

ロールキャストによる革新的高強度 Mg 合金 クラッド材の創製とその熱間鍛造性

東京電機大学 理工学部・理工学科 機械システム工学系
教授 渡利 久規

(2018 年度 一般研究開発助成 AF-2018022-B2)

キーワード：急冷凝固，軽量化，Mg 合金クラッド材

1. 研究の目的と背景

地球規模での環境負荷低減を達成するためには、自動車等の部品の軽量化によって、省エネを達成しエネルギーを有効に活用する技術の開発が重要な鍵を握っている。自動車産業界では、オランダやノルウェーをはじめ、EU では2030 年までにガソリン車およびディーゼル車の販売を禁止する等 EV 化の流れがこれまで以上に加速している。すなわち、自動車等の部品の軽量化には従来よりもさらに革新的な軽量化が必要な時代に入ってきたといえる。

従来、マグネシウム (Mg) 合金は最軽量な金属であるとみなされてきたが、実際の Mg 合金製品は、ほとんどダイカストによる家電製品部品等がほとんどで、産業界ではそれほど実用化されていない。これまで Mg 合金がほとんど実用化されていない主な理由は、次の3項目であると考えられる。

- 1) 展伸用 Mg 合金が高価であり、現在のところ国内外で安価な展伸用 Mg 合金の供給体制が確立されていない。
- 2) 結晶構造の特性から冷間加工性が低く、冷間で加工できる展伸材が市販されていない。
- 3) Mg 合金の強度や耐食性が低く、塑性加工に適した Mg 合金素材がない。潤滑材も含めた鍛造用 Mg 合金素材のプレス加工性や実証的な研究例もそれほど多くない。

かような状況では、Mg 合金が軽量材料として自動車産業界で実用化されるためには、上記に挙げられた3つの障害を克服する必要がある。

本研究では溶湯から、急冷凝固法の一つであるロールキャストによって熱間鍛造用の素材を溶湯から直接的に製造し¹⁾、これを用いて Mg 合金クラッド材料を創製する。さらに、ロールキャストによって溶湯から Mg 合金/Al クラッドを製造し、この素材が熱間鍛造用に使用できるかどうかを検討する試験を行う。Mg 合金は耐食性が低いため単体で実用化するには塗装工程が必要となり、塗装による別なコストがかかる。この弱点を克服するための一つの方法が、Mg 合金/Al クラッド²⁾ であると考えている。

本研究では高濃度 Al 含有マグネシウム合金の創製と、得られた素材の性質を明らかにすることを目指す。さらにこの Mg 合金に Al 合金を被覆したクラッドを製造するためのプロセスと成形性試験の結果について報告している。

2. 実験方法

2・1 実験に使用したロールキャスター

図1に、実験に用いたロールキャスターの概略図を示す。ロールの外径は 285mm、ロール幅は 150mm である。ロールと溶湯の接触長さは 50mm、ロールは鋼製でありロール表面が純銅で覆われている。ロール間隙は単純な一次元凝固理論式¹⁾ と図1に示すロールキャスターの下ロールだけを用いたメルトドラッグ実験の結果を考慮してロール周速度ごとに決定し、連続 casting が可能なロール間隙に設定している。図2にクラッド実験に用いたロールキャスターの概略図を示す。

