

平成 21 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「輸送機械用大型薄肉複雑一体成形部品の精密鑄造技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成 22 年 3 月

委託者 関東経済産業局

委託先 財団法人 千葉県産業振興センター

目次

第1章 研究開発の概要

1 - 1 研究開発の背景・研究目的及び目標

1 - 2 研究体制

1 - 3 成果概要

1 - 4 当該研究開発の連絡窓口

第2章 本論

2 - 1 差圧鋳造と注湯温度管理

2 - 1 - 1 差圧鋳造と温度管理(薄肉鋳物の製造技術開発)

2 - 1 - 2 注湯温度の管理(薄肉鋳物の製造技術開発)

2 - 2 低温鋳造と鋳型冷却法の開発(組織改良)

2 - 3 試作鋳造品の評価

2 - 4 装置開発

第3章 全体総括

第1章 研究開発の概要

本プロジェクトは平成19年度から始まり平成21年度迄の3年間に亘り標題の研究開発を行った。

- ・平成19年度：Al-Si-Mg系軽合金の金属組織の改良方法の開発及び装置設計・製作。
- ・平成20年度：装置製作、及び装置を使用しての最適プロセスの開発。サンプル試作。
- ・平成21年度：サンプル試作の続行(再現性の確認)、各種金属試験の実施。装置の完成及び将来輸送機の構造部品のサンプル試作。

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

現在、地球環境の悪化防止(温暖化防止)、燃料費の高騰への対策等々の観点から航空機等を含む輸送機械産業には軽量化による燃費の改善・向上及びトータル・ライフコスト(メンテナンス・コスト等も含む)の低減が急務になっている。軽量化、メンテナンス・コストの低減の為には部品の薄肉化、複雑形状の一体化等が必要になる。その為には現在使われている鋳造プロセスを改良し、航空機等の構造部品に適用する事が可能な精密鋳造部品の製造を可能にする技術を開発する事が必要である。現在のAl-Si-Mg系軽合金の鋳造品としての一般的な引張強度は220MPa~280MPa程度であり、伸びは2~3%程度であるが、同じAl-Si-Mg系の軽合金の組織改良をして引張強度を400MPa程度以上、伸びを5%以上の目標にした。この組織改良を可能にする技術開発が出来れば、航空機等の輸送機械の構造部品に適用する事が可能になり、鋳造法が採用される事により部品の一体化、薄肉化による軽量化が進み、且つ大きな部品製造コストの低減も期待出来る為、輸送機械産業全体に対しても国際競争力をつける為のソリューションの一つにはなることが考えられる。

Al-Si-Mg系軽合金における強度向上目標と実施結果

『目標』

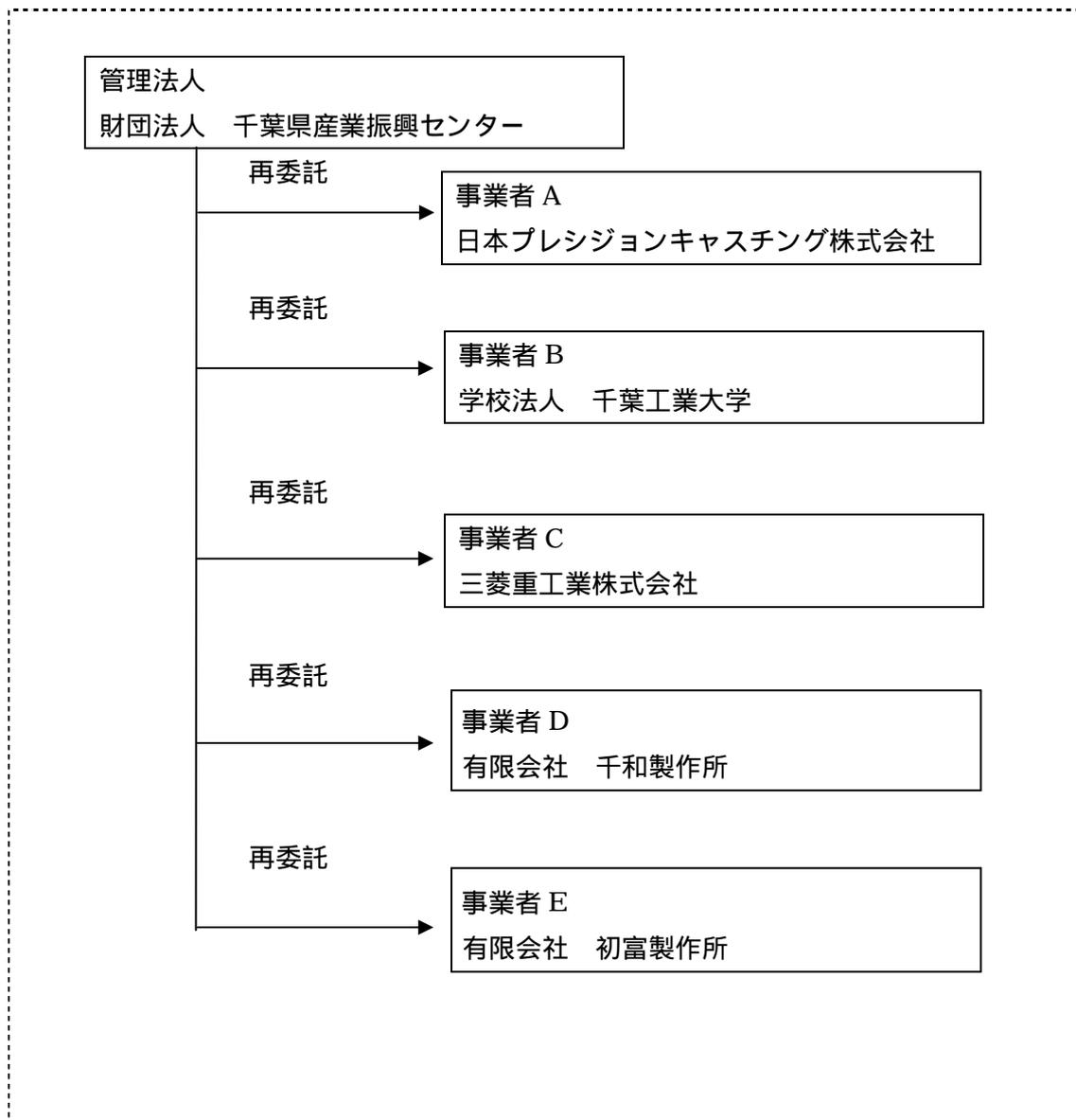
- ・引張強度：現状の220MPa~280Mpa → 400MPa以上
- ・伸び：現状の2~3% → 5%以上
- ・疲労試験：過去には航空機の規格での試験は殆ど無いが今回はASTMのSpecの試験法で疲労試験を行い、AMSのSpecで評価する
- ・肉厚：現状の大型鋳物の限界は2mm以上 → 1.5mmで大型鋳物の試作を行う

