解説

アルミニウム圧延の潤滑に関する最近のトピックス

鈴木 正道*

Recent topics of lubrication in the rolling of aluminum

Masamichi SUZUKI*

1. はじめに

アルミニウムを含む圧延加工における潤滑については、塑性と加工誌^{1),2)}、潤滑誌³⁾にて幾度か取り上げられ、解説がなされている。本稿では、主としてここ3～4年に発表された内外の文献を中心に、アルミニウム圧延の潤滑に関する最近のトピックスを取り上げてみたい。読者の参考のために、アルミニウム圧延における潤滑の特徴、潤滑機構についても簡単に紹介しよう。

2. アルミニウム圧延における潤滑の特徴性

アルミニウムの製板工程は通常次のとおりである。

連続鋳造スラブ→面削→ソーキング→熱間粗圧延→

・3～9 ton (シングルスタンド)

・350～600 mm厚 ・10～20 mm厚

→熱間仕上圧延→冷間圧延→仕上工程

→製品

上記の他に、熱間圧延上りのプレート(厚板)のまま製品となる場合もあり、また冷間圧延後さらに数パスの圧下をうけ最小板厚5～6 μm程度の箔製品となる場合もある。熱間、冷間および箔圧延条件を表1に示す。

2.1 熱間圧延

アルミニウムの熱間圧延は、300～500℃で行なわれるのが普通である。熱間圧延では、熱間加工中に板に生じた外傷、厚さの不均一、異物の飛込みなどは、その後の工程中に手を加えても完全に消滅させることは困難なので、潤滑は重要な意味をもつ。

熱間圧延においては、材料温度が高いため、ロールが熱で変形しないように冷却してやる必要がある。また、潤滑を“二面の一体化を妨げること”と定義すれば、圧延の場合、ロールと圧延材との一体化を妨げることであ

る。これにより摩擦を軽減させ、また圧延動力を小さくすることができる。しかし、アルミニウムの圧延では、動力の大小よりも製品の表面品質がより重要視されるのが普通である。実際にアルミニウムの板圧延で一番問題となるのがロール・コーティングである。ロール・コーティングとはアルミニウムが高温で圧延される際にロール面に付着して形成されるアルミニウムおよびその酸化物粉よりなる薄膜のことである。この薄膜は潤滑状態がよいほど薄く保たれるが、あまり薄いとロールによる圧延材のかみ込み能力が減ずる。コーティングが適度に薄く一様に存在する場合はよいが、もし厚くしかも部分的になれば、この膜がはがれて材料の表面に付着し、かえって表面を傷つけることになる。熱間圧延で生ずる板表面欠陥の多くは、多かれ少なかれ、ロール・コーティングと関係していることが多い。

2.2 冷間圧延(箔圧延)

鉄鋼の冷間圧延とアルミニウムの冷間圧延を較べると、最高圧延速度は両者とも2,500 m/minであり、パス当たりの圧下率はアルミニウムの方がやや高いとはいえ大差ない。しかし、鉄鋼の場合は材料の変形抵抗がはるかに大きく、変形による発熱をカバーするために、冷却性の大きいエマルジョン(多くは油脂系)を使用するの

表1 熱間・冷間・箔圧延条件

項目	熱間圧延	冷間圧延	箔圧延
圧延材温度,℃	300～500	～120	～60
圧延油温度,℃	～60	～60	～60
ロール温度,℃	80～130	50～90	～70
圧延油	エマルジョン	低粘度鉱物油 3～6 cSt, 100°F+添加剤	低粘度鉱物油 1.5～4 cSt, 100°F+添加剤
圧延速度, m/min	～300	～2,500	～1,200
圧下率, %	～50	～65	～60
張力, kg/mm ²	—	1～3	3～6
先進率, %	—	～10	～15
摩擦係数	～0.3	～0.2	～0.2

* ㈱日本軽金属総合研究所(蒲原) Nippon Light Metal Research Laboratory, Ltd. (Kanbara)

に反し、アルミニウムの場合にはアルミニウム特有の光沢ある表面仕上がりを確保するために、低粘度鉱物油に極性化合物を添加した圧延油を用いるのが普通である。すなわち、低粘度鉱物油を基油にした圧延油を用いるがために、鉄鋼の場合のように流体潤滑的な取扱いで議論を進めることは不可能であり、境界潤滑的な考察が必要となってくる点に特徴があるといえよう。実際には、流体潤滑状態と境界潤滑状態とが混在した、いわゆる混合潤滑モデルが提唱されているが、これについては後章で述べる。

