塑性流動シミュレーションを駆使した高効率のプレス成形技術（第1報）
ー難燃性マグネシウム合金の高機能組織制御と鉄道用車輌部材の開発ー

高橋孝誠*・深川和良**・塩澤　勇***

*生産技術部・**生産技術部（現：鹿児島大学）・***生産技術部（現：福岡市役所）

A highly Effective Press Forming Technology Using Plastic Flow Simulation (1stReport)
ーFunctionalizing of Non-combusutible Magnesium Alloy by Microstractural Control and Development of Railway vehicle parts-

KOSEI TAKAHASHI*, KAZUYOSHI FUKAGAWA**, ISAMI SHIOZAWA***

現在、マグネシウム合金の主たる成形法はダイカストやチクソーモールディングが中心であり、プレス絞り、鍛造等の塑性加工による製品はほとんど無く、その基礎的データもまだ不十分な状態である。ダイカスト、チクソーモールドの場合はピンホール、湯じわ等の問題があり、成形後のパテ修正、研磨、塗装の工程が必要不可欠である。一方プレス成形の場合は良好な表面性状が得られ、マグネシウム合金本来の光沢や金属感触を有する製品の創出が可能となる。さらにその技術確立によりダイカスト、チクソーモールドに比べより低コストで大量な生産が可能となる。本研究では、難燃性マグネシウム合金を加工対象とし、熱間押し出しによる板材を加工素材とするプレス成形技術について検討を行い、難燃性マグネシウム合金の塑性加工特性を把握することができた。

1．はじめに

近年，マグネシウム合金に対する製品化の研究が盛んにおこなわれているが、活性金属であり、また難加工材であるため，安全性やコスト面に問題があった。安全性で注目されているのが難燃性マグネシウム合金である。本研究は、地域新生コンソーシアム事業（H17～18）において実施したもので、次期新幹線の内装材（ドア、シート、荷棚、テーブル他）への難燃性マグネシウム合金の適用を想定し、総合的な生産技術を確立することにより大幅なコストダウンを目指した。各種車輌の内装材にはプレス絞り、曲げ部材が多いことに着目し、プレス成形技術の確立による鉄道用車両部材創出を目標に研究開発を行った。本報では H17 年度で行った深絞り成形に関して記述する。

2. 目的と目標

本研究は、(社)日本鉄道車両機械技術協会より鉄道車両用材料として不燃材の認定を受けた難燃性マグネシウム合金を適用することで、新幹線をはじめとする鉄道用車両の軽量化、省エネ化を達成するため、より高効率、低コストなプレス成形技術の確立を目的として行った。

プレス成形における金型開発費、試作コスト、生産コストを削減し確実な工程による製品品質の向上を図るためには三次元 CAD/CAE を活用することは非常に有効な手段である。特にマグネシウム合金の塑性加工は通常温間成形であり、成形温度は、200℃を超える領域のため、通常の展伸材に対する冷間加工に比べ複雑である。[1] 本研究においてはプレス成形シミュレーションシステム（日本イーエスアイ（株）、PAM-STAMP）を使用し、より効率的にプレス成形・金型条件の最適化を図ることにした。そのため、難燃性マグネシウム合金の基礎的な材料物性を総合的に実測し、それを基にシミュレーションの解析技術を駆使して最適化した加工条件の探索を行うとともに、難燃性マグネシウム合金に対する金型を設計する。

一方で温間成形技術の確立、および難燃性マグネシウム合金の温間域における成形データを収集する目的で温間成形実験を行うと共に、温間成形において温度の影響を受けやすい因子と考えられる潤滑剤、成形温度に着目し、成形実験による最適な加工条件の検討も行った。

3．実験方法及び実験条件

3.1 塑性流動シミュレーション

難燃性マグネシウム合金（AMX602、押出－T4 処理材 板厚１mm）を供試材として、プレス成形シミュレーションに必要な材料物性値、温間（150℃、200℃、250℃）でのヤング率、ポアソン比、真応力－真歪み線図（スイフトの式）、ランクフォード（ｒ）値（0°、45°、90°方向）、摩擦係数、FLD 成形限界曲線を材料試験により求めた。

