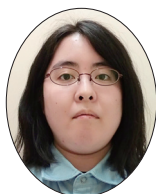


食品用二軸押出機による大豆ミート製造プロセスと予測シミュレーション

Soybean Meat Production Process by Food Twin-Screw Extruder and Predictive Simulation



福田 瑞香
Mizuka Fukuda



梅田 光秀
Mitsuhide Umeda



小田 智也
Tomoya Oda



宮川 真里奈
Marina Miyagawa



有留 北斗
Hokuto Aridome



博士(工学) 福澤 洋平
Dr. Yohei Fukuzawa

要 旨

世界人口の継続的増加、森林から農地への転換による森林破壊、健康的な食品への関心が、植物由来の原料から作られる代替タンパク質の需要を高めている。その中でも大豆ミートは食品用二軸押出機で製造され、押出機内で混合、溶融混練、冷却の過程を経ることで大豆タンパク質の結合が促進し、再配列と架橋によって組織化が進行する。この報告書では、食品用二軸押出機を使用した大豆ミートの生産プロセスにおけるシリンダ温度が大豆ミートの外観と組織化に与える影響と、大豆ミート生産に使用できる押出機内大豆タンパク質の温度および圧力の予測シミュレーション技術を述べる。

— Synopsis —

The continuous growth of world population, deforestation due to the conversion of forest to farmland, and interest in healthier food have raised the demand for alternative proteins produced from plant-based sources. Among them, soybean meat is produced in food twin-screw extruders, where the process of mixing, melt-mixing, and cooling in the extruder promotes the binding of soy proteins, and rearrangement and cross-linking lead to texturization. This report describes the effect of cylinder temperature on soybean meat appearance and texturization during the soybean meat production process using a food twin-screw extruder, as well as simulation techniques to predict soybean protein temperature and pressure in the extruder that can be used for soybean meat production.

1. 緒 言

近年、動物性タンパク質に代わり、大豆やエンドウ豆といった豆類および小麦タンパク質を原料とした、植物系タンパク質の需要が高まっている。この背景には、いくつかの要因が挙げられる。まず1つ目の要因が「プロテインクライシス(タンパク質の供給量不足)」である。世界人口は右肩上がりに増加を続けており、2050年には約90億人以上に達すると予測されている⁽¹⁾。このような世界的人口増加のほかに、新興国の経済発展による食生活の質向上や食の欧米化によって、タンパク質の需要が高まっているため、近い将来、需給バランスが崩れ、「プロテインクライシス」に陥るとみられており、その解消策として、植物系タンパク質に注目が集まっている。

2つ目の要因が「生産性向上による環境破壊」である。畜産では大量の飼料と水、広大な耕作地や牧草地が必要であり、前述の食肉需要の増加を賄うために森林が牧草地に変えられ、環境破壊が起きている。また、日本の農畜分野における二酸化炭素排出量の28%は家畜由来であり、その中でも牛のげっぶに含まれるメタンガスは二酸化炭素の25倍の温室効果を持つため、地球温暖化の一因と考えられている⁽²⁾。

3つ目の要因が「世界的な代替タンパク質ニーズの高まり」である。ベジタリアンやヴィーガンといった菜食主義者の人口割合が、特に欧米において増加傾向にある⁽³⁾。そのほかに食品の流通・加工等の技術発展、ライフスタイルの変化による食生活の多様化、健康的な食品への高い関心が食肉に代わる新たな食材を必要としており、今までなかった新たなタンパク質源の生産が望まれている。

冒頭に述べた通り、動物性タンパク質の代替品には、豆類や小麦などがある。その中でも大豆を用いた植物由来の代替タンパク質の製造開発の場合、既存の栽培技術の活用により低コストで原料の生産規模を拡大できるうえ、代替タンパク質の製造時に既存の食品加工プロセス技術が応用可能である。また、原料となる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、食品メーカーや製粉メーカー、化学メーカーが肉様素材の製造および研究を盛んに行っている。

本報告では、食品用二軸押出機を用いた大豆ミート製造プロセスにおける、押出機シリンダ温度の違いが大豆ミートの外観や組織化に及ぼす影響および押出機シリンダ内部の原料温度や圧力の予測を行うシミュレーションについて報告する。

