

たん白質を利用した食品3Dプリンタでの高たん白質食の立体造形

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

Food Ink Development of Soy Protein Isolate for Food 3D 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 a 'Food Ink', especially as protein ink for food 3D printing. Aqueous dispersion of soybean protein was prepared at various concentrations ranging from 15 to 30% to print 3D objects containing relatively high protein concentrations comparable to real meats, such as beef, pork, and chicken. Protein energy malnutrition (PEM) is often found in the elderly, and food containing a relatively large amount of protein is probably useful for them. After some improvements in both the food ink and paste extruder, SPI slurry-based food ink at 25% (w/w) can be used to print 3D food objects. This protein content is higher than that of real meats, such as beef, pork, and chicken, which ranges from 15 to 23%. Using the above SPI-based food ink, we successfully printed a steak-shaped object using SPI ink and fat ink, and sushi using SPI and carbohydrate ink. *Soy Protein Research, Japan* **23**, 52-56, 2020.

Key words : food 3D printing, soy protein isolate (SPI), food ink, PEM, rheology

多様でおいしい食を簡便に供給することで、健康長寿を目指すことは人類の長年の悲願である。高齢者をはじめとして、食品業界において近年低栄養が健康長寿への課題となっている。中でもたん白質の摂取方法の改善、多様化に注目が集まっている。この問題を解決するためには、高たん白質食を、おいしく、また楽しく食することが必要であると考えている。肉の中で

も比較的たん白質含量が多いとされる鶏ささみ肉は、スポーツ選手をはじめとして多く食されている。一方、鶏ささみ肉ばかりを食事で摂取するだけでは、食感などおいしさの面で飽きやすく、限界もある。

食の製造方法は日進月歩で進化している。簡便に、安く、またおいしい食を実現するために異分野の技術が応用され、食品分野においても様々な技術が開発されてきた。近未来に向けた食製造の基礎技術開発として、我々は食品3Dプリンタに注目している。欲しい

*〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂

食べ物を、いつ、どこでも用意できる食品製造装置、また全く新しい食感、食文化を生み出す食品製造技術に繋がると期待される。

本研究では、近年発展の著しい3Dプリンタを食品製造において利用する可能性を模索した。特に分離大豆たん白質（SPI）を主成分としたペースト状食品（以後フードインクと記す）の改良を行い、3Dプリンタによる立体造形を行った。なかでも、高たん白質含量の立体造形をSPIインクにより実現する方法について検討を行い、造形物の多様な形状や食感の実現法を模索した。

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、食品の3D造形用目的でフードインクを押し出すために、別途作成したペーストエクストルーダー²⁾に交換した。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、対応するようファームウェアについてはMerlinをベースとして、フード3Dプリンティングシステムとして構築した。

本研究では小型シリンジをステッピングモーターで押し出す方式を主として利用し、造形を行った。ディスプレイのシリンジにペースト状のフードインクを充填し、シリンジポンプ様のペーストエクストルーダーにセットする（Fig. 1）。ペーストエクストルーダーは、CAM制御プログラムの指示通りのタイミングで、指定量だけペースト状インクを押し出すために利用される。つまり、gcodeファイル（後述）に記載された通りに、XYZの3次元空間上で、CAD設計の通りの形状を造形するために、指定位置でインクの吐出が自動的に実行される。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。使用したシリンジは10 mLのロックタイプであり、シリンジ用ニードルは、14, 18, 20G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、はじめに（1）立体形状をPC上でCAD、モデリングソフトなどを利用して3D形状を構築し、（2）モーター制御コード（gcode）へと変換し、（3）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、（4）自動造形を開始する、という手順を踏むことになる。本研究におい

て、造形用モデリングデータは寿司や、ステーキ肉を利用した。食品形状については、公開されている立体形状を入手したり³⁾、また我々が3Dスキャナを利用することで、実在の寿司や、食品サンプルなどを取り込み、それらを複数のオブジェクトに分割するなど、加工した上で、複数インク（SPIインクと炭水化物インク、またはSPIインクと脂質インク）のプリント用データとして利用した。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、CAMツールとしてスライス設定にはCura、Reprap cloneの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。

また、SPIインクをペーストエクストルーダーで押し出すために必要な荷重をロードセルを利用して計測した。SPIインクをセットしたシリンジから、インクを吐出するためにピストンを押しこむ際、ピストンに加わる荷重をロードセルで計測する、我々が開発したシステムを利用して計測を行った。



Fig. 1. a) Disposable syringe was filled with (2) paste type food ink, especially with SPI-based ink, in this study, and placed on the paste extruder to automatic extrusion by the designed manner.