表１　温間成形の実験条件

<table>
<tr><th rowspan="2"></th><th colspan="3">実験項目</th></tr>
<tr><th>潤滑剤選定</th><th>材質比較</th><th>加工条件</th></tr>
<tr><td rowspan="3">材料</td><td rowspan="3">AMX602（T4 処理）材</td><td>AZ31 材</td><td rowspan="3">AMX602(T4 処理)材</td></tr>
<tr><td>AMX602 材</td></tr>
<tr><td>AMX602（T4 処理）材</td></tr>
<tr><td>成形速度</td><td>5mm/s 以下</td><td>5mm/s 以下</td><td>10mm/s 以下</td></tr>
<tr><td rowspan="4">潤滑剤</td><td>プレコートタイプ潤滑剤</td><td rowspan="4">プレコートタイプ潤滑剤</td><td rowspan="4">プレコートタイプ潤滑剤</td></tr>
<tr><td>鍛造用工作油ベース潤滑剤</td></tr>
<tr><td>プレス用工作油ベース潤滑剤</td></tr>
<tr><td>熱処理用油ベース潤滑剤</td></tr>
</table>

次に円筒深絞りを解析対象として、プレス成形シミュレーションシステム（PAM-STAMP）を使用し、材料試験により得られた材料物性値を入力データとして、金型温度、ダイ形状、摩擦係数、板押さえ力、絞り比等の成形要因をパラメータとしたプレス成形シミュレーションを実施し、プレス成形工程におけるわれ、しわ、材料流動性等の検証を行い、プレス成形に影響を及ぼす要因の最適化を図った。

3.2 温間成形

本研究では、円筒絞りによる評価を行った。まず潤滑剤の選定を行い、ついで、難燃性マグネシウム合金の塑性加工性を評価するため、同一条件で市販されている AZ31 マグネシウム合金板との比較を行った。また温間成形における T4 処理の有効性を確認するため、これらの比較も同時に行っている。最後に、成形温度と成形速度の関係を調査している。

金型の加熱は型に内蔵されているヒーターを用い、ブランク材の加熱も金型に置くことで行っている。用いたブランク材は直径 170mm 厚さ 1mm の円板である。金型は主にパンチ径 100mm のものを用いている。この場合、35mm の絞り深さ（絞り比 1.7）まで成形できた場合を成功とし、途中でフランジ部に割れ等が生じた場合は失敗として扱っている。また成形中に破断した場合は、その時点での成形深さを記録している。各荷重およびパンチストローク等はコンパクトレコーダー（株式会社共和電業製）にて記録している。しわ押え荷重は今回 60kN に固定して行った。実験条件を表１に示す。

3.3 実験装置の概要

温間成形実験にて用いたプレスと仕様を図１に、成形金型を図２に示す。

仕様
型式：UTM－AI
最大荷重：
　インナ‥‥80t
　アウタ‥‥50t
　ﾀﾞｲｸｯｼｮﾝ‥50t
成形温度：
　室温 ～ 250℃

図１　温間成形プレス機（株）アミノ製

図２　温間成形金型

4 実験結果

4.1 塑性流動シミュレーション

表２は材料特性取得試験により得られた難燃性マグネシウム合金の各温度における材料物性値である。温度の違いによりヤング率、応力－歪み線図（スイフトの式）に違いがみられるため温度依存性のある物性値となっている。表中の摩擦係数はプレコート潤滑剤(AB-2578T)を使用した時の摩耗試験により得られた値である。表３は解析の対象とした円筒絞りにおいて基本として設定したシミュレーション条件である。図３にパンチ及びダイのツール形状を示す。材料物性値は表２に示すものを入力データとして使用した。解析は解析温度に応じて、それぞれの温度での材料物性値を入れ替える方法で解析を行った。

