

平成20年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「凝固制御技術を活用した新チクソキャストイング装置の開発」

## 研究開発成果等報告書

平成21年3月

委託者 関東経済産業局

委託先 財団法人しずおか産業創造機構

# 目 次

第1章 研究開発の概要	1
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 当該プロジェクト連絡窓口	4
第2章 本論	5
2-1 基礎研究開発	5
1) 凝固制御により製造したビレット	5
2) 超音波の影響	5
3) 合金開発	6
2-2 ビレット製造装置開発	6
2-3 成形装置開発	6
1) 高周波誘導加熱装置	6
2) 試作	7
第3章 全体統括	9
第4章 図表等	10
図1 チクソキャスト法概略	10
図2 AC4CH合金の鑄造組織	10
図3 基礎鑄造試験によって得られたビレットのマイクロ組織	11
図4 鑄物組織に及ぼす超音波の影響	11
図5 ミクロ組織(超音波有)	12
図6 ミクロ組織(超音波無し)	12
図7 多段型鑄物の外観及びマクロ組織	13
図8 多段型鑄物のマクロ組織(0.57%Mg合金)	13
図9 引張試験結果	14
図10 ビレット製造装置	15

図11	ビレット製造装置の工程概略	15
図12	ビレット高周波誘導加熱装置	16
図13	試作品(エンジンマウントブラケット)外観と断面のマイクロ組織	16
図14	試作品(ハウジング)の外観	17
図15	試作品(ハウジング)のマイクロ組織	17
図16	ホイールディスク外観	18
図17	ホイールディスク外観	18
図18	18インチホイールディスクのX線写真	19
図19	18インチホイールディスクのマイクロ組織	19
表1	試作品(18インチホイールディスク)の実体切出し引張試験結果	20
図20	18インチホイールディスクの外観	20

## 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、地球環境保全からの省資源・省エネルギーや温暖化対策のための低燃費化の追求、リサイクル・産業廃棄物などの社会的要請への対応、国際的な競争や徹底した低コスト化などの課題が山積している。特に、地球温暖化対策としての CO<sub>2</sub> ガス排出削減のための低燃費化が大きな問題となっている。

さて、鋳物製造業界においては、低燃費化に対する方策として部材・部品の軽量化対策が講じられ、すなわち鉄系材料から軽合金材料への置換、鋳物の高品質化などの研究開発が積極的に進められている。このような背景の中で、高品質鋳物を得るための新しい鋳造技術として、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いる。半溶融・半凝固成形加工法は、固液共存温度領域にある半凝固金属に強力な攪拌を加えることによりデンドライトアームを破碎し液相中に微細球状の固相粒子が存在した状態を作り、みかけの粘性を小さくした状態で鋳型内に加圧成形して、最終形状を得る製造法である。レオキャストイング法は溶湯に攪拌を加えながら固液共存温度まで冷却して得られた半凝固スラリーをそのまま加圧成形させる方法である。一方、チクソキャストイング法は、連続鋳造時に機械的又は電磁攪拌を加えながら凝固させたビレットを所要なサイズに切断したものを供試材として、これを高周波誘導加熱装置などで半溶融状態まで再加熱し、得られた半溶融スラリーを射出スリーブに移動させ、加圧成形する方法である。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レオ・チクソキャストイング法の特長を簡単に列挙すると、

- (1) 成形時に層流に近い状態で充てんされるために酸化物やガスを巻込みにくく熱処理が可能となり強度向上が期待できる。
- (2) 液相が少ないために凝固収縮率が少なくなり収縮孔が減少する。
- (3) 凝固過程における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) 流動性、変形能が比較的高い半溶融スラリーを成形するために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。我々は、チクソキャスティング法について継続的に研究開発を行ってきており、鋳物の高品質化に対して有効な製法であることを明らかにしてきた。

ところで、チクソキャスティング法の最大の課題は、製品コストの改善である。すなわち、チクソキャスティング法に用いる組織調整されたビレットの製造には、特許や技術的ノウハウと共に大掛かりな電磁攪拌装置等の特殊な装置が必要なためにビレットの製造費が大きく嵩むこと、国内ではビレットの製造は行われておらず、海外からの輸入に依存しており、ビレットの供給も不安定であること、また、チクソキャスティング法の成形装置は現在、既存のダイカストマシンを改造しているものが主流であるが、欠点として、非常に高価な設備であること、大掛かりな設備のために大きな作業空間が必要となることなどが必然的に製品コストを増加させ、チクソキャスティング法の普及を妨げる要因となっている。したがって、チクソキャスティング法の拡大を図るためには、本法の特長を維持しつつ、かつ低コスト化を達成することが必要不可欠である。

本研究開発では、電磁攪拌など特別な処理を行わずに低コストで安定したチクソキャスティング用ビレットの製造技術及び製造装置開発並びに本法に適した成形装置開発を行う。以下に研究項目を記す。

### ① 基礎技術開発

目的の材料組織を得るための鋳造試験を系統的に行い、基礎となるビレット鋳造技術の確立を図る。

### ② ビレット量産装置の開発

溶解・保持炉、溶湯供給装置、温度制御システム、ビレット排出装置等の最適な組み合わせを研究し、ビレット量産装置の開発を行う。本装置で作製したビレットの性能評価を行う。

