

ブリキ材の調質圧延における表面性状と潤滑油挙動

青木 孝史朗*・野呂 和也*²・小豆島 明*³

Surface Qualities of Workpiece and Behavior of Lubricant on Tin Plate in Temper Rolling

Koshiro AOKI, Kazuya NORO and Akira AZUSHIMA

Synopsis : On the temper rolling especially importance of surface quality such as tin sheet, it is considered as the tribological study to obtain the homogeneous surface quality of the strip. The aims of this study are to examine systematically the effect of tribological factors on the surface qualities in the temper rolling for tin plate and to estimate the surface quality by the analysis of inlet oil film thickness. The temper rolling experiments were carried out, changing the rolling speed, the viscosity of lubricant and the surface roughness of tin plate. The oil film thickness in the inlet zone of contact region is calculated analytically based on Reynolds equation considering the surface roughness of the roll and the tin plate. From these experiment data, the qualitative relationship is found between the calculated oil film thickness and the surface qualities such as the brightness and the roughness. But it is difficult to interpret this relationship quantitatively. However, the surface brightness and the surface roughness are expressed as a function of the oil film thickness. To obtain the high brightness after temper rolling by the roll with mirror finish, it is required that rolling is carried out under the condition of minimum thickness of the inlet oil film as possible.

Key words: temper rolling; surface qualities; surface brightness; surface roughness; oil film thickness.

1. 緒言

よく知られている様に調質圧延工程は冷延鋼板製造における最終工程であり、調質圧延において製品の品質が最終的に決定されている。つまり、調質圧延により材料の降伏点伸びが消去されると共に、材料の表面粗さ、機械的性質そして形状などが制御されている。現在、経験に基づいた圧延条件の選択により調質圧延が一見問題なく行われているが、軽圧下圧延である調質圧延は通常の圧延と異なり、調質圧延のメカニズムはほとんど明らかにされていないのが現状である。特にトライボロジー的な課題として挙げられているのは、圧延後の鋼板表面性状の均一性を確保することである。

一般の冷間圧延においてニート潤滑下での潤滑油導入メカニズムは理解されるに至っているが、調質圧延では先にも述べた様に弾性変形と塑性変形が混在する弾塑性変形であるため、このメカニズムを適応できるか明らかではない。そのため調質圧延の潤滑機構を解明するためには、ロール・材料間での潤滑油の挙動を調査しなければならない。しかしながら、圧延中の潤滑油の挙動を観察することは非常に困難であるため、圧延荷重・圧延トルク・摩擦係数などの測定や、圧延後の材料の表面性状を調べることで、間接的に潤滑油挙動の把握が試みられている。表面性状に及ぼすトライボロジー因子の影響に関する報告は行われて

いる¹⁻⁸⁾が、これらの結果を利用して圧延後の材料の表面性状を定量的に制御することが可能になったとは言い難い状況である。

通常の冷間圧延において表面性状に及ぼすトライボロジー特性に関しては、著者らの一人¹⁻³⁾が入口油膜厚みを計算により求め、これをパラメータとして圧延後の試験片表面の光沢度、板とロールの表面粗さとの相関を得て評価を試みている。本論においては、この表面性状に関する実験手法を調質圧延に適応させる。すなわち調質液を用いた潤滑下の調質圧延における表面性状の変化と、圧延時の諸条件を網羅するプロセスパラメータとして計算により求められる入口油膜厚みを用い、その相関関係を調べる。特に本論では表面性状の1つである光沢度に対し、その制御方法の要求がなされるブリキ材に注目し、調質圧延における表面性状と潤滑油の挙動について検討を行った結果を報告する。

2. 実験方法

2.1 供試材および表面粗さの調整

供試材には冷間圧延後に焼鈍を施したブリキ材を用いた。1m×1mのシート材から長さ300mm、幅20mm程度の短冊を、シートの圧延方向と短冊の長手方向が揃う様に切り出した。

平成20年1月31日受付 平成20年3月28日受理 (Received on Jan. 31, 2008; Accepted on Mar. 28, 2008)

* 芝浦工業大学 (Shibaura Institute of Technology, 3-7-5 Toyosu Koutou-ku Tokyo 135-8548)

*2 横浜国立大学産学連携研究員 (現: 大同化学工業 (株)) (Yokohama National University, now Daido Chemical Industry Co., Ltd.)

