

27-2 マグネシウム合金の航空機への適用

1. 概要

航空機用構造材料としては、リサイクル性や環境負荷も考慮する必要があるが、軽量化が極めて重要である。20世紀初頭よりアルミニウム合金が主として使われてきたが、最近ではCFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer: 炭素繊維強化複合材料) の使用量が増えている。しかしながら、CFRPと金属材料は適材適所で使われていくものと思われ、CFRPの使用量が今後も増加し続けるとは必ずしも言い難い。セントルイスにある Boeing Research and Technology の金属材料統括シニアテクニカルフェローが「Return to Metals」と繰り返し言っていたことから、金属材料が今後も使われ続けることに疑いの余地は無い。

実用金属で最も軽いのがマグネシウムであり、その比重は 1.74g/cm^3 でアルミニウムの3分の2である。さらにマグネシウムは資源も豊富で、環境にも優しく、リサイクル性にも優れている¹⁾。特に、マグネシウムの密度に対する曲げ剛性(比剛性)はアルミニウムより優れており、例えば、同じ長さと同幅の板状梁の場合、荷重に対する変位を同等にするにはマグネシウムの梁の厚さはアルミニウムに比べて約15%厚くしなければならないが、それでも密度が小さいので梁の重量は約32%も軽量になる²⁾。このため、マグネシウムを主成分とするマグネシウム合金が次世代の航空機用構造材料として期待されている。しかし、マグネシウム合金は機械的強度の点でアルミにム合金に比べて優位性が無く、腐食し易いという問題を抱えている。しかもマグネシウム合金は燃え易いため、アメリカ連邦航空局 (Federal Aviation Administration: FAA) が内装材への使用を禁止してきたほどである³⁾。

ところが、航空機産業界などからマグネシウム使用禁止令を改定して欲しいという要望がFAAに寄せられ、FAAは2007年からマグネシウムの燃焼試験法の策定に取り掛かり、2014年末にはマグネシウム使用禁止令が解除された^{4),5)}。その結果、航空機分野にマグネシウム新時代が到来している。このような状況において、アルミニウム合金に対抗できる機械的特性と実用レベルにまで耐発火性を高めた新しいマグネシウム合金が我が国で開発された^{2),5)~11)}。開発された合金はKUMADAI耐熱マグネシウム合金とKUMADAI不燃マグネシウム合金であり、これらの新合金が2013年にFAAのマグネシウム燃焼試験をクリアしたこと^{2),8)}、航空機実装化を目指した研究開発が進められている。

本稿では、マグネシウム合金の航空機適用の歴史と研究開発動向、KUMADAIマグネシウム合金の特徴と研究開発の取組み、ならびに今後の展望について述べる。

2. マグネシウム合金の航空機適用の歴史と研究開発動向

2. 1 マグネシウム合金の航空機適用の歴史

マグネシウム合金が最初に航空機部品に適用されたのは1927年の北イタリアの水上飛行艇(サンタ・マリア号)である。それ以降、ドイツ(Focke Wulf Fw 190 A)、アメリカ(Lockheed F-80C, Convair B-36)、ロシア(TU-95MS)等で戦闘機や爆撃機に利用され、特にアメリカの爆撃機(Convair B-36)では8.6トンものマグネシウム合金が使用された¹²⁾。日本においても、1940年には戦闘機(高研機キ78)に使用され、戦後は富士

重工業がアメリカのビーチクラフト社のライセンス生産を行った練習機にマグネシウム合金が使用された¹²⁾。その後、マグネシウム合金の耐食性や発火性の問題、地金価格の高騰ならびに FAA による民間航空機の内装材への使用禁止令等によって、航空機への使用量が減少し、振動吸収性が高いというマグネシウム合金の利点が活かせるような軍需用ヘリコプターのギアボックスカバー等、マグネシウム合金の利用は限定されていた⁵⁾。

