

平成24年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「半熔融成形法を活用した革新的鋳物創生法の開発」

研究開発成果等報告書

平成25年 3月

委託者 関東経済産業局  
委託先 公益財団法人浜松地域イノベーション推進機構

## 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
1-2	研究体制	3
1-3	成果概要	6
1-4	当該研究開発の連絡窓口	6

### 第 2 章 本論

2-1	基礎技術開発	7
2-1-1	鋳型と金属組織の関係	7
2-1-2	アルミニウム基複合材、マグネシウム合金	9
2-2	ハイブリッド鋳型の開発	12
2-3	生産プロセス開発	18

第 3 章	全体総括	21
-------	------	----

## 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

近年、地球環境負荷低減が強く求められる中で、自動車をはじめ輸送機関では、大幅な燃費向上が急務な課題となっており、鋳物製造メーカーでは、軽量・複雑形状・高機能化など鋳物品質の高機能化が強く要求されている。

アルミニウム鋳造品の欠点は、溶湯を型内に流して凝固・固化させるために収縮孔の発生、酸化物や介在物の巻き込みなどの内部欠陥、凝固組織の不均一による強度・延性の低下により品質が大きく劣化する。ダイカストは、生産性の高い鋳造法であるが、高速で溶湯を金型に流入させるために大量のガスを含み、熱処理によりふくれが発生するため T6 処理による特性改善や溶接が不可能、凝固収縮によるひけ、酸化物や介在物の巻き込みによる内部欠陥が多い、加えて高速・高圧成形により、金型への熱負荷が大きいため金型寿命が短いなど、様々な鋳物品質の劣化が誘発される要因を多く含むために高強度・高延性化、高品質化を必要とされる部品への適用は困難とされてきた。このように、アルミニウム合金鋳物の品質は、鋳造欠陥に大きく影響を受けることから、欠陥の発生を抑える鋳造法などの改良・開発が盛んになってきている。

近年では、半溶融（チクソキャストイング）・半凝固（レオキャストイング）成形加工法が注目されてきた。一般の鋳造法では、完全な液相状態の溶融金属を用いるのに対して、低温の半溶融スラリーを使用する半溶融・半凝固成形加工法の特長として次のことが挙げられる。

（1）粘性の高い半溶融スラリーを用いることで、成形時に層流で充てんされるために酸化物やガスを巻きみにくく、熱処理が可能となる。

（2）凝固直前の高固相率で成形するために凝固収縮率が少なくなり収縮孔が減少する。

（3）液相が少なく、また比較的低い金型温度で加圧成形するため、凝固時の冷却速度が速まり微細な組織が得られ、加えて内部欠陥を低減できることから健全な品質が得られる。

（4）固液共存温度領域から成形するため凝固潜熱及び熱容量の減少により金型寿命が延長される。

（5）半溶融スラリーの流動性、変形能が比較的高いので、ネットシェイプ化が可能となり、また金型へのかじりが少なく、抜け勾配を小さくできることから最終形状に近い鋳物を製造できる。このため加工工程の短縮、素材の節減や歩留まりの向上が期待できる。

このような優れた特長を有する半溶融・半凝固成形法は、アルミニウム及びマグネシウム合金鋳物の新しい製造プロセスとして期待されており、本製法により得られた鋳物の特性評価、合金種類、製造技術など精力的に研究・開発が多くなされている。

さて、鋳造業界では、将来の鋳物製造技術に高強度化、高機能化、複

雑形状化、一体成形化、軽量化及び低コスト化を見据えた技術躍進が期待されている。現状は、ダイカスト法がアルミニウム合金鋳物の多くを占めており、この技術を主流とした技術開発が多く行われると考えられる。しかし、ダイカストは、熔融金属を高速・高圧で金型に射出・充てんして成形するプロセスであることから、空気やガスの巻き込みが多く、熱処理ができない等の材質上の制約がある。また、複雑なアンダーカットを有する製品の成形が難しく、一部では、ソルト中子や特殊な塗型をした砂中子が使用されているものの、一般的には高速・高圧成形に耐えられる金属製の金型を使用せざるを得ず、この金属製金型は、鋳物から引き抜き可能な単純形状に限られる。ましてや、高速・高圧に砂型の強度が耐えられないために、砂型への注湯は、不可能であって、砂型鋳造法の利点である、多品種少量生産、材質の選択が自由、設計変更が容易、短納期などへの対応は無理である。

ところで、半熔融金属を鋳型の中に低速・低圧で圧入する半熔融成形法では上記に示す特長に加えて、良好な流動性を有する半熔融状態の金属を用いるために、一般のダイカストに使用される崩壊しにくいソルト中子やシェル中子への分厚い塗型は不必要で、重力金型鋳造や低圧鋳造に使用される砂中子が使用、金型と砂型を組み合わせたハイブリッド鋳型への成形も可能であると期待できる。

本研究では、アルミニウム合金鋳物の新しい創生法の開発を目的とした。すなわち、砂型、金属中子、砂中子等を組合せた前例のないハイブリッド鋳型を用いた半熔融成形技術を開発すると共に、それに適した材料開発を行う。材料開発には、単なるアルミニウム合金に限定せず、剛性、耐摩耗性、低膨張性向上のためのアルミニウム基複合材、更なる軽量化のためのマグネシウム合金等も視野に入れる。成形に関しては、半熔融成形法の成形条件の最適化研究を行い、半熔融成形を活用した革新的鋳物創生法に適した生産プロセスの開発を行う。さらに、コンピュータシミュレーションを駆使したビジュアル試作を完成させる。

## 1. 基礎技術開発

### 1-1 鋳型と金属組織の関係

金型と砂型を組合せたハイブリッド鋳型を使用した半熔融成形品の場合、金属面に接している部分と砂に接している部分では、冷却能が異なるために当然金属組織が異なると予想される。砂型の冷却能は、砂、バインダー、硬化剤、塗型材等の種類によって異なるため、これらの影響について、金属学的基礎研究を行う。

### 1-2 アルミニウム基複合材、マグネシウム合金

半熔融成形は、ダイカスト法と違って、鋳造する材質の選択肢が広い。この特長を生かし、剛性、耐摩耗性、低膨張性の向上に有効であるアルミニウム基複合材や軽量化に有効であるマグネシウム合金の半熔融成形

に関する適応性について基礎技術開発を行う。

## 2. ハイブリッド鋳型の開発

半熔融成形に用いる砂型や砂中に使用する砂、バインダー、硬化剤、塗型等の最適化研究及び鋳造試験を行い、金型、砂型、金属中子、砂中子等を組合せたハイブリッド鋳型を完成させる。

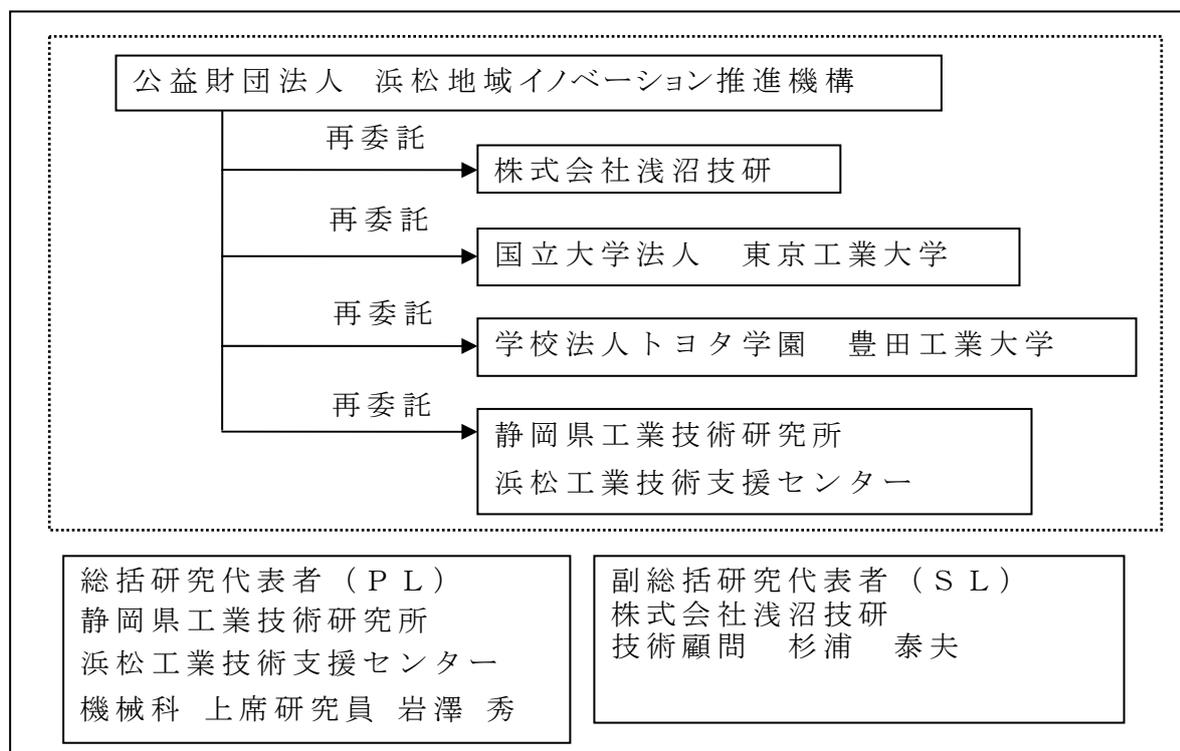
## 3. 生産プロセスの開発

上記にて開発した鋳型を実生産鋳物に適用し、半熔融成形の射出圧、射出速度、型締め、鋳型温度等、生産に対する成形条件の最適化研究を行い、半熔融成形を活用した革新的鋳物創生法に適した生産プロセスの開発を行う。さらに、コンピュータによる流動、凝固、変形シミュレーションを生産プロセスに取り込み、ビジュアル試作を完成させるために、シミュレーション結果と実際の鋳物との合せ込みを行い、各シミュレーションに使用する基礎物性値を決定する。

