

平成 30 年 6 月 20 日現在

機関番号：32657

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26420746

研究課題名(和文) マグネシウム合金の非対称繰返し曲げ加工による高機能化

研究課題名(英文) High functionalization of magnesium alloy by repeated asymmetric roll bending process

研究代表者

柳田 明 (YANAGIDA, Akira)

東京電機大学・工学部・教授

研究者番号：20432065

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：六方晶金属はすべり系が制限されているため冷間成形性が悪くマグネシウム合金の展伸材は利用が制限されている。成形性の改善には底面集合組織のランダム化必要とされるため、繰返し曲げ加工をAZ31マグネシウム合金に実施した。対称曲げに比べて上下ロールの径が異なる非対称曲げは焼鈍し後に高い成形性を示した。EBSD解析により連続非対称曲げ加工することで{0001}底面集合組織が弱化されRD方向へランダム化される傾向が確認でき、板厚中心部においても双晶変形が多く発現させることができるため180℃で12時間焼鈍しすることで、加工前の板厚中心硬さを維持しつつ、成形性の向上を図ることが出来た。

研究成果の概要(英文)：The use of magnesium alloy wrought material is limited because of its poor formability at room temperature due to their hexagonal close packed crystal structure, where there are limited operative slip systems. Dispersion of the basal texture is effective to improve the formability. A repetitive roll bending is conducted to AZ31 magnesium alloy. The improvement of cold formability in a continuous repetitive asymmetric roll bending by different roll diameter and low temperature annealing is more effective than that of asymmetric one. From the EBSD analysis, the continuous asymmetric bending process could weaken the basal texture of {0001} and randomized it in the RD direction, and deformation twins were observed more frequently even at the central part of plate thickness after subsequent 180°C annealing than that of symmetric one. It is supposed that asymmetric roll bending can apply strain effectively at the center of the thick of the sheet due to change of neutral axis of bending.

研究分野：塑性加工

キーワード：繰返し曲げ加工 変形双晶 成形性 EBSD Mg合金

1. 研究開始当初の背景

マグネシウム合金は優れた比強度・比剛性特性を示すため、軽量構造材料として注目され、マグネシウム鑄造材を中心として、家電製品筐体や自動車部材への適用が拡大している。しかしながら、室温での高い変形強度を有するものの破壊強度は低いため、常温での成形性が乏しい。このために、構造用展伸材の使用はあまり拡大していない。常温での低い成形性は、マグネシウム合金圧延材では、底面すべりが加工時に優先的に生じるため、底面{0001}が圧延板面に平行に配向した底面配向集合組織が形成されるためである。これらを改善するには、板厚方向への変形を容易にする集合組織制御、1) 板面に平行に配向する六方晶の底面を傾けること、2) 全体的に配向を弱める(ランダム化)があげられる。前者に関しては、繰返し曲げ加工と焼鈍や、高温圧延(450℃)と焼鈍の組み合わせが有効である。ランダム化に関しては、恒温(200℃)圧延と高温焼鈍(500℃)により実現可能であるとの報告があり国内外で多くの研究がなされている。

2. 研究の目的

生産性とコストを考えると(a)のロール曲げ加工を用いて、組織制御を行うことが最も実用的な手法だと考えられる。ロール曲げ加工法で曲げひずみ(ロール直径、ロール押し込み量)や加工速度などの加工プロセス条件が集合組織や成形性の変化に及ぼす影響を調査した研究は見られない。1パスあたりの加工量や曲げ回数、非対称曲げ、加工後熱処理が機械特性、内部組織、成形性に及ぼす影響を定量的に調査する。

3. 研究の方法

マグネシウム合金の冷間成形性を向上させるため、対称曲げおよび非対称繰返し曲げ加工を行う。焼鈍の後に機械的特性の測定(引張試験、硬さ試験)、光学顕微鏡による組織観察を行う。EBSD解析は必要に応じて適宜行う。成形性はエリクセン試験、温間V曲げ試験により評価する。曲げ回数、押し込み量、ロール径などを変化させた試験を行い、成形性が向上する臨界条件を見出す。

また、本助成金を用いて引張試験用の伸び計および、組織観察用の試料準備のための研磨装置を購入した。

4. 研究成果

供試材には板厚 1.0 mm のマグネシウム合金 AZ31 圧延材を使用した。試験材は圧延方向に沿って長さ 250 mm×幅 80 mm にシャリングにより切断した。繰返し曲げ加工を行う前に 400℃ で 1 時間の焼鈍しを行った。

