

## アルミニウム圧延における境界潤滑\*

野瀬 健二\*\*, 渡邊 貴道\*\*\*

### Boundary Lubrication in Aluminum Rolling\*

Kenji Nose\*\* and Takamichi Watanabe\*\*\*

#### 1. はじめに

アルミニウム（以下アルミ）は高い比強度や導電率、耐食性といった優れた特性を有し、飲料缶や医薬品容器、輸送材料などに広く用いられている。アルミは金属材料の中でも塑性加工性に優れ、生産効率の観点で圧延との相性が良い材料といえる。表面特性に関しては、圧延されたアルミは一般に美しい金属光沢を有し、そのまま製品表面として利用される場合も多い。近年では異種材料や塗膜との接着などの点も含め、表面特性に関する様々な要求がなされている。

アルミの圧延においては、ロールとアルミとの凝着が生じやすい。すなわち、アルミの圧延において対象となるトライボロジカルな作用面は、鋼製のロールとアルミ材ではなく、ロール表面に形成されるアルミ層と被圧延材とにある場合が多い。特に境界潤滑域で行われる熱間圧延（以下熱延）においてはその傾向は顕著である。この、ロール表面に形成されるアルミ層は一般にロールコーティングと呼ばれる。材種、クーラントおよび圧延条件から複雑な影響を受けるロールコーティングの制御は工業的な圧延プロセスにおける1つのキーテクノロジーといえる。

本解説記事ではアルミ圧延材の製造工程を概説し、熱間および冷間圧延（以下冷延）における金属表面やロール面の制御などの側面から境界潤滑を議論する<sup>1), 2)</sup>。

#### 2. アルミ圧延の製造工程とトライボロジー

アルミ合金板の製造工程では半連続鋳造により得られるバルク材（スラブ）から圧延を開始するプロセスが

広く用いられている。地金の重量単価の高さ、金属元素の中での融点と比熱の低さ、沸点が比較的高いこと、加工と熱履歴による組織制御の自由度が高いことが、こうしたプロセスを選択せしめている。また、アルミ板材の高リサイクル性と製品ライフサイクルにおける低環境負荷も、板製造プロセスにより担保されているといえる。

アルミ板材の製造工程の概略をFig. 1に示す。鋳造されたスラブは、面削された後に均熱処理により結晶組織および析出相が制御される。処理時間は数時間から24時間、温度は融点の7割から9割程度である。この時点でのスラブの厚さは300～600 mmであり、熱延により高い効率で板厚を減じられる。粗圧延機は英語圏ではbreak down millと称されるように、圧延による加工量が大きいことを一番の特徴としている。

熱延工程での材料温度はおおよそ350℃以上である。各種圧延パラメータから求められる先進率から、Bland & Fordの仮定の下で摩擦係数を求めれば0.1から0.4程度となる。すなわち、乾燥摩擦から境界潤滑域で加工がおこなわれていることとなる。ロールコーティングの厚さは数nmから数百nm程度であるが、その厚さや状態（組成や組織）は、圧延油と圧延条件に強く影響される。また、ロールコーティングからの凝着や板からの脱離に由来する構造欠陥も生じうる。

熱延における圧延油は板およびロールの冷却（クーラント）と潤滑の維持の2つの側面から、エマルション型の潤滑油が広く用いられている。エマルションはoil in water (O/W)型が一般的であり、油分濃度（数%）と粒径（数μm）が乳化剤と機械攪拌により制御されている。潤滑性向上のために、油性剤として高級脂肪酸や

\* 本稿は、トライボロジスト, 62 (2017), 485-489より転載

This review was reprinted from Journal of Japanese Society of Tribologists, 62 (2017), 485-489.

\*\* (株)UACJ R&Dセンター 第二研究部 博士(工学)

Research Department II, Research & Development Division, UACJ Corporation, Ph.D.

