

(解説)

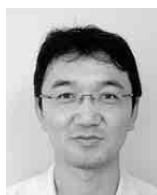
航空機用複雑鋳物の鋳造技術

Casting Technology of Aircraft Casting Parts



北原靖久*

Yasuhisa KITAHARA



柴田暁典*

Akinori SHIBATA



中田 守*

Mamoru NAKATA

Each sand cast gearbox in small passenger aircraft engines, has a complicated shape incorporated with many oil passages which configure internal oil circuits. Kobe Steel has developed sand casting technologies to establish a dominant position as a manufacturer of such gearbox castings. This paper introduces the manufacturing technologies and features of the gearbox castings.

まえがき = 当社大安工場は、航空機用鋳鍛造素材の国内トップメーカーとして 1995 年より操業している。その前身は、航空機製造の中心地である名古屋に、軍需向け航空機用鋳鍛造品の工場として 1937 年に設立された。戦後も防衛庁向け鋳鍛造品（以下、防需品という）を中心に生産を行い、とくに砂型鋳造品においては生産量の 95% が防需品という状況であった。しかし、防衛予算の緊縮に伴って防需品は減少傾向にあることから、今後大きな需要の伸びが見込まれる民間航空機分野へ進出すべく、1993 年よりボーイング社（米国）製 777 型機のドア用鋳造品、2001 年よりゼネラル・エレクトリック社（米国）製 CF34・8 エンジン（図 1）のアクセサリ・ギアボックス（以下、AGB という）用ハウジング素材（図 2）の生産を開始した。とくに CF34・8 エンジンは、ポンバルディア社（カナダ）やエンブラエル社（ブラジル）が圧倒的なシェアを持つリージョナルジェット機に搭載されており、安定した生産量が確保でき、大安工場砂型鋳造部門の生産量の 35% を民間航空機向け分野で占めるまでに成長してきている。その後も、新規 AGB ハウジング素材の引合い、開発が増加し、砂型鋳造部門の主力商品としての地位を築き上げている。



図 1 CF34-8 エンジン
Fig. 1 CF34-8 engine

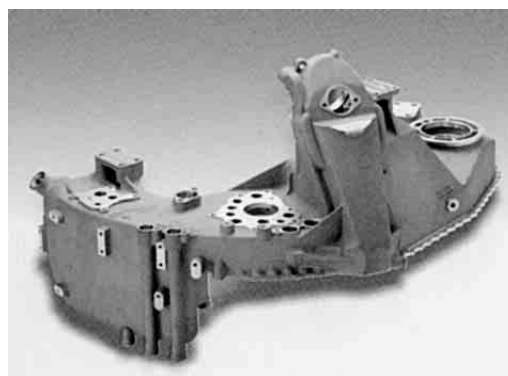


図 2 アクセサリ・ギア・ボックス（AGB）ハウジング
Fig. 2 Accessory gear box（AGB）housing

本稿では、航空機エンジン用 AGB ハウジングの製造技術を解説し、大安工場での今後の取組みについて紹介する。

1. AGB ハウジングの役割

AGB は、エンジンから動力を受取り、エンジンを作動させるために必要な燃料ポンプ、オイルポンプ、発電機、油圧ポンプなどの補機を駆動させる役割を担っている¹⁾。AGB の軽量化において、AGB 全体重量の約 40% を占めるハウジングの軽量化は重要なポイントである。AGB ハウジングに求められることは、高品質高強度、薄肉化、部品の一体化、複数のオイル通路（以下、オイルパッセージという）を有することなどである。

近年、NC 工作機械の発展は目覚しく、5 軸マシニングセンタや複合加工機など高機能で複雑な機構をもつ NC 工作機械が増えている。航空機用部品においても、アルミニウム板材からの削出しが盛んに行われており、鋳鍛造品から削出し品に切替える事例が増加している。しかし、AGB ハウジングの設計において、機械加工では加工

