

ま え が き

わが国の食糧自給率（カロリーベース）は長年約40%で推移し、先進国の中で極端に低い値となっている。政府は食料自給率を2015年度までに45%とする目標をたてている。また、米の消費の減少、輸入に多くを依存している麦、大豆、飼料作物等の国際価格の投機による急激な変動は憂慮すべき問題である。これらの問題の解決には、米の利用拡大及び麦、大豆、飼料作物の国内生産を推進するとともに、生産・流通の各段階での食料供給コストを縮減する必要がある。わが国の農林水産物や食品の輸出促進も重要であり、2013年までに輸出額を1兆円規模にするという目標が掲げられている。一方、地域の基幹産業である農林水産業と商業・工業等の産業間での連携、いわゆる「農商工連携」を強化し、地域製品の販売促進、新商品開発への支援などを通じた地域全体の所得の向上と雇用の確保も重要な課題である。農林水産省では食料産業クラスター事業等を通じて、地域食品産業の振興を図っており、地域ブランド化の支援も行っている。

このような背景のもと、国産の農産物や食品の高品質化、高付加価値化へのニーズが高く、そのための技術開発は食品総合研究所（食総研）の責務のひとつである。食総研では、新規の加工技術だけでなくスペkulイメーjing、ニューロイメーjing、走査型プローブ顕微鏡などの先端技術・機器を用いた新しい品質評価・安全性評価技術の開発にも注力している。また、産業活動の環境への影響に対する配慮が必要となっており、食品産業の環境影響などについても研究している。いずれの技術も、安全で環境負荷の少ない食品の製造・加工・流通にとって重要なものである。

食糧47号では、食総研で実施しているこれらのトピックス的な研究について解説する。食品に係る研究者や技術者だけでなく、食に関心をお持ちの多くの方々にも広く活用して戴くとともに、現在の食総研の活動について少しでもご理解戴ければ幸いである。

平成21年4月

農研機構食品総合研究所
所長 林 徹

I. 高品質食品製造を目的とした アクアガス調製技術の開発

1. はじめに

食品加工の中で、加熱処理は主要な単位操作の1つである。加熱処理としては、直接加熱、間接加熱、内部発熱（自己発熱）などの形態や湿熱加熱、乾熱加熱の形態などに区分され、用途に応じて利用されている。その中で、水蒸気は間接加熱の熱媒体として、また湿熱雰囲気の直接加熱として最も一般的な加熱媒体として古くから利用されてきた。この水蒸気は飽和水蒸気と呼ばれるもので、蒸発または沸騰によって発生した蒸気を意味し、大気圧の場合は100℃で発生する蒸気である。最近、この飽和水蒸気を二次加熱することで得られる過熱水蒸気（図1の飽和水蒸気曲線を参照）を用いた処理法が食品分野や環境分野で注目されている。簡単に使用目的を述べると乾燥、減容化、熱反応（食品の調理加工・殺菌、有害物質の分解や脱臭）、抽出、炭化などであり、それぞれの用途に応じて常圧においては120℃程度から800℃程度までの温度帯で利用されている。特に環境分野では、有害物質の分解や有機性廃棄物処理、再資源化などにおいて注目されている。

過熱水蒸気は、比較的古くから乾燥装置の熱媒体として用いられている。水蒸気密度が低く、高い温度に加熱された過熱水蒸気中へは水が蒸発してゆき、試料が乾燥される。試料を投入した直後では、試料の表面温度が低いために、水蒸気が表面に凝縮

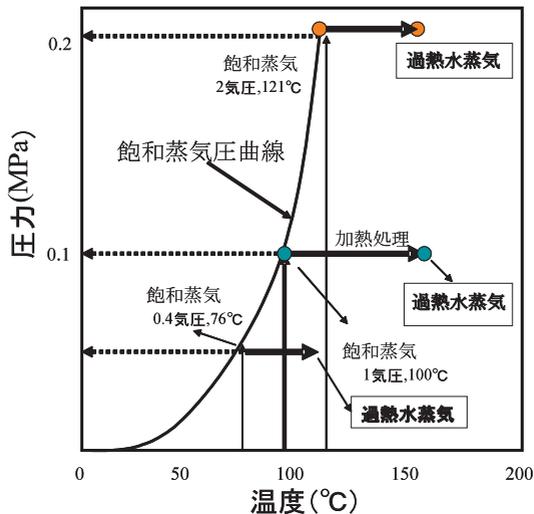


図1 飽和水蒸気圧曲線にみる過熱水蒸気

することで、潜熱により試料に大量の熱を与え、その後も過熱水蒸気からの熱が対流と放射により与えられることで、加熱空気以上の乾燥速度で乾燥することが出来る。また過熱水蒸気中に移動した水蒸気は過熱水蒸気を冷却することで凝縮により取り出し熱も回収できることに加え、再び過熱水蒸気を加熱することで循環的に使用できる効率的な乾燥法であり、さらに過熱水蒸気中の酸素濃度がきわめて低い状態での高温処理での防爆や酸化抑制などの利点もある。

過熱水蒸気を用いた食品加工は、我が国でも20年以上前から、前述の乾燥のみならず、食品の加熱加工においても利用検討が進んでいるが、特に最近、高品質食品の提供にあたって、微生物的な安全性確保や食品原料の有用成分の保持などの面から過熱水蒸気の食品加工への検討・導入が装置開発を含めて活発化している。特に品質面においては、2004年、家庭用調理器具に過熱水蒸気を組み込んだシステムが販売され、「水で焼く」というキャッチフレーズで健康調理法が提案されたことがその一因となっている。ここでは、農研機構・生研センターの「生物系産業創出のための異分野融合研究支援事業」に採択され、「アクアガスを用いた高品質汎用食材の新規調製技術の開発」のテーマで平成15年から19年までの5年間研究開発を実施してきた高品質食品製造のための新規過熱水蒸気システムについて紹介する。

2. 過熱水蒸気の実用分野での研究及び活用事例

食品への応用を主目的とした検討は、保坂・鈴木らの広島大学のグループで実施されてきた¹⁻³⁾。食品加工において実用的な装置開発を実施してきたのが塚田や山中らのキッコーマンのグループであり、過熱水蒸気を用いた香辛料などの殺菌処理を報告している⁴⁻⁶⁾。また上述の家庭用電気調理器具での検討などを大阪府立大学の宮武らのグループで行っており、最近では、過熱水蒸気の実用に関する研究会も立ち上がり、情報提供などが行われている。また水産物加工への利用検討については北海道立食品加工センターの阿部らが研究及び実際の商品開発について検討を行い、いくつかの成果が報告されている^{7,8)}。

ボイル処理やスチーム処理の代替という使い方ではなく、過熱水蒸気の実用分野での特徴的な応用例として、脱油処理が挙げられている。当方でも共同研究の中で、フライ食品からの脱油、さらに畜肉加工品の脱油・乾燥処理などの検討を実施した。その結果として、効果的な脱油が認められている。しかし、食品加工工程での連続的な過熱水蒸気処理での脱油処理の場合、脱油した油の装置内からの回収の点でいくつかの課題があった。過熱水蒸気処理で食材から分離した油が装置内での凝縮した水とともにドレインを通じて系外に完全に排出されれば問題はないが、低温域で固化した油成分や過熱水蒸気中に蒸発した油がライン中に付着した場合には食品加工時への異臭付着の原因となる。過熱水蒸気の排気あるいは循環システムでのオイル除去のシステムが必要になり、このようなシステムはコスト的にも課題が残る。加熱処理で蒸気化するものが水のみであれば、非常に効率的な循環システムでの加熱乾燥処理が可能であ

るが、食材全ての加熱処理においては、油分などの成分を如何に制御するかがポイントとなると考えられた。

過熱水蒸気のもう1つの特徴的な食品加工としては、焼成処理が挙げられる。実際に焼成処理までを水産物で行って、食感がソフトな製品が出来ることも明らかとなっている。これらの焼成処理において表面の乾燥工程が進んでいき、さらに加熱される事でメイラード反応による褐変、さらに一部成分の炭化が生じることなどで焼き色も付けられる。

食品分野での過熱水蒸気の利用として期待されているのが、殺菌処理としての利用である。実用化された加圧過熱水蒸気による香辛料などの粉体殺菌システムは、過熱水蒸気の特徴を活かした殺菌方法である。香辛料などに多く含有される耐熱性胞子は殺菌に高い温度(120℃以上)を必要とし、かつ、乾熱状態ではその耐性は湿熱状態よりも高いため、香辛料のような香りを保持することが不可欠な素材では効率的な殺菌が出来ない。また液中の加熱処理では、その香り成分が溶出したり、素材そのものの品質が劣化することで使用できないのが現状である。一方、高い温度雰囲気湿熱状態で発現させ、さらに水蒸気の対象物表面での凝縮による湿熱状態での迅速な温度上昇を生じさせる過熱水蒸気システムは、短時間に効果的にこれらの耐熱性菌を減少させることに成功している⁵⁾。一例を挙げると1.5気圧(150kPa)、140℃、4秒処理でのパプリカ粒の耐熱性菌(初発菌数: 7.6×10^3 CFU/g)を検出限界以下に、また6気圧(600kPa)、184℃、10秒の処理で、黒こしょう(粒)の耐熱性菌(初発 7.6×10^5 CFU/g)を 4×10^2 CFU/g まで減少させている。殺菌システムは香辛料をはじめ、穀類や乾燥農産物などの殺菌処理に用いられている。水蒸気密度を高くして、高温での短時間殺菌を行なうために加圧過熱水蒸気を用いているが、最近では、この過熱水蒸気において、加圧下でなく、常圧下においても冷凍食材や水産加工品の表面殺菌処理⁸⁾や野菜などの漬物などの製造前の表面殺菌処理⁹⁾、製粉前の生そばの殺菌処理¹⁰⁾など検討されている。従来の殺菌処理よりも品質の劣化が少ない、あるいは通常加熱殺菌処理では、利用できなかった生に近い状態での殺菌が可能であるという報告もなされており、今後も過熱水蒸気を用いた殺菌処理は食品の分野で利用が拡大することが予想される。

3. 新規過熱水蒸気システムの開発¹¹⁻¹⁸⁾

食品の安全性などの問題から消費者の国産農産物嗜好が強い現状がある。しかし国産農産物については限定された収穫時期から、それらを加工食材として利用するには、多穫期の豊富な素材を高品質の状態での貯蔵、流通することが出来ないため、輸入農産物への依存が高い状況にある。またカイワレダイコンの食中毒事故以降、生野菜の流通販売においては、その微生物制御が大きな課題となっている。

このような状況下で、農産物の高品質でかつ安全で日持ち性の高い一次加工食材が調整出来ないかという観点から検討を行い、過熱水蒸気に注目して新たなシステムを開発することに成功した。このシステムの最大のポイントは、過熱水蒸気での初期凝

縮からの一定期間の加熱処理を効率的に実施することにより、そのために、加熱した水を高速で加熱チャンバ内に噴霧し、加熱チャンバ内に常圧で115℃前後の微細水滴を含んだ過熱水蒸気雰囲気調整し、食材加工するシステムを開発した(図2)。この微細水滴を含んだ過熱水蒸気雰囲気をアクアガス™と呼称している。食材を過熱水蒸気雰囲気に投入してからの初期過程は、伊與田らが報告しているように①凝縮過程、②蒸発復元過程、③蒸発乾燥過程からなる「凝縮から蒸発への反転過程」と見なされる¹⁹⁾。この経過での食材の重量変化を図3に示す。

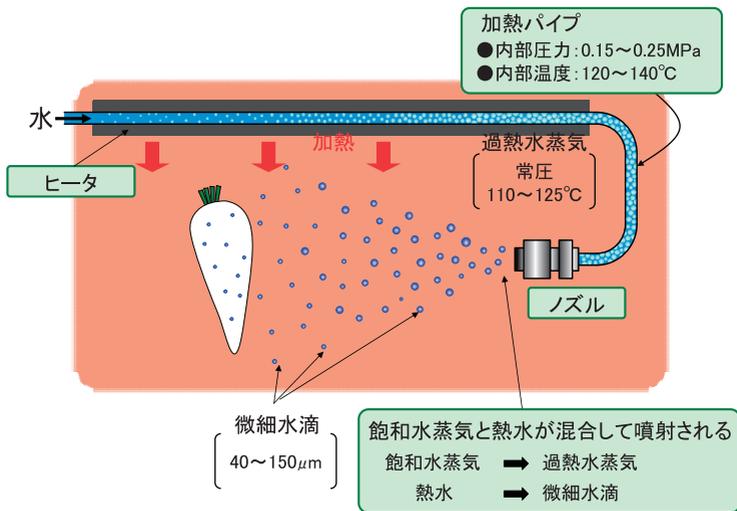


図2 アクアガス発生システム

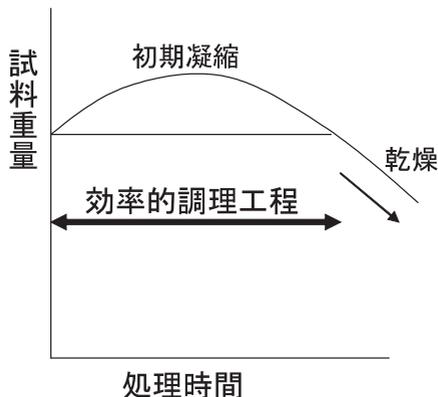


図3 初期凝縮過程から乾燥過程への試料重量変化

ここで重要なのは、加熱初期では表面を水蒸気の凝縮による水層が存在し湿った状態で潜熱の形で熱が伝達されることであり、これが野菜などの表面の短時間殺菌に利用できる。さらに、その後の処理工程で農産物を長期間貯蔵するのに必要な自己酵素の失活などに必要な加熱処理を進める際にも、食材表面に形成された水層が蒸発している過程においては、食材重量の減耗を生じることなく、効率的な調理工程が設定できる。この2つの効果をより促進することを目的で開発されたのが、アクアガス発生システムである。

このアクアガスについては、図4のような5機関での連携による開発を行った。このコンソーシアムにより、基礎的な特性解明から装置の改良、実用化、さらにこの加熱方法を用いた食材の調理特性の解明や最適な調理方法の提案、さらに商品設計と試験販売、システム設計と効率よく研究を実施することが可能となった。この成果として、事業開始から3年目で、コンソーシアム内のローズコーポレーションの調製したポテトサラダが試験販売され、継続的に既に関係スーパーで400万パックを超えて販売されていることや、装置開発を担当したタイヨー製作所で既にコンソーシム外に3台の実用加熱装置を制作販売していることなどが挙げられる。

以後、5年間にわたる研究開発での成果を基礎特性から応用まで含めて紹介する。

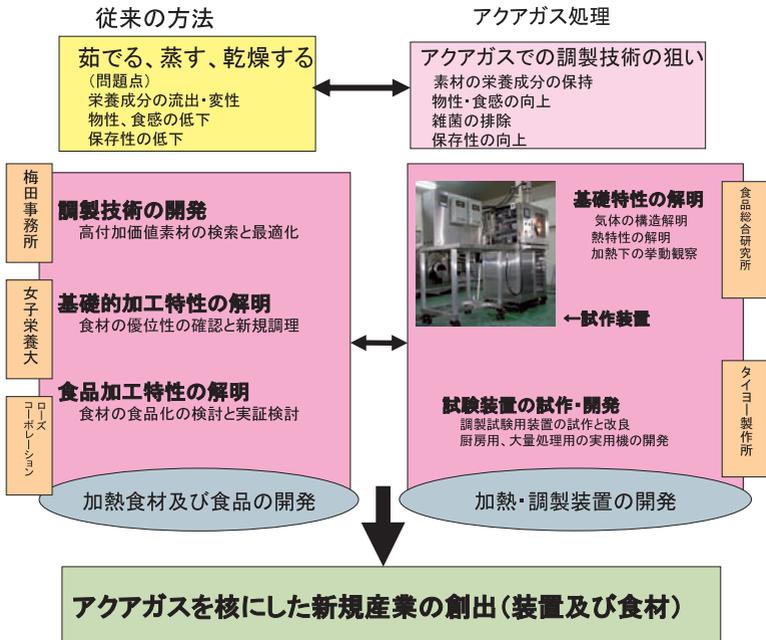


図4 アクアガスの研究開発（連携機関と分担概要）

4. アクアガスの基礎特性

1) 熱特性と乾燥特性

アクアガス等の加熱媒体から加熱対象物への熱伝達率を測定するため、加熱チャンバ内に定常熱流を作りその熱流束の測定が可能な熱流計を作製し、アクアガス、過熱水蒸気ならびに高温空気から熱流計への熱伝達係数を測定した。加熱媒体の温度はアクアガス試作機が最も安定してアクアガスを発生させることが可能な115℃とした。過熱水蒸気ならびに高温空気を用いた実験においては、アクアガスオープンへ過熱水蒸気あるいは高温空気をそれぞれ導入することにより行い、熱流計付近の加熱媒体流れ等の条件が同一になるよう調整し測定を行った。また加熱媒体の熱伝達率について、加熱対象物の表面温度に対する依存性を調べるため、熱流計表面温度を変化させ測定を行った。

測定された加熱媒体から熱流計への熱伝達率を図5に示した。アクアガス、過熱水蒸気ともに、熱流センサ表面温度が70℃以下では熱伝達率はほぼ一定の値を示したが、熱流センサ表面温度が70℃以上になると、熱伝達率が低下する傾向が見られた。またアクアガスと過熱水蒸気を比較すると熱流センサ表面温度が80℃以下ではアクアガスの熱伝達率が過熱水蒸気のものよりも高い値を示したが、熱流センサ表面温度が80℃以上になるとアクアガスの熱伝達率は過熱水蒸気と比較して低くなった。この熱伝達係数の温度依存性の原因としては、熱流センサ表面に付着した凝縮水等が熱移動抵抗となったためと考えられ、微細水滴によりセンサへの水の付着が多いアクアガスではこの傾向が強くなったためと考えられた。

次に、モデル食品試料として澱粉ゲルを用い、アクアガス、過熱水蒸気および高温

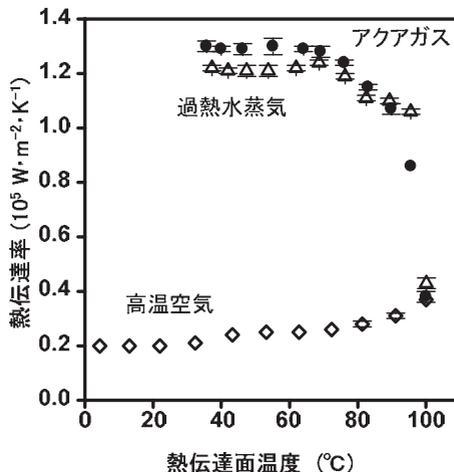


図5 加熱媒体の熱伝達係数の温度依存性

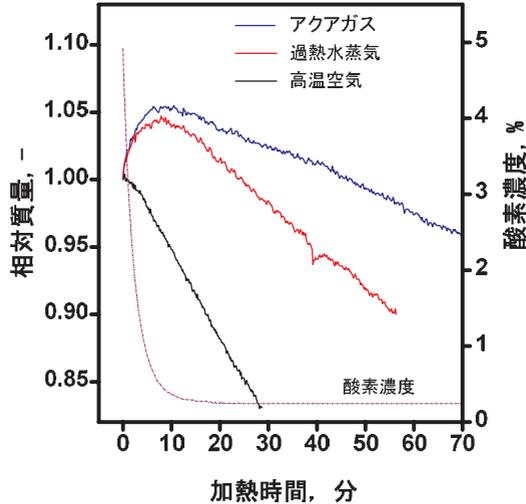


図6 アクアガスなどの加熱処理でのデンブンプモデル試料の質量変化

空気にて加熱を行い、試料の質量変化を測定しそれぞれの過熱媒体の乾燥特性を評価した。それぞれの加熱媒体の温度等の条件は熱伝達率測定時と同様とし、3回ずつ測定を行った。

測定されたモデル食品試料の質量変化を図6に示した。高温空気を用いた実験では試料の質量は測定開始後直ちに減少した。これは試料からの水分の蒸発によるものと考えられた。アクアガスならびに過熱水蒸気を用いた実験では、測定開始後、試料表面において水蒸気の膜状凝縮が観察され、凝縮水の付着による試料の質量増加が確認された。アクアガス、過熱水蒸気を用いた実験共に、試料の質量は約10分間増加した後、減少に転じた。アクアガスにおける試料質量の減少速度は過熱水蒸気と比較して遅かった。これはアクアガス中の微細水滴が試料に付着し、試料の乾燥を抑制したためと考えられた。

2) 微細水滴の挙動

アクアガスでの微細水滴の確認と挙動解明のために、高速度カメラによる測定を実施し、微細水滴の存在及び粒径などを明らかにした。撮影に用いた高速度カメラは株式会社フォトロン製、FASTCAM-APX RS 250Kである。撮影箇所はノズル近傍から20mm刻みで120mmまでの位置とし、それぞれの撮影箇所に合わせてカメラと照明の位置を動かした。撮影された微細水滴から水滴径を画像処理により計算した。図7に口径1.3および1.9mmのノズルを使用した際のノズル出口から20mmの位置において

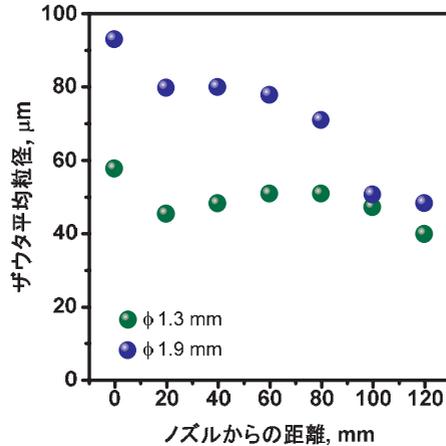


図7 微細水滴の平均粒径変化

撮影された微細水滴画像を示す。ノズル口径により生成される微細水滴の径に違いがあることが明らかになった。さらに1.9mmノズルでは初めに大粒径の水滴が生成され、その後水滴が剪断され小粒径の液滴となり、また1.3mmノズルではノズル噴霧口から小粒径の水滴が噴霧される様子が観察されたが、それを裏付ける結果が得られた。

3) 微細水滴の発生機構¹⁸⁾

実際の食品加工でのアクアガスの条件設定に対してノズル形状や供給水量が重要な因子であり、そのための微細水滴の発生挙動について検討を行った。ノズル内圧および温度から計算された理論水蒸気流量と実際に装置に供給された水量を図8に示す。ノズル内圧が低い場合は供給水量と理論水蒸気流量は一致したが、ノズル内圧が上昇し水蒸気噴流が音速に達すると実測供給水量が理論水蒸気流量を上回ることが確認された(青い水滴流量の部分)。給水量と理論水蒸気流量から計算された水/水蒸気の比は熱収支測定から得られた比と良く一致し、水滴の存在量は、供給水量とノズル内圧で制御できることが示唆された。

アクアガスの安定的条件設定には、アクアガス雰囲気での水(微細水滴)と水蒸気の割合や量の把握が重要な課題である。今後は、これらの知見を活用して、供給水量と加熱条件の調整からノズル内圧の制御、ひいてはアクアガス状態を制御するシステムを実用機に導入していく予定である。

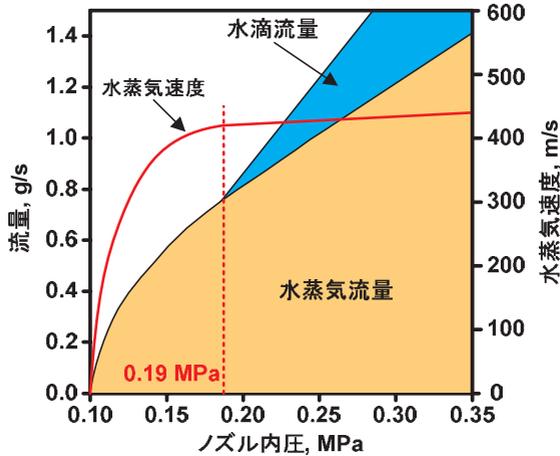


図8 水蒸気流量、水滴流量とノズル内圧の関係

5. 農産加工への応用

アクアガスは、通常の過熱水蒸気に比べて、2つの特徴を有している。1つは、加熱初期での熱伝達効率が高いということと、2つ目は、加熱時の蒸発速度の制御（速度低下）が出来るということである。食品加工に用いられる一般的な過熱水蒸気温度は、120℃から200℃程度であり、1つの大きな特徴として焙煎や焼成といった処理工程も可能である。アクアガスでは、115℃前後で、焼成処理には向かないが、比較的低温であることから、農産物の1次処理などへの応用が想定される。特にカイワレダイコンの集団食中毒事故以来、高品質の微生物制御法の要望の高い生野菜の殺菌処理や、自己酵素失活、物性改善等の目的で実施されるブランチングへの利用が期待される。対照食材によっては、ある程度の加熱処理時間を必要とするものがあるが、食材の乾燥による歩留まりの低下が予想される。アクアガス処理の場合、含有する微細水滴により、この反転過程の制御が出来ることで、加熱処理中の歩留まりの向上が大きな利点である。

さらに通常の飽和水蒸気処理や茹で処理で懸念される対象農産物成分（特に水溶性画分）の溶出や周辺の水の一部吸水による物性変化などを低減することで、品質の保持が期待できる。

1) アクアガスによる生野菜の殺菌¹³⁾

アクアガスおよび過熱水蒸気にてキュウリの加熱を行い殺菌効果について検討した。

処理温度は115℃とし、処理時間は30秒および60秒とした。未処理の試料と加熱処

理をした試料について、一般生菌数をコロニーカウント法にて計数した。

キュウリの殺菌結果を図9に示した。アクアガスおよび過熱水蒸気ともに30秒間の加熱で一般生菌数を 10^2 CFU/g以下に減少させることができ、また60秒間加熱された試料からは一般生菌は検出されなかった。加熱中の試料表面温度を測定したところ、アクアガスでは過熱水蒸気と比較して速やかな温度上昇が見られ、このためアクアガスは更に高い殺菌効果を示したものと考えられた。加熱処理後の試料の物性や色彩を測定した結果、図10に示すように物性の指標として破断応力を破断歪率で除した数値は、生のニンジンに近い値であり、30秒間加熱した試料についてはほぼ生野菜としての品質が保たれていると判断された。生野菜に近い品質を残して、短時間処理で素材表面の微生物を殺菌する用途が適用できる素材としてはニンジン、キュウリ、キヌサヤ、ブロッコリー、カリフラワー、グリーンアスパラなどが挙げられる。またこれらの野菜の短時間での殺菌処理物は、後半で述べる連携機関である女子栄養大学で纏めたアクアクッカーレシピ集に調理法などが記載されているが、サラダ、マリネ、カルパッチョなどが想定されている。なお、後述するポテトサラダについては、短時間処理したニンジン、キュウリなどの利用例と、その際の日持ち性向上を示すものである。

サラダ等では、広く殺菌処理に高いニーズがあるレタス、サラダ菜、ホウレン草、キャベツなどがあるが、葉菜類などにおいては、10秒程度の処理でも野菜の組織が温度で軟弱化されることで、現時点では利用できない状況にある。今後は短時間処理の改良、さらに加熱処理全般の課題でもある加熱処理後の迅速な冷却方法の検討も進めていく予定である。

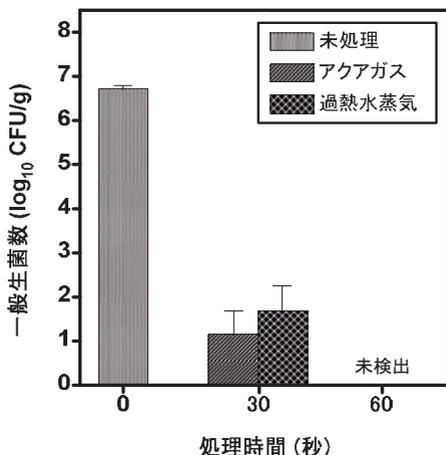


図9 キュウリ常在菌（一般細菌）への殺菌効果

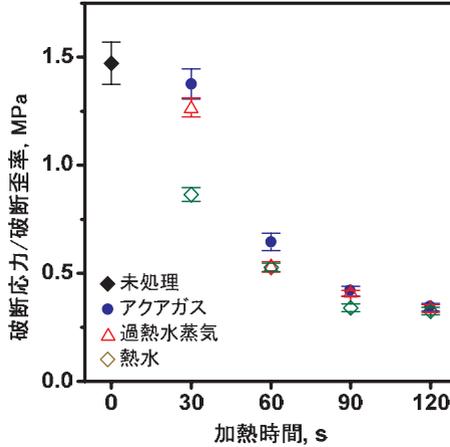


図 10 加熱によるキュウリの物性変化

2) ジャガイモ表面における枯草菌 (*Bacillus subtilis*) 胞子の殺菌²⁰⁾

調製した胞子液0.1mlをジャガイモ試料に塗布し、加熱処理を行わない試料は直ちにストマック袋に入れ、他の試料はアクアガス、過熱水蒸気および熱水により30分間加熱した後、直ちにストマック袋に入れ氷水にて30分間冷却した。試料に滅菌生理食塩水を加えストマックにて摩砕処理を行った後、試料液1mlを滅菌シャーレに取り標準寒天培地で混釈し、37℃にて48時間培養した後、発生したコロニー数を測定した。

ジャガイモ試料から検出された耐熱性菌の生存胞子数を図11に示した。胞子液を塗布し、加熱処理を行わなかったジャガイモ試料からはおおそ 10^6 CFU/mlの枯草菌が検出されたが、胞子液を塗布した後、アクアガス処理を施したジャガイモ試料からは菌は検出されず、また過熱水蒸気処理を施した試料からもほぼ検出されなかった。しかしながら熱水処理を施した試料からは平均して 10^3 CFU/mlの枯草菌が検出された。熱水処理を施した試料については検出された枯草菌数が 10^2 CFU/ml以下のものから 10^4 CFU/ml以上までのものとバラツキが非常に大きかった。この原因として、熱水処理においては表面に付着した胞子が主に熱水によって洗い流されたことにより耐熱菌数が減少したためと考えられた。ジャガイモ表面の凹凸等の形状により試料ごとに表面洗浄の効果に差が現れ、また熱水処理では加熱殺菌としては不十分であったため、上記の結果となったと考えられた。一方、アクアガスおよび過熱水蒸気処理では、加熱開始時には試料表面に凝縮した水が流れ落ちることにより試料表面が洗浄され、さらに30分間の加熱により試料表面が 100°C 以上に加熱されたことにより高い殺菌効果が現れたと考えられた。この他の耐熱性菌を用いた試験においてもアクアガス処理が過熱水蒸気処理と比較して高い殺菌効果を示す傾向があった。アクアガス処理にお

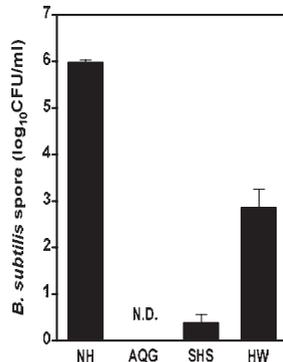


図 11 ジャガイモ表面に摂取した枯草菌胞子に対する殺菌効果

NH：未加熱 AQG：アクアガス
SHS：過熱水蒸気 HW：熱水

いては噴霧する微細水滴の量および温度において殺菌効果が特異的に高まる条件設定が存在することが期待される。

3) アクアガスによるジャガイモのブランチング¹⁵⁾

ジャガイモは流通量の季節変動が大きく長期保存技術の開発が求められている。加熱処理により酵素を失活させるブランチング処理はジャガイモ長期保存の有効な手段の一つであるが、処理されたジャガイモの品質、歩留りに関しては依然として改良の余地がある。そこでアクアガスによる高品質なジャガイモのブランチングを試みた。つくば市内の小売店で購入したジャガイモ(男爵)のうち質量が140～160gのものを選び、115℃のアクアガスおよび過熱水蒸気ならびに100℃の熱水を用いてジャガイモの加熱処理を行った。加熱中のジャガイモ内部の温度分布を測定し、また5～30分間加熱したのち急冷したジャガイモの中心部を通る切断面において、ジャガイモの品質低下に関わり耐熱性の高いペルオキシダーゼが活性を示す領域を簡易的に測定した。図12にジャガイモ断面においてペルオキシダーゼが活性を示す面積の割合の変化を示す。加熱の進行とともにジャガイモの表層部から温度が上昇し、これに伴ってペルオキシダーゼの失活が進行し、25～30分間の加熱処理によりジャガイモ中のペルオキシダーゼがほぼ失活した。別途行った実験により加熱媒体間には熱伝達率に差が確認されたが、ペルオキシダーゼ失活の進行に加熱媒体間の差は見られなかった。これは、この系でのジャガイモ加熱におけるピオ数は少なく見積もっても50以上と考えられ、ジャガイモ内部における熱拡散がジャガイモ温度の上昇に対して支配的であったためと考えられる。

115℃のアクアガスおよび過熱水蒸気ならびに100℃の熱水にて、ジャガイモ中の

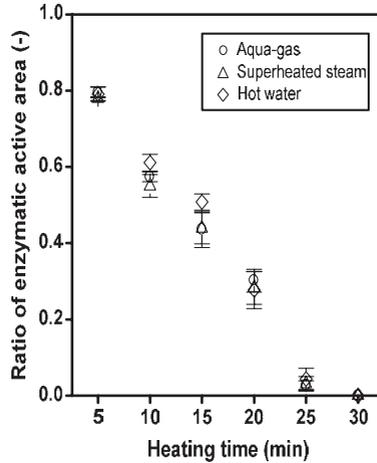


図 12 ジャガイモ加熱処理時のペルオキシダーゼ活性の挙動

酵素失活に十分な加熱時間は30分と判明したことから、それぞれの加熱条件にて30分間加熱処理したジャガイモについて品質の評価を行った。加熱処理後、急冷したジャガイモについて、力学的特性（破断応力、破断歪率）の測定を行い、色彩を色彩色差計にて測定した。また真空乾燥した試料の微細構造を走査型電子顕微鏡にて観察した。処理前後の試料の質量についても測定を行い、各処理におけるジャガイモの目減りについても評価を行った。

加熱処理を行ったジャガイモについて、力学的特性を測定した結果、熱水にて処理されたジャガイモは軟化が著しく進み、もろく崩れやすくなっており形状を保持しがたいという結果となった。アクアガスおよび過熱水蒸気にて処理されたジャガイモは軟化が比較的抑えられており、形状が保持されていた。色彩については、いずれの加熱媒体による処理においてもジャガイモ表皮の明度および鮮やかさが低下したが、熱水にて処理されたジャガイモにおいてその傾向が顕著であった。また電子顕微鏡にて撮影されたジャガイモの微細構造について図13に示す。ジャガイモ表皮に関しては未処理の試料には細胞壁由来と考えられる網目構造が観察され、アクアガスおよび過熱水蒸気にて処理された試料についても同様な構造が観察されたが、熱水にて処理されたジャガイモ表面にはこのような構造は認められなかった。またジャガイモ中心部については、未処理のものについてはデンプン粒が観察され、アクアガスおよび過熱水蒸気にて処理された試料においてはやはり細胞壁由来と考えられる構造が観察された。熱水にて処理された試料においても同様の構造が観察されたが、全体的に滑らかになっていた。以上のことを考慮すると、熱水処理と比較してアクアガス処理および過熱水蒸気処理においては、ジャガイモの品質低下を抑制した加熱処理が行えると

