平成23年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「ラピッドプロトタイピングによる精密鋳造用鋳型及び中子の迅速造型技術 の開発」

研究開発成果等報告書

平成24年 3月

- 委託者 中国経済産業局
- 委託先 社団法人日本鋳造協会

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
- 第2章 本論
- 最終章 全体総括

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

精密鋳造業界では、現在川下産業からの開発リードタイム短縮要求に応えるために

- ・鋳物設計段階から電子情報を交換し、コンカレントエンジニアリングを行う。
- ・3次元CAD/CAMを用いて金型設計・製作の期間を短縮する。

・試作に先立ち、鋳造シミュレーションにより鋳造方案の絞り込みを行う。

などの方策を駆使して、新規品リードタイムの短縮に努めている。

また光造型(SLA)技術あるいは粉末焼結積層造型(LS)技術を用いて短時間にプラ スチックモデルを迅速作成し、これらをワックス模型の替わりに消失模型として用い、この 後は従来の造型作業工程にて鋳型を製作し、金型製作せずにサンプル鋳物を製作している。 しかし、この方式でも造型作業を含めると2週間以上のリードタイムが必要となり、また複 雑・薄肉のセラミック中子を必要とする鋳物には適用できず、これら高度に複雑な鋳物の リードタイムの抜本的な短縮には直接貢献できていない。

本研究は、粉末焼結積層造型(LS)技術を用い、耐火物粉末材料を直接焼結でき る装置を開発する。また、これと並行して、耐火物粉末材料の開発を行い、LS技 術で焼結しやすく同時に精密鋳造用中子及び鋳型に適用できる材料を開発する。こ の開発した技術を基礎として精密鋳造用中子の製造技術を確立し、続いて精密鋳造 鋳型と中子を一体で造型出来る技術を確立する。

これら開発された中子・鋳型一体造型された鋳型を用いて精密鋳造試作品を作成し、 迅速サンプルとして評価可能となる条件を確立する。これにより精密鋳造新規品開 発リードタイムの抜本的短縮を実現する。

開発テーマ	目標値
 R P 装置の開 	造形品大きさ:鋳型外形寸法 300mmW×300mmL×500mmH を実現する設
発・改良	備の開発:実績 170mmW×250mmL×110mmH 鋳型
②耐火物粉末材	鋳型強度:MOR で仮焼結後 3MPa、二次焼結後 10MPa、高温(1000℃)で
料の開発	10MPa を得る材料を開発:実績二次焼結後 4.3Mpa
③造型試験	リードタイムの短縮:中子造型 24 時間以内:実績 6 時間(2 個)
	鋳物 48 時間以内:実績 24 時間(2 個)
④精密鋳造試験	鋳物表面粗さ:Ra6.3程度を確保:実績 Ra7.1

本研究開発期間で得られる最終目標値は下記のとおりである。

1-2 研究体制

- (1) 研究組織及び管理体制
- 1)研究組織(全体)



2) 管理体制

①事業管理機関

[社団法人日本鋳造協会]



2 (再委託先)

キングパーツ株式会社



妙中鉱業株式会社



株式会社アスペクト



伊藤忠セラテック株式会社



(2) 管理員及び研究員

【事業管理機関】 社団法人日本鋳造協会

管理員

	氏 名	所属・役職	<u>実施内容(番号)</u>
竹田	功	戦略的基盤技術開発室・グループリーダー	5
金井	香	戦略的基盤技術開発室・担当	5

【再委託先】 ※研究員のみ

キングパーツ株式会社

氏 名	所属・役職	<u>実施内容(番号)</u>
那須征雄	技術顧問	(1-1, (1-2))
		2 - 1
		3 - 1, $3 - 2$, $3 - 3$
		(4) - 1, $(4) - 2$, $(4) - 3$
滕井直樹	金型技術課課長	(1) - 1, $(1) - 2$
		3 - 1, $3 - 2$, $3 - 3$
一自账回		(4) - 1, $(4) - 2$, $(4) - 3$
二品版则) 功但 武 武 大 大 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、	(1 - 1, (1 - 2))
		3 - 1 $3 - 2$ $3 - 3$
		4 - 1 $4 - 2$ $4 - 3$
山手直樹	金型技術課係長	(1) - 1, $(1) - 2$
		2 - 1
		3 - 1, $3 - 2$, $3 - 3$
		(4) - 1, $(4) - 2$, $(4) - 3$
吉田 覚	鋳造課主任	3 - 1, $3 - 2$, $3 - 3$
		(4-1), (4-2), (4-3)
藤田 勝	鋳造課主任	3-1, $3-2$, $3-3$
		(4) - 1, $(4) - 2$, $(4) - 3$
竹内由子	铸造課担当	(1) - 1, $(1) - 2$
		(2) - 1
		(3) - 1, $(3) - 2$, $(3) - 3$
		(4) - 1, $(4) - 2$, $(4) - 3$

妙中鉱業株式会社

		氏	名	所属・役職	実施内容(番号)
岩瀬	稔			精密铸造製造部部長	$ \begin{array}{c} (1)-1, (1)-2, (2)-1 \\ (3)-1, (3)-2, (3)-2 \\ (4)-1, (4)-2, (4)-3 \end{array} $
佐藤	豊			技術課課長	$\begin{array}{c} (1) - 1 \\ (1) - 2 \\ (2) - 1 \\ (3) - 2 \\ (3) - 2 \\ (3) - 2 \\ (3) - 2 \\ (4) - 1 \\ (4) - 2 \\ (4) - 3 \end{array}$
小高	正博	Ì		品質管理課 主任	(4) - 1, $(4) - 2$, $(4) - 3$
井頭	誠			技術課	$\begin{array}{c} (1) - 1 \\ (1) - 2 \\ (2) - 1 \\ (3) - 2 \\ (3) - 2 \\ (3) - 2 \\ (3) - 2 \\ (4) - 1 \\ (4) - 2 \\ (4) - 3 \end{array}$
斎藤	洋	輔		技術課	(4) - 1, $(4) - 2$, $(4) - 3$

株式会社アスペクト

氏 名	所属・役職	実施内容(番号)
早野 誠治	代表取締役	
萩原 正	取締役LS事業部部長	(1) - 1, $(1) - 2(3) - 1$
関 信吾	L S事業部RDチーム チームリーダー	(1) - 1, $(1) - 2(3) - 1$
須甲 信一	MB事業部富士技術センター センター長	
堀場 欣紀	L S 事業部 R D チーム サブリーダー	(1) - 1, $(1) - 2$
佐々 雅祥	L S 事業部RDチーム サブリーダー	(1) - 2
井口 晋太郎	MB事業部富士技術センター チーフ	(1) - 2 (3) - 1

伊藤忠セラテック株式会社

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
江副 正信	技術部	2-1
牧野浩	技術部 CB技術開発課長	②-1
青山 令久	技術部	②-1
松原 眞	技術部 担当課長	2-1
島崎 英司	技術部	②-1

- (3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名
 - (事業管理機関)

社団法人日本鋳造協会

(経理担当者)	戦略的基盤技術開発室	担当	金井	香
(業務管理者)	戦略的基盤技術開発室	グループリーダー	竹田	功

(再委託先)

音七フロノ	
キングパーツ株式会社	

(経理担当者)	総務部	部長	田中 稔久	
(業務管理者)	製造部	部長	長谷川 宏	_

妙中鉱業株式会社

(経理担当者)	総務部総務調	₹ 課長	片岡	秋夫
(業務管理者)	精密铸造部	常務取締役	妙中	希見男

株式会社アスペクト

(経理担当者)	経理担当取締役	早野	予慎结	渼
(業務管理者)	取締役LS事業部	脹	萩原	Æ

伊藤忠セラテック株式会社

(経理担当者)	瀬戸経営管理課 課長代理	青山 尚典
(業務管理者)	取締役 瀬戸事業本部長	中本 公人

(4) 他からの指導・協力者

氏名	所属・役職	備考
本多 弘	株式会社 IHI キャスティングス 取締役 技術部長	 ・中子及び鋳型の製造技術 ・耐火物粉末材料焼結技術
筑後 一義	株式会社 IHI 技術開発本部 基盤技術研究所 材料研究部 主查	・中子及び鋳型の製造技術
新野 俊樹	東京大学生産技術研究所 准教授	応用電気機械システム工学 ・粉末焼結積層技術の応用 ・粉末焼結積層技術の高度化

1-3成果概要

① ラピッド・プロトタイピング (RP) 装置の開発・改良

①-1 400002レーザー及び搭載耐荷重改良設計(設変)

レーザー出力を既存設備の30Wから400W へ換装した後の稼働中にレンズやミラーが過熱により焼損する問題が発生した。これに対する改善項目として;

- 1) 光学系全てに粉塵対策のカバーを設置
- 2) レーザー光軸のアライメントの再確認・修正
- 3) レーザー光幅を一定の大きさに規制し、レンズの外側にレーザーが洩れるのを防止
- 4) レーザー・ウインドウを軽量化し、メインテナンスを容易化

以上の対策を施した結果、400Wフルパワーでの連続稼動が可能になった。

①-2. 造型温度とレーザー出力の適正化

400WCO₂ レーザーでの適正化条件の確立として、溶融シリカ粉末とアルミナ粉末の混合粉末に おいて、焼結実験を行い、ペンダント形状と板形状のテストピースを造型した。

