

題 目 AZ31 マグネシウム合金板の高温における繰返し塑性挙動と成形性
(Cyclic Plasticity Behavior and Formability of AZ31 Magnesium Alloy Sheet
at Elevated Temperature)

氏 名 片 平 卓 志

近年、資源の有効利用や地球環境保全などの観点から輸送機器の軽量化や材料のリサイクルが重要視され、比強度、比剛性、制振性など構造材料としての多くの利点を有するマグネシウム合金が注目されてきた。マグネシウムは、1808年にH. Davyにより発見された金属であり、鉄や銅に対して比較的新しい金属である。マグネシウム合金は軽量性や比強度に優れており、航空機関係に第二次世界大戦中の累積量で数万トン使用されたといわれている。しかし、コストや耐食性、製造時の安全性などの点に問題があり、社会生活に必要な汎用金属としてのその用途が広がらなかった。

日本でも航空機産業が消滅した戦後、マツダ、ホンダおよびトヨタなどが自動車部品にマグネシウム合金を使用していたが、1972年にドイツのフォルクスワーゲン社が「ビートル」に42,000トンを使用したのを最後に、エンジンの水冷化による耐熱性や耐食性の問題からアルミニウム合金の使用が主なものになりマグネシウムが使われることが少なくなった。しかし、近年、環境・公害・資源問題から、欧米では、自動車の燃費向上のためにはコストが高くてもマグネシウム合金を使用することが、社会的要請となっておりフォルクスワーゲン社を始めとした欧米各自動車メーカーが積極的にマグネシウム合金の大量使用をはかっている。また、電子機器、特にノートパソコンや携帯電話等の携帯用電子機器類の筐体においても、軽薄短小の時代の要求からいかに小さい、薄い、軽い製品を造るかの競争となり、樹脂に替わってマグネシウム合金が使用されるようになった。なお、この間、技術的には、0.6mmというダイキャスト薄肉製品の製造が可能になったこと、また溶解プロセスを含まない射出成形機による製造方法（チクソモールドィング法）が導入されたことにより樹脂加工業者が新たにこの業界に参入したことが、従来のマグネシウム合金ダイキャストの技術向上をもたらした。

近年、従来のダイキャスト法やチクソモールドィング法に比べ生産性が高く、高強度の製品の製造が可能な塑性加工によるマグネシウム製品の製造に注目が集まっており、今後の展伸用マグネシウム合金の発展が期待されている。プレス成形用の板材としては、Alを3%、Znを1%を含有するAZ31マグネシウム合金が唯一実用化されている。マグネシウムは室温では延性に乏しいが、高温では十分な延性を示すため、板材のプレス成形は200~300℃の温間で行われるのが普通となっている。このよう事情から、AZ31マグネシウム合金板の高温特性と成形性に関しては近年精力的に研究がなされているが現状では下記の問題があり、マグネシウム合金のプレス成形技術は確立されていない。

(1) マグネシウム合金板の温間プレス成形性に強く影響を及ぼす材料特性として変形抵抗と延性がある。これらの材料特性に及ぼす温度とひずみ速度の影響を調べた実験研究は多いが、その多くは200℃以上の高温で行っている。温間プレス成形では、省エネルギーや生産性、さらには成形品の機械的性質の観点から、成形温度はできるだけ低くできることが望ましい。そのことを意識すれば、200℃以下の材料特性は重要であるが、詳細なデータが少ない。

(2) マグネシウム合金板の成形を行うには面内の引張と圧縮で材料硬化挙動が大きく異なることにも留意が必要である。繰返し塑性変形挙動は、板材でもプレス成形後のスプリングバック予測などで重要であり、正確な変形挙動を知る必要がある。温間での繰返し変形について変形過程の集合組織の変化まで調査

した例はほとんどなく、どの温度においてすべり変形が主な変形機構となるかについては明らかになっていない。

(3) 温間成形においてマグネシウム合金の流動応力は大きく低下するので、温間成形はスプリングバックを抑制するという点においても効果が大いと思われる。しかし、スプリングバックに及ぼす成形温度と速度の影響を調べた例は少ない。とくに、ダイ肩に沿って板が引込まれ、板に繰返し曲げ・曲げ戻しが作用する引込み曲げはプレス成形で多く見られる変形モードであるが、この場合のスプリングバックについての実験研究はほとんどなされていない。

(4) 実際のプレス成形において材料は非比例なひずみ経路をたどり成形されることが少なくない。しかし、温間での非比例変形経路の成形限界の調査はその実験の難しさもあり、これまで全く行われていない。

そこで本研究では、マグネシウム合金板の温間成形技術を確立するために、マグネシウム合金板の温間における変形挙動を実験的に把握すること、プレス成形におけるスプリングバックと成形限界を主に実験的に調査し本論文では以下の結論を得た。

第1章では、本論文の主題に関する研究の工業的ならびに学問的背景を述べ、この分野における従来の研究を展望して本研究の位置づけを行うとともに、本研究の内容を説明した。

