

**博士論文**

**O/W エマルション圧延時の油導入メカニズム解明と  
圧延潤滑性及び表面性状の制御可能性に関する研究**

**2013年9月**

**中西 裕信**

## 表題

O/W エマルション圧延時の油導入メカニズム解明と圧延潤滑性及び表面性状の制御可能性に関する研究

## 目次

### 1. 序論

1.1 研究背景	・・・1
1.1.1 金属板の製造方法	
1.1.2 圧延における潤滑の目的	
1.1.3 一般的な圧延油組成	
1.1.4 O/W エマルション圧延潤滑時の供給方法	
1.1.5 圧延業界における課題	
1.1.6 圧延潤滑に関連する既往の研究	

1.2 本研究の目的と構成	・・・18
---------------	-------

### 2. 光干渉法を用いたプレートオンボール間のプレートアウトと油滴引き込み現象の関係

2.1 概説	・・・26
--------	-------

2.2 実験	・・・26
--------	-------

2.2.1 弾性流体潤滑理論	
2.2.2 光干渉法	
2.2.3 実験装置	
2.2.4 エマルション作製方法	
2.2.5 光干渉法による測定方法及び膜厚校正	

2.3 実験結果及び考察	・・・36
--------------	-------

2.3.1 プレートアウト量の制御方法	
2.3.2 フラッド状態における油滴引き込み挙動	
2.3.3 スターブ状態における導入油膜変化	

2.3.4	速度変化が導入油膜厚に及ぼす影響	
2.3.5	ロールバイト近傍の流れ場解析	
2.4	まとめ	・・・61
3.	圧延時の導入油膜厚測定方法の開発(トレーサ法)とエマルション特性が油膜厚形成に与える影響	
3.1	概説	・・・65
3.2	圧延実験条件及び圧延方法	・・・66
3.3	実験	・・・68
3.3.1	トレーサの選定と定量方法の検討	
3.3.2	板上油膜厚の測定	
3.3.3	分配比の算出	
3.3.4	導入油膜厚の算出	
3.4	実験結果及び考察	・・・72
3.4.1	板上油膜厚測定結果	
3.4.2	分配比	
3.4.3	導入油膜厚測定結果	
3.4.4	接触率	
3.4.5	連続圧延を想定した導入油膜厚挙動	
3.5	まとめ	・・・85
4.	プレートアウトの定量評価及び導入油膜厚との関係調査による油導入機構の推定	
4.1	概要	・・・88
4.2	プレートアウト量測定方法	・・・88

4.3	実験結果及び考察	・・・89
4.3.1	プレートアウト量測定結果	
4.3.2	導入油膜厚とプレートアウト量の関係	
4.3.3	入側油膜厚の算出と油導入に及ぼすプレートアウト量の影響	
4.4	まとめ	・・・96
5.	圧延機を用いた圧延潤滑性、表面性状制御の可能性に関する検証	
5.1	概要	・・・99
5.2	実験	・・・100
5.2.1	実験装置と条件	
5.2.2	実験方法	
5.3	実験結果及び考察	・・・105
5.3.1	エマルション条件による圧延潤滑性、表面性状の制御	
5.3.2	水及び界面活性剤による圧延潤滑性、表面性状の制御	
5.4	まとめ	・・・117
6.	結論	
6.1	研究成果の総括	・・・121
6.2	今後の展望と課題	・・・124
	謝辞	・・・126

# 1. 序論

## 1.1 研究背景

### 1.1.1 金属板の製造方法

金属板は、自動車、船などの大型製品から飲料缶などの身近な製品まで様々な用途に使用されている。そのため、金属板には厚さ、平坦度、形状、材料特性（強度、硬度）、表面性状など用途によって様々な特性が求められている。金属板製品は通常圧延によって製造される。圧延は金属加工方法の一つであり、2つあるいは複数のロール間に金属を通過させることにより、板だけでなく棒、線、管、型材など様な形状に加工する方法である。また、圧延に用いられる圧延機はロール構成によって数種類ある。4段あるいは6段の圧延ロールから構成されるスタンドを複数台使用し、連続的に圧延を行うタンデム圧延機（Fig. 1.1）、スタンド一つで行うシングル圧延機、12、20段と多数のロールを使用する多段圧延機などがある。多段圧延機は材料を直接圧延するロール径が小さいため、圧延荷重が低くなり1回の圧延で強加工ができる。さらに、圧延機にはロールの冷却や潤滑等の要求に応じて、圧延入側、出側、ロールごとに複数のスプレーが設置され、水や油が供給されている。

圧延によって製造される金属種は、鋼、アルミニウム、銅、チタンなどがあり、さらに各々に合金も存在するため多種多様である。ここで、圧延によ

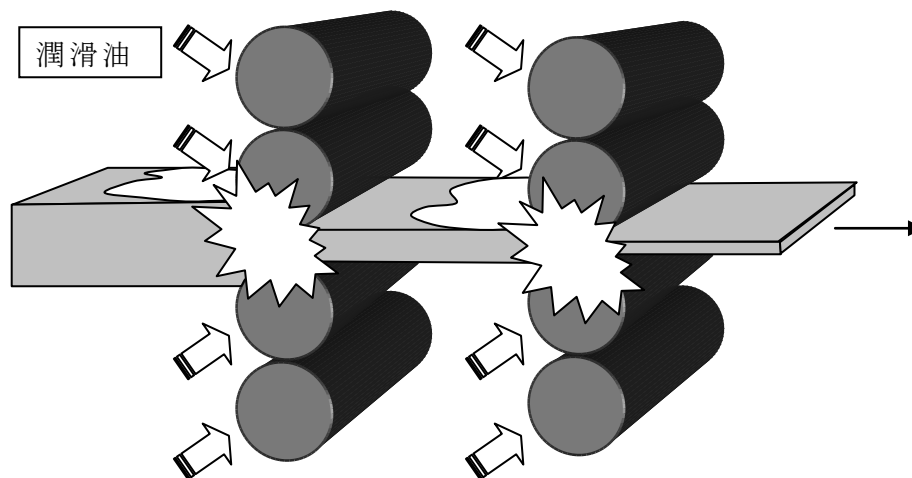


Fig. 1.1 タンデム圧延

って製造される主な金属の合金種を述べる。鉄鋼では Table 1.1 に示すように、一般材あるいは用途に合わせた冷延、熱延材やハイテンと呼ばれる高張力冷延鋼板等があり、家電、自動車、建築材料、橋梁、船舶などに使用され、組成や引張強度などが異なっている。金属の強度の違いは圧延時の潤滑状態にも影響を与えていると考えられる。また、アルミニウムは Table 1.2 に示すように、用途によって様々な合金種が存在している。各合金に含まれる金属成分によって圧延時の潤滑挙動が異なり、用途によっても潤滑に要求される性能も異なっている。同じく、銅板についても Table 1.3 のように複数の合金種が製造されている。金属板製造業における圧延工程では、このような多品種多明細が限られた圧延機を用いて製造されている。

Table 1.1 圧延鋼材例

	名称	用途	種別
冷延 鋼板	一般用	冷蔵庫など	SPCC
	絞り用	自動車など	SPCD
	深絞り用	自動車など	SPCE
熱延 鋼板	一般構造用圧延鋼材	建築、橋梁など	SS300、400、490、540 等 (数字は引張強さ)
	溶接構造用圧延鋼材	橋梁、船舶など	SM400A、490A、520B、570 等 (数字は引張強さ)

Table 1.2 アルミニウムと合金の分類

種類		用途	特徴
1000 系	純アルミニウム	家庭用品、日用品、電気器具など	1100、1200 は 99.0% 以上の一般用途。1050、1070、1085 はそれぞれ純度 99.50、99.70、99.85% 以上。加工性、表面処理性などに優れるが、強度は低い。
2000 系	Al-Cu 系合金	航空機、鉄道車両、機械部品、鍛造品など	ジュラルミンや超ジュラルミンと呼ばれる。2011 は快削性合金に優れるが耐食性に劣る。2014、2017、2024 は強度が高く構造材、鍛造品などに使用されるが、銅を含むため耐食性に劣る。
3000 系	Al-Mn 系合金	缶ボディ、屋根板、ドアパネルなど	3003 は純アルミニウムよりも強度が高く、加工性、耐食性にも優れる。Mg を 1% 程度添加した 3004、3104 は 3003 よりも強度高く、深絞りにも優れる。
4000 系	Al-Si 系合金	ろう材、鍛造ピストン材、エンジンプロック	4032 は Si の添加により熱膨張率を抑え、耐熱性、耐摩耗性に優れる。4043 は熔融温度が低く、ろう材として使用される。また、陽極酸化処理皮膜により灰色を呈するため外装パネルにも使用される。
5000 系	Al-Mg 系合金	缶エンド、自動車、船舶、圧力容器など	Mg 添加量の比較的少ないものは装飾用材や器物用材に、多いものは缶エンドや構造材として使用される。車輻、船舶の内装、建材としては 5005 が代表的。5052 は

			中程度の強度を持った代表的な合金。5083 は Mg 含有量の多い合金で非熱処理合金としては最も強度が高く耐食性、溶接性も良好ため溶接構造材として使用される。5082 は 5083 に近い強度を持ち、加工性、耐食性が良く、5182 はさらに強度が高い。缶エンドに使用される。
6000 系	Al-Mg-Si 系合金	建材、サッシなど	強度、耐食性とも良好で構造用材として使用される。6061-T6 は耐力が SS400 鋼に相当し、構造物に用いられる。6063 は代表的な押出用合金、建築用サッシなどを中心に使用される。
7000 系	Al-Zn-Mg 系合金	鉄道車両、航空機など	最も高い強度をもつ Al-Zn-Mg-Cu 系合金で代表的なものは 7075 で、航空機、スポーツ用品などに使用される。Cu を含まない溶接構造用 Al-Zn-Mg 合金は比較的高い強度があり、溶接部の強度が自然時効により母材強度近くまで回復する。7N01 がその代表例。

Table 1.3 伸銅品の分類

	合金元素	表記	用途
純銅系	—	C1020, C1100 など	電子機器、家電など
黄銅系	亜鉛+錫、鉛	C2100, 2600, C3560 など	ラジエータ、熱交換機、装飾品など
りん青銅系	錫、りん+亜鉛、鉛	C5102, C5210 など	電子部品、バネなど
洋白系	ニッケル、亜鉛、マンガン	C7351, C7701 など	精密機器、バネなど
その他	アルミニウム、ベリリウム、チタンなど	C6140, C1700, C1990 など	船舶、化学プラント、精密機器など

次に、各金属種（鋼板、銅板、アルミニウム板）の製造例について述べる。鋼板は、Fig. 1.2 に示すように、高炉、転炉の工程を経て、目標の成分と温度に制御した溶鋼を連続鋳造設備により、スラブ、ブルームあるいはビレットに鋳造する。これを加熱炉で圧延温度に加熱したのち、製品に熱間加工する。形鋼や棒鋼、線材は、孔型ロールを有する条鋼や線材圧延機によって、厚板は可逆式の厚板圧延機によって、熱延薄板はホットストリップミルによって加工する。熱延薄板は、酸洗後さらに可逆式圧延機またはタンデム圧延機により常温による圧延である冷間圧延によって薄板に加工する。さらに、冷延薄板は必要に応じ、錫、亜鉛めっきなどの表面処理を行い表面処理鋼板とする。

次に、銅板の製造例について Fig. 1.3 に述べる。銅板は高炉、転炉といった上工程はないが、基本的な流れは似ており、原料配合→溶解・鋳造→熱間

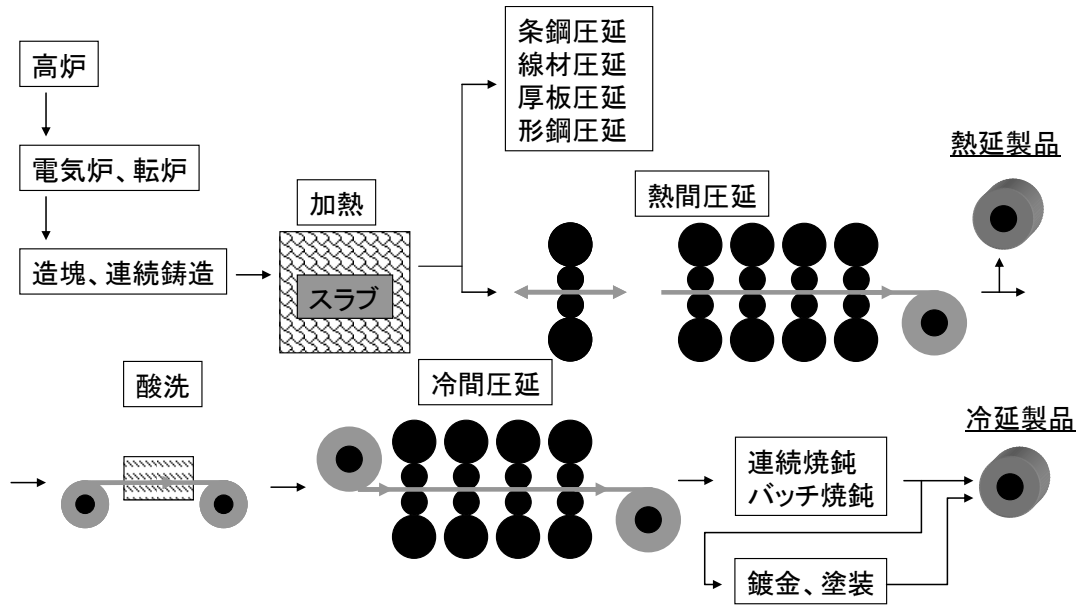


Fig. 1.2 鉄鋼の製造工程例

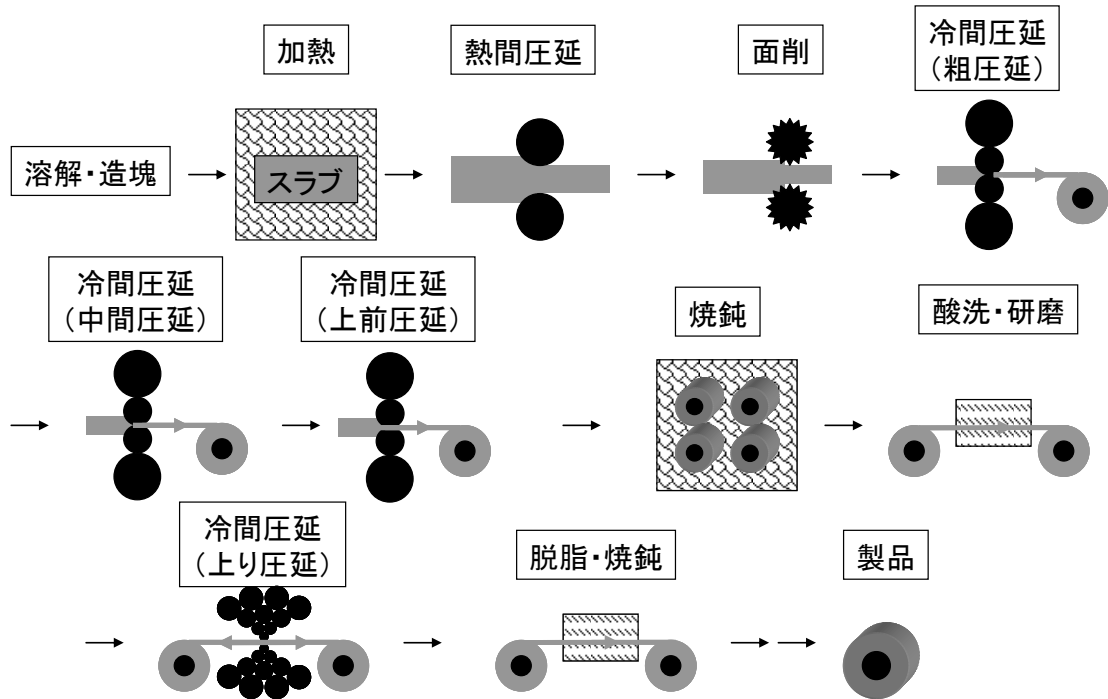


Fig. 1.3 銅板の製造工程例



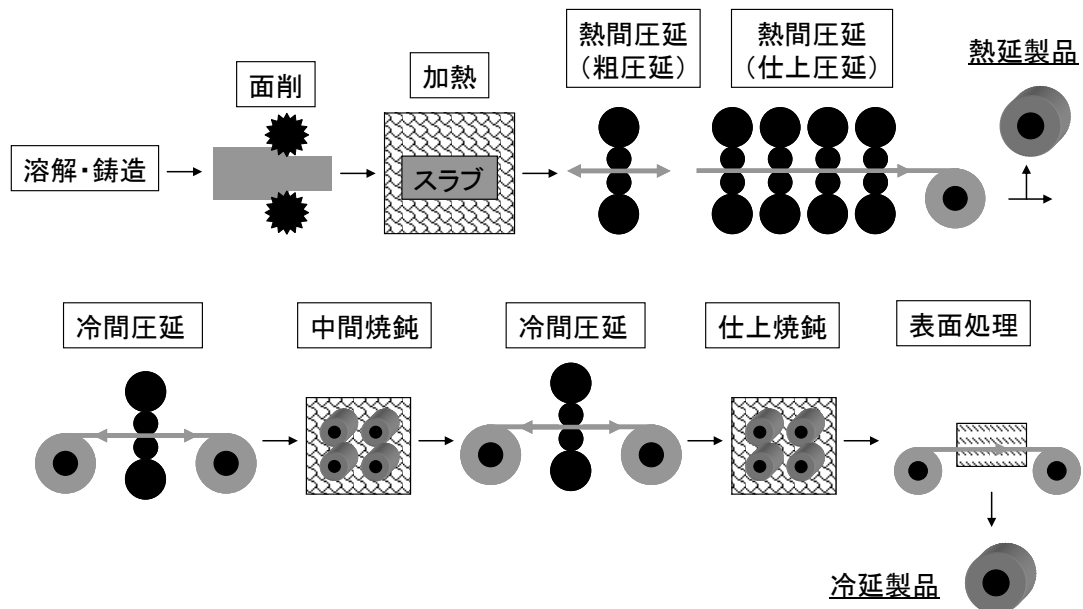


Fig. 1.4 アルミ板の製造工程例

圧延→粗圧延→冷間圧延→焼鈍→酸洗→仕上げ圧延→矯正→脱脂・酸洗→スリッター→検査→梱包→出荷の順に工程を経る。銅板の場合も銅板同様、熱間圧延、冷間圧延工程があるが、銅合金の熱間圧延は、まず鋳塊を 700～1000℃に加熱して、所定の温度以上を保ちながら圧延する。銅は加工硬化を起しやすいため冷間圧延では複数回の圧延を行った後、最後の上がり圧延にて、様々な引張強さ、硬さ等の機械的性質や客先要求の板厚精度・平坦度に仕上げる。銅板では製品前の冷間圧延は多段圧延機が使用されている。また、銅板製造工程では、熱間圧延後には表面を削り取る面削工程、上がり圧延後にも酸洗が行われている。

最後に、アルミニウムの製造例について Fig. 1.4 に述べる。アルミニウムも同様にスラブから2回の圧延工程を経由して製造される。この場合、熱間圧延はアルミニウムの再結晶温度以上（通常 400℃以上）で加工され、材料を容易に薄くのばすことができ、冷間圧延は常温で行われ、熱間圧延後の薄板製品の仕上げとして行われている。但し、アルミニウムの圧延では、他材料と異なり圧延後に酸洗やめっき処理が行われなため、圧延表面がそのまま製品表面となる。その点で銅板や銅板に比べてアルミニウム板の圧延は潤滑に求められる要求が高いといえる。

## 1.1.2 圧延における潤滑の目的

圧延において板形状や板厚精度などの本来の加工技術に関わる部分は、長い歴史の中で構築された圧延理論が実生産に適用されている。一方で金属板には形状だけでなく製品の表面品質も重要である。また、実生産では製造できればよいということではなく、効率的な生産（生産時の負荷低減）といった要求もあるが、このような課題に対しては潤滑が中核の技術となっている。しかし、圧延潤滑技術は、加工技術だけでなく材料や化学に関する知見も必要な境界領域に位置づけられ、現象理解が困難なことから、技術としてまだ十分確立されていない部分も多数ある。

尚、圧延における潤滑油或いは潤滑技術の目的は次の様に考えられている  
1.1)。

- ① 圧下率を大きくとることにより材料を効果的に薄くする
- ② 圧延荷重や圧延トルクなどの圧延負荷を小さくする
- ③ 高速化により圧延能率を向上される
- ④ 負荷の軽減によるロールの摩耗抑制、長寿命化
- ⑤ ロールや材料の冷却を行う
- ⑥ 材料の表面性状（欠陥、色調、光沢など）を向上させる

このような目的のため、冷間圧延、熱間圧延等の国内の大部分の圧延機において潤滑油が使用されている。

金属の圧延工程では大きく分けて2種類の圧延油の使用方法が行われている（Table 1.5、Fig.1.5）。一つは、アルミニウムや銅板の冷間圧延などで行われているニート圧延と呼ばれる方式である。これは、基油に各種添加剤を混ぜた圧延油をそのまま使用する圧延方法である。ニート圧延は油単体を取

Table 1.5 圧延油の使用形態

圧延材料	普通鋼	銅	アルミ
冷延	水系	粗圧延：水系 仕上圧延：油（ニート）	油（ニート） 一部水系
熱延	水系	水のみ	水系

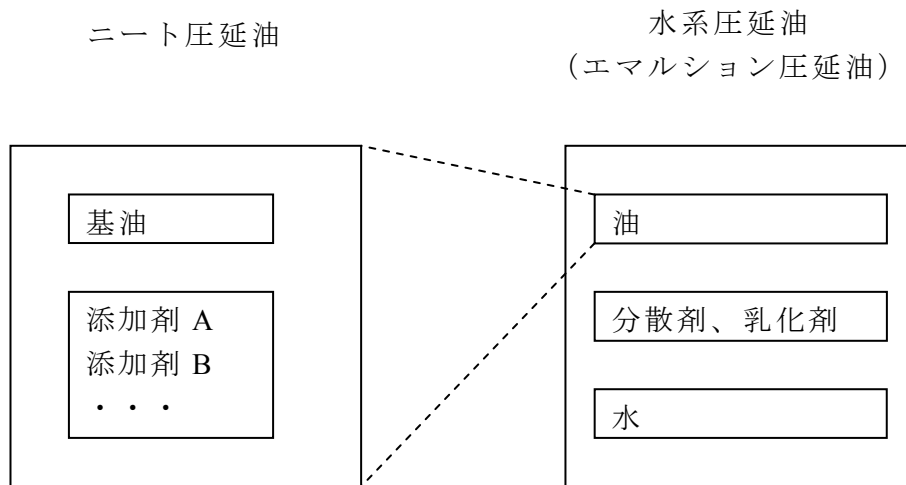


Fig. 1.5 ニート圧延油とエマルジョン圧延油

り扱うため管理が容易で、高い潤滑性を発現する事が出来るが、冷却能力はエマルジョンよりも低く、残油、噛み込み性、火災など様々なデメリットがある。

もう一つは、水の冷却作用と油の潤滑作用を期待した水系圧延油である。冷間圧延やアルミニウムの熱間圧延などで使用されている。水系圧延油は、通常水に油を数%分散させた O/W(Oil in Water)型のエマルジョン圧延油が使用されている。エマルジョンとは、二種類の互いに溶解しない液体の一方が液滴（分散質、分散相）状態で他方（分散媒、分散相）の中に分散した二相液体である。分散液滴は凝集あるいは合体し、密度差があれば二層に分離する傾向を持つが、液滴の凝集は界面張力（界面自由エネルギー）を下げ、界面に吸着分子の保護膜を作ることにより抑制できる。このような目的で界面活性剤が使用され、乳化剤あるいは分散剤と呼ばれている。また、乳化剤には、大きく分けてアニオン系、カチオン系、ノニオン系がある。Figure 1.6 には O/W エマルジョンの光学顕微鏡像を示す。水中に数  $\mu\text{m}$ ～数十  $\mu\text{m}$  の様々な大きさの油滴が浮遊していることが判る。また、このときの油滴の状態は Fig. 1.7 に示すように粒度分布として表現され、通常、粒子の全体積を 100% として累積カーブを求めたとき、その累積カーブの 50% となる粒径（中位径）が O/W エマルジョン油滴径の指標として用いられている。

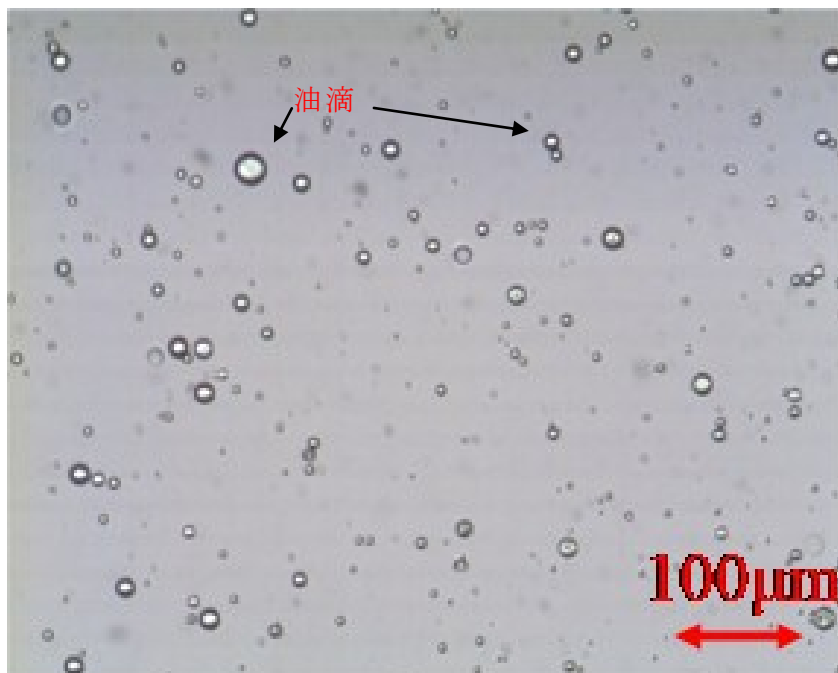


Fig. 1.6 O/W 型エマルジョン圧延油

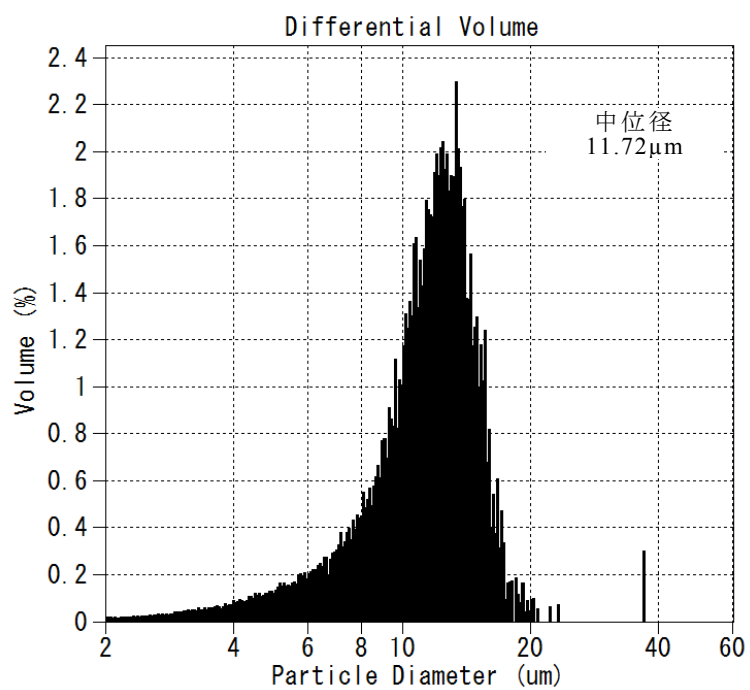


Fig. 1.7 O/W 型エマルジョン圧延油の粒度分布

### 1.1.3 一般的な圧延油組成

圧延油の主な組成（基油と主な添加剤）について Table 1.6 に示す。油脂、合成エステル、脂肪酸などの油性剤は官能基による金属表面への化学的、物理的吸着による効果を狙って添加されている。リン系、イオウ系、ハロゲン系化合物等の極圧剤は、厳しい潤滑状態（高温、高圧）で金属表面に生じる反応膜による境界潤滑性の向上効果を狙って添加されている。また、それぞれの添加量は数～数十％であり、それ以外は基油が占めている。通常、基油には鉱物油が使用され、鎖状・環状飽和炭化水素、鎖状不飽和炭化水素、芳香族炭化水素等がある。また、これらの基油粘度については流体潤滑的な効果や圧延後の残留油分等の観点で設定されることが多い。

Table 1.6 代表的な基油と添加剤

物質	構造	効用
基油	パラフィン系、ナフテン系、芳香族系	圧延油のベースになる成分
油性剤	油脂	金属との化学的・物理的吸着により潤滑膜を形成。
	合成エステル	
	脂肪酸	
	その他	
極圧剤	P：リン酸エステル、P-C 結合化合物、S：硫化エステル、ポリサルファイド、Cl：塩素化パラフィン、塩素化油脂	鉄と反応物を生成し、潤滑膜が高温、高圧下での耐焼付き性を示す。
他	ワックス、石油酸化物、ポリマー、油溶性 Ca 化合物、有機金属塩、固体潤滑剤等	

Table 1.7 添加剤と金属種に関する定性的な分類<sup>1.1)</sup>

	酸系添加剤 (脂肪酸、リン酸エステル、スルホン酸、塩素系化合物、酸系エステル)	アルコール系、アミン系添加剤 アルカリ系エステル
鋼系工具	有効な化成皮膜の生成	効果はあまり期待できない
超硬系工具	効果はあまり期待できない	有効
普通鋼系材料	有効	効果はあまり期待できない
ステンレス系材料	効果はあまり期待できない	有効
アルミニウム系材料	有効	さらに有効
銅系材料	有効	有効

また、添加剤（油性剤）は金属表面への吸着によって効果を発現するため、対象となる金属種も影響を与える。効果については Table 1.7 に示すように定性的な整理も行われている<sup>1.1)</sup>。有効な添加剤は対象となる金属種によって異なっていると言われており、境界潤滑領域における添加剤の挙動は圧延潤滑制御における重要な要素の一つと言える。

一方、O/W 型エマルション圧延時の潤滑メカニズムについては、エマルション中の油分が圧延部（以下、ロールバイト）入り口部にて濃縮されたあと、O/W から W/O への相転移を経て、ロールバイトへと導入されていくと考えられている<sup>1.2-1.3)</sup>。さらに、入り口における油の濃縮は2つの現象を経て生じていると考えられている。一つは、プレートアウトと呼ばれるものである。それは、O/W エマルションが金属に衝突した際に、親油性・疎水性の表面に対しエマルション中の油分が優先的に付着し、水分を排除して油膜を形成する現象である<sup>1.4)</sup>。もう一つは、ロールバイト入口におけるくさび領域で、トラップさせたエマルション中の油滴がそのまま引き込まれていく現象である<sup>1.5)</sup>。

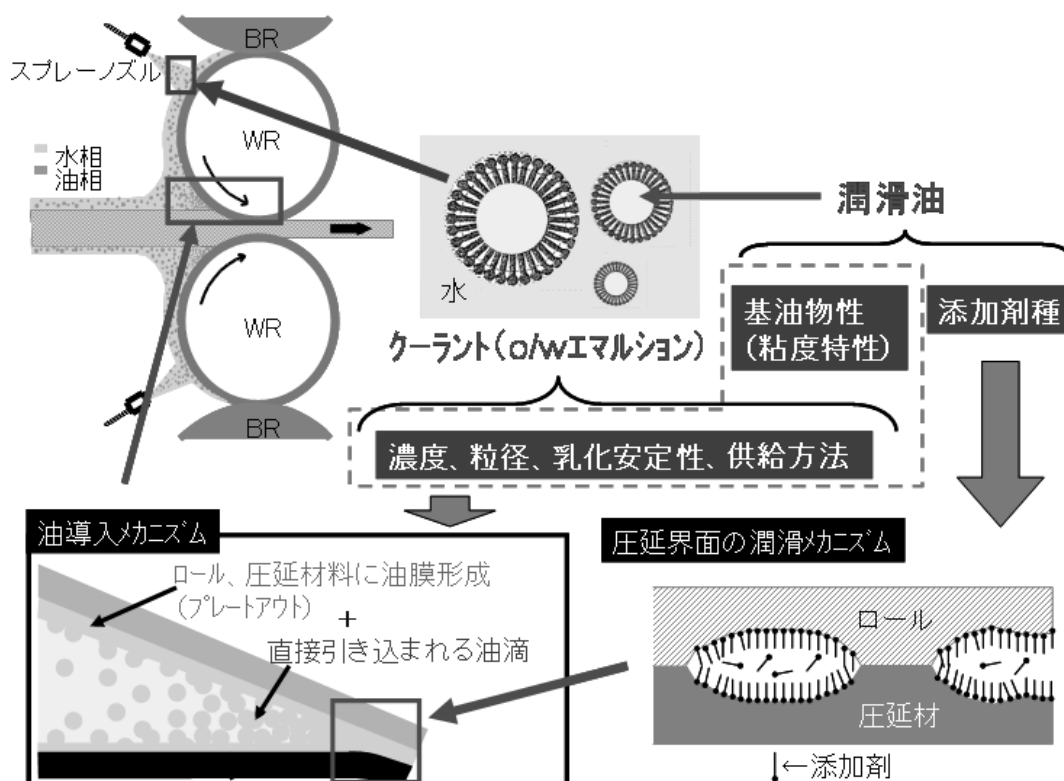


Fig. 1.8 エマルション圧延時の潤滑メカニズム

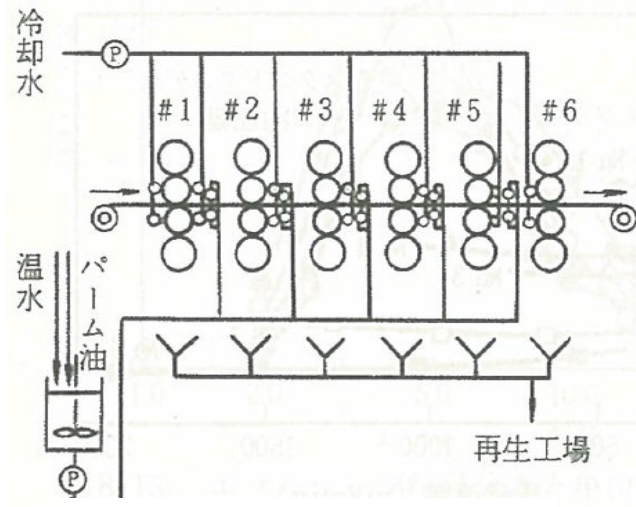
エマルション圧延時の潤滑には、Fig. 1.8 に示すように大きく分けて 2 種類の潤滑機構が重要であると考えている。一つは流体潤滑効果、もう一つは境界潤滑効果である。流体潤滑効果とは、ロールと金属板間（ロールバイト）に引き込まれて形成する油膜（以下導入油膜厚）に着目したものである。前述のエマルション導入挙動はこちらに対応する。この流体潤滑効果を理解するには、エマルションの特性（油分濃度、粒径、乳化安定性）に加え、エマルションをどのように供給するかといった要素も重要と考えられている。また、基油自体の粘性も影響する。一方、境界潤滑効果とは圧延時にロールバイト内で金属板が変形する中で、ロールと金属板の接触／非接触部における潤滑効果を意味するものである。この境界潤滑効果には導入油膜量も影響するが、ミクロな視点での圧延油中の添加剤の挙動の理解がより重要であると考えられる。

これまでも様々なエマルション圧延時の導入メカニズムは提案されているが、流体潤滑作用について、プレートアウトの形成挙動、プレートアウトと油滴引き込みの関係、圧延時の導入油膜厚挙動などは明らかになっておらず、境界潤滑作用についても作用機構は十分理解されているとはいえない状況にある。

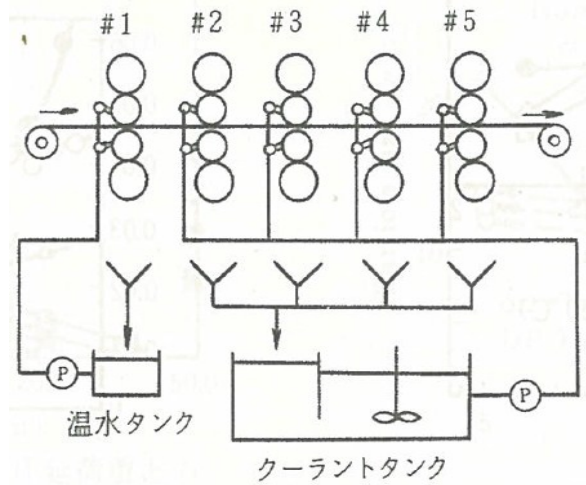
#### 1.1.4 O/W 型エマルション圧延潤滑時の供給方法

ロールバイト内の導入油膜形成には、O/W エマルションの供給方法が重要である。実際、その使用方法、供給方法によって圧延潤滑性や製品品質などを制御する試みは行われている。Fig. 1.9 に代表的な供給形態を示す。

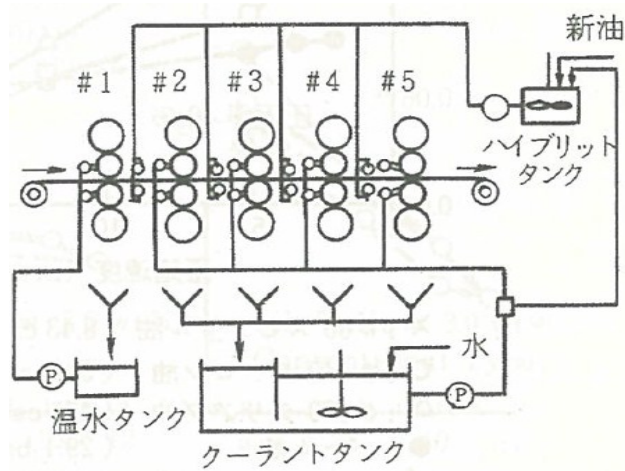
Figure 1.9(a)はリサーキュレーション型である。これは、潤滑とロール冷却を目的として、エマルション型の圧延油を循環使用する方式である。圧延油と冷却水を予め混合、攪拌し、油分濃度 0.5～5 %程度のエマルションとして、入側板上、入側ロール、出側ロールへとスプレー供給される。この方式では、消費減少分のみ水、油を補給する方法がとられるため、他の方式と比べ圧延油使用量は少なく、廃油処理の頻度が少ないといった利点がある。但し、エマルションの経時変化（粒径、粘度）が油劣化、鉄分・コンタミの混入等により生じ易いため、安定操業維持するための管理が必要になる。また、潤滑性を必要に応じて変化させるには複数タンクの使い分けが必要であり、潤滑と冷却機能が分離されていないため、使用温度が 40～60℃程度と比較的高く冷却効果は高くないといった欠点もある。



(a) リサーキュレーション型



(b) ダイレクト型



(c) ハイブリッド型

Fig. 1.9 代表的なクーラントシステム<sup>1.6)</sup>



Figure 1.9(b)はダイレクト型である。これはエマルジョン型の潤滑油と冷却水を分離して供給する方法である。潤滑油は濃度 5～20%のエマルジョンを入側板上に供給するが、常に新しい圧延油が供給するため潤滑性能に優れ、高速圧延、難加工材等に適すると言われている。また、水は冷却目的のため圧延ロールの出口側に供給される。この方式では、油を掛捨てを使用するため経時変化少なく操業は安定であり、圧延油の管理も容易である。但し、圧延油原単位が高く、廃水処理量が多いため処理コストがかかるという欠点がある。

Figure 1.9(c)はハイブリッド圧延である。この方式は循環方式の給油システムに小容量のミキシングタンク（ハイブリッドタンク）を併用し、潤滑と冷却をある程度分離できる。潤滑は、小型ミキシングタンクにて調整された高濃度のエマルジョンを所用スタンドの入側板上に供給する。その結果、良好な潤滑が確保でき、高速圧延に適すると考えられる。一方、冷却については、循環方式のエマルジョンと水を圧延ロール出側に供給して行う。この方式では、マスバランスが変わりやすいため、エマルジョンの管理が難しい点や廃油処理も必要になってくるため、循環方式よりも経済性は劣る。

### 1.1.5 圧延業界における課題

製造メーカによって状況は異なるが、近年の経済情勢において設備投資が限られている中、基本的には現有する圧延機を用い、効率的に他品種他明細を製造することが必要となっている。また、個々の製品に対する要求性能が全く異なる中で、ますます高まるユーザーからの要求にも対応していかなければならない。さらに、近年、海外製品との競争が激化する中で優位に立つためには、製品品質のレベルアップとともにコスト競争への対応は避けることができない。また、使用エネルギーの削減も必要であり、圧延時の荷重、摩擦係数の低減といった圧延潤滑性の改善による、さらなる生産効率の向上も求められている。

このような技術課題を解決する上で、圧延潤滑技術(圧延油配合設計技術、圧延油ハンドリング技術)のレベルアップは必須となっている。圧延油の開発以外にも前述のような O/W エマルジョンの使用方法による圧延潤滑性の制御なども試みられているが十分とはいえない状況である。そのため、潤滑メカニズムの理解を深め、実機における潤滑性制御の可能性、方向性を明らかにすることが重要である。

### 1.1.6 圧延潤滑に関連する既往の研究

前述のように、圧延の操業において潤滑技術に関わる課題は多数存在している。実際、様々な金属材料において生じる製品品質や生産性に関わる潤滑技術に関連する課題解決やその潤滑メカニズムの解明を目的とした研究が多数報告されている。

#### (a) 圧延における課題解決に着目した検討

##### 【鉄鋼】

圧延時の課題は材料ごとに異なる。例えば、鉄鋼の圧延を対象としては次の様な報告がある。鋼板の冷間圧延時の潤滑不足によって生じる表面欠陥(ヒートストリーク現象)に関し、ニート油や O/W エマルジョンの影響について木村らの報告<sup>1.7-1.8)</sup>がある。ニートとエマルジョンではヒートストリークの生じる摩擦形態の遷移発生挙動が異なる事、低濃度エマルジョンほどヒートストリークが発生しやすいことなどを報告している。また、実生産機において、圧延条件の影響について整理した例もある。ここでは、速度、圧下率、板厚、ロール径などによって摩擦係数が変化することを圧延実験によって明らかにしている<sup>1.3)</sup>。また、鋼板の熱間圧延における潤滑の影響についても報告されている。熱間圧延の場合、ロール摩耗改善、圧延動力低減、超微細粒鋼などの組織制御のため、ロールと材料界面の潤滑メカニズムの解明が必要となっている。そこで、小豆島ら<sup>1.9)</sup>は熱間圧延をシミュレートする評価装置を開発しエマルジョン条件や圧延油組成と摩擦係数の関係を調査し、油分濃度 1%を境にした潤滑状態の変化を考察し、熱間圧延における潤滑モデルを提案している。また、鋼板の熱間圧延ではスケールの生成も特徴的な現象であるが、スケールと潤滑性の関係について調べている例もある<sup>1.10-1.11)</sup>。

