

平成26年度
ものづくり中小企業・小規模事業者等連携事業創造促進事業
戦略的基盤技術高度化支援事業

「航空機中空複雑形状鋳物用、砂型差圧鋳造技術の開発」

研究開発成果等報告書概要版

平成27年 3月

委託者 中部経済産業局

委託先 公益財団法人石川県産業創出支援機構

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（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）
- 1-3 成果概要
- 1-4 当該研究開発の連絡窓口

第2章 複雑形状中空鋳物への対応

- 2-1 多糖類バイндаの適用
- 2-2 凍結鋳型の適用

第3章 鋳造欠陥への対応

- 3-1 ガスピンホールを発生させない差圧充填・凝固条件の検討
- 3-2 充填・凝固状態の把握とCAEの活用

第4章 実製品での航空機用複雑鋳物部品の試作と評価

- 4-1 形状精度への対応
- 4-2 鋳造欠陥への対応

第5章 高活性・難鋳造性鋳物への対応

- 5-1 不活性雰囲気下鋳造の実現
- 5-2 鋳型材と差圧制御条件の検討

第6章 全体総括

- 6-1 研究成果の総括
- 6-2 今後の事業化に向けた取り組み

第1章 研究開発の概要

航空機部品のように高い品質レベルが要求される金属部品は、NC 工作機械により、欠陥の少ない展伸ブロック素材から削りだしされる。しかし、加工工具の届かない中空部を有する複雑形状部品は、砂型鑄造法に依存せざるを得ない。本研究では、砂型鑄物の強度と靱性に悪影響を及ぼす鑄巣欠陥の極小化を達成する差圧鑄造技術と、中空化には不可欠な崩壊性鑄型の開発により、航空機用中空複雑形状鑄物の一体成形化技術を確立する。

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

本研究開発は、特定ものづくり基盤技術高度化指針のうち、以下のいくつかの項目に対応する。それぞれの項目での研究開発の背景及び目的を示す。

(十一) 鑄造に係る技術に関する事項

(1) 高付加価値化に対応した技術開発の方向性

① 複雑形状及び一体成形

航空機部品鑄物の一つであるアルミ合金製ギヤボックスは、エンジンを作動させるために必要な燃料ポンプや発電機などの補機を駆動させる役割を担っている。内部に複数のオイル通路を有することから、漏れがなく信頼性を確保した薄肉化と一体化が求められる。この様な加工工具の届かない複雑形状部品は、展伸ブロック材からの削りだしによる機械加工が不可能で、砂型鑄造によるしかない。

鑄物の中空部位を形成するために用いる中子は、熱容量の小さいアルミニウム合金では、鑄ぐるみ状態となって中子に崩壊を促すだけの熱が得られず、凝固後の鑄物に中子が固着し除去が難しい状態となる。順って、凝固後の固着が少なく容易に除去可能な中子や、適度な放置時間で崩壊が進む、崩壊性鑄型の適用を本研究開発において進める。

② 信頼性の向上

砂型鑄造の欠点として、冷却速度が遅い点があげられる。そのため、従来法の重力鑄造や低圧鑄造では、冷却速度の得られない部位で溶湯中の溶存水素が凝固課程で凝集し、ガスピンホール欠陥が発生する。ピンホール欠陥は強度低下を招くことから、欠陥を極小化とする本提案で取り組む差圧鑄造法の開発が必要である。

(2) 軽量化に対応した技術開発の方向性

①アルミニウム・マグネシウム化

近年、耐熱性に優れたマグネシウム合金鋳物用素材が開発され、部品適用が進んでいる。しかしながら、化学的に活性で反応性の高い元素を含んでいるため、溶湯の酸化やガス吸収が激しく極めて鋳造性が悪い。つまり、マグネシウム合金のような高活性・難鋳造性素材は、製品適用が期待されるも、欠陥発生率が高く、信頼性が低い状態にある。したがって、本提案で取り組む不活性雰囲気での新たな差圧鋳造法の開発が必要である。

最終的に製品化を目指す航空機用鋳物のアルミ合金製ギヤボックスは、内部に複数のオイル経路を有しており、漏れや割れがない信頼性を有した一体化成形品が求められる。そのため、研究開発の最終的な具体的な目標とし、実製品での航空機用複雑鋳物部品の試作と評価を行い、形状精度、鋳造欠陥に達成と、マグネシウム合金に代表される高活性・難鋳造性素材への対応を掲げている。

本研究開発においては、下記課題項目ごとに研究目標を設定した。

【1. 複雑径場中空鋳物への対応】

【1-1】中空部鋳物形状精度への対応

- ・アルミ合金製中空形状鋳物を試験対象とし、最小直径 15mm、長さ 300mm、外径公差 0.7mm の L 型中空部位を位置精度 $\pm 0.3\text{mm}$ 以内で鋳造する。

【1-2】中子への多糖類系バインダの適用

- ・従来法のシェル中子では、中子除去時間が約 10～60 分程度要していた除去時間を 3～10 分へと短縮する。
- ・変形が少なくかつ高活性・難鋳造材にも適用可能な中子材の検討

【1-3】凍結鋳型の適用

- ・サブテーマ 1-1 の目標鋳物形状を維持し、下記の除去作業時間を達成する。
- ・従来法の型で、ばらし作業時間が約 20～30 分程要していた鋳型を例とし、作業時間を 0～5 分へと短縮する。
- ・凍結鋳型の適用範囲を見極める。

【2. 鋳造欠陥への対応】

【2-1】ガスピンホールを発生させない差圧充填・凝固条件の検討

- ・比較のため、従来法の重力鋳造、自硬性鋳型およびシェル中子でのサブテーマ 1-1 の鋳造品において評価し、本手法では欠陥の大きさや数をそれ以下とする。

【2-2】 充填・凝固状態の把握と CAE の活用

- ・ 鋳型内に熱電対を設置し、溶湯の充填・凝固挙動を把握する。
- ・ 温度変化のデータから鋳造 CAE 解析のパラメータの補正を行い、解析精度を高める。

【3. 実製品での航空機用複雑鋳物部品の試作と評価】

【3-1】 形状精度への対応

- ・ 川下企業からアルミニウム合金製鋳物の例示を受け、要求される形状精度を達成する。

【3-2】 鋳造欠陥への対応

- ・ 従来法の砂型重力鋳造において、航空機部品鋳物の国際的な検査基準での判定が、Grade C とされたギャボックスを例として取り上げ、本提案で開発した手法を適用し、判定 Grade が一段階厳しい Grade B を目標とする。

【3-3】 航空機鋳物以外の他製品での試作と評価

- ・ 川下企業より試作部品の例示を受け、鋳造と評価を行う。

【4. 高活性・難鋳造性鋳物への対応】

【4-1】 不活性雰囲気下鋳造の実用化

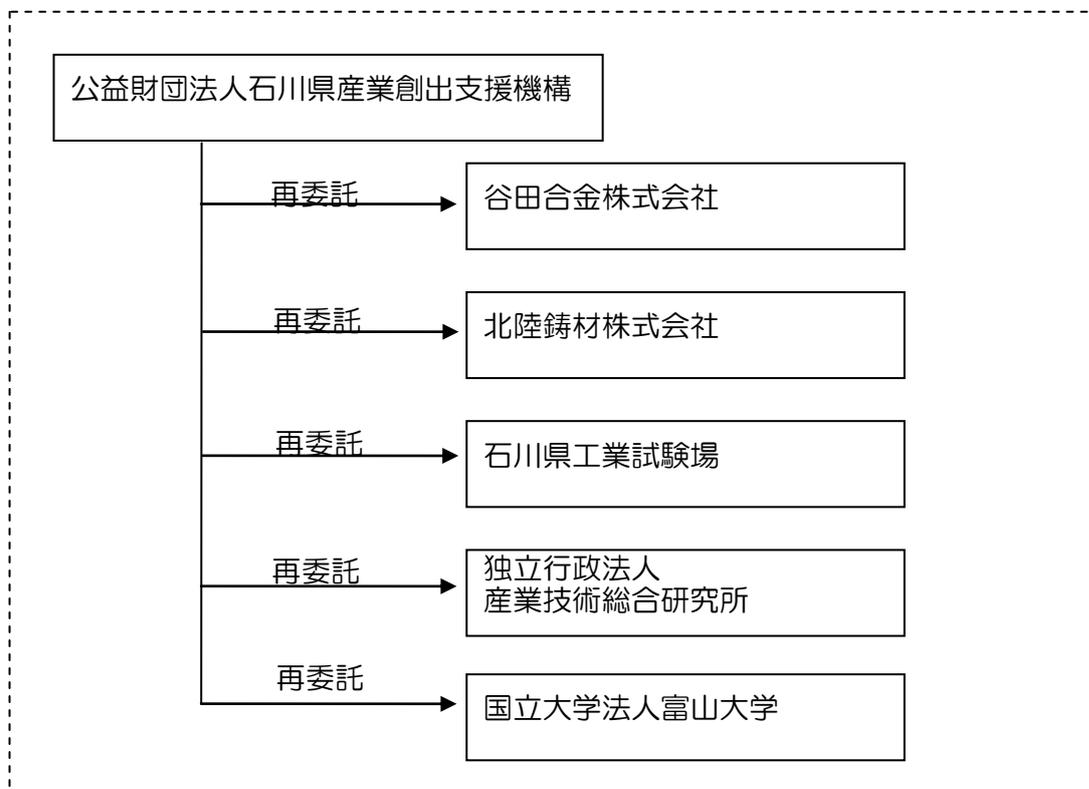
- ・ 不活性雰囲気置換装置の設計と設置により、差圧鋳造装置の雰囲気置換を達成する。

