

研究調査報告書

最近の赤外放射加熱

平成 10 年 3 月

社団法人 照明学会

赤外放射加熱とその応用に関する研究調査委員会

目 次

1.	まえがき	(松井 松長)	1
1.1	委員会の構成	(松井 松長)	1
1.2	委員会の活動概況	(松井 松長)	1
2.	赤外放射加熱の現状と課題	(河本康太郎)	4
2.1	赤外放射加熱の進展とその背景 (我国の産業用赤外加熱小史案)	(市川 真人)	8
2.2	ヨーロッパに於ける赤外放射加熱の最近の動向	(市川 真人)	11
2.3	産業用加熱における赤外放射の意義と特長	(木村 嘉孝)	14
2.4	産業分野における赤外放射加熱の応用と今後の課題	(木村 嘉孝)	16
3.	赤外放射加熱のシミュレーション	(市川 真人)	19
3.1	室内住空間の熱環境シミュレーション	(宮永 俊之)	21
3.2	遠赤外加熱と熱風加熱の比較のシミュレーション的考察	(木村 嘉孝)	24
3.3	電気回路系による加熱、乾燥過程のシミュレーション	(中尾 久徳)	27
4.	含水物の遠赤外放射加熱	(市川 真人)	31
4.1	水の吸収及び反射特性	(市川 真人)	31
4.2	含水物の昇温と乾燥特性	(市川 真人)	31
5.	赤外放射源の特性	(河本康太郎)	35
5.1	家電用赤外放射源	(梶 英俊)	36
5.2	工業用赤外放射源	(河本康太郎)	39
5.3	ガス (LPG, NLG) と石油による赤外放射源	(笹森 宣文)	44
5.4	光源の光放射特性	(向阪 信一)	47
6.	加熱機器・装置とその制御システム	(河本康太郎)	49
6.1	加熱対象物に対する必要放射照度	(森田 政明)	50
7.	赤外放射の計測	(笹森 宣文)	52
7.1	赤外放射源の放射率の測定	(笹森 宣文)	52
7.2	加熱対象物の反射率(吸収率)の測定	(笹森 宣文)	55
7.3	赤外放射加熱物の表面温度測定	(森田 政明)	59
7.4	赤外放射源の特性測定	(森田 政明)	61
7.5	赤外放射の計測システム	(玉重 繁良)	63
8.	赤外放射加熱の将来	(河本康太郎)	66
8.1	放射エネルギーによる加熱の特長	(河本康太郎)	66
8.2	熱エネルギー伝達(加熱)の速度	(河本康太郎)	66
9.	あとがき	(松井 松長)	69

1. まえがき

赤外放射加熱が工業生産ラインに導入されて60年になる。わが国での研究は、これより10年後の1948(昭和23)年頃からといわれている。その後、石英管ヒータ、シーブヒータ、セラミック放射体などの放射源やこれらを用いた加熱機器が開発されて、1975～1990年の赤外線産業(特に遠赤外)の発展期を迎えた。照明学会ではこれに呼応して赤外放射加熱技術研究調査委員会を設置し、技術動向を調査してきた。それ以来数年が経過して、技術の進展状況、複雑な加熱系の解析やシミュレーションなどを調査研究するために、新たに赤外放射加熱とその応用に関する研究調査委員会を発足させることになった。

本報告書は、平成 8年 8月から平成10年 3月までの 1年 8カ月の上記委員会の研究調査活動をまとめたものであって、赤外放射加熱の歴史的背景と現状、赤外加熱のシミュレーション、赤外域における水の透過・吸収・反射特性、各種赤外放射源の特性、放射加熱機器、赤外放射計測などで構成されている。

1.1 委員会の構成

委員会の構成は下記の通りであって、委員長 1、副委員長 1、幹事 3、委員 8の計13名である。

「赤外放射加熱とその応用に関する研究調査委員会」委員構成

委員長	松井松長	(福山大学工学部)
副委員長	河本康太郎	(東芝ライテック(株)技術本部研究所)
幹事	笹森宣文	(東京都立産業技術研究所光音部)
同	玉重繁良	(岡山職業能力開発短期大学校電子技術科)
同	中尾久徳	(名城大学理工学部電気電子工学科)
委員	市川真人	(名古屋大学名誉教授)
同	梶 英俊	(松下寿電子工業(株)坂出事業部)
同	向阪信一	(松下電工(株)中央エンジニアリング総合部)
同	尾谷 賢	(北海道工業試験場資源エネルギー部)
同	木村嘉孝	(TKエンジニアリング(株))
同	前田正典	(中国電力(株)技術研究センター)
同	宮永俊之	((財)電力中央研究所狛江研究所)
同	森田政明	(栗原工業(株)技術部)
途中退任		
委員	高木恒雄	(中国電力(株)技術研究センター)
同	吉井嘉寿憲	(松下寿電子工業(株)坂出事業部)

1.2 委員会の活動概況

委員会の開催は 9回で、審議経過は下記の通りである。なお、開催地の記入がないのは、

すべて東京(学会会議室)である。

第 1 回委員会(平成 8年 8月30日(金))

委員会設立趣旨説明。委員会運営方針の審議。話題提供「常温動作の小型赤外線カメラ」、「赤外放射計算」、「伝熱現象解析への電気回路計算法の適用」。

第 2 回委員会(平成 8年10月29日(火)、名古屋市、中部電力(株)電気利用技術研究所会議室)

学会の現況報告。赤外放射加熱に関する文献紹介。中部電力(株)電気利用技術研究所の概況説明。

第 3 回委員会(平成 8年12月20日(金))

話題提供「赤外加熱のシミュレーションの研究動向」、「電気式赤外放射源の歴史と開発動向」。「海外の赤外加熱技術の現況」。

第 4 回委員会(平成 9年 3月 4日(火))

話題提供「近赤外加熱の産業動向」、「電気式赤外放射源の歴史と開発動向(その2)」
「赤外放射の照射場における表面温度の測定法と放射率の測定値」。

第 5 回委員会(平成 9年 5月16日(金))

学会近況報告。話題提供「ヒート・フラックス・センサ、網膜の血管パターンによる個人の識別(伯東(株) 石渡氏)」、「近赤外線による各種塗料のキュアリング((株) エス・ケイ・ケイ 楯氏)」、「遠赤外加熱による食品内部への熱伝達」、「わが国の昭和20年代の工業用赤外加熱と分光放射測定」。

第 6 回委員会(平成 9年 8月28日(木))

次期赤外関係の研究調査委員会の新設について。

話題提供「ハロゲン・ヒータの加熱特性とガス・ヒータ、シーズ・ヒータとの加熱特性の比較(東芝、下村誠朗氏)」、「赤外線電球、赤外線ヒータの構造、特性」、「電力有効利用の実施例の紹介」、「完全放射体の黒さに関する文献紹介」、「我が国における赤外放射加熱技術の変遷ー赤外、熱風加熱の推移と背景事情」、「加熱特性の見地から含水物加熱乾燥炉の設計指針について」。

第 7 回委員会(平成 9年11月12日(水))

委員会報告書の目次案の提示と検討。

話題提供「石焼きイモの伝熱と赤外放射」、「遠赤外・熱風併用加熱系の模擬電気回路による解析法」、「人工太陽照明光源について」、「遠赤外線放射材料」、「産業分野における赤外線利用の現状」。

第 8 回委員会(平成10年 1月23日(金)、東京・インダストリアル・ホール3F会議室)

委員会報告書目次の項目および執筆者の再検討。

赤外線関係の公開研究会開催(日本赤外線学会、電気学会と共催)について。

話題提供「充填層内の放射伝熱と対流伝熱との伝熱効率の比較」。

第 9 回委員会(平成10年3月26日(木))

委員会報告書の編集。次期赤外関係研究調査委員会への申し送り事項。

本委員会の設置期間中に開催された赤外関係の研究会は 4回、見学会は 1回で、その概

要は次の通りである。

第 1 回研究会(平成 8年12月 8日(日)、学会会議室)

若手研究者研究発表会

第 2 回研究会(平成 9年 2月14日(金)(株)島津製作所東京支社)

赤外線関係公開研究会(日本赤外線学会、電気学会と共催)

第 3 回研究会(平成10年 2月28日(土)、日大理工学部)

若手研究者研究発表会

第 4 回研究会(平成10年 2月13日(金)、東京神田、(株)島津製作所東京支社)

赤外線関係公開研究会(日本赤外線学会、電気学会と共催)

見学会の開催

第 1 回見学会(平成 8年10月29日(火)、名古屋市)

中部電力(株)技術開発本部、電気利用技術研究所において赤外線加熱装置、その他の主要研究施設および設備を見学した。

(松井 松長)

2. 赤外放射加熱の現状と課題

赤外放射は、専門用語的には、エネルギー伝達の一様態である電磁波の一部分の特定区分波長域（0.78 μm ～ 1 mm）のものをいう。したがって、赤外放射の実体はエネルギーであり、赤外放射加熱というのは、この赤外放射エネルギーが対象物に伝達・投与された結果変換されて生じる熱エネルギーを加熱に利用したものである。

即ち、赤外放射の波長域の電磁波は、光子（光子）のエネルギーが比較的小さい波長域であるので、物質や人体に投与され、吸収されても、紫外放射の光化学作用のように、光子のエネルギーが直接物質や生体に作用することは少なく、大部分は分子や原子の振動エネルギーや回転エネルギーへの変換過程を経て、熱エネルギーに変換され、吸収された物質や生体の部位の温度を上昇させることになるからである。

また、赤外放射は電磁波の一種であるので、今まで述べてきたエネルギーとしての利用の他に、通信やリモート・センシングなど、情報処理のメディアとしても活用されているのは、良く知られている通りである。これらを含めて赤外放射の利用分野と用途の具体例をまとめたものを表2.1 に示す。

表2.1 の各種赤外放射の利用分野の中で、熱エネルギーの利用（いわゆる加熱）に関連する分野のエネルギー使用の実態を見ると、我が国においては、1996 年度に原油換算でほぼ3.0 億klのエネルギーが最終的に熱エネルギーに変換されて利用されていると推定される。

熱エネルギーに変換される前の一次エネルギーで見ると、化学エネルギー（灯油、LPG、天然ガスなどの燃料）と電気エネルギーに区分できる。化学エネルギーは大部分が燃焼によって熱エネルギーに変換されて利用されていると考えられるが、赤外放射に関連する部分は少ないので、本報告書では電気エネルギーを熱エネルギーに変換する方式（電気加熱）を主に検討することとしたい。

我が国においては、総電力使用量のほぼ 20 % が熱エネルギーに変換されて利用されていると予測される。また、図2.1 には、我が国における最近10年間の電熱関連機器の出荷高の推移を示す。図2.1 は機器の出荷高であり、使用電力量と一義的に対応している訳ではないが、家庭においても、電気エネルギーのかなりな割合が熱エネルギーに変換されていると推定される。

ところで、図2.1 の対象となっている製品の全てが赤外放射を利用して熱エネルギーを伝達・投与している（赤外加熱）方式の製品では無いことは明らかである。表2.1 に、電気エネルギーを一次エネルギーとする加熱方式の種類をまとめたものを示した。表2.2 に明らかなように、電気加熱にはいろいろな種類があり、使用エネルギーの割合から見ると、赤外加熱は必ずしも多くはないと推定される。

以下の各項において、赤外加熱方式が持っている、他の電気加熱方式に比べて差別化しうると考えられる特長について述べる。

表 2.1 赤外放射の利用分野と用途の具体例

区 分	作用の内容	具体的用途例
熱エネルギーの伝達・供給	熱化学作用（硬化）	接着剤の硬化，表面塗装の乾燥硬化。
	乾 燥	表面塗装の乾燥， 金属部品の洗浄後の乾燥， 木材の乾燥，乾麺の乾燥， 農水産物（椎茸，乾燥果物， 海苔，筍節，魚干物，煙草 の葉，茶葉など）の乾燥
	熔融・軟化	半田のリフロー，プラスチック加工前の軟化
	食品加工・調理	コーヒー・茶の焙焼， 鳥獣魚の焼上げ， 水産練製品の焼上げ， 加工食品の水分調節
	保温・加温・予熱・温熱	サウナ風呂，暖房， コンクリートの養生
	熱殺菌・熱殺虫	水産練製品の殺菌，種子・ 土壌の殺菌，ダニの駆除
	医療・診断	レーザー・メス，結石除去， PDT（D），腫瘍の焼灼， 虫歯の治療，子宮止血
非熱作用 (フォトン のエネル ギーの直 接的作用)	光化学作用	赤外写真
	光電子放出	光電変換形赤外センサー
	水素結合離間	酒類の熟成，水への作用
情報処理 のメディ アとしての 利用	情報伝達	赤外通信
	リモート・センシング	赤外リモコン，人感スイッ チ，赤外防犯装置， 赤外追尾装置
	測定・探査・分析	放射温度計，光高温計， 赤外撮像装置，暗視装置， 気象等観測衛星， 赤外瞳孔計，赤外分光分析

表 2.2 電気を一次エネルギーとした加熱方式の種類と特徴

加熱方式区分		熱エネルギーへの変換過程	被加熱物へのエネルギー投入方法
抵抗加熱	直接方式	エネルギー変換材料に通電し、通電による抵抗発熱により熱エネルギーに変換	被加熱物に直接通電する。
	間接方式		別置の抵抗発熱体に通電・発生した熱エネルギーを伝導、対流などにより被加熱物に伝達する。
赤外加熱		物体を高温に保ち、熱放射によってその熱エネルギーを赤外放射に変換する。その赤外放射を被加熱物に吸収させ、熱エネルギーに再変換。	赤外放射が空間を伝播し、被加熱物に伝達する。
誘電加熱		電氣的絶縁物に高周波の交流電界を加え、絶縁物内部の電気双極子を回転運動させ、熱エネルギーに変換。	高周波（通常は、マイクロ波）が空間を伝播し、被加熱物に伝達する。
誘導加熱		導体に磁束が交わると、導体中に電磁誘導によりうず電流が流れ、その抵抗発熱により、熱エネルギーに変換。	磁界発生用コイルに通電し、磁界を発生させる。
アーク加熱		空隙間でアーク放電を生じさせ、アーク放電抵抗により、熱エネルギーに変換。	被加熱物自身、または近傍に適当な空隙を造り、アーク放電させる。
プラズマ加熱		気体放電によって生じたプラズマを細孔から噴出させ、プラズマで変換された熱を高密度化。	高温・高速のプラズマ流を、被加熱物に投射する。
電子・イオンビーム加熱		電界中で電子またはイオンを加速し、被加熱物に衝突させ、熱エネルギーに変換。	加速された電子またはイオンを被加熱物に投射する。
レーザー加熱		誘導放出により光放射を発生させ（レーザー）、その光放射を被加熱物に投与・吸収させ、熱エネルギーに変換。	コヒーレントな光放射として、空間または媒質中を伝播し、被加熱物に伝達する。
ヒートポンプ		冷媒の状態変化を利用した熱交換。	冷媒の状態を変化させながら、熱交換の場所間を移動させる。

