高周波誘電・マイクロ波による表面乾燥 ーシート，成形品表面，薄膜などー

浅 見 忍^a^a 富士電波工機(株) 第一機器部(〒350-2201 埼玉県鶴ヶ島市富士見 6-2-22)

Surface Drying by High Frequency Dielectric and Microwave Heating - Sheet, Surface of Molded Article, Thin Film, and so on -

Shinobu ASAMI^a^a Fuji Electronic Industrial Co., Ltd(6-2-22, Fujimi, Tsurugashima-shi, Saitama 350-2201)**Keywords** : High Frequency Dielectric Heating, Microwave Heating, Surface Drying

1. はじめに

高周波誘電加熱・マイクロ波加熱は、電気部品をはじめ食品、自動車、建材、医薬品、セラミックス製造など多くの分野で利用されている。これらはCO₂を排出せず、作業環境を悪化させないクリーンなエネルギーであるが、近年、生産工程での電気使用量の見直し機運の高まりから、高周波誘電加熱・マイクロ波加熱の特長である“対象自体が加熱する高い加熱効率”が再度注目され、その動きは多くの業界・工程で起こっている。

本稿では、高周波誘電加熱・マイクロ波加熱の基礎知識と、対象の自己発熱・加熱効率の特長を活かした例として、高周波による表面乾燥での事例を紹介する。この応用は最近では印刷関連を越えてさまざまなシート状の対象の加熱・乾燥工程で希望も高まっている。また、成形物の表面乾燥処理など、今までと異なる新しい活用の動きも出てきている。

2. 高周波加熱の原理と特徴

高周波・マイクロ波は電磁波の一種であり、電磁波とは直交する電界と磁界の相互作用によって伝播する電気の波の総称である。これは可視光から、γ線やX線、放送や通信、携帯電話などに利用されているものなどがあり、その波長によって長波、超短波、マイクロ波、紫外線などに分類されている。表1にある様々な種類、これら全てが電磁波である。

工業用に利用される場合、一般的に10 kHz～200 MHzの範囲を「高周波」と総称し、さらに高い周波数を「マイクロ波」と称している。電磁波の中で加熱に利用できる周波数「ISMバンド」を表2に示す。ISMバンド(Industry-Science-Medical)とは、国際電気通信連合(ITU)により、電波をエネルギー源として産業・科学・医療に利用するために指定された周波数帯である(国際電気通信連合憲章 無線通信規則 5.150)²⁾。なお、マイクロ波の加熱向けの周波数915 MHzは南北アメリカ大陸に限り指定されている。

表1 電磁波の分類

周波数	波長	電波法による分類	名称	
1Hz				電波
10	100	(ELF)	極超長波	
100	10	(SLF)	極超長波	
1 kHz	1 Mm	(ULF)	極超長波	
10	100	VLF	超長波	
100	10	LF	長波	
1 MHz	1 km	MF	中波	
10	100	HF	短波	
100	10	VHF	超短波	
1 GHz	1 m	UHF	極超短波	
10	100	SHF	センチメートル波	
100	10	EHF	ミリ波	
1 THz	1 mm		テラヘルツ波	
10	100		遠赤外線	
100	10		赤外線	
1 PHz	1 μm		可視光線	
10	100		紫外線	
100	10			
1 EHz	1 nm		X線	
10	100			
100	10		γ線	
	1 pm			

表2 ISM周波数

周波数	許容偏差	波長	備考
13.56 MHz	± 7 kHz	22.1 m	
27.12 MHz	± 163 kHz	11.1 m	
40.68 MHz	± 20 kHz	7.37 m	
915 MHz	± 13 MHz	32.8 cm	南北アメリカ大陸のみ指定
2.45 GHz	± 50 MHz	12.2 cm	
5.8 GHz	± 75 MHz	5.17 cm	
24.125 GHz	± 125 MHz	1.24 cm	

3. 高周波誘電加熱とは

3. 1 高周波誘電加熱の原理

高周波誘電・マイクロ波加熱は、導電性よりも誘電性が優れた物質である「誘電体」が主な加熱対象である(金属粉末など一部例外有り)。誘電体の内部には自由電子はあまり含まれていないが、そのかわり分子の両側に陽陰等量の電荷を持ったたくさんの双極子(ダイポール)が含まれており、外から加えられる電気力線の方向が変わるにつれて、それらは平均位置を変えないで配列の軸方向を変えようとする。このとき互いに摩擦・衝突し、発熱を起こす。分子ダイポールが振動する様子を図1に示す。電界の極性変化に対して、双極子の振動が追いつかないと、その差が誘電体損失となり、誘電損による高周波発熱作用となる。つまり“対象の誘電体が振動しやすいか否か”で加熱の量、されやすさが大きく異なる。

