

# 食品工学の産業界への貢献と未来への期待

井村直人

東京大学先端科学技術研究センター，日本食品工学会副会長

## 1. はじめに

私たちが毎日食べたり飲んだりしている食品は、生のまま食する以外は、「調理」という工程によって、素材のおいしさがさらにアップしたり、保存性が向上したりといった付加価値がつけられている。いや刺身でさえ、その包丁の使い方によって口に入れたときの食感が異なるので、腕の良い板前が切った刺身のほうがおいしいという意見もある。いずれにしても食品を調理するときにはすでに何らかの加工が加えられており、工場で作られる加工食品であれば、さらに様々な単位操作が施されていると考えて差し支えない。

私は前職で長年にわたって様々な飲料の開発やその製造技術の開発に携わっていたが、その中でもとくにインスタントコーヒーの製造工程は、食品工学のベースとなる化学工学の単位操作の多くが詰まったユニークな食品製造工程である。このインスタントコーヒーの製造工程を例に、これらの単位操作がどのように食品の製造や開発に応用されているのかを紹介する。そして食品の開発や製造において食品工学を応用する意味や、これからの食品工学に期待することなど、日本食品工学会設立20周年を迎えるにあたり、長い間産業界において食品工学に携わってきたひとりとして、私なりの考えを述べたいと思う。

## 2. インスタントコーヒーの製造工程と単位操作

図1に代表的なインスタントコーヒーの製造工程のフローを示す。

海外の原産地から輸入されたグリーンビーンとよばれるコーヒー生豆（実際にはマメ科ではなく、アカネ科の常緑広葉樹「コーヒーノキ」の種子）は高温で焙

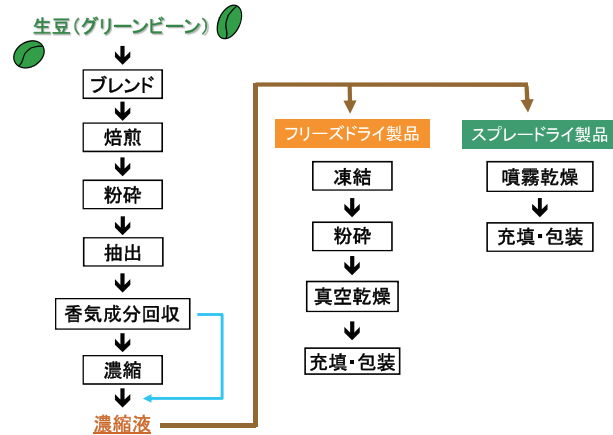


図1 インスタントコーヒーの製造工程

煎される。ここではメイラード反応をはじめとする様々な反応によってコーヒーの味と香りが生成される。次に焙煎されたコーヒーを粉碎し、熱水と接触させることによって可溶性の固形分を抽出し抽出液を得る。そしてその抽出液から凍結乾燥や噴霧乾燥により水分を取り除き、可溶性の粉末乾燥物を得る。このように100%コーヒー生豆だけを原料として製造されたものがインスタントコーヒーである。

また、乾燥工程における香り成分の保持率の向上と乾燥効率の向上のために、抽出液は乾燥工程に送られる前に濃縮されることが一般的である。蒸発を用いた濃縮を行う場合は同時に香り成分も失われるため、その蒸気に含まれる香り成分を蒸留や膜分離などによって回収し、乾燥前の濃縮液に添加する操作も行われる。これらの操作によって高品質なインスタントコーヒーをより経済的に製造できるようになる。

インスタントコーヒーには大きく分けて、凍結乾燥によって製造される「フリーズドライ製品」と噴霧乾燥によって製造される「スプレードライ製品」があり、一般的には凍結乾燥では低温下で操作できることから、フリーズドライ製品のほうがスプレードライ製品に比べて高品質な製品を得ることが容易である。

このように、インスタントコーヒーの製造工程には数多くの操作が含まれているため、その品質は産地やグレードなどを含む原料生豆の品質だけではなく、それぞれの工程における操作に大きく左右される。