### 1-2 研究体制

#### (1) 研究組織及び研究体制

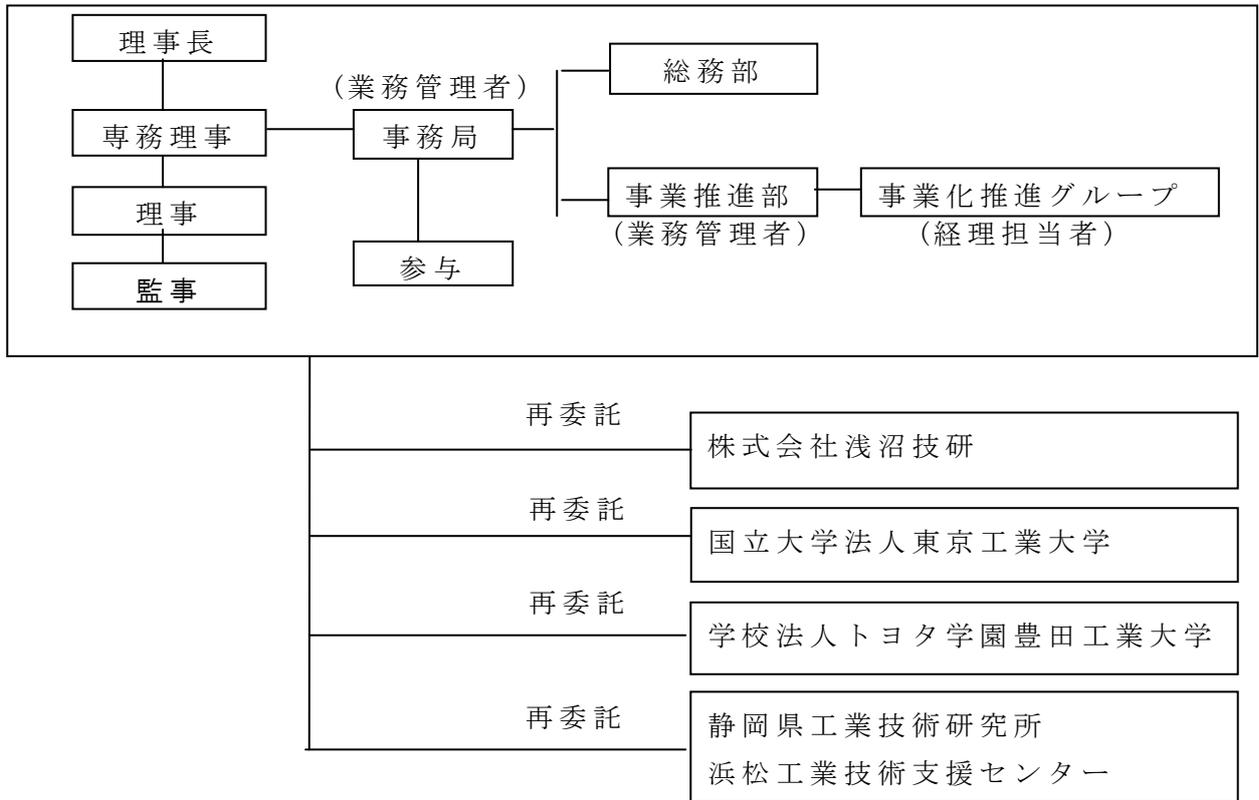
##### 1) 研究組織（全体）



2) 管理体制

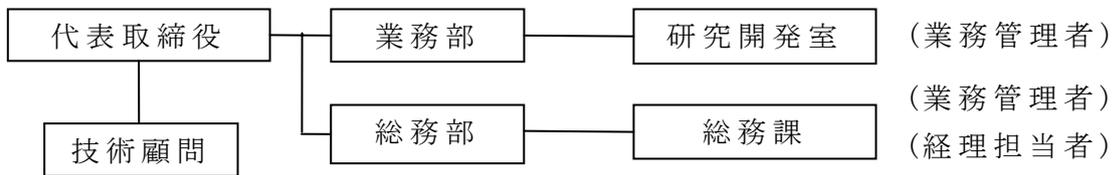
① 事業管理機関

[公益財団法人浜松地域イノベーション推進機構]



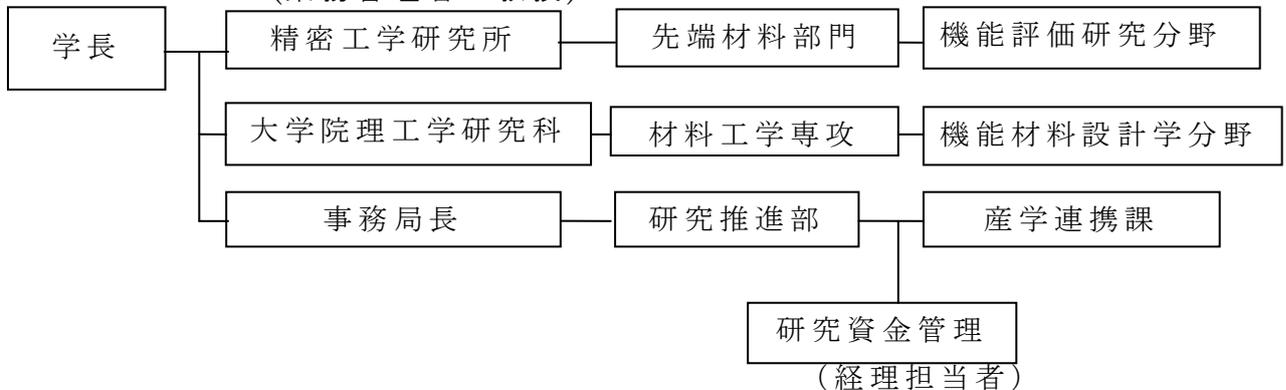
② 再委託先

[株式会社浅沼技研]

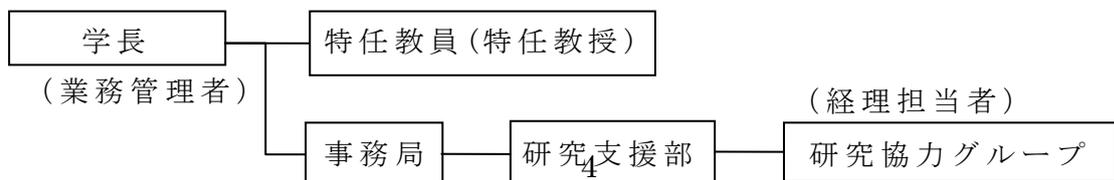


[国立大学法人東京工業大学]

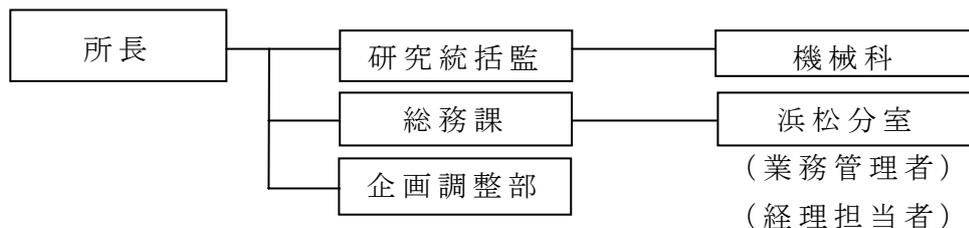
(業務管理者：教授)



[学校法人トヨタ学園 豊田工業大学]



[静岡県工業技術研究所 浜松工業技術支援センター]



(2) 管理員及び研究員

【事業管理機関】公益財団法人浜松地域イノベーション推進機構

① 管理員

氏名	所属・役職
太田 純司	専務理事・事務局長
大石 篤郎	総務企画部長
内野 義光	事業推進部長
米谷 俊一	事業推進部事業化推進グループ長
中山 典子	事業推進部事業化推進グループ主任

【再委託先】

(研究員)

株式会社浅沼技研

氏名	所属・役職
杉浦 泰夫	技術顧問
上久保 佳則	研究開発室長
高橋 正詞	研究開発室
山本 健介	研究開発室

国立大学法人東京工業大学

氏名	所属・役職
里 達雄	精密工学研究所 教授
手塚 裕康	大学院理工学研究科 助教

学校法人トヨタ学園 豊田工業大学

氏名	所属・役職
恒川 好樹	特任教授

静岡県工業技術研究所 浜松工業技術支援センター

氏名	所属・役職
岩澤 秀	機械科 上席研究員

(5) 知的財産権の帰属

知的財産権は全て当方に帰属することを希望する。

### 1 - 3 成果概要

1. 基礎技術開発		
項目	1-1 鋳型と金属組織の関係	1-2 アルミニウム基複合材、マグネシウム合金
達成項目	<p>(1) 砂中子と金型を組合わせたハイブリッド鋳型を用いて、鋳造用アルミニウム Al-Si-Mg 系合金を半熔融成形し、組織と機械的性質を明らかとした。</p> <p>(2) 砂中子を用いた半熔融成形法においても高強度・高延性が維持できることが明らかとなった。</p>	<p>(1) 20vol%~40vol%SiC 複合材を用いた実製品形状の半熔融成形鋳物の製造技術を確立できた。</p> <p>(2) 複合材の内製化を目的として、超音波付加方式による複合材製造装置を設置、鋳造試験を行った。</p> <p>(3) 難燃性 Mg 合金及び Mg-RE-Zn-Zr 合金を用いた半熔融成形技術開発を行った。</p>

3. 生産プロセス開発	
達成項目	<p>(1) 実製品形状鋳物の試作試験を通じて、半熔融成形条件の最適化、製造装置の改良、金型技術など、実用化に向けた要素技術の重要課題を抽出し、生産技術への展開を図ることができた。</p> <p>(2) 低コスト化、商品価値の付加など、量産を想定した設備開発を行い、量産要素技術確立の基礎とした。</p>