①-3. レーザー走査パターンの適正化

問題点を解決すべく、簡易的に、1層における複数回塗りつぶし機能のソフトウェアの改良を 行った。

①-4. ソフトウエアの改良

鋳物に要求されるあらゆる形状を形作るための造型機能を拡張するため以下のソフトウエアを開 発し追加導入した。

- 1) 多重輪郭描画機能
- 2) 多重塗りつぶし描画機能
- 3) 造形物固定用ベース板使用機能
- 4) 3次元オフセット機能

以上のソフトウエアの開発・導入により、中子及び鋳型の一体造型が可能となった。

一耐火物粉末材料の開発

②-1. 耐火物粉末材料の粒子形状および粒度分布測定

代表的耐火物粉末材料である、球状シリカFB-40S、シリカ系粒子FB-40R、シリカ粒子 S85-Pとアルミナ粒子AX-116の粒子形状と粒度分布が解かった。

2-2. 耐火物粉末材料の流動性の最適化

耐火物粉末材料の平均粒径は20µm以上で、安息角40°以下が最適の粉末材料となることが解かった。

②-3. 耐火物粉末材料の加熱処理

1200℃の低温でもアルミナ系粉末を25%の混合を行えば29%の残留率を示し、アルミナ系粉末の混合が焼結性の向上に有効であることが確認できた。

②-4. 適切な耐火物粉末材料の選定

主成分の溶融シリカ粒子について種々の材料を検討した結果、最適材料としてFB-4 OR を 選定した。またこれに配合して二次焼結後の強度を向上させるための配合剤として溶融アルミ ナ粒子 AX116 を選定した。

②-5. 耐火物粉末材料のハンドリング性向上のための有機バインダーの分析

ー次焼結条件設定段階で、無機耐火物の配合のみでは目標の一次焼結強度が得られないこ とが判明したため、有機バインダーを添加して一次焼結強度の向上を図った。この結果有機 バインダーの内、有機バインダーAが最適との結果が得られたので、レーザー照射後の耐火物粉 末材料のハンドリング向上となる有機バインダーAの分析で、化学分析の結果はCa0、Si02を主に 含有することが分かった。また、X線回折の結果は、特に同定は出来なかった。

③造型試験

③-1. テストピースによる一次焼結及び二次焼結条件の確立

溶融シリカ(FB-40R)、溶融アルミナ(AX-116)及び有機バインダーの組み合わせによる焼結 体の特性を把握し、造型条件を確立した。

③-2. 中子(比較的小物)の造型条件

上記で得られた造型条件で、長さ250mmのタービンブレード用中子を造型した。 またこの中子の特性を引き出すプロセス条件を設定することができた。

③-3. 一体鋳型(大物)の造型試験

中子造型条件と同一造型条件で中子と鋳型を一体化した鋳型を造型できた。実際に製作された鋳型対法は、170mmWx250mmLx110mmHであった。

④精密鋳造試験

④-1. 中子(比較的小物)の鋳造試験及び鋳物の品質評価

RP 中子をワックス成形して鋳包み、これを一般的な造型条件で造型した後、鋳造試験を行った。 しかし中子と接触する鋳物面の表面粗さは目標値より少し悪かった。

④-2. 鋳型(大物)の鋳造試験及び鋳物の評価

170mmW x 250mmL x 110mmH の単翼鋳型を2個取り鋳型に組み立てて 鋳造試験を行った結果、注湯に十分耐えられることが証明できた。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

社団法人 社団法人日本鋳造協会 戦略的基盤技術開発室 竹田 功 電話番号:03-3431-1375、FAX:03-3433-7498 E-mail:takeda@foundry.jp

第2章 本論

①ラピッドプロトタイピング(RP)装置の開発・改良

- ① -1. 400WCO₂レーザー及び搭載耐荷重改良設計(設変)
 - i.研究内容
 - i-1. 400WCO2レーザー及び搭載耐荷重改良設計および改造
 - i-1-1. プロジェクトにて目標仕様の確認と決定
 - i-1-2. 400WC02搭載レーザーの機種選定、及びこれを搭載する上での機構設計および改造
 - (ア) 光学系部品の配置検討および改造(レーザー変更に伴う折り返しミラーの位置変更、数量 追加等)
 - (イ) レーザー装置のサイズ変更によるレーザー搭載部のカバー形状設計変更および改造
 - (ウ) レーザー電源容量の違いによる電源、ブレーカ、リレー類の仕様変更もしくは回路変 更検討および改造
 - (エ) レーザー装置変更に伴い、レーザー冷却チラーの検討および変更
 - (オ) 冷却水流量計の見直しおよび変更
 - i-1-3. 現状プラスチック粉末仕様から耐火粉末材料仕様への駆動系の機構設計および改造
 - (ア) 造型部および材料供給部の駆動モータの検討および変更
 - (イ) 造型部および材料供給部スプリングダンパの検討および改造
 - (ウ) ブレークアウトステーション(BOS)の耐荷重増強検討および改造
 - (エ) カートリッジ運搬用リフタの見直しおよび変更
 - i-2. 400WCO2レーザー及び搭載耐荷重改良のための造型装置の改造
 - i-2-1. 400WCO₂レーザー及び耐荷重 350kg の設置・稼動
 - i-3. 光学系部品へのカバーの装着
 - i-4. アパーチャマスクの製作及び取付け
 - i-5. レーザーウィンドウの改良
 - ii.研究成果
 - ii−1. 400WCO₂レーザー及び搭載耐荷重改良設計(設計変更のみ)
 - ii-1-1. 400WCO2 レーザーの仕様および機種決定

レーザー波長の吸収率を調査した結果、セラミックに対しては遠赤外線の方が吸収が強いことが 分かった。従って、002レーザーを採用することとした。波長と吸収率の関係のグラフを図1示す。



図1. 電磁波波長と物質の放射率(=吸収率)の関係

00₂レーザーの選定は日本国内で入手可能かつアフターケアがしっかりしている、以下の2機種において比較検討した。

・米Coherent社製DIAMOND E-400(パルス発振レーザー)

・米Synrad社製Firestar 400(擬似CW発振)

CW レーザーは、樹脂材の連続切断/溶融/マーキング加工に適しており、パルス発振レーザーは、 穴あけ加工や、金属切断に適していると言われている。

従って、擬似CW発振のFirestar 400に決定した。

ii -1-2. 400WCO₂搭載レーザーの機種選定、及びこれを搭載する上での機構設計および改造
 (ア)光学系部品の配置検討(レーザー変更に伴う折り返しミラーの位置変更、数量追加等)
 下記図2が400WCO₂レーザー搭載ラピッドプロトタイピング(RP)装置である。
 図2の光学系部品部の機構設計および改造を行った。



図2. 400WC02 レーザー搭載RP装置の造型部と光学系部品部

従来の 30WCO₂ レーザーは、装置上部の手前に配置されていたが、新規 400WCO₂ はサイズが大きいため装置上部の後上部に設置することとした。



図3. レーザー変更後の配置



(イ) レーザー装置のサイズ変更によるレーザー搭載部のカバー形状変更

米 SYNRAD 社製 Co₂レーザー、Firestar - 400 を縦置きにすることにより、レーザーを設置す る従来のレーザーBox の高さよりもレーザーの高さ方向の方が高くなり、高さ方向に約 200mm 程度レーザーが装置の天板から出っ張る。安全を考慮して、別途専用のカバーを製作しレー ザーを覆うように取り付けた。



図5. 改造前の光学部カバー



図 6. 改造後の 400WC02 レーザーとカバー

(ウ) レーザー電源容量の違いによる電源、ブレーカ、リレー類の仕様変更もしくは回路変 更検討および改造

レーザー電源容量の違いによる電源系統の部品、回路を見直した。

現状のレーザー電源容量は、単相 200V、12A であり、Synrad 社製 CO₂レーザーの Firestar - 400 の電源容量は、三相 200V、72A である。従って、現状のブレーカ、リレー類は使用できない。変更 後のレーザー電源は、装置設置部屋に設置した。

但し、レーザーの電源入/切は、安全を考慮し、装置側で電気回路を組むことにより、リモート で行えるように変更した。



図7. レーザー電源の設置・配線



図8. 交換後のレーザー電源用電磁開閉器

(エ) レーザー装置変更に伴うレーザー冷却チラーの検討および変更 レーザー装置変更に伴うレーザー冷却チラーは、冷却能力の高い以下のチラーが必要となる。

(RKED2200B-V:屋内設置)



図 9. 400W レーザー用チラー本体

(オ) 冷却水流量計の見直し完了



図 10. チラー本体の配管

改造前の 30W レーザーから 400W レーザーへ変更するため、レーザーに必要な水流量が違っ てくる。当然のことながら、容量の大きな 400W レーザーの方が必要な水流量が大きくなる。 そのため、現状の流量計では測定が不可能となるので、容量の大きい流量計へ変更した。 改造前のレーザーに必要な水流量:3.8L/分以上 400WCO₂ レーザーに必要な水流量:15.2L/分以上 改造前の流量計: CKD 製 WFK5008-15 (1~8L/分) 変更後の流量計: CKD 製 WFK5027-15 (3~27L/分)



