

## 簡易粉末成形－焼結法および曲げ加工金型を用いた 鉄道車両模型の製作

三部 竜太郎<sup>\*1</sup>, 藤井 惇平<sup>\*1</sup>, 白木 快<sup>\*2</sup>, 福田 龍一,  
島田 大嗣, 尾崎 充紀, 笹山 智仁, 谷口 幸典

Fabrication of metal train model by performing metal bending and simplified powder metallurgy technique  
in extracurricular activities

Ryutarō SANBE, Junpei FUJII, Kai SHIRAKI, Ryuichi FUKUDA,  
Hirosugu SHIMADA, Mitsunori OZAKI, Tomohito SASAYAMA and Yukinori TANIGUCHI

Recently, there are many extracurricular activities which aim to fabricate train model in Japanese high schools. Since the products are exhibited in annual competition and judged by well-informed person, students have to tackle enhancement of their craft to fabricate realistic train model themselves. To enhance its feel of a material, we have designed and produced a HO gauge train model with metal working processes which are simplified to ensure safe and easy operations by young students. Die-bending process and simplified powder metallurgy technique has been conducted to form main body. Metal train model have been successfully fabricated and won the highest award in the competition.

### 1. 緒 言

鉄道愛好家の中で鉄道模型を主な趣向として交流を図るコミュニティが存在し、そのニーズに合わせた様々なイベントがある。高等学校においても、鉄道模型を扱う文化系のクラブ・サークルが多く存在しているが、自ら手を動かして模型を作ることに興味を示す高校生は少なくなく、鉄道風景のジオラマ製作から鉄道車両の自作まで、ものづくりを主体に据えた活動が成されている。そのような課外活動の成果発表や交流の機会として、(一社)鉄道模型コンテストが主催する「全国高等学校鉄道模型コンテスト」(以下、鉄道模型コンテストと表記)が2009年より毎年開催されている<sup>(1)</sup>。鉄道模型コンテストは、鉄道風景ジオラマや、鉄道車両模型の規格の1つであるHOゲージ車両を自作して出展するものであり、その出来栄が審査員および一般来場者の投票で評価される。なお、HOゲージは実物の鉄道車両に対して1/80の大きさのものを指し、日本において一般的な規格であるNゲージの約2倍の寸法である。

さて、市販の鉄道車両模型の生産工程においては、精巧さを求める愛好家のニーズを満たすために、プラスチック

射出成形はもちろん、ダイカスト成形や板金成形等の各種金属加工法も採用され、精度とともに質感が高められている。鉄道模型コンテストにおいて、金属素材を活用した作品はわずかにあるが、それらは、各種板金成形加工機や高価なレーザー加工機等、金属加工環境を有する工業高校や工業高等専門学校の作品に限られるようである。高等学校の生徒にとって金属の成形加工を行うことは困難であるため、紙やプラ板を素材とした手作業による製作例がほとんどとなる。したがって特に質感の面で市販製品と自作作品の間には大きな隔りがある。

筆者らは工業系高等教育機関に所属する学生・教職員として、高専ロボコンに代表されるような課外学習活動として金属加工作業を行い、金属の質感を活かした作品が製作可能な環境にある。しかし、市販の鉄道車両模型で適用されるような高精度な造形が可能な機器は有していない。これは、ダイカスト成形など高精度かつ大量生産を前提とした高価な金型による金属加工を教育目的で運用することがコスト面で非現実的なためである。ダイカスト成形以外に、意匠の面において高精度な金属加工法は鋳型鋳造～機械加工、となる。鉄道模型では特に顔の部分である車両前面部(以下、前面ブロック)に複雑な造形を行う必要があ

