

戦略的基盤技術高度化支援事業

「木型・金型を用いない
高精度砂型鑄造法による、船舶用銅合金
大型鑄物製品の低コスト・短納期・無欠陥を
目指した生産技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成28年3月

委託者：九州経済産業局

委託先：公益財団法人飯塚研究開発機構

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	1
1-2	研究体制	6
1-2-1	研究組織及び管理体制	6
1-2-2	管理員および研究員	8
1-2-3	経理担当者および業務管理者の所属、氏名	9
1-2-4	他からの指導・協力者名及び指導・協力事項	10
1-3	成果概要	11
1-4	当該プロジェクト連絡窓口	14
第 2 章	砂型用粉体技術の開発	15
2-1	砂型強度、成型性に優れた積層造形材料の開発および評価	15
2-1-1	概要	15
2-1-2	目的と目標	15
2-1-3	研究内容及び成果	15
2-1-4	研究成果のまとめと今後の取組	24
2-2	熱伝導に優れた積層造形用材料の開発と評価	24
2-2-1	概要	24
2-2-2	目的と目標	24
2-2-3	研究内容及び成果	24
2-2-4	研究成果のまとめと今後の取組	27
第 3 章	砂型の大型化技術の開発	28
3-1	中子・主型の一体化技術の開発	28
3-1-1	概要	28
3-1-2	目的と目標	28
3-1-3	研究内容及び成果	28
3-1-4	研究成果のまとめと今後の取組	30
3-2	砂型分割・接合技術の開発	30
3-2-1	概要	30
3-2-2	目的と目標	30
3-2-3	研究内容及び成果	30
3-2-4	研究結果のまとめと今後の取組	32
第 4 章	凝固最適化技術の開発	34
4-1	ブロック方式冷却砂型の設計	34
4-1-1	概要	34
4-1-2	目的と目標	34
4-1-3	研究内容及び成果	34
4-1-4	研究結果のまとめと今後の取組	34
4-2	鋳造シミュレーションによる凝固の健全性評価	35
4-2-1	概要	35
4-2-2	目的と目標	35
4-2-3	研究内容及び成果	35
4-2-4	研究結果のまとめと今後の取組	35

第 5 章	船舶用銅合金バルブの試作と評価	36
5－1	概要	36
5－2	目的と目標	36
5－3	研究内容及び成果	36
5－4	研究成果のまとめと今後の取組	37
第 6 章	全体統括	39
6－1	主な成果	39
6－2	研究開発後の事業化展開	39

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

日本の造船関連事業者は、業界のグローバル化に伴い韓国・中国メーカーの大型ドック開設などの影響を受け、厳しいコスト競争にさらされている。船舶には数多くの銅合金鋳物製品が搭載されており、川下製造業者である造船関連事業者からは、船舶の国際的コスト競争に対応するため、購入品の低コスト化の要請がますます強くなっている。さらに、船舶の修理において交換される銅合金鋳物製品（例えばバルブ）の調達においても、海運会社による船舶運用の合理化・低コスト化に伴い、修理に要する期間が短縮され、短納期対応などの付加価値向上が求められている。この船舶用銅合金鋳物製品における、低コスト化と短納期化を妨げる要因は、木型・金型の使用にあることが判明した。

そこで、上記問題を解決するために、3D 積層造形技術を応用した、木型・金型を用いない 3D 積層造形砂型鋳造法が研究開発されている。しかし、この研究開発では、次の問題が確認されている。

- ① 鋳肌が粗く、高精度鋳物が出来ない。
- ② 大型鋳物に対応できない。
- ③ 凝固欠陥が発生する。

川下製造業者からの低コスト化と短納期化のニーズに応えるためには①～③の問題を解決する必要がある。そこで 3D 積層造形砂型鋳造法の高度化が迫られている。

(2) 研究の目的

日本の造船関連事業者は、銅合金鋳物製品メーカーに対して、多種少量生産、低コスト化、短納期化への対応を求めている。従来技術では、木型・金型を用いた砂型鋳造法が主な製法であり、木型・金型の作製自体が、低コスト化や短納期化を妨げる問題となっている。

その問題を解決するために、木型・金型を用いない独自の鋳型製造技術として 3D 積層造形砂型鋳造法が研究開発されている。岩手大学も同技術を研究開発しており、これまでの鋳物砂の研究成果から、「複数の砂の組合せ」「硬化剤のブレンド」により、砂型強度を向上させる技術シーズを有している。鷹取製作所では、小型石膏鋳型の 3D 積層造形砂型鋳造技術を有している。本研究開発では、これらのシーズを活用した応用開発により、大型の船舶用銅合金鋳物部品を低コスト、短納期で製造する技術の高度化を図る。

本研究開発の概要について、図 1-1 に記す。

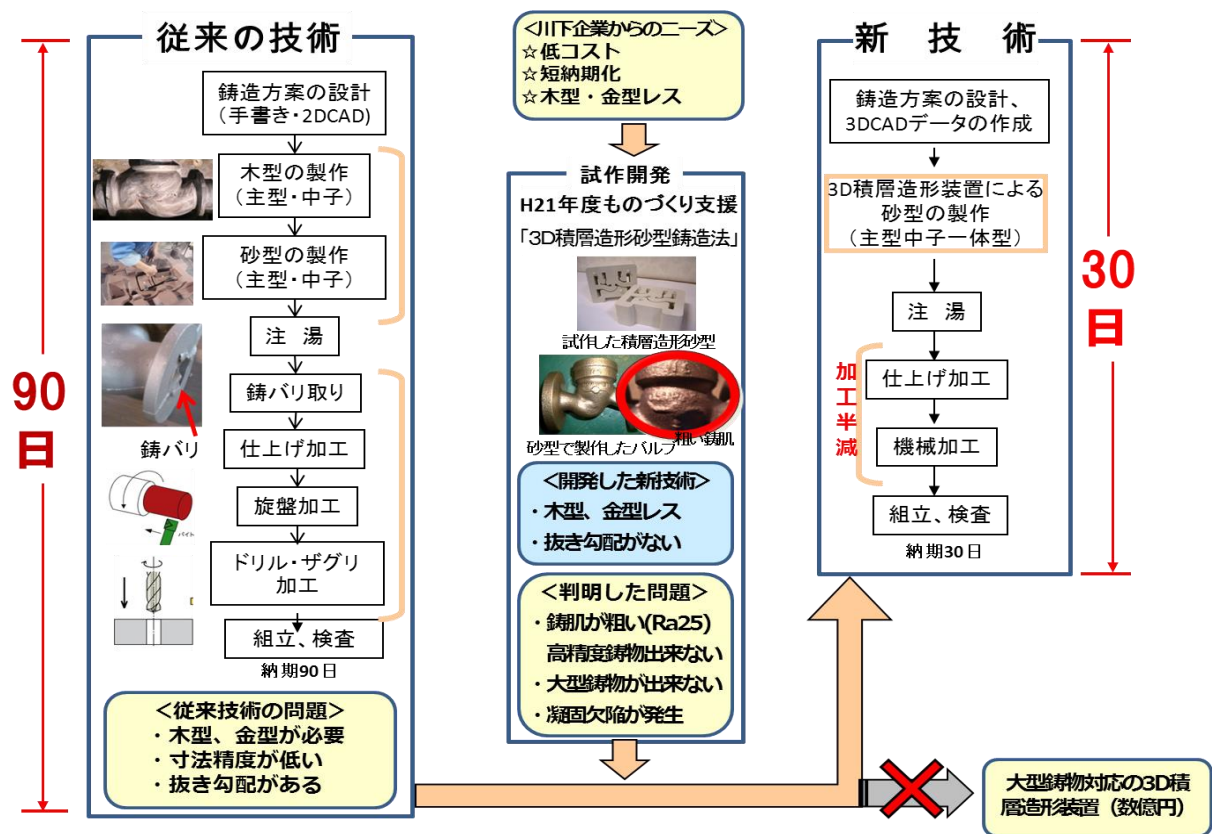


図 1-1 研究開発の概要

(3) 研究の目標

多種少量生産の船舶用銅合金大型鑄物製品を安価に短納期で製造するため、木型・金型を用いない 3D 積層造形砂型鑄造法に独自の「砂型用粉体技術」「砂型の大型化技術」「凝固の最適化技術」を組み合わせた高精度で大型の 3D 積層造形砂型鑄造法を新規に開発する。凝固の最適化で欠陥を無くし、鑄物形状の高精度化で加工時間を半減する。

造船関連事業者の「低コスト」「短納期」「木型・金型レス」のニーズに応える供給体制を確立する。

<研究開発の技術的目標値>

本研究開発の技術的目標値は、図 1-2 及び以下の内容の通りである。

- ・ **低コスト：加工時間50%削減(従来比)**
- ・ **短納期：90日⇒30日(従来比)**
- ・ **高品質：Ra25⇒Ra12.5(表面粗さ)**

図 1-2 研究開発の技術的目標値

【1. 砂型用粉体技術の開発】

本研究開発では、砂型用粉体材料の粒度、添加複合物、成型の最適条件を確立することにより、高強度で熱伝導性に富む、船舶用銅合金大型鋳物製品用の砂型用粉体の製造技術を高度化する。

【1-1】砂型強度、成型性に優れた積層造形用材料の開発と評価

＜研究実施時期：平成 25 年～平成 26 年＞（岩手大学、鷹取製作所、鷹取鋳造）
鋳物砂の粒度制御と硬化剤添加により、砂型強度の向上を図る。

（目標）

砂型強度[抗析力]： 従来（珪砂 1MPa） → 開発品 2MPa（2 倍）

（砂型が崩壊せず鋳肌が粗くならない強度を目指す。）

【1-2】熱伝導に優れた積層造形用材料の開発と評価

＜研究実施時期：平成 26 年～平成 27 年＞（岩手大学）
鋳物砂に熱伝導が異なる複数の粉末を添加することにより、熱伝導率の向上を図る。

（目標）

熱伝導率： 従来（珪砂 0.3W/mK） → 開発品 0.45W/mK（1.5 倍）

（公害問題から近年使用が控えられているクロマイトサンドと同等の熱伝導率を目指す。）

【2. 砂型の大型化技術の開発】

本研究開発では、大物鋳物用の砂型を、限られた造形サイズの 3D 積層造形装置で製造するための「砂型分割方法」、崩壊なくそれら砂型を組み合わせるための「砂型連結方法」を確立し、船舶用銅合金大型鋳物製品（本研究では、大型バルブ）用砂型（MAX L=1300mm）の積層造型条件の最適化を図る。

【2-1】中子・主型の一体化技術の開発

＜研究実施時期：平成 25 年～平成 26 年＞

（鷹取製作所・鷹取鋳造・ホーク工業）

中子を上型もしくは下型に連結させた一体の砂型を作製する。中子を連結させ一体化した砂型を用いることで、中子と上型及び下型との隙間に発生する鋳バリを従来の 2mm から 0.5mm 以下とする。図 1-3 参照

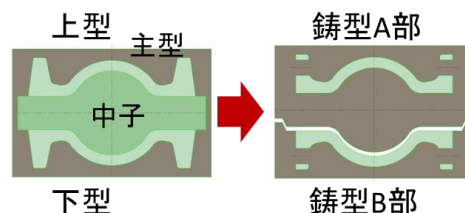


図 1-3 従来技法と

中子・主型の一体化技法

【2-2】砂型分割・接合技術の開発

＜研究実施時期：平成 25 年～平成 27 年＞

（鷹取製作所・鷹取鑄造・ホーク工業）

砂型分割方法と砂型連結方法を検討し、外形サイズ L=1300mm の砂型が作製できる条件を確立する。

図 1-4 参照

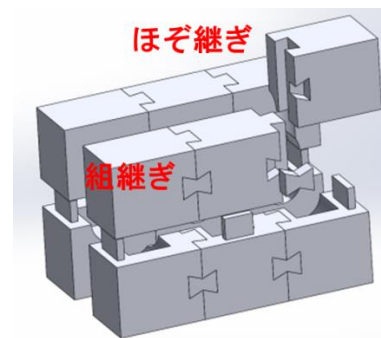


図 1-4 砂型の接合

【3. 凝固の最適化技術の開発】

本研究開発では、肉厚変動部や隅角部にひけ巣が発生しないように、ブロック方式冷却砂型による最適な冷却方法を確立し、鑄造技術の高度化を図る。

【3-1】ブロック方式冷却砂型の設計

＜研究実施時期：平成 26 年＞

（鷹取製作所・鷹取鑄造）

凝固の最適化や指向性凝固を目的として、それに適したブロック方式冷却砂型を設計する。図 1-5 参照

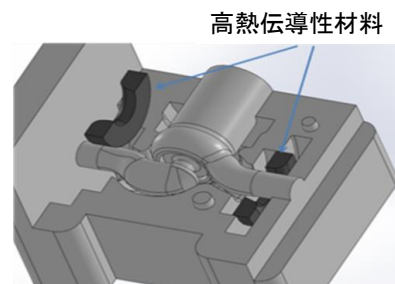


図 1-5 ブロック方式冷却砂型

【3-2】鑄造シミュレーションによる凝固の健全性評価

＜研究実施時期：平成 26 年＞

（鷹取製作所・鷹取鑄造）

評価試験砂型の試作結果と鑄造シミュレーションの分析結果を比較・評価して、ひけ巣欠陥がない鑄造方案を定める。図 1-6 参照

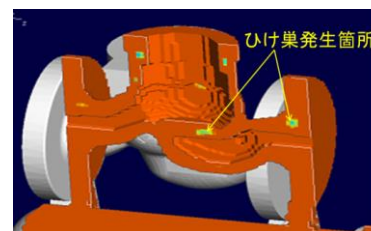


図 1-6 鑄造シミュレーション例

【4. 船舶用銅合金バルブ試作と評価】

＜研究実施時期：平成 27 年＞

（鷹取製作所・鷹取鑄造・ホーク工業）

本研究開発では、新開発の砂型用粉体材料を用いて最適化された 3D 積層造形鑄造法により砂型作製・鑄造を実施して船舶用銅合金大型バルブを低コスト・短納期で製造する技術の高度化を図る。

