

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2008

課題番号：19560118

研究課題名（和文） MID成形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 Rapid Prototyping for MID Fabrication

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：

本研究は積層造形法で成形回路部品（MID）を、迅速試作技術（RP）を用いて実現することを将来的な目標としており、MID 試作技術のための基礎理論の構築を目指した。本研究では、(1)高粘度流体がインクジェット方式で吐出可能となるためのノズルヘッド部のパラメータ設計を行って最良形状を算出した。また、(2)粉末焼結積層造形法において、予熱段階でレーザー光照射が粉末層に与える温度変化などの解析を行った。また、(3)カーボンナノチューブを混合した導電性樹脂を作製して、熔融式 MID - RP 成形法の可能性について検討評価した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2008年度	1,900,000	570,000	2,470,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

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：ラピッドプロトタイピング、積層造形法、MID

1. 研究開始当初の背景

Molded Interconnect Device（成形回路部品：MID）とは、射出成形品の表面に立体的に直接電気回路を形成する技術である。

近年の電子機器の小型化に伴って、筐体部品と、平面的なプリント基板配線を製造し、組み立てて製品化するような、従来の製品開発方法には限界が来ている。

MID は、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技術であるため、携帯機器など新製品への導入へ、ますます重要性が増している。

MID は、①樹脂成形品、②三次元形状、③

三次元回路、の三要素を基本とし、樹脂成形品表面に金属膜で回路形成したものと定義される。通常 MID 実現には多くの方法が考えられており、1つの金型を使う1回成形法と、2つの金型を使う2回成形法で大まかに分類できる。その後、エッチングなどの1次処理、めっきによる表面処理などの複数の工程を経て部品が完成する。しかしながら、従来工法は以下の欠点を有している。

① これらの工法は部品形状を先に成形し表面に回路パターンを描くため、配線密度が部品形状の表面積に支配され、多層配線できない。

- ② 多段階の工程と、エッチングなどの処理が必要で、大規模な設備が要求される。
- ③ 部品形状を付与するために、必ず金型が必要で製造時間とコストが掛かるため製品開発期間の短縮へのボトルネックとなる。

一方、積層造形法に基づく **Molded Interconnect Device – Rapid prototyping (MID-RP)** 技術には以下の特長があり、実現すれば上記問題をすべて解決することが出来る。

- ① 積層しつつ部品形状を造形していくため、部品内部へ配線することも可能で高密度配線も実現できる。
- ② 装置内ワンプロセスでMID部品を実現出来るため小規模な装置で済む。
- ③ 積層造形に基づいているので金型を必要としない。
- ④ 付加加工が原理であるために必要な量しか成形時に消費されず省資源なエコ加工が期待できる。

本研究では、部品の立体形状の成形を積層造形技術で、また3次元配線を、シルバー・ナノ・インクを用いたインクジェット技術により、これらを組み合わせることでMIDのラピッドプロトタイピング技術を実現することを最終的な目標としている。しかしながら、積層造形法に基づいたMID-RP技術が実現されるためには、以下の問題が解決されなければならない。

- (1)MID-RP に向けたインクジェットデバイスの開発
- (2)異種材料接合・親和性の問題
- (3)配線微細化技術の開発
- (4)相変化に起因する内部ひずみの問題

MID 成形は、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きで実現しようとする場合には、これまでの単一材料を中心に研究が行われてきていた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。

2. 研究の目的

本研究は積層造形法でMIDの迅速試作を実現することを将来的な目標とし、本研究課題ではMIDのラピッドプロトタイピングに必要な基礎理論を整備することにある。

この課題を実現するために、本研究では、以下の項目の研究を遂行する。

- (1) 高粘性流体吐出のためのインクジェットノズルの解析と検討
- (2) そり変形を抑えた微細パターン描画のための熱成形プロセス解析と検討
- (3) 接合問題における熱成形プロセスの影響の解析と検討

