マグネシウムの板圧延

Rolling of magnesium

佐藤 雅彦*

Masahiko SATO*

1. マグネシウムの圧延

板圧延工程とは、金属材料を回転するロールと呼ばれる円筒形工具間を通過させ、板厚を薄くする工程である。材料の変形形態は、ロールによる連続的な圧縮変形といえる。圧延には熱間圧延と冷間圧延があり、マグネシウムは工業生産的な冷間圧延が不可能であるために、粗圧延から仕上げ圧延までのすべての工程が約 200℃ 以上の熱間で行われる。これはマグネシウム板材独特の集合組織と変形機構によるものであるが、この点がマグネシウム合金板材の発展を遅らせた原因といえる。現在では、マグネシウム合金の優れたホットコイル製造方法と熱間圧延技術が開発され、市場においてもその成形体が好評を博すまでになった。マグネシウムの圧延品は、高い表面性状と高比剛性率を利用した携帯用電子機器筐体に使用が拡大しつつある。

2. 製造工程と設備構成

2.1 圧延に使用されるマグネシウム合金

マグネシウム合金は ASTM による表示が国際的に通用している¹⁾。なかでも圧延に用いられる展伸用合金は、AZ (Mg-

Al-Zn) 系, ZK (Mg-Zn-Zr) 系合金などが規格化されており、図 1 に示す規則によって、主な添加元素とその添加量が表示される。表 1 に ASTM B90 における AZ31B 合金の化学組成規格を示す。また、JIS においても JIS H 4210 に規定されている。表 2 にマグネシウム合金板および条の JIS 記号とそれに対応する他の規格での相当合金および主な用途を示し、表 3 にはそれぞれの化学成分規格を示す。展伸材は、圧延、押出、鍛造などに用いられ、実際の使用量の大半を AZ 系合金が占める。その中でも AZ31 合金 (JIS の MP1 相当 Al : 3%, Zn : 1%) は成形性、強度、価格のバランスに優れ、圧延材として最も多く使用されている。表 4 に AZ31B 合金の製品の代表的レードル値 (溶湯分析値) を示す。圧延板材

図 1 マグネシウム合金の表示

表 1 ASTM B90/B90M における AZ31B マグネシウムの化学組成規格

(mass%)

記号	化学成分										
	Al	Zn	Mn	Fe	Si	Cu	Ni	Ca	RE	Zr	Mg
AZ31B	2.5~3.5	0.6~1.4	0.2~1.0	0.005 以下	0.10 以下	0.05 以下	0.005 以下	0.04 以下	—	—	Bal.

表 2 マグネシウム合金および条の種類および記号

種類	記号	対応 ISO 記号	相当合金 (参考)				
			ASTM	BS	DIN	NF	
1 種 B	MP1B	ISO-MgAl ₃ Zn ₁ (A)	AZ31B	MAG110	3.5312	G-A3Z1	成形用, 電極板など 食刻板, 印刷板など 成形用, 食刻板, 印刷板など 成形用など
1 種 C	MP1C	ISO-MgAl ₃ Zn ₁ (A)	—	—	—	—	
7 種	MP7	—	—	—	—	—	
9 種	MP9	ISO-MgZn ₂ Mn ₁	—	MAG131	—	—	

* 日本金属(株) (〒108-0014 東京都港区芝 5-30-7)。NIPPON KINZOKU CO., LTD. (5-30-7 Shiba, Minato-ku, Tokyo 108-0014)。

受付日: 平成 21 年 7 月 1 日 受理日: 平成 21 年 8 月 5 日

7

表3 マグネシウム合金板および条の化学成分

(mass%)

種類	記号	化学成分										
		Al	Zn	Mn	Fe	Si	Cu	Ni	Ca	その他の元素	その他の元素の合計	Mg
1種B	MP1B	2.4~3.6	0.5~1.5	0.15~1.0	0.005以下	0.10以下	0.05以下	0.005以下	0.04以下	0.05以下	0.30以下	Bal.
1種C	MP1C	2.4~3.6	0.5~1.5	0.05~0.4	0.05以下	0.1以下	0.05以下	0.005以下	—	0.05以下	0.30以下	Bal.
7種	MP7	1.5~2.4	0.5~1.5	0.05~0.6	0.010以下	0.10以下	0.10以下	0.005以下	—	0.05以下	0.30以下	Bal.
9種	MP9	0.1以下	1.75~2.3	0.6~1.3	0.06以下	0.10以下	0.10以下	0.005以下	—	0.05以下	0.30以下	Bal.