境界潤滑的であり、金属—金属接触の機会が多いだけに、潤滑不足が原因と思われるヘリング・ボーン、チャター・マークなどの表面欠陥が問題となるが、圧延時の摩擦係数が単純に低ければいいというものでもない。たとえば、摩擦係数が低すぎると、先進率（板のロール出口速度がロール周速より何パーセント速いかで定義される）が低くなり、場合によっては負の値となりいわゆる“圧延不安定”を招くことになる。

なお、箔圧延では通常の冷間圧延よりもなお表面品位が重要であり、さらに低粘度の鉱物油が使われるのが普通である。また、板厚が極めて小さいこと、そして平均箔厚に対する接触弧長さの比が通常の冷間圧延と比べて数倍に達するなど、潤滑の面から厳しいわけであるが、通常の冷間圧延と同列に扱われることが多い。

2.3 潤滑機構

潤滑剤からみて、圧延潤滑機構を考えるということは

- (i) 第1段階：接触弧入口のくさび部にどれだけ均一潤滑に潤滑剤が供給されるか、
- (ii) 第2段階：どれだけの量の油分が接触弧内へ導入されるか（入口油膜厚さ）、
- (iii) 第3段階：導入された油分が接触弧内でどのような挙動をとるか、

を考えることである。この潤滑剤の動きに、ロール、素材との interaction が加わることににより潤滑機構が律せられる。それぞれの段階についての詳細な検討は別の解説⁹⁾を参照していただくとして、ここでは各段階に関連するいくつかの考え方を紹介する。

2.3.1 混合潤滑モデル

圧延潤滑機構を考える際に、従来から流体潤滑モデルすなわち流体膜でロールと材料が完全に隔てられ、直接金属接触がないというモデルを想定することが多かった⁵⁾。しかし、これは現実の圧延工程とくにアルミニウムの圧延工程にはそぐわないということで、Tsao ら⁶⁾は混合潤滑モデルを提唱している。

第1段階で潤滑な潤滑剤が接触弧入口のくさび部へ供給されているとして、第2段階の入口油膜厚さを、Hitchock のロール扁平変形の式をも考慮した流体潤滑的な

- A：摩擦係数一定
B：混合潤滑モデル(境界潤滑支配的)
C：摩擦応力一定
D：混合潤滑モデル(流体潤滑支配的)

図1 混合潤滑モデルと他モデルの比較

考え方により求めている。第3段階の接触弧内部では、摩擦せん断応力 τ は、流体膜の存在する部分のせん断応力 τ_f とロールと材料との真実接触部分の境界膜せん断応力 τ_b との和、すなわち、

$$\tau = \tau_f + \tau_b = (1-A)\mu \cdot (U-V)/h + kA \quad (1)$$

で表されるとしている。

ここで A ：接触率(全面積に対する真実接触面積の比)

μ ：潤滑剤粘度

U ：材料速度

V ：ロール周速

h ：流体油膜厚さ

k ：比例定数

混合潤滑モデルによる解析の一例を図1に示す。従来のように接触弧内で摩擦係数一定あるいは摩擦応力一定という考え方と本モデルの違いは明らかである。いくつかの類似のモデルも提出されているが⁷⁾、いずれも入口油膜厚さの算出、接触率の評価、接触弧内での粗度変化を考慮に入っていないこと、比例定数 k の評価等々不十分な点もあるが、アルミニウムの圧延における潤滑を考える際に、有用なステップといえよう。

2.3.2 冷間圧延における境界潤滑機構

前述のようにアルミニウムの冷間ないしは箔圧延では、低粘度鉱物油をベースにし、これに数パーセントの極性化合物を添加して圧延油として使用するのが普通である。基油が極めて低粘度であるため、1,000 m/min程度的高速圧延の場合でも極性化合物による摩擦低減効果が認められることは図2の例でも明らかである。境界潤滑が重要な役割を果たしていることには異論をはさむ余地がないところである。

