

平成30年度  
戦略的基盤技術高度化・連携支援事業  
戦略的基盤技術高度化支援事業

「複雑形状を持つ回転体鋳物用砂型の製造技術の確立」

研究開発成果等報告書

2019年5月

担当局 東北経済産業局  
補助事業者 地方独立行政法人 岩手県工業技術センター

## 目 次

### 第1章 研究開発の概要

- 1-1 研究開発の背景・研究目的および目標
- 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

- 2-1 切削加工した砂型および切削加工した砂型から作製した鋳造品の評価
  - 2-1-1 砂型用の鋳物砂と樹脂の選定
  - 2-1-2 加工による砂型の表面粗さ・形状精度の把握
  - 2-1-3 加工した砂型を用いて鋳造した鋳造品の表面粗さ・形状精度の把握
  - 2-1-4 湯流れ CAE 解析による鋳造品の変形量と砂型・鋳造品の形状変化の比較
  - 2-1-5 3次元デジタイザによる砂型および鋳造品の測定技術の確立
- 2-2 3DCAD 図面から切削加工により砂型を作製する手順の確立
  - 2-2-1 型の割り方の検討
  - 2-2-2 ツールパスの作成方法の検討
- 2-3 2-1 および2で得られた成果の検証
  - 2-3-1 曲面など複雑な形状のモデルによる検証
  - 2-3-2 試作

### 最終章 全体総括

- 3-1 研究開発成果
- 3-2 PR活動および特許取得
- 3-3 研究開発後の課題・事業化展開

# 第1章 研究開発の概要

## 1-1 研究開発の背景・研究目的および目標

### 1) 研究開発の背景

ポンプ用羽根車などの形状はコンピュータを用いた流体解析の発達によって複雑になり、従来の木型を用いた方法では作製が難しくなってきている。そのため、新しい製造方法の開発が望まれている。

### 2) 研究開発の目的・目標

#### ○目的

本研究事業では上記の問題を解決するため、砂型を直接切削加工する方法について以下の3つの項目に分けて検討を行った。

#### 1. 切削加工した砂型および切削加工した砂型から作製した鋳造品の評価

はじめに、削りやすさと欠け難さという相反する要素を満足したうえで、鋳造品に対する形状精度や表面粗さを満足する鋳物砂と樹脂の組み合わせを検討した。そして、選定した砂に合わせた最適な切削加工条件を検討した。切削加工した砂型で作製した鋳造品の形状精度や表面粗さについても評価を行った。併せて、これらを評価する計測技術や解析技術を検討した。

#### 2. 3DCAD 図面から切削加工により砂型を作製する手順の確立

製品の3DCAD 図面を基に砂型のデータを作成し、5 軸加工する際に有効なツールパスの作成方法についても検討した。

#### 3. 項目1 および2で得られた成果の検証

項目1 および2で得られた成果を基に、試作モデルや川下企業から提供いただいたモデルの試作を行った。試作品の形状精度と表面粗さを評価し、川下企業の要望を満足できる技術であることを確認した。

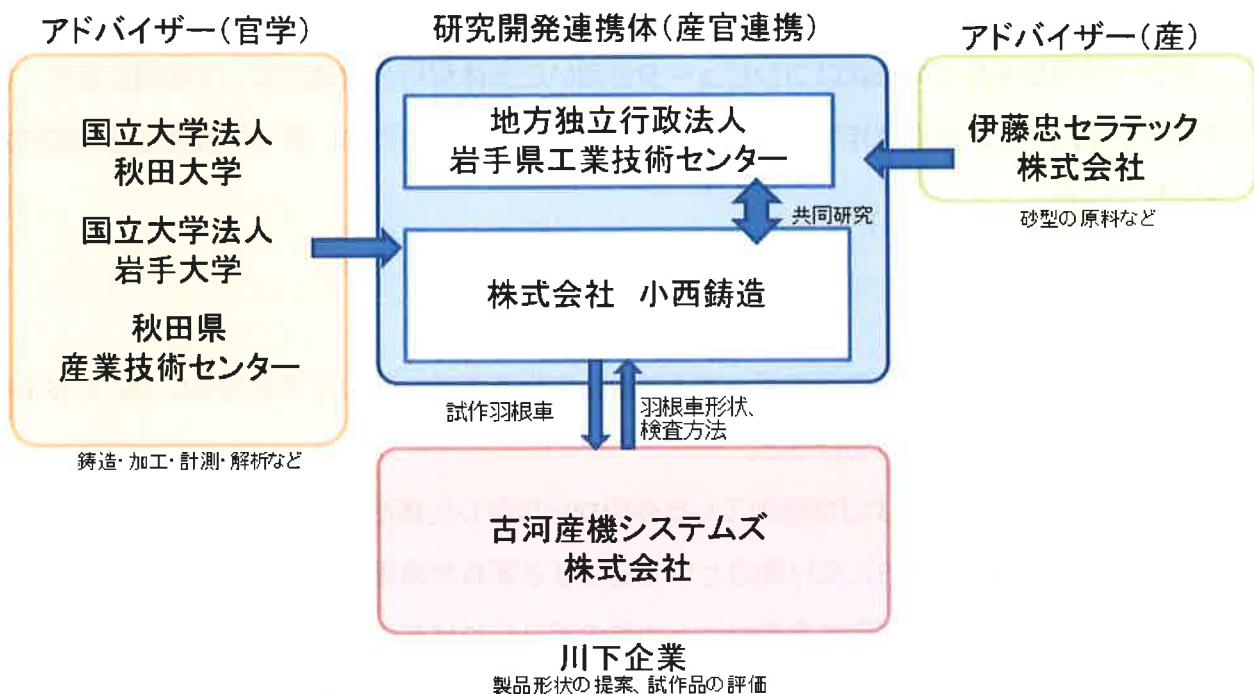
#### ○目標

鋳造品の形状加工精度±1.0mm 以内、表面粗さ  $Rz100 \mu m$  以下で複雑形状を持つ回転体を鋳造する。

### 3) 実施結果

砂型を切削加工によって作製することで、目標値である鋳造品の形状加工精度±1.0mm 以内、表面粗さ  $Rz100 \mu m$  以下を実現した試作品を作製することができた。川下企業の評価でも求められる品質を満足するものであった。

## 1-2 研究体制 (研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)



総括研究代表者 (PL)

氏名： 池 浩之

事業者名・所属部署名：(地独) 岩手県工業技術センター・素形材プロセス技術部 部長

副総括研究代表者 (SL)