### 1 - 4 当該研究開発の連絡窓口

窓口：公益財団法人浜松地域イノベーション推進機構

担当者：中山 典子

住所：〒432-8036 静岡県浜松市中区東伊場二丁目7番1号

浜松商工会議所会館8階

連絡先：TEL 053-489-8111 FAX 053-450-2100

E-mail nakayama@hai.or.jp

## 第 2 章 本論

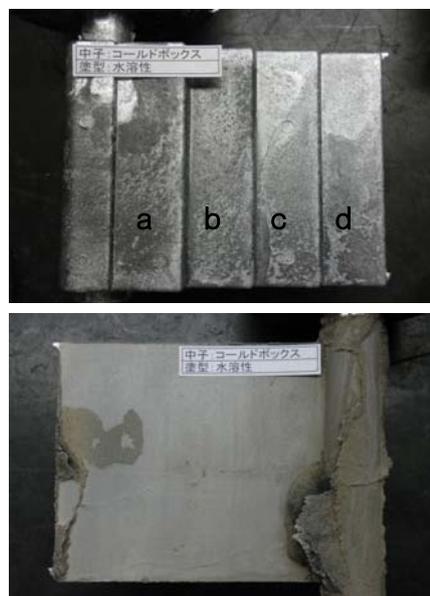
### 2-1 基礎技術開発

#### 2-1-1 鋳型と金属組織の関係

固液共存領域から固化させる半熔融成形法では、凝固時の冷却速度が速いために結晶組織、特に共晶組織の微細化がもたらされ、強度及び延性が向上する。しかしながら、本研究のように鋳型の一部に冷却能の小さい砂型を用いることで、その部分において冷却速度の低下に起因する組織の不均一、すなわち共晶 Si 相の粗大化が懸念される。共晶 Si 相の粗大化は、機械的性質、特に伸びやじん性を損なわせる要因となるものの、どのくらい特性が劣化するか不明である。そこで、図 2-1-1 に示す鋳型の一部に砂中子を配した肉厚 5mm、10mm、15mm 及び 25mm を有する段付形状のハイブリッド鋳物の金属組織及び機械的性質に及ぼす鋳型の冷却能の影響を調べた。鋳放し材及び T6 処理した半熔融成形鋳物の金属組織を図 2-1-2 並びに図 2-1-3 にそれぞれ示す。半熔融状態において固相部分である初晶  $\alpha$  相は、鋳物各部においても、その大きさは変化せず、均一に分布している。砂中子面近傍の共晶化合物相（共晶 Si 相、Al-Fe 系化合物相）は、金型面近傍に比べて

若干粗大に晶出するものの、普通の重力鋳造材に比べて微細であった。T6 処理することにより、共晶 Si 相は粒状化し、その大きさは、砂中子面及び金型面近傍部分においてもほとんど同程度となり、T6 処理により鋳放し材における共晶 Si 相の大きさの違いが緩和されたことが示された。

T6 材の引張試験結果を図 2-1-4 に示す。各肉厚中央部の比較では、肉厚 5mm 部位で引張強さ及び 0.2%耐力が低く、その他の各肉厚部ともにほぼ同等であった。伸びは、肉厚の最も薄い 5mm 部位が最も高く、約 12%となり、肉厚が厚くなるにつれて低下した。伸びが最も肉厚感度に敏感であった。肉厚 15mm 部位における砂中子面、中央部及び金型面近傍の比較では、いずれの値も大きな違いは認められないが、冷却速度が遅い砂中子面近傍がやや低値となった。ミクロ組織観察結果においても、砂中子面及び金型面近傍では、共晶 Si 相並びに Al-Fe 系化合物相の形状、大きさに違いが認められており、これらの晶出相の性状により、引張特性の差異が生じたものと考えられる。



a:肉厚 25mm b:肉厚 15mm c:肉厚 10mm d:肉厚 5mm

図 2-1-1 段付形状鋳物の外観

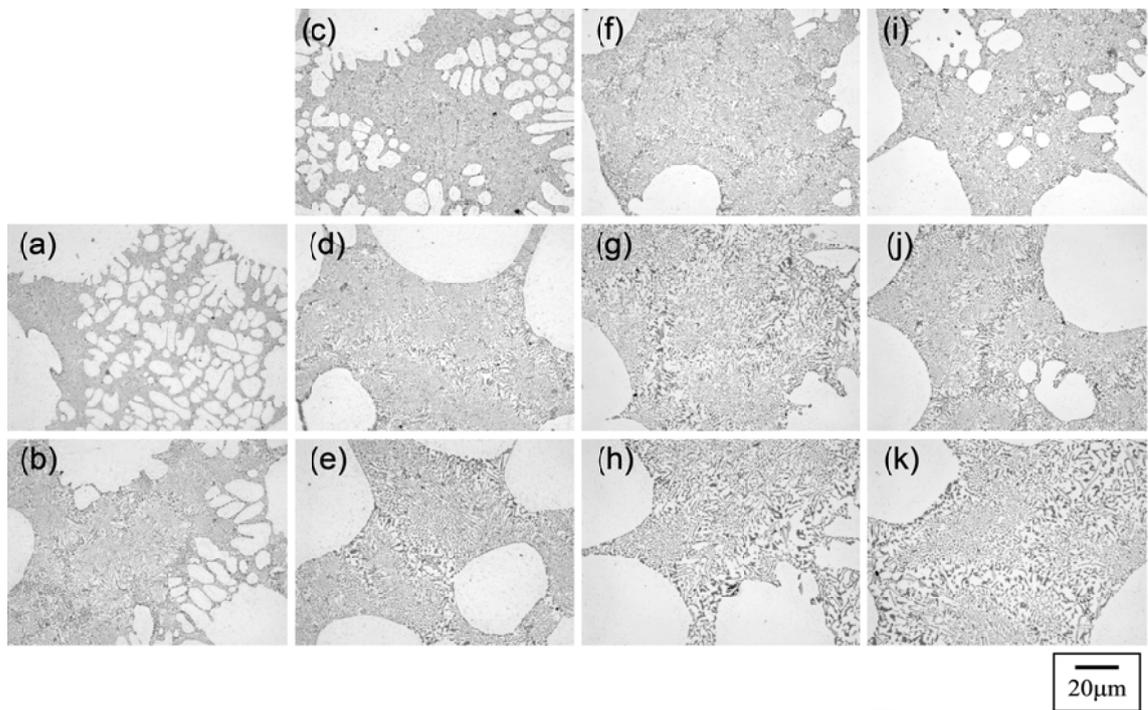
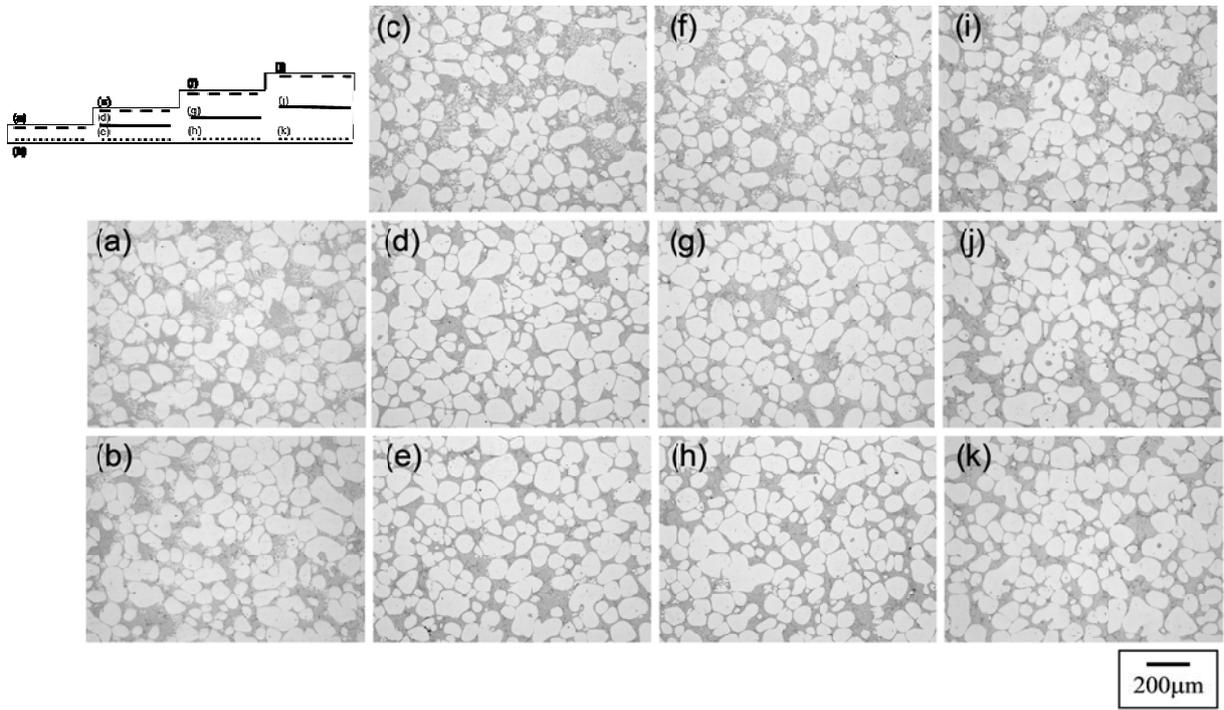


図 2-1-2 半熔融成形鋳物の鋳放し材の金属組織  
(上：低倍、下：高倍)