本研究課題においては、本手法による立体

回路部品が、MIDの機能(電気的、機械的特性)を満たすための条件を基礎実験により検討し、MID試作技術のための基礎理論の構築を目指す。

3. 研究の方法

インクジェット回路形成と粉末焼結式積層造形法をベースとした **Molded Interconnect Device – Rapid prototyping (MID-RP)** 実現のための研究を主として行う。

- (1) 高粘度流体吐出のためのインクジェットノズルの解析と、インクジェット基礎実験装置の構築：高粘性流体は、現在のインクジェット機構では吐出が困難となっている。VOF法によるインクジェット解析システムを構築してその原因を解析し、高粘性流体に対応可能なノズル先端の構造を解析する。

基礎実験用に構築したインクジェットノズル(図1参照)を基にした数値解析用モデルを図2に示す。図2(a)に示す境界条件にて二次元解析を行う。図2(b)に示すノズルヘッド部のA~Fは制御因子として設定する。



図1 ピエゾ式インクジェットノズル

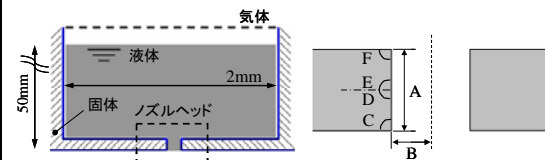


図2 解析モデル

(a)解析条件

ノズルヘッドの各制御因子における水準値を表1に記す。表1の制御因子と水準は、L18直交表の値の組み合わせにより割り付け、18種類のノズルヘッド形状から評価する。誤差因子には入出力の関係に影響を及ぼす粘度を2水準設定する。解析条件はノズル駆動のパルス周期と誤差因子である粘度の6条件から行う。解析条件を表2に記す。解析結果からSN比を算出し、要因効果図を作成する。

表1 制御因子と水準値

制御因子		水準		
		1	2	3
A	板厚 [mm]	80	100	—
B	穴径 [mm]	30	40	50
C	出口角 [°]	80	90	100
D	中央下角 [°]	80	90	100
E	中央上角 [°]	80	90	100
F	入口角 [°]	80	90	100

表2 解析条件

気体粘度	[mPa·s]	0.0148
液体粘度	[mPa·s]	50, 100
気体密度	[kg/m ³]	1
液体密度	[kg/m ³]	1000
表面張力	[mN/m]	0.07
パルス周期	[μs]	100, 150, 200
振動変位	[μm]	0.5
立上り駆動	[μs]	2
立下り駆動	[μs]	2

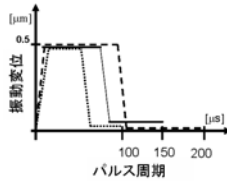


図3 パルス周期

(b)最良形状の特徴の比較

最良形状の特徴はテーパー穴とノズル穴入口周辺の段から構成されている。そこで、テーパーと段が与える影響を液滴量から評価する。最良形状との比較は、基本形状、基本+テーパー形状、基本+段形状から行う。

(2) そり変形を抑えた微細パターン描画のための熱成形プロセス解析：粉末焼結積層造形法において、レーザー光走査による励起熱分布の影響を、Chad Konradらの方法(Int. J. Heat and Mass Transfer 48 (2005) pp.3932-3944)を用いて解析する。

そり変形の解析の前段階として、予熱段階での粉末層の温度変化、熱侵入深さについて調査する。また、温度変化、熱侵入深さに影響のあるパラメータについて検討する。

本造形法はレーザー焼結により目的となる立体形状を造形する。時間に依存する熱流束は(1)式で与えることができる。

$$q''(t) = q_0'' e^{-\frac{t^2}{t_p^2}} \quad (1)$$

q'' : heat flux[W/m²]
 q_0'' : beginning heat flux[W/m²]
 t : time[s]
 t_p : half width of the laser beam pulse at 1/e[s]

