

通電加熱技術による凍結食肉の解凍処理

熊林義晃, 井上貞仁

Thawing of frozen meat using ohmic heating

Yoshiteru Kumabayashi and Sadahito Inoue

Frozen meat was thawed by ohmic heating in a bath of circulating brine. This method enabled fast thawing of meat even in large blocks and even with low-temperature brine. The method achieved a higher yield of thawed meat than conventional methods and produced meat of superior color and water binding capacity.

現在の加工用冷凍食肉の解凍方法は、自然解凍や流水解凍が主流となっている。これらの方法は大量処理が可能でコストが安いという利点があるが、解凍に長い時間を要し、季節により気温、水温が変化するため一定の解凍条件が得られない欠点もある。気温、水温が高い季節では微生物の汚染や増殖による食中毒の発生や食肉中に存在する各種塩類、酵素類による品質劣化の促進が懸念される。気温、水温が低い季節では、所定の時間内に解凍が終了せず、製造工程に影響を与える問題点がある。

解凍工程の処理面の観点からは、一定の解凍条件で短時間に解凍を終了させたい要望がある。また、出来上がる製品の品質面の観点からは、短時間の処理で解凍期間中の温度を低くしたい要望がある。つまり、低温の一定の環境下において短時間で解凍することが望まれているが、水と氷の熱伝導率の違いから解凍には凍結の約2倍の時間が必要であると云われている¹⁾ことから、この要望を満たすことはかなり難しいと考えられる。

このような一見矛盾する条件を克服するために、様々な解凍方法が開発されている²⁾。短時間で解凍できる方法の一例としてマイクロ波を照射して内部から熱を発生させ短時間で解凍する装置が販売されている。必要な量を短時間で処理できるという大きな利点があるが、設備コストが高いこと、扱う食品の特性や大きさによってマイクロ波の照射方法や装置の設計を変えないと加熱ムラ

が発生しやすいなどの問題点もある。

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直接発熱させる技術であり、加熱効率が低いこと、迅速加熱が可能なことなどの長を有している。この技術は既にかまぼこの製造、豆乳加熱によるとうふの製造やパン粉用原料パンの焼成などに用いられている^{3) 4) 5)}。

このような通電加熱の特徴を解凍処理でも活かすことができれば、低温の一定の環境下において短時間で解凍できる可能性がある。本研究では、温度管理が可能で迅速な解凍方法の開発を目的に通電加熱技術の食肉解凍処理への応用を検討した。

実験方法

1. 試験装置

解凍処理は、試料用凍結肉を所定温度、所定濃度の塩化ナトリウム水溶液（以後、ブラインと呼ぶ）に浸漬したまま、ブラインと試料用凍結肉両方に通電することで行った。図1に試験装置ブロック図を示した。装置は、ブラインの温度を所定温度に制御するヒーター、クーラー、温度調節器を有する温調槽と平行に向かい合う様に配置した通電処理を行う二枚のチタン製の電極板を有する解凍槽で構成した。温調槽と解凍槽との間は、ポンプによりブラインを循環させた。

