高周波誘電加熱による急速解凍装置

Rapid Thawing Device by Radio Frequency Dielectric Heating

山本泰司^{*1}

Yasuji YAMAMOTO

Thawing method by using dielectric heating can rapidly heat food with less temperature difference between the surface layer and inside of the food, because the food itself becomes a heat-generating element. Compared with microwaves (300MHz~30GHz), radio frequency waves (3MHz~300MHz) are so suitable for thawing that hot spots and thermal runaway hardly occur. The half-thawing state at slightly lower temperature range -5 to -1°C than the freezing point is called “Tempering”, which is distinguished a complete-thawing state. “Tempering” has been variously utilized for frozen food processing. Herein we introduce thawing cases and an overview of batch type and continuance type radio frequency thawing equipments.

Keywords: Thawing, Thawing equipment, Dielectric Heating, Radio frequency, Microwave, Tempering.

1 はじめに

スーパー、コンビニ、デパ地下、ファーストフード、レストランチェーンなど、われわれの周りには、様々な種類や形態の食品で溢れ、好きなものを好きな時に、手にいれることができる。これらの多くは、食品メーカが工業的に生産した加工食品であり、使用されている食品原料、例えば鶏、豚、牛などの畜肉や魚肉は、凍結状態で貯蔵、流通されている。凍結されることで品質の経時変化と細菌繁殖を抑制することができるため、長期保存ができる。これらの凍結された食品の品質は、原料の鮮度、加工における品質管理という基本的な問題に加え、凍結や解凍過程の品質管理、凍結技術や解凍技術に大きく依存している [1]。

凍結技術は、近年の凍結装置やシステムの発展に伴い、飛躍的な進歩を遂げ、生産性が高く低コストで高品質が確保されている。一方、凍結技術と表裏の関係にある解凍技術については、空気解凍（送風、冷蔵庫）、水解凍（流水、ミスト）が依然として主流となっている。解凍は、単純に食品の品温を高め、氷を融かすという操作であり、品質を保持するためには、品温が一定温度以上に高くない範囲で、いかに迅速に氷を融かすということが求められる。空気解凍や水解凍は、外部か

らの熱伝導による加熱であり、いわゆる緩慢解凍で時間がかかる。解凍速度をあげようとする、食品の表面と内部の温度差が大きくなり、ドリップの流出などの品質劣化、また細菌汚染の危険性もある。これに対して高周波やマイクロ波の誘電加熱による解凍は、急速解凍が可能である。本稿では、誘電加熱を利用した食品原料の解凍と高周波解凍装置について紹介する。

2 誘電加熱による解凍

高周波（3~300MHz）やマイクロ波（300MHz~30GHz）は、テレビ・ラジオなどの放送、携帯電話などの通信に古くから使われている電波の一種である。金属のように電流を通しやすい物質を導電体、通しにくい絶縁物を誘電体という。プラスチック、ガラス、セラミックス、木材などは、誘電体である。誘電体を高周波やマイクロ波の電界作用により加熱することを誘電加熱（dielectric heating）という。食品の多くは、導電体と誘電体の両方の性質をもつが、凍結された状態では主として誘電体としての性質が支配的である。凍結状態の食品を誘電加熱した場合、自らが発熱体となって加熱されていくため外部温度の影響をほとんど受けることなく、食品内部と食品表面の温度差を少なく急速に加熱できる。適切に利用することで短時間に品温を高めることができ、品質劣化の少ない理想的な解凍が可能となる。

連絡先： 山本泰司, 〒543-0002 大阪府大阪市天王寺区上汐 6-3-12, 山本ビニター株式会社,
e-mail: yamamoto@vinita.co.jp

