

アニマルフリー素材で処方すること

久保村 喜代子

Kiyoko Kubomura

久保村食文化研究所



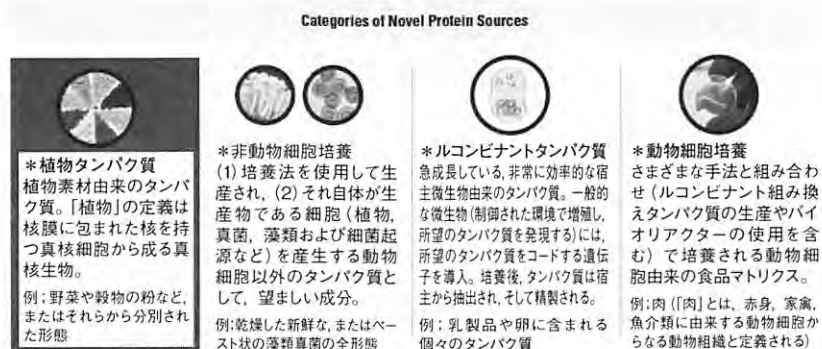
新しいタンパク質源が、革新的で魅力的で持続可能な新しい肉、卵および乳製品の代替品を生み出す鍵を握っている。

1. アニマルフリー新規タンパク質とは何か？

これまで私たちが食してきた動物性タンパク質を異なった側面からみると、新規タンパク質源は、生産、コストおよびインフラ原料調達の見点から、植物、非動物細胞培養、遺伝子の組換え体（ルコンビナント）および動

物細胞培養の4つのカテゴリーのいずれかに当てはまる。起源、原料的には、植物、非動物細胞培養および組換えタンパク質（ルコンビナント）に由来する成分、すなわち、穀物とマメ科作物の種子（植物タンパク質）など、または真菌、藻類、細菌の形態（非動物細胞培養）や動物が関与しないで生産された動物性タンパク質（カゼイン、ホエー、オボアルブミンなど）（組換えタンパク質とよばれる）を包括している。

さらに、アニマルフリー肉、卵、乳製品の代替品を創るために、これらの成分を使用した処方戦略（formulation strategies）が必要となる。アニマルフリー製品には、新規タンパク質の一つまたは組み合わせを組み込むことができる。生産、コストおよび原料の見点から以下の4つのカテゴリーに分類される（図1）。



植物タンパク質は、乾燥種子、全粒粉、および脱脂された小麦粉、濃縮物、単離物、ならびに加水分解単離物を含むさまざまな成分形態の素材が属する。

図1 新しいタンパク質源のカテゴリー



2. 植物由来とは何か？

「植物性タンパク質」は、植物、非動物細胞およびルコンビナントタンパク質を由来とする細胞・組織から得られるもののことを指すが、「植物ベース」は、これらの原料の一つまたは組み合わせたもので、一つの動物性原料不使用の製品を創り出している。従って「植物由来」とは、非常に幅広い意味を持つ。

植物素材が動物素材の製品の代替になるためには、植物素材は少なくとも動物素材に近い官能的な要素（すなわち、風味、芳香、テクスチャー、噛みごこち、水気、口当たり、外観、そして色合い）を満たすデザインが必要である。

例えば、植物由来の食肉代替物は、筋肉全体の細い縞（しま）や畝、溝といった構造的な類似、もしくは同一の繊維質のテクスチャー、またはあらかじめ形成されたパテや挽肉のように組織が並び、崩壊し、線維状になることで提供し得る。

