総 説

食品産業への圧力利用

早川 功*

Pressure Utilization for Food Industry

Isao HAYAKAWA

Laboratory of Food Process Engineering, Department of Bioscience & Biotechnology, Division
of Bioresource & Bioenvironmental Sciences Graduate School, KYUSHU UNIVERSITY

は じ め に

食品の高品質化が求められて久しく、その延長線上に圧力処理の目的も在る。そこで食品産業における圧力処理を考えると次の2点に集約されよう。1つは食品に新しい機能を付与すること、2つ目は熱よりも穏和な条件で有害微生物を殺菌することである。

平成元年に食品産業用超高压利用技術研究組合が設立されたことを契機に¹⁾この種の研究が世界に先駆けてわが国で展開された^{2)~6)}。

言うまでもなく圧力の特徴は全ての物質の容積を縮小させることである。体積の縮小に伴い、圧力媒体を含め、加圧された全ての物質は歪み(体積歪)を生じる。この歪みは熱で失活した酵素を再活性化したり、タンパク質を不可逆的に変性させたりする。しかし圧力変性は加圧されるタンパク質の構造により、圧力感受性を異にする。一般に分子内にドメイン構造を多く持つタンパク質は圧力に強い抵抗を有する⁷⁾。

食品が加圧されるとその内部のタンパク質、糖質およびアルコールなどとそれらの周囲の水分子との間で水素結合が促進されて熟成効果が現れる。更に加圧されたものの味が改善されることから、野瀬らはこの作用を巧みに応用し新しい物性と味覚を備えた圧力ハムを開発した^{8)~11)}。また山崎らは圧力処理を用いて低アレルギー米や全く新しい機能を有する炊飯米を開発した^{12)~22)}。

一方、圧力殺菌も多く研究者に試みられているが、それらは主として高い静水圧による菌体酵素やタンパク質の圧力変性の応用である²³⁾。しかし圧力媒体である水を介して伝わるエネルギーが小さく、圧力でタンパク質を短時間に変性するために必要なエネルギーは熱のように簡単には伝わり難く、微生物を短時間に殺菌することはできない。(これは液体圧縮の特徴であり、1000 MPaで得られるエネルギーは約0.832 J (0.2 kcal) / molである。)²⁴⁾それ故、殺菌を目的とするならば、静水圧の応用では無く、大きな力が得られ易い動圧を用いて微生物の細胞壁の破壊を考えるべきである。

殺菌の主目的は耐熱性孢子を対象にするものとするが、国内で発生している食中毒を調べると²⁵⁾²⁶⁾、ボツリヌス菌のような耐熱性孢子に起因するものは少なく、それらの多くはグラム陰性菌を原因菌としている。従ってサルモネラ、大腸菌、ビブリオなどのグラム陰性菌の破壊殺菌が可能か否かについて室温以下の温度領域で検討し面白い現象を得たので紹介する。

圧 力 ハ ム

一般的に生ハムは深みのある香りと旨味に優れた食品であるため多くの人々に好まれる。このような味覚と物性を備えた圧力ハムが登場した^{8)~11)}。

高い圧力で肉の物性(軟らかさ、風味、色調、熟成)や味を改善し、且つその保存性を向上させるための研究

* 九州大学大学院農学研究院生物機能科学部門食品バイオ工学講座食品製造工学研究室 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

が平成元年から開始された。即ち、新鮮な豚ロースを塩漬した後、20～40℃、250 MPa で 3 時間処理し燻煙すると、肉は赤身を呈した軟らかい物性と旨味を有し、更にみずみずしさをも兼ね備えたものになった。これが圧力ハムの誕生である。

衛生管理上、圧力ハム製造工程における微生物の動向が極めて重要であるために、各単位操作における汚染状態を検討している。

原料肉からは大腸菌群、サルモネラ属菌、クロストリジウム属菌が検出されているが、塩漬された後にサルモネラ属菌、燻煙処理後に大腸菌群とクロストリジウム属菌が消失したことから、前処理工程が極めて重要である。

