

食品製造における速度過程が関与する現象の工学的解析



京都大学大学院農学研究科 教授 安 達 修 二

1. はじめに

1次生産物（農水畜産物）を加工して食品または食品素材をつくる科学（口に入るまでの科学）と、それらを摂取したときに体内で起こる現象を解明する科学（口に入ってから科学）を包含する農芸化学における食品科学が、人類の健康で豊かな生活に貢献するには、両者の調和した進展が不可欠である。演者は、前者の食品製造プロセスに関する研究を手掛けてきた。ヒトが恒常的に摂取する食品を製造するには、摂取後に体内で起こる現象や材料のもつ化学的な特性に対する深い知識を必要とする。これが農芸化学分野で食品製造工学を研究・教育する意味と理解している。

農芸化学分野の研究は、着目する対象に対して有効な多くの手段を用いて、その理解の深化を図る研究手法が多い。一方演者は、物質や熱などの移動速度過程に関する移動現象論と（生）化学反応の速度過程を定量的に扱う反応工学の考え方を、食品製造プロセスの効率化や製造過程で起こる現象の解明に適用する手法で、安全な食品を安価で合理的に製造するための基礎的な研究を行ってきた。その過程で得られた主な成果は以下の4点であり、そのうちの2点（2と5）について、少し詳しく述べる。

2. 連続クロマトグラフ装置の設計法の確立とバイオリクターとの融合によるさらなる効率化

液体クロマトグラフィーは樹脂充填層内における溶質成分の移動速度の差を利用した分離・分析法であり、停止したベルトコンベア上をウサギはカメより速く走り、ウサギが先に、カメが後からベルトコンベアの他端に到達することに例えることができる。ここで、ウサギとカメの移動速度の中間の速度でベルトコンベアを逆方向に回転させると、ウサギとカメは異なる方向に移動する。これが移動層型連続クロマトグラフにより2成分を連続的に分離する基本的な考え方である。しかし、充填剤を移動させることは困難であるので、小分割した複数のカラムを連結し、液の入口と出口を所定の周期で液流れ方向に切り替えることにより、相対的に充填剤を液とは逆方向に流す擬似移動層操作が採用される。本装置は、原料（ウサギとカメ）供給口、溶離液供給口、吸着性の弱い成分（ウサギ）の取出口、吸着性の強い成分（カメ）の取出口により4つのゾーンに分割され、小分割したカラムの大きさ、その各ゾーンへの配置本数、流路の切替周期、各ゾーンの液流速、供給・取出液の速度などの多くの操作変数を適正に制御しなければ、効率的な分離は達成できない。このように複雑な装置に対して、吸着剤が連続的に移動すると近似して、定常状態における装置内の濃度分布を簡便に求める数式モデル（連続移動層モデル）を提出し、本モデルに基づいて、吸着剤流れと液流れのそれぞれによって運ばれる溶質速度の比を表す無次元パラメータと各ゾーンの役割に着目して、良好な分離が達成できるように各ゾーンの流速の範

囲を合理的に決定できることを示した。また、各ゾーンの小カラムの寸法と本数を決定する方法（装置の設計法）を提案した。さらに、実際の擬似移動層の操作法に忠実に、非定常状態における濃度分布も計算できる数式モデル（間歇移動層モデル）も提出した。これらの数式モデルは、基本的な設計法として現在でも広く利用され、パソコンで簡単に利用できるパッケージをWeb上で無料公開している。

また、擬似移動層操作が採用される高果糖異性化糖の製造装置の一部に固定化グルコースイソメラーゼ反応器を組み込むことにより、分離工程で使用される溶離液の量を大幅に低減して溶質濃度の低下を抑えるとともに、目的成分であるフルクトースの回収率を高めて、濃縮工程の負担を軽減する省エネルギーなプロセスを提案した。

3. 亜臨界水の食品加工への利用に関する基礎的並びに応用的検討

常圧における沸点から臨界温度の範囲（100～374℃）で加圧することにより液体状態を保った亜臨界水は、常温常圧の水とは異なる特徴をもつ。一つはイオン積が大きく、酸または塩基触媒として作用する点である。亜臨界水中で糖やペプチドなどは加水分解だけでなく、縮合や異性化などを受けることを見出し、速度論的に解析した。もう一つの特徴である比誘電率が低く有機溶媒に近い性質をもつことに着目して、農水産未利用資源から抗酸化性物質などの有用な物質を効率的に抽出する方法を提出した。なお、これらの過程では抽出だけでなく、加水分解やメイラード反応なども併発する。さらに、亜臨界条件に保持した水とエタノールなどとの混合液は特異な特性をもつことを見出した。