図4に示す物理モデルでは、レーザー光を照射した瞬間の時間を $t = 0$ とすると、熱流束は $t = 0$ のときに最も高い値を示す。その後、時間が経つにつれ減少する。

レーザー焼結のプロセスは①予熱ステージ、②熔融・収縮ステージ、③凝固ステージの3つのステージに分類することができる。予熱ステージの時間は、粉末表面の温度が熔融温度 T_m に達するまでの時間とする。そして、粉末表面の温度が粉末の熔融温度に達すると熔融・収縮ステージに移行する。

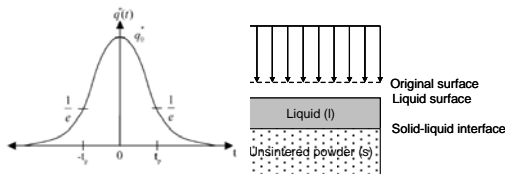


図4 レーザ光物理モデル

解析モデル及び解析条件について、予熱ステージの支配方程式は、完全に凝固され、密になった状態を基準とし、熱伝導方程式、境界条件、熱流束より (2)、(3)の無次元方程式が得られる。

$$\theta_s(Z, \tau) = -S_c + \frac{Ste}{2\Delta K_s(1-\epsilon_s)} e^{-\tau^2} (\Delta - Z)^2 \quad \tau < \tau_m \quad (2)$$

$$\Delta = \sqrt{3\sqrt{\pi}\alpha_s} e^{\tau^2} [1 + erf(\tau_m)] \quad \tau < \tau_m \quad (3)$$

θ : dimensionless temperature
 Z : dimensionless coordinate
 τ : dimensionless time
 τ_m : dimensionless time (melting point)

S_c : subcooling parameter
 Ste : Stefan number
 Δ : dimensionless thermal diffusivity
 K_s : dimensionless thermal conductivity (unsintered solid)
 ϵ_s : volume fraction of gas (unsintered solid)
 α_s : dimensionless thermal diffusivity(unsintered solid)

無次元方程式より、粉末層にレーザー光を照射し、粉末が熔融する前の予熱段階について以下の解析を行う。粉末層は1層目の粉末層とする。

- (a) z 方向に対する粉末の時間温度変化
- (b) ステファン数の変化にともなう粉末表面 ($Z=0$)の温度変化
- (c) ステファン数の変化にともなう粉末層の熱侵入深さ

共通の条件を表3に、それぞれの変化させるパラメータの条件を表4に示す。

表3 解析共通条件

S_c (subcooling parameter)	3.0
ϵ_s (volume fraction of gas (unsintered solid))	4.0
α_s (dimensionless thermal diffusivity(unsintered solid))	0.008
K_s (dimensionless thermal conductivity (unsintered solid))	0.008

表4 パラメータ条件 (a),(b),(c)

	Ste(Stefan number)	τ (dimensionless time)
(a)	0.6	-2.0, -1.4, τ_m
(b)	0.4, 0.5, 0.6	-3.0 < τ < τ_m
(c)	0.4, 0.5, 0.6	-3.0 < τ < τ_m

ステファン数とは固液界面における顕熱(物質の状態を変えずに、温度を変化させるために費やされる熱量)と潜熱(物質の状態変化のとき、温度変化を伴わずに吸収または放出される熱量)の比のことである。ステファン数は(4)式で与えられる。

$$Ste = q_0'' \frac{\sqrt{\alpha_p t_p}}{\alpha_p \phi h_{sl} \rho_L} \quad (4)$$

α_p : thermal diffusivity(fully densified resolidified part) [m²/s]
 ϕ : volume fraction of the low melting point powder
 h_{sl} : latent heat of fusion [J/kg]
 ρ_L : density(low melting point powder) [kg/m³]

(3) 熔融式M I D - R P 成形における接合問題の基礎特性実験:

熔融式積層造形に基づいたM I D - R P で成形した部品の電気的特性(電気伝導度)などを評価することで接合問題の基礎特性を評価する。

ABS樹脂は、熱溶解積層造形機であるスト

ラタシス社製 Dimension 768 で使用される ABS 樹脂を使用する。

単層ナノチューブをイオン性液体 1-ブチル-3-メチルイミダゾリウム・テトラフルオロボレートで分散し、ABS 樹脂を混合して導電性材料を作製する。

単層ナノチューブの含有率を変えることにより、材料の電気抵抗率の変化を調べる。3 で作製したシート状の材料から 1cm×1cm の形状を切り出し、四探針測定法を用い表面抵抗を測定する。測定した表面抵抗から抵抗率を計算する。単層ナノチューブの含有率が 1wt%、2wt%、3wt% となる材料を作製し、電気抵抗率を測定する。

また作製した材料で実際に造形し成形性を検討する。熱溶解積層造形機を用いて横 10[mm]×縦 5[mm]×高さ 1[mm]の直方体を造形する。ABS 樹脂で造形した立体形状と、単層ナノチューブの含有率が 1wt%、2wt% となる材料で造形した立体形状を比較する。

4. 研究成果

(1) 高粘度流体吐出のためのインクジェットノズルの解析と、インクジェット基礎実験装置の構築：

(a) ノズルヘッド部の最良形状解析結果

SN 比の要因効果図を図 5 に示す。この要因効果図から SN 比が高い値の水準 A1 B3 C1 D3 E1 F1 が、液滴量に影響するノズルヘッド形状因子となる。この条件の形状を最良形状とする。図 6 に最良形状のモデルを示す。

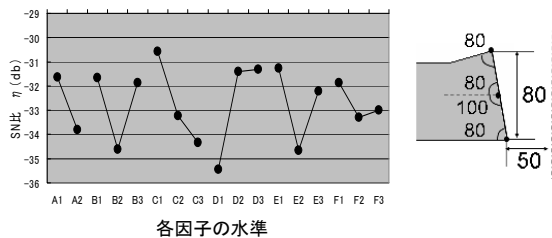
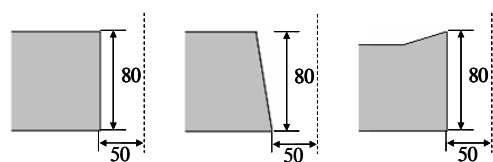


図 5 SN 比に対する要因効果図 図 6 最良形状

(b) 最良形状の特徴比較の解析結果

図 7 に解析に用いた各比較形状を示す。



(a) 基本形状 (b) 基本+テーパ (c) 基本+段
図 7 比較形状

各形状における液滴量の結果を表 5 に記す。テーパ、段、テーパ+段が影響した液滴量を図 8 に示す。

テーパの影響による液滴量は、最良形状と基本+段形状では 732[ppl]、基本形状と基本+テーパ形状では 875[ppl]増加した。段の影響

による液滴量は、基本形状と基本+段形状では 7005[ppl]、最良形状と基本+テーパ形状では 6983.5[ppl]増加した。最良形状と基本形状の比較によりテーパ+段の影響は、液滴量 7737[ppl]増加した。この液滴量は、テーパと段がそれぞれ影響した液滴量の和とほぼ同等の結果が得られた。これにより、最良形状はテーパと段の影響が液滴量に顕著に反映していることが分かる。