図11.変更後の流量計

ii-1-3. 現状プラスチック粉末仕様から耐火粉末材料仕様への駆動系の機構設計および改造 (ア)造形部および材料供給部の駆動モータの検討

耐荷重目標350kg以上を達成するため、ピストンモータの選定および変更を行った。

表1. モータの主な仕様

	パート用	フィード用		
従来のモータ	MSMD082P1T(AC三村目200V)	MUMA042P1T (AC三相200V)		
変更後のモータ	MSMD082P41N 1/5	MSMA042P41N 1/5		
	(AC三相200V、減速機付き)	(AC三相200V、減速機付き)		
トルクの違い : パー	- ト用 改造前 2.4N.m → 改造	造後 10.7N.m		

フィード用 改造前 1.3N.m → 改造後 5.3N.m

(イ) 造型部および材料供給部スプリングダンパの検討および改造

耐荷重目標350kg以上を達成するため、従来のスプリングダンパを変更した。

表2.	スプ	IJ	ン	ノブ	タ	シノ	$^{\circ}\mathcal{O}$	而招	計重
1.4.	· · /	/	~	/	/	¥ .		11111	

	28.1 田	フォード田
		ノイード用
従来のダンパ	115kg/本	75kg/本
	2本使用:230kg	2本使用:150kg
変更後のダンパ	200kg/本	150kg/本
	2本使用:400kg	2本使用:300kg

(ウ) ブレークアウトステーション(BOS)の耐荷重増強検討完了

a)リフタの耐荷重

現状は、耐荷重 250kg(最大 300kg)のリフタを1 台使用しているが、目標の 350kg 以上を 達成するため、同じリフタを2台使いとし、目標を達成した。

b)動作確認

パートカートリッジへ350kg分の重りを入れ、そのカートリッジをBOS にセットし、リフタを 上下させ問題なく動作することを確認した。

(エ) カートリッジ運搬用リフタの見直し完了

従来のリフタの耐荷重は、250kg であるため、目標の 350kg を達成するためリフタを変更し た。

外形寸法

変更後: BX50 耐加重 500kg 960×518×1195mm

ii-2. 光学系部品へのカバーの装着

レンズやレーザーウィンドウに埃や粉塵が付着する対策として、光学系ユニットのカバーを取 り外した際に剥き出しになっている第2ミラーからレーザーウィンドウまでの光路全体を覆うカ バーを新規設計・製作を行った。



図12. 光学系カバーおよびアパーチャマスク取付イメージ図

下記に光学系カバーの取付前と取付後の写真を記載する。

カバーを取り付け後、カバーと部品間に隙間が無いことを確認した。

今回の改造でX/Y ガルバノミラー、レーザーウィンドウ、Z ガルバノレンズに粉塵や埃が付き難くなった。



図13. 第2ミラーとZガルバノ間カバー取付前



図 15. X/Y ガルバノミラーカバー取付前



図14. 第2ミラーとZガルバノ間カバー取付後



図 16. X/Y ガルバノミラーカバー取付後



図17. X/YYガルバノミラーカバー取付後

図18. X/Y ガルバノミラーカバー断面イメージ図

ii-3. アパーチャマスクの製作及び取付け

平成22年度の実験において、造型中にレーザー出力が減衰するという現象が発生した。

この原因は、レーザーの光路上でのレーザー光軸の中心が合っていなく、Z ガルバノレンズの 入り口でレーザー光が Z ガルバノレンズからはみ出しており、Z ガルバノレンズに正規のレー ザー光が入射されていなかった。そのため、Z ガルバノレンズからはみ出たレーザー光が造型面 上ではなく、レーザーウィンドウ付近で焦点を結んでしまったことにより、レーザーウィンドウ が異常過熱されてしまった。レーザーウィンドウは温度上昇により、レーザー光の吸収率が急激 に増加する特性を持っているため、造型中にレーザーの出力が減衰するという現象に繋がった。

レーザーメーカーの助言により、レーザービーム径を正規の平行光へ調整後、レーザービーム 径をアクリルバーンパターンで測定したところ約 \phi 16mm あった。この径では、Z ガルバノレンズ の入射光としてはまだ大きい(Z ガルバノレンズ入射光径仕様 : 14.45mm)。そこで、平成 23 年度にはビーム径を小さくするためのアパーチャマスクを新規に製作し取付けることで、 ビーム径を小さくし、レーザー光が正規に入射されるように改良を行った。



図19. 新アパーチャ

図20. 新アパーチャ

図21. アパーチャカバー

- (ア) 造型中のレーザー出力減衰現象の確認を下記の方法で行った。
 - a. 90mm角のパーツを16個照射した時にレーザー光が弱く見える現象が発生するか確認。
 - b. 150mm角のパーツを数層照射した時にレーザー光が弱く見える現象が発生するか確認。



図 22. レーザー出力減衰確認テスト (90mm 角 16 個照射)

(イ) 確認結果

アパーチャを取付けることによりレーザー光の干渉が無くなりレンズが異常加熱を起こし造型 中にレーザー出力が減衰するという現象は無くなった。

ii-4. レーザーウィンドウの改良

ii-3 でレーザーウィンドウに埃や粉塵が付着することで、焼損すると記述したが、レーザー ウィンドウに埃や粉塵が付着していないかどうかの確認を行うには、レーザーウィンドウをその 都度、装置から外す必要があるが、現状のレーザーウィンドウは重量が重く、簡単に脱着するこ とが困難である。そこで、平成 23 年度には、レーザーウィンドウの機能はそのままにし取扱い 易くするための改良を行った。

- ・従来のレーザーウィンドウの重さは、 2.5kg
- ・新規のレーザーウィンドウの重さは、 1.5kg



図23. レーザーウィンドウ ・重量を軽くすることで、機能を保持した脱着が容易となった。

①-2. 造型温度とレーザー出力の適正化

i.研究内容

- i-1. 400WCO2 レーザーによる適正化条件の確立
- ・400WCO₂レーザー搭載設備の導入と稼働試験 2010年7月3日にキングパーツ(株の装置へ400WCO₂レーザーの搭載を完了した。
- ・耐火物粉末材料を用いた焼結条件についての基礎データの採取
 レーザー照射の条件を変えて溶融シリカの粉末の焼結実験を実施する。
 各種材料毎にパラメータを取得する。
- ii.研究成果

・溶融シリカ粉末(FB-40R)とアルミナ粉末(AX-116)の混合粉末において、焼結実験を行い、テストピースを造型した。

ü−1. ペンダント形状



Φ25.4mm × t5mm図 24. 造型形状

ii-2. 板形状





図 25. 焼結体



図27. 焼結体

①-3. レーザー走査パターンの適正化

i.研究内容

i-1. 400WCO₂ レーザーによる走査パターンの適正化ソフトウェア開発および稼動試験(レー ザー操作パターンの適正化実機組み込み)

(ア) 問題点

レーザーによる焼結直後にカール歪みが発生し、リコータが次の層の粉末を供給する際に、 カール歪みで隆起した部分を引っ掛けて、造型した部分を破損乃至位置ずれを生じさせる。

シリカ砂を焼結した場合、レーザー照射により溶融したシリカが凝固する際に急激に冷却され ると同時に、焼結部が収縮し、カール歪が生じている。このカール歪みが造型面より上に隆起し た場合、リコータのブレードが引っ掛ける。

ü.研究成果

問題点を解決すべく、簡易的に下記のソフトウェアの改良を行った。

・1層における複数回塗りつぶし機能

簡易的なソフトウェアの変更により、カール歪の発生が抑制され、積層が可能となった。

① -4. ソフトウェアの改良

i.研究内容

- i-1. 中子及び鋳型造型作業の実施(一次試作)
- i-1-1. 一次試作の結果を反映したソフトウェアの改良
- i-2. 中子及び鋳型に適した密度構造の確立
- i-2-1. 造型物密度を部分的に変化させるための改造
- i-2-2. 造形物の反り変形を防止するための改造
- i-3.3次元オフセット機能の追加

焼結材の密度や気孔率を制御するため、3次元的に鋳型の内壁(溶湯と接する面)と鋳型の 外壁(放熱・冷却する面)の間で傾斜的にレーザー照射の密度を変えることにより内壁が 「密」外壁が「疎」になる成形条件を与る。

今までのRP装置では、平面上の2次元オフセット処理は常識的に行われている。

平成 21 年度では、その 2 次元オフセットを使用して外壁を複数回塗りつぶすことにより密度 に傾斜性を持たせることを検討したが、今までの 2 次元オフセットでは、造形物の上面および下 面の塗りつぶしをすることができない。(図 28 参照)



円筒の側面の密度は高くなるが、上面と下面の 密度は高くならない

図 28. 2 次元オフセット処理

また、造形物の配置により、密度が高くなる幅が指定した幅にならない場合や、均一にならない場合がある。(図 29 参照)



