

最新陶磁器デジタルデザイン技術の開発

副島 潔、古田 祥知子、白石 敦則、江口 佳孝
佐賀県窯業技術センター

本研究は、従来取組んできた陶磁器デジタルデザイン技術の高度化を目的として取組んでいる。粉末積層増形式3D プリンターを利用した、有田焼と同じ天草陶石粉末による陶磁器生地直接造形に成功した。材料押出方式による造形の研究にも着手した。NC 切削による型制作技術の高度化にも取組み、有田焼創業 400 年事業において多数の製品開発に協力した。

Development of Advanced Ceramics Digital Design Method

Kiyoshi SOEJIMA, Sahiko FRUTA, Atsunori SHIRAIISHI, Yoshitaka EGUCHI
Saga Ceramics Research Laboratory

The purpose of this study is the advancement of the ceramics digital design method, which we worked on conventionally. We succeeded in direct molding of the ceramics body utilizing powdery laminating 3D printer. Utilizing ceramics power the same with Arita-ware. Also we started the study of the molding by the Material Extruding method. We worked on the advancement of the model production technology by the CNC Milling, and cooperated with a large number of development of products on business for Arita 400 years Anniversary project.

1. はじめに

当センターでは、陶磁器のデザインから製造に至るプロセスに 3D デジタル技術を応用する研究を 20 年来続けており、「陶磁器デジタルデザイン技術」として業界への普及を図っている。業界への認知も進み、現在では陶磁器分野でも多くの新製品がデジタル技術を利用して開発されるようになった。2016 年は、有田で日本国内では最初の磁器が焼かれた 1616 年から 400 年目にあたる。佐賀県は「有田焼創業 400 年事業」として多くのプロジェクトを推進してきた。本研究はこの事業の一環として、従来の陶磁器デジタルデザイン関連技術をさらに高度に発展させ、世界最高レベルの陶磁器製造技術開発を目指している。

2. 3D プリンターによる陶磁器製作技術の研究

2.1 粉末固着式 3D プリンターによる直接成形技術

2.1.1 概要

従来の陶磁器デジタルデザイン技術では、コンピュータ上で制作した 3D データから、NC 切削で石膏型



図 1 陶磁器粉末を原料として造形した試作品。

を加工し、成型と焼成を経て陶磁器が完成する。3D プリンターは、形状確認のためのサンプルモデル、あるいは特殊な場合の原型を作るための手段に過ぎず、いわば間接的な造形への活用にとどまっており、実際の陶磁器を製造するためには「型」を用いなければならなかった。

ここ数年、改めて 3D プリンターが注目されるようになったのは、単なるサンプルモデルにとどまらず、積極的に製品そのものを製造する新たな手段として期待されているからである。プラスチック系材料や金属系材料では、直接造形できる。陶磁器の生産手段とするな

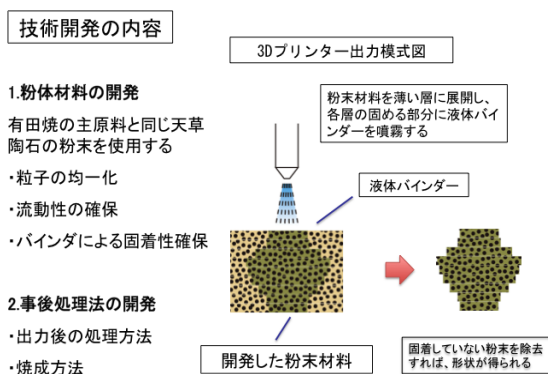


図2 技術開発の内容。

らば、陶磁器原料で成形できなければならない。

当センターでは、粉末固着式 3D プリンターによる陶磁器製作技術の研究に数年前から取り組んできた。陶磁器の形状デザインをコンピュータ上でを行い、その形状データから3D プリンターを使って出力したものを焼成すれば、データどおりの陶磁器が得られるような、粉末造形材料と、関連する周辺技術を研究するものである。本研究では、従来の製法による有田焼の最終製品に出来るだけ近い品質のものを、迅速かつ安価に実現することを目的としている。有田焼業界からスムーズに認知が得られるよう、現在使用されている天草陶石を主成分とした粉末材料での実現を目指してきた(図1)。