卵の乳化特性を置換する製品は、卵に近い色、安定性、クリーム感を有するスプレッドやドレッシングを生み出す可能性がある。

植物由来の乳製品代替製品は、ミルク特有の白色で滑らかな、そしてクリーミーな口当たりをヨーグルトおよびチーズなどの加工食品に提供し得る。

伝統的な肉、卵や乳製品は、われわれの食卓を席卷し続けている。動物由来製品は、経験的にも本能的にも、消費者の摂食行動および購買行動の3つの主要な要因、すなわち味、価格、利便性を間違いなく満たしている。植物由来製品の成功は、これら3つの推進力を発揮できるかどうかにか左右される。別の見方をすると、動物由来製品は、これらの動物性ではないタンパク質の一つ、もしくは組み合わせを組み込むことによって、持続可能性と革新性を向上させる食品革命のテンプレート（雛形）になり得る。

3. 植物ベース処方

食品の革新へ一つのルールがあるのなら、それは味を引き出すことである。

風味とは感覚器官が製品の刺激を感知し、構成する多数の属性によって定義されるであろう。植物由来の製品の場合、処方は、少なくともそれらがターゲットとなる動物由来の製品と官能的に同等になることを目的としている。

多くの植物由来素材メーカーの最終的な目的は、消費者が常に植物由来を選択するというより、まずは動物製品のように味が優れた製品を作ることにある。食品科学者にとって、プロジェクトのパラメーターと動物以外の成分の機能的、栄養的品質との間の適切なバランスを取ることを意味する。最適な処方を組むために、処方者（Formulator）が植物タンパク質の新製品の創製、または既存製品の改良に際して、非動物性細胞培養成分やルコンビナント組換えタンパク質を配合することが効果的である。

4. 動物由来の成分を含まない素材

動物由来のものを使用しない処方を用いた食品開発のベースとして、使用する成分や素材、それらによって提供されるユニークな機能性、またその機能が成分固有のどのような遺伝物質や処理方法に起因するのかを理解することが重要である。

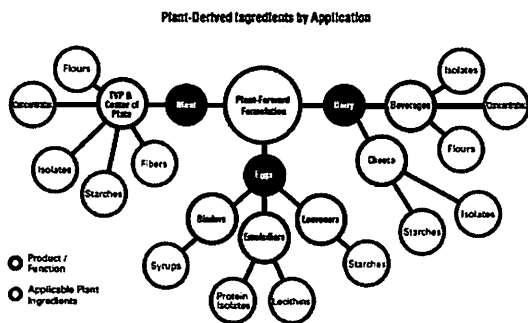


図2 アプリケーション別植物由来の素材・成分

このセクションでは、植物、動物以外の細胞培養、およびリコンビナント組換えタンパク質について、処方戦略と考慮事項を念頭に置いて説明する。現在市販されている植物性タンパク質と派生成分素材の機能と利用形態について図2に示す。

肉、卵、乳製品の処方の見直しは、栄養的な同等性を達成しながら、少なくとも伝統的な動物由来製品の持つ官能的特性を満たすことを目的としている。図2はマインドマップであり、さまざまな植物由来成分とアプリケーションを提案し、タンパク質だけでなく植物のすべての成分の使用を含んでいる。

5. 植物タンパク質

植物タンパク質は、主に穀物やマメ科作物に由来し、全成分あるいは分別して得られた成分の形で提供される。細分化されたタンパク質の形態としては、粉末タンパク、濃縮タンパク、分離タンパクおよび加水分解タンパクなどが含まれる。物理的、化学的、生物学的処理におけるさまざまなアプローチの結果として、植物タンパク質源は、ニュートラルなカラー、匂い、風味など、加工食品に採用されるための重要なパラメーターに加え、例えば高タンパク質含有量、アミノ酸の多様性、その他商業的なアプリケーションやプロセスにまたがる広大な機能的用途特性を満たすことで、さらに注目を集めるであろう。

粉末、濃縮、分離および加水分解の形態の植物性タンパク質は、溶解性、粘度調整、ゲル化、乳化、発泡および生地形成など、さまざまな機能特性を付与することができる。機能におけるそれらの役割を果たすタンパク質は、その純度によってアロマとフレーバー（芳香と風味）に部分的に影響を与える。一般に、完成した食品がその材料の天然の形態に近いほど、その香りおよび風味がより明白になる（例えば、マメ科植物由来のタンパク質源のノートは、粉末化、さらに分離型タン

