

平成 30 年 6 月 29 日現在

機関番号：32657

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06522

研究課題名(和文) 急凝固法による高強度マグネシウム合金材料の創製と熱間鍛造性

研究課題名(英文) Manufacturing of high strength magnesium alloys manufactured by rapid cooling process and their hot forging characteristics

研究代表者

渡利 久規 (WATARI, HISAKI)

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) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：高アルミニウム含有Mg合金を用いて急凝固実験を行い得られた材料の熱間鍛造性を調査した結果以下のことを明らかにした。

Mg-11mass%Al-0.8mass%Zn, Mg-12mass%Al-0.8mass%Zn, Mg-13mass%Al-0.8mass%Zn, の3種類のMg合金で15mmの板厚の厚板素材を製造することができ、タンデム双ロール法では24mmの鍛造用厚板が製造可能であることを示した。EDSD解析の結果、結晶粒径はロール表面近くで70 $\mu$ m, 板材の中央部で30 $\mu$ mであった。サーボプレスによる鍛造試験を行い試験温度420 $^{\circ}$ Cで高さ5mmのピン形状部品の製造が可能であることを実証した。

研究成果の概要(英文)：Twin roll casting experiments to manufacture thick forging materials were conducted using high aluminum content Mg alloys. Hot forgeability of the obtained material was examined. As a result, the following research results were obtained. Three types of high aluminum content Mg alloys, such as Mg-11 mass%Al-0.8 mass% Zn, Mg-12 mass% Al-0.8 mass% Zn, Mg-13 mass% Al-0.8 mass% Zn, were selected in roll casting experiments. By using the tandem twin roll method, it is possible to manufacture a forging thick sheet material of 24 mm at maximum. From a result of EDSD analysis of the cast strips, the crystal grain size was 70  $\mu$ m near the roll surface and 30  $\mu$ m at the center part of the strip, Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> and Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub> was discontinuously precipitated at the crystal grain boundaries. A hot forging test using a servo press was performed and it was demonstrated that it is possible to manufacture a pin-shaped part (heat sink) with a height of 5 mm, at a 420 degrees centigrade.

研究分野：塑性加工

キーワード：Rapid cooling Magnesium alloys Twin roll casting Hot forging High strength materials Weight reduction

## 1. 研究開始当初の背景

(1)二酸化炭素の排出量を加速的に削減する社会の実現のために、自動車や産業機械分野ではさらなる軽量化技術が必要とされている。本課題では、高濃度 Al 含有マグネシウム合金の溶湯から、急冷凝固法の一つである双ロール法を用いて高強度厚板 Mg 鍛造用素材を直接的に製造し、これを用いて微細な組織を有する塑性加工用の熱間鍛造マグネシウム部品の成形を実現するための研究を行う。

(2)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。期待されいながら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。本課題は、学術的側面、工業的な側面の両者から以下の「問い」に答える必要性から着想したものである。

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)

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。

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)

近年、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した。上記の3点の問題点については、次に述べる対策により問題を解決することとし、最終的な目的を達成するための計画を立案したものである。

## 2. 研究の目的

(1)本研究の具体的な数値目標は幅 150mm、厚さ 15mm 以上の鍛造用マグネシウム合金素材(室温耐力 250MPa、室温引張強さ 450MPa、平均結晶粒径 10 μm 程度、伸び 10%)の実用的部品の成形である。本研究では革新的軽量 Mg 合金部品のプレス加工により温間鍛造で成形できる低コストで高強度かつ高耐食性熱間鍛造用素材を創製し温間鍛造を目的として実証的な研究を行う。

(2)本研究では、図1に示す3段のタンデム双ロールキャストを用いて厚板クラッド材を製造し、各々のクラッド材料の機械的性

質の特性を調査し、クラッド材料を使用した成形技術を確認することを目的としている。Mg 合金三層クラッドキャスト材では板幅 150mm 幅、Mg 合金の結晶粒径 10 μm 以下、耐力 250MPa、室温引張強さ 450MPa の厚板素材を製造し、これを 250 以下の低温で成形することを目標としたのは従来の国内外の研究成果、およびこれまでの著者らの研究結果から考えて実現可能であると判断したことによる。