【4-2】 鋳型材と差圧制御条件の検討

- ・ 川下企業からマグネシウム合金製鋳物の例示を受け試作する等により、要求される形状精度を達成する。(評価項目は 3-2 と同等とする。)

1-2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）

(1) 研究組織（全体）



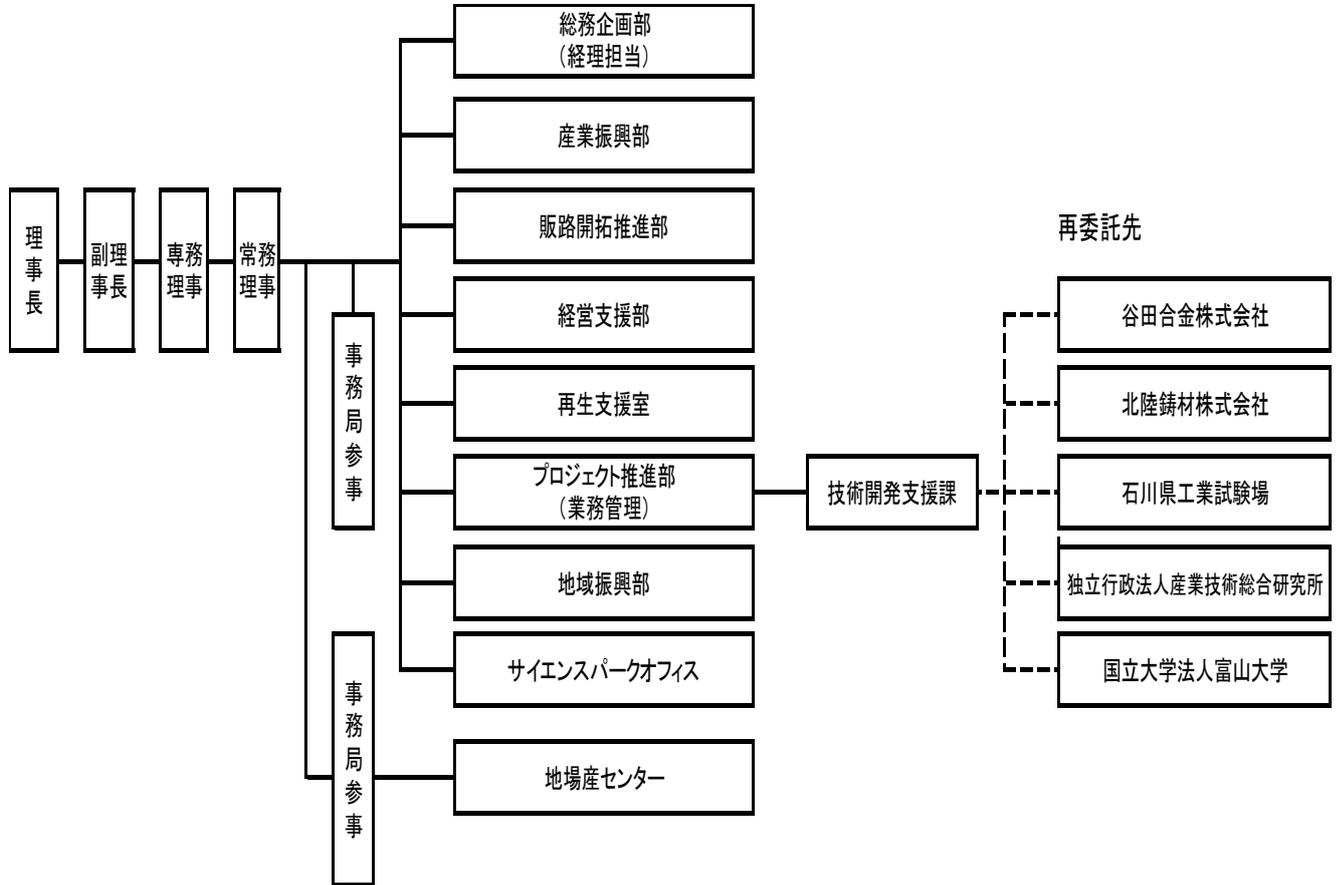
総括研究代表者（PL）
所属 谷田合金株式会社
役職 代表取締役社長
氏名 駒井 公一

