

食品用二軸エクストルーダーを用いた植物性タンパク原料の 官能評価と機器分析による相関解析

Sensory Evaluation and Correlation Analysis of Plant-Based Protein Materials Using a Food-Grade Twin-Screw Extruder and Instrumental Analysis.



福田 瑞香
Mizuka Fukuda



梅田 光秀
Mitsuhide Umeda



宮川 真里奈
Marina Miyagawa



行弘 環
Tamaki Yukuhiro



博士(工学) 福澤 洋平
Dr. Yohei Fukuzawa

要 旨

近年の世界的な人口増加、畜産養殖に伴う環境破壊、健康的な食品への関心の高まりから、植物由来原料による代替タンパク質の需要が高まっている。代替肉（プラントベースミート）の素材として食品用二軸エクストルーダーで製造される植物性タンパク質には、食肉と同等な食感の発現による「美味しさ」が求められている。しかし、これまで製造した植物性タンパク質は人の感覚による官能評価が中心であり、定量的評価ができず、混練プロセスの最適化が困難な状況であった。よって、これまで行われていた官能評価における「食感」に注目し、プロセス条件を変化させた植物性タンパク質の官能評価と機器分析を実施した。その際に得られた結果を相関解析することで、官能評価と機器分析の相関性が評価可能であることを確認した。

— Synopsis —

Recent global population growth, environmental destruction caused by livestock aquaculture, and interest in healthy foods have increased the demand for alternative proteins made from plant-derived raw materials. As a meat substitute, soy meat made from plant-based proteins produced by food twin-screw extruders is expected to achieve the same texture and “deliciousness” as real meat. However, plant-based proteins produced so far have been mainly evaluated by human sensory evaluation, and quantitative evaluation was not possible, making it difficult to optimize the mixing process. Therefore, we focused on “texture” in the sensory evaluation that had been conducted so far, and conducted sensory evaluation and instrumental analysis of plant-based proteins under different process conditions. Correlation analysis confirmed a clear relationship between sensory evaluation and instrumental measurements.

1. 緒 言

近年、世界的な人口増加による食糧危機や畜産における環境影響といった社会問題から、動物性タンパク質に代わり、豆類や小麦といった原料による植物性タンパク質の需要が高まっている⁽¹⁾。その中でも大豆を用いた代替肉(プラントベースミート)の製造開発は、大豆の栽培技術の活用により低コストで植物性タンパク質の原料の生産規模を拡大できるうえ、植物性タンパク質の製造時に既存の食品加工プロセス技術を応用可能である。また、大豆は比較的安価であり、食用油の原料として多く輸入されている。そこで、食品メーカや製粉メーカ、化学メーカが肉様素材の製造および研究を盛んに行っている⁽²⁾。

このプラントベースミート製造に使われる植物性タンパク質の開発において重要視されているのは、食肉と同等な「食感」を帯びた肉様素材の製造である。日本では古くから豆腐やおからといった豆類由来の食品からタンパク質を摂取している。この影響によって、植物性タンパク質の市場成長率は肉類を中心に摂取する海外では12.7%であるのに対し、日本国内では4.1%と低く停滞している⁽³⁾。日本人は多様な食感の豆類由来のタンパク質に馴染みが深いため、海外に比べて植物性タンパク質に対するこだわりが強いことが影響していると予想される。このことから、日本国内で植物性タンパク質市場を広げるためには、食肉と同様の食感を生み出し、日本人の嗜好を満足させることが重要となる⁽⁴⁾。食品用二軸エクストルーダーとしては、食感に繋がる製造プロセスのパラメータを明確にし、食品メーカのニーズに対応した混練プロセスの最適化が求められている。

これまで植物性タンパク質の主な評価方法は、複数の対象を比較する一対比較試験法といった官能評価や表面形状に関する外観評価だった。これらの方法は人の感覚に依存した評価方法のため、定性的なデータが中心であった。定性的なデータは食品のような複雑系の状態を理解するのに適しているが、植物性タンパク質製造の混練プロセス最適化においては多様なパラメータの組み合わせによる結果を蓄積し、再現性を確保することが重要である。そのため、定性的なデータではなく数値に基づく定量評価が求められる。製造した植物性タンパク質の機器分析から得られた物性値と官能評価の結果をデータ解析によって相関付けることで、これまで感覚に依存していた植物性タンパク質の食感を定量化し、製造プロセスに反映することで食肉再現を目的とした製造プロセス開発を目指す。