\*\*\* (株)UACJ R&Dセンター 第五開発部

Development Department V, Research & Development Division, UACJ Corporation

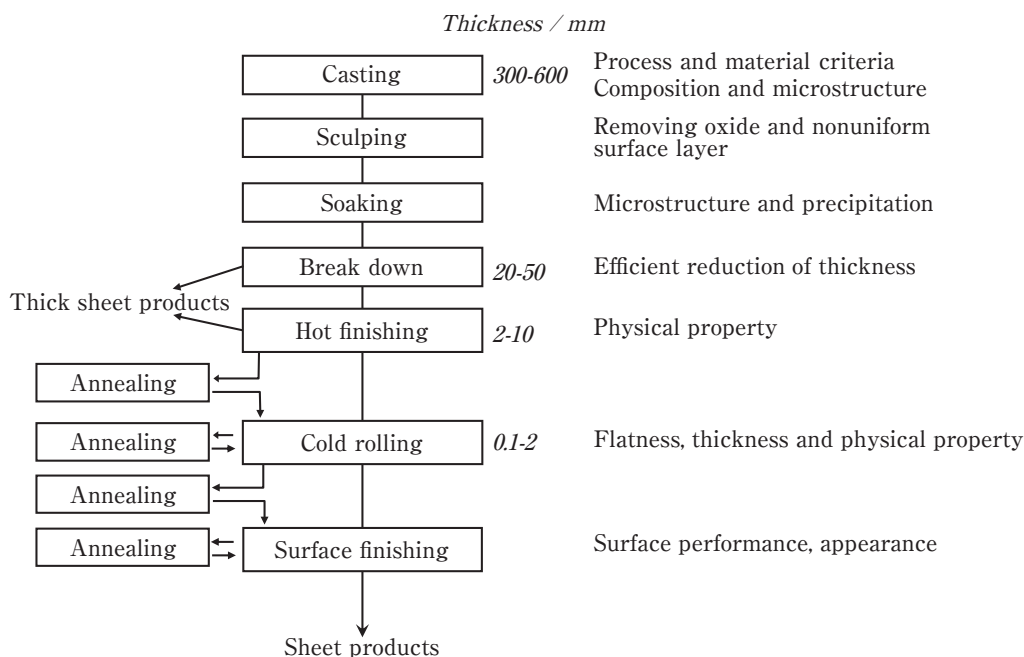


Fig. 1 A production process of aluminum sheets.

油脂，エステルが添加されている<sup>3,4)</sup>。これらの成分を単価，乳化安定性や長期耐久性，発生するアルミニウム微粒子の分散性<sup>5)</sup>などの観点でバランスさせつつ，圧延材や圧延機の条件ごとに最適化するノウハウが圧延メーカーおよび加工油メーカーが保有する技術といえる。極圧添加剤も用いられることがあるが，上記のロールコーティングとの関連で，その作用機構は未解明である部分が多い。鋼材に対するS系およびZn系の極圧剤の表面終端構造は，鋼材とは電子構造が異なる(s,p軌道主体の)アルミ合金にそのまま適用できるとは考えにくく，この分野の基礎研究は今後，学術的にも産業的にも大きなブレイクスルーに結びつくと考えられる。

生産設備としての熱延システムは動的安定に近い形で管理する必要がある。すなわち，系内で摩擦により生じるAI微粒子と高級脂肪酸との反応において金属石鹸が生成されるとともに，各種成分が熱投入による蒸散と濃化を生じ，これらが供給/排出のバランスの下で制御される。どの項目を制御パラメータとするかは，設備や操業状態により変わり得る。熱延は圧延機あたりにおける生産性(単位時間あたりの圧延ton数)が高いために，製造所に粗熱延，仕上げ熱延が一組設置され，複数の冷延機との組み合わせで使用されることが多い。

数十mm以上の厚板のまま製品となる航空機用材料，LNGタンク用材料などでは，この後に超音波探傷などによる製品検査が行われる。厚さ数mm程度以下の製品に関しては，熱延板はコイル形状に巻き取られ冷延工程に送られる。

冷延工程では通板速度が高い(1000 m/min程度のため，圧延界面に導入される油膜導入量も必然的に多くなり，摩擦係数は一般に0.03から0.1程度となる。冷延油としては鉱油に高級アルコールやエステルを数%程度添加したものが使われることが多い。40℃動粘度として数cStのものが選ばれる。圧延ロールと材料との界面への油膜導入量は，通板速度や圧下率(数十%)の変化幅により，数nmから1 μm程度の範囲で変化する。このため，圧延条件に依存した潤滑状態が操業条件(板のスリップ)や表面状態(光沢や焼き付き不良)に強く影響を与える。冷延油に関しても発生したアルミ粉を濾過除去するフィルターと部分置換により性状が管理される。