##### 【アルミニウム】

アルミニウム圧延時の課題に対しても、多数の潤滑に関わる検討が報告されている<sup>1.12-1.24)</sup>。アルミニウム箔ではオイルピットの生成を抑えることで表面光沢を向上させることが出来るが、低粘度油を使用すると潤滑不足によるヘリングボーンが発生するため、表面品質と潤滑性の両立が重要である。そこで、短冊圧延によって、圧延時のロールバイト内の油膜厚に対する圧延速度、ロール粗さ、基油粘度、材質等の影響を明らかにしている<sup>1.17)</sup>。同様にアルミニウム板に対してもヘリングボーンの発生挙動について圧延油条件との関係が報告されている<sup>1.24)</sup>。アルミニウムの熱間圧延ではロールコーティングの生成が製品品質を決める重要な現象であるが、倉知ら<sup>1.18-1.23)</sup>は圧延油

組成に加えて、O/W エマルジョンの濃度、粒径がロールコーティング性に与える影響について調査している。油分濃度は高く、粒径は大きい、即ちロールへの油付着量（＝プレートアウト）が多い方が、ロールコーティングが付きやすく表面は粗くなることを報告している。本文献では圧延油組成について、基油ではナフテン系の方がパラフィン系よりもロールコーティングが厚くなること、オレイン酸はロールコーティングの成長を促進する効果をもつこと等も述べられている。

他の金属材料についても、銅板冷間圧延における圧延油組成と荷重低減効果の関係に関する調査<sup>1.25-1.27)</sup>やチタン冷間圧延における潤滑油特性と摩擦状態の関係<sup>1.28-1.29)</sup>といった報告があり、圧延により製造される金属種すべてにおいて潤滑が重要な技術課題として扱われていることが判る。

また、表面性状については、欠陥だけでなく光沢を指標とした製品表面品質に与える潤滑の影響について着目した研究も多い<sup>1.30-1.35)</sup>。小豆島ら<sup>1.32-1.34)</sup>や山本ら<sup>1.31)</sup>は、オイルピット、表面粗度、光沢度の変化挙動について接触率や導入油膜厚の観点から考察している。また、馬場ら<sup>1.30)</sup>は実生産機において生じる表面性状を解析し、表面粗さと光沢の変化にはオイルピットの状態が影響していることを明らかにした。そして、ピットの大きさや深さには、圧延圧力、変形抵抗、油物性が、ピットの分布には乳化安定性、プレートアウト性、材質が、ピットの形態には圧延速度によって変化する導入油膜厚が影響することを示している。

#### (b)基礎的評価試験機を用いた潤滑挙動理解

このように圧延時の潤滑挙動の理解は圧延業界にとって重要課題であり、個々の金属材料を対象とした潤滑現象の調査が行われてきた。しかし、個別課題解決のための潤滑挙動の理解ではなく、圧延業界の共通技術として根本的な圧延潤滑挙動を理解することも重要である。圧延潤滑では前述のようにロールバイトの油膜（導入油膜）生成が重要な要素であり、導入油膜厚生成挙動を明らかにする事が、圧延時の潤滑メカニズム自体の理解に繋がる。そのため、数値解析による検討<sup>1.36-41)</sup>と共に様々な基礎実験による検討が多数報告されている。特に、ニート圧延よりも複雑で、実生産で多用されているエマルジョン圧延の潤滑機構（プレートアウト、油滴の動的濃化）に着目した実験的な研究が多く見られる。

##### 【プレートアウトに着目した検討】

実験的な研究において、ロールバイトへの油導入についてはプレートアウトと油滴の引き込みによって生じるとの観点に立ち、両現象に着目した検討

が行われている。プレートアウトは金属表面への油膜形成を意味するが、その評価方法はない。そのため独自のプレートアウト試験装置を開発し、圧延におけるプレートアウト現象に着目した研究が多数行われている<sup>1.42~1.48</sup>)。間瀬ら<sup>1.43~1.44</sup>)は、プレートアウト時の鋼板温度の増加による粘度低下や蒸気膜の生成がプレートアウト量に影響することを報告している。白井ら<sup>1.42</sup>)はエマルション形態を持つ圧延油のプレートアウト特性と潤滑性能について調査した。W/O/W型の方がO/W型よりも、粒子径が大きく、再乳化しにくいいためプレートアウト量が多いことを示している。また、圧延においても有利であることを確認し、プレートアウト性が優れている方が潤滑性も良好であることを明らかにしている。また、藤田ら<sup>1.45~1.48</sup>)はダイレクト型の実圧延を想定し、プレートアウトに着目した潤滑制御方法を検討している。プレートアウトによって圧延荷重や表面状態が変化することやエマルション供給によってプレートアウトが変化する可能性を示し、プレートアウトとエマルションの動的濃化挙動の理解が実機における潤滑メカニズムの理解に重要であることを述べている。

#### 【油滴の直接的引き込み現象に着目した検討】

一方、プレートアウトと同様にエマルション中の油滴の動的濃化挙動についても検討が行われている<sup>1.2~1.3, 1.49~1.52</sup>)。特に、ガラスディスクとボール間に生じる油膜の光干渉による定量評価や、高速度カメラによる直接観察に関して多くの報告がある。Nakaharaら<sup>1.2~1.3, 1.50</sup>)は、ステンレスロール上にガラスプレート或いはガラスディスクを押し当てて移動/回転させることにより、ロール/ディスク間への油滴の引き込み挙動の観察を行った。ロール/ディスク接触部入り口で、油滴は逆流、滞留、引き込みという3種類のパターンを持ち、それらが速度、濃度によって変化することを見出した。また、油溜まりの生成も明らかにした。他にも、Zhu<sup>1.50</sup>)は光干渉法を用いて油膜厚を測定し、入口部の状況変化により導入油膜厚も変化することを明らかにしている。他にも、O/Wエマルション圧延時の導入油膜厚に与える高圧粘度特性の影響に着目した報告などもある<sup>1.52</sup>)。

#### 【その他の検討】

このような、個々の油導入現象に着目した研究以外にも、金属間の接触部における導入油膜の生成挙動を直接評価する試みも行われている。木村ら<sup>1.5</sup>)は、四円筒型の潤滑評価装置における接触部の接触電気抵抗の変化から油膜形成を把握する方法を考案し、エマルション油使用時の油膜生成機構について提案している。転がり接触部入り口にきた油滴の粒径と固体間の隙間が等しくなったところで二面間にトラップされ、隙間の減少とともに水が排除さ

れ、エマルションの濃度が増加し、油分濃度が 100%になったところで油に圧力が生じるというものである。さらに、スターブ潤滑の理論を用いることによりここで予測した膜厚が X線透過法によって求めた値と一致することを確認している<sup>1.55)</sup>。また、このトラップされやすさ(トラップ率)に着目した報告もある<sup>1.53~1.54)</sup>。ここでは、トラップ率に界面活性剤種による置換エネルギーが影響していることを明らかにしている。

### (c) 圧延機を用いた潤滑現象理解

上記の基礎的な評価装置を用いた潤滑挙動の解明が行われている一方で、Deneuve<sup>1.56~57)</sup>ら、小豆島<sup>1.58)</sup>ら、Dubey<sup>1.59~60)</sup>は、様々な摩擦試験機と圧延機を用いた検討を行い、摺動機構、接触状態、試験条件が異なると圧延時の潤滑挙動を再現できないことから、実際の圧延の潤滑挙動の理解には圧延機の使用が最も適していることを述べている。

圧延機を用いた油導入メカニズムの理解では、中島<sup>1.61)</sup>が圧延機によってエマルション油とニート油による流入機構の違いに着目した検討を行っている。ここでは、ニート圧延の場合ある量までは全て導入されるが、限界以上になると導入量は潤滑あるいは圧延条件で決まること、エマルション圧延の場合は、水或いはエマルション層が導入油量を減少させる可能性があることを示している。また、Reich<sup>1.62)</sup>らは、エマルション中の水分の挙動を理解するため、 $H_2^{18}O$ を用いた圧延を実施した。その結果、圧延後の板には水由来の $^{18}O$ が圧延当初から確認され、ロールバイトには油だけでなく水分も導入される可能性を示した。また、佐伯<sup>1.63)</sup>はニート油であるが、圧延時に実際にロールバイトへの導入される油量測定方法として滴下法を考案し、潤滑油の種類・粘度、圧延速度、ロール径、圧下率、材料の変形抵抗などがロールバイト内への導入油膜厚に影響を与えることを明らかにしている。同様に、圧延界面の油膜挙動を定量的に理解する試みとして蛍光染料と UV 光を用いた蛍光法による検討が小豆島<sup>1.64)</sup>によって行われている。蛍光顕微鏡の高感度 CCD 像を画像処理することにより油膜厚さを見積り、圧延速度によって油膜厚が変化することを定量的に示している。

### (d) 油導入挙動の解析的検討

また、解析的な油導入メカニズムの理解も行われている。水野<sup>1.65~66)</sup>は導入油量を表現するパラメータを提案し、摩擦係数や圧延後の表面粗さがそのパラメータによって定性的に評価できることを示した。また、小豆島らは O/W エマルション圧延時の導入油膜厚について、レイノルズ方程式に基づい

た予測式を導出、提案し、定量的に油膜厚が求まることを実験的に確認している<sup>1.67-75)</sup>。それにより、導入油膜厚と粗さや表面光沢との関係、油滴が機械的に補足される割合を意味するトラップ率の変化などを明らかにした。

このように、圧延においてロール／ストリップ間へと導入される油膜の把握は、接触界面での潤滑挙動や加工後の表面性状を理解する上で重要な課題であると認識され、メカニズム理解のための検討が多数行われてきた。特にニート油に比べ機構が複雑であるが、実生産で多用されている O/W エマルションについて着目された研究も多い。しかし、実際に O/W エマルション圧延時の導入油膜厚を測定した例はなく、基礎的な検討においても圧延の状態を考慮し検討された例はない。さらに、プレートアウトや油滴引き込みのそれぞれについての研究はあるが、両者の関係やそれらが導入油膜厚に与える影響について定量的に評価された例もない。このように、O/W エマルション圧延における潤滑メカニズムの理解はまだ十分とはいえない状況であるが、様々な金属の圧延加工業界において、潤滑は非常に重要な要素技術であり、潤滑制御指針となる潤滑メカニズムの解明は切望されている。

## 1.2 本研究の目的と構成

以上、鉄鋼、非鉄メーカにて行われている圧延工程の潤滑の置かれた状況について述べ、潤滑技術の重要性、高度化の必要性を示した。さらに、様々な研究例を紹介した。現在、圧延業界が直面する課題に対して対応していくには、圧延潤滑技術のレベルアップを避けて通れない状況にあるが、そのためには、圧延潤滑メカニズムの理解を深め、圧延潤滑性や製品品質の制御可能性を明らかにして、その方向性を示す指針を構築することが必要である。

そこで、本研究では、特に国内外の圧延工程で多用されている O/W エマルションのロールバイトへの油導入現象に着目し、新たに基礎的な EHL 試験機による油膜厚形成挙動の評価方法【第 2 章】と小型圧延機による圧延時の油膜形成挙動の評価手法【第 3、4 章】を考案することによりメカニズムの解明を試みた。さらに、得られた知見をもとに、圧延時の潤滑性や表面性状の制御可能性を見極め、実圧延を想定した操業指針の確立に取り組んだ【第 5 章】。

2 章以下の各章について概要を述べる。

### 【第 2 章】

本章では、O/W エマルションのロールバイトにおける油膜形成挙動を理解

する方法として、光干渉システムを持つディスクオンボール試験機を用いて油滴の挙動や導入油膜の直接評価、観察を行った。さらに、プレートアウトと O/W エマルション条件を個々に制御できる方法を考案し、既報の油膜形成挙動ではなく、プレートアウトと油滴引き込みの関係に着目した油膜形成挙動について調査を行った。

### 【第 3 章】

2 章ではプレートアウト、油滴引き込み、導入油膜に関係があることが明らかになった。しかし、実際の圧延を想定した場合、使用される材質の違い、圧力、速度等の実験条件、塑性変形の有無など、ディスクオンボール試験機とは異なる点が多々ある。そこで、本章では、圧延における導入油膜厚形成メカニズム理解のために、導入油膜厚測定を行う方法としてトレーサ法を新たに考案し、エマルション性状が導入油膜厚に与える影響について調査した。

### 【第 4 章】

3 章では、圧延時の導入油量が定量的に求まり、エマルション性状、圧延潤滑条件との関係が明らかになった。ここで、導入油膜測定時のプレートアウト量が求まれば両者を比較することにより、圧延時のプレートアウト、油滴引き込み、導入油膜の関係が明らかになると考えられる。そこで、圧延ロールに付着するプレートアウト量測定法を考案し、エマルション性状、圧延潤滑条件との関係を調査した。さらに、導入油膜厚との関係を調べる上でロールバイト入り口部の油膜厚（入側油膜厚）に着目し、入側油膜厚とプレートアウトの関係を調査した。

### 【第 5 章】

2~4 章の調査から、O/W エマルション圧延時の油導入形成メカニズムを提案した。このメカニズムに対して小型圧延機を用いた検証と実圧延における圧延潤滑性、表面性状制御の可能性について調査した。

### 【第 6 章】

各章の結果について総括し、実圧延への展開について述べた。本研究では、O/W エマルション圧延時の油導入メカニズムを提案し、それに基づいた圧延条件適正化により圧延潤滑性や表面性状の制御可能性について示した。

尚、本論文で述べる圧延時の潤滑性（圧延潤滑性）の制御とは、圧延時の荷重や摩擦係数を制御することであるが、その指標として主に摩擦係数と相関を持つ先進率を用いた。尚、ロールバイト内にロール周速と材料速度が一致する中立点が存在する。この中立点より出口側は先進域と言い、 $(\text{出口材料速度} - \text{ロール速度}) / (\text{ロール速度})$  を先進率と呼ばれる。また、実生産

を想定した場合、製品の表面品質が重要であるが、その指標としては実圧延でも使用されている圧延後板表面の光沢度（60° 反射率）を用いた。



## 参考文献

- 1.1 塑性加工におけるトライボロジー 社団法人日本塑性加工学会編 コロナ社
- 1.2 中原・塩川・京極：O/Wエマルション潤滑の転相領域, トライボロジスト, 35, 12 (1990)907.
- 1.3 中原：エマルションの流体潤滑機構, トライボロジスト, 40, 8 (1995)644.
- 1.4 W.L.Roberts : Friction in the Cold Rolling of Steel Strip, Friction and Lubrication in Metal Processing, New York. ASME, (1966)103.
- 1.5 Y. Kimura & K. Okada : Elastohydrodynamic Lubrication with Oil in Water Emulsions, Proc. JSLE. Int. Trib. Conf., Tokyo (1985) 937.
- 1.6 板圧延の理論と実際 (改訂版) 社団法人日本鉄鋼協会
- 1.7 木村・岡田：鋼板の冷間圧延におけるヒートストリークの発生に関する研究Ⅲ O/W エマルション潤滑における焼付きの発生, 潤滑, Vol.30, No.4 (1985) 282.
- 1.8 木村・岡田：鋼板の冷間圧延におけるヒートストリークの発生に関する研究Ⅱ ころがり-すべり接触における O/W エマルションの潤滑特性, 潤滑, Vol.30, No.4 (1985) 274.
- 1.9 小豆島・D.W.Xeu：熱間圧延の摩擦係数に及ぼす潤滑油因子の影響と潤滑メカニズムの解明, 鉄と鋼, Vol.93, No.11, (2007) 681.
- 1.10 A.Shirizly, J.G.Lenard : Use of Lubricants and Emulsions During Hot Rolling of Carbon Steel, Mech. Work Steel Process, Vol.36 (1998) 489.
- 1.11 今江・金成：ラボミルによる熱間圧延用潤滑剤の性能評価, 日本鉄鋼協会創形創質工学部会シンポジウム, No.1327 (1997) 15.
- 1.12 R.Reich, N Panseri, J.Bohaychick : The Effects of Lubricant Starvation in the Cold Rolling of Aluminum Metal When Using an Oil-In-Water Emulsion, Lubr. Eng., Vol.57, No.4 (2001) 15.
- 1.13 池田・秦・村尾・市本：アルミニウム板の熱間圧延用 DP 型圧延油の潤滑特性, 神戸製鋼技報, Vol.56, No.1 (2006) 54.
- 1.14 A. Shirizly, J.G. Lenard, J.Sauer, K.Januszkiewicz : Lubricant Capture During Hot Rolling of an Aluminum Alloy, Tribol. Trans., Vol.45, No.2 (2002) 205.
- 1.15 池田・松井・柴田：アルミ冷間圧延における潤滑特性に及ぼす Cr めっきロールの影響第2報 Cr めっきロールの潤滑特性へ及ぼす圧延条件の影響, 塑性加工連合講演会講演論文集, Vol.48<sup>th</sup> (1997) 587.
- 1.16 小豆島・千田・中川：アルミ箔圧延の潤滑に関する研究Ⅱ ヘリンボーン発生に及ぼす潤滑因子の影響, 塑性加工連合講演会講演論文集, Vol.39<sup>th</sup> (1988) 569.
- 1.17 小豆島・千田・中川：アルミ箔圧延の潤滑に関する研究Ⅰ 表面性状に及ぼす潤滑因子の影響の基礎検討, 塑性加工春期講演会講演論文集, Vol.1987 (1987) 111.

- 1.18 吉田・平野・南：アルミニウム熱間圧延油に関する研究Ⅰ 圧延油組成,エマルジョン性状が潤滑性に及ぼす影響, 潤滑, Vol.28, No.3 (1983) 214.
- 1.19 吉田・平野・南：アルミニウム熱間圧延油に関する研究Ⅱ エマルジョンの経時変化が潤滑性に及ぼす影響, 潤滑, Vol.28, No.4 (1983) 273.
- 1.20 吉田・平野・南：アルミニウム熱間圧延油に関する研究Ⅲ 熱板におけるエマルジョン浮上温度, 潤滑, Vol.28, No.12 (1983) 903.
- 1.21 吉田・平野・南：アルミニウム熱間圧延油に関する研究Ⅳ ロールコーティングの評価, 潤滑, Vol.30, No.6 (1985) 438.
- 1.22 吉田・鈴木・倉知：アルミニウム熱間圧延油に関する研究Ⅴ 圧延油組成,エマルジョン性状がロールコーティングに及ぼす影響, 潤滑, Vol.30, No.7 (1985) 492.
- 1.23 T.Kurachi, T. Yoshida & K. Suzuki : Influence of Oil Composition and Emulsion Properties on the Rollcoating Buildup During Hot Rolling of Aluminum, Lubr. Eng., Vol.43, No.8, (1987) 660.
- 1.24 R.Reich, J.Wise, R.Colbert : The Effectiveness of Boundary and Hydrodynamic Lubrication when Cold Rolling Aluminum Metal, Tribol Trans, Vol.51, No.5 (2008) 627.
- 1.25 五十嵐・今泉・柴田：銅および同合金に対するエーテル化合物の圧延潤滑効果について（その1）,銅と銅合金, Vol.43 (2004) 192
- 1.26 今泉・五十嵐・柴田：銅および同合金に対するエーテル化合物の圧延潤滑効果について（その2）,銅と銅合金, Vol.43 (2004) 197
- 1.27 柴田・五十嵐・今泉：銅および同合金に対するエーテル化合物の圧延潤滑効果について（第3報）,銅と銅合金, Vol.44 (2005) 103
- 1.28 志渡・小野寺・川並：チタンの冷間圧延における潤滑に関する研究, 塑性加工連合講演会講演論文集, Vol.44<sup>th</sup>, No.1 (1993) 387.
- 1.29 福田：チタン及びチタンの圧延加工,軽金属,Vol.55, No.11 (2005) 544.
- 1.30 馬場・岩崎：冷間圧延における潤滑と表面, 塑性と加工, Vol.13, No.139 (1972) 609.
- 1.31 山本・白石・井上・阿高・中島：ステンレス鋼の冷間圧延における板表面の光沢の形成 ステンレス鋼の冷間圧延潤滑の研究 第1報, 塑性と加工, Vol.33, No.381 (1992) 1190.
- 1.32 青木・野呂・小豆島：ブリキ板の調質圧延における表面性状と潤滑油挙動, Vol.94, No.10 (2008) 438.
- 1.33 ステンレス鋼の冷間圧延潤滑に関する研究Ⅱ 短ざく及びコイル圧延における添加剤の影響, 塑性加工春期講演会講演論文集, vol.1986 (1986) 167.
- 1.34 小豆島・木原・五弓：冷間圧延における圧延後の試料の表面性状 冷間圧延における摩擦と潤滑の研究Ⅱ, 塑性と加工, Vol.18, No.196 (1977) 337.

- 1.35 小豆島・井柳・野呂：冷間圧延のエマルション潤滑における表面性状の研究 I 表面性状に及ぼす圧延速度、潤滑油粘度の影響，塑性加工連合講演会講演論文集，vol.37th (1986) 453.
- 1.36 A.K.Tieu, P.B.Kosasih : Experimental and numerical study of O/W emulsion lubricated strip rolling in mixed film regime, Tribol. Lett., Vol.25, No.1 (2007) 23.
- 1.37 P.B.Kosasih, A.K.Tieu : Mixed film lubrication of strip rolling using O/W emulsion, Tribology int., Vol.40, No.5 (2007) 709.
- 1.38 山本・中島・川並・柴田：冷間圧延の摩擦係数解析に関する研究 I 混合潤滑域における圧延の摩擦係数解析，塑性と加工，Vol.24, No.272 (1983) 967.
- 1.39 山本・友清・荒谷・井上・渡邊：鋼の冷間圧延の潤滑機構に及ぼす圧延潤滑油の粘度の影響，塑性と加工，Vol.37, No.422 (1996) 265.
- 1.40 S.R.Schmid, W.R.D.Wilson : Lubrication of Aluminum Rolling by Oil-in-Water Emulsions, Tribol. Trans., Vol.38, No.2 (1995) 452.
- 1.41 S.R.Schmid, W.R.D.Wilson : Lubrication Mechanisms for Oil-In-Water Emulsions, Lubr. Eng., 52, 2 (1996) 168
- 1.42 白田・酒井：鋼用冷間圧延油のプレートアウト性と潤滑性について，潤滑，vol27, No.8 (1982) 594.
- 1.43 間瀬・河野・山本：冷間圧延の潤滑特性に関する検討，第 28 回塑性加工連合講演会 (1977) 114
- 1.44 間瀬・河野・山本：冷間圧延油のプレートアウト性に関する検討，鉄と鋼，64, 11 (1978) 250
- 1.45 木村・藤田・西浦・曾谷：エマルション圧延油のプレートアウト特性，平成 24 年度塑性加工春期講演会講演論文集，(2012) 159
- 1.46 藤田・松原・木村・曾谷：エマルション圧延油の高効率プレートアウト技術，平成 24 年度塑性加工春期講演会講演論文集，(2012) 161
- 1.47 藤田・松原・木村・曾谷：実験圧延機を用いたプレートアウトによる潤滑制御，平成 24 年度塑性加工春期講演会講演論文集，(2012) 163
- 1.48 藤田・木村：冷間圧延における潤滑特性に及ぼすプレートアウト量の影響，鉄と鋼，vol.97, (2011) 32
- 1.49 黒田・伊藤・宮田・伊藤：水中液滴エマルションの潤滑特性，日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集 (2000) 1033
- 1.50 D. Zhu, G. Biresaw, S. J. Clark and T. J. Kasun : Elastohydrodynamic Lubrication with O/W Emulsions, Trans. ASME, J. of Trib. 116 (1994) 310-320
- 1.51 T. Nakahara, T. Makino & K. Kyogoku : Observations of Liquid Droplet Behavior and Oil Film Formation in O/W Type Emulsion Lubrication, Trans. ASME, J. of Trib. , 110 (1988) 348.
- 1.52 東崎・松本・森本・梶原・中野：エマルションの弾性流体潤滑 (EHL) 特性を考慮した冷間圧延潤滑メカニズム，三菱重工技報，Vol.29, No.1 (1992) 18
- 1.53 益子・岡田：O/W エマルションのトライボロジー，トライボロジスト，Vol.36,

No.5 (1991) 369

- 1.54 木村・岡田・橋爪：O/W エマルションの EHL 膜形成に及ぼす界面活性剤の影響，日本潤滑学会第 31 回全国大会（名古屋）予稿集（1986）341.
- 1.55 木村・岡田：X線透過法による O/W エマルションの EHL 膜厚測定，トライボロジスト，34, 3 (1989) 200.
- 1.56 P. Deneuille : On the Use of Laboratory Friction Tests to select Lubricants for Cold Rolling of Aluminum Alloy, Lubr. Eng., Aug (1999) 28.
- 1.57 P. Deneuille, P Charbonnier & J. C. Ravey : Phase Diagrams of a Cold Rolling Emulsion for Aluminum, Lubr. Eng., 51 (1995) 629.
- 1.58 小豆島・宮川：冷間圧延用潤滑油の潤滑性及び耐焼付き性の評価，塑性と加工，Vol.25, No.285 (1984) 915.
- 1.59 S.P.Dubey, G.K.Sharma, K.S.Shishodia, & G.S. Sekhon : A Study of Lubrication mechanism of Oil-in-Water (O/W) Emulsions in Steel Cold Rolling, Int Lubr Tribology, Vol.57, No.5 (2005) 208.
- 1.60 S.P.Dubey, G.K.Sharma, K.S.Shishodia, & G.S. Sekhon : Study on the Performance of Oil-in-Water Emulsions during Cold Rolling of Steel Strip, Tribol. Trans., Vol.48, (2005) 499.
- 1.61 中島・柴田・上堀：エマルジョンを用いた冷間圧延における圧延油の流入特性，昭和 54 年度塑性加工春期講演会講演論文集，(1979) 379.
- 1.62 R. A. Reich, J. M. Epp & R. P. Festa : A Method to Study the Mechanism of Lubrication with O/W Emulsions in Cold Rolling Aluminium Using  $H_2^{18}O$ , SIMS and TOF-SIMS, Lubr. Eng., 50, 1 (1994) 31.
- 1.63 佐伯・橋本：圧延時の油膜厚み－薄板冷間圧延の潤滑油に関する研究・第 3 報，塑性と加工，8,72 (1967) 34.
- 1.64 小豆島・夏井・稲垣・菅井：蛍光法による冷間圧延材料表面上の油膜計測による潤滑挙動の解明，鉄と鋼，Vol.86, No.11 (2000) 755.
- 1.65 水野：冷間圧延に関する実験 第 1 報・潤滑条件の推定，塑性と加工，Vol.7, No.66 (1966) 383.
- 1.66 水野：冷間圧延に関する実験 第 2 報・潤滑条件因子としてみた理論油膜厚さ，塑性と加工，Vol.7, No.68 (1966) 447.
- 1.67 小豆島・木原・五弓：冷間圧延における油膜厚みの解析と測定 冷間圧延における摩擦と潤滑の研究Ⅲ，塑性と加工，Vol.19, No.214 (1978) 958.
- 1.68 小豆島・北村：定常変形加工における入口油膜厚み，塑性加工春期講演会論文集，vol.1986 (1986) 151.
- 1.69 小豆島・野呂・井柳：冷間圧延のエマルション潤滑における表面性状の研究Ⅱ

ケン化価,エマルション濃度・粒径,乳化剤量の影響,塑性加工春期講演会講演論文集, vol.1987 (1987) 115.

- 1.70 小豆島・野呂・井柳：冷間圧延のエマルション潤滑における表面性状の研究Ⅲ エマルション潤滑における入側油膜厚みの解析, 塑性加工連合講演会講演論文集, vol.39th (1988) 557.
- 1.71 小豆島・浅場・井柳：冷間圧延のエマルション潤滑における表面性状の研究Ⅳ 入口油膜厚み解析結果の定量的検討, 塑性加工春期講演会講演論文集, vol.1989 (1989) 711.
- 1.72 小豆島・野呂・井柳：冷間圧延におけるエマルション潤滑に関する研究（第1報）エマルション潤滑における圧延後の表面性状と導入油量, トライボロジスト, 34, 12 (1989) 879
- 1.73 小豆島：表面粗さを考慮に入れた油膜厚みの解析と測定 冷間圧延における摩擦と潤滑の研究Ⅴ, 塑性と加工, Vol.36, No.414 (1995) 737.
- 1.74 小豆島・野呂：エマルション潤滑における入口油膜厚みの解析と定量的検討 冷間圧延における摩擦と潤滑の研究Ⅵ, 塑性と加工, Vol.39, No.455 (1998) 1238.
- 1.75 稲垣・小豆島：冷間圧延のエマルション潤滑におけるトラップ率に及ぼす潤滑条件の影響, 塑性と加工, Vol.50, No.576, (2009) 54.

## 2. 光干渉法を用いたプレートオンボール間のプレートアウトと油滴引き込み現象の関係

### 2.1 概説

前章で述べたように、鉄鋼の冷間圧延やアルミの熱間圧延などでは O/W 型のエマルションが使用されている。また、圧延における潤滑は生産性、表面品質に直接影響を与える重要な要素となっている。O/W 型エマルション圧延時の潤滑メカニズムを理解する上では、プレートアウトと油滴の引き込み現象が重要である。一方、プレートアウトに着目した研究は比較的实验が容易であることもあり多くの報告がある<sup>2.1-7)</sup>が、油滴の直接的な引き込み挙動については十分な検討が行われていない。これまでも、ガラスディスクと金属ロール間の油膜厚を光干渉で測定する方法を用いて O/W エマルションにおける油滴引き込み挙動の理解が行われてきた<sup>2.8-12)</sup>。しかし、これらは O/W エマルションを供給し続ける中で油膜の生成挙動を調べたものである。Fig.1.8 に示すように、供給されたエマルションは直接引き込まれる油滴の供給源となるだけでなく、その油滴によってプレートアウトも生じさせる。そのため、エマルション中の油滴の引き込み挙動だけでなく、それによって生じたプレートアウトも混在した状態で検討されたことになる。つまり、プレートアウトと油滴の引き込みを切り分けて、油滴引き込み自体の挙動や油膜生成における両現象間の関係について調べられた報告はないといえる。そこで、本章ではプレートアウトと油滴導入を独立して評価できる方法を考案し、O/W エマルション使用時のガラスディスクと金属ボール間の油膜形成挙動を光干渉法と高速度カメラにより調査した。

### 2.2 実験

#### 2.2.1 弾性流体潤滑理論

ここで、本実験システムの基本となっている弾性流体潤滑理論<sup>2.13)</sup>について述べる。荷重を受けている面積が極めて小さい歯車、転がり軸受けの転送面、トラクションドライブの接触部では、高圧のために固体表面の弾性変形と、潤滑油の粘度の圧力による変化の2つの効果によって、表面粗さに相当するサブマイクロメートル程度の油膜厚さが形成される。このような状態を

弾性流体潤滑（Elasto-Hydrodynamic Lubrication 略して EHL）と呼び、その理論を弾性流体潤滑理論あるいは EHL 理論と呼ぶ。尚、実際の圧延機においても EHL 理論による導入油膜の予想も可能であるが、O/W エマルジョンを潤滑剤として使用する場合、エマルジョンの流動特性から予想よりも厚い油膜が形成される等 EHL 理論だけでは説明できないとされている<sup>2.14)</sup>。

## 2.2.2 光干渉法

光干渉法とは、半透被膜を有するガラス面に相対する金属面との間の油膜を、ガラス板越しに光を入射させ観察した際に、ガラス面と鋼球面で反射した光との干渉により発生した干渉縞から油膜厚を求める方法で、EHL 膜厚測定などに用いられる最も一般的な方法である<sup>2.15)</sup>。特徴としては、接触部における油膜厚分布が得られることや光の波長を基準としているため測定値の信頼度が高いことが挙げられる。光干渉法の概略図を Fig2.1 に示す。

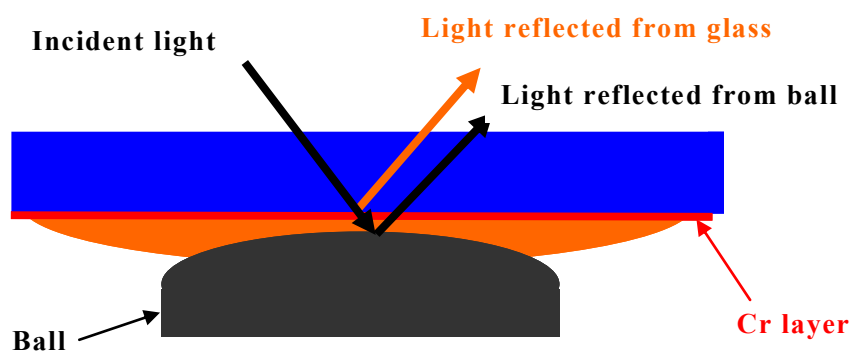


Fig. 2.1 光干渉法

## 2.2.3 実験装置

本研究で設計製作した実験装置の外観を Fig.2.2 に示し、模式図を Fig.2.3 に示す。この実験装置は Disk on Ball 型を採用し、導入油膜は回転するボールとディスク間で形成され、光干渉法により油膜厚測定を行う。詳細は後述するが、光干渉には 2 色波長光と白色光の 2 種類を行った。測定に使用した高速度カメラはキーエンス製 VW-9000、光源には分光計器製 SM-2WF 2 単色光同時照射装置を使用した。白色光による膜厚測定には、分光器として 2 次元領域の連続的な多数点の分光データの採取を可能とするイメージング分光器(JFE テクノリサーチ ImSpector)を用いた。ディスクには、硬度、耐熱性、透過度に優れているサファイアガラス（ $\phi$ 180mm、厚さ 15mm）を用いた。サ

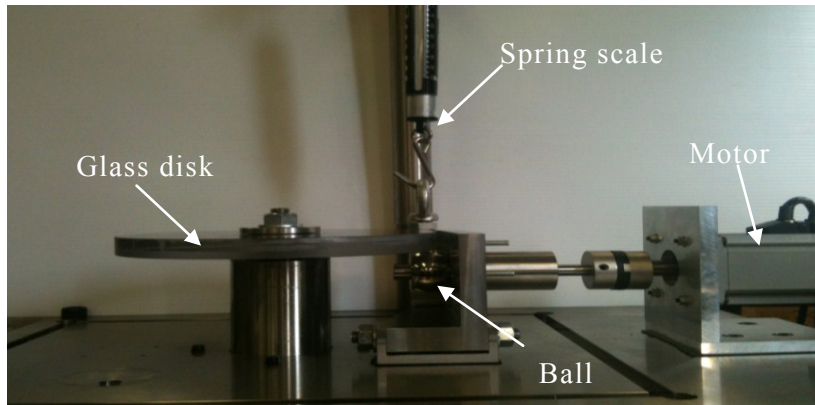


Fig. 2.2 実験装置外観

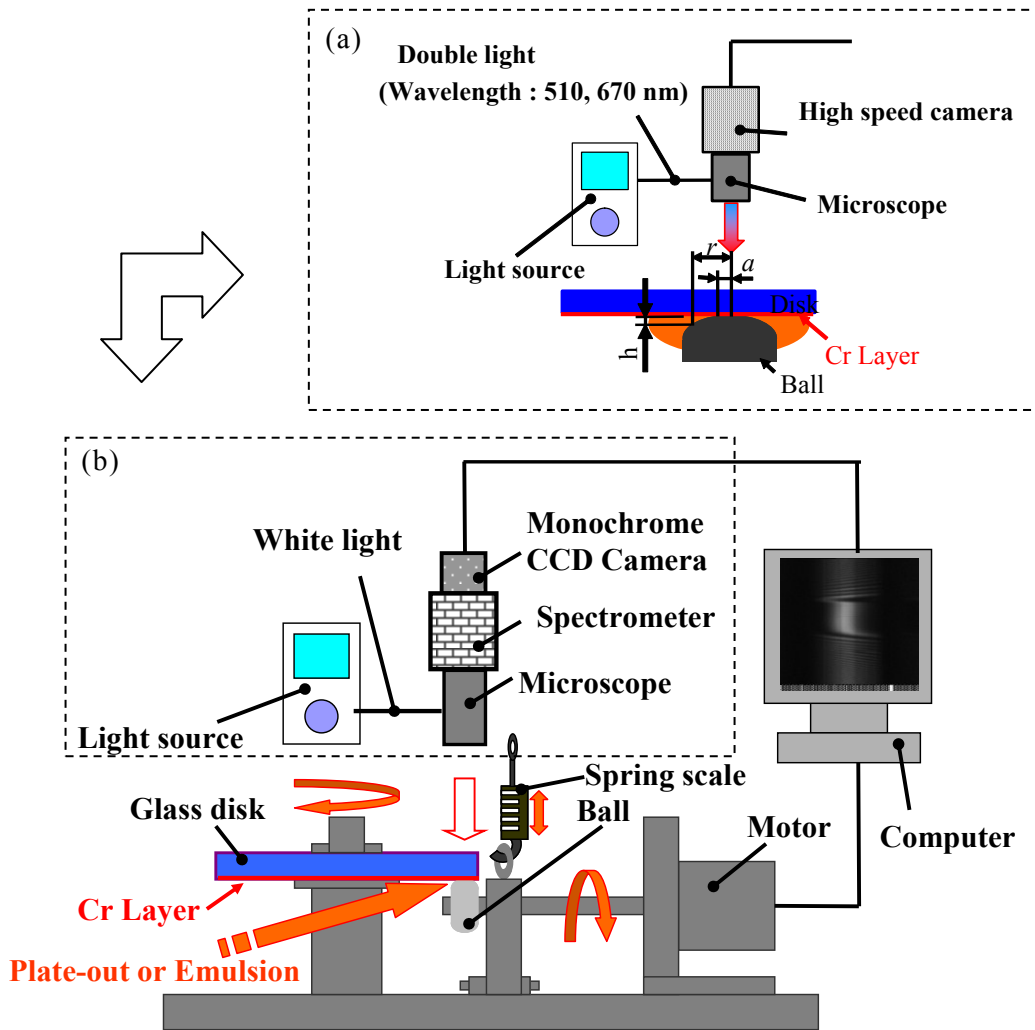


Fig. 2.3 実験装置



ファイアガラスには、光干渉法を実現するため Cr コーティングを施しており、また反対面には反射光の散乱を防ぐ反射防止剤を凝着させている。サファイアガラスは波長 550 nm を透過率 45 % で透過できるようにコーティングを施した。ボールには SUS403 (φ40 mm) を用いた。

本実験装置の仕組みを説明する。ボールは軸、カップリングを介してサーボモータにより駆動させる。ボールの土台をバネばかりによって上下させてディスクと接触させることにより荷重をコントロールする。ボールとディスクを接触させた状態でボールを回転させ、接触面の摩擦によりディスクを同速度・同方向に回転させる。ボールとディスクを接触、回転させた状態で、接触部分にノズルによりニート油・エマルションを供給することにより、圧延機のロールバイト近傍を再現した。尚、2 色波長光を用いた場合には、供給直後に接触部分の真上から高速度カメラで観察し、導入油膜厚を測定した (Fig.2.3a)。白色光を用いた場合には、光を真上から接触部に入射させ、接触部で干渉した光を顕微鏡、分光器を通して得られる分光像を CCD カメラで 1 フレーム毎に撮影し、コンピュータに保存した。これを分光像画像解析によって膜厚を求めた (Fig.2.3b)。

実際の圧延機は、ノズルによりエマルション供給を行うことでプレートアウトを生成し、油滴引き込みを行う。しかし、本実験では、Disk on Ball 型装置を採用したため、エマルション供給によるプレートアウト生成の実現が難しい。そこで、エマルション中の油をニート油の状態ですべて事前にガラスディスク上に供給し、付着膜厚を制御することでプレートアウトとした。また、その後、ディスクとボールの接触部にエマルションを噴霧し油滴供給を行うことで圧延の状態を再現した。

## 2.2.4 エマルション調整方法

エマルションに用いた基油は、タービン油 (32cSt/40°C) を使用した。希釈水には蒸留水、添加剤にはオレイン酸 (3mass%) を使用した。O/W エマルションは、蒸留水に数%の油を入れハンディミキサーで攪拌した。エマルション粒径はハンディミキサーの強さとミキシング時間で調整した。エマルション粒径の測定には、電気的検知帯方式粒度分布測定装置 (ベックマンコールター社製マルチサイザー III、測定誤差±0.6μm 以内) を使用した。この測定結果から、本実験に使用するエマルション条件を決定した。Table 2.1 に本実験で使用したエマルション性状を示す。以後エマルション性状は A~I と表記する。

Table 2.1 エマルジョン条件

Emulsion	Concentration [mass%]	Particle size[ $\mu\text{m}$ ]
A	1	20
B	1.5	20
C	2	20
D	4	15
E	4	20
F	4	30
G	6	20
H	8	20
I	10	20

## 2.2.5 光干渉法による測定方法

### 2.2.5.1 2色波長光による膜厚測定

導入油膜厚測定方法として光干渉法を採用したが、まず、2色波長光を用いた検討を行った。膜厚測定方法を以下に示す。ガラスディスクとボールを静的弾性接触させ、その接触部分に2波長光を照射する。今回の装置では、100 Wのキセノンランプを使用し、波長を550 nm、670 nmの二波長光だけを照射した。生じる干渉縞をFig.2.4に示す。Fig.2.4より、接触円半径  $a$  とそれぞれの干渉縞までの長さ  $r$  を測定し、式(2.1)に代入することで、干渉縞色と膜厚  $h$  の校正値を算出した。その結果をTable 2.2に示す。また運転状態の接触部分の写真をFig.2.5に示す。この校正値とFig.2.5の中央部の色を対応させて導入油膜厚を決定した。

$$h = \frac{aP_{\max}}{E'} \left\{ - \left( 2 - \frac{r^2}{a^2} \right) \cos^{-1} \frac{a}{r} + \left( \frac{r^2}{a^2} - 1 \right)^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (2.1)$$

$a$  : 接触円半径 ( $a=129.56\mu\text{m}$ )

$r$  : 接触円中心からの距離

$P_{\max}$  : 最大ヘルツ圧力 ( $P_{\max}=3P/2 \pi a^2=568 \text{ MPa}$ )

$P$  : ボールの押付け力 ( $P=20\text{N}$ )

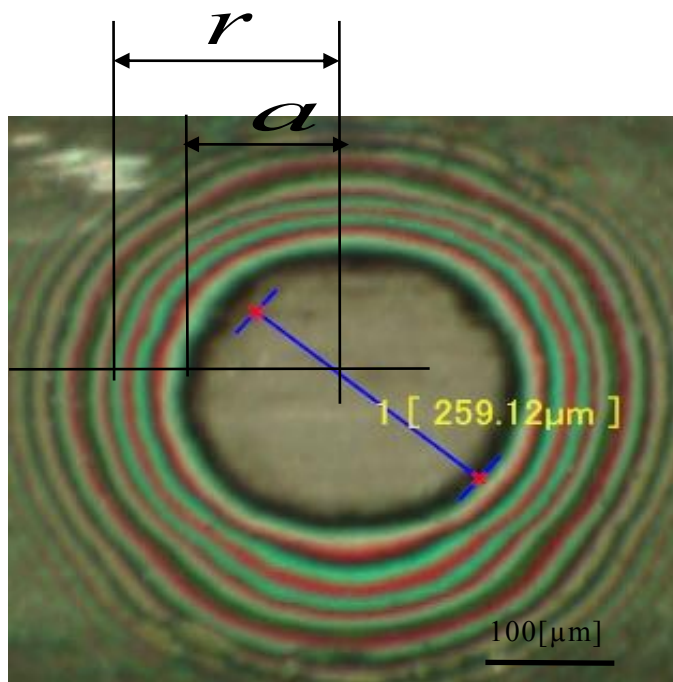
$$E' : \text{等価弾性係数 } \frac{1}{E'} = \frac{1}{2} \left( \frac{1-\gamma_1^2}{E_1} + \frac{1-\gamma_2^2}{E_2} \right) \quad (E'=287\text{GPa})$$