なお、マイクロ波も高周波誘電と同じ加熱原理であるが、高周波誘電とマイクロ波との違いは、「周波数」、「波長」、「電極の有無」である。

3. 2 吸収電力の計算

図2に示すように誘電体と1対の電極板で構成されるコンデンサの静電容量をCとする。電界が存在する誘電体の中では先に述べた双極子の振動中にロスが発生するが、これを抵抗とロスの無いコンデンサで等価的にあらわすことができる。コンデンサを流れる電流 I_c は位相が90度進み、抵抗を流れる電流 I_r は位相が δ だけ遅れる。この角度 δ を誘電損失角、また I_r と I_c の比を誘電正接と呼ぶ。

$$I = I_r + I_c = V/R + j2\pi f C V$$

誘電体内に誘電損として消費される電力は

$$W = VI \cos\theta = VI_c \tan\delta = 2\pi f C V^2 \tan\delta$$

電極面積をS、距離をd、真空の誘電率を $\epsilon_0 = 0.0886 \times 10^{-12}$ (F/cm), ある誘電体の誘電率が真空の誘電率の何倍になる

図1 誘電体中の分子ダイポール

図2 誘電加熱と等価回路

かを表す比誘電率 ϵ_r とすると、平行電極の静電容量は

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r S/d \quad (\text{F})$$

したがって、

$$W = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon_r S/d V^2 \tan\delta \quad (\text{W})$$

$$= 0.556 f \epsilon_r S/d V^2 \tan\delta \times 10^{-12}$$

誘電体の体積は $S d$ (cm^3)で表されるから単位体積当たりの電力密度 P は

$$P = W/(S d) \quad (\text{W/cm}^3)$$

$$= 0.556 f \epsilon_r V^2/d^2 \tan\delta \times 10^{-12} \quad (\text{W/cm}^3)$$

V/d は電界の強さであるからこれを E (kV/cm)とおき f をMHzで表すと

$$P = 0.556 f E^2 \epsilon_r \tan\delta \quad (\text{W/cm}^3)$$

以上から、加熱速度を上げるには E と f を大きくすれば良いことになる。電界の強さ E が極端に高いと誘電体の電気破壊を起こしたり、電極間の空気中に放電を起こしたりするため、最大値に限度がある。また周波数 f がある程度高くなると電極を大きくできないこと、高周波電力を大きくできないことなどから限界がある。

ここで身近な物質の1 MHzにおける比誘電率 ϵ_r と誘電正接 $\tan\delta$ およびその積のおおよその値を表3に示す。

表3にあるように、誘電体は比誘電率 ϵ_r と誘電正接 $\tan\delta$ を持ち、この数値は高周波で加熱反応を起こすことを意味し、比誘電率 ϵ_r と誘電正接 $\tan\delta$ の大小は(同一条件下での)それぞれの加熱の多寡を意味する(比誘電率 ϵ_r と誘電正接 $\tan\delta$ は周波数や対象の温度によって異なる)。

水は高周波で極めて加熱されやすいもののひとつであり、高周波は水の選択的加熱乾燥に非常に適している。 $\epsilon_r \tan\delta$ から水の場合の吸収電力 P を算出してみる。周波数13.56 MHz, $E = 1$ kV/cmとすると、 $0.556 \times 13.56 \times 1 \times 2.46 = 18.5$ (W/cm^3)と算出できる。

3. 3 高周波誘電加熱の特徴

従来の加熱方式は外部熱源からの対流・輻射・伝導による熱の移動に依存するのに対し、誘電加熱では被加熱物自身が発熱する。各種加熱方式による加熱時の温度分布例を図3に示す。

表3 誘電体の比誘電率と誘電正接の概略値

誘電体	ϵ_r	$\tan\delta$	$\epsilon_r \tan\delta$
水	80 ~ 82	0.3	2.46
綿	6.0	0.16	0.96
軟質塩化ビニル	3.3 ~ 4.5	0.14	0.63
ウール	4.6	0.04	0.18
木材	3	0.03	0.09
アクリル	2.7	0.03	0.08
A B S	2.8 ~ 3	0.026	0.078
ソーダガラス	6.5	0.01	0.065
シリコン	3.0 ~ 4.1	0.005	0.021
生ゴム	3.0 ~ 4.0	0.005	0.02
ポリカーボ	2.0 ~ 3.0	0.0009	0.003
ポリプロピレン	2.2 ~ 2.6	0.0018	0.0017
石英ガラス	3.5 ~ 4.5	0.0003	0.0014
ポリエチレン	2.3 ~ 2.4	0.0005	0.0012
ポリスチレン	2.5 ~ 2.7	0.0004	0.001
テフロン	2.1	0.0002	0.0004
空気	≈ 1.0	≈ 0	≈ 0