表4 代表的な AZ31B マグネシウムのレードル分析値 (単位: mass%)

区分	Al	Zn	Mn	Ca	Si	Fe	Cu	Ni	Others
実績 AZ31B	3.02 2.5/3.5	0.95 0.6/1.4	0.4 0.2/1.0	0.02 ≤0.04	0.02 ≤0.10	0.003 ≤0.005	0.002 ≤0.05	0.0004 ≤0.005	≤0.30

は、主にプレス成形用途として使用されるが、鋳造を基本としたダイカスト品と比較して表面欠陥が少なく、外装筐体に用いられる場合が多い。さらに素材肌を活かした薄い塗装処理を行うような、高意匠面に用いられる場合が多い。このことから、表面処理性と耐食性を維持するために、Fe, Ni, Cu等の不純物は特に厳重に管理する必要がある。また近年では、高合金系 AZ 合金の圧延材も製作されるようになってきた。これは、さらなる高強度化と高耐食性、および表面処理の容易さ等への期待によるもので、基本的には Al 添加量の多い AZ61 (Al : 6%, Zn : 1%) や、AM60 (Al : 6%, Mn : 0.3%), AM50 (Al : 5%, Mn : 0.3%) が主である。

これら AZ 系合金のほかに、Mg-Li 系合金も圧延素材として用いられている。Mg に 6% 以上の Li を添加すると体心立方晶の β 相²⁾ が析出し、冷間成形性が著しく改善される。さらに 12% 以上の Li を添加すると β 単相合金となって、さらに冷間成形性が良好になる。一般的には、Mg-Li 合金に Al や Zn を添加して使用される。この合金の ASTM による表示は、Al 添加合金は LA, Zn 添加合金は LZ である。

3. 圧延とは

圧延は、圧延機などを用いて板厚を薄くする工程である。被圧延材である板材は摩擦力によって二つのロール間に引込まれ、板厚方向に圧縮されて、目標の板厚まで板厚が減少する。図2に模式図を示すが、このときのロールと板が接触しているロール円弧の長さを接触弧長、その圧延方向長さを投影接触長さ L_d という。板圧延の加工度は圧下率 r (リダクション) で表され、圧延前の板厚 h_0 、圧延後の板厚 h_1 を用いて次式で与えられる。

$$r = \frac{h_0 - h_1}{h_0} \times 100(\%) \quad h_0 - h_1 : \text{圧下量}$$

また、ロール周速が一定の場合、板速度はロール入口から

図2 圧延によるロール間での変形

出口に向かって速くなる。そして入口から出口に至る接触弧長内でロールの周速 V_R と等しくなる点がある。これを中立点 NP と呼ぶ。この中立点前後ではロールと板との相対速度が逆となる。すなわち、中立点より入り側では板はロールより遅れ、出口では先進 (増速) する。

このように、板は圧延によって板厚方向に圧縮されるが、これに応じて圧延方向に伸びる。圧延後の長さは圧縮前の長さのほぼ h_0/h_1 で示すことができる。厳密には異なるが、これは板圧延では平面ひずみの仮定がほぼ成り立つこと³⁾を示している。

	ロール段数記号	ロール配置	特徴と用途		ロール段数記号	ロール配置	特徴と用途
ロール積み重ね方式	2H		<ul style="list-style-type: none"> 最も単純な構造の圧延機 形状制御困難 分塊圧延、粗圧延に適用 	クラスタ方式	12H		<ul style="list-style-type: none"> クラスタ構造により小径ワークロールを使用することができる。 硬質材料や薄物圧延に適用される。 ステンレス鋼、けい素鋼、銅合金などに使用される。
	4H		<ul style="list-style-type: none"> 圧延機の基本形 熱間圧延、冷間圧延の多くに適用 		20H		
	6H		<ul style="list-style-type: none"> 4H圧延機に中間ロールを追加した圧延機 形状制御性に優れ、多彩な圧延特性を持つ 				

図3 圧延機で採用されているロール配置

4. 圧延機

4.1 圧延機の種類

圧延製品の種類は多く、これらが多数の工程を経て製造されるため、圧延機の種類も多種多様なものになっている。これらの圧延機は構造あるいは適用法の違いによって分類することができる。

4.2 圧延機を構成するロールの段数

圧延機の構造面からの最も基本的な分類は、ロールの段数で行われる。ロール段数は図3に示されるように最も単純な2段ロール圧延機から、主に銅合金やステンレス鋼の圧延に用いられる20本のロールで構成される20段圧延機まで多岐にわたる⁴⁾。一般に、ロールの段数が増加するのは、圧延される材料の特性や必要とされる板厚によるもので、加工硬化の大きい材料や、箔などの薄物材料ほど多段圧延機が使用される。マグネシウムの圧延に用いられる圧延機は2段から6段圧延機が多い。これはマグネシウムが工業生産として冷間圧延できないことに起因しており、熱間圧延中の加工硬化が小さいことと、圧延効率よりもむしろ形状制御性や、圧延中の温度保持性を重視して選択されるからである。