$E_1, \gamma_1$  : ディスクの弾性係数、せん断ひずみ ( $E_1=420\text{GPa}$ ,  $\gamma_1=0.32$ )

$E_2, \gamma_2$  : ボールの弾性係数、せん断ひずみ ( $E_2=205\text{GPa}$ ,  $\gamma_2=0.30$ )

Table 2.2 干渉縞の色と隙間距離

Fringe color	Clearance[ $\mu\text{m}$ ]
1 <sup>st</sup> White	0.000
1 <sup>st</sup> Black	0.009
1 <sup>st</sup> Green	0.036
1 <sup>st</sup> Yellow	0.075
1 <sup>st</sup> Red	0.175
2 <sup>nd</sup> Black	0.204
2 <sup>nd</sup> Green	0.261
2 <sup>nd</sup> Red	0.338
3 <sup>rd</sup> Green	0.426
3 <sup>rd</sup> Black	0.523
3 <sup>rd</sup> Red	0.562
4 <sup>th</sup> Green	0.714
4 <sup>th</sup> Black	0.771
2 <sup>nd</sup> Yellow	0.906



接触部直径：259.12 $\mu\text{m}$

Fig. 2.4 接触部（静止時）

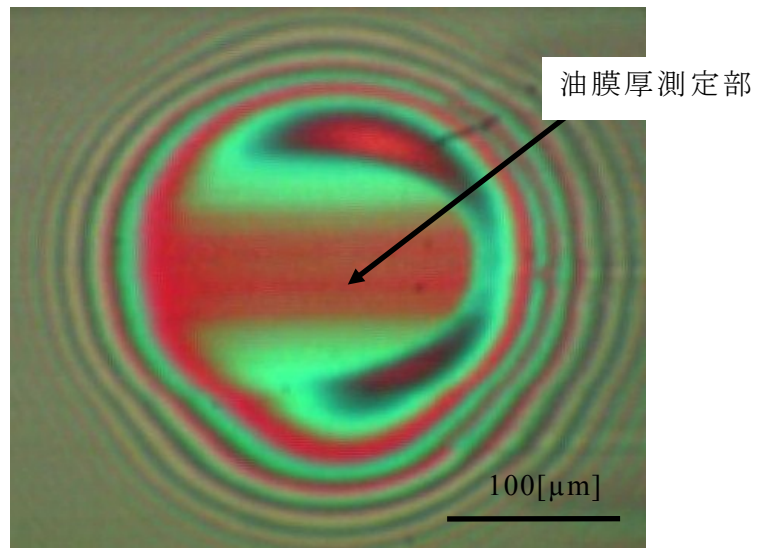


Fig. 2.5 接触部（回転時）

### 2.2.5.2 白色光による膜厚測定<sup>2.16)</sup>

2色光を用いることによりある程度の膜厚予測は可能になったが、例えば1st Yellowと1st Redの間では $0.1\mu\text{m}$ の間隔があり、油膜厚の変化を詳細に把握する上では分解能は十分でないと言わざるを得ない。そこで、もう一つの方法として白色光による膜厚測定について検討を試みた。ディスクとボールの接触部へ白色光を照射した場合、Fig.2.6に示すような干渉縞が生じる。ここで、最も強く干渉している波長を、分光機を通して得られる画像から特定し、油膜厚さを算出した<sup>2.17)</sup>。

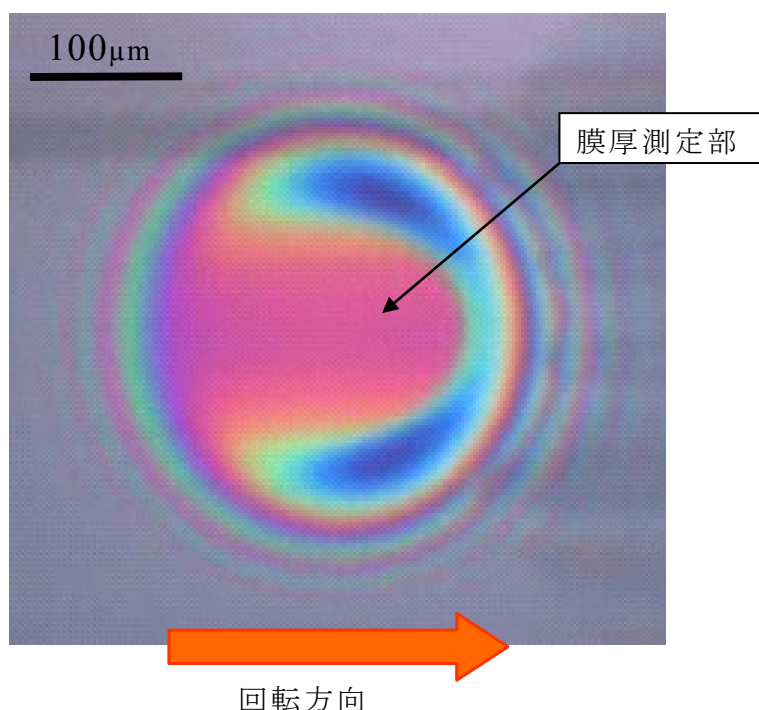


Fig.2.6 接触部（回転時）

本実験における分光計測は、滑り方向に平行な接触域直径を通る線分上において行った。Fig.2.7に回転速度 $2.5\text{m/s}$ における分光像の一例を示す。図の横軸は干渉光の波長、縦軸は接触域の滑り方向の距離である。この分光像の画像解析から光の強度分布を求め、最も強く干渉している光の波長を測定する。分光像は $640\times 480\text{pixel}$ で構成されており、波長の分解能は $0.945\text{nm/pixel}$ で、横軸に表示される波長は約 $280\sim 900\text{nm}$ である。Fig.2.7に示した分光像において、接触部の中央部分を画像解析して得られた光の強度分布をFig.2.8に示す。この分布において、強度が最大時の波長が最も強く干渉している波

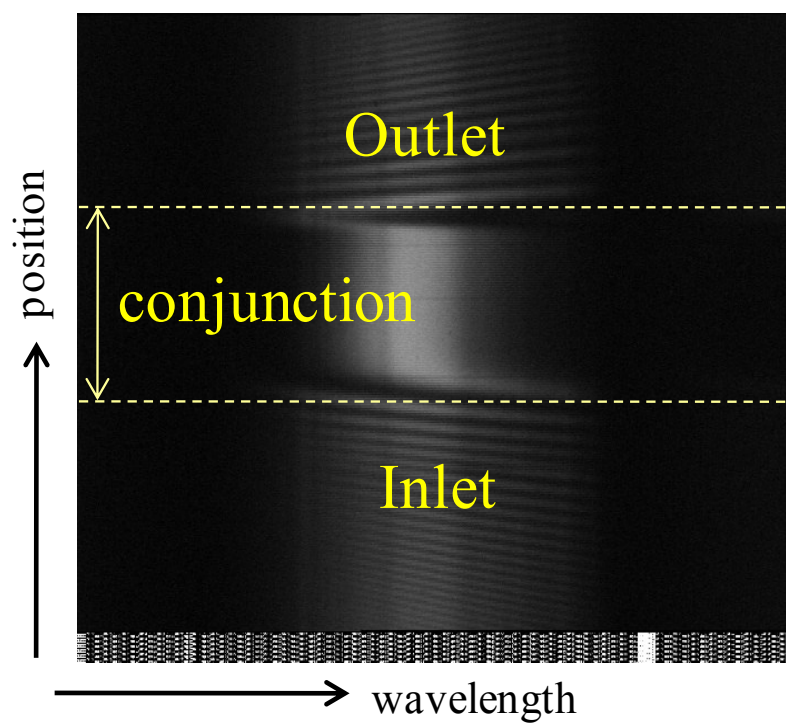


Fig.2.7 分光像

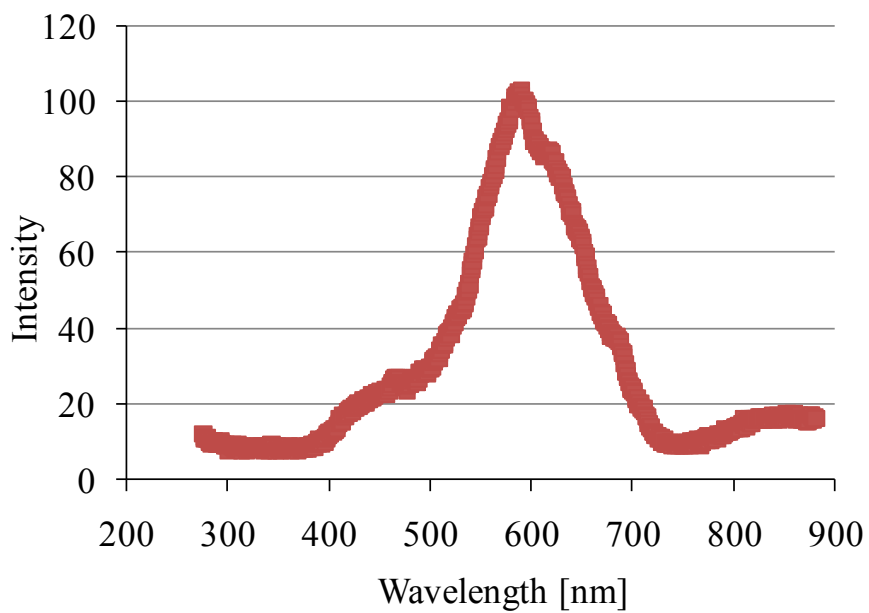


Fig.2.8 波長の強度分布

長になる。ここで、最も強く干渉している波長  $\lambda_{max}$  を式 (2.2) に代入し、膜厚  $h$  を算出した。

$$h = \frac{(N - \phi)\lambda_{max}}{2n} \quad (2.2)$$

$n$  : 潤滑油の屈折率,  $n=1.47$

$N$  : 干渉縞次数,  $N=1,2,\dots$

$\phi$  : 位相差,  $\phi = \frac{m\lambda - 2nt \cos \theta}{\lambda}$

$m$  : 干渉縞次数,  $m=1,2,\dots$

$\lambda$  : 平均入射波長,  $\lambda=590\text{nm}$

$\theta$  : 入射角,  $\theta=0^\circ$

$E'$  : 等価弾性係数,  $E'=287\text{GPa}$

$\lambda_{max}$  : 最も強めあう光の波長

### 2.2.5.3 本論文における油膜厚の表現方法

ディスクとボール間の油膜厚については、白色光の方が精度良く測定できることから、本論文における膜厚測定値については白色光を用いた結果を示すこととする。一方、白色光による膜厚測定では分光像しか得られないが、視覚的に理解を深める上で、同一条件下における2色波長光の干渉像をその時の接触状態として併記することとした。

## 2.3 実験結果及び考察

### 2.3.1 プレートアウトの制御方法

今回の実験ではプレートアウトとエマルジョンを独立してコントロールしなければならない。そこで、プレートアウトについては、ニート油をディスク上に一旦塗布したあと、脱脂綿を用いて拭き取ることにより調整した (Fig.2.9)。本手法によってプレートアウト量をコントロールした際の導入油膜厚の変化を Fig. 2.10 に示す。このときの試験条件は回転速度 2.5m/min、荷重 20N、油粘度 32cSt/40°Cである。ディスク上の付着油膜量が十分ある状態 (以下、フラッド潤滑状態) の場合、導入油膜厚は本試験条件で決まる膜厚  $0.344\mu\text{m}$  で一定である。しかし、付着量を徐々に減らしていくと、ある地点を境として導入油膜厚が減少を始める。これは、本来導入される油膜をプレートアウトだけでは補うことができない状態 (以下、スターブ潤滑状態) にあることを意味する<sup>2,18~23)</sup>。また、スターブ潤滑状態になると付着量の減少と共に導入油膜厚は減少していくことが示された。このように、本試験機を用いてプレートアウト量によるディスク/ボール間接触部入側の油供給状態のコントロールができた。

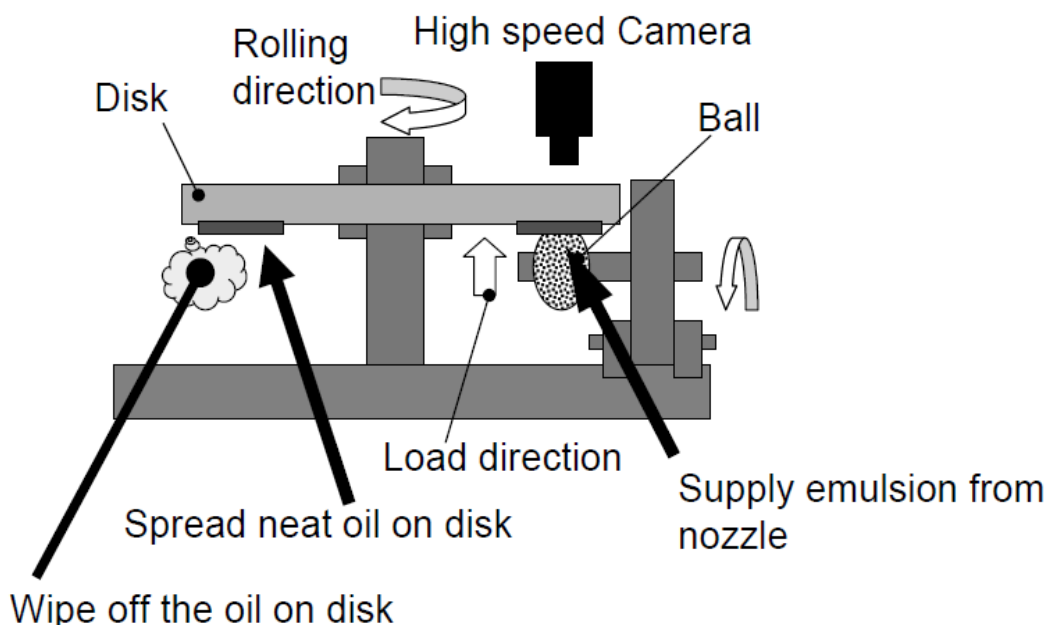
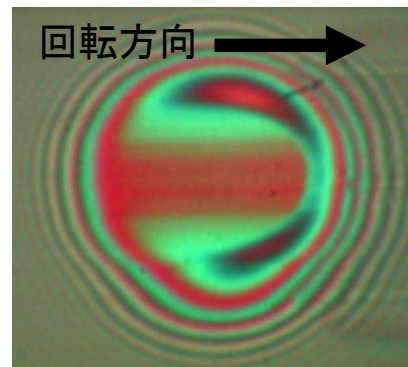


Fig. 2.9 プレートアウト量のコントロール方法



速度:2.5[m/sec]  
荷重:20[N]  
油: 鉱物油  
(オレイン酸3%含)  
油粘度:32[cSt/40°C]



0.344 [μm]

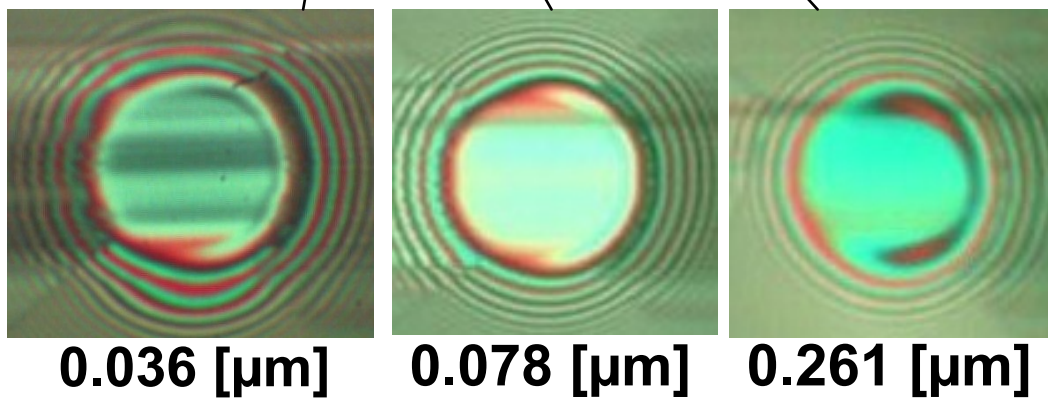
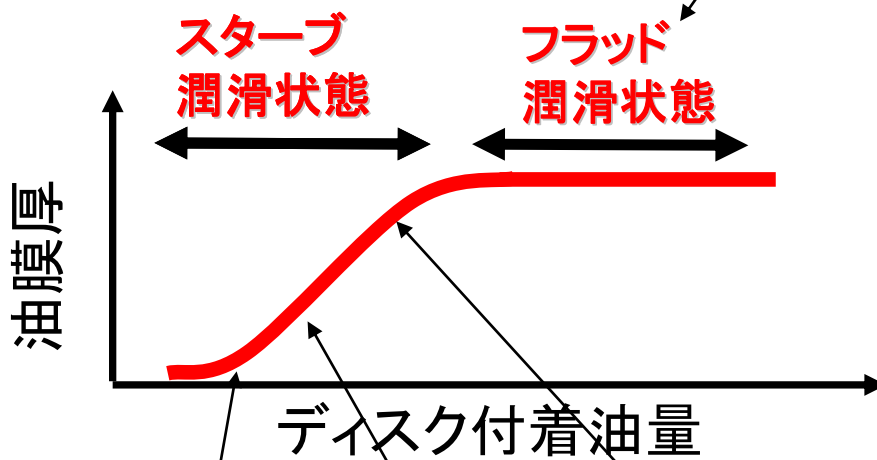


Fig. 2.10 プレートアウト量による導入油膜厚の変化

### 2.3.2 フラッド潤滑状態下における油滴引き込み挙動

まず、プレートアウトが潤沢に存在するフラッド潤滑状態における油滴導入挙動について調査した。実験では、油膜厚  $0.344\mu\text{m}$  の十分に油が供給されている状態 (Fig.2.11) において、エマルション A~C 及び E を供給し、油滴引き込みが導入油膜厚に及ぼす影響を調べた。実験手順を以下の通りである。尚、本実験では、エマルションは粒径を  $20\mu\text{m}$  で統一し、エマルション濃度を A : 1.0mass%、B : 1.5mass%、C : 2.0mass%、E : 4.0mass% に調整したものをを用いた。

- (1) ボールをディスクに接触させ、 $2.5\text{ m/s}$  で回転させる。その際押付け力は  $20\text{ N}$  とする。
- (2) ボールとディスク間に十分な量のプレートアウトを供給して油溜りを生成させ潤沢状態にする。
- (3) エマルション A~C、E を供給し、光干渉法により導入油膜厚を測定する。エマルションを供給する時間は、供給開始からディスクが 1 回転するまでとし、その間の導入油膜厚を測定した。

エマルション E (4mass%) を供給した際の、接触領域の観察結果を Fig.2.12 に示す。エマルション供給する前の導入油膜厚  $0.344\mu\text{m}$  に対して  $0.343\mu\text{m}$  とほぼ変化がないことが確認された。EHL における油膜厚はその試験条件によって決まるため、すでに油膜が飽和しているフラッド状態にエマルションを供給しても変化しないことを示す結果である。即ち、圧延においてもフラッド潤滑状態にあればエマルションを供給しても油膜厚に変化が生じないことから、潤滑性を向上させることは困難であることが推察される。

一方、油分濃度を低下させたエマルション B (1.5mass%) 供給時の結果 Fig.2.13 に示す。導入油膜が  $0.276\mu\text{m}$  に減少する結果が得られた。このように同じエマルションであっても濃度が低い場合には、油膜厚を減少させる効果を持つことが示された。原因として、使用したエマルション濃度は非常に低く水が大部分を占めると考えられるので水の存在が影響したのではないかと推定した。そこで、水単体を供給した場合の油膜形成挙動についても調査した。結果を Fig.2.14 に示す。その結果、供給後膜厚は  $0.236\mu\text{m}$  とさらに油膜厚は薄くなった。この現象理解として、フラッド状態に水を供給した後のガラスディスクに付着している水分を採取して光学顕微鏡観察を行った。その顕微鏡像を Fig.2.15 に示す。採取した水中に、数  $\mu\text{m}$  ~ 数十  $\mu\text{m}$  の油滴が存在することが確認することができた。即ち、接触領域の入口部分において、水によって油溜りやプレートアウトがはげしく攪拌され、再乳化することで、

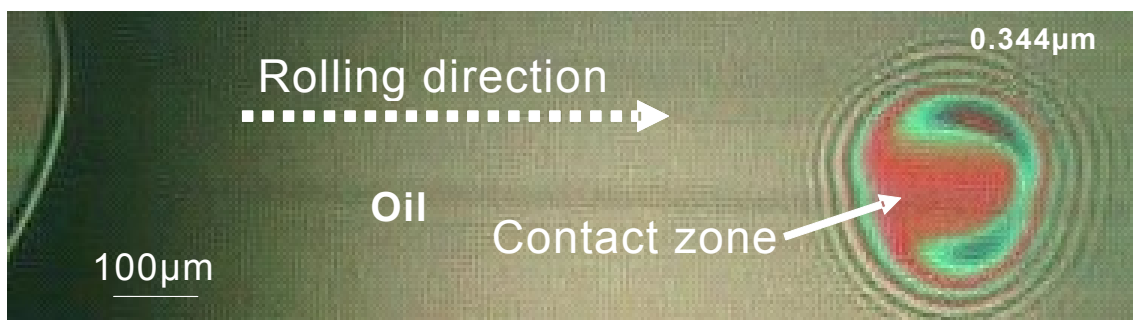


Fig. 2.11 フラッド状態 (回転数 2.5m/s)

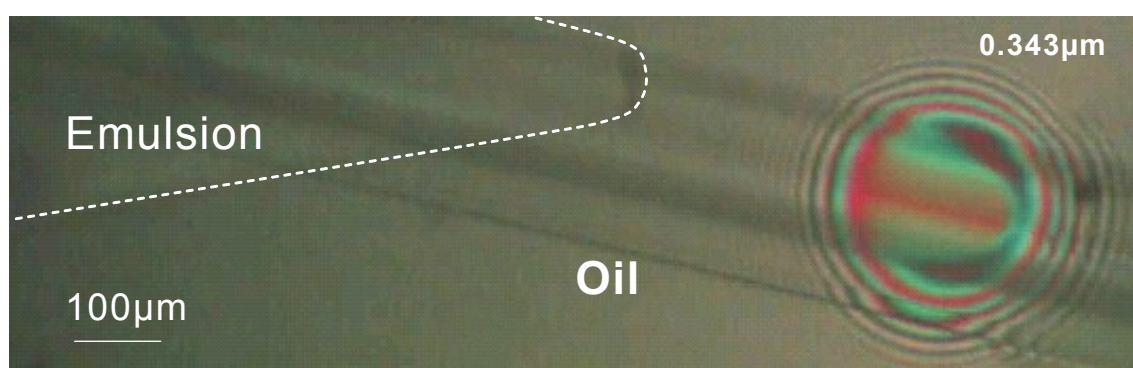


Fig. 2.12 エマルジョン E 供給時 (回転数 2.5m/s)

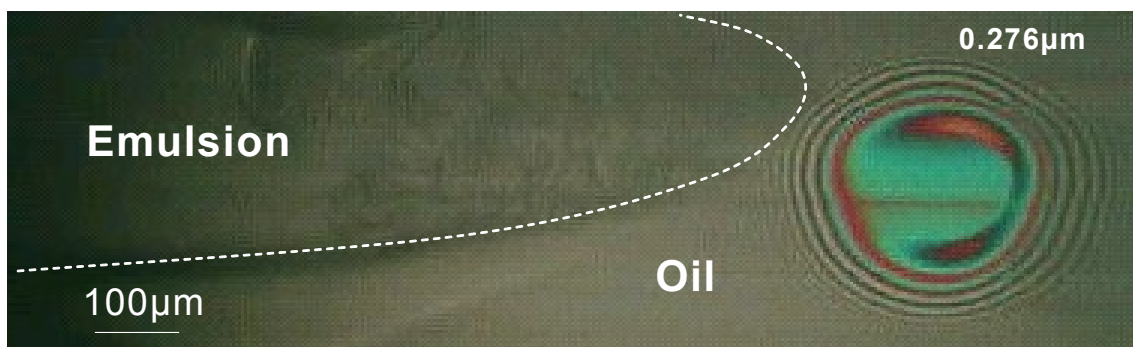


Fig. 2.13 エマルジョン B 供給時 (回転数 2.5m/s)

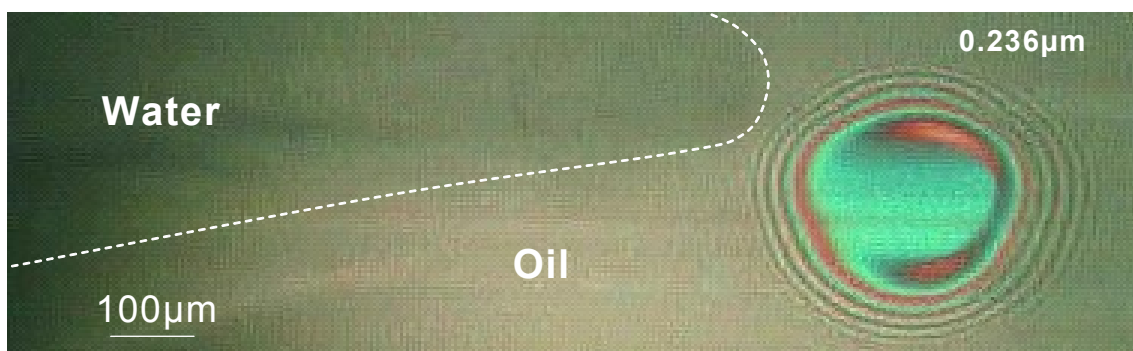


Fig. 2.14 水供給時 (回転数 2.5m/s)

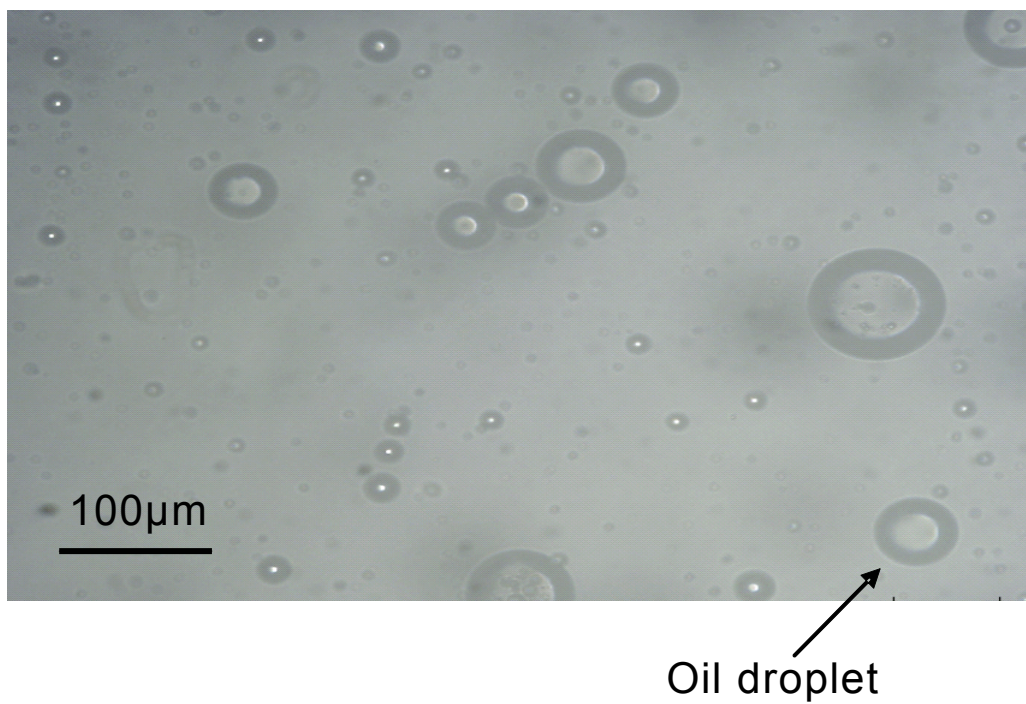


Fig. 2.15 試験後に回収した水の顕微鏡像

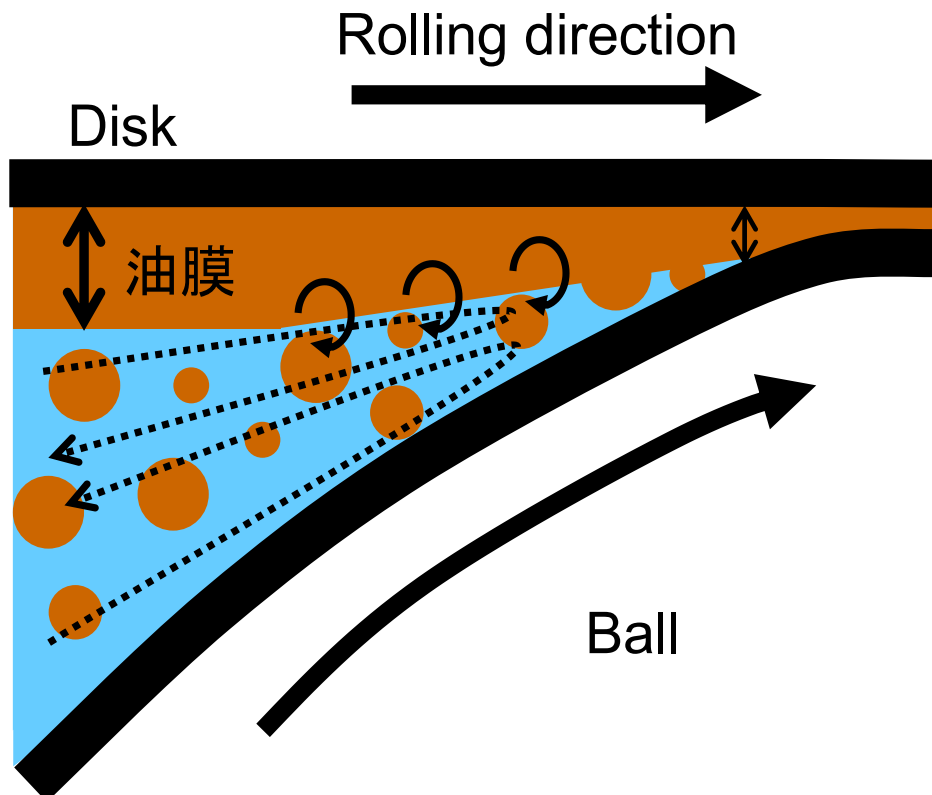


Fig. 2.16 水によるプレートアウト油除去効果

導入油膜厚が減少したと考えられる (Fig.2.16)。

ここで、その他の濃度についても同様の実験を行い、濃度と油膜減少効果の関係について整理した結果を Fig.2.17 に示す。その結果、今回の実験条件では約 2% 以下になった場合、初期の油膜厚よりも減少し始める事が判った。この減少開始濃度は試験条件によって変化すると考えられるが、フラッド潤滑状態であっても、低濃度エマルジョンや水を供給した場合には、水による油分の再攪拌現象が生じ導入油膜を減少させることが明らかになったと言える。

ここで、フラッド潤滑状態に高濃度 (2mass% 以上) のエマルジョンを供給した場合には、油膜厚は変わらないことを示した。しかし、エマルジョン中には必ず水が存在していることから再乳化現象は発生していると考えられる。しかし、同時にエマルジョン中に含まれる油滴による油分供給が行われることから、油量の減少分を補ってフラッド状態の油膜形成に最低限必要な油分は供することができ、油膜の変化がなかったのではないかと推測できる。このように、再乳化で減少した油膜をエマルジョン中の油分が補うのであれば、同じフラッド潤滑状態であってもプレートアウトによる供給油量が少ない場合には、高濃度エマルジョンでも完全に補うことができない可能性がある。

そこで、Fig.2.18 に示すように、接触部周辺の油溜まり量が異なるフラッド潤滑状態(a)、(b)を生じさせ、水による油膜減少効果について確認した。結果を Fig.2.19 に示す。Fig.2.19(a)は十分に油が供給されているフラッド潤滑状態であり油分の境界が接点よりも離れている。一方、Fig.2.19(b)は油分供給量が少ないフラッド潤滑状態を示しており、油分の境界が接触部に近づいていることが判る。Fig.2.19(c)はフラッド潤滑状態(a)にエマルジョンを供給した場合、Fig.2.19(d)はフラッド潤滑状態(b)にエマルジョンを供給した場合である。予想通り、油溜まりの少ないフラッド潤滑状態(b)の場合には、油膜減少が生じなかったエマルジョン E (4mass%) を供給した場合にも導入油膜厚が減少する傾向が現れた。これは、フラッド潤滑状態であっても、供給されるプレートアウト油分が少ない場合には油膜減少効果が起こりうることを示すものである。

このように、低濃度エマルジョンや水を供給することにより導入油膜厚が減少するという知見が得られたが、圧延時の導入油膜形成挙動を理解する上でも、プレートアウトや油滴引き込みだけでないということを示唆するものであり、実圧延において導入油量低減効果を狙う場合の指針となると考えられる。

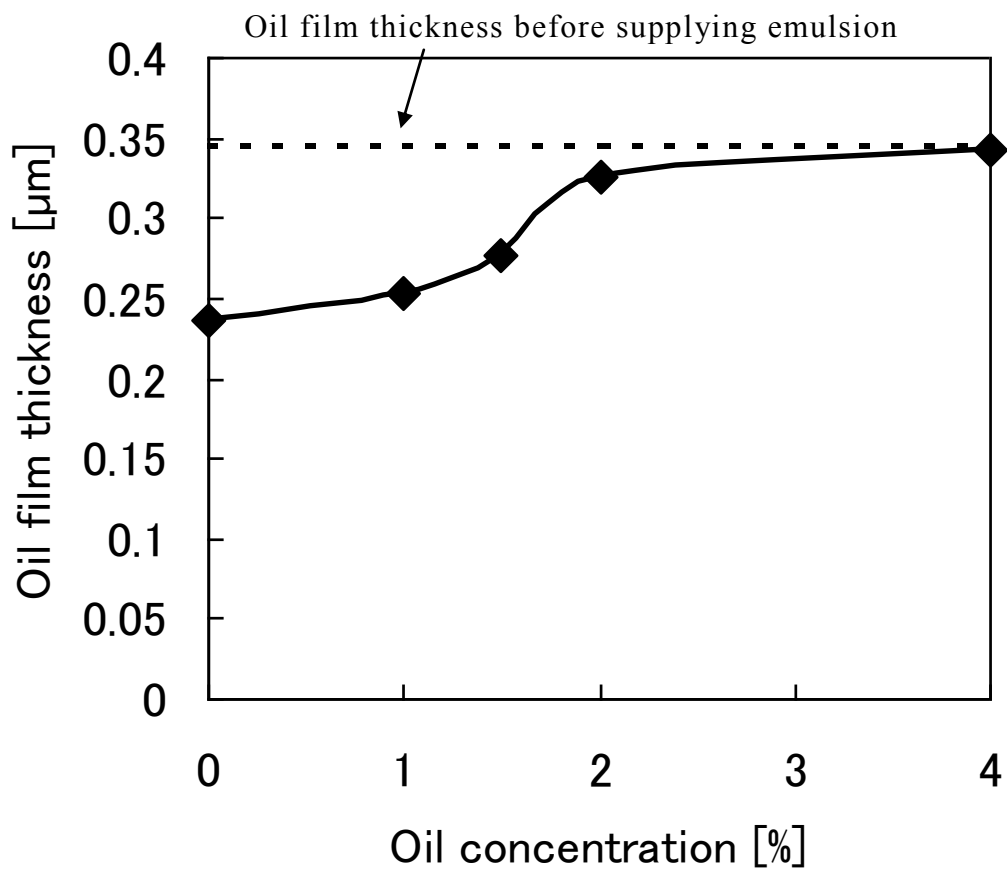


Fig.2.17 エマルション濃度と供給後油膜厚の関係

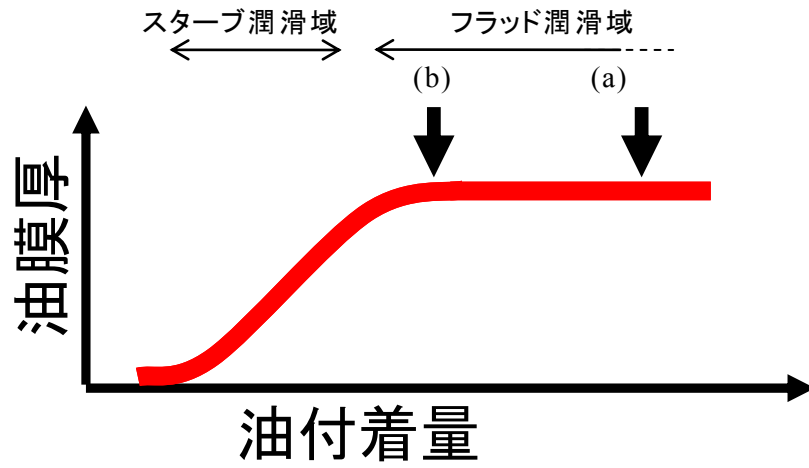


Fig. 2.18 フラッド潤滑状態における油付着量の違い

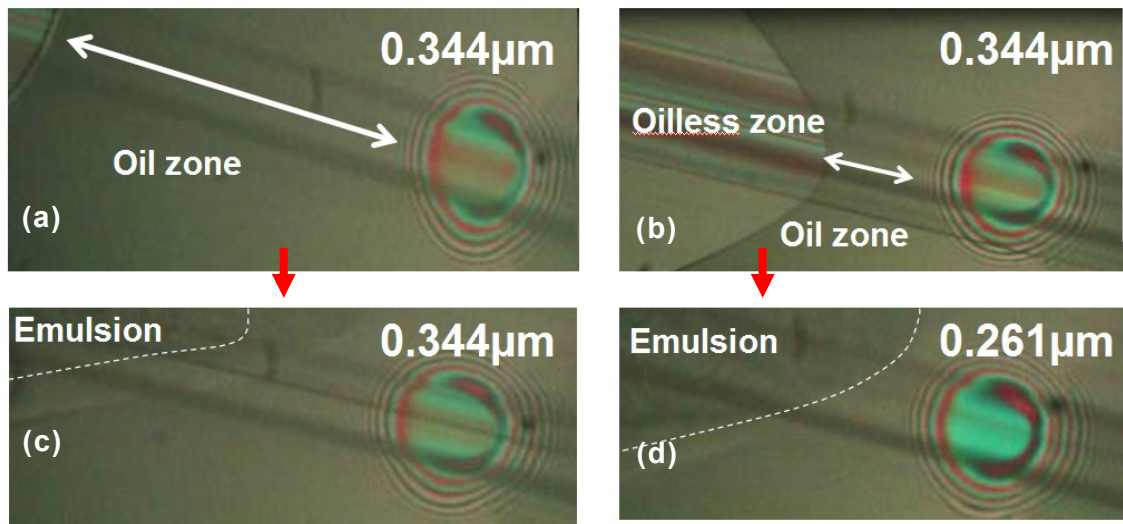


Fig. 2.19 フラッド潤滑状態のレベルによる油膜厚変化

### 2.3.3 スターブ潤滑状態における導入油膜厚に及ぼす影響

次に、接触円周りに油溜りがなく、油の供給が十分でないスターブ潤滑状態 (Fig.2.20) における、導入油膜形成挙動について調査を行った。まず、スターブ潤滑状態を作りだした後、各種エマルションを供給し、生じる油膜厚の変化を調べた。ここで、濃度影響調査に使用したエマルションは、粒径を  $20\mu\text{m}$  で統一し、濃度を C : 2mass%、E : 4mass%、G : 6mass%、H : 8mass%、I : 10mass% とした。また、また粒径影響調査には、油分濃度を 4mass% で統一し、粒径を D :  $15\mu\text{m}$ 、F :  $30\mu\text{m}$  に調整したものをを用いた。その他、実験手順を以下に記す。

- (1) ボールをディスクに接触させ、 $2.5\text{ m/s}$  で回転させる。その際押付け力は  $20\text{ N}$  とする。
- (2) ボールとディスク間に潤沢状態になるまでプレートアウトを供給し、その後油量を拭き取り、導入油膜厚を観察しながらスターブ状態にする。
- (3) 各種エマルションを供給し、光干渉法により導入油膜厚を測定する。

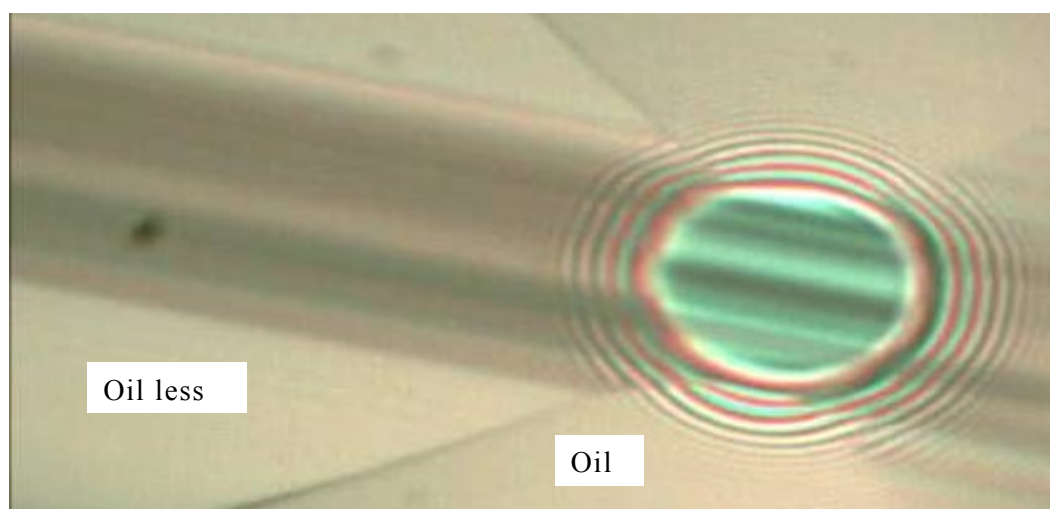


Fig. 2.20 スターブ状態 (回転数  $2.5\text{m/s}$ )