図 29. 円筒を Y 軸中心に 45 度傾けた場合

そのため、3次元CADデータを造型データへ変換・編集する3次元積層造型機用ソフト ウェア(MagicsRP)を単独購入し、研究開発を推進することにした。このソフトウェアを使 用して3次元CADデータに3次元オフセット処理を行い、その3次元オフセット処理をさ れた3次元データをラピッドプロトタイピング(RP)装置に送り、3次元的に鋳型の内壁 (溶湯と接する面)と鋳型の外壁(放熱・冷却する面)の間で傾斜的にレーザー照射の密度 を変えることにより内壁が「密」外壁が「疎」になる成形条件を与え、中子及び鋳型に適した密 度構造を確立することとした。

下記にその作業手順を示す。

- ・ 3次元CADによるデータの作成。
- ・ 3次元CADデータを3次元積層造形機用ソフトウェア (MagicsRP) により3次元オフ セット処理を行う。
- オフセット処理された3次元データを造型機に送り、造型機にて外壁と内壁のレーザー 照射パターンを変更して走査し、中子及び鋳型に最適な密度を実現する。

ii.研究成果

ii-1. 中子及び鋳型造型作業の実施(一次試作)

ii-1-1. 一次試作の結果を反映したソフトウェアの改良

・中子及び鋳型に適した傾斜構造用ソフトウェアの確立

実験のため2次元的に密度に傾斜性を持たせるための機能を簡易的なソフトウェア改良により 実現した。

ii-2. 中子及び鋳型に適した密度構造の確立

ii-2-1. 造型物密度を部分的に変化させるための改造

平成 22 年度に、簡易的なプログラムにて実験確認した 2 次元的に密度に傾斜性を持たせるための機能を、平成 23 年度はラピッドプロトタイピング(RP)装置の従来のソフトウェア (SEMware)に機能を追加改造(改良)した。

ii-2-2. 造形物の反り変形を防止するための改造

(ア) 1層における複数回塗りつぶし機能の追加

平成 22 年度に、簡易的なプログラムにて実験確認した 1 層における複数回塗りつぶし機能を、 平成 23 年度はラピッドプロトタイピング(RP)装置の現状のソフトウェア(SEMware)に機能 を追加改造(改良)した。

(イ) 設定画面変更後の確認

複数回塗りつぶし機能および密度に傾斜性を持たせる機能の設定画面確認。

仕様通り、設定できることを確認した。

(ウ)造形物固定用ベース板の使用に対する機能の追加

ベース板をレーザー照射により加熱し、その上にサポートを積層し、サポート上に形状を積層 させる機能をソフトウェア改良することで実現した。



(エ) レーザー照射時にカールが発生しない最小焼結単位の形状をある一定の間隔を空けて焼結し、

最終的にデータ通りのサイズの形状にすることを自動で行えるようにソフトウェアの改良を行った。

ii-3. 3 次元オフセット機能の追加

下記の通り、3次元積層造形機用ソフトウェア (MagicsRP) で3次元データから外壁のみを抽 出し、外壁形状と内壁形状を別部品として造型機に取り込み別々の照射パターンで走査すること により、外壁と内壁の密度を変えることができた。

手順

a.3次元オフセット機能により元の形状(図32)を数mm小さくする。→内壁形状とする。(図33) b. 元の形状からaの形状をブーリアン演算により引算する。引算した結果を外壁形状とする。 (図 34)

c. 内壁形状と外壁形状は、密接にくっつけた状態で造型する。(図35)

d. 引算後に残ったデータを外壁形状として造型機の密度を傾斜的に変化させる機能により密度変化 させ、密に造型する。

e. 内壁形状は、粗く造型する。





図 32. 元の形状



図 33. 小さくした形状



図34. 元の形状から小さくした形状を引算した結果 図35. 外郭と内部形状は密接させ造型する

②耐火物粉末材料の開発

(担当実施機関:伊藤忠セラテック株式会社、キングパーツ株式会社、妙中鉱業株式会社) 中子および鋳型に適した耐火物粉末材料から焼結性およびRP装置のハンドリング性を考慮した 粒子形状・粒度分布について技術開発をする。又これらの中子・鋳型の特性を確保するために必要 な配合剤の開発及び加熱処理を行い、これらを検証をする。

②-1. 耐火物粉末材料の粒子形状および粒度分布測定

 鋳物業界におけるセラミック中子及び 鋳型の使用状況を調べ、求められる特性を確認すると共に、 現有プラスチック粉末と中子・鋳型用粉末材料として用いられる可能性のある耐火物粉末について 粒子形状の観察と粒度分布の測定を行い、本研究に適した耐火物粉末材料選定の資料とする。

○検討項目

●現有プラスチック粉末の必要特性の確認

●セラミック中子用耐物火物粉末材料及び鋳型用耐火物粉末材料に必要な特性の確認

i. 研究内容

i-1. 現有プラスチック粉末特性の確認

ラピッドプロトタイピング技術で用いられている一般的プラスチック粉末の粒子形 状および粒度分布を図1に示す。平均粒径は 33μm で、その幅は狭く、形状は概略丸 味を帯びている。又、調査結果として、現状ラピッドプロトタイピング技術では平均 粒子径20µm以上の粒子が使用可能な事が確認できた。



図36. プラスチック粉末の粒子形状と粒度分布

i-2.中子及び鋳型に求められる耐火物粉末材料の特性

研究メンバーを含め鋳物業界を調査した所、中子及び鋳型への耐火物粉末材料の要求 項目としては、高熱性、綺麗な鋳肌の生産性と苛性による溶出性であった。

高熱性としては、鋳造鋳込み温度が1650℃前後であるため、耐火物粉末材料の耐 熱性はその温度以上あるものとなる。綺麗な鋳肌の生産性とは、鋳物の表面粗さが細に なることができる材料が要求される。又、苛性による溶出性を考慮するとシリカ系の材 料をベースに選定する必要がある。表3に適用可能性のある耐火物粉末材料の特性を示 す。

項目	化学成分	鉱物組成	耐火度	比重	粉体嵩密度	熱伝導率 (W/m・K)
シリカ (珪砂)	SiO2 99%	クリストバラ イト	SK33 (1730°C)	2.2~2.4	1.55	0.7
ジルコン サンド	ZrO2 66% SiO2 33%	ジルコン	SK37 (1825°C)	4.6~4.8	2.99	0.8
焼結 アルミナ	AI2O3 99.5%	コランダム	SK40 (1920°C)	3.8	2.42	0.77
合成	AI2O3 71%	ムライト	SK38	2.82	1.7	0.57

表3. 中子及び鋳型に求められる一般的耐火物粉末材料の特性

i-3. 耐火物粉末材料の粒子形状観察と粒度分布測定

SiO2 28%

ムライト

走査型電子顕微鏡にて粒子形状の観察を行なうと共にレーザー式粒度分布測定器での 粒度分布の測定を行なう。代表的耐火物粉末材料および本研究に適すると思われる耐 火物粉末材料についての測定結果を図37~40に示す。

(1850°C)



 $100\,\mu\,\mathrm{m}$

平均粒径 40 µ m

累積(%)

60 40 20

10000 粒径(µm)





 $10 \,\mu \,\mathrm{m}$

図 38. シリカ系粒子 FB-40R



100

1000

平均粒径91.1µm





 $50\,\mu\,\mathrm{m}$



ii.研究成果

(ア) ラピッドプロトタイピング技術では平均粒子径20μm以上のプラスチック粉末粒子が

使用可能な事が確認できた。

- (イ) 調査結果、中子及び鋳型への耐火物粉末の要求項目としては、高熱性、綺麗な鋳肌の 生産性、苛性による溶出性であることが解かった。
- (ウ) 代表的耐火物粉末材料である、球状シリカFB-40S、シリカ系粒子FB-40R、シリカ粒子 S85-Pとアルミナ粒子AX-116の粒子形状と粒度分布が解かった。

②-2. 耐火物粉末材料の流動性の最適化

ラピッドプロトタイピング(RP)装置では耐火物粉末材料のリコーティング特性が重要な要素であり、そのリコーティング特性は耐火物粉末材料の流動性に関係していると推測される。②—1の耐火物粉末材料を本装置にてリコーティング試験を行なうと共に、粉末材料の流動性の指標として安息角を測定し、その関係について調査する。 ●耐火物粉末材料候補から RP 用に流動性の良い材料を選定する

●流動性の指標を定める

i.研究内容

- i-1.耐火物粉末材料のリコーティング試験
- i-1-1. 耐火物粉末材料の安息角測定

安息角の測定方法を図 41 に示す。上部のコーン部に粉末材料を入れ下部円盤上へ落 下させ、粉末山頂の高さを測定する。山頂高さと円盤径から仰角を算出し、その値を 安息角とする。

様々な耐火物粉末材料の安息角を測定した結果を、粒度測定及びリコーティング試験評価結果と共に表4に示す。安息角の低かった粉末材料は、粒形が球状に近いもの、 粒度範囲が狭いもの、更にある程度粒径の大きなものであった。その中で、溶融シリ カFB-40S は粒径が細かく安息角が低い粉末材料であった。





図41. 安息角の測定方法;装置(左図)、測定(右図)

i-1-2. リコーティング試験

前項i-1-1にて安息角を測定した耐火物粉末材料を本装置にてリコーティング試験を 行なった。代表の試験結果を図 42 に、その評価結果を表 4 に示す。シリカ系粒子の FB-40S は綺麗なリコーティング特性を示した。



