

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760697

研究課題名(和文) マグネシウム合金板の繰り返し塑性変形におけるマルチスケール変形特性

研究課題名(英文) Multiscale-deformation behavior of magnesium alloy sheet during in-plane cyclic loading

研究代表者

浜 孝之 (Hama, Takayuki)

京都大学・エネルギー科学研究科・准教授

研究者番号：10386633

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：マグネシウム合金は、輸送機器の軽量化を促進する素材として近年注目されているが、その変形挙動は十分解明されていない。本研究では、引張変形と圧縮変形を繰り返し与えたときの変形挙動を実験および数値解析により研究した。多様な条件下で変形挙動の考察を進めた結果、マグネシウム合金板の変形挙動には、双晶変形と呼ばれる結晶レベルの変形モードが非常に大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。またその知見に基づいて、変形挙動を結晶レベルの変形から予測するための理論モデルを新しく提案し、種々の変形挙動を高精度に予測することに成功した。これにより、マグネシウム合金板の変形挙動の理解に大きく貢献することができた。

研究成果の概要(英文)：Magnesium alloys are receiving a lot of attention in various industries because of an increasing demand for lightweight materials. However their deformation behavior has not been understood well. The present study aims at investigating the cyclic tension-compression behavior in magnesium alloy sheets both experimentally and theoretically. The experimental results under various loading conditions showed that the activity of twinning played a significant role in the work-hardening behavior. Based on the results obtained from the experiment, a new theoretical model was proposed to predict the deformation behavior based on the crystalline deformation. The simulation predicted the work-hardening behavior as well as the evolution of texture accurately, verifying the model. The above results brought new insight into the deformation behavior of magnesium alloy sheets.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料加工・処理

キーワード：マグネシウム合金板 繰り返し塑性 結晶塑性有限要素法 双晶変形 環境材料

1. 研究開始当初の背景

マグネシウム (Mg) 合金はリサイクル可能な軽量構造金属であり、航空産業や自動車産業など様々な分野で注目されている。最近では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。一方で、プレス加工後の除荷時に生じるスプリングバックは成形品の形状精度を決定づける重大な問題であるにも関わらず、Mg 合金板におけるスプリングバック特性はほとんど明らかになっていない。その主な理由は、Mg 合金では従来の構造用金属材料とは巨視的な変形挙動が大きく異なるため、従来の知見がそのままでは適用できないことによる。例えば過去の研究により、Mg 合金では引張変形時と圧縮変形時で加工硬化挙動が大きく異なることや、除荷時に強い非線形挙動が発現することなどが報告されている。しかしながらこれらの現象がスプリングバックに与える影響は明らかにされていない。

以上の観点から筆者らは、Mg 合金板のプレス成形におけるスプリングバック特性を体系的に明らかにし、その知見に基づいて数値解析による高精度なスプリングバック予測技術を開発することを最終目的として 2007 年度より本研究に着手した。

Mg 合金における上記のような特徴的な変形挙動は、六方最密構造を有することに由来する。六方最密構造はそもそも結晶レベルでの異方性が非常に強く、またそのため初期結晶方位分布が変形挙動に大きな影響を及ぼす。さらに、巨視的な塑性変形に与える双晶活動の影響も大きく、異方性をさらに強める要因となっている。

ところでプレス加工中に金属板は、曲げ曲げ戻しなどの繰り返し変形を受ける。そのため繰り返し塑性変形特性を理解することはスプリングバック特性を解明する上で極めて重要である。特に Mg 合金板では、前述のように加工硬化挙動が引張時と圧縮時で大きく異なるため、その繰り返し塑性変形特性は従来の構造用金属材料と大きく異なると考えられる。しかしながら、例えばこれまでの Mg 合金における繰り返し変形に関する関連研究は専ら材料学的 (ミクロな) 視点に基づくものであり、マクロな加工硬化挙動との関連はほとんど研究されていない。

以上より、「Mg 合金板のスプリングバック特性」を解明するために不可欠な要素の一つとして、双晶活動などのミクロな変形特性から「繰り返し変形」時のマクロな変形特性をシームレスに解明する本課題を着想した。

