

平成 31 年 4 月 14 日現在

機関番号：24506

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06017

研究課題名(和文) 粒子衝突によるマグネシウム合金への樹脂-金属交互積層厚膜形成とその接合性評価

研究課題名(英文) Formation and bondability of resin/metal laminated thick film on magnesium alloy by particle collision

研究代表者

原田 泰典 (Harada, Yasunori)

兵庫県立大学・工学研究科・教授

研究者番号：30218656

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：アルミニウム合金やマグネシウム合金のような軽金属における表面特性向上のため、ショットピーニング技術である粒子衝突を応用した樹脂含有金属薄板の接合を試みた。おもに、マグネシウム合金において、樹脂と金属を交互に積層した積層板の良好な接合性が得られる加工条件について調べた。その結果、試験片への加熱温度は200度以上で基材への接合は可能であった。また、基材への硬質粉末および樹脂含有の金属薄板の接合は可能であり、接合性も良好であった。また、耐食性や耐摩耗性も改善することがわかった。以上より、本手法はマグネシウム合金の表面改質に対して有効な技術であることが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ショットピーニングのような粒子衝突によって、樹脂の被覆されたアルミ箔の接合が可能であることを確認し、粒子衝突による樹脂皮膜の形成は十分に可能であることが得られた。接合する樹脂自体も軽量であるため、軽量化には適していると考えられる。さらに、金属と樹脂を交互に積層させて厚膜を形成することも可能であることがわかった。このような接合方法はこれまでに行われたことがなく、皮膜形成に及ぼす加工条件を明らかにすることは本研究の学術的な特色であり、独創的な点であると考えられる。とくに、マグネシウム合金は、省エネを背景として、自動車や航空機などの搬送機器関連分野において、今後ますます利用範囲が広がる材料である。

研究成果の概要(英文)：In order to improve the surface properties of light metals such as aluminum alloys and magnesium alloys, bonding of resin-containing metal thin plates has been attempted by shot peening technology. Mainly, in magnesium alloy, it investigated about the processing condition which can obtain the good bondability of the laminated sheet which laminated resin and metal alternately. As a result, joining of the dissimilar sheet to the workpiece was at a heating temperature of 200 degrees or more. Moreover, the bondability of the thin sheet containing resin and hard powders to the base material was good. Moreover, it turned out that corrosion resistance and abrasion resistance also improve. From the above, it became clear that this method is an effective technique for surface modification of magnesium alloys.

研究分野：金属加工、表面処理

キーワード：表面処理 合金 マグネシウム合金 ショットピーニング 耐食性 接合 耐摩耗性 接合性 アルミニウム

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

国内における自動車や航空機などの輸送機器分野において、環境問題や省エネルギーの観点から機械部品の小型化と軽量化が強く求められている。そのため、従来から使用されている鉄鋼材料からアルミニウム合金やマグネシウム合金などの軽金属、そして繊維強化プラスチックへの移行が急速に進んでいる。マグネシウム合金の場合、実用金属の中では最も軽量であることから利用範囲が広がっているが、鉄鋼材料に比べて耐食性や耐摩耗性が低いことが実用化の大きな障害となっている。古くからマグネシウム合金の表面改質は、めっき、蒸着、溶射などの多くのコーティング技術が行われている。耐食性の向上に関する研究では、例えば、真空蒸着によって AZ31Mg 合金に高純度 Mg を被覆した後にふっ化処理皮膜の被覆を行うことで、耐食性の改善が報告されている。また、高周波スパッタリングによって AZ31 Mg 合金基板に Mg-Si 成膜を行い、優れた耐食性を示すことが報告されている。しかしながら、従来法では高温や多湿など過酷な環境下においてコーティング材のはく離が生じる場合があり、密着性の向上と耐食性の確保を図るための研究が盛んに行われているのが現状である。一方、申請者はショットピーニングのような粒子衝突を利用した異種材接合を試みている。材料表面にショットと呼ばれる微粒子の鋼球を衝突させることで、異種金属薄板を材料表面に接合させる加工法である。材料表面が大きい塑性変形を生じるため、表面積の拡大に伴う新生面の発生とショットの衝突による高い圧縮力が加わることで接合が可能となる。これまでにアルミニウム合金やマグネシウム合金の耐食性を高めるため、異種金属薄板の接合が可能であることを報告している。