安全性の観点から *Salmonella enteritidis* IFO 3313、低温でも増殖する *Listeria monocytogenes* Scot A および *Yersinia enterocolitica* 03 などの殺菌を検討している。*L. monocytogenes* Scot A と *Y. enterocolitica* 03 が 10^{2-3} cfu/ml 汚染された肉を 250 MPa、20 分間処理すると生菌数は 30 cfu/ml まで減少し、60 分間処理で無菌化される。しかし肉が 10^8 cfu/ml 以上に汚染されると 180 分間処理後にもこれらの生菌が測定され、高濃度の細菌汚染は絶対に避けねばならない。またグラム陽性菌の *Staphylococcus aureus* はグラム陰性菌よりも強い圧力抵抗性を示し、圧力処理で完全に殺菌することは困難であり、この菌に汚染された原料処理は注意を要する。

現在の技術で安全で風味や光沢に優れた高品質圧力ハムを造るためには、*Clostridium botulinum* の増殖を特異的に抑制する亜硝酸塩や硝酸塩の添加は必要であるため、これらの塩類添加と製造工程中における細菌数の推移を求めて図 1 に、同じく保存期間中の変化を図 2 に示す。

これらの添加は製造工程や保存期間中における一般生菌数の増殖を抑制し、更に大腸菌群、黄色ブドウ球菌、サルモネラ属菌およびクロストリジウム属菌の生育を阻止することから、現行技術に必要不可欠な方法である。

低アレルギー米

山崎は高品質の米加工品を造るために、圧力の応用を考え、米から飯に変わる過程の水の挙動を詳細に観察した。加圧された水が米の胚乳部の奥深くまで浸透し、そこに含まれている空気が浸透してきた加圧水に溶解しつつ、水と置換され、最終的に空気の部分は加圧水で満たされる。次の圧力を抜く過程で胚乳部のタンパク質などが外部に溶出するための道筋が造られる。則ち、胚乳部

図 1 高圧ハム製造工程中の一般生菌数の変化^{8,9)}

図 2 添加物が高圧ハムの一般生菌数の変化に与える影響^{8,9)} (原料肉: 国産フレッシュロース)

で水との接触を妨げていた空気の容積は 100 MPa で初期体積の約 1/1 000 に圧縮され、加圧水への溶解度が一挙に上昇するために、水への置換が急速に進行する。次の減圧操作でそこから空気が排出されると同時に圧力水の抜けた微小孔の通路が胚乳部に出現する。次の溶出工程で物質移動を促進させる。特に、米アレルギーの溶出に有効である。90% 精白の新潟産コシヒカリを 2 倍量の抽出液に浸漬後、20℃、100～700 MPa で 10 分間加圧で抽出されたタンパク質量を図 3 に示す。5%-D イソアスコルビン酸によるアレルギー溶出は水や 1% 抽出液に比べて極めて高い溶出タンパク量を示す。なお、このタンパク質は人抗体イムノブロッティング法で米アレルギーと確認された。従って、この圧力処理法は新しい低アレルギー米製法として注目される。更にこの手法は他のデンプン系の穀類アレルギーの抽出法にも応用可能と考えられる。^{12)～14)22)}

図3 米タンパク質の溶出に及ぼす圧力の影響¹⁷⁾

圧力処理炊飯米

圧力で米胚乳深部まで水を十分に浸透させた後に炊飯された飯（圧力処理炊飯米）は炊飯直後から強い粘りと速い硬化を呈す。且つその米粒中の水の存在状態が無処理炊飯米（従来型炊飯）のそれと異なる上に老化状態も違うことを山崎らが DSC 測定で明らかにした¹⁵⁾¹⁶⁾。また圧力処理炊飯米の外観は従来型炊飯米のそれとは異なり、穀粒の形をそのまま維持しながら相似的に膨張し、その表面に光沢がある。その内部に亀裂や破壊が無く、極めて高い透明感を持つ。また 400 MPa 以上で処理された浸漬米は胚乳組織の形が崩れ、デンプン粒の間に水が進入した痕跡を残し、部分的に厚い壁のように見える糊の網状構造を形成することから、圧力によるデンプンの水和現象が発現したものと推察される。更に、この圧力処理炊飯米の糊化度は従来型炊飯米のそれに比較して高い。即ち、圧力処理後の炊飯米がある期間保存された