ノズル穴入口周辺の流速を測定する。流速は立下り駆動までの時間を測定する。中心点、縁からの高さ 200[μm]の結果を図 9、図 10 に示す。

段による影響は、流速の加速が大きい傾向があり、縁からの流速が大きいことから、段によって液体が巻き込まれたことが分かる。

表 5 各形状の液滴量

	最良形状	基本形状	基本+テーパ	基本+段
液滴量[ppl]	10257	2520	3395	9525

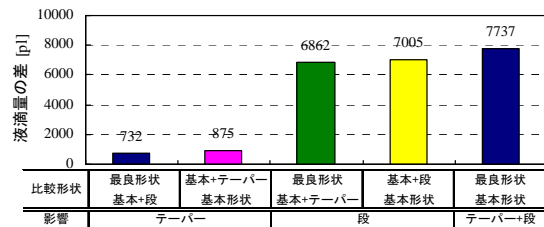


図 8 テーパと段の影響

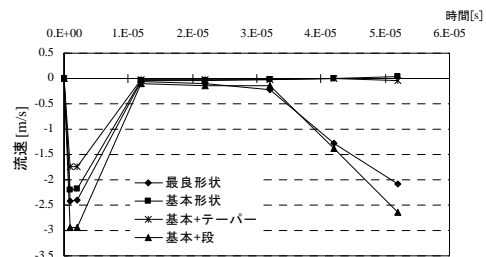


図 9 ノズル穴入口の中心点

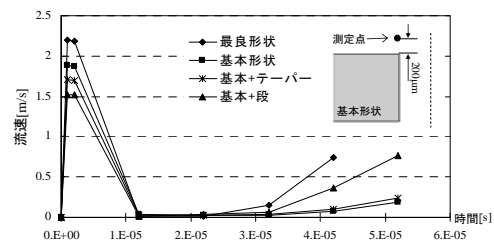


図 10 ノズル穴入口の縁 高さ 200[μm]

ノズルヘッドのパラメータ設計から最良形状を算出し、形状の特徴による影響を調べた結果、以下の知見を得た。

テーパ穴とノズル穴入口縁の段が液滴噴射を促進させる。

段によってノズル穴に流入する液体が巻き込まれ、流速が加速する。

(2) そり変形を抑えた微細パターン描画のた

めの熱成形プロセス解析：粉末焼結積層造形法において微細パターンを描画可能とするために、レーザーパワー、走査パターンの違い等による焼結体への影響を調べた。

(a) z 方向に対する粉末の時間温度変化解析結果を図 11 に示す。予熱段階 ($\tau = -2.0, -1.4$) から熔融開始時 ($\tau = \tau_m$) までにおいて、どの時間に変化させた場合でも、z が増加するにつれ、温度が減少することがわかる。また、熔融開始時間 τ_m に近い程、温度減少率も大きくなることがわかった。

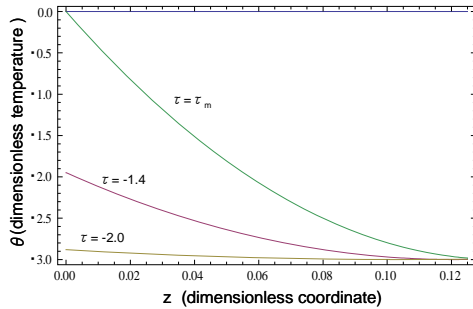


図 11 粉末表面の温度プロファイル

(b) ステファン数の変化にともなう粉末表面の温度変化解析結果を図 12 に示す。ステファン数が大きくなるにつれ、温度上昇率が大きくなることがわかる。 $\theta = 0$ のとき予熱が終わり、熔融温度に達することを考慮すると、ステファン数が大きい方がより早く熔融温度に達することが確認できる。

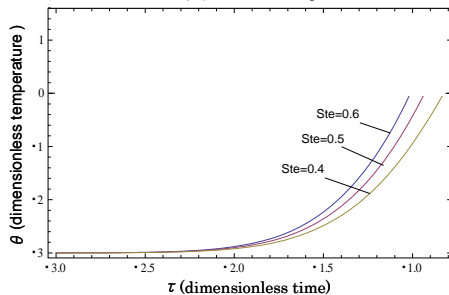


図 12 粉末表面の温度プロファイル

(c) ステファン数の変化にともなう粉末層の熱侵入深さの解析結果を図 13 に示す。図 13 のグラフと (4) 式より、ステファン数による熱侵入深さの変化は変わらないことがわかった。しかし、ステファン数によって τ_m (熔融点に達する時間) の値は異なり、ステファン数が大きいほど τ_m は小さい。よって、熱侵入は時間 $\tau = \tau_m$ まで起こるので、ステファン数が大きいほど、熱侵入深さは減少することがわかった。