まず、エマルション濃度の影響について述べる。開始時のフラッド潤滑状態と拭き取り後のスターブ潤滑状態を Fig.2.21(a)、(b)に示す。ここで、フラッド状態の導入油膜厚はこれまで同様  $0.344\mu\text{m}$ 、スターブ潤滑状態を  $0.036\mu\text{m}$  とした。また、エマルション供給後の接触領域の例として、エマルション E(4mass%)と I(10mass%)について Fig.2.21(c)、(d)に示す。エマルション E を供給した場合、油膜厚は接触領域の色合いは赤色に変化し膜厚としては  $0.184\mu\text{m}$  まで増加していることが判った。同様に、エマルション I を供給した際の接触領域は緑色であり、膜厚は  $0.272\mu\text{m}$  であった。また、再度ニート油を供給した場合についても Fig.2.21(e)に示すが、元のフラッド潤滑時の膜厚  $0.344\mu\text{m}$  に戻る事が確認された。その他のエマルションについても同様に膜厚を求め、濃度と油膜厚の関係を整理した結果を Fig.2.22 に示す。油分濃度の増加と共に油膜厚は増加していき、フラッド潤滑時の油膜厚に近づいていくことが明らかになった。これは本実験で使用しているエマルションの粘度・粒径は一定であることから、濃度増加に伴ってエマルション中の油滴数は増えることになる。つまり、接触領域の入口部分に引き込まれる油滴の頻度が増え、導入油膜厚が厚くなったと考えられる。

次に、濃度が同じで 4mass%で粒径の異なるエマルション D ( $15\mu\text{m}$ )、E ( $20\mu\text{m}$ )、F ( $30\mu\text{m}$ ) を用い、粒径の影響について調査した。干渉像の変化について Fig.2.23 に示す。フラッド潤滑状態及びスターブ潤滑状態は濃度の影響調査と同様の条件とした。Fig.2.23(a)、(b)に示す。また、各エマルションを供給した際の接触領域の観察結果を Fig.2.23(c)~(e)に示し、粒径と油膜厚の関係を整理した結果を Fig.2.24 に示す。エマルション D ( $15\mu\text{m}$ ) の供給により油膜厚は  $0.164\mu\text{m}$ 、エマルション E ( $20\mu\text{m}$ ) の供給により  $0.184\mu\text{m}$ 、エマルション F の供給により  $0.267\mu\text{m}$  と粒径増加と共に油膜厚は厚くなる結果が得られた。この結果から、スターブ潤滑状態においては、エマルション粒径の大きい方が、供給直後の導入油膜厚を増加させることが明らかになった。エマルション中の油滴は、粒径が大きいほど親油性の表面にトラップされやすいと考えられていることから<sup>2,22-26)</sup>、今回も引き込まれる油滴数が増加することで導入油膜厚が厚くなったと考えられる。尚、同濃度のエマルションの場合、粒径が大きくなるに伴い油滴数は減少し、接触領域の入口部分の接触頻度や引き込まれる数が減少するにも関わらず、導入油膜厚は増加していることから、濃度と同様に粒径も導入油膜厚をコントロールする上で重要な要素であることがわかる。

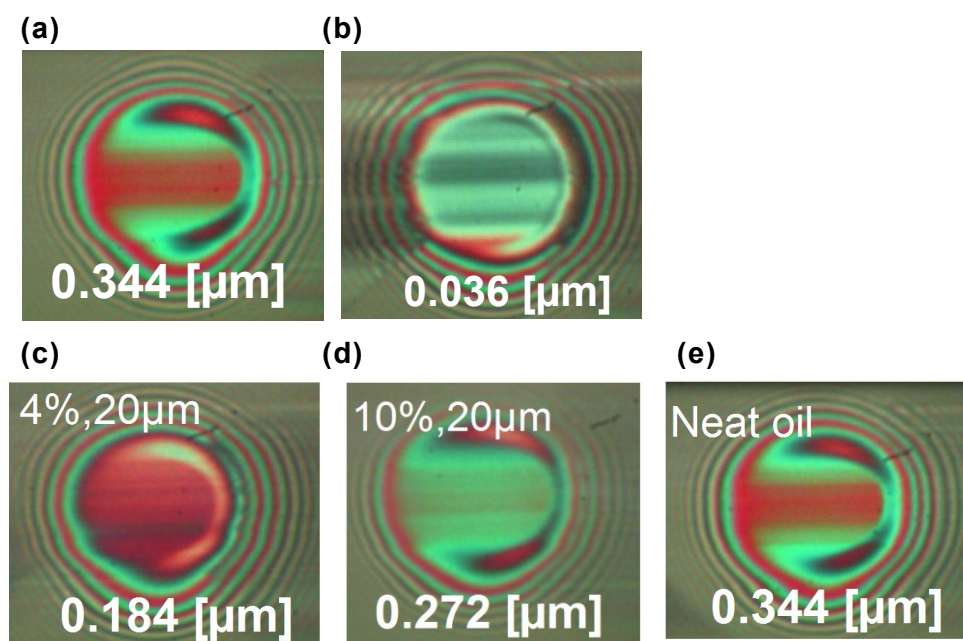


Fig. 2.21 スターブ潤滑状態における導入油膜厚変化（干渉像）

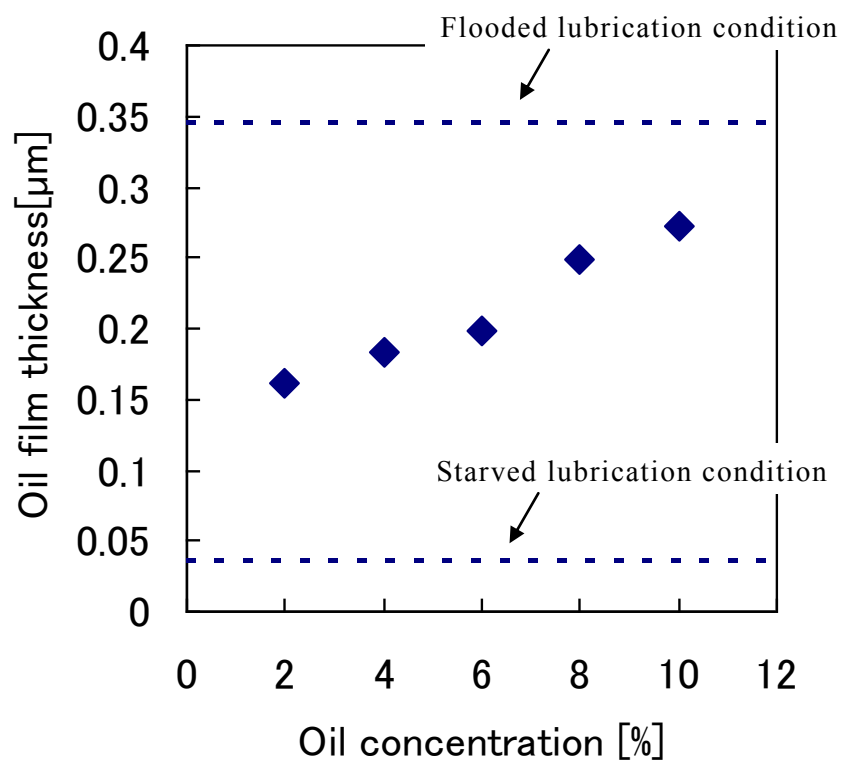


Fig. 2.22 油分濃度による油膜厚変化

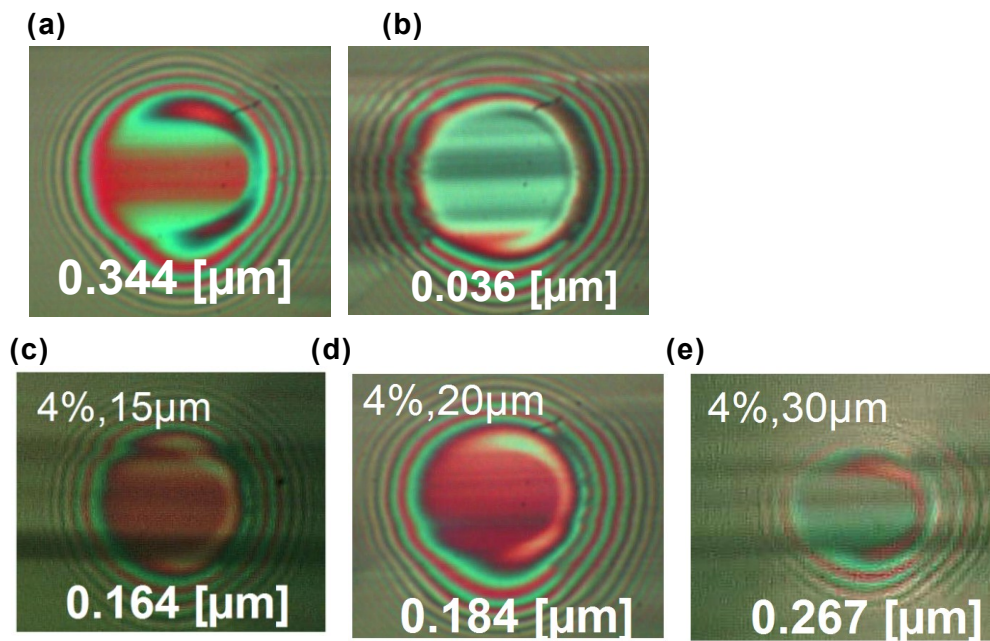


Fig. 2.23 スターブ状態における導入油膜厚変化（干渉像）

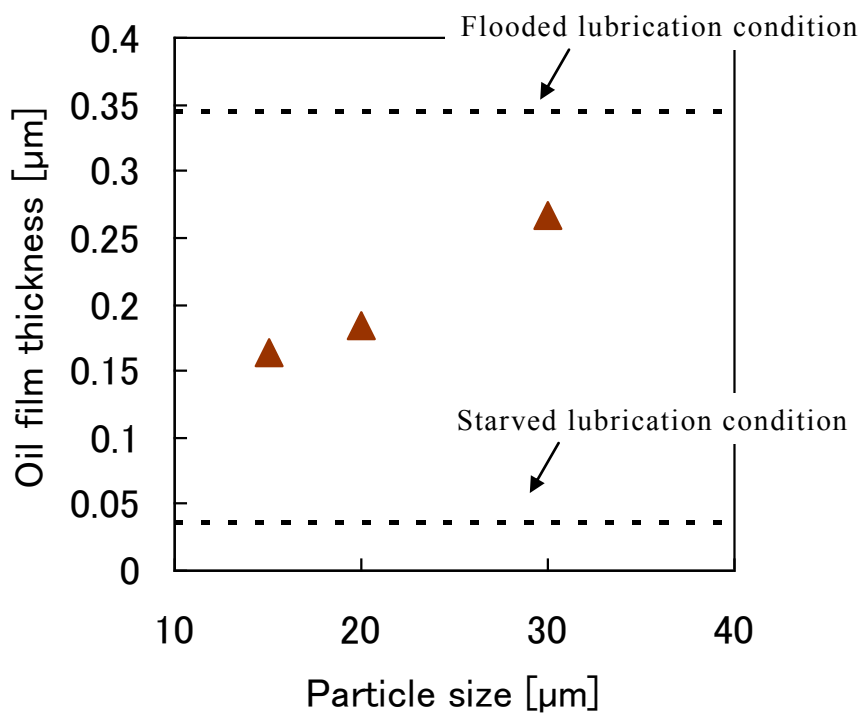


Fig. 2.24 粒径による油膜厚変化

このように、接触部がスターブ潤滑状態にある場合、エマルション性状（濃度、粒径）が導入油膜厚に影響を与えることが明らかになった。一方、これまでのスターブ潤滑状態は  $0.036\mu\text{m}$  を代表値として各エマルションの影響を調べてきた。しかし、実際にはスターブ潤滑状態にも様々な厚みがある（Fig.2.10）。そこで、さらに厚みの異なるスターブ潤滑状態を調整し、導入油膜厚生成に与える影響について調査を行った。ここでは、スターブ潤滑時の油膜厚として、 $0.036\mu\text{m}$  に加え、 $0.078\mu\text{m}$ 、 $0.192\mu\text{m}$ 、 $0.259\mu\text{m}$  について調査を行った。エマルション E（4mass%、 $20\mu\text{m}$ ）供給時の接触領域の状態と油膜厚測定結果を Fig.2.25 に示す。供給するエマルションが同じにも関わらず、供給前  $0.036\mu\text{m}$  では  $0.15\mu\text{m}$  程度の油膜増が見られたのに対し、 $0.259\mu\text{m}$  の場合には数  $\mu\text{m}$  と若干の増加しか生じなかった。これは、同じスターブ潤滑状態であっても、程度によってエマルション供給による導入油膜厚の変化量が異なることを示唆する結果である。

さらに、その他のエマルション条件についても同様に膜厚測定を行い、濃度の影響について整理した結果を Fig.2.26、粒径の影響について整理した結果を Fig.2.27 に示す。また、油滴供給の影響度を理解するため、元の油膜厚を差し引いた増加油膜厚で整理した結果を Fig.2.28、Fig.2.29 に示す。

Figure 2.26 の結果からは、スターブ潤滑の状態によらず濃度増加と共に油膜も増え、フラッド潤滑時の油膜厚に近づいて行くことが判る。但し、2mass% エマルション供給時にはスターブ潤滑時の油膜厚によって  $0.1\mu\text{m}$  程度の差があったにも関わらず、10mass% エマルション供給時には  $0.02\mu\text{m}$  程度の差しかなくなっており、高濃度エマルション供給時には、初期のスターブ潤滑状態の影響は小さくなることが明らかになった。これは、Fig.2.28 に示されるように、スターブ潤滑状態に関わらず濃度増加と共に油膜厚は増えるが、スターブ潤滑時の油膜厚が厚くなるほど、エマルション供給即ち油滴供給による油膜形成効果は小さくなることを意味する。尚、粒径の影響についても、粒径の増加と共に導入油量は増えるが、粒径が小さいほどスターブ潤滑状態の差は大きくなっている。また、粒径による増加油膜厚の変化も Fig.2.29 濃度の場合と同様にスターブ潤滑時の油膜厚が厚くなるほど効果は小さくなっている。これまでもトラップ率という考えに基づき、接触部への油滴の導入されやすさが変化する可能性は提案されていた<sup>2.22-26)</sup>が、スターブ潤滑状態、即ちプレートアウトの油膜厚によってそれが変化する可能性を実験的に示したものであり興味深い知見と言える。

Starved lubrication condition

Before supplying emulsion

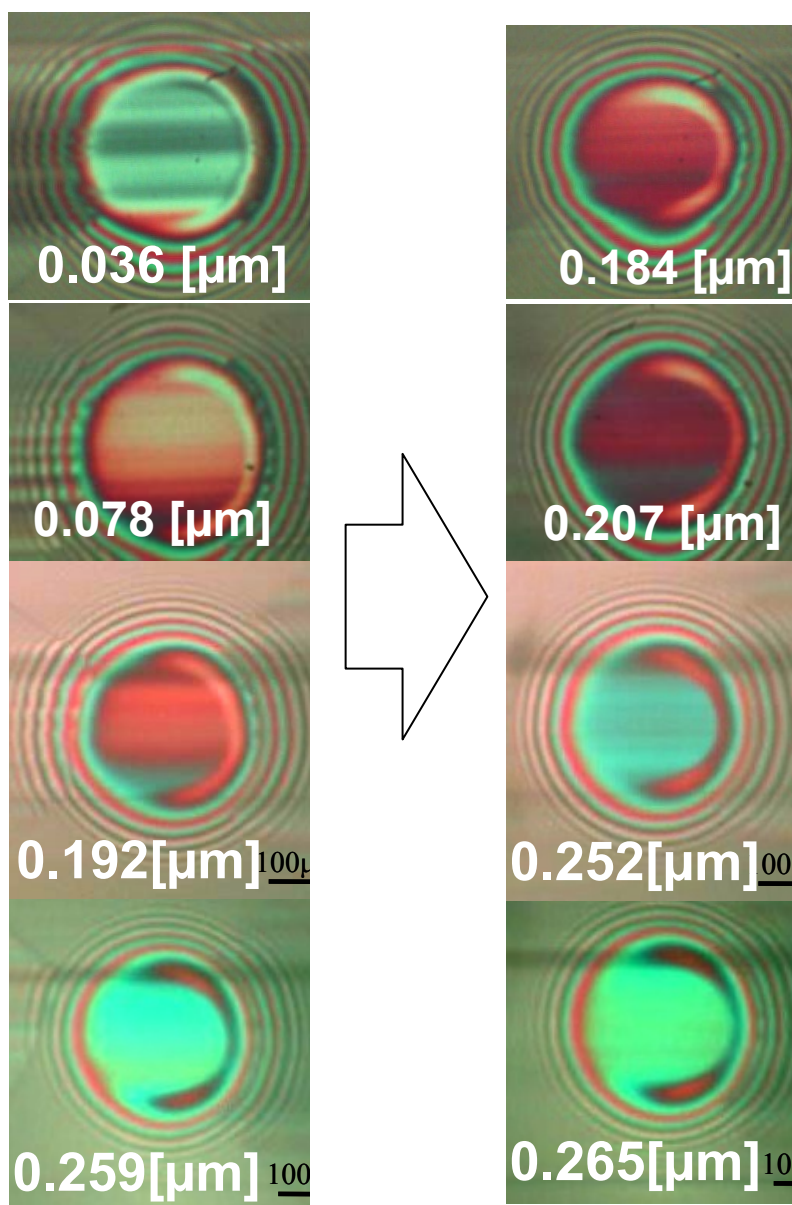


Fig. 2.25 スターブレベルが導入油膜厚に与える影響

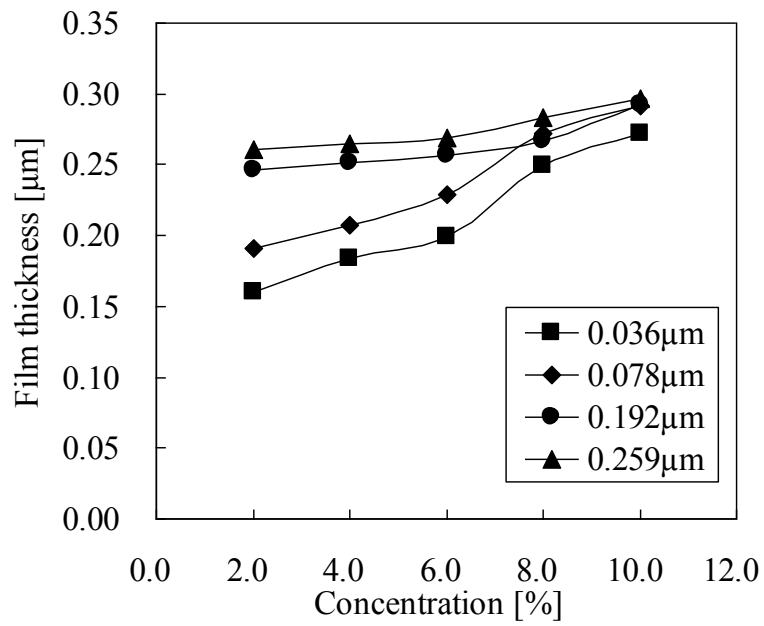


Fig. 2.26 スターブ潤滑状態の油膜形成に与える影響変化 (濃度の影響)

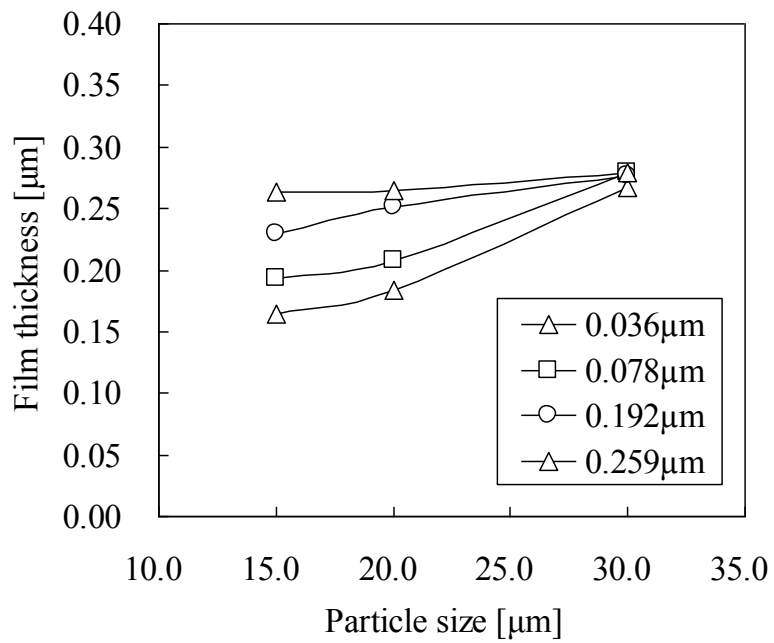


Fig. 2.27 スターブ潤滑状態の油膜形成に与える影響変化 (粒径の影響)

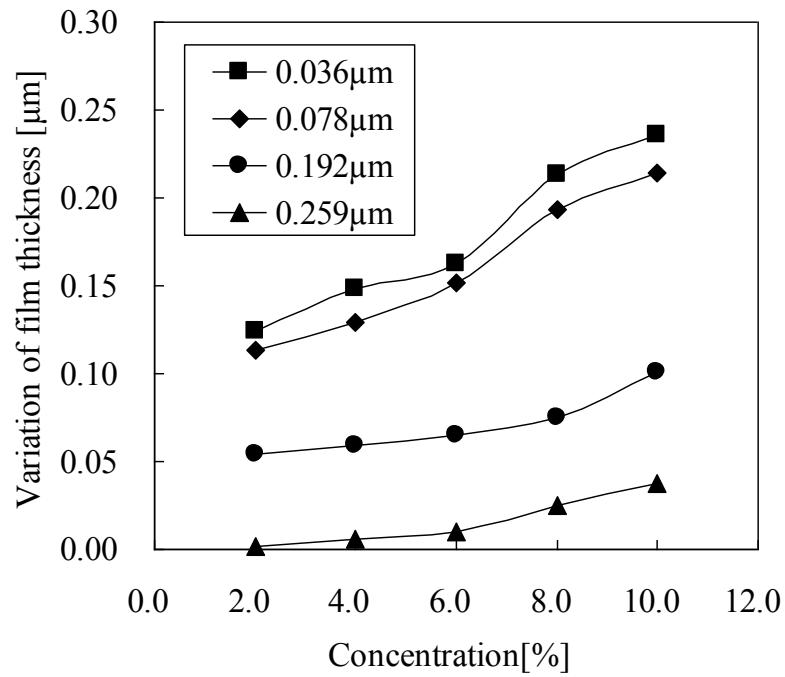


Fig. 2.28 スターブ潤滑状態による増加油膜量の変化  
(濃度の影響)

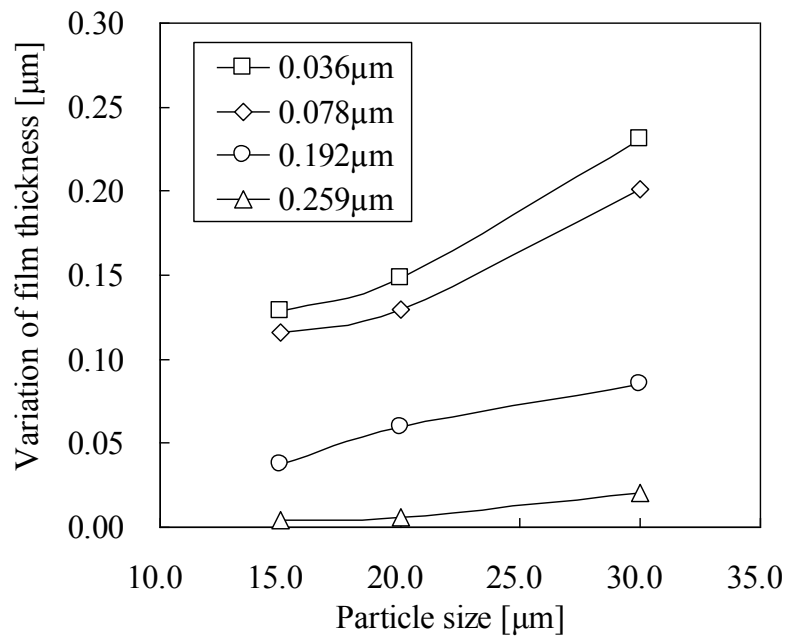


Fig. 2.29 スターブ潤滑状態による増加油膜量の変化  
(粒径の影響)

#### 2.3.4 速度変化が導入油膜厚に及ぼす影響

油の導入現象においては圧延速度も影響することが知られている。そこで、ディスク及びボールの速度を上げ、これまで同様にスターブ状態に対するエマルジョン供給の効果について調査を試みた。その際の実験手順は以下の通りである。

- (1) ボールをディスクに接触させ、1.0~7.0 m/s で回転させる。その際押付け力は 20 N とする。
- (2) ボールとディスク間に潤沢状態になるまでプレートアウトを供給し、その後油量を拭き取りスターブ状態にする。
- (3) 様々なエマルジョンを供給し、光干渉法により導入油膜厚を測定する。実験には、エマルジョン E (4mass%、20 $\mu\text{m}$ )、F (4mass%、30 $\mu\text{m}$ )、I (10mass%、20 $\mu\text{m}$ ) を使用する。

回転速度 5m/s において、フラッド潤滑状態及びスターブ潤滑状態にエマルジョン E (4mass%、20 $\mu\text{m}$ ) 及び I (10mass%、20 $\mu\text{m}$ ) を供給した際の接触領域の観察結果を Fig.2.30 に示す。まず、フラッド潤滑状態は Fig.2.30(a)に示すように速度増加によって 0.583 $\mu\text{m}$  まで増加した。これを、スターブ潤滑状態 Fig.2.30(b)としてこれまで同様 0.036 $\mu\text{m}$  に調整した。そして、エマルジョン E を供給したところ膜厚は Fig.2.30(c)に示すように 0.078 $\mu\text{m}$  まで増加した。

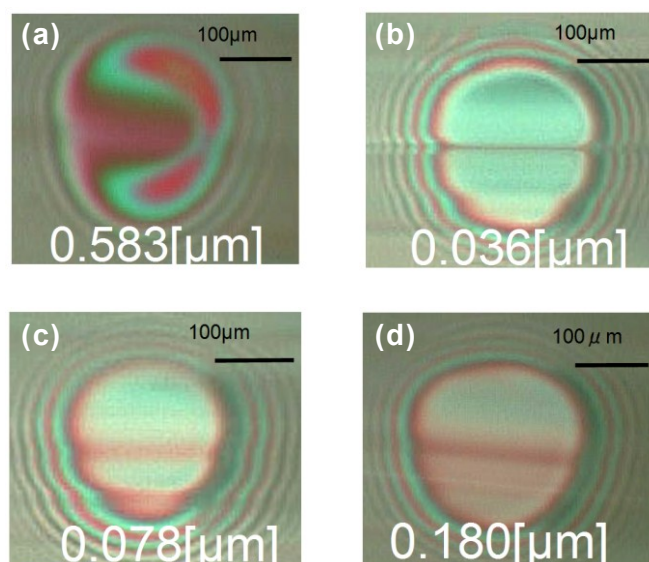


Fig. 2.30 回転速度 5.0m/s における油膜厚変化



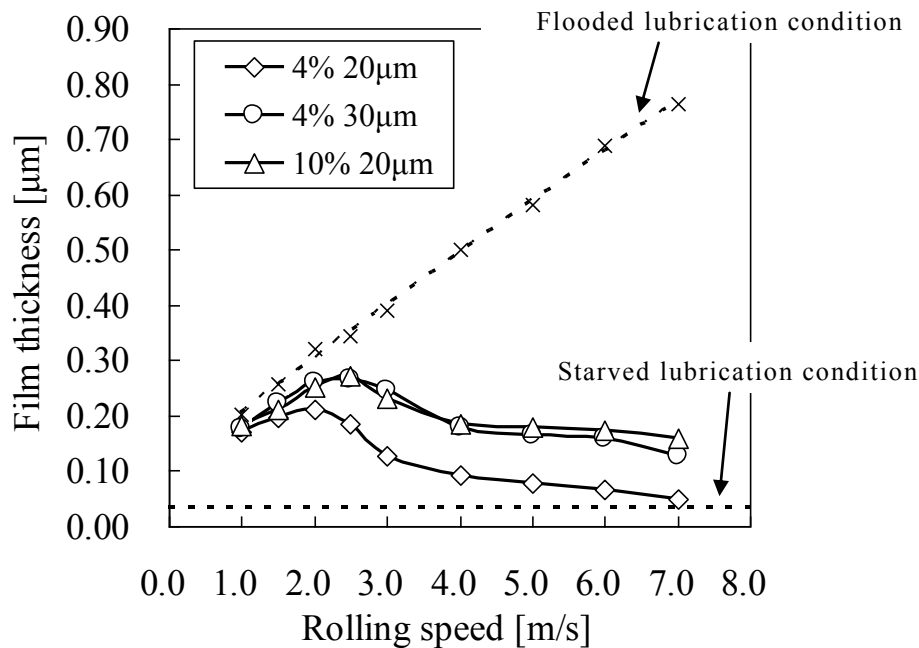


Fig. 2.31 速度による油膜厚の変化

同様にエマルジョン I (10mass%、20μm) を供給した際には Fig.2.30(d)に示すように 0.180μm まで増加した。高速条件においても、濃度が高いほど導入油膜厚は厚くなる傾向は同じであることが示された。

ここで、その他の速度及びエマルジョン F (4mass%、30μm) を用いた際の油膜厚変化について Fig2.31 に整理した。尚、図中には各速度におけるフラッド潤滑時の油膜厚と拭き取り後のスターブ潤滑状態の油膜厚を点線で示している。

各エマルジョン条件とも 2~3m/s の速度までは油膜増加傾向を示すが、その後は速度増加と共に油膜厚が減少している。これは、D.Zhu や T.Nakahara らの報告<sup>2,9~12)</sup>にあるように、低速では油溜まりが生じることにより油の供給が十分あるためフラッド潤滑と同様の油膜厚となるが、さらに速度が速くなると、入り口部での逆流により油溜まりが消失し、供給不足となって導入油膜厚が減少するという現象を再現していると考えられる。但し、本結果では速度が速い場合に、低速よりもさらに油膜厚が薄くなるという結果が得られているが、D.Zhu や T. Nakahara らの報告ではそこまでの減少は生じていない。これは、彼らの実験は、プレートアウトと油滴導入を切り分けていないため、油滴起因のプレートアウトが生じており、スターブ潤滑状態でとは言っても

ある程度のプレートアウト油膜を生じた状態にあると考えられる。本実験では両現象を切り分けており、さらに少ないプレートアウト油膜厚のスターブ状態を生じさせたため、速度増加による油膜減少の影響がさらに大きくなり、低速時の油膜厚よりも少なくなった可能性がある。即ち、初期のスターブ状態（＝プレートアウト量）によって、導入油膜厚に対する速度の影響も変化する可能性を示唆するものと言える。

## 2.3.5 ロールバイト近傍の流れ場解析

### 2.4.4.1 解析領域及び仮定

ここで、スターブ潤滑状態下において速度が速いほど油滴引き込み効果が小さくなる可能性を検証するため、接触領域の入口部分の流れ場解析を行った。

ここでは、Fig.2.32 に示すようなロールバイト近傍のロール・鋼板間の台形部分を解析領域とした。座標系は  $(r, z)$  平面座標系とする。また、鋼板に対するロール角度  $\delta$  として、 $r=r_0$  から  $r=r_1$  まで封入流体で満たされているものとする。その他の仮定を以下に示す。

- ・ 流体は非圧縮性であり、等温・等粘度とする。
- ・ 流れ場は定常であり、慣性項・体積項（重力）は無視する。
- ・ 台形領域が解析対象であるため、液面形状も平面とする。
- ・ 鋼板・ロールともに  $r$  方向に運動する。

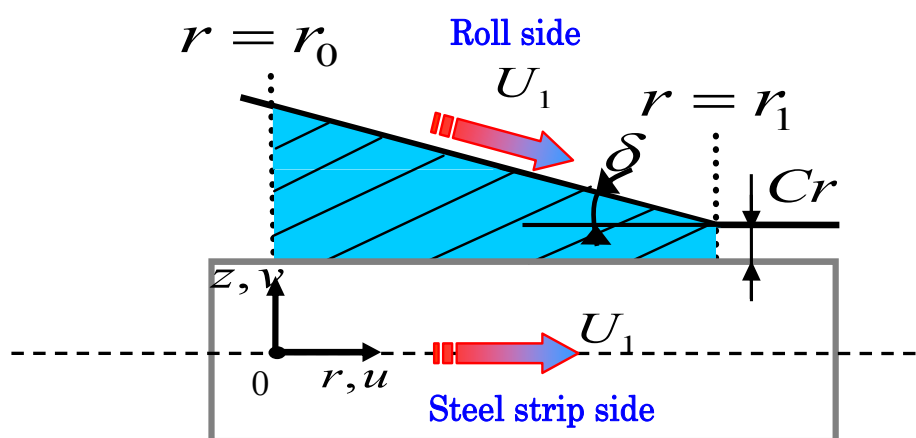


Fig. 2.32 解析領域

#### 2.4.4.2 次元流れの式

流れ場は式 (2.2) の Navier-Stokes 方程式<sup>2.27)</sup>と、式 (2.3) の連続の式より求められる。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \cdot \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2.3)$$

式 (2.2) の Navier-stokes 方程式において、第 1 項は非定常項、第 2 項は対流項、第 3 項は圧力項、第 4 項は粘性項に相当する。仮定より、慣性項（非定常項・対流項）を無視して連続の式とあわせて 2 次元に書き直すと以下のようになる。

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2.4)$$

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} = 0 \quad (2.6)$$

ここで、動粘性係数  $\nu = \mu / \rho$  であり、粘性係数  $\mu$  を用いて、式 (2.4) ~ (2.6) を書き直すと以下のようになる。

$$0 = -\frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2.7)$$

$$0 = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} = 0 \quad (2.9)$$

無次元係数  $R=r/r_0$ 、 $Z=z/r_0$ 、 $U=u/u_{ref}$ 、 $V=v/v_{ref}$ 、 $P=p/p_a$  を用いて式 (2.7) ~ (2.9) を無次元化すると以下のようになる。

$$0 = -\frac{\partial P}{\partial R} \frac{p_a}{r_0} + \mu \left( \frac{\partial^2 U}{\partial R^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Z^2} \right) \cdot \frac{u_{ref}}{r_0^2} \quad (2.10)$$

$$0 = -\frac{\partial P}{\partial Z} \frac{p_a}{r_0} + \mu \left( \frac{\partial^2 V}{\partial R^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Z^2} \right) \cdot \frac{u_{ref}}{r_0^2} \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial U}{\partial R} + \frac{\partial V}{\partial Z} = 0 \quad (2.12)$$

また無次元パラメータとして  $S = \mu u_{ref} / r_0 p_a$  を設定し、式 (2.10) (2.11) を変形してまとめると、本解析で用いる方程式は以下のようなになる。

$$-\frac{\partial P}{\partial R} + \frac{1}{S} \left( \frac{\partial^2 U}{\partial R^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Z^2} \right) = 0 \quad (2.13)$$

$$-\frac{\partial P}{\partial Z} + \frac{1}{S} \left( \frac{\partial^2 V}{\partial R^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Z^2} \right) = 0 \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial U}{\partial R} + \frac{\partial V}{\partial Z} = 0 \quad (2.15)$$

#### 2.4.4.3 境界条件

Fig.2.33 に対象領域での境界条件を示す。

①-② (鋼板面)

鋼板のみが  $R$  方向に移動する。ここで  $U_1$  は設定鋼板速度  $u_1$  を無次元化したものである。

$$U = U_1 \quad (2.16)$$

$$V = 0 \quad (2.17)$$

②-③ (台形左面)

封入流体端面において、 $R$ 、 $Z$  方向ともに速度を持たないため、境界条件は以下のようなになる。

$$U = 0 \quad (2.18)$$

$$V = 0 \quad (2.19)$$

③-④ (ロール面)

鋼板のみが  $R$  方向に移動するため、境界条件は以下のようなになる。

$$U = U_1 \quad (2.20)$$

$$V = 0 \quad (2.21)$$

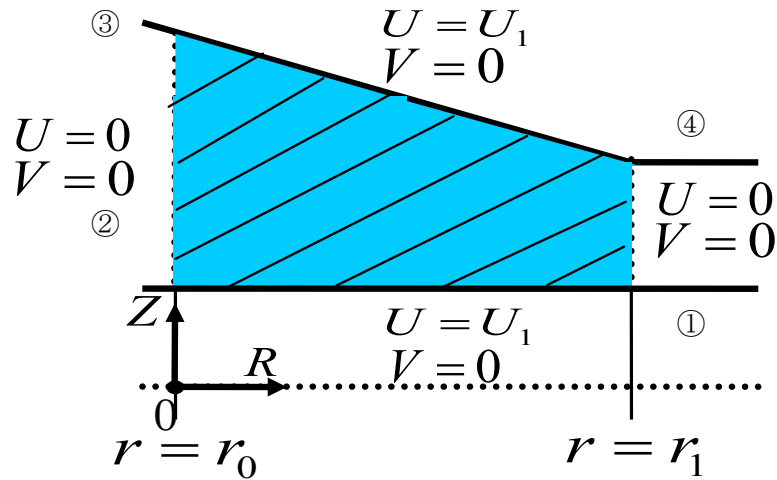


Fig. 2.33 境界条件

#### ④-① (台形右面)

封入流体端面において、 $R$ 、 $Z$  方向ともに速度を持たないため、境界条件は以下のようなになる。

$$U = 0 \quad (2.22)$$

$$V = 0 \quad (2.23)$$

#### 2.4.4.4 解析方法及び格子配置法

流れ場を、差分法を用いて解析するには、一般的に、

- (1) 領域を差分格子に分割する。
- (2) 無次元化した Navier-Stokes 方程式及び連続の式を、差分格子で成り立つ差分方程式に書き換える。
- (3) 得られた差分方程式で格子点上の値を求める。

という方法である。

しかし、圧力及び2方向の速度を同じ格子点で計算させると、一様分布のような非現実的な解が出てくる可能性がある。そこで本研究ではそれぞれの速度成分をずらして配列するスタッカード格子を用いる。これにより標準的なコントロールボリューム (Fig.2.34 の斜線部) において離散化された連続の式は、隣り合った速度成分の差を含んでおり、これにより波打った速度場が連続の式を満たすのを防いでおり、さらに2つの隣り合った格子点間の圧力差が、これらの格子点間にある速度成分に対する駆動力になるという利点を得て、この問題点を解決することが出来る。また解法は緩和法で解く場合

収束が速く、スタックカード格子を利用しやすい SIMPLER 法 (Semi-Implicit Method for Pressuer-Linked Equations Revised、改良一結合方程式の半陰解法) を用いる<sup>2,28)</sup>。Fig.2.35 に本研究で用いた解析領域の格子分割と、圧力および 2 方向の速度の格子点位置を示す。 $r$  方向無次元速度  $U$  および  $z$  方向無次元速度  $V$  は、それぞれ無次元圧力  $P$  から、 $r$  方向および  $z$  方向に半格子ずらして配置した。格子数は  $5 \times 27$  とし、収束緩和誤差が  $10 \times 10^{-6}$  以下に到達するまで解析を行った。解析条件を Table 2.3 に示す。

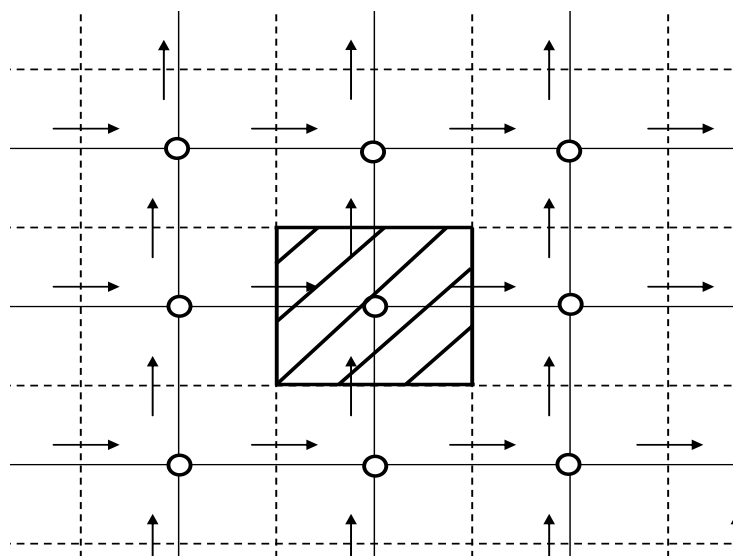


Fig. 2.34 コントロールボリューム

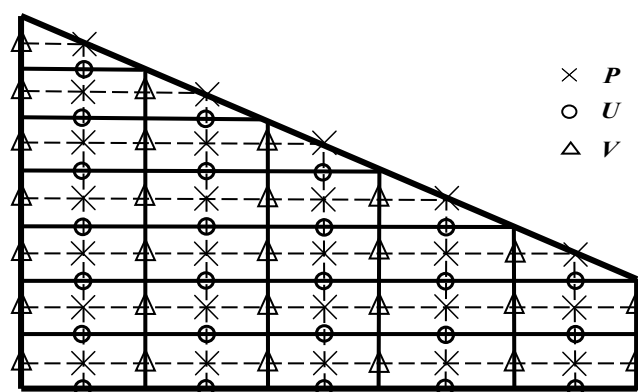


Fig. 2.35 解析モデル (P, U, V)

Table 2.3 解析条件

Clearance $C_r$ [ $\mu\text{m}$ ]	0.1
Angle of roll $\delta$ [deg]	20
Density of lubricant $\rho$ [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	998.2
Coefficient of viscosity of lubricant $\nu$ [Pa · s]	$1.008 \times 10^{-3}$
Representative length [mm]	1.0
Representative speed [mm/s]	1000

#### 2.4.4.5 解析結果及び考察

ロールバイト近傍の流れ場解析の結果を Fig.2.36 に示す。この結果より、接触領域の入口部分では油滴の逆流が発生し、速度増加に伴って流れが大きくなることがみてとれる。これにより、高速度状態では油滴の浸入及び捕捉が妨げられ、油滴引き込み効果が得られなかったと考えられる。またエマルション粒径の影響において、小粒径の場合油滴引き込み効果が小さいのは、この渦による影響もあると考えられる。この渦の影響を調べるために、300 W の白色光を接触領域に照射し、低速度と高速度における油滴引き込み挙動を観察する実験を行った。その結果を Fig.2.37 に示す。この結果から低速度では接触領域の入口付近に油滴引き込みを観察することができ、渦の影響をほとんど受けていないことがわかる。しかし高速度では、入口付近まで油滴が入り込まず、油滴引き込みを行えていないことがわかった。以上のことから、高速度では接触領域の入口部分に油滴を逆流させるような渦が発生し、油滴引き込みを妨げるため、低速度に比べ導入油膜の増加量が小さくなったと考えられる。尚、前述の水による油膜低減効果もロールバイト入口の流速が早いほど大きくなる可能性があることから、これも影響している可能性はある。