図4 高圧処理米飯の保存期間と高周波（電子レンジ）加熱による糊化度の関係¹⁸⁾

後に高周波（電子レンジ）で復元されると保存期間の延長に連れ、その糊化度が初期の値よりも増加する（図4参照）。特記すべきことは、保存期間の延長でその糊化度はさらに高くなり、15日間保存後の糊化度は100%に達する。即ち、保存期間の延長につれ糊化度はますます増加する^{15)~22)}ような性質を備えた炊飯米は過去に存在せず、圧力が米に新規の機能を付与したことを示し、今後の発展に期待したい。

圧力殺菌

理想状態における水の断熱膨張速度は圧力に依存せず 1500 m/s である。水の体積弾性係数 (β) は圧力や温度で変わるけれども、極めて大きい (100 MPa で $\beta=2500$ MPa, 200 MPa で $\beta=3500$ MPa)。この水の物性を巧みに利用することで比較的簡単に耐熱性孢子のスポアコートや栄養細胞の細胞壁が物理的に破壊されて殺菌されるものとする。

孢子を回転楕円体として全表面積を求め、600 MPa 下で *Bacillus stearothermophilus* IFO 12550 孢子に掛かる全荷重を算出すると、おおよそ 2.51 mg/cm² になり、静水圧下で孢子に掛かる荷重の小さいことが判る。

力 (F) は加速度 (α) に質量 (m) を掛けたものである。圧力容器の水が理想的に断熱膨張をするならば、圧力で孢子内部に浸透した水も同時に断熱膨張を強いられる。この時に生じる加速度は 2.25×10^6 m/s² になる。従って、圧力で菌体内に浸透したわずかな水でも、桁違いの大きな荷重をスポアコートに与えることができる。

スポアコートが受ける衝撃力は下記の式で示される。瞬間除圧装置の圧力容器の形状が水の断熱膨張量を補正した形状に作られているならば、菌体内で衝撃波が発生する。衝撃波は不連続的に増幅されるため、破壊に作用する力は飛躍的に増大し、スポアコートや栄養細胞の細胞壁はより低い圧力でも破壊されるものと推察される。

$$F = \alpha \cdot m$$

F: 力 [kg 重]

m: 質量 [kg]

$$\alpha = (V_1^2 - V_2^2) / 2 \Delta L \quad [\text{m/s}^2]$$

V_1 : 運動する物体が衝突するときの初速 [m/s]

V_2 : 衝突後の物体の速度 [m/s]

ΔL : 衝突から停止するまでの変位 [m]

(1) 耐熱性孢子^{27)~34)36)~52)}

圧力容器の圧力が瞬間に除圧されると、圧力で耐熱性孢子のスポアコートを浸透した水が孢子内で瞬間断熱膨張を強いられる。同時に断熱膨張を強いられた水はスポ

アコートを内側から外側に押し出す。この時、除圧速度が速ければ、速いほど、断熱膨張に基づく速度エネルギーは水の断熱膨張力（体積弾性率×体積歪量）に加わり、スポアコートを内側から外側に強く押し出す。

著者らはこの仮説を実証するために 500 MPa から瞬間除圧できる実験装置を試作した。100～200 MPa の静水圧で殺菌が難しい耐熱性有芽胞細菌 *Bacillus stearothermophilus* IFO 12550 胞子を既存の殺菌圧力に比較して約 1/6～1/3 の 100～200 MPa で破壊殺菌した（図 5-1）^{34)36)～49)}。200 MPa から瞬間除圧したときの処理時間と生残菌数の関係を図 5-1 に示す。同様に 75℃、100～200 MPa で処理された胞子の走査型電子顕微鏡写真を図 5-2 に示す。95℃ における *B. stearothermophilus* 胞子の殺菌速度は 75℃ の値に比べて約 2.5 倍速い。100℃ における供試胞子の D 値が 3000 分であることから³⁵⁾ 指標菌が熱で死滅したとは考えら

