

平成29年度採択
戦略的基盤技術高度化・連携支援事業
戦略的基盤技術高度化支援事業

「大型薄肉ダイカスト金型向けナノカーボン表面処理技術の開発」

研究開発成果等報告書

令和2年3月
(事業実施期間 平成29年度～令和元年度)

担当局	中部経済産業局
補助事業者	公益財団法人科学技術交流財団
法認定中小企業者	株式会社メックインターナショナル

目次

第1章 研究開発の概要	2
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	2
1-2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）	7
1-3 成果概要	8
1-4 当該研究開発の連絡窓口	10
第2章 本論	11
2-1 従来ナノカーボン表面処理の説明	11
2-2 平成29年度実施内容詳細	12
2-3 平成30年度実施内容詳細	17
2-4 令和元年度実施内容詳細	30
第3章 全体総括	61
3-1 研究成果の総括	61
3-2 今後の事業化に向けた取り組み	61
参考文献	62

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) 研究開発の背景

近年、ダイカスト製品は、自動車部品以外にも産業機器やOA機器等に広く使われている。また、自動車用のアルミボディ化に代表されるように、ダイカスト製品の大型化・薄肉化・高意匠化が求められている。今後更なる軽量化のニーズが高まるのは必然であり、ダイカスト製品の薄肉化・複雑形状化と高品質・低コストの両立が必須と考えられる。薄肉化や高品質確保のためには、優れた溶湯充填性の確保とガス巻きみやひけ巣の低減が必要となる。この対応手段としては、一般的には高真空化や超高速射出化などの鑄造機のハイスペック化が考えられるが、背反として鑄造機の価格アップや維持管理費の増大、型寿命の低下などによるコストアップが課題となる。

メックインターナショナルでは、上記課題を解決できる表面処理技術として注目されている、画期的な湯流れ性を有するダイカスト金型向けナノカーボン表面処理（以下CC処理と記載）技術を保有しており、既に小型製品では低コスト化に貢献している。しかしながら、まだ自動車のアルミボディ部品のような大型製品に対応できる大型処理炉がなく、また現状のCC処理の製品面は、製造工程の都合により荒い面粗度となるのが課題である。本技術を進化・改良させ、大型・高意匠性部品にも使える表面処理技術開発に取り組む。

(2) 研究目的及び目標

<CC処理技術の課題>

川下企業のアルミボディ開発の具体的な要求を図1に示す。要求項目は1) 薄肉化、2) 型歪み、3) 鑄巣、4) 意匠性、5) マシンダウンサイズ、6) 型ダウンサイズ、であり各々の目標値が示されている。弊社では、現在エンジンやミッションでCC処理を適用し1)～6) 項について改善を実施中であるが、アルミボディ開発の基本的な進め方として、これまで培って来たCC処理を改良する。

開発内容として、4) 項の意匠性について面粗度要求Ra1は現在のCC処理型では基準を達成できないことが判明している。これに対して高意匠性に対応できる大型CC処理炉の開発が必要となった。高意匠性CC処理（以下新CC処理と記載）の開発には、現在生産している処理炉や工程をベースにした新しいナノカーボン生成技術の研究が必要である。さらに新CC処理した金型にて鑄造し、高い品質効果が望めるかの実証実験も必要である。

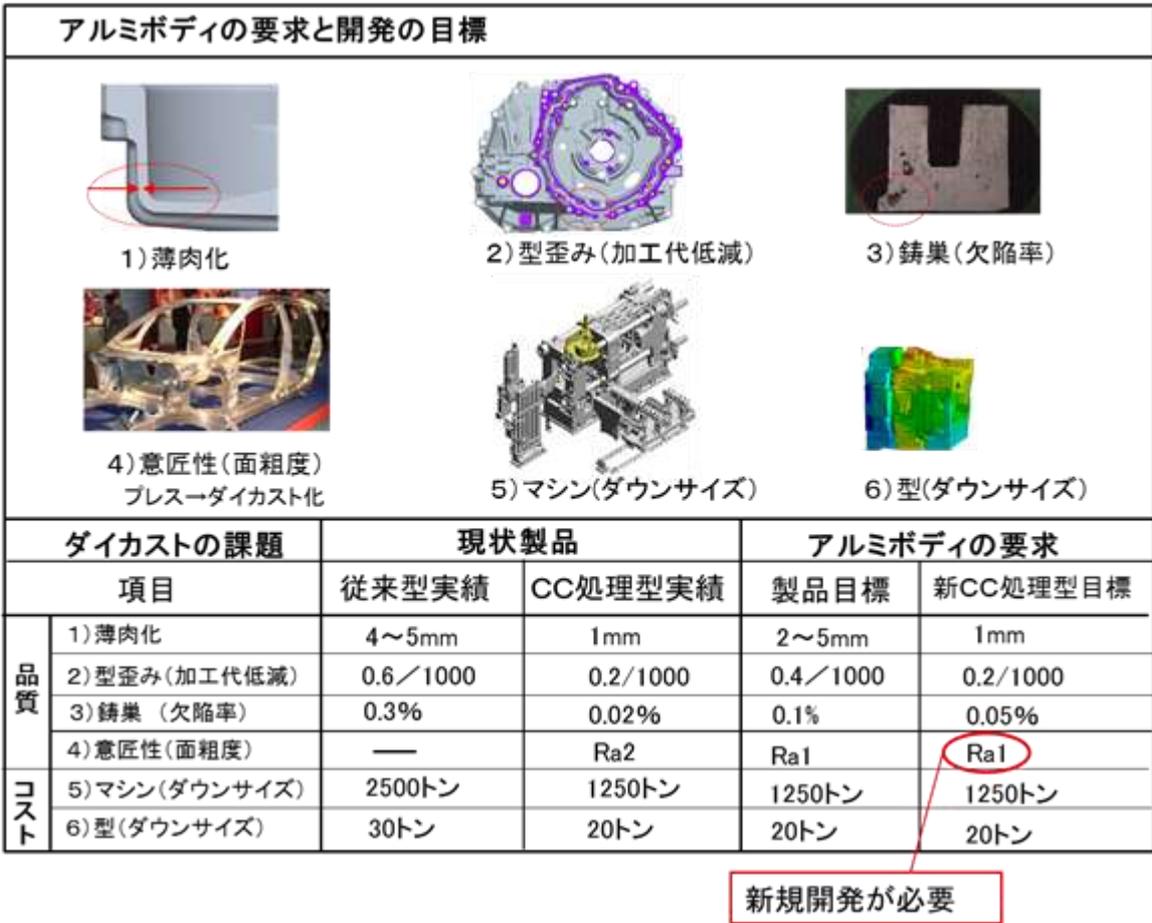


図1 アルミボディ開発の具体的な要求

<課題への対応>

【1】新CC処理の開発（高意匠性CC処理の研究）

炉内ガスの挙動研究と実験用に新たな大型処理炉の開発導入が必要。

【2】表面活性化技術の開発（ショットブラスト（*）など金型研掃技術の研究）

高意匠性アルミボディに対応できる滑らかな型表面が得られる新CC処理技術の研究が必要。

（*）ショットブラスト：投射材と呼ばれる粒体を加工物に衝突させ、加工を行う方法

【3】実金型での鑄造評価（新CC処理した金型で鑄造：高品質低コストの達成）

高意匠性の新CC処理した金型で鑄造し、ダイカスト鑄造目標（品質、コスト）の達成が必要。

<課題に対する重点実施事項の目標>

【1】新CC処理の開発

【1-1】炉内ガス流動CAE解析：流動解析試行・実用化

【1-2】高意匠性CC処理の研究：面粗度Ra1以下

【2】表面活性化技術の開発

【2-1】表面研掃技術の研究：ショットブラスト設備の設計・製作完了

【2-2】高意匠性が得られる下地処理（*）技術の開発：面粗度Ra1以下

（*）下地処理：炉内処理の前に、ショットブラストにより表面を活性化する工程

【3】実金型での鑄造評価

【3-1】湯流れ基礎評価：溶湯の流動長が最大となる条件を開発

【3-2】ダイカスト実験金型評価：面粗度…Ra1以下、湯流れ性能…現状と同等

【3-3】CC処理型鑄造CAEの確立：従来型の鑄造CAEと対比できるCC処理型専用解析技術の完成

<当初の目的及び目標に対しての実施結果>

《平成29年度実施結果》

【1】新CC処理の開発

【1-1】炉内ガス流動CAE解析

流動解析試行・実用化完了。岐阜大学にて炉内流動解析を実施した結果、炉の形・ガス種・ガス投入時期・圧力・流量・温度・内部攪拌の条件に対して、炉内でガスが時間変化に伴い混合流動する様子を可視化することができた。この結果に基づき、新大型処理炉を導入し、処理条件を決定した。

【1-2】高意匠性CC処理の研究

下地処理工程のショットブラスト条件を変更した実験を実施した結果、面粗度Ra1以下の高意匠性を確保できる可能性があることがわかったが、皮膜品質の安定化の課題が見つかり、次年度も継続して研究することとした。

《平成30年度実施結果》

【2】表面活性化技術の開発

【2-1】表面研掃技術の研究

ショットブラスト設備の設計・製作、導入完了。

【2-2】高意匠性が得られる下地処理技術の開発

面粗度Ra1以下の目標達成目処付け完了。

正規ショットブラスト導入前の予備試験で基本技術の目処付けを完了し、正規ショットブラスト機導入後、再現実験を行い新CC処理の面粗度目標を達成できた。

【3】実金型での鑄造評価

【3-1】湯流れ基礎評価

溶湯の流動長が最大となる開発目標達成。

岐阜大学にて、鑄造実験を実施し熱抵抗値を算出し、実験を裏付けるCAE技術に結びつけることができた。

【3-2】ダイカスト実験金型評価

135T評価型を製作し、鑄造評価を実施した。その結果、面粗度・湯流れ性とも目標は達成したが、皮膜品質問題が発生したため次年度も継続して研究することとした。

【3】実金型での鑄造評価

【3-1】湯流れ基礎評価（平成30年度からの継続）

岐阜大学にて湯流れ評価型による基礎実験を継続し、CC処理した金型による鑄造特性を評価した。湯流れ性を検討した結果、湯流れ性に対するCC処理の優位性を発現する因子として溶湯の流動速度があると推察された。

また流動中の溶湯湯先の状態を直接観察した結果、CC処理による湯流れ性に対する効果は、界面張力の低下による流動活性化エネルギーの低下であると推察された。

【3-2】ダイカスト実験金型評価

平成30年度の135T評価型で発生した、皮膜の剥がれ対策として、強固な皮膜強度を有する高意匠CC処理の研究を行い、面粗度の改善と強固な皮膜強度が得られることがわかった。

高意匠CCの大型部品への適用評価として、800Tダイカスト評価金型を製作し、鑄造評価を実施した。その結果、高意匠CCの面粗度は通常CCに比べ大きく改善した。また、高意匠CCの湯流れ性はCC処理なしと通常CCの間であることがわかった。

【3-3】CC処理型鑄造CAEの確立

ダイカストの工程を①射出開始から充填完了工程、②高圧付加中の凝固工程、③圧力伝達終了後の凝固工程、の3つに分けてそれぞれに対して検討を行った。その結果、ダイカスト金型の温度変化の実測値とシミュレーションの結果は良い一致を示した。

研究組織・管理体制を図2に、研究者及び協力者を表1に示す。

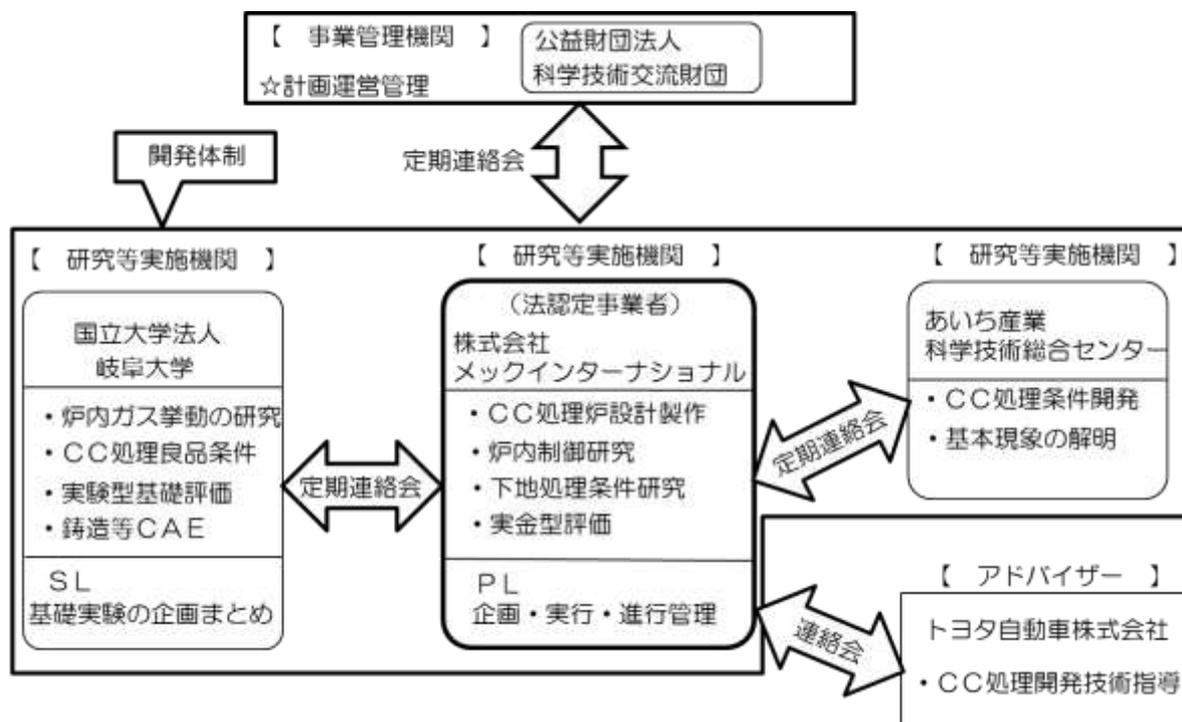


図2 研究組織・管理体制

表1 研究者及び協力者一覧

役割	氏名	所属・役職
PL	柴田 勉	(株)メックインターナショナル シニアアドバイザー
SL	新川 真人	岐阜大学 工学部 機械工学科 准教授
運営管理	青木 博史	科学技術考慮尾財団 科学技術コーディネータ
↑	古川 寿三枝	科学技術考慮尾財団 業務部研究交流グループ 係長
アドバイザー	松尾 賢作	トヨタ自動車株式会社 素形材技術部 室長
研究者	唐木 満尋	(株)メックインターナショナル シニアアドバイザー
↑	山口 哲史	(株)メックインターナショナル 第1営業技術部 次長
↑	高味 克浩	(株)メックインターナショナル 第1営業技術部 主幹
↑	松岡 優	(株)メックインターナショナル 第2営業技術部 係長
↑	西田 哲	岐阜大学 工学部 機械工学科 准教授
↑	加藤 正樹	あいち産業科学技術総合センター 共同研究支援部 試作評価室 主任研究員
↑	杉本 貴紀	あいち産業科学技術総合センター 共同研究支援部 計測分析室 主任研究員

《平成29年度成果概要》

【1】新CC処理の開発

【1-1】炉内ガス流動CAE解析

岐阜大学にて炉内流動解析を実施した結果、炉の形・ガス種・ガス投入時期・圧力・流量・温度・内部攪拌の条件に対して、炉内でガスが時間変化に伴い混合流動する様子を可視化することができ、新大型処理炉の導入及び処理条件決めに寄与した。

【1-2】高意匠性CC処理の研究

健全なナノカーボン生成に重要な役目を果たす金型表面のショットブラストは、背反として意匠性の低下につながることは判明している。そこでショットブラストの投射時間を変更しCC皮膜品質を評価した結果、投射時間を短くすることで高意匠性を確保できる可能性があることがわかった。しかし皮膜品質の安定化という新たな課題がわかり、次年度も改善のために研究を継続することとした。

《平成30年度成果概要》

【2】表面活性化技術の開発

【2-1】表面研掃技術の研究

平成29年度の事前評価の結果、ショットブラスト研掃が型表面の活性化、健全なナノカーボン生成に重要な役割を果たすことがわかり、これを受け平成30年度は、投射型ショットブラスト機を導入し、ショットブラスト研掃による下地処理技術を中心に研究した。

【2-2】高意匠性が得られる下地処理技術の開発

正規ショットブラスト機導入前の事前評価にて、高意匠性が得られる下地処理技術の基本条件を明確化し、正規ショットブラスト機導入後に再現実験を行い、CC処理後の面粗度目標達成の目処付けができた。

【3】実金型での casting 評価

【3-1】湯流れ基礎評価

岐阜大学にて、CC処理の湯流れ性を評価するため、重力 casting の流動解析・ casting 評価を実施した。溶湯の流動長が最大となる条件を研究し、CC処理特有の伝熱や流動の様子を

観察した。その結果今後必要となるダイカストCAE開発に向けたデータを取得できた。

【3-2】ダイカスト実験金型評価

135T ダイカスト実験金型を製作し、導入したショットブラスト機を使用して高意匠CC処理を行い、鑄造評価を実施した結果、湯流れ性や欠陥率等の目標を達成した。しかしながら、一部皮膜の剥がれが発生したため、あいち産業科学技術総合センターにて、鑄造前後のナノカーボンの皮膜観察を行った結果、鑄造後にカーボン皮膜が部分的に剥がれていることが観察された。この原因は皮膜強度が低いことと推定し、次年度に強固な皮膜を有する高意匠CC処理の検討を行った。

岐阜大学では、鑄造CAEによる湯流れ・凝固解析を行い、メックインターナショナルでのダイカストの鑄造条件を提示することができた。

《令和元年度成果概要》

【3】実金型での鑄造評価

【3-1】湯流れ基礎評価（平成30年度からの継続）

岐阜大学にて湯流れ評価型による基礎実験を継続し、CC処理した金型の鑄造特性を評価した。重力鑄造でのCC処理ありの湯流れ性は、CC処理なしと比較してやや良好であるが、ショットブラストにより凹凸を付与した金型とは大きな違いは無かった。ダイカストではCC処理の優位性が確認されていることから、湯流れ性に対するCC処理の優位性を発現する因子として溶湯の流動速度があると推察された。組織観察の結果、CC処理金型では冷却速度が大きくなったことから、CC処理金型の特徴のひとつに溶湯の充填完了後の凝固過程における良好な伝熱特性があると考えられた。

流動中の溶湯湯先の状態を直接観察した結果、CC処理金型では未処理金型と比較して接触角が大きい結果となった。一方、CC処理金型に離型剤を塗布し、同様の評価を行った結果、接触角が小さくなった。流動中は離型剤によるホバリング効果が報告されている[1]ことから、CCに離型剤を塗布した場合の金型と溶融アルミの表面エネルギーのつり合いが変化すると考えられた。また、押出し法により静的な接触角を測定した結果、試験開始直後では接触角はほぼ同じであったが、CC未処理金型では時間とともに接触角が小さくなった。一方、CC処理金型では接触角はほぼ変化が無かった。これら濡れ角の評価の結果をもとにして、固体（金型）と液体（溶融アルミ）の界面張力を計算した結果、CC処理金型のほうが

小さいことが判明した。このことは、流動活性化エネルギーが小さくなることを意味しており、CC 処理による湯流れ性に対する効果は、界面張力の低下による流動活性化エネルギーの低下であると推察された。

【3-2】ダイカスト実験金型評価

平成30年度に評価した高意匠CC処理金型（135T）で一部皮膜の剥がれが発生し、皮膜強度の不足が確認された。その対策として、強固な皮膜強度を有する高意匠CC処理の検討を実施した。通常のCC処理した皮膜表面を研掃することで、面粗度の改善と強固な皮膜強度が得られることがわかった。

大物ダイカスト部品を模擬した800T ダイカスト評価金型を製作し、CC処理なし・高意匠CC・通常CCの条件で鑄造評価を実施した。その結果、高意匠CCの面粗度は通常CCに比べ大きく改善し、ほぼ目標に近い成果が得られた。また、高意匠CCの湯流れ性はCC処理なしと通常CCの間であることがわかった。

【3-3】CC処理型鑄造CAEの確立（岐阜大学）

ダイカストの工程を①射出開始から充填完了工程、②高圧付加中の凝固工程、③圧力伝達終了後の凝固工程、の3つに分けてそれぞれに対して検討を行った。

①では、Nusselt 数、Prandtl 数を考慮するため、Nusselt 方程式から熱伝達係数の算出を行った。②は高圧が付加されている凝固過程において、溶湯-CC層-金型の直列熱抵抗モデルから数値計算を行った。また、③は凝固実験による入熱量から算出するとともに、溶湯への圧力伝達終了後に発生するエアギャップが新たな熱抵抗層となることを考慮し、熱伝達係数が非定常変化すると仮定をして決定した。その結果、ダイカスト金型の温度変化の実測値とシミュレーションの結果は良い一致を示した。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

所属：株式会社メックインターナショナル 第1営業技術部

氏名：高味 克浩

電話：0565-37-7020 FAX：0565-37-7022

E-mail：k.takami@mec-int.co.jp

第2章 本論

2-1 従来のナノカーボン表面処理（CC処理）の説明

CC処理は金型を炉に入れて高温下でナノカーボンを生成後、ナノサイズフラレンを内部に浸透させ、厚さ15 μ m程の皮膜を造る表面処理技術として弊社が世界で初めて開発量産化した。図3は金型表面よりナノカーボン皮膜が生えている断面写真である。

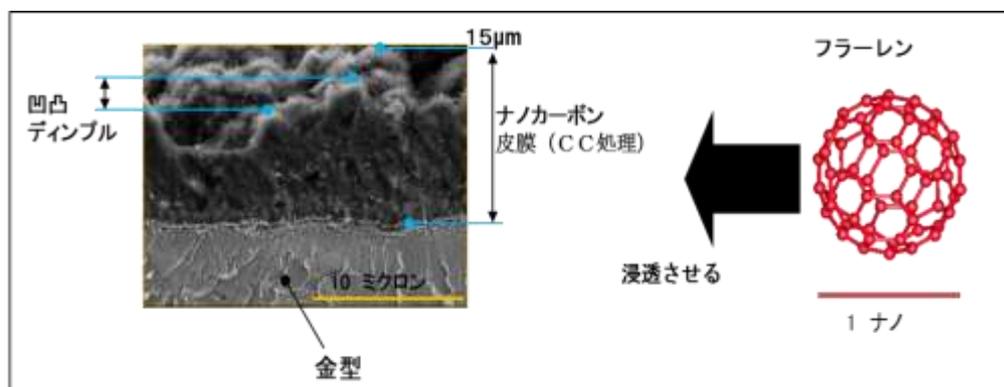


図3 CC処理金型断面図

図4に湯流れ状態の模式図を示す。従来型では、溶湯は金型表面に沿って流れるのに対し、CC処理型は、溶湯と金型の間には空気層が発生し転がるように流れ、溶湯が凝固せず速く遠くまで届く特殊な性能がある。この表面処理は発表と同時に多くの国内ユーザーの注目を集め、自動車・家電分野でダイカスト鑄造に採用され、大きな品質改善効果を得ている。従来金型は鑄造する時に溶湯が型に触れ凝固が急速に始まることから流動が悪く、湯境・鑄巣など流動不足が原因の鑄造欠陥が多く発生している。このように画期的な性能を持つCC処理であるが、型表面をショットブラストにより研掃し、凹凸を付与する必要があるため、表面粗度が荒くなるという課題がある。

ダイカスト	従来型	CC処理型
	※表面に沿って流れる 低湯流れ性 	※転がるように流れる 高湯流れ性
	金型 型表面: 平滑・面粗度 Ra1	金型 CC皮膜 空気層 (断熱) 型表面: 凹凸・面粗度 Ra2

