

(解説)

航空機用アルミニウム鋳造品の動向

Trends in Aluminum Alloy Casting for Aircraft Parts



北原靖久*
Yasuhisa Kitahara



中田 守*
Mamoru Nakata



柴田暁典*
Akinori Shibata

One-piece aluminum casting parts are ideally suited to reduce the weight and cost of aircraft parts. Recently, aluminum casting applications have become increasingly common. This paper introduces aluminum casting samples for aircraft parts, the high strength aluminum alloy D357.0-T6, and a casting technique developed for large thin-walled structures. In relation to these trends, the end of the paper discusses Kobe Steel's Daian Plant and plans for its future aluminum casting processes.

まえがき = 航空機部品の軽量化・低コスト化に対して、鋳造品は多数の部品からなる組立品を一体で製造できるため、非常に有効な手段である。これまで、展伸材と比較すると鋳造品には欠陥が発生しやすく、その信頼性の低さより適用が見送られる場合が多かったが、近年の鋳造技術の進歩と、高強度な D357.0 (Al-Si-Mg 系) 合金の登場により、特に一次構造部材への一体鋳造化が増加している。また、1m を超えるサイズの大型薄肉鋳造品の技術確立により、薄肉・大型部品への鋳造品適用が可能となったことも大きな理由である。

当社大安工場では、航空機用アルミニウム鋳造品の国内トップメーカーとして、これらのニーズに応えるべく、D357.0 合金による鋳造品の製造に関する認証を、1999 年ボーイング社より取得した。また 2000 年には、D357.0 合金を用いた大型薄肉精密鋳造技術の開発を行った。

本稿では、アルミニウム鋳造品の適用を高めた D357.0 合金や大型薄肉精密鋳造品の開発状況を解説し、当社大安工場での今後の取組みについて紹介する。

1. D357.0 合金の特徴

航空機用鋳造アルミニウム合金の開発について、1970 年代に米国において CAST (Cast Aluminum Structures

Technology) という名のプログラムで YC-14 前脚取付部耐圧隔壁の試作が行われた (写真 1)¹⁾。しかし、当時の鋳造技術では機械的性質のバラツキが大きく、量産適用には至らなかった。その後、溶湯成分の厳格な管理、不純物の低減、鋳造方案の適正化など鋳造材料技術は大きく発展した。航空機用鋳造品の主材料である Al-Si-Mg 系合金は、鋳造性に優れた A356.0 合金から、Mg 添加量を多くして強度を高めた A357.0 合金などに改良され、D357.0 合金に至った。表 1 に A356.0, A357.0, D357.0

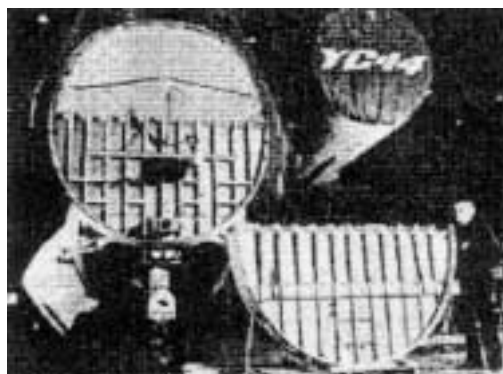


写真 1 YC-14 前脚取付部耐圧隔壁試作 (CAST プログラム)¹⁾
Photo 1 Trial for YC-14 forward fuselage pressure bulkhead (CAST program)¹⁾

表 1 各種アルミニウム鋳造合金の化学成分
Table 1 Chemical composition of aluminum alloys

Grade	(mass%)								
	Cu	Si	Mg	Mn	Fe	Zn	Ti	Be	Al
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	-	Bal.
A357.0	Max.0.20	6.5 ~ 7.5	0.40 ~ 0.7	Max.0.10	Max.0.20	Max.0.10	0.04 ~ 0.20	0.04 ~ 0.07	Bal.
D357.0	Max.0.20	6.5 ~ 7.5	0.55 ~ 0.6	Max.0.10	Max.0.12	-	0.10 ~ 0.20	0.04 ~ 0.07	Bal.