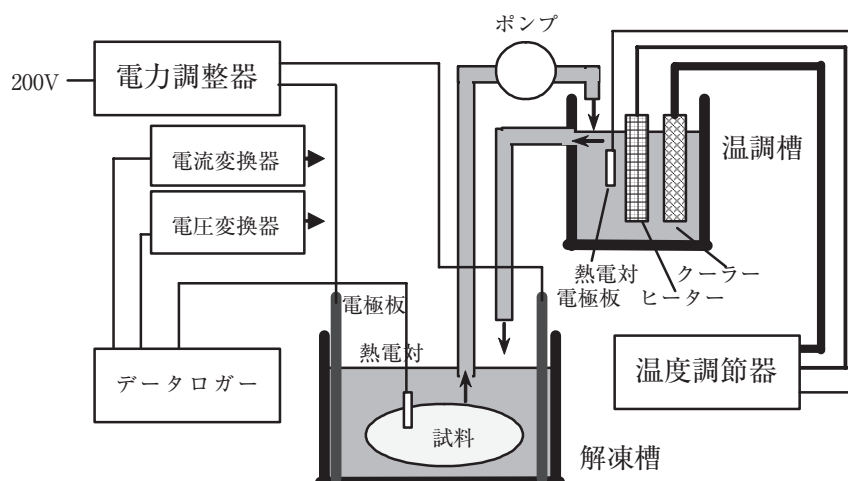


図1 通電解凍の試験装置ブロック図

通電処理は、電力調整器（富士電機製 RPBE2040）を主部品とした自作装置を用いた。試料の温度は熱電対を用いて、また印加した電圧と電流は電力用トランスデューサである電流変換器（横河 M&C 製 237400-35）及び電圧変換器（横河 M&C 製 237400-34）を用いてデータロガー（アドバンテスト製 7326B）で記録した。なお電流は変流器（富士電機製 FRC-5-26）（図示なし）を用いて電流変換器に接続した。解凍中の温度は、試料の所定位置に配置した熱電対とデータロガー（アドバンテスト製 R7326B）またはペンレコーダー（TOA 製 INR-6061）を用いて記録した。

温調槽、解凍槽およびポンプは、解凍する試料の大きさに応じて以下の2種類を適宜使い分けた。

小型の試料の解凍装置は以下の装置で構成した。ブラインの温度は、温度調節器（東京理化器械製 THS-10）、クーラー（東京理化器械製 ECS-0）、ヒーター（日本シーズ線製 A-50E：100V 500W）で所定温度になるように制御した。

ブラインの循環はポンプ（西山製作所製 NSE-13）を用いて、発砲スチロール製の解凍槽（内寸 20 × 29 × 40cm）と発砲スチロール製の温調槽（内寸 15 × 21 × 30cm）との間でブライン 23 リットルを循環させた。解凍槽には、電極板（幅 13 × 高さ 25 × 厚さ 0.1cm）を配置した。

大型の試料の解凍装置は以下の装置で構成した。ブラインの温度は調節器（オムロン E5EK）、クーラー（東京理化器械製 ECS-80）、ヒーター（八光電機製作所製 パイプヒーター水用：100V 1kW）を用いて所定温度になるように制御した。ブラインの循環はポンプ（花塚製

作所製 FP60 型）を使用して、発砲スチロール製の解凍槽容器（内寸 31 × 33 × 52cm）及び PP 製タンクの温調槽（内寸 30 × 13 × 27cm）との間でブライン 35 リットルを循環させた。解凍槽には、電極板（幅 25 × 高さ 13 × 厚さ 0.1cm）を配置した。

通電は、電力調整器を手動で制御することで約 200V の電圧を断続的に印加するか、または 200 ~ 0 V の範囲で調整することで行った。手動による制御は、解凍肉の温度が所定のブライン温度を越えないように行った。

2. 小型肉の解凍試験

試料には屠殺解体された牛もも肉を入手して使用した。試料は解凍条件が一定になるようにハム類の製造に使用するファイバラスケーシング #5N（径 11.2cm）に長さ約 25cm（重量約 1.5kg）となるように充填した。試料に温度測定用の熱電対を所定位置に配置した後、-23℃ 冷凍庫で十分凍結させてから解凍試料とした。

試験区（流水解凍 + 通電）は、解凍試料を解凍槽のブラインに浸漬させ、ブラインを循環させながら電極板を通してブラインおよび試料に通電した。ブライン（0.1%（w/v）塩化ナトリウム水溶液）の温度は、10℃ に設定した。対照区（流水解凍）は、試験区と同一条件で循環させながら、通電のみを行わずに解凍した。対照区として夏期の水道水温を想定して 20℃ 流水解凍も行い、試験区と解凍時間を比較した。試験区、対照区とも解凍肉中心温度が 5℃ に到達した時点で終了とした。

3. 畜肉の電圧－電流特性の測定

畜種による電流の流れやすさの違いについて、牛もも肉、豚もも肉、鶏むね肉の三種類の電圧－電流特性を測定した。試料はファイバラスケーシング #5N（径

11.2cm) に長さ約7cm になるように各々の肉を充填し、両端にチタン製の電極板を入れて肉と密着させた。所定温度(0, 10℃) に設定した恒温槽内に、中心温度が同一温度になるまで静置してから測定した。測定は、恒温槽内でファイブラスケーシングの外部から先端部が鋭利な複数の金属棒を内部の電極板に押し当てることで接触させて電圧を印加した。大きな電圧を長時間印加すると試料の温度が上昇するため、電圧の印加は短時間に留め、試料温度が変化しない様に注意した。