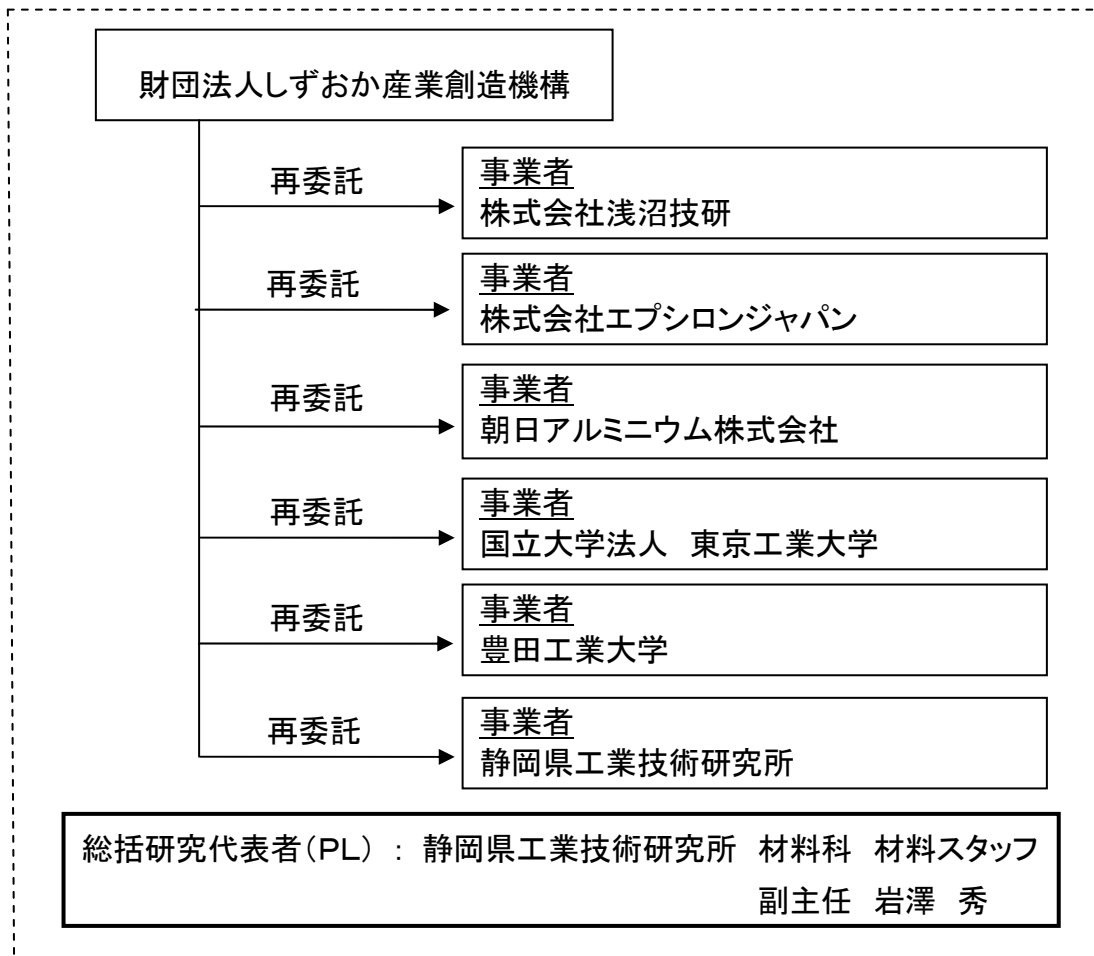
### ③ 成形装置の開発

ビレットの加熱、油圧制御機構による射出、加圧、抜型、離型材塗布、型締め等の全工程が自動で行える簡易かつコンパクトな成形装置を開発する。上記②により開発した装置を使って製造したビレットを用いて成形した実体品の実証試験を行い、ビレット量産装置との最適化を研究し、新チクソキャスティング装置として完成させる。

## 1-2 研究体制

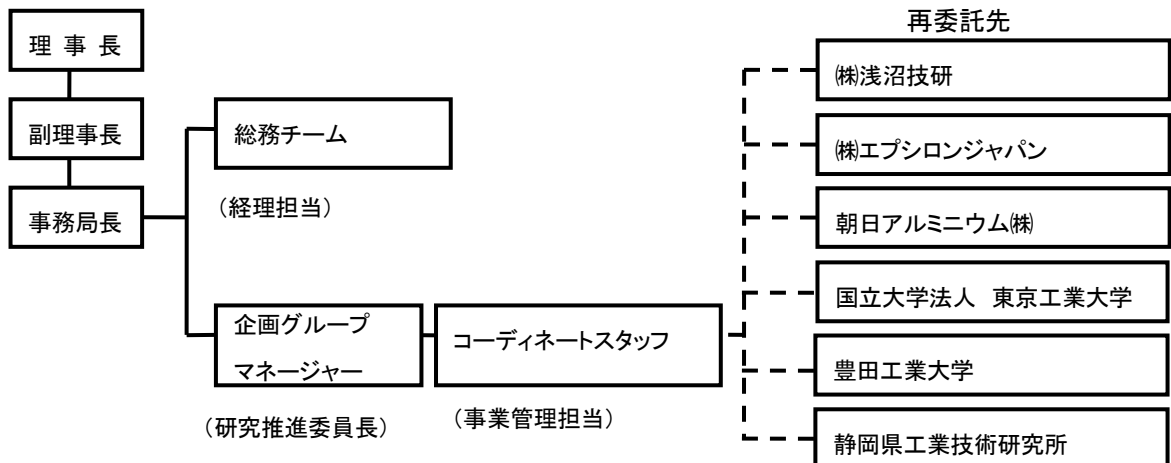
### (1) 研究組織及び管理体制

#### 1) 研究組織(全体)



#### 2) 管理体制

事業管理者[財団法人しずおか産業創造機構]



### 1-3 当該プロジェクト連絡窓口

窓 口 : 財団法人しずおか産業創造機構 コーディネートスタッフ

担当者 : 主査 榛葉敏孝、主査 前田頼光

住 所 : 〒420-0853 静岡県静岡市葵区追手町44-1

連絡先 : Tel(054-254-4512) Fax(054-251-3024)

E-mail (coordinate@ric-shizuoka.or.jp)

## 第2章 本論

### 2-1 基礎研究開発

#### 1)凝固制御により製造したビレット

図1にチクソキャスト法法の概略を示す。チクソキャスト法では、半熔融状態で固体として存在する初晶 $\alpha$ 相の形状は、粒状であることが必要のために、連続铸造時に機械的又は電磁攪拌などの特別な処理が施されたビレットを供試材としている。この特別なビレットを高周波誘導加熱装置などで半熔融状態まで再加熱し、得られた半熔融スラリーを射出スリーブに移動させ、加圧成形する。本開発では、電磁攪拌などの特別な処理を必要とせず、金属製容器に流し込んだ溶湯の凝固過程を制御するだけでチクソキャスト用のビレットを供給できるビレット製造技術を開発した。図2に電磁攪拌したビレット(現状品)と凝固制御によるビレット(開発品)を用いて成形した鋳物の組織を比較した。初晶 $\alpha$ 相がデンドライト状に晶出した重力铸造とは異なり、チクソキャストでは、いずれも初晶 $\alpha$ 相は、粒状となっており、凝固制御技術により電磁攪拌を施したビレットと同様の組織が得られた。

凝固のバランスが不適當であると図3に見られるように初晶 $\alpha$ 相は、粒状とはならず歪な形状となる。本開発では、直径150mmまでのチクソキャスト用ビレットの製造技術を確立した。

#### 2)超音波の影響

凝固時に超音波を加振すると結晶粒が微細になることが知られている。このことは超音波の加振が、凝固時に晶出する初晶 $\alpha$ 相の微細粒状化に対して有効に働くことを示唆している。すなわち、容器に溶湯を注ぐだけの铸造作業に比べて铸造条件をある程度広範囲に、かつ性状の良いビレットを製造できる可能性がある。また、昨今ではリサイクル材の使用量が増大しており、その影響として不純物元素であるFeの混入が避けられない。多量のFeが含まれると凝固時に粗大な針状の金属間化合物相が晶出し、機械的性質、特にじん性が低下する。超音波加振は、このような金属間化合物相の破碎、微細化に有効であることも考えられる。そこで本基礎研究の一つとして、注湯後の溶湯に超音波加振を行い、鋳物組織、特に初晶 $\alpha$ 相と金属間化合物相の性状がどのように変化するか実験した。図4から図6にビレット組織に及ぼす超音波の影響を調べた結果を示す。超音波を付加することで、結晶粒が微細となり、初晶 $\alpha$ 相の形状が粒状となることが明らかとなった。



