

研究種目：若手研究(B)  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18760547  
 研究課題名（和文） マグネシウム合金の温間成形におけるスプリングバック特性の解明とその有限要素解析  
 研究課題名（英文） Springback characteristics of magnesium alloy sheets in warm forming and its finite element simulation  
 研究代表者  
 浜 孝之 (HAMA TAKAYUKI)  
 京都大学・大学院エネルギー科学研究科・助教  
 研究者番号：10386633

研究成果の概要：地球温暖化対策が喫緊の課題である昨今，マグネシウム合金は軽量化材料として大きな注目を集めている．本研究ではマグネシウム合金板のプレス成形時に問題となるスプリングバック（弾性回復による形状変化）について詳細な検討を行った．その結果，スプリングバックの低減には成形中に材料を加熱する方法が最も有効であることが明らかとなった．一方，理論的にスプリングバックを高精度に予測するには，温度変化に伴う弾性係数（ヤング率）の変化とともに結晶レベルの変形がスプリングバックに及ぼす影響を適切に考慮することが重要であることが明らかとなった．

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,800,000	0	1,800,000
2007年度	900,000	0	900,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	270,000	3,870,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・材料加工・処理

キーワード：マグネシウム合金，スプリングバック，引張曲げ成形，プレス成形，双晶，再結晶，有限要素法

## 1. 研究開始当初の背景

(1) マグネシウム合金（以下 Mg 合金）はリサイクル可能な軽量構造金属であり，かつ比強度や振動吸収性の高さから航空・自動車産業など様々な分野で適用が進められている．

(2) 六方最密構造を有する Mg 合金は，常温では非底面すべり系がほとんど活動しないため塑性加工性に乏しい．そのため材料を溶融

して加工する方法（鋳造加工）が主に用いられている．しかし生産性の向上や構造部材への適用拡大の観点から，プレス加工への適用が熱望されている．

(3) Mg 合金の非底面すべり系は温度上昇とともに活動しやすくなるという特長を持つ．そこで最近では金型と材料（Mg 合金板）を温めながら絞り成形を行う温間深絞り成形の研

究が活発に行われており、プレス加工への適用に向けた検討が進められている。一方プレス加工後のスプリングバック（弾性回復による形状変化）は成形品の形状精度に関わる重大な問題であるにも関わらず、Mg合金板のスプリングバック特性については以下の理由からほとんど明らかになっていない。

① 従来検討対象とされてきた深絞り成形ではスプリングバックがほとんど発生しないため、この現象についてほとんど検討されてこなかった。

② Mg合金は初期集合組織によって変形特性が大きく変わる。そのためスプリングバック特性の本質的な解明には従来の巨視的な視点だけでなくマルチスケールの視点（結晶レベルのミクロな変形特性に基づいてマクロな変形特性を解析する多階層的な手法）が不可欠である。しかしこれまで、マルチスケールの視点からMg合金のスプリングバック特性を詳細に研究した例はない。

③ 有限要素解析を用いたスプリングバック予測はプロセス設計において有効な手段である。しかし従来の構造用金属とは異なる変形特性を有するMg合金の成形解析技術は十分に確立されていない。その結果、有限要素解析によりスプリングバックの検討を行うレベルに達していないのが現状である。

## 2. 研究の目的

詳細な実験観察および巨視的・マルチスケールのアプローチによる有限要素解析技術を新たな開発することにより、Mg合金板の冷温間プレス加工におけるスプリングバック特性を体系的に解明することを最終目的として研究を遂行する。補助金交付期間内では、上記目的のうち本研究の基盤となる以下の点に注目して研究を推進する。

(1) 2次元引張曲げ成形を対象として、温度やしわ押さえ力などの加工条件がスプリングバックに与える影響を巨視的およびマルチスケールの視点から明らかにする。

(2) Mg合金板成形に関する有限要素解析プログラムを開発することにより、実験で得られた知見に対して理論的裏付けを行う。また同時に、より高精度な有限要素解析を行うために解決すべき解析手法上の課題を抽出する。

## 3. 研究の方法

### (1) 供試材

市販のMg合金板AZ31B（板厚0.8mm）を供試材として、そのスプリングバック特性を調査した。実験に先立って、供試材を350°、1.5時間の条件で焼鈍した。以下に研究方法の概要を示す。

