研究論文

マグネシウム合金の複雑形状プレス加工技術の開発

本田　崇*　杉井　伸吾*　山崎　栄一**

Development of Press Processing Technology for Complicated Shape of Magnesium Alloys

HONDA Takashi*, SUGII Shingo*and YAMAZAKI Eiichi**

抄　　録

マグネシウム合金は軽量で比強度が高いことから，その板材をプレス加工により複雑な形状に成形することで，これまでにない付加価値の高い製品を得られる可能性がある。本研究ではマグネシウム合金の複雑形状プレス成形として，板材に複数の三角錐台形状を有するテトラボードを対象にシミュレーションを用いて成形工程を検討した。実際に成形可能であることを試作により確認し，本手法による工程設計の有効性を示した。また，ブロー成形による加工に比べ，加工時間の大幅な短縮と板厚分布の均一化を達成することができた。

1.　緒　　言

現在，航空機や鉄道車両の床材などの軽量構造部材として，大きな曲げ剛性をもつハニカムパネルが広く用いられている。しかし，せん断変形・面内圧縮に対する強度不足や，火災時に表面材との接着剤が燃焼する危険性が指摘されている。そこで，テトラボードを組み合わせることでハニカムパネルと同程度の曲げ剛性，高いせん断強度・面内圧縮特性を持たせたトラスコアパネルが，表面材が不要な軽量構造部材として着目されている[1) 2)]。本研究では軽量で比強度が高いマグネシウム合金（以下 Mg 合金）を用いたテトラボードの製作を行ったので報告する。

2.　工程設計

金属薄板の成形にはプレス成形，ハイドロフォーミング，ブロー成形等が用いられるが，製造コストの安いプレス成形で加工できることが望ましい。そこで，シミュレーションを用いてプレス成形によるテトラボードの成形実現性，工程設計および金型形状の検討を行った。

図 1 に示すテトラボードを成形の対象とした。三角錐台のアスペクト比（底面の辺長と高さの比率）は 0.4 である。材料が均一に薄くなる最も理想的な状態を仮定しても，板厚減少率が成形限界を超えれば，このアスペクト比ではプレス成形は不可能である。Mg 合金 AZ31 の成形限界の板厚減少率（200℃～250℃）は等二軸引張で約 63%であり[3)]，全体が均一に薄くなる場合で約 29%，三角錐台の投影面積が均一に薄くなる場合で約 39%となるため，一様伸びとなる加工条件に近ければ成形可能と判断した。

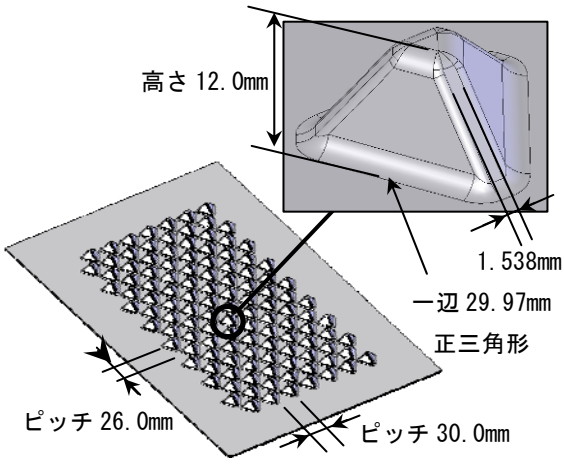


図 1　テトラボード成形形状

*　研究開発センター

**　下越技術支援センター

2.1　予備解析

プレス成形による材料の流れと板厚変化を確認するため，まず単工程での成形予備解析を行った。シミュレーションには汎用有限要素解析コード ANSYS ver.12.0.1 を用いた。

2.1.1　解析モデル

計算モデルには周囲からの材料の流入がなく一番厳しい条件と想定される，すべての三角錐台を同時に成形する場合を想定し，ブランク中心部のコアを解析対象とした。全体モデルの対称性より，1 つのコアを成形する領域を抜き出し，次にコア形状の対称性より 1/6 を解析領域とした（図 2）。図 3(b)に有限要素モデルを示す。形状を把握しやすいよう 4/6 に拡張したモデルを図 3(a)に併記する。ブランクの厚さは 0.8mm とした。金型は変形を無視できることから表面形状を剛体として定義し，ダイスは全自由度を，パンチはプレス方向以外を拘束した。ブランクの各対称部には対称境界を設定した。また，摩擦条件であるが，金型との潤滑条件が異なると摩擦係数も異なるものとなり，計算により得られる板厚分布も異なる結果となる。