### 3)合金開発

チクソキャストにに適した合金を開発するために主要添加元素である Mg(マグネシウム)量を変化させたビレットを作製し、チクソキャスト成形した鋳物の組織及び機械的性質を調べた。図7に多段型鋳物の外観及び断面マクロ組織を示す。図8には、鋳放し材のミクロ組織を示す。いずれの肉厚とも粒状の $\alpha$ 相と共晶組織とから構成されており、肉厚による差は認められない。図9にT6材の引張試験結果を示す。Mg量が多くなるにつれて引張強さ及び0.2%耐力は増加するが、伸びは低下する。0.3%から0.68%にMg量が多くなるにつれて引張強さ及び0.2%耐力は、それぞれ270N/mm<sup>2</sup>から340N/mm<sup>2</sup>、225N/mm<sup>2</sup>から290N/mm<sup>2</sup>に増加した。伸びは、0.68%Mg合金においても12%に達した。また、肉厚と引張特性には、ほとんど違いは認められなかった。このことは、チクソキャスト法では、肉厚感度が鈍いものと考えられる。なお、比較のために重力金型鋳造品の引張試験結果も載せているが、図から明らかなようにチクソキャスト品の方が、高い伸びを示すことが明らかである。

#### 2-2 ビレット製造装置開発

図10にビレット製造装置を示す。図11に連続鋳造試験における工程概略を示す。①原点より工程が始まり、②湯汲みでは、溶湯中にラドルを入れて、アルミ合金溶湯を汲み出す。この時、湯面検知装置により一定量となるように制御されている。③溶湯の入ったラドルは搬送機により容器の上まで搬送され、④容器に注湯される。注湯された容器は、ビレット排出位置まで1タクト毎に移動する(この時アルミ溶湯合金は凝固している)。⑤排出位置まで来た容器は、上方に設置している容器取出装置により持ち上げられる。⑥ビレット排出工程では、ビレットはビレット取出し装置にて所定の場所に押出される。本装置では、直径150mmまでのビレットを製造することが出来る。(特許出願中)

#### 2-3 成形装置開発

##### 1) 高周波誘導加熱装置

図12にビレットの高周波誘導加熱装置を示す。主要な仕様は、電気容量80kW(20kW高周波発生装置、4台)、加熱コイル8台(20kW-2台×4台)である。ビレットは断熱性ブロック上に設置され、ビレットの加熱の場合、加熱コイルは下降、ビレットの加熱コイル間の移動の場合では上昇している。ビレット加熱は、プログラム制御されており、8台の加熱コイルで加

熱一休止(均熱化)を繰り返して、室温から半溶融温度まで行われる。このビレット加熱装置では、直径 150mm までのビレットを加熱することが出来る。

## 2) 試作

### (a)エンジンマウントブラケット(強度部品)

図13にチクソキャスティング成形したエンジンマウントブラケットを示す。マクロ組織観察では、偏析などは認められず、均一な組織であった。X線写真においては、内部欠陥は認められなかった。実体切出しテストピースによる引張試験においても既存品に比べて高強度・高延性であることがわかった。

### (b)ハウジング(薄肉部品)

図14にハウジングの外観写真を示す。チクソキャスティング品は、その特長を活かすために、既存のダイカスト品に比べて極力薄肉形状とした。鋳抜きの抜け勾配は $1^\circ$ 、最少肉厚を3mmとし、ダイカスト品に比べて約20%軽量化した。X線写真に示すように内部欠陥は無く、健全な鋳物を成形することができた。また、断面マクロ組織を調べたところ、偏析等の欠陥は無かった。断面のミクロ組織を図15に示す。ゲート側、フランジ側(ゲートから最も遠い部位)及びそれらの中間部分においても、均一な粒状 $\alpha$ 相と微細な共晶組織が観察されており、引けやポロシティは認められない。実体切出しテストピースによる引張試験から既存のダイカスト品に比べて強度及び伸びとも大きく上回ることが確認出来た。

### (c)18インチホイールディスク(薄肉部品)

直径150mm(6インチ)ビレットを用いて成形試験を行った。図16及び図17に型締力及び成形圧力を変えて成形した鋳物の写真を示す。成形速度及び金型温度は同じとした。いずれも不廻りなどの外部欠陥は認められなかった。成形力が最も低い40トン(成形圧力 $177\text{kgf}/\text{cm}^2$ )においても十分成形可能であることが明らかとなった。成形力40トンで成形した鋳物のX線写真を図18に示すが、内部欠陥は認められず、健全な鋳物を成形することができた。図19に成形力50トンで成形したホイールディスクの各部のミクロ組織を示す。各部とも粒状 $\alpha$ 相と微細な共晶領域が観察され、均一な組織であった。異なる成形力で成形したホイールディスクの実体切出しテストピースによる引張試験結果を表1に示す。引張強さは、 $265\text{N}/\text{mm}^2\sim 280\text{N}/\text{m}$

m<sup>2</sup>、伸びは13%~18%の範囲となり、良好な特性を示した。このことから、成形圧力が388 kgf/cm<sup>2</sup>~177kgf/cm<sup>2</sup>においては、成形圧力によらず同等な鋳物が得られたことが明らかとなった。図20に18インチホイールディスクの外観を示す。今回、肉厚を積極的に薄肉化し、リブ構造により剛性を保つ形状とした。そのために、同一の大きさのホイールディスクに比べて約20%の軽量化が達成された。

## 第3章 全体総括

### 1. 基礎研究開発

- 1) 初晶  $\alpha$  相が粒状になるか否かの鑄造条件を明らかにすることができ、ビレット量産装置における量産要素技術の基礎技術開発を完了した。
- 2) 超音波加振は、初晶  $\alpha$  相の粒状化に良い影響を与え、金属間化合物相を微細にする。このことは、不良率の低減及びリサイクル材の使用に良い結果を与える。
- 3) 合金開発によりチクソキャストにに適した合金組成の知見を得た。

### 2. ビレット製造装置の開発

- 1) 直径 150mm までのビレットを安定的にかつ連続的に鑄造可能な装置を開発することができ、量産時の要素技術を確立した。本装置について特許出願を行った。
- 2) 鑄造したビレットは、成形試験を通じて性能評価を行い、チクソキャスト成形が可能であること、できた鑄物品質及び特性は良好であることを確認した。

### 3. 成形装置の開発

- 1) ビレット加熱装置開発において、直径 150mm までのビレットを連続加熱可能な装置が完成し、ビレットの加熱要素技術を確立した。
- 2) 成形プレス開発において実験用金型による成形試験を実施し、成形技術を確立することができた。鑄物の品質は良好であり、高強度化、薄肉化、軽量化が可能であることが明らかとなった
- 3) 成形圧力が、ダイカストの半分以下でも成形可能であることがわかった。このことにより、成形装置の小型化、シンプル化及び低コスト化が可能であることがわかった。
- 4) 最適な成形プレスの仕様を構築することができた。

