

報 文

交流高電界処理における電極内部の温度分布の解析

植村 邦彦[§], 小林 功, 井上 孝司*, 中嶋 光敏

食品総合研究所, * (株) ポッカコーポレーション 中央研究

Computer Fluid Dynamics study on heating liquid food by High Electric Field AC

Kunihiko Uemura[§], Isao Kobayashi and Takashi Inoue*, and Mitsutoshi Nakajima

National Food Research Institute, 2-1-12 Kannondai, Tsukuba, Ibaraki 305-8642

*Pokka co., Shikatu, Kitanagoya, Aichi 481-8515

Abstract

High Electric Field Alternating Current process inactivates microorganisms in liquid food. The inactivation was caused by both high temperature and high electric field. In this study, the temperatures both high temperature and high electric field in saline solution and orange juice were analyzed numerically. The highest temperature was obtained at the edge of electrodes and the lowest was at the center. The temperature differences in saline solution and orange juice were 8°C and 15°C, respectively. Those were decreased with increasing flow speed and improving the shape of electrode pattern. This CFD study contribute to design HEFAC electrodes.

交流高電界技術は、食品成分の熱による劣化を最小限に抑えながら液状食品の殺菌や液状食品素材の酵素失活等を効率的に行う処理方法として植村らによって開発された^{1,2)}。液状食品に交流電界を印加した場合、食品が持つ電気伝導率に比例した電流が流れることから、食品自身が発熱するジュール加熱または通電加熱と呼ばれる現象が生じる。また、電界強度が殺菌対象の微生物の細胞の両端に1V以上の電位差が生じるような電界を印加すると、細胞膜に穴が開く現象（電気穿孔）が知られている³⁾。電気穿孔によって微生物が死に至る確率は、微生物が含まれている材料の温度が高いほど高くなることが報告されている⁴⁾。従って、交流高電界処理は通電加熱による温度上昇と細胞膜の電気穿孔の相乗効果のため、加熱だけの殺菌に比べて100分の1以下の短時間処理で微生物の殺菌が実現するものと考えられているが、交流高電界の殺菌メカニズムが十分に解明されているとは言い難い。殺菌メカニズム解明

のためには、材料に印加された電界強度と温度履歴を正確に把握する必要があるが、実際の交流高電界処理に用いられる電極間には5kV/cm以上の電界が生じているため、そこに熱電対等のセンサーを挿入して直接材料の温度を測定することは不可能である。そこで、本研究では、流れる液状食品に電界を印加したときに材料にどのような電界が印加されて、加熱されるのかを数値的に検証した。また、電極形状を変えたときに、材料に印加される電界や温度変化を知ることは、電極の設計にとっても重要な情報となる。そこで、本研究ではいくつか電極パターンを変えたときの温度分布を数値計算で求めた。

実験方法

(1) コンピュータのハードウェアおよびソフトウェア

コンピュータはDell製Dimension XPS (CPU:Pentium4,

2006年12月22日受付, 2007年1月29日受理

[§] 連絡先 (Corresponding author), uemura@affrc.go.jp

表 1. 各材料の物性値 (27℃)

物性値	テフロン	チタニウム
密度 [kg/m ³]	2200	4510
比熱 [J/kg/K]	1050	580
熱伝導率 [W/m/K]	0.25	16.1
電気伝導率 [S/m]	1x10 ⁻¹⁸	6.0x10 ⁵