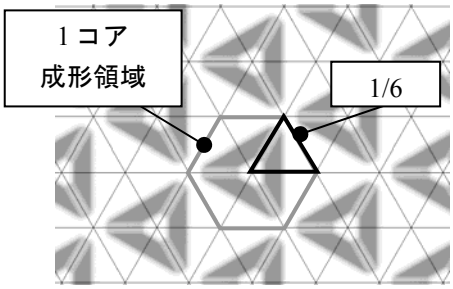
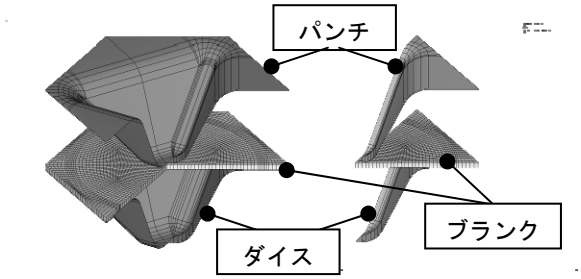


図 2　対称性を考慮した解析モデル



(a) 4/6 拡張表示　(b) 1/6 解析モデル

図 3　有限要素モデル

AZ31 の摩擦係数は潤滑方法の違いにより 0.05～0.3 程度となるが，成形条件や加工の進行によっても摩擦係数は変化するため，潤滑条件に依らず成形可能であることが望ましい。そこで，ある程度の潤滑条件の変動に対応できるよう中間値として摩擦係数 0.15 を選定し解析を行った。

2.1.2　材料モデル

AZ31 が良好な加工性を得られる 250℃を加工温度に設定した。材料に適用した AZ31 の機械特性を表 1 に示す。硬化則は 250℃での挙動から等方硬化則を適用した。応力-ひずみ曲線に関しては，万能材料試験機による引張試験にて得られたカーブを用いた。図 4 に応力-ひずみ曲線を示す。

2.1.3　予備解析結果

単工程成形時のブランクの変形を図 5 に示す。左に断面方向から見たパンチ押し込み量を，右に板厚分布の変化を示す。パンチを押し込むにつれ三角錐台頂点付近の板厚のみ大きく減少し，三角錐台周囲からの材料の流入はおこらない。これは求める一様な変形が単工程の成形では得られないことを示している。ここで AZ31 の成形限界板厚減少率 63%から，元の板厚 0.8mm に対し 0.3mm が成形可能の目安となる。成形完了前であるパンチ押し込み量 7mm の時点で，板厚は約 0.2mm となり，単工程での成形は不可能であることがわかる。

表 1　AZ31 の機械特性(250℃)

ヤング率（GPa）	74
ポアソン比	0.33

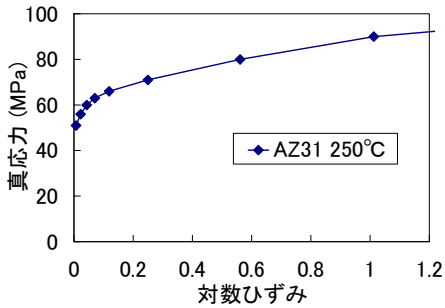
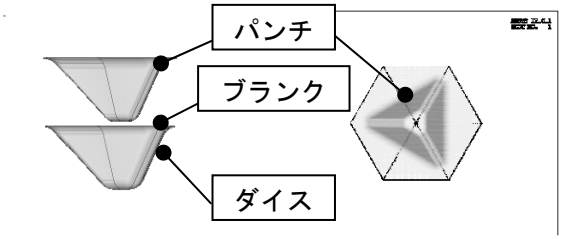
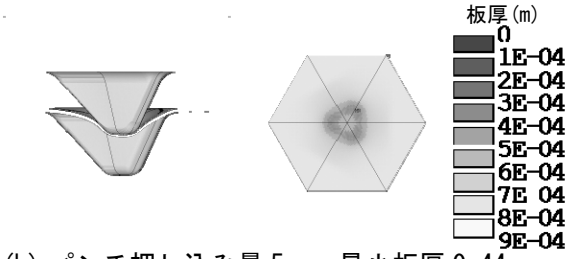


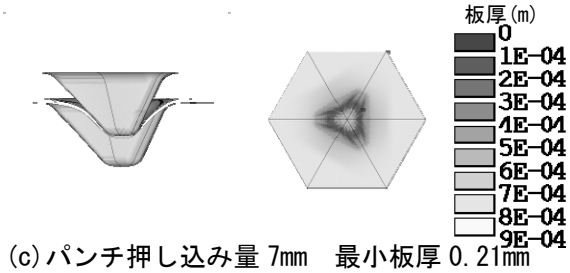
図 4　AZ31 の応力-ひずみ曲線(250℃)