4.3 板形状制御

圧延板材では、平坦度（フラットネス）やクラウン等の形状制御（プロフィール）を行う必要がある。クラウンは幅方向の板厚偏差のことで、形状ばかりでなく、絶対値は板厚精度にも影響を与える重要なものである。図4に代表的な板クラウンの例を示すが、クラウンは原料コイルのクラウンが仕上げ圧延品のクラウンにまで影響を与えるため、実際には全工程において管理すべき項目である。圧延機におけるクラウンの発生要因は複数考えられるが、主に、①圧延ロールの弾性変形、②ヒートクラウン等が要因となる。これら板クラ

名 称	特 徴	外 観
フラット	幅方向に均一な板厚分布	
凸クラウン	板幅中央部が厚い板厚分布	
凹クラウン	板厚中央部が薄い板厚分布	
ウェッジ	幅方向で片テーパ状の板厚分布	
複合クラウン	幅方向で二つ以上の凸クラウンを持つ板厚分布	

図4 板クラウンの種類の模式図

ウンの制御方法として、あらかじめロールのたわみを予測して、ロールを研磨して圧延ロールの形状を変化させておく、イニシャルロールクラウン制御がある。この方法はほぼすべての圧延機において一般的に行われているもので、特にロール段数の少ない2段圧延機などでは重要な方法である。正確な制御を行うためには、圧延荷重に伴うロールの弾性変形量を正確に把握する必要がある。

4段以上の圧延機ではロールベンディング装置やロールクーラントスプレーによる制御が行われる。図5に主な形状制御

圧延機	形状制御	制御機構名称	ロール配置
ロールベンディングミル		WRベンディング
		WR:ワークロール	
		IMRベンディング
		IMR:中間ロール	
ロールシフトミル		IMRシフト

図5 圧延機で用いられている主な形状制御機構

図6 可逆式四段圧延機の一例

機構を示すが、ロールベンディング装置とは、油圧装置を用いて主にワークロールをたわませるものであって、イニシャルクラウン制御と併用される。ロールベンディング装置には、油圧シリンダを複数配し、より多くのたわみを与えられるようにしたベンダもある。図6に可逆式4段圧延機の一例を示す。6段以上の圧延機の場合は中間ロールを有するために、この中間ロールに主にテーパを付けて、幅方向にシフトさせる中間ロールシフトも用いられる。中間ロールのテーパ量や端部からの深度を変化させることで制御幅を変化させることができる。このような圧延機はUCミルもしくはHCミルと呼ばれる。

クラスタタイプの圧延機もマグネシウムに適用可能である。図7に代表的なクラスタタイプミルである20段圧延機ハウジング部の外観を示す。しかしながら、LZ、LA合金やAZ系合金箔材の仕上げ圧延など限定的な適用がほとんどである。このクラスタタイプの圧延機は、特に薄物の圧延において高い形状制御性を有しており、中間ロールシフトや、ASUと呼ばれる分割偏心バックアップロール制御を用いることができる。これらを最大限利用することで、SUSにおいて0.002mm

図7 可逆式20段圧延機のロール配置例

図8 各種実用材料の熱間圧延温度範囲の比較

厚で幅700mmのコイル材圧延も行われている。マグネシウムにおいても、0.1mm以下の箔材試作圧延に用いられた実績もある。

このように、圧延機にはタイプ別に複数の形状制御技術が投入されているが、これらは万能ではない。もともと矩形断面をもつスラブから圧延を行った場合、薄い部分は厚い部分に比べて長くなるために平坦度が悪化する。現実的には、幅方向に複数幅で切断し製品とする多条取りを行う場合や、後に行われる形状矯正工程の効果を考慮した形状の作り込みが必要であり、この点においては、マグネシウムと他金属との間に違いはない。

4.4 温度管理

前述のようにマグネシウムの圧延は、分塊から仕上げまでのすべての圧延工程が熱間で行われる。このために、圧延材の温度管理が非常に重要である。温度管理は平坦度制御だけでなく、圧延の可否自体を大きく左右する。図8に鉄、アルミニウムとの圧延温度および範囲の違いを示すが、マグネシウムは工業生産的に必要な圧延下限温度が200°C近傍で、圧延材の機械的特性を考慮すると圧延に使用できる温度範囲は200~400°Cと200°C程度の幅しかない⁵⁾。このような温度範囲を実現するために製造工程には各種の工夫がなされている。量産工程の情報公開はまったくと言っていいほどなされていないために詳細は不明であるが、スラブ等被圧延材はあらかじめ加熱炉内で加熱され圧延に供される場合が多い。また、ロールを加熱する場合もある⁶⁾。報告されているロール加熱法はカートリッジヒータ等をあらかじめロール内に組込み、