繰返し曲げ加工に用いたロール曲げ加工機を図 1 に示す。上ロール 3 本、下ロール 4 本とし、上ロール径 28 mm または 32 mm、下ロール径 32 mm、ロールピッチ 40 mm、上ロ

ールの高さを調整することで曲げ加工量を調節できる。ロール速度 110 mm/s とした(上下の回転数は同じ)。図 2 に押し込み量 δ の定義を示す。押し込み量は上下のロールで試験材を挟み込み、試験材が水平な状態を基準とし、そこからの上ロールの締め込み量とする。押し込み量及び加工回数を表 1 に示す。7 本のロール通過後を 1pass とする。 $\delta=3.5\text{mm}$ とし、幾何的に求められる 1pass あたりの表層のひずみは、0.067 となる。加工後に再度 400℃ で 1 時間、180℃ で 12 時間、160℃ で 12 時間の焼鈍し処理を行い、加工後の焼鈍しの影響を調べた。160℃ -12 時間の焼鈍しでは、双晶組織に変化を与えないことが報告されている¹⁾。押し込み量 $\delta=2$ の条件も実施したが δ は大きいほど組織形成に有効であったので本報告では $\delta=3.5$ に関して示す。

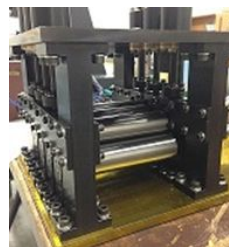


図1 試験機概観

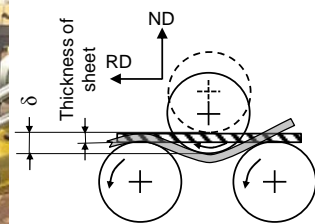


図2 押し込み量の定義

(1) 表面硬さ

連続ロール曲げ加工した試験片の板厚表面硬さを測定した。図 3 に同径ロールを用いた連続対称曲げ加工、図 4 に異径ロールを用いた連続非対称曲げ加工のビッカース硬さ試験の結果を示す。連続ロール曲げ加工後の板厚表面の硬さを、対称曲げ加工および非対称曲げ加工にて比較した。また加工後の焼鈍し温度の違いによる変化を調査した。

加工後の焼鈍し温度の違いで、表面硬さは大きく異なる結果となった。加工後に 400℃ -1 時間と 180℃ -12 時間の焼鈍し処理を行ったものは、大幅に表面硬さが低下する傾向にあるが、160℃ -12 時間の焼鈍し処理では加工前の生材と同程度のビッカース値であるため、焼鈍しによる表面硬さの低下は見られなかった。これは、400℃ -1 時間と 180℃ -12 時間の焼鈍し処理では、表層部付近で再結晶が起こったために表面硬さが低下したと考えられる。一方で、160℃ -12 時間の焼鈍し処理では、マグネシウム合金の再結晶温度に達していない低温焼鈍しであるために、連続ロール曲げ加工による加工硬化を維持できていると考えられる。また、非対称曲げ加工の方が、対称曲げ加工より、押し込み量が同じでも異周速となるため、せん断変形が大きくなりロール曲げ加工の効果を得やすいことが確認できた。また、3pass 以降ではすべての加工条件において、表面硬さの大きな変化は見られなかった。

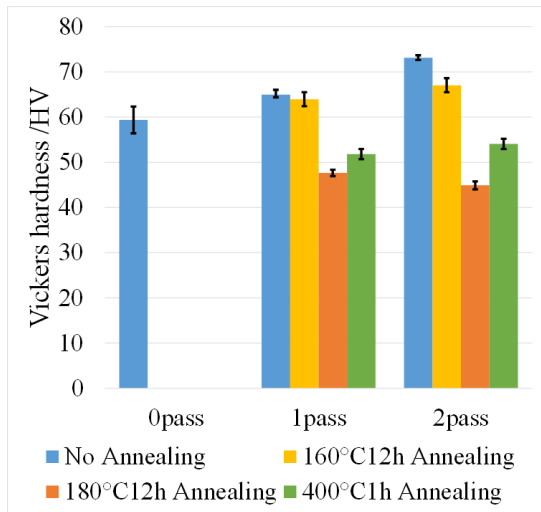


図3 表面硬さ(同径ロール)

