# 法政大学学術機関リポジトリ

## HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-07-03

# 温間バルジ成形によるマグネシウム合金T継 手の製造法の研究

岡本, 敦司 / OKAMOTO, Atsushi

(発行年 / Year) 2008-03-24

(学位授与年月日 / Date of Granted) 2008-03-24

(学位名 / Degree Name) 修士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor) 法政大学 (Hosei University)

# 2007年度

# 修士論文

# 温間バルジ成形によるマグネシウム合金

# T継手の製造法の研究

## INVESTIGATION OF HOT BULGE FORMING FOR TEES PIPE JOINT OF MAGNESIUM ALLOY

- 指導 直井 久 教授
- 主查 直井 久 教授
- 副查 大澤 泰明 教授
- 法政大学大学院 工学研究科 機械工学専攻 修士課程

06R1106 岡本 敦司

第1章 緒論	
1.1 はじめに	
1.1.1 マグネシウム合金	•••3
1.1.2 バッレジ成形法	•••4
1.1.3 研究目的と課題	•••5
第2章 材料試験	
2.1 材料試験方法	
2.1.1 供試材の仕様	•••6
2.1.2 引張試験法	•••6
2.1.3 压縮試験法	•••10
2.2 材料試験結果・考察	
3.2.1 引張式験結果	•••12
3.2.2 圧縮試験結果並びに引張特性と圧縮特性の比較	•••15
第3章 組織觀察	
3.1 組織観察方法	
3.1.1 光学顕微鏡観察法	•••17
3.1.2 電子顕微鏡観察法	•••19
3.2 組織観察結果・考察	
3.1.1 光学顕微鏡観察結果	· · · 20
3.1.2 電子顕微鏡觀察結果	••••22
第4章 バッレジ試験金型設計法	
4.1 バッレジ成形金型設計法	
4.1.1 金型表面性状評価試験法	•••29
4.1.2 数値解析による摩擦係数の推定	•••35
4.1.2 数値解析による金型形状設計	•••37
4.2 バンジル形金型設計法結果・考察	
4.2.1 金型表面性状評価試験結果・・・	•••39
4.2.2 数値解析による摩擦係数の推定	• • • 44
4.2.3 数値解析による金型形状設計結果	•••45
第5章 温間バッレジ成形試験法	
5.1 温間/ シレジ成形法	

5.1.1 温間/ ジレジ成形法	•••47
5.1.2 新金型による温間バッレジ成形法	•••51
5.1.3 数値解析によるバッレジ成形法	• • • 51

## 5.2 温間バンジンが形結果・考察

5.2.1 温間/ シレジ成形可能範囲の確立	••• 52
5.2.2 新金型による温間バッレジ成形法	· · · 55
5.2.3 数値解析によるバッレジ成形可能範囲の推定	•••56

### 第6章 結言

### 参考文献

謝辞

#### 第1章 緒論

#### 1.1 はじめに<sup>1)</sup>

#### 1.1.1マグネシウム合金

近年、環境問題の観点から輸送機器の燃費改善のための軽量化が求められており、そ れらを達成する材料としてマグネシウム合金に注目が集められている。マグネシウムは 比重が 1.74 とアルミニウムの約 2/3、鉄の約 1/4.5 で、実用金属材料中で最も小さく、 さらに比強度、振動吸収性、電磁波シールド性、切削性、耐くぼみ性、リサイクル性な どに優れるという多くの長所を併せ持っている。またリサイクル性における、マグネシ ウムの再生に要するエネルギーは、初期材料製造時の 5%程度で、環境に適した材料で あり、今後の大きな需要が見込まれる。表 1-1 にマグネシウムと各種金属の機械的性質 を示す。

資源としては、地殻構成クラーク数が8番目で地殻表層部における存在比重量は1.93mass%であり、海水中にはMg元素として約0.13%が溶解しており資源量が豊富である。

マグネシウムの結晶構造は最密六方晶であるため室温での塑性加工が難しいという欠 点がある。室温では底面すべり以外のすべり系が活動しにくいため、マグネシウム合金 の冷間加工は、実用的に10~20パーセントが限度である。しかし高温では柱面すべりや 錐面すべりの非底面すべりが活動できるようになるため,延性が急激に増加し熱間圧延 や熱間押出しはアルミニウムと同程度に行える。

金属名	比重	融点	沸点	比熱	引張	圧縮	伸び	硬さ
					強さ	強さ		
単位		°C	°C	kJ/kg•K	MPa	MPa	%	ΗB
マグネシウム	1.74	651	1110	1.03	98		5	30
アルミニウム	2.74	660	2486	0.88	88		45	23
鉄	7.86	1535	2754	0.46	265		45	67
Mg合金AZ31B	1.78	566		1.04	199	96	15	49
円管押出材								
Mg 合金AZ61B	1.81	490		1.05	226	130	16	60
円管押出材								

表 1-1 マグネシウムと各種金属の機械的性質

#### 1.1.2 バルジ成形法

バルジ成形とは管状素材に内圧と軸力を加えて、管全体または一部を外側に膨らませ て、目的の形状・寸法の製品に成形する加工法であり、塑性加工でのハイドロフォーミ ングの一つとして分類されている。図 1-1 にハイドロフォーミングの一般的な概念図を 示す。まず金型内に管材を装着し、その後、管内に内圧を負荷して拡管させ、金型内面 形状に管材を変形させる。その際に両端から軸押しパンチで材料を押込むことで、拡管 時の減肉を抑制する。管内面の圧力媒体は、通常、水や油等の液体を用いるが、低融点 金属やゴムを使用する場合もある。ハイドロフォーミングは従来のプレス成形の代替と して採用される例が多く、プレスと比較した場合には、スポット溶接のためのフランジ 不要による軽量化や部品点数削減、閉断面化および大変形による加工硬化によって剛 性・強度の向上等の利点が挙げられる。一方、欠点として生産性の低下や装置が大型で 高価、加工パラメータが多いために加工条件の設定が難しいなどがある。



#### 図 1-1 ハイドロフォーミングの概念図

#### 1.2 研究目的と課題<sup>2</sup>

マグネシウム合金は実用金属材料中でもっとも軽量で、比強度が高く、リサイクル性 に優れている。繊維強化プラスチックとほぼ同等の軽さを持ち、チタンに相当する高比 強度を持っている材料である。その特長を生かして燃費向上のために軽量化を必要とす る自動車部品など輸送機関係やノートパソコン、携帯電話の筐体部品、小型家電製品、 IT 関連製品のパッケージ部など用途が拡がっている。しかし、部品の単純な材料置換と してのマグネ化では、単なるコストアップになってしまうのが現状である。製造方法は 鋳造、ダイカスト法、などの溶融加工による方法が主流である。これに対して、生産性 に優れ、多様な断面形状が容易に得られる塑性加工法の適用できれば、上記の部品や製 品をはじめ幅広い分野への応用が期待できる。マグネシウム合金の普及には展伸材の採 用が必要不可欠であり、展伸マグネシウム合金材のプレス加工などの研究が進められて いるが、管材などの塑性加工技術に関する研究例は少ない。そこで自動車や二輪車など 中空構造部材に使用される製品を製造することを目的とし、温間バルジ成形法を提案し、 代表的な形状であるT継手の最適製造法について研究を進めている。本報では、FEM 解 析とバルジ成形の金型表面性状評価試験による最適な金型設計や潤滑条件、および温間 バルジ成形試験による成形可能範囲の明確化と成形条件の最適化について検討してきた 結果を報告する.



