

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 12 月 1 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560128

研究課題名（和文）

ナノマテリアルを用いた機能性部品のラピッドプロトタイピングに関する研究

研究課題名（英文）

Study on the rapid prototyping of functional parts using nano-material

研究代表者

檜原弘之 (NARAHARA HIROYUKI)

九州工業大学・大学院情報工学研究院・教授

研究者番号：80208082

研究成果の概要（和文）：

本研究は積層造形法で Molded Interconnect Device(成形回路部品:MID)等の機能性部品の迅速試作実現を将来的な目標とし、本研究課題ではナノ材料等を用いて導電機能を検討した。シルバーナノインクによる実験では、カーボンインク等を併用して FDM 部品内部へインクの浸透を防ぐことが回路形成には有効となることが判った。炉による熱処理を行わずに積層造形法による直接描画を実現するために導電性樹脂の基礎特性実験を行った。ABS 樹脂にカーボンブラックを混合した導電性樹脂は、FDM 装置による吐出が可能であったが、一般的な電気回路として用いるには不十分であった。はんだ粉末を混合した導電性樹脂の電気抵抗率は、一般的な電気回路として用いるのに十分な値を示した。

研究成果の概要（英文）：

This study sets realization of the rapid prototyping of functional parts, such as Molded Interconnect Device (MID), as the prospective target by the Additive Fabrication method. This project studies the conductive function using nano-material etc. It turned out by the experiment that it is effective in circuit formation to prevent the silver nano-ink from spreading inside FDM parts by using carbon ink together. In order to realize conductive circuit by an Additive Fabrication method directly, without heat treatment at a furnace, the fundamental experiment for conductive resin was conducted. The discharge from the nozzle of an FDM head was possible for the conductive resin which mixed carbon black to ABS resin. However, it showed the value insufficient for using as a generic electric circuit. The electrical resistivity of the conductive resin mixed solder powder showed sufficient value to use as a generic electric circuit.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,900,000	870,000	3,770,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	100,000	30,000	130,000
年度	0	0	0
年度	0	0	0
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：生産システム

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：MID、ラピッドプロトタイピング、Additive Manufacturing

1. 研究開始当初の背景

積層造形法はラピッドプロトタイピングとも呼ばれる。3次元形状部品を薄い層の積み重ねとして定義し、プラスチックや金属材料を少しずつ付加接合しながら立体部品を実現する技術である。切削等の除去加工技術とは異なり、複雑な形状であっても加工プロセスがほとんど影響を受けずに製造可能という特長を持つ。

一方、Molded Interconnect Device（成形回路部品：MID）とは、射出成形部品の表面に電気回路を立体的に形成する技術である。MID部品は、機械構造部品と電気配線回路部品との機能を共に有しており、省スペース化、組み立て工数の削減などの要求を満足できることから、電子機器の小型化に伴い重要性が増している。

MID部品は構造部品としての部品形状と、電気配線の一体化されたものであるため、将来的にはセンサー型部品、流体検査チップ、小型アクチュエータやスマート部品のための要素技術となり得る。MIDにより、これまでに無い機能部品を実現できることから、機械的機能の役割としての部品構造体の形成技術についても基礎的な検討を加えてゆくことが必要である。

MIDは今後、産業的に価値が高まると予想されるが、これを積層造形法に基づいて実現しようとする場合、これまで該当分野の研究で考慮する必要の無かった以下の研究が必要になってくる。

- ①単一材料の問題から異種材料組み合わせ問題への拡張。
- ②基台と配線部での異種材料接合問題。例えば金属とプラスチックの接合物理。
- ③配線材料・構造材料としての導電性・絶縁性機能の考慮。
- ④3次元的な細線化・微細化の研究。
- ⑤造形基本原理選択の問題。