4. 大型肉の解凍試験

試料には屠殺解体された豚もも肉(重量約4kg) を入手して使用した。試料に温度測定用の熱電対を所定位置に配置した後、-23℃冷凍庫で十分凍結させてから解凍試料とした。

試験区(流水解凍+通電)、対照区(流水解凍)は、小形肉の解凍試験と同様に解凍した。ブライン(0.025% (w/v) 塩化ナトリウム水溶液)の温度は、解凍にとってより厳しい条件となるように5℃に設定した。また、通電した際に凍結肉に電流を集中し易くさせるためにブラインの塩濃度を小形肉の場合に比べて低い値にした。対照区として冷蔵庫内での解凍を想定して5℃自然解凍も行い、試験区と解凍時間を比較した。試験区、対照区とも解凍肉中心温度が5℃に到達した時点で終了とした。

5. 品質評価用肉の解凍試験

品質評価用の試料は豚ロース肉を4分割して重量約1.0kgの大きさとした。試料に温度測定用の熱電対を所定位置に配置した後、-23℃冷凍庫で十分凍結させてから解凍試料とした。解凍には小形肉で使用した装置を使用した。解凍条件は、試験区(流水解凍+通電)をブライン(0.05% (w/v) 塩化ナトリウム水溶液)の温度を5℃に設定して行った。対照区として、夏期間の水道水温及び工場内の室温を想定して20℃流水解凍と20℃自然解凍を行った。20℃流水解凍は、温調槽を20℃に設定してブラインを循環させながら、実際の工場において夕方から解凍を開始して次の日の朝に終了するという作業時間を想定して17時間をかけて解凍した。20℃自然解凍は、恒温器の温度を20℃に設定して20℃流水解凍と同様に17時間で解凍した。

6. 解凍肉の品質評価

各種解凍方法で処理した試料の品質は以下の項目について行った。解凍歩留りは、表面の水滴を拭き取った解凍直後の重量と解凍前の重量の比から算出した。保水性は加圧濾紙重量法により、アクトミオシン抽出量は

Biuret法により、Met化率は比色定量法により測定した。pH値は試料をホモジナイズし、上清をpHメーター(TOA製HM-50V)で測定した。色調は色彩色差計(ミノルタ製CR-30)を使用してハンター表色法により測定した。ジェリー強度は、試料からモデルソーセージを製作し、レオメータ(サン科学製CR-200D 直径10mm球形プランジャー)を使用して破断強度と破断凹みを測定してそれらの積から算出した。肉の微細構造の観察は走査型電子顕微鏡(日立製作所S-2400)で行った。タンパク質の分解等の変化の有無については電気泳動法(SDS-PAGE)で調べた。

さらに衛生度に関して、各種解凍方法で処理した解凍肉等の一般生菌数を測定した。この試験では、実際に企業で多く行われている水道水をオーバーフローさせながら解凍する流水解凍も対照区として行い、他の対照区と同様に17時間で解凍した。

実験結果および考察

1. 小型肉の解凍試験

図2に通電の有無による昇温特性の違いを示した。試験区、対照区とも中心部温度が-23℃から-5℃付近までの昇温時間に大きな差はなかった。流水解凍+通電の場合、対照区に比べて-3℃付近からの温度上昇が急速に速くなった。特に中間部の昇温が急速で、ブラインの温度を超えない様にするために電圧の細かな調整が必要であった。試料の中間部(表面と中心部の中間の位置)と中心部とにおける-3℃付近からの立ち上がりの時間差は、対照区の場合は約4時間の差であったのに対して、試験区は約1.5時間の差となり大幅に短縮された。通電処理の効果により、試料の表面から中心部へ向けた熱の供給が迅速に行われていると考えられる。しかし、-5℃以下の温度領域では通電処理の効果は小さく、これは凍