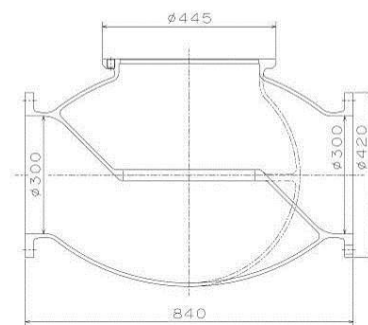


図 1-7 銅合金大型バルブ
（玉形弁 300A）

（目標）

・加工時間：	従来 60 時間	→	開発品 30 時間	（50%削減）
・納期：	従来 90 日	→	開発品 30 日	（納期 1 / 3）
・鑄物表面粗さ：	従来 Ra25	→	開発品 Ra12.5	（滑らかさ 2 倍向上）

本研究開発で行う内容を図 1-8 に記す。

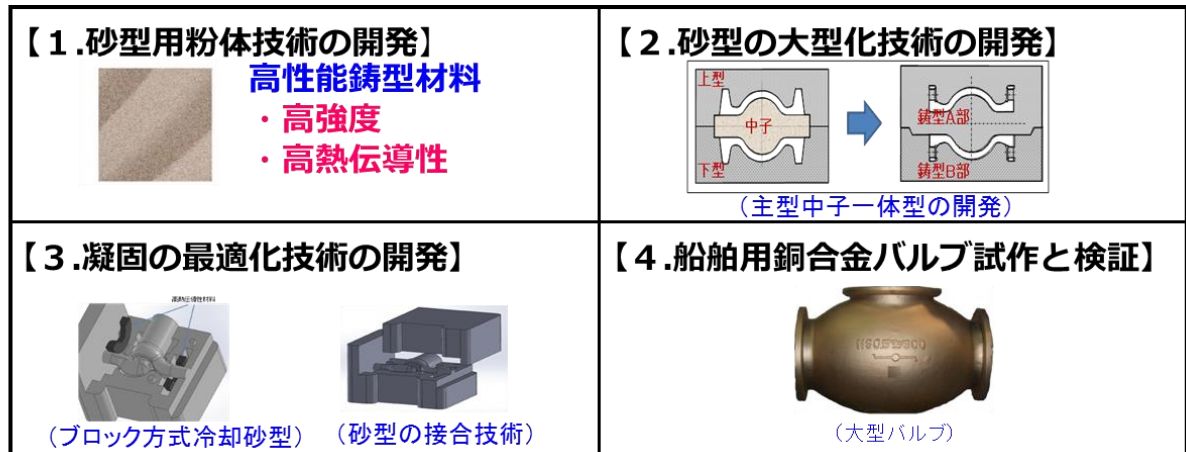


図 1-8 研究開発内容

本研究開発の高度化目標及び技術的目標値を表 1-1 に記す。

表 1-1 問題と高度化目標及び技術目標

試作開発で判明した問題	高度化目標	技術的目標値
鑄肌が粗い 表面粗さRa25	砂型用粉体技術の開発	高精度 表面粗さ Ra12.5 ※1
大型鑄物に対応できない L=200mm	砂型の大型化技術の開発	砂型外形寸法 L=1300mm ※2
凝固欠陥が発生する	凝固の最適化技術の開発	凝固欠陥を無くす

※1 加工レス部分を増やすために必要な値(JIS規格の表面粗さに基づく)

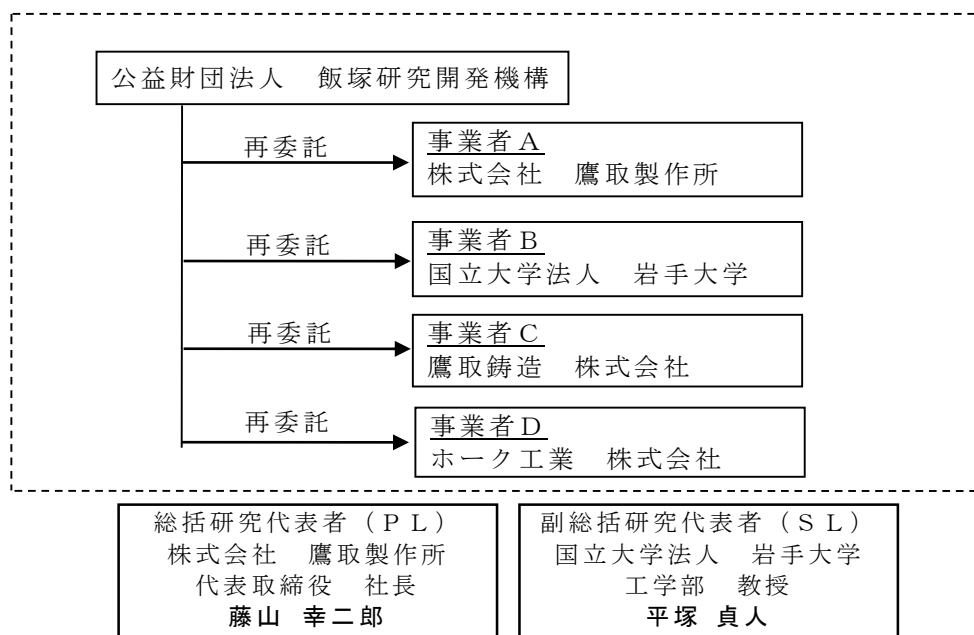
※2 当社で製造する最大のバルブ用鑄物(玉形弁300A)に必要な砂型のサイズ

本年度の研究開発について、第 2 章以降の本論を参照のこと。

1－2 研究体制

1－2－1 研究組織及び管理体制

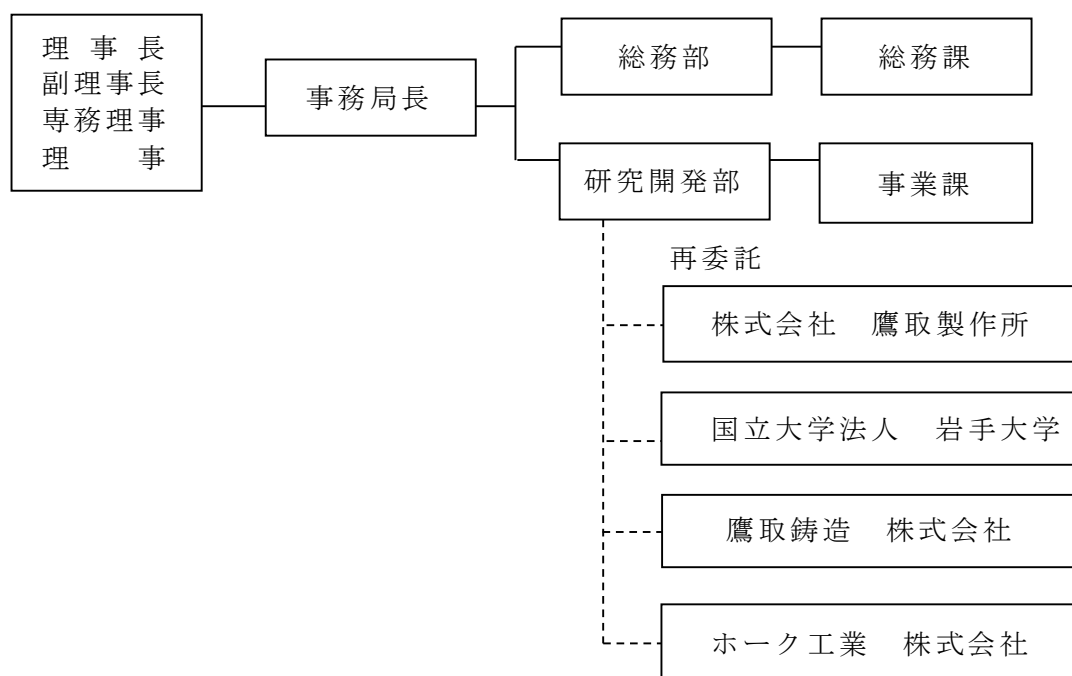
1) 研究組織



2) 管理体制

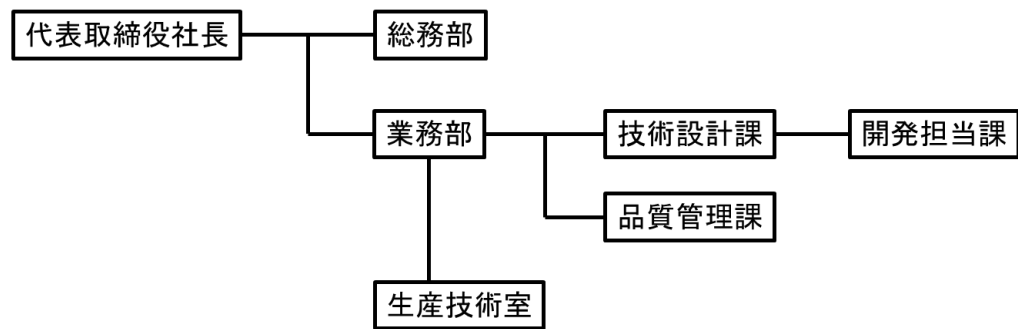
① 事業管理機関

[公益財団法人 飯塚研究開発機構]

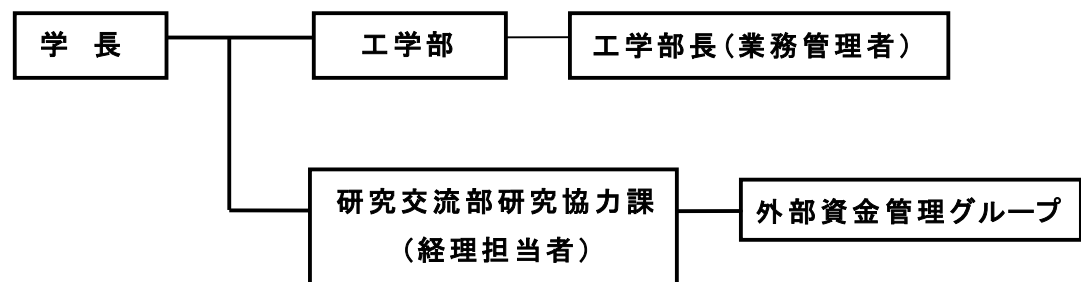


② 再委託先

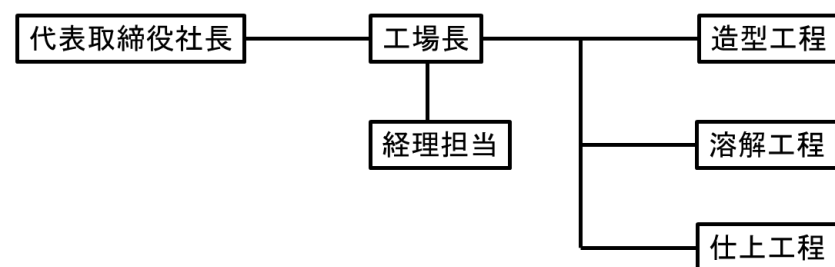
株式会社 鷹取製作所



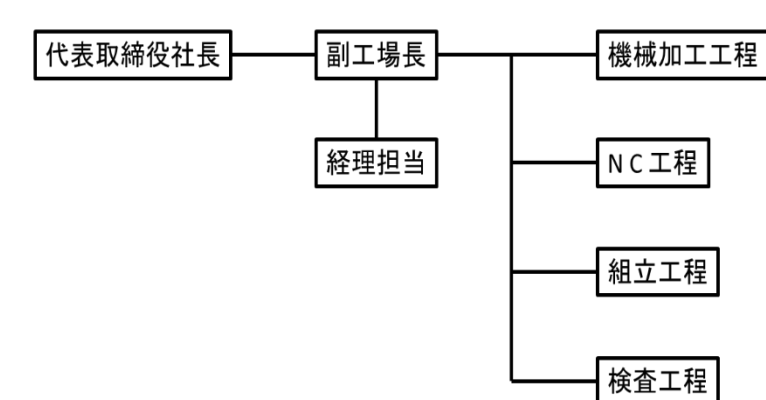
国立大学法人 岩手大学



鷹取鑄造 株式会社



ホーク工業 株式会社



1-2-2 管理員及び研究員

【事業管理機関】公益財団法人 飯塚研究開発機構

① 管理員

氏 名	所属・役職	実施内容(番号)
白水 卓二	総務部・部長	⑤
武藤 修史	総務部総務課・課長	
堀下 玲子	総務部総務課・事務主査	
中村 裕章	研究開発部・部長	
中島 健次	研究開発部事業課・課長	
林 伊久	研究開発部事業課・専門研究員	
鬼丸 健二	研究開発部事業課・事業主任	
仲 孝幸	テクニカルコーディネータ	
菅原美世子	研究開発部事業課・嘱託員	
村田 陽子	研究開発部事業課・嘱託員	

