

# 4. 高周波誘電加熱による急速解凍装置

Rapid Thawing Device by Radio Frequency Dielectric Heating

キーワード：解凍，解凍装置，誘電加熱，高周波，マイクロ波，テンパリング  
Thawing, Thawing equipment, Dielectric heating, Radio frequency, Microwave, Tempering

山本 泰司 Yasuji YAMAMOTO

## 1. 誘電加熱による解凍

高周波 (3 ~ 300 MHz) やマイクロ波 (300 MHz ~ 30 GHz) 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、木材などは、誘電体である。誘電体を高周波・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に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。

## 2. 高周波加熱とマイクロ波加熱

高周波やマイクロ波は、図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、次式で示される。電力は、周波数、電界の強さ、損失係

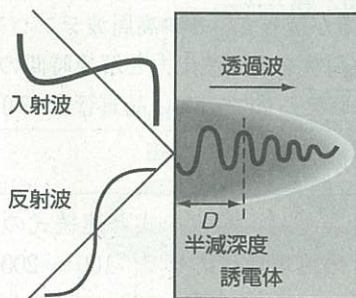


図1 誘電体に吸収された電波

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。

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

$\epsilon_r \cdot \tan \delta$  : 損失係数

$f$  : 周波数 (Hz)

$E$  : 電界強度 (V/m)

$P$  : 電力

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。表1に示すように10 MHz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、1000 MHzなら約20倍、2500 MHz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<sup>1)</sup>。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。これ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、解凍における熱暴走のリスクが高いことがわかる<sup>2)</sup>。

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 ( $D$ ) とよび次式で示される。

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

表1 水と氷の損失係数 ( $\epsilon \cdot \tan \delta$ )

物質名	高周波 (10 MHz)	マイクロ波 (1 000 MHz)	マイクロ波 (2 500 MHz)
水 (25℃)	0.63	1.23	12.3
氷 (-15℃)	0.067	0.065	0.0028

表2 牛肉の電力半減深度(計算値)

物質名	高周波 (10 MHz)	マイクロ波 (1 000 MHz)	マイクロ波 (2 500 MHz)
凍結牛肉(-15℃)	61 cm	12 cm	4 cm
牛肉(15℃)	26 cm	3 cm	0.4 cm

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。表2は、凍結と生状態の牛肉の半減深度を計算したものである。凍結状態において10 MHzの高周波は、1 000 MHzのマイクロ波より約5倍、2 500 MHz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<sup>2)</sup>。

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13.56 MHz、あるいは27.12 MHzである。欧米では、915 MHz(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<sup>1)</sup>。

### 3. 高周波加熱によるテンパリング

図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、被解凍物は図3のように、上下一対の電極間に挟まれ空気層(エアギャップ

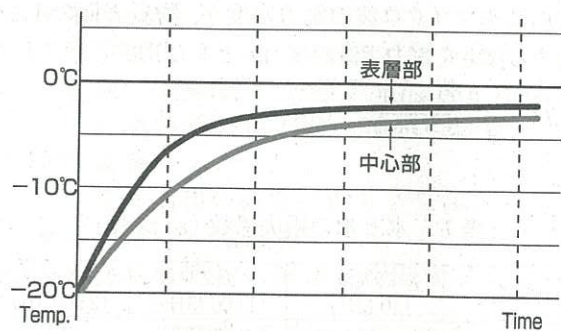


図2 高周波解凍による温度上昇曲線

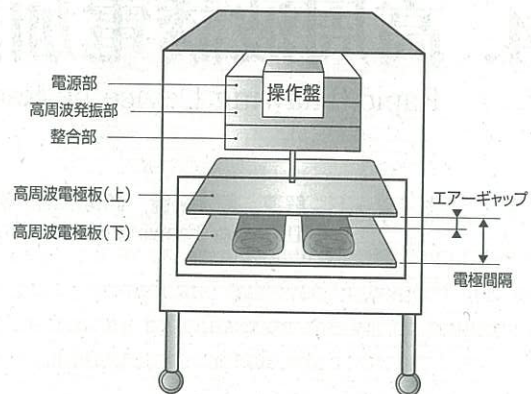


図3 高周波解凍装置の構造

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 $\epsilon_r$ 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<sup>3)</sup>。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<sup>2)</sup>。実際、水の入った容器を高周波電極板間に置いて、ほとんど加熱が起らない。これに対しマイクロ波は、電子レンジでコップに入った水を効率良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ししやすい。

工業生産の原料として使われる畜肉や魚肉などは、-20℃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~-1℃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、部分的にまだ水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。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げ温度は、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~-3℃が、ハンバーグ製造用の牛・豚肉のミキサー加工には-4~-2℃が、鶏から揚げ加工用には-2~-1℃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できるため、高い品質管理が可能である。

