◇◇◇ 解説記事 ◇◇◇

3D フードプリンターによる介護食の造形および造形物評価

堀内真美[1,2,†]，赤地利幸[2]，川上　勝[1,3]，古川英光[1,3]

[1]山形大学大学院 理工学研究科 機械システム工学専攻，[2]大和製罐株式会社 総合研究所，
[3]山形大学 ライフ・3D プリンタ創成センター（LPIC）

1. は　じ　め　に

2012 年秋に日本に 3D プリンターブームがやってきた．山形大学ではその時，高強度ゲルを自在造形する 3D ゲルプリンターの研究をしており [1,2]，注目を集めた．そこで，食品もゲルであることから食品を造形する 3D フードプリンティングの研究にも着手した [3,4]．最近では，山形県の世紀株式会社とコラボして，図 1 に示すようなオリジナルの 3D フードプリンターの開発を進めた [5]．それを活用して大和製罐株式会社とのコラボで介護食の開発にも着手している．

本稿では，食品の 3D プリンティング研究の情勢を紹介し，さらに我々が現在，進めている介護食の 3D プリンティングとその評価について紹介する．

2. 食品加工と 3D プリンティング技術

2.1 食品加工と 3D プリンティング技術

3D プリンターは，製造業に革命をもたらす技術として登場し，航空や自動車など工業の分野で活用が始まった．その後，3D プリンターによるものづくりは，造形精度の高まりと扱える材料の広がりにより，工業分野だけでなく食品分野でも活用が期待されるようになった．

一方，伝統的な食品加工方法として，3D プリンティングに用いられる造形法に類似した食品の加工技術は元々存在していた．例えば熱溶解積層法（FDM 法）は積層する部分を除けば押出成形と類似しており，パスタやビーフンなどの麺類，スナック菓子，フライドポテト，シリアル食品など，押出成形によって作られる食品は広く利用されている．また，食品具材を積層することによって成型する食品も多く存在し，テリーヌやパイ，ラザニアなどがある．増粘剤やゲル化剤，デンプンの糊化やタンパク変性などを応用して食品を結着させることも食品加工では一般的であり，蒲鉾などの練り製品，ゼリーや寒天，餅，茶碗蒸しなどがある．多くの食品加工法には 3D プリンティング技術に繋がる要素技術が含まれているといえる．

食品の中でもとくに嗜好性や芸術的な要素を含む菓子類には，練り切りなどの和菓子や飴細工，チョコレートのように，複雑な形状や華やかな成型を施した食品も数多く存在する．これらの加工は職人やパティシエが手作りで作るような手工業的なものだが，3D プリンティングによる成型によって，機械化が難しかった分野においても食品加工技術として応用できる可能性がある．

2.2 食品加工における 3D プリンティング導入の課題

樹脂や金属の 3D プリンターは金型や精密部品を容易に造形するなど，工業用途で大きく広まってきたが，食品用途への応用における付加価値は未だ不明瞭である．また，3D プリンティング技術を食品へ応用するためには，食品安全の視点も必要であり，従来の 3D プリンターのものとは異なる課題がある．

3D プリンティング技術が食品に応用され，広く利用されるためには新たな付加価値の創造が必須である．食品に 3D プリンターを活用する特長として，既存の樹脂や金属の 3D プリンターと同様に，「複雑形状」，「パーソナライズ」，「オンデマンド」は重要なキーワードとなると考えている．3D プリンターでなければ造形でき

著者略歴

堀内真美（Mami HORIUCHI）
2015 年　明治大学大学院 農学研究科 農芸化学専攻修了
現　職　山形大学大学院 理工学研究科 機械システム工学専攻 博士後期課程在学
大和製罐株式会社 総合研究所 第 2 研究室

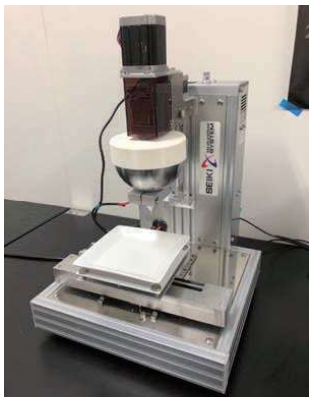
赤地利幸（Toshiyuki AKACHI）
2010 年　岐阜大学連合大学院 連合農学研究科 生物資源科学専攻修了 博士（農学）
現　職　大和製罐株式会社 総合研究所所長

