

食品への高圧利用の現状と課題

京都大学農学部農芸化学科 林 力丸

はじめに

圧力利用が注目されてから4年が経過し一部実用化がみられたが、まだまだ本格的ではない。他の例をみれば分かるように、この期間は新しい考えとその果実が技術として定着するには短すぎる。そうはいても、すべてが事を急ぐ世の中であるから、「要はどうなんだ」という短ペイ急な質問も多い。評価には当人の洞察力が要るし、事が成るか成らないかは当事者の意思の強さが大きく作用するから予想は難しいが、成長曲線で見れば今は準備期であり、模索と蓄積の期間である。対数増殖期は今後控えていると一般的には言えるであろう。この機会に現状を眺め、反省を含め現状と展望の一端を思い付くままに述べてみる。

1. 実用化の現状と課題

a. 市場に出た加圧食品

1990年4月は記念すべき日であり、加熱に代わり加圧プロセスを用いたジャムが明治屋から販売された。ひき続き同社はフルーツソースやフルーツデザートなど十種以上の製品を継続して市場に出している。1991年8月にはポッカコーポレーションが苦みを抑えたグレープフルーツジュースを販売した。ひき続き、和歌山食品工場ではみかんジュースの一時殺菌を加圧処理で行なうという。この場合、ジャム製品はバッチ式高圧処理装置であるが、他は液体の半連続処理装置である。

これらの開発には、努力のほかに着眼の独創性や偶然のチャンスが預かっているという。また、圧力処理でジャムになるという発見、苦み成分が抑制されるという発見など新しい現象をいち早く取り入れた点も注目される。

b. 常温流通の問題

加圧処理は天然の風味を保存する食品加工と言うキャッチフレーズであり、事実、試験段階ではそのようなものができるが、いざそれを保存し流通させようとすると、常温では具合が悪い。その理由の第一は中性の食品では耐熱性の芽胞が殺菌できない難点のためであり、第二はせっかくの天然の風味も常温に置くと劣化が早いからである。第三にしばしば酵素の失活が不十分なことも挙げられる。

芽胞子の殺菌には、どうしても、風味の保存とは相入れない過激な操作がいるようである。そこで、加熱した状態での加圧、すなわち、熱と圧力の併用の試みは重要となろう。その操作としては、圧力容器の内部加熱に精力を入れなくても、保温した加圧装置にあらかじめ加熱したものを入れれば良い。急速加圧時に温度上昇する断熱圧縮も積極的に利用できる。他の物理的因子の併用も考えられる。

常温流通で腐らない食品に消費者側では健全性に疑いをもつことが多い。毎日口にされる物に対して、時間と共に違和感を感じ、体全体で恐れを抱くのは頷け

る事である。むしろ、食品は丁寧に扱わないと傷むという、ともすれば忘れがちであるが重要なことを若い人に教育する努力を怠ってはならない。

加熱処理では、殺菌と同時に酵素失活もでき、風味が変わる。したがって、加熱処理後の貯蔵中の風味変化や酵素作用を余り気にしなくてすんできた。しかし、加圧処理では、風味が残り酵素失活も不十分であるから、貯蔵中に変化が進む。厄介なことに、食品の味に影響するタンパク質分解酵素、デンプン分解酵素、エステラーゼなどの分解酵素は耐圧性が強いようである。また、ポリフェノール酸化酵素も耐圧性があり、果物を加圧すると褐変化がかえって進みやすくなる。つまり、加圧処理では生命活動はストップするが成分は変化しないと表現できる。この現象は実は食品分野で初めて遭遇する問題であり、死後変化の生化学あるいは食品化学を研究課題とする必要がある。

風味の保持と殺菌の兼ね合いを考えれば加圧処理と冷蔵保存の組み合わせが現在妥当な線に思う。

c. 法律

食品衛生法に圧力処理許可を求める希望は酸性食品の加圧殺菌の分野で強くなっている。かなりデータも揃ってきたのでそろそろその動きが必要である。

d. 加圧装置—量の処理と値段

当初からの問題である装置の高価格の問題が依然として残っている。中小規模の多い食品産業にあっては手作業も多く、したがって小規模生産の機械が欲しい。その場合、現在の装置価格は高すぎる。装置を安価に提供する装置産業の努力と、一方では安く使う努力（センターなどで共同購入して、皆で使うなど）が要る状況と思う。

2. 試験と研究

古代からほとんどの食品の加工、保存の技術は経験に基づいて工夫されてきた。これに対し、加圧食品という新たな食品を身近なものにしていくためには、現代の科学の助けがいる。というのは、加圧食品を開発していく過程で、新たな観察や研究課題が増えている。例えば、加圧に伴う酵母細胞の変化が電子顕微鏡により詳しく調べられ、核膜の異常変化が指摘されている。圧力処理後の筋肉の構造と機能の解析に関心が高い。また、加圧によるペクチンの可溶化が観察は細胞の膜や壁に対する新たな興味を呼ぶものである。デンプンの構造変化に対する圧力効果の研究も始まっている。一方、加圧食品の出現は食品科学の方面に新たな課題を生んでいる。例えば、加圧後に自発的に進行する食品の色や匂いの変化を抑制することが求められる。

加圧食品を発展させるには、これらの現象の解明が重要な事は言うまでもない。生化学を基礎にした、自然界にはない人工環境としての高圧生化学や高圧食品科学を新たに体系化していかなければならない。