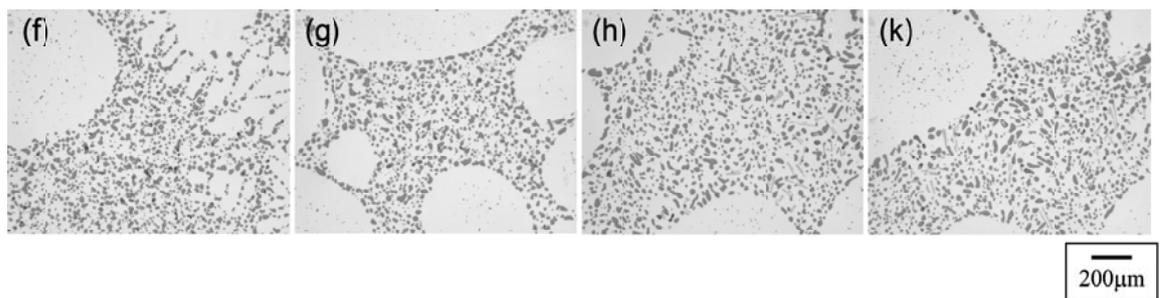


図 2-1-3 半熔融成形鋳物の T6 材の金属組織

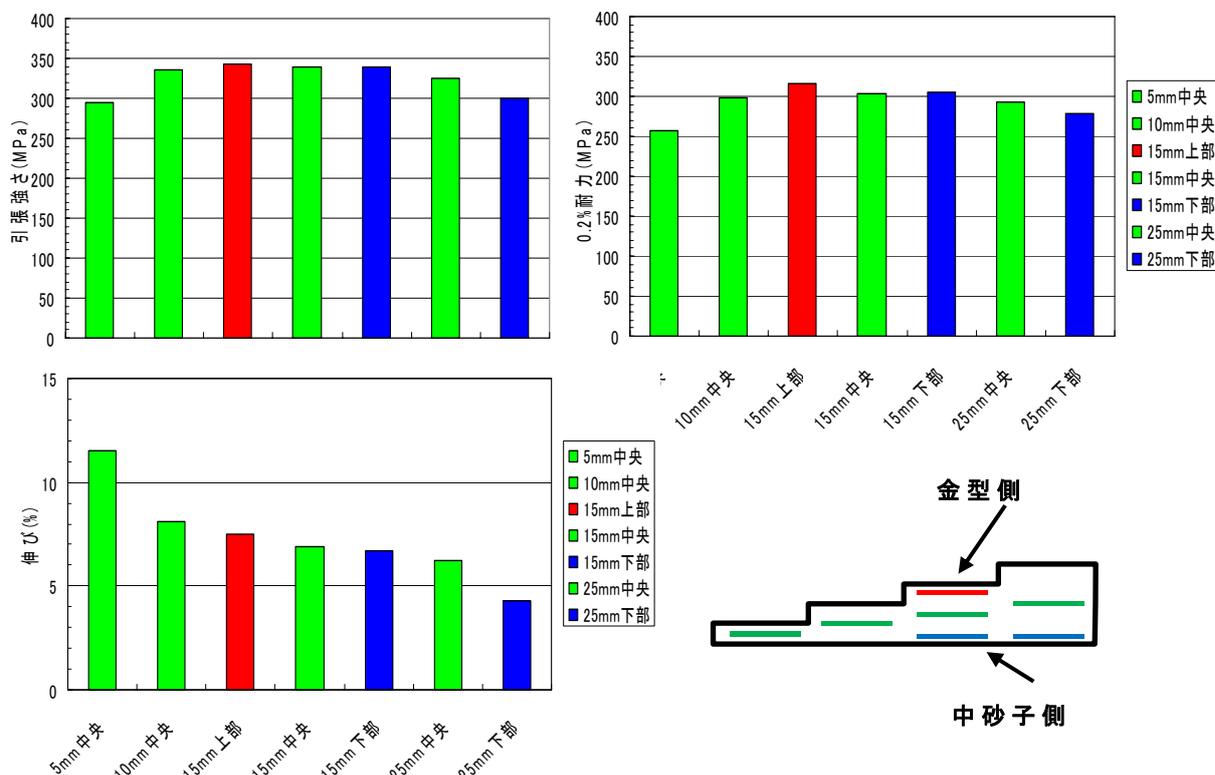


図 2-1-4 半溶融成形鋳物の T6 材の引張試験結果

## 2-1-2 アルミニウム基複合材、マグネシウム合金

本研究では、本製法の適用を拡大させる目的として、異なる機能合金への適用を試みた。すなわち、①高耐摩耗性、低熱膨張率合金としてのアルミニウム基複合材、②更なる軽量化を目指したマグネシウム合金について試験した。

### ①アルミニウム基複合材

実部品形状のハイブリッド鋳型を用いて 20vol%~40vol%SiC アルミニウム合金基複合材の半溶融鋳物（図 2-1-5）を製造し、鋳物品質及び特性評価を行った。内部のカラーチェック及びマクロ組織観察結果では、偏析などの内部欠陥のほとんど無い健全な内部品質を確認した。それぞれの鋳物の金属組織では、図 2-1-6 に示すように SiC 粒子はマトリックス中に均一分散した形態となっており、マクロ的な凝集は、ほとんど無かった。

大越式摩擦摩耗試験機により実施した摩耗試験結果を図 2-1-7 に示す。摩耗試験条件は、乾式及び湿式の 2 条件、相手材は、SUJ2（軸受鋼）、摩耗距離 200m とした。乾式では、摩耗速度 1.98m/s、付加荷重 20.6N、61.7N 及び 185N、湿式では、摩耗速度 0.62m/s 及び 1.98m/s、付加荷重を 62N 並びに 185N とした。評価は、摩耗試験後の試料表面の摩耗痕の長さをデジタルマイクロスコープで読み取り、摩耗量を算出した。比較材として、鋳造用アルミニウム合金 AC4C-T6、ADC12 ダイカスト材、FC250 の結果も併示した。乾式及び湿式いずれにおいても、複合材の摩耗量は、他のアルミニウム合金に比べて少なく、特に 20vol%以上の SiC 複合材の摩耗特性は、FC250 と同程度となった。

湿式条件での摩耗痕断面のマイクロ組織を図 2-1-8 に示す。複合材では、軟らかいマトリックス中に硬い SiC 粒子が摩耗面近傍に存在しており、この SiC 粒子が摩耗に効いている。そのため高含有 SiC 合金の方が、耐摩耗性が優れる。一方、AC4CH-T6 合金及び ADC12 合金では、硬い Si 相の大きさは小さく、複合材のように耐摩耗に有効であるとは言い難く、マトリックスが削り取られるようになっていた。試料全体の硬さは、AC4CH-T6 や ADC12 と比べて低いものの、軟らかいマトリックス中に硬い SiC 粒子が均一分散していることで、摩耗性は大きく向上した。