有田焼と同素材の陶磁器粉末を利用して成形し、焼成まで行って陶磁器を得る技術を開発し、2015年3月に「C3DPO (Ceramic 3D-Direct Print-Out):陶磁器 3D ダイレクトプリントアウト」技術として発表するに至った。

2.1.2 研究内容

実験機は、Z310Plus(旧 Z Corporation 社、現 3D Systems 社)を利用した。

3D プリンティングでは、材料を薄い層(実験機では0.1mm)に伸展させなければならない。用意した初期材料は粒子径のばらつきが大きく、流動性が悪く、結果として伸展性に問題があった。粉末材料の粉体流動性については、粒子径のばらつきを抑えることである程度向上することが知られている。実機での造形実

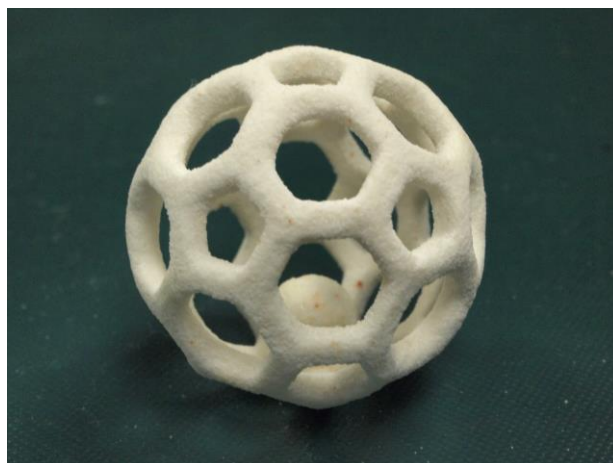


図3 焼成した試作品。

験において、当初は滑らかな造形面を構成することが出来なかったが、篩い分けによって $50\mu\text{m}$ 以下の微粒子側を除去することにより、伸展性が改善され、平滑な造形面を得ることが出来るようになった。

伸展性が解決し、造形サイクルそのものは問題なく終了するようになった段階でも、当初は固化が不十分であり、造形物を取り出すことができず、満足な造形物が得られるまでには時間を要した。現在のところ、重量比約 20%の有機系バインダーを添加することで、良好な成形性が得られ、この成形体で焼成実験を行い、焼成品を得ることができた(図3)。

2.1.3 従来のデジタルデザイン技術及び 3D プリンターの活用と、新技術の比較

陶磁器製造技術のデジタル化に取り組んでいる当センターでは、従来の製造プロセスを前提とした上で、3D プリンターの活用を図ってきた。

コンピュータ上で制作した 3D データから、NC 切削で石膏型を加工し、成型と焼成を経て陶磁器が完成する。3D プリンターは、形状確認のためのサンプルモデル、あるいは特殊な場合の原型を作るための手段に過ぎず、いわば間接的な造形への活用にとどまっております。実際の陶磁器を製造するためには「型」を用いなければならなかった。

これに対し、今回開発した「C3DPO (Ceramic 3D-Direct Print-Out):陶磁器 3D ダイレクトプリントアウト」技術は、3D プリンターで陶磁器原料を直接造形

