

平成23年度戦略的基盤技術高度化支援事業

省エネ型高品質軽合金鑄造装置の開発研究

研究開発成果等報告書

平成24年3月

委託者 近畿経済産業局

委託先 公益財団法人 新産業創造研究機構

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（高度化目標、技術的目標）	1
1－2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）	4
1－3 成果概要	7
1－4 当該プロジェクト連絡窓口	8
第2章 本論	9
1 鋳造装置開発	9
1－1 機械的構造・駆動部分の開発	9
1－2 保持炉および低圧溶湯供給装置関連の開発	11
2 装置全体組立と評価	17
3 本鋳造法における溶湯流動挙動の理解とシミュレーション技術開発	19
3－1 X線による可視化実験	19
3－2 鋳造シミュレーション技術開発	21
4 鋳造品の試作と鋳造基本技術の把握	27
4－1 鋳造品の試作	27
4－2 鋳造基本技術の把握	29
最終章 全体総括	31

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（高度化目標、技術的目標）

1) 研究の目的

本研究開発は、ものづくり基盤技術の中の「鑄造に係わる技術」である。従来のダイカスト法におけるガスや酸化皮膜の巻き込みによる欠陥、装置コスト、使用エネルギー量等の問題解決を目指す。また、低圧鑄造法等の生産性の低さを解消し、より優れた高品質鑄造品をより低コスト・低エネルギーで生産できる鑄造装置の開発を目的とする。

自動車、その他産業が、川下産業のニーズであり、以下のニーズを対象として、研究開発、及び事業化を進める。

1-1) 自動車に関する事項

自動車産業では、環境や安全問題への対応から車体の軽量化と高信頼性が求められている。その結果、コンロッド、ブレーキ等の足回り部品、オートマチックトランスミッション部品、スリーブバルブ等の制御装置部品、エアコン部品、ディーゼルエンジン部品などの鑄造部品に対して「高強度化」、高耐圧性の製品が求められる。また、従来の低圧鑄造法では生産性が悪く、通常のダイカスト法では空気の巻き込み欠陥が発生し、強度、靱性、耐圧性が低い。このためダイカスト法と同様の生産性でT6熱処理（JIS H 0001：1998. 450～550℃での溶体化処理後人工時効硬化処理（120℃×24hr）したもの）可能な高強度製品、高耐圧製品が求められている。

一方、国際的な競争の激化に伴いコスト低減が急速に進んでおり、「複雑形状化」に対応した一体成型をすることで「軽量化」、「低コスト化」が求められている。現状のダイカスト法では製造困難な複雑形状製品の一体成形化や軽量化、これに伴うコスト削減が重要である。また、省エネルギー化、従来の作動油使用設備の改善等の「環境配慮」及び、IT化、小型化が求められている。

1-2) その他産業に関する事項

その他産業の中で、二輪車や射出成型機の川下産業において、小型エンジン部品、潤滑油分配弁等においても自動車産業と同様、「高強度化」、「複雑形状化」、「軽量化」、「低コスト化」、「環境配慮」への鑄造技術の対応が期待されている。

本研究開発では、上記ニーズを背景として、従来のダイカスト法におけるガスや酸化皮膜の巻き込みによる欠陥、装置コスト、使用エネルギー量等の問題点や低圧鑄造法等の生産性の低さを解消し、より優れた高品質鑄造品をより低コスト・低エネルギーで生産できる鑄造装置の開発を進めた。

2) 研究の目標

自動車、その他産業からの高強度化、複雑形状化、軽量化、低コスト化、環境配慮等のニーズを踏まえ、複雑形状を実現し、品質の確保および向上、環境配慮に資する鑄造技術の開発のため、低圧鑄造と同様に溶湯中に浸漬したセラミック製ストークと鑄型の間に溶湯開閉用部材を配置し、鑄型空隙部の減圧とストークを取り囲むセラミックス密閉容器の加減圧を利用して注湯する鑄造技術開発を行うため、前年度は主として各種の要素技術の試作開発を進めた。これらの成果を踏まえ、本年度は要素技術のさらなる改良を重ね、「装置全体の組立と評価」を行い、「鑄造品の試作と鑄造基本技術の把握」を前倒しで実施するために、鑄造専門のユーザーの協力を得て、完成した装置をユーザーサイトに持ち込んで鑄造実験に着手し、本事業の終了後に行うべき事業化に備えることを

目標とした。

①－１ 機械的構造・駆動部分の開発

①－１－１ 開閉用部材および制御装置の開発

①－１－２ 開閉用部材とストークの接合技術開発

①－１－３ 金型開閉、溶湯加圧および上下動移動装置の開発

①－２ 保持炉および低圧溶湯供給装置関連の開発

①－２－１ ストークおよび密閉容器の開発

①－２－２ 溶湯バルブの開発

①－２－３ 湯面制御用シリンダの開発

①－２－４ 湯面制御装置の開発

①－２－５ 保持炉の開発

①－２－６ 密閉容器加減圧および溶湯バルブ駆動装置の開発

上記の各要素技術開発成果に基づき、鑄造装置として組み上げ、評価するべく下記の開発テーマを実施する。

② 装置全体組立と評価

また、上記の装置開発を補完、強化するため、下記のような装置内部の溶湯の挙動を実験解析し、またシミュレーションとの比較により、理論的側面を強化することにより、開発の効率化につなげる。

③ 本鑄造法における溶湯流動挙動の理解とシミュレーション技術開発

③－１ X線による可視化実験

③－２ 鑄造シミュレーション技術開発

④ 鑄造品の試作と鑄造基本技術の把握

以下、実施項目ごとに、内容を詳述する。

①－１ 機械的構造・駆動部分の開発

①－１－１ 開閉用部材および制御装置の開発（太洋マシナリー株式会社）

支持盤および金型に接触して水平移動し、汚れた溶湯除去、溶湯の鑄型への導入、閉鎖等を受け持つ最も重要な部品である。気密性の向上、トラップや開口部寸法などの最適化、特に耐久性を向上させる。装置機能の最終目標値は以下の通りとする。

・気密性： 1kPa 以下の真空度を実現

・耐久性： 5,000 ショット以上

本年度は、昨年度に実施した「開閉用部材および制御装置」の「機能確認実験装置」での機能確認、気密性（真空度 1 kPa 以下）等の基本的な機能の確認で抽出した課題を溶湯を用いた実験で、その耐久性の確認を行う。5,000 ショット以上、気密性は 1kPa 以下の真空度が目標である。

①－１－２ 開閉用部材とストークの接合技術開発（太洋マシナリー株式会社）

接合部でガスを吸引しない気密性を確保し、湯差しや凝固が生じず、容易に接続できる構造と技術を開発する。

本年度は、開閉部材とストークとの接合部を装置全体へ組込んだ状態で、接合部のガス吸引に対する気密性を維持し、湯差しや凝固も生じない構造であることを実証する。

①－１－３ 金型開閉、溶湯加圧および上下動移動装置の開発（太洋マシナリー株式会社）

製品取出し、塗型等のための金型開閉、開閉用部材と金型の上下移動装置、及び溶湯加圧装置・制御技術を開発する。装置機能の最終目標値は以下の通りとする。

- ・溶湯加圧： 最大 5MPa
- ・開閉用部材ゲート閉鎖後加圧開始時間： 0.1s 以内
- ・鋳型開閉最大ストローク： 200～300mm
- ・開閉時間： 2s 以内

本年度は、昨年度に試作、機能確認を行った「金型開閉および上下動移動装置」の操作性改善を含めて、抽出課題をもとに設計の見直し、改造を行う。

①－２ 保持炉および低圧溶湯供給装置関連の開発

①－２－１ ストックおよび密閉容器の開発（日本坩堝株式会社）

溶湯との反応性、熱容量が小さく、気密性のあるストック及び密閉容器を開発する。また、密閉容器は円筒状密閉容器で最適材質を選択し成型技術を開発する。取付け部のフランジは、気密性確保のため、平坦性を重視して開発を行う。装置機能の最終目標値は以下の通りとする。

- ・耐加圧力： 0.1MPa
- ・気密性： 10kPa 以下の真空度保持可能なこと

本年度は、昨年度に改造した「注湯装置（ストック、密閉容器単体）」の抽出課題への対策のための改造を行う。及び本機能の中核をなすストックの目標性能である 0.1MPa の耐加圧性、10kPa 以下の真空度保持能力を確認する。

①－２－２ 溶湯バルブの開発（日本坩堝株式会社）

適切な材質、加工法、密閉容器との取付け技術等を開発する。最終目標値は以下の通りとする。

- ・溶湯の漏れ： 0.1cc/s 以下

本年度は、昨年度に試作、機能確認を行った「注湯装置（バルブ装置本体機能確認用）」の抽出課題をもとに改造を行い、溶湯漏れを中心にその実用性を評価する。

①－２－３ 湯面制御用シリンダの開発（日本坩堝株式会社）

熱損失が少なく、100ℓ程度の溶湯体積相当を補填できる耐火物製シリンダを開発する。

本年度は、昨年度に製作した湯面制御用シリンダを鋳造実験に用い、その実用性を評価する。

①－２－４ 湯面制御装置の開発（太洋マシナリー株式会社）

湯面位置を±5mm で保つための装置、制御技術を開発する。

本年度は、本開発装置に最適な「湯面制御装置」として選択し、製作したフロート制御・ガス加圧方式の機構について、実際の鋳造実験で評価を行う。

①－２－５ 保持炉の開発（日本坩堝株式会社）

熱損失を最小限に抑え、本鋳造プロセスに適した構造を開発する。そのため、炉のカバー、炉壁の熱遮断を最適化する。最終目標値は以下の通りとする。

- ・耐久性： 1ヶ月保守不要
- ・耐熱性： 800℃
- ・熱損失： 200W/m²以下

本年度は、昨年度に設計・製作した「保持炉」を鋳造実験に用い、耐久性、熱損失を実証する。なお、熱損失については、予算の制約があり、装置全体での実証が困難なため、保持炉の本体の一部に所定の性能を満足する耐火・断熱材の層を施工しており、この部分の温度分布測

定から、実証を行うこととする。

①－２－６ 密閉容器加減圧および溶湯バルブ駆動装置の開発（太洋マシナリー株式会社）

密閉容器を時間的に 0.01～0.1MPa 変化できる不活性ガス加圧・減圧および制御装置および溶湯バルブを 0.5s 以内に開閉できる駆動装置・技術を開発する。

本年度は、昨年度に設計・製作した装置を用い、最終目標の圧力変動範囲（0.01～0.1MPa）、溶湯バルブの所用駆動時間（0.5 s 以内）を一体化した装置において、実証する。

② 装置全体組立と評価（太洋マシナリー株式会社）

本年度は、昨年度に引き続き、アドバイザー参画の casting 専門企業である株式会社双立に装置を持ち込んで、ユーザーの立場から実験協力してもらいながら実証実験を進め、開発した各要素技術の機能を実証評価する。

③ 本 casting 法における溶湯流動挙動の理解とシミュレーション技術開発

（アイ・イー・ソリューション株式会社、太洋マシナリー株式会社）

③－１ X 線による可視化実験

5 件以上の可視化実験とシミュレーションの比較により現象を理解する。

本年度は、試作した「流動状態可視化実験用装置」を用いて、可視化実験を昨年度までに実施した回数 4 条件を積算して、合計で 5 回以上の実験を行う。なお、実験や装置の改良等については、太洋マシナリー株式会社の協力を得て遂行することとする。

③－２ casting シミュレーション技術開発

開閉用部材の移動、溶湯加減圧と背圧を考慮した湯流れシミュレーション機能と最適 casting 条件推定ソフトを開発する。また、可視化観察結果と比較する。

本年度は、当初の目標とした湯流れシミュレーションの機能を有するソフトを完成する。

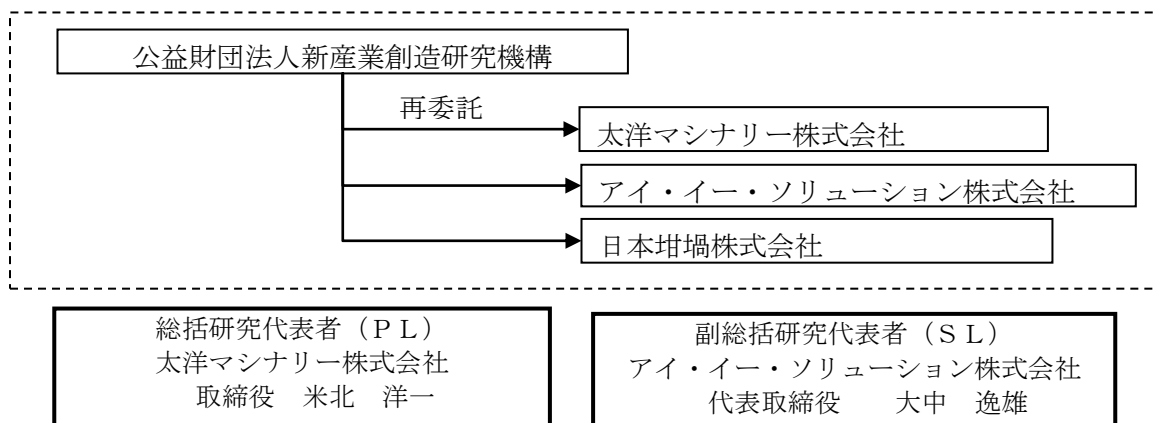
④ casting 品の試作と casting 基本技術の把握（太洋マシナリー株式会社）

前記の 3 種類の casting 品が製造可能なことを示し、また、casting 方案や casting 条件等の最小限の casting 技術を把握する。

「高強度化」、「複雑形状化」、「軽量化」の 3 要件に対応するモデル部品の内、前年度は、アルミブロックに複数の空孔のある耐圧性部品を試作したが、本年度は、残りの 2 要件に対応する casting 品の試作評価を行う。