本報告では、「美味しい」という感覚を構築する複数の要素の中で「食感」に注目し、官能評価と機器分析結果の相関解析を行い、さらに製造プロセスのパラメータの影響を調査したので、その結果を報告する。

2. 実験方法

2.1 サンプル作成

官能評価と機器分析に用いる植物性タンパク質は、二軸エクストルーダー TEX30 α (シリンダ径 $D = 32$ mm、 $L/D = 21$ (L :シリンダ長さ),日本製鋼所製)で製造した。図1に二軸エクストルーダーを用いた植物性タンパク質の製造プロセスの模式図を示す。原料となる粉末状の脱脂大豆を重量式フィーダ(日本製鋼所製、J-NX-T26DJ-MP)によって二軸エクストルーダーへ投入した後、プランジャポンプ(タクミナ製、PLSXP2-014-STS-UVX)によって、押出量に対して40 wt%の水を添加した。エクストルーダー内の混合ゾーンにて脱脂大豆と水を均一に混ぜ合わせたのち、シリンダ温度130℃以上の溶融・混練ゾーンで脱脂大豆と水を混練することで、タンパク質の成分が他成分と分離して、タンパク質の均一相が形成される⁽⁵⁾。その後、エクストルーダー先端に装着しているダイ内の冷却ゾーンで生じるせん断作用によってタンパク質を配向させる。これによって繊維状の植物性タンパク質が形成される。植物性タンパク質製造にはスクリュ構成、シリンダ温度、水分量等の運転条件が品質に影響を及ぼすと考えられる。そこで、植物性タンパク質の官能評価への二軸エクストルーダーのプロセスパラメータの影響を調べるため、様々な混練条件下で植物性タンパク質の製造テストを行った。原料には脱脂大豆(昭和産業株式会社製)を用い、表1の条件から全35サンプルとなる植物性タンパク質を採取した。

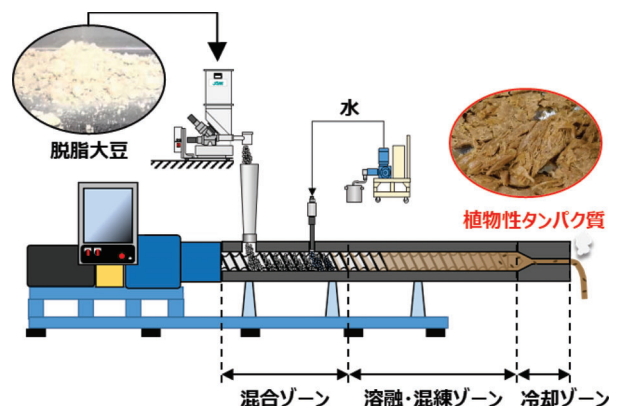


図1 植物性タンパク質製造プロセス模式図

表1 植物性タンパク質製造条件

条件	押出量 (kg/h)	水分量 (wt%)	スクリュ回転数 (rpm)	シリンダ温度 (°C)	
				隣接	先端
基準	6	40	250	150	135
1~3	6	30~50	250	150	135
4~8	6	40	150~350	150	135
9~16	6	40	250	130	120~155
17~23	6	40	250	135~170	120
24~28	6	40	250	150	125~155
29~35	6	40	250	135~170	135

2.2 評価方法

2.2.1 官能評価

製造した植物性タンパク質は、官能試験によって評価した。官能評価とは、食品の美味しさに関して味覚を含めた五感(視覚、聴覚、触覚、味覚、嗅覚)から数値化する方法である。官能評価は一般財団法人日本食品分析センターへ依頼・実施した。表1に示した基準条件にて作製した植物性タンパク質を評価基準とし、各条件で製造した植物性タンパク質を、試験評価者12名(男性3名,女性9名)が評価した。今回実施した官能評価は分析型とされ、試験評価者は評価者選定用基準臭(第一薬品産業株式会社)により嗅覚正常者と判断され、指定された水溶液の味が正しく識別できた者の中から選択された。なお、評価項目には食感に注目した「風味」「噛み応え」「舌触り」「弾力」「筋っぽさ」「解れやすさ」「しっとりさ」および対象となる大豆ミートの美味しさを示す「総合評価」の8項目を設定し、7段階尺度(-3～3)で評価した⁽⁶⁾。