このインスタントコーヒー製造の主な工程でどのような単位操作が行われているか、そしてその操作にお

### 著者略歴

井村直人 (Naoto IMURA)

東京大学先端科学技術研究センター 特任教授

1980年 東京大学農学部農芸化学科卒業

1992年 博士(農学) 東京大学

味の素ゼネラルフーズ(株)、米国ゼネラルフーズ、英国クラフトフーズ研究所などを経て、

2019年より現職 日本食品工学会副会長

〒153-8904 東京都目黒区駒場 4-6-1

E-mail: nimura@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

いてどのような物性値に着目してパラメータを操作しているかをまとめたものが以下の表である。

このようにインスタントコーヒーの製造工程には多くの化学工学の単位操作が含まれている。また、コーヒー以外の食品製造の工程でも、これほど多くの単位操作が集まってはいないものの、様々な単位操作が使われている。食品製造においては、原材料の品質や配合といったパラメータ以上に、こういった工程で行われている単位操作の条件が製品の品質に大きな影響を与えることから、化学工学の単位操作を用いる食品工学は、食品の開発や品質改良、コスト削減などにとってたいへん有効な学術領域であるといえる。

### 3. 食品における化学工学的手法の限界と効用

ところが、食品製造工程に多くの単位操作が使われているからといって、実際に食品メーカーで新しい工程や製品の開発に食品工学の手法が有効に使われているかという点、必ずしもそうではない。これにはいくつかの理由が考えられる。

まず、食品は非常に多くの成分からなる複雑な系であり、そのすべての成分の物性値がわかっておらず、またそれら成分間の相互作用なども不明なことが多い。そして、そういった複雑さのために、単位操作で用い

られる理論式の適用が困難であったり、単純化したために理論通りの結果を得ることが難しかったりといったことが起こりやすく、食品製造工程に対する工学的手法の適用が進んでいないというのが実態ではないだろうか。

また、食品の場合は、単位操作を行うときに、トレードオフの関係にある複数の目的を同時に達成することが求められることも、理論的なアプローチを妨げている要因であろう。食品の乾燥を例にとると、乾燥工程の第一の目的は、水分を減少させることによって水分活性を下げ、保存性を向上させることである。したがって、その乾燥後の製品が必要とする保存性を確保できるように水分を除去することが重要である。こういった観点では乾燥で最も重要な目的変数は水分ということになる。ところが厄介なことに、目標とする水分含有量まで水を除去したことにより、もともと食品のもっている香気成分などが失われたり、乾燥中の温度次第でメイラード反応などが起こり、味や香りや外観が損なわれてしまったりする。このように食品の場合は常にいくつもの目的を同時に達成できるような工程条件を導き出すことが求められるため、理論的な検討ではなく、様々な条件の組み合わせによって数多くの実験を行い、目的とする物性値や品質が達成できるところを探るといったやり方に陥ってしまう傾向がある。

表1 インスタントコーヒー工程の単位操作と関連物性値

工程	目的	単位操作	操作主要パラメータ	物性値の例
ブレンド	風味の設計	攪拌・混合	時間	比重
焙煎	香気・呈味成分の生成	伝熱	温度/時間 熱媒流速	熱伝導率/熱伝達率 光学的吸収特性(焙煎を色で管理)
		攪拌・混合		比重
抽出	固形分の抽出	抽出	温度/時間 溶質溶媒比	熱伝導率/熱伝達率 可溶成分拡散係数
香気成分回収	香気成分の分画・濃縮	蒸発/蒸留/凝縮/吸着	温度/圧力/時間/吸着材	揮発性成分の拡散係数
濃縮	乾燥工程での乾燥効率向上と香気成分保持率向上	蒸発	温度/圧力(真空度)/時間	揮発性成分の拡散係数 粘度
		伝熱(凍結濃縮)	温度/時間	熱伝導率/熱伝達率 粘度
		濾過(膜濃縮)	温度/圧力/時間	浸透圧 粘度
凍結	真空乾燥時の昇華	凍結(伝熱)	温度/時間	熱伝導率/熱伝達率 比熱・密度 粘度
真空乾燥	昇華による水分の除去	乾燥(伝熱/昇華)	温度/圧力	熱伝導率/熱伝達率 水分(活性)
噴霧乾燥	蒸発による水分の除去	乾燥(伝熱/蒸発)	液滴径 温度/時間	粘度/表面張力 熱伝導率/熱伝達率 揮発性成分の拡散係数 水分(活性)

