

# 高精度・短納期を実現するマイクロ波成形工法の開発

Development of Rapid and Accurate of Dimension Microwave Molding Technology

長嶋 貴志  
Takashi Nagashima

松原 亮  
Ryo Matsubara

若杉 勇作  
Yusaku Wakasugi

伊豫田 真  
Makoto Iyoda

## 要 旨

樹脂部品を高精度・短納期に製造可能なマイクロ波成形工法を開発した。射出成形工法と同品質で、さらに低コスト、短納期を実現するためには、成形用シリコンゴム型および成形品の寸法精度向上と寸法予測技術が必要となる。これらに対し、成形用シリコンゴム型を均熱に硬化させる高精度型製造技術、電磁界・熱流体・熱変形の連成シミュレーションを用いたマイクロ波成形時における成形品の寸法予測技術を開発した。本技術を用いて、在庫部品から製作したサービスパーツは実用化可能な精度を実現した。

## Abstract

We developed a microwave molding method to manufacture resin parts precisely and in a short time. In addition to improving the dimensional accuracy of molding dies and molded products, simulation technology for predicting their dimensions was required, in order to achieve the same quality at a lower cost and shorter manufacturing time than with the injection molding method. Therefore, we developed the mold manufacturing technology for hardening the molding mold uniformly and the simulation technology to predict the dimensions of molded products accurately during microwave molding combining such simulation technologies as electromagnetic field, thermal fluid, and thermal deformation. Service parts manufactured from inventory parts achieved sufficient accuracy for practical use utilizing these technologies.

## 1. はじめに

工業製品には多くの射出成形による樹脂部品が使用されている。顧客のニーズに合わせた品質・機能・デザインが異なる小ロット商品、義肢装具、補聴器など個人への要望に合わせたカスタマイズ商品などを提供するには、企画数100台以下でも対応可能な少量生産が必要である。

第1図にECM (Engineering Chain Management) およびSCM (Supply Chain Management) における樹脂部品を少量生産するメリットを示す。商品企画段階で量産品質の試作品を顧客に提示できれば、相互の理解が深まり、課題を共有できる。デザイン、形状、機能などの課題を抽出する従来の試作評価に加え、外観、触感を含めた品質

課題や量産の課題も抽出でき、開発・設計期間を短縮できる。小ロット部品を短納期で調達でき、サービスパーツも迅速に提供できるため、在庫量を削減できる。生産終了後の金型保管などの管理費用も削減できる。

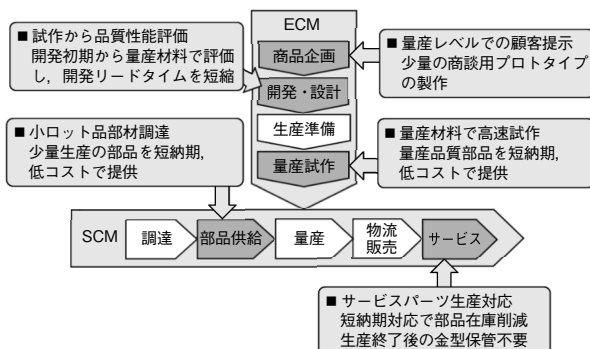
これらを実現するには、金型を使用しない3Dプリンタなど、RP (Rapid Prototyping) 技術の活用が考えられる。本稿では、射出成形工法と同品質でさらに低コスト、短納期を実現する、少量樹脂部品の製造工法を述べる。

## 2. 少量樹脂部品製造工法の問題点

試作評価で活用されている切削加工、3Dプリンタ、マイクロ波成形は、金型を使用しない少量樹脂部品製造工法である。商品企画段階から量産までのすべてのプロセスで使用するためには、商品機能に合わせた材料選択、寸法精度、迅速性が必要である。本章では、これらの工法の問題について述べる。

