食品熱操作から見た食品工学とそれを支える技術

酒　井　　昇

日本食品工学会副会長，東京海洋大学

1. は　じ　め　に

日本食品工学会が本年8月に設立20周年を迎えたことは誠に喜ばしいことであるとともに，感慨深いものがある．設立総会と第1回の大会は2000年8月4日に，渡辺尚彦実行委員長のもとに東京水産大学（現東京海洋大学）で開催された．このとき，会場係の責任者をつとめ，大会の運営に携わらせていただいた．日本食品工学会はインダストリー関係の活動が活発であることが特徴であるが，第1回大会からインダストリアルプラザを開催している．当時，食品機械工業会で既に「アカデミックプラザ」を開催しており，逆の立場のプラザがあっても産学ともに有意義であろうと企画された．その発表会場は，数多くのパネルを教室（品川キャンパス講義棟）に並べられず，一般の発表会場と隣接させるために4階の廊下とした．「アカデミックプラザ」にならって，パネルにはご丁寧にスポットライトも取り付けた．8月の真夏に冷房の利かない廊下で皆さん汗だくになって説明していて，私としては冷や汗もので，違った意味の汗をかいた記憶がある．また，当日を含めると参加登録者は約450名と想定以上に多く，天王洲アイルのホテルで開催した懇親会にも多くの参加者を得，食べるものがたちまちなくなってしまったというのも今となっては懐かしい思い出である．

設立から20年たった今，食品工学において何が変わったのか，食品の加熱操作の視点から考えてみたい．

2. 食品工学の研究領域

食品工学会第1回大会では，6件の設立記念特別講演，シンポジウムⅠ“殺菌・洗浄工学”(5件)，シンポジウムⅡ“食品センサー工学”(4件)，シンポジウムⅢ“食品物性変換工学”(4件）の講演が行われた．これらの講演と合わせて117件の一般発表，21件のインダストリアルプラザの発表が行われた．すべての発表は質疑応答のないショートプレゼンテーションとポスター発表で，いわゆる口頭発表の形式はとらなかった．第1回の大会ということもあり，一般発表のセッションを細かく22に分類し発表を募っている．セッション分類と発表件数を表1に示す．

一方，20周年記念となる食品工学会第21回大会では，“20周年記念シンポジウム"を含む3件のシンポジウムが企画されていた．これらシンポジウムは新型コロナウイルス感染症（COVID-19）感染拡大防止のため，開催が延期されたものの，一般発表とインダストリアルプラザはすべてポスター発表とし，ウェブ上で発表資料を閲覧，電子メールにて質疑・回答する形式で開催された．未曾有の事態に，同時期に開催予定の多くの

表1　第1回大会のセッション分類

	セッション分類	件数
A	食資源の供給	0
B	保蔵・輸送	4
C	食品分析	5
D	物性・物理化学	24
E	分離・精製	12
F	濃縮・乾燥	8
G	混合・乳化	5
H	熱的操作	5
I	機械的操作	0
J	調理操作	5
K	発酵・酵素	13
L	洗浄・殺菌・除菌	15
M	センサー・プロセス制御	3
N	包装・容器	0
O	食品流通	0
P	用水・廃水	0
Q	環境・食資源循環	6
R	標準化（HACCP,ISO140000など）	0
S	特殊条件下の食品加工	2
T	複雑系と食品	3
U	食品感性工学	3
V	食品機能	4
Z	インダストリアルプラザ	21