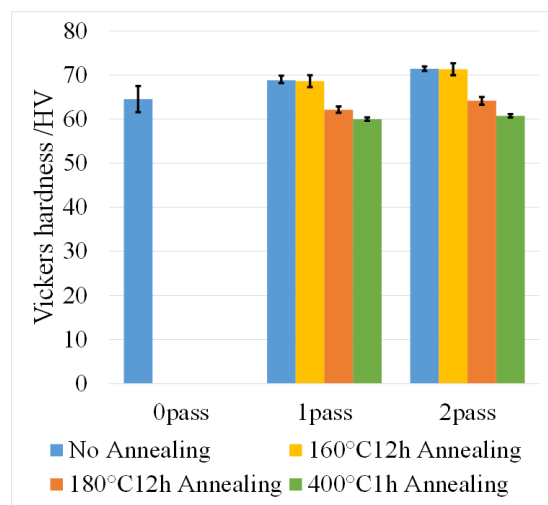


図5 TD断面硬さ(同径ロール)

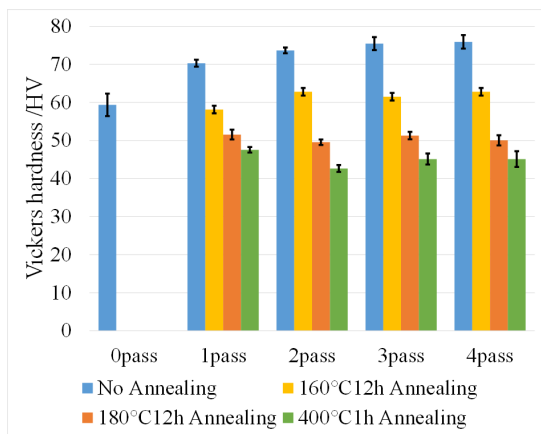


図4 表面硬さ(異径ロール)

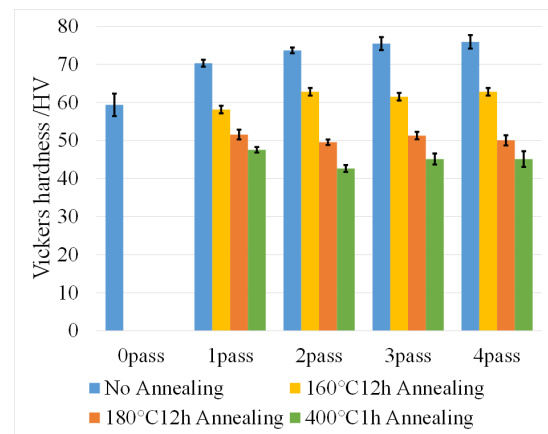


図6 TD断面硬さ(異径ロール)

(2)TD 断面硬さ

連続ロール曲げ加工した試験片の板厚 TD 断面の硬さを測定した。図5に同径ロールを用いた連続対称曲げ加工，図6に異径ロールを用いた連続非対称曲げ加工のビッカース硬さ試験の結果を示す。連続ロール曲げ加工後の板厚 TD 断面の硬さを，対称曲げ加工および非対称曲げ加工にて比較した。また，加工後の焼鈍し温度の違いによる変化を調査した。

TD 断面硬さでは，加工後の焼鈍し温度の違いによる硬さの変化は，表面硬さに比べて少ないことがわかる。特に，160 -12 時間の焼鈍し条件では加工後の焼鈍し処理による板厚 TD 断面の硬さの低下はほとんど見られず，連続ロール曲げ加工による加工硬化を維持できているが，3pass, 4pass においては低下した。また，400 -1 時間，180 -12 時間の焼鈍しではわずかに板厚 TD 断面硬さが低下しているが，表面硬さ結果と比べると硬さの低下量は極めて少ないことが確認できる。また，加工回数を増やしても低下は見られなかった。したがって，連続ロール曲げ加工後の焼鈍しによる影響は，同径ロールを用いた対称曲げ加工および異径ロールを用いた非対称曲げ加工とともに，板厚中心部における TD 断面硬さには影響が少ないことがわかる。