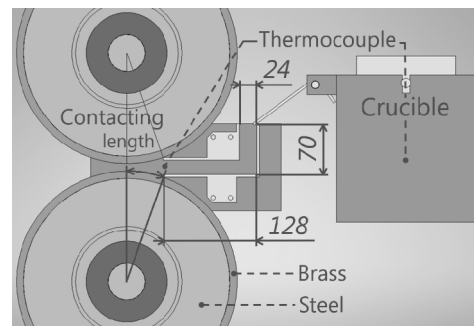


図1 横型双ロールキャスター概略図

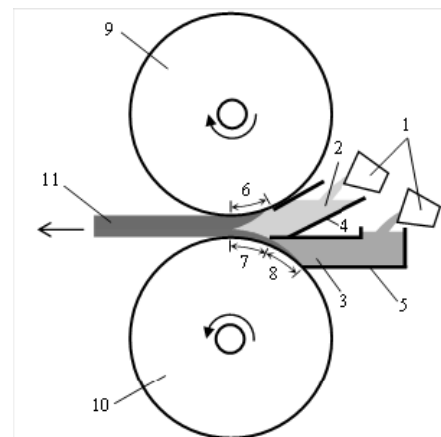


図2 クラッド製造用双ロールキャスター概略図
(1. 坩堝, 2. Mg 合金溶湯, 3. Al 合金溶湯, 4. 上ロールノズル, 5. 下ロールノズル, 6. 上ロール凝固長さ, 7. 溶湯接触長さ, 8. 下ロール凝固長さ, 9. 上ロール, 10. 下ロール, 11. クラッド)

2・2 実験材料および実験条件

表1に実験に用いた高濃度Al含有Mg合金の種類と実験条件を示す。実験に使用した高濃度Al含有Mg合金はAM系のMg合金のAl含有量のみ10%~13%まで変更し、AZ系のMg合金においては、Al含有量を11%~13%まで変更している。また、図2に示すロールキャスターを用いて一工程でクラッドを製造する場合には、AM100とA1050を用いてクラッド製造実験を行っている。

表1 実験に用いた高濃度Al含有マグネシウム合金

Experiments	Materials	Liquidus temperature [°C]	Pouring temperature [°C]	Roll speed [m/s]
Mg casting	Mg-11 % Al-0.2 % Mn	595	600	3.2, (6,9,12)
	Mg-12 % Al-0.2 % Mn	591	596	3.1, (6,9,12)
	Mg-13 % Al-0.2 % Mn	587	592	2.9, (6,9,12)
	Mg-11 % Al-1.0 % Zn	587	592	2.5
	Mg-12 % Al-1.0 % Zn	581	586	2.5
	Mg-13 % Al-1.0 % Zn	574	579	2.5
	Clad casting	Mg-10 % Al-0.2 % Mn	595	600
A1050		657	660	8

2・3 板厚の計測および温間圧縮試験

図3に実験で得られた板材の板厚計測箇所を示す。また、得られた鋳造材の温間圧縮試験を行うため、実験で得られた鋳造まま材から、直径4.5mm、高さ7mmの円筒試験を切り出して圧縮試験を行うことで、温間成形性を評価した。

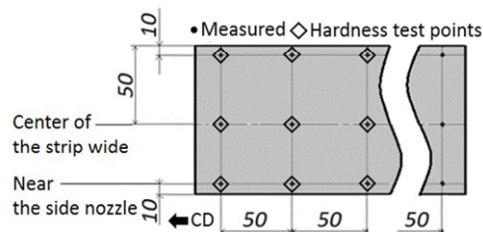


図3 板厚の計測箇所

3. 実験結果

3・1 鍛造用素材の板厚および表面性状

図4は熱間鍛造用素材を製造するために、表1においてロール周速度を2.5m/s~3.2m/sの間で変化させて厚板を製造しようと試みた場合の板厚計測の一例である。図1に示した横型ロールキャスターを用いて、板厚10mm程度の厚板が製造できていることを示している。表1示した低速度の条件では厚さ10mm程度の板材が連続鋳造されている。鋳造材は、図5に示すようにAl含有量が高いため比較的金属光沢があり、表1に示した条件では得られた板材の両面ともにはクラック等の欠陥も肉眼では見られない。横型ロールキャスターを用いて10mm程度の厚板を製造することができた。

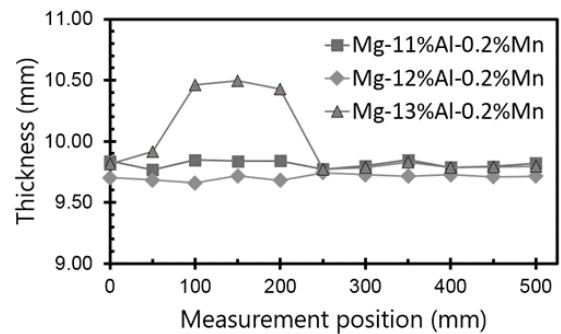


図4 鋳造まま材の板厚計測の一例
(ロール周速度 $V=2.5\text{m/s}$)