*3 横浜国立大学大学院 (Graduate School of Engineering, Yokohama National University)

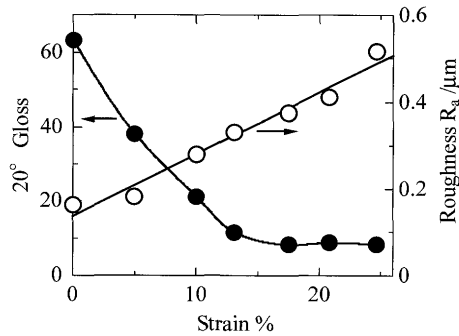


Fig. 1. Surface roughness and brightness of tin plate for tensile strain.

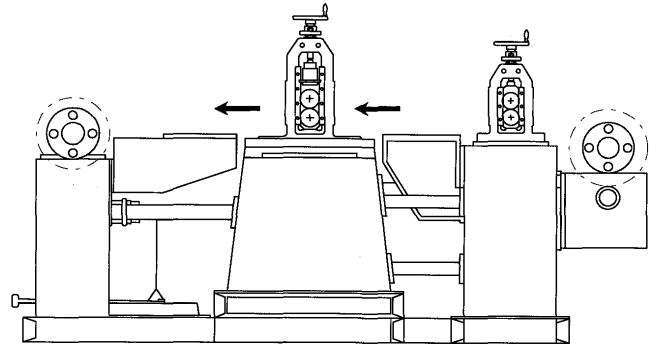


Fig. 2. Schematic illustration of cold rolling mill.

供試材の表面粗さを調整するため、予め引張加工により材料表面を自由変形させ、表面粗さを調整した。引張加工には定格5tfの引張試験機を用い、引張速度を2.0mm/minで行った。板表面粗さの測定には触針式表面形状測定機を用いた。指標として R_a を用い、評価面を3点測定して全ての測定の平均値を測定値とした。また光沢度は表面光沢計を使用し、指標として20° Glossを用いた。評価項目として光沢度を用いる事の長所は、①評価領域（光の照射面積：約150mm²）が粗度計に比べて大きい、②大まかな傾向をとらえやすい、といった事が挙げられ、逆に短所としては、①局所的な評価は不向き、②曲面の測定が困難、といった事が挙げられる。この短所を考慮して、板の反りをできるだけ取り除いた後、評価面を各5点測定し、最大値・最小値を除く3つの測定結果の平均値を測定値とした。

供試材に引張加工を施し、材料表面を自由変形させた際の結果をFig. 1に示す。ひずみの増加とともに、粗さは比例的に増加し、光沢度は10程度までは比例的に減少するが、その後はあまり変化せず、下限が見受けられた。この結果より、初期表面粗さとして0.16 μm （受入材）、0.33 μm （13%加工材）、0.52 μm （25%加工材）の3種類を選択した。また、この引張加工に伴う供試材の機械的性質であるが、受入材は降伏応力：220 MPa・引張強さ：325 MPa・全伸び：28.6%であったが、13%、25%加工材において0.2%耐力がそれぞれ359 MPa、400 MPaとなった。

2・2 圧延・調質液および試験条件

圧延にはFig. 2に示す、著者らの一人が開発した二段型冷間圧延機⁹⁾を使用した。上下ロールは直径 $\phi 76$ mm、胴長60mmのSUI-2製である。ロールは鏡面ロールであり、ロール表面粗さ R_a は0.01 μm となるよう調整した。圧延速度は1.5、4.5、26.6、50.5 m/minの4段階で変化させた。また圧下率は5%を目標とし、 $\pm 0.5\%$ を許容範囲とした。

実験で使用した調質液は、脂肪酸-アルカノールアミン塩を主成分とする原液を水で5%に希釈した水溶性調質圧延液、パラフィン系を主成分とする低粘度調質油、ナフテン系を主成分とする高粘度調質油の3種である。この3種の調

質液を室温で使用した。また、これら調質液の20°Cにおける粘度は、それぞれ0.00115、0.00620、0.374 (Pa·s)であった。

供試材への調質液供給方法は、ヘキサンにより脱脂した供試材を、調質液を溜めたバット内に浸し、圧延直前に取り出す方法を用いた。また上下ロール・その他ステージなどへの供給は刷毛による直接滴下で行った。また比較のため調質液を用いないドライ条件下でも実験を行った。

