Sn 含有双ロール鋳造 Mg-Al-Zn 系および Mg-Al-Mn 系合金の結晶組織と冷間成形特性

東京電機大学　理工学部　理工学科　機械工学系
教授　渡利　久規
（2022 年度 一般研究開発助成 AF-2022015-B2）

キーワード：双ロール鋳造，Sn 添加，冷間曲げ成形性

１．研究の目的と背景

近年, 自動車産業ではガソリン車の燃費向上による CO_2 排出量削減が求められ, 今後主流になると考えられる電気自動車(EV)においても, 航続距離向上のため車両の抜本的な軽量化が求められている. マグネシウム(Mg)合金は実用金属中で最も軽量であり，比剛性・制振性・リサイクル性にも優れることから車体軽量化への適用が期待されているが, 六方晶構造に起因するすべり系の少なさと強い集合組織のため常温での成形性に乏しく, 実用化されている構造部品はごくわずかである.

従来，Mg 合金展伸材はビレット鋳造後に均質化・熱間圧延・焼鈍を経て製造されるが，工程数が多くコストが高いことが実用化の障壁となっている. これに対し双ロール鋳造法は，溶湯を一対の回転ロール間に直接注入し，急冷凝固と圧延を同時に行うことで薄板を直接製造できる連続鋳造プロセスであり, 工程の短縮と微細な鋳造組織の獲得を同時に実現できる製造法として注目されている. 一方, 双ロール鋳造まま材は依然として強い基底面集合組織を持つため, 常温での曲げ加工時に割れを生じやすいという課題がある．Sn を添加した Mg-Al-Zn 系合金では，Sn 原子の存在により非底面すべりの活動が促進され, 動的再結晶時の集合組織が弱化することが報告されており, 双ロール鋳造と適切な後処理（圧延・繰返し曲げ等によるひずみ付与と再結晶）を組み合わせることで，常温成形性を大きく改善できる可能性がある.

そこで本研究では，Sn 含有双ロール鋳造 Mg-Al-Zn 系合金(AZT912：Mg-9％Al-1％Zn-2％Sn)および Mg-Al-Mn 系合金(AM60)を対象に，鋳造まま材と，異周速圧延・繰返し曲げ加工＋圧延を組み合わせた組織制御材の結晶組織を調べるとともに, 常温Ｖ曲げ試験によって冷間成形性を評価し，市販展伸用 Mg 合金(AZ31，AM60)と比較検討した.

２．研究方法

２・１　双ロール鋳造実験

AZ91 に Sn を 2mass％添加した AZT912(Mg-9％Al-1％Zn-2％Sn)を，双ロール鋳造機により板厚 2.4±0.09 mm，板幅 100 mm，長さ 1500 mm の鋳造板として作製した．Fig.1 に鋳造ラインの外観を示す.



Fig.1　双ロール鋳造ラインの外観

２・２　組織制御プロセス

鋳造まま材に対し, (1) 鋳造まま, (2) 異周速圧延, (3) 繰返し曲げ・逆曲げおよび圧延（曲げ半径 R＝21t），(4) 同(R＝15t)の 4 条件の後処理を施し，付与するひずみの経路と量を変えることで集合組織のランダム化の程度を変化させ，常温成形性への影響を系統的に調べた. 比較材として，市販展伸用 MgAl 合金 AZ31(AM31-O)および AM60(AM60-O)の圧延材を用いた.

異周速圧延は，直径の異なる 2 本のロールを無潤滑・2 パス（圧下率 4%，6%，合計約 10%）で通板し，板厚方向にせん断ひずみを付与するプロセスである(Fig.2). 一方, 繰返し曲げ・逆曲げは，直径 30 mm のロール 3 本を用いて材料に曲げ・逆曲げを繰返し与えるプロセスであり(Fig.3)，いずれの処理後も 406℃・5 時間の溶体化処理と 60℃の温水焼入れを行い, ひずみ付与によって蓄積した歪エネルギーを再結晶に利用した.

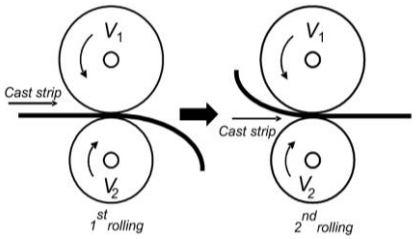


Fig.2　異周速圧延によるひずみ付与の模式図

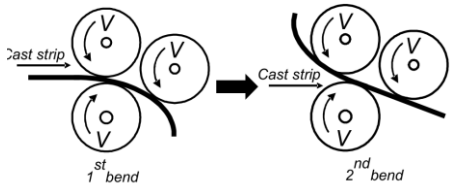


Fig.3　3 本ロールによる繰返し曲げ・逆曲げの模式図

本研究で提案する板材の製造プロセス全体の概要を Fig.4 に示す.

