

研究の動向

■ 食品の組織・構造と機能

—咀嚼・嚥下容易食品，低塩／低糖質化食品およびボトムアップ方式製造食品— 岩手大学農学部 三浦 靖

1. はじめに

我が国が直面している喫急の課題は，新型コロナウイルス感染症（COVID-19）対策のみならず，『超高齢社会』や『多発する自然災害』への対策と言える．食関連分野からこれに対応する方略として咀嚼・嚥下容易食品，低塩／低糖質化食品ならびに災害食の開発・普及が注目されている．咀嚼・嚥下容易食品は誤嚥性肺炎の予防，低塩化／低糖質化食品は生活習慣病の予防，災害食は日常の社会においても特定の食事を必要とする人々，さらに被災地で生活，活動する人々に必要な食事の提供に役立つ．また，従来からの食品加工法ではトップダウン方式（素材や配合，加工装置の運転条件の設定で構造を形成させる）が主流であるが，これからはボトムアップ方式（構造単位を積層して構造を形成させる）の進展が期待されている¹⁾．立体構造や微細構造を制御することにより食品テクスチャーや嚥下容易性，呈味を調整する目的での食品3次元造形，環境負荷，抗生物質耐性菌の発現，動物福祉などの観点から拡大しつつある植物由来食の志向に対応した食肉代替品の製造に関する研究が増加している．そこで，本稿では咀嚼・嚥下容易食品，低塩／低糖質化食品，ボトムアップ方式製造食品の実現に向けての研究動向を解説する．

2. 食品開発の社会的背景

(1) 超高齢社会

我が国の総人口は1億2,530万人（2021年8月1日現在概算値，総務省統計局公表）であり，前年同月に比べて51万人（0.40%）が減少している．そして，65歳以上の高齢者人口は3,637万人，高齢化率は29.1%（2021年8月1日現在推計）である．

(2) 自然災害

昨今は自然災害が多発しており，気象庁は過去10年間で規模が大きい地震として9件を公表している．2021年2月13日：福島県沖【マグニチュード7.3，最大震度6強】，2018年9月6日：胆振地方中東部（平成30年北海道胆振東部地震）【同6.7，同7】，2016年4月14日：熊本県熊本地方（熊本地震）【同7.3，同7】，2011年3月11日：三陸沖（平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震）【同9.0，同7】などである．また，気象庁は過去5年間の台風，豪雨，豪雪，暴風，高潮災害について，被害を総合的にみて規模の大きなもの，社会的な関心・影響が高いものとして17件を公表している．2021年7月1日～7月3日：東海地方・関東地方南部を中心とした大雨，2021年1月7日～1月11日：発達した低気圧及び強い冬型の気圧配置に伴う大雪・暴風，2020年12月14日～12月21日：強い冬型の気圧配置による大雪，2020年9月4日～9月7日：台風第10号による暴風，大雨等，2020年7月3日～7月31日：令和2年7月豪雨などである．

(3) 生活習慣病

生活習慣病に該当する主な疾病として，高血圧，脂質異常症，2型糖尿病，慢性腎臓病，高尿酸血症／痛風，肥満症／メタボリックシンドローム，脂肪肝／非アルコール性脂肪性肝疾患／非アルコール性肝炎，アルコール性肝炎，慢性閉塞性肺疾患，肺がん，大腸がん，歯周病などが挙げられている．これらに至る自覚症状が現れ

Makoto MIURA

国立大学法人岩手大学農学部 教授

〔著者紹介〕（略歴）

1981年3月 東北大学農学部食糧化学科卒業

1983年3月 東北大学大学院農学研究科博士課程前期（食糧化学専攻）農学修士

1986年3月 東北大学大学院農学研究科博士課程後期（食糧化学専攻）農学博士

1986年4月 三菱化成工業株式会社（現 三菱ケミカル株式会社）総合研究所 研究員

1994年4月 岩手大学農学部 助教授

2007年4月 国立大学法人岩手大学応用生命科学系農学部 准教授

2011年10月 同 教授

現在に至る

〔専門分野〕食品化学工学，レオロジー，界面コロイド科学

なくても、健康的と言えない生活習慣の影響は確実に身体への負担として蓄積されて深刻な疾病にいたる。この生活習慣病は国民医療費（一般診療医療費）の約3割、死亡者数の約5割を占めている。また、要支援者および要介護者となった主な原因として生活習慣病が3割を占めているなど社会的にも大きな課題となっている。低塩化食品は高血圧症の予防に、低糖質化食品は2型糖尿病の予防に貢献できる。