*アルミ・銅カンパニー 大安工場 鋳造室

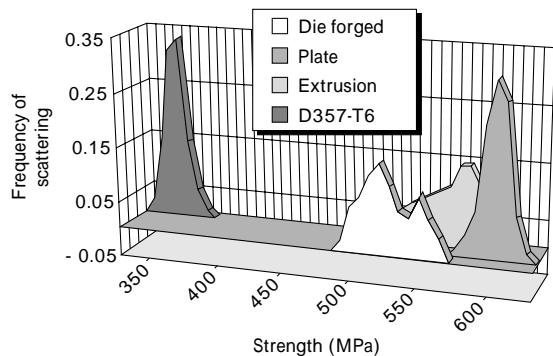


図1 アルミニウム合金鋳造材と鍛錬材の抗張力分布²⁾
Fig. 1 Strength comparison of aluminum casting and forged parts²⁾

合金の化学組成を示す。

D357.0 合金の特徴として、不純物である Fe 量の更なる低減と Mg 量の管理範囲を厳格にし、材料に起因した機械的性質のバラツキを抑えることを最大の特徴としている。図 1²⁾に鋳造材である D357.0 合金と鍛錬材である型鍛造、厚板、押出材の抗張力のバラツキ頻度を示す。図 1 からわかるように、D357.0 合金の抗張力は鍛錬材と比較して低いが、特性のバラツキは鍛錬材と同等以上に良いことがわかる。D357.0 合金は、AMS (Aerospace Material Specification) 4241 として 1986 年に規格化された。この規格では製品ごとに同じ砂型で、冷却速度が製品の一部と同程度になるような板状試験片を採取することや、DAS (Dendrite Arm Spacing) を測定して機械的性質を保証するなど詳細な手順が決められており、鋳造品の信頼性に重点をおいたスペックとなっている。

このように鋳造品の不安定要素である特性バラツキを、大きく改善した D357.0 合金の登場は、従来鋳造品の課題であった「強度がばらつき信頼性がない」が解決されてきている。

2. 海外での鋳造品適用状況

近年多くの航空機機体構造物で、ネットシェイプ鋳造品の使用が増加している。従来の板材やブロック材からの加工削り出し (Hog out) によるか、板金部材からの加工 (Assemblies) によるものの代替として、前述した D357.0 合金を適用した薄肉精密鋳造技術にて高度に一体化設計されることで、大きなコスト削減が実現されている。

米国では、D357.0 合金を適用した大型一次構造部材やドア鑄物などがすでに量産化されている。例として、B767-40ER コックピット内装に 11 種類のアルミニウム鋳造品を使用し、50%のコスト削減に成功している (写真 2³⁾)。また B767 の Landing gear door においても D357.0 合金一体鋳造品により、大幅なコスト削減を達成している (写真 3³⁾)。

3. 当社の技術開発状況

3.1 D357.0 合金

当社大牟田工場では、1997 年度から D357.0 材の研究開発を実施した。Mg 量と引張強度特性の関係 (図 2⁴⁾)、溶体化処理時間と引張強度特性の関係 (図 3⁴⁾) など把握し、

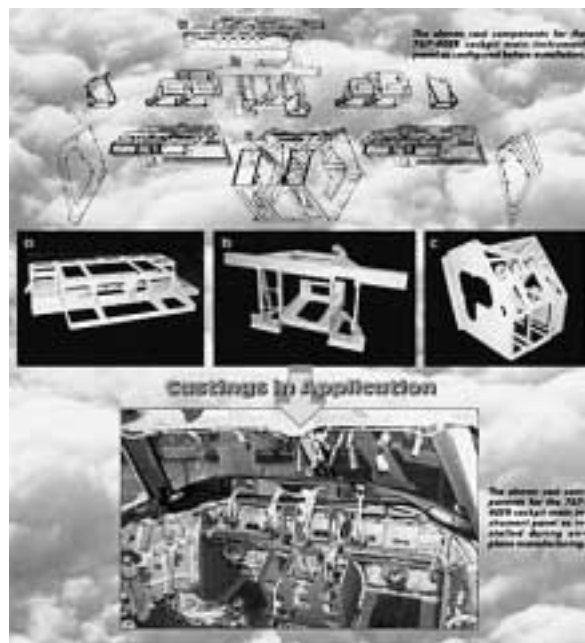


写真 2 B767-40ER コックピット内装へのアルミニウム鋳造品適用例³⁾
Photo 2 Aluminum casting application for aircraft (B767-40ER cockpit)³⁾



