

農畜水産物の鮮度を最大活用するための 食品高圧加工技術

1. はじめに

食品科学 (food science) と食品工学 (food engineering)¹⁾ とから生み出された結果が、食品に関する技術である。海外では、食品と技術とを直接接合した food technology の類の言葉をしばしば目にするが、日本語で「食品技術」としてもわかりにくく、分野毎の技術として表現する必要がある。よって、食品加工技術 (food processing technology)、食品包装技術 (food packaging technology)、食品流通技術 (good distribution technology)、食品分析技術 (food analysis technology) 等のように、食品関連の分野と繋げると意味が明解になる。food technology は、食品関連技術と訳せば良いのかも知れない。

食品加工においても、様々な技術がある。その中の一つが、食品高圧加工技術 (high pressure processing technology for Food) である。高圧加工には、衝撃波を用いるような動的な高圧加工 (high dynamic pressure processing) と、圧力媒体で徐々に加圧してから保持後に減圧する静的な高圧加工 (high static pressure processing) とがあり、特に、水が圧力媒体として用いられ、食品産業界で実用化されている後者は、高静水圧加工 (high hydrostatic pressure processing) と呼ばれる。高圧加工を省略して「HPP (high pressure processing)」と呼ぶ場合もあるが、近年は、衝撃波による食品加工技術²⁾ も出現しているので、高静水圧加工との区別に注意する必要がある。筆者は、今後の混乱を避けるために、そしてこの言葉がこれ以上普及しないように、HPP の略称を用いないように心掛けている。

食品高圧加工³⁾ は、1987年の実用化提言⁴⁾以降、1990年の高圧加工ジャム⁵⁾実用化を契機として発展し、処理技術としては成熟しつつある。しかしながら、加工技術としては、熱加工技術と比べると、未解明な現象が多い分、期待も高く、それ故に解決すべき課題も多い。食品高圧加工技術での食品製造においては、加熱、冷却、凍結等の熱加工技術でなければできないこともあり、一方、高圧加工技術でしかできないこともあるので、それぞれの特徴を理解する必要がある。そこで本稿では、食品高圧加工技術を概観し、その特徴を解説する。

2. 非熱的食品加工技術としての高圧処理の特徴

食品を加熱すると、色素成分、香気成分等の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等、様々な化学反応が起きる。これは、分子運動が活発になることで、化学反応が促進されるからである。加熱生成物は、

Maillard（註：「マイヤール」と書くのが原語の仏語に近い。）反応により，独特な風味及び色合いの元となるし，それは時として，加熱臭として不快な臭いを発する原因になることもある。

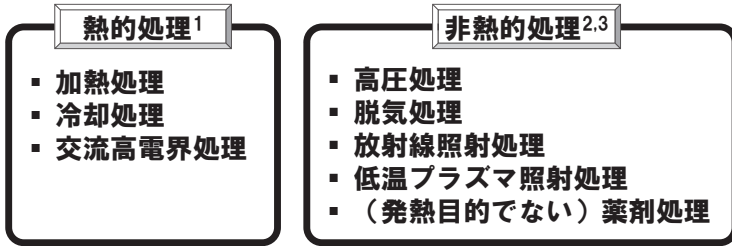
一方，圧力での処理においては，分子運動が抑制されるため，化学反応は原則的には促進されない。よって，農畜水産物の新鮮な風味の低下を最小限にする加工が可能である。食品の場合は，主として水和である溶媒和は促進するが，これは，水が水素と水酸基として二重結合に付加する化学反応の水和反応と区別する。この溶媒和等により，高圧処理では，主として分子の巨視的・微視的な物理的変化が起こる。例えば，巨視的には，気泡分散系では気体の液体への溶解による均一化で気泡が消失し，微視的には，分子と分子との間にある空隙を埋めるように分子が詰め込まれて密度が高くなる。特に蛋白質のような巨大分子では，分子内・分子間の水素結合等が切れ，各種分子により分子内の空隙が埋められて，元の立体構造が崩れて変性が起こる。

食品高圧加工においては，化学反応を最小化しつつ，物理的変化を利用する。これは，熱加工卵（茹で卵）と高圧加工卵とを比較すると理解しやすい（表1）。いずれの加工操作によっても卵の蛋白質は固まるが，熱加工卵からは硫黄様の独特な加熱臭がする一方で，高圧加工卵からは特段の臭いはない。これらを食べると差異は明確であり，熱加工卵を美味しくする食塩は，高圧加工卵を美味しくしない。高圧加工卵は，化学反応が抑制されたために，生卵と同じ風味を持つからである。高圧加工卵を美味しく頂くためには，塩ではなく，生卵を美味しくする醤油が適している。

高圧処理では，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。よって，高圧処理は，非加熱の操作ではなく，厳密には非熱的操作でもない。しかし，放射線照射処理，低温プラズマ照射処理等の新しい食品加工技術と同様に，「熱を積極的に用いた処理ではない」という意味で，広義での非熱的操作に分類される（図1）。熱処理では，熱伝達・熱伝導の制約のため，食品を熱媒体に置いても，その中心温度が目的温