またステファン数は照射エネルギーに依存することから、照射エネルギーを変化させることで、粉末表面の温度、熱侵入深さが制御できると考えられる。

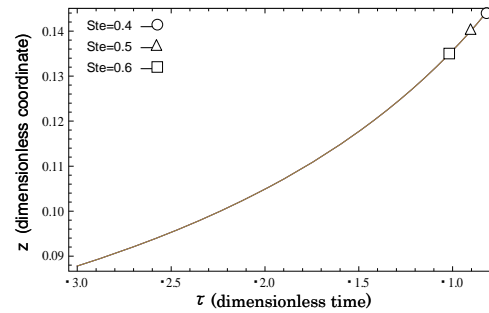


図 13 熱侵入深さ

(3) 熔融式 MID-RP 成形における接合問題の基礎特性実験：熔融式 MID-RP 成形のために、カーボンナノチューブの混合により ABS 樹脂に導電性を付与し、電気抵抗率、立体成形性などの基礎特性を評価した。

ABS 樹脂に単層ナノチューブを混合し導電性材料を作製した。作製した材料の電気抵抗率を測定した結果、単層ナノチューブの含有率を 1wt% ずつ上げることによって、電気抵抗率が下がることを確認した (図 14)。

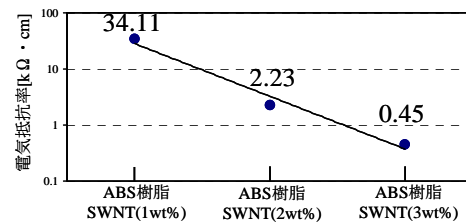
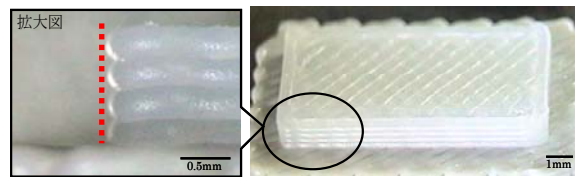
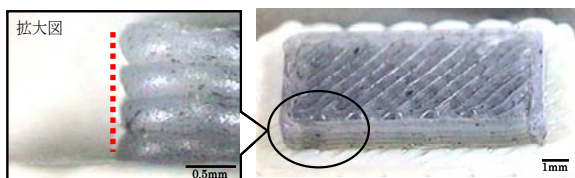


図 14 実験結果 (電気抵抗)

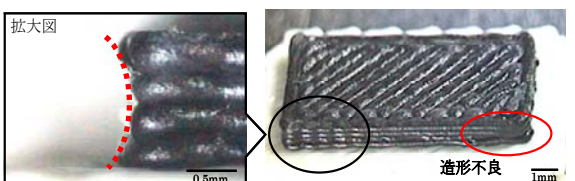
作製した材料で積層造形を行ったところ、作製した材料での造形の可能性を示すことは出来たが、造形不良を改善するためには、積層条件をさらに検討する必要があることを確認した (図 15)。



(a) ABS 樹脂を用いた立体造形



(b) 単層ナノチューブ 1wt% 添加樹脂を用いた立体造形



(c) 単層ナノチューブ 2wt% 添加樹脂を用いた立体造形

図 15 実験結果 (3 種類の樹脂による積層造形)

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12件)