2. 研究の目的

申請者は、アルミニウム合金やマグネシウム合金のような軽金属表面に耐摩耗性や耐食性を有する異種材を接合させることで、軽金属の耐摩耗性や耐食性を向上させる試みを行っている。これまでの研究成果を踏まえ、最近、樹脂で被覆されたアルミ箔をマグネシウム合金表面に載せた状態で微粒子の衝突を行えば、樹脂の被覆が可能ではないかと考えた。その結果、基礎的なモデル実験ではあるが、粒子衝突によって変形した部分では樹脂の被覆されたアルミ箔が強固に接合していることが分かった。表面近傍における接合部断面を観察した結果、粒子の衝突した変形領域では樹脂被覆アルミ箔は破断や空隙はなく、マグネシウム合金と接合することが分かった。さらに、ごく最近、樹脂をアルミ箔でサンドイッチ被覆したシートに注目して、それを数枚重ねた状態で接合試験を試みた。その結果、まだ基礎的な実験レベルであるが、樹脂を複数含む多層シートが接合する可能性があることが分かった。したがって、これまでの研究成果であるマグネシウム合金表面への純アルミ箔の接合を発展させ、マグネシウム合金表面への樹脂皮膜形成を行うとともに、さらに積層構造を有する樹脂と金属を交互積層させて皮膜の厚膜形成を試みる。

3. 研究の方法

ショットピーニングを利用したマグネシウム合金への樹脂被覆したアルミ箔の単層および複層の接合を行い、①樹脂皮膜層の接合性に及ぼす粒子衝突の加工条件と②耐腐食性や耐摩耗性などの表面特性を明らかにする。具体的には、樹脂皮膜層に及ぼす因子、例えば粒子の衝突速度や衝突時間などについて、また塩水浸漬試験や耐摩耗試験による評価について調べる。取り扱うマグネシウム合金は一般構造材料として使用されている AZ 系合金とし、接合する樹脂は耐熱性のある樹脂である。接合では樹脂の材質や厚みなどを変化させた場合についても接合性や表面特性に及ぼす影響について調べた。

3-1 試験材料

市販 JIS 準拠の軽金属材料を用いた。おもに表面改質として使用した材料はマグネシウム合金 AZ31 系である。基材として、各種材料の押出し丸棒材から円板状の試験片に切り出した。試験片のサイズは、直径 50mm、高さ 10mm の円板形状である。一方、基材表面に接合する異種材料は、薄板は高純度純アルミニウム (4N、99.99wt.%) と純アルミニウム A1070 (99.97wt.%) である。ライニングに用いた純アルミニウム薄板 A1050 は、厚さ 0.02~0.08mm、硬さ 30HV、密度 $2.7\text{mg}/\text{mm}^3$ である。樹脂は、耐熱性樹脂の薄板や箔を用いた。また、耐摩耗性を改善するため、平均硬さ 1400HV を有する超硬合金粉末を用いた。

3-2 ショットピーニングによる異種材接合法

ショットライニング加工は、ショットピーニングを応用した異種材接合法である。ライニング加工は、試作設計した加熱装置を内部に組み込んだ遠心式ショットピーニング装置を用いた。また、接合性に低いマグネシウム合金 AZ31 系基材と純アルミニウム薄板(箔)を接合させる際、接合性を高めるため本研究では試作した加熱装置を遠心式ショットピーニング装置内に組み込み、試験片表面を加熱した状態でショットライニング加工を行った。試験片加熱時は、断熱材によって表面全体を覆い、試験片表面の温度を均一に保った。ショットライニング加工は投射速度 60m/s、投射時間 10~30s、投射量 0.17kg/s、投射距離(投射口から試験片までの距離) 270mm、雰囲気は大気中の条件で加工を行った。投射材は平均直径 1.0mm、硬さ 445HV の鋳鋼製ショットを用いた。また、超硬粉末を接合させる場合、ショットの衝突による衝撃やショットピーニング装置内部の回転翼(インペラ)の風圧により超硬粉末が飛散してしまうことを考慮した。最初の接合では、純アルミニウム薄板のライニング加工を行い、表面に生じた凹凸面に超硬合金粉末を載せた後、再度の純アルミニウム薄板のライニングを行った (図 1 参照)。

