

# 食品工学のさらなる発展への期待

小林 功

国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 食品研究部門

## 1. はじめに

一般社団法人日本食品工学会が設立20周年を迎えられることを、ご同慶の至りに存じます。私が、初めて食品工学と接点を持ったのは、今から23年前の春です。大学4年生に進級する時に化学工学研究室に配属された直後、外研生として農林水産省食品総合研究所・食品工学部・反応分離工学研究室で卒業研究を開始して以来、食品乳化・分散工学および食品消化工学を中心に研究を進めてきました。今回、『食品工学のさらなる発展への期待』について執筆する機会に恵まれました。“愚者は経験に学び、賢者は歴史に学ぶ。”は、初代ドイツ帝国宰相、オットー・フォン・ビスマルクの言葉とされています。ここでいう「経験」と「歴史」は、それぞれ「自分の経験」と「他者の経験」を意味します。本稿では、食品工学に関わる研究・開発に携わっている方々の一助になればとの思いを込めて、これまで進めてきた研究について回顧した後、食品工学の未来への期待を述べたいと思います。

## 2. 食品乳化研究

卒業研究のテーマは、当時黎明期にあった「マイクロチャンネル (MC) 乳化」に関するものでした。MC乳化が開発された経緯については、恩師である中嶋光敏先生 (筑波大学特命教授) が述懐されています [1]。あれから20年余りたった今もMC乳化研究を進めている

のですから、外研生として新たな環境に飛び込んだことは、私の人生にとって大きな転機となったのは間違いありません。単位操作である乳化は、食品を製造する際によく用いられる加工プロセスの1つです。従来の乳化機では、得られるエマルジョン (乳化物) の粒子径分布が広く、平均粒子径の制御も容易ではありません。1990年頃、粒子径分布が狭いエマルジョンを製造可能な「膜乳化」が開発されました。独特な微細構造を活用したMC乳化では、粒子径が非常に狭いエマルジョンが得られるとともに、液滴作製の様子をリアルタイムで顕微鏡観察できます。加工プロセスで起きている現象を直接観察・可視化することの大切さは、MC乳化に関する実験や研究発表を通じて強く実感しました。

博士課程に進学した頃、MC乳化の生産性向上に有効な貫通型MCアレイに関する研究に取り組み始めました。最初の貫通型MCアレイ基板は、東京大学生産技術研究所・藤田博之教授 (東京大学名誉教授) の研究室で製作され、一連の微細加工プロセスの手伝いをさせていただいたのを今でも鮮明に憶えています。流路断面が丸い貫通型MC (直径 $10\mu\text{m}$ ) を通過した分散相は膨張するのみでしたが、矩形断面の貫通型MC (短辺 $10\mu\text{m}$ 、長辺 $30\mu\text{m}$ ) を用いることで均一径の微小液滴を安定的に作製できることを見出しました。この研究成果に関する特許を出願した後に発表したのが、日本食品工学会第2回 (2001年度) 年次大会でした。それ以来、在外研究で不在の時期を除いて毎回参加しています。実は、最初に製作した矩形貫通型MCのアスペクト比 (長辺/短辺) は、閾値よりも辛うじて大きかったことがその後の研究で明らかになり、今、思い返しても冷や汗が出てきます。

貫通型MCに関する特許が登録されて間もなく、試験研究用のMC乳化装置が上市 (株イーピーテック) されました。博士課程の最終学年に在籍中のことでした。その後、ポスドク時代および独立行政法人食品総合研究所に職を得た後も、貫通型MC構造の非対称化や貫通型MCアレイ基板の大型化などの改良を重ねつつ [2]、食品メーカーを含む多数の企業との産学連携活動に携わってきました。企業での就業経験がない私にとって、産業界の方の考え方や取り組み方を学べる貴重な機会になっています。

貫通型MCから微小液滴が作製される現象を解析し

### 著者略歴

小林 功 (Isao Kobayashi)

国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 食品研究部門  
上級研究員

1998年 東京理科大学工学部第一部工業化学科卒業

2003年 筑波大学大学院農学研究科博士課程修了 博士 (農学)

2003年 日本学術振興会特別研究員PD (筑波大学応用生物化学系)

2005年 独立行政法人食品総合研究所 研究員

2008年 独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構 食品総合研究所 主任研究員

2010年~2011年 カリフォルニア大学デイビス校 客員研究員 (農研機構長期在外研究員)

2015年 筑波大学グローバル教育院 准教授 (協働大学院) (兼任)

2016年~現在 国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構 食品研究部門 上級研究員

2019年 筑波大学グローバル教育院 教授 (協働大学院) (兼任)