給電ブラシなどで給電してロールを加熱するものである。概念図を図9に示す。被圧延材と直接接する圧延ロールへの加熱は大きく、ロールを加熱することでマグネシウム合金の温度低下が抑制され、1回の加熱で大きな総合圧下率を与えることが可能となる。しかしながら、高温に積極的に加熱されたロールで圧延する場合、圧延効率は高くなるが、反面、潤滑が非常に困難となる。マグネシウムは特に熱間圧延時にロールへの凝着（ピックアップ）が生じやすく、表面品質に悪影響を及ぼす。鍵田らはマグネシウムの圧延における潤滑油の有効性を評価している⁷⁾。図10に圧延潤滑条件を変化させた場合のロール表面への影響を示す。潤滑油を用いることで凝着を軽減でき、特に合成油使用の効果が高いとしている。ロール表面の粗さにおいても、合成油が最も小さい。ま

図9 ヒータによる加熱ロール例（模式図）

た、このピックアップを防止するために多量の圧延油を用いる場合がある。いまだ有効な圧延油がないばかりか、炭化した圧延油が板材表面に押込まれて、やはり表面品質に悪影響を与える。

形状の面では、形状制御性の高い多段圧延機ほど材料とロール間のみならず、ロール／ロール間の熱伝導や潤滑も考慮する必要がある。このようにロール数が増加すると温度分布が複雑になるため、温度分布変化を考慮したロールクラウンと形状制御装置の適用範囲の検討が必要となる。

5. マグネシウム圧延材の製造工程

マグネシウム合金圧延板材の製造工程の一例を図11に示す。所定の成分調整を行ったマグネシウム合金溶湯から種々の方法でホットコイルを製造し、仕上げ圧延を経て幅切断、表面仕上げを行い、製品コイルとなる。以下に各工程の現状とポイントを示す。

図10 潤滑油の及ぼすロールおよび被圧延材表面への影響

図11 マグネシウム合金圧延板材の製造工程例

7

5.1 母材コイルの形態

板圧延を行うためには、まず母材となるホットコイルを得る必要がある。その方法としてスラブ圧延法、押出法、ストリップキャスト法が現在実用化されている。工業的なマグネシウムの圧延はまだ歴史が浅く、これらの方法の中から、コスト・サイズ・品質面を考慮して選択される。

5.2 スラブ圧延法

スラブ圧延法は、重力鋳造法や半連続鋳造（DC）法などにより矩形断面の大型インゴットを製作し、熱間圧延機の仕様に合せて切出したスラブを熱間圧延してホットコイルを製造するものである。原料となるマグネシウム合金インゴットは、海外メーカにおいて約127~305mm厚×406~1041mm幅の矩形DC（半連続鋳造）スラブが製造されて⁸⁾おり、ドイツやカナダでは1000mm幅を超える板材が製造・販売されている。

日本国内においても、900mm幅の板材の試作例があるが、現在量産品として確認できる圧延用途のスラブは、図12に示す150mm厚×600mm幅（最大750mm幅）のスラブか、

図12 圧延用マグネシウム合金スラブ外観

16インチ直径の円形断面を持つDCビレットをスライスしたものである。

このスラブの品質は、圧延材に直接大きな影響を与えるために、まず良質なスラブを得ることが重要となる。マグネシウムは溶湯内の不純物元素より比重が小さいため、これを炉底に沈降させ分離するが多いが、不純物元素との比重差が小さく、多くの時間を要する。このため、溶解炉のほかに静置炉、保持炉を区別して使い分けている⁹⁾。しかしながら、鋳造時には不純物を巻き込みやすく注意が必要である。前述の通り、マグネシウム合金のスラブは、主に重力鋳造か半連続鋳造によって製造されている。マグネシウムの重力鋳造は鉄製鋳型を用いて行われるが、表面近傍に生成した酸化物質や不純物層を除去するために表面研削が行われる。この点についてはアルミニウムなどと同様である。その後、均質加熱処理が行われる。例えばAZ31合金では400℃以上で24時間程度の均質加熱処理が行われることが多い。これは凝固時に生じた固溶元素の析出物や偏析を均質化することが目的であって、AZ61等の合金元素添加量の多い合金ではさらに長時間加熱処理される場合がある。半連続鋳造はモールドで表面が凝固した直後に水冷されるため、冷却速度が速く、単相合金の場合、サイズによっては均質加熱処理が省略される場合もある。

このようにして製造したスラブは、熱間圧延によってホットコイルとなるが、圧延工程にはシートタイプの圧延機か、このシートタイプの圧延機にファネスコイルと呼ばれる、保温機能を有するリール設備を組合せたステッケルタイプの圧延機が使用される。図13に熱間圧延工程に使用される圧延機の組合せ例を示す。熱間圧延は再結晶温度以上で行われるが、他の熱間圧延を行う材料、例えば鉄鋼材料やアルミニウムと比較して圧延温度範囲が狭く、場合によっては耳割れや板切れが生じ、安定操業を困難なものとしている。