(4) 新型コロナウイルス感染症（COVID-19）

COVID-19治療において、人工呼吸器を離脱して気管チューブを抜管した後に嚥下障害の危険性が増すことが報告されている。これは、COVID-19では挿管期間が長期化しやすいこと、感染管理の観点からリハビリテーションや栄養介入が行いにくいことなどが原因と考えられている。治療において経静脈栄養法にて十分な栄養素を投与しても、長期絶食が続けば摂食・嚥下機能障害が惹起されることも指摘されている。さらに、COVID-19禍では、嚥下障害がある場合に誤嚥性肺炎を起こさないように特に注意が必要であると言われている。COVID-19禍が深刻になってくると、外出を避ける日常生活およびテレワークを余儀なくされるようになり、運動量の大幅な減少や食生活が乱れるばかりでなく、これでの死亡率が基礎疾患患者で極めて高いことから、誤嚥性肺炎や生活習慣病を予防することがますます重要になってきた。

(5) 持続可能な食料の確保

現在の食品供給システムで解決すべき課題として、環境負荷、抗生物質耐性菌の発現、動物福祉などが挙げられている²⁾。市場調査企業 Mattson（米国）が IFT 主催の SHIFT20 において報告した内容によれば、植物由来食に関する食習慣が拡大しつつある。植物性食品の選択理由は、先ず健康面であり、次いで持続可能性である。しかし、植物由来の食肉代替品の販売が増加しているのにも関わらず、食肉に比較して高価であるために消費者は購入を控えている。また、消費者は、健康や動物福祉、持続可能性などの理由から植物由来の乳代替品を購入している。ここで、植物由来素材を用いた食肉代替品は、ミートアナログ、ミートレスミート（肉類似品、擬似肉、代替肉）、プラントベース・ミート、ベジタルミートなどと呼ばれている。

3. 咀嚼・嚥下が容易な食品

(1) 研究背景

ヒトの摂食嚥下は、認知期（先行期）、咀嚼期（準備期）、口腔期、咽頭期、食道期という摂食5期に分けられる。感覚のフィードバックが嚥下にとって不可欠な調節

因子であるが、標準的な嚥下障害評価においてこれが包括的に考慮されない³⁾。感覚喪失に起因する嚥下困難は感覚性嚥下障害と称され、機能性あるいは突発性嚥下障害を除外した診断を受けている場合がある。感覚喪失は一次運動障害なしで嚥下障害を引き起こすかもしれないので、感覚性嚥下障害は嚥下運動障害とは異なった型に分類されなければならない。この認識を広めて適切な評価ツールを開発することは嚥下障害看護を推進することになる。1984年に概念提唱された食品の機能は、一次機能（食品の土台となる基本的な機能である栄養機能）、二次機能（食品の受容性に関わる感覚・嗜好機能）、三次機能（健康の維持に関わる生体調節機能）から構成されている。その後、喫食による満足感や喜び、意欲などの精神機能も考慮されるようになった。そこで、従来の生体調節機能が成分に注目したモノ由来型であるのに対して、咀嚼・嚥下や唾液の分泌に注目したコト由来型の重要性が指摘されている。

(2) 最近の研究例

健全な嚥下における食塊の特性が呼吸計測値に及ぼす影響に関する総説によれば、食塊の特性が中枢感覚閾値を超えた嚥下中における呼吸機能に対して様々な影響を及ぼすので、食塊の理化学的特性の標準化が望まれている⁴⁾。

嚥下障害者および高齢者向けに食品テクスチャーを改変した食品（TMFs）のレオロジー的、トライボロジー的および官能的特性に関する総説によれば、素材と加工条件を変化させることにより食品の風味や外観が改善される⁵⁾。官能特性が改変された食品は、嚥下容易性が改善されつつ嗜好性が維持される。そして、TMFsの実現に向けて食品科学や臨床医学、感覚科学などの領域横断的な研究の推進が提唱されている。

固体食品の口腔処理を食品構造から考察した総説によれば、固形食品の構造とその口腔処理との関係を理解することは、食品テクスチャーや呈味などの特徴を増強すること、ならびに体重管理や嚥下障害などの健康関連因子の改善にとって重要である⁶⁾。固体食品の口腔処理を①咀嚼に関連した口腔生理、②口中での食品の変形、③食品テクスチャーの知覚、④味の知覚に区分し、固体食品の構造が口腔処理に及ぼす影響の基本的機構が強調されている。

キサントガム、グアーガム、 κ -カラギーナン、ローカストビーンガムを単独あるいは2者併用で添加した料理牛肉ペーストの3次元造形性と食品テクスチャー特性が評価された⁷⁾。これらの配合で調製したものは、国際嚥下困難者用食品標準化イニシアチブ（IDDSI）フレームワークでの5～7に分類された。