## 第4章 图表等

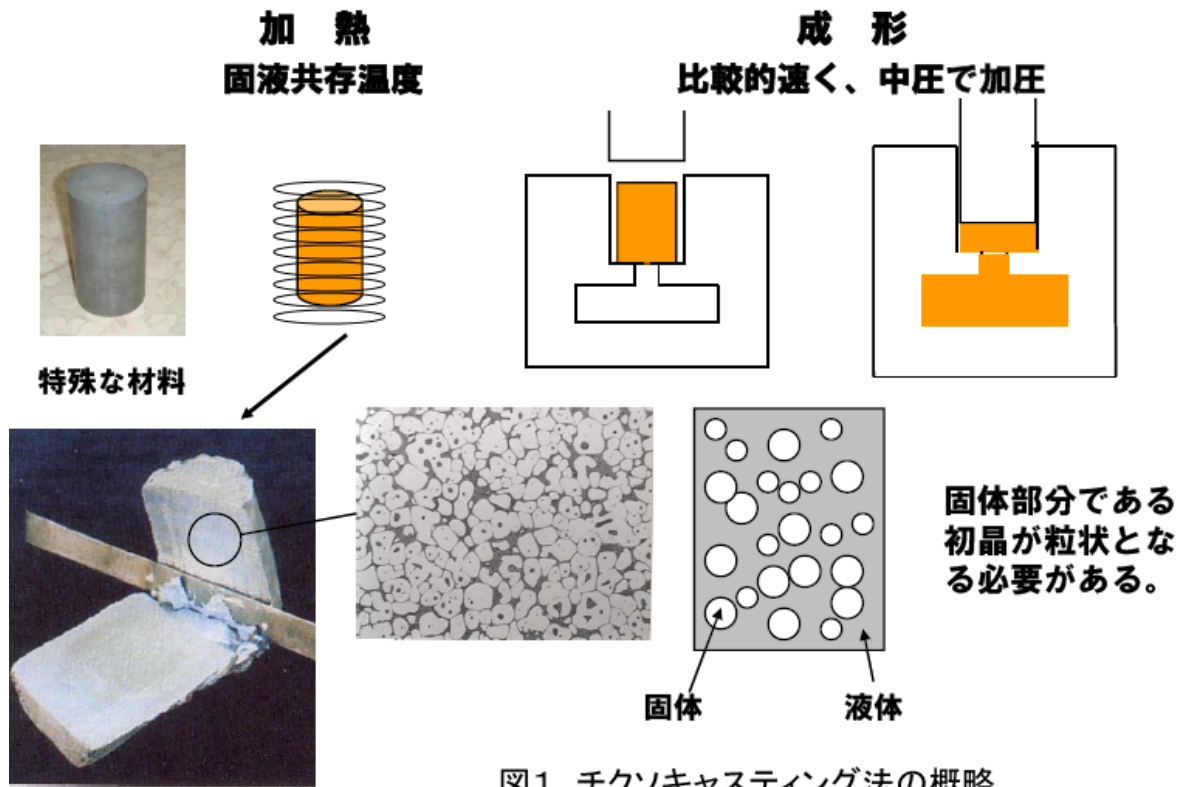


図1 チクソキャスト法の概略

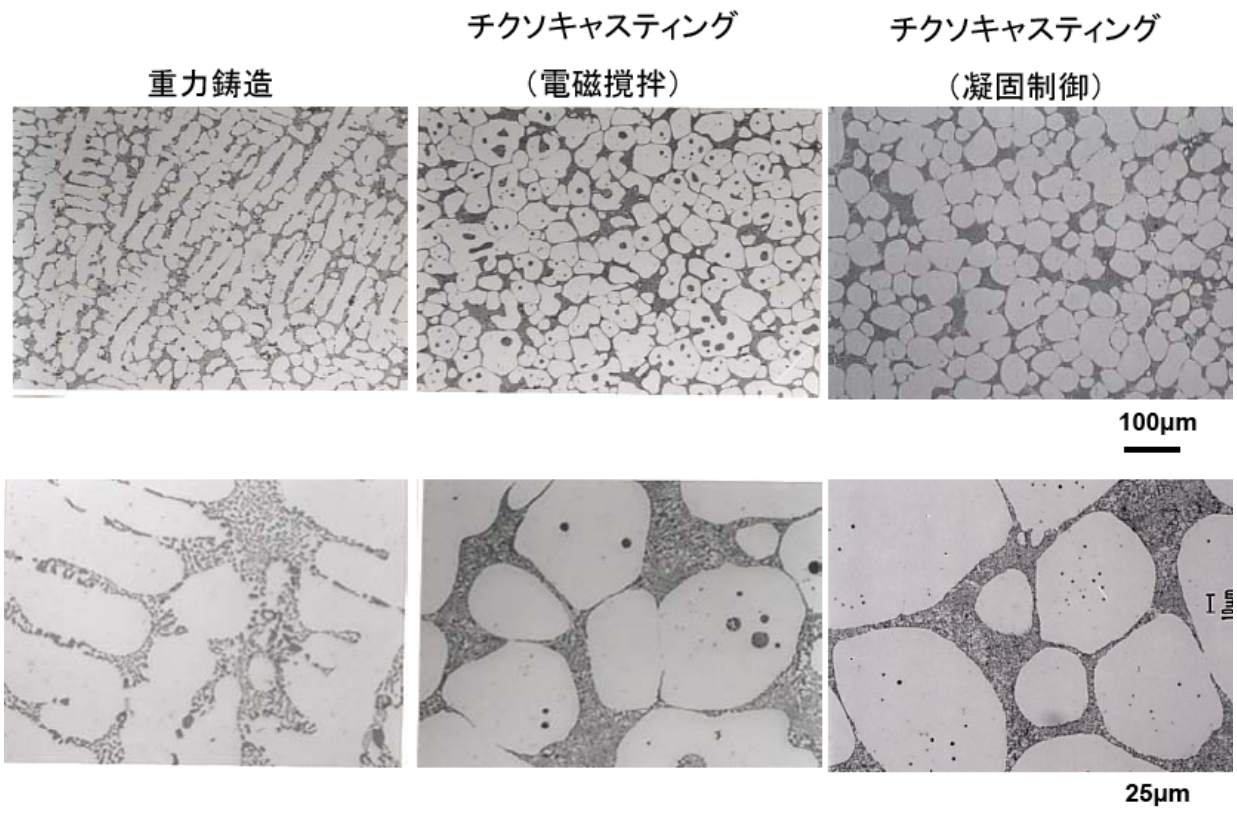


図2 AC4CH合金の铸造組織

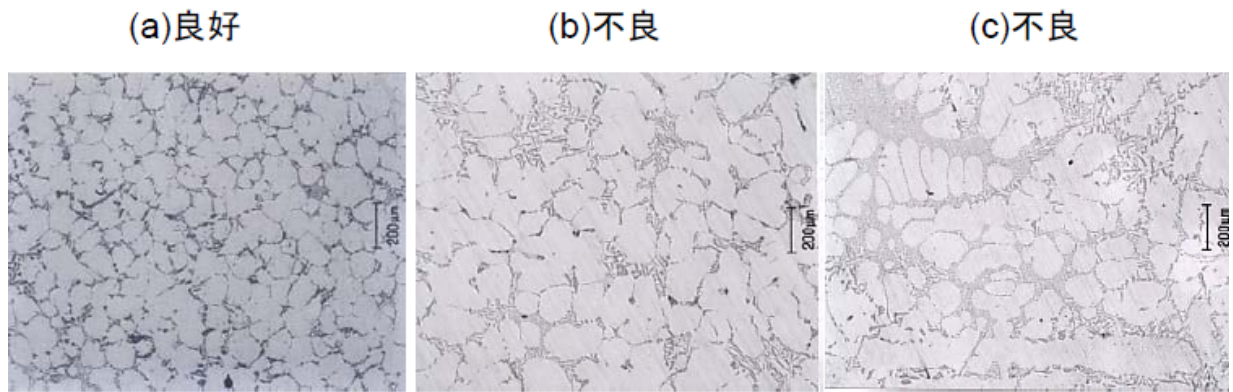