表1 鶏卵の熱加工と高圧加工との比較

	生卵	熱加工卵 (茹で卵)	高圧加工卵
処理条件	冷蔵	100℃, 10 min	700 MPa, 25℃, 10 min
割卵後の 外観	生	卵白：白く固化 卵黄：淡い黄色で固化	卵白：白く固化 卵黄：濃い黄色で固化
香り	生	イオウ様の加熱臭あり	生
味	醤油との相性が良い。 塩との相性が悪い。	塩及び醤油との相性が良い。	醤油との相性が良い。 塩との相性が悪い。



¹ 力学的処理等の他の処理との比較のため、熱処理よりは「熱的処理」の方が汎用的である。

² 「熱を主たる処理手段としない」という意味での「非熱的」であることが多い。

³ 熱処理との対比で「非熱処理」を用いることもあるが、「非熱処理」には「非熱+処理（非熱的処理）」の他に、「非・熱処理（熱処理をしない生）」の意味があるので、誤解を避けるための注意が必要である。

図 1 高圧処理の位置付け

度に到達する迄に一定時間が必要である。それ故、食品の熱物性を十分に把握した上で伝熱を予測しなければ、不均一な加熱が問題となることがある。この際、不完全な殺菌を避けるために、安全係数をかけて、必要以上に長く熱処理すると、品質が更に劣化する。一方、高圧処理を含めた圧力処理では、食品を圧力媒体に浸漬^{しんじく}して加圧すれば、ほぼ瞬時に食品全体が目標圧力に到達する。よって均一な食品加工が可能である。

これまで、一連の研究において着目されてきた食品高圧加工の特徴は、均一な瞬時伝達、ウイルス・微生物の不活性化、栄養成分・香気成分・色素成分の損耗抑制、食品高分子（澱粉、蛋白質等）の変性、液体含浸及び気泡分散の促進、貝類・甲殻類の開殻殻等である（図2）⁶⁾。この中で、当初から重要視されているのが、鮮度低下を抑えつつ農畜水産物の加工を行う際の微生物不活性化である。

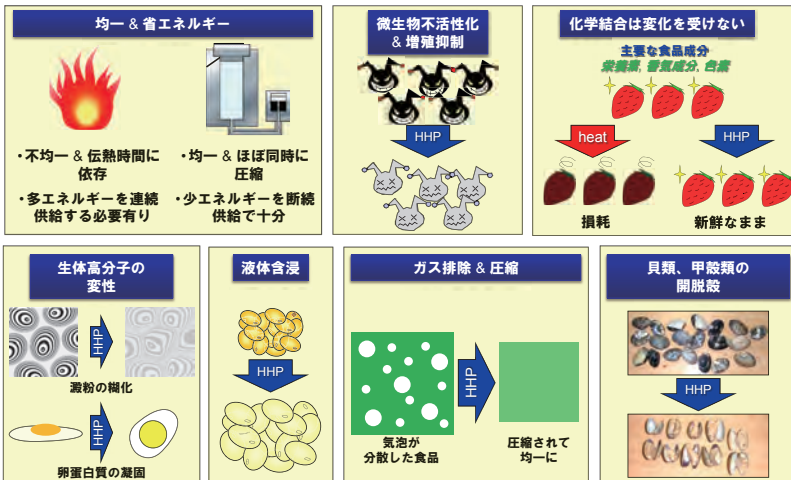
3. 微生物不活性化⁷⁾

3-1. 微生物不活性化の注意点

食品高圧加工によって十分なりリスク低減ができたとしても、原材料に、基準値以上の物理的・化学的ハザードが含まれていては意味を成さない。また、殺菌等による十分なりリスク低減を達成するためには、原材料ができる限り清浄でなくてはならない。そのためには、食品原料に付着する家畜糞便等の洗浄、収穫、保管、切断等の操作に用いる装置、器具の消毒等に十分に配慮した上で、できる限り清浄な原料を密封包装し、介入技術の一つである高圧加工に供して、殺菌（もしくは可能であれば滅菌）する必要がある。教科書、学術論文によっては、消毒、殺菌、滅菌等、食品衛生確保に関する用語⁸⁾が、統一されていなかったり、不適切に使われていたりすることがあるので、表2を参考にさせて頂ければ幸いである。特に、「滅菌」が不適切に使われることが多いので注意が必要である。

表 2 食品衛生に関する重要な用語⁸⁾

英語	和訳	解釈
microbial inactivation	微生物不活性化	微生物の活動を低減すること。致死的に不活性化すれば死滅。亜致死的に不活性化すれば損傷で、損傷したものは回復しうる。
pasteurization	殺菌	微生物を死滅させる操作。従来、低温殺菌として、狭義の意味で用いられていたが、近年は、健康危害のある微生物を低減する操作で一般的に用いられる。
sterilization	滅菌	微生物を全滅させる操作。全滅するか、全滅しないかの二者択一であることに注意が必要。
disinfection	消毒	器具その他、非生物体から、細菌芽胞以外の食中毒菌の殆ど又は全てを除去する操作。食品そのものは対象としない。
intervention	介入	微生物の付着、増殖、生存を妨げる行為。行為は、殺菌、滅菌、消毒、除染、洗浄等、段階・状況によって様々。
decontamination	除染	対象から有害物質を取り除き、取り扱い、使用、廃棄等が安全に実施できるようにする操作。
cleaning	洗浄	土等の目に見える汚れを、洗い落とす操作。殺菌、消毒、滅菌等の効率を高めるためには、完全な洗浄が求められる。