(a) 初期配置およびパンチ形状



(b) パンチ押し込み量 5mm　最小板厚 0.44mm



(c) パンチ押し込み量 7mm　最小板厚 0.21mm

図 5　単工程成形時の板厚変化

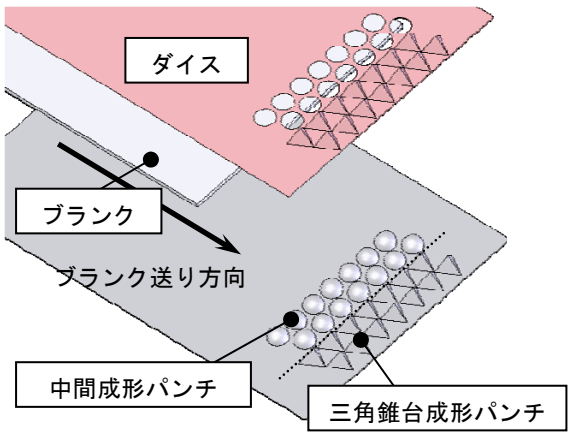
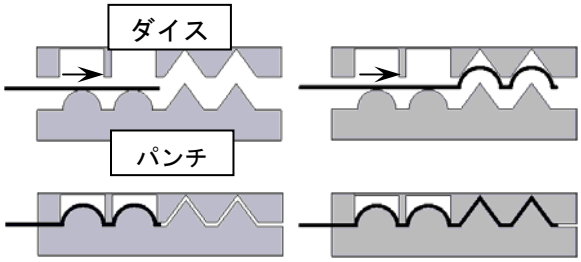


図 6　金型形状概要



第 1 工程　　第 2 工程

図 7　各工程の成形概要

2.2　成形工程の検討

単工程での検討結果から，1 工程で三角錐台形状に成形した場合には期待した一様な板厚減少にはならないことがわかり，中間形状への成形を含む多工程による成形を検討した。

工程数や中間工程の形状には様々なパターンが考えられる。AZ31 の特性はエリクセン試験より張出成形性が優れていることがわかっており，中間工程の形状は半球への張り出しとした。工程数に関しては少ないほどよいため 2 工程で成形可能か検討を行った。

金型形状の概要を図 6 に示す。成形は順送プレスを想定し，金型には中間形状を成形するための半球形状パンチと最終形状を成形するための三角錐台形状のダイスを配置する。半球形状のパンチに対応するダイスには穴，最終形状のダイスに対応するパンチには板厚分をオフセットしたパンチを設ける。各工程での成形の概要を図 7 に示す。まず第 1 工程では中間形状の半球にブランクが成形される。次の第 2 工程では，第 1 工程で配置した中間成形パンチの列分だけブランクを移動させ，第 1 工程で成形された半球は三角錐台形状に，同時に半球形状パンチにセットされたブランクでは新たに半球が成形される。この工程の繰り返しにより，平面ブランクから半球形状に成形され，次工程で三角錐台形状に成形される。

2.2.1　中間工程形状の検討

中間工程のパンチ形状は，1 コアに納まる半球サイズが候補であり，また半球をすべて張り出す必要もないため，様々な形状が考えられるが，すべての形状についてシミュレーションを行うのは非効率的である。そこでシミュレーションで検討する半球形状をまず幾何形状から絞り込み（形状検討①），さらに最適な形状をシミュレーションにて検討することとする（形状検討②）。

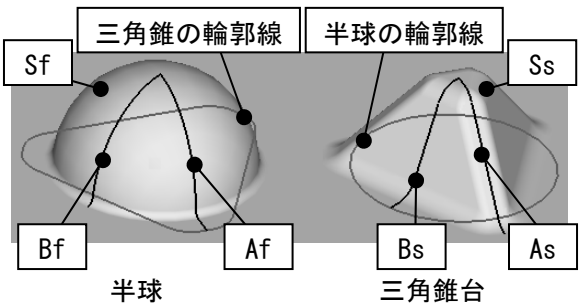
半球形状の検討を行うにあたり，まず単工程成形が困難な原因を考察する。単工程成形では，

求める三角錐台形状への形の変更と表面積の拡大を同時に行おうとするが，表面積の増加は一様でなくパンチ先端部周辺のみでおこっており，これが成形を困難にしている。そこで，各工程で形の変更と表面積の拡大と役割を分けることができれば，成形を可能にできると考えられる。したがって形状の検討①を行うにあたり，最初の成形では三角錐台形状と幾何学的な代表寸法値が近い半球形状へ張出成形を行うこととし（以下，中間工程と称す），次の工程（以下，形状成形工程と称す）では中間工程形状から三角錐台形状へ板厚分布を変えずに形状のみ変更を行うことを目標とする。

2.2.2　中間工程形状の絞込み（形状検討①）

中間形状と三角錐台形状の代表的な幾何学形状として今回比較した形状パラメータを図 8 に示す。形状パラメータは半球，三角錐台およびそれらの輪郭線を基に，面積 S，長さ A（長稜線），B（短稜線）の計 3 つとした。半球，三角錐台ともに単純な幾何学形状であり，S，A，B を計算で求めることは容易である。