### 2.1 切削加工

樹脂ブロックを刃物で除去加工する加工法である。寸法精度は100 mmあたり $\pm 0.01$  mm $\sim 0.05$  mmと高いが、刃物で削るため、一体加工が難しい形状があり、分割加工、接着組み立てとなり、強度、信頼性を確保できない[1]。そのため、射出成形と同品質、低コストの部品製造は困難である。



第1図 樹脂部品少量生産のメリット

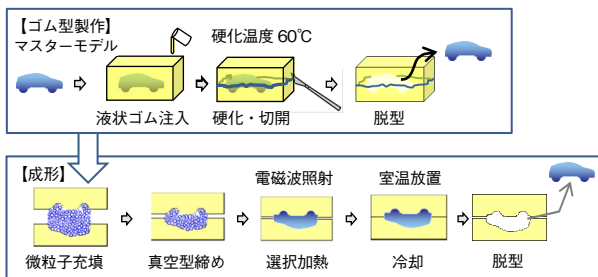
Fig. 1 Merit of the small-scale production of resin parts

## 2.2 3Dプリンタ

材料押出法，材料噴射法，粉末床溶融結合法，液槽光重合法などの各種の方法があるが，材料押出法は線材を溶融・積層をするため寸法精度は低く，また，他の3方法は，寸法精度は高いが選択できる材料が少ない．そのため，強度，耐候性，難燃性，衝撃性，耐薬品性など，商品特性で求められる複数の要件を満たすことができない．

## 2.3 マイクロ波成形

第2図にマイクロ波成形プロセスを示す．シリコーンゴム型（以下ゴム型とする）は，製品の原型（以下マスターモデルとする）をシリコーンゴムで固めた後切開し，マスターモデルを取り出して得る．微粒子状に加工した熱可塑性樹脂をゴム型内部へ充填し，型内部を真空引きして樹脂間の空気除去と型締めを行い，ゴム型外部から照射する電磁波で型内部の樹脂を溶融した後に冷却・固化させることで部品を製造する．照射する電磁波は2.45 GHzのマイクロ波であり，ゴム型と樹脂の両者を加熱する．射出成形と同じ熱可塑性樹脂が選択・使用できるが，寸法精度はJIS B 0405普通公差等級（以下寸法公差とする）中級と低い[2][3]．



第2図 マイクロ波成形プロセス  
Fig. 2 Microwave molding process

切削加工による高精度なマスターモデルの製作，型の製造，成形，寸法測定の一連のプロセスを何度か繰り返すことで成形品の寸法精度を高められるが，この一連のプロセスに1週間ほどの時間を要する．寸法精度が低下している理由を明らかにし，試行錯誤する必要性をなくせば，寸法精度と迅速性を両立できる製造方法として活用できる可能性がある．

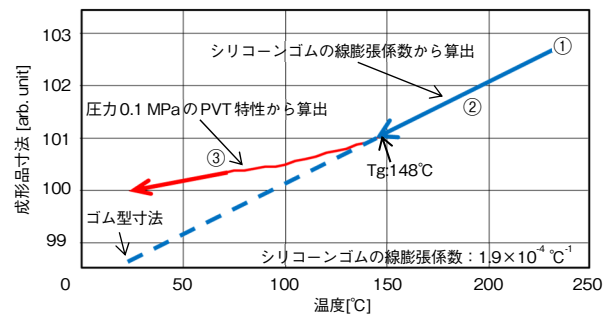
## 3. マイクロ波成形工法の課題

マイクロ波成形を射出成形工法と同品質，さらに低コスト，短納期を実現するには，寸法を予測できることが重要である．そのためには，マイクロ波成形プロセス中

の温度変化による成形品の寸法を把握することが必要である．

### 3.1 マイクロ波成形プロセス中の寸法変化

熱可塑性樹脂のポリカーボネート（以下PCとする）とゴム型に用いるシリコーンゴムの熱収縮の変化から，マイクロ波成形プロセス中の成形品の寸法変化を検討した．PCのガラス転移点（以下T<sub>g</sub>とする），シリコーンゴムとPCの平均線膨張係数を熱分析装置で測定した．PCの圧力（P），比容積（V），温度（T）の関係をPVT測定装置で測定した．第3図に測定結果から算出した寸法変化を，室温（25°C）での成形品寸法を100として示す．



