性向上のため圧延速度を高くしたり、ロール径の大きな圧延機を使用した際、表面光沢が低下する問題に直面した。冷間圧延の表面光沢は、圧延速度、圧下率、圧延油粘度およびロール材料の表面粗さなど多くのトライボロジーの条件に依存し、図4に示すような表面光沢の結果を示した¹³⁾。この圧延実験は、直径75 mmの鏡面ロールでブライト表面の板厚0.4 mm低炭素鋼板を5種類の圧延油 (No.1 : 2.8 cSt, No.2 : 7.0 cSt, No.3 : 23.5 cSt, No.4 : 37.3 cSt, No.5 : 97.4 cSt) で1.2 ~ 121 m/minの圧延速度で一定の圧下率 (20%) で圧延をしたものである。これらの結果から表面光沢Gsは、

$$Gs = Gs(U_1, U_2, r, t, Y, \eta_{0\alpha}, \beta, \text{etc}) \dots\dots\dots(4)$$

のように多くの因子で表現されなければならないことがわかった。ここで、rは圧下率、tは板厚およびYは材料の降伏応力である。しかし、図4の表面光沢の結果を図5のように入口油膜厚みでプロットすると、ストライペック線図と同様一つの線ですべての実験点がプロットされることを示した¹³⁾。この入口油膜厚みは熱的效果を入れたレイノルズ方程式から計算したものである。この関係から圧延前のロールを材料の

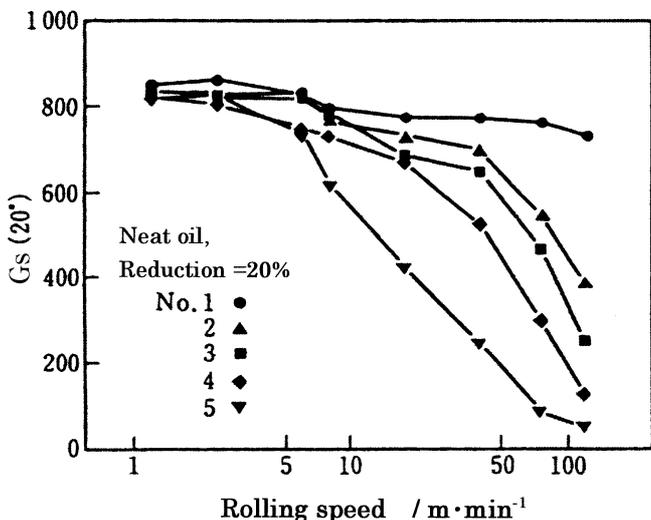


図4 表面光沢と圧延速度の関係¹³⁾

表面粗さの影響をも考慮すると、表面光沢Gsを

$$Gs = Gs(h_i, R_{a0}^{\text{ロール}}, R_{a0}^{\text{材料}}) \dots\dots\dots(5)$$

で表すことができることを示した。

筆者は、式(5)をベースにしてステンレス鋼の冷間圧延における表面光沢推定システムを提案し、実機での各パス後の表面光沢を実験室レベルでの圧延機を用いて簡単に推定できることを示した¹⁴⁾。更に、この表面光沢推定システムを用いて実際の圧延における表面光沢を推定し、実機における各パス後の表面光沢と推定された表面光沢が良く一致することを確かめた¹⁵⁾。

