

平成23年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「耐震型水道部品及び高耐食性給水ポンプ部品の迅速製造技術の開発」

研究開発成果等報告書概要版

平成25年 1月

委託者 中部経済産業局

委託先 財団法人石川県産業創出支援機構

目 次

第1章 研究開発の概要

- 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標
- 1-2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）
- 1-3 成果概要
- 1-4 当該研究開発の連絡窓口
- 1-3 成果概要
- 1-4 当該研究開発の連絡窓口

第2章 粉体 RP 機による鋳物製造の短納期化への対応

- 2-1 RP 鋳型材料の粉体配合割合の最適化
- 2-2 大物適用のための分割鋳型の適用
- 2-3 RP 鋳型による鉛フリー銅合金、2相ステンレス鋳鋼の適用

第3章 鉛フリー銅合金での水道部品適用への対応

- 3-1 実操業に対応した溶湯成分の管理水準の設定
- 3-2 RP 鋳型での水道部品の適用

第4章 2相ステンレス鋳鋼でのインペラ製造技術構築への対応

- 4-1 鋳造シミュレーション適用のため解析データの収集
- 4-2 RP 鋳型でのインペラ製品適用

第5章 全体総括

- 5-1 成果の総括
- 5-2 工業所有権の取得状況及び対外発表等の状況
- 5-3 今後の事業化に向けた取り組み

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、世界的な水資源の確保の流れを受け、海水を淡水化するプラントで使用するポンプの開発設計が盛んに行われている。開発では、CAE で候補となった羽根形状の異なる試作部品を、モータに組み付け、実製品評価を行うことが開発の鍵となっており、その部品の迅速提供が川上鑄造企業へ課せられた課題である。また、上下水道の配管構造体の製造を行う川下企業では、地震による地盤変動でも連結部分が外れない耐震型水道部品開発を行っている。ここでも、実製品による評価が必要であり、川上の鑄物製造業は、開発周期を短くするため、川下企業が要求する形状に柔軟に対応した鑄造部品の短納期提供が求められている。

一方、近年の注目すべき鑄型の造型方法の一つに、RP 造形法を用いた迅速造型がある。例えば、樹脂をコーティングした砂にレーザを照射焼結し、鑄型を造型する手法があり、我々が対象とする銅合金やステンレス鑄鋼のような高融点金属の鑄造型に適用可能であるが、RP 機が高価なため設備導入が困難である。中小鑄造企業においては、コストを抑えたインクジェット式 RP 機による鑄型製造法の開発が期待されている。

一方、鑄物素材の製造工程に着眼すると、より耐食性能の高い 2 相ステンレス鑄鋼の適用が羽根車（インペラ）部品において進んでいる。しかし、鑄造欠陥の発生に伴い鑄造歩留まりが従来の普通鑄鋼よりも悪いため、2 相ステンレス鑄鋼での最適な製造条件の確立が必要である。銅合金鑄物においては、有害物質の規制が強まり、銅合金鑄物の鉛フリー化が進んでいる。しかし、鉛フリーの銅合金鑄物は、これまでの鉛を含有する素材と比較して、鑄造欠陥が発生しやすい傾向にある。鑄造企業は、水道用部品の鑄造欠陥を減少させるべく、その製造方法の高度化が迫られている。

(2) 研究の目的

インクジェット式粉体固着積層法による RP 造形は、液体を粉体へ噴霧し、粉体が硬化積層していく機構で、機器設備費としては他 RP 機より安価であるが、造形した鑄型は、石膏製のため熔融金属で熱分解し、高融点金属の鑄造には適用不可能であった。ゆえに、耐熱性のある鑄型を開発し、粉体固着積層式の RP 機で製造できれば設備コストを抑え、

川下企業のニーズである短納期化に対応した鋳造プロセスが実現できる。

これまで、(有)小松鋳型製作所と石川県工業試験場では粉体固着積層式 RP 機用の鋳型材料となるセメント粉体の研究開発を行い、耐熱性鋳造用鋳型として国内特許権を取得（PAT No. 4722988 造形用材料、機能剤、造形製品及び製品）した。しかしながら、本研究開発で対象とするインペラ等は、鋳込み重量が大きいうえ、水流抵抗の低下を鋳肌を求める製品であり、さらなる研究開発が必要なため、鋳型強度の向上と鋳物の表面粗さ、最大造型寸法の向上を目的とした。

鉛フリー銅合金の水道部品への使用が推進されている中、合金開発企業であり、かつ水道部品の販売先である川下企業の(株)栗本鐵工所と川上の水道部品鋳物製造業の(株)羽田合金においても、これまで共同で鉛フリー銅合金の実用化を目指し、溶解性、鋳造性、ならびに製品評価としての耐圧性について調査を行ってきた。これまでの調査研究により、溶解時に亜鉛をはじめ含有成分が損耗する成分変動に伴った、鋳造欠陥を招くことが一部わかっている。しかしながら、実操業では、鋳造企業毎に操業条件が細かく異なり、例えばフラックス剤や脱ガス剤の添加条件も異なる。このため、系統的实验による溶湯成分の変動に伴う、鋳造欠陥発生との因果関係を明確にし、実操業に対応した溶湯成分の管理方法を設けることを目的とした。

世界的に淡水化プラントの需要が伸びており、その構成部材として強度と耐食性を兼ね備えた2相ステンレス鋳鋼が要求されている。しかしながら、その製造は大企業に寄るところが多く、実証研究の内容は明らかではない。これまで高級鋳鋼(株)では石川県工業試験場と共同で、2相ステンレス鋳鋼の溶解の手法や鋳造後の熱処理に伴う鋳鋼材の機械的性質や腐食特性の評価を行ってきた。これを踏まえ本研究では、ポンプ部品インペラ形状を得るうえで必要な、押し湯形状等の鋳造方を構築する上で基礎データを構築し、鋳造シミュレーション技術を活用した製造条件の確立を目的とした。

(3) 研究の目標

インクジェット式粉体固着積層法 RP 鋳型の開発により鉛フリー銅合金、2相ステンレス鋳鋼鋳物の製造を短納期化する。型製造を一般的な造型期間の2～6週間から24時間に短納期化し、鋳造工程を含めた鋳物製造を1週間以内とする。下記課題項目ごとに研究目標を設定した。

【1. 粉体 RP 機による鋳物製造の短納期化への対応】

【1-1】 RP 鋳型材料の粉体配合割合の最適化

鋳型の原材料の配合を検討し、RP 鋳型を開発する。

噴霧液体による粉体中へのなじみを最小限とする粉体材料の探索を行い、

鋳物表面の表面粗さが Rz50 μ m 以下を目指す。

【1-2】 大物適用のための分割鋳型の検討

大物鋳物適用のため分割鋳型を想定し、崩壊無く持ち運びが可能な型連結手法を検討することで、大きさ 400mm 以上の鋳物製造を目指す。

【1-3】 RP 鋳型による鉛フリー銅合金、2 相ステンレス鋳鋼の適用

RP 鋳型による鉛フリー銅合金、2 相ステンレス鋳鋼鋳物の製造を実現する。

【2. 鉛フリー銅合金での水道部品適用への対応】

【2-1】 実操業に対応した溶湯成分の管理水準設定

実操業で想定される溶湯の成分変動に起因した鋳造品の欠陥発生挙動をとらえ、鋳物製造時の管理水準を明確にする。

【2-2】 RP 鋳型の水道部品適用

鉛フリー銅合金製水道部品の短納期製品化を達成し、鋳型製造で 24 時間、鋳込みから仕上げの鋳造工程で 2~3 日間、合計 1 週間以内の短納期製品化を実現する。

【3. 2 相ステンレス鋳鋼でのインペラ製造技術構築への対応】

【3-1】 鋳造シミュレーション適用のための解析データの収集

円錐形状試験片と解析結果の比較により、2 相ステンレス鋳鋼固有の欠陥判定閾値を決定する。

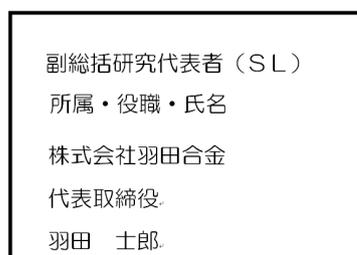
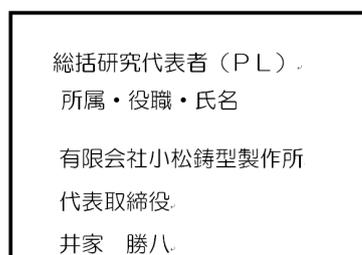
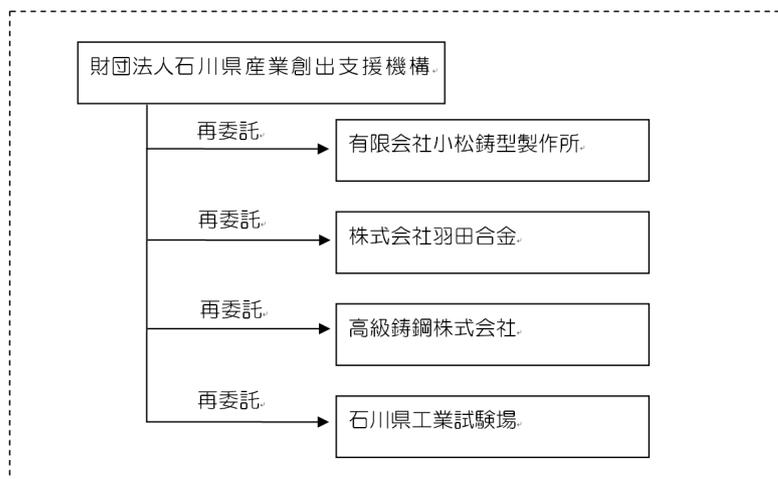
【3-2】 RP 鋳型でのインペラ製品適用