氏名： 小西 信夫

事業者名・所属部署名：(株) 小西鋳造 代表取締役

## 1-3 成果概要

- 木型を用いず直接加工データを作成し製造するため、木型に起因する形状の制約や形状誤差が無く、精度の高い鋳造品（形状精度±1 mm、表面粗さ Rz100 μm）の製造が可能となった。
- 3DCAD 図面から直接砂型を加工するため、納期・コストの短縮につながる。
- 製品の設計変更やモデルチェンジなどに対しても加工データを修正するだけで済むため、費用・時間を最小限にし、かつ速やかに対応できる。

#### 1-4 当該研究開発の連絡窓口

担当者 地方独立行政法人 岩手県工業技術センター 素形材プロセス技術部 飯村 崇

TEL: 019-635-1115

FAX: 019-635-0311

E-mail : t-iimu@pref.iwate.jp

## 第2章 本論

### 2-1 切削加工した砂型および切削加工した砂型から作製した鋳造品の評価

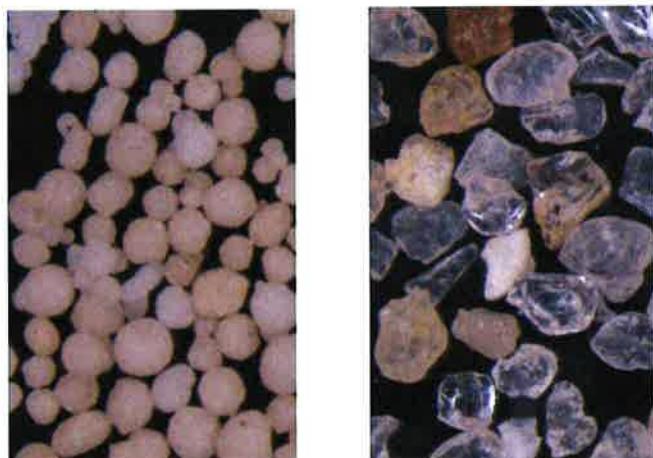
#### 2-1-1 砂型用の鋳物砂と樹脂の選定

鋳型の製造時間を短縮するには高い切削速度が必要である。そこで切削速度 180m/min 以上、工具送り速度 6000mm/min において、エッジ部分の欠損（欠け）が発生しない鋳物砂と樹脂の選定作業を行った。

鋳物砂については、以下の 3 点を考慮し人工砂を使用することとした。（人工砂は伊藤忠セラテック株のセラビーズを使用している。）

- ①ムライト系( $\text{Al}_2\text{O}_3$  61%, $\text{SiO}_2$  36%)で耐火度が高い(1825°C)。
- ②熱膨張率が小さく鋳造品の寸法精度に優れる。
- ③珪砂など天然由来の鋳物砂と比べ形状のばらつきが少ない。（図 1）

（切削加工時の強度や仕上げ面の表面粗さについてもばらつきが少ないと考えられる。）



1) 人工砂

2) 珪砂（天然の鋳物砂）

図 1 人工砂と珪砂の拡大写真

砂型を固める際に使用する樹脂（粘結剤）については、水ガラス、フラン樹脂、アルカリフェノール樹脂について調査を行った。水ガラスとフラン樹脂については表面と内部の硬化性にはばらつきがあり、砂型の強度が不均一になると考えられることから、時間を置くことで内部まで均一に硬化するアルカリフェノール樹脂を使用することとした。

次に、砂型の表面粗さや形状精度と砂の粒度の影響を調査するため、未使用の鋳物砂（新砂）の#650、850、950、1450 および処理をして再使用する鋳物砂（再生砂）の#650

を使用して加工実験を行った。表 1 に鋳物砂と樹脂の組み合わせを示す。砂型の切削加工性について調査した結果を①～③に示す。

表 1 鋳物砂と樹脂の組み合わせ

砂の材種	人工砂 新砂#650、#850、#950、#1450 および再生砂#650
樹脂	アルカリフェノール系

- ①#650～1450 の間において、砂の粒度と切削加工時の砂型の欠けの発生のしやすさには相関がみられない。
- ②再生砂は欠けが発生しづらい。
- ③切削速度を 300m/min まで上昇させた場合でも（工具送り速度 6000m/min）、切込み量を適正にすることで欠けの発生を抑えることが可能である。

以上のことから、欠けの発生しづらい再生の人工砂で、現場の状況を鑑み#650 を使用することとした。

## 2-1-2 加工による砂型の表面粗さ・形状精度の把握

2-1-1 で選定した再生砂#650 と樹脂を用いて砂ブロックを作製し、切削加工後の形状精度と表面粗さを確認するため、5 軸マシニングセンターを使用して切削加工実験を行った。加工および測定箇所の模式図を図 2 に示す。また、加工条件を表 2 に示す。