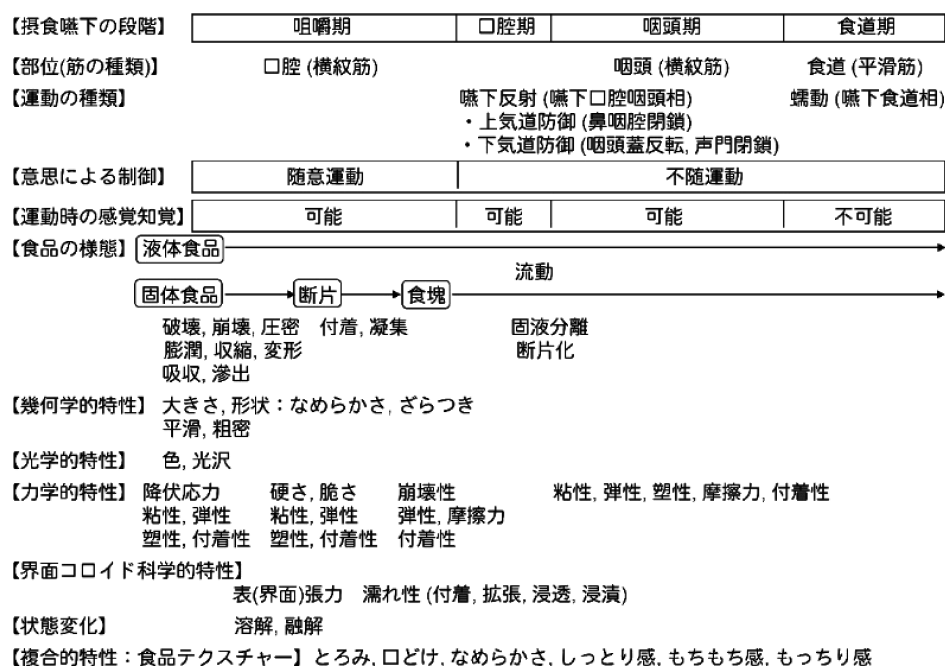


図1 摂食嚥下における食品物性と食品テクスチャーの関連

著者らは、咀嚼時には唾液を過度に吸収することなく容易に崩壊して食塊が形成され、嚥下時には食塊から唾液が滲出することなく、適切な速度で咽頭部を通過するようにするために、唾液に対する界面張力、唾液吸収性、食塊の粘弾性、口腔・咽頭部・食道部の粘膜に対する摩擦特性を所定範囲にすれば、咀嚼・嚥下容易性が向上することを明らかにしている(JST 研究成果展開事業 地域産学バリュープログラム, 課題番号: 17940858, 2017～2018年, 図1)。

4. 低塩／低糖質化食品

(1) 低塩化食品

1) 研究背景

食塩の摂取量と血圧との因果関係が確認されている⁸⁾。高血圧の人と正常血圧の人、抗高血圧治療した人での無作為化試験は、減塩が血圧を低下させることを示している。したがって、低塩化は費用対効果が良好なので、すべての国で実施するか加速することが提唱されている。低塩化は主に食品中の食塩配合量の低減、食塩代替素材(塩化カリウム、乳酸カリウム、グルコン酸カリウム)による置換、他の食品素材の添加(エリスリトール、香料など)による塩味増強で対応しているが、塩味の強度が十分ではない、苦味が発生するなどの問題が残されている。そこで、著者らは塩味が塩化ナトリウムとほぼ同等で、ナトリウム摂取量／カリウム摂取量比を適切な範囲(モル比で2以下)にする「ナト・カリ食」[®]を普及する手段としてナト・カリ塩、ナト・カリ減塩調味料、ナト・カ

リ減塩加工食品(味噌、醤油、だし汁、漬物、塩乾品、パンなど)の開発を進めている。

2) 最近の研究例

食肉加工品の製造にはナトリウム塩が不可欠である。しかし、ナトリウム塩の過剰摂取による健康問題の関係から、食肉加工業ではナトリウム塩の代替物が検討されている⁹⁾。4種類の塩(塩化ナトリウム、ヒマラヤ岩塩、塩化ナトリウム-塩化カリウム混合物、塩化ナトリウム-塩化カリウム-塩化マグネシウム-塩化カルシウム混合物)が冷凍ヤギ・ソーセージの理化学的、食品テクスチャー的、微生物学のおよび官能的な特性に及ぼす影響が検討されている。塩化ナトリウムを他の塩化物塩と置換しても冷凍ヤギ・ソーセージの理化学的、微生物学的ならびに官能的な特性に負の影響を与えなかった。

健康食品を工業デザインにより販売促進するために、食品の塩味知覚が3次元造形した容器の表面模様を通して増強されるかが検討された¹⁰⁾。触覚により引き起こされた塩味の予想と実際の食塩含量との差が大きすぎると、表面模様の適用が逆効果になることもあった。