副総括研究代表者（SL）
所属 石川県工業試験場
役職 専門研究員
氏名 藤井 要

(2) 管理体制

① 事業管理機関

公益財団法人石川県産業創出支援機構

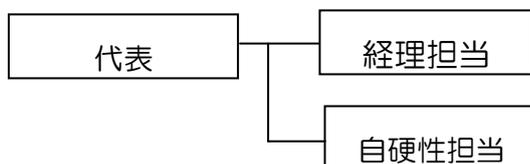


② 再委託先

谷田合金株式会社



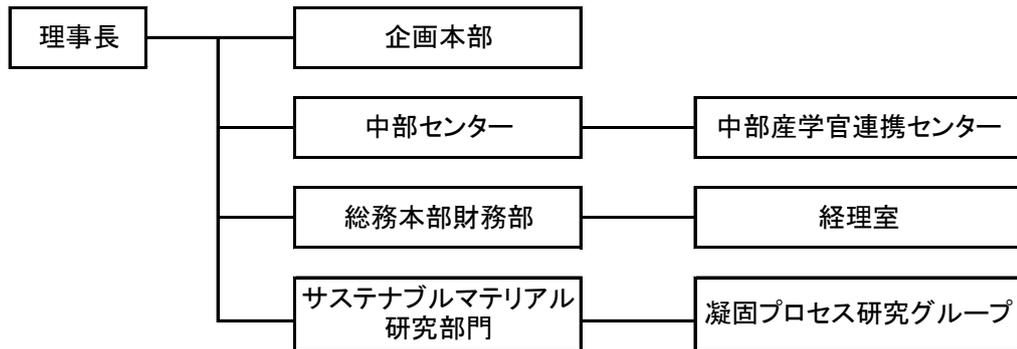
北陸鑄材株式会社



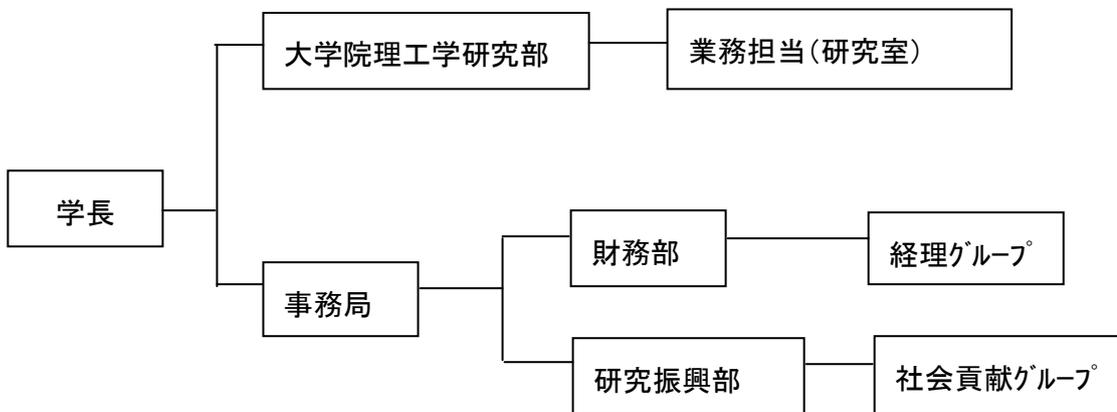
石川県工業試験場



独立行政法人産業技術総合研究所



国立大学法人富山大学



(3) 管理員及び研究員

【事業管理機関】 公益財団法人石川県産業創出支援機構

管理員

氏名	所属・役職
平崎 直純	プロジェクト推進部長
木村 孔明	プロジェクト推進部技術開発支援課
中尾 一也	総務企画部総務企画課長

【再委託先】

研究員

谷田合金株式会社

氏名	所属・役職
駒井 公一	代表取締役社長
谷田 恒平	管理部課長兼営業技術
砂山 昇	製造部鑄造課
町野 亮	製造部鑄造課

北陸鑄材株式会社

氏名	所属・役職
荒井 義則	代表
山川 茂	自硬性担当

石川県工業試験場

氏名	所属・役職
藤井 要	機械金属部 専門研究員
谷内 大世	機械金属部 技師

独立行政法人産業技術総合研究所

氏名	所属・役職
多田 周二	凝固プロセス研究グループ長
尾村 直紀	凝固プロセス研究グループ 主任研究員
李 明軍	凝固プロセス研究グループ 主任研究員
村上 雄一朗	凝固プロセス研究グループ 主任研究員
松井 功	凝固プロセス研究グループ 研究員

国立大学法人富山大学

氏 名	所属・役職
才川 清二	大学院理工学研究部准教授

1-3 成果概要

以下の項目での実験・評価を行った。成果の概要は以下の通り。

複雑形状中空鋳物への対応

多糖類バインダを用いた中子の製造条件の検討を行った。L型形状の中子型を用いて金型温度、圧入速度、圧入加重、焼成時間、保圧時間のうち、成形状態に最も影響を及ぼす金型温度と保圧時間に対し、詳細な検討を行った。保圧時間は、バリの発生と中子断面の中空形状の成形に影響することが分かった。保圧時間のコントロールによりバリがなく、中空形状を有する中子の成形が可能となった。さらに、金型温度は、割れ（クラック）による造型の可否と、強度に影響することがわかった。これら、制御条件の検討より、実製品形状の中子での成形条件の指針を得た。さらに、中空部鋳物形状精度の評価を完了し、従来法に比べ十分な除去時間の短縮を達成した。

凍結鋳型の適用に関して、L型のアルミニウム合金鋳物でも凍結鋳型で鋳造可能であることを確認できた。一方、形状により抜型が困難な場合があることがわかり、その対策として、水分とともに若干量のコロイダルシリカを添加し凍結させた。中子強度は改善され、破損することなく中子を型枠から抜型できた。凍結鋳型の更なる複雑形状への適用可能性を探るため、実生産品用型枠を用いて鋳型の作製を試みた。結果は、鋳型の作製は可能であったが中子は作製ができなかった。凍結鋳型の場合には、最適な型枠形状が従来砂型とは異なる可能性があり、複雑形状鋳物用にも凍結鋳型を十分適用できると思われる。

鋳造欠陥への対応

多糖類バインダの適用で作製した試験用鋳物を切断し、従来法の低圧鋳造と開発法の差圧鋳造での鋳物内部の欠陥を比較評価した。従来法のシェル中子では湯境不良が発生したが、多糖類バインダでは湯境が発生しなかった。また、どちらの中子も微小な空隙欠陥が発生しているが、差圧鋳造では、空隙欠陥が抑制されていることが確認できた。鋳造欠陥への対応とし、差圧鋳造が極めて有効であることが明確になった。

充填完了、凝固完了、加圧除去のタイミングや鋳造条件を決定するため、差圧鋳造装置内の鋳型に熱電対を設置し、各部の温度変化を計測した。この結果から、熱電対での実測結果とCAE解析結果で差異がないことがわかり、解析精度に信頼性があることを確認した。鋳造方案の決定には、CAEを取り入れることで、実鋳造回数を極少化することができ、十分に効果を発揮した。

実製品での航空機用複雑鋳物部品の試作と評価

川下企業より例示を受けた航空機部品鋳物における崩壊性中子の造型条件および試作鋳造を行った。L型形状の中子で得た製造条件の基礎データを基に、製品形状での中子の成形に成功した。その中子を用いた試作鋳造品は、形状崩れの不具合が発生したが、原因を調査し対策を施した結果、 $\pm 0.3\text{mm}$ 以内で要求形状精度を満足し、国際判定基準の GradeB を達成した。また、航空機鋳物以外の他製品での試作と評価を予定していたが、航空機鋳物部品の試作・評価に注力したため、実施できなかった。今後、他製品についても実施していく。

高活性・難鋳造性鋳物への対応

差圧鋳造によるマグネシウム合金の製品適用を行うため、鋳型材や鋳造雰囲気の評価が必要である。そのため予備実験としてラボベースでの鋳造実験を行った。実験には、高活性・難鋳造材用鋳造装置を設計・設置し、マグネシウム合金 (Mg-Gd-Nd 活性合金) の鋳造実験を実施した。実験により鋳造前の溶湯清浄度を向上でき得る精錬方法 (温度、フラックス、脱ガス方法) 等の技術をほぼ確立することができた。これら富山大学でのラボベースの鋳造実験結果を基に川下企業から例示を受けたマグネシウム合金製の航空機鋳物部品の試作を行った。鋳物の外観においては、特に異常は見られなかった。ただし、鋳物の内部には、引け巣欠陥が一部に見られた。この原因を調査するために、鋳造 CAE 解析を行った結果、製品部において堰前が取り残され最終凝固部になりやすいためであることが分かった。堰の大きさを調整することで欠陥を抑制することができると考えられる。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

(事業管理機関)

公益財団法人石川県産業創出支援機構

プロジェクト推進部長 平崎直純

Tel:076-267-6291 Fax:076-268-1322

Email:hirasaki@isico.or.jp

第2章 複雑形状中空鋳物への対応

2-1 多糖類バインダの適用

平成24年度当初に予備実験とし10mm角、長さ50mmの簡易型で成形した中子を用い、砂の種類およびバインダ添加剤量を変化させた中子の製造試験と抗折力による強度評価を行った。それにより、バインダの配合比と骨材の種類による強度変化の基礎データを構築し、多糖類系バインダの配合を決定した。

これらの配合条件を用い、実製品を模擬した図2-1中の黄色で示したL型形状中子での製造条件の検討と、鋳物にした際の中子性能の評価を行った。鋳物にした際の鋳造実験は、重力鋳造、差圧鋳造、低圧鋳造それぞれを比較し、本テーマの開発手法である差圧鋳造の優位性を明らかにした。

中子の製造工程は、①プランジャの圧入位置に金型移動、セット後、②ホイップ状に混練された原材料が加熱された金型に圧入され所定時間の保圧時間で焼成される。その後、③型開き、中子の取り出しとなる。ここで、製造条件として考えられる制御可能パラメータは、金型温度、圧入速度、圧入加重、焼成時間、保圧時間である。このうち、成形状態に最も影響を及ぼす金型温度と保圧時間に対して詳細な検討を行った。図2-2に中子の成形状態とし、不良としたものを分類し示す。