ダイカスト法射出成形法図 1-2各加工法によるマグネシウム合金の使用例



#### 第2章 材料試験

#### 2.1 材料試験方法

#### 2.1.1 供試材の仕様

今回温間バルジ成形に使用した供試材はマグネシウム合金 AZ31B(ASTM 合金記号)の円 管押出材を使用した。供試材寸法は直径 φ が 50mm、肉厚 t が 2mm、長さ1 が 260mm であ る。AZ31 の ASTM 規格を表 2-1 に示す。

表 2-1 マグネシウム合金 AZ31B の化学成分 (mass%)

A 1	Zn	Mn	Fe	Si	Cu	Ni	Ca	Mg
2.5	0.6	0.20	0.005	0.10	0.05	0.005	0.04	Rem.
~3.5	$\sim 1.4$	~1.0	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	

#### 2.1.2 引張試験法

た

形







図 2-2 に今回用いた引張試験機画像、図 2-3 に引張試験機断面図を示す。加熱には高 温を維持するために、赤外線加熱炉を設置した。試験片は図 2-4 に示すような耐熱鋼 SNCM220 のチャックでくさびを用いて締結した。試験片の温度は熱電対を試験片平行部 に接触させて行った。温度低下の防止は赤外線加熱炉と外部との隙間にカウオール(セラ ミックファイバー)をつめておこなったが、炉内の熱の対流に対する処置はおこなわなか った。



図 2-2 引張試験機画像



図 2-3 引張試験機断面図





図 2-4 耐熱鋼 SNCM220 チャック

#### 2.1.3 圧縮試験法

AZ31の圧縮特性を把握するため、表 2-3の条件で押出軸方向の圧縮試験を行った。試験片には AZ31の中実丸棒押出材を用いた。

圧縮試験片寸法	直径φが12mm、長さ1が18mm
ひずみ速度(1/sec)	0.01
試験温度	常温, 100℃から 400℃の 100℃間隔

表 2-3 圧縮試験条件

表 2-4 に今回用いた圧縮試験機の材質を、図 2-5 に圧縮試験機写真、図 2-6 に圧縮試 験機の部品図を示す。圧縮試験機の加熱ホルダーは熱が逃げにくいような設計をした。 また、高温を維持するために高周波誘導加熱コイルを使用し、試験片の温度測定は K型 熱電対を台座に接触させておこなった。試験片と台座の潤滑には黒鉛系固体潤滑剤を用 いた。

#### 表 2-4 圧縮試験機の材質

部品名	圧縮試験片	金型試料	加熱ホルダー(上)	加熱ホルダー(下)
材質	Mg 合金 AZ31B	S35C	SUS304	SUS304





圧縮試験全体図

圧縮試験治具





図 2-6 圧縮試験機の部品図

#### 2.2 材料:試驗結果·考察

#### 2.2.1 引張講絲課

ひずみ速度0.01/secにおける公称応力-公称ひずみ線図を図2-7に、真応力-真ひずみ線図を図2-8に示 す。図2-8の真応力-真ひずみ線図は試験片の破断時の断面積から破断時の真応力、真ひずみを求め、最大 応力点から破線で結んである。温度を上げるにつれ変形抵抗が減少していき、ひずみが増加することがわ かる。特に400℃でのひずみの増加が著しい。



図 2-7 引張試験における公称応カー公称ひずみ線図





図 2-9 にひずみ速度別の引張強さ-温度線図を、図 2-10 にひずみ速度別の真破断ひず み-温度線図を示す。200℃からひずみ速度依存性が現れ、400℃の真破断ひずみではその 差が顕著に現れた。



図 2-10 ひずみ速度別の真破断ひずみ-温度線図

図 2-11 にひずみ速度感受性指数である m 値を示す。なお m 値を求める際はひずみが 10%のときの応力値を使用した。変形抵抗とひずみ速度の関係を示す。

m 値が高い金属の場合、くびれが生じてくびれ部にひずみが集中すれば、その部分の ひずみ速度が高くなり、応力が高くなる。したがって狭い領域にひずみが集中すること はなく、くびれは広い範囲に広がり、大きな伸びを生じることができる。



#### 2.2.2 圧縮 式 続 ま 果 並 び に 引 限 特 性 と 圧 縮 特 性 の 比 較

図 2-12 に圧縮試験における真応力-真ひずみ線図を示す。圧縮時の応力、ひずみは負値となるが、比較のため便宜的に正値として表示している。図 2-7 と比較すると 常温、100℃での耐力と加工硬化の違いが目立つ。また圧縮下においては 200℃以上で破 断が起きずに変形し続けていくことがわかった。図 2-13 にひずみ速度 0.01/sec におけ る各温度での引張と圧縮での耐力、加工硬化指数 n の違いを示す。常温では耐力と n 値 の差は顕著であるが温度を上げるにつれて差が減少していくことがわかる。



図 2-12 圧縮試験における真応力-真ひずみ線図



常温、100℃において圧縮試験での耐力が低い原因として試験片端面の拘束が考えられ る。圧縮試験と引張試験では圧縮試験は試験片の端面に拘束を受けるのに対し、引張試 験では標点間部がチャック部から離れているために拘束を受けないという違いがある。 この違いが変形特性の差である可能性もあるので、端面に拘束を受けないような試験片 形状にて圧縮試験をおこなってみた。図 2-14 に試験片寸法と試験片の写真を、図 2-15 に試験結果を示す。拘束を受けにくい試験片形状でも同じような変形特性となった。端 面の拘束が引張特性と圧縮特性の差の原因とは一概にはいえないことがわかった。



