

令和 3 年 6 月 23 日現在

機関番号：32657

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04800

研究課題名(和文)革新的軽量マグネシウム合金クラッド材料の創製および熱間鍛造性

研究課題名(英文)Development of innovative lightweight cladding magnesium alloy materials and their hot forging characteristics

研究代表者

渡利 久規(Hisaki, Watari)

東京電機大学・理工学部・教授

研究者番号：90210971

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では高濃度Al含有したMg合金をベースとした革新的軽量クラッド材料を製造し、Mg合金クラッド材の熱間鍛造の実証性を評価することを目的とする。本研究では以下のことを明らかにした。Al含有量10%以上のMg合金クラッドの凝固点の推定、固相率分布、冷却速度を推定した。Al/Mg合金クラッドの製造実験から、板厚5mm～6mmのクラッドをロール周速度8m/min、圧下率を15%以上の場合連続鋳造できることを示した。クラッド材の界面に微細なMg₁₇Al₁₂の析出を確認し金属間化合物は溶体化処理によって母相であるMg相内部に固溶することおよび重ね材料を直接熱間鍛造してその有効性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、高濃度のAlを含有したMg合金をベースとした革新的軽量クラッド材料を溶湯から直接的に一工程で製造するプロセスを開発した。得られたクラッド材料の界面には金属間化合物Mg₁₇Al₁₂が分布しているが界面における混合層を薄くすることによって温間成形が可能である革新的軽量クラッド材を製造することができる。また得られたクラッド材を熱間成形することは可能で、本法で得られたクラッドを直接熱間鍛造することでクラッドの熱間鍛造成形は有効であることを示した。本研究は提案した加工プロセスを利用することで軽量化が促進され、革新的軽量化によってCO₂等の排出を軽減することに貢献できるところ意義がある。

研究成果の概要(英文)：In this research, an innovative lightweight clad material of Mg alloy containing a high Al content has been fabricated. The following results has been summarized. (1) From the roll casting experiment, the solidification point, distribution of the solid fraction and the cooling rate were estimated. (2) It was clarified that an Al/Mg clad with a width of 150 mm and 5 mm to 6 mm thick can be continuously cast at a roll speed of 8 m/min, and the apparent roll reduction was 15% or more. (3) A novel process which can manufacture an Al/Mg clad in a step, was developed directly from the molten metals of A1050 and AM100. (4) The intermetallic compounds at the interface was scopically observed. Fine precipitation of the Mg₁₇Al₁₂ was confirmed in the grains as well as at the grain boundaries. It was confirmed that these intermetallic compounds can be soluted in Mg phase by T6 treatment. (5) The effectiveness of direct hot forging of the Cu/Al clad, clarified from the experiment.

研究分野：塑性加工

キーワード：急冷凝固 マグネシウム合金 双ロール鋳造 金属間化合物 Mg/Alクラッド 熱間鍛造

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、『軽量化』は、ものづくり産業において、環境への負荷を低減にするための重要なキーワードになっている。例えば、自動車産業等においても Mg 合金は、次世代の素材として着目されている。しかし、これまで Mg 合金の量産品のほとんどは安価なダイカスト製品であり、高価な展伸材のプレス加工や鍛造成形の実用例は少ない。期待されているが製造現場で実用化されていない理由は以下の3つの理由によるものであると考えている。

①塑性加工に適した安価な素材の供給体制が国内で確立されていない。(マグネシウム合金展伸材の価格は 5000 円/kg で、板材では 1000 円/kg 以下にする製造技術が必要) ②マグネシウム合金の機械的な強度が低い。また、鍛造等の塑性加工用素材に適した素材が少なく、プレス加工等における解析等も含めた実証的な研究例が少ない。③結晶構造が最密六方晶のため冷間での加工が困難であり、マグネシウム展伸材を冷間で塑性加工する材料がない。(結晶方位のランダム化および方位制御が必要である) ハイブリッド車 (HV) や電気自動車 (EV) の開発が進み、Mg 合金を軽量化に積極的に利用するための革新的な素材創製技術、革新的な成形技術の確立が必要な時期がきている。そこで、これまでの Mg 合金に関する研究を総合的に検討し、Mg 合金を積極的に利用できる方法を学術的かつ実証的に検討するために研究を立案した。

