

大豆たん白質を利用した食品3Dプリンタ用フードインクの開発

武政 誠*

東京電機大学大学院生命理工学専攻生命物理化学研究室

Development of 'Food Ink' from Soy Protein Isolate for 3D Food Printing

Makoto TAKEMASA*

Tokyo Denki University, Graduate School of Science and Engineering,
Life Sciences and Engineering, Saitama 350-0394

ABSTRACT

Soy protein isolate (SPI) was used to develop edible paste ink as 'Food Ink' for food 3D printing. Aqueous solutions of soybean protein were prepared at various concentrations ranging from 5 to 50%. In all the concentrations, extrusion from the syringe was possible, but the quality of the printed object was relatively low compared with the other food inks, probably due to the viscoelastic properties of aqueous suspensions of SPI alone. Xanthan, a microbial polysaccharide used in food industry as a thickener, was added to improve the viscoelastic properties to maintain the object shape. The food ink developed in this study was relatively more precise than other food inks. *Soy Protein Research, Japan* **22**, 35-39, 2019.

Key words : food 3d printing, soy protein isolate (SPI), xanthan, viscoelasticity, thickener

多様でおいしい食を簡便に供給することは人類の長年の悲願と言える。近年、3Dプリンタの著しい発展により、試作品をはじめ小ロット量産品まで、ものづくり革命が始まっている。本研究ではこの3Dプリンタを食品に応用し大豆たん白質を材料として造形するために必要な技術確立を目指した。

食をその場で作成する事は、環境への配慮からも求められており、食品ロス削減推進法成立により注目が集まっている。高齢者向けでも安全でおいしい高たん

白食のニーズは大きく、食品3Dプリンタを利用する事で、もしおいしく、かつ安全な食が、必要とされるその場で必要な量だけ作成することが可能になれば、今後非常に大きな意味を持つと考えられる。

これまでチョコレートや飴、パスタなど、脂質と糖質の造形において商業化が始まっているが、たん白質素材の利用報告例はほぼない。一方で、たん白質は基本栄養素でもあり、完全な食事を作るためには、たん白質を食品3Dプリンタのインク（以下ではフードインクと記す）として利用を可能にすることが必須である。

*〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂

本研究で食品3Dプリンタで大豆たん白質をフードインク化するために必要な、基礎的な物性面の検討を行い、今後立体造形物を、栄養面でたん白質含量を増加させ、また多様な食感を実現するための基礎技術の確立をめざしている。大豆たん白質を利用したペースト状食品の開発を、特に粘弾性特性の制御を中心に検討を行った。

方 法

RepRap project¹⁾の成果物であるオープンソース型3Dプリンタ設計に基づいた互換キット品(Alunar M605Bなど)を購入し、本3Dプリンタをベースとして、ペースト状食品を利用できるように改造して利用した。熱可塑性樹脂のフィラメントを押し出す(エクストルーダー)部分を、別途作成したペーストエクストルーダー²⁾を固定できるように取り付け部分を作成した。また、ステッピングモーターおよびヒーター等を制御する基板についても拡張性の高い基板へと変更を加えている。

ペーストエクストルーダーは、ペースト状の食品、またセメントなどの押し出し機構であり、本研究では、立体造形を行う材料であるペースト状食品(フードインク)をディスプレイシリンジに充填し、シリンジを設計通りの指定の位置で指定量だけ押し出す操作を繰り返すことで造形を行った。シリンジの押し出しは、3Dプリンタ制御コントローラーを用いて、ステッピングモーターを介して制御している。フードインクの押し出しは一般に必要な荷重が大きくなりがちである。これは食品として、ある程度硬い、歯ごたえのある食品を造形するために、「かたい」材料のインクを用いる事が必要となるためである。本研究では小型(10 mL)シリンジをステッピングモーターで押し出す方式を採用し、ギアで減速することにより比較的小型のモーターを利用した造形を可能にした。

シリンジの先端部には、押し出しノズルとしてニードルを取り付けた。使用した10 mLシリンジは、株式会社TOP製のロックタイプであり、シリンジ用ニードルは、18G(ゲージ規格、内径φ0.82 mm)および20G(同0.59 mm)を利用した。