図3 基礎鑄造試験によって得られたビレットのマイクロ組織

**超音波有**



**超音波無**



図4 鑄物組織に及ぼす超音波の影響



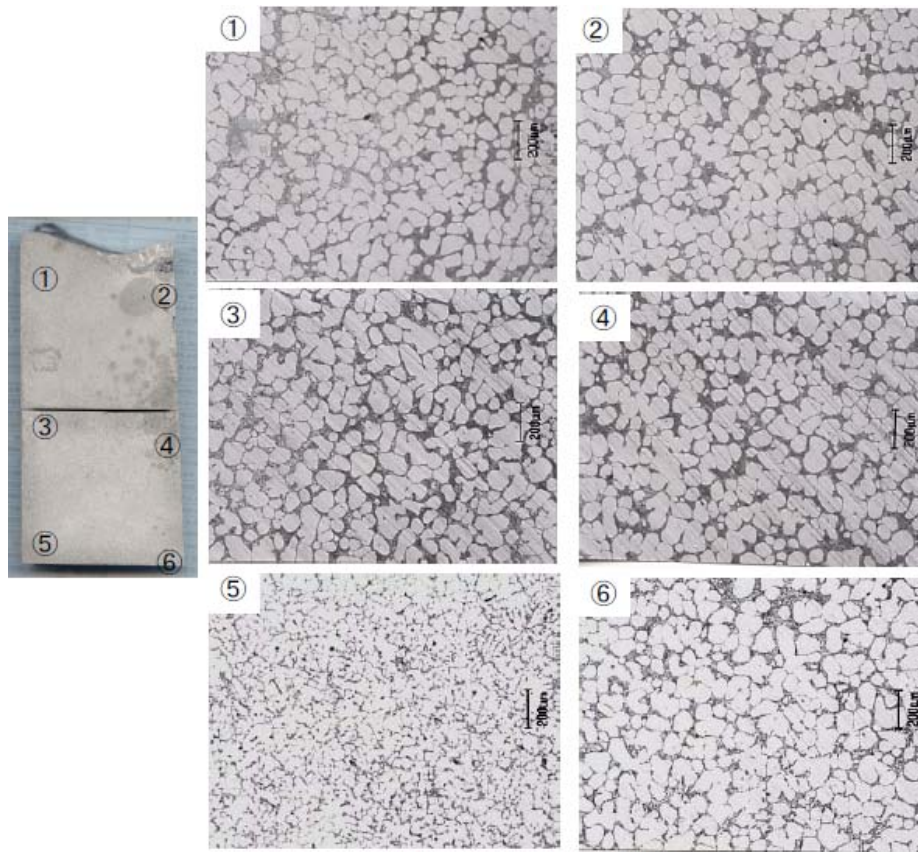


図5 ミクロ組織(超音波有)

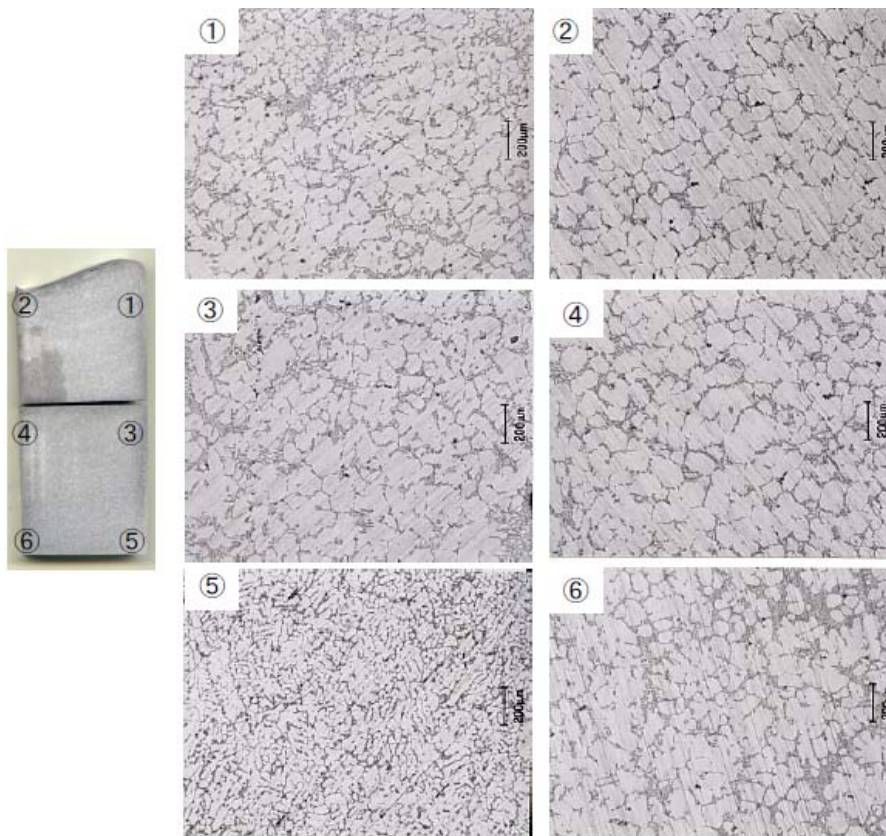


図6 ミクロ組織(超音波無し)