第3図 成形品の寸法変化  
Fig. 3 Dimensional change of the molding process

#### ① 成形温度（230°C）

成形品，ゴム型ともに膨張しているが，成形品はゴム型の空隙で溶融状態にあり，ゴム型と同寸法である．

#### ② 成形温度からT<sub>g</sub>（148°C）までの冷却過程

成形品は溶融状態からゴム状態に変化している領域であり，型形状への追従性が高い[4]．そのため，成形品とゴム型は同寸法となり，ゴム型の線膨張係数により寸法変化する．

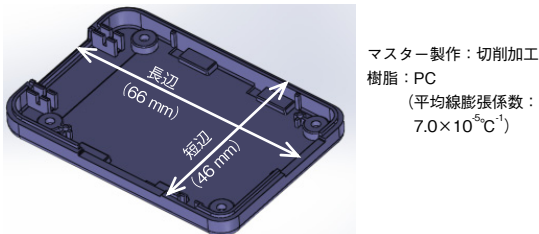
#### ③ T<sub>g</sub>以下の温度領域

成形品は外力による形状変化が難しいガラス状態であり，ゴム型寸法ではなく，PCのPVT特性に基づき収縮する．したがって，PCのPVT特性からPCのT<sub>g</sub>でのゴム型寸法を推定し，それを実現できるゴム型を製作できるようにすることが必要である．

### 3.2 寸法予測に必要な因子

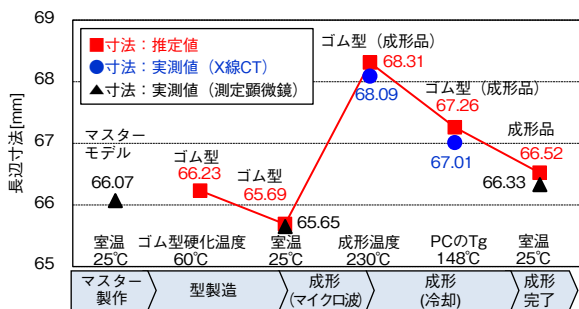
PCの樹脂ブロックを切削加工したマスターモデル（第4図）を用いて，硬化温度60°Cで製作したゴム型とPCを用いた成形品のマイクロ波成形プロセス中の寸法をそれぞれ測定した．冷却過程での型内部寸法の実測は，X線CT（Computed Tomography）を用いて，ゴム型と溶融し

たPCの界面を測定した。前節で測定した物性値からの推定値と実測値の比較を行い、T<sub>g</sub>でのゴム型寸法とPCのPVT特性から、成形品寸法を予測する際に必要な因子を明確にする。



第4図 評価サンプル  
Fig. 4 Molding parts for trial

成形温度 (230°C) に到達後、真空を維持した状態でゴム型を成形設備より取り出し、X線CT装置内に設置して冷却時のゴム型内部の成形品の長辺の寸法を測定した。第5図にマイクロ波成形プロセス中のゴム型および成形品の長辺の推定値と実測値を示す。型製造時のゴム型寸法の推定値は、マスターモデルと液状シリコンゴムが60°Cで均熱した後、硬化したとして算出した。成形中のゴム型寸法の推定値は、型全体が均熱したとして算出した。成形品寸法の推定値は、T<sub>g</sub>でのゴム型寸法推定値とPCのPVT特性から算出した。



第5図 成形プロセス中の解析値と実測値の比較  
Fig. 5 Comparison of calculations and measurements during the molding process