【再委託先】※研究員のみ

株式会社 鷹取製作所

氏 名	所属・役職	実施内容(番号)
藤山 幸二郎	代表取締役 社長	①-1、②-1、②-2、 ③-1、③-2、④
手島 孝徳	業務部 生産技術室 室長	①-1、②-1、②-2、 ③-1、③-2、④
秋吉 善成	業務部 技術設計課 主査	①-1、②-1、②-2、 ③-1、③-2、④
矢野 孝文	業務部 技術設計課 課長	①-1、②-1、②-2、 ③-1、③-2、④
江藤 元信	業務部 技術設計課 主任	①-1、②-1、②-2、 ③-1、③-2、④
田中 翔平	業務部 技術設計課 担当	①-1、②-1、②-2、 ③-1、③-2、④
八谷 朋彦	業務部 技術設計課 担当	①-1、②-1、②-2、 ④
小河 昭彦	業務部 品質管理課 課長	①-1、②-1、②-2、 ③-1、③-2、④
新田 健人	業務部 品質管理課 担当	①-1、②-1、②-2、 ③-1、③-2、④

国立大学法人 岩手大学

氏 名	所属・役職	実施内容(番号)
平塚 貞人	工学部 教授	①-1、①-2
横内 孝之	工学部 特任研究員	

鷹取鋳造 株式会社

氏 名	所属・役職	実施内容(番号)
森 和幸	工場長	①-1、②-1、②-2 ③-1、③-2、④
国武 真治	造型工程 主任統括	
田中 勉	仕上工程 主任	
松木 泰憲	造型工程 担当	

ホーク工業 株式会社

氏 名	所属・役職	実施内容(番号)
佐藤 光和	副工場長	①-1、②-1 ②-2、④
別府 章宏	機械加工工程 主任	
中村 隆男	検査工程 主任	
三原 勉	NC工程 主任	
牛島 義隆	組立工程 担当	
佐々木 貞治	組立工程 担当	
西隈 徹	NC工程 担当	

1-2-3 経理担当者及び業務管理機関の所属、氏名

(事業管理機関)

公益財団法人 飯塚研究開発機構

(経理担当者) 総務部 総務課 課長 武藤 修史
(業務管理者) 研究開発部 部長 中村 裕章

(再委託先)

株式会社 鷹取製作所

(経理担当者) 総務部 総務部長 吉永 興平
(業務管理者) 業務部 業務部長 市川 衛

国立大学法人 岩手大学

(経理担当者) 研究交流部 研究推進課 課長 前田 洋介
(業務管理者) 工学部 工学部長 船崎 健一

鷹取鑄造 株式会社

(経理担当者) 工場長 森 和幸

(業務管理者) 工場長 森 和幸

ホーク工業 株式会社

(経理担当者) 副工場長 佐藤 光和

(業務管理者) 副工場長 佐藤 光和

1-2-4 他からの指導・協力者名及び指導・協力事項

推進委員会委員

(外部推進委員)

氏 名	所属・役職	備 考
木村 正勝	株式会社 木村鉄工所 取締役社長	アドバイザー
赤澤 達矢	株式会社 ツチヨシアクティ 九州事業所	アドバイザー
藤井 孝彦	有限会社 藤井技術事務所 代表取締役	アドバイザー
北橋 和宏	武藤工業 株式会社 九州営業所 所長	アドバイザー

(内部推進委員)

氏 名	所属・役職	備 考
藤山 幸二郎	【株式会社鷹取製作所】 代表取締役 社長	
矢野 孝文	業務部 技術設計課 課長	
八谷 朋彦	業務部 技術設計課	
平塚 貞人	【国立大学法人岩手大学】 工学部 教授	
森 和幸	【鷹取鑄造株式会社】 工場長	
佐藤 光和	【ホーク工業株式会社】 副工場長	
中村 裕章	【公益財団法人飯塚研究開発機構】 研究開発部 部長	
仲 孝幸	テクニカルコーディネータ	

(注)・研究員(労務費を委託対象にする)には、委と備考欄に記載すること。

1-3 成果概要

①砂型用粉体技術の開発

①-1 砂型強度、成形性に優れた積層造形用材料の開発と評価

目標項目	最終目標値	結果	達成度
砂型強度(抗折力)	2.0[MPa]	2.0[MPa]以上	100%
表面粗さ	Ra12.5	Ra11.5	100%

①-2 熱伝導に優れた積層造形用材料の開発と評価

目標項目	最終目標値	結果	達成度
熱伝導率	0.45[W/mK]	0.52~0.57[W/mK]	100%

②砂型の大型化技術の開発

②-1 中子・主型一体化技術の開発

目標項目	最終目標値	結果	達成度
鑄バリ	0.5mm 以下	0.5~10mm	90%

達成度の理由

砂型の結合部分に鑄バリが発生しており、大きさは 0.5mm~10mm であった。目標達成とはならなかったが、鑄バリは仕上げ作業で処理できるため大きな欠点にならないと判断した。

②-2 砂型分割・接合技術の開発

目標項目	最終目標値	結果	達成度
砂型分割方法と砂型連結方法を用いて砂型製作	L=1300mm	L=1300mm	100%
L=1300mm用砂型の設計後から鑄込みまでの製作日数	15 日	52 日	80%

達成度の理由

3D 積層造形装置の造形速度が遅く、砂の自動回収、プリンターヘッドの交換やエラー等で停止する時間が発生し、造形に多くの時間を要した。時間短縮として、造形するブロックの大きさを高さ約 230mm から半分の高さにする方法がある。高さを低くすると、必要なバインダー量が減り、プリンターヘッドの交換回数も 1 回でよいため、エラーで停止する可能性が低くなる。分割数が増えるが、確実に造形作業が行えると考えられる。

③凝固の最適化技術の開発

③-1 ブロック方式冷却砂型

目標項目	最終目標値	結果	達成度
凝固コントロール	指向性凝固を実現する	指向性凝固を実現した	100%

③-2 鑄造シミュレーションによる凝固の健全性評価

目標項目	最終目標値	結果	達成度
ひけ巣欠陥	ゼロ (鑄造シミュレーション)	ゼロ (鑄造シミュレーション)	100%

④船舶用銅合金バルブの試作と評価

従来(加工時間:60時間、納期:90日、鑄物表面粗さ:Ra25)から短縮する。

目標項目	最終目標値	結果	達成度
加工時間	30時間	25時間	100%
納期	30日	63日	85%
鑄物表面粗さ	Ra12.5	Ra12.18	100%

達成度の理由

3D 積層造形装置の造形サイズの制限や造形速度の問題から、造形時間は目標の 3.5 倍の時間を要した。一方、仕上げ加工と機械加工では目標日数を達成した。よって納期は 63 日となり、目標の約 2 倍の日数となったが、従来品と比較すると約 1/3 ほど短縮できる。

以下、各項目の成果報告である。

① 砂型用粉体技術の開発

①-1 砂型強度、成形性に優れた積層造形用材料の開発と評価

平成 25 年度は、アルミナ、クロマイト、人工砂の粒径(粒度)を変え、さらにセメント硬化剤の炭酸リチウムの添加量を変化させた砂型材料を作製し、砂型の硬化時間を測定した。その結果、炭酸リチウムの添加量を増やすことにより始発時間は短くなり、硬化速度も増加した。また、硬化時間はアルミナ、クロマイトは同等であるが、人工砂は、硬化時間が長くなる傾向を示した。

また、アルミナ、クロマイト、人工砂にセメント硬化剤(炭酸リチウム)の添加量を変化させた砂型試験片を作製し、鑄型強度を測定した結果、アルミナを用いた場合、炭酸リチウムを 5% 添加した砂型材料の鑄型強度が向上し、1.5MPa 以上となった。

平成 26 年度は、アルミナとアルミナセメントに硬化剤(炭酸リチウム)を加えて砂型材料を作製し、3D 積層造形装置を用いて積層ピッチを変えた砂型試験片を作製し、鑄型強度を測定した。その結果、積層ピッチが小さいほど、鑄型強度が増加することが分かった。積層ピッチ 0.1mm の鑄型を用いた場合の鑄型強度が 2.0MPa 以上となった。この造型最適条件により、H26 年度目標値 2.0MPa 以上を達成した。

平成 27 年度は、3D 積層造形装置で作製した砂型の乾燥時間を調整するために、グリセリン添加量を変化させた砂型を作製し、砂型の硬化時間を測定した結果、グリセリンの添加量が増加すると始発時間は長くなり、グリセリン添加量 5% の時は、完全に硬化していないので、鑄型乾燥の不具合が発生しないものとなった。

また、グリセリンの添加量を変化させた砂型試験片を作製し、鑄型強度を測定した

結果、グリセリン添加量が 0～5% の範囲でも、鑄型強度は 2.0MPa 以上となった。

3D 積層造形装置が砂回収作業により 20 分間停止し、その間に積層造形用砂に塗布されたバインダーが乾燥し積層の境目が発生する問題に対して、バインダーの調査、試作バインダーの製作を行った。結果、バインダーの試作は行えたが、積層の境目は発生した。バインダーの開発は引続き補完研究で行い、積層の境目が発生しない成分の条件を求める。

①-2 熱伝導に優れた積層造形用材料の開発と評価

平成 26 年度は、熱伝導に優れた積層造形用材料の開発において、①-1 で開発した砂型強度に優れた骨材にアルミナ (Al₂O₃) や炭化ケイ素 (SiC) 添加複合剤を加えた砂型を造形した。それぞれの砂型材料の熱伝導率を測定した。その結果、①-1 で開発したアルミナ砂型の熱伝導率は、0.42W/mK、SiC の熱伝導率は 0.52 W/mK となった。SiC の添加複合剤を用いた鑄型により、H26 年度目標値 0.45W/mK 以上を達成した。

平成 27 年度は、①-1 で開発した砂型強度に優れた骨材に黒鉛の添加複合剤を加えた砂型を造形し、それぞれの砂型材料の熱伝導率を測定した。その結果、①-1 で開発したアルミナ砂型の熱伝導率 0.42W/mK に比べて、熱伝導率の大きい黒鉛粉を用いると鱗状黒鉛では、0.54 W/mK、人造黒鉛では、0.57 W/mK とさらに大きくなった。黒鉛の添加複合剤を用いた鑄型により、H27 年度目標値 0.45W/mK 以上を達成した。

② 砂型の大型化技術の開発

②-1 中子・主型の一体化技術の開発

中子・主型の一体化技術の研究開発を行った。現在の 3D 積層造形装置で中子と主型の一体化を行うと、砂の除去が困難になり鑄込み不良になる。そのため、主型と中子は分離した砂型へ設計変更した。鑄バリは積層の境目や分割面で 0.5～10mm ほど発生しており、目標達成とはならなかったが仕上げ作業で除去できるため、大きな問題とはならない。砂型の補修作業により鑄バリは低減できると推察される。最後に、鑄抜き穴は砂の除去作業等において、形状が変形し、きれいな円形にならなかった。そのため鑄抜き穴の効果は少ないと考えられる。今後は、実用化にあたり鑄抜き穴は設けず、鑄バリが発生しないように砂型の補修作業を行う。

②-2 砂型分割・接合技術の開発

砂型分割・接合技術の開発を行った。組み継ぎ・ほぞ継ぎの砂型を設計・造形したが、積層の境目から分離する問題が生じた。そこで造形高さを約 60mm に制限、平面度の影響が少ない水平分割に変更し、各砂型はボルト固定とした。また積層造形用砂は鑄物砂よりも多くの水分を含み、鑄込み時のガス発生が問題となっていた。そこで主型は乾燥させ、中子用の型を造形し、鑄物砂を用いた中子を作製した。その結果、L=1300mm の鑄込みは成功、水圧検査も合格できる鑄物ができた。L=1300mm の砂型造形日数は、3D 積層造形装置の造形サイズや造形時間の問題から、目標の 3.5 倍の 52 日を要した。この技術は木型がない製品に対して有効であるが、L=400mm のサイズに限

界であると考えられる。

今後は、第 2 章 2-1-4 で述べたように、バインダーの開発は引続き補完研究で行い、積層の境目が発生しない成分の条件を求める。また開発したバインダーを用いて砂型造形を行い、分割数が少ない L=400mm 以下の製品の実用化をしていく。

③ 凝固の最適化技術の開発

ひけ巣欠陥ゼロの铸造シミュレーション結果を元に、ブロック方式冷却砂型を配置した船舶用銅合金バルブ L=1300mm の作製する場合の铸造方案を決定した。この方案を反映させた L=1300mm の砂型を作製し、船舶用銅合金バルブは完成した。

④ 船舶用銅合金バルブの試作と評価

L=1300mm の砂型を作製し鑄込み後の評価を行った。平成 26 年度の研究成果より、砂型は平面分割を行いボルト締結で砂型のズレを抑える等、対策を行った。その結果、鑄込みは成功し、水圧検査も合格した。目標である表面粗さの滑らかさ 2 倍、加工時間短縮は達成できたが、納期は従来の約 2/3 であった。砂型が大型のため、造形時間が非常に長くなるためである。