$$\text{式(1)から境界摩擦せん断応力 } \tau_b \text{ のみを取り出せば} \\ \tau_b = kA \quad (2)$$

であるがこの比例定数 k はいまだ未知なところが多い境界膜強度、金属—金属接触面積などにより決まる。

k として τ_b が添加剤の種類や圧延速度、圧下率などの

図2 アルミニウムの冷間圧延における極性化合物の摩擦低減効果

圧延条件に依存することは図2からも明らかであるが、とくに極性化合物の作用機構については定説がまだない。

境界潤滑については、Hardy⁸⁾、Bowden⁹⁾ 以来の金属表面に吸着配向した極性分子膜が金属凝着を抑制するという考え方が圧延の接触弧内（第3段階）に全面的に適用できるかは疑わしい。筆者は岡部¹⁰⁾も紹介しているような“thick rigid boundary layers”によるミクロ的な流体潤滑作用も関係しているのではないかと考えている。すなわち極性化合物を含む潤滑油の粘度は表面近傍で単分子膜厚さをはるかに超えてパルクの粘度より大きな値を示すことがあり、境界潤滑はこの long range の粘度増加層の特殊な構造が関係しているのではなからうか。さらに検討が望まれるところである。

3. アルミニウム圧延における潤滑の問題点

Sargent¹¹⁾ は今世紀末までのこれからの20年間のアルミニウム圧延における潤滑の問題点とその解決法について示唆に富んだ解説をしているので以下に紹介しよう。

将来の問題としては

- ① 石油の供給が減少する
- ② 環境および健康に関する規制が厳しくなる
- ③ 石油コストそして圧延コストが上昇する
- ④ アルミニウム製品の需要が増大する
- ⑤ 製品の品質とくに表面品質に対する要求が高まる
- ⑥ 他材料との競合が厳しくなる

を掲げている。そしてこれらの問題に対し次の解決策を提示している。

- ① 生産性を高める

連続プロセス、高速度、高圧下率の達成。そのためには余計に発生する熱を取扱うための冷却効率のよいクーラントと熱膨張の小さいロールが必要。

- ② 非石油ベースの圧延油

石油留分がアルミニウム圧延油として使用できな

図3 ダイス温度と圧縮応力との関係

くなる時がやってくるだろう。そのためには石炭から低粘度石油に似た製品を開発する必要がある。

③ 圧延油の再生使用

汙過法の改良そして安価な再生法が必要

④ 圧延における潤滑の理解を深める

一圧延油粘度が圧力に対して指数関数的に増加することは知られているが、この粘度変化に対する添加剤の効果については知られていない。

一圧力による粘度変化が時間に依存することは確かであるが緩和時間のデータはなく、またこれが圧延において重要な因子であるかどうか知られていない。

一ある種の添加剤は表面に吸着し、この膜厚は分子の大きさや表面凹凸の高さより厚くなることがあるが、圧延においてこの種のデータが全くない。

一ロール・コーティング形成。脱着の機構についてもつと知らねばならない。

一圧延油と汚染物の化学についての理解がもつと必要。

一圧延プロセスに対するより深い理解が必要。我々はまだ十分満足すべき圧延理論をもっていない。

アルミニウム圧延における潤滑の問題点とその解決策をまことに要領よくまとめた論文である。前章までに述べたことそして次章以下で論ずる内容も多かれ少なかれ Sargent の指摘した諸点に関連していることに読者も気付かれるであろう。

4. 熱間圧延潤滑に関するトピックス

アルミニウム熱間圧延油の表面欠陥のうちで一番問題とされるのがピック・アップ欠陥である。これは圧延板に陽極酸化処理を施した時に、表面に黒斑模様として現れる表面欠陥であり、ロール・コーティングとの関連が深い。Koponov¹²⁾ はピック・アップ欠陥が潤滑不良に起因し、圧延圧力を高めると考え、圧縮試験により圧縮応