図4 湯流れ状態模式図

2-2 平成29年度実施内容詳細

【1】新CC処理の開発

【1-1】炉内ガス流動CAE解析

高意匠性CC処理開発のため、新規導入の大型処理炉でのナノカーボンの生成過程と品質について実験的検証とCAE解析を行い、工業的に安定的に製造する技術を確立した。CC処理の運転条件において、複数のガスを投入し窒化处理と同時にナノカーボンを生成するが、従来技術においては、炉内の様子が理論的に明確になっておらず、対象物に応じて経験的に条件を設定していた。炉内のガス流動、密度、対象物、配置等を研究し良品条件を明確化するために、岐阜大学と共同で内部を予測し最適化が可能となる炉内ガス流動CAEを実施した。

図5に現有CC処理炉(小型)、図6に新CC処理炉(大型)の断面構造を示す。解析に必要な炉の構造は躯体・ガス流入通路・攪拌用ファン・排気通路・対象物セット治具である。

CC処理をCVD(Chemical Vapor Deposition、化学気相堆積法)であると考え、金型材料(SKD材)を基板とし、原料に炭化水素を用いた熱CVDによるカーボン膜の生成プロセスにおける気相の混合状態および流動状態をCAEにより検討した。解析コードにANSYS-FLUENT14.5を利用し、処理炉形状から2次元軸対象モデルとして、攪拌用ファンを考慮した非定常解析を実施した。表2に解析条件を、図7に解析モデルを、図8に解析結果を示す。ガスAが充填した炉内に入口部からガスBが流入している様子がわかる。入口部から流入したガスBは主に流れの方向に沿って装置内へ流入しその後流れと直交する向きにも流れていることがわかる。これは入り口付近では、流れの方向へはガスの流れにより混合が進み、流れと直交する向きにはガスの濃度差による拡散で混合が促進されている様子を再現できている。このことからCAEによる計算は有効であると考えられる。

上記結果に基づき、写真1に示す大型処理炉(ピット型スーパーマルチナイトプロセス装置)を導入し、処理条件の最適化に取り組んだ。

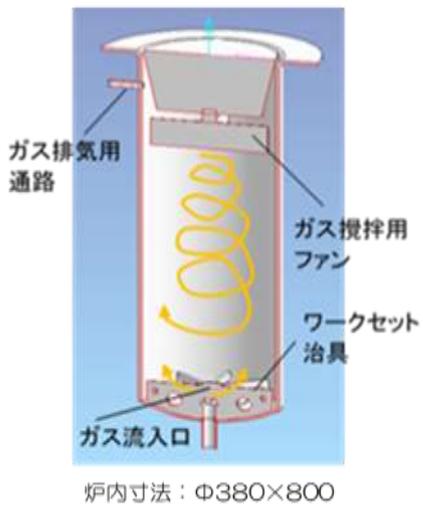


図5 現有CC処理炉(小型)

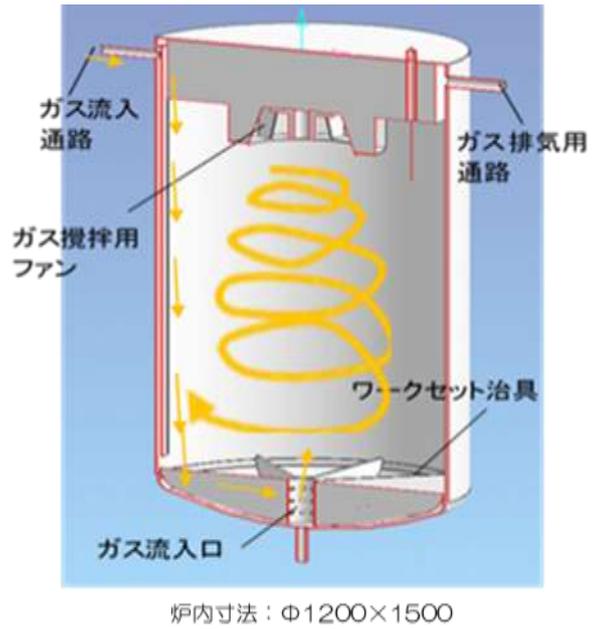


図6 新CC処理炉(大型)

表2 解析条件

ガス流入速度(cm/s)	10
ガス出口気圧(atm)	1
炉内温度(° C)	400
ガスB 温度(° C)	0
乱流モデル	k-εモデル

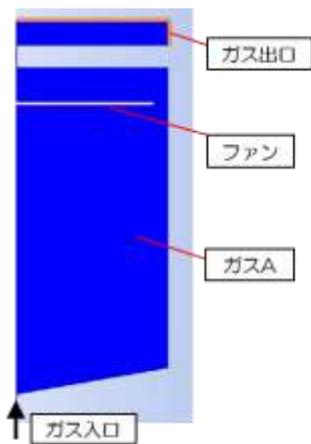


図7 解析モデル

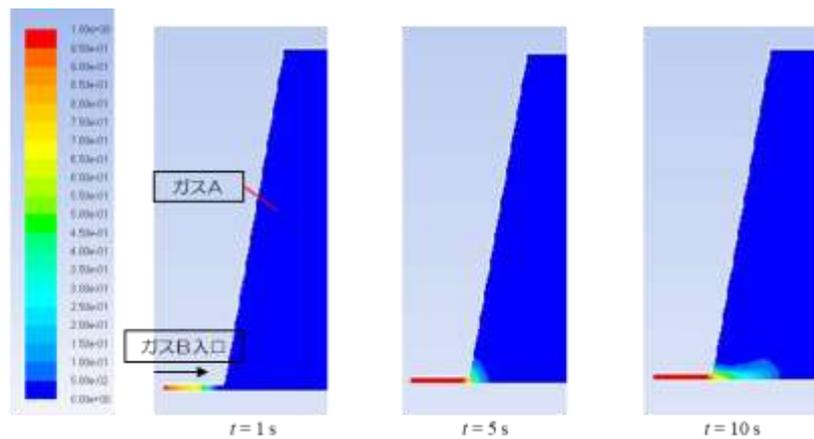


図8 解析結果



写真1 大型処理炉（ピット型スーパーマルチナイトプロセス装置）

【1-2】高意匠性CC処理の研究

ナノカーบอนを炉内で金型表面に生やすためには、表面の活性化が必要で研掃により表面を荒らす方法を採用している。高意匠性のダイカスト製品を鑄造するナノカーボン型を製造するために型表面を事前に処理する研究を実施した。またナノカーボンの生成状態を観察するため、あいち産業科学技術総合センターと共同で光学機器によるテスト材の観察、判定方法に関する実験を行った。

図9に現状と今回研究のCC処理工程を示す。現状は下地処理工程にて研掃能力の高い条件でショットブラストを実施しているため、最終面粗度は Ra2~3程度である。今回の研究では味見試験として、研掃力の低い条件でナノカーボン皮膜が生成できるかを研究した。

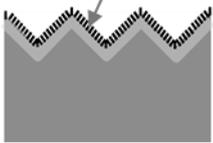
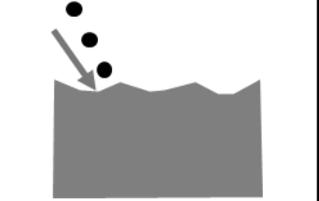
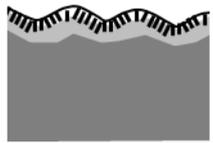
工程	型製作	下地処理 (ショットブラスト)	ナノカーボン生成
現状	金型		ナノカーボン  Ra 2~3
今回研究	金型		 Ra 1以下

図9 CC処理工程

ショットブラスト工程は(1)現状(従来法)、(2)新工法A、(3)新工法Bの3種類で実施した。(2)、(3)は従来よりも平滑度の高い表面が得られる方法である。

電子顕微鏡によるCC皮膜表面の観察結果(試料台を45°傾斜して観察)を図10に示す。皮膜の表面状態は(1)現状に対し(2)、(3)の新工法の方が平滑であるが、部分的な皮膜の剥離が観察された。この部分をSEM-EDSで詳細に観察した結果、CC皮膜の剥離は、金型表面との境界で発生していることがわかった。(図11)

上記結果より、ナノカーボン皮膜と金型界面との結合力を確保する表面活性化技術の開発が必要であることがわかった。

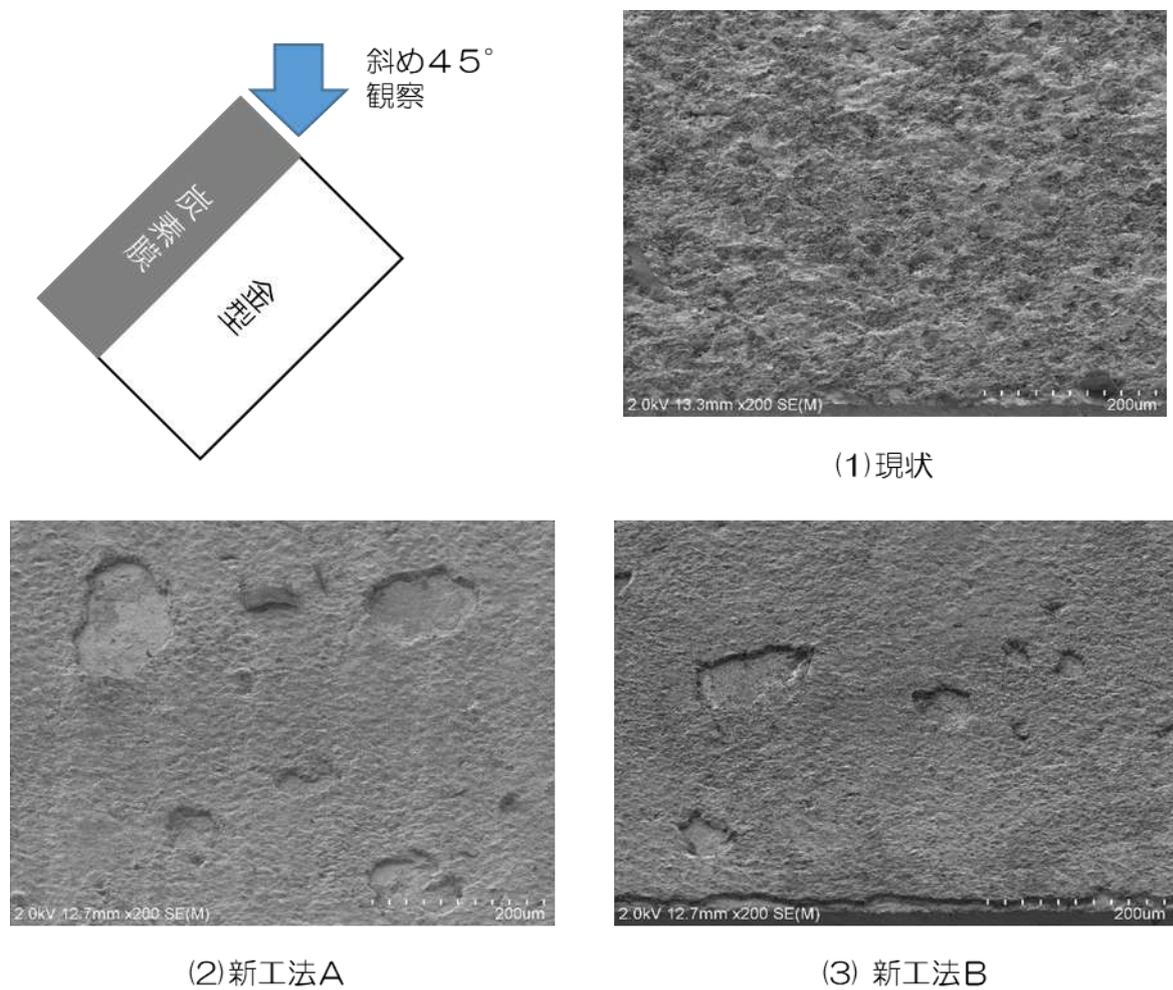


図10 CC皮膜表面観察結果

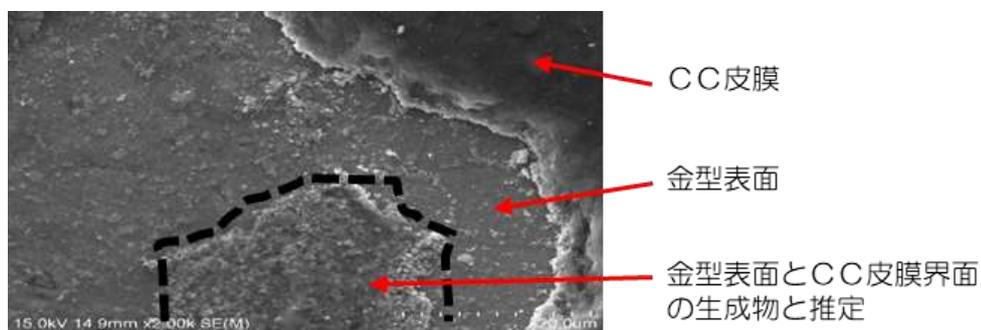


図11 皮膜剥離部 SEM 観察結果

2-3 平成30年度実施内容詳細

【2】表面活性化技術の開発

【2-1】表面研掃技術の研究：ショットブラスト設備の設計・製作

平成29年度研究の結果、ショットブラスト研掃が型表面の活性化、健全なナノカーボン生成に重要な役割を果たすことがわかり、平成30年度はこれを受けショットブラスト研掃技術を中心に研究した。

一般的なショットブラスト機は「吹付け型」と「投射型」の2種類がある。メックインターナショナルで現状使用しているショットブラスト機は「吹付け型」であり、高硬度・多角形の砥粒を高速度で対象物に噴射することにより、深く鋭利な研掃が可能である。また「投射型」ショットブラスト機は低硬度の砥粒を低速で投射することにより、浅く滑らかな研掃が可能である。高意匠性CC処理を開発するため、メックインターナショナルに「投射型」ショットブラスト機を導入し、今回2つのショットブラストを組み合わせることで粗さを調整しながら一連の評価実験を行った。

【2-2】高意匠性が得られる下地処理技術の開発：面粗度Ra1以下の確立

1) 2段階ショットブラストの評価

下地処理工程で面粗度を向上させるために、吹付け型ショットブラストで表面を荒らした後、投射型ショットブラストで表面をならす2段階ショットブラストの評価を実施した（図12）。

評価は、型製作→吹付けショットブラスト→投射ショットブラスト→CC処理の工程ごとに、面粗度を測定し、目標（Ra1以下）に対する評価を行った。投射ショットブラストの砥粒は大・小の2種類で評価した。図13に結果の代表例を示す。吹付けショットブラストで荒らされた面粗度は、投射ショットブラストでは大きな改善は見られなかった。また、砥粒小の方が面粗度の改善に有効であることがわかった。

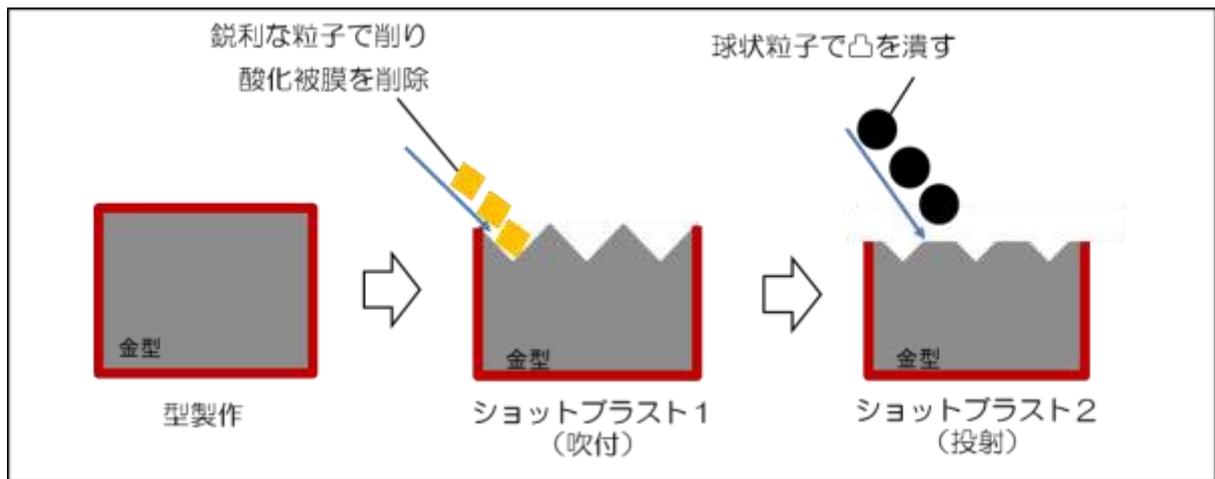


図12 2段階ショットブラスト評価工程

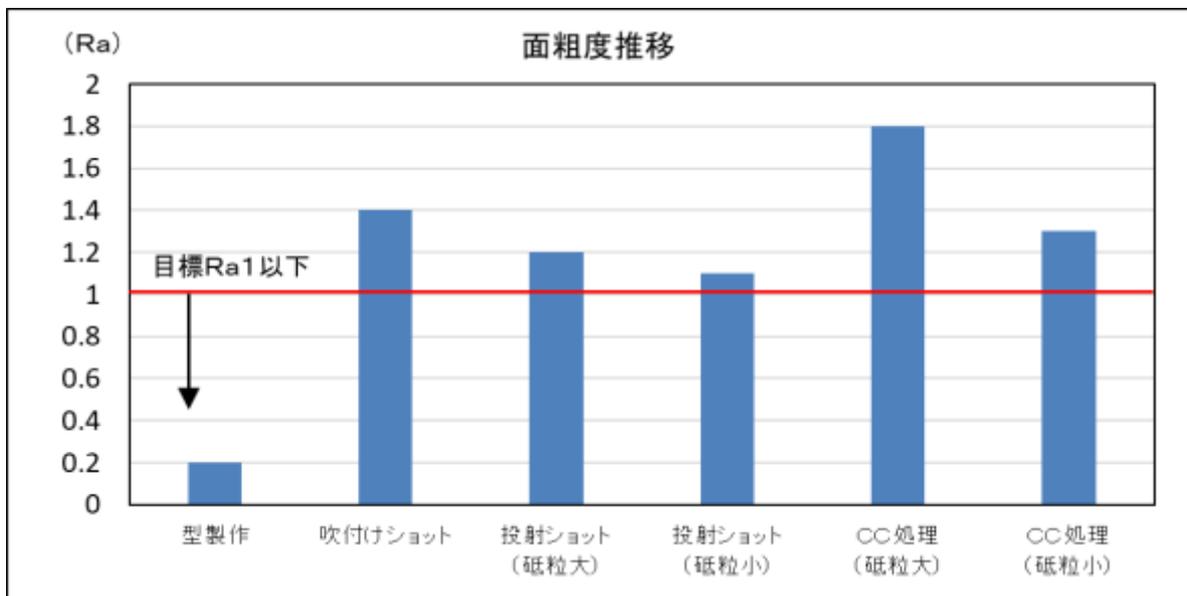


図13 面粗度測定結果

2) 手作業研磨+投射ショットブラストによる面粗度改善評価

吹付けショットブラストでは面粗度が大幅に悪化することから、吹付けショットブラストに代えて手作業研磨→投射ショットブラスト→CC処理の工程で面粗度を評価した(図14)。手作業研磨にて使用した研磨材はセラミック粒子を貼り付けた紙ヤスリを使用した。図15に面粗度の測定結果を示す。投射ショットブラストの砥粒小の条件で面粗度Ra0.8と目標達成の目処付けができた。

また、あいち産業技術総合センターの調査により酸化皮膜の除去とCC皮膜が生成されていることも確認できており、高意匠性CC処理開発の方向が見えてきた。

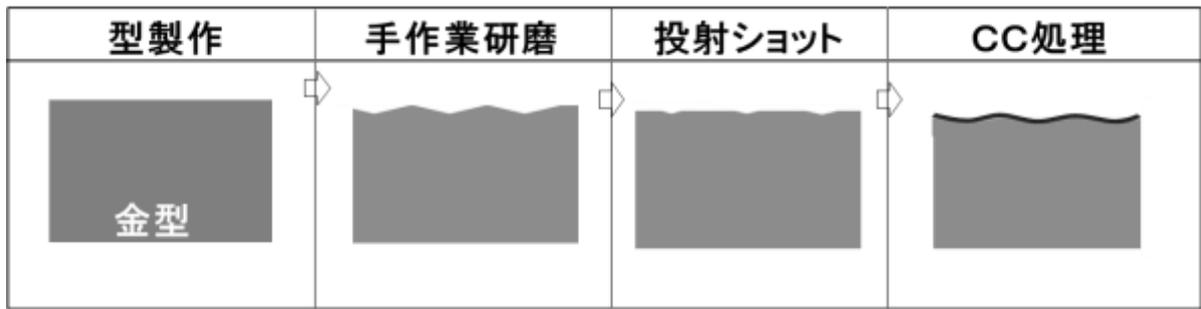


図14 手作業研磨+投射ショットブラスト評価工程

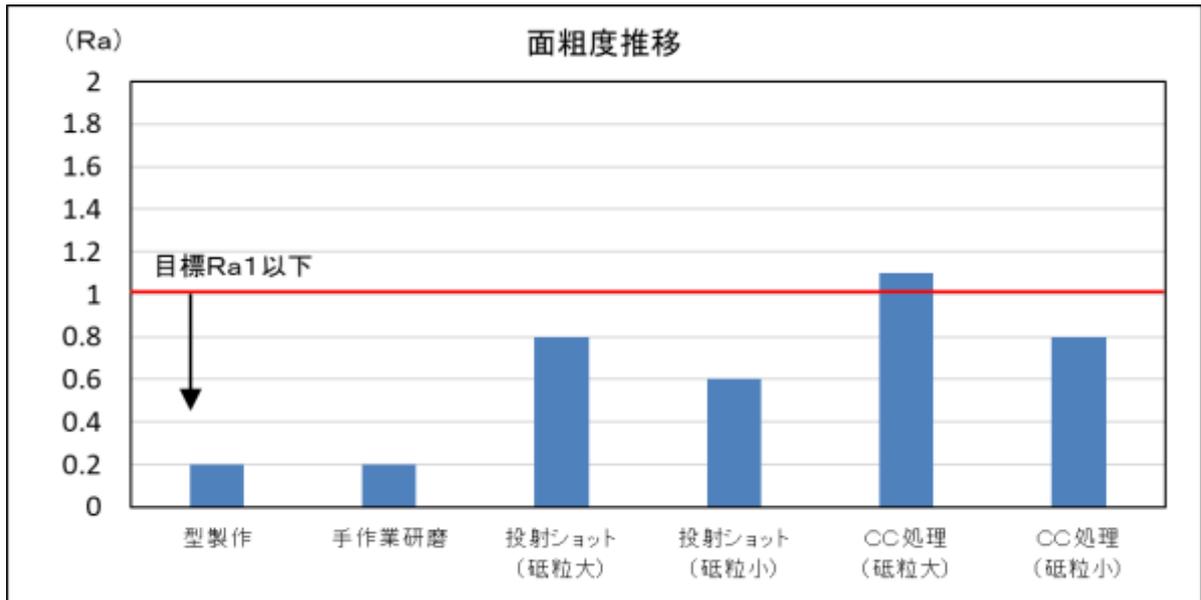


図15 面粗度測定結果

【3】実金型での casting 評価

【3-1】湯流れ基礎評価 (岐阜大学): 溶湯の流動長が最大となる条件を開発

1) 湯流れ評価テスト概要

CC処理をした金型を用いた重力 casting 実験を実施し、湯流れ性を評価するとともに金型内の現象を検討した。図16に基礎評価用実験装置の概略を示す。S50C 厚板に 15mm×4mm の溝を加工して流路とした。この流路に対して加工したまま (以後、As-machining)、CC 処理前のショットブラスト加工を施した状態 (以後、Blast)、および CC 処理を施した状態 (以後、CC) の 3 種類を用意した。流路にはφ1mm の先端露出型熱電対を流路表面と同じ高さになるように設置した。ADC12 溶湯の注湯時は耐熱レンガにより湯口カップを作成して手酌により注湯した。このとき、金型温度は室温 (20° C) から 180° C と変化させた。また、金型の上型側には幅 0.5mm の隙間を設け、その隙間からビデオカメラにより溶湯の流動状態を観察した。