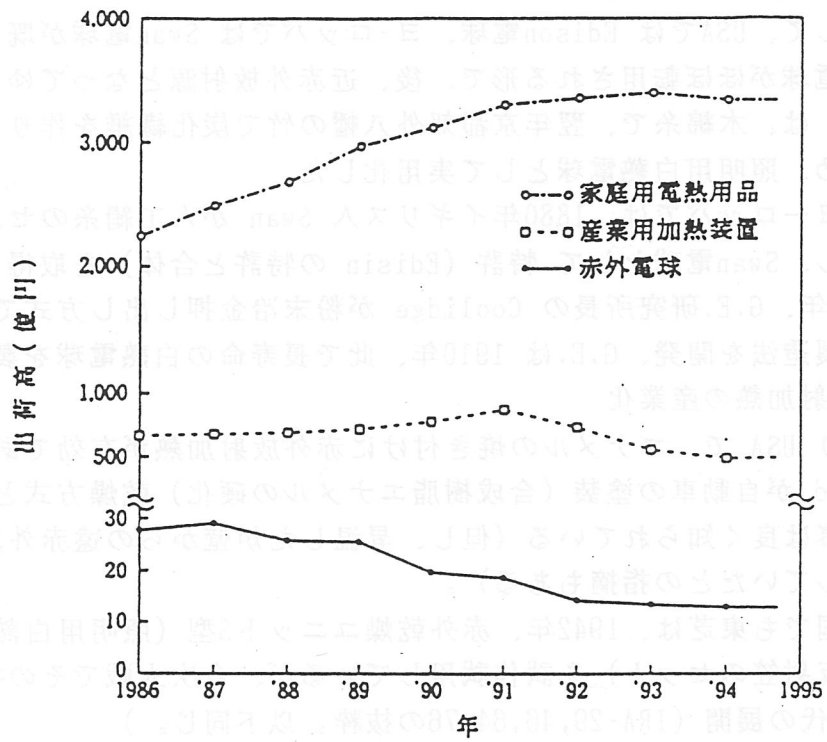


図 2.1 我が国における電気加熱関連製品の出荷高の推移

(河本 康太郎)

2.1 赤外放射加熱の進展とその背景（我国の産業用赤外加熱小史案）

赤外加熱技術の開発と経緯については、森田政明：照学誌(1989 No.5 pp.267-271)に詳しい。本稿はそれを補うもの。

2.1.1 敗戦、1945年以前の、欧米と我国の事情(委員会提出資料番号,IRA-29の抜粋)

(a) 照明用白熱電球→赤外放射源

照明用光源として、USAでは Edison電球、ヨーロッパでは Swan電球が既に実用化されており、此等白熱電球がほぼ転用される形で、後、近赤外放射源となってゆく。

1879年 Edison は、木綿糸で、翌年京都郊外八幡の竹で炭化繊維を作り、此を真空ガラス容器に封じ込め、照明用白熱電球として実用化した。

上記と独立にヨーロッパでは、1880年イギリス人 Swan が人工絹糸のセルローズを炭化フィラメント化し、Swan電球として 特許 (Edisin の特許と合体) を取得している。

その後 1905-8年、G.E.研究所長の Coolidge が粉末冶金押し出し方式でタングステン・フィラメントの製造法を開発、G.E.は 1910年、此で長寿命の白熱電球を製品化した。

(b) 近赤外放射加熱の産業化

1930年代となり USA で、エナメルの焼き付けに赤外放射加熱が有効である事が知られ 1938年11月、Ford が自動車の塗装（合成樹脂エナメルの硬化）乾燥方式として大々的に此を取り入れた事は良く知られている（但し、昇温した炉壁からの遠赤外放射も自ずから加熱乾燥に寄与していたとの指摘もある）。

上記を受け我国でも東芝は、1942年、赤外乾燥ユニットS型（照明用白熱電球型近赤外放射源と外付け反射笠のセット）を試作試用しているが、今次大戦でその後の開発を中断。

2.1.2 1950年代の展開（IRA-29,46,64,76の抜粋。以下同じ。）

USA では今次世界大戦中、近赤外加熱方式が兵器（軍用車両等の塗装乾燥）の生産性向上に大きく寄与していた事が敗戦後の我国で知られる様になり、東芝は S型の他 R型（白熱電球洋梨型、背後は内蔵反射鏡面）も製造し、1949年、自転車や自動車向け塗装乾燥炉を製造納入している。

1950年頃から電学誌、照学誌、電試い報、電気評論等に赤外加熱に関する研究論文や解説が掲載される様になり、1951年京大を中心とする主に関西地域の関係者によって赤外線技術連合会が結成されている。そして同会は赤外加熱技術の解説書（電気書院刊、1952年、同増補版1956年）を編集公刊、赤外加熱産業の急速な立ち上げに大きく貢献した。

上述の研究報告や解説記事の中には、(a)赤外塗装乾燥では塗料の可視域特性、即ち色相への依存度が小さい、(b)白熱フィラメント温度 2500Kよりも低温の 2000Kの方が寧ろ試料水の昇温が大きい、(c)更に、白熱赤外電球と此よりはるかに低温の赤熱放射体とを比較し、照射パワの水試料に対する透過が前者では大きく即ち吸収が小さく、従って昇温も小さい等、貴重な実験結果が挙げられている。

それにも拘らず、赤外放射加熱を伝統的な熱風加熱と対比して特徴づけるにあたり、赤外加熱は熱風加熱同様、被熱物に対し”外部加熱”であるが、薄物の被熱物に対しては天日乾燥加熱と同様”内部加熱”の一種と考えられると、曖昧な解説をしたりしている。又波長 1μ 以下の放射は物体の薄層中で吸収され、 1μ 以上は幾分内部まで浸透するので、放射による乾燥には 1μ 以上の方が重要である等、誤った理由づけを行っている。

上述した事情は、敗戦後の急速な産業復興を企図し現場技術的分野への対応に追われ、

基礎となる加熱工学上の考察を更に進める暇が乏しかった故とも推察される。尤もその為の理論解析に必要な道具、赤外分光光度計も手軽には利用出来る状況になかった。

既述した赤外技術連合会編、赤外線技術-加熱とその応用-二著それぞれの末尾に、同会が行った二回に亘るアンケート調査の結果が示されており、当時の近赤外加熱産業の実態を知る事が出来る貴重な資料となっている。

当時の適用は主に、塗装、繊維、食料、皮革の四分野にわかれ、1951年末ユーザ宛調査では、38社、41施設、総計約 3400kW、1954年末同じくユーザ宛調査では、75社、84工場122施設、約 10500kW、回答もれを加え約 13000kWと 3年間で 4倍増している（尚 8電力会社宛調査の結果は18000kW、6 赤外ランプメーカー宛の結果は 17000kWとなっている）。最初の調査時点では、戦時中の電力施設荒廃下にあり、更なる電気式赤外加熱の展開は危惧されていたが、1952年、5年計画の電源開発促進法が制定され、順調に電源開発が進捗、電源電力への懸念が消失した事も幸いしている。

上記調査の結果から、最も広く利用されたのは塗装乾燥及び繊維関係であった事がうかがわれ、特に自動車（トラック）等車両関係で大型の連続炉が各社で建設されている。1951-53年の朝鮮戦争による特需が敗戦後の我国産業経済復興に資したとされているが、上記塗装乾燥炉の中には（筆者による個別調査の結果）当時の進駐軍（=占領軍）向けのものがあり、朝鮮特需という政治的要因が赤外加熱の発展と無縁では無かった事も窺がはれる。

2.1.3 1960年代-1970年代初期迄の発展 (IRA-76)

1960年に始まった池田経済成長政策を一般的背景とし、新しい食料分野への展開の他、1970年前後から電子回路部品や半導体関連の新産業も勃興し、早くから立ち上がった分野以外へも赤外加熱は広がっていったものと見受けられる。そして 1970年頃、トヨタ自動車向け東芝納大型の乾燥連続炉（375W×3000=1000kW）が、我国最後の大型近赤外加熱施設として、建設されている。

2.1.4 1970年代の変遷 (IRA-76)

1973年末に始まる第1次、79年に始まる第2次石油危機は我国の産業構造に影響を与え、大きな電力消費を必要とする大型の近赤外加熱産業を打撃し、上記の他自動車用の大型の既設塗装乾燥炉は総て順次廃棄され、プロパンや LNG 等の化石系燃料による熱風加熱方式にとって替わられる運命下に置かれた。国のエネルギー政策でもあり、又高電力コスト、近赤源の高コストも経済上嫌われた。

上述、2.1.2-2.1.4 の変遷の経緯は、電球工業会及び東芝の赤外電球生産高資料によっても、年代別増産ないし減産の状況から、極く概略ではあるが裏づけの事も出来る。（又例えば、ランプ型より大きく有効な近赤源、石英管型の物が東芝で製造され始めたのは1961年となっている。）

2.1.5 1980年以降。遠赤外加熱技術の台頭 (IRA-76)

赤外分光高度計の進歩普及によって、被熱物の、水、高分子化合物等の特徴的な透過（吸収）スペクトルが測定されて公刊され、又赤外源の放射スペクトルも容易に測定出来る様になった。従って被熱物の吸収と赤外源の放射との両スペクトル特性をマッチさせる

事によって省エネルギーに資する事が徐々に知られる様になって来た。即ち被熱対象の水や総ての高分子化合物は近赤外域（波長 $0.8\sim 2\mu\text{m}$ ）で吸収は極めて小さく、中赤域（ $2\sim 4\mu\text{m}$ ）から特に遠赤域（ $4\sim 15\mu\text{m}$ ）にかけて大きく且つ多くの吸収帯域を持っているので、後者の帯域で大きな放射パワーとなる遠赤加熱がエネルギー損失の少ない赤外加熱として優れている事が理解される様になって来た。他方家電品向けの遠赤放射源として、1950年代から石英管ヒータが、1970年代にはシーズヒータがそれぞれ作られており、1980年頃となって我国の伝統的窯業技術を背景とし電熱線を封じ込んだ平板状の優れた遠赤放射体が日本がいし等から市販される様になった。従って電力コストとの兼ね合いに於いて、又施設の規模も比較的大きくない産業用の赤外加熱として、特に我国で遠赤加熱が主流となって発展する様になったものと見る事が出来る。

以上の情勢を受け、日本電熱協会内に1984年遠赤加熱部会が設置され、同協会は1988年赤外加熱用語集、1990年エレクトロヒート応用ハンドブック（オーム社刊。赤外・遠赤加熱章pp.52）、1991年遠赤外加熱の理論と実際（オーム社刊。pp.263）、1992年電熱協会規格・遠赤ヒータを公刊している。

1990年遠赤外線産業協会が創設され、1992年（社）遠赤外線協会となり、遠赤外加熱に関する多くの調査研究の成果（赤外線関係測定器のラウンドロビン比較試験、自動車の遠赤塗装乾燥試験例等々）を公刊している。

農水省は1989年、電磁波利用による食品の効率的加工・貯蔵技術の開発（同省技術会議事務局発行）を公刊、その第1章（pp.81）で製茶、蜜柑、水産品への遠赤適用上の研究調査結果を詳述している。

付：学会のハンドブックに見られる赤外加熱の動向：

照明学会編。1953,68,78,87年版で赤外加熱を取りあげている紙幅は53年版では9頁、版を追って減少し、78年版で0.5頁、87年版でも約0.5頁、遠赤加熱について近年応用が注目されているとし数行の説明がふされているに留まり、学会及び関係産業界に於ける一般的な関心低下の動向を一見物語っている様にも受けとめられる。（IRA-29）

電気学会編、1951,67,78,88年版。51年版では赤外炉の既述は無く、僅かに、赤外電球による乾燥器があると述べるにとどまっており、67年版では、赤外加熱の章を設け、約1頁赤外電球の規格を挙げ、赤外加熱炉を構成する為同電球を配置した赤外バンクを図示説明し、簡単に近赤加熱の定性的な説明を付している。78年版では更に詳しく赤外加熱を取りあげ、約2.5頁、特に遠赤加熱の節も設け被熱物、高分子化合物例ポリプロピレンの中、遠赤域透過率スペクトル、及び赤外放射の反射装置として使われるアルミ板の反射率スペクトルが表面の酸化層厚に依存してどの様に変化するかを図示する等、遠赤加熱に関する工学的基礎事項に迄解説が及んでいる。88年版では紙幅増加し解説もかなり詳しく、約4頁、特に遠赤加熱の節ではセラミクス板放射体の構造図、概略ではあるが被熱物、水の近、中赤域透過率スペクトル図をも示している。即ち電工ハンドブックの方は1970年代以降の関係する工学及び産業界の動向をかなり良く反映している様に受けとめられる。

2.2 ヨーロッパに於ける赤外加熱の最近の動向(IRA-27)

2.2.1 車両の塗装乾燥

(1)イギリス(在 Coventry)の工場でフランス車プジョーの組立及び近赤加熱(468kW)塗装乾燥炉稼動中、週産2250台。

(2)同じく在 Coventry の Alvis軍用車両工場では、塗装乾燥は従来ガス燃焼の熱風炉によっていた。即ち5層各層毎の塗料乾燥にそれぞれ最高8時間を要し、加えて予熱工程として年中連続稼動の予熱炉を必要とした。全炉の占積は259m²。仕上がりの不出来や汚れにに対し事後の補修作業も欠かせなかった。年間エネルギー消費はガス19万therms(注:1therm=1000kcal.)と電力1300kWhでその年間経費は£6万余に達していた。1990年、当時の地域国営電力によるプロジェクトチームの技術的協力を得、従来炉を廃棄し、炉の最大定格484kW(ヒータ最大需要200kW)の赤外(注:中赤?)加熱炉を建設した。下地の鋼板厚仕様は車種毎に不同(最大3インチの物もあり、又場所による厚さも不同)に拘らず、表面加熱である為(注:と述べ)塗装各層の仕上がり良好。塗装5層各層の乾燥所要時間は45分、予熱を含む乾燥全所要時間は60%減、エネルギーコストも減少、炉の占積は23m²となり1/10以下、作業環境の改善顕著、同国営電力から生産効率賞を授賞。

注:UIE(国際電熱連合)は4年毎に電気加熱に関するコンGRESSを開催している。

各回の発表論文の内、赤外加熱に関するものは、1988年度3件、1992年度9件、1996年度8件を数え、ここ10年余産業界の本分野への関心の深さを窺わせる。

イギリスではサッチャ首相の方針の下、同国営電力を統括するElectricity Councilは解散、組織は総て民営化(発電3社、送電1社、配電12社)、総括機関としてElec. Associatesが創設されている。その下に国営時代の研究機関を引継ぎ、研究開発会社E A Technology社(在Carpenhurst、我国の電中研相当、但し上記国内電力会社の他、全欧及びUSA等の電力(我国から中電)、計38社から協賛研究費を得ている)が1991年創設され、フランス国営電力EdFの研究所と共に、ヨーロッパに於ける電力需要研究開発の中心的機関となっている。

2.2.2 近赤加熱産業の展開

上記二工場は1996年度コンGRESS(於バーミンガム、イギリス)時の見学先となったもの。以下は此のコンGRESSに提出された論文。

(a)製紙工業分野(特にコート紙等高級紙)への適用は活発であり、フランスでEdFの指導を得、新しい近赤加熱方式のパイロット機(220kW)が製作され、同型機はスイスで稼動中、又工業用第1号機(1400kW)がフランスで稼動、生産性向上5-10%の実績。

(b)繊維産業分野 伝統的なイギリス繊維産業が安価な輸入品に対抗すべく、民営化された配電会社所属の研究所が指導し、(1)現用の熱風炉に中赤加熱を付設し、施設の占積を拡大する事なく、大きく生産性の向上と合わせて省エネにも成功した木綿布、合成繊維布の織機例、(2)従来の製造システムを抜本的に整理、サイリスタ制御102kW近赤加熱を採用、省力化、工場環境整備に成功したポリエステル不織布製造例、(3)衣服用芯材料の製造工程に中赤加熱(30kW×2)を採用、熱源の立ち上げ即応性と省エネ等に成功した例。

(c)食料品分野 EdFの後援を受け、大量の料理用二枚貝の自動処理(口開けと洗浄、

精白)用トンネル窯(金網ベルトコンベヤ上の貝を、石英管型近赤放射源(70cm,3kW,主放射域 $0.7\text{-}2\mu\text{m}$)で、ゾーン1で上方から $3\text{kW}\times 15$ 本、ゾーン2で上方から15本、下方から12本、ゾーン3で下方から12本、計 162kW で照射、貝の種類、大きさによって窯内滞留時間及び点灯本数制御)を開発している。