植物性タンパク質の官能評価結果は、物性値に依存すると考え、機器分析を用いて空隙率・水分率・圧縮破断曲線を測定した。

2.2.2 空隙率

植物性タンパク質は製造条件によって、内部の水分が気化することで空隙が発生する。この空隙率を分析するため、各サンプルを押出方向に対して垂直方向に裁断し、その断面写真を撮影した。その後、画像解析ソフト(ImageJ)を用いて、断面写真における植物性タンパク質部分の面積と空隙部分の面積の割合から空隙率を求めた。

2.2.3 水分率

水分率は赤外線水分計(株式会社ケツト科学研究所製、FD-600)にて測定した。各条件で製造した植物性タンパク質100gをミルで粉碎し、温度135℃で2時間乾燥させ、水分を除去した後、加熱前後の重量差から水分率を求めた。

2.2.4 圧縮破断曲線

クリープメータ(株式会社山電製、RE2-3305C)で各サンプルの硬さや弾力を評価した⁽⁷⁾。測定時には治具とサンプル台の間へ40×20mmに裁断したサンプルを設置し、Φ3mmの治具でサンプルに接した地点から荷重をかけ、サンプルが破断するまでの圧縮破断試験を行った。この試験から得られる圧縮破断曲線から、最大荷重、荷重を与えた際の総エネルギー合計、弾性率、破断荷重、ひずみ率を評価した。

2.3 解析方法

官能評価と機器分析の相関性はピアソンの積率相関係数の算出によって行った。相関係数とは「2つの変数の間にあ

る線形な関係の強弱を測る指標」⁽⁸⁾のことであり、この値から変数間の相関性を確認することができる。相関係数 r は、式1を用いて共分散をそれぞれの変数の標準偏差で割ることで求められる。

$$r = \frac{S_{xy}}{S_x S_y} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad \cdots \cdots \text{式 1}$$

この相関係数は一方のデータが増加すると他方のデータも増加する「正の相関」、一方のデータが増加すると他方のデータは減少する「負の相関」、データの増減に直線的な関連が見られない「相関がない」といった3つにわけることができる。これらの相関係数の尺度は $0.7 \leq r \leq 1$ で「強い相関」、 $0.4 \leq r \leq 0.7$ 「やや相関」、 $0.2 \leq r \leq 0.4$ 「弱い相関」、 $0 \leq r \leq 0.2$ 「ほとんど相関無し」となっている⁽⁹⁾。

3. 分析結果

3.1 官能評価と機器分析の相関係数

図2に官能評価7項目(風味、噛み応え、舌触り、弾力、筋っぽさ、解れやすさ、しっとりさ)と植物性タンパク質そのものの美味しさを判断する総合評価との相関係数を赤は正の相関、青は負の相関として示す。総合評価に対して、噛み応え、弾力、筋っぽさ、解れやすさが強い相関を持ち、噛み応えが柔らかく、弾力が弱く、筋っぽさがない、解れやすい植物性タンパク質が美味しいとされる傾向にあることが分かった。また、これら4項目の中でも弾力の要素が総合評価に強く影響していることが明らかとなった。食品を噛んだ際の噛み応えの柔らかさは弾力の弱さに関係し、筋っぽさがないことは植物性タンパク質の繊維が少ないことで形成される柔らかい構造から、弾力に通じると考える。このことから食品を口にした際の弾力が美味しさに起因する要素であることを確認した。