1条件につき3回の圧延を行い、圧延荷重・板厚の変化を測定すると共に、上ロールと接触した板面を評価面として光沢度や表面粗さを測定した。

3. 実験結果

3・1 ドライ条件下における表面性状変化

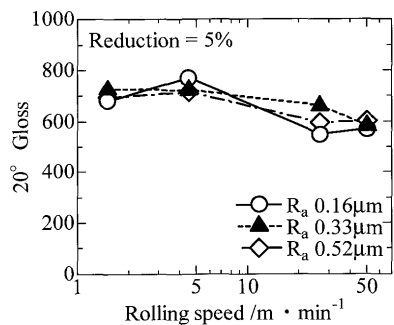
圧延後の光沢度はいずれの場合も圧延前より大幅に向上した。Fig. 3(a)に結果を示す。図から分かるように、圧延前光沢度はそれぞれ63（受入材）、12（13%加工材）、8.3（25%加工材）であったが、圧延後は600から700程度になった。

このようにドライ圧延条件下では圧延後の光沢度に対して、材料の初期表面粗さの影響はほとんど見られず、鏡面ロールの平滑さが転写されたことにより、表面粗さが減少し表面光沢が増加した。

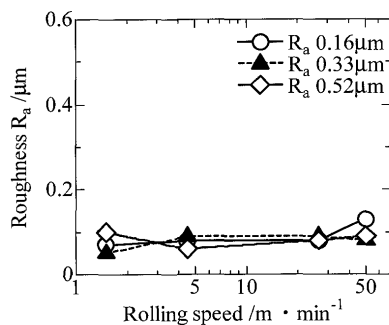
同じく表面粗さの変化をFig. 3(b)に示す。光沢度の変化同様、初期表面粗さの影響はほとんど見られず、ある一定の範囲内の粗さへと変化する傾向が見られた。

3・2 調質液使用時の表面性状変化

前述のドライ条件下と同じく、3段階の表面粗さに調整したブリキ板を、圧延速度を変化させて圧延した時の光沢度をFig. 4に示す。無潤滑の時ほど変化はしなかったが、いずれの場合も圧延前の状態より上昇した。また圧延速度の増加および調質液粘度の増加に伴い、光沢度の上昇が鈍くなる傾向が見られた。具体的な値として圧延前光沢度はそれぞれ63（受入材）、12（13%加工材）、8.3（25%加工材）であったが、圧延後は最も低粘度の水溶性調質液では

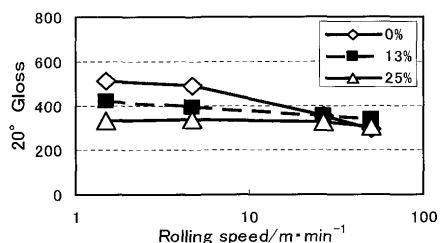


(a) Brightness vs Rolling speed

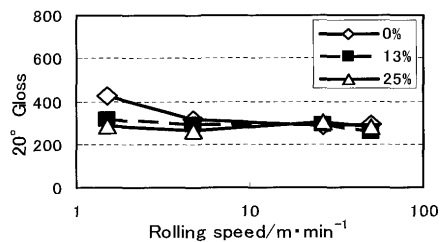


(b) Roughness of rolled workpiece vs Rolling speed

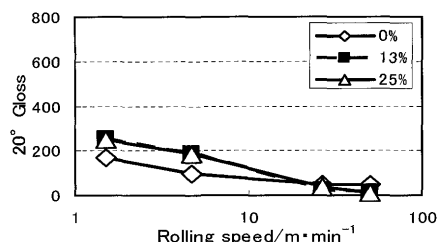
Fig. 3. Change of surface brightness and roughness by rolling speed on the tin plate with different initial surface roughness at a reduction of 5% without lubricant.