3.0GHz) を用い、シミュレーションソフトは米国ACE社製CFD-ACE ver.2006の、乱流モデル、熱伝導、電磁気モジュールを使用した^{5,6)}。

(2) 材料の物性値

電極ユニットを構成する電極材料のチタニウムおよび絶縁材料のテフロンの各物性値の温度変化による変動は無視し、表 1 の文献値を用いた。

対象試料の0.01% (W/V) 濃度の食塩水および100%オレンジジュース (Brix 11) は自身の温度変化に応じて物性値が変動することを考慮した。食塩水の密度、粘性率、定圧比熱は、0.5MPaの圧力における273.15K, 300K, 320K, 340K, 380K, 420Kの各温度の純水の物性値⁷⁾を用いた。オレンジジュースの定圧比熱および熱伝導率は純水の物性値 (文献値⁷⁾)を用いた。オレンジジュースの密度、粘性率、電気伝導率および食塩水の電気伝導率は以下に示す方法で実測し、測定値を補完する近似曲線を求め、近似曲線のグラフから273.15K, 300K, 320K, 340K, 380K, 420Kの温度における各物性値を読み取った。

① 電気伝導率の測定

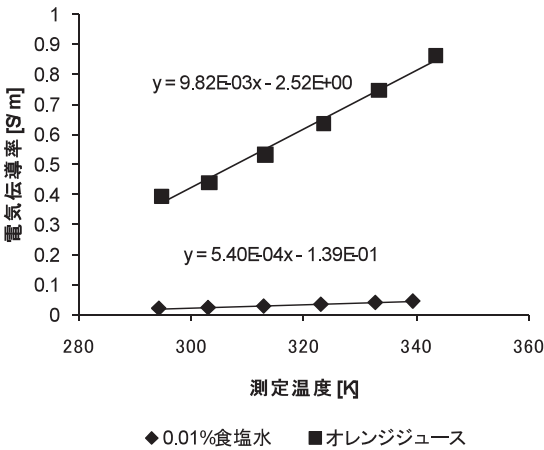
ガラス容器の内壁面に密着させた60mm X 60mmの大きさのチタニウム製平行平板電極 (電極間隔25mm) に試料を充填し、ガラス容器を恒温槽内で所定の温度になったときの試料の10kHzの周波数における抵抗値をインピーダンスメータ (NF回路ブロック製、2330A) で測定し、各温度における電気伝導率を求めた。図 1 (a) に食塩水およびオレンジジュースの電気伝導率の測定結果を示した。

② 密度の測定

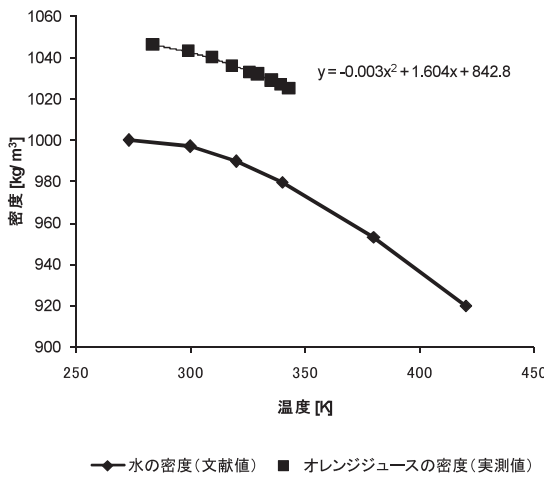
オレンジジュースの各温度における密度は定法に従って測定した。図 1 (b) には測定したオレンジジュースの密度と純水の密度 (文献値⁷⁾)を示した。