4. 粉末化による脂質の酸化抑制機構の解明

液状脂質と食品高分子の濃厚水溶液を乳化して得られるO/W エマルジョンを噴霧乾燥などにより急速に脱水して微小な油滴を食品高分子の乾燥層で被覆（粉末化）すると、脂質の酸化が大幅に抑制される。これは、食品高分子乾燥層が酸素の移動に対する障壁になるためと考えられていた。しかし、脂質の酸化動力学と酸素の拡散速度を連立して得た脂質の酸化過程に対する考察から、粉末化による脂質の酸化抑制は酸素の拡散速度の低下だけでは説明できず、粉末中での脂質の多様な存在状態を考慮するモデルにより現象をよく説明できることを示した。

5. パスタの乾燥および茹で過程における水の移動機構の解明

食品には、保存性を高めるために乾燥し、喫食時に復水するものも多い。パスタは小麦の一種であるデュラム・セモリナと水だけからつくられており、食品の乾燥や吸水（茹で）の過程で起こる現象を検討するには好適である。クラックを発生させることなく短時間に乾燥する条件の決定や茹でパスタの食感の制御には、パスタ内での水の移動機構を知ることが不可欠であ

る。そのためには、1本のパスタ内の水分分布を測定する必要があり、核磁気共鳴画像法 (MRI) などが用いられているが、装置が極めて高価であり、かつ原理的に低含水率の領域は測定できず、解像度も低い。とくに、パスタの中心に芯が残り (含水率が低く)、食べ頃といわれるアル・デンテ (al dente) の水分分布を正確に測定できない。そこで、含水率に依存してパスタの色が変化することに着目し、デジタルカメラで撮影した画像を解析することにより、低価格で低含水率の領域まで高い解像度で水分分布を正確に測定する方法を開発した。本法により、パスタ表面の含水率はすぐには平衡値とならず、時間とともに増加すること、表面付近には含水率分布が平坦な領域があり、それが時間とともに広がること、さらに、吸水初期にはパスタのガラス転移に起因する急激な含水率の勾配が存在することを見出した。これらの知見は、パスタの茹で過程を単純な水の拡散と捉える従来の考え方では説明できない。太さの異なるパスタの吸水量を外挿して得られる無限に細い仮想的なパスタの吸水速度と、グルテンのみで調製したパスタの吸水速度から、表面の含水率の変化はグルテンの構造の緩和に起因することを明らかにした。また、その過程が律速であり、構造が緩和すると短時間でデンプン粒が吸水・糊化して、ほぼ等方的な膨潤により平坦な含水率分布の領域が形成され、さらに内部では含水率の勾配により水が拡散する機構を提出した。また、パスタのレオメータによる物性値と水分分布を検討し、食感との関係を明らかにした。さらに、乾燥条件の異なるパスタの茹で過程での水分分布とレオメータによる物性値の測定から、乾燥条件を制御することにより茹でパスタの食感を合理的に制御できる可能性を示した。

また、生パスタの乾燥条件を合理的に決定し、製品の含水率を適正に制御するには、予熱期間を考慮することが重要であることを明らかにした。さらに、乾燥期間中にクラックが発生しないように、生パスタは温度と湿度を複雑に変更して乾燥され

るが、種々の温度と湿度における乾燥速度に及ぼす含水率の影響を体系的に測定し、任意のプログラムで温度と湿度を変えたときの乾燥過程を正確に予測する方法を確立した。

6. 結 び に

農芸化学は目的指向型の応用研究であり、企業と大学がそれぞれの役割を分担して、目的を達成することが必要である。そこで、大学に所属する研究者として、関心はあるが商品開発などには直結しないため、食品企業等では検討し難い、プロセスの設計法の開発、新しい食品加工法の可能性や食品加工プロセスで生起する現象の解明などを手掛けてきた。このように、課題解決型の研究スタイルであるが、工学的な手法を適用することにより、課題ごとに、ささやかながら新規な方法の開発や機構の解明につながる知見が得られたと考える。食品を合理的に製造するための「如何に」を取り扱う食品工学は、地味な分野であるが、食品科学の均衡のとれた進展には大切な分野と考える。このような分野の面白さを感じていただければ幸いである。

謝 辞 食品工学分野の研究を手掛ける機会を与えていただき、今日に至るまで長きにわたりご指導を賜りました松野隆一先生に心より御礼を申し上げます。また、研究者としての手ほどきにご指導をいただきました中西一弘先生並びに工学分野に奉職する機会を与えていただきました橋本健治先生に厚く御礼を申し上げます。これらの研究は、演者が勤務した京都大学工学部化学工学科、新居浜工業高等専門学校工業化学科、静岡県立大学食品栄養科学部食品学科および京都大学農学部食品工学科 (現 大学院農学研究科食品生物科学専攻) で行ったものである。ともに研究を進めていただいたスタッフや卒業生並びに企業の皆さまに感謝いたします。また、多くのご支援をいただきました日本農芸化学会、とりわけ関西支部の皆さまに厚く御礼を申し上げます。