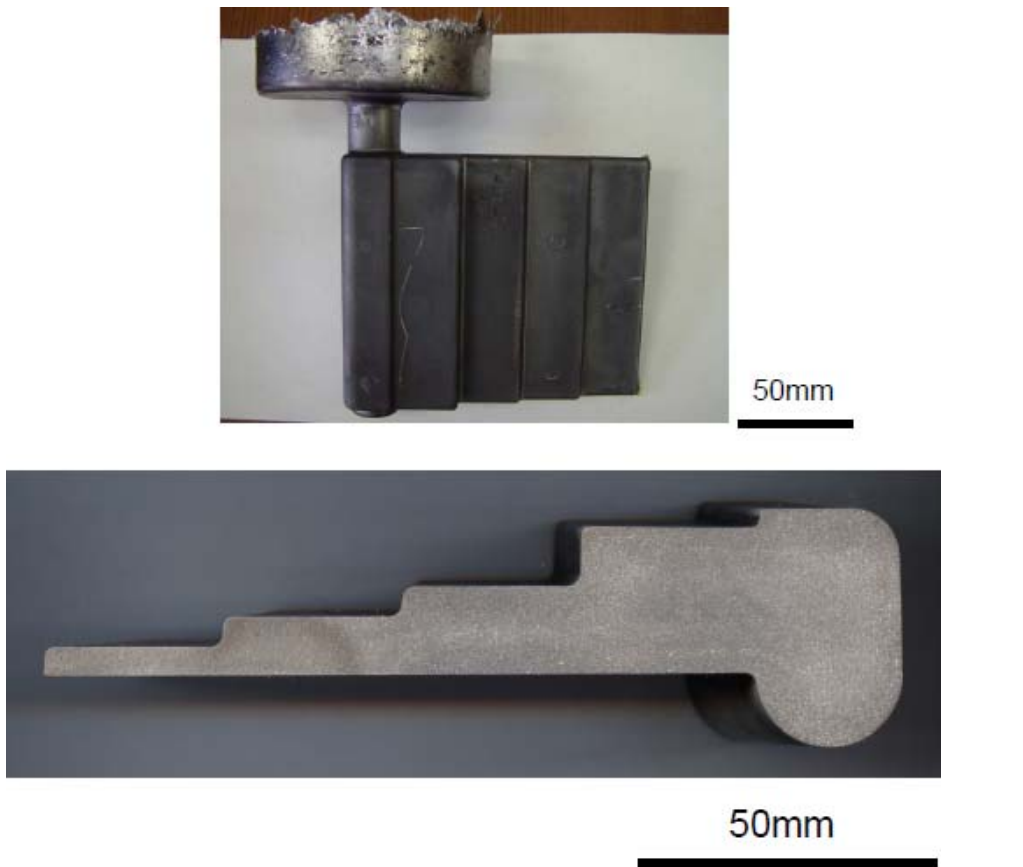


図7 多段型鋳物の外観及びマクロ組織

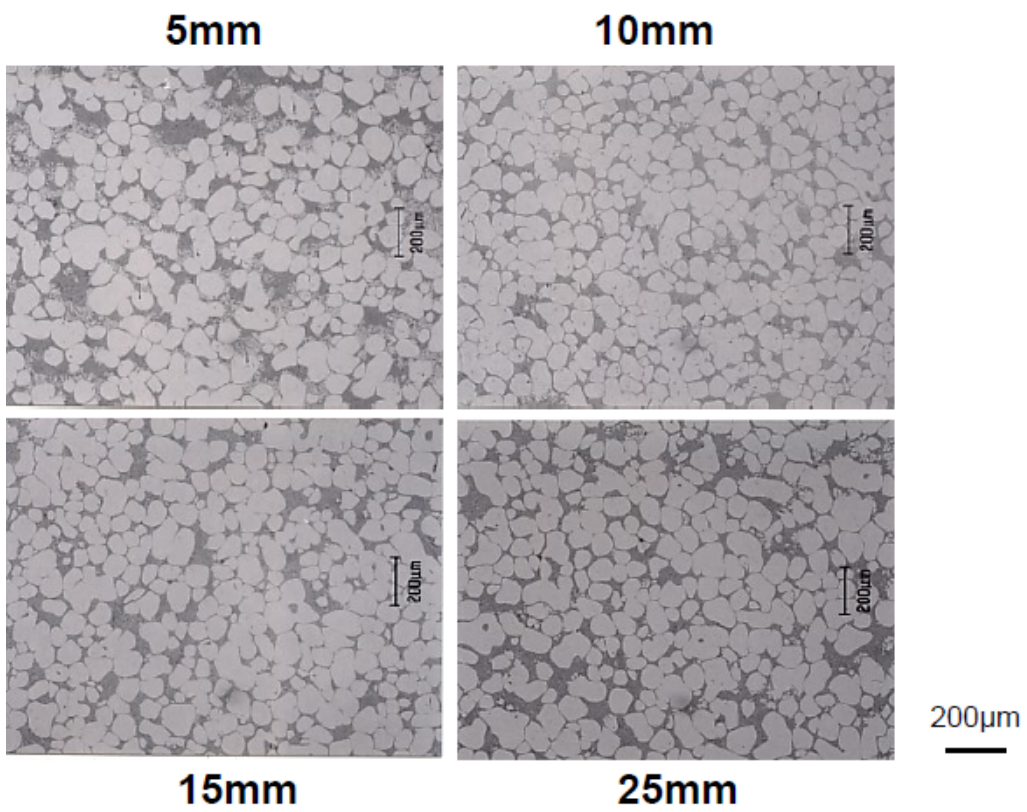


図8 多段型鋳物のミクロ組織 (0.57%Mg合金)