*アルミ・銅カンパニー 大安工場

ツールのアクセスに限界があり、肉ぬすみができないところが多く、また複数のオイルパッセージなどの中空部分は、機械加工による形状の作り出しが不可能である。一方、砂型鋳造は、このような加工を可能とするものであり、AGBハウジング開発には欠かすことができない製造プロセスであるといえる。

2. 適用合金

航空機部品のような高い品質レベルが要求されるアルミニウム鋳造品は、航空機用鋳造合金規格である AMS-A-21180 に規格化された高力合金を使用する。AMS-A-21180 には、A201.0, 354.0, C355.0, A356.0, A357.0, 359.0 の6種類の合金がある。表 1²⁾ に各合金の化学成分を掲載した。なかでも C355.0, A356.0, A357.0 の3種類は鋳造性に優れ、適用頻度が高い鋳造用合金である。Al-Si-Cu-Mg 系合金である C355.0 合金は、150 までの温度上昇があっても強度低下が少なく、エンジン部品などに多く適用される。Al-Si-Mg 系合金である A356.0 合金は鋳造性に優れた最も一般的な鋳造用合金である。A356.0 合金より Mg 添加量を多くして強度を高めた A357.0 合金は、優れた鋳造性と高い強度から近年多くの航空機用アルミニウム鋳造品に適用されている。どの合金を使用するかは、使用環境や必要強度により設計者が決定している。ちなみに、大安工場で生産している各種 AGBハウジングは、C355.0, A356.0, A357.0 合金を使用している。Al-Cu 系合金に Ag を添加した A201.0 合金は最も高い強度を有するが、鋳造性の悪さから AGBハウジングのような複雑鋳造品にはあまり適用されていない。注目すべきは D357.0 合金であり、不純物である Fe 量のさらなる低減と 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パラツキを抑えることを最大の特徴としている。図 3³⁾ 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。同図からわかるように、D357.0 合金の抗張力は鍛錬材と比較して低いが、特性のパ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、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 合金は、今後航空機用鋳造品への適用が拡大していくと見込まれる。

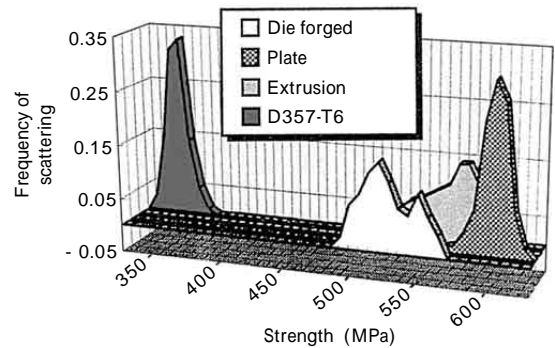


図 3 アルミニウム合金鋳造材と鍛錬材の抗張力分布
Fig. 3 Strength comparison of aluminum casting and forged parts

3. 製造技術

3.1 型製作技術

複雑な AGBハウジング鋳造品を製造するうえで、型の高精度化は重要なポイントである。従来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木型を使用していた。木型製作は、木型職人によるノミヤ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。

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 加工した高精度型を適用している。

AGBハウジング鋳造品は、約 60 種類の中子型と 20 種類のオイルパッセージ中子型が必要であり、合計 80 種類にもおよぶ型の設計が必要である。3D-CAD システムによって型設計が容易になり、前述した高精度型の NC 加工化と合せ、型製作日程を大きく短縮させることができた。従来、型設計から型完成まで 8 カ月を要していたものが、2 カ月で型を完成させることができるようになった(図 4⁴⁾)。図 5⁴⁾ は AGBハウジングにおいて、3D-CAD にて設計された砂中子組付状態と、実際に製作した砂中子の組付状態を示す。80 個以上の砂中子の設計、組付けを CAD にてシミュレーションすることにより、砂中子の干渉や組付順序などを事前確認でき、鋳造品開発期間の短縮を実現している。

また、従来は 80 種類もの砂型の組立てに経験 10 年以上の熟練作業者を必要としたが、型精度の向上により、経験が 1 年未満の作業でも砂型組付作業が容易になり、作業工数や作業者の育成期間が短縮でき、生産変動への対応が容易になった。

