

造形可能な溶液粘度領域の拡張を目指した 3D ゲルプリンタの開発

Development of a 3D gel printer to extend the range of solution viscosities that can be printed

櫻井 佑真¹, 渡邊洋輔², 川上 勝², エムディナヒン イスラム シブリ², 小川 純²,
アジット コースラ², 古川 英光²

Yuma SAKURAI¹, Yosuke Watanabe², Masaru KAWAKAMI², MD Nahin Islam SHIBLEE², Jun OGAWA²,
Ajit KHOSLA², Hidemitsu FURUKAWA²

¹山形大学工学部

²山形大学院理工学研究科

¹Faculty of Engineering, Yamagata University

²Graduate School of Science and Engineering, Yamagata University

【要約】

これまで、高分子ゲルを造形するためには、主に型を用いたプロセスが必要であった。型の利用は、造形物の形状に制限を与える。我々は高分子ゲルの自由な形状を造形可能にするために、光硬化型の3D ゲルプリンタを開発した。本研究では、造形可能なゲルの溶液粘度領域を拡張した 3D ゲルプリンタを開発する。装置の振動の影響が大きい低粘度溶液においては、振動を抑制するためモータの静音化、防振対策、及び造形条件の検討を行った。高粘度溶液においては、遅い溶液の流れを考慮した造形ステージの動作を検討した。

キーワード: 3D ゲルプリンタ, 振動, 溶液粘度

【Abstract】

To form polymer gels, a mold-based process is mainly required. The use of molds limits the shapes of the objects. We developed a light-curing 3D gel printer to enable the fabrication of polymer gels in any shape. In this study, we develop a 3D gel printer that extends the solution viscosity range of the moldable gel. In the case of low-viscosity solution, where the vibration of the machine has a large influence, we investigated the quietness of the motor, the anti-vibration measures, and the molding conditions in order to suppress the vibration. In the case of high viscosity solution, the motion of the modeling stage was examined considering the slow flow of the solution.

Keywords: 3D Gel Printer, Vibration, Solution Viscosity

1. 序論

高分子ゲルは、高分子鎖のネットワーク内に溶媒をため込んだ物体や状態のことを指す。高分子ゲルは、広範な弾性率の調整が可能であり、生物のような柔らかい動きや表面を模倣するソフトロボットに適した材料といえる。

高分子ゲル材料は、硬化前の溶液(プレゲル溶液)の組成や硬化手法によって、硬化後の物性を調整することができる。より柔らかいゲルを造形するには、プレゲル溶液において、溶媒の量と比較してゲルの骨格となる成分の量を少なくするとよい。水を溶媒としたハイドロゲルにおいては、骨格成分の減少とともに、プレゲル溶液の粘度も減少する。

硬化後のゲルの物性を調整しやすい硬化手法としては、光硬化が挙げられる。光硬化では、光を照射すると重合反応を開始する光開始剤を使用する。光開始剤が含まれたプレゲル溶液に対して光の照射強度を調整することで、硬化後の弾性率を制御できる。この仕組みを利用して、我々は 3D ゲルプリンタを開発した。3D ゲルプリンタは、プレゲル溶液の液面に対して、レーザー光

源を走査し、任意の位置で硬化させることで、三次元の構造体を造形することができる。

これまで、高粘度のプレゲル溶液を用いると、硬化後の弾性率が大きくなるものの、3D ゲルプリンタの造形精度が低下することを報告している。一方で、低粘度のプレゲル溶液を用いた際は、どのような因子が重要であるか未検討であった。

本研究では、造形可能なゲルの溶液粘度領域を拡張した 3D ゲルプリンタの開発を行う。特に、低粘度の溶液では、装置の振動の振動による液面の揺れが造形精度に影響を与えることが推察される。そこで、振動を抑制するためモータの静音化、防振対策、及び造形条件の検討を行った。一方で、高粘度溶液においては、造形する液面に、安定してゲル溶液を供給できるかということが、造形成功の鍵となっている。そこで、高粘度溶液を考慮したステージの動作方法としてオーバーディップを採用した。オーバーディップと造形精度の関係について報告する。