図 42. シリカ系耐火物粉末のリコーティング試験

材料名	品名又は品番	粒度範囲 (μ m)	平均粒度 (μ m)	安息角 (°)	リコーティング 評価
	FB-40S	18.1~73.2	39.8	33	0
	FB-105	1.5~59.0	12	46	×
谷融ンリカ(球仏)	FB-5D	1.2~16.0	5	48	×
	SFP-30M	0.46~0.74	0.5	50	×
	A-42-2	2.52~10.1	5.6	53	×
アルミナ	AES-22S	0.63~2.31	1.5	57	×
	AES-12	0.53~1.95	1.2	43	×
カリフトボニノト	CR-6	1.52~41.4	10.9	50	×
<u> </u>	CR-1	1.16~24.7	4.8	47	×
<u></u>	ジルコンサンド	80~150	105	32	0
シルコン	ジルコンフラワー	4.5~39	13.6	46	×
	ビーズ(大)	75~212	145	31	0
合成ムライト	ビーズ(小)	45~100	71	34	0
	MM 325#	1.95~33.9	16.3	48	×
ハイアルミナサンド	OA-45	300~700	500	36	0

表4 各種耐火物粉末の粒度、安息角、リコーティング試験結果

注)リコーティング試験結果は、粉末のリコート状況により、優良(○)、良(△)、不良

(×)の三段階で評価した。

参考) RP装置で用いられている現有プラスティック粒子の安息角は32.4°で有った。

i-2. 流動性指標の確立

表 4 の結果よりリコーティング試験結果と平均粒径の関係を図 43 (a) で示し、更にリ コーティング試験結果と安息角の関係を図 43 (b) で示す。

その結果、リコーティング特性と深い関係がある流動性には、平均粒径と安息角が指標 となることが分かった。本研究では、耐火物粉末材料の平均粒径は 20 µ m以上で安息角4 0°以下が適する粉末材料となることが示された。



(図中;○は球状又は丸味のある粒子、△は角状の粒子)

図43. リコーティング評価結果と耐火物粉末の平均粒径(左図)及び安息角(右図)との関係

ii.研究成果

- (ア)安息角の低かった粉末材料は、粒形が球状に近いもの、粒度範囲が狭いもの、更にある程度粒径の大きなものであった。その中で、溶融シリカFB-40Sは粒径が細かく安息角が低い粉末材料であった。
- (イ)シリカ系粒子のFB-40Sは綺麗なリコーティング特性を示した。
- (ウ) 耐火物粉末の平均粒径は20µm以上で、安息角40°以下が最適の粉末材料となることが解かった。

2-3. 耐火物粉末材料の加熱処理

中子及び鋳型に適した耐火物粉末材料のシリカ系粒子としてFB-40S およびFB-40R を、又 焼結補助材料としてアルミナ系粒子としてAX-116 を選定した。これらの耐火物粉末は熱ラ ピッドプロトタイピング(RP)装置のレーザー照射により熱を受けることとなるが、ここで は加熱方法は異なるが、耐火物粉末に熱処理を施し、粒子形状と結晶化の変化を確認する。又、 本研究開発では中子および鋳型の作製を最終目的としているので、選定した耐火物粉末の焼結 性が重要となってくる。中子及び鋳型に適した耐火物粉末材料としてシリカ系耐火物粉末を選 定しているが、アルミナ系耐火物粉末を混合し、その焼結性の向上も検討する。

- ○検討項目
 - シリカ系耐火物粉末材料 FB-40S 及び FB-40R について加熱処理による粉末粒子の変化 確認
 - シリカ系耐火物粉末材料及びシリカ系耐火物粉末とアルミナ系耐火物粉末の混合粉末 材料の加熱処理による焼結性の確認

i.研究内容

- i-1.加熱処理によるシリカ系耐火物粉末材料粒子の変化
- i-1-1. 加熱処理方法

加熱処理用の電気炉(二珪化モリブデン発熱体使用)を図44に示す。耐火物粉末材料を入れた耐火性ルツボを電気炉内へ収納し、1時間毎に約300℃で昇温させ、1000℃~1600℃の所定温度にて60分間の保持を行い、その後電気炉内にて自然冷却を行なう。



図44. 電気炉(二珪化モリブデン発熱体使用)

i-1-2. 加熱処理されたシリカ系耐火物粉末材料の測定結果

- 各温度で加熱処理された耐火物粉末を走査型電子顕微鏡により観察した。又、各処理耐火物粉末を粉末 X 線回折装置によりクリストバライト結晶(101 面)のピーク強度を測定し、1650℃加熱処理後のクリストバライト結晶(101 面)ピーク強度を100%とした値と比較し、クリストバライト量として数値化した。
- その結果、耐火物粉末の粒子形状及びクリスとバライト量が 1400℃と 1500℃の間で大きく 変化することが確認された。以下に、大きく変化の表れた 1400℃と 1500℃の走査型顕微 鏡写真とクリストバライト量を示す。





FB-40S(クリストバライト量、7%)FB-40R(クリストバライト量、5%)図 45.1400℃、60 分間の加熱処理後の耐火物粉末





FB-40S(クリストバライト量、100%)
 FB-40R(クリストバライト量、74%)
 図 46. 1500℃、60 分間の加熱処理後の耐火物粉末
 i-2. シリカ系耐火物粉末材料及びシリカ系耐火物粉末とアルミナ系耐火物粉末の混合粉末材料の加熱処理による焼結性の確認



図47. 加熱処理による耐火物粉末の焼結性確認試験方法

i-2-2. 焼結性試験結果

耐火物粉末材料が加熱処理により焼き固まったものは、より高い残留率を示す。このこと から、焼結性の検討として残留率数値を比較するこことした。

この結果、1300℃と1200℃で顕著な変化が現れ、シリカ系耐火物粉末は1300℃で残留率4% であったが、アルミナ系粉末を15%混合すれば99%の残留となり、又、1200℃の低温でも アルミナ系粉末を 25%の混合を行えば 29%の残留率を示し、アルミナ系粉末の混合が焼結 性の向上に有効であることが確認できた。

以下に、試験結果の一部写真と処理温度と残留率の関係を図48、49、表5に示す。



FB-40R=100%粉末 (残留率、4%)



FB-40R:AX-116=85%:15%混合粉末 (残留率、99%)

1300℃、60分間の加熱処理後の耐火物粉末 図 48



FB-40R:AX-116=85%:15%混合粉末 (残留率、0%) 図 49. 1200°C、60 分間加熱処理後の耐火物粉末



FB-40R:AX-116=75%:25%混合粉末 (残留率、29%)

表5	耐火粉末材料及び混合粉末材料の各温度処理での残留率	(%)
10		(10)

加田温中			FB-40RとAXー116の混合比率			
処理温度	疽度 FB−40S		95:5	85:15	75:25	
1100°C	0	0	0	0	0	
1200°C	0	0	0	0	29.2	
1300°C	4.2	2.1	2.2	98.5	98.8	
1400°C	98.6	99.8	99.8	99.7	99.8	
1500°C	98.7	97.7	_	_	_	

ii. 研究成果

1200℃の低温でもアルミナ系粉末を25%の混合を行えば29%の残留率を示し、アルミナ系粉末の混合が焼結性の向上に有効であることが確認できた。

2-4. 適切な耐火物粉末材料の選定

i. 研究内容

これまで試験した中で RP 法で使用可能性の高い適正化範囲内となる測定値を持つ耐火物 粉末材料について表4 に示す。シリカ系粒子 S85-P の特性試験を行った結果、入手し易 く、平均粒径 20~40 µ mで粒度範囲の狭く、安息角の小さいシリカ系の耐火物粉末 FB-40R に、焼結補助材料としてアルミナ系の耐火粉末 AX-116 を本試験用耐火物粉末材料に 選定することとした。

材料名		SEM観察	嵩密度	(g/ml)	平均粒子径	安息角
		粒子形状	軽装	重装	(µm)	(°)
	FB 40S	丸	1.067	1.273	39	33
s.	FB 40 R	丸	1.253	1.469	38	31
	FB 105	丸	0.77	1.066	17	46
ッカ	FB 5D	丸	0.83	1.115	5	48
リズ	S85-P	丸	1.129	1.301	84	24
术	S511-L	丸	1.138	1.323	39	40
	FB 940	角	0.896	1.216	20	49
アルミナ系	AX116	丸	1.898	2.231	20	26

表6 適正化範囲内の測定値を持つ耐火物粉末材料

ü. 研究成果

耐火物粉末材料として、入手し易く、平均粒径20~40μmで粒度範囲の狭く、安息角の小さいシリカ系のFB-40Rを選定した。また、焼結補助材料として、アルミナ系のAX-116を選定した。

②-5. 耐火物粉末材料のハンドリング性向上のための有機バインダーの分析

中子及び鋳型に適した耐火物粉末材料のシリカ系粒子としてFB-40Rを、又焼結補助材料としてアルミナ系粒子としてAX-116を選定したが、これらの耐火物粉末は熱ラピッドプロトタイピング(RP)装置のレーザー照射により熱を受け、固化するが、その強度は極めて小さい。その固体のハンドリングを向上させる為に用いられる有機バインダーの特性について調べる。 〇検討項目

