

令和 6 年 6 月 6 日現在

機関番号：13201

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01308

研究課題名(和文)磁気支持操作による非接触3D光造形技術の創生

研究課題名(英文)Creation of 3D stereolithography technology by non-contact magnetic support operation

研究代表者

大路 貴久(Ohji, Takahisa)

富山大学・学術研究部工学系・教授

研究者番号：30334709

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：本申請は、磁気浮上技術と光造形技術を融合した3D光造形技術を提案し、その実現可能性を広範に評価することを目的とする。本技術に不可欠な三大要素は、磁性光硬化樹脂(mPCR)液の作製・評価、レーザー光源、磁気浮上機構、液体容器、三次元移動ステージの各構成要素を含むプロトタイプ機の製作、基本形状造形である。mPCR液は、レジン液に四酸化三鉄微粒子を10wt%混合した液体であり、磁気力制御、光硬化ともに良好であることを示した。各構成要素を含むプロトタイプ機を製作し、mPCR液に対する磁気力操作、光造形の手順を提示し、mPCR液の垂直、水平積層造形が所望の精度で実現可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

磁気浮上技術による液体(mPCR液)の位置決め制御・操作技術と、光造形技術を融合させる本研究課題は、既存の光造形手法にみられる土台(Zステージ)に直接積層造形するものとは異なり、余計な接触面や支持脚を印刷する必要がない、造形材料や造形時間のムダが排除できる、環境負荷が少ないといった特長を持つ。光造形装置内に磁気浮上機構を組み込むことでシステム全体としては複雑化するが、機能を統合したプロトタイプ機による実験で、磁気支持状態での高精度な垂直、水平積層造形を達成しており本方式の実現性を示せた。本研究での成果は、学際研究的意義のみならず、産業技術としての新規性と意義を十分に有している。

研究成果の概要(英文)：This project aims to extensively evaluate the feasibility of a novel stereolithography technique that integrates magnetic levitation and stereolithography technologies. The project's tasks are (1) preparing magnetic photo-curable resin (mPCR) fluid and evaluating its physical properties, (2) fabricating a prototype machine including a laser light source, maglev unit, fluid reservoir, and three-dimensional linear stage, and (3) printing basic shapes. The mPCR fluid mixed with 10 wt% of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> particles in resin liquid showed that magnetic sensitivity and UV light-curing properties are sufficient for the new stereolithography system. We fabricated a prototype machine that included the components mentioned above. Using the prototype, we tested and evaluated the layered printing of a magnetically supported mPCR fluid cone vertex in the vertical and horizontal directions. As a result, we demonstrated that the prototype machine could print the fluid with the specified layer thickness.

研究分野：電磁応用工学

キーワード：Magnetic levitation Positioning control 3-D printing Additive manufacturing mPCR fluid

### 1. 研究開始当初の背景

<1.1> 磁気浮上技術の背景 磁気浮上は、物体に対し磁気力を作用させて非接触で支持する技術である。機械式軸受の代替要素として高支持剛性化が図られ、鉄道等の輸送機器や5軸能動制御型磁気軸受の研究開発により進展してきた。一方、申請者らは、システムの簡素化やコスト削減に向けた新奇構成による磁気浮上装置を複数提案してきた。2017年度からは、液体(磁性流体)に対し磁気浮上状態の始動、安定浮上に関する研究に着手し、磁性流体の液滴非接触浮上、円錐形状(液錐)での磁気支持操作を遂行し技術を確立した。

<1.2> 3D造形法の背景 積層造形法(Additive Manufacturing: AM)には7つの分類(略)があり、各造形法に適用可能な材料の拡張(樹脂や金属等)や完成品質の向上等を競うフェーズで開発が進んでいる。熱溶解積層(Fused deposition modeling: FDM)や、UV硬化樹脂液を用いた光造形(Stereolithography: SLA)は、比較的平易な造形法として民生化されている。一般に、造形物はステージ面に直接造形され、造形物本体とは別のサポート部も併せて造形されることもあることから、バリ処理等の後工程が必要、サポート部の材料や造形にかかる時間が完全にムダになる、といった不可避な課題が存在する(図1)。これらの課題の克服には、バリやサポートを根本的に無くし、最初から最後まで材料を非接触支持状態としながら加工することが望まれる。

