ミニマムヒーティング（交流高電界，高周波パルス）による液体食品の高品質殺菌技術

植　村　邦　彦
（農研機構食品研究部門，〒305-8642 茨城県つくば市観音台 2-1-12）

High-quality sterilization for liquid foods by Minimum Heating (High Electric Field AC and High Frequency Pulse)

Kunihiko UEMURA
(Institute of Food Research, NARO)

要　旨

食品の加熱殺菌において安全性の向上と品質の確保はトレードオフの関係にある。ミニマムヒーティングは，電気エネルギーを利用することで微生物の殺菌に必要な加熱時間を短縮し，加熱による品質劣化を抑制するため安全性と高品質を両立できる殺菌方法である。ここでは，ミニマムヒーティングのうち清涼飲料の様な低粘度液体食品の殺菌に対応する交流高電界技術，ならびに果実や野菜のペースト状の高粘度液体食品に対応する高周波パルス技術について紹介する。

1. は じ め に

食品の安全性や保存性を高める殺菌・加工方法として加熱処理が一般に用いられているが，安全性を高めるための高温での長時間の加熱により食品の熱変性が問題となる。一方，電子レンジの様に電気エネルギーを用いた加熱方法は，食品を迅速に加熱することが可能である。しかしながら，電子レンジのマイクロ波加熱は，食品を均一に加熱することが難しいため，殺菌に利用することは問題が残る。そこで，電子レンジよりも低い周波数の交流を用いることにより，均一迅速加熱が実現する。マイクロ波よりも低い周波数の交流を食品に印加すると，食品中のイオンが交流の電界方向に従って振動する。振動するイオンが周囲との摩擦熱を生じることにより食品が発熱する。このような食品自身の発熱は内部加熱であり，通電加熱，ジュール加熱，誘電加熱などと呼ばれる。また，10 kV/cm 以上の高電界のパルスを食品に加えると微生物の中には温度上昇を伴わずに殺菌される高電界パルスと呼ばれる技術があり，加熱を伴わない非加熱殺菌技術として一部で実用化されている。ただし，微生物の中には細菌芽胞の様に高電界による殺菌効果が小さいものが中性の食品に混入する場合，安全性を担保するためには高温の加熱処理が必要となる。電気による加熱において，加熱時間を短縮することで，食品の高品質な殺菌を行うものをミニマムヒーティングと名付けた。ミニマムヒーティングは，対象とする食品の形状別に，レモン果汁の殺菌で実用化された「交流高電界」，ポテトサラダ等パウチ食品の高品質殺菌のための「水中短波帯加熱」，水産加工品の常温流通を実現する「水中短波帯加圧加熱」，果実ペーストなど高粘度液体食品を高品質な状態で長期保存可能と

* E-mail：uemura@affrc.go.jp

する「高周波パルス連続加熱」などの技術を開発してきた。ミニマムヒーティング技術は，食品の高品質化と長期保存を両立し，食品ロスの低減，さらには国産農産物の輸出促進に寄与するものとして期待されている。本稿では，ミニマムヒーティングのうち，低粘度の液体食品を連続的に殺菌する技術として開発した交流高電界技術と果実や野菜のペースト状の高粘度食品を殺菌する技術として開発中の高周波パルス連続加熱技術について紹介する。

2. 交流高電界技術

1996年に，日本各地で腸管出血性大腸菌O157による集団食中毒事故が多発した。これに対応するため農林水産省のプロジェクト研究が開始された。筆者はプロジェクトに参画し，電気的な処理により食品中の大腸菌を殺菌する研究に着手した。電気による非熱的な殺菌方法として既に知られていた高電界パルスは，微生物の細胞膜に穴をあける電気穿孔と呼ばれる効果により微生物を殺菌するもので，パルス幅が短い場合，加熱を伴わずに微生物を殺菌することが可能である。そこで，同じ電気を用いる通電加熱において，高電界パルスと同程度に電界を高くすれば電気穿孔が生じるのではないかと考え，狭い電極間に高電圧を印加し，食品に交流の高電界を加えた。交流高電界を印加された食品はジュール加熱による急激な発熱が同時に生じる。図1の交流高電界装置の場合，2 mmの電極間を2 m/sの速度で通過させることで必要以上に温度が上昇しないように運転している。交流高電界は，狭い電極間を素早く通過する必要があるため，処理できる試料は低粘度の液体食品に限られる。モデル液に添加した大腸菌を交流高電界処理したとき印加電界が残存大腸菌に与える影響を図2に示した。図より，印加電界が5 kV/cm以上となったときに残存菌数が優位に低下