図 2 損傷菌の考え方⁷⁾

生物学的リスクとして最も重要なものは微生物であり、特に細菌の不活性化についての研究は、1899年⁹⁾以降、食品高圧科学に於いて最も歴史が長く、食品高圧加工が実用化して以降、知見が飛躍的に増大した。更に、高圧処理による微生物の損傷・回復に関連した研究は、近年盛んであり、高圧処理により細菌コロニー

が検出されないことが、殺菌の他に損傷を意味しうることに注目されている¹⁰⁾。細菌の中には、病原性細菌と腐敗細菌とがあるが、いずれもが加工時の殺菌対象であり、特に病原性細菌についての研究事例が多い。一方、黴(カビ)、酵母については、これらが品質劣化に関与するのは勿論であるが、黴毒生産等による健康被害に直ちに繋がる事例が少ないため、知見が限られている。

微生物またはウイルスの殺滅または損傷の評価において、注意すべきことは、その効果が、生物種、細胞の形状・状態、食品マトリックス、検出手法、装置、その他の影響を受けるということである。

高压処理による微生物不活性化においては、凡そではあるが、耐圧性が芽胞>グラム陽性菌>グラム陰性菌・酵母・カビの順に高く、これは、熱処理における傾向と類似している¹¹⁾。細菌の形状については、棒状の桿菌が圧力に最も弱く、球菌が最も強いという傾向¹²⁾もあり、確かに *Staphylococcus aureus* (黄色ブドウ球菌) の耐圧性は高い¹³⁾ が、例外はある。細菌の状態によっても耐圧性が異なり、定常期の細菌の方が、対数増殖期のものよりも、耐圧性が高い¹⁴⁾。また、これらを含む食品マトリックスに糖質、蛋白質等が多く含まれると、微生物は失活し難い傾向があり、これら共存成分以外にも、pH、水分活性、浸透圧等の影響がある。損傷菌の検出時に、選択培地と非選択培地とを用いて差分を求める場合があるが、健常菌であってもそれぞれでの検出菌数が異なりうる。更に、異なる実験装置でのデータは、装置の圧力校正、容器形状及び容器内試料設置位置、水以外の圧力媒体の利用等によって異なり、時には大きな差異に繋がることもあるので、直接の比較には注意が必要である。実験室によっては、零度以下での実験を想定してエタノールを圧力媒体として用いることがあるが、エタノールは圧縮率が水より遥かに高いので、断熱昇圧/減圧時の加熱/冷却の影響が大きい。

3-2. 損傷菌

健常な細菌(健常菌)にストレスを与えると、それが強度であれば死滅して死菌となり、そうでなければ損傷して損傷菌となることが知られている。損傷菌は、その損傷程度に応じて、軽度損傷菌(亜致死的損傷菌)及び重度損傷菌(致死的損傷菌)となること、狭義の損傷菌は軽度損傷菌であり、広義の損傷菌は、「修復前には準安定または不安定な状態にあり、その生存性ストレスの程度やその後の保存条件によって左右され、従って培養の可否もその結果として決まる」ものとして、前者及び後者を含めて「半致死的損傷菌」と定義されている¹⁵⁾。ここに「中度損傷菌」の概念を加えて定義し、図3のように考える⁷⁾。つまり、「準安定または不安定な状態」にある中度損傷菌が、軽度損傷菌に回復する、または、さらに損傷が進んで重度損傷菌となって死滅すると考える。

損傷菌が、次亜塩素酸処理、超音波処理、両性界面活性剤処理、電子線処理等と、熱処理とを、逐次または同時に組み合わせることによって、健常菌から軽度損傷

菌または重度損傷菌を経て死滅する様子は、土戸らによって纏められている¹⁶⁾。

高圧処理によっても損傷菌は発生する。具体的な事例を示すと、例えば、8 log (CFU/ml) 程度の大腸菌を高圧処理 (500 - 600 MPa, 25°C, 10 分間) すると、処理後には検出できなくなるが、その後異なる保存温度で静置する間に、回復したり、死滅したりすることが示されている (図4)¹⁰⁾。また、牛乳に接種したリステリア属菌は、高圧処理 (550 MPa, 25°C, 5 分間) 後には検出されない