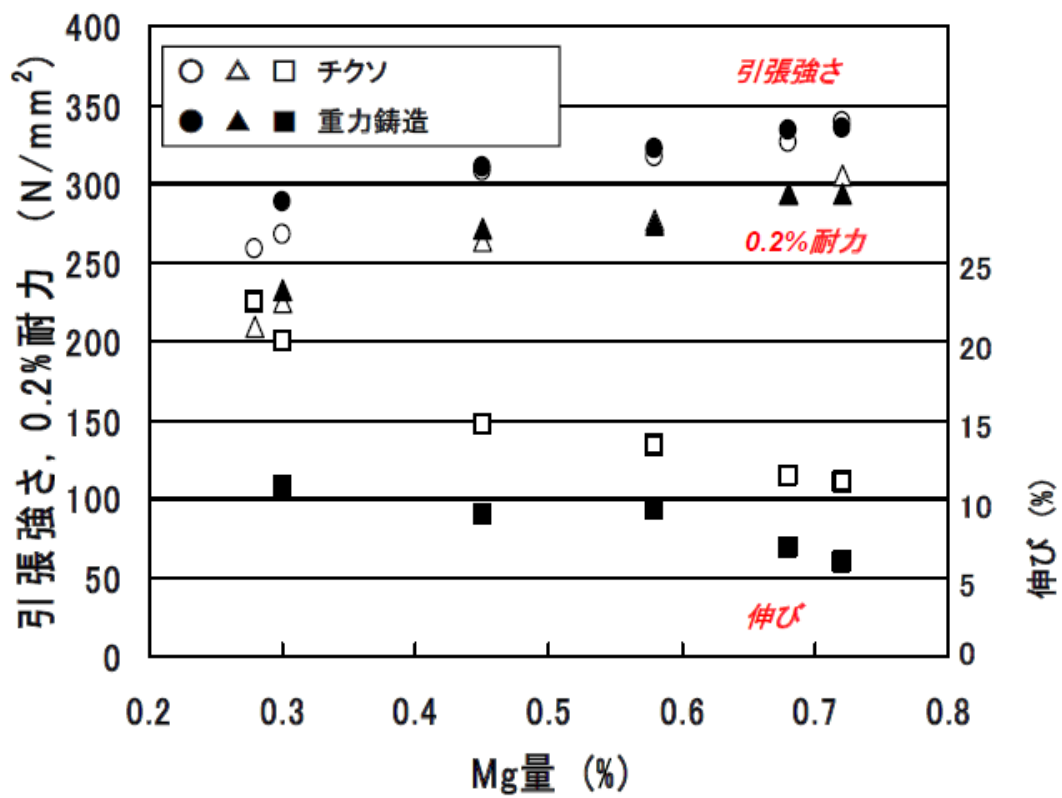


図9 引張試験結果



図10 ビレット製造装置

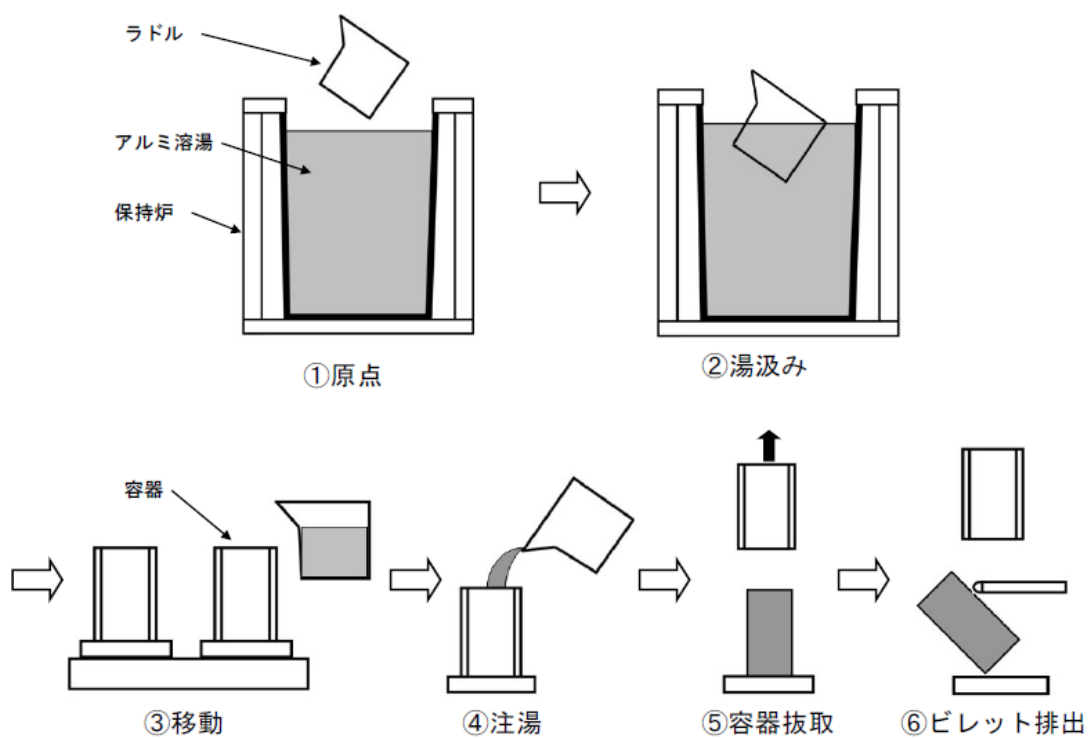


図11 ビレット製造装置の工程概略



図12 ビレット高周波誘導加熱装置

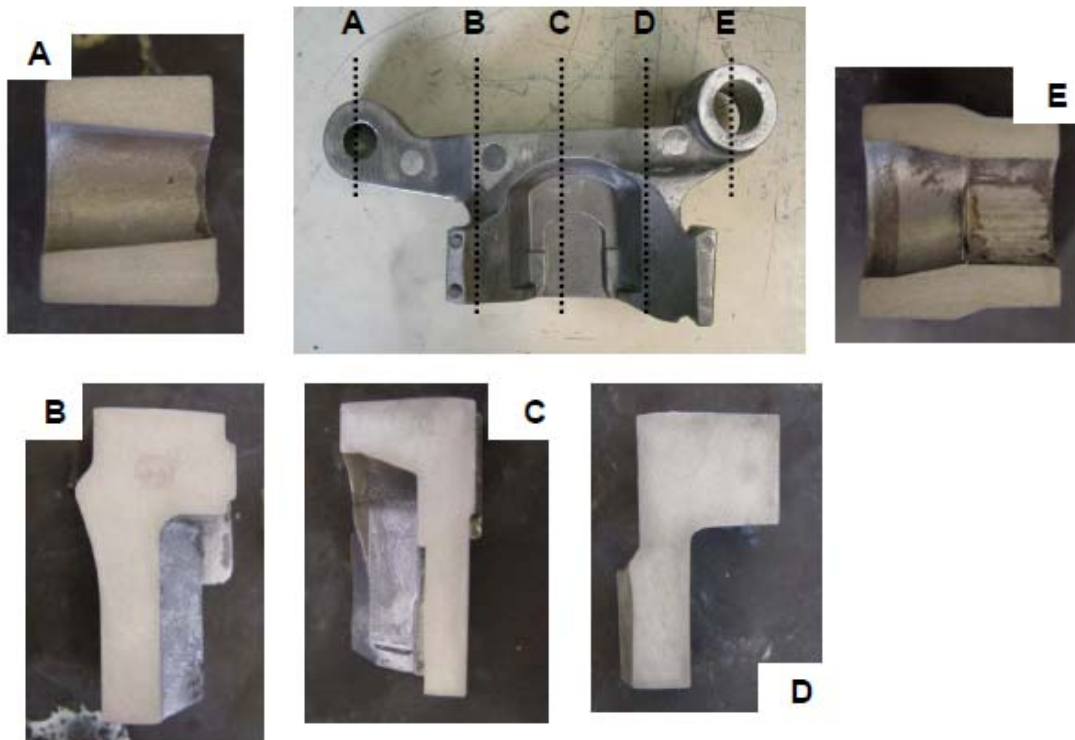


図13 試作品(エンジンマウントブラケット)外観と断面のマクロ組織



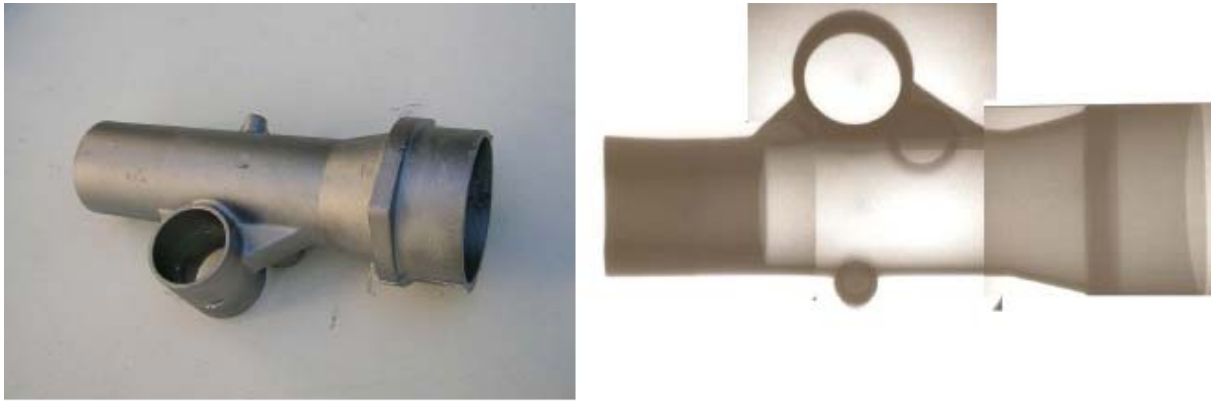


図14 試作品(ハウジング)の外観

ゲート側

フランジ側

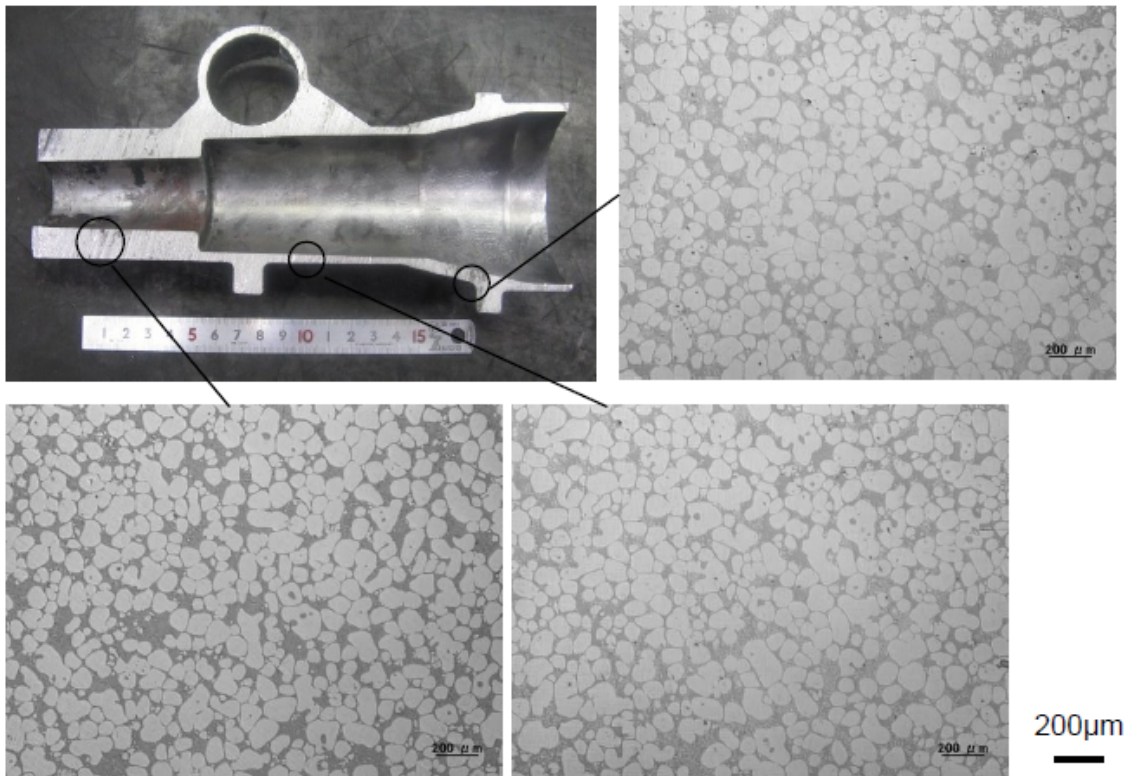


図15 試作品(ハウジング)のマイクロ組織

型締力: 300ton

成形力: 90ton(成形圧力388kgf/cm<sup>2</sup>)



型締力: 250ton

成形力: 70ton(成形圧力309kgf/cm<sup>2</sup>)



型締力: 200ton

成形力: 60ton(成形圧力258kgf/cm<sup>2</sup>)



図16 ホイールディスク外観

型締力: 250ton

成形力: 50ton(成形圧力216kgf/cm<sup>2</sup>)



型締力: 200ton

成形力: 40ton(成形圧力177kgf/cm<sup>2</sup>)