### 4. 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、100~200 kg/hrの小型、200~500 kg/hrの中型、500~5 000 kg/hrの大型とラインナップが揃っている。

#### 4.1 バッチ式小型解凍装置

図4はバッチ式小型解凍装置の外観である。小型で容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。



図4 バッチ式小型解凍装置の外観

#### 4.2 連続式小型解凍装置

図5に連続式の小型解凍装置の外観を示す。凍結食品は、コンベアで入口から出口に運ばれる間に解凍庫内で連続的に高周波加熱され、解凍が進む。高周波発振器、電源などをすべて解凍庫の上部に格納することで、解凍庫内は水洗いが可能であり、サニタリー性にも十分に配慮されている。

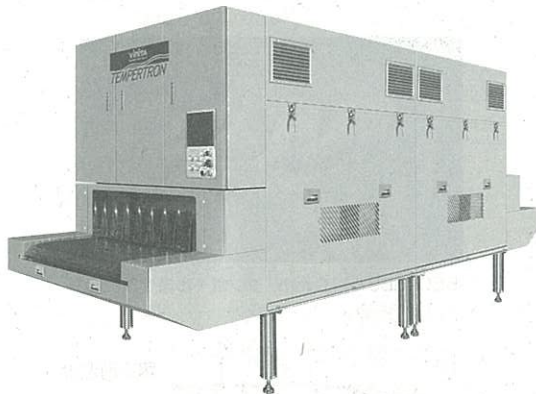


図5 連続式小型解凍装置の外観

#### 4.3 連続式大型解凍装置

図6は、連続式大型解凍装置の構造、図7はその外観を示す。時間当たり1～5t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、ラインとして自動化を実現している工場が多い。

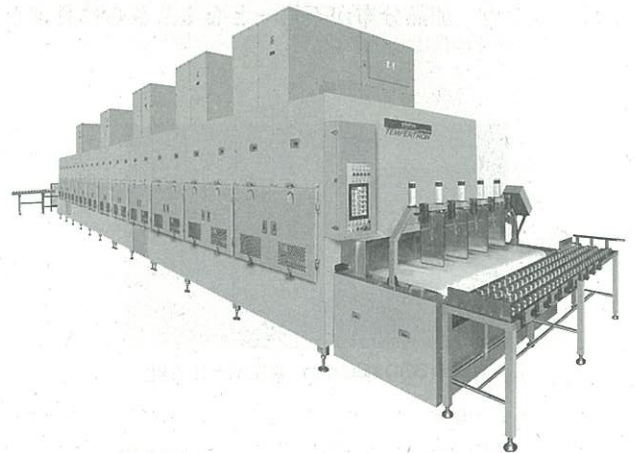


図7 連続式大型解凍装置の外観

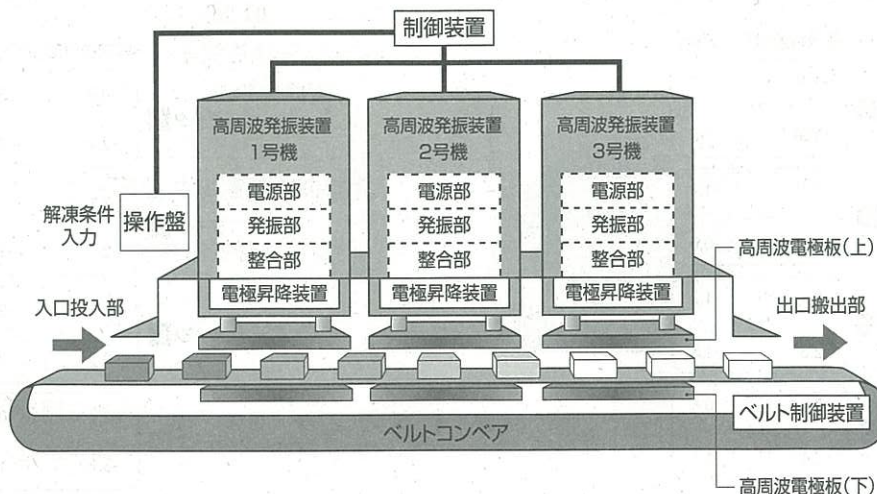


図6 連続式大型解凍装置の構造

5. 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。

5.1 鶏肉の解凍

から揚げなどの原料となる鶏肉は、海外の原料工場です骨処理され、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~-1℃程度の高い温度まで均一な解凍が可能である(図8)。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い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℃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。

5.2 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やすい。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~-2℃程度まで品質の良い解凍が可能である(図9)。骨付きもも肉、骨付き手羽の解凍に利用されている。

