

■遠赤加熱の理論(1)遠赤外加熱の熱工学的特長（放射伝熱工学の観点より）

1 遠赤外加熱・乾燥を巡る過大・過小評価

遠赤外加熱はこれまでに、いろいろな立場からの評価を受けてきた。最初に我が国でその効果が認められ出した頃は、電磁波が物体内部まで浸透していくので、素早い処理が出来るとか、電磁波の独特のマイクロな作用で食品はおいしく出来上がる、などと宣伝され、識者からの反論を浴びた。例えば遠赤外線は多くの物体の極く表面層でほとんど吸収され内部に浸透しないので、深部への熱伝達に格別有利ではない、あるいは石焼芋がうまく、あるいはおいしく焼けるのは加熱された石からの遠赤外放射が寄与しているのではない、その熱伝達機構も石からの熱伝導や石の間を通る熱風によるものだ、などの説である。これらの反論、あるいは遠赤外加熱過小評価論は、以下に示すように、大いなる誤解に基づいているのであるが、未だにそのような説を唱える識者もおり、それらの影響も蒙って、遠赤外加熱が優れた加熱・乾燥の汎用技術として、幅広い信頼を克ち得ていないように見えるのは、残念なことである。そこで、ここでは(社)遠赤外線協会において説明されている、遠赤外加熱の優れた効果を生み出すいくつかの機構について、改めて整理し、全体的な因果関係のマップにまとめ、識者らの誤った理解を正す一助とする。

2 遠赤外加熱の熱工学的特長

(1)熱源との非接触

遠赤外加熱とその他の一般の加熱方法、すなわちマイクロ波などを除く熱風加熱や熱板加熱との違いは、後の二つが熱源との接触による伝熱であるのに対し、前者は熱源とは離れていることである。接触伝熱の場合、物体表面の温度は急速に熱源温度に接近するので、すぐに両者の温度差は無くなっていく。従って熱源から物体への熱流は短時間に減少する。それ以降の内部の昇温や水分蒸発は、熱源あるいは周囲との平衡的な状態において、いわば自然任せで進むのを待つことになる。

また熱源温度を任意に設定することは出来ない。熱源は物体と接触しているのであるから、その温度は物体が熱的に耐えられる温度以下でなければならない。すなわち熱源が供給できる熱流は勝手に定めることは出来ず、自ずから定まっていることになる。

一方遠赤外加熱の場合は、物体表面は急に上昇することはない。従って通常遠赤外ヒータ温度はかなり高めに設定して用いることが出来る。というより、表面に熱的ダメージを受けさせずに、如何にヒータ温度を高く設定して、放射パワーを大きく取るかを追及して

いくことがポイントになる。すなわちこの加熱・乾燥方法は、表面温度が限界に達する前に必要なエネルギーを投入することにより、所定の水分除去あるいは内部昇温を完了させようという、非平衡的、あるいは過渡状態利用の方法なのである。また投入パワー律速の方法とも言える。ヒータ温度設定の自由度が高い、ということである。

(2)理想的な放射伝熱

①で述べた熱源との接触の有無は、伝熱方式としては、対流および伝導に対して放射という分けかたになる。さらに遠赤外加熱においては、遠赤外ヒータと加熱対象物との間に、放射特性と吸収特性との好ましい合致があり、言うならば理想に近い放射伝熱が成立すると考えられる。近赤外加熱も放射加熱であるが、上記特性の合致の点で、理想的とは言いがたい。遠赤外対近赤外の対比については、後の(4)①と(5)でも検討を加える。

理想的な放射伝熱にはどのような利点があるか、以下に解析を行う。まず接触加熱の場合、熱風あるいは熱板の温度を T_A [K]、物体の表面温度を T_s [K] とすると、その間の熱流の大きさ Q_C