1-2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）

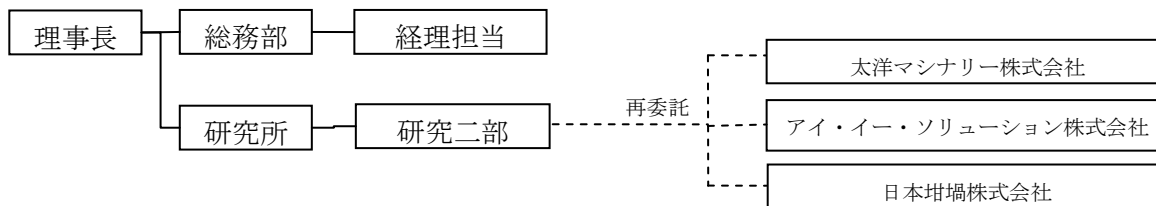
1）研究組織（全体）



2) 管理体制

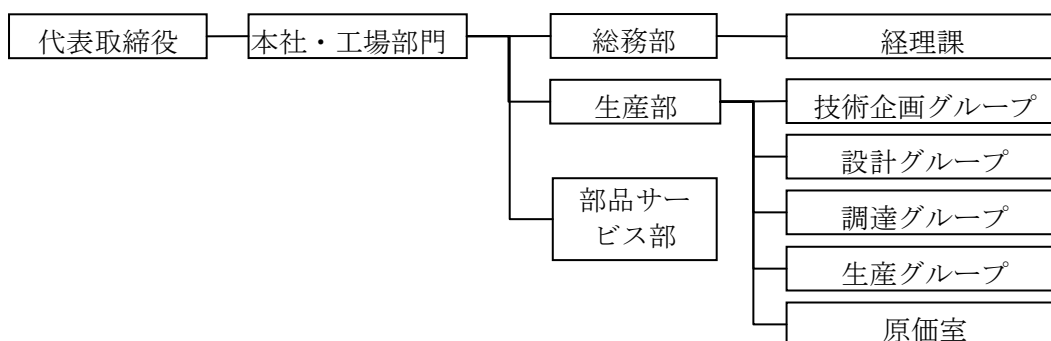
2-1) 事業管理者

[公益財団法人新産業創造研究機構]



2-2) 再委託先

太洋マシナリー株式会社



アイ・イー・ソリューション株式会社



日本垣堀株式会社



3) 管理員及び研究員

3-1) 事業管理者 公益財団法人新産業創造研究機構

①管理員

氏 名	所属・役職	実施内容 (番号)
高谷 芳明	研究所 研究二部 ・ 部長	—

②研究員 : なし

3-2) 再委託先

太洋マシナリー株式会社

氏 名	所属・役職	実施内容（番号）
米北 洋一	取締役	①、全般
岩本 実	設計グループ・課長	①-2-4、①-2-6、②
高道 博	技術企画グループ・課長	①-1、①-2-4、①-2-6、②、③、
申 東秀	設計グループ・課長	④
藤井 真	技術企画グループ・課員	①-1-1、①-2-4、④
下藤 潤平	技術企画グループ・課員	①-1-3、④
		①-1-2、④

アイ・イー・ソリューション株式会社

氏 名	所属・役職	実施内容（番号）
大中 逸雄	代表取締役	③、①、②全般
杉山 明	技術部長	③

日本坩堝株式会社

氏 名	所属・役職	実施内容（番号）
大橋 秀明	取締役・技術開発部長	①-2-1、2、3、5、②、④
白川 克行	技術開発部・嘱託	①-2-2、3、5、②、④
神野 健市	築炉エンジニアリング部 次長	①-2-3、5、②、④
春田 秀晃	築炉エンジニアリング部 主任	①-2-3、5、②、④
安藤 公一	技術開発部・課長	①-2-1、2、3、5、②、④
城野 貴洋	技術開発部・部員	①-2-1、2、3、5、②

4) 協力者（アドバイザー委嘱委員の所属、氏名）

兵庫県立工業技術センター 材料技術部長

小西技術士事務所 代表

株式会社双立 取締役会長

川崎重工業株式会社 技術研究所 材料技術部 部長

GMB株式会社 取締役副社長

平松テクニカルアドバイザー事務所 代表

柏井 茂雄

小西 邦彦

桑名 紀文

道場 康二

森 勝

平松 健男

1-3 成果概要

1) 進捗状況

初年度の平成 21 年度には各要素技術の確認実験を行い、2 年目の平成 22 年度には、本装置のコンセプトの核心となる溶湯の供給部の「開閉用部材」、「湯面制御」の要素実験を継続し、それらの成果を踏まえ、鑄造の実証実験を行う「省エネ鑄造技術実証装置」の設計製作に反映し、平成 22 年度末にはこの実証装置として組み立てた。これまで、このように当初の計画に従い、キーハードとなる技術を重点的に検討し、実用化技術へのステップアップを図ってきた。

本年度平成 23 年度が最終年度となるが、「省エネ鑄造技術実証装置」を本研究開発委員会のアドバイザー委員として協力を得ている（株）双立の工場に設置して、鑄造実験を進めた。（株）双立は、鑄造品の専門メーカーであり、本研究開発で完成した装置の実験実証をユーザーサイトで行うという意味もある。実験開始当初は、保持炉のヒーターの破損などが重なり、折悪しく東北の震災の影響で交換部品の調達が遅れるなど、不測の事態に見舞われることもあった。また、本研究開発の全く新規のコンセプトに基づく装置原理であり、アルミ溶湯を微妙な圧力バランスで制御するといった開発要素については、実際の装置を使って試行錯誤的な運転・制御条件、ノウハウを把握していくといった開発プロセスを経る必要がある。このような事情により、金型を設置した本格的な鑄造品の試作実験を行えるようになるまでには、予想以上の苦労があった。しかしながら、経験値の上昇と装置改造を経て、その甲斐あって平成 23 年度の終盤には、当初予定していた鑄造試作品のサンプルを得ることが出来るようになった。結果的には、各要素技術の開発目標値、装置全体としての目標についても、当初設定した目標を満足する実験成果が得られた。

2) 目標達成度

本年度は、「省エネ鑄造技術実証装置」として全体装置の改造を行うと共にユーザーサイトでの鑄造実証を行うことを主な目標として研究開発を実施した。

① 鑄造装置開発

①-1 機械的構造・駆動部分の開発

①-2 保持炉および低圧溶湯供給装置関連の開発

前記の「研究の目標」の項で掲げた各要素技術の目標数値、例えば、気密性、耐久性、等々については、特に問題なく設定目標を達成した。個々の要素技術の目標達成状況の詳細については、表 1-1 のとおり総括した。

② 装置全体の組立と評価

上記の通り、①-1、①-2 で確認しながら設計製作を完了した「省エネ鑄造技術実証装置」の実証実験を開始した。

なお、本研究開発の再委託先には、鑄造品製作を事業として行っているメンバーがいないので、アドバイザーとして参画していただいている（株）双立の工場に上記の「省エネ鑄造技術実証装置」をユーザー実証のために持ち込んで、実証実験を進めた。

③ 本鑄造法における溶湯流動挙動の理解とシミュレーション技術開発

X 線による可視化実験装置を用いて、可視化実験を行って、省エネ鑄造技術実証装置に用いた金型と同じ形状の黒鉛型を用いて、内部の湯流れ状況を可視化して、鑄造条件の検討に役立

てた。

また、シミュレーションソフトにより、同じく実際の鋳造実験用の金型内のアルミ溶湯の流動状態のシミュレーションを行い、実験条件や制御方法の改善への指針として役立てた。

④鋳造品の試作と鋳造基本技術の把握

前記の溶湯の流動挙動の実験観察、シミュレーションの成果も活かしながら、実験的には、鋳造方案や鋳造条件等を検討し、本研究開発で開発した「省エネ鋳造技術実証装置」の特徴を生かした新規の鋳造技術の基本的な特性を把握した。

「高強度化」、「複雑形状化」、「軽量化」の3要件を鋳造実験により実証評価した。

昨年平成22年度に試作したに、アルミブロックに複数の空孔のある耐圧性部品に加えて、鋳造の実事業としても既存のダイカスト装置では、製造することが困難であった非常に肉厚の自動車部品をモデルとしたもの、更にはプラスチック材質として開発が行われていた羽根車形状の部品を試作対象として追加し、「高強度化」、「複雑形状化」、「軽量化」の要件に対応する鋳造品の試作評価を行った。

表 1-1 研究開発の目標達成状況 詳細

項目番号	テーマ細目の名称	主担当	評価	備考
①-1	機械的構造・駆動部分の開発			
①-1-1	開閉用部材および制御装置の開発	OMCO	△	耐久性の数値目標 500 ショットの実証は時間的都合で未達。開閉時の移動の抵抗上昇傾向がみられないので問題なし、と判断。
①-1-2	開閉用部材とストークの接合技術開発	OMCO	○	
①-1-3	金型開閉、溶湯加圧および上下動移動装置の開発	OMCO	○	
①-2	保持炉および低圧溶湯供給装置関連の開発			
①-2-1	ストークおよび密閉容器の開発	ルツボ	○	
①-2-2	溶湯バルブの開発	ルツボ	△	溶湯漏れ 50cc/s が現状。当初計画時より形状、圧力が大きくなったことが要因。漏れ分をメークアップして対策。
①-2-3	湯面制御用シリンダの開発	ルツボ	○	
①-2-4	湯面制御装置の開発	OMCO	○	
①-2-5	保持炉の開発	ルツボ	○	
①-2-6	密閉容器加減圧および溶湯バルブ駆動装置の開発	OMCO	○	
②	装置全体組立と評価	OMCO	○	
③	本鋳造法における溶湯流動挙動の理解とシミュレーション技術開発			
③-1	X線による可視化実験	I E	○	
③-2	鋳造シミュレーション技術開発	I E	○	
④	鋳造品の試作と鋳造基本技術の把握	OMCO	○	

注 1) 主担当の略称

OMCO：太洋マシナリー株式会社

ルツボ：日本坩堝株式会社

I E：アイ・イー・ソリューション株式会社

注 2) 評価の欄の記号の意味

○：当初設定の目標達成

△：未達成ながら問題なしと判断

×：未達成

1-4 当該プロジェクト連絡窓口

公益財団法人新産業創造研究機構（担当：高谷芳明）

連絡先 tel 078-306-6803

fax 078-306-6812

第2章 本論

1 鑄造装置開発

1-1 機械的構造・駆動部分の開発

1-1-1 開閉用部材および制御装置の開発

1) 開発した開閉用部材

図 1-1-1-1 に開発した開閉用部材を示す。ストークを通して開閉用部材に入った湯は、まずトラップで汚れた湯表面部を取り込む。続いて開閉板を迅速に湯通過位置まで移動し、清浄な湯を金型キャビティに注湯する。数秒後に更に開閉板を加圧位置まで移動し、加圧ピンでキャビティ内の湯を凝固収縮まで加圧する。開閉板駆動力を低減するため、トラップと湯通過部の距離を短くし、またホルダに肉盗みを設置して開閉板が湾曲しやすいようにした。トラップにベントホールを設置して空気抜きを考慮した。

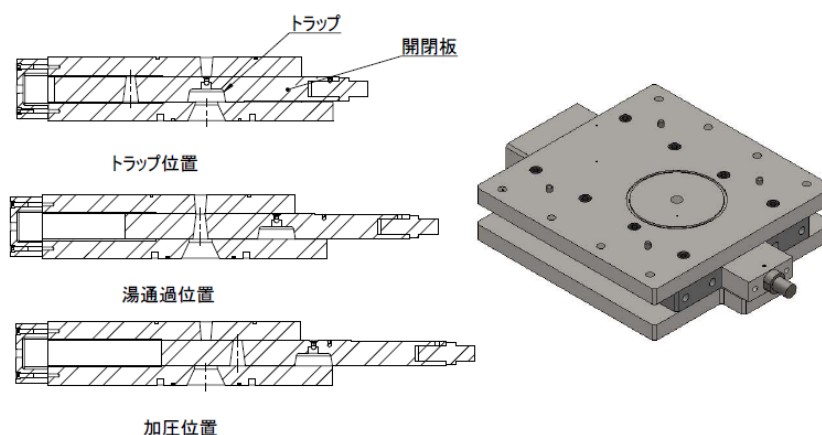


図 1-1-1-1 開発した開閉用部材

2) 耐久性実験

実機で開閉用部材の機能と耐久性を評価する前に、開閉板のみで耐久実験を行った。開閉板を実際とは上下逆抜きにして、ストークに相当する場所から湯を注ぎ、その後開閉板を動かして、その時の駆動力をロードセルで、また開閉板の温度を非接触温度計で測定した（図 1-1-1-2）。40 回連続実験をし、最大荷重は約 1500kg であった（図 1-1-1-3）。また潤滑剤塗布回数もこの間 1 回のみであった。本実験は通算 300 回以上行ったが問題は見られなかった。