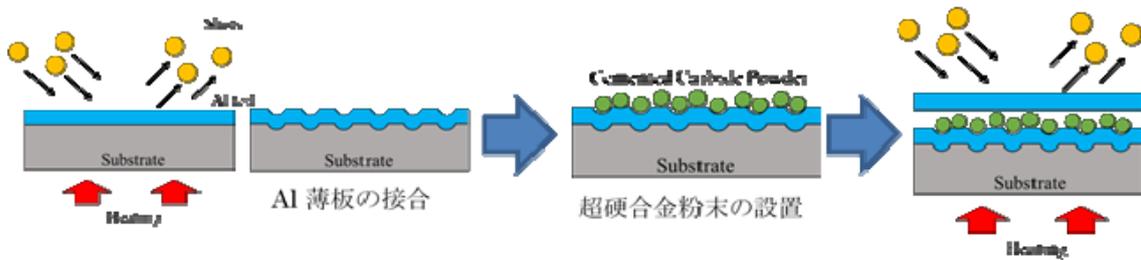


図1 異種金属薄板および超合金粉末のライニング方法の概略

3-3 接合状態の評価方法

ショットライニングによる薄板の接合加工後、純アルミニウムや超合金粉末などの異種材皮膜の接合状態を調べるため、形成した異種材皮膜の断面観察を行った。断面観察はデジタルマイクロスコープを用いて行った。具体的には、加工後の試験片中央部分を直方体形状に切り出し、常温硬化性樹脂テクノビットによって埋め込んだ後、試験片断面をエメリー研磨紙#120～#1500で研磨後、バフ研磨によって鏡面化して観察を行った。バフ研磨における研磨材は、硬質微粒子のアルミナ研磨材#2000および#3000によって研磨を行った。

3-4 腐食試験

ショットライニング加工を行った試験片や未処理試験片の耐食性を調べるために腐食試験を行った。未処理試験片、ショットピーニング加工処理を施した試験片、ショットライニング加工を施した試験片の3種類に対して、評価を行った。腐食液は過飽和塩化ナトリウム水溶液(塩水)を用い、1時間の浸漬後、試験片表面近傍の切断加工を行い、表面近傍断面観察を行った。

3-5 摩耗試験

ショットライニング加工を行った試験片や未処理試験片の耐摩耗性を調べるため、摩耗試験による評価を行った。摩耗装置はスガ摩耗試験機 NUS-IS03 である。摩耗試験機はモータ回転運動をクランク部で往復運動に変換し、試験片固定台が往復する。その際に荷重錘によって試験片に押し付けられた摩耗輪が試験片表面を往復することで摩耗を行った。本研究では、摩耗輪は研磨紙を貼り付けた直径 50mm、幅 9mm のサイズを使用した。研磨紙は SiC 研磨紙、粒度#240 を用いた。摩耗試験条件は、往復速度 40times/min、1 回の試験での摩耗回数 400times、摩耗輪に負荷する荷重は 26.8N(精度±0.15N)とした。

4. 研究成果

4-1 マグネシウム合金 AZ31 への純アルミニウム薄板の接合性

異種材の接合性が低いとされるマグネシウム合金表面への純アルミニウム薄板の接合性を調べるため、厚さや接合温度の影響について調べた。具体的には、ショットライニング加工によって、マグネシウム合金 AZ31 に厚さ 0.02mm～0.08mm のアルミニウム箔のみを接合させた。図2に、接合性における試験温度と薄板厚さの関係を示す。薄板の厚さが増加しても加熱温度が増加すれば、接合性は良好となることがわかった。つまり、板厚が 0.1mm 程度の接合の場合、加熱温度 300℃であれば、基材への接合は可能であることがわかった。

図3に、厚さ 0.02mm の純アルミニウム薄板をライニングしたマグネシウム合金試験片3個の外観を示す。ショットの衝突によって、いずれの表面も凹凸状態であるが、薄板の亀裂やはく離はまったく見られなかった。以上より、接合性はとても良好であることがわかった。

図4に、厚さ 0.02mm と 0.04mm の純アルミニウム薄板を 200℃で接合した断面をそれぞれ示す。純アルミニウム薄板とマグネシウム合金の接合面では空隙は見られなかった。また、純アルミニウム薄板のはく離や割れも見られなかった。接合性は良好であることがわかった。