ところが、FAA はマグネシウムの使用禁止令を解除するために、2007 年からマグネシウム燃焼試験法の策定に取り掛かり、2014 年にはそれを策定した⁴⁾。この結果、マグネシウム燃焼試験法をクリアするマグネシウム合金が民間航空機に使用できることになり、航空機分野にマグネシウム新時代が到来している。

2. 2 航空機分野におけるマグネシウム合金の開発動向

欧州では、AEROMAG (Aeronautical Application of Wrought Magnesium) プロジェクトが 2005 年～2008 年に実施され、また MagForming (Forming Technologies Development for Introducing Wrought Magnesium Applications in Aeronautics) プロジェクトが 2006 年～2009 年に実施された¹²⁾。これらのプロジェクトには、EADS (European Aeronautic Defence and Space Company: EADS)、エアバス社、Magnesium Elektron 等を中心に、AEROMAG には 21 機関、MagForming には 12 機関が参加した。AEROMAG プロジェクトでは AZ31 合金 (マグネシウム にアルミニウムを 3wt% と亜鉛を 1wt% 添加した合金) や WE43 合金 (Magnesium Elektron が開発した合金であり、マグネシウムにイットリウムを 4wt% とネオジウムを 3wt% 添加した合金) 等の構造部材の試作によって、マグネシウム合金の構造部材の成立性が実証され、MagForming プロジェクトでは AZ31 合金、AZ80 合金 (マグネシウムにアルミニウムを 8wt% と亜鉛を 0.5wt% 添加した合金)、WE43 合金等の成形技術のレベルアップが図られた^{13), 14)}。そして、2014 年には FAA の燃焼試験をクリアした WE43 合金がエアバス社の航空機用座席へ適用されることが発表された¹⁵⁾。

米国では、ボーイング社が 2012 年に韓国知識経済部と「ECO マグネシウム」を含めて素材・部品分野の包括的連携の覚書 (MOU) を締結して、内装品の研究開発を開始した⁸⁾。「ECO マグネシウム」は、市販マグネシウム合金に酸化カルシウム (CaO) を 1wt% 程度添加して発火温度を高めた合金であり、韓国生産技術研究院 (KITECH) で開発された。FAA の燃焼試験をクリアしており、航空機用座席への適用を目指して研究開発が進められている。

一方、我が国では、経済産業省の「民間航空機基盤プログラム」における「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、KUMADAI 耐熱マグネシウム合金の急速凝固粉末冶金材料等の開発が、次世代金属・複合材料研究開発協会 (RIMCOF、現素形材センター)、三菱重工業、福田金属箔粉工業、熊本大学等によって 2003 年～2007 年まで実施され、KUMADAI 耐熱マグネシウム合金のアルミニウム合金に対する優位性が実証された^{11), 12)}。その後、KUMADAI 耐熱マグネシウム合金と、熊本大学が新たに開発した KUMADAI 不燃マグネシウム合金が FAA の燃焼試験を簡単にクリアしたことから、航空機用構造材料としての期待が一気に高まった⁸⁾。その結果、2014 年には、ボーイング社と熊本大学は KUMADAI 急冷耐熱マグネシウム合金の航空機への適用を目指して

共同研究を開始した⁵⁾。また、経済産業省の「次世代構造部材創製・加工技術開発」が2013年から2015年の予定で、*KUMADAI* 急冷耐熱マグネシウム合金と *KUMADAI* 铸造耐熱マグネシウム合金の航空機実装化を目指して、素形材センター、三菱重工業、富士重工業、熊本大学等によって、加工・組立の要素技術開発と航空機構造体への適合性調査が進められている^{5),12)}。さらに、*KUMADAI* 急冷耐熱マグネシウム合金の大型化・低コスト化・量産化を目指した素材製造法の要素技術開発が、内閣府の「戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)」として、住友電気工業、熊本大学、産業技術総合研究所、安全衛生総合研究所によって2014年～2015年の予定で進められている⁵⁾。