『結果』

- ・疲労試験の一部(後述)を除きすべての項目をほぼ達成する事が出来た。

1 - 2 研究体制

研究体制を下図に示す。



総括研究代表者 (P L)
日本プレジジョンキャスティング株式会社
常務取締役 柴田治

副総括研究代表者 (S L)
日本プレジジョンキャスティング株式会社
製造部長 馬場 誠一郎

共同研究体の各機関で定期的に技術開発会議を行い事業推進した。

氏名	所属・役職	備考
柴田 治	日本プレジジョンキャスティング株式会社 常務取締役	P L <input type="checkbox"/> 委
馬場 誠一郎	日本プレジジョンキャスティング株式会社 製造部長	S L <input type="checkbox"/> 委
茂木 徹一	千葉工業大学 工学部 教授	<input type="checkbox"/> 委
都築 圭紀	三菱重工業株式会社 名古屋航空宇宙シ ステム製作所 研究部 材料研究課長	<input type="checkbox"/> 委
雨宮 美能留	有限会社 千和製作所 代表取締役	<input type="checkbox"/> 委
口石 幸久	有限会社 初富製作所 代表取締役	<input type="checkbox"/> 委
松山 隼也	J F E テクノリサーチ株式会社 主席研究員	アドバイザー
長谷川 利之	財団法人 千葉県産業振興センター 東葛テクノプラザ 参事	<input type="checkbox"/> 委

1 - 3 成果概要

1 - 3 - 1 平成 19 年度成果概要

： 鋳造用新真空溶解装置の開発

在来の軽合金の溶解炉とは異なり高周波誘導による溶解炉を製作し、後述する様に正確な温度管理を可能にした溶解炉を開発製作した。

： Al-Si-Mg 系鋳造アルミニウム合金の高強度化技術の開発

鋳造したアルミ合金の結晶粒を微細化する為に各種の人工的な凝固管理を行う『凝固制御プロセス』の技術開発を行った。

1 - 3 - 2 平成 20 年度成果概要

： 鋳造用新真空鋳造装置の開発

平成 19 年度の溶解装置に引き続き新真空鋳造・凝固管理装置の開発製作を行い、真空溶解・真空鋳造凝固管理を連続で行う装置を開発製作した。

： Al-Si-Mg 系鋳造合金の高強度化技術の試験

人工的な凝固管理技術の各種の試験を前年度において行い、最適の『凝固制御プロセス』である SC プロセス（日本プレジジョンキャスティング（株）開発プロセス）を適用して現在量産を行っている製品に近い形状のサンプルを製作して試験鋳造を行って組織、強度等の解析を行いほぼ期待通りである事を確認した。