図 9 に絞りこみ作業のイメージを示す。三角錐台の形状は決まっているため Ss，As，Bs は不変であるが，中間形状の Sf，Af，Bf は半径(R)と高さ(h)の関数であり，それぞれ R，h により値は変化する。よって，S，A，B すべてについて差Δを小さくできる R，h の組み合わせを中間工程のパンチ候補として形状の絞り込みを行った。本開発では，三角錐台の形状を基準として，-10%<ΔS<10%，-10%<ΔA<10%，0%<ΔB<15%となるような形状を候補とした。



Af, As：長稜線（成形部長さ①）
Bf, Bs：短稜線（成形部長さ②）
Sf, Ss：表面積

図 8　対応させる形状パラメータ

2.2.3　中間工程検討シミュレーション

形状検討①により絞り込まれた形状についてシミュレーションにて検討した（形状検討②）。材料モデル，摩擦係数は単工程と同じ条件とし，解析モデルについても単工程と同様に 1 コアの 1/6 とした。解析モデル例を図 10 に示す。金型形状は中間工程と形状成形工程に対応する半球形状と三角錐台形状のパンチ，ダイスの 2 セットである。実際の加工は順送プレス成形を想定しているが，解析では同一の加工領域で計算を行うことからブランクの移動ではなく，金型の交換により 2 工程の計算を行った。

解析結果例を図 11 に示す。左に中間工程後の板厚分布，右に形状成形工程後の板厚分布を

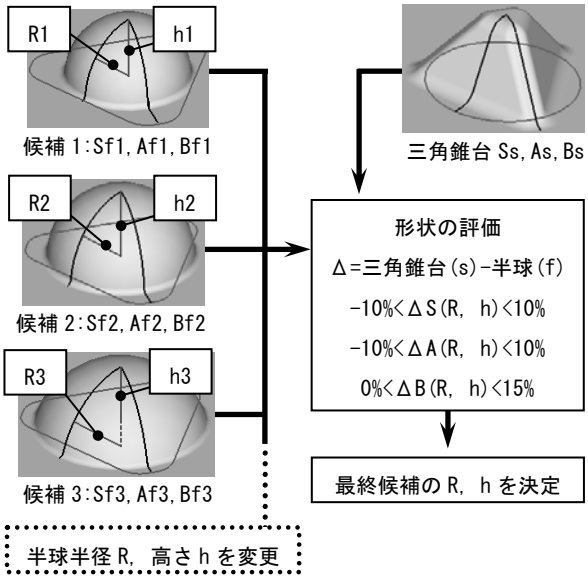


図 9　形状検討①の作業イメージ

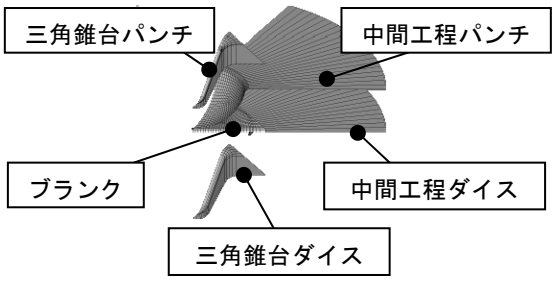
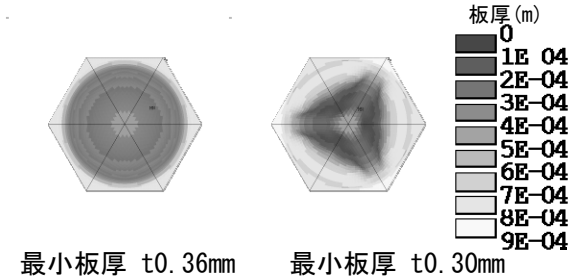
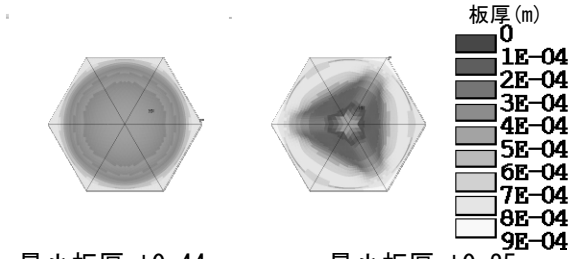