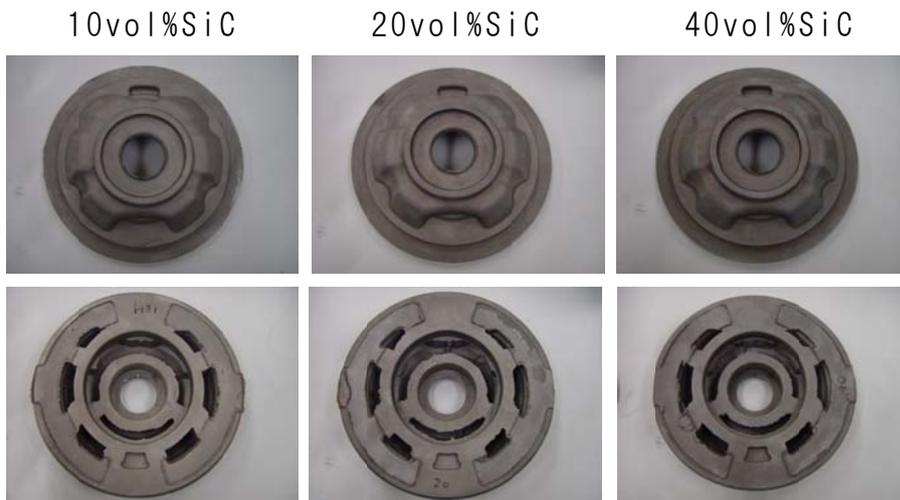


図 2-1-5  
複合材ピレット  
で製造した  
半溶融成形  
鋳物の外観  
写真

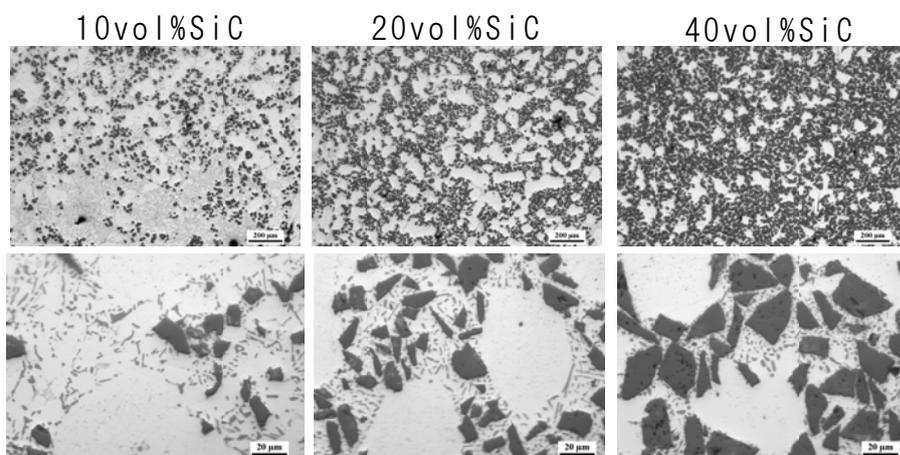


図 2-1-6  
複合材ピレット  
で製造した半  
溶融成形鋳  
物の金属組  
織

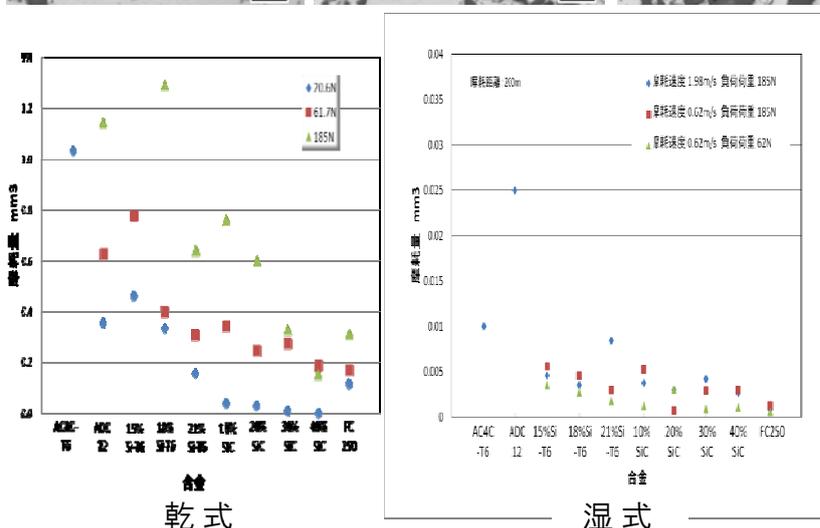


図 2-1-7  
大越式摩擦  
摩耗試験結  
果

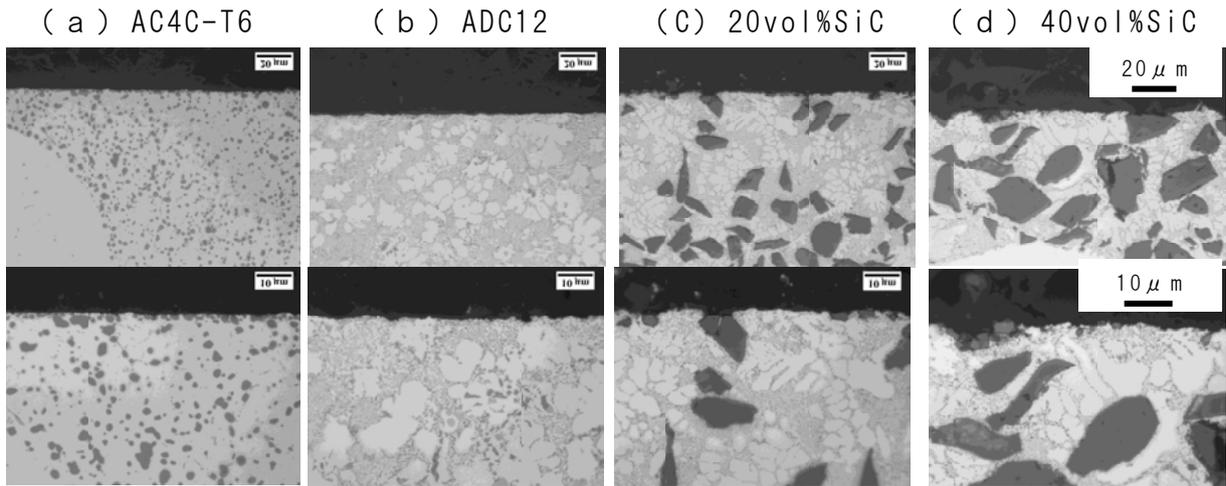
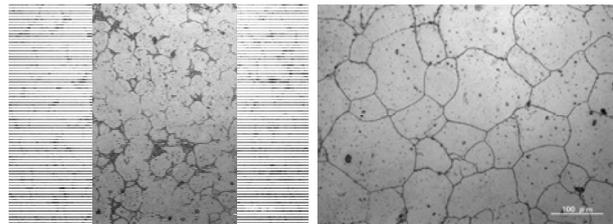


図 2-1-8 大越式摩耗試験後の摩耗痕断面のミクロ組織

②マグネシウム合金

本研究では、難燃性 Mg 合金として、Ca 添加した Mg-9%Al-1%Zn (AZ91) 合金及び高級 Mg 合金として RE 添加した Mg-RE(-Zn-Zr) 合金の半熔融成形鋳物について評価した。Ca 添加 Mg 合金では、0.2%Ca 添加により、半熔融時の燃焼が抑えられることがわかった。0.2%Ca 添加した Mg 合金の金属組織、EPMA 分析結果及び Ca 添加合金の引張特性を図 2-1-9、図 2-1-10 並び



に図 2-1-11 にそれぞれ示す。Ca を含む化合物相が結晶粒界に晶出し、T6 処理により、拡散・固溶するものの、一部粒状となって残存した。引張試験において、Ca 添加により引張特性は低下した。

図 2-1-9 Ca 添加 Mg 合金の金属組織 (上：鋳放し材、下 T4 材)

高級 Mg 合金開発において、半熔融成形した Mg-RE 合金の金属組織を図 2-1-12 に示す。直径約 100 μm の初晶 α 相と共晶化合物相から構成される。溶体化処理 (T4) により、共晶化合物相の多くは、α-Mg マトリックス内

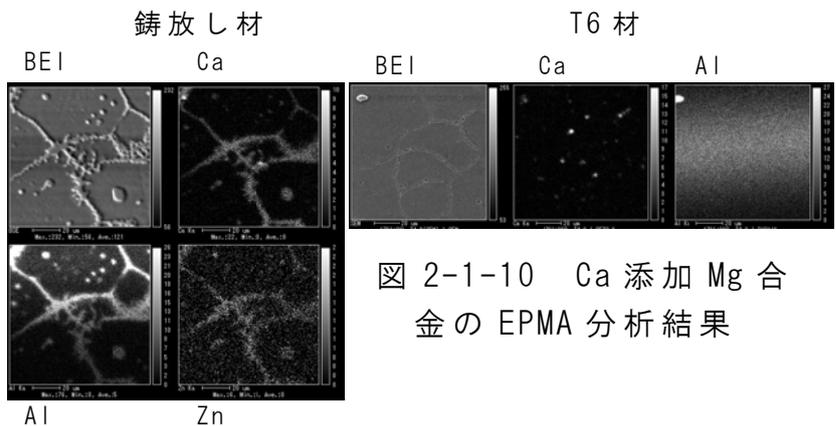


図 2-1-10 Ca 添加 Mg 合金の EPMA 分析結果

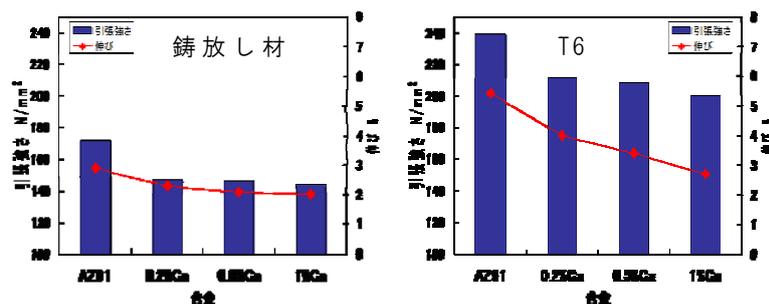


図 2-1-11 引張試験結果

に拡散・固溶し、その量は減少するものの、粒界には、一部残存した。組織構成相を調べるために成形したまま（鋳放し）材及び T6 材について EPMA 分析を行った結果を図 2-1-13 に示す。鋳放し材では、Nd 及び Gd は、結晶粒界をネットワークに濃縮しており、これらの元素を含む化合物相が晶出していると考えられる。

鋳放し材及び T6 材の引張試験を行ったところ、鋳放し材の引張強さ、0.2%耐力及び伸びは、それぞれ  $163\text{N}/\text{mm}^2$ 、 $109\text{N}/\text{mm}^2$  並びに 6.6%、T6 材では、それらは  $234\text{N}/\text{mm}^2$ 、 $194\text{N}/\text{mm}^2$  並びに 5.4%となり、伸びは若干低下するものの引張強さ及び 0.2%耐力は増加した。T6 材の引張特性は、RE 添加した QE22 合金の金型鋳造材に比べて 0.2%耐力及び伸

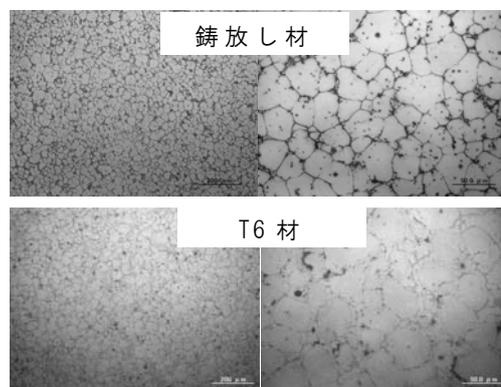


図 2-1-12 半熔融成形した Mg-RE 合金の金属組織

びは同程度以上であり、EQ21 合金に比べて、いずれも高い特性となった。

以上の結果、まだ研究段階ではあるものの、Ca 添加及び RE 添加 Mg 合金ともに、半熔融成形技術を適用することで、その有効性を発揮できる可能性を期待できるものと考えている。

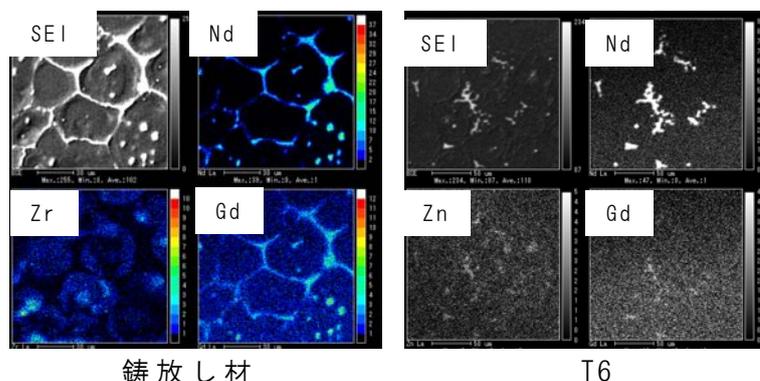


図 2-1-13 EPMA 分析結果

## 2-2 ハイブリッド鋳型の開発

数種類の実部品形状のハイブリッド鋳型を製作し、それらを用いた半熔融成形試験及び試作品の性能・品質評価を行い、砂型（砂中子）の作製方法、半熔融成形条件の最適化に努めた。それぞれの試作品について、試作開発成果を示す。

### (1) ステータによる試作試験

ステータは、トランスミッション機構内のトルクコンバータ部品の一部であり、回転運動により流体を後方に伝える部品である。形状は、外形約 170mm、内円と外縁を肉薄の羽根で連結された構造であり、その羽根部分は、伝達効率を向上させるために湾曲に設計した。湾曲した羽根の肉厚が約 0.7mm、ゲートから 50 枚が放射状に並んだ円形であり、その羽根の形状を形成するために砂中子を使用している。図 2-2-1 にステータの概要図を示す。図 2-2-2 には、砂中子を示す。一つずつの砂中