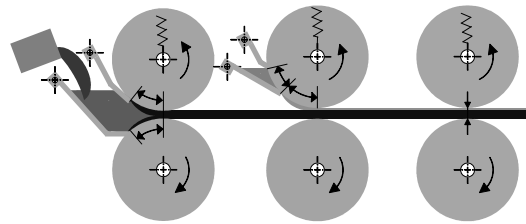


図1 タンデム双ロールキャスト実験装置

## 3. 研究の方法

本研究では、急冷凝固法(図1:タンデム双ロール法)を用いて高強度 Mg 合金の三層クラッド厚板材を低コストで製造し、得られたクラッド材を高強度熱間鍛造用素材として使用するための実験を行う。双ロール法では、冷却速度が 1000 /sec ~ 3000 /sec と非常に高く、10 μm 程度の微細な金属組織が得られるため、熱間鍛造における成形荷重を3割程度減少できることもすでに確認している。これまでは上下のロールを一对しか持たない従来の双ロールキャストでは、低速度で厚肉の鍛造用厚板素材を製造することは困難であるが、上下一對となるロールをタンデムに3段並べてある、タンデム双ロールキャスト等で厚板を積層することで鍛造用の厚板素材の製造は可能となる。本研究では高アルミニウム含有 Mg 合金熱間鍛造用の三層クラッド厚板材料を製造し、この材料の特性評価を行い、サーボプレスを用いた先進プレス成形技術を用いて高強度 Mg 合金による鍛造成形を実用化するための研究を行うことを目的として研究課題を遂行した。

## 4. 研究成果

(1)平成 27 年度は、急冷凝固法によって高強度三層 Mg クラッド材の製造装置を用いて厚さ 15 mm 程度の鍛造用素材を製造する実験を行った。また、得られた材料の結晶組織の調査および、機械的性質の評価を行なった。実験に使用した、Mg-Al-Zn 系のマグネシウム合金は、幅 100mm ~ 150mm である。実験では Mg-12mass%Al-0.8mass%Zn、Mg-13mass%Al-0.8mass%Zn の二種類の材料の厚板製造実験を行った。その結果、最大厚さ 11mm の Mg-12mass%Al-0.8mass%Zn 材を製造することが可能であり(凝固長さ 120mm、ロール周

速度 3m/min), Mg-13mass%Al-0.8mass%Zn に対しては, 厚さ 15mm の板材を連続鋳造することが可能(凝固長さ 120mm, ロール周速度 3m/min) であった. 得られた. 金属組織の観察および引張試験の結果から以下のことを明らかにした. Mg - 12mass%Al - 0.8mass%Zn, Mg - 13mass%Al - 0.8mass%Zn, の鋳造まま材の結晶粒径は 20 $\mu$ m ~ 30 $\mu$ m であり, アルミニウム含有量が増加すると結晶粒径も微細になっていた. 引張試験による Mg-12mass%Al-0.8mass%Zn, および Mg-13mass%Al-0.8mass%Zn の 0.2%耐力と引張強さはそれぞれ 272MPa, 360MPa, 272MPa, 360MPa, 315MPa, 470MPa であり, Mg-13mass%Al-0.8mass%Zn の 0.2%耐力と引張強さは数値目標は達成することができた. (2) 平成 28 年度は, 急冷凝固法によって三種類の高アルミニウム含有高強度 Mg 合金を用いてクラッド材料の鋳造実験を行い, 金属組織の観察, EBSD 解析を行った. さらに, 実際の熱間鍛造実験を行うことによって, 本研究で創成された材料が熱間鍛造に適しているのかどうか調査を行った. この結果以下のような研究成果が得られている.

Mg-11mass%Al-0.8mass%Zn, Mg-12mass%Al-0.8mass%Zn, Mg-13mass%Al-0.8mass%Zn, の 3 種類の高アルミニウム含有 Mg 合金を用いてタンデム双ロール法によって, 24mm の鍛造用厚板素材を製造できることを確認できた. さらに得られた鍛造用素材の結晶組織の観察のため EBSD 解析を行なった結果結晶粒径は, ロール表面近くで 60 ~ 75 $\mu$ m, 板材の中央部で 30 ~ 40 $\mu$ m, 結晶粒界には Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> および Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub> が不連続析出していた. 得られた鍛造用厚板素材を使用してサーボプレスによる鍛造実験を行ったところ, 鍛造温度 420 で高さ 5mm のピン形状部品(ヒートシンク)の製造が可能であることを実証した. この際, サーボダイクッションによる背圧効果によって, 鍛造部品のピンの高さを一定にそろえることができることを明らかにした. サーボダイクッションによる背圧は最大荷重の 1%程度で十分であり, 大きな背圧でなくても成形には十分効果があることが実際の熱間鍛造成形試験によって明らかになった.

(3) 平成 29 年度は, クラッド材料, およびこれまででは特性が不明であった Mg-Al-Mn 系高アルミニウム含有 Mg 合金 Mg 合金材の製造実験および熱間鍛造実験を行なった. 本実験では, 厚板(15mm)の製造実験を行い, これによって Mg-Al-Mn 系の厚板部品の熱間鍛造試験を行うことを目標とした. 本実験によって, 300 から 400 の温度域における高アルミニウム含有 Mg 合金の温間での圧縮特性が検証できた. また, 高強度 Mg 合金鍛造用素材の厚板材の熱間鍛造時の塑性流動と潤滑条件の因果関係の解明, 成形におよぼすスライドモーションの影響, 熱間鍛造成形された成形品の機械的特性を検証して急冷された高濃度アルミニウム合金における金属間

化合物(Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub> and Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>)等が実際の熱間鍛造品において, どのような影響を及ぼすのかについて調査を行った. これらの成果をまとめると以下ようになる.