3. *KUMADAI* マグネシウム合金の特徴

3. 1 一般的な方法で作製した2種類の *KUMADAI* 铸造マグネシウム合金

(1) *KUMADAI* 铸造耐熱マグネシウム合金

KUMADAI 耐熱マグネシウム合金は主にマグネシウム (Mg) に亜鉛 (Zn) を0.5～2原子%とイットリウム (Y) あるいはガドリニウム (Gd) を2～3原子%添加した合金であり (図1)^{5),7)}、その比重は約1.85g/cm³である。この合金の特徴は、LPSO 構造 (Long Period Stacking Order Structure: 長周期積層構造) という新奇な原子配列構造を持つ相で強化されていることであり、LPSO 型マグネシウム合金とも呼ばれる。

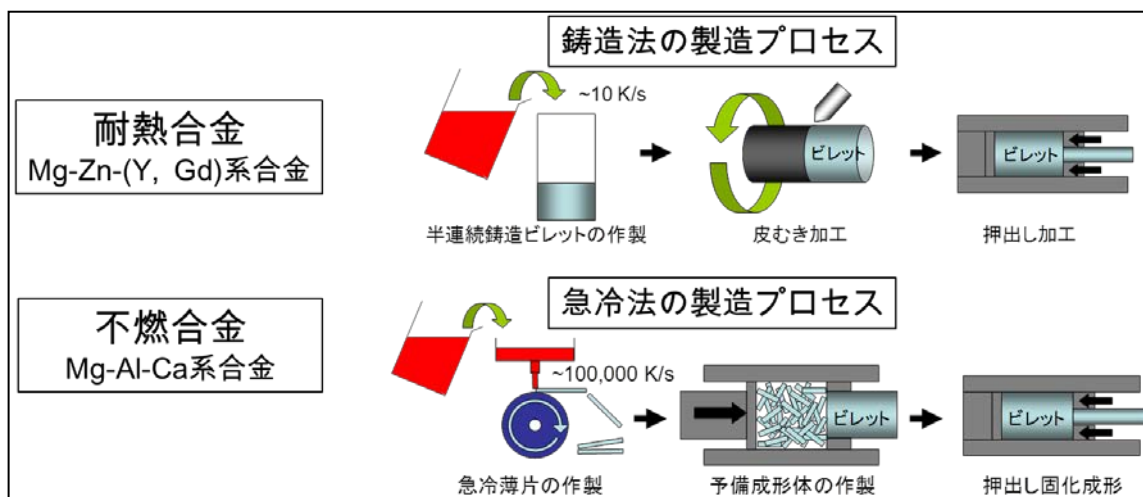


図1 *KUMADAI* マグネシウム合金の種類と製造法

Mg-Zn-Y系合金中に存在するLPSO相の広角散乱暗視野走査透過電子顕微鏡 (HAADF-STEM) 写真を図2に示す⁵⁾。ZnとYが濃化した4原子層 (写真の白いコントラストの点) が6周期という長い周期で積層していることがわかる。ZnとYが濃化した2原子層に挟まれる形で積層欠陥という構造変調が存在しており、この構造変調と濃度変調が同期しているという意味でシンクロ型 LPSO 構造と呼ぶ場合がある⁵⁾。

KUMADAI 铸造耐熱マグネシウム合金は、铸造した状態では平凡な機械的特性しか示さないが、塑性加工すると、LPSO 構造がキンク変形して延性を保持しながら機械的強