2. 研究の目的

交付期間では、スプリングバックに大きな影響を及ぼす「繰り返し負荷におけるマクロな変形特性」について、結晶レベルのミクロ情報に基づくマルチスケールの視点から解明することを目的とする。これまでの研究から、繰り返し引張/圧縮変形時のマクロな変形

特性には引張双晶の活動が大きく影響することが示唆されている。そこで本課題では、巨視的な加工硬化挙動に与える双晶活動の影響に注目して、実験および理論解析の両面からそのマルチスケール変形特性の解明を推進する。なお、適宜示している文献引用番号は、5 節の雑誌論文の番号に対応している。

3. 研究の方法

本研究で用いた実験および解析の具体的手法を以下に示す。

(1) 実験方法

実験では、主として AZ31Mg 合金圧延板 (板厚 0.8mm もしくは 1.0mm) を用いて (板面内での) 引張試験、圧縮試験、反転負荷試験などを行った。本研究では、座屈を伴うことなく薄板に面内の圧縮変形を与えるため、クシ歯ジグにより試験片の板厚方向へ圧縮力 (しわ抑え力) を与えながら実験を行った。実験装置の模式図を図 1 に示す。チャック部とクシ歯ジグを分割することで摩擦力の増大を防ぐ機構とし、またしわ抑え力を油圧ポンプで与えることで安定したしわ抑え力の付与を実現した。

また本研究では、二軸引張試験機の開発を行った。交付期間内では主に、試験機に指令信号を送るためのソフトウェア開発を推し進め、ほぼ指令通りに作動することを確認した。そして開発した試験機を応用して、圧縮予ひずみを与えた後に種々の方向へ引張変形を与えた時の交差効果を調査した。

さらに、変形後の双晶活動の様子を調査するため、光学顕微鏡による組織観察を行った。

(2) 解析方法

解析には、筆者らが開発を進めている結晶塑性有限要素法を用いた。本プログラムではひずみ速度依存型の構成式を採用し、また活動可能なすべり系および双晶系として底面すべり系、柱面すべり系、錐面すべり系、そして引張双晶系を考慮した。本研究では、反転負荷にも対応した解析プログラムの開発と解析を用いた繰り返し変形特性の解明に焦点を当てて研究を進めた。

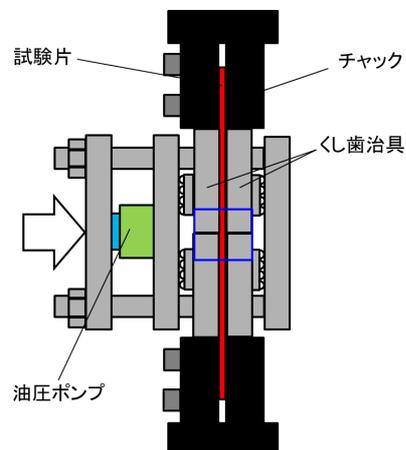


図 1 面内圧縮試験装置の模式図

4. 研究成果

(1) 実験条件の確立

面内圧縮試験に関する予備検討として、供試材に付与するしわ抑え力の最適化を行った。種々の条件で検討した結果、しわ抑えによる板厚方向応力を約 1MPa(供試材の降伏応力の約 0.6%)とすることで、座屈が発生せず、かつしわ抑え力による摩擦力を可能な限り抑えた実験が遂行できることがわかった。この実験条件により、最大ひずみ振幅 10% (±5%), 最大繰り返し数(サイクル数) 10 回程度まで面内繰り返し引張-圧縮変形を与えた際の応力-ひずみ線図の測定が可能となった。

(2) 面内繰り返し塑性変形特性

予ひずみを与えずに平均ひずみをゼロとして実験を行った例として、ひずみ振幅 6%の時の応力-ひずみ線図を図 2⁵⁾に示す。1 回目のサイクルでは以下のような傾向であった。圧縮時の降伏応力は引張時よりも小さい。圧縮では、負荷方向が反転するまで応力が徐々に上昇し続ける。そして負荷方向が引張に反転すると、二度の応力急上昇(S 字状の曲線)が発現する。