図 2-14 試験片寸法と試験片画像



図 2-15 中空材を用いた圧縮試験

#### 第3章 組織観察

#### 3.1 組織難察方法

#### 3.1.1光学顕微鏡觀察法

供試材の加熱加工に伴う組織変化を調べるため、引張試験、圧縮試験後の試験片を切断し、光学顕微鏡にて組織観察をおこなった。組織観察の流れを図 3-1 に示す。観察するサンプルは未加工のものとひずみ速度 0.01/sec の試験温度常温、100、200、300 及び400℃でおこなったものである。観察面の概要については図 3-2 に示す。観察時の倍率は400 倍でおこなった。尚、試験片の腐食はピクリン酸アルコール溶液 100ml、蒸留水 10ml、 氷酢酸 5ml で作成した腐食液に 3 秒漬け込みおこなった。



図 3-1 組織観察の流れ





圧縮試験片



図 3-2 光学顕微鏡観察面

#### 3.1.2 電子顕微鏡觀察法

AZ31B の材料特性を微視的立場から考察するために透過型電子顕微鏡にて観察をおこ なった。試料に平行な電子線が入射した場合、電子線は結晶内を直進して結晶を透過す る電子線(透過波)と、結晶内でブラッグ回析を起こして入射電子線に対して  $2\theta_B(\theta_B;$ ブラッグ角)の角度で回析される回析電子線(回析波)に分かれ、透過波からは試料の拡大 像である電子顕微鏡像が得られ、回析波からは電子回析図形が得られる<sup>3)</sup>。本研究では 電子回析図形から方位解析もおこなった。

観察したサンプルは引張試験片、圧縮試験片ともにひずみ速度 0.01/sec で試験温度常 温、400℃でおこなったものである。また圧縮試験片については未加工のものも観察を行 った。試験片の腐食は硝酸アルコール溶液により電解研磨をした。

観察面については、常温の試験片については引張、圧縮の両試験片とも破断した、せん断面を観察し、400℃の引張試験片については破断部分の近傍を板厚方向から観察をおこなった。また未加工の圧縮試験片と 400℃で加工を行った圧縮試験片については中心軸に沿って切断し、その切断面の中心部分を観察した。観察時の倍率は1万倍と5万倍である。図 3-3 に使用した電子顕微鏡の写真を示す。



図 3-3 超高圧電子顕微鏡

#### 3.2 組織觀察結果 考察

3.2.1 光学顕微鏡観察結果

表 3-1 に光学顕微鏡の観察結果を示す。常温、100℃では歪んだ結晶粒が観察される。 また圧縮試験片では 200℃で動的再結晶が観察され始めるのに対して引張試験片では 300℃で動的再結晶が観察され始める。これは引張試験片の観察部分はくびれ部であり、 くびれ部のひずみ速度が速いがために動的再結晶の出現が圧縮試験片より遅れる要因と して考えられる。

マグネシウム合金の圧縮下での低降伏点の出現は双晶変形が起因しているとの報告が あるが<sup>4)</sup>、この論文では引張下で双晶が出現したかは述べていない。常温、100℃の引張 試験片の観察写真からは双晶のような筋が観察されたが光学顕微鏡の写真からは双晶と 断定することはできない。

加工前の結晶粒に着目すると、温間で加工されていたにも関わらず結晶粒が大きいこ とがわかる。このことからこの押出材は押出温度が高く、結晶粒成長がおこったものと 予想できる。



表 3-1 光学顕微鏡観察結果



#### 3.2.2 電子顕微鏡觀察結果

常温加工の試験片の観察写真を図 3-4 に示す。引張、圧縮の両者とも moire 像が観察 された。結晶方位のずれによる割れが発生したときにこのような moire 像が観察される。 引張、圧縮ともに結晶格子がゆがんでおり、5万倍で観察したが転位が一本一本見えず、 転位密度が著しく増殖していることがわかった。また転位密度が高いため双晶の観察は できなかった。



引張試験片

圧縮試験片



図 3-11 に 400℃で加工を行った試験片の観察写真を示す。400℃で加工を行った写真 も常温加工の写真と同じように引張と圧縮での大きな差は見当たらなかった。図 3-11 の 写真は 1 万倍で観察を行ったが、常温の時のような転位の著しい増殖はなかった。これ は動的回復や動的再結晶より転位が消滅し、転位のほとんどない結晶と置き換わって、 転位密度が減少したからである。図 3-5 の右の写真は回復によって生じた転位網の例で、 この転位網を亜粒界という。

図 3-6 に未加工の試験片の観察写真を示す。







図 3-6 未加工の試験片の観察写真

次に方位解析について説明を行う。

最密六方晶の場合は(100)、(120)、(001)、(011)、(021)、(121)、(012)、(031)、(122)、 (311)、(411)、(013)の12パターンの回析が起きる。図 3-7 に回析パターンを示す。





•	•	× 033	•				•	× 033	•	•
•	130	022	114	•			131	022	x 115	×
•	121	011	103	•			122	011	104	
•	112	000	112				113	000	ī13	•
x	103	011	ī21			•	104	011	122	
•	114	022	ī30			•	x 115	022 ×	131	•
•	•	033 (311)			2 17 16 17	•	•	033 (411)		



図 3-7 回析パターン

方位解析をおこなう際は回析写真と上記のパターンを照らし合わせ、どの面の回析写 真なのかをまず把握する。図 3-8 に把握できた写真を例としてあげる。



図 3-8 面を把握した回析写真例

面が把握できたらフィルム上で斑点間の距離 g<sub>hkl</sub>を測定し、式(1)を用いて面間隔 d<sub>hkl</sub>を算出する。

波長との関係 
$$g_{hkl}d_{hkl} = \lambda L$$
式(1)  
 $\lambda = 0.87 \times 10^{-3} nm$   $L = 1.39 \times 10^{9} nm$ 

ここで λ は電子線の波長、L は試料とフィルム間の距離でカメラ長である。右辺の λL は試料の物理的な性質には関係ない装置定数でカメラ定数と呼ばれる。算出した面間隔 から式(2)を用いて格子定数 a、c を導く。

面間隔 
$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{\frac{4}{3}(h^2 + k^2 + hk) + (\frac{a}{c})^2 l^2}}$$
 式(2)

計算した結果 a=0.313nm、c=0.537nm という結果が得られ、格子面方線と(001) 面法線 とのなす角は

$$\cos \omega = \frac{ld}{c}$$
 式(3)  
で与えられる。

方位解析した結果を図 3-9 に示す。未加工のものは押出方向と、ほぼ同じに底面が配 向していることが確認できた。

マグネシウムは常温では底面すべり以外の柱面すべりや錐面すべりが活動しにくいが、 高温になると柱面すべりや錐面すべりが活動するようになる<sup>50</sup>。底面が押出方向とほぼ 平行に配向していることから、高温においても底面すべりが優先的に活動していること がわかる。