子を重ね合わせて、羽根形状のキャビティをつくり、塗型塗布後、乾燥させる。砂中子は、コールドボックス法で製作した。砂中子の砂は、珪砂又はアルミナ系人工砂、塗型は、水溶性又は油性とし、砂種類、塗型の種類、塗型の塗り方、乾燥方法などの条件を試行錯誤しながら検討し、完成度をあげた。半熔融成形では、ビレット加熱を用いて 80kW 高周波誘導加熱装置にて直径 75mm の 356 アルミニウム合金ビレットを半熔融加熱した後、成形速度 150mm/s、成形圧力 23.2MPa、主型（金型）温度を約 250℃、砂中子温度を 150℃として成形した。成形には、120 トン油圧プレスを用いた。砂中子と試作結果の一例を図 2-2-3 に示す。いずれの中子砂ともに塗型無では、砂中子に接した鑄肌面は、凸凹となり、実用的でない。塗型塗布により鑄肌は改善され、特に人工砂を用いた方が美麗であった。砂中子面の表面粗さは、普通の砂型鑄造品に比べて小さく、表面欠陥も無かった。試作品各部の金属組織を図 2-2-4 に示す。各部とも均一分布した粒状の  $\alpha$  相と共晶組織から構成されており、引け巣、偏析等の内部欠陥は無かった。肉厚 0.7mm の羽根断面においても健全な半熔融組織を示している。また、金型面と砂型面との金属組織に違いは無く、冷却速度の影響は、ほとんど無いものと言える。本試作試験を通じて、砂中子の造り方の創意工夫、成形条件の最適化を図ることで図 2-2-5 に示す試作品を完成させた。

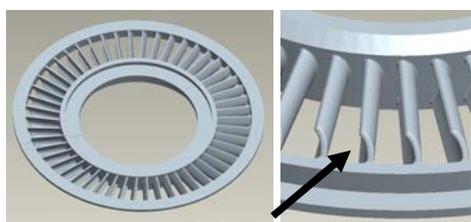


図 2-2-1 ステータ概要図



砂中子  
重ね合わせた砂中子を塗型した後、乾燥  
図 2-2-2 砂中子



図 2-2-3 ステータの試作例

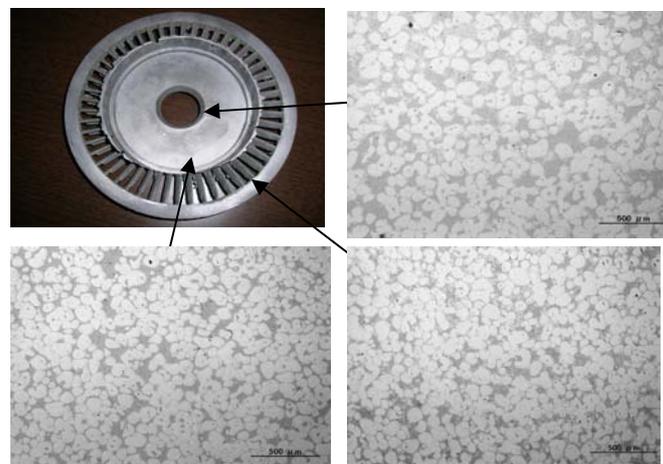


図 2-2-4 ステータ試作品各部の金属組織（円盤部）

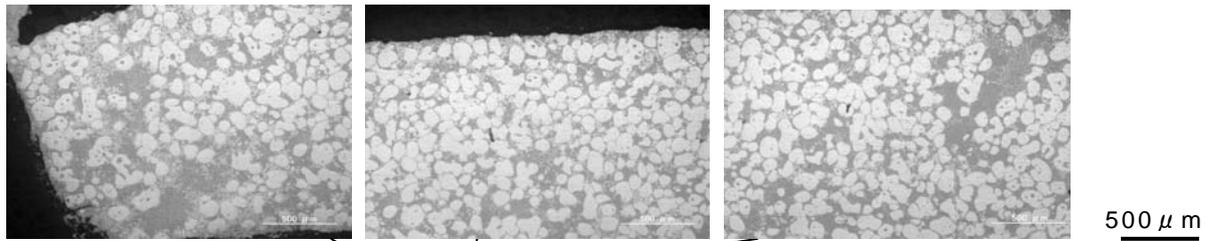


図 2-2-4 ステータ試作品各部の金属組織(羽根部)

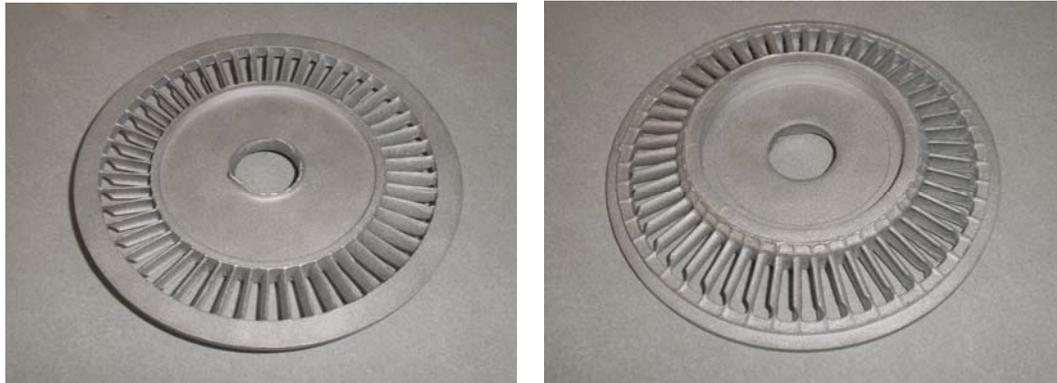


図 2-2-5 試作したステータ

## (2) モーターケースによる試作試験

モーターケース形状の概略図を 2-2-6 に示す。薄肉で円形の外壁と内壁の間を 5mm の空洞にしたシリンダー形状であり、胴部の外壁と内壁の肉厚は 5mm、全長 140mm とした。内壁と外壁の間の 5mm の空洞部に砂中子を挿入する。使用する砂中子の肉厚は、5mm 程度と薄く、かつ全長も 140mm 近くあるため、難易度の高い試作品である。ゲートは、図に示すように上部の蓋の中央部分とした。ピレットは、直径 100mm、高さ 120mm の 356 アルミニウム合金を用いた。砂中子は、アルミナ系（エスパール#125）人工砂を用いてコールドボックスで作製した。製作した砂中子の外観を図 2-2-7 に示す。半熔融成形では、ピレット加熱には 80kW 高周波誘導加熱装置、成形は 120 トン油圧成形プレスを用いた。

成形圧力 35MPa と 13MPa で成形した試作結果を図 2-2-8 に示す。成形条件では、成形速度 350 mm/s、鑄型温度 320℃、砂中子温度 120℃と同じとして、成形圧力を変えた。成形圧力 35MPa では、砂中子が高さ方向の途中から挫屈したように割れてしまい、鑄物形状ができなかった。成形圧力が高いために流入時の半熔融金属の圧力に砂中子の強度が耐えきれなかったためと考えられた。成形圧力を 13MPa まで減圧することで、砂中子が割れることなく、成形することができた。切断面を見ても内壁と外壁の真ん中に空洞部が形成されている（砂中子は、砂落としにより除去されている）。砂中子に接した鑄肌も、特に目立った欠陥は無く、美麗であった。トライ&エラーを繰り返しながら、現状の最適化条件を

見極めることができた。

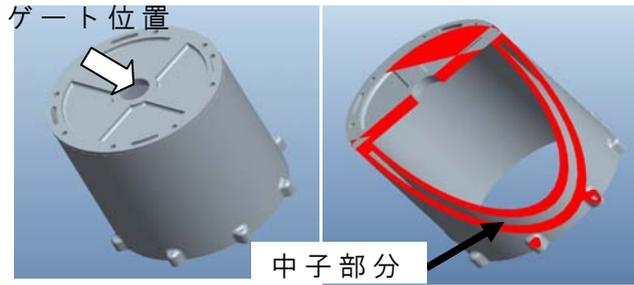


図 2-2-6 モーターケースの概略図



図 2-2-7 造型したまま 塗型塗布後、乾燥砂中子外観

成形圧力：35MPa(343kgf/cm<sup>2</sup>)



成形圧力：13MPa(128kgf/cm<sup>2</sup>)



図 2-2-8 成形圧力と試作品外観

試作したモーターケース断面におけるマクロ組織写真及び(a) ゲート直下、(b) 上型（金型）と砂中子による外壁部、(c) 砂中子と下型（金型）による内壁部(d) 最終充填部の各部のミクロ組織を図 2-2-9 並びに図 2-2-10 にそれぞれ示す。マクロ組織写真では、

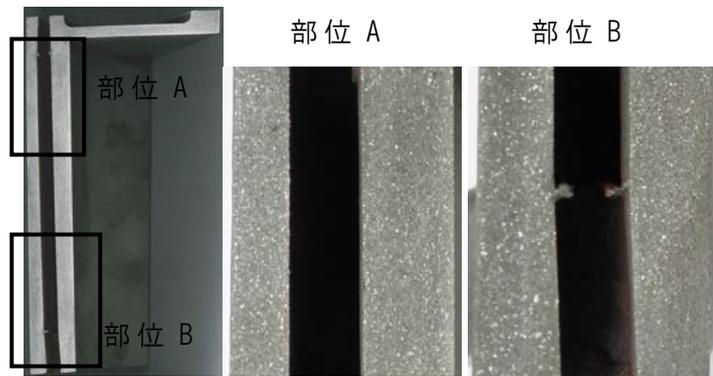


図 2-2-9 モーターケース断面のマクロ組織写真

どこの部位においても偏析は観察されず、固相部の粒状 $\alpha$ 相と液相部の共晶部が均一に充填されていることを示している。また、鋳壁部と肉厚中央部の結晶の大きさもほとんど変化無かった。マイクロ組織写真では、いずれの各部とも均一に分布した粒状の初晶 $\alpha$ 相と共晶組織が観察されており、固相部（初晶 $\alpha$ 相）と液相部（共晶部）が、局部に偏った、偏析は無い。共晶部分をクローズアップしたマイクロ組織写真から、いずれも微細な共晶組織が見られることから、半熔融成形法の特長である速い冷却速度による凝固が達成されている。完成した試作品外観を図 2-2-11 に示す。