全国的に見ると、すでに、試験装置が120台近く出回っている。この多くは

食品の官能検査ができる規模のものであるが、小規模の研究用の機械もある。そこで行われている試験研究は実に様々であるが、次のような観点も必要と思う。

a. 殺菌だけでなく新しい食品の開発

およそ加熱効果のある食品には加圧効果があると見てよいから、殺菌効果に偏ることなく、食感の変化を求めて幅広い観察が欲しい。その場合、加圧してそのまま食するもの、加圧後加熱するもの、半加熱して加圧するものなど熱と圧力の組み合わせは多い。圧力と熱の程度を変えてほとんど無限の組み合わせの中から、新しい食感をもった高品質食品の開発を目指すノウハウの把握が始まっている。

b. 植物タンパク質の高圧効果

粉加工のプロセスに加圧処理を挟む可能性の研究として、植物タンパク質に対する高圧効果の研究はいまだに少ない。

c. デンプンあるいはデンプン食品に対する高圧効果

タンパク質の変性圧力より高い圧力が必要なせいかこの研究は少ない。実験手段として加圧中に攪拌がしにくいのが難点である。

d. 保存に圧力を使う試験

深海程度の圧力は微生物の殺菌はしないが増殖を押さえるので、静菌による食品の保存に圧力を使う調査が欲しい。この程度の圧力は温度を下げるのと似た効果が期待できる。これに冷蔵庫程度の低温を組み合わせる事も試みられてよい。

数百気圧の圧力装置は相当大型のものができる。

e. 温度の併用の問題

耐熱性の芽胞を殺菌する目的で、高温下での加圧の試みが見られるが、温度を上げて加圧する場合には断熱圧縮による容器内温度の上昇が無視できない。蒔田らの測定を見ると、30℃の水を400 MPa まで52秒で加圧するのはほとんど断熱圧縮に等しく、12℃の温度上昇がある。温度上昇は最初の水温が高いほど高く、60℃の水は16℃ほど上昇する。このような温度上昇は実験には不都合であり、これを抑えるようにゆっくり加圧することになるが、そうすると加圧時の圧力効果の評価かが問題となる。一方、急速加圧が断熱圧縮に等しいなら、これは再現性があることになるから、この温度上昇を積極的に食品処理に使えることになる。

温度併用のひとつとして、冷却下での加圧が殺菌に試みられるようになった。この場合、マイナス温度では加圧してから冷却するため、圧力容器無いを急速に冷却する工夫をしないと冷却に時間がかかる。急速凍結の目的で圧力を使う場合（圧力移動凍結法と言う）も、今のままでは冷却に相当の時間かかる。

圧力を使う急速解凍や不凍結保存の方法は、200 MPa までの圧力利用として、もっと試験されてよいと思う

f. その他

加圧処理のインディケータの開発のため、常日頃の実験で色の変化に留意して欲しい。加圧処理後の匂い、味、色の化は興味ある研究課題と思う。

3. 研究会と情報交換

加圧食品を発展させるためには学問と組織化が要ると思う。なんとか研究会のような物を明確に組織する必要に迫られている。今までは生物関連領域における高圧科学研究会と称するものを発起人と立てるだけで発足させ、年一回のシンポジウムを開いてきたが、不十分であるので、研究会あるいは組織が必要になっている。そこでは、委員会を作って次のような核になる活動も欲しい。

- a. 定数の収集と測定 of 努力—無機化合物（食塩など）や有機化合物（アミノ酸や糖類）の高圧下での物理的定数（溶解度や相図）が欲しい。
- b. 測定機械の規格化と普及—既存の測定装置が使える規格化した高圧装置の開発や研究用圧力装置のメーカーの育成が急務である。
- c. 法律改正の運動の核も作らねばなるまい。
- d. 毎年のシンポジウムに増加している参加者のためにも国内組織がいる。わが国の加圧食品の発展を諸外国が注目するようになった。そこで、今までの食品産業は伝統が物を言い、日本社会でほとんど用が果せてきたが、これからは外国にも進出する努力が要る。そのために国際会議の開催準備が必要となろう。手初めに、1992年9月には日欧合同のシンポジウムをフランスで行おうとしている。これは講演数が90、参加者が300名の盛況が見込まれている。
- e. 教育活動—加圧食品を食べる側に圧力の啓蒙が必要になっている。そのためには、理科教室で扱える高圧装置を作り、水圧とこれの関わる現象の教育を若年学校に導入することから始めねばならないであろう。
- f. 機関誌—圧力利用が一般に広がると研究発表の場は既存の学会で良い。成長期にある研究を育て、データを収集するには、当面、定期刊行物が欲しい。

おわりに

現在の日本の最終飲食費支出55兆円の内、約75%は加工食品あるいは外食の費用に充られている。人々は他人が手を入れた食品を食べざるをえない状況であることを物語っている。この社会的背景は別の機会に考察するとして、食品産業は食品の加工に大変な努力が強いられている。新しい工夫が次々に見られる中で、圧力を熱と共に使う考えはますます必要になると思う。その場合、殺菌ばかりでなく食品の製造プロセスに圧力を入れる努力が大きな効果を生むことであろう。

参考図書

1. 林 力丸編、「食品への高圧利用」、さんえい出版、1989
2. 林 力丸編、「加圧食品—研究と開発」、さんえい出版、1990
3. 林 力丸編、「高圧科学と加圧食品」、さんえい出版、1991
4. 林 力丸編、「高圧の生物科学と食品科学」、さんえい出版、1992
5. C. Balny, R. Hayashi, K. Heremans, & P. Masson編、「High Pressure and Biotechnology」, John Libbey Eurotext、92120 Montrouge, France