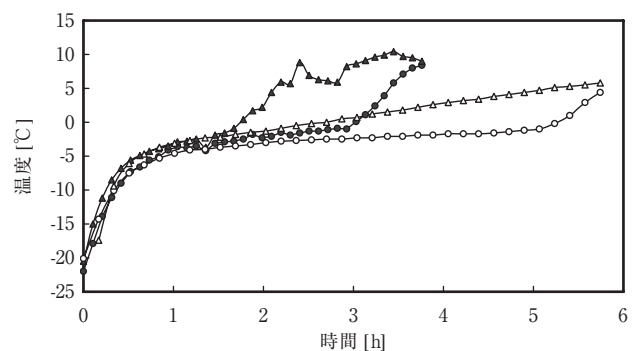


図2 通電の有無による昇温特性への影響

●-中心部(10℃流水解凍+通電) ▲-中間部(10℃流水解凍+通電)
○-中心部(10℃流水解凍) △-中間部(10℃流水解凍)

結した状態の試料には電流がほとんど流れないためと考えられる。

図3に解凍時間の比較を示した。中心温度が-5℃までの到達時間は、試験区では約1時間を要しており、10℃流水解凍の対照区と同等であった。20℃流水解凍の対照区では、0.5時間となり、周囲の温度が大きく影響していた。0℃までの到達時間は、解凍方法により大きな差がみられた。10℃流水解凍の対照区では、5.3時間であったが、試験区では3.1時間と0.6倍に短縮された。20℃流水解凍の対照区では、1.4時間と0.3倍と短く、周囲の温度が大きく影響していた。5℃までの到達時間では0℃までの到達時間の差の影響がそのまま出ており、解凍方法により大きな差があった。しかし、0℃と5℃との到達時間の差をみると、試験区では、0.3時間、10℃流水解凍の対照区では0.5時間、20℃流水解凍の対照区では0.6時間となった。試験区では通電処理の効果で約半分の時間になっていたが、二つの対照区の比較から周囲の温度の影響は小さかった。

図2、図3の結果から、通電処理は-5℃から0℃までの温度帯で大きな効果を発揮できることがわかった。

2. 電圧-電流特性に及ぼす畜種の影響

図4に畜種の違いによる電圧-電流特性を示した。この結果から鶏肉が一番電流の流れやすい特性を示し、豚、牛ではほぼ同じ特性となった。また、0℃よりも10℃の高い試料温度で電流が流れやすいことがわかり、0℃と10℃の試料温度で畜種による流れやすさの傾向は変わらなかった。電圧-電流特性のグラフの傾きから試料の見かけの抵抗値を算出すると、0℃のとき、鶏肉22.4Ω、豚肉27.8Ω、牛肉27.4Ωとなり、10℃のとき、鶏肉16.4Ω、豚肉21.2Ω、牛肉21.1Ωとなった。畜種により電流の流れやすさに差はみられたが大きな差では