応力-ひずみ曲線には、サイクルを重ねるごとに以下のような変化が見られた。第一に、圧縮下での初期降伏時には急激な勾配変化が見られるが、2 サイクル目以降では勾配変化は緩やかである。また第二に、圧縮前期の勾配はサイクル数によらずほぼ同様であるが、圧縮後期の勾配はサイクル数の増加に伴って徐々に大きくなる。そして第三に、引張前期の勾配はサイクル数によらずほぼ一定であるのに対して、引張終期の勾配はサイクル数の増加とともに徐々に小さくなる。以上のように、引張と圧縮では繰り返し変形中の挙動が大きく異なることが明らかとなった。また結果は省略するが、この傾向はひずみ振幅によらずほぼ同様だが、定量的にみるとひずみ振幅が大きくなるとその変化もより顕著であった⁵⁾。

以上のような加工硬化挙動に与える双晶活動の影響を調査するため、繰り返し変形時

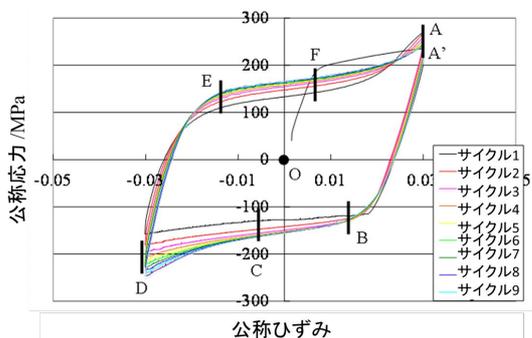


図 2 繰り返し変形時の応力-ひずみ線図 (ひずみ振幅 6%の場合)⁵⁾

の双晶面積率の推移を光学顕微鏡による組織観察から調査した。図 3⁵⁾に、繰り返し変形中の双晶面積率の推移を示す。観測点 O~F は図 2 中の記号と対応している。引張変形中 (O A) は双晶面積率がほとんど変化しないことから、双晶の活動は非常に小さいことが示唆される。その後応力が反転して圧縮変形が始まると (B D)、変形が進むにつれて双晶面積率が上昇する。これより、圧縮中は双晶の活動が活発なことがわかる。そしてその後再び引張に転じると (D A')、双晶面積率は徐々に低下する。これは、圧縮中に活動した双晶が元の方位に戻る現象(双晶回復)が発現したためと考えられる。以上の傾向は定性的にはサイクル数によらず同様である。サイクル数が増すにつれて双晶面積率は全体的に上昇しているが、サイクル 5 以上では上昇は見られなかった(詳細な結果は諸略する)⁵⁾。この結果より、双晶の活動量は 5 サイクル目程度までは増加し続けるが、それ以降では収束することが示唆される。

以上の結果から、図 2 で見られる加工硬化挙動に及ぼす双晶活動の影響は以下のように考えられる。まず、圧縮後期の加工硬化挙動については以下のとおりである。サイクル数が小さい間は双晶の活動が活発なため、勾配も小さい。しかしながらサイクル数が大きくなると双晶活動が収束するため、それに伴って代わりにすべり変形が活発になり、その結果勾配が上昇したと考えられる。

一方、引張後期の加工硬化挙動については以下のように考えられる。引張前期では双晶回復が活発なため勾配は小さいが、双晶回復の収束とともに二度目の応力急上昇が始まる。サイクル数が大きくなるにつれて引張開始時(点 D)の双晶面積率が大きくなるため、双晶回復に要するひずみ量が大きくなる。そのため、反転後に二度目の応力急上昇が開始するまでのひずみ域が拡大し、結果としてサイクル数の増加に伴い引張終期での勾配が低下したものと考えられる。

