マグネシウム合金の航空機適用

榎本 清志*

Journal of The Japan Institute of Light Metals, Vol. 65, No. 9 (2015), 472-477
© 2015 The Japan Institute of Light Metals

Magnesium alloys for aircraft applications

Kiyoshi ENOMOTO*

Keywords: *magnesium alloy, aircraft*

1. はじめに

航空機の構造用材料としては、20世紀初頭より主としてアルミニウム合金が使われてきたが、最近ではボーイング787やエアバスA350に見られるように、さらなる性能向上および軽量化をねらって炭素繊維強化複合材料(CFRP)の使用量が大幅に増大し、構造重量の半分程度を占めている。

しかしながら、Al-Li合金が適用される動きもあり、CFRP使用が今後も大幅に続くとは必ずしも言えず、金属材料も使われ続けるのは間違いない。

一方、マグネシウムは比重が1.74でアルミニウムの2/3と構造用金属材料の中で最も軽量であり、航空機構造用材料として、大きな可能性を有しており、歴史的にも航空機構造へ適用されたこともある。

本稿では、マグネシウム合金の航空機構造適用の歴史および新しいマグネシウム合金に関する取り組みについて解説する。

2. マグネシウム合金の航空機構造適用の歴史

マグネシウム合金が最初に航空機部品へ適用されたのは、1927年北イタリアで、水上飛行艇サンタ・マリア号のエンジンブロック、オイルパンなどの鋳物部品である¹⁾。1930年代にはドイツのFocke Wulfの主要構造の一部にマグネシウム合金板、鍛造品、鋳造品が630kg使われた²⁾。

1940年代になると、Lockheed F-80C戦闘機一機の全機構造を試験的にマグネシウム合金で製造することも行われた³⁾。1機で最もマグネシウム合金が適用されたのは図1に示す米国の戦略爆撃機Convair B-36で、全体で8.6トンものマグネシウム合金が適用され、機体、翼、尾翼部に3.4トンのマグネシウム合金板材が使用された¹⁾。アルミニウム合金に

比べて4.5トンの軽量化を実現したということで、常に軽量化が求められる航空機にとって、魅力的な材料であることは間違いない。1950年代にはソ連において爆撃機TU-95MSに1550kgのマグネシウムが使用された³⁾。日本においては1940年に図2に示す高研機キ78(研三)において発動機架にマグネシウム合金の一体構造としたので、アルミニウム合金に比べて半分程度の重量になった。また、1950年代には富士重工業が米国ビーチクラフト社のライセンス生産により図3に示すT-34Aメンター練習機を生産していたが、舵面にマグネシウム合金が適用されていた²⁾。

その後、マグネシウム合金の耐食性の問題や価格高騰があり、徐々にアルミニウム合金に置き換わって適用量が減ってきた。現在航空機に適用されているのは、振動減衰特性を活かして、図4に示すようなヘリコプタ、固定翼機のトランスミッションケースやギアボックス等のケーシング等一部に限られている⁴⁾。しかし、強度上および耐食性、さらには耐火性の問題を克服すれば、航空機の構造部材への適用は十分考えられる。

世界的に見ると、航空機用鋳造マグネシウム合金の開発は、主として英国のMagnesium Elektron Limited社で行われ、図5に示すように強度、耐熱性、耐食性の向上が図られてきた²⁾。

図1 Convair B-36

*一般財団法人素形材センター 次世代材料技術室 航空機材料技術部(〒105-0011 東京都港区芝公園3-5-8 機械振興会館) Aircraft Materials Engineering Division, RIMCOF Research Center of Advanced Metals and Composites, SOKEIZAI CENTER (Kikai Shinko Bldg., 3-5-8 Shibakoen, Minato-ku, Tokyo 105-0011) E-mail: enomoto@sokeizai.or.jp
受付日:平成27年5月1日 受理日:平成27年6月24日

図2 高研機キ78

図3 T-34A メンター

図4 ヘリコプタ用トランスミッションケース

図5 マグネシウム鋳造合金開発の流れ

図6 FAAマグネシウム耐火試験

3. マグネシウム合金の耐火性に関する動き

マグネシウム合金は耐火性の観点から、航空機内部への適用がアメリカ連邦航空局 (FAA) により禁止されていた。しかし、1990年代後半に独立行政法人産業技術総合研究所においてマグネシウム合金にカルシウムを添加することにより、発火温度の上昇が報告されている。その後、英国や韓国においても耐火性が向上したマグネシウム合金が開発された。FAAでも図6に示す試験をクリアすれば、機内での適用が認められる状況にあり⁵⁾、マグネシウム合金の航空機への適用に関しては追い風になっていると言える。