著者略歴

酒井　昇（Noboru SAKAI）

東京海洋大学大学院教授

1980年　東北大学大学院工学研究科化学工学専攻修士課程修了

（1988年工学博士（東北大学））

1980年　東北大学工学部資源工学科　助手

1988年　東京水産大学食品生産学科　助手

東京水産大学食品生産学科　講師，助教授，東京海洋大学へ組織変更を経て

2004年　東京海洋大学海洋食品科学科　教授

現在：食品生産科学科　教授

1988–1989年　米国ラトガース大学博士研究員

2013–2014年度　日本食品工学会誌編集委員長

2015–2020年度　本会副会長

© 2020 Japan Society for Food Engineering

学会が中止を決めたなか，ウェブ開催という形で対応していただいた橋本篤実行委員長をはじめ，大会実行委員の皆様に感謝申し上げたい．ポスター発表のウェブ開催は，時間を気にせずじっくり閲覧・質問できること，他の参加者との質疑応答が閲覧できることなどメリットも多く，今後の大会のあり方を考える上で一考になったと思われる．

第21回大会は例年とは違った開催とはなったが，口頭発表のないウェブ開催にもかかわらず，一般発表件数は例年とほぼ変わらない101件であった．大会のセッション分類と発表件数を表2に示す．インダストリアルプラザに関しては，例年のような開催ができなくなったため，発表件数は例年よりも少なくなっている．また，今回はウェブ開催のため設けられていないが，International Sessionが第17回大会から設けられている．このセッションでは，研究の国際化により海外からの留学生・研究者が増え，全ての発表で英語の発表・質疑応答が行われている．

第1回大会のセッション分類（表1）を見ると，化学工学の単位操作を中心に構成されていることがわかる．化学工学会内に「食品化学工学研究会」が設置されたのを起点に，その研究会は「食品化学工学特別研究会」，「食品工学特別研究会」と名称を変え，特別研究会の期限満了に伴い，化学工学会から独立して日本食品工学会が設立された[1]経緯を考えると化学工学の単位操作が基本となっていることが頷ける．

第21回大会のセッション数は6と第1回大会に比べてかなり少なくなっているが，第1回を除いてセッション数は4～8程度であり，口頭発表のプログラム編成を考えてのことと思われる．第1回大会と比較するために，表2中の【　】内に相当すると考えられる第1回大会のセッションと発表件数を記載した．「Q環境・食資源循環」のように，その中の発表が多岐にわたり，第21回大会の一つのセッションに分類できないものは省略している．第1回大会との違いは，単位操作関連のいくつかのセッションが大きく「食品製造・加工」にまとめられていることである．その他のセッションも統合されてはいるが，良し悪しは別として，新たに加わったセッションはないことがわかる．これは食品工学がカバーしている学問領域は変わらないことを意味する．なお，食品工学学問領域の詳細については食品工学会ホームページを参照されたい．また，創立5周年記念に出版された「食品工学ハンドブック（朝倉書店，2006年）および20周年記念に出版の「食品製造に役立つ食品工学事典（恒星社厚生閣，2020年）」の項目分類[2]とほぼ同じであることからも，当然ではあるが，食品工学の学問体系は変わらないと言える．

表2　第21回大会のセッション分類

	セッション分類	件数
A	食品製造・加工【G,H,J,K,Q,S(36)】	23
B	乾燥・分離工学【E,F(20)】	15
C	分析・物性・物理化学【C,D(29)】	26
D	計測・制御【M(3)】	13
E	品質管理・評価【U(3)】	12
F	殺菌・制菌・洗浄・保存【B,L(19)】	12
IP	インダストリアルプラザ【Z(21)】	8

一方，発表件数を比較すると，「分析･物性･物理化学」は第1回と第21回大会でほぼ変わらないが，単位操作に相当する「食品製造・加工」が36→23，「乾燥・分離工学」が20→15，「殺菌・制菌・洗浄・保存」が19→12とそれぞれ減少している．その分，「計測･制御」（3→13）と「品質管理･評価」（3→12）が増えている．1年のみの比較であり，どの程度のトレンドとなっているかは不明であるが，単位操作そのものに加えて，プロセスの制御，製品品質の評価が重要になってきていることが窺える．