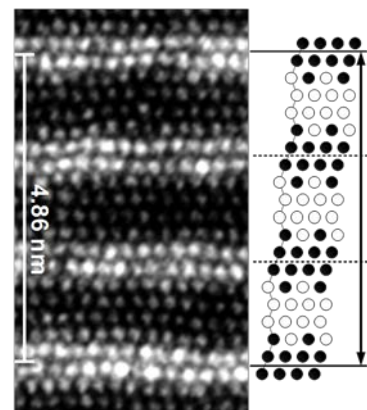


図2 LPSO 構造の HAADF-STEM 写真

度が著しく向上する。キンク変形とは異方性の強い層状物質に見られる挫屈形態であり、結晶の折れ曲がりによって起こる変形である。キンク変形が材料を強化するという現象は、**KUMADAI** 鋳造耐熱マグネシウム合金において初めて見出された現象であり、この「キンク強化」が新しい材料強化法として注目されている。鋳造材を押出し加工して作製した **KUMADAI** 鋳造耐熱マグネシウム合金 (図1) は市販マグネシウム (AZ31B) の2倍近い降伏強さ (注1) を持ち、単位重量当たりの降伏強さ (比降伏強さ) で比較すると、高強度アルミニウム合金を凌駕するものである (図3)。また、200℃での降伏強さは、既存の耐熱マグネシウム合金や耐熱アルミニウム合金よりも高く (図4)、300℃で1,000時間加熱しても特性の低下が小さく、熱的に安定である。耐熱合金と言われる所以がここにある。また、**KUMADAI** 鋳造耐熱マグネシウム合金の圧縮降伏強さは引張降伏強さと同程度であり、一般的なマグネシウム合金とは異なり、降伏強さの対称性は高い。また、**KUMADAI** 鋳造耐熱マグネシウム合金の発火温度は市販マグネシウム合金に比べて230℃以上も高く、カルシウム (Ca) や酸化カルシウム (CaO) を市販合金に添加した従来の難燃マグネシウム合金よりも高い (図5)。さらに、**KUMADAI** 鋳造耐熱マグネシウム合金にアルミニウム (Al) やランタン (La) を複合微量添加することによって耐食性が5倍以上に向上し⁹⁾、優れた機械的特性や耐熱性を保持しながら市販合金 (AZ31B) 並みの耐食性が得られる。このように、従来の難燃マグネシウム合金を凌駕する難燃性と市販合金並みの耐食性を持ちながら、優れた機械的特性と耐熱性を併せ持っていることに、**KUMADAI** 鋳造耐熱マグネシウム合金の革新性がある。

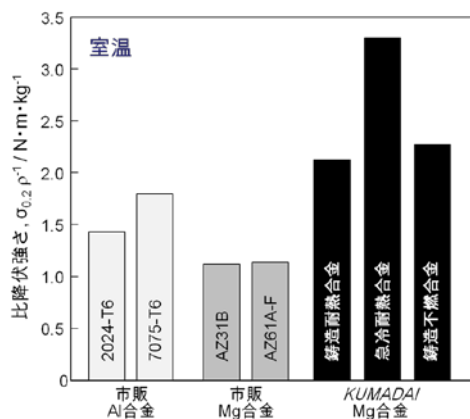


図3 **KUMADAI** マグネシウム合金の優れた機械的強度 (室温)

(注1) 降伏強さ

応力を増していくと、ひずみと応力との関係が比例しなくなり、応力を除去しても歪が残る場合がある。この現象を降伏と呼び、この現象が起き始める応力を降伏強さと呼ぶ。材料の種類によっては降伏現象が明確にみられないものもある。

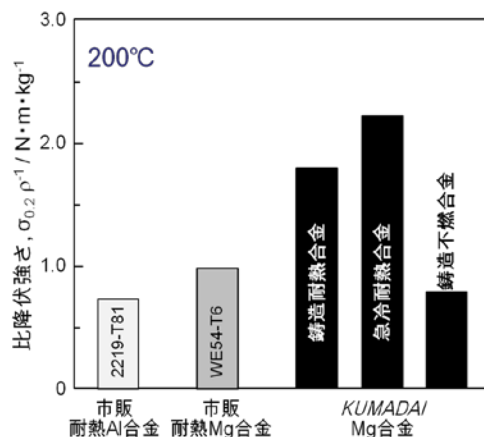


図4 **KUMADAI** マグネシウム合金の優れた機械的強度 (200℃)