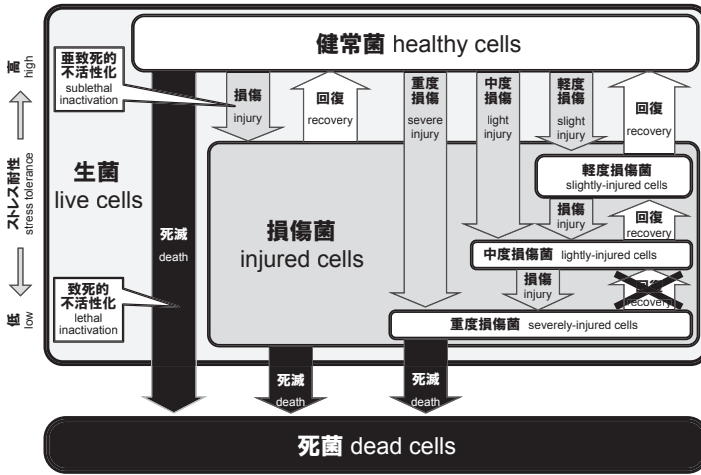


図3 大腸菌の高圧損傷及び回復

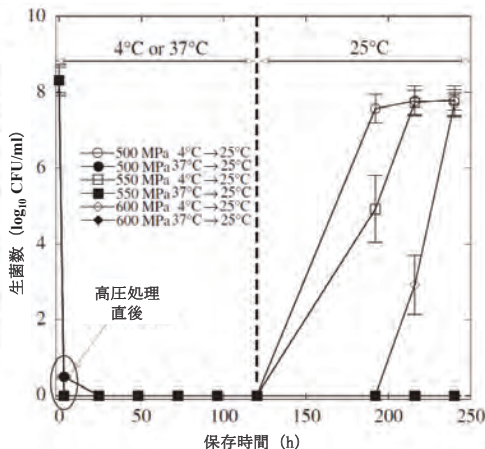


図4 牛乳中の *Listeria monocytogenes* の損傷及び回復・増殖¹⁷⁾

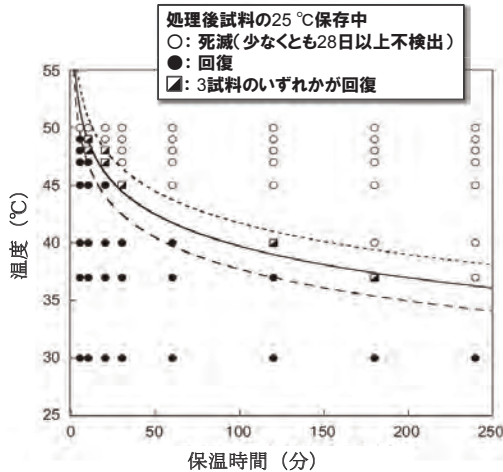


図5 中温中高压処理による自滅的発芽誘導殺菌法⁸⁾

が、異なる保存温度で静置する間に、やはり回復したり死滅したりする。37℃、40℃、45℃、50℃と保存温度が高い程、それぞれ4時間、3時間、1時間、5時間以上、静置すれば死滅し、それより短い静置時間では回復しうる（図5¹⁷⁾。

3-3. 低温高压処理による微生物制御

世界の食品高压加工では、5℃近傍の低温で600 MPaの高压力を課す低温高压処理が趨勢である。この低温高压処理は、単に高压処理と呼ばれることが多く、圧力保持時間は、目的にもよるが、概ね3～5分間である。この圧力保持時間は、数分間であっても、十分な微生物不活性化効果が期待できる。むしろそれ以上長く保持して処理しても、微生物不活性化効果が大幅に向上することは期待できず、作業効率が低下するだけである。また、600 MPaまでの昇圧には2～3分間程度が必要であるが、容器容量に応じて増圧機の台数を増やせば、昇圧時間は短くすることができる。減圧は、装置への負担が無い程度にまで早くすることができるが、早すぎると、MAP (modified atmosphere packaging: ガス置換包装) 容器にピンホール等が発生する問題も懸念される。昇圧及び減圧の際には、それぞれ断熱圧縮及び断熱膨張による加熱及び冷却がある。製品への断熱圧縮による加熱が気になるころではあるが、これは初発温度が高い程大きく、低温では約2℃/100 MPaのものが、約80℃以上では5℃/100 MPaとされ、業界では、約3℃/100 MPaで推算することが多い。つまり、600 MPaまで加圧すると、10℃の初発温度が最高で28℃程度に到達し、その後は容器への放熱と、減圧時の断熱膨張による冷却とで、再び10℃近傍に戻る。加圧も力学的な仕事の一つであるので、

昇圧・保持・減圧を繰り返すと、徐々に温度が上昇する。それ故に、高圧処理を実施する際には、循環恒温水等で冷却することが、製品の温度管理上重要である。

600 MPa での高圧処理により、生物、特に微生物細胞の活性が低下し、致命的に不活性化すると細胞死が誘導されると考えられている。特に、酵素・受容体として機能することがある蛋白質は、熱処理では殆どが失活するが、高圧処理では、その限りではない点に注意が必要である。また、細胞の構成成分は、蛋白質のみならず、DNA、脂質、糖質等のその他成分であるので、細胞活性低下に関与する生体成分に関する要因は、蛋白質自体の変性だけではなく、蛋白質と他成分との相互作用の変化、他成分の変性も考慮する必要がある。また、高圧処理では、成分変性、成分間相互作用変化以外にも、細胞膜等が損傷することも示唆されている。急速減圧時に水の衝撃波（伝播速度：約 1,500m/s）により、耐熱性細菌胞子が物理的に破壊されることが観察されている¹⁸⁾。