(a) Water-soluble lubricant

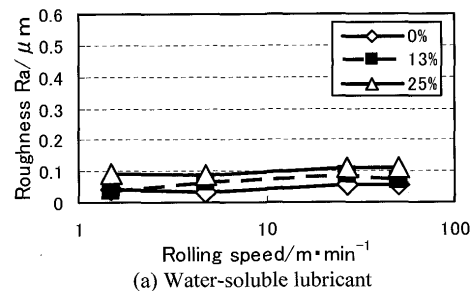


(b) Mineral oil with low viscosity

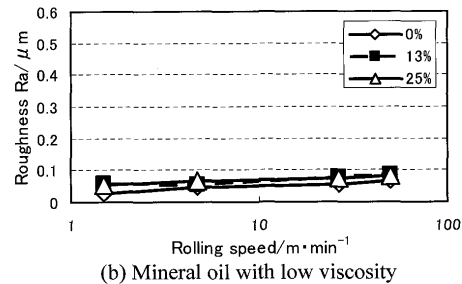


(c) Mineral oil with high viscosity

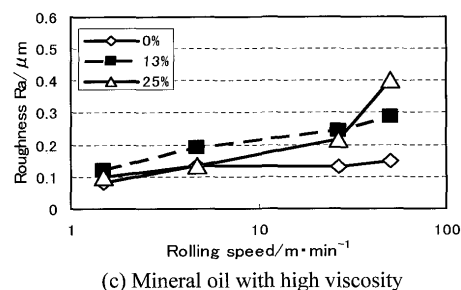
Fig. 4. Relationship between surface brightness and rolling speed at a reduction of 5% on the tin plate with different initial surface roughness using lubricants with various viscosities.



(a) Water-soluble lubricant



(b) Mineral oil with low viscosity



(c) Mineral oil with high viscosity

Fig. 5. Relationship between surface roughness and rolling speed at a reduction of 5% on the tin plate with different initial surface roughness using lubricants with various viscosities.

296から513 (受入材), 337から420 (13%加工材), 303から330 (25%加工材), そして最も高粘度の高粘度調質油では46から170 (受入材), 14から257 (13%加工材), 11から249 (25%加工材) とある程度の範囲を有する値となった。

表面粗さの変化をFig. 5に示す。圧延速度の増加に伴い圧延後の粗さはわずかに増加する傾向が見受けられた。表面粗さの変化に対しては初期粗さや圧延速度といったパラメータよりも調質液粘度の方がより大きな影響があり、粘度の増加と共に、表面粗さは増加した。

この様に、圧延条件による光沢度・表面粗さへの影響に関しては、圧延速度の増加および調質液の粘度が増加するほど、光沢度の上昇が鈍くなり、表面粗さの平坦化も抑えられ、粗さは増加する傾向が見受けられた。材料の初期表面粗さの影響はドライの時と同様ほとんど見られなかった。

圧延による光沢度・表面粗さの変化は、圧延条件・調質液粘度といったプロセスパラメータの違いによる結果である。これらの1つ1つのパラメータが光沢度や表面粗さに対してどのように影響するのか把握することは難しい。そこで本研究では、これらのパラメータを網羅する指標とし

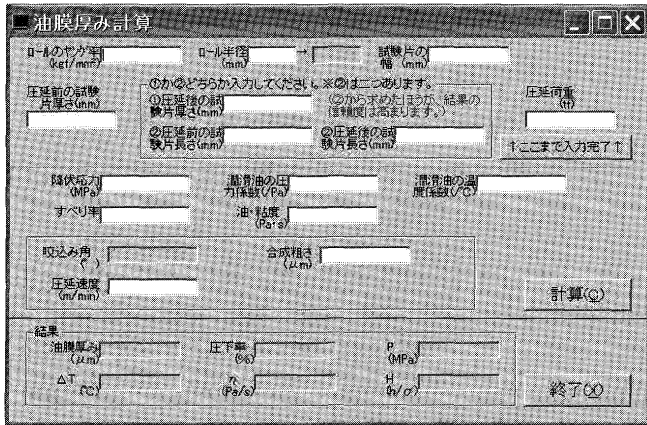


Fig. 6. Execution screen of program for calculation of inlet oil film thickness.