パクとなるに従い減少する）。

香りや風味と並んで、いくつかの植物性タンパク質は口当たりにも悪影響を与えることが知られている。これらの大部分は、水和、カッティングおよび加熱加工を通して対処することができ、これらを組み合わせると滑らかでニュートラルテイスティング（特徴のない風味）、そして白い植物ベースの飲料、スプレッドを作ることができる。水和、カッティングおよび加熱加工に加えて押出し成形にも、植物ベース肉の製造において望ましくない匂いや風味を減少させる効果がある。

単離・分離画分（分留による加水分解タンパク質、別名タンパク質加水分解物）の生成もタンパク質の機能性を強化する。加水分解物は、化学的加水分解、酵素的加水分解、またはこれらの2つの方法の組み合わせによるものである。最終生成物は、その加水分解度（DH：切断されたペプチド結合の百分率）により測定される。DHは機能的品質だけでなく、栄養的品質風味（最適な生化学的吸収をもたらすが苦い風味を生じる）にも影響を与える。

加水分解物は噴霧乾燥され、溶解性、最低限の保水性、粘度およびゲル化機能性を必要とする高タンパク質用途のために、乾燥粉末として供給される。加水分解物の価値は、粘度を最小限に抑えながら、多くのタンパク質を低用量に収めることが可能となる。特に、すぐ飲めるスポーツ飲料では、加水分解物は、動物由来品と同等以上のタンパク質を産出する点で注目すべき価値があるかもしれない。

6. デンプンと食物繊維

タンパク質画分だけが革新的な植物由来食品に対する解決策となると信じることは、大きな誤解であろう。植物性タンパク質源の主な成分であるデンプンと食物繊維は、タンパク質が不足している場所を埋める一方で、

同じ機能のいくつかを発揮することができる。植物タンパク質(具体的には分留・分別濃縮物および分離物)の需要が上昇し続けるに従い、それらの大多数の構成内容となるこれら副産物の供給もまた増加する。

伝統的なデンプンの機能としては粘度(増粘)が強調され、必ずしもゲル強度、安定化、または独特のテクスチャーの機能については注目されているわけではない。新たなデンプンの源、特にマメ科植物タンパク質の誘導体は、クリーンな表示、ハイドロコロイド代替をはじめ、機能的代替物になり得る独特の特徴を呈する。天然の形では、例えばマメ科植物由来デンプン(エンドウデンプンなど)は、他のデンプンには欠如している機能性をも有している。

例えば、滑らかな種子表面のエンドウのアミロース含有量は30~40%の範囲であり、皺のあるエンドウではさらに高く(60~76%の範囲)なる(Ratnayake, Hoover, Warkentin 2002)。アミロース含有量が、伝統的で一般的なデンプン源(例えば、トウモロコシ、小麦、タピオカ、ジャガイモ、米)の2倍であるため、エンドウ由来のデンプンはゲル強度、フィルム形成およびパリパリ感(肉製品の食感を再現するのに有利な特徴)を付与できる。これらの特徴は、調理されたソーセージをスナッフ(パクッと食いつく、

噛みつく)、あるいは鶏の胸肉や豚肉のカット、または牛肉を噛む、食いつくといった状況で表現される。

さらに、デンプンは、離水またはブライン(塩水)の浸出を減少、制御する手段(正式にはシネレシスとよばれるプロセス、離漿;ゲルが内部の液体を放出して体積を減少する現象)に寄与する。すり身のようなシーフード製品においては、デンプン(天然型および変性型)は食感やプロセスの改善およびコスト削減と並んで水分調整に貢献する(Luallen 2004)。