2. 研究の目的

本研究では、軽量である Mg 合金の特徴を最大限に利用するために、以下の3つの目的を遂行するために、すなわち、①塑性加工可能な経済的な Mg 合金製造法クラッド材の製造を実現すること。②高 Al 含有 Mg 合金の特性を生かした塑性加工に適した Mg 合金のクラッドの製造法を提案すること。③得られたクラッド材の熱間鍛造の可能性を探ることである。

以上の目的のために次の方法で研究計画を立案し遂行した。

3. 研究の方法

(1) 塑性加工可能な経済的な Mg 合金製造法クラッド材の製造実験

双ロール法を採用し急冷凝固によって微細な結晶構造を持つ二層 Mg 合金クラッド材の基板となる Mg 合金素材を経済的に製造する。双ロール法の冷却速度は 1000K/s~3000K/s と高く 10 μm 程度の微細な金属組織が得られることが期待される。微細な α 相を有する熱間鍛造では成形荷重を 2-3 割低減できる可能性がある。

(2) 高 Al 含有 Mg 合金による機械的な強度の改善

通常よりも Al 含有量の高い (Al 含有量 10%~13%) Mg 合金をクラッドの基材として使用する。これまでの研究から Al 含有量 13%の素材では、耐力 235 MPa, 引張強さ 415MPa であること、またこの時の β 層は粒界付近に均一に析出することが明らかになっている。このためクラッドの製造においても、β 相の制御が重要になる。本実験では、製造条件による β 相の析出状況の調査と熱処理による β 相の制御を行い、β 相の特性をクラッドの製造に生かすための実験を行う。

(3) 背圧制御可能なサーボプレスによるクラッド材の熱間鍛造実験

サーボダイクッション搭載型サーボプレスを使用し、得られたクラッド材の熱間鍛造実験を行いその可能性を検討する。すでに、Al 含有量 13%である Mg-13mass%Al-1%Zn 合金の場合にスクロール形状の熱間鍛造が、最大荷重の 3%程度の背圧付加によって実現できることを報告しているが、他のクラッドの場合や、高 Al によるヒートシンク形状などのように実用化の可能性を検討するための熱間鍛造実証試験を行う。

4. 研究成果

(1) 高 Al 含有 Mg 合金の製造実験および特性⁽¹⁾

3種類の高 Al 含有 Mg 合金の双ロール鋳造実験を行った。実験に使用した Mg 合金は、Mg-11 mass%Al-0.2 mass%Mn, Mg-12mass%Al-0.2 mass%Mn, Mg-13mass%Al-0.2 mass%Mn である。双ロール実験において得られた鋳造材の一例 (Mg-13mass%Al-0.2 mass%Mn) を図 1 に示す。得られた板材の表面は比較的金属的な光沢が見られた。本実験で得られた板材の板厚は約 9.5mm~10 mm程度であった。この時のロール周速度は 3.0m/min, ロールが溶湯と接触する部分の接触弧長は 50 mmである。得られた鋳造まま材の結晶組織を観察したところ、Fig. 2 のような組織が得られている (ロールキャスト材板厚の中央付近)。結晶の平均粒径は 45 μm である。他の Mg 合金の場合も同様な組織が得られている。