5.3 押出法

押出法は、もともとアルミニウムサッシなどで実用化された技術を応用し、マグネシウム合金の板材に応用したもので

	圧延機配置	特徴
厚板		<ul style="list-style-type: none"> ・粗、仕上げ用の二基の可逆圧延機でシートを圧延する場合。 ・主に厚板に用いられる。 ・設備が安価。
可逆式		<ul style="list-style-type: none"> ・可逆式仕上げ圧延機一基でスラブからホットコイルまで圧延する場合。 ・加熱・保温機能を持つリールを有する。
粗+可逆式		<ul style="list-style-type: none"> ・それぞれ一基の可逆式粗圧延機と可逆式仕上げ圧延機の組合せ。 ・生産の自由度が高い。

図13 マグネシウム合金熱間圧延設備の組合せ例

ある¹⁰⁾。原料となるビレットは、溶解・精錬方法が異なるが、アルミニウムと同様の DC 鋳造機を用いて製造可能である。押出設備についてもアルミニウムとマグネシウムは共用が可能である。得られる板材の表面品質は高く、表面欠陥や耳割れのない良好な製品が得られている。また、金型サイズの変更により、幅や板厚の選択の自由度が高いこともこの方法の特徴の一つである。スラブ圧延法やストリップキャスト法では必要となる、原料切断工程の省略が可能となることで歩留まりの向上が望める。しかしながら問題点として、押出設備の構造上の制限から、板幅および板長さに制限がある。すなわち、押出機的能力（押出圧力）によって決定されるビレット径に伴う板幅の制限や、ランアウトテーブルの長さによって決定される長さの制限があり、コイルが小単重になってしまうことである。

5.4 ストリップキャスト法

ストリップキャスト法^{11)~14)}は、マグネシウム合金の溶湯を直接板材として鋳造するもので、薄板を直接鋳造できることから、近年では国家レベルでの研究¹⁵⁾も行われ、工程省略によるコスト低減などが期待されている新しい技術である。現在では、板厚 4.3mm、板幅 530mm のコイル材が量産開始され、コストダウンを含めて今後の展開が大いに期待できる。また、一般的な重力鋳造や DC（半連続鋳造）と比較して冷却速度が速く、数百 K/s にも達する¹⁶⁾。これは初期結晶粒径の微細化と、Mg-Al 系品出物の微細分散が生じると報告されており、よい特性を持つ母コイルを得られる可能性がある。問題点としては、回転ロール間で連続鋳造されるために、特に長手における凝固状態の均一化が困難とされている。また、表面品質や品出物を含めた介在物制御が当面の課題ともされる。図 14 に各種法によって製作されたホットコイルの外観を示す。手法によってサイズや表面状態はまちまちであるが、どれも実用に耐えるよい仕上がりとなっている。

5.5 切断

製造されたホットコイルは、仕上げ圧延機の仕様や注文に合わせて耳や幅の切断が行われる。マグネシウム合金コイルの切断はスリッタにより行われる。スリッタは数枚の回転刃（カッター）を組合せて、コイル材もしくは広幅材のトリミングや所定の幅に多条切断するための設備である。マグネシウムの切断は他実用金属と比較して困難である。それはマグネシウムの室温変形性の低さに起因し、切断面のほとんどが段差の大きい破断面となるからである。特に厚板においてその影響が大きく、最悪の場合、くさび状のクラックを発生させる場合もある。これらは仕上げ圧延時に耳割れに発展する場合があり、幅歩留まり低下の原因となる。

5.6 仕上げ圧延

仕上げ圧延は、一般的に材料温度で約 200°C 以上の熱間で行われる^{6),17)}。マグネシウム合金の仕上げ圧延設備の形式は、図 15 に示すようにシート圧延とコイル圧延の大きく 2 種類に分類できる。シート圧延は、短尺のシート状の素材を圧延機に供給して圧延する方式である。このシート圧延によって多くの量産マグネシウム圧延板材が生産され、実際、海外では 1000mm を超える幅のシート圧延も行われる¹⁸⁾ など、世界的にもマグネシウムの仕上げ圧延においてポピュラーな方

図 14 各種法で製作された圧延用マグネシウム合金ホットコイルの外観

図 15 仕上げ圧延機の形式

法である。前述の通り、マグネシウム合金は粗圧延から仕上げ圧延まで、再結晶以上の温度で熱間圧延する必要があるが、シート圧延は、圧延機とそれに付随した材料加熱用の加熱炉があればよく、各パス間で再加熱を行うことで、効率よく耳割れや板割れなどの温度低下による欠陥を排除して作業が可能である。また、リール設備やコイル加熱炉などの大型設備の導入が不必要でもある。このような理由から、これまでのマグネシウム合金圧延板材は、ほとんどがシート状で供給されてきた。しかしながら、切り板状であるために、平坦

7

度制御性や形状制御性が悪く、特に板の反りについては、繊細なロール直径のペア差管理や周速制御が必要となる。さらに生産性が劣ることと、外因によるきずの発生確率が高いことが問題点として挙げられる。