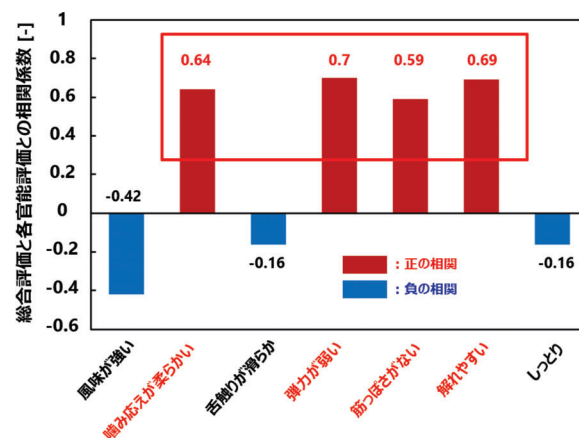


図2 総合評価と各官能評価との相関係数

図2で示された官能評価項目と関係する機器分析項目を明らかにするため、図3に示す相関係数を算出した。ここでは各項目の相関の強さを色の濃淡で表している。相関係数は-1から1の間の数値をとり、濃い赤で示した部分は相関係数が1に近い正の相関、濃い青で示した部分は-1に近い負の相関が強く出る。ここでは「強い相関」と判断される $\pm 0.7 \sim \pm 1$ の値に注目した。機器分析項目の中で圧縮破断試験で測定した最大荷重は弾力、総合評価との間に強い相関が見られた。ここで最大荷重と弾力が正の相関であるのに対し、最大荷重と総合評価は負の相関を持つことから、最大荷重が大きいほど弾力は増加する一方で、総合評価は低下することが分かる。また、空隙率は弾力と強い相関を持ち、水分率は総合評価に影響した。これは空隙率の増加による植物性タンパク質の内部変化が弾力に影響し、さらにそれが総合評価を変化させると考えられる。このように官能評価と機器分析の相関解析を行うことで、どのような物性値が人の感覚によって評価していた項目に起因しているのか、傾向を知るきっかけになることが分かった。これにより官能評価は機器分析結果から推測が可能であると考えられる。

以降は弾力に注目し、機器分析の結果が官能評価へもたらす影響を、プロセス条件を変化させたサンプルを測定した結果から述べる。

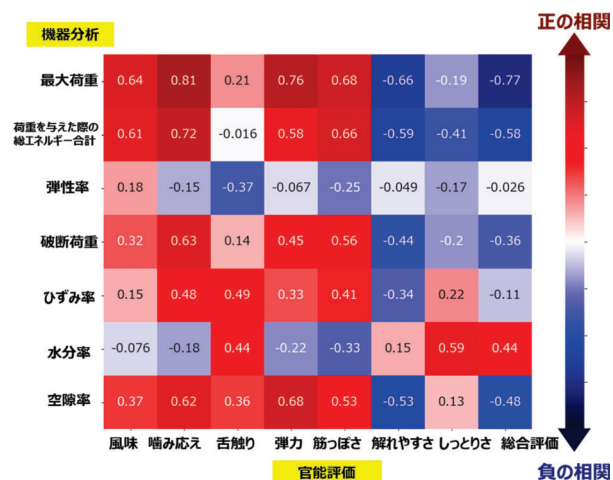


図3 官能評価と機器分析の相関係数

3.2 シリンダ温度の影響

弾力は官能評価と機器分析の相関から、最大荷重との関係が強い。図4に混練部のシリンダ温度を変更した際の最大荷重と弾力の評価点の関係を示す。弾力の評価点は数値が小さくなるほど柔らかく、大きくなるほど硬いことを示している。シリンダ温度の上昇と共に最大荷重および弾力が増加した。シリンダ温度上昇によりタンパク質の結合が促進されることでタンパク質同士の結びつきが強くなり、弾力のある植物性タンパク質が製造されたと考えられる⁽¹⁰⁾。