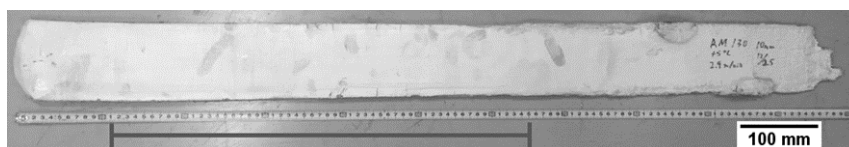


図 1 双ロール鋳造実験で得られた板材の外観 (Mg-13mass%Al-0.2 mass%Mn)

得られた Mg 合金板材から、円形の直径 4.5 mm、高さ 7.0mm の圧縮試験サンプルを切り出し、温間で圧縮試験を行った場合の真応力-真ひずみ曲線を図 2 に示す。

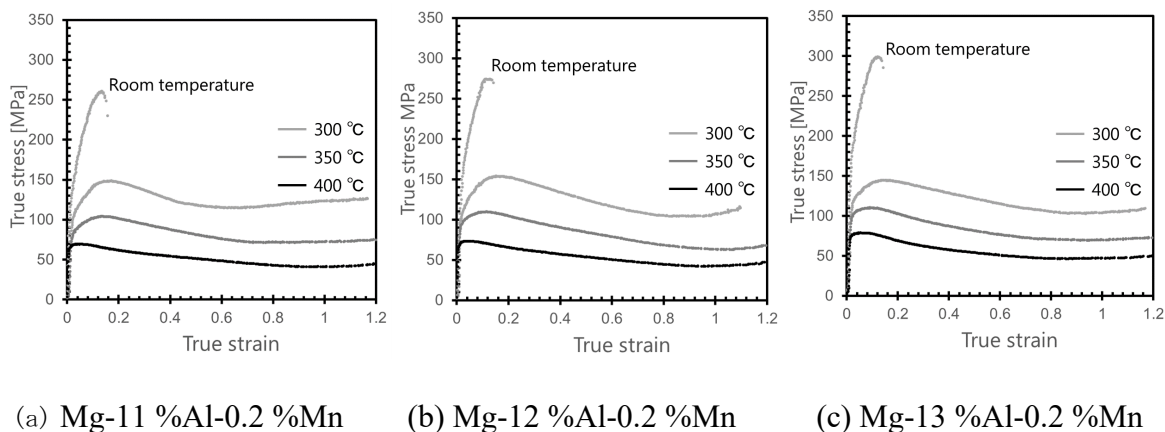


図 2 双ロール鋳造材の真応力-真ひずみ線図

温間圧縮試験による試験結果からは、成形温度が 300°、350°、400° の場合のピーク応力は Al の含有量がそれぞれ、11%、12%、13%と Al 含有量が増加するにつれて、150MPa、153MPa、144MPa が得られている。また、Al 含有量を変化させた場合の双ロール鋳造材のビッカース硬さを図 3 に示す。図 3 より、Al 含有量の増加に伴ってビッカース硬さが増加することを示している。Al 含有量が 13% のとき、Mg-13%Al-0.2%Mn の場合にはビッカース硬さは 83 まで上昇している。この硬さは、引張試験では約 260MPa に相当すると推測できる。

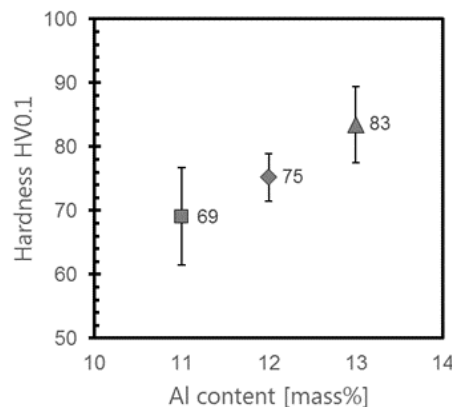


図 3 Al 量とビッカース硬さの関係

各温度におけるピーク応力と温度の関係を求めた結果を表 1 に示している。表 1 の結果からは、300 °C 以上での圧縮において真応力-真ひずみ線図は動的再結晶によるものと考えられる加工軟化を示している。さらに、表 1 の結果からは、300°C 以上の温度においては、Al の含有量に関わらず最大真応力の値は同程度であった。室温と 300 °C ではすべての材料で試験片側面に斜め割れが生じた。350 °C と 400 °C ではすべての材料で同心円状に圧縮が可能であったが、初期高さから 70 % の圧縮では試験片側面に縦割れが生じている。