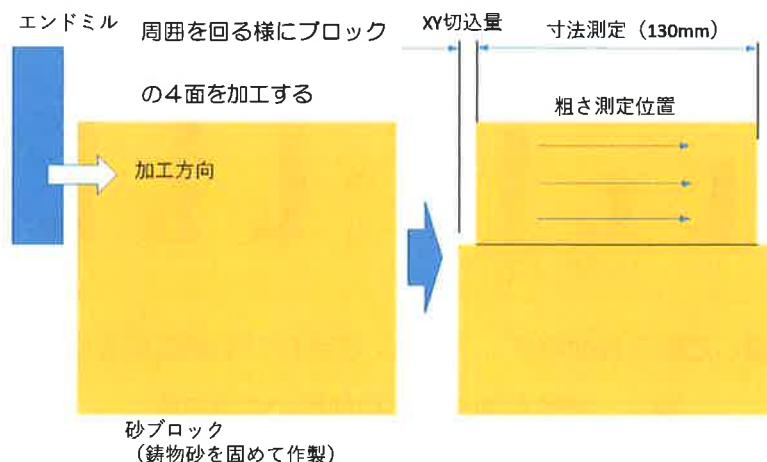


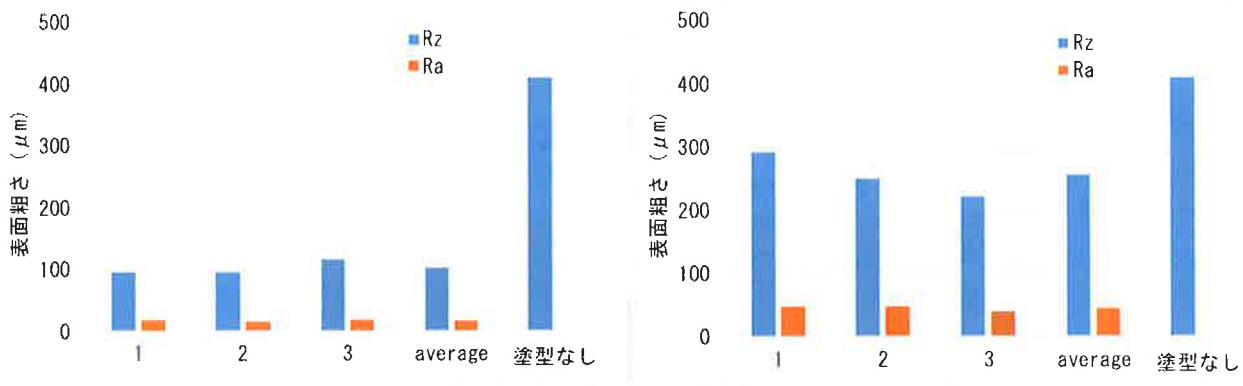
図 2 加工形状および粗さ測定位置

表2 切削加工試験条件

項目	条件
被削材	鋳物砂#650 再生 W50×L150×H125
加工条件	側面加工 切削速度：300mm/min 送り速度 6000mm/min（一刃送り 1.05 mm/刃）
	切込量 径方向 5.0mm 軸方向 20mm
使用工具	フラットエンドミル φ20
使用機器	同時5軸マシニングセンター（平安コーポレーション NC-151-MC1508）

図3は切削した面に塗型処理をした際の表面粗さの測定結果を塗型剤の塗布方法毎に比較したものである。図中の“塗型なし”は、切削したままの表面粗さを示す。塗布方法の“浸漬”は、あまり大きくない砂型や中子を塗型剤の入った容器に浸けて塗布する方法で、高粘度の塗型剤を使用する。“吹き付け”は主型など大きい砂型にスプレーを使用して塗布する方法で、低粘度の塗型剤を使用する。それぞれ3か所ずつ粗さ測定を行っているが、“浸漬”は、粗さのばらつきが小さく、かつ安定して  $Rz 100 \mu m$  程度となった。一方“吹き付け”は、測定場所によるばらつきが大きくかつ  $Rz 200 \sim 300 \mu m$  の間の大きな値となっており、粗さの改善効果はそれほど高くないことがわかった。また、図4は塗型処理後の表面の拡大写真である。“浸漬”的場合、砂の粒子が塗型剤で完全に覆われ、表面の凹凸が小さくなっていることがわかった。

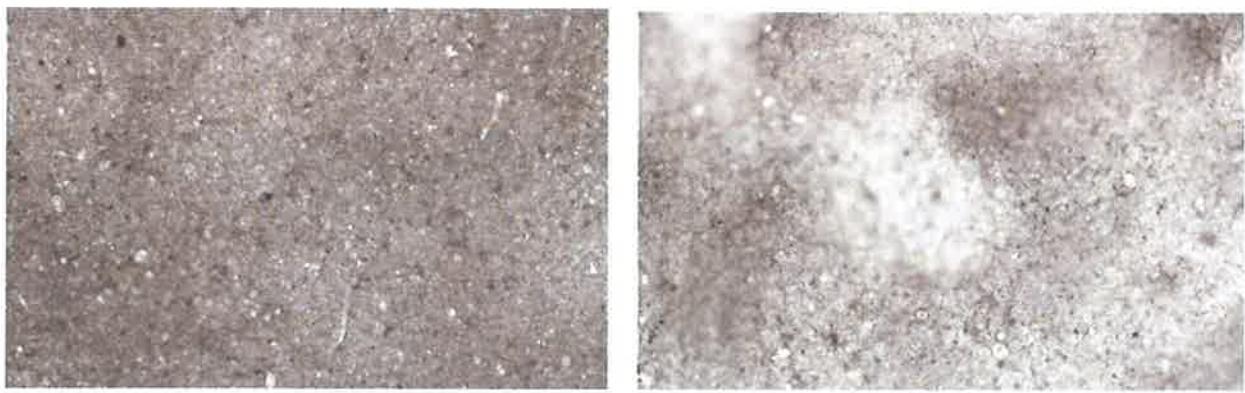
以上のことから、砂型の塗型処理は“浸漬”で行うこととした。



1) 浸漬で塗型処理した際の表面粗さ

2) 吹き付けで塗型処理した際の表面粗さ

図3 塗型処理を施した砂型の表面粗さ



1) 浸漬

2) 吹き付け

図4 塗型処理をした砂型表面の拡大図

図2に示す加工後の砂型の寸法をデジタルノギスにて測定した結果を図5に示す。加工の目標寸法は130 mmである。測定値はマイナス気味であり、砂型を構成する砂粒が工具によって削り取られる際に、周辺の砂粒も同時に脱落しているためであると考えられるが、再生砂#650以外は目標寸法の0~−0.2 mmの間であり、目標値±0.5 mm以内は満足している。再生砂#650については新砂と比べて目標値からのずれが大きい。これは、再生処理の際に前の樹脂の残渣などが残り、樹脂による結合力が新砂より弱いことから、砂粒の脱落が新砂の場合と比べ起こりやすいことが原因であると推測される。ただし、測定値の−0.35 mmは目標値を十分満足する値であり、形状精度の面においても再生砂#650で問題ないことがわかった。