て、入口油膜厚みを用いる。つまり入口油膜厚みと光沢度・表面粗さの変化の相関関係から、表面性状と潤滑油挙動の整理を試みる。

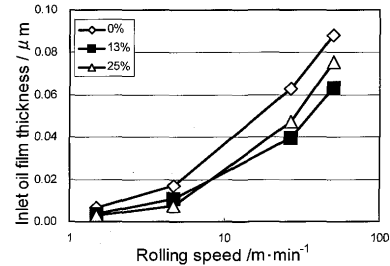
4. 表面粗さを考慮した油膜厚み計算プログラム

4.1 計算による入口油膜厚みの導出概念

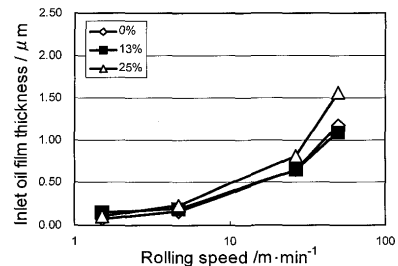
本研究では著者らの一人が考案した手法³⁾を用いる。基本的な考え方は入口部での油膜のせん断による熱効果の影響と Patir と Cheng の接触モデル^{10,11)}を用いてロールと材料の表面粗さを考慮したレイノズル方程式を導き、数値計算により入口油膜厚さを求めるものである。計算に用いた仮定等は文献³⁾で示されたものと同一である。この概念を基に入口油膜厚み計算プログラムが開発され、本研究では Visual-Basic でコンパイルしたプログラムを使用し、入口油膜厚みの計算を行った。プログラムの実行画面を Fig. 6 に示す。このプログラムにて入力するパラメータは、ロール半径、ロール剛性率、試験片幅、試験片圧延前厚さ、試験片圧延後厚さ、圧延荷重、試験片の降伏応力、潤滑油粘性圧力係数、潤滑油粘性温度係数、すべり比、潤滑油粘度、圧延前合成表面粗さ、圧延速度である。

4.2 入口油膜厚み値との相関

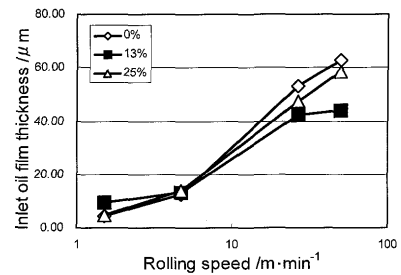
プログラムにより計算された入口油膜厚みを用いて、光沢度および表面粗さの実験結果の整理を試みる。まず、油膜厚みと圧延条件の関係を Fig. 7 に示す。圧延速度の増加および調質液粘度の上昇に伴い、油膜厚みが増加していることが分かる。次に油膜厚みと光沢度の関係を使用した調質液別に整理した図を Fig. 8 に示す。油膜厚みの増加に伴い、圧延後の光沢度が減少している事が分かる。Fig. 8 の3図の縦軸である入口油膜厚みは、それぞれ示している範囲が異なっている。そこで3つのグラフを1つにまとめたものが Fig. 9 になる。この図に示される様に、圧延後の光沢度と油膜厚みの相関は、入口油膜厚み値の減少に伴い光



(a) Water-soluble lubricant



(b) Mineral oil with low viscosity



(c) Mineral oil with high viscosity

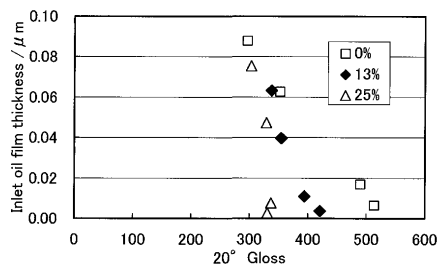
Fig. 7. Relationship between inlet oil film thickness and rolling speed at a reduction of 5% on the tin plate with different initial surface roughness using lubricants with various viscosities.

沢度の向上が認められる領域と入口油膜厚みが光沢度とほぼ無関係となる領域が存在するようである。

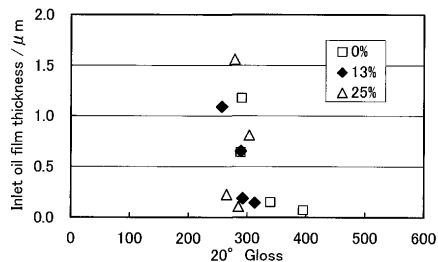
光沢度の値は圧延により変化するので、加工前後での値の変化に注目し油膜厚みとの相関を示したものが Fig. 10 である。初期表面粗さに依存せず、一様に油膜厚みの減少に伴い、光沢度の変化が大きくなることが認められる。入口油膜厚みの減少により鏡面ロールによる平坦化が進行すると理解できる。