### 2. 研究の目的

上記の光造形技術に、申請者らの有する磁気支持操作技術を融合することで、新たな造形法を確立することが主題であり、材料開発、装置開発、造形手順の導出、基礎形状の造形物作製を通じて、本造形法の実現可能性を調査する。図2は本造形技術の概念図である。

具体的な実施項目として、①磁気支持操作装置の製作と磁性光硬化樹脂液の作製、②浮揚液滴に対する光照射時の固液移行現象の解明、③磁性光硬化樹脂液の供給と磁気支持操作、④光照射と磁気力操作による3D造形度評価、の4つを掲げ研究を始めた。最終的に①③④の項目で成果を得た。以降、[1] 磁性光硬化樹脂液の作製と磁気支持操作装置の製作、[2] 磁性光硬化樹脂液の供給と磁気支持操作、[3] 光照射と磁気力操作による3D造形度評価、と付番し記載する。

### 3. 研究の方法

#### [1] 磁性光硬化樹脂液の作製と磁気支持操作装置の製作

本造形法の実現には、造形材料となる液体の開発(磁気感受性かつ光硬化性を有すること)が不可欠である。磁性流体を基準に、磁性微粒子と母液(光硬化樹脂液)との調合割合や粘度特性を評価し、光硬化性を妨げない造形用液体材料の開発を行う。また、既存の磁気浮上装置を用いて磁気支持操作状況の評価することで、流体の制御性ととも磁気感受性が担保されるかどうかを確認する。

磁気支持操作と光硬化が可能なプロトタイプ機の構成要素を明らかにし、造形空間および各構成要素の適切な配置を検討し、プロトタイプ機を製作する。

#### [2] 磁性光硬化樹脂液の供給と磁気支持操作

磁性光硬化樹脂液の連続供給のための仕組みとして、特殊な治具を製作し毛管現象と磁気吸引力による液体の吸い上げを実施する。磁気浮上制御された液体に対し、制御電磁石の平面(水平)移動や液体頂点の垂直移動(ステージ操作および目標指令値操作)など、光造形に直結する液体の移動操作に関する実験・数値解析を遂行する。

#### [3] 光照射と磁気力操作による3D造形度評価

造形技術の最終形態を想定し、液体とレーザー光の動きを連動させながら硬化させる実験を行う。リザーバから磁性光硬化樹脂液を磁気力で吸引供給し、治具先端で液体を保持しながら同時に光照射することで最初の点を固着させる。これ以降は造形物上に吸引される液錐の頂点を位置決めしながら光硬化、走査を繰り返す(図2)。なお、液錐頂点制御による造形では、最初の固着点で治具との接触を許容するが、材料や造形時間にムダのない理想的な造形法となり得る。

本造形法に特化した造形手順を考案し、その反復による積層造形で磁気支持操作が破綻しないことを確認するとともに、造形物に対する造形度評価を実施する。

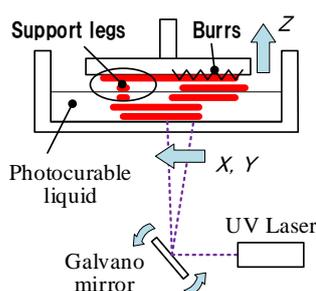


図1 SLAの基本構成

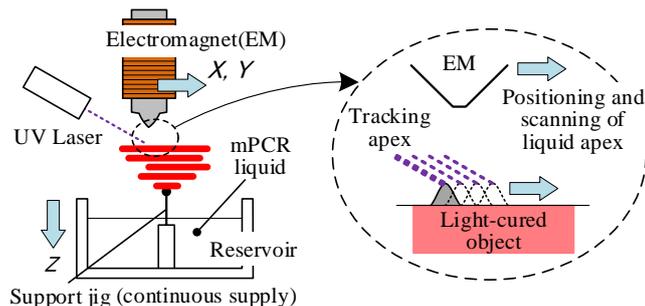


図2 提案方式の概念図

#### 4. 研究成果

##### [1] 磁性光硬化樹脂液の作製と磁気支持操作装置の製作

###### 【mPCR 液の作製と特性評価】

まず、本研究の造形材料となる磁性光硬化樹脂液 (mPCR 液: Magnetic photocurable resin fluid) の作製・物性評価を行った。mPCR 液に求められる要素として、「磁気感受性」、「光硬化性」、「粘度」、磁性微粒子混合時の「均一分散性」が挙げられる。