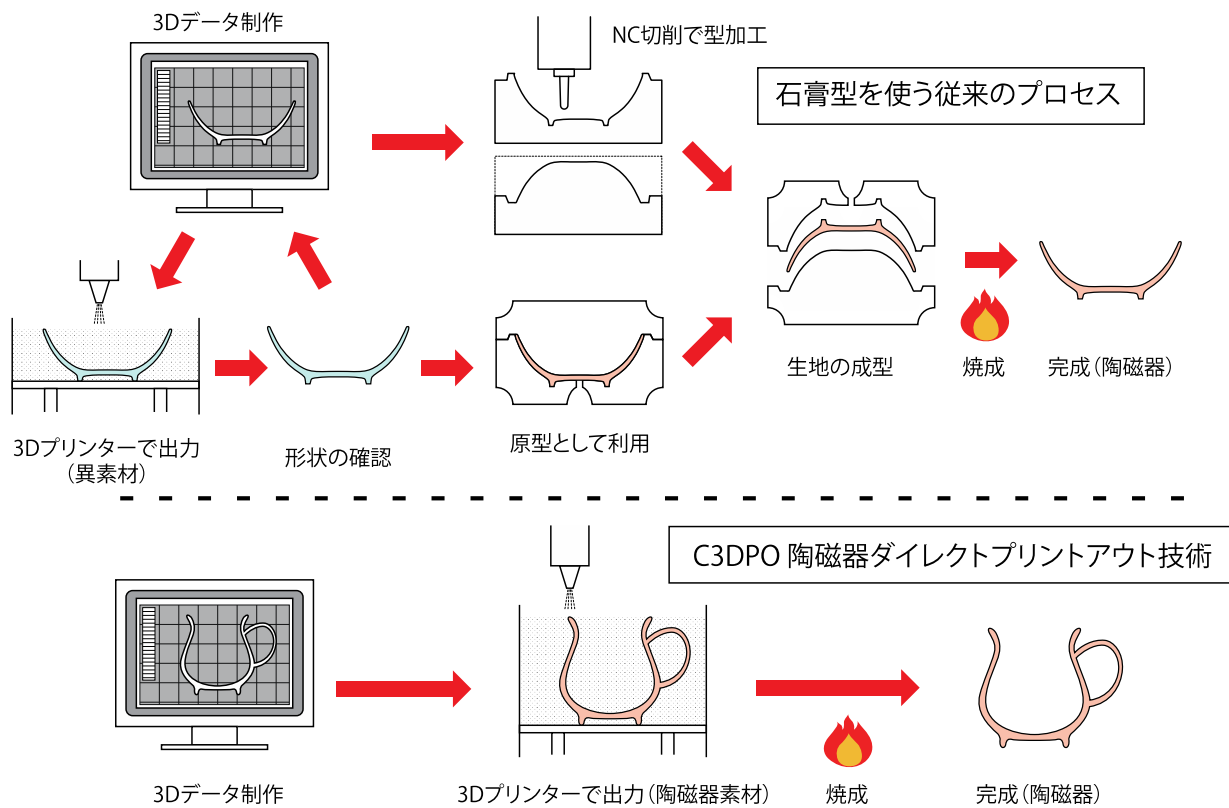


図4 プロセスの比較.

するという「型を用いない製造」を可能にするもので、陶磁器の製造及び流通に変革を及ぼす可能性を秘めている(図4)。

この技術をさらに発展させていくことで、次のような効果が期待できる。

- ・石膏型を使用した従来の成形方法では不可能とされていた複雑な製品の製作を実現
- ・「型」製作を必要としない単品製作を容易にし、極少量の陶磁器製品の商品化を牽引
- ・迅速な試作による製作プロセスの短縮及び低コスト化

しかしながら、現時点での試作品は、完全に磁器化しておらず、強度も従来の製法のものに比べて不足しており、技術開発としてはまだ研究段階である。今後、寸法精度や密度・強度の向上、造形の自由度を高めるため周辺技術等についての課題をクリアする研究を進めていく必要がある。

2.2 熱熔融法積層方式(FDM)による陶磁器成形試

験

2.2.1 概要

3D プリンティングには、粉末積層方式以外に光造形方式、粉末焼結方式、熱熔融積層方式、など様々な方法がある。この中で、熱熔融積層方式(Fused Deposition Molding、以下FDMと表記)は、目的の形状を直接積層して成形していく方式で、中でも現在10万円前後の低価格帯で購入できる汎用3Dプリンターとして主流になっている。FDMは、フィラメントと呼



図5 FDM用フィラメント.

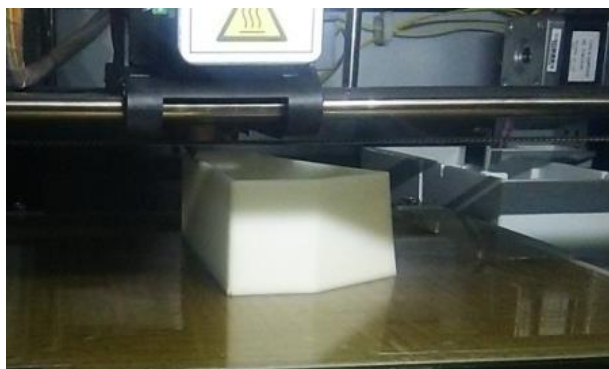


図 6 FDM による積層成形の様子。

ばれるワイヤ状の熱可塑性樹脂(図5)を加熱熔融し、プリンタヘッドから成形テーブルに出力して積層、固化して成形する方式である(図6)。

セラミックスは熱可塑性を持たないが、加熱熔融可能な樹脂-セラミックス複合フィラメントが開発できれば、安価な 3D プリンターが利用できるため、汎用性の高い陶磁器・セラミックスの成形方法の一つになると期待される。そこで本研究では、樹脂材料にセラミックス粉末を配合した、セラミックス複合フィラメントの作製を試み、FDM によるセラミックス成形の可能性を検討した。