た際、計算機シミュレーション手法であるCFD (Computational Fluid Dynamics) を利用しました。研究室のパソコンでも実行できる市販CFDソフトウェアを利用した研究に着手できたのはよかったものの、試行錯誤を重ねながらも非円形貫通型MCを用いた液滴作製を再現できない時期が半年近く続きました。初期投資のプレッシャーが次第に増していき、半ば諦めかけていた時、ようやく非円形貫通型MCから微小液滴が安定的に作製される現象の再現と要因の解明に成功しました。安堵したのも束の間、今度は膨大な画像・数値データと格闘する日々が始まりました。CFDについては、食品工学分野においても利用が広がりを見せています。とくに、食品の加工・流通・陳列などのプロセスを設計・解析する際に有用なツールであるといえます。

近年、(非対称)貫通型MC基板を用いて粗エマルジョンを均質化するMCホモジナイザーを開発しました。MCホモジナイザーの利用により、粒子径分布が狭いエマルジョンを単回処理で製造することが可能です。MCホモジナイザー装置は、今年中に上市される見込みです。

### 3. 食品消化研究

2005年頃から、エマルジョンの*in vitro*消化研究に携わり、摂食された食品の消化動態に関心を抱くようになりました。2007年が終わりを迎えた頃、筑波大学・市川創作准教授(筑波大学教授)および当時、市川先生の研究室に配属されて間もなかった神津博幸氏(筑波大学博士)と共同で、ヒト胃のぜん動運動に駆動される内容物の流動状態に関する研究に着手しました。胃壁でのぜん動運動は、食品の胃内消化挙動に影響する主要因子であると考えられています。しかし、従来の胃内消化性試験では、胃壁のぜん動運動が考慮されていない、もしくは定性的に考慮されたものに留まっていた。

ぜん動運動が定量的に模擬された食品の胃内消化性試験装置(ヒト胃消化シミュレーター(GDS; Gastric Digestion Simulator)と命名)の開発に着手する前、ぜん動運動に誘起される液状胃内容物などの流動状態についてCFDおよびPIV(Particle Image Velocimetry)を利用して詳細に解析しました。MC乳化研究で利用してきたCFDが、別の研究でも活かされたのは幸いでした。胃の出口(幽門部)を模した系による流動シミュレーション結果は、胃全体を模した系による結果と類似していることが示され、GDSの開発へと進みました。GDSの開発コンセプトは、ヒト胃内消化プロセスの特徴を抽出・単純化して再現することでした。GDSに具備されたぜん動運動は、成人を対象とした*in vivo*試験

による知見、すなわち臨床データを参考にして設計されたものです。また、食品の消化挙動を直接観察できる装置構造を採用したのは、MC乳化研究において「観る」ことの重要性を強く実感したことも関係しています。GDSを利用した様々な固形食品(モデル)の胃内消化挙動に関する研究を実施しつつ、人工胃液の分泌機構と胃消化物の排出機構を備えた連続型GDSの開発などの改良を重ねていきました[3]。新たな胃内消化性試験装置としてのGDSに関する基本特許は実施許諾され、今年中に上市される見込みです。*In vivo*手法を用いた胃内消化性試験には、倫理面や被験者数などの面で大きな制約がありますので、食品分野などにおけるGDSの活用が期待されます。

消化研究を開始して以来、「なぜ、乳化とは随分異なる内容の研究を展開しようと思ったのですか」といった質問を度々受けてきました。乳化と消化は、ともに「プロセス」という点で共通しています。摂食前の加工プロセスとしての乳化は、摂食後の体内プロセスである胃内消化とかけ離れているようにみえます。けれども、私の中では「プロセス」という共通軸に沿って存在しています。MC乳化研究と胃内消化研究は、分子スケールからマイクロ・マクロスケールにわたる「マルチスケール」を対象としています。私たちは、主に化学工学の方法論を用いて研究を進めてきました。MC乳化研究では食品モデルのような単純系を用いる場合がほとんどであったのに対し、GDS研究では複雑系である食品そのものも多用してきました。研究の大きな柱が2本あることで、メリットを感じる時があります。研究が順調に進まないことは間々ありますし、それぞれの研究の進捗状況も異なります。「複数の流れ」を持つておくことで、1つの流れが停滞していても、もう1つの流れが進行することで踏み止まれます。

2010年の夏から1年間、米国カリフォルニア大学デイビス校・生物農業工学科・食品工学研究室(R. Paul Singh 特別教授(カリフォルニア大学特別名誉教授))で在外研究を行う機会を得ました。当時の食品工学研究室では、食品の胃内流動・消化やナッツ類の貯蔵安定性に関する研究が進められていました。私自身は、乳化研究を行っていたこともあり、「Model Stomach System」と呼ばれる装置を用いたナチュラルチーズの*in vitro*胃内消化挙動に関する研究に携わりました。研究室は「少数精鋭」という言葉がふさわしい雰囲気です。Singh先生と直接議論を交わしながら各自の研究を精力的に行っていました。Singh先生と議論を重ねていった中で、食品が複雑系であり、かつ個体差や季節変動もあることを踏まえて食品工学研究を展開していくことの大切さを深く学ぶことができました。MC乳化研究では欧州の研究者と交流することが多かった私にとって、米国で研究生活により三視(視点・視野・視座)