#### 第4章 バルジ試験金型設計法

#### 4.1 バルジ試験金型設計方法

#### 4.1.1 金型潤滑性能評価試験法

温間バルジ試験実機では、金型の材料や表面粗さ、表面加工等を評価するには、材料 費等多大なコストと時間がかかる。そこで温間バルジ試験での最適な金型の表面性状を 探索するために、小さく簡易モデル化した試験である、金型潤滑性能評価試験を行った。

まず、リング状の試験片を圧縮し、加工後のリングの形状より摩擦係数を推定するリ ング圧縮試験を行った。しかし、バルジ成形では供試材の移動量が大きく潤滑剤の流れ も大きいのに対し、リング圧縮試験では試験片の移動量が小さい為、潤滑性能の比較や 摩擦係数を推定する事が困難であり、バルジ試験の潤滑状態を再現することが出来なか った。そこで温間バルジ試験に適正な金型表面性状を調査するための金型表面性状評価 試験法を考案した。ねじで引抜ロッドにマンドレルを締結し、ストリッパープレートを 用いて供試管を拡管引抜きする。テーパーの付いたマンドレルを引抜くことで拡管され た供試管にかかる面圧をバルジ試験の内圧と見立てて、金型と供試管の接触部を再現し た。その際、表面粗さや表面性状の異なるマンドレルを用い、引張荷重から摩擦係数の 推定をおこなった。図 4-1 に試験用マンドレルの寸法及び、表面性状評価試験の概略を、 図 4-2 に表面性状評価試験の概要、図 4-3 に表面性状評価試験画像を示す。また今回の 試験では摩擦係数低減を目的として DLC コーティング(Diamond-Like-Carbon)をマンド レルに施した。

試験温度は 400℃で行い、加熱には赤外線加熱炉を使用し、温度の測定には R 型熱電 対を使用した。供試材には外径 φ が 28 mm、肉厚 t が 2.5 mm、長さ L が 60 mmのマグネシ ウム合金 AZ31B の円管押出材を使用し、潤滑剤には黒鉛系の固体潤滑剤を使用した。な お供試材の内側の角はマンドレルを傷つけてしまう恐れがあるので R 付けをした。表に 今回使用したマンドレルの表面粗さと材質等を示し、図 4-4, 4-5, 4-6 に各マンドレルの 画像を示す。DLC コーティングと母材との密着性はサンドブラスト仕上げ面が優れてい ると報告されているので<sup>60</sup>、サンドブラスト仕上げ面に DLC コーティングを施したマン ドレルでの試験も行い、また DLC コーティングの推奨<sup>71</sup>されている材質(超硬合金、合金 工具鋼等)と表面粗さ(Rz0.2 以下)を使用したマンドレルも用意した。

29

材質	表面粗さ(Rz)	表面加工	DLC
S45C (炭素鋼)	0.8, 3.5	研削	有, 無
SKD61 (合金工具鋼)	2.2, 4.6	サンドブラスト	有,無
SCM440 (クロムモリブデン鋼)	0.2, 3	研削	有,無
SKH51 (ハイス鋼)	0.2, 3	研削	有,無
G3 (超硬合金)	0.08, 0.3	研削	有,無

表 4-1 試験に使用したマンドレル仕様



図 4-1 試験用マンドレルの寸法及び表面性状試験の概略



図 4-2 表面性状試験の概要図



図 4-3 表面性状評価試験



Rz 0.8 Rz 3.5 Rz 0.8+DLC





図 4-5 DLC を施したサンドブラスト仕上げマンドレル







左 Rz 低 右 Rz 高 図 4-6 DLC を施したマンドレル 上から G3, SKH, SCM

DLC コーティングの特徴を記す<sup>8)</sup>。

DLC とは Diamond-Like-Carbon の略で、硬さ等ダイヤモンドに類似した特性をもつ炭 素膜である。製膜原料はCH<sub>4</sub>(メタン)やC<sub>6</sub>H<sub>6</sub>(ベンゼン)などで、製膜方法にはイオン 化蒸着法などが用いられる。使用可能温度はおよそ 400℃までであり, ビッカース硬さは およそ 3000 程度である。今回の実験ではナノテック社のおよそ 500℃まで使用可能な耐 熱 DLC を施して試験を行った。

DLC コーティングの利点として。摩擦係数の低減、加工面品質の向上、メンテナンス 頻度の低減、長寿命化、無潤滑または潤滑剤の低粘度化などが挙げられ、難点としては 高温に弱い、密着性が弱い、コーティングが高価であることなどが挙げられる。

図4-7<sup>8)</sup>にボールオンディスク試験によるアルミニウムボールに対する各種硬質薄膜の ボール磨耗と摩擦係数を示す。各種薄膜と比較してDLCコーティングの摩擦, 磨耗性能 が高いことがわかる。



雰囲気 :大気中無潤滑 摩擦速度;100mm/sec 荷 重 :4.9N 摩擦距離:100M ボール径:6mm

図 4-7 ボールオンディスク試験による各種硬質薄膜と

ボール磨耗,摩擦係数(※文献(7)より引用)

#### 4.1.2 数値解析による摩擦係数の推定

表面性状評価試験の変形特性を把握するため、有限要素法解析ソフト MARC を使用し摩擦係数の推定を行った。金型・ストッパー等は剛体とし、マグネシウム管は対象性を考慮して 1/2 の三次元直方体要素モデルとした。マグネシウム合金 AZ31 押出管材の応力歪線図は 400℃における引張試験で得られたものを使用した。数値解析の解析条件を表 4-2 に示す。また実際に解析を行っているモデルの一例を図 4-8 に示す。なお、図 4-9 に示すように、解析による表面性状評価試験の推定面圧はおよそ 5MPa ほどとなり、実際のバルジ試験より厳しい条件となった。

この解析により、金型表面性状評価試験をシミュレーションし、引抜荷重を比較する ことによって摩擦係数の推定を行う。

供試材	才寸法	Φ28× t 2.5×L60mm (対称性を考慮し,1/2 モデル)			
軸方向		40			
分割数     周方向		20			
	肉厚方向	2			
要素	タイプ	3 次元直方体要素			
材料モデル	温度	400°C			
引張速度		0.5mm/sec			
摩擦停	系数 μ	0.0~0.5			