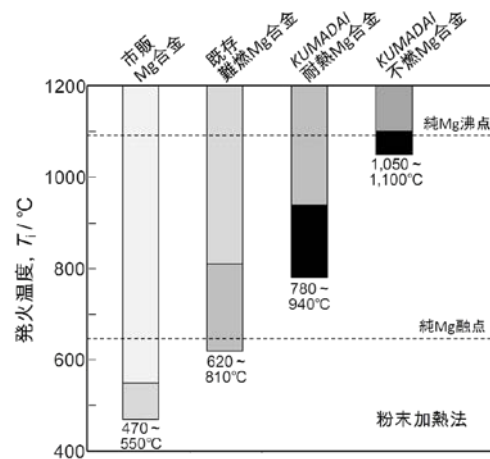


図5 **KUMADAI** マグネシウム合金の高い発火温度

(2) KUMADAI 鑄造不燃マグネシウム合金

KUMADAI 不燃マグネシウム合金はマグネシウム (Mg) にアルミニウム (Al) を 10 原子%とカルシウム (Ca) を 5 原子%添加した合金であり (図 1) ^{5), 8)}、その比重は約 1.79g/cm^3 である。この合金の特徴は、C36 型の原子配列構造を持つ六方晶系の (Mg, Al)₂Ca 化合物相で構成されていることであり、この化合物相が塑性加工によって微細分散して優れた機械的特性が発現する。鑄造材を押出し加工して作製した KUMADAI 鑄造不燃マグネシウム合金 (図 1) の室温での単位重量当たりの降伏強さ (比降伏強さ) は、高強度アルミニウム合金よりも高いが、高温での降伏強さは平凡である (図 3、図 4)。また、その降伏強さの対称性は高い。粉末加熱法で測定した発火温度は $1,000^\circ\text{C}$ を超え、従来の難燃マグネシウム合金や KUMADAI 鑄造耐熱マグネシウム合金を大幅に上回るものである (図 5)。図 6 に示すように、 700°C の溶湯を大気中に出しても燃えることは無く、また沸騰しても発火しないことから、不燃性のマグネシウム合金が世界で初めて実現できたと言える。不燃合金と言われる所以がここにある。大気中での溶解・鑄造が可能であるとともに、切り子の発火の危険性も低くなるので切削加工も容易となる。さらに、KUMADAI 鑄造不燃マグネシウム合金の耐食性は市販の高耐食 AZ91D 合金 (マグネシウムにアルミニウムを 9wt%と亜鉛を 1wt%添加した合金) 等よりも優れている。このように、不燃性ならびに優れた室温強度と耐食性を併せ持っていることに、KUMADAI 鑄造不燃マグネシウム合金の革新性がある。



図 6 KUMADAI 不燃マグネシウム合金の高い発火温度

3. 2 急冷法による高性能化

溶湯を約 10^5K/s の冷却速度で急速凝固した急冷材を押出し固化成形するという急冷法を用いることによって KUMADAI マグネシウム合金の特性は大幅に向上する ^{10), 11)}。鑄造材を押出し加工するという鑄造法に比べて室温降伏強さが約 1.6 倍に、耐食性が 10 倍以上に向上するとともに、高速超塑性という優れた成形加工性が発現する。特に、降伏強さの高い対称性は言うに及ばず、機械的特性の異方性が極めて小さいということが、急冷合金ならではの特徴である。急冷法で作製した KUMADAI 急冷耐熱マグネシウム合金と高強度アルミニウム合金の代表格である超々ジュラルミン (7075-T6) との性能比較を表 1 に示す。

