

特 集 産業電化が拓く省エネ・低炭素社会

赤外加熱技術の最新動向

Status Quo of Infrared Heating Technology

中野 幸夫*

Yukio Nakano

1. まえがき

赤外加熱は赤外放射（赤外線）による熱伝達を主体とした加熱方式である。赤外放射は電磁波の一長波長領域における総称であり、多くの物質に吸収されやすい特徴をもっている。赤外放射を吸収した物質は、物質自身が発熱し、結果として加熱される。赤外加熱では、伝導加熱や対流加熱のように外部から物質に直接的に熱エネルギーが与えられるわけではない。与えられるのはあくまでも赤外放射という電磁波のエネルギーである。

年表を紐解くと、ドイツの天文学者ハーシェルは、1800年頃、赤外線を発見したとある。それから100年、1800年代の終わりから1900年代の初めにかけて、シュテファン、ボルツマン、レイリー、ジーンズ、ヴィーン、そしてプランクといった偉人が活躍し、黒体放射に関する理論が発展した。彼らの研究業績が現在の赤外加熱の理論的基礎を与えてくれている。しかもレイリー・ジーンズの放射則とヴィーンの放射則の破綻を回避するためにプランクが導入したエネルギーの量子化は、アインシュタインの光量子仮説と光電効果での検証などを経て、現代物理学の礎になっている。

本稿では、この赤外加熱の原理、赤外放射に関する諸法則に触れた上で、赤外放射体ならびに赤外加熱の適用事例と最新動向について概説する。

2. 赤外加熱の原理

図1に示すように、赤外放射は可視放射の長波長端（波長0.78 μm）から電波の短波長端（波長1 mm）までの波長範囲の電磁波の総称である。ただし、波長100 μm以上はマイクロ波・電波の領域に区分される場合もある。また、赤外放射の短波長側は、表1に示すように、二つないし三つの領域に区分されることが多い。なお、通常の赤外加熱において考慮すべき長波長端はせいぜい15 μmである¹⁾。

赤外放射は、物質を構成する原子や分子の熱運動、すなわち物質の温度に応じて、物質表面から放射される。分子

全体の伸縮や湾曲などの振動状態のエネルギーの減少によって赤外放射が放射され、逆に赤外放射の吸収によってこれらの振動状態のエネルギーが増加する、すなわち温度が上昇する。したがって、照射された赤外放射を吸収することによって引き起こされる物体の温度上昇が赤外加熱である。伝導加熱や対流加熱のように、外部から物体に熱エネルギーが与えられた結果ではない。

金属を除く、多くの物質、特に有機物質は2.5~30 μmの赤外放射の波長領域に多くの吸収帯をもつため、赤外放射を吸収しやすく、加熱されやすい。伝導加熱や対流加熱では、まず物体の表面に熱が伝わり、ついで内部に熱が伝導で伝わっていく。したがって、完全な表面加熱である。一方、赤外加熱の場合は、図2に示すように、物体表面に入射した赤外放射が、物体内部に浸透する過程で吸収されて、物体自身が発熱する。したがって、伝導加熱や対流加熱の場合とは異なり、正確には内部加熱の部類に入る。しかし、実際の赤外加熱において加熱対象となる物質には、プラスチックや塗料などの有機物質や食品などが多い。これらの物質は赤外放射をよく吸収するために赤外加熱に適するわけであるが、赤外放射をよく吸収するが故に赤外放射の浸透深さはせいぜい10~100 μmのオーダーである。したがって、赤外加熱はミクロ的に見ると内部加熱といえるが、薄膜の加熱などを除いて、現実的には伝導加熱や対流加熱と同じく表面加熱と考えてよい。