コイル圧延は、コイル状の長尺母材を連続的に圧延していく方法であり、薄板圧延の世界ではポピュラーな方法である。マグネシウム合金の仕上げ圧延においても、圧延素材の温度管理を行うことで、他材料と同様のコイル圧延が可能である。以下、このコイル圧延の工程説明を進める。

マグネシウム合金のコイル仕上げ圧延に用いられるのはシングルスタンド式圧延機が多い。ロール構成は2Hi, 4Hi, 6Hiが考えられ、形状制御はワークロールクラウンのほかに、ワークロールベンディングやロールシフト機構により行われる。圧延板材には高い平坦度が要求される場合が多く、熱間仕上げ圧延のまま製品となる場合は、これら形状制御機構の使いこなしには注意が必要である。また、コイル圧延では、リールと呼ばれる巻取り装置を、ミルスタンド左右に設置してコイルの巻出し、巻取りを行う。このコイル圧延では、ロールとリール間で張力を付加することができる。圧延方向に対して、巻取り側の張力を前方張力、巻出し側を後方張力とそれぞれ呼ぶ。図16は圧延圧力分布に及ぼす張力の影響¹⁹⁾を示したものである。図は軟鋼板の圧力分布を用いた例であるが、張力を付加することで圧延圧力が低減する。具体的には、前方張力でロール出口側が、後方張力で入口側が減少し、前後同時付加で圧延圧力はさらに低下する。また、張力には、ロール前後での板の平坦度を保つ効果があり、特に広幅の薄板圧延や箔(0.1mm以下)圧延では、張力の付加なしに工業的な生産は不可能に近い。

アルミニウムや銅等の非鉄金属の場合は、歩留まり向上と加工熱による温度上昇分の冷却などのために一方向へ圧延してコイルを再び巻戻すワンウェイ圧延を行う場合があるが、マグネシウムの場合でも圧延したコイルの再加熱を行うために、このワンウェイ圧延を用いることがある。この方法の場合、1パスごとに再加熱する必要があるために時間がかかるが、圧延機自体へオンラインの加熱装置などの設置の必要がなく、比較的導入しやすい方法である。コイル圧延方法には、リバース(可逆)圧延もある。リバース圧延はワンウェイ圧延と違い、リールに巻かれた材料を可逆的に多数パスで圧延する方法であって、効率的なゲージダウンが行え、量産に適した方法である。ステンレス鋼や銅合金の薄板圧延ではリバース圧延が一般的である。マグネシウムに多数パスリバース圧延を用いる場合、薄板で長尺の材料を圧延することとなるため、ロールバイト前後の温度変化を最小限にする必要があり、ミルスタンド前後にインライン加熱装置を設置する等、温度保持・管理を徹底しなければならない。図17にリバース圧延によって製作されたAZ31B合金コイルの外観を示す。このように、マグネシウムでもアルミニウムや鉄鋼材料等と同様の外観と形状を持った長尺コイル材の製作は可能であり、図中のような板厚0.05mmの箔材コイルの製造も可能である。

5.7 表面仕上げ

圧延材の表面には、酸化皮膜や圧延油、外部環境から巻込まれた鉄の酸化物等が付着している。これらは腐食の起点と

図16 板幅中央の張力分布

図17 マグネシウム圧延コイルの外観

なるばかりか、後工程のプレスや表面処理工程に悪影響を及ぼす。このため、これらを除去するための仕上げ工程が必要である。マグネシウムの表面仕上げには、酸洗処理や研磨処理などがある。

酸洗処理は以下の工程をとる場合が多い。まず、脱脂工程で表面を洗浄する。この場合、脱脂には鉄系材料と同様にアルカリを用いる場合が多い。次に酸洗を行う。このとき使用される酸は、有機酸または無機酸、もしくはこれらの混合物が適宜用いられる。その後、冷・温水洗浄後乾燥する。

研磨処理は、酸洗処理後もしくは圧延後そのまま行われる。処理は安全性の面から湿式で行われ、研磨ベルトや研磨ホイールによって行われる。特に外装向けの素材の場合は、この研磨肌が製品意匠に直接影響を及ぼす場合が多く、最近では研磨工程が標準化する傾向にある。

6. 圧延材の品質

マグネシウムの冷間圧延が困難である理由は、結晶構造と集合組織に起因している。マグネシウムは結晶構造が稠密六方構造であり、軸比が最密充填構造に近く $c/a \approx 1.623$ である。図18にマグネシウム合金圧延材の{0001}不完全極点図を示す。図には圧延のままの極点図と、それを573Kで再結晶熱処理したものを示すが、マグネシウム合金圧延材の集合組織は、圧延～熱処理の工程でほとんど変化しない。このことから、マグネシウム合金圧延板材は、図19に示すように六方晶の底面である{0001}面が圧延面に平行に配列する集合組織を呈する^{20),21)}。このような圧延集合組織を有する場合、室温で活動が確認されるすべり系が底面や柱面のa軸に