比重が約 3 割小さいにもかかわらず、室温降伏強さと疲労強度は超々ジュラルミンより

も高い。特に、耐食性が2倍近くに達することは、マグネシウム合金が腐食し易いという従来の概念を覆すものであり、*KUMADAI*急冷耐熱マグネシウム合金の特筆すべき特性である。一方、*KUMADAI*急冷不燃マグネシウム合金の研究はあまり進んでいないが、室温降伏強さ 500MPa と伸び 5%が達成されている。

なお、*KUMADAI*急冷耐熱マグネシウム合金と *KUMADAI* 急冷不燃マグネシウム合金の発火温度は融点以上であるので、これらの急冷合金の発火温度は鑄造合金と同じであり、優れた難燃性や不燃性を有している。

表1 *KUMADAI* 急冷耐熱マグネシウム合金と高強度アルミニウム合金との性能比較

	<i>KUMADAI</i> 急冷耐熱マグネシウム合金 (Mg _{96.7} Zn _{0.85} Y ₂ Al _{0.45} 合金)	超々ジュラルミン 7075-T6
比重	1.85 g/cm ³	2.75 g/cm ³
降伏強さ	533 MPa	505 MPa
伸び	10.6%	11%
疲労強度(10 ⁷ 回)	325 MPa	275 MPa
腐食速度	0.16 mm/year	0.29 mm/year

3. 3 FAA 燃焼試験に合格

FAA のマグネシウム燃焼試験法における判定基準では、930°Cのバーナーによる4分間の加熱において、加熱開始から2分以内に発火せず、バーナー加熱停止から3分以内に自然鎮火するものが合格となる^{4), 16)}。*KUMADAI* 鑄造耐熱マグネシウム合金と *KUMADAI* 鑄造不燃マグネシウム合金の両方ともに、バーナーで4分間加熱しても燃えることすらなく、試験片が燃えることが前提の判定基準を極めて容易にクリアしたことから^{2), 8)}、航空機用構造材料として使用できる可能性が高まった。(図6参照)

4. 実用化に向けた研究開発の取組み

4. 1 素材製造技術の開発

*KUMADAI*鑄造耐熱マグネシウム合金については、科学技術振興機構の「地域結集型研究開発プログラム(CREATE)」(2006年12月~2011年11月)によって、既に大型素材の製造基盤技術が確立されている(図7)⁶⁾。400kg溶解規模で、添加元素を直接溶解・

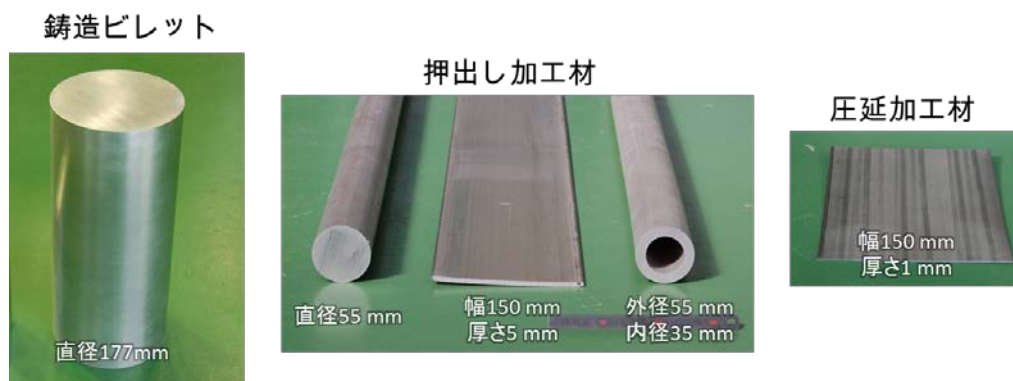


図7 *KUMADAI*鑄造耐熱マグネシウム合金の外観写真

合金化するとともに、目標組成に対して $\pm 5\%$ の精度で成分を制御し、耐食性を低下させる不純物濃度を低減することが可能である。また、介在物を低減して極めて清浄な溶湯を作製することができるフィルタリング技術や、結晶粒径が均一で微細な組織を有する大型の鋳造ビレットを製造できる半連続鋳造技術が確立されている。また、大型の棒・管材や板材等が作製できる押し出し技術や圧延技術が確立されている。さらに、微細加工技術の開発によって、直径 3mm の細管や、直径 0.05mm の極細ワイヤー等の製造技術も確立されている。現在、これらの素形材は、応用製品を開発するために、試作品として提供されている。