### (2) 冷温間一軸引張試験

供試材の機械的性質を調べるため、常温から225°の範囲で一軸引張試験を行った。実験中の評点間距離をビデオ撮影することにより、画像解析から伸び量（公称ひずみ）を算出した。一方ヤング率の測定にはひずみゲージを用いた。

### (3) 冷温間引張曲げ成形実験

本研究で設計製作した引張曲げ成形実験金型を図1に示す。金型は差し込まれたヒーターによって加熱され、温度コントローラーを用いて金型温度を制御した。しわ押さえ力はバネを介して与えられ、成形中にはナットによって保持された。

試験片の寸法は50mm×220mmであり、市販の潤滑剤G-2576（日本工作油）を用いた。スプリングバック量は縦壁部の開き量によって評価した。

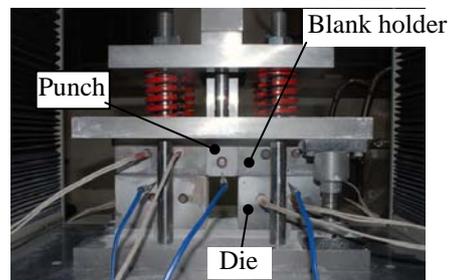


図1 引張曲げ成形実験装置

### (4) 組織観察

成形前後の供試材を組織観察した。一軸引張試験では破断後の試験片の破断部近傍について組織観察した。また引張曲げ成形実験では、成形品のダイ肩部および縦壁部の二カ所について、板の両面近傍を観察した。

### (5) 結晶塑性有限要素解析プログラムの開発

Mg合金成形を対象とした結晶塑性有限要素解析プログラムを新たに開発し、実験結果について理論的な考察を行った。また解析手法上で解決すべき課題を検討した。

## 4. 研究成果

### (1) 供試材の機械的特性

図2に一軸引張試験により得られた公称応力-公称ひずみ線図を示す。全伸びは温度が上がるほど向上している一方で、一様伸びは温度に依らずほぼ一定である。このことから、本実験では全伸びの向上は主に非一様伸びに起因すると考えられる。図3に温度と引張強さ、0.2%耐力、およびヤング率の関係を示す。引張強さと0.2%耐力は温度上昇とともにほぼ線形的に低下している。これは温度上昇に伴って六方最密構造の非底面すべり系が活動

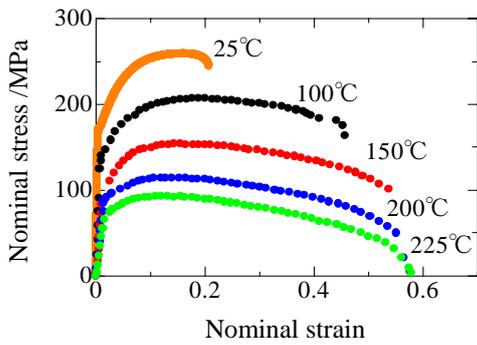


図2 各温度下における公称応力-公称ひずみ線図

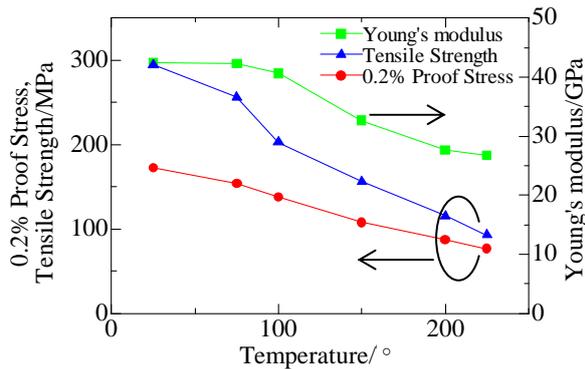


図3 温度と機械的性質の関係

しやすくなったためである。一方ヤング率は、常温から 100° まではほとんど変わらないのに対して、100° 以上の温度域では温度上昇とともに大きく低下している。以上の傾向は過去の文献で示された結果と概ね良く一致している。

一般的に、引張強さおよび 0.2%耐力の低下はスプリングバック量を減少させ、逆にヤング率の低下はスプリングバック量を増加させると理解される。従って機械的特性の観点から考えると、温度上昇に伴うスプリングバック量の変化は流動応力の低下とヤング率の低下の相関で決定されると考えられる。