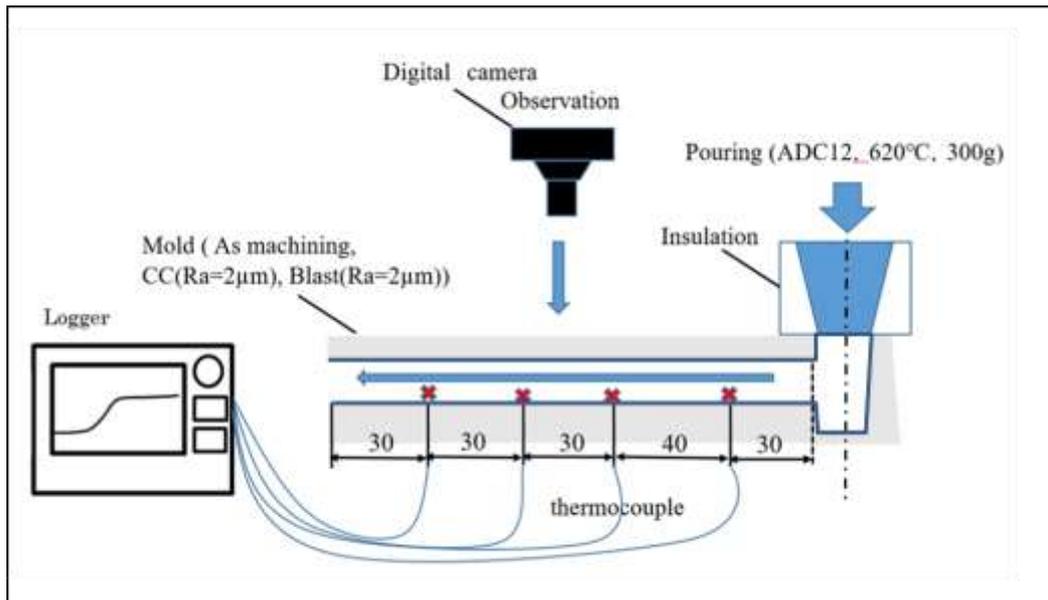


図16 流動性評価実験装置の概略図

2) 金型温度と流動長の比較

図17に流動長の測定結果を示す。Blast、CCともにAs-machiningと比較して流動長が大きくなった。また、BlastとCCを比較するとほぼ同等、もしくは若干CCのほうが大きくなった。

※As-machining : 金型を機械加工した状態

※Blast : 機械加工→ショットブラスト研掃状態

※CC : 機械加工→ショットブラスト→CC処理状態

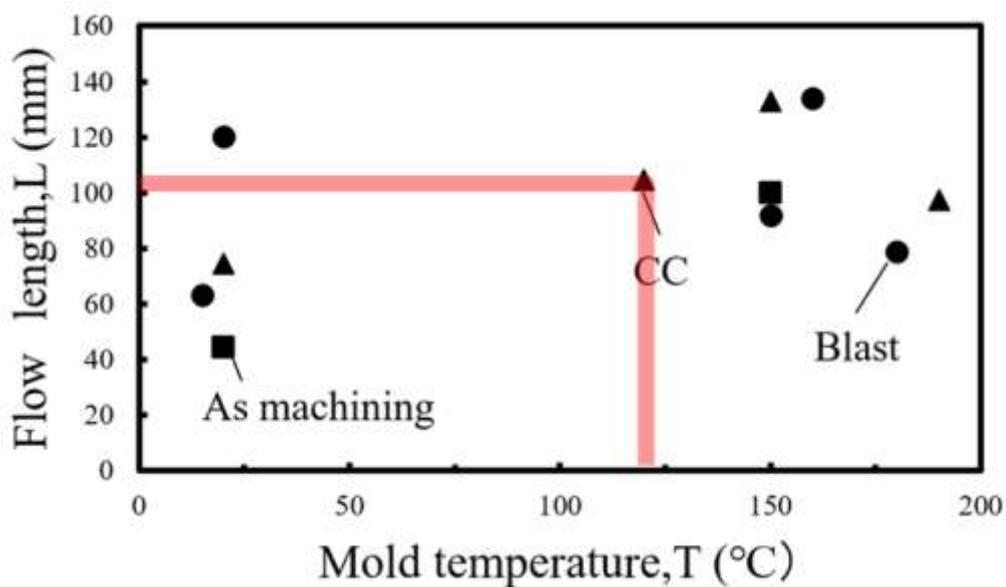


図17 各金型による流動長の比較

3) 流動中の湯先と金型との動的接触角度の測定

図18に高速度カメラによる流動中の溶湯湯先と金型との動的接触角の観察結果を示す。金型温度は室温とし、CCとAs-machiningの金型により比較した。観察結果より、CCの接触角は約 130° 、As-machiningは約 138° であり、CCの場合は金型に対して濡れないという結果が得られたが、大きな差があるとは判断できなかった。CC処理をすることにより金型と溶融アルミ合金との界面特性が変化し、金型に対して濡れないと言われている。今回の観察結果からその傾向は確認できたが、大きな差は見られなかった。今回、CCはドライ状態の室温下で実験を行ったが、ダイカストプロセスでは加熱された金型表面のCC皮膜に離型剤が含浸した状態で溶湯が金型に接触する。今回の結果から、CCの効果として言われている湯の流動が改善される現象は、離型剤による影響も大きいと想定される。

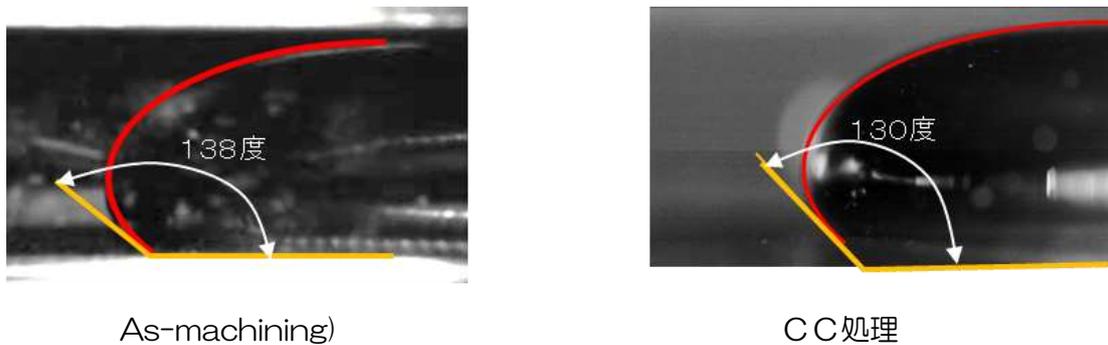


図18 流動中の湯先と金型との動的接触角

【3-2】ダイカスト実験金型評価：面粗度 Ra1 以下、湯流れ性能 現状と同等

CC処理金型の基本性能を評価するため、図19に示す実験金型をメックインターナショナルにて製作した。鑄造実験に先立ち、岐阜大学にてCAE解析を実施し、金型温度・速度・湯流れ等最適な鑄造条件を決定した。鑄造実験はメックインターナショナル保有の135Tダイカストマシンにて実施し、あいち産業科学技術総合センターにて鑄造前後のCC皮膜の表面状態を観察した。

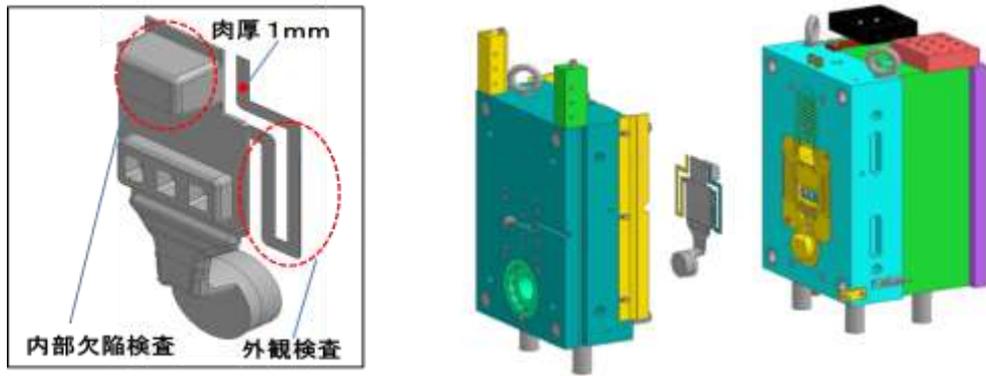


図19 ダイカスト実験金型

1) 鋳造CAE解析結果(岐阜大学)

1)-1 湯流れ解析(CC処理無し)

岐阜大学による流動中の熱抵抗値の算出など、鋳造CAEによりダイカスト金型内部湯の流動状態が明確になった。図20に示す内容にて、流動中1→流動中2→流動中3に向けて型の内部で湯が流動する様子が視認できた。また、詳細に調査した結果、流動中3の段階で湯流れが停止することがわかった。CAE画像の色は溶湯の温度を表しており黄色→青色に向けて金型で冷却され凝固する様子が見える。今回1mmの薄肉部位で湯が流動するかCAEにて計算した結果、流動中3に示すように凝固により湯の流動が途中で停止することが確認できた。

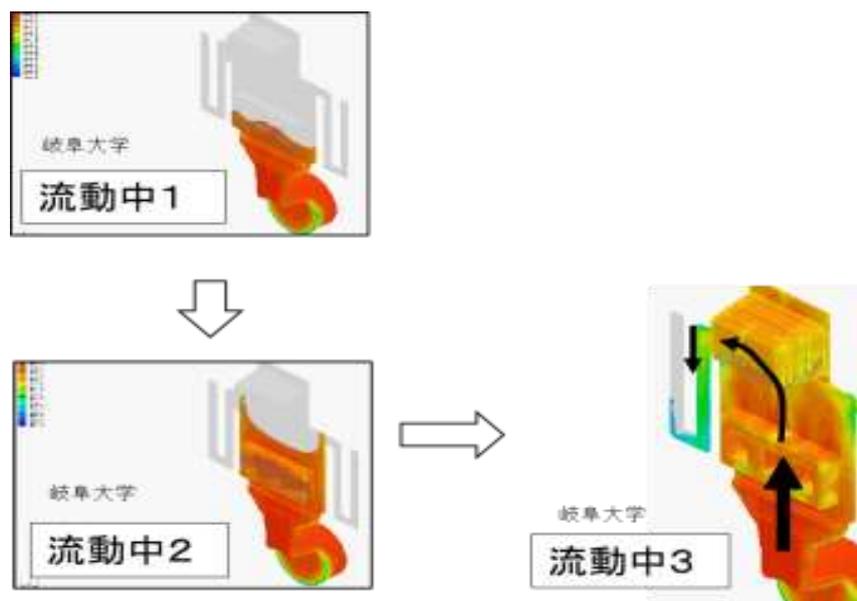


図20 岐阜大学鋳造解析(湯流れ)

1) -2 熱伝達係数の算出

CCの特徴として、良好な流動性と凝固過程での良好な冷却性があることがわかっている。そこで、測定した金型温度変化からCCを用いたダイカスト工程で金型-溶湯間の熱伝達係数を逆解析的に算出した。図21に推定した熱伝達係数を示す。また、比較のため一般的なダイカスト工程における熱伝達係数（図中破線）も用いた。この値は過去の検討結果より取得した値である[2]。

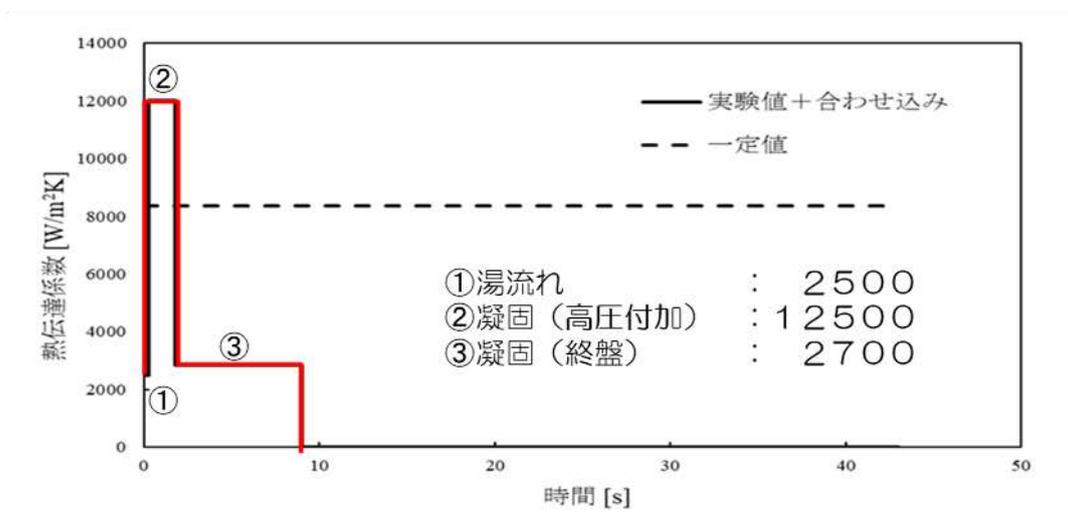


図21 CC有無による熱伝達係数

1) -3 CC 有無によるダイカスト鋳造サイクル中の金型温度変化の計算結果の比較

図22にダイカスト 1 サイクル中の金型温度変化の計算結果を示す。CCを想定した場合、キュアリング中に急激に金型温度が低下する。また、金型温度の低下の度合いはCCなしの場合と比較して大きく、射出開始後に同じ時間だけ経過したときの金型温度はCCありのほうが低かった。また、金型内での温度分布はCCありのほうが小さく、CCなしと比較して温度分布が小さくなる時間は短かった。

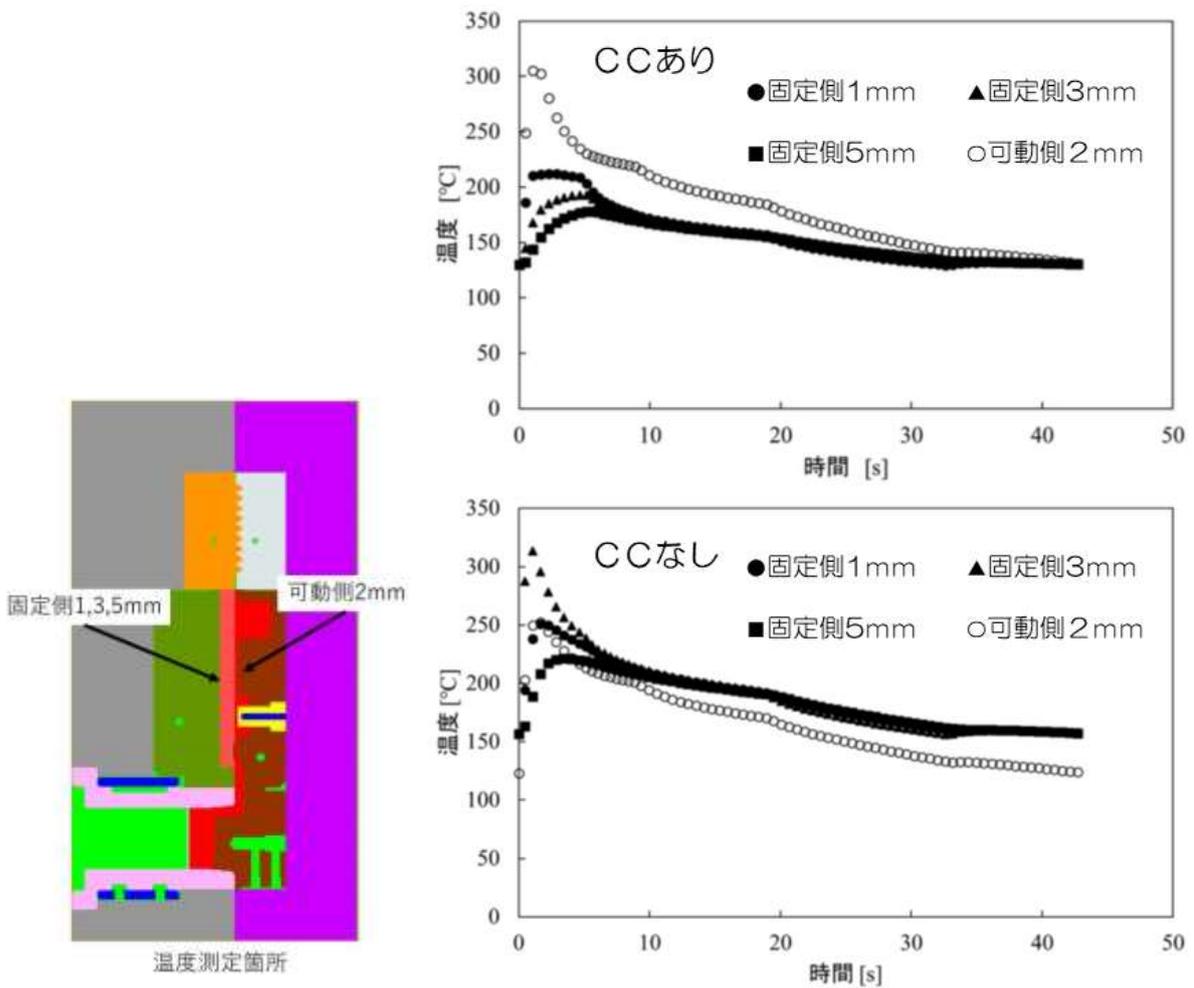


図22 CC有無によるダイカスト金型温度変化の計算結果の比較

1) -4 ガス欠陥解析 (CC処理無し)

岐阜大学の鋳造解析により、金型内部に発生するガス欠陥(空気の混合)の発生する様子が明確になった。図23に示す流動中3において内部の様子を解析モデルにて切断した結果、厚肉部位に鋳造開始から0.172秒後に湯の流動により渦が発生しており、そこに残留している空気と溶湯が混ざりながら欠陥が発生することがわかった。

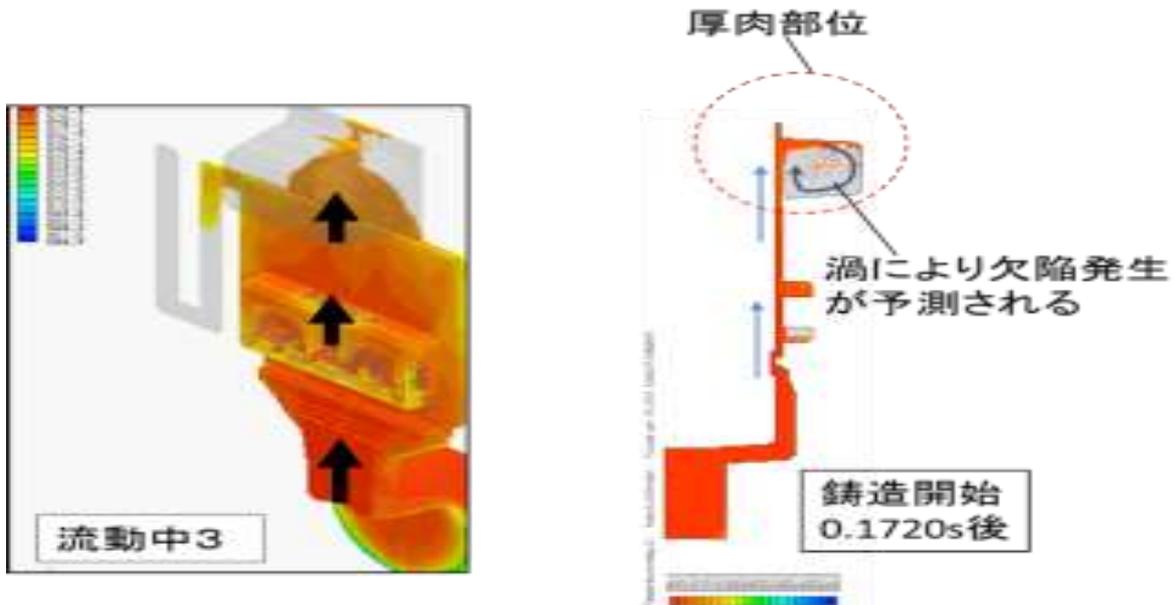


図23 ガス欠陥解析結果

1) -5 凝固欠陥解析 (CC処理無し)

岐阜大学の鋳造解析により、金型内部に発生する凝固欠陥(収縮巣)の様子が明確になった。図24に示す凝固の進行1の溶湯が充填された段階及び、凝固進行2の段階で欠陥(凝固巣)の発生が確認された。断面で見ると当初微細な欠陥が時間と共に成長し増加してゆく様子が解明できた。

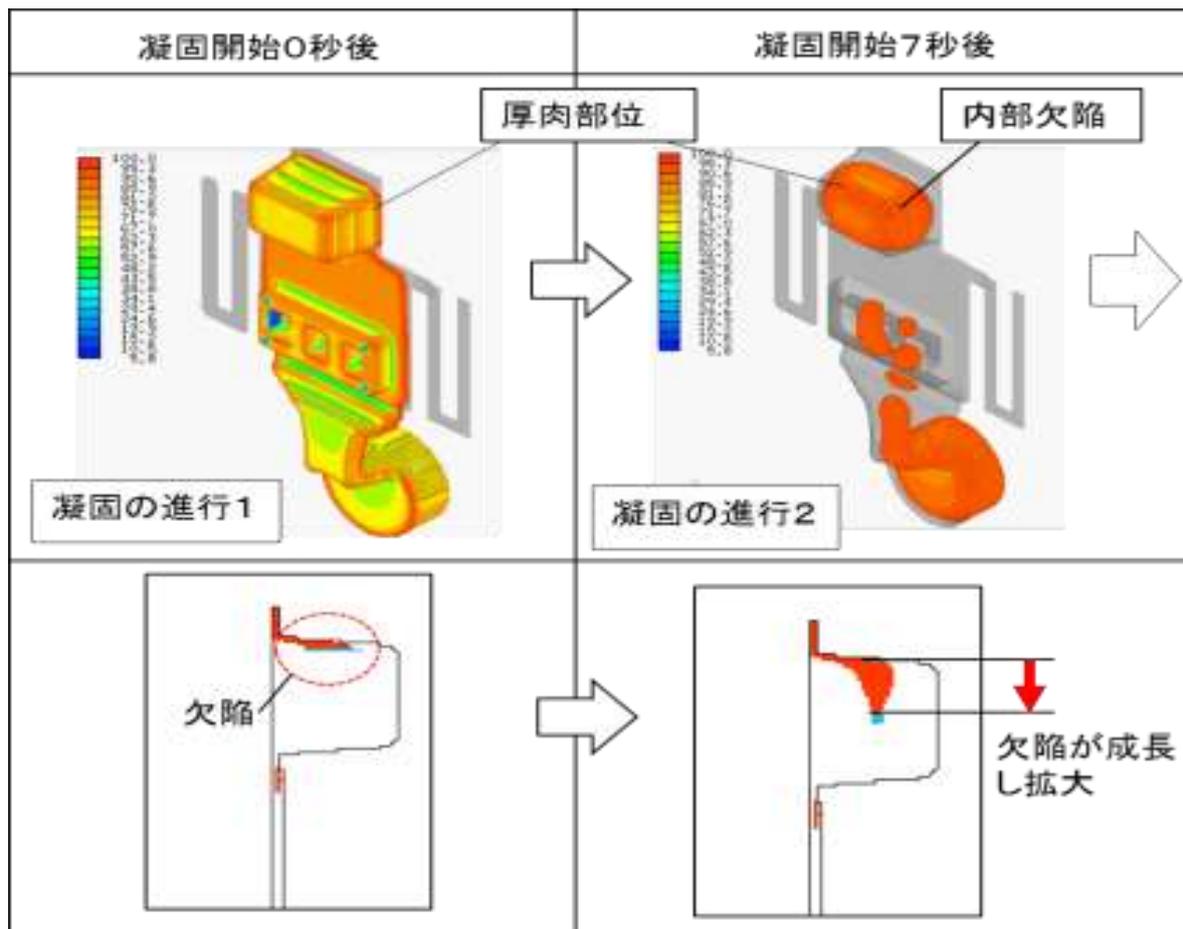


図24 凝固欠陥解析結果

2) 135T ダイカスト 鑄造評価

2) -1 湯流れ性

溶湯の流動性を評価するため、厚さ1mmの薄い溝を金型に掘り込み溶湯が到達できる距離（流動長）を測定した。その結果、CC処理なしでは120mmの位置で凝固により流動が停止、CC処理ありでは250mmの位置まで流動が確認された。この様子は先の岐阜大学で計算した湯流れ解析と一致した。CC処理ありでは鑄造圧力にかかわらずCC処理なしに対し、2倍以上の流動長となりCC処理の有効性を確認できた（図25）。

