

平成25年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「低温域で鋳造する金型重力鋳造の革新的生産技術開発による
高強度薄肉鋳物の実現」

研究開発成果等報告書

平成26年3月

委託者 近畿経済産業局

委託先 株式会社MORESCO

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	
1-2	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	粉体離型剤を用いた低温金型での大型・薄肉鋳物の実現可能性	6
2-1	目的及び概要	
2-2	モデル金型(A)による鋳造条件, 鋳造材(AC4C, ADC12 相当)の検討	6
2-2-1	鋳造条件および評価項目	
2-2-2	2次デンドライトアームスペーシング(AC4C)	
2-2-3	2次デンドライトアームスペーシング(ADC12 相当)	
2-2-4	鋳造欠陥解析	
2-3	モデル金型(A)による粉体離型剤, 鋳造材(AC4B)の検討	12
2-3-1	鋳造条件と評価項目	
2-3-2	2次デンドライトアームスペーシング	
2-3-3	鋳造欠陥解析	
2-3-4	引張試験	
2-4	鋳造シミュレーションを用いた湯流解析	18
2-5	粉体離型剤を用いた AC4C 固相含有溶湯の流動実験	20
2-5-1	実験方法	
2-5-2	流動長測定	
2-5-3	2次デンドライトアームスペーシング	
2-5-4	まとめ	
第3章	全体総括	24

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的および目標

自動車産業(以下二輪, 四輪を含む)では, 環境問題・安全問題の対応から車体の軽量化と「高機能化」が求められている。また, 自動車産業のグローバル化の進展に伴い, グローバル調達できる材料部材と「地球環境への配慮ニーズ」が高まっている。本研究では, 「日本独自の優位性を確保」するために, 低温域で鋳造する金型重力鋳造による高強度薄肉鋳物の生産技術を開発し, 「軽量化」と「コストダウン」に適応した多品種小ロット生産を可能とする 多極分散型生産システムを確立する。

本研究開発プロジェクトでは, 各メンバーが有する特有の技術を融合させ, 従来技術課題を解決し, 低温域で鋳造する金型重力鋳造による高強度薄肉鋳物の多品種小ロット生産を可能とする多極分散型生産システムを確立するために, 以下のような項目で研究開発を行う。

新技術を実現するための解決すべき研究課題と研究開発項目

研究課題	解決の方向性	研究開発項目
微細な SDAS (< 20 μm) は緩冷却で得ること物理的に不可能	低い金型温度で溶融アルミを金型表面で急冷	[1. 低温金型で溶融アルミを急冷による SDAS 微細化技術]
鋳造可能な寸法は 0.5m、肉厚 4mm までが技術的限界値	粉体離型剤による溶融アルミの流動性を上げる	[2. 粉体離型剤を用いた溶融アルミ凝固・湯流の制御技術]
塗型剤のノウハウ	塗型剤を粉体離型剤へ	[3. 低温金型用粉体離型剤開発]
毎ショット粉体離型剤塗布必要	粉体離型剤塗布方法研究	[4. 静電塗布適用の研究・開発]

本研究プロジェクト全体の目標は次に示す 4 項である。

研究開発項目	指標	従来	目標値
低温金型で溶融アルミを急冷による SDAS 微細化技術	SDAS	SDAS 20 ~ 40 μm	SDAS < 20 μm
粉体離型剤を用いた溶融アルミ凝固・湯流の制御技術	最大寸法, 最小肉厚	最大寸法 0.5m, 最小肉厚 4mm	最大寸法 1m, 最小肉厚 2mm
低温金型用粉体離型剤の開発	低温金型重力鋳造法に適合	塗型剤	塗膜厚制御できる
静電塗布適用の研究・開発		実例なし	塗布自動化

我々は, 本プロジェクトで, 以下の研究開発目標を達成することができた。

低温金型で溶融アルミを急冷による SDAS 微細化をおこない

角筒状鋳物および実機鋳造モデル金型(A)で目標とする SDAS < 20 μm の鋳物を得た。

粉体離型剤を用いた溶融アルミ凝固・湯流の制御をおこない

角筒状鋳物および実機鋳造モデル金型(A)で目標とする最小肉厚 2mm 以下の鋳物を得た。この際, 最大寸法 0.5m の鋳物を得るについては, 0.3m までの鋳物を得た。また, より大型寸法の鋳物については, 最終目標となる最大寸法 1m の鋳物の実現可能性を代替評価できるよう実機鋳造モデル金型(A)を改造することで, 最大寸法 1m でも湯まわり性の検討を行った。なお, 最小肉厚については 2mm の鋳物を実現することができた。

低温金型用粉体離型剤の開発のため

角筒状鋳物で塗型剤と粉体離型剤の熱伝達係数を求めた結果, 従来の塗型剤と比較して, 粉体離型剤では 1 ~ 2kW/m²K 高い熱伝達係数であることが分かった。

実機鋳造モデル金型(A)で粉体離型剤を静電塗布した際の塗膜厚を確認した結果, 付着した膜厚は 20 ~ 60 μm で均一に付着していることが分かった。

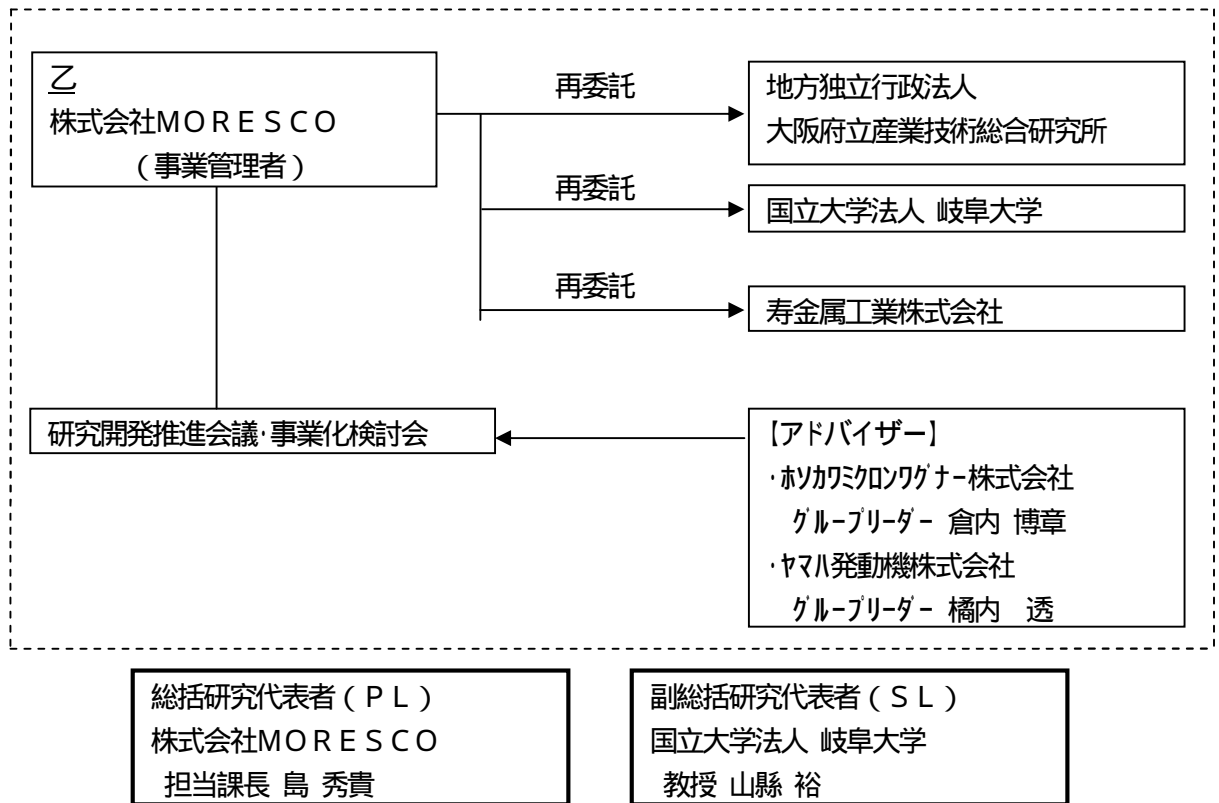
静電塗布適用の研究・開発のため

実機鋳造モデル金型(A)に対するロボットを用いた粉体離型剤の塗布においてはロボット・アームの動作を変更することが有効であることが分かった。

1 - 2 研究体制

(1) 研究組織および管理体制

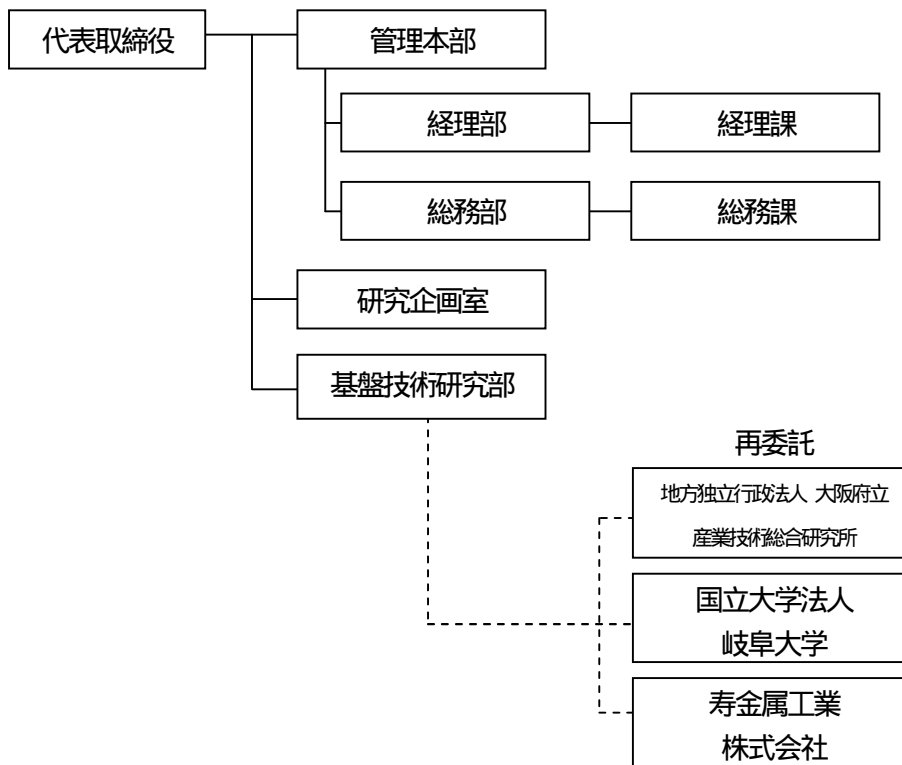
1) 研究組織(全体)