1 - 3 - 3 平成 21 年度成果概要

： 新真空溶解・真空鋳造装置の開発

最終年度は新装置を各種の形状の試作品に適用できるように装置の改修を行い、新しい形状の航空機用の構造部品を想定した試作品の鋳造を行った。

： Al-Si-Mg 系鋳造合金の高強度化技術の試験

将来機を想定した機体構造部品を川下ユーザーである三菱重工業（株）に設計をして頂き、薄肉大型高強度一体製品の試作を行った。高強度化に実証の向け疲労試験を行い在来鋳造法に比較して非常に優れた結果を得る事が出来た。

1 - 4 当該研究開発の連絡窓口

財団法人 千葉県産業振興センター 東葛テクノプラザ
担当者 長谷川 利之
所在地 〒270 - 0882 千葉県柏市柏の葉 5 - 4 - 6
連絡先 TEL 04 - 7133 - 0139 FAX 04 - 7133 - 0162

第 2 章 本論

2 - 1 差圧鋳造と注湯温度管理

2 - 1 - 1 差圧鋳造と温度管理(薄肉鋳物の製造技術開発)

平成 19 年度開発概要

在来の鋳造軽合金の肉厚は 3mm～5mm 程度で製作されているが、本プロジェクトは 1.5mm 程度の薄肉の肉厚で有りながら 1m 程度の大型の部品も製造できる鋳造装置を開発する事を目指し真空溶解・真空鋳造の装置を開発する為、在来の軽合金の溶解において採用されていた、抵抗発熱体による軽合金の溶解法ではなく、温度の制御(薄肉に対応する為)の正確度、温度の昇降の容易性等のために高周波誘導炉の開発を行った。19 年度は高周波誘導による軽合金の溶解、温度の上昇、下降および一定の温度保持機能の確認と真空度の上昇、維持の確認する事が出来た。(写真 1、2 参照)



写真 1 真空溶解炉用真空ポンプ

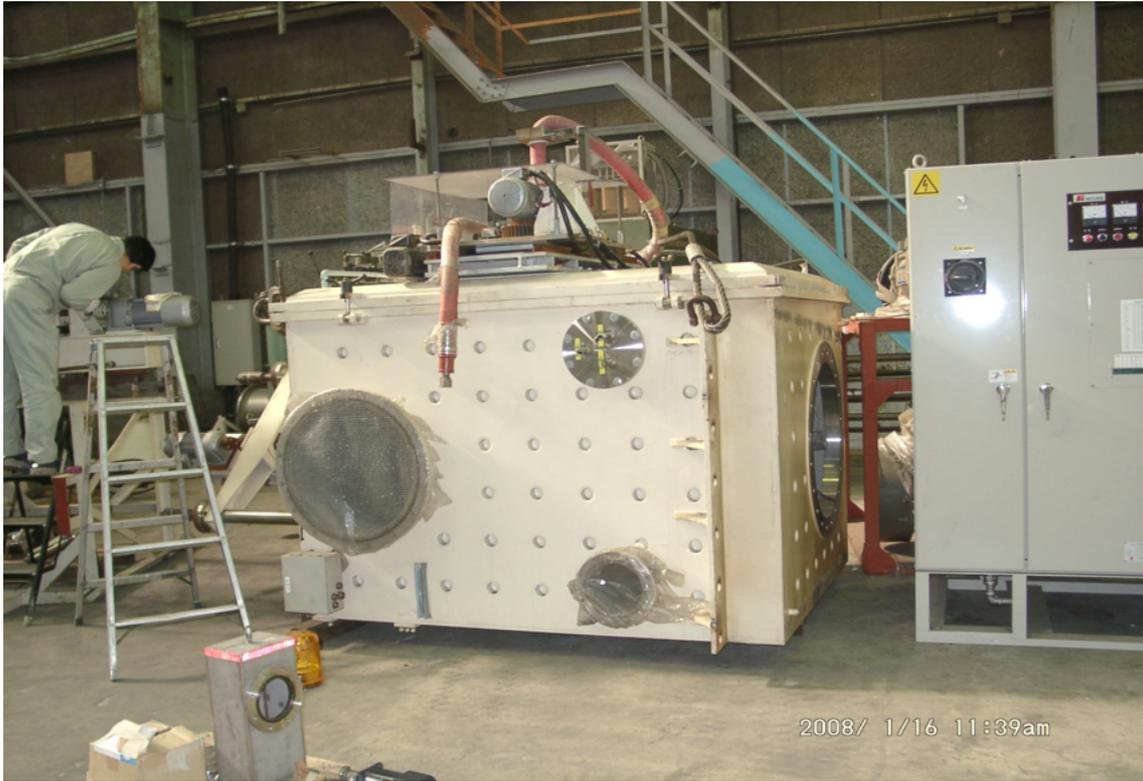


写真 2 溶解炉本体



写真 3 溶解炉制御盤

平成 20 年度開発概要

19 年度に引き続き、新装置の鋳造室、及び凝固管理装置の製作を行い、装置全体が出来上がり、本新装置を使用して実機を想定したサンプルを試作し、良好な結果を得る事が出来、薄肉複雑一体形状の製品の製造を可能にする事が出来た。