図3 加熱方式での温度パターン

3. 4 高周波誘電加熱のメリット

①急速かつ均一な加熱・乾燥が可能

一般的に電気的良好な絶縁体である誘電体は同時に熱伝導率が小さい。このため外部加熱では外側の温度はあがっても中心部はなかなか昇温せず、内部の昇温に長時間を要する。誘電加熱は物質自体が発熱し熱伝導の時間を必要としない。短時間で均一に加熱することができる。

②加熱効率が良好

誘電加熱は炉体や雰囲気を加熱すること無く、被加熱物自体が昇温するので余分なエネルギーは不要である。

③レスポンスがよく制御が容易

被加熱物自身の発熱であるため、高周波電力の印加に対し温度が迅速に反応する。加熱の立上り、停止等が迅速に行える。

④選択加熱が可能

発熱が加熱対象の誘電体損失係数($\epsilon_r \tan \delta$)に依存するので選択加熱が可能となる。例えば、印刷物の水性インクの乾燥ではベースの紙は加熱されず、インクのみが高周波エネルギーを吸収して発熱・蒸発する。

⑤減圧下や特殊雰囲気での加熱が可能

減圧下でも誘電加熱は対象自体を発熱することができるため、水の沸点を抑えて効率的に乾燥することができる。材料自体の温度を低く押えることで、材料の変色・変質を嫌う食品や繊維、木材の乾燥に応用されている。また、熱伝導・対流によらないので反応性ガスや不活性ガス雰囲気内での加熱処理にも有効である。

⑥間接加熱が可能である

誘電加熱では、容器中のものを直接加熱することができる。外部加熱は、容器の中のものを加熱しようとすれば、熱伝導が悪いために時間を要する。この時、容器は誘電体損失が小さいもので、容器の中の空気及び水蒸気が膨張しても電極に触れないようにすることが必要となる。

⑦環境にやさしい

誘電加熱は熱源として有害なガスを発生することなく、また作業室の温度を上げることもない。騒音を発生させることもないので作業環境がよい。

3. 5 高周波誘電加熱のデメリット

①被加熱物が誘電体に限定される

導電体は高周波誘電加熱の対象にはならない(マイクロ波

は加熱できるケース有り)。被加熱物が金属を含む場合、金属部分が誘導加熱により過剰に加熱されることがある。対象が誘電体でも加熱乾燥速度を上げるのに過度に電極電圧を高くするとスパークが発生する場合がある。

②防爆構造が取れない(高周波導入用の入口が必要なため)。

③他の熱源に比べてイニシャルコストが高い場合が多い。

④均一加熱には装置工夫が必要

均一に加熱するためには電界を一樣にする必要がある。被加熱物の形状によっては困難な場合もある。

④電磁波による他への干渉に注意が必要

電磁波の応用であるため、関連法規の遵守、周辺設備への電磁妨害(EMI)に配慮する必要がある。

3. 6 高周波誘電の電極構成

マイクロ波と高周波誘電は加熱の原理は同じであるが、周波数は異なる(表2参照)。周波数の他にマイクロ波と高周波誘電の大きな違いは、アプリケーション構成で、マイクロ波は無電極であるのに対して、高周波誘電は電極を要する。高周波誘電では各種電極を用いることで、様々な形状寸法の加熱対象を均一に加熱、または部分的に・選択的に加熱することができる。下記に電極の構造と装置構成を述べる。

①平行電極

物質が均質で形状が一樣な場合、平行平板電極が良く使われる。平行平板は、端部を除けば電界分布が一樣となり均一加熱しやすい(図4参照)。逆に薄物の場合や形状が不定形の場合、静電容量が増大し、内部インピーダンスが低下する欠点もある。平行電極はバッチ式、連続式共に装置化が可能である。

【応用例】

- ・ファインセラミックスの原料ブロックの乾燥
- ・セラミックスハニカム押出成形品の乾燥
- ・箱詰めされた食品の加熱(乾燥、調理、殺卵)
- ・木材の加熱・乾燥・接着など

②ローラー電極

対象がパイプやシャフト、円柱状の場合、ローラー電極を使い回転させ電界分布を一樣とし、内部まで均一に加熱する(図5参照)。電極が2本のローラーで構成され、加熱対象はローラー電極上を回転しながら加熱される。電極間隔は可変でき、内部、外周部の昇温を最適にコントロールできる。装置構成はバッチ式となる。