<sup>\*1</sup> 機械工学科3年生, 機械研究会部員

<sup>\*2</sup> 電気工学科1年生, 機械研究会部員

るが、そのために CNC フライス盤が必須となり、高度な専門技能が必要となる。加えて、鑄造作業を課外学習活動として実施することは安全性の観点からも困難であり、鉄道模型コンテストの趣旨からも逸脱するものと思われる。一方で模型の車体については、ワイヤーカット放電加工機を使用すれば、車体側板の窓やドア部を高精度に切抜き加工することが可能である。しかし、形状再現性を考えると、側板の上端と下端はそれぞれ天井板と床板と曲面でつながるために、その部分の加工をどのように行うかが問題となる。そのため、HO ゲージ車両模型の自作を金属素材で行うことによる製品の質感向上を目指す場合、車体形状の再現性を多少犠牲にするか、単純形状部品のみ金属加工品とし、それ以外を紙やプラスチック素材で補うか、のいずれかの選択が必要とされる状況にあった。

そこで筆者らはこれまでに、実物の車体に忠実な側板形状を曲げ加工によって成形することを目的として、レーザー加工機で側板形状となるように切り出したアクリル樹脂板を車体長さ分だけ積層した簡易的な曲げ加工型を製作し、真鍮板の曲げ加工を行った<sup>(2)</sup>。その結果、この手法ではアクリル樹脂間の接合精度を確保することが困難であり、側板にしわが発生した。またアクリル樹脂の剛性と圧縮強度の不足から加圧力は制限され、目的とする曲率を得ることができなかった。これら成形不良による形状誤差を手作業にて修正する必要が生じたこともあり、鉄道模型コンテストにおいては当日までに製作が間に合わず未完成品を出展せざるを得なかった。

その一方で鉄道模型コンテストにおいては、3Dプリンタやレーザー加工機など、いわゆるデジタルファブリケーション機器を駆使して精巧な造形を実現した作品がいくつか見られる状況になっている。その背景として、FabLab (Fabrication Laboratory) と定義される市民工場の開設が近年急速に進んでいることが挙げられる。大学においても工学部のみならず、教育学部や図書館に FabLab が設置されつつあり、人材育成はもちろん、地域社会とのつながりの構築や地域に根差した商品開発など、様々な目的で運営されている。総務省情報通信政策研究所による報告<sup>(3)</sup>では、現在、大量生産・大量消費を前提として企業だけが行うものと暗黙的に認知されている設計製作活動は、多品種少量生産を可能とするデジタルファブリケーション機器の発展と FabLab の普及によって、将来的には誰もが出来るものになる、という予想もされている。デジタルファブリケーション機器で加工可能な素材は現時点では樹脂や木材、紙であるが、アルミや銅の切削加工に対応する比較的低価格な卓上 CNC ミリングマシンも現れている。鉄道模型コンテストのような高校生や学生向けのものづくりイベントへの参加を契機として、一般的な教育機関においても課外活動等でのデジタルファブリケーション機器の導入が増え、今後、金属素材を活用した作品も増えることが示唆される。

本報告では、HO ゲージ鉄道模型の自作を金属素材で行うにあたり、車体側板形状の高い再現性を実現するため、アルミ合金製金型を製作してアルミ板素材の曲げ加工を行った結果について示すとともに、新たな試みとして粉末

冶金法を用いて銅合金製の車両前面ブロックを造形し、車両全体をほぼ金属化した製作内容について述べる。なお、製作した車両は2016年12月に西日本旅客鉄道株式会社によって運行開始された323系(先頭車2両、中間車6両の8両編成)である(図1)。



図1 JR西日本323系の外観写真

## 2. 設計および製作方法

### 2.1 設計製作の指針

十分な強度を兼ね備えた車体とするために、図2に示すような車体構成とした。車体を構成するパーツは床板とフレーム、そして側板の3つである。

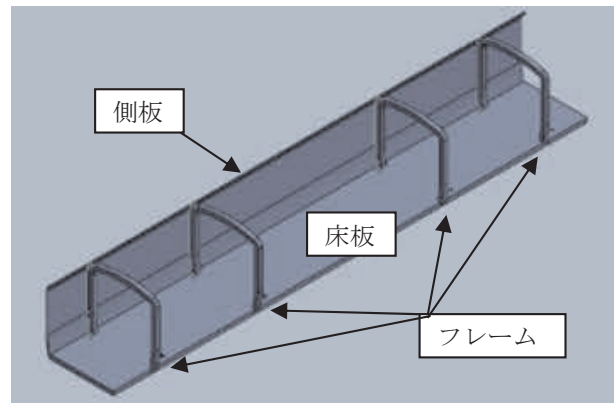


図2 車体構成図

床板となる平板に4つの門型のフレームを差し込み、そのフレームに曲げ加工を施した側板を接着することで、製作の簡略化と車体剛性の向上を図っている。これを計8両分製作する。次に、前面ブロックについて、図3に示すような3D形状データを作製した。