表２　難燃性マグネシウム合金(AMX602)の材料物性値

材質		150℃	200℃	250℃
ヤング率(MPa)		40820	34320	28280
ボアソン比		0.33	0.32	0.30
密度(ton/mm^3)		1.74E-09	1.74E-09	1.74E-09
摩擦係数		0.032	0.025	0.042
r 値	0°	0.43	0.47	0.55
	45°	0.88	0.84	0.81
	90°	1.02	0.76	0.81
スイフトの式		σ (MPa)=C(ε_0+ ε)^n		
	C	320.2	232.9	152.8
	ε_0	0.0052	0.0052	0.0052
	n	0.186	0.152	0.115

表３　円筒絞りシミュレーション条件

条件	内容
ブランク形状	φ170、t=1.0（AMX602）
成形深さ	35mm
メッシュサイズ	MAX8.5mm アダプティブメッシュ２回
板押さえ力	60kN(解析は 1/4 モデル使用、15kN)
ダイ	φ102.2、ダイ肩R8
パンチ	φ100、先端R8

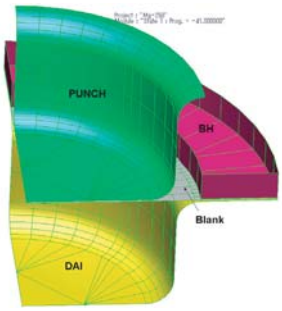

図３　パンチ、ダイのツール形状

4.1.1 金型温度の影響

図４は金型温度のプレス成形に及ぼす影響を解析したものである。左からそれぞれ金型温度 150℃、200℃、250℃に対し、絞り深さが 30mm、30mm、35mm の解析結果である。下段の図はそれぞれの温度に於ける FLD 成形限界曲線を示している。上段の図は FLD 成形限界曲線に基づき成形材に発生するわれ、しわの評価を行ったものである。図中赤色はしわ発生領域、橙色はしわの危険領域、緑色は安全領域を示している。割れが発生する場合は青色の領域で表示される。それぞれ左から絞り深さが 30mm、30mm，35mm を少し過ぎたところでしごき状態となったため計算がストップしているが、この時点まではいずれの温度においても割れの領域は観察されず、いずれも解析上は絞りが可能との解析結果が得られている。

T=150℃　　T=200℃　　T=250℃

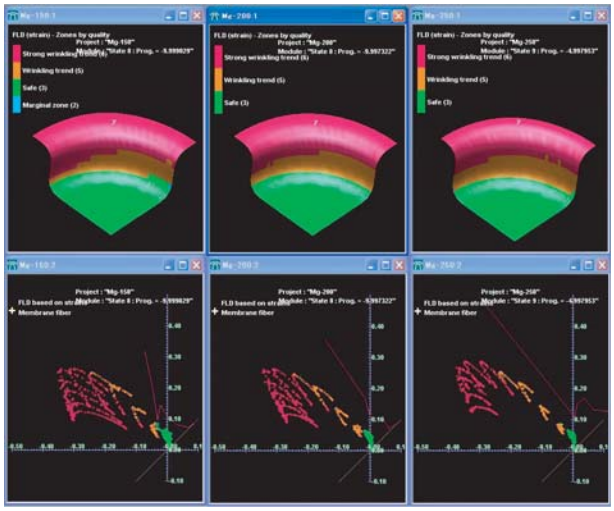

図４　金型温度の影響

4.1.2 ダイ肩Ｒの影響（250℃）

図５は金型形状（ダイ肩半径 R）のプレス成形に及ぼす影響を解析したものである。左からダイの肩 R が 3mm、5mm、8mm の場合の解析結果である。ダイ肩 R が 3mm の場合は材料の流動性が非常に悪くなり、5mm 程度の絞り深さでパンチ肩部付近に割れが発生（図中の青色領域）、FLD 成形限界曲線においても歪み状態が割れの領域に入るのが観察される。図に