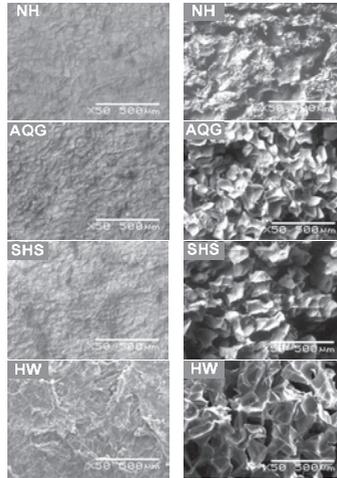


図 13 ジャガイモの各加熱処理時の構造
左 表面, 右 中心部

NH: 未加熱 AQG: アクアガス
SHS: 過熱水蒸気 HW: 熱水

考えられた。

またそれぞれの加熱媒体にて加熱処理されたジャガイモの目減りを図14に示した。アクアガス処理ではジャガイモの目減りが抑制され、これは微細水滴によりジャガイモの水分が調整されたためと考えられた。以上の結果から、アクアガス処理ではジャガイモの目減りを抑えながら良好な品質にてブランチングを行うことが可能であると結論付けられた。

4) ブロッコリーのブランチング²¹⁾

ブロッコリーを用いて、アクアガス加熱と既存の加熱法(茹でる、蒸す)について実験を行った。3-4cmの小房に切り分け、実験に供した。加熱条件は、芯温が95℃到達時までとした。処理時間をアクアガスで5.2分、茹で加熱で4.3分、蒸し加熱で5.7分であった。処理試料について物性、色調および総ビタミンC量の測定及び官能検査を実施し、その結果、アクアガス加熱処理では、水っぽさがなくまた甘みが強いという味の面と硬さにおいても「丁度良い」と評価され、味および嗜好性が良好であることが明らかになった。色調においては、冷蔵貯蔵後の色変化が少なく、さらにビタミンCにおいても他の処理に比べて高い残存率(100%)を示しており、栄養面でも嗜好性の面でも品質の高い加熱食材を調整できる可能性を示唆していた。既にアクアガス加熱処理で上記のような優位性を確認したものとして、枝豆とダイコンについて報告

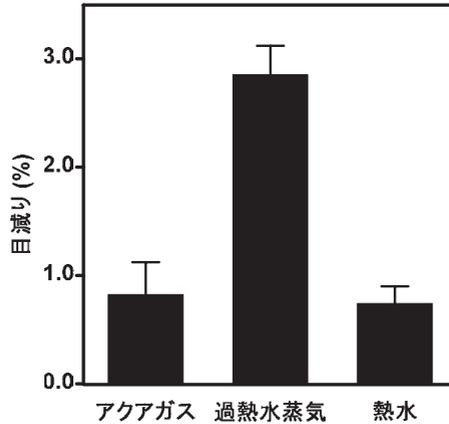


図 14 各加熱処理でのジャガイモの目減り
各処理時間は30分(熱水は100℃, それ以外は115℃)

している^{22,23)}ので、参照されたい。

5) アクアガスによるポテトサラダ調理¹³⁾

ポテトサラダは惣菜の中でも、販売量が高い商品である。しかしながら、原材料の初発菌制御が困難なことから、安全とおいしさを両立させることが難しく、その品質保持技術の開発が急務となっている。そこでアクアガスおよび従来法にてポテトサラダを調理し品質について検討した。アクアガス調理ではジャガイモ、ニンジン等はアクアガス加熱を行い、タマネギ、キュウリ等の材料についてはアクアガスによる短時間加熱により殺菌したものをを用いた。従来の調理法では、ジャガイモニンジン等は蒸し器で加熱し、タマネギ、キュウリ等は次亜塩素酸ナトリウム水溶液等を用いて殺菌したものをを用いた。

それぞれの方法で調理したポテトサラダを10℃に保存し、細菌数の変化を調べた結果を表1に示した。アクアガスにて調理されたポテトサラダは大幅に日持ちが改善したと言えよう。さらにパネル6名にて二点嗜好試験法により食味試験を行った結果、食味、香り、テクスチャー、色調全てにおいて対照処理よりもよいという結果となった。現在、大型アクアガス加熱装置(アクアクッカー)を用いて加熱処理したジャガイモを使用したポテトサラダは、平成17年秋から継続的に試験販売され、他の総菜などと比較した商品評価としても高い評価を継続的に認められている。今後は、短時間殺菌処理などを効率的に行う装置の開発により、研究成果として認められている生野菜の殺菌処理も含めた、ポテトサラダや他の食品製造を検討している。

表 1 ポテトサラダ中の菌数変化

試験区	初発		10℃ 4 日後	
	一般生菌数 /g	大腸菌群 /g	一般生菌数 /g	大腸菌群 /g
対照	1.5 × 10 ³	陰性	9.0 × 10 ⁵	陰性
アクアガス	<300	陰性	<300	陰性

対照においては、ジャガイモは蒸し機で加熱（芯温95℃到達後20分）、キュウリ等の野菜については、200ppmでの次亜塩素酸ナトリウム溶液浸漬処理あるいは沸騰水での短時間加熱処理して調整した。アクアガス処理においては、素材を各加熱時間で処理して、調整した：ジャガイモ（芯温到達後10分）、キュウリ（1分）、人参（4分）、キャベツ（3分）。

6. アクアガス加熱処理の特徴を生かしたレシピ開発

今まで述べてきたアクアガスでの野菜などの表面殺菌処理やブランピングでの特性評価を基に、大量調理での調理へのアクアガス加熱処理の利用方法について、女子栄養大学の大量調理研究室により纏めた。

このレシピの設計は、従来の加熱処理よりも品質的に優れた条件のものや微生物制御処理により安全性が高まった野菜素材を用いた食品調理のみならず、省エネ、時間短縮などの利点を有するものも掲載している。

具体的には、アクアガス加熱による赤飯については、「振り水の必要がなく、作業の省力化が可能、また加熱による水分蒸発がなく加水量調節による硬さの調製が容易である。この加熱処理で、米のつやや香りがよく炊き上がる。」という特徴を有している。このレシピ集は、品質特性などについては論文化したものを基礎に、さらに大量調理の観点での利点を加えた150以上のレシピを纏めたものであり、アクアガス加熱技術の参考資料としてアクアガスコンソーシアムで作成した。関心のある方には配布している（問い合わせ先：（独）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 製造工学ユニット（電話029-838-8029）（<http://nfri.naro.affrc.go.jp/>））

7. アクアガス加熱装置の実用化

紹介したアクアガス加熱処理については、コンソーシアムでの研究開発を実施してきた、装置開発担当のタイヨー製作所で実用機を開発し、大量生産用アクアガス加熱装置（アクアクッカー）（ジャガイモの加熱処理で1回200kg程度の処理が可能）、さらにホテルパン1/2サイズ5枚を処理できる厨房型アクアクッカーを既に製造販売を開始している（図15）。（問い合わせ先：株式会社タイヨー製作所（電話0138-77-1001）（<http://www.taiyo-seisakusho.co.jp/>））

8. さいごに

過熱水蒸気という農産加工においては、比較的新しい加熱媒体について、特に微細



図15 事業化したアクアガス加熱装置

左：厨房用アクアクッカー， 右：大量生産用アクアガス加熱装置（アクアクッカー）

水滴を含有することにより，熱伝達率向上や乾燥抑制といった，農産加工（特に表面殺菌や1次加工処理など）に適した新しいシステムについて，装置の概要から基本特性，さらにいくつかの農産加工への応用事例について述べた．これらの応用事例については，一般的な農産物において予備検討などをすでに実施しているが，適用しにくい野菜なども多くあることがわかっている．さらに，一般的なバッチ加熱処理では，現在，連携機関での加熱装置を完成させているが，連続処理装置などの開発はまだ終了していない．今後は，アクアガス処理を様々な農産物へ応用し，高品質で安全な汎用食材を周年安定供給することが可能なシステムについて検討し提案していく予定である．またそれらの調製した食材をアクアガスにて効率的かつ高品質に調理することが可能なレシピを開発・提供することによりアクアガス利用を促進し，安全でおいしい食品の供給に貢献していきたいと考える．（企画管理部 業務推進室 五十部 誠一郎）

引用文献

- 1) 高含水率の浸水米を得るための過熱水蒸気処理米の浸漬に関する研究，久保田 清，弘中和憲，鈴木寛一，保坂秀明，日本食品工業学会誌，Vol.25，1978，p.251-256．
- 2) 常圧過熱水蒸気の食品への利用，保坂秀明，食品工業，8/30，1999，p.46-55．
- 3) 過熱水蒸気の特性と2・3の応用，鈴木寛一，保坂秀明，食品機械装置，No.10，2000，p.77-85．
- 4) 食品工業に於ける加圧水蒸気と過熱水蒸気の利用，塚田 直，日本食品工業学

- 会誌, Vol.31, 1984, p.536-545.
- 5) 過熱水蒸気による粉粒体殺菌技術の進展, 山中良郎, 食品と開発, Vol.33, No.10, p.9-13.
 - 6) 低温過熱水蒸気を利用した解凍装置, 古川博一, 庄司 晃, 冷凍, Vol.76, No.4, 2001, p.32-38.
 - 7) 過熱水蒸気を用いたホタテ白干し製品の高品質化, 西岡不二男, 浅岡大介, 山崎雅夫, 日本食品科学工学会誌, Vol.51, No.3, 2004, p.167-171.
 - 8) 過熱水蒸気および高温空気による水産乾製品の表面殺菌, 阿部 茂, 宮下和夫, 日本食品科学工学会誌, Vol.53, p373-379 (2006).
 - 9) 白菜付着微生物に対する過熱水蒸気の殺菌効果, 小野和広, 遠藤浩志, 稲津康弘, 宮尾茂雄, 日本食品科学工学会誌, Vol.53, p172-178 (2006).
 - 10) 常圧過熱水蒸気処理が生そばの保存性と食味に及ぼす影響, 小野和広, 遠藤浩志, 山田純市, 庄司一郎, 五十部誠一郎, 日本食品科学工学会誌, Vol.54, p320-325 (2008).
 - 11) 気体水による加熱方法及びその装置, 特願特許広報, 特開 2004-358236 (2004).
 - 12) 微細水滴を含む過熱水蒸気の伝熱・乾燥特性, 五月女格, 坂本晋子, 竹中真紀子, 五十部誠一郎, 小笠原幸雄, 名達義剛, 日本食品工学会誌, **6**, 229-236 (2005).
 - 13) 微細水滴を含む過熱水蒸気処理による野菜の高品質殺菌処理, 五月女格, 小関成樹, 鈴木啓太郎, 五十部誠一郎, 山中俊介, 小笠原幸雄, 名達義剛, 防菌防黴, **33**, 523-530 (2005)
 - 14) アクアガス加熱食材の基礎的調理加工特性に関する研究 (第1報) - ブロccoli について -, 殿塚婦美子ら, 日本食生活学会誌, Vol.16, No.3, p242-248 (2005).
 - 15) 微細水滴を含む過熱水蒸気によるジャガイモの1次加工処理, 五月女格, 鈴木啓太郎, 小関成樹, 坂本晋子, 竹中真紀子, 五十部誠一郎, 小笠原幸雄, 名達義剛, 日本食品科学工学会誌, **53**, 451-458 (2006).
 - 16) アクアガスを用いた高品質汎用食材の調製技術の開発 (特集記事), 五十部誠一郎, 五月女格, 竹中真紀子, 熱物性, Vol.20, No.4, p.208-215 (2006).
 - 17) アクアガスの加熱機構と農産加工への応用, 五十部誠一郎, 日本食生活学会誌 (総説), **17**(3), 193-197 (2006).
 - 18) アクアガス発生ノズルから噴射される水/水蒸気混相流中の水量測定, 五月女格, 小笠原幸雄, 名達義剛, 五十部誠一郎, 日本食品工学会第9回年次大会講演要旨集, p90 (2008).
 - 19) 過熱水蒸気乾燥における凝縮から蒸発への反転過程, 伊興田浩志, 西村伸也, 野邑奉弘, 日本機械学会誌論文集, Vol.63, No.8, p.170-176 (1997).
 - 20) 微細水滴を含んだ過熱水蒸気の殺菌効果の評価と食品調理加工への応用, 山中俊介ら: 防菌防黴, **35**(6), 341-349, 2007.
 - 21) アクアガス加熱食材の基礎的調理加工特性に関する研究 (第1報) - ブロccoli

- リーについて－，殿塚婦美子ら：日本食生活学会誌，**16**，3，242-248（2005）.
- 22) アクアガス加熱食材の基礎的調理加工特性に関する研究（第2報）－枝豆の加熱法・加熱時間による物性及び色調について－殿塚婦美子 他：，日本食生活学会誌，**18**(3)，264-264，2007.
- 23) アクアガス加熱食材の基礎的調理加工特性に関する研究（第3報）－だいこんについて－，日本食生活学会誌，長田早苗 他：**18**(3)，223-230，2007.

Ⅱ. マイクロチャネル乳化による 単分散エマルション製造技術

はじめに

乳化は、連続相となる液体の中に連続相と混じり合わない微小液滴（分散相）が分散しているエマルション（乳化物）を製造する操作であり、食品工業において多く利用されているプロセスの一つである。エマルションの基本素材は水・油・乳化剤であるが、実際の乳化食品は複雑な多成分系である。エマルションの液滴径と液滴径分布は、エマルションの保存安定性や呈味特性等の諸性質に大いに影響を与える重要な因子である。たとえば水中油滴（O/W）エマルションである牛乳を例にとると、絞りたて牛乳における脂肪球（微小油滴）のサイズは数 μm であるが、市販牛乳（ホモ牛乳）における脂肪球のサイズは乳化機を用いて $1\mu\text{m}$ 未満に微細化されている。絞りたて牛乳の方がコクが強くまろやかであるといわれるが、これはホモ牛乳に比べて液滴径が大きいからである。一方、ホモ牛乳は脂肪乳を微細化することにより保存安定性が高められている。ちなみに、エマルションの保存安定性は液滴径分布を狭くする、すなわち単分散エマルションにすることで高めることができる（図1a）。もしエマルションの液滴径と液滴径分布の精密制御が可能になれば、食感、呈味、安定性等が高度に設計された乳化食品を開発できるようになると期待される。しかしながら、一般的な食品乳化機（攪拌乳化機、コロイドミル、高圧乳化機、超音波乳化機）では、液滴径は経験的に設定されている上に、得られるエマルションは液滴径分布の広い多分散エマルションである（図1b）¹⁾。

食品総合研究所の中嶋らは、均一径の並列微細流路（マイクロチャネル，MC）であるMCアレイを利用したMC乳化技術を1990年代半ばに提案し、液滴径が精密に制御された単分散エマルションの製造を可能とした（図2）^{2,3)}。本稿では、単分散エマルションの製造技術の先駆けとなった膜乳化について最初に概説し、その後にMC乳化技術の基礎から応用にわたって解説する。

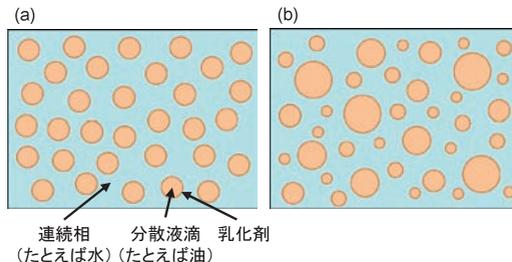


図1 単分散エマルション(a)と多分散エマルション(b)の概念図

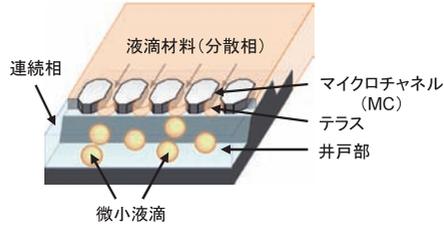


図2 マイクロチャネル乳化の模式図

1. 膜乳化

膜乳化は、多孔質膜を用いてエマルションを製造する乳化技術であり、宮崎県工業試験場（現宮崎県工業技術センター）の中島らによって1980年代後半に提案された⁴⁾。膜乳化で最もよく用いられる多孔質膜は、中島らが開発した南九州地方に豊富に存在するシラス石灰を利用して製造された細孔径分布の狭いシラス多孔質ガラス膜（SPG膜）である⁵⁾。膜乳化手法は、多孔質膜を介して分散相液体を直接液滴化する直接膜乳化⁶⁾（図3a）と多孔質膜を介して粗エマルション中の液滴を微細化するプリミックス膜乳化^{7,8)}（図3b）に大別される。上述の膜乳化手法の共通点としては、膜表面近傍での乳化時に強力な剪断力を加えない、すなわちマイルドな乳化プロセスであることが挙げられる。直接膜乳化では、エマルションの液滴径分布は使用する多孔質膜の細孔径分布に依存するため、変動係数が10%程度の準単分散エマルションの製造が可能であるが、液滴生産性は $0.01 \sim 0.1 \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \text{ h})$ 程度と比較的低い。一方、プリミッ

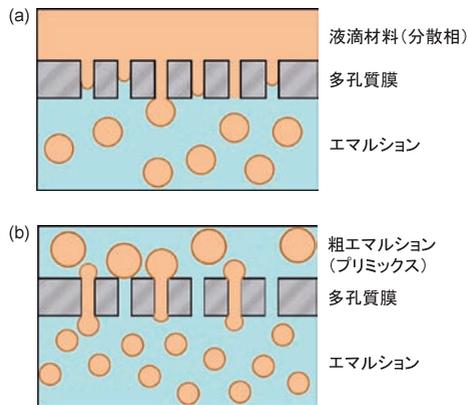


図3 膜乳化プロセスの模式図

(a) 直接膜乳化, (b) プリミックス膜乳化

クス膜乳化では、エマルションの液滴径分布は直接膜乳化よりも広いが $1\text{m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ 以上の非常に高い液滴生産性を達成することができる。ちなみに、多孔質膜を介して同一のエマルションを数回通過させることで液滴径分布が20%未満の準単分散エマルションを製造可能な膜乳化手法も提案された⁹⁾。膜乳化によって実際に製造された食品エマルション（水中植物油滴）の平均液滴径は $0.2\sim 30\mu\text{m}$ 程度であった。直接膜乳化では膜細孔径の3倍程度であったが、プリミックス膜乳化では膜細孔径の2倍程度と直接膜乳化と比べて液滴径が小さくなる傾向にあった。膜乳化挙動の解析は、各々の条件下で製造されたエマルションの液滴径分布等の数値データをもとに行われるのが一般的である。筆者らは、膜乳化プロセスの可視化を数年前に実現し、膜乳化挙動の詳細な解析を可能とした^{10, 11)}。

膜乳化の食品分野への応用に関する研究開発は、1990年頃より国内外で数多く行われてきた。なかでも、膜乳化を利用して製造された超低脂肪スプレッドが1990年代前半に日本国内で上市されたことは特筆に値する¹²⁾。このスプレッドは超低脂肪率(25%)であるにもかかわらず、保存料無しで冷蔵6ヶ月という長期の賞味期限を達成した。このほかにも、膜乳化を利用した生味噌の旨味強化を目的とした旨味成分封入固体脂マイクロキャリアの製造¹³⁾などの研究報告がなされている。

2. マイクロチャネル乳化

2.1 マイクロチャネル乳化の開発

半導体微細加工技術は、集積回路の製造技術として1950年代に登場し、電子部品の飛躍的な小型化をもたらした。半導体微細加工技術はその後とも電子産業の発展に伴って飛躍的に進歩し続けており、現在では線幅数十nmの超微細回路を高精度で製作することも可能になった。食品総合研究所では、毛細血管モデルとして流路断面のサイズが $6\mu\text{m}$ 程度のMCを多数有する単結晶シリコン製のMCアレイ基板を提案した¹⁴⁾。Kikuchiらは、このMCアレイ基板を組み込んだ血液レオロジー計測・観察装置を1990年代初頭に開発し、MCアレイを介した血液成分の流動状態の計測および顕微鏡観察を可能にした¹⁴⁾。その後、上記MCアレイ基板を乳化操作に応用したMC乳化が1990年代半ばに中嶋らによって提案された。Kawakatsuらは、MC乳化が液滴径分布の非常に狭い単分散エマルションを製造可能な乳化技術であること示した²⁾。

2.2 マイクロチャネル乳化の原理

MC乳化では、図2のようなユニークな構造のMCアレイを介して微小液滴の作製が行われる。MCアレイは、並列MC、テラス、および井戸部から構成されるとともに、平坦な透明板と圧着させることで微小流路として機能する。分散相の操作圧力がブレイクスルー圧力(ΔP_{BT})と呼ばれる圧力に達すると、分散相がMCアレイを通過して微小液滴の作製を開始する。ブレイクスルー圧力は、基板表面に対する分散相の接触角(θ)を考慮したYoung-Laplaceの式(式1)により推算することができる¹⁵⁾。

$$\Delta P_{BT} = 4 \gamma \cos \theta / d_{MC} \quad (1)$$

式1において、 d_{MC} はMC断面の直径である。Sugiuraらは、MC乳化における液滴作製は空間の微小化に伴って相対的に大きくなる界面張力を駆動力として活用していることを提案した¹⁶⁾。具体的には、分散相の先端部分が井戸部の中で膨張し始めた後に、テラス上における円盤状の油水界面のLaplace圧力 ($\Delta P_{Lap,terrace}$) が井戸部における油水界面のLaplace圧力 ($\Delta P_{Lap,well}$) よりも有意に高くなる。その結果、テラス上の分散相が井戸部の方へ急激に流入して最終的に油水界面の分裂および微小液滴の作製が起こる仕組みである。MC乳化プロセスにおいて最も特徴的なことは、連続相の強制流れを必要とせず均一サイズの微小液滴を作製できる点であり、液滴化に必要なエネルギー ($10^3 \sim 10^4 \text{ J/m}^3$) が非常に低く、なおかつエネルギー効率も報告例では65%と極めて高い¹⁶⁾。

2.3 マイクロチャンネル乳化装置

MC乳化装置の一例を図4に示す。MC乳化装置の基本構成は、MCアレイ基板が組み込まれた乳化モジュール、連続相・分散相供給部、顕微ビデオシステムである。また、MCアレイ基板はMC乳化装置の心臓部であり、例としてMC乳化研究で当初から使用されてきた単結晶シリコン製の平板溝型MCアレイ基板の概略図を図5aに示す。このMCアレイ基板のサイズは15mm四方である。MCアレイ基板の加工面には4列のMCアレイが配置されているとともに、各々のMCアレイの両側には井戸部と呼ばれる空間が形成されている。図5bの光学顕微鏡画像より、加工されたMCのサイズは極めて均一であることがわかる。MCのサイズ分布は、作製される微小液滴のサイズ分布に直結するため、単分散エマルションの製造には均一径のMCを有するMCアレイ基板の使用が不可欠である。



図4 マイクロチャンネル乳化装置の一例

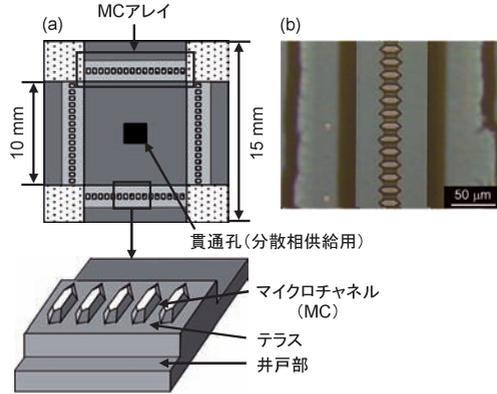


図5 デッドエンド型 MC アレイ基板
(a) 模式図, (b) MCアレイの光学顕微鏡画像

MC乳化操作は次のような手順で行われる。平板溝型MC基板の場合では、乳化モジュール内部でその加工面を石英ガラス板に圧着することにより微細流路としてのMCアレイが形成される。分散相はシリンジポンプや液柱差圧を駆動力としてモジュール内に供給される。モジュール内に供給された分散相液体がMCを通過して連続相中に押し出されることにより液滴が作製される(図2)。連続相は、必要に応じてシリンジポンプや液柱差圧を駆動力としてモジュール内に供給され、主として作製された微小液滴の回収に利用される。また、MCアレイを介した乳化操作は顕微ビデオシステムを用いて随時観察しながら行う。

3. マイクロチャネル乳化の基本特性

MC乳化により単分散エマルションを安定的に製造するためには、MCアレイの表面が分散相に濡れない状態を保つことが不可欠であり、適切な分散相・連続相・乳化剤の選択が必要である。MC乳化で最も用いられている単結晶シリコン製のMCアレイの表面は、使用前にプラズマ酸化処理が施されるため、親水性であり負に帯電している。TongらはMC乳化における乳化剤の電荷の影響について検討し、上述のMCアレイの表面との親和力が作用しない陰イオン性および非イオン性の乳化剤を用いた場合に単分散O/Wエマルションを安定的に製造できることを報告した¹⁷⁾。一方、MC乳化により単分散W/Oエマルションを安定的に製造するためには、MCアレイの表面を疎水性にする必要がある²⁾。単結晶シリコン製のMCアレイの場合では、シランカップリング処理により表面疎水化が行われる。

MC乳化により製造可能な単分散エマルション(水中植物油滴)の平均液滴径は今のところ1~100 μm 程度であり、MCの断面径の3倍程度である^{18,19)}。作製される微

小液滴のサイズは、基本的にはMCとテラスの寸法に依存するが、連続相と分散相の粘度の影響も受ける。MCとテラスの寸法に関しては、MCの深さとテラスの長さが液滴径に与える影響は大きいですが、MCの幅と長さが液滴径に与える影響はごくわずかであった^{3,20)}。また、二相の粘度比(分散相粘度/連続相粘度)が増加するにつれて液滴径が減少する傾向にあった²¹⁾。

MC乳化において、液滴作製プロセスに大きな影響を与える操作因子はMC内部での分散相流速である。分散相流速が臨界値より低い領域では界面張力が支配的となり作製される液滴のサイズもほとんど変化しないが、分散相流速が臨界値より低い領域になると粘性力の影響が現れ始めて作製される液滴のサイズが急激に増大することが示された²²⁾。また、MC乳化における臨界分散相流速はMC深さが同じ場合、MCが細長い方が高くなり、液滴作製効率が高くなることも示された²⁰⁾。

4. マイクロチャンネル乳化基板の開発

4.1 クロスフロー型マイクロチャンネルアレイ基板

MC乳化研究において当初使用されていたMCアレイ基板(図5)は、デッドエンド型と呼ばれるものであり液滴作製挙動の解析には有用であるがエマルションの回収には不向きであった。川勝らは、クロスフロー型MCアレイ基板を開発し、単分散エマルションの長時間製造と回収を容易にした²³⁾。当初設計されたクロスフロー型MCアレイ基板には2列のMCアレイが配置されている(図6)。上記のMCアレイに挟まれた空間に連続相を流通させるための流路が形成されている。クロスフロー型MCアレイ基板では、作製された微小液滴が連続相の流れにより回収孔の方へ移動でき、長時間の乳化操作が可能になっている。筆者らはその後、14列のMCアレイを有する大型クロスフロー型MCアレイ基板を開発し、このMC乳化基板を用いて単分散エマルションを従来比10倍以上の液滴生産性で製造できることを示した²⁴⁾。現時点においてクロスフロー型MCアレイ基板は、後述する貫通孔型MCアレイ基板では容易でない数 μm サイズの単分散エマルションの製造に有用なMC乳化基板である。

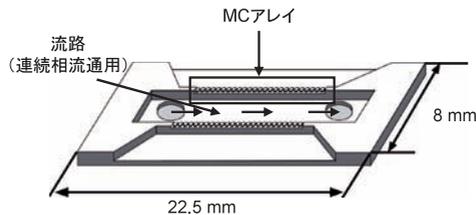


図6 クロスフロー型MCアレイ基板の模式図

4.2 貫通孔型マイクロチャネルアレイ基板

これまで紹介してきた平板溝型MC基板は単分散エマルションの製造に関しては問題ないが、MCが溝型であるという構造ゆえにMCの集積度が低くならざるを得ず、結果的に微小液滴の生産性も低くなるという課題を抱えていた。筆者らは、この課題に対する一つの解決策として微細貫通孔である貫通孔型MCが高集積された貫通孔型MCアレイ(図7)を開発した²⁵⁾。単結晶シリコン製の貫通孔型MCアレイは、最先端の半導体深掘り技術であるディープ反応性イオンエッチングを利用して加工された²⁵⁾。標準サイズの貫通孔型MCアレイ基板のサイズは24mm四方であり、基板中央部に微細貫通孔(断面サイズ約 $10\mu\text{m}$)が約1万本/ cm^2 で配置されている(図7a)。上述の技術を用いて加工された貫通孔型MCのサイズは平板溝型MCと同様に極めて均一である(図7b)。貫通孔型MCアレイ基板を用いた乳化実験は、専用の乳化モジュール内に設置された貫通孔型MCアレイを介して分散相を連続相領域中に圧入して行われる。

筆者らは当初の数年間、対称構造の貫通孔型MCアレイの開発とその乳化特性について研究を行ってきた。開発初期の頃は、貫通孔型MCの断面形状の影響について検討し、単分散エマルションの安定的製造に有用な断面構造を実験により示した(図8)^{25,26)}。円形貫通孔型MCや断面アスペクト比(長辺/短辺)が小さい矩形貫通孔型MCの場合では、平均液滴径が $100\mu\text{m}$ 以上の多分散エマルションが製造された。一方、断面アスペクト比が大きい矩形貫通孔型MCの場合では、変動係数が5%未満の単分散エマルションが製造された。矩形貫通孔型MCに関して、液滴作製挙動が大きく変化する断面アスペクト比のしきい値は約3であることがわかった。また、製造された単分散エマルションの液滴径は基本的には短辺のサイズに依存し、MC断面サイズの3倍程度であった。

貫通孔型MCアレイにおける単分散エマルション(水中大豆油滴)の生産性は、最大液滴製造速度が $60\text{L}/(\text{m}^2\text{h})$ 程度であり、平板溝型MCアレイの100倍以上の生産性を有

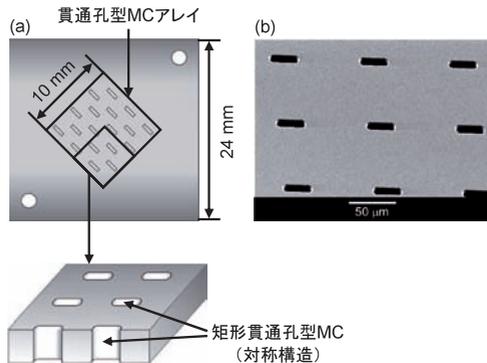


図7 貫通孔型MCアレイ基板

(a) 模式図, (b) 貫通孔型MCアレイの電子顕微鏡画像

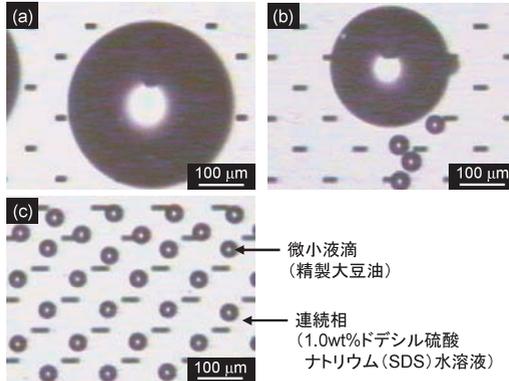


図8 矩形貫通孔型MCを介した微小液滴の作製

断面アスペクト比；1.9(a), 2.7(b), 3.8(c)
(分散相流速：10L/(m²h))

していることが示された²⁵⁾。ところが、標準サイズの貫通孔型MCアレイ基板では、均一サイズ微小液滴の生産性は10mL/hにも満たなかったため、基板の大型化に関する研究も進められている。筆者らは、MCアレイ部の面積を従来の10倍程度にスケールアップした約21万本の矩形貫通孔型MCを有するMC乳化基板を開発し、均一サイズ微小液滴(大豆油)の生産性を約10倍向上させた²⁷⁾。なお、貫通孔型MCアレイ基板のさらなる大型化は、後述する最新型の非対称貫通孔型MCアレイの方で推進中である。

MC乳化における単分散エマルションの生産性は上述の対称貫通孔型MCアレイの開発により大幅に向上した。しかしながら、対称貫通孔型MCは水のような低粘性液体を分散相として用いると液滴作製が不安定になり、結果として多分散エマルションが製造されるという欠点があった。そこで筆者らは、マイクロスロットと円形MCが連結した非対称構造の貫通孔型MCを提案した(図9a)²⁸⁾。対称貫通孔型MCアレイの場合と同様の加工プロセスにより、図9のような均一サイズの非対称貫通孔型MCが製作された²⁹⁾。非対称貫通型MCを用いることにより、分散相が低粘性油であっても単分散エマルションの安定的製造が可能であることが示された²⁸⁾。また、非対称貫通孔型MCアレイは、分散相として大豆油を用いた場合においても対称貫通孔型MCアレイよりも高い生産効率を有していることがわかった(図9b)。さらに、非対称貫通孔型MCアレイが開発されたことにより、低粘性の水溶液を分散相とした単分散W/Oエマルションを高い生産性で安定的に製造することも可能となった³⁰⁾。

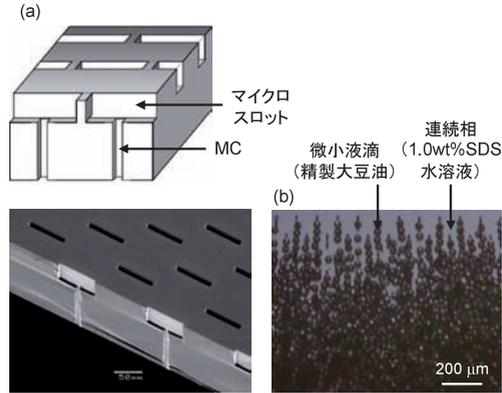


図9 (a) 非対称貫通孔型 MC アレイの模式図および電子顕微鏡画像、
(b) 非対称貫通孔型 MC を介した単分散エマルジョンの高效率製造
(分散相流速：100L/(m²h))