急冷法には、図 8 に示すように、溶湯を高圧ガスで噴霧する高圧ガスアトマイズ法、溶湯を高速で回転する銅製ロールの表面に吹き付ける単ロール式液体急冷法、ならびに溶湯を高速で回転する双ロールの間隙に流し込む双ロール式液体急冷法等がある。

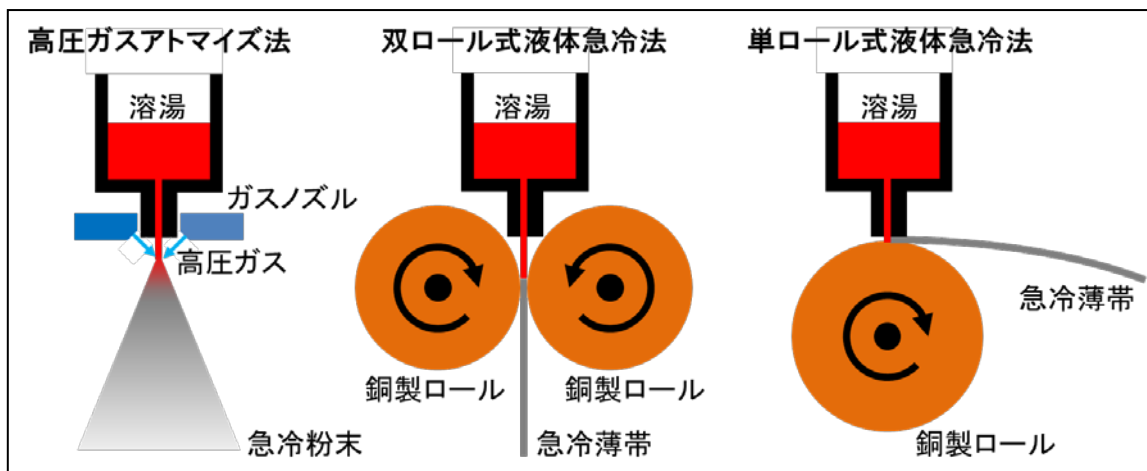


図 8 主な急冷法

KUMADAI 急冷耐熱マグネシウム合金については、溶解量が 1kg ではあるが、従来の高圧ガスアトマイズ法に比べて安全性と量産性と製造コストの点で優れている単ロール式急速凝固薄片製造装置が開発されている⁶⁾。直径 20mm 程度の丸棒材や幅 50mm で厚さ 5mm の板材が作製できているが、現在、内閣府の「戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)」として、低コスト化・量産化を目指した大型素材の製造技術の開発が進められている⁵⁾。

4. 2 航空機実装化の開発

航空機に適した *KUMADAI* マグネシウム合金の合金・プロセス設計、防食や接合・締結等の加工・組立要素技術開発、ならびに航空機構造体への適合性調査が、経済産業省の「次世代構造部材創製・加工技術開発」プロジェクトとして、2013 年から 2015 年の予定で進められている^{5), 12)}。具体的には、内装品、ブラケット類、胴体等のストリンガーへの応用が検討されている。今後は、2020 年から開発が始まるボーイング社の次期民間航空機への採用を目指して、大型素材での材料スペックの整備、加工・組立技術の開発、構造体の最適化設計、構造体の試作・評価が行なわれる予定である。

