

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2008～2010

課題番号：20246032

研究課題名(和文) 微細粉末・微細レーザを用いた粉末焼結積層造形の微細性向上に関する研究

研究課題名(英文) Improvement of selective laser sintering in part resolution using fine powder and fine laser

研究代表者

新野 俊樹 (NIINO TOSHIKI)

東京大学・生産技術研究所・准教授

研究者番号：70291929

研究成果の概要(和文)：市販の装置の1/3程度の微細なビーム径を有する造形装置を開発した。この装置を用いて180 μ mの薄壁と300 μ m微細スリットの造形に成功した。ビーム径と微細性の関係、微細構造体の強度と微細性の関係も明らかにした。それらの考察したところ、十分な強度が得られる薄壁の厚さとして0.6mmが最小値となることが明らかになった。組織工学担体の造形をアプリケーションとした場合の微細性の向上方法として、樹脂粉末を犠牲フィラーとした造形方法を提案した。

研究成果の概要(英文)：A laser sintering apparatus equipped with an optic system that can focus its beam in a spot one third diameter as small as typical commercially available. As a result, a vertical wall of 180 μ m in thickness and a slit of 300 μ m in gap were successfully built. Relationship between the beam diameter and fineness of obtained structure is investigated. The minimum wall thickness that maintains sufficient mechanical strength was obtained as 0.6mm. To improve the resolution of tissue engineering scaffold, plastic sacrificial filler was tested.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	17,500,000	5,250,000	22,750,000
2009年度	10,900,000	3,270,000	14,170,000
2010年度	7,700,000	2,310,000	10,010,000
年度			
年度			
総計	36,100,000	10,830,000	46,930,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：積層造形, Additive Manufacturing, ラピッドプロトタイピング, 粉末焼結積層造形 組織工学, 担体

1. 研究開始当初の背景

1989年に光造形装置がはじめて発売された当時、積層造形装置は、主にCADを活用した設計の形状確認やデータ検証に用いられており、樹脂製の模型が金型製作することなく迅速に得られるところからラピッドプロトタイピング(RP)と呼ばれていた。その後、様々な積層造形方式が研究された結果、一部の高機能積層造形装置においては、高い強度

が得られる造形方法や材料が開発され、競技車両に実際に搭載して1レースを走りきれるような機能試作品の製作や、軍用航空機や自動車の初期生産品などの少量生産への応用が実用化されている。積層造形法のこのような使用法はラピッドマニュファクチャリング(以降RM)と呼ばれるようになった。RMでは金型を用いずにプラスチック部品を生産できるため、少量生産の納期と費用を圧

縮できるのみならず、切削加工や金型を使った成形加工では製作できない複雑な形状を有する製品を製作できるなどの特長がある。

現在実用化されている RM では、熱可塑性の粉末を薄く敷き、レーザー光を照射して選択的に焼結して積み重ねることによって3次元形状を得る「粉末焼結積層造形法 (SLS 法)」が利用される場合が多い。SLS 法は熱可塑性という多くの材料が普通に有する性質を利用しているため、造形可能な材料のバリエーションが広く、その結果として強度・耐衝撃性・耐熱性に優れた樹脂の利用が可能である。このように製品の物理的性能の面では、LS 法は RM に適した積層造形法と言えるが、一方で有限な粒径を持つ粉末を利用している点、一般的な樹脂を加熱できる CO₂ レーザを小径のスポットに集光することが困難な点、また熱加工である点などから、集光が容易な紫外光レーザーを用いて液体を光化学的に固化させる光造形法に比べて微細構造の造形に向いていない。このため市販の粉末焼結積層造形装置は微細なものを造形するような設計をされておらず、ビーム径は 400 μm 以上と大きく、結果として造形可能な壁の厚さは 800 μm と微細構造を有する部品の製作は不可能である。このような状況からこれまでの RM の例は代表寸法が 50mm を越えるような大きなものか、微細構造を必要としないものに限定されている。