600 MPa での高圧処理では、有害細菌の他に、腐敗菌を対象とした製品が加工されている。いずれの菌も、その菌株によって耐圧性が異なるので注意が必要である。例えば、腸管出血性大腸菌の耐圧性は、菌株によって大きく異なる¹⁹⁾。

近年、低温高圧処理して微生物を制御し、絞りとった生ジュースのようでありながら一ヶ月前後の賞味期限を保証した高圧処理ジュースの市場は、欧米、韓国、台湾等、国外で伸びている。一方、国内では、高級生搾りジュースの店頭販売が人気を呼んでいることもあり、日本に輸出を希望する企業、日本国内生産を目論む企業も現れている。しかしながら、高圧処理ジュースが、日本の食品衛生法の清涼飲料水製造基準を満たすためには、熱殺菌との同等性を示して個別認可を得る必要がある。一方、殺菌効果における同等性の証明には、同等性を示すために必要な微生物の種類、その低減菌数等、必要条件の提示が不可欠であるが、それが文書として明示されていないので、個別に当局担当者に相談する以外には手立てがない。目下のところ、高圧処理ジュースの国際規格が存在しないことから、世界貿易機関（World Trade Organization）における今後の非関税障壁問題を回避する目的で、国際食品規格委員会（Codex Alimentarius Commission）における国際規格の策定等が求められてくる可能性がある。

3-4. 中高圧処理による静菌

100 ~ 300 MPa での中高圧処理は、日本で発展している。100 MPa 程度の中高圧下では、雑菌は死なずとも増殖抑制つまり静菌されるので、酵素活性を抑制する食塩を添加せずに酵素活性を著しく高めることができる。この原理を利用して、塩無添加での魚醤促成製造法^{20) 21)}が提案され、無塩醤油の製造が実現している。酵母による醗酵がないため、独特の香気に欠けるが、高級醤油を少量添加した減塩醤油として商品化された。同様の酵素反応促進による商品開発の進展は顕著であり、健康食品・化粧品として豚の胎盤を効率的に酵素分解して得たプラ

センタエキスのみならず、スッポンエキス、ニンニクエキス等の各種エキス利用製品が実用化されている²²⁾。

3-5. 高圧処理・中高圧処理による芽胞の不活性化

高圧処理で納豆菌のような細菌の芽胞を死滅させるのは難しく、1GPaでも生残しうる²³⁾。一方、高温処理と高圧処理とを組み合わせる方法があり、2009年に米国で認可された圧力補助熱処理法（PATP, pressure-assisted thermal process；または圧力補助熱滅菌法：PATS, pressure-assisted thermal sterilization）では、予熱したスープ、マッシュポテト等の低酸性食品（low-acid foods: pH4.6以上&水分活性 >0.85 ；米国FDA定義）を500～700 MPaで加圧する過程での断熱圧縮加熱により90～121℃に加熱し、長期保存を可能とする²⁴⁾。高温加熱時間が短いことから、従来のレトルト食品よりも品質低下を抑えられる利点がある。

一方、芽胞の高圧処理では、処理圧力に応じて、100-200 MPa近傍での生理的発芽と、400-600 MPa近傍での非生理的発芽との2種類の発芽を誘導することができる²⁵⁾。芽胞の生理的発芽は、圧力によりアミノ酸、糖類と同様に発芽レセプターが刺激されて開始する。非生理的発芽では、圧力によりジピコリン酸と共にカルシウム等の金属イオンの放出が誘導される。また、200 MPa以上で処理した場合は、生理的発芽と非生理的発芽とが複合的に働き、更に、処理圧力が高くなると非生理的発芽のみが働くようになり、発芽誘導効果が低くなることが報告されている。発芽誘導により、芽胞コルテックスの加水分解、低分子量酸可溶性蛋白質の分解があることから、耐熱性の低下と共に芽胞の不活性化が、熱及び圧力により達成できる。

中高圧処理による効率的な生理的発芽誘導を利用して、自滅的に細菌芽胞を死滅させることもできる。100-200 MPaで60℃以上の中高温をかけつつ処理することにより、生理的発芽と同時に熱死滅が可能であり、例えば、100 MPa、65℃、30分間の処理で、*Bacillus subtilis* 168株の芽胞を4桁以上死滅させることができる²⁶⁾。これは、中温中高圧処理による自滅的発芽誘導殺菌法⁸⁾である(図6)。この手法を用いれば、栄養細胞が死滅する比較的低い温度でも、芽胞を効率的に殺菌できる可能性がある。

3-6. 細菌以外への効果：真菌類（黴、酵母）・ウイルス・寄生虫

黴については、例えば、果実・果実加工品を汚染しうる *Byssoschlamys nivea* の子嚢胞子を、ブドウ果汁（水分活性0.97）もしくはビルベリージャム（同0.84）に接種し、700 MPa、70℃、30分間の非実用的に過酷な高圧処理を施した報告がある²⁷⁾。ブドウ果汁では4log (CFU/ml) が不活性化するが、ビルベリージャムでは1 log未満の不活性化効果しかない。これは、上述した食品マトリックスの影響と考えられる。

