

# 交流電界によるミニマムヒーティング殺菌技術

## はじめに

食品の微生物汚染に起因する食中毒事故が毎年発生し、大きな社会問題となっている。食品の安全性を向上させるために、有史以来、食品を外部から火等の熱源で加熱する外部加熱が脈々と行われてきた。食品を加熱することで微生物が殺菌される一方、加熱により食品中の熱に弱い有用な成分が変性してしまうことが問題となる場合が多い。1900年頃から電気を使った通電加熱が行われるようになってきた。通電加熱とは、食品に電界を印加すると、電界に従って食品内部を電流が流れ、流れた電流の二乗に比例する電気エネルギーが熱エネルギーに変わって食品自身が発熱するジュール加熱とも呼ばれる内部加熱である。通電加熱に用いる電源の周波数は、当初、50Hzや60Hzの商用の低周波の交流であったが、電極と食品の接触面で電極の腐食が問題となったため、現在は、20kHz以上の高い周波数の交流が多く用いられるようになってきた。さらに、筆者らは20kHzの周波数で、1000V以上の高電圧の交流を用いた交流高電界と呼ばれる技術を開発し、果汁の様な液体食品の高品質な殺菌方法として実用化してきた。また、さらに高い周波数である3MHz～30MHzの短波帯の周波数の交流を用いることで、たんぱく質を含んだ液体食品やプラスチック包装された固体食品への応用展開が進められているところである。外部加熱は食品の中心部が目的の温度に達するまで、外部から長時間加熱する必要があるのに対して、交流電界を用いた内部加熱は、食品を内部から均一に発熱する特徴を持つため、食品の中心部を短時間で昇温することが可能である。したがって、この内部加熱を利用することにより、食品の殺菌に必要な加熱時間を短縮し、有用な食品成分の熱変性を起こりにくくしている。このように電気を用いることにより、最小の加熱時間で殺菌を実現する方法をミニマムヒーティングプロセスと呼ぶことにし、本稿では、各種の食品に対応したミニマムヒーティングプロセスについて具体例を示して解説する。

## 1. ジュール加熱による味噌の殺菌

ジュール加熱とは、一般に30kHz以下の周波数の交流を用いた食品の加熱方法である。食品を2枚の平行平板電極間に挟み、両電極に外部から交流電界を印加した場合、食品内部には電界の方向に沿って電界に比例した交流電流が流れようとするが、食品中で電気を運ぶイオンの移動遅延や摩擦が電氣的な抵抗に換算され、流れた電流の二乗と生じた抵抗に比例した電気エネルギーが熱エネルギーに変換されて材料自身が発熱する。ジュール加熱は自己発熱による熱効果が殺菌に寄与していると考えられる。以下に、ジュール加熱の一例として、連続通電加熱による味噌の殺菌および酵素失活について述べる。

味噌はわが国の伝統的な食材であるが、年々消費が減少している。その理由として、塩分濃度が高いことと、出汁を取るのに手間がかかることである。そのため、塩分を低下した減塩味噌が市販されているが、塩分を低下させた味噌は微生物が増殖しやすくなるため、十分な殺菌を行う必要がある。また、味噌に出汁をあらかじめ加えた出汁入り味噌が多く販売されるようになったが、出汁の成分である核酸が味噌麴に含まれる酵素フォスファターゼによって分解されるため、出汁入り味噌は酵素を失活しておくことが必要である。したがって、味噌を加熱することで殺菌と酵素失活を行っているが、味噌を加熱による褐変と香気成分の変化が問題となっていた。そこで、連続通電加熱により、加熱時間の短縮を目指した。

### 1-1 味噌の連続通電加熱

高粘度のペースト状食品である味噌を連続加熱処理するために強力な搬送装置が必要となるが、図1に示した連続通電加熱装置により、味噌を通電加熱することが可能である。電極は図2に示すように、7個のリング電極と電極に挟まれる6個の樹脂管で構成され、7個の電極には交互に交流電界が給電される。リング電極の内側を流れる味噌内部は図3に示すように電気力線に沿って、電流が流れ、味噌が発熱する。また、味噌の中心部と外側を比べると、外側の方が電気力線の密度が高く、外側の温度が高くなるが、リングの内径 (D) と電極間距離 (L)