2) 管理体制

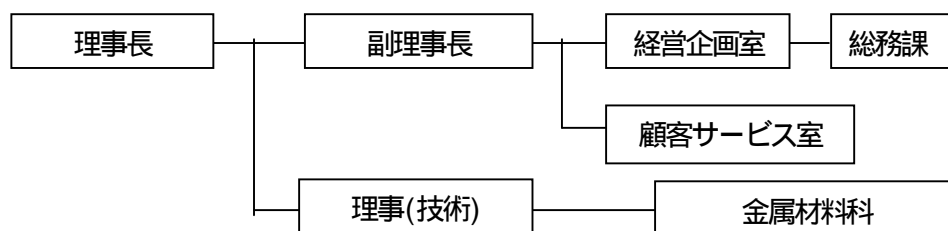
事業管理機関

[株式会社 MORESCO]

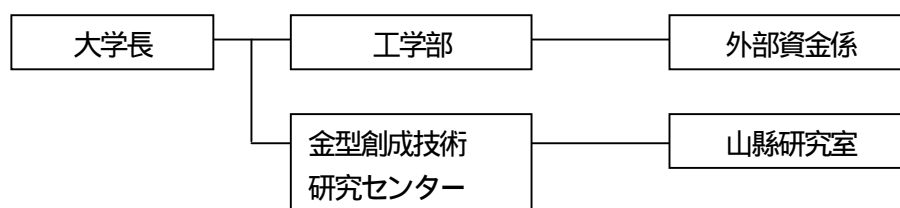


(再委託先)

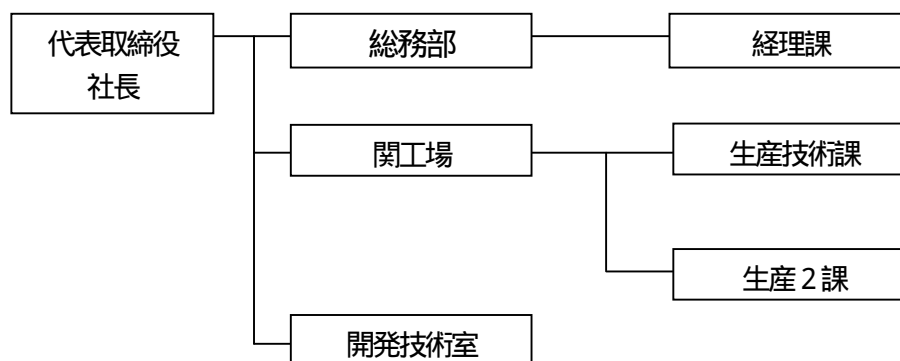
地方独立行政法人 大阪府立産業技術総合研究所



国立大学法人 岐阜大学



寿金属工業株式会社



(2) 管理員および研究員

【事業管理機関】株式会社 MORESCO

管理員

氏名	所属・役職
島 秀貴	基盤技術研究部 担当課長
榎本 博之	管理本部 経理部 経理課長
清水 和美	管理本部 経理部 課長補佐
大伊 勝利	管理本部 総務部
藤井 祥伸	研究企画室

研究員

氏名	所属・役職
島 秀貴(再)	基盤技術研究部 担当課長

【再委託先】 研究員のみ

地方独立行政法人 大阪府立産業技術総合研究所

氏名	所属・役職
松室 光昭	機械金属部 金属材料科 主任研究員
武村 守	" 主任研究員

国立大学法人 岐阜大学

氏名	所属・役職
山縣 裕	金型創成技術研究センター 教授
新川 真人	" 助教

寿金属工業株式会社

氏名	所属・役職
久保 忠継	代表取締役社長
谷川 昌司	開発技術室 室長
伊藤 和彦	" 係長
原田 雅行	" 研究員
井田 義之	関工場 生産2課 GDC係長代理

(3) 経理担当者および業務管理者の所属, 氏名

(事業管理機関)

株式会社 MORESCO

(経理担当者)	管理本部 経理部 経理課長	榎本 博之
(業務管理者)	基盤技術研究部 担当課長	島 秀貴

(再委託先)

地方独立行政法人 大阪府立産業技術総合研究所

(経理担当者)	企画総務部 総務課 総務グループ 主査	小林 仁
(業務管理者)	顧客サービス室長	森田 均

国立大学法人 岐阜大学

(経理担当者)	工学部 外部資金係	市橋 昂
(業務管理者)	金型創成技術研究センター 教授	山縣 裕

寿金属工業株式会社

(経理担当者)	総務部 経理課	尾崎 友二
(業務管理者)	開発技術室 室長	谷川 昌司

1 - 3 成果概要

1 - 3 - 1 粉体離型剤を用いた低温金型での大型・薄肉鋳物の実現可能性

ここでは、実機鋳造モデル金型(A)に改造を施した後、アルミニウム合金特性の異なる AC4C, ADC12 相当材, AC4B の 3 種類を用いて鋳造実験を行うことで、大型・薄肉鋳物の代替評価を行った。その結果、いずれの合金においても粉体離型剤を用いることで低温金型でも製品充填率を向上できることが分かり、AC4C では金型温度 235-240 (注湯温度 731) , ADC12 相当材では金型温度 230-255 (注湯温度 700) , AC4B では金型温度 190-235 (注湯温度 710) で、それぞれ完全充填することが明らかとなった。

1 - 3 - 2 粉体離型剤を用いた溶融アルミ凝固・湯流の制御技術

1 - 3 - 1 の改造を施した金型で、粉体離型剤の種類と塗布量、および、アルミニウム合金を変化させて検討を行った。それぞれ得られた製品について、組織観察, X 線 CT スキャナによる鋳造欠陥・肉厚解析を実施した結果、粉体離型剤の種類と塗布量を変化させても 2 次のデンドライトアームスペーシングへの影響はなく、目標値である 20 μm 以下となり、この際、製品薄肉部には鋳造欠陥はほとんどなく健全であった。また、アルミニウム合金に ADC12 相当材を用いた場合、鋳造組織の 2 次のデンドライトアームスペーシングは概ね 15 μm 以下となり、目標値を達成していることを確認した。次いで、アルミニウム合金に AC4B を用いた場合も ADC12 相当材と同様の鋳造組織、鋳造欠陥はほとんどなく、このような特性を反映して良好な機械的特性が得られた。

1 - 3 - 3 低温金型用粉体離型剤開発のため静電塗布を適用技術

1 - 3 - 1 の実験で用いた実機鋳造モデル金型(A)に塗膜厚確認用のテストプレートを設置し、ロボット・アームに固定させたコロナチャージ方式の塗装ガンを用い、粉体離型剤を塗布した後、テストプレートに付着した粉体離型剤の膜厚を塗布膜厚測定器で確認した結果、付着した膜厚は 20 ~ 60 μm で均一に付着していることが分かった。また、テストプレートの設置位置によって膜厚は 80 ~ 110 μm であったが、この位置では、塗装ガンによって 2 度塗りされていることが判明し、以後、実験においてはロボット・アームの動作を変更することで、他の位置同様に 1 度塗りとした。

1 - 3 - 4 新規部品について事業化検討

本研究開発で特徴となる薄肉で高強度の鋳物となる、とりわけ、最小肉厚 2mm でも高い寸法精度を活かせる新規となる部品について、主に、自動車用部品を対象に、どのような技術提案、および、事業展開ができるかについて検討し、川下企業 2 社のニーズ調査を行った。また、1 - 3 - 1 で明らかとなった適用できるアルミニウム合金の選択肢が増えたことで、川下企業のニーズへもスムーズに対応可能となると考えられ、今後の事業化を推進していく。

1 - 4 当該研究開発の連絡窓口

〒650 - 0047 兵庫県神戸市中央区港島南町5丁目5 - 3

株式会社 MORESCO 本社 基盤技術研究部 島 秀貴

Tel: 078-303-9066 Fax: 078-303-9022 E-mail: shima@moresco.co.jp

第2章 粉体離型剤を用いた低温金型での大型・薄肉鋳物の実現可能性

2-1 目的および概要

金型重力鋳造においては溶湯が急冷されるために薄肉形状で湯まわり性が悪く、湯まわり性を向上させるために金型温度を高く設定する。そのため大型かつ薄肉での高強度の鋳物は作りにくいのが現状である。よって本章では平成23年度に導入したモデル金型(A)に改造を施し、実機による金型重力鋳造を行うことで、大型かつ薄肉で低温の金型による高強度の鋳物を得ることを目的とした。

ここでは、実機鋳造モデル金型(A)に改造を施すことで、アルミニウム合金特性の異なる AC4C、ADC12 相当材、AC4B の3種類を用いて鋳造実験を行い、大型・薄肉鋳物の代替評価を行った。

まず、初期に金型重力鋳造への粉体離型剤の検討として、製品肉厚 2mm のモデル金型(A)作製に参考とした量産型で使用されているアルミニウム合金 AC4C を用いて検討している。一般にアルミニウム合金の選択には、主に設計段階での設計者の必要とする機械的特性が満足されるよう、鋳造技術者が種々検討(鋳造性・品質・コスト)した上で決定される。従って、本技術において、AC4C 以外の合金にも適用できることを明らかとすることは、鋳造サイドでの合金の選択肢を広げ、かつ、設計者への設計の自由度を与えることが可能となる。このことは、我々が今後の市場展開をスムーズに行う上でも重要となる。よって、製品肉厚 2mm のモデル金型(A)に粉体離型剤を用いて、アルミニウム合金にダイカストに一般的に用いられる ADC-12 を適用した際、得られた製品がどの程度の凝固組織(SDAS)を有する鋳物を得ることができるかを目的に、アルミニウム合金 AC4C との比較を行った。この際、製品品質となる鋳造欠陥解析も行った。