ファイバーは、クリーン表示の問題に対応し、栄養上の恩恵を生み出す一方で、粘度、ゲル化および糸引きを付与する物性機能をも供与する。可溶性繊維は一般に、水にさらされると粘性が増す、またはゲルを生成する(少なくとも親水コロイドの補充において有益である)。食感への影響に加えて、繊維の線状構造は、植物由来の食肉製品(動物由来のミートカットのそれに匹敵する繊維性組成物を目的としている可能性がある)の形状作成に役立つ(図3)。

7. 植物由来素材成分と加工の全体像

最終的な植物タンパク質(それらの分離物)加工食品は、豊富なデンプン、食物繊維、糖、およびさまざまな濃度のタンパク質(原

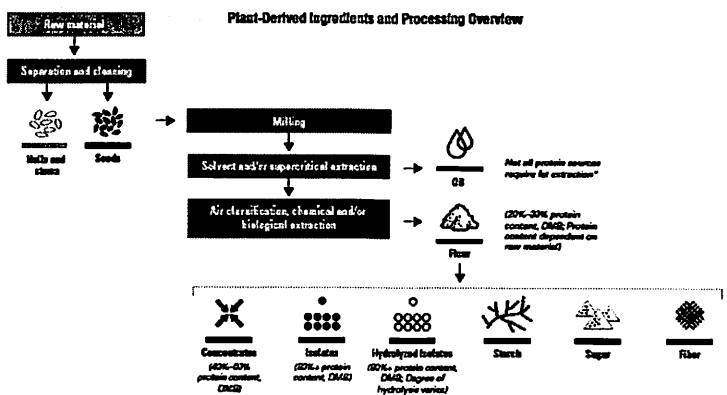


図3 植物由来素材成分と加工の全体像

料に依存する)により形成される。これらの素材成分は、高い保水性(そしてさらに、強く柔軟性のあるゲルの生成)から乳化、そして生地形成まで、低コストで機能的なソリューションを数多く提供する。豆類は脂肪含有量が低いため、必ずしも脂肪抽出工程は必要なく、伝統的な脂肪抽出化学物質、すなわちヘキサンを避けることができる。

1) 植物タンパク質の利用

新しい植物性タンパク質食品は、大豆を加工した食品の人气が高く、テンプレートも大豆を使ったものが中心となる。大豆の加工テンプレートは、手頃な価格と低コストで最適な製品を作るロードマップを示している

例えば、大豆成分の優位性は、最大限に利用可能な複数の機能(収穫物利用、生原材料、そして最終製品の目的に最も適う組み合わせを見出すための最適化)の結果である。

これは、大豆が1エーカーあたりの食料産出量が最大の作物であり、本質的に高いタンパク質含有量と多様なアミノ酸プロファイルを有するからである。さらに、大豆のすべての部分が人間と動物の栄養に確実に使用されており、加工工程においても大豆が非常に重要な機能を果たす。大豆はさまざまな用途に使用可能である。これらはすべて、未使用の新しい動物様成分、すなわち大豆以外の植物には完全には適用されていないパラメーターである。

多くの企業が、植物由来タンパク質を使用するための自社能力の拡大に取り組んでいる。例えば、チリを拠点とするスタートアップ企業のNotCoは最近、植物の分子特性をマッピングする機械学習プラットフォームの開発を強化するために3000万ドル(日本円で約30億円)を確保した。同社はこのデータベースを動物由来食品の分子構造との比較に使用し、どの植物由来タンパク質が、どの動物由来タンパク質の色、風味、食感を構造的に再現可能か判断している。

近代の収穫作物は一般に、植物由来の肉を造ることを目的として分子構造やアミノ酸構成を進化させてきた訳ではなく、他の目的(例えば、石油生産、動物の飼育、製パン)のために最適化してきた。したがって、われわれGood Food Instituteは、植物由来の食肉代替品のために作物を最適化することに、オープンアクセス(誰でも入れる研究への資金提供)を優先してきた。われわれの競争的研究助成金プログラム開始を通して、昨今植物ベースと細胞ベースの食肉研究に300万ドル(約3億円)を授与した。この研究への無制限のアクセスは、科学界全体および食品業界に利益をもたらすであろう。EquinomやBenson Hill Biosystemsなどの植物育種会社も、植物ベースの肉、卵および乳製品の用途に最適化された作物を開発している。