食品への圧力利用—加圧食品の物性

京都大学農芸化学教室 林 力丸

生の食品を水に入れて加熱する代わりに、数千気圧の静水圧を加えると調理、加工、殺菌ができる。加熱処理では栄養素の破壊、異臭の発生、味の低下が起こるが、室温での加圧処理では物質の破壊や生成は少なく、天然の風味が保たれる。すなわち、加圧処理法は現在の食品産業が求める非加熱処理として有効な手段である。すでに、加熱工程を加圧工程で置き換えた加圧食品が一部市販されるようになっている。ここでは、食品の加圧処理法の原理や特徴を述べ、加圧食品の物性を中心に研究と開発の現状を概観する。

1. はじめに

最近の食品産業は極端な加熱処理の弊害に気付き、非加熱法を求めている。そこで、1000気圧 (100 MPa) 以上の高い静水圧を用いると、熱利用で問題になる栄養分の損失、異臭の発生、異常物質の生成、エネルギーの大量消費などの短所が克服でき、風味を保持したまま食品の加工や殺菌が可能となることを指摘してきた [1~6]。つまり、圧力処理法は食品の調理、加工、殺菌、保蔵のために非加熱法として使え、加熱食品に対し加圧食品 [a] ができる。

この考えに基づき実用化を目指す研究と開発が活発になり (その成果は単行本 I ~ III [b] に纏められている)、すでに、加圧食品の第一号が市場に出た [c]。この過程で基礎研究としての研究課題も増え、研究者も増加している。当然ながら、応用と基礎の研究は紙の表裏のように一体として発展している。

本文では、食品への高圧利用の考え方を述べ、加圧食品を実現させるための最近の研究と開発の進歩のなかで、主として、加圧処理による食品の物性変換を概観する。加熱物性に対し、加圧物性の研究は始ったばかりであり、今後の発展が期待される。

2. 加圧の意味と水の圧縮

食品への圧力利用とは、人工的に作った高い水圧の環境の下でおこる生化学的現象や生物学的現象を利用することである。物質の状態を変える熱力学的因子である T と同様に P の効果も利用できるという考えである。生物材料に対する圧力の不可逆の効果は 100 MPa 以上でみられることが多い。

この意味での高圧の利用は無機や有機化学および固体圧縮の方面で進んでいるが、生物とその関連領域を

結び付けた産業はようやく発展しようとしている。

圧力を加える対象物には気体、液体、固体があるが、食品の場合、ガス状態や固いものはないから、気体圧縮や固体圧縮は考えなくて良い。食品の主成分である水の圧縮、すなわち、液体圧縮の効果が課題になる。この場合、圧力はパスカルの原理で一様に直ちに作用するという特徴がある。粉状や粒状の食品あるいは水分の少ない乾燥食品の加圧には、パスカルの原理が適用できないのでここでは扱わない。

温度と圧力を変えた水の状態図 (II-1 参照) は、食品の加圧の基礎として重要である。室温のまま水を加圧すると 200 MPa までは水の融解点下がる (II-3 参照) が、1,000 MPa 以上になると固体になる。水を圧縮するのは固体圧縮となり、変化は小さいと考えられるので、食品分野では 1,000 MPa 以下の圧力が利用範囲となる。加温して加圧する場合も固体圧縮のような超高圧は当面重要と思われぬ。

水を加圧しても体積の減少は少なく、数百 MPa の加圧でも 10 数% ほどの減少にすぎない (II-1 参照)。したがって、圧縮過程での発熱は少なく、実測によると、400 MPa まで 42 秒の急速加圧をすると水温は 11.8°C 上昇する。しかし、約 15 分で元の温度にもどる。これを 10 秒以内に除圧すると 12°C の温度降下がある (I-10 参照)。これは、急速な加圧や減圧をするときには食品の温度変化の制御が必要なことを示す (III-8 参照)。

高圧の世界では溶解している物質の解離平衡や溶解度などは変化し、溶液の pH が変わる。例えば、pH 単位の加圧変化は、リン酸緩衝液では 0.33 単位/100 MPa、トリス緩衝液では 0.02 単位/100 MPa と見積もることができる (7)。このような変化は食品の圧力処理でも加熱処理でも変化の一因子として忘れてはならない。

3. 生物および生体物質に対する圧力効果

タンパク質の熱凝固と圧力凝固は共に変性あるいはタンパク質の立体構造の変化と把握され、その熱力学的理解も得られている(1-7参照)。それによると、タンパク質の圧力変性は、系全体の体積減少に即応するために水の中でタンパク質の非共有結合が自発的に変化し高次構造が崩壊するものであり、タンパク質単独の変化ではなく、水の体積減少の結果と理解できる。

このことは、タンパク質に限らず、非共有結合で全体構造を作り上げている核酸や多糖類(デンプンなど)などの生体高分子も高圧の影響をうけ、立体構造が壊れ機能は失われることを意味する。また、脂質のように疎水結合するものも影響をうけるし、脂質とタンパク質複合体(細胞膜など)も元の総合構造が影響をうける。デンプンに対する高圧効果の研究は少ない。

不可逆的に壊れる圧力の目安として、脂質とタンパク質複合体、タンパク質の四次構造は200~300 MPaの比較的低下により、核酸、デンプン、単量体の酵素は比較的高い圧力により変化する。

100 MPa以上の圧力は多くの生物を死滅させる。微生物に対する高圧効果の観察は19世紀に遡ることができる(8)。実験条件が異なるため一概には言えないが、細菌、かび、酵母などは300 MPa以上で死滅し、ウイルスはより低下で不活性化する。食品の加圧殺菌の研究成果は文献 I~III [b] に多数収められている。