UV 硬化樹脂液を 2 種 (高粘度, 低粘度) 用意し, 磁性微粒子 (四酸化三鉄, 平均粒径 1.0  $\mu\text{m}$ ) の割合, 増粘剤 (カルボキシメチルセルロース) の割合を試行錯誤的に調合して mPCR 液を作製し, 均一分散性を沈降試験で比較評価した。その結果, 増粘剤は均一分散性向上に貢献しないこと, 高粘度 mPCR 液のほうが磁性微粒子 (10 wt%) は均一に分散 (24 h で 80% 維持) することが確認された。

ベース液中の磁性微粒子の量を 10 wt% 一定とし, 現有の磁気浮上装置で mPCR 液錐頂点の位置決め制御を行った。いずれも磁気力での安定な支持状態が得られ磁気感受性に問題がないことが示された。一方, 高粘度液体のほうが頂角 (液錐頂点の角度) が鈍くステップ応答が遅いことから, 上記のとおり均一分散性に優れるものの本提案の光造形手法では不適とした。以降では, 低粘度 mPCR 液を物性評価対象とする。

図 3 は粘度測定環境である。現有の磁気浮上装置で液錐頂点を支持した際の定常電流値から, 空間中の直流磁場 (14.8 kA/m) を得た。ヘルムホルツコイルを作製し, 粘度計 (ATAGO, VISCO-895) の周囲に設置することで, 同等の直流磁場下 (NF 回路, BP4610 使用) での粘度を温度調整下で測定した。図 4 の結果より, mPCR 液の粘度は, 直流磁場下のほうが磁場無しの場合に比べ約 33% 増大し 160 mPa.s (at 28°C) であった。

図 5 は光硬化性に関する実験例である。mPCR 液をカバーガラス上に 0.5 mm 厚で均一塗布し, UV レーザー光 (CivilLaser, 波長 405 nm, 光出力 0.01 W~0.5 W, 焦点距離 50 mm, 光径 1.0  $\phi$ mm) を 10 mm  $\times$  10 mm で走査し硬化させた際の造形物 (洗浄後) の写真である。なお, カバーガラス側を XY ステージに置き走査した。mPCR 液と焦点距離を一致させることで最小 0.2 mm 幅で光硬化が可能であり, 焦点距離から離れると硬化幅が増大することがわかる。本実験により, 磁気支持状態でも常に焦点距離を保ちながら mPCR 液に適切に光照射するための高精度な制御が必要との見解に至った。その他, mPCR 液の光吸収性と透過限界に基づく試験を行い, 適切な造形厚さは 0.5 mm 程度以下であることもわかった。

以上より, mPCR 液は均一分散性を除いて所望の物性で作製された。均一分散性は短時間 (数時間程度) であれば低粘度 mPCR 液でも問題はない。ただし, 造形時間によってはレーザーバ内で攪拌するなど, 別途要対応となる。

###### 【磁気浮上構成要素と光造形構成要素の融合のための再配置】

図 2 の概念図に基づけば, 磁気支持装置で天吊りされた棒状電磁石を水平方向に走査させることで, mPCR 液錐頂点が水平方向に追従しレーザー光もそれを追尾する形となる。しかし, 現有の磁気浮上装置に X ステージを設置し電磁石を水平方向に動かすと筐体自体が振動し造形精