れず、物理的な破壊で殺滅されたものとする。

この破壊殺菌の律速因子は圧力で胞子内部に浸透した水量である。浸透水量はスポアコートの水の浸透性に依存する。水の浸透性は圧力、加圧時間および熱の影響を受ける。従って、加圧時間の増加、圧力と熱の上昇はスポアコートの水の浸透性を促進させ、浸透水量を増加させる。浸透水量の増加は殺菌率の向上につながる。それ故、この殺菌は加熱殺菌と同様に熱の関数とも言えるが、圧力因子があるため、殺菌曲線は一般的な一次反応型（アレニウス型）にならず、処理時間に対してテーリングを伴う L 字型を示す。但し、前述の現象は温度、圧力、加圧時間の関係で変化すると同時に高压セルの出口開口比は特に殺菌特性に大きな影響を与える。

図 5-2 の写真からスポアコートは明らかに水の断熱膨張力で内側から外側に押し出されて破壊されている。しかし 100 MPa で破壊された胞子の写真 B と C の壊れ方は 200 MPa から殺菌された写真 D の壊れ方とは異なる。B は内圧の上昇によるスポアコートの完全破裂であり、胞子はゴースト化している。C は内圧の上昇で今にもスポアコートが破裂しようとする寸前である。B と C は同じ 100 MPa 処理であるが、その破壊状態は明らかに異なる。C の出現割合は B に比べて極めて少ない。また高濃度胞子分散液は胞子表面の疎水性の関係で胞子塊を形成しやすい。C の胞子は胞子塊の中心部に位置した結果によるものと考えられる。その理由は、胞子塊の芯部にある胞子はその塊の表面もしくは表面付近にあるものに比較し、水と接触する機会が少なくなり、C のような壊れ方をしたものと推察する。それ故、この種の割れ方は必然的に少なかったものとする。

一方、200 MPa から瞬間除圧された胞子の壊れ方は 100 MPa のそれとは完全に異なり、バラバラに破壊される（写真 D）。この時の水の膨張率は 75℃、100 MPa で 3.93% で、200 MPa では 6.79% になる。試作装置の除圧

図 5-1 瞬間除圧殺菌における *B. stearothermophilus* IFO 12550 胞子の加圧時間と生残菌数の関係

図 5-2 *B. stearothermophilus* IFO 12550 胞子の瞬間除圧後の SEM 写真^{37)～39)}

A, 対照; B, 100 MPa, 75℃, 60 分加圧後瞬間除圧; C, 100 MPa, 75℃, 60 分加圧後瞬間除圧; D, 200 MPa, 75℃, 60 分加圧後瞬間除圧

図 6 *B. steartotherophilus* IFO 12550 胞子の生存菌数と温度の影響

条件：pH 7.0, M/15 リン酸緩衝液

A, 50～100 MPa, 720 分加圧；B, 10～40 MPa, 720 分加圧

時間は 100 MPa で 0.00165 s で、200 MPa では 0.00155 s である。200 MPa の断熱膨張量は 100 MPa よりも約 74% 大きく、胞子の寸法が同一であると仮定するならば、スポアコートの内壁に生じる力は単純計算でも、膨張量が増加した分、増加し、その上に、200 MPa の断熱膨張速度が 100 MPa の値に比べて 133% 速いことから、歪速度の増加に連れてスポアコートの受ける力も大きくなったものと考えられる。従って 200 MPa で処理された胞子のスポアコートはその弾性率以上の応力を受け、一挙

に脆性破壊に至ったことがスポアコートの破断面から判る。これに反し、水の断熱膨張量が少なく、断熱膨張速度の遅い 100 MPa で処理された胞子のスポアコートは緩和現象の発現により、破裂したスポアコートは開花したチューリップの花の形に類似する (写真 B)。