次に、同様の目的でアルミニウム合金を AC4B に変更した。この際、粉体離型剤の種類および塗布量について検討した。得られた試料について欠陥解析後、組織観察を実施し、引張試験によって機械的特性を評価した。

また、解析装置を用いて、低温金型での薄肉鋳物の湯まわり性の検討を目的として、鋳造シミュレーションを用いてモデル金型(A)の湯流解析を行った結果、粉体離型剤がどのように溶湯の流動性を向上させるのか、すなわち粉体離型剤が関与する金型 - 溶湯間の熱伝達係数を変化させたところ、金型 - 溶湯間の熱伝達係数は $8 \text{ (KW/m}^2 \cdot \text{K)}$ と推定され、鋳造実験で得られた製品の未充填部と解析での未充填部の様子が近かった。

最後に、低温金型で粉体離型剤を用いた際に、どのように溶湯が流動するかについて、流動性を評価するための実験金型を用いて流動実験を行った。

2-2 モデル金型(A)による鋳造条件、鋳造材(AC4C, ADC12 相当)の検討

2-2-1 鋳造条件および評価項目

実験には図1に示すモデル金型(A, $200 \times 300 \times$ 肉厚 2mm), および、傾斜鋳造機を用いた。鋳造材料には、まず、アルミニウム合金 AC4C を Na 改良処理し鋳造に用いた。次いで、AC4C の溶湯に Al-25%Si 母合金を添加することにより ADC12 に相当するよう調製し鋳造に用いた。表1に AC4C と ADC12 の化学組成(JIS 規格値), および、ADC12 相当材の組成分析結果を示す。調製した ADC12 は JIS 規格値から Cu 量と Si 量が異なる組成となったが、実験目的を満足するもので、ADC-12 相当材とした。

粉体離型剤はグラフェース MT-80 を用いた。図2に示すように、ロボット・アームに固定させたコロナチャージ方式の塗装ガン(Wagner 製, PEA-C4A)を用い、まずは空気のみにより金型全面を清掃し(4sec), 次いで負極性に帯電(印加電圧/電流 50KV/80 μ A) させた粉体離型剤を塗出(粉体搬送空気量 4.0m³/h, 粉体塗出割合 20%, 距離 150~200mm, 時間下型 7sec./上型 4sec.)させることで金型の製品彫りこみ、押湯、湯口・ランナー部に連続して塗布した。

750~780 で保持した溶湯を金型のバケットに一旦注湯した後、熱電対で溶湯の温度を計測し、所定温度に達した時点で鋳造機を傾斜させ鋳込んだ。金型の傾斜速度を切替える位置は 20° または 10° とした。凝固までのチルタイム(傾斜開始~型開時間)は 140 秒とした。製品は押湯および湯口・ランナーを切断した後の重量を計測後、合金の比重で製品体積に換算し、CAD モデルの製品体積に対する比率を製品充填率として算出し、湯まわり性を比較した。

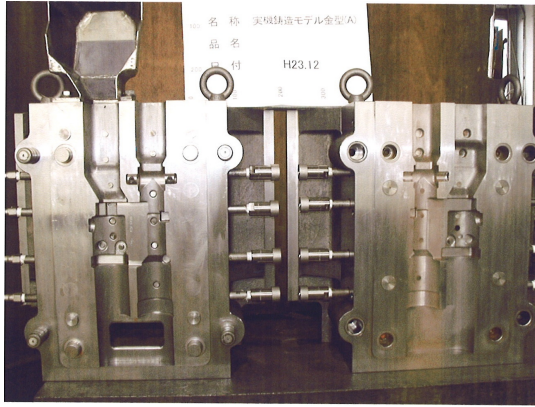


図1 モデル金型(A) (左) (200×300×肉厚 2mm), 傾斜鋳造機にセットした様子(右)



図2 ロボットアームに固定させたコロナチャージ方式の塗装ガンで金型に粉体離型剤を塗布する様子

表1 AC4CとADC12の化学組成, および, ADC12相当材の組成分析結果(mass%)

	Cu	Si	Mg	Zn	Fe	Al
AC4C ^{*1}	<0.25	6.5-7.5	0.20-0.45	<0.35	<0.55	残部
ADC12 ^{*1}	1.5-3.5	9.6-12.0	<0.3	<1.0	<1.3	残部
ADC12相当材 ^{*2}	0.01	9.44	0.15	0.01	0.09	残部

^{*1} JIS規格値, ^{*2} 分析値

表2に鋳造実験で得られた試料の各種条件, 充填率, および評価項目を示す. なお, AC4Cについては, 今回新材質(人口砂+フェノール系バインダー)のシェル中子(以後, 新シェルと略す)を用いたので, その内部欠陥への影響を調査する目的で試料 No.10 を用いて X 線 CT 撮影を実施した. さらに, 凝固組織への影響を調査する目的で試料 No.14 を用いて組織観察を実施した. ADC12 相当材については, 溶湯温度を3水準変化させた試料 No.23, 24, 28 を用い, X 線 CT 撮影後組織観察を実施した.

表2 実験条件, 充填率, 評価項目

	試料 番号	切り替え	シェル	注湯温度	開始時 型温 (°C)		終了時 型温 (°C)	
					(上型)	(下型)	(上型)	(下型)
AC4C	1	20°	旧	-				
	2	20°	旧	721	158	171	168	182
	3	20°	旧	729	170	184	178	194
	4	20°	旧	-	177	193	191	207
	5	20°	旧	728	185	201	191	205
	6	20°	旧	731	190	205	200	216
	7	20°	新	720	197	210	205	219
	8	20°	新	720	201	213	-	-
	9	10°	新	724	206	217	-	-
	10	10°	新	717	212	222	222	232
	11	10°	新	724	217	226	-	-
	12	20°	新	726	220	228	227	238
	13	20°	新	733	224	232	230	241
	14	10°	新	730	228	235	235	244
	15	10°	旧	732	230	236	241	246
	16	10°	新	731	235	240	243	249
	17	10°	旧	732	236	240	246	251
	18	10°	新	731	220	224	230	234
	19	10°	温度測定	712	215	218	225	230
	20	10°	温度測定	731	216	218	226	231
	21	10°	温度測定	725	218	220	227	233
ADC12 相当	22	10°	新	716	241	219	252	225
	23	10°	旧	716	251	226	261	233
	24	10°	旧	700	254	231	264	237
	25	10°	新	701	255	234	264	239
	26	10°	新	681	255	236	262	241
	27	10°	温度測定	715	253	236	263	241
	28	10°	新	661	249	235	256	238

2 - 2 - 2 2次デンドライトアームスペーシング(AC4C)

鑄造材に AC4C を用いて鑄造した製品の凝固組織の定量化を目的に試料の肉厚 2mm 部の金型側, 中央, 中子側の 2 次デンドライトアームスペーシング (SDAS) を測定した. 各試料, 部位の組織写真からデンドライト状の部分ランダムに 3 ヶ所を選び, その長さから SDAS を算出した. 図 3 に SDAS の測定結果 (図中 No.14/第 3 回実験) を, これまでの AC4C を用いた実験時のデータも含めて示す. 部位 C については, 15 μm 前後であり, これまでよりも冷却速度が小さい条件であったことが分かる. 部位 C' についても, 15 μm 弱であり, これまでと同等か, やや冷却速度が小さい条件となっている. 今回の鑄造条件は, 金型傾動加速度切り替え位置を早くするなど冷却速度が遅くなる種々の対策を施しており, SDAS 測定結果はこれとは矛盾しない結果である.

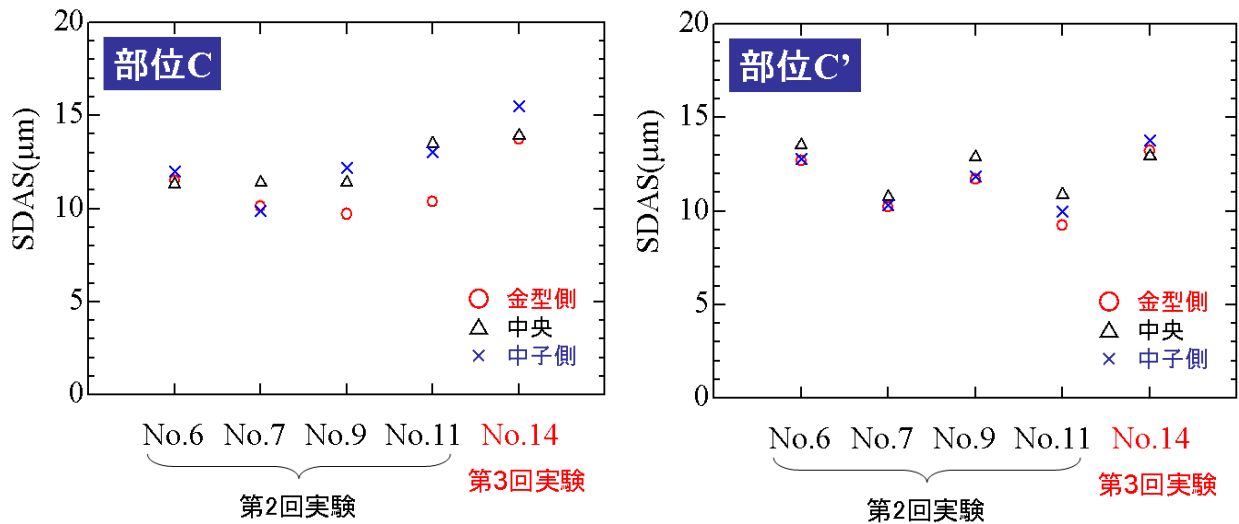


図 3 2次デンドライトアームスペーシング(AC4C, 左図: 上型側, 右図, 下型側)

2 - 2 - 3 2次デンドライトアームスペーシング(ADC12 相当)

鑄造材に ADC12 相当材を用いて鑄造した試料 No.23, 24, 28 の肉厚 2mm 部の金型側の 2 次デンドライトアームスペーシング (SDAS) を測定した結果を図 4 に示す. なお, SDAS の算出は 2 - 2 - 2 と同様に行った. 図には平均値 (白丸) 以外に, 最小値, 最大値, 平均値をエラーバーとして示している. 溶湯温度が低いほど SDAS は小さくなる傾向が僅かに認められるが, いずれも 10 数 μm ほどの値で大差はない. 一般的に溶湯温度は金型充填率へは寄与すると考えられるが, SDAS を決定する凝固温度域での冷却速度に及ぼす影響は僅かであるということが示唆される結果である.