著者らは、食品の低塩／低糖質化に向けた呈味性の制御に関して、科学研究費助成事業(挑戦的萌芽研究)課題番号15K12321, 2015～2016年)において、固体食品の微細構造を食品用乳化剤などで変化させて咀嚼時の破断挙動を任意に制御するための基礎的知見を得た。3次元造形装置を用いて細線並列構造(塩化ナトリウムまたはスクロースを添加した生地と、これらを添加しない生地

を用いて交互並列、単種並列の単位層を並列積層）と細線交差構造（2種交互並列、単種並列の単位層を交差積層）を持つ低水分固体モデル食品を調製したところ、いずれの構造でも塩味の増強効果は見られなかったが、甘味の増強効果が見られた。これは甘味物質が偏在することにより、継続的な味覚刺激によって起こる順応ならびに味覚受容の閾値上昇が抑制されたことに起因すると推察された。

(2) 低糖質化食品

1) 研究背景

炭水化物は組成式 $C_m(H_2O)_n$ からなる化合物であり、単糖あるいはそれを最小構成単位とする重合体である。化学的特徴である重合度によって分類すると、単糖（重合度が1）、オリゴ糖（重合度2～20）、多糖糖（重合度20以上）に分類される¹¹⁾。この炭水化物のうち、ヒトの消化酵素により加水分解されて栄養になるものは糖質、加水分解されないものは食物繊維と呼ばれている。糖質は食品加工業において様々な形態で幅広く利用されており、食品の味質や食感のみならず、水分活性の調整、着色性、浸透性、澱粉老化の抑制などの特性から食品の嗜好性や保存性を左右している。低糖質化は食品中の糖質配合量の低減やスクロース代替素材（高甘味度甘味料：アスパルテームやアセスルファムカリウムなど、糖アルコール：エリスリトール、ソルビトール、マルチトールなど）による置換で対応しているが、風味や食品テクスチャーに望ましくない影響を及ぼすといった問題が残されている。そこで、血糖値の短時間での上昇の抑制、摂取エネルギーの低減に向けた低糖質菓子の製造を可能にする素材および製法の開発が求められている。

2) 最近の研究例

スクロース代替物質の官能属性はスクロースとは異なって一時的なものであり、異味が感じられ、消費者の許容性を低下させる¹²⁾。知覚特性に対する甘味物質と甘味影響物質の構造依存性の効果が検討され、ケトン数、芳香環、二重結合と $M \log P$ （化合物の部分構造に分けて得られる溶解度の計算値）が中心的役割を担っていることが明らかになった。さらに、理化学的特性の間での相互作用が感覚反応の複雑さを呈している。

バルク甘味素材としてイソマルトオリゴ糖を使用し、小麦粉多糖から糖質を生成させるために多糖加水分解酵素（アミルグルコシダーゼ、フルクタナーゼ）およびサワードウという異なる手法を組み合わせた方法で減糖パンの提供が試みられている¹³⁾。

健常者が低糖質ケーキを摂取後、血糖値は上昇しにくいことが知られているが、低糖質ケーキの構造、食感、甘味の強度と質は通常スポンジケーキの水準に達してい

ない。そこで、著者らは低糖質化を行った配合でも満足がいく品質を達成させるためにシヨ糖代替素材および小麦粉代替素材を考案し、泡沫構造および理化学的特性と甘味強度との関連性を検討している。

5. ボトムアップ方式の食品加工

(1) 3次元造形

1) 研究背景

3次元造形装置が様々な業界・業種で活用されており、食品製造分野でも脚光を浴びている。非食品素材を対象にした3次元造形法の ASTM International 規格では付加製造を①粉体層融合（熱エネルギーにより粉体層を選択的に融合）、②直接エネルギー融着（押し出し時に熱エネルギーにより素材を融解させて融合）、③素材の押し出し成形（素材をノズルや開口孔から吐出）、④結合剤噴射（結合剤溶液を粉体素材に吐出し、焼成して最終硬化）、⑤素材噴射（造形素材の液滴を選択的に吐出）、⑥シート積層（素材シートを結合させて造形）、⑦容器内光重合（容器内の感光性高分子を光活性やUV重合化により選択的に硬化）に分類されている。しかし、食品分野では③素材の押し出し成形法が主に適用され、粒体／粉体の分散液、糖の融液、ゼリー生地、穀粉ペースト、卵白／卵黄－米粉ペースト、油脂食品の融液などを吐出生地にして、均質構造の固体食品を造形しているのが現状である¹⁴⁾。しかも、関連する国内外の研究の殆どは形状の3次元造形に特化しており、微細構造の3次元造形に関する研究は少ない。なお、食品用途の3次元造形装置での生地（溶液、分散液）の吐出機構は、(a) シリンジ式、(b) スクリュー式、(c) 圧縮空気駆動式に大別される¹⁵⁾。また、装置の形状は、(a) カルテシアン（直交座標）形状、(b) デルタ（3軸三角形配置）形状、(c) ボーラー（極平面）形状、(d) スカラ（水平多関節）形状に分類される¹⁶⁾。