作製したSPIフードインクを用いて3Dプリンタによる造形を行う際は、立体形状をPC上で構築し、モーター制御コードへと変換し、ペーストエクストルーダーにフードインクが充填されたシリンジをセットした後に造形を開始した。本研究における、造形用モデリングデータは造形のモデルにはアルファベットのT

を模った形状を使用した。鉛直方向をZ方向とし、それに垂直な平面内にX-Y軸を取ると、それぞれの最大値は $(X_{max}, Y_{max}, Z_{max}) = (35.6, 42.6, 10.0)$ mmであった。

各工程に利用したソフトウェアを以下に記す。CAD(モデリング)にはBlender(2.47)、CAMツールとして、スライス設定にはCura、モーター制御回路のファームウェアとしてMarlinを利用した。

結果と考察

5.00, 10.0, 15.0, 20.0% (w/w)の濃度でSPI水分散スラリーを調整した。

作製した5~20% (w/w)のスラリーを10 mLシリンジに充填し、手で押し出した後の線上造形物の状況をFig. 1a, bに示す。5.00% (w/w)のスラリーではシリンジから一定速度になるよう努めながら押し出した直後に、高さが急速に減少した。これは粘弾性特性、特に粘度が低いことによりインクが流れてしまったためであると考えられた。つまり、立体造形をするためには押し出し時の形状を維持する事ができなかったといえる。また、押し出した造形物の上に重ねて押し出しても、2層目に出力したインクは垂れてしまい、積層させることができなかった。このような状態では、インクには不向きであると考えられる。この原因は、粘度が低く、SPIと水の2成分系で考えた場合には、SPIの濃度が低いことにあると考えられる。

より高濃度の、10, 15% (w/w)では、複数回、積層させることはできたが、時間経過とともに形状が崩れてしまい、5分後には5% (w/w)と同様に流れる傾向がみられた。5%SPI分散液と比較すると、10~15%のSPIフードインクの方が、形状保持の観点からはより優れてはいたが、現状の3Dプリンタの造形速度は平面1層を造形するために5分以上かかることもあり、このSPI濃度ではまだ不十分といえる。

さらに高濃度の20% (w/w)では積層しても崩れにくく、インクとしての適性が高いと考えられたため、後述する3Dプリンタを利用した自動出力を試みた。また、20% (w/w)以上へと濃度を増加させた場合には、均一なペースト状インクを短時間で調整することがより困難であった。また手でシリンジから押し出す際にも、必要な荷重が高いことなどにより、ペーストエクストルーダーによる自動出力が困難になる。などの理由から、SPI濃度は20% (w/w)をフードインクとして、次に立体造形を試みた。

このフードインクで造形した例をFig. 2aに示す。造形に用いた立体モデル(Fig. 2b)と比較すると、造形

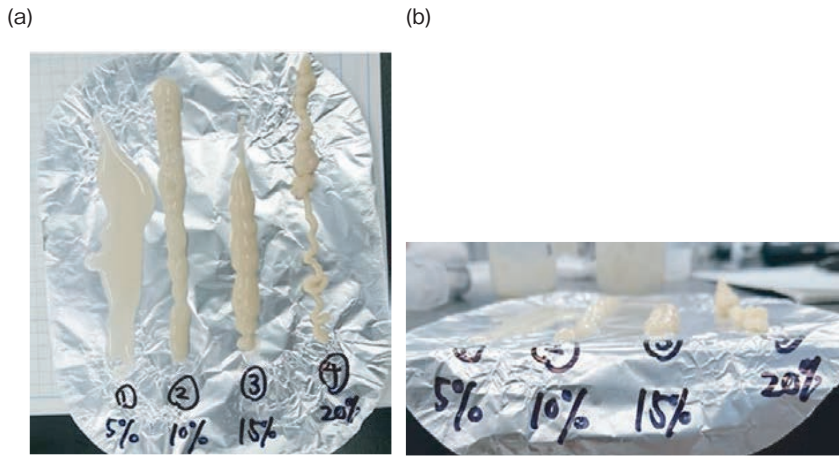


Fig. 1. (a) SPI/water slurry at different concentrations extruded manually from syringe. (b) Side view of Fig. 1a. Extruded volume of each food ink and the other conditions, such as speed are almost the same. By decreasing concentrations, the height of the extruded object decreases due to the flow.