ここで、一般的には圧延速度の増加と共に導入油膜は増えると言われているが、今回の結果はそれと逆であった。これは、プレートアウトの存在が影響したと考えられる。今回の実験においてもフラッド潤滑状態の油膜厚は、高速度の場合には  $0.583\mu\text{m}$  (Fig.2.30) であるのに対し、低速度では  $0.344\mu\text{m}$  (Fig.2.21) と高速度の方が導入油膜厚は厚くなっている。これは、その試験条件下で生じる導入油膜厚に対して油が十分に供給されているからと考え

られる。一方、今回の速度影響調査はスターブ潤滑状態における油滴の引き込み効果を対象としているため、油滴引き込み減少分がそのまま油膜厚に影響したと考えられる。実圧延では速度増加と共に、油滴引き込み量は減少しているかもしれないが、その時の潤滑状態（フラッド、スターブ）によってプレートアウト起因の油供給量も影響していると考えられる。つまり、圧延において速度増加と共に導入油量が増加する現象は、プレートアウトが比較的存在し、無視できない状態にあると推定される。

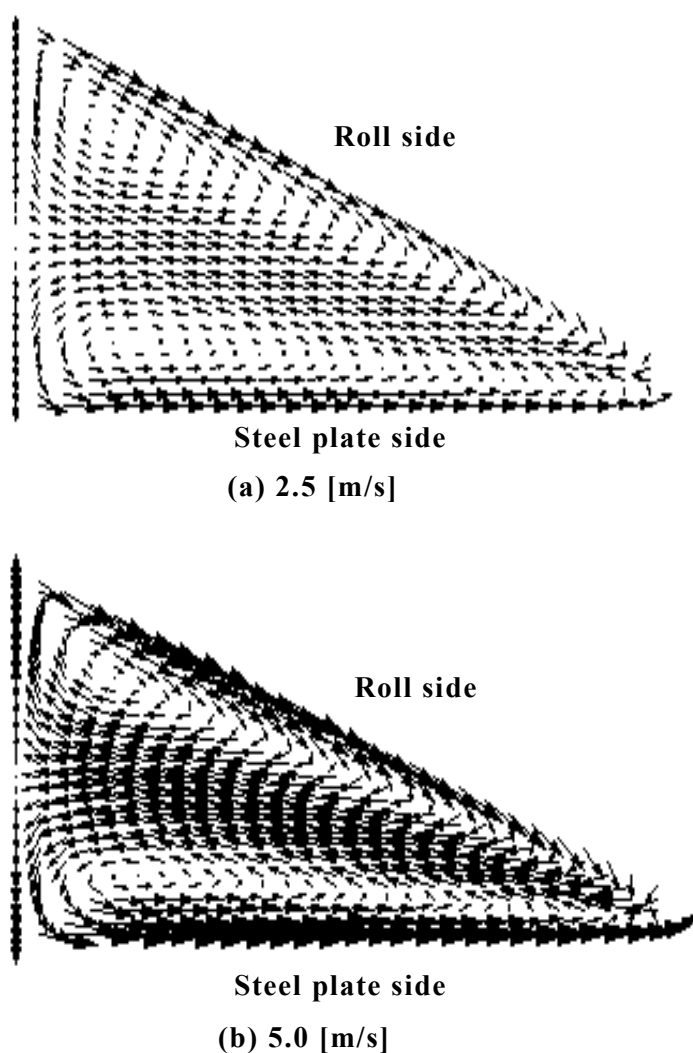
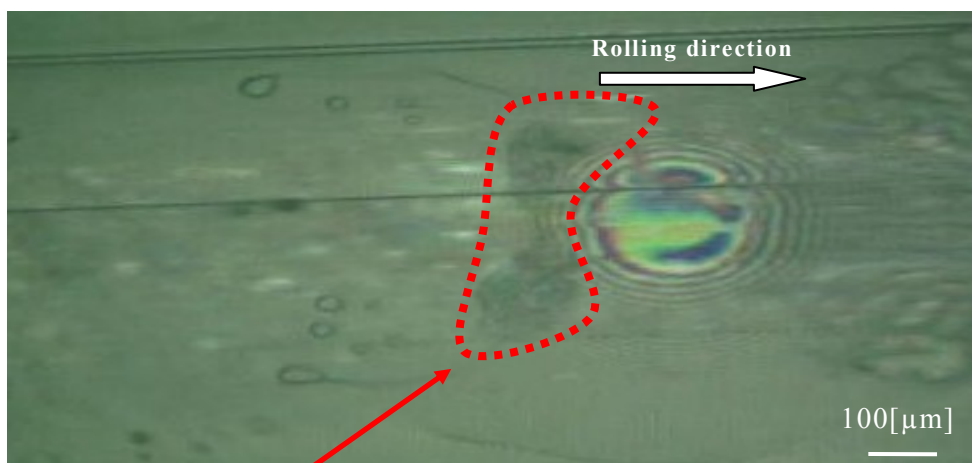


Fig. 2.36 ロールバイト入側の流れ





(a) 2.5 [m/s]



(b) 5.0 [m/s]

Fig. 2.37 引き込まれる油滴の変化

## 2.4 まとめ

本章では、O/W エマルションのロールバイトにおける油膜形成挙動を理解するための方法として、光干渉法による油膜厚測定と高速度カメラによる油滴や油膜挙動の直接観察が可能なディスクオンボール試験機（ディスクオンボール型光干渉システム）を試作した。さらに、プレートアウトと O/W エマルション条件を個々に制御できる方法を考案することにより、油膜形成挙動だけでなく、プレートアウトと油滴引き込みの関係を明らかにした。得られ

た主な知見は次の通りである。

- プレートアウト量を減少させることにより、潤沢に油が供給されているフラッド状態から、油不足状態のスターブ状態へと変化する。また、フラッド状態の場合にはプレートアウト量を変化させても導入油膜厚は変化しないが、スターブ状態ではその時のプレートアウト量によって導入油膜厚は増減する。
- フラッド状態の場合、導入油膜厚の形成に油滴の引き込みによる油膜増加は起きない。
- スターブ状態の場合、導入油膜厚の形成に油滴の引き込み効果が影響する。スターブ状態ではエマルション性状（濃度、粒径）によって、導入油膜厚が変化する。
- エマルション中の水に油膜厚を下げる効果があることを確認した。フラッド状態であっても油量が少ない場合には、水によって導入油膜厚が減少することが判明した。
- 回転速度の増加により、フラッド状態の場合には導入油膜厚が増加する。一方、スターブ状態にエマルションを供給する場合には、速度増加によって接触部入口の逆流現象により導入油膜厚が減少する。但し、油分濃度などのエマルション条件が導入油膜厚に与える影響は変化しない。

## 参考文献

- 2.1 白田・酒井：鋼用冷間圧延油のプレートアウト性と潤滑性について 潤滑, vol27, No.8 (1982) 594.
- 2.2 間瀬・河野・山本：冷間圧延の潤滑特性に関する検討, 第 28 回塑性加工連合講演会 (1977) 114.
- 2.3 間瀬・河野・山本：冷間圧延油のプレートアウト性に関する検討, 鉄と鋼, 64, 11 (1978) 250.
- 2.4 木村・藤田・西浦・曾谷：エマルション圧延油のプレートアウト特性, 平成 24 年度塑性加工春期講演会講演論文集 (2012) 159.
- 2.5 藤田・松原・木村・曾谷：エマルション圧延油の高効率プレートアウト技術, 平成 24 年度塑性加工春期講演会講演論文集, (2012) 161.
- 2.6 藤田・松原・木村・曾谷：実験圧延機を用いたプレートアウトによる潤滑制御, 平成 24 年度塑性加工春期講演会講演論文集 (2012) 163.
- 2.7 藤田・木村：冷間圧延における潤滑特性に及ぼすプレートアウト量の影響, 鉄と鋼, vol.97 (2011) 32.
- 2.8 黒田・伊藤・宮田・伊藤：水中液滴エマルションの潤滑特性, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集 (2000) 1033.
- 2.9 D. Zhu, G. Biresaw, S. J. Clark and T. J. Kasun : Elastohydrodynamic Lubrication with O/W Emulsions, Trans. ASME, J. of Trib. 116 (1994) 310-320.
- 2.10 T. Nakahara, T. Makino & K. Kyogoku : Observations of Liquid Droplet Behavior and Oil Film Formation in O/W Type Emulsion Lubrication, Trans. ASME, J. of Trib. , 110 (1988) 348.
- 2.11 中原・塩川・京極：O/Wエマルション潤滑の転相領域, トライボロジスト, 35, 12 (1990)907.
- 2.12 中原：エマルションの流体潤滑機構, トライボロジスト, 40, 8 (1995)644.
- 2.13 木村：トライボロジー（摩擦の科学と潤滑技術）, pp209-210.
- 2.14 益子・岡田：O/W エマルションのトライボロジー, トライボロジスト, 36, 5 (1991) 369.
- 2.15 薫・遠藤：様々な潤滑剤の EHL, トライボロジスト, 56, 1 (2011) 24.
- 2.16 H. A. Spikes and R. P. Glovnea : Measurement of sub-nanometer lubricant films using ultra-thin film interferometry, Tribology Letters, 15, 3 (2003) 217.
- 2.17 塩見・牧野・杉村：超薄膜光干渉法による純滑り接触下のナノメートルスケールの油膜厚さと摩耗の測定, トライボロジスト, 52, 11 (2007) 818.

- 2.18 L. D. Wedeven, D. Evans & A. Cameron : Optical Analysis of Ball Bearing Starvation, J. Lub. Tech. Trans. ASME., Vol.93 (1971) 349.
- 2.19 B. J. Hamrock & D. Dowson : Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication of Point Contacts, J. Lub. Tech. Trans. ASME., Vol.99 (1977) 15.
- 2.20 D. Dowson, W. Y. Saman & S. Toyoda : A Study of Starved Elastohydrodynamic Line Contacts, Proc. 5<sup>th</sup> Leeds-Lyon Symp. (1978) 92.
- 2.21 P. E. Wolveridge, K. P. Baglin & J. F. Archard : The Starved Lubrication of Cylinders in Line Contact, Proc. I.Mech. E., Vol.185 (1970/71) 1159.
- 2.22 相原・D. Dowson : 弾性流体潤滑におけるグリース膜厚さの実験的研究 (第1報)
- 2.23 相原・D. Dowson : 弾性流体潤滑におけるグリース膜厚さの実験的研究 (第2報) グリース膜の形成メカニズム, 潤滑, Vol.25, No.6 (1980) 379.
- 2.24 益子・岡田 : O/W エマルションのトライボロジー, トライボロジスト, Vol.36, No.5 (1991) 369.
- 2.25 Y. Kimura & K. Okada : Elastohydrodynamic Lubrication with Oil in Water Emulsions, Proc. JSLE. Int. Trib. Conf., Tokyo (1985) 937.
- 2.26 木村・岡田・橋爪 : O/W エマルションの EHL 膜形成に及ぼす界面活性剤の影響, 日本潤滑学会第 31 回全国大会 (名古屋) 予稿集 (1986) 341
- 2.27 河村哲也, “流体解析 I”, pp49-53
- 2.28 水谷幸夫, 香月正司, “コンピュータによる熱移動と流れの数値解析”, pp122-124.

### 3. 圧延時の導入油膜厚測定方法の開発(トレーサ法)とエマルション特性が油膜厚形成に与える影響

#### 3.1 概説

圧延時の導入油膜厚形成挙動の理解のため、前章では O/W エマルションの油導入部に着目し、ガラスディスクと金属ボール間のプレートアウトと油滴の引き込みの関係について調査を行った。しかし、実際の圧延における潤滑には、Fig3.1 に示すように様々な因子が影響を与える。特に素材の影響や圧延条件はプレートアウト性や流体的な導入挙動にも影響するため、実挙動を理解するには無視できないと考えられる。EHL 試験機や基礎的な摩擦摩耗試験機による圧延挙動の再現も試みられているが<sup>3.1~3.8)</sup>、圧延潤滑挙動を評価するには圧延機を使用することが望ましいとの報告がある<sup>3.9~3.13)</sup>。

これまでにも、実際の圧延機を使用したロール/ストリップ間の導入油膜の評価が試みられている。ニート油に関しては、圧延前の油量と圧延後の広がり面積から導入油膜厚を測定する方法<sup>3.14)</sup>、エマルション圧延に関しては、表面粗さから予測する方法<sup>3.15)</sup>、エマルション圧延後の板表面光沢度から導

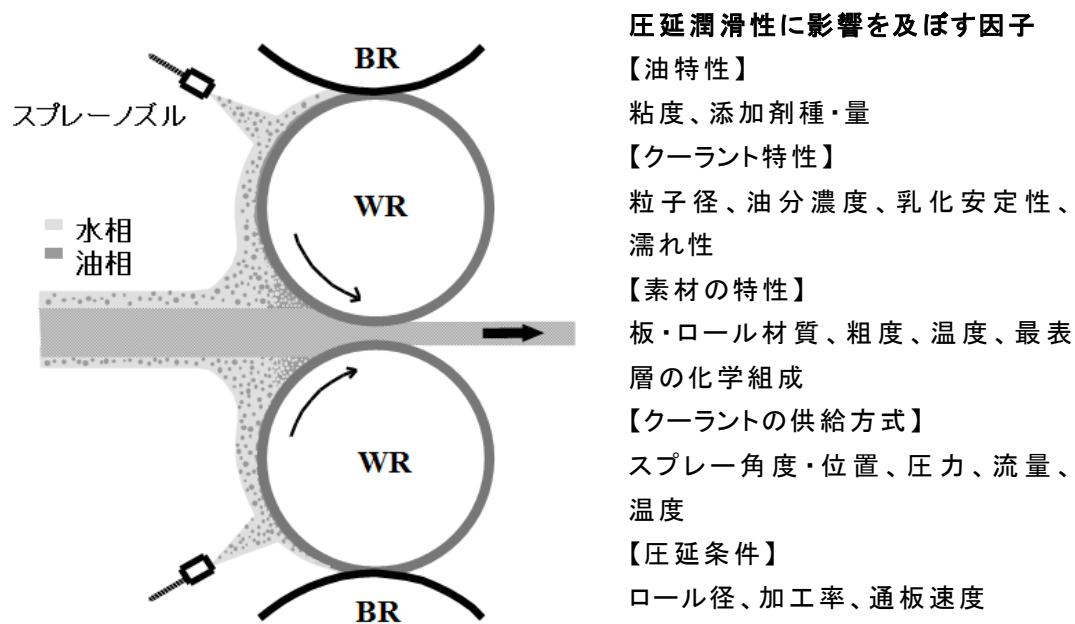


Fig.3.1 圧延潤滑性に影響を及ぼす因子

入油膜厚を推定する方法<sup>3.16)</sup>、同位元素の酸素(18)をもつ重水をトレーサとして圧延時のロール／ストリップ間の水と油の挙動を調べる方法<sup>3.17)</sup>などが報告されているが、実際にアルミニウムや鉄のエマルジョン圧延を行い、直接的に導入油膜厚を測定するという方法は確立されていない。また、アルミニウム熱間圧延のように入側温度が400℃以上になる場合や、常温下でも揮発性の高い圧延油を用いる場合などに適応可能な方法もない。

そこで本章では、不揮発性のトレーサを添加した基油を用いて圧延を行い、圧延後の板上付着トレーサ量と、圧延界面に導入された油のうち、板表面に残留する割合を求め、導入油膜厚を算出するという方法を考案した。本章では、この手法により、導入油膜厚と、エマルジョン粒径、油分濃度、圧延時の通板速度との相関を調査した結果、および、導入油量と圧延性能との関係を調べるため、導入油膜厚より算出した圧延界面の接触状態と先進率との関係について報告する。

### 3.2 圧延実験条件および圧延方法

実験条件を Table 3.1 に示す。圧延にはロール直径 297mm、幅 200mm の 2 段ロール高速圧延機を使用した。圧延機の仕様を Fig.3.2 に示す。ロール材質

Table 3.1 実験条件

<b>Base oil A</b>	Mineral oil [viscosity:75mPa·s/20℃]
<b>Emulsifying agent</b>	Cationic dispersing agent
<b>Emulsion temp.</b>	25~30℃
<b>Roll</b>	SKD61 [φ 297mm、Roughness:Ra1.0 μm]
<b>Strip</b>	Aluminium plate(1050) [ <sup>W</sup> 80× <sup>L</sup> 1300× <sup>T</sup> 2.0、 Roughness:Ra0.2μm]
<b>Spray flow rate</b>	1L/min( $1 \times 10^{-3}$ m <sup>3</sup> /min)
<b>Rolling speed</b>	100、300、600、1000m/min
<b>Reduction</b>	20%

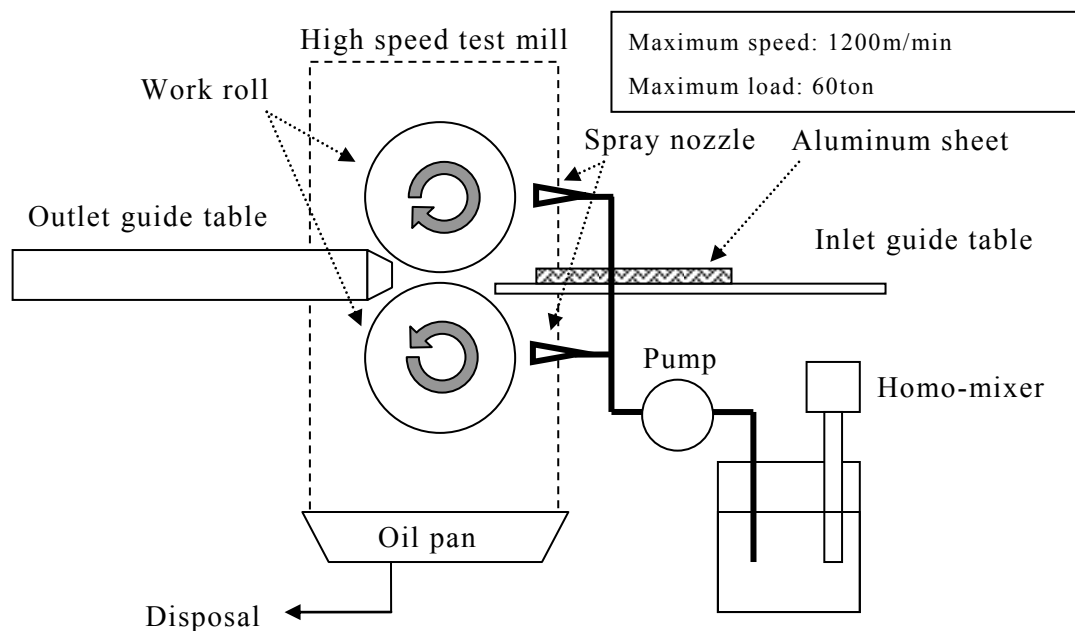


Fig.3.2 圧延実験装置

は SKD61 を使用し、表面粗度を Ra1.0 になるよう研磨により調整した。圧延時のロール温度は室温で行った。

圧延材はアルミニウム板 (JIS A1050) の O 材 (焼き鈍し処理材) を使用した。寸法は板厚 2.0mm、幅 80mm、長さ 1300mm とし、表面粗度を Ra0.2 に統一した。圧延前にはすべてアセトンを用いて表面を拭き、油分、汚れを除去して用いた。

O/W エマルションには、実圧延に使用される圧延油 A と分散剤を使用した。圧延油 A は、鉱物油をベースとして、各種油性剤、酸化防止剤などが配合されたものである。分散剤についても同じく実圧延で使用している高分子カチオン型分散剤を用いた。また、水にはイオン交換水を用いた。

O/W エマルションは、室温のイオン交換水に分散剤を溶解させた後、後述するトレーサを予め添加した圧延油を所定量添加し、ホモミキサを用いて粒径を調整した。粒径測定には、ベックマンコールター社の電気的検知帯方式粒度分布測定装置 (マルチサイザー III) を使用し、圧延前後のエマルション粒径が所定の値であることを確認した。尚、本装置の測定誤差 $\pm 0.6\mu\text{m}$  は以内である。また、エマルションは、上・下に設置したフラットノズルを通して

1L/min( $1 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{min}$ )、0.3MPa で噴霧した。

圧延は切り板で行い、エマルジョンのスプレー噴霧およびロール回転開始後、スプレー流量と回転数が安定したところで、エマルジョンを供給し続けたまま、アルミニウム板を挿入し、各通板速度で切り板圧延を行った。尚、回転数と供給量を安定させるため、スプレー開始から圧延開始までは3秒間とした。圧延時の圧下率は20%（圧延前  $t2.0 \rightarrow$  圧延後  $t1.6$ ）になるようロール間ギャップを調整し、圧延後の板厚測定により確認した。また、圧延速度は100、300、600、1000m/minで行った。

### 3.3 実験

#### 3.3.1 トレーサの選定と定量方法の検討

圧延時の導入油膜厚を測定する方法として、圧延時に供給された油中に定量可能なトレーサ成分を含有させることができれば、圧延後の圧延材表面に付着するトレーサを元に圧延時の導入油膜厚が求まるのではないかと考えた。特に、圧延は冷間、熱間と様々な使用温度条件があるため圧延温度の影響を受けないことが望ましいが、トレーサによって本来の圧延に影響を与えてはいけない。そこで、本実験で用いるトレーサに必要な条件を下記に示した。

- ・ 熱間圧延相当の高温条件下においても、蒸発、分解等で失われることなく圧延後の材料表面に残留する。
- ・ トレーサ添加により、エマルジョンの乳化安定性を阻害しない
- ・ 調整したエマルジョンの中でトレーサが基油から水中へ溶出ししない
- ・ トレーサの定量分析精度が高い。

これらの条件を満たすものとして、本実験では、ロール、圧延材に含有されていない金属元素を主成分とする、水に不溶な有機金属化合物（金属石けん）を用いることとした。有機金属化合物は400°Cを超える高温下において、有機成分が蒸発、分解するものの、金属成分は圧延材表面に残留するため、熱間圧延時の油膜厚測定への利用が期待できる。

また、圧延後の材料表面付着トレーサの定量分析は、圧延材表面中央部（50mm×50mm）を切り出し、硝酸2%含有水溶液で10min エッチングした後、純水で希釈した回収液を測定検液とし、フレイムレス原子吸光分析装置を用いて行った。



### 3.3.2 板上油膜厚の測定

基油に上記有機金属化合物を 10wt%含有した圧延油を用いてエマルジョンを調整し圧延を行った。尚、有機金属化合物を添加したことにより、20℃における基油粘度は 95mPa・s に増加している。圧延後の材料表面には、ロール／ストリップ間へ導入された圧延油に由来する金属成分（トレーサ）が付着しているため、これを定量分析し、圧延油中に添加した有機金属化合物濃度から逆算することで板上に付着する油膜厚（板上油膜厚）を算出した。また、同一の圧延材表面から 2 箇所測定し、トレーサ付着量にばらつきはほとんどないことを確認した。

### 3.3.3 分配比の算出

通常、O/W(Oil in Water)エマルジョン圧延では、ロール／ストリップ間の入口部において、プレートアウトと呼ばれるロールやストリップ表面の油膜生成と、油滴が直接引き込まれる二つの現象が生じ、最終的には O/W から W/O(Water in Oil)への相転移を経て油分のみが界面に導入されると考えられている (Fig.3.3) <sup>3.1~2)</sup>。

また、出口においては、ロール／ストリップ間へ導入された圧延油は

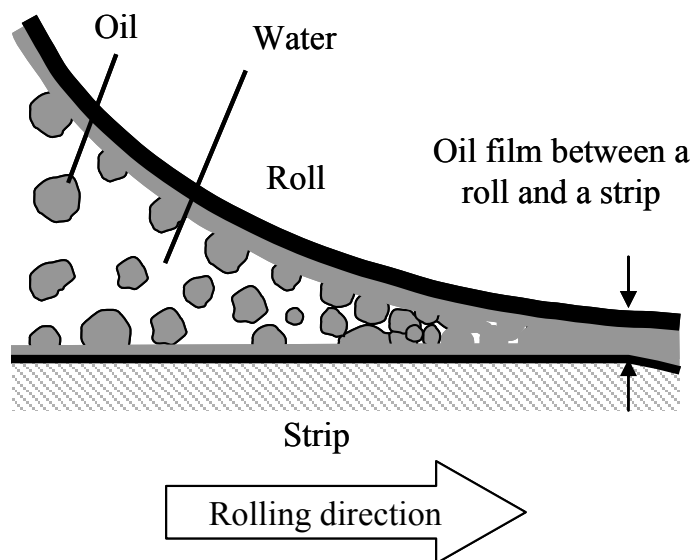


Fig.3.3 ロールバイト入口部

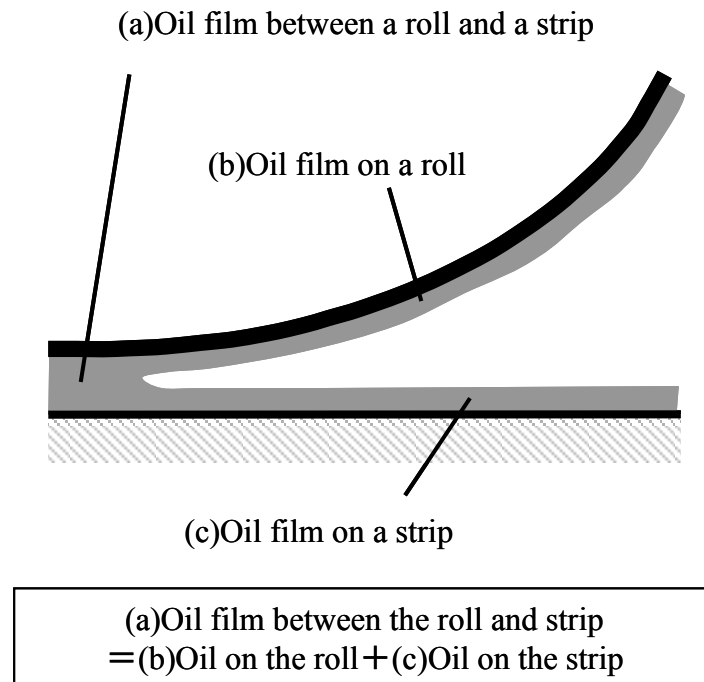


Fig.3.4 ロールバイト出口部

Fig.3.3 に示すように、ロール側と板側の二つに分配される。しかし、油の金属表面への付着は、油や金属材料の特性、金属面の粗さ、圧延条件などの影響を受けるため、圧延部出側においてロール表面と材料表面に等分されるとは限らない。一方で前述の板上油膜厚は、圧延機出側で板側に残留した油膜に相当するが、導入油膜に対する板上油膜の割合（これを分配比とする）が求めれば、板上油膜厚から導入油膜厚に換算することができる。

ここで、エマルジョン圧延であってもロール／ストリップ間にはほぼ油分のみが導入されていると考えられていることから、分配比は同一圧延条件下でのニート油と同様であると仮定し、既報の滴下法を活用して分配比の算出を行うこととした（Fig. 3.4）<sup>3.14)</sup>。

分配比測定手順を示す。まず、トレーサを添加した圧延油を、圧延材の先端側に一定量滴下した。滴下にはマイクロピペットを使用し、事前に数十回サンプリングを行い、滴下量にほとんどばらつきがないことを確認した。続いて実際に圧延を行う。その結果、Fig. 3.5 に示すように、板上に楕円形の油膜が生成する。この楕円上にトレーシングペーパーをあてて形状を切り取り、その重量から広がり面積を見積もった。圧延後の油滴が広がった様子を Fig.3.6 に示す。滴下量や滴下位置の確認を行ったが、位置の影響はほとんど

なく、滴下量を2滴にした場合にはほぼ倍の面積になることを確認した。そして、滴下量をこの広がり面積で割ることによって導入油膜厚を求めた。さらに、油滴の広がった箇所からアルミニウム板を所定面積切り出し、付着するトレーサ物質を定量することで板上油膜厚を求めた。このようにして、同一圧延油で得られた板上油膜厚、導入油膜厚が得られたことから、両値を用いて分配比を算出した。

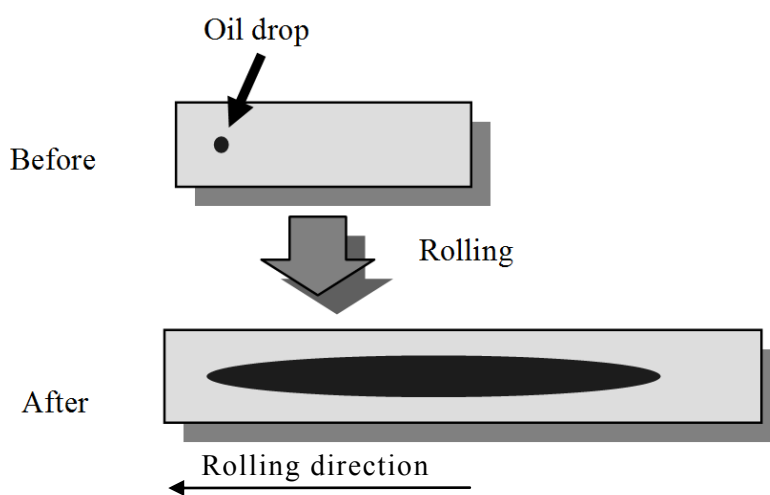


Fig. 3.5 トレーサ法

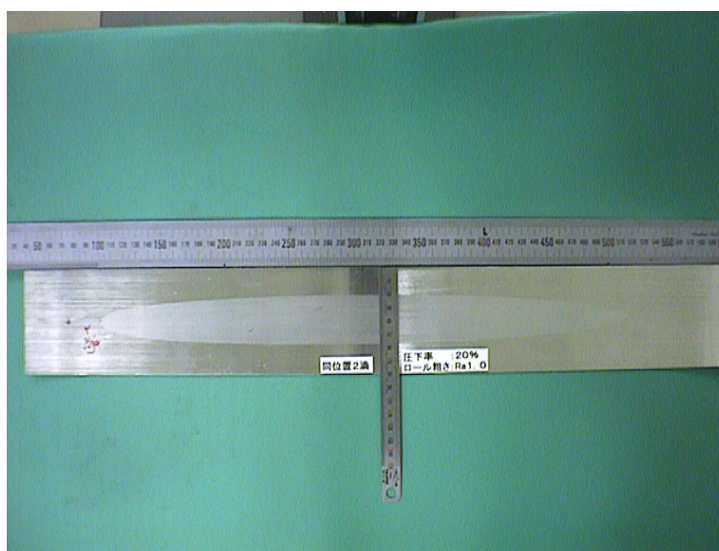


Fig. 3.6 圧延後の油膜の広がり例（圧下率 20%）

### 3.3.4 導入油膜厚の算出

このように、エマルジョン圧延後の材料表面に付着する割合（分配比）が求まったことから導入油膜厚の算出を試みた。トレーサ法の流れを Fig.3.7 に示す。尚、ここで得られた油膜厚は圧延出口部におけるロール／ストリップ間の油膜厚に相当すると考えられるため、ロール／ストリップ間へ導入された油膜は接触弧内で材料の表面積増大と共に薄くなると仮定し、 $1/(1-r)$  ( $r$ : 圧下率)をかけて補正し、ロール／ストリップ間の導入油膜厚とした<sup>3.14)</sup>。

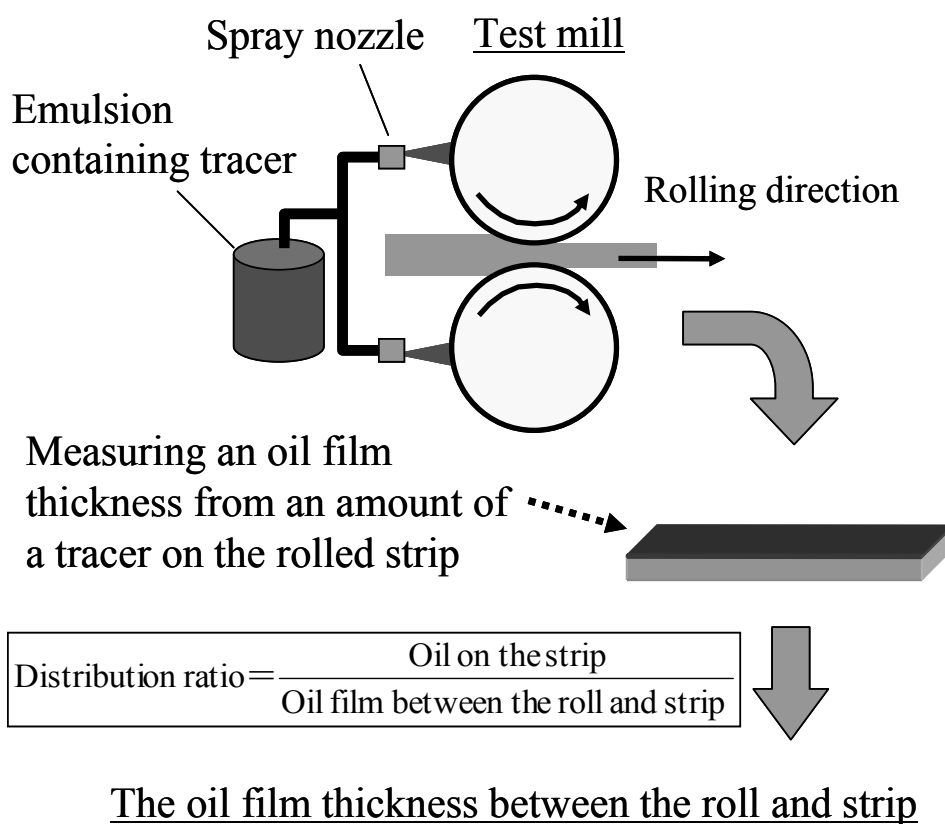


Fig.3.7 トレーサー法

## 3.4 実験結果と考察

### 3.4.1 板上油膜厚

選定したトレーサは、アルミニウムの熱間圧延等の高温条件においても使用できるものを選定した、そこで、まず、圧延入側のアルミニウム板温度を

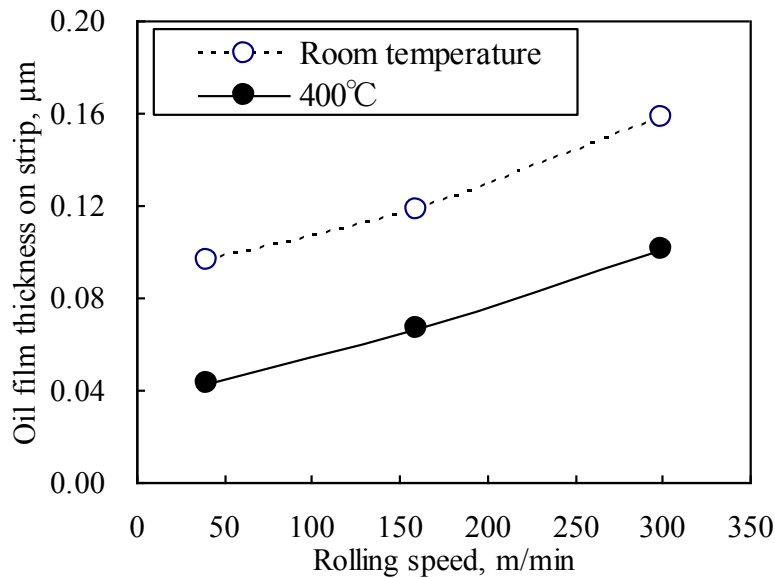


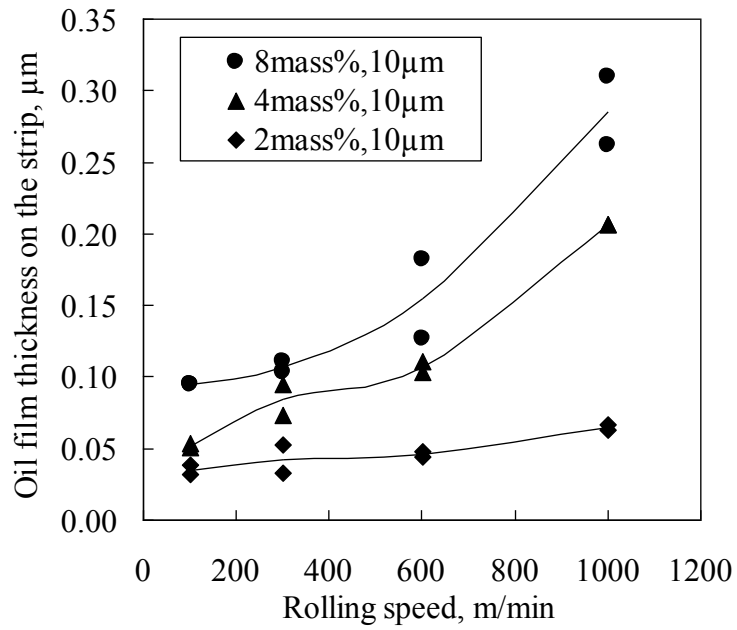
Fig. 3.8 板上油膜厚に与える板温度の影響

室温と 400°C に加熱したものを用い、高温時の測定可能性を調べると共に、温度による板上油膜厚の変化について調査を行った。結果を Fig. 3.8 に示す。このときエマルションは濃度 2mass%、平均粒径 10 $\mu\text{m}$  に調整して用いた。

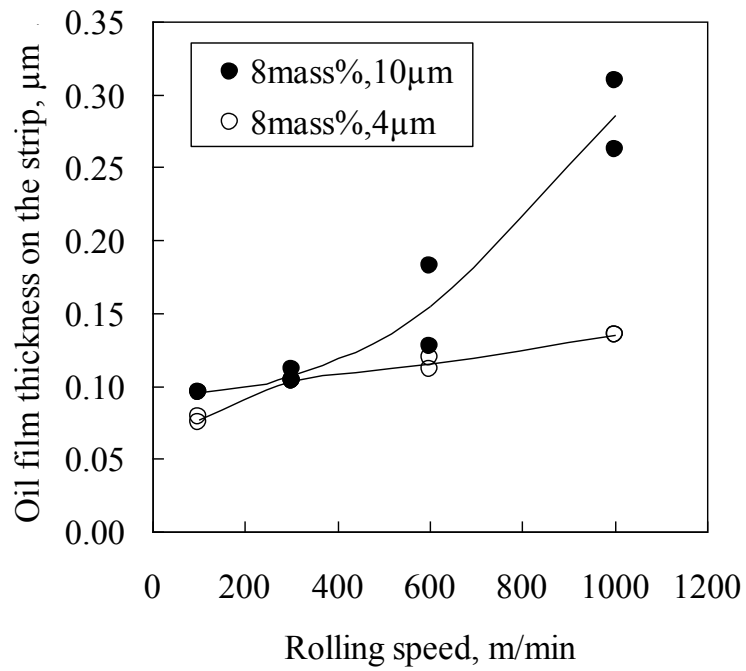
圧延油が揮発、若しくは分解すると予想される高温下においても、トレーサが定量可能であり、板上油膜厚を求めることができた。また、入側温度に関わらず、通板速度増加と共にアルミ板上油膜厚が増加するが、入側温度が高いほど全速度において少なくなっていることが判る。これは、アルミニウム板の温度増加に伴う基油粘度低下により、ロール/ストリップ間に導入される油量が減少したためと考えられる。

次に、板温度を室温にした場合のエマルション条件（油分濃度、粒径）の影響を調査した。結果を Fig.3.9 に示す。実験では、各条件について二回圧延を実施したが、比較的再現性の高い結果が得られている。

Figure 3.9(a)には油粒径が同一（10 $\mu\text{m}$ ）で油分濃度が異なる場合の通板速度と板上油膜厚の相関を示している。油分濃度に関わらず、通板速度増加に伴い板上油膜厚が増加していることが判る。また、油分濃度が高いほど板上油膜厚は厚くなっている。Fig.3.9(b)には、同一油分濃度で油粒径が異なる場合の板上油膜厚挙動を示す。油分濃度が一定であっても、板上油膜厚は粒径が大きいほど厚くなり、特に通板速度が速い程その差は大きくなっていることが判る。このようにエマルション濃度、粒径、通板速度によって板上油膜厚が変化することが明らかになった。



(a) Effect of oil concentration



(b) Effect of particle size

Fig.3.9 板上油膜厚の変化

### 3.4.2 分配比

板上油膜厚が求まったことから、使用した圧延油についてニート圧延を実施し、導入油膜厚、板状油膜厚、分配比を求めた。Fig. 3.10 に示す。板上油膜厚、導入油膜厚はともに通板速度の増加に伴って増大し、板上には 30~40% 程度の油膜が残留し、等分されていないことが明らかになった

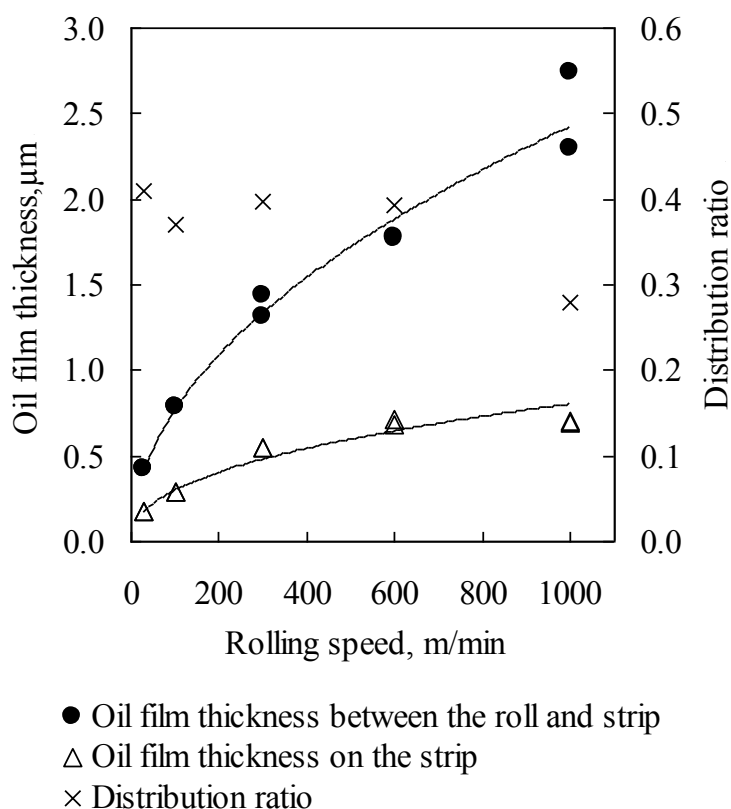


Fig.3.10 分配比

ここで、ロール (JIS SKD61)、アルミ板 (JIS A1050) の鏡面加工材と圧延油の接触角を Table 3.2 に示す。SKD61の方が接触角は大きくなっており、基油はロールの方が濡れ広がりやすいことになる。また、表面粗度が大きいほど真の表面積が大きくなり、よりぬれ易くなると考えられることから、ロールに比べ粗度が小さく、ぬれにくいアルミ板の方が表面に残留する油量が少なくなったと考えている。

尚、高速では導入油量が増加するが、板状油膜厚はほぼ一定になるため、分配比は若干小さくなっている。実験上のバラツキ範囲の可能性もあるが、

導入油膜厚が速度に応じて増加し、板表面粗さに対して十分厚くなった場合、板表面が油膜で覆われてしまうため、粗さによる油膜の捕捉効果が小さくなり、アルミ板上に油膜が残りにくくなった可能性がある。そのため、それ以上の導入油量は大部分がロール上の付着油となり、ロールへの分配量が増えた可能性がある。