マスターモデルとゴム型では平均線膨張係数に差があるため、室温ではゴム型寸法はマスターモデルよりも小さくなる。型製作後の室温の型寸法は、推定値と実測値との誤差は0.1 mm以下である。しかし、成形温度、PCのT<sub>g</sub>、室温までの冷却過程では、成形品の推定値と実測値では0.19 mm以上の誤差が生じ、マスターモデルに対して±0.3 mmの誤差範囲となるため、寸法公差は中級となる。これは、型周辺が室温のため、型内部がPCのT<sub>g</sub>のとき型

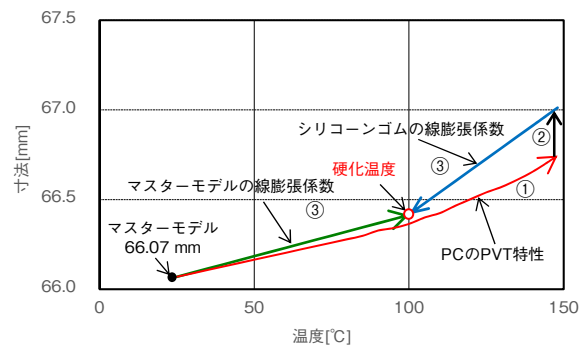
表面の温度が109°Cと低く、ゴム型寸法が小さくなるのが原因と考えられる。そこで、誤差要因を明らかにするため、成形温度到達後にPCのT<sub>g</sub>に保持された恒温槽を用いて、型全体を均熱させた後、室温で冷却して成形を行った。その結果、成形品の寸法は66.58 mmとなり、推定値との誤差は0.1 mm以下となった。ゴム型全体を均熱するためには数時間を要するため、成形品の寸法予測には、型内部と型外部の温度差を考慮したPCのT<sub>g</sub>でのゴム型寸法を予測することが必要である。

#### 4. 寸法精度向上と寸法予測技術

寸法公差が精級の成形品を得るために、成形用ゴム型を均熱に硬化させる型製造技術および成形品の寸法予測技術の検討を行った。

##### 4.1 高精度ゴム型製造技術

ゴム型はマスターモデルを中心に設置した型枠に、液状シリコンゴムを流し込み、恒温槽で加熱し、硬化させて製作する。高精度なゴム型製作には、熱硬化が始まる前に均熱していることが重要となる。今回用いるゴム型の硬化温度は、以下の方法で100°Cと算出した (第6図)。



第6図 ゴム型の硬化温度算出  
Fig. 6 Calculation of the curing temperature of silicone rubber molds

① PCのPVT特性から、マスターモデルと同じ66.07 mmとなるT<sub>g</sub>でのゴム型寸法を算出する。

② 3.2節で硬化温度60 °Cにて製作したゴム型のT<sub>g</sub>における推定値と実測値の誤差を考慮し、①で算出したゴム型の寸法を補正する。

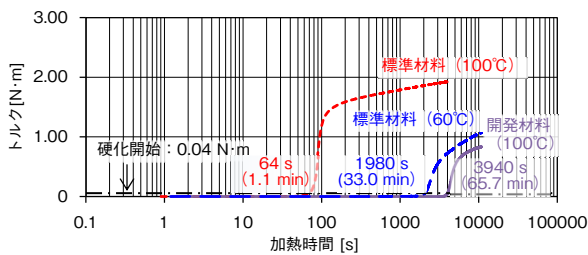
③ マスターモデルの線膨張係数、シリコンゴムの線膨張係数から、②で算出したゴム型寸法となるゴム型の硬化温度を算出する。

しかし、標準材料のシリコンゴムは100°Cでは著しく短時間で硬化するため、マスターモデル、シリコンゴムが均熱する前に硬化が始まる。そのため、硬化温度が

不均一となりマスターモデルと相似形状の高精度なゴム型を製造できない。硬化温度と線膨張係数の関係から高精度な成形品を得るためには100℃で均熱するまで硬化しないシリコンゴムが必要であり、さらに、均熱するまでの時間を把握する必要がある。しかし、恒温槽内でゴム中心の温度測定は困難である。そこで、シリコンゴムの硬化遅延の検討およびシミュレーションを用いた恒温槽内でのシリコンゴムの均熱化の検討を行った。