③ 粘性率の測定

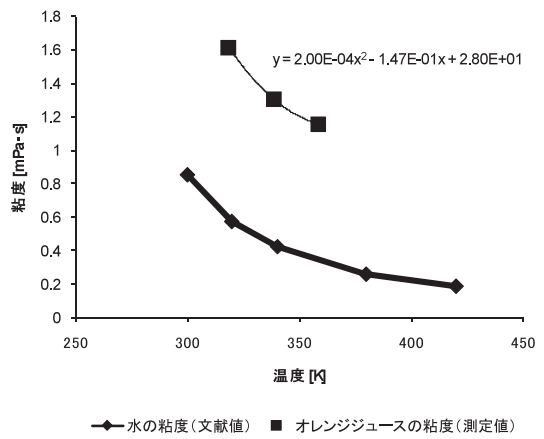
高速回転型回転粘度計 (HAKKE社製, ROTOVIS-



(a) 食塩水およびオレンジジュースの電気伝導率



(b) 食塩水およびオレンジジュースの密度



(c) 食塩水およびオレンジジュースの粘度

図 1 オレンジジュースおよび食塩水の物性値

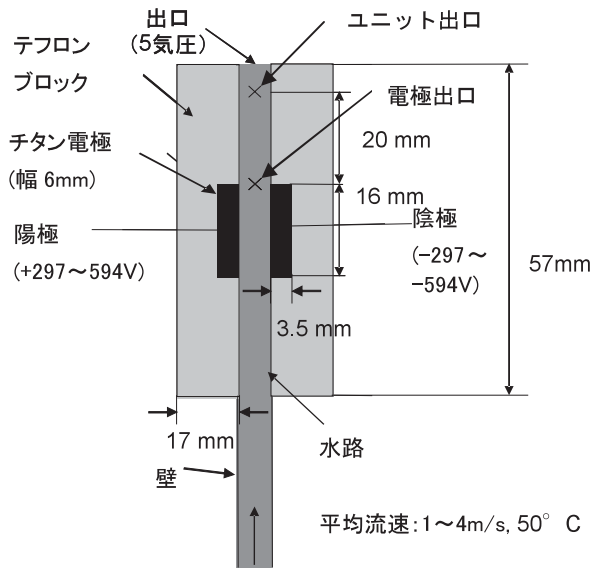


図 2 電極ユニット縦断面の模式図

CO) を用いて、最大回転数256rpmにおける粘性率を測定した。図 1 (c) には測定結果および純水の粘性率 (文献値⁷⁾) を示した。

(3) 計算条件

電極の構造は実際の交流高電界処理装置に用いた電極部と同一寸法とし、電極間隔 1 mmとした平行平板電極に $\pm 0 \sim 500\text{V}$ の定電圧を印加したモデルについて検討した。電極部の流れ方向に沿った縦断面図を数値モデル化した (図 2 参照)。材料は初期温度 50°C 、流速 60L/h で図の下から電極部に入り上から出るものと仮定すると、電極間を流れる材料のレイノルズ数は20,000となるため、材料の流れを乱流モデルと仮定した。材料と電極内部の壁面との境界速度を 0m/s とした。実際の熱電対は電極出口から20mm離れた管内の中心部に設置しており、その点の温度をユニット出口温度 (処理温度) とした。材料の処理温度が 100°C 以上まで上昇する場合を想定し、系内の圧力を 0.5MPa とした。

実験結果と考察

(1) 食塩水の計算結果と計算の収束条件

食塩濃度 0.01% (W/V)、温度 50°C の食塩水を 2m/s の速度で流し、 11.8kV/cm の電界を印加した場合、計算時間 0.1s から 1.0s まで変化させたとき、電極入口、電極出口およびユニット出口の管内の中心温度の計算値を図 3

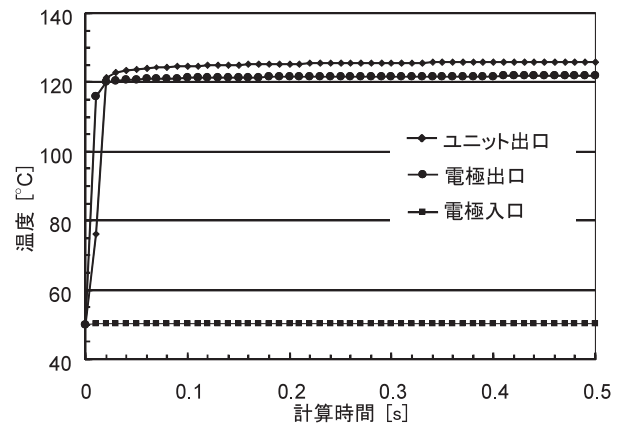
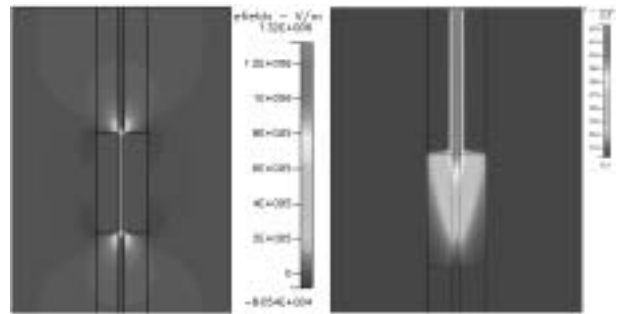