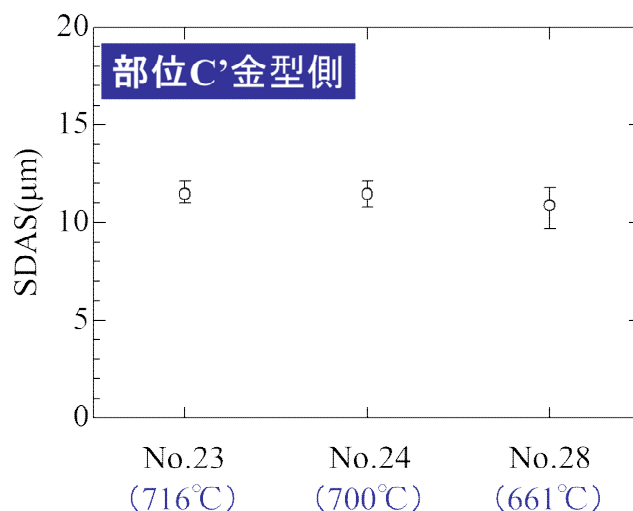


図 4 2次デンドライトアームスペーシング(ADC12 相当)
(図中カッコ内は注湯温度)

2 - 2 - 4 鑄造欠陥解析

図5に示すX線CTスキャナ(東芝ITコントロールシステム株式会社:TOSCANER-32300 μ FPD)を用いた.表3に本装置の主な仕様を示す.試料は図6に示すように3分割してそれぞれを撮影し,それらを3次元画像解析ソフト(日本ビジュアルサイエンス株式会社:VGStudio MAX2.1)に取り込み欠陥解析を行った.X線の管電圧は225 kV,管電流は240 μ Aとした.また,空間分解能は100 μ m程度であった.欠陥検出条件は8 voxel(0.009 mm³) ~ 100 mm³とした.



図5 X線CTスキャナ

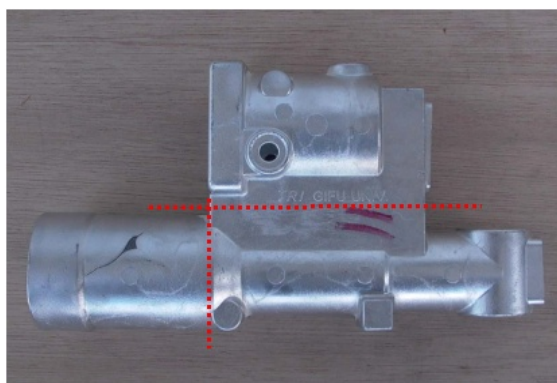


図6 試料の切断位置

表3 X線CTスキャナの主な仕様

X線発生装置	管電圧	最大230kV
	管電流	最大1mA
	出力	最大140W
	焦点寸法	4 μ m
X線検出器	形式	フラットパネルデテクタ
	有効エリア	200 \times 200mm
	画素ピッチ	0.2 \times 0.2mm
試料テーブル (微調機能付)	搭載可能寸法	最大 170 \times h250mm
	搭載可能重量	最大10kg

試料 No.10(表2/AC4C)および試料 No.23, 24, 28(表2/いずれも ADC12 相当)について X 線 CT スキャナを用いて鑄造欠陥解析を行った.図7に試料 No.10 の欠陥解析結果を示す.これまで AC4C を用いた実験時での結果と同様に,欠陥は厚肉部の中央の溶湯補給が行われにくい部分に多く,薄肉部には大きな欠陥は認められない.最大欠陥サイズは 34 mm³であった.図8,図9,図10に試料 No.23, 24, 28 の欠陥解析結果を示す.欠陥発生部位はこれまでの結果と同様であり,また最大欠陥サイズは,それぞれ 22 mm³, 39 mm³, 11 mm³であった.つまり,溶湯温度を変化させても,また材料を ADC12 に変えても欠陥位置やサイズなどに大きな差異は認められなかった.

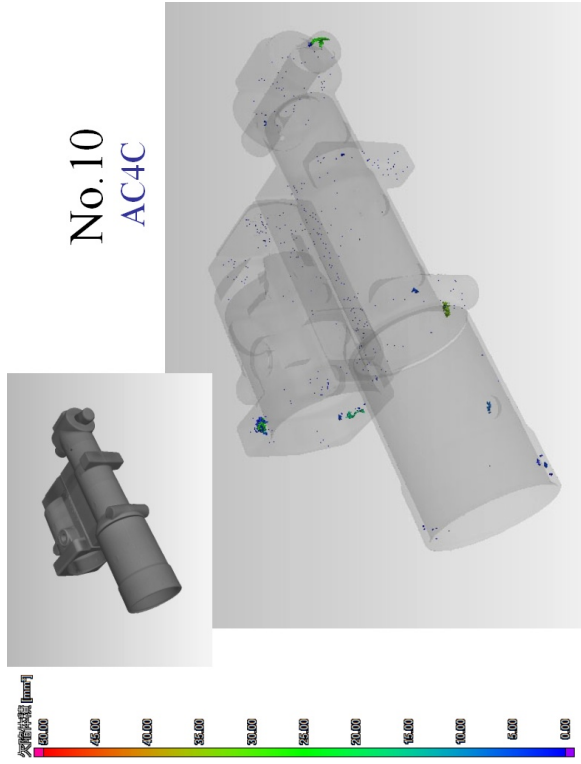


図7 欠陥解析結果(試料No.10)



図8 欠陥解析結果(試料No.23)



図9 欠陥解析結果(試料No.24)



図10 欠陥解析結果(試料No.28)

2 - 3 モデル金型(A)による粉体離型剤, 鑄造材(AC4B)の検討

2 - 3 - 1 鑄造条件と評価項目

2 - 2 - 1 で示した鑄造条件から, 鑄造材料をアルミニウム合金 AC4B に変更し, Na 改良処理し鑄造した. この際, 金型の傾斜速度を切替える位置は製品充填率が良好であった 10° とした. 表 4 に鑄造実験で得られた試料の各種条件および評価項目を示す. 前半の試料 No.10 から No.35 までは粉体離型剤の種類および塗布量の変更実験である. 粉体離型剤の種類はグラフェース MT-80(表中, 無機と記す), および, アストロルブ NDP-1(表中, 無機 + 有機と記す)を用いた. 後半の試料 No.51 から No.58 はシェル中子サイズの変更実験であり, 製品にある 2つの円筒部分の間隔がシェル はシェル よりも 0.2 mm 広く, さらに, シェル はシェル よりも 0.2 mm 広くなるように設計されている.

評価項目については, 各粉体離型剤条件から試料 No.12, 17, 20, 33 を選定し, X 線 CT スキャナによる欠陥解析後, 組織観察を実施した. 引張試験には試料 No.10 を用いた. 肉厚解析は試料 No.51, No.52, No.58 で実施した. なお, 表にはないが試料 No.13 は組織観察のみ実施した.

表 4 実験条件と評価項目(AC4B)

試料	離型剤	ロボット速度 (動画で確認)	注湯温度	上型	下型
10	無機(従来)	従来	700	216	229
11	無機(従来)		710	219	233
12	無機(従来)		710	225	238
13	なし		710	223	233
14	なし		710	224	236
15	なし		710	228	238
16	無+有(従来)	従来	711	219	225
17	無+有(従来)		710	221	227
18	無+有(従来)		710	224	230
19	無+有(1/2)	高速	710	199	204
20	無+有(1/2)		710	204	210
21	無+有(1/2)		710	209	216
33	無機(1/2)	高速	710	236	222
34	無機(1/2)		710	240	229
35	無機(1/2)		710	240	234

試料	シェル	注湯温度	上型	下型
51	①	従来	232	220
52	②		231	223
53	③		232	227
54	①		233	227
55	②		230	225
56	③		197	192
57	②		200	198
58	③		205	205

2 - 3 - 3 2次デンドライトアームスペーシング

2次デンドライトアームスペーシング(SDAS)の算出は2 - 2 - 2と同様に行った. 図 11 に各試料 SDAS の平均値に加えて, 最小値および最大値についても記した. 比較的ばらつきが大きい試料もあるが, 概ね $10 \sim 15 \mu\text{m}$ の範囲である. ただし, 粉体離型剤を塗布していない試料 No.13 の SDAS はおよそ $9 \mu\text{m}$ であった. いずれの部位についても目標値である $20 \mu\text{m}$ 以下を達成していることが明らかとなった.