2.2.2 実験方法

セラミックス粉末としては、磁器焼成体の粉砕物である天草セルベン(中心粒径 $6.9 \mu\text{m}$)を用い、樹脂は、FDM 用フィラメントとして一般的に用いられている ABS 及び PLA を用いた。樹脂とセルベンの配合方法としては、溶媒で樹脂を溶解し、セルベンを混合する方法(①)、および加熱熔融した樹脂にセルベンを混合する方法(②)、の2つを試みた。

方法①では、PLA がアルコール、アセトン、キシレン系いずれの溶媒にも不溶であるのに対し、ABS フィラメントはキシレン系溶媒に可溶なので、ABS とキシレン系溶媒の組み合わせで試験を行った。まず 5~10mm にカットした ABS 樹脂フィラメントをプラスチック容器に入れ、樹脂/溶媒の重量比が 2~3 になる範囲で溶媒を投入し、45℃に調整した恒温振とう器で一昼夜攪拌して樹脂を溶解した。セルベン/樹脂の重量比が 1~4 の範囲でセルベンを添加し、ハイブリッドミキサーで混合してペーストを調製した。次にペーストを

口径約 2mm のシリンジで射出またはシリコンカップ中に流し込んで乾燥し、一次成形物を得た。一次成形物は 1300℃で焼成し、焼成後の状態を確認した。さらに一次成形物をカットして作製したペレットを、185℃に加熱したフィラメント製造機(図7)に投入し、複合フィラメントの作製を試みた。

方法②では、樹脂ペレットと天草セルベンをフィラメント製造機に直接投入して 150~185℃で加熱混合し、複合フィラメントを成形した。装置の複合化(混合)能力が限られているため、押出したフィラメントを 5mm 程度に切断し、装置に再投入・成形する作業を 3 回繰り返す、複合フィラメントの均質化をはかった。樹脂に対するセルベンの配合割合を 9%から 50%まで徐々に増やし、複合フィラメントの作製を行った。また作製したフィラメントについて、1300℃での焼成試験を行った。

2.2.3 結果と考察

3D プリンター用フィラメントの特性として、柔軟性と強度が求められる。方法①において、セルベン/樹脂配合比の変化による一次成形物およびその焼成体の性状を比較した(表1)。樹脂に対するセルベンの比が 1.0~2.0 の範囲では成形物の柔軟性は保たれ

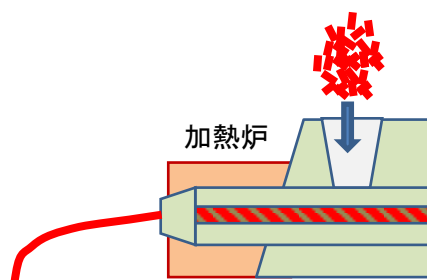


図 7 フィラメント製造機の模式図及び写真。

表 1 セルベン／樹脂配合比(重量比)の違いにおける一次成形物の性状変化。

セルベン／樹脂 配合比(重量比)	柔軟性	焼成時の状況 (1300℃)
1.0	◎	× 激しく発泡
1.5	◎	× 激しく発泡
2.0	○	△ 発泡
2.5	△	○ やや発泡
3.0	×	◎ 焼締り良好
4.0	×	◎ 焼締り良好