2 相ステンレス鋳鋼製インペラ製品の短納期製品化を達成する。

鋳型製造で 24 時間、鋳造工程を 4~5 日間とし、合計 1 週間以内の短納期製品化を実現する。その際、シミュレーション解析を活用し方案決定を行う。

1-2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）

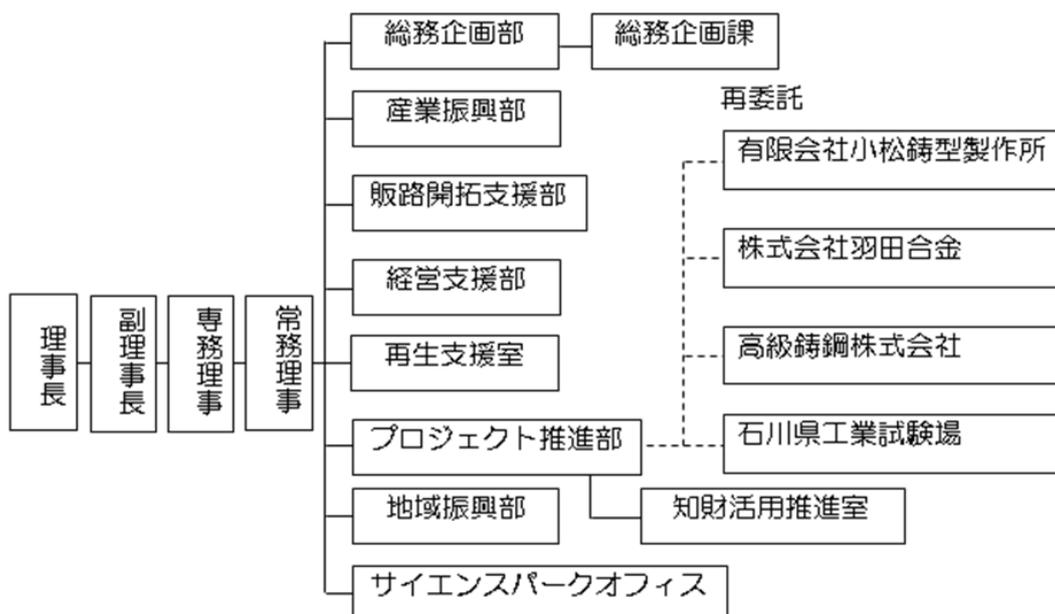
1) 研究組織（全体）



2) 管理体制

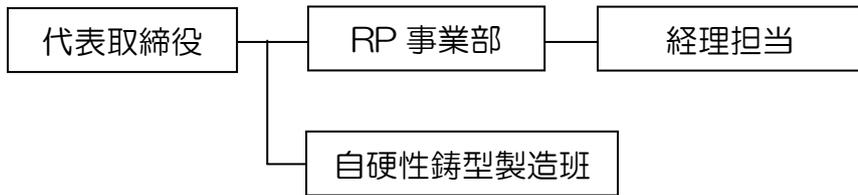
① 事業管理機関

財団法人石川県産業創出支援機構

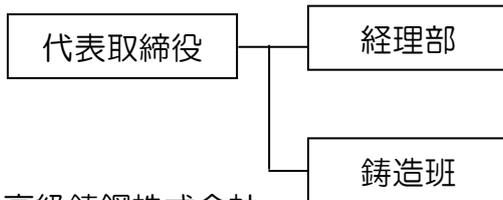


② 再委託先

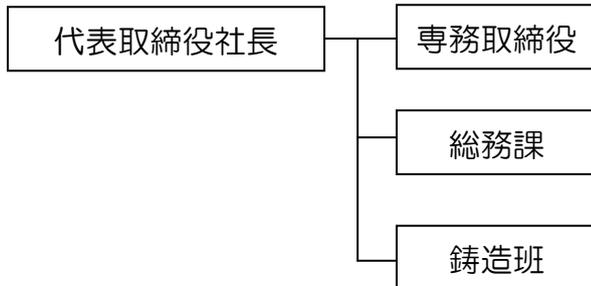
有限会社小松鋳型製作所



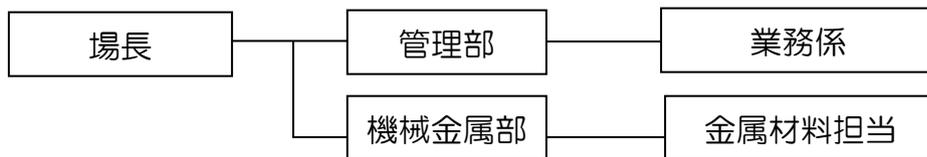
株式会社羽田合金



高級鋳鋼株式会社



石川県工業試験場



(2) 管理員及び研究員

【事業管理機関】 財団法人石川県産業創出支援機構

管理員

氏名	所属・役職
西村 聡	プロジェクト推進部長
高畑 典男	プロジェクト推進部知財活用推進室長
中尾 一也	総務企画部 総務企画課長

【再委託先】

研究員

有限会社小松鋳型製作所

氏名	所属・役職
井家 勝八	代表取締役
井家 洋	RP事業部 主任
中西 孝之	自硬性鋳型製造 班長
井家 美紀	RP事業部

株式会社羽田合金

氏名	所属・役職
羽田 士郎	代表取締役
谷口 晴彦	鋳造リーダー

高級鋳鋼株式会社

氏名	所属・役職
濱上 豊敬	専務取締役
藤崎 誠剛	主任

石川県工業試験場

氏名	所属・役職
坂谷 勝明	機械金属部 部長
藤井 要	機械金属部 専門研究員
谷内 大世	機械金属部 技師

1-3 成果概要

インクジェット式粉体固着積層 RP 機による鋳物製造の短納期化への対応に関し、セメント粉体の最適配合を見いだした。さらに、造型後の焼成や塗型剤の検討によって、より強度と表面粗さを向上した RP 鋳型を開発した。また、分割鋳型の製造に関し、従来の造型法では、抜き勾配がなく造型が不可能な羽根形状を有する鋳型の製造に成功した。開発した粉体材料を用いて、水道部品分水栓および、ポンプ部品のφ320mm インペラ、φ450mm ガイドベーン用鋳型を RP 造型し、鋳造品を得た。

鉛フリー銅合金での水道部品適用への対応に関し、溶湯に脱ガス剤、フラックス剤それぞれの添加剤種の検討を行い、その効果を比較した。各種評価試験により、鉛フリー銅合金鋳物に最適なフラックス剤、脱ガス剤を選定した。さらに、溶湯分析を行う際に用いる溶湯成分分析機（以下、発光分析装置）を効率的に確認・校正するため、独自の標準試験片を作製した。鋳造企業の操業状態に適した効率的な溶解、鋳造を可能とした。

2 相ステンレス鋳鋼でのインペラ製造技術構築への対応に関し、RP 鋳型による階段状試験片鋳型を作製し、2 相ステンレス鋳鋼と普通鋳鋼の比較鋳造を行った。鋳造試験片とシミュレーション解析結果から、2 相ステンレス鋳鋼の欠陥予測は、普通鋳鋼を基とすることとした。これらの知見を基に 2 相ステンレス鋳鋼製品における鋳造方案の設計に対して、鋳造シミュレーション解析を適用することによって効率化を図った。

事業化対象製品である鉛フリー銅合金による水道部品分水栓と 2 相ステンレス鋳鋼製インペラの製造に関し、開発した RP 鋳型を用いて鋳造を行った。鉛フリー銅合金製の水道部品を製造した結果、製品一つにはガス欠陥が発生したもの、その他の製品は鋳肌や外観寸法において、従来法と同等品を製造することができた。2 相ステンレス鋳鋼製インペラにおいては、一部中子の崩壊とベーニングによるしわが見られたが、鋳造品の外観形状は確保でき、表面粗さも目標を達成した。これら、RP 鋳型による鋳造での欠陥対策法として、ガス抜き孔を従来法より多く配置した鋳造方案にすることで、ガス欠陥の抑制が期待できるが、中子部の崩壊に関しては、鋳型強度のさらなる向上が必要であると考えられた。