2.2.3 新しい赤外放射源の開発

欧米では伝統的に赤外加熱即近赤加熱であった。更に電力供給の信頼度が我国に比し著しく劣っている背景もあって、不測の停電時、不良加熱製品を出力し続けぬ様、放射パワの急速な立ち下げ、復帰後すぐ生産再開出来る様、急速な立ち上げが可能な、熱容量の小さい近赤源が好まれて来た。電力コストも相対的には安価だった。しかし最近になって被熱物の赤外吸収特性との関係上、エネルギー有効利用によるエネルギー・コスト減の見地から、従来近赤加熱であったものの一部が中赤加熱へ、更に遠赤加熱へシフトする例が見られるようになった。上述2.2.1と2.2.2でも此を窺う事が出来る。(尤も放射パワが本質的に大きく照射密度を大きくとる事出来(次頁、赤外エミッタ特性一覧表参照)、生産力の大きい施設として、近赤加熱が依然として主流である事に変わりはない。)

上述の見地から従来よりも熱応答の早い、中赤、及び遠赤放射源の開発が望まれ、此等が製品化された。

(a) 高速応答中赤エミッタ 熱線材として慣用されてきたニクロム、タングステンに替わり、熱容量の小さいカーボンファイバ(径数十 μm)を一系列平板状に並べた薄厚、幅約 10mm を熱線材として石英管に封じ込めた物。定格運転状態でファイバ温度 1200°C 、電源切り時放射パワが定格値の30%まで急降下する所要時間 1.75 秒、寿命 5000 時間、 $47\text{cm}, 1\text{kW}$ 型と $77\text{cm}, 2\text{kW}$ 型の2種。ドイツ系の Heraeus Noblelight社と、前記 E A Tech.社との協同研究開発の成果。主適用分野として、乾燥、印刷等を挙げている。

(b) 再放射型即応性遠赤エミッタ、Re-Emitter 高速応答性の石英細管型近赤エミッタ($28\text{cm}, 1\text{kW}$)を1次放射源とし、2次放射源(熱容量の小さい熱絶縁板に、カーボン材を吹き付け厚さ 0.2mm に仕上げ)を照射、後者が被熱物を遠赤照射するセット。但し石英管の裏側半面もカーボン塗布され、昇温、上記遠赤放射に加わる。 6kW モジュールでは、近赤管6本を 7.5cm 間隔で平行配置、カーボン板($60\text{cm}\times 30\text{cm}$)との離隔距離は数 cm 、カーボン面定格温度約 700°C 。此のモジュールで構成した炉の例で、遠赤放射面が定格温度の90%に達する所要時間は4分(相当する熱風炉で約20分、電熱線埋め込み型セラミクス板による炉では6分)、電源切りで10%温度まで冷える所要時間は2分(セラミクス板では6分)。

放射パワのスペクトル特性はカーボン面からの遠赤放射と、此と温度の異なる石英管後背カーボン面からの遠赤放射の他、カーボン板からの僅かな反射近赤放射の三者からなる。 $1\text{-}8\mu\text{m}$ 域が主放射域、 $3\text{-}4\mu\text{m}$ 域に緩やかな山($4.6\text{kW}/\text{m}^2\mu\text{m}$)。収縮包装フィルム材ポリエチレンの吸収率のピーク($3.5\mu\text{m}$ 近傍)と良くマッチするスペクトル特性となっている。カーボン板から約 12cm 離れた平面上の照射密度均一性はかなり良く、平板状被熱物の収縮包装炉に適するが、七面鳥等の不規則形状物には適さないと断っている。

電気入力に対する放射エネルギー効率、側面に反射版ありで 57.5% 、無しで 49% (セラミクス板型炉では、有りで 44% 、無しで 39%)。

Double R Controls社が E T Tech.からライセンスを受け製品化(最小型は 3kW)。

(注：本件についての kongress 提出論文は極めて簡単且つ定性的。上記は筆者が E A Tech.社に赴き、開発担当者に直接会って得た情報に基づくもの。)

筆者が現地（イギリス）で収集した赤外エミッタ・メーカ各社のパンフ類を整理して得た結果を特性表として示す。 赤外エミッタ特性一覧表

	近赤エミッタ	中赤エミッタ		遠赤エミッタ	
石英管型 ヘレウス社製	・ 温度 (°C) 約 2500 ハロゲンガス封入	高速型 約 1500	標準型 1200~950~900	600	
	・ λ_m (μm)	約 1.0	約 1.6	2~2.4~2.5	3.5
	・ 熱応答時間 (sec)	約 1	約 2	(数十)	5×60
	・ 得られる照射密度の最大値、M (kW/m ²)	150 400 (水冷式)	90	60	一桁数
洋梨型 パンク	・ 温度 (°C)	2400	石英管型 パンク 1350	900	シースヒータ型 パンク
	・ λ_m (μm)	1.1	2	2.5	
	・ 熱応答時間 (sec)	3	4.5	30	3×60
	・ M (kW/m ²)	450	80	100	60

注： λ_m は放射輝度最大となる波長。”工業加熱分野(TC27, IEC)”では、国際規定、IEC IEV Pub.841(1983)による赤外波長区分、近赤(約0.8-2 μm)、中赤(2-4 μm)、遠赤(4-1000 μm)が広く認められている。ヨーロッパでは、此に拠って、概略 λ_m が存在する近、中、遠赤域で赤外エミッタを区分している。(但し上記の波長区分は、他の学術分野では、国際的にも現在全く不統一の状態に在る。)

我国では、放射輝度のスペクトル上、放射の平均値相当となる波長 λ_a (通常 $\lambda_a < \lambda_m$)の属する区分で赤外エミッタを区分する。又遠赤エミッタの使用温度は通常 500°C前後。

付：LTEE (カナダ最大の水力発電会社、Hydro Quebec 所属の電気応用、電気化学の研究所。国及び Quebec州政府の補助を受けている)の既述 kongress 提出論文は、同所がガス及び電気式赤外エミッタの放射パワースペクトル測定器、全放射パワの三次元マップ作製機、効率、過渡特性測定器を整備している事を唱い、各種赤外エミッタの測定例を挙げている。

(市川 真人)

2.3 産業用加熱における赤外放射加熱の意義と特長

2.3.1 近赤外放射と遠赤外放射 —— その特長

産業用加熱の分野における赤外放射加熱の利用は、わが国と欧米諸国との間で際立った違いをみせている。すなわち欧米の近赤外（短波長）放射に対するわが国の遠赤外（長波長）放射という図式である。前者は石英管内に封入されたタングステンフィラメントに通電、高温に加熱することで発せられる波長の短い赤外放射を利用し、電流入・切時のヒーター（フィラメント）温度変化の速い応答性と高パワーという特徴を活かして、自動制御された自動車関連の塗装乾燥ラインや製紙工場的高速乾燥ラインなど大型設備で活躍している。ラインに加熱物があるときとないときに素早く対応して、ヒーター温度の瞬時の昇降が可能なので、エネルギーの無駄がなく、ラインの供給物切れにも安全な点が評価された結果である。

しかし多くの物質にとって近赤外放射はそれ程吸収性が良くはないため、この方式は多少のロスを承知した上での、高速、高能率処理を狙ったものであるといえよう。従って電力費の比較的安い地域に適した方式であり、わが国よりも欧米で主流となった。またこの場合、ヒーターへの供給電力を細かく制御することは通常行わず、最大負荷で通電するか、オフにするかである。

一方後者は、適当なセラミック材質から成る管や板を電熱線等で加熱する構造の遠赤外放射体（ヒーター）を用い、セラミック材質から放射される波長の長い赤外放射を利用している。その温度は通常は600℃以下と、前者に比べかなり低温度域、低パワー域に属する。従ってこの方式は前者よりも時間当たりの処理量の少ない、全消費電力の少ないコンパクトなプロセスか、あるいは処理温度を相対的に低めに厳しく保つことを要求されているプロセスに向いている。近赤外と遠赤外とのこの両者の違いは、単に使用電力規模、処理能力の点にのみあるのではなく、もっと質的なところにおいて、それがそれぞれの使われ方に反映している。

わが国の遠赤外放射加熱利用の状況をみると、前者同様塗装の乾燥にも広い実績を上げているほか、電気電子基板の乾燥・硬化や食品材料の乾燥・加熱に効果的に使われていることが特徴的である。これらの例では、熱的に微妙な運転制御や仕上がりの均一性を求められたり、あるいは採用している熱処理プロセスの違いや、材料の受ける熱履歴のちょっとした違いが、品質を大きく左右する、というような問題を抱えていることが多い。

食品の温度をある温度以内に抑えて、かつ所定量の水分蒸発や望ましい熱変化を起こさせる、というような目標に対し、通常の熱風乾燥方式では大変時間が掛かるか、狙った品質に到達しないという例は少なくない。これに遠赤外加熱を導入して、極めて短時間に所定の処理を完了し、目標の品質レベルのものを得、しかもその所要時間の短かさ故に、従来のバッチ処理の工程を連続化することに成功した、という事例はその典型である。

2.3.2 わが国における遠赤外放射加熱の意義

わが国における遠赤外放射加熱は、最も汎用的で、設備も安く、エネルギーコストの点でも電力を使わないで済む熱風加熱に対するアンチテーゼとして導入されたといえよう。すなわち熱風方式では、その処理速度、仕上がりの品質が生産者に採って満足されなかった場合に、その解決手段として期待され、かなりの範囲でそれに答えてきたのである。

遠赤外方式は通常電気を熱源としているため、熱風との比較においては、厳しくエネル

ギーコストを比較される。遠赤外放射が対象物への吸収性に優れていること、また熱風に比べ高レベルの伝熱量を確保できるために大幅時間短縮が出来ること、などからエネルギーの利用効率が非常に高く、これが遠赤外方式が受け入れられた理由の一つであろう。また加熱の各段階において、それぞれ適切に設定した表面温度でヒーターを制御することにより、品質も高いレベルで管理できたことも、期待に答え得たもう一つの理由である。

食品加熱を代表とする、このような微妙なエネルギー制御を必要とする加熱プロセスにおいて、近赤外放射はパワーが大きすぎ、熱風は弱すぎ、遠赤外放射が対象物の熱的变化とパワーのバランスが最もよいといえよう。また加熱装置1基当たりの電力容量についても、わが国の状況で実現し得るのは、通常高々200~300kWまでであろう。これは遠赤外加熱装置のカバーする範囲でもある。欧米における近赤外加熱装置は、これより1桁程度大きい装置まで稼働している。

2.3.3 遠赤外放射加熱の効果とそのメカニズム

遠赤外放射加熱が、このような熱的にセンシブルな材料に対し、

1)非常に効率的に、すなわち短時間に必要な、一般的には熱風加熱よりも多くの、エネルギーを加えることが出来、かつ

2)均一性も高く、望ましい品質レベルを達成しやすい

理由としては、次のような点が上げられる。すなわち、

①放射が対象物に良く吸収される遠赤外域で成されるため、放射加熱の利点そのまま享受できる。

②放射加熱のため、処理物表面温度がいきなり高温の熱源温度に触れず、徐々に昇温していくこと。伝熱問題の境界条件がStefan-Boltzmannの絶対温度の4乗で表わされる熱流に支配されること。このため、加熱の初期から終期までほぼ一定量の熱流が表面から流入し、物体表面の温度が所定の限界を越えないうちに、必要なエネルギーが短時間で供給される可能性が大きいこと。

③②の高熱流確保は物体内部の昇温の速さにも結びつくから、内部の温度の均一性向上にも効く。

④遠赤外加熱装置は、通常ヒーターから均一照射を受けるような構造を採っており、ヒーターは加熱のゾーン毎に精度の高い制御を行う。これらも製品の均一性を初めとする品質レベルの向上に有効に寄与している。

品質上の差別化の期待をもって、このような遠赤外加熱方式の効果を追求する場合の多いわが国においては、それぞれの顧客の状況、ニーズに合わせた形での導入が検討されたため、結果としてその利用は個別的、ケースバイケースの展開を示している。またその狙いも単なる能率、品質アップだけでは飽きたらず、従来のバッチ工程を連続化し、合わせて省力もしようなどと、大きな合理化効果までターゲットにおいている場合が多い。

一方欧米における近赤外加熱の場合は、大型の従来プラントに対する補助手段としての導入が多く、従来生産性、品質の点でネックになっている個所にこれを導入し、

- ・増負荷による増産
- ・予備乾燥等前処理による増産
- ・追従制御性や均一性向上による仕上げ品質向上、歩留まり向上

などの点で、これも大きな効果を挙げている。

2.4 産業分野における赤外放射加熱の応用と今後の課題

2.3 で述べたように、わが国における赤外加熱の主体は遠赤外加熱であるので、以下これについて取り上げることとし、新しい試みに的を絞って述べる。

2.4.1 遠赤外加熱の応用に関する進展

(1) 使用雰囲気、使用温度域の拡大

使用雰囲気そのものが加熱源である熱風方式などと異なり、放射加熱は雰囲気がどうであれ、すなわち冷たい風が吹いていても、減圧下あるいは真空においても、放射エネルギーを伝えることができる。また凍結状態にある物体に対し、その周囲の環境の温度を、従ってその物体の表面の温度を上げることなく、放射エネルギーを加えることもできる。

① 減圧乾燥、真空凍結乾燥

製鉄所などで用いる大型モーターの洗浄後の溶剤乾燥を、周囲に遠赤外ヒーターを装着した真空チャンバーで行っている例が紹介されており、時間短縮の効果を上げている。しかし食品、バイオなど、本来このようなシステム導入に適しているとみられていた分野では、遠赤外方式はあまり浸透していない。遠赤外方式は、乾燥終期を除き、従来型装置の熱板温度よりかなり高い温度をパネルヒーターに対し設定し、所要時間の大幅短縮とこれによる設備のコンパクト化（投資額の削減）を意図したものである。しかしバッチ式の装置では、時間短縮は運転サイクル数の増加をもたらし、総合的なメリットが出にくかったのかも知れない。この辺り、ユーザー、装置メーカー両者の問題意識が今後生まれてくることを期待したい。

② 熱風併用方式

炉内の暖まった空気を循環させて、電力の節約と炉内雰囲気温度の均一化を図ることは通常行われているが、塗装乾燥炉や半田リフロー炉において、系外から熱風を積極的に導入し、効率と仕上がりの良さを得ている例がある。対流加熱の長所が加わったという説明がされているが、放射に対し陰の出来る物体の温度均一化には寄与すると思われるが、説得力に欠ける。十分な熱風気流下にあっては、物体表面温度はそれ以上の温度に上がることはなく、局所的に乾燥が終わった部分でも過熱されることが少なく、パワーを落とさずに放射エネルギーを残りの部分に与えることが出来るのだと考えた方がよい。

③ 冷凍食品などの解凍

水に対し遠赤外放射は良く吸収されるが、氷に対しても効果的である。解凍はその表面を解かしてしまえば駄目なので、表面温度を低く抑える必要がある。このため融解熱を効率よく食品に加えることが、通常の方法ではたいへんむずかしいが、遠赤外放射は優位な方法の一つである。②と同じ考えに立てば、適当な温度の、例えば零下数度の冷風を吹き付けながら高パワーの遠赤外放射を与えれば、ドリップの少ない解凍が比較的短時間で行える。

ただやはり放射加熱の限界から、大きな物体に対してはそのメリットが実質上なくなってしまう。マイクロ波などとの併用など考えられないだろうか。

(2) 炉形式の広がり

現在活躍している遠赤外加熱炉のほとんどは、コンベアで処理物を連続的に搬送しながら、遠赤外ヒーターからの照射を与えるタイプであり、扱う材料の性状、形態に合わせ、メッシュ、スチール、テフロンシート等のベルトに材料を直接、あるいはトレーに入れて