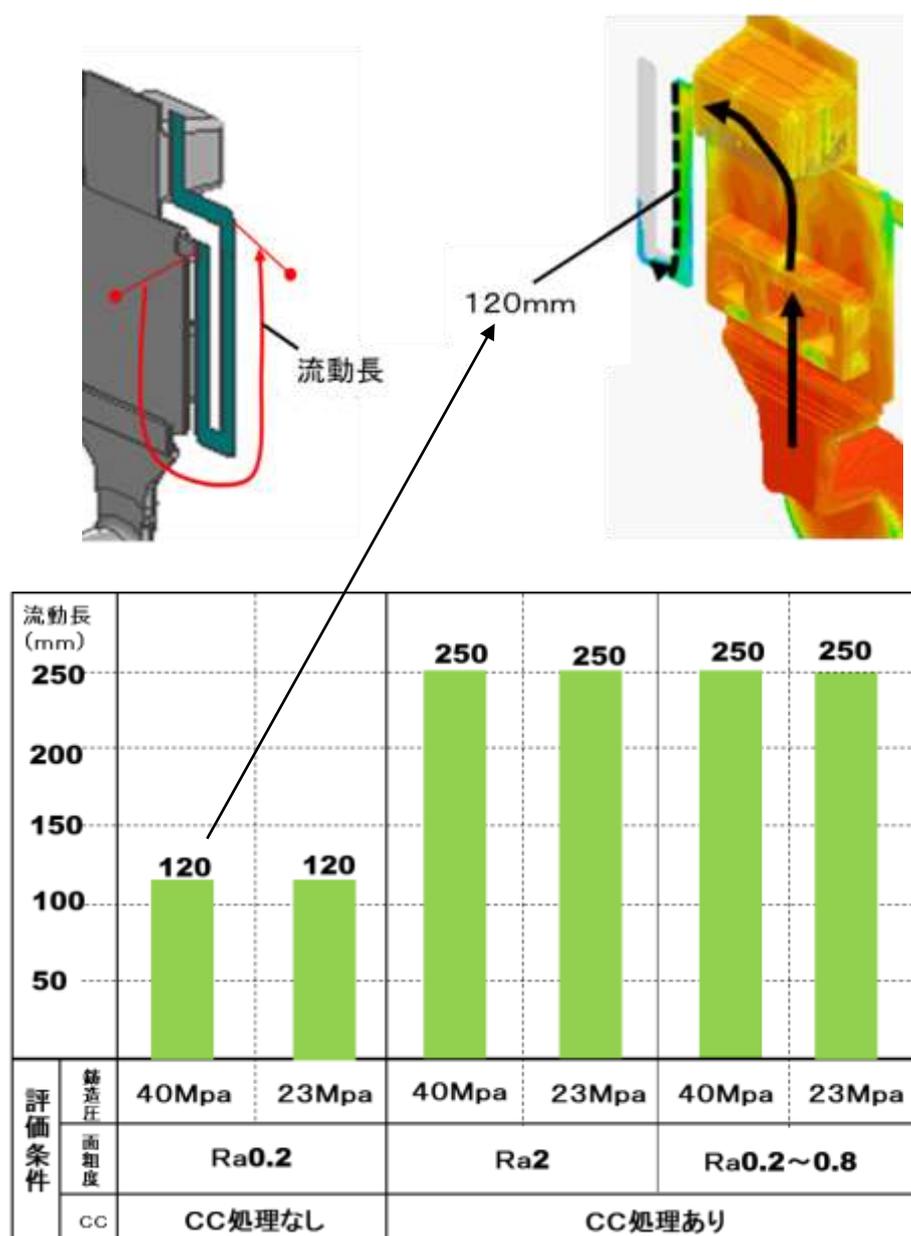


図25 湯流れ性評価結果

2) -2 内部欠陥

鋳造製品の厚肉部に発生する内部欠陥を調査するため、X線CTスキャナーで撮影した結果を図26に示す。CC処理なしでは製品内部に大型の内部欠陥が発生した。一方、CC処理ありは大幅に低減できていることが判明した。欠陥率は0.3→0.1%以下に低減しており、CC処理の湯流れ向上の効果で欠陥が微細化し分散されていると推定される。どの条件でも鋳造圧が低い23Mpaでは、鑄巣の増加が見られた。

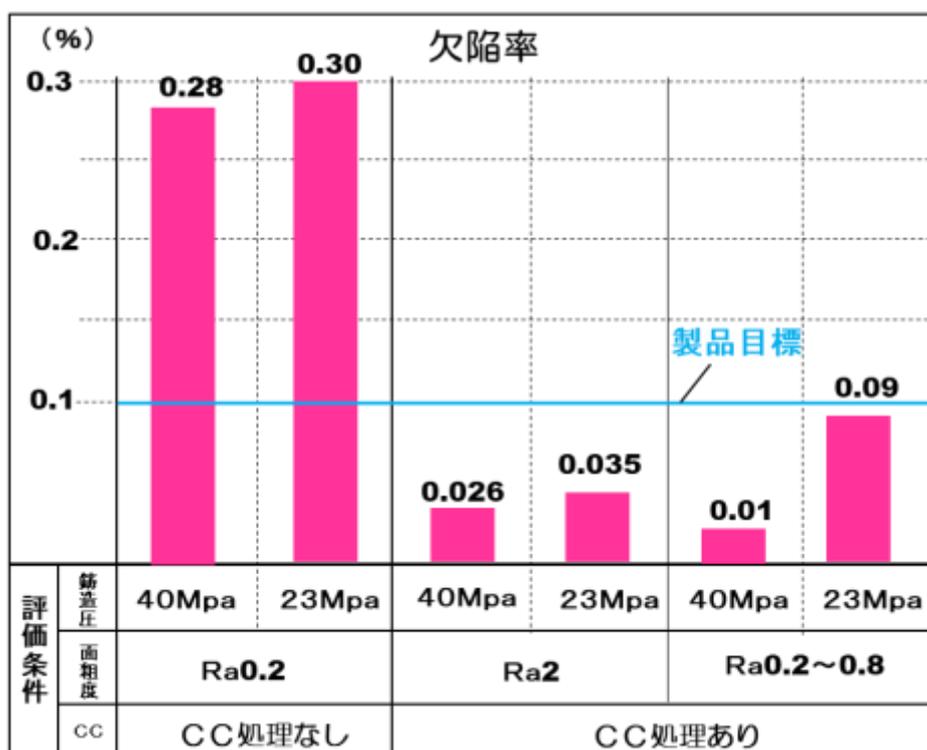
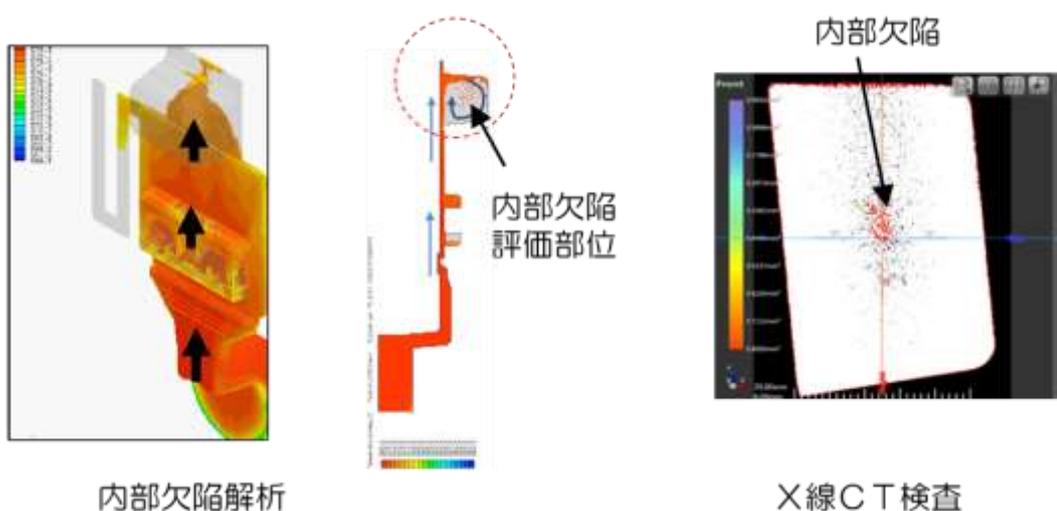


図26 内部欠陥評価結果

3) 評価金型のCC皮膜調査 (あいち産業科学技術総合センター)

3) -1 鑄造前後の金型表面性状調査

CC処理金型での鑄造評価完了後、金型表面のCC処理がどの様に変化しているか調査分析を行った。図27は皮膜調査の内容を表し、型製作→研掃(吹付け型ショットブラスト)→CC処理→鑄造を実施、ナノカーボンの変化を調査するため、CC処理をした鑄造未実施のテストピース(以下 TP と記載)と比較を行った。TP はCC処理完了状態であり、CC層が15 μm程度生成されている。一方、鑄造後のCC皮膜は厚さが減少する方向に変化していることがわかった(拡大写真・SEM、EDS分析)。この原因は、皮膜の強度不足と推定されたため、次年度に詳細調査を実施した。

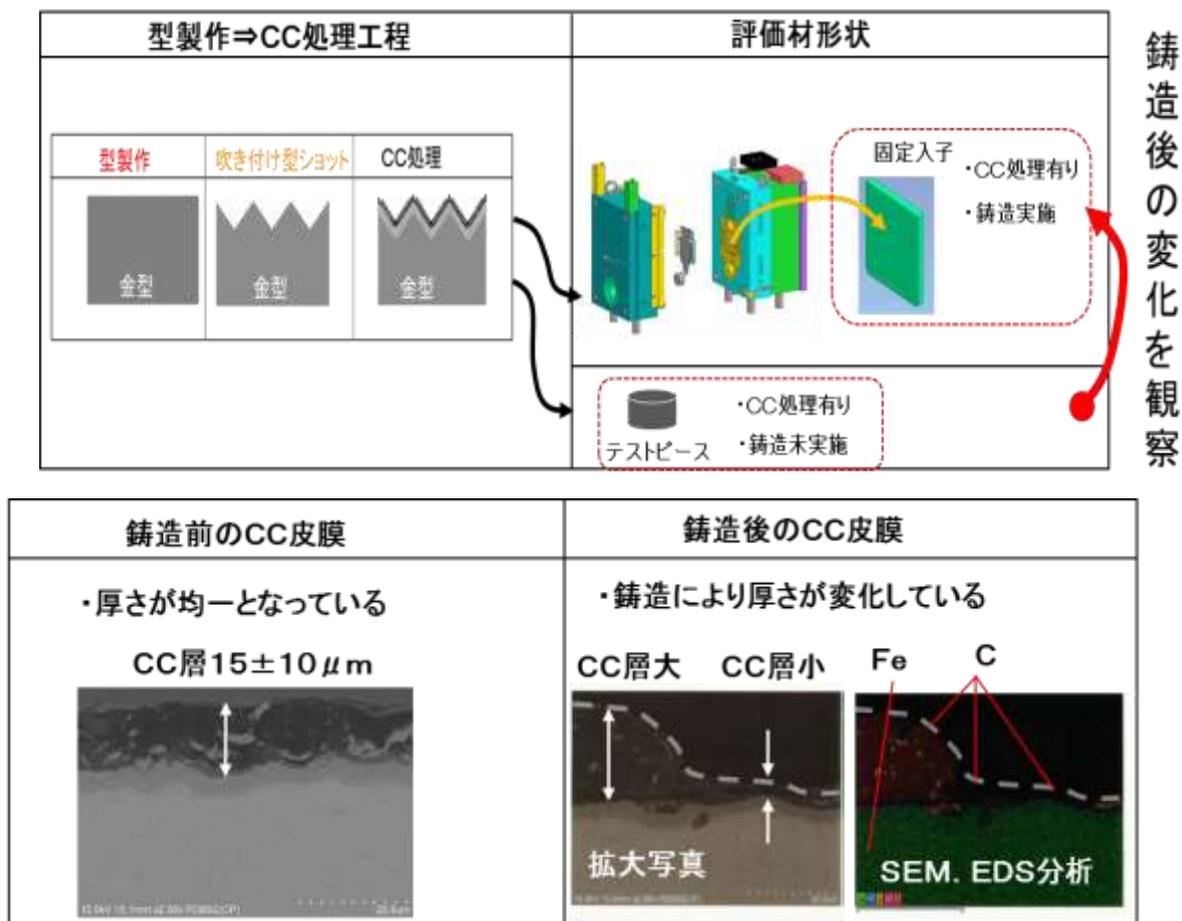


図27 鑄造前後皮膜の比較

2-4 令和元年度実施内容詳細

【3-1】湯流れ基礎評価（岐阜大学 平成30年度からの継続）

1) CC処理金型と熔融Alの接触角の静的評価

図28に固液間接触角測定装置（アドバンス理工製 WET-1200）によりCC処理有無の金属基板に対して、熔融アルミが下方から押し出された瞬間の接触状態を示す。試験は、700℃のAr雰囲気中で実施をした。接触角は $\theta/2$ 法により算出した。押し出された1分後の接触角を測定した結果、CCありでは135°、CCなしでは125°となり、CCありのほうが濡れ性が悪い結果となった。

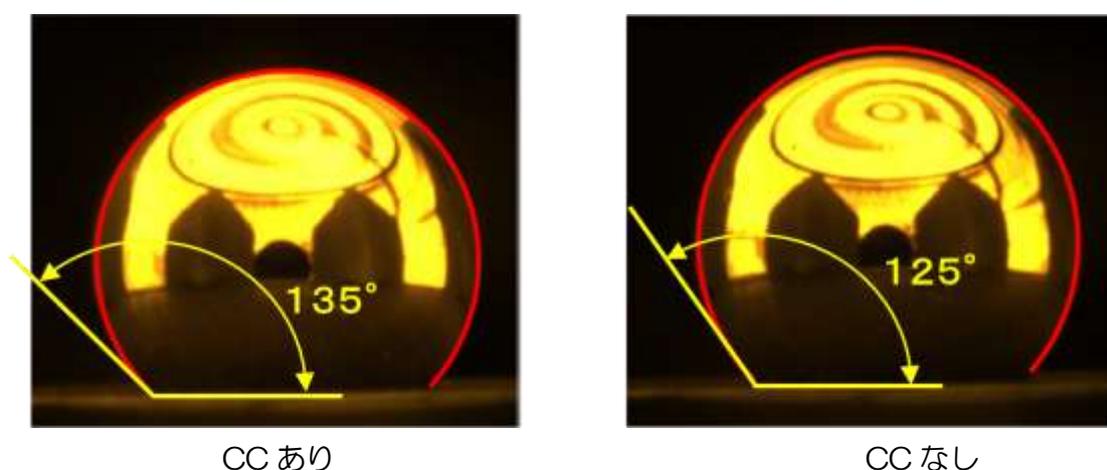


図28 熔融アルミとCC処理有無のSKD61製基板との濡れ性の比較

2) 流動中の接触角の評価

図29に室温と200℃に設定したCC処理有無の金型に対して、離型剤を塗布/未塗布したときの流動中の熔融金属と金型間の接触角を示す。接触角は $\theta/2$ 法により算出した。As-machiningの金型の場合、金型温度、および離型剤の有無に関係なく、ほぼ155-160°となった。一方、CC処理の金型の場合、金型温度、および離型剤の有無により接触角は変化した。室温・離型剤なしの場合は、CCなしの場合とほぼ同じ値であったが、200℃・離型剤なしの場合には接触角が大きくなった。さらに、200℃・離型剤ありの場合には接触角が小さくなった。このことは、CCと熔融Al間の界面特性は温度、および離型剤により変化することがわかった。

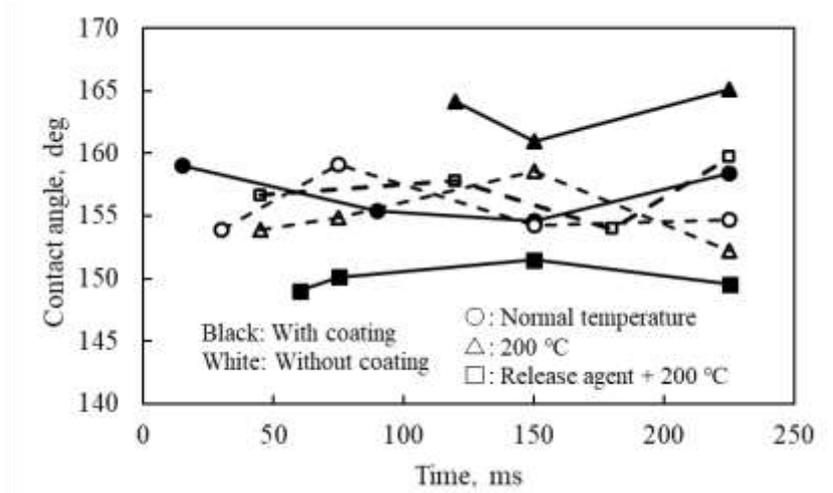


図29 流動中の溶融 Al (ADC12) と金型間の接触角の比較

3) CC 有無による湯流れ性の基礎評価 (重力鋳造実験)

図30に各種金型条件における鋳物の流動長と金型温度の関係を示す。金型温度の増加に伴って流動長は大きくなっている。しかし、As-machining の金型を除き、CC、および Blast の金型、および離型剤の有無による流動長への影響はなく、重力鋳造では CC 処理が流動長に及ぼす影響はなかった。

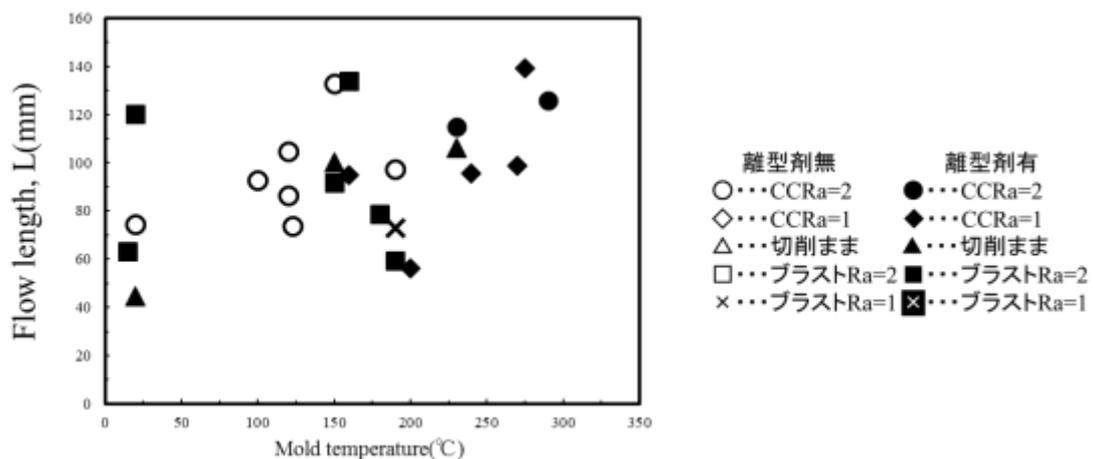


図30 各種金型における流動長と金型温度の関係

図31に離型剤を塗布した各種金型における湯先流動速度の測定結果を示す。横軸は、流動長さに対する速度計測位置を示す。流動中、湯先の速度はほぼ一定となる領域が存在し、流動末期では急激に流速が低下した。しかし、いずれにおいてもほぼ同じ値となっていた。

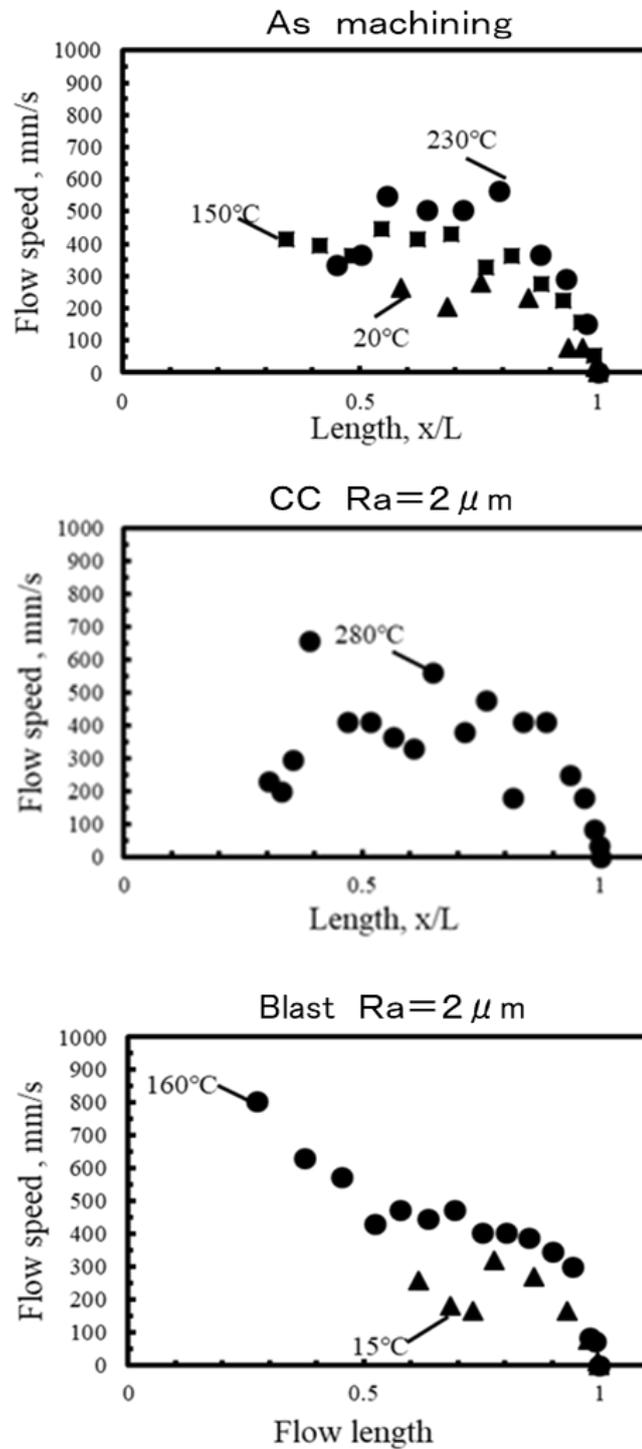


図31 流動中の湯先流速の比較（離型剤あり）

4) CC 有無による冷却速度の基礎評価（重力鋳造実験）

図32に鋳物の組織中の α デンドライトから算出した二次枝間隔（SDAS）の測定結果を示す。いずれの金型においてもほぼ同じ値となった。しかしADC12のSDAS（ λ_2 ）と部分冷却凝固時間（ θ_f ）の間には、 $\lambda_2 = 6.45 \theta_f^{0.31}$ の関係が報告されている[3]。今回測定した鋳物では、CCありの金型温度は他と比較して高い。つまり、他の金型と比較して冷却速度が大きいことを意味している。