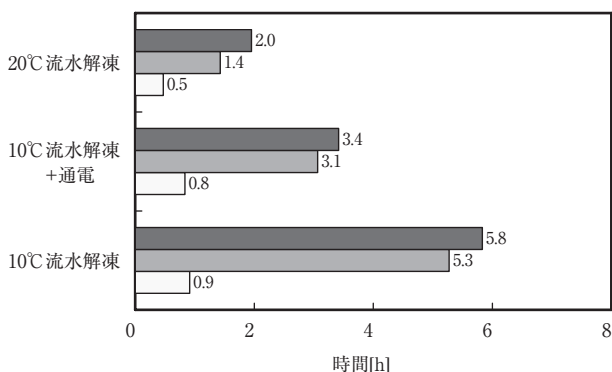


図3 解凍時間の比較

□ -5℃到達時間 ■ 0℃到達時間 ■ 5℃到達時間

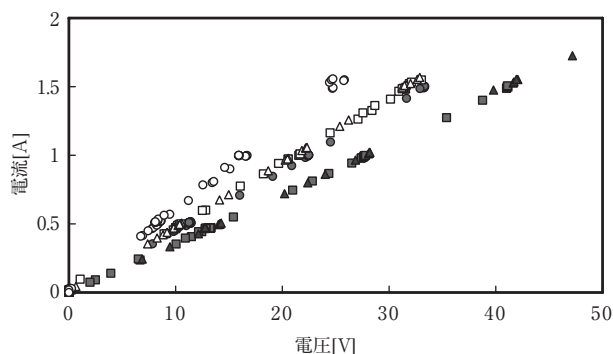


図4 畜種の違いによる電圧-電流特性への影響

■ブタ 0℃ ▲ウシ 0℃ ●トリ 0℃ □ブタ 10℃ △ウシ 10℃ ○トリ 10℃

なく、同一の装置で対応可能な範囲と考えられ、どの畜種でも通電処理による解凍が可能であることがわかった。

3. 大型肉の解凍試験

図5に大型肉の場合の通電の有無による昇温特性の違いを示した。試験区、対照区の5℃流水解凍は中心部温度が-23℃から-5℃付近までの昇温時間に大きな差はなかったが、5℃自然解凍の昇温時間は両者より長くなった。試験区では、流水解凍+通電の場合、対照区に比べて-3℃付近からの温度上昇が急速に速くなり、小形の肉の解凍試験と同様の傾向がみられた。

図6に大型肉の解凍時間の比較を示した。-5℃までの到達時間は、試験区では約1.5時間を要しており、5℃流水解凍の対照区と同等であった。5℃自然解凍の対照区では、3.4時間と長くなり、周囲媒体の熱容量が大きく影響していた。0℃までの到達時間は、解凍方法により大きな差がみられた。5℃流水解凍の対照区では、9.5時間であったが、試験区では6.5時間と0.7倍に短縮された。5℃自然解凍の対照区では、29.8時間と4.6倍に長くなった。5℃までの到達時間では、解凍方法に

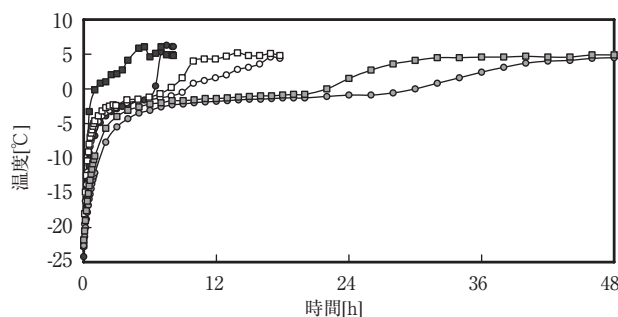


図5 通電の有無による昇温特性への影響

●中心部 (5℃流水解凍+通電) ■表面部 (5℃流水解凍+通電)
○中心部 (5℃流水解凍) □表面部 (5℃流水解凍)
●中心部 (5℃自然解凍) □表面部 (5℃自然解凍)

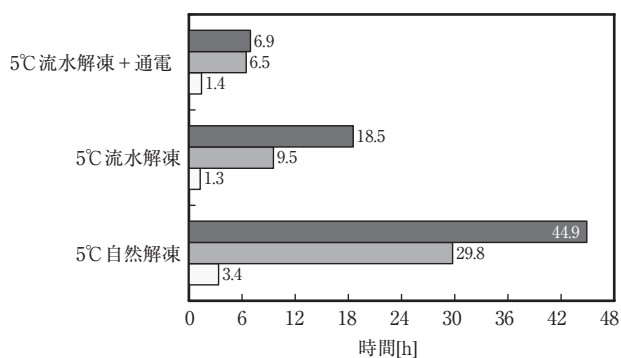


図6 大型肉の解凍時間の比較

□-0℃到達時間 ■5℃到達時間

よって0℃までの到達時間の差に加算されて、さらに大きな差が生じた。0℃と5℃との到達時間の差をみると、試験区では、0.4時間、5℃流水解凍の対照区では9時間、5℃自然解凍の対照区では15時間となった。試験区と5℃流水解凍の対照区との比較では通電処理の効果で約1/20の時間になっていた。大形肉の場合では0℃から5℃までの到達時間の差においても解凍方法によって大きな差がみられた。

図5、図6の結果から、通電処理は-5℃から0℃までの温度帯に加えて0℃から5℃までの温度帯でも大きな効果を発揮できることがわかった。通電処理は大型肉にも解凍時間を大幅に短縮する効果が認められた。