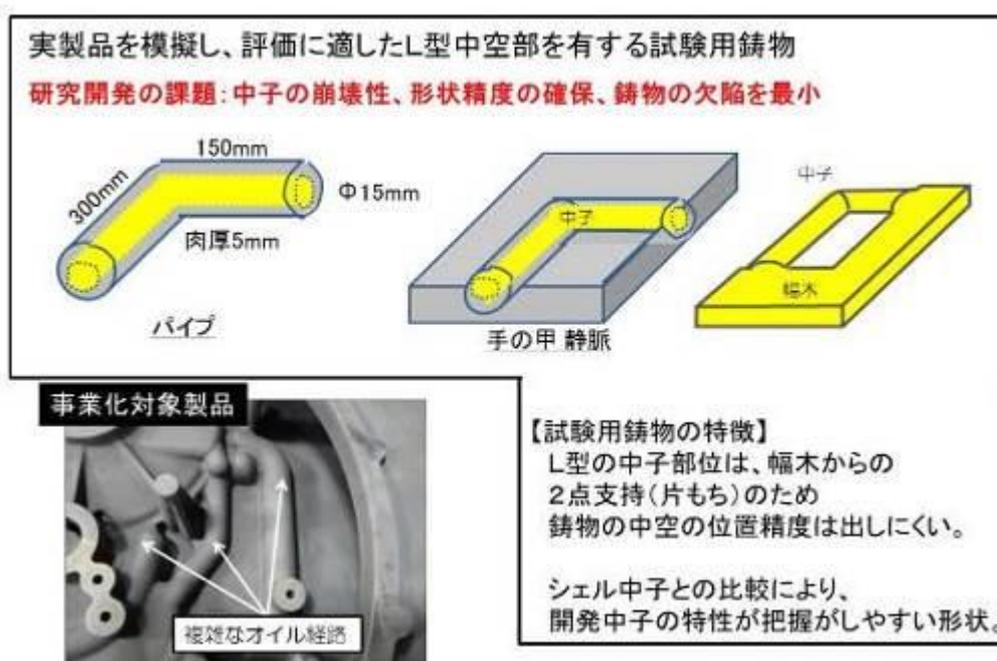


図2-1 L型形状中子と評価用鋳物



図2-2 成形した中子の不良状態や中空形状での分類

製造条件の検討の際、具体的には、金型温度を150、200、250、300℃、保圧時間を5、30、60、180秒と変化させ造型実験を行った。

保圧時間は、バリの発生と中子断面の中空形状の成形に影響し、30秒から60秒が妥当であった。保圧時間の選択によりバリがなく、適度な中空形状をコントロールできることがわかった。さらに、金型温度は割れ（クラック）と造型の可否に影響し、200℃から250℃が妥当であることがわかった。示差熱分析試験の結果より、多糖類系バインダは250℃から熱分解が始まるため、バインダの熱分解による結合力劣化があると考えられる。

次に、良好な造型状態で得た中子を用いて、鑄造試験を行った。鑄物形状は、図2-1で示したパイプ形状と手の甲静脈形状の2種とした。鑄造材はアルミニウム合金AC4Cとし、注入温度を740℃とした。なお、鑄造法は、重力鑄造、差圧鑄造、低圧鑄造それぞれで行った。

図2-3にそれぞれの形状と鑄造法で作製した鑄物の外観を示す。外観上は、主立った欠陥がなく良好な鑄物であった。また、これら多糖類系バインダを用いた中子以外にも、従

来法による中子（シェル）を用いた鑄造試験も比較のため行った。

まず、これらの鑄物からの中子の除去性を測定した。表2-1にその結果をしめす。多糖類系バインダを用いた本研究で開発している中子に関しては、溶湯の凝固直後の鑄物の中子は、自己崩壊しており、軽く揺さぶっただけで、中空部から容易に取り出すことができ、実質的な作業時間は無いに等しい状態であり、革新的な作業効率の向上が明らかとなった。一方、シェル中子は、ランマによる加振とエアブローによる空圧での除去が必要であり、30分近く要した。なお、これらの中子の除去性は重力鑄造、低圧鑄造、差圧鑄造の鑄造法により変化することはなかった。

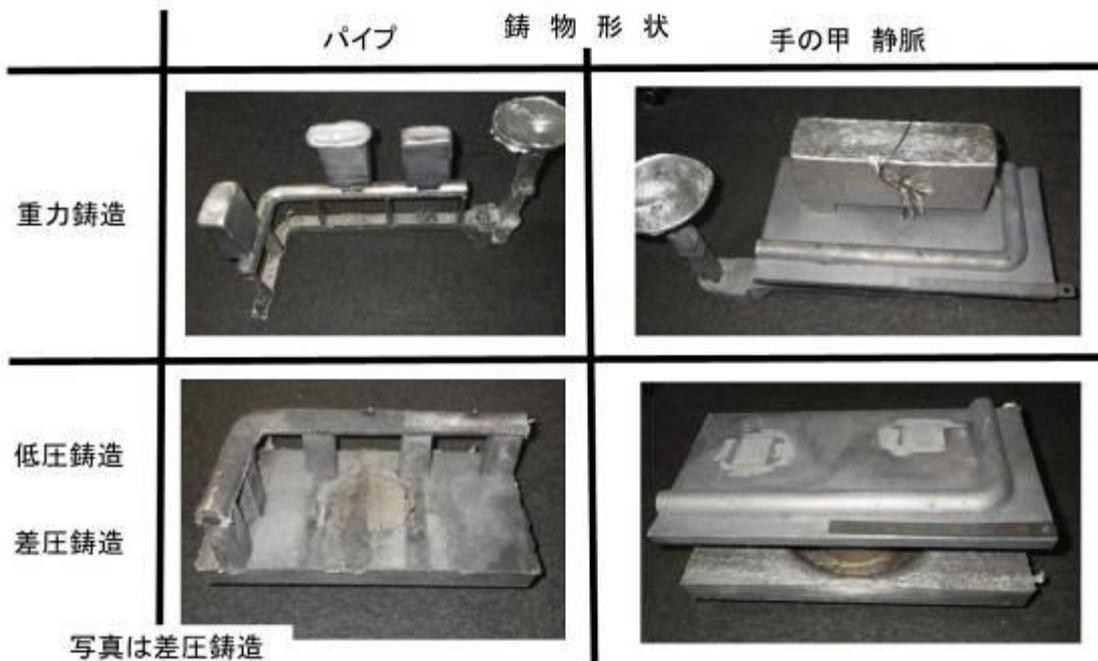


図2-3 鑄造品の外観

表2-1 中子の種類による鑄物からの除去時間

鑄物からの中子の取り出し時間

中子の種類	ランマ時間	エアブロー時間	合計時間
開発中子（多糖類系）	0~s	0~s	≒0s
従来中子（シェル）	15min	15min	30min

★開発中子は自己崩壊

得られた鑄物すべてにおいて、最も中子が移動しやすく、位置精度が出にくいと考えられる部位で切断し、断面の円形中空部の位置精度を測定した。図2-4にその測定例を示す。具体的な数値と傾向をまとめると、以下であった。

手の甲形状では、従来法のシェルと多糖類系バイнда中子ともに中空部位が外よりに曲がる傾向があった。多糖類系バイндаは外方向に1.3mm ずれ、上方向に0.7mm ずれていた。シェルは外方向に0.8mm ずれ、上方向にはずれていなかった。パイプ形状では、シェルに比べ多糖類系バイнда中子がより外よりに曲がる傾向があった。多糖類系バイнда中子は外方向に0.8mm ずれ、上方向に0.3~1.0mm ずれていた。シェルは外方向に0.4mm ずれており、上方向にはずれていなかった。

開発対象の多糖類系バイндаによる中子と従来法のシェル中子によるものとの位置精度を比較し、多糖類系バイндаを用いた中子の精度は悪かったものの、幅木等の型設計で十分対応が可能である範囲であった。