2・3　冷間 90°　V曲げ試験

冷間で行った 90°V曲げ試験装置を Fig.5 に示す.



Fig.5　冷間 90°　曲げ試験装置

各条件の板材について，90°V曲げ試験（ボトミング曲げ，荷重制御）により常温での冷間成形性を評価した．供試材の板厚は 2.4 mm, パンチ先端半径 R は 3.3, 6.0, 7.2 mm, 成形速度は 1.0 mm/min とし，圧下方向投影面積あたり約 25 MPa の面圧に達した時点で圧下を停止した．曲げ方向は圧延方向(0°)およびこれと直角方向(90°)の 2 方向とし，各条件 3 本ずつ試験した．評価は，Fig.6 に示すように，割れのないもの(A)，引張り側だけに割れが発生し，圧縮側には割れのないもの(B)，引張り側と圧縮側の両方に割れが発生したもの(C)，完全に分離したもの，の 4 水準に分類し，あわせて除荷後のスプリングバック量（戻り角度）も測定した.

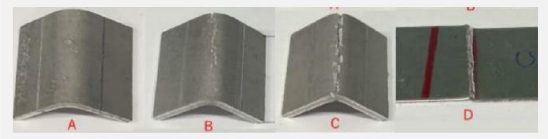


Fig.6　曲げ試験結果の評価

3．実験結果

3・1　鋳造組織

Fig.7 に示すように，鋳造まま材は板厚方向で組織が大きく変化しており，急冷される表層近傍では微細な等軸晶が，板厚中心部に向かうにつれて粗大な柱状晶ないし等軸晶が成長していることが確認された．これは双ロール鋳造特有の冷却速度分布を反映した典型的な鋳造組織であり，この不均一な鋳造組織が，後続の圧延・曲げ加工によるひずみ付与と再結晶挙動，ひいては最終的な集合組織のランダム化の程度に影響すると考えられる.

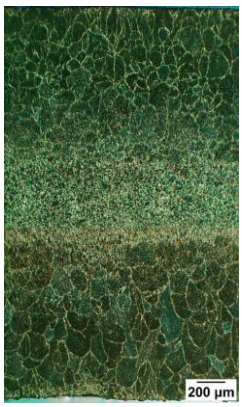


Fig.7　双ロール AZT912 合金鋳造まま材の組織

3・2　組織制御後の結晶粒径

異周速圧延後に 406℃・1 時間の焼鈍を行った材料では，Fig.8 に示すように板厚中心部で平均結晶粒径約 22 μm, 表層部で約 54 μm まで微細化し，鋳造まま材（表層部で約 100 μm）と比べて表層近傍の組織が顕著に微細化した．一方，繰返し曲げ・逆曲げ後に同条件で焼鈍した材料は，Fig.9 に示すように板厚中心部で約 28 μm，表層部で約 108 μm であり，双ロール鋳造まま材とほぼ同等の粒径にとどまり，曲げ・逆曲げのみでは顕著な結晶粒微細化は生じないことが分かった．また，曲げ半径の違い(R＝21t，R＝15t)による組織への影響も明確には認められなかった.

この結果は，常温冷間成形性の向上が単純な結晶粒微細化（ホール・ペッチ効果）のみによるものではなく，繰返し曲げ・逆曲げによって導入される双方向のせん断ひずみが，再結晶時の結晶方位分布（集合組織）を選択的にランダム化する効果によってもたらされていることを示唆している.