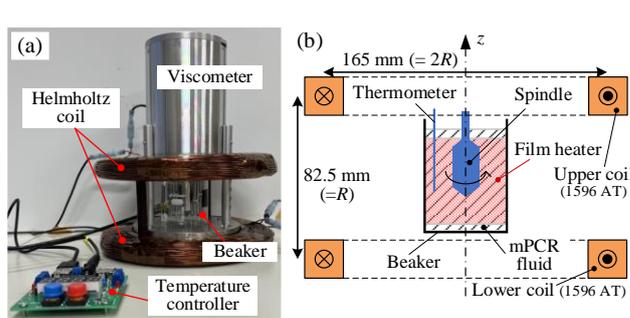


図 3 粘度測定系 ((a)全体写真, (b)磁場印加部)

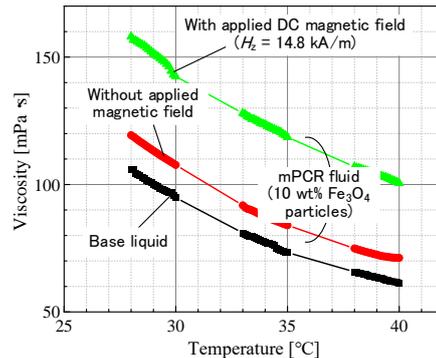


図 4 温度-粘度特性

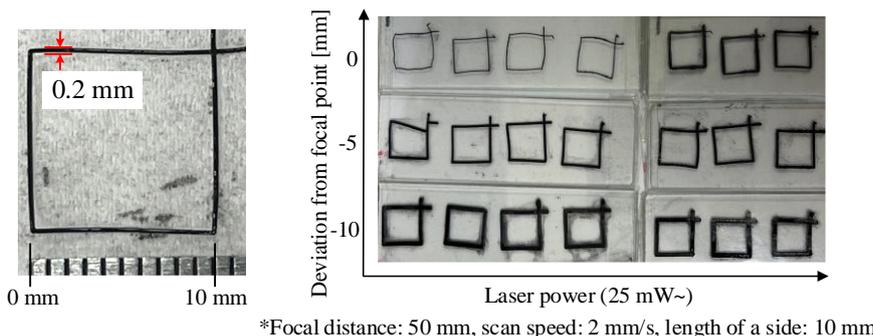


図 5 光硬化幅試験 (最小 0.2 mm 幅)

度に影響が出る。また、レーザー光による追尾も焦点距離を維持しながら走査制御するのは極めて困難と予想された。そこで、構成要素の配置（何を動かし何を固定するか）を再検討した。

構成要素には「レーザー光源」、「磁気浮上部（制御電磁石、変位センサ）」、「液溜り（リザーバ）」、「リニアステージ（XYZ）」、「外部制御環境」がある。液錐頂点の位置決め制御、液錐頂点の光硬化の両方を成立させるためには、電磁石中心、液錐頂点、レーザー照射点を一致させる必要がある。そこで、電磁石中心軸にレーザー光路（スルーホール）を確保し、レーザー焦点距離と液錐頂点を一致可能な扁平形状を採用した。磁気浮上部とレーザー光源は重量物となるため、水平走査するにはそれ相応の強固な筐体を準備する必要がある。これを回避するためにリザーバ側を3台のステージに設置し三次元走査する構成とした。

種々検討の結果、図6のプロトタイプ機を製作した。図6(a)において、上からUVレーザー光源（CivilLaser, 前述）、制御電磁石（図6(b)、先端テーパード、スルーホール2.5φmm、SmCo磁石内挿）、透過型レーザー変位センサ（omron, ZX-LT010, 波長650nm）、mPCR液リザーバ（液溜り）、リニアXYZステージ（中央精機, ALV-104-HP, ALS-106-H1PC）の順に配置した。また、制御環境としてDSP（dSPACE, MicroLabBox）、パワーアンプを準備した。磁気浮上部は変位センサからの信号をA/Dを介しDSP内に取り込み所望の電圧値を演算したのち、パワーアンプにて増幅し制御電磁石への入力とした。また、DSPからのパルス信号によりレーザー光出力制御、XYZステージ制御が可能となっている（ステージ操作は外部コントローラでも可能）。