図 3 食塩水の交流高電界処理における時間経過と各部の温度変化



(a) 電界分布

(a) 温度分布

図 4 電極ユニット縦断面の電界分布および温度分布

にプロットした。図より、 50°C の温度で電極ユニットに入った食塩水は 0.01s 後には電極出口で 100°C まで昇温し、 0.02s 後には最高温度に近い 120°C まで昇温した。ユニット出口温度は電極出口から 0.01s 程度遅れて昇温し、 0.03s 以降は電極出口中央部の温度を上回り、 0.5s でほぼ一定の値に収束することが分かった。

(2) 食塩水の温度分布

通電開始後 0.5s 後の電極縦断面の電界強度分布を図 4 (a)、温度分布を図 4 (b) に示した。平行平板電極で作られる電界は電極間ではほぼ均一の値となった。均一な電界を通過する材料は電極出口部分で急速に温度が上昇し、電極出口部の電極に接している部分で最高温度になることが分かった。電極出口横断面の温度分布およびユニット出口部の横断面の温度分布の計算結果を図 5 にプロットした。図より、電極ユニット出口部の電極近傍の最高値と中心の最低値の温度差は 2°C であったのに対し、電極出口部の電極近傍の最高値と中

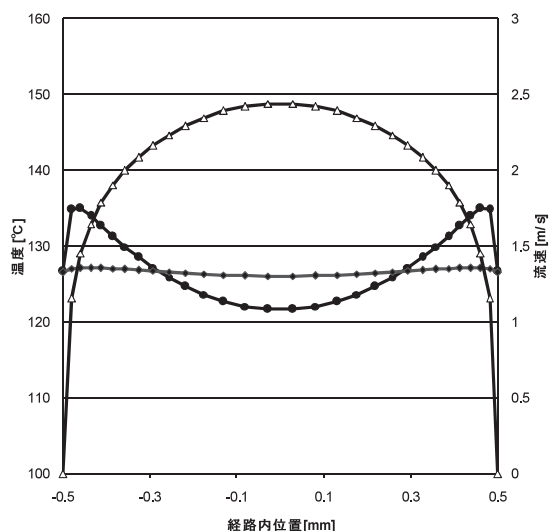


図5 電極出口およびユニット出口横断面の温度分布と流速分布

心の最低値の温度差は22℃と大きくなることが分かった。また、そのときの電極出口部横断面の流速分布は図5に示したように両端の電極に近い部分の流速が遅いことから、その部分で温度が上昇したためだと考えられた。以上より、食塩水に交流高電界を印加した場合、ユニット出口部の中心温度（温度計測点）に比べて、電極出口部で最大8℃高くなることが分かった。

(3) 食塩水の流速を変えたときの温度分布

材料の流れを速くすると電極の通過時間が短くなるため、ユニットの出口温度が低下するが、流速の変化にかかわらずユニット出口の温度が120℃になるように電極に印加する電圧を調整した。図6に食塩水の流速を変えた場合に温度差の変化を示した。ただし、温度差は、電極出口の電極付近の最高温度とユニット出口の中心部の温度との差とした。図より、流速が早くなるほど温度差が小さくなることが分かった。