川上　勝（Masaru KAWAKAMI）
1999 年　神戸大学大学院自然科学研究科（物質科学専攻）修了
現　職　山形大学 ライフ・3D プリンタ創成センター（LPIC）LPIC 副センター長

古川英光（Hidemitsu FURUKAWA）
1996 年　東京工業大学大学院 理工学研究科 物理学専攻 博士（理学）
現　職　山形大学 ライフ・3D プリンタ創成センター（LPIC）LPIC センター長，工学部長特別補佐（研究）

1 〒252-0131　神奈川県相模原市緑区西橋本 5-5-1
2 〒992-8510　山形県米沢市城南 4-3-16
† E-mail: m-horiuchi@mail.daiwa-can.co.jp

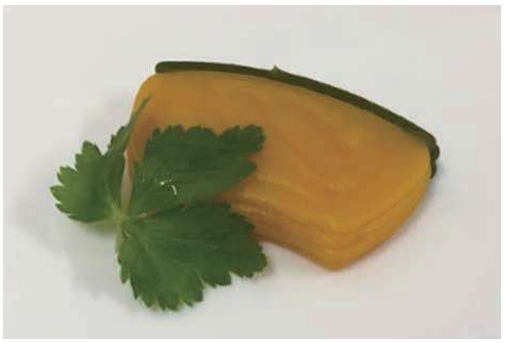
© 2021 Japan Society for Food Engineering



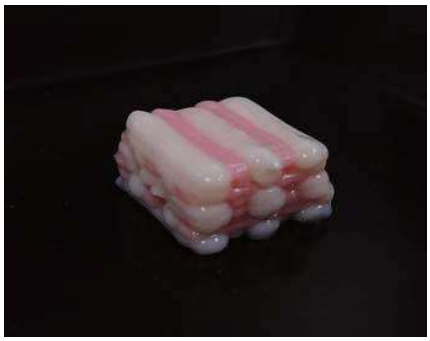
(a) スクリューで押し出すFP-2400



(b) 二種類のノズルを備えもつFP-2500



(c) カボチャのインクを用いてFP-2400で造形したカボチャ



(d) FP-2500の二色刷りを活かして井桁構造を組み込んだ介護食モデル

図1　3D フードプリンターとその造形物（山形大学 × 世紀株式会社）

ない複雑な構造とそれによりもたらされる食感や風味の機能，特別用途食品や宗教，アレルギーなどに対応したパーソナライズ化，中食化が進む食習慣の行きつく未来としてのオンデマンド食品などは，新たな食品の価値を創造する技術となっていくものと考えている．

食品安全の面では，当然のことながら食品として食べられるためには，食品として安全な原料，素材を使う必要がある．自ずと，造形技術も食品に適用できる方式に限定されることとなり，UV 照射による光造形などは使えない．また，装置の食品原料が接触する表面の部材は食品衛生法に準ずる素材で作られ，加工部分や食品の通過部分は洗浄，殺菌が可能でなければならない．従来の 3D プリンターはこれらの点が考慮されておらず，食品加工，食品安全の技術との融合が必須となる．

3.　食品 3D プリンティングの研究開発の現状

3.1　食品 3D プリンターの特長

前述したとおり，食品に 3D プリンターを活用する特長として，「複雑形状」，「パーソナライズ」，「オンデマンド」は必要不可欠な技術要素である．

手作業や成形型ではできないような「複雑形状」が 3D プリンターを使えば容易に造形することができる．見た目の楽しさを演出できるのはもちろん，構造を緻密に制御することで味や食感を設計することも期待できる．

情報革命によって，世界中の人と繋がり，世界中から情報を得ることができるようになった今，消費者のニーズは多様化している．介護食品やベビーフードのような特定の人を対象とする食品や，宗教上の理由やビーガンなどの食習慣による食の制限など，食のパーソナライズ化が進んでいる．また，近年，アレルギーや糖尿病，高血圧症患者などの増加から個々に対応した食の提供も求められてきている．食産業に 3D プリンターが活用されるようになれば，これまでのマスプロダクションから「パーソナライズ化」の実現が期待できる．