表 4-2 表面性状評価試験解析条件



図 4-8 数値解析モデルの一例





#### 4.1.3 数値解析を用いた金型設計

温間バルジ試験の形状設計や変形特性を把握するため、有限要素法解析ソフト MARC を 使用し成形のシミュレーションを行った。数値解析の解析条件を表 4-3 に示す。また実際に解析を行っているモデルの一例を図 4-10 に示す。

供試材寸法		$\Phi$ 50× t 2. 0×L260mm		
分割数	軸方向	130		
	周方向	20		
	肉厚方向	2		
要素タイプ		3 次元直方体要素		
材料モデル	温度	400°C		
摩擦係数 μ		0. 1		

表 4-3 数値解析によるバルジ試験条件



図 4-10 数値解析でのバルジ試験モデルの一例

バルジ成形金型を製作するにあたり、最初に金型形状の最適化を行った。T継手の 形状として、図4-11に示すような直管交差型とエルボ対向型の2種類の形状を考案し、 解析により両者の成形性を比較した。直管交差型は2本の直管を垂直に合わせて肩部 にRを付けた形状で、エルボ対向型は2つのエルボを重ねた形状で、直管交差型に比 べて肩部が広く、メタルの流れ易い形状となっている。また、さらに成形性に優れた 金型形状の探索のため、図4-12に示すような、T継手の枝管部R形状のダブルR化に ついても検討した。ダブルRの金型についてはエルボ対向型を元として、更にメタル の流れがスムーズになるように肩部のRを二重にして緩やかな形状となっている。





直管交差型

エルボ対向型



図 4-11 T 継手の形状

図 4-12 ダブルR金型の形状

#### 4.2 バルジ試験金型設計結果・考察

#### 4.2.1 金型表面性状評価環験結果

#### (1) 表面粗さによる潤滑への影響

研削仕上げの表面粗さの異なるマンドレルにおける DLC コーティング無しで潤滑剤を 塗布した試験結果を図 4-13 に示す。

通常の金属表面は、表面粗さを形成する小さな凹凸があり、その凹部にたまった潤滑 剤は素材と工具と接触するときに逃げる隙間がないと機械的に閉じ込められて工具と素 材とを離す潤滑膜を形成する。この効果は、すべての塑性加工において期待でき、素材 表面を酸による腐食などで粗くしておけば摩擦係数は低下する<sup>90</sup>。図の2種類の表面粗 さの場合では Rz が 0.8µmのマンドレルのほうが引張荷重は低く、3.5µmのマンドレル での表面を粗くしたことによる摩擦係数の低下は見られなかった。しかし、図の表面粗 さの場合では、Rz0.2µmのマンドレルのほうが Rz3µmのマンドレルよりも引抜荷重は 高く、表面粗さを低くしすぎたことによって供試管との接触面が増え、焼き付きを起こ し、振動を伴った。表面の凹凸への潤滑剤の閉じ込めによる摩擦係数の低減は Rz0.8 近 傍での表面粗さの際に現れると考えられる。



図 4-13 切削仕上げマンドレルにおける表面粗さと引張荷重

#### (2) DLCコーティングによる潤滑への影響

次に表面粗さ Rz0.8 のマンドレルにDLCコーティングを施したもので試験結果を示 す。試験条件として、DLC 処理をしないで潤滑剤の塗布しない「無潤滑」、DLC 処理しな いで潤滑剤を塗布した「潤滑剤あり」と、DLC 処理して潤滑剤を塗布した「DLC+潤 滑剤」の3通りで試験を行った。図 4-14 に結果を示す。



図 4-14 DLC処理及び潤滑剤と引張荷重

「無潤滑」においては供試管がマンドレルに焼き付いてしまい、激しく振動を伴いなが ら拡管された。引張荷重も大きくなり、バルジ成形においても無潤滑での成形が難しい 事が予想できる。「潤滑剤あり」においては無潤滑における引張荷重の半分以下になり潤 滑剤の重要性が伺えた。「DLC+潤滑剤」においては引張荷重が無潤滑のおよそ 1/5、 潤滑剤ありのおよそ 1/2 と非常に高い潤滑性能を示した。「DLC+潤滑剤」において試 験後のマンドレルを観察したところ、図 4-15 のように DLC が剥離したような跡が見られ たため、光学顕微鏡にて 200 倍で表面観察を行った。観察より、剥離のように見えた部 分は供試管であるマグネシウム合金が付着していることがわっかた。この付着により、 試験回数を重ねるごとに荷重が徐々に上がっていき、潤滑性能が下がっていることが分 かった。



図 4-15 試験後の研削仕上げマンドレルの表面観察

#### ③サンドブラスト仕上げでのDLCによる引張荷重への影響

サンドブラスト面に DLC を施したマンドレルでの試験結果を図 4-16 に示す。



図 4-16 DLC を施したサンドブラスト仕上げマンドレルに おける表面粗さと引張荷重

結果として DLC 無しでは振動は起こらなかったものの、全体的に引抜荷重が高くなっ ている。DLC 有りでは DLC 処理されているにも関わらず振動を伴いながら拡管し、DLC 無 の結果よりも潤滑性能の低下が見られた。試験後のマンドレルを観察すると図 4-17 に示 すように、DLC が剥がれているようにサンドブラストの凹凸がなくなっていた。しかし 光学顕微鏡による表面観察により、サンドブラスト面によりマンドレルの表面粗さが粗 くなったことで、凹凸部に高温によって軟らかくなったマグネシウム合金が入り込み、 付着していることがわかった。付着したマグネシウム合金は研削面のマンドレルよりも 多く、その付着により、DLC の効果が無くなり、振動を伴い、荷重が上がったと考えら れる。



#### 図 4-17 試験後のサンドブラスト面の表面観察

#### (4) DLC 処理における表面粗さの引抜荷重への影響

表面粗さの異なるマンドレルに DLC コーティングを施し、試験を行った結果を図に示 す。この試験ではDLCの効果を向上させるために、推奨材料である G3(超硬合金)、SKH51、 SCM440 をマンドレルに使用した。

表面粗さの異なるマンドレルを用いて行った試験結果を図 4-18 に示す。DLC 無しの場合 では供試菅が焼き付きを起こし振動を伴いながら拡菅された。反対に DLC 処理をしたも のでは振動がなくなり引抜荷重が下がった。特に表面粗さの低い Rz0.2 のマンドレルで は DLC 処理によって著しく潤滑性能の向上が確認された。