から積載したり、あるいはトロリーチェーン方式で処理物を吊るしたり、適当な方式を選択している。トロリー方式は別として、これらは厚みがあまりなく、かつ均一なものか、それとも均一に積載できるものに対して適用できる。

そのような方式では扱えなかった材料を処理することを考えて開発されたロータリードラム方式は、一般に粒、不揃いの塊、不定形の細片、茶葉などの形状や藻の絡まったようなようなものが扱え、コーヒー豆の焙煎やお茶の火入れ装置として実績をもっている。材料を転動させながら搬送し、常に新しい受熱（照射）面を形成させることで均一処理を図っている。原藻海苔（塊状）の焼成装置では、同じような回転ドラム型の熱風方式では到達し得なかった均一な緑色への焼成が、遠赤外放射単独の方式で可能になった。

このほか広い皿（パン）を水平方向に（回転運動を加味して）揺動させ、そこに載せたナッツ類を反転あるいは移動させ、全面に上から遠赤外照射を加えるバッチ処理の焙焼機も広く利用されている。

(3) 処理物の供給・移送技術への対応

処理物の性状、形状によって、上に述べたように炉体の形式が選択されるが、さらにそれへの供給や、移送の仕方もそれに対応する必要がある。遠赤外加熱装置では扱うものが実に幅広く、新規の装置を製作する度にその供給装置を開発する必要に迫られるなどということが少なくない。

シート状食品乾燥装置では、ゾル状の食材をテフロンベルトの上に、1mm程度の厚みで均一に塗工する装置が開発された。またサブミクロン級の微粉の乾燥装置では、力が加わると硬く締まってしまふ、チクソトロピックな性質をもつ粉体を、約7mm以下の小塊にしてベルトやトレイに散布する装置が同時に新たに製作された。削り機に掛ける前に鏝節を乾式で加熱するための焼軟装置では、形、大きさのバラバラな鏝節をメッシュベルトに自動的に並べていくフィーダーを求められた。

遠赤外加熱装置は、一般的に積載厚みを大きく取れないため、照射面積を広く必要とする傾向があり、設備の設置面積が不足する場合がある。このような場合コストアップにはなるが、多段の連続装置も作られている。

常圧下での液体濃縮にも遠赤外加熱は有効であるが、扱う液体の性質が問題になることが多く、応用例は多くない。水単独の場合よりずっと液温を高くし、200℃以上にしないと、水分が蒸発しない高純度アルカリ水溶液濃縮装置では、ムラを避けるため液体を一定の液深で一定流速で流し、遠赤外照射に加え、上部から加熱乾燥空気を液面に吹き付けることで、乾燥能力を確保している。ここで薬品蒸気によるヒーターの腐食を避けるため、系の内部はステンレスのケースで密閉し、セラミック管ヒーターの端子部はケースの外に出し、取り出し部でシールを行っている。

2.4.2 今後の課題

遠赤外加熱装置は、実に広い範囲で利用されているにも関わらず、これまで述べてきたように、汎用的装置は少なく、ケースバイケースの状況により、個別的な対応、開発が不可欠になっている。遠赤外加熱はその効率の故に、従来バッチ式で一晩掛けて乾燥していたものに対し、連続化できる可能性をもたらした。当然ながらこれは時間との勝負になり、それぞれの場合にそれぞれのむずかしさや問題点を解決する必要に迫られたということであろう。

応用分野の面からみると、食品はもっと効果が認識されてよい対象の一つであり、その範囲も広いので、働きかけ次第では有望である。電気電子部品等は乾燥、硬化など遠赤外加熱に適した工程が少なくないが、特定の工程を除きあまり普及していない。ただし要求の増えているクリーン対応の点では、遠赤外ヒーターおよび炉体設計はまだまだレベルアップの要があるにしろ、一般的にクリーン化に適した方法ではないかと思われ、事実そのような使われ方も成されている。化学プラントへの導入も効果の点では興味あるところであるが、あまり汎用化という点では期待できないかも知れない。

遠赤外加熱はまた環境問題への一方策として捉えられることもあるが、廃棄物処理関連の加熱装置は、パルプモールド（古紙利用の包装緩衝材）乾燥装置など、一部の例を除き利用されてはいない。しかし今後は廃棄物リサイクルシステムの確立など状況変化に応じ、この方面への展開が求められよう。

扱う温度にかなり低めの限界をもつような、化学材料、有機材料などを絶乾状態にするという要求に対しては、真空下での処理は別として、遠赤外乾燥以外の手段は考えにくい。一般に乾燥はたいへん大きなエネルギーを必要とする工程であり、我々を取り巻く状況における乾燥処理の必要性、そして乾燥工程の、低温故のエネルギー効率の悪さなどを考慮すると、産業界全体で乾燥のために用いる熱エネルギーは莫大なものになるのではなかろうか。このような点からも、エネルギー効率の優れた遠赤外加熱の利用を乾燥分野において推進していくことは、社会のニーズにもかなった今日的テーマと思われる。

(木村 嘉孝)

3. 赤外放射加熱のシミュレーション

(1) ボイケン・モデル的手法 (IRA-8付資料。3.3及び4.参照)

熱伝導系の温度、熱流、熱抵抗、熱容量を、それぞれ電気伝導系の電圧、電流、電気抵抗、静電容量に対応させると、良い相似関係が成立する。此に着目、オランダの C.L. Beuken(1901-1993)は、ハードウェアで電気回路を構成し、静電電圧計と電流計で要点の電圧、電流を測定、非定常現象を含む一次元熱系を解析出来る事を示した。此は計算機分類上、直接相似型の熱伝導シミュレータであるが、第二次世界大戦後広くヨーロッパ各国でボイケン・モデルとして建設使用された。

USAでは 1942年コロンビア大学の V.Paschkis は空間二次元熱系も解析出来る大規模な物を設置、Heat & Mass flow Analyserと称した。我国でも日立製の物が 1963年、当時の八幡製鉄所に納められている。

ずっと遅れてデジタル計算機の進歩に伴い、熱系を表す非線形の連立偏微分方程式からなる数学モデルによって解かれる様になったが、此のプログラム化は容易でなく、又求解に先だつて解の見通しを得る事も、事後の解のチェックも容易ではない。他方、ボイケンモデルの手法を復活し、抵抗とコンデンサとからなる電気回路で熱系を”構成出来れば”、現在ソフト化されている既成のソフトに拠って容易に計算機解が求められるだけでなく、電気回路の常識によって回路図を視察し、上述した見通しも立てられる。此の為、昇温した被熱面からの対流損失熱流ないし熱風からの供給熱流を表現する為に”対流伝熱抵抗” r_h (温度差/熱流) を定義し、被熱表面からの乾燥蒸発を表現する為に”真の蒸発抵抗” r_v (定率乾燥期で定義し、昇温値/蒸発潜熱流) を新たに定義提案した。此の様にして、熱源の定温度源を定電圧源で、定熱流供給源を定電流源で表し、遠赤放射ないし熱風加熱(更に併用加熱)される被熱含水物からなる熱系を、電源と、抵抗、コンデンサからなる電気回路で模擬し、此に拠って熱系の計算機解析を可能とした(IRA-84)。

尚電力会社で敷設電力ケーブルの昇温解析に此の手法を試みた例もある。

(2) オーソドックスな放射熱系解析手法 (文献(1)と3.1参照)

閉じた複数の面で構成される空間内に物体(面)が存在する系の放射熱交換を考察する。此の場合系内任意の二面間の放射パワ交換は、両面絶対温度の各4乗差×係数となる。此の係数は(全面間に生ずる相互反射の影響を無視すれば)二面の各放射率と、それぞれの面積、形状、相対的な配置だけで定まる”形態係数”(geometrical view factor,等)、或いは角関係(angle factor)とも呼ばれ、慣用的に記号 F或いは ϕ (各面を表す二つの下添字を付す) ×着目面の面積×スシュテファンボルツマン定数で与えられる。Fは簡単な場合、化学工学や伝熱機械工学のハンドブックに計算公式が示されている。厳密には全面間相互反射を考慮した係数、”放射の交換係数”(radiant exchange factor,慣用的に手書き文字の Fが記号として充てられる)とすべきであるが、極く簡単な場合でない限り此は算出困難な為、Fで代用される事が多い。F等については、計算上並びにチェックに便利な諸定理も知られている⁽²⁾。上記放射熱交換と対流伝熱とを合わせ考慮し、空間を構成する諸面及び物体面の温度を計算機解析する。

(3) 含水被熱物の形状、即ち被熱物を工夫モデル化(平板、或いは円柱)し、熱風加熱と遠赤加熱を解析した計算結果と実験例(試料、薩摩芋)を 3.2に示す(IRA-62,85)。

3. の引用文献

- (1)宮永、他：三次元空間の熱放射環境解析法、電中研々究報告(平4)T 93045,及び91064
- (2)工業電気加熱ハンドブック、2.6 温度放射 pp.27-38 (電気書院、昭43)
- ・ W.A.McADAMS:Heat Transmission, pp.63-82 (McGraw Hill, 1964)
- ・ Obert & Young:Element of Thermodynamics & Heat Transfer,pp.408~(McG.H.1962)

(市川 真人)

3.1 室内住空間の熱環境シミュレーション

近年、事務所ビルで使用されるエネルギーのうち空調が占める割合が最も大きいにもかかわらず、そこで働く人の大半が熱環境に非常に不満を感じていることが報告されている。OA機器から発生する熱や不均一な空気温度が不満の主な理由としてあげられている。この状況を改善して快適で省エネな住空間をつくり出すためには、空気の流れと人体との対流熱交換、在室者の身近にある熱源との放射熱交換、発汗等による潜熱移動などと温熱快適性との関係を明確にしておく必要がある。電力中央研究所では居室および人体をモデル化し、人体表面からの放射と対流による熱移動を解析¹⁾するシミュレーションによって在室者の温熱快適感の予測を行っている。本節ではその結果の一例を紹介する。

(シミュレーション結果の一例)

放射冷房²⁾および対流冷房された室内を2名の在室者ととも三次元モデル化(図3.1.1)した。それぞれの熱環境および人体からの放射や対流による放熱量を放射と対流の連成伝熱計算により解析し、先に行った実測結果と比較した。

- (1) 室内の気温および壁面温度の分布の解析値は実測値と概ね1℃以内で一致し、モデルの妥当性を検証できた。
- (2) 人体モデルの全放熱量³⁾の解析値を用いて予測した従来のPMV⁴⁾を修正した温熱感⁵⁾は、室内の作用温度⁶⁾の一次関数で表現でき、在室者による温熱感の実測結果⁷⁾とよく一致した(図3.1.2)。従来のPMVによる温熱感予測結果と比べて予測精度が向上した。
- (3) 放射冷房室と対流冷房室における人体モデルの全放熱量がほぼ等しい場合の放熱量の内訳を比較した(図3.1.3)。放射冷房では放射による放熱量が対流による放熱量の3倍近く大きい(全放熱量の50%以上を占める)こと、対流冷房の対流による放熱量は放射冷房の対流による放熱量の2倍近く大きいことなどがわかった。ここで得られた知見は適切な空調設計および住空間計画に貢献できると考える。

注1) 当所で開発した熱放射環境の解析プログラム(研究報告T94031他)と市販の気流解析プログラムPhoenics ver.2.1を組み合わせて連成伝熱計算を実現した。

注2) 正確には放射パネルと対流冷房による複合冷房。

注3) 呼吸・不感蒸泄による放熱量(W)、放射による放熱量(W)、対流による放熱量(W)の和

注4) Fangerらによって提唱された温熱感指標。-3(寒い), -2(涼しい), -1(やや涼しい), 0(中立), +1(やや暖かい), +2(暖かい), +3(暑い)の7段階。

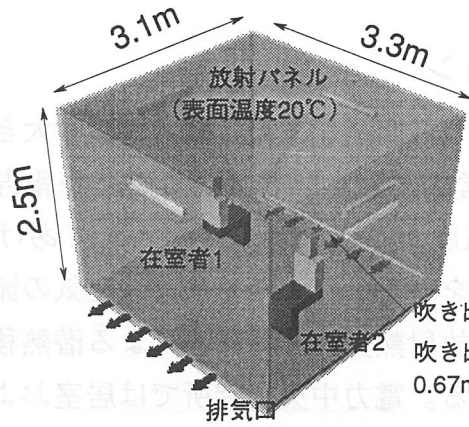
注5) 本報告では、以下の式で人体モデルの温熱感を予測した。

$$\text{温熱感} = (0.028 + 0.303e^{(-0.036 \times \text{活動量})}) \times [\text{活動量}(\text{W}/\text{m}^2) - \text{人体モデル単位面積あたりの全放熱量}(\text{W}/\text{m}^2)]$$

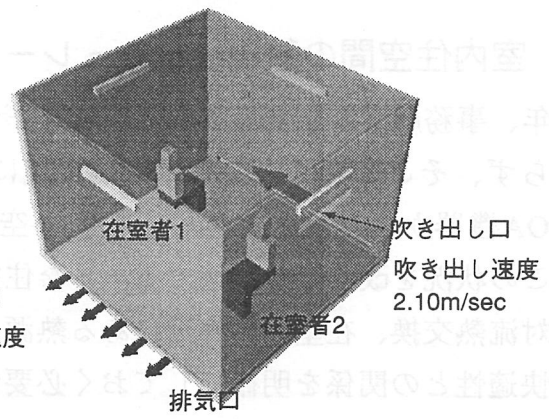
注6) 作用温度は気温と平均放射温度の平均値とした。

注7) 放射冷房時48名、対流冷房時36名の在室者が申告した温熱感の値の平均値。当所内に設置した実験室内で温熱感申告試験が行われた(研究報告T95075)。

(宮永 俊之)