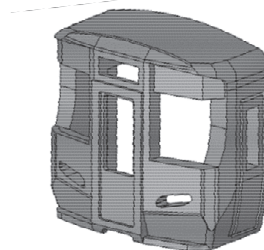


図3 前面ブロックの3D形状

この形状を、銅およびニッケルを素材として簡易粉末成形-焼結法<sup>(4)</sup>で製作する。一般的な粉末冶金法 (Powder Metallurgy Method: PM 法) は、金属粉末の混合～金型成形～焼結、という生産プロセス<sup>(5)</sup>で、焼結高速度工具鋼<sup>(6)</sup>や、鉄道車両においてもパンタグラフのすり板の生産に適用されているなど、各種焼結合金の製法として有名である。これを簡便な作業で誰もが安全に実施できるように改良したのが簡易粉末成形-焼結法である。この手法は、粉末の成形をスリップキャスト法で行うことで手作業にて行えるように簡易化したものであり、金属粉末を液体バインダと混ぜて泥状にして、それをあらかじめ用意した成形型に流し込んで造形する。液体バインダとして寒天水を用いれば、80℃程度の安全な温度で、無加圧で簡単に造形できることが確かめられており、成形型は市販の速乾性シリコーン樹脂に3Dプリンタで製作した任意形状の品物を型取りして製作可能である。ただし、本手法においては成形体の焼結後の体積が約1/3に収縮することがわかっている<sup>(4)</sup>。したがって型取りする原型は製品の収縮を考慮して大きめに製作する。また、開口部を有した形状の場合、乾燥～焼結時の不均一な収縮によって製品形状が大きくひずむ可能性もある。これらを考慮して、原型形状はその大きさを製品の1.4倍とし、窓開口部などをふさいだものとした。原型の3DデータとそれをPLA樹脂で出力したものを図3に示す。

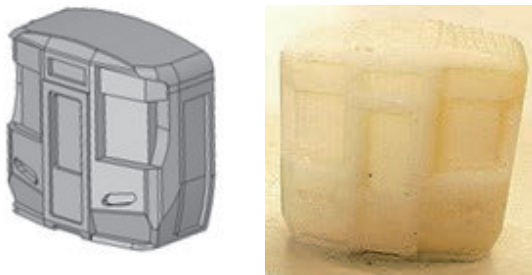


図3 簡易粉末成形のための原型

車体側板は曲げ加工を行うため、加工性の良い材料を用いる必要がある。前回の試みでは厚さ0.2mmの真鍮板を使用した。十分な加工精度と車体剛性を確保できなかったことから、今回は十分な強度を得ることや塗装の手間を省くことを目論み、製作する車両と同様にアルミ板を使用し、その厚さを0.5mmとした。床板とフレームには厚さ2.0mmのアルミ板を使用した。また、排障器は3DプリントしたPLA樹脂製とし、クーラー・床下機器は3Dプリンタにて出力した原型を型取りした型を用いてレジンキャストを用いて大量に複製することで、製作時間と費用の短縮を図った。パンタグラフや台車は市販製品を利用した。

## 2.2 車体の製作方法と側板の加工結果

床板はワイヤーカット放電加工機を用いて素材を切断し、この時にフレームを接合しやすくするために切り欠きを設ける。同じくワイヤーカット放電加工機を用いて切り出したフレームをこの切り欠きに接合する。これら形状データはフリーの2DCADソフトウェアであるJw\_cad (Jiro

Shimizu & Yoshifumi Tanaka) を用いて作成した。

車体側板は、同じくワイヤーカット放電加工機を用いてドアや窓などの部分を切り抜いたものを、金型を用いて曲げ加工を行って製作する。金型素材は側板素材であるアルミ板より硬く、かつ切削加工しやすい材料を選定する必要があり、アルミ合金として強度の高いジュラルミンブロックとした。これをマシニングセンターで切削加工し、図4に示す形状の曲げ加工金型とした。マシニングセンターの加工可能長さの都合で長手方向に二分割した二組を製作し、金具を用いて1つに繋げて使用する。