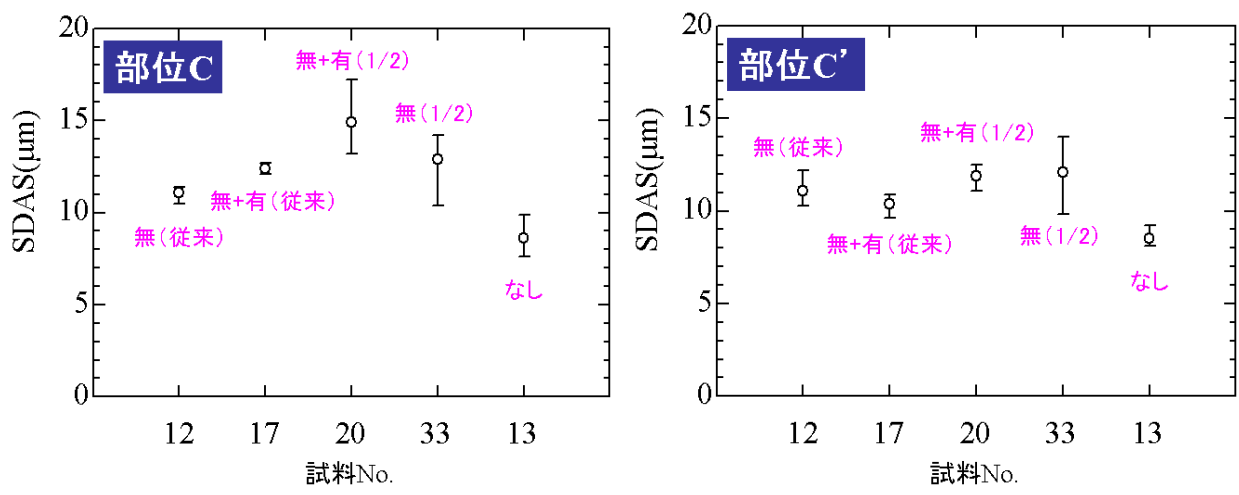


図11 2次デンドライトアームスペーシング(上図:部位C, 下図:部位C')

2 - 3 - 3 鑄造欠陥解析

鑄造欠陥解析の方法は2 - 2 - 4と同様に行った。図 12 に試料 No.12 の欠陥解析結果を示す。欠陥サイズは0~50 mm³の範囲で色分けして表示している。湯口側の上型側に比較的大きな欠陥(44 mm³)が認められるが、他の部位には大きな欠陥は認められず、欠陥数も比較的少ない。図 13, 図 14 にそれぞれ試料 No.17, No.20 の欠陥解析結果を示す。大きな欠陥は認められず、欠陥数も少ない。最大欠陥サイズは、それぞれ3 mm³, 5 mm³である。図 15 に試料 No.33 の欠陥解析を示す。押湯側の上型側に比較的大きな欠陥(62 mm³)が認められ、他の部位にも比較的多くの欠陥が認められた。以上の4試料の欠陥解析結果をまとめて図 16 に示す。厚肉部においては、“無機”を塗布した試料で比較的大きな欠陥が認められたが、部位、サイズを考慮すると製品特性に悪影響を及ぼすものではない。薄肉部においては鑄造欠陥に大差は認められなかった。以上より、粉体離型剤の種類と塗布量を変化させても、鑄造欠陥発生状況へ及ぼす顕著な影響は認められないことが明らかとなった。

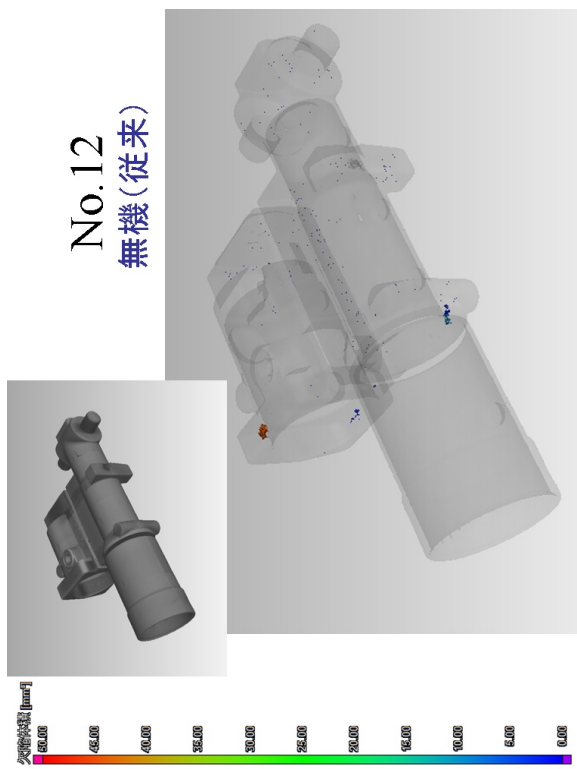


图 12 欠陥解析結果(試料No.12)



图 13 欠陥解析結果(試料No.17)

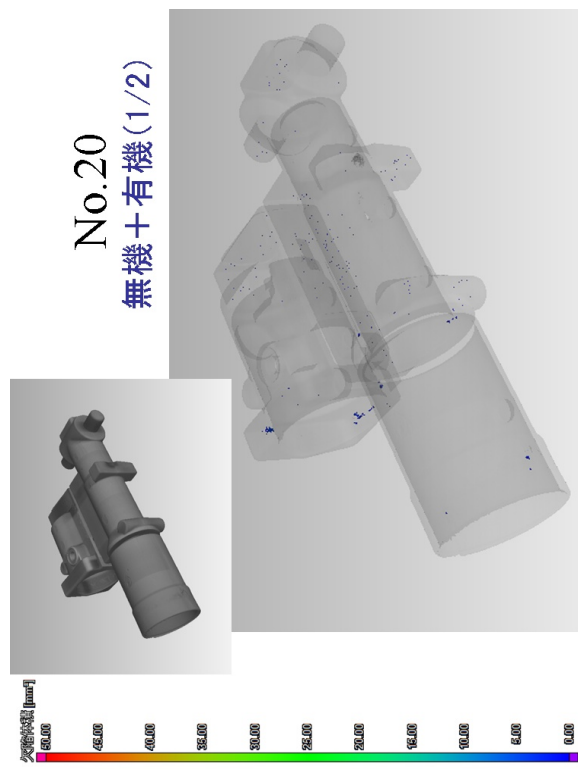


图 14 欠陥解析結果(試料No.20)

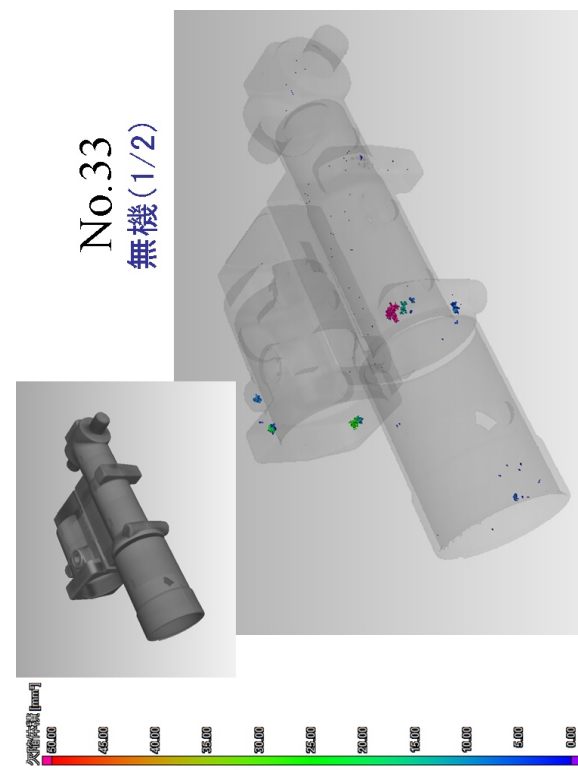


图 15 欠陥解析結果(試料No.33)

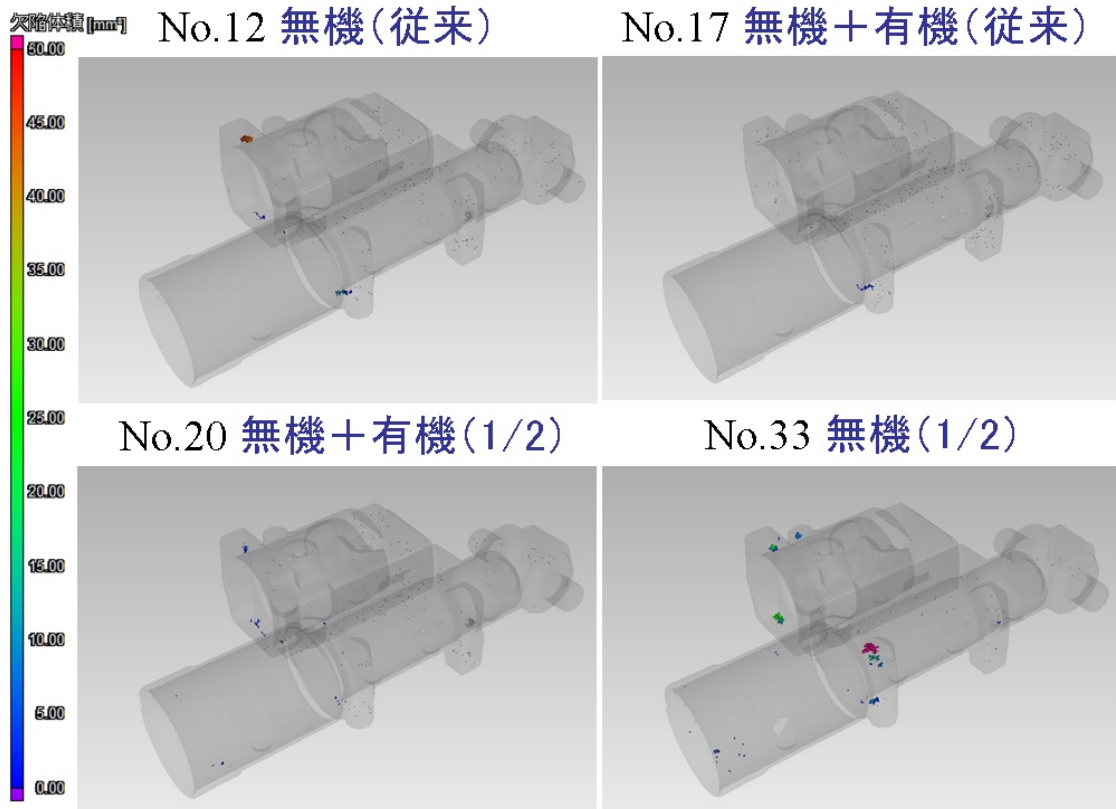


図16 欠陥解析結果の比較

2 - 3 - 4 引張試験

試料の採取部位を図 17 に示す。ワイヤ放電加工機(ブラザー:HS300)を用いて図の横方向に短冊状の試料を切り出し、さらに図 18 に示す形状に切り出した。図に示すように下型側を as cast 材、上型側を T6 熱処理材とした。試料の放電加工面はサンドペーパーにて研磨し、放電加工影響部を除去した。ただし、その他の表面は鋳造のままとした。熱処理条件は 500℃、8 時間の溶体化処理後水冷し、一晚室温で放置後、160℃、7 時間の時効処理を施した。引張試験はインストロン型試験機にて、引張速度 3 mm/min、室温にて実施した。なお、試験片はわずかに曲率を持っていたが、平板用の治具にてチャッキングした。0.2%耐力は伸び計を用いて計測し、破断伸びは試験後の試料を突き合わせてノギスで標点間距離を計測することにより算出した。