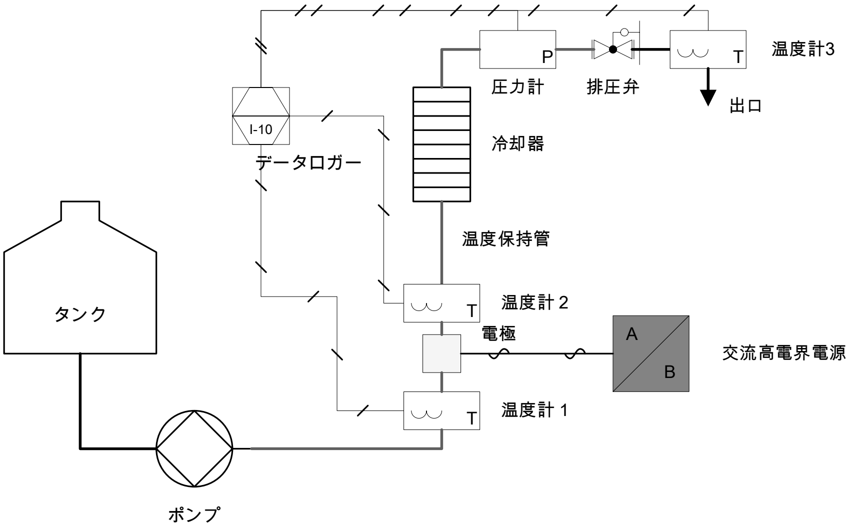

図1　交流高電界装置

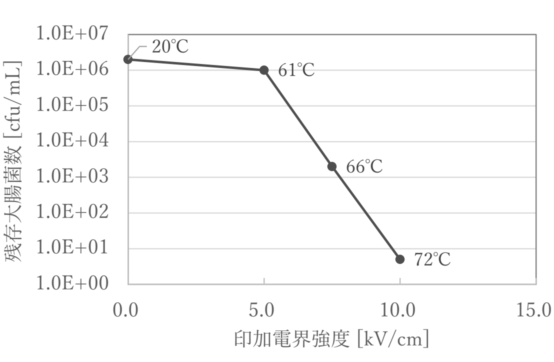

図2　印加電界が大腸菌に与える影響
沿字は液体の加熱温度を示す。

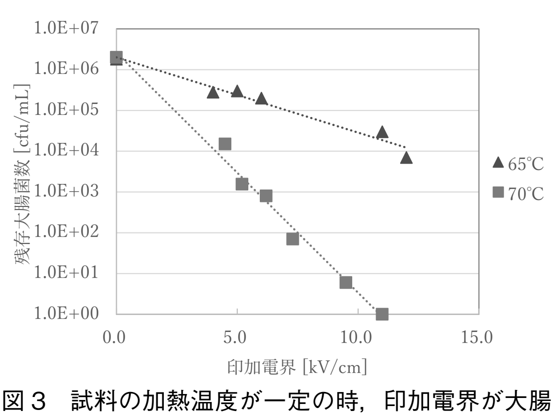

図3　試料の加熱温度が一定の時，印加電界が大腸菌に与える影響

することが分かった。また図3はモデル液の電気伝導率を変えることで加熱温度が同じ値となる条件で電界が大腸菌数に与える影響をプロットした。この結果，残存菌数の対数は印加電界強度に比例して減少し，加熱温度が高い方がその減少率が高くなることが分かった。つまり，交流高電界は大腸菌に対して，高電界と加熱温度の併用により，殺菌効果が高くなることを示している[1)]。一方，pH4以下の酸性飲料に好酸性耐熱芽胞菌（TAB）が残存した場合，腐敗臭の発生が問題となることから，耐熱性の高い細菌芽胞を失活することが要求された。液体試料添加した細菌芽胞に対して，10 kV/cmを超える交流高電界を印加した場合でも，細菌芽胞は失活しなかった。そこで，図1の装置のように出口に排圧弁を設け，系内の圧力を0.5 MPa以上に維持することで，交流高電界により，試料を沸騰せずに100℃以上に加熱することに成功した。交流高電界の印加により，0.1秒以内の短時間で100℃以上に加熱することで，液体試料中の細菌芽胞はヒートショックを受けて損傷し，温度保持中の失活速度が高くなったと考えらえられた。したがって，交流高電界は温度保持時間を短縮することが可能となった[2)]。また，加熱処理を伴う交流高電界技術はあらゆる微生物の殺菌に対応しており[3,4)]，従来の加熱殺菌に置き換えて製品を上市することが可能となった。また，交流高電界は殺菌と同時にペクチンメチルエステラーゼやリポキシゲナーゼなどの農産物が持つ酵素を効率的に失活する特徴がある[5)]。交流高電界で食品中の不要な酵素を失活することで食品の保存中の酸化や風味の変質を抑制し，食材の高い品質を長期間保存することが可能となった[6)]。食品メーカーおよび装置メーカーとの共同研究を実施しながら装置のスケールアップ，数々の商品化テストを経て2014年に食品メーカーから交流高電界殺菌によるレモン果汁製品が上市された。交流高電界は，細菌芽胞の殺菌に必要な加熱時間を従来加熱に比べて1/10以下に短縮できたことから，果汁本来の色やフレッシュな香気成分を保持し，製品の品質を高めることが可能となった。本技術は，果汁以外に一部の牛乳の殺菌にも利用されている。