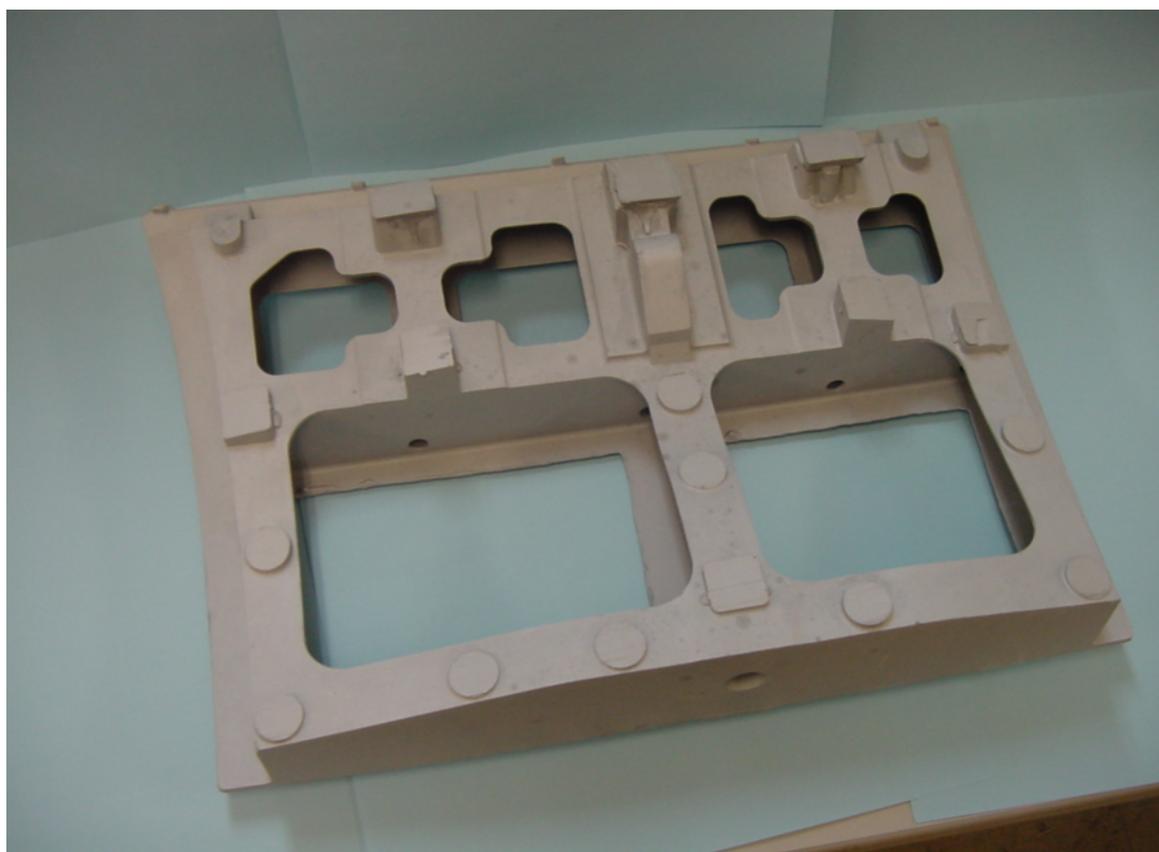


写真 4 実機を想定したドア用のフレーム・サンプル
(肉厚 2mm 程度、大きさ 400mm × 330mm となり精密鋳造としては大型品)

平成 21 年度開発概要

20 年度に完成した装置に小改修を加え、多様な形状の製品の試作を行う事が可能になり、最終の目的である、将来機を想定した実機の構造部品の設計を川下ユーザーに依頼して行い、次頁に掲載をする様な図面(図 1 参照)の機体構造部品の試作を行い良好な結果を得る事が出来た。(写真 5 参照)

これにより当初の目的で有った、輸送機械用の大型薄肉一体成形部品の製造技術の開発という目的はほぼ達成する事が出来た。この技術により今後の航空機、高速鉄道等の構造部品の一体成形を行う事が可能になり、製造コスト、ライフサイクル・コスト等の低減により上記の製造業界の競争力を高める事



写真5 メインフレーム試作品（材質：A357合金）

2-1-2 注湯温度の管理

平成19年度開発概要

19年度においては前述のように新装置の真空溶解の方法に在来の軽合金の溶解方法（抵抗発熱体）とは異なり高周波誘導による溶解を取り入れて高温時の温度管理が容易に出来るようにした。

平成20年度開発概要

20年度には装置全体が完成した為、試験溶解（テスト溶解）を10回程度行い良好な結果を得られた為に、前述の写真4のサンプル品の試作（6回の溶解）を行い全て目標の溶解注湯温度（700度±5度）の設定に対し実測（熱電対による）の温度で700度～702度の範囲と非常に良好な温度管理を実現する事が出来た。この開発の完了に伴い21年度に予定された大型薄肉複雑一体形状品の試作品の鋳造に目途がついた。今回開発した新真空溶解・真空鋳造装置を使う事で、製品の形状に合わせて注湯温度の精密な管理が可能になり種々の形状の製品の製造を可能にするものである。