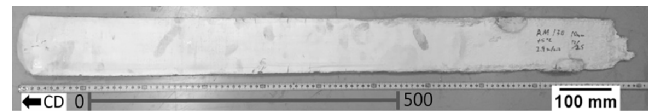


図5 鋳造された Mg-13 mass%Al-0.2 mass%Mn
(ロール周速度 $V=2.5\text{m/s}$)

3・2 ロールキャスト材の組織観察

図6(a)、図6(b)および図6(c)は、表1において連続鋳造された Mg-13%Al-0.2%Mn の上ロールとの接触部、板材中央部および上ロールとの接触部、の各位置における組織を示している。図5に示した鋳造材は肉眼では欠陥は確認できないが、200倍程度の光学顕微鏡による観察では、上ロールおよび下ロールとの接触部分に小さな空孔が確認できる。図7に組織の拡大図を示している。

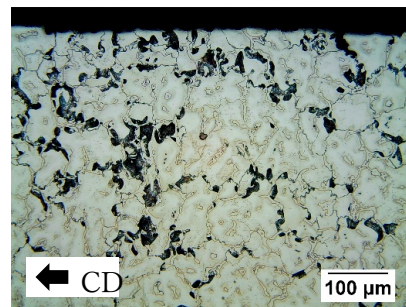


図6(a) 上ロールとの接触部 ($V=2.9\text{m/s}$)

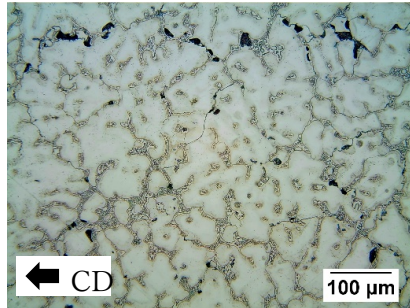


図 6 (b) 板材中央部 (V=2.9m/s)

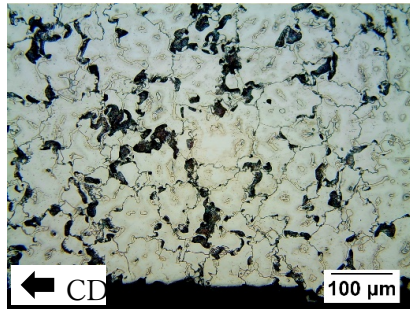


図 6 (c) 下ロールとの接触部 (V=2.9m/s)

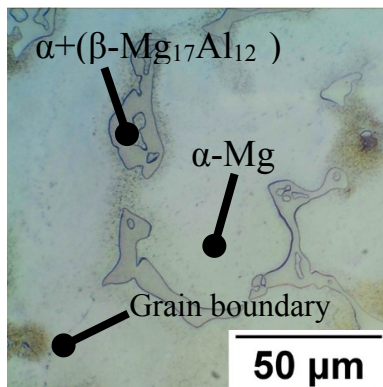


図 7 結晶組織 (拡大図)

金属間化合物 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ は $\alpha\text{-Mg}$ の粒内および結晶粒界上に存在し、この形態はロール周速度や製造する板厚の厚さによって異なる。ロール周速度が遅い条件では β 層は結晶粒界に析出し、ロール周速度が速い条件では、 β 層は α 層内に小さく点在する形で見られる。表 1 において本研究で使用した高 Al 合金 Mg 合金の β 層は溶体化、時効処理等によって制御することが可能であり、この β 層の制御が祖塑性加工に適した Mg 合金の創製のひとつのポイントになることが示唆されている。

3・3 連続铸造まま材の応力 - ひずみ線図と硬さ試験

双ロール実験で得られた Mg-11%Al-0.2%Mn, Mg-12%Al-0.2%Mn および Mg-13%Al-0.2%Mn の連続铸造まま材の 300°C, 350°C, 400°C における応力ひずみ線図を図 8(a), 図 8(b) および図 8(c) をそれぞれ示す。真応力は、ひずみの増加につれて上昇し、ひずみが 0.2% 以下のところでピークとなりその後緩やかに減少しているのが確認できる。