図 18 マグネシウム合金板材の不完全極点図

図 19 マグネシウム圧延板材結晶配列の概念図

図 20 マグネシウム合金板材底面すべりの概念図

図 21 各種マグネシウム合金板材の結晶粒径比較（再結晶熱処理材）

図 22 AZ31B マグネシウム合金圧延板材の機械的特性に及ぼす結晶粒径と温度の影響

平行方向しかないマグネシウムは、図 20 に示すように板厚方向（c 軸方向）へのひずみを生じることができない。よって、板厚減少を生じる形態の変形が著しく困難であり、圧延

を含めた室温での成形性は悪い。こういった要因から、マグネシウム圧延板材の成形加工はほとんどが熱間で行われる。ゆえに、熱間成形に適した板材への特性制御が必要である。

7

図 23 成形品の外観に及ぼす初期結晶粒径の影響

マグネシウム合金圧延材の品質として重要視されるのは、主に以下の点である。

- ①結晶粒径の制御と微細化
- ②板厚精度、形状
- ③表面品質

6.1 初期結晶粒径の影響

マグネシウム合金圧延材の機械的性質は、室温・熱間ともに、初期結晶粒径に大きく依存する。市販されているマグネシウム圧延材の断面組織例を図 21 に示す。入手可能な市販材でも、図に示すように結晶粒径が大きく異なる。試作材も含めると 10 倍以上の結晶粒径差がある。熱間における破断伸びと温度の関係に及ぼす初期結晶粒径の影響の一例を図 22 に示す²²⁾。実際にマグネシウム合金板材のプレス成形が行われる 200~300℃ の温度範囲では、微細な結晶粒を持つ材料は高い延性を示し、実際のプレス成形においても高い成形性を示す。しかしながら、このような微細結晶をはじめとした、高い熱間成形性を示す材料は、室温での強度試験において、低い延性を示す場合が多い。このため、低い室温延性を理由に試作初期段階で不採用になるケースがしばしばある。しかしながらこの点については、素材メーカーと成形加工メーカーとの綿密な打合せが必要であり、マグネシウムの熱間成形性を構成する要因についての理解が特に必要である。

さらに、成形性だけでなく成形体の外観にも結晶粒径は大きな影響を与える。図 23 に円筒絞り成形品の外観を示すが、微細な結晶を持つ板材で成形した場合は非常に滑らかな外観を示す。これに対して粗大粒の板材では、成形体表面にくびれ状の模様が多数発生し大きく外観を損ねている。このように板材の初期結晶粒径は品質に大きな影響を与える。特にマグネシウム合金板材が熱間圧延によって製造されることを考慮すると、圧延材の組織形成は圧延温度とパススケジュール

図 24 平坦度不良の種類

図 25 圧延材に発生した形状不良例

に大きく影響されることが考えられる。しかしながら、微細結晶をすべての板厚範囲においてコイル全長で実現するのは困難であるが、圧延機の実操業可能範囲で最適化する必要がある。

6.2 表面品質

成形性に関する品質とは別に表面性状に関しても高い品質が求められている。現在では、アルミニウムや鉄鋼材料（ステンレス鋼等）に近い外観品質が求められ、内外装部品等使用形態によらず研磨による最終仕上げが一般的になりつつある。これは後工程である表面処理～塗装工程を考慮したもので、今後はさらに高い品質が求められることが予測される。このような、高い表面品質を得るためには、仕上げ圧延時で、ある程度の表面状態を確保する必要があるが、そのためには母材であるホットコイルの表面品質からの管理が必要である。圧延においてホットコイルに生じた欠陥を仕上げ圧延工程で修正することは極めて困難であり、場合によっては粗圧延前、仕上げ圧延前に研磨工程が追加される。研磨方法はベルト研磨やブラシ研磨などが、欠陥の程度によって適宜用いられるが、仕上げ圧延前など長尺コイルに重研磨を行う場合、表面積が大きく、作業時間が長くなるばかりか歩留まりを大きく低下させ、材料単価を大幅に上昇させる。できる限りホットコイル製作時の欠陥には注意をする必要がある。

6.3 板の形状

マグネシウムの圧延材においても、平坦度は他材料同様に重視される。圧延形状の制御には、前述のイニシャルロールクラウンや圧延機の形状制御機構を活用して行われるが、仕

上げまで熱間で圧延されるマグネシウムでは、特に熱膨張差を考慮したクラウン設定が必要である。仕上げ圧延の段階では、この板クラウン自体を大きく変化させることは困難であり、無理に修正すると、図 24 に示すような、いわゆる中伸びや耳波、片伸びなどの形状不良の原因となる。図 25 に片伸びと中伸びが発生した形状不良例を示す。写真では確認困難であるが、この程度の形状不良が生じてしまうと、製品としての価値が著しく低下する。鉄鋼やアルミニウム、銅合金などの圧延機では、オンライン用のプロフィール計が実用化され活用されているが、このようなことから、ホットコイルの段階で板クラウンの制御をしておく必要がある。マグネシウムのホットコイルは、押出、スラブ圧延など複数の手法で製造されるが、それぞれの手法ごとにクラウンの形成メカニズムが異なる。よって、製品形状を視野に入れたホットコイルクラウンの検討が必要である。形状に及ぼすクラウンの影響は他材料と同様であるが、製法ごとの適正クラウンの明確な指針がないのが現状である。