【応用例】

- ・電機絶縁部品、機械部品、メラミン食器、プラスチック漆器や雑貨類など圧縮成形品の余熱

図4 平行電極

図5 ローラー電極

※+電極と-電極間の高周波（破線）に対象が通過することで加熱することができる。

図6 格子電極の電界と負荷の状態

- ・トランスファー成形による半導体・ICなどの電子部品やコイル・抵抗などのプラスチック封止
- ・FRPの引抜成形、SMC・BMCなどの成形
- ・セラミック成形品の乾燥など

③格子電極

シート状の薄い物質に対して、格子（グリッド）電極を同一面上に（+）（-）を交互に配置し薄物の物質と電界を片面から結合し加熱する。格子電極構造モデルを図6に示す。連続または枚葉・搬送パレットに載った状態のいずれも対応可能である。なお、格子電極では電極上は電界が無いため、負荷を加熱することができない。連続搬送することで全体を均一に加熱することができる。

【応用例】

- ・宅配便伝票、封筒、はがき等糊の乾燥
- ・給料明細等ビジネスフォームの水性インクの乾燥
- ・フィルムに塗工したセラミックや電子材料の乾燥（除去対象は水、溶剤）
- ・無機物表面にコートした材の表面乾燥など

3.7 印刷分野で使用される連続式乾燥装置

高周波誘電加熱は印刷関連やビジネスフォームの糊乾燥、水性インクジェット乾燥に広く使用されている。

ビジネスフォームとは、宅配便や給与明細をはじめとする伝票類など、両端にプリンタ用のマージナルホールがあるコンピューター用紙のことで、通常4枚～9枚程度重なっており、端が糊で接着されている。連続用紙にミシン目が入り、ジグザグに折られた状態に成形するため、糊が乾燥していないと、お互いが固着しトラブルになる。

熱伝導による従来加熱乾燥では、用紙全体に熱を加える必要があるが、熱により用紙が収縮するため、調整が大変難しい。特に数枚重なり合った内部の糊を外部加熱で短時間に乾燥することは不可能である。また、加熱炉内に滞留した場合、

コゲや発火などの事故に繋がることもある。

高周波誘電加熱では、水性塗工剤のみが選択的に加熱され、紙の温度を上げること無く急速かつ均一に乾燥することができる。発火のような事故も発生しない。

水性インクジェットでの乾燥も糊の乾燥と同じく、水性高周波誘電は対象の水分のみを加熱するため、安全である。インクジェットでの高周波誘電の大きなメリットは、従来の遠赤外線やヒーターロールと異なり、乾燥炉からの最低限の排気のみで乾燥炉内の雰囲気温を温める必要がないことである。

給与明細や年金通知等の個人情報扱うデータ印字では、情報漏洩防止・セキュリティが前提となるため、熱風等による乾燥では作業環境の排熱・換気に伴う設備費は乾燥システムよりも大きなものとなり、ランニングコストにも大きく影響していた。

高周波誘電は排熱排気処理が不要なため、付帯設備のコストが大幅軽減できることも大きなメリットとなっている。

図7に連続乾燥装置の電極配置図と図8に電極部の写真（テスト機）を示す。図9に印刷乾燥装置の構成、図10に実例を示す。

ビジネスフォームの糊乾燥ラインや水性インクジェット乾燥のラインは全長で10m以上、最長で15m以上あるが、高周波誘電の乾燥工程は最長でも2mとなっている。

印刷インキの乾燥に必要なエネルギーを従来の熱風方式と比較すると、

①熱風の場合	熱風の熱効率（非循環）：約10%
②高周波の場合	高周波の効率：約40%

一方、電源部に供給する電力からみた発生効率は①で100%に近く、②では50%程度であるが総合効率としては1:2となり高周波誘電加熱のほうが圧倒的に良い。

3.8 格子式電極・高周波誘電加熱の他分野での応用

格子電極による高周波誘電加熱は、印刷物や伝票類等での、水を対象とした乾燥利用がほとんどであったが、高周波誘電

図7 電極配置

図8 印刷乾燥装置のアプリケーション部

図9 印刷乾燥装置の構成

※+電極と一電極間の高周波（破線）に成形物の塗工面が通過することで加熱ができる。

図11 成形物表面の高周波乾燥

図10 連続式高周波誘電乾燥装置

図12 マイクロ波シートタイプ連続処理装置

は有機溶剤も配合によっては加熱・乾燥することができる。

最近では、化学メーカーなどで溶剤を対象としたシートの連続乾燥を検討する動きが見られる。防爆対策については（お客様のご理解と協力を得て）電源及びアプリケーションを内圧防爆にする等、改良を加えている。例えば、セラミックスシートから有機溶剤を除去する工程で、従来の熱風による乾燥が20分、炉長20～30m要したのに比べ、高周波誘電では乾燥時間は3分程度、加熱効率は熱風の5倍以上、電力使用量も1/6になったケースもある。