引張試験後の試験片について組織観察を行った。紙面の都合上結果の掲載は省略するが、150° あたりから粒界に再結晶が生じ始め、200° 以上では全域に亘って再結晶が生じている様子が観察された。この結果は Mg 合金の再結晶温度は 150° 程度であるという従来の知見と一致する。この結果より、150° 以上での機械的特性値 (図 2, 3) の変化には再結晶の発生が大きく関与し、スプリングバックに与える再結晶の影響も考慮する必要があることが示唆される。

(2) 引張曲げ成形実験

① 縦壁部開き量

図 4 に各温度下におけるしわ押さえ力と縦

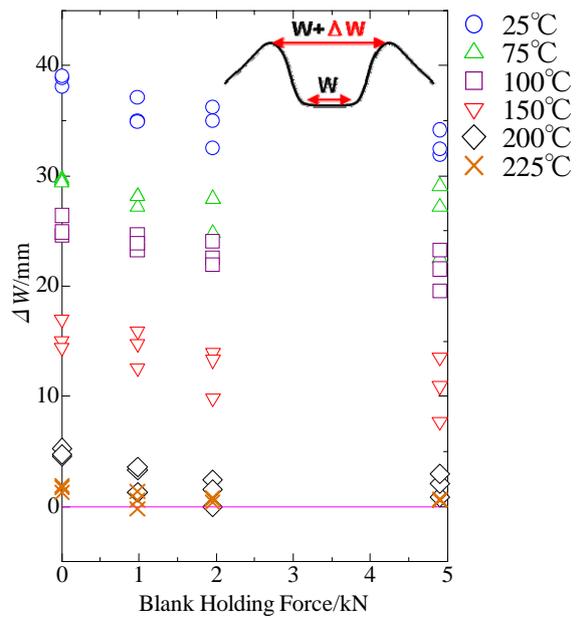


図4 各温度下におけるしわ押さえ力と開き量の関係

壁部開き量の関係を示す。ただし図中の  $\Delta W$  は開き量を表す。開き量は温度が上昇するにつれて大きく減少し、225° ではしわ押さえ力に依らず 3mm 以下である。また同様に、しわ押さえ力の上昇とともに開き量は減少している。しかし、温度上昇に比べてしわ押さえ力上昇による開き量の減少量は小さい。さらに、開き量の減少はしわ押さえ力が 2.0kN 程度で下げ止まり、しわ押さえ力をそれ以上上昇させてもほとんど変化しない。この結果より、スプリングバック量を減少させるにはしわ押さえ力に比べて温度を上昇させる方法が効果的であることが明らかになった。

② 縦壁部における逆曲げの観察

図 5 に常温および 225° で成形した時の下死点における縦壁部形状を示す。常温では逆曲げ変形は確認できないが、225° では顕著な逆曲げ変形が確認できる。本実験では、しわ押さえ力に依らず 150° 以上で明らかな逆曲げが観察された。

③ 考察

変形形状や機械的特性などの巨視的な視点から、スプリングバック量が図 4 のような推移を示す理由について考察する。

4(1) に示したように、温度変化に伴うスプリングバック量の変化は流動応力の変化とヤング率の変化の相関によって決定される。そこで定性的な傾向のみを知ることを目的として従来の定式化による弾塑性有限要素解析を行い、流動応力の変化とヤング率の変化のいずれがスプリングバックに対して支配的かを