結果と考察

SPIは水分散系としてフードインクを作製した場合、高濃度においてペーストエクストルーダーから安定した吐出が困難となった。これには、複数の要因があると考えられた。まず、20%（w/w）以上の高濃度SPIインクでは、シリンジからの押し出しが一定量、一定速度での押し出しが困難であり、一定速度でピストンを押し込むと、吐出量が一時的に減少し、その後まとめて多量に吐出される、という現象がみられた。実際に、一定速度でピストンを押し込んだ場合では、ピストンに加わる荷重を経時変化として測定した場合、一定ではなく変動する現象が観察された。これはSPIインクの不溶性成分の均一性などの問題が考えられる。例えば、不溶性成分がシリンジ内で不均一な分布となり、吐出用ノズル内に集中した際に、一時的に吐出が制限され、その後応力集中により詰まりが解消された後に、まとめて吐出した、などの可能性が考えられる。この

問題は、SPIフードインクを調整する際に、攪拌を十分に行うことで解決を試みたが、明確な違いはみられなかった。解決法としてはニードルを太くする（14G以下）が有効であった。

また、ペーストエクストルーダーで利用するモーターに流す電流値を増加させ、実効トルクを増加させること、またはギア他メカニカルな改良を施すことで、改善することが可能であり、約25%（w/w）のSPI濃度においても、シリンジポンプ型ペーストエクストルーダーを用いた場合でも、造形は可能であった。これにより、豚肉、牛肉などに含まれるたん白質含量と比較しても遜色ないたん白質含量（Table. 1）で造形物をプリントすることができ、ベーコンやウィンナーと比較すると2倍程度のたん白質含量を達成できた。

これらの結果から、たん白質濃度向上による、肉に匹敵し、さらにはそれを上回る高たん白食をプリント可能とし、同時に食感を制御することにより、多様な食感を持つ高たん白含量食をオンデマンドでプリントする指針が得られた。

Table 1. Typical protein content in some foods (reproduced from ref. 4)

	Protein content [% (w/w)]
Bacon	12.8
Wiener	13.2
Pork belly	14.2
Ham	16.5
Beef sirloin	16.5
Grilled pork	19.4
Chicken fillet	23.0
Raw ham	24.0
SPI food ink (this study)	25.0
Beef jerky	54.8

このSPIフードインクを用いて3Dプリントした例をFig. 2に示す。写真では、寿司として認識できる外見の造形が、高たん白フードインクと、炭水化物フードインクを利用する事で可能となった。造形に用いた立体モデル（Fig. 2a）と比較すると、米粒の凹凸や、マグロ刺身部分の筋など、外見上の形状再現性が低い部分もみられた。

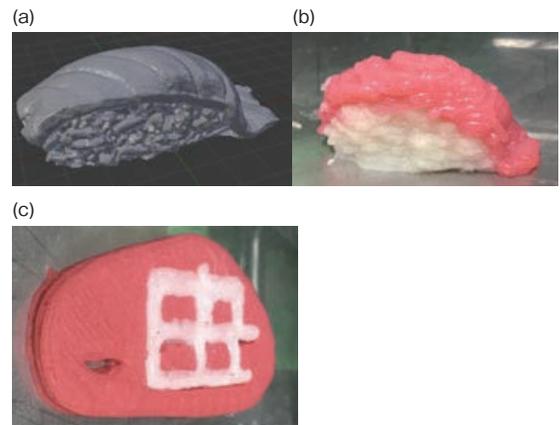


Fig. 2. (a) 3D model of shushi³⁾, and printed 3D foods using 23% (w/w) SPI slurry, and (c) steak printed with SPI and fat ink.

SPI濃度をさらに増加させて30%以上とすることも可能であるが、造形物表面が波打つなど、造形精度の低下を招きやすいレオロジー特性であった。濃度の増加とともにフードインクの粘度や弾性率が増加した。単位時間当たりのフードインク吐出量を一定として造形を行う場合、シリンジを押し込むために必要な荷重は、SPI濃度の増加とともに顕著に増加する。これはSPIに限らず高分子の溶液物性としては一般に知られているが、不溶成分の多いSPIでも顕著にみられることが、前述の造形精度に影響を及ぼしたと考えられる。シリンジ先端に装着するニードルのノズル内径、また押し込み速度に応じて、ペーストエクストルーダーに加わる荷重は変化することが確認された。つまり、ノズル内径減少に応じて、前述のように連動する押し込み速度の増加に対して荷重は増加したと考えられる。また応力緩和により、経時変化を起こすことも確認された（Fig. 3）。3Dプリンタにおけるフードインク押し出しでは、停止状態から一定速度まで瞬間的に到達させ、その後瞬時に停止、という速度変化が大きい状態で造形が行われる。これは、デジタル制御においてパルス状態に押し込み量を制御する際、速度変化が短時間だけ非常に大きくなるのが、一因である。また、応力緩和は、フードインクの粘弾性特性を反映していると考えられる。

SPI濃度をさらに上げてNEMA17モーターによる押し込み、さらには造形は可能であったが、造形精度他とのトレードオフの関係にも注意が必要であった。つまり、ニードル径を減少させることで造形精度を向上させられる可能性は原理的には高まるが、より細径