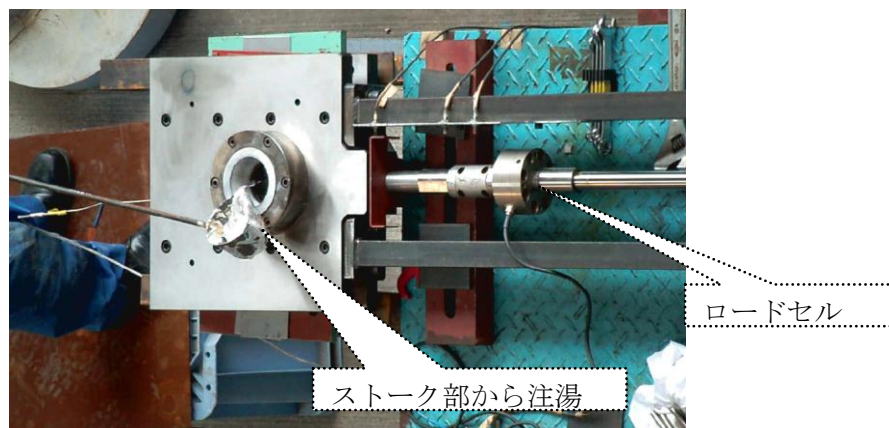


図 1-1-1-2 耐久性実験

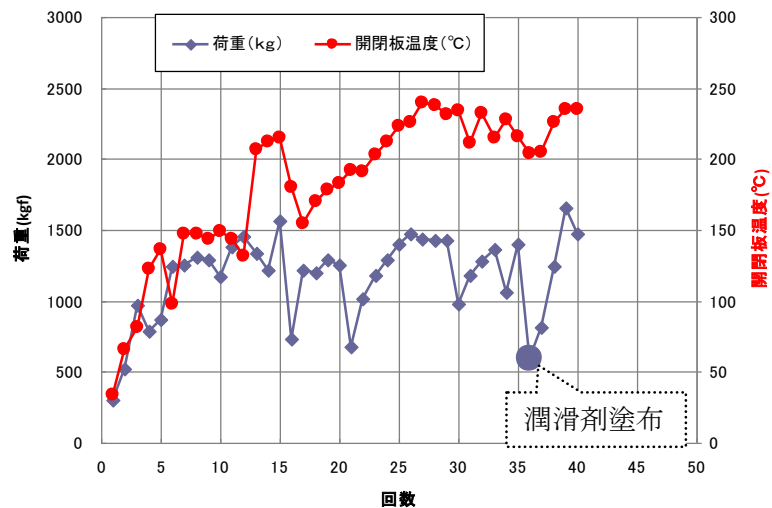


図 1-1-1-3 駆動力と温度の変化

1-1-2 開閉用部材とストークの接合技術開発

ストークを開閉用部材に均一に押し付けて湯が漏れないように工夫した。

実機での鑄造中この部分から湯がもれることはなく、機能を十分満足していることを確認した。

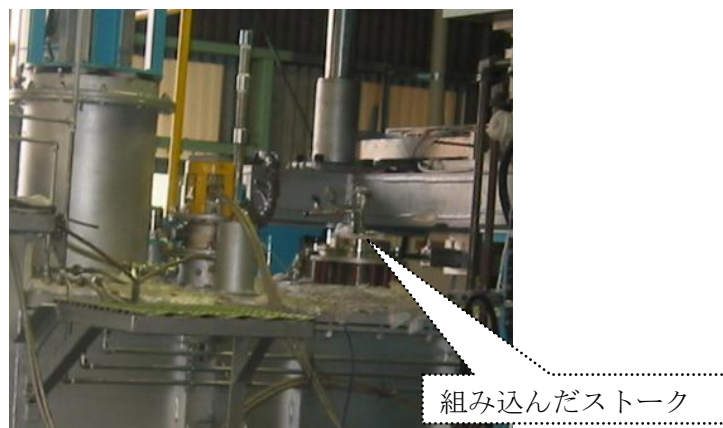


図 1-1-2-1 炉に組み込んだストーク部

1-1-3 金型開閉、溶湯加圧および上下動移動装置の開発

実機で金型開閉、溶湯加圧及び上下動移動装置が動作することを確認した。主な仕様を表 1-1-3-1 に示す。

表 1-1-3-1 開発装置の主要諸元

		開発装置
装置仕様	金型寸法	400W×400L×400H
	金型重量	500kg
	サイクルタイム	30sec
	稼動ダイブプレート寸法 (上)	800×600
	下部ダイブプレート寸法 (下)	(600×600)
	昇降ガイドロッド芯間	1100×900
油圧ポンプ	最大圧力	21Mpa

	最大吐出力	83L/min
	タンク容量	100L
	モータ容量	7KW
昇降ヘッド	油圧シリンダー	φ 100×400st -2 本
	上昇力	306kN (19.5MPa)
	下降力	210kN (19.5MPa)
	下降端保持力	210kN (19.5MPa)
	昇降スピード	
上型開閉	油圧シリンダー	φ 160×150st
	型開力 (製品押出力)	137kN (10MPa)
	型閉力	200kN (10MPa)
	昇降スピード	125mm/sec
	エアシリンダ	不要
開閉板	油圧シリンダー	φ 63×600st
	最大力	50kN 以上
	開閉スピード	333mm/sec
製品加圧	湯加圧	油圧シリンダーで加圧
	圧力	5MPa
真空	吐出量	120L/min
	真空圧	-6.7Pa
	真空タンク	20L

1-2 保持炉および密閉容器の開発

1-2-1 ストークおよび密閉容器の開発

上記項目について素材として選定したチタン酸アルミニウムによる基本物性、アルミ溶湯に対する特性調査を実施した。

1) 物性測定

特性評価にあたり使用するチタン酸アルミニウムの物性を表 1-2-1-1a. 熱衝撃試験結果を表 1-2-1-1b、図 1-2-1-1 に示す。

表 1-2-1-1a. 物性測定結果

測定項目	R. T.
嵩比重	3.43
気孔率 (%)	6.30
曲げ強度 (MPa)	41.8
弾性率 (GPa)	28.9
通気率 (*1)	2.2E-05
耐熱衝撃性	1000℃

*1 単位は $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}/\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{cmH}_2\text{O}$

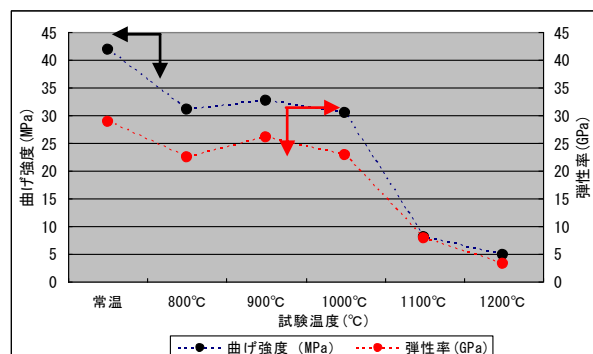


図 1-2-1-1 熱衝撃試験結果

【考察】

試験温度 800～1000℃において常温強度に比べるとやや低い値となっているがサンプルにクラック等確認されず $\Delta T=1000^{\circ}\text{C}$ の耐スポール性を有すると考える。今回実機使用では対象がアルミ溶湯であるので温度としては 700℃程度であり本試験結果よりスポール性について問題ないと判断する。

また、昨年実施のアルミ溶湯による汚損(濡れ性)試験から引っ付き等の影響もほとんどなくストーク等の部材として使用する場合に必要な特性を有している。

2) 気密性試験

ストークおよび密閉容器の開発の条件である気密性 (10kPa 保持) について検証した。

供試体 (ルツボ形状) の内部を約 100kPa まで脱気した後に供試体の外表面よりの空気の侵入による圧変動一時間により観察を実施。実験状況の写真を図 1-2-1-3、結果を図 1-2-1-4 に示した。

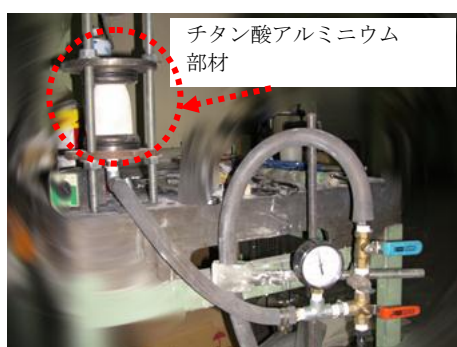


図 1-2-1-3 試験状況

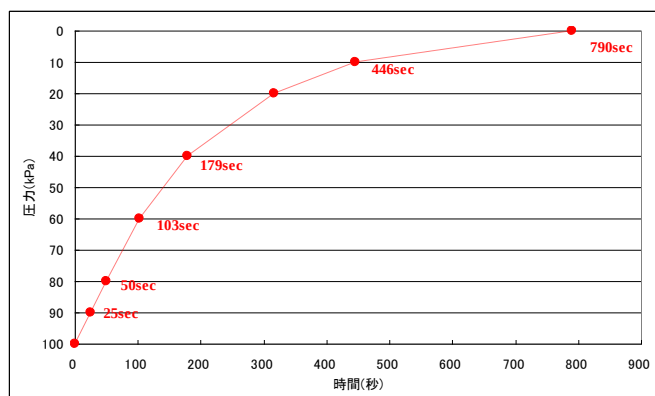


図 1-2-1-4 気密性測定結果

【改良試験】

チタン酸アルミニウム部材のマトリックスに存在するマイクロクラックをコーティングにより埋め(低下させ)気密性の向上を図った。

●コーティング液

精密鋳造用シリカバインダー液+アルミナ原料(固形分量 60wt%) 混合液

●試験水準

- ① コーティング液をルツボ外表面に塗布(刷毛塗り)
- ② コーティング液をルツボ内側を脱気しながら外表面に塗布(刷毛塗り)
- ③ コーティング液中にルツボを浸し、脱気処理
- ④ ③で作製した試験体を 1200℃にて加熱処理

何れの方法も塗布後に 120℃乾燥処理、表面をサンドペーパーにて表面処理実施

●結果

試験結果を図 1-2-1-5a (リーク時間測定)、図 1-2-1-5b (100→90kPa リーク時間) に示す。

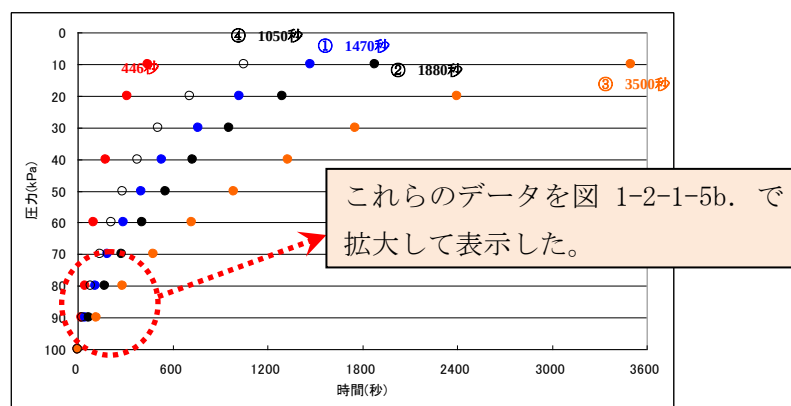


図 1-2-1-5a. 試験結果（リーク時間測定）

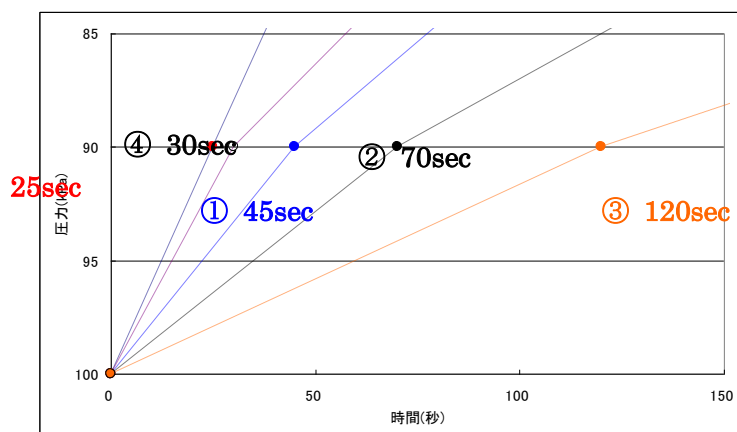


図 1-2-1-5b. 試験結果（リーク時間 100→90kPa）

●考察

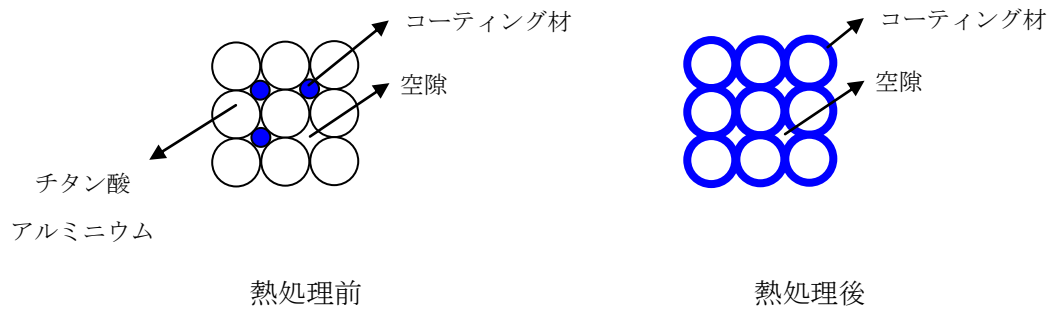
- ① コーティング材塗布により母材のみ比べ気密性が大きく改善された。また脱気を伴いながら施工した場合にはより気密性の向上が見られた。
- ② コーティング処理の結果は何れも無垢の部材に対して気密性（10kPa までの到達時間）の向上が見られた。
- ③ コーティングによる通気率の変化を無コーティングのものと片面、両面コーティングしたものと比較した。（片面コーティングは水準①と同様な塗布方法）
結果を表 1-2-1-2 に示す。

表 1-2-1-2 コーティングによる通気率変化

	通気率(*)	リーク時間 (100→10kPa)	リーク時間 (100→90kPa)
無コーティング	2.2E-05	446sec	25sec
片面コーティング	1.8E-05	1470sec	45sec
両面コーティング	1.5E-05	—	—

* 単位は $\text{cm}^3 \cdot \text{cm} / \text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{cmH}_2\text{O}$

- ④ コーティング液にルツボを浸した状態での脱気処理（処理③）が最も効果的であり、1200℃熱処理品が最も劣るものとなった。熱処理によりコーティング材のシリカ分が液相となったことが影響しているものと推察（下図参照）



3) 耐圧性試験

ストークおよび密閉容器の開発の条件である耐圧性(0.1MPa)について検証した。

● 試験結果

3kg/cm² まで加圧を実施。母材強度（曲げ）が約 40MPa（400kg/cm²）有することから部材の形状（厚さ、大きさ、エッジ部分等）によって強度値に差は生じるが問題なく終了した。