力とロール温度との関係について調べた。アルミニウムおよび Al-Mg合金の円柱サンプルを400℃に加熱し、50～250℃に加熱された平ダイスの下ダイスとサンプルの間にエマルションを流し込み圧縮を行なった。この時エマルションの保持と一定圧下率を与える目的で拘束リングを用いた。43%圧下の場合のアルミニウムの圧縮応力測定例を図3に示す。圧縮応力は100～120℃の間で極小値を示している。これは100～120℃の温度範囲でエマルションからの油分離 (Thermal separation)が行なわれるためであるとしている。すなわちアルミニウムの熱間圧延では最適ロール温度が存在すると結論している。松下ら¹³⁾もアルミニウム合金の圧延の潤滑特性と板表面状態について検討し、Thermal separationの重要性を指摘している。図4に彼らによるアルミニウム熱間圧延油の付着試験結果を示す。これは50℃に加熱したエマルションタンクの中に一定温度に加熱した試片 (60 mmW×150 mmL×2 mmT) を通過させた後の油付着量を測定したものである。付着量は室温から 100℃付近までは温度とともに低下し、150℃付近で極大値を示す。それ以上温度が高くなると再び付着量は減少する。エマルション粒径が大になると極大値の位置が高温側にずれている。図3と図4の結果は検討対象が異なり、必ずしも同日に論ずべ

図4 付着量に及ぼす温度の影響

きではないかもしれないが、Thermal separationの面からだけみれば、熱間圧延では最適ロール温度が存在するといつていいように思われる。

伊藤¹⁴⁾は熱間圧延板の表面欠陥と圧延油との関係を系統的に調べ、いくつかの興味ある知見を得ているのでやや詳しく紹介しよう。現場ではピック・アップ欠陥を少なくする目的でロール・ブラッシングを行ないロール・コーティングが薄く、均一にコントロールされるのが普通である。ブラッシングと消費動力を調べた結果を図5

図5 ブラシロールの違いによる消費動力の比較 (3004)

表2 市販油の一般性状

Sample	A	B	C	D	E	F	G	H
Neat Oil								
Sp. Gr. 15/4°C	0.900	0.949	0.933	0.899	0.895	0.925	0.934	0.920
Vis. cSt/100°F	34.98	53.93	67.36	37.4	57.32	41.5	87.35	103.2
Vis. cSt/210°F	5.20	6.07	6.83	5.53	7.52	5.54	9.82	10.84
Viscosity Index	79	45	42	90	102	51	99	97
Flash Point°C	162	161	154	148	214	168	232	324
Acid Value (mgKOH/g)	24.2	27.3	26.9	24.0	11.2	145	24	191
Sapo Value (mgKOH/g)	25.5	38.0	38.2	254	17.7	20.0	34.6	35.0
pH	9.0	8.6	8.6	8.8	8.7	8.6	8.1	8.1
(4Vol% Emulsion)								
Main Emulsifier	Carboxylic Acid Amine Soap			Anionic		Nonionic		

表3 直接加熱試験結果

Sample	A	B	C	D	E	G	H
Before Heating Free Oil (vol%)	tr	tr	tr	tr	0	0	0
Oil Content in Emulsion (vol%)	7.80	7.61	7.70	7.82	7.96	7.86	7.91
After Heating Free Oil (vol%)	5.30	5.00	5.10	5.20	tr	tr	tr
Oil Content in Emulsion (vol%)	2.33	2.41	2.39	2.30	7.44	7.61	7.43
Emulsion Life ¹⁾	Long	—	Long	Long	Short	—	Short

1) Emulsion Life Long About 1 year or more
 Short About 1~2 months

図6 圧延荷重に及ぼすロールコーティングの影響

に示す。同一圧延条件のもとではナイロンブラシの方がスチールワイヤブラシよりも消費動力が大きい（荷重法により求めた摩擦係数も大きい）ので、ナイロンブラシはワイヤブラシに較べて、コーティング除去能力が小さいとしている。表2に示す市販エマルジョン型圧延油8種について加熱試験を行ない表3の結果を得た。加熱試験によるフリーオイルの生成の差が、一般にいわれている実機における寿命の長短と対応していることがわかる。またフリーオイルの生成の有無は配合乳化剤の種類により異なっている。フリーオイルそれ自身はエマルジョンの潤滑性を良くする性質があるが、同時にエマルジョン中の金属粉やアルミニウム石ケン等を吸着除去する作用がありエマルジョンのスカムアウト性を良くするという。金属粉等はフリーオイルと共に液面に上昇しスキミングにより系外へ棄てられる結果、系は長期間比較的きれいに保たれ、寿命が長くなるものと考えられている。ある種の脂肪酸アミン塩系圧延油はこの性質が著し