また試験後のマンドレルの表面を観察した結果を図 4-19 に示す。表面粗さ Rz3,0.3の マンドレルではマグネシウム合金の付着がやや見られたが、Rz0.2 以下のマンドレルで は付着は確認されなかった。マグネシウムの付着が無いことから表面粗さの低いマンド レルでは潤滑性能の向上が顕著であったと考えられる。またその後 5 回ほど同じマンド レルを用いて試験を行ったが、Rz0.2 以下のものでは依然マグネシウムの付着は見られ ず、荷重は安定していたため、回数を重ねることによる潤滑性能の低下も無いと考えら れる。



図 4-18 金型表面粗さの引張荷重への影響





Rz0.2 Rz3 図 4-19 試験後のマンドレル写真(SKH, DLC 有)

#### 4.2.2 数値解析による摩擦係数の推定

数値解析により摩擦係数 µ を 0,0~0.5 に変えて金型表面性状評価試験のシミュレーションを行い、解析による潤滑性能比較試験の荷重-変位線図から摩擦係数の推定を行った。解析による変位-荷重線図を図 4-20 に示す。また解析による引抜荷重を用いて、表面性状評価試験結果の摩擦係数の推定を行った図4-21 も示す。



図 4-20 数値解析による荷重-変位線図



図 4-21 研削面マンドレルでの摩擦係数の推定

図より、DLCを施していないマンドレルを用いたもので推定摩擦係数 µ は0.3~0.4、DLCを施したものでは、表面粗さRz3がおよそ µ=0.28、Rz0.3が0.17、表面粗さRz0.2以下のものでおよそ0.1、0.1以下という結果になった。また、DLCを施したものでは表面粗さが下がるにつれて引抜荷重が下がっているのがわかる。材質による摩擦係数の違いは少なく、今後、高温での金型材の硬さの低下やDLC 膜の耐久性などを確認する必要はあるが、SCM のような安価な材質でも潤滑性能向上の期待が持てる。

#### 4.2.3 数値解析による金型形状設計結果

図4-22 に金型形状の違いによる温間/シレジ成形性を比較した1/2 モデルでの解析結果を示す。(a)の直 管交差型に対して(b)のエルボ対向型は技部の膨らみが良好であり、成形性が良いといえる。図4-23 に成 形時のパンチ押込み荷重のグラフを示す。



図4-23 金型形状に違いによる成形時のパンチ押込み荷重の比較

エルボ対向型における押込み荷重は、直管交差型に比べて約4kN低く、この結果からもエルボ対向型の成 形性が良いことがわかった。またさらに成形性に優れた金型形状の探索のため、エルボ対向型をもとに、 枝管部R形状のダブルR化を検討した。図4-24に1/4モデルでの解析によるパンチ押込み荷重の比較結果 を示す。ここで、1/4モデルとしたのはダブルR形状の解析が1/2モデルでは成功しなかったためである。



図4-24 ダブルR型金型の1/4モデルでの解析によるパンチ押込み荷重の比較

これより、枝管部のダブルR化により押込み荷重を約2kN下げることができるということがわかり、成形 性向上に効果が期待できると思われる。しかし、ダブルR型の金型は、R部が大きくなることでの直管部 の減少など、T継手の製品形状が変化してしまうことや、金型製作上での手間などの関係から、採用する には難しいと考えられる。

#### 第5章 温間バルジ成形法

#### 5.1 温間バルジ成形方法

#### 5.1.1 温間バルジ成形可能範囲の確立

図 5-1 に温間バルジ成形機概略図、図 5-2 に温間バルジ成形機画像、図 5-3 にバルジ 試験機金型を示す。本研究温間バルジ成形機では、上金型と下金型の間に供試管を挟み 込み、高周波誘導加熱コイルにより試験温度まで金型を加熱し、圧力導入部より窒素ガ スを充填することにより管に内圧 p を与え、同時に供試管の両端から油圧シリンダによ りパンチを押込むことにより肉厚を供給して張り出し、成形を行う。左右の押込み距離 △0 を押込み前の供試材長さ0 で割ったものを押込み率△0 / 0 と定義した。

内圧にはボンベにより供給される窒素ガスを用いた。内圧の設定をボンベにつけてあ るゲージにておこない、内圧の測定はパンチ部手前の圧力センサで行った。パンチ部の 押込みは油圧シリンダを用いた。油圧の設定はポンプのゲージにて行い、油圧の測定は シリンダ入口の圧力センサで行った。パンチ移動量は光センサ、温度は熱電対を用い測 定した。

今回の試験では温度は 300、350、400、450℃の各温度で、内圧の設定値 1.5~4.0MPa とパンチを押込む油圧シリンダの油圧設定値 4~10MPa を変化させて行い、押込み率は 40%とした。潤滑剤には黒鉛系の固体潤滑剤を使用した。またバルジ試験金型に DLC(Diamond-Like-Carbon)コーティングを施した。表 5-1 に温間バルジ試験条件、温間 バルジ試験金型仕様を記す。

今回製作する T 継手の形状寸法を図 5-4 に示す。継手の膨らみ部分を枝部、R の部分 を肩部とする。T 継手の成形性の判定については肉厚が 2 mm以上。枝部の直径が 49 mm以 上で外表面性状として、しわや座屈が軽微であることとした。また、肉厚基準と枝部の 直径基準は JIS の規格内である。

試験温度	内圧	押込み油圧設定値	押込み率
(°C)	(MPa)	(MPa)	(%)
300, 350, 400, 450	1.4~4.0	$4\sim 10$ MPa	40

表 5-1 温間バルジ試験条件

表 5-2 温間バルジ試験金型仕様

表面粗さ(µm)	材料	形状	表面加工		
Rz6	S45C	エルボ対向	DLC		



図 5-1 温間バルジ成形機概略図



図 5-2 温間バルジ成形機



図 5-3 バルジ試験機金型



図 5-4 T 継手形状寸法(単位:mm)

バルジ試験では図 5-5 に示すような、頂点部の破裂、肩部座屈、側面部座屈等の成形 不良を生じる。それら成形不良の発生を防ぐための適正な成形可能範囲を確立する必要 がある。本バルジ試験機では内圧設定値とパンチを押込む油圧シリンダの設定値によっ て制御されているため、図 5-6 に示すように、それぞれを変化させて、各成形不良限界 を設定し、成形可能範囲を調査する。