従来の発芽 vs. 自滅的発芽

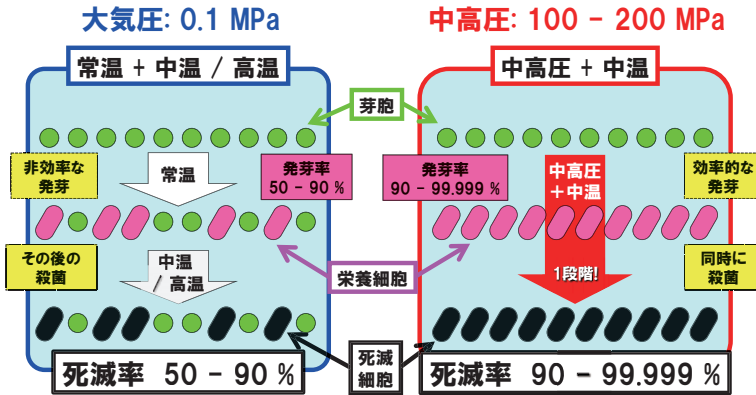


図6 中温中高压処理による自滅的発芽誘導殺菌法

酵母については、例えば、栄養細胞または子嚢胞子の各状態にある *Zygosaccharomyces bailii* を、各種果汁に接種して、300 MPa、25℃、5分間の実用的条件での処理を施した報告がある²⁸⁾。栄養細胞では5 log が不活性化する一方で、子嚢胞子では1 log 未満しか不活性化しない。これは、上述の細胞の形状または状態による差異と考えられる。

食中毒の原因となるウイルスとしては、ノロウイルス、ピコルナウイルス（例えばA型肝炎ウイルス、アイチウイルス、エンテロウイルス、ヒトパレコウイルス）、E型肝炎ウイルス、ロタウイルス、アデノウイルス、アストロウイルスが知られるが、この中で特に問題となるのは、ノロウイルス及びA型肝炎ウイルスである。ウイルスの高圧不活性化²⁹⁾は、1929年にHite等がタバコモザイクウイルスを用いた結果を報告している。タバコモザイクウイルスは、920 MPaで漸く不活性化するが、幸いなことに、殆どのヒトウイルス、動物ウイルスは、タバコモザイクウイルスよりも高圧力に弱い。タバコモザイクウイルスの報告以降、特に食品高圧加工が実用化して以降、ウイルスの高圧不活性化の報告は増えている。

日本では、アニサキス、サルコシステイス等の寄生虫による食中毒数が年々増加する傾向がある。特にアニサキスは、食中毒の原因となる線虫であり、2012年から寄生虫食中毒の届出が義務化して実態把握が進みつつある。人間に健康被害を加えるのはアニサキスの第三期幼虫であるが、培養ができないため、寄生虫殺滅実験のためには、根気良く多数捕獲する努力が必要である。200 MPa、0～15℃、10分間の処理で、アニサキスは全滅し、それより低い圧力では、長い場合1時間の処理が必要なこと、120 MPa以上、10分間以上の処理では、殆どの

アニサキスが死滅すること、繰り返し処理が有効なこと等が、明らかにされている³⁰⁾。アニサキスは、熱処理(60℃で数秒,70℃で瞬時)もしくは冷凍処理(-20℃で24時間以上)で死滅するが、熱処理では熱変性による品質劣化が不可避であるし、冷凍処理には長時間が必要である。従って、高圧処理には、加減圧時の組織破壊の問題もあるが、変性無く短時間の処理で寄生虫を死滅させられる可能性がある。

4. 食品高圧加工装置

食品高圧加工においては、概して100～600 MPaの高圧力が用いられる。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。食品加工用の実用化装置は、間接加圧法を採用している。また、食品加工用実用化装置には、縦型と横型とがある(図7)。従来は、縦型が主流であったが、近年は、大容量を実現する横型が普及しつつある。食品加工では、大量処理で処理費用を抑制することが重要なため、食品高圧加工においても、処理費用削減のために容器の大型化が望まれる。容器大型化のためには、容器径または容器長を増す選択があるが、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、装置製造コスト抑制のために、容器長を増して対応するのが理想的である。しかし、縦型で容積長を増すと、処理品が入ったカゴを、最低でも容器長の倍程度の