電子材料メーカーでは接着剤の加熱硬化工程での検討が進んでいる。

また、水を対象とした応用でもシート状の食品の連続乾燥や、樹脂繊維の乾燥などでの希望が増えている。さらには、無機成形物等の表面に塗工したスラリーの乾燥など、薄物・シート以外での応用も検討されている（図11参照）。

高周波誘電への期待は以下の点で共通している。

- ①対象自体が加熱され、非常に高い熱効率が得られる。これにより、乾燥炉が極端に小さくなる。
- ②対象の雰囲気を加熱する必要がない。従来では長大な加熱炉を生産条件の温度まで安定させるのに、多量のエネルギーを必要とする。
- ③生産開始までの準備・待機時間を必要としない。高周波誘電は稼動、即生産開始が可能なのに比べ、従来方法は生産条件に炉内が安定するまで数時間を要する。この間の装置稼動に掛かるコスト、さらに生産に携われない人

件費がコストアップに繋がる。

- ④炉外排熱に関わる装置を必要としない。

4. マイクロ波による薄膜シートの加熱

弊社では薄膜の加熱・乾燥・焼成を目的に、マイクロ波応用装置を開発した。半導体式電源とアプリケーション技術（シングルモード・マルチモードキャビティ）が融合し、主に金属を含む、有機・無機粉末の焼結・反応・合成・不純物除去をはじめ、特定のラジカル制御を狙ったプラズマプロセスやナノ粒子製造、新素材開発等で使用され始めている。

図12にITO膜・ZnO膜・金属蒸着膜等のマイクロ波による磁場加熱例・金属ナノインクを低温焼成したアプリケーションの例を示す。これは大気中でロール to ロールにて非接触にて加熱できる技術であり、マイクロ波を電界と磁界に分離しスパーク無しで加熱することが可能になった。基材はPEN・PET・石英等が可能、多連結することで処理量upが可能である。

これは“マイクロ波による金属加熱”の検討がきっかけであった。一般にはマイクロ波で金属は加熱できない＝反射、またはスパークを発生するという先入観から、加熱対象としての考えは少なかった。実際、金や銀で装飾された皿を電子レンジで使用すると、装飾部分がスパークを起こす。“金属＝マイクロ波加熱の対象外”と考えていた。

しかし、“スパーク”を“過剰な発熱現象”と捉えると、

図 13 半導体式マイクロ波実験装置(シングルモード)
(2.45 GHz 500 W 半導体式電源)

マイクロ波を精密に制御することができれば、スパークさせずに加熱することができ、ある条件下では、マイクロ波は金属粉末を加熱できる。

現在、レアアースの回収や新材料の開発(高温加熱による還元反応等)、燃料電池や太陽電池向け材料開発や導電性透明膜の加熱焼成など、様々な局面で検討・利用が進められている。

図 13 にシングルモード実験装置を示す。本装置は半導体式(全固体化)で 0.1 W 単位の精密な電力制御及び周波数の変動が少なく、スペクトラム純度が良く、精度が高いテストが

可能となった。

5. おわりに

高周波誘電やマイクロ波は、新材料や新製品の開発で検討・導入されるケースが多かった。最近では加熱効率の高さを活かし、使用電力量の削減を目的に検討されるケースも増えている。

弊社は昭和 23 年に設立されて以来、高周波誘電、マイクロ波など電磁波エネルギーを利用する加熱装置メーカーとして、省エネ、省力化、そして省資源や地球環境の保護に貢献している。発振機などのデバイスからテスト装置、大型生産装置まで自社で開発・製造している。

高周波誘電やマイクロ波は対象の成分、形状寸法、目的、生産条件などによって加熱の状態や装置の仕様が異なる。弊社では、お客様の希望に対して最も効率的な周波数の選択から検討をスタートし、お客様に合わせた装置開発を行っている。興味のある方は弊社ホームページを御覧いただきたい。

(Received May 29, 2015)

文 献

- 1) 富士電波工機株式会社 ; <http://www.fdc.co.jp/>
- 2) 浅見 忍 ; 高周波誘電による印刷関連での乾燥及びマイクロ波による薄膜シートの加熱, エレクトロヒート(2012年9月号)。