

(解説)

当社における航空機用砂型鋳物の動向

中田 守*・小池 進**

*アルミ・銅カンパニー・大安工場・鋳造室 **アルミ・銅カンパニー・大安工場・品質保証室

Trends in Aircraft Sand Casting at Kobe Steel

Mamoru Nakata・Susumu Koike

Since 1937, Kobe Steel has enjoyed critical acclaim from Japanese aircraft manufacturers, and has maintained the top market share for its aluminum/magnesium castings. Kobe Steel uses two techniques for such castings: a Zr-magnesium alloy casting technique, and a low-pressure casting technique. The production of magnesium alloy casting WE43, a Mg-Y-R.E.-Zr system alloy, requires Cl-free melting and the inert gas shielded casting. A casting process for D357-T6, a high-strength aluminum casting alloy for large integrated aircraft structures, is currently being developed.

まえがき = 大安工場は1995年4月から全面稼働した、当社でもっとも新しい工場の一つである。しかしその前身である旧名古屋工場は、1937年に航空機製造の中心である名古屋に、航空機用鋳鍛造品の専門工場として設立された。

以来、GHQによる7年間の航空機開発中止期間を除き現在に至るまで航空機部品の製造をおこなっており、とくに砂型鋳造においては、アルミニウム鋳物で国内の約70%、マグネシウム鋳物で約90%のシェアを確保している。その技術開発力と品質保証体制は、各航空機メーカーの高い評価と信頼をえて、航空機用高品質鋳物メーカーとして確固たる地位を保ちつづけている。

本稿では、旧名古屋工場および当工場の砂型鋳造部門において、とくにエポックメイキングとなった特殊マグネシウム合金鋳造技術および低圧鋳造技術について振り返るとともに、今後の動向について紹介したい。

1. 特殊マグネシウム合金鋳物の開発

Zrおよび希土類元素を含む特殊マグネシウム合金は、マグネシウム合金のなかでも、耐熱性に優れるなどの長を有しており航空機・ヘリコプタ用ミッションケースなどには欠かせない合金である。

旧名古屋工場は、1937年からマグネシウム合金鋳物の生産をおこなっており、終戦後一時生産を中止した。その後1953年頃、航空機開発再開とともにマグネシウム鋳物の生産を再開し、1955年にはMg-R.E.(希土類)Zr系鋳物の生産を開始した。しかし、当時微細化剤であるZrの添加はZrCl₄を使用した方法であったため、環境面およびchloride contamination低減のために精力的な研究がおこなわれた。佃¹⁾は1959年から1960年にかけて、本系合金の溶解、微細化、機械的性質を広範囲にわたり研究し、9編の論文を発表している。

その後1961年にDowとの技術提携により、マグネシウム合金の基本技術を確立するとともに、EZ33AおよびQE22A合金での鋳造技術を確立した。その結果、写真1に示すヘリコプタ用ミッションケースの生産が可能

になった。

本製品は1977年頃から生産が開始され、現在でも当工場において量産中である。適用合金はMg-R.E.-Ag-Zr系のQE22A-T6合金であり、機械的性質は、引張強さ240MPa、耐力180MPaと高強度を有する。製品重量は約20kgとQE22A-T6合金では、大型の部類に属する。

1977年当時、マグネシウム合金としてEZ33A、QE22Aなどの特殊マグネシウム合金のほか、Mg-Al-Zn系のAZ91C合金やAZ92A合金、Mg-Al-Mn系であるAM100A合金などが主流であった。

1980年頃にMEL社(Magnesium Electron Ltd.英)がZE41A-T5合金を開発した。ZE41A合金はMg-4%Zn-1%R.E.-0.7%Zr合金で、従来より主に使用されていたAZ91C合金やAZ92A合金の鋳造性を改善するために開発された合金であり、当社ではその溶解精錬技術向上に努めた。この結果、同時期に開発された新型中等ジェット練習機T4の風防フレームへのZE41A-T5合金の適用が決定した。写真2に現在でも量産中の本製品を示す。

Zrの添加方法については、1959年当時に佃が発表しているように、母合金による添加が非金属介在物の混入防止にもっともよいとわかっていたものの¹⁾、良質の母合金が安定的に入手できずZrCl₄での微細化を余儀なくされたが、1972年には環境問題からZrF₄+NaClによる