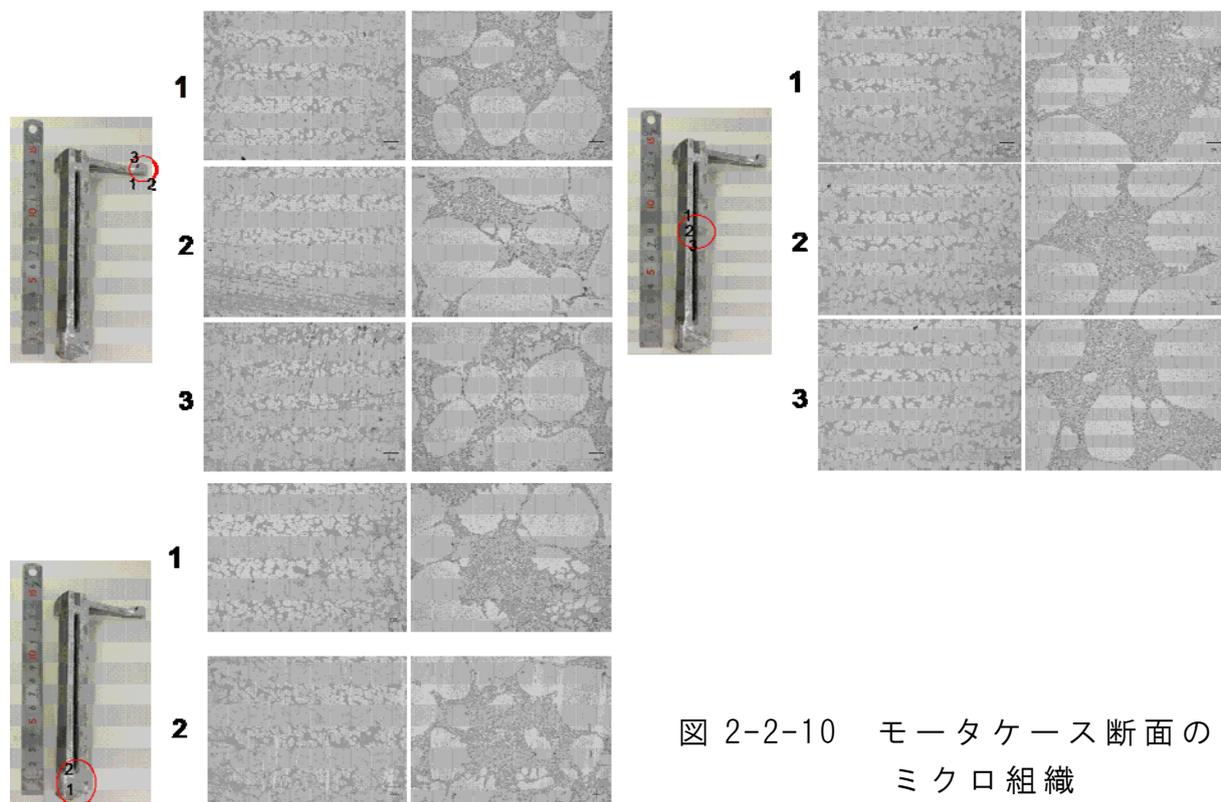


図 2-2-10 モーターケース断面のマイクロ組織

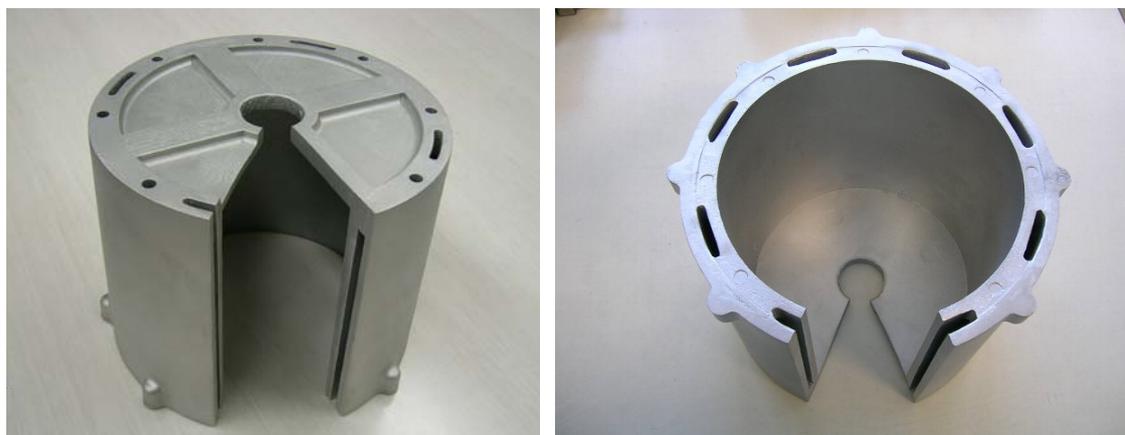


図 2-2-11 試作したモーターケース外観

### (3) T/C インペラによる試作

C/T インペラ形状の概略図を 2-2-12 に示す。直径 120mm の円盤状に湾曲した薄肉の羽根が円周状に配置しており、その部分に砂中子を入れ

て羽根形状を形成する。羽根の厚さは、根元で 1.5mm、最薄部で 1.0mm とした。羽根の肉厚が非常に薄いため、うまく充填できるか、不安であったが、半熔融成形の能力を確認するためにトライした。図 2-2-13 に砂中子を示す。砂中子は、アルミナ系人工砂を用いてコールドボックスで作製した。ビレットは、直径 100mm、高さ 120mm の 356 アルミニウム合金を用いた。主型を約 250℃、成形速度を 350mm/s とした。

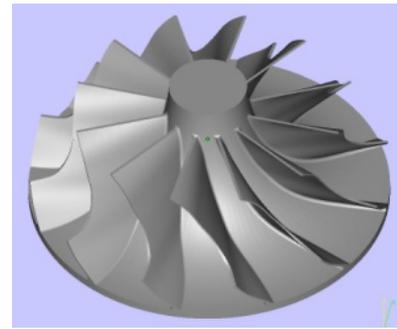


図 2-2-12 T/C インペラ形状の概

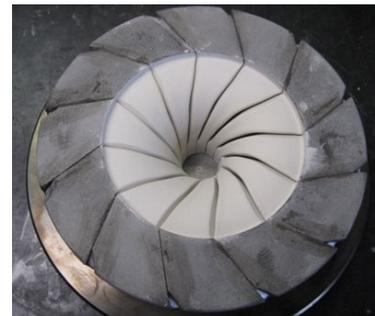


図 2-2-13 砂中子

図 2-2-14 に 113MPa(128kgf/cm<sup>2</sup>) から 36MPa(353kgf/cm<sup>2</sup>) に成形圧力を変化させた時の鋳物外観を示す。成形圧力が最も高い 36MPa では、羽根形状を形成する砂中子が大きく崩壊した。成形圧力を低くすることで、砂中子の崩壊は、ある程度抑えることができたが、それでも羽根形状は正常に形成されていない。

しかし、成形圧力を低く抑えても 1mm 以下の肉厚の羽根の部分で充填できた。次いで、砂中子の作製方法を見直し、成形試験を行った。図 2-2-15 に結果を示す。羽根部分の砂中子の崩壊を防ぐことができ、かつ不廻り等の外部欠陥の無い、健全な外観の鋳物を成形することができた。各部の金属組織を図 2-2-16 に示す。各部ともに粒状の α 相が均一に分布しており、偏析やマイクロポロシティは無い、健全な内部品質の鋳物を造ることができた。特に最も薄い羽根の先端部分（実測寸法 0.7mm）においても、偏析は無く、充填されていた。

13MPa(128kgf/cm<sup>2</sup>)      26MPa(255kgf/cm<sup>2</sup>)



36MPa(353kgf/cm<sup>2</sup>)

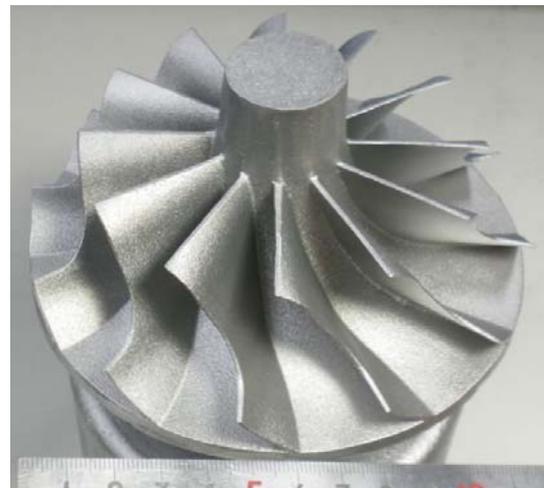


図 2-2-15 試作した C/T インペラの  
外観

図 2-2-14 成形圧力と鋳物外観

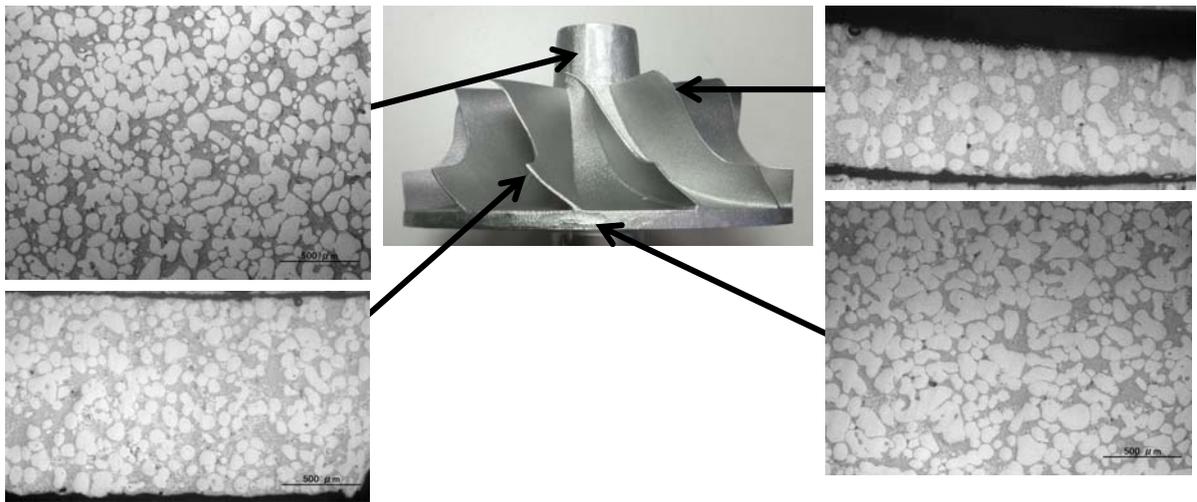


図 2-2-16 試作品の各部の金属組織

### 2-3 生産プロセス開発

本開発では、砂中子の作製方法、金型技術、半熔融成形技術など基礎的な製造技術を確認する目的で、砂型造型機、成形油圧プレス機の型締め機構の変更等の機器設備の設置、(半)量産化を視野に入れ、連続生産システムの検討を行った。