2. 食品用二軸押出機の歴史

スクリュ機構をもつ食品加工装置はぶどう絞り機や搾油機などに古くから用いられてきた。その中で食品加工における押出機の歴史をひもとくと、食品加工用押出機の原型が作られたのは1930年代後半である。この時代の押出機は一軸型が中心であり、パスタ類の製造へ用いられたのちにシリアルやスナックへと利用範囲が拡大し、1970年代からは植物性タンパク質を繊維状に加工した植物性組織化タンパク質(Texturized Vegetable Protein: TVP)の製造へ利用されるようになった⁽⁴⁾。

時期を同じくして、1970年代からプラスチック加工用として利用されていた二軸押出機が改良され、食品分野においても利用されるようになった。食品用に改良された二軸型は一軸型では制御できない高水分や高油分の原料を容易に扱えるだけでなく、混練性能も高いため、二軸型による食品開発が進められた⁽⁵⁾。さらに、二軸押出機は混練、加熱、成形あるいは膨化といった多くの機能を一台で賄えるため、これまで複数工程を経て製造していた食品を一台の二軸押出機で製造可能であり、連続処理性が高く生産効率の向上も果たせるため、多くの食品分野へ導入された。

そして、植物性組織化タンパク質の製造も、一軸型から二軸型を用いた製造が主流となっていく。初期段階の1970年代ごろに製造されていた植物性組織化タンパク質の主な役割は、食品の保水性や食感の向上に用いられる品質向上剤であった⁽⁶⁾。昨今では、代替肉需要の高まりに応えるため、本物の肉に近い食感や味わいを再現する技術が注目されているので、優れた混練性能を持ち、高温高圧下においてタンパク質の膨化や組織化の可能な二軸押出機が、植物性組織化タンパク質の製造に広く用いられている。

3. 二軸押出機による大豆ミート製造プロセス

図1に二軸押出機の外観、図2に二軸押出機を用いた大豆ミート製造プロセスの概要を示す。大豆ミートの原料は乾燥大豆から油を抽出して得られる粉末状の脱脂大豆である。原料となる粉末状の脱脂大豆は重量式フィーダによって二軸押出機へ投入された後、ブランジャポンプによって原料：水＝6：4の割合になるように水が加えられ、混合ゾーンで均一に混ぜ合わされる。その後、下流の熔融・混練ゾーンへと搬送されたのち、シリンダ温度130℃以上で混練される。この混練の際、原料温度が130℃以上に達すると、脱脂大豆の各成分が熱熔融を始めるとされており⁽⁷⁾、それによりタンパク質の成分が他成分と分離して、均一相が形成される。先端部の押出ダイによる冷却ゾーンでは、これまでの高温高压下の混練により粘度上昇した原料内部と冷却されているダイ内壁面の間に温度差が生まれ、粘度勾配を生じる。粘度勾配によって材料速度差が発生するとともに、狭いダイ流路を流れることで生まれる高いせん断作用により、原料は配向する。しかし、そのままの状態では原料の粘度が非常に高く延伸が難しいため、繊維状に延伸するには冷却ダイの温度調整が重要となる。最後に、ダイ出口から大気圧下へ放出されると同時に、膨化・固化することで繊維構造を持った大豆ミートが生成される⁽⁸⁾。図3にダイから押出されるシート形状とミンチ形状の大豆ミートを示す。ダイの出口形状を変更することで、シート形状やミンチ形状などの様々な形状の大豆ミートが製造可能である。

大豆ミートの最終的な評価は、噛み応えや風味といった官能的評価によって判断されるが、これらは繊維量、膨化度、水分量といった定量的な値に左右されると考えられるので、二軸押出機のスクリュ構成やシリンダ温度のほかに、水分の添加割合といった様々なプロセス条件の最適化が必要であり、それらが各社のノウハウとなる。