(界面の単位面積当たり、単位時間に移動する熱量) $[kW/m^2]$ は、比例定数を $h[kW/(m^2 \cdot K)]$ とおくと(1)式が成立する。この比例定数は熱風加熱の場合、界面の熱伝達係数に相当する。ここで熱源側の温度 T_A は一定であり、一方 T_s は加熱の進行に伴い上昇する。

$$Q_C = h(T_A - T_s) \quad (1)$$

一方放射加熱の場合、遠赤外ヒータから物体表面へと流れる熱流の大きさ Q_R $[kW/m^2]$ は、ヒータ温度 T_H [K] と物体表面温度 T_s [K] の、それぞれの 4 乗の差に比例するので(2)式が成り立つ。ここで σ は Stefan-Boltzmann 定数であり、 ε は高温側、低温側両物体の放射率、形状、幾何学的配置で決まる形態係数を含んだ因子であるが、ここではその値自身が問題ではないので、1 とする。

$$Q_R = \varepsilon \sigma (T_H^4 - T_s^4) \quad (2)$$

縦軸に熱流 Q_C および Q_R 、横軸に物体の表面温度 T_s を採り、これらの式をグラフにしたのが図 1 である。なお上記の変数以外の各因子には、図中に示したようにそれぞれ代表

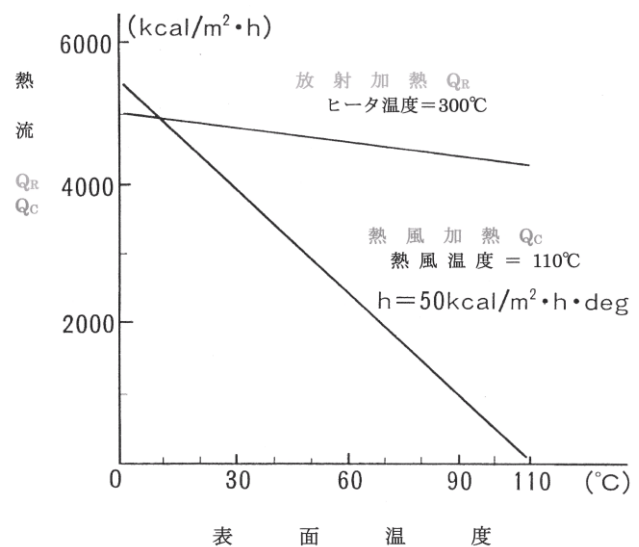


図 1 加熱進行に伴う熱流変化

的な数値を代入して作図した。[ここでは各因子の熱量の単位として、Wh でなく kcal を用いている。因みに $1\text{kWh}=860\text{kcal}$ である。また理解を容易ならしめるため、温度は $^{\circ}\text{C}$ で表している]。

加熱の進行に伴い T_s は上昇していくが、その時接触加熱では、熱流が T_s に対し比例的に減少していくのに対し、遠赤外加熱では T_s が上昇してきても、熱流は僅かしか減らず、ほぼ一定の熱流が確保されることが分かる。これは熱伝達能力の面からは、非常に有利な特長であることは明らかである。

(3)乾燥における劇的な効果

この一定熱流確保の加熱方式と周囲あるいは熱源との平衡状態の下での加熱方式の違いは大きい。熱風乾燥と遠赤外乾燥との対比において、前者がバッチ式で半日掛かっているのが、後方で処理すると連続装置で例えば 20 分で済む、というような劇的な違いが生じるのは、今述べた理由によるのである。もちろんここで、遠赤外乾燥には、①で述べた放射パワーを限界まで高めてみる自由度があり、当然最高の成績が得られるような、放射パワー投入のプログラムを設定しておくことが必要である。

遠赤外乾燥には熱風乾燥ではなし得ないことがまだある。(1)で熱風乾燥は平衡乾燥になっていると指摘した。従ってそれにより達成される仕上がり水分は、平衡水分以下にはなり得ない。一方遠赤外乾燥は、雰囲気的水分には余り左右されず、投入されたパワーで蒸発速度が決まる度合いが高い。これも(1)で述べた投入パワー律速の意味である。乱暴に言えば、放射パワーを倍にすれば、倍の速度で水分が蒸発する。これが平衡論的な乾燥ではなく、過渡的な乾燥が行われるという意味である。水分除去の難しい物質に遠赤外乾燥を適用し、しばしば 0.3%などの絶乾に近い乾燥が達成されるのは不思議ではない。