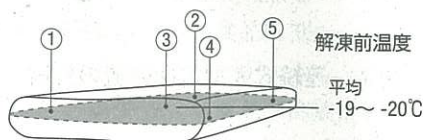
5.3 牛肉の解凍

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海外からの輸入であり、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℃以下の半解凍状態にするの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性の問題より、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。

解凍の初期に表層部を先行させて昇温させてしまうと中心部への高周波エネルギーの浸透が悪くなり、中心部

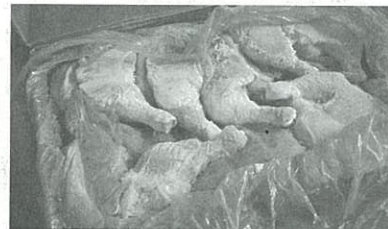


430x360x50mm, 真空パック 4kg

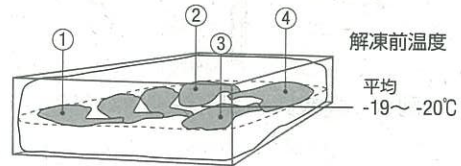


解凍後温度(10分後)	
データA	-1.4 -1.1 -2.0 -1.8
データB	-1.1 -1.2 -1.0 -0.6
データC	-2.1 -1.3 -2.3 -1.6
データD	-2.8 -0.8 -2.4 -1.1

図8 鶏肉(むね肉, 箱なし)



550x380x110mm, ダンボール箱 13.6kg

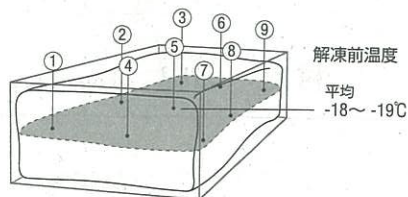


解凍後温度(25分後)	
データA	-0.9 -3.2 -2.1 -2.8
データB	-2.1 -1.6 -2.1 -2.6
データC	-1.6 -2.0 -2.5 -2.2
データD	-2.1 -0.7 -3.1 -1.3

図9 骨付き鶏肉(もも肉, 箱入り)



530x360x175 mm, ダンボール箱 27.2 kg



	中間温度(10分後)			解凍後温度(45分後)		
データA	-9.6	-9.9	-11.9	-2.4	-2.6	-1.6
	-10.3	-9.1	-11.5	-3.2	-1.6	-2.0
	-10.9	-12.7	-10.5	-2.3	-4.7	-2.3
データB	-4.6	-9.8	-9.8	-0.5	-3.4	-3.8
	-10.5	-7.3	-9.2	-2.9	-0.5	-2.5
	-12.3	-10.8	-11.0	-4.0	-2.8	-2.9
データC	-8.7	-11.3	-10.0	-3.1	-2.6	-4.4
	-13.1	-9.9	-13.1	-2.5	-2.0	-2.4
	-10.0	-11.4	-10.8	-3.2	-2.4	-2.1
データD	-11.2	-9.3	-9.3	-2.6	-2.2	-2.9
	-11.4	-7.5	-11.1	-3.4	-2.6	-2.9
	-9.3	-10.6	-12.3	-3.4	-3.5	-4.5

図10 牛肉(テーブルミート, 箱入り)

の解凍を進めることができない。表層部の過加熱や部分煮えが発生しやすい。このため高周波加熱条件を工夫し、高周波エネルギーを牛肉の中心部へ集中させるようにしながら、30～50分という時間をかけて解凍している。これにより-4～-2℃の温度帯まで均一な解凍が可能となった。この温度帯ではドリップの流出はほとんどなく、変色などの品質劣化もない(図10)。大手ハンバーガーチェーン店で膨大な量が消費されているハンバーガーパティの原料肉の解凍には、この高周波テンパリングが利用されている。

### 6. 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。

#### 6.1 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。

#### 6.2 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である。
- (3) 厚みのある容量の大きなものの解凍が可能である。
- (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。

高周波加熱による凍結食品の解凍は、既に20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、工業的な食品加工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。

#### 文 献

- 1) 伊藤正晃:「マイクロ波加熱技術集成」pp.300-304, エヌ・ティー・エス, (1994).
- 2) 山本泰司:「ニューフードインダストリー」, 43(3), 8-16 (2001).
- 3) 金井秀夫, 栗山一政:「電熱」, 45, 71-79 (1989).

#### Summary

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 (300 MHz ~ 30 GHz), radio frequency waves (3 ~ 300 MHz) 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℃ 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.



山本 泰司 Yasuji YAMAMOTO

関西学院大学経済学部卒業

山本ビニター(株)  
Yamamoto Vinita Co., Ltd.  
代表取締役社長

原稿受理 2013年8月30日