これらの結果は、ステンレス鋼板の冷間圧延における圧延パス設計の改善を可能にするとともに新しい圧延プロセスの設計の際に有用なデータを与えることになる。

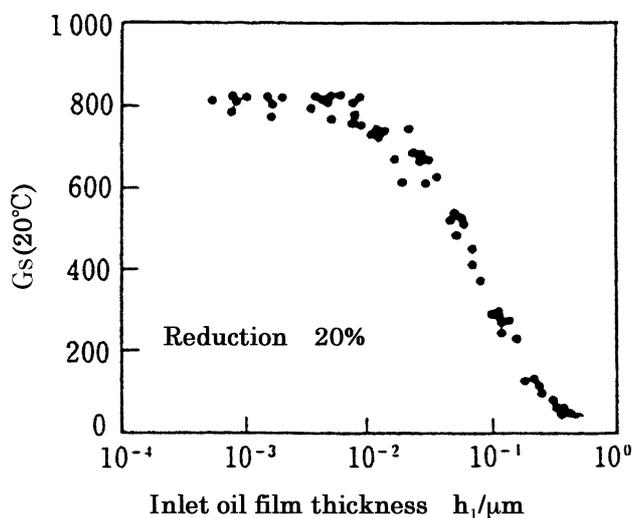


図5 表面光沢と入口油膜厚みの関係¹³⁾

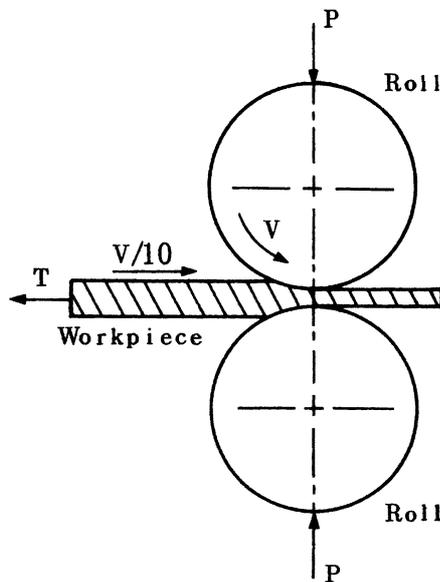


図6 評価試験機のロールバイトの模式図²⁰⁾

3.4 焼付きの評価

1980年代に入って薄鋼板の冷間圧延の際の焼付きに関する研究が盛んに行われるようになった。この時期には基礎的試験機や実験室用圧延機を用いて耐焼付き性の評価が行われた¹⁶⁻¹⁸⁾。これらの研究結果から耐焼付き性の評価にはロールと材料での界面温度が最も重要な因子であることがわかった。耐焼付き性を評価するためには界面温度に影響を与える相対すべり速度、摩擦力およびすべり距離(接触弧長)のトライボロジックの因子に注意を払わなければならないことを示し¹⁹⁾、図6に示すようなすべり圧延タイプの評価試験を開発した²⁰⁾。図6に示すようにロール回転時も材料が同時に塑性変形するように、材料をロール速度に比べて1/10の低速度で移動させるようにした。そのため、実機と同じ相対すべり速度を得るためのロール速度は実機の約1/10で良く、試験機で小型で安価にすることができた。

この潤滑性評価試験機を用いて、牛脂3%エマルジョンを用いて得られた耐焼付き限界の結果を図7に示す²¹⁾。焼付きの無い領域A(○印)、遷移領域B(△印)および完全に焼付いた領域C(×印)が存在しており、耐焼付き性評価にはBとCの境界の焼付き限界線を求め、その比較により行うこととした。この焼付き実験から焼付き領域Cには低速域のC-Iと高速域のC-IIの二つの焼付き形態があり、低速域の焼付きの形態は冷間圧接タイプであり、高速域の焼付きは実機において見られるヒートタイプであることを示した。また、この潤滑性評価試験機から、3種類の商業用エマルジョン圧延油(ケン化価、A:49、B:90、C:112)の間にも図8に見られるように明確な焼付き限界に差が現れることを示した。更に、この潤滑性評価試験機から得られた焼付き限界のデー

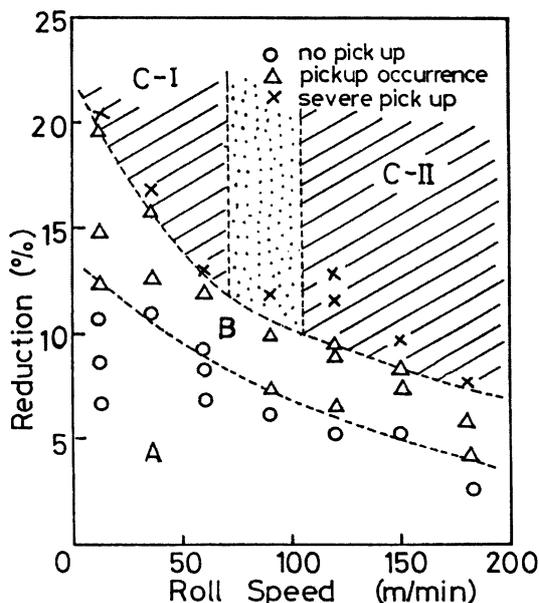


図7 牛脂3%エマルジョン圧延油の焼付き限界線²¹⁾

タから実機使用のための評価を行うためのシステムの提案を行った²²⁾。

これらの結果は、これまでの定性的な耐焼付き性評価から定量的な評価が可能になるとともに、この耐焼付き性データを用いることにより実機の耐焼付き限界の定量的な評価を可能にした。