B. Stearotherophilus IFO 12550 胞子に汚染された食品はその品質の低下を伴わずに市販の加熱殺菌装置で殺滅できないが、当該殺菌方法は 75～95°C, 200 MPa で確実に殺滅できる。しかし 200 MPa は依然として高い圧力であり、実用化の為には、より低い圧力が求められる。水の浸透性と拡散性は温度と圧力と時間の関数であることから、これらを因子に用いて温度を横軸に、生存菌数を縦軸に取り、50～100 MPa の値を図 6 (A) に、10～40 MPa の値を図 6 (B) に示す。図 6 から明かなように 50 MPa 以上の圧力では、温度の上昇に連れて生存菌数は直線的に低下し、この圧力範囲における殺菌曲線は殺菌時間に対してアレニウス型を示す。即ち、50 MPa 以上の圧力水は耐熱性胞子の生物的防御を破りスポアコートを貫通できる。その時、スポアコートに掛かる荷重は最低 0.209 mg/cm² に相当する。

一方、40 MPa 以下の低い圧力では、殺菌曲線は時間軸に対し非アレニウス型を示す。生存菌数は温度の上昇につれて二次関数的な挙動を示し、75～80°C に最適殺菌温度が存在する。この時、胞子に掛かる荷重は 0.167 mg/cm² 以下である。このことは微生物の最適生育環境よりも高い温度域では、胞子の防衛機構が作動し、胞子

図 7-1 瞬間除圧殺菌における *Salmonella typhimurium* IFO 13245 の加圧時間と生存菌数の関係

図 7-2 瞬間除圧された *Salmonella typhimurium* IFO 13245 の SEM と TEM 写真（上段，TEM 写真；下段，SEM 写真）

内部への水の浸透，拡散を抑制することを示唆する。従って，当該孢子の効率的な圧力殺菌温度は 75～80℃である。

これらの実験結果は 100℃で調理した食品を耐熱性フィルムに封印後，60～80 MPa，75～80℃で長時間保温することで包装された調理食品を完全に無菌化できることを示唆する。

(2) 栄養細胞^{(37)(27)～(34)}

我が国の食中毒事件を調べると，技術的に殺菌の難しい耐熱性芽胞細菌に起因したものは少なく，グラム陰性菌によるものが非常に多い。

平成 8 年に発生した細菌性食中毒患者数の合計は 41 025 名であり，1 位がサルモネラ菌（*Salmonella* 属）の 16 576 人で全体の 40.1% を占める。2 位は病原性大腸菌（*Escherichia coli*）の 14 488 人で 35.1% で 3 位は腸炎ビブリオ（*Vibrio*）の 5 241 人で，全体の 12.7% である⁽²¹⁾⁽²⁶⁾。これら 3 種類の菌に起因する食中毒発生件数が全体の 87.9% を占めることから，これらのグラム陰性菌に対する破壊殺菌を試みた。誌面の都合で第 1 位のサルモネラ菌を中心に述べる。図 7-1 は *Salmonella typhimurium* IFO 13245 の瞬間除圧による殺菌特性であり，図 7-2 はその時の電子顕微鏡写真である。なお，*E. coli* IFO 3301 と *V. parahaemolyticus* IFO 12711 の瞬間除圧殺菌特性や電子顕微鏡観察はいずれも *S. typhimurium* の殺菌特性に類似していたが，*E. coli* が他の 2 種類の菌よりもやや強い圧力耐性を示した。しかし，これらの微生物は何れも 100～200 MPa の範囲で容易に死滅する。また何れの微生物も 25℃よりも－5℃で

より簡単に殺菌される。300 MPa 以上の圧力処理は温度による殺菌率の差を縮小し，400 MPa で完全に消失し，何れの微生物も 2，3 分以内で 10^7 cfu/ml 以上が殺菌される。