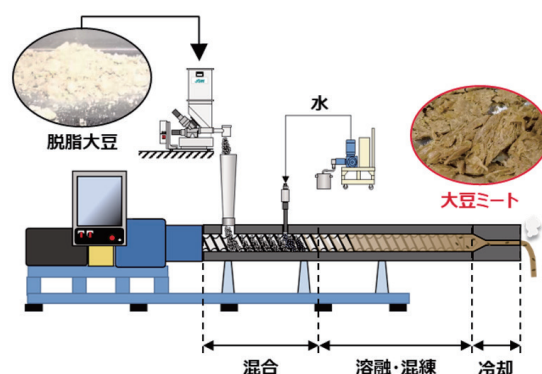


図2 大豆ミート製造プロセス模式図



(a) シート形状

(b) ミンチ形状

図3 ダイから押出される大豆ミート



図1 二軸押出機（当社製）

4. 大豆タンパクの組織化

食肉は皮下脂肪と筋間脂肪組織、骨格筋によって構成されている。中でも骨格筋は円筒状の巨大多核細胞である筋線維の束によって構成されている。大豆ミートが肉様食品として位置付けられるのは、原料に含まれる大豆タンパクの組織化によって、食肉の繊維構造を再現できるからにほかならない。

そこで、二軸押出機のプロセス因子が大豆タンパクの組織化に及ぼす影響を調べるため、小型機(TEX30)を用いて大豆ミート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)を用いた。各種条件のうち脱脂大豆:水 = 6:4 およびスクリュ回転数 200 rpm を固定し、混練部のシリンダ温度を 120 ℃から 5 ℃ずつ上げて、サンプル採取した。

図 4 に各シリンダ温度で得られた大豆ミートの外観を示す。シリンダ温度が高いほど、大豆ミート表面の繊維の粗さが抑えられ、滑らかになっていく傾向が確認された。具体的には、混練部シリンダ温度が 120 ℃の場合、大豆ミート表面はぼそぼそしており、繊維の粗さが目立っている。しかし、シリンダ温度 145 ℃の場合、シート断面は押出ダイの出口形状と同じであり、シート表面の繊維配向も進んでいるので、光沢を有するほど平滑になっている。

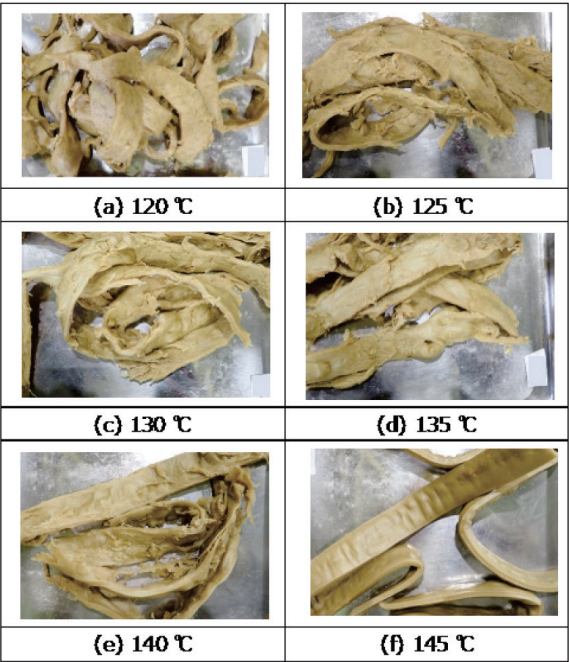


図 4 各シリンダ温度で得られた大豆ミートの外観

また、混練部シリンダ温度の違いによる大豆ミートの組織変化を簡単に確認するため 120 ℃、130 ℃および 145 ℃のサンプルを手で裂いて、組織化の進み具合を比較した。120 ℃のサンプルでは、細かい繊維が見られるが、繊維の塊が凝集した状態なので崩れやすく、押出方向に関係なく裂くことができる。130 ℃のサンプルでは、繊維が押出方向に配向しているため裂きやすく 120 ℃のサンプルに見られた細かい繊維ではなく、鶏のささみのように太い繊維の束と細かな繊維の混ざった状態であった。145 ℃のサンプルでは、裂くのが困難であり、しかも硬かった。繊維は押出方向に配向しているが、それらが集まることで、大豆ミート内部に積み重なった繊維層が形成されているため硬くなったと推測される。また、シリンダ温度が 100 ℃以下の段階で押出機先端部から採取されたサンプルは、原料と水の混ざった粘土状であり、水に溶かすと容易に分解する。以上のテスト結果から、大豆タンパクの組織化には、シリンダ温度が大きな影響を与えることが明らかとなった。