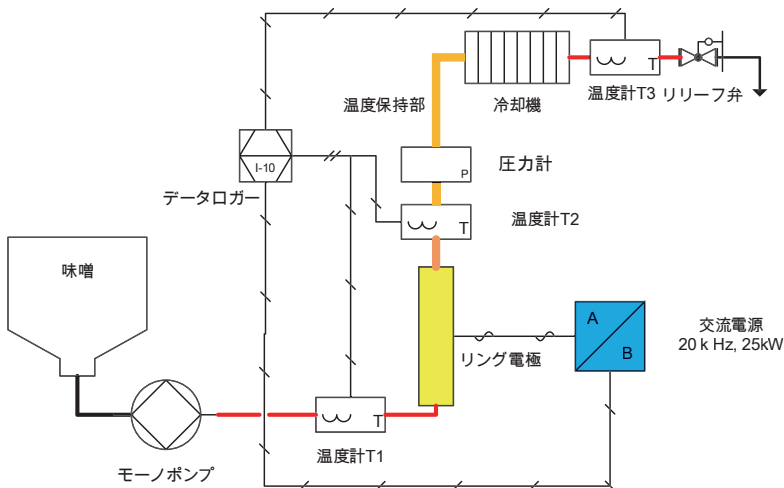


図1 味噌の連続通電加熱装置

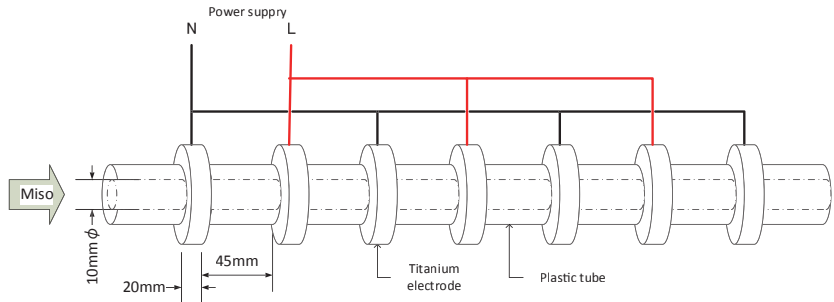


図2 リング状電極

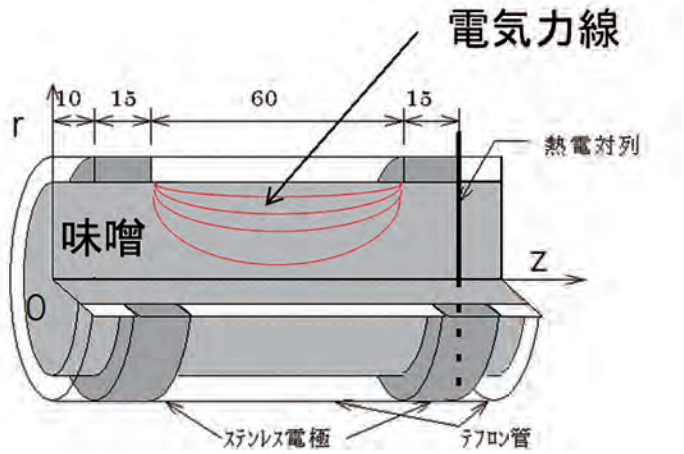


図3 リング状電極による味噌の通電加熱機作

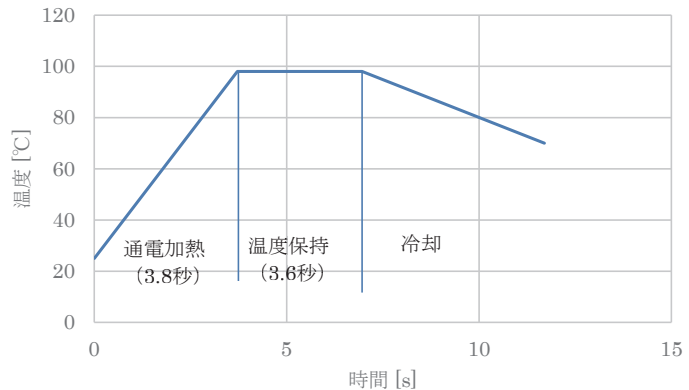


図4 連続通電加熱における味噌の温度履歴

の比 (L/D) を 3 以上とすることにより、味噌の中心部と外側の温度差を小さくできることが分かっている<sup>1)</sup>。連続通電加熱による味噌の温度履歴を図 4 に示した。連続通電加熱は、4 秒で 95℃ まで昇温し、4s 温度保持後、直ちに冷却した。このとき、味噌に添加した枯草菌芽胞は 1/500 に低減した<sup>2)</sup>。味噌に含まれる酵素フォスファターゼは、4s の連続通電加熱で 65℃ まで昇温したところ、94% 失活した。通電加熱は通常加熱に比べて 10℃ 低い温度で失活したことが分かった<sup>3)</sup>。