熱間および冷間の双方の加工油に関していえば，使用による変化(劣化)だけでなく，置換や濾過，精製，排出を伴いながら，動的に制御される特徴を有している。このため，圧延油は加工材料だけでなく，圧延条件と性状管理手法との組み合わせにおいて性能が議論されなければならない。このため，加工油メーカーと圧延メーカーとの間の技術的なすりあわせが重要となる。

### 3. 粗熱延における摩擦係数とスラブ噛み込み性

粗熱延における生産性をトライボロジー的な一側面から議論する。粗熱延油の性能指標の一つとしてスラブの噛み込み性が挙げられる。高い圧下率において表面性状を向上するためには，高粘度かつ油性の強い油設計が好ましい。しかしながら，ワークロール径と大

大きく変わらないスラブを数十%以上の圧下率で加工する場合には、物理的に板がロールの間に噛みこまず、圧延が開始できないという現象が発生しうる。

以下に限界噛み込み角度と呼ばれるこの条件が、粗熱延の生産性にどのように影響を与えているかを議論する。圧下量とスラブ厚さにより決定される限界噛み込み角度  $\alpha$  (Fig. 2) は、マクロには摩擦係数 ( $\mu$ ) により決定される。すなわち

$$\mu p \cos \alpha > p \sin \alpha \quad (1)$$

より

$$\arctan \mu > \alpha \quad (2)$$

となる。この式に基づき、ワークロール直径500 mm、スラブ厚500 mm→50 mm時の限界噛み込み角度、摩擦係数および圧下率の関係を示したのがFig. 3である。当然、1パス目で設定可能な圧下率は小さく、パスが進むにつれてワークロール径/板厚の比率が上昇し、大きな圧下率をとることが可能となる。

摩擦係数が決定する限界噛み込み角度で最も効率的に圧延を繰り返した場合の圧延回数(パス数)を算出する。 $\mu = 0.2$ から $0.1$ への変化において、必要な圧延回数は12回から25回へと倍増する。産業的には効率よく板厚を減ずるプロセスが求められるが、噛み込み角度は摩擦係数とトレードオフの関係があることが分かる。このため、単純に高い潤滑性が求められるだけでなく、圧延材に適した圧下配分を実現可能とするように摩擦係数を調整する必要がある。複数の材種を通板する熱延ラインにおいては、この問題の最適解を得る困難が増すことは推測しやすい。

熱延における潤滑設計においては、熱延油のロール表面でのプレートアウト現象(熱延油の表面への残存)の理解が重要となる。熱延におけるロールおよびスラブの表面温度は高く、クーラントの水分は蒸発しながら

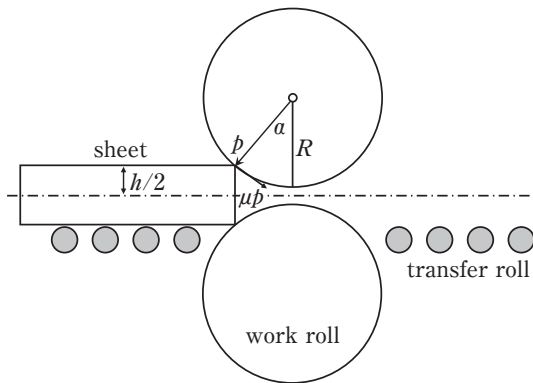


Fig. 2 Schematic diagram of slab biting in a break-down mill.

ら(ロールの冷却)、バイトに油滴を到達させる機構が重要となる。一般にはロール温度が $100^{\circ}\text{C}$ を超えると、表面への油滴の供給量が減少し始めることが知られている。これは沸騰膜の形成により油滴が物理的に反跳することにより説明されることが多いが、明確な実験的証拠は得られていない。技術対策としては油滴の粒径を数 $\mu\text{m}$ 程度以上に安定化させることで、ロールに到達する油量を増やす方策がとられる。圧延時にバイトに導入される油膜厚さ( $t_d$ )の式をFig. 4に示す。ここで、 $R$ はロール半径、 $\Delta h$ は圧下量、 $r$ はリダクション、 $\eta$ は油の粘度、 $p$ は面圧である。これにより圧延に必要な油膜厚さはただだか数十nm程度(数十 $\text{mg}/\text{m}^2$ )であることを推測させるが、これを上回る十分な量の油をロールに残すことが熱延潤滑の必要条件となる。既報<sup>6)</sup>によれば、 $100^{\circ}\text{C}$ 前後のロール温度におけるプレートアウト量は $1 \text{ g}/\text{m}^2$ のオーダーにあり、通常の圧延条件においてはプレートアウトした油の大半はバイトから排出されながら圧延が進行している挙動が推測される。