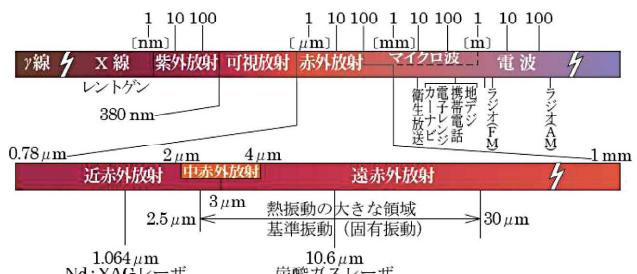


図1 電磁波のスペクトル¹⁾

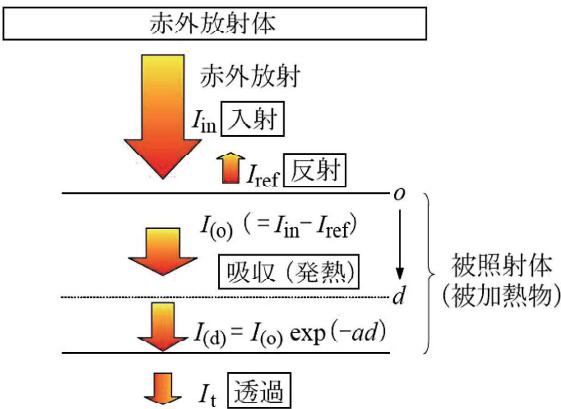
表1 赤外放射の波長区分¹⁾

名称	波長区分	
近赤外放射	0.78~3 μm	0.78~2 μm
中赤外放射	-	2~4 μm
遠赤外放射	3 μm~1 mm	4 μm~1 mm

*関東学院大学理工学部理工学科電気学系教授

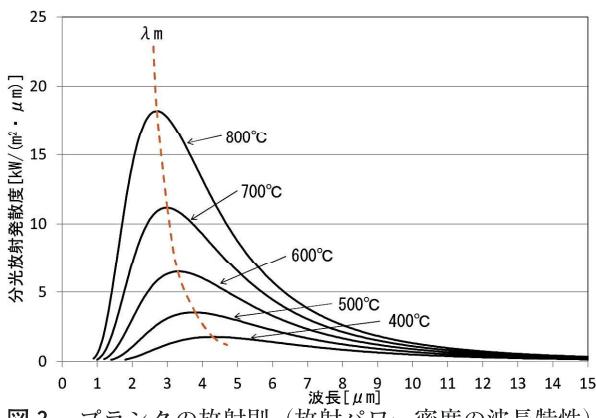
〒236-8501 横浜市金沢区六浦東1-50-1

E-mail : nakano@kanto-gakuin.ac.jp



3. 赤外放射に関する諸法則

赤外加熱を支える基礎理論に「プランクの放射則」がある。プランクの放射則は放射体から放射される放射パワー密度の波長特性を与えてくれる。図3は放射体の表面温度をパラメータにして、分光放射パワー密度（分光放射発散度）を図示したものである。図からわかるように、表面温度が高くなるほど放射パワー密度の山が急峻に立ち上がる。また、表面温度が異なる放射パワー密度のラインが交わることはない。さらに、分光放射パワー密度が最大となる波長 λ_m は、表面温度が高くなるにつれて短波長側にシフトする。これは「ウイーンの変位則」と呼ばれており、 λ_m は絶対温度で表した放射体の表面温度T [K]に反比例する。また、放射体から放射される全放射パワー密度はTの4乗に比例する。これは「ステファン・ボルツマンの法則」と呼ばれている。このため、放射体の表面温度が高くなれば、全放射パワー密度は急激に増加する。これらの諸法則は理想的な放射体（黒体）がもつ性質であるが、赤外加熱に用いられる多くの放射体においてもこれらの性質が概ね現れる。



4. 赤外放射体

赤外加熱に用いられる赤外放射体の多くは電気エネルギーを熱エネルギーに変換する発熱部としてのフィラメント

トあるいは電熱線と、これを内部に納める管状、板状、電球状などの外形部分から構成される。この外形部分は、通常、石英ガラス、セラミックス、あるいは表面にセラミックスを被覆した金属のいずれかで形成されている。赤外加熱に用いられる代表的な赤外放射体（赤外ヒーター）の種類と特性を表2に示す。ウイーンの変位則が示すように、分光放射パワー密度が最大となる波長 λ_m は放射体物質の表面温度によって規定されることから、これらの放射体は概ね放射体物質の表面温度で区分されているといつてもよい。さらに、ステファン・ボルツマンの法則が示すように、全放射パワー密度は放射体の表面温度が高くなれば急激に増加することから、 λ_m の短い放射体ほど全放射パワー密度は大きい。

一般に遠赤外放射体ではセラミックスの間接加熱がほとんどで、放射体の表面温度は最大900°C程度、放射パワー密度は10~30kW/m²程度である。一方、近赤外放射体、中赤外放射体では、石英管に封入したタンゲステンフィラメントの直接通電がほとんどで、フィラメントの表面温度は900~2200°C程度、放射パワー密度は50~120kW/m²程度のものが一般的である。使用温度が高い分、遠赤外放射体と比べると寿命は短い。また最近では、温度が3000°Cを超えるパワー密度も1000kW/m²を超えるような近赤外放射体も実用化されている²⁾。これまでにない圧倒的な放射パワーによって適用分野がさらに広がることが期待される。