これらの研究課題は、単一材料の研究が中心の、これまでのラピッドプロトタイピング研究をさらに発展させるものとして非常に興味深く、重要なテーマである。

本研究課題では、積層造形技術による新しい機械的機能としての通気構造の成形技術の検討を進める。また配線回路形成のための電気的機能について、ナノマテリアルを用いて新材料・新プロセス開発技術の検討を加えてゆく。

2. 研究の目的

本研究はMolded Interconnect Device（成形回路部品：MID）等の機能性部品の迅速試作実現を将来的な目標とし、本研究課題では

積層造形法でナノマテリアルを用いて機能性部品のラピッドプロトタイピングを実現するために必要となる基礎理論の整備にある。この課題を実現するために、本研究では以下の課題に取り組む。

- (1) 高粘性樹脂流体吐出のための吐出ノズルの解析と実験
- (2) 微細パターン描画の熱成形プロセスによる機能部品の機能解析と実験
- (3) 接合問題における積層プロセスの影響の解析と検証実験

3. 研究の方法

- (1) 高粘性樹脂流体吐出のための吐出ノズルの解析と実験

熔融型積層造形法を模した吐出ノズル機構を製作し基礎実験装置の構築を行う。吐出ノズル機構の構造の違いによる基礎実験を実施して、基礎特性評価を行う。熔融樹脂を制御性良く吐出可能にする熔融ヘッドを構築するための熔融ヘッド構造についての機能性評価手法を検討する。ポリビニルアルコールとホウ砂水溶液の混合溶液でスライムを作製し、実際の熔融した樹脂の粘度に近くなるよう調整した材料で吐出実験を行う。

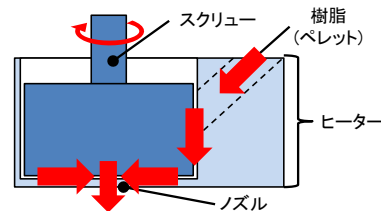


図1 検討を行う FDM ヘッドの基本構成

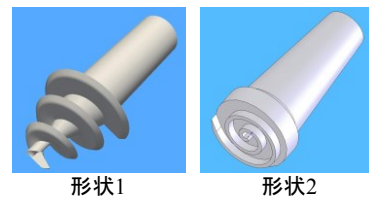


図2 比較を行うスクリュー形状

表1 実験条件

	粘度[dPa·s]	回転数[rpm]		吐出時間[s]
N1	150	15	30	60
N2	50			

また小型スクリューを用いた FDM 装置のノズル機構の設計形状について検討する。入力に回転数、出力に吐出質量とした入出力関係について調べる。品質工学に基づくパラメータ設計により、粘度の影響を受けにくく材料吐出を促進する最良ノズル形状を求める。

(2) 微細パターン描画の熱成形プロセスによる機能性部品の機能解析と実験

レーザー光を選択的に描画することで、図3(b)に示すような、流体回路等に適用可能な任意のデザインの微細な3次元通気構造を実現することが可能である。積層造形法で微細パターンを描画可能とするため、レーザー粉末焼結式積層造形法に基づく積層プロセスの基礎特性を評価し、通気機能を発現・向上させるための成形条件について検討する。

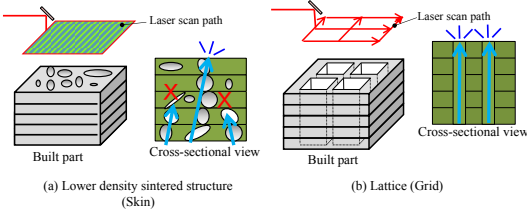


図3 レーザ粉末焼結による通気構造形成

多孔質焼結金属フィルタの単位時間当たりの通気量は次式によって導かれる。

$$\Delta P = (\mu L / \phi)(Q/A) \quad (1)$$

ここに、L:空孔部厚さ[mm]、 μ :空気粘性係数[Pa·s]、Q:通気量[l/mm²]、 ΔP :圧力損失[Pa]、 ϕ :透過係数[m²]、A:格子状構造面積[mm²]である。