平成 21 年度開発概要

21 年度はさらに装置に改修を加えて多種類の形状の試作を可能にする為、昇下降の位置決めが自在に出来る様にした。この改修によりいかなる方案の製品であれ試作・製作を可能にした。写真 5 のメインフレームは肉厚 1.5mm の極薄肉製品であるが、正確な温度管理により綺麗に湯が廻っているのが見て取れる。

前述の概要報告に有る様に、3 年間の開発により新装置が完成し多種類の形状の輸送機械用大型薄肉一体形状部品の製造については目途がついた。

2 - 2 低温鑄造と鑄型冷却法の開発（鑄造組織の改良）

平成 19 年度開発概要

一般的な Al-Si-Mg 系の軽合金の鑄造品の強度については下記のように一番条件の良い金型鑄造の強度の現状を下記の表 1 の様に掲載しているが、金型鑄造は冷却速度の点では鑄造品としては在来プロセスとしては一番速く、高強度の製品を得る事が出来ると考えられる為、まず金型鑄造法の強度を基準に考えてゆく事にした。

表 1 機械的性質

現状の強度(規格)			
JIS H 5202 Al-Si-Mg 系 AC4CH(A356)			
種類	熱処理	引張強度(MPa)	伸び(%)
AC4C	T6	235MPa	5%以上

上記の機械的性質を目標に高強度化を可能にするためには後述するように結晶粒の微細化に取り組む必要がある。一般的には精密鑄造法は他の金型鑄造法、砂型鑄造法と比較しより高温で鑄造され、且つ鑄型もより高温で保持された鑄型である為条件としては悪くなる。しかし今回はこのような条件のもとであっても高強度化を図るべく準備を行った。

19 年度は鑄造後の冷却速度を上げる方法の方向付けを図り良好な成績を上げる事が出来た。

表 2 に有る目標強度に近づけるべく種々の方法の実験を行った。その方法を表 3 に掲げた。(表 3 は平成 19 年度成果報告書よりの引用である)

表 2 機械的性質の目標値

JISH5202 Al-Si-Mg 系の強度目標値			
種類	熱処理	引張強度(MPa)	伸び(%)
AC4C	T6	380 ~ 400(MPa)	8 ~ 10%

上記の強度を精密鋳造法で得るには人工的な冷却速度の管理を行う必要がある。その結果、下記の様な結果を得る事が出来た。

表 3 冷却速度の違いによる機械的性質の変化
冷却速度の人工的な管理手法の結果報告 (成果報告)

凝固速度の変化	冷却条件	引張強さ(N/平方mm)	伸び(%)
自然放冷(冷却なし)	遅	270.6 (平均)	4.6(平均)
エア-冷却	速い	285.7 (平均)	7.4(平均)
液体窒素冷却	速い	293.7 (平均)	7.9(平均)
チルプレート使用	速い	291.3 (平均)	7.6(平均)
SCプロセス	速い	299.3	10.8
・鋳型温度:600		溶解温度:730	

上記の結果により引っ張り強さ、伸びの点から SC プロセスを採用する事にした。

平成 20 年度開発概要

20 年度はさらに新装置を使用して前掲の写真 4 のサンプルを新装置の SC プロセスで鋳造を行い、試験片を切出して機械的性質の試験を行った。試験については 2 種類の Al-Si-Mg 系合金を適用した。(A356 合金と A357 合金) A356 合金についての試験片は予め試験片の金型を作製し精密鋳造で試験片を作製して試験を行った。その結果は表 4 の通りである。A357 合金の試験結果は弊社の在来鋳造品の試験片は条件の良い試験片の金型から精密鋳造により製作された試験片結果であり、SC プロセス品は湯道(非常に劣悪な条件になる)から切出された試験片の結果で有る。(表 5 を参照)

表 4 の中にある様に同じ試験片の製造方法での比較をしてみると、SC プロセスの優位性が充分に見てとれる。特に伸びの数値は航空機等の設計においては一番大事な数値であり、SC プロセス品は鍛造に近い良好な数値となっている。表 5 の A357 合金の場合は試験片の製作状況は SC プロセス品の方は非常

に不利な条件になっているが、それでも大事な伸びの数値が通常品を大幅に上回っている。この結果においても SC プロセス品の優位性が証明されている。

表 4 A356 合金機械的性質比較

規格	材質	引張強度	耐力	伸び
AMS4218H 7.0Si-0.35Mg Al alloy casting	A356.0 T6	221MPa (228MPa)	152MPa (186MPa)	2% (3%)
AMS4218H 7.0Si-0.35Mg 弊社通常鑄造品	A356.0-T6 試験片は(別鑄込み)丸棒試験片φ6.35×25である	277MPa 試験結果は5チャージ分の各チャージ2本ずつの計10本の平均値である。	215MPa	6.8%
AMS4218H 7.0Si-0.35Mg 弊社SCプロセス鑄造品	A356.0-T6 試験片は同上	317MPa 試験結果は5チャージ分5本の平均値である。	241MPa	14.7%