●耐火物粉末材料のレーザー照射後のハンドリング性向上の為に用いられる有機バインダーの特性 および分析を行う。

i.研究内容

i-1. 化学分析

有機バインダーの分析結果を表5に示す。ただ、本有機バインダーAの Ig. loss は 99.98%であり、以下の分析は Lg, loss 処理後の残渣を蛍光 X 線分析装置により測定した。 その結果、CaO、SiO2を主に含有することが分かった。

表7 有機バインダーAの分析結果(試料はLg. loss 処理後のもの)

SiO2	Al2O3	Fe2O3	TiO2	CaO	Na2O	P2O5	ZrO2	Cr2O3	Total
29.16	5.7	0.51	1.13	59.99	1.37	1.03	0.86	0.24	99.99

i-2. X線回折測定

有機バインダーAのX線回折の結果、特に同定は出来なかった。



図50. 有機バインダーAのX線回折測定結果

ii. 研究成果

レーザー照射後の耐火物粉末材料のハンドリング向上となる有機バインダーAの分析で、化学分析の結果はCa0、Si02を主に含有することが分かった。また、X線回折の結果は、特に、同定は出来なかった。

③造型試験

(担当実施機関:株式会社アスペクト、キングパーツ株式会社、妙中鉱業株式会社)

改良設備したラピッドプロトタイピング(RP)装置と選定した耐火物粉末材料を用いて製作した焼結品の熱的・機械的特性を把握し、従来のセラミック中子に近い焼結品を製作できる 条件を確立する。

平成22年度は、平板に冷却孔などを配した中程度の難易度形状(図 51-1)や翼形状のように 湾曲しさらにリターンフローを配した最も難易度の高い形状(図 51-2)の2種類の難易度の異 なる試験片形状を用いて、中子の造型試験を実施し造型することができたが強度が目標に達し ていないため(目標 10MPa 以上に対して 8.4MPa)、平成23年度は、更に焼結条件を開発して、 従来の中子及び鋳型と同等の特性を持つ中子及び鋳型の開発を行う。最終目標は、中子造型2 4時間以内、鋳型48時間以内を達成する。



図51-1.中程度の難易度形状

図 51-2. 最も難易度の高い形状

③-1 テストピースによる一次焼結及び二次焼結条件の確立

i.研究内容

材料開発にて配合選定したシリカ系 (FB-40R)、アルミナ系 (AX-116) と有機バインダー の混合材料を用いてRP装置により熱的特性 TP (ペンダント状)、機械的特性 TP (板形状) の一次焼結体を製作し、二次焼結後の特性を確認、及び無機バインダー含浸、二次焼結後の 特性を確認する。

- (ア). 熱的特性把握試料(φ25mm×T6mmペンダント形状)の作成、及びこれを用いた熱的特性の把握
- (イ). 機械的特性把握試料(W25mm×T6mm×L100mm)の作成、及びこれを用いた機械的特性の 把握(有機バインダー:2種類を実施する)
- (ウ).一次焼結品を二次焼結において強度を上げるため、各種無機バインダーを含浸させ、その後で、二次焼結を行なう試験を実施する。
- i-1. 熱的特性の把握

シリカ系(FB-40R)、アルミナ系(AX-116)粉末と有機バインダーの混合材料を用いてRP装置により熱的特性把握試料(ペンダント形状)を図.52に測定結果を表.8に示す。測定方法はレーザーフラッシュ法による。

- i-1-1. レーザー焼結条件(熱的特性把握試料)
 - ・レーザーパワー:115W
 - ・走査速度:5.04m/S
 - ・走査間隔:0.15mm
 - ・積層ピッチ: 0.12mm
 - ・二次焼結温度:1300℃



図. 52 熱的特性把握試料 (φ1インチ×t6mm)

現状鋳 型	熱伝導率(W/(m・K))		比熱(J/	密度(g/cm3)	
初層側	常温	0.907	常温	0.770	2.09
	250°C	0.973	250°C	0.957	
	500°C	0.960	500°C	1.010	
	750°C	1.033	750°C	1.063	
	1000°C	1.193	1000°C	1.193	
バック層	常温	0.793	常温	0.790	1.91
側	250°C	0.830	250°C	0.970	
	500°C	0.830	500°C	1.053	
	750°C	0.997	750°C	1.183	
	1000°C	1.143	1000°C	1.303	
RP 法	熱伝導率(W/(m•K))	比熱 (J/	密度 (g/cm3)	
含浸無し	常温	0. 22	常温	0. 55	1.35
	500°C	0. 30	500°C	0. 85	
	1000°C	0. 38	1000°C	0. 92	
含浸有り	常温	0. 25	常温	0. 49	1.54
	500°C	0. 36	500°C	0. 78	
	1000°C	0. 49	1000°C	0. 89	

表. 8 熱的特性測定結果(レーザーフラッシュ法)

RP法にて製作したTPは、熱伝導率・比熱とも低い結果となった。これは、焼結体の密 度が低い為(スポンジ状)、熱の伝わりが遅いものと考察される。

i-2.機械的特性の把握

機械的特性把握には、有機バインダー2種類を実験した。シリカ系(FB-40R)、アルミナ系(AX-116)粉末と有機バインダーAの混合材料とシリカ系(FB-40R)、アルミナ系(AX-116)粉末と有機バインダーBの混合材料を用いてRP装置により機械的特性把握試料(板形状)を製作し評価した。機械的特性把握試料を図.53に示す。有機バインダーAは、平均粒径80 μ mに対して有機バインダーBの平均粒径5 μ mしかない為、混合材料の流動性(リコート性)の低下から添加量が5wt%以下と制限され有機バインダーBの添加量は3wt%となった。両バインダー別・二次焼結温度別の機械的特性を図.54~56に示す。

- i-2-1. レーザー焼結条件(機械的特性把握試料)
 - レーザーパワー:115W
 - ・走査速度:5.04m/S
 - ・走査間隔 : 0.15mm
 - ・積層ピッチ:0.12mm
 - ・バインダー:有機バインダーA



- ・レーザーパワー:101₩
- ・走査速度:5.04m/S
- ・走査間隔 : 0.15mm
- ・積層ピッチ:0.12mm
- ・バインダー:有機バインダーB



図.53 機械的特性把握試料 (W25mm×T6mm×L100mm)、及びレーザー焼結条件

i-2-2. 二次焼結温度別機械的特性結果



図. 54 二次焼結温度別の収縮率

有機バインダー別では、有機バインダーAと比較して有機バインダーBの方が収縮率大きくなる結果となった。また、焼結温度が高くなるほど収縮が大きくなっている。目標値に対しては達成している。 二次焼結温度別の気孔率:目標値35%以下



図.55二次焼結温度別の気孔率

有機バインダー別では、有機バインダーAと有機バインダーBに大きな違いはない結果となった。 気孔率は、焼結温度が高くなるほど小さくなっている。目標値に対しては、まだ達成出来ていない。 二次焼結温度別の抗折強度:目標値10MPa以上



図. 56 二次焼結温度別の抗折強度

有機バインダー別では、有機バインダーBと比較して有機バインダーAの方が高い抗折強度を示した結果となった。焼結温度は、1300℃が最も高い抗折強度になっている。目標値に対しては、達成出来ていないので抗折強度を上げる為に無機バインダーによる含浸処理の効果を確認する必要がある。

無機バインダー含浸による抗折強度

ー次焼結体を無機バインダーに含浸処理させた後に二次焼結(1300℃)させた抗折強度。無機バインダーの種類は平均粒径 18 nmと平均粒径 25 nmの 2 種類を実験した。含浸条件は減圧状態で 0.5 時間含浸した。結果を図.57 に示す。



図.57 含浸の抗折強度

無機バインダーを含浸することにより、含浸処理をしないものと比較して平均粒径 18nm、平均 粒径 25nmとも抗折強度が2倍以上(1.7MPa→4.3~4.5MPa)高くなった結果が得られた。

ii.研究成果

材料開発結果、熱的特性把握及び機械的特性把握から現状での適正材料は、シリカ系(FB-40R)、 アルミナ系(AX-116)粉末と有機バインダーAの混合材料で二次焼結温度は、1300℃と分かった。 また、無機バインダーを含浸することにより抗折強度が2倍以上(1.7MPa→4.3~4.5MPa)高 くなり、含浸処理の効果は十分あるものと分かった。強度目標にはまだ足りないが、鋳造試験が 出来る強度にはなったものと考える。

③-2. 中子(比較的小物)の造型試験

i.研究内容

材料開発、及び特性実験結果をもとにRP装置により 250mm中子の一次焼結体を製作。 その後、無機バインダー含浸、乾燥後二次焼結実験を実施し二次焼結条件を確立する。完成 した 250mm中子の品質確認 (3Dデータと比較) を行う。

- (ア). 中子の造型試験
- (イ). 製作品の品質確認
 - ・ 製作した中子の特性調査として、寸法精度ならびに溶解性を調査する。
- i-1. 250mm中子の造型実験

シリカ系(FB-40R)、アルミナ系(AX-116)粉末と有機バインダーAの混合料を用いてRP装置により製作した。250mm中子の一次焼結体を図.58に示す。

レーザー焼結条件

- レーザーパワー:115W
- ・走査速度:5.04m/S
- ・走査間隔:0.15mm
- ・積層ピッチ:0.12mm
- ・バインダー:有機バインダーA
- ・積層時間:6時間(2個)