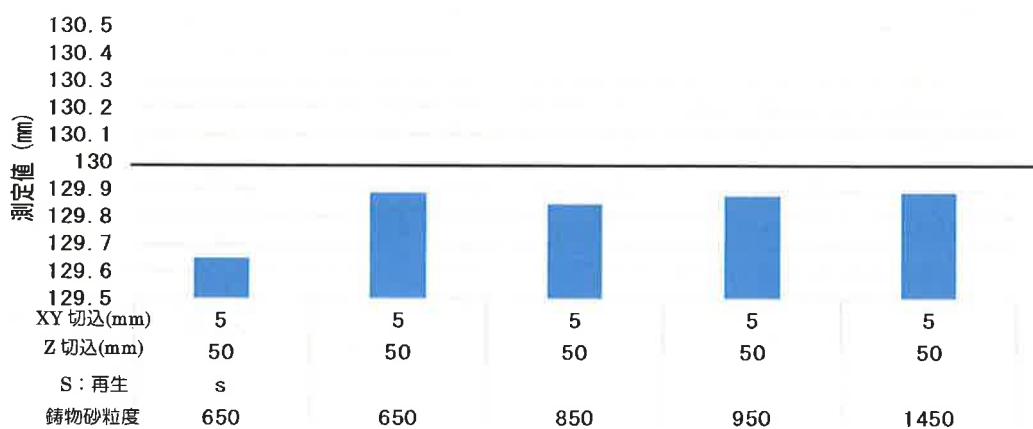


図5 切削した砂型の形状精度

### 2-1-3 加工した砂型を用いて鋳造した鋳造品の表面粗さ・形状精度の把握

切削により作製した砂型を用いて鋳造実験を行った。図6は試験片の3DCADデータ、図

7は図6をもとに作成した砂型の3DCAD データ、図8は図7のデータを用いて作製した切削砂型を用いて鋳造した試験片である。

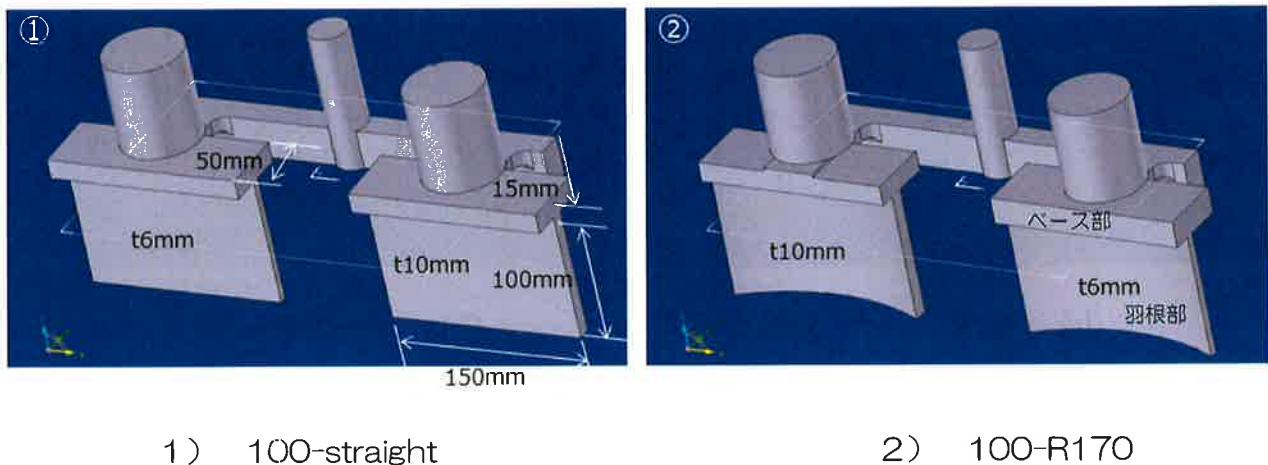


図6 鋳造実験モデル 3D データ

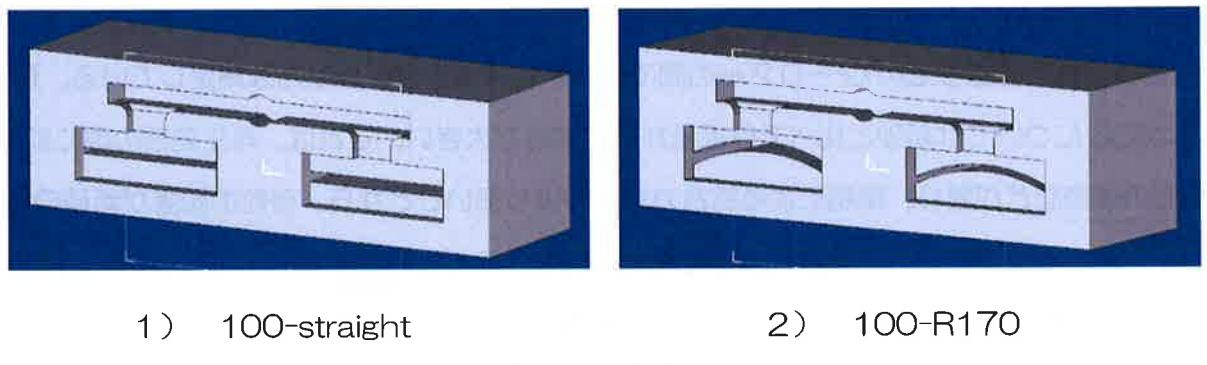


図7 鋳造実験用砂型 3D データ

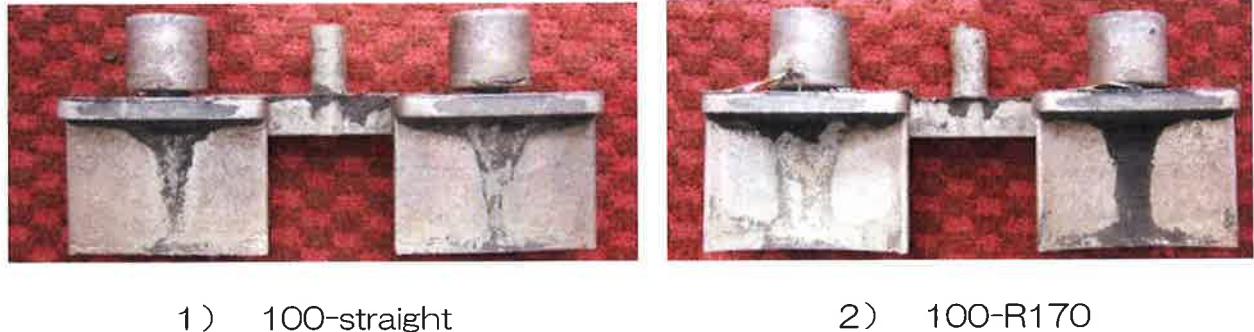


図8 図7 の切削砂型による鋳造試験片

検討を行った形状は4種類で、羽根車の羽根をイメージした薄い板状の羽根部と肉厚のシャフト部分をイメージしたベース部からなる形状とした。また、羽根部は単純な直線状の

“100-straight”と実際の形状に近いR170mmで湾曲した“100-R170”を作製した。羽根部の長さは、 $\phi 6\text{mm}$ のエンドミルで加工が可能な寸法である最大の深さ100mmとした。厚みは6mmおよび10mmの2種類とした。

寸法測定は、デジタルノギスを用いた厚みや幅などを測定し、任意の3か所ずつを測定した。表面粗さは、輪郭形状測定機(DFS600S 小坂研究所)を使用して評価した。

寸法精度(表3および4)は、いずれも誤差の目標値である±1mm以下を満足しているが、寸法の大きい長さ羽根部の100およびベース部の150mmの部分については、誤差がマイナス方向に大きくなっている。凝固時の収縮の影響を強く受けていると考えられる。また、ベース部の15mmの部分は、砂型の合わせ目の影響で形状が崩れ測定値が大きめになっていると考えられる。6mmの羽根部分の厚みについては、 $\phi 6\text{mm}$ のエンドミルを用いて砂型の加工を行っているが、0.5mm程度大きくなっていることから、 $\phi 6\text{mm}$ のエンドミルで深さ100mmを加工する場合、加工代が0.5mm以上必要であることが確認できた。