さらに，国内では急速な高齢化や高齢者の単身世帯の増加，働き手の減少も社会課題となっている．食品 3D プリンターは，「オンデマンド」で，必要なものを，必要なときに，必要な場所で提供することができ，調理技術が不要で，誰がやっても，同じ味や見た目を再現することができるため，こうした課題に対しても，食品 3D プリンターは救世主となるだろう．

© 2021 Japan Society for Food Engineering

3.2　世界の 3D プリンティング研究開発

ドイツの菓子メーカー Katjes は，グミを造形できる 3D プリンター Magic Candy Factory を開発した．この 3D プリンターでは写真や画像のデータを基に数分間でカスタマイズグミを作ることができる．フレーバーはレモンやイチゴなど 8 種類の中から選択できる．加熱したグミの原料をシリンジから押出し，積層していく．アメリカのベンチャー企業である Bee Hex は，宇宙飛行士が宇宙空間でも美味しい食事が作れるようなロボットを求めていたアメリカ航空宇宙局（NASA）から出資を受け，ピザの 3D プリンターを開発した．生地やトマトソース，チーズなどの原料を全て粉末化し，長期間の宇宙滞在にも適応できるようにした．3D プリンターでピザを作るときは，原料の粉末を水に溶かしてタンクに入れ，押出して成形を行う．さらに，オランダのベンチャー企業である by Flow が開発した 3D プリンターを使った世界初の 3D プリント食レストラン Food Ink が期間限定で開店した．この 3D プリンターは，シリンジポンプに食材を充填して押出す方式で食品の造形を行う．オランダは国レベルで食品 3D プリンターの研究開発を行っており，オランダ応用科学研究機構（TNO）はイタリアの大手食品メーカー Barilla と共同でパスタの食品 3D プリンターを開発した [6, ⅰ]．

日本では，3D プリンターを使った食の転送プロジェクトとして Open Meals が旗揚げされた．実際の料理をあらゆる角度からデータ化し，その料理を忠実に再現することを目指している．さらに，2019 年にはスペースフード X というプロジェクトが立ち上がり，その中でデータ転送により個人最適化された料理をオンデマンドで供給する技術開発が掲げられている [7]．食品の 3D プリンティング技術が産業利用されている例としては，ディスペンサー装置により製造工場や製菓店でチョコレートの 3D 造形が行われている（図 2）．2018 年には著者（古川）を会長とした「やわらか 3D 共創コンソーシアム」が立ち上がった．多種多様な 3D プリンター装置と食品材料を組み合わせたものづくりの場となり，革新的技術を創出することを目指している．



図 2　チョコレートの 3D プリンティング
（写真提供　武蔵エンジニアリング株式会社）

3.3　今後の技術開発に求められること

世界中で食品 3D プリンターの技術開発が行われ，期間限定のレストランやイベントなどで利用されているが，一過性のものがほとんどである．我々の実生活や産業に根差し，ビジネスとして成り立っているものは，残念ながらほとんどない．食品をいかに造形するかに加えて，食品 3D プリンターをいかに使うかといった用途開発が必要な段階に来ていると考えられる．

4.　食品 3D プリンターの用途開発

4.1　食品 3D プリンターの用途検討

我が国では，高齢化が急速に進んでいる．総人口に占める高齢者（65 歳以上）の割合は 1950 年以降増加し続け，2019 年には 28.4% となった．今後もこの上昇は続くと予測され，2025 年には 30%，2040 年には 35.3% になると見込まれている [ⅱ]．このように超高齢社会となった日本では，いかにして高齢者の QOL（Quality of Life）を高め健康寿命を延ばすかが重要であり，その基本は食にあると言っても過言ではない．いくつになっても，食べることは，生きる中で大きな喜びの 1 つである．しかし，高齢になると味蕾の減少や唾液分泌量の低下が起こり，味を感じにくくなる．五味の中でもとくに塩味は，60 歳を過ぎた頃から急激に閾値が上昇し，味を感じにくくなることが知られている [8,9]．また，高血圧症や糖尿病のために塩や糖の制限を余儀なくされる高齢者も多い．塩味や甘味は味や香り，旨味を引き立たせるのに重要な役割を果たし，食事を美味しくするために不可欠である．そのため，限られた塩や糖の使用で，塩味や甘味を増強させる技術が求められる．