Table 3.2 油の金属に対する接触角

JIS SKD61	JIS A1050
14.4°	8.6°

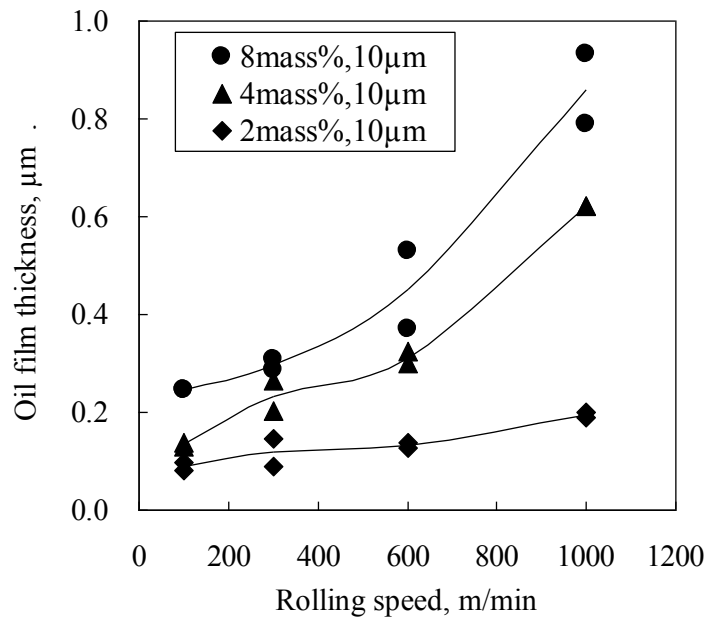
### 3.4.3 導入油膜厚測定結果

#### 3.4.3.1 エマルション濃度の影響

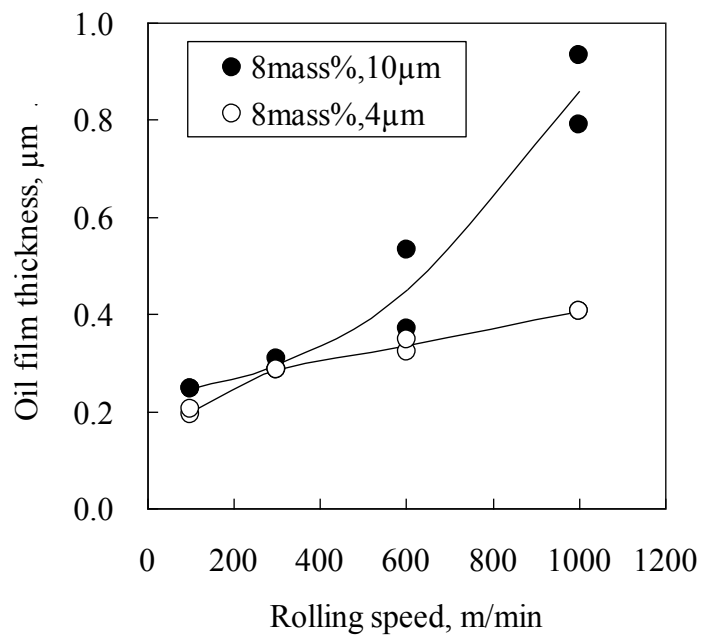
それぞれのエマルション条件について、板上油膜厚と分配比を用いて導入油膜を求めた結果について Fig.3.11 に示す。まず、Fig.3.11(a)に同じ粒径でエマルション濃度が異なる場合の、導入油膜厚と通板速度の関係を示す。導入油膜厚は 0.1~1 $\mu$ m の範囲にあり、どの速度においても濃度が高いほど厚くなることが明らかになった。これは、濃度増加によるプレートアウト量の増加や油滴の引き込み頻度の増加が影響していると考えられる。

さらに、各濃度間の導入油膜厚差は高速になる程大きくなっている。これは、低速になると流体潤滑理論上ロールバイト内の油量は少なくなる。一方で、エマルションが供給されてからロールバイトに引き込まれるまでの時間は長くなるため、金属やロールとの接触時間は増えることからプレートアウト量は増加しやすくなる。その結果、全てのエマルション条件においてプレートアウト量が導入油量に対して多くなるため、油滴引込みの影響は小さくなり、エマルション条件間の差も小さくなったのではないかと推測している。逆に、高速ではロールバイト内の導入油量は多くなるが、エマルションが供給されてから油滴が引き込まれるまでの時間は短いためプレートアウト生成には不利に働く。その結果、プレートアウトだけではロールバイト内の油膜形成に必要な油量を補いきれないため、油滴引込みの影響が大きくなり、エマルション性状の影響が顕著になったと推測している。





(a) Effect of oil concentration



(b) Effect of particle size

Fig.3.11 導入油膜厚

### 3.4.3.2 エマルション油滴径の影響

次に、同じ油分濃度 8mass%でエマルション粒径が異なる場合の導入油膜厚と通板速度の関係を Fig.3.11(b)に示す。

大粒径(10 $\mu$ m)の方が導入油膜厚は多くなり、通板速度が速いほど顕著になっていることが判る。これは、木村ら<sup>3.18)</sup>が提唱するトラップ理論に基づけば、粒径が大きいほどロールバイト入口部において固体表面による捕捉が起りやすくなるためと考えられる。或いは、粒径増加によってエマルションの乳化安定性が低下することで、油水分離が起りやすくなり金属表面へのプレートアウト生成に有利に働いた可能性もある。尚、低速で条件間の差が小さくなっているのは、濃度の場合と同様に、どの条件においても導入油量よりも十分にプレートアウトが存在しているため差が小さくなったと考えている。尚、同濃度であれば粒径が大きいほど油滴数は減少するので、金属面への衝突頻度やロールバイトへの引き込まれやすさは低下するにもかかわらず導入油膜厚は増えていることになることから、濃度だけでなく粒径の影響も無視できないことが判る。

### 3.4.3.3 圧延速度の影響

前述のように、濃度、粒径に関わらず速度増加と共に、導入油量は増加する。但し、高濃度、大粒径の方が速度に対する油膜の変化量が大きいことが判る。また、各エマルション条件間の差異も、低速では小さく、高速になるほど大きくなる。中原らは、ガラスディスクとロールを用いた実験装置で、低速では油溜まりが生成するが、速度の増加に伴って油溜まりが消失し、油滴の直接的な引き込み状態が中心となること、および、圧延界面入口部には逆流領域が存在し、高速になるほど小さな油滴は進入しにくくなって、大粒径の油滴が捕捉されやすくなることを報告している<sup>3.1~5)</sup>。つまり、高速ほど油滴の引き込み挙動の影響が大きくなる。よって、高濃度の方がより油膜は厚くなり、粒径についても逆流やトラップの効果が大きくなる。よって大粒径の方がより厚くなったのではないかと推察している。即ち、圧延においても、EHL試験機で確認された現象が生じ、通板速度に応じた入口部の状態(油溜まりや逆流効果)の変化により、プレートアウトや油滴引き込みのバランスも変化していることを示唆するものであると考えている。つまり、導入油膜厚の形成挙動を理解する上では、導入油膜厚だけではなく、圧延時のプレートアウト量も定量的に求め、両者の関係把握が必要であろう。

### 3.4.4 接触率

これまで、トレーサ法によって求めた導入油膜厚の挙動について述べてきた。しかし、圧延時の潤滑性を評価する上では、ロールバイト内の潤滑状態を理解することも重要である。そこで、今回得られた導入油膜厚を用い圧延時の潤滑状態の把握を試みた。

通常、潤滑状態を平均摩擦係数 $\mu_m$ で表すと、式(3.1)で示される<sup>1)</sup>。

$$\mu_m = \alpha \cdot \mu_b + (1 - \alpha)\mu_l \quad (3.1)$$

$\alpha$ は接触率といい、ロールと材料が金属接触または境界潤滑にある部分の占める割合を表したものであり、界面における潤滑状態の指標となる。また、 $\mu_b$ はその部分の平均摩擦係数、 $\mu_l$ は流体膜で隔てられている部分の摩擦係数である。この接触率に関しては、界面でのロール、材料の合成粗さと油膜厚から式(3.2)で求まるとした報告がある<sup>3.19~3.20)</sup>。

$$\alpha = \exp\left(-1.794 \frac{t}{\sigma_e}\right) \quad (3.2)$$

ここで $\sigma_e$ はロールと材料の合成粗さ、 $t$ は平均油膜厚である。ここで、前述のようにエマルジョン圧延におけるロール／ストリップ間に導入された油膜厚が定量的に求まっていることから、この導入油膜厚とロール、アルミ板表面粗度を用いて式(3.2)から接触率が求まると考えた。結果を Fig. 3.12 に示す。図中には、滴下法で得られたニート油の場合の接触率も示している。ここで、図中の接触率 0.17 付近の点線は油膜厚と合成粗さが等しくなる場合を示しており、点線以下では、粗さ以上に油膜が存在することを意味する。ニート油使用時には、潤沢な油膜が存在するが、エマルジョン圧延では接触部が多く、通板速度やエマルジョン条件によって接触状態が変化することが判る。また、油分濃度 8mass%、平均粒径 10 $\mu$ m のエマルジョン圧延では高速になるとともに接触割合が減少し、1000m/min では合成粗さ相当の油膜に近づいている。実際、圧延実験においても、この条件ではロールに対するかみ込み性が著しく低下したことから、実際の接触状態を表現していると考えられる。

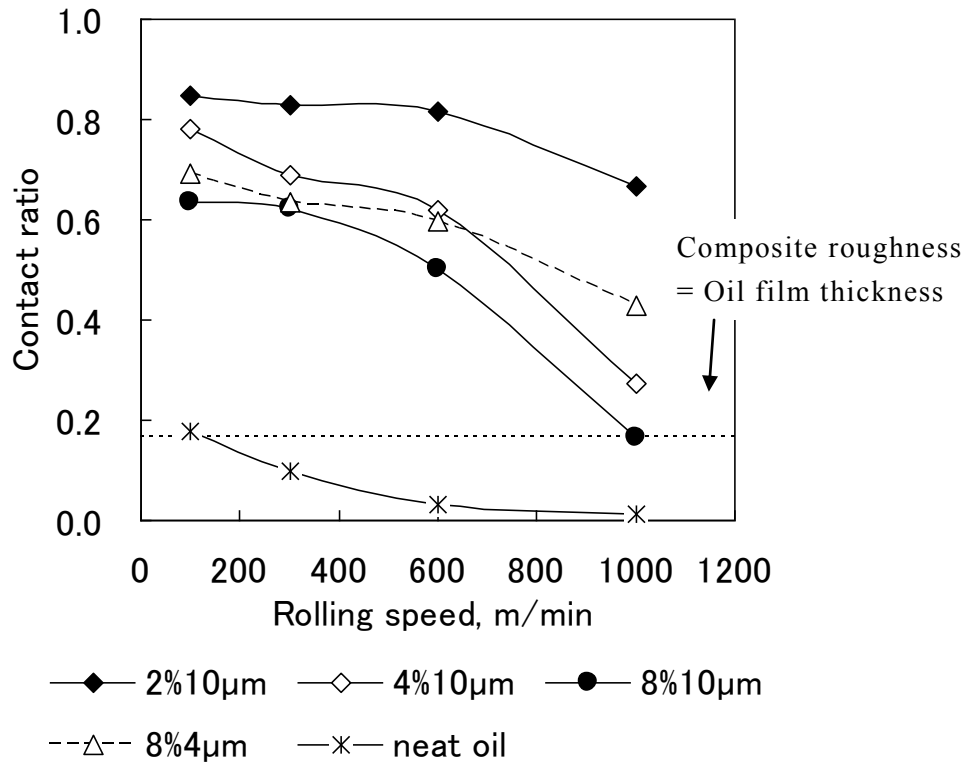


Fig. 3.12 接触率の変化

### 3.4.5 連続圧延を想定した導入油膜挙動

#### 3.4.5.1. 板上油膜厚と導入油膜厚測定結果

このようにトレーサ法によって、圧延時の導入油膜厚を定量的に求め、エマルション条件との影響を明らかにすると共に、接触率による潤滑状態が把握できた。一方、例えば冷間圧延などではエマルションを供給しながら数千mのコイルを連続的に圧延している。即ち、ロール上に噴霧されたエマルションは供給後直ちに圧延に使用され、エマルション中の油滴がロールや板表面に接する時間が非常に短いためプレートアウト量も多くはない。しかし、前述までの方法では、実験上、圧延前にロールにエマルションを3秒程度スプレーする必要があるため、ロール上に潤沢なプレートアウトが生じた状態で圧延を行っていることになる。つまり、実機のプレートアウト量よりも多

い状態で圧延している可能性がある。そこで、Fig. 3.13 に示すように、ロール周よりも長いアルミニウム板を用いて、供給直後のエマルションと短時間に生じたプレートアウトで圧延されたロール 2 周目相当部の挙動を調査することにより連続圧延を模擬することとした。

板上油膜厚および導入油膜厚測定結果を Fig. 3.14 及び 3.15 に示す。潤沢にプレートアウトされている場合と同様に、高濃度、大粒径、高速ほど板上油膜厚、導入油膜厚共に厚くなることが確認された。但し、100m/min では潤沢なプレートアウトの場合と連続供給の場合ではほとんど差はないが、1000m/min では連続圧延の方が  $0.1\sim 0.3\mu\text{m}$  程度減少している。これは、速度によらず 2 周目の方が 1 周目よりもプレートアウト量は少なくなっていると考えられるが、100m/min ではロールバイトの導入油膜厚が少ないため、減少後のプレートアウトであってもそれに比べると十分であり、導入油膜厚が多い 1000m/min では、プレートアウトの減少によって導入油膜厚を形成するための油量が不足してきたため影響が現れてきたのではないかと考えている。

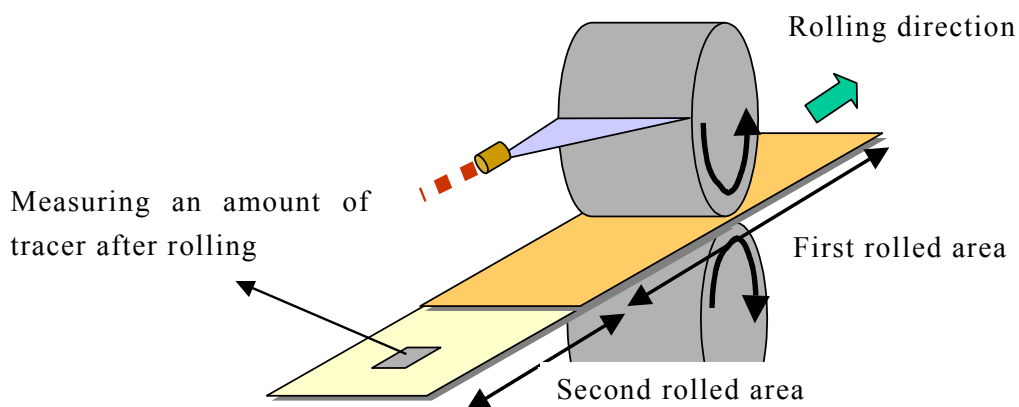


Fig.3.13 連続圧延を想定した圧延 2 周目の測定

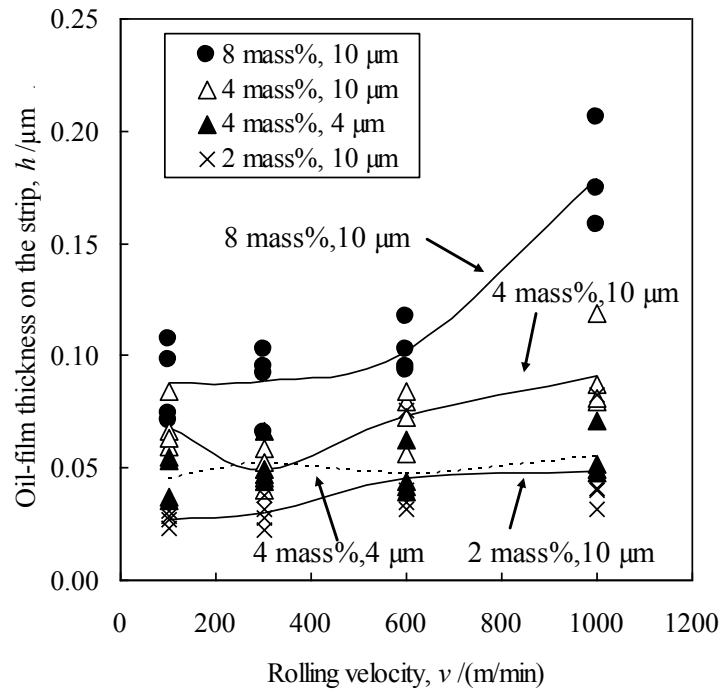


Fig.3.14 圧延 2 周目の板上油膜厚測定結果

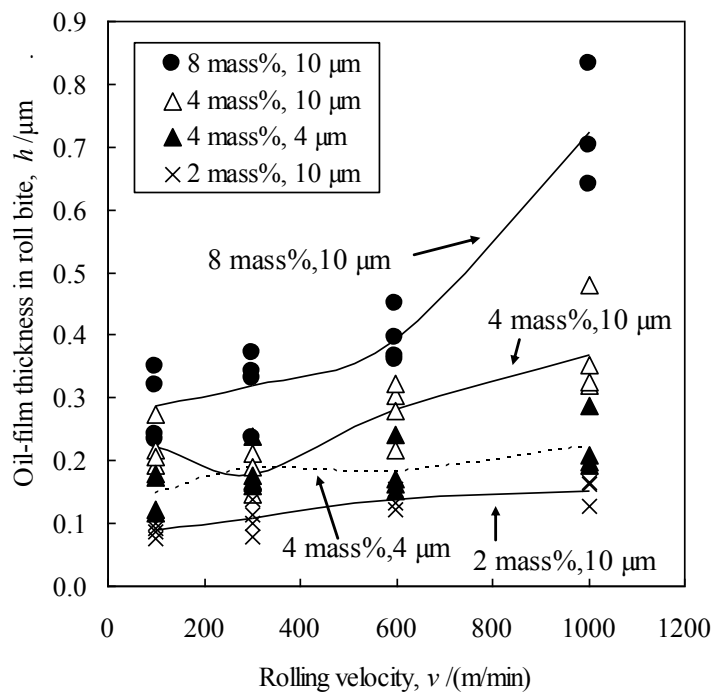


Fig.3.15 圧延 2 周目の導入油膜厚測定結果

### 3.4.5.2. 接触率と圧延潤滑性の関係

上記のように連続圧延を想定した場合にも、導入油膜厚を求めることができた。そこで、潤沢にプレートアウトした場合と同様に接触率を算出した。Fig.3.16 にその結果を示す。連続圧延の場合は高速域で導入油膜厚が減少することから、Fig.3.12 に比べると接触率も若干増加していることが判る。

ここで、接触率の変化は境界潤滑領域、金属接触領域の増減を意味することから摩擦係数に影響すると考えられる。そこで、ロールバイトにおける摩擦挙動を理解するため、接触率と摩擦係数の関係に着目した。圧延加工では、被圧延材速度はロールバイト入口においてロール速度よりも遅く、出口では材料が伸ばされるために速くなる。このときロールバイト内にロール周速と材料速度が一致する中立点が存在する。この中立点より出口側は先進域と呼ばれ、 $(\text{出口材料速度} - \text{ロール速度}) / (\text{ロール速度})$  が先進率と定義され、先進率は摩擦係数と共に増加することが判っている。尚、先進率は予めロール上に付けた点状のポンチの間隔と、圧延後の板表面に転写されたポンチ間隔を測定し、 $\text{先進率} = (\text{板表面ポンチ間隔} - \text{ロール上ポンチ間隔}) / (\text{ロー$

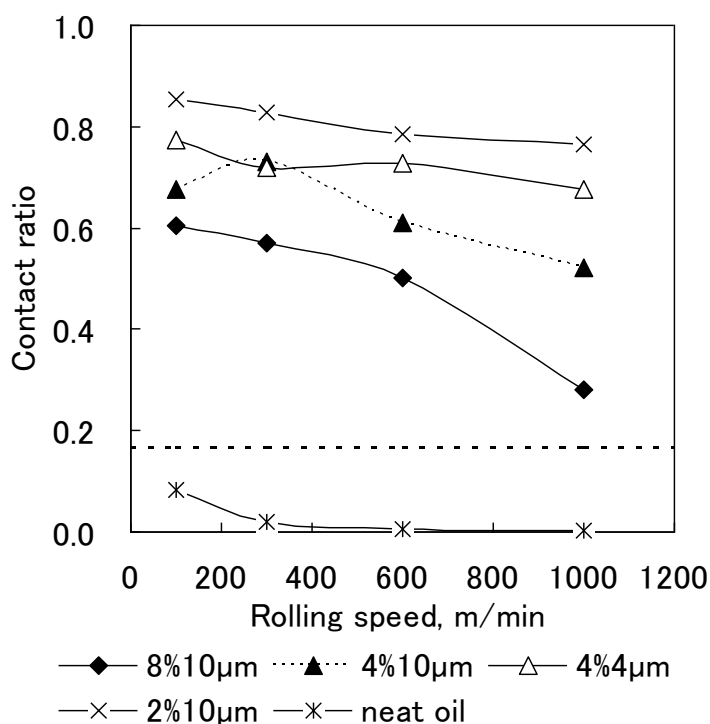


Fig.3.16 接触率

ル上ポンチ間隔)により算出した。尚、ここではさらに Brand & Ford の式を用いて先進率から摩擦係数を推定した<sup>3.21~3.22)</sup>。

各エマルションの通板速度と摩擦係数の関係を Fig3.17 に示す。油分濃度

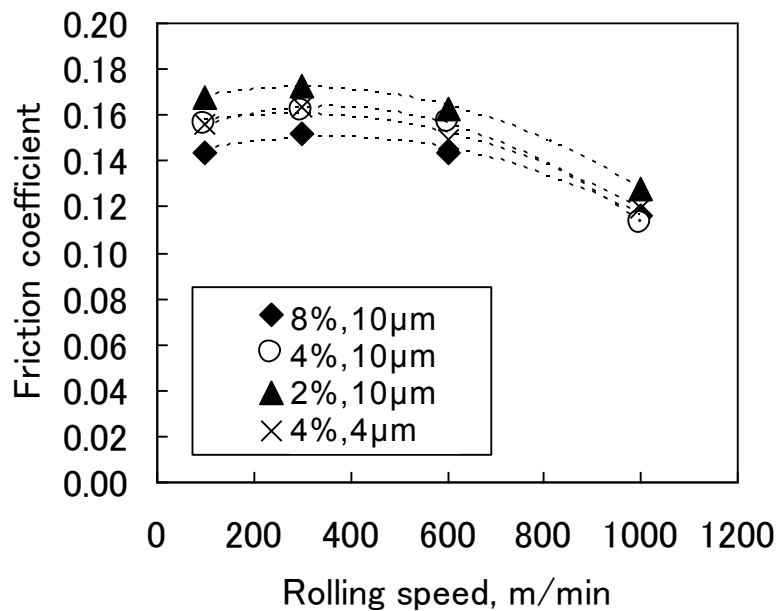


Fig.3.17 先進率の変化

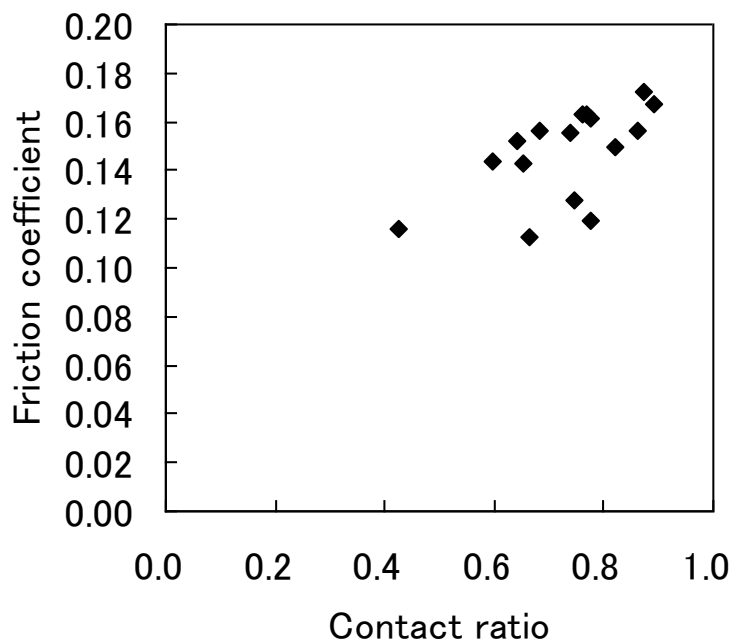


Fig.3.18 接触率と摩擦係数の関係



が高く、高速になるほど摩擦係数が低下することが明らかとなった。さらに、摩擦係数は 0.1 付近にあり今回の圧延条件は混合潤滑に近い領域にあることが推測される。

また、接触率と摩擦係数の関係を Fig. 3.13 に示すが、接触率の増加と共に摩擦係数が上昇していることが示されている。これまでも、導入油量によって接触状態が変化していると仮定して、圧延後の表面形態による導入油量の推定が行われている<sup>3,15)</sup>が、今回の結果から、導入油量がロールバイトの接触状態に影響し、摩擦係数を変化させていることを実験的に確認できた。

### 3.5 まとめ

これまで圧延時の導入油膜厚の挙動を理解するため様々な試みが行われていたが、実圧延における導入油膜厚の定量的評価は不十分であった。本章では適切なトレーサの選定と分配比の算出により、圧延時の導入油膜厚測定方法を確立した。本手法により、エマルションを用いた高速圧延時のロール／ストリップ間への導入油膜厚を求め、エマルション粒径、濃度、通板速度が潤滑状態に及ぼす影響を調査し、次の様な知見を得た。

- ・ 圧延後の板、ロールに残留する油量は等分されず、材料種や表面粗度が影響する。
- ・ エマルション濃度、粒径、圧延速度によって板上に残留する油膜（板上油膜厚）は変化する。
- ・ 導入油膜厚はエマルション濃度が高いほど、粒径が大きいほど、圧延速度が早いほど増加する。但し、エマルション条件間の膜厚の差異は速度によって変化し、高速になるほど差は大きくなる。これは、油滴の引込みとプレートアウトが導入油膜厚に与える影響が、通板速度によって変化している可能性を示唆する。
- ・ 導入油膜厚の増減で圧延界面の接触状態が変化することにより、圧延時の潤滑性は変化している。

このように、定量的に導入油膜厚が求まったことにより、油滴の引き込み効果が増える可能性が示された。これは、エマルション圧延油開発や潤滑メカニズムを理解する上では、圧延油中の添加剤やエマルションのプレートアウト性能だけではなく、油滴の引き込み現象の理解も重要であることを示唆するものである。

## 参考文献

- 3.1 中原・塩川・京極：O/Wエマルション潤滑の転相領域, トライボロジスト, 35, 12 (1990)907.
- 3.2 中原：エマルションの流体潤滑機構, トライボロジスト, 40, 8 (1995)644.
- 3.3 黒田・伊藤・宮田・伊藤：水中液滴エマルションの潤滑特性, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集 (2000) 1033.
- 3.4 D. Zhu, G. Biresaw, S. J. Clark and T. J. Kasun : Elastohydrodynamic Lubrication with O/W Emulsions, Trans. ASME, J. of Trib. 116 (1994) 310-320.
- 3.5 T. Nakahara, T. Makino & K. Kyogoku : Observations of Liquid Droplet Behavior and Oil Film Formation in O/W Type Emulsion Lubrication, Trans. ASME, J. of Trib. , 110 (1988) 348.
- 3.6 東崎・松本・森本・梶原・中野：エマルションの弾性流体潤滑（EHL）特性を考慮した冷間圧延潤滑メカニズム, 三菱重工技報, Vol.29, No.1 (1992) 18.
- 3.7 益子・岡田：O/W エマルションのトライボロジー, トライボロジスト, Vol.36, No.5 (1991) 369.
- 3.8 木村・岡田：X線透過法によるO/WエマルションのEHL膜厚測定, トライボロジスト, 34, 3 (1989) 200
- 3.9 P. Deneuveille : On the Use of Laboratory Friction Tests to select Lubricants for Cold Rolling of Aluminum Alloy, Lubr. Eng., Aug (1999) 28.
- 3.10 P. Deneuveille, P Charbonnier & J. C. Ravey : Phase Diagrams of a Cold Rolling Emulsion for Aluminum, Lubr. Eng., 51 (1995) 629.
- 3.11 小豆島・宮川：冷間圧延用潤滑油の潤滑性及び耐焼付き性の評価, 塑性と加工, Vol.25, No.285 (1984) 915.
- 3.12 S.P.Dubey, G.K.Sharma, K.S.Shishodia, & G.S. Sekhon : A Study of Lubrication mechanism of Oil-in-Water (O/W) Emulsions in Steel Cold Rolling, Int Lubr Tribology, Vol.57, No.5 (2005) 208.
- 3.13 S.P.Dubey, G.K.Sharma, K.S.Shishodia & G.S. Sekhon : Study on the Performance of Oil-in-Water Emulsions during Cold Rolling of Steel Strip, Tribol. Trans., Vol.48 (2005) 499..
- 3.14 佐伯・橋本：圧延時の油膜厚み－薄板冷間圧延の潤滑油に関する研究・第3報, 塑性と加工, 8, 72 (1967) 34.
- 3.15 左海・斉藤・岡本・加藤：板の表面観察による鋼の高速冷間圧延における潤滑状態の推定, 塑性と加工, 19, 214 (1978) 972.
- 3.16 小豆島・野呂・井柳：冷間圧延におけるエマルション潤滑に関する研究（第1

報) エマルション潤滑における圧延後の表面性状と導入油量, トライボロジスト, 34, 12 (1989) 879

- 3.17 R. A. Reich, J. M. Epp & R. P. Festa : A Method to Study the Mechanism of Lubrication with O/W Emulsions in Cold Rolling Aluminium Using  $H_2^{18}O$ , SIMS and TOF-SIMS, Lubr. Eng. , 50, 1 (1994) 31
- 3.18 Y. Kimura & K. Okada : Elastohydrodynamic Lubrication with Oil in Water Emulsions, Proc. JSLE. Int. Trib. Conf., Tokyo (1985) 937.
- 3.19 中島・柴田・上堀 : 高速冷間圧延潤滑機構に関する理論的及び実験的検討, 昭和 54 年度塑性加工春期講演会講演論文集 (1979) 53
- 3.20 A. H. Uppal & S. D. Probert : The Plastic Contact between a Rough and a Flat Surface, Wear, 23 (1973)173.
- 3.21 福田・井畑・樽本・澤田 : 純チタン薄板の圧延技術, 神戸製鋼技報, Vol.49, No.3 (1999) 34.
- 3.22 H.Ford : J. Iron & Steel Inst., Vol.168 (1951) 57.

## 4. プレートアウトの定量評価及び導入油膜厚との関係調査による油導入機構の推定

### 4.1 概要

前章までに、光干渉法を用いたディスクオンボール試験機による、導入油膜形成挙動の理解や、トレーサ法による圧延時の導入油膜厚の測定を行った。その結果、エマルジョン圧延時のロールバイトにおける導入油膜厚やその生成機構を解明する上で、油滴の引き込み挙動の理解が重要であることが判ってきた。しかし、圧延実験において油滴引き込み挙動を直接評価することは容易ではない。一方、導入油膜生成は油滴の引き込みとプレートアウトから成ることから、逆に導入油膜厚とプレートアウトの関係を明らかにすることにより、油滴引き込みの挙動の理解につながると考えた。

そこで、本章では前述の導入油膜厚に対応するプレートアウト量測定を行うことにより、油導入に及ぼすプレートアウトの影響を調査し、その関係性から油滴引き込みの挙動についての推定を行った。

### 4.2 プレートアウト量測定方法

実験方法と使用した材料について次に述べる。エマルジョンは、予めトレーサを添加した基油と高分子カチオン型分散剤を用い、ホモミキサで調整した。エマルジョンの粒径測定には電氣的検知帯方式粒度分布測定装置（測定誤差 $\pm 0.6\mu\text{m}$ 以内）を使用し、圧延前後のエマルジョン粒径が所定の値であることを確認した。プレートアウト量の測定には様々な方法が検討されているが<sup>4.1~7)</sup>、ここでは導入油膜厚測定実験と同じロール直径 297mm、幅 200mm の 2 段ロール高速圧延機を使用し、ロールに対するプレートアウト性を評価することとした。まず、所定のエマルジョンをノズルからロールへ一定時間噴霧させた後直ちに回転を停止し、ロール表面を所定面積マスキングした後、事前に十分乾燥させた脱脂綿に適量のヘキサンを含ませてロール上に付着している油分を拭き取った。拭き取り後、脱脂綿は速やかに炉温 150°C のオーブン炉内へ移し、重量が安定するまで 10~15 分程度加熱して、ヘキサン、水分を揮発させた。拭き取り前後の重量差をプレートアウト量として求めた。尚、エマルジョンの噴霧時間はシャッターを用いてコントロールした (Fig.4.1)。実験条件を Table 4.1 に示す。

Table 4.1 実験条件

Base oil	Mineral oil [viscosity: 75 mPa·s/20°C]
Emulsifying agent	Cationic dispersing agent
Strip temp. Roll temp.	Room temperature
Emulsion temp.	25–30°C
Roll	SKD61 [φ 297 mm、 Roughness: Ra 1.0 μm]
Spray flow rate	1 L/min(1×10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> /min)
Rolling velocity	100、 300、 600、 1000 m/min

### 4.3 実験結果と考察

#### 4.3.1 プレートアウト量測定結果

Figure 4.2、4.3 にエマルジョン濃度、粒径を変化させた場合のプレートアウト量測定結果を示す。Fig.4.2(a)、4.2(b)はロールへの噴霧時間を 3 秒間した場合の結果を、Fig.4.3(a)、4.3(b)にはロール 1 周分だけ噴霧した結果を示す。また、Fig.4.2(a)、4.3(a)はエマルジョン粒径を 10μm で統一し、油分濃度を变化させた結果を、Fig.4.2(b)は油分濃度 8mass%で粒径を 10μm と 4μm に

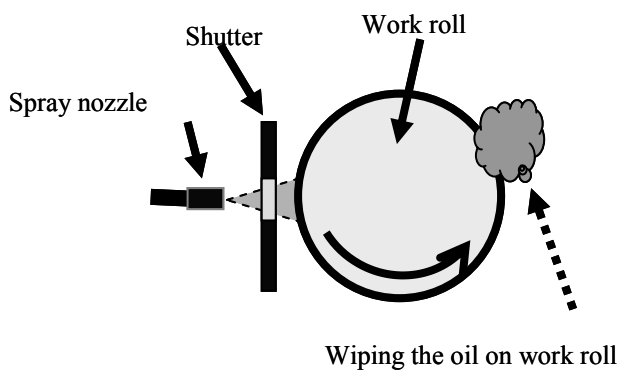
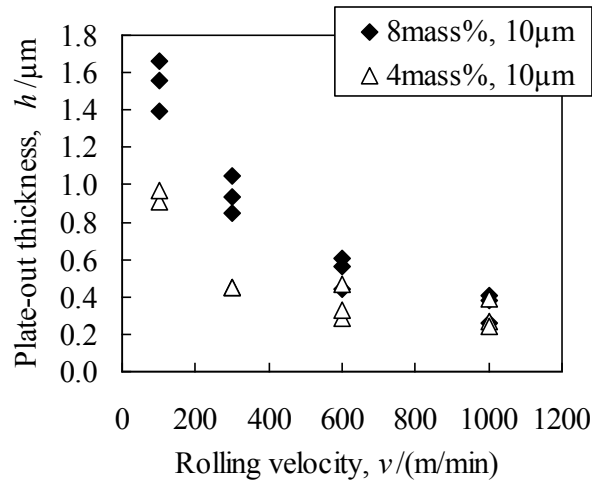
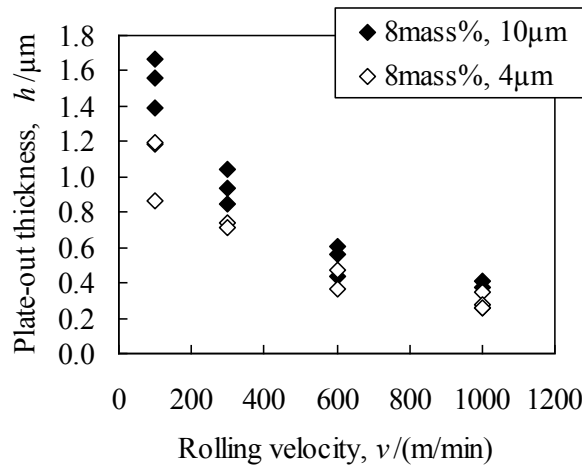


Fig.4.1 プレートアウト量測定方法



(a) 油分濃度の影響

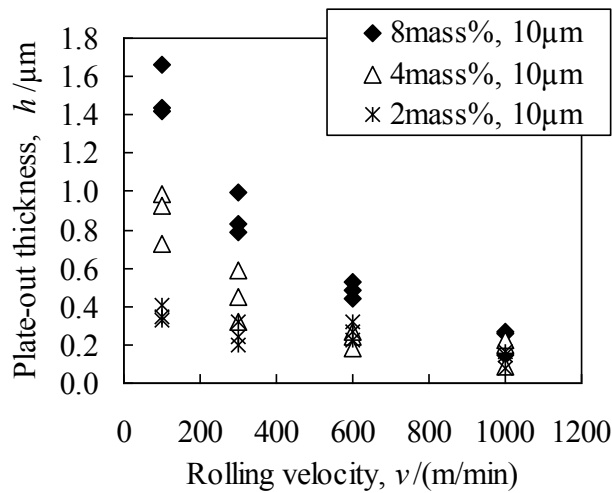


(b) 粒径の影響

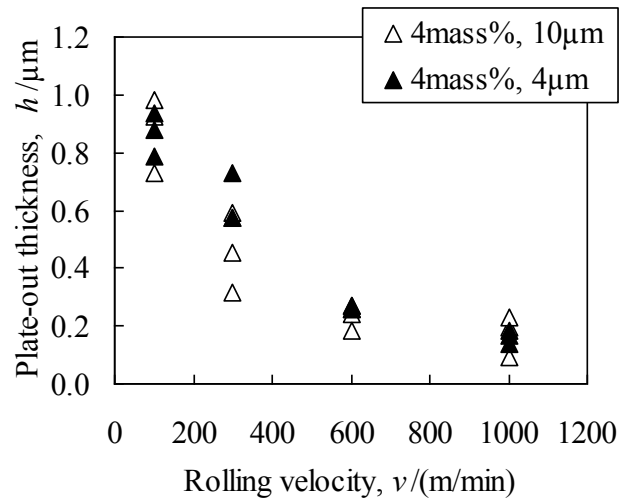
Fig.4.2 プレートアウト量測定結果 (spray time: 3 sec)

変化させた結果、Fig.4.3(b)は油分濃度 4mass%で同じく粒径を 10 $\mu$ m と 4 $\mu$ m に変化させた結果を示している。Fig. 4.2(a) より粒径が同じ場合には油分濃度が高いほどプレートアウト量は多くなることが判る。これは、油の供給量が多いほどロールとの接触頻度が増えるためと推定される。また、油分濃度によるプレートアウト量の差は低速になるほど大きくなっている。高速ではロールの回転による遠心力によって、プレートアウトする前にロールから飛ばされてしまうが、低速ではロール表面で油滴を含んだエマルションのまま保持されるため、付着現象が生じやすい。そのため、エマルション中の油分濃度の影響が出やすくなったのではないかと考えられる。

一方、Fig.4.2(b)では粒径は大きいほどプレートアウト量が大きくなること  
が明らかになった。粒径が大きいほどエマルションは不安定な状態にあり、



(a) 油分濃度の影響



(b) 粒径の影響

Fig.4.3 プレートアウト量測定結果 (spray time : 1 rotation)

濡れ広がりが生じやすくなるためではないかと考えられる。過去には板に対するプレートアウト性が報告されているが<sup>4,1-7)</sup>、回転体に対しても同様の傾向を持つことが示された。

Figure 4.3(a)、(b)はシャッターを用いて、ロール1周分だけ噴霧させた結果である。これは、実際の圧延ではロールに噴霧されたエマルジョンが直ちに、ロールバイトへと供給され、圧延に使用されるため、これを模擬して実施したものである。Figure 4.3(a)には同粒径で濃度を変化させた場合の結果を示しているが、Fig. 4.2(a)同様に濃度が高いほどプレートアウト量は多くなる傾向を示しており、また、その差は速度が遅いほど顕著であった。また、粒

Table 4.2 ロール 1 回転に要する時間

Rolling velocity (m/min)	Time for one-roll rotation (sec)
100	0.51
300	0.17
600	0.08
1000	0.05

径に関しても、Fig.4.3(b)は Fig.4.2(b)とは油分濃度が異なるものの、粒径が大きい方がプレートアウト量は増えるという同様の傾向が見られた。但し、その差は Fig.4.2(b)よりは小さく、油分濃度が低いことによる衝突頻度の低下が影響した可能性が考えられる。

このように、各エマルション条件間の傾向は噴霧時間によらないことが明らかになった。また、プレートアウト量は、特に低速でロール 1 周分噴霧した方が 3sec 噴霧よりも若干小さくなっており、噴霧時間がプレートアウト量に与える影響も明らかになった。ここで、過去の報告<sup>4,2~3)</sup>にあるような顕著な差が見られなかったのは、今回使用したエマルションのプレートアウト性が高くロール 1 周分の噴霧でも飽和に近くなったためと考えている。

#### 4.3.2 導入油膜厚とプレートアウト量の関係

このように各エマルション条件に対するプレートアウト量が求まったことから、前章で求めた導入油膜厚との比較を行った。結果を Fig.4.4 に示す。図中には各圧延速度別にプレートアウトと導入油量の関係を示している。圧延速度にかかわらずプレートアウト増加と共に導入油量も増えることが確認された。また、圧延速度が速いほど変化量が大きくなっており、プレートアウトの変化が導入油膜厚に与える影響も大きくなることがわかった。

#### 4.3.3 入側油膜厚の算出と油導入に及ぼすプレートアウト量の影響

プレートアウトと導入油膜は相関を持つことが明らかになったが、前述のように、ロールバイトの導入油膜はプレートアウトと油滴引き込みによる入口部の油膜形成を経て生じていると考えられている。即ち、プレートアウトが油導入に与える影響を考察する上では、導入油膜よりも入側油膜厚との比



