

平成21年度 戦略的基盤技術高度化支援事業

「鉛フリー銅合金の減圧凍結システムによる  
低コストで無公害な鑄造技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成22年 3月

委託者 中部経済産業局

委託先 財団法人 中部科学技術センター

## 目 次

第1章	研究開発の背景・研究目的および目標	1
第2章	研究体制	2
①	事業管理者	2
②	研究実施場所	2
③	研究組織	3
④	管理体制	4
⑤	管理員および研究員	6
⑥	経理担当者および業務管理者の所属・氏名	7
第3章	成果概要	8
①	コスト低減に資する鋳造技術の開発	8
②	環境配慮に資する鋳造技術の開発	12
③	減圧凍結システムの生産性向上に資する鋳造技術の開発	15
④	事業化の検討	16
⑤	プロジェクトの管理・運営	16
第4章	当該研究開発の連絡窓口	17
第5章	全体総括	18
付録	対外発表等	20

## 第1章 研究開発の背景・研究目的および目標

耐食性や加工性に優れる青銅合金鋳物は水回り製品や海洋部品、油圧部品などに広く利用されている。しかし、本合金の加工性や潤滑性を発現している鉛は、人体や環境への影響が大きいことからその使用については様々な規制が進んでいる。特に、飲料水中の鉛の基準値は厳しく規定されており、青銅鋳物の鉛をフリー化した新しい材料が要求されている。一方、青銅鋳物はこれまでスクラップを利用した資源の循環が進められており、安価に鋳物を供給できる体制が整えられている。このような状況下で、川下産業が求める新しい鉛フリー青銅鋳物を供給することは中小鋳物業者にとって原料コストが上昇する上、機械加工時や鋳造時の不良増加による歩留まり低下のためのプロセスコストの上昇などが懸念され、従来材料なみのコストで鋳物を提供することは不可能な状況にある。さらに、追い討ちをかけるように世界的な資源不足に見舞われ、銅の地金価格や鉛を代替するビスマスの価格は近年非常に高くなっている。また、中小鋳物工場は典型的な3K職場となり、川下産業からの新しい要求に応じた技術開発を行う人材の確保も難しく、住宅地に隣接する工場は廃業や海外移転を余儀なくされている状況にある。

このような社会的鉛フリー化の要求と低コストでの鋳物調達の要求を同時に満足するために、本研究開発では①コスト低減に資する鋳造技術の開発、②環境配慮に資する鋳造技術の開発、③減圧凍結システムの生産性向上に資する鋳造技術の開発を実施する。特に、住宅地に隣接する中小鋳物工場においても継続的な鋳物生産が可能となり、人材確保や技術伝承が行えるよう21世紀の都市型鋳造工場を構築できる新しい鋳造技術の開発に取り組む。

コスト低減に資する鋳造技術の開発では、鋳物の強度を高めてその薄肉化により鋳物重量を30%以上低減するとともに、材料歩留まりを50%から70%程度にまで高め、さらに不良率を低減することにより鋳物製品にかかるコストを低減する。また、環境配慮に資する鋳造技術の開発では、産業廃棄物を25%以下に減少し、粉塵・騒音・振動・臭気などのゼロ化を目指す。本技術開発の中心となる減圧凍結システムにおいては、生産性を向上することによりプロセスコストの削減を目指す。

なお、本研究開発は、(十) 鋳造技術に係る技術に関する事項1. 鋳造技術に係る技術において達成すべき高度化目標の(5) その他産業に関する事項①川下産業が抱える課題およびニーズの力、低コスト化およびケ、環境配慮に深く関係するものである。

## 第2章 研究体制

### ①事業管理者

財団法人中部科学技術センター(最寄り駅：名古屋市営地下鉄東山線伏見駅)  
〒460-0008 愛知県名古屋市中区栄二丁目17番22号

### ②研究実施場所(下線は主たる研究実施場所)

株式会社加藤製作所(最寄り駅：名鉄本線新清洲駅)  
〒452-0942 愛知県清須市清州1668番地

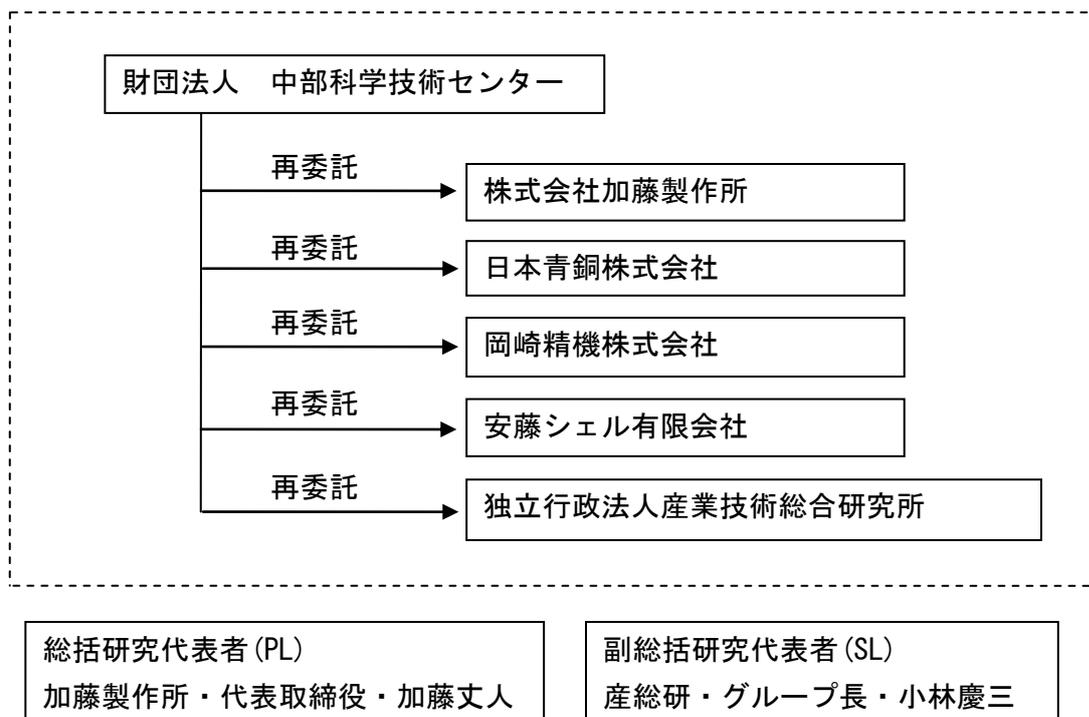
日本青銅株式会社(最寄り駅：JR山手線西日暮里駅)  
〒116-0014 東京都荒川区東日暮里2-14-8  
日本青銅株式会社岡谷工場(最寄り駅：JR中央線下諏訪駅)  
〒394-0024 長野県岡谷市堀の内1-3-30

