

通電加熱技術を利用した食品加熱試験 —— 固液混合食品の昇温特性 ——

熊林義晃・金野利春*・河野慎一

Heating Property of Liquid-Solid Mixtures during Ohmic Heating

Yoshiteru KUMABAYASHI, Toshiharu KONNO, Shinichi KONO

Ohmic heating is the technique that heats food by passing electricity through it. The foods that do not contain solids are heated virtually simultaneously all over by ohmic heating because these foods have uniform electrical conductivity. Conversely, the foods that contain solids do not heat uniformly. The passing of current through liquid and solid food do not have the same value because liquid and solid food each have a different electrical conductivity.

This study investigated heating properties of liquid-solid mixtures during ohmic heating. Ohmic heating was used to sterilize and cook white potatoes in a salt solution. This study also investigated the heating properties using autoclave and ohmic heating simultaneously.

The heating properties of white potatoes are complex on account of their position in the liquid. The heating of liquid-solid mixtures using autoclave and ohmic heating at the same time is a valuable method in reducing the difference of F values between liquid and solid food.

食品を加熱する場合、熱源として水蒸気、熱水等の熱媒体によって間接的に食品を加熱する方法が一般に用いられている。このような熱伝導による加熱では、最も遅い被加熱部は固形物の中心である。殺菌等を目的として加熱する場合、設定される温度条件は、固形物の中心という最も加熱されにくい部分に適用されなければならない。このような熱源の加熱処理では、レトルト殺菌技術に代表されるように液状物や固形物表面が過加熱となるため、食品の品質にとって好ましくない。

通電加熱技術は、食品自体を電気導電体とみなし、交流電流を流すことにより食品自体を内部から直接発熱させる技術であり、食品全体を加熱できること、加熱効率が低いこと、迅速加熱が可能なことなどの特徴を有している。

加熱の対象となる食品の形態として、固形食品や液状食品など食品成分がほぼ均一に分布していると考えられ

る食品（均一系）と固形食品と液状食品とが混合した状態の食品（固液混合系）とがある。

通電加熱技術は、食品に電圧を印加して電流を流すことで発熱させるので、食品がもつ導電率によって発熱量が変化する。均一系の食品では導電率もほぼ均一と考えられるので均一な加熱が容易であると考えられる。通電加熱技術が実用化されているのは水産練り肉の加熱によるかまぼこの製造、パン粉用パンの焼成、豆乳加熱によるとうふの製造など均一系の食品が多い^{1) 2) 3)}。さらにみその殺菌、ウインナーソーセージ練り肉の加熱、こんにゃくの製造など実用化の検討がなされている^{4) 5) 6)}。

一方で混合系の食品はおでんの加熱などの検討がなされているが、実用化例は少ない⁷⁾。

固液混合系の食品を用いた通電加熱試験の報告例として調味液と、ニンジン、ダイコン、つみれ、ちくわなどをを用いたものがある^{8) 9)}。

* 北海道電力株式会社総合研究所（〒067-0033 北海道江別市対雁 2-1）

固液混合系の食品は、一般に液状部分と固形部分とで導電率が異なり、電流が均一に流れにくいと予想され、均一に加熱することは技術的に難しいと考えられる。

本研究では、通電加熱技術を固液混合食品の加熱に利用した場合の昇温特性について検討を行った。

固液混合系食品の固形物として主としてジャガイモを、液状部分は食塩水を使用した。ジャガイモは、でんぷん含有量が多く、 α 化により導電率が変化して発熱特性が大きく変わると予想される。液状食品中で加熱を行うと複雑な昇温特性になると予想される。

実験方法

1. 試料

加熱用の固形物試料として根菜を用いた。ジャガイモは、ニセコ産Lサイズの「ダンシャク」を、ダイコン、ニンジン市販品を用いた。ジャガイモ、ダイコン、ニンジンは剥皮後、くり貫き用具を用いて中心部を一辺3cmの立方体としてくり貫いたものを使用した。ジャガイモについては剥皮したまま（丸形）のものも適宜用いた。

2. 通電装置

試験は交流電力調整器（富士電機 RPBE2040）を中心部品として自作した装置を使用した。周波数は50Hz固定で電力調整は位相制御方式で行った。図1に装置のブロック図を、表1に仕様を示した。