図 10　中間工程検討解析モデル



最小板厚 t0.36mm　　最小板厚 t0.30mm

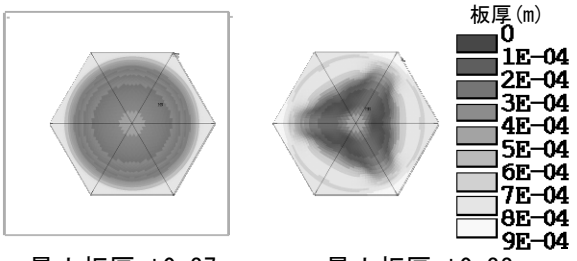
(a) ΔS=-6.8% ΔA=-1.5% ΔB=9.0%



最小板厚 t0.44 mm　　最小板厚 t0.25mm

(b) ΔS=2.2% ΔA=3.2 ΔB=14.7%

図 11　形状検討②　板厚予測の例 μ=0.15



最小板厚 t0.37mm　　最小板厚 t0.32mm

図 12　最適形状　板厚分布予測 μ=0.15

示す。図 11(a)，(b)はサイズが異なる半球パンチ形状の結果である。ともに等二軸に近い張出形状であるため，中間工程では張出成形部全体で均一な板厚分布となる。ただし，よりΔSが 0 に近い(b)の方が形状成形後の板厚は薄くなることから，単一の代表寸法だけでは最適な中間工程形状は決定できないことがわかる。

最適形状における板厚分布の予測を図 12 に示す。単工程成形（図 5）に比べ，三角錐台成形時の板厚減少が少なく，板厚分布も均一になっている。三角錐台成形後，最も板厚が薄くなる箇所の板厚は 0.32mm となり，成形限界の板厚 0.3mm より厚いことから，2 工程で成形できる可能性を得た。この形状にて金型を製作し，テトラボードの試作を行った。

3.　多工程テトラボード成形

3.1　予備張出試験

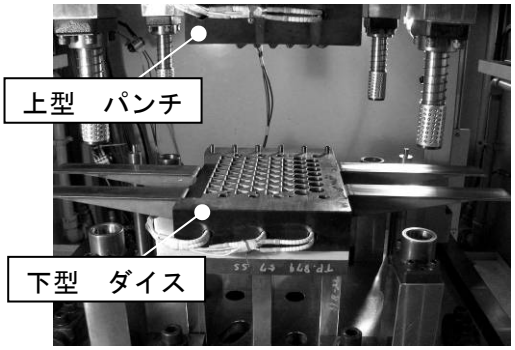
成形に用いる潤滑剤には扱いやすさ，多工程への適用から油系潤滑剤が望まれる。そこで本研究ではアクア化学(株)製の油系潤滑剤 MG-3 を用いてテトラボードの成形を行うことにした。MG-3 の摩擦係数についてはトラスコアの中間成形と同様に張出成形となるエリクセン試験を行い，板厚分布を実験値とシミュレーションで比較し板厚分布が一致する値を採用した。試験は高温用エリクセン試験機を使用し試験温度 250℃にて JIS Z 2247:2006 エリクセン試験方法に準じた。得られた MG-3 の摩擦係数は 0.23 であった。

3.2　多工程テトラボード成形金型

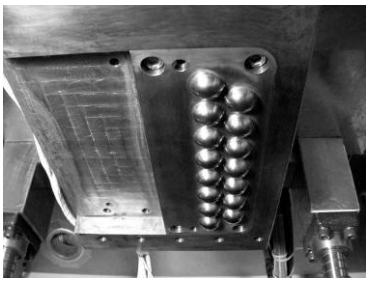
成形にはアイダエンジニアリング(株)製サーボプレス装置 NS1-2000(D)を用いた。試作に用いた多工程テトラボード成形金型の写真を図 13 に示す。工程間のブランクの移動は手動にて行うため，成形中の位置決めが問題となる。本開発ではこの問題の解決のため，中間工程を分離して 1 枚のパネルの成形を行い，次にその中間工程の形状を位置決めとして最終形状の成形を行うこととした。また，シミュレーションの結果から，多工程成形におけるブランクは三角錐台成形後十分な板厚が残ると予想されることから，形状精度の向上を目的とした矯正工程をさらに設けた。

3.3　多工程テトラボード成形試験

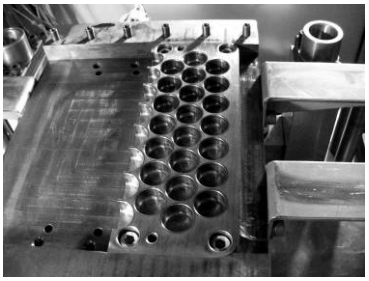
成形条件を表 2 に示す。ブランク材の加熱のために，ブランクと金型の接触後その位置にて 15 秒停止し，その後 1～2mm/sec の速度にて成形した。試験の結果，良好な形状の試作品を成形することができた。加工品の外観を図 14 に示す。



(a)加工全景



(b)中間工程　上型　パンチ



(c)中間工程　下型　ダイス

(d)形状成形工程　上型　パンチ

(e) 形状成形工程　下型　ダイス

図 13　多工程テトラボード成形金型

表 2　成形条件

成形速度	1～2mm/sec
金型温度	260℃
加熱時間	15sec

図 14　加工品外観

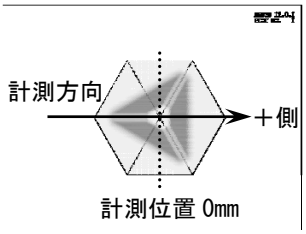
4.　シミュレーションと実験結果の比較

エリクセン試験から求めた摩擦条件によるテトラボード成形シミュレーションと試作した製品の板厚の比較を行った。板厚の測定はカールツァイス社製三次元座標測定機 UPMC550C を用いた。各工程における成形部の板厚分布を図 15 に示す。なおシミュレーションは形状矯正工程を行っていないため，形状矯正後の板厚分布は試験品の実測値のみである。