3. 高周波パルス連続加熱

野菜や果実を粉砕してペースト状にしたものは，様々な加工食品の原料として広く利用される。また，未利用の農産物も利用できるため，廃棄ロスの低減にも有効である。破砕直後のペーストは，生果と同様の栄養成分や機能性成分を保持し，高齢者や乳幼児用の食品素材として有用であり，付加価値の高い食材である。しかしながら，野菜や果物を破砕すると細胞が破壊され，酵素反応が直ぐに始まり，各成分の酸化や分解が進むため，変色，風味の低下，栄養成分や機能性成分の変質が生じることが問題である。さらに，剥皮することにより微生物による腐敗が進行しやすくなることも問題である。そこで野菜や果物を破砕後，直ちに酵素失活と殺菌を行い，包装することが望ましい。酵素の失活や殺菌のためには加熱処理が有効であるが，生果の色や風味の熱変性を抑えた加熱方法として，前項の交流高電界技術の利用が効果的である。しかしながら，交流高電界は前項で述べた通り，低粘度の液体食品に限られており，ペーストのような高粘度の液体食品に対応しない。もし，ペースト状の高粘度液体食品に交流高電界を適用すると，ペースト食品が狭い電極間を通過する際，固形分や繊維分が電極間をブリッジした（図4）ときに瞬間的に大きな短絡電流が流れ，電源の保護回路が働くことで電気の供給がストップしてしまう。つまり高粘度の液体を電界加熱処理するためには，短絡を起こしにくい電極構造とし，電源は過電流を制御して安定的な電気を供給できるようにする必要がある。そこで，高粘度の液体を流した時に生じる不規則な電流変化に対応して電流を瞬時に制御可能な双極性の高周波パルス電源を

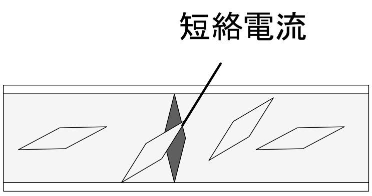

図4　高粘度液体食品の短絡

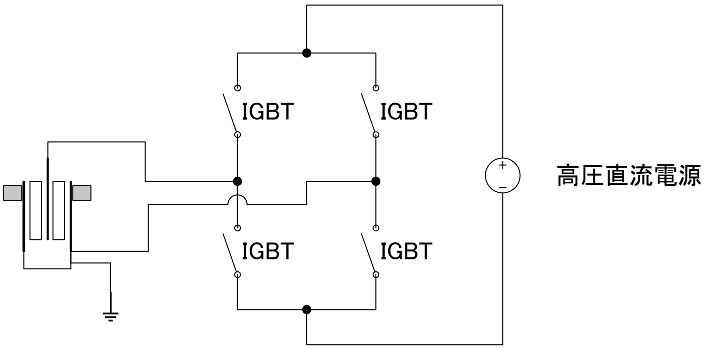

図５　高周波パルス電源回路

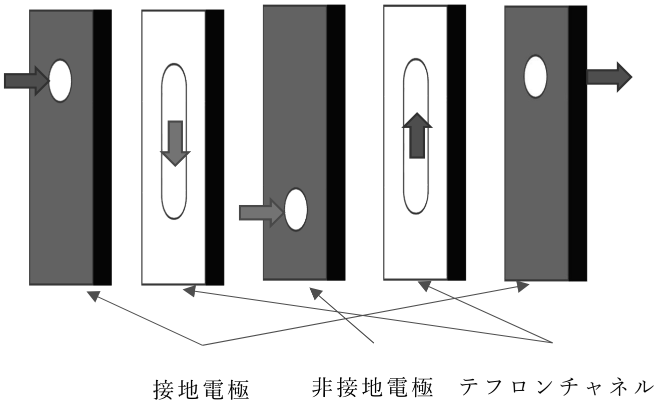

図６　３層電極構造

開発した（図5）。また，電極内の電界分布が一様となるように3層電極とした（図6）。そこで，図1の交流高電界システムの電源及び電極を新たに開発したものに置き換えて，高周波パルス連続加熱装置を作製した。剥皮したリンゴをミクログレーダーで破砕後，直ちに高周波パルス連続加熱装置を用いて図7に示すような温度履歴で加熱処理した。