5. CFD を利用したマイクロチャネル乳化研究

MC 乳化装置は、液滴作製挙動の顕微鏡観察が可能な構成になっているが、液滴生産性の面で有利な貫通孔型 MC の場合では MC 内部における二相の流動状態を観察することが困難である。CFD (Computational Fluid Dynamics, 数値流体力学) は、流路内部における流体の流動・圧力状態を数值的・視覚的に詳細解析することが可能な計算機手法である。筆者らは、対称貫通孔型 MC を対称として MC 乳化プロセスの CFD 研究を開始した³¹⁾。均一径の微小液滴は、矩形貫通孔型 MC の断面アスペクト比がしきい値 (約3) よりも大きい場合に作製されることが CFD シミュレーションにおいても示された³¹⁾。また、CFD シミュレーションにより、液滴作製時の油水界面の挙動を詳細に把握することもできた。矩形貫通孔型 MC を介して均一サイズの微小液滴を作製するためには、連続相が MC 内部に流入可能な空間が十分存在し続けることが不可欠であること、ならびに分散相が MC を通過した後に MC 出口内側でネックが速やかな形成・分裂して微小液滴が作製されることを明らかにした (図10)³¹⁾。CFD は、上述の MC 断面形状の影響に加えて、MC のサイズ、分散相の供給条件、分散相と連続相の物性値の影響について検討する際にも有用なツールである。筆者らは最近、CFD を利用した非対称貫通孔型 MC を介した液滴作製に関する研究を進めている。

6. マイクロチャネル乳化の応用

MC 乳化における液滴作製プロセスは非常にマイルドであり、熱やせん断に弱い食品用素材 (たとえばタンパク質や糖質) の利用に適している。また、MC 乳化により製造された単分散エマルジョンの液滴径は精密に制御されており、食品用素材を用いて

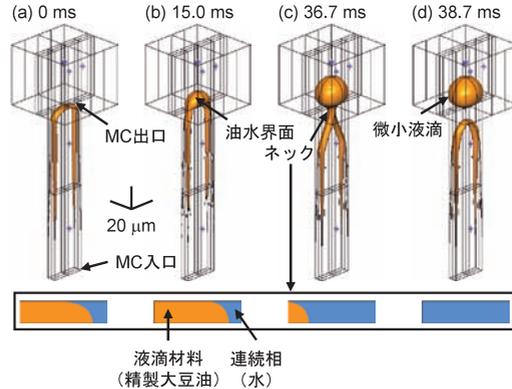


図 10 矩形貫通孔型 MC (長辺 40mm, 短辺 10mm) を介した微小液滴作製の CFD シミュレーション結果

(MC 入口における分散相流速: 1.0mm/s)

単分散マイクロ粒子・マイクロカプセルを製造するためのテンプレートとしても有用である。上述の優れた特徴を持つ MC 乳化の応用に関する種々の研究が筆者らのグループにより進められてきた。

食品用乳化剤の選択は、MC 乳化により食品用単分散エマルションを安定的に製造するために重要なポイントである。筆者のグループでは、MC 乳化における食品用乳化剤 (非イオン性乳化剤, タンパク質) の影響について検討を行った^{32,33)}。非イオン性乳化剤を含む系では、常温下で水に可溶性親水性乳化剤が単分散エマルション (水中大豆油滴) の安定的製造に有用であった。タンパク質を含む系においては、単分散エマルション (水中大豆油滴) を安定的に製造するためには、常温下で水に可溶性親水性タンパク質を選択し、なおかつ前記タンパク質が負に帯電する pH 条件で使用する必要があることがわかった。

筆者らのグループは、MC 乳化を利用した単分散マイクロ粒子・マイクロカプセルの製造についても下記の研究を行ってきた (図 11)。Sugiura らは、高温 MC 乳化により製造された単分散 O/W エマルション (分散相: 融解した高融点脂質) を冷却・凍結乾燥することにより、粉末状の単分散脂質微粒子 (平均サイズ約 20 μm) を得た¹⁵⁾。川勝らは、MC 乳化によって製造した単分散 W/O エマルション (分散相: 天然高分子水溶液) をゲル化処理して単分散天然高分子ゲルビーズ (平均サイズ約 20 μm) を得た³⁴⁾。Nakagawa らは、MC 乳化により製造した単分散 O/W エマルション (連続相: ゼラチン水溶液) にアカシア水溶液を添加し、その後系の pH 低下と温度低下の操作を行って単分散コアセルベートマイクロカプセル (平均内径 38 μm, 平均外径 52 μm) を得た³⁵⁾。Chuah らは、MC 乳化を用いて単分散 O/W エマルション (連続相: 改質レシチン水溶液)

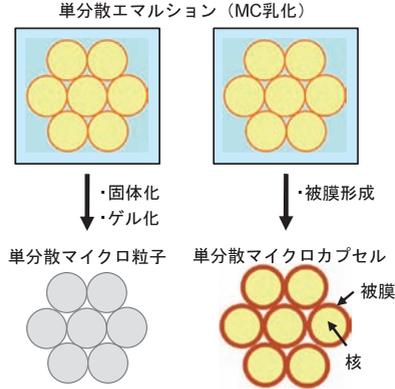


図 11 MC 乳化を利用した単分散マイクロ粒子・マイクロカプセルの製造の模式図

を製造した後、キトサン水溶液を適切な pH 条件下で適量添加することにより油水界面に安定な電解質複合体が形成された単分散 O/W エマルジョンを得た³⁶⁾。

筆者らのグループは、MC 乳化を利用した単分散複合エマルジョンの製造についても研究を行ってきた。たとえば、高圧乳化機により製造した W/O エマルジョン (平均液滴サイズ $0.2 \sim 0.3 \mu\text{m}$) を分散相として MC 乳化を行って単分散 W/O/W エマルジョン (平均油滴径約 $40 \mu\text{m}$, 内水相体積分率 $10 \sim 30\%$) を製造できることを示した (図 12)³⁷⁾。

MC 乳化は、食品に加えて医薬品・化粧品・化成品等でも有用な乳化技術であると考えられ、これまでに単分散ジャイアントベシクル^{38, 39)}、単分散高分子マイクロ粒子⁴⁰⁾、シリカナノ粒子により安定化された O/W エマルジョン⁴¹⁾ 等が MC 乳化を利用して製造された。

7. まとめ

本稿で解説した MC 乳化は、非常にマイルドなプロセスにより液滴径が精密に制御された単分散エマルジョンを製造できる先端乳化技術であることが示された。MC 乳化の基本特性に関する理解は相当進んだが、液滴化機構の完全解明や MC アレイの最適化等について今後検討する必要がある。MC 乳化装置に関しては、クロスフロー型 MC アレイ基板や貫通孔型 MC アレイ基板の開発により乳化時の操作性や液滴生産性が大幅に向上した。ラボスケールの MC 乳化装置は実用化に至ったが、実用生産規模 (液滴生産性 $> 1 \text{ kg/h}$) の MC 乳化装置の開発が急務であり、現在推進中である。また、MC 乳化で作製可能な均一径微小液滴のサイズ範囲 (現在 $1 \sim 100 \mu\text{m}$) の拡大も必要である。MC 乳化の利用により、単分散エマルジョンに加えて単分散マイクロ粒子・マイクロカプセル・複合エマルジョンの製造も可能である。これらの単分散マイクロ

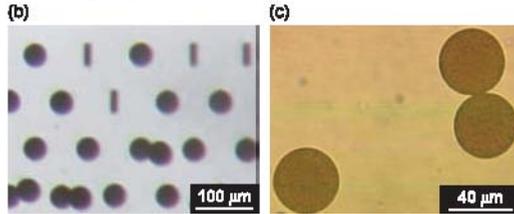
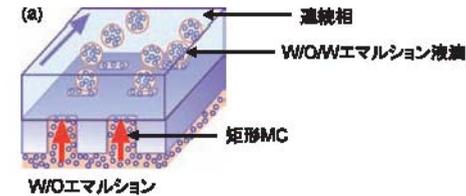


図12 貫通孔型MC アレイを用いた単分散 $W_1/O/W_2$

エマルジョン製造の模式図 (a) および顕微鏡画像 (b) ,

(c) 作製された均一径W/O/W エマルジョン液滴

(W_1 : 5.0 wt % グルコース水溶液, O : 5.0 wt% TGCR 大豆油溶液 ,

W_2 : 1.0 wt% Tween 80 ・ 5.0 wt % グルコース水溶液. 分散相操作圧力 : 1.3 kPa.)

分散系は、食品・医薬品・化粧品・化成品等への応用が期待され、実用化に向けた研究開発も一部で進められている。MC乳化に関する研究開発がさらに進展すれば、MC乳化を利用した種々の単分散マイクロ分散系の実用生産が可能になるであろうと期待される。

謝辞

MC乳化研究は中嶋光敏博士（現筑波大学教授）と共同で行ったものである。

（食品工学研究領域 先端加工技術ユニット 小林 功, 植村 邦彦）

文 献

- 1) McClements, D. J., Food emulsions: Principles, practice and techniques. 2nd ed. (CRC Press) , pp. 1-26, 233-267 (2004) .
- 2) Kawakatsu, T., Kikuchi, Y. and Nakajima, M., Regular-sized cell creation in microchannel emulsification by visual micro-processing method, *J. Am. Oil Chem. Soc.*, **74**, 317-321 (1997) .
- 3) Sugiura, S., Nakajima, M. and Seki, M., Prediction of droplet diameter for microchannel emulsification, *Langmuir*, **18**, 3854-3859 (2002) . 4) 中島忠夫, 清水正高, 多孔質ガラス膜によるO/W エマルジョンの調製, 化学工学会第21回秋季大会, p.86, 福岡 (1988) .

- 5) 中島忠夫, 清水正高, 火山ガラスを原料にした多孔質ガラス (SPG) の製造と利用, 鉱物学雑誌, **18**, 393-403 (1988).
- 6) 中島忠夫, 清水正高, 久木崎雅人, 多孔質ガラス膜による単分散 O/W エマルジョンの調製, 化学工学論文集, **19**, 984-990 (1993).
- 7) Suzuki, K., Shuto, I. and Hagura, Y., Characteristics of membrane emulsification method combined with preliminary emulsification for preparing corn oil-in-water emulsions, *Food Sci. Technol. Int.*, **2**, 43-47 (1996).
- 8) Suzuki, K., Fujiki, I. and Y. Hagura, Preparation of corn oil/water and water/oil emulsions using PTFE membrane, *Food Sci. Technol. Int.*, **4**, 164-167 (1998).
- 9) Vladislavjevic, G.T., Surh, J. and McClements, J.D., Effect of emulsifier type on droplet disruption in repeated Shirasu Porous Glass membrane homogenization, *Langmuir*, **22**, 4526-4533 (2006).
- 10) Kobayashi, I., Yasuno, M., Iwamoto, S., Shono, A., Satoh, K. and Nakajima, M., Microscopic observation of emulsion droplet formation from a polycarbonate membrane, *Colloids Surf. A*, **207**, 185-196 (2002).
- 11) Yasuno, M., Nakajima, M., Iwamoto, S., Maruyama, T., Sugiura, S., Kobayashi, I., Shono, A. and Satoh, K., Visualization and characterization of SPG membrane emulsification, *J. Membr. Sci.*, **210**, 29-37 (2002).
- 12) Katoh, R., Asano, Y., Furuya, A., Sotoyama, K., Tomita, M., Preparation of food emulsions using a membrane emulsification system., *J. Membr. Sci.*, **113**, 131-135 (1996).
- 13) 森下敏郎, 小玉誠, 河野幹雄, 固体脂キャリアにおける封入成分の5'-リボムクレオチドの高含有化, 宮崎県工業技術センター・宮崎県食品開発センター研究報告, **48**, 111-115 (2003).
- 14) Kikuchi, Y., Sato, K. and Kaneko, T., Optically accessible microchannels formed in a single-crystal silicon substrate for studies of blood rheology, *Microvascular Res.*, **44**, 226-240 (1992).
- 15) Sugiura, S., Nakajima, M., Tong, J., Nabetani, H. and Seki, M., Preparation of monodispersed solid lipid microspheres using microchannel emulsification technique, *J. Colloid Interface Sci.*, **227**, 95-103 (2000).
- 16) Sugiura, S., Nakajima, M., Iwamoto, S. and Seki, M., Interfacial tension driven monodispersed droplet formation from microfabricated channel array, *Langmuir*, **17**, 5562-5566 (2001).
- 17) Tong, J., Nakajima, M., Nabetani, H. and Kikuch, Y., Surfactant effect on production of monodispersed microspheres by microchannel emulsification method, *J. Surfactants Detergents*, **3**, 285-293 (2000).
- 18) Kobayashi, I., Uemura, K. and Nakajima, M., Formulation of monodisperse emulsions

- using submicron-channel arrays, *Colloids Surf. A*, **296**, 285-289 (2007).
- 19) Sugiura, S., Nakajima, M. and Seki, M., Preparation of monodispersed emulsions with large droplets in microchannel emulsification, *J. Am. Oil Chem. Soc.*, **79**, 515-519 (2002).
 - 20) Sugiura, S., Nakajima, M. and Seki, M., Effect of channel structure on microchannel emulsification, *Langmuir*, **18**, 5708-5712 (2002).
 - 21) Kawakatsu, T., Trägårdh, G., Trägårdh, Ch., Nakajima, M., Oda, N. and Yonemoto, T., The effect of hydrophobicity of microchannels and components in water and oil phase on droplet formation in microchannel water-in-oil emulsification, *Colloids Surf. A*, **179**, 29-37 (2001).
 - 22) Sugiura, S., Nakajima, M., Kumazawa, N., Iwamoto, S. and Seki, M., Characterization of spontaneous transformation-based droplet formation during microchannel emulsification, *J. Phys. Chem. B*, **106**, 9405-9409 (2002).
 - 23) Kawakatsu, T., Komori, H., Nakajima, M., Kikuchi, Y. and Yonemoto, T., Production of monodispersed oil-in-water emulsion using crossflow-type silicon microchannel plate, *J. Chem. Eng. Japan*, **32**, 241-244 (1999).
 - 24) 小林功, 和田芳弘, 植村邦彦, 中嶋光敏, 平板溝型マイクロチャネルを用いた乳化法のスケールアップ, 日本食品工学会第7回年次大会, p. 152, つくば (2006).
 - 25) Kobayashi, I., Nakajima, M., Chun, K., Kikuchi, Y. and Fujita, H., Silicon array of elongated through-holes for monodisperse emulsions, *AIChE J.*, **48**, 1639-1644 (2002).
 - 26) Kobayashi, I., Mukataka, S. and Nakajima, M., Effect of slot aspect ratio on droplet formation from silicon straight-through microchannels, *J. Colloid Interface Sci.*, **279**, 277-280 (2004).
 - 27) Kobayashi, I., Mukataka, S. and Nakajima, M., Production of monodisperse oil-in-water emulsions using a large silicon straight-through microchannel plate, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **44**, 5852-5856 (2005).
 - 28) Kobayashi, I., Mukataka, S. and Nakajima, M., Novel asymmetric through-hole array microfabricated on a silicon plate for formulating monodisperse emulsions, *Langmuir*, **21**, 7629-7632 (2005).
 - 29) Kobayashi, I., Vladislavjević, G.T., Uemura, K. and Nakajima, M., High-performance production of monodisperse emulsions using microfabricated asymmetric through-hole array, *Proc. μ TAS 2007*, 1541-1543 (2007).
 - 30) Kobayashi, I., Murayama, Y., Kuroiwa, T., Uemura, K. and Nakajima, M., Production of monodisperse water-in-oil emulsions consisting of highly uniform droplets using asymmetric straight-through microchannel arrays, *Microfluid. Nanofluid.*, DOI : 10, 1007/s10404-008-0368-3.

- 31) Kobayashi, I., Mukataka, S. and Nakajima, M., CFD simulation and analysis of emulsion droplet formation from straight-through microchannels, *Langmuir*, **20**, 9868-9877 (2004).
- 32) Kobayashi, I. and Nakajima, M., Effect of emulsifiers on preparation of food-grade oil-in-water emulsions using a straight-through extrusion filter, *Eur. J. Lipid Sci. Technol.*, **104**, 720-727 (2002).
- 33) Saito, M., Yin, L.-J., Kobayashi, I. and Nakajima, M., Preparation characteristics of monodispersed oil-in-water emulsions with large particles stabilized by proteins in straight-through microchannel emulsification, *Food Hydrocolloids*, **19**, 745-751 (2005).
- 34) 川勝孝博, 織田直哉, 米本年邦, 中嶋光敏, マイクロチャネル W/O 乳化法による単分散アルブミンマイクロカプセルの作製, 化学工学論文集, **26**, 122-125 (2000).
- 35) Nakagawa, K., Iwamoto, S., Nakajima, M., Shono, A. and Satoh, K., Microchannel emulsification using gelatin and surfactant-free coacervate microencapsulation, *J. Colloid Interface Sci.*, **278**, 198-205 (2004).
- 36) Chuah, A.-M., Kuroiwa, T., Kobayashi, I. and Nakajima, M., Effect of chitosan on the stability and properties of modified lecithin stabilized oil-in-water monodisperse emulsion prepared by microchannel emulsification, *Food Hydrocolloids*, **23**, 600-610 (2009).
- 37) Kobayashi, I., Mukataka, S. and Nakajima M., Preparation of monodisperse W/O/W emulsions using microfluidization and straight-through microchannel emulsification, *J. Am. Oil Chem. Soc.*, **82**, 65-71 (2005).
- 38) Sugiura, S., Kuroiwa, T., Kagota, T., Nakajima, M., Sato, S., Mukataka, S., Walde P. and Ichikawa, S., Novel method for obtaining homogeneous giant vesicles from a monodisperse water-in-oil emulsion prepared with a microfluidic device, *Langmuir*, **24**, 4581-4588 (2008).
- 39) Kuroiwa, T., Kiuchi, H., Noda, K., Kobayashi, I., Nakajima, M., Uemura, K., Sato, S., Mukataka, S. and Ichikawa, S., *Microfluid. Nanofluid.*, DOI: 10.1007/s10404-008-0854-9.
- 40) Sugiura S., Nakajima, M., Itoh, H. and Seki, M., Synthesis of polymeric microspheres with narrow size distributions employing microchannel emulsification, *Macromol. Rapid Commun.*, **22**, 773-778 (2001).
- 41) Xu, Q., Nakajima, M. and Bink, B. P., Preparation of particle-stabilized oil-in-water emulsions with the microchannel emulsification method, *Colloids Surf. A*, **262**, 94-100 (2005).

Ⅲ. 食品高圧加工技術

はじめに

有史以来、食品の調理・加工と言えば、火すなわち熱を利用することであった。事実、食品の調理・加工における操作に関する日本語では、焼く、炒める、煮る、蒸す、煎る等の漢字は、火偏(ひへん)、連火(れんが)等の「火」を表現する偏旁を部首として含む。人類は、火を用いた加熱操作により、食品に焼き目や焦げ目を付けて独特の風味を醸し出して美味しくしたり、殺菌して保存期間を長くしたりしてきた。現代社会では、火に変わって電子レンジ、電気オーブンが利用されるようになったが、これらも加熱を積極的に利用した熱的操作である。

一方、食品加工への圧力の利用は、遡ればナポレオンの時代からなされている。フランス軍の長期遠征のために、ガラス瓶の中に食べ物を入れて密封加熱することにより、長期保存可能な食品を実現している。つまり、おそらく数気圧の加圧であったであろうが、ガラス瓶に密封して加熱すると同時に、瓶内の蒸気により圧力が増し、結果としてレトルト操作が加えられていたと考えられる。この技術を基盤として、現在では、食品工場で加工されるレトルト食品は密封した容器を加圧下で加熱することによる滅菌食品の製造が可能となっており、家庭では圧力釜による加圧加熱で調理時間が短縮可能となっている。しかし、これらにおける加圧は、密閉系での加熱により常圧よりも数気圧程若干高くしているだけの消極的加圧に過ぎない。つまり、従来の食品加工においての圧力利用は、このような消極的利用が殆どであり、加熱操作の補助的役割を果たすのが主流であった。

しかし、1980年代後半に状況は一変した。数千気圧(数百MPa)(表1)もの高圧力を、食品加工で積極的に利用することが提案されたのである。加熱を積極的に利用しないという意味で、広義の非熱的操作と言えよう。1987年、当時京都大学助教授の林力丸博士が、高圧力の食品加工への利用についての提言を「食品と開発」に和文で投稿¹⁾して以降、食品高圧加工の研究開発が日本で盛んになり、この流れは世界へと広がった。日本において芽吹いたこの革新的な加工技術、食品高圧加工技術により、圧力が新たな食品加工操作パラメータとして加わった。

高圧処理がもたらす変化

食品の加熱により、食品中の様々な分子の運動が活発になり、水などの揮発成分が気化して損失し、分子同士の衝突回数が増えて分子間の化学反応が促進され、また、分子を構成する原子同士が激しく動き合うために、分子内の原子間結合が切れやすくなる。このため、分子中の官能基が他の官能基と反応して新たな加熱生成物が生じたり、分子結合が切れて有用成分が失われたりするなど、様々な化学反応が起きる。この化学反応により、加熱食品に独特な風味や色合いが醸し出される。

表 1 圧力の単位換算

	Pa (N/m ²)	MPa ¹⁾ (10 ⁶ x N/m ²)	bar	標準大気圧 ²⁾ atm	工学気圧 ³⁾ kgf/cm ²	psi ⁴⁾ (lbf/in ²)	Torr (mmHg)
Pa (N/m ²)	1	1 x 10 ⁻⁶	1 x 10 ⁻⁵	0.98693 x 10 ⁻⁵	1.0197 x 10 ⁻⁵	1.4504 x 10 ⁻⁴	7.50062 x 10 ⁻³
MPa (10 ⁶ x N/m ²)	1 x 10 ⁶	1	10	9.8693	10.197	145.04	7500.62
bar	1 x 10 ⁵	0.1	1	0.98693	1.0197	14.504	750.062
標準大気圧 atm	1.01325 x 10 ⁵	0.101325	1.01325	1	1.0332	14.696	760
kgf/cm ² (工学気圧)	9.80665 x 10 ⁴	9.80665 x 10 ²	0.980665	0.9678	1	14.2233	735.559
psi	6.895 x 10 ⁻³	6895	6.895 x 10 ⁻²	6.805 x 10 ⁻²	7.0307 x 10 ⁻²	1	51.71
Torr (mmHg)	1.33332 x 10 ⁻⁴	1.33332 x 10 ²	1.33332 x 10 ⁻³	1.316 x 10 ⁻³	1.35951 x 10 ⁻³	0.01934	1

1) 100 MPa = 986.93 atm (約 1,000 atm)

2) 標準大気圧 : 1 atm = 1.01325 x 10⁵ Pa (1954年第10回国際度量衡総会にて定義)

3) kgf/cm² (工学気圧 : at) は、圧力計等に用いられた。1 kgf/cm² = 9.80665 x 10⁴ Pa

4) pound per square inch: 1 lb (1 pound: 0.45359237 kg) に標準重力加速度 (9.80665 m/s²) と同じ加速度を生じさせる力 1 lbf (1 重量ポンド : 4.4482216152605 N) が、1 in² (1 平方インチ : 6.4516 x 10⁻⁴ m² = 0.0254 x 0.0254 m²) にかかる圧力。米国で未だに使われている。

5) 1 Torr = 101325 / 760 Pa と定義されている。1 Torr ≈ 1 mmHg として実用上差し支えない。

一方、圧力処理は、積極的な加熱を行わない広義の非熱的処理であるため、熱処理で促進される化学反応は原則的には起きず、分子の巨視的・微視的な物理的変化が起こる。つまり、圧力が高くなると、巨視的には、例えば気泡分散系では気体が液体に溶解して気泡が失われて均一化し、微視的には、分子運動が制約を受けつつ、分子と分子との間にある空隙を埋めるように分子は詰め込まれる。特に巨大分子、例えばタンパク質などでは、巨大分子立体構造内の空隙を埋めるように、それまで分子を安定化していた分子内の水素結合などが切れて構成原子が詰め込まれ、分子自体の体積を小さくするように、より密になるように、分子内の空隙が埋められて元の立体構造が崩れる。つまり変性が起こる。高圧下での分子は、常圧下ではとりえない立体構造にたたみ込まれることもあり、この条件下では、常圧下で近づき得なかった官能基が接近するなどして新たな反応が起きることもある。また、二つの分子が化学反応を起こして全体の体積が減少する場合は、化学反応が促進されることがある。

食品の高圧加工においては、圧力処理におけるこの特異な物理的変化を利用して、食品に様々な変化を起こすことができる。

一方、高圧処理においては、積極的な加熱は行わなくても、加圧時には断熱圧縮に

よる温度上昇、減圧時には断熱膨張による温度低下があるため、非加熱操作ではなく、狭義では非熱的操作でない。また、高圧処理の加圧・減圧時の温度変化は、加圧・減圧速度、容器形状等にも左右される。しかし、水の圧縮率は数%程度であるため、気体と比べると、圧縮率は著しく低く、加圧時・減圧時の温度変化は比較的少ない。また、食品高圧加工においては、含水率が高い食品を対象とし、気体が混入していても加圧時には食品中の気体に溶け込んでしまうので、やはり温度変化は少なく、食品高圧加工の実用装置においてこれを問題にすることは殆ど無い。

食品高圧加工の歴史

食品加工においては、食品成分の変化、微生物の不活性化等が重要である。長年の研究成果の蓄積により、食品の熱処理に関しては、これらについて多くの知見があり、また、現在も知見が日々蓄積している。一方、圧力が食品成分もしくは食品微生物の挙動に及ぼす影響についての研究蓄積は、熱処理と比べると著しく少ない。

高圧力が生物・生物素材に及ぼす影響についての基礎科学的な研究は、1899年に Hite が報告した高圧(力)による牛乳保存性向上の論文²⁾に見られるように、19世紀末から行われており、更に1912年には高圧下での水の状態図³⁾が、1914年には卵白の変性⁴⁾が、Bridgmanにより報告され、同じく1914年に Hite ら⁵⁾により野菜、果物の微生物学的保存性と高圧処理との関連について報告されている。ハーバード大学の P. W. Bridgman は、ピストンシリンダー型の高圧装置を用いて、さまざまな物質の高圧下での挙動を系統的に研究し、1946年にノーベル物理学賞を受賞している。いわば高圧研究全般の父とも言える研究者である。

高圧力の工業的な利用は、1950年代半ばから、人造ダイヤモンド、セラミック膜製造などに見られる。しかし、食品の処理、加工への実用的利用に関する研究は、1987年に林¹⁾により高圧処理技術の食品加工への応用が提言されるまでは活発にはなされておらず、この提言以来、食品・生物関連の高圧研究が著しく進展したと言える。また、これ以前には、セラミックス加工などに用いられてきたHIP(熱間等方圧加圧: Hot Isostatic Press)及びCIP(冷間等方圧加圧: Cold Isostatic Press)が高圧食品加工用として利用されることはなかったと言えよう。当時の食品科学者にとって、熱以外の操作パラメータである圧力の利用は革新的であり、高圧利用という一種のブームに湧いていたようである。事実、農林水産省食品流通局技術室(当時)では、1989年から4ヶ年計画で食品製造業11社および機械装置・計測器・包装資材製造業10社からなる食品産業超高压利用技術研究組合を運営し、11の研究課題を遂行した⁶⁾。卵黄・卵白の物性変化・殺菌、低温殺菌・細胞損傷、包材への影響、カカオマス殺菌・カカオ脂テンパリング・カカオ後発酵、高粘性食品の高圧処理、蜂蜜殺菌、水産物の高圧処理、緑茶飲料の殺菌、乳・乳製品製造、解凍・不凍結低温貯蔵・鮮度保持、食肉加工、麹菌の高密度培養が課題であった。同時に、温度制御や衛生対策を施した食品加工用高圧装置の開発も行われた。

高圧加工食品研究の変遷

1987年以降の取り組みにより高圧加工商品の開発が行われ、1990年には、世界初の高圧加工食品が日本に於いてジャムとして実現した^{7,8)} (図1)。食品衛生法では高圧殺菌が認められていないこと、加熱していないために酵素が失活せず酸素が残存することなどから冷蔵流通されたが、果実の生の風味を損なうことなく微生物を不活性化した画期的な新規食品として着目を集めた。ここで、「殺菌」ではなく「不活性化」という用語を用いるのは、高圧処理では微生物が殺菌される場合もあるが、損傷を受けるのみで回復しうる^{よもぎ}可能性があることを加味しているからである。高圧加工ジャム以外にも、高圧処理した蓬を練り込み、新鮮な色調・風味を残した蓬餅⁹⁾も市販されている (図2)。高圧 (力) により米粒に水を含浸させてから炊き上げる手法による高圧処理を利用した無菌米飯も各種実用化し、電子レンジでの戻りの良さがセールスポイントとなった¹⁰⁾ (図3)。近年、上述の高圧処理浸漬無菌米飯を密閉した容器に発熱体とともに入れ、水を注いで発熱させるだけで米飯30食を暖めて供することを可能とした非常用米飯が開発され、長期保存に耐えかつおいしくて暖かいご飯を災害時などの緊急時に活用できるようになった (図4)。



図1 世界初の高圧加工食品「ジャム」
(イチゴ、リンゴ、ブルーベリー)⁵²⁾



図2 高圧加工した蓬 (ヨモギ) を練り込んだ餅⁵²⁾



図3 浸漬工程に高圧処理を利用した無菌米飯⁵²⁾



図4 高圧処理無菌白飯を利用した非常食
(30食, 5年間保存可能)⁵²⁾

高圧加工食品開発当初は、食品の殺菌に主眼がおかれ、さまざまな高圧殺菌実験がなされたが、納豆菌のように安定な孢子を形成して環境変化に耐える芽胞菌については高圧殺菌が困難であること、装置の初期設備投資が大きく中小企業には普及しづらいことなどから、高圧食品加工技術開発を断念したり市場から撤退したりする企業も徐々に増え、研究も一時の勢いを失ってしまったかに思えた。

しかし、高圧力が生体成分もしくは生物に及ぼす影響についての研究はその後も着実に進められ、生物素材に及ぼす高圧力の影響についての国際会議が1992年のフランスを皮切りに、1995年日本、1996年ベルギー、1998年ドイツで開催された。以降、高圧バイオサイエンス・バイオテクノロジー国際会議 (International Conference on High Pressure Bioscience and Biotechnology : HPBB) として定期開催となり、2000年に日本(京都)で第1回のHPBBが開催されて以降、2002年ドイツ(ドルトムント)の第2回HPBB、2004年ブラジル(リオデジャネイロ)の第3回HPBB、2006年日本(つくば)の第4回HPBB、2008年米国(サンディエゴ)の第5回HPBBが開催された。2010年にはドイツ・ミュンヘンで第6回HPBBが開催される予定である。また、欧州では、FAIRプロジェクトによる食品・生物系高圧研究の推進に続き、欧州連合の30機関が集い、2006年3月1日よりNovelQ IP FP6 of the EU¹¹⁾が開始された。NovelQ (ノーヴェルQ)と略称されるこのプロジェクトIntegrated Project 'Novel processing methods for the production and distribution of high-quality and safe foods' (総合プロジェクト「高品質で安全な食品を生産し流通させるための新規加工法」)では、新鮮さを醸し出す製品の品質及び保存期間を改善する目的で、高圧処理、パルス電場処理、プラズマ処理、先端加熱技術、包装技術といった環境に優しい新規加工技術を開発して実証する。2006年から毎年の会合が開催され、研究開発が進められており、今後注目すべき動向である。また、米国では軍用高品質食糧としての有用性を睨み、大学・企業で盛んに研究が進められている。韓国では日本企業との連携により高圧処理無菌米飯が実用化した。韓国では、これら製品の宣伝を積極的にテレビ放送したおかげで、韓国の消費者における食品高圧加工の認知度が高まり、好印象が定着したという。これもあって、韓国では食品高圧加工に進出する企業が続々と出ているという。一方、日本国内では、生物関連高圧研究会が活発に活動し、また、2004年の第45回高圧討論会以降、物理、化学、材料、地学といった従来からの高圧科学に加えて、食品・生物関連のセッションが設けられるようになった。

このように、食品成分・生体成分の研究は脈々と続けられ、澱粉、各種タンパク質の変性、酵素活性、微生物不活性化などに関する研究蓄積がなされてきた。また、高圧加工肉製品の実用化がスペインのみならず、米国、日本でも行われ好評を得ており、また、高圧処理無菌米飯も日本のみならず韓国でも実用化していることから、これまでの研究蓄積の活用が更に進展してきたと言える。

物性変換

高压処理により、物質は、密度を小さくする方向に圧縮され、疎密の違いが減少する方向に物理的変化が起こる。その際に、澱粉の水懸濁液が糊になったり、タンパク質分子が変性したりする等、物性が変化する。

澱粉は、水の共存下で加熱すると熱糊化することが知られているが、高压処理によっても糊化する現象（圧力糊化：pressure gelatinization）が明らかとなり、さまざまな澱粉を対象に、特に圧力及び温度の影響が調べられた。圧力糊化澱粉の酵素受容性向上¹²⁾や特異な粘弾性挙動^{13,14)}も調べられ、また、高压処理直後から観測される老化（急速老化：rapid retrogradation）も発見された¹⁵⁾。しかし、この圧力糊化を系統的に把握するための研究は少なく、5%の小麦澱粉水懸濁液について状態図が得られている^{16,17)}のみで、その他の澱粉について、異なる水分含有量についての検討は十分でなかった。筆者らのグループはこの点について研究を進め、高压処理した馬鈴薯澱粉の状態図を作成している¹⁸⁾。澱粉以外の糖類については、すでに1972年には寒天-水系、メチルセルロース水系でのゾルゲル相図が6,000気圧までについて報告され、エンタルピー変化 (ΔH) 及び体積変化 (ΔV) が、寒天では負値、メチルセルロースが正値をとることから、それぞれ親水性である水素結合、疎水結合の生成が相転移に関与すると指摘されている¹⁹⁾。

食品タンパク質に関しては、乳、卵、畜肉、魚肉のタンパク質について検討されている。 α -ラクトグロブリン、 β -ラクトグロブリン、分離ホエータンパク質といった乳タンパク質のゲル化などの物性変化²⁰⁾、卵タンパク質の加圧によるゲル化²¹⁾、卵白アルブミンの加圧によるゾルゲル転移²²⁾、加圧によるミオシンの状態変化²³⁾、アクトミオシンのゲル-ゾル変換²⁴⁻²⁶⁾、魚肉タンパク質のゲル化²⁷⁾などが広く研究されている。近年では、システイン添加により、高压処理のみではゲル化しない α -ラクトグロブリンのゲル化が起こることが報告され²⁸⁾、システインのような還元性食品成分の加圧ゲル化促進能の研究の更なる進展が待たれる。

チョコレートなどの油脂系食品の成分、或いは微生物の細胞膜構成成分である脂質の高压力による相転移についても知見が集められ、カカオ脂、大豆油、パーム油、コブラ油などの固-液相転移²⁹⁾やリン脂質二分子膜のゲル液晶相転移^{30,31)}などが温度および圧力によって制御できることがわかっている。

単位操作としての利用

澱粉、タンパク質、脂質などの物性変換のみならず、化学工学における単位操作の観点からの高压利用研究がなされている。

タンパク質のX線構造解析には結晶化が不可欠だが、タンパク質自体が結晶化しにくいものであり、格子欠陥の少ない良質な結晶を作るのは難しい。しかし、タンパク質の中には、高压力下で結晶化が促進されるもの（例：グルコースイソメラーゼ）があること、静水圧であれば系内に速やかに均一に伝播する操作性の利点が結晶化制御