一方、鋳造工程の期間に関し、目標の短納期化を達成し、鋳型製造で 24 時間、鋳込みからまで 2 日間を可能とした。また、仕上げ工程に関し、専用加工機による機械加工や外注による熱処理工程を短期化できれば、合計 1 週間以内の最終製品の製造は十分可能である試算を得た。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

(事業管理機関)

財団法人石川県産業創出支援機構

プロジェクト推進部 研究交流推進課長 高畑典男

Tel:076-267-6291 Fax:076-268-1322

Email:takabatake@isico.or.jp

第2章 粉体 RP 機による鋳物製造の短納期化への対応

2-1 RP 鋳型材料の粉体配合割合の最適化

(1) 目的

研究では、鋳型の粉体材料配合の最適化を図り、耐熱性に富んだインクジェット式粉体 RP 鋳型を開発する。具体的には、銅合金やステンレス鋳鋼の鋳造にも耐えうる十分な鋳型強度を有しつつ、造型中の噴霧液体のにじみを最小限とする粉体材料の探索を行い、鋳物表面の表面粗さが Rz50 μm 以下を目指すことを目標とした。

(2) 実験方法

RP 鋳型用の粉体材料として必要とされる点は、インクジェットから噴霧された液体による硬化と、にじみを最適化し、寸法精度を確保することである。粉体材料を探索、開発するにあたり、RP 造型機に粉体材料をセットし造形テストを繰り返し行うことは、時間と労力を要する。そのため、シャーレに候補となる粉体を手で引き詰め、精製水を垂らして硬化する粉体のサイズ・重量を測定するスクリーニングを行った。次に、RP 機により候補となった試験体を造形し、造型後の持ち運び性（ハンドリング性）と組み立て時の破損防止を目的に、抗折力の評価を行った。また、鋳型からのガス発生量を減らし、鋳造品のガス欠陥を減らすため、原材料の熱分解挙動を把握する示差熱分析を行った。さらに、選定した粉体材料に対して実際の鋳造を行い、熱間強度の評価を行った。熱間強度は図2-1-1に示すように、ボックス型の主型に、赤点で囲んだ試験体となる円筒中子を RP 造形し、鋳造することで円筒形状の中空部を有する鋳物を形成する。鋳物の断面を観察し、中空部の真直を評価した。さらに、開発した RP 鋳型により鋳造した鋳物を表面粗さ計で測定した。

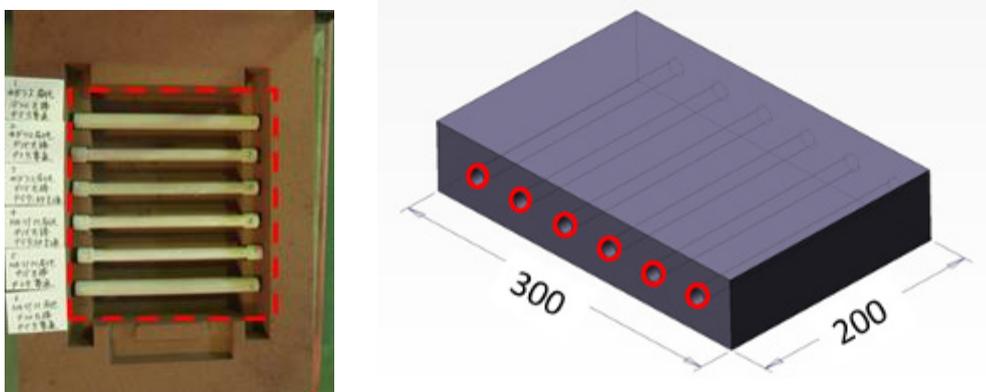


図2-1-1 試験体をセットした鋳型と中子強度評価用の鋳物形状

(3) 結果と考察

(3) - 1 シャーレーテスト

PVAの含有率を変化させた場合の、PVAを少なくすると、重量が重くなり、厚みが増す傾向がある。そこで純正の粉体のZP140の重量と厚みの傾向に近い、PVA1.2%以上で今後のRP機による成型実験を行うこととした。さらに、ガラスを添加した場合も評価し、硬化部分の形状にはさほど影響がないことがわかった。

(3) - 2 抗折力試験

図2-1-2 に骨材の種類を変化させ場合の抗折力を示す。この結果、骨材としてFineBzより、ルナモスを使用した場合の方が、鋳型強度が良いことが判明した。さらにガラス粉末を加えた場合、鋳型強度が増した。また、含浸剤に漬けた試料による試験も行った。水ガラス、シリカゾルとも含浸前と比較し、強度が向上した。

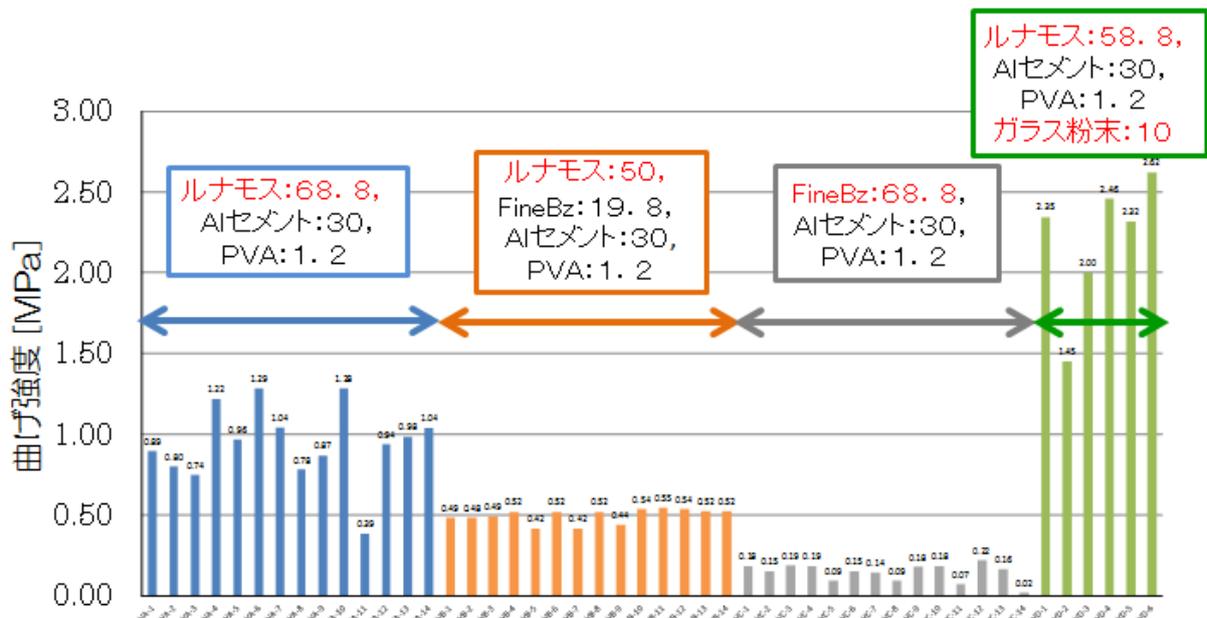


図2-1-2 骨材による抗折力の変化

3) - 3 示差熱分析

市販の純正粉体のZP140とアルミナセメントの比較では、ZP140は、石膏の熱分解による大きな変曲点が2箇所見られるが、アルミナセメントの場合は、熱分解が少なかった。同様な試験をPVA、ガラス粉末をそれぞれ混合した粉末の数種にて行い、それぞれの熱分解特性を把握した。PVA単体であれば、250℃から450℃にかけて、比較的大きな重

量減少と、発熱反応が見られた。これは有機分が熱と反応することで発熱し、ガスが発生することで重量が減少していると考えられる。また、ガラス粉末は、重量変化はほぼ見られなかった。しかし、800℃から大きな吸熱反応が見られた。これは、ガラス粉末がガラス転移点に達し、強度が低下することが想定された。アルミナセメント・ルナモス・PVAが混合された粉体では、単体におけるルナモスとPVAの反応がそれぞれ出ているので、混合されたことによる化学的变化はないと考えられた。これら示差熱分析の結果から、注意すべき点は、PVAにおけるガスの発生と、ガラス粉末のガラス転移点における強度低下であった。

一方、PVAの重量変化において、450℃あたりで80%以上の重量が減少されており、更なる加熱で、PVAを蒸発していると考えられる。つまり、成型後の1000℃で焼成することは、焼き締めることと同時に、ガスの基となる有機分を焼き飛ばしてしまうこともでき、 casting時のガス欠陥の減少が期待できる。