次に、押出機内でどのような反応が起こり、大豆タンパクの組織化が進行していくのか、その流れを 4 つの段階に分けて説明する。

まず、大豆タンパクの主成分は β -コングリシニンとグリシニンであり、球形をしている。両主成分のアミノ酸含有量のうち大部分を占めているのがグルタミン酸とアスパラギン酸であり、両主成分の約 45 % を占めているが、グルタミン酸が多い。また、主成分を比較するとシスチンの含有量は β -コングリシニンが多い。このシスチン含量はジスルフィド結合(S-S 結合)に関連し、大豆タンパクの形成に影響する⁽⁹⁾。このほかにも大豆の持つ天然タンパク質の構造は静電相互作用、疎水性相互作用、双極子相互作用、水素結合およびジスルフィド結合等の複数の力で形成されている。その中でも、押出機の冷却部における水素結合とジスルフィド結合の形成が、大豆タンパクによる肉様繊維形成に大きく関わることが知られている⁽¹⁰⁾。

図 5 に推定される押出機内部における大豆タンパク組織化の流れを示す。第1段階では、原料となる脱脂大豆に水が加えられる。水分含有量が低いとき、脱脂大豆の大豆タンパクへの熱変性温度は 180 ℃と高温側に位置している。しかし、脱脂大豆に対して 10 % ~ 40 % の水が加えられると、大豆タンパクの熱変性温度が 140 ℃ ~ 160 ℃付近になると報告されている⁽¹¹⁾。この理由として、水が多くなると原料内の構成分子が動きやすくなるためと考えられている⁽¹²⁾。その結果、大豆タンパク組織化における二軸押出機のシリンダ温度設定が低くなり、運転にもメリットをもたらしている。原料が下流に搬送されて温度上昇してゆくと、水素結合が切断されて、球状の大豆タンパクの分子鎖が徐々に展開し、その内部に水が含まれてゆく。

第2段階の高温高圧の溶融混練ゾーンでは、原料温度が

130 ℃以上に達するので、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ともに、これらの相互作用が強くなるため、新たなジスルフィド結合や水素結合が形成される。反応の進行した大豆タンパクは急に粘弾性を増すため、押出機内の搬送には下流側のシリンダ温度をより高い温度に保ち、原料の流動性を維持する必要がある⁽¹³⁾。

図6に混練ゾーンで発生するタンパク質の構造変化の模式図⁽¹⁴⁾を示す。シリンダ温度を高く設定することによって、 α ヘリックス(主鎖に含まれる原子間の水素結合による右巻きらせん構造)から β シート(分子鎖が隣り合って並んだ際に水素結合によって形成されるシート構造)、 β ターン、無秩序コイル等へのタンパク質の形状変化反応が促進するとされている。また、スクリュ回転数が高くなると、せん断が高まり、大豆タンパク質分子間のジスルフィド結合および非共有結合等の結びつきが、共有結合架橋に変化する可能性がある⁽¹³⁾。

第3段階である冷却ゾーンでは、タンパク質分子の再配列およびタンパク質分子と小さな凝集体の整列による架橋が起り、繊維構造が形成される。

最後に冷却ダイを通過する際、繊維構造はダイ内部の粘度上昇によるダイスに接した部分から中心部への速度分布の不均一さによって、押出方向へ引き延ばされて、繊維状の構造が形成される。このようにして大豆タンパクの組織化が進むと考えられる。

5. 大豆ミートの混練挙動予測

大豆ミート製造においては、押出機内部における原料温度や圧力が大豆タンパクの組織化に大きな影響を与える。それゆえ、押出機内部の状況を知ることが、大豆ミートの開発や製造にとって大きな価値を持つ。