積層造形による RM を実用化するには従来の成形加工に対する経済的有意性を示す必要がある。積層造形による製品 1 個あたりの製作費が製品の寸法にほぼ比例するのに対して、成形加工による製作費は製品の寸法との強い関連はなく、微細構造などがある場合においては金型が複雑になり、むしろ費用が大きくなる場合がある。即ち RM の実用化は現在実用化がすすんでいる大型の低精度製品よりも、むしろ微細製品の方が適しており、微細性や精度に大きな価値観が認められる国内市場において RM を展開するには微細性の向上が不可欠であり、これさえ実現すれば積層造形の新しい展開が可能である (図 2)。これまで微細 LS 造形に関しては、波長 1.06 μm の YAG レーザを 20 μm に集光することにより、厚さ 30 μm アスペクト比 20 以上の薄い壁を作ることに成功した例が報告された例があるが、樹脂の微細造形についての報告はほとんどない。これに対して申請者らは、CO₂ レーザを 150 μm に集光したレーザーマーカ装置を光源に用いた装置によりナイロン樹脂粉末を用いて幅 200 μm の壁を造形することに成功している。

助成対象者のこれまでの成果で単にビーム径を小さくするだけでも、微細性の有意な向上が得られることが確認されたが、造形物の精度、強度などの力学的な特性に関する考

察には至っていない。また、造形の微細性にはビームスポット径の他にも、粉末の粒径が造形の微細性に大きな影響をあたえることは容易に想像ができる。これまでの研究では粒径が 50 μm 程度の粉体を用いていたが、目的とする造形分解能と粒径が近づくこと、小さな粒子を用いた場合は粒径が波長に近づくことなどによって生ずる非線形な現象についての考察は行われていない。

2. 研究の目的

樹脂の粉末焼結積層造形はラピッドマニュファクチャリングなど産業的可能性が高いにも関わらず、得られている知見は非常に少ない。そこで本研究では、本加工法の微細性の向上に資するために以下の知見を得ることを目的とする。

(1) 造形条件が微細性に与える影響

LS 法においてはレーザーが照射されていない部分にも焼結を生じることが多く (余剰焼結)、従来の造形では 0.1mm~0.5mm 程度の余剰焼結が生じる場合があったが、必要とされる微細性が高くないため詳細な研究は行われていなかった。微細性を向上するにはこの余剰焼結を減らす必要があり、余剰焼結のメカニズムと主要因を究明して、微細性を向上する造形条件を得るためのメソロジーを得る。

(2) 粉末の特性・構成が微細性に与える影響

造形に影響を与える材料の特性には、粒子の熱的特性、光学的特性、機械的特性などの素材に関する特性、粒子の形状、粒径やその分布など粒子としての特性の二つの特性が影響する。また、さらに造形精度を向上するにはフィラを導入することがあり、フィラの上記特性についても微細性に影響を与えると考えられる。本研究では、フィラも含めた材料の特性が微細性に与える影響について、粉末の粒径とビーム径、波長との関連も含めて考察する。

(3) アプリケーションに関する研究

肝臓などの軟組織の組織再生医療においては、毛細血管を模擬した流路を有し、スポンジ状で、生体吸収性の材料から構成される足場 (担体) が必要となる。申請者らはこの造形に関する研究を行っているが、材料、微細性に関してさらに高度化を試みる。現在金属の造形は商業化されているが、材料は限定的である。そこで、生体吸収性の樹脂粉末の造形物を消失模型とした精密鑄造による微小金属部品の造形を目指す。

3. 研究の方法

(1) 微細造形プラットフォームの開発

平成 20 年度は本研究で使用する造形装置を製作する。微細性を評価することから、ビームスポット径を 150 μm 以下とするような造形装置を目指す。また、粉末の供給については、微細粉末の供給に効果があると考えられ