は示していないがダイ肩Ｒが 2mm と 1mm の場合はさらに割れ領域が拡大する解析結果が得られている。ダイ肩Ｒが 5mm と 8mm の場合は絞り深さ 35mm までは割れの発生は観察されないがダイ肩Ｒが 5mm の場合はダイ肩部近傍に折れのある形状が観察される。プレス成形の成否に関してはダイ肩部のＲが非常に重要な要因となる。

R=3mm　　R=5mm　　R=8mm

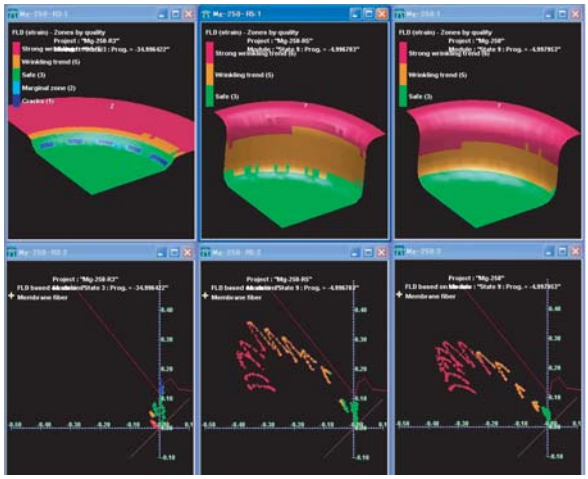

図５　ダイ肩Ｒの影響（２５０℃）

4.1.3 潤滑剤の影響

図６は潤滑剤のプレス成形に及ぼす影響を考察したものである。左よりプレコートタイプの潤滑剤で摩擦係数が 0.04、真ん中は油系の潤滑剤で摩擦係数は 0.10、それとシステムのデフォルト値の 0.12 で解析したものである。摩擦係数 0.04 と 0.10 の場合は絞り深さ 35mm までは割れの発生は観察されないが、摩擦係数 0.12 の場合は絞り深さ 20mm 時点で割れが発生するという解析結果が得られている。また摩擦係数 0.10 の場合は 0.04 の場合に比べると歪み状態が割れの危険領域により接近しているのが観察される。プレス成形においては潤滑剤の選定も重要である。

4.1.4　板押え力の影響

図７は板押さえ力の影響について解析したもので、板押さえ力が 2kN、10kN、60kN での解析結果である。2kN の場合は板押さえ力不足のためフランジ部に大きくしわが発生するのが観察される。板押さえ力の 10kN はしわ押さえ面積から計算される力である。極端なしわの発生は観察されないが、60kN の場合に比べるとダイ肩部近傍での微小なうねりが観察される。以上のシミュレーション結果は絞り比が 1.7 の解析であるが、絞り比が 2（パンチ径 60mm、ブランク径 120mm）の場合、絞り比が 3（パンチ径 60mm、ブランク径 180mm）の場合についてもプレス深絞りの可能