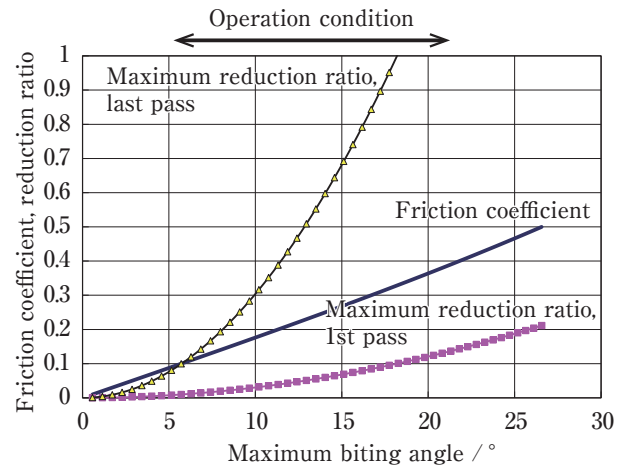


Fig. 3 Friction coefficient and maximum reduction ratios plotted against maximum biting angle.

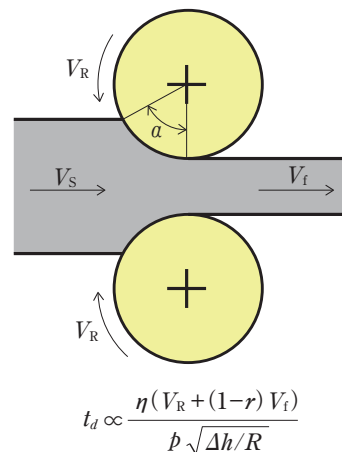


Fig. 4 Oil film thickness in rolling.

#### 4. 熱延におけるロールコーティング

ロールコーティングを定量化することは熱延油の油性の設計や圧延条件の最適化の出発点となる。Fig. 5にはラボ圧延機において観察されるロールコーティングの外観を示す。通板した板幅の領域でロール表面状態が変化していることが目視でも確認される。異なる圧下率において、圧延枚数ごとにロールコーティングがどのように変化するかを測定した結果をFig. 6に示す。ロールコーティング量は圧延枚数に応じて増加していくことが確認できる。その厚さは圧下率によって大きく異なる。もちろん、クーラント中の油性剤や板温度の影響も受ける。ここではラボ圧延機において通板枚数に依存した値として示してあるが、Fig. 6の横軸は圧延長としてとらえることが可能である。実際にはただか数十m程度の圧延長でロールコーティングの厚さは100 nm程度に達することが分かる。上述の油膜導入量との比較でいえば、ロールコーティングの凹凸と油膜が同等の厚さとなり、境界潤滑状態がシビアに影響を受けることが推測される。

実際に、過剰なロールコーティングが板面の形状欠陥に結びつく例を示す。Fig. 7には熱延板面に生じる鱗片形状の表面欠陥のSEM像を示している。図中のRDは圧延方向を示す。ラボ圧延機において、圧下率

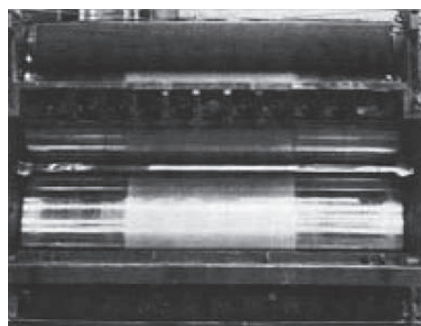


Fig. 5 Roll coating formed in a lab mill<sup>9)</sup>.