る粉末圧粉機構を導入する（図1）。

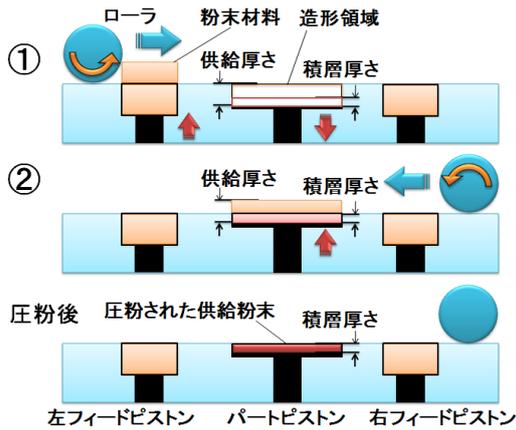


図1. 粉末の圧粉機構. 逆回転機構による粉末供給プロセス①と順回転ローラによる圧粉②を繰り返すことにより、安定した供給が可能になる。

(2) 造形条件が微細性に与える影響の調査

本研究では様々なパラメータを変化させて、微細性にどのような影響を与えるかを評価する。図2に示されるように、粉末にレーザーが照射されると、レーザーが照射されていない領域 ($1/e^2$ 半径の外) の粉末も加熱され、意図していない領域にも焼結物（余剰焼結物）が生じる。余剰焼結の主たる要因は、レーザーが粉末に照射されたときの散乱光や透過光による加熱、照射レーザーで直接加熱された粉末からの輻射および熱伝導による周辺粉末の加熱などが挙げられる。造形の微細性を向上するために余剰焼結量を低減を目指す。

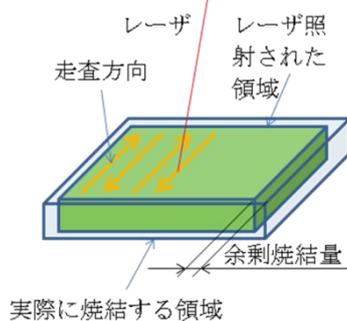


図2 余剰焼結

余剰焼結は、供給するレーザーエネルギーを低減すれば、低減することができるが、一方で造形物の焼結度が低下し、造形物の強度が低下するため、余剰焼結の低減と強度の維持はトレードオフの関係にある。積層造形をはじめとする付着加工では、造形パラメータや造形する形状によって、大きく異なる点があるが、従来の除去加工や成形加工と大きく異なる点がある。また、造形物の強度は RM を行う上で常に重要なパラメータとなるが、造形物のかさ密度（充填率）とは強い連関があるため、標準試験片において造形物と密度と強度の関係

を評価し、各微細性評価においては造形物の充填率の評価も常に行うこととする。また、同じエネルギーを供給する場合でも走査間隔を小さくする（図3 オーラップ露光）ことによって微細性が向上することが経験上わかっているため、さらに詳細な調査を行う。

なお、本研究で微細性は、図4の様な薄い縦壁を造形し、その厚さで評価した。

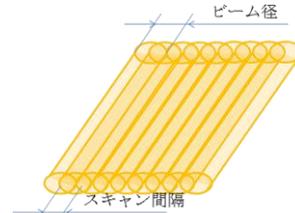


図3 オーラップ露光

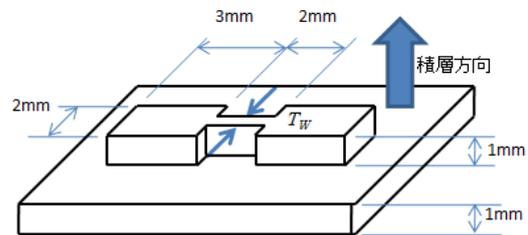


図4 微細性評価試験片. 中央部の薄い部分の厚さ測定することにより微細性を評価した。

(3) 粉末の特性が微細性に与える影響の調査

LS法においては、材料の特性が造形物の品質を大きく左右する。現在、RMの実現に向け耐衝撃性や破断ひずみの向上など部品として使用したときのタフネスの向上を目指した研究が活発に行われているが、微細性の向上を目指した余剰焼結の少ない材料開発はあまり行われていない。既に述べたように、余剰焼結の発生には材料粉末の加熱分解能に関わる透過率、輻射率（吸収率）、反射率などの光学的特性、加熱開始後に熱の拡散に関わる熱容量、熱伝導、潜熱などの熱的な特性が大きな影響を与えると考えられる。