加圧状況（3kg/cm² 加圧）を図 1-2-1-7 に示す。

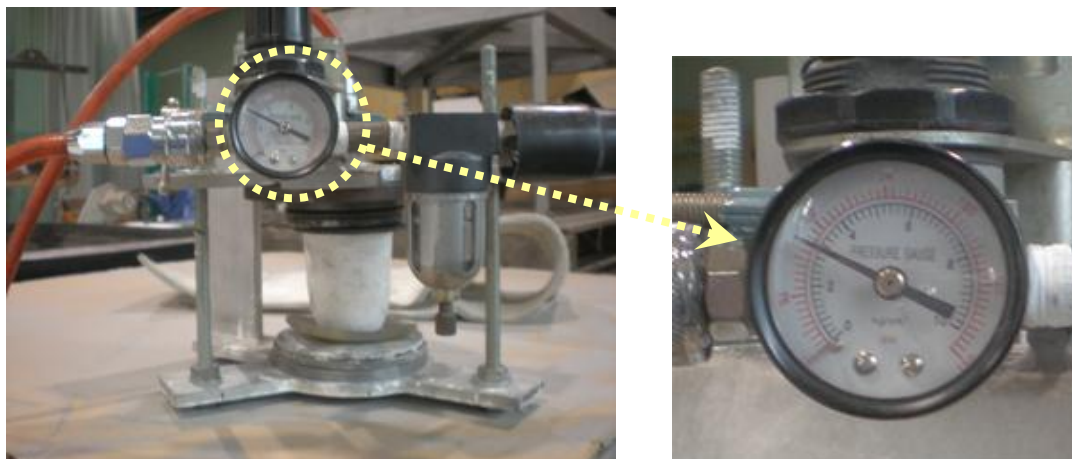


図 1-2-1-7 加圧試験状況（加圧力 3kg/ cm²）

4) まとめ

ストークおよび密閉容器の開発において選定したチタン酸アルミニウム素材は、アルミ溶湯に対する濡れ性、スポール性能、耐圧性では問題ない結果を得た。

気密性については、素材のマトリックスにマイクロクラックを有することから完全に密閉された状態にはならないが、鑄造実験では現仕様（チタン酸アルミニウム母材のみの状態）でもアルミ溶湯が母材を覆いコーティングされた状態も付加し、問題なく使用することができる。

1-2-2 溶湯バルブの開発

溶湯バルブの構成は、サイアロン製ストップピンをエアーシリンダで開閉、押圧調整はバネ方式（現有バネで押圧は max30kg/cm²）、孔部への位置合わせは台座を移動する事で調整した。溶湯バルブは圧力のかからない 1 室側に取り付けたことで、調整及びメンテナンス作業は楽に行える。特に損傷等問題は発生せず、駆動状況も良好である。

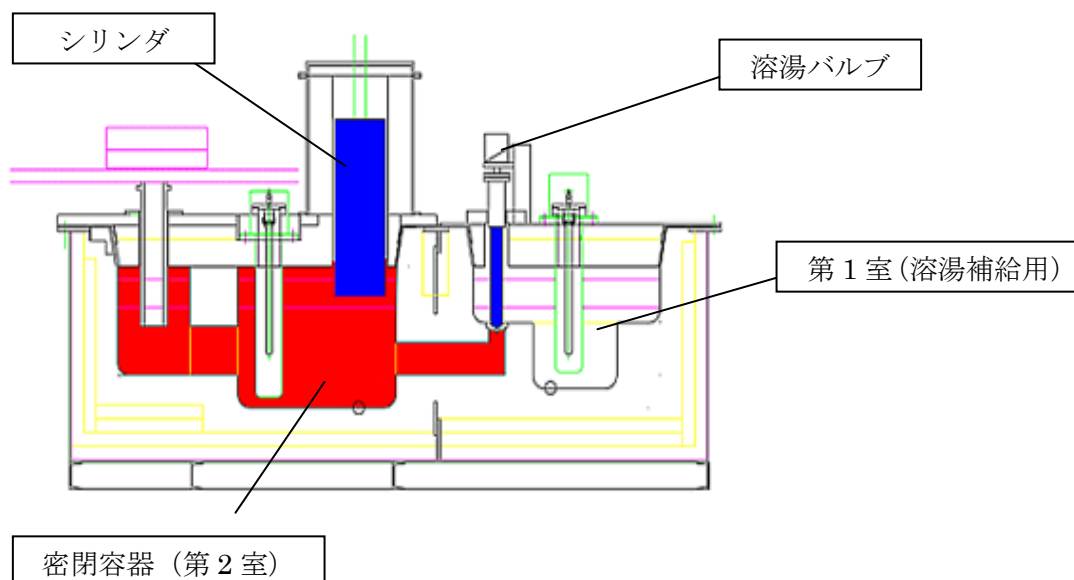


図 1-2-2-2 実機モデル

1-2-3 湯面制御用シリンダの開発

シリンダを溶湯上部に移動して溶湯に浸さない方式を採用、アルミ付着による駆動部のトラブルをなくす構造とした。また、本体は SUS 製シリンダ（薄肉鋼板製）とし、下部に断熱耐火物を張り、シリンダを支持する外筒は、鋼板間全面にセラミックファイバーを充填することで断熱性を向上させた。

1-2-4 湯面制御装置の開発

1) 目的

湯面計測定値は湯面制御をする重要データなので、実機で湯面計の精度測定を行なった。

2) 調査方法

フロート部を加圧して湯面を上昇させ、その時の湯面計とレーザ測定値及び実測値の変化を求め、整合性を調査した。

3) 結果

湯面計とレーザ測定値がほぼ一致した（図 1-2-4）。このことから測定した湯面高さをもとに、フロート湯面とシール湯面を制御することにした。

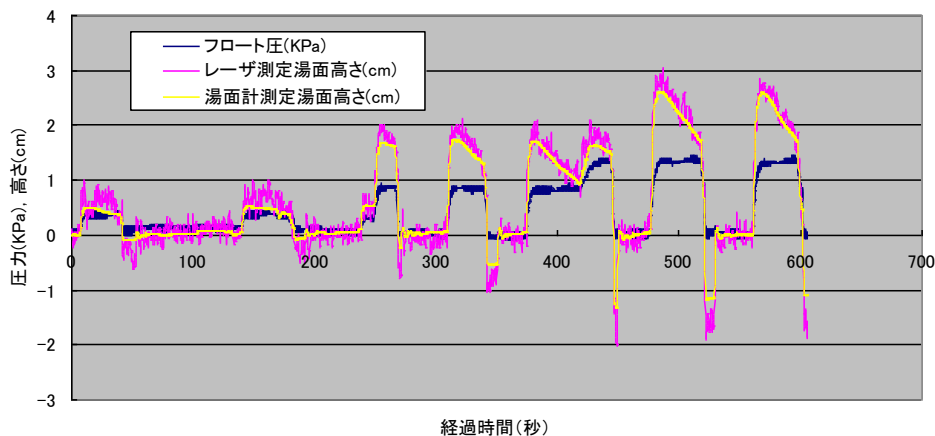


図 1-2-4 改善した湯面計測定値とレーザ測定値

1-2-5 保持炉の開発

平成 22 年度に設計製作した保持炉を鑄造実験に用い、耐久性、耐熱性及び熱損失を検証した。昨年 8 月に受湯後終了まで約 7 ヶ月間の溶湯を連続保持し実験に供した。その結果、耐久性及び耐熱性については問題なしと評価した。なお、実験段階に於いてヒーター保護管割れが起きたが、原因は、1 室の湯面制御トラブルや 2 室（大気開放部）のヒーター廻りの酸化物堆積によるものであったが、その後、湯面制御法を確立したことでトラブル発生はなくなった。

また、本炉は金種交換や炉体改良時の炉内湯抜き作業が手軽に行えるように、天井部に取り付けるタイプの安価な縦型ヒーターを採用したが、壁側から溶湯に直接装入する方式のヒーターを採用すれば、高温部が大気に触れる事が無いため 1 室の酸化物堆積の問題は解決されると考える。

本炉の省エネ性能については、各部位別の表面温度及び特別に設けた実証壁の温度を測定して考察し、さらに課題を抽出してより理想的な炉構造を導くべく検討した。溶湯保持時の温度分布測定結果を図 1-2-5-1、図 1-2-5-2 に示す。

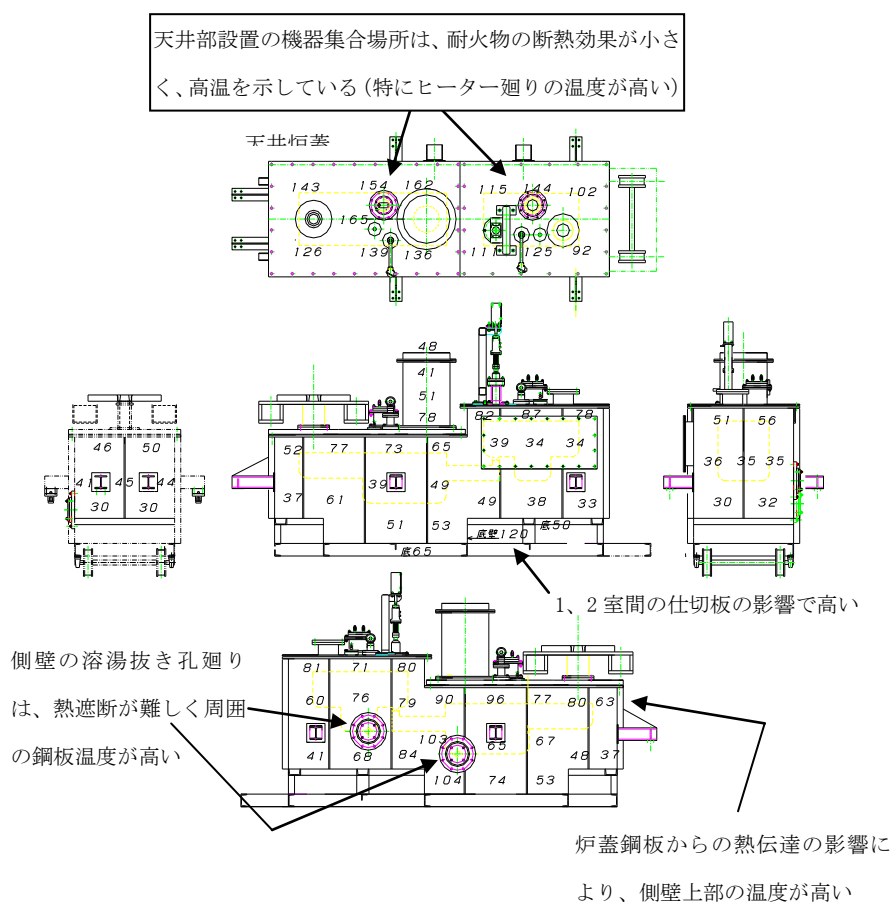


図 1-2-5-1 溶湯保持時の表面温度

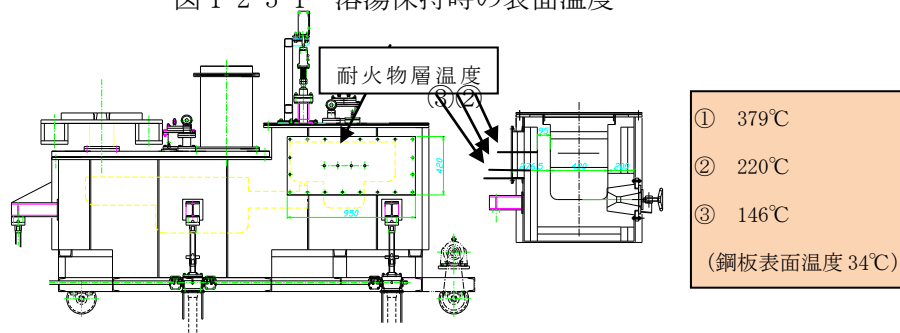


図 1-2-5-2 実証壁の耐火物温度

熱損失目標値 $200\text{W}/\text{m}^2$ を達成するための保持炉の構造案は以下の通りである。

- ①浸漬ヒーターの取り付け位置変更
側壁に取り付けてヒーターチューブ全体を溶湯に浸漬させる。
- ②レベルセンサー及び熱電対の取付部の変更
外殻鋼板との間に十分な断熱材を配置する。密閉型とする事も必要。
- ③炉体は極力、1室タイプ。円柱形または立方形として溶湯量対比表面積を小さくする。

1-2-6 密閉容器加減圧および溶湯バルブ駆動装置の開発

フロート部のフロートを上下すると同時にガスシリンダを移動し、不活性ガスをフロート部内に入れて炉圧を変化させ、その力でストーク内の湯面高さを制御する方式を開発した。これらを動作させた時に湯面高さと速度が適切に制御され、またシール湯面も所定の範囲に制御させているか確認するために、ストーク湯面高さとシール湯面高さ、及び各部の圧力を測定した。

ガスシリンダは2段階に分けて移動し、フロート部にアルゴンガスを供給した。その結果の一例を図1-2-6-1に示す。シール湯面は所定の炉壁厚さの範囲に入ることを確認した。また、シール各部の圧力もほぼ等しく、各部の湯面も湯面計の湯面とほぼ等しいと推定された。このことより、湯を問題なく上下動できることがわかった。

ストーク湯面は湯面とトラップ面までの距離を第1段階で上昇させ、続いて第2段階で更に製品高さまで上昇させた。なお、実際の casting ではフロートの湯面高さを測定することができない。そこで、フロート圧と湯面高さの相関を求め、フロート圧から湯面高さを推定した。

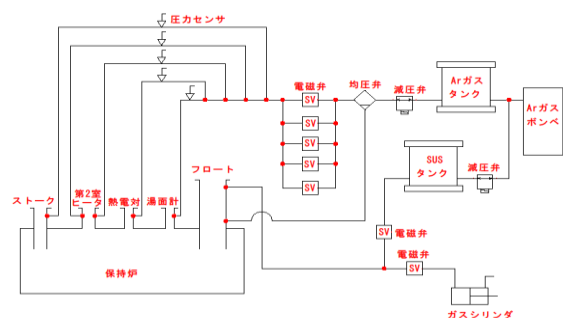


図 1-2-6-1 配管系統図

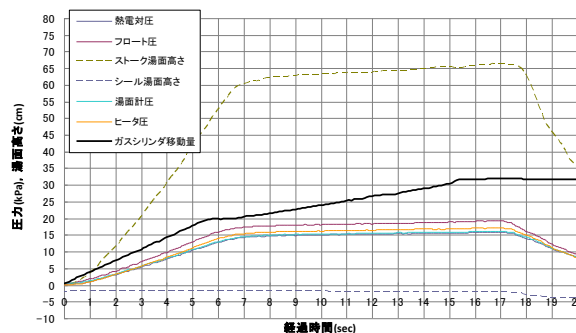
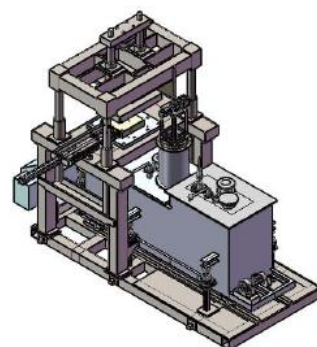