今後は、補完研究で要素技術であるバインダーの開発を進めながら、小形バルブである L=400mm 以下の試作を行い、実用化を目指す。また L=400mm 以下の実用化に向けて、L=1300mm で判明した技術課題の解決策をフィードバックし、砂型の最適化を進める。小形バルブ L=400mm 以下の実用化が完了した後、L=1300mm の試作を行い、大形バルブの実用化を目指す。

1-4 当該プロジェクト連絡窓口

公益財団法人飯塚研究開発機構 研究開発部 林 伊久

TEL: 0948-21-1156 FAX: 0948-21-2150

E-mail: hayashi@cird.or.jp

第2章 砂型用粉体技術の開発

岩手大学工学部	教授	平塚貞人
(株)鷹取製作所	課長	矢野孝文
(株)鷹取製作所		八谷朋彦
鷹取鑄造(株)	工場長	森和幸

本研究開発では、砂型用粉体材料の粒度、添加複合物、成型の最適条件を確立することにより、高強度で熱伝導性に富む、船舶用銅合金大型鑄物製品用の砂型用粉体の製造技術を高度化する。

2-1 砂型強度、成型性に優れた積層造形材料の開発および評価

2-1-1 概要

鑄物砂の粒度制御と硬化剤添加により、砂型強度の向上を図る。

2-1-2 目的と目標

砂型強度[抗析力]: 従来 (珪砂 1MPa) → 開発品 2MPa(2倍)
(砂型が崩壊せず鑄肌が粗くならない強度を目指す)

表面粗さ: 従来 Ra25 → 開発品 Ra12.5
(滑らかさ2倍に向上)

2-1-3 研究内容及び成果

平成25年度は、砂型強度、成型性に優れた積層造形用材料の開発を実施した。アルミナ、クロマイト、人工砂の粒径(粒度)を変え、さらにセメント硬化剤の添加量を変化させた砂型材料を作製し、砂型の硬化時間を測定することにより砂型成型性を調べた。また、砂型材料について抗析試験を行い、砂型材料の強度が向上する配合量を調べた。

平成26年度は、砂型強度、成型性に優れた積層造形用材料を3D積層造形砂型鑄造法により作製する。その後、砂型強度及び表面粗さ、鑄造性、鑄物試験片の表面粗さ、仕上げ加工した鑄物試験片の表面について評価を行った。

平成27年度は、平成26年度に判明した積層の境が発生する対策として、各積層造形用粉体材料に液体バインダーを加えて、硬化促進剤と鑄型強度を調べ、鑄型強度2.0MPa以上の作製条件を確立した。

具体的には、下記のとおりである。

A) 砂型の硬化時間の測定

アルミナ、クロマイト、人工砂の各種層造型用粉体材料に液体バインダー (ZB60) を加えて作製した砂型の硬化時間を測定した。試料は、粉末材料に液体バインダーと硬化促進剤として炭酸リチウムを加えて 1 分間攪拌して作製した。作製したスラリーを JIS R5201 凝結試験機を用いて $300 \pm 1\text{g}$ の荷重でのスラリー底面と始発針の先端の距離を測定した。また、硬化時間は、バインダー添加 3 分後から、スラリー底面と始発針の先端の距離が 40 mm 以上に 2 回なるまで 1 分毎に測定を行った。

図 2-1 に、炭酸リチウムの添加量を 5 % とした場合の 3 種類の粉体材料の硬化時間を示す。なお、比較のために従来材 (石膏材料) の硬化時間も測定した。炭酸リチウム 5 % 添加の時、硬化時間はアルミナ、クロマイは同等であるが、人工砂は、硬化時間が長くなる傾向を示した。

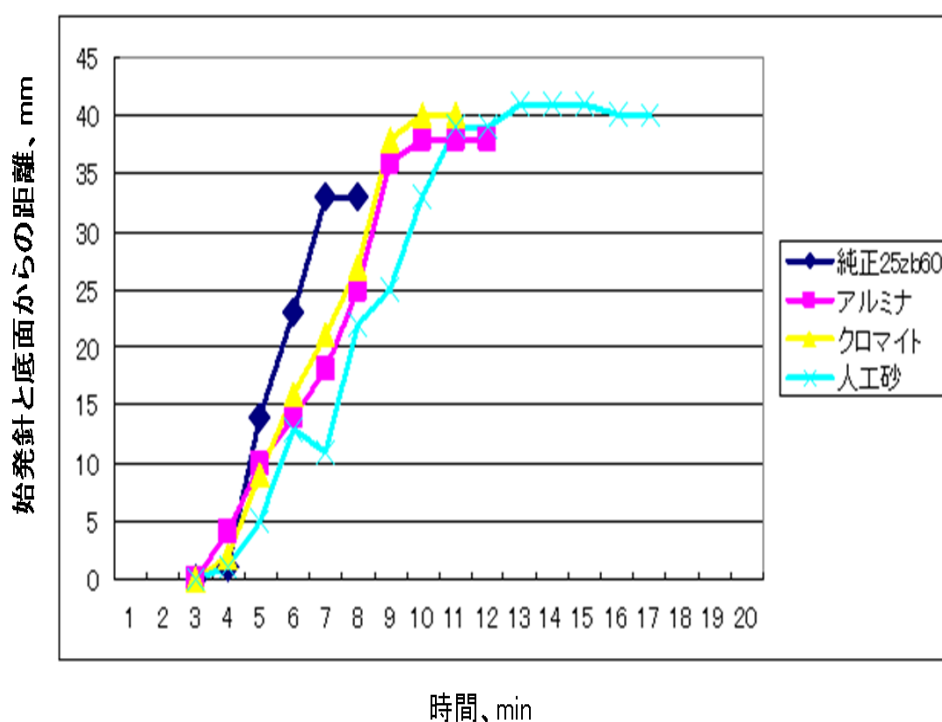


図 2-1 鋳型材料の硬化時間

積層の境が発生する対策として、グリセリンを加えて作製した砂型の硬化時間を測定した。試料は、粉末材料に液体バインダーと硬化促進剤として炭酸リチウム、グリセリンを 0 ~ 10 % まで加えて 1 分間攪拌して作製した。

図 2-2 に、グリセリンの添加量の変えた場合の硬化時間を示す。グリセリンの添加量が増加すると始発時間は長くなった。なお、硬化速度はグリセリンの量が変化しても変わらなかった。装置が 20 分停止することを想定してグリセリン添加量 5 % の時は、完全に硬化していないでの、鋳型乾燥の不具合が発生しないと考えられる。

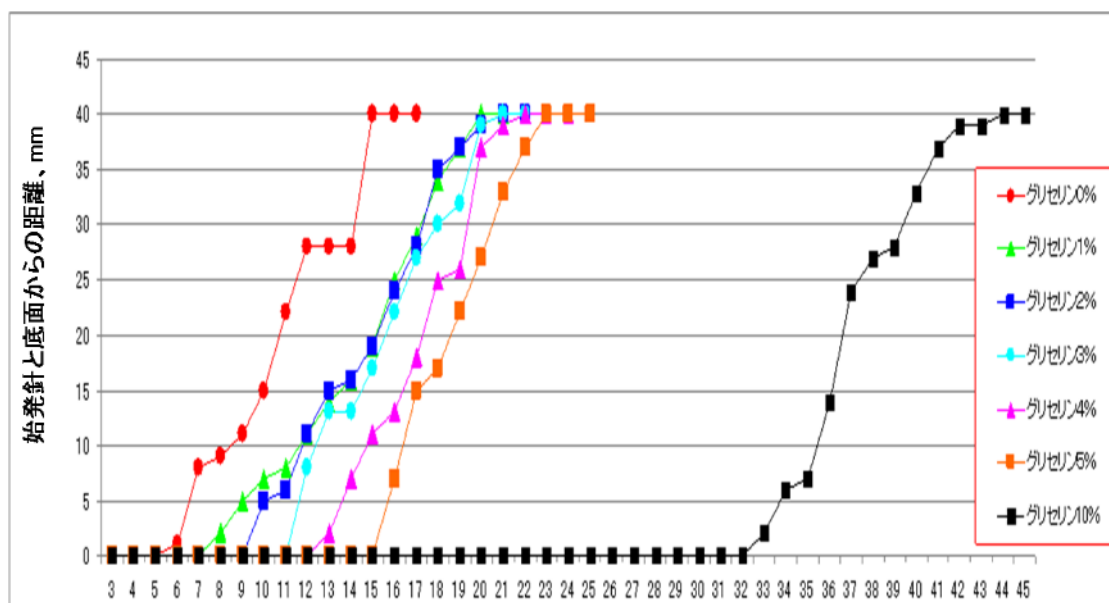


図 2-2 鋳型材料の硬化時間

B) 鋳物試験片用砂型の強度測定

3D 積層造形装置を用いて作製した試料の大きさは $10 \times 20 \times 75\text{mm}$ である。板状試験片を鋳型強度試験機により抗折試験を行い、抗折強度を測定した。

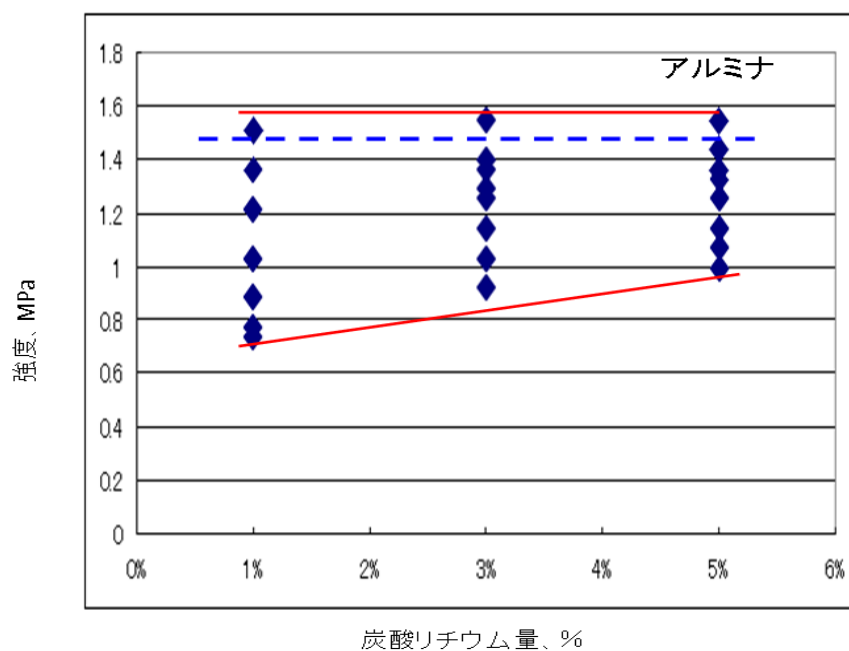


図 2-3 鋳型材料の硬化時間

図 2-3 にアルミナを用いた場合の鋳型強度を示す。砂型の強度は、炭酸リチウムの量が増えると増加し、 $0.77 \sim 1.55\text{MPa}$ の範囲となった。鋳型の硬化が促進された試料は、鋳型強度が 1.5MPa 以上となった。

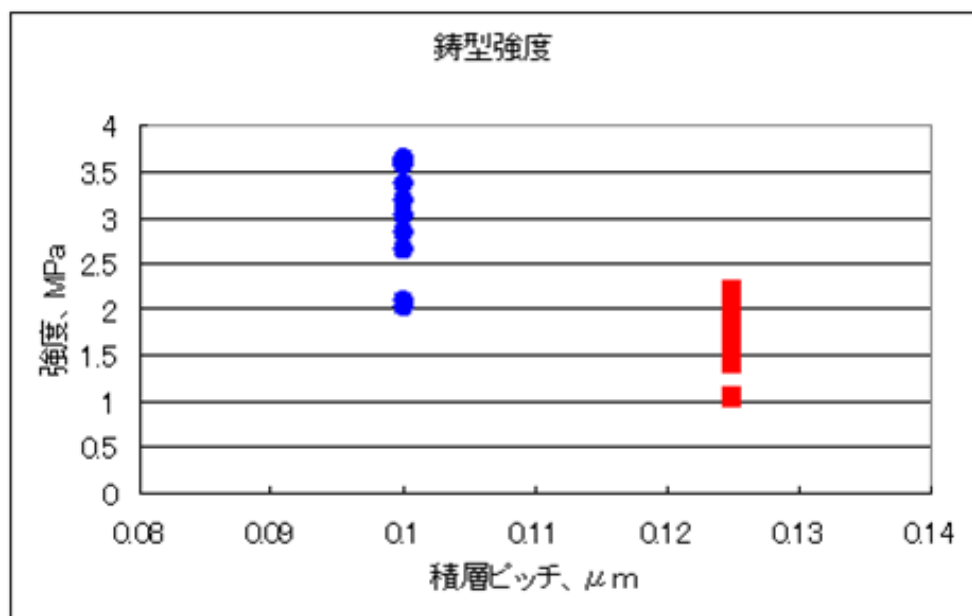


図 2-4 鑄型強度と造型積層ピッチ間隔との関係

図 2-4 に鑄型強度と造型積層ピッチ間隔の関係を示す。造型積層ピッチ間隔が小さくなると砂型の強度は増加し、鑄型強度は 2.0MPa 以上となった。これは、使用したアルミナの粒度が $50\mu\text{m}$ と $100\mu\text{m}$ の 2 種類ものであるため、積層ピッチを $100\mu\text{m}$ とすると充填密度が増加したためと考えられる。