図.58 250mm中子一次焼結体

i-2. 二次焼結実験

一次焼結体を無機バインダー含浸、乾燥後ムライトビーズ(平均粒径 110 µm)に埋め二 次焼結を実施した。決定した二次焼結条件、及び二次焼結完了した中子を図.59 に示す。



図.59 決定した二次焼結条件、及び二次焼結完了した中子

i-3. 製作した中子の特性調査として、寸法精度を調査する。

寸法精度の調査は、レーザー非接触測定機を用いて3Dデータと二次焼結品の比較測定に より評価した。レーザー非接触測定機を図.60示す。比較測定結果(カラーマップ)を図.61 と図.62に示す。



ü. 研究成果

A218 00 D -0.38

る変形は小さかった。

シリカ系 (FB-40R)、アルミナ系 (AX-116) 粉末と有機バインダーAの混合材料を用い 250 mm中子の一次焼結体を製作することが出来た。二次焼結の際にテストピースを防止する ことができ、変形の少ない 250mm中子を製作することが出来た。の様な単純な形状では

1

比較測定結果から、全体的厚み方向が約0.4mm小さく、全長については約2.0mm小さく なっており、収縮率は約0.9%になった。また、一次焼結・二次焼結の際に発生が予測され

図.62 比較測定結果(試料-2)

A304 💼 0: -2.44

A010 10 D. -0.30 発、生しなかった割れが発生したが、冷却時間を長く(72h)することで割れ

③-3. 一体鋳型(大物)の造型試験

i.研究内容

材料開発にて配合選定したシリカ系(FB-40R)、アルミナ系(AX-116)と有機バインダーAの混合材料を用いてRP装置により一体鋳型の一次焼結品を製作、無機バインダー含浸、二次焼結した一体鋳型を製作し、特性調査を行う。

最終目標の一体鋳型写真(従来の製法で鋳物のサンプル写真)を図 63-1 に一体鋳型に て鋳造された鋳物と鋳物の内部写真を図 63-2 に示す。

- (ア). 三次元形状(アンダーカット)について、改良されたソフトウェアが有効である モデル形状を作成することにより確認し、さらに必要性があれば改良を加える。
- (イ). 一体鋳型の製造試験
- (ウ). 製作品の品質確認

製作した一体鋳型の特性調査として、強度、通気性ならびに崩壊性を調査する。





図 63-1. 一体鋳型



図 63-2. 一体鋳型にて鋳造された鋳物と鋳物の内部

i-1. 一体鋳型の一次焼結品の製造

シリカ系(FB-40R)、アルミナ系(AX-116)と有機バインダーAの混合材料を用いてRP装置により一体鋳型を製作する。製作した一体鋳型を図.64に示す。

レーザー焼結条件

- ・レーザーパワー:115W
- ・走査速度:5.04m/S
- ・走査間隔: 0.15mm
- ・積層ピッチ:0.12mm
- ・バインダー:有機バインダーA
- ・積層時間:24時間(2個)



鋳型内部に250mm中子

一体鋳型





切断断面

- 図.64 製作した一体鋳型の一次焼結品
- i-2. 二次焼結実験

ー次焼結体を無機バインダー含浸、乾燥後アルミナボール(粒径1~2mm)に埋め二次 焼結を実施した。二次焼結条件は割れが予測されるため250mm中子よりも更に冷却時間 を長くした。二次焼結条件を図.に結果を図.65に示す。 1300℃



i-2-1. 二次焼結結果

二次焼結結果、外観は特に欠陥等は確認されなかったが、一体鋳型内部に割れが確認された。

二次焼結した一体鋳型を図.66 に示す。 外観は特に欠陥無し



図.66 二次焼結した一体鋳型(鋳型寸法:250L×170W×110Tmm)

i-3. 製作品の品質確認

製作した一体鋳型の特性調査として、抗折強度、通気性ならびに崩壊性を調査する。

i-3-1. 抗折強度

ー体鋳型(鋳型寸法:250L×170W×110Tmm)から直接抗折強度測定ができないので、図.57 のデータと同じと推測されます。

i-3-2. 通気度

一体鋳型から直接通気度測定ができないので、板形状 TP を無機バインダー含浸処理、二次焼結 (1300℃) し測定したデータを表9に示す。

則正力法:100mlの水が押し出り空気が試験力中を通過りる時间を使					
	試験片形状:板TP				
項目	時間(秒)	亚内			
		++++>			
	166				
(キングパーツ)	122	142			
	139				
	43				
RP 法にて製作した鋳型	46	45			
	45				

表9 通気度

ii.研究成果

シリカ系(FB-40R)、アルミナ系(AX-116)と有機バインダーAの混合材料を用いてRP装置 により一体鋳型を製作することが出来た。製作鋳型の通気度は良好だが抗折強度が4.3MPaと 低い結果となった。鋳造の際の安全性を考慮して一体鋳型に通常の精密鋳造鋳型を2~3層補 強して精密鋳造実験を行うことにした。

④精密鋳造実験

(担当実施機関:キングパーツ株式会社、妙中鉱業株式会社)

RP装置にて製作した中子及び鋳型に溶湯を注湯し、出来上がった鋳物の品質を確認し、試作品として使用に耐えるサンプルが迅速に製作できる条件を確立する。最終的には表面粗さ Ra6.3程度の精密鋳造品を作製し、新規品開発リードタイムの抜本的短縮を実現(中子造型24時間以内、鋳型48時間以内の実現)する。

④-1. 中子(比較的小物)の鋳造試験及び鋳物の品質評価

i.研究内容

RP装置にて製作した250mmLブレード用セラミック中子を使用してWAX 成型し、従来方法で 造型・脱ロー後大気鋳造して、寸法(収縮)、鋳肌(面粗度、肌荒れの有無)、強度(鋳造時の破損の 有無)等セラミック中子としての性能を確認する。

(ア). 鋳造試験

[大気鋳造](担当 妙中鉱業株式会社)

・材質:SCS13、SCM440、SCS2

[真空鋳造](担当 キングパーツ株式会社)

・材質:インコネル

当初、キングパーツ㈱の真空溶解鋳造設備を使用してインコネル材 (Ni基合金) の鋳造試験を予定していましたが、真空溶解鋳造設備の故障によりインコネル材の 鋳造試験は実施出来ていない。

- (イ). 評価項目
 - (1) 寸法(収縮)
 - (2) 鋳肌(面粗度、肌荒れの有無)
 - (3) 強度(鋳造時の破損の有無)

i-1. WAX パターンの成型

RP装置にて製作した250mmブレード用セラミック中子を使用してWAXパターンの成型を 実施した。また、成型された WAX パターンの X 線検査を行ったところセラミック中子の破 損は無く、WAX 成型時に必要な強度が確保できていることが確認出来た。

図 67 WAX パターンの成型

WAX パターンの X 線写真

i-2. ツリーの組立

X線検査の結果、破損の無い事が確認された WAX パターンを1 ツリー2P付けで組立を実 施した。

図 69 組立てられたツリーの状態

i-3. 造型作業

組立てられたツリーを従来方法でコーティングを行い、鋳型を完成させた。

図 70 完成した鋳型の状態

i-4. 脱ロー・鋳造

完成した鋳型を脱ロー・焼成後 SCS13、SCS2 の2 鋼種について鋳造を行なった。 [鋳造条件]

・鋳型焼成温度 1,000℃ ・鋳込み温度 1,600℃

(SCS2)

- 図 71 250mm Lブレード鋳造後の状態
- i−5. 鋳造品の評価
- i-5-1.寸法(収縮)

中子と同一条件で造型された W25×L100×T6の板状テストピースを WAX 内に封入し、 従来方法にて造型・脱ロー後 SCS13 で鋳造した鋳造品の寸法を測定して中子の収縮率を 確認した。

図 72 板状テストピースと鋳造品

表 10 甲十の収縮率	表	10	中子の収縮率
-------------	---	----	--------

測定部	テストピース寸法 (mm)	鋳物寸法 (mm)	収縮率(%)
W25	24.56	23.64	3.7
L100	98.39	95.95	2.5
T6	6.45	6.12	5.1

i-5-2. 肌(面粗度、肌荒れの有無)

収縮率確認用に鋳造した板状テストピースの鋳造品を使用して面粗度の測定を実施した。

図 73 面粗度の測定

i-5-3.強度(鋳造時の破損の有無)

鋳造品のX線検査を実施したところ、中子の破損は無かった。

- ii.研究成果
 - (ア)中子と同一条件で造型されたW25×L100×T6の板状テストピースをWAX内に封入し、 従来方法にて造型・脱ロー後SCS13で鋳造した鋳造品の寸法を測定して中子の収縮率を 確認した結果、現在一般的に使用されているセラミック中子とほぼ同様の収縮であり、 寸法的な問題は無い事が確認出来た。
 - (イ)収縮率確認用に鋳造した板状テストピースの鋳造品を使用して面粗度の測定を実施した結果、平均でRa 12.3でありプロジェクト目標値Ra6.3を達成出来ていない。 造型後の中子に希釈スラリーを塗布する等、面粗度向上の為に更なる改善が必要であることが確認された。
 - (ウ)強度(鋳造時の破損の有無)
 (券造品のX線検査を実施したところ、中子の破損は無く、ラピッドプロトタイピング(R
 P)装置にて製作された中子は鋳造に耐え得る十分な強度が確保されていることが確認出来た。
- ④-2. 鋳型(大物)の鋳造試験と鋳物の評価