4. 世界の航空機へのマグネシウム合金開発の動き

欧州、北米、オーストラリア、中国、韓国等海外ではマグネシウムを戦略材料に位置づけ、航空機だけではなく自動車等もターゲットに公的資金により精力的に研究開発を進めて

いる。

韓国の鉄鋼大手メーカーのPOSCOではマグネシウム精錬工場はもとより自動車向けにマグネシウム板材の製造を始めている。2000年には韓国の生産技術研究院 (KITECH) で、市販マグネシウム合金にCaOを1mass%程度添加し発火温度の向上と湯流れ性も向上する「ECOマグネシウム」を開発した。発火温度は620~660°C程度とのこと。2012年に米国ボーイング社は韓国知識経済部と「ECOマグネシウム」を含めて素材・部品分野の包括的協力に向けた了解覚書 (MOU) を締結した⁶⁾。

欧州ではマグネシウム合金を用いることにより、アルミニウム構造に比べて35%の軽量化を狙いAEROMAG (Aeronautical Application of Wrought Magnesium) プロジェクトが実施された。期間は2005年から2008年で、EADS、エアバス、Magnesium Elektron Limited社等21機関が参加し、AZ31、WE43等の材料で構造部材を試作してアルミニウム合

表1 研究開発体制

		テーマ区分	担当企業等	担当大学・独法
<div>総合技術委員会</div> <div>複合材非加熱成形技術委員会</div> <div>複合材構造健全性診断技術委員会</div> <div>次世代マグネシウム合金部材化技術委員会</div> <div>データベースワーキンググループ</div> <div>RIMCOF</div> <div>PL(プロジェクトリーダー) (独)宇宙航空研究開発機構 石川航空プログラムディレクタ(当時)</div> <div>SL(サブPL) 「構造健全性診断技術」 東京大学 武田教授</div> <div>SL(サブPL) 「次世代Mg合金技術」 長岡技術科学大学 小島学長(当時)</div>	次世代複合材料技術	非加熱成形技術	電子線硬化プロセスによる航空機用構造部材の開発 川崎重工(株) 東邦テックス(株) (株)ジャムコ 原子燃料工業(株)	
			紫外線硬化プロセスによる航空機用構造部材の開発 三菱重工(株) 三菱レイヨン(株) 横浜ゴム(株)	大阪市立大学
			光(可視光)硬化プロセスによる航空機用構造部材の開発 富士重工(株) 東レ(株)	山形大学
		健全性診断技術	光相関ブリルアン散乱計測法による航空機構造センシング技術の開発 三菱重工(株)	東京大学
			航空機翼BOX構造の損傷モニタリングシステムの開発 富士重工(株) 日立電線(株)	東京大学 東北大学 (独)産業技術総合研究所
	次世代マグネシウム合金技術		高信頼性先進グリッド構造による航空機構造モニタリング技術の開発 三菱電機(株)	東京大学
			光ファイバセンサによる航空機構造衝撃損傷検知システムの開発 川崎重工(株)	東京大学
	総合調査研究	次世代マグネシウム鋳造合金部材の開発	石川島播磨重工業(株) (株)コベルコ科研	長岡技術科学大学
		次世代マグネシウム粉末合金部材の開発	三菱重工(株) 福田金属粉工業(株) (株)コベルコ科研	東京大学 熊本大学
		複合材料特性評価、データベース	RIMCOF	(独)宇宙航空研究開発機構 大阪府立大学 金沢工業大学

金と比較する各種試験を行った。FSW (Friction Stir Welding) やLBW (Laser Beam Welding) も行い、APU室の外板をストレッチ成形して試作し、マグネシウム合金の構造部材成立性を確認している⁷⁾。

また、時期的には重なるが、やはり欧州においてMagForming (Development of New Magnesium Forming Technologies for the Aeronautics Industry) プロジェクトが実施された。期間は2006年から2009年でEADS, エアバス, Magnesium Elektron Limited社等12機関が参加している。AZ31, AZ80, WE43等の材料を用いて窓枠鍛造品, コンプレッサインペラ鍛造品, 超塑性成形ドア, 深絞り成形アンテナサポート等を試作して、マグネシウム合金の成形技術のレベルアップを狙った。こちらのプロジェクトは部品レベルでマグネシウム合金を適用するための成形技術の開発である⁸⁾。