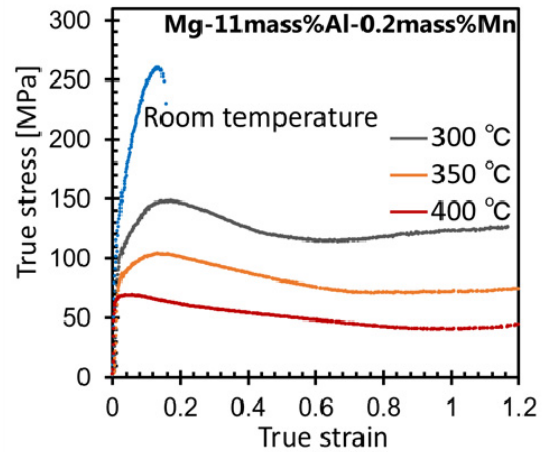


図 8 (a) 真応力-真ひずみ線図 (Mg-11%Al-0.2%Mn)

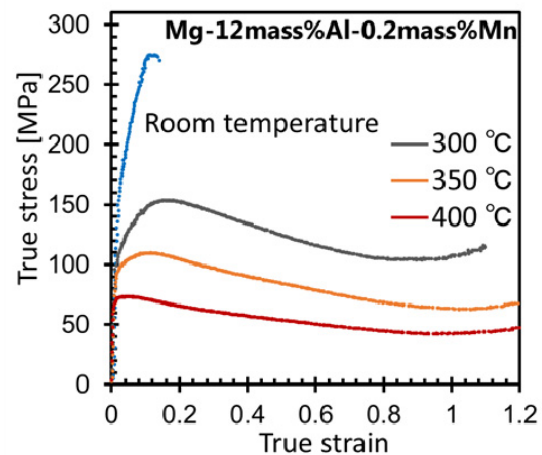


図 8 (b) 真応力-真ひずみ線図 (Mg-12%Al-0.2%Mn)

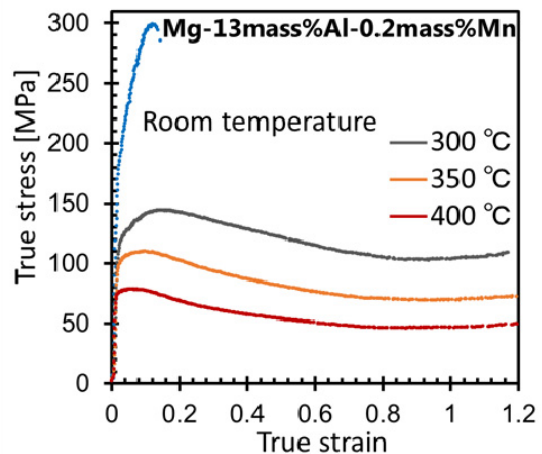


図 8 (c) 真応力-真ひずみ線図 (Mg-13%Al-0.2%Mn)

応力がピークとなった以降、その後は動的再結晶が進行しているものと考えられる。また、Al の含有量の違いでは、Al 含有量が大きくなるにつれて、ピークの応力値も増大する傾向が得られている。また、ビッカース硬さの測定結果も図 9 に示すように、Al 含有量の増加に従って硬さも増加していることが確認できる。これらの結果は Al の含有量の増加とともに相対的に金属間化合物の体積が

増加することが原因であると考えられる。

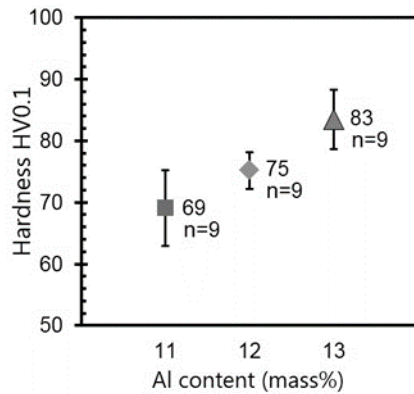


図9 鋳造された Mg-x%Al-0.2 Mn 鋳造まま材の硬さ

3・4 Mg合金/Alクラッド材の製造実験結果

図10(a), 図10(b), 図10(c), 図10(d)および図10(e)は, 表1のクラッド製造の実験条件において, ロール間隙を異なる5種類のロールギャップ(見かけの圧下率0%, 5%, 10%, 15%, 20%)を設定して, 各実験条件下で製造されたAM100/A1050クラッド材を示している。