3．食品熱操作から見た研究の移り変わり

セッション分類に見られるように，食品工学がカバーする領域は広いので，食品熱操作に絞って研究の移り変わりを見てみたい．ここでの食品熱操作（Thermal food processing）は単なる加熱・冷却のみでなく，加熱を伴う操作（殺菌，乾燥，加熱調理等）を含んでいる．表3および表4に，それぞれ第1回大会および第21回

表3　第1回大会における食品熱操作関連研究発表タイトル

番号	研究発表タイトル（16件）
D4	液状食品の誘電特性
D6	食品タンパク質の加熱による変性，凝集，重合化，ならびに分解
F6	乳化単一液滴乾燥におけるフレーバー散失機構の解析
F7	Retention of Emulsified Flavor during Spray Drying and Release Characteristics from the Powder
H1	ジュール加熱による液体の殺菌
H2	マイクロ波加熱における内部発熱モデルの検討
H3	過熱水蒸気処理の伝熱および乾燥特性
H4	冷凍食品のマイクロ波解凍
J1	デンプン食品の水分移動方程式
J2	デンプン糊化過程において生じる局所含水率のNMR法を用いた測定
J3	デンプン食品の調理（加熱）過程における水分移動に関す研究
J4	加熱調理における米粒内の糊化進行の偏光顕微鏡による観察
L1	レトルト食品の積載方法の違いによる熱伝達への影響
L2	レトルト殺菌の熱解析
L3	油水混合系における細菌胞子の局在性と熱死滅
L4	固形物を含む無菌充填食品の殺菌条件算定

© 2020 Japan Society for Food Engineering

表４　第 21 回大会における食品熱操作関連研究発表タイトル

番号	研究発表タイトル（17 件）
A06	オーブン加熱における丸鶏焼成の最適調理に関する研究
A08	サツマイモのマイクロ波加熱調理における伝熱ならびに反応の解析
A16	微粉砕米粉の製造と揚げ調理用途への適用性
A18	工業的炊飯プロセスを想定した加熱負荷による米飯状態変化の解析
B01	米粒の乾燥における新しい遠赤外線 (FIR) ヒーターの応用
B06	乳化イサダオイルの噴霧乾燥粉末化と作製粉末の特質
B08	マイクロ波照射および熱風乾燥により製造した赤肉リンゴのセミドライフルーツの色彩，総ポリフェノール含量および抗酸化活性
C22	異なる調理法によるホウレンソウ中のルテイン，シュウ酸，硝酸イオンの変動
D01	時短調理パスタの食感に関する研究
D06	麺茹で調理における水分ならびに塩分の挙動解析：LA-ICP-MS によるパスタ内部の Na イメージング
D07	食品製造設計への伝熱解析・流体解析の活用
D12	ゆで加熱中の鍋内温度分布と対流の予測と可視化
E09	食品加工におけるアクリルアミドの生成抑制に関する研究
E10	フライ過程における食用油の遊離脂肪酸の変化について
F01	容器詰伝導体の加熱殺菌時の内部温度分布に容器材料が与える影響
F08	水中短波帯加圧加熱によるソーセージの殺菌
F09	Kinetic analysis of liquid egg pasteurization process during ohmic heating

大会における食品熱操作関連の研究テーマを示す．表からわかるとおり，セッションは多岐にわたっているが，各研究テーマを食品熱操作関連とみなしたのは個人的見解である．

食品加熱操作を化学工学（食品工学）的に捉えるとメインは熱・物質移動と反応と考えられる．学問的には移動論と反応速度論である．ジュール加熱やマイクロ波加熱の場合には電磁波工学，収縮や膨潤によって変形する場合には材料力学がさらに加わる．このような観点からすると，第１回大会の研究テーマと第 21 回大会の研究テーマに大きな違いはないように見える．しかし，この 20 年間におけるコンピュータのハードとソフトの目覚ましい発展により，その中身は大きく変わっている．