石英管タイプの放射体の場合、石英ガラスの分光特性によって、内部のフィラメントから放射された放射パワーのうち、概ね3 μm以下の波長成分は石英ガラスを透過して外部に放出される。一方、それ以上の波長成分は石英ガラスに吸収されて石英ガラスが加熱される。加熱された石英ガラスの表面からはその温度に応じた赤外放射（主に3 μm以上）が周囲に放射される。図4に示すように、最近では加熱された石英ガラスの表面を空冷することで、石英ガラスから放射される成分（主に遠赤外放射）を抑制して、石英ガラスを透過する短波長成分（近赤外放射）だけを利用する放射体も開発されており、「波長制御ヒーター」と呼ばれている。フィルム等の薄膜に塗布されたコーティングの乾燥等への適用が期待される³⁾。

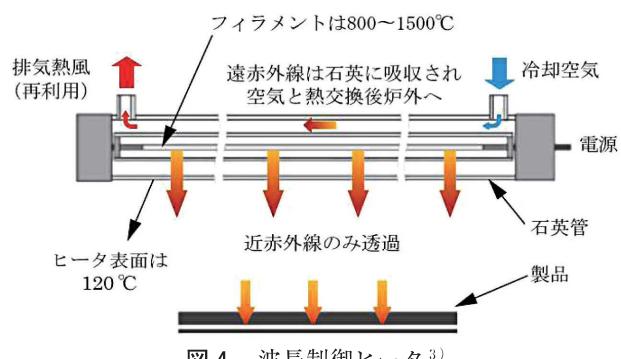


図4 波長制御ヒーター³⁾

表2 赤外放射体（赤外ヒータ）の種類と特性¹⁾

大分類	小分類	形態	発熱源	発熱体温度[°C]	λ_m^* [μm]	立ち上がり時間	放射パワー密度[kW/m ²]	対物質特性ほか	寿命[h]
近赤外ヒータ・中赤外ヒータ	短波長形	透明石英管にArガス封入	Wフィラメント	2100	1.2	1秒以内	120	可視域を含み、反射、透過を伴う	5000
	ハロゲン形	短波長形と類似							
	カーボン形	短波長形と同等						放射波長域をやや長波長側にシフト	8000
	中波長形	短波長形と同等						放射波長域を長波長側にシフト	>20000
	遠赤外ハロゲン形	管面にブラックコーティング						放射波長域を長波長側にシフト	5000
遠赤外ヒータ		表面がセラミックス	電熱線	max900	2.5~	数分	10~30	多くの材質に良く吸収される	非常に長い

* λ_m : 分光放射パワーが最大となる波長 [μm]

5. 赤外加熱の適用事例

赤外加熱の産業分野への適用は、1938年に米国フォード社が自動車の塗装乾燥に赤外電球を用いたのが最初である⁴⁾。その後、近赤外ヒータならびに遠赤外ヒータが開発されて、加熱温度範囲、被加熱対象の範囲が広がり、現在では、機械・金属産業や自動車産業をはじめとして、エレクトロニクス産業や電気・電子機器産業、食品、農林水産、繊維など、種々の産業で広く利用されている。これらの適用事例をまとめたものが表3である。

特に、電気・電子機器産業は有望な赤外加熱の適用分野の一つである。太陽光発電(PV)パネル、燃料電池、リチウム二次電池、液晶ディスプレイ(LCD)、プラズマディスプレイ・パネル(PDP)、有機ELなど、先端機器の電子部材や電子部品の製造工程に赤外加熱が広く用いられている。例えば、PVパネルでは、パネル基盤に電極材料(金属ペースト)を印刷し、乾燥・焼成させる工程に、従来の熱風加熱に替えて、赤外加熱が導入されている。また、今後、生産量が大きく増加すると期待される電気自動車(EV)やプラグイン・ハイブリッド自動車(PHEV)などに搭載されるパワー半導体のモールド乾燥や、モータの絶縁体に用いられるワニスの乾燥なども赤外加熱にとって期待される領域である。

さらに、産業分野だけでなく、民生分野にも広く活用されており、赤外加熱を利用した各種調理機器や暖房器具、家庭用サウナなどの健康関連機器、医療用赤外照射器などが商品化されている。

6. 赤外加熱の最新動向

最近、赤外加熱技術に関わる者にとって喜ばしい出来事が2件あった。一つは、マツダが「ものづくり日本大賞」

の内閣総理大臣賞(平成27年度)を受賞されたことであり⁵⁾、もう一つは、スズキ、中部電力、メトロ電気工業が「省エネ大賞」の資源エネルギー庁長官賞(平成27年度)を受賞されたことである⁶⁾。