^{*1} 山本ビニター株式会社

3 高周波加熱とマイクロ波加熱

高周波やマイクロ波は、Fig.1 のように被加熱物の表面から入り、徐々に熱エネルギーに変換され減衰されながら内部に浸透していく。

このとき熱に変換される単位体積当りの電力(P)は、式(1)で示される。電力は、周波数、電界の強さ、損失係数に比例する。周波数が高ければ高いほど、また電界が強ければ強いほど、発熱が大きい。損失係数は、それぞれの物質がもっている固有の電気的特性であるが、周波数、温度などによって変化する。

$$P = \frac{5}{9} \times 10^{-10} \times \epsilon_r \cdot \tan \delta \cdot f \cdot E^2 \text{ (W / m}^3\text{)} \quad (1)$$

$\epsilon_r \cdot \tan \delta$: Loss factor

f : Frequency (Hz)

E : Electric field stress (V/m)

氷と水では、損失係数が大きく異なるので注意が必要である。Table.1 に示すように 10MHz の高周波の場合、水と氷の損失係数の差は、約 10 倍と計算される。マイクロ波の場合は、1000MHz なら約 20 倍、2500MHz なら約 4000 倍となる。周波数が高くなるほど水と氷の発熱の差が大きくなる[2]。解凍とは氷が水に相転換する過程であり、誘電加熱による水と氷の発熱差は解凍の品質に大きな影響を与える。誘電加熱により凍結食品の一部が早く融け、氷から水に転換した場合、さらに誘電加熱を加え続けるとこの部分がより強く発熱する。

このことにより熱暴走が起こり（ランナウェイ現象）、ホットスポット（hot spot）とよばれる煮えや焦げを発生させる。マイクロ波は高周波と比較して、解凍に

Fig.1 Electromagnetic wave absorbed to dielectric

Table.1 Loss factor of water and ice ($\epsilon_r \cdot \tan \theta$)

Material	Radiofrequency (10MHz)	Microwave (1000MHz)	Microwave (2500MHz)
Water(25℃)	0.63	1.23	12.3
Ice(-15℃)	0.067	0.065	0.0028

おける熱暴走のリスクが高いことがわかる[3]。

高周波やマイクロ波の電力密度が、物質表面の 1/2 に減衰する深さを電力半減深度(D)とよび、式(2)で示される。

$$D \cong \frac{3.32 \times 10^7}{f \cdot \sqrt{\epsilon_r} \cdot \tan \delta} \text{ (m)} \quad (2)$$

電力半減深度は、周波数と損失係数に反比例する。つまり周波数が高いほど、また損失係数が高く発熱しやすい物質ほど、エネルギーは深く浸透せず表層部で熱に変換される。Table.2 は、凍結と生状態の牛肉の電力半減深度を計算したものである。凍結状態において 10MHz の高周波は、1000MHz のマイクロ波より約 5 倍、2500MHz のマイクロ波より約 15 倍の浸透深さがある。解凍が進み、温度が上昇すると損失係数は上昇するため、マイクロ波の場合さらに半減深度が小さくなり、加熱を続けることで表層部と内部との温度差が大きくなりやすい。厚みのある容量の大きな凍結食品を解凍するには、周波数の低い高周波の方が適している[3]。

これらのことより日本では、工業用生産に使われている解凍装置の多くに高周波が利用されている。使われている周波数は、ISM バンドとよばれる国際的な割当て周波数である 13.56MHz 或いは、27.12MHz である。欧米では、915MHz（日本では使用に電波法無線設備規則による規制がある）のマイクロ波を利用した解凍装置も普及している[2]。

4 高周波加熱によるテンパリング

Fig.2 は、高周波加熱による一般的な凍結食品の温度上昇曲線を示したものである。0℃に近づくにつれて温度上昇が急速ににぶり、そのまま加熱を続けても完全解凍は困難である。解凍が進むと食品内部の自由水が融け始め、融解潜熱に加熱エネルギーが大きく奪われるので温度上昇がにぶるのは当然であるが、高周波の場合はそれだけではない。