加熱容器は、内径10×10cmのアクリル樹脂製のもので行った。電極板は、寸法10×14cm、厚さ1mmのチタン板を使用し、2枚の電極板が平行になるように配置した。（電極板間距離：10cm）

3. 導電率の測定

根菜の導電率の測定はインピーダンスメーター（日置電機3522）を用いて行った。一辺3cmの立方体状の根菜試料を2枚の電極板（寸法5×8cm）で上下に挟み、電極板と根菜試料を密着させるために300gの荷重を上部電極にかけて測定した。測定信号は振幅1Vrms、周波数50Hzを使用した。

温度特性測定時の加熱は、立方体の根菜試料を1個ずつ、煮崩れを防止するために水とともに、チャック付きのビニール袋に入れ、ウォーターバスで行った。中心温度が所定温度に到達後取り出し、すばやく導電率を測定した。中心温度は測定専用とした同形の根菜試料の中心部に熱電対を取り付けて測定した。

測定には生の根菜試料と中心部の温度が70℃になるまでゆでたものを使用した。

根菜試料の導電率は以下に示す式で算出した。

$$\rho = \frac{1}{R} \cdot \frac{d}{S}$$

ρ ：導電率[S/cm]

R：インピーダンスメーターの抵抗測定値[Ω]

d：電極間距離[cm] S：電極板との接触面積[cm²]

固液混合系の食品は、液状部分の導電率も加熱中に変化するため食塩水を用いて導電率の温度特性を調べた。食塩水は、0.3mS/cm（25℃時、以下同様）、1.0mS/cm、3.9mS/cmの3種類とし、スターラーで攪拌しながら加熱を行い測定した。測定は導電率計（東亜電波工業CM14P）を用いて行った。

4. 昇温特性の測定

所定導電率の食塩水中に所定個数のジャガイモを浸漬した形で通電を行い、ジャガイモ中心部、食塩水の温度を測定した。

加熱試料には、立方体の生のジャガイモを用い、150Vの定電圧を印加して加熱した。食塩水の導電率は0.5、0.1、3.9mS/cmの3種類用意した。昇温中の温度や通電中の電圧、電流はデータロガーを用いて記録した。

食塩水中のジャガイモの配置を図2に示した。

5. 電力の測定

昇温特性の測定において、食塩水中でジャガイモを加熱する際の電力、電力量を算出した。データロガーで記録した電圧、電流、温度、サンプリング間隔から下記の式で算出した。加熱期間は、通電開始から食塩水と試料の中心部が100℃に到達するまでの時間とした。

電力(W) = 電圧(V) × 電流(A) × サンプリング間隔(秒)

平均電力(W) = 加熱期間の電力総和(W) / 加熱時間(秒)

電力量(Wh) = 平均電力(W) × 加熱期間(秒) / 3600(秒)

6. 高圧高温加熱との併用

高圧高温加熱はオートクレーブ（平山製作所 HA-300M2）を用いて行った。通電加熱容器にはピーカー（容量：2リットル）を用い、食塩水（導電率3.9mS/cm：25℃時）を1リットル入れ、丸形のジャガイモを浸漬し、オートクレーブ内に配置した（図3）。

高圧高温加熱中の印加電圧は、食塩水の温度が、オートクレーブ内部の温度と同じように上昇するように調整して印加した。昇温中の温度や通電中の電圧、電流はデータロガーを用いて測定、記録した。温度はジャガイモの中心温度、表面温度、食塩水温度について測定した。F値は測定した温度から以下の式を用いて算出した。

表 1 通電加熱装置仕様

入力相数	単相
定格入力電圧	200V
定格出力電流	30A
最小負荷電流	0.5A
制御方式	位相制御方式
出力電圧調整範囲	入力電圧の0~98%
設定信号	可変抵抗, 電流信号, 電圧信号

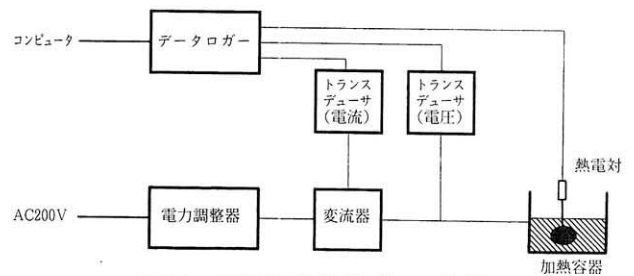


図 1 通電加熱装置ブロック図

$$L = 10^{\frac{T-121.11}{z}}$$

$$F = \int Ldt$$

T : 測定温度(°C)