RP装置にて製作した一体鋳型を焼成・鋳造して一体鋳型としての性能を確認する。

i.研究内容

RP装置にて製作した一体鋳型を焼成・鋳造して一体鋳型としての性能を確認する。鋳造試験としては、難易度の最も高い鋳造材料 SCS13 材のみを実施する。評価は、鋳造品の面粗度・肌荒れ、一体鋳型内部の中子状態(鋳造時の破損の有無)、鋳型の通気性(湯廻り不良の 有無)とする。

RP装置にて製作した一体鋳型を焼成・鋳造して一体鋳型としての性能を確認する。

(ア). 鋳造試験

[大気鋳造](担当 妙中鉱業株式会社)

・材質:SCS13、SCM440、SCS2

[真空鋳造](担当 キングパーツ株式会社)

・材質:インコネル713C

当初、キングパーツ(株の真空溶解鋳造設備を使用してインコネル材(Ni基合金) の鋳造試験を予定していましたが、真空溶解鋳造設備の故障によりインコネル材の 鋳造試験は実施出来ていない。

(イ).評価項目

- ・寸法(収縮)
- ・肌(面粗度、肌荒れの有無)
- ・強度(鋳造時の破損の有無)
- ・鋳型の通気性(湯回り不良の有無)

i-1. 鋳造試験

鋳造試験は、一体鋳型を鋳造する為のカップに取り付けし一体鋳型焼成後 SCS13 材を 鋳造した。鋳造試験状況写真を図.74 に示す。

①製作した一体鋳型の二次焼結品

③安全(補強)の為精密鋳造鋳型を3層コート


```
⑤鋳造後冷却
```


②一体鋳型と鋳造用カップの取り付け

④一体鋳型焼成後 SCS13 材鋳造

⑥完成した一体鋳型鋳造品

- 図.74 鋳造試験状況写真
- i-2. 一体鋳型鋳造品の評価
- i-2-1. 一体鋳型の外観鋳造試験した一体鋳型の外観写真を図.75 に示す。

表面の外観写真

中空部

図.75 鋳造した一体鋳型鋳造品の外観写真

i-2-2. 一体鋳型の面粗度・断面 面粗度を比較した写真を図.76 に示す 外観面

内面

観面25S

内面50S

面粗度の測定(3点平均):表面R a 7.1,内面R a 24.2

図.76 面粗度比較測定写真

i-2-3. 一体鋳型断面観察 一体鋳型で鋳造した鋳物断面写真を図.77 に示す。

断面写真

中子割れ・砂かみ

図.77 一体鋳型で鋳造した鋳物断面写真

ü.研究成果

一体鋳型の鋳造試験結果では、一体鋳型の二次焼結の際に使用するアルミナボールによる砂かみが鋳造品の表面・内部とも確認され、中子割れも数箇所確認された。アルミナボールの砂かみについては二次焼結後の除去方法を改善する必要がある。また、面粗度の比較測定結果では、表面 7.1・内部 24.2 で、目標のR a 6.3 を達成出来ていないが、 一体鋳型を鋳造できたことは成果である。

④-3. 鋳造後の砂除去方法の改善

i.研究内容

RP装置にて製作したセラミック中子、及び一体鋳型の崩壊性、及び溶出性を確認する。

(ア).鋳造試験

[大気鋳造](担当 妙中鉱業株式会社)

・材質:SCS13、SCM440、SCS2

[真空鋳造](担当 キングパーツ株式会社)

・材質:インコネル713C

当初、キングパーツ(株の真空溶解鋳造設備を使用してインコネル材(Ni基合金)の鋳造試験を予定していましたが、真空溶解鋳造設備の故障によりインコネル材の 鋳造試験は実施出来ていない。

- (イ). 評価項目
 - ・鋳型の崩壊性
 - ・苛性ソーダ系溶出ソルトへの溶出性
- i-1. 鋳型の崩壊性(一体鋳型)

鋳造した一体鋳型の崩壊性について通常の精密鋳造鋳型と比較したが、特に劣ることはな く良好な崩壊性であった。一体鋳型の気孔率、強度からも崩壊性については問題無いもの と考えられる。

i-2. 苛性ソーダ系溶出ソルトへの溶出性

一体鋳型を鋳造した製品の中子部分の溶出に使用したリーチング装置を図.78に示す。

図.78 リーチング装置 (圧力容器内で溶出)

ü.研究成果

一体鋳型の崩壊性については、通常の精密鋳造鋳型と比較して良好な崩壊性であった。また、一体鋳型中子部分の溶出については、一般の中子では溶出に8時間掛かるところが、本開発鋳型は4時間で溶出ができた。したがって、鋳造後の砂除去方法の改善は特に必要は無い。

最終章 全体総括

3年間の開発活動を振り返ると、レーザー出力を既存の30Wから400Wへ切り替えを行ったことで、先行して種々の条件設定を行ったデータがそのまま採用できなかったので、400Wに換装してから本格的な条件設定をやり直すことになり、当初計画より開発が遅れたことは反省しなければならない。また当初計画では耐火物粉末材料の配合のみで一定の焼結強度が得られ、成形物のハンドリングが可能と設定したが、成形途中での成形品の変形防止の技術開発が完成せず、有機バインダーを配合して一次焼結し、この有機バインダーの焼結力を利用してハンドリング可能とした。

プロジェクト全員の協力により、開発期間内に中子を鋳包んだ一体造型鋳型に鋳造試験を行うところまで実施できた。出来上がった鋳物自体は表面粗さ及び中子の良品歩留まりなど多少の改善点はあるものの、今回開発されたプロセス条件をさらに改善することにより、ラピッド・プロトタイピングによる「中子入りの鋳型による迅速製作鋳物」の実現が見えてきたと確信する。

専門用語等の解説

由子	「「「「「「「」」」」を書いていたい、「「」」」にあっていた。「「」」「「」」、「」」、「」、「」、「」、「」、「」、「」、「」、「」、「」、
	表の1次1010。 病理及、 可圧ノーノ やふう取なこ C倍山 C1 いる。 フルコン、 冶瓶ノノバ、 ノル ミーナ ドの 執時 遅 がいたく て 耐い 性の 傷わた 耐い 松士 対判の 松士 た 式 形 快 武 したまの が 田 い
	これての激励での少なくて町久住の愛信に町久付木物本の初木を成が光成したものが用い。
精密鋳造鋳型	精密鋳造鋳型は主にジルコン、溶融シリカ、アルミナなどの耐火粉末材料で構成
	される。 鋳型の製作方法はろう模型の周りに耐火粉末材料の微粒子と粘結剤を混
	ぜたスラリーを塗り、その上から粗粒耐火粉末材料をまぶし、これを乾燥させる。
	この作業を必要回数繰り返しろう模型の周りに耐火粉末材料を積層させる。その後
	加熱し中のろうを溶かし出した後、さらに高温で焼成し、残ったろうを完全に燃焼
	させて完成させる。
ラピッドプロトタイ	積層造形技術とも言う。付着させ積層しながら立体物を作る技術である。使用される材料
ピング(RP)技術	により技術は4つに区分されている。粉末積層焼結技術は、この一つである。
CAD	Computer Aided Design のこと。コンピュータの支援により設計する技術及びソフトウェ
	ア・ツール
CAM	Computer Aided Manufacturing のこと。工場の生産ラインの制御など製造作業をコン
	ピュータで支援すること。また、そのためのソフトウェアやシステムなどのこと。
SLA	StereolithographyAparatus のこと。積層造形技術の一種であり、光硬化性樹脂を材料と
	して、紫外線レーザーを用いて硬化させながら、積層することで立体形状を作る技術。
LS	Laser Sintering のこと。積層造形技術の一種であり、各種粉末材料をレーザーを用いて
	焼結させながら、積層することで立体形状を作る技術。
造形	積層造形技術を用いて、立体形状をつくること。
成形	射出成形法で立体的な製品形状の模型をつくること。精密鋳造の場合、ろうを材質とした
	製品形状の模型が作られる。
造型	精密鋳造用鋳型を作製すること。鋳「型」を「造」るから、造型と言われる。
MOR	Modulus of Ruptureの略。鋳型の3点曲げ強度のこと。
RP 装置	今回は、LS 技術を用いて耐火粉末材料を直接焼結する装置と定義する。精密鋳造用
	中子や鋳型を同時造形することが可能となる。
アパーチャマスク	Aperture: (カメラの) 絞り、(レンズなどの) 有効口径
	レーザー光の径が Z ガルバノレンズの有効口径より大きい場合、レンズの有効口径
	内に収まるように余分な光を遮断するための金属板。
フィード	成形エリアに材料を供給するための材料を予め入れておく部分。
コロイダルシリカ	S i O 2 またはその水和物のコロイドで、通常、粒子径が10~300nm で一定の構造を持たな
	いもの。