図7 圧延荷重に及ぼす板温度の影響

く長寿命特性を発揮するようである。他方エマルジョンが過度に安定なことは、外見は良好なエマルジョンに見えるが、潤滑性、寿命の点ではマイナスであり、アルミニウム熱間圧延油としては不適合であると結論している。同じ著者はクーラント使用水質、日常管理法等にも触れ、とくにクーラントの汚れ度合を知る試験法として“ころがり破壊温度”を提唱している。加熱されたアルミニウムの板上に滴下したエマルジョン粒がころがる最低温度を測定するものであり、クーラントの汚れがひどいほど、ころがり破壊温度が高くなる。クーラント管理法として興味ある方法である。

松下ら¹⁵⁾は熱間圧延潤滑特性に及ぼす油種の影響について報告している。図6は圧延荷重に及ぼすロール・コーティングの影響を示したものである。無潤滑圧延時にはロール・コーティングの発達に伴って圧延荷重は増加している。引続きロール・コーティングしたロールを用いて潤滑圧延すると圧延枚数とともに荷重が減少し、一定値に近づいている。その時(F)の荷重はロール・コーティングのないロールを用いて圧延した場合(A)よりも低下していることからロール・コーティングが潤滑に寄与しているとしている。図7は圧延荷重に及ぼす板温

図8 赤外吸光分析結果

図9 パス回数とロールコーティング量との関係

度の影響を示す。オレイン酸が熱の作用により減磨効果をもつことがわかる。図8はオレイン酸の圧延時の変化を調査するために行なった圧延後の板表面の赤外吸光分析結果である。圧延した板の表面に金属石ケンの存在が認められる。金属石ケンが圧延時の潤滑に寄与すると考えられている。

本村ら¹⁶⁾はロール・コーティング量が圧延特性に及ぼす影響を調査している。ロール・コーティングを付着させるダミー材を280本用い、総本数490パスで1つの条件を終了する方法がとられている。最初の20パスを連続ダ

表4 供試潤滑油

Oil	Viscosity at 40°C cSt	Base Oil	Additive
A	500	Polybutane	
B	67.4	N	—
C	7.77	P	A
D	4.06	P	A
E	2.21	P	A
F	1.48	P	A
G	4.30	P	E

N: Naphthenic Oil, P: Paraffinic Oil

A: Alcohol, E: Ester

図10 圧延荷重、表面あらさに及ぼす粘度の影響

ミー材圧延をし、つぎに各5パスずつ20, 30, 40%圧下率で15本圧延し、このローテーションを14回繰返し、490パス圧延する。図9に材料毎に材料1枚あたりのロール・コーティング量を示す。A 5083, A 1050, A 2017の順にロール・コーティング量は低下するが、特にA 5083は高温状態で表面活性が高く、酸化の影響を多く受けるようで、コーティング量は多くなっている。200パス以降はコーティング量は増加しなくなるが、圧延によってロールへのアルミニウム微粉の付着と脱落との関係において後者が多くなると考えられる。この傾向はアルミニウム合金および高圧下率ほど付着と脱落とが顕著に繰返されるようである。純アルミニウムの場合は、低圧下率で低く、高圧下率で高いコーティング量を示し、アルミニウム合金の場合は、あまり圧下率の影響を受けず、移着現象は材料によって大きく影響を受けるとしている。

ロール・コーティング, Thermal separation, クーラントそしてクーラント管理等々について断片的に述べてき

図11 圧延荷重に及ぼす板および潤滑油温度、潤滑油種の影響

表5 圧延油の性状

圧延油	粘度 ¹⁾ (sec)	比重	酸価 (mgKOH/g)	P H	乳化安定性 ²⁾	使用濃度 (%)	使用温度 (°C)	備 考
A	38.6	0.867	49.5	5.0	不安定 (10~16)	8.0	30	エマルジョン
B	34.2	0.832	0.7	5.8	不安定 (10~16)	10.0	30	エマルジョン
C	51.4	0.866	13.4	—	—	5.0	40	エマルジョン
D	73.8	—	1.1	6.5	安定 (0.63~4.0)	9.9	30	エマルジョン
E	71.2	0.908	8.66	8.8	非常に安定 (0.4~0.63)	5.0	40~55	エマルジョン
F	31.2	0.820	0.06	—	—	—	30	鉱油ストレート

1) RW 1号, 50°C

2) エマルジョンの粒径分布により判定。

体積%で80%以上が含まれるエマルジョン粒径範囲を示す。(単位 μm)