岡崎精機株式会社(最寄り駅：名鉄本線岡崎駅)  
〒444-0104 愛知県額田郡坂崎字竹下83

安藤シェル有限会社(最寄り駅：あおなみ線荒子駅)  
〒454-0848 愛知県名古屋市中川区松ノ木町2-63

独立行政法人 産業技術総合研究所 中部センター(最寄り駅：JR高蔵寺駅)  
〒463-8560 愛知県名古屋市守山区下志段味2266-98

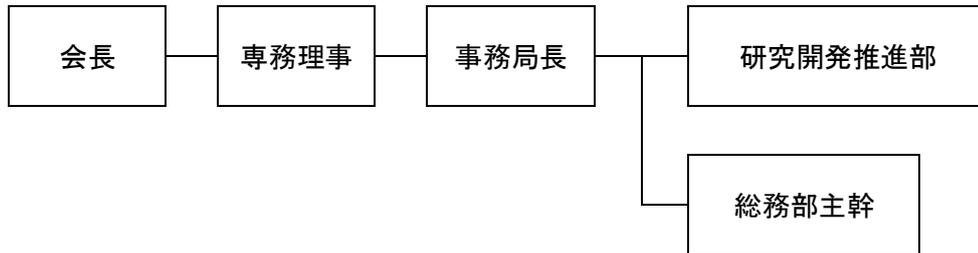
③研究組織



④管理体制

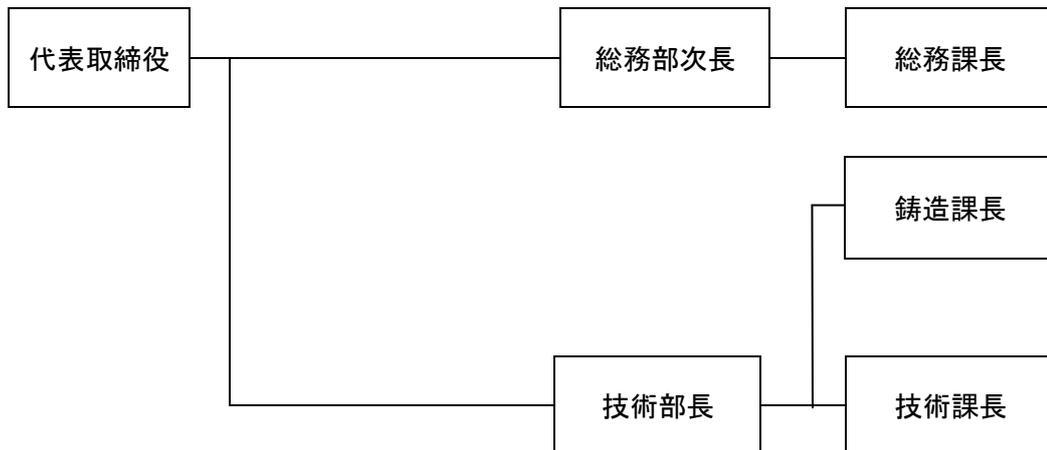
事業管理者

財団法人中部科学技術センター

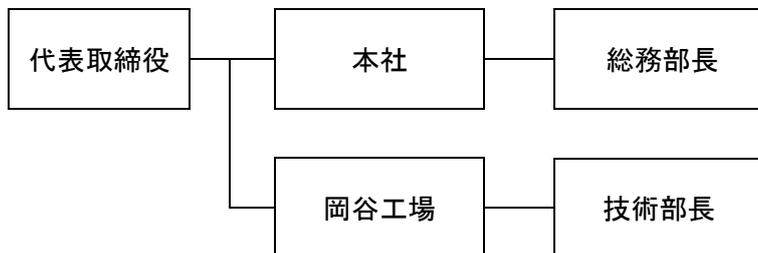


再委託先

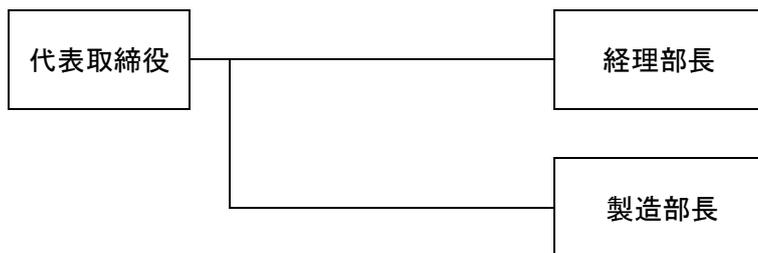
株式会社加藤製作所



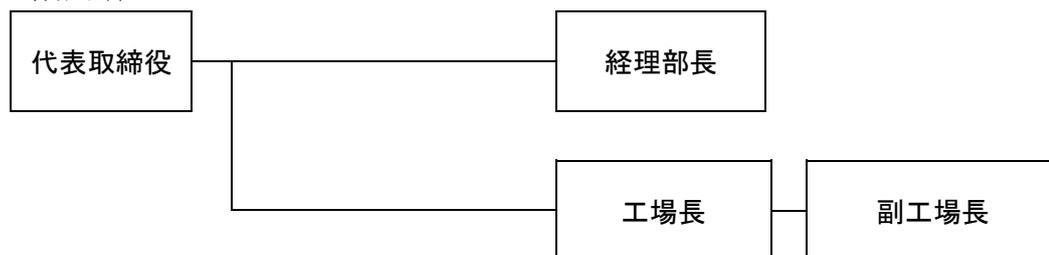
日本青銅株式会社



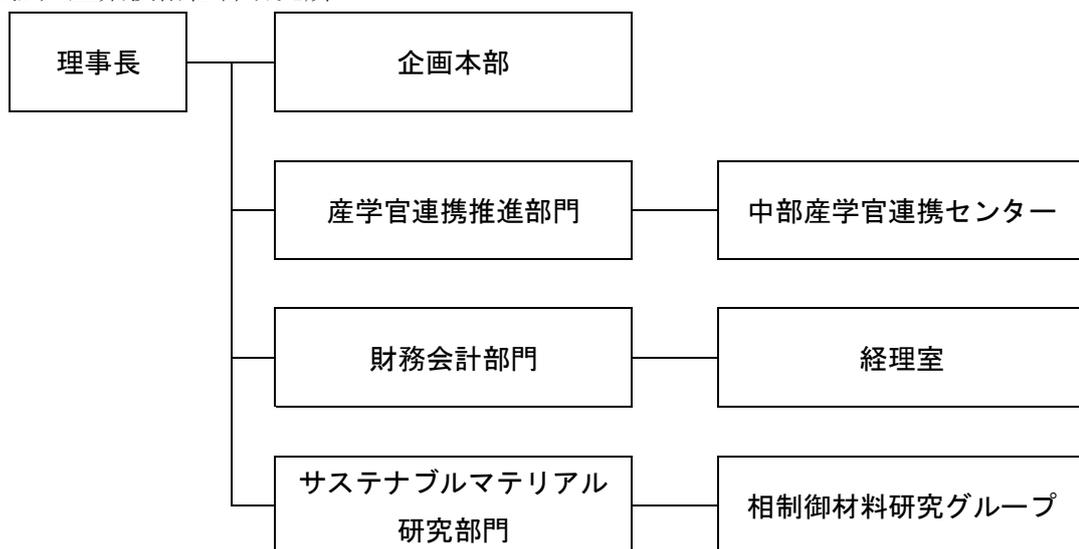
岡崎精機株式会社



安藤シェル有限会社



独立行政法人産業技術総合研究所



⑤管理員および研究員

【事業管理者】 財団法人中部科学技術センター  
管理員

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
永田 達也	研究開発推進部長	⑤
福嶋 昭	研究開発推進部 担当部長	⑤
大澤 秀敏	研究開発推進部 担当部長	⑤
平澤 進	研究開発推進部	⑤
高須 容功	研究開発推進部	⑤
宮島 和恵	研究開発推進部	⑤