(3)エリクセン試験

連続ロール曲げ加工した試験片の成形性を調査するためにエリクセン値を測定した。図7に同径ロールを用いた連続対称曲げ加工，図8に異径ロールを用いた連続非対称曲げ加工のエリクセン試験結果を示す。連続ロール曲げ加工後の成形性を，対称曲げ加工および非対称曲げ加工にて比較した。また，加工後の焼鈍し温度の違いによる変化を調査した。ロール曲げ加工によって硬さが上昇したことで，加工後のエリクセン値は低下する傾向にあるが，加工後に焼鈍し処理を施すことで，エリクセン値は向上した。また，焼鈍し処理後のエリクセン値は対称曲げ加工よりも非対称曲げ加工の方が高い値となった。400 -1 時間の条件では，硬さの低下に伴いエリクセン値が大きく増加したことが確認でき，これは表層部において回復・粒成長が起こったことに起因していると考えられる。180 -12 時間および 160 -12 時間焼鈍しでは，加工前の生材と同程度のビッカース硬さを維持しつつエリクセン値は向上しているため成形性の向上が確認できる。3pass 以降ではすべての条件においてエリクセン値は低下する傾向にあることがわかる。これは加工回数の増加に伴う疲労により内部欠陥が入ったことによるものと考えられる。

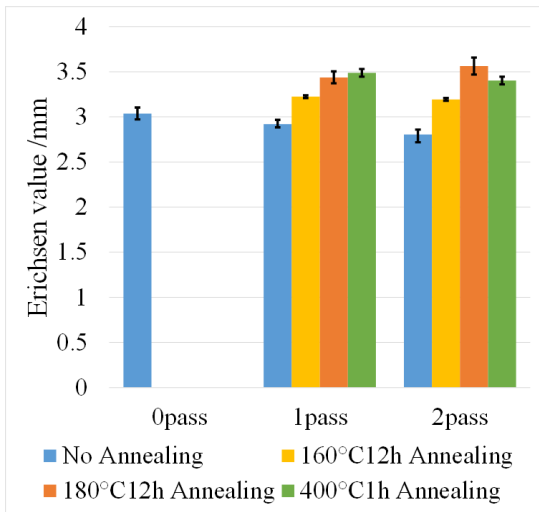


図7 エリクセン値(対称ロール)

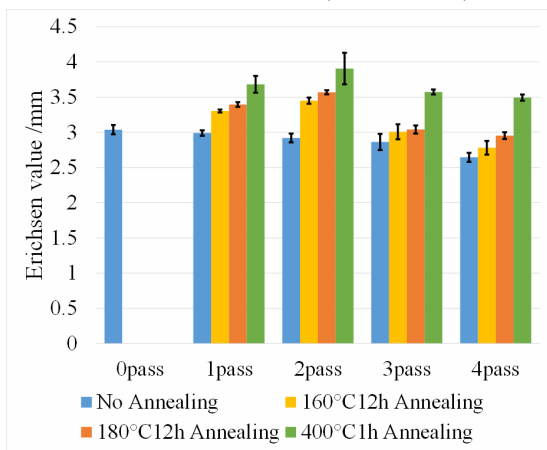


図8 エリクセン値(異径ロール)

(4)引張試験

異径ロールを用いた連続非対称曲げ加工による試験結果を示す。図9に1pass加工時の各条件、図10に2pass加工時の各条件での引張試験結果を示す。

引張強さは熱処理を施すと低下する傾向にあることがわかる。400℃-1時間焼鈍しでは50[MPa]程度の低下が見られるが硬さ試験で見られたほどの大きな違いはない。伸びに関しては180℃-12時間焼鈍しでの数値がそのほかの条件と比べて大きいことがわかる。また、1pass時よりも2pass時で伸びが向上していることがわかる。熱処理無し、160℃-12時間、180℃-12時間焼鈍しでは約100[MPa]の応力域で荷重が上がらなくなるが、これは双晶の数が減少(de-twinning)することに起因すると考えられる。

(5)V曲げ試験

異径ロールを用いた連続非対称曲げ加工のV曲げ試験結果を示す。表1に1pass加工時、表2に2pass加工時の各条件でのV曲げ試験結果を示す。表においてArは生材、NAは焼鈍し無しを示す。