図5に先端シリンダに隣接するシリンダの温度を130℃、150℃に固定した状態で、先端シリンダの温度を変更した

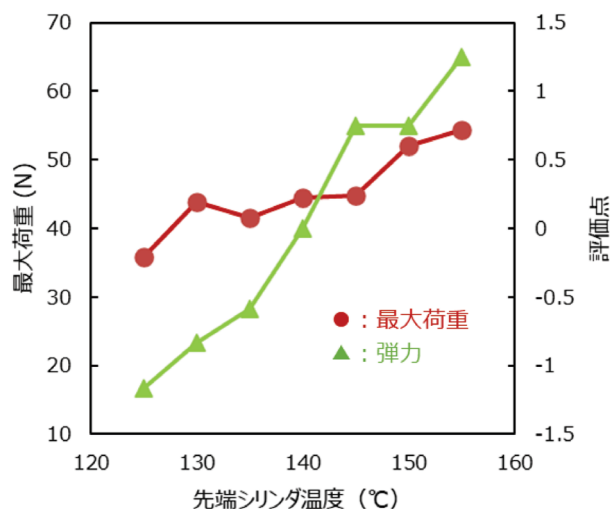


図4 先端シリンダ温度別の最大荷重と弾力の評価点

場合の植物性タンパク質の破断曲線を示す。グラフの縦軸は荷重、横軸はひずみ率である。また、横軸のひずみ率0%はサンプルと治具が接した噛み始めであり、治具とサンプル台が接した点をひずみ率100%とすることで上下の歯が噛み合わさった噛み終わりとしてとらえている。

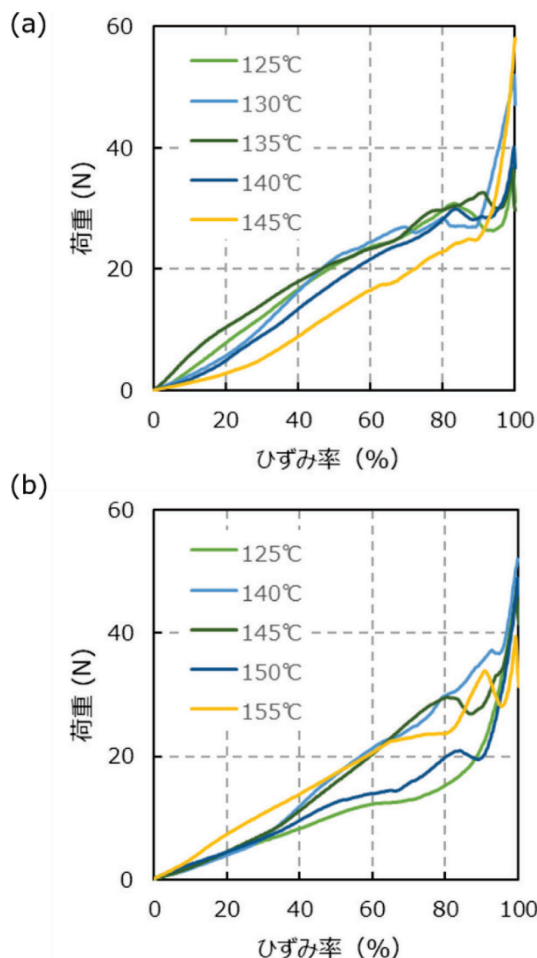


図5 隣接シリンダ温度固定時の先端シリンダ温度別破断曲線
(a) 130℃ (b) 150℃

隣接シリンダを 130 ℃ に固定した場合、先端シリンダ温度を変更しても破断曲線に変化は見られなかった。これに対し隣接シリンダを 150 ℃ に固定した場合、先端シリンダの温度によって破断曲線における荷重の増加傾向に違いが見られた。先端シリンダ温度が 125 ℃ の場合、ひずみ率 0 % ～ 40 % (噛み始め段階)、40 % ～ 80 % (噛み締め段階) では破断曲線の傾きが異なった。これは治具でサンプルを押した際、内部が柔らかいために流動変形することで荷重が減少するためである。先端シリンダ温度が低温の場合には噛み始めと噛み締め段階で破断曲線の傾きが異なり、シリンダ温度が高い場合はひずみ率の変化に対しサンプルの荷重が直線的に増加している。このことから隣接および先端シリンダ温度が植物性タンパク質の形成に影響することが分かった。