に適しており、高品質結晶の育成に圧力制御が有効であることから、圧力は新たな晶析操作パラメータとしての可能性を秘めている^{32,33)}。

200 MPaまでの加圧下では、氷の融点が圧力上昇に伴って低下するので、圧力移動凍結技術 (pressure-shift-freezing) が興味深い。例えば、-10℃で凍結している食品を100 MPa以上に加圧すると氷が融解し、逆に0℃以上で100 MPaに加圧した水は、加圧したまま-10℃付近に冷却することで漸く凍結する。これらを利用して、豆腐³⁴⁾、寒天ゲル³⁵⁾、カラギーナン³⁵⁾の高圧凍結の際に生じる変性について研究がなされている。

乾燥穀類を水に浸漬するプロセスでは、吸水時間が長いことが問題となる。例えば、大豆では16～18時間必要であるが、これは、高圧液体含浸プロセスにより短縮することが出来る。高圧含浸無菌玄米飯では、吸水に12時間程度が必要な玄米を高圧処理することにより、精白米と同等の30分で吸水を完了させることに成功している³⁶⁾。

また、高圧処理による低アレルギー化も可能である。コメのアレルゲンタンパク質を高圧処理によって抽出する技術により、低アレルギーご飯および低アレルギー米パンが開発されている³⁷⁾。

更に、200 MPa以下の高圧処理により、牡蠣の二枚貝が開き、身が簡単に落ちることが知られており³⁸⁾、高圧処理は二枚貝の開殻・脱殻、ロブスターの脱殻簡易化のためにも用いられている。日本では、牡蠣・アサリなどの二枚貝の開殻・脱殻において実用化されている。例えば、従来は専用の治具を使って牡蠣の二枚貝を開殻してから、更に貝柱を削いで身を脱殻して加工用牡蠣としていたところを、80 MPa、40℃の条件下で処理することにより、これら操作が同時に行えるばかりでなく、手作業の際には問題となっていた牡蠣殻片の混入による製品へのクレームが、実用化して少なくとも3年間で全く無いという。しかし、貝殻に付着した構造タンパク質が関与するであろう開殻・脱殻機構については未解明であり、今後の機構解明研究が待たれる。

微生物不活性化

微生物、特に細菌の不活性化についての研究は、1899年のHiteの論文¹⁾に始まり、食品高圧加工の研究に於いて歴史が比較的長い。しかし、食品の高圧処理による微生物不活性化の効果については、その加工利用の歴史が始まってから知見が飛躍的に増大したと言える。特に、高圧処理による微生物の損傷・回復に関連した研究は、近年盛んになっており、高圧処理により細菌コロニーが検出されないことが、殺菌を意味することの他に、損傷を意味することもあることが注目されている³⁹⁾。これらに鑑みると、微生物に対する高圧処理の影響を評価する際には、「殺菌」よりも広義の「不活性化」を用語として用いるのが適切と考えられる。

食品高圧加工においては、化学結合が影響を受けることが殆どないため、香気成分、色素成分、栄養成分、機能性成分は一般に損失が少ない。従って、高圧力によって細菌類を不活性化しつつ、高品質な最小加工食品を生産することが出来る。高圧処理による微生物不活性化を活用した実用化事例としては、高圧加工肉製品がある⁴⁰⁾ (図5)。

ハム・ソーセージ等の肉製品の製造では、まず熱処理によって一次殺菌を行うが、食品添加物を加えない場合は、ハムのスライス、ソーセージの切断、それらの包装の際に混入した乳酸菌などの腐敗菌が保存中に増殖するために、賞味期限が短くなる問題がある。そこで、包装後に二次殺菌として高圧処理を施すことにより、腐敗菌を不活性化し、食品添加物を加えることなくとも賞味期限を延長することが可能である。しかも、硝酸塩を加えない場合には味質も向上するという。

芽胞菌の殺菌には困難が伴い、1 GPaでも完全には死滅させられないことも報告されているが、急速減圧する際の衝撃波 (Shockwave) を利用したShockwave殺菌法⁴¹⁾により芽胞菌の殺菌効率を高められることが示されている。一方で、食中毒の原因となる菌の殆どが芽胞菌でないとの指摘もあり、また、滅菌状態でなくとも低温流通・保蔵により高品質食品を提供できると言う観点からも、今後さらに高圧加工食品には期待が寄せられる。

レトルト処理のような加熱滅菌操作でも、完璧な殺菌が達成できるとは限らない。酸性食品では、80～90℃、10～20分間のレトルト処理により芽胞菌以外の微生物を殺菌するが、酸性食品の物性値範囲 (pH4.6以下、水分活性0.94以下) では芽胞状態の細菌は増殖しない。高圧殺菌に於いては、細菌の死滅条件を明らかにして安全係数をかけ、操作条件を決定することにより、食中毒事故のリスクを低減することは可能である。特に、酸性食品については、高圧不活性化後にして低温流通し、高品質加工食品として流通させることが今後期待される。

近年は、予測微生物学が注目されている。予測微生物学は、pH、温度、塩濃度など様々な環境条件における残存微生物の増殖挙動、殺菌工程における死滅挙動について実験データを集積し、予測式によってそれら挙動を記述し、新たな食品の殺菌条件における増殖・死滅挙動を予測して、操作条件の最適化に活かす学問である。国際データベース (ComBase)⁴²⁾には世界中の殺菌データが逐次集められているが、高圧殺菌に関するデータに関して、日本からの呼びかけによりデータベース化がなされようとしている。また、細菌の増殖・死滅挙動を予測するプログラムについては、米国農務



図5 熱処理（一次殺菌）後に高圧処理により二次殺菌した肉製品⁵²⁾

省のPMP (Pathogen Modeling Program)⁴³⁾がインターネットで公開されており、対象菌種を選び、加工操作条件を入力することで細菌の増殖・死滅挙動の予測ができる。これも逐次改訂されており、将来的には高圧不活性化の予測も可能となることが期待される。更に、細菌の増殖・死滅の経時変化を予測する動力学的予測手法に加え、高圧処理した細菌の生存/死滅境界線を記述する統計的予測手法⁴⁴⁾が提示されており、今後更に、予測微生物学的手法により微生物の高圧不活性化を評価し、活用することが期待される。

一方、高圧による微生物不活性化機構の解明に向けて、高圧力が生体に及ぼす影響について研究が進められている。大腸菌、枯草菌、酵母などのゲノムが解明され、近年最も着目に値するのは、これらゲノム情報を元に遺伝子発現や遺伝子構造を網羅的に解析する技術、ジェノミクス (genomics) である。ジェノミクスの核となるのはDNAマイクロアレイであり、これは数 cm^2 のスライドガラス基板に数百から数万種類のDNAプローブ (DNAの短鎖) を配置させたもので、高圧処理した微生物のmRNAを抽出して、特異的に発現した遺伝子、もしくは逆に発現が抑制されてしまった遺伝子を特定することができる⁴⁵⁾。この手法は、深海微生物等の高圧力耐性機構解明においても威力を発揮する。

高圧処理が食品成分量に及ぼす影響

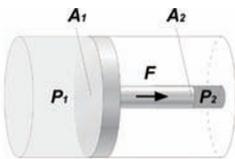
高圧処理によって化学結合が殆ど影響を受けず、各種成分が維持されることはすでに述べたが、野菜や果実を高圧処理することによって栄養成分であるビタミンC^{46, 47)}や血圧降下効果のある機能性成分のGABA (γ -アミノ酪酸)⁴⁸⁾が増強されることが近年明らかとなりつつある。この増強機構については解明されていないが、高圧処理における減圧時に細胞組織が破壊されることで、細胞内外の基質・代謝酵素の相互作用が高まることが原因ではないかと考えられている。

食品高圧加工装置

食品高圧加工においては、概して100~600MPaの高圧力が用いられる。このような高圧力を発生させるためには、クレーン、ショベルカーなどの動作を支援する油圧ポンプの圧力(10~70MPa)を増圧機により増圧して利用する。原理は極めて簡単で、増圧機内部のプランジャーにより、油圧を大きな面積(低圧力側)に負荷し、プランジャーを介して小面積(高圧(力)側)の水(食品処理用の圧力媒体)に伝えるものである。つまり、力を負荷する面積によって圧力が決定される原理を単純に利用したものである(図6)。

1990年代から、工業用の高圧加工装置が食品加工用として改良されて利用されるようになった。高圧加工装置としては、高圧容器にピストンを圧入して容積を減少させて加圧する直接加圧法によるものと、高圧容器に高圧力の圧力媒体を圧入して加圧する間接加圧法によるものがある(図7)。これらのうち、食品加工用として実用化さ

れている装置は、間接加圧法によるものである。また、食品加工用実用化装置には、縦型と横型とがある(図8)。従来の食品高压加工装置では、縦型が主流であったが、近年は、横型が普及しつつある。食品加工では、大量処理により処理費用を抑制することが重要であるため、食品高压加工でも同様に、処理費用削減のために容器の大型化が望まれる。容器の大型化のためには、容器径を増すか、容器長を増すかの選択があるが、容器径を増すと、指数関数的に容器壁を厚くする必要があり、大幅なコストアップになるので、装置製造コストを抑制するためにも、容器長を増して対応するのが理想的である。縦型で容積長を増すと、処理品を取り出すために、処理品が入ったカゴを最低でも容器長の倍程度の高さから釣り上げて取り出さなければならず、天井高さが制約要因となる。一方、横型では、設置場所の最大長に応じて如何様にも容器長を増すことが可能となる利点があるが、容器の開放時に圧力媒体となる水を全て取り出し、容器密閉時に再度水を大量に入れるという縦型では不要であった操作が必要になる。しかし、横型では、圧力媒体圧入用ポンプ以外に、高速で圧力媒体を流入させる目的のポンプを併用することによって、この問題点を解決している。横型の高压食品加工装置は、最大処理量が420Lのものが開発されており⁴⁹⁾、その処理能力から、今後益々普及する可能性がある。



$$P_2 = F / A_2 = P_1 \times (A_1 / A_2)$$

ex) 600 MPa = 60 MPa x (50 cm² / 5 cm²)

図6 増圧の原理

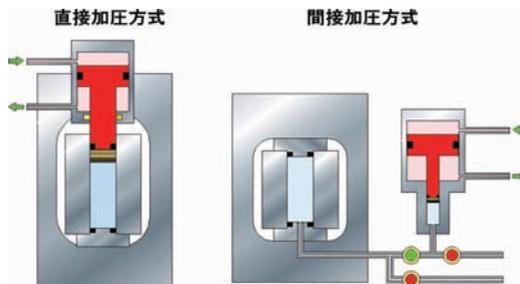


図7 直接加圧方式と間接加圧方式⁵²⁾

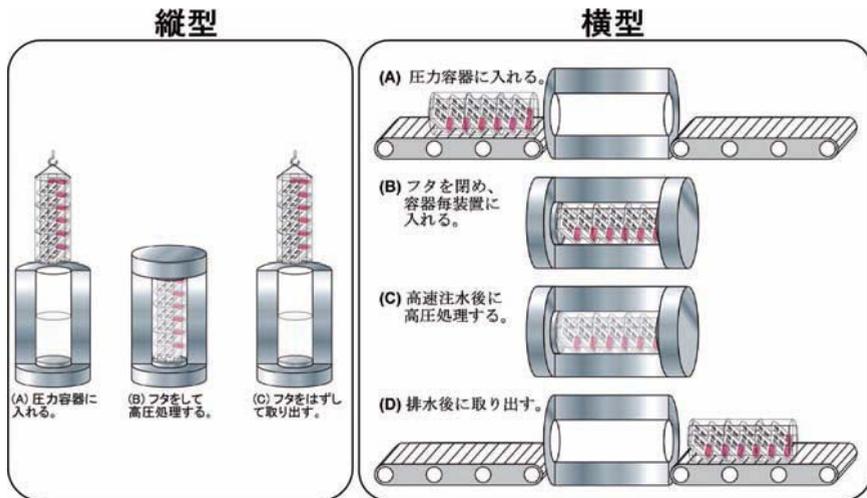


図8 縦型・横型の食品用高圧加工装置⁵¹⁾

おわりに

食品高圧加工は日本で初めて実用化し、世界に広がり、現在では欧米でいくつもの高圧加工食品が販売されている。しかし、高圧力が食品成分、生体成分、微生物を始めとする生物に及ぼす影響は、熱がそれらに及ぼす影響と比べると圧倒的に理解が遅れている。しかし言い換えれば、食品高圧加工の分野は、高圧力で誘導されるであろう未発見現象の宝庫であると言える。

近年の国際会議での食品高圧加工に関する発表を見ると、バクテリオシンなどの添加物併用、他の非熱的殺菌手法との併用等による殺菌効果の向上といった新たな視点は見られるものの、日本国外では依然として殺菌を目的とした高圧利用研究が盛んである。日本国内では、高圧力による牡蠣の開殻・脱殻工程や高圧液体含浸を利用した米飯類の製造が実用化され、また、野菜・果実の栄養・機能性成分の高圧処理による増強可能性が見出されている。高圧力で液体を含浸させるといった視点は、これまでのところ諸外国で殆ど着目されていないものであり、特に栄養・機能性成分の増強については、諸外国での研究報告は見られない。

未発見現象の宝庫である食品高圧加工の分野においては、新視点での研究開発を深化させることにより、実用化技術が更にまた見出だされるであろうし、基礎科学における新発見も続々と発見されると期待される。

ここ数年の高圧食品加工における進展の流れの詳細については、過去の幾つかの総説^{50,53)}と本稿とを読み比べて頂きたい。

(食品工学研究領域 食品高圧技術ユニット 山本 和貴,小関 成樹)

参考文献

- 1) 林力丸：食品と開発，**22**, 55-62 (1987)。
- 2) B. H. Hite, *Bull. West Virginia Univ. Agric. Exp. Station*, **58**, 15-35 (1899)。
- 3) P. W. Bridgman: *Proc. Amer. Acad. Arts Sci.*, **47**, 441-558 (1912)。
- 4) P. W. Bridgman: *J. Biol. Chem.*, **19**, 511-512, (1914)。
- 5) B. H. Hite, N. J. Giddings, C. E. Weakley, Jr., *Bull. West Virginia Univ. Agric. Exp. Station*, **146**, 3-67 (1914)。
- 6) 食品産業超高压利用技術研究組合 編，“食品産業の未来を拓く高压技術と高密度培養”，(1993, 健康産業新聞社)。
- 7) 堀江雄, 木村邦男, 井田雅夫, 吉田泰博, 大亀邦仁, *日本農芸化学会誌*, **63**, 975-980 (1991)。
- 8) K. Kimura, M. Ida, Y. Yoshida, K. Ohki, T. Fukumoto, *Biosci., Biotechnol. Biochem.*, **58**, 1386-1391 (1994)。
- 9) 山崎彬, 笹川秋彦, 柘淵美倭子, 山田明文, “高压バイオサイエンス”, 功刀滋, 嶋田昇二, 鈴木敦士, 林力丸 編, p. 328-335 (1994, さんえい出版)。
- 10) 山崎彬, 笹川秋彦, *日本農芸化学会誌*, **74**, 619-623 (2000)。
- 11) http://www.novelq.org/ANQ/ANQ_index.aspx
- 12) R. Hayashi, A. Hayashida, *Agric. Biol. Chem.*, **53**, 2543-2544 (1989)。
- 13) M. Stolt, N. G. Stoforos, P. S. Taoukis, K. Autio, *J. Food Eng.*, **40**, 293-298 (1999)。
- 14) H. Katopo, Y. Song, J. -L. Jane, *Carbohydr. Polym.*, **47**, 233-244 (2002)。
- 15) R. Stute, R. W. Klingler, S. Boguslawski, M. N. Eshtiaghi, D. Knorr, *Starch/Stärke*, **48**, 399-408 (1996) 。
- 16) J. P. Douzals, J. M. Perrier-Cornet, J. C. Coquille, P. Gervais, *J. Agric. Food Chem.*, **49**, 873-876 (2001)。
- 17) B. A. Bauer, D. Knorr, *J. Food Eng.*, **68**, 329-334 (2005)。
- 18) K. Kawai, K. Fukami, K. Yamamoto, *Carbohydr. Polym.*, **67**, 530-535 (2007)。
- 19) K. Suzuki, Y. Taniguchi, T. Enomoto, *Bull. Chem. Soc. Jap.*, **45**, 336-338 (1972)。
- 20) 菅野長右エ門, 木泰華, 萩原敏夫, 飴谷美智子, 東徳洋, “高压生物科学と高压技術”, 鈴木敦士, 林力丸編, p.109-116 (1997, さんえい出版)。
- 21) 本間一男, 芳賀紀之, “生物と食品の高压科学”, 林力丸 編, p.325-330 (1992, さんえい出版)。
- 22) 土井悦四郎, 清水篤, 北島直文, “生物と食品の高压科学”, 林力丸編, p.171-177 (1992, さんえい出版)。
- 23) 山本克博, *化学と生物*, **37**, 375-380 (1999)。
- 24) 鈴木敏郎, 松本信二, 鴨居郁三, “生物と食品の高压科学”, 林力丸編, p.288-292 (1992, さんえい出版)。

- 25) Y. Ikeuchi, H. Tanji, K. Kim, A. Suzuki, *J. Agric. Food Chem.*, **40**, 1751-1755 (1992).
- 26) Y. Ikeuchi, H. Tanji, K. Kim, A. Suzuki, *J. Agric. Food Chem.*, **40**, 1756-1761 (1992).
- 27) 又平芳春, 良知昭吾, 坂口幸政, 山口孝司, 坂井和男, 石川正人, “高压バイオサイエンス”, 功刀滋, 嶋田昇二, 鈴木敦士, 林力丸編, p.288-295 (1994, さんえい出版).
- 28) 和勁松, 佐藤和寛, 萩原敏夫, 東徳洋, 菅野長右エ門, 日本農芸化学会大会講演要旨集, 263-263 (2005).
- 29) 安田篤史, 望月恵三, 清水孝雄, 鈴木敦, “高压科学と加圧食品”, 林力丸編, p.176-180 (1991, さんえい出版).
- 30) 金品昌志, 松木均, 高压力の科学と技術, **4**, 223-230 (1995).
- 31) 金品昌志, 松木均, 高压力の科学と技術, **9**, 213-220 (1999).
- 32) Y. Suzuki, G. Sazaki, T. Matsui, K. Nakajima, K. Tamura: *J. Phy. Chem. B*, **109**, 3222-3226 (2005).
- 33) 鈴木良尚, 佐崎元, 澤田勉, 宮下哲, 小松啓, 田村勝弘, 高压力の科学と技術, **13**, 149-156 (2003).
- 34) 測上倫子, 高压力の科学と技術, **9**, 191-198 (1999).
- 35) M. Fuchigami, A. Teramoto, “Advances in High Pressure Bioscience and Biotechnology”, ed. H. Ludwig p. 493-496 (1999, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg).
- 36) 山崎彬, 高压力の科学と技術, **6**, 182-186 (1997).
- 37) 山崎彬, 高压力の科学と技術, **6**, 236-241 (1997).
- 38) 室越章, 日本水産学会誌, **70**, 671-673 (2004).
- 39) S. Koseki, K. Yamamoto, *Int. J. Food Microbiol.*, **110**, 108-111 (2006).
- 40) 田邊学, 食品と容器, **48**, 628-635 (2007).
- 41) I. Hayakawa, S. Furukawa, A. Midzunaga, H. Horiuchi, T. Nakashima, Y. Fujio, Y. Yano, T. Ishikura, K. Sasaki, *J. Food Sci.*, **63**, 371-374 (1998).
- 42) Eastern Regional Research Center, US Department of Agriculture- Agricultural Research Service, ComBase.
[<http://wyndmoor.arserrc.gov/combase/>] . Accessed Oct. 30, 2008.
- 43) Eastern Regional Research Center, US Department of Agriculture- Agricultural Research Service, Pathogen Modeling Program:
[<http://ars.usda.gov/Services/docs.htm?docid=6786>] . Accessed Oct. 30, 2008.
- 44) S. Koseki, K. Yamamoto, *Int. J. Food Microbiol.*, **116**, 136-143 (2007).
- 45) 岩橋均, 環境技術, **31**, 679-685 (2002).
- 46) 笹川秋彦, 山崎彬, 山本美穂子, 佐藤悠子, 山田明文, 第45回高压討論会講演要旨集, p.66-66 (2004).
- 47) 小関成樹, 松原真樹, 山本和貴, 日本食品科学工学会第52回大会講演要旨集, p.108-108 (2005).

- 48) 杵淵美倭子, 関谷美由紀, 山崎彬, 山本皓二, 日本食品科学工学会誌, **46**, 323-328 (1999).
- 49) C. Tonello, 食品と容器, **49**, 262-269 (2008).
- 50) 山本和貴, 食品と容器, **46**, 614-619 (2005).
- 51) 山本和貴, 小関成樹, 食品と容器, **48**, 150-154 (2007).
- 52) 山本和貴, 小関成樹, 農業技術, **63**, 69-77 (2008).
- 53) 山本和貴, 食品と容器, **49**, 328-334 (2008).

Ⅳ. 無触媒メチルエステル化法を用いた バイオディーゼル燃料の製造

—国内の廃食用油への応用とアジアの油糧資源への展開の可能性—

1. はじめに

近年、地球温暖化や化石資源枯渇問題を背景に、バイオディーゼル燃料 (biodiesel fuel) が軽油代替燃料として注目されている。バイオディーゼル燃料とは、植物油脂や動物油脂などの再生可能な資源からつくられる軽油代替燃料である。一般的には、動植物油脂の主成分であるトリグリセリドとメタノールとの反応により得られる脂肪酸メチルエステルのことをいう。その主な特徴は、カーボンニュートラル、生分解性、再生可能なバイオマス燃料、排ガスが軽油のそれに比較してクリーンであることなどである。

日本とアメリカや欧州とにおけるバイオマスの位置づけには、多少の相違が見られる。すなわち、欧米では、バイオマス利用は余剰農産物対策の一環であるのに対して、エネルギー作物の集約的栽培が困難な我が国では、有機性廃棄物の地域エネルギー化を目指した技術開発研究が中心となっている。このことは、バイオディーゼル燃料の利用に関してもあてはまる。欧州ではナタネの新油を、またアメリカではダイズの新油を原料としたバイオディーゼル燃料が生産されているのに対し、食用油脂の9割以上を輸入に頼っている我が国では、新油を原料としたバイオディーゼル燃料の生産は現実的ではなく、廃食用油を原料とした検討が中心となっている。

ここでは、まず、国内における廃食用油の現状を解説するとともに、国内外におけるバイオディーゼル燃料利用の現状とその問題点について述べる。次に、バイオディーゼル燃料生産に関する最近の取り組みとして、無触媒メチルエステル化法に関する研究例を紹介する。さらに、無触媒メチルエステル化法の特徴に基づき、アジアの油糧資源への展開の可能性について考察する。

2. 我が国における廃食用油の現状

食用油は、表1のように、動植物油脂を精製したものが用いられており、総消費量は、年間約2.5百万tで、植物油脂が2.25百万t、動物油脂が0.25百万tである¹⁾。廃食用油の発生量(食用として供給される油脂の量から、ヒトにより摂取される油脂、直接廃棄される揚げ油、鍋や皿または製造設備に付着し洗い流される油脂、油脂容器に残存し捨てられる油脂、食べ残しとして捨てられる油脂および市中から戻り廃棄される製品に含まれる油脂の量を差し引いた量。すなわち、食用として供給された後に、回収可能な形態で排出される油脂の量)を正確に把握するのは困難であるが、発生元は家庭と業務用(食品製造業を含む)であり、回収されているのは業務用が中心で家庭用はわずかである。回収量(発生した廃食用油のうち実際に回収され再利用される

表1 我が国の消費実績（平成13年）

(単位:原油1,000t)

用途 区分	国内向け需要			輸出用	合計
	食用	非食用	計		
植物油	2,251	252	2,503	20	2,523
動物油	245	236	481	1	482
計	2,496	489	2,985	21	3,006

油脂の量)は、再利用用途からの推計によれば、飼料用と脂肪酸分解用が主で、その量は年間20～25万tとされている。全体の発生量は、家庭からの発生量が販売量や調理方法から見て20万tと見込まれることから、業務用をあわせて40～45万t程度とみられている²⁾。

このような廃食用油の現状からすると、未回収の20万t程度については、バイオディーゼル燃料として汎用的に使用される可能性を有していると考えられる。また、回収廃食用油の用途の中心である飼料および脂肪酸原料としての需要が落ち込み傾向にある中、バイオディーゼル燃料化のコストが低減されれば、現在飼料等に利用されているものの全量が、バイオディーゼル燃料に流れる可能性もある。さらに、廃食用油のバイオディーゼル燃料化が国民の意識の中に浸透すれば、廃食用油の回収率が增大することが期待され、下水へ流される廃食用油の量が減ったり、ごみの量が減ったりといった面での環境負荷軽減の効果も期待される。

3. バイオディーゼル燃料利用の現状

欧州においては、主にナタネの新油からバイオディーゼル燃料が生産されており、その生産量は、2004年において、ドイツが約109万t、フランスが約50万t、イタリアが約42万tとされる。また、アメリカにおいてもダイズの新油を主な原料として約8万tのバイオディーゼル燃料を生産しており、2004年現在、世界全体で200万tを上回る生産量があるとされる。生産量は年々増大しており、2005年には300万t、さらに、2006年には400万tに達したとされている³⁾。また、世界第一位および第二位のパーム油生産量をほこるインドネシアおよびマレーシアにおける現状については、筆者らの調査報告⁴⁾があるので参考にされたい。一方、食用油脂の9割以上を輸入に頼っている我が国においては、新油によるバイオディーゼル燃料生産は現実的ではなく、廃食用油を原料としたバイオディーゼル燃料生産が一部で行われているのが現状である。国内における生産量は年間3000tといわれ、そのうちの1600tが京都市の事業によるものである⁵⁾。京都市では、1997年以来、脂肪酸メチルエステルに変換することを目的として、家庭や食堂から廃食用油を回収している。アルカリ触媒法により廃食用油から脂肪酸メチルエステルを製造し、ゴミ回収車および市バスの燃料として利用している。約220台のゴミ回収車が、脂肪酸メチルエステルを燃料として走行している。市

バスの場合には、出力の関係上、脂肪酸メチルエステル20%と軽油80%とからなる燃料 (B20) を用いており、約80台が走行している。

4. バイオディーゼル燃料の利用促進を妨げている問題点

動植物油脂は、軽油に比較して高い粘度を有するため、そのままでは通常のディーゼルエンジンの燃料として使用することはできない。ディーゼル代替燃料としての利用を可能にするためには、その粘度を低下させる必要がある。動植物油脂からのディーゼル代替燃料製造で実用化されている製法は、アルカリ触媒を用いたトリグリセリド (triglyceride) のアルコリシスによる脂肪酸メチルエステル (fatty acid methyl esters: FAME) の生成を利用した低粘性化技術であり、副産物としてグリセリン (glycerol) が生成する (図1)。

廃食用油を原料としたディーゼル代替燃料の価格を低下させ実用性を向上させるためには、副産物であるグリセリンの有効な用途を開発しなくてはならないが、アルカリ触媒を用いたメチルエステル化法では反応後にアルカリ触媒を取り除く精製工程を設けない限りは副産物の用途には制限がある。

また、アルカリ触媒法では遊離脂肪酸が反応を阻害するため、廃食用油を原料として用いる場合には前処理として脱酸工程が必要となるが、この工程が余分なコストを要するばかりではなく、脱酸により歩留まりが減少する。

このため、アルカリ触媒を用いることなく低コストでバイオディーゼル燃料を生産できる方法が求められている。

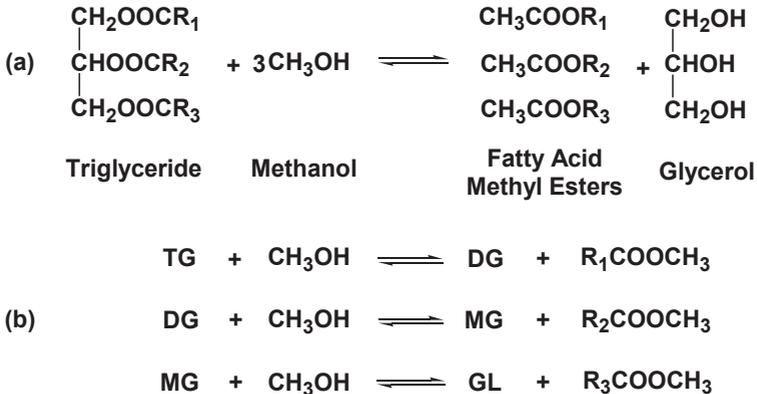


図1 油脂 (トリグリセリド: Triglyceride) のアルコリシスによる脂肪酸メチルエステル (Fatty Acid Methyl Ester: FAME) の生成。

(a)は全体反応を表し、(b)は同反応を3段の平衡反応として記述。TG: トリグリセリド, DG: ジグリセリド, MG: モノグリセリド, GL: グリセリン (glycerol); 通常はアルカリ触媒を使用

5. バイオディーゼル燃料生産に関する最近の研究

従来のアルカリ触媒を用いたメチルエステル化法に比較して、アルカリ触媒を用いないメチルエステル化法は、いくつかの利点を有する。

無触媒メチルエステル化法による反応システムにおいては、反応後にアルカリ触媒を除去するための精製工程が不要となる。したがって、システム全体の構造が簡略化されるとともに、副産物であるグリセリンを他の産業で直接利用することが可能となる。このため、バイオディーゼル燃料製造に要する全体としてのコストが低減される。

また、無触媒メチルエステル化法を用いたシステムにおいては、トリグリセリドだけではなく遊離脂肪酸もメチルエステルに変換できると考えられる。したがって、反応に先駆けて遊離脂肪酸を除去するための脱酸工程が不要となる。このため、バイオディーゼル燃料の製造コストが低減されるとともに、システム全体としての歩留まりが向上することが期待される。

こうした利点に対する期待から、我が国において、いくつかのグループがバイオディーゼル燃料製造のための無触媒メチルエステル化プロセスの開発に取り組んでいる。

5.1 超臨界メタノール法

アルカリ触媒を用いないメチルエステル化法として、超臨界メタノール法が提案されている⁶⁾。この方法は、触媒を用いる代わりに、メタノールを臨界点(239℃, 8.09 MPa)以上の高温高压にすることで反応性を高めるものである。なたね油2.0gを、350~400℃, 45~65MPaの高温高压条件下で、メタノールと油のモル比を42:1として反応させた結果、240秒で反応が終了したとするデータがSakaらにより示されている。また、最近では、亜臨界水による油脂の加水分解を組み合わせた二段階超臨界メタノール法⁷⁾と呼ばれる方法が提案されている。この方法では、まず亜臨界状態の水を用いてトリグリセリドを加水分解して遊離脂肪酸とグリセリンを得た後に、超臨界メタノール中で遊離脂肪酸をメチルエステル化して脂肪酸メチルエステルを得る。二段階超臨界メタノール法を用いることにより、製品中に含まれるモノグリセリド含量が低下し、製品の品質が向上するとしている。

5.2 STING 法

飯嶋ら⁸⁾は、油脂のエステル交換と熱分解との同時反応に基づくSTING法(Simultaneous reaction of Trans-esterification and crackING)法を提案している。この方法においては、超臨界状態のメタノール中において油脂のメチルエステル化反応と熱分解反応とが同時に進行し、中鎖脂肪酸からなるトリグリセリド、ジグリセリド、モノグリセリドおよびメチルエステルならびに高級アルコール、低級アルコール、その他炭化水素等が生成する。これらの成分は単一の相を形成し、全体がディーゼル代替燃料として利用される。このため、このプロセスにおいては副産物(グリセリン)は生成せず、

プロセス全体としての歩留まりを向上させることができる。また、STING法により生成した製品は、アルカリ触媒法によるものと比較して粘度と流動点がともに低い。このため、その品質はアルカリ触媒法によるものに比較して高いとされる。

5.3 過熱メタノール蒸気法

超臨界メタノール法やSTING法によるプロセスは、高温・高圧の条件下での操作を必要とするため、これらの方法を用いた際のイニシャルコストは比較的高価なものとなると考えられる。メチルエステル化によるディーゼル代替燃料の製造コストをさらに低減するための方法として、筆者らは常圧付近で過熱メタノール蒸気を油脂中に吹き込むことによりメチルエステルを生成する無触媒メチルエステル化反応の検討を行っている^{9,10}。図2に検討に用いた装置の概略を示す。油脂 (vegetable oil) を満たした反応槽 (reactor vessel) の底部より過熱状態のメタノール蒸気 (superheated methanol vapor) を供給する。生成したFAMEは、未反応のメタノール蒸気およびグリセリン (glycerol) とともに反応槽から流出し、冷却器 (condenser) で凝集・回収される。未反応のメタノールを除去することにより、FAMEとグリセリンは二相に分離する。この反応においては、触媒は一切用いられない。

容量500mLのベンチスケールの反応槽を用いてひまわり油による反応を行った結果、290℃程度の反応温度で最も効率よくFAMEが生成することを確認している。この方法は、アルカリ触媒の除去工程が不要となるばかりではなく、常圧付近での反応であるため装置コストを低く抑えることができるものと期待される。

図3には、過熱メタノール蒸気法におけるFAMEの流出速度に及ぼす原料油脂の組成の影響を示した。この方法においては、トリグリセリド (TG) だけではなく、遊離脂肪酸 (FFA) もFAMEに変換されることが分かる。さらには、遊離脂肪酸における

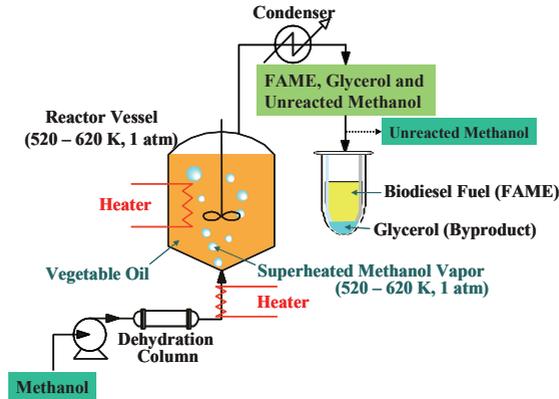


図2 過熱メタノール蒸気法に基づく反応装置のフロー図

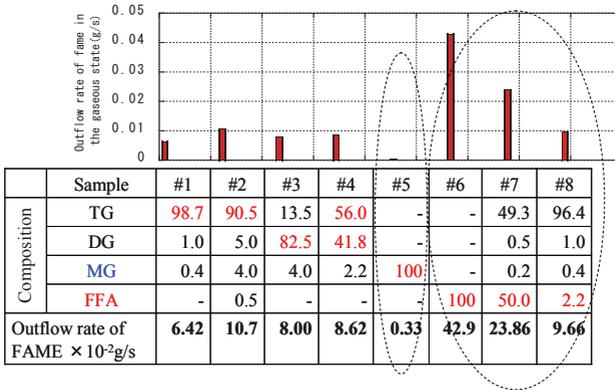


図3 原料油中の組成が脂肪酸メチルエステル（FAME）の流出速度（outflow rate）に及ぼす影響

(TG: トリグリセリド, DG: ジグリセリド, MG: モノグリセリド, FFA: 遊離脂肪酸)