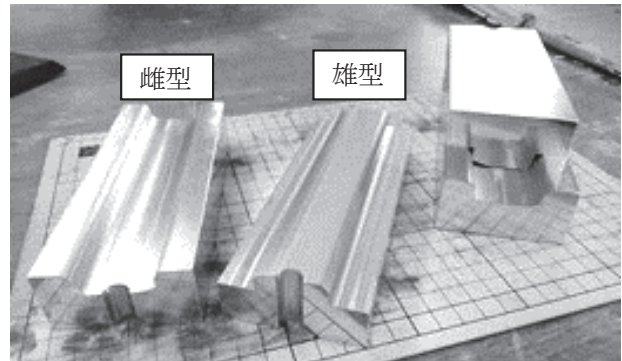


図4 簡易粉末成形のための原型

曲げ加工は、雌型に側板を設置し、雄部を被せて手で押さえつけた状態で、金型の中央と両端の三か所を万力で強圧して行った。これは金型の長さが長いために一度に車体長さ全体を補う加圧力を負荷できないためである。このようにして金型による強圧で曲げ加工された側板を図5に示す。結果、しわの発生も無く、上端と下端における曲面が滑らかに成形されていることがわかる。

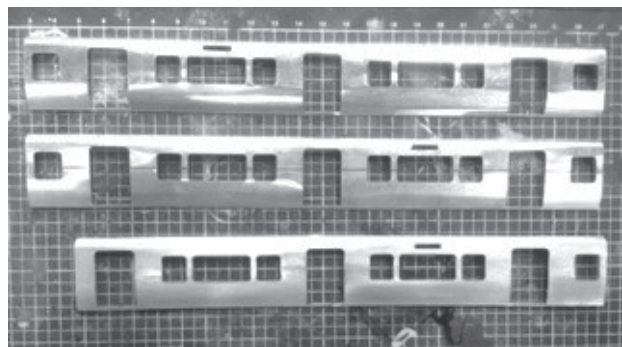


図5 曲げ加工後の側板

## 2.3 前面ブロックの製作方法

素材として用いた銅粉末 (Cu)、ニッケル粉末 (Ni) および水と寒天粉末 (Agar) の配合量を表1に示す。

表1 簡易粉末成形における成形体素材の配合量

Cu	200 g
Ni	32 g
Water	225 g
Agar	2.5 g



このようにNi粉末をCu粉末に対して16mass%配合することは、焼結後の製品をCu-Ni合金として強度を増加させることを意図している。また、CuにNiを添加すると、いわゆる白銅と呼ばれるようにその色合いが銀白色に近いものになることも、後の塗装工程を考えると好都合となる。

焼結後の製品がどれほど収縮するのかが分からないために、収縮率の測定と、形状精度の調整のための試作実験を三通りの条件で行った。作業行程を以下に箇条書きで記す。

- (1) 表1に基づいて測り取った原料粉末をビーカー内で水と混練する。
- (2) 温度が70～80℃になるようにビーカーを加熱保持しながら十分に混練してスラリーとする。
- (3) スラリーを型に流し込み、15分ほど冷蔵庫で冷却して型から成形体を抜き出す(図6)。
- (4) 成形体を十分に乾燥する。なお、本研究では電気乾燥器にて60℃で24時間以上乾燥させた。
- (5) 乾燥した成形体の端面を紙やすりで平滑にしたものを、ステンレス容器の中に入れ、備長炭粉末を、成形体を覆うように容器に充填する。
- (6) ステンレス容器ごと電気炉に投入し、初めに300℃で60min. 保持して寒天成分を昇華して取り除く。その後、1050℃で必要な時間だけ保持する。図7に焼結における温度-時間グラフの例を示す。
- (7) 焼結後、容器から製品を取り出し、表面の酸化膜をワイヤブラシで取り除く。その後、ボール盤による穴あけと手仕上げにて、所要の形状に仕上げて完成させる。