図 19 に得られた応力 - 歪み曲線を示す。as cast 材は 3 本試験したが、比較的ばらつきの少ない曲線を描いている。一方、T6 材は早期に破断した 2 本を除けば、熱処理の効果により高い引張強度を示す。表 5 に引張試験結果の一覧を示す。早期破断した 2 本は除いた。引張強度は平均値で as cast 材が 218 MPa、T6 材が 363 MPa である。AC4B 金型鋳材の JIS 規格値はそれぞれ 170 MPa、240 MPa であることと、製品から切り出した試験片であることを考え合わせると非常に良好な結果である。これは組織の微細化が達成された結果であると考えられる。0.2%耐力については、T6 材は as cast 材の 3 倍近い値となっている。なお、伸びについては JIS 規格では規定されていない。

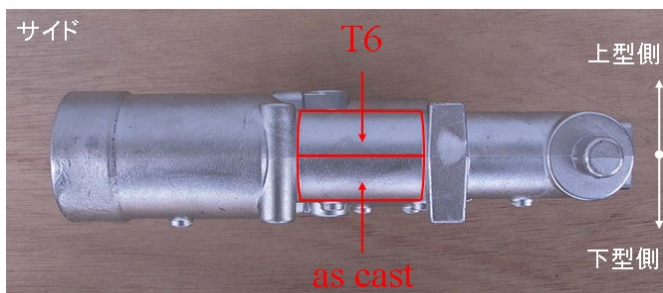


図 17 引張試験片採取部位(試料 No.10 の側面)

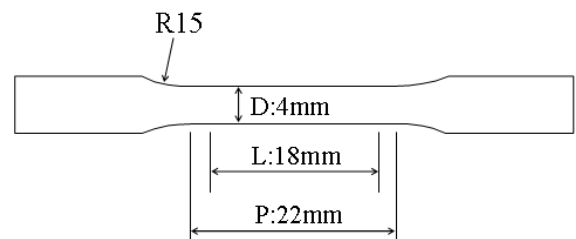


図 18 引張試験片形状

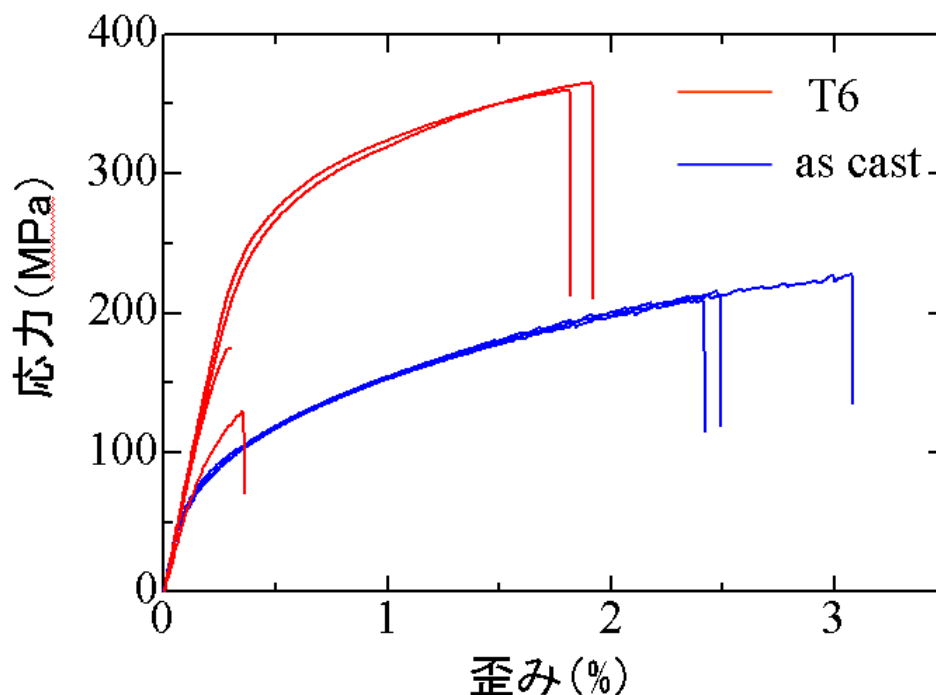


図 19 応力 - 歪み曲線

表5 引張試験結果一覧

試料	引張強さ (MPa)	0.2%耐力 (MPa)	伸び (%)
as cast-1	216	103	2.3
as cast-2	210	101	3.4
as cast-3	228	102	3.4
T6-1	360	285	1.3
T6-2	365	280	1.8

図 20 に早期破断した2つの試料の破断面写真を示す。黒色部は鑄造欠陥があった部分であると思われる。実際、SEMにより黒色部を観察するとデンドライト状の鑄造組織が観察された(図 21)。X線CTスキャナによる鑄造欠陥解析では薄肉部には大きな欠陥は認められなかったが、X線CTスキャナでは検出できない酸化膜が試料内部に巻き込まれていた可能性が考えられる。

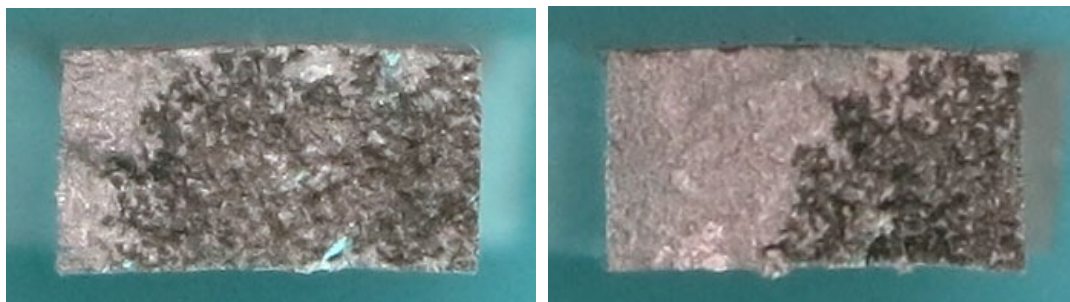


図 20 引張試験片破断面

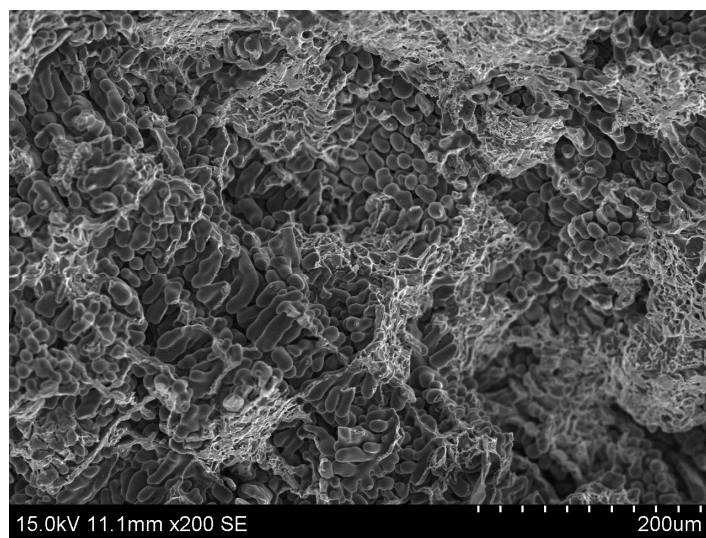


図 21 引張試験片破断面のSEM像(図 20の黒色部)

2 - 4 鋳造シミュレーションを用いた湯流解析

コンピュータシミュレーションによる湯流解析を行う際に、溶湯 - 金型間の熱伝達係数は極めて重要な因子である。ここでは、コンピュータシミュレーションによる湯流解析を実施するとともに実鋳造品と比較することによって熱伝達係数を推定した。シミュレーションの方法は解析ソルバーに JS-CAST を用い、モデル金型(A)の実験で行っている傾斜鋳造(傾斜速度切替位置 20° で低速:5.5(deg/s)から高速:12.4(deg/s)に変速)の湯流シミュレーションを実施した。溶湯(AC4C)の密度、比熱、熱伝導率は温度依存性を考慮し、JMatPro による計算結果を用いた。動粘性係数は、 $0.006(\text{cm}^2/\text{s})$ とした。表6に解析条件を示す。なお、シミュレーションに用いる金型データには、実測データではなく設計データを用いた。この際、3次元金型寸法変換装置にて STL データを作成した。図22に導入した3次元金型寸法変換装置の外観とファイル修正状況を示す。市販の3D-CADソフトウェアにて作成された STL 等の中間ファイルは、使用する解析ソフトにインポートする際に不具合が生じる場合がある。今回の場合は、ほとんどが問題なくインポートできたが、一部メッシュが細かい部分で不具合が生じる場合があった。その場合に、本装置にて修正をして STL ファイルを作成し、解析ソフトにインポートして解析を行った。図23に解析ソフトにインポートした金型 STL ファイルにより構成された解析モデルを示す。