FAMEの流出速度は、トリグリセリドにおける値に比較して数倍高いことが分かる¹¹⁾。すなわち、従来法であるアルカリ触媒法においては反応を阻害する遊離脂肪酸が、過熱メタノール蒸気法においては反応を促進する物質として作用するばかりではなく、それ自身がFAMEの原料となり得ることが明らかとなった。このことは、過熱メタノール蒸気法が、不純物として遊離脂肪酸を高濃度に含有する廃食用油等の原料に適した方法であることを示すものである。

ベンチスケールでの結果をもとに、1時間あたり1000kgのFAMEを生産することの

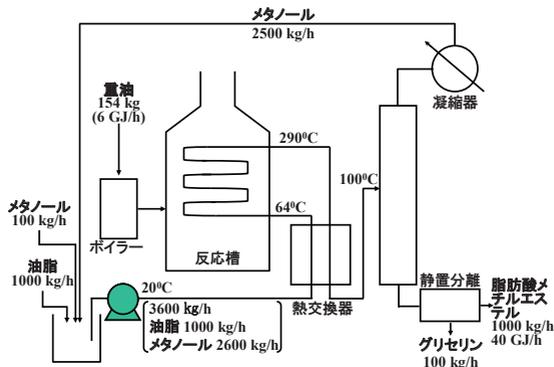


図4 ベンチスケールの反応装置での実験結果をもとに想定した実用規模の反応装置における物質収支

できる規模にこの方法をスケールアップした場合を想定し、その反応装置における物質収支と経済性の評価を行った¹²⁾。想定した反応装置のフローを図4に示す。ここでの原料はトリグリセリドである。この反応装置の場合、1000kgのFAMEを製造するために、154kgの重油が反応器の熱源として消費されることとなる。すなわち、40GJの燃焼熱を有するFAMEを生成する際に必要な投入エネルギーは、6GJとなる。また、製造コストに関しても、従来のアルカリ触媒法に比較して1kgあたり30円程度低減できる可能性が示唆されている。

平成17年度においては、1日当たり40LのFAMEを製造することのできるパイロットプラントを設計・製作しその性能を確認している(図5)。現在は、1日当たり400LのFAMEを生産できる規模の実証試験装置を用いて、実用化に向けての検討を行っている(図6)。



図5 過熱メタノール蒸気法に基づくパイロットプラントの外観
(設計生産能力：40 L/d)



図6 過熱メタノール蒸気法に基づく実証プラントの外観
(設計生産能力：400 L/d)

6. アジアにおける油糧資源への展開

前述のとおり、欧州やアメリカにおいては、それぞれなたね油と大豆油を用いたバイオディーゼル燃料製造が大々的に行われている。しかしながら、食用利用と競合する油糧資源をバイオディーゼル燃料の原料とすることは、食用油脂の価格の高騰を招く等の問題を引き起こす可能性がある。このため、我が国を含むアジアの国々においては、油脂の搾油工程から排出される廃液に含まれる脂質や油脂精製工程での副産物（遊離脂肪酸等）およびジャトロファ（*Jatropha curcas* L.）等の食用利用と競合しない油糧作物から得られる油脂が、バイオディーゼル燃料製造用の原料として高い可能性を有しているものと考えられる。

インドネシアおよびマレーシアは、それぞれ世界第一位および第二位のパーム油生産量をほこっており、搾油工程から排出される廃液に含まれる脂質や油脂精製工程で排出される副産物だけでもかなりの賦存量になるものと考えられる。特に、油脂精製工程から排出される遊離脂肪酸の量は、少なくとも原料油の5～10%程度に達するとされる。しかも、これらの油糧資源は、既に集まって存在しており、回収を必要としないといった特長も有する。さらには、インドネシアやマレーシアにおいては、こうした油糧資源は、年間を通じてコンスタントに排出され、季節性がないといった特長を有する。

ジャトロファは、年間降雨量400mm以下のやせた土地でも生育可能であり干ばつや害虫にも強いいため、インドネシア東部地域などオイルパーム生産に向かない限界地（マージナルランド）でも生育が可能とされる⁴⁾。また、ジャトロファの種子から搾油した油は毒性があり非食用油脂であるため、パーム油のように食用需要と競合することはなく、生産量の拡大がバイオディーゼル燃料原料の増産に直結する可能性が高いなどの利点を有する。しかも、ジャトロファの導入は、限界地への農業の展開を可能とするものであり、こうした地域における社会貢献が期待される。このため、東南アジア、特にインドネシアにおいて、ジャトロファの増産が検討されている。こうした状況からすると、ジャトロファから得られる粗油を精製することなくそのまま用いることができれば、精製のためのコストを削減することが可能となり、バイオディーゼル燃料製造原料としてのポテンシャルはさらに高まるものと考えられる。

これらの油糧資源の特徴は、遊離脂肪酸の含量が高い点である。このため、これらの資源はアルカリ触媒法を用いたディーゼル代替燃料生産には適していない。一方、前述の通り、無触媒メチルエステル化法は、油脂の主成分であるトリグリセリドだけではなく遊離脂肪酸からもFAMEを生成することが可能である。このため、無触媒メチルエステル化法は、アジアの油糧資源に適した方法であると考えられ、今後の展開が期待される。

7. おわりに

以上、動植物油脂、特に廃食用油をディーゼル代替燃料として利用するための研究の動向を紹介した。現在、国内で消費されている軽油は、4600万kLとされ、国内で排出される廃食用油の全量をバイオディーゼル燃料として利用できたとしても、需要全体の1%程度にとどまる。しかしながら、ここで紹介したように触媒を用いないバイオディーゼル燃料製造技術は、東南アジアにおけるパーム油製造工程から排出される廃棄物系脂質等の幅広い資源に対して適用が可能であると考えられる。

こうした研究の成果から、低価格で効率よくバイオディーゼル燃料を製造する技術が確立され、これらの技術が地球温暖化の防止や化石資源の保護およびアジアにおける農村の活性化に貢献することを期待する。

謝辞

本稿で紹介した研究成果のうち「無触媒過熱メタノール蒸気法による廃食用油からのバイオディーゼル燃料製造技術の開発」に関しては、農林水産省「地域活性化のためのバイオマス利用技術の開発(エタノール変換)」プロジェクトの助成により、東京大学大学院農学生命科学研究科農学国際専攻国際情報農学研究室、滋賀県立大学工学部機械システム工学科山根研究室、鹿島建設株式会社技術研究所およびアイシーエス株式会社と共同で実施されたものである。

(食品工学研究領域 反応分離工学ユニット 鍋谷浩志, 穂原昌司)

参考文献

- 1) 我が国の油脂事情, 農林水産省食品産業振興課, p.107 (2002).
- 2) 義村利秋: 廃食用油の利用と今後の動向, 第2回油化学セミナー資料, 日本油化学会, p.29-34 (1999).
- 3) 特別レポート「バイオディーゼルの抱える問題点」, 油脂, **59**, 37-41 (2006).
- 4) 山崎理恵, 鍋谷浩志, 相良泰行: マレーシア・インドネシアにおけるパームディーゼル研究動向, 日本食品工学会誌, **6**, 105-111 (2005).
- 5) 特集「バイオディーゼル燃料-現状と見通し-」, 油脂, **56**, 18-23 (2003).
- 6) Saka, S. and Kusdiana, D.; Biodiesel fuel from rapeseed oil as prepared in supercritical methanol, *Fuel*, **80**, 225-231 (2001).
- 7) Kusdiana, D. and Saka, S.; Two-Step Preparation for Catalyst-Free Biodiesel Fuel Production, *Applied Bio-chem. Biotechnol.*, **115**, 781-792 (2004).
- 8) 飯嶋渡: グリセリンを副生しない軽油代替燃料の製造技術, 農業技術, **60**, 512-516 (2005).
- 9) Yamazaki, R., Iwamoto, S., Nabetani, H., Osakada, K., Miyawaki, O., Sagara, Y.; Non-

- Catalytic Alcoholysis of Oils for Biodiesel Fuel Production by a Semi-Batch Process, *Japan Journal of Food Engineering*, **8**, 11-18 (2007).
- 10) Joelianingsih, Maeda, H., Hagiwara, S., Nabetani, H., Sagara, Y., Soerawidjaya, T. H., Tambunan, A. H., Abdullah, K.; Biodiesel fuels from palm oil via the non-catalytic transesterification in a bubble column reactor at atmospheric pressure: a kinetic study. *Renewable Energy*, **33**, 1629-1636 (2008).
 - 11) Joelianingsih, Nabetani, H., Hagiwara, S., Sagara, Y., Soerawidjaya, T. H., Tambunan, A. H., Abdullah, K.; Performance of a Bubble Column Reactor for the Non-Catalytic Methyl Esterification of Free Fatty Acids at Atmospheric Pressure. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, **40**, 780-785 (2007).
 - 12) 石川智子, 山崎理恵, 岩本悟志, 鍋谷浩志, 小坂田潔, 宮脇長人, 相良泰行; 無触媒アルコリス反応によるバイオディーゼル燃料生鮮方法の経済性評価と原料油の価格がバイオディーゼル燃料の価格に及ぼす影響について, 日本食品工学会誌, **6**, 113-120 (2005).

V. スペクトルイメージングの食品評価への応用

1. はじめに

食品は様々な物質からなる混在系であり、その内部における各種成分の分布がその品質を大きく左右する。例えば、パンやうどんの品質を高めるには、生地段階においてタンパク質由来のグルテンを網目状かつ均一分布させることが重要とされている¹。しかしながら、食品の品質測定は化学分析値やテクスチャ等、成分分布を配慮しないパラメータを対象とする場合がほとんどであり、成分分布を可視化した研究は数少ないのが現状である。成分分布を可視化する事例においても、前処理が必要である、形状から経験的に判断を行っており恣意的である等の課題が多い。そのため、食品の製造条件が食品内部における成分分布、ひいては品質に影響を与える機構は未解明のままである。

そのため、従来はポイント測定である分光法や蛍光測定法を、2次元計測に拡張する「スペクトルイメージング」により、食品の成分分布を可視化する研究が、近年行われるようになってきた^{2,3,4,5}。本稿では、スペクトルイメージングの概要について述べると共に、筆者らが取り組んできた食品評価への応用事例について紹介する。

2. スペクトルイメージングの概要

2.1. ハイパースペクトルとマルチスペクトル

スペクトルイメージングは、表1に示すようにハイパースペクトルイメージングとマルチスペクトルイメージングに分けられる⁶。前者は、図1に示すハイパースペクトルを計測・解析する手法であり、従来の分光・蛍光計測では試料の1点においてスペクトルを測定するのに対し、ある平面領域内の全ての点において連続スペクトルを測定する。例えば100万画素のデジタルカメラを利用して平面領域内のスペクトルを取得する場合、100万個の検出器によるスペクトル測定に相当し、従来法と比較して100万倍という膨大な量のデータを取り扱うことになる。ハイパースペクトルには、従来のスペクトルと同様に試料の光学的情報に加えて、位置情報も含まれているという特

表1 スペクトルイメージングの分類

	ハイパースペクトルイメージング	マルチスペクトルイメージング
スペクトル情報	連続	離散
情報量	多	小
測定・解析時間	長	短
例	赤外イメージング、近赤外イメージング、ラマンイメージング、励起・蛍光マトリックスイメージング	多重蛍光観察、カラー画像撮影

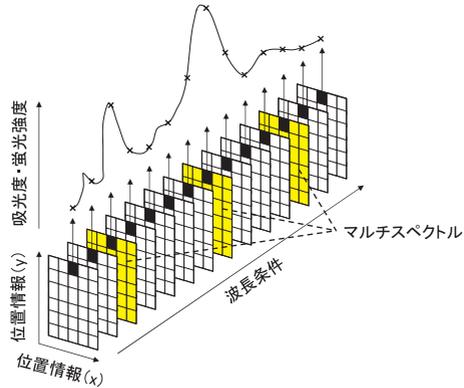


図1 ハイパースペクトル

通常の画像は、 x 、 y 方向の位置情報を持つ。ハイパースペクトルは連続した異なる波長条件で撮影した画像を並べたもので、位置情報の他に各画素のスペクトル情報を持つ。 $x \times y \times$ 波長条件からなる3次元データであることから、「ハイパーキューブ」と呼ばれることもある。また、マルチスペクトルは、ハイパースペクトルから互いに離れた数波長分のデータを抽出したものである。

徴がある。情報量が多い反面、測定や解析に長時間を要するという難点がある。ハイパースペクトルイメージングの例として、赤外イメージング⁷、近赤外イメージング⁸、ラマンイメージング⁶、励起・蛍光マトリックスイメージング⁹等が挙げられる。

一方、マルチスペクトルイメージングは、位置情報の取得についてはハイパースペクトルイメージングと同じであるが、連続スペクトルではなく、互いに離れた数波長分の光学情報のみを計測・解析する手法である。情報量が少ない反面、測定・解析に時間を要さないため、研究分野のみならず、産業界における製品の品質評価等にも用いられている。多重染色した試料を複数の励起・蛍光波長条件で観察する多重蛍光観察や、RGB3バンドの情報を対象とするカラー画像撮影が例として挙げられる。

以下では、計測・解析により高度な技術を要するハイパースペクトルイメージングの計測法、解析法について述べる。

2.2. ハイパースペクトルの計測法

ハイパースペクトルの計測は位置情報取得と分光計測を組み合わせで行われる。主な位置情報取得法を表2に示す。XY走査法は、試料の1画素に相当する範囲の吸光スペクトルを、単素子の検出器で測定する方法である。従来法と異なる点は、試料をXY方向に走査することにより、位置情報を取得する点である。常に同じ条件で計測するため、照明ムラが全くない反面、得たい画像の画素数分だけ計測を繰り返す必要があり、画像の取得に長時間を要する。一方、イメージ撮影法は、CCD素子などの面

表 2 位置情報取得法の比較

位置情報取得法	検出器形状	機械的走査	利点	欠点
XY走査法	1点	要	安価・照明ムラなし	計測に時間を要する
ライン走査法	線上に配列	要	照明ムラ小	計測に比較的時間を要する
イメージ撮影法	面上に配列	不要	計測が短時間	照明ムラの補正が必要

状の検出器を用い、1回の測定で位置情報を取得する方法である。画像の取得が迅速に行えるのが特徴であるが、正確な計測を行うためには、試料表面における照明ムラを補正する必要がある。また、ライン走査法（pushbroom法¹⁰とも呼ばれる）は、検出器をライン状に並べ、1回の測定で検出器の数だけスペクトルを測定する方法である。試料を検出器が並ぶ方向と垂直に走査することにより、位置情報を取得することが可能である。XY走査法とイメージ撮影法の間隔的な特徴を持ち、前者とよりも短時間で、後者よりも照明ムラの少ない画像を撮影することが可能である。

一方、主な分光法には、表3に示す手法が挙げられる。バンドパスフィルタは、特定波長の光のみを透過させる特殊なフィルタである。バンドパスフィルタは安価であり、光の透過率が高く短時間の露光で画像が得られる利点がある反面、1波長につき1枚のバンドパスフィルタが必要であり、連続スペクトルの測定は困難である。また、グレーティング（回折格子）は、従来の近赤外分光法で用いられており、連続スペクトルの測定が可能である。しかしながら、グレーティングの前に設置されたスリットにより光量が大きく減衰するため、長時間の露光が必要となること、また、試料の空間情報がx方向の1次元に制限され、2次元の空間情報を取得するには試料を機械的にy方向に走査する必要があるため、ハイバースペクトルの取得に時間を要するという難点がある。一方、液晶チューナブルフィルタ（Liquid Crystal Tunable Filter: LCTF）は、液晶チューニングエレメントと複屈折フィルタを組み合わせたモジュールに電圧を印加し、その電圧を変化させることにより、透過波長を任意の波長に設定可能な特殊フィルタである。通常のバンドパスフィルタと異なり、1台で連続スペクトルの測定が可能であること、50ms以下の短時間で透過波長を切り替えることが可能な点が特徴である。また、可動部分がなく、保守性に優れる。しかしながら、1台数百万円と高価で

表 3 分光法の比較

分光法	機械的走査	可動部	利点	欠点
バンドパスフィルタ	不要	なし	安価・高透過率	多波長計測には複数のフィルタが必要
グレーティング	要	あり	連続スペクトル計測可能	位置情報取得に機械的走査が必要・低透過率
LCTF: Liquid crystal Tunable Filter (液晶可チューナブルフィルタ)	不要	なし	連続スペクトル計測可能・高透過率・高速波長切替	高価
AOTF: Acousto-Optic tunable Filter (音響光学チューナブルフィルタ)	不要	なし	連続スペクトル計測可能・高透過率・高速波長切替	高価

あることが難点として挙げられる。AOTF (Acoustic Optical Tunable Filter) は、音響光学素子に超音波を印加すると、光学素子中を伝播する超音波がグレーティングと同様の役割を果たすことを利用した分光フィルタであり、LCTFと同様の長を有する。

2.3. ハイパースペクトルの解析手順

図2に、ハイパースペクトル解析の概略を示す。まず、ハイパースペクトル中の試料部分において、可視化対象の成分濃度に特徴のある部分に対象領域 (Region of Interest: ROI) を設定する (図2a)。次に、ROI内の画素に含まれるスペクトル情報を抽出し (図2b)、重回帰分析、主成分分析、判別分析等、通常の分光分析と同様に多変量解析を行い、検量線や判別式等の定量・定性モデルを構築する (図2c, d)。さらに、作成したモデルを、ハイパースペクトルの各画素に含まれるスペクトル情報に適用することにより、各画素が成分濃度の特徴等の情報を持つ画像が得られる (図2e)。最後に、成分濃度の特徴に合わせて画像を彩色することにより (図2f)、試料における成分分布を可視化した画像が得られる (図2g)。なお、上記のうちROI設定からモデル構築までの過程は、ロット毎、品種毎等目的にあった集団からサンプリングした試料に対してのみ行い、完成したモデルを他の試料に適用することにより、解析を簡略化することが可能である。ただし、その場合は未知試料に対する予測精度を検証するなどして、モデルが十分信頼できることを確認しておく必要がある。

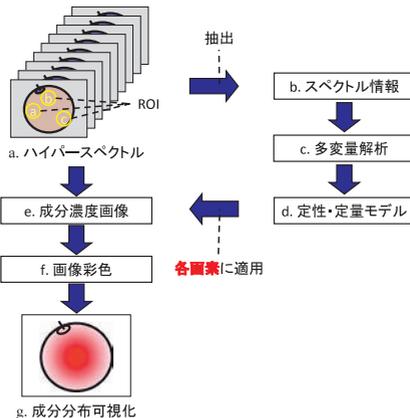


図2 ハイパースペクトルの解析手順

ハイパースペクトルは位置情報 (= 画像) とスペクトル情報を持つため、解析手順も画像処理 (a→e→f→g) とスペクトル処理 (b→c→d) に分けられる。後者の結果を前者に適用することにより、成分分布の可視化画像が得られる。

3. スペクトルイメージングの応用事例

以下では、スペクトルイメージングの応用事例として、メロンの糖度分布を可視化した研究と、ブルーベリー果実に混入した異物を可視化した研究を紹介する。

3.1. メロンの糖度分布可視化

3.1.1. 試料

北海道産のらいでん（青肉メロン）およびらいでんレッド（赤肉メロン）各1個を試料とした。温度変化によるスペクトルのシフトを防ぐため、それぞれ室温25℃で一晩放置した後、暗室にて実験を行った。

3.1.2. 計測システム

図3に計測システムの概略図を示した。通常、CCDカメラは8-bit（256階調）であるが、本研究では40万画素16-bit（65536階調）の冷却CCDカメラ（武藤工業社製CV-04Ⅱ）を使用した。このCCDカメラは高い階調度を持つ上、線形特性が $\gamma=1$ であることから、各画素が近赤外分光分析装置の受光器と同様の働きをすると考えられる。カメラレンズの前面には、透過波長を700-1100nmの任意の波長に設定することが可能な液晶チューナブルフィルタ（Varispec社製VS-NIR1-10-LC-20）を装着した。照明には近赤外線照射装置（林時計工業社製LA-100IR）を用い、サンプル表面の輝度ができるべく均一になるよう、サンプルの左右に配置した。また、CCDカメラとサンプル表面の焦点距離が一定となるよう、石英ガラスをカメラレンズと水平に設置し、その表面にサンプルを密着させた。

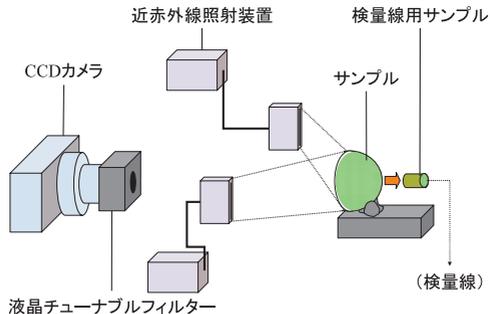


図3 ハイパースペクトル計測システム

近赤外照射装置でサンプル表面を照明し、反射光をCCDカメラで撮影するシステムである。また、液晶チューナブルフィルタにより撮影波長を任意に設定することができる。

3.1.3. ハイパースペクトルの計測

青肉・赤肉メロンサンプルをそれぞれ半分に切断して、その断面画像を800-1000nmの範囲で5nmおきに41枚撮影し、図4に示すハイパースペクトルを得た。画像サイズは384×192ピクセルであり、露光時間は各波長における計測システムの感度にあわせて0.2-5秒の範囲で変化させた。さらに、撮影したサンプルから直径25mmの円柱状に果肉をくり抜き、これを検量線作成用サンプルとし、内側表面の画像を半割サンプルと同様にして撮影した。画像を取得した部分から1mm厚のスライスを取り出し、その果汁を絞って糖度をデジタル糖度計（アタゴ社製PR-100）で測定した。以上の作業を果肉の内側から果皮付近まで繰り返すことにより、様々な深さにおけるメロン果肉のハイパースペクトルと糖度のデータを得た。

3.1.4. 画像処理

得られた画像に含まれる①暗電流ノイズ、②バイアス電圧、③各ピクセルの感度ムラ、④不均一な照明に起因する光量ムラを画像処理によって補正した。さらに、吸光度の定義に従い、以下のように補正画像の各画素における輝度値を吸光度に変換した。

$$A_{\lambda} = -\log(R_{\lambda}/M_{\lambda}) \quad (1)$$

ここで、 A は吸光度である。また、 M は標準白色板を撮影した画像の各画素における輝度値、 R は補正画像の各画素における輝度値であり、それぞれ近赤外分光法における入射光強度、反射光強度に相当する。上記(1)を、撮影波長 λ 毎に適用することにより、各画素における吸光スペクトルを得た。

3.1.5. 検量線の作成

図5に、らいでんの場合を例にした検量線の作成手順を示す。まず、得られた検量線作成用サンプルのハイパースペクトルに、上記と同様の画像処理を行い、果肉の中心部約 $\phi 25$ mmをROIに設定し、800-1000nmにおける吸光スペクトルを求めた。本研究では試料の反射光を測定したため、光吸収の有無によらず、試料の表面状態の違

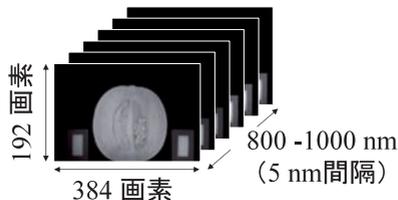


図4 メロン果肉断面のハイパースペクトル

384画素×192画素×41波長の約30万点からなる3次元データ。

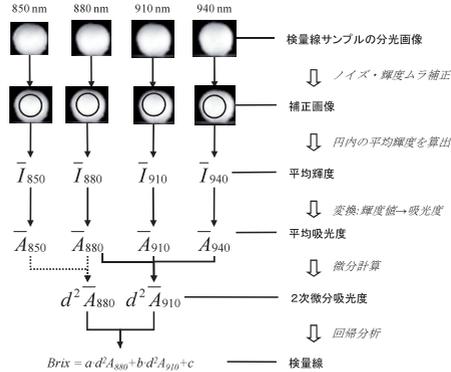


図5 検量線作成手順（らいでんの場合）

いに応じてスペクトルが上下にシフトする加算的変動が起こる可能性があった。また、一般的に吸光スペクトルは長波長側の水の吸収ピークにつられ、波長が大きくなるにつれて吸光度が大きくなる乗算的変動を持つことが多い。そこで、スペクトルの加算的・乗算的な変動の影響を軽減し、吸光ピークを強調するため、得られたスペクトルを波長で2次微分⁹、図6に示すような2次微分スペクトルを得た（なお、2次微分処理は微少なノイズを強調する効果も持つため、状況に応じて用いるかどうかを判断する必要がある点に注意されたい）。さらに、らいでん、らいでんレッドそれぞれの2次微分スペクトルと糖度の実測値について重回帰分析を行い、糖度と2次微分吸光度が高い相関を持つ波長を2つ採用した。ここで、採用波長を2つに限ったのは、説明変数の増加による検量線の過剰適合及び画像処理が煩雑になることを防ぐためである。

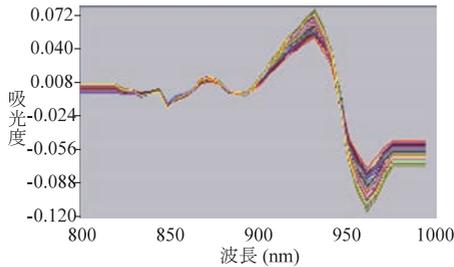


図6 2次微分スペクトル

2次微分スペクトルでは原スペクトルの吸光ピークが負のピークとなって現れる。そのため、960 nm 近傍の水の吸収ピークが大きな負のピークとして観察される。

重回帰分析の結果、らいでんにおいては910nmと880nm、らいでんレッドにおいては915nmと955nmにおける2次微分吸光度の組み合わせと、糖度の高に高い相関があることが明らかになり、図7に示すように、選択波長における2次微分吸光度と糖度の検量線を作成した。910nm近辺には糖の吸収帯があることが報告されている^{13,14,15}。また、880nm近辺の2次微分吸光度は果肉における光路長と¹³、955nm近辺の2次微分吸光度は水分と高い相関があることが知られており、前者は果肉の光学的性質、後者は果肉の含水率による影響を補正する効果があると考えられた。したがって、らいでんの検量線で採用された910nm及び880nm、らいでんレッドで採用された915nmと955nmは、メロン果肉の糖度検量線として妥当であり、2つの検量線は誤差を補正した上で糖度を正確に反映していると判断した。また、2つの検量線は共に高い精度を示し、本研究で用いた計測システムを用いて、糖度の推定に十分な精度の検量線が得られることが分かった。

3.1.6. 糖度分布の可視化

半割サンプルの断面画像について、検量線作成用サンプルと同様の画像処理を行い、各画素における2次微分スペクトルを求めた。次に、らいでんにおいては910nmと880nm、らいでんレッドにおいては915nmと955nmにおける2次微分吸光度に図7の検量線を適用し、各画素における糖度を求めた。最後に、糖度の大小をカラーマッピングし、図8に示す糖度分布の可視化画像が得られた。実画像から糖度分布を予測することは不可能であるが、糖度分布可視化画像では、果皮付近より果実の中心部において糖度が高いことが明らかであり、これは実際にメロンを食した際の食味と一致している。また、底部よりは上部がより糖度が高い傾向が観察され、「先に柔らかくなる底部が最も甘い」という通念が必ずしもあてはまらないことが分かった。

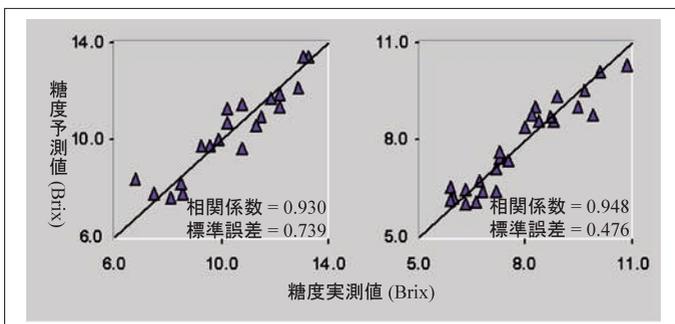


図7 糖度の検量線
(左：らいでん，右：らいでんレッド)

図中の直線は実測値＝予測値となる理想の検量線で、▲のデータ点がこの直線に近いほど精度が高いと言える。

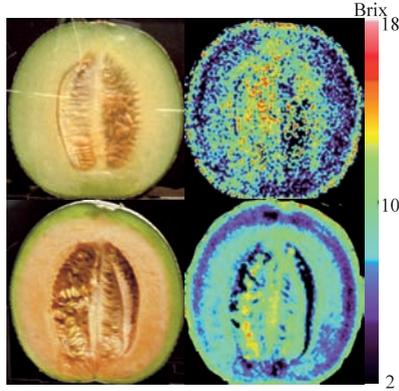


図8 サンプルの実画像と糖度分布可視化画像
(上段：らいでん，下段：らいでんレッド)

3.2. ブルーベリー果実原料中の異物検知¹⁷

近年，消費者が食品の品質や安全性に大きな関心を持つようになり，ジャムやフルーツヨーグルトのソースなどの果実を加工した製品に混入した異物に対するクレームも増加している．そのため，果実加工工場では人手による目視検査を増強しているが，異物が果汁に染まり，果実とほぼ同じ色となってしまうため，異物を完全に除去することができないのが現状である．そこで筆者らは，スペクトルイメージング手法を応用して，近年機能性食品として関心が高く，輸入量も増加しているブルーベリー果実を対象に，目視検査に代わる高精度な異物検知技術の開発を試みた．

3.2.1. 計測装置

図9に計測装置の概略を示す．本装置は照明装置 (Megalight50, HOYA-SCHOTT)，液晶チューナブルフィルタ (VS-VIS2-10-MC-35, Cambridge Research & Instrumentation Inc.)，カメラレンズ及びモノクロ CCD カメラ (ORCA-ER-1394, 浜松ホトニクス) により構成されている．照明装置からの光はライトガイドを通じて試料に照射される．また，試料からの反射光は，液晶チューナブルフィルタにより 400-720nm の任意の波長で分光されるため，本装置により試料のハイパースペクトルを計測することが可能である．

3.2.2. 試料

冷凍された状態で輸入した米国産ブルーベリー果実を用いた．適量の果実を常温で 2 時間放置し，解凍した．解凍の際生じる果汁を採取し，これに異物として用意した小石，毛髪，葉，枝，虫を 1 時間浸漬し，果汁の色を付けた．これを，「異物が果汁の色に染まり，肉眼ではほとんど識別できない」という加工現場の状況を再現するための

モデル試料とした。

3.2.3. 分光画像の取得

図9に示すように、セラミック製標準白色板を計測装置の下に置き、白色板表面をなるべく均一に照明するよう、照明装置の位置を調整した。この状態で白色板の画像を405～720nmの範囲で、5nmおきに計64枚撮影した。次に、白色板の代わりにバランスディッシュ（D-M, イナ・オプティカ）を置き、その上に解凍したブルーベリー果実と染色した異物を乗せて試料とし、白色板と同一条件で撮影した。さらに、吸光度の定義に従い、得られた画像に式1を適用して各画素の吸光度を算出することにより、各波長における吸光度画像を得た。また、吸光度画像より果実部分及び異物部分にROIを設定して内部の平均吸光度を算出し、それぞれの吸光スペクトルを得た。

3.2.4. 異物検知条件の決定

図10に示すように、得られた吸光スペクトルを波長で2次微分し、果実と異物の違いを比較・検討したところ、クロロフィルの吸光帯である680nm付近で葉・枝の2次微分吸光度が果実より大幅に小さくなることが明らかとなった。したがって、葉・枝及び果実の680nmにおける2次微分吸光度を算出し、両者の中間値を閾値に設定することにより、葉・枝を検知することが可能であると考えられた。なお、他の異物に関しては、果実と吸光度が大きく異なる波長帯を見つけることができなかった。

3.2.5. 異物検知画像の作成

660, 680, 700nmの3枚の吸光度画像を用い、下記の式に従って各画素の2次微分吸光度値を算出した¹²。

$$d^2A_{680} = A_{700} - 2 \times A_{680} + A_{660} \quad (2)$$

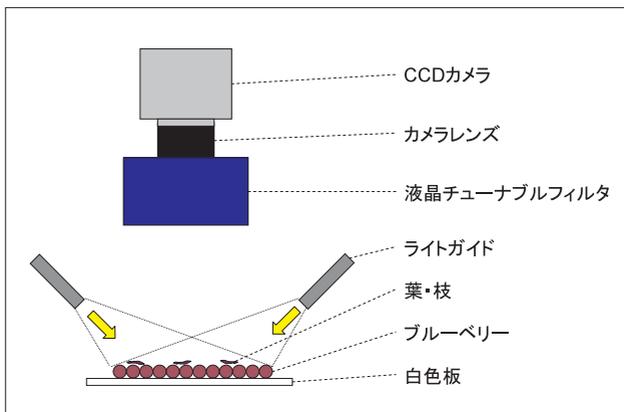


図9 計測装置及び試料の設置方法

ここで、 d^2A_{680} は 680nm における 2 次微分吸光度値、 A_λ は波長 λ における吸光度である。さらに、前述した値を閾値とし、値が閾値以上の画素を黒、閾値未満の画素を白とする二値化処理を行い、図 11 に示す葉・枝の検知画像を作成した。検知画像の白色部分と実際に葉及び枝が置かれた位置は良好に一致し、本手法が異物検知に有効であることが明らかとなった。

4. おわりに

本稿では、対象の分光特性と空間情報を同時に取得、解析することにより、対象の成分分布を明らかにする「スペクトルイメージング」について取り上げた。本稿で紹介した以外にも、凍結食品内の氷結晶構造を可視化した研究¹⁸や、魚の切り身の水分・

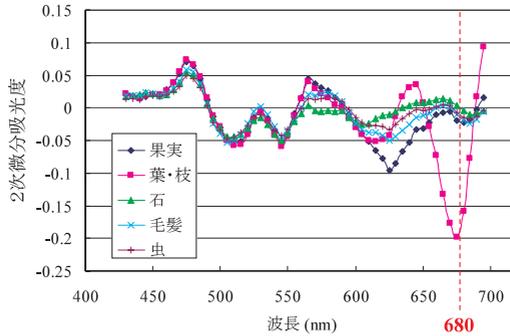


図 10 ブルーベリー果実及び異物の 2 次微分吸光スペクトル

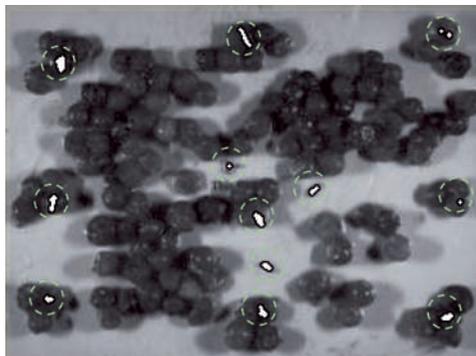


図 11 異物の検知画像

○: 実際に異物が置かれた位置、○: 画像処理により異物と判定された位置
異物と判定された部位 (白抜き) は全て点線内に入っており、異物の混入位置を精度良く特定できていることが分かる。

脂質分布可視化¹⁹、鶏肉の汚染部位検知²⁰、も報告されており、食品の品質を定性的・定量的に評価するなどの基礎研究の分野と、食品加工現場などの実用分野の双方において、スペクトルイメージングが幅広く活用されていくことが期待される。
(食品工学研究領域 計測情報工学ユニット 葛 瑞樹, 杉山 純一)

引用文献

- 1 竹谷光司：新しい製パン基礎知識，パンニュース社，2001.
- 2 P. Martinsen：Measuring soluble solids distribution in kiwifruit using near-infrared imaging spectroscopy, *Postharvest Biol. Technol.*, **14** (3), 271-281, 1998.
- 3 J. Sugiyama：Visualization of sugar content in the flesh of a melon by near-infrared imaging, *J. Agric. Food Chem.*, **47** (7), 2715-2718, 1999.
- 4 M. Tsuta and J. Sugiyama：Near-Infrared Imaging Spectroscopy Based on Sugar Absorption Band for Melons, *J. Agric. Food Chem.*, **50** (1), 48-52, 2002.
- 5 葛瑞樹ほか：ハイパースペクトルシステムによる近赤外分光イメージングメロン糖度分布の可視化事例－，映情学誌，**56**，2037-2040，2002.
- 6 A. A. Gowen et al.：Hyperspectral imaging – an emerging process analytical tool for food quality and safety control, *Trends Food Sci. Technol.*, **18**, 590-598, 2007.
- 7 P. J. Teado and M. D. Moris：Infrared and Raman-spectroscopic Imaging, *Appl. Spectrosc. Rev.*, **29** (1), 1-38, 1994.
- 8 A. S. El-Hagrasy et al.：Near-infrared spectroscopy and imaging for the monitoring of powder blend homogeneity, *J. Pharm. Sci.*, **90** (9), 1298-1307, 2001.
- 9 M. Tsuta et al.：Three-Dimensional Visualization of Internal Structural Changes in Soybean Seeds During Germination by Excitation-Emission Matrix Imaging, *Trans. ASABE*, **50** (6), 2127-2136, 2007.
- 10 P. M. Mather：Computer processing of remotely-sensed imagery, Wiley, 1987.
- 11 福島英雄：天文アマチュアのための冷却CCD 入門，誠文堂新光社，pp. 133-188，1996.
- 12 岩本睦夫ほか：近赤外分光法入門，幸書房，1994.
- 13 S. Kawano et al.：Nondestructive Determination of Sugar Content in Satsuma Mandarin using Near Infrared (NIR) Transmittance, *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* **62**, 2, pp. 465-470, 1993.
- 14 S. Kawano and H. Abe：Development of a calibration equation with temperature compensation for determining the Brix value in intact peaches, *J. Near Infrared Spectrosc.*, **3**, pp. 211-218, 1995.
- 15 天間毅ほか：携帯型りんご糖度計の開発とその応用，第15回非破壊計測シンポジウム講演要旨集，pp. 113-117，1999.
- 16 株式会社ニレコ：近赤外分光分析法技術資料Ⅲ，NIRECO NIR News，pp. 18，

- 1994.
- 17 Tsuta et al. : Foreign substance detection in blueberry fruits by spectral imaging, *Food Sci. Technol. Res.*, **12**(2), 96-100, 2006.
 - 18 都甲洙ほか : 近赤外分光イメージングによる生体材料内の3次元氷結晶構造の可視化, *冷空論*, **22**(2), 185-191, 2005.
 - 19 G. Elmasry and J. P. Wold : High-Speed Assessment of Fat and Water Content Distribution in Fish Fillets Using Online Imaging Spectroscopy, *J. Agric. Food Chem.*, **56**(17), 7672-7677, 2008.
 - 20 K. C. Lawrence et al. : A hyperspectral imaging system for identification of fecal and ingesta contamination on poultry carcasses, *J. Near Infrared Spectrosc.*, **11**(4), 269-281, 2003.