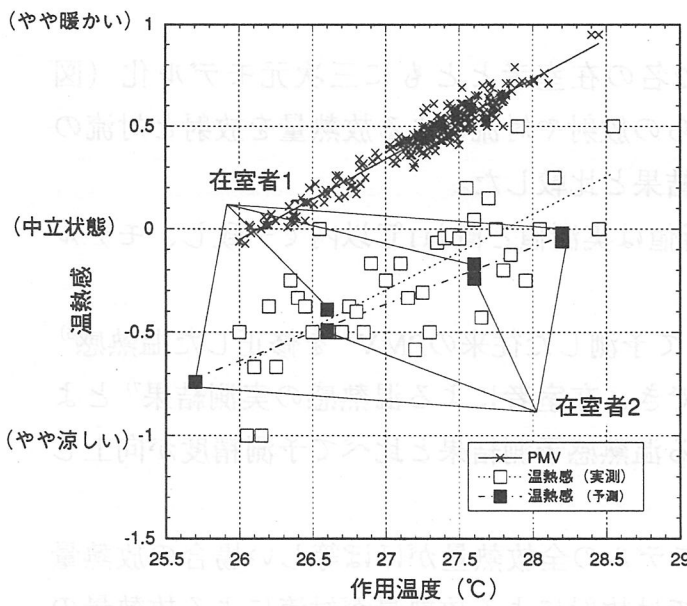


(a)放射冷房室

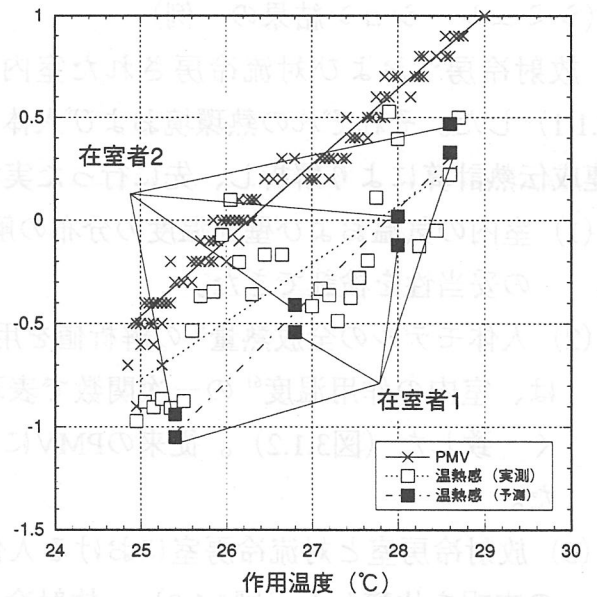


(b)対流冷房室

図3.1.1 解析モデル



(a)放射冷房室



(b)対流冷房室

図3.1.2 温熱感の予測値と実測値の比較

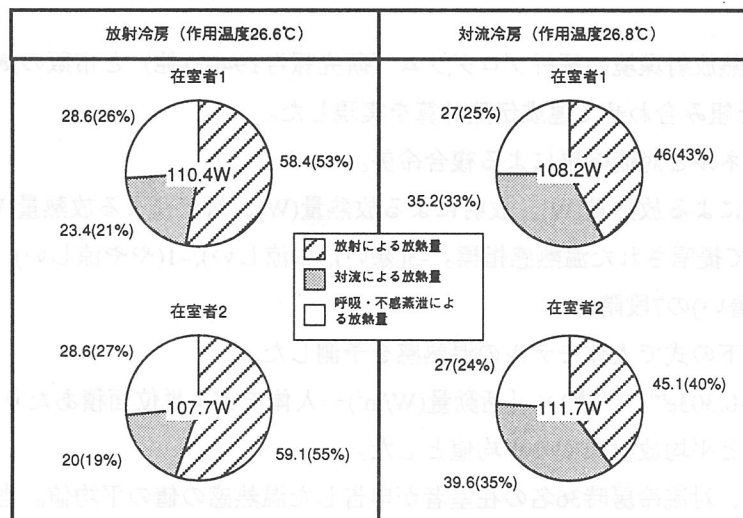


図3.1.3 人体モデルの放熱量の内訳

参考資料

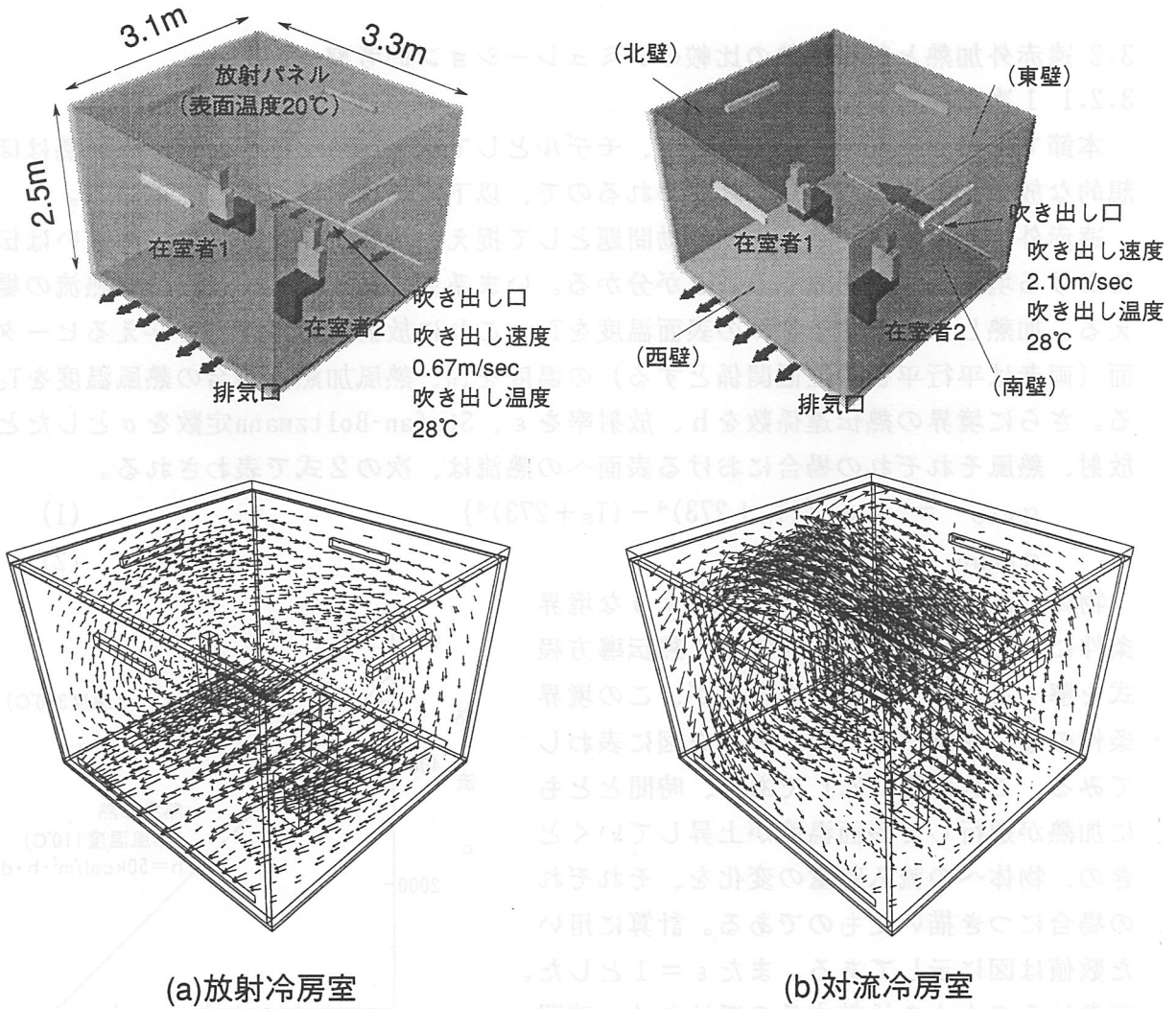


図 参-1 気流解析の結果

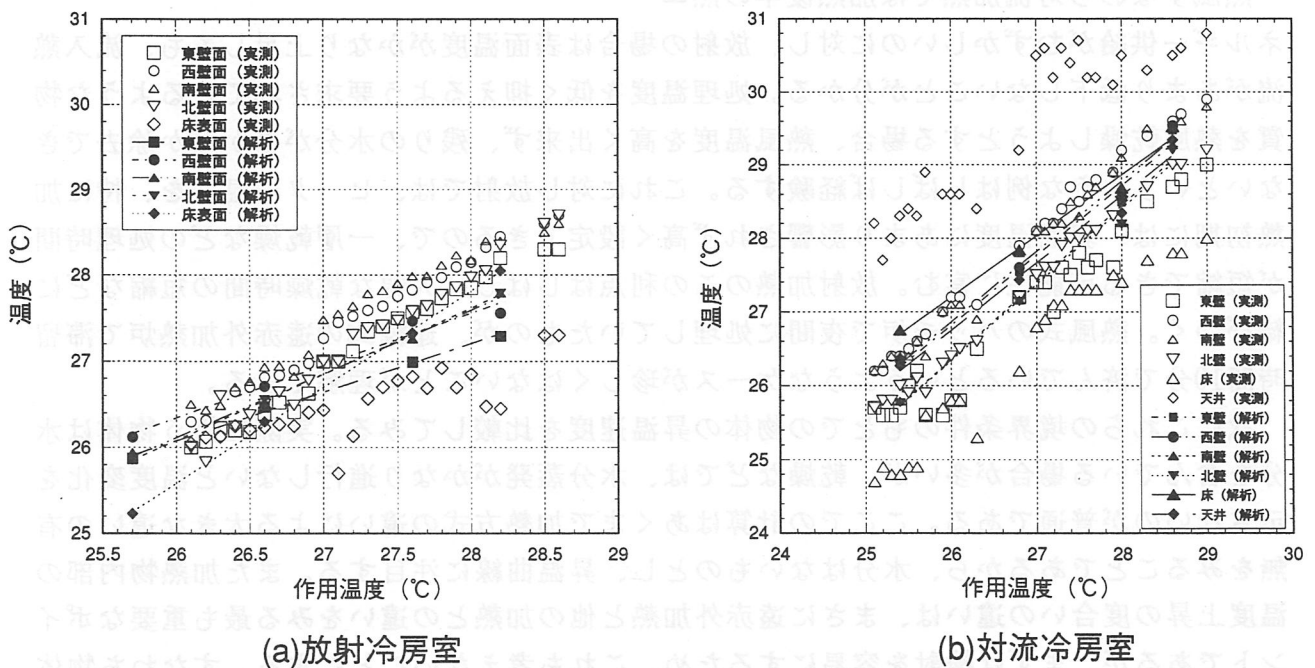


図 参-2 壁面温度の解析値と実測値の比較

3.2 遠赤外加熱と熱風加熱の比較のシミュレーション的考察

3.2.1 1次元モデル

本節では遠赤外加熱を論じる場合、モデルとして放射加熱を扱う。遠赤外加熱はほぼ理想的な放射加熱になっていると思われるので、以下両者は同義語として進める。

遠赤外加熱と熱風加熱とを熱移動問題として捉え、比較すると、そこでの違いは伝熱面における境界条件に帰着することが分かる。いま系を単純化して1次元的な熱流の場を考える。加熱しようとする物体の表面温度を T_s 、これに放射エネルギーを与えるヒーターの面（両者は平行平板の位置関係とする）の温度を T_H 、熱風加熱の場合の熱風温度を T_c とする。さらに境界の熱伝達係数を h 、放射率を ϵ 、Stefan-Boltzmann定数を σ としたとき、放射、熱風それぞれの場合における表面への熱流は、次の2式で表わされる。

$$q_{\text{RAD}} = \epsilon \sigma \{(T_H + 273)^4 - (T_s + 273)^4\} \quad (1)$$

$$q_{\text{CONV}} = h(T_c - T_s) \quad (2)$$

物体の温度変化や分布は、このような境界条件にさらに初期条件を設定して熱伝導方程式を解くことで一般には求まるが、この境界条件の違いを調べるため、両式を図に表わしてみる。これが図3.2.1であり、時間とともに加熱が進行して表面温度が上昇していくときの、物体への流入熱量の変化を、それぞれの場合につき描いたものである。計算に用いた数値は図に示してある。また $\epsilon = 1$ とした。両者はその大小を比較するのではなく、時間経過（温度上昇）に伴う熱流変化を問題にすべきである。

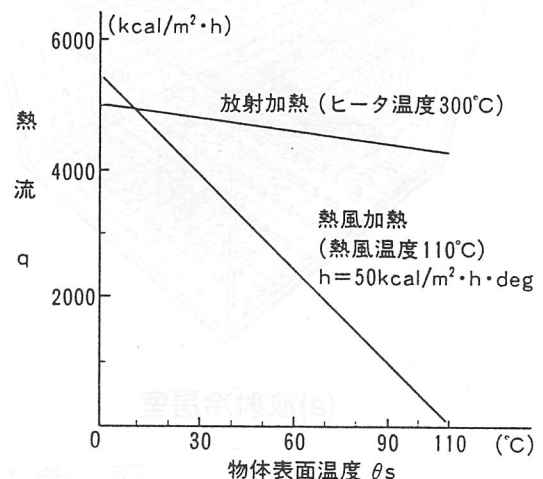


図3.2.1 表面温度の変化に伴う熱流変化

熱風すなわち対流加熱では加熱後半の熱エネルギー供給がむずかしいのに対し、放射の場合は表面温度がかなり上昇しても、流入熱流があまり低下しないことが分かる。処理温度を低く抑えるよう要求されているような物質を熱風乾燥しようとする場合、熱風温度を高く出来ず、残りの水分がなかなか除去できないというような例はしばしば経験する。これに対し放射では、ヒーター温度を、特に加熱初期には、表面温度にあまり影響されず高く設定できるので、一層乾燥などの処理時間が短縮できる可能性に富む。放射加熱のこの利点はしばしば大幅な乾燥時間の短縮などに結びつく。熱風式のバッチ炉で夜間に処理していたものが、連続式の遠赤外加熱炉で滞留時間10分で済んでいるというようなケースが珍しくはないことが理解できる。

次にこれらの境界条件のもとでの物体の昇温速度を比較してみる。実際に扱う物体は水分を含んでいる場合が多いが、乾燥などでは、水分蒸発がかなり進行しないと温度変化を示さないのが普通である。ここでの計算はあくまで加熱方式の違いによる大きな違いの有無をみることであるから、水分はないものとし、昇温曲線に注目する。また加熱物内部の温度上昇の度合いの違いは、まさに遠赤外加熱と他の加熱との違いをみる最も重要なポイントであるが、まずは検討を容易にするため、これも考えないことにする。すなわち物体の厚みを考えず、ただし重量 W 、比熱 C 、表面積 S の面として扱う。すると上の2式がそ

のまま使え、物体温度を T_x 、周囲温度ならびに物体初期温度を T_A 、経過時間を t とすると以下の式が成り立つ。

《放射加熱の場合》

$$CW(dT_x/dt) = \epsilon \sigma S \{(T_H + 273)^4 - (T_x + 273)^4\} \quad (3)$$

ここでいわゆる放射の形状因子のようなものは無視しているが、傾向をみるためには許されるであろう。

《熱風加熱の場合》

$$CW(dT_x/dt) = hS(T_c - T_x) \quad (4)$$

ここで上と同じく $T_H=300(^{\circ}\text{C})$ とし、 T_x が 15°C から 100°C に上昇したときの(3)式右辺の大きさの変化を求めると、図3.2.1で確かめたとおり、熱流は初期の87.6%にしか落ちていない。そこでこの放射の熱流を一定とみなし Q_0 とおくと、(3)は

$$CW(dT_x/dt) = Q_0 \quad (5)$$

これを解いて

$$T_x(\text{放射}) = (Q_0/CW)t + T_A \quad (6)$$

一方(4)式を解くと、

$$T_x(\text{熱風}) = T_c - (T_c - T_A)\exp\{-(hS/CW)t\} \quad (7)$$

熱風の場合の熱流は(4)式で表わされ、そこに(7)式を代入して、

$$Q(\text{熱風}) = hS(T_c - T_A)\exp\{-(hS/CW)t\} \quad (8)$$

これらの結果を模式的に図3.2.2に示す。

3.2.2 結果の解析

この模式図から両者の顕著な違いが、次のように読み取れる。これまでの検討では水分なしとしていたが、以下では乾燥についても言及する。たいへん乱暴ではあるが、この結果をみると、このような推察はそれほど飛躍してはいないと考える。

- ・熱風加熱は初期の温度上昇が速いにもかかわらず、その後極端に遅くなり、飽和現象を示す。
- ・熱風温度が高すぎると、表面が焦げ易い。一方それを避けるため低く設定すると加熱後半の熱流が確保できず、例えば乾燥はなかなか進まない。
- ・熱風乾燥では、いたずらのその温度を高く設定するのではなく、昇温速度をある程度抑え、その間に水分が蒸発する時間を確保する必要がある。後述の遠赤外乾燥と異なり、熱風乾燥は、準平衡的現象である。すなわち周囲の環境で蒸発速度は決まり、エネルギーを強制的に増やして乾燥速度を上げるのはむずかし