これまでにも食事の美味しさはそのままに，塩や糖を減らすための研究開発が行われてきた [10–12]．その 1 つが塩や糖の美味しさを代替，補完する食品素材の開発である．塩の代替として塩化カリウムを使用した減塩食品が数多く販売されている．糖の代替としては，天然のものから人工のものまで様々な甘味料が開発されている．また，ダシの味を強くすることで塩味が補完されたり，イチゴやモモなどそれまでの経験によって脳が甘いと記憶しているものの香料を添加することで甘味が補完されたりしている．しかし，こうした代替や補完の技術では，もとの味が変わってしまう．何かを添加する開発とは別に，構造の不均一性による錯覚を利用した減塩，減糖の研究も行われている．Noort らは，全体の塩分濃度が均一なパンと塩分濃度が異なる生地を重ねて焼成したパンを用意し，塩味の強さについて官能評価を行った．その結果，全体の塩分量が同じでも濃い部分と薄い部分がある方がより塩味を強

© 2021 Japan Society for Food Engineering

く感じ，さらに，濃淡差が大きいほど塩味を強く感じることがわかった [11]．Holm らは，全体のショ糖濃度が均一なゼラチンゲルとショ糖濃度が高い部分と低い部分があるゼラチンゲルを作って甘味を感じる強さを評価し，不均一な度合いの高いゲルは均一なゲルよりも甘さを強く感じるという結果を得ている [12]．これらのように，塩分や糖分の量を変えなくても，不均一な分布構造をつくることにより，甘味や塩味を増強することが期待できる．

しかし，実際には，食品を塩分や糖分の濃度が異なる分布構造として製造することは技術上課題も多い．とくに，咀嚼・嚥下能力が低下した高齢者の食べる食事は我々が普段食べる食事よりも軟らかく，成形型や手作業で分布構造をつくることは難しい．この課題を 3D プリンターであれば解決できると考えた．3D プリンターは材料を積層して造形を行うため，容易に不均一な分布構造を作ることができると考えられる．

4.2　不均一な分布構造による塩味／甘味増強評価

食品 3D プリンターで造形されるのは，クッキー生地や温めて溶けた状態のチョコレートなど，ノズルから吐出できる流動性があり，かつ，ノズルから吐出した後で積層できる程度の硬さ（弾性率で数十 kPa ～数十 MPa 程度）がある食品であり，介護食のような軟質食品は 3D 造形が難しかった [13–16]．そこで，我々はまず，タンパク質とゲル化剤を添加することにより，軟質食品の 3D プリンティングを可能にすることを試みた．そして，タンパク質が加熱により変性して吐出線を保形し，ゲル化剤が完全にゲル化せず流動性がある温度で吐出することで，軟質食品を 3D プリンティングできることを明らかにした [17]．

この 3D プリンティング手法を用い，実際に介護ムース食を 3D プリンターで造形して塩分や糖分の濃度の分布が不均一な分布構造をつくり，塩味や甘味を増強することができるか検証した．日本介護食協議会は「介護食品」を「ユニバーサルデザインフード」と命名し，かたさと粘性を指標にして区分 1 ～ 4 の自主規格を制定している．タンパク質（乳，卵白）とゲル化剤を混合して作製したユニバーサルデザインフード区分 2 のかたさ（かたさ上限値 50 kPa）のムースを用い，ディスペンサー方式の 3D プリンターで分布構造を造形して (図 3)，不均一な分布構造が塩味／甘味を感じる強さに与える影響を評価した．結果を図 4 に示す．全体の塩分／糖分量は同じに設計し，全体が均一なムースと，外側が濃く内側には塩分／糖分が含まれていない分布構造のムース，内側が濃く外側には塩分／糖分が含まれていないムースをそれぞれ作製し，2 点識別法で塩味／甘味を強く感じる方を選択させた．その結果，塩味では，外側に濃い層がある方が均一なものに比べて味を強く感じることが示された．甘味では，外側あるいは内側に濃い層があることで味を強く感じることが示された．これらの結果より，塩分／糖分が濃い部分を作ることで，全体の塩分／糖分量を減らしても満足できる介護ムース食を作ることができると考えられた．3D プリンターを用いた不均一分布の造形による減塩／減糖食製造技術は，介護食だけでなく通常の食事においても応用が期待できる．