**〔1〕シリコンゴムの硬化遅延**

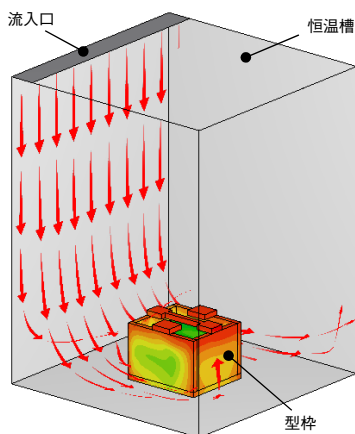
ゴムにねじり振動を加えたときのトルク変化により硬化特性を評価できるキュラストメータでシリコンゴムの熱硬化特性を測定した（第7図）。標準材料は100℃では1.1 minで硬化が始まる。そこで、シリコンゴムに硬化遅延剤を混合し、硬化開始を遅延させる材料を開発した結果、硬化開始時間は65.7 minまで遅延が可能となった。



第7図 シリコンゴムコンパウンド熱硬化特性  
Fig. 7 Thermosetting property of silicone compound

**〔2〕シミュレーションを用いたシリコンゴム均熱化**

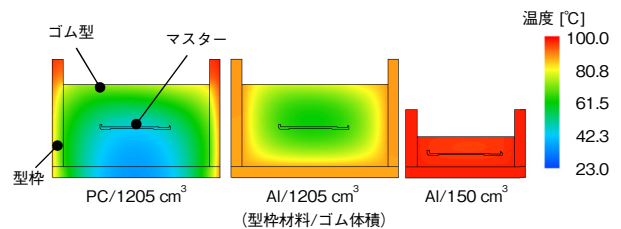
熱流体シミュレーションを用いて、恒温槽内で熱硬化プロセスにおけるゴム型の温度分布を検討した。熱流体シミュレーションは、複雑形状や大規模モデルに適した有限体積法からなる熱流体解析ソフトを用いた。第8図



第8図 熱硬化プロセスにおける熱流体シミュレーションモデル  
Fig. 8 CFD (Computational Fluid Dynamics) model in heat processing

にシミュレーションモデルを示す。

使用する恒温槽および加熱対象となるゴム型とゴム型用型枠を3次元の実寸法でシミュレーションモデル化した。また、恒温槽内の温風を再現するために槽内の風量を測定し、流入風量として入力した。60 min時点でのゴム型断面温度分布の解析結果を第9図に示す。一般に型枠として使われるPCの場合、熱伝導率が低いために、温風が直接当たらない型底面側の温度は低く、全体が均熱化されない。一方で、型枠に熱伝導性の良いアルミニウム (Al) を用いることで加熱の均等性が向上し、さらに、ゴム型の体積を減らすことで最も精度が求められるマスターモデル近傍まで均熱が可能となった。



第9図 ゴム型温度分布  
Fig. 9 Rubber mold temperature distribution

**4.2 シミュレーションを用いた成形品の寸法予測**

成形品の寸法精度を向上させるために、マイクロ波成形のプロセスをシミュレーションする手法を検討した。

マイクロ波成形は、マイクロ波成形設備内に熱可塑性樹脂を充填したゴム型を設置し、成形設備内で一定時間電磁波により加熱し、その後、成形設備から取り出し、常温で冷却していく過程となる。

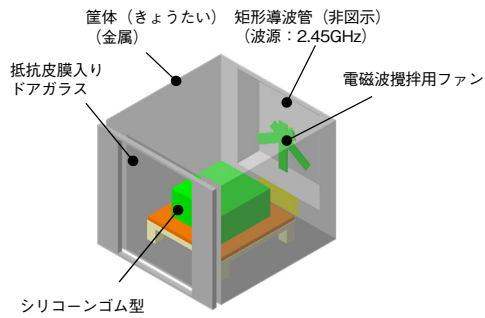
この過程を、電磁界、熱流体および熱変形のシミュレーションを連成することでモデル化する手法を考案した。