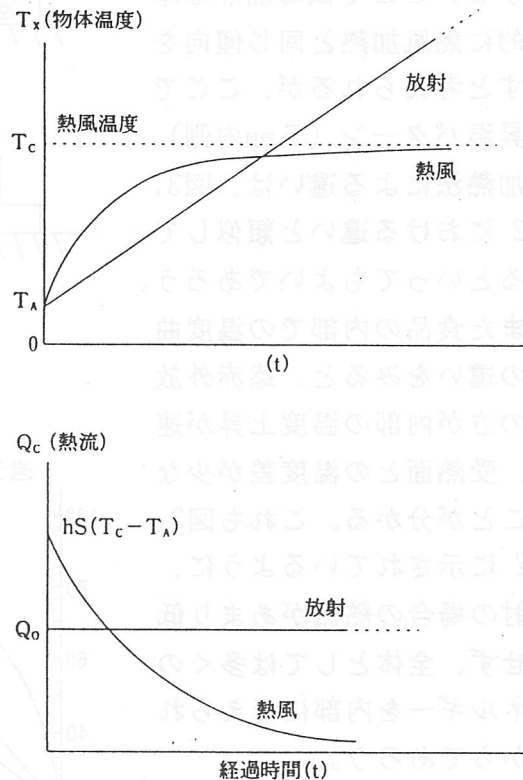


図3.2.2 放射と熱風の場合の温度変化と熱流変化

い。

- ・遠赤放射加熱では一定速度で昇温する。加熱の後期でもその速度は低下しないので、物温の限界のある場合は要注意である（普通加熱後半のヒーター温度は低く設定し、温度上昇を抑える）。逆に初期は温度上昇が遅いので、この間にエネルギーを出来るだけ多量に投入して（初期のヒーター温度は可能な限り高く設定する）、例えば水分蒸発速度を高め、除去すべき水分のほとんどを取り去るようにする。
- ・ここでは物体の温度が上昇しつつある間の、過渡的な状態を利用して、水分蒸発のためのエネルギーを、そのパワーを任意、あるいは適宜設定しながら、物体に半ば強制的に加えていく感がある。遠赤放射加熱特に乾燥は、ヒーター温度の経時的な変化（連続炉ではゾーン毎の設定）がたいへん重要な意味をもつ。

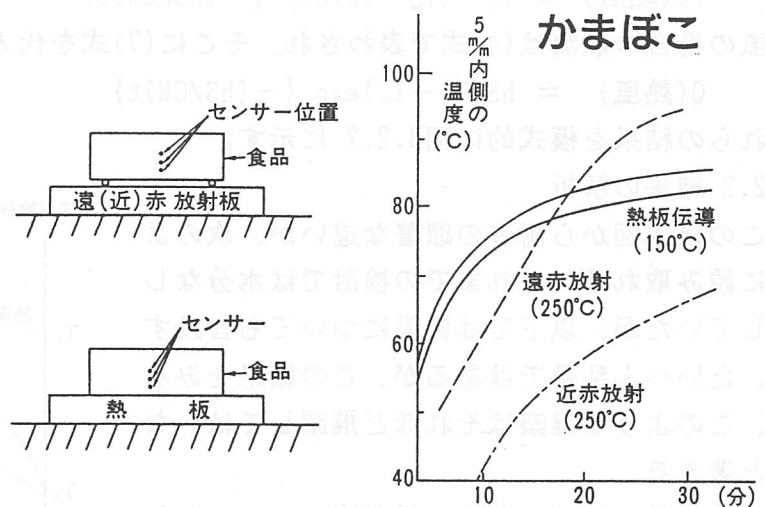
3.2.3 実験との比較

図3.2.3 は食品材料を遠赤放射と熱板伝導とで加熱した場合の、内部の温度変化を比較した実験である。表面温度を所定の値に制御した熱板に食材を直接おいた場合と、表面に遠赤放射材料を塗布してある同様の熱板に、スペーサーを介して食材をおいた場合とで、食品内部の温度変化を測定、比較している。

30分後に表面が同じような焼き色になるように条件を選び、熱板温度として遠赤外250℃、伝導150℃の間で比較する。ここで伝導加熱は本質的に熱風加熱と同じ傾向を示すと考えられるが、ここでの昇温パターン（5mm内側）の加熱法による違いは、図3.2.2における違いと類似しているといってもよいであろう。

また食品の内部での温度曲線の違いをみると、遠赤放射の方が内部の温度上昇が速く、受熱面との温度差が少ないことが分かる。これも図3.2.2に示されているように、放射の場合の熱流があまり低下せず、全体としては多くのエネルギーを内部に伝えられるからであろう。

(木村 嘉孝)



さつまいも (30mm厚)

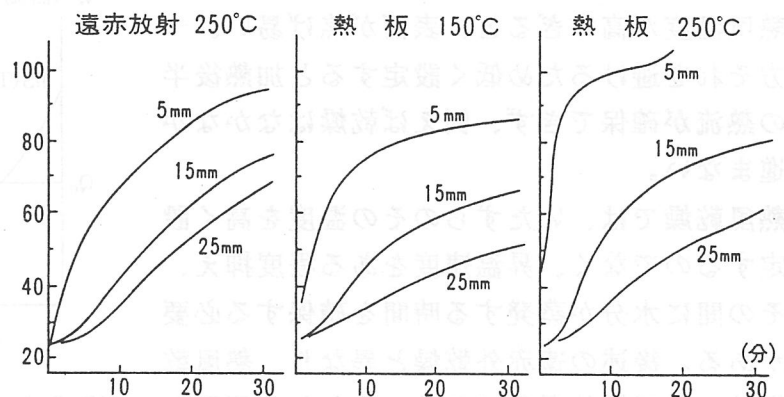


図3.2.3 食材の加熱実験 —— 放射と伝導の比較

3.3 電気回路系による加熱、乾燥過程のシミュレーション

3.3.1 電気回路系による熱系の模擬電気回路

平板状含水物（被熱物） W に密着して下地 S が存在する場合、電気系と熱系の対応（3.参照）から S を W に縦続接続した模擬電気回路が構成される。なお、“真の蒸発抵抗 r_v ”（3.参照）を被熱表面（昇温 θ_0 ）と室温（基準温度）間に接続し、蒸発現象を模擬回路上で模擬する {図 3.3.1}。

1 被加熱面の境界条件

(1) 遠赤外放射源 絶対温度の 4 乗差に比例して熱流が被照射面に供給される。放射源温度 $500[^\circ\text{C}]$ 、被熱面が $20 \rightarrow 60[^\circ\text{C}]$ へ昇温した場合この間の供給熱流 q_0 の変動は $1.5[\%]$ 程度で q_0 は定電流源とみなされる。

(2) 熱風源 熱風温度（室温から測った定温度源） Θ を一定とし、被熱面温度を θ_0 とすれば熱風源の供給熱流 $q_h = h(\Theta - \theta_0) = (\Theta - \theta_0)/r_h$ となり図 2 を得る。ただし、 h は対流熱伝達係数 $[\text{W}/\text{cm}^2 \cdot \text{deg}]$ 、 $r_h = 1/h$ は対流伝熱抵抗 $[\text{deg}/(\text{w}/\text{cm}^2)]$ 。

q_h は被熱表面の昇温 θ_0 に伴い変動し、 q_0 からの干渉も受ける。 {式(4)参照}

図 3.3.2 の直列に r_h を持つ定温度源 Θ は、電気回路解析で公知の等価電源変換の定理を熱系における等価熱源変換に適用すれば、 r_h 枝路を並列に持つ定熱流源 Θ/r_h に等価変換される。

(3) 遠赤外放射と熱風との併用加熱源 図 3.3.3(a)に、遠赤外・熱風併用加熱系を示す。図 3.3.3(b)は、図 3.3.3(a)の左側の熱風源を 3.3.1 1、(2)の等価熱源変換を適用して得たもので、定熱流源 $Q_0 = q_0 + \Theta/r_h$ と“見掛け上の蒸発抵抗 r ” $r = r_v \cdot r_h / (r_v + r_h)$ が並列につながれた単独遠赤外加熱系となる。

図 3(a)で $\Theta \rightarrow 0$ すなわち、短絡除去 {図 3.3.3(b)では開放除去} すれば同一対流風速下の単独遠赤外加熱系となる。このとき r_h 枝路は残り、図示と逆向きになる q_h は対流放熱流を表わす。

これを総括すれば、単独遠赤外加熱系、単独熱風加熱系、遠赤外・熱風併用加熱系を問わず、何れも r_v, r_h, W, S 等を熱負荷として持つ単独遠赤外加熱系として考察、解析することができる。

等価電源変換の定理について付言すれば {直列に内部抵抗 r_h を持つ定電圧源 E からなる電圧源} \leftrightarrow {並列に内部抵抗 r_h を持つ定電流源 E/r_h からなる電流源} である。熱系では電圧源は温度源、電流源は熱流源（3.参照）に対応し、両者が等価とは、同じ端子電圧（熱系では r_h 端の温度）で同じ出力電流（熱系では熱流）となる、の意である。この定理は線形系では一般的に成立つから、他の構成回路 W, S が精密回路（分布定数回路） {図 4(a)} であるか、簡易回路（集中定数回路） {図 4(b)} であるかにかかわらず成立する。なお、等価電源変換の定理を熱源変換に適用することの加熱工学上の妥当性について付言した。)

2 裏面の境界条件

産業実用上は被熱物 W の裏面に密着して下地 S がある場合が多い。いま S の裏面が

(1) 理想的に熱絶縁されていれば、図 1 の θ_{sm} 端 \odot を開放

(2) 自然対流にさらされていれば、対流伝熱抵抗 r_h を介して θ_{sm} 端 \odot を終端する。

下地がない場合は、図 1 で S を除去し、 W の裏面 θ_n 端 \odot を (1) 理想熱絶縁の場合

は開放、(2) 自然対流にさらされている場合は、対流伝熱抵抗 r_h を介して終端する。

3.3.2 下地 S のある平板状含水物 W の遠赤外・熱風併用源による加熱特性

S の裏面が自然対流にさらされている熱系解析の模擬電気回路は、計算機による数値解析のための精密回路 {図 3.3.4(a)}、理論解析のための簡易回路 {図 3.3.4(b)} を得る。

1 簡易回路による理論解析

昇温、熱流を図 3.3.4(b) のように定義し、 $Q_0 = q_0 + \Theta/r_h$ として次の解析解を得る。

$$\theta_0 = r_v \cdot q_v = r \cdot Q_0 \left[\frac{R + R_s + r_h'}{r + R + R_s + r_h'} + \left\{ \frac{R}{r + R} - \frac{R + R_s + r_h'}{r + R + R_s + r_h'} \right\} \exp(-t/t_r) \right] \quad (1)$$

$$\theta_n = \frac{r(R_s + r_h')}{r + R + R_s + r_h'} \cdot Q_0 \{1 - \exp(-t/t_r)\} \quad (2)$$

$$q_c = \frac{r}{r + R} \cdot Q_0 \cdot \exp(-t/t_r) \quad (3)$$

$$q_h = \frac{r}{r_h} \cdot \frac{\Theta}{r_v} \left[\frac{r_v + R + R_s + r_h'}{r + R + R_s + r_h'} + \left\{ \frac{r_v + R}{r + R} - \frac{r_v + R + R_s + r_h'}{r + R + R_s + r_h'} \right\} \exp(-t/t_r) \right] - \frac{r}{r_h} \cdot q_0 \left[\frac{R + R_s + r_h'}{r + R + R_s + r_h'} + \left\{ \frac{R}{r + R} - \frac{R + R_s + r_h'}{r + R + R_s + r_h'} \right\} \exp(-t/t_r) \right] \quad (4)$$

$$t_r = \frac{(C + C_s)(r + R)(R_s + r_h')}{(r + R) + (R_s + r_h')} \quad \text{ただし} \quad r = r_v \cdot r_h / (r_v + r_h) \quad (5)$$

$t \rightarrow \infty$ 、すなわち、定率乾燥期（定常状態）の昇温、熱流は簡易回路 {図 3.3.4(b)}、精密回路 {図 3.3.4(a)} にかかわらず当然同一となり

$$\theta_0|_{t=\infty} = \frac{r(R + R_s + r_h')}{r + (R + R_s + r_h')} \cdot Q_0 = \frac{r_v/r_h}{1 + r_v/r_h} \cdot r_h \cdot Q_0 \cdot \frac{1}{1 + r/(R + R_s + r_h')} \quad (1')$$

式(1')の末項は、W 裏面理想熱絶縁時に比し、S がある場合の補正低減係数である。

$$\theta_n|_{t=\infty} = \frac{R_s + r_h'}{R + R_s + r_h'} \cdot \theta_0|_{t=\infty} \quad (2') \quad q_c|_{t=\infty} = 0 \quad (3')$$

$$q_h|_{t=\infty} = \frac{r}{r_h} \cdot \frac{1}{r + R + R_s + r_h'} \left\{ \frac{\Theta}{r_v} (r_v + R + R_s + r_h') - q_0 (R + R_s + r_h') \right\} \quad (4')$$

S がなく、W 裏面理想熱絶縁で定率乾燥期で考えると $q_h|_{t=\infty} = (r/r_h) \left(\frac{\Theta}{r_v} - q_0 \right)$ となる。

q_h 以外の上記諸量のすべては $Q_0 (= q_0 + \Theta/r_h)$ で支配され、熱風は Θ/r_h で係るが、 q_h では Θ/r_v で係り、これが q_0 との大小関係が支配的要因となる {文献 1) 図 5(a),(b) 参照}。

2 精密回路による計算機解とその考察

産業実用上典型的な 2 例を、図 3.3.4(a)で示される精密回路について計算機解を求める(利用したソフトは EQUATRAN-M⁴⁾)。W を厚さ 1mm の水 { $R \cong 16 \text{ deg}/(\text{W}/\text{cm}^2)$ 、 $C \cong 0.42 \text{ W}\cdot\text{s}/\text{cm}^2\cdot\text{deg}^2$ } とみなし、S を厚さ 10mm の木板 { $R_s \cong 740 \text{ deg}/(\text{W}/\text{cm}^2)$ 、 $C_s \cong 1.32 \text{ W}\cdot\text{s}/\text{cm}^2\cdot\text{deg}^2$ }、厚さ 1mm の鉄板 { $R_s \cong 0.96 \text{ deg}/(\text{W}/\text{cm}^2)$ 、 $C_s \cong 0.38 \text{ W}\cdot\text{s}/\text{cm}^2\cdot\text{deg}^2$ }

また、S の裏面は室温の自然対流 { $r_h \cong 1700 \text{ deg}/(\text{W}/\text{cm}^2)$ ³⁾}、熱風源と被熱面間の対流伝熱抵抗 { $r_h \cong 400 \text{ deg}/(\text{W}/\text{cm}^2)$ 、強制対流風速 $4 \cong \text{m/s}$ に相当³⁾}、 $r_v/r_h=0.3$ ¹⁾と仮定すれば真の蒸発抵抗 $r_v \cong 120 \text{ deg}/(\text{W}/\text{cm}^2)$ 、加熱現象の進行速度を示す目安となる時定数 t_r の値は式(5)から、S 木板の場合 $t_r \cong 180 \text{ s}$ 、S 鉄板の場合 $t_r \cong 80 \text{ s}$ 、S がなく W 裏面が理想熱絶縁の場合式(5)で $R_s \cong 0, C_s \cong 0, r_h \rightarrow \infty$ とおき、 $t_r = C(R+r) \cong 45 \text{ s}$ となる。

単独遠赤外加熱時の定率乾燥期表面昇温期待値 $\theta_0|_{t \rightarrow \infty} = 22 \text{ deg}$ とすれば、必要な遠赤外入力 q_0 は式(1)で Q_0 のうち $\Theta/r_h=0$ とおき $q_0=0.25 \text{ W}/\text{cm}^2$ 。これに熱風加熱を併用し、熱風温度 Θ (基準値室温からの上昇分) $=30 \text{ deg}$ の場合について考察する。

上記の例系において、W を精密回路、S を精密回路及び簡易回路とし、計算機解の結果を図 3.3.5(a) (S 木板)、(b) (S 鉄板) に示す。図 3.3.5(a)(b)の加熱特性曲線に見るように、S が存在する場合(実線、点線)は W 裏面理想熱絶縁時(破線)に比し、予熱期間長(過渡過程)は S の R_s, C_s の効果により延長され、特に初期の変化が大きく遅れ S の木板の場合特に顕著である。S が鉄板の場合{図 3.3.5(b)} R_s, C_s の値が相対的に小さいため殆ど差異は生じない。