表 1 温間圧縮試験の結果

Materials	Peak stress (MPa)			
	Room temp	300 (°C)	350 (°C)	400 (°C)
Mg-11 %Al-0.2 %Mn	263	150	104	70
Mg-12 %Al-0.2 %Mn	275	153	111	74
Mg-13 %Al-0.2 %Mn	299	144	111	79

(2) 高 Al 含有 Mg 合金によるクラッド製造実験^②

三種類のクラッド製造条件に対して対して、クラッドの製造条件と接合の状況を調査した。使用した材料は AM100 と A1050 である。クラッド製造実験においては、見かけの圧下量を 0%、5%、10%、15%、20% の 5 通りに変化させて圧下力とクラッド製造条件の関係を調査した。この結果から、15% 以上の圧下力でクラッドは接合している。また、接合界面における金属間化合物の状況を図 5 に示している。圧下量を増加させるに従い、A11050 と AM100 の接合界面の混合層の厚さが減少し、接合力が向上している。図 6 は接合界面におけるビッカース硬さの分布を示している。図 5 の横軸は、図 4 の a, b, c および d の各箇所に対応する。この結果から、金属間化合物 Mg₁₇Al₁₂ は、主に接合界面上と界面の A11050 側の位置に分布しておりこの領域の金属間化合物が成形に影響を与えるものと推測できる。

接合界面の接合強度を確認するために、幅 15 mm 長さ 70 mm のクラッドを切り出し、接合部分の長さを 5mm として引張せん断試験を行った。この結果、せん断部分の破断せん断応力は 44 MPa であり、目標とするせん断接着強度 40MPa の数値目標を達成できた。

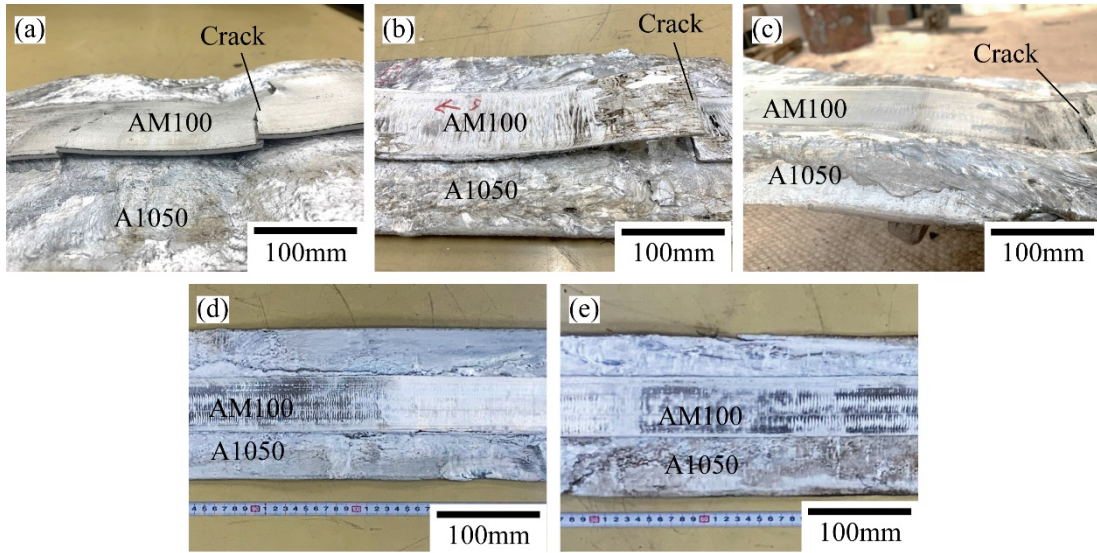


図4 見かけの圧下量と Mg/Al クラッドの関係
 ((a) 0%, (b) 5%, (c) 10%, (d) 15%, (e) 20%)