以上の結果から、当初の予想どおり、繰り返し変形に及ぼす双晶活動の影響は非常に

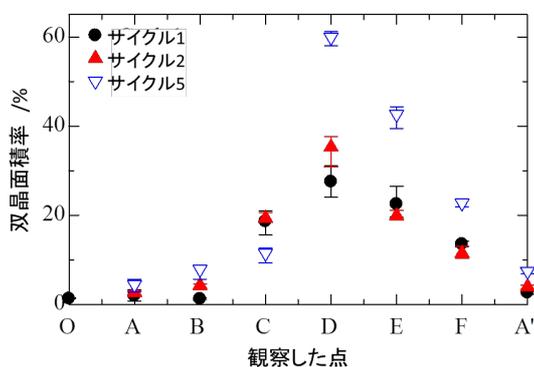


図 3 繰り返し変形時の双晶面積率の推移⁵⁾

大きいことが示唆される。そこでこの点についてより詳細に調査するため、圧縮予ひずみを与えた後に繰り返し変形を行った。圧縮変形中の双晶活動は引張変形中に比べて大きいことから、圧縮予ひずみを与えることで双晶活動の推移が変化し、その結果加工硬化挙動も大きく変化することが考えられる。

図 4¹⁾に圧縮予ひずみを付与後に繰り返し変形を与えた場合の結果を示す。ここでは例として、圧縮予ひずみが-5%、ひずみ振幅が6%の場合の結果を示す。圧縮後期では、予ひずみがない場合(図 2)に比べてサイクル数の増加に伴う勾配の上昇が明らかに大きい。一方引張後期では、予ひずみがない場合にはS字状の曲線が発現していたのに対して、圧縮予ひずみを付与した場合には見られない。そのため、図 2 で見られたようなサイクル数の増加に伴って引張後期の勾配が低下する傾向は見られない。なお結果は省略するが、圧縮予ひずみが小さい場合はS字状の曲線が発現し、全体的な傾向は予ひずみがない場合とほぼ同様であった。

続いて、予ひずみによって引張後期の加工硬化挙動が変化するメカニズムを考察する。前述のように予ひずみが大きくなるとS字状の曲線が発現しなかった。これは、2度目の応力急上昇が発現する前に引張から圧縮へ応力反転したためであり、もし応力反転しなければ条件に依らずS字状の曲線が発現すると考えられる。そこでこの仮説を検証するため、圧縮予ひずみを付与後に破断するまで引張変形を与え続ける実験を行った。

その結果を図 5¹⁾に示す。仮説どおり、圧縮予ひずみの大きさに依らずS字状の曲線が発現している。この結果より、繰り返し変形においてS字状の曲線が発現するかどうかは、ひずみ振幅や予ひずみ量などの加工条件によって決まることが示唆される。また従来の研究より、2度目の応力急上昇が始まるまでの変形は双晶回復が支配的であると考えられることから、S字状曲線が発現は圧縮時の

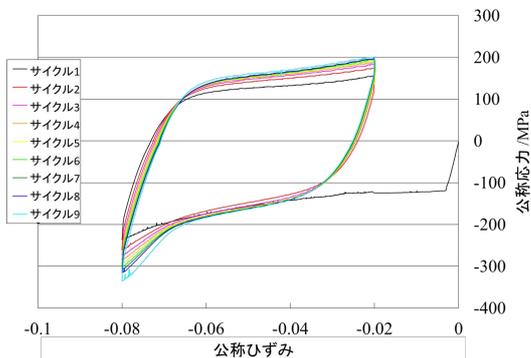


図 4 圧縮予ひずみ負荷後の繰り返し変形時の応力-ひずみ線図(圧縮予ひずみ-5%、ひずみ振幅6%の場合)¹⁾

双晶活動量および引張時の双晶回復量によって決定され、またそれらの関数として定式化可能なことが示唆される。

(3) 結晶塑性有限要素法プログラムの開発

(2)で示した実験結果から明らかなように、反転負荷を伴う Mg 合金板の変形挙動を結晶塑性有限要素法により予測するためには、双晶回復を考慮することが不可欠である。そこで本研究では、過去に提案された双晶活動モデルを発展させることで新しい双晶回復モデルを開発した^{2), 4)}。紙面の都合上、モデルの詳細については省略する。各種負荷経路における応力-ひずみ曲線の実験結果および解析結果の例を図 6⁴⁾に示す。いずれの結果においても、実験結果で見られる特徴的な加工硬