ているが、2.5 でやや硬くなり、3.0 以上では折り曲げると容易に折れてしまう状態であった。一方、1300℃焼成時の性状は、セルベン／樹脂の比が1～1.5のときは発泡が激しく、3.0 以上で良好な焼締りを示した。セルベン／樹脂＝2.0～2.5 でも発泡は見られるものの、ほぼ焼き締っており緻密な焼成体が得られた。以上の結果を踏まえ、フィラメント製造機による試験にはセルベン／樹脂＝2.0～2.5 で配合した一次成形物が適していると判断した。セルベン／樹脂＝2.0 の割合で作製した一次成形物を 185℃のフィラメント製造機に通してフィラメントの製造を試みた。しかしながら、出口から押出された成形体は激しく縮れて固まってしまう、柔軟性が完全に失われるという結果となった。これは、有機溶媒での溶解時に樹脂が変質したためと考えられ、セルベン／樹脂＝2.5 の試験も同様な結果になると予想されるので、溶媒を用いた配合試験はここで断念した。

方法②では、まず装置の熔融温度を 185℃に設定し、ABS 樹脂を用いた加熱熔融試験を行ったが、投入口下部の温度が上がりきらず、樹脂と粉の混合が不十分な状態でシリンダーを通ることとったため、セルベン粉が装置内部で目詰まりを起こして装置が停止

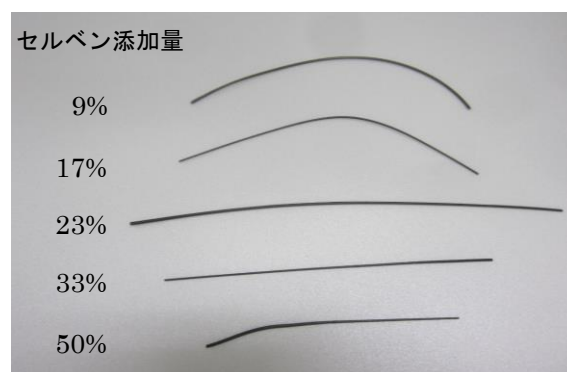


図 8 PLA にセルベンを配合して作製したフィラメント。

してしまう状況が頻発し、口金からフィラメントを押し出すことはできなかった。次に PLA 樹脂を用いた試験を行った。装置の熔融温度を 150℃に設定し、樹脂に対するセルベンの添加量を徐々に増やしながらフィラメントの押出を行ったところ、セルベン添加量が多いところでは樹脂が軟化し押出時の流動性が大きく変形しやすかったが、添加量 9～50% の範囲でワイヤ状のフィラメントを成形することができた(図 8)。しかしながら、セルベン添加量が 33% を超えると複合フィラメントの柔軟性が無くなり、脆く折れやすくなってしまった。

逆にセルベン添加量が少ない領域では、フィラメントとしての柔軟性は保たれるが、樹脂の含有割合が高いため、1300℃焼成時に焼失する部分が大きく、焼成前の形状が完全に崩壊してしまった。

FDM 方式 3D プリンターに用いるフィラメントの特性として柔軟性は必須である。セルベンの配合割合を下げると柔軟性は維持できるものの、焼成時に成形体の形状を全く保つことができなくなった。このように、FDM でのセラミックスの成形は、相反する 2 つの条件を両立する必要があり、非常に困難であると考えられる。汎用性の高い FDM は成形プロセスとして非常に魅力的ではあったが、実現の可能性は低いと判断し、ここで終了することとした。

今後は、同様な直接成形の方式として、粘土状の材料を細いひも状に押出して積層していく材料押出し方式の 3D プリンターによる陶磁器の成形を検討していく予定である。

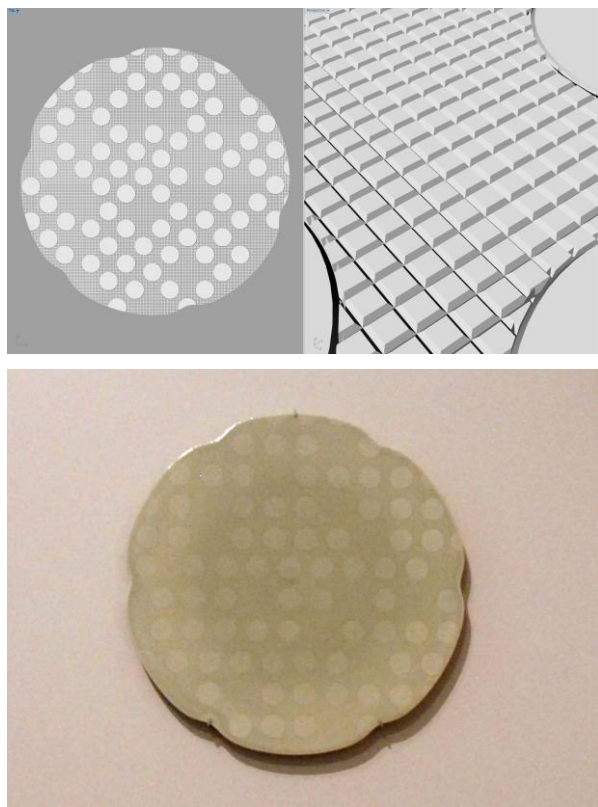


図 9 2016/ Edition.