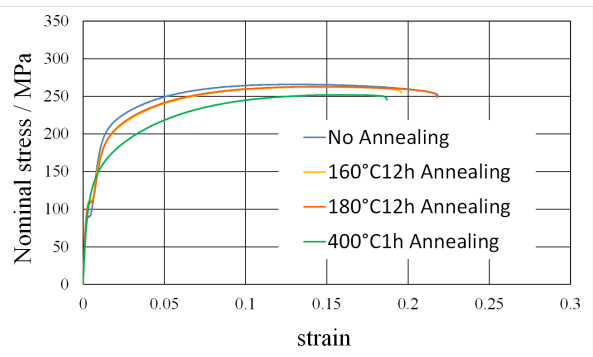


図9 引張試験(1pass)

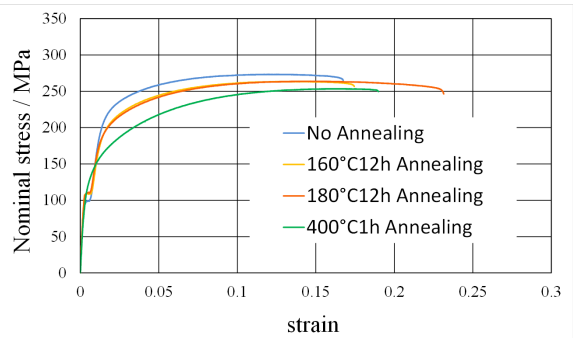


図10 引張試験(2pass)

100における試験結果では、すべての条件において割れが生じてしまったが、150における試験結果では2passでの180℃-12時間焼鈍し、1passおよび2passでの400℃-1時間焼鈍しの条件において、R=2[mm]という厳しい条件での90°V曲げ成形が可能となった。よって、180℃-12時間焼鈍しにおいて2pass時の方が1pass時よりも曲げ加工性が向上していることがわかる。

表1 V曲げ試験結果(1pass)

	Ar	NA	160°C/12hA	180°C/12hA	400°C/1hA
100					○
150					

表2 V曲げ試験結果(2pass)

	Ar	NA	160°C/12hA	180°C/12hA	400°C/1hA
100				○	○
150					

(6)組織観察

2pass非対称曲げの板厚中心部の結晶組織焼鈍写真をそれぞれ図11(a)~(d)に示す。

(b)では非対称曲げによるひずみ量が増大したために、全体的に完全に再結晶した結晶粒が観察され、平均結晶粒径も大きくなり、変形双晶は見られなかった。(c)および(d)では、粒成長や再結晶が起こらずに、繰返し曲げにより生成された変形双晶を消失させずに加工組織を回復させることが出来ている。このことから対称曲げではひずみが導入されにくい板厚中心部において変形双晶の発生が確認され、非対称曲げによる変形双晶の発生により底面組織の強度低下が可能であるこ

とが示唆される．また，加工回数の違いによる変化はあまり確認できなかった．

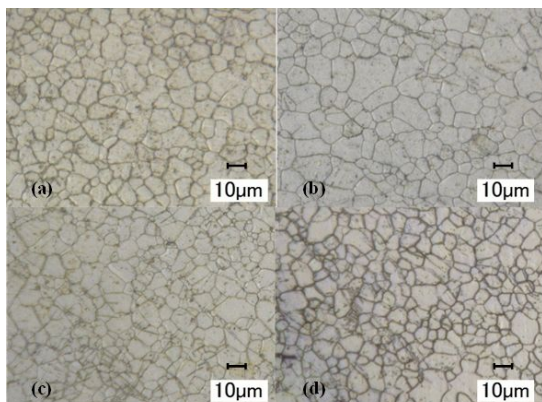


図 11 組織観察結果(2pass)
(a)焼鈍し無し，(b) 400 °C -1 時間，(c) 180 °C -12 時間焼鈍し，(d) 160 °C -12 時間焼鈍し

(7)EBSD 解析

走査電子顕微鏡による結晶解析の手法である EBSD(Electron Back Scatter Diffraction Patterns)法を用いて，結晶方位の配向性および底面集合組織観察を行った．EBSD 解析装置は JEOL 製 FE-SEM/EBSD (JSM-7100F) を用いて，パターンの取得は OIM Data