前述したようにFAAでは耐火試験をクリアすれば、航空機内への適用が認められることとなったが、Magnesium Elektronはマグネシウム合金の航空機用座席への適用を2014年に発表した⁹⁾。チタン合金を座席へ適用した例はあったが、マグネシウム合金は初めてである。

5. 日本におけるマグネシウム合金の研究開発

欧米では1950年～1980年代に急速凝固による高強度マグネシウム合金の開発が行われたが、その後わが国において、1990年代に東北大学金属材料研究所の増本らによりMg-Al-Ca系やMg-TM-RE (TM: 遷移金属) 系のアモルファス合金が開発されたが、実用化には至らなかった¹⁰⁾。

その後1999～2003年に実施された文部科学省特定領域研究 (B)「高性能マグネシウムの新展開」において研究開発が広範囲に実施され、飛躍的な成果が得られた。熊本大学の河村らは、Mg-Y-Zn合金において液体急冷法で作成した合金を固化成形し、濃度変調を伴った新奇な長周期積層構造 (以下LPSO構造という) を有するとともに耐力600MPa, 伸び5%を達成している。また、長岡技術科学大学の鎌土らは、各種の合金組成により、アルミニウム合金と同程度の耐熱特性が得られることを示した¹⁾。

図7 マグネシウム粉末合金製造プロセス

これら大学の研究成果を踏まえて、次世代金属・複合材料研究開発協会 (現 素形材センター) では、経済産業省の民間航空機基盤プログラム「次世代航空機用構造部材創製・加工技術開発」の1テーマとして2003年度～2007年度の5年間、次世代マグネシウム合金製造技術の研究開発を実施した。

研究開発体制を表1に示すが、前述した熊本大学の河村らの「次世代マグネシウム粉末合金部材の開発」と長岡技術科学大学の鎌土らによる「次世代マグネシウム鋳造合金部材の開発」の2テーマで、大学の研究室レベルの成果を実用化することをねらい、企業と連携して実施した。

「次世代マグネシウム粉末合金部材の開発」においてはMg-Zn-Yを基本組成として急冷凝固により強度向上と耐食性向上を狙った。マグネシウム合金は活性金属であるため、大学で実施したガスアトマイズ法では、粉末粒子が細くなると爆発の危険性があり工業化するには問題であった。そこで図7に製造プロセスを示すが、単ロール法を採用することにより急冷薄片作製技術を確認し、安全に高性能合金製造が可能となった。図8に今回作製したマグネシウム合金薄片と市販アルミニウム粉末の爆発燃焼試験結果を示す。マグネシウム薄片の爆発下限濃度が800 g/m³であったのに対し、アルミニウム粉末は140 g/m³であり、安全性が確認された。急冷薄片製造装置を図9に示すが、薄片製造後は裁断、封缶、押

図8 マグネシウム合金と市販アルミニウム合金の爆発燃焼試験結果

図9 急冷薄片作製の概略図および装置外観

図10 マグネシウム粉末合金の比強度

図11 マグネシウム粉末合金の疲労強度

出等の固化成形を行う。目標は7075アルミニウム合金材の1.3倍の比強度と同等の耐食性を有する合金の開発とした。プロジェクトを進めていく中で、Mg-Zn-Yに機械的特性を維持しつつ、耐食性を向上させる第四添加元素を検討し、Alが効果的であることを明らかにした。結果として、図10に示すように比強度は目標であるアルミニウム合金の1.3倍を

上回り、疲労強度も図11に示すように7075アルミニウム合金材の1.8倍を示している。耐食性に関しては図12に示すようにFeが34ppm以下であれば、アルミニウム合金を上回る耐食性を示し、目標を達成している。また、急冷薄片で製造しているにもかかわらず、異方性はほとんどない。最終的には図13に示すようにZ型断面(幅33mm、高さ21mm、厚さ

図12 マグネシウム粉末合金の腐食試験結果

図13 マグネシウム粉末合金によるストリング試作品

図14 マグネシウム鋳造合金製造プロセス

2~3mm)を持つストリングを試作し、約30%の軽量化ができることを実証した¹¹⁾。

「次世代マグネシウム鋳造合金部材の開発」においてはアルミニウム鋳造品の中で最も強度の高いA201材の1.3倍の比強度および同等の耐食性を有する合金の開発を目標とした。図14に製造プロセスを示すが、雰囲気中で溶解鋳造を連続実施できる雰囲気溶解吸引鋳造プロセスを開発した。これにより溶湯の酸化による介在物の発生と巻き込みが抑制可能となり、高品質な鋳物が作製できることとなった。結果として図15に示すようにMg-3.2Gd-0.5Zn-0.2Zr合金において強度目標を達成した。耐食性は図16に示すようにA201合金に匹敵する。試鋳した結果、図17に示すように最小肉厚1.5mmのリブ構造を有する薄肉箱形状鋳物の試作に成功した¹²⁾。プロジェクト終了後も実用化に向けた検討が進められている。