図 1-2-6-2 湯面高さと各部の圧力変化

2 装置全体組立と評価

2-1 概要

平成 23 年 3 月に(株)双立様に装置を設置し、炉と装置全体との連動試験を行なった。問題はなく計画したとおり動作することを確認した。鑄造実験前に、開閉板の耐久実験と湯面制御等を進めた。平成 24 年 2 月までに「金型 1」と「RP 型」および「金型 2」で鑄造を行なった。



(株)双立様に設置した装置

2-2 成果

計画した図 2-2-1 の動作を問題なく行ない、鑄造できることを確認した。

目標と結果の要約を表 2-2 に示す

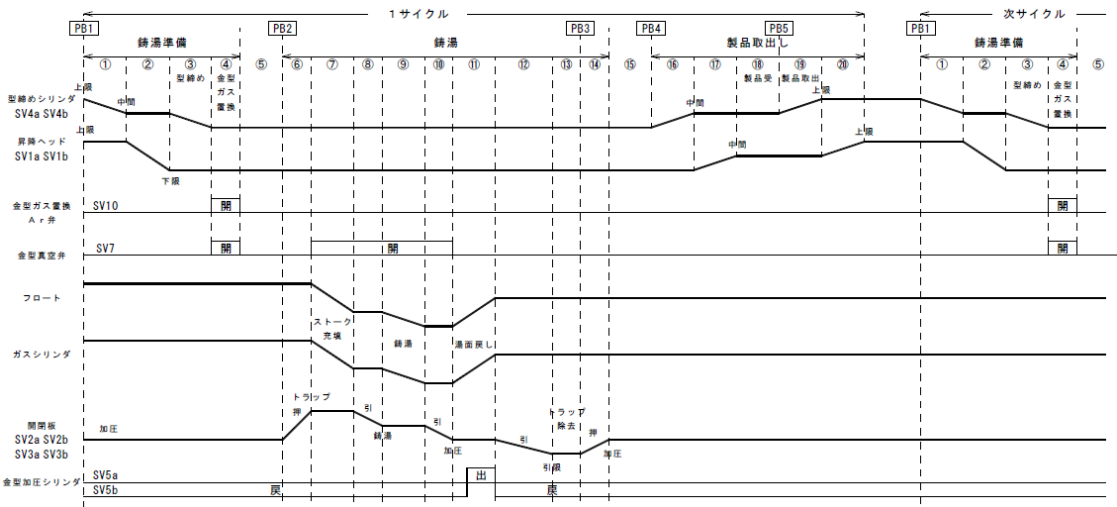


図 2-2-1 鑄造サイクルの行程

表 2-2 目標と結果の要約

No	研究名	主担当	目標	現状	評価
①-1 機械的構造・駆動部分の開発					
①-1-1	開閉用部材及び制御装置の開発	太洋M	気密性:1KPa以下	気密性:1KPa以下(注湯口)	○
			耐久性:5000ショット	耐久性:300ショットまで実施し、問題なし	△
①-1-2	開閉用部材とストークの接合技術開発	太洋M	気密性があり湯差しなきこと	実機で湯差しなきこと確認	○
①-1-3	金型開閉、溶湯加圧及び上下動移動装置の開発	太洋M	湯加圧装置:5MPa以上	湯加圧装置:5MPa以上	○
			ゲート閉鎖後 0.05 秒以内で加圧可能	ゲート閉鎖後 0.05 秒以内で加圧可能。	○
			上下動ストローク:600mm	上下動ストローク:600mm	○
			移動速度:60mm／s	移動速度:60mm／s	○
			鋳型開閉ストローク:200mm	鋳型開閉ストローク:200mm	○
			開閉時間:2秒	開閉時間:2秒	○
①-2 保持炉及び低圧溶湯供給装置関連の開発					
①-2-1	ストーク及び密閉容器開発	日本ルツボ	耐加圧力:0.1MPa	ストークでの減圧(0.1Mpa)での試験では問題なくでき問題ないと判断するが、更にストークでの加圧試験を予定	(○)
			気密性:10KPa以下の真空度保持	実操業サイクル 20 秒で現状使用に耐えているが、更に緻密化技術を付加することで 10kPa を 120 秒間保持できることを確認した。	○
①-2-2	溶湯バルブ	日本ルツボ	溶湯もれ:0.1CC／s以下	現状は 50cc/s であるが、当初計画より圧力、形状、容量ともに増大し、溶湯の流れも逆方向で厳しくなった。現在は漏れ分を補充。	△
①-2-3	シリンダ	日本ルツボ	熱損失少なく、100ℓ程度の溶湯補填	問題なく性能発揮(仕様設計通り)	○
①-2-4	湯面制御装置の開発	太洋M	湯面位置精度:±5mm	湯面位置精度:±5mm達成	○
①-2-5	保持炉	日本ルツボ	耐久性:1ヶ月保守不要	炉耐火物、ストーク、フロート、バルブ⇒問題なし(推定)	○
			耐熱性:800℃	OK	○
			熱損失:200W／m2以下	製造コストの関係から、熱損失 200W/m2 を全面適用できなかったが、確認のため設置した壁面では 120W/m2 と想定できる結果。更に詳細データ検討を予定。	○
①-2-6	密閉容器加減圧及び溶湯バルブ駆動装置の開発	太洋M	加減圧は電動方式で、ガスの使用量を最小にする。	サーボ駆動シリンダで加減圧	○
			バルブ駆動:ピストン駆動	空気圧ピストン駆動	○
②	装置全体組み立てと評価	太洋M	装置の組み立てと機能確認	装置を組み立て、問題なく動作を確認	○

3 本鑄造法における溶湯流動挙動の理解とシミュレーション技術開発

3-1 X線による可視化実験

本開発では、モデル黒鉛鑄型における溶湯流動状態を5件以上直接観察し、また数値シミュレーションとの比較により鑄造現象を理解することを目的とした。

3-1-1 流動状態可視化実験装置

可視化実験装置の概略を図3-1-1に、完成した装置の外観を図3-1-2にそれぞれ示す。可視化実験装置は、黒鉛製鑄型、真空ボックス、U字管、真空系、電動サーボ方式のエアシリンダ、熱交換器などからなる。これらを、X線観察用の遮蔽ボックスに導入するための架台に載せて構成した。鑄造は、U字管に溶湯を入れ、真空ボックスを減圧あるいはエアシリンダによる加圧で鑄型に溶湯を鑄込む。

真空ボックスはX線の透過性を考慮し、透過面は0.125mm厚のポリイミド膜とした。さらに、減圧時のポリイミド膜の過剰な変形を防止するため、格子状のバックアップを設置した。なお、予算の都合から、開閉部材を使用した鑄造の可視化は実施できなかった。

3-1-2 可視化実験結果例

1) リング状鑄型（パワーシリンダによる加圧のみ）の場合

パワーシリンダの駆動条件は、駆動速度：1000rpm（10cm/sec相当）、加減速時定数：50ms、シリンダ内径：63mm、駆動距離：75mmとした。保持炉の最高到達温度は約650℃であった（設定温度は750℃）。

観察結果を図3-1-3(a)に示す。ゲートから侵入した溶湯は、すぐに左右に別れた。キャビティ流入直後は急拡大分となるため、液面上昇速度が低下するが、やがてほぼ等速でリングを充填した。充填中、ゲートから溶湯と共に気泡が侵入する様子が観察された。充填過程において液面が乱れることはなく、比較的スムーズに充填が進行した。一方、溶湯がキャビティ内を充填完了した後にもゲートからの気泡の流入が見られた。気泡の発生源は、上部プレートと黒鉛金型の隙間、保持炉と上部プレートの隙間を埋めるために使用した粘土状充填剤（nonfan）など、多数考えられ、特定に至っていない。

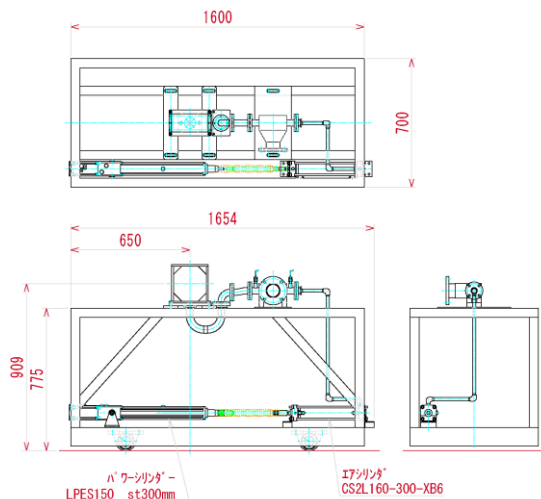


図 3-1-1 流動状態可視化実験装置概略

図 3-1-2 装置外観

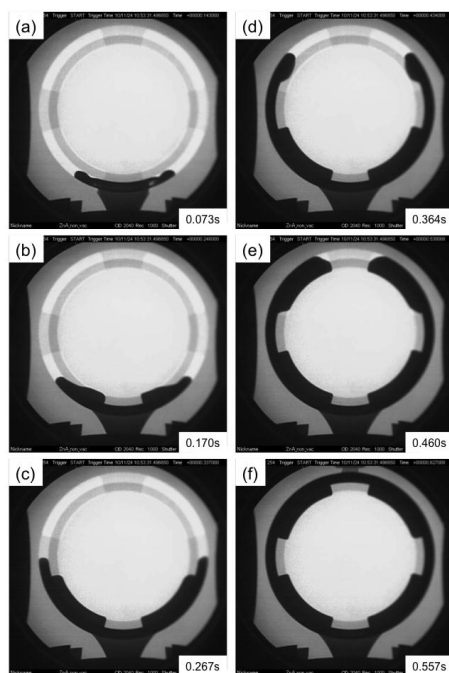


図 3-1-3(a) 可視化実験結果例（加圧のみ）

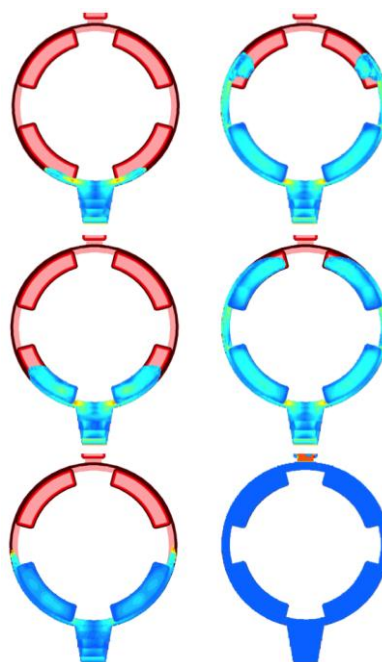


図 3-1-3(b) シミュレーション結果

2) 矩形状鋳型（エアシリンダによる加圧）の場合

エアシリンダの駆動条件は、駆動速度：2000rpm（20cm/sec 相当）、加減速時定数：50ms、シリンダ内径：63mm、駆動距離：200mm であった。

観察結果を図 3-1-4(a) に示す。加圧のみの場合、真空ボックスは不要となるため、バックアップの金具などは視野に入っていない。溶湯はキャビティ流入直後に瞬時流入速度の低下が見られたが、完全に停止すること無く流入が継続された。瞬時流入速度が低下するのは溶湯への圧力を媒介している空気層の圧縮性によると考えられる。すなわち、ゲートで流路の断面積が急縮小したため、システム内部の空気が瞬時圧縮され、シリンダからの駆動力が空気の圧縮に消費された結果、溶湯流入速度が低下したと考えられる。溶湯は、ゲートから上面の鋳壁まで上昇し、上面鋳壁にあたってキャビティ内に分散した。その後、溶湯の勢いが低下すること無く充填が完了した。最終充填位置は、上面の突起状の空間となったが、中央部の突起のみ完全には充満しなかった。また、充填完了後スリーブ内の溶湯が落下する現象が見られた。溶湯落下によって生じた空間に、キャビティからも溶湯が落下する様子が見られた。スリーブ内の溶湯は、その後時間の経過に伴って、観察時間内で上下動を 1、2 回繰り返した。

得られた鋳物は非常に湯じわがおおく、あまり綺麗な鋳肌ではなかった。また、溶湯の落下流出が原因と考えられる外びけも見られた。

3-1-3 数値シミュレーション

1) リング状鋳型の場合

図 3-1-3(a) に示す観察結果に対する数値シミュレーション結果を図 3-1-3 (b) に示す。パワーシリンダのピストンは定速駆動であるため、計算時の境界条件は速度境界条件とした。しかしながら、実際には圧縮性の空気を駆動媒体として使用するため、より厳密には、空気の圧縮性の考慮が必要である。計算は、開発したソフトを組み込んだ高精度鋳造 CAE シミュレーションソフトである JSCAST を利用して実施した。充填挙動は概ね一致していると思われる。

2) 矩形状鋳型の場合

図 3-1-4(a) に示す観察結果に対する数値シミュレーション結果を図 3-1-4 (b) に示す。計算時の境界条件は速度境界条件とした。このため、観察結果で見られたような流入時の一時的な速度の低下や充填完了後のスリーブ内での溶湯落下の減少などは再現出来なかったが、充填挙動は概ね一致している。この他、鑄造欠陥の観察結果とシミュレーションの比較を実施したが、その結果は 3-2-3 で述べる。