本研究では熱伝導の異なるフィラを用いることにより、混合粉末の熱伝導を制御し、熱伝導を評価することにより、熱伝導がフィラに与える影響について調査する。

(4) 組織再生用担体の造形

これまでに、食塩と生体吸収性のポリカプロラクトン (PCL) 粉末の混合粉末を LS 造形し、その後食塩を溶出することによって、90%以上の高い空孔率を有し、かつ培養液をまんべんなく供給するための微細流路ネットワークが配置された担体を造形している。これまで流路径は 1mm 程度であったが、本研究で開発した装置と得られた知見を利用してさら

に微細な構造を有する担体を試みる。

(5) 精密製造用モデルの造形

現在金属の直接造形を目指した多くの研究が行われているが、その微細性は樹脂のそれよりも遥に低い。金属の実験室レベルの微細造形は既に報告されているが、造形時間が長く、装置価格の回収が困難である。積層造形モデルを消失模型としての利用は実用化されているが、模型の消失が困難であるという問題がある。本研究ではアルカリ溶液での加水分解性の高いポリグリコール酸 (PGA) を消失模型の材料として利用することを試みる。

4. 研究成果

(1) 微細造形プラットフォームの開発

試作した加工装置の主な仕様を表 1 に示す。粉面状での最小ビーム径は 130 μm となった (図 5)。この装置で加工可能な壁の最小厚さは 180 μm となった (図 6)。

表 1 試作装置の主な仕様

レーザー種類	CO ₂ レーザー
スポット径	130 μm
ワークディスタンス (装置下面から)	108.53mm
露光範囲	100 \times 100mm
焦点深度 (ビーム径<135 μm の範囲)	0.70mm
スキャンラインの位置決め分解能	1 μm
最大出力 (粉面での値)	30W (4.6W)

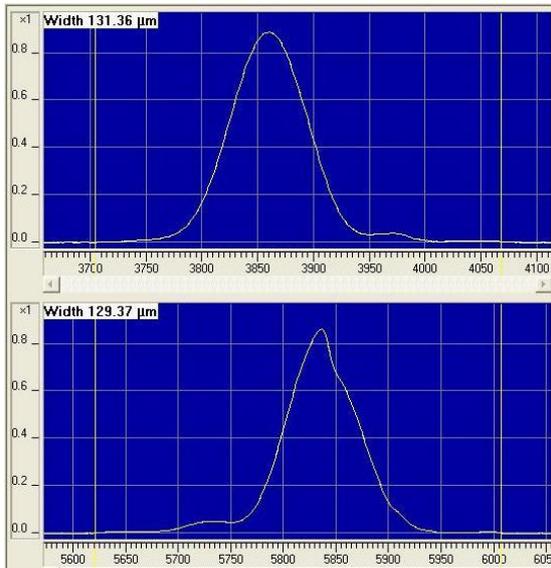


図 5 試作装置のビームプロファイル

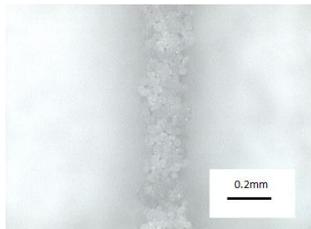


図 6 得られた最も薄い壁 (180 μm)