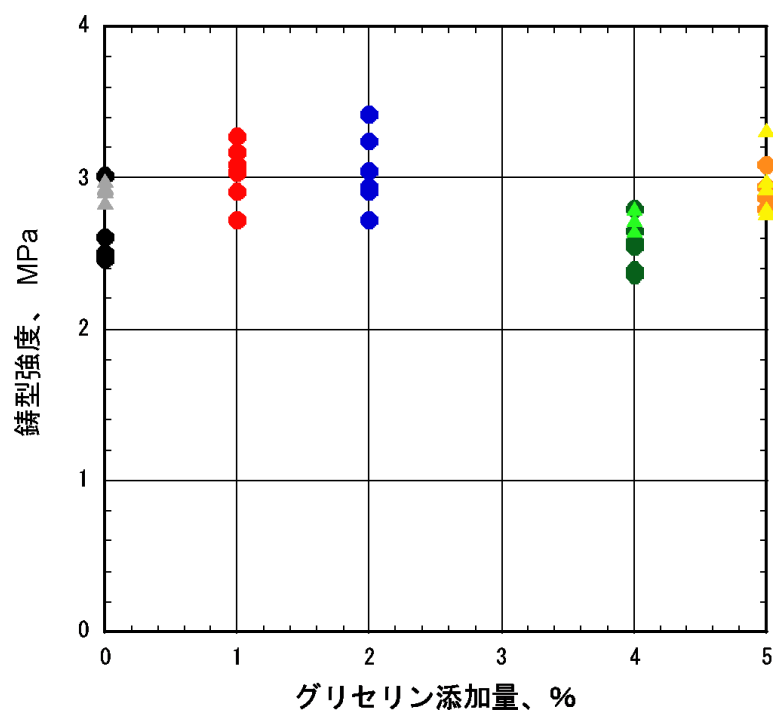


図 2-5 グリセリン添加量と鑄型強度との関係

図 2-5 にアルミナ、アルミナセメント、炭酸リチウムを加えた砂型用粉体原材料に、グリセリンを 0～5% 加えて作製した鑄型の強度を示す。

グリセリン添加量を増加すると 2%までは鑄型強度は増加するが、それ以上では、鑄型強度はわずかに減少した。なお、グリセリン添加量が 0～5%の範囲でも、鑄型強度は 2.0MPa 以上となった。

C) 鑄物試験片用砂型への鑄造

○平成 25 年度

鑄物試験片用砂型として、引張試験片作成用の鑄型を CAD により設計した。その CAD データにより 3D 積層造形装置を用いて鑄物試験片用砂型を作成した。積層造形した CAD データとの整合性、3D 積層造形装置の制御条件、粉体積層条件を調べて従来材料との比較を行うために、始めに石膏により造型を行った。図 2-6 に石膏で造型した鑄型を示す。次に、アルミナに炭酸リチウムを 5%添加した粉体材料により 3D 積層造形装置を用いて鑄物試験片用砂型を作製した。図 2-7 に造型した鑄型を示す。

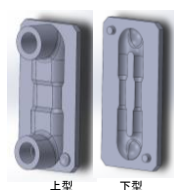


図 2-6 CAD データと石膏の鑄型



図 2-7 アルミナ材料で造型した鑄型

青銅合金（CAC403：88.5%Cu-9.2%Sn-2.3%Zn）を電気炉で溶解し、1150℃で図 2-7 に示した鑄型に鑄込みを行った。図 2-8 は型ばらしの様子を示す。従来の自硬性鑄型に比べて崩壊性が良かった。



図 2-8 型ばらし後の試験片とショットブラスト後の湯口の部分

図 2-12 に、型ばらし後の試験片を示す。型ばらし後の状態で若干色焼けした部分もあった。図 2-13 に、ショットブラスト後の物の湯口部分を示す。ショットブラスト後の状態は、通常の製品と同じ色であった。砂型強度、成型性に優れたアルミナ粉体材料により 3D 積層造形装置を用いて作成した鑄物試験片用砂型により青銅鑄物を鑄造できることが分かった。

○平成 26 年度

鑄物試験片用砂型の鑄造を行った。

①岩手大学で開発した砂の配合量を元に、外部推進委員のツチヨシアクティ九州事業所で砂型材料を混練した。

②3D 積層造形装置で 10×20×75mm の試料を作製し、試料の表面粗さを検討した。

③②で検討した砂型材料を用いて A 号供試材を鑄造した。

結果を表 2-1 に示す。1 回目では、効果促進剤として使用する炭酸リチウムの粒度が $688\mu\text{m}$ と大きく、砂型の精度が粗くなることが判った。そこで、2 回目は炭酸リチウムの粒度を $25\mu\text{m}$ とし、砂型材料の混練を実施した結果、試料の表面が良好となった。しかし、3D 積層造形装置内で自然硬化する課題が生じた。次に 3 回目は、炭酸リチウムの粒度は $25\mu\text{m}$ のままとして、炭酸リチウムの添加量を $5\rightarrow 3\%$ として、砂型材料の混練を実施した。結果、試料の表面は良好となり、装置内での自然硬化もないことが判った。

表 2-1 炭酸リチウム調整結果

	1回目 (5/23入荷分)	2回目 (7/10入荷分)	3回目 (8/7入荷分)
配合の内容	平塚先生にご教示 頂いた通りに配合	炭酸リチウム粒度 メーカ変更	炭酸リチウム 5 $\rightarrow$ 3%添加量変更
結 果	炭酸リチウムの 粒度粗い	粒度良好 装置内で自然硬化 する。	粒度良好 2回目同様、自然 硬化する。
外 観			

3 回目で調整できた砂型材料を用いて、3D 積層造形装置で積層ピッチ $100\mu\text{m}$ の条件で砂型を造型した。造型品は、JIS H 5120 銅及び銅合金鋳物で規定する青銅鋳物用の A 号供試材を造型した。その後、砂型に鋳込みを行い、図 2-9 に示す A 号供試材の鋳物を作製した。



図 2-9 A 号供試材と A 号供試材の砂型、試験片

D) 鋳肌の表面粗さ測定、表面観察

○平成 26 年度

鋳物表面を表面粗さ測定機で測定した。その結果、 $Ra11.5\mu\text{m}$ という結果となり、目標値を達成することができた。計測時の画像を図 2-10 に示す。また、マイクロスコープで表面を観察したところ、従来工法で鋳造した鋳物と遜色は無かった。ただし、目視観察では水平方向に積層の線が入る事が確認できる。

※ Ra ：算術平均粗さ 測定長さ $L=12.5\text{mm}$



図 2-10 表面粗さ測定結果(左)、マイクロスコープ観察(20 倍:中央)、目視観察(右)

また、砂型に塗型剤を塗布して、表面粗さ及び砂型の型バラシ性を比較した。比較の結果、マグネシウム系の塗型剤が良好である事が判明した。

表 2-2 塗型剤の比較調査結果

	塗型有り マグネシウム系	塗型有り 黒鉛系	塗型無し
外 観			
鑄肌の表面粗さ	Ra 8.89	Ra 8.93	Ra 11.9
型パランシ性	良好	良好	普通

作製したA号供試材を JIS Z 2241 金属材料引張試験方法で規定する 4 号試験片に合わせ機械加工を行った。JIS に示す形状と機械加工を行った 4 号試験片を図 2-11 に示す。

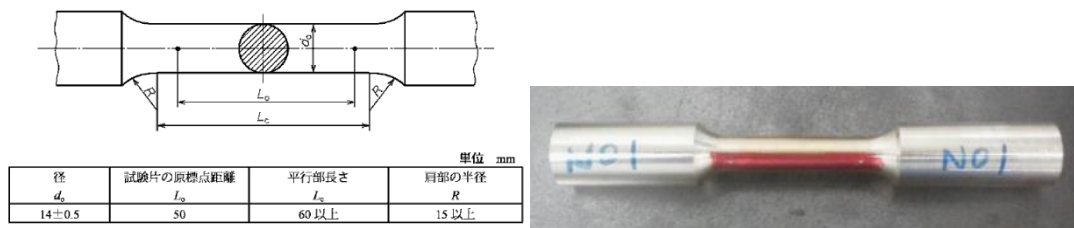


図 2-11 4 号試験片の寸法(左)と機械加工後(右)

その後、機械加工した試験片を引張試験した結果、表 2-3 のようになった。

表 2-3 引張試験及び伸びの試験結果

	引張強さ [N/mm ²]	伸び [%]
1 回 目	273	26
2 回 目	208	13

JIS 基準値 引張強さ 245 N/mm² 以上、伸び 15% 以上

引張強さと伸びの結果、1 回目合格、2 回目不合格となった。以下のような、試験の違いがあった。

① 1 回目砂型は、鑄込み前に乾燥を実施した。

② 積層造形した砂型を鑄物砂で全体を覆った。それにより冷却速度が違った
鑄込み後の砂型の画像を図 2-12 に示す。機械加工後の鑄物を表面粗さ測定機で測定した。その結果は、Ra2.5 であった。



図 2-12 鑄込み後の砂型(左:1 回目、中央:2 回目)、表面粗さ(右)

マイクロスコープで引張試験後の破断面を観察した。図 2-13 に従来品と今回の試験片のマイクロスコープで観察した破断面(倍率 20 倍)を示す。従来品には、デンドライト(樹枝状晶)が外周から伸びている事が確認できる。しかし、今回の試験片にはデンドライトが少ないことが見受けられる。凹凸が多い事も分かった。また、従来と今回の試験

片の破断面（倍率 1 倍）を図 2-13 に示す。こちらを比較すると今回の試験片の断面（2 回目）は、従来品に比べ粒子が荒いことが判った。

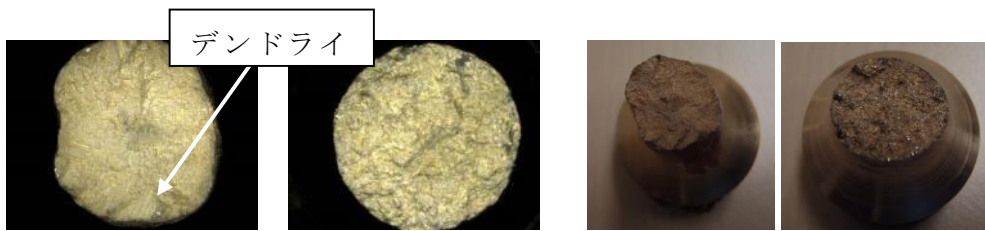


図 2-13 破断面比較(倍率 20 倍と 1 倍、左:従来品、右:試験片)

○平成 27 年度

平成 26 年度の研究において、3D 積層造形装置が造形高さ約 33mm ごとに砂の自動回収することが判明し、砂型に積層の境目が発生した。そこで、3D 積層造形装置メーカーの純正バインダーの成分分析を行い、主成分を調整することで、20 分間装置が停止しても積層の境が発生しない成分条件を求めた。

・純正バインダーの成分分析

純正バインダーに含まれる成分分析を行い、純正バインダーの主な成分比率を調べた。主成分は水、乾燥防止剤のグリセリン、界面活性剤のポリエチレングリコール等を含む液体であった。



図 2-14 純正バインダー

・バインダーの調合

純正バインダーに乾燥防止剤であるグリセリン+0.5%添加品、エチレングリコール+0.5%添加品を作製し、それぞれ造形を行った。造形の結果、グリセリンの方が良い結果となり、グリセリンを添加して、乾燥しにくい配合量を確認した。

・強度試験 1

純正バインダーにグリセリン 2～5%添加品を用いて造形を行った。試験片寸法は 5×5×40mm の角柱とし、造形方法の比較として境目なしと境目ありの 2 種類造形した。



図 2-15 試験片(左)、試験中の様子(右)

・試験結果 1

試験結果を図 2-16 に示す。境目なしでは純正バインダーを用いた試験片が最も高い強度となった。またグリセリンを添加した試験片では、強度は低下、添加量に対して大きな差は見られなかった。一方、境目ありでは大きく強度が低下した。また全ての試験片が

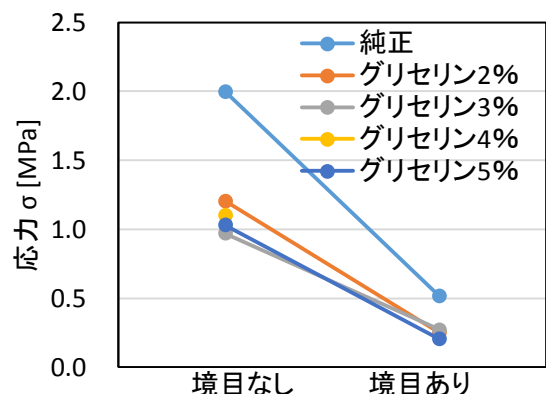


図 2-16 試験結果

3D 積層造形装置の停止位置で割れていた。停止中にバインダーが乾燥し、十分な接着力を保てなかったと考えられる。

・強度試験 2

純正バインダーにグリセリンを 2、3% 添加し、試験片の造形を行った。試験片は抗折試験片(寸法: 10×20×75mm)、全て境目なしとした。また乾燥による影響を比較するため、陶芸用窯で 200℃ 焼結を 1 時間、3 時間、6 時間とした。



図 2-17 試験片(右)と試験中の様子(左)

・試験結果 2

試験結果を図 2-18 に示す。乾燥の有無に関わらず、グリセリンを添加したバインダーの強度は高く、その中でもグリセリン 2% 品が最も強度がある結果となった。また乾燥時間が増すごとに、強度が増す傾向が見られた。