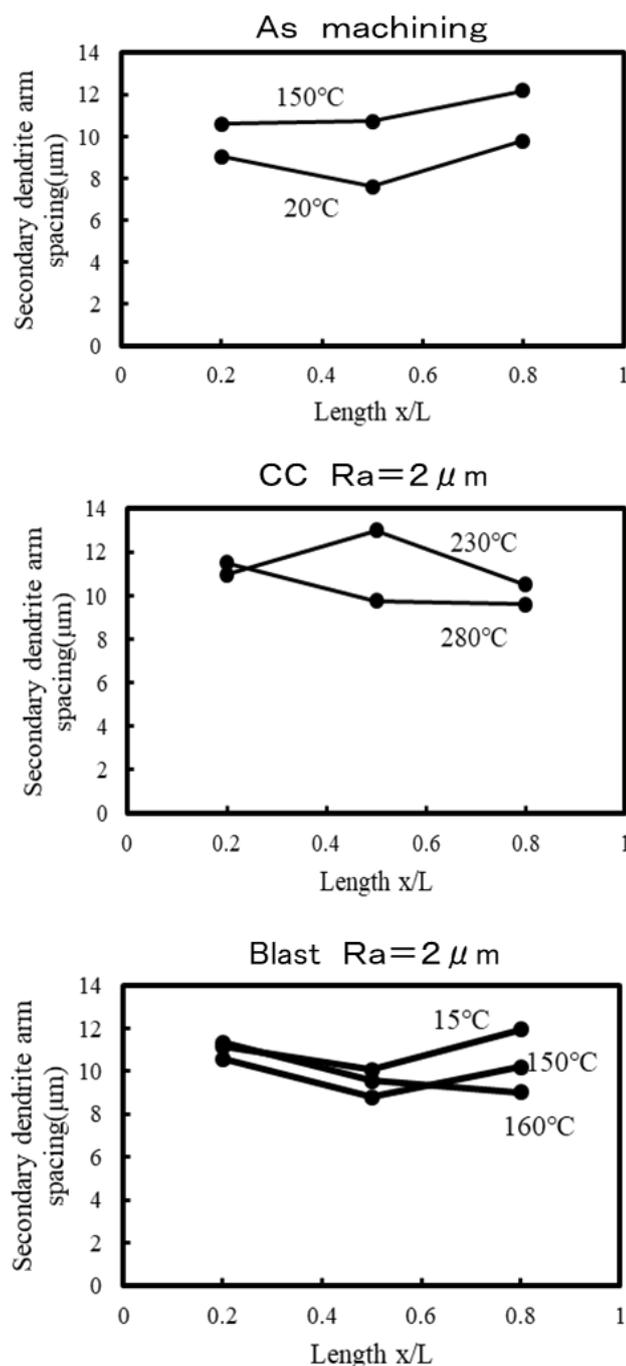


図32 SDASの測定結果（離型剤あり）

【3-2】ダイカスト実験金型評価

1) 強固な皮膜強度を有する高意匠CC処理の開発

1) -1 平成30年度評価の高意匠CC処理の課題

平成30年度に導入した投射式ショットブラストを用いて、図33に示す高意匠CC処理工程を開発した。この工程により処理した高意匠CCは、目標の面粗度Ra1以下を達成したが、鑄造評価において一部皮膜の剥離が発生した。

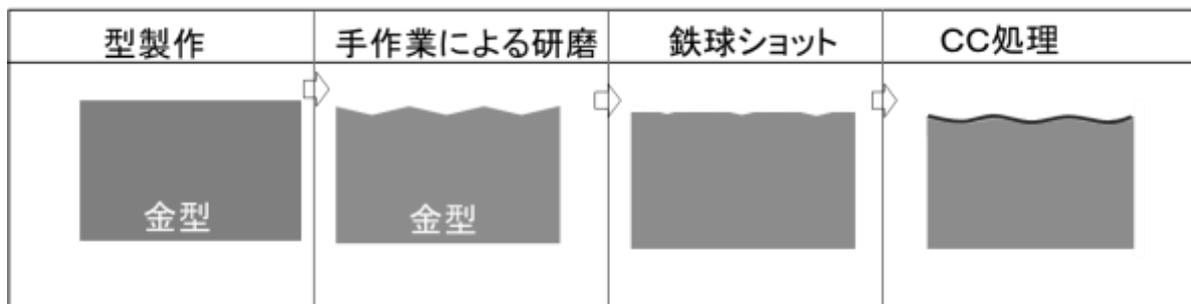


図33 高意匠CC処理工程

1) -2 皮膜強度の調査

上記剥離の原因を調査するため、メックインターナショナルにて皮膜強度測定を実施した。測定は図34に示すように、高意匠CC処理した評価TPをシャフトに接着し、引張試験機で破断時の荷重を測定した。



図34 皮膜強度測定方法

測定結果を図35に示す。皮膜強度の目標値20MPaに対し、高意匠CCは10~14MPaとショット機内のテーブル位置にかかわらず目標を下回っていることがわかった。通常CCの皮膜強度は23MPaであった。このことより、鑄造後の皮膜の剥離原因は皮膜強度が低いことであると考えられる。

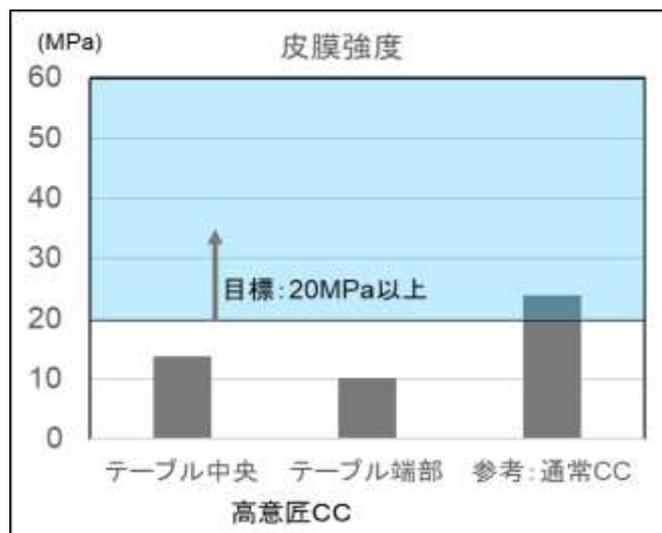


図35 皮膜強度測定結果

1) -3 強固な皮膜強度を有する高意匠CC処理の検討

高意匠CCで皮膜強度が低くなるのは、投射式ショットブラストの砥粒が、 $\phi 0.3\text{mm}$ と小さく研掃能力が不足したため、金型表面の酸化膜が十分除去できなかったと推定された。

強固な皮膜強度を得るためには、従来の吹付ショットブラストで酸化膜を確実に除去する必要がありと考え、通常のCC皮膜をベースにした新高意匠CC処理を検討した。通常CC処理した表面を追加工することで面粗度の良い皮膜を創生できないか評価した。皮膜の追加工方法は、A、B、Cの3種類とした。

1) -4 新高意匠CC処理のTP評価

TPによる評価結果を図36に示す。A、B、Cとも面粗度、皮膜強度は目標を達成した。膜厚については現状目標を外れるが、実铸造にて膜厚の変化と流動性を評価することとした。

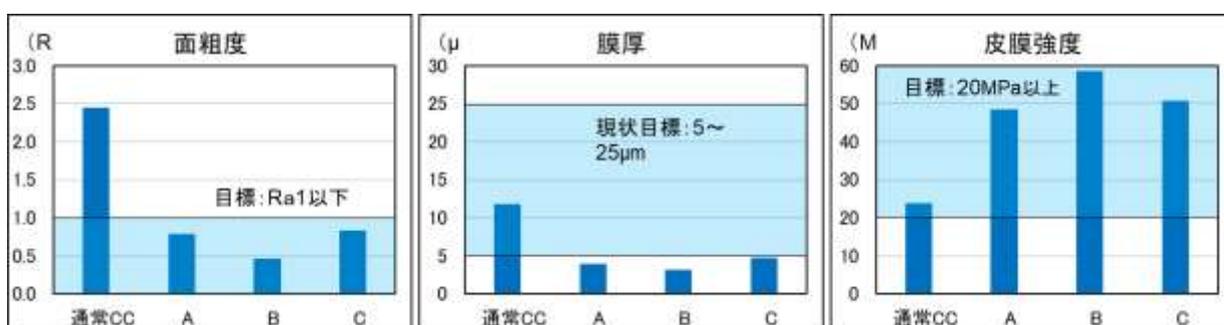


図36 TP評価結果

1) -5 追加工後の皮膜評価（あいち産業科学技術総合センター）

あいち産業科学技術総合センターにおいて、追加工 A、B、C の条件で処理した後のCC皮膜の状態を、SEM 観察により評価した。斜め 45° からの表面及び断面観察の結果を図 37 に示す。

いずれの試料でも、成膜前の吹付ショットブラスト処理により生じた基材表面の凹凸に対して、凹の部分ではCC皮膜が厚く、凸の部分ではCC皮膜が薄く存在する傾向が観察された。一方、面粗度の値は、いずれの試料も比較試料である通常CCに対して小さく、目標 Ra 1 以下を達成した。

上記より、CC皮膜の成膜により金型表面の凹凸を埋めた後、追加工することにより面粗度が改善されることがわかった。

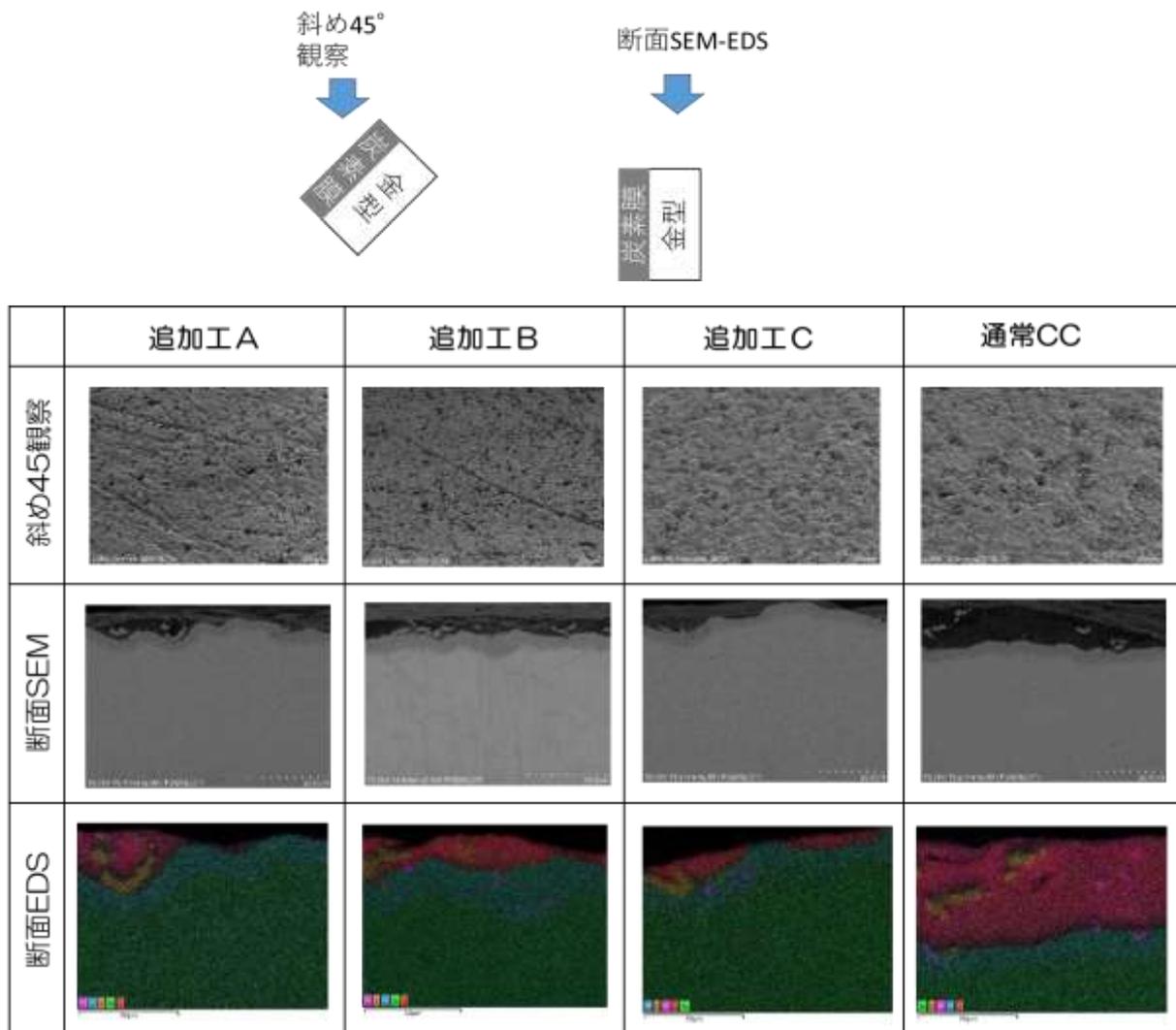


図37 研磨・研掃後の皮膜評価

1) -6 新高意匠CC処理の鑄造評価（面粗度・膜厚）

図38に示す135T ダイカスト用平板型にて、追加工した高意匠CC皮膜の面粗度と膜厚の推移を評価した。平板全面に通常CC皮膜を生成したのち縦方向に3分割し、A、B、Cの3種類の追加工をして鑄造した。

図39、図40に鑄造前後の面粗度と膜厚の測定結果を示す。面粗度はAとCの条件でほぼ目標を達成した。また、膜厚は各条件とも1~2 μm の減耗が見られた。膜厚の現状規格は、 $15 \pm 10 \mu\text{m}$ であるが、新高意匠CCでは通常CCよりも膜厚は薄くなるため、新たな規格を設定する必要がある。

上記の結果と製造工程の制約を考慮し、以降の評価はCの追加工方式で行った。

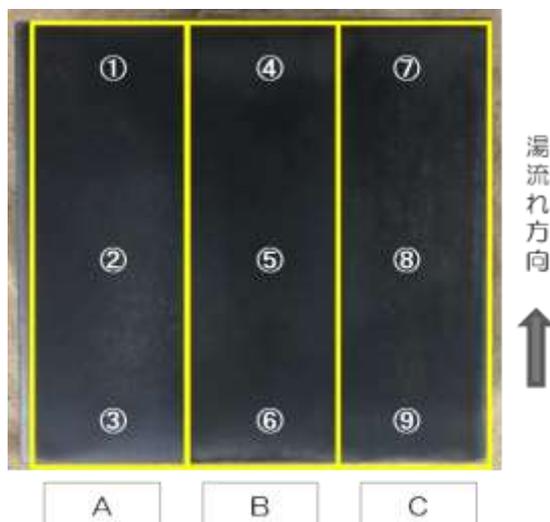


図38 ダイカスト用平板型

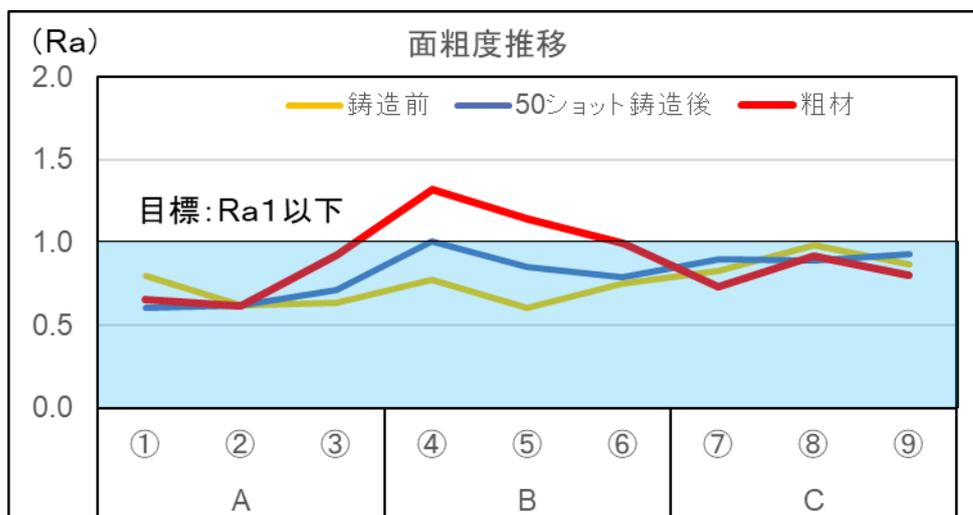


図39 面粗度測定結果

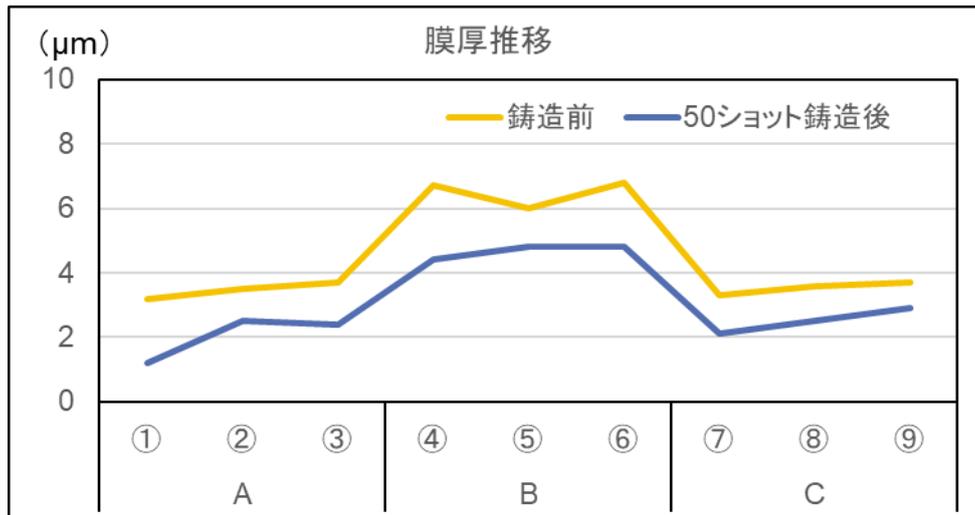


図40 膜厚測定結果

1) -7 新高意匠CC処理の铸造評価(湯流れ性)

135T 湯流れ評価型にて湯流れ長を評価した。図41に示す評価モデルの肉厚0.5mmと1.0mmの薄肉部の流動長を測定した。測定結果を図42に示す。肉厚0.5mmではゲート速度15m/s、30m/sとも新高意匠CCはCCなしと通常CCの中間レベルの湯流れ性であった。また肉厚1.0mmのゲート速度15m/sの条件でも同様の傾向を示したが、30m/sの条件では新高意匠CCはCCなしとほぼ同等の結果であった。

上記より、新高意匠CCは通常CCに対しては湯流れ性能は劣るが、条件の厳しい薄肉、低速側ではCCなしと比較して効果が見られることがわかった。

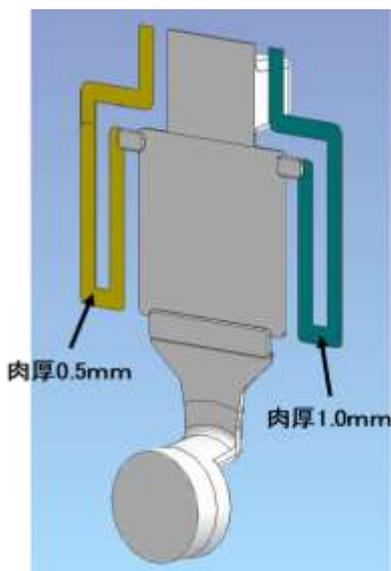


図41 湯流れ評価モデル

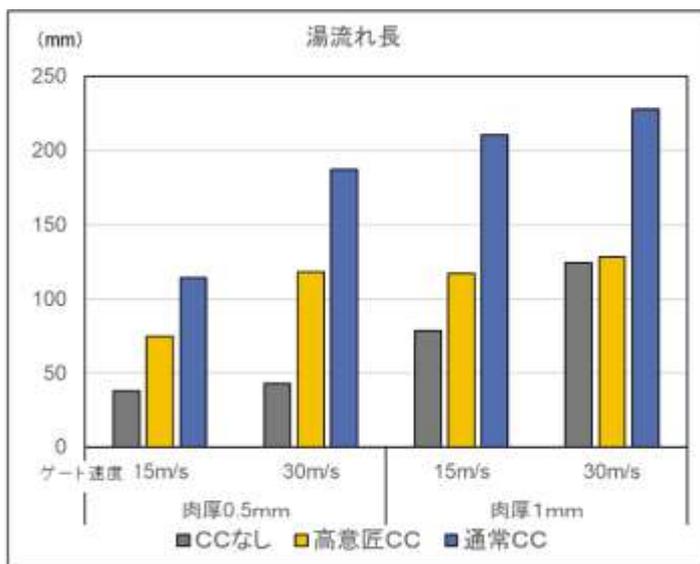


図42 湯流れ長測定結果

2) 800Tダイカスト金型鑄造評価

大物ダイカスト部品を模擬した800T ダイカスト評価金型を設計・製作し、メックインターナショナル保有のダイカストマシンにて各種条件での鑄造評価を実施し、高意匠CCの実用化に向けた評価を行った。

2) -1 800T ダイカスト金型設計製作

図43に800T 評価型の外観写真を、図43に評価モデル外観図を示す。評価モデルは肉厚を1、2、3mmと変化させ、湯流れ性を評価できるようにした。また反ゲート側に厚肉部を設け、内部欠陥の発生状況を確認できるようにした。

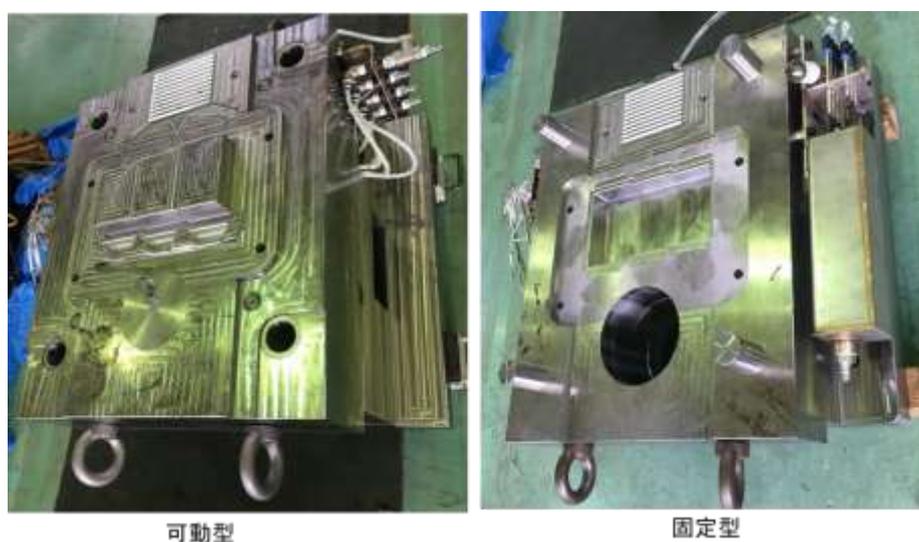


図43 800T 評価型外観写真

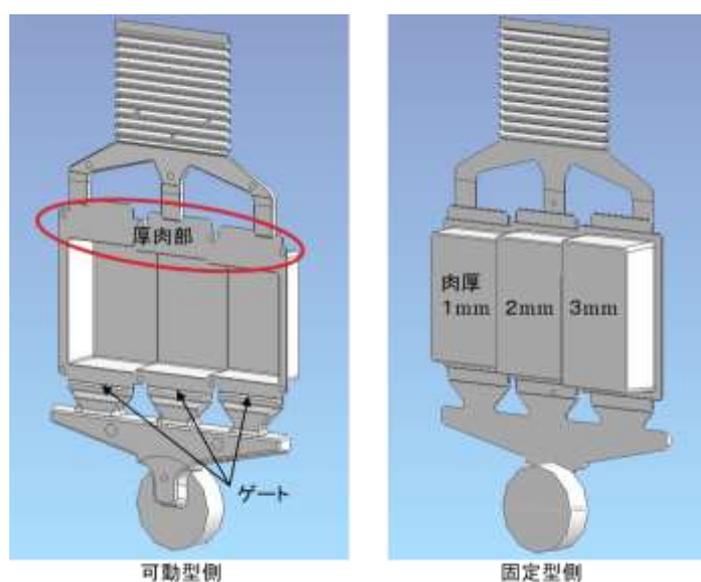


図44 評価モデル

2) -2 鑄造評価内容

2) -2-1 評価条件

- ① CC処理：なし、新高意匠CC（以降は単に高意匠CCと記す）、通常CC
- ② 射出速度：1m/s、2m/s
- ③ 鑄造圧：30MPa、50MPa

2) -2-2 評価項目（測定部位は図45に示す）

- ① 面粗度（固定側 肉厚1、2、3mmの上下6ヶ所）
- ② 湯流れ性（肉厚1、2、3mm部で比較）
- ③ 引張強さ・伸び（肉厚1、2、3mm部で比較）
- ④ 硬さ・組織（肉厚1、2、3mm部で比較）
- ⑤ 内部欠陥
- ⑥ 型温（可動型 8ヶ所、固定型 2ヶ所 表面より2mm）
- ⑦ 圧力（固定型2ヶ所）
- ⑧ 押出しピンひずみ（可動型8ヶ所）
- ⑨ 膜厚