なお、精密回路での熱現象変化速度を示す尺度 τ と簡易回路の時定数 t_r の値は類似した値となる。したがって、 t_r によって予熱期間長 ($\cong \tau$) の見当をつけることができると推量される。

S の裏面が自然対流でなく、強制対流で風速大、すなわち、対流伝熱抵抗 r_h が小さい場合には、W の均熱加熱特性は失われ、また、W 表面の昇温値 θ_0 も低下する。

文献

- 1) 市川、中尾：遠赤外照射、熱風、及び両併用加熱される平板状含水物の昇温、熱流、及び乾燥速度に関する理論的考察 照学誌 80-5, pp.339-348(1996)
- 2) 伝熱工学資料(改訂題 4 版)：機械学会 p.314, p.331
- 3) シャック著、高橋訳：応用伝熱 コロナ社 p95 h の Jürges 式(1979)
- 4) 三井東圧 EQM 研究会：EQUATRAN-M 入門 財団法人省エネルギーセンター

(中尾 久徳)

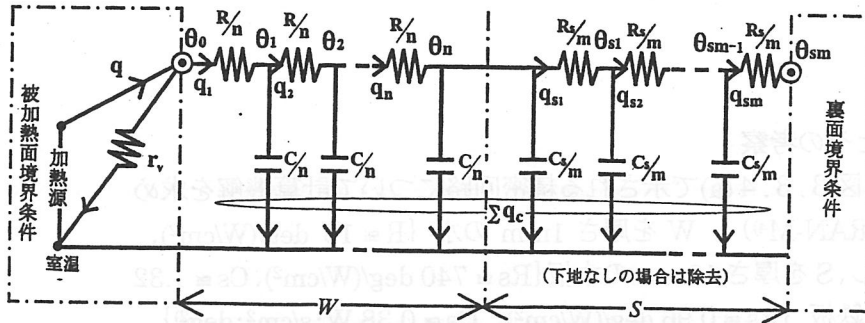


図 3.3.1 片面加熱、同面蒸発、他面下地の模擬回路

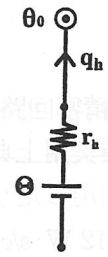


図 3.3.2 熱風源の等価回路

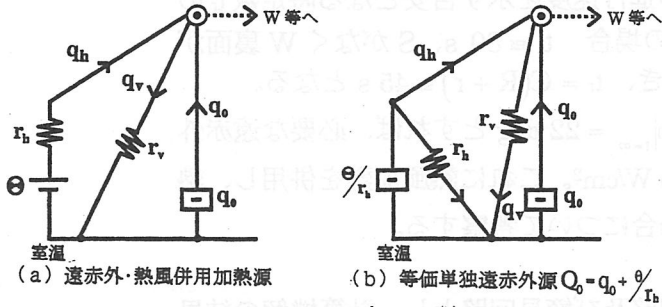
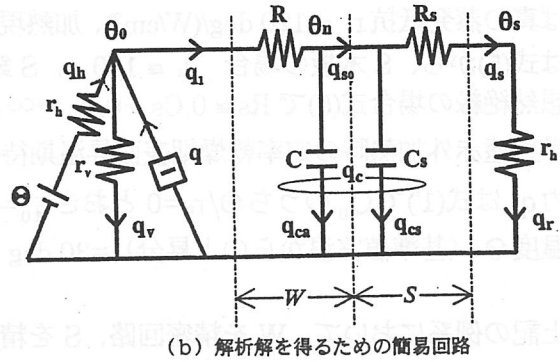
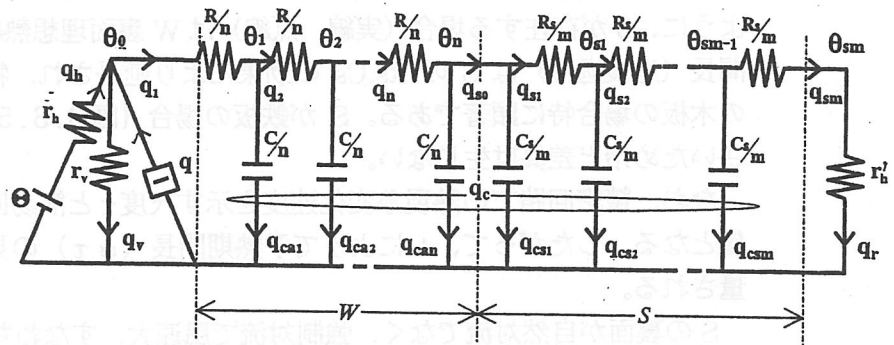


図 3.3.3 併用加熱系の被加熱面条件



(b) 解析解を得るための簡易回路



(a) 計算機解析のための精密回路

図 3.3.4 片面遠赤外・熱風併用加熱、同面蒸発、下地裏面自然対流時

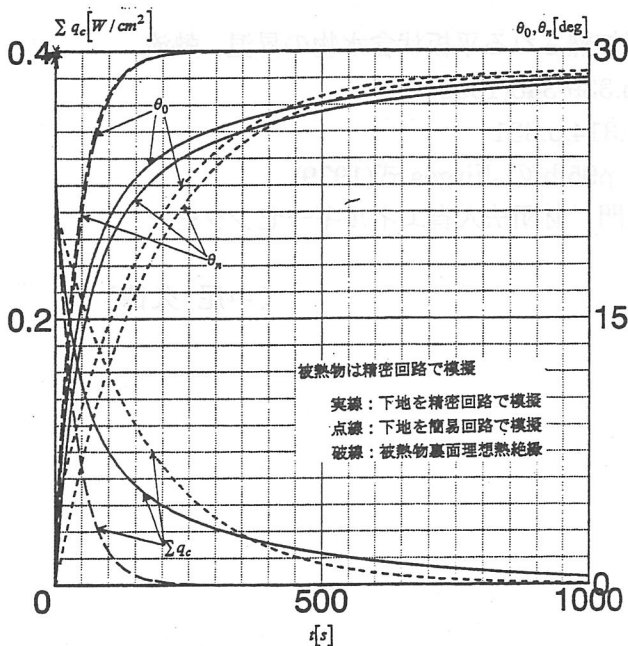


図 3.3.5 片面遠赤外・熱風併用加熱、同面蒸発、下地裏面自然対流時の昇温及び顕熱流特性

(a) 含水被熱物 (厚さ 1[mm])、下地木板 (厚さ 10[mm])

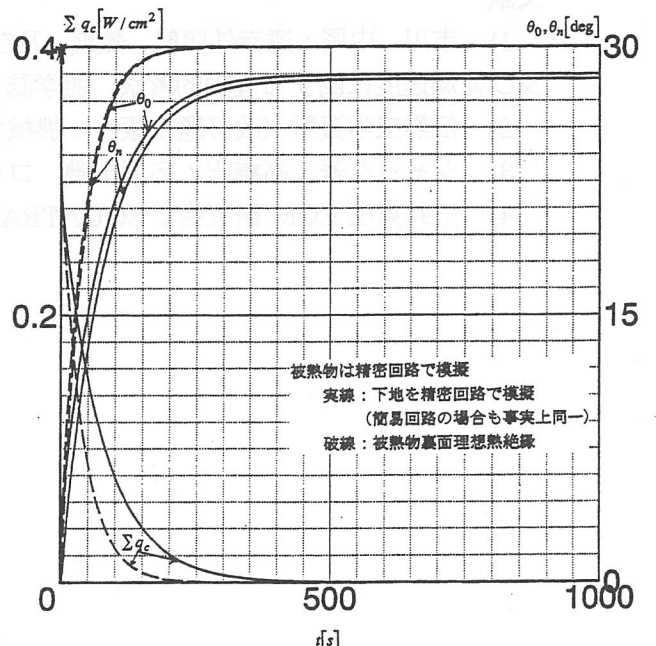


図 3.3.5 片面遠赤外・熱風併用加熱、同面蒸発、下地裏面自然対流時の昇温及び顕熱流特性

(b) 含水被熱物 (厚さ 1[mm])、下地鉄板 (厚さ 1[mm])

4. 含水物の遠赤放射加熱

赤外分光々度計の発達及び普及によって種々の材料の特徴的な透過（吸収）スペクトルが容易に測定され、その結果が公刊される様になった事を 2.1で述べた。しかし此は吸収波長を知って、未知材料を同定ないしその化学構造を知る定性化学上の目的に資するものであって、赤外放射加熱に於ける被熱材料の加熱工学とは”間接的”に係わるに留まる。此の加熱現象について”直接的”な見通しを得る為には、更に進んで被熱材料の物性値、Lambert吸収係数のスペクトルを知る必要がある。

此を知る為には、分光々度計によって二枚の窓板に挟まれた各種厚さの液体試料及び窓板単体の測定を必要とする他、複雑な相互反射、吸収、透過系を形成している被測試料系について複雑な理論解析を必要とする。被熱材料、水については筆者による解析結果が公刊されている⁽¹⁾⁽²⁾。又資料として上記解析の歴史的経緯も解説し⁽³⁾、更に委員会報告でも概説した⁽⁴⁾。（但し水以外の材料については、寡聞にして知らない。）

水面の屈折率のスペクトルについても、”概略ではあるが”、筆者による結果が公刊されている⁽²⁾。

4.1 水の吸収及び反射特性

吸収特性について：水の Lambert吸収係数スペクトル（波長域 0.8~25. μm ）⁽³⁾に於いて遠赤波長域に着目し、次の貴重な結論を得る。含水物を水で置き換えて考察する事が許される限り、遠赤照射される含水物へ侵入した放射パワーは、含水物の厚さ<0.1mm 部で吸収され尽くす。従って被熱含水物の厚さがほぼ(0.5~1)mm以上ならば、吸収の波長依存性を考慮する事なく、事実上全放射の表面加熱と見なして加熱理論を構成する事が出来る。

反射特性について：遠赤照射される含水物面を水面と見なすと”仮定”すれば、上記屈折率のスペクトルから、垂直入射の場合には簡単に理論計算され、反射率は遠赤域を含む上記赤外域では数%以下となる。従って事実上、仮定の下では、反射成分は殆ど無視される。

4.2 含水物の昇温と乾燥特性

3.の冒頭記事(1)の後半で述べた要領に従って、”含水物を照射する遠赤加熱系”は上述の理から表面加熱となつて、3.3の図で示されている様な等価電気回路で模擬され、3.3で解説されているソフト、EQUATRAN-M(IRA-84)で計算機解を求める事が出来る。

被熱含水物をC,Rの分布定数回路で表現すれば昇温期の温度、熱流の過渡解も概ね正確に得られ、定率乾燥期の定常解（昇温及び乾燥速度）は、簡単化した集中定数回路による理論式によって手計算でも簡単に得られる（4.2.2末尾の・参照）。

・本解析法適用の限界 本法は(1)沸騰を生じない含水物温度、<100℃の場合、(2)十分に含水された材料等で見られる典型的な昇温特性、即ち予熱昇温期を経て定率乾燥期の一定昇温（熱源からの供給熱流=蒸発潜熱流+対流放熱流となる温度平衡状態）となる期間迄に適用は限定される。引き続く減率乾燥期（被熱物材料の性質によって蒸発困難となり昇温再開）や、定率乾燥期の認められぬ昇温状態となる様な場合には適用出来ない。

4.2.1 熱伝導系の電源部境界条件と温度解等

(1) 熱板加熱と遠赤加熱⁽⁵⁾ 両加熱方式とも同じ表面加熱である。しかし被熱面境界条件は、前者は温度一定、後者は（ほぼ）熱流一定（遠赤エミッタの温度500℃と仮定す

れば昇温に伴う含水物への熱流入力の変動は数%程度)と異なる。此から加熱方式に依存するそれぞれの加熱特性を容易に推定する事が出来る。

即ち室温から測った一定温度源 Θ の熱板加熱では、含水物被熱面昇温を θ_0 とし、両面密着し接触熱抵抗 r_c が小さいと前提すれば、加熱開始直後の熱流入力 $(\Theta - \theta_0)/r_c$ は極めて大きく \rightarrow 昇温の立ち上がりも極めて大きい。 θ_0 が急上昇すれば上記入力急減し、 θ_0 は緩やかに Θ ないしその近傍値へ漸近する。

此に反し遠赤加熱では、ほぼ一定の熱流源 q_0 からの入力となるから、被照射面の θ_0 の立ち上がりは緩やかであるが、時間経過と共に長く昇温を続け、 Θ を越える事となる。

尚被熱物内部の昇温は熱伝導によるから、それぞれ表面昇温より遅れるが、それぞれ表面同様な特性となる事は容易に推定される。

・上述は、含水物総ての面からの蒸発及び対流放熱を無視した場合の事である。此の場合、加熱表面での境界条件として温度一定或いは熱流入力一定の熱伝導偏微分方程式の問題に帰せられ、それぞれ解析解を求める事が出来る。表面及び内部についての解析解による温度及び熱流の数値解曲線は上述した推定結果を示している。

即ち遠赤加熱では”表面過熱が無い状態”で、”熱の内部浸透性に優れる”という特性を得る。

・蒸発及び対流放熱がある場合(熱板時は接触面は密着、従って開放された裏面だけで蒸発と放熱が起こる。遠赤時は被照射面で起こる(但し簡単に他面は熱絶縁とする))は、等価回路図上蒸発を r_v 、放熱を r_h で表しその並列抵抗値を r_e 、含水物抵抗を R とすれば、容易に次の様に加熱現象を推定出来る。即ち加熱開始直後、被熱面昇温の小さい期間の立ち上がり特性は、無蒸発、無放熱対流を仮定した時と殆ど同様に、遠赤時昇温の立ち上がりは遅れる。最終平衡状態では：熱板時は表面昇温 $\theta_0 = \Theta$ 、裏面は等価回路上、分圧比で与えられ、 $\Theta \cdot r_e / (R + r_e)$ となり $< \Theta$ 、他方遠赤時は q_0 の行き先は r_h と r_v だけであるから表、裏面共に $q_0 \cdot r_e$ となる。

熱板加熱では、立ち上がりが早い事もあり、表面の過熱を避ける為 Θ が余裕をもって選ばれ、他方制御が容易な遠赤加熱では q_0 が適当に選定され得、 $q_0 \cdot r_e > \Theta$ とする例が一般である。熱伝導による内部及び裏面昇温もまた表面同様の経過を辿るから、遠赤時の内部昇温は明かに熱板時を追い越す。等価回路図で数値的に此を計算機解として示した。

(2)熱風加熱系 \rightarrow 遠赤加熱系の変換⁽⁷⁾ 同じく表面加熱の熱風源 Θ から被熱面(昇温 θ_0)へ供給される熱流 $= h(\Theta - \theta_0)$ (h は対流熱伝達係数。風速大ならば大)となる。等価回路上で温度差を電圧差、熱流を電流で表し、 h の逆数を r_h とすれば、上式から熱風源は内部抵抗 r_h を直列に持つ定電圧源 Θ で表される電圧源となる。熱系が近似線形系として取り扱われる限り、線形系の電気回路理論による電圧源 \rightarrow 電流源の変換定理を適用(逆も可)し、上記電圧源は並列内部抵抗 r_h を持つ定電流源 Θ/r_h で表される電流源に変換される。即ち熱風加熱源は遠赤放射源 Θ/r_h が被熱面 θ_0 につながれ、此が分路枝として対流放熱抵抗 r_h を持つ遠赤加熱源に理論上変換される(3.3の図参照)。以上の変換は電源部以外の回路部分に無関係に行われ得るから、熱風加熱系は形式上遠赤加熱系として理論解析が可能となる。更に熱風 Θ 、遠赤 q_0 の併用加熱系も一つの遠赤源($q_0 + \Theta/r_h$)で放熱対流抵抗 r_h となる場合として取り扱う事が出来る。即ち単独遠赤加熱系による熱伝導解析は近似的に、遠赤、熱風、併用加熱系に対し、ユニバーサル的な意義を持つ事となる。