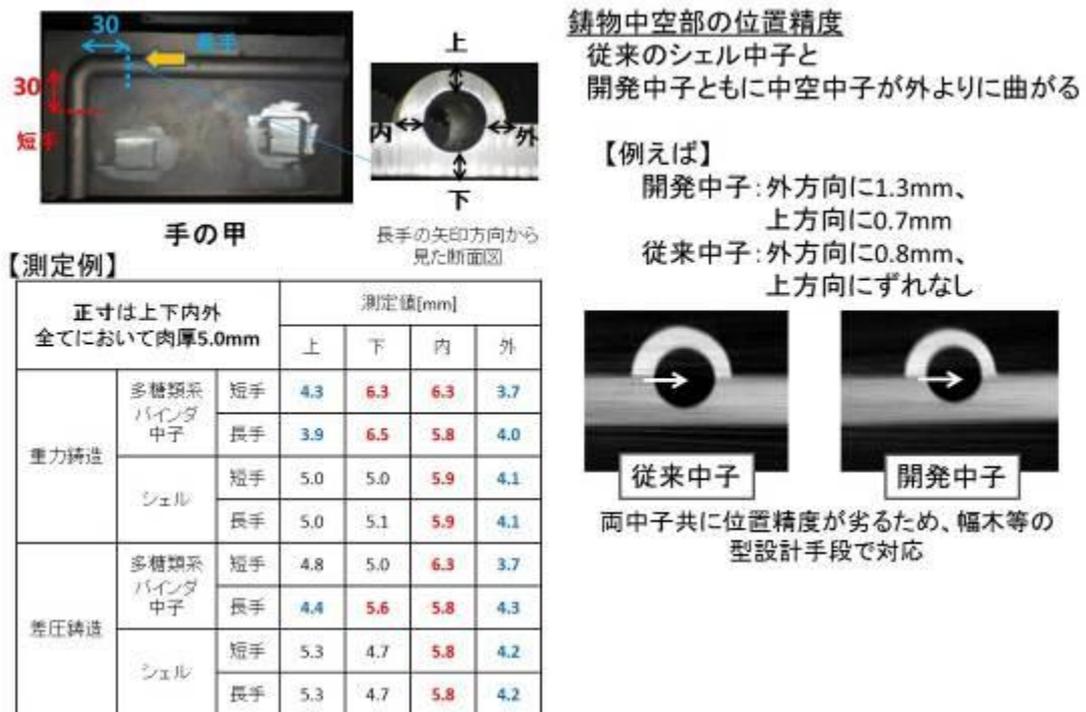


図2-4 位置精度の測定例

2-2 凍結鑄型の適用

少量の水を添加した砂を造型し、これを凍結させることによって強度を付与した凍結鑄型は、鑄造時に受ける溶湯の熱で氷が溶けるため、鑄造後の崩壊性に優れるという利点をもつ。産業技術総合研究所では、凍結鑄型や凍結中子の産業的な普及拡大に向けた研究開発に取り組んできており、これまでに青銅合金鑄物を対象としてその実用化に成功した実績を有する。そこで、本事業では、製品鑄造後の鑄型や中子の除去作業にかかる作業負担軽減を目的として、複雑な中空形状を有するギャボックスなど航空機用アルミニウム合金鑄物を対象とした差圧鑄造プロセスに凍結鑄型および凍結中子を適用するための技術開発を行った。

事業の初年度である平成 24 年度は、凍結鑄型の大型化および凍結中子の長尺化に取り組んだ。テストピースとして 15mm の直径を有する 150×300mm の L 字型中子を考え、鑄造品の肉厚を 5mm としてこれを鑄ぐるむことのできるサイズの主型について凍結技術を検討した。近年、大きな鑄型を効率的に凍結させる方法として差圧を利用した新しい凍結手法が提案され凍結鑄造にかかる技術開発が加速したが、この差圧を利用した凍結法では鑄型造型用型枠内に冷気の通気性を確保するベントホールを配置する必要があり、曲面部の多い複雑形状の鑄型を凍結鑄型にて作製することは容易ではなかった。そこで、ベントホールを必要とせず素材そのものが通気性を有する型枠材として、低温環境での強度特性に優れた多孔質ポリエチレン板を開発した。このポリエチレン板を底板に使用して型枠を組み、5%の水分を含むけい砂を充てんして差圧による鑄型の凍結を試みた。その結果、問題なく凍結鑄型を造型できることが確認され、凍結鑄型造型用の型枠材として有用であることが示された。



図 2-5 L 字型鑄物用凍結鑄型

2 年目である平成 25 年度は、 $\phi 15 \times 150 \times 30$ Omm の L 字型凍結中子に対応する大きさで凍結鑄型によりアルミニウム合金の鑄造が可能かどうかを調べるために、中子なしの中実状態で鑄造試験を行った。図 2-5 に示す鑄型を準備し AC4CH アルミニウム合金をおよそ 720℃ で注湯したところ、図 2-6 に示すような L 字型アルミニウム合金鑄物を鑄造することができた。これにより、この大きさのアルミ

ニウム合金鋳物でも凍結鋳型で鋳造可能であることを確認できた。この結果を受け、鋳物の中空化を図るために、中子の形を主型へ組み込めるよう幅木をもたせた形状へと変更しながらこれに対応する主型と合わせて凍結鋳型の造型を行った。このとき、中子およびこれに対応する主型部分の断面形状については、型枠の加工性を考慮して 3° の抜き勾配を与えた四角形としたが、凍結までは順調に進んだものの型枠から鋳型を外す段階で問題が発生した。中子においては、幅木をもたせたことで4辺が拘束される形状となったため抜型時に曲げモーメントが生じやすくなり破損が頻発した。また、主型についても、湯道を考慮して案を設計した結果、図2-7に赤丸で示したように4辺が囲まれた部分で鋳型の抜けが悪くなり欠けが多発した。その対策として、型からの離型性を改善するためにシリコン系離型剤を塗布したところ、主型については抜型性が改善され不良率を大幅に低減することが出来た。しかしながら、中子については離型剤の適用だけではまだ不十分であり、抜本的な対策が必要とされた。

最終年度である平成26年度は、中子の抜型性を改善するために断面形状を円形に変更し、また強度改善のために砂の中へコロイダルシリカを添加して凍結中子を造型した。この対策により抜型性が大きく向上し、破損することなく中子を型枠から外せた。図2-8は、主型に組み込んだ凍結中子を示している。この鋳型を用いて鋳造試験を行ったところ、湯廻り性に問題のないことを確認できた。しかしながら、中子から発生する水蒸気の影響と思われる鋳造不良が発生し、品質面ではまだ課題が残った。そこで、中子から発生する水蒸気を円滑に鋳型外部へ排出する技術を開発して対応を図った。その結果、品質が大幅に改善され、ほぼ目的形状の鋳物を鋳造することに成功した。



図2-6 鋳造したアルミ合金鋳



図2-7 凍結主型用型枠



図2-8 主型に組み込んだ凍結中子

第3章 鋳造欠陥への対応

3-1 差圧鋳造による欠陥抑制効果

前章 2-1 多糖類バインダの適用で作製した試験用鋳物を切断し、従来法の低圧鋳造と開発法の差圧鋳造での鋳物内部の欠陥を比較評価した。その結果を図3-1に示す。

図中左側にまとめた欠陥評価より、従来法のシェル中子では湯境不良が発生したが、多糖類バインダでは湯境が発生していない。多糖類バインダ中子が湯境欠陥を抑制できた原因は、中子形状による影響と考えられる。多糖類バインダ中子は中空を有するが、従来法のシェル中子は中実である。従来中子は、注湯後に中子から発生したガスによる背圧によって湯境が発生したと考えられるが、多糖類バインダ中子は中空部をガスが通ることで、湯境の発生を抑制できたと推測される。

また、図右側は微小な空隙欠陥を明確にするカラーチェックを行った結果である。低圧鋳造においてどちらの中子も赤色に着色された空隙欠陥が発生していることが分かる。しかしながら、開発法の差圧鋳造を適用することで、従来法の低圧鋳造で発生した空隙欠陥が抑制されていることが確認できる。この結果より、差圧鋳造の効果である空隙欠陥の極小化が明確になった。

複雑形状を模したL型形状試験片鋳物より、第2章 2-1で述べた従来のシェル中子に比べて開発の多糖類バインダは崩壊性に優れており、さらに差圧鋳造法を適用することで空隙欠陥が抑制できる。これらの比較評価結果から、本開発手法は、従来に比べ欠陥を抑制でき複雑形状鋳物の生産性が高い手法である。