グラム陰性菌の細胞壁は孢子のスポアコートと機能や物理的強度を異にする薄いペプチドグリカン層と物理的強度の弱い脂質二重膜から構成されている。従って，スポアコートのそれに比較し，水の通過抵抗は小さく，透水性は高い。それ故，水の断熱膨張で生じる微量の水は細胞壁を自由に通過できるために，細胞壁を物理的に破壊することは困難と考えられた。しかし約 10% の歪み（400 MPa）を瞬時に開放すると，3 種類のグラム陰性

図 8 水の圧縮率に及ぼすショ糖濃度と圧力の関係⁽¹⁹⁾

図 9 微生物の耐圧特性^{50~52)}

Symbols ; ■, 殺菌; □, 生菌

菌の細胞壁は室温で完全に破壊され、供試菌は全て殺菌された。-5℃では、さらに低い圧力である200 MPaでも 10^7 cfu/ml 死滅した。なお、加圧から除圧までの機械操作に要する時間は約2、3分である。

おわりに

圧力は加圧に伴う容積縮小とそれに伴うタンパク質の圧力変性、自己分解、更に水分子とタンパク質、糖質、アルコールなどとの水素結合を促進することから、生ハムに近い美味しい新製品、低アレルギー米、更に新機能の炊飯米などが開発された。

しかし蜂蜜のような高濃度糖液中の耐熱性孢子は1000 MPaの静水圧に晒されても、死滅することは無く、強い圧力耐性を示す^{47)~49)}。その要因が糖のOHによる水分子の拘束に起因するものと思われていたが、そのみで耐熱性孢子の圧力耐性を十分に説明し得なかった。伊藤らは糖や塩の溶解量と水の体積変化の割合を測定し、濃度増加が水の圧縮量を減少させることを明らかにし、蜂蜜のような高糖濃度液中の耐熱性孢子が圧力で殺菌し難い要因を解明した(図8)^{4)~9)}。また園池は大腸菌や乳酸菌の圧力殺菌の速度論的な研究を行い、グラム陽

性菌群、グラム陰性菌群、酵母・カビ群、そして耐熱性孢子群に分類し、それらの耐圧性をまとめ(図9)^{50)~52)}、耐熱性孢子が他の微生物グループから明らかに遊離し、極めて強い圧力耐性を示すことを明らかにしている。それらの中には1200 MPa、1000分間加圧後にも生存する孢子を確認している。

グラム陽性菌の細胞壁はグラム陰性菌のそれよりも、物理的強度に勝り、一般的に強い圧力耐性を有する。しかし、グラム陽性菌もグラム陰性菌も-5~-20℃で何れも簡単に破壊殺菌される。その理由は200 MPaの水は-20℃でも液体であり、圧力開放により瞬時に I_h 型氷に変わる。この時、水から氷に相変化するとき、細胞内容積が約9%増加する。更に、100もしくは200 MPaで圧縮されたときに生じる水の圧縮歪をも含めた容積が圧力解放に伴い自動的に回復することから、最終的に菌体内容積は100 MPaで約12.5%、200 MPaで約15%増加する(図10参照)。この容積増加が凍結下で優れた殺菌効果を示すものとする。

なお、試作装置の断熱膨張速度は理想状態の約1/10(500 MPaのとき)~1/15(100 MPaのとき)であったことから、理想的な装置が造られるならば、革命的に優れ

図 10 温度に対する水の容積変化と相図

水の相変化に伴う容積変化 0°C の水→0°C の氷：
約 9% 容積増加

たデータが得られるものとする。

文 献

- 1) 食品産業用超高压利用技術研究組合編：高压技術と高密度培養，健康産業新聞社（1993）。
- 2) 林 力丸編：高压科学与加压食品，さんえい出版（1991）。
- 3) 林 力丸編：生物と食品の高压科学，さんえい出版（1993）。
- 4) 功刀 滋・嶋田昇二・鈴木敦士・林 力丸編：高压バイオサイエンス，さんえい出版（1994）。
- 5) 鈴木敦士・林 力丸：高压生物科学与高压技術，さんえい出版（1997）。
- 6) 功刀 滋・林 力丸：高压バイオテクノロジー，さんえい出版（1998）。
- 7) HAYAKAWA, I., LINKO, Y.-Y. and LINKO, P.: *Lebensm. Wissenas. Techn.* **29**, 756 (1996)。
- 8) 野瀬正敏・岩城 朗・服部真之：食肉加工への高压処理の応用，功刀 滋・嶋田昇二・鈴木敦士・