表6 解析条件

解析条件		
	材質	初期温度 (°C)
溶湯	AC4C	730
金型	SKD61	230
シェル芯	Shell Core	20
カップ	S45C	20
空気	air	20

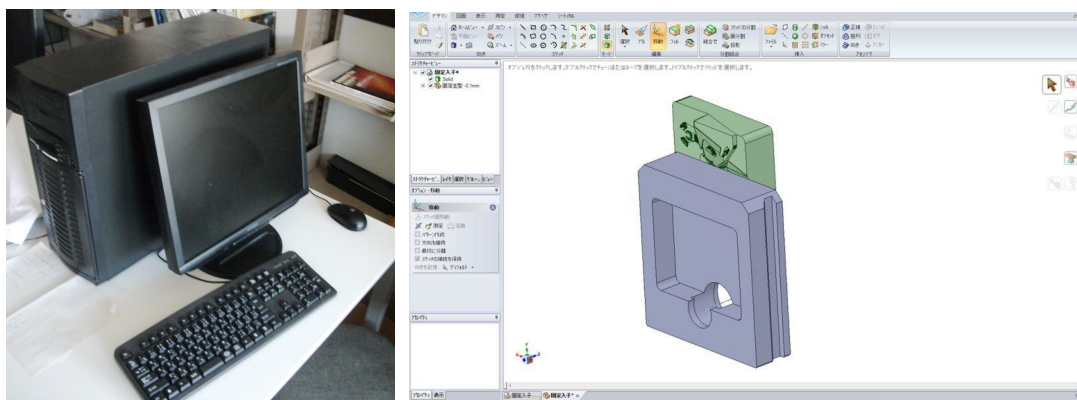


図22 金型寸法変換装置外観(左)と作業風景(右)

湯流シミュレーションを行った結果, 図 24 に熱伝達係数を 4, 8, 12kW/m²K と変化させたときの湯流解析結果(傾斜角 90°)を示す. 熱伝達係数の違いにより充填状況に違いがみられる.

図 25 に鋳造品と湯流れ解析結果(8kW/m²K)の比較を示す. 鋳造品の未充填部と解析による未充填部とが比較的一致している. これより, 熱伝達係数は 8kW/m²K とした. ただし, この値は粉体離型剤のみの値ではなく, シェルから発生するガスの影響も含んでいると考えられる.

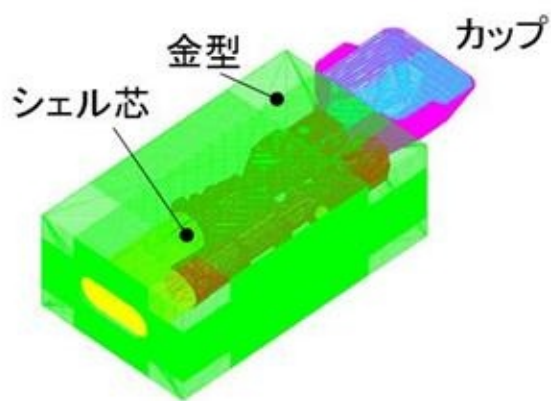


図 23 解析モデル(総要素数:14,350,952)

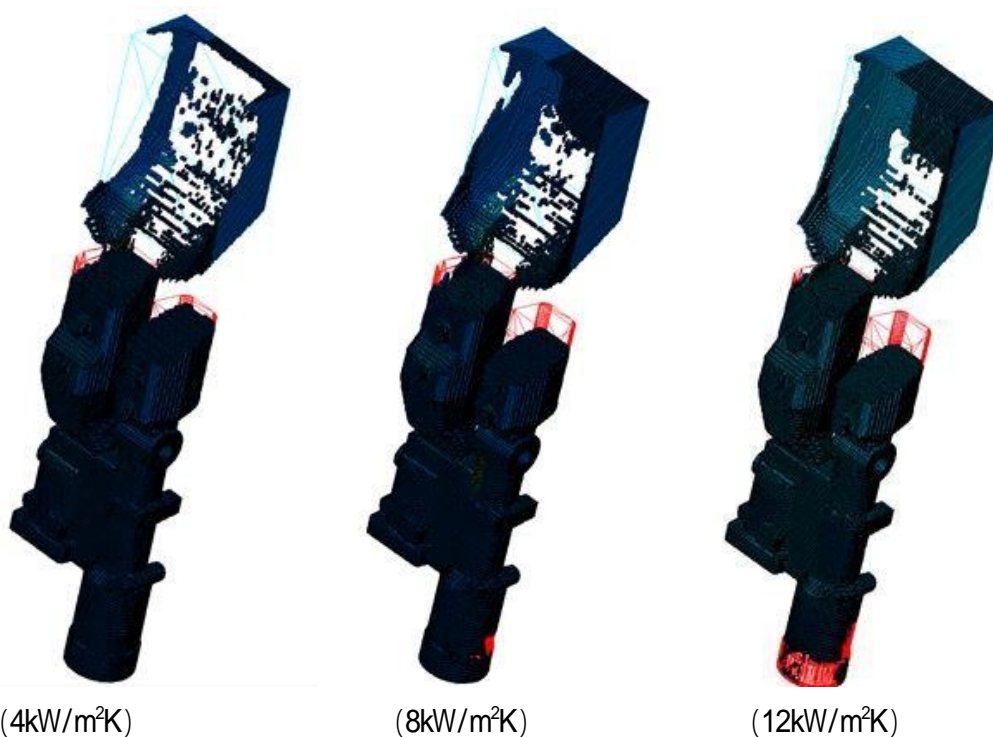


図 24 湯流解析結果



図 25 実鋳造品と解析結果の比較

2 - 5 粉体離型剤を用いた AC4C 固相含有溶湯の流動実験

粉体離型剤を使用した際の溶湯の流動性を評価するため、実験金型を用いて AC4C 固相含有溶湯の流動実験を行った。実験では、金型に粉体離型剤を塗布し、金型に直接溶湯を観察できる隙間を開けることで、金型重力鑄造に粉体離型剤を用いた場合の流動性および金属組織の評価を行った。

2 - 5 - 1 実験方法

単純な平板形状における金型温度と溶湯温度、粉体離型剤の流動性と凝固組織への影響を調べるために金型重力鑄造を行った。金型温度は電気炉を用いて昇温、空冷で冷却して調整した。注湯は、手酌注ぎによる誤差を無くすためストッパーを用いる方法にした。また、溶湯を直接観察するため金型中央に隙間を設け、その真上からデジタルカメラによって観察を行った。図 26 は実際に金型重力鑄造実験を行う直前の様子の写真である。表 7 に実験条件を示す。

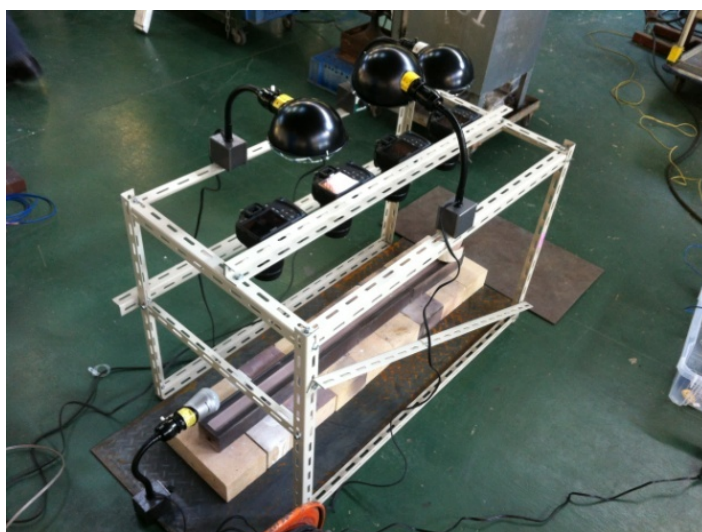


図 26 流動性評価用実験金型外観

表 7 実験条件

	材質	目標温度()
溶湯	AC4C	650
金型	SS400	200
ストッパー・坩堝	黒鉛	150
粉体離型剤	MT80グラフェース	

2 - 5 - 2 流動長測定

表8に流動長と粉体離型剤膜厚の実験結果を示す。結果を見ると、全体的にばらつきが大きく、金型温度が近い値でも流動長の差が約 300mm あった。なお、実験条件の管理や方法に大きな違いはなかった。(株)MORESCOにて実施した実験結果(H25年8/7-9)を整理した。溶湯温度 650 における流動長と金型温度の関係を図27、流動長と粉体離型剤膜厚の関係を図28に示す。これらを見ると、金型温度、粉体離型剤膜厚が増加するにつれて流動長は増加していることがわかる。

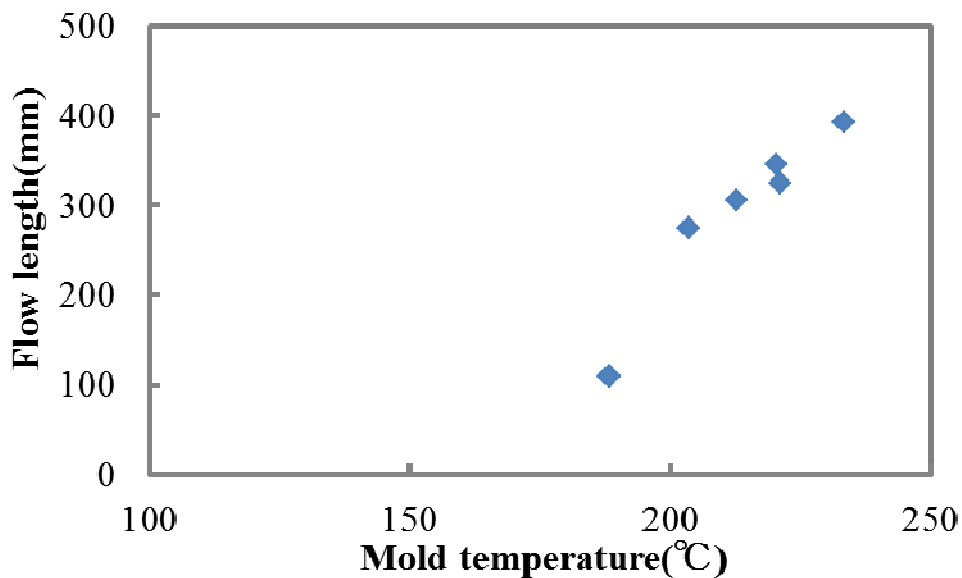


図27 金型温度と流動長の関係(溶湯温度 650)