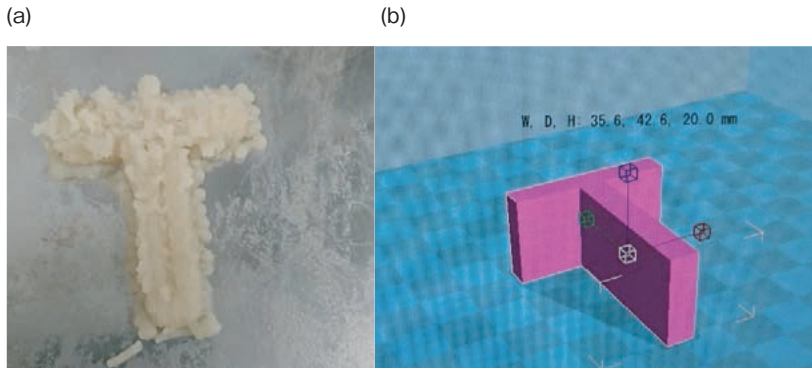


Fig. 2. (a) 3D-printed object using 20% (w/w) SPI slurry, and (b) 3D modelling data used for the print.

精度が高くないことが分かる。造形物表面が波打ったり、ボロボロに崩れた状態となっていた。これはフードインクの粘弾性特性が、細径ノズルから押し出したままの形状を維持する目的に最適化されていないことに起因すると考えられる。

ペーストエクストルーダーに取り付けたニードルからフードインクを押し出すためには流動性を有している必要がある。一方で押し出しを停止した際にすぐに停止する必要があるが、はちみつのような高粘性液体ではキレが悪く垂れ続けてしまう。モーター制御を遅延なく造形へと反映できるようにするためには、様々な特性が求められるが、例えば緩和時間の短い粘弾性特性が要求される。また、ノズルから吐出された後のレオロジー特性には別の特性が必要である。たとえば高剛性であることが求められる。何故なら、3Dプリンタでは材料を平面内に配置した後に、その面の上に

被せる形で別のレイヤーを積み重ねる操作を繰り返す事で3次元形状を構築するため、造形済みの下部の材料が、脆かったり、または粘性体であり粘性係数が小さかった場合には、積み重ねる事が出来ずに、崩れたり流れてしまったりするためである。

前述の、ボロボロとした表面状態は、フードインクの各小要素間の結着力が弱いために、造形線の連続性が保たれなかったと考えられる。この問題を解決するために、食品業界で多用されている増粘剤であるキサンタンガムを添加して、SPIフードインクのレオロジー特性を改質する事を試みた。キサンタンガムは、*Xanthomonas campestris*が産生する菌体外多糖であり、セルロース骨格を持ち、主鎖2糖あたり1つ、側鎖を有している。この側鎖により水溶化されたセルロースであるともいえる。水溶液中では2重螺旋構造を取ることが知られており、剛直な構造、および巨大分子