図17 ホイールディスク外観



型締力:200ton

成形力:40ton(成形圧力177kgf/cm<sup>2</sup>)

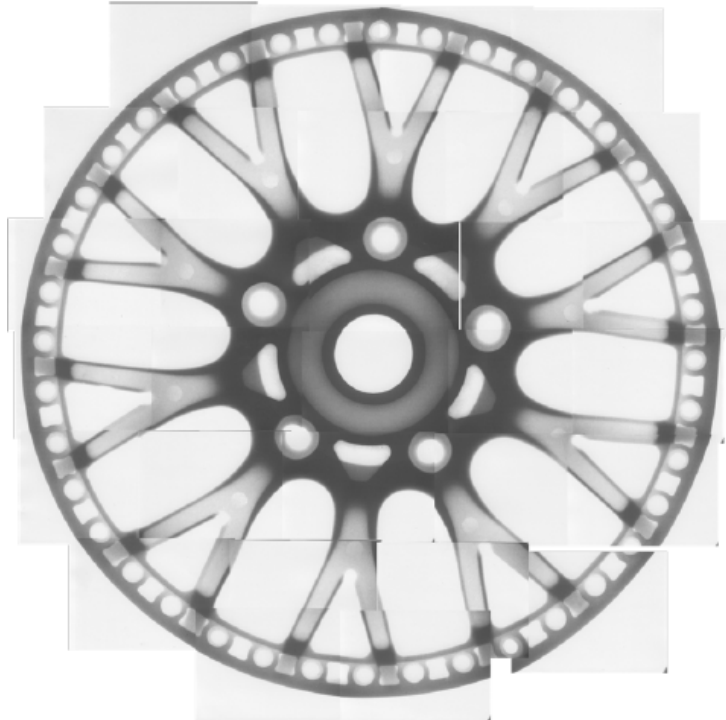
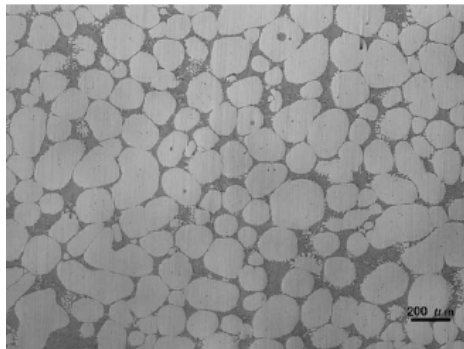
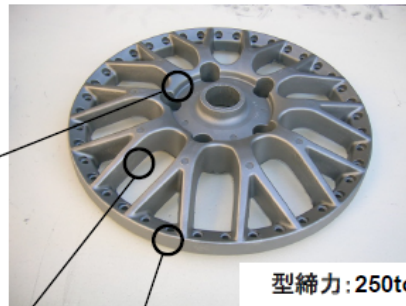
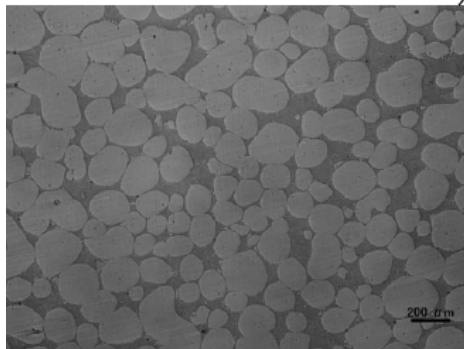


図18 18インチホイールディスクのX線写真

ゲート近傍



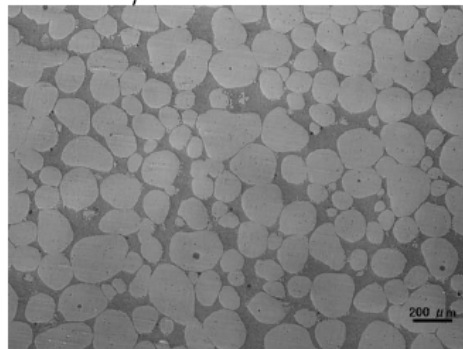
スポーク



型締力:250ton

成形力:50ton(成形圧力216kgf/cm<sup>2</sup>)

リム



200μm

図19 18インチホイールディスクのマイクロ組織

表1 試作品(18インチホイールディスク)の実体切出し引張試験結果

成形条件 (成形圧力)	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)
258kgf/cm <sup>2</sup>	280	15.5
216kgf/cm <sup>2</sup>	265	18.1
177kgf/cm <sup>2</sup>	273	13.0



図20 18インチホイールディスクの外観