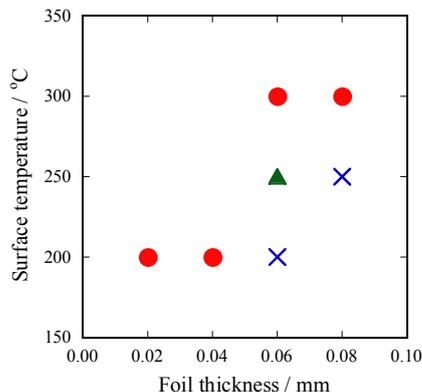
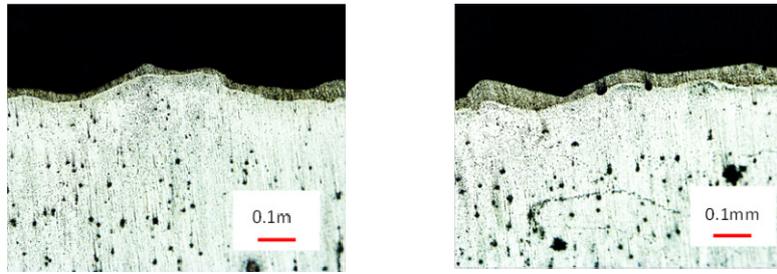


図2 マグネシウム合金基材への純アルミニウム薄板の接合性



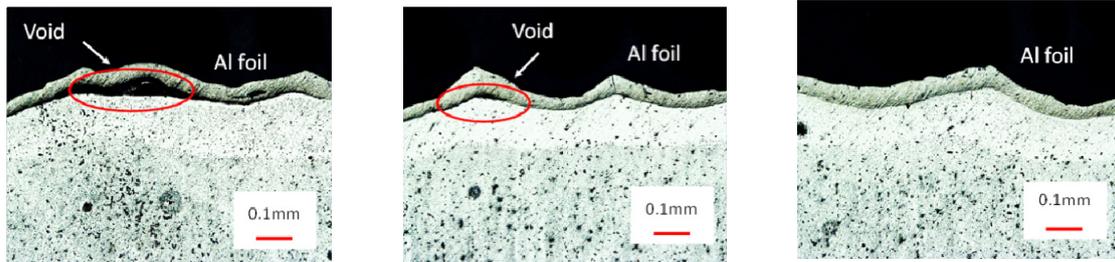
図3 純アルミニウム薄板の加工後のマグネシウム試験片の外観



厚さ 0.02mm

厚さ 0.04mm

図4 純アルミニウム薄板のライニング後のマグネシウム合金表面の断面組織

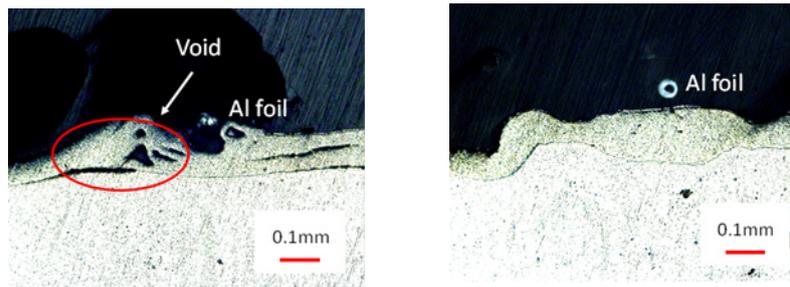


加熱温度 200°C

加熱温度 250°C

加熱温度 300°C

図5 厚さ 0.08mm の純アルミニウム薄板のライニング後のマグネシウム合金表面の断面組織



加熱温度 250°C

加熱温度 300°C

図6 厚さ 0.08mm の純アルミニウム薄板のライニング後のマグネシウム合金表面の断面組織

図5に、加熱温度を変化させて厚さ 0.06mm の純アルミニウム薄板をライニングして得られた接合表面の断面組織をそれぞれ示す。加熱温度 200°Cおよび 250°Cで接合した断面において、純アルミニウム薄板とマグネシウム合金の接合面に空隙がそれぞれ見られる。薄板の厚さが増加すると、薄板の塑性片変形が十分でないためである。そのため、加熱温度が低い場合、空隙は大きいことがわかる。つまり、加熱温度が高くなるにつれて、接合性は改善していることがわかる。加熱温度 300°Cで接合した断面では空隙は見られない。純アルミニウム薄板の変形抵抗が加熱温度の上昇につれて低下したためと考えられる。

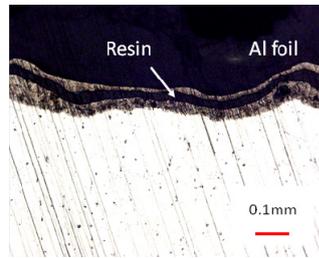
マグネシウム合金基材への純アルミニウム薄板の接合性に及ぼす板厚の影響について調べるため、さらに板厚を増加させて接合性について調べた。図6に、加熱温度を変化させて厚さ 0.08mm の純アルミニウム薄板をライニングして得られた接合表面の断面組織をそれぞれ示す。加熱温度 250°Cで接合した断面では純アルミニウム薄板とマグネシウム合金基材の接合面や薄板内部に空隙が見られる。しかし、加熱温度 300°Cでは接合した断面に空隙は見られない。以上のことより、ショットライニング加工を行う際の加熱温度が純アルミニウム薄板の接合状態に大きく影響を及ぼしていることがわかった。