Z : 熱死滅時間を 1/10に縮めるために高める必要がある温度 (ポツリヌス菌 (Cl. botulinum) の芽胞の値を使用 : 10°C)

L : 致死率 [ある温度での熱死滅の効果を121°Cでの加熱に換算した値]

オートクレーブの加熱設定温度は121°Cとした。ジャガイモの中心のF値が3となった時点で加熱を停止し、最終的にジャガイモの中心のF値が約4となるようにした。

実験結果および考察

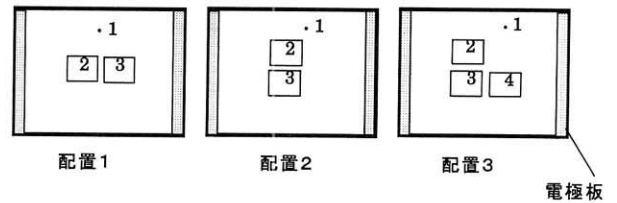
1. 導電率

図4に根菜試料の導電率の温度特性を示した。食塩水の導電率も合わせて示した。

生の根菜ではいずれも温度が10~40°C, 70~90°Cの範囲において導電率が徐々に変化したのに対し、40~70°Cの範囲では指数的に大きくなった。ゆでた根菜の導電率は生の根菜のそれとは異なった特性を示し、指数的变化は見られなかったが温度上昇に伴って徐々に大きくなった。根菜の導電率はゆでたことによって0.1mS/cmのオーダーから約30倍上がり、ゆでた野菜は10°Cから90°Cに温度が上昇することで2~3倍程度大きくなった。根菜の種類で大きな違いはなかった。

ジャガイモとダイコン、ニンジン等の導電率が、40~70°Cの範囲で急激に導電率が高くなる要因は、ジャガイモの場合はでんぷんのα化、ダイコン、ニンジンの場合は細胞組織の軟化に対応したものと考えられた。

食塩水の導電率は、温度上昇と共にほぼ直線的に大きくなった。いずれの食塩濃度の場合も20°Cから80°Cまで



「・1」は液温測定用センサ

図 2 ジャガイモの配置図

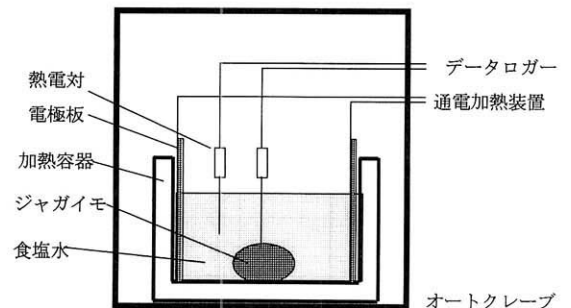


図 3 高圧高温加熱と通電加熱との併用

変化したとき、値は約2.5倍となった。

食塩水の導電率と温度との回帰式は以下の通りとなった。

0.3mS/cm の場合 導電率=0.00660×(温度)+0.1392
R²=0.9969

1.0mS/cm の場合 導電率=0.02163×(温度)+0.4754
R²=0.9979

3.9mS/cm の場合 導電率=0.08450×(温度)+1.8236
R²=0.9987

2. 昇温特性

図5, 図6に2個のジャガイモを食塩水中で加熱したときの昇温特性を示した。いずれも食塩水の導電率は0.5mS/cmで、図5は、図2中の配置1で図6は配置2の場合を示した。