(4)遠赤外吸収と深部への熱伝達

①浸透と吸収

遠赤外放射はその波長域によっていくらかの差異はあるが、ほとんどの物質において、その表面であまり反射されず、表面近傍で非常によく吸収される。従って概ね物体深部には浸透しにくいといえる。近赤外放射は、多くの物質に対し、表面で反射される分も含むが、反射されずに内部に進んだ分は、進むにつれ徐々に吸収されていくが、ほぼ吸収されるまでに進む距離は遠赤外放射の場合より深い。もしもすべてが吸収されない場合は、その物質の厚みの反対側から透過していく。近赤外放射はより深く浸透するといっても、やはり表面に近い部分で圧倒的な部分が吸収され、浸透していくにつれ、指数関数的に減衰していくから、その浸透機構が格別遠赤外放射に比し、内部への熱伝達に有利というわけ

でもないのである。

では表面でほぼ吸収されつくす遠赤外放射は、内部への熱伝達に不利なのか。「深部への熱伝達は熱伝導によっており、ある程度の厚みを持った物体の場合、その深さのほとんどの距離は熱伝導が支配している。表面の高々0.1~0.2mmは瞬時に放射が吸収されたとしても、内部への熱伝達の早さには全く寄与しない。遠赤外加熱は熱伝導と変わりがなく、深部を早く加熱するはずがない」。このような説が、やはり識者から発せられたことがあり、未だにそうではないかと思っている人が少なくない。

②熱伝導の方程式の意味と深部の昇温速度を決める因子

熱伝導方程式は、伝達距離が同じならば同じ時間に同じエネルギーが移動するなどということは述べていないし、それ自体「熱の移動の速度」を規定はしない。熱伝導方程式は、定常状態においては、入ってきた熱流の大きさ(単位時間に入ってくるエネルギー量)と同じ分だけそこから出て行く、という熱流連続しか規定していない。系が定常状態になく、熱流の出入りに差があれば、それに応じた速さでその温度が上昇、あるいは低下する、ということである。そもそも同じ物体の内部に「熱が速く伝わる」とは、単位時間当たりには伝わるエネルギーの量が大きいということであろう。つまり熱流が大きいということである。

ある物体を外部から加熱する場合、物体表面から内部に入ってくる熱流がその物体の熱的变化の全てを支配する。その際の物体内部の温度分布の時間変化を求めることを、熱伝導方程式の境界値問題を、ある境界条件(例えば表面から流入する熱流を既定する式など)の下で解くというが、その温度変化の様子(速さ)を左右するのは、境界条件であって、熱伝導方程式ではない。表面、すなわち境界から与えられる熱流が大きければ、内部あるいは深部の昇温が速くなる、ということである。

遠赤外加熱では、2(2)の熱流維持のところの説明した通り、この熱流が加熱プロセスの進行に伴い、あまり低下することなく、ほぼ一定の値を保って(しかもその値を2(1)で述べたように、かなり自由に大きく取れる)表面から流入するため、内部の昇温が順調に行われる。これに対し熱風や熱板との接触加熱では、取りうる熱流の大きさに限界があり、あるいは熱流が加熱初期を過ぎると低下し始め、それ以降は低いレベルで推移するため、内部へのエネルギー供給が滞り、結果として、深部の昇温が遅くなるのである。

(5)表面と深部との温度差がより少ない加熱と品質面への寄与

上の(3)②で述べたように、遠赤外加熱は接触加熱に比べ、内部への熱流の大きさが維持されるため、深部温度の上昇が早い。一方表面は熱源と触れていないため、その温度は徐々

にしか上がらない。接触加熱の場合に加熱直後から急上昇するのは、対照的である。このため表面と深部との温度差は、接触加熱に比べかなり小さい。すなわちより均一な加熱が出来る。この特長は、当然ながら製品の品質管理上有利に働く。すなわち風香味などの面でもより望ましい品質達成に寄与するはずである。遠赤外加熱が利用され始めた頃からしばらくの間、その効果を強調するために使われた説明「遠赤外加熱は中まで電磁波が伝わるので、奥まで早く温まる」というのは、理屈としては正しくはなかったが、現象論的には頷けるものがあったのである。

繰り返すが、遠赤外加熱の浸透の浅さはなんら問題となっていない。遠赤外放射が多く物体表面であまり反射されずにほとんどが吸収され、理想に近い放射伝熱が成立することが利点なのである。遠赤外放射よりは物体のより深い位置に亘って吸収されるが、表面での反射が無視できない近赤外放射の方が、同じ放射パワーで比べた場合、深部加熱に対してより有利であるということはない。