を涵養できたのは大きな収穫でした。外国で研鑽を積む若手研究者が少なくなつてから久しいように感じます。たとえ、長期滞在が難しい環境や状況であっても、食品工学の世界的な潮流に触れる機会をもつていただけることを願っています。

#### 4. さらなる発展への期待

今回、私が携わってきた主な研究について振り返つてみたことで、「ものづくり」を強く意識しながら研究を進めてきたことを再認識しました。「ものづくり」は工学の根幹をなす概念です。これは、工学(engineering)という言葉自体がラテン語の「ingenium」に由来している説があることから窺えます。食品工学は、食品を対象とした「ものづくり」に関わる実学であり、産業界との距離が非常に近いという特徴があります。実際に、日本食品工学会の設立前も、食品化学工学研究会、食品化学工学特別研究会、および食品工学特別研究会として産学間の交流が活発に行われていたと伺っています。日本食品工学会に入会して以来、年次大会への参加や委員会での活動などを通じて、世代や産学の垣根を超えた交流が積極的に行われているのを肌で感じます。こうした良き伝統の継続を切に願っています。

人類が生命活動を営んでいる限り、食品産業が必要であることは言わずもがなです。すなわち、食品工学の必要性が今後も失われることはないと考えられます。一方、食品産業および食品工学を取り巻く国内外の動向は、時代の流れとともに変化し続けています。例えば、食品工学分野における最大の国際会議である International Congress on Engineering and Food (ICEF) では、ポストハーベストおよび摂食後の消化プロセスなどを含めたフードシステム全体を俯瞰して食品工学に向き合っている印象を受けました。先達の諸先生方によって体系化された食品工学の基盤を継承しつつ、未来の食品工学の明確な理想像を描いて社会に貢献できる研究開発に取り組んでいく姿勢が求められているように思います。この点に関して、日本食品工学会が重要な役割を果たせるのではないかと期待しています。

「食品工学」という共通言語をもつ研究者と技術者が手を携えれば、国内外の舞台で食品工学、食品産業、および消費者に貢献できると考えています。世界人口の増大および平均寿命の延伸が続いている今、安全性と信頼性が担保された食品の安定供給および高付加価値

・差別化が求められています。2015年の国連サミットで採択された「持続的な開発目標 (SDGs)」の達成を意識した食品の研究開発が、今後さらに活発化していくことは想像に難くありません。水、エネルギー、および植物性素材の有効利用、情報技術との融合、ならびに食品ロスの削減に対する関心も非常に高く、国内外で様々な提案や取り組みがなされています。食品工学分野においても、国や地域の伝統や文化を尊重したうえで、心身の健康および長寿に資する食品の研究開発を推進していくことが望まれます。

今年に入ってから、COVID-19の感染が世界的に急拡大しました。すでに、各種産業に甚大な影響を及ぼしています。急速に進展したグローバル化の影響をまざまざと思い知らされたと同時に、部分的ではありますが脱グローバル化の動きも見受けられます。勤務・学習形態を含めた世界的な移動制限が続き、停滞感や閉塞感に包まれている状況に置かれています。たとえ緩やかでも、歩みを止めることなく進んでいくことの大切さを実感しています。日本食品工学会第21回年次大会が“ウェブページを活用したポスター形式で開催”されることを知り、大会実行委員の先生方の強い思いが伝わってきました。私見ではありますが、「何ができるか」「どうしたらできるか」といった自問・質問をしていくことは、研究・開発活動を含む様々な活動にも有益であると考えます。今後、予想だにしない急激な変化の波が押し寄せてきても、国内外の変化に対応しながら成長、進化していける人物や組織であれば、乗り越えていけるに違いありません。

末筆ながら、一般社団法人日本食品工学会の益々のご発展を祈念いたします。

#### 引用文献

- 1) M. Nakajima; “Food engineering as “Becoming”” (in Japanese). Japan Journal of Food Engineering, Special Issue of the 10th Anniversary of the Foundation, 72 (2010).
- 2) I. Kobayashi; “Development and CFD analysis of asymmetric straight-through microchannel emulsification” (in Japanese), Jpn. J. Food Engr., 16, 147 (2013).
- 3) I. Kobayashi, H. Kozu, Z. Wang, S. Ichikawa; “Visualization and evaluation of disintegration of food particles using a human gastric digestion simulator” (in Japanese), Nippon Shokunin Kagaku Kogaku Kaishi, 65, 533 (2018).