圧延後の表面粗さと入口油膜厚み計算値の関係を示した図を Fig. 11 に示す。表面粗さと油膜厚み値との相関は、油膜厚みが十分に大きく表面粗さの変化に対し影響を受けない領域、油膜厚み値の減少と共に粗さが減少する領域、油膜厚み値が変化しても粗さがほとんど変化しない領域、の3つに分かれるようである。比較のため、これらのグラフにはドライ圧延後の表面粗さも併せて示している。(便宜上、入口油膜厚み値 $= 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}$ の位置に示す。) 潤滑下における圧延後の表面粗さは、油膜厚み値の減少に伴い、ドライ圧延で得られる表面粗さの値の範囲内へと収束していくことが分かる。

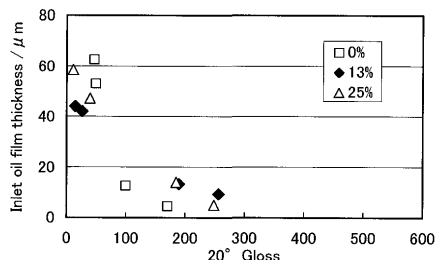
光沢度と同様に、圧延前後の粗さの変化と入口油膜厚み



(a) Water-soluble lubricant



(b) Mineral oil with low viscosity



(c) Mineral oil with high viscosity

Fig. 8. Relationship between inlet oil film thickness and surface brightness at a reduction of 5% on the tin plate with different initial surface roughness using lubricants with various viscosities.

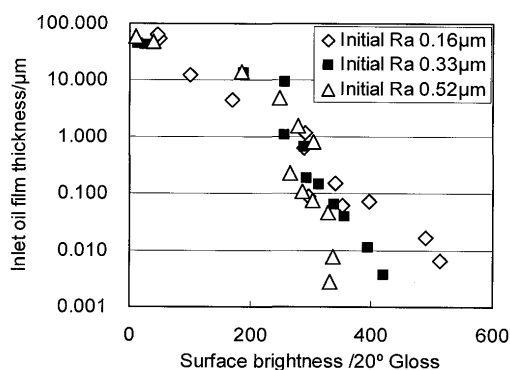


Fig. 9. Relationship between inlet oil film thickness and surface brightness at a reduction of 5% on the tin plate with different initial surface roughness using lubricants with various viscosities.

値の関係を Fig.12 に示す。初期粗さが大きいほど油膜厚みの減少に伴い表面粗さの変化が大きくなることが分かり、その変化は入口油膜厚み値が $10\ \mu\text{m}$ 以上の領域では著しく進み、 $10\ \mu\text{m}$ から $0.1\ \mu\text{m}$ 程度までは緩やかに生じている。一方、入口油膜厚みが $0.1\ \mu\text{m}$ 以下あたりからは、表面粗さの変化に対して油膜厚みはほぼ無関係になることが分かる。

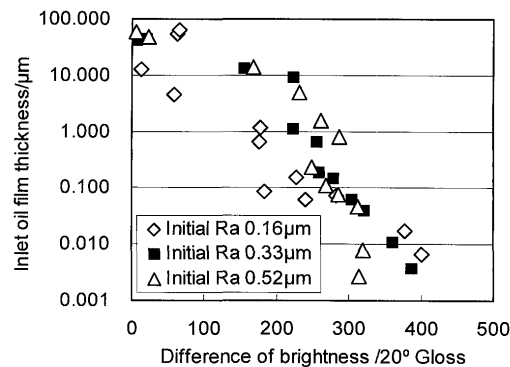


Fig. 10. Relationship between inlet oil film thickness and difference of surface brightness at a reduction of 5% on the tin plate with different initial surface roughness using lubricants with various viscosities.

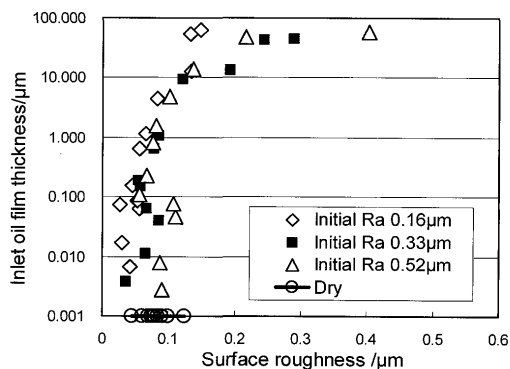


Fig. 11. Relationship between inlet oil film thickness and surface roughness at a reduction of 5% on the tin plate with different initial surface roughness using lubricants with various viscosities.