また、河村らは熊本県とくまもとテクノ産業財団と共同

■達成強度(平均値)
Mg-2.0Gd-1.2Y-0.75Zn-0.2Zr : 361MPa (T6のみ)
Mg-3.2Gd-0.5Zn-0.2Zr : 413MPa (T6のみ)

図15 マグネシウム鋳造合金比強度

図16 マグネシウム鋳造合金腐食試験結果

外形 : 250×150×35mm
外周・スキン板厚 : 4.5mm
リブ板厚 : 1.5mm

図17 マグネシウム鋳造合金試鋳品

で、科学技術振興機構(JST)の地域結集型研究開発プログラム(CREATE)「次世代耐熱マグネシウム合金の基盤技術開発」を2006年~2011年に実施し、LPSO型マグネシウム合金の製造基盤技術の確立と「次世代耐熱マグネシウム合金実用化プラットフォーム」の構築を図った⁹⁾。

2012年にはマグネシウムの沸点(1091℃)を超えても発火せず、しかも常温で460MPaという引張降伏強さを持つ「KUMADAI耐熱マグネシウム合金」を開発した。ちなみにLPSO構造で強化した高強度・高耐熱性のマグネシウム合金は「KUMADAI耐熱マグネシウム合金」と呼ばれることになっ

た⁵⁾。

前述したように、FAAは所定の耐火試験に合格することを条件に、マグネシウム合金の航空機機内部品への適用を許可することになり、「KUMADAI不燃マグネシウム合金」、「KUMADAI耐熱マグネシウム合金」とも試験をクリアしている。

このような状況で、2003年から2007年まで実施した「次世代航空機用構造部材創製・加工技術開発」で培ったKUMADAI耐熱マグネシウム合金の基盤技術を実用化につなげるべく、「次世代構造部材創製・加工技術開発」を2013年から2015年の予定で立上げ「マグネシウム合金の開発と航空機への適用研究」を国立大学法人熊本大学、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構、三菱重工業株式会社、富士重工業株式会社が参加して実施中である。

ここでは、急冷凝固法および鋳造法で制作したKUMADAI耐熱マグネシウム合金押出材の大型化と量産化のための基礎技術確立を狙っている。表面処理やFSWによる接合方法についても検討を実施している。合せて圧延材としてMg-Li合金の開発も実施している。

6. おわりに

2014年10月には、国立大学法人熊本大学と米国ボーイング社が急冷凝固法によるKUMADAI耐熱マグネシウム合金に

関し共同研究を行うと発表した¹³⁾。これによりマグネシウム合金の航空機構造適用が大きく推進されると思われる。

今後は経済産業省、NEDO、大学、素材メーカー、国内の航空機メーカーが連携してマグネシウム合金の航空機構造適用をめざし国内のサプライチェーン構築を図って行きたい。

参 考 文 献

- 1) 小原 久：航空と宇宙，2007年3月号，(2007)，11-16.
- 2) 伊牟田守，笹嶋幹雄：第250回塑性加工シンポジウム前刷り，日本塑性加工学会，(2006)，35-42.
- 3) I. Ostrovsky and Y. Henn: International Conference—New Challenge in Aeronautics, ASTEC'07, (2007), 1-5.
- 4) 中田 守，小池 進：R&D 神戸製鋼技報，**50**-3 (2000)，58-61.
- 5) 河村能人：素形材，**55**-6 (2014)，32-38.
- 6) 河村能人：アルトピア，**42**-8 (2012)，9-13.
- 7) http://www.transport-research.info/web/projects/project_details.cfm?id=11198
- 8) http://www.transport-research.info/web/projects/project_details.cfm?id=35092
- 9) <http://magnesium-elektron.com>
- 10) 河村能人，大河内均，関川貴洋，関 義和：金属，**80** (2010)，623-630.
- 11) 都筑隆之：次世代航空機用構造部材創製・加工技術シンポジウム講演集，(2008. 1)，37-42.
- 12) 黒木康徳：次世代航空機用構造部材創製・加工技術シンポジウム講演集，(2008. 1)，31-35.
- 13) <http://www.kumamoto-u.ac.jp/organizations/kico/news/20141110>