表3 100-straightの形状測定結果

左		1	2	3	Avg.	Dif.	$\sigma$
ベース 部	150	149.63	149.82	148.97	149.47	-0.53	0.45
	50	50.09	49.91	—	50.00	0.00	0.13
	15	15.53	15.23	15.36	15.37	0.37	0.15
羽根部	100	99.21	99.4	99.12	99.24	-0.76	0.14
	6	6.54	6.52	6.5	6.52	0.52	0.02

左		1	2	3	Avg.	Dif.	$\sigma$
ベース 部	150	149.63	149.82	148.97	149.47	-0.53	0.45
	50	50.09	49.91	—	50.00	0.00	0.13
	15	15.53	15.23	15.36	15.37	0.37	0.15
羽根部	100	99.21	99.4	99.12	99.24	-0.76	0.14
	6	6.54	6.52	6.5	6.52	0.52	0.02

表4 100-R170の形状測定結果

左		1	2	3	Avg.	Dif.	$\sigma$
ベース 部	150	149.84	149.66	149.91	149.80	-0.20	0.13
	50	49.71	49.75	—	49.73	-0.27	0.03
	15	15.46	15.49	15.27	15.41	0.41	0.12
羽根部	100	99.08	99.38	99.27	99.24	-0.76	0.15
	10	10.25	10.22	10.25	10.24	0.24	0.02

右		1	2	3	Avg.	Dif.	$\sigma$
ベース 部	150	149.26	149.53	149.8	149.53	-0.47	0.27
	50	50.08	49.6	—	49.84	-0.16	0.34
	15	15.35	15.38	15.29	15.34	0.34	0.05
羽根部	100	98.93	98.86	99.59	99.13	-0.87	0.40
	6	6.48	6.64	6.56	6.56	0.56	0.08

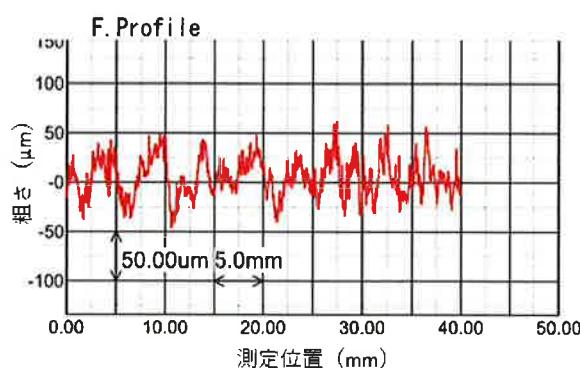


図9 鋳造品の表面粗さ測定結果の一例

表面粗さは、羽部分を横方向に走査する方法で3回測定を行った。測定結果の一例を図9に示す。表面粗さは平均で  $Rz92\mu m$  であり、鋳造品の表面粗さも目標値  $Rz100\mu m$  を達成できた。

#### 2-1-4 湯流れCAE解析による鋳造品の変形量と、砂型・鋳造品の形状変化の比較

鋳造品の凝固過程における変形を評価するために、CAE解析ソフト(ANSYS)を用いて、凝固時の変形に関する過渡伝熱-構造解析を行った。先に伝熱解析を行い、ANSYSで砂型中の鋳造品の温度変化を解析し、熱電対による温度測定値と比較することで、砂型や大気への熱伝達係数などを決定した。今回検討する温度条件は、鋳造実験時の温度変化を再現するため7000secまでは砂型内にあり、10000secまでは型をばらして外気に触れた状態となるように調整した(表6)。その後、得られた温度変化をもとに構造解析で変形の解析を行った。

表6 热伝達係数設定値

対象領域	熱伝達係数(cal/cm <sup>2</sup> ·s·°C)	温度(°C)
雰囲気-鋳造品	0.005	20
砂型-鋳造品	0.0005	200

解析の結果、図10に示す通り“100-straightモデル”的変形量は1/100mmオーダであり、目標値±1.0mmに対し十分に小さい値であることがわかった。

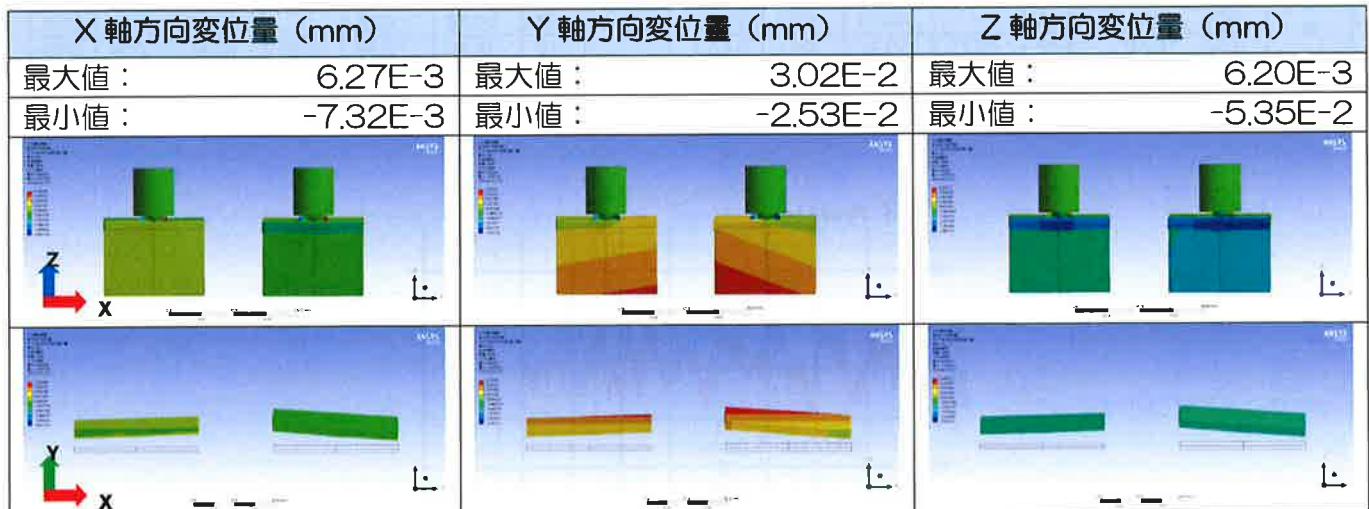
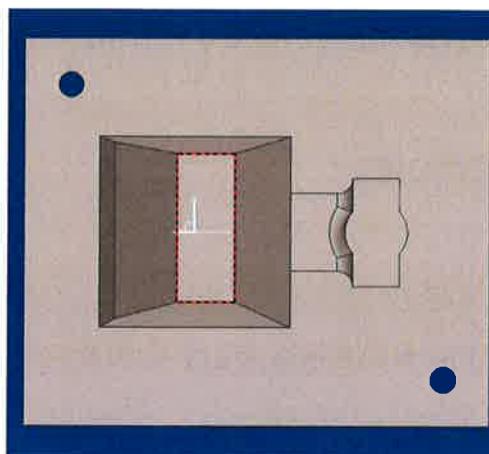