4. 3 材料普及を目指した特許戦略

KUMADAI マグネシウム合金に関しては「特許群」が形成されている。既に、科学技術振興機構の支援プログラム等を活用して 89 件の特許が申請されており、基本特許も含めて 54 件の特許が国内外で成立している。また、材料普及を目的に「非独占ライセンスシステム」が構築されており、後から参入する企業にもライセンスできる知財運用が行われている。さらに、技術移転企業であるテックマネッジ(株)に窓口を一本化して、迅速なライセンスができる体制も構築されている。

5. 今後の展望

FAA のマグネシウム燃焼試験をクリアした *KUMADAI* 耐熱マグネシウム合金と *KUMADAI* 不燃マグネシウム合金は、高強度アルミニウム合金を凌駕する機械的特性を持つとともに、切削屑が燃える危険性が低いことから、削り出し加工が多用されている航空用構造材料に適していると言える。特に、急冷法で作製した *KUMADAI* 急冷耐熱マグネシウム合金は、超々ジュラルミンを凌ぐ比曲げ剛性、室温強度、耐熱性、疲労強度、耐食性を持つとともに、材料異方性が無く、引張／圧縮耐力の対称性も良いことから、次世代の航空機用構造材料としては最も有望な材料であると言える。

今後の研究開発の課題としては、①開発合金のさらなる高性能化、②大型素材の低コスト量産技術とリサイクル技術の確立、③防食処理、切削、プレス成形、鍛造、接合・締結等の素材の 2 次加工技術や組立加工技術の確立、④開発合金を用いた部品や構造体の開発、⑤規格化と国際標準化ならびに認証取得、などが挙げられる。

航空機の軽量化の要請は今後ますます強まっていくものと考えられ、より軽くて強い材料の開発は重要である。民間航空機へのマグネシウム使用禁止令が解除されて航空機産業にマグネシウム新時代が到来しようとしている状況で、我が国において、航空機用構造材料として有望な *KUMADAI* マグネシウム合金が絶妙なタイミングで開発されたことから、この大きな流れに乗ることができれば、我が国の航空機産業も大きく発展するものと思われる。

6. おわりに

第二次世界大戦前に我が国で超々ジュラルミンが開発され、それを主翼の主桁に用いた零戦が高性能であったように、材料開発の歴史を振り返ると、画期的な材料が発見されるたびに技術革新が起きてきたことは歴史が証明している。新材料が開発されて実用化されるには、通常 20～30 年かかると言われている。*KUMADAI* マグネシウム合金はちょうど折り返し地点を通過したところであり、これからが実用化に向けての正念場と思われる。

参考文献

- 1) Magnesium and Magnesium Alloys, eds. M.M. Avedesian and H. Baker (ASM International, Materials Park, OH, 1999).
- 2) 河村能人: アルトピア, No. 8 (2013), 18-25.
- 3) FAA Technical Standard Order (TSO).
- 4) T. Marker: Fire Tests January 2013 Final Report.pdf, FAA, (2013).

- 5) 河村能人：軽金属, 65 (2015), 466-471.
- 6) 河村能人：日本ガスタービン学会誌, 43 (2015), 35-40.
- 7) 河村能人：金属, 80 (2010), 581-588.
- 8) 河村能人：アルトピア, 8 (2012), 9-13.
- 9) 河村能人：機械と工具, 4 (2014), 74-80.
- 10) Y. Kawamura, K. Hayashi, A. Inoue and T. Masumoto: Mater. Trans., 42 (2001), 1172-1176.
- 11) 河村能人, 大河内均, 関川貴洋, 関義和: 金属, 80 (2010), 623-630.
- 12) 榎本清志：軽金属, 65 (2015), 460-465.
- 13) http://cordis.europa.eu/result/rcn/52107_en.html
- 14) http://cordis.europa.eu/result/rcn/47156_en.html
- 15) <http://magnesium-elektron.com>
- 16) T. Marker: maker-0313-mgtask.pdf., FAA, (2013).