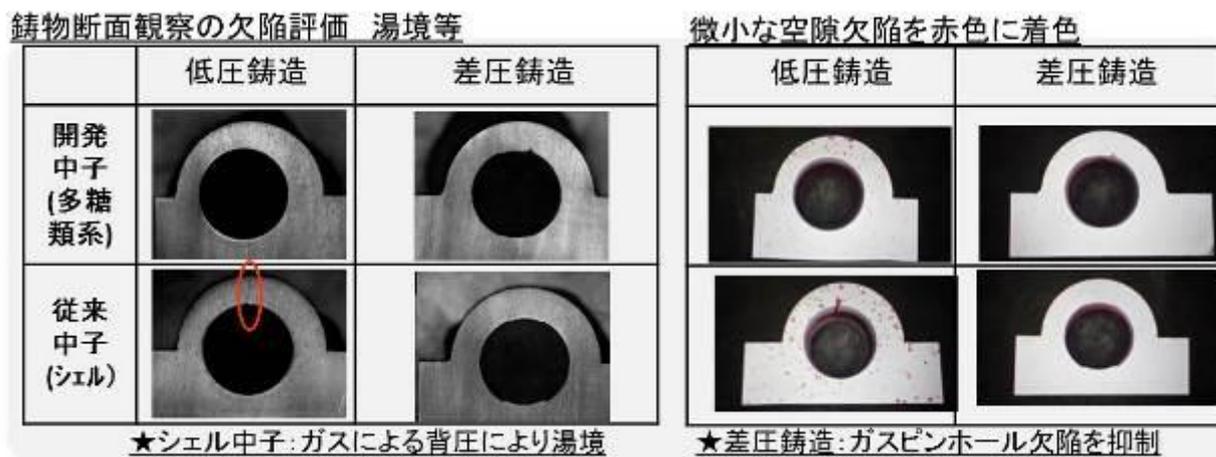


図3-1 鋳物断面の欠陥評価 (左: 切断研磨 右: カラーチェックによる欠陥染色)

3-2 充填・凝固状態の把握とCAEの活用

差圧鋳造装置内の鋳型に熱電対を設置し、溶湯が流れることで鋳型の各部における温度変化データを取得した。得られた温度変化データより、充填完了、凝固完了、加圧除去のタイミングや鋳造条件を決定する。また、鋳造CAEと比較を行い、解析パラメータとしての熱伝達係数等の物性値の補正を行うことによって、解析精度を高め鋳造CAE利用による鋳造方案の最適化を高度化させる。

図3-2に熱電対の設置位置、計測した温度変化データを示す。プログラム上ではストーク部から充填完了まで20秒の設定である。実測した温度変化より、A-E間の充填完了は約12秒であった。測定位置Aより下には、堰やストークがあるので、もう数秒充填に時間がかかっている。実測とCAE解析結果を比較すると、測定位置B-C間、C-D間それぞれの充填時間に大きな差がないことを確認した。この結果から、熱電対での実測結果とCAE解析結果で差異がないことがわかり、解析精度に信頼性があることを確認した。鋳造方案の決定には鋳造CAEを取り入れることで、実鋳造回数を極小化することができ、十分に効果を発揮した。

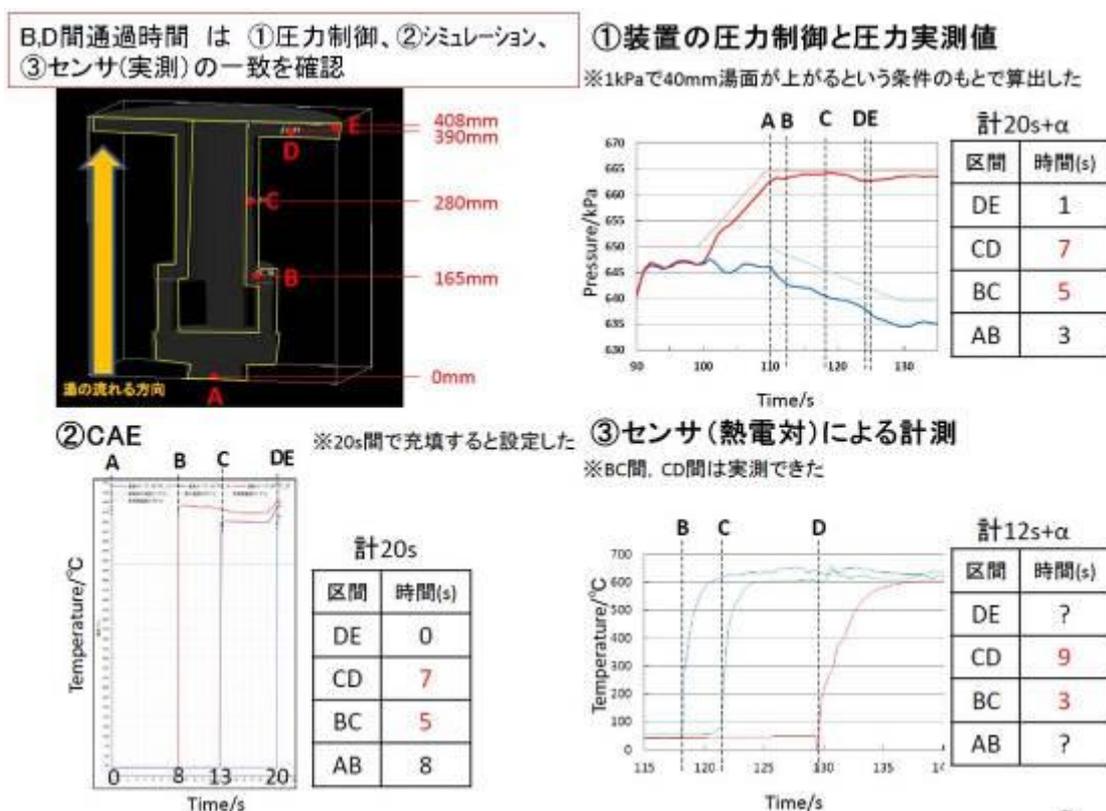


図3-2 熱電対の設置位置およびCAE結果と計測温度変化データ

第4章 実製品での航空機用複雑鋳物部品の試作と評価

4-1 形状精度への対応

図4-1に示すように川下企業より例示を受けた航空機部品鋳物において、多糖類系バインダ中子の優れた崩壊性を効果的に発揮される部位を選定し、中子の造型および試作品の鋳造を行った。図4-2に崩壊性中子を製造する様子を示す。試作製品は、複雑形状であるフィン形状を有した複雑形状で中子の細部への造型が困難な部位である。平成25年度までの間にL型形状中子で得た結果を基に造形条件を検討し終え、平成26年度は造型した中子を用いて鋳造試験を行った。なお、この鋳物部品の鋳造方案決定には、第3章で行ったCAEを活用し、試作回数を低減している。図4-3に航空機部品鋳物の外観を示す。第2章で確認したとおり、多糖類バインダ中子は、崩壊に優れ試作品の型ばらし時間が1/9以下（従来法45分のところ、5分で完了）に時間が短縮できた。