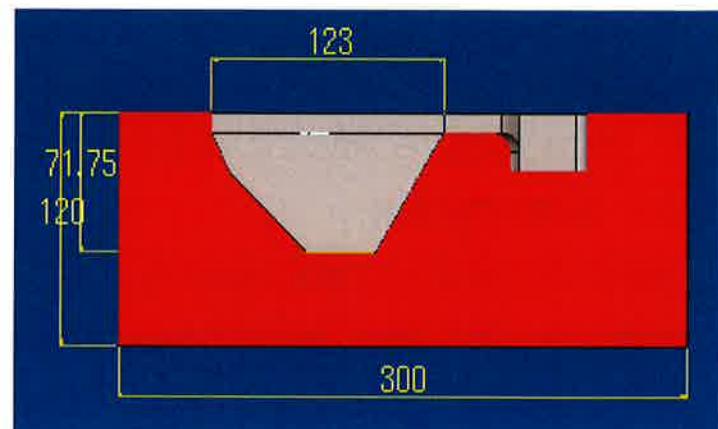
図10 100-straightモデルの変形解析の結果

## 2-1-5 3次元デジタイザによる砂型および鋳造品の測定技術の確立

切削加工で作製した砂型の精度を確認するため、3次元デジタイザを使用して砂型を測定し、CADデータとの比較を行った。測定の対象としてテーパ面や円筒面などよく用いる形状の精度を確認するため、図11の形状を採用した。また、測定結果を図12に示す。



1) 正面図

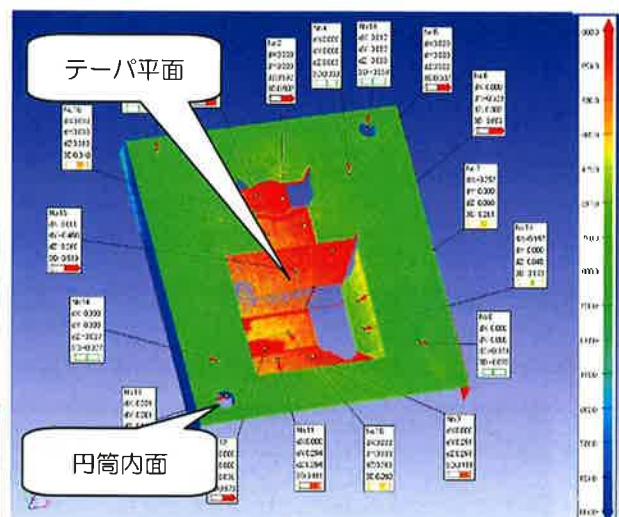


2) 断面図

図11 3次元デジタイザにより測定を行った砂型の形状



1) 測定の様子



2) 測定誤差のコンター図

	形状誤差平均値 (mm)
円筒内面	-0.253
テーパ平面	0.449

図12 3次元デジタイザによる砂型の測定結果

砂型切削の加工精度を求めるためにテーパ平面で構成される立体形状モデルの設計値照合検査を行った。その結果、テーパ平面では削り残しの傾向が見られ、その大きさは+0.45mm、円筒内面では削り過ぎの傾向が見られ、その大きさは-0.25mmであった。

今回の結果では複数軸を同時に動かすテーパ面の加工について誤差が大きくなっているが、最大でもおよそ±0.5mmと目標値を満足していることがわかった。また、値が安定していることから、工具補正を加えることでさらに形状精度の高い砂型を作製可能である。

## 2-2 3DCAD 図面から切削加工により砂型を作製する手順の確立

### 2-2-1 型の割り方の検討

実際に砂型を削るうえで最適な形状を見つけるため、中子の分割方法について CAD/CAM 上で検討を行った。羽根と羽根の間でもう 1 か所分割する 2 分割型を CAD 上で検討したが、分割による砂型強度の低下や組み合わせによる精度の低下が懸念されたことと、2 つのパートの組み合わせが難しいことがわかった。また、当事業の研究推進会議において、川下企業より、砂型の分割は精度の低下につながることから避けるようにとの意見があり、可能な限り分割を行わない方向で検討を進めることとした。

### 2-2-2 ツールパスの作成方法の検討

図 13 に示す 2-3-1 の簡易モデルについて、加工パスの作成を行った。5 軸マシニングセンターの加工ヘッドの首振り軸（C 軸）の回転角度の制限や、切削工具の抜き差しなどの動作が把握しやすい範囲で計算を行うように、加工面を 90 度ずつに分割し、部分ごとにパスを作成することで、パスの作成が可能となった。