## 2. 交流高電界の殺菌効果

### 2-1 大腸菌などの栄養細胞の殺菌<sup>4)</sup>

ジュール加熱の印加電界を高めていくと、外部電界によって微生物の両端に生じる電位差が約 1V に近づき、細胞膜の両端に生じるクーロン力が細胞膜の弱い部分を破壊し、細胞膜に穴が開く電気穿孔と呼ばれる現象が生じる。生じた穴が修復できないほど大きな場合、微生物は死に至る。電気穿孔に必要な電位差である 1V を微生物にかけるためには、微生物の大きさが 1 $\mu\text{m}$  であると仮定すると、外部から 10kV/cm の電界強度を持つ電界を印加することが必要になる。実際に、高電圧パルス殺菌では、数 10kV/cm 以上の高電界のパルスを複数回繰り返して印加している。ただし、パルスは通電時間が数  $\mu\text{s}$  以下と短いことから、パルスで発生するジュール熱は小さく、結果として非熱的な殺菌処理が可能である。一方、交流高電界の場合は、食品中に常に電流が流れるため、大きなジュール熱が発生し、食品の温度を昇温させてしまう。また、ジュール加熱で用いられる 1000V 出力の交流電源で高電界を得るために電極間隔を 1mm 程度に狭めている。1mm の電極間隔に 1000V の電圧を加えれば、電極間に 10kV/cm の電界が印加されることになる。ただし、電極間で高電界を印加された食品には、大量な電流が流れ込み、ジュール加熱による急激な温度上昇が生じ、狭い電極間を素早く通過させる必要があるため、対象となる食品は粘度の低い液体食品に限られる。大腸菌添加したモデル液に電界強度の異なる交流高電界を印加したところ、5kV/cm 以上の電界を印加したときに残存大腸菌数が大幅に減少することが分かった (図 5)。ただし、電界強度が高くなるほどジュール発熱の量が多くなるため、グラフの添え字のように液体の温度は電界とともに上昇し、このような大腸菌の殺菌が電界効果によるものかジュール加熱の温度によるものか区別がつかなくなる。そこで、電気伝導度の異なるモデル液を用意し、液体の到達温度が設定した値になるように加える電界を調整し交流高電界加熱を行った。実験結果を到達温度が一定の条件で電界強度が残存大腸菌数に与える影響をプロットした (図 6)。この結果より、材料の温度履歴が同一の場合、電界強度に比例して残存大腸菌数の対数が減少することがわかった。ただし、材料の到達温度が 65℃ と 70℃ で比較したところ、70℃ のほうが残存大腸菌数の減少率がかなり大きくなることがわかった。つまり、交流高電界による大腸菌の殺菌は高電界の効果とジュール熱による熱的な効果の相乗効果により殺菌されたといえる。