この結果から、バインダーの試作にあたりグリセリンの成分比率は 12% 以下とし、西邦化学産業(株)に試作バインダーの作製を依頼した。

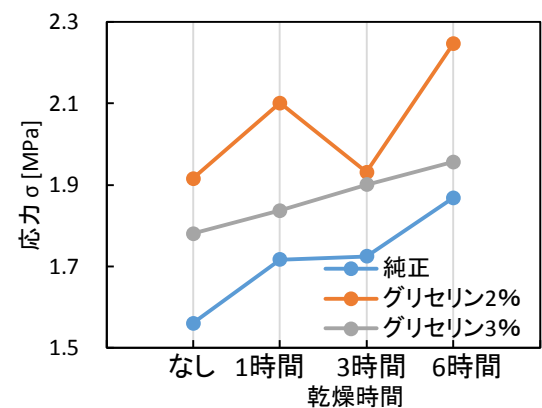


図 2-18 試験結果

・試作バインダーの粘度試験

西邦化学産業(株)殿(武藤工業(株)殿より紹介)より、試作バインダー 2 種(661、662)を製作頂いた。この試作バインダーには、西邦化学産業(株)殿のノウハウとして、接着剤となる樹脂成分が含まれている。この試作バインダーを用いて粘度試験を行った。

・試験結果

純正バインダーの粘度が 1.30[mPa・s] に対して、試作バインダー 661 は 7.95[mPa・s]、試作バインダー 662 では 25.43[mPa・s] となり、純正バインダーと比較して大きな値となっていた。粘度は純正バインダーに近い値が望ましいが、造形可能であれば問題ないとされる。



図 2-19 試験装置

これらの調査から、樹脂成分を取り除きグリセリン 10% のバインダーを作成した。このバインダーを用いて、鋳物試験片用砂型を造形し、L=1300mm と同時に鋳込みを行った。試験片の砂型は 3 種製作した。型バラシ後の試験片と機械加工後の試験片を図 2-20 に示す。全ての試験片が基準値を合格した。鋳物砂の砂型では引張強さ 260~290MPa 程度であるため、今回は非常に良い結果となった。次に鋳物試験片の表面粗さを測定した。試験片 1 の上型は積層造形用砂、下型は鋳物砂であるため、砂の違いによる比較も行った。なお試験片は型バラシ後、ショットなどの手入れ作業は行っていない。



図 2-20 鋳込みと型バラシ後(左)、機械加工後(中央)、試験後(右)

積層造形用砂の場合、表面粗さは全て Ra12 以下となった。鋳物砂の場合の表面粗さは Ra21.04 であった。この結果から積層造形用砂では滑らかさ約 2 倍になることが分かった。



図 2-21 表面粗さ測定の様子と砂型の違いによる表面粗さ

2-1-4 研究成果のまとめと今後の取組

アルミナとアルミナセメントに硬化剤（炭酸リチウム）を加えて砂型材料を作成し、3D 積層造形装置を用いて積層ピッチを変えた砂型材料を用いて、鋳型強度を測定した結果、積層ピッチ 0.1mm の鋳型材料を用いた場合の鋳型強度が 2.0MPa 以上となった。この造型最適条件により目標値 2.0MPa を達成した。

3D 積層造形装置が砂回収作業により 20 分間停止し、その間に積層造形用砂に塗布されたバインダーが乾燥し積層の境目が発生する問題に対して、バインダーの調査、試作バインダーの製作を行った。結果、バインダーの試作は行えたが、積層の境目は発生した。バインダーの開発は引続き補完研究で行い、積層の境目が発生しない成分の条件を求める。

2-2 熱伝導に優れた積層造形用材料の開発と評価

2-2-1 概要

砂型材料に熱伝導が異なる複数の粉末を添加することにより熱伝導率の向上を図る。

2-2-2 目的と目標

熱伝導率：従来（珪砂 0.3W/mK）→ 開発品 0.45W/mK（1.5 倍）
（公害問題から近年使用が控えられているクロマイトサンドと同等の熱伝導率を目指す）

2-2-3 研究内容及び成果

平成 26 年度は、熱伝導に優れた積層造形用材料の開発において、①-1 で開発した砂型強度に優れた骨材に添加複合剤を加えて砂型を造型する。その後、砂型試験片の熱伝導率を測定し、熱伝導率 0.45W/mK 以上となる条件を調べた。

平成 27 年度は、は、①-1 で開発した砂型強度に優れた骨材にアルミナ・黒鉛等の添

加複合剤を加え砂型材料を作製する。それぞれの砂型材料の熱伝導率を測定し、熱伝導が向上する配合量を調べた。

具体的には、下記のとおりである。

A) 砂の熱伝導率を向上させる添加複合剤の検討

①-1 で開発した砂型強度に優れた骨材アルミナに熱伝導率を向上させるために添加する複合剤を調べた結果、熱伝導率 70W/mK の炭化ケイ素 (SiC) と熱伝導率 95~100W/mK の黒鉛粉を用いて試験を行うこととした。

B) 添加複合剤を加えた砂型材料の作製

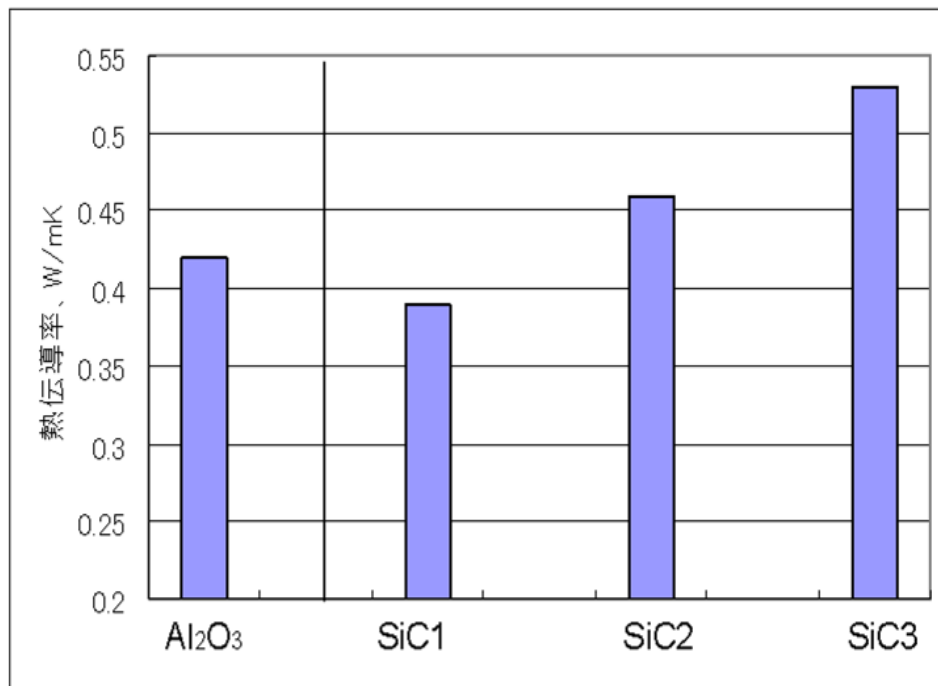
熱伝導率の異なる 2 種類の炭化ケイ素 (SiC) にアルミナセメントと炭酸リチウムを加えて 10 分間攪拌した砂型用粉体原材料を用いて、3D 積層造形装置を用いて造型積層ピッチ条件を 0.1mm して砂型材料を作製した。なお、実験では SiC50 と SiC100 の材料をそれぞれ 100:0、50:50、0:100 に混合した材料を用いた。

また、黒鉛粉（鱗状黒鉛、人造黒鉛）にアルミナセメントと炭酸リチウムを加えて 10 分間攪拌した砂型用粉体材料を用いて、3D 積層造形装置を用いて砂型材料を作製した。

C) 砂型の熱伝導率の測定

京都電子工業社製迅速熱伝導率計 <QTM-500> (平成 26 年度導入機械設備)を用いて砂型材料の熱伝導率を測定した。

図 2-22 に作成した砂型の熱伝導率の結果を示す。①-1 で開発したアルミナ砂型の熱伝導率は、0.42W/mK であった。SiC50 に対して熱伝導率の高い SiC100 の添加割合を増加させた砂型を用いると、砂型材料の熱伝導率は増加した。SiC100 にアルミナセメントを混合した添加複合砂型材料の熱伝導率は 0.52 W/mK となった。



Al₂O₃: アルミナ(65%)+アルミナセメント(35%)

SiC1: SiC50(65%)+アルミナセメント(35%)

SiC2: SiC50(32.5%)+ SiC100(32.5%) +アルミナセメント(35%)

SiC3: SiC100(65%)+アルミナセメント(35%)

図 2-22 作成した砂型材料の熱伝導率

図 2-23 に作製した砂型の熱伝導率の結果を示す。①-1 で開発したアルミナ砂型の熱伝導率は、0.42W/mK であった。SiC の熱伝導率は 0.52 W/mK となった。熱伝導率の大きい黒鉛粉を用いると鱗状黒鉛では、0.54 W/mK、人造黒鉛では、0.57 W/mK とさらに大きくなった。

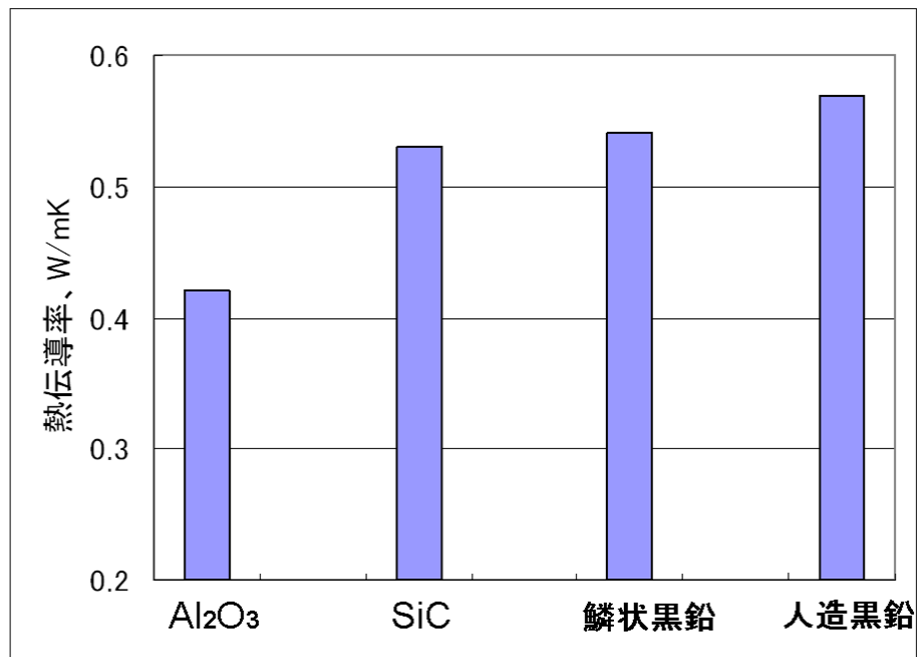


図 2-23 作成した砂型材料の熱伝導率

2-2-4 研究成果のまとめと今後の取組

①-1 で開発したアルミナ砂型に熱伝導性の優れた炭化ケイ素 (SiC) または黒鉛粉を複合添加し、3D 積層造形装置を用いて作製した砂型材料の熱伝導率は、0.52～0.57W/mK となった。この添加複合剤を用いた造型最適条件により、H27 年度目標値 0.45W/mK を達成した。

下記の特許を取得した。

特許「積層造形用材料、粉体固着積層法による鋳型の製造方法及び鋳型」
(特願 2014-256377)

また、下記の特許を申請した。

特許「中子、冷し金、積層造形用材料及び鋳型の製造方法」(特願 2016-014511)

第3章 砂型の大型化技術の開発

(株)鷹取製作所	代表取締役	社長	藤山幸二郎
(株)鷹取製作所	技術設計課	課長	矢野孝文
(株)鷹取製作所	技術設計課		八谷朋彦
鷹取鑄造(株)	工場長		森和幸
ホーク工業(株)	副工場長		佐藤光和

本研究開発では大物鑄物用の砂型を、限られた造形サイズの 3D 積層造形装置で製造するための「砂型分割方法」、崩壊なくそれら砂型を組合わせるための「砂型連結方法」を確立し、船舶用銅合金大型鑄物製品（本研究では、大型バルブ）用砂型（MAX L=1300mm）の積層造型条件の最適化を図る。

3-1 中子・主型の一体化技術の開発

3-1-1 概要

中子を上型もしくは下型に連結させた一体の砂型を作製する。

3-1-2 目的と目標

中子を連結させ一体化した砂型を用いることで、中子と上型及び下型との隙間に発生する鑄バリの抑制を図る。図 3-1 に鑄バリが発生の状態を示す。

【最終目標値】

鑄バリ: 従来 2mm → 開発品 0.5mm 以下



鑄バリ

図 3-1 鑄バリ

3-1-3 研究内容及び成果

○平成 25 年度

平成 25 年度は、石膏材を用いた中子・主型の一体化技術の検討を実施した。3D 積層造形装置の特徴を活かし、中子を下型に連結させた一体の砂型を分割して作製した（図 3-2）。3D 積層造形装置の造形材として一般的に用いられている石膏材を用いて、L=400 mm の砂型を作製し、中子と主型との分割位置について検討を行った。