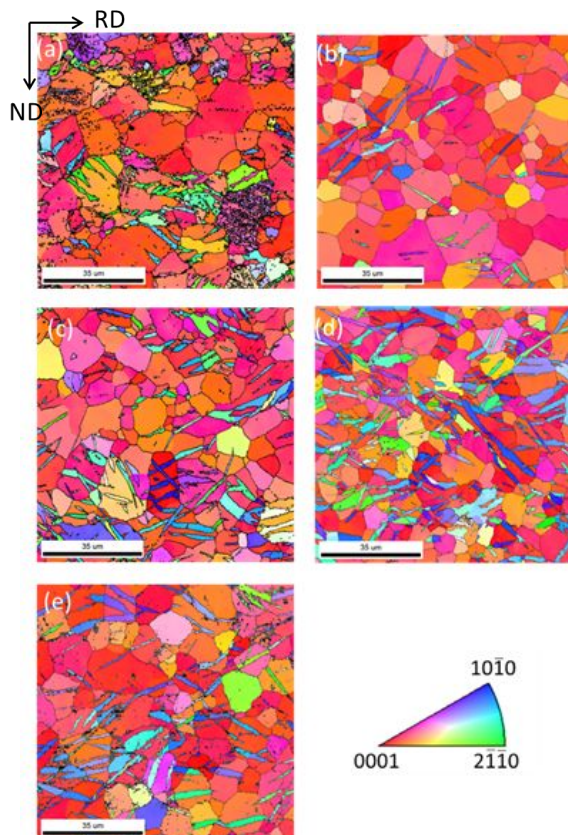


図 12 結晶方位分布
(a)焼鈍し無し，(b)2pass 対称曲げ 160 °C -12 時間，(c)2pass 対称曲げ 180 °C -12 時間焼鈍し，(d)2pass 非対称曲げ 160 °C -12 時間焼鈍し，(e)2pass 非対称曲げ 180 °C -12 時間焼鈍し

Collection v.7.0.1，パターンの解析は OIM Analysis v.7.0.1，共に EDAX 社製のものを使用した．解析範囲:90 × 90 μm，ステップサイズ:0.2 μm とした．図 12 に各条件での EBSD 解析結果を示す．

160 °C -12 時間の条件では熱処理による双晶組織の変化がないとすると，非対称の方が連続ロール曲げ加工により発現した変形双晶が数多く見られるため，表層の硬さの低下だけでなく，変形双晶が成形性の向上に起因していると考えられる．また，180 °C -12 時間の条件では対称曲げ，非対称曲げを比較すると，エリクセン値の差は小さい．これは，熱処理による再結晶・粒成長または双晶の増加が原因であると考えられる．

(8)まとめ

よって，連続ロール曲げ加工することで板の内側に発生する圧縮変形，外側に発生する引張変形を利用して引張，圧縮変形を加えることで積極的に板内に双晶変形を発現させすべり面の向きをランダム化，すなわち底面集合組織の緩和することが可能であると考えられ，180 °C -時間の焼鈍しすることで，生材程度の板厚中心硬さを維持しつつ，成形性の向上を図ることが出来た．

<引用文献>

1) T. Hama, Y. Tanaka, M. Uratani, H. Takuda, Deformation behavior upon two-step loading in a magnesium alloy sheet, Int. J. Plast. Vol. 82 (2016), pp. 283-304.

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 1 件)

Akira Yanagida, Yuma Hirai and Kenji Sekido, Improvement of formability of AZ31magnesium alloy by repeated roll bending process, Procedia Engineering, 査読有, 207 (2017) 920-925.
DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.852

〔学会発表〕(計 3 件)

柳田明，平井友麻 繰返し曲げ加工によるマグネシウム合金の成形性の改善 (第 1 報，曲げ加工 1 パスあたりのひずみ量の影響) M&M 材料力学カンファレンス 2015, OS0105-43

柳田明，平井友麻 「繰返し曲げ加工による Mg 合金の成形性の改善：第 2 報，非対称曲げの影響」M&M 材料力学カンファレンス 2016, OS01-09

柳田明，秋山 拓人，平井 友麻，繰返し曲げ加工による Mg 合金の成形性の改善 (第 3 報，非対称曲げが内部組織変化に及ぼす影響) M&M 材料力学カンファレンス 2017, OS0705

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況(計 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

柳田 明 (YANAGIDA, Akira)
東京電機大学 工学部・教授
研究者番号：20432065

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

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