配置1の場合、温度が40°Cまではジャガイモと食塩水とはほぼ同時に温度が上昇した。温度が40°Cを超えた時点で、ジャガイモの温度が急に上がり始め、食塩水より

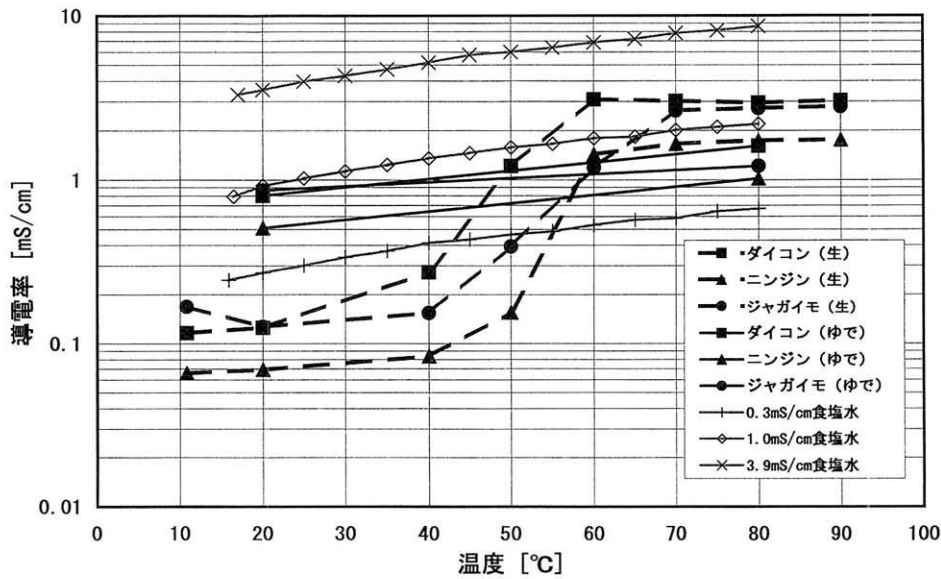
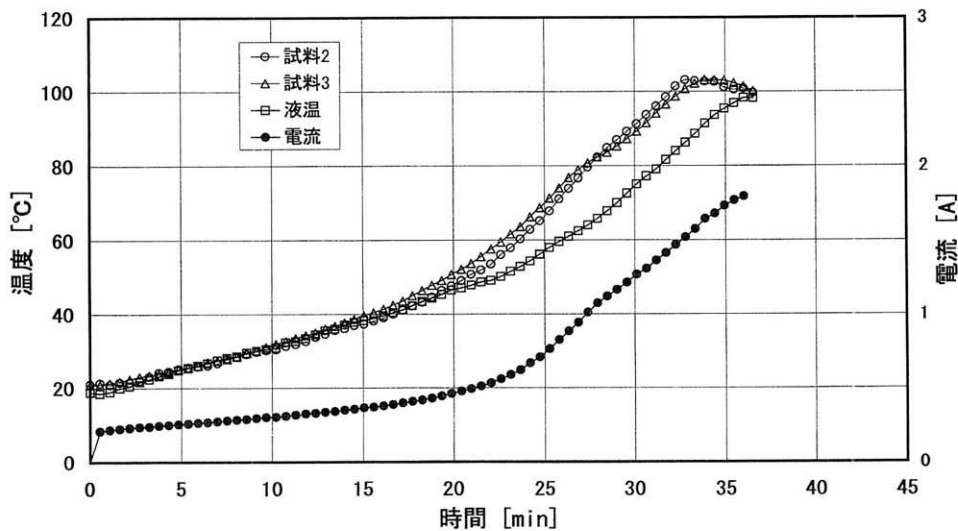


図4 根菜と食塩水の導電率

図5 配置1の各ジャガイモの昇温特性
(図2参照, 0.5mS/cm)

早く100°Cに達した。電流値はジャガイモの温度が急に上がり始めたのに対応するように大きくなった。

配置2の場合、温度が40°Cまではジャガイモと食塩水とはほぼ同時に温度が上昇した。温度が40°Cを超えた時点で、ジャガイモの温度が上がり始め、食塩水より早く温度が上昇したが、70°C付近で昇温の速度が遅くなり、80°C付近で食塩水とほぼ同じとなり、両者ほぼ同時に100°Cに達した。

配置1では、電極板からジャガイモを見た時、等価的に断面積が9 (= 3 × 3 cm) cm²、長さが6 cmのジャガイモとして考えることができる。距離が10 cmある電

極間に長さ6 cmのジャガイモが入っているため、ジャガイモを流れる電流は、ジャガイモの導電率に大きく影響されると考えられた。加熱初期では図4の結果よりジャガイモの導電率は、周囲の食塩水のそれより小さな値のためジャガイモを流れる単位面積あたりの電流は食塩水のそれよりも小さいと考えられた。温度が上昇し40°Cを越すとジャガイモの導電率が大きくなり始め、さらに周囲の食塩水より大きくなったとき、電流は集中的にジャガイモを流れ、温度が急激に上昇したと考えられた。