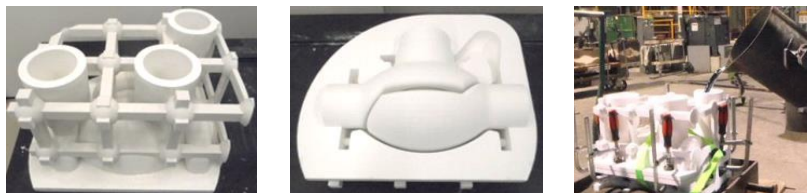


図 3-2 石膏砂型の上型, 下型+中子と鑄込み

○平成 26 年度

平成 26 年度は、中子を下型に連結させた一体の L=400mm 砂型を作製した。その結果、一体化した砂型を用いることで、中子と上型及び下型の隙間に生じる鑄バりを無くして、

鑄仕上げ時間を短縮できる中子・主型の一体化技術の見通しがついた。しかし、3D 積層造形装置で作製した一体化砂型は中子と主型の隙間が狭く、砂型材料の除去に 5 時間以上を要した。また全ての砂を排除できず残っていた砂が抵抗となり、砂型内部の圧力が上昇、上型と下型の接合部から外部へ銅合金が漏れた(図 3-3)。



図 3-3 試作 1 回目の砂型

岩手大学が開発した砂型材料と 3D 積層造形装置純正バインダーでは、造型高さ 33mm 毎に作動する砂回収でバインダーが自硬化し、積層の境が発生した。3D 積層造形装置で造型可能な $H=229\text{ mm}$ までの砂型は造形不可能と判断した。暫定的な措置として、確実に造型できる造型高さ $H=60\text{ mm}$ に変更し、上型:7 分割、下型:7 分割、中子:7 分割で $L=400\text{ mm}$ の砂型の作製及び銅合金の鑄込みを実施した。しかし、砂型の合わせ面に平坦な面を造形する事が出来なく、鑄バリが発生し形状不完全な玉形弁となった(図 3-4)。



図 3-4 砂型と鑄込み、鑄物

○平成 27 年度

平成 27 年度は、主型と中子を分離させ、主型は平面度の影響が少ない水平分割とした。中子は $L=300\text{ mm}$ 同様に中子用の型を 3D 積層造形装置で造形し、鑄物砂の中子を作製した。鑄物砂の中子を用いることで、 $L=400\text{ mm}$ の鑄込みは成功となった(図 3-5)。



図 3-5 $L=400\text{ mm}$ の砂型と鑄込み



図 3-6 鑄バリ、ザグリ、鑄抜き穴

図 3-6 に示すように、砂型の結合部分に鑄バリが発生しており、大きさは 0.5 mm ～ 10 mm であった。目標達成とはならなかったが、鑄バリは仕上げ作業で処理できるため大きな欠点にならないと判断した。フランジ加工は加工代の低減により従来の加工時間 40 分

から 5 分間短縮となった。目標値の 20 分以下は達成できなかった。また鑄抜き穴は、砂の除去作業により砂が削れ、きれいな円形にならず、鑄抜き穴の効果は少ないと判断した。

3-1-4 研究成果のまとめと今後の取組

中子・主型の一体化技術の研究開発を行った。現在の 3D 積層造形装置で中子と主型の一体化を行うと、砂の除去が困難になり鑄込み不良になる。そのため、主型と中子は分離した砂型へ設計変更した。鑄バリは積層の境目や分割面で 0.5~10mm ほど発生しており、目標達成とはならなかったが仕上げ作業で除去できるため、大きな問題とはならない。砂型の補修作業により鑄バリは低減できると推察される。最後に、鑄抜き穴は砂の除去作業等において、形状が変形し、きれいな円形にならなかった。そのため鑄抜き穴の効果は少ないと考えられる。今後は、実用化にあたり鑄抜き穴は設けず、鑄バリが発生しないように砂型の補修作業を行う。

3-2 砂型分割・接合技術の開発

3-2-1 概要

砂型分割方法と砂型連結方法を検討し、外形サイズ L=1300 mm の砂型が作製できる条件を確立する。

3-2-2 目的と目標

- ・砂型分割方法と砂型連結方法を用いて、外形サイズ L=1300 mm の砂型を作製する
- ・外形サイズ L=1300 mm 用砂型の設計後から造形完了までの製作目標日数
従来: 65 日間(木型製作を含む) 目標: 15 日間

3-2-3 研究内容及び成果

○平成 25 年度

平成 25 年度は、石膏材を用いた L=800 mm の砂型分割・接合技術の検討を実施し、砂型分割・接合技術を確立した。砂型の分割位置及び方法、さらに砂型同士の接合方法を 3D 積層造形装置に一般的に用いられている石膏材を用いて検討した。その後、10 分割した石膏材の砂型を組継ぎ及びほぞ継ぎの組み合わせで接合し、低融点合金を鑄込むことに成功した。



図 3-7 L=800mm の主型と中子の 3DCAD 図と石膏砂型(下型、中子)

○平成 26 年度

平成 26 年度は、岩手大学が開発した砂型材料を用いた L=800 mm の砂型を作製した。分割位置及び方法、砂型同士の接合方法を検討し、これらを組み込んだ 3DCAD データを作

成、3D 積層造形装置で砂型を作製した。しかし 3D 積層造形装置の技術課題により、暫定処置として造型高さ H=60mm に条件変更して、L=800mm の砂型の製作が終了した。継続して平成 27 年度で鋳込みを行った。

○平成 27 年度

平成 27 年度は、平成 26 年度に生じた 3D 積層造形装置の技術課題を解決するため、

- ・砂回収ラインの停止
- ・ヒータースイッチの追加
- ・バインダータンクの増設

の改造を行った(図 3-8)。

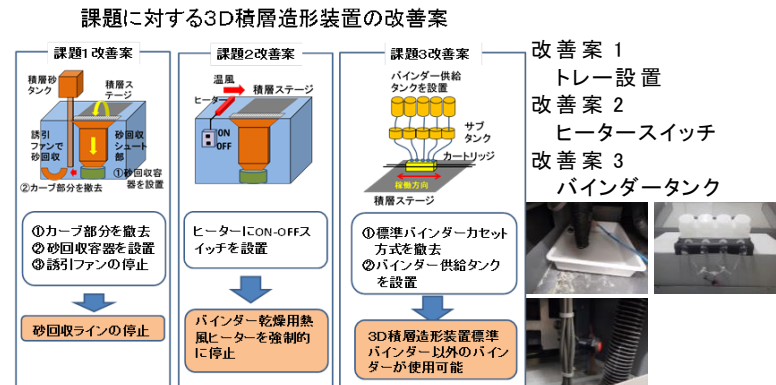


図 3-8 3D 積層造形装置の改造

・L=800mm

平成 26 年度の目標である L=800 mm の砂型組立、鋳込みを実施した。砂型の形状は、L=800 mm を確実に造型できる造型サイズ H=約 60mm とし、図 3-9 に示すように平面度の影響が少ない水平分割に設計変更し、砂型を造形、組立を行った。鋳込み時にガスの発生を確認し、型バラシ後の L=800mm には穴が空いていた。この部分は中子の一部が分離し、主型に接触したと考えられる。解決策として、中子用の型を造形し、鋳物砂の中子を製作する。積層の境目や 33mm ごとの境目がないため、型が分離する可能性は低いと考えられる。この対策を L=300mm で実施した。



図 3-9 L=800mm の CAD 図と砂型と鋳込み

・L=300mm

次に L=300mm の砂型造形、鋳込みを行った。L=800mm と同様、平面度の影響が少ない水平分割とし砂型の高さ H=約 60mm とした。砂型に溶湯が満たされたが、湯口・押湯からガスが吹き出した。上型部分に穴が空き、ガス発生による不良となった(図 3-10)。



図 3-10 砂型と鋳込みの様子

鋳物不良の結果から、主型を乾燥させ、中子用の型を造形した。この方法により鋳物砂の中子を作製、砂型内の水分量を減らし、積層の境目のない中子ができた。主型の乾燥については、陶芸用窯で焼結し鋳込みを行った。穏やかに注湯が完了し、ガス欠陥等はなく鋳込みは成功した。L=300mm は水圧検査でも水漏れはなく製品として完成した。

L=300mm は外部推進委員である榑木村鉄工所殿に出荷され船舶の海水系統に設置された。設置から約 6 ヶ月後の L=300mm には緑青が見られるが、これは配管から転移したものであり、L=300mm は正常に機能している。



図 3-11 機械加工後から完成までの L=300mm

・ L=1300mm

最終目標である L=1300mm の砂型造形、鋳込みを行った。主型は L=800mm、400mm 同様に水平分割とし、砂型をボルトで固定する方法とした。また中子は L=300mm、400mm と同様に中子用の型を造形し、鋳物砂を使用した中子を製作した。鋳込みはガスの発生など大きな問題はなく、順調に進み成功した。また鋳バリは 0.5mm～30mm ほどであったが、多くが 8mm 以下であった(図 3-12)。

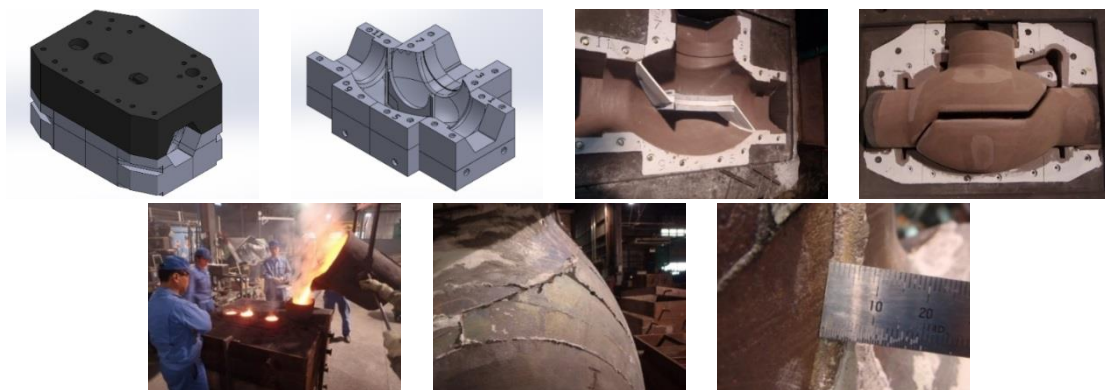


図 3-12 中子用の型と主型、鋳込みと型バラシ

目標の加工時間は 45 分であったが、L=1300mm は 80 分であった。従来品と比較して 10 分の短縮となった。また製作日数の目標は 30 日であったが 63 日の結果となった。3D 積層造形装置の造形時間に多くの時間を要した。



図 3-13 仕上げ後(左)と機械加工後(中央、右)

3-2-4 研究成果のまとめと今後の取組

砂型分割・接合技術の開発を行った。組み継ぎ・ほぞ継ぎの砂型を設計・造形したが、積層の境目から分離する問題が生じた。そこで造形高さを約 60mm に制限、平面度の影響が少ない水平分割に変更し、各砂型はボルト固定とした。また積層造形用砂は鋳物砂よりも多くの水分を含み、鋳込み時のガス発生が問題となっていた。そこで主型は乾燥さ

せ、中子用の型を造形し、鋳物砂を用いた中子を作製した。その結果、L=1300mm の鋳込みは成功、水圧検査も合格できる鋳物ができた。L=1300mm の砂型造形日数は、3D 積層造形装置の造形サイズや造形時間の問題から、目標の 3.5 倍の 52 日を要した。この技術は木型がない製品に対して有効であるが、L=400mm のサイズが限界であると考えられる。

第 2 章 2-1-4 で述べたように、バインダーの開発は引続き補完研究で行い、積層の境目が発生しない成分の条件を求める。また今後は、開発したバインダーを用いて砂型造形を行い、分割数が少ない L=400mm 以下の製品の実用化をしていく。

下記の特許を取得した。

特許「鋳型及び鋳型の製造方法」(特願 2014-256376)

また、下記の特許 4 件を申請した。

特許「鋳型の製造方法、中子の製造及び中子製造」(特願 2016-014396)

特許「鋳型及び鋳型の製造方法」(特願 2016-009883)

特許「鋳型及び鋳型の製造方法」(特願 2016-007882)

特許「積層造形用材料、粉末固着積層法による鋳型の製造方法及び鋳型」
(特願 2016-014514)

第4章 凝固の最適化技術の開発

(株)鷹取製作所
(株)鷹取製作所
鷹取 casting (株)

代表取締役
技術設計課
工場長

社長
課長

藤山幸二郎
矢野孝文
森和幸

本研究開発では、肉厚変動部や隅角部にひけ巣が発生しないように、ブロック方式冷却砂型による最適な冷却方法を確立し、鑄造技術の高度化を図る。

4-1 ブロック方式冷却砂型の設計

4-1-1 概要

ブロック方式冷却砂型の設計技術を確立する。「①-2 熱伝導に優れた積層造形用材料の開発と評価」で開発した積層造形用高性能砂型材料を用いて、3D 積層造形装置でブロック方式冷却砂型を作製した(図 4-1)。凝固の最適な製品形状に沿ったブロック方式冷却砂型を決定する。