## [2] 磁性光硬化樹脂液の供給と磁気支持操作

まず、磁気浮上の観点から、プロトタイプ機でのmPCR液錐の磁気浮上状態を調べた。図7は頂点を位置決め制御した際の実験結果である。初期目標ギャップを5.6mmとし、ステップ状に目標ギャップを1mm変化させたところ、約0.3sでギャップ4.6mmに偏差なく整定した。ギャップ4.6mmから5.6mmに変化させた場合も同様の結果となった。このことからプロトタイプ機での磁気浮上性能に問題が無いことが確認された。

つづいて、mPCR液の供給方法について、液錐頂点を磁気支持しその先端を光硬化させたいため、リザーバ（シャーレ）内中央にPLA製治具を立ててmPCR液を引き上げた。治具は、透過型レーザー変位センサの遮光板としての機能とともに、mPCR液を治具表面を伝わせる役割がある（図10(a)参照）。治具材料に磁性体を使用することでmPCR液の引上げ易さを期待したが、制御電磁石が磁性治具を吸引してしまいmPCR液が吸引されないこともわかった。

図8は、本造形法による造形手順（垂直方向）である。①リザーバ内にサポート治具を立て、その先端まで吸い上げたmPCR液を位置決め制御、②液錐頂点の光硬化・治具先端での固着、③リザーバ側のZステージを降下し1層目の上に小さな液錐を形成、④1層目の上で2層目を硬化の順であり、これを繰り返すことで垂直方向に積層化される。一番の難所は、1層目の上に小さな液錐を形成する部分である。この手順③の実験は、例えばレーザー光の焦点距離（50mm）

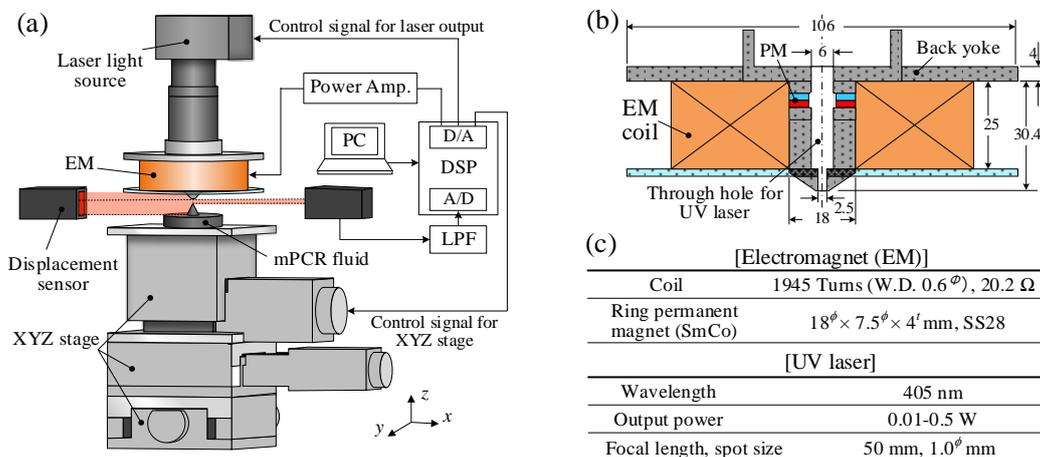


図6 プロトタイプ機の構成 ((a)全体構造, (b)制御電磁石設計, (c)電磁石, 光源仕様)