表 1 AMS-A-21180 各種アルミニウム鋳造合金及び D357.0 合金の化学成分
Table 1 Chemical compositions of aluminum alloys AMS-A-21180 and D357.0 alloy

	Cu	Si	Mg	Mn	Fe	Zn	Ti	Be	Ag	Al
A201.0	4.0~5.0	Max.0.05	0.15~0.35	0.20~0.40	Max.0.10	-	0.15~0.35	-	0.40~1.0	Bal.
354.0	1.6~2.0	8.6~9.4	0.40~0.6	Max. 0.10	Max.0.20	Max.0.10	Max. 0.20	-	-	Bal.
C355.0	1.0~1.5	4.5~5.5	0.40~0.6	Max. 0.10	Max.0.20	Max.0.10	Max. 0.20	-	-	Bal.
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.
359.0	Max.0.20	8.5~9.5	0.50~0.7	Max. 0.10	Max.0.20	Max.0.10	Max. 0.20	-	-	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.

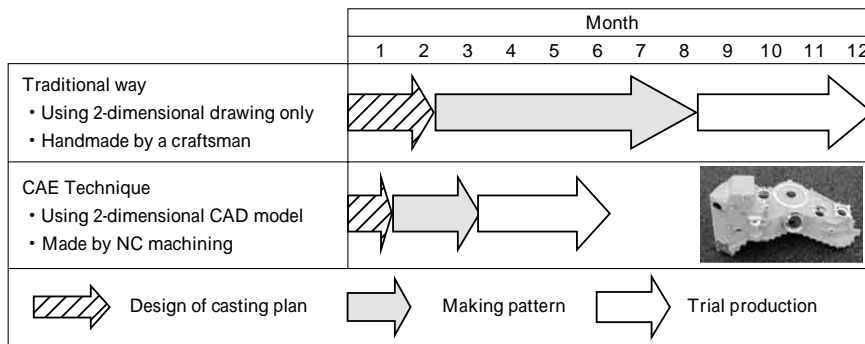
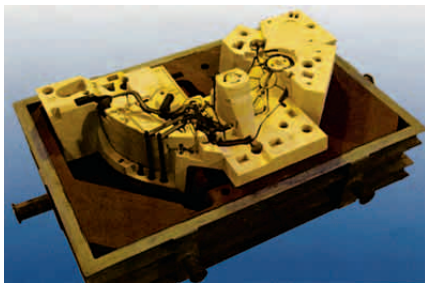


図4 CAE 技術を用いたギアボックス鋳物の開発期間
Fig. 4 Development of gear box casting using CAE technique



3D-CAD シミュレーション
3D-CAD simulation



実際の砂型組付け状態
Actual sand mold

図5 AGBハウジング鋳物の砂型組付け
Fig. 5 Sand mold assembly for accessory gear-box housing casting

3.2 オイルパッセージ造型技術

AGBハウジングには6~8mmほどのパイプ状のオイルパッセージが複雑に配置されており、中空部を形成するにはオイルパッセージ中子と呼ばれる砂型を使用する(図6)。オイルパッセージ中子は、アルミニウム溶湯を鋳型内に注いだ際、700以上の高温のアルミニウム溶湯に包まれ加熱されることでガスを発生する。このガスがAGBハウジングのオイルパッセージに線状欠陥を引起こし、オイル漏れなどの重大欠陥を引起こす。また、砂の熱膨張によりオイルパッセージ中子に割れや膨張がおこり、AGBハウジングの不良を引起こす。オイルパッセージ内の線状欠陥は通常検査では発見しづらく、客先機械加工後の最終検査まで見つからないこともあり、工数損失も非常に大きくなる。

大安工場では、オイルパッセージ中子に使用する砂は、一般鋳物に使用される鋳物用砂(けい砂)ではなく、熱膨張が低い人工砂を使用している(図7)。また、砂に添加する粘結材や硬化剤の添加量を最低限に抑える(図