高周波加熱処理（100℃，110℃，4秒）および従来加熱処理（70℃，80℃，30分）で処理した試料のポリフェノールオキシダーゼ活性を測定したところ図8に示す通り，全ての処理区でポリフェノールオキシダーゼを失活することが分かった。リンゴ本来のビタミンCの残存量を測定したところ，高周波パルス加熱はリンゴに含まれているビタミンCは高周波パルス加熱処理では減少することはなかったが，従来加熱処理で半分以下に減少した（図9）。また，5℃で1年間保存後の外観を図10に示した。高周波パルス加熱処理したサンプルは褐変することなく，長期間破砕直後の色を保存可能となる。GC-MSを用いた香気成分の分析を行ったところ，高周波パルス処理したサンプルは，未加熱に近い香り成分を維持していたが，80℃ 30分従来加熱したものは香気成分の熱変性が認められた。また，高周波パルス加熱で100℃以上に加熱すれば，あらゆる微生物，交流高電界と同様に耐熱性細菌まで殺菌可能だと考えられる。今後，高周波パルス連続加熱が，リンゴ以外の果物ピューレや野菜ペーストに応用され，フードロスの低減に寄与することが期待

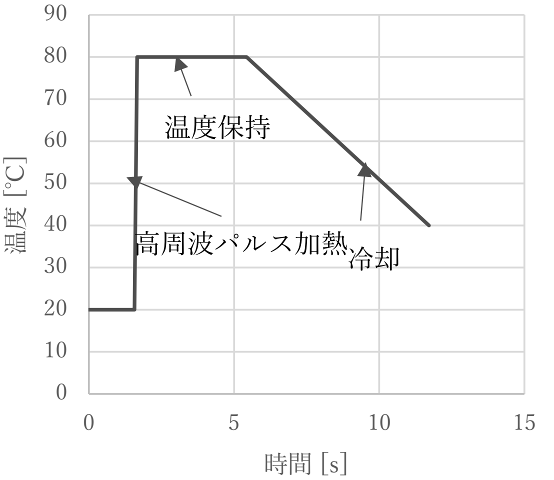

図７　高周波パルス加熱による温度履歴

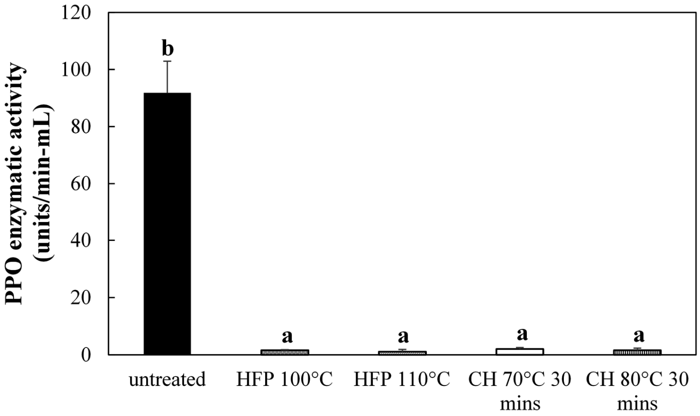

図８　高周波パルス加熱および従来加熱がポリフェノールオキシダーゼ活性に与える影響

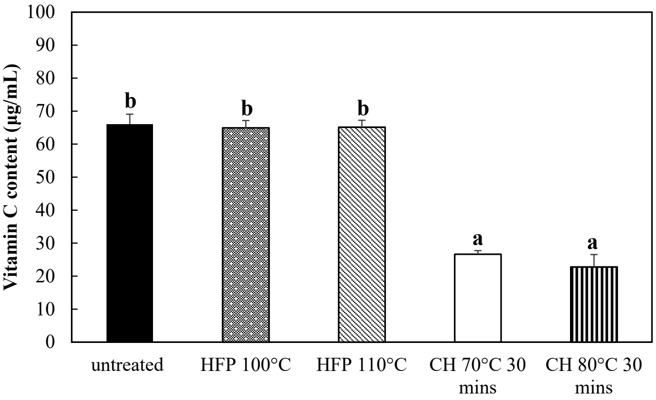

図９　高周波パルス加熱および従来加熱がリンゴのビタミンＣに与える影響

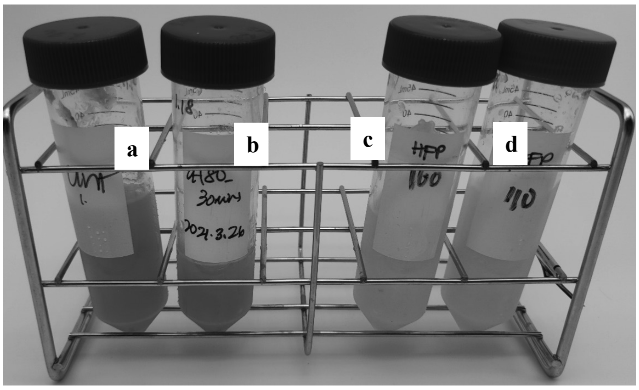

図 10　高周波パルス加熱および従来加熱処理したリンゴピューレの低温保管（5℃，１年間）後の外観　(a: untreated; b: CH 80℃; c: HFP 100℃; d: HFP110℃)

される。

4. お わ り に

ミニマムヒーティング技術として，交流高電界と高周波パルス加熱の有効性について紹介したが，その他，固体食品やパウチ包装したチルドパウチ食品に対応した水中短波帯加熱[7,8,9,10,11]，レトルトパウチ食品に対応した水中短波帯加圧加熱を開発した[12,13,14]。また，根茎野菜を丸ごと洗浄殺菌することに対応した高周波パルス水中高周波パルス加熱装置の開発も進めている。以上ミニマムヒーティング技術を用いることにより，農産物および加工食品を高品質な状態のまま長期間保存することが可能となり，食生活の向上，食品ロスの低減，和食の輸出促進，さらにはSDGs推進に寄与することが期待される。

参 考 文 献

1） Uemura K, Isobe S. Developing a new apparatus for inactivating Escherichia coli in saline water with high electric field AC, Journal of Food Engineering 53（3）203–207（2002）

2） Uemura K, Isobe S. Developing a new apparatus for inactivating Bacillus subtilis spore in orange juice with a high electric field AC under pressurized conditions, Journal of Food Engineering 56（4）325–329（2003）

3） 井上孝司，河原優美子，池田成一郎，土方祥一，五十部誠一郎，植村邦彦．交流高電界による各種微生物胞子の殺菌，日本食品工学会誌，8, 3, 123–130（2007）

4） Uemura K, Kobayashi I, Inoue T. Inactivation of *Alicyclobacillus acidoterrestris* in orange juice by high electric field alternating current, Food Science and Technology Research, 15, 3, 211–216（2009）