高周波で誘電加熱する場合、被解凍物は Fig.3 のように、上下一對の電極間に挟まれ空気層（エアーギャップ）を介して加熱される。被解凍物の解凍が進み表層部が氷から水になるにつれて、比誘電率 ϵ_r が急激に増大するため、高周波電圧のほとんどが電極板間の被解凍物が置かれていない空間にかかってしまい、被解凍物は解凍されにくくなる[4]。これは高周波独特の特性であり、熱暴走を防ぐには好都合である。実際、水の入った容器を高周波電極板間に置いて、ほとんど加熱が起こ

らない。これに対しマイクロ波は、電子レンジがコップに入った水を効率よく加熱することでわかるように、解凍が進むにつれホットスポットの出現や熱暴走を起こしやすい。

工業生産の原料として使われる畜肉や魚肉などは、 -20°C 程度で冷凍保存されている。これらの凍結原料は、そのままの状態では非常に硬く氷結しており、次工程であるカットやスライス、ミキシングなどの加工が困難である。 $-5\sim-1^{\circ}\text{C}$ 程度の半解凍状態にすれば加工が容易である。この氷点より少し低い温度帯で、部分的にまだ氷の残る半解凍状態にすることを、完全解凍と区別してテンパリング (tempering) とよんでいる。

Table.2 Penetration of half depth of the beef
(calculated value)

Material	Radiofrequency (10MHz)	Microwave (1000MHz)	Microwave (2500MHz)
Frozen Beef (-15°C)	61cm	12cm	4cm
Raw Beef (15°C)	26cm	3cm	0.4cm

Fig.2 Temperature rise curve by the radiofrequency thawing

Fig.3 Structure of the radiofrequency thawing device

このテンパリングに高周波加熱を利用すれば、短時間で高品質に解凍できる。これを高周波テンパリングとよび、現在様々な凍結食品加工に利用されている。テンパリングの仕上がり温度は、食品の種類や解凍後の加工方法などにより異なる。たとえば、牛・豚肉のスライス加工には $-5\sim-3^{\circ}\text{C}$ が、ハンバーグ製造用の牛・豚肉のミキサー加工には $-4\sim-2^{\circ}\text{C}$ が、鶏から揚げ加工用には $-2\sim-1^{\circ}\text{C}$ の温度帯が適している。高周波テンパリングでは、仕上げ温度の調整を高周波出力と解凍時間の調整により簡単に確実に行えるので、高い品質管理が可能である。

5 高周波解凍装置

高周波解凍装置は、バッチ式と連続式の2種類がある。時間当りの処理量に応じて、 $100\sim200\text{kg/hr}$ の小型、 $200\sim500\text{kg/hr}$ の中型、 $500\sim5000\text{kg/hr}$ の大型とラインアップが揃っている。

5.1 バッチ式小型解凍装置

Fig.4 はバッチ式小型解凍装置の概観である。小型で簡易に移動や据え付けが可能である。多品種小ロットの解凍に適しており、コンビニの惣菜や弁当の製造工場、外食チェーンのセントラルキッチンなどで広く使われている。

5.2 連続式大型解凍装置

Fig.5 は、連続式大型解凍装置の構造、Fig.6 はその概観を示す。時間当たり $1\sim5\text{t}$ 程度の連続処理が可能である。コンベアに沿って、高周波発振機と上下一組の電極が複数組 (2~5 組) 設置されている。食品の解凍の進行状況 (温度) に合わせ、複数の高周波発振機を適切に制御することで、常に最適な状態で高周波加熱できるように工夫されている。大規模食品工場における大量生産に適した装置である。高周波解凍装置の前後に自動整列投入装置と自動排出装置を付け、ラインを自動化して省人化を実現している工場が多い。