3. NC 切削による型制作技術の高度化

3.1 有田焼創業 400 年事業における製品開発

本研究は、従来培ってきた陶磁器デジタルデザイン技術を基礎として、さらに高度な水準を目指している。なかでも手作業では不可能な微細な表現は、陶磁器デジタルデザイン技術の特色の一つである。有田焼創業 400 年事業では、この特色を生かした製品も多く生まれた。

中核事業の一つである「2016/ Project」では、8カ国 16 名のデザイナーと地元企業とのコラボレーションにより、300 もの新製品が開発された。この過程では、デザイナーがデザインした 3D デジタルデータをベースに開発が行われた事例が大半である。なかでも Scholten & Baijings によってデザインされた「Edition」シリーズでは、全品の生産用石膏型を、本研究の途上で得られた NC 切削による微細加工技術で制作した。本「Edition」シリーズは有田焼の伝統的な手仕事と最新のデジタル技術の融合が一つの目標であった。例えば図 9 の例は、一辺 0.4mm の四角錐が約 3 万個並びパターンを形成している。このような微細な表現

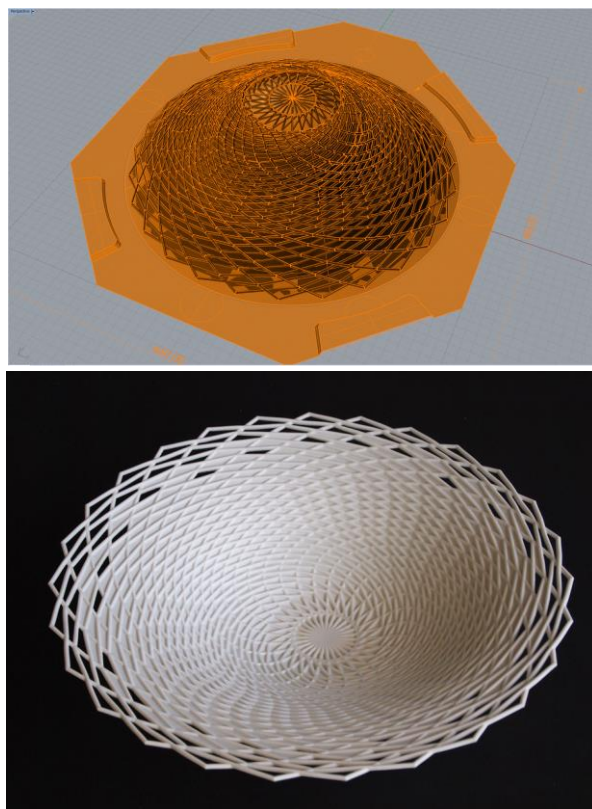


図 10 隈研吾氏デザインの鉢.

を施した生地をベースに、畑萬陶苑(伊万里市)により手仕事で加飾が行われた。

「Arita400Project」において、建築家隈研吾氏がデザインした器は、Grasshopper (CAD ソフトウェア Rhinoceros で動作するアルゴリズム生成による形状モデリングモジュール)でデザインされた、独特の編籠状の鉢であるが、当センターで一部形状のアレンジを施したうえで NC 切削により石膏型を加工し、李荘窯業所(有田町)で制作された。

以上の作品群は、有田焼創業 400 年事業における技術的なマイルストーンともいえよう。

3.2 有田焼精密模型「ホンダ NSX」の開発

本田技術研究所の協力を得て、有田焼創業 400 周年である 2016 年 8 月に同社が日本国内でも販売を開始した最新スポーツカー「ホンダ NSX」(図11)の有田焼精密模型に取組んだ。スケールは自動車模型で一般的な 1/18 である。

以前に制作した新幹線模型 1)では、車体基本部分が排泥鑄込成型であったが、本模型では、車体前後



図 11 ホンダ NSX 東京モーターショー出品車
(ホンダ技術研究所提供).