格子ピッチを変えて作製した格子状通気構造の試験片の透過係数を求める。通気量Qおよび圧力損失 ΔP の測定を行う。粘性係数 μ と空孔部厚さLは既知であることから、この結果から(1)式に基づき、透過係数 ϕ を算出する。試験片形状を図4に、実験条件を表2に、通気試験装置の構成を図5に示す。

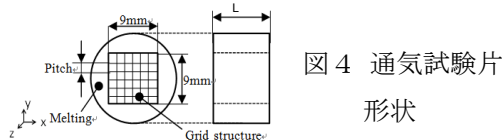


図4 通気試験片形状

表2 実験条件

Name	Length of the lattice Side [mm]	Lattice thickness [mm]	Building pitch [mm]	Pressure [MPa]
Pitch0.6	9 (A=81[mm ²])	10,15	0.6	0.1~0.6
Pitch0.8			0.8	
Pitch1.0			1.0	
Pitch1.2			1.2	
Pitch1.4			1.4	
Pitch1.6			1.6	
Pitch1.8	1.8	0.05~0.2		
Pitch2.0	2.0			

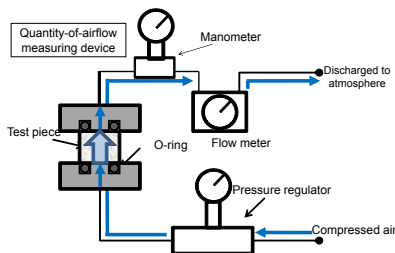


図5 通気試験装置の構成

(3) 接合問題における積層プロセスの影響の解析と検証実験

熱溶解積層造形法(FDM法)に基づき、導電性機能を実現する方法として、以下の2手法について検討する。第1の手法は、FDMで作製された基板(部品)上に、シルバー・ナノインク等で配線回路を形成する(図6(a))。第2の手法は、FDMの造形原理をそのまま使うが、導電材料を混合した導電性プラスチックを作成し、配線回路を形成する(図6(b))。

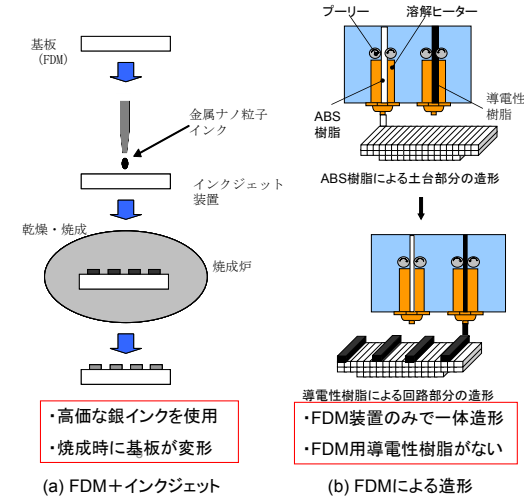


図6 積層造形法に基づくMID形成

①導電性材料の積層条件の違いによる導電性への影響:

FDM部品へ直接シルバーインクで配線回路を描画しようとする、部品内部へのインクの浸透が観察された。FDMの造形は付加加工となるために、細かい隙間が生じていたのがその原因であった。このため、図7に示すように、配線部位で異なる積層条件を与え、電気抵抗率にどう影響を与えるかを実験した。使用した材料は、シルバーナノインク(三ツ星ベルト、MDoT-SL)、カーボンインク(デンカブラック分散液、BMAB粉状体)、焼成温度は100°C送風乾燥炉中(VOS-200SD)にて行った。