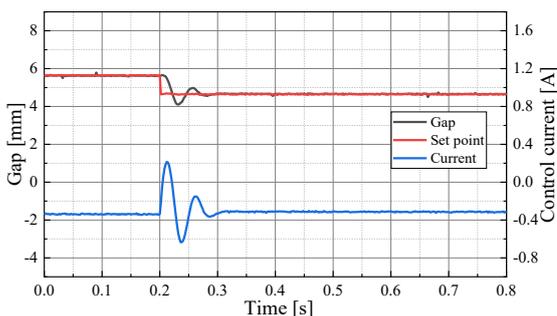


図7 プロトタイプ機での浮上応答試験例

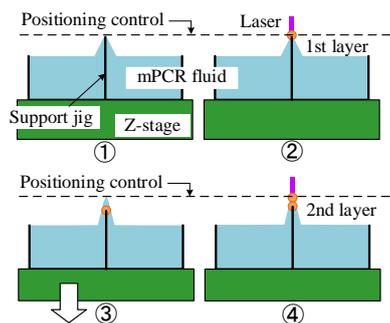


図8 造形手順（垂直方向）

からずれて光が広がると図5のように硬化幅が広がり、治具先端で傘状に硬化し、2層目の mPCR 液が吸い上がらない状況が見られた。そこで、レーザー集光度の高い位置（ギャップ）で mPCR 液錐頂点を磁気支持することで手順③を遂行できた。なお、水平方向造形の場合、手順③で X, Y ステージを用いて水平移動をする点で異なる。

### [3] 光照射と磁気力操作による 3D 造形度評価

造形手順に基づき、プロトタイプ機での磁気支持状態での光造形試験を行った。図9(a)は、造形最初の光硬化の写真(手順②に相当)である。図9(b)は、垂直方向に手順③④を反復した際のギャップ、治具先端位置、制御電流値、および、目標値の波形である。なお、垂直造形では Z ステージのみを外部コントローラにより操作した(手順③)。階段状の治具先端を示すグラフはステージ降下量 ( $\Delta z$ ) と同値であり、図9(b)では  $\Delta z = 0.1 \text{ mm}$  とした。同図よりステージ降下後、一旦ギャップが増減しその後目標値 (5.6 mm) に収束するのが確認でき、mPCR 液頂点が目標値通りに位置決めされている。このときレーザー光を照射する(出力 75 mW, 照射時間 0.5 s)。目標値に一致するまでの時間が造形の序盤と終盤で異なっており安定していない。そのため現状では、目標値への一致を確認し、外部コントローラで手動操作する方法をとった。

図10は積層造形物の造形度評価を示す。まず、加工物写真(図10(a))について、垂直方向へ図9(b)の反復操作を30回繰り返すことで、計31層、3.15 mmの垂直造形物を作製した。水平方向も同様に、X ステージ移動量  $\Delta x = 0.2 \text{ mm}$ 、15回の反復操作により3.25 mmの水平造形物を作製した。図10(b), 10(c)は、それぞれ垂直造形物、水平造形物の寸法を示す。垂直造形では、積層回数(31層  $\Delta z = 0.1 \text{ mm}$ 、56層  $\Delta z = 0.04 \text{ mm}$ )で作製されるべき寸法(設定移動量)はそれぞれ3.10 mm、2.24 mmとなる。実際の造形物の積層量に概ね一致しており良好な造形精度が得られた。一方、水平造形は、設定移動量 3.00 mm に対し、造形物の x 方向長さは約 3.25 mm となった。これはレーザー光径外周の光強度と照射時間に起因する誤差であり改善点である。また、図10(a)の水平造形写真では垂直方向の凹凸が見られる。これは走査方向(x方向)と同方向に変位センサ光が透過しており、既硬化部が後段の mPCR 液錐頂点のギャップ検出を困難にするためである。同じく水平方向となる y 方向に走査すればこの凹凸は解消されるものと考えられる。

光照射タイミング、ステージ移動指令は半自動(matlab/simulink プログラム, キーボード入力, 外部コントローラ操作)の段階である。垂直方向、水平方向ともに、指定通りの積層精度が得られることから三次元造形を期待できる知見が得られた。磁気支持型光造形の基礎的技法が確立されたことで産業システム化への見通しを得ることができた。