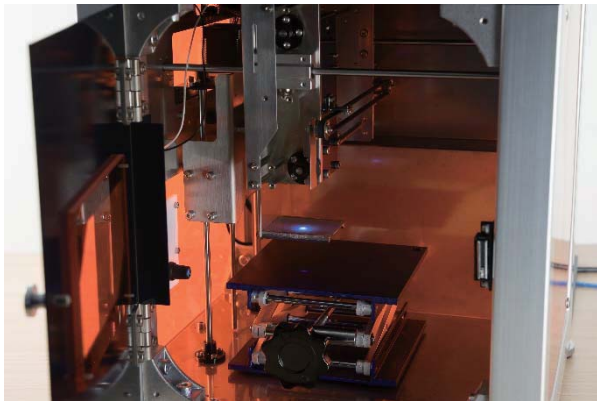


Fig.1 3D Gel Printer "Gel PiPer"

2. 装置の説明

本研究では、我々が開発した Gel PiPer という 3D ゲルプリンタを用いた。図 1 に示すように、プレゲル溶液に対して任意の位置で 405nm の光を照射し、3 次元構造を造形する。スポット径は 0.3mm である。造形ステージはステンレス製の金網を用いている。

図 1 に Gel PiPer の外観を示す。

3. 振動実験と造形

本研究では、デジタル表示式振動計デジバイプロ Model-1332A を用いて振動を計測した。図 2 のように振動計のセンサー部分を両面テープでステージ部分に取り付けて変位 DISP[mm(P-P)]を計測した。計測の際、コネクタアクセサリ BNC-2120 を用いて PC に接続し、Igor.pro の wave scan 機能を用いて振幅を求め、フーリエ変換を用いて振動数を求めた。今回は、3D プリンタで広く用いられている安価なモータドライバである A4988 (HiLetgo 製)と、静音化モードを有するモータドライバ TMC2208 (BIGTREETECH 製)における振動を比較した。造形スピードは、5mm/s ,10mm/s ,20mm/s とした。

造形する材料は、ICN(Inter-crosslinking Network structure)ゲルを用いた。表 1 に ICNゲルの組成を示す。モノマーとして DMAAm(N,N-Dimethyl acrylamide),ポリマーとして HPC(Hydroxypropyl Cellulose), 架橋剤として KarenzMOI-EG (2-(2-methacryloyloxyethoxy)ethylisocyanate),光重合開始材として波長 405nm に吸収ピーク波長を持つ TPO (Diphenyl (2,4,6-trimethyl benzoyl) phosphine Oxide),印刷精度向上のための吸収剤として AS-150(Benzenesulfonic acid, 2, 2'-(1,2-ethenediyl)bis[5-[4-methoxy-6-(phenylamino)-1,3,5-triazin-2-yl]amino]-,sodium salt(1:2)),溶媒として精製