(4) オレンジジュースの温度分布

表1で示した物性値を有するオレンジジュースに交流電界（2.08kV/cm）を印加した場合のシミュレーション計算を行った。計算時間0.5sのユニット出口部および電極出口部の温度分布を図7に示した。図より電極出口部の電極近傍の最高値と中心の最低値の温度差は最大21℃となることが分かった。この結果はオレンジジュースの粘度が食塩水の粘度より約1mPa/s高いことから（図1（c））、電極を通過する材料の流速分布が図7に示したような形になり、電極に接する速度の遅い部

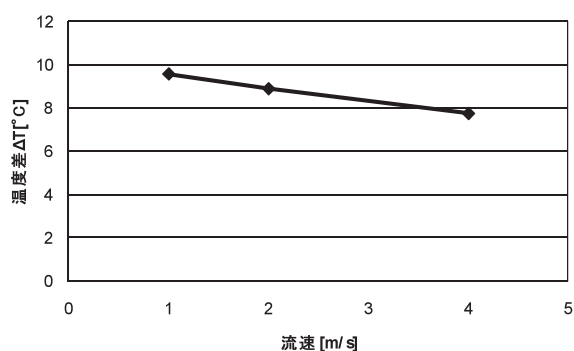


図6 食塩水の流速を変えたときの温度差の変化

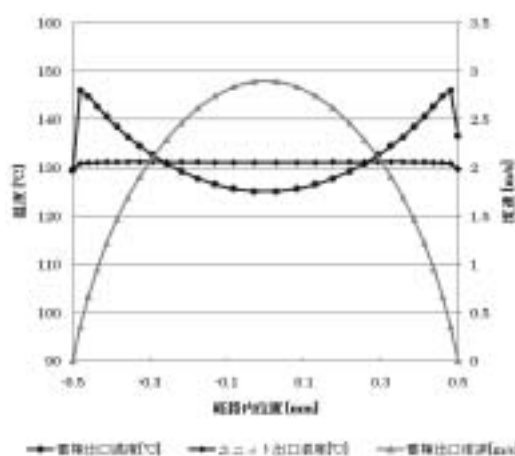


図7 オレンジジュースの電極出口およびユニット出口の横断面の温度分布と流速分布

分の割合が多くなったためだと考えられた。オレンジジュースに交流電界を印加した場合、ユニット出口部の中心温度に比べて、電極出口部で最大15℃高くなることが分かった。

(5) 電極パターンを変えたときの温度分布

16mmの電極長を2mm毎の8つのブロックに分割し、そのうち、4ブロックをチタン電極、残りの4ブロックをテフロンブロックとし、電極ブロックとテフロンブロックの並べ方をA、B、Cの3通りに変えて計算を行った。A,B,C各電極パターンとそのときの温度分布をそれぞれ図8（a）,（b）,（c）に示した。A、B、Cタイプの電極による出口の温度差は、それぞれ $\Delta T_A=20.3^\circ\text{C}$ 、 $\Delta T_B=25.0^\circ\text{C}$ 、 $\Delta T_C=20.1^\circ\text{C}$ となった。電極近傍の材料の温度上昇には、その部分の流速、電極を介した放熱、材料の攪拌が影響している。つまり、Aのパターンは4つの電極が一体化しているため電極全