電磁界シミュレーションは、3次元の複雑な形状や材料定数の異なる物質の解析に適しているFDTD (Finite difference time domain method) 法からなる電磁界解析ソフト[5]を用いた。熱流体シミュレーションは4.1.2項と同様のソフト、熱変形シミュレーションは有限要素法からなる構造解析ソフトを用いた。第10図にマイクロ波成形のシミュレーションモデルを示す。

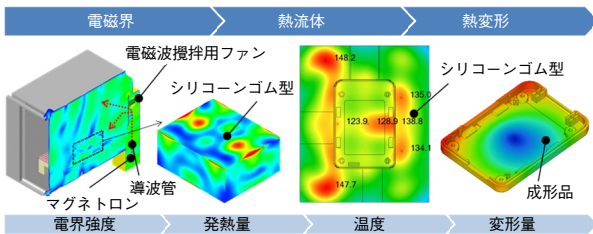
マイクロ波成形設備および加熱対象となる成形用のゴム型を3次元の実寸法で解析モデル化し、設備内での電磁波の攪拌 (かくはん) も、電磁波攪拌用ファンの回転をモデル化することで考慮した。

第11図に電磁界、熱、熱変形の検討フローおよびシミュレーション結果を示す。

電磁界シミュレーションでゴム型の発熱量を算出し、その結果を熱流体シミュレーションに入力し、ゴム型の



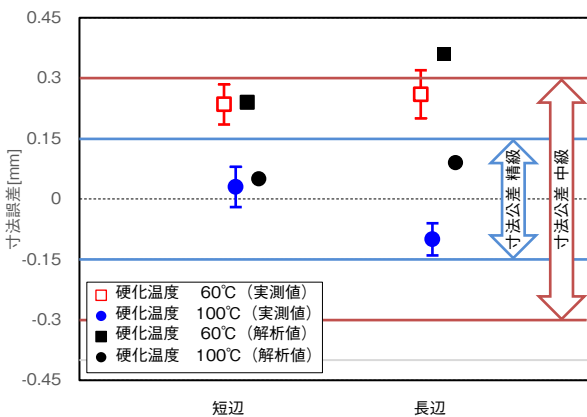
第10図 マイクロ波成形シミュレーションモデル  
Fig. 10 Microwave molding analysis model



第11図 電磁界, 熱流体, 熱変形の連成シミュレーション結果  
Fig. 11 Results obtained by electromagnetic field, thermal fluid, and thermal deformation simulation

温度分布を算出した。その結果から、さらにゴム型から生成される成形品の変形量を算出する一連の解析手法を考案した。

これら一連の取り組みの結果として、第12図に硬化温度60℃と硬化温度100℃で製作したゴム型で成形した成形品の実測結果および解析結果を示す。



第12図 ゴム型硬化温度と成形品の寸法精度  
Fig. 12 Dimensional accuracy of molded parts depending on the mold curing temperature

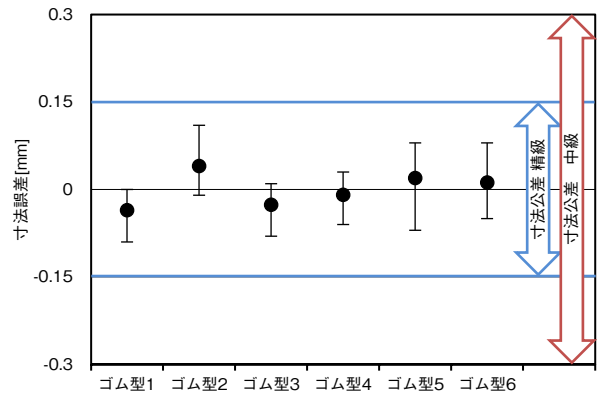
製作した成形品は、ゴム型硬化温度60℃では寸法公差はマスターモデルに対して±0.8 mmの誤差範囲である粗級～±0.3 mmの中級であったが、硬化温度100℃では±0.15 mmとなり精級を達成し、予測した寸法となる高精度なゴム型を製作できた。