(3) - 4 熱間強度試験

図2-1-3 鋳物を切断し、中子による成形精度を評価した例を示す。左の写真は、鋳造時の熱で変形した試験片中子により、鋳物の中空部が湾曲した場合である。一方、右の写真は、変形が少ない場合である。中子サイズと含浸剤塗型剤を変化させ、それぞれの条件での熱間強度試験を行った結果、含浸剤・ガラス粉末無しの鋳型は、鋳造時に崩壊したものもあり、鋳造時の安定性が欠けることが判明した。また、ガラス粉末が入ったRP鋳型材では、全く鋳造品の形状として得られなかった。これは、抗折力では鋳型の強度の向上が認められたが、示差熱分析の結果から判明したガラス転移点での強度低下が原因と考えられる。従って、ガラス粉末入りRP鋳型材は、鋳造には不向きであるとわかった。

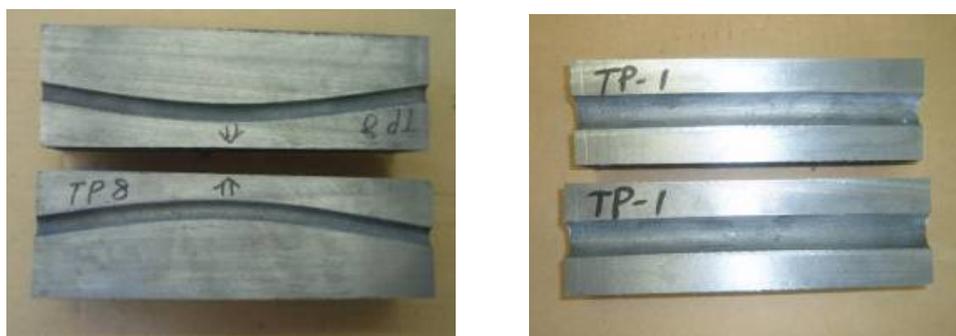


図2-1-3 変形した試験片鋳物（左）と中子強度を有し変形が少ない場合（右）

2-2 大物適用のための分割鑄型の適用

(1) 目的

RP 機で作製できる鑄型のサイズには限りがある。また、生産性を向上させるために行う一つの鑄型に多数の製品を配置する多数個込めを行う。そのため、複数個の鑄型を組み合わせ、一つの鑄型とする必要がある。鑄型を複数の構成部品で分割して造型した後に、組み立てし、一体化した分割鑄型の造型を目的とした。

(2) 対象モデル

対象とした製品は、図2-2-1に示す水道部品用分水栓、図2-2-2に示すポンプ部品の $\phi 320\text{mm}$ インペラ、及びポンプ部品の $\phi 450\text{mm}$ ガイドベーンである。これらを対象として CAD 上で鑄型の部品構成を検討し、RP 造型機により 2-1 RP 鑄型材料の粉体配合割合の最適化で検討した鑄型材料を用いて、造型を行った。特に、 $\phi 450\text{mm}$ ガイドベーンは、従来の中子造型法では、抜き勾配が水平、垂直方向に対して直線的に配置できずに、抜き型が不可能な3次元形状の羽根形状を有するものである。

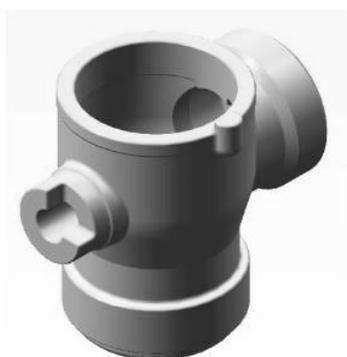


図2-2-1 水道部品用分水栓

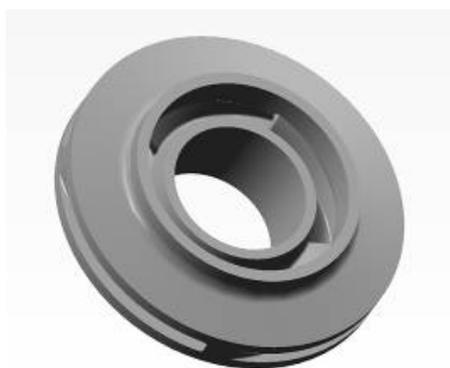


図2-2-2 $\phi 320\text{mm}$ インペラ

(3) 結果

試作した分割鑄型の例とし ①全長 150mm 程度の水道部品分水栓を 2 個込めとした鑄型であり、概寸 $400\text{mm} \times 150\text{mm}$ 程度の鑄型、② $\phi 320\text{mm}$ インペラ部品用の鑄型で、概寸 $500\text{mm} \times 390\text{mm}$ 程度の鑄型、③ $\phi 450\text{mm}$ ガイドベーン用の鑄型で $\phi 535\text{mm} \times 120\text{mm}$ ある。①に関しては、図2-2-3に、③に関しては、図2-2-4に実際に造型した鑄型の写真を示す。なお、 $\phi 450\text{mm}$ ガイドベーンに関しては、3次元形状を有する羽根を形成するため、羽根形状を3次元的に個別に造型した。個

別に造型した部品を組み合わせることで、ガイドベーン全ての羽根を構成した中子を造型した。主型に関しては単純形状であったため、一般的な木型を用いた造型を行い、RP 鑄型による中子と一般的な鑄型を組み合わせた複合構造とした。一方、RP 鑄型の製造に関し鑄型製造に要した所要時間を計測した。水道部品分水栓の鑄造型には 24 時間以内で達成した。φ320 インペラ鑄型の造型に関しては、約50時間必要であったが、RP 機の複数台使用と型乾燥時間を短縮すれば24時間以内へ短縮が可能となる試算を得た。



図2-2-3 分水栓の分割造形した鑄型部品（左）と組み立てが終わった RP 鑄型（右）



(a) ガイドベーンの羽根用中子を複数組み合わせたRP造形中子

(b) RP造形中子を主型に組み付けた鑄型

図2-2-4 450mm ガイドベーン用の鑄型

2-3 RP 鋳型による鉛フリー銅合金、2相ステンレス鋳鋼の適用

RP 鋳型による鉛フリー銅合金鋳物、2相ステンレス鋳鋼鋳物の製造を実現するため

前項 2-2 大物適用のための分割鋳型の適用で記載した分水栓のRP 鋳型 及び 図
φ320mm インペラ部品の鋳型 に対し、それぞれ鉛フリー銅合金、2相ステンレス鋳
鋼での鋳造を行った。得られた鋳造品に関する詳細は、後述の3-2 RP 鋳型での水道
部品の適用及び 4-2 RP 鋳型でのインペラ製品適用に記載した。

3章 鉛フリー銅合金での水道部品適用への対応

3-1 実操業に対応した溶湯成分の管理水準の設定

(1) 目的

地金メーカーは、それぞれ個別に鉛フリー銅合金を開発し、切削性、鋳造性、耐圧性などを明らかにし、鉛フリー銅合金地金の供給の増加を図っている。これに対し、鉛フリー銅合金地金を溶解・鋳造して生産活動を行う鋳造企業は、それぞれの鉛フリー銅合金地金に対応した生産技術を構築し、川下企業に対して水道関連部品を供給する必要がある。鉛フリー銅合金は、従来材のCAC406と比較して、製造実績が乏しいため、その製造工程に関する指針は定かではない。特に各鋳造企業によって溶解炉や溶解頻度が異なり、溶解作業の操業手順は確立されておらず、鋳造欠陥が多発する問題がある。

本項目では、(株)栗本鐵工所が開発した Ni 含んだ Bi 系鉛フリー銅合金クリカブロンズ (JIS H5120 CAC904 該当) を対象とし、従来材のCAC406に使用されている精錬、脱ガス用の添加剤の影響を系統的实验により評価し、溶湯成分と鋳造欠陥発生との因果関係を明確にすることを目的とした。

また、(株)羽田合金が自社にて鉛フリー合金 CAC904 溶湯成分の管理を行うには、溶湯を迅速に炉前分析し、成分調整の上、出湯する必要がある。一般的に、発光分析装置を用いた分析では、装置を可動の都度、確認校正の作業を行う。しかしながら、小規模溶解を行う中小鋳造企業においては、分析装置が連続運転とはならず、稼働と停止を繰り返す事から、この校正作業の負担が大きくなる。特に校正には、各成分が規定量含有された標準試験片を複数個分析し、装置を校正する必要がある、必要成分の個数分の分析をしなければならず、時間的、人的労力を伴う。このため、効率的に成分分析を行うため、一つの試料で一度に複数成分の確認を可能とする独自の標準試験片を作製することを目的とした。

(2) フラックス剤および脱ガス剤の検討

(2) - 1 実験方法

実験で使用した添加剤の名称に関し、製造メーカーのカタログによれば、その効果を表した様々な名称で記載されている。偏析防止剤、微細化剤、脱ガス剤、脱酸剤、精錬、フラックス等である。ここでは、CAC406 にて汎用的に用いる市販の添加剤を4種選定し、(株)羽田合金や関連副資材メーカーにて使われる呼称として、フラックス剤と脱ガス剤に分類した。脱ガス剤としては、製造メーカーの異なる脱ガス-A、脱ガス-B の2種、フラックス剤とし、メーカーの異なるフラックス-A、フラックス-B の2種の計4種類である。添加方法は、各々の添加剤製造メーカーが推奨する方法で行った。