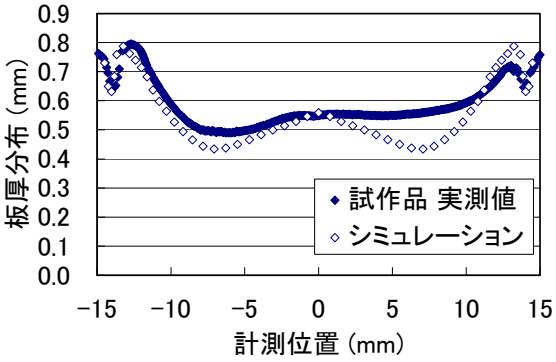
各工程ともに，板厚分布の傾向はよく一致しており，成形の可否も含めシミュレーションによる成形の予測精度は十分であるといえる。計測位置＋側ではシミュレーションより実験値が厚くなる傾向があるが，これは全面を一度に成形することをシミュレーションでは想定しているのに対し，実験は順送にて成形しているため，計測位置＋側からわずかな材料の流入が起こるためと考えられる。ただし，板厚の差は小さいこと，シミュレーション予測値のほうが薄いため評価は安全側となることから，十分シミュレーションにより評価は可能であると考えられる。

5.　ブロー成形品との比較

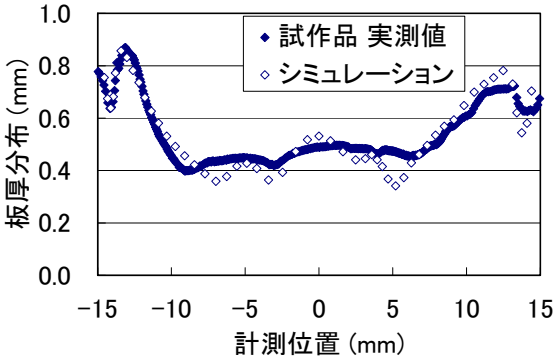
製品の板厚，加工時間，金属組織について昨年度取り組んだブロー成形（金型内で高圧気



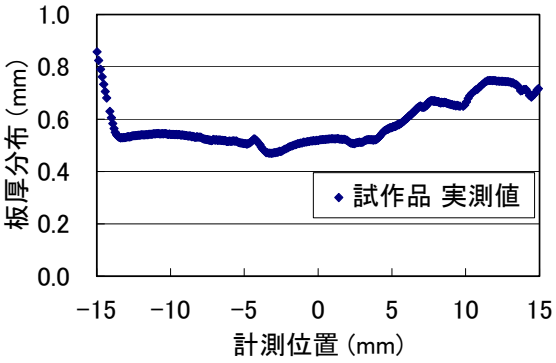
(a) 板厚測定方向



(b) 中間工程後の板厚分布



(c) 形状成形工程後の板厚分布



(d) 形状矯正工程後の板厚分布

図 15　板厚分布の比較

体を吹き込み成形する加工法）との比較を行った。

5.1　板厚測定結果の比較

図 16 に昨年度ブロー成形にて試作したテトラボードとの板厚分布測定結果の比較を示す。ブロー成形は三角錐台の頂点付近の板厚が薄くなってしまうのに対し，プレス成形では頂点付近は薄くならず均一な板厚分布となる。また矯正工程を行うことで，さらに均一な板厚分布を得られている。これは製品を構造部材として使用するにあたり，プレス成形品の方がより高い強度，信頼性が期待できる。

5.2　加工時間の比較

ブロー成形における加工時間とプレス成形における加工時間の比較を行った。加工対象とするパネルのテトラボードは先掲の図 14 に示す 18 列とする。プレス成形については，本研究の条件を基に連続工程にて成形することを仮定し，加工時間の算出を行った。表 3 にそれぞれ

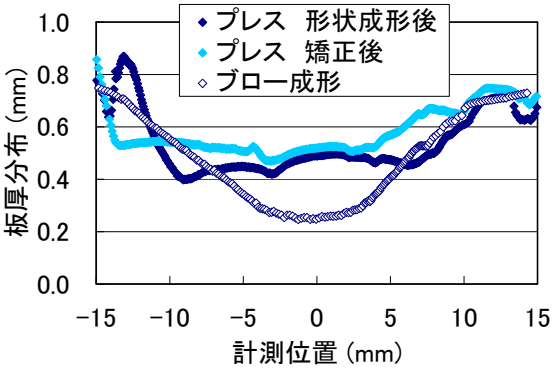


図 16　プレスとブロー成形品の比較

表 3　加工時間の比較

	ブロー (sec)	プレス(sec)			
		各作業時間		工程	
				1	2～11
加工時間	7200	搬送	5		5×10
		初期加熱	15	15	
		再加熱	5		5×10
		成形	10.5	10.5	10.5×10
		合計		25.5	205
合計	7200	230.5			