さらに、ベンチスケールでの検討では理論式とよく合ったとしても、スケールアップしたとたんに全く異なる品質になってしまったということもよくある。「結局工場現場で実際のスケールで検討しなければわからない」という経験を繰り返すうちに、「どうせ完璧に予測できないのだからモデル実験や計算に基づく検討は意味がない」ということになり、ベンチスケールでのモデル実験やパイロットプラントでの検討を飛ばして、いきなり大きなスケールのプラントで試行錯誤の検討を行うというパターンに陥ってしまう場合も多いのではないかと思う。

食品製造では複雑な系の対象物をいろいろな制限のある条件下で加工する必要があるからといって、食品工学的な検討を諦めてしまってはもったいない。重要なことは、すべての現象が工学的モデルで完璧に説明できなくても、ベンチトップでのモデル実験やパイロットスケールでの理論的な検討などを行うことによって、工場で装置を設計したり製造条件を決めたりする際に、「こっちの方向に行けばいい」、「そっちは絶対行ってはいけない」といった「道しるべ」を得ることができるということである。基礎的な検討は回り道のように思われるかもしれないが、生産実機で何百トンという大量の原料を使って、いろいろなパラメータや条件を振ってやみくもにテストをしなければならぬところを、あらかじめベンチトップやパイロットプラントといった小さなスケールで理論的な検討を行い、「道しるべ」を用意しておくことによって、実機ではパラメータや条件を絞り込み、数トンの原料で検討が終わるかもしれないのである。無駄な試作を避けることで、原料や時間の節約ができ、結果としてよい製品を低いコストで作ることにつながるのである。

#### 4. おいしさの追究と食品工学

食品には栄養素やカロリーを供給する一次機能、味・香り・美味しさなど感覚的機能である二次機能、生体調節機能（生体制御、疾病の防止、疾病の回復、体リズムの調整、老化抑制）の三次機能という3つの機能があるとされている。

一次機能は栄養素の種類と量で数値化が可能であることから、食品製造の工程におけるこれら栄養素の消長は、分析することによって定量的にとらえることができ、そこで起きている現象をいろいろな工学的手法を用いて解析することが可能である。

また三次機能は、近年機能性表示食品や特定保健用食品（トクホ）などによって一般の人にも注目されている機能である。私たちが普通に食事によって摂取している他の成分との相互作用まで考えるとまだ不明なところはあるものの、機能に関与する成分は臨床試験

などで明らかになり、その定量も可能であることから、この成分を工学的手法で解析したり制御したりということが可能である。

このように食品の製造工程において標的とする成分が明確でかつ定量が可能であれば、製造工程を構成する単位操作において、その成分の消長を工学的な手法で明らかにすることができる。また、食品の製造で非常に重要な殺菌においても、必要な賞味期間や品質を確保するためにはどの菌を死滅（菌数の減少）させればよいのか、ということがわかっていれば、殺菌条件は理論的に導き出すことができる。

ところが、二次機能である「おいしさ」は、その本質は何なのかは今もってなぞのままである。「おいしさ」は人間が五感（味覚、嗅覚、触覚、視覚、聴覚）から得られる情報を自分の経験なども照合しながら導き出す感覚である。たとえミシュラン星付きレストランの料理でも、目隠しをして食べれば必ずしも全員がおいしいと感じるかどうかはわからないということは、皆さんも某テレビ番組などを通じて感じているであろう。また、多くの人がおいしいと言っている自分はそのとは思わないといったことや、同じ食品でも誰と食べるか、どんな環境で食べるか、どんな気分の時に食べるか、空腹のときに食べるか満腹で食べるか、など自分一人でも状況によって「おいしさ」は変化することは、だれもが経験したことがあるのではないだろうか。