#### 2.4 前面ブロックの試作実験結果

まず初めに、図3に示した原型を用いて成型型を作製し、前節で述べた通りの手順で作業を進め、焼結時の保持時間を180min.としたものを試作した。図8にその製品外観を示す。側面の形状が全く転写されていないのは、図6でも見られるように、型からの抜き出しの段階で形状が損なわれたためである。製品の寸法を目標値との対比として表2に示す。

この試作より、以下の知見が得られた。

- (1) 3Dプリントした原型表面の積層痕が成型型に転写され、そのまま製品表面に現れる。
- (2) 前面の貫通扉と窓部の間にある段差、および下部の段差など細部形状についてはスラリーの充填が十分ではない、もしくは成形体を抜き出す際に破損してしまうため精巧な形状となっていない。設計の段階で、段差の厚さを広めにとっておく必要がある。
- (3) 製品の寸法が元の模型と比べ、僅かに小さくなるため仕上げしろが取れない。これは焼結時間が長すぎたことが原因と考えられる。

これより、側面部分を別部品として三つのパーツとして分割して製作し、前面と接合させることとした。それらパーツの3D形状を図9に示す。前面をAパーツ、屋根部をBパーツ、左右側面は同形状であるためそれらをCパーツとする。



図6 乾燥前の成形体の外観

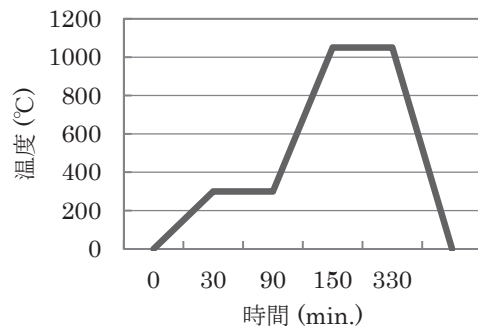


図7 電気炉による焼結時の温度-時間設定の例



図8 焼結後の前面ブロックの外観 (焼結時間 180min.)

表2 焼結時間 180min. で作製した製品の寸法

	目標値	製品
横 (mm)	34.0	33.8
縦 (mm)	32.0	31.4
横誤差率 (%)		-0.588
縦誤差率 (%)		-1.88

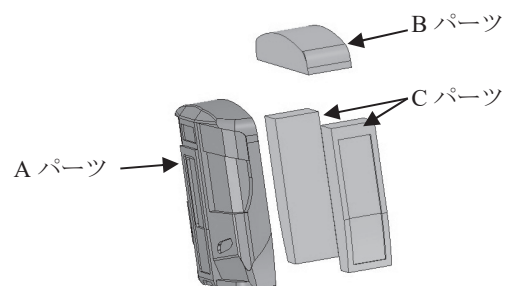


図9 前面ブロックの分割

また、原型の積層痕をパテなどで滑らかに仕上げた上で型取りするとともに、細部形状に適当な抜き勾配を設けて成形体が抜けやすくなるようにした。加えて、A パーツについては肉厚が薄くなったことを利用して、乾燥後の成形体に穴を設けることで、焼結後の穴あけ～手仕上げ加工を省略可能かどうか確かめるものとした。その製品の外観を図 10 に示す。焼結後、左右の窓枠が側方向にひずんでいることがわかる。この原因は、内側部分の体積収縮量が相対的に増加したことで、内側と外側で縦方向のひずみ速度に差が生じた結果、ひずみ速度が遅い窓枠外側が座屈変形したためと考察される。



図 10 前面ブロック成形体と焼結後の外観 (A パーツ、開口部を穴あけ後に焼結)

ひずみ速度の差を極力なくすように窓穴の大きさを小さくして試作してみたが、座屈発生を完全に抑制することはできなかった。加えて、肉厚が薄くなったことで若干のねじり変形も見られたため、焼結時において均一に収縮させて形状を保つ観点からは、成形体にある程度の厚みが必要であることがわかった。これら結果を踏まえて、焼結後の手仕上げ加工の省略化については断念し、厚めの肉厚になるように、また段差部についても抜き出し時の破損を回避するために焼結後の後加工で施すこととして A パーツの形状を再設計した。再設計した 3D 形状を図 11 に示す。また、仕上げしろを取るために、焼結温度 1050℃での保持時間を 120min. に変更した。焼結後の外観を図 12 に示す。なお、窓部の穴はボール盤によるもので、手仕上げで加工している最中の子である。