研究員

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
該当なし		

【再委託先】 ※研究員のみ

株式会社加藤製作所

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
加藤 丈人	代表取締役	①、②、③、④
青山 憲	技術部長	①-1、①-2、①-3、①-4、③-1
稲垣 昌哉	鑄造係	①-1、①-2、①-3、①-4、③-1
真野 和宏	技術課長	①-1、①-2、①-4
星川 直樹	技術係長	①-2、①-4
堀田 真義	鑄造係長	②-1、②-2、②-3

日本青銅株式会社

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
小林 秀章	取締役 技術部長	①-3、①-4、④

岡崎精機株式会社

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
蒲野 良雄	代表取締役	①-1、①-2、②-3、④
鈴木 修	製造部長	①-1、①-2、②-3

安藤シェル有限会社

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
前田 三千夫	代表取締役	②-1、②-2、③-1、④
佐藤 俊典	工場長	②-1、②-2、③-1
内山 年昭	副工場長	②-1、②-2、③-1

独立行政法人産業技術総合研究所

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
小林 慶三	グループ長	①-1、①-2
西尾 敏幸	主任研究員	①-1、①-4
多田 周二	主任研究員	①-1、①-2、①-4
中山 博行	研究員	①-1、①-2、①-4

⑥経理担当者および業務管理者の所属・氏名

(事業管理者)

財団法人中部科学技術センター

(経理担当者) 総務部 主幹 田村 幸司

(業務管理者) 研究開発部長 永田 達也

(再委託先)

株式会社加藤製作所

(経理担当者) 総務部次長 江原 泰彦

(業務管理者) 技術部長 青山 憲

日本青銅株式会社

(経理担当者) 総務部長 外川 進

(業務管理者) 取締役技術部長 小林 秀章

岡崎精機株式会社

(経理担当者) 取締役総務部長 蒲野 栄子

(業務管理者) 製造部長 鈴木 修

安藤シェル有限会社

(経理担当者) 取締役経理部長 前田 玲子

(業務管理者) 工場長 佐藤 俊典

独立行政法人産業技術総合研究所 中部センター

(経理担当者) 財務会計部門 経理室 室長 宮本 晃之

(業務管理者) サステナブルマテリアル研究部門 部門長 中村 守

### 第3章 成果概要

本研究開発では、鉛を含まない青銅鋳物を安価に製造するため、鋳鉄で実績のある減圧凍結システムに独自の凍結中子技術を組み合わせた無公害で環境に配慮した新しい鋳造技術を開発する。具体的には、①コスト低減に資する鋳造技術の開発、②環境配慮に資する鋳造技術の開発、③減圧凍結システムの生産性向上に資する鋳造技術の開発を実施することにより、鉛フリー青銅鋳物の高強度化による薄肉化、鋳造方案の最適化による材料歩留まりの向上、鋳型凍結時間の短縮による生産性の向上などを目指した。また、あわせて鋳造プロセスにおける産業廃棄物の低減、粉塵・騒音・振動・臭気などのゼロ化を実現することにより、中小鋳物工場が国内において操業を継続しうる環境に配慮した鋳造技術の確立を目的とした。

本研究開発では、鉛フリー青銅合金鋳物に関して幅広い知見を有する企業や研究機関が参加することにより効率的な研究開発を推進した。日本青銅株式会社では、青銅合金における鉛の加工性や潤滑性を代替する元素としてビスマスの有効性に着目し、鉛フリー青銅合金インゴットの製造技術を確立している。株式会社加藤製作所ではビスマス入り鉛フリー青銅合金を鋳造する技術開発に早くから着手しており、凍結鋳型の作製技術も平成18年度から構築している。また、産業技術総合研究所では、ビスマス入り鉛フリー青銅鋳物の冷却速度を早くすることで組織が微細となり、鋳造材の引張り強度が高くなることを報告すると同時に、添加するビスマス量を減じられることも見出している。これらの技術をベースとして、さらに安藤シェル有限会社の中子技術や岡崎精機株式会社の鋳物設計技術を融合させることにより、製造コストの20%削減を達成できる基盤技術を確立する。これにより、民生品に要求される鉛フリー化の潮流に合致した青銅鋳物をわが国から供給できる体制を構築することを目指す。

#### ① コスト低減に資する鋳造技術の開発(株加藤製作所, 日本青銅株, 岡崎精機株, 産総研)

これまでの銅合金鋳物はスクラップを積極的に利用することで材料コストを抑えてきたが、鉛フリー銅合金は新しく開発された材料であるため、ここ数年間はスクラップが市場に出回ることは期待できず、鉛に比して高価なビスマスを使用する分のコストアップが避けられない状況にある。さらに、近年の急激な銅相場の高騰は鉛フリー青銅鋳物の原材料価格を上昇させ、銅合金鋳物業界は一層厳しいコスト低減を迫られている。このような悪条件下において、従来材と同程度の価格で川下産業へ鉛フリー銅合金鋳物を供給するためには、原材料費を低減するのみならず、製品歩留まりの向上を図ることによって現在の鋳造プロセスにかかるコストを下げるのが不可欠である。そのため、本研究開発では鋳物組織の微細化による高強度化と鋳型キャビティ内の溶湯流動性の改善による薄肉化を図り、鉛フリー青銅鋳物のコスト低減を実現する。平成21年度は、実用鋳物形状に凝固シミュレーションを適用することによって凍結鋳型による鋳造方案の最適化を図り、製品の薄肉化および軽量化により歩留まりを30%改善するとともに不良率を20%以下に抑制して材料費の30%低減を目指す。

#### ①-1 鉛フリー青銅鋳物の高強度化による軽量化技術の開発(株加藤製作所, 産総研)

鋳物の組織微細化には凝固時の冷却速度を上げることが有効であり、溶湯流動性の改善に

は通気性に優れた高強度の鋳型を用いて鋳型キャビティ内のガス排出速度を向上させることが効果的である。水を混合した砂粒を冷気にて凍結した鋳型は、通気性に優れると同時に低温で提供されることから急速な凝固を実現できる他に類を見ない優れた特長をもつ。この凍結鋳型を利用した鋳造技術に対して、産総研と加藤製作所が共同でコンピュータシミュレーションと注湯実験を行い、急冷効果による鉛フリー青銅鋳物の高強度化による薄肉化を図ることによって鋳物重量を30%以上軽量化することを目指す。

平成19年度は、湯流れ・凝固解析ソフト（イーケーケー・ジャパン製 CAPCAST）を導入し、産総研にて低温鋳型を用いた際のシミュレーションを行った。また、加藤製作所では鋳型の凍結装置を導入して凍結鋳型の作製実験と鋳物の薄肉化実験を実施した。その結果、凍結鋳型の強度や溶湯との接触による鋳型温度の変化などの現象を明らかにすることができた。特に CAPCAST によるシミュレーションでは、湯流れ解析および凝固解析を行うことにより、本来可視化できない鋳型キャビティ内の充填挙動を明らかにすることができた。しかしながら、凍結鋳型に関する熱物性データは未だ不明な点が多く、解析精度の向上を図ることが課題として残った。同時に、平成19年度には、φ60mmの止水ボールバルブについて減圧凍結鋳造システムを用いた鉛フリー銅合金（CAC902）の鋳造を行い、木型におけるベントホールの位置などを検討して強固な凍結鋳型を作製する技術を開発した。この技術を利用することにより、ボールバルブの肉厚を4mmから3mmへ減じてCAC902鋳造材を作製し、鋳物を薄肉化することによって鋳造欠陥を減らせることを明らかにした。しかし、鋳造材の表面（鋳肌）は荒れており、さらに鋳肌を滑らかにする鋳造技術を開発する必要がある。