(2) 造形条件が微細性に与える影響の調査

図 7 に壁の実際の厚さと設定値 (レーザーの中心が通る範囲) の関係を示す。ビーム径が 300 μm と 150 μm では大きな差があったが、150 μm と 130 μm ではほとんど差がなかった。壁の厚さや設定値を、ビーム径で規格化すると、300 μm と 150 μm とで結果がたいへん良く一致しており (図 8)、ビーム径と微細性が線形な関係にあることがわかり、それ以下では、ビーム径以外の別の要因が、微細性を制限していることが分かった。

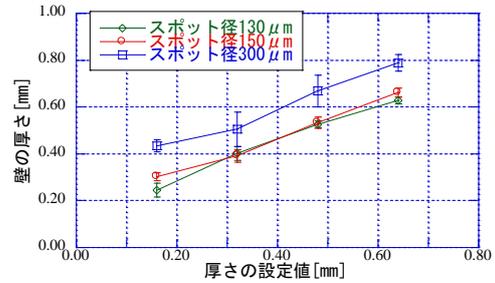


図 7 壁の厚さと厚さの設定値の関係

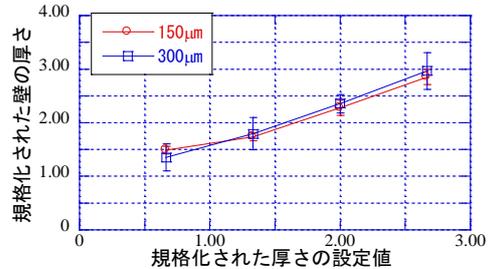


図 8 ビーム径で規格化した壁の厚さと厚さの設定値の関係

壁の厚さの設定値が同一でも、面積あたり供給エネルギーが大きいと壁の厚さは厚くなる (図 9)。これはエネルギーが大きくなることにより、余剰焼結量が大きくなるためである。一方、エネルギー供給量を小さくすると、充填率は低下する傾向にある (図 10)。逆にエネルギー供給量を大きくしても、密度は 80% 程度で飽和する傾向がみとめられた。充填率と最大引張強さの関係には強い相関があった (図 11)。以上の結果から、微細性を向上するには余剰焼結を減らすべきであり、それにはエネルギー量を強い策しなければならない。一方、エネルギー量を減らすと、充填率が低下して、結果として強度が低下する。即ち、強度と微細性はトレードオフの関係にあり、ある目標の強度を決め、それが得られる最小の壁の厚さが微細性の有意な最高値と言うことになる。ここでは、エネルギー供給量と充填率の関係において、充填率が 80% 程度で飽和すること (図 10)、充填率で 30MPa 程度の実用的ともいえる強度が出ることから、80% 以上の強度が得られる条件の中で最も微細性が高まる条件を求めたところ、最小で 0.6mm の厚さの壁を造形することができた。

オーバーラップ露光の露光間隔と充填率の関係を検査したが、有意な差は得られなかった。

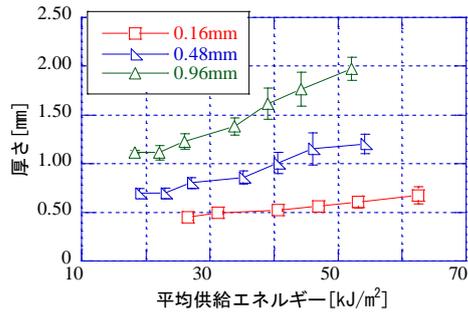


図9 エネルギー供給量と壁の厚さの関係 (四角の中は暑さの設定値)

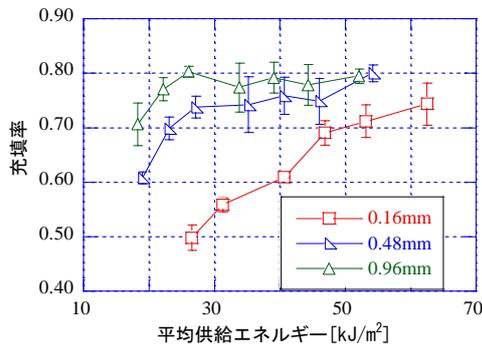


図10 エネルギー供給量と充填率の関係 (四角の中は暑さの設定値)