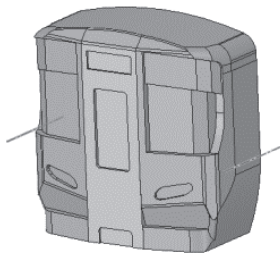


図 11 再設計した A パーツ形状



図 12 再設計 A パーツの焼結後の外観

A パーツについて複数回の試作を行い、最終的に良好な形状となった製品の寸法を表 3 に示す。両者とも収縮量が不十分であり、120min. では保持時間が若干短いことがわかったが、縦横比はおおむね保たれており、誤差量も仕上げしろとして修正可能な範囲であったため、これらを別に作成した B パーツ、C パーツを介して車体と接合して先頭車両 2 両を完成させることに成功した。

表 3 焼結時間 120min. で作製した製品の寸法

	目標値	製品①	製品②
縦 (mm)	34.0	35.8	36.0
横 (mm)	32.0	33.5	33.3
縦誤差率 (%)		5.29	5.88
横誤差率 (%)		4.69	4.06

### 3. 作品の完成と鉄道模型コンテスト出展結果

塗装した車体部品と前面ブロック部品を全車両分組み立てて、最後に 3D プリンタ等で製作した各種パーツを取り付け、所定のマーキングを施して HO ゲージ車両模型として完成させた。作品の外観写真を図 13 に示す。



図 13 完成した作品の外観写真

本作品を第 9 回全国高等学校鉄道模型コンテスト 2017 に出展した結果、最優秀賞を獲得することができた。したがって、簡易粉末成形-焼結法および曲げ加工金型を用いることで、市販品と同様の質感を有し、かつ形状の再現度の高い鉄道車両模型を製作することができたものと言える。

### 4. 結 言

HO ゲージ鉄道車両模型を設計製作するにあたって、一般的には紙やプラ板を素材として製作されている車体および前面ブロックの金属化を実現するため、ジュラルミン金型を作製してアルミ板の曲げ加工を行い、実物と同様の車体側板形状を成形するとともに、簡易粉末成形-焼結法

による Cu-Ni 合金製の前面ブロックの製作に成功した。簡易粉末成形－焼結法については、試作を繰り返して検討した結果、手仕上げなど後加工の労力を排除できるほどの精巧な造形法として確立するまでには至らなかったものの、金属加工設備を用いずに、車両の顔となる部品を一定の精巧さで製作することができた。完成した作品を鉄道模型コンテストに出展した結果、最優秀賞を獲得することができたことから、本報告で実施した製作手法は、市販品と同様の質感を有する金属製模型の自作に適しているものと言える。

### 謝 辞

製作作業においては、奈良工業高等専門学校機械実習工場の設備を利用させていただくとともに、関係する技術職員の先生方の多大なるご協力をいただいた。また、鉄道模型コンテストにおいてはコンテスト関係者や参加校の生徒の方々から鉄道車両模型の自作に関する有益な助言をいただいた。ここに関係各位に謝意を表します。

### 参考文献

- (1) 鉄道模型コンテスト HP, <https://www.moraco.jp/>
- (2) 榎真一, 谷口幸典, 高橋明, 島田大嗣, 福田龍一, 三部竜太郎: 鉄道模型車両 HO ゲージの設計製作, 日本設計工学会関西支部平成 28 年度研究発表講演会講演論文集 (2016), 67-68.
- (3) 総務省情報通信政策研究所: 「ファブ社会」の展望に関する検討会報告書, 2015.
- (4) 谷口幸典: 粉末冶金－焼結法を教材化した小中学生向け教育プログラムの開発, 塑性と加工, 57-671 (2016), 1128-1129.
- (5) 石丸安彦: 粉末冶金の基礎と応用, 67, 技術書院, 1993.
- (6) 黒田大介: 機械・金属材料学, 110, 実教出版, 2015.