私が食品工学の研究に初めて携わったのは，米国ラトガース大学故速川貫一先生の下で博士研究員として食品の乾燥についてで，その理論解析を行ったときである [3]．乾燥過程を解析するためには，熱・水分移動の基礎式を解く必要があるが，FORTRAN でプログラミングを行った．当時（1988 年）パソコンの計算能力は低く，大型計算機のバッチ処理で行ったものである．計算結果も大型プリンタに紙で出力されるため，離れたキャンパスにある大型計算機センターに車で取りに行くという今では考えられない状況で計算を行っていた．今や，同じ計算がわずか 800g のパソコンで出来るので当時を考えるとその進歩に驚きである．

第１回大会（2000 年）の頃には，大型計算機を使用せずとも，ワークステーションあるいはパソコンレベルで数値計算ができるようになっている．第１回大会では，「L2 レトルト殺菌の熱解析（水島賢一ら，味の素）」において１次元熱伝導解析ソフトを用いて殺菌のシミュレーションを行っている．また，研究室からはマイクロ波加熱に関する研究「H2 マイクロ波加熱における内部発熱モデルの検討」を発表した．この数値計算には，熱伝導方程式における食品内部での発熱量をランバートの法則から計算しているが，パラメータはマイクロ波の浸透深さと表面エネルギー強度で，電磁波工学の基礎式（マクスウェルの方程式）は使用していない．そのため，表面エネルギー強度を実測して食品内部の温度分布を予測したが，電子レンジの構造等の影響を議論することはできなかった．

20 年経過する間に，パソコンの性能が飛躍的に向上するのと同時に，アプリケーションソフトの発達も目覚ましいものがある．第 21 回大会では，研究室からマイクロ波加熱に関する研究「A08 サツマイモのマイクロ波加熱調理における伝熱ならびに反応の解析」を発表した．この研究においては，熱移動解析と電磁場解析のアプリケーションソフトを用いて計算を行っている．電磁場解析では実際の電子レンジの形状をもとにモデルを作成し，回転アンテナの回転も組み込んで計算している．また，計算結果は別のモ３次元汎用可視化ソフトを使ってアニメーション化している．これにより，以前にはできなかった電子レンジ全体の解析が可能となり，ターンテーブル型，フラットテーブル型の違いや，電子レンジ形状や導波管の位置の影響についてもシミュレーションが可能となった．

第１回大会では発表していないが，当時，研究室では缶詰内自然対流の研究も行っていた．基礎式（運動方程式，連続の式，熱収支式）をパソコンで解いて，計算結果の温度分布は等温線図，流体の流れはベクトル表示していた．当時の化学工学の常套手段であった．

その後，CFD（Computational Fluid Dynamics）ソフトがパソコン用にも開発され，パソコンレベルで流体解析ができるようになった．研究室では鍋内自然対流の解析を CFD ソフトを使って行った [3] が，パソコン画面上でアニメーション化された対流の様子を見た時には感動したものである．

以上の電磁場解析ソフトおよび CFD ソフトは他のソフトと組み合わせて使うこともできるが，基本的には単独のアプリケーションソフトである．近年ではさらに発展し，統合 CAE（Computer Aided Engineering）が利用されている．統合 CAE は基本となるプラット

© 2020 Japan Society for Food Engineering

フォームのもとに，必要に応じて電磁場解析，CFD，反応等のモジュールを組み合わせることにより，シミュレーションが可能になる．利用者にとっては必要なモジュールのみを購入すればよく，便利である．第21回大会においては，研究室から発表した「A06オーブン加熱における丸鶏焼成の最適調理に関する研究」で統合CAEソフトCOMSOL Multiphysicsを用いている．ここでは，熱伝導解析，輻射，自然対流（CFD），水分移動についてのモジュールを組み込み，オーブン全体の複雑な計算が可能となった．第21回大会では，その他にも「D07食品製造設計への伝熱解析・流体解析の活用（櫻谷修司，ハウス食品）」，「D12ゆで加熱中の鍋内温度分布と対流の予測と可視化（八川梨沙ら，お茶大）」で統合CAEが使用されている．食品工学において，食品熱操作関連に限らず，今後益々統合CAEが利用されるものと思われる．