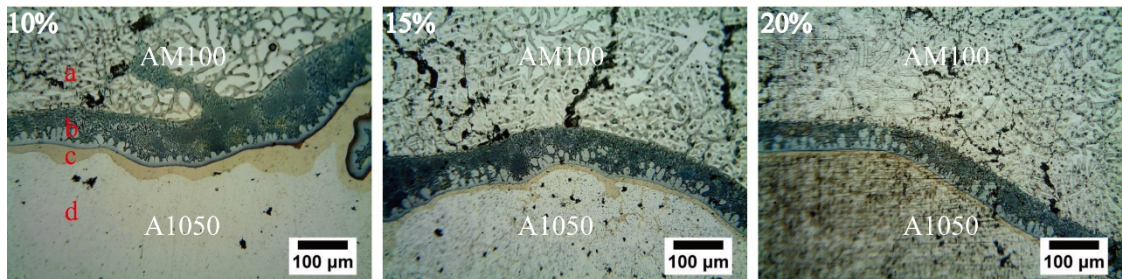


図5 見かけの圧下量と接合界面
 (圧下量 10%, 15%, 20%)

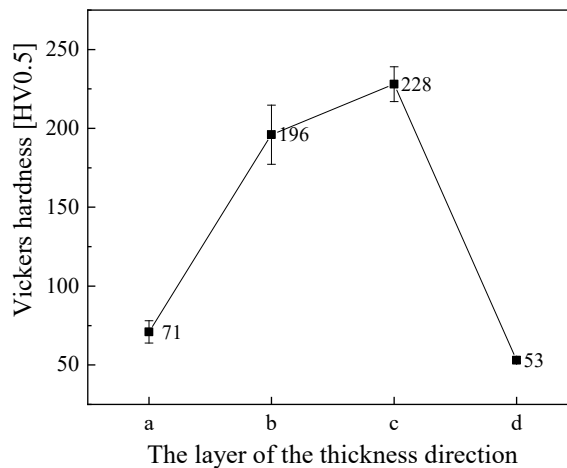


図6 接合界面における硬さ分布

(3) クラッド熱間鍛造実験

クラッドの成形性を評価するための予備実験の一例として、Cu/A1050 の場合の熱間鍛造試験を行った。ただし、ここでは Cu と Al は素材の流れを確認するためにクラッドにする前に、二枚の別々な材料として重ねてある。この状態 Cu (無酸素銅) と A11050 の重ねたままでヒートシンク上の熱間鍛造を行った場合の一例を図 7 に示す。この結果から、二枚の重ねた板から外側が Cu 内部が A1150 のクラッド成形品を製造することができた。鍛造試験に使用したのは黒鉛系の潤滑剤であり、成形温度は約 420°C である。得られた成形品の断面部分の一例を図 8(a)、図 8(b) および図 8(c) に示している。この状態では、固相接合までは達していないがこの後の熱処理によっては界面での接合が可能になると推測される。また、クラッドの場合でも界面の接合状態が保証されれば予備実験の結果と同様な成形品を得ることが可能になると考えられ、本実験で手