f=0.04　　f=0.10　　f=0.12

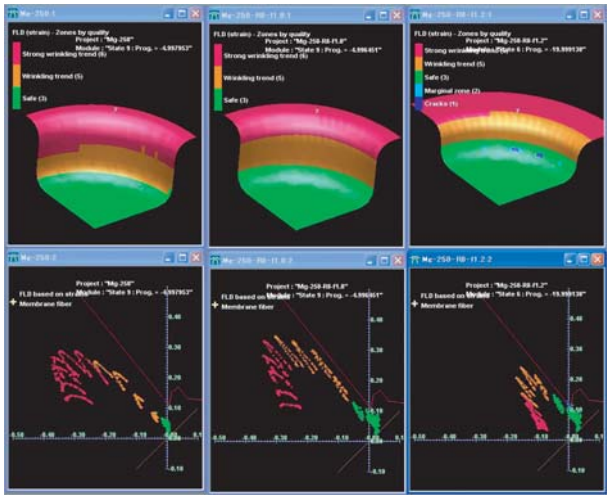

図６　潤滑剤の影響（２５０℃）

F=2kN　　F=10kN　　F=60kN

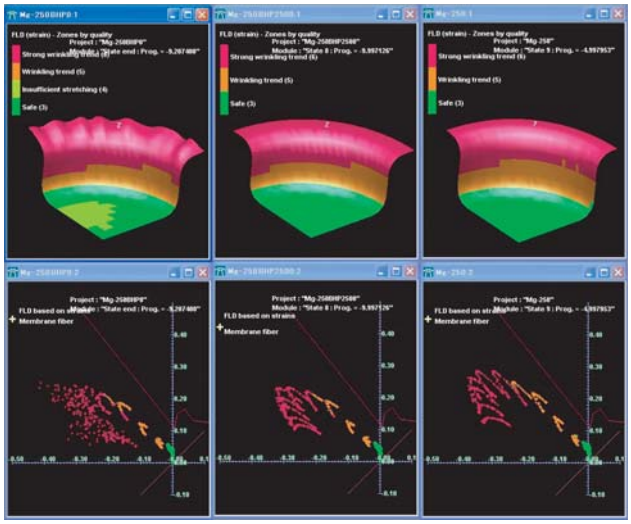

図７　板押さえ力の影響（２５０℃）

性について解析を実施した。絞り比２の場合は板押さえ力の変更により最大絞り深さ 45mm までの絞りが可能となることが確認された。一方絞り比３の場合は板押さえ力を変更しても材料の流動性は改善されず 10mm 程度の絞り深さで割れが発生する。成形条件の検討がさらに必要との結果が得られた。