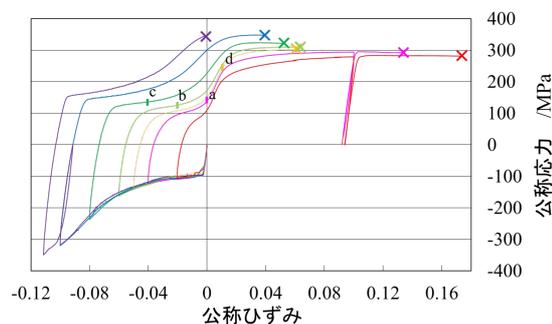


図 5 種々の圧縮予ひずみ負荷後の反転負荷試験結果¹⁾

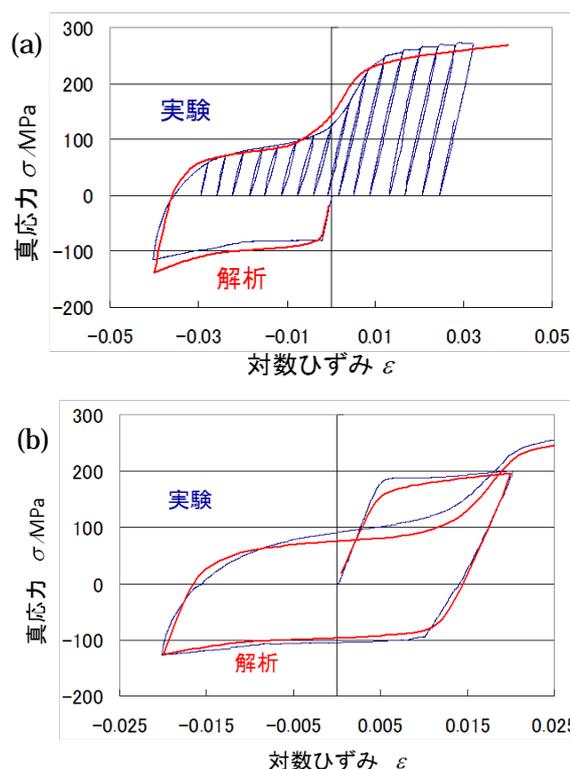


図 6 各種負荷経路における応力-ひずみ曲線の実験結果と解析結果。(a)-4%圧縮-引張、(b)2%引張-4%圧縮-引張⁴⁾

化挙動を良好に再現している。

続いて反転負荷時の加工硬化挙動を結晶レベルの微視変形から検討する。図7(a)⁴⁾に、予ひずみ-4%付与後に引張変形を与えた際の、各すべり系および双晶系の相対活動度推移を示す。圧縮時には、双晶活動が最も活発であり、次いで臨界分解せん断応力の低い底面すべり系の活動が活発である。その後引張に反転すると、2度目の応力急上昇が開始するまでは双晶回復が最も活発であるが、その後双晶回復は急激に活動を弱めて代わりに柱面すべり系の活動が活発になる。そして2度目の応力急上昇が完了した以降は、柱面すべり系の活動が最も活発であり双晶回復はほとんど見られない。この傾向は単調引張時の傾向と同様である。以上のように、反転負荷時に見られるS字状の曲線は双晶の活動度からほぼ説明できることが明らかとなった。

続いて、圧縮予ひずみの大きさが応力反転後の加工硬化挙動に及ぼす影響を検討するため、予ひずみを-10%とした場合の相対活動度を図7(b)に示す。この場合、圧縮変形中の双晶回転により、引張変形開始時には結晶方位が大きく分散している。そのため応力反転後も早期から双晶回復、底面すべり系のほか非底面すべり系の活動が見られる。また、双晶回復の活動は予ひずみが小さい場合に比べて緩やかに低下し、それに伴い非底面すべり系の活動も緩やかに活発化する。その結果、2度目の応力急上昇が開始する際には、柱面すべり系だけでなく錐面すべり系や双晶なども活動している。以上のように、予ひずみが