無処理の溶湯と各添加剤を投入した溶湯を、テータモールド試験片、階段状試験片、チル試験片、引張試験片に鋳込み、欠陥や機械的性質の比較を行った。同時に溶湯をピンサンプラーで採取し、不活性ガス溶解法にて酸素と水素の溶存量を分析した。

溶解は、市販の鉛フリー銅合金地金 CAC904 材を用い、高周波溶解炉にて溶解重量約45kgで行った。これまでの(株)羽田合金での実績を踏まえ、地金と返り材の比率を6:4とし、溶け込み後の垂鉛添加を0.5%とした際にフラックス剤や脱ガス剤の添加を行い、その後脱酸処理として15%リン銅合金を0.3%添加した。その工程手順を図3-1-1に示す。

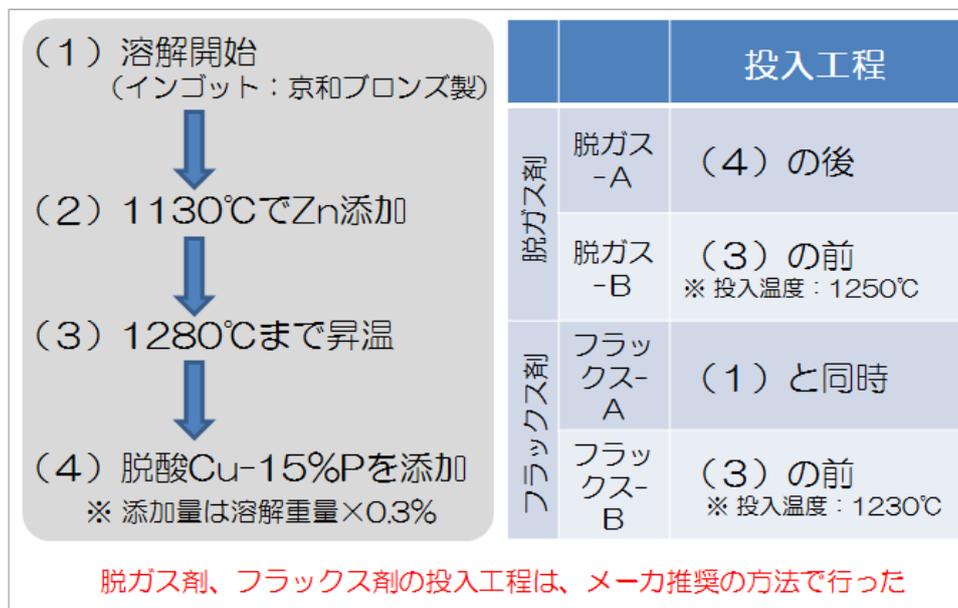


図3-1-1 溶解工程の手順

(2) - 2 結果と考察

テータモールド試験片のカラーチェックによる染色探傷では、フラックス-A にピンホールらしき箇所が 1 点見られたが、その他の条件の試験片に関しては、微少引け巣も見られず全て健全な状態であった。また、マクロ組織写真からは、結晶粒径にさほど大きな差異はみられず、パイプ状のヒケの大きさにおいても顕著な差は見られなかった。階段状試験片による断面観察結果では、カラーチェック写真に関し、脱ガス-A 及びフラックス-A に関して最肉厚部の階段の中央部にピンホールが確認できた。マクロ組織写真の結果からは、いずれの条件においても、肉厚に応じた結晶粒径の大きさに変化は少なく、肉厚感受性に対する影響は、どのフラックス剤、脱ガス剤を用いても同等に思われた。チル試験片による破面観察結果では、一般的にチル試験片は、チル面からのチル層それに続く柱状晶および、等軸部とモトル部から成り、その状態から溶湯の良否を判断する。一般的な青銅系鋳物 CAC406 の場合、健全な柱状晶及び等軸晶部では青灰色を呈し、不健全な等軸晶部には、黄色、褐色、燈赤色が混在する。通常、チル面からの青灰色の長さを測定して溶湯の品質を判定する。ただし、鉛を含まない合金の場合、溶湯が良質であっても青灰色部は生じないので判定が難しいとされ、柱状晶の長さやヒケや破面の色調、粗の程度から総合的に判断しなければならないとされる。今回の結果において、柱状晶の長さ及び破面の色調が異なる部位を評価した。それぞれの添加剤の条件で鋳込み温度が同一でなかったものもあり、その評価は難しいと考えられる。柱状晶の長さに関し、同一の添加剤の条件では、鋳込み温度が低温の方が短かった。さらに、低温で注湯を行った全ての条件において、楕円で囲った変色箇所が存在し、フラックス-A を除く高温注湯には存在しなかった。特に、フラックス-A の高温注湯と脱ガス-A の低温注湯の条件の試験片は変色の度合いが著しかった。

ガス分析は、脱ガス剤の投入による効果を確認する目的で、脱ガス-A、脱ガス-B のそれぞれの処理と、処理を施さなかった脱ガス処理無しのものに対して行った。図 3-1-2 にガス分析の結果を示す。酸素に関しては、無処理のものと比較し、脱ガス剤投入の効果が見られ、脱ガス-A より脱ガス-B の効果が高かった。一方、水素に関しては脱ガス-B は、最も分析値が低い値となり、その効果が確認された。しかし、脱ガス-A による処理を行ったものは、無処理のものより悪い結果となった。

それぞれの条件にて鋳造した試験片の表面に機械加工を施し引張試験片とし、引張強度と伸びを測定した。脱ガス-A を除いて全ての条件にて、低温での引張強さと伸びが、高温の

ものより大きかった。また、脱ガス-A と脱ガス-B を比較すると、伸びは脱ガス-B の方が高く、引張強さは、ほぼ同程度合った。また、フラックス剤を比較した場合、フラックス-B の方がフラックス-B よりも強度、伸びの両方において優れていた。無処理のものと比較した場合、フラックス-B 及び脱ガス-B の処理が伸びにおいて、効果が見られたが、フラックス-A 及び脱ガス-A に関しては、さほど大きな効果は見られなかった。

フラックス剤、脱ガス剤の優劣において、テータモールド試験片と階段状試験片によるピンホール欠陥の有無、チル試験片破面での変色部位の有無、ガス分析の結果、及び引張試験の結果を総括すると、フラックス-B 及び脱ガス-B が有効であった。

なお、脱ガス剤の使用手順は、添加剤メーカーの指針に従っている。図3-1-1 溶解工程の手順に示すように、脱ガス-A は脱酸処理としてのリン銅合金の投入の後に、脱ガス-B はリン銅合金の投入の前に投入される。したがって、今回の分析結果は、脱ガス剤に含まれる成分の効果のみを評価したものとは言えず、脱ガス剤の投入方法も影響している可能性があり、さらなる検討が必要である。

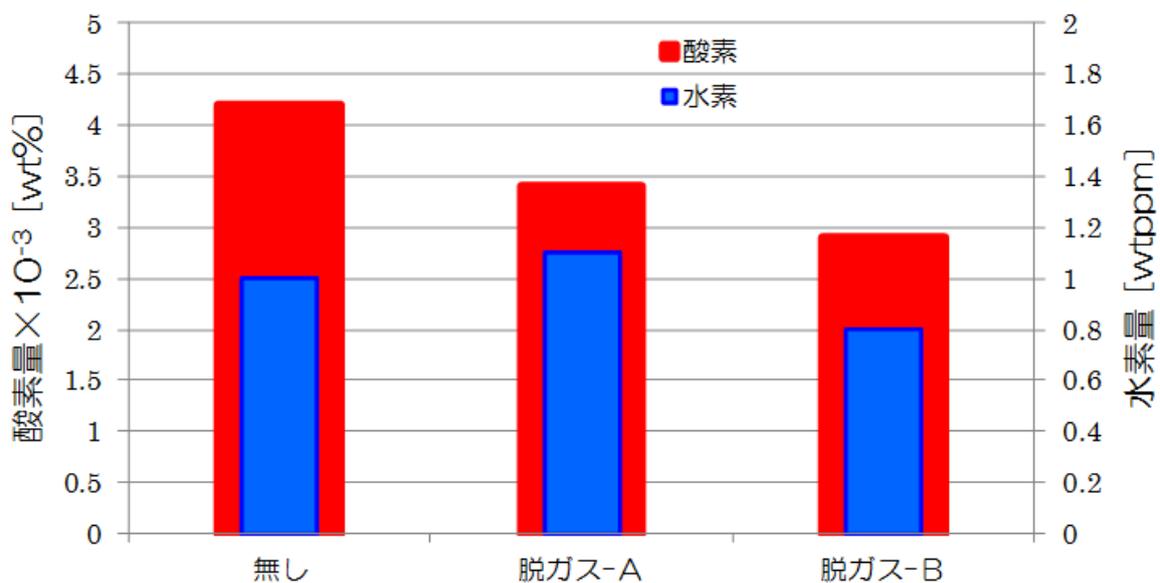


図3-1-2 ガス分析の結果

(3) 実操業炉での溶湯成分評価のための標準試料の作製

(3) 実験方法

鉛フリー合金 CAC904 の標準試料の作製のため、円筒形状の金型を製造し、金型急冷により、適度に铸造組織が緻密化した標準試料を作成した。試料を長手方向に5mm 刻みで