Al-Mn-Zn 系の高アルミニウム Mg 合金の双ロール鋳造実験を行い厚さ 15 ミリの板材の連続鋳造を実現した. 得られた材料を熱間鍛造することで, 鍛造中の金属間化合物の状態, 鍛造品の機械的性質を明らかにした. また, Al-Mn-Zn 系の高アルミニウム Mg 合金の急冷凝固時におこる不連続析出, および連続析出について EBSD と SEM 観察によって確認した. 得られたクラッド材の鍛造用素材への適用性を調査し, 結晶粒系が 10 ~ 30 $\mu$ m 程度の素材であればヒートシンク等の精密な鍛造品の素材として使用可能であること, および熱間鍛造の際には金属間化合物が引き延ばされて粉碎され微細に分布していることが明らかになった.

## 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 5 件)

Toshio Haga, Ryusuke Onishi, Hisaki Watari, Shinichi Nishida, Defect and Diffusion Forum, 査読有, Vol.382, 2018, 147 - 154

DOI:http://www.scientific.net/DDF.382.147

Toshio Haga, Ryusuke Onishi, Hisaki Watari, Shinichi Nishida, Defect and Diffusion Forum, 査読有, Vol.382, 2018, 160 - 166

DOI:http://www.scientific.net/DDF.382.160

Toshio Haga, Shinichi Nishida, Hisaki Watari, Key Engineering Materials, 査読有, Vol.748, 2017, 181 - 186

DOI:http://www.scientific.net/KEM.748.181

Toshio Haga, Kentaro Okamura, Hisaki Watari and Shinichi Nishida, Materials Science Forum, 査読有, Vol.893, 2017, 262 - 266

DOI:http://www.scientific.net/MSF.893.262

Hideto Harada, Shin-ichi Nishida, Mayumi Suzuki, Hisaki Watari and Toshio Haga, Applied Mechanics and Materials, 査読有, Vol.772, 2015, 250 - 256

DOI:http://www.scientific.net/AMM.772.250

[学会発表](計 8 件)

Hisaki Watari, Future possibilities of Magnesium alloys in transportation industry, 7<sup>th</sup> International Conference on Engineering

and Innovative Materials, 2018  
Hisaki Watari, Application of TRC High Aluminum Content Magnesium Alloys for Hot Forging, 7<sup>th</sup> International Conference on Engineering and Innovative Materials, 2017  
Tomohiro Kishi, Hisaki Watari, Mayumi Suzuki and Toshio Haga, Hot forging of Roll-Cast High Aluminum Content Magnesium alloys, 20<sup>th</sup> International ESAFROM Conference on Materials Forming, 2017  
Tomohiro Kishi, Takefumi Ishikawa, Hisaki Watari, Masahiro Tsukamoto and Toshio Haga, Development of hot forging process of high aluminum content magnesium alloys manufactured by horizontal twin-roll casting, The 5<sup>th</sup> Conference of Combined Australian Materials Societies, 2016  
Sueji Hirawatari, Tomohiro Kishi, Takefumi Ishikawa, Hisaki Watari, Characteristic of cast twin roll Mg materials manufactured with high aluminum content during hot forging, International Conference on Advances in Materials & Processing Technologies, 2016  
Tomohiro Kishi, Takefumi Ishikawa, Hisaki Watari and Toshio Haga, Hot forging behavior of high aluminum content Magnesium alloys manufactured by horizontal twin-roll caster, International Conference on Advances in Materials & Processing Technologies, 2016  
Sueji Hirawatari, Hisaki Watari, Evaluation of Friction Properties of Magnesium Alloy during Hot forging by Ring Compression Test, 5<sup>th</sup> International Conference on Engineering and Innovative Materials, 2016  
Hisaki Watari, Hot forging of high-aluminum content Magnesium alloys by using a servo press, 4<sup>th</sup> International Conference on Materials Science&Engineering, 2015

〔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：  
国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：

番号：  
取得年：  
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

渡利 久規 (WATARI, Hisaki)  
東京電機大学・理工学部・教授  
研究者番号：90210971

### (2) 研究分担者

羽賀 俊雄 (HAGA, Toshio)  
大阪工業大学・工学部・教授  
研究者番号：00212134

鈴木真由美 (SUZUKI, Mayumi)  
富山県立大学・工学部・教授  
研究者番号：20292245

山崎 敬則 (YAMAZAKI, Takanori)  
東京電機大学・理工学部・准教授  
研究者番号：80342476