CAEはパソコン画面上でモデルを作成し，結果も静止画あるいはアニメーションとして美しく表示されるので，利用者にとっては至って重宝なツールとなる．しかし，途中の数値計算についてはブラックボックス化し，どのような計算が行われているのかが分かりにくい．食品工学関連の学生も含めて，食品工学技術者は，ブラックボックスであるがゆえに数値計算の中身を理解しつつ利用することが肝心であると考える．また，あり得ない結果が出た時におかしいと感じ，示された計算結果が妥当なものであるかが判断できる自然観を養うことも重要である．

4．既往の技術から新技術へ

前述したように，学問としての食品工学は時代が経過しても変わらないが，時として世間から注目される技術がある．私が食品工学に初めて携わった1980年代後半に遠赤外線加熱が日本で注目され，焼成，焙煎，乾燥，殺菌，解凍等のプロセスで新たに利用された[4]．赤外線の加熱は工業的に古くから使われ，日本では炭焼きや石焼き芋でなじみのある加熱法である．にもかかわらず，新しい技術として注目されたのはセラミックス素材の効率良い遠赤外線ヒーターが開発され，製品の品質も向上したためと思われる．当時，遠赤外線焙煎コーヒーが美味しいと評判になり，「遠赤外線焙煎」のCMが印象に残っている．また，美味しく焼けるということで遠赤外線を強調した家庭用グリルのCMも流されていた．少し時代が遡るが，「違いが分かる男のゴールド・・」で懐かしい（年配者限定）インスタントコーヒーのCMでは新しい技術としてフリーズドライ製法が強調されていた．その後，遠赤外線加熱もフリーズドライも食品産業としては定着している．研究室でも遠赤外線加熱に関する論文をいくつか発表している[3]が，第21回大会の発表「B01米粒の乾燥における新しい遠赤外線（FIR）ヒーターの応用（Yvan Llave，新潟食料農業大学）」にあるように現在でも日々進歩している．

食品加熱操作において近年注目された技術として，遠赤外線加熱と同様に通電加熱（ジュール加熱）がある．通電加熱は，食品に直接電圧を印加し，電流が流れることにより発生するジュール熱を利用して加熱する内部加熱方法であり，対流や輻射により外部から加熱する方法に比べて熱効率が高く，温度制御性が良いという特徴をもつ．通電加熱の食品への応用は1900年代初頭から試みられており，米国において商用周波数の交流で通電加熱殺菌技術が確立されるなど，決して新しいものではない．しかし，電極腐食の問題等で普及しなかった経緯がある．近年，耐腐食性の電極が開発されたのと高周波数の電源を利用することにより，電極腐食を軽減する技術が開発され，食品への適用が進んでいる．第1回大会の発表「H1ジュール加熱による液体の殺菌（秋山美展ら，秋田県総合食品研究所）」にあるように，液状食品は通電加熱により連続加熱が可能であることから，殺菌を中心として開発が進んだ．その後，豆腐の製造，味噌の製造，蒲鉾の製造，畜肉・魚肉の加工，液卵の殺菌等食品産業で幅広く実用化されている[5]．

2000年（第1回大会）以降に注目された他の例として過熱水蒸気加熱がある．過熱水蒸気を用いた家庭用オーブン「ヘルシオ」が2004年に発売され，「水で焼く」のキャッチフレーズで大ヒットした．その後，各家電メーカーから過熱水蒸気オーブンが発売され，現在も多機能化が進み，進化している．食品産業でもこれに触発され，特に焼成関係で過熱水蒸気加熱装置の開発が進み，食品メーカーの利用が広がった．