4. 食品加圧の方法と特徴

食品の加圧の例として、生卵の加圧は次のように行なう。殻付卵を水をはった圧力容器に入れピストンを押し、加圧すると、殻の内外は直ちに一樣な圧力となり、白身も黄身も高い静水圧の場に置かれた状態になる。減圧し取り出してみると、卵の殻は割れずに中身のタンパク質は凝固している[10, 11]。

液状食品、ペースト状食品、水を含んだ生の食品、動植物の組織などは、プラスチック製の袋に入れ、真空包装し同様に圧力を加える。乾燥した粉末状の食品は水を含ませなければならない。しかし、液体圧縮として扱える水分量は個々の食品で試す必要がある。

圧力処理と熱処理は次のような点で異なる。

温度を上げずに数千気圧の圧力を用いるときには、共有結合の切断や生成は起こらないと考えてよい。高圧下においては非共有結合のみが影響される。このことは、成分変化やビタミンなどの栄養素の破壊、異臭の発生、毒性因子の生成などが高圧処理によっては起こらないことを意味する。つまり、熱処理と違い圧力処理したものは、臭いや味がなまのままである。

この点は高圧処理の利点であり欠点となる。つまり、

高圧処理は、生の風味を奪ぶときには良いが、有用な共有結合の変化(加熱香気の発生やメイラード反応)をおこすことはできない。このような特徴をみると、高圧利用の分野は熱と同様に広大である(表 I)。

表 I 熱と圧力の食品分野での利用

操 作	熱	圧力
調理・加工		
消化性	可	可
凝固・ゲル化	可	可
化学変化*	可	不可
保蔵		
殺菌	可	可
殺虫	可	可
酵素失活**	可	可

*色、味、匂い、栄養素の変化(分解や生成)を指す。**加熱に比べ加圧失活は困難なことがある。

タンパク質やデンプンの圧力処理は物性の面で熱処理と異なる状態を作り出すので、圧力処理により今までにない新しい食品素材ができる。

圧力の使い方の面での特徴は、食品の中心に瞬時に伝わり効果を見出す点である。したがって、暖まるまで時間がかかる予備加熱という概念は要らない。また、圧力の継続にはエネルギーは不要である。これらのことから、加圧処理の長所は以下のようになる。

- (1) 風味や栄養素の保持-加熱により壊れやすい味、香り、色、ビタミンなどが天然のまま保持し、加工や殺菌ができる。
- (2) 新しい物性-加熱加工と異なる独特の物性が出せる。
- (3) 一樣な処理-加熱むらがなく、食品の表面と内部の性質には変化がない。
- (4) 瞬間処理-圧力が瞬時に伝わる性質は電気刺激のように圧力刺激として使える。
- (5) 水と氷の平衡点の変化-加熱とは異なる独特の利用法がある。
- (6) 省エネルギー-ここでは扱わないが今後研究すべき重要な特徴と考える。

これらの特徴は加熱に比べて短所になりうる。

5. 加圧食品の概要

5・1 食品への高圧効果の利用法

熱を使う場合、冷せばもとに戻る変化と冷やした後も効果が継続する変化の利用がある。圧力も風味を保つ利点を最大限生かし、以下のように可逆的变化と不可逆的变化を利用できる。

- (1) 酵素反応の制御→有用物質の生産
- (2) タンパク質やデンプンの酵素による分解、修飾、限定分解→無蒸気酸酵、脱臭
- (3) 酵素の不可逆的失活→生酒、天然果汁
- (4) タンパク質のゲル化、でん粉の糊化→テクスチャー改良、食品の新素材
- (5) 脂質とそのタンパク質混合体に対する効果→エマルジョンの改良
- (6) 静菌→生鮮食品の保藏期間や輸送時間の延長
- (7) 殺菌、殺虫→天然果汁、肉、魚、野菜、果物
- (8) 熟成の制御・停止→肉の自己消化 [9]、醃酵食品、漬物
- (9) 保藏や輸送、加圧解凍、急速凍結(後述)。
- (10) 発芽の制御→種子産業

当然、医療や薬品への利用(無菌食、血液製剤、培養液などの製造、消毒、保存性の向上)に使える。熱処理と違う圧力処理独特の使い方もあるが、要は、熱効果は圧力処理によっても期待できると考えてよい。

5・2 半調理食品

人間は熱調理した食品に慣れているし、温かいものを美味しいと感ずる。しかし、二度の加熱(二度炊き)は食品の風味や触感を微妙に変化させることが多い。そこで、圧力処理により、臭いや味は生のまま変化せず、元の風味が保たれたまま殺菌や加工ができれば、食前に少し手を加えて口に入れる、半調理食品(pre-cooked foodsやoven-ready foods)の用途が拓ける。

表Ⅱ 圧力利用による半調理食品製法の多様化

今までは	
①熱処理	→加熱調理
圧力も使うと	
②圧力処理	→加熱調理
③半加熱処理	→圧力処理→加熱調理
④圧力処理	→加熱処理→加熱調理

食べる直前に加熱調理することを想定するなら、食品加工に加圧工程を加えると食品の特徴に応じて表Ⅱのような新しい工程の組み合わせが可能となり、半調理食品の製造工程に多様性をもたすことができる。表中