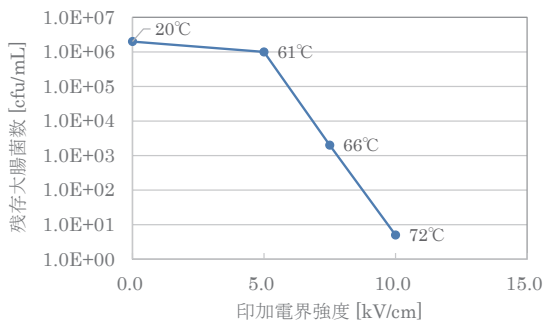


図5 交流高電界の電界強度が残存大腸菌数に与える影響  
添え字は液体の最高到達温度を示す。

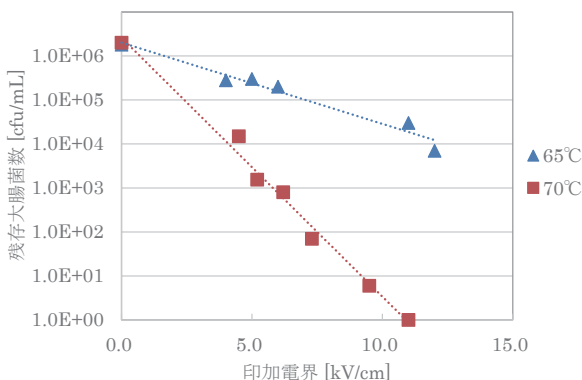


図6 材料の温度履歴を一定にした場合、印加電界が残存大腸菌数に与える影響

## 2-2 芽胞の失活<sup>5)</sup>

交流高電界による食品中の耐熱性芽胞の失活を考えて、電界強度を 11.5kV/cm まで高くしたが、芽胞は殆ど失活しないことが分かった。高電圧パルスの研究では 40kV/cm 以上の電界で漸く失活し始めた例と、失活しない例が報告されていた。つまり、耐熱性芽胞の芽胞は強固な孢子膜や外皮で覆われており、高電界による電気穿孔が生じるとは考え難い。そこで、芽胞の場合は電界効果よりも、ジュール加熱の温度による失活を目指した。具体的には、0.6 MPa 程度の加圧下で液状食品が沸騰しない状態で、交流高電界を印加し、110℃程度の温度まで材料を瞬間的に昇温した。その結果、材料に添加した芽胞が従来加熱に比べて短時間で失活することが分かった。図7に従来法の加熱および交流高電界の保持温度時間を変化させたときの失活速度変化のアレニウスプロットを示した。図より、

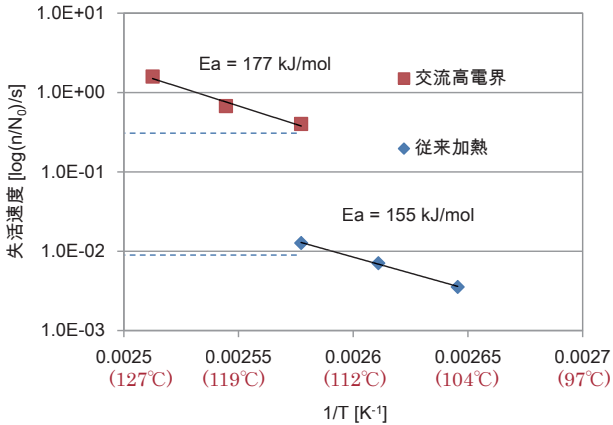


図7 従来法の加熱処理と交流高電界の保持温度における芽胞の失活

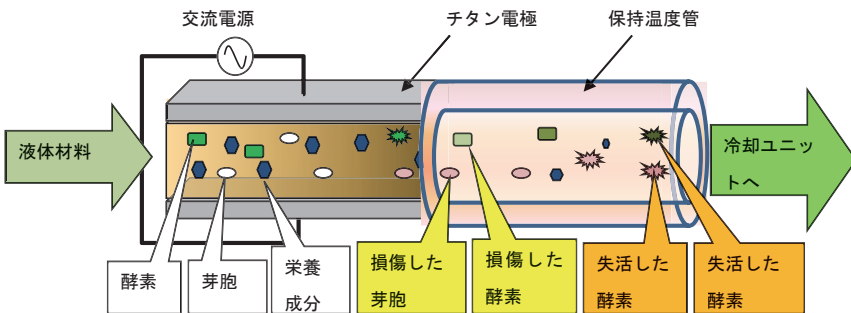


図8 交流高電界による枯草菌芽胞失活のモデル

従来の加熱に比べて、交流高電界後の保持温度部で、約40倍の失活速度になっていることが推察された<sup>6)</sup>。図8に交流高電界加熱(HEF-AC)による芽胞の失活のモデルを示した。交流高電界加熱による食品中の芽胞の失活は、印加した電界により、材料中を流れる大量の電流と、それによる急激な温度上昇によって芽胞が何らかの損傷を受けたことにより、芽胞の耐熱性が低下し、その後の保持温度で急速に失活したものと考えられた。

### 2-3 交流高電界装置

交流高電界加熱装置の概要を図9に示した。構成的には高温短時間加熱(UHT)の加熱部分を交流高電界用電極ユニットに置き換え、温度保持部分を短縮したものである。したがって、装置の大きさは非常にコンパクトになる。交流高電界用