写真 3 B767 landing gear door アルミニウム鋳造品³⁾
Photo 3 Aluminum casting for B767 landing gear door³⁾

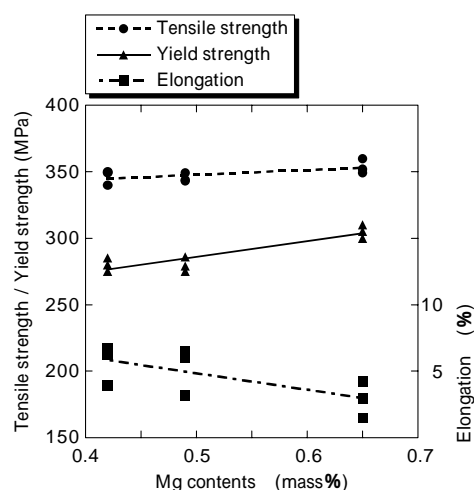


図 2 D357.0-T6 材の Mg 量と引張強度特性の関係⁴⁾
Fig. 2 Relationship between mechanical properties and Mg contents of D357.0-T6 alloy⁴⁾

強度特性のバラツキを減らし信頼性の高い鋳造品を得るためには、製造条件因子を十分管理することが必要であることが確認できた。ポーイング社は、この D357.0 合金

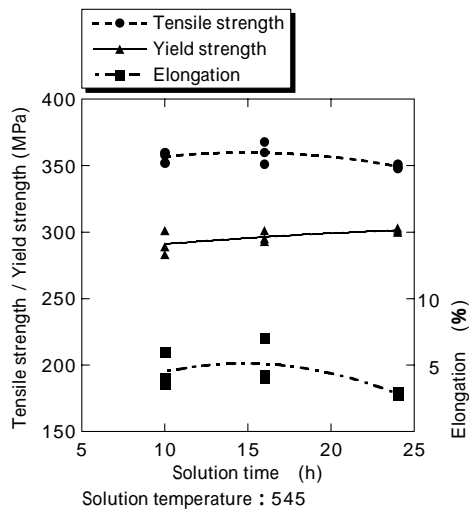


図3 D357.0-T6 材の溶体化処理時間と引張強度特性の関係⁴⁾
 Fig. 3 Relationship between mechanical properties and solution time of D357.0-T6 alloy⁴⁾

をベースにした自社規格 (BMS7-330) を規定しており、当社大牟田工場は、砂型鋳物メーカーとして世界で3番目、国内鋳造メーカーでは初めて、D357.0 合金による鋳造品の製造に関する認証をボーイング社より1999年に取得している。

3.2 大型薄肉精密鋳造品の開発

当社は、15年前より航空機用一次構造部材の研究開発に着手してきた。まず1989年から3年間にわたり、航空機用ドア一次構造部材の一体鋳造品化研究を(財)日本航空宇宙工業会から受託し、従来の板金構造物より9%の重量低減、47%もの大幅なコストダウンが図れることを確認している(写真4⁵⁾)。1997年には「大型アルミ合金精密鋳造品設計手法研究」を(財)日本航空機開発協会より受託し、水平尾翼前縁構造モデルの試作を行った(写真5)。1999~2000年度に、(財)日本航空機開発協会が受託した新エネルギー・産業技術総合開発機構研究「革新的軽量構造設計基盤技術開発」の機種構造開発に加わり、世界的にみても実機での適用がほとんどない(図4⁴⁾)、最小肉厚2.0mmで大きさ1850×1550×342mmという薄肉大型一体化構造鋳造品(写真6⁴⁾)を開発した。従来の薄板、押出材による板金組立構造と比較して、部品点数低減(170点→1点)、10%の軽量化および33%の低コスト化を図ることがわかった。

3.3 鋳造品開発における CAE 化

肉厚2.0mmの大型薄肉鋳物を製造するうえで、型の高精度化は重要なポイントである。砂型鋳造プロセスにおいて、砂型を製作する際に使用する型には従来木型を使用していた。木型製作は、木型職人が図面をもとにノミやカンナでの手作りであり、長い工期が必要であるとともに、型精度もラフなものであった。鋳造品の許容寸法公差も250mm長さあたり±0.8mmであり、1mを超えるような大型鋳物は±3mm程度の寸法バラツキを許容していた。