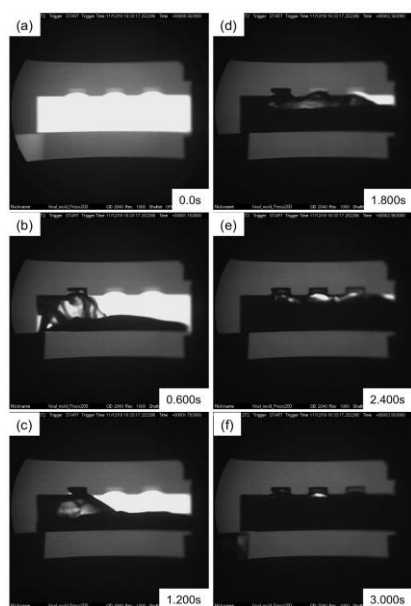


図 3-1-4(a) 可視化実験結果例（加圧のみ）

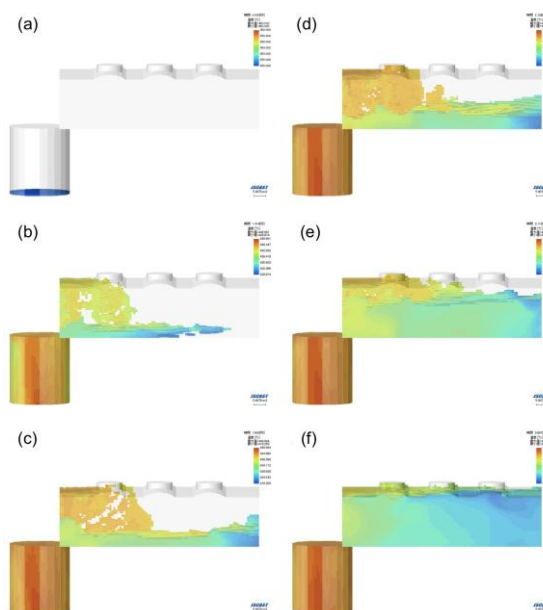


図 3-1-4 (b) シミュレーション結果

3-2 鑄造シミュレーション技術開発

開閉用部材の移動、溶湯加減圧と背圧を考慮した湯流れシミュレーション機能と最適鑄造条件推定ソフトを開発した。また、試作鑄造品の観察結果と比較した。

3-2-1 シミュレーション方法

1) 基本的想定

湯閉系は図 3-2-1 に示す。実用機も試作装置と同様の構造になると考え、以下を想定した。

- ゲート断面寸法は、ストック先端の最小断面寸法より小、中心位置はほぼストック中心に一致。
- ゲートと注湯口の共通断面積部から溶湯が鑄型空隙部に流入する。このゲート共通断面積は開閉用部材の移動で変化する。

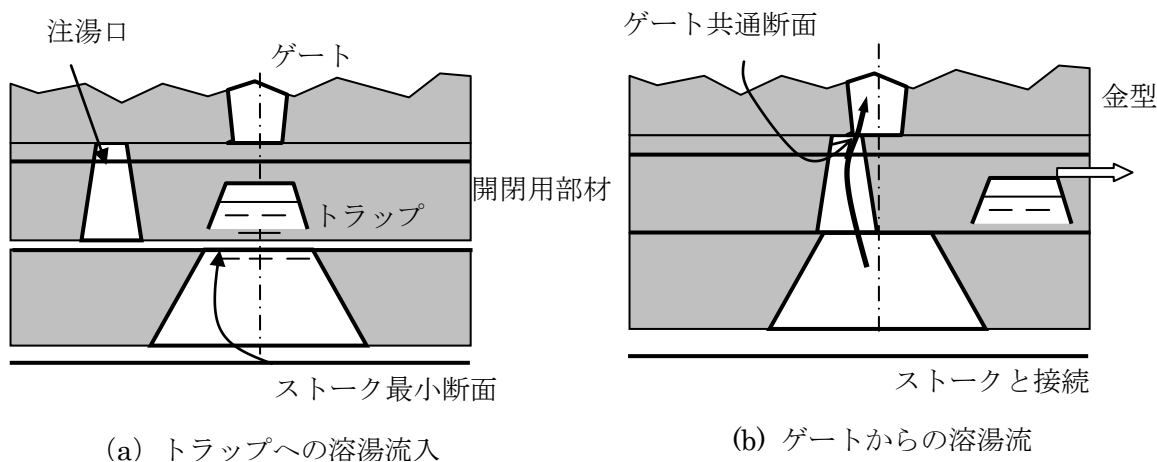


図 3-2-1 開発鑄造装置における湯口系

2) ゲート共通断面積の計算

図 3-2-2 に示すように、ゲートおよび注湯口を要素に分割し、ゲート断面要素、注湯口要素を登録する。次に、注湯口要素を開閉用部材の移動速度で移動させ、各ゲート断面要素（静止）と注湯口要素の重なり状態からゲート共通断面積を算出した。

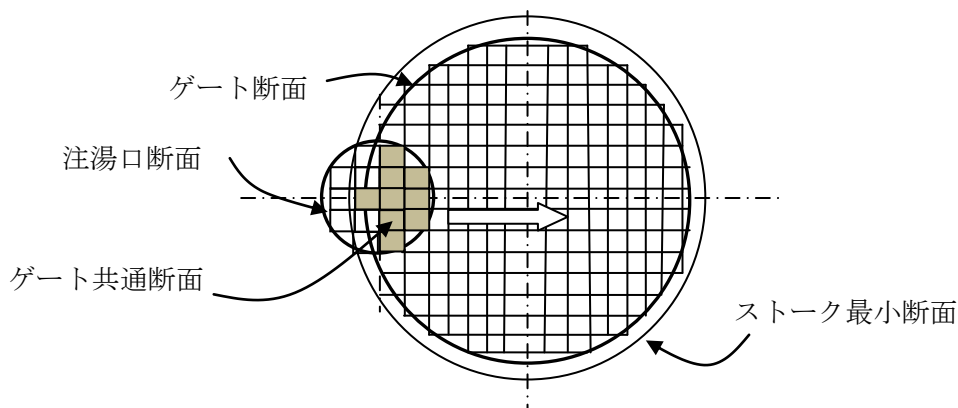


図 3-2-2 ゲートと注湯口の共通断面積が溶湯通過部となる

3) 開閉用部材の移動速度

図 3-2-3 に示すように、3 段階変化可能とした。ここで、時刻 $t_2 \sim t_5$ はゲートがストークを通過する速度を小さくした場合を想定している。

4) ゲート共通断面での境界条件

試作機では、フロートを移動させて注湯する。

この場合、フロート断面積を S_f 、速度を V_f 、ゲート共通断面積を A_g 、ゲート速度を V_g とすると

$$V_g = \frac{S_f V_f}{S_g} \quad (1)$$

となる。

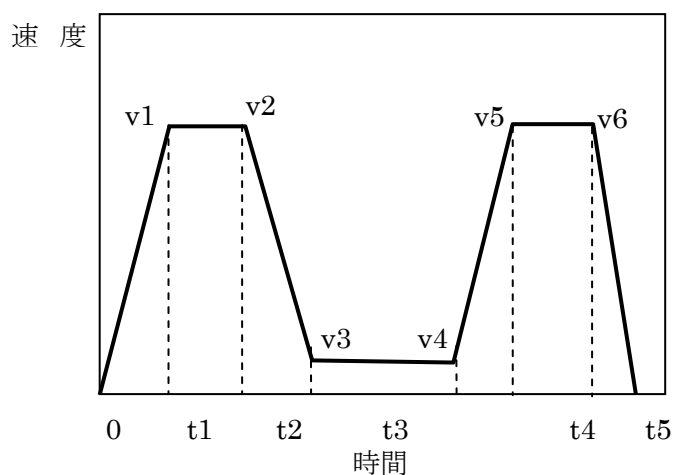


図 3-2-3 ゲート移動速度の変化

実際の溶湯供給系は図 3-2-4 のようになっており、バルブ 1 は閉じられており、溶湯の漏れは極力少ないよう配慮されているが多少の漏れは存在するであろう。これはこのシミュレーションの誤差になる。

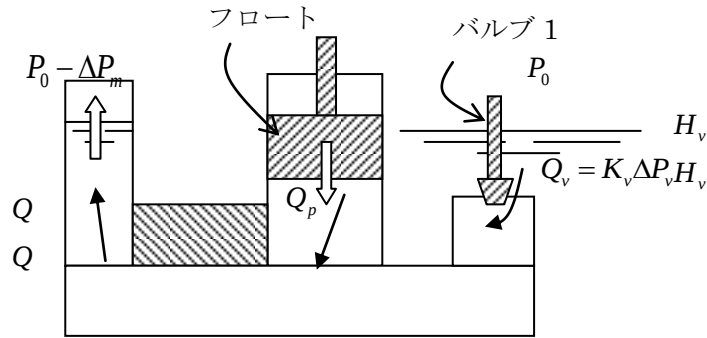


図 3-2-4 ゲートからの溶湯流入系

5) 局所加圧シミュレーション

本開発鋳造法で金型を使用した場合、溶湯充填後の引き巣生成を防ぐため、外部から局所加圧する必要がある。そこで、鋳型空隙部の一部をスクイズ・ピンで加圧して、凝固収縮で不足する溶湯を補う場合のシミュレーション・ソフトを以下の仮定の基に開発した。

- スクイズ・ピンの先端に圧力境界条件を設定し、ピン先端の移動を圧力境界の移動として扱う。
- スクイズ・ピンの圧力は、ある限界固相率以下の固相率の領域内に伝搬する。
- 固液共存域はニュートン流体と仮定し、固相率の小さい領域では、固相と液相の両方が移動し、固相率の大きい領域では、ダルシー則に従い、液相のみが移動する。
- ポロシティは圧力がある限界値以下に低下した領域に発生する。

3-2-2 シミュレーション結果

市販の JSCAST をベースソフトとして、開発したプログラムを組み込んだ。

1) 開閉板の移動速度変化が図 3-2-5 の場合の結果を図 3-2-6 に示す。約 1.12 s で鋳型空隙部を比較的スムーズに充填している。しかし、この移動速度変化ではなく、0.3 s で開閉板移動速度を 10cm/s と一定にした場合、鋳型空隙部が充填されないうちに注湯口がゲートを通り過ぎてしまい充填できないことが分かった。また、図 3-2-6 では、注湯口を溶湯が充填してから鋳型空隙部に溶湯が流入しており、上部が最終充填位置になっているが、速度一定の場合、注湯口の充填が遅れ、空気を巻き込むことが分かった。図 3-2-5 に示すように、注湯口がゲートに重なり始める時期とゲートから離れ始める時期の速度を大きくして、ゲート中心付近では速度を下げ停止状態に近くして、この状態での流入量を多くすることが望ましい。ゲート共通断面積が小さいと (1) 式から分かるように流入速度が非常に大きくなり、ガスの巻き込みや鋳型損傷など不都合なことが起こる。

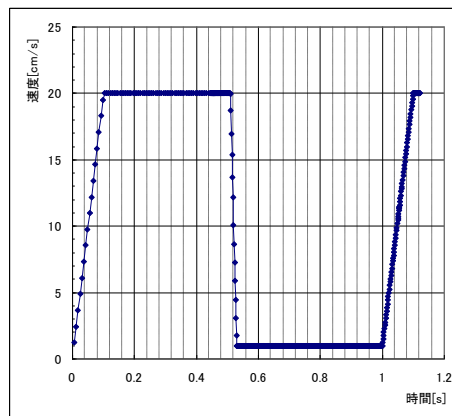


図 3-2-5 図 4-2-6 に使用した開閉用部材の移動速度

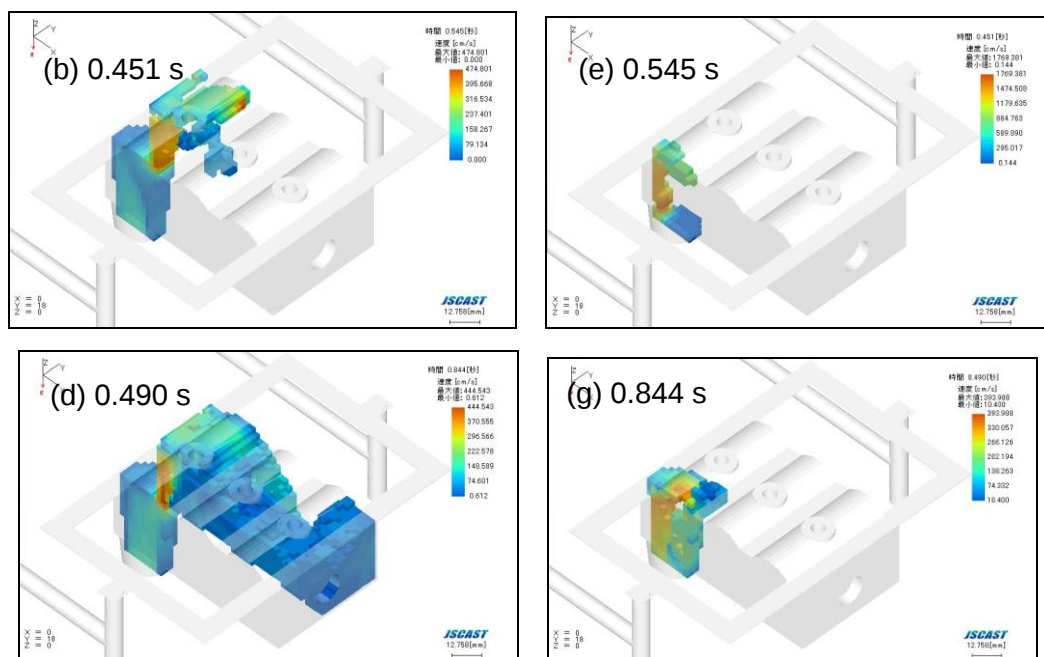


図 3-2-6 シミュレーション結果の一例（断面図で図 3-2-5 に示す開閉用部材移動速度を使用）

2) ポロシティ・シミュレーション結果

(1) 試作モデルモデル 1

図 3-2-7 は試作モデル 1 に対する湯流れ解析結果を示すもので、1.2 秒で充満しているが、ピンク色の部分にガスが残留している。図 3-2-8 は、凝固解析結果の一例で、溶湯充満後 28.9 秒における固相率 0.9 以下の領域を示している。

このようなシミュレーション結果から、溶湯未充満領域および凝固収縮を補うため、図 3-2-9 に示すように側部からスクイズ・ピンを圧入することが考えられる。

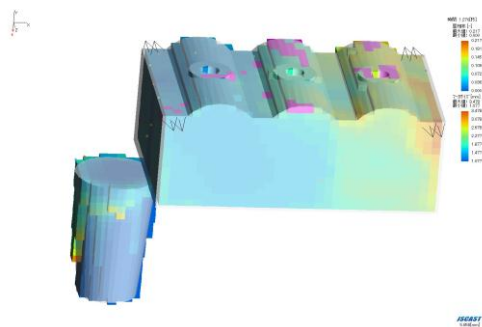


図 3-2-7 溶湯背圧を考慮した湯流れ解析結果（注湯開始後 1.2 s）

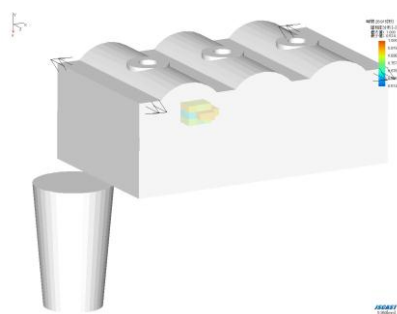


図 3-2-8 凝固解析結果
(28.9 s における固相率 0.7 以下の領域を示す)