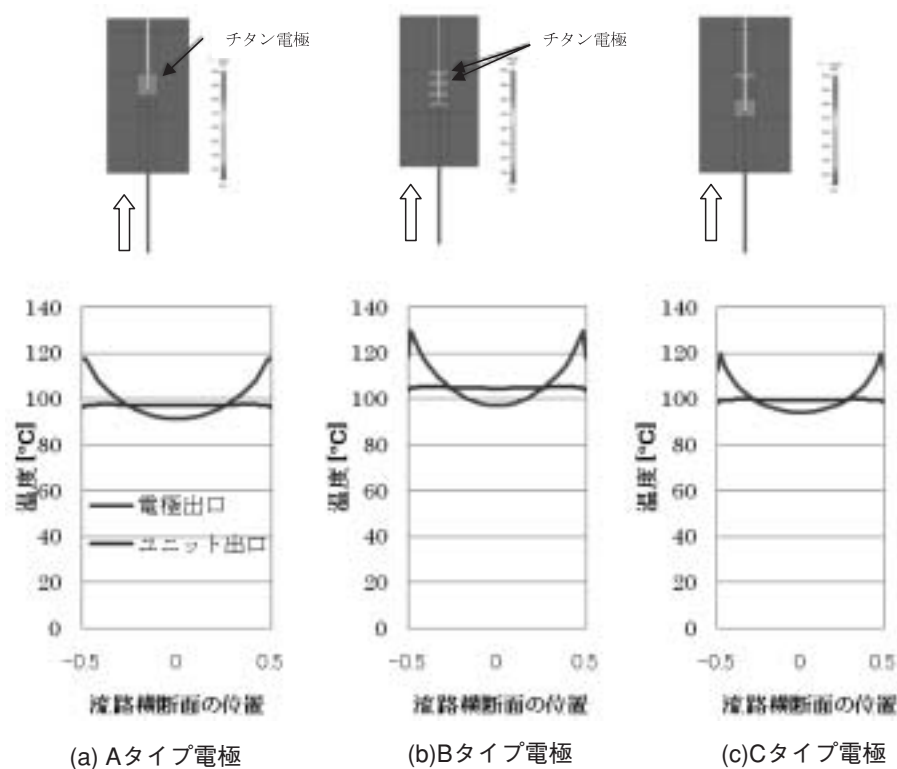


図 8 3 タイプの電極による電極出口およびユニット出口横断面の温度分布

体からの放熱量が最も高く、BやCのパターンの場合 (b) (C) 電極出口の温度分布で見られるような鋭いピークが現れなかった。Bのパターンは4つの電極が断熱性の高いテフロン材料で分離しているため放熱量が最も低く、出口部の温度がAやCのパターンより高くなった。Cのパターンは最終段の電極の間に4ブロック（8 mm）の絶縁部分があり、その間の攪拌で温度の均一化され、ピーク温度がBのパターンほど高くなかったものと考えられた。

要 約

液状食品の交流高電界処理において、電極内部を流れる食塩水及びオレンジジュースの温度分布をコンピュータシミュレーションを用いて計算した。計算の結果、電極出口部の電極に接している部分の温度がもっとも高くなり、中心部のもっとも温度が低い部分との差は食塩水の場合とオレンジジュースの場合で、それぞれ、8℃、15℃となった。その温度差は材料の流速を早くすることや電極構造を変えることによって小さくすることが可能であることが分かった。

文 献

- 1) Uemura, Kunihiko and Isobe, Seiichiro. *Developing a new apparatus for inactivating Escherichia coli in saline water with high electric field AC*.: *J.Food Engineering*. 53. 203-207, 2002.
- 2) Uemura, Kunihiko and Isobe, Seiichiro. *Developing a new apparatus for inactivating Bacillus subtilis spore in orange juice with a high electric field AC under pressurized conditions*. : *J.Food Engineering*. 56, 325-329, 2003.
- 3) Coster, H. G. L. and Zimmermann, U. *The mechanism of electrical breakdown in the membranes of valonia utricularis*. : *Journal of Membrane Biology*, 22, 73-90, 1975.
- 4) Zhang, Q., et al. *Inactivation of E.coli and S.cerevisiae by pulsed electric fields under controlled temperature conditions*.: *American Society of Agriculture Engineering*, 1-2351, 381-587, 1994.
- 5) Giridharan M.G., ほか. *Multi-disciplinary CAD system for MEMS*. : *Journal of Modeling and Simulation of Microsystems*, Vol. 2, No. 1, 43-50, 2001.

- 6) Kobayashi Isao, Mukataka Sukekuni and Nakajima Mitsutoshi. *CFD Simulation and Analysis of Emulsion Droplet Formation from Straight-Through Micro-channels.*: Langmuir, 20, 9868-9877, 2004.
- 7) 伝熱工学資料.: 日本機械学会, 1986.