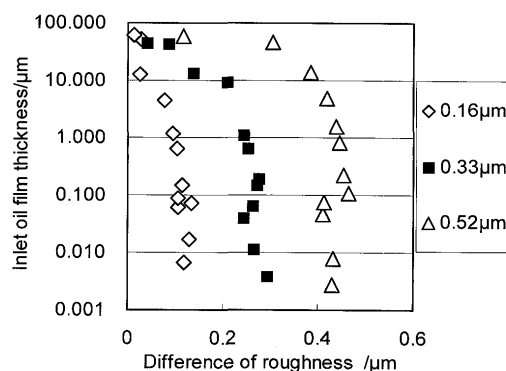


Fig. 12. Relationship between inlet oil film thickness and difference of surface roughness at a reduction of 5% on the tin plate with different initial surface roughness using lubricants with various viscosities.

以上まとめてみると、鏡面ロールを使用して高い光沢度を得るためには、材料の初期粗さに関わらず、入口油膜厚み値が可能な限り小さくなる条件下で圧延を行うことが重要であり、また表面粗さを整えるという観点からは、入口油膜厚み値が $0.1\ \mu\text{m}$ 程度以下になる条件で行えば、ドライ圧延に近い状態が得られると言えよう。

5. 表面性状と油膜厚みの相関

5・1 圧延時における板表面の平坦化と自由あれ

圧延時におけるロールと材料の接触状態は定性的には以下の3つの状況であることが知られている。

- ①ロールと材料間に十分な潤滑油が導入される場合、材料はロールによる拘束を受けずに変形し、材料表面は自由変形し表面粗さは増加する。
- ②界面に導入される潤滑油の減少に伴い、ロール・材料表面の凸部同士の接触が始まり、ロールによる変形拘束が生じる。
- ③潤滑油が界面にわずかししか導入されない場合、圧延中の材料はほとんどの領域でロールと接触し、表面粗さの転写が行われる。

今回得られた実験結果を上記の考え方に当てはめて整理すると、表面粗さがほとんど変化せず初期粗さとほぼ同等であった、油膜厚みが厚い領域が①、入口油膜厚みの減少と共に光沢が増加し、表面粗さが低下していく領域が②、入口油膜厚みが低下しても、光沢度・表面粗さ共に変化の小さな領域が③に相当すると考えると、今回の入口油膜厚みの大きさに伴う表面性状の変化は定性的に理解することができる。

一般の冷間圧延においては、著者らの一人¹²⁾は①と②の境界となる入口油膜厚み値として $h_1 = (R_{\max 0}^{\text{ロール}} + R_{\max 0}^{\text{材料}})/2$ 、②と③の境界となる入口油膜厚み値として $h_2 = (R_{\max 0}^{\text{ロール}} + R_{\max 0}^{\text{材料}})/2$ 、と近似することができると述べている。しかしながら、今回の実験結果においては、上記に示す①・②・③のそれぞれの境界に応じた定量的な関係を見いだすまでには至らなかった。

5・2 油膜厚み計算プログラムの適応

この入口油膜厚み計算プログラムでは、理論的には入口油膜厚みの値として100 μm からほぼゼロの値まで取り得ることはできる。この計算値に対しては、潤滑油粘度が高い場合には、実験値とのずれがあるものの、粘度が低い場合には実験値はかなり一致すると報告されている³⁾。また、同時にその値がどこまで適応可能なのか吟味されており、この点から本実験結果を検討する。

今回用いている入口油膜厚みの計算プログラムの適用範囲について、著者らの一人³⁾は以下のように述べている。

- a) 入口油膜厚みに及ぼす表面粗さの影響は、入口油膜厚みが合成表面粗さの3倍以下で現れ、0.5倍までその影響が大きくなる。
- b) 計算された油膜厚みは合成表面粗さの1/2以下では物理的意味がなく、その限界値が使用限度となる。

上記のa)の理由としては、表面粗さを考慮した油膜厚み計算値と考慮せずに計算した値が、合成粗さの3倍以上でその差がなくなことを意味している。b)で述べている事は、プログラム中で計算しているレイノルズ方程式の導出

過程で生じる制限である。また、合成粗さの1/2以下であれば、ロール・材料間に導入される油量は流体力学的な動的効果よりも表面凹部に捕捉される効果の方が大きくなり、その効果により入口油膜厚みが決定されてしまうことを示していると説明している。