図12 各種圧延油における摩擦係数と圧下率の関係

たわけであるが、ここ2~3年でこれまで未知なところが多かった熱間圧延潤滑の解明の手がかりが感じとられるようになってきたことは喜ばしいことである。

5. 冷間圧延潤滑に関するトピックス

冷間圧延潤滑の分野においては上述の熱間圧延潤滑の分野に較べて取り上げるべきトピックスはやや少ないが、鉱物油ベースにかわる水ベースの圧延油の検討など注目すべき報告もいくつかみられる。

村田ら¹⁷⁾はアルミニウム用冷間圧延油全般について解

図13 各種圧延油における反射率と圧下率の関係

説し、基油と油性剤のそれぞれに要求される品質、性能について述べ、冷間圧延油の今後の動向についても触れている。また圧延油保守管理の重要性についても言及している。たとえば冷延コイルの焼鈍により発生するか、色ステイン (Brown Stain) の原因を追及し、ステインの主な原因はアルミニウム石ケンの過度の生成にあることを明らかにした。そしてこの種の試験に赤外線吸収スペクトル法が有効なことを示した。

松下ら¹⁸⁾は板の表面性状に及ぼす圧延条件の影響を明らかにする目的で、テストミルを用い、表4の潤滑油を

使用し圧延を行なった。圧延荷重、板表面あらさの結果を図10に示す。両者におよぼす潤滑油粘度の影響は明らかである。図11は圧延荷重に及ぼす板および潤滑油温度、潤滑油種の影響を示したものである。板および潤滑油を50℃に加熱した場合よりも、80℃に加熱した方が荷重が高いこと、ほぼ同一粘度の潤滑油GとDとの比較では添加剤の違いもあり異なつた挙動を示すことなどが明らかである。圧延枚数の増加により圧延荷重が増加したり減少したりする点は、鋼板の圧延と異なる点であり、これは圧延時にアルミニウムがロール表面にコーティングされ、このコーティングによつて圧延状態が著しく異なるためであると考えられる。この意味においてベースオイルや添加剤の選択にはロール・コーティングを考慮することが重要であると指摘している。アルミニウムの冷間圧延における圧延荷重の圧延長さ依存性は木原¹⁸⁾も報告しているところである。冷間圧延においても、ロール・コーティングは潤滑状態の一つの指標であり、圧延荷重、板表面あらさ、板表面反射率等に及ぼす影響も強いので、今後重視すべきポイントであろう。

木村ら¹⁹⁾は鉱物油ベースにかわるアルミニウム水溶性圧延油について報告している。現在、アルミニウム冷間圧延機の圧延速度は2,000 m/min前後の高速となつていゝるが、生産性向上の目的で圧延速度をさらに高速化する要求が強くなつてきている。このような要求に現在使用している鉱油系の圧延油で対処するとすれば、冷却性の面と、ロールかみ込み部における油膜厚さの増加を考慮し光沢のよい板を得るためには、低粘度油が必要となる。しかし、低粘度鉱油系圧延油の使用は1,500 m/min以上の圧延速度では火災が多発する危険があるのが実情である。ここに水溶性圧延油の開発の必要性があるが、さらに前述の Sargent¹¹⁾ の指摘にもあるように将来の低粘度鉱油のアルミニウム圧延油としての供給に制限が出てくることを予測するならば、水溶性（あるいは水ベース）圧延油開発の必要性はより重要になつてくる。木村らは表5の圧延油（A～Eは5～10%エマルジョンとして、Fは鉱油そのまま）を用いて一連の実験を行なった。図12、図13に結果の一部を示す。鉱油Fと同等の性能を示す水溶性圧延油が2、3あること（たとえば圧延油A、B等）が明らかとなつた。水溶性圧延油で発生しやすいウォーター・ステインの防止法についても彼らは言及しているが、ウォーター・ステインが完全に防止できれば、非常に将来が期待される。水溶性冷間圧延油についてはソ連では広く使用されているということであり、Mysyakin ら²⁰⁾は59 ts エマルジョン（83～85%絶縁油級鉱油、9.5～10.5%オレイン酸および5.5～6.5%トリエタノールアミンの10%エマルジョン）における劣化、磨耗粉蓄積などについて興味ある報告をしている。