平成20年度は、φ60mmで高さ20mm程度の円柱形状試験片が取れる凍結鋳型を作製し、鋳型内に複数の熱電対を埋設して鋳物の温度変化を高速で測定するシステムを試作した。また、得られた凍結鋳型内部の温度変化とCAC902鋳物の温度変化から凍結鋳型の伝熱モデルを提案し、それを反映したシミュレーション用のデータベースを作成した。さらにイーケーケー・ジャパンの協力のもと、凍結鋳型に対応したプログラムの改良を行い、解析精度の向上を図った。また、鋳肌の状態を改善するために、溶湯が鋳型に接したあとでもある程度の鋳型強度を保持できるよう、コロイダルシリカを添加した凍結鋳型の作製技術を開発した。これにより凍結鋳型による鋳造品の鋳肌が大きく改善され、不良率の低減につながった。また、新たな鋳造モデルとして、従来材より0.5mm肉厚を低減したメーターケースを試作した。ただし、この形状を有する鋳物の鋳造方案作成に鋳造シミュレーションを適用したが、解析精度が悪く、良品を鋳造することができなかった。そこで、凍結鋳型の熱物性値を得るためのモデル実験を行い、鋳造シミュレーションの解析精度を高めた（図1参照）。

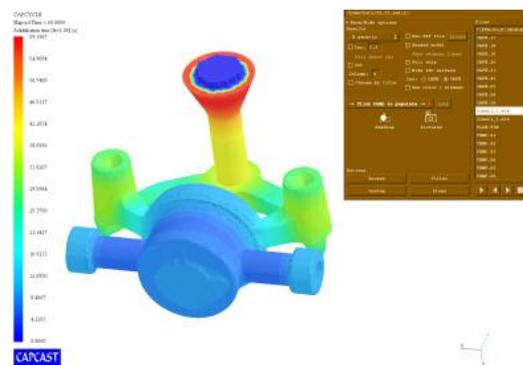


図1 メーターケースの凝固解析結果

平成21年度は、鋳型や鋳物の温度変化を超高速で計測できるデータロガーを導入し、凍

結晶型における伝熱挙動を解明した。また、凍結鑄造に適した砂の形状、材質および粒度などを明らかにした。実鑄造方案に凝固解析（コンピュータシミュレーション）を導入し、薄肉鑄造品を作成した。実際のメーターケース形状の鑄物を凍結鑄型で鑄造した際の材料削減率として23%を達成した。

#### ①-2 材料歩留まりの向上技術の開発(株加藤製作所, 岡崎精機(株), 産総研)

銅合金鑄物の鑄造では、比較的小さな複雑形状の製品を多数個取りする 경우가多く、大きな湯道や押し湯を採用して不良品の発生を防止している。しかし、このような鑄造方案では鑄込み量に対する製品歩留まりが悪い。そこで、鉛フリー青銅合金の熱物性データを厳密に測定して、コンピュータシミュレーションにおける解析精度を向上し、減圧凍結システムに最適な鑄造方案を作成して材料歩留まりを現状の50%から70%以上に改善する。

平成19年度は、岡崎精機と加藤製作所において鑄造方案の作成を行い、単純形状鑄物における押し湯や湯道の小型化を検討した。その結果、凍結鑄型においては押し湯を小さくしても鑄造欠陥が発生しにくいことがわかった。特に凍結鑄型では飛ばされの欠陥が多く、湯回り不良やガス欠陥は比較的少なかった。ただ、鑄物を薄肉化した場合にはガス欠陥が増加する傾向があり、鑄造方案を最適化する必要があることがわかった。さらに、加藤製作所にて実際に鑄造を行い、材料歩留まりの検証を行った。その結果、薄肉鑄物の方が材料歩留まり（鑄造欠陥を伴わない良品の割合）が向上する傾向を示した。これは溶湯の熱容量と鑄型への熱移動が大きく影響しているものと考えられ、凍結鑄造における熱バランスを評価することが重要であることが確認できた。

平成20年度は、より複雑な形状をもつ鑄物への対応を図るため、実用鑄物形状であるボールバルブやメーターケースに対して鑄造方案を最適化し、材料歩留まりを統計的に把握した。その結果、薄肉鑄物では湯流れ不良に起因する鑄造欠陥が発生するものの、ビスマス入り青銅合金に見られるざく巣などの鑄造欠陥を抑制できることがわかった。また、①-1における鑄造シミュレーションの解析精度を向上させてボールバルブの鑄型内充填挙動を解析することができた。しかし、メーターケースの鑄造方案への適用を試みたところ、凍結鑄型の伝熱メカニズムを反映した熱物性値までは入力できなかったため、複雑形状の本モデルへの適用までには至らなかった。

平成21年度は、メーターケースなど複雑形状の鑄物に対して、①-1の熱物性値を導入して薄肉鑄物に対する鑄造方案を作成した。特に鑄造品の湯流れ不良の予測には有効なシミュレーションを実施することができた。しかし、微小な鑄造欠陥については、予測しきれない部分があり、実際の鑄造実験にて確認する必要があることがわかった。さらに、凍結鑄造における熔融金属の湯流れ性を生型と比較しながら評価した。実験とシ

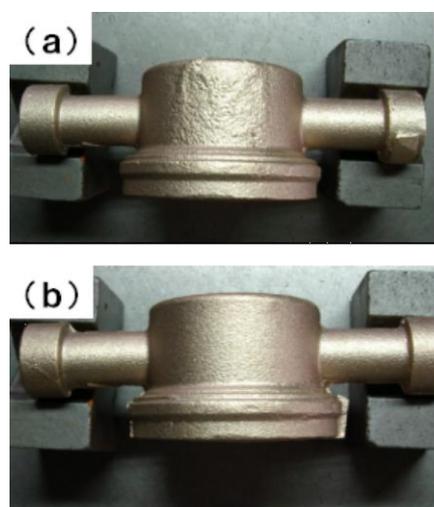


図2 メーターケースの外観  
(a)改良前、(b)改良後

ミュレーションとを組み合わせることで、図2に示すように、鑄肌を改善することができた。

### ①-3 減圧凍結システムに適した鉛フリー材料の開発(日本青銅株, 榊加藤製作所, 岡崎精機株)

凍結鑄型による鑄造プロセスでは急速な凝固が生じるため、従来の生型を用いた鑄造とは異なった鉛フリー青銅合金の化学組成で最高特性が得られる可能性が高い。そこで、鉛を代替するビスマスに着目し、凍結鑄型による鑄造プロセスに適したビスマス配合比率の鉛フリー青銅合金を開発し、鑄造時の欠陥発生を抑える。特に、鑄造時の寸法精度を向上して切削加工時の削り代を20%削減するとともに、微細な鑄造欠陥の連結による圧漏れなどの鑄造不良を20%低減することを目指す。