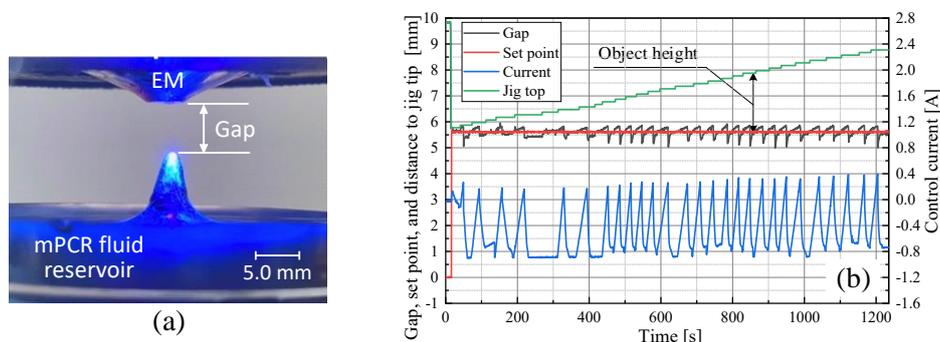
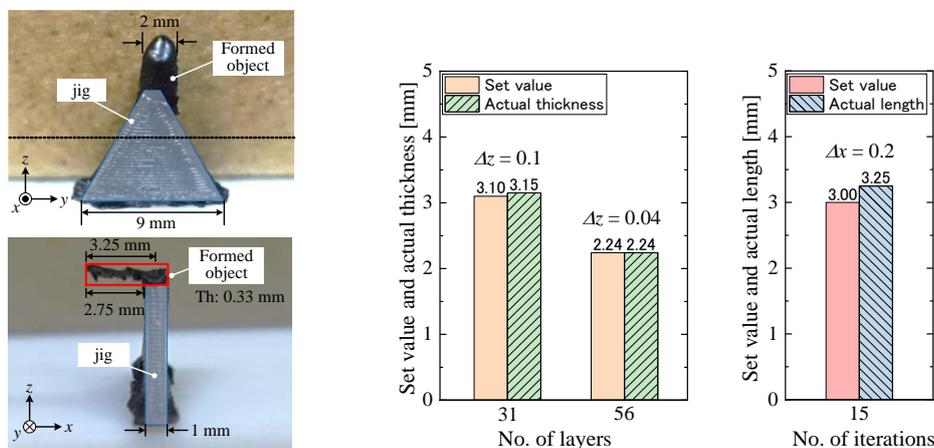


図9 磁気支持光造形実施例(垂直方向)  
(a)液錐頂点の位置決め制御時の光照射写真, (b)Z ステージ移動時の各制御信号



(a) 造形物写真(上: 垂直, 下: 水平) (b) 垂直積層造形の厚さ (c) 水平積層造形の長さ

図10 積層造形物の造形度評価

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 西晃平, 北守祐貴, 大路貴久, 飴井賢治
2. 発表標題 磁気支持式光造形のための磁性光硬化樹脂液の作製と評価
3. 学会等名 2022年度電気・情報関係学会北陸支部連合大会 (JHES2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 西晃平, 北守祐貴, 油井純貴, 大路貴久, 飴井賢治
2. 発表標題 磁気支持式光造形装置の開発 ~ 磁性光硬化樹脂液の作製・評価と造形試験 ~
3. 学会等名 第35回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム (SEAD35)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takahisa Ohji, Kohei Nishi, Junki Yui, Kenji Amei,
2. 発表標題 Proposal of a 3-D Stereolithography System Incorporating Magnetic Levitation Technique
3. 学会等名 The 12th Japan-Mediterranean Workshop on Applied Electromagnetic Engineering for Magnetic Superconducting, Multifunctional and Nanomaterials (JAPMED'12) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kohei Nishi, Junki Yui, Takahisa Ohji, Kenji Amei
2. 発表標題 Fundamental Configuration and Principles of a Stereolithography System Utilizing Magnetic Levitation Technique
3. 学会等名 The 21st International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics (ISEM2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 油井純貴, 大路貴久, 飴井賢治
2. 発表標題 磁性光硬化樹脂液の粘性比較による磁気支持制御・追従性評価
3. 学会等名 2023年度電気・情報関係学会北陸支部連合大会 (JHES2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 吉澤優大, 油井純貴, 西晃平, 大路貴久, 飴井賢治
2. 発表標題 磁気浮上型3D光造形システムの構成と基礎造形試験
3. 学会等名 2024年電気学会産業応用部門大会 (JIASC2024)
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関