図 3-2-10 はスクイズ・ピン先端の移動経過を示しており、注湯後開閉板で注湯口を閉鎖後 6 秒で急にピンが移動し、ケース 1 では、その後徐々に移動し、30 秒に約 52mm となり停止している。ケース 2（実際の試作装置の場合）では、25mm 以上移動できないので、6 秒で 25mm 一定となっている。スクイズ・ピンが最初急に移動するのは、未充満領域および巻込まれたガス気泡、さらに 6 秒までに発生したポロシティなど溶湯が存在しない部分に溶湯が供給されるためである。その後の移動は凝固収縮に伴う体積

分をスクイズ・ピンの体積で補うため、凝固速度に応じて変化している。

図 3-2-11(a)、(b) は其々、ケース 1、2 の場合に生じたポロシティ欠陥を示しており、ケース 2 ではかなりのポロシティが発生しているが、ケース 1 では上部にポロシティが存在するものの、内部にはほとんどないことが分かる。

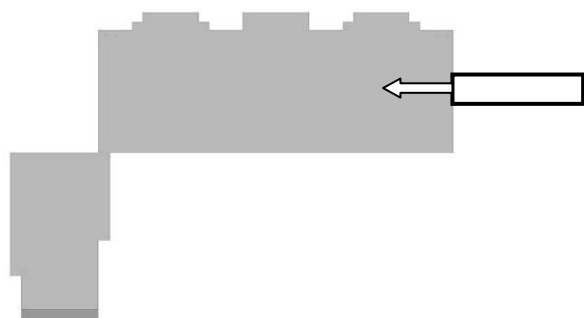


図 3-2-9 スクイズ・ピン

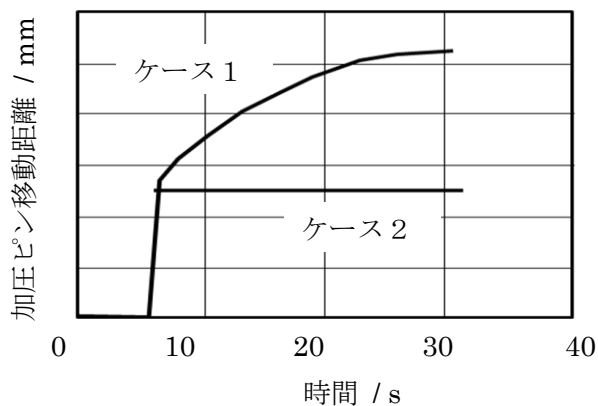


図 3-2-10 シミュレーションで得られたスクイズ・ピンの移動距離と時間の関係

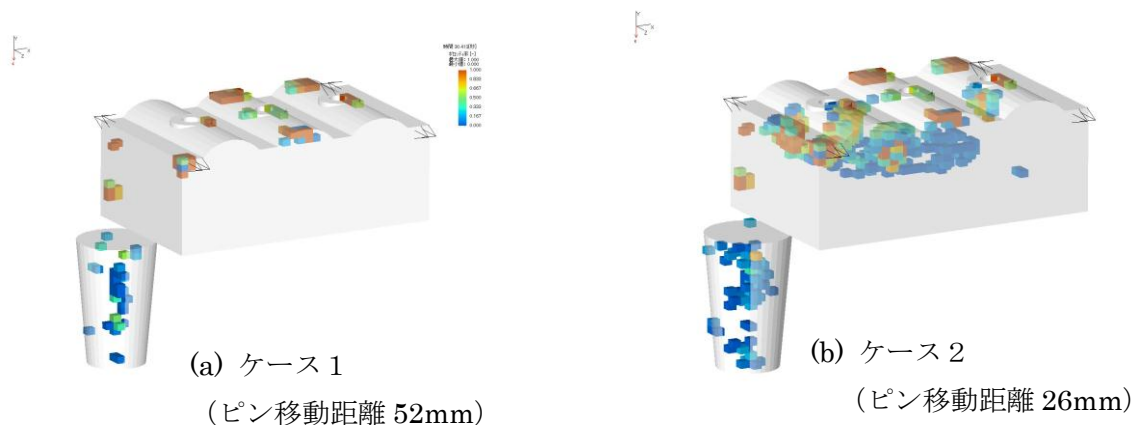


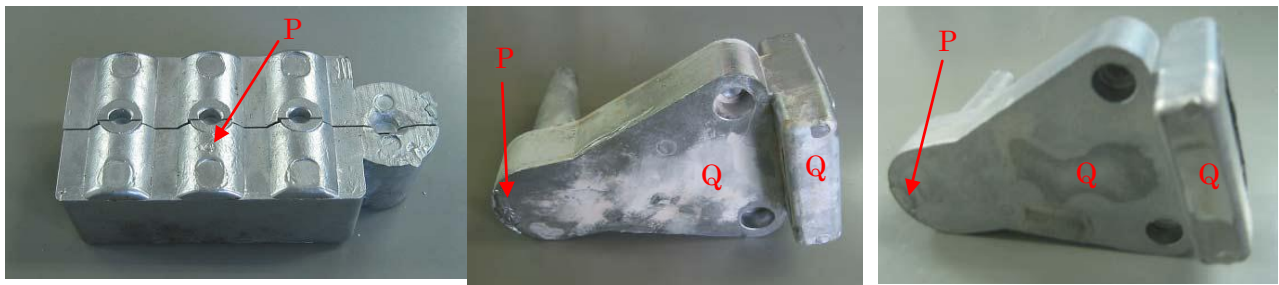
図 3-2-11 ポロシティ・シミュレーション結果

3-2-3 鋳造結果との比較

可視化実験とシミュレーションの比較については、3-1-3 で述べた。ここでは試作鋳造結果との比較を示す。

1) 最終充填位置

最終充填位置には通常、湯じわ等の欠陥が観察される。図 3-2-12(a)、(b) は夫々、試作モデル 1、2 の上面の外観写真であり、図 3-2-7 に例示するようなシミュレーションによる予測最終充填位置近くに湯じわ欠陥が見られ、良く一致している。なお、図 3-2-12(a) では、明示できないが、良く見ると図 3-2-7 の最終充填位置近くに湯じわが見れる。



(a) 試作モデル 1

(b) 試作モデル 2

(c) 試作モデル 2

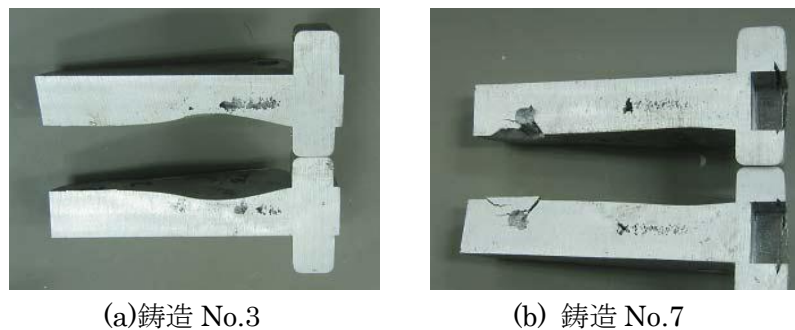
図 3-2-12 試作モデル 1、2 の上面の外観写真

(P は湯じわ欠陥、Q は外引けであるが未充填領域であった可能性が大きい)

2) 加圧ピンの効果と引け巣の発生

図 3-2-13 は試作モデル 2 の鋳物断面であり、鋳造する度に異なった位置に引け巣が発生している。図 3-2-14 はシミュレーション結果を示している。ここで、(a)は 11s 間加圧した場合、(b)は 30s 加圧した場合である。ただし、これらの結果は、ポロシティ率（空隙率）が 1%以上の領域を示しており、断面写真では、数%のポロシティ率は判別できないので、シミュレーション結果の方が大きく見えている点に注意されたい。

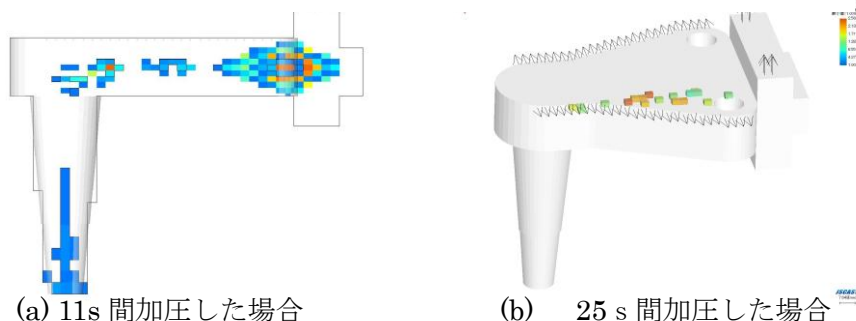
図 3-2-13(a)は加圧ピンが約 12s 加圧された実験結果であるが（この時間には 1 秒程度の誤差がある）、外引けが減少し、内部引けも減っている。シミュレーション（図 3-2-14(a)）でも同様の傾向がみられる。実験では、加圧ピンが引き抜けなことを恐れて、予定の 30s まで加圧していないが、もし、長時間加圧できていれば、図 3-2-14 (b) に示すように欠陥はかなり小さくなっていたかも知れない。



(a) 鋳造 No.3

(b) 鋳造 No.7

図 3-2-13 試作モデル 2 の鋳物断面



(a) 11s 間加圧した場合

(b) 25 s 間加圧した場合

図 3-2-14 シミュレーション結果

なお、実験では、スクイズ・ピンの挿入深さは 15～19mm であったが引けが発生していた。一方、シミュレーションではスクイズ・ピンを凝固終了まで加圧できれば、16mm 程度の挿入深さで、大きな引け巣は発生しないと予測された。この違いが生じた理由として以下が考えられる。

- a) 加圧は 12s 程度までしか行われていないので、その後の凝固収縮に伴う引け巣が発生した。もし、30s 程度加圧していたらもっと引け巣が減ったかも知れない。
- b) 加圧が 13s までしか行われていないのに、ピンが 15mm 進入したのは、充満直後のガス巻き込み量が推定値以上に多かった。
- c) シミュレーションでは、溶湯中に進入するピンの材料物性値を Al 合金と同じと仮定している。この仮定はピン寸法が小さい場合には、結果にあまり影響しないが（ピンの熱伝導率が Al 合金よりかなり低いためであることをシミュレーションで確認している）、この例ではかなり大きいので、凝固が進み、最終凝固位置が湯口近傍に移動した。

上記のような原因をより明らかにするには、ピン材料を正確に考慮したソフトに改善してシミュレーションする他、加圧時間を長くした実験データの取得が必要である。

3-2-4 結言

開閉用部材の移動、溶湯加減圧と背圧を考慮した湯流れシミュレーション機能と最適鑄造条件推定ソフトを開発した。また、可視化観察結果と比較した。本鑄造装置と同様の鑄造における可視化は費用の点から実施できず、空気加圧による可視化実験となったため、新たに開発した開閉部材の機能の確認はできなかった。しかし、湯流れ状況はシミュレーション結果と比較的良く一致した。また、局所加圧鑄造結果等のシミュレーション結果は実鑄造結果を良く説明できており、本シミュレーションが鑄造条件の設定に役立つことが分かった。なお、ここで、最適鑄造条件推定ソフトは、本プロジェクト計画に記載の通り、自動的に最適条件を算出するという意味ではなく、最適と思われる鑄造条件の推定に役立つソフトという意味である。

4 鑄造品の試作と鑄造基本技術の把握

4-1 鑄造品の試作

計画した 3 種類の製品のうち、①耐圧製部品は油圧分配弁を金型 1 で、②剛性向上部品は自動車の駆動軸まわり部品を金型 2 で、③複雑形状部品はインペラを RP 型で試作した。

4-1-1 金型 1

1) 製品と金型

油圧分配弁を想定した製品（図 4-1-1-1）を示す。見切り線は製品の上面とした。凝固収縮分を補充するため加圧ピンを側面部から押すようにした。

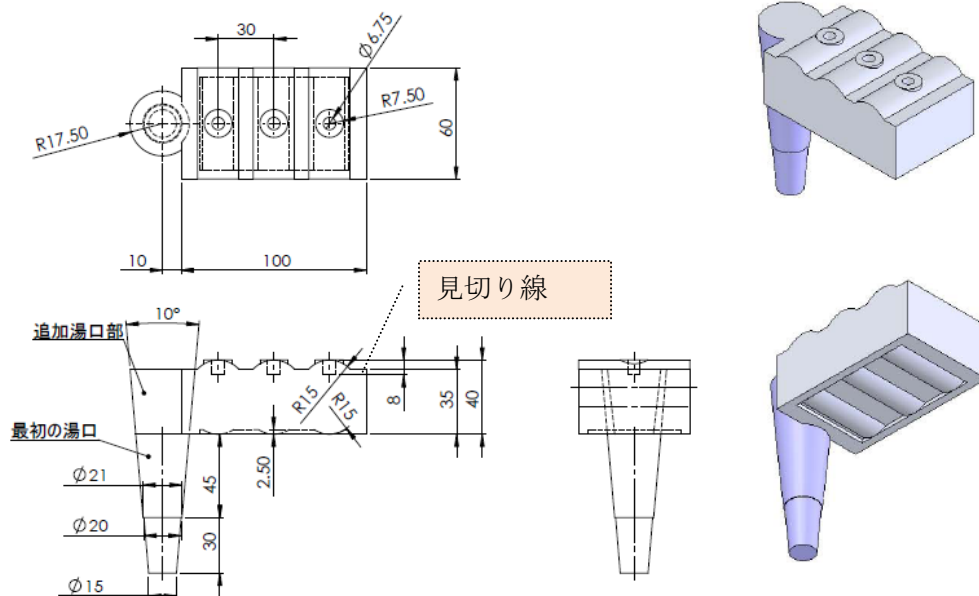


図 4-1-1-1 金型 1 の製品

湯がキャビティ全体に充填し、良好な外観の試料が得られた（図 4-1-1-2）。しかし断面観察すると空洞が残っており、加圧ピンで十分湯が押されてないことが推定された。