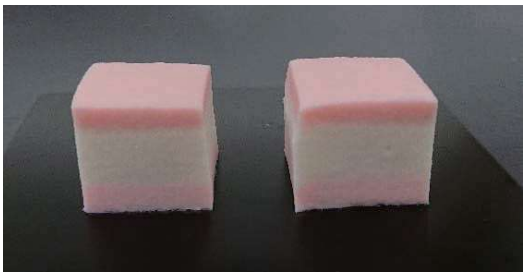
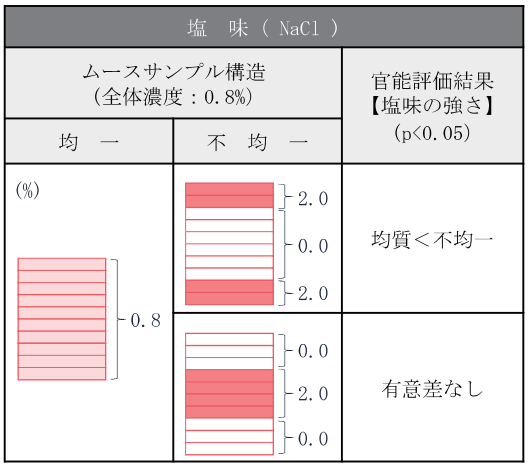
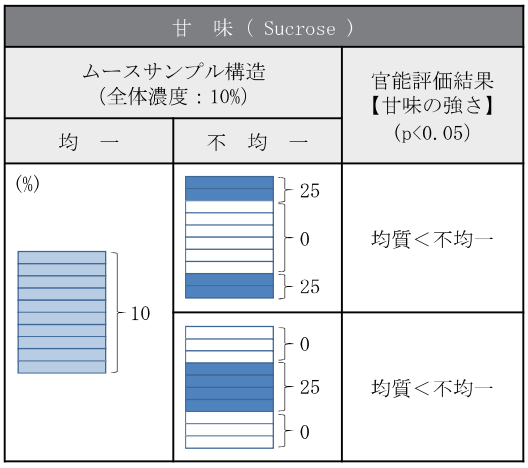


図 3　官能評価用分布構造ムース



(a) 不均一分布の塩味強度への影響



(a) 不均一分布の甘味強度への影響

図 4　官能評価結果

© 2021 Japan Society for Food Engineering

5. 食品 3D プリンターの今後の展望

食品の 3D プリンティングによる新たな付加価値の創造は未だ研究開始から間もなく，十分な研究開発ができているとは言い難い．今後，さらなる複雑な形状や構造の造形を可能にし，構造がもたらす不均一性がどのような機能を発揮するのか探求していきたいと考えている．また，食の未来像として，将来懸念されている全世界的な食糧難，畜肉・魚に代わる代替タンパク源利用，細胞培養や藻類の活用といった新たな食糧原料の登場など，食糧の技術革新に対して，3D フードプリンターが活用できる場面は益々増えていくことが期待され，様々な食品に対応できる 3D プリンティング技術の確立が求められている．

実際の食品の 3D プリンティング技術の社会実装については，今まさに 3D フードプリンターで作られた食品の販売が始まろうとしている．この原稿を執筆中にもスイスの Barry Callebaut 社が 3D フードプリンターで造形したチョコレートをホテル，コーヒーチェーン，レストランに展開すると発表したというニュースが舞い込んできた．このような事例を通して「複雑形状」をした 3D 食品の実売がまずは進むであろう．次に今後 5 ～ 10 年のうちには 3D フードプリンターがマルチマテリアルに対応し，3D 食品の「パーソナライズ」が進むだろう．そして，2025 年の大阪万博のあたりで，そういった新技術を体験できるレベルに到達し，その先には 3D フードプリンターの造形がはるかに高速化し，注文してからほんの数分で調理された 3D 食品が提供されるような「オンデマンド」が起きると予想している．2050 年にはそういった技術が国際宇宙ステーションで活用されているような未来を実現するために研究を推進していきたい．