前者では、自動車ボディの塗装乾燥工程において、塗膜のみに効率的にエネルギーを与えて昇温でき、かつ塗色やワークからの距離に応じて、塗膜に与えるエネルギーを、迅速、かつきめ細やかに調整できる赤外ヒータが用いられている。この赤外加熱技術を含む一連の塗装乾燥技術の開発によって、VOC(揮発性有機化合物)を多く含んでいた塗料の水性化を可能にしてVOCの大幅な削減を可能にするとともに、省エネ・省CO₂を実現している⁷⁾。なお、この技術はすでに平成25年度の「省エネ大賞」資源エネルギー庁長官賞にも輝いている⁸⁾。

また後者では、自動車エンジン部品の鋳造工程の金型加熱において、従来使用していたガスバーナーを、赤外ヒータに変更して、大幅な省エネ・省CO₂、生産性・安全性の向上、ならびに作業環境の向上を実現している。赤外ヒータには波長1.9 μmで放射強度が最大となるカーボンヒータが用いられている⁹⁾。

上記のいずれの技術も国内の自動車メーカーによる赤外加熱を用いた生産技術に関するもので、これまで赤外加熱がいくつかの工程で使用されていると推測されるものの、その技術が公表あるいは紹介される機会が少ないと感じていた分野のものである。海外の文献では、すでに1980年代の後半に、米国の自動車メーカーであるクライスラーにおいて自動車ボディの塗装乾燥工程に赤外加熱が用いられ、質のすこぶる高い塗装を実現していることや、建材用の大型金属板の塗装焼付け工程に赤外加熱が導入されて、生産性や作業環境の大幅な向上、塗料溶剤の大幅な削減、さらには省エネ・省資源・省スペース等、赤外加熱の大きな尊

入効果がインパクトのある筆致で紹介されていた^{10,11)}。ようやくわが国でもこのような技術が広く紹介され、評価され、一般に認知されるようになったと感じている。広く紹

介されることで、このような技術が他産業へ水平展開され、赤外加熱技術の一層の普及と一層の革新が進むものと期待される。

表3 赤外加熱の適用事例¹⁾ほか

適用産業	加熱の目的					
	組成変化、反応、焼付け、硬化	切断、せん孔	軟化、溶融、溶接	乾燥	予熱、保温、加温、温熱	殺菌、除菌
機械、金属製品、金属材料	塗装焼付け、接着硬化、マーキング印刷焼付け	金属板の切断、金属板の穴あけ	—	水切り、塗装乾燥	金型・部品の予熱、保温、焼ばめ	—
自動車、自動車部品	塗装焼付け、接着硬化、植毛加工、マーキング印刷焼付け	—	ホットスタンピング	塗装乾燥	—	—
電気・電子機器および部品、半導体部品	塗装焼付け、回路印刷ペースト、レジスト、インクの焼付け、封止剤、接着剤硬化、素子の焼成	—	はんだリフロー、接続コードのカール加工	回路印刷の予備乾燥、器材部品の洗浄乾燥	ディップ外装の予熱、半導体部品のアニーリング	—
プラスチック加工	加熱硬化、熱エージング、発泡スチロールの発砲、減容処理	—	成形加工時の軟化、エンボス加工、廃棄材の軟化圧縮、焼ばめ	材料乾燥、水切り乾燥	—	—
ゴム、皮革	ゴム二次加硫、接着硬化	—	軟化成形	塗装乾燥（バインダ、上塗り）	—	—
繊維、織物	衣服、織物へのスクリーン印刷焼付け	—	溶融接着	水切り、八掛け、なっ染	—	—
木材、建築材料	合板の接着	—	—	製材・パルプシートの水分乾燥、目止め、上塗り、プリント乾燥	塗装前の予熱	—
ガラス、陶器、窯業、セラミックス	印刷焼付け、ガラスはり合せ、陶器上薬焼付け	セラミックスの切断、セラミックスの穴あけ	金属-セラミックス溶接	水切り、陶器成形後予備乾燥	上薬塗布前の予熱、コンクリート養生	—
印刷、製本	刷版バーニング処理	—	—	インク・ニス・ビニル引きの乾燥、のり付け乾燥	—	—
化学薬品	原材料焙焼	—	—	原材料の乾燥	—	—
食品加工、調理	鳥獣魚肉の焼上げ、ゆで卵製造、水産練り製品の座り・焼上げ、パン・菓子・珍味類の焼上げ、豆・ナッツ・茶の焙焼、赤外調理器	—	冷凍食品の解凍	乾燥野菜の製造、干ししいたけの製造、めんの乾燥、海藻・魚介類の乾燥	調理済食品の保温	包装後の殺菌、水産練り製品の殺菌
農林水産、畜産	寒冷紗ののり付け、乾燥	—	—	たばこ・茶葉の乾燥、生薬材料の乾燥、家畜の飼料・ふん尿の乾燥、シールドベレットの乾燥	暖房、生育促進	種子・土壤の殺菌
生活、医療	—	—	—	衣服・寝具の乾燥	サウナ、暖房、温熱治療、リハビリテーション、赤外こたつ、赤外ストーブ	—
その他	—	—	融雪	—	大規模赤外暖房	—