平成19年度は、ビスマス量を低減した鉛フリー青銅合金インゴットを日本青銅にて作製する技術を確立し、榊加藤製作所にて凍結鑄型による鑄造プロセスによる単純形状の鑄物(テストピース等)の鑄造実験を行った。2mass%Bi程度の鉛フリー青銅合金を安定して作製することが可能となり、これをインゴットとした鑄造技術も確立できた。しかし、二本取りの鑄造方案で作製した鉛フリー青銅合金鑄物の引張り試験片では強度特性が二極化してしまった。これは鑄造材の特性ではなく、湯境に起因した欠陥の影響と考えられた。また、得られた鑄造材に対して鑄造欠陥の分析を榊加藤製作所および岡崎精機にて実施したが、厚肉の鑄物では飛ばされに起因する鑄造欠陥が多くなり、薄肉化するとガスに起因する欠陥が増加することがわかった。さらに凍結鑄型では注湯温度を低下しても溶湯流動性を確保できることが明らかになった。さらに、低ビスマス化による加工性について検討するため、日本青銅、榊加藤製作所および岡崎精機にて切削試験を実施したが、切削条件を少し下げることによって加工できることがわかった。

平成20年度は、鉛フリー青銅鑄物の鑄造品における寸法精度を向上するため、鑄型強度の改善について検討を行った。特に、凍結鑄型における砂の充填性の改善を図るため、砂の粒度分布や鑄型表面への塗型について検討した。その結果、コロイダルシリカの添加により鑄肌が改善されるとともに、鑄物の寸法精度も向上することが示された。また、凍結鑄造では加圧時に欠陥が結合して圧漏れにつながるざく巣などの鑄造欠陥の発生が少

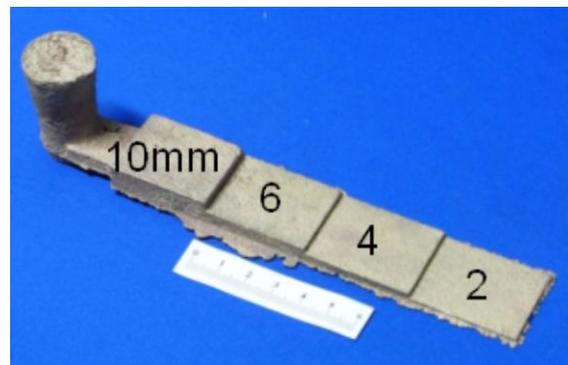


図3 凍結鑄型で作製した階段状鑄物

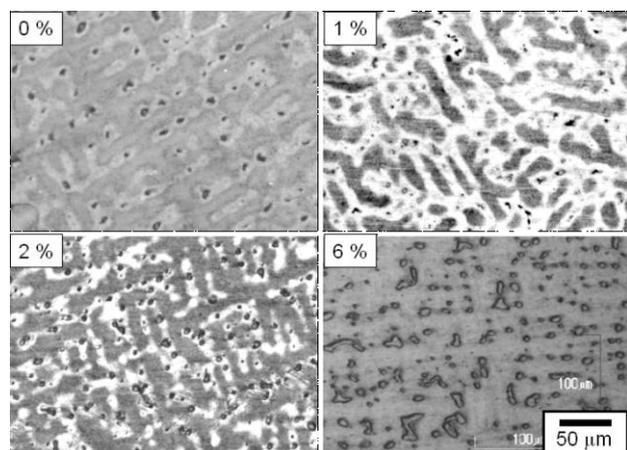


図4 Bi入青銅合金凍結鑄造材(4mm<sup>t</sup>)のマイクロ組織(0mass%Bi,1mass%Bi,2mass%Bi,6mass%Bi)

なくなることも明らかにした。さらに、CAC902 合金の組織微細化のために、異質物核生成を利用した組織微細化方法を新たに開発した。

平成 21 年度は凍結鑄造と異質物核生成技術を併用して、微細組織を有する CAC902 鑄造材の開発を行った。添加元素によって CAC902 鑄造材の組織微細化を行えることを確認したが、そのメカニズムについては明らかにすることができなかった。今後、事業化を考える上では、鑄造品のコストを抑制するためにも、結晶微細化メカニズムを明らかにして最適な添加量を探る必要がある。なお、図 3 および図 4 に示すとおり、ビスマスを追加した鉛フリー青銅合金について、凝固時のビスマスの挙動を詳細に調べるとともに、鑄造材の機械的特性に与える影響についても明らかにした。

#### ①-4 鉛フリー銅合金鑄物の機械的特性の検証(日本青銅(株), 産総研, (株)加藤製作所)

減圧凍結鑄造システムでは組織微細化効果が期待され、鉛フリー青銅鑄物の引張り強度や伸びなどの機械的特性が従来の鑄造材とは異なるものと考えられる。そこで、実際に減圧凍結鑄造システムを用いたテストピースの作製を行い、機械的特性を測定する。

平成 19 年度は、加藤製作所で減圧凍結鑄造システムにより作製した鉛フリー銅合金鑄物の組織観察を産総研で、機械的特性の評価を日本青銅にて実施した。その結果、Bi を添加した鉛フリー青銅鑄物では、その組織に対して凍結鑄型の有する高い冷却性能を十分反映させることができなかった。これは凍結鑄型表面が溶湯の熱で崩壊し、エアギャップが生成して熱伝達が低下したためと考えられた。また、二本取りの引張り試験片の鑄造方案では湯流れに起因する欠陥のため、鑄造品の機械的特性が二極化する傾向を示した。

平成 20 年度は、引張り試験片を鑄造する方案を再検討するとともに、鑄型へ熱が伝達しやすくなるように鑄型表面への耐熱性の向上あるいは鑄型表面の強化について技術開発を行った。その結果、凍結鑄型にコロイダルシリカを追加することが最も有効な技術であり、鑄造欠陥を低減できることを明らかにした。また、CAC902 鑄造材の機械的特性が低下する原因として脱ガス不足が大きく影響していることを見出し、その対策を実施した。その結果、凍結鑄造した CAC902 の機械的特性は従来の鉛入り青銅合金(CAC406)鑄造材と同等以上であることを確認した。

平成 21 年度は、①-3 で開発した組織微細化技術と凍結鑄型の特性を利用した冷却機構を発展させ、さらなる機械的特性の向上を図った。特に、溶解時に燃焼ガスを使用しない高周波誘導加熱式の実験溶解炉を導入し、CAC902 材の機械的性質に及ぼす溶解時のガス吸着の影響について詳細に調べた。鑄造材の評価については、これまでのテストピース状鑄物だけでなく、実際の鑄物形状における種々の評価を実施した。その結果、最終凝固部付近では欠陥が発生しやすく、機械的特性が低下することが明らかになった。得られた CAC902 凍結鑄造材は、210MPa の平均引張り強さ(最大引張り強さ 236MPa) および 17% の平均伸び(最大伸び 26%) を示した。

#### ②環境配慮に資する鑄造技術の開発(株)加藤製作所, 安藤シェル(有), 岡崎精機(株)

銅合金鑄物を製造する中小鑄物工場は住宅地に隣接した環境で鑄物を製造しており、鑄物製造工程における騒音や粉塵などを工場外へださないための設備投資が不可欠である。さら

に、鋳物工場内は騒音や粉塵が多く、作業環境は苛酷であり中小鋳物工場では人材の確保が厳しい状況にある。このような厳しい状況下では中小鋳物工場の廃業や海外移転に歯止めがかからず、国内の優秀な鋳物技術の伝承に支障が出始めている。銅合金鋳物を環境品質に優れた鉛フリー銅合金鋳物に切り替えるに際して、鋳造システムを根底から見直し、製造工程で発生する廃棄物や粉塵、騒音などを限りなくゼロにし、住宅地に隣接した利便性の高い地域でも操業を継続できる21世紀の都市型鋳造システムを構築する。特に、従来の有機系素材を用いた鋳造システムを環境負荷の少ない天然素材や無機系素材に変更した鋳造システムを開発する。平成21年度は、凍結中子の実用化により、産業廃棄物の発生量を80%以上低減するとともに、型ばらし作業にともなう振動や騒音および有機物の分解による悪臭の発生をゼロ化することを目指す。