第1回大会の発表「H3過熱水蒸気処理の伝熱および乾燥特性（鈴木寛一ら，広島大）」にあるように，過熱水蒸気は従来から乾燥や殺菌において食品産業で使われていた技術である．決して新しくはないが，過熱水蒸気を調理に使うことにより，食材を外はカリッと，中はジューシーに焼き上げ，余分な脂や塩分も落とせるという，いわゆる健康調理を謳い文句に販売したところ，累計販売台数200万台以上の大ヒットオーブンになっている．

発売前に脂が落ちやすいということは実験で確認できるが，なぜ落ちやすいのかを理論的に明らかにしたいということで，過熱水蒸気調理の解析について，企業と共同研究を行った[6]．過熱水蒸気調理時の脱油現象も，加熱に伴うタンパク質変性による収縮と水・油分の移動であり，まさに移動現象である．単に余分な脂が落ちるからでは消費者は納得せず，それを理論的に説明する説明責任がメーカー側に存在するとのこと

© 2020 Japan Society for Food Engineering

であった．なぜその商品が優れているのか説明責任を果たす上でも，学問としての食品工学は今後もさらに重要性を増すと考える．

5. 終 わ り に

本原稿のタイトルは，元々20周年記念シンポジウム「日本の食品工学　20年の歩みとこれからの20年」（新型コロナウィルス感染拡大防止のために延期された）を想定してつけたものである．本文で記したように，設立から20年経過しても，学問としての食品工学の領域と学問体系は変わっていないと言える．しかし，それを支える技術の進歩は目覚ましいものがあり，まさに十年一昔である．ここでは，コンピュータのハードとアプリケーションソフトについて記したが，ニューラルネットワーク等のAIの登場は革新的であり，今後その利用は避けて通ることができない技術である．実際，食品工学関連でも利用が始まっており，日本食品工学会フォーラム2020「人工知能（AI）が開く食品産業の新時代」が開催予定であった（国際食品機械工業展と合わせて開催中止）．また，ここでは取り上げなかったが，分析技術と測定技術の進歩も顕著であり，今後もこれらの新技術を取り入れていくことは必須と考える．

また，本文で記したように，既往の技術あるいは他分野で使われていた技術が新しい技術として注目されることがままある．私が学生の頃，窯業関連の授業があった．その先生いわく，粘土をこねくり回して地味に研究していたら，セラミックが工業的に重要視され，一躍研究が注目されるようになったとのことであった．また，知り合いの先生で博士論文の研究では，ただひたすら石を磨いて試料を作製し，それを破壊するという実験を行って学位を取ったが，その後ナノ粒子が工業的に注目され，一躍重要な研究となったという先生もいた．

今後の20年間でどのような技術が注目されるかを予見することは難しい．しかし，地味であっても，その基礎となる食品工学をしっかりと根付かせ，新しい技術にも対応できる体制を取っておくことが肝要である．今後も食品工学が新しい技術を取り入れて発展し，食品産業を支える礎であり続けることを期待する．

参 考 文 献

1) 安達修二：日本食品工学会設立前の活動と設立後の10年, 日本食品工学会誌, **21**, A3–A6 (2020).
2) 酒井昇：20周年記念食品工学事典の刊行について, 日本食品工学会誌, **21**, A7–A10 (2020).
3) 酒井昇：食品加熱操作における熱・水分移動・反応の工学的研究, 日本食品工学会誌, **19**, 57–78 (2018).
4) N. Sakai. T. Hanzawa: Applications and advances in far-infrared heating in Japan, Trends in Food Science & Technology, **5**, 357–362 (1994).
5) 中井利雄, 酒井昇：食品の電気物性と通電加熱, 熱物性, **25**, 200–208 (2011).
6) 門馬哲也, 酒井昇, 中門千晴, 福岡美香, 高見星司：肉類の過熱水蒸気調理における水分・油分移動について, シャープ技報, 第94号, 10–15 (2006).

© 2020 Japan Society for Food Engineering