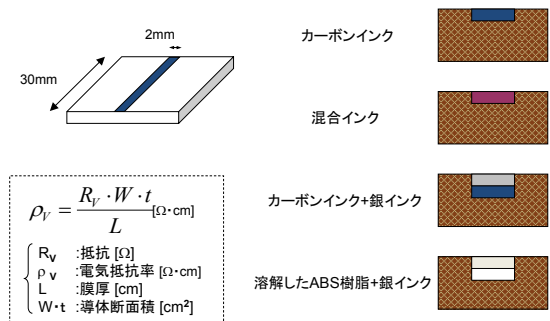


図7 導電性インク配線部の積層条件

$$\rho_v = \frac{R_v \cdot W \cdot t}{L} \quad [\Omega \cdot \text{cm}]$$

$$\begin{cases} R_v & \text{: 抵抗} [\Omega] \\ \rho_v & \text{: 電気抵抗率} [\Omega \cdot \text{cm}] \\ L & \text{: 膜厚} [\text{cm}] \\ W \cdot t & \text{: 導体断面積} [\text{cm}^2] \end{cases}$$

②積層造形用導電性樹脂の調合に関する基礎特性実験：

シルバーナノインクは回路描画後に、導電性を与えるために炉内にて熱処理を行う必要がある。一方、積層造形法により直接描画できる導電性樹脂を開発すれば、炉による熱処理を行わずに済む。ABS樹脂に導電性材料を混合してワイヤー状に加工した導電性樹脂を作製し、電気抵抗率を調べる。使用した導電性材料は、カーボンブラック（デンカブラック、BMAB 粉状体）、鉛フリーはんだ粉末（Sn/3.5Ag/0.5Cu、粒径 20-38 μ m、融点約 212 $^{\circ}$ C）である。

4. 研究成果

(1) 高粘性樹脂流体吐出のための吐出ノズルの解析と実験

図 2 に示した 2 種類のスクリー形状に対して機能性評価を実施した結果を図 8 に示す。形状 1 では SN 比が -31.87 [db]、形状 2 では -27.77 [db] という結果を示した。粘度の影響を受け難いのは形状 2 となった。

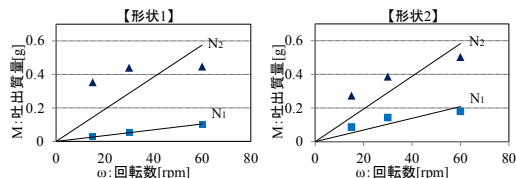


図 8 回転数に対する吐出重量

次に形状 2 に対するパラメータ設計を実施したスクリー形状の結果を図 9 に示す。また、スクリー回転数に対する吐出重量の関係を図 10 に示す。最適条件と比較条件における SN 比の利得の推定値は 5.92 [db] で、確認実験の利得は 2.67 [db] となった(表 3)。利得の再現性の向上は今後の課題である。

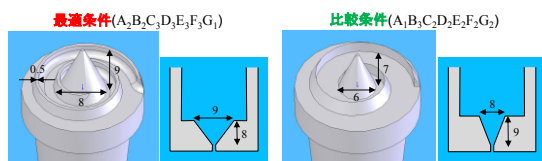


図 9 最適条件のスクリー形状

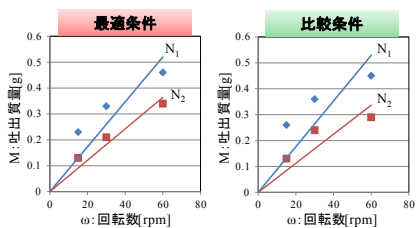


図 10 パラメータ設計後の吐出量の関係

表 3 再現性の検討結果

条件	SN比	
	推定値	確認値
最適条件	-19.66	-21.44
比較条件	-25.57	-24.08
利得	5.92	2.64
推定値-確認値	3.27	

(2) 微細パターン描画の熱成形プロセスによる機能性部品の機能解析と実験

透過係数の測定結果を図 11 に示す。造形ピッチが 1.2mm 以上になると透過係数 ϕ の大幅な増加が観察された。造形ピッチ 0.6~1.0 までは透過係数は同程度であるが、造形ピッチ 1.2 以上になると透過係数に差が生じた。レーザ走査間隔 1.2mm 以上になるとレーザ走査間隔の増加に伴う空孔径の増加、流量の増加によりレイノルズ数が層流域を超えて(1)式が適用できなくなったと考えられる。