#### ②-1 産業廃棄物の削減技術の開発(株加藤製作所, 安藤シェル有)

鋳型と中子を天然素材あるいは無機系素材に転換し、鋳造プロセスにおける鋳物砂の回収および再生の資源循環を高め、産業廃棄物の発生量を現状に比して25%以下にすることを目指す。

平成19年度は、有機系素材を用いない造型技術を加藤製作所にて確立し、安藤シェルと加藤製作所が共同して従来の中子形状への凍結鋳型の適用を試みた。一般的なシェル中子では半分ずつ作製(半ペラ)して張り合わせる技術で中子を作製する 경우가多いが、砂と水を混合した粉体を凍結して中子形状にするには単純形状に限定されてしまった。複雑形状では強度が不足し、ハンドリング時に中子が破壊するという問題が発生した。そこで、一体成形を行うため、中子の中心に空洞を作りながら凍結する技術を開発した。中子強度としてはまだ不足みであるが、空洞を設けたことで短時間凍結、中子の軽量化を実現することができた。

平成20年度は中子強度を改善するため、中子の砂充填性を改善する技術(ブロー造型など)や微粒子セラミックスの添加について検討した。その結果、ナノサイズの無機材料粒子を添加した水と砂の混合粉体を造型することによって、ボールバルブ用の凍結中子を作製できることを確認した。また、凍結中子を作製する際に中子の破損を防止できる新しい技術を開発した。これにより、世界ではじめて実用的な凍結中子の試作に成功するとともに、本中子を用いたCAC902 ボールバルブを作製した(図5参照)。さらに、複雑形状の凍結中子を作製するための中子作製技術も開発した。これらの技術開発によって、シェル殻の発生を抑えた産業廃棄物の少ない鋳造システムとすることができた。

平成21年度はこれまでの技術を総合的に融合し、組織が微細化したCAC902合金で薄肉の鋳物を凍結中子の利用で試作した。種々の形状の凍結中子に対して作製技術を確立し、凍結鋳型の成形ラインと組み合わせることにより凍結中



図5 凍結中子を凍結鋳型にセット  
(ボールバルブ)

子を組み込んだオール凍結鑄型を作製して鑄造を行った。中子から発生する水蒸気の影響も比較的少なく、廃棄物量を低減した鑄造プロセスとすることができた。

#### ②-2 粉塵・騒音・振動・臭気の抑制技術の開発(株加藤製作所, 安藤シェル有)

有機材料の使用を極力低減し、熱分解に伴う臭気や有毒ガス、粉塵の発生を抑えるとともに、鑄造型工程の圧縮作業および鑄型から鑄物を取り出す型ばらし工程の振動作業を排除した新しい鑄造システムを構築して、騒音や振動などをゼロ化することを目指す。

平成19年度は減圧凍結鑄造システムにおける最適な鑄型組成(砂粒径や水分量、混合時間など)を検討し、鑄造後の型ばらし時における粉塵発生状況を確認した。その結果、6号けい砂より少し細かい砂粒を用いることで、短時間での造型、鑄肌の改善が行えることを見出した。また、水分量は5%が適していることもわかった。さらに、砂込め方法についても検討を行い、最適な充填方法を見出した。ただ、砂込め方法はあまり鑄肌の改善には有効ではなく、作業時間を勘案して実際の砂充填作業を決定すればいいものと考えられる。

平成20年度は、ボールバルブとメーターケースの鑄造をモデルに、実際に発生する騒音や振動、臭気などを確認した。凍結中子が利用できるようになったため、シェル殻の排出もなく、凍結鑄型は自然崩壊により除去できるようになった。特に、ボールバルブでは実際の製品形状に仕上げるまでを行い、総合的な評価を行った。

平成21年度は、鑄造後の砂を早期に再利用できるようにする技術を開発し、凍結鑄造システムの生産効率向上を目指した。砂の再利用については、乾燥が重要であることがわかった。ただ、現在の凍結鑄造システムにおいては砂の乾燥より木型の乾燥により生産性が左右されており、木型の表面を洗浄して、乾燥する作業を効率化することが重要であった。生産性を向上するためには、凍結時間を短縮することが有効であるが、安定した鑄型を作製するには現在の時間を短縮することはリスクがあり、鑄物を多数個取りする方が効果的であると考えられた。なお、凍結時間に影響を及ぼすベントホールの数や配置についても、ほぼ技術を確認することができた。

#### ②-3 省エネルギー化・省資源化技術の開発(株加藤製作所, 岡崎精機株)

単位重量当たりの製品を得るために必要となる材料使用量を20%以上減じて省資源化を進め、材料の溶解回数の低減などにより材料の溶解に必要なエネルギー量を低減することを目指す。

平成19年度は①-2と連携して、材料歩留まりを改善した型の作製を加藤製作所と岡崎精機が連携して行った。押し湯の減量化、鑄物の薄肉化により材料使用量を減じることができた。ただし、鑄物の機械的特性が向上しないと薄肉鑄物の実用化にはつながらない。

平成20年度は①-4と連携しながら、最適な鑄物肉厚による材料使用量の低減を行った。その結果、ボールバルブでは肉厚を3mmに、メーターケースでは肉厚を2.5mmにすることができた。また、凍結鑄造では、加圧時に欠陥が連続して圧漏れにつながるざく巢などのマイクロ欠陥を低減できることも確認した。

平成21年度は、得られた技術を融合して、それぞれの鑄造モデルに対して省エネルギー、省資源の割合について解析した。原材料がバージン材を多く使うことから、コスト的には高くなってしまいが、凍結鑄造システムの電気使用量が生産量にあまり依存しにくいことから、

多数の鋳物を生産することでコスト面での有利さが出てくることがわかった。また、廃棄物の低減に伴う処理コストの低下も製造コストに反映されることがわかった。

### ③減圧凍結システムの生産性向上に資する鋳造技術の開発(株加藤製作所, 安藤シェル有)

鉛フリー青銅鋳物のコスト低減を実現するためには、生産性の向上が不可欠である。そこで、減圧凍結鋳造システムに対して、銅合金鋳物の生砂型造型ラインに匹敵する生産性を付与するための技術開発を行う。平成21年度は、減圧凍結システムにおける鋳型の凍結挙動を明らかにし、ベントホールの配置および通風速度を最適化することによって、メーターケースやボールバルブ用鋳型の凍結時間を3分まで短縮することを目標とした。

#### ③-1 減圧凍結システムにおける鋳型凍結時間の短縮に関する研究(株加藤製作所, 安藤シェル有)

減圧凍結システムは自硬性鋳型を置き換える生産能力を有しているが、銅合金鋳物で使われている生砂型を置き換えるだけの生産性は有していない。これは鋳型の凍結時間、中子をセットするための時間、鋳型の組み付け時間などが生砂型のプロセスに比べて長時間を要するためである。そのため、減圧凍結システムでは生産性の点で、鋳物コストが上昇する結果になってしまう。そこで、中子を凍結中子にするとともに、ハニカム構造の新しい母型プレートを導入して鋳型の凍結時間を現在の6分から3分に短縮する技術を開発する。さらに、予備冷却装置を備えた連続式鋳型凍結装置を開発し、生砂型鋳造システムに匹敵する月産40トンレベルの生産性を付与する。また、①-1および①-2のシミュレーション技術を活用して生産性の向上を図る。

