新技術・新製品

機械特性とリサイクル性に優れたカーボン強化マグネシウム合金の開発

橋本嘉昭* 日野 実** 村上浩二***
斉藤 研**** 金谷輝人*****

1. はじめに

マグネシウム合金は，軽量で比剛性が高く，放熱性，防振性，電磁波シールド性に優れるなど，多くの特性を有している．特に輸送機器分野では，CO_2 排出量削減の観点から，車両の軽量化が最重要課題であり，これにはマグネシウム合金の利用が有効である．また，家電分野では，ノート PC 等，様々な携帯電子機器フレームに用いられている．携帯電子機器は更なる小型化・軽量化が切望されており，マグネシウム合金製フレームに対して機械特性の向上および薄肉で複雑形状が要求されている．現在，その要求に対応するプロセスとして，ダイカストやチクソモールド等の高圧金型鋳造法が広く適用されている．高圧金型鋳造法は100年以上の改良を重ね，複雑形状品を高速で鋳造できる優れた工法であるが，ビスケット・ランナー等の多くの成形端材が生じるため，リサイクル可能な合金とすることは，LCA の観点から重要な要件となる．

筆者らは，マグネシウム合金市中屑のリサイクルに関する研究を進める中で，自動車用ハンドルのマグネシウム合金製芯金に付着したウレタンや，エンジンカバーに付着した焼付き油由来のカーボンが耐食性を大幅に低下させるなど，リサイクル性に悪影響を及ぼすことを示した[1]．同時にカーボンには有害なものと有益なものがあることを見出し，希少元素を用いることなくマグネシウム合金を強化する手法として，リサイクル性に優れたカーボン強化マグネシウム合金の開発に成功した[2]．本稿では，その特徴を報告する．

* ㈱STU：取締役 研究開発室長
** 広島工業大学：教授
*** 岡山県工業技術センター：研究員
**** ㈱日本製鋼所：研究員
***** 岡山理科大学：教授
Development of Carbon Reinforcement Magnesium Alloy Superior in Strength and Recyclability; Yoshiaki Hashimoto*, Makoto Hino**, Koji Murakami***, Ken Saito**** and Teruto Kanadani*****(*STU Co., Ltd. **Hiroshima Institute of Technology. ***Industrial Technology Center of Okayama Prefecture. ****The Japan Steel Works, Ltd.. *****Okayama University of Science)
2015年10月27日受理[doi:10.2320/materia.55.21]

2. 開発の経緯および特徴

マグネシウム合金へのカーボン添加が結晶粒の微細化ならびに機械的性質の向上に寄与することは以前より知られていた[3]．しかし，マグネシウムとカーボンは，両者間の濡れ性が乏しいため，マグネシウム-カーボン合金を作製することは困難で，これまで様々な検討が行われているが，実用化に至っていなかった．

一方，電子機器用マグネシウムフレーム製造を中心に適用されているチクソモールド成形は，マグネシウムインゴットから粉砕したチップを出発原料とし，半溶融状態にされたチップは加熱されたシリンダー内をスクリューによって押出され，金型内に高速充填され，製品へと成形される．出発原料であるチップの表面にカーボンを修飾することができれば，これまで困難であったカーボンが添加されたマグネシウム合金の作製が期待できる．そこで，経済産業省戦略的基盤技術高度化支援事業において，カーボン添加マグネシウム合金の開発研究を行った．

その結果，これまで実用化が困難とされてきたマグネシウム-カーボン合金の開発および実用化に成功した．開発したカーボン強化マグネシウム合金は，1. 静的強度向上，2. 疲労強度向上，3. 耐食性向上，4. 良好なリサイクル性，5. 良品率向上による信頼性向上とコストダウンという優れた特性を有しており，以下に製造プロセスの特徴およびカーボン強化マグネシウム合金(以下，開発合金と記す)の特性を紹介する．