ここでは食品用二軸押出機の混練挙動の予測シミュレーション技術について紹介する。本シミュレーション技術は、二軸押出機の樹脂混練プロセスにおける樹脂温度や圧力の予測のために開発されたが、高温時の大豆タンパクの挙動は樹脂のような熱可塑性を示し、流動特性が類似していることから、食品混練プロセスにも本シミュレーションが活用できると考えている。

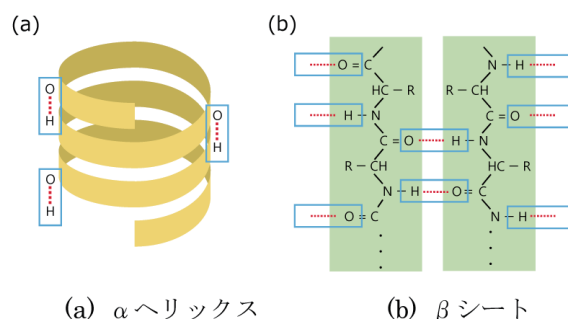


図6 タンパク質の構造変化の模式図

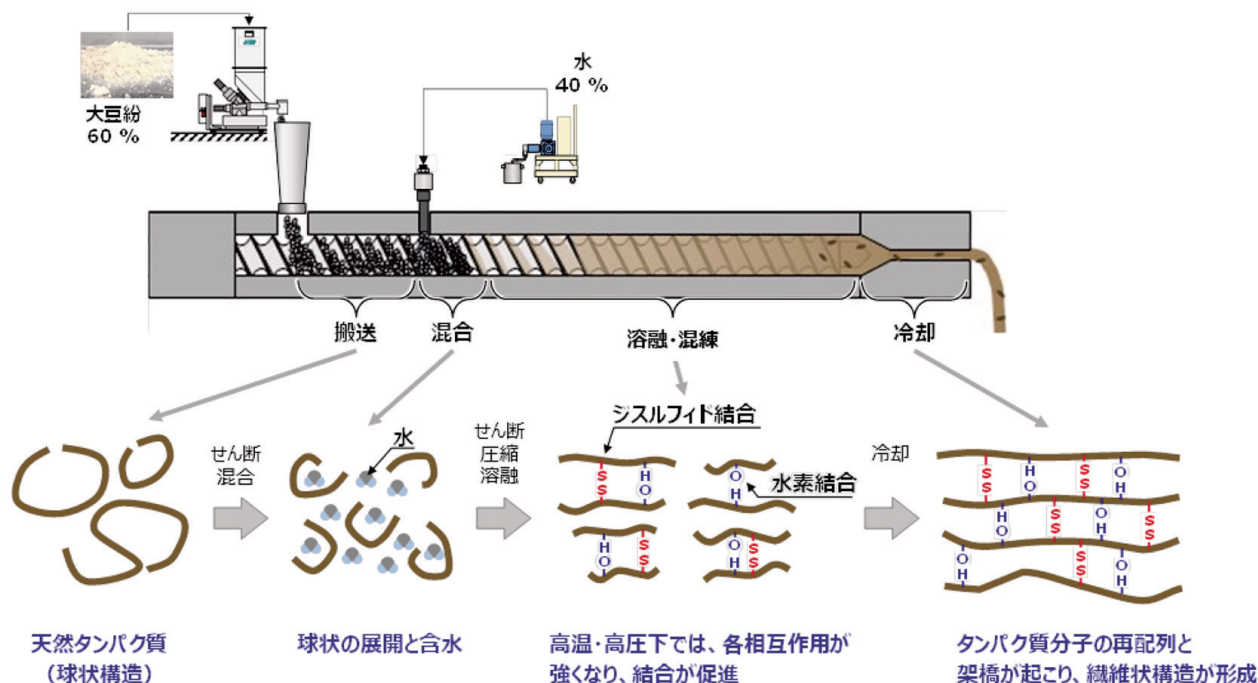


図5 押出機内部における大豆タンパク組織化の流れ

図7に解析条件の設定から結果出力までの手順を示す。原料物性(原料の液体粘度、固体時と液体時の比熱・熱伝導率・融点)、スクリュ構成、プロセス条件(原料供給量、スクリュ回転数、シリンダ温度)を入力し、解析を実行する。出力は滞留時間、充填率、トルク、パワー、固相率(溶融率)、原料温度、圧力およびせん断エネルギーの予測値である。本シミュレーションには、流路メッシュの作成といった作業が不要なので、1ケースの解析時間(入力から解析完了まで)は5分程度であり、解析時間は非常に短い。それゆえ、大豆ミート製造テストを行いながら、シミュレーション結果も参照できるので、無駄なく迅速に品質調整を行うには、非常に有用な優れたアプリケーションである。