3.5 高潤滑性冷間圧延用ロール

1980年代の冷間圧延ロールに最も必要とされている要請事項は、ロール原単位の向上や、ロール組替時間の減少を可能とするロール摩耗を減少させることであった。高クロム鍛鋼ロールや硬質クロムメッキロールの開発により、ロール摩耗を減少させることが可能となった。1990年代に入り極薄鋼板の超高速圧延を可能とする基盤技術として摩擦係数や耐焼付き性のようなトライボロジックの観点からロール材質に対して検討を加える必要が生じてきた。筆者らは、すべりタイプの潤滑性評価技術を用いて表1に示す7種類の高炭素・高クロム系ロール材料の摩擦係数および耐焼付き性を調べた^{23, 24)}。図9に各種ロール材質の耐焼付き限界の結果を示す。炭素・クロム含有量が増加し、ロール表面の炭化物が増加する焼付き発生の圧下率が炭化物表面比率が15%までは増加している。しかし、炭化物比率が15%を越えると限界圧下率はほぼ一定となった。そこで、同じ実験結果を炭化物

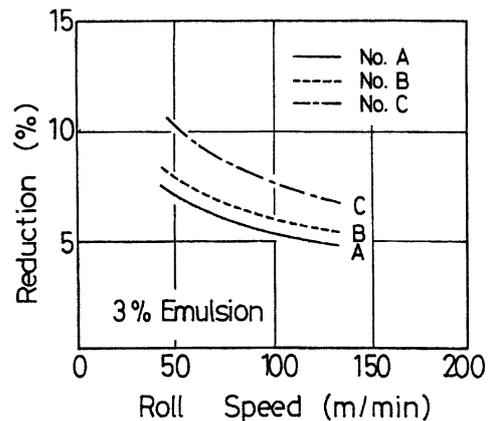


図8 商業用エマルジョン圧延油の耐焼付き性の比較²¹⁾

表1 評価したロール材質の成分

Symbol	Chemical composition (wt%)									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Co	W
DS-A	0.93	0.42	0.34	0.002	0.002	7.86	0.89	0.45	-	-
DS-B	1.03	0.45	0.34	0.002	0.002	8.92	0.88	0.45	-	-
DS-C	1.25	0.50	0.37	0.007	0.006	10.06	0.97	0.48	-	-
DS-D	1.51	0.45	0.35	0.002	0.002	12.46	0.88	0.46	-	-
DS-E	1.86	0.52	0.38	0.011	0.006	14.90	0.95	0.48	-	-
DS-F	2.16	0.52	0.39	0.012	0.006	17.15	0.95	0.48	-	-
DS-G	2.43	0.52	0.40	0.015	0.007	19.73	0.98	0.48	-	-

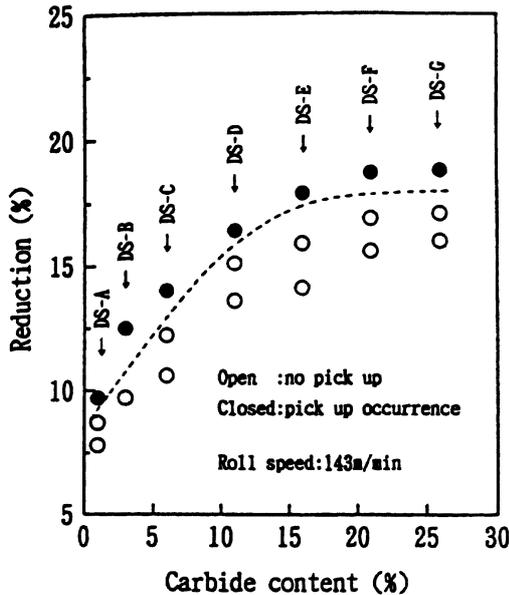


図9 各種炭化物の含有率のロール材質の焼付き限界²⁴⁾

間隔で整理すると、図10のように焼付き限界圧下率が直線的になることを示した。

これらの結果は、ロール材質が摩耗だけではなく潤滑性にも影響を及ぼしていることを示すとともに、ロール表面上の炭化物間隔をパラメータとして用いて高潤滑性冷間圧延ロールを設計できることを示した。