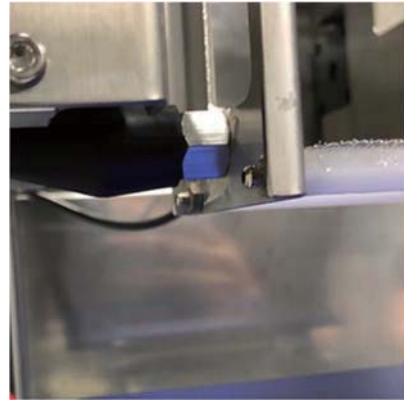


Fig.2 Mounting vibrometer sensor

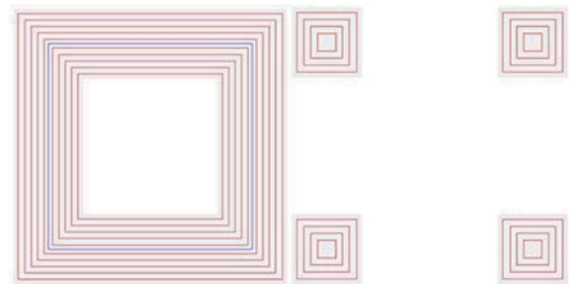


Fig.3 Moulding Path

水を使用した

また、ICNゲル溶液調整後に、HPCを再度加えることでプレゲル溶液の粘度を調整した。表 1 に示した組成に HPC を加えて粘度を変更した溶液を作成し、0wt%,+0.1wt%で造形物の比較を行った。粘度は EMS-1000 で測定を行った。0wt%, 0.1wt%を加えた際のプレゲル溶液の粘度はそれぞれ 25.2mPa・s, 40.0mPa・s であった。

また、本研究では、オーバーディップ動作が造形物に与える影響について調査した。高粘度溶液の場合、溶液が流れないことで造形ステージに溶液が供給されないことがある。オーバーディップ動作は、次の層を造形する前に余分にステージを沈ませ、ステージの上に溶液を満たす動作を指す。実際には、各層が造形される前にオーバーディップの動作となる G-code を差し込むことで、動作を実現させた。これまでの実験と同様に各スピードでの造形と、溶液の粘度を変更した際の造形物の評価を行った。この時、モータドライバを A4988 とした。

4. 造形物の評価方法

本研究では、10mm x 10mm x 10mm の立方体の中を

Table 1 Composition of ICN gel

Monomer [Mol/L]	Polymer [Mol/L]	Cross-linker [Mol/L]	Initiator [Mol/L]	Absorber [wt%]
DMAAm	HPC	Karenz	TPO	AS-150
4.0	2.0×10^{-2}	2.0×10^{-2}	1.0×10^{-2}	1.0×10^{-1}

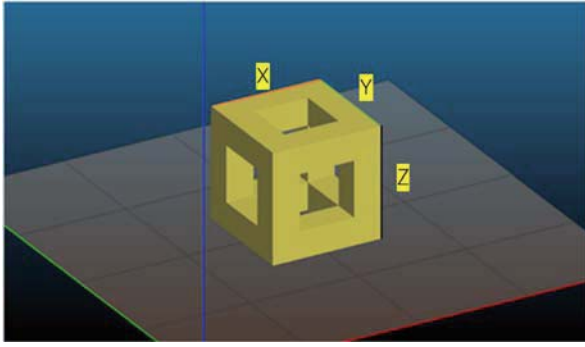


Fig.4 Hollow cube

くり抜いた格子状の構造体を造形した。中の中空部分は、5mm x 5mm である。形パステータを図 3 に示す。造形物は顕微鏡 (OLYMPUS 社 SZ2-ILST) で撮影し、その後、ImageJ を用いて造形物の大きさを確認した。図 4 に造形物と、造形物内で測定した三箇所を示す。また、STL ファイルで作成した設計データとの差分率を理論値 X_i 、実験値 X_e とした時の差分率 $a_0 = (X_e - X_i) / X_i * 100$ により求め、グラフ化した。今回は一部の造形条件でステージの下部に硬化したゲルが見られた。今回はそのような光の突抜による余分なゲルの効果についての測定は考慮していない。

5. 結果及び考察

まず、モータドライバによる振動数の比較を行った。モータドライバ A4988 において、造形スピードを 5mm/s, 10mm/s, 20mm/s として振動を測定した。造形スピードが大きくなるにつれて、縦軸の振幅の最大値は大きくなる傾向が見られた。これは TMC2208 でも同様の傾向が見られた。また、TMC2208 と A4988 における振動測定の結果を図 5 に示す。図 5 の縦軸は振幅を示し、横軸は周波数を示しており、赤色が TMC2208、黒色が A4988 を示している。TMC2208 と A4988 を比較したところ、振幅が最大となる振動数及び振幅の最大値はほぼ同じ値であった。以上よりモータドライバの変更による振動の影響は小さいことが分かった。