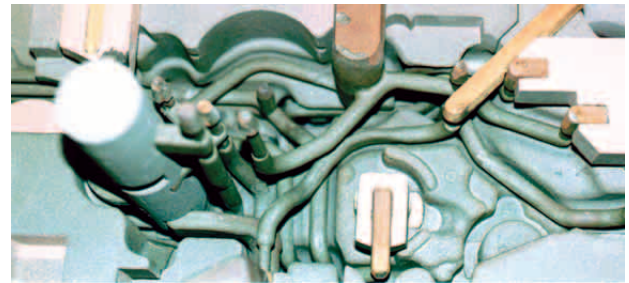


図6 パッセージ中子組み付け
Fig. 6 Passage core mold assembly

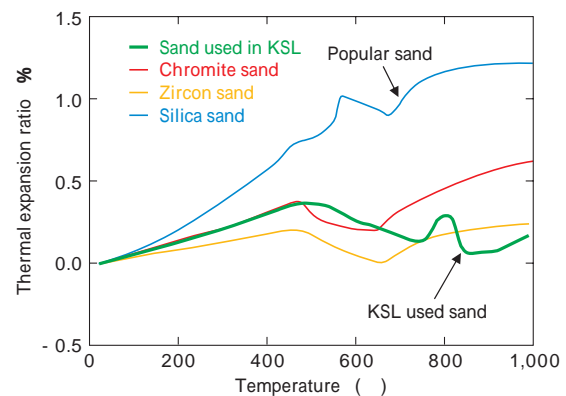


図7 鋳物砂の熱膨張特性
Fig. 7 Thermal expansion ratios of various casting sands

8)とともに、オイルパッセージ中子より発生するガスを鋳型外に強制的に排出し、ガス欠陥の発生を抑えている。

3.3 解析技術

AGBハウジングのような複雑薄肉鋳物においては、複雑形状化に伴う製品内の肉厚変動に起因するひけ巣欠陥や、湯流れ時の溶湯の乱れによる空気の巻き込み欠陥などが発生しやすい。AGBハウジングは中子点数も多く、造型作業に多大な時間を要する。このため、試作回数を削減することは、鋳造製品の開発期間短縮や開発コストの低減に非常に大きな効果が期待される。鋳造時の湯流れや凝固過程が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、CAE解析技術は今後ますます重要になってくる。

図9はAGBハウジングの湯流れ・凝固解析のシミュレーション結果の一部である。解析に使用する物性値やシミュレーション結果の評価方法には課題があり、各データの収集、試作結果とシミュレーション結果との比較検証による境界条件の見直しなどを行い、解析精度の向