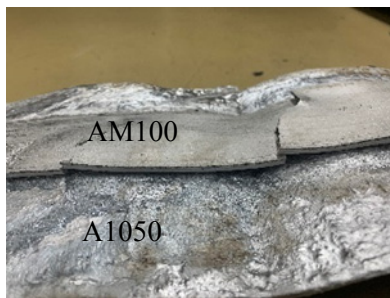


図10(a) 鋳造したクラッド (圧下率0%)



図10(b) 鋳造したクラッド (圧下率5%)



図10(c) 鋳造したクラッド (圧下率10%)

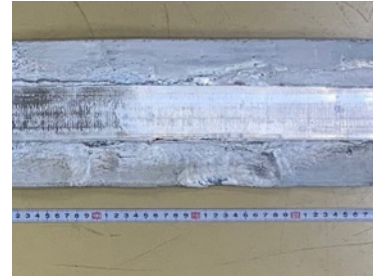


図10(d) 鋳造したクラッド (圧下率15%)



図10(e) 鋳造したクラッド (圧下率20%)

図10(a)~図10(e)よりクラッドは表1に示す実験条件では, 見かけの圧下率を0%~20%まで変化させた場合, 図10(d)および図10(e)に示すように, 見かけの圧下率が15%, 20%の場合に接合が可能であった。それ以下の圧下率では剥離や割れが発生し, クラッドが得られていないことが判明した。

3・5 クラッド接合部の組織観察および硬さ試験

図11(a), 図11(b)および図11(c)は, 表1のクラッド製造の実験条件において, 見かけの圧下率が10%, 15%, 20%の場合の接合部の組織を示している。

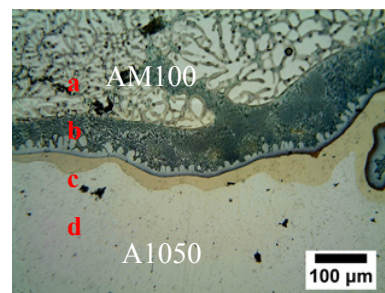


図11(a) クラッド接合部 (圧下率10%)

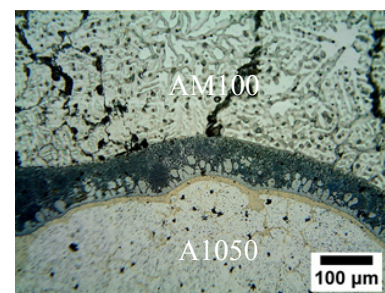


図11(b) クラッド接合部 (圧下率15%)

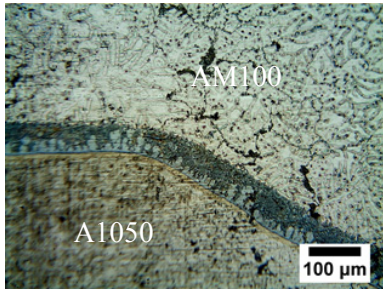


図 11(c) クラッド接合部 (圧下率 20%)

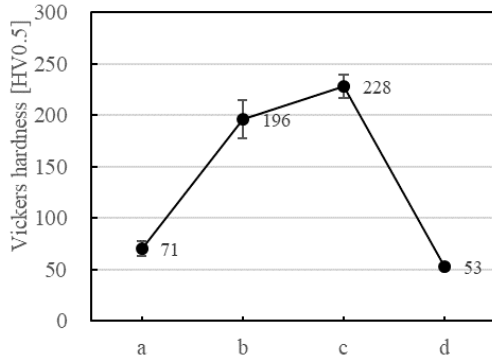


図 12 クラッド接合部各位置における硬さ

接合部の各位置における硬さ試験の結果を図 12 に示す。図 11(a)~図 11(c)の組織観察および、図 12 の硬さ試験の結果より Al 側の c の位置には多量の金属間化合物の分布があるものと推測される。図 12 の b および c 部を含む、混合層の厚さは、 $60\mu\text{m}$ から $120\mu\text{m}$ 程度であり、見かけの圧下率が 20% の場合 $68\mu\text{m}$ であった。