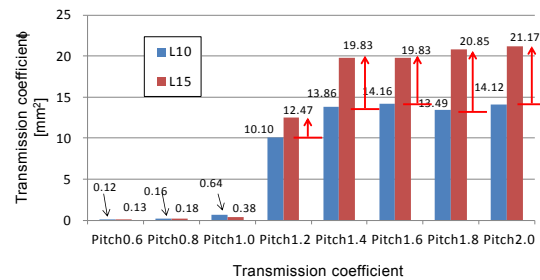


図 11 透過係数の測定結果

(3) 接合問題における積層プロセスの影響の解析と検証実験

①導電性材料の積層条件の違いによる導電性への影響：

積層条件の違いによる導電性への影響の測定結果を図 12 に示す。混合インクは導電性が確認できなかった。カーボンインク、ABS樹脂+シルバーナノインクの塗布条件では焼成時間の経過に伴い、低い電気抵抗率を示し、また、電気抵抗率の変化が大きかった。

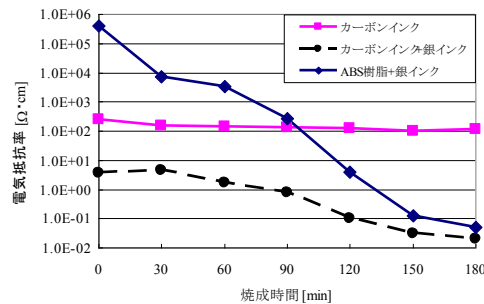


図 12 電気抵抗率の変化
カーボンインク+シルバーナノインクの塗

布条件において、カーボンインク中のABS樹脂配合比率を変化させた結果を図13に示す。ABS樹脂が5~25%の場合は焼成後、 1.5×10^{-2} [$\Omega \cdot \text{cm}$] 程度の値を示した。

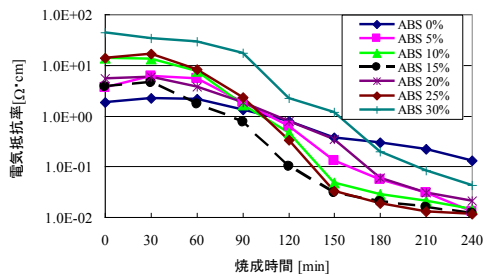


図13 ABS樹脂配合比率毎の電気抵抗率

シルバーナノインクをFDM積層造形物へ描画した場合の導電性への影響を調べた。カーボンインクまたは溶解したABS樹脂を用いて事前にコーティングを併用することでFDM部品内部へインクの浸透を防ぐことが回路形成には有効となることが判った。

②積層造形用導電性樹脂の調合に関する基礎特性実験：

炉による熱処理を行わずに積層造形法による直接描画を実現するために導電性樹脂の基礎特性実験を行った。

ABS樹脂にカーボンブラックの添加量を変化させた導電性樹脂を作製し、電気抵抗率を測定した。90vol%で、 0.84 [$\Omega \cdot \text{cm}$] となった (図14)。

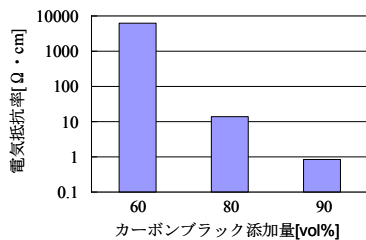


図14 カーボンブラック添加量の影響

この90vol%のワイヤー状の導電性樹脂はノズルから吐出が可能であった。吐出後の電気抵抗率は 1.03 [$\Omega \cdot \text{cm}$] となり、吐出前とほぼ同等の値となった。しかし一般的な電気回路として用いるには不十分であることが判った。