図4-1 例示を受けた航空機部品鋳物



図4-2 中子製造金型

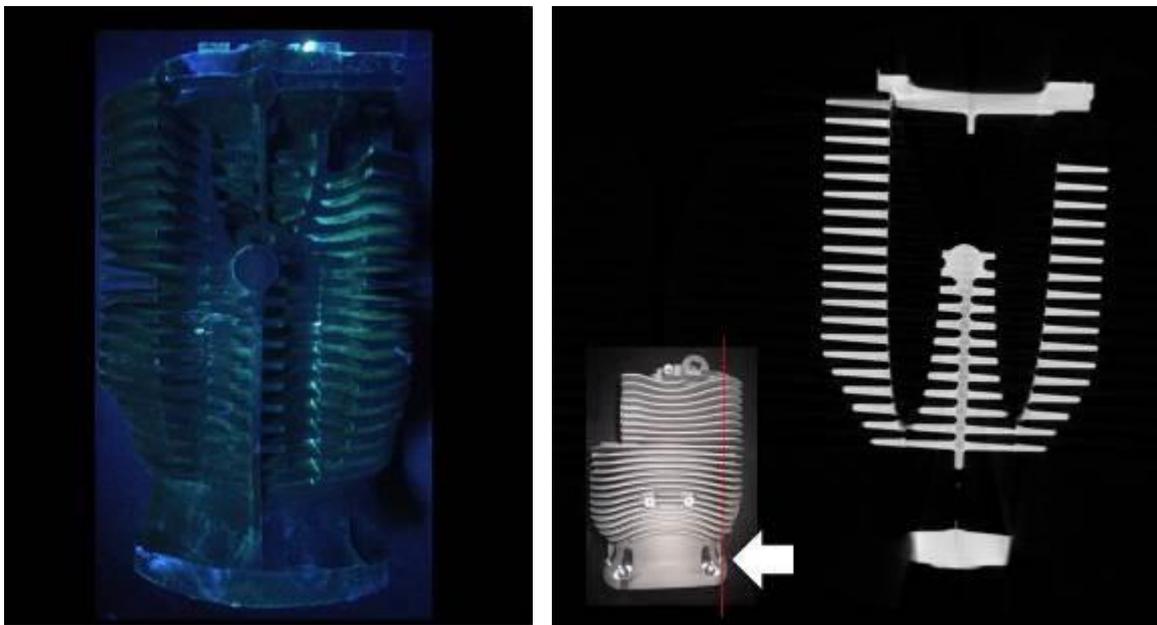


図4-3 試作した製品鋳物

初めに試作した製品は、多糖類系バインダ中子の熱変形により製品形状に崩れが生じた。多糖類系バインダ中子が熱変形した原因は、砂付きが不足であったため、中子造形条件の保圧時間をさらに20秒伸ばすことで、以前よりも十分な砂付き状態を確保させた中子を造形した。改善した中子を用いて鋳込みを行ったところ、崩れない製品を作製することができた。試作製品の複雑形状部であるフィン部は、図面寸法に対して±0.3mm以内であり、要求される形状精度を達成していることを確認した。

4-2 鋳造欠陥への対応

図4-4に試作した航空機部品鋳物の欠陥評価結果を示す。左は、鋳物表面の欠陥を検査する蛍光浸透探傷検査試験結果であり、右は、鋳物内部の欠陥を検査する放射線透過検査試験結果である。蛍光浸透探傷について、本研究開発手法の多糖類系バインダ中子を用いた製品は、従来法のシェル中子に比べて表面欠陥がほぼ無い状態であり、従来品と同等以上の仕上がりである。懸念していた多糖系バインダ中子を適用したフィン部に着目すると、バインダ成分の熱分解ガスによる欠陥模様は無い。放射線透過については、航空機部品鋳物の国際的な検査基準であるAMS 2175の判定グレードBで不具合となる欠陥は見られなかった。



(左：蛍光浸透探傷検査試験結果、 右：放射線透過検査試験結果)

図4-4 鋳造欠陥の評価

第5章 高活性・難鋳造性鋳物への対応

5-1 不活性雰囲気下鋳造の実用化

高活性・難鋳造材であるマグネシウム合金を鋳造するためには、溶解したマグネシウム合金と、酸素を含む空気と遮断し、反応を抑制する必要がある。そのため、差圧鋳造装置内部の鋳型室および溶湯保持室内から空気を除去し不活性雰囲気に置換した上、空圧制御を行う。

不活性雰囲気置換装置の設計と設置、試運転等を行い、雰囲気置換が可能になりマグネシウム合金等の活性金属を含む合金を鋳造することが可能になった。

差圧鋳造装置を用い鋳造を行うには、活性金属との反応によって鋳物品質に及ぼす鋳型材質や、鋳造雰囲気の影響を調査する必要がある。差圧鋳造装置は、密閉構造で有り、観察する窓が小さく、鋳造現象の把握が困難である。そのため、先ず、主に富山大学がラボベースで図5-1に示す高活性・難鋳造材用鋳造装置を用いて、鋳造実験を行った。



図5-1 高活性・難鋳造材鋳造装置の外観

本研究の対象材料である高活性・難鋳造材のマグネシウム合金溶湯と通常使用している濾過用フィルタ (SiO_2) の反応具合を検証し、マグネシウムに適した濾過用セラミックフィルタの探索を行った。検証実験には、Mg-Gd-Nd系マグネシウム合金を鋳造し、鋳物のミクロ組織を詳細に観察した。通常使用している SiO_2 製濾過用フィルタは、マグネシウム合金溶湯と反応しフィルタ近傍のミクロ組織は多数の欠陥を有することとなり、使用できない。対策方法として、文献より金属酸化物の生成エネルギーの観点から検討すると、MgOやCaOが対策材質として可能性が高い。また、この実験を通じて溶解後、鋳造前の溶湯清浄度を向上でき得る精錬方法（温度、フラックス、脱ガス方法）についてもほぼ確立することができた

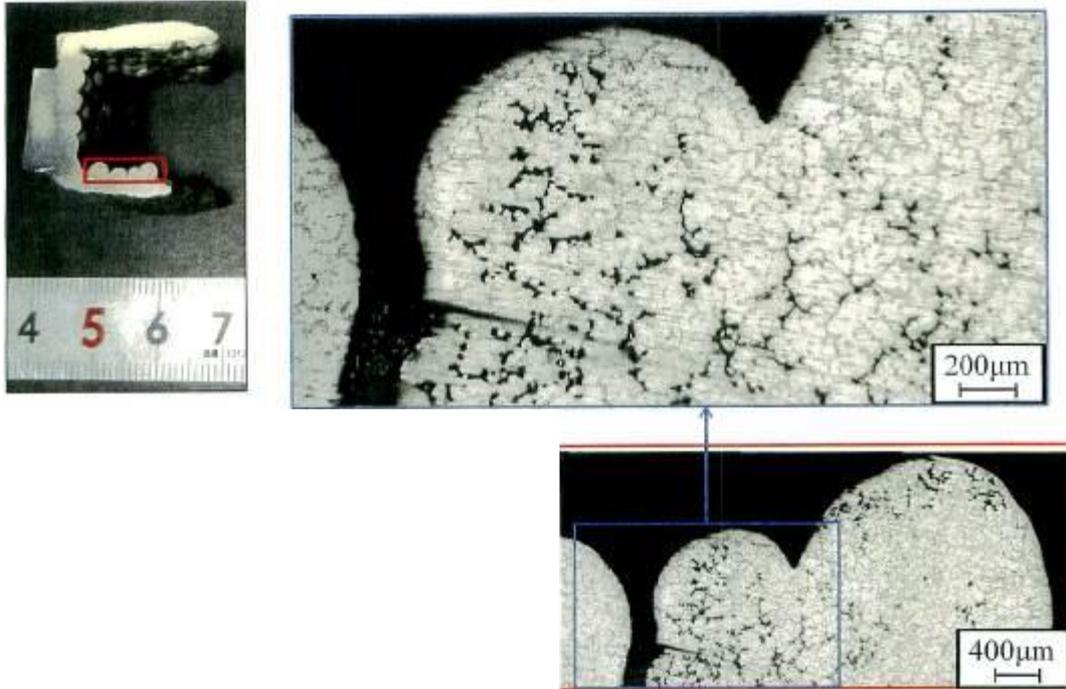


図5-2 ミクロ組織写真

5-2 鋳型材と差圧制御条件の検討

川下企業より例示を受けたマグネシウム合金製の航空機部品鋳物を試作した。これらの製品は、高活性金属であるマグネシウム合金製であるため、アルミニウム合金とは異なり溶湯と鋳型が反応しない鋳型材の適用や適した差圧制御条件の検討が必要である。これまでの間には、鋳型材質や鋳造雰囲気の影響、最も鋳物品質に影響が少ない塗型材や肌砂を調査した。この調査結果と富山大学での鋳造実験結果を踏まえて製品試作を行った。

例示を受けたこれらのマグネシウム合金製航空機部品鋳物は、内部に直径 6mm の複雑な流路がある。この流路を造形するために多糖類系バインダ中子で図5-3に示すような中子を作製した。多糖類系バインダ中子造形の注意点として、多糖類系バインダは従来のシェルに比べて流動性が良い。そのためバリが発生しやすいので、精密な型合わせが重要である。

マグネシウム合金の鋳造にあたり、鋳型・中子が造形のままでは溶湯と反応する。これを防止するために、富山大学で調査・実験により開発した結果であるコーティング材（フッ化マグネ：硫黄：タルク粉末＝1：1：1）を塗布した。

試作した鋳物部品を評価した結果、鋳物の外観においては、特に異常は見られなかった。ただし、図5-4に示すとおり鋳物の内部には、引け巣欠陥が一部に見られた。この原因を調査するために、鋳造CAE解析を行った結果、製品部において堰前が取り残され最終凝固