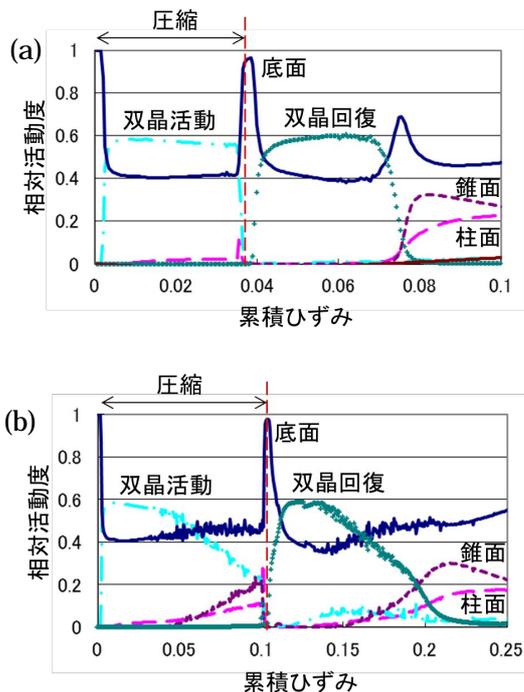


図7 反転負荷時の相対活動度の推移。(a)-4%圧縮-引張、(b)-10%圧縮-引張。⁴⁾

大きくなると双晶回復支配型の変形モードからすべり変形支配型の変形モードへの移行が緩やかになるため、結果としてS字状曲線の変化も緩やかになると考えられる。

また詳細は省略するが、開発したプログラムにより除荷時の非線形挙動^{2),3),7)}や等塑性仕事面の発展についても実験結果を良好に再現し⁶⁾、またその変形メカニズムを結晶レベルの微視変形の観点から明らかにした。

(4) 交差効果

これまでの結果から、応力反転後には双晶回復が加工硬化挙動に大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。一方これまでは初めの負荷方向と反転後の負荷方向が同軸上の場合を対象としていたが、負荷方向が同軸上にない場合には双晶回復の仕方が変化し、加工硬化挙動にも大きく影響することが考えられる。そこでこれを詳細に調査するため、本研究で開発した二軸引張試験機を応用して交差効果を調査する実験を行った。具体的には、圧縮予ひずみを与えた試験片から種々の方向へ小型試験片を切り出し、引張変形を与えた時の交差効果を調査した。

図8に予ひずみが-3%の場合の再負荷時の応力-ひずみ線図を示す。図中の角度は圧縮時と引張時で負荷方向がなす角であり、0°は図5に示した結果と対応する。またRD、TDは圧延方向、圧延直角方向をそれぞれ表す。この結果より、角度が大きくなるとS字状の加工硬化挙動は不明瞭になり、45°以上では全く発現しないことが明らかとなった。

その変形メカニズムを結晶塑性有限要素法により検討した。詳細な結果は省略するが、90°では0°に比べて明らかに双晶回復の活動が小さく、またその変形モードは通常の引張変形に非常に近いことがわかった。この結果から、再負荷時の角度が大きくなるにつれて双晶回復しにくくなり、その結果通常の引張変形と同様の変形モードに近づくためS字状の曲線が発現しなかったと考えられる。こ