表 5 A357 合金機械的性質比較

規格	材質	引張強度	耐力	伸び
AMS4219E 7.0Si-0.55Mg-0.12Ti-0.06Be Al alloy casting	A357.0 T61	262MPa (283MPa)	207MPa (165MPa)	2% (3%)
AMS4219E 弊社通常鑄造品	A357.0-T61	372MPa	317MPa	5.9%
AMS4219E 弊社SCプロセス鑄造品	A357.0 T6	353MPa	285MPa	8.1%

20 年度においては上記の様に新装置を使用して薄肉(2mm程度の肉厚)の製品を低温(700度)で鑄込みを行い、その機械的性質の確認を行う事が出来良好な結果を得る事が出来た。

平成 21 年度開発概要

21 年度は 20 年度の結果を受け、写真 4 のドア用のフレーム・サンプルを 5 個試作し全て 700 度～702 度（熱電対による実測）の範囲の低温で鋳込み、良品になった。これにより新装置を使用しての試作の再現性を確認し、装置の有効性の実証ができた。21 年度はさらに航空機用の規格に基づいて各種の試験（機械的性質、内部品質）を行い下記のように優良な結果を得る事が出来た。（表 6 参照）

表 6 A357 合金の新装置による試作品の機械的性質の比較

鋳造法の分類	機械的性質	DAS（*注 2）の平均値
在来の精密鋳造法による A357 合金の試験片（AMS4219 規格による）	引張強度 283MPa 耐力 221MPa 伸び 3.0%	120 μ ~150 μ
今回開発新装置・SC プロセスによる A357 合金の実体切出し試験片	引張強度 381MPa *注 1 耐力 329MPa *注 1 伸び 5.9% *注 1	30 μ ~35 μ

*注 1：この数値は今回開発新装置による試作サンプル（写真 4 と同じ形状）の湯道から切出した試験片のうちの 1 番低い数値を掲げてあり、他の数値は全てこの数値を上回っている、又湯道という条件の悪い部分から切り出した試験片であり、5 個の試作品からの数値でもあるという事を考慮すると上記の数値は非常に良好な数値と言える。

*注 2：DAS(Dendrite Arm Spacing の略である)は溶融金属が凝固する時に結晶の核が成長をするが、その時結晶の核の成長する方向の直角方向の 2 次枝の間隔を表すものであるがこの数値は結晶粒の微細化を表すものであり、この DAS の数値が小さいと機械的性質を向上させる。
参考迄に下記にこの考え方の基礎になる Hall-Petch の関係式を以下に説明する。

『参考』Hall-Petch の関係式

$$y = \sigma_0 + k_y d^{1/2}$$

(y : 求める強度、 σ₀ : ベースになるアルミの強度、 k : 定数、 d : DAS の値)

上記の関係式により DAS の値が小さいほど強度が上がって行く。

21 年度の開発は他に写真 5 のメインフレームの試作を新装置で行い、1.5mm の大型超薄肉品を作製した。

その結果、写真に観られる様に湯廻り不適合も皆無であり、良好なサンプルが出来た。

2 - 3 試作鋳造品の評価

- ・ 外観：20 年度、21 年度のサンプル試作品について全て外観的には良好な製品が出来上がった。（写真 4 及び写真 5 に示した）

- ・ 内部品質

21 年度の試作品 5 個については想定される部品としての要求品質グレード（クリチカル・エリアグレード B、一般エリアグレード C とする）を仮に決めて、その要求品質に基づいて放射線透過検査を行い、十分に余裕のある結果を得る事が出来た。尚、蛍光浸透探傷検査も実施し全く問題のない事も確認する事が出来た。在来の鋳造品と比較し、欠陥が非常に少ない事が確認出来た。これは新装置が真空中で溶解・鋳造される事に負う事が大きいと考えられる。

- ・ 機械的性質試験

20 年度、21 年度の試作品について機械的性質の試験を行ったが、前述の表 5 及び表 6 に掲げてある様に非常に良好な結果を得る事が出来た。

試作品（ドア用フレーム）は肉厚が薄くしかも曲面を持っている為、試作品そのものからの実体切出し試験片を製作する事が出来ない為、条件の悪い湯道から試験片を切出さざるを得ず、厳しい条件の中での試験結果として考えると非常に高強度の軽合金精密鋳造品と考える事が出来る。

- ・ 疲労試験

航空機（輸送機械）用の部品として近い将来適用してもらう為に、鋳造品としては非常に高い壁になる、疲労試験を平成 21 年度において実施し本プロジェクトの仕上げを行った。この疲労試験結果の概要は後述する様に在来の鋳造品との比較では格段に優れた結果を示しているが、使用した原材料（A357 合金）の清浄度に酸化物等が含まれていた為、疲労試験の結果においては若干の不満の残る部分も有ったが、今回のプロジェクトの成果としては将来の航空機の部品に十分に適用できる装置・プロセスの開発が出来たと考える。疲労試験は重要な試験である為下記に別途報告する。