次に、はんだ粉末55vol%、銅粉末(分散剤)10vol%、ABS樹脂35vol%で一定とし、混練温度による導電性の比較を行った。170~200°Cにおいて低い電気抵抗率を示すことがわかった(図15)。

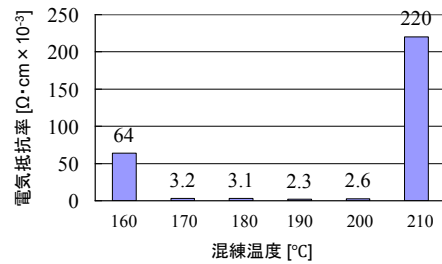


図15 混練温度による影響

顕微鏡写真による比較では、190°Cでは一様に分散していたが、他の条件では、分散せずに凝集や、はんだの塊が観察された(図16)。

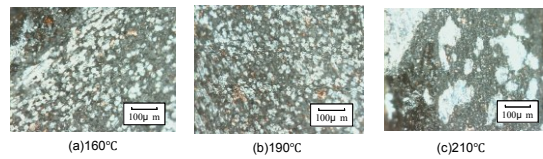


図16 混練温度の違いによる顕微鏡写真

次に、銅粉末混合量の違いによる、電気抵抗率の測定を行った。混練温度を190°Cで一定、ABS樹脂を35vol%で一定とし、銅粉末の添加量を0~30vol%の間で5vol%づつ増加させて混練し、ワイヤ状に加工した。吐出前よりも電気抵抗率が低くなり、銅粉末混合量10vol%において $2.6 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ となり、一般的な電気回路として用いるのに十分な値を示した(図17、18)。

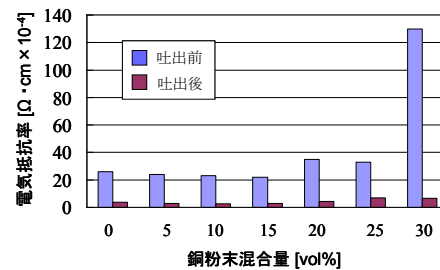


図17 吐出前後の電気抵抗率

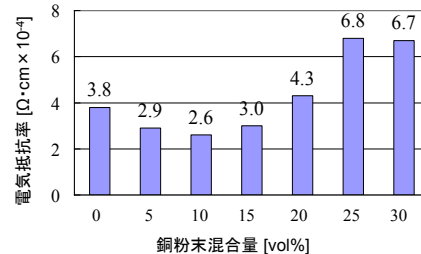


図18 電気抵抗率の銅粉末による影響

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計14件)