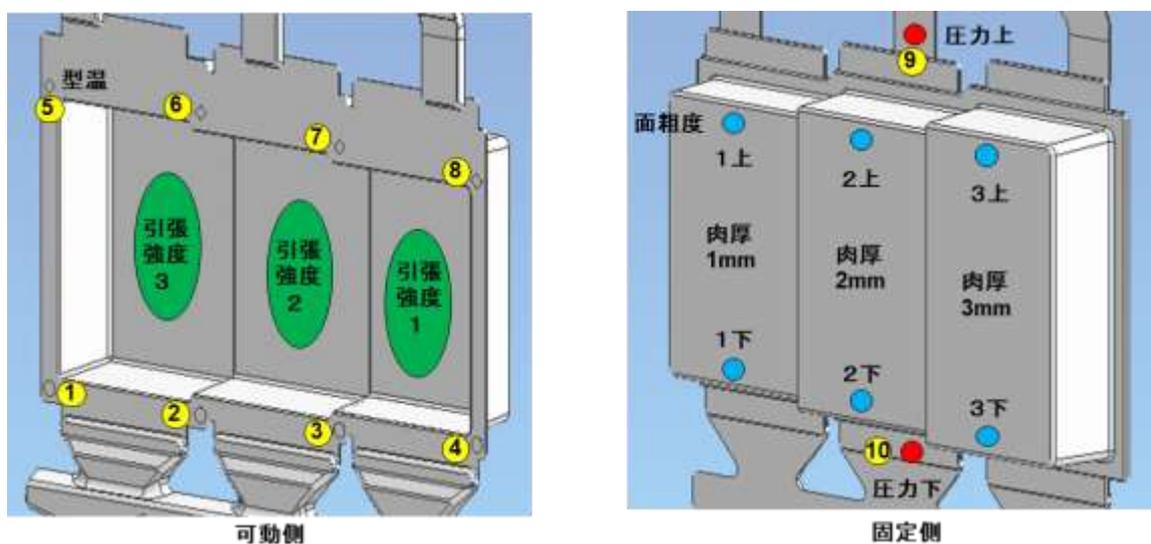


図45 測定部位

2) -3 面粗度評価

2) -3-1 面粗度測定

図46に面粗度の測定結果を示す。高意匠CCは通常CCに比べ大幅に面粗度は向上するが、目標の面粗度 Ra1 以下に対し、Ra1.1と目標は未達であった。ただしCCなしと比較しても Ra で 0.3 程度の差であり、今後改良の余地があると考ええる。また、肉厚・射出速度・鋳造圧力による差は見られなかった。

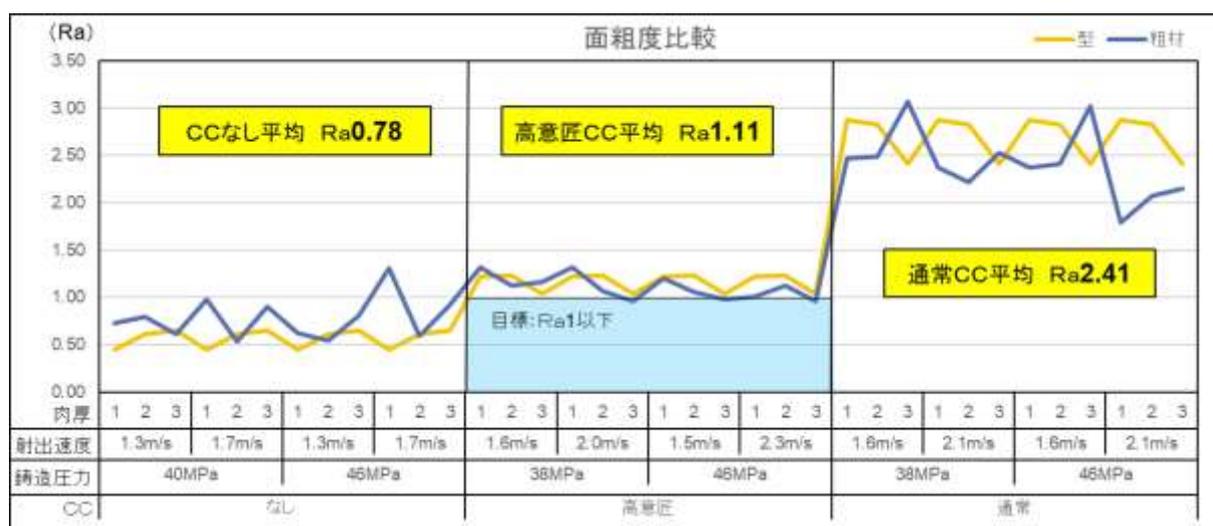


図46 面粗度測定結果

2) -3-2 製品表面性状調査（あいち産業科学技術総合センター）

図47にCC処理の各条件での製品表面の光学顕微鏡観察像を示す。CC処理なしの場合表面には、金型表面に残る加工時のツールマークが転写されており、溶湯が型表面に密着していることがわかる。一方、厚み 1mm の試料では、数十 μ m 程度の大きさの欠陥が多数観察され、型内部の湯流れの状態があまり良くないことが推察された。

CC処理をした場合も、成形体表面はCC皮膜の表面状態と類似した状態となっていることが観察されたが、CC処理なしの場合と異なり、厚み 1mm の試料においても湯流れの不良に伴う欠陥は観察されなかった。CC処理方法の比較では、高意匠CC処理の方が通常CC処理の場合に比べ、より表面の凹凸が少ない印象であり、高意匠CC処理を行うことにより平坦な表面が得られたと考えられる。

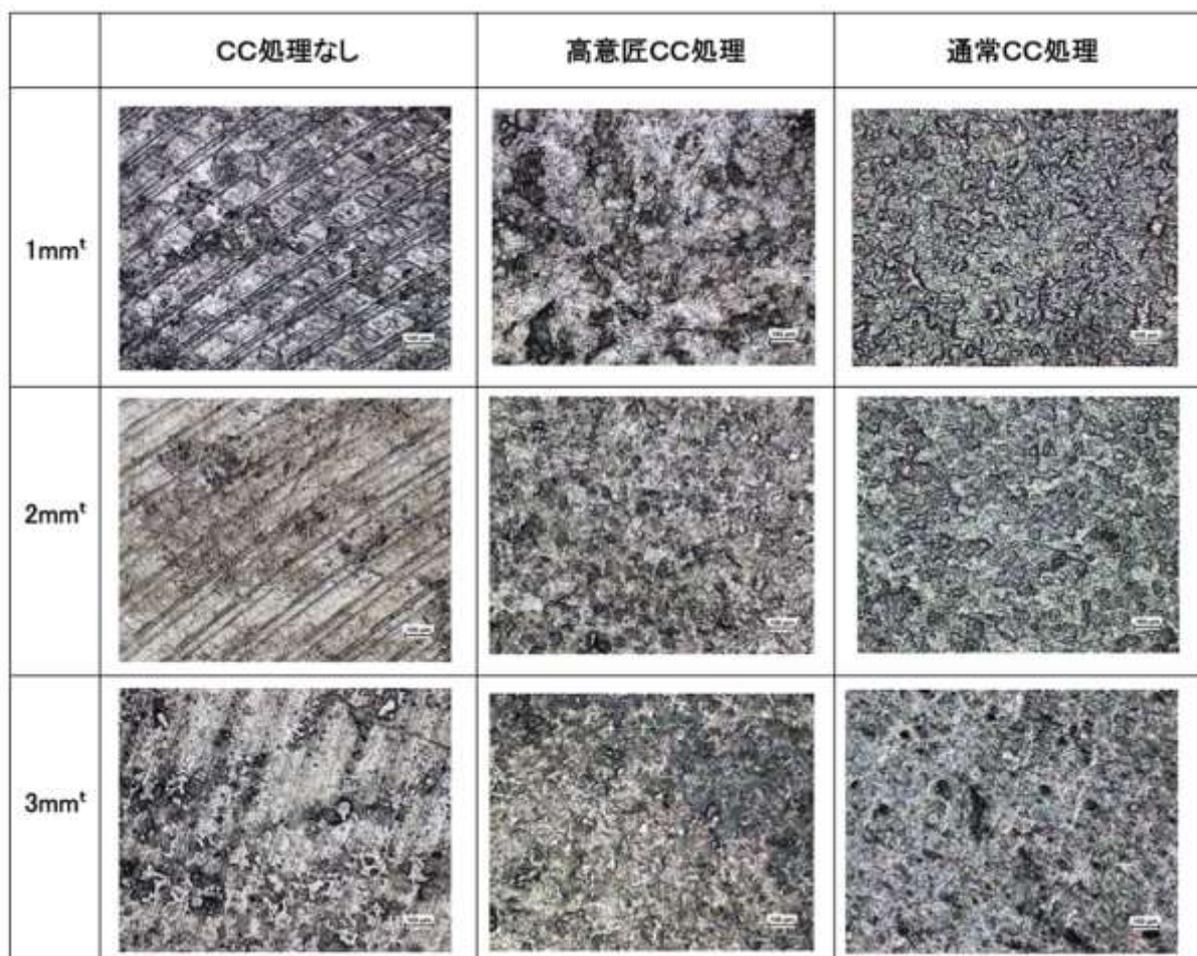


図47 製品表面の光学顕微鏡像

2) -4 湯流れ性評価

大物ダイカスト製品を模擬した製品部の湯流れ性は、単純な流動長では評価できないため、外観の目視評価とした。湯流れ性を1（悪い）～10（良い）の10段階で評価した結果を図48に示す。また図49に湯流れ指標のグラフを示す。

肉厚2mm と3mm の部位は全ての条件で湯流れ性は良好であった。肉厚1mm の部位では通常CCでは良好であったが、高意匠CC、CCなしの順に悪化し、流速が遅くなると悪くなる傾向を示した。この結果は135T の湯流れ評価の結果と一致しており、高意匠CCの湯流れ性は通常CCとCCなしの中間レベルであることが確認された。

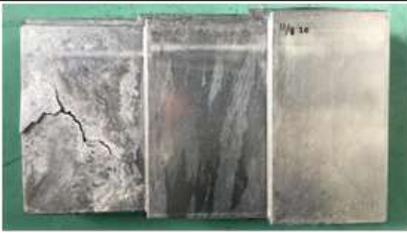
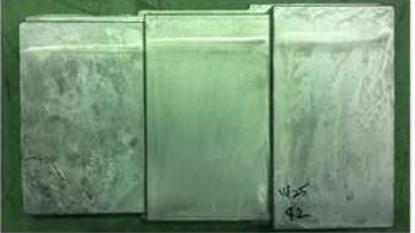
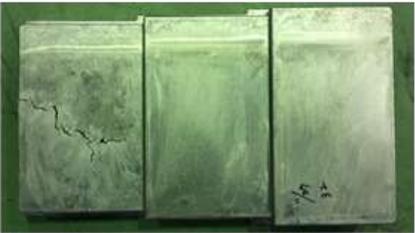
CC	速度	肉厚	湯流れ性(10段階)	粗材外観
なし	1.3m/s	1mm	2	
		2mm	10	
		3mm	10	
	1.7m/s	1mm	3	
		2mm	10	
		3mm	10	
高意匠	1.5m/s	1mm	4	
		2mm	10	
		3mm	10	
	2.0m/s	1mm	7	
		2mm	10	
		3mm	10	
通常	1.6m/s	1mm	10	
		2mm	10	
		3mm	10	
	2.1m/s	1mm	10	
		2mm	10	
		3mm	10	

図48 湯流れ性評価結果

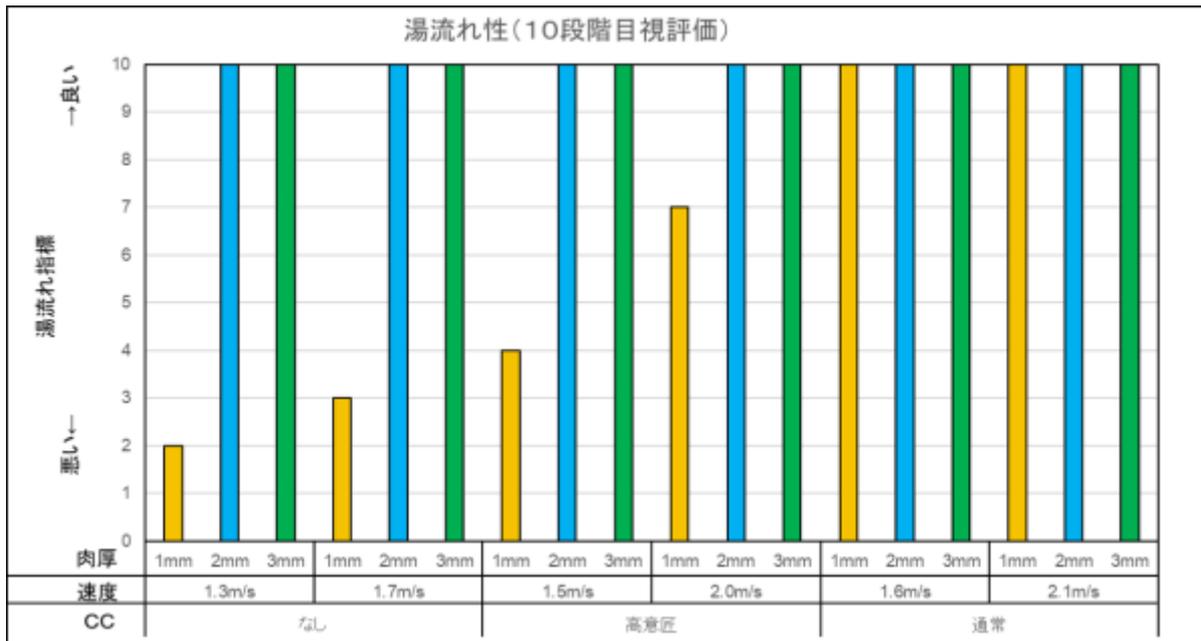


図49 湯流れ性評価結果

2) -5 引張強さ・伸び評価

図50に引張強さと伸びの測定結果を示す。引張強さはCCなしと高意匠CCはほぼ同等であったが、通常CCはやや低い値を示した。伸びについても同様の傾向であった。

今回の試験では試験片の端部で破断するものが多く、上記結果は参考値とする。

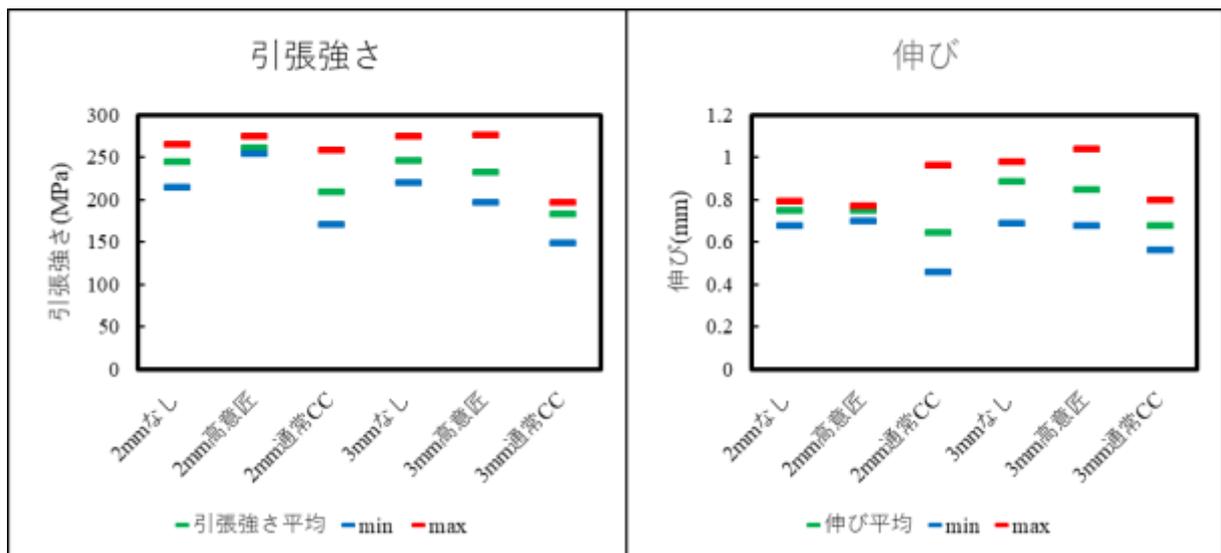


図50 引張強さ・伸び測定結果

2) -6 硬さ・組織

図5 1 に硬さ測定結果を図5 2 に組織写真を示す。硬さは肉厚1 mmではCCなしがやや高い値を示したが、他の肉厚では各条件で大きな差は見られなかった。また、組織写真ではCCなしの肉厚2mmと3mm および高意匠CCの肉厚3mm部で、表面近傍に白線が見られた。これは白色バンドと呼ばれる初晶 α -A1相が偏析したもので、急冷された場合に発生しやすい。このことからCC処理は湯流れ時には比較的急冷されにくいことを意味していると考えられる。

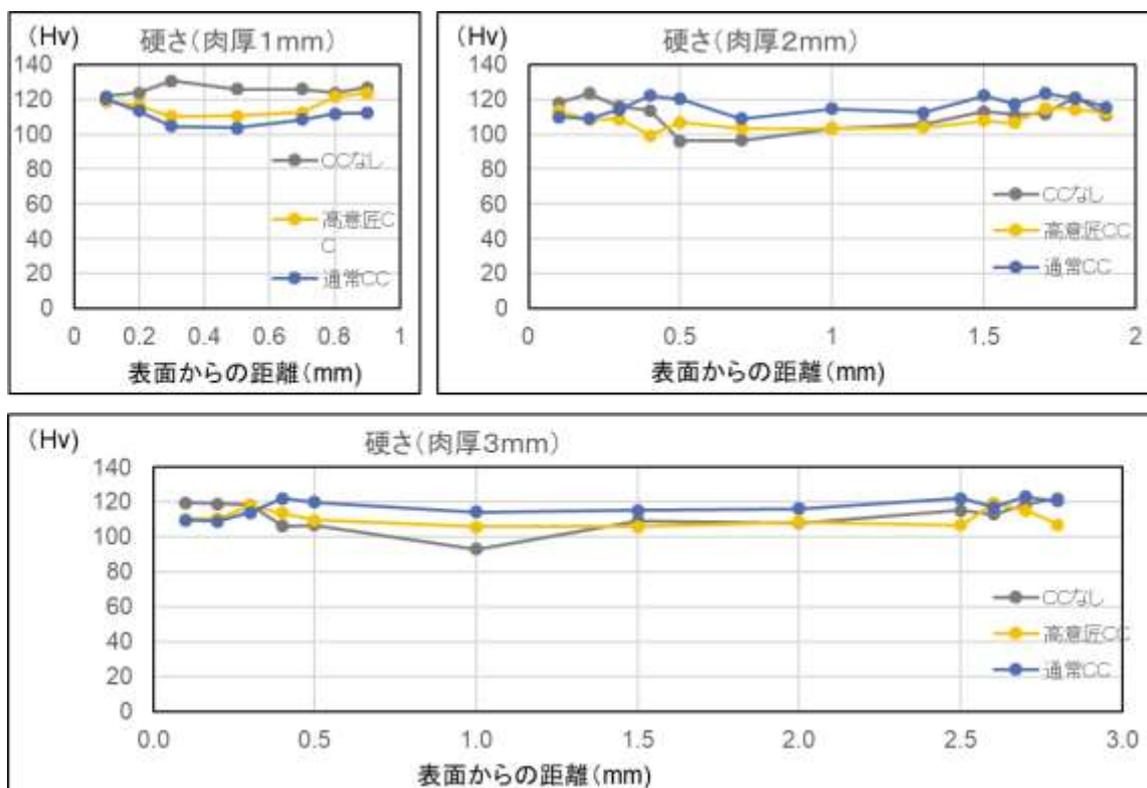


図5 1 硬さ測定結果

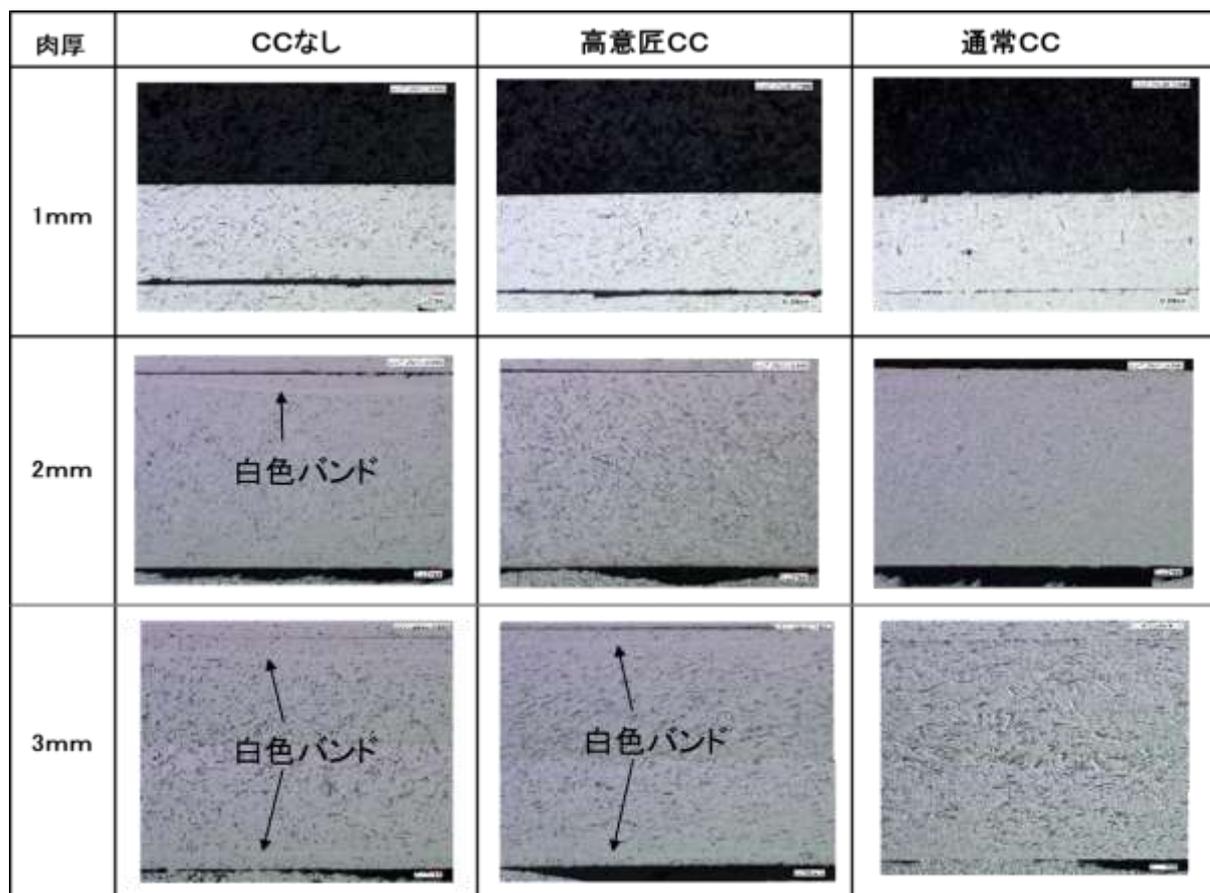


図52 組織写真

2) -7 内部欠陥評価

図53に内部欠陥調査部位を示す。肉厚1、2、3mmの反ゲート側の厚肉部を調査した。図54に製品断面写真とCT画像の調査結果を示す。CT画像は岐阜大学にて撮影した。CCなしのCT画像はアルミと空気の境界が不鮮明なため除外した。肉厚1mmの部位は、CC有無にかかわらず、内部欠陥が多発しており、各条件とも肉厚が増加するにつれ欠陥は減少する傾向が見られた。CC処理した金型は、圧力伝播性が優れていることはわかっており、引け不良に対しては効果があると考えられている。しかしながら、複雑な製品形状の場合、湯流れ中に巻き込んだ気体が内部欠陥となるため、CC処理の効果が顕著にみられなかったと考えられる。気体を巻き込まないような湯道やガス抜きベントの改善が必要となる。