の加工時間を示す。プレス成形に必要な時間はブロー成形の加工時間の約 1/31 であり，大幅な加工時間の短縮が可能である。

5.3　Mg合金製テトラボードの金属組織

5.3.1　AZ31 板素材の金属組織

テトラボード成形試験に用いた AZ31 板素材の金属組織写真を図 17 に示す。試料を研磨した後，腐食液（ピクリン酸 5%-酢酸 13%-蒸留水 12%-エタノール溶液）にてエッチングし，金属顕微鏡観察を行った。粒径 10μm 前後の細かな組織であり，板素材製造工程によるものと思われる双晶変形が所々に観察される。

5.3.2　成形法とAZ31 の金属組織

AZ31 板材を用いて，ブロー成形とプレス成形の工法の違いによる金属組織への影響を調べた。観察場所および成形後の金属組織写真を図 18 に示す。プレス成形（260℃温間成形）による金属組織は，素材に比べ若干成長した結晶粒が観察される。10μm を超えた程度であり，良好な状態である。また，素材に存在していた双晶はみられず，等軸状の結晶であり，金属組織学的には加工の影響が取り除かれた状態を呈している。

一方，ブロー成形（430℃×2 時間）による金属組織には，結晶粒が著しく成長粗大化し，20μm 以上の粒が多く存在する。加工温度が高く，また加工時間も長いことから，当初より予想された結果となった。また，ブロー成形では頂部板厚が約 0.25mm と非常に薄く，結晶粒が

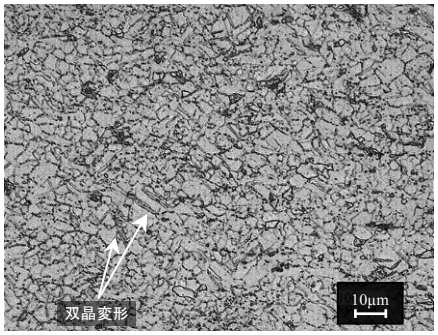
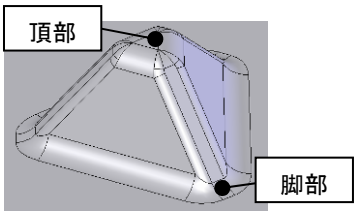
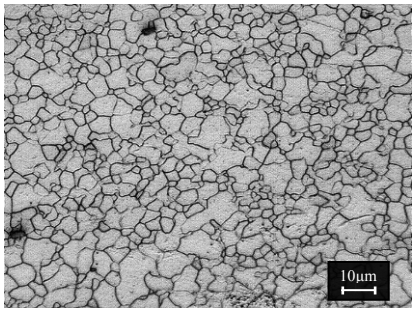