図 5-5 バルジ成形での成形不良時の形態





#### 5.1.2 新金型による温間バルジ成形

温間バルジ成形では金型と供試管の接触部での摩擦による成形への影響が大きい。そ こで摩擦係数を低減することで、バルジ成形可能範囲の拡大もしくは、内圧、押込み荷 重などの低下が予想される。前章の金型表面性状評価試験では、超硬、SKH51、SCM440 にて、表面粗さを Rz0.2 で製作した金型に DLC コーティングを施した場合に、摩擦係数 µ=0.1 という良い結果が得られた。この結果を元に材料 SCM440、表面粗さ Rz0.2 で DLC コーティングを施した新しい金型を作成し、潤滑性能向上による、バルジ成形可能範囲 の拡大を目指した。成形温度は 400℃、押込み率は 40%とした。図 5-7 に新しく作成し た金型を、表 5-3 に金型の仕様を示す。



図 5-7 新金型外観

	表面粗さ(µm)	材料	形状	表面加工
新金型	Rz0. 2	SCM440	エルボ対向	DLC
旧金型	Rz6	S45C	エルボ対向	DLC

表 5-3 金型仕様の比較

5.1.3 数値解析による温間バルジ成形法

数値解析でのバルジ成形の成形可能範囲を推定するため、有限要素法解析ソフト MARC を使用し、成形シミュレーションを行った。解析条件は前章と同様に、応力歪線図には 温度 400℃引張試験結果を用い、押込みパンチと金型を剛体とし、解析モデルには三次 元直方体要素モデルを使用し、摩擦係数は 0.1 とした。

#### 5.2 温間バルジ成形法結果・考察

#### 5.2.1 温間バルジ成形法結果

図 5-8 に成形温度 400℃、押込み率 40%におけるバルジ成形試験結果を示す。前述の T継手の成形判定基準を満たしたものを○、形状は満たしているが、若干の亀裂やしわ が認められるものを△、その他、座屈、破裂等成形不可のものを×で表している。各成 形不良時の状況を下記(1),(2)に示す。成形を成功させるには内圧と押込みのバランスが 大きく影響し、バランスのとれた範囲が右斜めに存在している。図にバルジ成形試験時 の各パラメータのチャートを示す。尚、試験機の能力から、内圧 5.0MPa、押込シリンダ 油圧 10MPa を上限としている。



#### (1) 内圧・押込み圧力の影響

押込みとの関係が大きいが、内圧が低いと肩部で座屈を起こし、逆に内圧が高すぎる と頂点部で破裂を起こす可能性が高くなる。主に、内圧高で押込み低のときに肉厚の供 給が間に合わずに、頂点部で破裂が起き、内圧低で押込み高のときに押込みが早くなり すぎるために、膨らむ前に肩部、側面部の座屈を生じる。破裂を起こさなかった場合で も肉厚の減少がおき、成形基準を満たさなくなる。図 5-10 に内圧における成形状況を示 す。



図 5-10 内圧による成形不良時の状況

#### (2) 成形温度の影響

温度別での成形可能範囲を図 5-11 に示す。450℃の試験では、供試材の変形抵抗の減 少と破断ひずみの増大による内圧、押込み荷重の低下と成形可能範囲の拡大が確認でき、 300、350℃の試験では変形抵抗が増加し、内圧、押込み荷重が増大した。尚、300℃では 試験機の能力不足により成形不可能であった。内圧により発生する管周方向引張応力と 押込み荷重により発生する管軸方向圧縮応力の組合せによる応力が、各温度における供 試材の変形抵抗を上回ったうえで、両者がうまくバランスすることが重要である。300℃、 350℃では変形抵抗の増加に加え加工硬化率が大きいのでより押込み速度が低下してい き、押込めなくなることがある。押し込みが不可能になることを避けるために押込み圧 力を高くすると管端の噛み込みや、管の内部の圧力が高まる前に押込みが始まることに よる肩部、側面部の座屈が起こる。図 5-12 に押込み圧力における成形状況を示す。





図 5-12 押込み圧力における成形状況

#### 5.2.1 新金型による温間バルジ成形法結果

本試験では、新しく作成した新金型と旧金型の潤滑性の比較検討を行った。図 5-13 に 新金型と旧金型におけるバルジ成形可能範囲結果の比較を示す。

金型表面性状評価試験より、表面粗さの低い金型材に DLC を施した新金型のほうが旧 金型に比べ、摩擦係数が低く、成形可能範囲が拡大および、成形時間の短縮、もしくは、 内圧、押込み荷重が低い範囲にシフトすると予想された。しかし試験結果より、新金型・ 旧金型ともに、成形可能範囲はほぼ同等の大きさとなり、成形時間もほぼ変わらず、潤 滑性の著しい向上は確認できなかった。

新金型での成形不良形態としては肩部の座屈が多く、内圧 2.0MPa での旧金型の肩部座屈 と比較すると座屈の範囲が広く、深さが大きかった。この原因としては、金型の表面加 工の際に、肩部のR部分や枝部を Rz0.2以下にすることが技術的に難しく、金型の表面 粗さを測定したところ、枝部、R部の表面粗さは Rz0.43 となっていた。これにより、図 5-14 に示すように、枝部の摩擦係数が上がり、張り出しが難しくなり、張り出し方向と 押込み方向の成形バランスが悪くなり、成形範囲が拡大しなかったと考えられる。しか し、表面粗さが Rz0.2 の直管部では試験後もマグネシウムの付着は見られず、潤滑も良 好であったため、枝部の表面粗さが改善され、押込みと張り出しのバランスが取れれば 成形可能範囲の拡大が予想される。

lPa)	5.0 4.5 4.0	<ul> <li>成形温度 400℃</li> <li>押込み率 40%</li> </ul>								+==	成形温度 400℃ 押込み率 40%					
	3.5	押		破	裂	×	×			<b>护</b> 込		破	裂	×	×	
<u>2</u>	3.0	込		×	Δ	0	0			めザ	×	×	×	0	Δ	
Б Ш	2.5	めず	×	0	0	0	×			9	×	×	×	0	0	
	2.0	9	×	×	×					×	×	0	0	Δ	×	
	1.5				座	屈				×	×	×	×	×	×	
	1.0									×			座	屈		
	4 5 6 7 8 9 10 4 5 6 7 8 9 押込シリンダ油圧設定値 (MPa)												10			

図 5-13 400℃における T 継手バルジ成形可能範囲の比較

(b) 旧金型

(a)新金型



図 5-14 金型枝部の表面粗さと摩擦係数の関係

#### 5.2.3 温間バルジ試験の数値解析結果

まず、数値解析による解析精度の検証を行うために、解析と実験の定量的な比較を行った。比較した実験状態は、試験温度400℃、内圧2.0MPa、押込み油圧7MPaを使用した。 尚、解析ではパンチの移動を実験と同じパンチ位置にて制御を行った。比較の対象として、成形後の肉厚とパンチ押込み荷重の比較を行った。結果を図 5-15, 5-16 に示す。