(1) マグネシウム合金チップへのカーボン修飾

図 1 には，AZ91D マグネシウム合金チップ表面へのカーボン修飾のモデルおよびカーボン修飾前後のチップ外観を示す．チップ(平均サイズ：4 mm)表面にカーボンを固定化するためにはカーボンのサイズおよび表面電荷の制御が重要である．なぜならカーボンの固定化は静電吸着に基づいているため，カーボンの最適粒径はナノサイズで，カーボンナノ粒子表面の末端には COOH 基，OH 基，CHO 基等の官能基を修飾し，最適な電荷を付与することにより，カーボン修飾チップ(図 1)を得ることができる．なお，カーボンの粒径や表面電荷ならびに添加量は，後述する成形後の特性に影響を及ぼし，カーボン未添加材よりも逆に特性を低下させる場合も

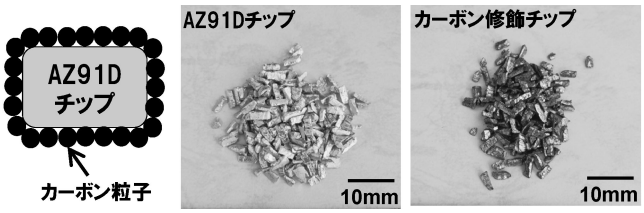

図１　カーボン修飾の概略と AZ91D および開発チップの外観.

表１　カーボン未添加および開発合金の引張特性.

	0.2%耐力(MPa)	破断強度(MPa)	伸び(%)
AZ91D	158	186	2.0
開発合金	187	213	3.0

ある.

⑵　機械特性

電子機器フレームに適用されている AZ91D マグネシウム合金のインゴットをチップ状に加工し，出発原料とした(図1)．チクソモールド成形によって平板(200×100×2 mm)を作製し，JIS に準拠した13B 号試験片を削り出し，引張試験を行った.

表 1 には，カーボン未添加チップおよび開発チップから同一条件でチクソモールド成形した試験片の機械特性を示す．未添加の AZ91D 合金と比較し，開発合金の0.2%耐力，引張強さ，伸びは全て向上し，特に0.2%耐力は18%も向上する[2].

疲労特性についても疲労試験片をチクソモールド成形し，回転曲げ試験によって評価した結果，引張強さと同様，カーボン添加によって15%程度向上した.

⑶　鋳造性

携帯電子機器の小型化・軽量化に対応するため，マグネシウム製フレームは今以上の薄肉で複雑形状が要求されている．成形肉厚が 0.5 mm の湯流れ評価用渦巻き金型を用いた同一条件でのチクソモールド成形品の外観を**図 2** に示す．開発合金による流動長は，未修飾のそれと比べ，大幅に向上しており，良好な湯流れ性が得られる．なお，湯流れ性の向上はチップ表面のカーボンナノ粒子による潤滑効果に基づいている.

一方，チクソモールドやダイキャストでは，溶融と凝固収縮に起因する鋳巣や空気の巻き込みによる内部欠陥が懸念され，特に肉厚が増すにつれ，内部欠陥は発生しやすくなる．そのため，チクソモールド成形は，主に電子機器フレームなどの薄肉部品に適用されてきたが，今後，自動車関連部材へ展開するためには，肉厚の増大に伴って生じる内部欠陥が問題となる．これにも開発チップが有効に作用する.

図 3 は，同一条件で成形した直径 10 mm のダンベル形状品を X 線 CT スキャナーによって撮影した画像で，開発チップによる成形品の内部欠陥は，未添加チップのそれよりも大幅に減少している．このように開発チップは，鋳巣などの内部欠陥の抑制にも寄与する．なお，カーボン添加による内部欠陥の抑制メカニズムは，現在，検討中である.

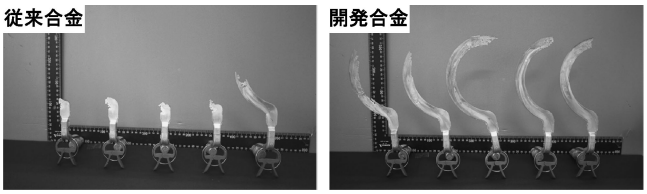

図２　肉厚 0.5 mm の渦巻き金型による流動長.