配置2では、電極板からジャガイモを見た時、等価的に断面積が18 (= 3 × 6 cm) cm²、長さが3 cmのジャ

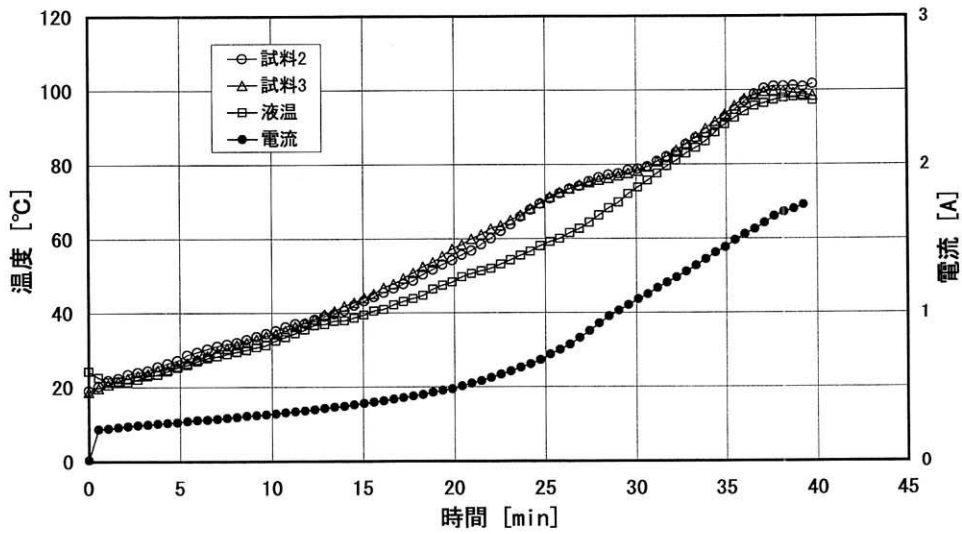


図6 配置2の各ジャガイモの昇温特性
(図2参照, 0.5mS/cm)

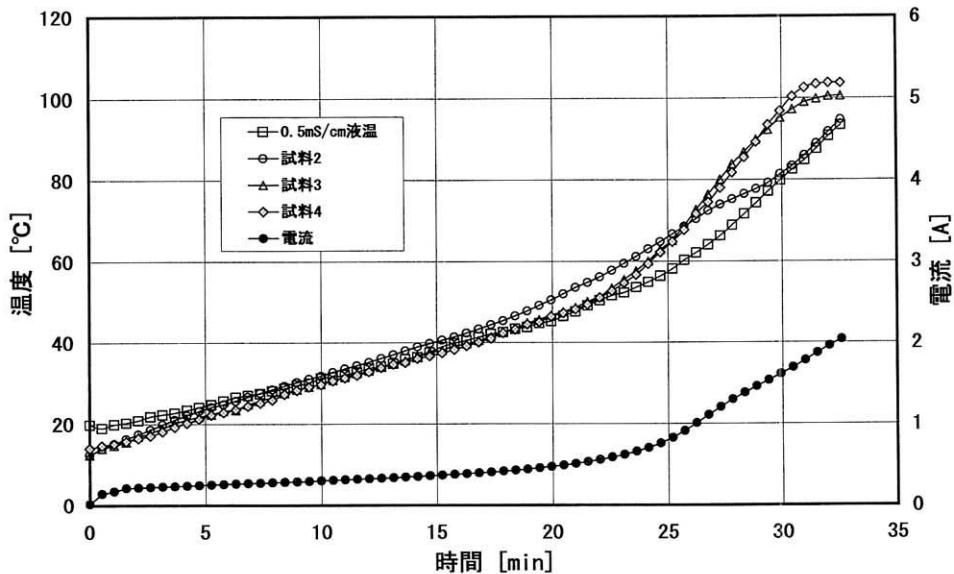


図7 配置3の各ジャガイモの昇温特性
(図2参照, 0.5mS/cm)

ガイモとして考えることができる。距離が10cmある電極間に長さ3cmのジャガイモが入っているため、ジャガイモの影響は小さく、ジャガイモを流れる電流は、その導電率には大きく影響されないと考えられた。加熱初期では配置1の場合と同様にジャガイモを流れる単位面積あたりの電流は食塩水よりも小さいと考えられた。温度が上昇し40℃を越すと配置1の場合と同様に、電流は集中的にジャガイモを流れ、温度が上昇したと考えられたが、この時の単位面積あたりの電流値は、配置1の場合に比べて小さな値であったと考えられた。温度がさらに上昇し80℃以上になっても、ジャガイモを流れる単位