産業界にとってのさらなる機会は、植物のあらゆる部分の付加価値の高い用途を見つけることである。植物のタンパク質含有量は、動物のそれと同様に、一般に食用部分の重さの20~30%である。残りの70%から80%はどうなるのであろうか?産業が動物のあらゆる部分に用途を創出したように、産業は植物のあらゆる部分に用途を創出し、原料と製品の革新のためにより多くの可能性を生み出していかねばならない。

8. 非動物細胞培養

動物以外の細胞培養で、食肉様食品を作る時の基原は膨大に広がる。動物細胞以外のものをすべて含み、その供給源は、培養方法を使用して生産される植物、真菌、藻類および細菌を含み得る。これらの成分を商業的に入手するためには一定の制限があるが、非動物細胞培養生成物は、マイコプロテインおよび藻類供給源として、現代はその概観において議論されるレベルに至っている。

マイコプロテインは菌類から派生したもので、その栄養特性、構造的およびテクス

チャーの影響、風味(うま味)、そして効率的な加工方法において豊富な利点を提供できる。マイコプロテイン、例えば*Fusarium venenatum*, PTA-284 (Quornブランド製品の背後にある生物)は、乾物ベースで45%のタンパク質、25%の繊維、13%の脂肪、および10%の炭水化物で構成されている。その繊維質は、少なくとも制御された加熱および凍結を通して、筋肉全体の繊維質のテクスチャーと同等の繊維とゲル複合体(絡み合った繊維およびゲル化したタンパク質)のテクスチャーを創造することが可能である。

発酵プロセスの収集と遠心分離により得られるPTA-284製品の湿重量(約25%の固形分)は、商業用食品製造に現在利用されている形態(要はペースト)である。製造工程は、純粋培養物を接種した原料を、炭水化物(他の必要な成分の中)を含む培地が連続供給される発酵のプロセスにより、菌糸体の成長をもたらす。この菌糸体を培地と組み合わせ、遠心分離して完成ペーストを得る(Finnigan, NeedhamとAbbott 2017)。

マイコプロテインと同様に、藻類は一貫した条件と栄養素の供給を必要とする閉鎖発酵プロセスを通して製造される。そのユニークな適応性は、その栄養組成を変えることで、同じ種でも高タンパク質または油含有製品を産出する(供給される栄養素の種類と量に依存する)ことができる。タンパク質の場合、完成した成分は全細胞藻類の形で存在する可能性があり、単純に洗浄、乾燥、そして均一な粒径に縮小されている(高タンパク質粉を生成)。タンパク質成分として利用されていない場合は、その油分が抽出される(Klamczynska and Mooney 2017)。

1) 非動物細胞培養の利用

これらの処理効率と組み合わせられた、マイコプロテインおよび藻類の本質的に高いタンパク質含量は、植物原料を超える利点を示す。機能的および栄養的特徴が有望である

にも関わらず、非動物細胞培養はその商業的入手可能性の欠如が障害となっている。今日市販品は存在しないが、細菌や植物など動物以外の細胞培養による素材は、真菌や藻類と同じように使用することが可能である。

さらに、商業的入手可能性が限られているのは、現在の種または株(Quornの*F. venenatum*など)が唯一の供給源であることを意味するわけではない。むしろ、株の多様性を拡大する大きなチャンスがある。完成したペーストの作成は、Quornの製造現場では理想的かもしれないが、原料輸送、有効期間またはコストによって最適なものが開発できる可能性がある。藻類は乾燥した最終成分素材を産出したが、その風味と色は用途の多様性を制限し、使い道を妨げているのかもしれない。最終的に、非動物細胞培養は、原料ソース、完成原料、最終商品への加工、および市販食品において、それらの機能性を活かす機会が存在する。