発生してしまった形状不良の修正方法として、一般的なローラレベラによる矯正や、プレステンパ等も用いられる。ローラレベラは連続的に配置された複数本のロール間で曲げを行い、形状を矯正するものである。使用できる下限ロール径に制限があるほか、強度の矯正を行った場合は、機械的特性が変化する可能性があるが、そのほかは鉄鋼材料などと同様に処理することができる。一方、プレステンパは加熱矯正法の一つであって、バッチ処理が前提となるために、シート状の材料に用いられる。これは、材料のクリープ変形によってひずみの除去と形状矯正するものであり、作業効率を考慮して再結晶近傍の温度で処理する場合が多い。このプレステンパにおいても機械的特性が変化する場合が多く、多くは強度が低下する。

7. おわりに

マグネシウム合金板材は高価で加工が難しいというイメージがあるが、その特性を理解し、加工に最適な素材・成形条件を選択すれば、プレス成形は極めて容易である。冷間で数工程から十数工程にわたって行われる複雑な絞り成形でも、マグネシウムの熱間絞り成形では 1, 2 工程で成形可能な例がほとんどである。マグネシウム合金板材を用いたプレス成形は、薄肉化（軽量化、高密度化）への対応、表面性状の高さ等からノート型 PC のケーシング等に採用例が多くなってきた。また、マグネシウム圧延材でしか達成できない分野と

して、0.1 mm 近傍の箔材の使用量が増加傾向にあり、スピーカ振動板や時計の針などに数多く採用例が見られるようになってきた。しかし、実際にはマグネシウム合金板材のプレス成形加工技術を持ち、量産可能なプレスメーカは国内でも数えるほどしかなく、試作段階で頓挫する例も少なくない。表面処理についても同様である。しかしながら、圧延板材を用いた鍛造、打抜き、曲げ、絞り、およびその複合成形は、量産技術として秀逸である。母材製作方法も多様化してきており、今後は安価で高品質な板材の出現が見込める。更なる使用量増加に期待する。

参 考 文 献

- 1) 日本マグネシウム協会編：マグネシウム技術便覧，カロス出版，(2000)，73.
- 2) 日本マグネシウム協会編：マグネシウム技術便覧，カロス出版，(2000)，235.
- 3) 日本塑性加工学会：板圧延，コロナ社，(1993)，14.
- 4) 日本塑性加工学会：板圧延，コロナ社，(1993)，113.
- 5) 佐藤雅彦：塑性と加工，**48** (2007)，373.
- 6) 鎌田征雄，橋詰 壮，高松和也：塑性と加工，**48** (2007)，417-421.
- 7) 鎌田征雄，橋詰 壮，高松和也：塑性と加工，**47** (2006)，973-977.
- 8) 日本マグネシウム協会編：マグネシウム技術便覧，カロス出版，(2000)，241.
- 9) 日本マグネシウム協会編：マグネシウム技術便覧，カロス出版，(2000)，237.
- 10) 村井 勉：マグネシウム合金の成形加工技術の最前線，シーエムシー出版，(2005)，107-118.
- 11) 渡利久規，羽賀俊雄，古閑伸裕：アルトピア，(2006)，16-21.
- 12) Y. Nakaura, A. Watanabe and K. Ohori: Mater. Trans., (2006), 1743-1749.
- 13) 西田進一，本村 貢：軽金属，**55** (2005)，315-320.
- 14) 松本和也，鎌土重晴，奥村勇人，小島 陽：軽金属学会第 111 回秋期大会講演概要，(2006)，141-142.
- 15) 松崎邦男，初鹿野寛一：日本金属学会秋季講演大会概要，(2003)，10.
- 16) 中浦祐典，杉本 丈，渡部 晶：軽金属学会第 115 回秋期講演大会概要，(2008)，34.
- 17) 大口，菅又 信，金子純一，久保田伸彦：塑性加工連合講演会講演論文集，(2003)，89-90.
- 18) P. Juchmann, S. Wolff: Proceedings of the 6th International Conference Magnesium Alloys and Their Applications, (2003), 1006-1012.
- 19) 石川孝司：塑性と加工，**22** (1981)，816.
- 20) 金子純一，菅又 信：日本金属学会誌，**64** (2000)，141-147.
- 21) 大年和徳，勝田基嗣：軽金属，**51** (2001)，534-538.
- 22) 佐藤雅彦，加治屋強，八代利之：軽金属，**54** (2004)，465-471.