面積あたりの電流は周囲の食塩水を流れるそれと大きな差はなく、同時に昇温したと考えられた。

図7に図2中の配置3で示した3個の場合の昇温特性を示した。試料2が最初に昇温したが、60℃付近から試料3、4に追い越された。

配置3では、電極板からジャガイモを見た時、等価的に断面積が18(=3×6cm)cm²、長さが6cmの部分と3cmの部分があるジャガイモとして考えることができる。配置2、3が組み合わせられた形であるため、長さが6cmの部分を通る電流は、ジャガイモの導電率に大きく影響され、長さが3cmの部分は影響が小さいと

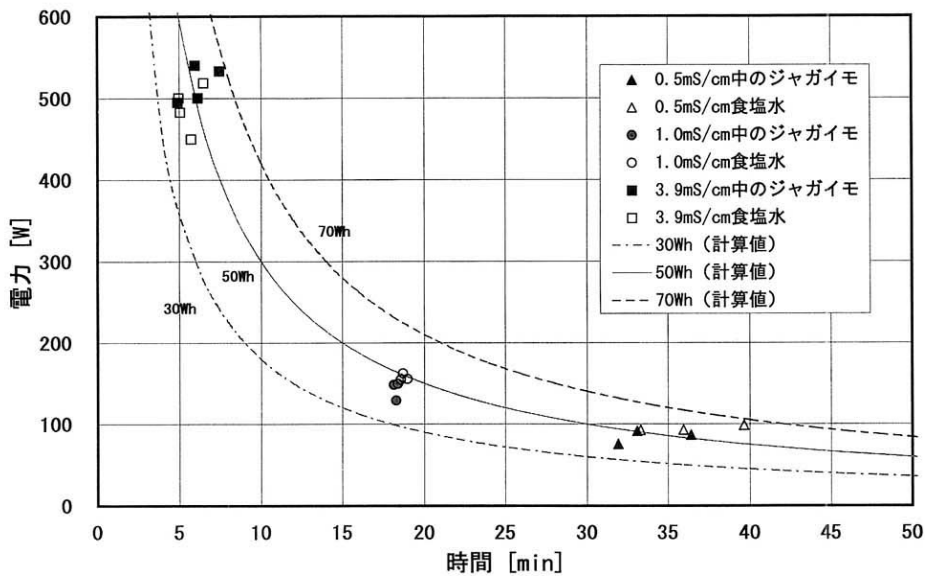


図8 異なる導電率の食塩水中における
100°Cに到達するまでの時間－電力特性

考えられた。

加熱初期では配置1, 2の時と同様にジャガイモを流れる単位面積あたりの電流は食塩水のそれよりも小さいと考えられた。温度が上昇し40°Cを越すとジャガイモの導電率が大きくなり始めるが、周囲の食塩水より小さいときは長さが3cmの部分の方が6cmの部分より電流が流れやすいため、試料4が先に昇温したと考えられた。温度がさらに上昇し周囲の食塩水の導電率よりジャガイモのそのの方が大きくなり始めると、長さが6cmの部分の方が3cmの部分より電流が流れやすくなり、試料3, 4の温度が急激に上昇したと考えられた。試料2は温度が80°C以上になっても単位面積あたりの電流は周囲の食塩水を流れるそれと大きな差はなく、食塩水と同時に昇温したと考えられた。

試料が複数個の場合、ジャガイモや食塩水の加熱に要する時間に差が生じたり、試料の形状、その導電率、食塩水内での配置等で個々の試料は複雑な昇温特性を示すことがわかった。

3. 電力と電力量

図8にジャガイモと食塩水とが100°Cに達するまでに要した時間と電力値との関係を食塩水の導電率を変えて測定した結果を示した。食塩水の導電率が高いほど短時間で加熱でき、電力値が大きくなる傾向があった。時間と電力の積である電力量を計算すると、導電率に関係なくほぼ同一の電力量となっていることがわかった。所定量のジャガイモと食塩水がある一定の温度まで上昇させ

るエネルギーは、試料の導電率に関係なく一定であった。

食塩水の導電率が0.5mS/cmの場合、ジャガイモと食塩水がそれぞれ100°Cに到達するまでに要する電力の平均値はそれぞれ85Wと95Wで10Wの差があった。時間の平均値は33.8分と36.3分で2.5分の差があった。ジャガイモの方が短時間で低電力値で100°Cに到達する傾向があった。