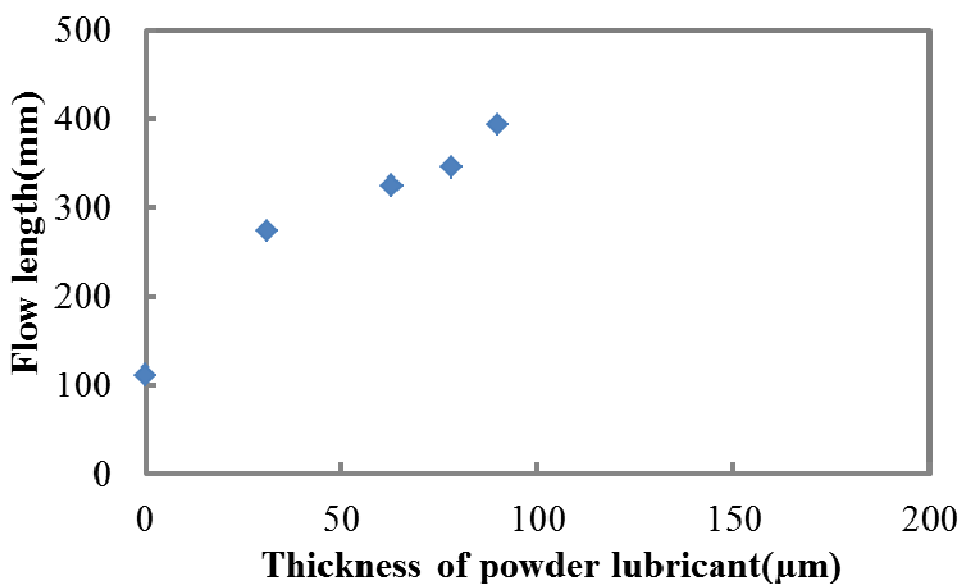


図28 粉体離型剤膜厚と流動長の関係(溶湯温度 650)

表 8 流動長測定結果

		Aug.8							
Date		1	2	3	4	5	6	7	8
No.		610	642	620	646	654	654	650	650
Melt temperature()									
Mold temperature()		205.2	188.3	207.1	220.2	212.7	221.0	203.5	200.7
Temperature of graphite stopper()			82.9	133.5		82.6	72.0	68.5	106.5
Temperature of test piece()				197.8	206.1	202.1	213.5	198.2	187.3
Thickness of powder lubricant(μm)		0	0	82	78		63	31	23
Flow length(mm)		90	110	300	345	305	324	274	148

		Dec.4~6											
Date		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
No.		662	710		635	617	604	646	647	647	646	652	649
Melt temperature()													
Mold temperature()		209.6	214.5	180.6	137.5	216.1	191.3	233.4	132.5	213.2	160.0	203.1	194.1
Temperature of graphite stopper()			227	160	140	244.7	180.5	213.5	150.5	158.8	190	152.8	123.5
Temperature of test piece()				167.8	113.5	183	175.2	180.2	129.4	155.9	138	138	78.8
Thickness of powder lubricant(μm)		35	95	120	45	35	35	90	150	58.3	40.3	60	30
Flow length(mm)		418	420	417	417	129	110	392	179	355	389	151	418

2-5-3 2次デンドライトアームスペーシング

金属組織写真から組織の粗密度を値として示すために2次デンドライトアームスペーシング(SDAS)を測定した。測定点が少ないものは、流動長が短く中間150mmと先端がほぼ同じ点になってしまったため、中間150mmで試験片を採取せずに先端とゲートのSDASを測定したためである。実験時、鋳物と坩堝内に残った溶湯が繋がった状態で凝固してしまい、再溶解したものについては測定できなかった。溶湯温度650、金型温度200付近の条件だけまとめた結果を図29に示す。実線は8月8日の実験結果、破線は12月4~6日の実験結果を表している。図のカッコ内は粉体離型剤膜厚を示している。SDASはおよそ15~25 μm であり、最小で8 μm 、最大で30 μm であった。SDASはゲート付近から中間に行くにしたがって大きくなり、中間から先端に行くにしたがって小さくなる傾向が多く見られた。違った傾向を示しているサンプルについて実験条件、実験結果を見たが特筆すべき事項は見られなかった。粉体離型剤膜厚がSDASの大きさに影響しているような傾向も見られなかった。

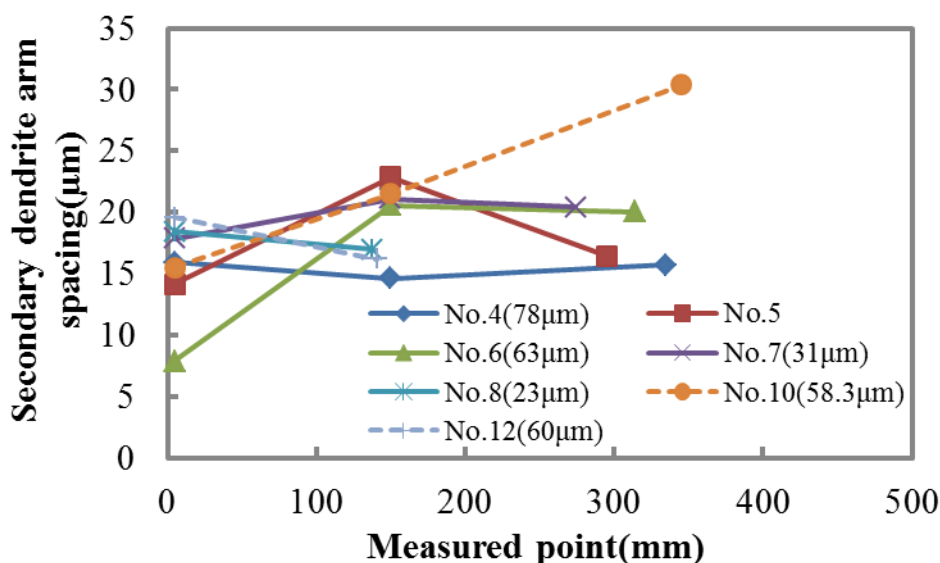


図29 2次デンドライトアームスペーシング(溶湯温度650 /金型温度200)

2-5-4 まとめ

金型重力鋳造に粉体離型剤を用いた場合に流動性や金属組織における溶湯温度、金型温度、粉体離型剤の影響を調べるために、鋳造実験を行った。それぞれの条件における、流動長、流動速度、2次デンドライトアームスペーシングを測定し以下のことが明らかになった。

- (1) 溶湯温度650、金型温度200で400mm以上の流動長を得ることができた。
- (2) 粉体離型剤膜厚が増加、溶湯温度、金型温度が上がることで流動長が長くなる。
- (3) いずれの条件においても、2次デンドライトアームスペーシングが約20 μm の金属組織を得ることができた。

第3章 全体総括

金型重力鋳造法は重力を利用した鋳造法の一つで、簡易的な鋳造機を用いて中堅中小企業を中心に製造されている。簡易な金型を使用することで小ロット生産に適しているが、金型の溶湯温度の低下を防ぐために断熱性のセラミックス系塗型剤を金型表面に厚く塗りつけることが必要で製品寸法 0.5m、肉厚 4mm までが限界とされ、大型薄肉鋳造品には適さず鋳造組織も粗大となり高強度な製品を得にくい。

本研究開発では、軽合金製自動車部品に最も多く用いられているアルミ合金部品の生産性向上および多極分散型生産システムに適した鋳造方法を確立するために、金型重力鋳造において、金型を低温領域とし粉体離型剤を用いることでアルミニウム合金の高強度薄肉鋳物の生産技術の革新をはかることを目的としている。

本研究開発における研究項目として、次の事項を実施し、下記の目標を達成できた。

- 1 モデル金型(A)による鋳造条件、鋳造材(AC4C, ADC12 相当)の検討
- 2 モデル金型(A)による粉体離型剤、鋳造材(AC4B)の検討
- 3 鋳造シミュレーションを用いた湯流解析
- 4 粉体離型剤を用いた AC4C 固相含有溶湯の流動実験

特に、改造を施した実機鋳造モデル金型(A)において、アルミニウム合金特性の異なる AC4C, ADC12 相当材, AC4B の 3 種類を用いて鋳造実験を行うことで、大型・薄肉鋳物の代替評価を行った結果、いずれの合金においても粉体離型剤を用いることで低温金型でも製品充填率を向上できることが明らかとなった。

また、粉体離型剤の種類と塗布量、および、アルミニウム合金を変化させて検討を行い、それぞれ得られた製品について、組織観察、鋳造欠陥を実施した結果、粉体離型剤の種類と塗布量を変化させても 2 次のデンドライトアームスペーシングへの影響はなく、目標値である 20 μ m 以下となり、この際、製品薄肉部には鋳造欠陥はほとんどなく健全であった。

これまで最小肉厚が薄くなるに従って、金型の寸法、シェル中子の寸法精度、および、金型とシェル中子との合わせ精度が大型の製品寸法、かつ、最小肉厚 2mm の実現には必要不可欠な開発要素であった。本課題について各メンバーが有する特有の技術を融合させることで、低温域で鋳造する金型重力鋳造による高強度薄肉鋳物の多品種小ロット生産を可能とする多極分散型生産システムの確立に勢力的に取り組んできた。

今後、本研究開発で取り組んだ薄肉で高強度の鋳物となる、とりわけ、最小肉厚 2mm でも高い寸法精度を活かせる新規となる部品を川下企業に向けて、技術提案、および、事業展開を推進していく。