切断し、各切断面に対して4箇所発光分析を行った。各断面の分析を連続的に行う事で、試料の長手方向の成分偏析を測定した。対象成分は、炉前の溶湯成分の管理として重要とされるSn, Zn, Ni, Biとした。長手方向の分析値で安定した領域を決定し、発光分析装置の校正に用いる箇所を決定した後で、その部位についてICP分析を行い、標準試料としての値付けを行った。

3-2 RP 鋳型での水道部品の適用

(1) 目的

前途3-1実操業に対応した溶湯成分の管理水準の設定で得た知見を基に、鉛フリー銅合金製の水道部品鋳物を製造する。この際、鋳物製品の短納期化を達成するため、開発したRP 鋳型を用いた実製品を対象とした鋳造において、発生する欠陥を分類評価し、短納期で製品化する上での注意点を明確にする。

(2) 実験方法

水道部品鋳物を想定した鋳造実験は、第2章 粉体 RP 機による鋳物製造の短納期化への対応にて開発した RP 鋳型を用い、水道部品である分水栓をモデルとして造型し、製品部を2個同時に鋳造する2個込とした。2個込としたため鋳型は、RP 造型機で効率的に造型ができる部品に分割し、構成する分割鋳型とした。

ただし、従来の鋳型では、中子を用いる中空鋳物部位でも、鋳物製品の中空位置精度を保持するため、従来の中子に相当する部位と主型とを RP 技術を用いて一体に成形した。さらに、注湯後の溶湯比重と圧力に耐えるようにバックサンドを周辺に補強し、鋳造を行った。

(3) 結果と考察

RP 鋳型を2枠造型し、分水栓鋳物を計4個鋳造した。得られた鋳物は、従来の鋳型によって鋳造された場合と遜色なく、良好な鋳肌と形状であった。次に鋳物に機械加工を施し、外観確認を行った。その結果、4個の鋳物の内、1個にガス欠陥が見られた。その欠陥部位に対し、電子顕微鏡観察を行った結果を図3-2-1に示す。欠陥形状は、球状の空隙でガス欠陥であった。この欠陥に関し、RP 鋳型ではない従来の砂型を用いた場合でも、同様の欠陥が発生する場合もある。ただし、その発生率は、RP 鋳型よりも低いため、RP 鋳型を使用する際は、適切なガス抜き配置を行う必要があると考えられた。さらに、肉眼による

欠陥が認められなかった残りの3個に対し、一般的に分水栓部品に対して行われる耐圧試験を行った。3個とも圧漏れ欠陥はなく良好な製品と判定された。



図3-2-1 欠陥部位とその部位を拡大した電子顕微鏡写真

一方、鉛フリー銅合金製水道部品製造に関する所要時間については、鋳込みから加工までの鋳造工程を2日で達成することが可能であった。しかし、機械加工（仕上げ）にあたり専用ジグでの機械加工が必要であるため、外注加工先にて時間を要した。

第4章 2相ステンレス鋳鋼でのインペラ製造技術構築への対応

4-1 鋳造シミュレーション適用のため解析データの収集

(1) 目的

鋳物の品質に大きな影響を及ぼすものの要因として、溶湯温度や溶湯成分の変動に加え、湯道や押し湯の大きさ、配置を考慮した鋳型設計、いわゆる鋳造方案がある。その最も懸念すべき点は、引け巣欠陥や湯回り不良、ガス欠陥等の鋳造欠陥への対応である。方案設計に関し、技術者の勘と経験だけでなく、近年のコンピュータの処理能力の向上によって機能が向上した鋳造シミュレーションを活用することが有効である。

一方、鋳造シミュレーションを活用する上で必要となる入力条件には、材料の密度、比熱、熱伝達率などの物性値、温度などの初期条件、鋳物と鋳型間のなどの境界条件があり、これらの値を入力する必要がある。しかしながら、今回対象としている RP 鋳型や 2 相ステンレス鋳鋼に関しては、鋳造シミュレーションを適用した報告が皆無なため、適切な入力条件が定かではない。

以上のことから、本項目では、独自に開発した RP 鋳型に 2 相ステンレス鋳鋼を用いた鋳造実験と、既存のシミュレーションデータベースを用いた従来材の解析結果を比較検討し、RP 鋳型と 2 相ステンレス鋳鋼を用いた際に、シミュレーションによる欠陥予測の指針を得ることを目的とした。さらに、従来鋳型と RP 鋳型の比較鋳造を行い、RP 鋳型ならではの欠陥発生挙動の考察も行った。

(2) 階段状試験片による鋳造実験およびシミュレーション解析

鋳造シミュレーション解析ソフトは、市販の J S - C A S T Ver1.0 を用いた。まずは、シミュレーション解析の操作方法の習得とその解析結果の妥当性を確認するため、鋳造方案を変化させた階段状試験片を用いた鋳造実験と、それらをモデルとしたシミュレーション解析を行った。使用した鋳鋼と鋳型材は、解析ソフト中の入力条件のために物性データベースとして既にある普通鋳鋼（JIS SCS450材）と汎用的に広く用いられる鋳型材料（Al系人工砂 650番・アルカリフェノール）を従来鋳型として用いた。鋳造した階段状試験片を長手方向に縦割りにして現れる欠陥と、鋳造シミュレーション解析の結果を比較することによって、解析結果の妥当性の確認を行った。

これら普通鋳鋼による方案を変化させた階段状試験片の実鋳造品の欠陥発生位置と鋳造

シミュレーションによる欠陥位置は比較的一致しており、鑄造シミュレーションによる欠陥位置の予測解析は妥当であると考えられた。

(3) RP 鑄型の欠陥発生挙動 普通鑄鋼

(3) - 1 実験方法

開発した RP 鑄型の欠陥発生挙動が、従来用いる鑄型と異なるかを知るために、両鑄型を用いて欠陥発生挙動の比較を行った。2章 1-1でも触れたが、開発した RP 鑄型は、セメントバインダを用いるため、従来鑄型と比較した場合、鑄型材の通気度は低い。そのため、従来鑄型に比べてガス欠陥を誘発する可能性がある。そこで、実験に用いる階段状試験片の形状と鑄造方を図4-1-1とし、上階段部にガスだまりを設け、ガス欠陥の発生挙動をより顕著に捉えることとした。鑄型は、2章1-1で開発した RP 鑄型と(2)に記した従来砂型を用いた。鑄造条件は(2)で記したものと同様、普通鑄鋼にて行った。

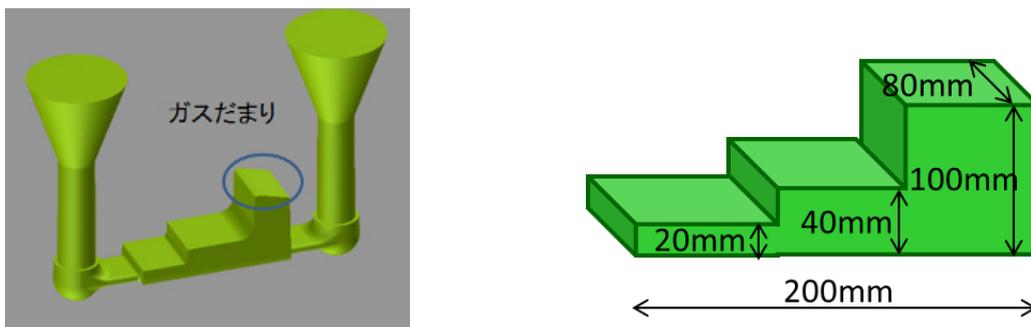


図4-1-1 RP 鑄型評価用の階段状試験片の形状及び寸法と鑄造方案

(3) - 2 結果と考察

図4-1-2 に RP 鑄型と従来砂型を用いて鑄造した階段状試験片を縦に切断した断面を示す。写真上の従来砂型を用いた試験片には、図中の青囲み部で示すように、試験片の重力方向上部のガスだまり部に欠陥が観察され、加えて、赤囲みで示す引け巣欠陥も同時に観察された。これらは、見かけ上連結しているが、欠陥内部の表面状態からガス欠陥と引け巣欠陥に分類できた。一方、RP 鑄型において、従来砂型で観察された欠陥に加え、黄色囲みで示すように、中段階段上部に楕円気泡形状のガス欠陥が観察された。