また、産業用加熱分野以外においても、民生用冷暖房分野において、宇土市、(株)エコファクトリー、(有)アル設備企画が「輻射式冷暖房システム等の導入による体育館の省エネ化」で、「省エネ大賞」の審査委員会特別賞（平成26年度）を受賞している。

さらに、「赤外加熱過程の詳細なコンピュータ・シミュレーション技術」が進化している。赤外加熱過程の詳細なコンピュータ・シミュレーション技術は、岐阜大学の西村誠氏、電力中央研究所の宮永俊之氏らが手がけてきたが、近年、日本ガイシの近藤良夫氏が実用的なソフトウェアを開発し、赤外加熱過程の詳細なシミュレーションが実用的なレベルで可能になった¹²⁾。これまで、赤外加熱の最適条件の抽出のための手段としては、被加熱物のサンプルと小型の加熱炉とを用いた試行実験が主流であったが、これにコンピュータによる詳細なシミュレーション実験が加わることで、加熱のための最適条件の抽出作業が格段に効率化されると期待される。シミュレーション技術のますますの発展と、シミュレーションに必要となる放射体ならびに被加熱物の分光特性や熱的特性に関するデータベースの構築に期待がかかる。

7. あとがき

近年、赤外加熱に用いる放射体は、これまでにないハイパワーのものが開発され、また、放射波長をある程度制御できるものも開発されている。一方、赤外加熱過程の詳細なシミュレーションが可能な実用的なソフトウェアが開発され、被加熱物の赤外吸収特性に適合した波長の赤外放射

だけを必要量だけ照射して赤外加熱を行うという一種の理想形に、ソフト面、ハード面から近づきつつあるよう感じられる。今後のさらなる技術革新に期待したい。

参考文献

- 1) 日本エレクトロヒートセンター；エレクトロヒートハンドブック，(2011)，pp. 389-449，オーム社。
- 2) 松本金属工業株式会社カタログ；アドフォス社NIR®の基本原理と特徴。
- 3) 近藤；波長制御乾燥システム、エレクトロヒート，194 (2014)，pp. 14-18.
- 4) Hackforth；Infrared Radiation, (1960), McGraw-Hill.
- 5) マツダ株式会社；第6回 ものづくり日本大賞 内閣総理大臣賞「揮発性有機化合物とCO₂を同時削減する新塗装技術『アクアテック塗装』」，平成27年11月。
- 6) スズキ株式会社 相良工場、中部電力株式会社、メトロ電気工業株式会社；平成27年度 省エネ大賞 資源エネルギー庁長官賞「鋳造工場における赤外線ヒータ式金型加熱器の導入による省エネ・省力化」，平成28年1月。
- 7) 橋本、亀迫、松田、世良、和泉、大谷；アクアテック塗装工程短縮技術の開発、マツダ技法，28 (2010)，pp. 65-69.
- 8) マツダ株式会社；平成25年度 省エネ大賞 資源エネルギー庁長官賞「揮発性有機化合物とCO₂を同時削減する新塗装技術」，平成26年1月。
- 9) スズキ株式会社 相良工場、中部電力株式会社、メトロ電気工業株式会社；鋳造工場における赤外線ヒータ式金型加熱器の導入による省エネ・省力化，月刊「省エネルギー」，68-2 (2016.2)，pp.52-55.
- 10) R. Whitaker；Shining Promise for Infrared Paint Curing, EPRI Journal, Sept. 1989, pp.27-31.
- 11) J. Cohen；Supporting Business with Infrared Processing, EPRI Journal, Oct./Nov. 1987, pp.28-33.
- 12) 近藤；赤外加熱シミュレーションとその応用、日本赤外線学会誌，24-2 (2015.2), pp.4-10.

協賛行事ごあんない

コーチェネシンポジウム2021

[会期] 2021年2月5日（金）

[主催] 一般財団法人コーチェネレーション・エネルギー高度利用センター

[場所] イイノホール&カンファレンスセンター（東京都千代田区内幸町2-1-1）+WEB配信（ハイブリッド方式）

[URL] <https://www.ace.or.jp/aceseminar/seminars/detail/134/>

[問合せ先] コーチェネレーション・エネルギー高度利用センター

E-mail : event@ace.or.jp