2) 最近の研究例

米澱粉の3次元押し出し成形性と操作条件の最適化がなされている¹⁷⁾。50% (w/w) 米澱粉ペーストをノズル・サイズ、造形速度およびモータ回転数を変えて吐出したところ、速いモータ回転数（180～240 rpm）において低造形速度（13.3～25 mm/s）で良好に3次元造形できた。

ガム類や安定剤を配合しないクッキー生地の3次元造形と後工程の適用性に影響する因子が検討された¹⁸⁾。容易に造形できて焼成後の形状が良好で、構造変形しないクッキーを得るのに最適な生地配合が明らかになっている。

せん断流動化する流体食品の押し出し型3次元造形工程を数値シミュレーション法で評価することが試みられて

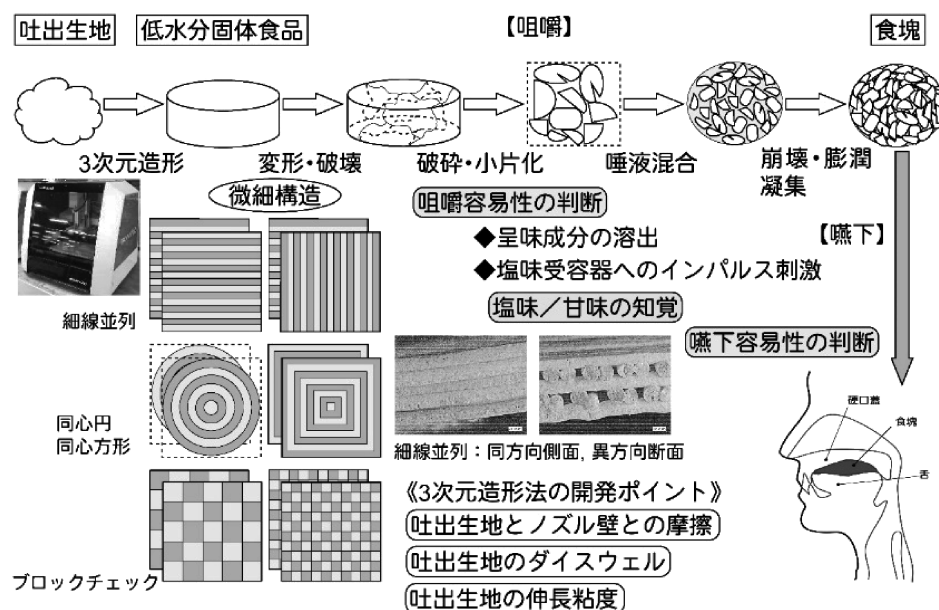


図2 呈味／咀嚼・嚥下容易性制御に向けた3次元造形の体系

いる¹⁹⁾。押し出し工程での材料の速度、局所せん断速度、粘度と圧力分布を計算し、材料のレオロジー的特性および流動場分布と、造形特性との関連性を検討している。

9種類の食品素材を用いて、3次元造形用の吐出生地をスクリーニングするために新規なプロットにより寸法安定性を評価することが試みられている²⁰⁾。そして、3次元食品構造の変形範囲を予測するための無次元数（密度、貯蔵弾性率、損失弾性率、降伏応力、高さを変数）が考案された。

押し出し型3次元造形においては、吐出生地のレオロジー的特性が重要であり、低磁場核磁気共鳴法で計測した¹H-横緩和時間と強い相関があった²¹⁾。吐出生地の造形性と材料特性（レオロジー的特性、力学的強度、水分子の運動性）との関係を検討し、3次元造形物の構造の寸法安定性と自立性を定量化することが試みられている。

著者らは、呈味／咀嚼・嚥下容易性の制御に向けた3次元造形法を検討している（図2）。食品用3次元造形装置の原理確認機（XYZ軸駆動方式、テーパノズル内径0.84 mm）を製作した。食品の3次元造形では、吐出生地をノズル先端から所定の形状になるように平面上に吐出し、これを繰り返して積層している。ノズル先端部での吐出生地の流速分布とダイスウェルを適切に制御しなければ所定の形状に3次元造形できない（図3）。そのためには、吐出機構に合わせてピストンの背圧、スクリュの回転抵抗、圧縮空気の圧力などの吐出生地の吐出量に関する制御因子、シリンジやシリンダの先端から吐出生地を吐出して着地するまでの高さ、ならびにシリンジやシリンダの先端の移動速度などの吐出生地に加えられる変形に関する制御因子を制御しなければならない（図4）。