3.3 水分量の影響

図 6 に、水分量 30 wt%、50 wt% で製造した植物性タンパク質の断面画像と各サンプルを 5 回測定して得た破断曲線を示す。水分量 50 wt% の場合に対し、30 wt% の場合は破断曲線に大きなばらつきが見られた。一部のサンプルではひずみ率 80 % 付近で荷重が一度減少し、再び増加に転じる谷のような波形を示したことから、この変化は歯と歯の当たる直前での破断、つまり噛んだ際の歯切れであると考えられる。水分量 30 wt% の場合の断面写真ではサンプル内部に多くの空隙が見られ、断面積に対する空隙率は水分量 50 wt% の場合より高い。この空隙は、サンプルがダイから吐出され、圧力が解放される際に、繊維化した植物性タンパク質の層内部で水分が蒸気に変化することで発生していると考えられ、破断曲線のばらつきおよび歯切れ感に起因していると推測される。これは空隙がほとんど見られない水分量 50 wt% の場合の破断曲線ではばらつきが少なく、破断点を持たない結果とも一致する。このように空隙を有する植物性タンパク質は、噛むことで空隙が圧縮され、反発力が発生する⁽¹¹⁾。そして、強く噛んだ瞬間に空隙を形成していた繊維層が歯で噛み切れられ、空隙部分の反発力が小さくなる。シリンダ温度が低い場合には空隙がなく、柔らかいために、このような反発力は発生しない。これが植物性タンパク質を噛んだ瞬間の弾力に影響する要素の 1 つと考えられる。

また、水分量 50 wt% の場合は 30 wt% の場合と比較して、ひずみ率 60 % で荷重が 15 N 程度であり、破断曲線が緩やかに曲がっていることから、内部が柔らかいことが分かる。このことから水分率の違いによる内部構造の変化を確認できた。

次に水分量 40 wt% に設定し、先端シリンダ温度を 125 ℃ ～ 155 ℃ まで 5 ℃ ずつ変更した場合のサンプルの水分率と弾力の評価点を図 7 に示す。各シリンダ温度によるサンプルの水分率の変化から、製造時に投入された水分量 40 wt% を維持しつつもサンプル内の水分量は上昇していることが確認できる。また、官能評価からは、シリンダ温度の上昇によって水分率の上昇と共に弾力が高くなることが分かる。エクストルーダー内部ではシリンダ温度の上昇によって、タンパク質の各成分は熱溶融し、他成分と分離する。この際、展開したタンパク質が低分子量へ細かく分解されると共に、水分を取り込む。さらに高温・高圧化では天然タンパク質を構成している静電相互作用、疎水性相互作用、双極子相互作用等の相互作用が強まり、新たなジスルフィド(S-S 結合)結合や水素結合が形成される⁽¹²⁾。植物性タンパク質内の水分量の増加は、水素結合とジスルフィド結合の形成による繊維化の促進により、組織内に取り込まれているためと考えられる。