図 5-15 解析値と実験値の成形後の肉厚の比較



結果より、肉厚では 0.2mm ほどの差しか出ておらず、傾向もよく似たものが出ている のがわかる。また押込み荷重においても、荷重の立ち上がりの低さや、荷重の振れがや や気になるが、荷重にほとんどの差は見られない。よって本数値解析は実験を良くシミ ュレートしていると考えられる。

バルジ成形実機では押込み荷重と内圧により制御しているが、解析では押込み速度と 内圧を一定に制御することにより成形を行った。解析で押込み荷重制御するには、内圧 や材料の変形抵抗により押込み荷重のチャートが変化するため、一定条件での試験を行 うことが難しいからである。解析試験条件は温度 400℃、内圧は 1~4.5MPa パンチの押 込み速度は 0.1~2.0mm/s まで変化し、摩擦係数は µ=0.1 とした。実験での押込み速度 は一定ではないので、新金型による試験結果を用いて、押込み距離一成形時間線図の近 似線から押込み速度を求めた。図 5-17 に実験での押込み距離一成形時間チャートの一例 を示す。図 5-18 に解析値と実験値のバルジ成形可能範囲を示す。バルジ成形可能範囲の 推定では、バルジ試験と同様に、頂点部の破裂限界と肩部の座屈限界を用いて、範囲を 推定した。図 5-19 に解析と実験での成形品の比較を行った結果を示す。成形成功では頂 点部の膨らみにやや違いが出ているが、高さ、形状ともにほぼ同様とみなすことができ る。肩部座屈においても、肩部座屈を再現できていて、良好なシミュレーション結果で ある。頂点部破裂においては、解析では破裂という現象が起こらないため、破裂限界を 設定する必要がある。今回は前述にある、T 継手形状寸法の製品判定基準である、高さ 60mmの部分で肉厚が 2mm に満たないものを減肉による成形不良と設定した。

図 22 より、解析値と実験値の成形範囲は内圧が上がるにつれて、押込み速度が上がる

57

傾向があり、内圧と押込み速度のバランスが重要であると言え、押込み速度を制御する ことにより、成形範囲の推定が行える。実験値の成形範囲は解析の範囲は押込み速度の 大きい右側に少しずれた。これは解析の材料特性が実際の供試材に比べて変形抵抗が大 きく、内圧による、材料の膨らみが遅くなり、速度が遅くなった、もしくは、押込み速 度の近似による差があるためと考えられる。



図 5-17 実験での押込み距離-成形時間線図



図 5-18 400℃におけるバルジ試験解析と新金型による実験の成形可能範囲の比較



図 5-19 解析と実験での成形状況の比較

#### 第6章 結言

- 1) マグネシウム合金 AZ31B は 200℃あたりからひずみ速度依存性があらわれ、400℃ まではひずみ速度依存性が増していく。
- 2) 低温域では引張特性と圧縮特性に顕著な差がみられるが、温度を上げるにつれて差 がなくなっていく。
- 3) 200℃あたりから動的再結晶があらわれ、400℃になると微細な結晶粒が全域に広が っていた。200℃以上で延性が増すのは動的再結晶により転位を含まない結晶粒が 発生したためと考えられる。
- 4) AZ31Bの押出材は底面が押出方向とほぼ平行に配向する集合組織を作っていることが確認できた。このことから高温でも底面すべりが優先的に活動していることがわかった。
- 5) 金型表面性状評価試験により、DLC 処理を施した表面粗さ Rz0.2 の金型が最も潤滑 性能が良く、その摩擦係数 µ は推定 0.1 以下となった。またサンドブラスト面を DLC コーティングの母材とした場合は本研究では良好な結果は得られなかった。
- 6) DLC コーティングは金型の潤滑性能向上に効果があり、金型の表面粗さを低くする ことで、その潤滑性能はさらに向上する。また、サンドブラスト面を DLC コーティ ングの母材とした場合は本研究では良好な結果は得られなかった。
- 7) 数値解析によるバルジ金型形状による成形性の比較では、エルボ対向型のおけるダ ブル R 型での金型形状が成形性に優れていることがわかった。
- 8) バルジ成形では温度、内圧、押込み圧力のバランスが重要になり、その成形可能範囲は成形温度により分布の大きさ、位置が異なる。
- 9) バルジ試験金型の表面粗さを低くし、DLCを施して試験を行ったが、摩擦係数のば らつきが生じ、成形可能範囲の拡大および、成形時間の短縮など、いくつかの課題 は残したが、技術指針は得た。
- 10) 数値解析により、バルジ試験の成形可能範囲を推定したが、実験値よりも全体的に 押込み速度の低い範囲となった。しかし、成形範囲の傾向は同様であるため、押込 み速度を制御することにより、成形範囲の推定を行うことができる。

#### 参考文献

- 1) 日本マグネシウム協会:マグネシウム技術便覧(2000), 33, 55-65
- 2) 鎌土ほか:マグネシウム合金の成形加工技術の最前線, (2005), 337-338
- 3) 坂:結晶電子顕微鏡学, (1997), 87
- 4) 横山ほか:純マグネ押出材の引張・圧縮応力\_ひずみ特性の非対称性と変形双晶観 察,日本実験力学講演論文集 N0.3, (2003), 187-192
- 5) 日本マグネシウム協会:マグネシウム技術便覧, (2000), 105-106
- 6) 片岡ほか:DLC 膜の密着性とドライ絞り加工への適用,塑性と加工第 46 巻第 532 号, (2005), 412-4165)
- 7) ナノテック株式会社:DLC コーティング技術資料, (2007)
- 8) 熊谷泰: DLCコーティング膜の塑性加工への応用, 塑性と加工第 38 巻第 435 号, (1997-4),
- 9) 大矢根ほか:塑性加工学,(1974),124

#### 謝辞

本研究を遂行するにあたり,御指導,御鞭撻を賜りました直井久教授に深く感謝の意を申し上げます。

試験機、材料の加工等様々な御協力、貴重な御助言を頂きました高周波熱錬株式会社 生田様、桑原様、富田様に心から感謝の意を申し上げます。

材料の金属学的観点からのアドバイスや電子顕微鏡による観察をしていただきました 東京工業大学名誉教授の佐藤先生に心からの感謝の意を申し上げます。

実験に使用した供試材、試験材料の加工、御指導を頂きました中央工作室島貫様、富 田様、松波様、小山様、研究を進めるにあたり多くの協力をしてくれた佐藤君、山根君、 原君に非常に感謝しております。

この研究に協力してくださいました全ての皆様に心より御礼申し上げます。ありがとうございました。