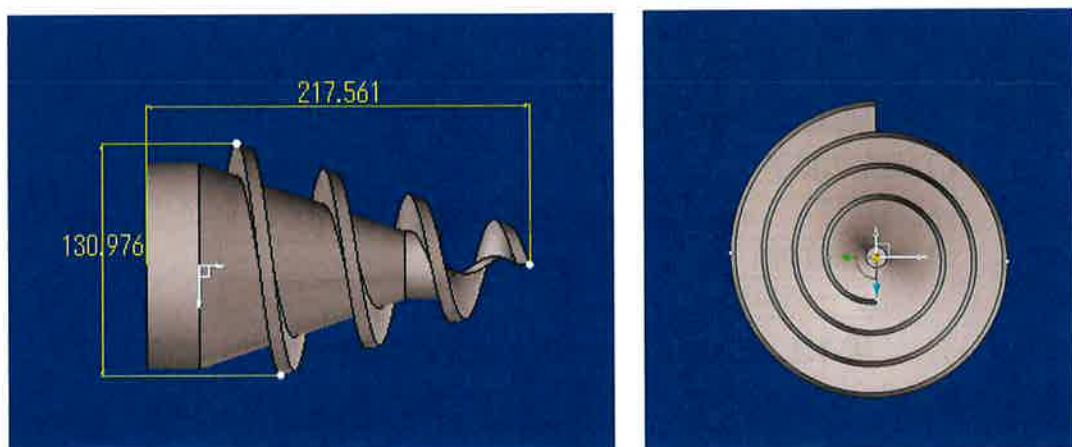


図 13 試作用簡易モデル形状

## 2-3 2-1 および 2 で得られた成果の検証

### 2-3-1 曲面など複雑な形状のモデルによる検証

2-2-2 で検討したツールパス作成方法により中子の作製が可能となり、これを用いて鋳造を行った。作製した鋳造品を図 14 に示す。中子に塗型処理を行ったところ、塗型を塗った時点で、中子が軟化し羽根の厚みにはらつきが生じた。2-1-3 において試験した際、図 15 に示すように塗型塗布面の断面に浸漬の場合 1mm 以上塗型がしみ込んだ痕跡が見られたことから、浸漬の場合は塗型剤の希釈に使うエタノールが砂型内に浸透し、砂型を軟化させてしまうものと考えられる。これについては、塗型処理と砂型の組み立ての順番やタイミングを変えることで、対策可能であることを確認した。



図 14 鋳造したモデル形状

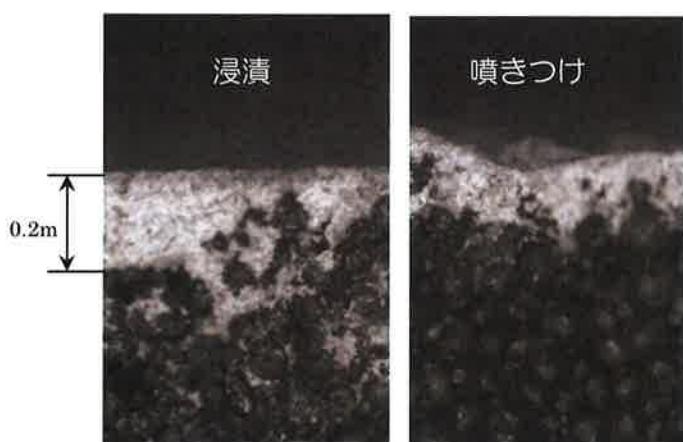


図 15 塗型塗布面の状態

### 2-3-2 試作

これまで得られた成果を基に、川下企業の試作形状を実際に作製し評価した

#### 1) 試作

##### ○試作の手順

①砂型の 3DCAD データ作成（製品の 3DCAD 図面をもとに、砂型の CAD 図面を作成）

川下企業より提示いただいた CAD データをもとに砂型のデータを作成した。ポイントは切削加工しやすい形状の中子にすること、および塗型処理による中子の軟化を抑えることである。

②CAE 解析（CAE により湯流れと変形について解析を行い、必要に応じて CAD データを修正）

CAE 解析結果より、鋳造品は全体的な収縮が生じるもの、薄肉部分の曲りなど局部的な変形はほとんど発生しないというデータが得られたことから、鋳造欠陥の無い鋳造方 案を作成するための湯流れ解析のみを実施した。

### ③ツールパスの作成（切削のプログラムを作成）

加工ヘッドの首振り軸（C 軸）の動作範囲を考慮した作成方法で、ツールパスを作成し た。

### ④切削加工（切削加工で砂型を作製）

砂ブロックから③のツールパスで砂型を切削加工する。

### ⑤型の仕上げ（塗型処理、主型と中子の組付けなど）

2-3-1において問題となった塗型処理による中子の軟化による影響を無くす手順で、組み立てと塗型処理を行った。

### ⑥鋳造（作製した砂型に注湯）

### ⑦後処理（水韌処理、熱処理、プラスト処理）

収縮が大きいと予想される部分があることおよび、サンドblastによる薄肉部分の変 形が考えられることから、従来の後処理方法（試作 1）に加え、収縮による形状変化を考 慮し熱処理の追加とサンドblast時間の短縮を図った方法（試作 2）についても評価を行った。

試作 1（通常の処理）：鋳造の後、水韌処理+サンドblast

試作 2（収縮対策）：鋳造の後、水韌処理+650°C 焼き戻し+サンドblast（時短）

### ⑧評価（形状測定、表面粗さ測定）

3 次元デジタイザ（COMET6 Carl Zeiss）を使用し、試作した鋳造品の形状測定を 実施した。また、表面粗さは粗さ計（タリサーフ PGI1245 AMETEC テーラーホブソ ン）を使用し測定した。表面粗さについては測定長さ 40mm を確保するのが難しい形状 であることから、測定は2か所のみとして平均値を用いて評価した。結果、試作 1 が形状 精度  $\sigma=0.508\text{mm}$ 、表面粗さ  $Rz=111.0 \mu\text{m}$ 、試作 2 が形状精度  $\sigma=0.489\text{mm}$ 、表面 粗さ  $Rz=80.05 \mu\text{m}$  であった。

## ○形状の評価

試作品の形状精度を3次元デジタイザを使用して測定し、設計値（3DCAD モデル）との 比較を行った。比較にはモデルの特徴点（コーナー、カーブ、穴など）をもとに設計値・測

定値の位置あわせを実施し、その状態からの形状の誤差量を算出する方法を用いた。今回の試作品形状は、各羽根の先端部や円錐台のボディ形状を基準とみなすことが出来るものの、実際に円錐台形状のボディの上面部を用いて位置合わせを行うと、設計値と測定値データのズレが大きくなり、適切な形状精度の検証ができないことがわかった。そのため、設計値・測定値の位置合わせについては、測定ソフトの持つ「ベストフィット」機能を基準としながら、手動にて点群（測定値）の平行・回転移動を行い、設計値・測定値の一番近似しやすい位置設定に調整した。測定結果を表7に示す。

試作品表面の測定ポイントにおける設計値からのはらつきは、試作1が $\sigma=0.508$ 、試作2が $\sigma=0.489$ であり、焼戻し処理およびプラスト時間の短縮によりはらつきが小さくなることから、これらの処理により変形が小さくなっていることがわかった。（3次元デジタイザによる測定では、測定点が多いことから統計的手法で精度を評価した。）

また試作2において測定ポイントの95%（ $\pm 2\sigma$ ）が $\pm 0.978$ 以内であったことから、目標の形状精度 $\pm 1.0\text{mm}$ を満足することができた。さらに、表面粗さの測定値も $Rz80.05\mu\text{m}$ であり、目標の $Rz100\mu\text{m}$ を満足できた。