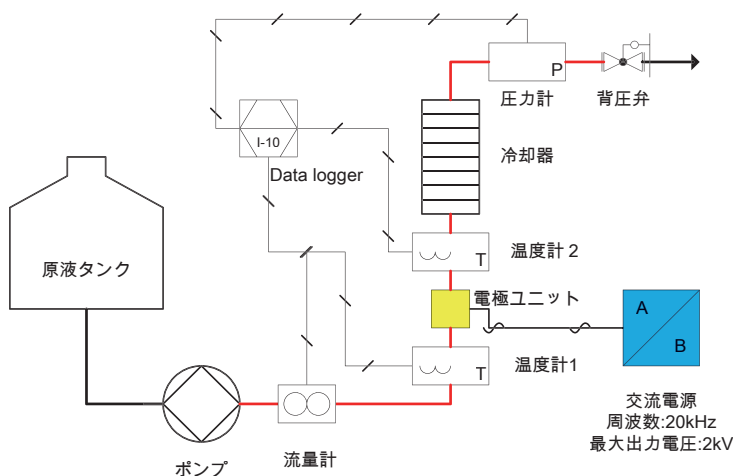


図9 交流高電界加熱装置の概要

電源としては、食品材料および電極の電気分解を避けるために、20kHzの周波数の交流で1kV程度の高電圧の交流電源を用いている。小型の交流高電界加熱では、2mm離れたチタニウム製の並行平板電極に1000ボルトの電圧をかけることにより、電極間には、5000V/cmの高電界が生じる。電極間を約2m/sの速度で液体食品を流した場合、液体は0.01s以内に昇温される。

#### 2-4 各種微生物に対する殺菌効果<sup>7)</sup>

交流高電界加熱の最高到達温度が各種微生物の失活に与える影響を表1に示した。交流高電界加熱の処理条件は、最高到達温度に達してからその温度を1秒間保持し、直ちに冷却したものである。表1の左側2菌種は栄養細胞であり、右側の4菌種は細菌芽胞である。栄養細胞の場合、印加した高電界が細胞膜に穴を開けることにより、一瞬で死に至らしめる。一方、耐熱性の芽胞の場合は、交流高電界は、高電界と交流電流による急激な温度上昇により損傷を与えたことにより、交流高電界印加後の保持温度部分における失活速度が従来加熱処理の10倍から100倍早い速度で失活したと考えた(図7)。したがって、交流高電界後の保持温度時間を1sに短縮することが可能となった。つまり、交流高電界加熱により、栄養細胞から芽胞まで広範囲な微生物に対して従来の加熱処理よりも短い加熱時間でそれらを失活させることが可能となる。

## 2-5 交流高電界加熱による品質変化<sup>8)</sup>

交流高電界加熱と超高温短時間加熱（UHT）の食品中の温度履歴の一例を比較すると、交流高電界は、0.01s で目的の温度に達し、1s の温度保持後、直ちに冷却に入るのに対し、UHT は 30s で目的の温度に達し、30s 温度保持後、冷却に入っている。したがって、食品が 100℃ 以上の高温となっている時間で比較すると、交流高電界が 5s なのに対し、UHT はその 10 倍の 50s 要している。加熱時間が短いほど、熱に弱い食品材料中の香気成分や栄養成分の多くを保持することになる。例えば、搾汁直後のオレンジジュースに交流高電界加熱（HEF-AC）および同程度の殺菌効果となる UHT 処理を施し、オレンジジュース中の有用な栄養成分として、βカロテンおよびビタミン C の変化を測定した（図 11、図 12 参照）。その結果、HEF-AC 処理は、UHT 処理よりも、熱に弱い栄養成分を多

表 1 交流高電界による各種微生物の失活

Temperature	<i>S.cerevisiae</i>	<i>E.coli</i>	<i>B.subtilis</i>	<i>B.cereus</i>	<i>A.acidocaldarius</i>	<i>Geo.stearothermophilus</i>
65℃	○	△				
70℃	○	○				
110℃			×	×		
115℃			△	△	×	
120℃			○	○	○	×
130℃			○		○	×
135℃						△
140℃						○