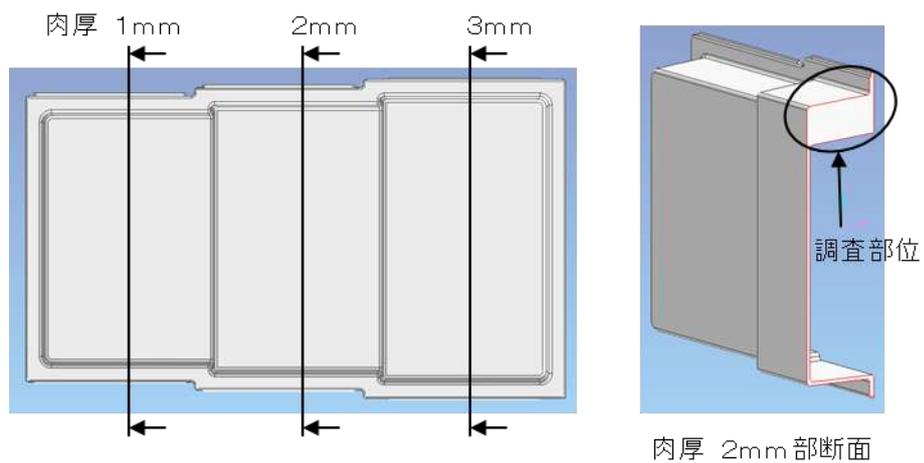


図53 内部欠陥調査部位

CC	製品断面写真			CT画像		
	肉厚 1mm	2mm	3mm	肉厚 1mm	2mm	3mm
なし				/		
高意匠						
通常						

図54 内部欠陥調査結果

2) -8 型温測定

図55に可動型の型温測定結果を示す。各条件とも上側の温度が高くなっている。これは上部の厚肉部の影響と考えられる。CCありの測定結果は熱電対セット不良と考えられるため、CCあり・なしでの明確な差があるかは不明であった。

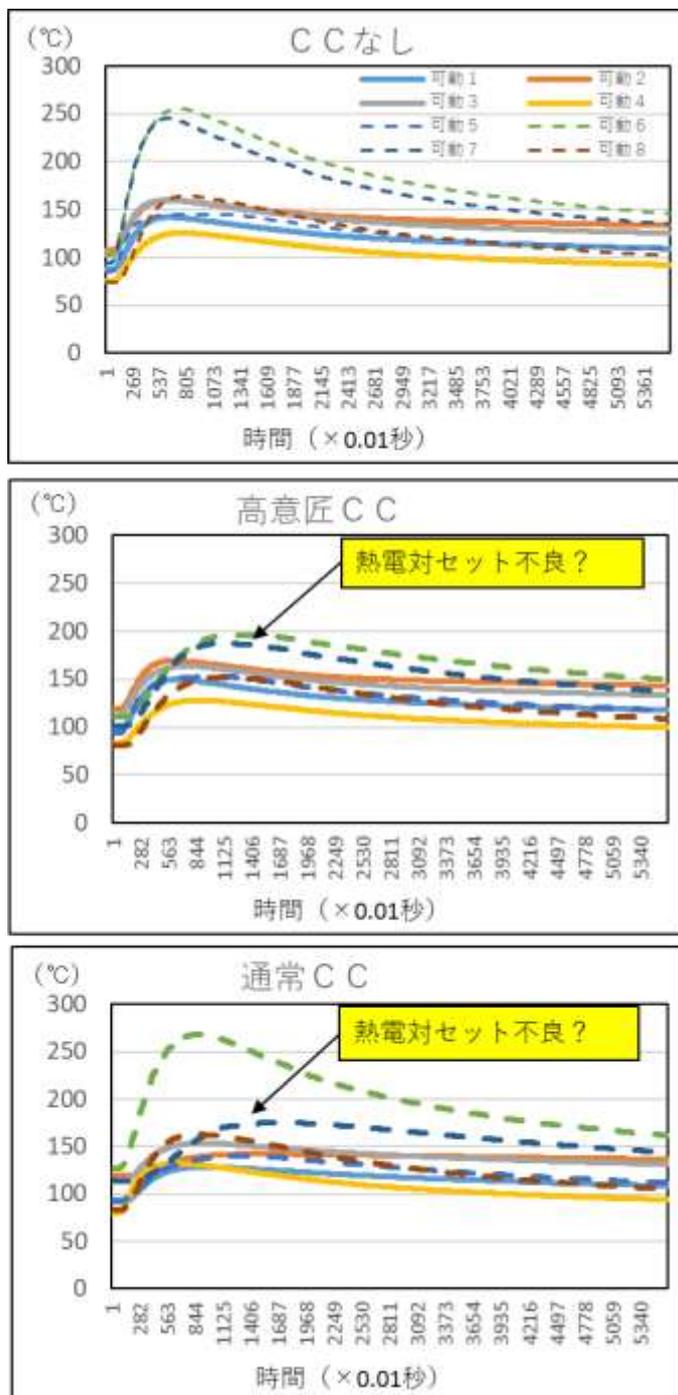


図55 可動型 型温測定結果

図56に固定型の型温測定結果を示す。可動型と同様、各条件とも上側の温度が高くなっているのは上部の厚肉部の影響と考えられる。また、昇温速度に着目し各条件の昇温速度を図56に整理した。この結果より昇温速度はCCなし<高意匠CC<通常CCの順に高くなった。これはCC皮膜の方が凝固時の熱伝達率が高いためと考えられる。本データは岐阜大学にてCAE解析に活用した。

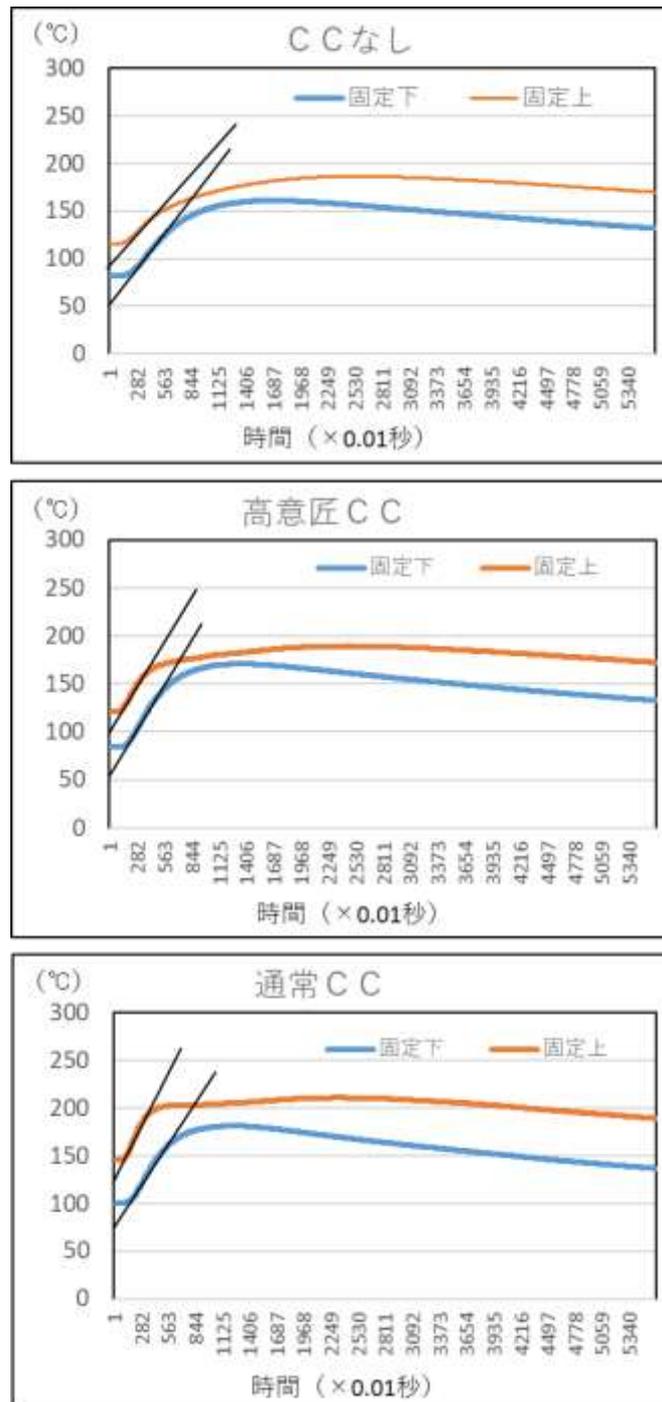


図56 固定型 型温測定結果

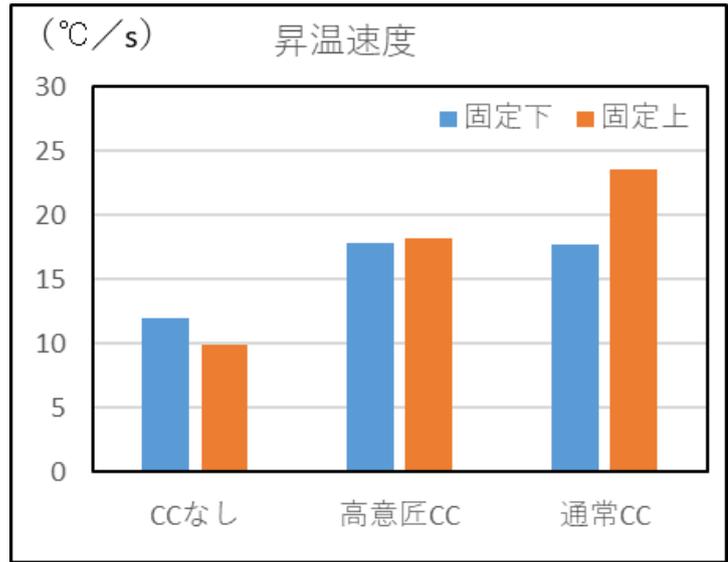


図57 固定型 昇温速度

2) -9 圧力測定

図58に固定型の圧力測定結果を示す。上下圧力とも高意匠性CCの方がCCなしよりもやや高い圧力を示したが、通常CCは他に比べ低い圧力となった。これは溶湯の流動性が良すぎてセンサー穴にアルミが差し込んだためと推定される。この結果より、高意匠CCでも圧力伝播性に優れていることがわかった。

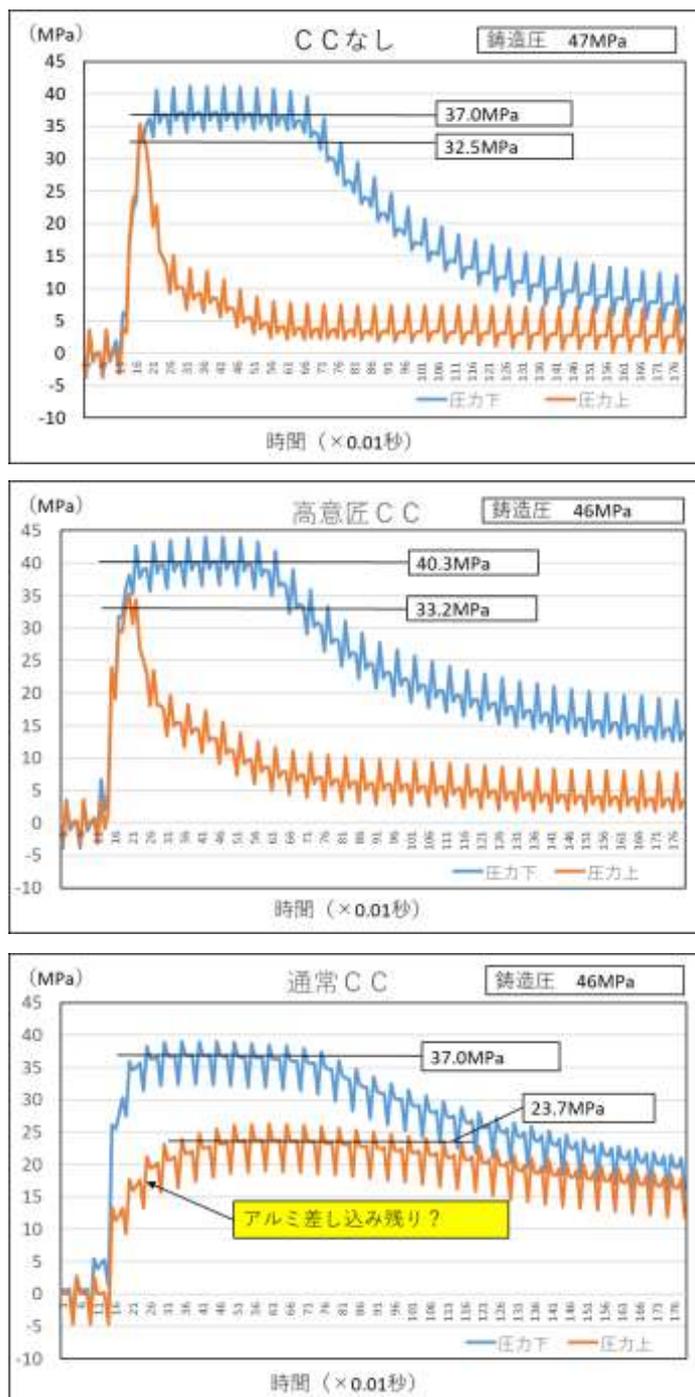


図58 固定型 圧力測定結果

2) -10 押し出しピンひずみ測定

押し出しピンに働く応力は、①射出時、②型開時、③押出時の3つのタイミングで変化する。各タイミングでのひずみを比較したグラフを図59に示す。

①射出時の圧縮ひずみは、CCなし<高意匠CC<通常CCの順で大きくなり、CC処理は射出圧力を良く伝えるといえる。

②型開時のひずみの変化は圧縮されていたピンが型開により解放されるために起こり、変化量は、CCなし>高意匠CC>通常CCの順で小さくなる。

③押出時の歪の変化量は、CCなし>高意匠CC≒通常CCの順で小さくなる。このことより、CC処理は押出時の抵抗が小さくなるといえる。

また図60に押し出しピンひずみ測定結果の詳細を示す。

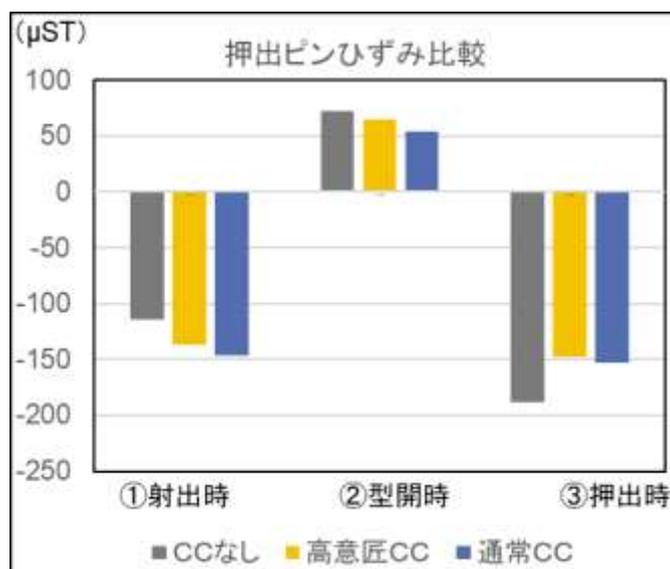


図59 押し出しピンひずみ比較

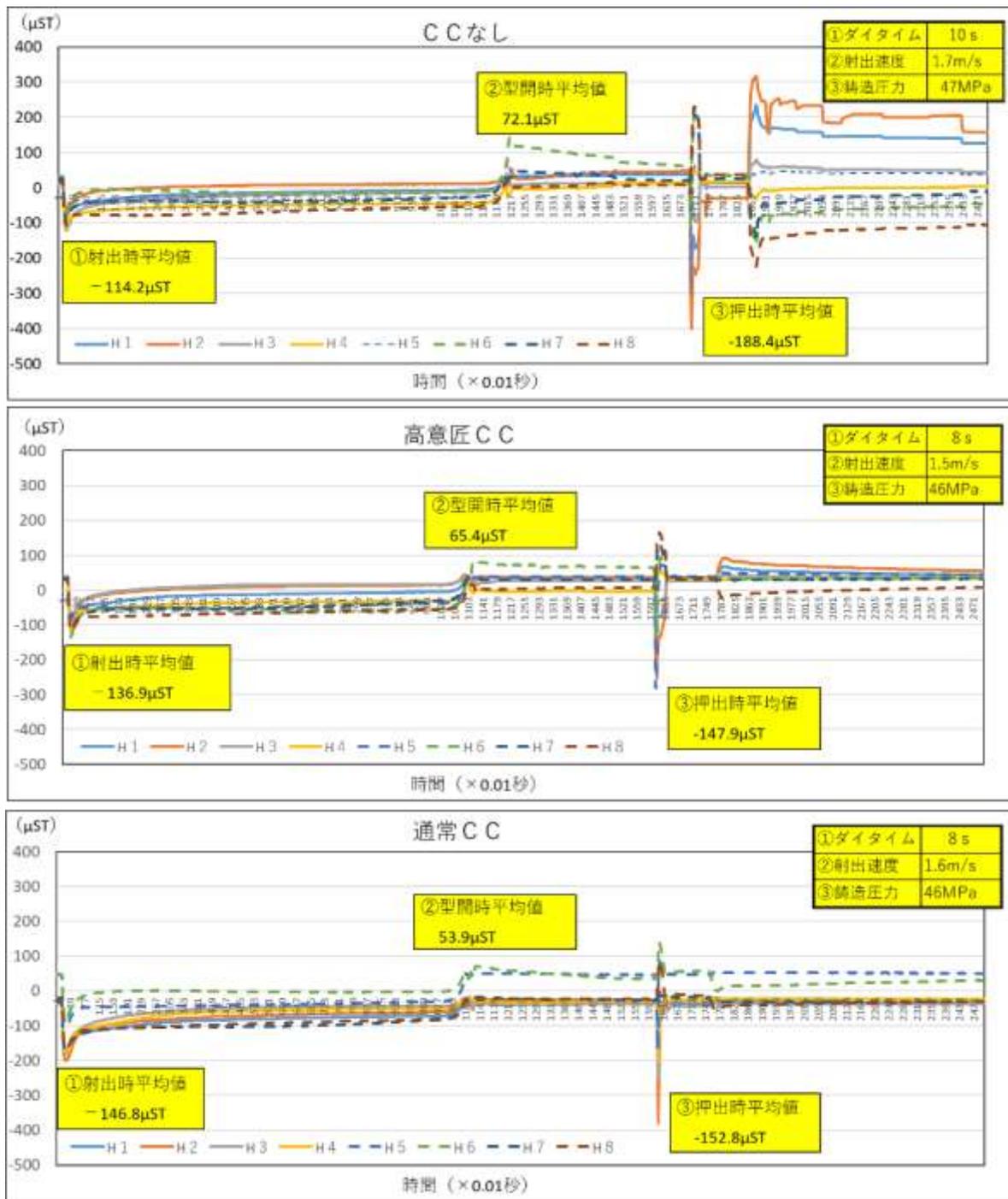


図59 押し出しピンひずみ測定結果

2) -1 1 膜厚

図6 1 に鑄造前後のCC皮膜の膜厚推移を示す。膜厚の減耗率は、高意匠CCでは2 4～7 0%、通常CCでは2 1～5 4%であった。また、高意匠CC、通常CCとも製品の内側となる可動入子の減耗率が大きい。

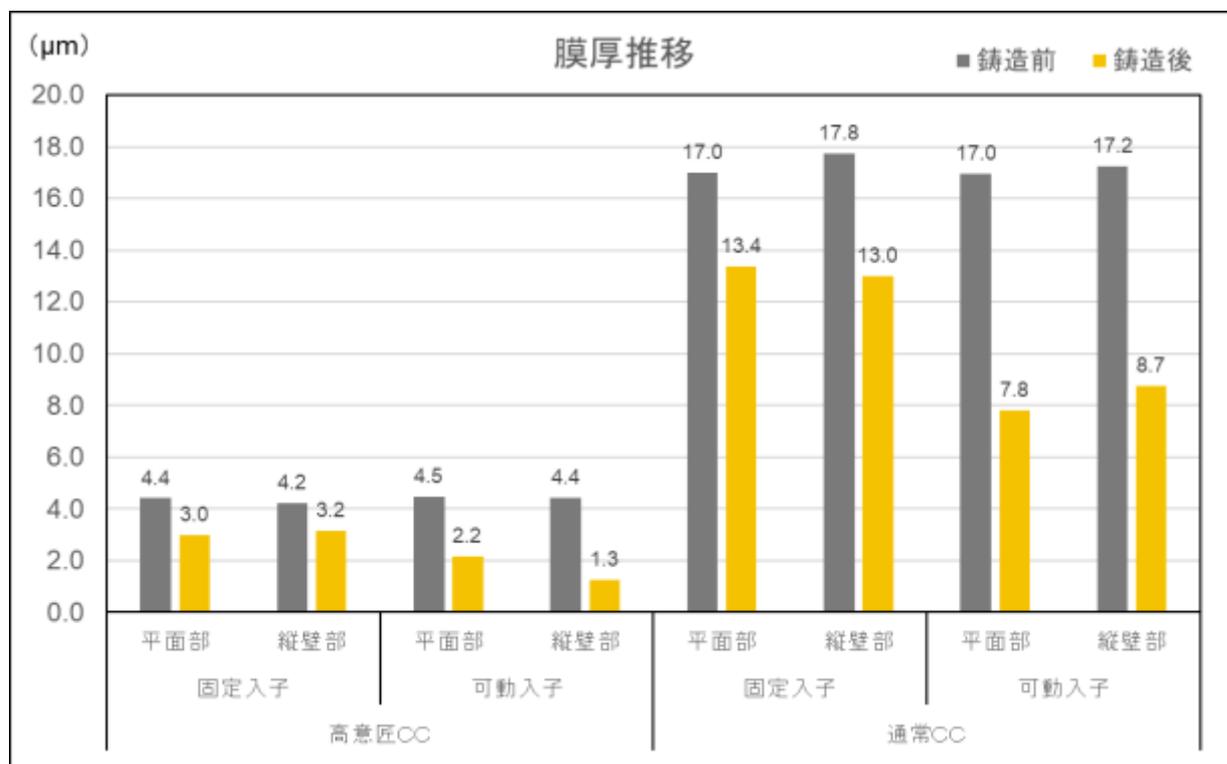


図6 1 膜厚推移

3) 鋳造解析・構造解析 (岐阜大学)