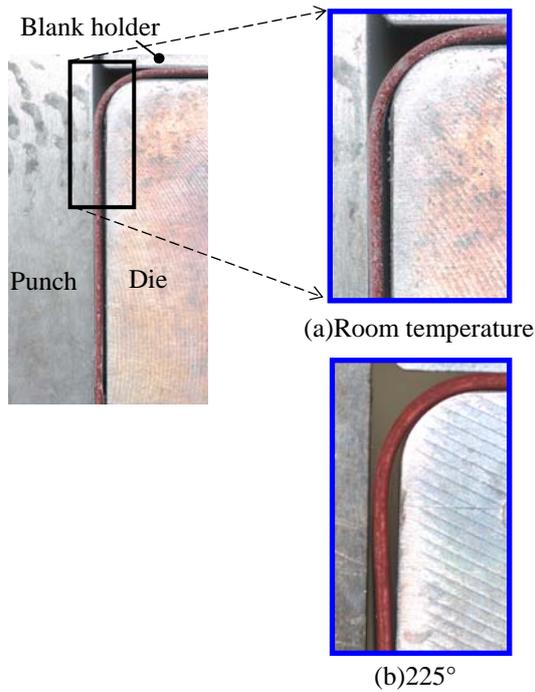


図5 下死点における縦壁部形状

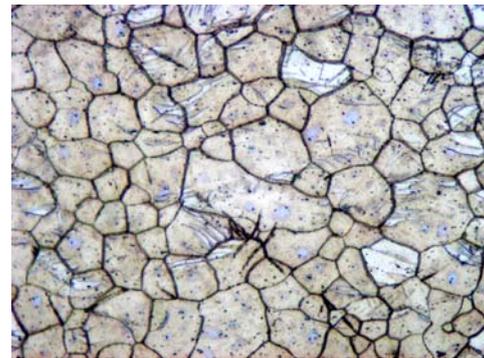
数値的に検討した。その結果、紙面の都合上詳細な結果は省略するが、ヤング率に比べて流動応力の変化が開き量に及ぼす影響が支配的であることが判った。このような理由から、図4に示すように温度の上昇に伴って開き量が減少したと考えられる。

一方、ヤング率変化の開き量に与える影響は定性的な傾向を左右するほどではないものの、決して無視できる大きさではなかった。これは図3に示したように、温度上昇に伴うヤング率の低下が大きく、225°では常温のおおよそ半分程度になるためである。従って数値解析によりスプリングバック量を定量的に予測するには、ヤング率の変化も適切に考慮することが重要である。

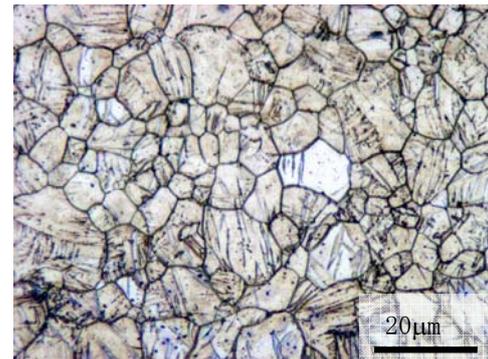
引張曲げ成形では、成形中に縦壁部で逆曲げ変形が発生するとスプリングバック量が減少することが知られている。これは逆曲げ変形によって縦壁部が除荷状態になるためである。従って、150°以上では開き量の減少には機械的特性の変化だけでなく逆曲げ変形の発生も大きく影響したと考えられる。

#### ④ 組織観察

続いて、結晶レベルでの変形がスプリングバックに及ぼす影響を調査するため、成形品の組織観察を行った。以下簡単のため、板材のblank holderと接触する側の面を表面、ダイと接触する側の面を裏面と呼ぶ。図6,7に常温で成形した場合のダイ肩部および縦壁部の組織写真を示す。裏面近傍は、ダイ肩部で圧縮変形を受けた後に縦壁部で引張変形を受ける。逆に表面近傍はダイ肩部で引張変形

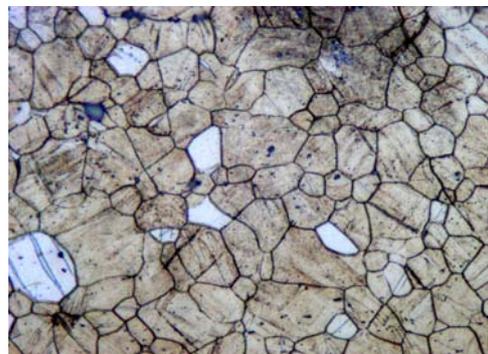


(a) 表面側 (引張側)

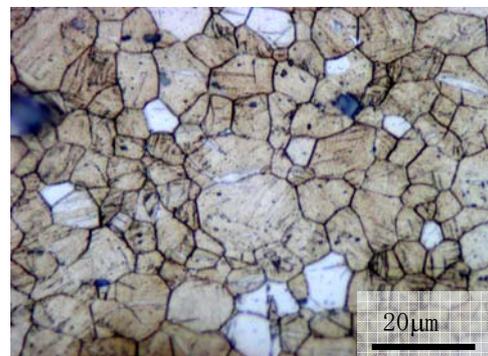


(b) 裏面側 (圧縮側)