これらのことから、RP 鑄型を用いた方案設計の際、従来の鑄型よりもガス抜き孔を効果

的に配置する必要であることがわかった。

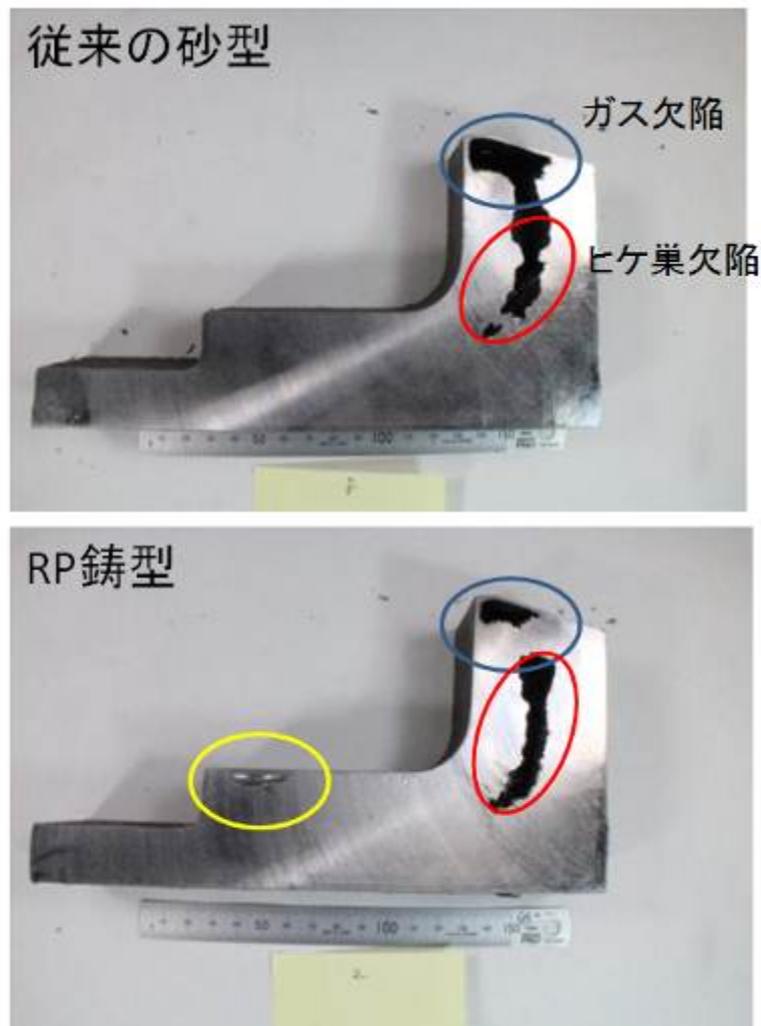


図4-1-2 RP 鋳型（下段）と従来砂型（上段）を用いて
鋳造した階段状試験片の断面

（4）2相ステンレス鋳鋼による階段状試験片の鋳造

（4）-1 実験方法

次に、2相ステンレス鋳鋼にて（3）-1 実験方法にて使用したガスだまりを有する階段状試験片を対象とし、RP 鋳型を用いて鋳造実験を行った。さらに、（3）で作製した普通鋳鋼の階段状試験片との欠陥発生挙動の比較を行った。また、使用した鋳造シミュレーションソフトJS-CASTVer10には、2相ステンレス鋳鋼の物性値がデータベースとして存在しないため、普通鋳鋼のデータベースで行った解析結果と2相ステンレス鋳鋼での鋳造結

果を比較し、その際を把握することによって、2 相ステンレス鋳鋼でのシミュレーション解析利用の指針を得ることとした。

(4) - 2 結果と考察

2 相ステンレス鋳鋼を RP 鋳型に鋳造した階段状試験片の断面観察結果より、ガス欠陥、引け巣欠陥及び面ヒケが見られた。図 4-1-3 には、普通鋳鋼と比較した図を示す。2 相ステンレス鋳鋼の上階段のガスだまり部に見られるガス欠陥位置は、普通鋳鋼と比較し重力方向の下側に見られた。さらに、中段階段部には、ガス欠陥は見られなかった。面ヒケは 2 相ステンレス鋳鋼には顕著にみられ、普通鋳鋼には観察されなかった。

図 4-1-4 に普通鋳鋼、従来鋳型の物性データによる鋳造シミュレーション解析結果と RP 鋳型での 2 相ステンレス鋳鋼鋳造品の欠陥位置を比較した図を示す。階段状試験片の赤囲み部の引け巣欠陥の位置は、等凝固時間曲線の閉ループ位置と極めて一致した位置を示すが、試験片の緑囲み部に示す面ヒケに関しては、解析結果から読み取ることは難しかった。また、青囲み部のガス欠陥について、シミュレーションによる解析結果から推察するため、湯流れ解析を行った。階段状試験片断面の観察結果では、普通鋳鋼の場合、中段階段上部にガス欠陥が見られる。加えて、上段階段には、普通鋳鋼、2 相ステンレス鋳鋼いずれの材質にもガス欠陥が見られ、2 相ステンレス鋳鋼の場合は、普通鋳鋼と比較して、重力方向においてより下位置にガス欠陥が発生していた。これらを踏まえ湯流れシミュレーションの解析結果を時系列で考察すると、注湯 0.6 秒と、注湯 1.5 秒にも大きなガス巻き込みが見られた。これらのガス巻き込みが、それぞれ階段中段および階段上段のガス欠陥に起因していると思われる。また、従来鋳型と比較して通気性が劣る RP 鋳型の場合、巻き込まれたガス欠陥は鋳物内部に残存しやすく、さらに、普通鋳鋼と比較して粘性が高い 2 相ステンレス鋳鋼の場合、ガスの浮上が遅く、より鋳物芯部に欠陥が発生すると考えられた。

	普通鋳鋼	2相ステンレス鋳鋼
階段状試験片 縦割断面		
発生した欠陥	<上段> ガス欠陥、ヒケ巣欠陥	<上段> ガス欠陥、ヒケ巣欠陥、面ヒケ
	<中段> ガス欠陥、ヒケ巣欠陥	<中段> ガス欠陥、ヒケ巣欠陥、面ヒケ
	<下段> なし	<下段> なし

図4-1-3 RP 鋳型階段状試験片による普通鋳鋼と2相ステンレス鋳鋼の比較

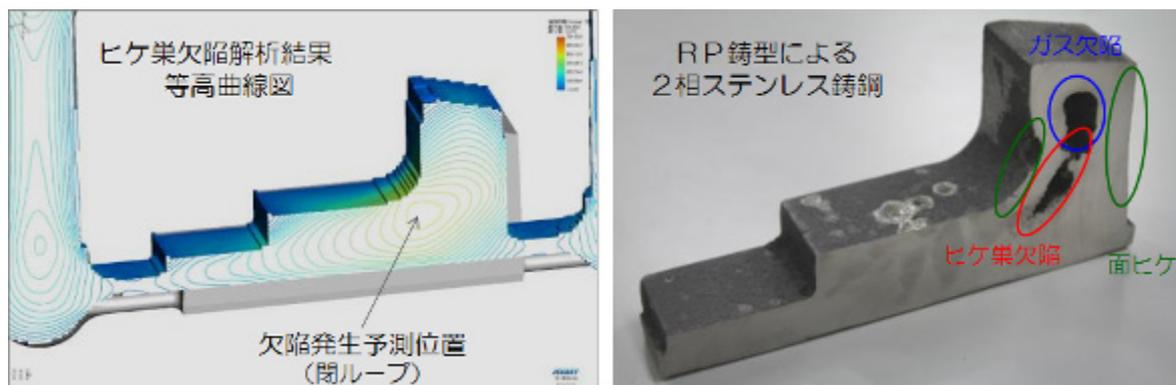


図4-1-4 普通鋳鋼、従来鋳型の物性データによる鋳造シミュレーション解析結果と RP 鋳型での2相ステンレス鋳鋼鋳造品の欠陥位置の比較

4-2 RP 鋳型でのインペラ製品適用

(1) 目的

前途4-1 鋳造シミュレーション適用のため解析データの収集 で得た知見を基に、インペラ鋳物の方案設計に鋳造シミュレーション解析を適用し、開発した RP 鋳型を用いることで2相ステンレス鋳鋼製インペラ製品の短納期製品化を達成する。実製品をモデルとした鋳造と製品化を想定することで発生する不具合を分類評価し、短納期で製品化する上での注意