3) -1 800T金型の湯流れ解析

図62にCC有無による金型の湯流れ解析結果を示す。CC処理をした金型の解析方法(伝熱特性)については、【3-3】に記載の方法を用いた。計算の結果、CC有無に関係なく肉厚1mmの箇所では充填前にすでに固相率が20%以上の箇所があり、この部分で湯まわり不良が発生すると考えられる。しかし、その大きさはCCありのほうが少ないと推察された。

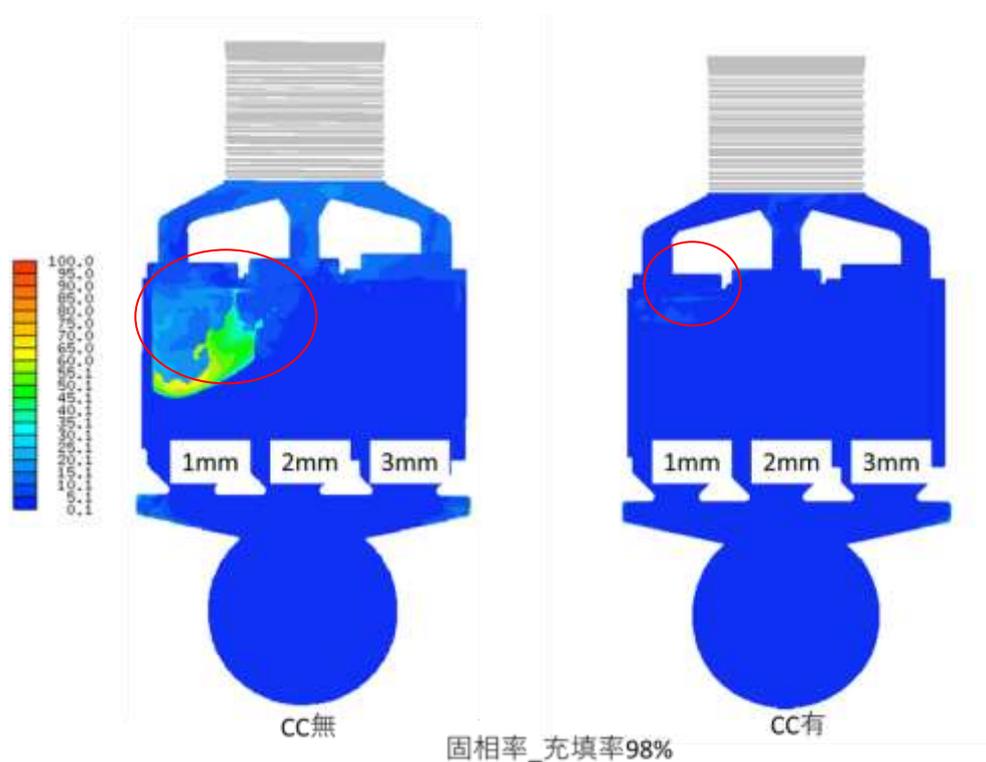


図62 CC有無による湯流れ解析結果

3) -2 800T金型の構造解析

図63にキュアリング時における金型に発生する相当応力の計算結果を示す。本計算は、金型を弾性体として計算しており、計算された応力の値は通常よりも大きくなっているが、CC有無による影響を比較するうえでは問題ないと判断した。図より、金型の凸部、および凹部の角部において大きな応力が発生しており、その値はCCなしのほうが大きかった。

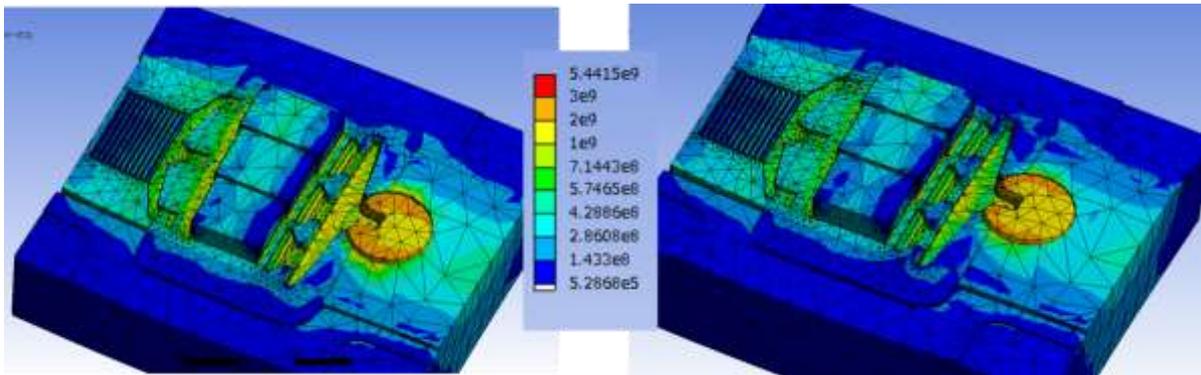


図63 CC有無によるキュアリング時の金型に発生する相当応力の計算結果

4) CC処理した金型の寿命評価

4) -1 評価モデル概要

CC有無を考慮した金型温度解析を実施し、その結果を熱荷重とした。また、キュアリング中の鋳造圧力(40MPa)は静水圧的に金型に作用すると仮定をし、その両者を付与したFEMモデルにより構造解析を実施した。構造解析には、固定側、可動側金型の両方を使用し、固定型プラテン側の面を拘束するとともに、可動型プラテン側から800tonfの荷重を面全体に付与することによって、型締め力を表現した。図64に解析に用いた金型モデルを示す。

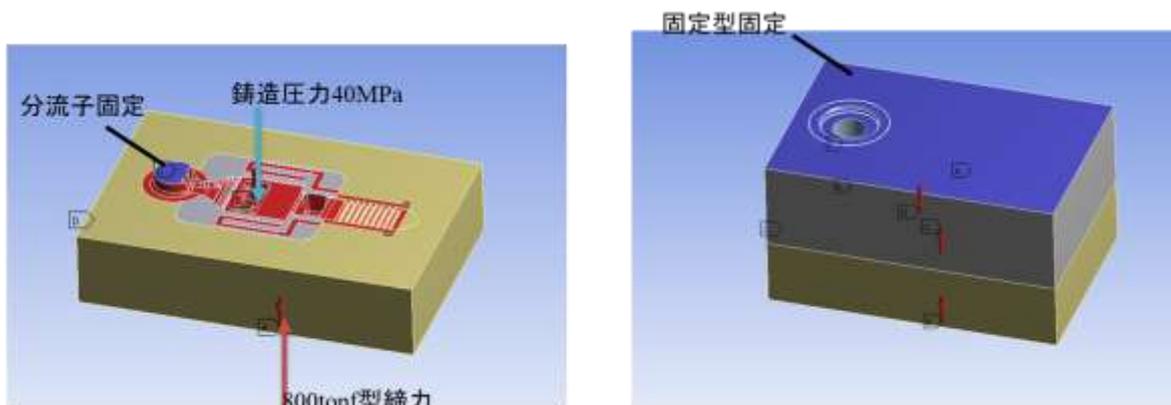
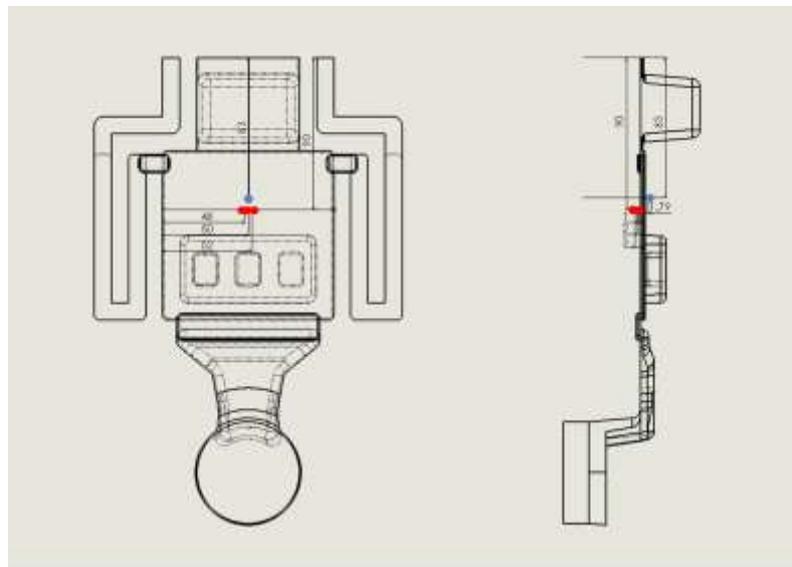


図64 金型構造解析に用いた金型モデル

4) -2 金型温度解析

図65にCC有無を考慮した金型温度解析結果を示す。CCありの場合、金型内部の最高温度はCCなしと比較して低かった。



- 熱電対①: 固定型—製品より1mm離れる
 ②: 固定型—製品より3mm離れる
 ③: 固定型—製品より5mm離れる
 ④: 可動型—製品より1.79mm(2mm)離れる

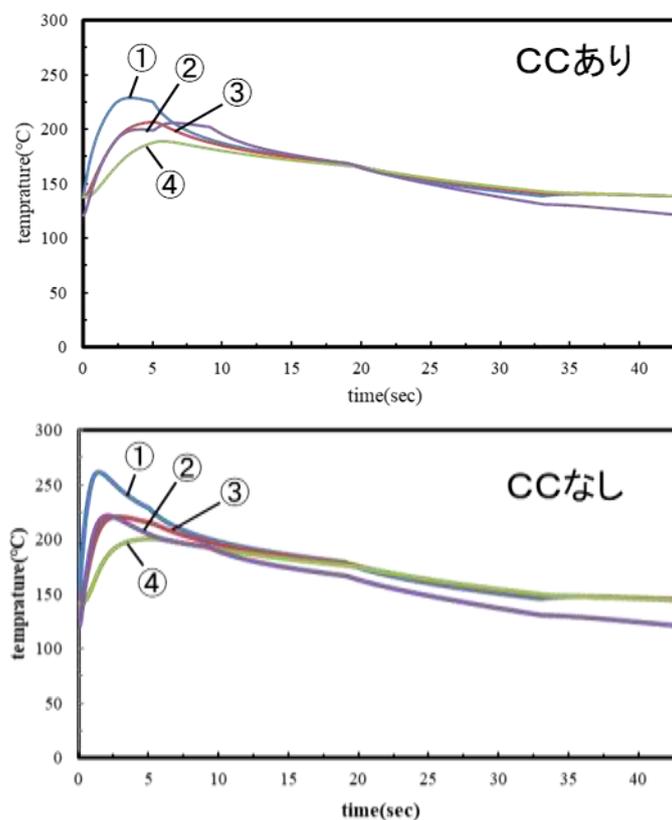


図65 ダイカスト 1 サイクル中の金型温度変化の計算結果

4) -3 ひずみ

図66に金型内でもっとも大きなひずみが発生した箇所のひずみの変化を計算した結果を示す。CCありのひずみの最大値は、CCなしの最大値のおよそ1/3程度であった。

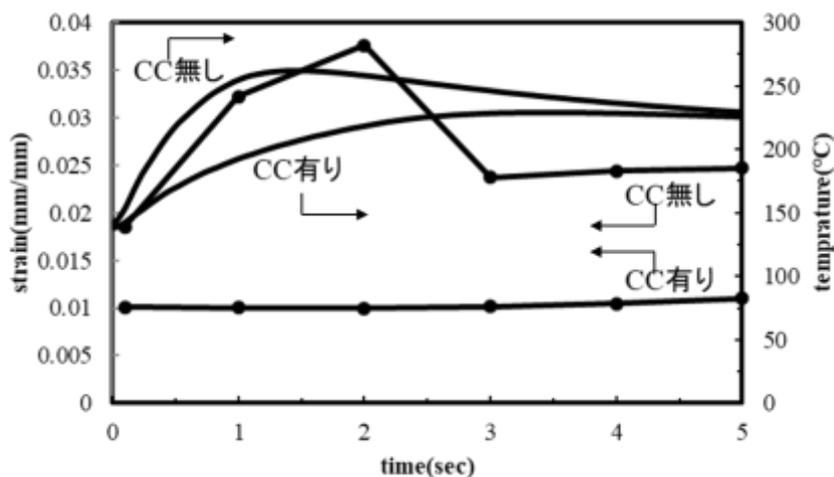


図66 金型キャビティにおける最大ひずみの変化

4) -4 相当応力

図67に金型内において最も大きなひずみを示した箇所の相当応力の変化を示す。弾性解析のため、計算された相当応力は金型材の0.2%耐力(@200°C)より大きくなっているが、CC有無で比較をすると、CCありのほうがCCなしより小さかった。

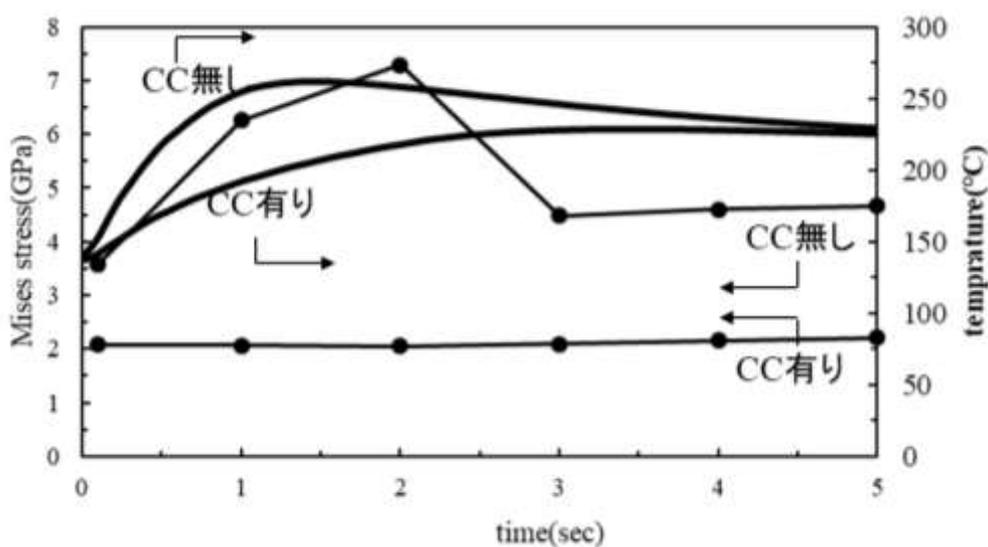


図67 金型キャビティにおける相当応力の変化

【3-3】CC処理型鋳造 CAE の確立

1) CC処理をした金型のシミュレーション方法

ダイカストは主に 3 つの工程に分けられる。①湯流れ、②凝固（高圧付加）、③凝固（終盤：凝固進展後の圧力伝播が弱まる工程）である。また、CCの特徴として、湯流れ時と凝固時の2つの伝熱特性があることは今年度の成果からわかった。そこで、これらの各工程の熱伝達係数のうち、②、③は前年度までの成果を用いることとした。一方、今年度を実施した①湯流れ時の熱伝達係数を再度検討した。

湯流れ時、溶湯の流動速度は極めて大きい。そこで、液体金属に対する適応が推奨される以下の Nusselt 方程式[4]により熱伝達係数を推定した。

$$Nu = 5.0 + 0.025(RePr)^{0.8}$$

ここで、 Nu は Nusselt 数、 Re は Reynolds 数、 Pr は Prandtl 数をそれぞれ表す。また、適用範囲は $10^2 < Re < 10^6$ 、 $Pr < 0.1$ である。この式をもとにして算出した流動時の熱伝達係数は $80\text{kW/m}^2\text{K}$ であった。これらの結果を踏まえ、CC処理型鋳造 CAE に適用する熱伝達係数を図68に示す。

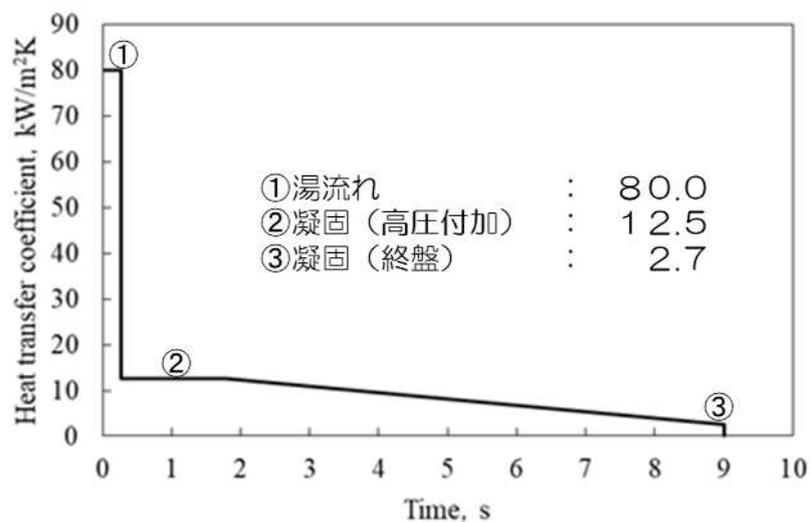


図68 CC処理型鋳造 CAE に適用する熱伝達係数

2) 金型温度解析と実測結果との比較

上記結果を基に、下記4つの熱伝達係数モデルを使って、金型温度解析を実施した。各モデルの熱伝達係数($\text{kW}/\text{m}^2\text{K}$)は、①湯流れ/②凝固(高圧付加)/③凝固(終盤)を示す。

<モデル1-1(CC有)> 80 / 12.5 / 2.7 <モデル1-2(CC有)> 2.5 / 12.5 / 2.7

<モデル2-1(CC無)> 80 / 8.0 / 6.8 <モデル2-2(CC無)> 6.8 / 8.0 / 6.8

金型温度解析結果と実測値との比較を図69に示す。上記結果で求めた熱伝達係数80 $\text{kW}/\text{m}^2\text{K}$ を使った方がより実測値に近い結果を示した。

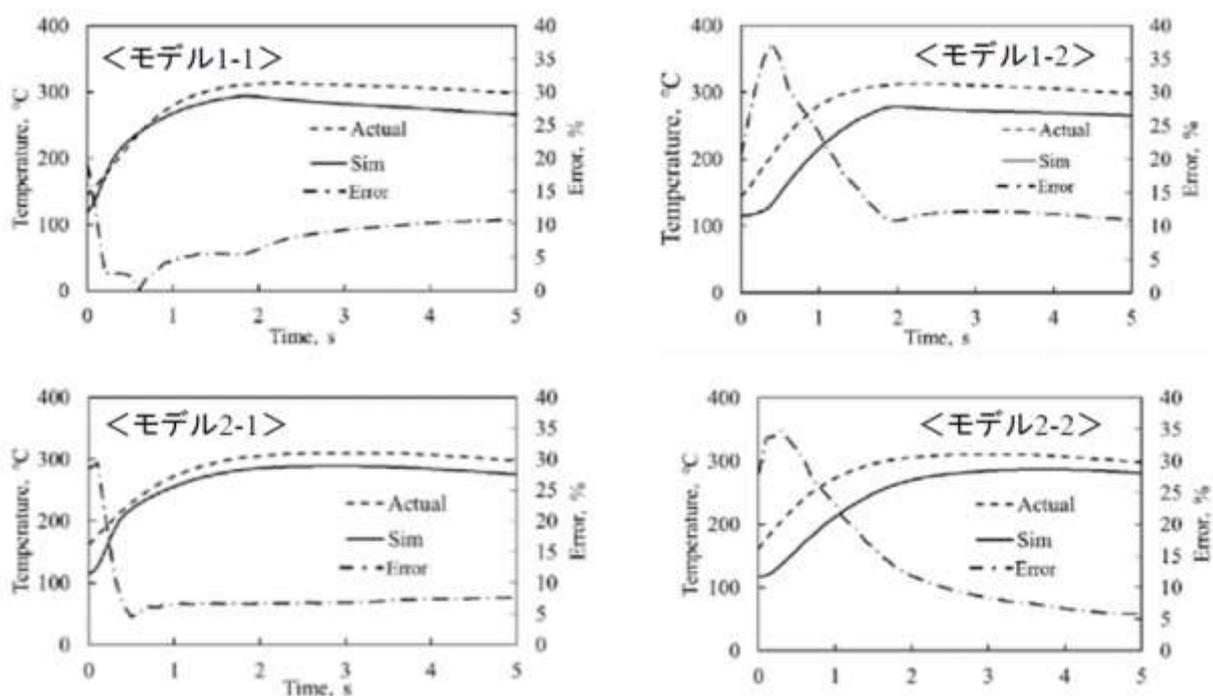


図69 金型温度解析結果と実測値との比較

第3章 全体総括

3-1 研究成果の総括

自動車用ボディ部品のアルミ化に代表される、ダイカスト部品の大型化・薄肉化・高意匠化に対応するため、大型薄肉ダイカスト金型向けナノカーボン表面処理技術の研究を実施した。現状CC処理の課題として、大物金型に対応できる大型CC処理炉の技術開発や高意匠CC処理の研究開発等を行い、下記の成果が得られた。

- (1) 大型CC処理炉内ガス流動解析を実施し、炉内のガス流動状況を可視化した。その結果を基に、新大型処理炉を導入し処理条件を確立した。
- (2) 高意匠CC処理の実現に向け、下地処理でのショットブラスト条件を変更した実験を行い、面粗度や湯流れ性能を評価した結果、目標達成の目処付けができた。
- (3) しかしながら、皮膜品質の低下が見られたため、あいち産業科学技術総合センターの協力を得て、強固な皮膜を有する新たな高意匠CC処理を開発した。
- (4) 高意匠CC処理した金型での鑄造実験を実施し、面粗度・湯流れ性とも目標に近い成果が得られた。また、CC処理有無での各種データを取得できた。
- (5) 岐阜大学にて重力鑄造型でCC皮膜の基本特性を評価した結果、CC皮膜は溶湯との濡れ性が悪く、金型間の界面エネルギーの制御という新たな特性を有しているとともに、凝固特性も良好であることがわかった。
- (6) CC処理型の鑄造 CAE の確立を岐阜大学で実施した。CC処理の伝熱特性に注目し、ダイカスト中の熱伝達係数を算出し、精度の高い鑄造CAEが可能となった。。また、その結果を用いることによって、金型の構造解析も可能となり、CC処理型の設計に対しても有効なCAE技術を確立した。

3-2 今後の事業化に向けた取り組み

- (1) 高意匠CCの開発目標に対しては、面粗度、湯流れ性ともあと一歩目標には届かなかったが、大きな成果が得られたため、事業化は十分期待できる状況にある。
- (2) 今後目標達成に向け、追加実験を継続するとともに、川下企業に対し高意匠CCのサンプル評価を依頼し実用化を目指す。

参考文献

- [1] 長藤ほか : 鑄造工学、 91(20419)、 pp.415-419.
- [2] 山縣ほか : 鑄造工学、 86(2014)、 pp.121-126.
- [3] 澤崎、宮原 : 鑄造工学、 84-7(2012)、 pp.375-382.
- [4] 結城和久、 J. Plasma Fusion Res. Vol.93, No.6 (2017), pp. 278-284.