(6) 雰囲気とは独立な加熱

伝導加熱には雰囲気は関与しないし、対流加熱の場合は雰囲気自体が熱源であり、それが加熱全体を支配する。これに対し放射加熱の場合は、電磁波の伝播は雰囲気とは全く関係がない。例えば真空下でも加熱が出来るから、遠赤外真空あるいは凍結乾燥の装置が利用でき、通常の真空乾燥に比しより効率的な処理が期待出来る。また遠赤外放射の下で、雰囲気を任意に設定することも出来る。例えば雰囲気をマイナス温度の冷風にしたり、常温の空気を吹き付けたり、必要なら熱風を吹き付けても構わない。

マイナス温度の冷風を併用することは、省エネに逆行するように思える。しかし例えば冷凍品を解凍する場合、それにより表面温度の上昇を抑え、融解を避けながら、放射パワーを高めることが出来、短時間での解凍が可能になる。また所定時間である食材を乾燥するために設定した放射パワーでは、その表面が焦げてしまうというような場合、常温の空気を吹付け、同時に放射パワーを必要なレベルに維持し、あるいはさらに高めて、より短時間で所定の乾燥を達成する、ということも狙える。半田のリフロー炉では半田の熔融と基板の熱損傷防止との、相反するような事象を両方達成させるべく、熱風などを吹き付けている。これは意識しての手法か否か分からないが、熱風による表面冷却の効果ともいえる。

3 マイルドでパワフルな遠赤外加熱の因果関係図

加熱目的、加熱対象物に適合した、適当な温度の雰囲気を有効に設定し、同時に極力高

い放射パワーを追及することで、効率と品質の両方を達成することが不可能ではないのである。これまでの説明のように、遠赤外加熱はマイルドでパワフルな、すなわち表面には熱的に優しく、短時間処理のためにパワフルなエネルギー投入が出来る加熱方法なのであるが、この雰囲気による冷却効果はさらにその特長を活かした方法とってよい。

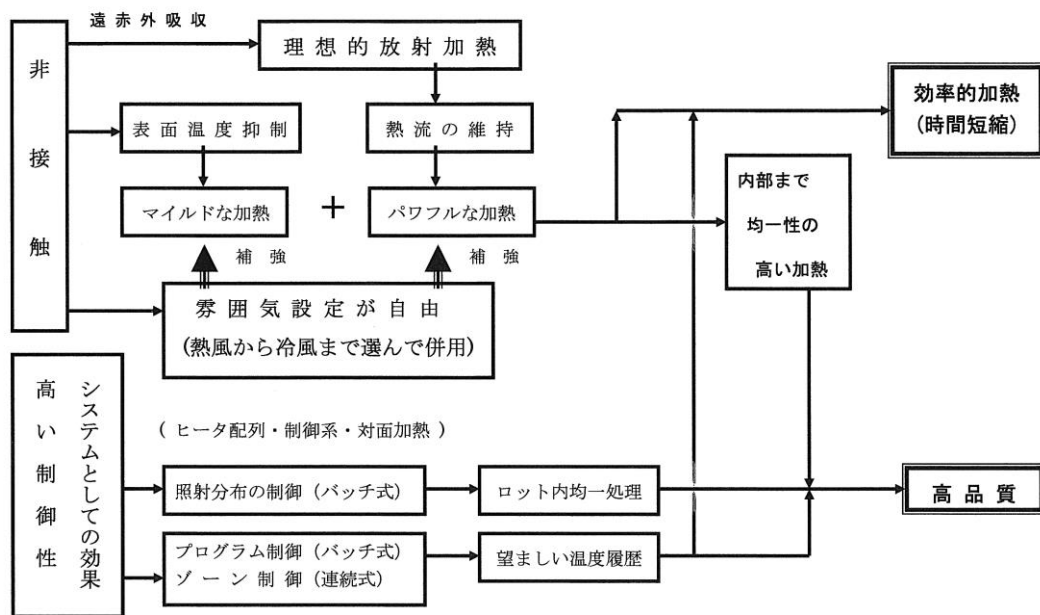


図2 遠赤外加熱効果因果関係図

最後にいろいろな要因が互いに関係して効果を生み出している遠赤外加熱の因果関係を図2に示しておく。