1. 實松宏明, 是澤宏之, 檜原弘之, 鈴木裕, "FDM造形物における樹脂層の接着強度評価手法の検討", 2011年度精密工学会九州支部大分地方講演会, 2011年12月10日, 大分, 171-172
2. 下川雄基, 是澤宏之, 檜原弘之, 鈴木裕, "FDMに適用可能な熱可塑性樹脂吐出機構の開発-スクリー機構の機能性評価-", 2011年度精密工学会九州支部大分地方講演会, 2011年12月10日, 大分, 169-170
3. 浦川裕貴, 是澤宏之, 檜原弘之, 鈴木裕, "FDMに用いる導電性材料に関する研究", 2011年度精密工学会春季大会学術講演会, 2011年3月16日, 東京, 443-444
4. 實松宏明, 是澤宏之, 檜原弘之, 鈴木裕, "FDMによる成形物の樹脂層の接着強度向上に関する基礎的研究", 2011年度精密工学会春季大会学術講演会, 2011年3月16日, 東京, 437-438
5. 下川雄基, 是澤宏之, 檜原弘之, 鈴木裕, "FDMに適用可能な熱可塑性樹脂吐出機構の開発-スクリー機構による吐出実験-", 2011年度精密工学会春季大会学術講演会, 2011年3月16日, 東京, 439-440
6. 實松宏明, 是澤宏之, 檜原弘之, 鈴木裕, "FDM成形物における樹脂層の接着強度評価を目的とした表面自由エネルギーの測定", 2010年度精密工学会九州支部熊本地方講演会, 2010年12月11日, 熊本, 81-82
7. 下川雄基, 是澤宏之, 檜原弘之, 鈴木裕, "FDMに適用可能な熱可塑性樹脂吐出機構の開発-スクリーを用いた吐出機構の作成及び評価-", 2010年度精密工学会九州支部熊本地方講演会, 2010年12月11日, 熊本, 79-80
8. 浦川裕貴, 是澤宏之, 檜原弘之, 鈴木裕, "FDMに基づく立体造形を目的とした導電性材料の作製", 2010年度精密工学会九州支部熊本地方講演会, 2010年12月11日, 熊本, 77-78
9. 菊池理志, 是澤宏之, 檜原弘之, 鈴木裕, "ラピッドプロトタイプングによる配線回路付きプラスチック成形品の作製", 2010年度精密工学会春季大会学術講演会, 2010年3月18日, 埼玉, 749-750
10. 加藤翔太, 是澤宏之, 檜原弘之, 鈴木裕, "FDM装置のノズル機構に関する基礎的研究", 2010年度精密工学会春季大会学術講演会, 2010年3月18日, 埼玉, 751-752
11. 浦川裕貴, 是澤宏之, 檜原弘之, 鈴木裕, "FDMに用いる導電性材料の作製", 2010年度精密工学会春季大会学術講演会, 2010年3月18日, 埼玉, 945-946
12. 菊池理志, 是澤宏之, 檜原弘之, 鈴木裕, "導電性材料による配線回路付きプラス

チック成形品の作製に関する研究", 2009年度精密工学会九州支部佐賀地方講演会, 精密工学会, 2009年12月12日, 佐賀

13. 浦川裕貴, 加藤翔太, 菊池理志, 是澤宏之, 檜原弘之, 鈴木裕, "FDMに基づくMID成形の検討-導電性材料の作製及び評価-", 2009年度精密工学会九州支部佐賀地方講演会, 精密工学会, 2009年12月12日, 佐賀
14. 加藤翔太, 是澤宏之, 檜原弘之, 鈴木裕, "FDM装置のノズル機構に関する基礎的研究-ノズル機構の機能性評価及び初期形状の検討-", 2009年度精密工学会九州支部佐賀地方講演会, 精密工学会, 2009年12月12日, 佐賀

6. 研究組織

(1) 研究代表者

檜原弘之 (NARAHARA HIROYUKI)

九州工業大学・大学院情報工学研究院・教授

研究者番号: 80208082

(3) 連携研究者

鈴木 裕 (SUZUKI HIROSHI)

九州工業大学・大学院情報工学研究院・教授
研究者番号: 00144204

是澤宏之 (KORESAWA HIROSHI)

九州工業大学・大学院情報工学研究院・助教
研究者番号: 70295012

研究協力者

菊池理志 (KIKUCHI SATOSHI)

九州工業大学・大学院情報創成専攻 (当時)

加藤翔太 (KATO SHOTA)

九州工業大学・大学院情報創成専攻 (当時)

池内孝弘 (IKEUCHI TAKAHIRO)

九州工業大学・大学院情報創成専攻 (当時)

平田渉 (HIRATA WATARU)

九州工業大学・大学院情報創成専攻 (当時)

浦川裕貴 (URAKAWA YUUKI)

九州工業大学・大学院情報創成専攻 (当時)

竹下翔 (TAKESHITA SHO)

九州工業大学・大学院情報創成専攻 (当時)

下川雄基 (SHIMOKAWA YUUKI)

九州工業大学・大学院情報創成専攻 (当時)

實松宏明 (SANEMATSU HIROAKI)

九州工業大学・大学院情報創成専攻 (当時)