で各々の処理の目的は、風味の発生と保持、殺菌、加工、保藏と考えればよい。高圧処理を食品に利用する効果の一つは、このような半調理食品あるいは部分調理食品を目指すとして最大の長所が生かせる。

なお、加圧食品は火を通したり、温めたりすれば加熱処理と同じ風味がする。

5・3 高圧装置(Ⅰ-10、Ⅱ-26、28、Ⅲ-38～44)

小型の実験装置は手動式の油圧ポンプにより2万気圧まで発生させることができる。市販のものは錆びるので、食品の研究では圧力媒体としてヘキサンをを用いるとよい。官能検査にも足りる食品を試験するため、食品用の試験装置がある。これは、セラミックス加工用のCIP装置(Ⅰ-10参照)に類似している。

食品の大量処理のため、圧力装置には大型化、連続化、軽量化、食品の汚染防止の工夫などのほか、付属装置として攪拌、温度制御、昇圧と減圧速度の制御などの改良がある。食品特有の問題として、繰り返し回数が多いためシールの工夫、食品の衛生面や安全性の面で十分な配慮がある。すでに、バッチ処理用の内容積50リットルの装置、液状食品用の毎時4トン処理する半連続装置が食品産業として稼働している。

経費の面でみると、高圧装置は鍋釜にくらべ初期コストは高いが、運転経費は熱にくらべてエネルギー消費が少ない(Ⅱ-28参照)

5・4 加圧の仕方と包装(Ⅱ-24、Ⅲ-36参照)

圧力容器内に直接入れてもよいが、通常は食品を袋や瓶に封じてから圧力容器に投入する。そのため、液状や懸濁状の試料はプラスチック瓶に一杯に入れ、空気が入らないようにねじ蓋をする。熱シール性のプラスチック袋にいれて真空パックする方法は広く使える。

耐熱性が不要という特徴を生かし、プラスチック材料で熱シールする方法は食品に優れている。しかし、加圧処理後に自然に進行する食品の風味の劣化や退色を抑えるために、空気や光の影響をなくすなどの新たな配慮が包装材料や形態に求められている。これは食品化学の新しい研究課題である。

6. 食品加工への高圧利用

6・1 酵素の利用

a. 反応の制御

酵素反応を含め化学反応は加熱により促進されるが、加圧によっては活性化体積の正負により促進も減速もある。この現象の利用は肉の軟化、自己消化など食品分野ばかりでなく [2]、化学物質や薬品の合成など広く酵素利用の分野で注目されている。

b. 選択的酵素分解

高圧下の酵素反応では、基質が高圧効果で変化することを利用する方法もある。例えば、タンパク質やデンプンに分解酵素を共存させて加圧すると、酵素を失活させず基質を分解されやすいように変化させることができる。したがって、あらかじめこれらを変性や糊化させずに酵素分解することができる。

この原理を応用して、牛乳ホエータンパク質混合物(WPC)中に多量に存在するβラクトグロブリンを選択的に分解除去することができる[2,12]。この技術は、アレルゲンとなるWPC中のβラクトグロブリンの除去法として役立つと思われる。

さらに、畜肉工場のヘモグロビンの脱色や魚肉の脱臭あるいは可溶化などの工程にプロテオリシスを使う場合に利用できるであろう(2)。

6・2 食品素材の物性改良

圧力処理によりタンパク質もデンプンも立体構造が壊れ、消化酵素により分解されやすくなる。しかし、加熱処理と加圧処理では物性は大きく異なる。

a. タンパク質の変性

卵白は400 MPaの処理で半熟状態になり、620 MPa以上でしっかりしたゲルになる。黄身は400 MPaでしっかり固まる。より低圧で黄身の方が固まるのは、温泉卵が60℃で30分間加熱で黄身が固まり、白身が半熟状態になると似ている。したがって、400 MPaで加圧すると温泉卵そっくりのものができる。加圧ゲルの消化性は優れ、ビタミンは保存され、色は鮮やかであるが、噛みごたえなどの物性は独特で、黄身はようかんの生地似ている[12]、(I-1.5参照)。

大豆タンパク質 [13]、魚肉 [14, 15]、畜肉 [16~

18]も加圧によって簡単に風味が生そのまま、滑らかな腰のある独特なゲルができる。

レオロジー的性質や官能的な風味の特徴を加圧ゲルと加熱ゲルと比較すると明らかな差異がある[11, 19]すなわち、加圧処理したものは生の色を保持し、風味が保たれ、光沢、きめの細かさ、なめらかさなどに優れている。また、加熱処理に比べると付着性があり、軟らかく、弾力性を有し、もろさがない(表Ⅲ)。

このように、加圧処理で形成されるゲルは加熱ゲルとは異なる特徴をもち、これを食品の調理、加工へ利用すると、従来の加熱調理とは異なる新しいタイプの食品を生み出す可能性をもっている。

b. デンプンの糊化

室温で数時間加圧すると、小麦デンプンは300 ~ 400 MPa、トウモロコシデンプンは400 ~ 500 MPaの処理により、アミラーゼに分解されやすいデンプンに変化する。しかし、馬れい薯デンプンは圧力処理にもっとも抵抗し、45℃、500 MPaの処理でもわずかな変化にすぎない。いずれのデンプンも温度を25℃から60℃まで変化させ加圧すると、温度が高いときほど低い圧力処理でアミラーゼ消化性が向上した(20)。

圧力処理したデンプンの顕微鏡による外観の観察では偏光十字が消失し粒径の増大が見られる。示差走査熱量分析と粉末X線回折により変化を見ると、糊化熱の減少と結晶化度の低下がある。糊化特性をアミログラフで見るとデンプンごとに特徴的な曲線を示す。