当社は、複雑形状の鋳造品の型設計に最適なCADシステムや5軸加工機を導入し、硬質樹脂ブロックをNC加工した高精度型の内製を2003年より実施している。



Material : D357.0-T6 alloy
 Size : 620mm×600mm×80mm, 1.5tmm

写真4 A357.0 合金航空機用一体化ドア鋳物⁵⁾
 Photo 4 Integrated structure door casting of A357.0 alloy⁵⁾



Material : D357.0-T6 alloy
 Size : 600mm×400mm×600mm, 2.0tmm

写真5 D357.0 合金航空機用水平尾翼前縁鋳物⁴⁾
 Photo 5 Leading edge casting of D357.0 alloy⁴⁾

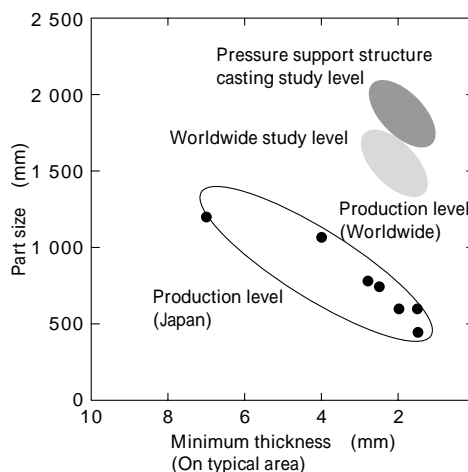


図4 砂型鋳造品の最小肉厚と製品サイズの関係⁴⁾
 Fig. 4 Relationship between casting size and minimum wall thickness⁴⁾



Material : D357.0-T6 alloy
 Size : 1850mm×1550mm×342mm, 2.0tmm

写真6 耐圧床支持構造鋳造品⁴⁾
 Photo 6 Integrated casting for cockpit pressure floor support structure⁴⁾

3D-CAD システムを用いた型製作の CAE 化は、1 m を超える鋳造品を ±0.5mm の寸法公差にて製作できるようになり、大型薄肉鋳物の開発に大きく寄与している。

また航空機用エンジン部品のような複雑形状品において、3D-CAD システムは型設計を容易にし、前述した高精度型の NC 加工化と合わせ、型製作日程を大きく短縮することができた。写真 7 に示す 8 人乗りビジネスジェット機エンジン用ギヤボックスの型製作において、従来型設計～型完成まで 8 カ月を要していたが、3 カ月で型完成ができた（図 5）。

最近では、CCD カメラによる画像データを 3D-CAD データと比較した非接触寸法測定方法（図 6）や、CT スキ



写真 7 ビジネスジェット機用ギヤボックス
Photo 7 Gear box casting for business jet airplane

ャンによる内面検査にて、従来製品を切断しなければ見ることができなかった部位をパソコンにて確認できるような装置も開発されている。鋳造時の湯流れや凝固過程をシミュレーションできるソフトウェアも高度化しており、鋳造業界における 3D-CAD/CAM/CAE はますます重要性を増していくと考えている。

4. 今後の動向

4.1 航空機用ドア構造物の新規拡販

航空機には用途に応じた多くのドアが存在する（旅客出入用・緊急脱出用・電子機器アクセスハッチ・前部点検用ハッチ・着陸装置用カバー・補機点検用・客室と圧バント・荷物アクセス用・貨物アクセス用など）。ドアは当社がこれまで開発してきた大型薄肉鋳造技術の拡販に最も期待できる部材であり、重点課題として取り組んでいく予定である。

4.2 航空機エンジン用鋳造品の拡販

前述した大型薄肉精密鋳造技術や 3D-CAD システムによる高精度型により、GE 社（米国）製 CF34-8 ジェットエンジンに使われる大型薄肉ギヤボックスの開発・量産化に成功した（写真 8）。このような大型薄肉ギヤボックスは、海外鋳造メーカーからの輸入に頼っており、国内鋳造メーカーではこれまで製作できなかった。当社大安工場では、2003 年 5 月に初回品納入を開始し、生産台数の急増もあり、現在では主力製品としての地位を築き上げた。

ジェットエンジンの高性能化が進む中で、鋳物の高精度化・複雑化・大型化が求められている。市場のニーズに応えられる技術を有した当社にとって、ギヤボックス市場の今後の需要拡大が大いに期待できる。