点を明確にする。

(2) 実験方法

第2章 粉体 RP 機による鋳物製造の短納期化への対応 にて開発した RP 鋳型を用いて 図2-2-2に示すφ320mm インペラ鋳物に対して RP 鋳型による 2 相ステンレス鋳鋼の鋳造実験を行った。用いた 2 相ステンレス鋳鋼の鋳造条件は、(4) 2 相ステンレス鋳鋼による階段状試験片の鋳造 で行った条件と同じである。なお、最終的な RP 鋳型の押し湯形状に関する鋳造方案の決定は、鋳造シミュレーション解析により繰り返し検討を行った。

(3) 結果と考察

インペラ鋳物の鋳造方案設計に関し、鋳造シミュレーション解析を繰り返し行い、方案の検討を行った。押し湯の大きさや位置に関し、図4-2-1に示すように大きさを変化させて解析を行った。押し湯が小さい場合、左図のように製品内部に閉ループが見られることから、段階的に押し湯を大きくし、解析を繰り返すことによって押し湯の大きさを決定した。最終的には右図にあるように閉ループの位置が押し湯側に移動するように押し湯の大きさを決定した。

図4-2-2に鋳造した鋳物の外観を示す。鋳物の外観は、一部中子の崩壊による形状不良とベーニングによるしわが見られた。また、注湯の際、鋳型に注がれた溶湯にガスが浮上する様子が従来鋳型よりも顕著に確認できた。その理由は、通気度が低いためと思われる。適切なガス抜き孔を多く配置した鋳造方案にする必要があると思われる。

一方、2相ステンレス鋳鋼インペラの製造に関する製造所要時間については、鋳込みから加工までの鋳造工程を2日で達成することが可能であった。しかし、機械加工（仕上げ）にあたり熱処理工程が必要であるため、もう3日程度かかった。これは、2相ステンレス鋳鋼は難削材であるため、切削加工する際に固溶化処理が必要であったためである。

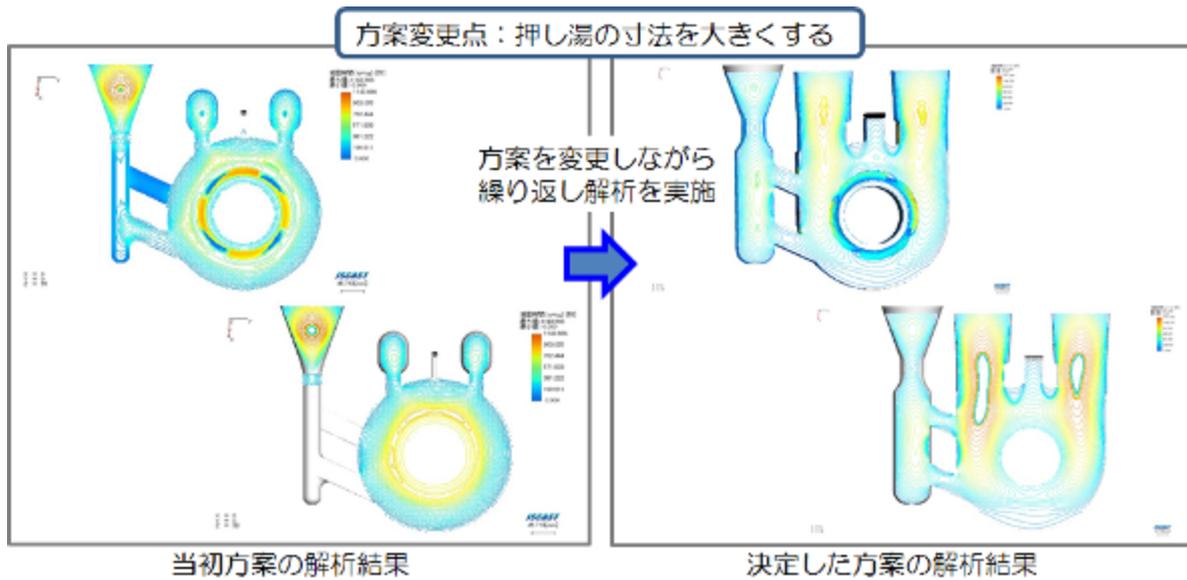


図4-2-1 インペラ鑄物の方案設計における鑄造シミュレーションの活用

φ320インペラ実鑄造結果



図4-2-2 方案付きインペラ鑄物と仕上げ加工後の鑄物の外観

第5章 全体総括

5-1 成果の総括

水道関連部品製造企業は、耐震構造を有する水道部品や海水淡水化処理装置の給水ポンプ等の開発を行っている。開発では、試作部品を実機搭載し、繰り返し評価を行うことから、鑄造企業は川下企業の要求する素材による鑄物を迅速提供することが求められる。

本研究開発では、CADデータからインクジェット式RP機を利用して耐熱性を有するセメント鑄型を直接造型し、鉛フリー銅合金製水道部品や2相ステンレス鑄鋼製インペラ等の複雑形状鑄物の鑄型製造を24時間、鑄物製造を1週間以内の短納期製造技術を開発した。

第1章では、研究の背景や実施体制並びに成果の概略を述べた。

第2章では、粉体RP機による鑄物製造の短納期化への対応と題し、材料粉体に関する研究開発を進めた。RP機での造形テストの前に、シャーレテスト、抗折力試験、示差熱分析により粉体材料の配合の検討を行い、スクリーニングを行った。その後、RP機による円筒形状の中子を造型し、試験片への鑄造によって熱間強度を評価した。その結果、原材料である骨材、セメント材、PVAの最適配合を見いだした。さらに、造型後の焼成や塗型剤の検討により、より強度の向上したRP鑄型を開発した。開発した粉体材料を用いて、水道部品分水栓および、ポンプ部品のφ320mmインペラ、φ450mmガイドベーン用鑄型をRP造型した。必要に応じ、構成要素に分割した分割鑄型の製造に成功し、特に、従来の造型法では、抜き勾配がなく造形が不可能な羽根形状を有する鑄型の製造に成功した。

第3章では、鉛フリー銅合金での水道部品適用への対応に関し、溶湯に脱ガス剤、フラックス剤それぞれ2種、計4種の添加剤の検討を行い、その効果を比較した。試験片鑄造による欠陥評価やガス分析、強度試験の結果、フラックス-B及び脱ガス-Bが、フラックス-A及び脱ガス-Aより良好であると判明した。また、溶湯分析を行う際に用いる発光分析装置を効率的に確認校正するため、独自の標準試験片を作製した。炉前分析を迅速に行い、管理水準との照らしあわせが容易にできることで、鑄造企業の操業状態に適した効率的な溶解が期待できる。最終段階として、事業化目標製品である鉛フリー銅合金による水道部品分水栓を開発したRP鑄型を用いて4個製造した。その結果、製品一個にはガス欠陥が発生したものの、その他3個の製品は鑄肌や外観寸法において従来法と同等品を製造することができた。

第4章では、2相ステンレス鑄鋼でのインペラ製造技術構築への対応と題し、RP鑄型による階段状試験片鑄型を作製し、2相ステンレス鑄鋼と普通鑄鋼の比較鑄造を行った、発生

した内部欠陥は、普通鋳鋼とほぼ同様の傾向であるが、外部には面ヒケが生じた。従来鋳型による階段状試験片の比較鋳造とシミュレーション結果から、2相ステンレス鋳鋼の欠陥予測判定は、普通鋳鋼を基とすることとした。これらの知見を基に2相ステンレス鋳鋼製品における鋳造方案の設計に対して、鋳造シミュレーション解析を適用することによって効率化した。最後に、事業化目標製品であるRP鋳型を用いた2相ステンレス鋳鋼製インペラの鋳造を行った。その結果、一部中子の崩壊とベーニングによるしわが見られたが鋳造品の外観形状は確保でき、表面粗さも良好であった。これら、RP鋳型による鋳造でのガス欠陥対策法としてガス抜き孔を従来法より多くした鋳造方案にすることでガス欠陥を抑制が期待できるが、中子部の崩壊に関しては、鋳型強度のさらなる向上が必要であると考えられた。一方、製造期間に関し、目標の短納期化を達成した。鋳型製造で24時間、鋳込みからまで2日間を可能とした。また、仕上げ工程に関し、専用加工機による機械加工や熱処理工程を短期化できれば、合計1週間以内の最終製品の製造は十分可能であると考えられた。

本5章では、全体の総括について述べた。

5-2 工業所有権の取得状況及び对外発表等の状況

本プロジェクトによる技術開発は、鋳物の製造技術のノウハウだけでなく、RP機用粉体材に関わる開発技術が大半を占めることから、国際出願も視野に入れた特許出願を行う予定としている。

5-3 今後の事業化に向けた取り組み

従来の鋳物製造と比較した場合の、価格やリードタイム等をより明確にする。さらに、鋳型強度やガス欠陥発生から製品形状が制限されるため、対象可能製品の限界を見極めつつ、技術開発を進め機能向上を図る。

現在、研究成果を受け、数社の企業から具体的な製品の提示がある。上記の課題をこれらの具体的な製品試作を繰り返していき、クリアしていく取り組みを行い事業化を進める。

以上