4-2 マグネシウム合金 AZ31 への樹脂を含む純アルミニウム薄板の接合性

マグネシウム合金の耐食性の改善を行うため、防水性の高い樹脂薄板を含む純アルミニウム薄板の接合を試みた。まず、樹脂薄板をそのままの状態でもマグネシウム合金表面への接合は困難である。そのため、加圧と熱加工を組み合わせる手法を開発した。具体的には、純アルミニウム薄板によって樹脂薄板をサンドイッチした構造の薄板である樹脂サンドイッチ薄板を作製して用いた。ここで、純アルミニウム薄板と樹脂薄板は加熱と圧力の複合処理によって接合が達成している。



試験片外観



表面近傍断面組織



図8 樹脂サンドイッチ薄板のライニング後の試験片外観（加工時間 15s）

図7 樹脂サンドイッチ薄板（総板厚 0.08mm、樹脂 1 層）のライニング後の試験片外観と表面近傍の断面組織（加工時間 10s）

図7に、樹脂サンドイッチ薄板（樹脂 1 層、厚さ 0.03mm）を接合した試験片外観および表面接合断面をそれぞれ示す。加工時間は 10s である。ライニングした薄板は、はく離や破断することなく接合しているのがわかった。また、断面においても樹脂サンドイッチ薄板が破断することなく接合されていることがわかった。次に加工時間を 15s に変化させて接合性を調べた。

図8に、樹脂サンドイッチ薄板を接合した試験片外観を示す。加工した照射時間は 15s である。ショットの繰り返し衝突の衝撃によって、樹脂サンドイッチ薄板の一部に破断やはく離が見られた。加工時間が増加すると、接合した最表面の純アルミニウム薄板が加工硬化によって飛散したためと考えられる。以上より、樹脂サンドイッチ薄板を接合させる最適照射時間は 10s であるということがわかった。

4-3 マグネシウム合金 AZ31 へ純アルミニウム薄板を接合した試験片の耐食性

アルミニウム合金に比べて腐食しやすいマグネシウム合金に対して耐食性を調べた。耐食試験を行うため、未処理、ショットピーニング後、ショットライニング後の 3 種の試験片を腐食液である過飽和塩化ナトリウム水溶液（海水）に 1 時間浸けた。浸漬後の試験片表面を観察した結果、未処理材では、旋盤加工して生じた同心円状の痕跡が見られ、多くの孔が見られた。次に、ショットピーニングによるのみ加工した処理材では、表面が白色に変化して凹凸状態であり、激しく腐食が生じていた。凹凸面の発生で表面積が拡大し、腐食液と反応しやすくなったためと考えられる。一方、純アルミニウム薄板の接合材では、ショットの衝突したままの状態であった。耐食性の高い純アルミニウム薄板が接合しているためである。

4-4 マグネシウム合金 AZ31 へ超硬合金粉末を含む純アルミニウム薄板の接合性

マグネシウム合金における耐摩耗性を改善するため、超硬合金粉末を含んだ純アルミニウム薄板の接合を行い、その接合性について調べた。超硬合金粉末の接合において、予めマグネシウム合金表面へ純アルミニウム薄板を接合させた後、その際に生じた凹凸面を利用して超硬合金粉末を試験片表面に載せた。ショットピーニング加工中に生じる風圧によって超硬合金粉末が飛散するため、超硬合金粉末を載せた表面に対して厚さ 0.02mm の純アルミニウム薄板で覆った。その状態で所定の加熱温度で保持後、ライニング加工を行った。また、その工程を繰り返すことによって、2 層および 3 層の超硬合金粉末を含んだ多積層の薄板のライニングを行った。加工後の表面ははく離や割れなどの欠陥は見られず、接合性は良好であった。また、接合断面の観察結果では、超硬合金粉末が 2 枚の純アルミニウム薄板にサンドイッチされた層が形成しており、超硬合金粉末と純アルミニウム薄板は空隙なく接合されているのが確認できた。