6 高周波解凍の実例

高周波解凍装置による実際の解凍例を紹介する。

6.1 鶏肉の解凍

から揚げなどの原料となる鶏肉は、海外の原料工場

で脱骨処理され、むね肉やもも肉などの種類ごとに大きさを揃えてカットされ真空パックされている。外形が平坦で厚みも薄いので、高周波加熱には最適である。ダンボール箱より取り出して個別に搬送ベルトの上に並べて解凍することにより、10 分程度の短時間で $-2 \sim -1^{\circ}\text{C}$ 程度の温度まで均一な解凍が可能である (Fig.7)。この温度帯で鶏肉は手で簡単に身割れできるような柔らかな状態となっているが、ドリップの流出はほとんどない。大規模食品工場の鶏から揚げ生産ラインでは、初期温度 -20°C 程度の鶏肉を 1 時間当たり 1~3t 連続的に解凍処理している。

Fig.4 General view of the compact batch thawing device

Fig.5 Structure of the continuous thawing device

Fig.6 General view of the continuous thawing device

6.2 骨付の鶏肉の解凍

鶏肉でも骨付き肉を高周波やマイクロ波で解凍することは難しい。骨部と肉部では、損失係数や導電率が大きく異なるため、加熱分布が不均一となる。さらに骨部などの突起があると、そこに高周波やマイクロ波が集中するので過加熱になり易い。高周波の場合は、20~30 分の時間をかけてゆっくりと解凍してやることでダンボール箱に入ったままの状態でも $-3 \sim -2^{\circ}\text{C}$ 程度まで品質のよい解凍が可能である (Fig.8)。骨付きもも肉、骨付き手羽の解凍に利用されている。

6.3 牛肉の解凍

ハンバーグやミートボールなどの原料に使われている牛肉のほとんどは凍結された状態で海外から輸入される。ダンボール箱の厚みが 17~18cm もあるため、通常の冷蔵庫解凍やミスト庫解凍では、 0°C 以下の半解凍状態にするにも非常に時間と手間がかかる。そのためにドリップの流出が多く、品質の劣化やサニタリーの問題より、もっとも解凍が難しいものの一つである。これらの原料牛肉は、切り身をダンボール箱に詰め込み一つの塊として凍結したものであり、厚みがあり、脂肪・赤身が混合し、形状が不定型である。高周波解凍でも通常の加熱条件では解凍が困難である。

Fig.7 Chicken (breast, without the carton)

Fig.8 Chicken with the bone (thigh, enter the carton)

Fig.9 Beef (table meat, enter the carton)

7 高周波テンパリングと高周波解凍装置の特長

以下に高周波テンパリングと高周波解凍装置の特長についてまとめる。

【高周波テンパリングの特長】

- (1)氷点以下の温度までの解凍である
- (2)5~60分の短時間で処理できる
- (3)表面と内部の温度差は少ない,均一解凍であり,品質が高い
- (4)ドリップロスが少なく,歩留まりが高い

【高周波解凍装置の特長】

- (1)生産量に合わせて必要な量を即時解凍できる
- (2)連続処理できる,生産設備のライン化が可能
- (3)厚みのある容量の大きなものの解凍が可能
- (4)包装したままやダンボール箱のまま解凍できる
- (5)省スペースである
- (6)水は一切使用しないので,排水処理の問題がない
- (7)作業環境が良い,衛生管理しやすい

8 結言

高周波誘電加熱による凍結食品の解凍は,既に30年以上の歴史があり,近年特に普及が進んでいる。高周波解凍装置は,食品工業における解凍処理には欠くことができないものとなりつつある。今後,高周波加熱による解凍・テンパリング,高周波解凍装置が,さらに広く普及していくものと期待される。

参考文献

- [1]高井陸雄:食品の解凍,食品機械装置 Vol9, pp.57-59,1991
- [2]伊藤正晃:「マイクロ波加熱技術集成」,エヌ・ティー・エス, pp.300-304,1994
- [3]山本泰司:ニューフードインダストリー,43(3), pp.8-16, 2001
- [4]金井秀夫,栗山一政:電熱, Vol45, pp.71-79, 1989