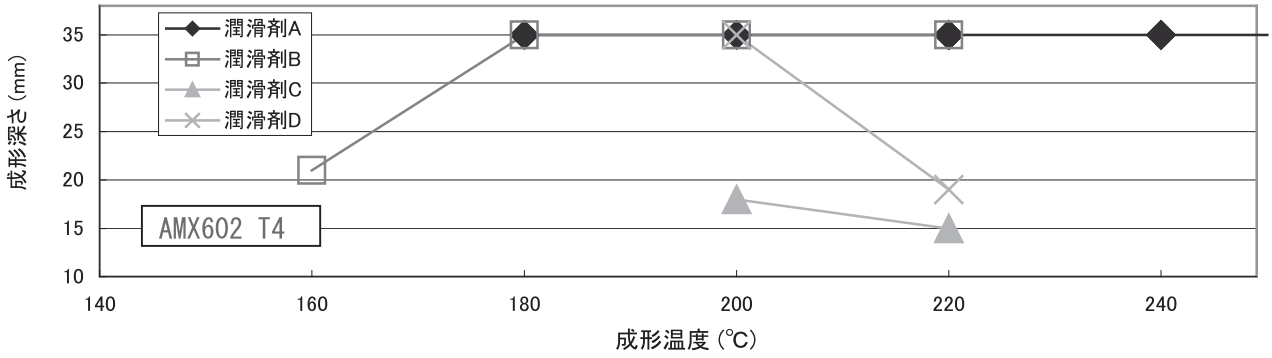

図８　潤滑剤における成形性評価

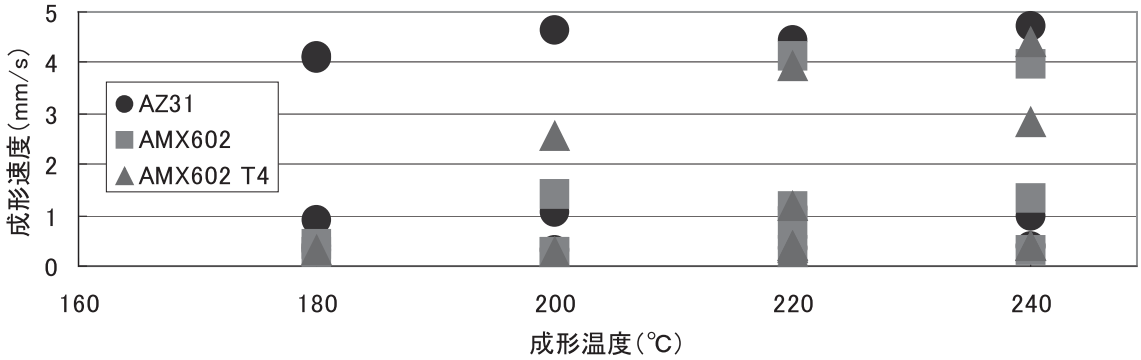

図９　マグネシウムの種類による成形性

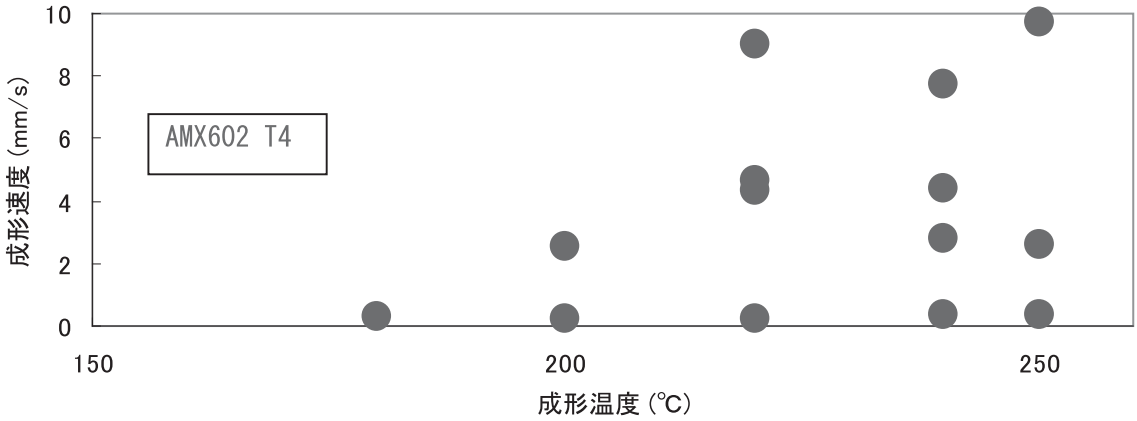

図１０　成形温度と成形速度

4.2 温間成形

4.2.1　潤滑剤による成形性

温間成形における潤滑剤の成形性評価を図８に示す。プレコートタイプ潤滑剤、鍛造用工作油ベース潤滑剤、プレス用工作油ベース潤滑剤、及び熱処理用油ベース潤滑剤をそれぞれ潤滑剤A、B、C、Dと表記している。実験結果から、潤滑剤C、Dは他に比べるとかなり劣っており、潤滑剤Bは200℃前後で比較的成形性が良いことがわかる。実験を行った温度範囲では、良好でかつ安定した成形性を示したのは潤滑剤A、すなわちプレコートタイプ潤滑剤であっ

4.2.2　マグネシウム合金の種類による成形性

マグネシウム合金の種類による成形性を図９に示す。AZ31 材は実験を行った温度領域で安定した成形性を示している。一方、難燃性マグネシウム合金においては成形温度が低いと、成形速度が低速でないと成形が行えず、温度上昇とともに、成形が可能な速度が上がっていく傾向がうかがえる。また今回の実験では、成形性に対する熱処理の影響は見られなかった。

4.2.3　成形温度と成形速度

成形温度と成形速度に着目して、評価を行った。図 10 に結果を示している。成形温度が 220℃以上になると比較的速い成形速度であっても成形可能であることが示されている。

4.2.4　成形例

図 11 に成形例を示す。ブランクホルダーによるしわ押え力が弱いと、フランジ部にしわが発生する。破断に関してはしわ押え力が逆に強すぎることが原因の一つと考えられるが、他に潤滑剤の潤滑性低下、あるいは、ブランク材の耐熱強度も考慮する必要がある。これらは AZ31 マグネシウム合金において比較的多く生じたが、最も多かったのはパンチ肩 R 部付近からの割れであった。一方、今回扱った難燃性マグネシウム合金ではフランジ部において割れが多発した。またこの割れは押出し方向に対し 90°のフランジ部で斜めに発生し、魚の尻尾状の小片に割れることもあった。