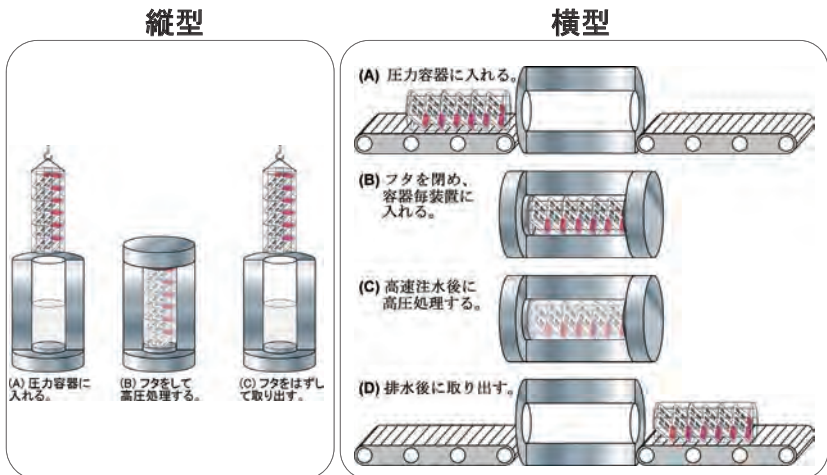


図7 縦型・横型の食品用高圧加工装置³⁴⁾

高さから釣り上げて取り出さなければならず、天井高さに制約される。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せる利点があるが、容器の開放時に圧力媒体の水を全て取り出し、容器密閉時に水を再度大量に入れるという縦型では不要な操作が必要である。よって横型では、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。横型の食品高圧加工装置は、最大処理量が525 Lのものが開発されており、今後益々普及する可能性がある^{31) 32)}。日本国内でも、近年、400～600 MPaの50～400 L容量の食品高圧加工装置が近年開発され市販され始めている³³⁾。

また、食品産業界では、中小企業または小規模事業者数は、全体の事業者数の99.7%を占めていることが特徴であり、それ故に、食品高圧加工装置のような大規模な設備投資ができない事業者が殆どである。そこで着目に値するのが、受託加工または有償加工 (toll processing/tolling) である。装置のみを保有する企業が、食品企業から持ち込まれた包装食品を、一回処理当たり、kg等の単位当たり等で課金して処理する業態である。有償加工は、米国、カナダ、中国、台湾、ニュージーランド、オランダ、スペイン、アイルランド、イタリア、ドイツ、イギリス等で事業化されている。日本国内でも受託加工は一部可能であり、中高压処理 (100 MPa まで)、高压処理 (600 MPa まで) の受託生産が実施されている。中小企業への食品高圧加工技術普及のためには、受託加工の更なる普及が不可欠である^{31) 32)}。

5. おわりに

食品加工においては、美味しさ及び利便性を追求しつつ、安全性を確保する必要がある。食品高圧加工には、従来の熱加工と比べると、美味しさ、利便性の点で優れる利点がある。しかしながら、微生物の高圧損傷及び保存中の回復についての知見蓄積、装置及び包装技術の進化、高圧加工食品のマーケティング等、まだまだ研究開発の余地がある。消費者の高品質・安全志向に応えるべく、そして、高品質な国産農畜水産物の高圧加工品の輸出に向けて、産学官が連携して研究開発を進める必要がある。

(食品加工流通研究領域 食品品質評価制御ユニット 山本 和貴)

参考文献

- 1) 山本和貴, シリーズ「ミドルのつぶやき」近くて遠かった食品工学. 日本食品工学会誌, 18, A2-A3 (2017).
- 2) Iwasa S., Maehara H., Nishi M., Tanaka S., Watanabe, T., Itoh, S., Hokamoto, K. Food processing trials using underwater shock wave by electrical

- discharge. *Mater. Sci. Forum*, **767**, 223-228 (2013).
- 3) Yamamoto, K., Food processing by high hydrostatic pressure. *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, **81**, 672-679 (2017) .
 - 4) 林力丸. 調理・加工・殺菌・保存への高圧利用の可能性. 食品と開発, **22**, 55-62 (1987).
 - 5) Kimura, K., Ida, M., Yoshida, Y., Ohki, K., Fukumoto, T. Co MParison of keeping quality between pressure-processed jam and heat-processed jam: changes in flavor components, hue, and nutrients during storage. *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, **58**, 1386-1391 (1994).
 - 6) 山本和貴, 食品高圧加工の動向. ソフト・ドリンク技術資料, **171**, 1-18 (2013) .
 - 7) 山本和貴, 食品高圧加工における食品安全性確保. 食品と容器, **58** (9), 530-537 (2018) .
 - 8) 山本和貴, 食品高圧加工による微生物不活性化の課題と展望. FFI ジャーナル, **221** (4), 291-296 (2016) .
 - 9) Hite, B. H. The effect of pressure in the preservation of milk. *Bull. West Virginia Univ. Agric. Exp. Station*, **58**, 15-35 (1899).
 - 10) Koseki, S., Yamamoto, K. Recovery of *Escherichia coli* ATCC25922 in phosphate buffered saline after treatment with high hydrostatic pressure. *Int. J. Food Microbiol.*, **110**, 108-111 (2006).
 - 11) Daryaei, H., Yousef, A. E., Balasubramaniam, V. M. Microbiological aspects of high-pressure processing of food: inactivation of microbial vegetative cells and spores. In: Balasubramaniam, V. M., Barbosa-Cánovas, G., Lelieveld, H. L. M. (eds.). High Pressure Processing of Foods, New York (NY), Springer, pp. 271-294 (2016).
 - 12) Ludwig, H., Schreck, C. The inactivation of vegetative bacteria by pressure. In Heremans, K. (ed.). High pressure research in the biosciences and biotechnology, Leuven University Press, Leuven, pp.221-224 (1997).
 - 13) Cebrián, G., Mañas, P., Condón, S. Co MParative resistance of bacterial foodborne pathogens to non-thermal technologies for food preservation, *Frontiers Microbiol.*, **7** (734), 1-17 (2016).
 - 14) Mackey, B. M., Forestière, K., Isaacs, N. Factors affecting the resistance of *Listeria monocytogenes* to high hydrostatic pressure. *Food Biotechnol.*, **9**, 1-11 (1995).
 - 15) 土戸哲明. 損傷菌とその食品微生物制御における意義. イルシー, **130**, 11-17 (2017).
 - 16) 土戸哲明, 坂元仁, 食品工業, **55**, 45-53 (2012).
 - 17) Koseki, S., Mizuno, Y., Yamamoto, K. Use of mild-heat treatment following