図6 常温におけるダイ肩部の組織写真

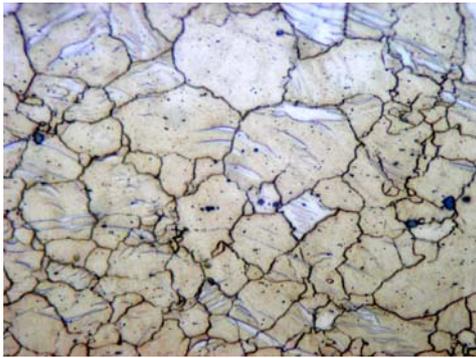


(a) 表面側 (引張→圧縮側)

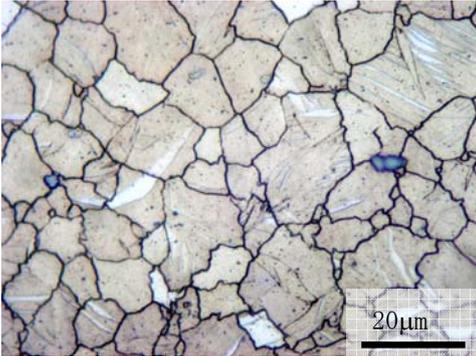


(b) 裏面側 (圧縮→引張側)

図7 常温における縦壁部の組織写真

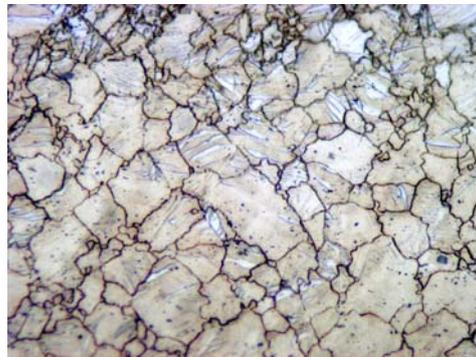


(a) 表面側 (引張側)

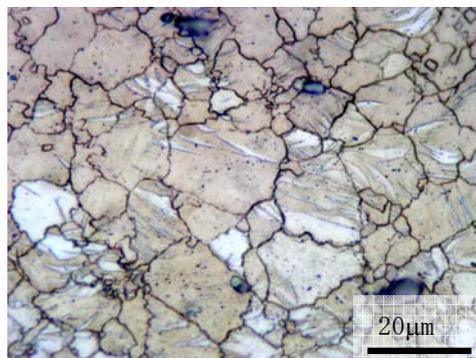


(b) 裏面側 (圧縮側)

図 8 225° におけるダイ肩部の組織写真



(a) 表面側 (引張→圧縮側)



(b) 裏面側 (圧縮→引張側)

図 9 225° における縦壁部の組織写真

を受け、その後縦壁部で圧縮変形を受ける。裏面では初期の底面集合組織の影響でダイ肩部において多くの双晶が活動している (図 6(b)). しかしその後縦壁部に至ると双晶の多くが消滅している (図 7(b)). 一方表面では、圧縮変形を受ける縦壁部でやはり双晶が活動している (図 7(a)). しかしその活動量は裏面ダイ肩部に比べると少ない。これより、双晶の活動量は予ひずみによって異なることが示唆される。

従来の研究より、双晶の活動は巨視的な応力-ひずみ関係に大きな影響を及ぼすことが知られている。図 6, 7 の結果から、常温での成形の場合板材の表裏面で双晶に起因して成形特性が大きく異なることが示唆される。従って数値解析によってスプリングバック予測を行う場合には双晶の成形性に及ぼす影響を適切に考慮することが不可欠である。

図 8, 9 に 225° で成形した場合の組織写真を示す。常温の結果とは異なり双晶はほとんど活動していない一方で、粒界近傍に再結晶の発生が確認できる。再結晶の数はダイ肩部に比べて縦壁部の方が多い。これは曲げ曲げ戻しを受ける縦壁部の方がより大きな塑性変形を受けるためと考えられる。この結果より、温間域で開き量が非常に小さいのは、前述の要因に加えて再結晶の発生も要因の一つとなったと考えられる。一方、縦壁部における再結晶の発生は表裏面では大きく変わらずにほぼ同様の傾向であったことから、温間域では常温に比べて表裏面での成形特性の違いが小さくなると考えられる。従ってスプリングバック予測が常温に比べて容易であることが示唆される。