2) ルコンビナント組み換えタンパク質

食品に使用される組換えタンパク質は、正確には遺伝子組換え操作された非動物細胞の培養物とみなすことができる。これは、動物以外の細胞(または酵母などの宿主)が個々のタンパク質を増殖、もしくは増殖するための宿主となるからである。具体的には、DNA配列が作成され、非動物細胞に挿入され、培地として供給される他の成分を使用し、発酵によって個々のタンパク質を生産する。無細胞産物、すなわち個々のタンパク質は、組換えタンパク質技術による産出物であり、通常食品中に存在するタンパク質であるカゼイン、乳清(乳製品中のタンパク質)およびオボアルブミン(卵中のタンパク質)を含む。

組換えタンパク質は、特定のタンパク質が持つ機能を食品に付与するために利用の需要が期待される。最終製品を形成するうえで、非動物起源(植物および非動物細胞培養物)に由来する他の成分(例えば脂肪、炭水



化物)と組み合わせられることとなる。組換えタンパク質の食品利用については、加工助剤として役立つ歴史がある。例えば、「ベジタリアンレンネット」とよばれるキモシン、アミラーゼ、リパーゼ酵素製品である。カゼイン、ホエー、ゼラチンおよびオボアルブミンなどのタンパク質を作ることを目的として組換え技術を利用する場合、組換えタンパク質のアウトプット、つまり生産物は加工助剤ではなく、最終製品内の主要成分や機能成分となる。そのためパラダイム(理論的枠組みがある時代や分野に特徴的な科学認識方法)システムが変化する。

組換えタンパク質の技術は、最終生成物および製造方法の両方で役立つ。この主要なタンパク質を造る組換えタンパクの Kategorii と、動物以外および動物細胞培養(「クリーンな肉」の原料となる)との根本的な違いは、最終生成物が単離された個々のタンパク質(細胞ではない)であることにある。細胞自体が製品であり、組換えタンパク質は動物の関与をまったく必要としない。

3) ルコンビナント組換えタンパク質の利用

組換えタンパク質技術は、公的にアクセス可能なゲノムデータベースから所望の遺伝子配列を入手し(事実上すべての一般的な食品関連種がすでに配列決定されている)、それを合成し、次いでタンパク質を生産するように設計された非動物宿主細胞に挿入する。現状では恐らく、植物ベースの食肉代替製品分野における最も顕著な例はImpossible Foods社の製品である。同社は酵母を使用して、大豆植物に含まれる分子であるレグヘモグロビンを生産している。この鉄分を含んだヘムは動物の肉のヘムと同じ風味で、インポッシブル・バーガー(Impossible Foods社のハンバーガー)の「肉のような」味を引き立てている。

ヘムは氷山の一角にすぎない。組換え生産技術を利用して高付加価値の原料、酵素およ

び生物活性物質を生成する可能性は多々存在している。そして、こうした生産物は完成した食品原料素材として、または原料の機能性を向上させるための加工助剤として役立つ。

4) 植物ベースの未来を想像する



アニマルフリー食品の将来を見据える時、配合、処方におけるあらゆる創意工夫が必要となる。新素材の開発、新素材の品質管理や規格・規制における課題解決、それらの機能を最大限に活かす製造プロセス、そして多様な伝統的食品など、各々に対応したアプリケーション開発に取り組みなければならない。確かに植物由来の肉様製品は、タンパク質分離・画分のみならず、植物を構築する多くの成分から作り出すことができる。植物ベースのタンパク質素材に対する需要が高まるにつれて、それらの副産物の供給およびその付加価値利用の機会もまた増大する。最前線の処方・配合者は、今日私たちの社会・時代・場所などに支配的な風潮やすう勢、既成の原理などに捉われず、食料安全保証、人間の健康、そして動物にプラスの効果をもたらす製品開発に取り組んでいる。