このような結果は、高い静水圧により、デンプンの生の立体構造が壊れ、デンプンに種々の変化がおこり、アミラーゼ消化性が高まることを示しており、加熱によるデンプンの糊化現象と類似している。これを利用すれば無蒸点醗酵など種々の用途に利用できよう。しかし、加圧処理したデンプンをそのまま食べても芯があり、加熱糊化デンプンと物性は大きく異なる。

表Ⅲ 食品タンパク質の加圧と加熱ゲルの比較

特性	加圧	加熱
色の変化	無	有
光沢・つや	大	小
透明感	大	小
きめの細かさ	大	小
なめらかさ	大	小
風味の変化	無	有
硬さ	小	大
弾性	有	有
伸展性	大	小
付着性	大	小

7. 圧力下で水が凍らない現象の利用

水の状態図の低圧領域を見ればうなづける(Ⅱ-3参照)ように、加圧下での水の凍結温度は低下する。すなわち、50 MPaでは-4℃、200 MPaでは-20℃においても水は凍結しない。これは逆に、氷は加圧すると融解することになる。このような水に特有の現象を氷点下不凍結保存、加圧解凍、急速凍結などの食品分野に利用できる[25, 26]、(Ⅱ-3, Ⅲ-9参照)。

これらを適用する場合、加圧による食品の物性変化との兼ね合いが問題となるが、150 MPaまでの圧力は食品に対して大きな影響はない。

このための実験には、低温で耐圧性のある圧力容器を作製し、これに試料を入れ加圧した後、この圧力容

器を冷温槽(室)に入れ、試料に静水圧がかけた状態で保存する。その後、25℃にもどし、圧力を解除してから試料の性状を測定する。この場合、圧力容器はコックを閉鎖すれば、圧力を保ったまま油圧ポンプから切離すことができる。200 MPa 程度の大型加圧装置の製造は容易であり、この考えの実用化は期待できる。

7・1 加圧不凍結保存(Ⅱ-3、Ⅲ-9参照)

凍結により失活や変質しやすい酵素、微生物、食品などを0℃以下で凍結しない状態で保存する試みがなされている。例えば、凍結失活する酵素(βアミラーゼ、カタラーゼ、カテプシンC)の溶液に200 MPa をかけ、-20℃で17時間保存したところ、高い残存活性が認められた。逆に、この保存条件で失活しやすい酵素もあった。さらに、加圧氷点下殺菌ともいうべき新しい殺菌方法の可能性もある。殺菌に低温と加圧を併用するのが今後課題である[24]。

イチゴを凍結すると弾力性を失い、中央に空洞ができる。しかし、-5℃で60 MPaの加圧をして8日間保存したところ、鮮やかな色、新鮮な香り、堅さが保持され、空洞も生じない。トマトでも同様の結果が得られた。肉を200 MPa をかけて-20℃に9日間保存したところ、色調変化、揮発性チッ素やドリップの発生、保水性の劣化などが防止された。

氷点下で生物材料を不凍の状態にして保存するのは、酵素失活や食品の変質の抑制に有効である。

7・2 凍結食品の加圧解凍(Ⅱ-3、Ⅲ-9参照)

モデル実験として蒸留水で作った氷の加圧解凍を調べた。-10～-30℃の水を50～200 MPa で加圧し、圧力容器を5℃に30分間保った後、圧力を解除し氷の重量を測定し融解率を求めた結果、加圧融解は圧力が高いほど速やかになり、200 MPa ではいずれの水も完全に融解した。塩や糖を含む氷は加圧融解しやすい。

牛肉を12日間凍結保存後、20℃で30分間50～200 MPa で解凍した結果、150 MPa 以上ではやや白味がかかるが、100 MPa では生肉の鮮色が保持されドリップ量も少ない。

凍結食品の自然解凍では、時間を要し、-5℃付近の最大氷結晶生成帯に長時間さらされるため、組織、テクスチャー、香りの劣化がおこるし、加熱解凍では不均一な熱の分布が生じ、外側の部分が熱変性するなどの難点がある。加圧解凍は、短時間に質的变化を最少にして解凍するのに有効である。

氷の融解熱や融解温度を熱力学的に計算し、圧力、時間、温度の最適条件を選択すれば、加圧解凍は比較的低圧の大型装置を使って行なえよう。

7・3 食品の急速凍結

豆腐の凍結にこの原理を利用する試みがある。

8. 熱と加圧の併用[21, 24]

熱と圧力の併用とは、室温での加圧ではなく、加温あるいは低温での加圧を意味する。このときには、熱と圧力の作用の基本的な効果の差異に注意がいる。

8・1 基本になる現象

a. 物理化学的、生化学的原理

熱と圧力は物質の状態変化と平衡の性質に逆の作用をする。すなわち、物質を加熱すると、固体から液体、気体へと変化をするのに対し、加圧すると逆に変化する。また、体積、分子間距離、微細構造の乱れは加熱により増加するが、加圧では減少する。このように、熱と圧力の作用は逆方向の結果を生みだす。