写真1 QE22A合金製ヘリコプタ用トランスミッションケース
Photo 1 Helicopter transmission case of QE22A alloy

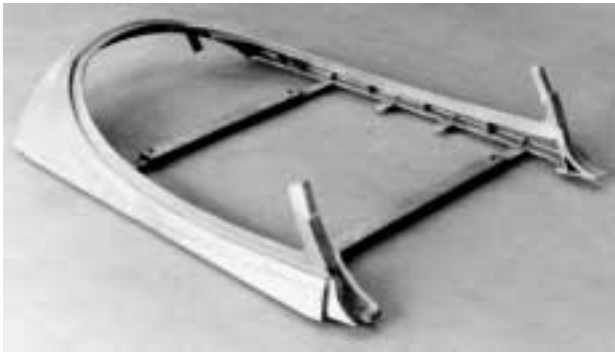
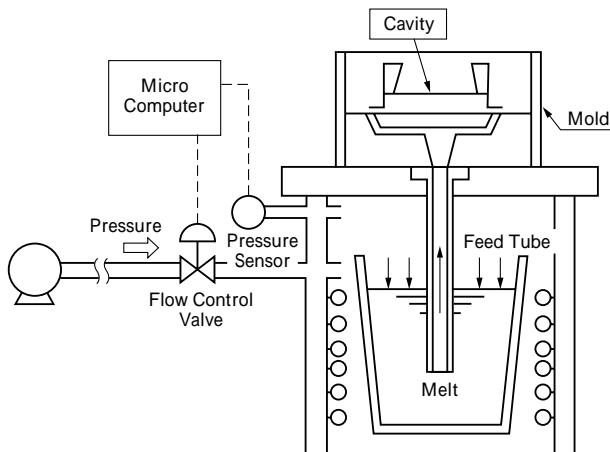


写真2 ZE41A合金製航空機用風防フレーム
Photo 2 Aircraft windshield frame of ZE41A alloy



第1図 低圧鑄造装置
Fig. 1 Low-pressure pouring equipment

微細化にも取組んだ。

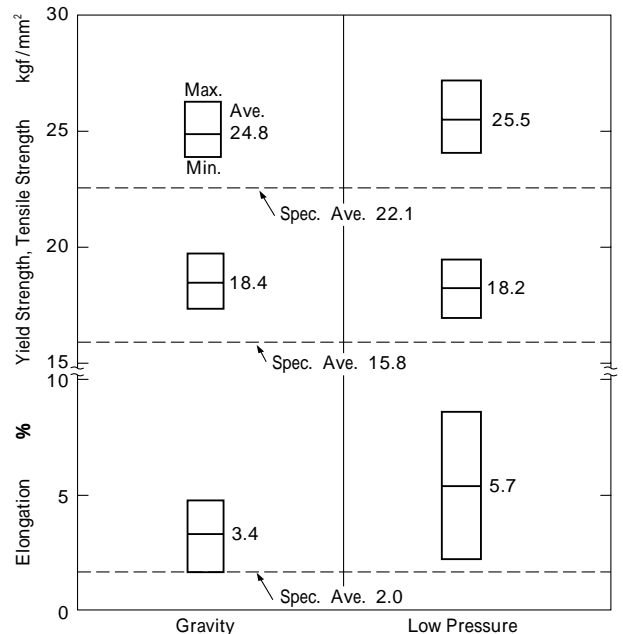
いっぽう、このMEL社との技術提携により、Mg-30%Zr母合金が安定的に入手できるようになり、母合金による添加に変更した。その結果、chloride contamination問題は後述のLP鑄造技術と相まって、ようやく解決をみることができた。

なお、ZE41A合金は、この風防フレーム以後適用製品が飛躍的に増加し、SH60Jヘリコプタのメインギアボックスなど、現在では当工場のマグネシウム生産品のうち50%近くを占めるまで増加している。