『疲労試験の概要報告』

適用スペック：AMS 4249A D357.0-T6 アルミ合金規格(疲労破壊試験を伴う規格)

ASTM E 466 金属材料の一定振幅軸疲労試験規格

- ・尚、AMS は Aerospace Material Specification の略である
- ・ASTM は American Society of Testing Materials の略である。

上記のスペックに基づき下記の表 7 の試験項目の試験を行った。試験は在来の精密鑄造法によって製造された試験片と今回の新装置・SC プロセスにより製造された試作品の湯道より切出された試験片との結果を比較した。

表 7 疲労試験項目

疲労試験項目	試験項目内容
・試験片の本数	各応力毎に 3 本ずつの試験を行う事とする (10 本程度)
・試験の応力	最大で 276MPa の応力にて試験を行う事という AMS 4249A の規定に基づき 210MPa の応力から始める事とし、240MPa,170MPa の 3 応力で試験を行う。
・試験の周波数	AMS 4249A の規定により 10Hz とする
・試験片の形状	ASTM E466 - 07 の規定に基づき今回の試作鑄造品の形状、方案より可能な部位から切出した平板試験片とする。結果として試作鑄造品の湯道を使用する。在来の一般鑄造法による試験片も条件を同じくする為湯道を使用する。

疲労試験の目標値は下記の表 8 の通りである。

表 8 疲労試験目標値

試験片のライフ(注)	AMS 4249A の規定 3.6.2.2.1 項に有る様に実体からの切出し試験片の平均ライフは 68,000 ~ 78,000 サイクルであり、個別の最少のライフは 36,000 ~ 42,000 サイクルである。
------------	--

- ・注：上記の表中の数値は試験片の形状が丸型試験片での数値であり、径()が 6.35mm ~ 9.52mm の試験片による場合の数値である。本プロジェクトの試験片は平板試験片であり、且つ板厚が 2.5mm という試験片の為、微細な欠陥でも大きな影響を受ける為非常に厳しい疲労試験であると考え。

【結果】今回の新装置・SC プロセス鑄造品から切出した試験片の結果(表 9)と在来のプロセスである一般鑄造品から切出した試験片の試験結果(表 10)を比較する

事により、新装置・SCプロセスの優位性が良く解る。

表 9 新装置・SC プロセス品 疲労試験結果

最大応力 (MPa)	疲労寿命 (サイクル数)
170	190842
170	183229
170	223998
210	119097
210	39523
210	83711
240	34879
240	11658
240	13142

表 10 一般鋳造品 疲労試験結果

最大応力 (MPa)	疲労寿命 (サイクル数)
170	42686
170	18201
210	3922
210	9858
240	1540
240	30207

表 9 及び表 10 を比較すると良く解るが、新装置・SC プロセスの優位性が良く実証されている。

また、応力と疲労寿命の関係を下図に示す。

【考察】表 9 の新装置・SC プロセス鋳造品の試験結果で 240MPa の最大応力での寿命が規定のサイクル数に達していないのは、前述の表 8 の注のところで述べた様に平板試験片の為小さな欠陥を拾って寿命が短くなっている。疲労寿命はその材料の中に含まれる欠陥等による最弱因子により寿命が左右される事になるという定説に従っている。しかし、在来の鋳造方法の一般鋳造品と比較すると新装置・SC プロセス鋳造品の優位性により、将来の航空機の構造部品には適用が出来るものと考えられる。

試作品の評価全体を概要報告すると新装置・SC プロセス鑄造法の有効性が確認され、薄肉大型品(1.5mm)の鑄造技術が確立し、且つ今迄にない機械的性質、疲労寿命の向上を期待できる装置・技術が出来たと考える。

2 - 4 装置開発

- ・平成 19 年度は前述の写真 1～写真 3 にある溶解装置を製作し、且つ真空ポンプの組み込みを行った。(真空ポンプはロータリー・ポンプとメカニカル・ブースター・ポンプを各 2 台ずつ使用)
- ・平成 20 年度は 19 年度の試験結果に基づき人工的な凝固管理プロセスを SC プロセスに決定し、このプロセスを新装置の中に組み込んで装置の全体が完成した。(18 頁の写真 6 及び 19 頁の写真 7 参照) 炉体の寸法は、5.6m × 3.0m × 1.8m になっており写真にも有る様にステージを設置して使用する。
- ・平成 21 年度は多種類の形状に対応出来る様にする為に昇降装置に改修を加え自在に位置決めを可能にした事で装置は完全に完成した。