温度と圧力を両軸にタンパク質の変性度合いを見ると、熱と圧力の増強効果、逆に、熱と圧力の拮抗現象があることが読み取れる。また、低温では比較的低下で変性することも分かる。この場合、水が-20℃でも凍結しない200 MPa の下では、～200 MPa ほどの比較的低下でタンパク質は変性すると読みとれる。

b. 化学反応に対する高圧効果

化学反応の速度は温度と圧力により影響を受ける。温度の影響は活性化エネルギー(E)により特徴づけられ、反応速度は一般に温度の上昇とともに早くなる。一方、圧力の影響は活性化体積(ΔV^\ddagger)により特徴づけられ、反応はこれが正のとき促進され、負のとき抑制される。加熱下おこる食品関連の化学反応はどのような高圧効果を受けるかの解析が重要になる。

c. 実験上の注意

熱の移動には時間がかかるが、圧力の伝達は瞬時である。このため、圧力容器内の温度を一様にするために攪拌装置が欲しい。また、加圧と減圧に伴う温度変化に注意が必要である。数百MPaの急速加圧と減圧にはかなりの温度変化があるから、高温や低温での加圧にはこの影響が無視できない(2・1参照)。

8・2 熱と圧力の併用による食品の加工

温度と圧力を独立に変化させることが食品の加熱加工と加圧加工の基本であるが、圧力利用の体験が進むうちに、(1)高圧装置ひいては食品の価格低減のためにより低圧で目的を達成したい、(2)耐熱性の芽胞を死滅させ、酵素の失活効果を高めたい、(3)熱と圧力の両方の効果を同時に求めたい、などの期待のため、熱と圧力を併用する試みがでてきた。これは物性変化を効果的に求めたいときにも当てはまる。

加熱あるいは冷却の状態に加圧する場合、効果が増強される（増強効果）ときと、逆に、効果が失われる（拮抗効果）ときとがある。この相反する効果は広く微生物やウイルスの死滅、タンパク質の変性、酵素の失活で報告されている。食品の加圧加工には、風味や物性変化を制御することも必要なので、温度と圧力の選定に注意が要る。

a. 増強効果

適度の加温のもとに加圧すると酵母、黴、一般細菌を死滅させるのに必要な圧力は低くなるし、枯草菌など *Bacillus* 属の耐熱性胞子はかなり死滅する。このような加熱と加圧の併用による増強効果は酵素の失活にも認められる [22] ので、物性や風味の変化を最少限にする加温状態で加圧すれば、加圧圧力を低減して、物性の改良を行うことが期待できよう。これは圧力装置の価格、寿命に好都合な条件となる。

b. 拮抗効果

常圧では 47℃ で急速に死滅する大腸菌が、40 MPa をかけるとこの温度でも生存できる。酵素の例として、スプチリシンは常圧、45℃ では熱失活するが、300 MPa をかけると失活が抑えられる [22]。

これらの事実は、酵素失活や殺菌ばかりでなく、食品物性の改良に圧力を利用するとき、温度の兼合いがかって逆効果になることを意味している。

c. 食品に特有の化学反応に対する高圧効果

食品は加工、殺菌の過程で加熱されるとき、色（メイラード反応）や臭の発生、栄養素の破壊、異物の生成などの変化を伴う。これらの変化は酸化、分解、合成などの化学変化であり、意図的に利用されるものもあるが、抑制が望まれることもある。また、タンパク質や多糖類の加水分解反応のように食品加工に利用される化学反応もある。しかし、室温以下の低温では見られない化学反応が、高温と加圧の併用のときにどのような影響を受けるかの研究例は乏しい。

最近、筆者らはメイラード反応 [23] や加水分解反応（Ⅱ-2、Ⅲ-5 参照）に対する圧力効果を調べた。その結果、アミノ基とアルデヒドの結合反応は圧力効果を受けないが、褐色物質を生成する重合反応は加圧すると顕著に抑制された。これは高圧下で食品を加熱すると褐変が抑制されることを示す。

タンパク質の塩酸（3-10 N）加水分解反応を 60℃、50-550 MPa の下に行なったところ、反応速度は圧力の増加と共に高まり、500 MPa では 10 倍も高かった。この結果から、タンパク質の加水分解反応に高圧を利用すると、反応の温度や時間を短縮させたり、触媒量を少なくするなどの効果が期待できる。

デンプンなど多糖類の加水分解反応に対しては圧力

の促進効果は少なかった。

d. 低温と圧力の併用 [24]

パン酵母は -20℃ では 200 MPa で死滅する（Ⅱ-3 参照）。この条件は、水の状態図から見て凍結しない水の相であるから、酵母は高圧と高温の併用ばかりでなく、低温との併用によっても死滅効果が強まる [7]。

この例は、圧力と熱の併用というとき、マイナス温度を含む低温（-20 ~ 10℃）での加圧が効果的であることを示している。この低温の併用効果は、食品の風味を保ち物性を変化させたいときには重要となろう。しかし、氷点下の加圧の際には、加圧後冷却するプロセスになるため、加圧容器と試料の冷却に時間を要し、処理時間が長くなるという操作上の問題がある。

9. おわりに

高圧の発生が可能になったこの一世紀の間に、加圧による微生物の死滅、タンパク質の凝固の観察に始まり、Hite ら [25, 26] は食品の保蔵に、Macfarlane [9]、Elgasi [27] は肉の軟化に圧力の効果を試している。本文ではわが国で活発に進められている研究と開発を中心に述べたが、最近では Farkas ら [28 ~ 30] の総説もあり、今後は外国での広がりが期待される状況にある。

加圧食品は人類にとって未経験であるばかりでなく、従来の体験からも予想できないほどの新しい。食品の加熱処理が歴史的には経験の蓄積の上に発展したのに対し、加圧処理には高圧生物学ともいべき科学の先導が必要と思う。この科学の発展のために、この一文が本誌の読者にとって熟物性とともに加圧物性の研究を喚起することになれば幸いである。