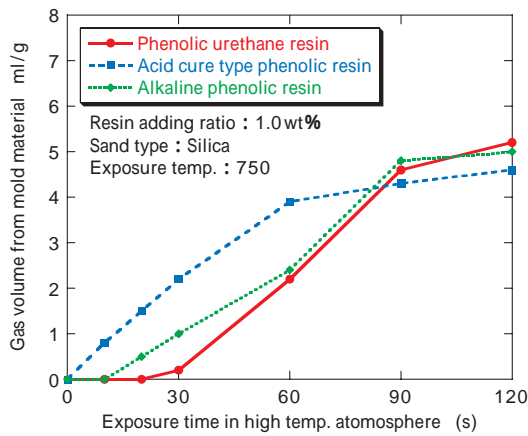


図8 各種レジンによるガス発生量比較
Fig. 8 Comparison of gas volume for various resins

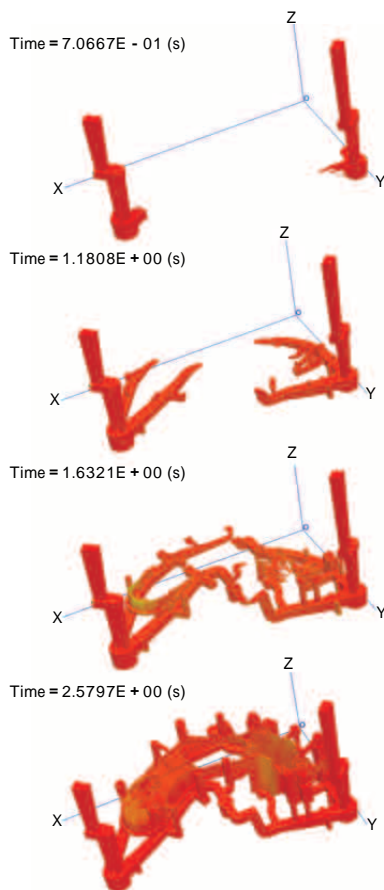


図9 AGBハウジング湯流れ解析例
Fig. 9 Flow analysis sample for AGB housing

上が必要である。

4. 今後の取組み

4.1 開発段階での鋳物提案推進

AGB 開発において設計段階より鋳物メーカーが設計提案していくことは、開発期間の短縮、設計変更の簡易化、部品一体化による軽量化、鋳物のつくりやすさに伴うコスト低減など、メリットが大きい。大安工場は、国内製造会社の AGB 開発・設計段階より参画させていただき、厳しい開発日程に対応してきた。

今後も、3D-CAD モデルを活用し、AGB ハウジング設計（客先） 最適な型構造提案や湯流れ・凝固解析による最適形状提案（当社） 設計見直し（客先）の提案型

ものづくりシステムを確立することで開発期間短縮、コスト低減を図りたい。この進め方は図面完成後に複数鋳物メーカーに見積り、発注していた従来の手順とは異なるため、国内 AGB 製造会社とのパートナーとしての関係をより強固にすることが重要となる。

4.2 他のエンジン用鋳造品への展開

航空機用エンジンには、AGB ハウジングのみでなく、燃料ポンプやオイルポンプ、オイルタンク、発電機（IDG）、スタータなど、AGB に装着される多数の補機部品がある。これらの部品は複雑薄肉鋳造品であり、当社鋳造技術を生かして当社製品として着実に開発していきたい。また、エンジン吸気口付近のダクト部品やフロントフレームなど大型鋳造品のほとんどが海外メーカーにて製作されており、今後これらの部品の開発も進めたいと考えている。

4.3 海外への展開

大安工場は、AGB 用鋳造品を生産する日本国内唯一の工場であり、さらなる需要拡大策として国内市場の範囲にとどまることなく、輸出の促進が重要である。海外展開における課題として、海外鋳造メーカーに対する価格競争力の強化が必須である。為替変動や労務費に起因するコスト差を圧縮するためにも、造型・検査作業の一部機械化による工数削減、デジタル技術採用による検査費低減などの技術改善が必要である。

また海外鋳造メーカーでは、高強度アルミ合金の採用、AGB 鋳物の大型薄肉化、オイルパッセージの小径化、ジェットエンジン用鋳造品へのマグネシウム合金適用などが進んでおり、大安工場としては、低不純物・低介在物の溶解・精錬技術の開発、大型注湯設備の立上げ、小径（4mm 以下）パッセージ中子製作技術の開発、マグネシウム合金鋳物の量産技術確立などの技術開発を進めることが急務である。

むすび = 大安工場において AGB 用鋳造素材を生産開始するまで、国内のエンジン製造メーカーは海外調達に頼るしかなかった。現在、航空機エンジン用 AGB ハウジングの量産機種は年々増加し、大安工場のオンリーワン製品としての地位を着実に築いてきている。しかし、航空機用エンジンの価格競争も年々激化しており、今後さらに技術力アップ、作業改善を図り、QCD（品質・コスト・納期）の全てにおいて、国際競争力を高めることができるよう取組んでいきたい。

なお、AGB ハウジングの生産にあたり、川崎重工業㈱ガスタービン・機械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) 加納照之ほか：川崎重工技報，第 143 号（2000 年）pp.36-41.
- 2) SAE International：AMS-A-21180，（2005 年）
- 3) 吉野保明ほか：第 36 回飛行機シンポジウム予稿集，（1998）pp.561-564.
- 4) 北原靖久ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.54, No.3（2004）pp.54-58.