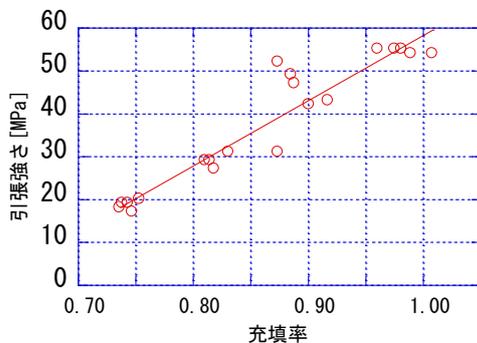


図11 充填率と引き張強さの関係

(3) 粉末の特性が微細性に与える影響の調査

PCLを焼結樹脂とし、フィラとして、食塩、PGAを用いて混合粉末の熱伝導を調整した。従来の研究より造形の微細性には温度伝導度が影響することが示唆されていた。図12に種粉体と、混合粉体の温度伝導度を示す。混合粉体の温度伝導度はPCL+NaCl, PCL+NaCl+PGA, PCL+PGAの順に小さくなった。焼結の微細性は、1層の焼結を行いそのその厚さを評価することによって評価した(図13)。焼結層の厚さと温度伝導度が順序で良い一致をみていたことから、本仮説が正しかったことが確認された。

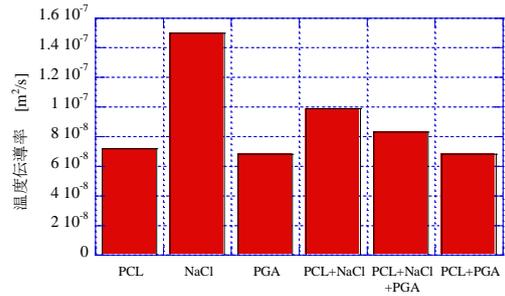


図12 混合粉体の温度伝導度

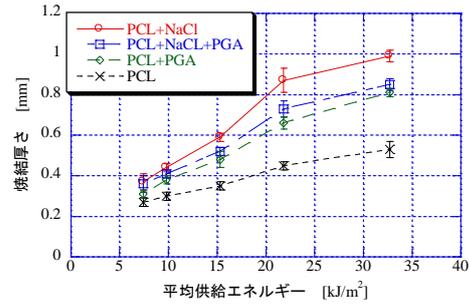


図13 充填率と引き張強さの関係

(4) 組織再生用担体の造形

既に利用した流路径1mmの担体モデルを0.6倍に縮小したモデルを用いて担体の造形を行った(図14)。X線CTによって観察したところ、モデルにおいて流路径は0.6mmとなるが実際は余剰焼結のため0.3mmことが確認された(図15)。



図14 試作した担体

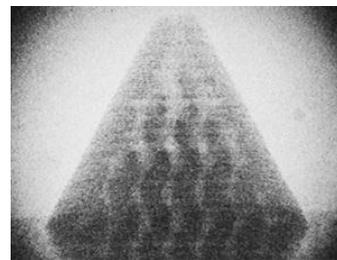


図15 担体のX線透過像

(5) 精密鋳造用模型の造形

精密鋳造用消失模型の造形材料としてPGAを選びその造形に成功した。PGAは、融点と再凝固点の温度差が小さく、従来の造形法では造形できなかった。本研究では、造形物を特殊なベースプレートに固定して造形する方

法を考案し、PGA に適用したところ造形を行うことができた。充填率は 70%程度となり、10mm×10mm×4mm の試料を造形し、5%wt 水酸化ナトリウム溶液 50℃で溶出を行ったところ、表面積あたりの溶出速度は 55mg/min・cm² となり、体積に換算すると、0.08cm³/min・cm² が得られた。

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)

[雑誌論文] (計 7 件)