案した方法で得られた Mg 合金およびMg合金クラッドの直接鍛造の可能性を確認することができた。

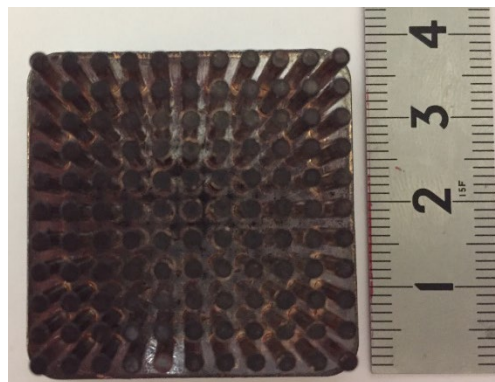


図7 熱間鍛造成形されたCu/Al重ね板の一例



図8(a) ピンの先端部分



図8 (b) ピンの中央部



図8 (c) ピンの根本部分

<引用文献>

- (1) 戸塚穂高, 関 香苗, 大北 綾音, 羽賀 俊雄, 渡利久規, ロールキャスティングによるAM系高アルミニウム含有マグネシウム合金の製造, 軽金属学会第137回秋季大会, 2019.
- (2) Hotaka Tozuka, Kanae Seki, Hisaki Watari, Toshio Haga, Casting of High Aluminum Content AM Series Magnesium Alloys by Using a Horizontal Twin Roll Caster, Key Engineering Materials, Vol. 841, pp. 340-345.
- (3) Feng Gengyan, Hisaki Watari, Mayumi Suzuki, Toshio Haga and Toru Shimizu, Novel Direct Cladding of Magnesium and Aluminum Alloys Using a Horizontal Twin Roll Caster, Key Engineering Materials, Vol. 880, pp. 17-22.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hotaka Tozuka, Kanae Seki, Hisaki Watari, Toshio Haga	4. 巻 841
2. 論文標題 Casting of High Aluminum Content AM Series Magnesium Alloys by Using a Horizontal Twin Roll Caster	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Key Engineering Materials	6. 最初と最後の頁 340-345
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4028/www.scientific.net/KEM.841.340	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Harunori Kobayashi, Hotaka Tozuka, Hisaki Watari	4. 巻 841
2. 論文標題 Estimation of Cold Roll Forming Characteristics of Wrought Magnesium Alloy with Tension-Compression Asymmetry	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Key Engineering Materials	6. 最初と最後の頁 346-352
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4028/www.scientific.net/KEM.841.346	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Toshio Haga, Kohei Tuchitani, Hisaki Watari, Shinichi Nishida,	4. 巻 831
2. 論文標題 Casting of Bar Using a Twin Wheel Caster	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Key Engineering Materials	6. 最初と最後の頁 46-51
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4028/www.scientific.net/KEM.831.46	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Toshio Haga, Takuya Yamashiki, Hisaki Watari, Shinichi Nishida	4. 巻 831
2. 論文標題 Investigation of Burr on Strips Cast by Vertical-Type High-Speed Twin Roll Caster	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Key Engineering Materials	6. 最初と最後の頁 40-45
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4028/www.scientific.net/KEM.831.40	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Harunori Kobayashi and Hisaki Watari	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Cold Roll Forming Behavior of Wrought Magnesium Alloy with Tension-Compression Asymmetry	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Key Engineering Materials	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計18件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 13件)