#### (a) 砂（中子）型造型機

砂（中子）造型装置を図 2-3-1 に示す。砂中子造型装置は、砂とバインダーを混練・調整するミキサー、その砂を鑄型に入れて造型するコアシューター、ガス流入により砂型を硬化させるガスボックス及びガスが無害化させる中和塔から構成されている。様々な条件による砂中子造型試験から、砂中子造型に関する基礎技術を確認した。また、砂型造型の効率化を目的に設備改良を行い、安定・造型サイクルタイムの短縮を可能とし、量産設備構築の足掛かりとした（図 2-3-2）。



図 2-3-1 砂中子造型装置



ガスボックスとコアシューターを一体化し、安全・安定、サイクルタイムの短縮が可能

図 2-3-2 改良した砂中子造型装置

### (b) ステータ型の改造

2-2(1)のステータでは、分割された1ピース形状の砂中子を50ヶ組合わせて一つの砂中子としていた。砂中子造型の簡素化、簡略化にするために、一体型の砂中子の造型にトライした。これにより、大幅な砂中子造型時間の短縮が可能となる。また、複雑・薄物鋳物の砂中子の造型方法についても技術熟成し、量産化に向けた生産技術として位置づけた。

一体型砂中子取り金型及び砂中子を図 2-3-3 に示す。円周状に整列した羽根形状を形成する金型ピースが、一個ずつ嵌めあい構造となっており、造型・硬化・乾燥した後、それらを引き抜いて完成された砂中子となる。造型は、上記(b)の造型機により造型した。一体型砂中子を用いて試作したステータの外観を図 2-3-4 に示す。直径 170mm の円盤状で 25 枚の羽根が円周状に配置してある。鋳物品質は、外観及び内部ともに良好である。



図 2-3-3 ステータ用砂中子型(上)と砂中子(下)



図 2-3-4 ステータの外観

### (c) 湯流れシミュレーション

試作段階から量産への速やかな移行を実現させる手段の一つとして、湯流れシミュレーションの活用を考えている。湯流れシミュレーションにより、鋳型を製作する前に予め欠陥対策を盛り込むことは、不良率の低減、試作回数の低減によるコスト削減につながる。湯流れシミュレーションを用いて実製品との整合性を検討し、生産性向上の手段の一つとして、その有効性を検討した。複雑形状鋳物を用いた湯流れシミュレーションと実際に半熔融成形により得られた鋳物の比較を図 2-3-5 に示す。半熔融成形に適したシミュレーションソフトは無いために、市販のシミュレーションソフトを用い、物性値を様々に変化させて解析を行い、妥当と思われる条件でシミュレートした。図の右側より半熔融金属がキャビティに流入する。鋳物は、回路のような複雑形状であり、人間では湯流れの判断がとても困難である。実際の鋳物及びシミュレーション結果において、図中の丸印で囲ってあるところが欠陥に該当する。この

欠陥は、流入した半熔融金属が合流し、完全に溶着しなかったために生じた。両者の対比から、非常に良く欠陥位置が一致していることが分かった。他の部位においても同様な結果が得られた。

このことは、湯流れシミュレーションによる欠陥発生部位の特定をある程度可能にすることを示し、シミュレーションの有効性が確認できた。他の実製品についても同様に解析し、シミュレーション解析技術の向上につなげている。

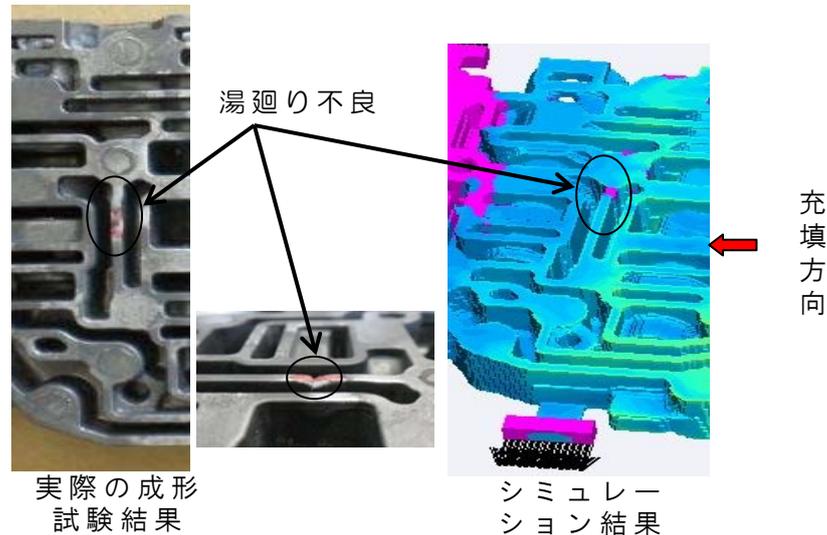


図 2-3-5 湯流れシミュレーション

#### (d) エアブラスト装置

ハイブリッド鋳型を用いて試作した鋳物は、その後、200℃程度の加熱による砂落とし、バスケット切断、バリ取り、熱処理、仕上げ等が行われ、砂型面では砂残り、金型面では離型剤など表面を清浄化する必要がある。特に砂型面の鋳肌は、金型面に比べて鋳肌表面の改良処理が必要である。そこで、ハイブリッド鋳物の鋳肌改良、砂型面と金型面の鋳肌の同質化、鋳物の商品価値を高める手法として、エアブラストを設置して、その効果を確認した。



図 2-3-6 エアブラスト装置

## 第3章 全体総括

### 1. 基礎技術開発

- 1) 砂型と金型を組合わせたハイブリッド鋳型を用いて、半熔融成形した鋳物の組織と機械的性質に及ぼす鋳型冷却能の影響を調べた。金型に比べて冷却能の劣る砂型面においても、微細結晶組織となり、砂型による機械的性質の劣化は、ほとんど無いことが明らかとなった。これにより、砂型を使用した半熔融成形法は、複雑形状鋳物を造る有効的手法として確立された。
- 2) 20vol%SiC~40vol%SiC 複合材を用いて実製品形状のハイブリッド鋳型による半熔融成形試験を行った。複合材が均一分散した複合材鋳物、特に 40vol%SiC 複合材においても健全品質の半熔融成形鋳物ができることを明らかとした。機械的性質及び熱特性は、既存アルミニウム合金に比べて優れており、鋳鉄からの代替合金として魅力的であることを示した。
- 3) 複合材の内製化を目的とした超音波付加+機械攪拌による複合材製造装置を設置した。基礎的な鋳造条件を把握し、複合化の用途が立った。
- 4) Ca 添加した難燃性マグネシウム(Mg)合金及び Mg-RE(Nd, Gd)-Zn-Zr 合金について半熔融成形鋳物を製造した。難燃性 Mg 合金では、0.2%Ca 添加により、難燃性が発現し、実用レベルの機械的性質が得られた。Mg-RE(Nd, Gd)-Zn-Zr 合金の機械的性質は、既存の製法とほぼ同程度であった。いずれの Mg 合金ともに軽量化合金としての魅力を備えているものと考えている。

### 2. ハイブリッド鋳型の開発

- 1) 砂型と金型を組合わせたハイブリッド鋳型を製作した。
- 2) 砂中子の製作条件を系統的に調べ、半熔融成形において破損しない強度をもつ砂中子の製作条件を確立した。
- 3) 複雑・薄肉の実製品形状のハイブリッド鋳型を用いた半熔融成形鋳物を製造し、半熔融成形条件の最適化に努めた。半熔融鋳物の性能評価から、外部品質、内部品質及び機械特性において実用レベルであることを確認した。
- 4) 普通の砂中子を用いて半熔融成形できることが明らかとなった。複雑・薄肉形状のアルミニウム合金鋳物の品質とコストを両立させた製造法として革新的なものと評価している。

### 3. 生産プロセス開発

- 1) 実製品形状鋳物の試作試験を通じて、半熔融成形条件の最適化、製造装置の改良、金型技術など、実用化に向けた要素技術の重要課題を抽出し、生産技術への展開を図ることができた。

2) 低コスト化、商品価値の付加など、量産を想定した設備開発を行い、量産要素技術確立の基礎的見地が得られた。

#### 4. 事業化

輸送機器産業をメインターゲットとし、複雑・薄肉・軽量・高強度部品を求める産業分野（一般機械、情報家電等）にも訴求していく。今後、品質・信頼性を高め、航空・宇宙産業への進出も図る。参加企業は、自動車部品供給メーカーとの共同開発を行い、良好な評価を得ている。本プロジェクトにおいて、進化した軽量・複雑形状鋳物製品の試作が可能となり、更なる需要拡大も期待できる。

受注体制では、企業が中心となり、多種多様なユーザーニーズに対応する。得意分野に応じた生産を行う。事業化に向けた量産技術を早期に確立し、試作を含めた（小）量産に対応できる受注体制を構築する。本製法の知的所有権を取得しており、共同研究体との技術提携、事業提携を行うことも視野に入れている。