2. LP 鑄造技術の確立

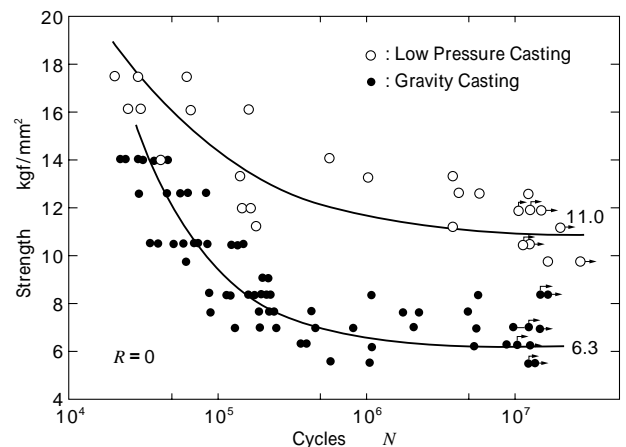
重力鑄造では、酸化物が発生しやすい。これは溶湯が湯口系を落下するとき乱流を起こして空気を巻込むためである。湯口系で発生した酸化物が製品キャビティ内に流入しないように、湯口底、湯道、堰に各種のフィルタが利用されているものの、製品高さが高い場合など溶湯が湯口系を満たすのに時間がかかる場合には、酸化物の発生量増大によりフィルタでの除去が困難になった。この酸化物の発生を低減させるために低圧鑄造による層流充填が効果的である。

そこで、小池ら²⁾は1980年に世界に先駆け砂型鑄物の低圧鑄造技術を確立し、前述のヘリコプタ用ミッションケース類などに適用を開始した。第1図に模式図、第2図および第3図に写真1に示したミッションケース鑄物の機械的性質および疲労曲線を示す²⁾。低圧鑄造品の機械的性質は、重力鑄造品より高い伸び値



第2図 QE22A合金製ミッションケース鑄物の機械的性質

Fig. 2 Mechanical properties of QE22A alloy transmission case casting



第3図 QE22A合金製ミッションケース鑄物の疲れ強さ
Fig. 3 Fatigue strength of helicopter transmission case of QE22A alloy

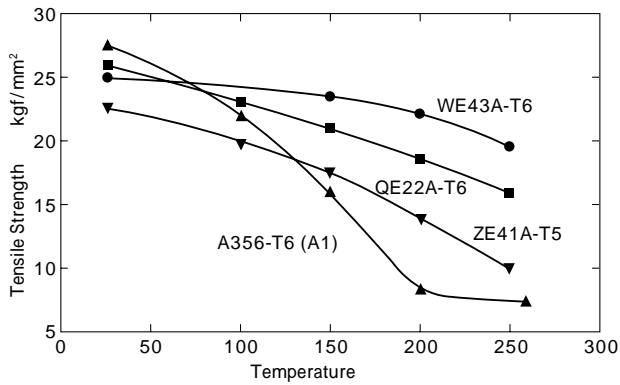
がえられている。また疲労強度は平均11.0kgf/mm²と重力鑄造品の平均6.3kgf/mm²にくらべて約1.8倍となった。これは低圧鑄造で鑄造することにより、微細な酸化物の混入が防止できたためである²⁾。

低圧鑄造技術の確立は、当工場にとって大きな技術的優位性を保つことになり、現在では、マグネシウム鑄物はもとよりアルミニウム鑄物の酸化物低減を目的として、幅広く適用している。さらに、大安工場への移転にあたっては、大型低圧鑄造設備を導入し、製品重量で約1000kgの船舶用ディーゼルエンジンのクランクケースも低圧鑄造法にて生産している。

3. 今後の動向

3.1 WE43A マグネシウム合金の鑄造技術開発

WE43A合金とは、1990年ごろMEL社が開発したMg-Y-R.E.-Zr系合金である。本系合金の特長は、YとR.E.と



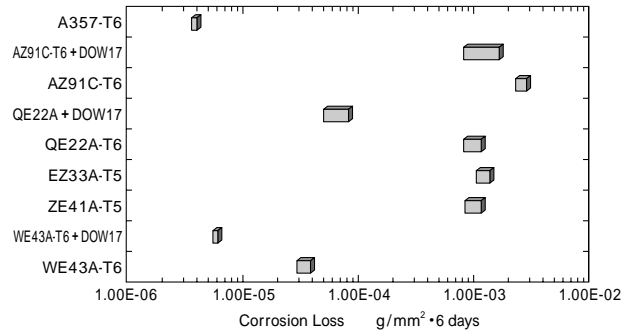
第4図 各種 Mg 合金の高温引張試験結果
Fig. 4 Effect of temperature on strength of magnesium alloy