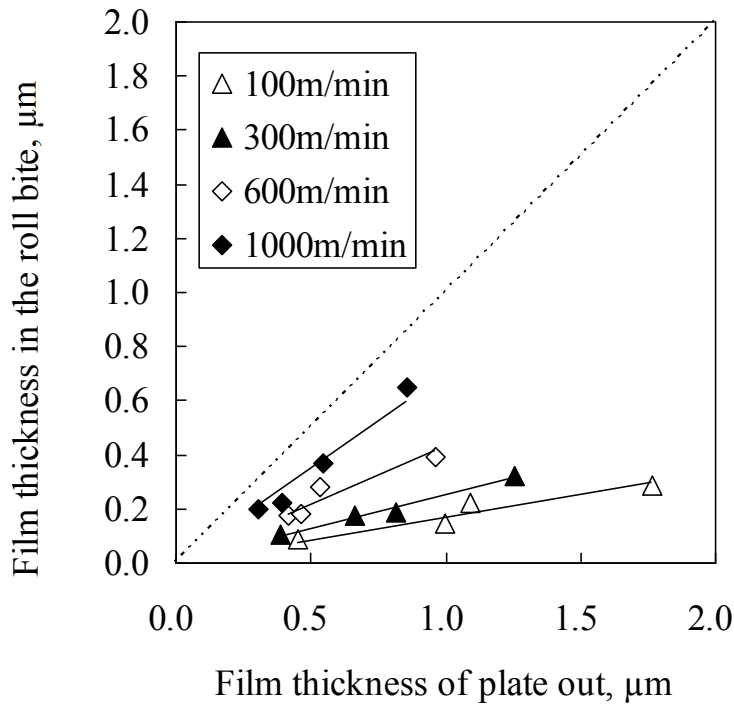


Fig.4.4 プレートアウトと導入油膜厚の関係

較をすることが望ましいと考えた。

ここで、入側油膜厚と導入油膜厚の関係について、小豆島らは熱的效果を考慮したレイノルズ式 (4.1) ~ (4.3) を提案し、入口部の油膜からエマルション圧延時の導入油膜厚が推定できることを実験的に確認している<sup>4.8~16)</sup>。

$$\frac{dP}{dh} = -\frac{6\eta(U_1+U_2)}{\tan\theta} \left( \frac{h-h_1}{h^3} \right) \quad (4.1)$$

$$K \cdot \frac{d^2T}{dy^2} + \eta \left( \frac{du}{dy} \right)^2 = 0 \quad (4.2)$$

$$\eta = \eta_0 \exp[\alpha P + \beta(T - T_0)] \quad (4.3)$$

$U_1$  : 入口部での材料速度、 $U_2$  : 工具速度、 $h$  : 油膜厚み、 $h_1$  : 入口部での油膜厚み、 $\theta$  : かみ込み角、 $T$  : 温度、 $T_0$  : 周辺温度、 $K$  : 潤滑油の熱伝導率、 $\eta_0$  : 常圧粘度、 $\alpha$ 、 $\beta$  : 粘度の温度、圧力係数

ここで、前述のトレーサ法により、各エマルション条件の導入油膜厚について定量的に求まっていることから、式 (4.1) ~ (4.3) を用いて逆算するこ

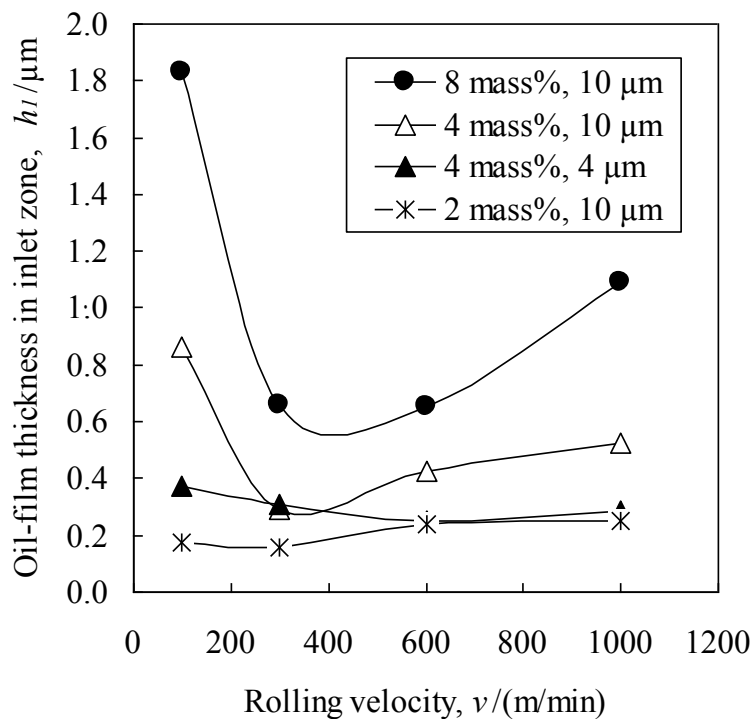


Fig.4.5 入側油膜厚

とによりそれぞれの入側油膜厚が求まると考えた。結果を Fig.4.5 に示す。導入油膜と同じく、油分濃度が高いほど、粒径が大きいほど入側油膜も多くなることが判った。また、低速度の油分濃度 4、8mass%の結果を除くと速度増加と共に入側油膜厚は増加していた。このように、エマルションの状態や圧延条件によって入側の油膜状態も変化することが示唆された。

次に、入口部の油膜厚と対応するプレートアウト量との比較を行った。結果を Fig.4.6 に示す。導入油と同様の傾向であることが判る。図中点線はプレートアウト量と入側油膜厚が同じ場合を示した。1000m/min のデータは点線よりも大きくなる結果となった。そこで、Fig.4.7 に示すように縦軸を入側油膜厚に対するプレートアウト量の割合として、速度による変化を調べた。ここで、1 以上ではプレートアウトが十分に存在し、1 以下ではプレートアウトだけでは入側油膜厚を与えることが出来ない。即ち、油滴の引き込み効果が無視できないことを意味する。結果、通板速度に応じて比が変化しており、低速の 4mass%、8mass% データを除くと、通板速度の増加と共に比は小さくなり、条件によっては高速で 1 以下になることが判った。これは、高速になるほどもう一つの供給現象である油滴導入の影響が大きくなることを示唆すると言える。

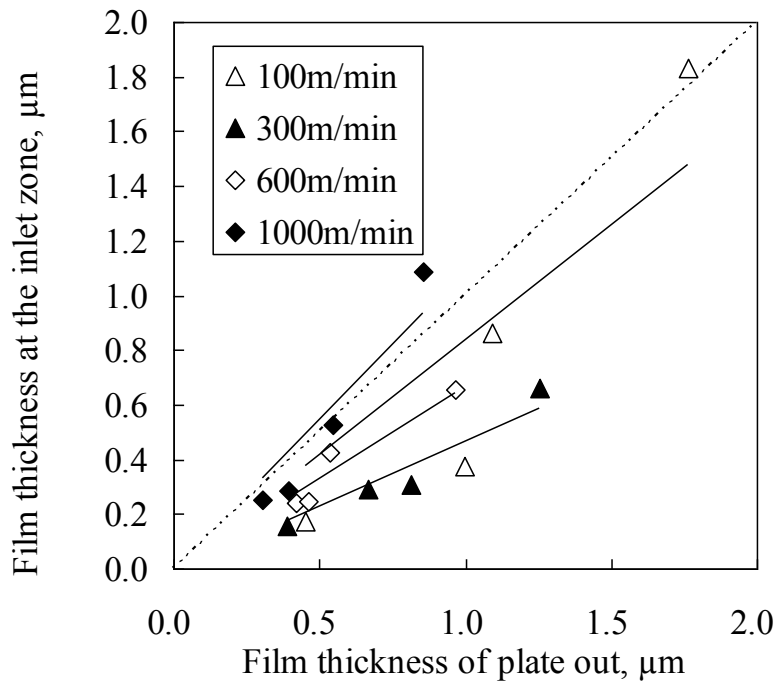


Fig.4.6 プレートアウトと入側油膜厚の関係

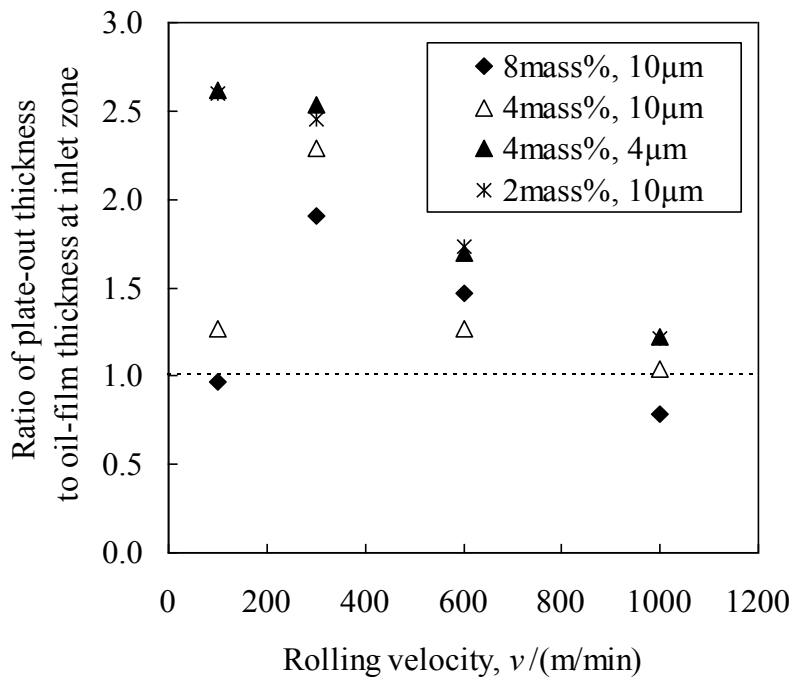


Fig.4.7 入側油膜厚に対するプレートアウト量の割合の変化

尚、低速で見られた現象の理解には至っていないが、高濃度や大粒径の条件で見られることから、中原らの文献で示されているように入口付近の油溜まりの生成が影響している可能性がある。即ち、高濃度、大粒径のエマルションで生じた油溜まりが、プレートアウト、油滴引き込みとは異なる第3の油供給源として働き、実際には入側油膜が増加した可能性がある。一方で、プレートアウトは、本来のエマルションに由来する量であるため、結果的に分配比として小さくなってしまったと推察している。

#### 4.4 まとめ

本章では、O/W エマルション圧延時のプレートアウト量を実験的に求め、エマルション粒径、濃度、通板速度の影響を明らかにした。さらに、導入油膜厚から入側油膜厚に算出し、プレートアウト量と比較を行うことにより、導入油膜生成における油滴の引き込み挙動の影響およびプレートアウトとの関係について考察した。得られた知見を以下に記す。

- ・ プレートアウト量測定方法を考案した。プレートアウト量は油分濃度、粒径増加と共に増えることが判った。但し、プレートアウト量は導入油膜厚とは逆に速度増加によって減少し、各エマルション間の差は速度が低いほど大きくなることが判った。
- ・ 導入油膜厚から入側油膜厚を算出した。入側油膜厚は油分濃度、粒径が増えるほど大きくなる事が判った。
- ・ プレートアウト量と入側油量の関係は、速度に応じて変化することを明らかにした。また、高速になるほど油滴導入の影響が大きくなる可能性を示した (Table 4.3)。

Table 4.3 導入油膜とプレートアウトの速度による変化

	高速	低速
導入油膜	多	少
プレートアウト	少	多
プレートアウト/入側油膜	小	大

今回の得られた知見は、エマルション圧延の潤滑においては、圧延油中の添加剤やエマルションのプレートアウト性だけではなく、油導入現象の理解も重要であることを示唆するものである。

## 参考文献

- 4.1 白田・酒井：鋼用冷間圧延油のプレートアウト性と潤滑性について，潤滑，vol.27, No.8 (1982) 594.
- 4.2 間瀬・河野・山本：冷間圧延の潤滑特性に関する検討，第 28 回塑性加工連合講演会 (1977) 114.
- 4.3 間瀬・河野・山本：冷間圧延油のプレートアウト性に関する検討，鉄と鋼，64，11 (1978) 250.
- 4.4 木村・藤田・西浦・曾谷：エマルション圧延油のプレートアウト特性，平成 24 年度塑性加工春期講演会講演論文集 (2012) 159.
- 4.5 藤田・松原・木村・曾谷：エマルション圧延油の高効率プレートアウト技術，平成 24 年度塑性加工春期講演会講演論文集，(2012) 161.
- 4.6 藤田・松原・木村・曾谷：実験圧延機を用いたプレートアウトによる潤滑制御，平成 24 年度塑性加工春期講演会講演論文集 (2012) 163.
- 4.7 藤田・木村：冷間圧延における潤滑特性に及ぼすプレートアウト量の影響，鉄と鋼，vol.97，(2011) 32.
- 4.8 小豆島・木原・五弓：冷間圧延における油膜厚みの解析と測定 冷間圧延における摩擦と潤滑の研究Ⅲ，塑性と加工，Vol.19, No.214 (1978) 958.
- 4.9 小豆島・北村：定常変形加工における入口油膜厚み，塑性加工春期講演会論文集，vol.1986 (1986) 151.
- 4.10 小豆島・野呂・井柳：冷間圧延のエマルション潤滑における表面性状の研究Ⅱケン化価，エマルション濃度・粒径，乳化剤量の影響，塑性加工春期講演会講演論文集，vol.1987 (1987) 115.
- 4.11 小豆島・野呂・井柳：冷間圧延のエマルション潤滑における表面性状の研究Ⅲエマルション潤滑における入側油膜厚みの解析，塑性加工連合講演会講演論文集，vol.39th (1988) 557.
- 4.12 小豆島・浅場・井柳：冷間圧延のエマルション潤滑における表面性状の研究Ⅳ入口油膜厚み解析結果の定量的検討，塑性加工春期講演会講演論文集，vol.1989 (1989) 711.
- 4.13 小豆島・野呂・井柳：冷間圧延におけるエマルション潤滑に関する研究（第 1 報）エマルション潤滑における圧延後の表面性状と導入油量，トライボロジスト，34，12 (1989) 879.
- 4.14 小豆島：表面粗さを考慮に入れた油膜厚みの解析と測定 冷間圧延における摩擦と潤滑の研究Ⅴ，塑性と加工，Vol.36, No.414 (1995) 737.
- 4.15 小豆島・野呂：エマルション潤滑における入口油膜厚みの解析と定量的検討

冷間圧延における摩擦と潤滑の研究VI, 塑性と加工, Vol.39, No.455 (1998) 1238.

- 4.16 稲垣・小豆島 : 冷間圧延のエマルション潤滑におけるトラップ率に及ぼす潤滑条件の影響, 塑性と加工, Vol.50, No.576 (2009) 54.
- 4.17 D. Zhu, G. Biresaw, S. J. Clark and T. J. Kasun : Elastohydrodynamic Lubrication with O/W Emulsions, Trans. ASME, J. of Trib. 116 (1994) 310–320.
- 4.18 T. Nakahara, T. Makino & K. Kyogoku : Observations of Liquid Droplet Behavior and Oil Film Formation in O/W Type Emulsion Lubrication, Trans. ASME, J. of Trib. , 110 (1988) 348.
- 4.19 中原・塩川・京極 : O/Wエマルション潤滑の転相領域, トライボロジスト, 35, 12 (1990)907.
- 4.20 中原 : エマルションの流体潤滑機構, トライボロジスト, 40, 8 (1995)644.

## 5. 圧延機を用いた圧延潤滑性、表面性状制御の可能性に関する検証

### 5.1 概要

前章までに、EHL 膜厚測定装置や小型圧延機によってロール／圧延材間への導入油膜厚形成挙動について調査を行い、以下のような知見が得られた。

- ・ 導入油膜厚に対しプレートアウトが潤沢にあるフラッド潤滑状態の場合、油滴の直接引き込み効果は小さく、導入油膜厚よりもプレートアウト量が少なくなるスターブ潤滑状態になった場合、油滴引き込みの影響が大きくなる。
- ・ 導入油膜厚とプレートアウト量の関係は、圧延速度によって変化する（圧延速度が速くなると導入油量は増加するがプレートアウト量は減少する）。
- ・ O/W エマルション中の水はプレートアウトの減少、さらには、導入油膜厚を減少させる効果を持つ。

第1章で述べたように、圧延工程をもつ製造業では、圧延時の潤滑性や表面性状の制御（最適化）は重要課題の一つとなっている。特に、実圧延を考慮すると現有設備をそのまま活用できる方が良いため、エマルション条件やその供給方法による解決が望ましい。

そこで、本章では、これまでに得られた知見に基づいて、小型圧延機を用い、圧延潤滑性や表面性状の制御可能性の検証を行った。尚、導入油膜厚の変化は圧延潤滑性だけでなく、圧延材の表面性状に影響を与えることは過去の報告で明らかになっている<sup>5,1~6)</sup>。さらに、小型圧延機によって得られた結果よりエマルション圧延時のメカニズムについても整理した。

尚、今回使用した圧延機は、実圧延における圧延油や圧延条件を探索するために使用されているものであり、本装置で示された傾向は実操業でも再現できる可能性があると考えている。本章での検討項目を以下に記載する。

- ① O/W エマルション圧延時の圧延潤滑性、表面性状の制御可能性の検討
  - (a) 供給条件による圧延潤滑性制御範囲拡大の可能性
  - (b) 潤沢状態、スターブ条件における潤滑制御の可能性
- ② 水及び界面活性剤による圧延潤滑性、表面性状の制御可能性の検討

## 5.2 実験

### 5.2.1 実験装置と条件

圧延機は前章までと同じ 2 Hi 型の圧延機、圧延ロール、アルミ板(A1050)を使用した。O/W エマルジョンに用いた油は 2.4cSt/40℃と 32cSt/40℃の鉱物油にオレイン酸を 1mass%あるいは 3mass%添加したものを使用した。また、エマルジョンの調整には、ホモジナイザーを用いた。ホモジナイザーを所定の回転数で攪拌し、開始 5 分、10 分、20 分、30 分後の粒径をコールターカウンタによって測定し、粒径が安定していることを確認した。また、ここで用いる粒径は、10~30 分間に測定した中位径の平均とした。また、本章では、圧延潤滑性の指標として先進率を用いた。先進率は、これまで同様ロール上に付けたポンチの間隔と板上に転写されたポンチの間隔の差から求めた。表面性状の評価には HORIBA 製グロスチェッカを用いた。測定は圧延方向及び幅方向の光沢度を測定した。

### 5.2.2 実験方法

#### 5.2.2.1 エマルジョン条件による圧延潤滑性、表面性状制御

##### (a) 潤滑状態変化による油滴引き込み効果発現可能性についての検証

プレートアウトと導入油膜厚の関係が圧延速度によって変化するので、速度が速いほどスターブ状態になり、油滴引き込みの効果が大きくなる可能性がある。また、実機で圧延潤滑性をコントロールする場合には、制御範囲は広いほど望ましいが、油滴引き込み効果の拡大によってエマルジョン条件による潤滑性、表面性状の制御範囲が広がる可能性がある。

そこで、小型圧延機を使用し、まず導入油膜に対しプレートアウト量が不足する高速条件において、油滴引き込み効果、即ちエマルジョン供給条件による圧延潤滑性、表面性状の制御可能性について検証した。実験ではプレートアウトと油滴引き込みの影響を個々に調べる方法として 2 種類の供給方法を採用した。

前述のように、通常のテスト圧延では、開始時にロールを回転させながら 3 秒間の噴霧を行うため、ロール上にプレートアウトが形成する。その上で、エマルジョンをそのまま噴霧供給し、切り板を挿入し圧延を行っている。ここで、圧延前の 3 秒噴霧後シャッターによって供給を停止し、直ちに切り板



を挿入して圧延を行えば、ロール上のプレートアウトのみで圧延できると考えた (Fig5.1)。そこで、このプレートアウトのみによる圧延とプレートアウトとエマルション供給による通常の圧延の2種類の方法を行い、導入油に対するプレートアウトとエマルション由来の油滴引き込みの影響度について調査を行った。また、圧延には2種類の粘度を持つ油を使用し、粒径についてはホモジナイザーの回転数によってコントロールした (Table5.1、Fig.5.2、Fig.5.3)。その他の実験条件について Table5.2 に示す。

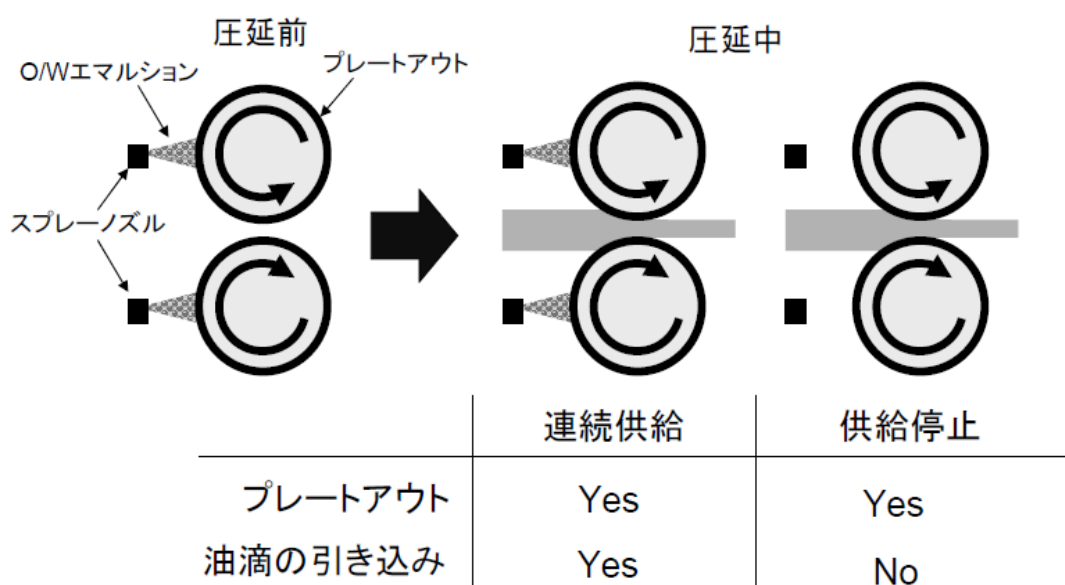


Fig.5.1 2種類のエマルション供給方法

Table 5.1 使用したエマルション条件

	基油	粘度	オレイン酸 添加量	ホモジナイザー 回転数	粒径 (*)
1	低粘度鉍物油 A	2.3cSt	3mass%	8000rpm	11.56 $\mu$ m
2	低粘度鉍物油 A	2.3cSt	1mass%	12000rpm	7.09 $\mu$ m
3	高粘度鉍物油 B	27cSt	1mass%	8000rpm	18.52 $\mu$ m

\* 粒径は 10~30 分の平均中位径

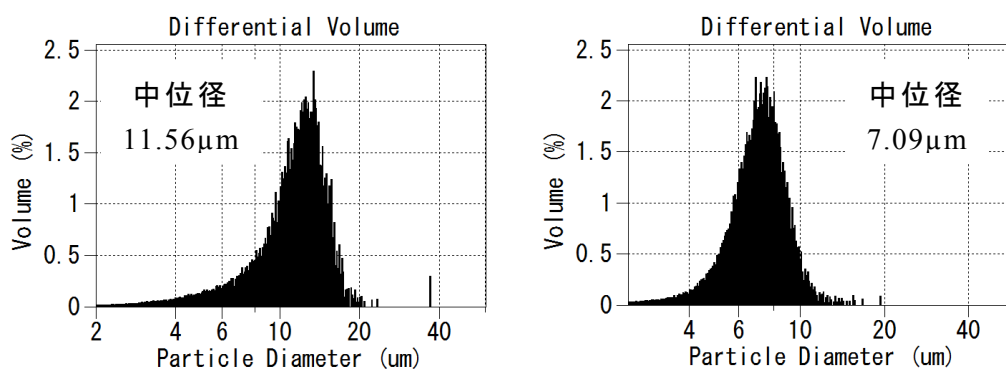


Fig.5.2 エマルション粒度分布(低粘度油A):グラフは30min攪拌後

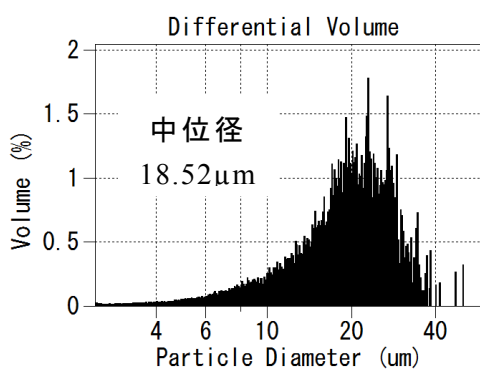


Fig.5.3 エマルション粒度分布(高粘度油B) :グラフは30min攪拌後

Table 5.2 実験条件

圧延油	鋳物油 低粘度油 A : 2.3cSt/40 °C 高粘度油 B : 32cSt/40°C
添加剤	オレイン酸
ロール	SKD61 (φ 297mm×w200mm)
アルミ板	A1050 (l960×w80×t2.0)
エマルション温度	45°C
エマルション供給量	1 L/min
エマルション油分濃度	4mass%
圧延速度	1000m/min
圧下率	20%

(b) エマルジョン条件による圧延潤滑性、表面性状制御の可能性

詳細は後述するが、2種類の供給方法を用いた実験から、導入油量の増加とプレートアウトの減少によってスターブ潤滑状態が生じれば、エマルジョン条件による制御可能性が発現することを確認した。つまり、圧延速度は速いほどエマルジョン条件による圧延潤滑性、表面性状の制御を行う上では有利であると考えられる。

一方、仮に圧延条件（圧延速度）を変えなくてもプレートアウトを制御することで、フラッド潤滑状態とスターブ潤滑状態を作り出すことができれば、O/W エマルジョン条件による圧延潤滑性、表面性状の制御範囲も変化できると考えられる。そこで、ここでは圧延条件は一定としてプレートアウト量を変化させて、O/W エマルジョン条件による圧延潤滑性、表面性状の制御を試みた。

実験はこれまで同様、基油に2種類の粘度を持つ鉱物油を用い、それぞれ、油分濃度の異なる3種類のエマルジョンを調整した。粒径はTable 5.4に示すように、ホモジナイザーを用いて30分間攪拌した後使用した。尚、圧延中も

Table 5.3 実験条件

潤滑油	鉱物油 低粘度油 A : 2.3cSt/40°C 高粘度油 B : 32cSt/40°C
添加剤	オレイン酸
ロール	SKD61 (φ 297mm × <sup>w</sup> 200mm)
アルミ板	A1050 ( <sup>l</sup> 960 × <sup>w</sup> 80 × <sup>t</sup> 2.0)
エマルジョン温度	45°C
エマルジョン流量	1 L/min
エマルジョン油分濃度	2、4、8mass%
圧延速度	100、600、1000m/min
圧下率	20%

Table 5.4 使用したエマルジョン条件

	基油	粘度	オレイン酸 添加量	界面活性剤	粒径 (*)
1	低粘度鉱物油	2.3cSt	3mass%	なし	9~11 $\mu$ m
2	高粘度鉱物油	32cSt	3mass%	対油 1mass%	14~20 $\mu$ m

\* 粒径は 30 分以降の平均中位径

定期的にコールターカウンターによって粒径を管理した。O/W エマルジョンは圧延中もロールに常にスプレーし続けた。プレートアウトは、圧延前にロール上に生じるプレートアウトだけでなく、十分なプレートアウトを再現する方法として、圧延前のアルミニウム板上に各油をバーコーター（# 4）で均一塗布することにより常に一定量供給した。

#### 5.2.2.2 水及び界面活性剤による圧延潤滑性、表面性状制御

ここまでは圧延潤滑性、表面性状の制御におけるエマルジョン中の油分の影響について検討を行ってきた。一方、2 章のディスクオンボール試験機による調査では O/W エマルジョンの水がプレートアウトした油膜を再攪拌し油膜厚を減少させる効果を持つことを明らかにした。そこで、本知見に基づき、水による圧延潤滑性や表面性状の制御可能性について検証した。

実験は、圧延前のアルミニウム板上にプレートアウトを想定した油を塗布し、ロールに水をポンプで供給した。また、圧延においても水による再攪拌が生じている場合、水中に界面活性剤を添加した場合には、さらに攪拌効果による油膜低減量が大きくなる可能性がある。そこで、ノニオン系界面活性剤を使用しその効果についても検証した。尚、通常 O/W エマルジョン調整時の界面活性剤の濃度は対油で添加するためである。対油 1mass%で固定し、実験で使用している油分濃度条件 2mass%、4mass%、8mass%に対応する、0.02mass%、0.04mass%、0.08mass%とした。それぞれの界面活性剤を事前に水に溶解させたのち圧延実験に使用した。実験条件を Table 5.5 に示す。

Table 5.5 実験条件

圧延油	鉍物油 ①低粘度油：2.3cSt/40℃ ②高粘度油：32cSt/40℃
エマルション油分濃度	2、4、8mass%
添加剤	①オレイン酸 1mass%、3mass% ②オレイン酸 1mass%
界面活性剤	ノニオン系界面活性剤 (高粘度油のみ使用)
界面活性剤濃度	0.02、0.04、0.08mass%
水温	45℃
供給量	1L/min
アルミ板	A1050 (l960×w80×t2.0)
ロール	SKD61 (φ 297mm×w200mm)
压下率	20%
圧延速度	100、600、1000m/min

### 5.3 結果と考察

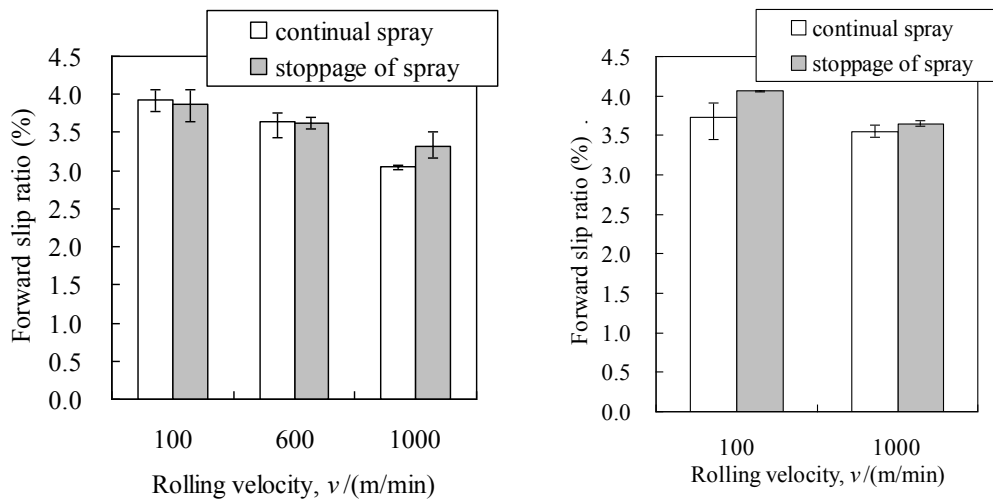
#### 5.3.1 エマルション条件による圧延潤滑性、表面性状制御

##### (a) 潤滑状態変化による油滴引き込み効果発現の可能性についての検証

潤滑状態（フラッド潤滑、スターブ潤滑）によって、エマルション中の油滴引き込み効果が変わる可能性があるため、プレートアウトと圧延速度を変化させて油滴引き込みが圧延潤滑性や表面状態に与える影響を調査した。

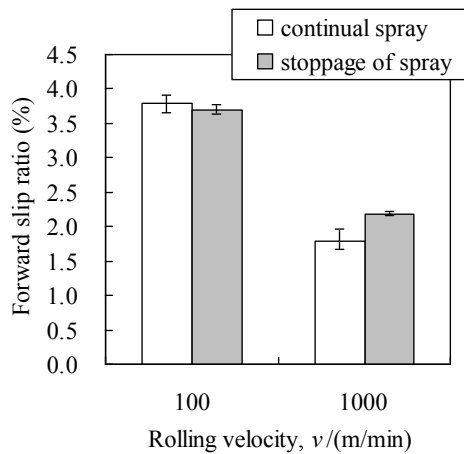
粘度、粒径の異なる3種類のO/Wエマルションについて、2種類の油供給方法を行った場合の圧延潤滑性をFig.5.4(a)~(c)に示す。尚、図中白抜きの棒グラフは圧延中も連続的にエマルションを供給した場合、グレーの棒グラフは、圧延直前に供給を停止しプレートアウトのみで圧延を行った結果である。

まず、Fig. 5.4(a)~(c)のすべての条件において、供給方法に関わらず通板速度の増加と共に先進率は低下している事が判る。特に高速では粘度が高粘度油の方がより先進率は低下している。これは、粘度や粒径にかかわらず流体潤滑効果による導入油膜厚増加が生じ圧延潤滑性が変化したと考えられる。



(a) Oil viscosity: 2.3 cSt/40°C  
Particle size: 6µm

(b) Oil viscosity: 2.3 cSt/40°C  
Particle size: 12µm



(c) Oil viscosity: 32 cSt/40°C  
Particle size: 19µm

Fig.5.4 エマルション供給方法が先進率に与える影響

一方、供給方法の違いに着目すると、低粘度で粒径が大きい Fig.5.4(a)や高粘度油を使用した Fig.5.4(c)では、100m/min あるいは 600m/min の場合には、供給方法の間に差はほとんど見られないが、1000m/min では明らかに供給を停止しプレートアウトのみで潤滑した場合の方が先進率は高い、即ち圧延潤滑性が低下している。一方、低粘度油で粒径が小さい場合には、100m/min で

あっても供給を停止した場合の方が、先進率が高く潤滑性が低下していることが確認された。

a これは、高粘度油、あるいは低粘度油でも粒径が大きい場合にはプレートアウトに有利に働くが、低速時には導入油量が少ないことから、導入油量に対して事前にロールに付着するプレートアウト量が十分存在する状態となり、油滴引き込みの影響が小さくなったと推測される。逆に、低粘度油で粒径が小さい場合には、プレートアウト性が低いため、低速であっても十分なプレートアウト量を確保できず、エマルジョン供給の影響が低速から発現したと考えられる。

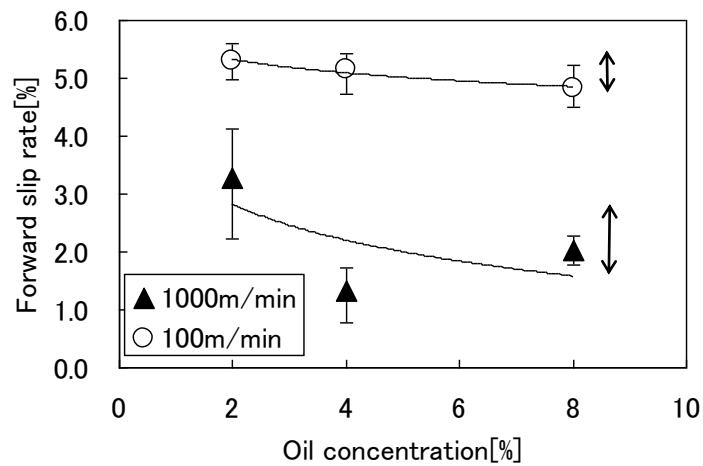
今回の結果は、プレートアウトと導入油膜の関係によって油滴引き込みの影響が変化するという仮説を支持する結果であるとともに、圧延速度によって潤滑状態をコントロールすることにより、供給方法やエマルジョン条件による圧延潤滑性の制御範囲が拡大できる可能性を示すものである。

#### (b) エマルジョン条件による圧延潤滑性、表面性状制御の可能性

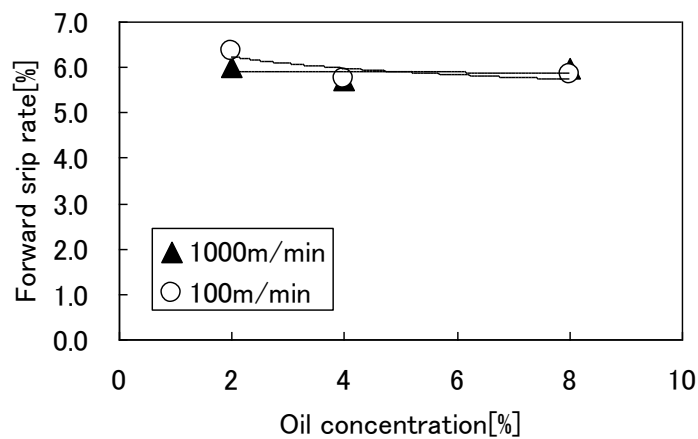
前述のように、エマルジョンによって圧延潤滑性を制御する上では高速条件の方が有利であることが明らかになった。そこで、ここでは実際に条件の異なるエマルジョンを調整し、圧延潤滑性の制御を試みた。また、併せて、製品品質の観点で表面性状も評価した。評価には実製品で表面の光沢度を表現する指標として用いられる  $60^\circ$  反射率を用いた。尚、圧延方向と幅方向について測定した。

Figure 5.5 には、高粘度油と低粘度油を用いて調整した 3 種類の濃度を持つエマルジョンについて 100m/min と 1000m/min で圧延した結果を示した。Fig.5.5(a)には高粘度油を使用した結果を示す。100m/min ではエマルジョン濃度による先進率の変化は小さいが、速度を上げることにより変化量は大きくなり 1%以上先進率が低下する結果が得られた。一方、低粘度油については、速度に関わらず変化量は非常に小さかった。

また、各先進率から Brand & Ford 式で摩擦係数を算出した結果を Fig.5.6(a)、(b)に示す。低粘度油では、摩擦係数が 0.2 程度と非常に高く境界潤滑性が高いことが判る。高粘度油では 100m/min で摩擦係数 0.1 弱と混合潤滑状態にあるが、1000m/min ではさらに低下し流体潤滑性が高くなっていることが判る。そして、高速の流体潤滑性が高い場合にはエマルジョン条件によって摩擦係数が 0.01~0.02 程度変化できた。一方、低粘度油では濃度の差は見られるが、境界潤滑性が高いため速度による差はあまり出なかった。これは油分濃度の増加は油性剤量の増加(この場合はオレイン酸の増加)を意味することから、



(a) 高粘度油 圧下率50%



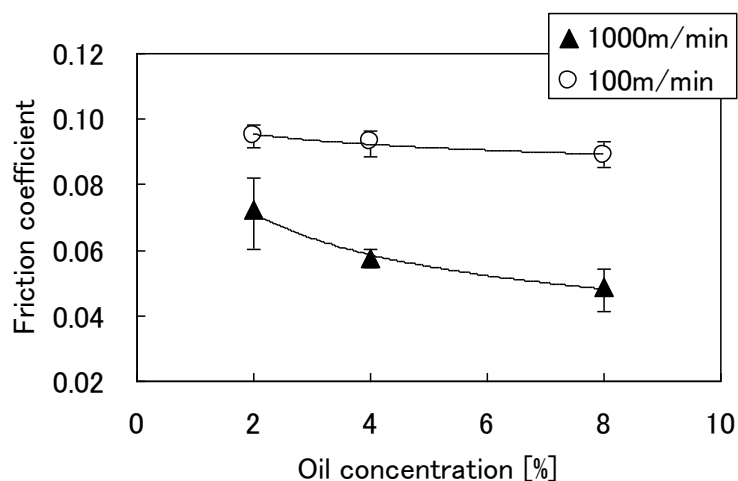
(b) 低粘度油 圧下率30%

Fig.5.5 エマルション濃度による先進率の変化

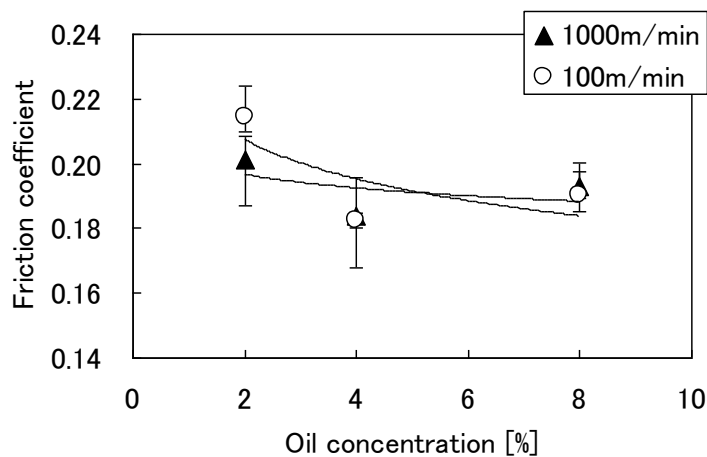
油性剤量に起因する境界潤滑的効果の差異が現れた結果ではないかと推察している。このことから、圧延潤滑を対象とする場合には流体潤滑的な油導入挙動と境界潤滑的な圧延界面の添加剤挙動の両面を考慮しなければならないともいえる。

次に、圧延潤滑性の変化量の大きい高粘度油の表面性状の変化を調査した。ここでは、幅方向と圧延方向の 60° 光沢度を Fig.5.7(a)、(b)に示す。100m/min では 2% から 8% まで濃度増加させても幅、圧延方向ともに 10 弱の光沢度増であるが、1000m/min では幅方向で 15 程度、圧延方向であれば 20~30 程度増加していた。表面性状は油膜厚と表面粗さの関係や摩擦状態の変化の影響を





(a) 高粘度油 圧下率50%



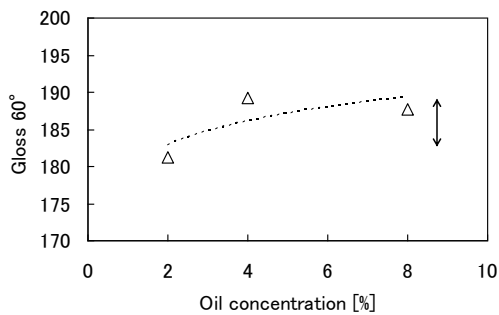
(b) 低粘度油 圧下率30%

Fig.5.6 エマルション濃度による摩擦係数の変化

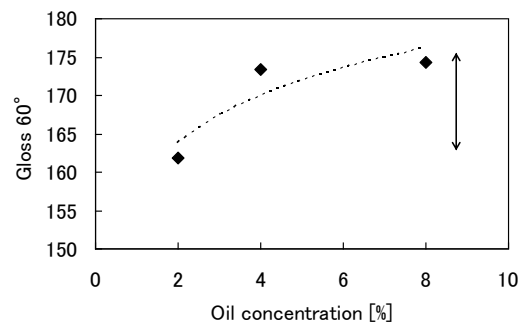
受けるため、高速の方が濃度による潤滑状態の変化が大きいことを意味する結果である。尚、元板の光沢度は巾方向で 490、圧延方向で 550 であることから、濃度が高くなることにより導入油膜が増加し、ロールと板の接触率が低下することによって、元板の光沢度に近づき値が大きくなったと考えられる。

このように、実際の圧延においても、油滴の引き込み、プレートアウト、導入油膜の関係を考慮することにより、圧延潤滑性や表面性状の制御可能であることを確認した。本知見も実圧延において潤滑性や表面状態を制御するための操業指針として活用できる。