#### ⑤ 結晶塑性有限要素解析プログラムの開発

Mg 合金成形を対象とした結晶塑性有限要素解析プログラムを新たに開発した。速度依存型の構成モデルを採用し、 $r_{min}$  法を用いて不釣り合い力の発散に注意しつつ陽的に時間積分を行った。双晶変形はすべり変形としてモデル化し、双晶に伴う結晶格子の回転は考慮しない。また各物性値には文献値を用いた。

開発したプログラムを用いて、常温を想定してさまざまな仮想初期集合組織の下で平面ひずみ引張・圧縮解析や純曲げ解析などを行ったところ、特に双晶の活動において実験と定性的に一致する結果が得られた。これより板の表裏面では双晶に起因して成形特性が大きく異なることも理論的に示された。一方繰り返し引張-圧縮解析や曲げ曲げ戻し解析など応力反転を伴う変形では、適切な解析結果を得ることができなかった。これは 4(2)④で示した応力反転に伴う双晶の回復 (消滅) がモデリングできていないためである。従って、結晶塑性有限要素法により引張曲げ成形解析を行うには、応力反転に伴う双晶変形の適切

なモデル化が重要であることが明らかとなった。

### (3)まとめと今後の展望

本研究で得られた主な成果を以下に示す。

- ① スプリングバック量の減少には、しわ押さえ力に比べて温度を上昇させる方法が非常に効果的である。
- ② 温度上昇に伴ってスプリングバック量が著しく減少するのは、流動応力の低下、縦壁部における逆曲げ変形の発生、再結晶の発生等の理由が複合的に作用するためである。
- ② 温度上昇に伴うヤング率の低下は、スプリングバック量変化に対して定性的にはあまり影響しないものの、定量的には大きな影響を及ぼす。従って数値解析によるスプリングバックの定量的な予測を行う場合は、ヤング率変化を適切に考慮することが不可欠である。
- ③ 常温での成形では、双晶の活動に起因して板の表裏で成形特性が大きく異なることが示唆された。従って高精度なスプリングバック予測を行うには、双晶の活動を適切にモデル化して解析に導入することが重要である。
- ④ 常温での Mg 合金成形を対象とした結晶塑性有限要素解析プログラムを開発した。曲げ曲げ戻し変形のような応力反転を伴う変形では、双晶変形の適切なモデリングが不可欠であることが示された。この知見は、組織観察から得られた知見③とも合致し、双晶変形がスプリングバック特性を理解する上で重要な因子であることが示された。

研究の背景でも示したように、これまで Mg 合金板のスプリングバックについてはほとんど研究されてこなかった。本研究ではその特性についてはじめて体系的な考察を行い、学術および実用の両面から有意義な知見を得た。一方、以下のような今後解決すべき課題が示された。

- ① そもそも、縦壁部における逆曲げ変形の発生メカニズムは未だ明らかとなっていない。そのため、温間域で逆曲げが発生しやすい理由も十分説明できないのが現状である。今後スプリングバック特性についてさらに理解を深めるためには、逆曲げ変形の発生メカニズムを明らかにすることが不可欠である。
- ② 双晶活動に伴う結晶回転の定式化は、これまでいくつかのモデルが提案されているものの未だ発展途上段階である。また、応力反転に伴う双晶の活動・回復（消滅）に関するモデル化も十分なレベルではない。今後有限要素解析により、常温での成形におけるスプリングバックを高精度に予測するためには、双晶変形の新しい数理モデルを構築することでこれら双晶に関わる諸問題を解決する必要がある。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 2 件)

① Takayuki Hama, Yuhta Kariyazaki, Keisuke Ochi, Hitoshi Fujimoto, and Hirohiko Takuda, Experimental Study on Springback of Magnesium Alloy AZ31B in Draw Bending, International Conference on Magnesium alloys and their applications, accepted.

② 浜孝之, 板津正明, 越智啓介, 藤本仁, 宅田裕彦, マグネシウム合金板のハット曲げ成形に及ぼす温度の影響, 第 59 回塑性加工連合講演会講演論文集, 75-76, 2008, 査読無。

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

浜 孝之 (HAMA TAKAYUKI)

京都大学・大学院エネルギー科学研究科・助教

研究者番号：10386633

### その他の研究協力者

京都大学大学院エネルギー科学研究科の大学院生 3 名