がネットワークを形成し、耐熱性が優れ、とくに 250 度ではアルミニウム合金 (A356-T6 合金) よりも優れている。さらに表面に生成する Y の酸化膜により、耐食性に優れ、AZ91D などの高純度マグネシウム合金とほぼ同等レベルである。

第4図に各種マグネシウム合金における高温強度を示す。WE43A-T6 合金は温度による低下が小さく、250 以上ではアルミニウム合金より高い値がえられた。第5図に各種マグネシウム合金における塩水噴霧試験結果を示す。第5図からあきらかなように、WE43A の腐食減量は、A357 アルミニウム合金には及ばないものの、ほかのマグネシウム合金より各段に優れていることがわかる。

しかしながら、本系合金は、Y が非常に酸化しやすく、Cl と Y とがいちじるしい反応をおこし滅失するため、塩化物 (フラックス) をもちいた溶解精錬をしてはならない、すなわちフラックスレス溶解技術が必要となる。さらに鋳造においては、激しい酸化により laminated oxide と呼ばれる酸化物が発生する。この酸化物が蛍光浸透探傷検査で線状欠陥となるため、不活性雰囲気鋳造技術が必要とする。

当工場では、1992 年ごろから、本系合金の基本特性の把握から始め、前述のヘリコプタ用ミッションケース鋳物への適用試作を実施するとともに、各航空機メーカーへの PR を精力的に実施した。しかしながら、当時、回転翼・固定翼とも開発案件がなかったことに加え、WE43A 地金は非常に高価であったため、各社とも興味は示したが実用化には至らなかった。その後、将来をにらんで溶解・鋳造技術などの開発に注力し、現在では今後の需要に対応できる技術を確立している。



第5図 各種 Mg 合金の塩水噴霧試験結果
Fig. 5 Corrosion comparison of magnesium and aluminum casting alloys



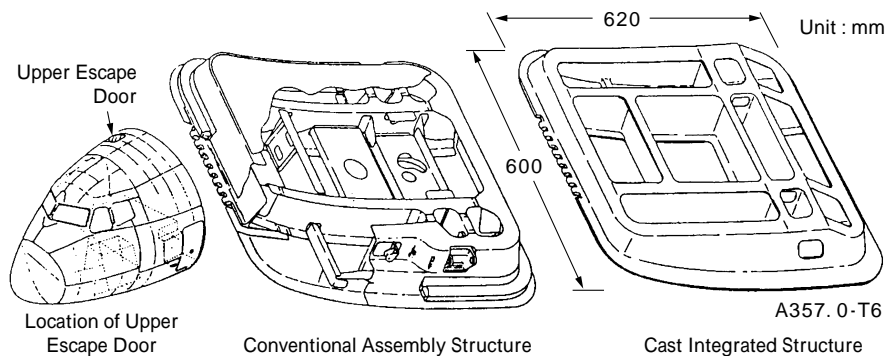
写真3 A357 合金製航空機用一体化構造ドア鋳物
Photo 3 Integrated structure door casting of A357 alloy

3.2 一次構造部材の鋳造一体化と D357 合金

欧米においては、すでに 1970 年代からアルミニウム合金鋳物による一体化構造の研究開発が進められている。たとえば、YC-14 輸送機の前脚取付部耐圧隔壁の鋳造品化適用研究 (CAST program) を始め、F/A-18 機垂直尾翼構造部材などが検討され、F16 においては空気取入部材へのアルミニウム鋳物が適用されている。

当社においても、1989 年から 3 年間にわたり川崎重工業㈱と共同で航空機用ドア一次構造部材の一体鋳造品化研究を日本航空宇宙工業会から受託した⁴⁾。開発対象となったドア構造を第6図に示す。このドア鋳物は、要求内部品質が MIL-STD-2175 グレード B、C と高品質であること、および肉厚 1.5mm と薄肉鋳物であることから、低圧鋳造法を採用した。このドア鋳物を写真3に示す。なお適用合金は、A357-T6 合金である。A357-T6 合金は Al-Si-Mg 系合金であり、その化学組成を第1表に、機械