林 力丸編：高压バイオサイエンス，さんえい出版，p.272-279（1994）。

- 9) 野瀬雅彦：シンポジウム「食品産業と高压科学」，食品工業と高压科学，日食工会第 46 回大会要旨，p.17（1999）。
- 10) 辻田純二・鈴木邦宏：高压処理技術を利用した食肉加工品，林 力丸編：加压食品，さんえい出版，p.123-130（1990）。
- 11) 大森 丘・重久 保：畜肉に及ぼす高压作用，林 力丸編：加压食品，さんえい出版，p.131-139（1990）。
- 12) 山崎 彬・笹川秋彦・杵淵美倭子・山田明文：高压を利用した餅の製造，功刀 滋・嶋田昇二・鈴木敦士・林 力丸編：高压バイオサイエンス，さんえい出版，p.328-335（1994）。
- 13) 笹川秋彦・杵淵美倭子・山崎 彬・山田明文：高压を利用した米菓の製造，功刀 滋・嶋田昇二・鈴木敦士・林 力丸編：高压バイオサイエンス，さんえい出版，p.336-343（1994）。
- 14) 山崎 彬・笹川秋彦・山田明文：熱測定，**23**, 149（1996）。
- 15) 山崎 彬：高压力の科学与技術，**6**, 128（1997）。
- 16) 山崎 彬：高压力の科学与技術，**6**, 182（1997）。
- 17) 山崎 彬・笹川秋彦：高压力の科学与技術，**6**, 232（1997）。
- 18) 山崎 彬・杵淵美倭子：高压力の科学与技術，**8**, 57（1998）。
- 19) 杵淵美倭子・渡辺勝也・小宮新一・山崎 彬・山本皓二：J. Appl. Glycosci., **46**, 31（1999）。
- 20) 山崎 彬・笹川秋彦：日食工誌，**45**, 526（1998）。
- 21) YAMAZAKI, A., YAMAMOTO, K. and YAMADA, A.: *Nippon Shokuhin Kagaku Kogaku Kaishi*, **46**, 369（1995）。
- 22) 山崎 彬：食品加工技術，**19**（4），203（1999）。
- 23) HAWLEY, S.A.: *Methods in Enzymology*, **49**, 14（1978）。
- 24) 大杉治郎：高压実験技術とその応用（丸善，東京），p.1（1969）。
- 25) 尼崎保健所：http://www.amagasakimed.or.jp/kenkokoza/98061/sld004.html。
- 26) 厚生省・食中毒：http://www.mhw.go.jp/houdou/0806/list.html。
- 27) GOULD, W.G. and SALE, H.J.A.: *J. Gen. Microbiol.* **60**, 335（1970）。
- 28) GLOUSTON, G.J. and WILLS, A.P.: *Initia J. Bacterial.* **97**, 684（1969）。
- 29) MURRELL, G.W. and WILLS, A.P.: *J. Bacterial.* **129**（3）: 1272（1977）。
- 30) WUYTACK, Y.E., BOVEN, S. and MICHIELS, W.C.: *Appl. and Environ. Microbiology*, **64**, 3220（1998）。
- 31) HAUBEN, A.J. Keristel, BARTLETLETT, H.D.,