4-5 ライニング処理したマグネシウム合金試験片の摩耗試験

摩耗試験による耐摩耗性の評価を行うため、未処理材および各種超硬合金粉末層接合材の摩耗後の試験片外観および摩耗状態を調べた。未処理材において、研磨された領域は平面で摩耗の痕跡が見られた。同様に、純アルミニウム薄板および樹脂薄板のライニング加工材においても平面で摩耗痕跡が見られた。一方、超硬合金粉末をライニング加工した試験片において、研磨された表面は平面に変化していたが、黒色の点在物のある灰色を呈していることがわかった。超硬合金粉末の存在によって、研磨後も黒色の点在する表面になったものと考えられる。超硬合金粉末を接合した試験片はいずれも摩耗量は小さく、未処理材のそれに比べて約 30% の低下であることがわかった。以上より、超硬合金粉末のライニングは摩耗性改善に有効であることがわかった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 6 件）

- ① 原田泰典、ショットピーニングによる表面加工、粉体技術 Vol. 10 No. 3 (2018), pp. 30-35 査読有
- ② Y. Harada, M. Nakahira, M. Nunobiki, K. Takahashi, Surface Modification of Aluminium Alloy by Shot Lining and Laser Heating, Proceedings of ISAAT2017, (2017), CD-R 査読有
- ③ Y. Harada, M. Matsumoto, M. Nunobiki, K. Takahashi, Surface modification of magnesium alloy by shot lining and laser heating, Materials Science Forum, Vol. 879 (2017),

pp 703-708 査読有

- ④ 原田泰典、ショットピーニング、表面技術、第 67 巻 第 1 号、2-7、(2016) 査読有
- ⑤ Y. Harada, M. Matsumoto, A. Nagao, K. Takahashi, Surface modification of aluminium alloy by shot lining and laser, Proceedings of PRICM-9, (2016), Ver.CD-R 査読有
- ⑥ Y. Harada, M. Matsumoto, K. Takahashi, Surface modification of magnesium alloy by shot lining and heat treatment, Proceedings of PRICM-9, Ver.CD-R 査読有

[学会発表] (計 20 件)

- ① 原田泰典、神崎雄大、田中一平、ショットピーニングを応用した異種材接合によるマグネシウム合金の表面改質、日本機械学会第 26 回機械材料・材料加工技術講演会 (M&P2018)、(2018), No. 408
- ② 神崎雄大、田中一平、原田泰典、ショットピーニングを利用したマグネシウム合金の表面改質、日本材料学会第 4 回材料 WEEK、(2018), Ver. CD-R
- ③ 原田泰典、神崎雄大、松本実、田中一平、ショットピーニングを応用したマグネシウム合金へのセラミックス粒子の接合、日本機械学会第 12 回生産加工・工作機械部門講演会、(2018), Ver. CD-R
- ④ 原田泰典、中平雅希、高橋勝彦、布引雅之、ショットピーニングと熱処理によるアルミニウム合金の表面改質、日本塑性加工学会第 68 回塑性加工連合講演会、(2017), pp. 259-260
- ⑤ 原田泰典、中平雅希、松本実、ショットピーニングを応用した異種材接合によるマグネシウム合金の表面改質、軽金属学会 第 133 回秋期大会、(2017), pp. 225-226
- ⑥ 松本実、原田泰典、ショットライニングによる Mg 合金へのセラミック粒子複合皮膜の形成、日本材料学会第 2 回材料 WEEK、(2016), No. 39
- ⑦ 松本実、原田泰典、布引雅之、ショットライニング加工熱処理によるマグネシウム合金 AZ31 への皮膜形成、日本機械学会 2016 年度年次大会、(2016), G0400301
- ⑧ 松本実、原田泰典、布引雅之、高橋勝彦、ショットライニングと熱処理の複合処理による Mg 合金の新しい表面改質、砥粒加工学会学術講演会、(2016), pp. 343-344
- ⑨ 原田泰典、松本実、布引雅之、高橋勝彦、ショットライニング熱処理法によるアルミニウム合金の表面改質、砥粒加工学会学術講演会、(2016), pp. 345-347
- ⑩ 松本実、原田泰典、布引雅之、ショットライニング加工熱処理によるマグネシウム合金への硬質皮膜形成、軽金属学会第 130 回春期大会、(2016), pp. 291-292

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等 該当なし

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：布引雅之

ローマ字氏名：Masayuki Nunobiki

所属研究機関名：兵庫県立大学大学院

部局名：工学研究科機械工学専攻

職名：准教授

研究者番号 (8 桁)：50244687

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：松本実 (兵庫県立大学大学院・院生)

ローマ字氏名：Minoru Matsumoto

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。