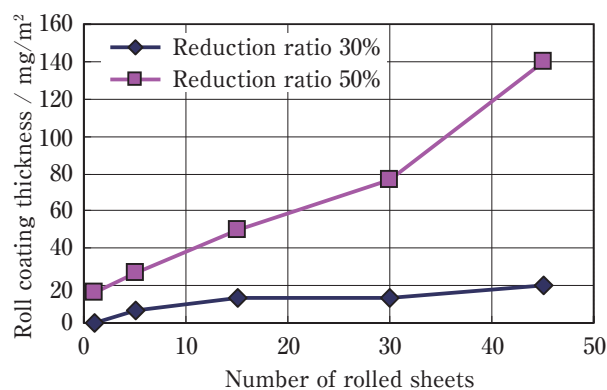


Fig. 6 Roll coating thickness plotted against numbers of rolled sheets with reduction ratios of 30 and 50%.

40%にて通板枚数に応じてこの形状がより明確に観察される。圧延枚数(量)に応じて欠陥がより顕著となることが分かる。ロールコーティングの成長に伴い、面内に数十 $\mu\text{m}$ といった比較的大きなサイズのロールコーティング厚さの分布が形成される。これらの凹凸が圧延の先進域、後進域において板面に転写されることでこのような形状が形成されることが確認されている<sup>7)</sup>。実際の生産ラインにおいてはロール表面を機械的に研磨するロールブラシが採用されており、ロール表面状態を一定に保つことで、潤滑条件を安定化させる工夫がなされている。

#### 5. 冷延における境界潤滑

冷延の潤滑制御にはロールバイト内への導入油膜量が重要となる。導入油膜量はFig. 4中の式で概算できる。すなわちロール周速( $V_R$ )および動粘度( $\eta$ )に比例し、圧延圧力 $p$ に反比例した油膜厚さ( $t_d$ )が得られることとなる。油膜等量の多寡は潤滑状態に影響を与えるだけでなく、板面にオイルピットと呼ばれるロールの転写痕の間の溝状の微細構造を形成しうる(Fig. 8)。そのサイズは可視光の波長程度であり、目視での板面

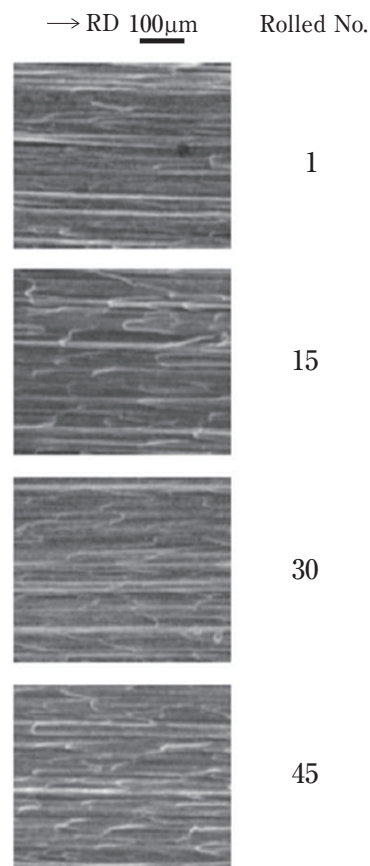


Fig. 7 Squamiform patterns on Al sheets formed by roll coating structures.



の色調に直接影響を与えうることが推測される。板面の圧延模様が製品の外観を決める板材においては、色調は重要な品質の1つであり、機械特性だけでなく、外観も冷延のパススケジュールを決める要因となる。

Fig. 9には冷延で通板速度を変化させた時の板面の明るさ(拡散反射率)がどのように変化するかを示す。導入油膜量は速度に比例して増加するが、これに応じてオイルピットの形状および面密度が変化することで板面の反射率が変化する様子が確認できる。圧延における長さの増大に比例し、それ以前の圧延パスの影響は減少する。このため、組織制御と表面の両観点から最適なパススケジュールが選択されることとなる。

冷延においても大きな圧下率においては境界潤滑の影響が強く現れうる。アルミ合金の冷延では、脂肪酸に比べてアルコールが境界潤滑性に優れていることが知られている。これは酸化皮膜への反応性の高さにより説明される。アルコールとアルミ表面との反応性に関しては、基油中に芳香族を含む場合において吸着活性が向上することが報告されている<sup>4)</sup>。環境負荷低減や作業環境の改善のために低芳香族基油が好まれる傾向にあり、芳香族鉱油成分を含まずとも新生面への反