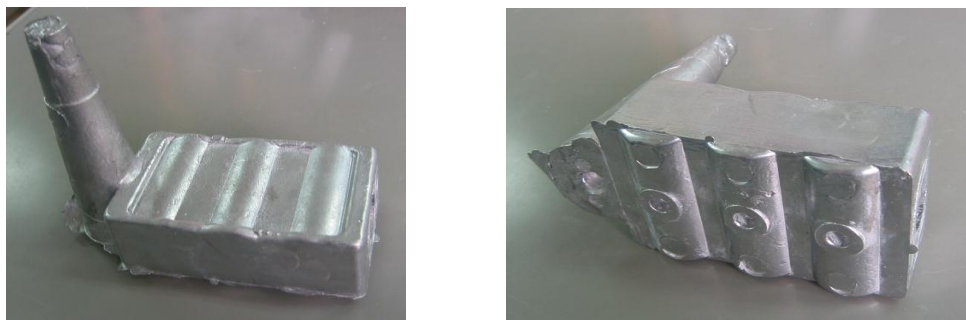


図 4-1-1-2 金型 1 の鑄造結果一覧

4-1-2 金型 2 での試作

自動車の駆動軸まわりの部品を簡素化した製品を設計した（図 4-1-2-1）。ダイカストでは T6 処理が難しいものを選定した。加圧量を増やすため、加圧ピンの断面積を大きくして、凝固収縮を十分カバーできるようにした。

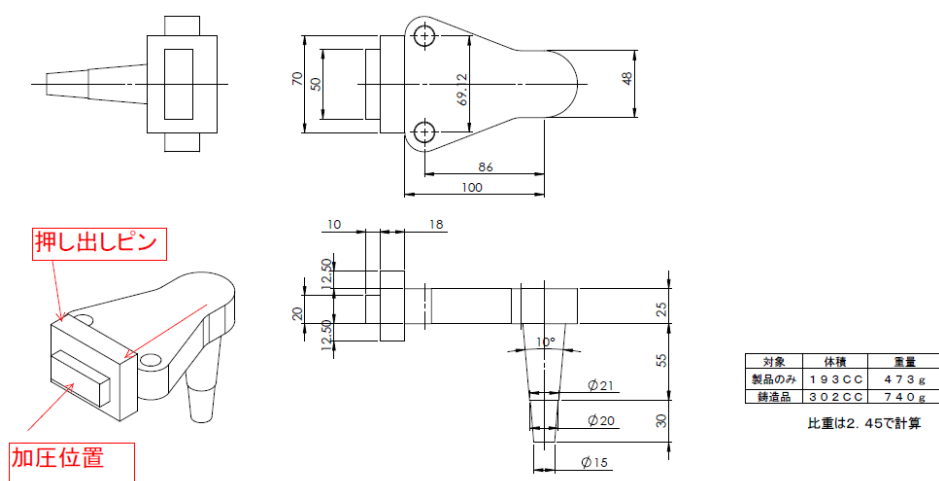


図 4-1-2-1 金型 2 の製品図

外観の良好な鑄造品が得られた。一部の試料は T6 処理したがふくれなどは見られなかった。断面観察では板厚さ方向の中立線上に微細な空洞が、また湯口上面に空洞が観察された。加圧ピンは最終凝固位置に取り付けるのが最適であるが、今回は鑄造機と金型との取り合いの関係で、加圧ピン取り付け位置が適切でなかったのが原因と推定される。



図 4-1-2-2 鑄造品

4-1-3 RP 型

兵庫県立工業技術センターに依頼しインペラの RP 型(Rapid Prototyping)を作成した(図 4-1-3-1)。解枠とガス抜きのために 2 つ割り構造とした。鑄造後の RP 型を図 4-1-3-2 に示す。

製品のハネの一部に欠けが観察された(図 4-1-3-3)。発生したガス抜きが十分でなかったと推定される。また断面観察したところ軸心に空洞が見られた。凝固収縮によるものと思われる。通気性の良い RP 型材料の選定、鑄造方案などの改良及び RP 型に適した鑄造パターンが必要と思われる。

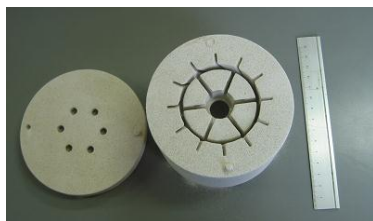


図 4-1-3-1 RP 型



図 4-1-3-2 鑄造後の RP 型



図 4-1-3-3 鑄造品

4-2 鑄造基本技術の把握

4-2-1 はじめに

開発した装置は、鑄造方案の観点からは、下記の点で従来の鑄造装置と異なる。

- (1) 低圧鑄造と同様に下方から溶湯を鑄型空隙部に注湯するが、鑄型空隙部充填後直ちに、開閉板で注湯口を閉鎖するので、溶湯には圧力がほとんど作用しない。従って、未充填領域への溶湯供給および凝固収縮体積を補うための加圧あるいは押湯が必要である。
- (2) 崩壊性鑄型を使用した場合、従来鑄造と同様に押湯を利用できるが、ガスによる全体加圧も可能である。
- (3) 注湯が移動する注湯口から行われる。

以上のようなことから、従来の鑄造方案をそのまま使用するには問題がある。試作鑄造やシミュレーションにより、現在判明している鑄造方案や鑄造条件で望ましい点は以下の通りである。

4-2-2 湯口方案

ダイカスト等では、図 4-2-1 のように堰を絞って、湯口系を除去しやすいようにするが、これは品質上良くない。なぜなら、せき断面積が小さいと、そこでの溶湯流速が大きくなり、空隙部のガスを巻き込むからである。真空減圧しても、完全真空は実現できないので、ガスを巻き込まない程度の速度(0.5m/s 程度)となるような断面積を確保する。すなわち、図 4-2-1(b)のように堰断面積を大きくする。また、上部に湯溜まりを設け(R 部)、製品部に多少でも圧力がかかり製品角部まで溶湯が流入しやすいようにすると共に、凝固収縮体積を補う溶湯源(押湯)とする。通常、堰断面積を大きくするとその除去コストが高くなり問題であるが、後述のように本プロセスではあまり問題にならない可能性がある。

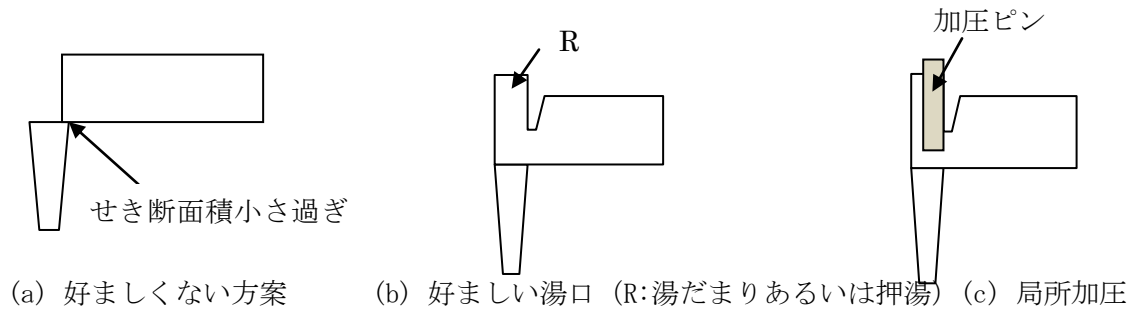


図 4-2-1 湯口方案

4-2-3 局所加圧および押湯方案

凝固収縮を補う溶湯供給のためには、図 4-2-1(c) に示すように、湯口上の湯だまり部に油圧等で加圧ピンを押し込み、溶湯を供給する（この他、局所的肉厚部が存在する場合、肉厚部近傍を加圧する工夫が必要）。これにより、ガスを巻き込んだ場合にもガスを潰すことが可能になる。また、薄肉部にも溶湯を供給できる。さらに、堰を製品から分離しやすいように接続部を切断あるいは薄くできる。

加圧ピンの押し込み時期、押し込み圧、引抜時期の決定には、3-2 節で述べているようにシミュレーション技術が役立つ。

加圧ピンを使用しなくても、湯だまり部 R を押湯としてここから凝固収縮分を補ってもよい。しかし、金型の場合、凝固が早いので、注意しないと有効な押湯とはならない。有効な押湯とするには、湯だまり部に気泡が存在するような湯流れを実現し、さらに湯だまり部の凝固が最後になるような寸法（あるいは断熱構造）にする必要がある。これに対しても開発したシミュレーション技術が役立つ。

4-2-4 開口部および注湯口の寸法（図 4-2-2）

開閉板に設ける開口部の形状は、円形でも、矩形でも良いが、通常円形で良いであろう。直径は、流速ができれば 0.5m/s 程度以下で、湯回り不良が生じない程度の低速になるよう設定する。流速が速いと噴流となり、ガスを巻き込み、欠陥となる。なお、開口部には溶湯が残留するが、温度収縮により容易に自然落下するので、除去は容易である。

注湯口の形状、寸法も同様であるが、鋳物と共に金型から取り出す必要があり、抜け勾配はある程度以上にする必要がある。その基準としては重力金型鑄造における値が使用できると思われる。

4-2-5 開閉板の移動速度

現状の開閉板移動速度は最大 200mm/s だが、高速化が望ましい。速度が遅いと下記の問題が生じる。

- 溶湯トラップに汚れた溶湯を入れた後、開口部を注湯口位置に移動する時間が長くなり、この間に湯面が凝固あるいは低下して、鋳型空隙部へのガス巻き込みが増える。
- 開口部と注湯口が一致する時間がかかり、図 4-2-3 に示すように有効流路断面積が小さい状態が長くなり、溶湯流速が大きくなってガスを巻き込む。

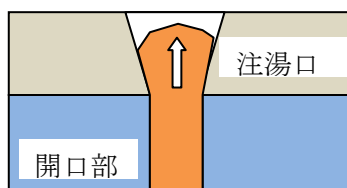


図 4-2-2 理想的な開口部と注湯口の位置

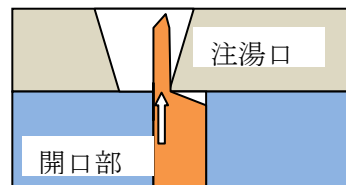


図 4-2-3 好ましくない位置

最終章 全体総括

従来のダイカスト法におけるガスや酸化皮膜の巻き込みによる欠陥を防止し、且つ低圧鑄造法等の生産性の低さを解消できるよう、高品質鑄造品を低コスト・低エネルギーで生産できる鑄造装置の開発を目的として研究開発を進めた。

開発した装置の主な特徴は、以下の3点である。

- ① 溶湯中に浸漬したセラミック製ストークと鑄型の間に溶湯開閉用部材を配置し、開閉用部材にはトラップ部、湯通過部及び加圧部が設置されている。トラップで湯表面の汚れた部分を取り除いた後、開閉板を迅速に移動して清浄な湯を湯通過部から鑄型内に導き、開閉板を移動して湯通過部を閉鎖し、鑄型内を加圧シリンダで加圧する。注湯後開閉板を閉じることにより低圧鑄造機の溶湯凝固待ち時間を短縮できる。またその状態で鑄型内加圧を加えることができるので、ダイキャストのような高圧力なしで高品質鑄造品を得ることができる。
- ② ストークは低圧鑄造機と同様に密閉容器内の溶湯に浸漬されているが、サーボモータ制御によるフロート制御で溶湯をストーク内へ押し込むと同時に、それと同調するガスシリンダの移動で不活性ガスを炉内に注入・排出するメカニズムであり、湯面計と炉内圧力で湯面高さを制御している。この方式により従来大量に圧縮空気などを用いて溶湯を押し上げていた装置と比較すると省エネ且つスムーズな注湯が可能となる。
- ③ 断熱性を考慮した保持炉の開発。

研究の結果、①の項目に関しては、事前実験、実炉実験の結果から、新規開発した開閉部材は300回の鑄造にも問題なく動作し、機能を満足していることを確認した。

また、②の項目に関しても、ストーク内の湯面高さを金型キャビティー部まで問題なく所定の速度で上昇・降下できることを確認した。総合すると提案時の省エネルギー60%以上を達成することは充分可能である。

③の項目に関しては、炉天井部に温度センサなど多くの部品を設置した関係で炉全体を断熱することができず、断熱性は期待したほどではなかったが、断熱壁を炉壁全体に拡大すれば現状値711が477W/m²まで低下でき、更に炉体に工夫を加えれば目標の熱損失200W/m²になることを数値シミュレーションで確認した。

開発した装置を用い3種類の鑄造品（「金型1」で耐圧部品、R P シェル砂型で複雑形状品、「金型2」で自動車足回り部品）を試作し、約2分の鑄造サイクルで鑄造することができた。製品取り出しの自動化、金型の冷却などで更に短縮を図ることも可能である。

鑄造品は良好な外観で、T6 処理も可能であった。内部に微細な空洞が観察されたが、凝固収縮によるもので、適切な金型に修正しての試作まで行えなかったのが残念であるが、試作での知見と装置内部の溶湯の挙動、またシミュレーションとの比較により、開発した装置に適切な鑄造方案や鑄造条件等の鑄

造技術を把握した。

課題としては、当初考えていた溶湯供給部の中に密閉容器があるという構造が実現できず、溶湯供給部と密閉容器を溶湯バルブでつなぐ形状になった事があげられる。当初、密閉容器として考えていた坩堝が使えずどちらかといえば通気性のある耐火材構造となったことで3年目のテストは予想以上の苦戦を強いられることとなった。今後この点を見直し、コンセプトの中でやれることを実施して、試作の容易な装置へ改善を進めることで、今後の事業化につなげていきたい。

すなわち、下記の課題があげられる。

- ①製品の取出し、トラップ中の凝固物の除去、開閉板潤滑剤の塗布が迅速にできるよう開閉板部材を改善し、サイクルタイムをダイカスト並みまで低減。
- ②湯面制御装置の簡素化とコストの削減。
- ③部材の合理化と断熱壁適用範囲の拡大で、更に省エネとコストパフォーマンスに優れた炉への改善。
- ④ casting シミュレーションの活用で今回開発した装置に最適な casting 方案と条件の決定。
- ⑤ casting 機本体の諸元の見直しとコスト削減。
- ⑥ 吸引注湯法や溶湯ポンプの利用による装置の大幅なコンパクト化とコストダウン。

以上