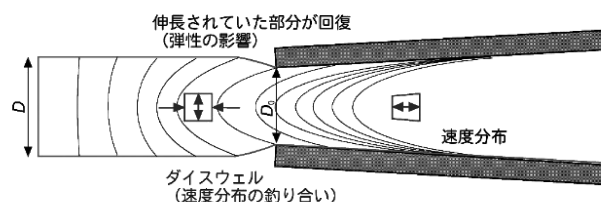


図3 ノズル先端部での吐出生地の流速分布とダイスウェル

さらに、これらの機械的制御のみならず、吐出生地の粘弾塑性を使用する食品素材の種類と配合量も制御しなければならない。そのために、熱流体解析システムを使用して、ノズルでの吐出生地の圧力分布と流速分布のシミュレーションも進めている。

3) 今後の展開

3次元造形装置はいずれ一般調理家電となるような卓上型として普及されることが想定される。吐出材料はプレミックスとして供給され、これに液体（水、牛乳、溶き卵など）を加えて生地を調製し、次に吐出して3次元造形するのである。必要に応じて、乾燥、焼成、揚げ加工、調味して喫食することになる。3次元造形装置がこのような形態で普及すれば、3次元構造に由来する高機能な食品（誤嚥性肺炎を起こさないようにするための咀嚼・嚥下容易食品や、栄養介入に用いられる低塩／低糖質化食品）に限らず、「食べたいときに、食べたい物を」手軽かつテイラーメイドに作ることができるユーザー体験を提供できる。

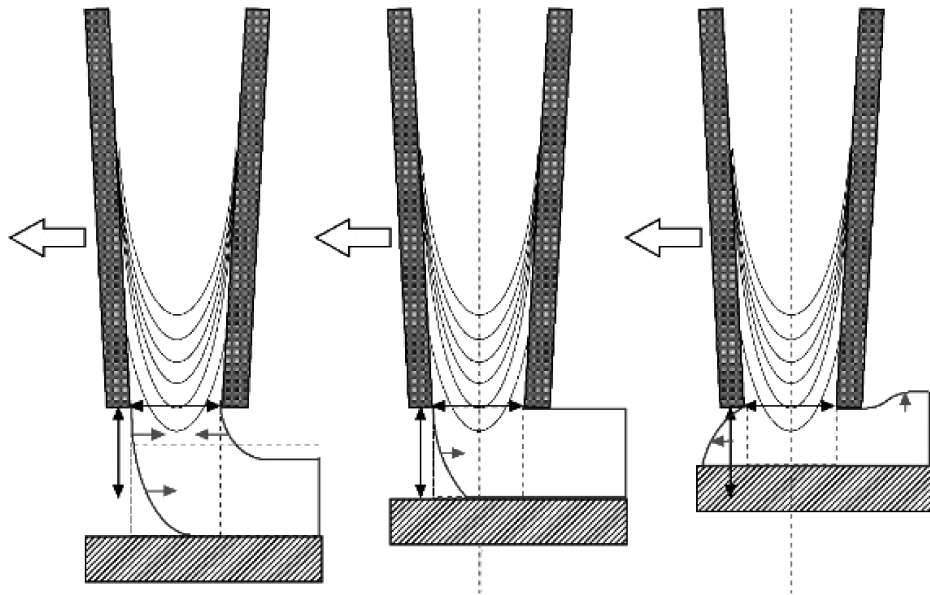


図4 水平移動しているノズル先端部での吐出生地の状態

(2) 食肉代替品

1) 研究背景

食品の構造化手法は、トップダウン方策とボトムアップ方策とに大別される。前者は食品素材の混合物を力場（せん断、伸長、圧縮）で組織化する手法であり、従来から広く行われてきた。この典型例としては、①エクストルージョンによる組織化、②種々のタンパク質を混合して組織化、③凍結組織化、④せん断組織化（食品素材の混合物を円錐・円板や同軸二重円筒でせん断）が挙げられる。一方、後者は組織化要素を組み立てて組織化する手法であり、今後は主流になると言われている。この典型例としては、①動物筋細胞の培養による組織化、②微生物が産生する繊維状タンパク質の組織化、③湿式紡糸による組織化、④電界紡糸によるナノファイバーの組織化が挙げられる。

2) 最近の研究例

食肉製品は成分組成や繊維状構造に由来して優れた感覚特性を有する。再構造化工程（構造－機能－プロセス相関）中にタンパク質相の挙動を調整する際の原料素材と処理パラメータの役割がまとめられている²²⁾。食品業界にとっての大きな挑戦は、構造特性が制御された概念ベース（牛肉様、鶏肉様など）のミートアナログを製造することである。