各条件における造形物の差分率についてのグラフを図 6 に示す。モータドライバを変更した際の造形物の差分率は大きく変化しなかった。X 方向と Y 方向は造形スピードが速くなるにつれて差分率は減少した。これはスピードが速くなるにつれて、造形に適した照射光量になっていることがわかる。なお、Z 軸の差分率はスピードの変化によらず、ほぼ一定の値だったので、図 6 に示していない。

次に、粘度と造形精度の影響について調査した。HPC を 0.1wt% 加えて粘度を増加させた溶液での各条件における造形物の差分率を図 7 に示す。HPC を加えて粘度を変更する前後で差分率の大きな変化は見られ

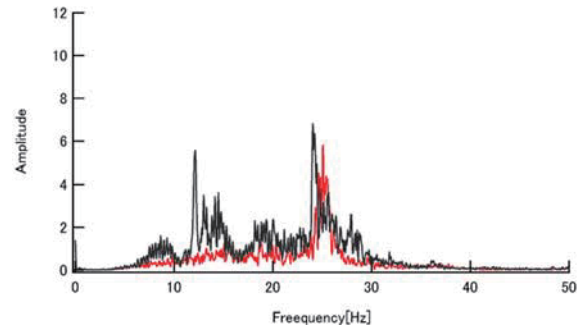


Fig.5 Vibration at Print speed 10mm/s

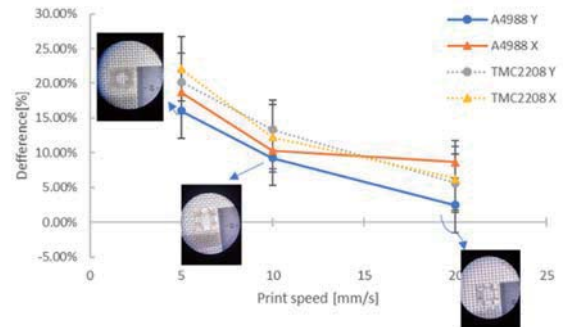


Fig.6 Evaluation of objects (HPC+0wt%)

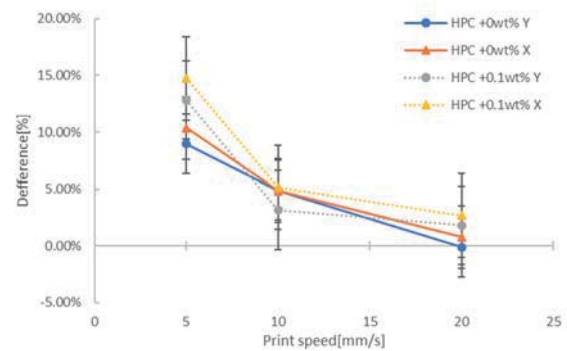


Fig.7 Evaluation of objects (A4988)

なかった。HPC 添加なしの溶液と、0.1wt% 加えた溶液の粘度は 25.2mPa・s, 40.0mPa・s であり、造形精度に影響を与えるほどの粘度の差がなかったことためである。

最後に、オーバーディップ動作造形精度に与える影響について調査した。HPC 添加なしの溶液と 0.1wt% 加えた溶液の差分率の結果を図 8, 図 9 (次項) にそれぞれ示す。HPC を 0.1wt% 加えた溶液ではオーバーディップによる差分率は大きく変化が見られなかった。HPC 添加なしの溶液では、オーバーディップによる差分率は減少した。また、造形物を観察したところ、オーバーディップの有無によって造形物に変化が現れた。HPC 添加なしの溶液を用いた造形物の上面の写真を図 10 (次項) に示す。オーバーディップを実施した場合、各辺は直線的に造形されているが、オーバーディップ動作がない場合、波打っているような構造が見られた。低粘度帯特有の液面の揺れが、オーバーディップの動作時間によって緩和され、直線的に造形できた可能性がある。