6. おわりに

以上、アルミニウム圧延潤滑の特徴と熱延・冷延各々の工程に關した最近のトピックスについて概説した。Sargent¹¹⁾ も指摘しているようにまだまだ未知なことも多いが、ここ数年間の研究により次第に解明されつつある部分が増えていることもまた確かである。本稿では言及することができなかつたが、視野をアルミニウムに限定せず、広く鉄鋼の圧延潤滑、あるいはアルミニウムを含む金属の塑性加工の潤滑にまで広げれば、アルミニウム圧延潤滑にも適用できる研究・報告は無数にあるといつてもよい。Sargent ら²¹⁾ による圧延板表面あらさの新評価法の提言、小豆島²²⁾ によるレーザを利用した板表面観察、Osbourne ら²³⁾ による HPLC (High performance liquid chromatography) を利用したエマルジョン再生法、Oyane ら²⁴⁾ による金属加工における材料、工具および潤滑剤評価のための万能試験法の提唱等々枚挙にいとまがない程である。

なお、アルミニウム圧延潤滑と密接な関係にある圧延板表面についてはは木村²⁵⁾ の解説、および軽金属学会編集の「アルミニウムおよびアルミニウム合金の表面欠陥分類」²⁶⁾ を参照していただきたい。

最後に、本稿がアルミニウム圧延関係者その他の方々にとつて多少なりともお役に立てば筆者の望外の幸せである。

参 考 文 献

- 1) 木原：塑性と加工，**16**-179 (1975)，1175.
- 2) 加藤，左海：同上，**20**-227 (1979)，1088.
- 3) 鈴木：潤滑，**24**-2 (1979)，7.
- 4) 鈴木：塑性と加工，**16**-168 (1975)，98.
- 5) たとえば
 - a) H. S. Cheng: *Friction and Lubrication in Metal Processing, ASME Book* (1966)，9.
 - b) W. R. D. Wilson & L. E. Murch: *ASME Paper, No. 75-Lub-32*.
- 6) Y. H. Tsao & L. B. Sargent, Jr.: *ASLE Trans.*, **21**-1 (1978)，20.
- 7) 小豆島，木原，宮川：第27回塑性加工連合講演会前刷，(1976)，96.
- 8) W. B. Hardy: *Collected Works, Cambridge Univ. Press*, (1936).
- 9) F. P. Bowden & D. Tabor: *Friction and Lubrication of Solids, Oxford*, (1954).
- 10) 岡部：塑性と加工，**20**-227 (1979)，1067.
- 11) L. B. Sargent, Jr.: *Lubrication Challenges in Metalworking and Processing Proceedings First International Conference*, (1978).
- 12) V. I. Koponov, I. D. Heikhman and V. A. Mitrofanov,: *Listo Prokatnoe Proizvodstvo* (1978)，18.

- 13) 松下, 高塚, 松井: 軽金属学会 第17回 シンポジウム「金属加工のさいの表面 につての 諸問題」, (1980), 43.
- 14) 伊藤: 同上, (1980), 51.
- 15) 松下, 高塚, 松井, 影山: 昭56塑性加工春季講演会講演論文集, (1981), 135.
- 16) 本村, 堀野, 堀端: 昭55塑性加工春季講演 会講演論文集, (1980), 207.
- 17) 村田, 川崎: 潤滑, **24**-2 (1979), 13.
- 18) 木原: 第28回塑性加工連合講演会講演論文集, (1977), 111.
- 19) 木村, 花木: 軽金属学会 第17回 シンポジウム「金属加工のさいの表面についての諸問題」, (1980), 38.
- 20) B. A. Nysyakin, K. I. Kuznetsov, V. A. Morozov and A. I. Evlanov: *Light Metal Age*, **10** (1977), 26.
- 21) L. B. Sargent, Jr. and Y. H. Tsao: *ASLE Transactions*, **23**-1 (1979), 70.
- 22) 小豆島, 山中, 宮川: 昭55 塑性加工 春季講演会講演論文集, (1980), 363.
- 23) T. Osbourn and G. Mantell: *American Laboratory*, **6** (1980), 18.
- 24) M. Oyane, S. Shima and T. Nakayama: *Preprint for The International Symposium on Metalworking Lubrication Century 2*, (1980), 13.
- 25) 木村: 塑性と加工, **20**-227 (1979), 1126.
- 26) 軽金属学会: アルミニウムおよびアルミニウム合金の表面欠陥分類, (1980-5).