4. 解凍肉の品質評価

表1に解凍方法による品質の違いを比較した結果を示した。解凍歩留と含水率は、5℃流水解凍+通電による方法が一番高く、歩留については自然解凍の場合と比較して7%も高かった。アクトミオシン抽出量は、他の解凍方法に比べて高い値となった。この値は、加工時の肉の結着性に関係があるといわれており、抽出量が多いほど結着性が良く、良質な加工品ができるとされている。Met化率は20℃流水解凍に比べて低い値となった。この値は肉色素のミオグロビンの酸化の程度を表す値で低い方が良くとされている。以上のことから試験区の解凍

方法の優位性が示唆された。しかし、保水性は他の解凍方法に比べて一番低い値となった。電気泳動法によるタンパクの分解の進行度、色調、pH値およびジェリー強度の測定項目では、試験区と対照区とに明確な差は認められなかった（データ不掲載）。

表2に解凍方法による一般生菌数の変化を示した。一般生菌数は20℃自然解凍では2倍に増え、20℃流水解凍（循環流水）では菌数が二桁ほど大幅に増えた。実際に企業で多く行われている水道水をオーバーフローさせながら解凍する流水解凍（実験時の水温は約11℃）では、解凍前後で菌数は変わらなかった。試験区の5℃流水解凍+通電の方法では、菌数の増加は見られず、現在食肉工場で一般的に行われている解凍法と同程度の衛生度であった。

図7に解凍方法が食肉の微細構造に及ぼす影響について電子顕微鏡による観察写真を示した。対照区の流水解凍、自然解凍では試料の筋線維間および筋原線維間の隙間が広くなり、流水解凍の方が広い間隔が多数見られた。試験区の流水解凍+通電では、筋線維がほぼ規則的に配列し、筋線維間の間隔が狭く、筋原線維間の隙間が見られなかった。

今回の凍結温度は-23℃であるため、筋肉細胞内に存在していた水は凍結過程で細胞外にしみ出て氷結すると考えられる。写真から試験区では、解凍すると筋肉細胞外で融けた氷は再び細胞内に吸収されて細胞はもとの形に還元したと考えられるので、生の細胞の状態に近いと思われる。対照区では、解凍後もかなりの水が細胞外に残存したままで細胞は還元不十分な形で解凍が終了したと考えられる。

対照区の保水性が試験区に比べて高くなったのは、対照区の解凍歩留や含水率の数値が低い値になっていることから水分が既に流失しており、見かけ上保水力が高く見えていると考えられる。試験区は解凍歩留や含水率が高い値を示しているにもかかわらず、保水性が未凍結肉に比べて低い値となっている。これは図7で示したよう

表1 解凍方法による品質への影響

	解凍		アクトミオシン 抽出量(mg/g)	Met 化率(%)	保水性(%)
	歩留(%)	含水率(%)			
未凍結肉	—	71.5	103	41	86
20℃自然解凍	93	68.4	107	45	77
20℃流水解凍	97	68.5	94	55	75
5℃流水解凍+通電	100	69.9	114	48	71

表2 解凍方法による一般生菌数への影響

解凍方法	区分	生菌数 (cfu/g)
20℃ 自然解凍	初発 肉	9×10^3
	解凍後 肉	2×10^4
20℃ 流水解凍 (循環流水)	初発 肉	8×10^4
	解凍後 肉	2×10^6
5℃ 流水解凍+通電 (循環流水)	解凍後 水	5×10^2
	初発 肉	2×10^4
11℃ 流水解凍 (水道水オーバーフロー)	解凍後 肉	1×10^4
	解凍後 水	N.D.
11℃ 流水解凍 (水道水オーバーフロー)	初発 肉	2×10^4
	解凍後 肉	2×10^4
11℃ 流水解凍 (水道水オーバーフロー)	解凍後 水	N.D.
	解凍後 水	N.D.

