

2023 年度杉山産業化学研究助成 報告書

フード 3D プリンタによる食感創製に向けた

造形精度向上を可能にするフードインク開発

東京電機大学 理工学部 武政誠

フード 3D プリンタは、少数ロットでもカスタム食品を製造すること、また既存の製造技術では現実的ではない食感を創り出すこと、など多数の利点を備えており、高齢化社会を迎えた現在、また今後必須となる製造技術として注目が集まっている。

一方で、従来は利用可能な食品素材が限定的であり、結果として 3D プリント可能な食品は限定的であった。その理由は、主としてレオロジー特性に起因し、造形精度が低くなってしまうことが、3D プリントを阻む原因であった。

食材を、ミキサーで粉々にするなどで適切なレオロジー特性を有するペースト状へと調整できれば、上記のペーストエクストルーダーにセットしてプリント用に利用する道が拓かれる。最も一般的な材料押し出し式 3D プリントにおいては、ニードル内径により、造形精度の空間分解能の限界が支配される。細孔ニードルを利用すれば細かい形状でも原理的には造形が可能となる。一方、細孔ニードルの使用はフードインクのレオロジー特性からは問題を生じさせる。プリンタの装置開発、利用者の利便性からするとフードインクは低粘度でなければならないが、プリント後は、高粘度である必要がある。何故なら、低粘度インクでは印刷したパターンが特にプリント直後に崩れてしまうためである。インクが高粘度であれば、短時間はパターンが保持される。一方、粘度だけでは不十分である。ハチミツや水飴のような、完全粘性体として近侍できる、ニュートン粘性液体では、プリントパターンが短時間維持できても、長時間が経過すれば、流動してしまい、プリント精度が低下する。この問題を解決し、長時間の形状安定性を持たせるためには、微小変形時の弾性率、特に貯蔵弾性率(E' , G')を増加させること

が必須となる。具体的には、架橋密度を増加することで、制御が可能になる。

これらのレオロジー特性、フードインクの力学物性として求められる物性は、互いに矛盾する特性もあり、天然の食品素材を破砕してペースト状にするだけでは達成することは不可能である。レオロジー特性改質を持つ天然食材、もしくは食品添加剤を適量添加すること、さらにはレオロジー特性に基づいた押し出し制御を実施することで解決可能となる。

水溶性高分子溶液としてフードインクを利用するだけでなく、不溶性微粒子の添加によりスラリーとして 3D プリントを実施することで、いかなる食品用栄養素であっても、分子量に依存せず高精度 3D プリントが可能となった。具体的には、セルロース粉末などの不溶性微粒子を添加することで、微粒子間の体積分率が一定値に近づくと定常粘度や、弾性率、剛性率が急増させることが可能である。つまり、栄養素など食品の味に影響を与えることなく、無味無臭の不溶性微粒子の体積分率に基づいて、いかなる栄養素であっても、高精度 3D プリントに成功した。この現象が、不溶性微粒子間のジャミング転移に起因していることを、本研究では明らかにした。ゲル濾過用カラム充填材を低アスペクト比材料、また高アスペクト比の（可食）材料としてセルロース粉末を利用して、材料特性としてレオメーターを利用し、 $G^*(\omega)$, $G^*(\gamma)$, $\eta(d\gamma/dt)$, を計測し、それぞれのフードインク材料で 3D プリントを実施し、造形精度を 3D スキャナで数値化し、フードインク物性と造形精度の関係性を評価した。結果としては、 $10^{4.7} < G' < 10^{5.0}$, $10^{4.0} < \eta < 10^{4.7}$ の 2 条件を同時に満たす場合は、高精度プリントが可能であった。

従来は、澱粉であっても、数十種類の澱粉それぞれに対して、種類や濃度を細かく

変化させて、どの材料であれば 3D プリント 可能か？などの議論が主流であり、膨大な種類の食品材料全てに対して実験することが困難であった。本研究により食品素材を問わず、いかなる食品素材でも一つの指標で高精度 3D プリントへの道を拓いたことで、食品の外見はもちろん、食感を設計通りに創り込む用途でもフード 3D プリンタを活用することが可能になった、と考えられる。

学会発表等

1. 小田陽矢，武政誠「食品素材を問わず高精度 3D プリントを実現するレオロジー特性」，第 77 回日本栄養・食糧学会大会，2023.5.
2. 小田陽矢，武政誠「レオロジー特性制御による食品栄養成分に依存しない高精度フード 3D プリント」，第 83 回日本分析化学討論会，2023.5.
3. 小田陽矢，武政誠「微粒子分散系としてのインク粘弾性



図 本研究で可能になった高精度フード 3D プリント。(a) 低精度 3D プリント例。レオロジー特性が最適化されていないフードインク使用。(b) 本研究で最適化したフードインクを利用した 3D プリント寿司。いずれも 3D モデルや、栄養成分としては同一材料を利用しており、本研究成果により任意の食品材料で高精度 3D プリント

制御によるフード 3D プリント材料の広範化」，第 71 回レオロジー討論会，2023.10.

- (優秀ポスター発表賞受賞)
4. 小田陽矢，武政誠「歯応えのある食品の 3D プリン

トに向けた可食インク開発」, 日本食品科学工学会 令和 6 年度関東支部大会, 2024.2.

(優秀ポスター発表賞受賞) . 他, 国際会議 1 件, 国内会議 3 件, 計 8 件発表