- ① Niino T, Hamajima D, Montagne K, Oizumi S, Naruke H, Huang H, Sakai Y, Kinoshita H, Fujii T, Laser sintering fabrication of three-dimensional tissue engineering scaffolds with a flow channel network, *Biofabrication*, 査読有り, 3, 2011, 034104-034113
- ② 新野俊樹, 積層造形-ラピッドプロトタイプングからラピッドマニファクチャリングへ, *精密工学会誌*, 査読無し, 76, 2010, 1304-1308
- ③ Imagawa S, Edagawa K, Morita K, Niino T, Kagawa Y, Notomi M, Photonic band-gap formation, light diffusion, and localization in photonic amorphous diamond structures, *PHYSICAL REVIEW B*, 査読有り, 82, 2010, 115116-1-115116-9
- ④ 新野俊樹, 山田英典, 粉末焼結積層造形による透明部品の作製-屈折率調整されたエポキシ樹脂の含浸によるプラスチック粉末焼結積層造形品の透明化-, *精密工学会誌*, 査読有り, 48, 2010, 348-361

[学会発表] (計 27 件)

- ① Niino T, Haraguchi H, Itagaki Y, Feasibility study on plastic laser sintering without powder bed preheating, *Solid Freeform Fabrication Symposium 2011*, 2011/8/11, Austin TX, USA
- ② 浜島大輔・新野俊樹, 融点の異なる 2 種類の混合樹脂粉末の粉末焼結積層造形, 2011 年度精密工学会春季大会学術講演会, 2011/3/14, 東洋大学
- ③ 原口仁志・新野俊樹, 粉末焼結積層造形における露光範囲の拡大-Scan & Stich の継ぎ目の強度の評価-, 2011 年度精密工学会春季大会学術講演会, 2011/3/14, 東洋大学
- ④ Niino T, Morita K, Improvement in Geometrical Resolution of Plastic Laser Sintering by Using Reduced Spot Sized Laser, *Solid Freeform Fabrication Symposium 2010*, 2010/8/11, Austin, TX, USA

- ⑤ 守田圭佑・新野俊樹, 粉末焼結積層造形の造形領域拡大における接続部の品質向上に関する研究, 2010 年度精密工学会春季大会学術講演会, 2010/3/18, 埼玉大学
- ⑥ 濱島大輔・新野俊樹, 粉末焼結積層造形における供給粉末の圧粉の効果に関する研究-ポリプロピレン樹脂を利用した際に生じる影響の評価-, 2009 年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2009/9/12, 神戸大学
- ⑦ 守田圭佑・新野俊樹, レーザ装置移動による粉末焼結積層造形の造形エリア拡大に関する研究, 2009 年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2009/9/12, 神戸大学
- ⑧ Niino T, Sato K, Effect of Powder Compaction in Plastic Laser Sintering Fabrication, *Solid Freeform Fabrication Symposium 2009*, 2009/8/3, Austin, TX, USA
- ⑨ 守田圭佑, 枝川圭一, 今川成樹, 新野俊樹, 高誘電率構造物の作製を目指した TiO₂, PA12 の混合粉末の粉末焼結積層造形に関する研究, 2009 年度精密工学会春季大会学術講演会, 中央大学, 2009/3/13
- ⑩ 佐藤和樹, 新野俊樹, 粉末焼結積層造形における供給粉末の圧粉の効果に関する研究-ポリアミド樹脂を利用した際の反り低減の効果の評価-, 2008 年度精密工学会秋季大会学術講演会, 東北大学, 2008/9/17
- ⑪ Niino T, Oizumi S., Sato K., Process Resolution of Laser Sintering Process Using Plastic Powder Containing Inorganic Filler at a High Rate, *Solid Freeform Fabrication Symposium 2008*, 2008/8/4, Austin, TX, USA

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://niinolab.iis.u-tokyo.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

新野 俊樹 (NIINO TOSHIKI)

東京大学・生産技術研究所・准教授

研究者番号: 70291929