本当に驚くべきことであるが、われわれは動物なしで今日の食生活を創造できるが、こうした能力の背景にある科学は新しいものではない。むしろ、タイミングが正しいというべきであろう。私たちの技術と理解は、現在動物から派生したすべての製品の複製を想像できるまでに進歩した。しかし、将来を超越し、これらの技術を現実のものにするためには、多くの研究が必要である。タンパク質生産のために、植物、微生物を改良する生物学者、成分を最適化する生化学者や生化学エンジニア、そしてこれらの成分を斬新な方法

で組み合わせて消費者に馴染みのある製品をより改善された価格で提供する食品科学者のさらなる技術の向上が必要である。

MJ Kinney, a member of IFT, is a food scientist with The Good Food Institute (mjkinney@gfi.org).

9. 終わりに

Animal Free 素材の開発は、みごとに勢いで進行している。



インポッシブルバーの製品表示例を注視すると、Natural Flavourという記載に気づく。インポッシブルバーは肉汁の風味などを再現するために、ヘムのほかに、小麦タンパク質、ヤシ油、ジャガイモタンパク質、その他天然フレーバーをブレンドしたもの、そして酵母エキス、塩、大豆タンパク加水分解物、コンニャクガム、キサンタンガムなどが少量ずつ含まれている(Impossible Foods 2018)。

ガスクロマトグラフ質量分析(GC/MS)を使用し、挽肉の香りと味に関与する数千種類の化合物を分析し、研究開発段階に数年費やしたそうだ。Savory Flavourの開発コンセプトに感慨がわく。

食べ物、生化学。肉も例外ではない!

分子生物学創始者の一人である Salvatore E. Luria 博士は、「本質的に、食物はペトリ皿に入れた人間の想像したロマンティックなスープ! 食べ物は、生化学的分子のセットで構成されている」と述べている。

巧みに組み合わせ(クッキング操作)するとおいしさのベクトル! Sensory Experience!

エセ肉・Animal Free Meat 開発は、その素材開発から Savory Flavour 風味調味料開発の王道であり、改めて調理科学 Culinology を学ぶことは、その扉を開け、新しい風味に出逢うことに違いない。

参考文献

- Finnigan, T., L. Needham, and C. Abbott. 2017. "Mycoprotein: A Healthy New Protein With a Low Environmental Impact." Chpt. 19 in *Sustainable Protein Sources*, edited by S. R. Nadathur, J. P. D. Wanasundara, and L. Scanlin. San Diego: Academic Press.
- Klamczynska, B., and W. Mooney. 2017. "Heterotrophic Microalgae: A Scalable and Sustainable Protein Source." Chpt. 20 in *Sustainable Protein Sources*.
- Luallen, T. 2004. "Utilizing Starches in Product Development." Chpt. 13 in *Starch in Food*, edited by A.-C. Eliasson. Lund: Woodhead Publishing. <https://www.sciencedirect.com/book/9781855737310/starch-in-food>.
- Ratnayake, W., R. Hoover, and T. Warkentin. 2002. "Pea Starch: Composition, Structure and Properties—A Review." *Starch/Staerke* 54 (6), 217-234. doi:10.1002/1521-379X (200206)54:63.0.CO:2-R.



くぼむら・きよこ

青山学院短期大学から、実践女子大学編入学卒業。専業主婦から食品業界、そして国際社会へ。東京調理師専門学校、カルピスR&Dセンターキッチン、小川香料、海外香料会社などで務め、現事務所をオープンし25年。専門は、セイボリーフレーバー。食品メーカーの商品開発などを主な業務とし、手がけた製品は1000を越える。ワールドフードサイエンス編集委員、IFT本部評議委員、同国際評議員、同教育プログラム講師、大学非常勤講師。全日本司厨協会ブロンズ賞、2008年IFTフェロー賞受賞。学術博士。

●久保村食文化研究所 <http://www.kubomura.net>