平成19年度は、加藤製作所にて、砂粒の大きさおよび水分量が減圧凍結システムの鋳型凍結時間に与える影響について検討した。その結果、6.3号けい砂に5%の水を添加して混合後、-40℃にて凍結することで鋳造に資する凍結鋳型を作製できることを明らかにした。

平成20年度は、①および②の技術を取り入れ、凍結中子を用いた減圧凍結鋳造システムにてボールバルブを試作し、実作業時間を実測した。まだ、生砂型にはおよばないものの、保冷库などの導入により生産性を向上することができた。

平成21年度は、さらに生産性を向上するため、周辺技術を開発した。特に、ネックとなっている保冷库から鋳込み場への凍結鋳型の移動時間を短縮するため、その動線を再検討し、最適化を図った。その結果、作業時間はかなり短縮することができた。ただ、当初予定していた短時間での凍結については、吸引速度をあげると鋳型表面に霜柱が生じて凍結鋳型の性能が低下するため、短時間凍結については今後の課題とした。生産性の向上については、鋳型の凍結時間を短縮するより、1枠における鋳物の生産個数を増やす方が生産性に有効であると考えられる。

### ④ 事業化の検討(株式会社加藤製作所, 日本青銅株式会社, 岡崎精機株式会社, 安藤シェル有限会社)

平成21年度は、本事業の最終年度にあたる。そのため、これまでに培ってきた凍結鋳造

システムおよび鉛フリー青銅合金に関する技術を早期に事業化できるように、これまでの基礎的な研究開発に加えて、具体的な産業部材形状（ボールバルブ、メーターケースなど）についても試作を行った。また、組織微細化に伴う材料強度の向上による薄肉化や製造歩留まりなどについてもユーザー側の意見を聞きながら平成21年度の研究開発を実施した。具体的には、当面の目標としてボールバルブとメーターケースを対象に、凍結鑄型を用いてビスマス系鉛フリー青銅合金 CAC902 を鑄造し、ユーザー側へサンプル出荷を行ってその評価を依頼した。

図6に示すように、鑄物を機械加工して使用するボールバルブについては、性能的にも十分満足できるものであり、使用上問題ないとの評価を得ることができた。しかし、メーターケースについては、鑄物表面の仕上げが十分ではなく、凍結鑄造法により作製した鑄物の鑄出しマークを検証してみたいとのコメントをいただいている。得られた評価結果を基に製品の改良、鑄造方案の検討を行い、ユーザーが満足する製品を得るための技術改良を加えて事業化を図る必要がある。

また、CAC902 鉛フリー青銅合金鑄物に対するユーザーの反応を見ながら、鑄造品の大型化（図7参照）や複雑形状鑄物、薄肉鑄物などへの展開を図り、早期に本技術を事業化することを推進する。

#### ⑤プロジェクトの管理・運営（(財)中部科学技術センター）

本研究の円滑な推進を図るため、委員会の運営、各研究開発項目の課題抽出、検討、研究成果の評価等プロジェクトの管理・運営を行う。

平成19年度は、3回の委員会を開催し、研究進捗状況の報告、課題の抽出、ユーザー企業からの意見反映を行った。

平成20年度も、プロジェクトの円滑な推進を図るため、4回の委員会を開催し、研究進捗状況の報告、課題の抽出・対策の議論、ユーザー企業からの意見交換を行った。

平成21年度は、実際の鑄物の生産につながるようユーザー企業からの意見も反映しながら4回の委員会を実施し、早期に事業化を図るための課題抽出を行った。また、研究の効率的な進展を図るため、研究開発の進捗状況報告と相互の意見交換を実施した。



図6 60mmボールバルブの外観(機械加工後)



図7 凍結鑄造で作製した大型鑄物

#### 第4章 当該研究開発の連絡窓口

##### 事業管理者

財団法人中部科学技術センター

〒460-0008 愛知県名古屋市中区栄二丁目17番22号

研究開発推進部 担当部長 大澤 秀敏

TEL:052-231-3043 FAX:052-204-1469

E-mail: h.osawa@cstc.or.jp

## 第5章 全体総括

### 成果の総括

飲料水中への鉛溶出の問題から鉛フリーの青銅合金鋳物への需要が増加することを見越して、鋳造性の悪い鉛フリー青銅合金を薄肉鋳物の形で製造できる減圧凍結鋳造システムの開発を平成19年度より行ってきた。特に、減圧凍結鋳造システムの高い冷却能を活用して組織の微細化、それに伴う鋳造材料の高強度化を狙った。また、鋳造プロセスで問題となる粉塵、騒音などの作業環境の改善、中子や廃砂などの産業廃棄物の低減を凍結鋳造プロセスにより実現することも考慮した。さらに、新しい凍結鋳造システムにおける生産性の改善や鉛フリー青銅合金の歩留まり改善を図り、実操業を仮定した場合の生産コストなどの精査を行った。

3年間のプロジェクトにより、鉛フリー青銅合金としてビスマスを含むCAC902合金に対して、減圧凍結鋳造システムによる鋳造技術を確立した。1180℃のCAC902青銅合金溶湯を-40℃で作製した凍結鋳型へ安全に鋳造できるモデルプラントを加藤製作所に構築し、製品形状であるボールバルブ（平成20年度）およびメーターケース（平成21年度）を実際に鋳造した。はじめは鋳造品の表面に形成する鋳出し文字も十分に作製できなかったが、水が蒸発しても鋳型の強度を維持する技術や砂の詰め方などを改良することでこれらの製品モデルを鋳造することができた。凍結鋳造における溶湯の冷却過程を詳細に調べ、従来の生型鋳造とは異なる伝熱メカニズムを明らかにすることができた。高温の溶湯が低温の鋳型に接した際に発生する水蒸気が急速に鋳型キャビティ内および鋳型の間隙を通して排出され、その途中で水蒸気が再度冷却される現象を明らかにすることができた。この現象を鋳造シミュレーションに反映させることで、凍結鋳造における溶湯の流動現象や欠陥の予測を行うことが可能となった。まだ、実際の複雑形状の鋳物に対して厳密な鋳造欠陥予測を行うまでには至らなかったが、凍結鋳造における方案作成の一助となるツールにすることができた。凍結鋳造におけるシミュレーションの解析精度を向上するため、加藤製作所にてさらなる研究を継続する予定である。

凍結鋳造におけるCAC902鋳物の組織は比較的微細ではあるが、生型に比して極端に微細化するまでには至らなかった。鉛入り青銅合金CAC406が凍結鋳造で微細化し、強度が向上することを考えると、ビスマスを添加したCAC902の鋳造組織が冷却速度の影響を受けにくいことによるものと推量される。ただ、凍結鋳型の伝熱メカニズムが凍結鋳型中の水分がなくなった後に鋳型の熱伝導率を大きく低減することにも起因しているものと考えられる。従来のけい砂に比べて熱伝導性の良好なアルミナ砂粒を用い、さらにその形状を球状とすることで水蒸気の散逸速度を向上させることにより、鋳物の冷却速度は飛躍的に高まりCAC902鉛フリー青銅合金でも鋳造組織は微細になった。しかし、微細な鋳造組織でもCAC902青銅合金の強度や伸びなどの機械的特性はあまり向上せず、鋳造組織の微細化は機械的特性のばらつきの低減に寄与することが明らかとなった。これは、ビスマスの分散状態を改善する効果によるものと考えられ、特性の安定したCAC902鋳造材を作製する上では有効な技術と考えられる。また、CAC902の組織微細化のための添加材を開発することができたが、その微細化メカニズム