○ : 99.9%以上、△ : 99%以上、× : 90%以上殺菌

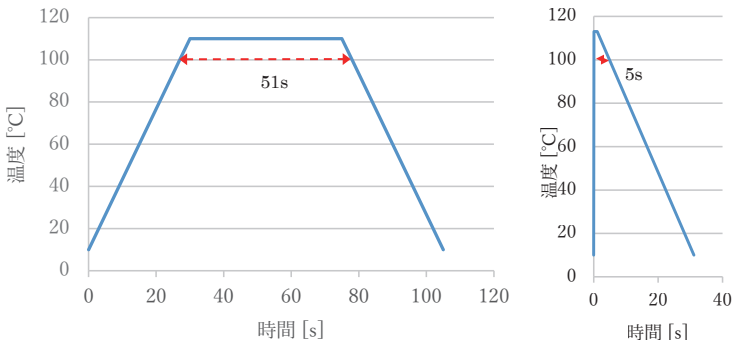


図 10 交流高電界と UHT の温度履歴



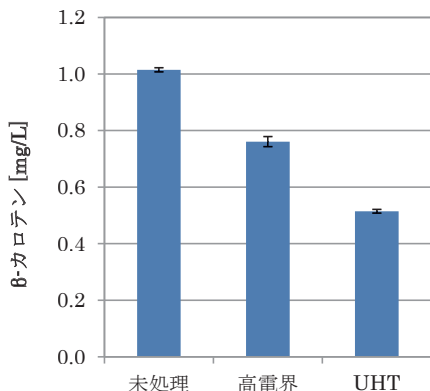


図 11 オレンジジュース中のβ-カロテンの残存量

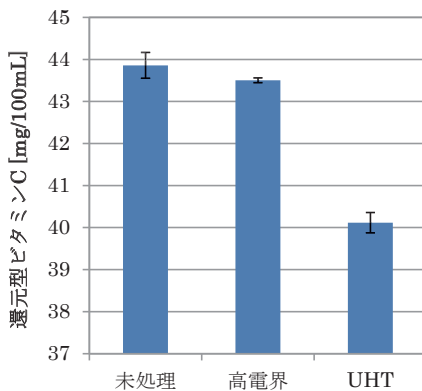


図 12 オレンジジュース中のビタミンCの残存量

く残存した。また、官能検査の結果からも HEF-AC 処理の方が生に近く、高い評価結果となることが確認されている。

## 2-6 交流高電界技術の実用化

食品総合研究所（現、農研機構食品研究部門）は、飲料メーカーおよび装置メーカーと共に、平成 15 年度中小食品産業活性化技術開発支援事業の中で、圧力容器を必要としない技術の改良に成功し交流高電界技術を確立した。平成 15～17 年度民間結集型アグリビジネス創出技術開発事業において開発した毎時 60 リットルの液体食品を処理できる装置によって、果汁、茶飲料、コーヒー飲料の殺菌など幅広く適用できることを実証してきた<sup>1)</sup>。また、平成 19～20 年度食品産業技術海外展開実証事業において、開発した毎時 2 トンの液状食品を殺菌できる装置によって、殺菌試験、製品の品質検査、製品の保存試験を行い、食品製造に問題がないことを確認した<sup>2)</sup>。さらに、事業終了後から現在まで、実際の製造ラインを模して、連続運転試験、装置の耐久性試験、製品製造コストの検討を重ねてきた。平成 25 年末、これらの成果を基に、毎時 5 トン処理可能な果汁製造ライン用の殺菌装置を導入し、レモン果汁製品を上市した。本装置を導入したことにより、従来のレモン果汁製品と比べて、褐変を 1/5 に、加熱臭を 1/4 に、ビタミン C の損失を 1/10 に減少されるなど、製品の品質を向上させることが可能となった。交流高電界技術は、特別な保守や消耗品が無いため保守コストが削減されること、必要な電気エネルギーは UHT よりも若干低減する可能性があることなど、実用化の妨げとなる問題はおおむね解決されている。

### 3. 短波帯交流電界

食品の安全性、利便性を考慮した結果、個別プラスチック包装のチルド食品や常温保存可能なレトルト食品が増加している。ただし、レトルト食品は、中心部を121℃の温度で30分以上保持するため、長時間の加熱が必要なことや、レトルト臭と呼ばれる加熱臭が発生すること、変色することなどの課題が残されていた。そこで、これらの問題に対処するために、水中短波帯加熱と呼ぶ加工方法を開発した。