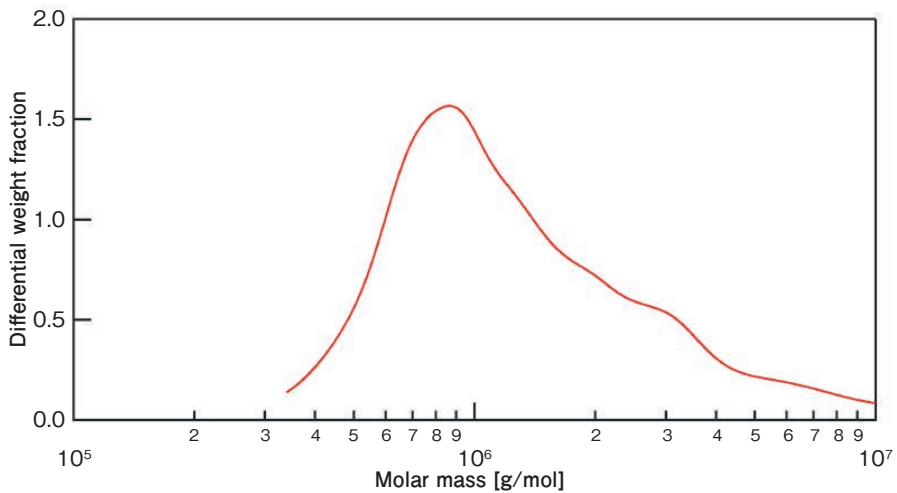


Fig. 3. Molar mass distribution of xanthan gum estimated by SEC-MALLS (Wyatt HELEOS).

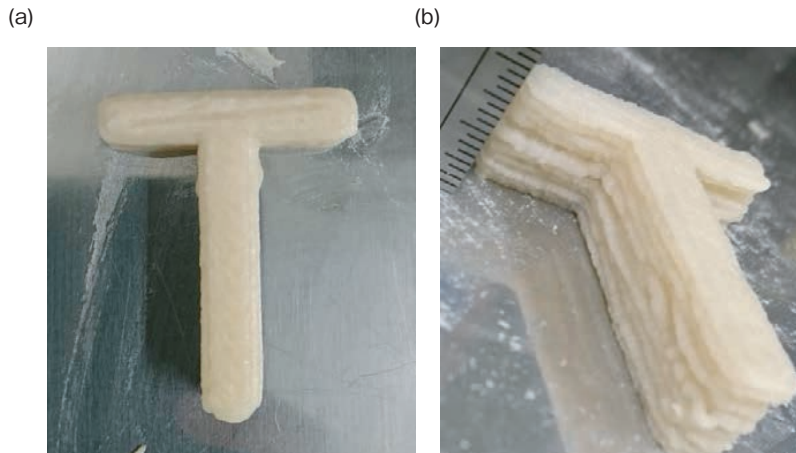


Fig. 4. (a) Top view of printed T-shaped object using 20% (w/w) SPI slurry thickened by xanthan 1% (w/w), and perspective view of the same object.

量（百万以上，Fig. 3）により少量の添加でも粘度を大きく増大させることができるため，食品業界では多用されている。

前述のSPIスラリーにキサントランガムも添加し，終濃度でそれぞれ20% (w/w)，1% (w/w) となるよう調整したスラリーを，フードインクとしてシリンジに充填し，ペーストエクストルーダーを用いて3Dプリンタで立体造形を試みた。その結果，Fig. 4のように，キサントランなしの造形物と比較して，造形精度が大

きく改善することが分かった。これは，SPI単独のスラリーでは，粘性が比較的低いことにより，連続して出力しているフードインク内部で生じた応力に耐えられずに，形状が維持できずに崩壊してしまっただが，キサントランガムによる増粘効果，特に低ずり速度における定常刷り粘度の増大により，ニードルから吐出後の形状が保持されるようになったためであると考えられた。

要 約

SPIスラリーを水系で調整し、フードインクとして3Dプリンタを用いた積層造形を行った。SPI単独の水系スラリーは約20% (w/w) より高濃度では、出力後に形状が維持可能であったが、それより低濃度では造形途中で自重を支えられずに流れることにより、立体形状が維持できない、つまり3Dプリンタ用フードインクとしては適さないことが分かった。20%SPIスラリーにおいても、そのまま造形すると、ボロボロした表面となり、造形精度は5 mm程度しか得られなかったが、キサentanガムを利用することにより、造形精度を5倍～10倍程度改善することに成功した。このように、立体造形用のフードインクでは、インクの粘弾性特性を適正な範囲に調整することにより、造形精度を向上させるために必須であることが明確であった。今後、実用化に向けて造形速度の向上や、食感を設計通りに造形するために必要な、フードインクの高度化においては、このレオロジー特性の制御をさらに細かく行う必要があると考えられる。

文 献

- 1) RepRap Project, <https://reprap.org/>
- 2) Paste extruder, <https://www.thingiverse.com/thing:591849>