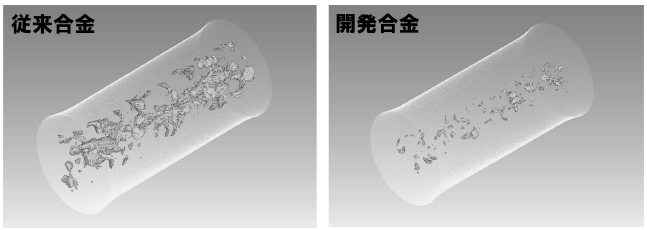

図３　X 線 CT による内部欠陥の比較.

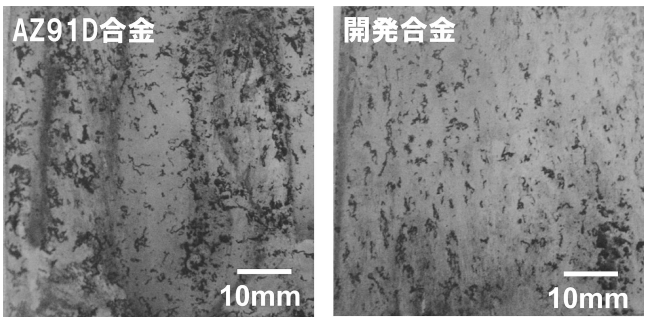

図４　各成形材の塩水噴霧試験24時間後の外観.

⑷　耐食性およびリサイクル性

マグネシウム合金は，前述したように多くの優れた特性を有している反面，電気化学的に卑な金属で，容易に腐食するため，実用に際して耐食性が問題視される．カーボン未添加チップおよび開発チップによる成形品の塩水噴霧試験24時間後の外観を**図 4** に示す．両者は共に腐食しているが，開発材の腐食生成物は，未添加のそれよりも減少しており，添加されたカーボンは素材の耐食性に悪影響を及ぼさない．さらに化成処理や陽極酸化処理などの表面処理材後の耐食性も開発材の方が優れているが，これはカーボンの潤滑効果による素材の偏析が抑制されることに基づく.

次に，リサイクル性を評価するため，開発チップならびに未添加チップによる成形端材 50 kg をそれぞれ溶解し，Dow310に準じた塩を用いて不純物を除去した後，670℃で30分間静置した溶湯からリサイクル鋳塊を作製した．各工程でのカーボン量を測定した結果を**表 2** に示したが，塩を用いる精錬によって得られる鋳塊の全炭素量は，開発合金と未添加合金ともにほぼ同じ値であった．また，開発合金の端材から得られるリサイクル材の機械的特性と耐食性は，未添加チップのそれらと同等以上であった．このことからカーボン修飾チップを出発原料とし，チクソモールド成形した端材のリサイクル材は，通常の AZ91D 合金として使用することができる.

3.　実績と将来性

⑴　ノートパソコンへの採用

本開発技術は，Panasonic 製ノート PC「レッツノート

表２　従来合金および開発合金の全炭素量.

検体	検体説明	全炭素量(mass%)
1.	AZ91D 4 mm チップ	0.0005
2.	1.の射出成型品	0.0065
3.	開発合金の射出成型品	0.1132
4.	3.の再溶解品	0.0030

MX」シリーズと韓国 LG 製ノート PC「グラム」シリーズで採用となった．前者は，強度・信頼性・スペック等に於いてノート PC では最高級の分類に属するため，性能と軽量化の両立が困難と思われていたが，「光学ドライブ搭載で世界最軽量」(2014年)を実現することに成功した(**図 5**)．後者は，14インチで 980 g を達成し，韓国史最軽量ノート PC として，韓国歴史院に登録となった．このように複数の携帯電子機器フレームに採用され，現在もタブレット等への新規フレームの量産試作を行っており，その中で2.⑶項の良好な湯流れ性に基づく良品率の向上が確認されており，コストダウンや信頼性向上に寄与することができる．