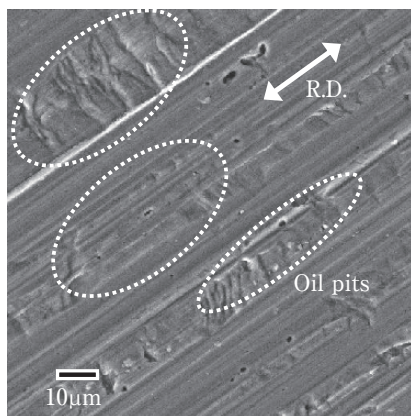


Fig. 8 Surface SEM image of a cold-rolled Al sheet.

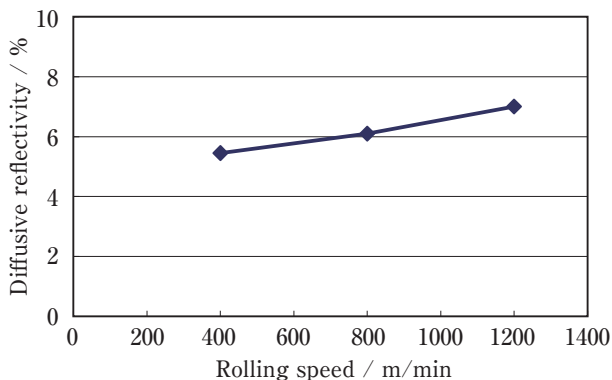


Fig. 9 Diffuse reflectivity of Al sheets plotted against sheet speed in cold-rolling.

応活性を高めた冷延油添加剤が検討されている。他方、表面への反応活性や終端の強さは、レビンダー効果によるアルミ粉発生の促進といった負の効果も生みうる<sup>8)</sup>。圧延におけるAl粉の発生は生産量の増大とともに増加する傾向にある。ここでも、潤滑特性だけでなく、洗浄性や蒸散性との兼ね合いで潤滑油と加工条件の設計がなされなければならない。

## 6. まとめ

アルミの熱間および冷間圧延での圧延油、プロセス条件および板面形状について潤滑制御が重要となる事例を紹介した。圧延潤滑の設計においてはロールコーティングの堆積や油性剤のアルミ新生面への吸着といったマイクロな条件だけでなく、導入油膜量やプレートアウトといったマクロな現象を捉える必要があり、基礎研究としても興味深いテーマとなり得ると考えられる。

## 参考文献

- 1) 菱川滋, 小林博幸: アルミニウムの板圧延技術, Furukawa-Sky Review 4 (2008) 1-9.
- 2) 渡邊貴道: アルミニウム合金の圧延におけるトライボロジー, トライボロジスト, 55 12 (2010) 847-853.
- 3) 上田薫, 初野圭一郎, 細見和弘: アルミニウムの熱間圧延性に及ぼすエステルの影響, トライボロジー会議予稿集2013-10 (2013) E10.
- 4) 柴田潤一: 環境負荷低減アルミニウム用圧延油における潤滑性向上技術, トライボロジスト, 53 7 (2008) 437-442.
- 5) 市本武彦, 森大記, 石井克広: アルミニウム板用熱間粗圧延油の紹介, 日本パーカライジング技報, 28 (2016) 49-51.
- 6) 細見和弘, 間瀬俊朗: トライボロジー会議予稿集, 東京 1997-5 (1997) 36-37.
- 7) アットナローグ チャローンジット, 山田隆太, 野瀬健二, 渡邊貴道: トライボロジー会議予稿集, 新潟 2016-10 (2016) 472-473.
- 8) 柴田潤一, 関 克巳, 小倉茂稔, 若林利明: アルミニウムの冷間圧延における摩耗粉発生挙動の研究(第1報) - 摩耗粉発生機構について -, トライボロジスト, 47 4 (2002) 306-312.



野瀬 健二 (Kenji Nose)

(株)UACJ R&Dセンター 第二研究部  
博士(工学)



渡邊 貴道 (Takamichi Watanabe)

(株)UACJ R&Dセンター 第五開発部