- high-pressure processing to prevent recovery of pressure-injured *Listeria monocytogenes* in milk, *Food Microbiol.*, **25**, 288-293 (2008).
- 18) Hayakawa, I., Furukawa, S., Midzunaga, A., Horiuchi, H., Nakashima, T., Fujio, Y., Yano, Y., Ishikura, T., Sasaki, K. Mechanism of inactivation of heat-tolerant spores of *Bacillus stearothermophilus* IFO 12550 by rapid decompression. *J. Food Sci.*, **63**, 371-374 (1998).
 - 19) Alpas, H., Kalchayanand, N., Bozoglu, F., Sikes, A., Dunne, C.P., Ray, B. Variation in resistance to hydrostatic pressure among strains of food-borne pathogens. *Appl. Environ. Microbiol.*, **65**, 4248-4251 (1999).
 - 20) 岡崎尚, 重田有仁, 青山康司. 静水圧を利用した食品の加工技術 (3). 食品と容器, **48**, 436-440 (2007).
 - 21) 岡崎尚, 重田有仁, 青山康司. 静水圧を利用した食品の加工技術 (4). 食品と容器, **48**, 508-516 (2007).
 - 22) 森川篤史, 中高圧処理を活用したエキス化. 食品と容器, **57**, 82-87 (2016).
 - 23) Cheftel, J.C. Effects of high hydrostatic pressure on food constituents: an overview. In: Balny, C., Hayashi, R., Heremans, K., Masson, P. (eds.), High Pressure and Biotechnology, Vol. 224, INSERM and John Libbey, Paris, pp. 195-209 (1992).
 - 24) Daryaei, H., Balasubramaniam, V. M., Yousef, A.E., Legan, J. D., Tay, A. Lethality enhancement of pressure-assisted thermal processing against *Bacillus amyloliquefaciens* spores in low-acid media using antimicrobial compounds. *Food Control*, **59**, 234-242 (2016).
 - 25) 森松和也. 高圧処理における芽胞菌の発芽誘導. 食品と容器, **57**, 155-160 (2016).
 - 26) Yamamoto, K., Morimatsu, K., Zhong, L., Baum, H., Inaoka, T. Kimura, K. Factors affecting suicidal germination of *Bacillus subtilis* spores in medium high hydrostatic pressure food processing. Book of Abstracts, 8th International Conference on High Pressure Bioscience and Biotechnology, Nantes, France, 15-18 July (2014).
 - 27) Butz, P., Funtenberger, S., Haberditzl, T., Tauscher, B. High pressure inactivation of *Byssochlamys nivea* ascospores and other heat resistant moulds. *LWT-Food Sci. Technol.*, **29**, 404-410 (1996).
 - 28) Raso, J., Calderón, M.L., Góngora, M., Barbosa-Cánovas, G.V., Swanson, B.G. Inactivation of *Zygosaccharomyces bailii* in fruit juices by heat, high hydrostatic pressure and pulsed electric fields. *J. Food Sci.*, **63**, 1042-1044 (1998).
 - 29) Shearer, A. E. H., Kniel, K.F., Chen, H., Hoover, D.G. High-pressure effects

- on viruses. In: Balasubramaniam, V. M., Barbosa-Cánovas, G., Lelieveld, H. L. M. (eds.). High Pressure Processing of Foods, New York (NY), Springer, pp. 295-315 (2016) .
- 30) Molina-García, A.D., Sanz, P.D. J. Food Prot., **65**, 383-388 (2002).
 - 31) Tonello, C. 世界の食品産業における高圧装置の動向. 食品と容器, **57** (3), 149-156 (2018).
 - 32) Raghubeer, E. 食品・飲料業界で伸びゆくニーズに応える高圧加工システム. 食品と容器, **58** (4), 214-218 (2017).
 - 33) 加藤雅敏, 横型超高圧処理装置 FOOD FRESHER の商品化とテスト・受託処理対応. 食品と容器, **57** (8), 476-480 (2016).
 - 34) 山本和貴, 小関成樹. 第4回高圧バイオサイエンス・バイオテクノロジー国際会議 - 食品高圧加工技術の最新動向. 食品と容器, **48** (3), 150-154 (2007).