⑵　自動車内装品への採用

自動車部品としては，トヨタ自動車製レクサスのドアノブに採用予定されている．レクサスシリーズは日本を代表する高級車ブランドであり，金属を使用することによる高級感と軽量化の両立が望まれたため，マグネシウム合金の適用が検討された．開発当初は，AZ91D 合金で試験を開始したが，強度が不足したために，本開発技術が採用予定となった．これには2.⑵項の機械特性とともに，2.⑶項の内部欠陥の抑制も重要な要因であり，薄肉部品が得意なチクソモールド成形が，今後，本開発技術を適用することによって厚みのある自動車部品等へも展開できる可能性を示唆している．

⑶　振動部位への採用

その他，米国 GE 社の超音波振動装置の筐体にも採用されている．超音波振動装置の筐体に要求される性能は，軽量化・耐食性・防振性・耐久性等であるが，特に振動部位における疲労特性が重要で，2.⑵項に示した疲労強度の優位性が採用のきっかけとなった．

⑷　様々な分野への拡がり

カーボン未添加の AM60B チップならびに開発チップを丸棒試験片形状に各40本，チクソモールド成形した成形品の重量分布を**図 6** に示す．開発材は重量のバラツキが減少するとともに，引張強度および伸びが向上し，より信頼性の高い成形品が得られた．このように本技術は，AZ91D 以外の汎用合金に対しても機械特性を向上させ，内部欠陥を抑制する効果がある．

本開発技術は，AZ91D 合金や AM60B 合金をはじめ多品種の合金に効果があることから，本稿で紹介した電子機器をはじめ，軽量化が必要不可欠な自動車や航空機部材など，様々な製品に対して機械特性の向上のみならず，良品率向上によるコストダウンと信頼性向上を実現する革新的な技術として，本開発技術の適用が拡大することを願っている．

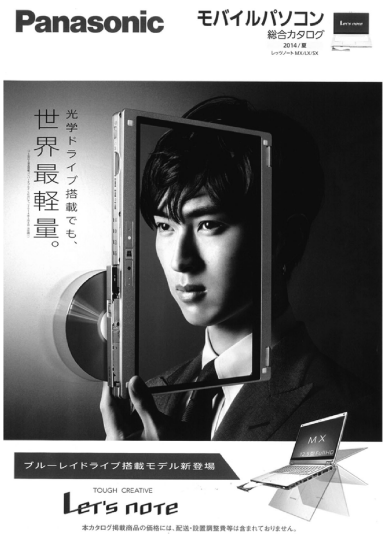

図５　開発技術が採用された製品カタログ.

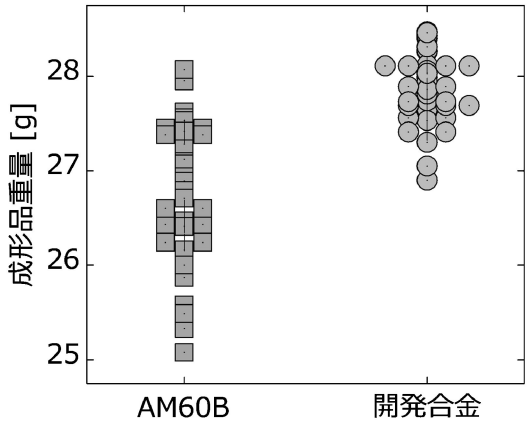

図６　AM60B チップでのチクソモールド成型品の重量分布.

4.　特　　許

本開発技術は，既に特許第5137049号，大韓民国特許10-1310622，中国特許 ZL201280002710.7を取得し，それに基づき，トヨタ自動車レクサスのドアノブに採用予定となった．また，大韓民国特許 10－1310622，中国特許 ZL201280002710.7を利用し，LG 製ノート PC を中国で製造し，日韓中の技術融合の核心的地位を占めた．さらに米国 GE 社での採用に続き，欧州車での適用協議を開始したため，米国および欧州で権利化を申請中である．

文　　献

（1）日野　実，水戸岡豊，村上浩二，橋本嘉昭，金谷輝人：軽金属，**62**(2012), 165–169.
（2）橋本嘉昭，日野　実，水戸岡豊，村上浩二，金谷輝人：軽金属，**65**(2015), 118–122.
（3）牧野邦彦，河田俊郎，羽根秀男：軽金属，**42**(1992), 810–814.