図8に大豆ミート製造プロセスでのシミュレーション結果の一例を示す。スクリュ構成は全長 $L/D = 21$ (L はスクリュの実長、 D はシリンダ径、 L/D は無次元スクリュ長を意味する。)であり、原料投入部から水分添加後の混合ゾーンまで含めた搬送ゾーン、その下流が加熱・混練ゾーン、さらに押出機出口までが冷却・押出ゾーンという構成である。加熱・混練ゾーンでは、高充填率部の原料圧力が高まり、混練が促進されることによって、原料温度の大幅な上昇と固相率の低下が生じ、溶融が進行している。また、高充填率部ではスクリュ回転によるせん断エネルギーが高く、原料に対して混練作用が効果的に働いているので、添加した水の混合と大豆タンパク成分の組織化が進行していると推察される。その後、原料は冷却・押出ゾーンを経て押出機先端に到達している。

このようなシミュレーションを有効に活用することによって、大豆ミート製造プロセス条件の改善や最適化を効果的に行えるだけでなく、廃棄物量の削減や省エネなど副次的なメリットもあると考えられる。

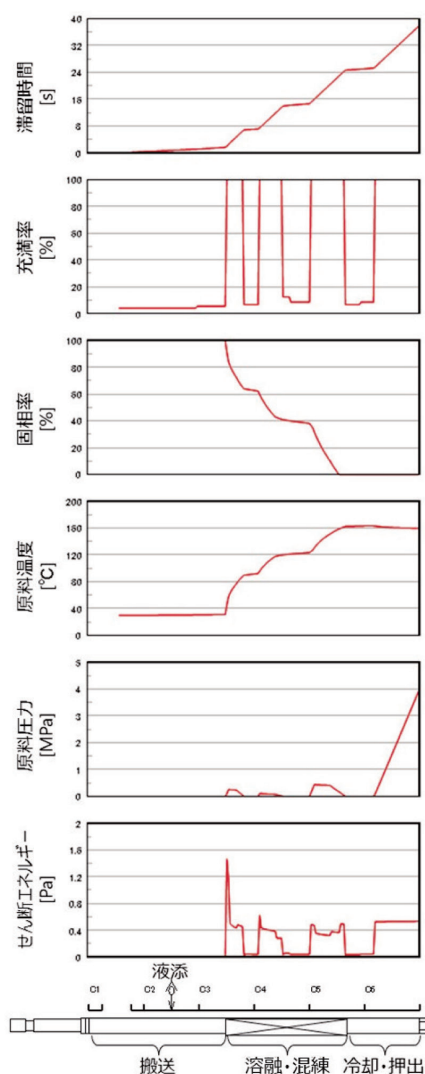


図8 大豆ミート製造プロセスでのシミュレーション結果の一例

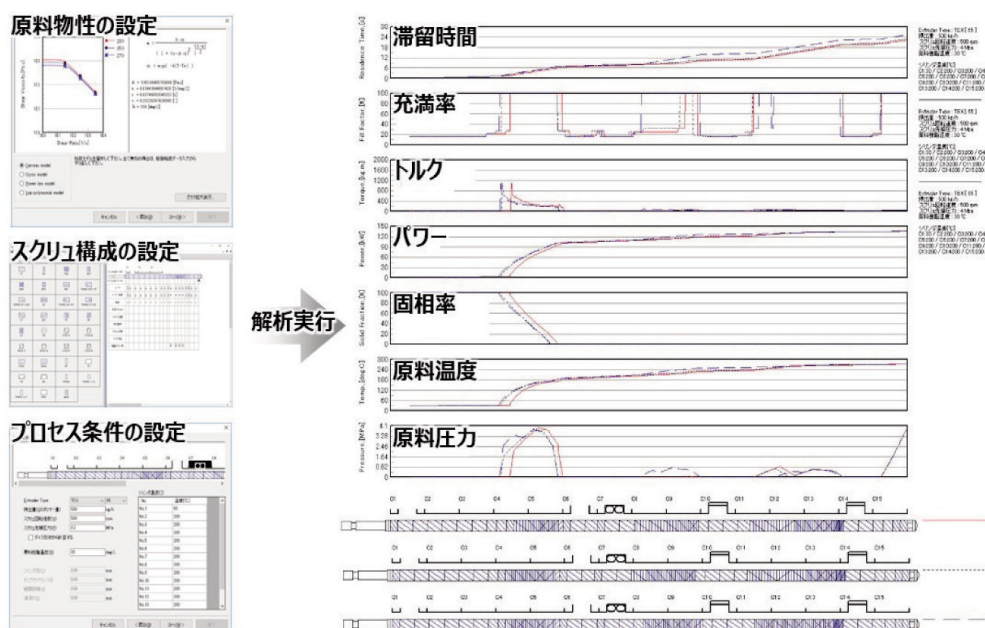


図7 解析条件の設定から結果出力までの手順(混練プロセス解析ソフトウェア「TEX-FAN」⁽¹⁵⁾)

6. 結 言

本報告では、食品用二軸押出機を用いた大豆ミート製造プロセスの紹介および押出機内における大豆タンパクの組織化について述べた。また、大豆ミート製造に活用できるシミュレーション技術の一例を紹介した。押出機内のタンパク質の挙動や内部状態は把握しにくく、大豆ミートの混練度合いなどの定量評価も困難ため、シミュレーション技術の有用性は高い。

現在、大豆ミート市場は成長を続けており、食品用二軸押出機の販売も増えると予想されていることから、今後も大豆ミートの高品質化や顧客のニーズに対応したプロセス開発に尽力する所存である。

“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: “プロテインク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) 環境省: “温室効果ガス総排出量算定方法ガイドライン Ver. 1.0”, p. 2, 環境省 総合環境政策局 環境計画課 (2017)