のニードルを利用して単位時間あたりに同一体積を吐出するためには、ニードルの押し込み速度は増加させる必要がある。結果としてより高速にペーストエクストルーダーのピストンを押し込む必要が生じる。その際粘度の効果により、ニードル径の下限およびSPI濃度上限を決めるためには、このようなモーターへの負荷や造形速度とのバランスを考慮する必要があることが分かった。

SPIインクは、同程度の分子量を持つ多糖類など他の高分子と比較すると、同濃度においても粘度が小さい。これがフードインク作成上、濃度を増加させやすい特徴につながっている。粘度発現のメカニズムから考察すると、SPIの固有粘度 $[\eta]$ は、小さいことが原因であると考えられる。キサンタンガムのような、二重らせん構造に由来する剛直な分子では、 $[\eta]$ が増大しやすく、粘度が増大してしまい、ペーストエクストルーダーからの吐出には大荷重が必須となるため、SPIと比べて1/10以下の低濃度においても吐出が

困難になりがちである。SPIインクではキサンタンと比較した場合、同一分子量において、数十分の一以下の $[\eta]$ に留まる。これは、SPIが水分分散系においてコンパクトな形状となっていることを意味している。また、凝集体形成などにより見かけ上分岐高分子としてふるまう結果、同一分子量の直鎖状の分子に対して、単位重量あたりの粘度が低減される、と考えられる。

別途開発したスクリーポンプにより、より容易に高粘度、高弾性率のフードインクでも、スムーズに、かつ高速に押し出すことが可能であった。このことから、SPIをベースとしたフードインクを、フード3Dプリンタ用のたん白質インクとして利用することは、十分可能であると考えられた。肉に匹敵するたん白質含量の食品をプリントすることで、低栄養の対策として高齢者などでも食べやすく、かつ必要な栄養を備えた食を必要とされるその場でプリントするための、たん白質フードインクとして、SPIはポテンシャルを備えていると考えられた。

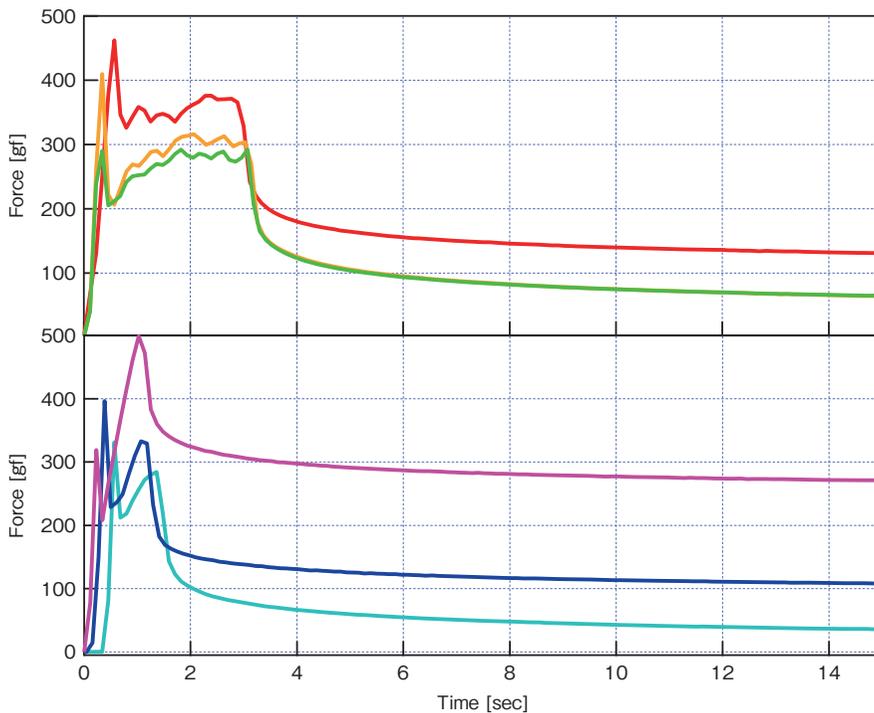


Fig. 3. Load measured at the piston of the paste extruder plotted as a function of time. Upper fig showed the force observed for the condition, 3 sec extrusion. Measurements were repeated for three times. Lower one does observed for one sec extrusion.

要 約

水分散系としてSPIスラリーを、フードインクとして調整し、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25% (w/w) 程度においても、造形が可能となった。造形速度を落とすこと、またノズル径を20Gなど細径としないことで、高濃度に伴って増加する粘度が高くても、造形精度を保ちつつ安定したプリントを可能にした。食感については、SPIインク単独を利用して均一構造の食品を型で成型した場合に対して、内部構造を工夫して造形することにより、食感の幅を広げることが可能である。

文 献

- 1) Reprap Project, <https://reprap.org/>
- 2) Paste extruder, <https://www.thingiverse.com/thing:591849>
- 3) Thingiverse, <https://www.thingiverse.com/thing:2032322>, Salmon Nigiri - Sushi Food, by Ardesi_Marco January 12, 2017
- 4) 「日本食品標準成分表2010」準拠新ビジュアル食品成分表 [新訂版] より抜粋