5） Uemura K, Takahashi C, Kobayashi I. Rapid Inactivation of Pectin Methylesterase in Tomato Juice Using High Electric Field Alternating Current, Food Science and Technology Research 21（1）7–11（2015）

6） Uemura K, Kobayashi I, Inoue T. Inactivation of *Bacillus subtilis Spores* in Orange Juice and the Quality Change by High Electric Field Alternating Current. Japan Agricultural Research Quarterly, 44, 1, 61–66（2010）

7） 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）

8） 植村邦彦，高橋千栄子，小林功．プラスチック包装された豆腐の短波帯殺菌，日本食品科学工学会誌，62, 11, 541–546（2015）

9） 植村邦彦．水中短波帯加熱によるポテトサラダの殺菌，農研機構研究報告食品研究部門，2, 15–19（2018）

10） Lara G, Takahashi C, Nagaya M, Uemura K. Application of radio frequency heating in water for extending the shelf-life of fresh-cut Japanese loquat fruit（Eriobotrya japonica）, Food Science and Technology Research 27（6）847–857（2021）

11） Lara G, Takahashi C, Nagaya M, Uemura K. Improving the shelf-life stability of vacuum-packed fresh-cut peaches（Prunuspersica L.）by radio frequency heating in water, International Journal of Food Science and Technology, 57, 6, 3251–3262（2022）

12） Uemura K, Kanafusa S, Takahashi C, Kobayashi I. Development of a radio frequency heating system for sterilization of vacuumpacked fish in water, Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 81, 4, 762–767（2017）

13） Kanafusa S, Takahashi C, Uemura K. The effect of radio-frequency heating on vacuum-packed saury（Cololabis saira）in water, Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 82, 9, 1576–1583（2018）

14） Jantapirak S, Takahashi C, Uemura K. Effect of radiofrequency heating of vacuum-packed nitrite-free sausage on quality properties and microorganism inactivation, Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 85, 4, 907–915（2021）