食塩水の導電率が3.9mS/cmの場合、ジャガイモと食塩水がそれぞれ100°Cに到達するまでに要する電力の平均値はそれぞれ517Wと488Wで29Wの差があり、時間の平均値は6.2分と5.7分で0.5分の差があった。食塩水の方が低い電力値で100°Cに到達する傾向があった。

食塩水の導電率が1.0mS/cmの食塩水の場合は、ジャガイモと食塩水が100°Cに到達するまでに要する電力値の平均値はそれぞれ142Wと157Wで15Wの差があり、時間の平均値はそれぞれ18.3分と18.7分で0.4分の差があった。ジャガイモの方が低い電力値で100°Cに到達する傾向があった。ジャガイモがもつ温度による導電率の変化幅のほぼ中間値である1.0mS/cmの食塩水の場合は、電力値と時間の差ともに小さかった。

固形食品の導電率と液状食品の導電率によって100°Cまで昇温するのに必要な電力や時間が変わるとともに、導電率の大小関係によって先に昇温する方が決定されることがわかった。

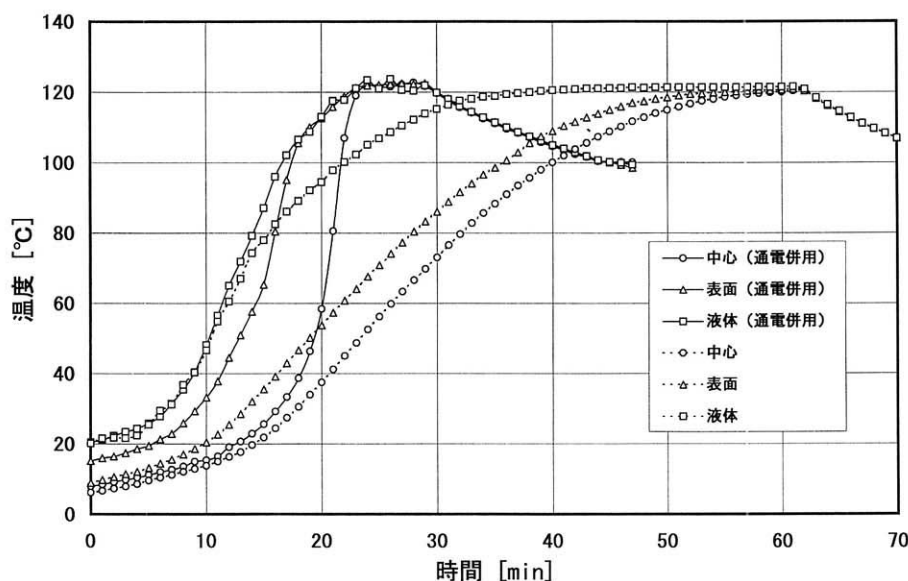


図9 高圧高温加熱時の昇温特性比較

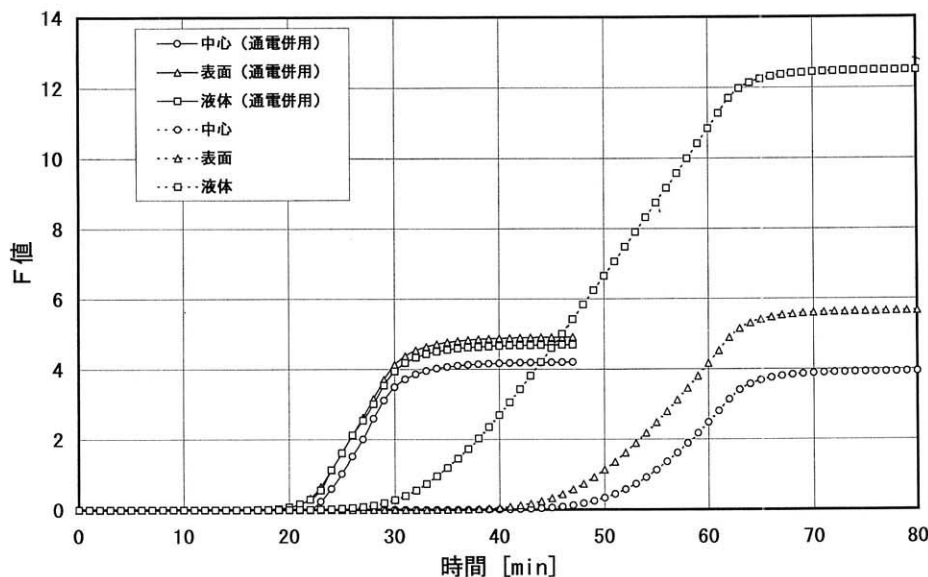


図10 高圧高温加熱時のF値比較

4. 高圧高温加熱との併用

図9に高圧高温加熱と通電加熱とを併用した場合と高圧高温加熱のみの場合との昇温特性を示した。通電加熱を併用した場合、食塩水、ジャガイモの表面、中心部の温度が電圧印加と同時に急に上昇し約25分で121°Cまで達した。通電加熱を併用しない場合は各部の温度はゆっくり上昇し、約60分で121°Cまで達した。通電加熱を併用することにより約半分の時間で目的の121°Cまで昇温できた。

図9において、ジャガイモ中心部の温度が60°C以下の時は、中心部の温度は表面、食塩水の温度と比べると約60°Cという大きな温度差が発生した。中心部のでんぷん

が α 化するまでは導電率が小さく、発熱が少ないことによるものと考えられた。この温度差を小さくするには、先に示した結果からジャガイモの導電率と同程度の導電率をもつ食塩水を使用すれば良いと考えられた。

今回の試験ではオートクレーブの加熱能力に合わせて、印加電圧を50V→70V→30Vと変化させたが、加熱能力の高い高圧高温加熱装置を使用する場合は、必要に応じて印加電圧を大きくし、さらに急速に昇温させる事も可能であると考えられた。