については明らかにすることができなかった。今後、継続した研究によりそのメカニズムを明らかにするとともに、効率的な添加量などを検討する。

凍結鑄造にて作製した CAC902 鑄物は従来の CAC406 の JIS 基準を超える機械的特性を示し、鑄物の薄肉化を実現できる素材であることを確認した。また、鑄造時の湯流れに起因する欠陥が多い CAC902 に対して、凍結鑄造では湯流れ性が改善され、薄肉鑄物を作製することができた。この結果、ボールバルブでは素材重量を 25% 低減することに成功し、鑄造品のコストを下げる事が可能であると考えられる。さらに、従来のガス溶解炉から高周波誘導溶解炉へ切り替えることによって、CAC902 中へのガス溶存量などが低減され、鑄造品の不良率を 23% に低減することができた。これらの実績値から凍結鑄造システムによる CAC902 合金の鑄造技術は国際競争力のある鑄造品の製造技術として展開できるものと考えられる。

凍結鑄型による鑄鉄やアルミニウム合金の鑄造実績はこれまでも報告されているが、複雑な中子を組み込んだ銅合金に関する報告事例はない。本技術開発では、凍結鑄造技術を応用して凍結中子を試作することに成功した。この技術を用いることで、従来のシェル殻の発生が抑制できるとともに産業廃棄物の発生量を飛躍的に低減することが可能となる。近年、産業廃棄物の処理量は増加しており、まだ生産性のそれほど高くはない凍結鑄造システムにおいても生産コストの低減につながるものと期待される。また、凍結中子を採用することで鑄物の取り出しを完全に鑄型の自然崩壊のみで対応できるようになり、住宅地近郊で操業する中小鑄物工場にとって問題となる粉塵や騒音を大幅に低減することができた。また、凍結鑄型の溶湯流動性のよさを利用して鑄込み温度を低減することも可能であることがわかり、インゴットの溶解に必要なエネルギー量も低減できることが確認できた。

加藤製作所に凍結鑄造システムのモデルプラントを構築することにより、凍結鑄造の作業性や物流経路などの問題点を明らかにすることができた。これにより、実際の凍結鑄造で生産する際の実原価計算などを実施することができ、凍結鑄造の利点を生かした製品群や製造量などを見積もることができた。

付録 対外発表等

【平成20年度】

誌上発表

- 1) S.Tada, T.Nishio and K.Kobayashi: Proc. AFC-10, (2008), 310
- 2) S.Tada, T.Nishio and K.Kobayashi: Int. J. Cast Metals Research, 21 (2008), 260
- 3) 多田, 牧野, 西尾, 小林, 青山: 鑄造工学, 80, (2008), 531
- 4) H.Nakayama, S.Tada, T.Nishio and K.Kobayashi: Proc. Shape Casting: Third International Symposium, TMS 2008 Annual Meeting, (2008), 113
- 5) S.Tada, H.Nakayama, T.Nishio and K.Kobayashi: Proc. Shape Casting: Third International Symposium, TMS 2008 Annual Meeting, (2008), 239

口頭発表

- 1) S.Tada, T.Nishio and K.Kobayashi: AFC-10, Nagoya, Japan, 2008/05/23
- 2) 多田: 第21回鑄鉄鑄物研究部会, 名古屋, 2008/06/26
- 3) 西尾, 中山, 多田, 小林: 日本鑄造工学会第153回全国講演大会, 石川郡野々市町, 2008/10/26
- 4) 中山, 多田, 西尾, 小林: 日本鑄造工学会第153回全国講演大会, 石川郡野々市町, 2008/10/26
- 5) 多田, 中山, 西尾, 小林: 日本鑄造工学会第153回全国講演大会, 石川郡野々市町, 2008/10/26
- 6) H.Nakayama, S.Tada, T.Nishio and K.Kobayashi: TMS 2008 Annual Meeting, San Francisco, USA, 2009/02/16
- 7) S.Tada, H.Nakayama, T.Nishio and K.Kobayashi: TMS 2008 Annual Meeting, San Francisco, USA, 2009/02/17

イベント出展

- 1) 加藤製作所, 産総研, 日本青銅, 岡崎精機, 安藤シエル, 中部科学技術センター: 中部ものづくりシンポジウム2008, 名古屋市, 2008/12/10

【平成21年度】

誌上発表

- 1) 中山, 多田, 西尾, 小林: 鑄造工学, 81, (2009), 371
- 2) S.Tada, H.Nakayama, T.Nishio and K.Kobayashi: TMS 2010 Collected Proceedings, General Abstracts, Materials Processing and Manufacturing Division, (2010), 261
- 3) 多田, 中山, 西尾, 小林: 鑄造工学, 82, (2010), 92
- 4) 中山, 西尾, 小林: 鑄造工学, 82, (2010), 97
- 5) 西尾, 中山, 小林: 鑄造工学, (2009/11), 投稿中

口頭発表

- 1) 小林, 尾崎, 多田, 西尾, 三上, 中山: 第21回最新科学機器展, 名古屋市, 2009/4/23
- 2) 多田, 中山, 西尾, 小林: 日本鑄造工学会第154回全国講演大会, 東京都, 2009/5/31

- 3) 中山, 西尾, 小林 : 日本鑄造工学会第154回全国講演大会, 東京都, 2009/5/31
- 4) 中山, 多田, 西尾, 小林 : 産業技術総合研究所中部センター研究発表会, 名古屋市, 2009/6/23
- 5) 多田 : 日本鑄造工学会東海支部鑄物技術講演会, 桑名市, 2009/7/1
- 6) 多田, 中山, 小林 : 日本鑄造工学会第155回全国講演大会, 長崎市, 2009/10/18
- 7) 多田 : 第4回産総研レアメタルシンポジウム, 東京都, 2009/10/26
- 8) 多田 : 産業技術連携推進会議ナノテクノロジー材料部会第50回素形材分科会, 名古屋市, 2009/11/19
- 9) S.Tada, H.Nakayama, T.Nishio and K.Kobayashi : TMS 2010 Annual Meeting, Seattle, USA, 2010/02/18

#### 工業所有権

- 1) 多田, 中山, 西尾, 小林, 加藤 : 特許出願, 特願2009-102125, 2009/4/20

#### イベント出展

- 1) 小林, 尾崎, 多田, 西尾, 中山 : 第21回最新科学機器展・第9回軽量計測総合展, 名古屋市, 2009/4/22-24
- 2) 多田, 中山, 西尾, 小林 : 産総研オープンラボ, つくば市, 2009/10/15-16
- 3) 加藤製作所, 産総研, 日本青銅, 岡崎精機, 安藤シェル, 中部科学技術センター : 中部ものづくりシンポジウム2009, 名古屋市, 2009/11/27

#### 受賞

- 1) 多田 : 日本鑄造工学会東海支部堤記念賞, 2009/4/10