3・6 クラッドのせん断試験の結果

図 13 にクラッド製造試験で得られた Mg 合金/ Al クラッドのから切り出したせん断試験片の寸法を示している。図 13 のせん断試験片を行った結果、クラッドの最大せん断応力は、 44MPa が得られており見かけの圧下力が 15% 以上を負荷して接合した試験片では、十分な接合強度を有していることが明らかになった。

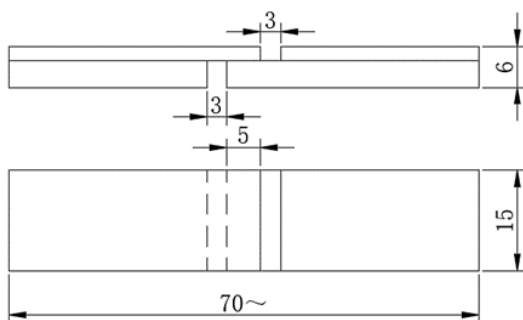


図 13 せん断試験片の寸法

3・7 熱間鍛造試験の結果

図 14 に示すヒートシンク形状の製品を、得られた高 Al 含有 Mg 合金铸造まま材から得られたブランク ($47\text{mm} \times 47\text{mm} \times 8\text{mm}$) を切り出して、サーボプレスを使用して熱間鍛造試験を行った。このとき、サーボプレスは 3t の背圧をかけるように設定し、成形温度のみを変えて成形試験を行った。

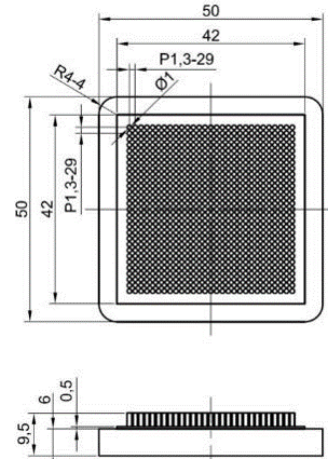


図 14 鍛造成形品の寸法

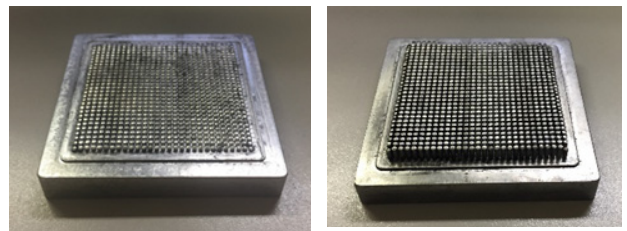


図 15(a) (左側) 鍛造成形品 (AZ111, $T_f: 380^\circ\text{C}$)

図 15(b) (右側) 鍛造成形品 (AZ111, $T_f: 410^\circ\text{C}$)

図 15(a) は Mg-11%Al-1.0%Zn を使用して、鍛造温度 390°C で成形した場合、図 15(b) は 420°C で成形した場合である。図 15(a) ではピン部の成形が不十分であったが、成形温度を上げることで熱間鍛造が可能であることを示している。実験した Al 含有量が 13% である Mg-11%Al-1.0%Zn の場合でも成形温度を 425°C まで上げることで、図 15(b) と同等な成形品が得られることを確認している。

4. 結論

Al 含有量の高い AM 系および AZ 系の Mg 合金の双ロールキャストを行いクラッドの製造および熱間鍛造に有効であることを明らかにした。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、公益財団法人天田財団の一般研究開発助成を受けました。ここに記して厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1)H. Watari et.al. : J. of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Vol.16 (2006), 172.
- 2)G. Y. Feng, H. Watari, et.al. : Key Engineering MAterials, Vol.880 (2021), 17.