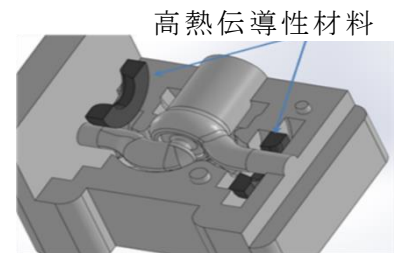


図 4-1 ブロック方式冷却

4-1-2 目的と目標

【最終目標値(平成 26 年度目標値)】

凝固の最適化や指向性凝固を目的として、それに適したブロック方式冷却砂型を設計する
目標:ブロック方式冷却砂型形状(厚み、長さ等)と凝固時の温度との相関関係を把握して、凝固をコントロールする(※指向性凝固を実現する)

4-1-3 研究内容及び成果

平成 26 年度は、ブロック方式冷却砂型の設計技術を確立した。玉形弁用弁箱において、鑄造欠陥(引け巣)発生が多い弁座部にブロック方式冷却砂型を配置した。弁座部は鑄物肉厚であり、鑄造後の温度降下が遅い。弁座部以外の温度降下をほぼ一致させる為、積極的に冷却する事が重要である。形状は弁座部の配置位置に合わせ、弁座の形状に沿わせた。また厚みを増すことで冷却能力が向上することが判明した。

形状は弁座部の配置位置に合わせ、弁座の形状に沿わせた。また厚みを増すことで冷却能力が向上することが判明した。鑄造シミュレーションで上部・中部・下部にブロック方式冷却砂型を配置して、解析を行った。その結果、上部へ配置する事が凝固の指向性を持たせ、欠陥の少ない形状であることが確認できた。

4-1-4 研究成果のまとめと今後の取組

鑄造シミュレーションを活用することで、ブロック方式冷却砂型と複数の位置に配置し検討を行った。玉形弁の弁座部上部に配置することで凝固をコントロールし指向性凝固を持たせ、欠陥の少ない鑄物となることを確認した。

4-2 鋳造シミュレーションによる凝固の健全性評価

4-2-1 概要

船舶用銅合金バルブ用砂型による凝固の最適化のため、鋳造シミュレーションを実施し、船舶用銅合金バルブ (L=1300 mm) を作製する場合の鋳造方案を決定した。(図 4-2)

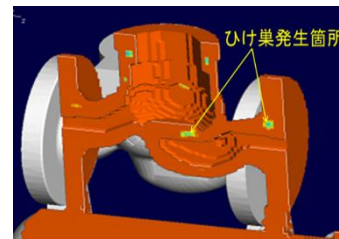


図 4-2 鋳造シミュレーション

4-2-2 目的と目標

【最終目標値(平成 26 年度目標値)】

評価試験砂型の試作結果と鋳造シミュレーションの分析結果を比較・評価して、ひけ巣欠陥がない鋳造方案を定める。

目標:ひけ巣欠陥ゼロ(鋳造シミュレーション)

4-2-3 研究内容及び成果

ブロック方式冷却砂型の形状設計において、L=400mm 砂型にブロック方式冷却砂型の配置を検討した。L=400 mm 砂型で鋳造凝固シミュレーションを実施した結果、玉形弁弁座部の上部に配置することが欠陥の少ない鋳物となる事が確認された。ブロック方式冷却砂型を造形し、弁座部の上部に配置した。ブロック方式冷却砂型は、②-2「熱伝導に優れた積層造形用材料の開発と評価」で、岩手大学が開発した熱伝導に優れた積層造形用材料を使用した。鋳込み後、ブロック方式冷却砂型を配置した玉形弁の弁座部について、マイクروسコープで計測する事が難しかった為、目視にて凝固とひけ巣の状態を確認した。特に有害なひけ巣は見受けられず、弁座部の鋳物の色が若干白くなっていた(図 4-3)。



図 4-3 鋳込みの様子(左)と鋳込み後の弁座部分(右)

ブロック方式冷却砂型を配置した船舶用銅合金バルブ (L=1300 mm) を作製する場合の鋳造方案を決定し、目標を達成した。平成 27 年度は、この方案を反映し L=1300 mm の砂型を作製し、船舶用銅合金バルブを完成した。

4-2-4 研究成果のまとめと今後の取組

ひけ巣欠陥ゼロの鋳造シミュレーション結果を元に、ブロック方式冷却砂型を配置した船舶用銅合金バルブ L=1300mm の作製する場合の鋳造方案を決定した。この方案を反映させた L=1300mm の砂型を作製し、船舶用銅合金バルブは完成した。

第 5 章 船舶用銅合金バルブの試作と評価

(株)鷹取製作所	代表取締役	社長	藤山幸二郎
(株)鷹取製作所	技術設計課	課長	矢野孝文
(株)鷹取製作所	技術設計課		八谷朋彦
鷹取 casting (株)	工場長		森和幸
ホーク工業 (株)	副工場長		佐藤光和

5 船舶用銅合金バルブ試作と評価

5-1 概要

本研究開発では、新開発の砂型粉体材料を用いて最適化された 3D 積層造形鑄造法により、砂型作製・鑄造を実施して船舶用銅合金バルブ(玉形弁 300A、図 5-1)を低コスト・短納期で製造する技術の高度化を図る。

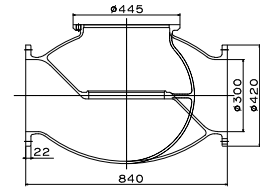


図 5-1 玉形弁 300A

5-2 目的と目標

【最終目標値(平成 27 年度目標値)】

・加工時間		
従来 60 時間	→	開発品 30 時間(50%削減)
・納期		
従来 90 日	→	開発品 30 日(納期 1/3)
・鑄物表面粗さ		
従来 Ra25	→	開発品 Ra12.5 (滑らかさ 2 倍)

平成 26 年度に岩手大学が開発した積層造形用砂型材料とブロック方式冷却砂型材料を用いて、L=1300mm のバルブの試作と評価を実施する。

5-3 研究内容及び成果

A) 3D 積層造形装置を用いて、砂型を設計試作

主型は水平分割とし、下型のみ 3D 積層造形装置で造形し、上型は木型を用いた鑄物砂とした。砂の違いによる表面粗さの比較のためである。中子は L=300mm、400mm の成果から 3D 積層造形装置で中子用の型を造形し、鑄物砂の中子を作製した。L=1300mm の場合、中子が大型のためケレンを用いて中子を支えた。また L=1300mm ではブロック方式冷却砂型を用いるため、鑄造シミュレーションソフト MAGMA(平成 26 年度導入機械設備)を用いた。解析から、凝固温度や新山係数を用いてブロック方式冷却砂型の効果を確認し、ブロック方式冷却砂型の形状を決定、3D 積層造形装置で造形した。

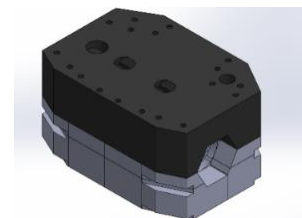


図 5-2 砂型の CAD 図

B) 積層造形法で作製した砂型に銅合金を鋳込む

L=1300mm の砂型を 3D 積層造形装置で造形を行った。砂型を組み合わせ、銅合金の鋳込みを実施した。砂型に溶湯が満たされ、湯口・押湯からのガス発生等は確認できなかった。鋳物に穴等はなく、鋳込みは成功した。



図 5-3 L=1300mm の造形作業と鋳込みの様子

C) 表面粗さを測定する

L=1300mm の表面粗さを測定した。上型(鋳物砂)の表面粗さは Ra15.16、下型(積層造形砂)の表面粗さは Ra12.18 であった。目標値 Ra12.5 を達成した。



図 5-4 表面粗さの測定

D) 鋳物健全性を確かめるため、機械加工後、水圧検査を行う

機械加工後の L=1300mm と水圧検査の様子を図 5-5 に示す。水圧検査で水漏れはなく合格した。



図 5-5 仕上げ後(左)、機械加工後(中央)と水圧試験の様子(右)

E) 仕上げ加工・機械加工時間に関する評価、従来の製造法との比較

製作日数は 3D 積層造形装置の造形サイズの制限や造形速度の問題から 63 日となり、目標の 3.5 倍の時間を要した。一方、仕上げと機械加工時間は 25 時間となり目標を達成した。当初の予測よりも早く作業が終了したと考えられる。納期は目標の約 2 倍の日数となったが、従来品と比較すると約 1/3 ほど短縮した。

5-4 研究成果のまとめと今後の取組

L=1300mm の砂型を作製し鋳込み後の評価を行った。平成 26 年度の研究成果より、砂型は平面分割を行いボルト締結で砂型のズレを抑える等、対策を行った。その結果、鋳込みは成功し、水圧検査も合格した。目標である表面粗さの滑らかさ 2 倍、加工時間短縮は達成できたが、納期は従来品の約 2/3 であった。砂型が大型のため、造形時間が非常に長くなるためである。

今後は、補完研究で要素技術であるバインダーの開発を進めながら、小形バルブである L=400mm 以下の試作を行い、実用化を目指す。また L=400mm 以下の実用化に向け

て、L=1300mm で判明した技術課題の解決策をフィードバックし、砂型の最適化を進める。小形バルブ L=400mm 以下の実用化が完了した後、L=1300mm の試作を行い、大形バルブの実用化を目指す。

第6章 全体統括

(株)鷹取製作所	代表取締役	社長	藤山幸二郎
(株)鷹取製作所	技術設計課	課長	矢野孝文
(株)鷹取製作所	技術設計課		八谷朋彦

6－1 主な成果

従来の砂型鑄造法では、「木型・金型が必要」「寸法精度が低い」「抜き勾配がある」ことが問題となり低コスト化、短納期化ができなかった。そのため、本事業では多種少量生産の船舶用銅合金大型鑄物製品を安価に短納期で製造するため、木型・金型を用いない 3D 積層造形砂型鑄造法に独自の「砂型用粉体技術」「砂型の大型化技術」「凝固の最適化技術」を組み合わせた高精度で大型の 3D 積層造形砂型鑄造法を新規に開発することを目的として取り組んだ。

その結果、凝固の最適化で欠陥を無くし、鑄物形状の高精度化で加工時間を低減し、造船関連事業者の「低コスト」「短納期」「木型・金型レス」のニーズに応える供給体制を確立した。

しかし、技術課題として 3D 積層造形砂型鑄造法を試作開発した結果、3つの問題が判明した。本研究開発における高度化目標、技術的目標値及び研究開発成果を併せ、以下に示す。

表 6-1 試作開発の問題とそれに対する本研究開発の目標、成果及び達成度

試作開発で判明した問題	高度化目標	技術的目標値	研究開発成果	達成度
鑄肌が粗い 表面粗さ Ra25	砂型用粉体技術の開発	高精度 表面粗さ Ra12.5	表面粗さ Ra12.18	100%
大型鑄物に対応できない L=200 mm	砂型の大型化技術の開発	砂型外形寸法 L=1300mm	L=1300mm 鑄込み完了	80%
凝固欠陥が発生する	凝固の最適化技術の開発	凝固欠陥を無くす	L=1300mm 水圧試験合格	90%

6－2 研究開発後の事業化展開

研究開発成果の事業化展開にあたり、船舶用青銅製バルブ及び船舶用部品等で想定される小ロット(1 個)受注のコスト比較を行った。本技術の事業化にあたり、コスト面で純正バインダーは、従来品よりコスト高である。しかし、開発バインダーであれば L=400mm 以下で事業を展開できると考えられるが、現状の開発バインダーは積層の境目が発生する。よって、この問題とコスト低減を補完研究において解決する。補完研究では、バインダー開発を実施し、砂型強度はそのままにバインダーの価格を純正バインダーの約 1/30 まで下げる調合方法を調べる。それにより、従来品より安価に小ロット(1 個)受注に対応できる。今後は、補完研究で要素技術であるバインダーの開発と共に、小形バルブ L=400mm 以

下の製品販売による事業展開を進める。小形バルブ L=400mm 以下の試作を行い、市場での評価を数多く受け、技術課題を砂型設計にフィードバックして製品販売を実現する。さらに小形バルブ L=400mm 以下の事業展開後、補完研究でのバインダーの開発による価格低減を進める。小形バルブの事業展開で得られた改善策を大形バルブ L=1300mm の実用化にフィードバックし、大形バルブ L=1300mm の事業展開を目指す。

なお研究開発結果の PR は、本社内にショールーム設置、業界団体へ成果発表及び展示会等への出展を行い、販売促進することで事業化展開する。

戦略的基盤技術高度化支援事業
「木型・金型を用いない高精度砂型鑄造法による、船舶用銅合金大型鑄物
製品の低コスト・短納期・無欠陥を目指した生産技術の開発」

研究開発等成果報告書

平成 28 年 3 月

委託者 九州経済産業局
〒812-8546 福岡市博多区博多駅東 2 丁目 1 1 番 1 号

委託先 公益財団法人飯塚研究開発機構
〒820-8517 福岡県飯塚市川津 6 8 0 番地 4 1
TEL 0948-21-1156 FAX 0948-21-2150

この報告書には、委託業務の成果として、産業財産権等の対象となる技術情報（未出願又は未公開の産業財産権等又は未公開論文）、ノウハウ等の秘匿情報が含まれているので、通例の取扱において非公開とする。ただし、行政機関の保有する情報の公開に関する法律（平成 11 年法律第 42 号）に基づく情報開示請求の対象の文書となります。



この印刷物は、印刷用の紙へ
リサイクルできます。