- ① 菊池理志 下池賢二, 是澤宏之, 榎原弘之, 鈴木 裕, "ラピッドプロトタイプングによる配線回路形成の検討-導電性インク焼成条件の評価・検討-", 2009年度精密工学会春季大会学術講演会, 精密工学会, 2009年3月13日, 東京都
- ② 加藤翔太, 榎原弘之, 鈴木裕, "熱溶解積層法の吐出機構開発に関する基礎的研究-第2報 吐出機構における機能の検討・評価-", 2009年度精密工学会春季大会学術講演会, 精密工学会, 2009年3月13日, 東京都
- ③ 下池賢二, 是澤宏之, 榎原弘之, 鈴木裕, "インクジェット法による高粘度材料利用に関する基礎的研究", 2009年度精密工学会春季大会学術講演会, 精密工学会, 2009年3月13日, 東京都
- ④ 黒木洋介, 是澤宏之, 榎原弘之, 鈴木裕, "金属光造形金型におけるそり変形の解析に関する基礎的研究-第2報 パラメータの変化が温度変化に及ぼす影響-", 2009年度精密工学会春季大会学術講演会, 精密工学会, 2009年3月13日, 東京都
- ⑤ Narahara Hiroyuki, Yuuta Okamura, Hirofumi Fukumaru, Hiroshi Koresawa, and Hiroshi Suzuki, "Fundamental Research on Fused Deposition Modeling using Conductive Material by Carbon Nanotube Mixing Resin", 7th France-Japan Congress on Mechatronics2008, 2008年5月21日, Le grand bornand, France
- ⑥ 菊池理志 下池賢二, 是澤宏之, 榎原弘之, 鈴木裕, "FDM成形物への導電性インクによる配線回路形成の検討-導電性インク焼成の評価・検討-", 2008年度精密工学会九州支部福岡地方講演会, 精密工学会, 2008年12月7日, 福岡
- ⑦ 加藤翔太 下池賢二, 是澤宏之, 榎原弘之, 鈴木 裕, "熱溶解積層法の吐出機構開発に関する基礎的研究", 2008年度精密工学会九州支部福岡地方講演会, 精密工学会, 2008年12月7日, 福岡
- ⑧ 下池賢二, 是澤宏之, 榎原弘之, 鈴木裕, "インクジェットノズル開発に関する数値解析を用いた基礎的研究", 2008年度精密工学会九州支部福岡地方講演会, 精密工学会, 2008年12月7日, 福岡
- ⑨ 下池賢二, 是澤宏之, 榎原弘之, 鈴木裕, "インクジェットノズル開発

発に関する基礎的研究", 2008年度精密工学会春季大会学術講演会, 精密工学会, 2008年3月17日~19日, 川崎

- ⑩ 岡村 勇太, 榎原弘之, "機能性材料を用いた熱溶解積層法に関する基礎的研究(第2報)", 2008年度精密工学会春季大会学術講演会, 精密工学会, 2008年3月19日, 川崎
- ⑪ 下池賢二, 是澤宏之, 榎原弘之, 鈴木裕, "インクジェットのノズルヘッド開発に関する基礎的研究", 精密工学会九州支部長崎地方講演会, 2007年12月8日, 長崎
- ⑫ 岡村勇太, 榎原弘之, 鈴木裕, "機能性材料を用いた熱溶解積層法に関する基礎的研究-カーボンナノチューブと樹脂による導電性材料の作製と評価-", 精密工学会九州支部長崎地方講演会, 2007年12月8日, 長崎

6. 研究組織

(1) 研究代表者

榎原弘之 (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

(2) 研究分担者

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

福丸浩史 (FUKUMARU HIROFUMI)

九州工業大学・情報工学部・技術職員

研究者番号: 60404109

研究協力者

岡村雄太 (OKAMURA YUUTA)

九州工業大学・大学院情報システム専攻(当時)

下池賢二 (SHIMOIKE KENJI)

九州工業大学・大学院情報システム専攻(当時)

黒木洋介 (KUROGI YOSUKE)

九州工業大学・大学院情報創成専攻(当時)

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)