さらに、解析結果においても、成形品長辺および短辺の寸法誤差は、長辺の形状が複雑でやや誤差が大きくなっているが、0.3%以下となり精度よく一致した。

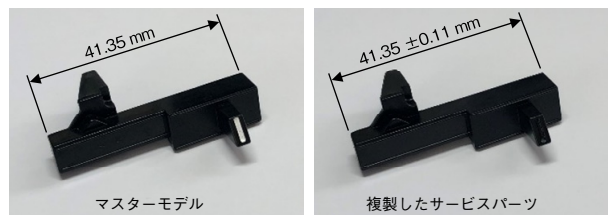
この解析手法を用いることで、成形品ごとに変形量から寸法予測が可能となった。

### 5. サービスパーツへの適用

サービスパーツとして保管されたPC製部品をマスターモデルとし、本技術を用いて複製した成形品の寸法測定結果を第13図、成形品の写真を第14図に示す。ゴム型の耐久性を考慮し、100個成形品を製作するため、同じマスターモデルで6個のゴム型を製作した。高精度ゴム型製造技術により、繰り返し同一形状のゴム型が製作でき、6個のゴム型で成形した100個の複製部品は寸法公差精級を実現した。



第13図 複製したサービスパーツの寸法精度  
Fig. 13 Dimensional accuracy of duplicated service parts



第14図 マスターモデルと複製したサービスパーツ  
Fig. 14 Master model and duplicated service parts

## 6. まとめ

樹脂部品を高精度・短納期で製造可能なマイクロ波成形工法を開発した。射出成形工法と同品質で、さらに低コスト、短納期を実現するためには、成形用ゴム型および寸法精度向上と寸法予測技術が必要となる。これらに対し、成形用ゴム型を均熱に硬化させる型製造技術およびマイクロ波成形時における成形品の寸法予測技術を開発した。本技術を用いて、在庫部品から製作したサービスパーツは実用化可能な精度を実現した。

今後、マイクロ波成形工法の適用範囲拡大のため、製品サイズの大形化や難燃樹脂対応など使用可能な樹脂素材の拡大に取り組み、さらなる対応力強化を図っていく。

### 参考文献

- [1] 上杉北斗, “3Dプリンターの実像,” 日本印刷学会誌, vol. 51, no. 4, pp. 236-240, 2014.
- [2] 栗原文夫, “マイクロ波成形による試作・少量生産<ゴム型で熱可塑性樹脂を成形する技術>,” 日本プラスチック工業連盟誌 プラスチックス, vol. 65, no. 9, pp.31-35, 2014.
- [3] (株) デイメック, “光成形システムAmolsys,” JSR Technical Review, no. 120, pp. 26-30, Mar. 2013.
- [4] 尾崎弘晃, “CF/P C積層板を用いたスタンピング成形品の表面品質, 強度および寸法安定性に及ぼす成形条件の影響に関する研究,” 博士論文, 金沢工業大学大学院工学研究科, 2015.
- [5] 並木武文 他, “電磁波解析ソフトウェアPoynting,” FUJITSU, vol. 59, no. 5, pp. 576-582, 2008.

### 執筆者紹介



長嶋 貴志 Takashi Nagashima  
コネクティッドソリューションズ社  
生産技術センター  
Production Engineering Center,  
Connected Solutions Company  
博士 (工学)



松原 亮 Ryo Matsubara  
コネクティッドソリューションズ社  
イノベーションセンター  
Innovation Center,  
Connected Solutions Company



若杉 勇作 Yusaku Wakasugi  
コネクティッドソリューションズ社  
イノベーションセンター  
Innovation Center,  
Connected Solutions Company



伊豫田 真 Makoto Iyoda  
コネクティッドソリューションズ社  
イノベーションセンター  
Innovation Center,  
Connected Solutions Company