図10に高圧高温加熱と通電加熱とを併用した場合と高圧高温加熱のみの場合とのF値を示した。通電加熱を併用した場合はF値の立ち上がり時期の違いは、5分以内

と小さかったのに対し、高圧高温加熱のみの場合は立ち上がり時期は食塩水で試験開始から30分、表面で45分、中心で50分と大きくばらついた。通電加熱を併用した場合、食塩水、ジャガイモの表面、中心部とも目標とした $F=4$ にほぼ近い値(4~5)になったが、高圧高温加熱のみの場合は、中心部がほぼ4という値を示しているのに対し、表面で約6、食塩水で約13という大きな値を示し、部位によってF値に大きな差が生じた。部位によるF値の差を小さくするために通電加熱の併用は有効であることがわかった。

要 約

固液混合試料を通電加熱することにより、以下の結論が得られた。

(1)根菜(生)の導電率は、ゆでたことにより0.1mS/cmのオーダーから約30倍大きな値となった。また、根菜の種類で大きな違いはなかった。

(2)固体試料を複数個配置して通電加熱を行った場合、試料の配置によって個々の試料は複雑な昇温特性を示した。しかし、試料と同程度の導電率をもつ食塩水と組み合わせることで個々の試料の100℃に到達するまでの加熱に要する時間に大きな差は生じなかった。

(3)食塩水の導電率が高いほど短時間で加熱でき、電力値が大きくなる傾向があったが、時間と電力の積である

電力量を計算すると、導電率に関係なくほぼ同一の電力量となった。

(4)高圧高温加熱と通電加熱を併用することにより、高圧高温加熱のみの場合に比べて、丸形ジャガイモの中心温度を約半分の時間で目的の121℃まで昇温できた。固液混合系食品を高圧高温加熱する場合、各食品部位のF値の差を小さくするために通電加熱の併用は有効であることがわかった。

文 献

- 1) 柴 真：食品と科学，3，94-98(1987)
- 2) 清水康夫：食品と科学，5，114-117(1988)
- 3) 吉川滉一：食品と科学，8，125-126(1996)
- 4) 柚木崎千鶴子，植村邦彦，野口明德：日食工第40回大会講演要旨集，104(1993)
- 5) 後藤道雄：ジャパンフードサイエンス，7，22-27(1989)
- 6) 吉野功：群馬県工業試験場研究報告，154-159(1993)
- 7) 宮園勝三：食品機械装置，7，85-90(1995)
- 8) 斎藤文彦：食品産業センター技研報，21，1-7(1995)
- 9) 太田睦：食品産業センター技研報，21，9-20(1995)