Ⅵ. 食味のニューロイメージング

1. はじめに

食品を味わうのは、ヒトの脳である。たしかに食品には味を呈する化学物質が含まれている。しかし、そのままでは、味とはならない。ヒトがその食物を摂取し、食品と相互作用して初めて味は生まれるのである。味のシグナルは、舌の味蕾などにある味細胞で得られ、延髄、視床を経て、大脳に到達する。そこで得られた神経細胞ネットワークの興奮パターン、すなわち脳内表象が味の本质である。もし、神経細胞ネットワークの興奮パターンを再現することができたならば、食品を味わうことなく、我々は味を感じることができる。実際、20世紀の半ば、カナダの医学者ペンフィールドが、開頭外科手術中の脳疾患患者の脳にある島と呼ばれる領域に電気刺激を与えたところ、患者は味を感じたという報告もある¹⁾。いわば、味のバーチャルリアリティである。ただし、味刺激を味わわずに味を感じるためには、直接、脳を電気刺激する以外の方法はいまだ存在しない。

しかし、少なくとも、近年、脳機能イメージング法の発達によって、食品を味わっているときに、脳のどこを使っているか、測ることは可能になってきた。そこで、本稿では、脳機能イメージング法による味覚研究の歴史を振り返ると共に、今後の動向について、展望を試みる。なお、本稿では、甘味、酸味、塩味、苦味、旨味からなる基本五味を「味」と表現する。また、これに、匂いと辛みなどの口腔感覚を加えた統合的な味を「食味」と表現する。

2. 脳機能イメージング法

脳機能イメージングとは、脳の活動を可視化する方法である。活動しているヒトの脳の、時間・空間的な活動変化を捉えることができるため、ヒト脳機能研究のパワフルなツールとなっている。脳機能イメージングの主な方法には、fMRI（機能的核磁気共鳴撮像法）、PET（陽電子放出断層撮像法）、MEG（脳磁気計測法）、EEG（脳波計）、fNIRS（機能的近赤外分光分析法、光トポグラフィ）等があり、それぞれ異なる測定特性を持つ（表1）。まずは、それぞれの方法を脳の活動のメカニズムに沿って簡単に紹介してみよう。

たとえば、今、右手の人差指を動かしたとする。このとき、動かした指の反対側にある左脳一次運動野という領域の神経活動が盛んになる。この神経活動をダイレクトに検出するのがMEGとEEGである。EEGは頭皮に置いた電極で、神経細胞の興奮によって発生した微弱な電流を検出する。一方、電流が発生すれば、そこには、磁場が生まれる。その磁場の変化を、頭の周囲に置かれた検出器で検出するのがMEGである。両者とも非侵襲で、時間分解能が極めて高く、ミリ秒単位の計測が可能である。その上、MEGは、磁場が生体組織の影響を受けにくいいため、数ミリメートル程度の高

表1 脳機能イメージング法の比較

手法	生理的測定対象	物理的測定対象	時間分解能	空間分解能	長所	短所
MEG	神経の電氣的活動	磁場	1 ms	5 mm, 3D	高時間分解能	計測困難な領域の存在
EEG	神経の電氣的活動	電流	1 ms	10-15 mm, 3D	低コスト, 計測の柔軟性	低空間分解能
PET	血流反応, 代謝反応	ガンマ線	10-45 s	4 mm, 3D	定量性	高コスト, 侵襲性
fMRI	血流反応	ラジオ波	0.5-5 s	1-5 mm, 3D	構造データの取得	高コスト, 計測の柔軟性のなさ
fNIRS	血流反応	近赤外光	0.1-1 s	10-30 mm, 2D	低コスト, 計測の柔軟性	脳の外側のみの計測

い空間分解能を有する。一方EEGは、電流が頭皮と頭蓋骨の影響を受けて歪むため、大脳の何処が活動したのかという空間情報には弱い。

神経活動がおこった脳領域では、神経活動に数秒遅れて、毛細血管の拡張、酸素化ヘモグロビンの増加、および脱酸素化ヘモグロビンの減少が起こる。fMRIとfNIRSは、このヘモグロビン濃度変化を非侵襲的に計測する。

fMRIは、高磁場における水素原子の核磁気共鳴現象を利用する。常磁性体である脱酸素化ヘモグロビンは、水素原子の配置を乱し、核磁気共鳴信号を低下させる。神経が活動すると、数秒後、脱酸素化ヘモグロビンの減少が引き起こされ、核磁気共鳴信号が増加する。したがって、脳を高磁場環境下に置き、核磁気共鳴信号の経時的な変化を調べることによって、脳の活動状態の変化を調べることができる。ちなみに、この原理は、1990年、わが国の小川誠二(当時 ベル研究所・米国)が発見した²⁾。さらに、核磁気共鳴信号の空間的な分布からは、脳の形態情報が得られる。そのため、fMRIでは脳活動と脳構造が同時に計測できる。脳機能と構造を対応付ける脳機能マッピング研究では、王道をいく技術である。

一方、fNIRSは光を利用する。頭皮上から脳へ光を当てると、一部の光は脳組織を通った後、反射して頭皮上に戻ってくる。光はヘモグロビンにより吸収されるため、この反射光の減衰度合いの経時的な変化から、脳内ヘモグロビン濃度の変化が分かる。fNIRSの利点は、測定の簡便さと自由度の高さである(図1)。脳機能イメージング法として一般化したのが1995年以降と遅いため³⁾、他の脳機能イメージング法に比べて方法論の整備が遅れているが、多様な実験をサポートするという点で、計測法としてのポテンシャルは高い⁴⁾。

PETは放射性同位元素でラベルされた分子の脳内における分布を検出することにより、神経活動に伴って起こる血流変化や、糖代謝変化を計測する。使用される放射性マーカーは半減期が短く、生体への影響が少ないが、厳密には非侵襲ではない。また、



fMRIの計測では、狭いスキャナー内で、動きを制限されたまま横臥位で味刺激が提示される。



fNIRSの計測では、日常に近い環境で、動きをあまり制限せず、座位で味刺激が提示される。

図1 fMRI と fNIRS による味覚実験環境

時間分解能が数十秒と非常に低い。空間分解能もfMRIには劣るが、シグナルの歪みがないので、アーチファクトの危険性は低い。PETの最大の利点は定量性である。血液量の絶対量を計測できるのは、PETのみである。血流の経時的な変化しか計測できないfMRIやfNIRSに対し、PETは安静時の絶対的な血流量を計測することが可能である。

このように、様々な脳機能イメージング法が存在するが、結果の解釈には、計測特性および計測対象の生理的意味を理解することが重要である。

3. 一次味覚野

脳機能イメージングの発達により、ヒトが味を感じるメカニズムも分かりだしてきた。味覚に関わる脳機能研究において、まず研究の関心を集めたのは、一次味覚野の同定である。一次味覚野とは、最初に味覚信号が投射される大脳皮質である。視覚、聴覚、触覚、嗅覚など、他の感覚では一次感覚野の同定は既になされている。ところが、一次味覚野の場所は未だに、世界の研究者の間で明確なコンセンサスが得られていない。

脳機能イメージング法が発達する以前は、損傷研究の結果から、中心溝の付け根にある、ブロードマンの第43野が一次味覚野の有力候補とされていた(図2)⁴⁾。その後、冒頭で紹介したベンフィールドらによる電気刺激実験によって、その奥にある島という領域の刺激で味を感じるという被験者の申告から、島が味覚野であるという可能性が浮上してきた¹⁾。さらに、サルを用いた電気生理実験から、前頭弁蓋部と島の移行部の領域にある神経細胞が味覚刺激に特異的に反応することが明らかになってきた⁵⁾。この結果、少なくとも、サルでは、この部分が一次味覚野であるということがほぼ確定的になった。

サルで正しいと思われた知見をヒトの脳機能イメージングで確認するというのは正攻法である。サルでは、脳の特定の神経細胞に刺した電極で繰り返し反応を調べた後、

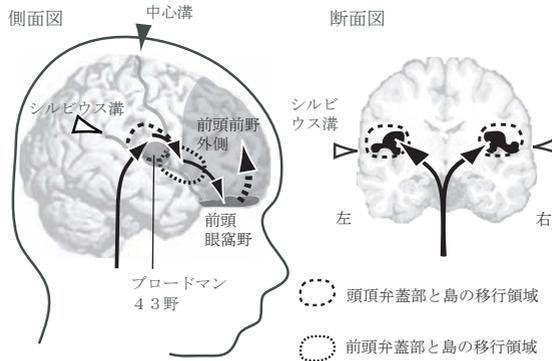


図2 味覚情報処理に関するヒト大脳領域

その神経細胞を焼き切り、場所を特定するという方法が採れるが、ヒトではこのような試験は、倫理的に実行不可能である。まずPETで、続いてfMRIで、一次味覚野はサルと同様、前頭弁蓋部と島の移行部付近(図2)という報告がなされた⁶⁾。

しかし、よくよく考えるとPETの時間分解能は数十秒、fMRIも数秒であり、一次味覚野の同定に使える精度ではない。一次味覚野の反応に誘起された、二次、さらに高次の脳反応を捉えている可能性がある。原理的に、一次味覚野の同定に対して最もポテンシャルの高い手法は、高い時間・空間分解能を有するMEGである。1996年、まず、村山らが、さらに小早川らが相次いで、MEGによる一次味覚野の計測結果を発表した^{7,8)}。ただし、この時点では、信号源が弁蓋部と島の移行部であることを示したものの、前頭部か頭頂部であるかという詳細な検討は不十分であった。その後、1999年、小早川らが頭頂弁蓋部と島の移行部(図2)で、最も速い味覚由来のシグナルが発生することを突き止め、さらに、fMRIでもその傍証を得た^{9,10)}。ここが現在、一次味覚野の最有力候補となっている。

ただし、一次味覚野の存在自体が疑問視されている面もある。サルの研究では、一次味覚野には、嗅覚や他の感覚からの入力に反応する神経も存在していることが分かっている。しかも、味覚信号の一部は大脳一次味覚野に達する前に既に口腔感覚情報と統合されている場合もあるという報告もある^{11,12)}。味覚信号に対して最初に興奮する大脳領域という意味では、頭頂弁蓋部と島の移行部を一次味覚野と考えてよいだろう。しかし、一次感覚野は、他の感覚系では入力のひとつを、その感覚系から得る脳領域である。果たして、このような入力特異性の高い脳領域が味覚系に存在するかどうか、判断は難しい。

4. 二次味覚野

一次味覚野探しが落ち着くと、代わって、二次味覚野の探求が盛んになってきた。二次味覚野は一次味覚野から次に情報が送られる部位である。一般的には、眼球のすぐ上に存在する大脳皮質、前頭眼窩野(図2)を指す。ただし、頭頂弁蓋部と島の移行部を一次味覚野とした場合、前頭弁蓋部と島を含む領域を指す場合もある。

オックスフォード大のロールズらによるサルを使った一連の研究によると、前頭眼窩野には、味覚、嗅覚、口腔感覚に共通に反応する神経細胞が存在しており、これらの感覚情報が統合されて、食味が生み出される場のひとつとされている¹¹⁾。さらに、食味と報酬系の情報が統合される場、端的に言えば、おいしさが生まれる場のひとつではないかと考えられている¹¹⁾。おいしさは変化するものである。おいしい食物を最初に口にすると非常においしい。これを食べ続けていくと、そのうちまずくなっていく。まず、サルでこの過程にともなって活動が変わる神経細胞が見つかった¹¹⁾。この実験のヒト版は、米国ノースウェスタン大のスモールらが、チョコレートを刺激として、PETを使用して行なった。チョコレートを食べ続け、満腹感が増すに連れ、被験者の感じるおいしさは減ってきた。これにしたがって、脳活動も前頭眼窩野の内側から外側へと変化していった¹²⁾。

このような研究によって、前頭眼窩野は食べ物に関する感覚統合の中心という概念が確立しつつある。ただし、前頭眼窩野付近の頭蓋骨には前頭洞という空洞が存在し、これがfMRIのシグナルを乱すため、fMRIを用いた前頭眼窩野活動の結果の解釈には注意が必要である。

5. 味覚情報の高次脳処理

2000年代半ばに入り、より高次の味覚情報の脳処理に関するfMRI研究が盛んになってきた。味覚研究の牽引的存在である、英国のロールズらのグループは単に味刺激を与えるだけでも、前頭前野の活動を伴うという観察から、受動的に味を感知する際にも、何らかの認知機能が誘発されているという可能性を示唆した¹³⁾。

また、味を想像しようとしたり、味のない溶液に注意を向けるといった行為によって、味覚皮質の活動が高まるという研究が最近立て続けに報告された^{14,15)}。いずれの場合にも共通するのは、前頭前野の活動増加であった。これに関連して、苦くてまずい溶液を「あまりまずくない」と詐称して提示した場合、味のまずさが低減して感じられるだけでなく、味覚関連皮質の活動が低まるという報告もなされた¹⁶⁾。このことから、高次脳領域から発せられたトップダウンの命令が、低次の脳活動を調節するという興味深い現象が明らかになりつつある。

さらには、食品のブランド価値に関する研究も進みつつある。米国のマクラーアーはペプシとコココーラという、成分的に良く似た飲料のおいしさは、ブランド情報の影響をうけること、そして、そのブランド情報の処理には前頭前野や海馬を中心とするネットワークが関与していることを見いだした¹⁷⁾。これは、高次味覚処理の研究と

してのみならず、ニューロマーケティングという新分野開拓のさきがけとしても有意義な研究である。

しかし、fMRIの環境下では実施が難しい実験もある。高次の脳機能研究では、実験課題が複雑になってくるため、単純に味を味わって、その脳反応を見るというわけにはいかない場合が多い。fMRIの実験条件では、横臥位で味を味わう。誤飲の危険性があるなどの制約のため、1ml程度の少量の溶液を味わった後、飲み込むという方法が一般的だ。このような条件では、味覚の感覚強度が落ちることが報告されており¹⁸⁾、薄い味や複雑な味などは味わうことが困難である。

一方、fNIRSの計測では、日常の飲食環境に近い条件で、座位のまま、食品刺激を味わう際の脳活動測定が可能である。したがって、潜在的には、fNIRSは高次の味覚処理研究に適している。ところが、fNIRSは脳機能研究のツールとしては、矛盾を抱えている。fNIRS計測では、脳の構造情報は一切得られないまま機能情報のみを得る。そのため、fNIRS単独では、トポグラフィックな脳活動データが得られても、それを脳の構造に対応化(レジストレーション)することができない。そこで、我々は、まずこの問題の解決に挑んだ¹⁹⁻²¹⁾。

fNIRS計測データを脳の構造にレジストレーションするためには、被験者のMRI画像があればよい。しかし、MRI画像の取得には費用と時間がかかる。そこで代わりに、被験者が属する母集団のMRI画像データベースを構築した(図3)。そのデータベースからランダムにMRI画像を取り出し、fNIRSデータを頭の上からその下の脳の表面に、仮想的にレジストレーションする。この作業を繰り返し、確率的な処理を行なうことによって、推定精度を向上させた。推定精度は概ね1センチメートル以内で、脳の主要な機能単位である脳回レベルの分解能を実現した。この、仮想レジストレーション

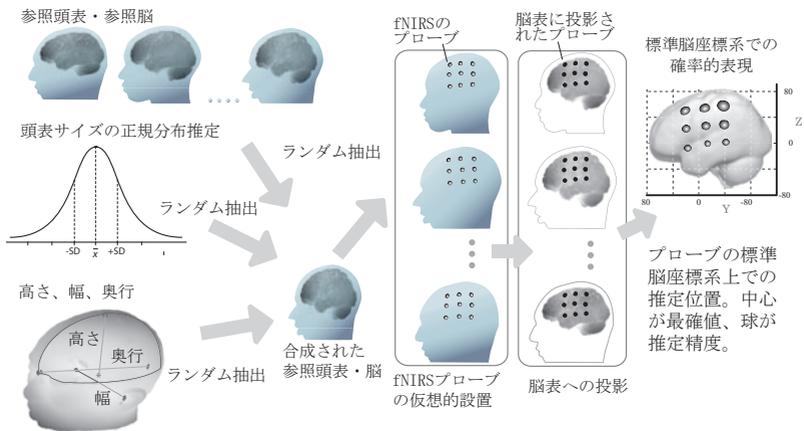


図3 fNIRSデータの仮想的レジストレーション法

の解析結果は、fMRIやPETで標準的に用いられている標準脳座標系上に、x, y, zの座標値で数値表現できる。これによって、fMRIやPETなどの研究で得られた膨大な脳機能研究リソースをfNIRS研究で活用することが可能となり、さらにはfNIRSデータを他のイメージング研究でも利用することが可能となった。

このように、仮想レジストレーション法という包丁を研ぐことによって、ようやく、fNIRSを用いて高次味覚処理の研究を行なう準備が整ったわけである。そこで、我々は、fNIRSを用いて、味覚情報の記憶の謎に迫ることにした²²⁾。

脳が様々な感覚からの情報入力を受けてから、その情報を記憶として貯蔵するまでの認知処理過程、すなわち、「覚える」過程を「記銘」という。これまで、視覚、聴覚、触覚といった感覚情報を、意図的に記銘する際には、脳の前頭前野という領域が関与していることが分かってきた。一方、嗅覚の意図的記銘に関しては、前頭前野の関与について否定的な結果が得られており、嗅覚と同様、原始的な感覚である味覚でも前頭前野は関与しない可能性があると考えられていた。しかし、味覚の記銘に関する脳機能研究はこれまでなされていなかったため、味の意図的記銘にも前頭前野が働くのか実際の実験で検証することにした。

実験は18名の右利き成人ボランティアを対象とした。なお、計測部位に左脳の言語野が含まれるため、少しでも言語を使用して味を覚えた可能性のある被験者は解析から除外した。味覚刺激用のサンプルとして、甘味、酸味、塩味、うま味のバランスが異なる基本味溶液を8種類用意した。このうち、2種類の溶液を連続して味わってもらい、2つの溶液が同じかどうか、比べてもらう。2つ目の味と比べるために、最初の味を覚えなくてはならない(記銘条件)。また、比較のために、同様の溶液を、味を覚えようとしない条件でも味わってもらった(対照条件)。前頭前野を含む領域を対象として、記銘条件と対照条件での脳活動をfNIRSで計測し、記銘条件から対照条件の脳活動を差し引いて、意図的記銘に関わる脳活動を抽出したところ、左右両側の前頭前野に有意な脳活性が認められた(図4)。

これまでの視覚、聴覚、触覚の記銘に関する脳機能研究では、文字や音読された言葉などの言語情報の意図的記銘には、左側の前頭前野が関与することが知られている。一方、顔や幾何学模様、抽象音などの言語化しにくい情報の意図的記銘には、左右両側の前頭前野が関与することが知られている。この実験で観察された、味を記銘する際の脳活動パターンは、言語化しにくい情報の意図的記銘としては典型的なものであった。この結果は、言葉を使わずに味を覚える際にも、視覚、聴覚、触覚の意図的記銘と同様の前頭前野領域が関与することを表している。また、前頭前野は、様々な認知処理過程に働くことが知られているが、その働きが、感覚間で共通かどうかはまだ分かっていない。この研究で得られた結果は、前頭前野領域の認知処理機能が、入力される感覚の種類に拠らず共通であるという説を支持している。

さて、この研究は、味を意図的に記銘するとき前頭前野が働いていることは少なくとも明らかにしたわけであるが、はたして、前頭前野で処理されている情報は、味

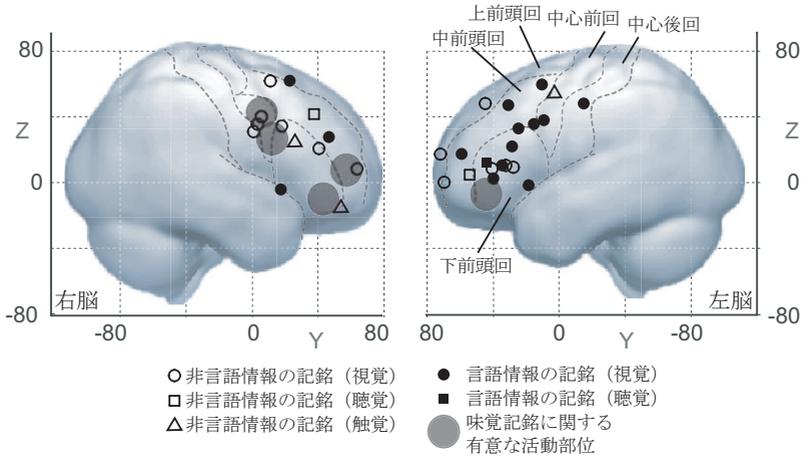


図4 標準脳座標系を利用した、記録に関する過去の脳機能イメージング研究の結果とfNIRSによる味の記録研究結果の比較

覚情報そのものであるかどうかは定かではない。むしろ、筆者はその可能性は低いと考えている。おそらく、それは、味覚由来の情報であろう。たとえるならば、「消えゆく味の後ろ姿」といった感覚である。人によっては、この感覚を表現するのに、言語を使う場合もあるだろう。実際に、我々が行った別の実験では、フレーバー刺激として緑茶を用いたが、この場合は、言語の使用を示唆する左側前頭前野の活動が顕著に観察された²³⁾。日常的になじみの深い刺激に対しては、言語情報との結びつきが強いというのが、その一因であろう。しかし、前項の実験条件では、言語化の極めて困難な味刺激を用いることによって、言語の影響は極力排除してある。その結果得られた脳活性は、言語化はできずとも、感覚的にはとらえることのできる、味由来の情報、言わば、「味のあんな感じ」の処理を表したものかもしれない。

6. 将来展望

最後に、fNIRSを中心とした脳機能イメージングが、どのように食品開発に貢献しうるかを展望してみよう。まず、このように脳機能イメージングが発達してくると、「脳を見ればヒトがどう味を感じているか、わかるのではないか」、という疑問が湧き起こるだろう。

実際、我々も「おいしさが脳の反応で判別できるのではないか」、という質問を様々な食品開発者から受ける。このようなアプローチは、脳科学分野では、「リバースインファレンス」と呼ばれている²⁴⁾。脳機能イメージングは通常、ある機能に関わる脳領域の同定に利用されるが、逆に、どの脳領域が活動しているかという情報から、関

与する機能を推定しようという、逆方向の試みである。

ところが、論理的には、「Aという課題を行なっているならば、Bという領域が働く」という命題に対して、その逆、「Bという領域が働いているならば、Aという課題を行なっている」は正しくない。これが成り立つのは、機能と領域に1対1対応が成り立つ場合のみである。したがって、脳機能の特異性の高い低次の領域であれば、リバースインファレンスは実用上有効であるが、脳機能イメージングレベルの空間解像度では機能の特異性が低い、高次の脳領域ではその信頼性は低い。

信頼できるリバースインファレンスを行なうためには、行動データの裏付けが必要になってくる。たとえば、ある課題に言語機能が関与したかどうかを推論するためには、言語野の活動のみでは証拠として不十分であり、傍証として被験者の自省報告を利用すれば、より信頼性の高いデータとなる。これは、被験者に言語を使ったかどうか聞くのに等しい。つまり、「被験者の申告は信頼できないので、脳を見て判断する。でも、そのためには、被験者の申告が必要である」という矛盾が起ってしまうわけである。したがって、現状では、食品を食べている際のヒトの脳活動から食品の印象を調べて、食品開発に利用するといった、「観能評価」の実現は、まだ見込み薄である。

このように書くと脳機能イメージングの食品開発への貢献が疑問視されるかもしれないが、食品特性を脳が処理するメカニズムの研究は重要である。特に食品開発には欠かせない、高度に訓練された官能評価パネルの脳がどうなっているか、その特殊能力の背景に存在する脳機能は興味深い。

このような試みは既に始まっており、イタリアのグループは、fMRIを用いて、ソムリエと一般人が脳のワインを味わっているときの活動を比べた。両者とも一次、二次味覚野の活動が高まっていたが、これに加えてソムリエでは、左右の前頭前野の活動が、一般人では扁桃体などの情動系の活動が高まっていた。これによって、ソムリエの特殊なワイン判別能力が、高度な認知処理に基づくことが示唆された²⁵⁾。我々も、最近、fNIRSによって、茶のフレーバーを官能評価する際の脳活動をモニタリングし、味の意図的記録時と同様の前頭前野領域が活動していることを明らかにした²³⁾。

こういった研究を考慮すると、官能評価のトレーニングによって、訓練の進行度がモニタリングできるという可能性は十分にある。あるいは、脳活動のパターンから、訓練効率が高そうな評価者をスクリーニングすることも可能になってくるだろう。

もう一つの方向性は、味の情報処理としての本質に関する研究を明らかにして、食品開発に利用するというものである。我々は、味情報を処理する際に、非言語情報経路が利用されることを示したが、このような味という情報が持つ性質を考慮すれば、官能評価の精度を上げることも可能だと予想している。

官能評価は、味を中心とした食品特性を言語情報に変換するという作業を伴う。

特に官能評価の最高峰と考えられているQDA (quality description analysis) では、その傾向が強い。QDAでは、官能評価者が集まり、ある特定の食品に関して言葉だしを行なう。その中から、目的とする食品の特性を最も適切に表現する用語群を見つけ出

し、この用語群を用いてターゲットとなる食品を評価する。つまり、QDAの根幹には食品特性の言語変換ルールを設定するという作業がある。このような作業に特化した脳を作り出すことも可能ではあるが、右脳を中心として処理される非言語情報を左脳の言語野に変換するという情報処理は、脳への負担が大きいという可能性がある。むしろ、抽象的な画像や色など、非言語ながらも客観的な対応が可能な情報への変換の方が、脳の味情報処理のメカニズムに則しているかもしれない。

このように、脳機能イメージング法を食品開発にダイレクトに利用できるというナイーブな幻想は成り立たない。しかし、食品特性の情報処理メカニズムを解明することによって、食品開発の方向性に重要な示唆を与えるパラダイムを提供することは十分に可能であろう。

(食認知科学ユニット 檀 一平太)

参考文献

- 1) Penfield, W. and Jasper, H.H. (1954) in *Epilepsy and the Functional Anatomy of the human Brain*, Little Brown, Boston.
- 2) Ogawa, S., et al. (1990) *Magn. Reson.Med.*, **14**, 68.
- 3) Maki, A., et al. (1995) *Med. Phys.*, **22**, 1997.
- 4) 檀一平太 (2006) バイオニクス, 4月号, **66**, 5月号, 54.
- 5) Bornstein, W.S. (1940) *Yale J. Biol. Med.*, **13**, 133.
- 6) Zatorre, R.J. and Jones-Gotman, M. (2000) In *Brain mapping: The systems* (Toga, A.W. and Mazziotta, J.C., ed) p.403-424, Academic Press. San Diego.
- 7) Murayama, N., et al. (1996) *Neurosci.Lett.*, **210**, 121.
- 8) Kobayakawa, T., et al. (1996) *Neurosci.Lett.*, **212**, 155.
- 9) Kobayakawa, T., et al. (1999) *Chem.Senses*, **24**, 201.
- 10) Ogawa, H., et al. (2005) *Chem.Senses*, **30**, 583.
- 11) Rolls, E.T. (2005) *Physiol. Behav.*, **85**, 45.
- 12) Small, D.M., et al. (2001) *Brain*, **124**, 1720.
- 13) Kringelbach, M.L., et al. (2004) *Neuroimage*, **21**, 781.
- 14) Kobayashi, M., et al. (2004) *Neuroimage*, **23**, 1271.
- 15) Veldhuizen, M.G., et al. (2007) *Chem. Senses*, **32**, 569.
- 16) Nitschke, J.B., et al. (2006) *Nat. Neurosci.*, **9**, 435.
- 17) McClure, S.M., et al. (2004) *Neuron*, **44**, 379.
- 18) Meiselman, H.L. (1971) *Percept. Psychophys.*, **10**, 15.
- 19) Okamoto, M., et al. (2004) *Neuroimage*, **21**, 99.
- 20) Okamoto, M. and Dan, I., (2005) *Neuroimage*, **26**, 18.

- 21) Shingh, A.K., et al. (2005) *Neuroimage*, **27**, 84.
- 22) Okamoto, M., et al. (2006) *Neuroimage*, **31**, 796.
- 23) Okamoto, M., et al. (2006) *Appetite*, **47**, 220.
- 24) Poldrack, R.A. (2006) *Trends Cogn. Sci.*, **10**, 59.
- 25) Castriota-Scanderbeg, A., et al. (2005) *Neuroimage*, **25**, 570.