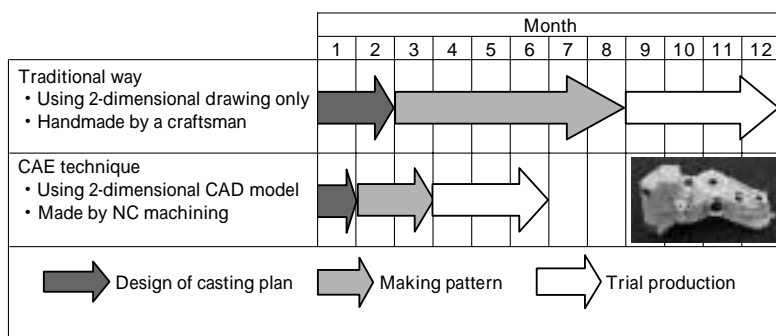


図 5 CAE 技術を用いたギヤボックス鋳物の開発期間
Fig. 5 Development of gear box casting using CAE technique

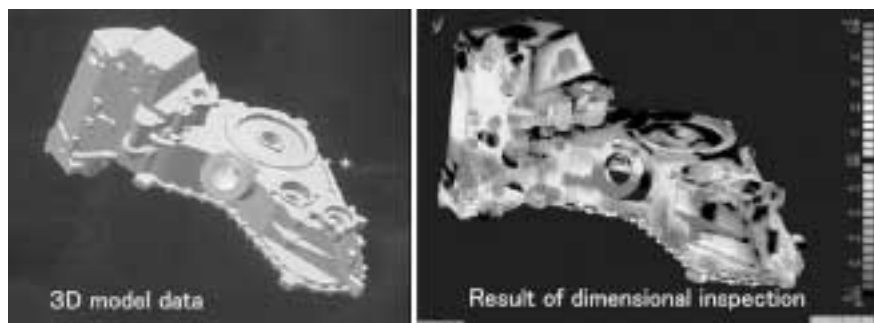
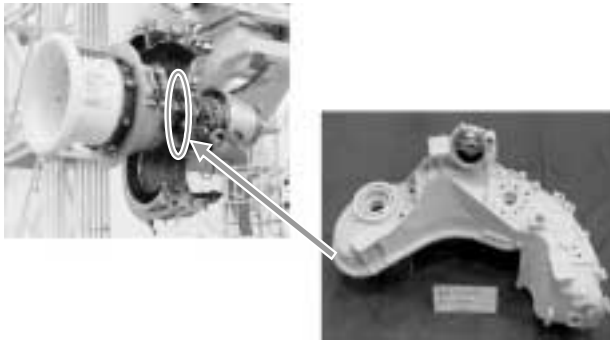


図 6 鋳造品と 3D モデルとの直接比較
Fig. 6 Direct comparison with casting surface and 3-dimensional model data



Size : 1 200mm × 550mm × 600mm, 2.5tmm

写真 8 CF34-8 エンジン用ギヤボックス鋳物
Photo 8 Gear box casting of jet engine CF34-8

むすび = 当社は D357.0 合金や大型薄肉鋳物技術の開発により、高品質で信頼性の高いアルミニウム鋳造品の製造を可能にした。海外調達に頼るしかなかった航空機用大型アルミ高品質鋳造品分野において、国内唯一の地位を築き、国内航空機メーカーの期待も非常に大きい。今後、品質安定化・コスト低減・リードタイム短縮など改

善を進めながら、新機種の実入り・生産量拡大に向けて取り組んでいきたい。

なお、大型薄肉精密鋳造品の開発にあたり、川崎重工業(株)航空宇宙カンパニーの方々には多大なご協力を頂きました。この場を借りて感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) James W. Fabar : "METALLOGRAPHIC ANALYSIS TECHNIQUES USED DURING THE CAST ALUMINUM STRUCTURES TECHNOLOGY(CAST)PROGRAM", Natl SAMPE Tech Conf ('80) p.768.
- 2) F. Feiertag : "Casting Properties from a Modern Viewpoint", Aeromat '95.
- 3) Boeing 社ホームページより抜粋 .
- 4) 吉野保明 : (社)日本鋳造工学会東海支部岐阜地区講演会講演資料 (2002).
- 5) 中田守ほか : R&D 神戸製鋼技報, Vol.42, No.1 (1992) p.54.