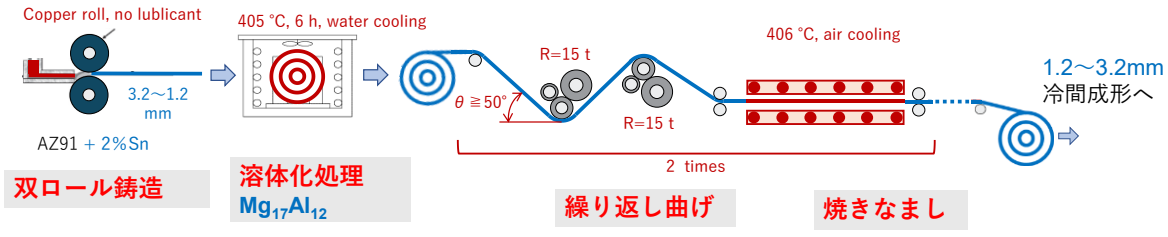


Fig.4　板材の製造プロセス

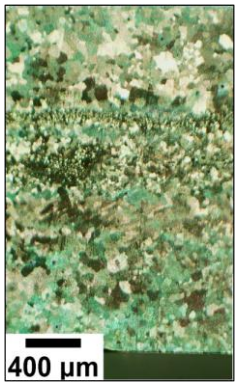


Fig.8　異周速圧延，焼鈍後の組織



Fig.9　繰返し曲げ・逆曲げ，焼鈍後の組織

3・3　90°Ｖ曲げ試験

Table 1 に 90°Ｖ曲げ試験結果を示す．鋳造のままの AZT912 は曲げ R が 4t 以外は，0°方向，90°方向で C と D 判定となった. 異周速圧延を施した材料ではいずれの方向も B 判定がほとんどであり，顕著な改善は見られなかった．これに対し，Table 1 に示すように，繰返し曲げ・逆曲げと 2 段ショットピーニングを組み合わせた材料(R＝3t,3.5t,4t)では，0°，90°方向とも,繰り返し曲げを 4 回繰り返した条件を除いて，大部分が A または B となり，割れの発生が大幅に抑制された.

これに対して，Table1 に示すように，繰返し曲げ・逆曲げと 2 段ショットピーニングを組み合わせた材料(R＝3t, 3.5t, 4t）では，0°，90°方向とも,繰り返し曲げを 4 回繰り返した条件を除いて， 大部分が A または B となり，割れの発生が大幅に抑制された. 特に繰り返し曲げ 2 回→焼鈍→繰り返し曲げ 2 回→焼鈍の場合, R＝3.5t, R=4t のすべてのケースで割れを生じることなく 90 度曲げが可能であった. Table 1 に示す条件の中で 2 回の繰り返し曲げの後に，2 段ショットピーニングを施した場合の効果はあまりなく，むしろ表面の割れを誘発する結果となった．Table 1 に示す結果からは，繰返し曲げ・逆曲げによって板厚内にひずみが蓄積し，化合物 Mg_2Sn が，再結晶後の粒界にピン止め(Zener pinning)として働き、粒界の移動（=粒成長）を機械的に抑制することで, 核生成に寄与するだけでなく, 集合組織ランダム化機構に寄与したのではないかと考えられる.

3・4　スプリングバック

スプリングバック量は，鋳造まま材で 10.9°であったのに対し，異周速圧延材では 15.6～19.8°とやや増加し，繰返し曲げ・逆曲げと圧延を組み合わせた材料では 4.2°～13.1°であった. 市販 AM31-O（90°方向）は 15.5°であり，組織制御を施した AZT912 材はスプリングバック量においても市販材と同等以下に抑えられることが確認された. Fig.10(a)および Fig.10(b)に繰返し曲げ・熱処理を付与した AZT912 材の曲げ試験片外観とスプリングバック測定の様子を示す.

3・5　考察

Sn 含有双ロール鋳造材の常温成形性が，鋳造プロセスそのものよりも，むしろ後続の組織制御プロセス（ひずみ付与経路と再結晶条件）に強く支配されることを示している. 特に繰返し曲げ・逆曲げによる双方向ひずみの導入は，一方向圧延のみでは得にくい集合組織のランダム化を促進し, 非底面すべりを含む多様なすべり系を動員可能にすることで, 割れを抑制しつつ曲げ加工を可能にできる可能性があると考えられる.

Table 1　90°冷間 V 曲げ試験結果

No.	工程	曲げ線	パンチ先端半径R / mm		
			4t	3.5t	3t
1	AZT912-T4双ロール材まま	RD	CCDD	DDDD	CDDD
		TD	BCDD	CDDD	CCDD
6	繰返曲2パス → 焼鈍 → 繰返曲4パス → 焼鈍	RD	AAAB	AABD	BBBB
		TD	AAAC	AABC	AABC
7	繰返曲4パス → 焼鈍 → 繰返曲4パス → 焼鈍	RD	繰返曲4パス後に板表面に割れ		
		TD			
8	繰返曲2パス → 焼鈍 → 繰返曲4パス → 焼鈍 → 二段SP → 焼鈍	RD	AAAB	ABBB	BCDD
		TD	ABBC	ABBB	BBCD
9	繰返曲4パス → 焼鈍 → 繰返曲4パス → 焼鈍 → 二段SP → 焼鈍	RD	繰返曲4パス後に板表面に割れ		
		TD			
5	繰返曲2パス → 焼鈍 → 繰返曲2パス → 焼鈍	RD	AAAA	AAAA	BCCC
		TD	AAAA	AAAA	AABB