上記のb)で示されるプログラムの理論的下限は本研究で使用したプログラムでも適応されなければならない。つまり入口油膜厚み値が合成粗さの1/2以下の領域ではプログラムにより得られる計算値に意味がないことになる。このような油膜が薄いと考えられる領域では前述のように潤滑油が表面凹部つまりオイルピットにトラップされ局部的に油膜が非常に薄くなるなど影響が大きくなることが予想される。本研究結果に対するオイルピットの変化と油膜厚みとの相関に関してはさらなる解析が必要であろう。また入口油膜厚みが厚い場合、実際の運用上からは、上記のa)で示される状況より、5・1で示された①と②の境界に相当する入口油膜厚みの方が意義深い。しかしながら今回の実験結果では①と②の境界に相当する入口油膜厚みは数 μm から数十 μm の範囲で推移しており、前述の様に合成粗さとの間に定量的な関係を見いだす事はできなかった。

この様にプログラムが導く入口油膜厚み値に対しては、計算における仮定の見直し、つまり調質圧延状態の板表面の変形を考慮したモデルをプログラムの中に新たに導入する必要がある。調質圧延は軽圧下であるが故に材料表面における弾性回復量は一般の冷間圧延に比べて相対的に大きな比率を占めることになり、表面性状に対し影響を与えることが予想される。しかし本研究で用いたプログラムは一般の冷間圧延用であるため、このような弾性回復は考慮していない。そのため計算値にずれが生じ、本実験結果の定量的な理解に至らなかったと考えられる。

以上の様に、今回用いた油膜厚み計算プログラムにより得られる入口油膜厚み値と表面性状との相関は定性的に理解することができた。これは、鏡面ロールで表面の造り込みを行う際の圧延条件を求める際に、この入口油膜厚み値を指標として用いることが可能であることを示唆している。

6. 結言

表面粗さを調整したブリキ板を用い、粘度の異なる調質液による潤滑下の調質圧延において、表面性状の変化と圧延時の諸条件を網羅するプロセスパラメータとして計算により求められる油膜厚みを用い、その相関関係を調べ以下の結論を得た。

今回の実験結果においては、入口油膜厚み値により表面性状変化の定量的な解釈は難しいものの、定性的な相関は確認された。その点から鏡面ロールで表面の造り込みを行う際、入口油膜厚み値を指標として用いることが可能であ

ろう。高い光沢度を得るためには、入口油膜厚み値が可能な限り小さくなる条件下で圧延を行う必要があり、適切な条件を選択することにより表面粗さをドライ圧延に近い状態へと整えることも可能であることが分かった。

本研究は日本鉄鋼協会「調質圧延ミクロ変形解析」研究会による援助を頂きました。研究の機会を与えて頂きました関係各位に御礼申し上げます。また、実験を行うにあたり協力して頂いた芝浦工業大学学部生（当時）江崎昇太氏・笹嶋真吾氏・富吉弥生氏に深く感謝いたします。

文 献

- 1) A.Azushima and K.Kitamura: Proc. of the 1986 Jpn. Spring Conf. for the Technol. Plast., Jpn. Soc. Technol. Plast., Tokyo, (1986), 151.
- 2) A.Azushima, J.Kihara and I.Gokyu: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **19** (1978), 958.
- 3) A.Azushima: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **36** (1995), 737.
- 4) Y.Kasuga and K.Yamaguchi: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, **33** (1967), 1294.
- 5) T.Mizuno: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **12** (1971), 369.
- 6) K.Baba and M.Iwasaki: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **13** (1972), 609.
- 7) T.Sakai, Y.Saito, S.Okamoto and K.Kato: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **19** (1978), 972.
- 8) H.Yamamoto, T.Uchimura and K.Yamada: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, **67** (2001), 2032.
- 9) A.Azushima: *Tetsu-to-Hagané*, **74** (1988), 696.
- 10) N.Patir and H.S.Cheng: *Trans ASME, Ser. F*, **100** (1978), 13.
- 11) N.Patir and H.S.Cheng: *Trans ASME, Ser. F*, **101** (1979), 220.
- 12) A.Azushima, K.Noro, Y.Iyanagi and H.Degawa: *Tetsu-to-Hagané*, **76** (1990), 576.