部になりやすいためであることが分かった。堰の大きさを調整することで欠陥を抑制することができると考えられる。

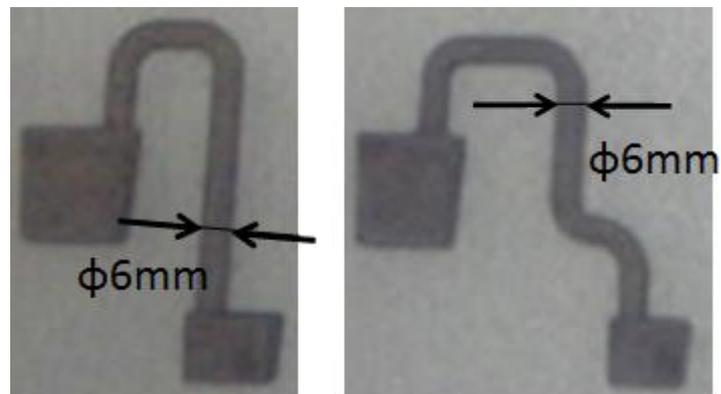


図5-3 小径中子外観写真

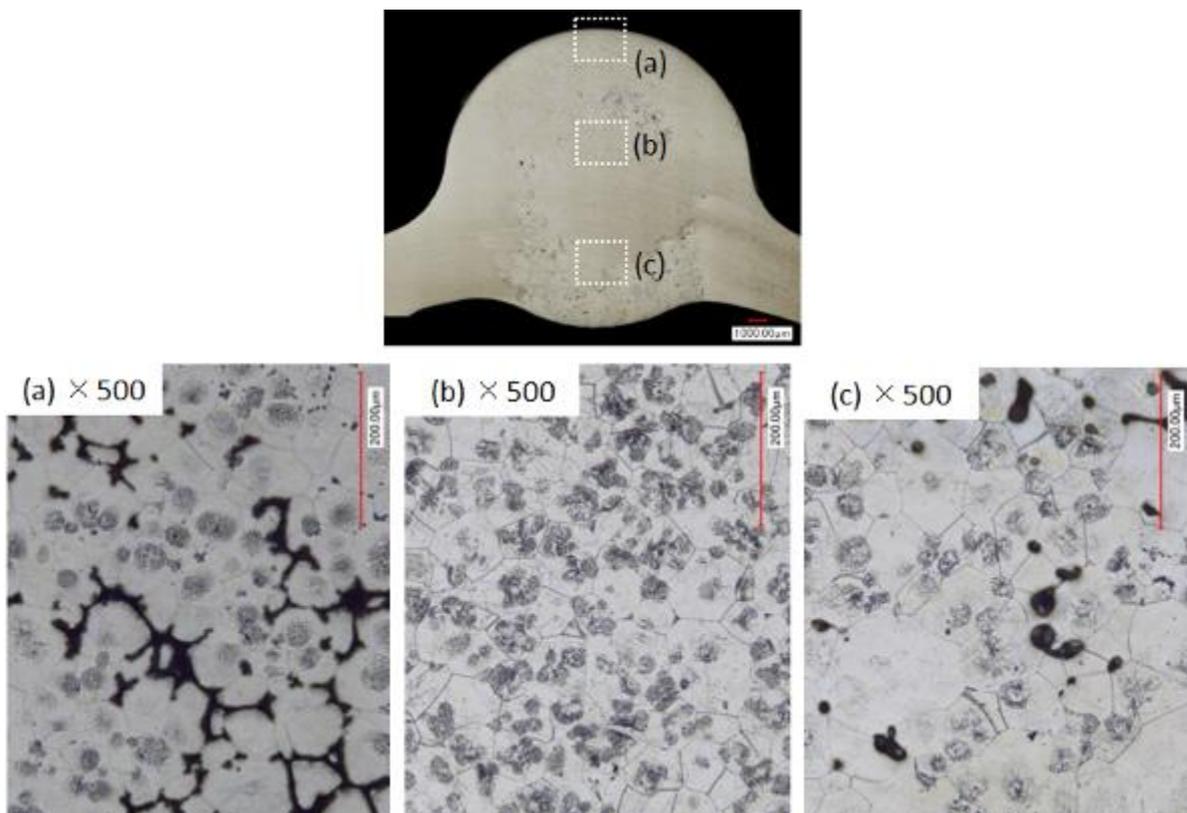


図5-4 試作部品の内部欠陥調査

第6章 全体総括

6-1 研究成果の総括

航空機部品のように高い品質レベルが要求される金属部品は、NC 工作機械により、欠陥の少ない展伸ブロック素材から削りだしされる。しかし、加工工具の届かない中空部を有する複雑形状部品は、砂型鑄造法に依存せざるを得ない。

本研究開発では、砂型鑄物の強度と靱性に悪影響を及ぼす鑄巣欠陥の極小化を達成する差圧鑄造技術と、中空化には不可欠な崩壊性鑄型の開発により、航空機用中空複雑形状鑄物の一体成形化技術の確立を行った。

第一章では、研究の背景や実施体制並びに成果の概略を述べた。

第二章では、崩壊性に優れた鑄型・中子材の検討を行った。1 点目の多糖類バイндаを用いた中子の製造条件の検討では、L 型形状の中子型を用いて成形状態に最も影響を及ぼす金型温度と保圧時間に対し、詳細な検討を行った。保圧時間は、バリの発生と中子断面の中空形状の成形に影響することが分かった。保圧時間の制御によりバリがなく、中空形状を有する中子の成形が可能となった。さらに、金型温度は、割れによる造型の可否と、強度に影響することがわかった。これら、制御条件の検討より、実製品形状の中子での成形条件の指針を得た。さらに、中空部鑄物形状精度の評価を完了し、従来法に比べ十分な除去時間の短縮を達成した。2点目の凍結鑄型の適用に関しては、鑄造可能であることを確認できた。一方、形状により抜型が困難な場合があることがわかり、その対策として、若干量のコロイダルシリカを添加し凍結させることで、強度は改善され破損することなく中子を型枠から抜型できた。実生産品用型枠を用いて鑄型の作製を試みた結果、鑄型の作製は可能であったが中子は作製ができなかった。凍結鑄型の場合には、最適な型枠形状が従来砂型とは異なる可能性があり、複雑形状鑄物用にも凍結鑄型を十分適用できると思われる。

第三章では、鑄造欠陥への対応として、前章で検討した多糖類バイнда中子で作製した試験用鑄物を切断し、従来法の低圧鑄造と本研究開発法の差圧鑄造での鑄物内部の欠陥を比較評価した。差圧鑄造は、従来法に比べガスピンホール欠陥が抑制され、大きさも縮小でき、極めて有効な手法であることが明確になった。また、溶湯の充填・凝固挙動の把握と鑄造CAEの活用に向けて、鑄型内に熱電対を設置して調査を行った。充填・凝固の様子を調べたことで、CAEの解析精度に信頼性があることも確認できた。方案決定には、CAEを利用することで実鑄造回数を極少化することができ、十分に効果を発揮した。

第四章では、川下企業より例示を受けた航空機部品鑄物の試作を行った。前章で得た基礎

データを基に、複雑形状であるフィン部に多糖類系バイнда中子を適用し、 $\pm 0.3\text{mm}$ 以内で要求形状精度を満足し、国際判定基準Grade Bを達成した鋳物ができた。また、航空機鋳物以外の他製品での試作と評価を予定していたが、航空機鋳物部品の試作・評価に注力したため、実施できなかった。今後、他製品についても実施していく。

第五章では、高活性・難鋳造材であるマグネシウム合金を鋳造するため、差圧鋳造装置内の不活性雰囲気置換を達成した。さらに、差圧鋳造によるマグネシウム合金の鋳造を行うため、予備実験によって鋳造前の溶湯清浄度を向上でき得る精錬方法（温度、フラックス、脱ガス方法）等の技術をほぼ確立することができた。この結果を活用して、マグネシウム合金製の航空機鋳物部品の試作した。鋳造欠陥への対応が残されている。

第六章では、全体の総括について述べた。

6-2 今後の事業化に向けた取り組み

得られた研究開発結果に加え、数社から問い合わせがあるため、事業化は十分期待できる状況にある。しかし、本研究開発においては、多糖類系バイнда中子の量産対応やコスト、マグネシウム合金の鋳造欠陥への対応等と残された課題がある。これらの課題について早急に対応しながら、事業化に必要なNadcapの取得にも力を入れていく。