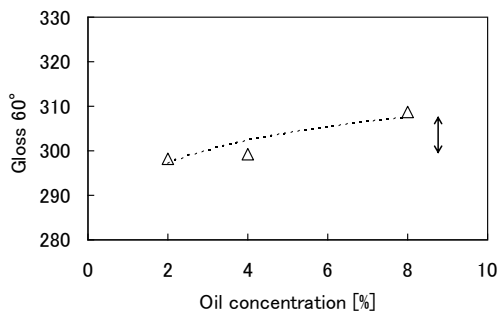
尚、今回は圧延速度を圧延における操業因子として取り上げ、その影響を



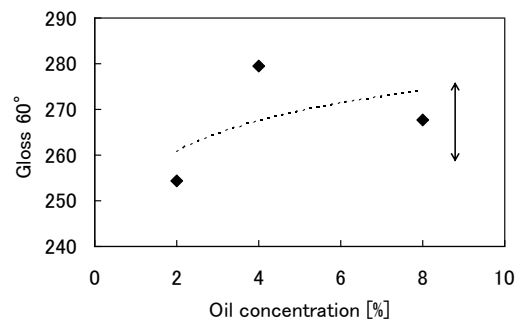
(a) 圧延速度100m/min  
測定:幅方向



(b) 圧延速度1000m/min  
測定:幅方向



(c) 圧延速度100m/min  
測定:圧延方向



(d) 圧延速度1000m/min  
測定:圧延方向

Fig.5.7 高粘度油の表面性状変化

調査した。実圧延の導入油膜厚は、圧延速度だけではなく、圧延材板厚、圧下率、表面粗度、材質などの影響を受け、プレートアウト量も圧延材やロールの状態の影響を受ける。つまり、これら因子をコントロールすることによってもエマルション条件や供給条件による圧延潤滑性、表面性状の制御範囲を変えることができるが、基本的な方向性は今回得られた圧延速度の知見を応用することで対応可能と考えている。

### 5.3.2 水及び界面活性剤による圧延潤滑性、表面性状制御

エマルション中の油分による潤滑性の制御可能性については明確になった。一方、第2章では水の存在が油膜の再攪拌現象を生じさせ油膜厚を減少させる可能性を示した。また、通常圧延に使用される O/W エマルションは乳化安

定性を確保するため界面活性剤が添加されているが、水による油の再攪拌が起こるのであれば、水中に界面活性剤を含有させることによりその効果はより大きくなると考えられる。そこで、本章では、水及び界面活性剤による潤滑制御の可能性について検討を行った。

Fig.5.8(a)~(d)に、水の噴霧による先進率の変化について示す。実験は、これまで同様、2種類の粘度を持つ鉱物油を用い100m/min、1000m/minで圧延を行った。Fig.5.8(a)、(b)には高粘度油の結果を示すが、速度に関わらず水の供給により先進率が増加していることが判る。特に1000m/minでは先進率がマイナスになっており、圧延時に圧延材がスリップしている状態であったが、水を供給することにより先進率0.08%と若干ではあるがプラス側に移った。これは、スリップによる圧延時の噛み混み不良が生じる条件であっても水の供給によって改善できることを意味している。同様に、低粘度油の結果もFig.5.8(c)、(d)に示す。高粘度よりも変化量は小さいものの、速度に関わらず先進率は増加している。これは、低粘度では元々プレートアウト量や導入油

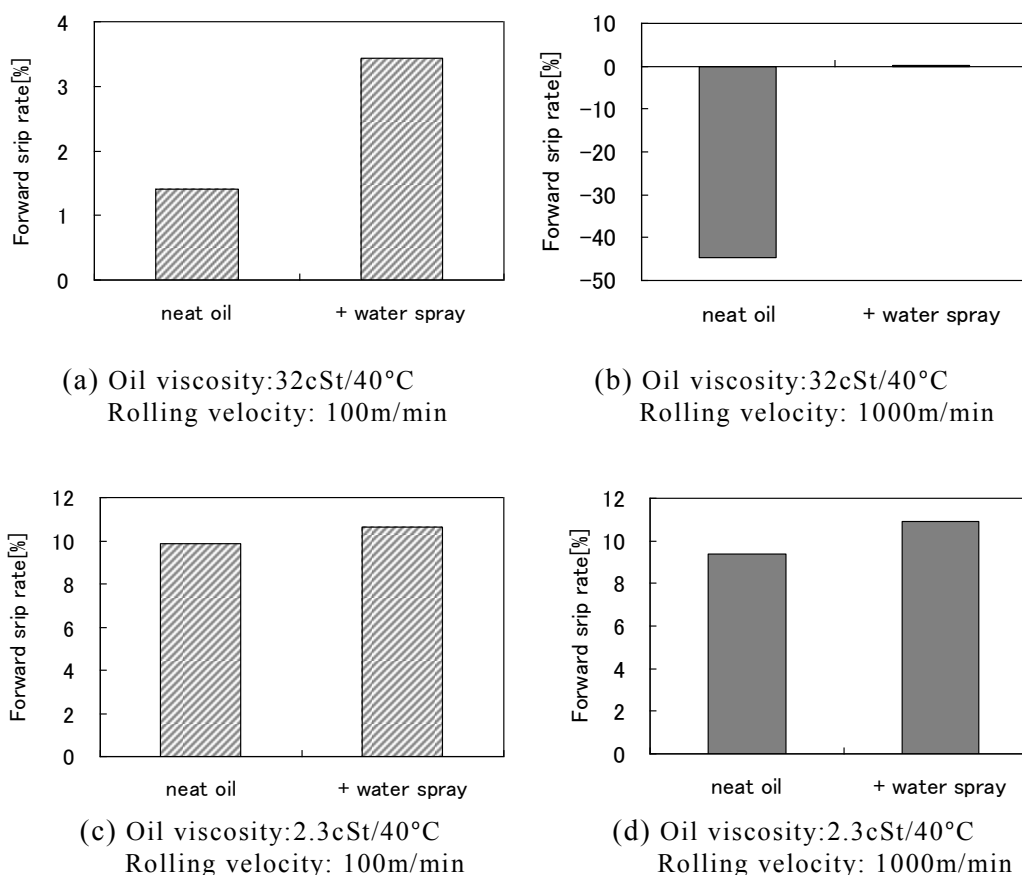


Fig.5.8 水供給時の先進率変化

量が少ないため、水による油膜除去の影響が小さいためと考えられる。

また、両粘度とも 1000m/min の方が先進率の変化量大きい。これは、前述の圧延入口部における流れ場の計算では、高速時に逆流の発生量が増えることが示されていることから、水による油除去効果がさらに大きくなったことに起因するのではないかと推察している。

次に表面性状に与える影響として長手方向反射率を Fig.5.9、巾方向反射率を Fig.5.10 に示す。長手方向、巾方向では傾向に差は無く、高粘度油の方が水によってより表面光沢が低下するという結果が得られた。これは、Fig.5.8 からわかるように、水の供給によって潤滑性が大きく低下しており、圧延界面の潤滑状態が変化し、ロールと板との接触割合が増加したことに起因すると考えられる。特に、高粘度油の方がロールバイトの油膜厚が厚いため、油膜除去による変化が大きくなった可能性も考えられる。一方、低粘度油については、水による潤滑性の変化も小さいこともあるが、元来、油膜厚が少ないために除去される油量が少なく、表面状態は大きく変化しなかった可能性がある。

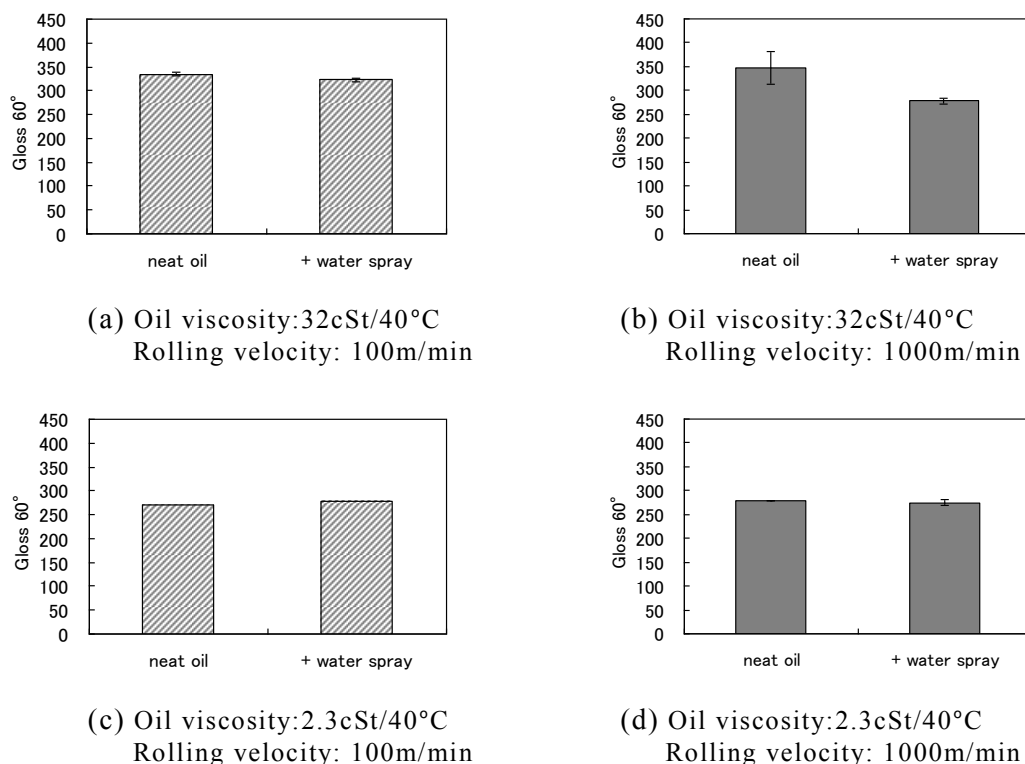
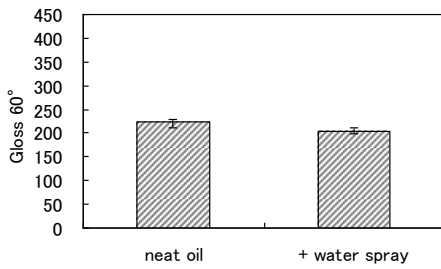
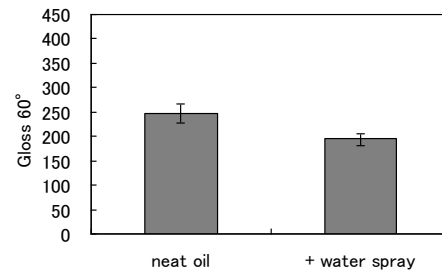


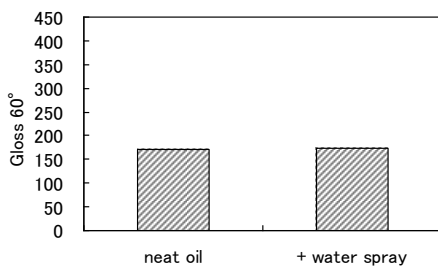
Fig.5.9 水供給時の反射率変化(長手方向)



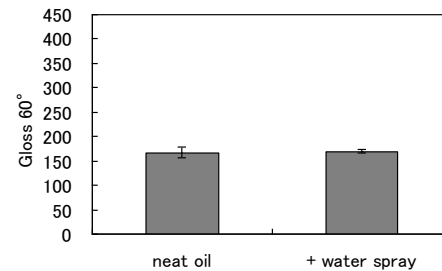
(a) Oil viscosity: 32cSt/40°C  
Rolling velocity: 100m/min



(b) Oil viscosity: 32cSt/40°C  
Rolling velocity: 1000m/min



(c) Oil viscosity: 2.3cSt/40°C  
Rolling velocity: 100m/min



(d) Oil viscosity: 2.3cSt/40°C  
Rolling velocity: 1000m/min

Fig.5.10 水供給時の反射率変化(幅方向)

このように、水が潤滑性や表面性状を変化させることが明らかになったことから、界面活性剤による潤滑性制御の可能性について検討を行った。本検討では、高粘度油を用いた。界面活性剤の添加量を対油で 1mass%としたため、これまでに実施した油分濃度 2mass%、4mass%、8mass%に対応させて、水中に 0.02mass%、0.04mass%、0.08mass%添加させた水を用いた。界面活性剤濃度による先進率の変化について Fig.5.11 に示す。0.04mass%から 0.08mass%への変化は小さいものの、無添加、2mass%と界面活性剤が増加するとともに、先進率が増加し潤滑性が低下する結果が得られた。これは、圧延における水による再攪拌が生じることを指示する結果といえる。また、エマルション圧延油の調整においても、一定の油分濃度に対して有効な界面活性剤量には上限があると言われており、今回 0.04mass%からの変化が小さくなった原因も同様の現象に起因するのではないかと推定している。また、表面性状の変化について Fig.5.12 に示す。幅方向、圧延方向共に添加量の増加と共に低下している。これも導入油量が減少することでロールと板との接触割合が増加し、板表面が荒らされることで低下した可能性がある。

このように、O/W エマルションを用いる場合の圧延潤滑メカニズムは、プ

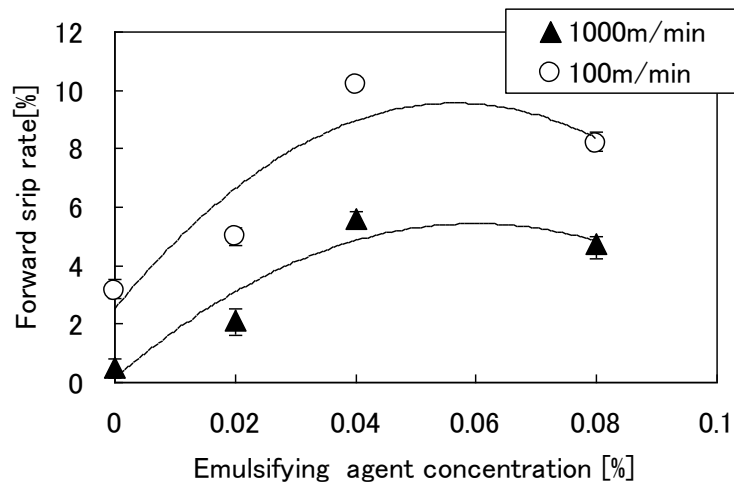
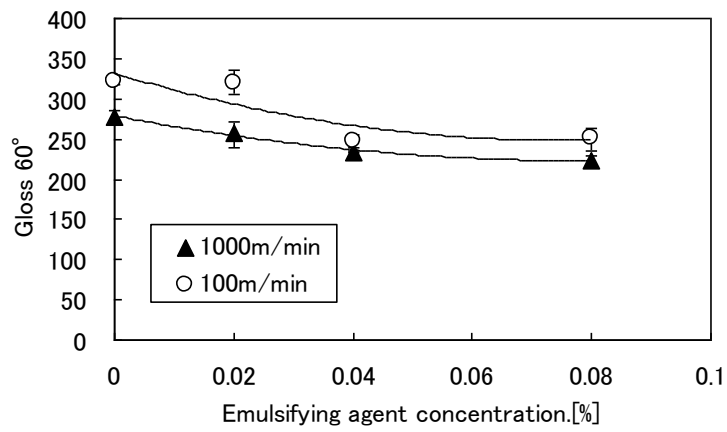
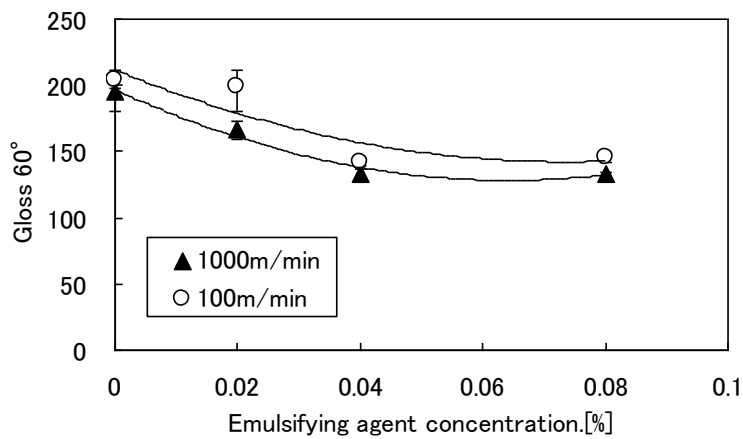


Fig.5.11 高粘度油 界面活性剤濃度の影響



(a) 圧延方向



(b) 幅方向

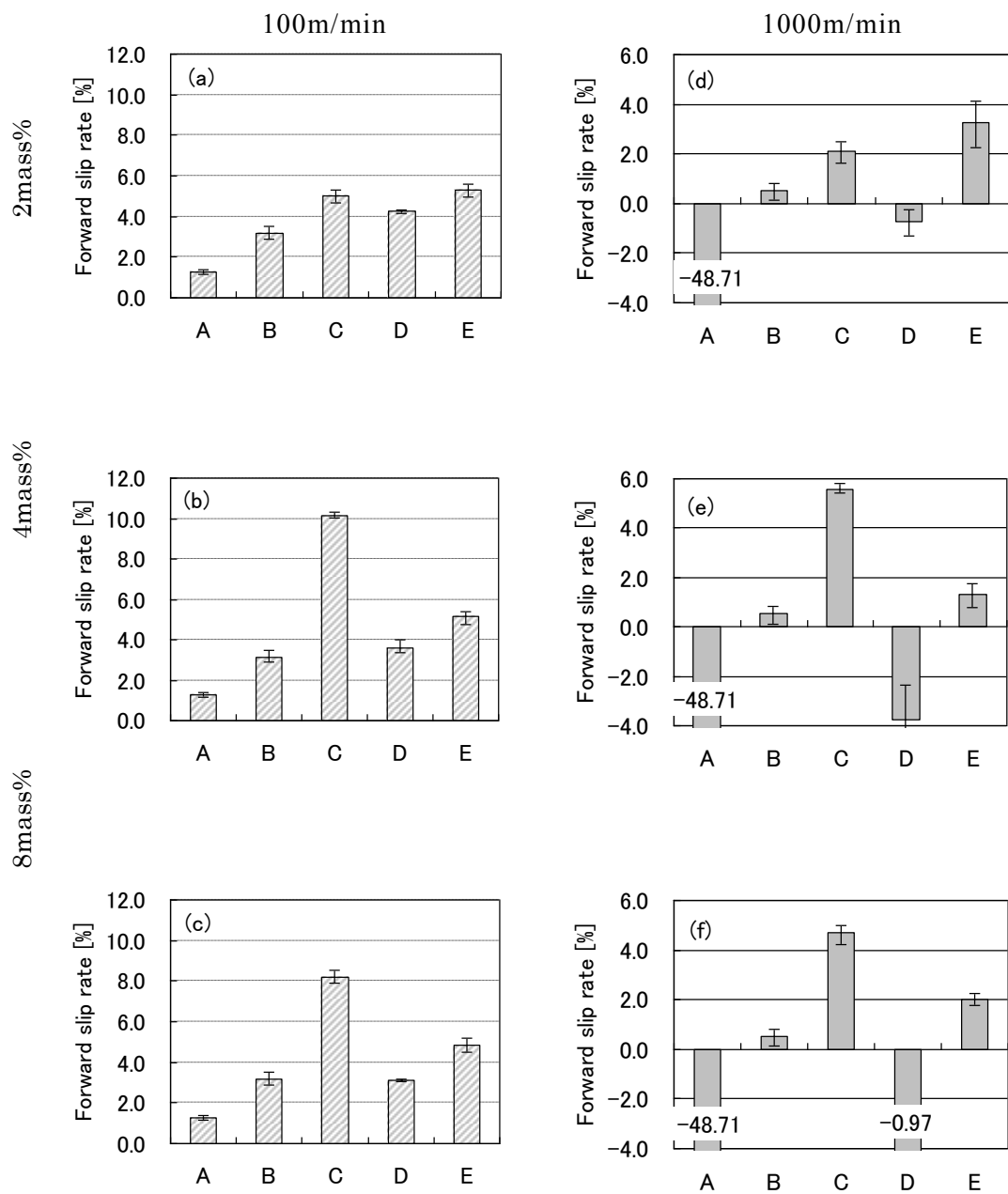
Fig.5.12 高粘度油の光沢度変化

レートアウトや油滴の引き込みといった油分に由来する効果と、水あるいは界面活性剤に起因する油膜削減効果の両方が生じていることが示された。

そこで最後に、これまでに高粘度油に対して得られたデータについて、ニート、ニート+水、ニート+界面活性剤、エマルションのみの比較を行いそれぞれの効果について考察を行った。結果を Fig.5.13 に示す。図中の A はニート油で圧延を行った結果、B はニート圧延時に水を供給した結果、C はニート圧延時に界面活性剤を各油分濃度に対応する添加量含んだ水を供給した結果、D はニート圧延時に各油分濃度のエマルションを供給した結果、E は各油分濃度のエマルションのみで圧延を行った結果である。また、(a)~(c)は圧延速度 100m/min、(d)~(f)は 1000m/min の結果であり、(a)、(d)は油分濃度 2mass%、(b)、(e)は 4mass%、(c)、(f)は 8mass%の結果である。

どの圧延速度、油分濃度においても、先進率はニート油のみの圧延が最も低い。また、水を添加することにより先進率は高くなり、界面活性剤によってそれはより高くなる。エマルションを供給した場合、低速では水のみを供給した際の先進率と同等か大きくなり、高速の場合は小さくなっている。また、界面活性剤を含有する水を供給した場合に比べると、低速、高速共にエマルション供給の方が小さくなっている。この結果より、低速であっても油滴の導入効果はあると考えられるが、その効果は高速に比べて小さい。一方、高速では水による油分除去効果よりも油滴引き込み効果による潤滑向上効果が非常に大きくなることが推察される。また、エマルションのみの圧延では、当然ニート油のみ、或いはニート油に水やエマルションを供給した場合よりも先進率が大きく圧延潤滑性は悪い。但し、界面活性剤による油膜除去に比べると油滴引き込み効果の分だけ潤滑性が良くなる事が明らかになった。

これまでも、テスト圧延機や実圧延機を用いて圧延潤滑性や表面性状を制御する検討は行われているが、本報のようにフラッド潤滑やスターブ潤滑といった潤滑状態を考慮あるいは制御することによる方法や水を考慮した例はない<sup>5.7~5.29)</sup>。今回得られた知見は、例えば、実圧延におけるロールへの噛み込み性の確保などの潤滑過多を避けなければならない場合に、水あるいは界面活性剤に着目して潤滑性を低下させることが可能であることを示唆するものである。また、圧延時の潤滑性や表面性状を制御するには、エマルション条件などの油条件の観点で検討されることが多かったが、実際には水や界面活性剤も影響することが実圧延において明らかになった。



- A: neat only
- B: +water
- C: +water including the emulsifier agent
- D: +emulsion oil
- E: emulsion oil only

Fig.5.13 高粘度油で供給条件による先進率の変化



## 5.4 まとめ

本章では、小型圧延機を用いた潤滑機構の検証と実圧延における圧延潤滑性、表面性状制御の可能性について調査した。得られた主な知見を示す。

- ① 低粘度で大粒径の場合や高粘度油を使用した場合には、低速で供給方法の差はほとんどないが、速度が速くなることによってプレートアウトのみで圧延した方が先進率は高く、潤滑性は悪くなる。
- ② 低粘度油で小粒径の場合には、低速であっても供給停止の方が、先進率が高く潤滑性が低い。
- ③ 油滴引き込みの影響が大きくなる高速条件において、エマルション条件による、圧延潤滑性、表面性状制御の可能性を調べた結果、高粘度油ではエマルション濃度を2mass%から8mass%に増やすことにより先進率を1%以上、摩擦係数で0.03程度低下させることができた。但し、低粘度では挙動が異なっており、流体潤滑的な油導入挙動と境界潤滑的な圧延界面の添加剤挙動の両面で考えなければならないことが判った。同じく、表面性状についても、低速に比べて高速の方が変化量は大きくなることが明らかになった。
- ④ 水の供給により、速度に関わらず先進率は増加する。また、表面性状に対しては、高粘度油の方がより表面光沢が低下する。
- ⑤ 界面活性剤の使用により油の除去効果は大きくなり、添加量を増加すると先進率は増加し、光沢度は低下する。

①、②については、高粘度油や低粘度油であっても、粒径が大きい場合にはプレートアウトを生じやすいため、低速でも導入油量に対してプレートアウト量が十分存在し、油滴引き込みの影響が小さくなるが、低粘度油で粒径が小さい場合には、プレートアウト性が低いため、低速であっても十分なプレートアウト量を確保できず、エマルション供給の影響が発現したと考えられる。この結果は、プレートアウトと導入油膜の関係によって油滴引き込みの影響が変化することを示唆するとともに、圧延速度を変化させることで、供給方法やエマルション条件による圧延潤滑性制御が可能になることを示すものである。③については、高速の方が濃度による潤滑状態の変化が大きいことに対応していると考えられ、圧延においても、油滴の引き込み、プレートアウト、導入油膜の関係を考慮することで、圧延潤滑性や表面性状の制御が可能であることを明らかにした結果と言える。④、⑤については、圧延時に圧延材がスリップしている状態であっても、水を供給することにより抑制

できことから、実操業における噛み混み不良に対し水による改善が期待できること示唆する結果である。尚、変化量は低粘度の方が小さかったが、これはプレートアウト量や導入油量が少ないため、水による油膜除去の影響が小さくなったためと考えられる。また、高粘度油の方がより表面光沢が低下したのは、高粘度油の方が水供給による先進率の増加量も大きいことから、圧延界面の接触率が大きく変化したためと推測している。また、④、⑤からは、通常、圧延に使用される O/W エマルションは水、界面活性剤が存在しており、その時の圧延潤滑メカニズムは、プレートアウトや油滴の引き込みといった油分に由来する効果に加えて、水あるいは界面活性剤に起因する油膜削減効果も無視できないことを示す結果である。

このように、圧延潤滑性や表面性状がエマルションやプレートアウト条件、さらには使用される水や界面活性剤に着目することにより制御できることが明らかになった。本章で得られた知見は、圧延条件適正化による圧延潤滑性や表面性状の制御や、スリップ抑制、噛み込み性の向上等の潤滑過多を避けなければならない場合に、水あるいは界面活性剤の適正化により改善できることを示したものであり、実操業の指針として活用が期待できると考えている。

## 参考文献

- 5.1 馬場・岩崎：冷間圧延における潤滑と表面，塑性と加工，Vol.13, No.139 (1972) 609.
- 5.2 山本・白石・井上・阿高・中島：ステンレス鋼の冷間圧延における板表面の光沢の形成 ステンレス鋼の冷間圧延潤滑の研究 第1報，塑性と加工，Vol.33, No.381 (1992) 1190.
- 5.3 青木・野呂・小豆島：ブリキ板の調質圧延における表面性状と潤滑油挙動，Vol.94, No.10 (2008) 438.
- 5.4 ステンレス鋼の冷間圧延潤滑に関する研究Ⅱ 短ざく及びコイル圧延における添加剤の影響，塑性加工春期講演会講演論文集，vol.1986 (1986) 167.
- 5.5 小豆島・木原・五弓：冷間圧延における圧延後の試料の表面性状 冷間圧延における摩擦と潤滑の研究Ⅱ，塑性と加工，Vol.18, No.196 (1977) 337.
- 5.6 小豆島・井柳・野呂：冷間圧延のエマルジョン潤滑における表面性状の研究Ⅰ 表面性状に及ぼす圧延速度，潤滑油粘度の影響，塑性加工連合講演会講演論文集，vol.37th (1986) 453
- 5.7 木村・岡田：鋼板の冷間圧延におけるヒートストリークの発生に関する研究Ⅲ O/W エマルジョン潤滑における焼付きの発生，潤滑，Vol.30, No.4 (1985) 282.
- 5.8 木村・岡田：鋼板の冷間圧延におけるヒートストリークの発生に関する研究Ⅱ ころがりすべり接触における O/W エマルジョンの潤滑特性，潤滑，Vol.30, No.4 (1985) 274.
- 5.9 小豆島・D.W.Xeu：熱間圧延の摩擦係数に及ぼす潤滑油因子の影響と潤滑メカニズムの解明，鉄と鋼，Vol.93, No.11 (2007) 681.
- 5.10 A.Shirizly, J.G.Lenard：Use of Lubricants and Emulsions During Hot Rolling of Carbon Steel, Mech. Work Steel Process, Vol.36 (1998) 489.
- 5.11 今江・金成：ラボミルによる熱間圧延用潤滑剤の性能評価，日本鉄鋼協会創形創質工学部会シンポジウム，No.1327 (1997) 15.
- 5.12 R.Reich, N Panseri, J.Bohaychick：The Effects of Lubricant Starvation in the Cold Rolling of Aluminum Metal When Using an Oil-In-Water Emulsion, Lubr. Eng., Vol.57, No.4 (2001) 15.
- 5.13 池田・秦・村尾・市本：アルミニウム板の熱間圧延用 DP 型圧延油の潤滑特性，神戸製鋼技報，Vol.56, No.1 (2006) 54.
- 5.14 A. Shirizly, J.G. Lenard, J.Sauer, K.Januszkiewicz：Lubricant Capture During Hot Rolling of an Aluminum Alloy, Tribol. Trans., Vol.45, No.2 (2002) 205.
- 5.15 池田・松井・柴田：アルミ冷間圧延における潤滑特性に及ぼす Cr めっきロー

- ルの影響第 2 報 Cr めっきロールの潤滑特性へ及ぼす圧延条件の影響, 塑性加工連合講演会講演論文集, Vol.48<sup>th</sup> (1997) 587.
- 5.16 小豆島・千田・中川: アルミ箔圧延の潤滑に関する研究 II ヘリンボーン発生に及ぼす潤滑因子の影響, 塑性加工連合講演会講演論文集, Vol.39<sup>th</sup> (1988) 569.
- 5.17 小豆島・千田・中川: アルミ箔圧延の潤滑に関する研究 I 表面性状に及ぼす潤滑因子の影響の基礎検討, 塑性加工春期講演会講演論文集, Vol.1987 (1987) 111.
- 5.18 吉田・平野・南: アルミニウム熱間圧延油に関する研究 I 圧延油組成, エマルション性状が潤滑性に及ぼす影響, 潤滑, Vol.28, No.3 (1983) 214.
- 5.19 吉田・平野・南: アルミニウム熱間圧延油に関する研究 II エマルションの経時変化が潤滑性に及ぼす影響, 潤滑, Vol.28, No.4 (1983) 273.
- 5.20 吉田・平野・南: アルミニウム熱間圧延油に関する研究 III 熱板におけるエマルション浮上温度, 潤滑, Vol.28, No.12 (1983) 903.
- 5.21 吉田・平野・南: アルミニウム熱間圧延油に関する研究 IV ロールコーティングの評価, 潤滑, Vol.30, No.6 (1985) 438.
- 5.22 吉田・鈴木・倉知: アルミニウム熱間圧延油に関する研究 V 圧延油組成・エマルション性状がロールコーティングに及ぼす影響, 潤滑, Vol.30, No.7 (1985) 492.
- 5.23 T.Kurachi, T. Yoshida & K. Suzuki : Influence of Oil Composition and Emulsion Properties on the Rollcoating Buildup During Hot Rolling of Aluminum, Lubr. Eng., Vol.43, No.8 (1987) 660.
- 5.24 R.Reich, J.Wise, R.Colbert : The Effectiveness of Boundary and Hydrodynamic Lubrication when Cold Rolling Aluminum Metal, Tribol Trans, Vol.51, No.5 (2008) 627.
- 5.25 五十嵐・今泉・柴田: 銅および同合金に対するエーテル化合物の圧延潤滑効果について (その 1) ,銅と銅合金, Vol.43 (2004) 192
- 5.26 今泉・五十嵐・柴田: 銅および同合金に対するエーテル化合物の圧延潤滑効果について (その 2) ,銅と銅合金, Vol.43 (2004) 197
- 5.27 柴田・五十嵐・今泉: 銅および同合金に対するエーテル化合物の圧延潤滑効果について (第 3 報) ,銅と銅合金, Vol.44 (2005) 103
- 5.28 志渡・小野寺・川並: チタンの冷間圧延における潤滑に関する研究, 塑性加工連合講演会講演論文集, Vol.44<sup>th</sup>, No.1 (1993) 387.
- 5.29 福田: チタン及びチタンの圧延加工, 軽金属, Vol.55, No.11 (2005) 544..

## 6. 結論

### 6.1 研究成果の総括

本研究では、これまで十分に理解がされていない、圧延時の O/W エマルションの導入挙動について、EHL 試験機とテスト圧延機を用いて調査を行い、以下のような知見を得た。

第 2 章では、O/W エマルションのロールバイトにおける油膜形成挙動を理解するため方法として、光干渉システムを持つディスクオンボール試験機を用いて油滴の挙動や導入油膜の直接評価、観察を行った。さらに、プレートアウトと O/W エマルション条件を個々に制御できるようにすることにより、油膜形成挙動だけでなく、プレートアウトと油滴引き込みの関係を調査した。得られた主な知見は次の通りである。

- ・ プレートアウト量を変化させることにより、潤沢に油が供給されているフラッド潤滑状態から、油不足状態であるスターブ潤滑状態を再現できた。
- ・ フラッド潤滑状態の場合、導入油膜厚の形成に油滴の引き込みはほとんど影響しない。しかし、エマルション中の水に油膜厚を下げる効果があることを確認した。フラッド潤滑状態であっても油量が少ない場合には、水によって導入油膜厚が減少することが判明した。
- ・ スターブ潤滑状態の場合、導入油膜厚の形成に油滴の引き込み効果が影響する。エマルション性状（濃度、粒径）によって、導入油膜厚が変化する。
- ・ 回転速度増加時には導入油膜厚が減少する可能性を示した。これはロールバイト入り口部の流れ解析により、油滴の逆流効果が影響していることを示した。

第 3 章では、実際の圧延を想定した場合、使用される材質の違い、圧力、速度等の実験条件、塑性変形の有無など、ディスクオンボール試験機とは異なる点が多々ある点を考慮し、圧延における導入油膜測定方法としてトレーサ法という新たな手法を確立し、圧延時のエマルション性状が導入油膜厚に与える影響について調査した。主な知見を以下に示す。

- ・ トレーサ法と分配比の考案により、圧延時の導入油膜厚を定量的に把握した。
- ・ 圧延後の板、ロールに残留する油量は等分されず、材料種や表面粗度が影響する。

- ・ エマルション濃度は高いほど、エマルション粒径は大きいほど導入油膜厚は増加するが、速度によって影響度は変化する。
- ・ 導入油膜厚の増減による接触状態の変化が圧延時の摩擦状態に影響する。
- ・ 油滴の引込みとプレートアウトがロールバイト入口の油溜まりに与える影響は、通板速度によって変化している可能性がある。

第4章では、圧延時のプレートアウト、油滴引き込み、導入油膜の関係について調査を行うため、第3章で得られた導入油量に対するプレートアウト量の測定を試みた。圧延ロールに付着するプレートアウト量測定法を考案し、エマルション性状、圧延潤滑条件との関係を調査した。さらに、導入油膜厚との関係を調べる上でロールバイト入り口部の油膜厚（入側油膜厚）に着目し、入側油膜厚とプレートアウトの関係を調査した。主な知見は次の通りである。

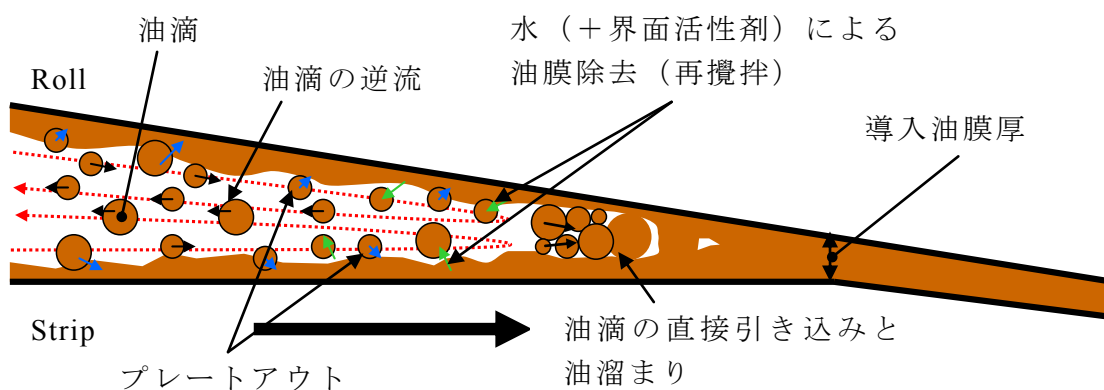
- ・ プレートアウト量もエマルション性状、圧延速度（ロール回転速度）によって変化する。高濃度、大粒径ほどプレートアウト量は増加するが、圧延速度（ロール回転速度）に対しては高速ほど量が少なくなる。
- ・ 油膜引き込み挙動理解のため入側油膜厚に着目し、導入油膜厚からレイノルズ方程式によって算出した。
- ・ 入側油膜厚とプレートアウト量の関係から高速になるほど油滴引き込み効果（エマルション性状の影響）が大きくなる可能性を示した。

第5章では、第2章～第4章で得られた知見に対して小型圧延機を用いた検証を行うと共に、実圧延における圧延潤滑性、表面性状制御の可能性について調査した。得られた主な知見を示す。

- ・ プレートアウトのみによる圧延とプレートアウト+油滴供給による圧延を比較した。低粘度で大粒径の場合や高粘度油を使用した場合には、低速で供給方法の差はほとんどないが、速度が速くなることによってプレートアウトのみで圧延した方が先進率は高く、潤滑性は悪くなる。低粘度油で小粒径の場合には、低速であってもプレートアウトのみで圧延した方が、先進率が高く潤滑性が低くなる。これはプレートアウトと導入油膜の関係によって油滴引き込みの影響が変化することを示唆するとともに、圧延速度を変化させることで、供給方法やエマルション条件による圧延潤滑性制御が可能になることを示すものである
- ・ 油滴引き込みの影響が大きくなる高速条件において、エマルション条件による、圧延潤滑性、表面性状制御の可能性を調べた。高粘度油ではエマル

ション濃度を増やすことにより摩擦係数を低下させることができた。同じく、表面性状についても、低速に比べて高速の方が変化量は大きくなることが明らかになった。圧延においても、油滴の引き込み、プレートアウト、導入油膜の関係性を考慮することで、圧延潤滑性や表面性状の制御が可能であることが明らかになった。

- 水及び界面活性剤による潤滑制御、表面性状の可能性について検討を行った。水供給により先進率は増加し、光沢度は低下する。界面活性剤を用いることによりその効果は大きくなる。
- O/W エマルション圧延潤滑メカニズムは、プレートアウトや油滴の引き込みといった油分に由来する効果に加えて、水あるいは界面活性剤に起因する油膜削減効果も影響している。
- 実際の圧延においても圧延潤滑性や表面性状がエマルションやプレートアウト条件、さらには使用される水や界面活性剤に着目することで制御可能であることを明らかにした。



- 圧延時のロールバイトにおける導入油膜は、プレートアウトと油滴の引き込みに加え、油溜まりの生成、水による油膜除去によって生じ、各現象の関係は速度によって変化する。
- 油滴の引き込みの効果はプレートアウトと導入油膜の関係（スターブ潤滑状態、フラッド潤滑状態）によっても変化する。

Fig.6.1 O/W エマルション圧延時の油導入メカニズム

このように、本研究では、エマルジョン圧延時の潤滑挙動解明のため2種類の手法を考案した。一つは、光干渉法を用いたディスクオンボール試験機において、プレートアウトと油滴導入を切り分けて油膜形成挙動を評価する手法であり、もう一つは、小型圧延機と金属石けんによる、圧延時の導入油膜厚の定量評価手法（トレーサー法）である。この2種類の手法によって、プレートアウト、エマルジョン中の油滴引き込み、油膜除去などの影響を明らかにし、圧延における油膜形成について Fig.6.1 のようなメカニズムを提案した。

さらに、このメカニズムに基づいて小型圧延機による検証を行い、実際の圧延において潤滑性や表面性状が制御可能であることを確認した。これにより、本研究で提案したメカニズムが操業指針として活用できる可能性を示したと考えている。

## 6.2 今後の課題と展望

本研究では圧延における影響因子として特に圧延速度に着目して検討を行った。しかし、実際の圧延では導入油膜厚に影響を与える因子として、他にも圧下率、ロール径、板厚、材質などがあり、プレートアウト量についても圧延材やロールの状態の影響を受ける。そのため、エマルジョン条件や供給条件による、圧延潤滑性、表面性状の制御範囲も変化すると推測される。実操業において、より正確に圧延潤滑性や表面性状を制御するためには、さらに各因子が与える影響を詳細に調査し、メカニズムを明らかにすることが必要であり、これは今後の研究課題と考えている。但し、圧延速度の増加によって導入油量に対するプレートアウトの影響が小さくなる現象は、圧下率の低下やロール径の拡大による導入油膜の増加で生じる現象と同様であると仮定するなど、本研究で獲得した知見に落とし込むことができれば、実操業の他の影響因子に対しても展開することが可能であり、国内外の鉄鋼、軽圧業界の圧延工程で生じうる様々な潤滑技術課題解決に対し、操業指針や圧延油設計指針として利用できると考えている。

一方、本研究は圧延における流体潤滑挙動に着目した検討であったが、Fig.1.8 で述べたように、圧延は混合潤滑領域にあると考えられており、境界潤滑の観点も重要である。圧延油に配合される添加剤の効果はその特徴（官能基、化学構造など）や、その使用量によって効果が異なる。また、その効果は被圧延材や圧延条件によっても変化すると考えられる。さらに、一般的に添加剤は境界潤滑効果を狙って使用されるものであるが、流体潤滑効果に



も影響を与える可能性もある。しかし、圧延における境界潤滑効果や添加剤の作用機構については、過去にも様々な調査が行われているものの、そのメカニズムの理解は十分ではなく、この点も今後の研究課題といえる。このように、本研究で得られた知見は圧延潤滑メカニズムの一端を明らかにしたに過ぎず、圧延潤滑メカニズムの解明には、境界潤滑、流体潤滑、さらには両現象の関係等、まだまだ多くの課題が残っており、継続的に検討が必要であると考えている。

## 謝辞

本研究を遂行するにあたって、同志社大学大学院理工学研究科 松岡敬教授、平山朋子准教授より、研究に関するご教示、並びに本論文の執筆に関して懇切丁寧なるご指導、ご鞭撻を賜りました。ここに、深甚なる謝意を表します。また、実験の実施に際し多大なご協力を頂いた、山中佑資氏、池田光孝氏、徳岡伶哉氏、並びに同志社大学大学院理工学研究科機械要素・トライボロジー研究室の皆様にご心より謝意を記します。また、本論文をまとめる機会を与えて頂きました同志社大学 田中達也教授にご心より謝意を記します。研究の実施に際し、東京工業大学 中原綱光名誉教授、九州工業大学 兼田楨宏名誉教授および西川宏志助教より温かいご指導を賜りました。心より謝意を記します。

本研究のきっかけを頂きました(株)神戸製綱所 佐伯公三氏に感謝いたします。また、研究開始当初から同社隈元純二博士(現:(株)コベルコ科研)、鈴木哲也博士、菊池直樹氏、藤浦貴保氏を始め同社機械研究所化学環境研究室の皆様には様々な面からご指摘、ご助言、ご協力頂きましたことに深くお礼申し上げます。また、大山高志氏、松岡誠司氏、村田崇信氏、進藤真博士をはじめ同社試作実験室の皆様には実験面で多大なご協力を頂きましたことに深くお礼申し上げます。

最後に、著者の執筆に当たって、私生活の面で気遣い、励まし、支えてくれた家族にご心より感謝いたします。

2013年9月

中西 裕信