の微細なメッシュ部分の成型を精密に行うため、圧力
鋳込成型で制作することにした。

模型の制作に当たって、本田技術研究所から特別
に実車の IGES データが提供された。陶磁器デジタル
デザイン技術を駆使して、12 分割した石膏型を NC 切
削で加工し、圧力鋳込み法で成形した。(図 12,13)

一部の小物部品は、陶磁器 3D ダイレクトプリントア
ウト技術により成形しており、以前に制作した新幹線

模型では、車体基本部分が排泥鋳込成型であったが、
本模型では、主に前後の微細なメッシュ部分の成型
が困難であるため、圧力鋳込成型で制作することにし
た。

提供されたデータは実車の外装データである。大半
はデータどおりであるが、1/18 スケールに縮尺してみ
た場合に実車の持つ幅広いイメージに合うよう、若干
左右方向を拡大した。またパネルラインは1/18スケ
ールでも再現できるよう、実スケールより太めに作り直
した。

ボディ成型のための鋳込型は、内部が底部・前部・
後部・右側部・左側部の5ピースと、外部が上部・前
部・後部・右側部・左側部の5ピース、左右ドア後部の
エアインテーク部の2ピースに分かれ、計12ピースの
分割とした(図 12)。型の組上げや成型後の取出しも
特殊な手順によるものである(図 13)。前後のメッシュ
部は従来の技術では再現が困難なほど微細なもので
あったが、精密に再現できた(図 14)



図 12 NSX 模型のボディ型.



図 13 成型の様子.



図 14 精密に再現されたメッシュ部.

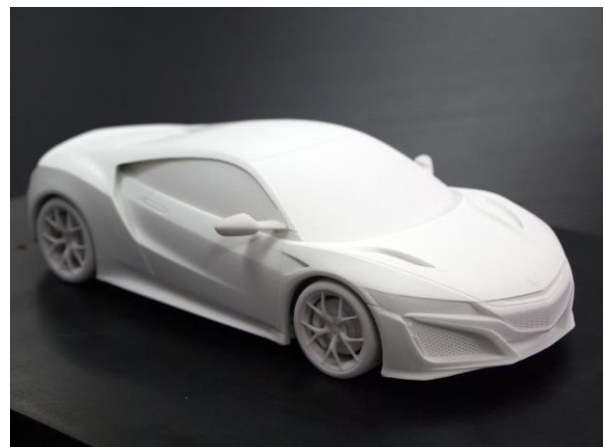


図 15 NSX 模型 白磁完成.

以前制作したトヨタ2000GT2)は1960年代末の車であり、ブレーキ部分は外部から隠れており再現の必要がなかったが、現代のスポーツカーであるNSXでは、ホイールの隙間から見えるブレーキディスクとキャリパーが高性能を感じさせる大きなポイントであるため、別部品で成型して再現した。ホイールスポークの断面は1mm²以下であり、複雑な形状であることから、成型は困難を極めた。

本模型は2016年11月に白磁の状態で作成させ、プレスリリースを行った(図15)。以後、実車に準じた彩色版の制作を継続して行っているところである。

4. まとめ

本稿は研究途中の中間報告である。3Dプリンターを利用した陶磁器生地の直接成形技術については、粉末積層造形による方法はひとまず成果が得られたが、前述のように今後も密度を向上させ磁器に近づける研究を継続している。材料押出方式による成形はフィラメント化を目指した研究では思わしい結果が得られなかったため、スラリーによる成形について研究を始めたところである。

また切削加工技術については従来の成果を基礎として、より高度化した技術で400年事業支援を中心に多くの開発事例に寄与した。今後は5軸加工技術の研究に注力する予定である。また業界への認知は進んでいるが技術者が足りない状況であり、今後も育成に努めたい。

謝辞

本研究を行うに当たり、NSX実車データを提供していただいた本田技術研究所様に、深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 副島 潔他, 佐賀県窯業技術センター平成22年度研究報告書, 57-59 (2011).
- 2) 副島 潔, 佐賀県窯業技術センター平成25年度研究報告書, 61-62 (2014).