このように、食品の第二次機能である「おいしさ」は定量的に扱うことが大変困難なものであるにもかかわらず、食品メーカーは「おいしい」食品を作ることと期待される。

食品製造の工程では常にこの「おいしさ」というとらえどころのないものを目的変数として、様々なパラメータを操作することになるのであるが、そもそも本当においしいものを作り出せたのかどうかを測るはつきりとした「モノサシ」がないことが、食品の開発や製造に関わる人たちにとっての大きな課題である。

おいしさの「モノサシ」がわからないからといって、例えばラーメン店にできる行列の長さを「モノサシ」にして、長い行列のできる繁盛店の味を再現しようとしても、その成分があまりにも多くかつ複雑で、その成分の中で何がおいしさに寄与しているのかがよくわからず、結局開発担当者や社内の一部の人の主観や思い込みで配合や製造条件を決めてしまうといったことが起こりがちである。

このように、おいしさを定量化することが難しいことと、おいしさに寄与する成分が何かがよくわからないということが、食品の開発や製造において科学的な手法の適用を阻害する大きな要因となっている。

最近ではメタボロミクスやケモメトリクスなどの手法を応用し、非常に複雑な系である食品の成分や官能

評価による属性を、官能評価多変量解析によって消費者の嗜好と結びつけ、おいしさに大きく寄与する成分を見つけ出し、その成分を増減することによっておいしさを制御することが行われている。もちろん万人がおいしいという食品はないのであるが、「大多数においておいしいと評価される」、「競合製品に比べて相対的においしいと評価される」、「改良前と比べておいしいと評価される」というような、ある条件下でのおいしさの定量化は可能であると考える。

図2は、消費者に複数のコーヒー製品を飲んで嗜好(好き-嫌い)を点数化してもらい、その嗜好得点と、香气成分(揮発性成分)、呈味成分、ヒトの官能評価による特性の関係を多変量解析し、嗜好への寄与度の大きい成分や官能特性を見つけた試みの一例である。

コーヒー中の香气成分である3-Methylindoleや4-Vinylguaiacole、呈味成分のcaffeineやクロロゲン酸が、官能特性である「削った木の香り」や「穀物の香り」そして「苦味の強さ」と強い正の相関があり、その官能特性が消費者の好き嫌いを点数化した「嗜好得点」と高い正の相関があることが示された。すなわち、これらの成分を制御することによって官能特性が変化し、より嗜好度の高い「おいしい」製品を作ることが可能であることが示唆された [1]。

このような手法によっておいしさに寄与する成分を特定することができれば、他の成分との相互作用などまだ解明できていないことはあるものの、それを「道しるべ」としてよりおいしい製品に効率的にそして低コストで近づくことができる。これはその成分を増減するために原材料を変更したり、食品添加物を使ったりすることで達成できる場合もある。しかし、日本の食品メーカーはできるだけナチュラルな原材料を使ってシンプルな原材料表示を目指している。原材料表示に読めないほど細かい字で何行にもわたって原材料や