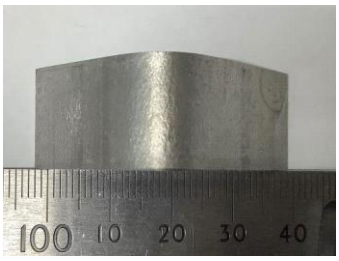


Fig.10(a)　AZT912 の曲げ試験片外観



Fig.10(b)　スプリングバック量(4.2°)の測定

特に繰返し曲げ・逆曲げによる双方向ひずみの導入は，一方向圧延のみでは得にくい集合組織のランダム化を促進し，非底面すべりを含む多様なすべり系を動員可能にすることで，割れを抑制しつつ曲げ加工を可能にしたと考えられる．今後は結晶方位分布を定量的に評価し，このメカニズムを検証する必要がある．

以上のように，双ロール鋳造と繰返し曲げ・逆曲げによる組織制御を組み合わせることで，従来は常温での曲げ加工が困難であった Mg 合金展伸材の適用範囲を拡大できる可能性が示された．冷間成形性を改善した Mg 合金の実用化として想定する用途は，例えば，切板のプレスブレーキによる冷間精密板金加工，および コイル材の冷間ロール成形等（EV のバッテーリーケース等）であり，自動車の構造部品への適用を想定した場合には，本プロセスは既存のロール成形ラインへの後付けが比較的容易であり，鋳造から板材までの工程短縮とあわせて，Mg 合金部品の実用化・軽量化に資する加工技術になり得ると考えられる．

3・6　今後のプロセス構想

現在，β相の析出状態を積極的に制御することで，さらなる常温成形性の向上を狙った新たな加工プロセスを構想している．具体的には，双ロール鋳造＋溶体化処理（408℃, 6 h, 温水焼入れ）によってβ相を固溶させた後，(1) 室温での軽圧下 PV 圧延（約 8%, 1 パス, 張力 7.2 MPa）と 360℃・10 分の高温時効によってβ相を連続的に析出させる経路，および (2) 275℃・圧下率 13%の温間ペアクロス圧延によってβ相を動的析出させる経路の 2 通りを比較検討する．いずれの経路も板厚を約 2 mm から 1.6～1.9 mm 程度まで減厚しつつ，β相の析出形態と結晶組織の微細化・ランダム化を両立させることを狙いとしている．

4．結言

Sn 含有双ロール鋳造 Mg-Al-Zn 系合金(AZT912：Mg-9%Al-1%Zn-2%Sn)を対象に，鋳造まま材と，異周速圧延・繰返し曲げ加工＋圧延を組み合わせた組織制御材の結晶組織を調査し，冷間の 90°V 曲げ試験によって冷間成形性を評価し，市販展伸用 Mg 合金(AZ31)と比較検討した．得られた結果を要約すると以下のようになる．

1) 双ロール鋳造により得た Sn 含有 Mg-Al-Zn 系合金(AZT912)の鋳造組織は，表層の微細な等軸晶と中心部の粗大晶からなる，冷却速度分布を反映した典型的な双ロール鋳造組織であった．
2) 鋳造まま材および異周速圧延材は常温V曲げ試験において割れを生じやすいのに対し，繰返し曲げ・逆曲げと圧延を組み合わせた組織制御を行うことで割れの発生を大幅に抑制でき，常温冷間曲げ成形性が向上することが明らかとなった．
3) 組織制御を施した Sn 含有双ロール鋳造材は，市販展伸用 Mg 合金(AZ31)と比較して明らかに優れた冷間成形性を示し，スプリングバック量も同等以下であった．

謝　辞

本研究は公益財団法人天田財団の一般研究開発助成による．ここに記して関係各位改めて謝意を表す．また，実験遂行にあたりご協力いただいた戸塚穂高氏，山田蒼樹氏，羽賀俊雄博士に感謝いたします．

参考文献

1) H. Tozuka, H. Watari and T. Haga : Improving Room Temperature Formability of Twin-Roll Cast Mg-Al-Zn-Sn Alloy by Repeated Bending, Proc. of the 27th International ESAFORM Conference, Toulouse, France, pp.2499-2505 (2024).
2) H. Watari : Improving Room Temperature Formability of Twin-Roll Cast Mg-Al-Zn-Sn Alloy by Adopting Repeated Bending and Heat Treatment, The 12th Asia Conference on Mechanical and Materials Engineering, Kyoto (2024).
3) 戸塚穂高，渡利久規，羽賀俊雄：Mg-9%Al-1%Zn-2%Sn 双ロール材の冷間曲げ成形性に繰返し曲げとショットピーニングが及ぼす影響，2024 年度春季塑性加工学会講演論文集．
4) 山田蒼樹，戸塚穂高，渡利久規，羽賀俊雄：Mg-9%Al-1%Zn-2%Sn 双ロール材の冷間曲げ成形性に Sn 元素が及ぼす影響，2025 年度軽金属学会講演論文集．