Ⅶ. 走査型プローブ顕微鏡による アレルギー検出手法の開発

1. はじめに

特定の食物にアレルギー疾患をもつ人にとっては、その食物を含有する食品の摂取により、重篤な障害を引き起こす可能性がある。したがって、加工食品中のアレルギーに関しては、食品衛生法に基づいて卵、乳、小麦、そば、落花生、えび、かにの特定原材料7品目については表示が義務化され、これに準ずる18品目が表示を推奨されている。

現在、アレルギーの検出には、免疫反応を利用してアレルギー物質そのものを検出するELISA (Enzyme Linked Immuno Sorbent Assay) 法やアレルギーが由来する生物のDNAを増幅して検出するPCR (Polymerase Chain Reaction) 法が主流となっている。ELISA法は、抗体、抗原(アレルギー)及び酵素標識抗体を結合させ、酵素活性による発光・発色を測定してアレルギーを定性・定量分析する方法であり、アレルギーのみでなく、微量タンパク質や微生物抗原等の検出に用いられる。PCR法は、特定生物種のDNAの増幅により、その生物に由来する成分が試料中に含まれることを示すことができるが、アレルギー成分を直接検出するものではないため、定量性はあまり期待できない。また、ELISA法やPCR法は、検出のために数時間程度の時間とある程度の量の試料を必要とし、試薬などの消耗品が高価でランニングコストが比較的高いという問題もあった。これに対して、抗原抗体複合体が試験紙上を移動する途上に、あらかじめ抗原と結びつく抗体を線状に固定した領域を用意しておき、現れる色付きのラインによって定性分析するイムノクロマト法があるが、所要時間も短くコストも少なくすむが、定量性はあまりなく感度も劣るものであった。

そこで、筆者のグループでは、微量な試料で迅速に食品中のアレルギーを検出するための新たなアプローチとして、走査型プローブ顕微鏡の技術を応用したアレルギー検出手法の開発を試みた。

2. 走査型プローブ顕微鏡

走査型プローブ顕微鏡 (SPM, Scanning Probe Microscopy) は、その名の通り、鋭い探針(プローブ)で試料表面を走査し、その表面の情報(凹凸、光強度、トンネル電流、摩擦係数、etc.)を記録し、コンピュータ上でデータを画像に再構成するのを基本的な動作原理としている。探針で試料表面を走査する際の制御方式と取得するデータにより、これまでに様々なタイプのSPMが考案され、それぞれに異なった名称が付けられている。

最初のSPMは、Binnigらによって1981年に発明された走査型トンネル顕微鏡であり、これは導電体と探針間のトンネル電流を検出して探針を制御するものであるが、検出対象は導電体に限られていた¹⁾。1986年には、同じくBinnigらによって原子間力顕微鏡が考案された。原子間力顕微鏡は、その名の通り探針の先端と物体間に働く極

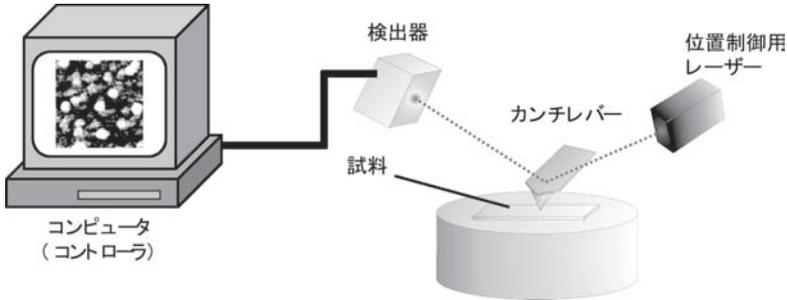


図 1 AFM の仕組み

カンチレバーで試料表面の近傍を走査すると、試料の凹凸に応じてカンチレバーがたわむ。カンチレバーの表面は鏡になっており、この鏡に位置制御用レーザー光線を当てて、その反射光を検出器で受ける。レバーのたわみに応じて鏡の傾きが変わるので反射光の向きが変わる。その向きを検出器で検出して、カンチレバーのたわみを求める。求められたたわみから試料の凹凸を計算し、コンピュータ上に記録して画像化する。

微弱な反発力（原子間力）を検出しながら、先端を先鋭化したカンチレバーと呼ばれるシリコン製の探針で物体表面を走査して、その立体形状を検出する顕微鏡である（図1）²⁾。また、絶縁体にも適用でき、染色や金属コートなどの特別な前処理なしに、大気中または液中で試料を観察可能なため、SPMの中では最も広く使用され、特に生命科学分野においては、細胞、染色体、DNA-タンパク質複合体などの微細構造観察に用いられている³⁾。その他、探針と物体の摩擦力を検出する走査型摩擦力顕微鏡、探針と物体に働く磁気力を用いる走査型磁気力顕微鏡、光の情報を得る走査型近接場光学顕微鏡なども考案されているが、本稿との関連は薄いため説明は割愛する。

本研究においては、上記SPMの中でも、数十ピコニュートンからナノニュートンの非常に微弱な力を検出することができる、原子間力顕微鏡（AFM, Atomic Force Microscope）を使用する。AFMは、上述のように探針と試料の間に働く微弱な分子間力を検出可能であり、この機能を利用すれば、探針に結合させた分子と基板に固定された分子の間に働く力学相互作用も計測できる。相互作用力は、カンチレバーを垂直方向に移動させ、カンチレバーを引き離れた（または押し付けた）際に生じるカンチレバーのたわみを測定し、カンチレバーのバネ定数から試料にかかる力の大きさを求めることにより得られる。通常のAFMの場合、対象試料や計測条件にも依存するが、1～10個程度の分子が相互作用する際に働く力を測定することが可能である。筆者らは、この原理を応用し、迅速なアレルギー検出システムを開発することを試みた。

3. AFM による抗体抗原相互作用の検出

AFMによる抗体抗原分子間力の測定は、これまでにも行われているが⁴⁻⁶⁾、探針と基板の間には、抗体抗原相互作用による特異的な分子間力（抗体—抗原分子間に働く

分子間力)のみでなく、物理吸着などの無視し得ない非特異的相互作用力も働くため、両者を明確に区別して測定することは困難であった。そこで、筆者らは、まずモデル系として、抗原に鉄貯蔵タンパク質であるフェリチンを、抗体に抗フェリチン抗体(ポリクロナール)を使用し、基板への抗原の固定方法、実験溶液、カンチレバーの移動速度を工夫し、測定条件の最適化を図った。その結果、非特異的な相互作用による吸着力を大幅に減少することに成功し、基板上的フェリチン分子の検出を可能とした。

(1) 基板への抗原の固定

抗体は、抗原表面のエピトープを認識して結合するため、抗原の基板への固定は、抗原の表面が実験溶液に対して露出していればよく、原則的には抗原の活性を考慮する必要がない。今回の計測では、抗体を固定したカンチレバーを基板上的抗原と短時間接触させ、その後カンチレバーを垂直方向へ移動させたときにカンチレバーに働く力から、抗体抗原分子間の結合力を測定する(図2)。そのため、抗原の基板への固定が弱いとカンチレバーの移動により抗原が剥がれる可能性がある。そこで、3-aminopropyltriethoxysilan (APTES) 修飾マイカ基板の上にフェリチンを静電吸着によって固定した後、グルタルアルデヒドを介して基板に導入したアミノ基とフェリチン表面のアミノ基とのクロスリンクを行い、共有結合によりフェリチンを確実に固定した。AFM による計測においては、基板表面が分子レベルでフラットであることが重要になるため、マイカ基板のAPTES 修飾は、窒素雰囲気中で気相法により行い⁷⁾、表面荒さ1 nm 以下の平坦性を実現している。

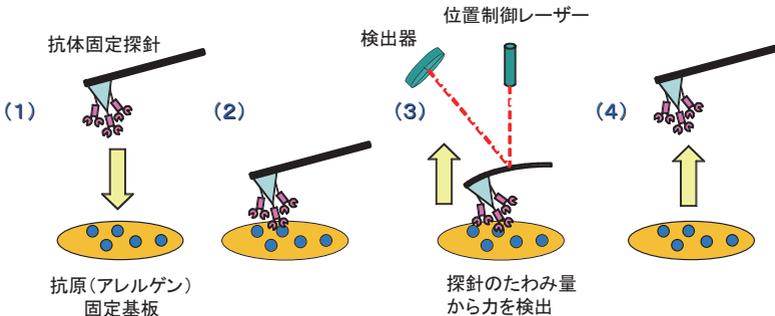


図2 AFMによる抗体抗原反応検出の原理

(1) AFM探針に抗体を基板に抗原(逆も可)をあらかじめ結合しておき、探針を基板に降下させる。(2) 探針と基板を接触させ、抗体と抗原の結合を生起させる。(3)、(4) 探針を徐々に上昇させ、結合が破断する時点の探針のたわみ量と探針のバネ定数から力を求め、これを両者の相互作用力とする。

(2) カンチレバー上への抗体の固定

抗体のカンチレバーへの固定は、直接カンチレバーの表面に抗体を固定した場合、表面との物理的相互作用により、抗体の活性（抗原への結合能力）が阻害される可能性がある。そのため、両面が金コートされているカンチレバー（OMCL-TR400PB, オリンプス）の表面を末端にカルボキシル基もつアルカンチオール（7-Carboxy-1-heptanethiol）と反応させて自己組織化単分子膜を形成させた後、NHS（N-Hydroxysulfosuccinimide）とEDC（1-Ethyl-3-[3-dimethylamino]propyl carbodiimide）を介して、抗体表面のアミノ基とクロスリンクさせ、抗体をカンチレバー表面に結合させた。

次にカンチレバーに結合している抗体が活性を有しているかどうかを確認するために、蛍光色素（Cy3）を標識した抗原タンパク（フェリチン）と非抗原タンパク（BSA, Bovine Serum Albumin）を探針と反応させて探針表面を蛍光顕微鏡により観察したところ、フェリチンのみが表面に結合することが確認できた（図3）。このことは、探針表面へのタンパク質の結合は非特異的吸着ではなく、抗体による特異的なものであり、抗体の機能を損なうことなくカンチレバー表面に固定できていることを意味する。

(3) AFM による抗体抗原反応の計測

AFM (Nano Wizard, JPK instruments) を用いて、カンチレバーの表面に結合した抗体と、基板に固定された抗原タンパク質間に働く力を計測し、力-距離曲線を求めた。力-距離曲線とは、AFMの試料台上の基板とカンチレバーを互いに近づけたり遠ざけたりして距離を変えたときに、カンチレバーにかかる力を距離に対してプロットして得られるカーブのことである。力-距離曲線の模式図を図4に示す。まず遠ざけた状態（点a）からカンチレバーを基板に近づけていくと、点bで、カンチレバーに固定された抗体と基板に固定された抗原もしくは非抗原タンパク質が結合する。さらに押しつけると、

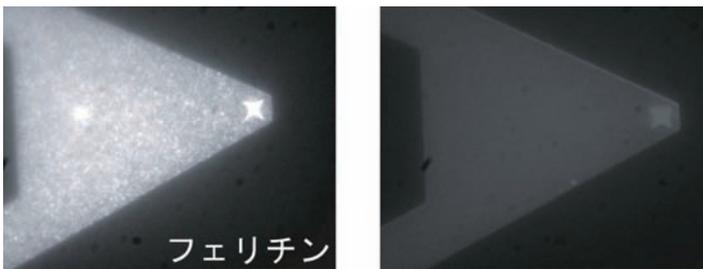


図3 抗体固定カンチレバーへの抗原及び非抗原タンパクの結合

蛍光色素（Cy3）標識した抗原タンパク（フェリチン）と非抗原タンパク（BSA）を抗フェリチン固定探針と反応させ、探針表面を蛍光顕微鏡により観察した。フェリチンのみが表面に結合していることが確認できる。

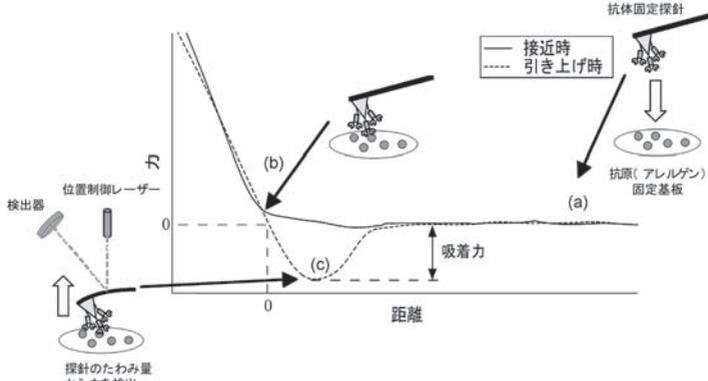


図4 カー距離曲線の模式図

横軸は、抗原タンパク質表面とカンチレバーとの距離を、縦軸はカンチレバーのたわみから求めたカンチレバーにかかっている力を表わしている。詳細は本文参照。

カンチレバーは押し上げられ上にたわみはじめる。上に大きくたわんだ状態から今度は徐々に遠ざけていくと、カンチレバーのたわみは解消されていく。点bからカンチレバーは抗体分子と抗原分子との相互作用により下にたわみ始める(点c)。下に最もたわんだときの力が抗体抗原相互作用による分子間力(吸着力)と思われる。

基板にフェリチン(抗原)、もしくはBSA(非抗原)を固定して、抗フェリチン抗体を固定したカンチレバーにより、リン酸化緩衝化生理食塩水中(PBS)で吸着力計測を行なった場合では、非抗原であるBSAにおいても抗原であるフェリチンと同程度の吸着力が検出された。今回用いたカンチレバーの直径(約20nm)と抗体分子の大きさ(数nm)から、力-距離曲線にみられた吸着力は10個程度の抗体分子と抗原分子の相互作用によるものと考えられる。このような少数の分子数の場合、分子のまわりの熱揺らぎの影響により、その相互作用は確率的におこる。そのため、今回の吸着力の測定においても、複数回行う必要がある。そこで、300回測定して得られた吸着力のヒストグラムを図5に示す。このヒストグラムからわかるように、フェリチン(抗原)とBSA(非抗原)では、吸着力の分布にそれほど大きな違いがみられなかった。このことは従来から行われてきた計測結果⁶⁾に一致する。また、従来から抗体抗原間、リガンド受容体間などの非共有結合は、その非共有結合を引き離す速度を速くすることで、結合強度が増大することが知られているが⁸⁾、カンチレバーの移動速度を早くしても吸着力の分布に大きな違いがみられなかった。これらの結果は、PBSのみで計測した吸着力には、抗体抗原反応に由来する特異的相互作用だけではなく、物理吸着などの非特異的相互作用による吸着力も多数含まれていることを示唆している。

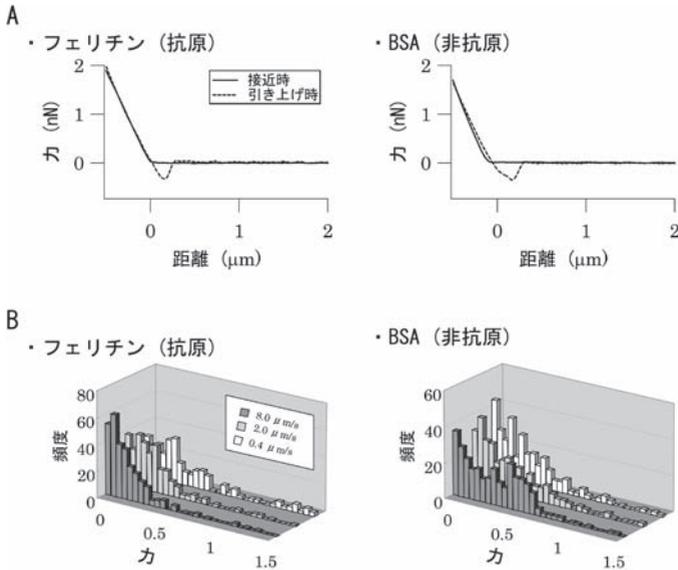


図5 リン酸化緩衝化生理食塩水中のみで計測したときの結果

Aは、抗体付きカンチレバーを基板に固定された抗原に $8.0 \mu\text{m/s}$ の速さで接近させたり遠ざけたりした場合に得られた力-距離曲線の1例. Bは、吸着力のヒストグラム.

(4) 測定溶液条件の検討

PBS中の計測では、抗原抗体反応を明確に検出することが困難であったため、非特異的吸着力を抑えることを目的に、測定溶液に界面活性剤Tween 20とブロッキング試薬 (Blocking reagent, Roche) を添加して計測を行った. Tween 20とブロッキング試薬存在下では、非存在下に比べて、フェリチン (抗原) の吸着力は増大しBSA (非抗原) の吸着力は減少した. 吸着力の分布 (図6) において、フェリチン (抗原) では特異的と思われる吸着力の頻度が増加し、BSA (非抗原) では非特異的と思われる吸着力の頻度は減少し、双方のヒストグラムには大きな違いがみられた. また、PBSのみの場合とは異なり、カンチレバーの移動速度を速くすると、吸着力の分布がフェリチンでは大きくなる方 (右側) に、BSAでは小さくなる方 (左側) にシフトし、非共有結合を引き離すのに必要な力は引き離す速度を速くすると増大するという従来⁸⁾の結果に一致した⁸⁾.

4. AFMによるアレルギー分子の検出

上述のように、モデル系を用いた実験により、非特異的な吸着力を低減することに成功したため、この実験系を実際にアレルギータンパク質に適用し、アレルギーに起因する特異的な抗体抗原相互作用の検出を試みた. その例を以下に示す.

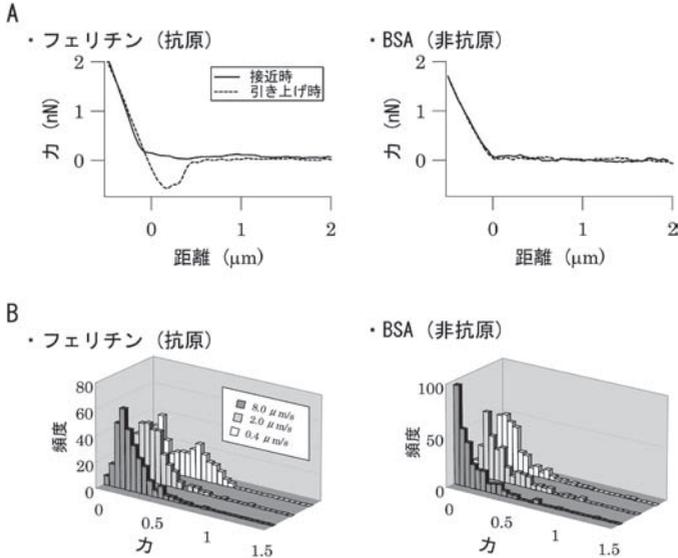


図6 リン酸化緩衝化生理食塩水中に Tween 20 およびブロッキング試薬を添加したときの計測結果

Aは、抗体付きカンチレバーを基板に固定された抗原に8.0 $\mu\text{m/s}$ の速さで接近させたり遠ざけたりした場合に得られた力-距離曲線の一例。Bは、吸着力のヒストグラム。

(1) オボムコイドの検出実験

図7に卵白主要アレルゲンであるオボムコイドの検出実験を行なった結果を示す。抗オボムコイド抗体固定カンチレバーを使用して、オボムコイド(抗原)、BSA(非抗原)、フェリチン(非抗原)に対してPBS中で複数回の力-距離曲線計測を行い、得られた吸着力のヒストグラムを比較したところ、吸着力の分布には大きな違いは見られなかった(図7 a-c)。しかし、0.5% Tween20と2%ブロッキング試薬を計測溶液に添加した場合には、双方のヒストグラムには大きな違いがみられた。オボムコイドに対しては0.15~0.35 nNの間に特異的と思われる吸着力のピークをもつヒストグラムが得られ(図7 d)、一方、非抗原であるBSAとフェリチンに対しては、非特異的と思われる吸着力の頻度は減少し、右肩下りの分布のヒストグラムしか得られなかった(図7 e, f)。これは、Tween 20とブロッキング試薬の存在により、抗原の吸着力が増大し、非抗原の吸着力が減少したことを示すものと考えられる。したがって、本手法により実際にアレルゲン検出の検出が可能であることが示された。

(2) β ラクトグロブリンの検出実験

さらに、対象を牛乳の主要アレルゲンである β ラクトグロブリンを対象として同様

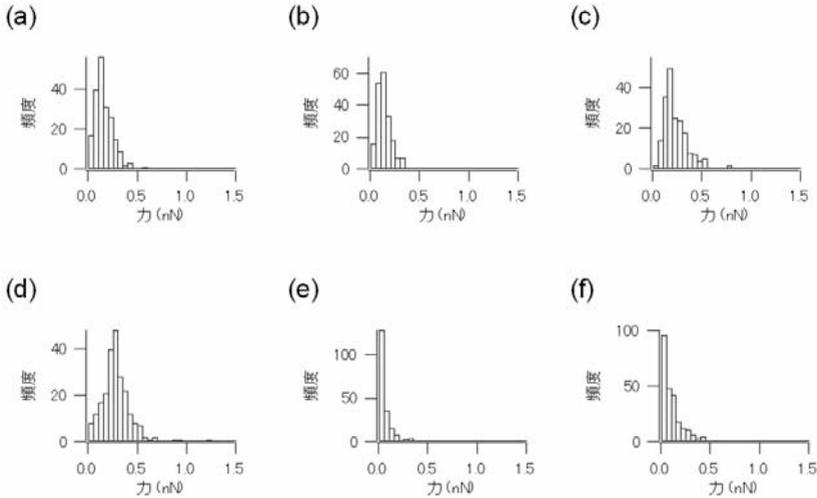


図7 オボムコイド検出実験の例

d-f, リン酸化緩衝化生理食塩水中に2%ブロッキング試薬と0.5% Tween 20を添加した溶液中での結果. カンチレバーの移動速度は $3.6 \mu\text{m/s}$. a, dはオボムコイド, b, eはBSA, c, fはフェリチン固定基板で行った検出実験の結果.

の実験を行なった(図8). この場合にもPBS中の計測では, オボムコイドの場合と同様に, β ラクトグロブリン(抗原), BSA(非抗原), フェリチン(非抗原), 吸着力の分布には大きな違いは見られなかった(図8a-c). そこで, Tween20及びブロッキング試薬の効果を検討したが, β ラクトグロブリンに対してはブロッキング試薬の効果は明確ではなく, Tween 20の添加のみにより抗原の吸着力のピークを得ることができた(図8d-f).

5. 今後の展望

本稿では, 原子間力顕微鏡を応用し, pN~nNレベルの力測定を行なうことによって, アレルゲンを検出することが可能なことを示した. これは, 界面活性剤とブロッキング試薬の使用及びカンチレバーの移動速度を大きくするなどの実験条件と制御を最適化し, 非特異的相互作用を大幅に減少させることによって実現したものである. 現在, アレルゲンとしては, 実験例に示した以外にも小麦主要アレルゲンであるグリアジン等についても検討を進めている. 本稿で紹介した例は, 単一のアレルゲンタンパク質のみを固定した試料を用いたモデル系の計測実験であったが, 実際の食品では様々な有機物質が混在している中で, アレルゲン検出を行なう必要がある. その

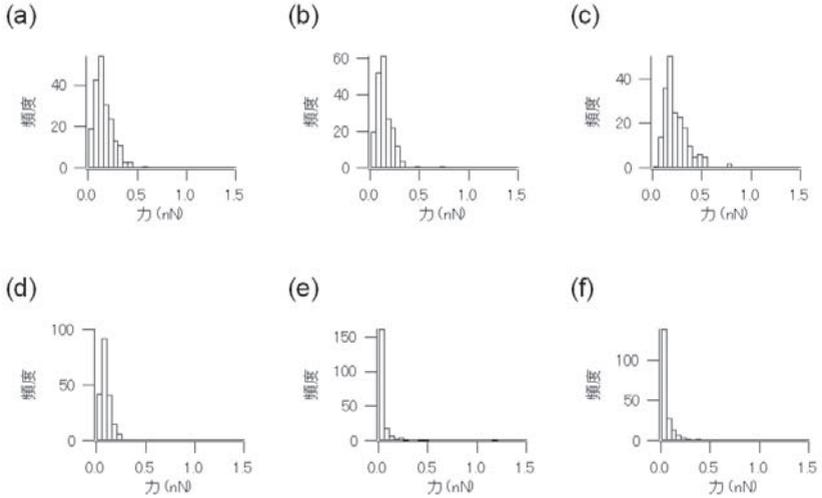


図8 β ラクトグロブリン検出実験の例

d-f, リン酸化緩衝化生理食塩水中に0.5% Tween 20を添加した溶液中での結果. カンチレバーの移動速度は $3.6 \mu\text{m/s}$. a, dは β ラクトグロブリン, b, eはBSA, c, fはフェリチン固定基板で行った検出実験の結果.

ためには、混在している検出対象以外に由来する非特異的吸着力を排し、抗原抗体相互作用のみを計測可能なことを実証する必要がある、現在、そのような実験も計画中である。近い将来には、SPMによる食品実試料中のアレルゲン検出も可能になると想定している。他の様々なアレルゲン検出と比較した場合の本手法の利点は、計測速度とカンチレバーの再利用にある。Force-Distance curveを1回計測してデータを得るまでの時間はわずか数秒程度ですむ。実際の検出には、計測を複数回行う必要があるものの、この繰り返しステップは自動化が可能であり、従来から行われてきたELISA法やPCR法に比べて大幅に時間を短縮することが可能である。さらに、抗体を固定したカンチレバーは、2000回以上の力測定の実行に耐えることもわかっており、使い捨てではなく繰り返し利用が可能である。したがって、本手法がさらに改良されればランニングコストを比較的低く抑えた高感度アレルゲン検出手法として展開が可能であると思われる。

また、一方で、本手法はアレルゲン検出のみでなく、様々な生体分子間相互作用の解析に応用が可能であり、タンパク質科学や細胞生物学などの基礎的研究においても有効な手段と考えられる。生体一分子計測が最も進んでいるモータータンパク質の研究分野では、従来の生化学による多分子の同時計測及び平均化された値の解析では

わからなかった，分子個々の性質が近年明らかになってきている⁹⁾。AFMによる抗体抗原相互作用の一分子解析が進めば，将来的に生命反応に携わる分子個々の性質の解析にも貢献が可能であろうと考える。

(食品工学研究領域 ナノバイオ工学ユニット 若山純一・杉山滋)

参考文献

- 1) Binnig, G., Rohrer, H., Gerber, Ch. and Weibel, E., Surface studies by scanning tunneling microscopy, *Phys. Rev. Lett.*, **49**, 57-61 (1982).
- 2) Binnig, G. and Quate, C. F., Atomic force microscope, *Phys. Rev. Lett.*, **56**, 930-933 (1986).
- 3) Czajkowsky, D. M., Iwamoto, H. and Shao, Z., Atomic force microscopy in structural biology: from the subcellular to the sybmolecular, *J. Electron Microsc. (Tokyo)*, **49**, 395-406 (2000).
- 4) Hinterdorfer, P., Baumgartner, W., Gruber, H. J., Schilcher, K. and Schindler, H., Detection and localization of individual antibody-antigen recognition events by atomic force microscopy, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **93**, 3477-3481 (1996).
- 5) Allen, S., Davies, J., Davies, M. C., Dawkes, A. C., Roberts, C. J., Trendler, S. J. and Williams, P. M., The influence of epitope availability on atomic-force microscope studies of antigen-antibody interaction, *Biochem J.*, **341**, 173-178 (1999).
- 6) Brogan, K. L., Shin, J. H. and Schoenfish, M. H., Influence of surfactants and antibody immobilization strategy on reducing nonspecific protein interaction for molecular recognition force microscopy, *Langmuir*, **20**, 9729-9735 (2004).
- 7) Sasou, M., Sugiyama, S., Yoshino, T. and Ohtani, T., Molecular flat mica surface silanized with methyltrimethoxysilane for fixing and straightening DNA, *Langmuir*, **19**, 9845-9849 (2003).
- 8) Evans, E., Energy landscapes of biomolecular adhesion and receptor anchoring at interfaces explored with dynamic force spectroscopy, *Faraday Discuss.*, **111**, 1-16 (1998).
- 9) Yanagida, T., Esaki, S., Iwane, A. H., Inoue, Y., Ishijima, A., Kitamura, K. and Tanaka, H., Single-motor mechanics and models of the myosin motor, *Philos. Trans. R. Soc. Lond. Biol. Sci.*, **355**, 441-447 (2000).

Ⅷ. 食糧供給とライフサイクルアセスメント

1. はじめに

地球温暖化が予想よりも早く進展していることが報じられている。現在進行している地球温暖化は、人間の社会活動に伴う二酸化炭素などの温室効果ガスの発生が主な原因である。2007年2月、国連の「気候変動に関する政府間パネル」(IPCC)により、人為的な温室効果ガスが温暖化の原因である確率は、「90%を超える」とされた。

1997年12月11日に、「気候変動に関する国際連合枠組条約」に基づいて、京都市の国立京都国際会館で開かれた地球温暖化防止京都会議(第3回気候変動枠組条約締約国会議、COP3)において、「気候変動に関する国際連合枠組条約の京都議定書」、いわゆる「京都議定書」が採択された。その後、加盟国の批准の遅れから発効が危ぶまれていたが、2004年11月4日のプーチン大統領の批准法への署名により2005年2月16日に発効し、世界は低炭素社会の実現に向けた大きな一歩を踏み出した。京都議定書において、先進国は、基準年(1990年)に対して約束期間(2008～2012年)に温室効果ガスを一定値(日本:6%, EU:8%など)削減することが義務づけられている。この温室効果ガスの削減目標に向けて、先進国ではあらゆる分野において温室効果ガスの発生を抑制することが緊急の課題となっている。

世界中の食品産業および家庭においては、原料である農畜水産物の生産、加工、流通、調理のために、多くの資源やエネルギーを使用している。したがって、食品分野においても、環境負荷の少ないシステムへの転換を図ることが喫緊の課題である。

ライフサイクルアセスメント(Life Cycle Assessment, LCA)は、製品やサービスの“ゆりかごから墓場まで”の環境に対する負荷を見積もることによって、環境に対するインパクト(影響)を評価しようとする手法である。本項では、食糧供給システムに関するLCAの動向と適用事例、並びにその課題について述べる。

2. ライフサイクルアセスメント(LCA)とは

2.1 LCAの概要

ISO-14040¹⁾によれば、LCAは、「製品システムのライフサイクルを通じた入力、出力及び潜在的な環境影響のまとめ及び評価」と定義されている。ここで、ライフサイクルとは、「原材料の採取又は天然資源の産出から最終処分までの連続的で相互に関連する製品システムの段階」である。すなわち、LCAは、製品の“ゆりかごから墓場まで”の環境に対するインパクト(影響)を評価しようとする手法である。

LCAは、4つのステップ、すなわち、①目的と調査範囲の設定、②インベントリー分析、③環境影響評価、④解釈、から構成される。LCAの直接の用途としては、環境負荷低減のための製品の開発および改善、戦略立案、政策立案、マーケティングなどがある(図1¹⁾)。

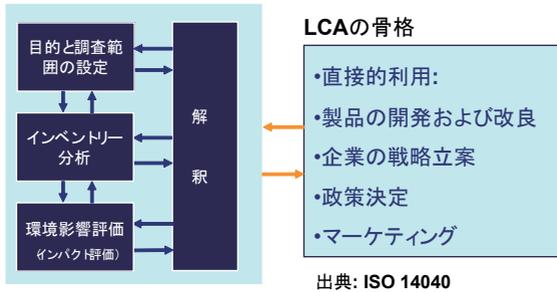


図 1 ライフサイクルアセスメントの枠組み

2.2 LCA の歴史

LCA 研究は、米国コカコーラ社による容器の環境影響評価（リターナブル瓶と飲料缶の環境影響評価）が概念の発端といわれている。その後、米国と欧州で SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) が設立され、1980年代から研究活動が本格化した。1993年から LCA の標準化作業が進められ、1997年に ISO-14040 が発行され、わが国においても同年に JIS-Q-14040 として発行された。なお、2006年に行われた ISO 規格の見直し作業により、14040 シリーズは、14040 と 14044 として再編され、これに基づいてわが国においても JIS の改訂が進められている。

わが国における研究体制の整備は欧米に比べて遅れをとったが、1995年に産学官の包括的な検討体制を構築するため LCA 日本フォーラムが設立された。さらに、その検討経過を踏まえて、より実際の展開を図るために 1998 年度から 5 年間「製品等ライフサイクル環境影響評価技術開発」（略称：LCA プロジェクト）が実施され、①我が国で共通使用できる LCA 手法の確立、②パブリックデータベースの構築、③データ活用・データメンテを容易に行えるネットワークシステムの構築、を目的として研究が行われた。その後、2003年4月から2006年3月まで、第2期のプロジェクトが実施された。

2.3 LCA 手法

2.3.1 目的と調査範囲の設定

製品システムについて、資源採取を含む原料の調達から製造、流通、使用、廃棄、リサイクルにわたるライフサイクル全体を対象として考えるのが LCA の基本である。ただし、個別の LCA の実施においては、まず目標や目的を明確化し、それに基づいて製品、ライフサイクルの範囲や評価項目を十分に検討して絞り込みを行う。ここで、評価を行う単位（機能単位：Functional Unit）を何にするのか、また、評価の範囲（システム境界：System Boundary）をどこまでにするのかが決まされる。

2.3.2 インベントリー分析

システム境界内の各工程における、資源消費量や大気、水質や土壌への環境排出物質を、項目毎に計算する。分析の結果を、消費された資源や環境中への排出物の一覧表 (Life Cycle Inventory, LCI) として示す。なお、計算精度は用いるデータの信頼性に影響されるため、データの根拠、出典などの明示が必要である。インベントリー分析には、積み上げ法と産業連関法があるが、詳細については後述する。

2.3.3 環境影響評価 (ライフサイクルインパクトアセスメント, LCIA)

インベントリー分析で求めた排出物を物質毎に集計し、どの領域に関係するかを割り振り、それぞれの影響度を定量化する。環境影響領域としては、地球温暖化、酸性化、富栄養化、オゾン層の破壊などが提案されている。さらに複数の影響領域で特性化した結果に統合化係数を用いて、一つの指標に統合化が行われる場合もある (ISOでは任意項目である)。LCIA手法の例については、後述する。

2.3.4 解釈

インベントリー分析やインパクト評価の結果を、単独または総合して評価、解釈する。

2.4 インベントリー分析の手法

2.4.1 積み上げ法

ISOにおけるインベントリー分析は、積み上げ法をベースとしている。そのため、積み上げ法をインベントリー分析の前提として説明してきたので、改めて説明するまでもないが、個々のプロセスについて、資源消費や環境排出物を算定して、項目ごとの総和を求める方法である (図2²⁾)。

2.4.2 産業連関法および 3EID 法

わが国の産業連関表は、生産活動の種類によって区分された約400の部門で構成され、各部門間の経済的なつながりを、年間の取引額で表現した行列形式の数表である。

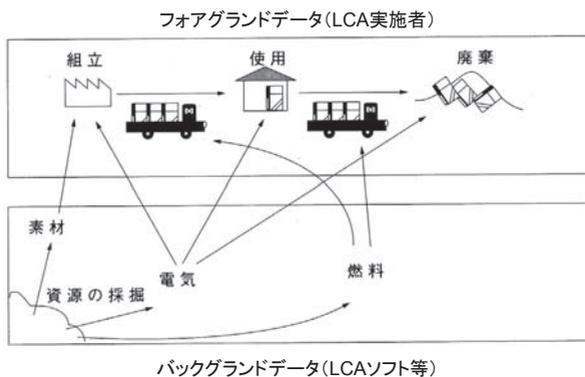


図2 LCIデータの収集方法 (冷蔵庫の例)

産業連関表を用いて、積み上げ法によらず直接、排出量を推計する方法が産業連関法である。

「産業連関表による環境負荷原単位データブック (3EID)」は、「産業連関表」を用いて算出した“環境負荷原単位”データベースである。3EIDの環境負荷原単位は、各部門の単位生産活動(百万円相当の生産)に伴って発生する環境負荷量であり、当該部門製品の単価(例えば円/t)が分かれば、物量当たりの環境負荷を算出することができる。多くの原料や部品を使用する製品に関するLCAの場合、積み上げ法では膨大な計算が必要となるが、産業連関法を利用することで、比較的容易にLCIを算出することができる。

味の素(株)は、3EIDデータと産業連関表の内生部門生産単価をもとに、食品関連材料について、各部門に含まれる製品ごとの物量単位に基づくCO₂排出係数を算出・データベース化し、これを公開している³⁾。

2.4.3 ハイブリッド法

個別の製品システムのライフサイクル全体について、精度の高いLCIを算出しようとする場合、積み上げ法の利用が望ましい。しかし、どうしてもデータの入手が困難な場合や、全体への影響の少ない部分の解析に要する労力を抑えたい場合がある。そのような場合に、主要なプロセスについては積み上げ法でLCIを算出し、全体への影響の少ないプロセスやデータの得られないプロセスについては、産業連関法を用いるのがハイブリッド法である。

2.5 ライフサイクルインパクトアセスメント (LCIA) 手法

(独)産業技術総合研究所ライフサイクルアセスメント研究センター(2007年度末で7年間の任期を全うし、2008年度から安全科学研究部門に移行した。)では、日本の環境条件を基礎とした被害算定型環境影響評価手法(LIME: Life cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling)を開発している。本手法においては、地球温暖化など11種の影響領域を通じて発生する被害量を、人間健康などのエンドポイントごとに求め、これらを基礎として環境影響の統合化までを行う、被害算定型のアプローチを採用している。さらに2006年には、信頼性の向上、代表性の向上、網羅性の向上(影響領域数が11から15へ増加)が図られた、LIME2が開発されている(図3)⁴⁾。