#### 3-1 短波帯加熱の特長

短波帯とはこれまで述べてきた20kHzの周波数のジュール加熱や交流高電界と、わが国では電子レンジで用いられている2.45GHzのマイクロ波との間の3MHz～30MHzの周波数の交流のことである。したがって、ジュール加熱の均一加熱とマイクロ波加熱のプラスチック包材を透過する両者の特長を兼ね備えた交流であるといえる。ただし、マイクロ波ほど電磁波となり難いため、空気よりも水のような媒体の方がエネルギーを伝えやすいため、プラスチック包装した食品を水中に浸漬し、水の外から短波帯を印加した<sup>9) 10)</sup>。

#### 3-2 サンマの水中短波帯加熱

図13に、水中短波帯加圧加熱装置の構造を示した。円筒型加圧容器内に小径の円筒電極と大径の円筒電極を配置し、円筒電極間に60℃の加熱水を満たし、真空包装したサンマ4尾を放射状に水中に浸漬した。加圧容器の底からポンプでこの水を吸い出して、上から水を循環させて、容器内の水温が均一になるようにした。両円筒電極間に27MHzの短波帯交流を印加し、容器内の水及び真空包装したサンマを短波帯で同時に加熱した。図14に短波帯印加後の容器内の水の温度およびサンマ体内（中心部）の温度履歴を示した。図より、サンマの昇温速度が水の昇温速度より早いため、サンマ体内の温度は短波帯印加5分後に水の温度を上回り、17分のとき水温よりも10℃高い130℃に到達した。また、水中短波帯加熱は、17分間の短時間の加熱でサンマ体内に挿入した枯草菌芽胞を5対数以上失活し、サンマの背骨をそのまま食べられるほど軟化させることが分かった<sup>11)</sup>。

### 4. まとめと今後の展開

以上、交流電界を利用したミニマムヒーティングプロセスとして、味噌の連続通電加熱、果汁の交流高電界殺菌、魚の水中短波帯加熱の応用例について述べてきた。交流高電界技術は、殺菌だけでなく食品に含まれる酵素を失活することも利用されている<sup>12)</sup>。その他、短波帯連続加熱を利用した液卵や豆乳等たんぱく質を含む液体食品の殺菌への応用<sup>13) 14)</sup>が進められている。また、パルス電界を利用した乳酸菌の機能性発現<sup>15) 16)</sup>などの研究を実施しており、電気を利用し