に解けた水分は細胞内に吸収されているが、細胞内タンパク質と十分水和しておらず、保持力が落ちているためと考えられる。

要 約

本研究により以下のことが明らかとなった。

(1) 流水解凍と通電を組合せた解凍では、流水解凍の場合に比べて $-5 \sim 0^\circ\text{C}$ の温度帯を短時間で通過でき

た。大型食肉試料に対しても、 5°C という低温の周囲環境温度下で大幅な解凍時間の短縮効果があった。

(2) 温度調節をしたブラインを循環することで、通電を伴った解凍期間中も試料の温度を低く抑えることができた。

(3) 通電処理は、畜肉の種類による電流-電圧特性に大きな差はなく、どの畜肉に対しても使用可能と考えられる。

(4) 流水解凍と通電の組合せによる解凍では、従来の解凍方法に比べて、解凍歩留り、アクトミオシン抽出性、Met 化率の評価で優位性が認められた。解凍肉の微細構造の観察からは、生の肉に近い状態で解凍できていると思われた。

(5) 5°C に温度制御した流水解凍と通電の組合せによる解凍方法では微生物の増殖は認められず、現状の解凍方法と同程度の衛生度であった。

以上のように本研究で行った低温のブラインを循環させる流水解凍と通電を組合せた方法は、解凍に対して要望されている条件を満たすことができる有効な技術と考えられる。

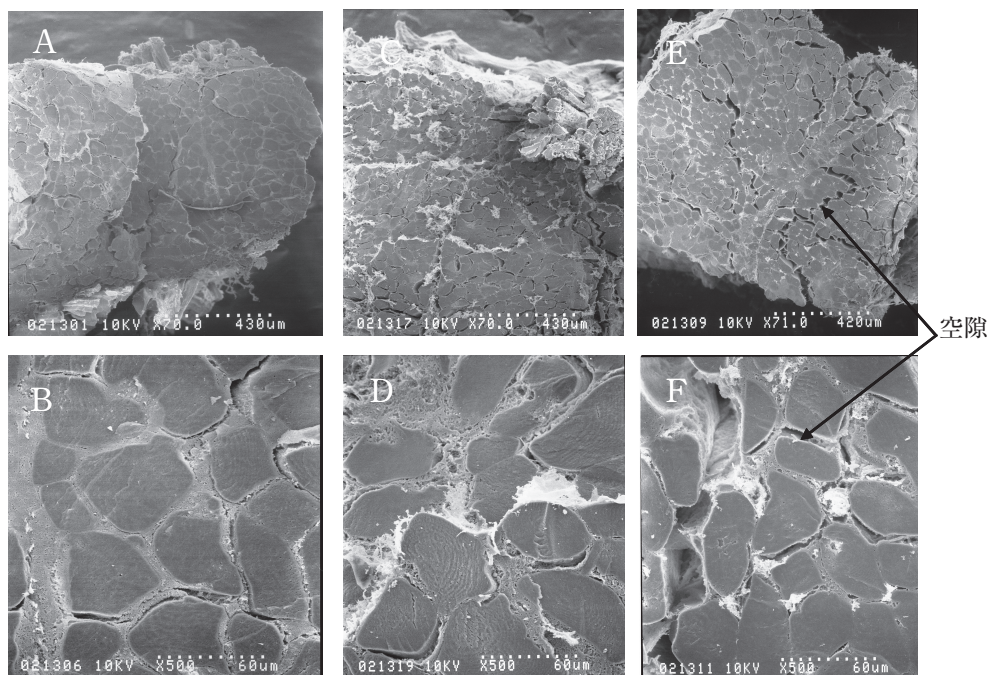


図7 解凍方法が食肉の微細構造に及ぼす影響

A, B 5℃流水解凍+通電 C, D 20℃自然解凍 E, F 20℃流水解凍

A, C, E 倍率70倍 B, D, F 倍率500倍

文 献

- 1) 白井義人, 吉川友隆, 食品のための凍結・解凍における成分変化, 食科工, 46, 447-453 (1999).
- 2) 田中武夫, 実際面からみた解凍装置の動向と展望, 食品加工技術, 10, 21-30 (1990).
- 3) 柴 眞, 水産ねり製品の加熱における時間短縮の効用, 食品と科学, 3, 94-98 (1987).
- 4) 清水康夫, 通電式製パン法とチタン通電極板について-チタンの科学と生物学的安全性について-, 食品と科学, 5, 114-117 (1988).