References

1) R. Hidema, K. Sugita, H. Furukawa; “3-Dimensional free-form fabrication of high-strength gels by laser scanning irradiation” (in Japanese). Trans. J. Soc. Mech. Eng. (A), **77**, 1002–1006 (2011).
2) A. Saito, M. Kawakami, H. Furukawa; “Development of 3D gel printer (3D geru purinta no kaihatsu)” (in Japanese). Nihon kikai gakkaisi, **122,** 8–11 (2019).
3) M. Shitara, J. Gong, R. Serizawa, M. Makino, A. Nishioka, H. Furukawa; “Food creation with 3D gel printer for foods” (in Japanese). Transactions of the JSME, **81**, 15–00008 (2015).
4) M. Kawakami, H. Furukawa; “Recent development in 3D food printing” (in Japanese). J. Imaging Soc. Jpn., **58**, 434–440 (2019).
5) Seiki Corporation; Patent application 2018–130863 (2017).
6) M. Kodama, Y. Takita, H. Tamate, A. Saito, J. Gong, M. Makino, A. Khosla, M. Kawakami, H. Furukawa; Novel Soft Meals Developed by 3D Printing. in Ch. 9 of “Future Foods” ed. By Heimo Mikkola, IntechOpen (2017).
7) Y. Kainuma, M. Kawakami, H. Furukawa; “3D Printing Technologies and Foods in Future” (in Japanese). Optronics, **38**, 135–137 (2019).
8) R. M. Cooper, I. Bilash, J. P. Zubek; The effect of age on taste sensitivity. J. Gerontol., **14**, 56–58 (1959).
9) M. W. Dodds, D. A. Johnson, C. K. Yeh; Health benefits of saliva: a review. J. Dent., **33**, 223–233 (2005).
10) T. Kawai; “The enhancing effect of saltness in food and the estimation” (in Japanese). Journal of the Brewing Society of Japan, **112**, 22–28 (2017).
11) M. W. J. Noort, J. H. F. Bult, M. Stieger, R. J. Hamer; Saltiness enhancement in bread by inhomogeneous spatial distribution of sodium chloride. J. Cereal Sci., **52**, 378–386 (2010).
12) K. Holm, K. Wendin, A. M. Hermansson; Sweetness and texture perceptions in structured gelatin gels with embedded sugar rich domains. Food Hydrocolloids, **23**, 2388–2393 (2009).
13) M. Lanaro, D. P. Forrestal, S. Scheurer, D. J. Slinger, S. Liao, S. K. Powell, M. A. Woodruff; 3D printing complex chocolate objects: Platform design, optimization and evaluation. J. Food Eng., **215**, 13–22 (2017).
14) A. Derossi, R. Caporizzi, D. Azzollini, C. Severini; Application of 3D printing for customized food. A case on the development of a fruit-based snack for children. J. Food Eng., **220**, 65–75 (2018).
15) Z. Liu, M. Zhang, C. H. Yang; Dual extrusion 3D printing of mashed potatoes/strawberry juice gel. Lwt, **96**, 589–596 (2018).
16) E. Pulatsu, J. W. Su, J. Lin, M. Lin; Factors affecting 3D printing and post-processing capacity of cookie dough. Innov. Food Sci. Emerg. Technol., **61**, 102316 (2020).
17) M. Horiuchi, T. Akachi, R. Fujii, M. Kawakami, H. Furukawa; “3D food printing for soft foods such as nursing food: Effects of protein and gelling agent added to burdock puree on retaining the shape of the discharged line and the printed object” (in Japanese). Jpn. J. Food Eng., **22**, 27–38 (2021).

URLs cited

i) www.tno.nl/en/tno-insights/articles/this-is-how-it-s-done-3d-food-printing/ (Feb.10, 2021).
ii) www.stat.go.jp/data/topics/topi1211.html (Feb.10, 2021).

「化学工学 第 84 巻 第 5 号 239–242 (2020) を改訂して掲載」

© 2021 Japan Society for Food Engineering