第6図 従来構造と鋳造品の比較
Fig. 6 Comparison between conventional assembly structure and cast integrated structure



第1表 各合金の化学組成
(MIL-A-21180D)Table 1 Chemical composition
of alloys (MIL-A-21180D)

	Cu	Si	Mg	Mn	Fe	Zn	Ti	Be	Ag	Others Total
A357.0	max 0.20	6.5 ~ 7.5	0.40 ~ 0.70	max 0.10	max 0.20	max 0.10	max 0.20	0.04 ~ 0.07	—	max 0.15
A356.0	max 0.20	6.5 ~ 7.5	0.25 ~ 0.45	max 0.10	max 0.20	max 0.10	max 0.20	—	—	max 0.15

的性質を第2表に示す⁵⁾。

このドア鋳物をもちいて、実機で想定される与圧荷重を模擬した静的・動的強度評価試験を実施し、航空機用大型構造部材としての評価をおこなった。その結果、とくに異常は認められず、機体の一次構造部材として適用できる強度特性であることが確認できた。また、従来の板金組立て構造から鋳造品一体構造への変更にて、机上計算では重量で約10%、コストでは45%の低減が可能であることが判明し、鋳物化が航空機のコストダウンおよび軽量化に寄与することをあきらかにした⁴⁾。

近年、鋳造品の一体化構造の要求がますます強くなっている。その一例を写真4に示す。本製品は、民間航空機用パッセンジャードアヒンジ部品であり、当工場にて1989年から生産を開始し、現在も生産中である。なお合金はA357-T6合金である。

航空機設計において、鋳造品の適用には品質・信頼性の安定度を考慮し、耐航性審査要領およびFAAの規定に基づき1.0から2.0の鋳物係数を乗じなければならない。この鋳物の品質・信頼性の安定度を高めるために、D357-T6合金(AMS4241A合金)が制定された。D357-T6合金はA357-T6合金をベースに、不純物であるFe量をmax 0.2%からmax 0.12%に厳しくおさえるとともに、Mg量の成分範囲を0.4~0.7%から0.55~0.6%と非常に狭い範囲に規定することに加え、さらにマイクロ組織の大きさを限定することにより、高強度化を達成し品質の安定化を図っている。

ボーイングは、このD357-T6合金をベースにさらに細かく規定した自社規格(BMS7-330)を規定しており、1999年に当工場は世界で第5番目、国内鋳物メーカーではじめてボーイングの認定を取得した。

現在、アメリカでは本合金を適用した大型一次構造部材、ドア鋳物、水平尾翼前縁部およびクルーガーフラップなどが、すでに量産化されている。国内においても、1997年に水平尾翼前縁構造モデルにて、鋳造性および切出し試験片による機械的性質の調査をおこなった。現在、超大型鋳物(大きさ約1.5m×1.7m、肉厚2.0mm)の研究開発を実施中であり、次世代の航空機用材料として今後さらに成長が期待できる。

むすび=1937年から続く砂型鋳造部門の歴史のなかで、もっともエポックメイキングとなった技術を紹介するとともに、今後の動向について紹介した。

第2表 各合金の機械的性質(MIL-A-21180D)

Table 2 Mechanical properties of alloys (MIL-A-21180D)

Alloy	Class	Tensile Strength MPa	0.2% Proof Strength MPa	El. %
A357.0-T6	1	322	251	3
	2	359	286	5
A356.0-T6	1	272	201	5
	2	286	215	3



写真4 A357合金製航空機用ドアヒンジ鋳物

Photo 4 Aircraft passenger door hinge casting of A357 alloy

航空機分野においては、鋳造品の構造部材への適用がいつそう進展していくと考えられ、より安定した品質の製品がえられる鋳造技術の開発を進めていきたい。

参考文献

- 1) 佃 誠: 軽金属, No.35 (1959) Mar.
- 2) 小池 進ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.38, No.4(1988) p.41.
- 3) James W. Faber: Natl. SAMPE Tech. Conf., (1980) p.768.
- 4) 中田 守ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.42, No.1(1992) p.54.
- 5) MIL-A-21180D, ALUMINUM ALLOY CASTING, HIGH STRENGTH, (1984).