加熱ともに加圧処理が食品の加工・保蔵・殺菌の技術として広く用いられれば、現在の社会に急増しつつある都会生活者の食生活は今よりずっと豊かにそして健全になるであろう。高圧の装置産業の進歩とともに、加圧食品の実用化が進むことを願っている。

註

[a] 現代用語の辞典では加熱食品の対語として加圧食品という語が採用されている。本分でもこれを用いる。

[b] 本文に関するシポジウムの報告が下記の 3 冊の単行本に纏められている。引用は各章を算用数字で示す（例、I-2 は「食品への高圧利用」の第 1 章）。

- I. 林 力丸編、「食品への高圧利用」、1989
 - II. 林 力丸編、「加圧食品—研究と開発」、1990
 - III. 林 力丸編、「高圧科学と加圧食品」、1991
- いずれも、さんえい出版（京都）刊行。

[c] 加熱を使わずに加圧プロセスにより作ったジャ

ムが1990年4月加圧食品第1号として市場に出た。その後、加圧処理を製造工程に使った果汁製品が販売され、加圧食品が実用化の段階に入った。これらは天然の果実の風味がしてまことに美味しい。

参考文献

- [1] 林 力丸, 食品と開発, 22(7)(1987)55.
- [2] R. Hayashi, Y. Kawamura, S. Kunugi; J. Food Sci., 52(1987)1107.
- [3] R. Hayashi, "Engineering and Food", Vol. 2. (ed. W. E. L. Spiess, H. Schubert) p. 815 (Elsevier Appl. Sci., England, 1989).
- [4] 林 力丸, 「食品化学工学2」108頁(化学工学会編, 1988).
- [5] 林 力丸, 「食品機能—機能性食品創製の基盤」(藤巻正生編)502頁(学会出版センター, 1988).
- [6] 林 力丸, 蛋白質・核酸・酵素, 34(1989)119.
- [7] R. C. Newman, W. Kauzmann, A. Zipp; J. Phys. Chem., 77(1973)2687.
- [8] C. E. ZoBell, "High Pressure Effects on Cellular Processes" (ed. A. M. Zimmerman) p. 85 (Academic Press, 1970).
- [9] J. J. MacFarlane, "Developments in Meat Sci. 3" (ed. L. Ralson) p. 155 (Elsevier Appl. Sci., New York, 1985).
- [10] R. Hayashi, Y. Kawamura, T. Nakasa, O. Okinaka; Agric. Biol. Chem., 53(1989)2935.
- [11] M. Okamoto, Y. Kawamura, R. Hayashi; Agric. Biol. Chem., 54(1990)183.
- [12] M. Okamoto, Y. Kawamura, R. Hayashi, A. Enomoto, S. Kaminogawa, K. Yamauchi; Agric. Biol. Chem., 55(1991)1253.
- [13] 松本 正、林 力丸、農化誌、64(1990)1499.
- [14] 昌子 有、佐伯宏樹、若目田 篤、中村 誠、野中道夫、日水誌、56(1990)2069.
- [15] W. C. Ko, M. Tanaka, Y. Nagashima, H. Mizuno, T. Taguchi; 日水誌、56(1990)2109.
- [16] K. Yamamoto, T. Miura, T. Yasui; Food Str., 9(1990)269.
- [17] A. Suzuki, M. Watanabe, K. Iwamura, Y. Ikeuchi, M. Saito; Agric. Biol. Chem., 54(1990)3085.
- [18] T. Ohmori, T. Shigehisa, S. Tajiri, R. Hayashi; Agric. Biol. Chem., 55(1991)357.
- [19] 島田淳子、香西みどり、山本文子、畑江敬子、食工誌、37(1990)511.
- [20] R. Hayashi, A. Hayashida; Agric. Biol. Chem., 53(1989)2543.

- [21] 林 力丸、食品工業、34(12)(1991)20.
- [22] 原 昭弘、長浜源社、大林 晃、林 力丸、農化誌、64(1990)1025.
- [23] T. Tamaoka, N. Itoh, R. Hayashi; Agric. Biol. Chem., 55(1991)2071.
- [24] 林 力丸、低温保蔵学会誌、17(1)(1991)23.
- [25] B. H. Hite; Bull. 58:15. West Virginia Univ. Agr. Expt. Sta., Morgantown, 1899.
- [26] B. H. Hite, N. J. Giddings, C. E. Weakly; Bull. 146:1. ibid., 1914.
- [27] E. A. Elgasim, W. H. Kennick; J. Food Sci., 45(1980)1122.
- [28] C. Metrick, D. Hoover, D. F. Farkas; J. Food Sci., 54(1989)1547.
- [29] D. F. Farkas, "Food Protection Technology" (ed. C. W. Felix) p. 393 (Lewis Pub., 1987).
- [30] D. G. Hoover, C. Metrick, A. M. Papineau, D. F. Farkas, D. Knorr, Food Technol., 99, March(1989).

Pressure Use in Food Science and Technology: Properties of Pressure-Processed Foods

Rikimaru Hayashi
Research Institute for Food Science
Kyoto University
Uji, Kyoto 611

As temperature is used in cooking, hydrostatic pressure of several hundreds MPa can be used for food processing and preservation. In this article, principle and unique properties of pressure-processing of food are reviewed, and the present status of research and development concerning processings of meat, fish meat and plant proteins are described. A recent advance in high pressure-treatment under an elevated temperature is also summarized. In 1990, the first pressure-processed food came into the market.

(Received Aug. 20, 1991)