その他のLCIA手法としては、パネル法(早稲田大学)、EPS2000(スウェーデン)、Eco-Point1997(スイス)、Eco-Indicator95/99(オランダ)、などが知られている。なお、LCIA手法は、方法がまだ確立しておらず、現在も研究が継続されている。

2.6 LCA ソフトウェア

LCAソフトウェア・データベースとしては、SimaPro、ECO-it、ecoinvent、TEAM、LCIAit、KCL-ECO、Gabi、AIST-LCA V4 (JEMAI-LCA Pro) などがあり、インベントリーデータベースを利用して、個別のLCA解析を比較的容易に実施することができる。

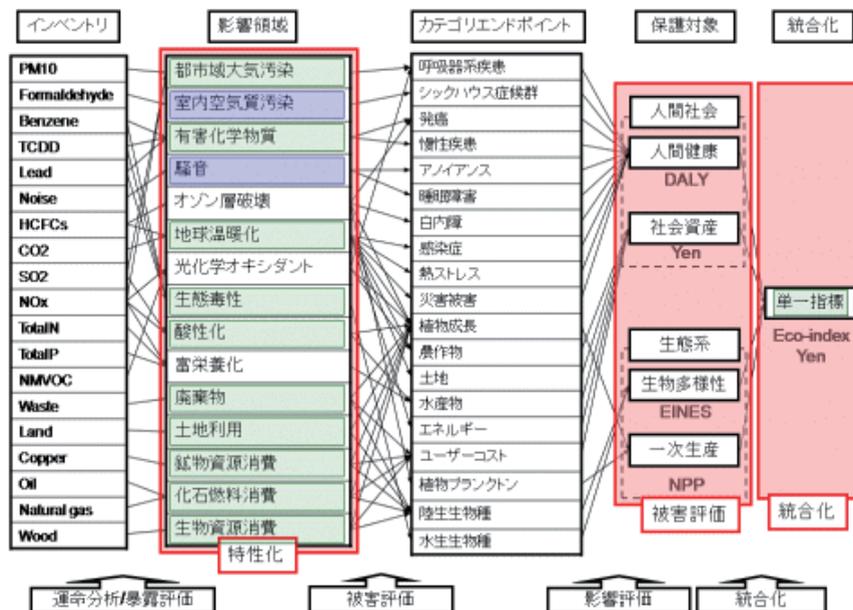


図3 LIME2 (日本版被害算定型ライフサイクル環境影響評価手法の第二版)⁴⁾

3. 食に関わるLCAの動向

LCAは、工業製品に対して精力的な適用が進められており、企業の環境報告書などにおいても公表されている。一方、農業・食品分野における実施例はまだ少なく、とくに、ライフサイクルを網羅する解析例は非常に限られている。それは、農業生産段階における農薬等資材の生産に関わるインベントリーデータが未整備である、システム境界の設定・機能単位の選択・副産物等の配分(Allocation)の方法が困難である、生産におけるCO₂固定などのベネフィットの定量化の問題、品質変化やロスの発生をどのように考慮するかなど、解析の上で多くの困難を伴うためである。

食品に関するLCA実施上のこのような困難にもかかわらず、これまでに多くの関係者の努力により、解析例は増えてきている。以下に、学術雑誌に掲載された論文から、その動向を簡単に紹介する。なお、世界的な食品LCAの動向については、Anderson(1994)⁵⁾、ROYら(2009)⁶⁾、国内の農業・食品LCA研究の動向については増田(2006)⁷⁾に詳しい。

3.1 LCA 研究の動向

加工食品の中で、解析対象として最も多く取り上げられているのは、パンである。小麦生産段階における有機栽培と慣行栽培の比較、製粉システムの比較、製パンプロセスの比較、包装、製造工程洗浄剤の比較、など多くの解析が行われている。その他、ビール、トマトケチャップなどの解析例がある。

畜肉や乳製品についても解析が行われている。和牛の肥育システムに関する研究⁸⁾、養豚システムに関しては適正農業規範 (GAP)、Label Rouge (LR)、Agiricultural Biologique (AB) などの環境保全型といわれるシステムと慣行システムの比較、牛乳生産における有機と慣行のシステム比較、牛乳の包装や廃棄物処理に関する解析、などが行われている。

アジア諸国において主食であるコメ、および米飯については、玄米、白米、パーボイルドライス、発芽玄米などに関する解析が行われており、これについては4.1で詳述する^{9,10)}。

3.2 国内の研究動向

農林水産省関係のLCA研究は、農林水産技術会議事務局のプロジェクト研究「持続的農業推進のための革新的技術開発に関する総合研究」として農業環境技術研究所が主体となって1998～2000年度に、その後2001～2002年度には独立行政法人化した農業環境技術研究所と農業技術研究機構のプロジェクトとして実施された。その成果報告書には、農業のLCA手法の開発に関する研究成果に加えて、水稲、トマト、キャベツ、コムギ、テンサイ、アズキ、緑茶、牧草、カンショ、ダイコン、飼料トウモロコシ、ウンシュウミカン、ナシの生産段階（一部は選果包装を含む）におけるLCIデータが掲載されている^{11,12)}。

2004年には、食品のLCA研究の推進を目的とする「食品研究会」が、(独)産業技術総合研究所ライフサイクルアセスメント研究センター、農林水産省所管の独立行政法人、大学、民間企業などのメンバーにより設立された。2004年度は経済産業省の「持続可能な消費」プロジェクトとして、2005年度以降は、日本LCA学会の研究会として活動を行っている。食品研究会の目的は、①食に関するライフサイクル全体の環境影響評価の実施、および、②食の持続可能性を表現する指標の開発である。2007年3月に開催された第2回日本LCA学会研究発表会では、食品研究会特別セッションが設定され、食品研究会関係者から多くの研究発表が行われた¹³⁾。

3.3 食品LCAに関する国際学会等

エコバランス国際会議が日本で隔年開催（第8回が2008年）され、欧州では2～3年間隔で国際会議が開催されている（2007年4月にはLCA in Foodsと題してスウェーデンで開催）。これらの国際会議において、農業・食品のLCAに関する研究発表が行われているものの、学術雑誌に論文として掲載されるのは、これらの発表のうちのごく

一部に限られている。食品LCAの研究成果を普及させるためには、より多くの論文の学術雑誌への掲載が望まれる。

LCAの標準化、研究などに関する組織としては、国際標準化機構(ISO)、国連環境計画(UNEP)、環境毒性化学学会(SETAC)、米国環境保護庁(EPA)、オーストラリア清浄生産中核研究拠点、デンマークLCAセンター、ベルギーLCA推進学会(SPOLD)、スウェーデン生産工学研究所(IVF)、英国環境戦略(CES)、産総研ライフサイクルアセスメント研究センター(現在は安全科学研究部門)、LCA国際センター(GALAC)、などがある。

3.4 食品LCAの課題

これまでの農業・食品LCA研究から明らかになった課題として、機能単位の選択によって、システムの比較評価結果が大きく異なるということが挙げられる。例えば、一般的には、有機農業は環境負荷が少ないと考えられている。それは、土地を機能単位(たとえば耕地1ha)として考えた場合には当てはまるが、機能単位を生産物(たとえば生産物1t)とした場合には、慣行栽培の方が環境負荷が小さくなる場合が多い。これは有機栽培では、一般的に害虫や病害の影響によって、一定面積当たりの生産量が慣行栽培に比べて少ないためである。

また、食品LCAにおける課題としては、生産方法や流通方法によって食品の品質、すなわち価値が変化するということが挙げられる。LCAにより製品やシステムを比較する場合、同等品質のものの一定量を機能単位とすることが求められる。異質なものの比較を実施する際には、環境効率という概念の導入などが必要となる。

環境効率は、製品の価値を、ライフサイクル環境負荷で割った数値である。前述の日本LCA学会「食品研究会」において、食の持続可能性を示す環境効率に基づく指標開発について検討が行われており、今後の研究の進展が期待される。

また、流通時の品質変化やロスの発生を考慮した解析も期待されるが、これについては、6.および7.で述べる。

4. 食に関わるLCAの研究事例

4.1 米製品および米飯のLCI

コメ製品には、稲の種子である粳(もみ)から籾殻を除去した「玄米」、玄米外側の糠層を取り除く精白処理を施した「白米」(精白歩合(除去される部分の質量比)は10%程度となる)の他に、「分づき米」(精白歩合が10%程度より小さいコメ)、発芽玄米(玄米に吸水させて部分的に発芽した状態のコメ)、パーボイルドライス(蒸煮処理による α 化の後に乾燥させたコメ製品であり東南アジアで利用されている)などがある。これらのコメ製品について、製造に伴うCO₂発生量に加えて、調理過程を含めたCO₂発生量(ライフサイクルCO₂、以下LC-CO₂)に関する解析が行われている^{9,10)}。

図4は、電磁誘導加熱(Induction Heating, IH)式の炊飯器(NP-GA05-XA,象印製)を

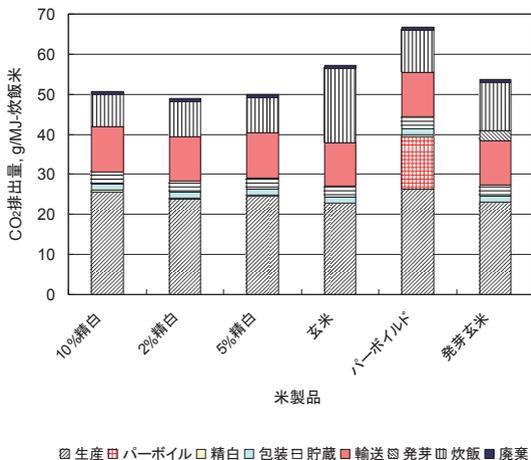


図4 各種米製品の炊飯米のLC-CO₂ (ポリエチレン袋包装)

使用して、コメ製品ごとの推奨モードで、食味として適当な硬さが得られる加水条件で炊飯した際の、炊飯米に含まれる熱量当たりのLC-CO₂ (g-CO₂/MJ)を示したのものである。最も調製・加工処理の少ない玄米で、LC-CO₂の値が白米や分づき米よりも大きくなっているのは、主として硬さを低下させる目的で、炊飯に長時間の加熱処理を必要とするプログラムが組み込まれているためである。玄米のLC-CO₂を減らすためには、圧力調理器の使用などにより調理時のエネルギー消費を低減させる必要があることがわかる。

4.2 トマトの生産流通とLCI

トマトは周年供給されており、冬場の生産においては温室が使用され、適正な温度を維持するために温室内の暖房が行われる。そのため、夏秋トマトと呼ばれる暖房不要の栽培と、年間を通じた温室栽培とでは、生産に関わるLC-CO₂の差が極めて大きい。すなわち、冬場のトマトを暖房が不要な温暖な地域で生産し、そこから消費地まで輸送することの方がLC-CO₂が小さくなる可能性がある。実際にその解析を実施してみると、日本から地球の反対側に当たる地域で栽培して船で輸送の方が、国内でハウス栽培する場合よりもLC-CO₂が少ないという結果が得られた(図5)¹⁴⁾。

一頃、フードマイレージという言葉をよく耳にした。地産地消などによって食品の輸送距離を短くすることで環境負荷の低減が可能であるという主張が使われるが、上記の結果は、やみくもに地産地消を進めることは得策でないことを示す。農業の基本は、適地適作であり、不適地での栽培は環境負荷を増やす可能性があることに注意が必要である。なお、農林水産省は、これまでフードマイレージを推奨してきたが、カー

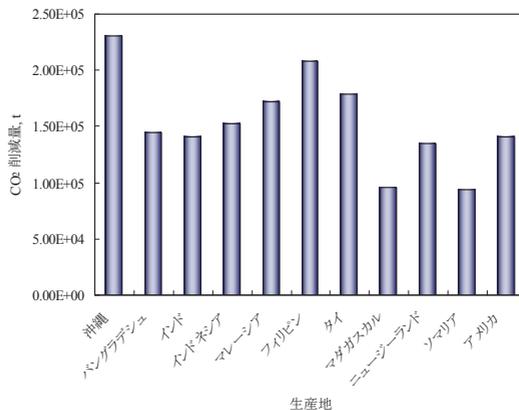


図5 雨よけ栽培トマトを東京へ低温輸送した場合のCO₂削減量
(コンテナ船で低温輸送)

(国内周年栽培のうち冬場の消費量を代替した場合)

ボンフットプリント (Carbon FootPrint, CFP) への対策の中で、フードマイレージについては慎重な扱いを求めている (毎日新聞, 2008年12月28日, 第2面)。カーボンフットプリントについては、5.で述べる。

4.3 食事メニューのLCI

日本LCA学会「食品研究会」では、日本の食生活によって誘発される環境負荷の実態を調べるために、5つのモデルメニュー (表1) を設定し、そのLC-CO₂を算出している¹⁵⁾。対象メニューの作成には、主食、主菜、副菜、汁物での出現頻度上位品目とその形態を参考に、家庭において出現頻度が高いメニューで、調理法を網羅していること、調理形態 (手作り、外食、加工食品) が揃っていること、などを条件にして料理が選択されている。

素材となる食品のLC-CO₂と、モデルメニュー調理時のエネルギー起因のCO₂排出量との合計から、献立としてのCO₂排出量が算出されている。調理時のエネルギー起因のCO₂排出量は、エネルギー消費量 (電気、都市ガス) を実測し、それらにCO₂排出

表1 設定したメニュー

朝食	昼食・おやつ	夕食1(和風)	夕食2(洋風)	夕食3(中国風)
トースト	ラーメン	ご飯	ご飯	ご飯
目玉焼き	スープ	具だくさん味噌汁	コーンポタージュ	ザーサイロースタン
サラダ	果物	焼き魚	ハンバーグ	鶏から揚げ
ヨーグルト	茶	茶わん蒸し	インゲンソテー 人参グラッセ	八宝菜
コーヒー	プラマンジェ	お浸し	ポテトサラダ	果物
		果物	果物	ビール
		ビール		

表2 メニューごとのLC-CO₂の比較

	素材のみ(食品)		調理エネルギー	LC-CO ₂ (素材と調理エネルギーの和)	
	産業連関表	連関表+積上げ		産業連関表	連関表+積上げ
朝食	1,160	1,056	116	1,276	1,172
昼食	1,706	1,167	773	2,479	1,940
夕食1	2,060	2,571	637	2,754	3,084
夕食2	2,407	5,432	423	2,830	5,855
夕食3	2,591	2,664	295	2,885	2,958

係数をかけて算定している。献立メニューごとの、素材起因および調理エネルギー起因のCO₂排出量を表2に示す。

この献立メニューのLC-CO₂に関する検討から、食品素材からのCO₂と調理からのCO₂のおよその比率、食品素材による違い(肉、乳製品、魚類などの動物性食品でCO₂排出量が多い)、調理方法による違い(茹でる、煮る、蒸すなどでCO₂排出量が多い)、積み上げ法と産業連関法の違い(和牛の場合など)、などが明確となった。これらの情報は、栄養バランスを保ちつつ、環境負荷の少ない食生活をデザインする際に活用できると考えられる。

4.4 プラスチック製通い容器と段ボール箱の比較

青果物流通におけるプラスチック製通いコンテナ(Resusable Plastic Container, RPC)と店頭ディスプレイ対応段ボール箱(Display-Ready Corrugated Container, DRC)について、エネルギー使用量、固形物排出量、温室効果ガス排出量に関する比較研究が行われている¹⁶⁾。それによれば、RPCの温室効果ガス排出量(CO₂相当量)(考慮ガスは二酸化炭素、メタン、亜酸化窒素の3種)は、DRCと比較して29%少ない(10品目の平均)と報告されている。

ただし、この比較研究において、RPCとDRCの容器としての緩衝性能については考慮されていない。これは、Chonhenchobらの先行研究¹⁷⁾で得られた研究結果、すなわち、マンゴーの輸送における果実の損傷性(輸送試験と室内振動実験による)は容器サイズが同等であればRPCと段ボール箱(Carton Box, CB)とでは差がない、という研究結果に基づいたものと考えられる。しかし、この報告の室内実験で採用された振動条件(各容器の共振周波数での試験)は、容器の影響を適切に評価できる条件とは言えない。

今後、緩衝のための内装材の追加などによって包装システム全体としての緩衝性能をそろえた上で、容器の種類とその環境負荷特性について評価することが必要であるといえる。

4.5 バイオエタノールのLCA

筆者の所属する流通工学ユニットにおいて実施しているバイオエタノールのLCA研究について、簡単に紹介する。

2007年2月には、「国産バイオ燃料の大幅な生産拡大」(Promotion Meeting of Biomass

Nippon Strategy, 2007) が総理大臣に提出され、2030年度までに600万kLの草本系などのセルロース由来バイオ燃料の生産を目指すことが目標として掲げられている。これを受けて農林水産省では、2007年度より委託プロジェクト「地域活性化のためのバイオマス利用技術の開発」を実施している。本プロジェクトは、研究期間が2007年度から2011年度までの5年間で、下記の4つの研究テーマから構成されている。

- ①国産バイオ燃料への利用に向けた資源作物の育成と低コスト栽培技術等の開発
- ②稲わら等の作物の未利用部分や資源作物、木質バイオマスを効率的にエタノール等に変換する技術の開発
- ③バイオマス利用モデルの構築・実証・評価
- ④バイオマス・マテリアル製造技術の開発

上記4つの研究テーマとそれに含まれる研究を系と称しており、食品総合研究所は、2系の研究統括機関となっている。

2系の研究課題のうち流通工学ユニットは、「各技術のコスト・エネルギー効率及びLCA評価」を担当している。これまでに、濃硫酸加水分解法(NEDOプロセス)によって稲わらからエタノールを生産する場合について、主としてエタノール変換効率(糖化効率×発酵効率)をパラメータとして、コスト、CO₂排出量、エネルギー収支に関する解析を行い、現在、論文投稿中¹⁸⁾である。現在、稲わらや資源作物からの酵素法によるエタノール生産プロセスについて解析を進めている。

5. カーボンフットプリント

2008年春頃から、新聞紙上などでカーボンフットプリント(Carbon FootPrint, CFP: 炭素の足跡)という言葉を見かける。CFPは、エコロジカルフットプリント(「ある特定の地域の経済活動、またはある特定の物質水準の生活を営む人々の消費活動を永続的に支えるために必要とされる生産可能な土地および水域面積の合計」)と同じように、環境負荷の量を分かりやすく表示しようとするものである。CFPの先進国は英国であり、そのプロトコルがPAS 2050として、また、導入のガイドがGuide to PAS 2050として公表されている¹⁹⁾。

経済産業省は、CFP制度の実現のために、2008年6月17日に「カーボンフットプリント制度の実用化・普及推進研究会」を立ち上げた。CFP制度とは、「商品・サービスの原材料調達から廃棄・リサイクルに至るまでのライフサイクル全体を通して排出される温室効果ガスの排出量をCO₂に換算して、当該商品及びサービスに簡易な方法で分かりやすく表示する仕組み」を意味する²⁰⁾。

LCA手法により算出されたCO₂排出量が商品及びサービスに表示されることは、CO₂の排出量の「見える化」の有力な一つの手段であり、それにより、消費者は環境負荷低減に向けた正しい情報の入手が可能となり、事業者はライフサイクルのどの段階で環境負荷が高いかを割り出し、効率的に環境負荷を下げるのが可能となるとともに、自らの環境負荷低減の取り組みを消費者に訴求することができる。経済産業省で

は、2009年度から実証事業を計画しており、その成果が期待される。

ところで、わが国のCFPで使用するCO₂排出原単位（GHGガスのCO₂相当量）データは、積み上げ法を基本としており、推奨データベースとしては、①LCA日本フォーラムLCAデータベース、②JEMAI-LCAデータベース、③エコリーフ原単位データが挙げられている²⁰⁾。

6. ポストハーベストシステムとLCA

4.4で述べたように、包装容器の環境負荷特性について比較研究を行う場合には、緩衝性能をそえた比較対象の設定が必要である。緩衝性能の評価においては、実輸送における振動条件と果実の損傷性を反映した振動試験（輸送シミュレーション²¹⁾）に基づく検討を前提とすべきと考える。

包装には、緩衝性能だけでなく、熱的特性（熱通過率、断熱性など）、物質移動特性（ガス透過性、水蒸気透過性）、情報伝達特性などに基づく各種の機能がある。したがって、その環境負荷特性の比較評価においては、これらの機能に十分配慮して条件を適切に設定した上での比較が求められる。包装を含めたポストハーベストシステムの主要な目的は、流通時の品質変化を防止あるいは抑制することにある。ポストハーベストシステムの環境負荷特性を比較検討する場合には、想定する条件ごとの品質保持効果を同等にそえた上での比較検討、あるいは、品質変化やロスの発生に伴う環境負荷を加味した比較でなければならない。

極論すれば、流通時の品質変化が避けられない食糧流通に関するLCAにおいては、“品質”を抜きにした比較検討にはあまり意味がということになる。今後は、品質変化を考慮した食品LCAの実施が期待される。

図6は、トマトの物流時の品質保持手段として低温あるいはMA包装を採用したと仮定したときの、LC-CO₂を示したものである¹⁴⁾。輸送距離が長くなると、低温輸送に比べてMA包装でLC-CO₂が小さくなることがわかる。図6は、輸送手段が船の場合の結果であるが、自動車の場合も同様の結果である。低温輸送は、低温の発生のために電気（あるいはその発生のために使用する重油などの燃料）を消費するため、出荷時にプラスチックの使用のためにLC-CO₂が発生するMA包装に比べて、輸送距離が長く長時間を必要とする場合には不利となる。なお、MA包装の有利・不利の分岐点は、自動車輸送で2,000km、船輸送で1,000kmであった。これは、自動車と船の輸送速度の違いに起因する。

7. ロス率とフードサプライチェーンのLCA

採用するポストハーベストシステムによって、食品の品質変化が異なり、ロスの発生に差が生じることとなる。すなわち、採用したシステムにおけるロスが大きい場合、同一量の供給を確保するためには、ポストハーベストシステムに投入すべき食品の量を多くする必要がある。つまり、採用するポストハーベストシステムの違いによって

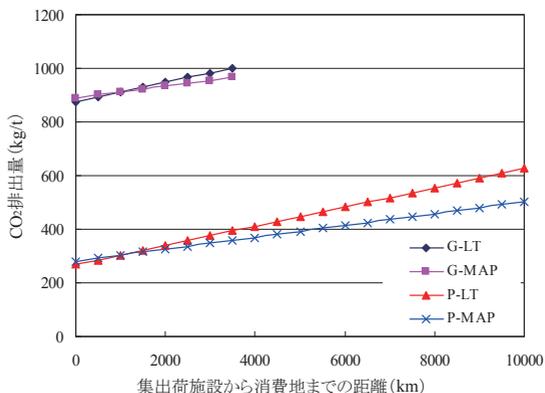


図6 トマトの栽培方法、品質保持方法、輸送距離が LC- CO₂ に及ぼす影響（コンテナ船輸送）

（G：温室栽培，P：雨よけ栽培，LT：低温，MAP：MA包装）

ロス率に差が生じ、システムに投入すべき食品の量が変化することになる。

図7は、ロス率（最終供給量に対する損耗量の割合）をパラメータとして、ライフサイクルインベントリーの相対値（相対LCI）をプロットしたものである⁶⁾。ここでは、ポストハーベスト手段のインベントリー（P）とロス率（L）との関係として、 $P = A/L$ を仮定している。ここで、Aは、生産に関わるインベントリーである。

図7から、ロス率が10%程度のところで相対LCIが極小となることが分かる。すなわち、ある食品を一定量供給する際に、環境負荷を最小化するポストハーベスト条件が存在することになる。

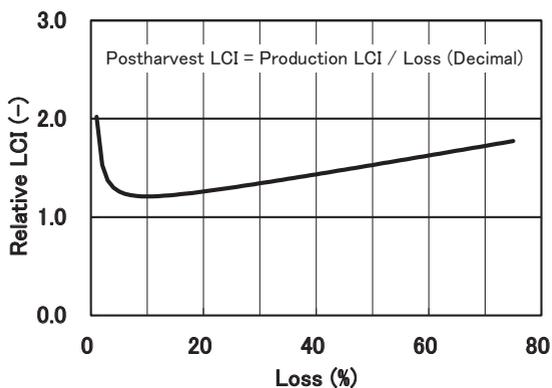


図7 ロス率（最終供給量基準）が食糧供給の相対LCIに及ぼす影響

例えば、包装資材は、環境負荷の最大の原因であるかのような扱いを受けているが、実は、適切に選択されれば、食品供給（フードサプライチェーン）における環境負荷を最少化することに大きく貢献できることになる。このことは、他のポストハーベスト手段についても言えることであり、LCAは、食糧供給における環境負荷の最少化に大きく貢献できると考えられる。

ところで、図7の曲線は、廃棄すべき品質基準の設定によって上下に移動する。すなわち、品質基準が厳しければ相対LCIが大きくなり、曲線は上方向にシフトする。逆に品質基準が緩ければ相対LCIが小さくなり、曲線は下方向にシフトする。すなわち、多少の傷を問題としないような消費行動をとることで、食糧供給のLCIを削減することができる。量販店等の日配品売場で、同じ製品の中から賞味期限までの期間が長い商品を選択する姿を目にすることがあるが、購入して直ぐに消費するものであれば、敢えて賞味期限の短い商品を選択することで環境負荷の低減に貢献できるということを知って欲しい。

8. おわりに

食糧供給システム、すなわちフードサプライチェーンには、原料生産、輸送、卸売、加工、小売、消費、廃棄物処理などさまざまなステークホルダーが関与しており、また、お互いの連携が十分ではないために、目的意識や情報の共有ができていない場合が多い。ライフサイクルアセスメントは、製品のいわゆる“ゆりかごから墓場まで”の環境への影響を評価する手法であり、製品全体の環境負荷を低減するためには、全体最適化を行うシステムアプローチが不可欠である。すなわち、LCAを実施することで、フードサプライチェーンにおけるステークホルダー間の連携を強化し、さらに、環境負荷の低減という共通の目的に向かって協力する機運が醸成されることが期待できる。

フードサプライチェーンにおけるステークホルダー間の連携が強化されることで、低環境負荷、高効率、低コストの製品設計を行うエコデザインの進展が期待される（Zufia and Arana, 2008）²²⁾。一方、ステークホルダー間の連携強化は、環境負荷の低減にとどまらず、適正農業規範（Good Agricultural Practices, GAP）や適正流通規範（Good Distribution Practices, GDP）の導入促進などにより食品安全を推進する上でも大きなメリットを生み出すことが期待できる。LCAは、今後のフードサプライチェーンの向上に対して、直接、間接に大きな効果をもたらすことが期待される。

地球環境保全は、人を含めた地球上の全ての生命に恩恵をもたらす。地球環境保全に向けた環境負荷の低減のためには、LCAの普及による対象システムにおける改善点の明確化とそれに基づく意志決定、技術の開発・導入、さらにそれらを支える投資が必要となる。2006年にノーベル平和賞を授賞したムハマド・ユヌス氏は、社会貢献を最優先にする新企業モデル「ソーシャル・ビジネス」（社会的企業）を提唱している（朝日新聞2009年1月6日朝刊）。資本主義のエゴとも言える金融至上主義によって、世界

的に大きな打撃を被った現在、環境主義の進展とその精神に基づく、金儲けや人間だけのためではない地球環境保全のための資本投入による、低炭素社会の実現を期待したい。

(食品工学研究領域 流通工学ユニット 椎名 武夫)

引用文献

- 1) ISO (International Organization for Standardization), ISO 14040:2006 (E) Environmental management - Life cycle assessment -Principles and framework, (2006).
- 2) 稲葉敦:LCA (ライフサイクルアセスメント) とは何かー LCA の手法と適用ー, 農業におけるライフサイクルアセスメント, 農林水産省農業環境技術研究所編, 養賢堂, pp1-14, 2000.
- 3) 味の素グループ, 食品関連材料の LC-CO₂ データベース (2009年1月13日確認: <http://www.ajinomoto.co.jp/company/kankyo/>).
- 4) ライフサイクルアセスメント研究センター, LIME2, (2009年1月13日確認: <http://unit.aist.go.jp/lca-center/ci/activity/project/lime2/index.html>).
- 5) K. Andersson, T. Ohlsson, P. Olsson, Life cycle assessment (LCA) of Food products and production systems, Trends in Food Science and Technology, **5**, 134-138 (1994).
- 6) Poritosh Roy, Daisuke Nei, Takahiro Orikasa, Qingyi Xu, Hiroshi Okadome, Nobutaka Nakamura, Takeo Shiina: A Review of Life Cycle Assessment (LCA) on some Food Products, Journal of Food Engineering, **90**(1), 1-10, 2009.
- 7) 増田清敬, 我が国の農業分野における LCA 研究の動向, 北海道大学農経論叢, **62**, 99-115, 2006.
- 8) A. Ogino, K. Kaku, K. Shimada, Environmental impacts of the Japanese beef-fattening system with different feeding lengths as evaluated by a life cycle assessment method, Journal of Animal Science, **82**, 2115-2122, 2004.
- 9) Poritosh Roy, Tsutomu Ijiri, Hiroshi Okadome, Daisuke Nei, Takahiro Orikasa, Nobutaka Nakamura, Takeo Shiina, Effect of processing conditions on overall energy consumption and quality of rice (*Oryza sativa* L.), **89**(3), 343-348 (2008).
- 10) Poritosh ROY, Tsutomu Ijiri, Daisuke Nei, Takahiro Orikasa, Hiroshi Okadome, Nobutaka Nakamura, Takeo Shiina: Life cycle inventory (LCI) of different forms of rice consumed in households in Japan, Journal of Food Engineering, **91**(1), 49-55, 2009.
- 11) 農業環境技術研究所 (2003): 「環境影響評価のためのライフサイクルアセスメント手法の開発」研究成果報告書.
- 12) 農業環境技術研究所 (2003): 「LCA 手法を用いた農作物栽培の環境影響評価実施マニュアル」.

- 13) 日本 LCA 学会, 第 2 回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集, (2009 年 1 月 13 日確認 : <http://www.jstage.jst.go.jp/browse/ilcaj/-char/ja>).
- 14) P. Roy, D. Nei, H. Okadome, N. Nakamura, T. Orikasa, T. Shiina, Life cycle inventory analysis of fresh tomato distribution systems in Japan considering the quality aspect, *Journal of Food Engineering*, **86**(2), 225-233 (2008).
- 15) 小澤寿輔・稲葉敦: 日本 LCA 学会食品研究会の成果の概要, 日本 LCA 学会誌, **4**(2), 129-134 (2008).
- 16) S. Paul Singh, Vanee Chonhenchob, Jogit Singh: Life Cycle Inventory Analysis of Re-usable Plastic Containers and Display-ready Corrugated Containers Used for Packaging Fresh Fruits and Vegetables, *Packaging Technology and Science*, **19**(5), 279-293 (2006).
- 17) Vanee Chonhenchob, S. Paul Singh: A comparison of corrugated boxes and reusable plastic containers for mango distribution, *Packaging Technology and Science*, **16**(5), 231-237 (2003).
- 18) 折笠貴寛・井上貴至・小島浩司・徳安健・ロイポリトッシュ・中村宣貴・椎名武夫: 稲わら由来のバイオエタノール生産におけるエタノール変換効率の違いがコスト, CO₂ 排出およびエネルギー収支に及ぼす影響, 農業機械学会誌, 投稿中.
- 19) British Standards Institution (BSI) , PAS 2050:2008 - Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services (2009 年 1 月 13 日確認 : <http://www.bsigroup.com/en/Standards-and-Publications/Industry-Sectors/Energy/PAS-2050/>).
- 20) 経済産業省, 「カーボンフットプリント制度のあり方(指針)」(案) たたき台(平成 20 年 9 月 26 日第 3 回ルール検討会) (2009 年 1 月 13 日確認 : http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/k_8.html).
- 21) 椎名武夫: 青果物の損傷性を考慮したランダム振動試験法の開発, 包装技術, **44**(10), 753-761 (2006).
- 22) J. Zufia, L. Arana, Life cycle assessment to eco-design food products: industrial cooked dish case study, *Journal of Cleaner Production*, **16**, 1915-1921 (2008).

その他の参考文献

- N. Itsubo, A. Inaba, Development of LIME2- Towards the establishment of methodology for decision making, SETAC-Europe Annual Meeting 2007, SETAC-EU-0249-2007.
- P. Roy, N. Shimizu, T. Shiina and T. Kimura: Energy consumption and cost analysis of local parboiling processes, *J. Food Eng.*, **76**(4), 646-655 (2006).
- P. Roy, N. Shimizu, N. Okadome, T. Shiina and T. Kimura: Life cycle of rice: Challenges and choices for Bangladesh, *J. Food Eng.*, **79**(4), 1250-1255 (2007).

- 羽賀清典, 和木美代子: 肥育牛のふん尿堆肥化におけるエミッションの LCA, 農林水産省農業環境技術研究所編, 農業におけるライフサイクルアセスメント, 養賢堂, 東京, pp116-125(2000).
- 南亘, 安井邦洋, 中野勝行, 金熙濬: まぐろ消費に伴う大気汚染物質 LCI, 日本水産学会誌, **70**, 548-554(2004).
- 渡邊一仁, 田原聖隆, 藤森康澄, 清水晋, 三浦汀介: イカ漁業の LCI と環境負荷, 環境科学会誌, **19**(1), 15-24(2006).
- Mikkel Thrane, LCA of Danish Fish Products, Int J LCA, **11**(1), 66-74 (2006).
- 梁瑞録・谷口郁・川島洋人・菊地栄治・相馬隆雄: 肉豚生産に伴う地球温暖化ガス排出量の推定, 日本 LCA 学会誌, **3**(3), 178-183(2007).
- 池口厚男・干場信司: 経済性, エネルギー, エントロピーによる家畜飼養の評価, 農業施設, **32**(4), 161-170(2002).
- 根本志保子: フードマイルズにみる生鮮野菜消費と環境負荷の変化, 生活経済学研究, **22**・**23**, 225-235 (2006).
- 根本志保子: 食料の小売および流通過程における CO₂ 排出量試算, 日本 LCA 学会誌, **5**(1), 113-121(2009).
- 折笠寛貴, ロイポリトッシュ, 根井大介, 中村宣貴, 椎名武夫: 卸売市場流通における環境負荷低減の可能性, 第 3 回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集, 226-227(2008).
- 津田淑江・大家千恵子・瀬戸美江・久保倉寛子・稲葉敦: 調理時におけるライフサイクル CO₂ 排出量の実践的定量, 日本 LCA 学会誌, **2**(3), 288-297(2006).
- 津田淑江・久保倉寛子・辻本進・上田玲子・大家千恵子: モデルメニューによる日本の食事の LC-CO₂ 評価, 日本 LCA 学会誌, **3**(3), 157-167(2007).
- 林清忠: 「農薬のリスク管理に向けてーライフサイクルアセスメントを考えるー」, 農業環境技術研究所, 47-56(2007).
- 林清忠, 小野洋, 上田達己, 天野哲郎: 「研究調査室小論集」, 第 10 号, 農業・食品産業技術研究機構, 55-63(2007).