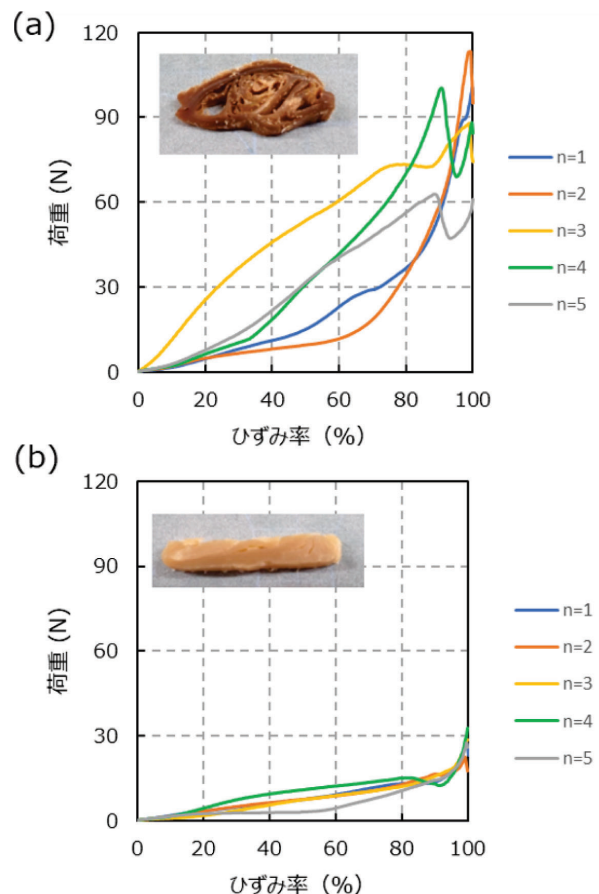


図 6 水分量別の断面写真と破断曲線
(a) 30 wt% (b) 50 wt%

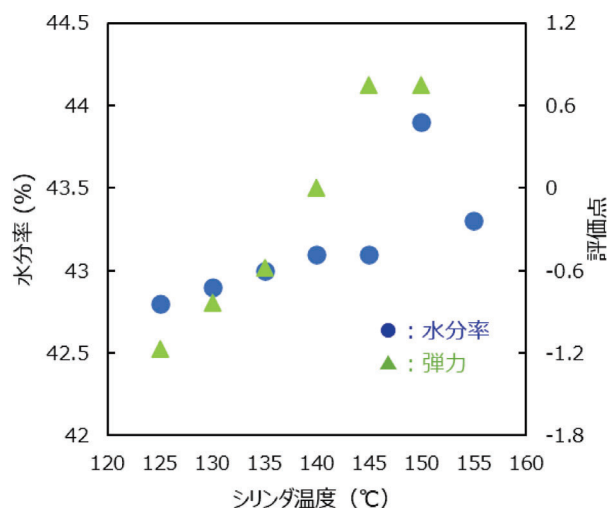


図7 先端シリンダ温度別の水分率と弾力の評価点

この植物性タンパク質の繊維化による内部構造の変化が弾力に影響すると考えられる。また原料比率だけでなくプロセス条件からも官能評価にアプローチできる可能性を示唆している。

4. 結 言

本報告では、食品用二軸エクストルーダーを用いた植物性タンパク質製造における「食感」の定量評価を目指し、官能評価と機器分析を実施し、相関解析を行った。結果としてそれぞれの官能評価のパラメータは機器分析から推察が可能ということが分かった。今後はエクストルーダー内部におけるタンパク質の反応挙動について理解を深めることが課題である。

昨今では大豆ミートに限らず様々な食品で二軸エクストルーダーの需要が高まっていることから、今後も食品の「食感」に注目していくことで、顧客が求める「美味しさ」を、食品用二軸エクストルーダーを活用して実現できるよう、製造プロセスの高度化に継続的に取り組んでいく所存である。

“TEX”は株式会社日本製鋼所の登録商標です。

参 考 文 献

- (1) 中村龍樹, 吉竹恒, 森衣里子, 伊藤瑛子: “プロテインライシスがもたらす食品業界の地殻変動”, 知的資産創造, Vol. 29 (2021), No. 11, pp. 88-101
- (2) 間島大介, 只腰千真: “代替肉業界の分析と日本が取り組むべき方向性”, NRI パブリックマネジメントレビュー, Vol. 220 (2021), pp. 2-11
- (3) 梶川慎也: “代替肉 (プラントベーストミートと培養肉) に係る動向”, KPMG ジャパン (2023), pp. 2-9

- (4) NACS 西日本支部 食活研究会: “「大豆ミートに関する消費者の意識調査」結果概要”, NACS 西日本支部 食活研究会 (2021), pp. 1-9
- (5) 野口明徳: “エクストルージョン・クッキング (Extrusion Cooking)”, JSM Mycotoxins, Vol. 67 (2017), No. 1, pp. 33-42
- (6) 長沢伸也: “官能評価・感性評価のための統計手法”, 感性工学, Vol. 8 (2008), No. 1, pp. 5-11
- (7) 山野善正: “進化する食品テクスチャー研究”, 株式会社エス・ティー・エス (2011), pp. 69-77
- (8) 栗原伸一: “入門 統計学 検定から多変量解析・実験計画法まで”, オーム社 (2011), pp. 17-19
- (9) 二宮正司: “相関係数に関する若干の考察”, 大阪経大論集, Vol. 59 (2008), No. 4, pp. 1-19
- (10) Z. Zhang et al.: “High-moisture Extrusion Technology Application in the Processing of Textured Plant Protein Meat Analogues: A Review”, Food Reviews International, Vol. 39 (2023), No. 8, pp. 4873-4908
- (11) 大久長範, 大能俊久, 熊谷昌則: “茹で稲庭うどんの破断強度に及ぼす空隙の影響”, 日本食品科学工学会誌, Vol. 53 (2006), No. 2, pp. 91-95
- (12) 山内文男: “大豆タンパク質の構造と食品物性”, 日本食品工業学会誌, Vol. 26 (1979), No. 6, pp. 266-277