- SOONTJENS, F.C.C., CORNELIS, K., WUYTACK, Y.E. and MICHILES, W.C. : *Appl. Environ. Microbiol.*, **63**, 945 (1997).
- 32) SALE, H.J.A., GOULD, W.G. and HAMILTON, A.W. : *J. Gen. Microbiol.*, **60**, 323 (1970).
- 33) BENITO, A., VENTOURA, G., CASADEI, M., ROBINSON, T. and MACEY, O. : *Appl. Environ. Microbiol.*, **65**, 1564 (1998).
- 34) PALOU, E., LOPEZ-MALO, A., BARBOSA-CANOVAS, V.G., WELTI-CHANGES, J., DAVIDSON, M.P. and SWANSON, G.B. : *Letters in Appl. Microbiol.*, **27**, 375 (1998).
- 35) INGRAM, M.C. : Spore formers as food spoilage organisms. in *The Bacterial Spores*. ed. by GOULD, G.W. and HURST, A., Academic Press, London. p.549 (1967).
- 36) 早川 功：瞬間断熱膨張式殺菌装置の開発. 食品工業. **40** (2), 45-50 (1997).
- 37) 早川 功：高圧殺菌機構の解明, 化学装置. **40** (3), 70-74 (1998).
- 38) 早川 功・堀内啓史・水永晃博・古川壮一・中島太一・藤尾雄策：日食工誌, **45**, 158 (1998).
- 39) HAYAKAWA, I., FURUKAWA, S., MIZDUNAGA, A., HORIUCHI, H., NAKASHIMA, T., FUJIO, Y., YANO, Y., ISHIKURA, T. and SASAKI, K., *J. Food Sci.*, **63**, 371 (1998).
- 40) HAYAKAWA, I., KANNO, T. and TOMITA, M. : Study on the Mechanism of spore sterilization by the application of high pressurization. Sixth Conference of The Asia Pacific Confederation of Chemical Engineering, Twenty-First Australian Chemical Engineering Conference, Melbourne, Australia, 26-29th September, Vol. 3, p. 131 (1993).
- 41) HAYAKAWA, I., KANNO, T., YOSHIYAMA, K. and FUJIO, Y. : *J. Food Sci.*, **59**, 164 (1994).
- 42) HAYAKAWA, I., KANNO, T. and FUJIO, Y. : Developments in Food Engineering. Ed. by T. YANO, R. MATSUNO and K. NAKAMURA. Blackie Academic & Professional, London, Glasgow, Weinheim, New York, Tokyo, Melbourne, Madras, p.867 (1994).
- 43) HAYAKAWA, I., LINKO, Y.-Y., LINKO, P. : High pressure technology in sterilization of biomass by adiabatic expansion of water. Engineering & Food at ICEF 7, Part 1. ed. by Ronald Jowitt. Sheffield Academic Press. London, Session. D. 9 (1997).
- 44) 早川 功・古川壮一：食品工業, **41** (10), 23 (1998).
- 45) 早川 功：殺菌と解凍への高圧技術, 食の先端科学, 相良泰行編, 朝倉書店, p.133-149 (1999).
- 46) 早川 功：化学装置, **41** (3), 75-79 (1999).
- 47) HAYAKAWA, I., ODA, M. and KAJIHARA, J. : Study of pressure bearability of baker's yeast under buffer conditions. in *Food Processing by Ultra High Pressure & Twin-Screw Extrusion*. ed. by I. HAYAKAWA, Technomic Publishing Company, Lancaster, USA, p.47-56 (1992).
- 48) 滝 妥恵・栗生武良・光浦暢洋・高垣康雄：高圧処理による微生物の殺菌. 加圧食品, 林 力丸編, さんえい出版, p.143-155 (1990).
- 49) 伊藤新次：シンポジウム「食品産業と高圧科学」, 食品工業と高圧科学, 日食工会第46回大会要旨, p.15 (1999).
- 50) 園池耕一郎：日食工誌, **44**, 522 (1997).
- 51) 園池耕一郎・瀬戸山保・久間嘉晴・木村義夫・秦野 徹・福本研治・石原正美：乳酸菌, 大腸菌の殺菌に対する温度と圧力の影響. 生物と食品の高圧科学, 林 力丸編, さんえい出版, p.213-219 (1993).
- 52) 園池耕一郎・福本研治：高圧処理の殺菌力とミルク成分への影響. 高圧技術と高密度培養, 食品産業超高圧利用技術研究組合編, 健康産業新聞社, p.215-241 (1993).

(平成11年11月22日受理)