- (3) 日本貿易振興機構 (ジェトロ): “ベジタリアン・ヴィーガン市場に関する調査 (英国、フランス、ドイツ)”, p. 5, 日本貿易振興機構 (ジェトロ) ロンドン事務所農林水産・食品部 農林水産・食品課 (2021)
- (4) 五十部誠一郎: “実需者ニーズに対応した食品加工技術の開発と実用化”, 日本食品工学会誌, Vol. 24 (2023) No. 1, pp. 1- 10
- (5) 野口明徳: “エクストルージョン・クッキング”, 化学と生物, Vol. 24 (1986) , No. 5, pp. 342- 348
- (6) 五十部誠一郎: “食品総合研究所食品工学部製造工学研究室”, 成形加工, Vol. 15 (2003) No. 7, pp. 498- 500
- (7) 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. 「Vol.67 No.1」, pp. 33- 42
- (8) 監修 山野義正: “進化する食品テクスチャー研究”, p. 464, 株式会社エヌ・ティー・エス (2011)
- (9) 山内文男: “大豆蛋白質の構造と食品特性”, 日本食品工業学会誌, Vol. 41 (1994) No. 3, pp. 233- 240
- (10) 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
- (11) 土井悦四郎: “食品タンパク質の加工特性に関する研究”, 日本食品工業学会誌, Vol. 39 (1992) No. 12, pp. 1163- 1169
- (12) 萩原知明: “ガラス転移の食品科学・工学への応用”, 日本食品工学会誌, Vol. 10 (2009) No. 1, pp. 1- 8
- (13) 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
- (14) 編高分子学会: “高分子化学の基礎”, p. 154, 株式会社東京化学同人 (1994)
- (15) 富山秀樹, 石橋正通, 井上茂樹: “二軸スクリュ押出機内の樹脂挙動解析ソフトウェア「TFX-FAN」の開発”, 日本製鋼所技報, No. 55 (2004) , pp. 32- 38