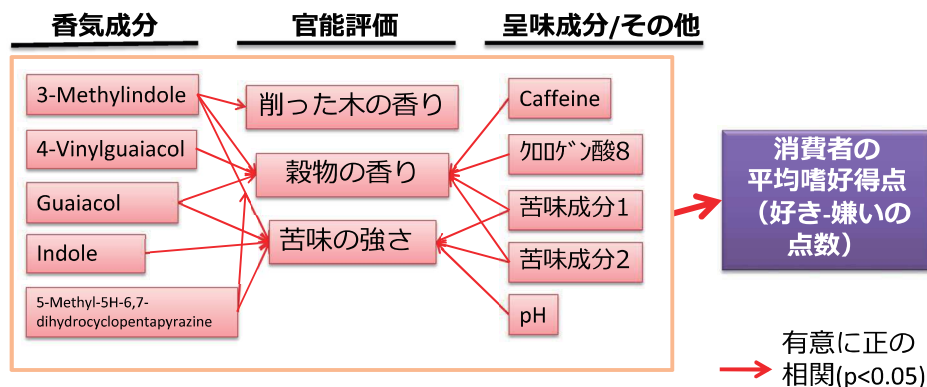
食品添加物が書かれている商品を日本の消費者は求めてはいない。また、原材料が増えればその調達も含めてコストが増加する。おいしさの達成と、この表示やコストの課題を同時に解決するためには、工程条件を制御したり、新しい装置を開発したりすることが有効であり、まさに食品工学の出番となる。

## 5. 食品メーカーにおける食品工学の可能性

しかし、食品メーカーでは時間的な制約などの理由によって、製造現場での経験などが優先され、食品工学手法を応用した検討や研究開発が十分に行われないことも多々見受けられる。この理由はこれまで述べてきたように、食品という複雑で気まぐれな対象物に関する課題に対して工学的な手法の効果的な使い方を見いだせず、結果として企業の経営に対するインパクトを十分に示し切れていないことが大きな要因であろう。

一般的な食品メーカーの企業としての目的は、高い品質 (high quality) の商品を、多くの人が取れる価格 (affordable price) で提供し、喜んでもらうということであると考える。決してミシュラン星付きレストランの味を再現した製品を、スーパーで1食1万円で提供して一握りの人に喜んでもらうということではないはずである。

食品メーカーの技術者たちは、とらえどころのない「おいしさ」を「見える化」する努力を続けると同時に、それをベースとした食品工学の手法を用いた研究や検討をさらに進めることが、よりおいしい製品をより求めやすい価格で多くの人に提供するという目標に到達する確率を大幅に引き上げ、結果的に企業の経営に対して大きなインパクトをもたらすことを改めて強く認識することが必要であると考える。



官能評価スコアおよび成分の機器計測値より嗜好度の予測が可能

図2 消費者の嗜好得点と官能評価および香气/呈味成分量との相関解析

## 6. アカデミアのみなさんへ

これは大学で食品工学を学ぶ学生や指導する教員にとっても重要な視座である。食品製造において食品素材に何らかの加工を加えると、そこには必ず化学工学の単位操作が使われており、すでに化学工学やそれをベースとする食品工学は食品産業に大きな貢献をしているといえる。したがって、食品工学を学んだ学生にとっては食品メーカーはその能力を発揮できる場であるはずである。しかしながら、現実の企業では、工学的な検討が十分に行われ、食品工学を学んだ学生のスキルや経験が十分に発揮できるかということ、難しいことも多い。大学教育に携わる研究者も、食品工学の社会への貢献や企業の経営へのインパクトをこれまで以上に重要な判断基準として、食品工学の手法を用いた様々な研究を進めていくことが重要であろう。

## 7. おわりに

2018年の日本の食品産業全体(外食産業, 農林水産業,

流通業を含む)の市場規模(国内生産額)はおよそ117兆円,そして,その中の食品製造業だけをとってもその生産額は約38兆円という大きな産業である[2]。また,昨今の新型コロナウイルスの世界的な感染拡大により,世界的なフードサプライチェーンの脆弱性が顕在化し,日本の安全保障の観点からも国内における食品産業のありかたは今後見直しを迫られるであろう。そこで,アカデミアとインダストリーの連携の強い日本食品工学会の特徴,強みを生かして,大学も食品メーカーも,これまで以上に食品の開発や製造への食品工学的なアプローチに挑戦し,日本食品工学会がこれからますます発展することを期待したい。

## 参考文献

- 1) 山本由紀ら: 日本食品工学会第17回年次大会講演要旨集, p. 71 (2016)
- 2) 農林水産省: 平成30年農業・食料関連産業の経済計算(概算) (2020)