ミートアナログ製品の成功要因は、食肉に類似した感覚特性である。食肉とミートアナログの食品テクスチャーと構造の分析方法：力学的計測、分光分析、画像化法がまとめられている²³⁾。さらに、各々の食品テクスチャーと構造の分析方法の長所と制約が述べられている。

培養肉は、社会と産業の関心から知られるようになって

てきた。伝統的な食肉生産とは対照的に、培養肉の製造には研究室レベルでの筋組織培養が必要である。従来の食肉生産での変数が分子レベルと機能的レベルでどのように食肉特性に影響するか、そして、現在の培養肉が食肉特性を再現できるかが議論されている²⁴⁾。

大豆タンパク質は、優れたゲル化性と繊維構造を形成する特性があることから食肉代替品の製造に活用されており、動物性タンパク質の代替素材として最も広く知られるようになった。大豆タンパク質を基材にした食肉代替品の開発歴史、原料組成と主要な加工処理法、研究の見通しと開発動向が概説されている²⁵⁾。

成功しているミートアナログは、食肉様の食品テクスチャーと多汁性で特徴づけられる。多汁性は水分保持容量（WHC）に関係付けられる。外部環境を介してWHCを制御する方法を理解するために、イオン強度とpHが吸水に及ぼす影響が検討された²⁶⁾。

(3) 今後の展開

2020年に内閣府はHuman Well-beingを目指して「ムーンショット型研究開発制度」を設け、その基盤となる社会・環境・経済の諸課題を解決すべく、7つのムーンショット目標を決定した。その中で、家庭から生じる食品残渣等を粉体・カートリッジ化し、3次元フードプリンタで再食品化することを例示している。さらに、2020年に農林水産省は基本政策として「フードテック等を活用した持続可能な産業育成」を策定し、その中で、消費者が食に求める価値観の変化に対応する機能性食品、代替タンパク質や完全食などの新たな食を供給する技術などが例示されている。また、負担をかけずに個人対応の

食の提供に役立つスマート調理家電や3次元フードプリンタ、深層学習などの技術なども挙げている。

6. おわりに

本稿では、COVID-19対策のみならず、『超高齢社会』や『多発する自然災害』に対する食関連分野からの方略として咀嚼・嚥下容易食品と低塩／低糖質化食品、ならびにボトムアップ方式製造食品（3次元造形食品、食肉代替品）の製造に関する研究動向を概説した。従来からの食品加工法はトップダウン方式が主流であるが、これからはボトムアップ方式の食品加工が急速に進展すると思われる。