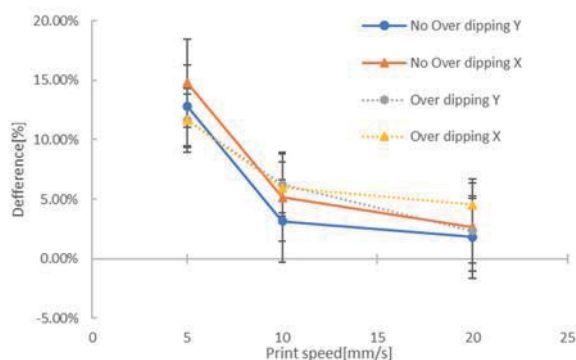


Fig.8 Evaluation of Over dipping (HPC+0.1wt%)

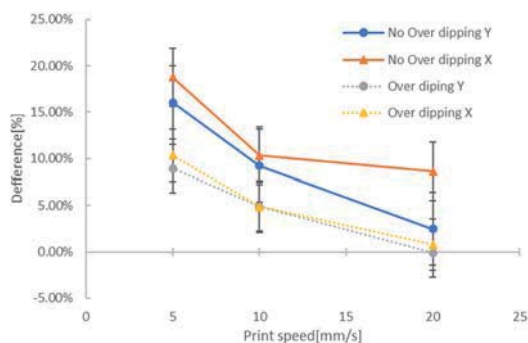


Fig.9 Evaluation of Over dipping (HPC+0wt%)

6. 結論

我々が独自に開発した 3D ゲルプリンタである Gel PiPer の溶液粘度領域を拡張すべく、25-40mPa・s 程度の低粘度 ICN ゲル溶液の造形を行った。低粘度溶液特有の液面の揺れが造形精度に影響を与えると仮定し、揺れの因子として、モータドライバや造形スピードを検討した。造形物は、設計値との差分率で評価した。造形スピードを増加させたところ、差分率が減少することが確認された。一方で、モータドライバを変更した際の差分率は大きくは変化しなかった。

また、ICN ゲル溶液に対して HPC を加えることで粘度を調整し、粘度と造形精度の影響を調査した。今回用意した溶液粘度の差は 15mPa・s 程度であり、大きな粘度の差がなかったため粘度と造形精度の影響は見られなかった。

さらに、Gel PiPer が高粘度溶液の造形を可能にするために、オーバーディップ動作について造形精度との影響を調査した。今回の調整したゲル溶液は低粘度だったため、オーバーディップによる造形精度の改善は見られないと予測していたが、オーバーディップ動作の有無によって造形精度に変化が見られた。オーバーディップ動作をする G-code は各層への造形が始まる前に行うため、オーバーディップ動作の時間が液面の揺れを低減した可能性がある。

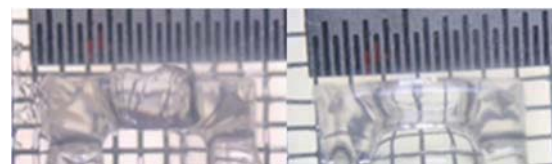


Fig.10 Over dipping or not (20mm/s)

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 JP17H01224、JP18H05471、JP19H01122、JP21H04936、JP21K14040、JST COI JPMJCE1314、JST OPERA JPMJOP1844、JST OPERA JPMJOP1614、ムーンショット農林水産研究開発事業 (MS508, JPJ009237)、内閣府が進める「戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 第 2 期 / フィジカル空間デジタルデータ処理基盤」、「官民による若手研究者発掘支援事業」(管理法人: NEDO) によって支援を受けたものである。

参考文献

1. Ultrahigh Ductile Gels Having Inter-Crosslinking Network (ICN) Structure (2012) Go TAKADA, Ruri HIDEMA, Hidemitsu FURUKAWA
2. Development of low viscosity gel material suitable for modeling with 3D gel printer and evaluation of mechanical properties (2018) Taishi TASE, Azusa SAITO, Takafumi OTA, Kei SATO, Kyuichiro TAKAMATSU, Kazunari YOSHIDA, Masaru KAWAKAMI, Hidemitsu FURUKAWA