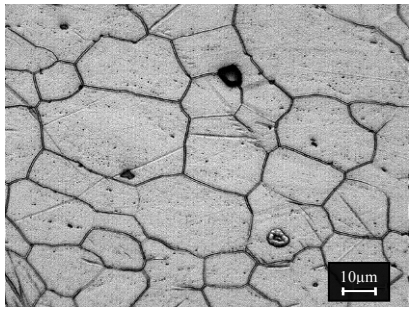
図 17　AZ31 板素材の金属組織



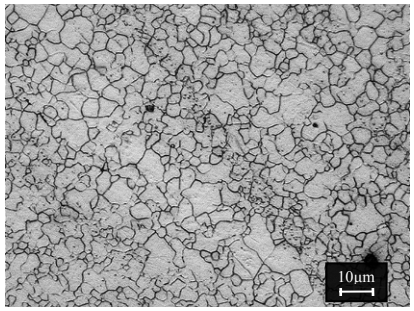
(a)観察場所



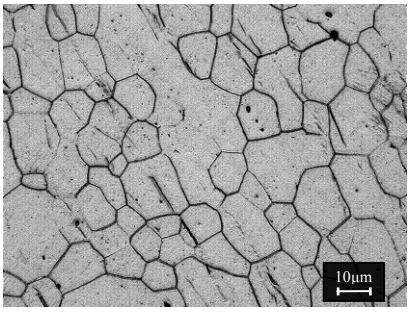
(b)AZ31 プレス成形　頂部



(c)AZ31 ブロー成形　頂部



(d)AZ31 プレス成形　脚部



(e)AZ31 ブロー成形　脚部

図 18　工法の違いによる金属組織への影響

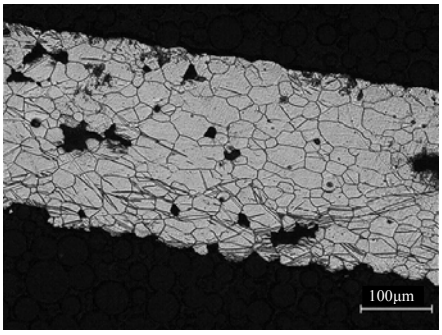
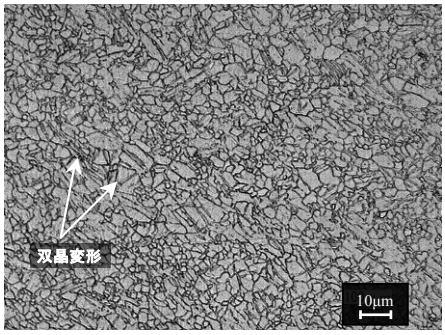


図 19　AZ31 ブロー成形頂部断面

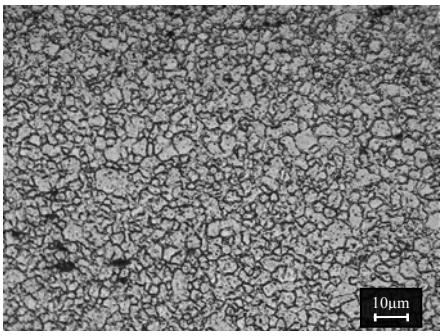
粗大化することから，板厚方向は 10 個前後の結晶粒となり，さらに粒の脱落がみられるなど強度的には好ましくない状態である（図 19）。この点，プレス成形品は微細結晶粒からなるため強度的に有利であり，板厚分布の均一さ，加工スピードはもちろんのこと，金属組織学的観点からも優位性を見出すことができた。

5.3.3　AM60 の金属組織

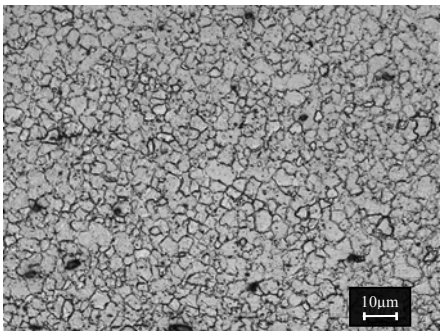
本研究は平成 21 年度都市エリア産学官連携促進事業（発展型）長岡エリア「マグネシウム合金の次世代製品開発」の中で行われたものである。本事業で開発された新 Mg 合金 AM60 についてもテトラボード成形試験を行い，良好な成形が可能であることを確認した。AM60 の板素材とプレス成形品の金属組織写真を図 20 に示す。AZ31 と同様に板素材は粒径 10μm 前後の細かな組織であり，双晶変形も所々に観察される。プレス成形後の組織は，等軸状の 10μm 以下の微細結晶粒である。AZ31 のプレス成形品よりさらに細かな組織であり，金属組織としては，非常に良好な状態と考える。



(a) AM60 板素材



(b) AM60 プレス成形　頂部



(c)AM60 プレス成形　脚部

図 20　AM60 の金属組織

6.　結　　言

(1) シミュレーションによりマグネシウム合金 AZ31 を用いてアスペクト比 0.4 のテトラボードの製造が可能であることを示し，試作により実際の成形が可能であることを確認した。これによりシミュレーションによる成形の可否の検討が可能であることを示した。

(2) 中間工程の金型形状の検討に，幾何学的な特徴を考慮した絞込みとシミュレーションを組み合わせることで，効率的な工程設計が可能になることを示した。

(3) プレス成形に最適な中間工程を設けることで，テトラボードの板厚をブロー成形に比べ均一にすることができ，製品品質の優れた構造部材を作成できることを示した。また，加工時間も 1/31 以下と大きく短縮できることを示した。

(4) 組織観察から，Mg 合金は温間プレス成形により細やかな等軸晶組織が得られ，

金属組織学的にも優位な加工方法であることを示した。一方，AM60 は AZ31 に比べ，より微細な金属組織が得られることを明らかにした。

参考文献

1）斉藤一哉，野島武敏，“平面／空間充填形に基づく新しい軽量高剛性コアパネルのモデル化”，日本機械学会論文集（A 編）73 巻 735 号，2007，p1302-1308.

2）戸倉直，萩原一郎，“トラスコアパネルの製造シミュレーション”，日本機械学会論文集（A 編）74 巻 746 号，2008，p1379-1385.

3）中哲夫，片平卓志，植川陽介，“AZ31 マグネシウム合金板の温間非比例成形限界ひずみとその解析的予測”，弓削商船高等専門学校 紀要 第 30 号，2008，p21-24.