第2章では、AZ31B マグネシウム合金板について、室温から 200°C における単軸引張試験を実施することで、変形抵抗と延性に及ぼす温度とひずみ速度の影響を調査した。また、温間角筒絞り成形試験を種々の温度と成形速度で行い、絞り成形性に及ぼす温度と速度の影響を調べ、以下の結果を得た。

- ・ 温間単軸引張試験においてマグネシウム合金板の応力-ひずみ特性の顕著な温度および速度依存性が確認された。試験温度の上昇に伴い流動応力は低下し延性も向上した。また、室温においてはそれほど表れていない速度依存性についても温度が高い条件では顕著に表れた。
- ・ 角筒絞りにおいても温度が高いほど成形性が良い傾向が確認できた。絞り成形性に及ぼす成形速度の影響については温度条件によって異なり、かならずしも成形速度が遅いほど絞り性が向上するとは言えない。絞り成形限界は、フランジ部のダイ穴への流入に必要な絞り力とカップの肩部および壁部の変形抵抗のバランスから決まる。ある温度域では、変形抵抗の速度依存性が高いため、高速で成形したほうが破断危険部であるカップ肩部や壁部での局所的な変形を抑制できるため、成形速度が速いほど成形性が高くなる場合もある。

第3章では、AZ31B マグネシウム合金圧延板の面内応力反転負荷試験を室温から 200°C の種々の温度で行い、その変形挙動および集合組織を観察した。得られた主な結果は以下のとおりである。

- ・ 室温では、非底面すべりが起こりにくいため、繰返し変形ではすべり・双晶・双晶解消変形が順次あるいは混合して生じる。その結果、圧縮側と引張側の応力-ひずみ応答が大きく異なる挙動を示す。繰返し実験の各段階での集合組織（極点図）の観察からこれらの変形モードがどのようなものであったかが特定できた。
- ・ 200°C の高温では、非底面すべりが活性化するため、主な変形機構はすべりであり、結晶の回転はほとんど見られない。流動応力が室温より大きく低下していた 137°C では、繰返しの応力-ひずみ挙動の引張・圧縮側非対称性はあまり顕著ではないが、集合組織観察からはすべり変形とともに双晶変形および双晶解消が混在していることがわかった。以上のように、繰返し塑性変形における応力-ひずみ応答の変化は、すべり変形の強い温度依存性（とくに非底面すべりの CRSS の温度依存性）と温度に不敏感な双晶変形（および双晶収縮）から説明することができる。

第4章では、AZ31B 板の引込み曲げにおいて温度と引込み速度がスプリングバックに及ぼす影響を調査した。

温度の上昇に従いスプリングバックは顕著に小さくなり、200°C、引込み速度 $0.01\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ の条件ではスプリングバックはほとんどなくなっていた。これは変形抵抗の温度依存性ととも動的回復による応力緩和

が大きく影響しているといわれる。また、高温においては引込み速度が遅いほどスプリングバックが小さくなるが、この現象も変形抵抗の温度依存性と応力緩和機構により説明することができる。

以上の実験結果から 200°C 以上の温度での成形でスプリングバックをほとんど抑制できることがわかったが、このことは実際のマグネシウム合金板の温間プレス成形条件設定に重要な指針となる。

第 5 章では、AZ31B マグネシウム合金板の非比例 FLD への温度、速度の影響調査した。

- ・ 成形温度が高くなるに従い成形限界は高くなり、成形速度が速くなるに従い成形限界は低下している。また温度上昇に伴い速度依存性が顕著になっている。
- ・ 既知の比例変形 FLC を用いて任意の非比例変形 FLD（成形限界ひずみ）を決定する方法を新たに提案した。成形限界相当塑性ひずみの大きさは最終の塑性ひずみの進行方向によって一義的に決定することができる。したがって、非比例変形 FLD を用いて、あらかじめ限界相当塑性ひずみをひずみの進行方向の関数として定めておけば、非比例変形の場合の成形限界はひずみ進行方向と累積相当塑性ひずみを観測するだけで決定することができる。
- ・ AZ31B 板の RT~250°C における非比例変形 FLD の実験から、上記の非比例成形限界ひずみの決定法が妥当であることが確かめられた。

第 6 章では、本研究で得られた結果を各章ごとに総括した。

以上のように、本論文では、マグネシウム合金 AZ31B 板の基礎的な温間変形挙動を結晶観察の側面からも調査し双晶および双晶解消がマクロな挙動に及ぼす影響について明らかにした。

また、温間プレス成形については、スプリングバックを抑制できる温度・速度条件を明らかにし、さらに非比例変形 FLD の予測手法について提案することができた。これらの成果は、今後ますます需要が拡大するであろうマグネシウム合金板温間プレス成形技術に対して有益な知見を与えマグネシウム合金の積極的な利用に大きく貢献するものと期待される。