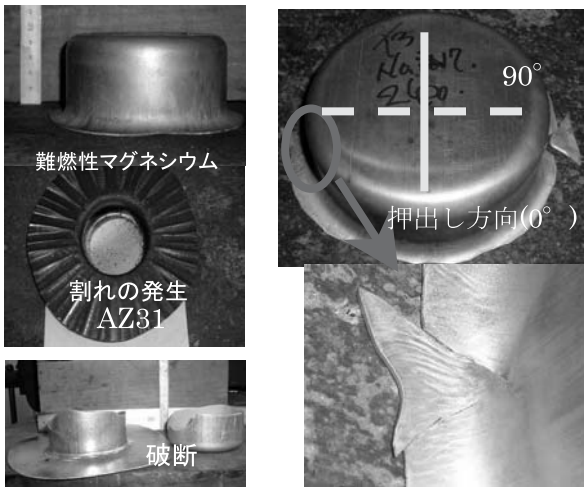

図１１　マグネシウム合金の成形事例

次に押し出し方向(0°)に沿って肉厚分布の測定を行った。中心からパンチ肩 R までは比較的一定の厚さを保っているが、R 部では肉厚の減少が生じ、底面から１0mm 程度で最小値を示している。以降はフランジ部まで増加している傾向にある。これは 90°方向でも同様であった。

肉厚分布から、パンチ肩 R 部付近で破断が生じやすいと考えられる。しかしながら、難燃性マグネシウムに関してはフランジの割れが問題となった。フランジ部が最も肉厚が大きいことから、フランジの割れは、円周方向の圧縮起因の可能性も考えられる。

５．考察

以上、本研究では難燃性マグネシウム合金における温間プレス成形に対するシミュレーション及び実験を行った。これらの結果、シミュレーションによる解析は実験における結果と非常に一致した傾向を示すことがわかった。例えば成形品の板厚分布で測定結果とシミュレーションの肉厚増減の挙動が非常に良く似ているのを確認できた。このようなことから、プレス成形条件、金型条件の最適化手法としてプレス成形シミュレーションの活用が有効な手段となり得ることが確認された。金型によるプレス成形の成否に関しては熟練者のノウハウに頼る部分が大きく、プレス成形現場では金型による試し打ちと金型修正を繰り返すトライアンドエラーが頻繁に繰り返されている。シミュレーションによる金型形状成形条件の妥当性の検証は、プレス成形における金型開発費、試作コスト、生産コストの大幅な削減効果につながることが期待される。

一方、温間成形実験を通じて温間成形技術の習得が成され、マグネシウム合金に対する成形データの収集が出来た。また、展伸材である AZ31 マグネシウム合金と難燃性マグネシウム合金における成形性の比較では、200℃以下の成形温度で差異が現れることが確認できた。このため、難燃性マグネシウム合金に対しては比較的高温で成形を行う必要がある。このことを考慮すると潤滑剤は耐熱性に優れているプレコートタイプが非常に適していると考えられる。成形温度に関しては 220℃以上が適していることがわかった。この成形温度以上であれば、比較的速い成形速度を用いることも可能である。

6. おわりに

H17 年度の結果、シミュレーションの有用性が明らかなった。また難燃性マグネシウム合金に対し、温間成形実験を行い、これらの成形データ、及び最適条件の検討を行った。本研究の成果は，H18 年度において、組織制御により改良された難燃性マグネシウム合金を用いた鉄道用車両部材の試作に生かされている。また我々はさらに曲げ加工の研究も行った。これらの詳細は次報で報告する。

本研究の遂行にあたり，シミュレーションに協力いただいた佐賀県工業技術センターに心より感謝の意を表します。

参考文献

1）小島陽, 井藤忠男監修, マグネシウム合金の製造と応用, シーエムシー出版