文 献

- 1) Dekkers, B. L.; Boom, R. M.; Goot, A. J van der. Structuring processes for meat analogues. *Trends in Food Science and Technology*. 2018, Vol. 81, 25–36.
- 2) 久保村喜代子. 食素材開発の新たな扉を開くフェイクミートとそのサイエンスとグローバル動向. 月刊フードケミカル. 2020, Vol. 36, No. 9, 73–82.
- 3) Santoso, L. F.; Kim, D. Y.; Paydarfar, D. Sensory dysphagia: A case series and proposed classification of an under recognized swallowing disorder. *Head and Neck*. 2019, DOI:10.1002/hed.25588.
- 4) Krishnan, G.; Goswami, S. P.; Rangarathnam, B. A systematic review of the influence of bolus characteristics on respiratory measure in healthy swallowing. *Dysphasia*. 2020, DOI:10.1007/s00455-020-10103-4.
- 5) Munialo, C. D.; Kontogiorgos, V.; Euston, S.; Nyambayo, I. Rheological, tribological and sensory attributes of texture-modified foods for dysphagia patients and the elderly: A review. *International Journal of Food Science and Technology*. 2020, DOI:10.1111/ijfs.14483.
- 6) Guo, Q. Understanding the oral processing of solid foods: Insights from food structure. *Comprehensive Review in Food Science and Food Safety*. 2021, DOI:10.1111/1541-4337.12745.
- 7) Dick, A.; Bhandari, B.; Prakash, S. Printability and textural assessment of modified-texture cooked beef pastes for dysphagia patients. *Future Foods*. 2021, DOI:10.1016/j.fufo.2020.100006.
- 8) He, F. J.; Tan, M.; Ma, Y.; MacGregor, G. A. Salt reduction to prevent hypertension and cardiovascular disease. *Journal of the American College of Cardiology*. 2020, Vol. 75, No. 6, 632–647.
- 9) Araujo, D. H. S.; Rodrigues, R. T. S.; Costa, M. M.; Miranda, J. O.; Lira-Alencar, N. R. C.; Queiroz, M. A. A.; Alencar, M. G.; Oliveira, T. P. R.; Neto, A. F.; Bonfá, H. C.; Carvalho, F. A. L.; Gois, G. C. Reduction of sodium content in frozen goat sausage using different types of salt. *LWT-Food Science and Technology*. 2021, DOI:10.1016/j.lwt.2020.110272.
- 10) Van Rompay, T.; Van Ooijen, I.; Groothedde, S.; Saakes, D. (Not to be taken) with a grain of salt: Enhancing perceived saltiness by 3D-printed surface textures. *Food Quality and Preference*. 2021, Vol. 93, DOI:10.1016/j.foodqual.2021.104279.
- 11) BeMiller, J. N. "Oligosaccharides". *Carbohydrate Chemistry for Food Scientists*. 3rd ed. Woodhead Publishing, 2019, 49–74.
- 12) Karl, C. M.; Wendelin, M.; Lutsch, D.; Schleining, G.; Dureschmid, K.; Ley, J. P.; Ktammer, G. E.; Lieder, B. Structure-dependent effects of sweet and sweet taste affecting compounds on their sensorial properties. *Food Chemistry*. 2020, Vol. 7, DOI:10.1016/j.fochx.2020.100100.
- 13) Müller, D. C.; Nguyen, H.; Li, Q.; Schönlechner, R.; Schwenninger, S. M.; Wismer, W.; Gänzle, M. Enzymatic and microbiak conversions to achieve sugar reduction in bread. *Food Research International*. 2021, Vol. 143, DOI:10.1016/j.foodres.2021.110296.
- 14) Mantihal, S.; Kobun, R.; Lee, B-B. 3D food printing of as the new way of preparing food: A review. *International Journal of Gastronomy and Food Science*. 2020, Vol. 22, DOI:10.1016/j.ijgfs.2020.100260.
- 15) Guo, C-F; Zhang, M.; Bhandari, B. A comparative study between syringe-based and screw-based 3D food printers by computational simulation. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019, Vol. 162, 397–404.
- 16) Sun, J.; Zhou, W.; Yan, L.; Huang, D.; Lin, L. Extrusion-based food printing for digitalized food design and nutrition control. *Journal of Food Engineering*. 2018, Vol. 220, 1–11.
- 17) Theagarajan, R.; Moses, J.A.; Anandharamakrishnan, C. 3D Extrusion Printability of Rice Starch and Optimization of Process Variables. *Food and Bioprocess Technology*. 2020, Vol. 13, 1048–1062.
- 18) Pulatsu, E.; Su, J-W; Lin, J.; Lin, M. Factors affecting 3D printing and post-processing capacity of cookie dough. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2020, Vol. 61, DOI:10.1016/j.ifset.2020.102316.
- 19) QiannanLiu, Q.; Zhang, N.; Wei, W.; Hu, X.; Tan, Y.; Yu, Y.; Deng, Y.; Bi, C.; Zhang, L.; Zhang, H. Assessing the dynamic extrusion-based 3D printing process for power-law fluid using numerical simulation. *Journal of Food Engineering*. 2020, Vol. 275, DOI:10.1016/j.jfoodeng.2019.109861.
- 20) Nijdam, J. J.; Agarwal, D.; Schon, B. S. Assessment of a novel window of dimensional stability for screening food inks for 3D printing. *Journal of Food Engineering*. 2021, Vol.292, DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2020.110349.

- 21) Zheng, Z.; Zhang, M.; Liu, Z. Investigation on evaluating the printable height and dimensional stability of food extrusion-based 3D printed foods. *Journal of Food Engineering*. 2021, Vol. 306, DOI:10.1016/j.jfoodeng.2021.110636.
- 22) Beniwal, A. S.; Singh, J.; Kaur, L.; Hardacre, A.; Singh, H. Meat analogs: Protein restructuring during thermomechanical processing. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2021, Vol. 20, No. 2, 1221-1249.
- 23) Schreuders, F. K. G.; Schlangen, M.; Kyriakopoulou, K.; Boom, R. M.; Goot, A. J. van der. Texture methods for evaluating meat and meat analogue structures: A review. *Food Control*. 2021, Vol. 127, DOI:10.1016/j.foodcont.2021.108103.
- 24) Ng, S.; Kurisawa, M. Integrating biomaterials and food biopolymers for cultured meat production. *Acta Biomaterialia*. 2021, Vol. 124, 108-129.
- 25) Zhang, T.; Dou, W.; Zhang, X.; Zhao, Y.; Zhang, Y.; Jiang, L.; Sui, X. The development history and recent updates on soy protein-based meat alternatives. *Trends in Food Science and Technology*. 2021, Vol. 109, 702-710.
- 26) Cornet, S. H. V.; Snel, S. J. E.; Lesschen, J.; van der Goot, A. J.; van der Sman, R. G. M. Enhancing the water holding capacity of model meat analogues through marinade composition. *Journal of Food Engineering*. 2021, Vol. 290, DOI:10.1016/j.jfoodeng.2020.110283.