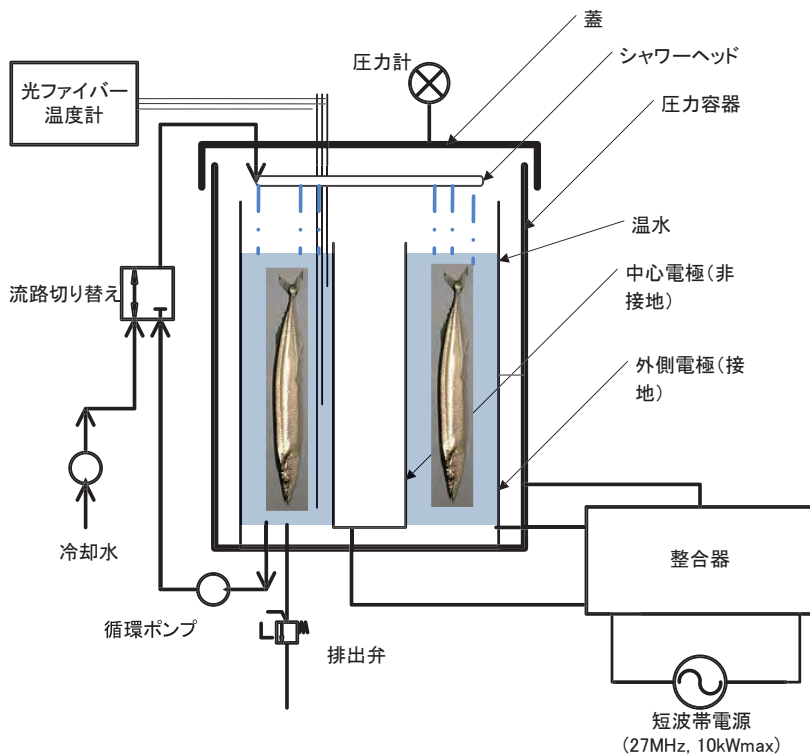


図 13 水中短波帯加圧加熱装置

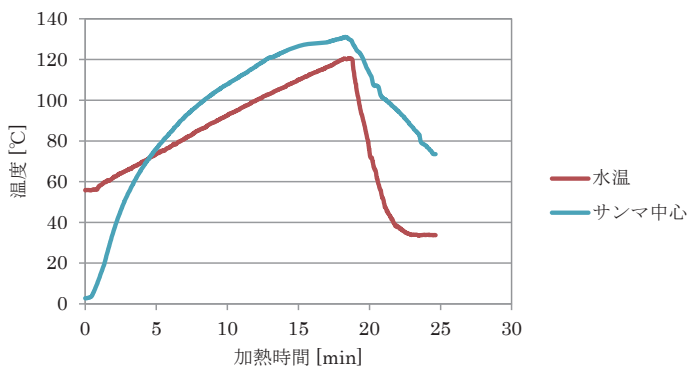


図 14 水中短波帯加熱による水温およびサンマ体内の温度履歴

表2 交流電界によるミニマムヒーティングプロセスのまとめ

	周波数範囲	電界強度	低温で 栄養細胞 の殺菌	高温で 細菌芽胞 の失活	プラス チック 包装食品	均一加熱	対象食品
高周波	3kHz ~ 30kHz	高電界（交 流高電界）	○	○	×	○	粘度の低い液体食品 （たんぱく質を多く 含むものを除く）
		低電界	×	○	×	○	粘度の高い液体食 品，固体食品
短波帯	3MHz ~ 30MHz	低電界	×	○	○	○	たんぱく質を多く含 む液体食品，粘度の 高い液体食品，固体 食品
マイクロ 波	300MHz ~ 3THz	低電界	×	○	○	△	あらゆる形状の幅広 い食品に対応

たミニマムヒーティングプロセスは殺菌だけでなく、食品の高付加価値化にも寄与する技術として広がりを見せている。

### 引用文献

- 1) 植村邦彦、小林功、井上孝司、中嶋光敏、交流高電界処理における電極内部の温度分布の解析、食品総合研究所研究報告、71、27-32、2007
- 2) 植村邦彦、高橋千栄子、小林功：日本食品科学工学会誌、63、11、516-519（2016）
- 3) 植村邦彦、高橋千栄子、小林功：日本食品科学工学会誌、63、12、575-577（2016）
- 4) K. Uemura and S. Isobe: J. Food Engineering, 53, 203（2002）
- 5) K. Uemura and S. Isobe: J. Food Engineering, 56, 325（2003）
- 6) K. Uemura, I. Kobayashi and T. Inoue: Food Science Technology Research, 15, 3, 211（2009）
- 7) 井上孝司、河原（青山）優美子、池田成一郎、土方祥一、五十部誠一郎、植村邦彦：日本食品工学会誌、8、3、123（2007）
- 8) 井上孝司、伊与田穰寿、池田成一郎、植村邦彦、五十部誠一郎：果汁協会報、596、1（2008）
- 9) 植村邦彦、高橋千栄子、小林功、短波帯加熱処理による包装済み味噌の酵素の失活、日本食品科学工学会誌、61、2、95-99（2014）
- 10) 植村邦彦、高橋千栄子、小林功、包装済み豆腐の短波帯殺菌、日本食品科学工学会誌、62、11、541-546（2015）

- 11) K. Uemura, S. Kanafusa, C. Takahashi and I. Kobayashi: *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 81, 4, 762-767 (2017)
- 12) 植村邦彦、高橋千栄子、小林功 : *日本食品科学工学会誌*, 63, 12, 575-577 (2016)
- 13) Uemura, K., Kobayashi, I.: *Journal of Food Engineering*, 100, 4, 622-626(2010)
- 14) Uemura, K., Takahashi, C., Kobayashi, I.: *Food Science and Technology Research*, 18, 3, 357-362 (2012)
- 15) Tetsuro Ohba, Kunihiro Uemura, Hiroshi Nabetani, Moderate pulsed electric field treatment enhances exopolysaccharide production by *Lactococcus lactis* subspecies *cremoris*, *Process Biochemistry*, Volume 51, Issue 9, September 2016, Pages 1120-1128
- 16) Tetsuro Ohba, Kunihiro Uemura & Hiroshi Nabetani, Changes in biosynthesis of exopolysaccharide in *Lactococcus lactis* subspecies *cremoris* treated by moderate pulsed electric field treatment, *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 81, 4, 724-734, 2017