以上のことから、形状精度・表面粗さとともに目標値を満足した試作品を作製することが可能となった。

表7 形状の測定結果

	誤差（平均）(mm)	誤差( $\sigma$ )(mm)
試作1	0.043	0.508
試作2	0.028	0.489

### ○重心の解析

今回の目標形状は回転体であることから、その重心位置のずれが製品性能や製造時の工数に大きく影響を及ぼす。そこで、形状測定結果をもとに重心位置を計算し、設計中心とのズレを解析した。結果を表8に示す。

解析結果を川下企業にて評価いただいたところ、試作1ではバランス取りのための加工量が多く使用は難しいとのことであった。しかし、試作2については加工によりバランスが取れる範囲内であることから、使用に問題ないとのことであった。また、参考までに積層砂型での鋳造品（砂型を積層造形で作製し、それを用いて鋳造で試作）についても調査したところ

ろ、重心のズレは数ミクロンであり積層砂型による鋳造の場合、変形はほとんど起こらないと考えられる。このことから、試作1および2の重心のズレについても凝固過程での収縮や砂型の特性など様々な方向から改善を試みる。これについては今後継続して検討を行う予定である。

表8 重心解析結果

	重心のズレ量(mm)
切削鋳型1	0.836
切削鋳型2	0.572
砂型積層造形	0.011

#### ○製造方法の比較

比較のため、金属積層造形でも同じモデルを試作した。それぞれの方法の特徴を表9に示す。切削砂型による鋳造は、他の製造方法と比較して、価格・納期と初期の量産まで対応可能であることを総合的に判断すると、今回の形状に対し有効な製造方法である。

表9 製造方法の比較表

	砂型切削鋳型による鋳造	砂型積層造形鋳型による鋳造	金属積層造形	木型を用いた鋳型による鋳造
製品作製までの時間	○(10日程度)	△(14日程度)	◎(3日程度)	×(20日程度)
1回の金額	◎(15万円程度)	○(20万円程度)	×(100万円程度)	△(50万円程度) ※
形状精度	○( $\pm 1.0\text{mm}$ )	◎( $\pm 0.6\text{mm}$ )	◎( $\pm 0.5\text{mm}$ )	×( $\pm \text{数mm}$ )
表面粗さ	◎( $Rz100\mu\text{m}$ )	○( $Rz120\mu\text{m}$ )	×( $Rz250\mu\text{m}$ )	◎( $Rz100\mu\text{m}$ )
データ作成	○(10時間)	◎(1時間)	◎(1時間)	×(1週間) (木型作製)
量産対応	○(数百まで可)	△(外注やや難)	×(難)	◎(可)
スコア	20	16	15	13

羽根車生産を参考に、試作から少量の量産を重視して点数付けを行った。◎4 ○3 △2 ×1

※木型代を含めた場合。⇒量産の際には価格が下がる。

## 最終章 全体総括

### 3-1 研究開発成果

#### (1) 切削加工した砂型および切削加工した砂型から作製した鋳造品の評価

- 砂型を切削加工するために、加工に適した鋳物砂および硬化用樹脂の選定を行った。
- 砂型の切削に適した加工条件を選定し、その条件で砂型を加工することにより形状精度の目標値±0.5mm 以内を実現した。表面粗さについても、浸漬で塗型処理を行うことで目標値 Rz100 μm を実現した。
- 切削により作製した砂型を用いて鋳造試験を行い、目標である形状精度±1.0mm 以内と表面粗さ Rz100 μm 以下を実現した。
- CAE 解析により鋳造品の変形を解析し、注湯からの凝固変形を解析する方法を確立した。
- 砂型の形状を3D デジタイザにより評価する方法を確立した。

#### (2) 3DCAD 図面から切削加工により砂型を作製する手順の確立

- 中子を作製する際の、中子の分割方法について検討を行ったが、分割は極力避ける方向で検討すべきであるとの結論に至った。
- ツールパス作成の際、加工部分を 90 度ごとに分割することで、5 軸マシニングセンターの加工ヘッドの首振り軸（C 軸）の角度制限の回避や工具の抜き差し動作の把握が容易になった。

#### (3) 試作

- 中子は、塗型処理などによる変形が問題となることから、塗型処理のタイミングや主型との組付け方法などを形状に合わせて検討する必要があることが明らかとなった。
- 川下企業の設計データを基に試作を行い、目標値である形状精度±1.0mm、表面粗さ Rz100 μm を達成し利用可能なレベルであることを確認した。

### 3-2 PR 活動および特許取得

#### (1) PR 活動

展示会用のサンプル（図 16）を作製し、4 つの展示会に出展した。合計 172 名に対し研究内容を PR することができ、試作品の製造方法として認識してもらうことができた。またユーザからのヒアリングにより、機械部品だけでなくプレス金型や荷電粒子加速器の測定機に

使用する小型の導波管など新しい分野でのニーズを確認することができた。

- ・第 15 回日本加速器学会年会・企業展示  
(長岡産業交流会館「ハイブ長岡」 H30 年 8 月 8 日 PM~10 日 AM 20 名)
- ・とうほく・北海道 自動車関連技術展示商談会 in デンソー  
(株)デンソー本社 H30 年 9 月 19 日~20 日 35 名)
- ・第 50 回管工機材・設備総合展(図 17)  
(東京都産業貿易センター 台東館 H30 年 10 月 24 日~26 日 72 名)
- ・とうほく・北海道 自動車関連技術展示商談会  
(刈谷市産業振興センター「あいおいホール」 H31 年 2 月 7 日~8 日 45 名)



図 16 展示サンプル（3枚羽根）



図 17 管工機材・設備総合展



## (2) 特許取得

3 件の特許取得を目指した。結果、事業終了時点で特許査定 1 件、出願中 2 件となっている。

- ・「鋳物用砂型の製造方法」 特許査定 (H31.1.10)  
切削して砂型にするための、人工砂と樹脂を混練した砂ブロックの作製方法
- ・「砂ブロックの製造方法」(特願 2019-023646) 分割出願 (H31.2.13)  
「鋳物用砂型の製造方法」から切削加工の記述を取り除きの範囲の拡大を図るもの
- ・「鋳造用砂型の製造方法および鋳造用中子」(特願 2019-051994) (H31.3.19)  
「回転体を作製する際の中子の形状において、羽根となる部分は溝加工のみで対応可能であること」など、中子の構造に関する特許

### 3-3 研究開発後の課題・事業化展開

- 砂型積層造形法や金属積層造形法と比べ、若干形状精度が劣ることから、これらの方法と同等の形状精度を達成する。
- 砂型の切削加工における工具寿命など、量産を円滑に進めるための研究を進める。