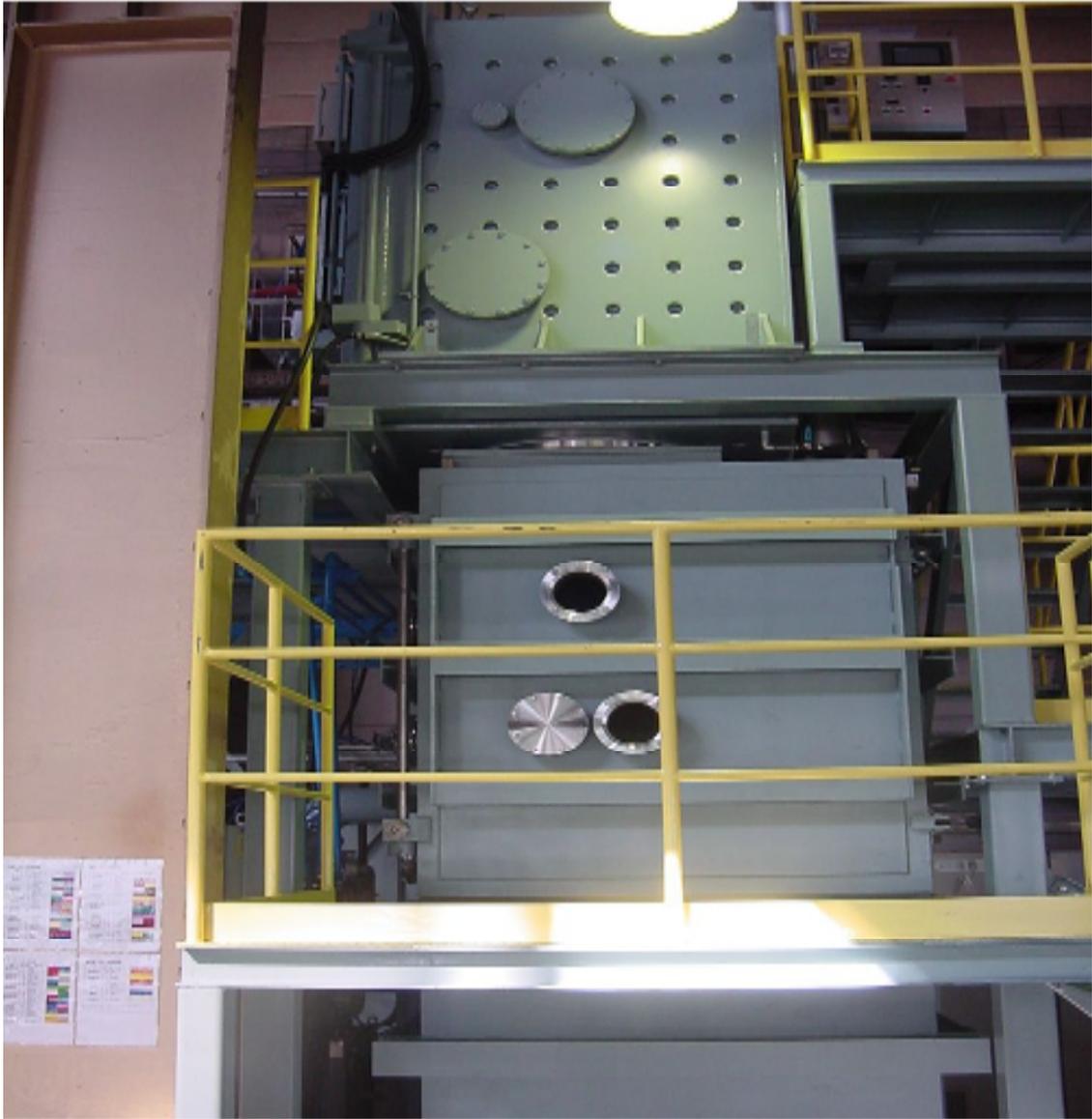


写真 6 新装置の溶解・鑄造部分



写真 7 新装置の制御盤を含め横から見た全体

第3章 全体総括

本プロジェクトは在来の精密鋳造品のイメージを大きく一新するべき技術開発を行い、日本の輸送機械製造業の国際競争力をつける事に寄与出来る鋳造品の製造を可能にすべくスタートし、次の3点を目標に開発を行った。

1. 大型薄肉複雑一体形状品の製造技術の開発
2. 在来の鋳造品の機械的性質の大幅向上
3. 鋳造品においては非常に大きな壁になっている疲労試験を行える程度の組織を持つ鋳造品の製造技術の開発

上記の3項目のうち1項と2項の2項目についてはほぼ当初予想していた技術の開発は出来たと考えている。3項についても数値は在来鋳造法との比較においては十分な結果を得る事が出来たものの、原材料の母合金の清浄度に若干問題が有り完全に満足の結果にはなっていないことが考えられる。この点は事前に精錬をした母合金を社内で製作し、開発の続行を続ける必要がある。前述のように全体としてはほぼ当初の目的を達成したことが考えられる。今後の航空機をはじめとする各種の輸送機械に本技術を採用した製品が構造部品として適用される日が近い事を期待する。

以上。