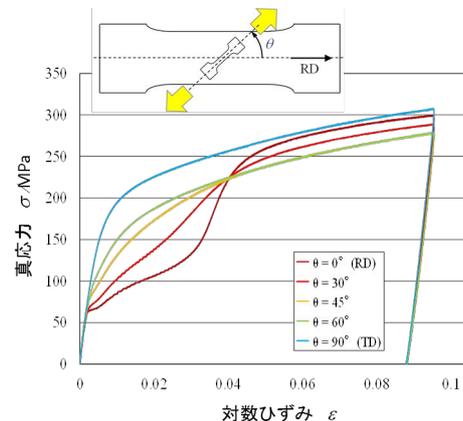


図8 圧縮予ひずみ付与後に種々の方向に引張変形を与えたときの応力-ひずみ曲線。

のように、双晶の活動は交差効果にも非常に大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。

(5)まとめ

本研究では、まず Mg 合金板の繰り返し変形における変形特性を調査するための実験および解析ツールを開発した。特に解析ツールとしては、双晶回復をモデル化した全く新しい結晶塑性有限要素法解析プログラムを開発し、その妥当性を示した。そしてこれらツールを駆使することで、Mg 合金板の変形メカニズムを結晶レベルの微視変形、特に双晶活動の観点から明らかにした。これにより、マグネシウム合金板における繰り返し変形時の変形挙動の理解に大きく貢献することができた。

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)

[雑誌論文](計 9 件)

Hama, T., Nagao, H., Kuchinomachi, Y., and Takuda, H.: Effect of Pre-strain on Work-Hardening Behavior of Magnesium Alloy Sheets upon Cyclic Loading, *Materials Science and Engineering A*, 591(2014), 69-77. 査読有。

<http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2013.10.083>

Hama, T., Kitamura, N., and Takuda, H.: Effect of twinning and detwinning on inelastic behavior during unloading in a magnesium alloy sheet, *Materials Science and Engineering A*, 583 (2013), 232-241. 査読有。

<http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2013.06.070>

Hama, T., Kitamura, N., Fujimoto, H., and Takuda, H.: Crystal plasticity finite-element simulation of deformation behavior during unloading under compression in a Magnesium alloy sheet, *Key Engineering Materials* 554-557 (2013), 71-76. 査読有。
<http://www.scientific.net/KEM>

Hama, T., and Takuda, H.: Crystal plasticity finite-element simulation of deformation behavior in a magnesium alloy sheet considering detwinning, *Steel Research International*, Special Edition, (2012), 1115-1118. 査読有。

<http://www.materialsvIEWS.com/metal-forming-2012/>

Hama, T., Kariyazaki, Y., Hosokawa, N., Fujimoto, H., and Takuda, H.: Work-hardening behaviors of magnesium alloy sheet during in-plane cyclic loading, *Materials Science and Engineering A*, 551 (2012), 209-217. 査読有。

<http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2012.05.009>

Hama, T., and Takuda, H.: Crystal Plasticity Finite-Element Simulation of Work-Hardening Behavior in a Magnesium Alloy Sheet under Biaxial Tension, *Computational Materials Science*, 51 (2012), 156-164. 査読有。

[10.1016/j.commatsci.2011.07.026](http://dx.doi.org/10.1016/j.commatsci.2011.07.026)

Hama, T., Ochi, K., Kitamura, N., Fujimoto, H., and Takuda, H.: Unloading behaviour of a magnesium alloy sheet under various loading paths, *Steel Research International*, (2011), Special Edition, 1054-1059. 査読有。

<http://www.materialsvIEWS.com/the-10th-international-conference-on-technology-of-plasticity-ictp-2011/>

[学会発表](計 24 件)

Hama, T., Hosokawa, N., and Takuda, H.: Accurate parameter identification for crystal plasticity finite-element analysis in a magnesium alloy sheet, *The 9th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Forming Processes (NUMISHEET 2014)*, Melbourne, Australia, January, 2014, 692-695, CD-ROM.

浜孝之, 口ノ町陽太, 藤本仁, 宅田裕彦: マグネシウム合金板における反転負荷時の加工硬化挙動に及ぼす予ひずみの影響, 第 64 回塑性加工連合講演会講演論文集, (2013-11), 459-460.

浜孝之, 宅田裕彦: マグネシウム合金板における反転負荷時の加工硬化挙動に関する結晶塑性有限要素解析, 第 64 回塑性加工連合講演会講演論文集, (2013-11), 283-284.

浜孝之, 細川尚宏, 眞山剛, 宅田裕彦: ランダム方位を有するマグネシウム合金板の結晶塑性有限要素解析, 平成 25 年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2013-6), 39-40.

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・准教授

研究者番号: 10386633