4 おわりに

本稿は、筆者が日本の鉄鋼業の発展とともに圧延プロセスにおけるトライボロジーについて関わってきた研究について述べた。このような研究の成果をあげることができたのは、鉄鋼業の世界最先端の優れた技術開発があったことによるものと感謝している。

最後に、これまで研究を続けることができたことに対し、研究をご指導頂いた多くの先生方および鉄鋼会社の研究者の方々並びに一緒に研究をやってきた大学の卒業生および鉄鋼会社の研究者の方々に深く感謝致します。

参考文献

- 1) M.P.Stone : Iron and Steel Engr., 30 (1953) 61.
- 2) 佐伯邦男, 橋本有司 : 塑性と加工, 7 (1966) 63, 183.
- 3) 水野高爾 : 同上, 7 (1966) 66, 383.
- 4) T.A.Dow, J.W.Kannel and S.S.Bupara : Trans, ASME, F97 (1975), 4.
- 5) W.R.D.Wilsom and L.E.Murch : 同上, F98 (1976), 426.
- 6) 小豆島明, 木原諄二, 宮川松男 : 27回塑加連講論, 96.

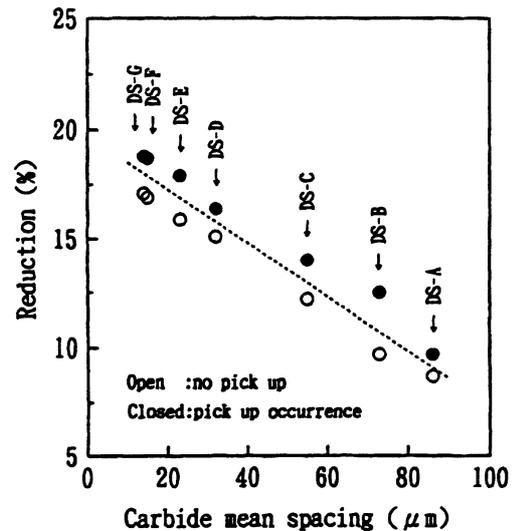


図10 各種ロール材質の焼付き限界圧下率と炭化物間隔の関係²⁴⁾

- 7) Y.H.Tsao and L.B.Sergnt : ASLE, 21 (1977), 1.
- 8) 五弓勇雄, 木原諄二, 小豆島明 : 塑性と加工, 115 (1974) 160, 400.
- 9) 小豆島明 : 鉄と鋼, 64 (1978) 2, 317.
- 10) 小豆島明, 北村晃一 : 昭61春塑加講論, (1986), 151.
- 11) 小豆島明 : 塑性と加工, 36 (1995) 414, 737.
- 12) 小豆島明, 野呂和也 : 塑性と加工, 39 (1998) 455, 1238.
- 13) 小豆島明, 野呂和也, 井柳好貴, 井川浩衛 : 鉄と鋼, 76 (1990) 4, 576.
- 14) 小豆島明 : 40回塑加連講論, (1989), 327.
- 15) A.Azushima : Proc.7th Inter. Conf. on Steel Rolling, (1998), 473.
- 16) 間瀬俊明, 山本秀男, 西野隆夫 : 潤滑, 27 (1982) 8, 552.
- 17) 伊藤紘一, 北村邦雄 : 同上, 27 (1982) 8, 559.
- 18) 田村裕保, 細野弘夫, 戸田一男, 小村義弘 : 昭54春塑加講論, (1979), 387.
- 19) 小豆島明 : 塑性と加工, 29 (1988) 328, 492.
- 20) 小豆島明 : 鉄と鋼, 74 (1988) 4, 696.
- 21) 小豆島明, 喜多良彦, 志磨貴司, 三橋勝 : 同上, 74 (1988) 10, 10.
- 22) 小豆島明, 喜多良彦 : 鉄と鋼, 76 (1990), 1270.
- 23) 小豆島明, 神保安弘, 金田敏明 : 鉄と鋼, 81 (1995), 64.
- 24) 小豆島明, 神保安弘 : 鉄と鋼, 81 (1995), 1150.

(2002年5月10日受付)