1. 発表者名 Harunori Kobayashi, Hisaki Watari, Hayato Aso and Yuji Kotani
2. 発表標題 Characteristic features of wrought magnesium alloys during cold roll forming process
3. 学会等名 The International Conference on Advances in Materials and Processing Technologies (AMPT2018) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hotaka Tozuka, Tomohiro Kishi, Hisaki Watari, Mayumi Ssuzuki, Toshio Haga
2. 発表標題 Horizontal Twin Roll Casting of AM-series Magnesium Alloys with High Aluminum Content
3. 学会等名 The International Conference on Advances in Materials and Processing Technologies (AMPT2018) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hisaki Watari
2. 発表標題 Future Possibilities of Magnesium Alloys in Transportation Industries
3. 学会等名 8th International Conference on Engineering and Innovative Materials (ICEIM2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hotaka Tozuka, Hisaki Watari
2. 発表標題 Casting of high aluminum content AM series magnesium alloys by using a horizontal twin roll caster
3. 学会等名 The 4th International Conference on Material Engineering and Application (4th ICMEA 2019) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hanuroni Kobayashi, Hotaka Tozuka, Hisaki Watari
2. 発表標題 Estimation of Cold Roll Forming Characteristics of Wrought Magnesium Alloy with Tension-compression Asymetry
3. 学会等名 The 4th International Conference on Material Engineering and Application (4th ICMEA 2019) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hisaki Watari
2. 発表標題 Cold Roll Forming of Wrought Magnesium Alloy with Tension-Compression Asymmetry
3. 学会等名 9th International Conference on Engineering and Innovative Materials (ICEIM2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hisaki Watari
2. 発表標題 Future Possibilities of Hot Forging of Magnesium Alloys
3. 学会等名 2nd Global Forging Summit China 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hisaski Watari and Hanunori Kobayashi
2. 発表標題 Springback estimation in cold roll forming of wrought magnesium alloy
3. 学会等名 Asia Pacific Measurement Forum on Mechanical Quantities 2019 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 戸塚穂高, 関 香苗, 大北 綾音, 渡利久規, 羽賀 俊雄
2. 発表標題 双ロールキャストによるAM系高アルミニウム含有マグネシウム合金の製造
3. 学会等名 軽金属学会第137回 秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 浜橋一徳, 渡利久規, 清水透, 羽賀俊雄
2. 発表標題 縦型双ロールキャスターを用いた高Al合金含有Mg合金の製造
3. 学会等名 軽金属学会第137回 秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hisaki Watari
2. 発表標題 Change of Automotive Industry and Future Possibility of Magnesium Alloys in Manufacturing Industries
3. 学会等名 The 9th International Conference of Engineering and Innovative Materials (ICEIM2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Feng Gengyan and Hisaki Watari
2. 発表標題 Novel Direct Cladding Process of Magnesium and Aluminum alloys by Using a Horizontal Twin-roll Caster
3. 学会等名 The 9th International Conference of Engineering and Innovative Materials (ICEIM2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hisaki Watari
2. 発表標題 Future Possibilities of Hot Forging of Magnesium Alloys
3. 学会等名 2nd Global Forging Summit China 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hisaki Watari
2. 発表標題 Cold Roll Forming of Wrought Magnesium Alloy with Tension-Compression Asymmetry
3. 学会等名 9th International Conference on Engineering and Innovative Materials (ICEIM2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 戸塚穂高, 関 香苗, 大北 綾音, 羽賀 俊雄, 渡利久規
2. 発表標題 双ロールキャストによるAM系高アルミニウム含有マグネシウム合金の製造
3. 学会等名 軽金属学会第137回秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木 燎平, 小林治紀, 渡利久規, 鈴木真由美, 清水透
2. 発表標題 展伸用マグネシウム合金の冷間ロール成形プロセスにおける引張・圧縮非対称性の影響
3. 学会等名 軽金属学会第137回秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 浜橋一徳, 渡利久規, 清水透, 羽賀俊雄
2. 発表標題 縦型双ロールキャスターを用いた高Al合金含有Mg合金の製造
3. 学会等名 軽金属学会第137回秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hotaka Tozuka, Tomohiro Kishi, Hisaki Watari, Mayumi Suzuki and Toshio Haga
2. 発表標題 Horizontal Twin Roll Casting of AM series magnesium alloys with high aluminum content
3. 学会等名 21st International Conference on Advances in Materials & Processing Technologies, (Dublin City University, Ireland), September 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	羽賀 俊雄 (Haga Toshio) (00212134)	大阪工業大学・工学部・教授 (34406)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	鈴木 真由美 (Suzuki Nayumi) (20292245)	富山県立大学・工学部・教授 (23201)	
研究分担者	山崎 敬則 (Yamazaki Takanori) (80342476)	東京電機大学・理工学部・准教授 (32657)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関