(3)熱風加熱と遠赤加熱⁽⁸⁾ 熱風加熱時、被熱面は熱吸収となり放熱は無いが(2)では等価的に定熱流供給源の遠赤源に置き換えた為に”見かけ上”放熱対流抵抗としての r_h を生じたもの)同面で蒸発が起こる。そして熱風からの対流伝熱による吸収熱流を大きくする(r_h 小)為に、通常強い強制対流風速が選ばれる。此は同時に蒸発面近傍の水蒸気分圧の勾配が大きくなる事を意味し含水物面の蒸発は促進(r_v 小)される。此の事は遠赤加熱時でも同様であつて、仮に常温の対流風速を大きく選んだとすれば対流放熱流は大きくなり、同時に蒸発も促進される。(此の定性的な推論を等価回路上の言葉に置き換えると、 r_h を小さくすれば r_v もそれに伴って小さくなる、即ち r_v と r_h の比は、熱風加熱でも遠赤加熱でも、風速には殆ど依存しないだろうとの推論を得る。此の点については4.2.2で詳述。)

遠赤加熱時の事実は上記と異なり、昇温した表面が常温の風によって冷却される事を嫌い、自然対流に任せるか或いは微風速とするのが一般である。即ち熱風時は遠赤時に比し、 r_h も r_v も共に小さい。

被熱物の昇温速度即ち時間特性を決定する此の熱系の時定数 T は(簡単に裏面熱絶縁とすれば) r_h 、 r_v 、被熱物の R と C の関数で与えられから、同一の被熱物を加熱する場合、上述した対流風速選定の相違の故に、熱風時の $T \ll$ 遠赤時の T となるのが一般である。従つて被熱物の昇温特性について言えば、熱風時の立ち上がりは早くむしろ(1)で述べた熱板時の特性へ接近し、実験例も此を示している(IRA-85)。即ち前述(2)で熱風加熱源は遠赤加熱源で等価され両熱系が同一の理論式で処理され得る事を述べ、一見両加熱方式が同一の加熱特性を与える様にも受け取られかねない理論を展開した。しかしそれぞれの場合の被熱物の加熱特性等の解は、被熱物(R と C)以外の熱系を構成するパラメータ(風速に大きく依存する r_h 、 r_v)が異なる為に、十分に異なり得る。

4.2.2 パラメータ r_v/r_h の提案⁽⁷⁾

前項で述べた様に、風速に無関係に定まるであろう比 r_v/r_h について考察、新しい理論を構成し、風速に関しない r_v/r_h 対蒸発面水温の関係理論式を導き、その数値解曲線を与えた。理論特性の一般的な性質として、通常の大気状態で、昇温 θ_0 が極く小さく0に接近すれば、比は $\rightarrow 0$ へ(此は昇温0でも自然蒸発があるから当然の事)概略10~25°Cへと昇温の増加に伴い比は大きくなり 0.25~0.2(即ち昇温した割程には蒸発は増加しない)、概略35°Cで約0.15へと下降(昇温増加と相対して蒸発著増)する特性となつた。

含水物の遠赤等加熱について公刊された実験19例でチェック、内11例はまずまず理論との一致を見たが、他の8例は理論曲線から遠く離れ、ほぼ0.3~0.4とばらついた。

此の、 r_v が相対的に大きいと云う事は、含水物を構成する水以外の成分が水分に対し物理的(毛管力等)ないし化学的拘束力として働き、下方から蒸発面への水分上昇を妨げたり、蒸発面でも自由水に対し蒸発を妨げているからである。従つて此の r_v/r_h 比が理論値から離れている程度によつて、 r_v/r_h は含水材料の蒸発難易性を判断するマクロなパラメータとしての意味を持つ。

・含水物の遠赤加熱炉設計上のガイドラインとして r_v/r_h 比の持つ意義⁽⁷⁾⁽⁸⁾

定率乾燥期の設計期待値として被熱面昇温と蒸発乾燥速度が与えられているならば、極めて簡単に、昇温は、 r_h (即ち風速)と、 r_v/r_h 、と q_0 (遠赤単独加熱の場合)或いは $q_0 + \Theta/r_h$ (併用加熱の場合)で与えられ;乾燥速度は、 r_v/r_h と q_0 或いは $q_0 + \Theta/r_h$ で与えられる簡単な式を誘導した。尚両式は公刊実験例でチェック、良い一致を見ている。

4. の引用文献

- (1)市川、西岡：中、遠赤放射に対する水の吸収率分光特性、照学誌72,2(昭63)pp.36-42
- (2)市川、他：近、中赤放射に対する水の浸透深さと屈折率、照学誌73,10(平1)pp.27-32
- (3)市川：(資料)遠赤放射の水に対する浸透深さ、照学誌74,12(平2)pp.30-33
- (4)照学研究調査報告書、赤外放射加熱技術の展望(平5,12月)pp.15-21
- (5)市川、中尾：遠赤外加熱される含水物中の熱伝導に関する理論的考察
-熱板伝導加熱との比較- 照学誌 78, 2, pp.51-57 (1994)
- (6)中尾、市川：遠赤外加熱される含水物中の熱伝導に関する理論的考察
-両面から放射加熱する場合- 照学誌 79, 2, pp.116-121 (1995)
- (7)市川、中尾：遠赤外照射、熱風及び両併用加熱される平板状含水物の昇温、熱流、乾燥速度に関する理論的考察 照学誌 80, 5, pp.339-348, (1996)
- (8)中尾、市川：遠赤外放射加熱される下地のある含水物の加熱特性解析 照学誌(1998)
(近く論文誌に掲載予定)

(市川 真人)

5. 赤外放射源の特性

赤外放射加熱のエネルギー源として使用される赤外放射源は、基本的には他から供給される一次エネルギーの変換部分と何らかの赤外放射物質の組み合わせから成っている。熱放射の様態によるものは、このエネルギー変換部分において、供給されたエネルギーが熱エネルギーに変換されることになる。

表5.1 に加熱に使用される代表的な赤外放射源について、エネルギー源の様態、放射物質、放射波長域などをまとめたものを示す。この表には、熱放射以外の様態による赤外放射源も合せ示してある。以下に、表5.1 の中から、主なものについて述べる。

表 5.1 赤外放射源の種類と特性

分類	一次エネルギー	エネルギー変換の機構	放射物質	放射源例	放射波長(μm)	備考	
熱放射	電気	放射体に直接通電し、その抵抗発熱によって変換された熱エネルギーで、放射体を自己加熱する。	タングステン 炭素 タンタル	赤外電球	0.8~2.5	<ul style="list-style-type: none"> 外管バルブ(ガラス)で長波長側が遮断される。 外管バルブよりの二次放射あり。 	
			ニクロム カンタル	家庭用ストーブ トースター 家庭用電熱器	2~5	外管(ガラス)のあるものは上に同じ。	
			酸化ジルコニウム、酸化イットリウム、酸化トリウムの混合物	ネルンスト・グロー	1~50	通電初期予熱が必要(抵抗の温度係数が負のため)。	
			炭化けい素 二けい化モリブデン クロム酸ランタン	グローバ	1~50	空気中で通電可能(ただし、酸化により抵抗値が変化する)	
			放射体の近傍に配置された抵抗発熱体に通電し、発生した熱エネルギーを放射体に伝達し加熱する。	銅 ステンレス ニッケル 各種セラミックス	シーズヒータ 遠赤外ヒータ	2~15 2~25	
			放射体を電極として、アーク放電を起し、プラズマ気体の電極衝撃などによるエネルギー変換で加熱する。	炭素	カーボン・アークランプ	1~25	炭素に別の材料を添加して分光分布を変えたもの(サリヤンカーボンなど)。
			放射体の近傍で、気体または液体を燃焼させ、発生した熱エネルギーを放射体に伝達し、加熱する。	酸化トリウム 酸化ジルコニウム 酸化セシウム など	ウエルスパッハ・マントル ラジアント・バーナ	2~25	
自発放出ルミネセンス	電気	放射物質を含む混合気体を放電により(弱電離)プラズマ化し、プラズマ中のエネルギー授受により、放射物質を構成する原子や分子を励起する。	水銀 セシウム ヘリウム キセノン	(超)高圧水銀ランプ セシウムアークランプ ヘリウムガイスラー管 キセノン短アークランプ	0.8~3	<ul style="list-style-type: none"> 線スペクトルと連続スペクトルの合成よりなる。 外管バルブよりの二次放射あり。 	
誘導放出ルミネセンス	電気	放射物質を構成する原子や分子(またはイオン)を、何らかの外的エネルギーで励起し、その中の特定準位間の特エネルギー差に相当する放射を増幅する。	二酸化炭素	CO ₂ レーザ	10.6		
			Na ⁺ , YAG	YAG レーザ	1.06		
			ガリウム砒素化合物	GaAs レーザ	0.84		
			鉛化合物	(Pb, Sn) Te レーザ	6.5~28		

5. 1 家電用赤外放射源

1. はじめに

近年、建物の高断熱・高气密化が向上しているため、室内暖房においては従来の燃焼式暖房器から、クリーン性・安全性・制御性に優れた電気暖房器の使用が増加している。電気暖房のうち赤外放射を使用したものは局部暖房を中心に使用されており、室内空気の加熱を目的としないため、省エネルギー性に優れた暖房方式であるといえる。ここでは家電製品における赤外放射応用のこれまでの展開について述べる。

2. 住宅用加熱器

(1) 暖房器具

室内での赤外放射暖房はストーブ・コタツに代表される局部暖房器具が主流である。

コタツ用の放射源として初期には電熱線を磁器製の枠に巻き付けたものであった。1960年頃、レモン形状の赤色ガラスを使用した電球式の放射源が開発され、『健康コタツ』として広く使用された。このヒータの特長はフィラメントに400Wと80Wのダブルフィラメントを採用し、きめ細かい温度調節が可能となった。その後、石英管を使用した管状のコルツ赤外線電球の採用により放射源の小型化が図れた。さらに、小型ファンや環状石英管を採用することによって発熱ユニットの薄型化や温度分布の均一化が実現できた。放射強度の調節も位相角制御方式による連続温度調節装置を採用し一層細かい温度調節がおこなえるようになった。

ストーブ用の放射源としては初期にはニクロムヒータが主として使用され、最近ではコルツ赤外線電球、ハロゲン電球等の使用が多くなっている。これは点灯直後の立ち上がり特性が電球方式の方が優れていること、および石英ガラスの使用により美観上優れていることに起因するものと考えられる。

(2) 調理器具

調理用としては、電気オーブン、トースタ、ロースタなどがある。これらの機器は放射加熱と対流加熱（空気による加熱）の併用器具であって、従来から放射源としてはニクロムヒータとかシーズヒータが使用されている。

最近では、電化住宅の増加に伴いハロゲン電球の使用が進んでいる。この機器は、構造・デザイン上美観に優れ手入れが容易なこと、加熱の立ち上がり時間が短いこと、火力コントロールの微調整が可能である等の特長を有する。構成としては耐熱性、耐衝撃性に優れた結晶化ガラスをトッププレートとして用い、その下にフィラメント温度2500K程度のハロゲン電球を使用している。この機器の調理の原理は熱伝導と放射による加熱がほぼ同比率であると言われている。したがって使用に際しては、加熱効率の点で適正な形状の調理器具を選択する必要がある。

3. 放射源の種類

現在、主に使用されているコタツ用の放射源の種類を中心にここでは述べる。

《花巻ヒータ》

・ニクロム等の電熱線を花巻状態（隣接線が互いに交差した位置関係）に巻いており、従来のコイル状巻きの石英管ヒータと比べ、石英管との接触面積が少ないので立ち上がり

速く、速熱性に優れている。また同じ消費電力の場合、電熱線温度を高く設計することができ、より高い輝度の視覚効果を得ることができる。

図5. 1. 1に花巻ヒータの構造図を示す

《コルツ赤外線電球》

・タングステンフィラメントをアルゴンガスと共に石英管バルブ内に気密封じたもので、従来の石英管ヒータと比べ速熱性に優れている。タングステンフィラメントの温度は2400Kに設計されている。また石英ガラスなので耐熱性、熱衝撃性に優れ、小型軽量化が実現できる。

《コルツ花巻電球》

・フィラメント温度を1300Kに設計しており、フィラメントにはタングステンワイヤーを花巻状に巻きアルゴンガスと共に石英バルブで気密封じたもので、従来の石英管ヒータに比べ速熱性に優れ、寿命が長い等の特長がある。

4. 放射源の性能

コルツ電球の石英管表面に遠赤外線放射材料を塗布したものが多く使用されるようになっている。これはフィラメントから石英管を透過して放射される短波長の赤外放射と、管壁で吸収されたエネルギーによって温度上昇した遠赤外線放射材料の表面から放射される長波長の赤外放射の両方の合成した放射を利用するものである。

また、コタツの高機能化の一手段として、高放射なアルミナ・シリカなどの多孔質担体に貴金属触媒を担持させたものを遠赤外線放射材料とした『多機能遠赤外ヒータ』が採用されるようになった。これは、遠赤外線放射熱源であると共に『ヒータからの加熱による酸化触媒反応を利用してコタツ内部で発生する悪臭を除去する』という脱臭機能をも併せ持ったことを特長とする。図5. 1. 2に従来のコルツ電球と多機能遠赤外ヒータの分光放射輝度特性を示す。

5. 今後の課題

現在、環境問題等から電気加熱器具の省エネルギーへの活発な取り組みがなされているなか、さらに加熱効率の高い赤外放射材料、放射の発生方式の開発、被加熱物との適合性を考慮した使用方法の取り組みなど、今後の進展を期待したい。

(梶 英俊)

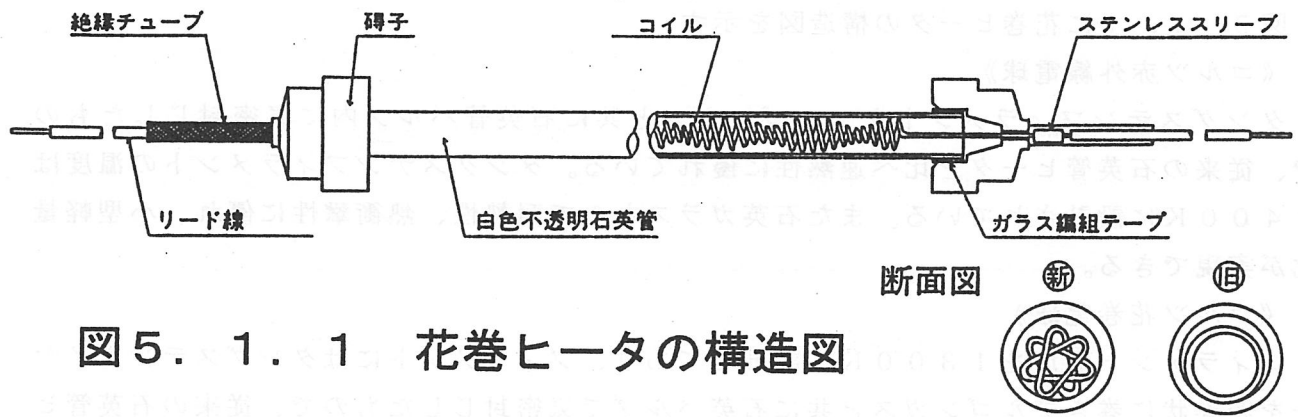


図5. 1. 1 花巻ヒータの構造図

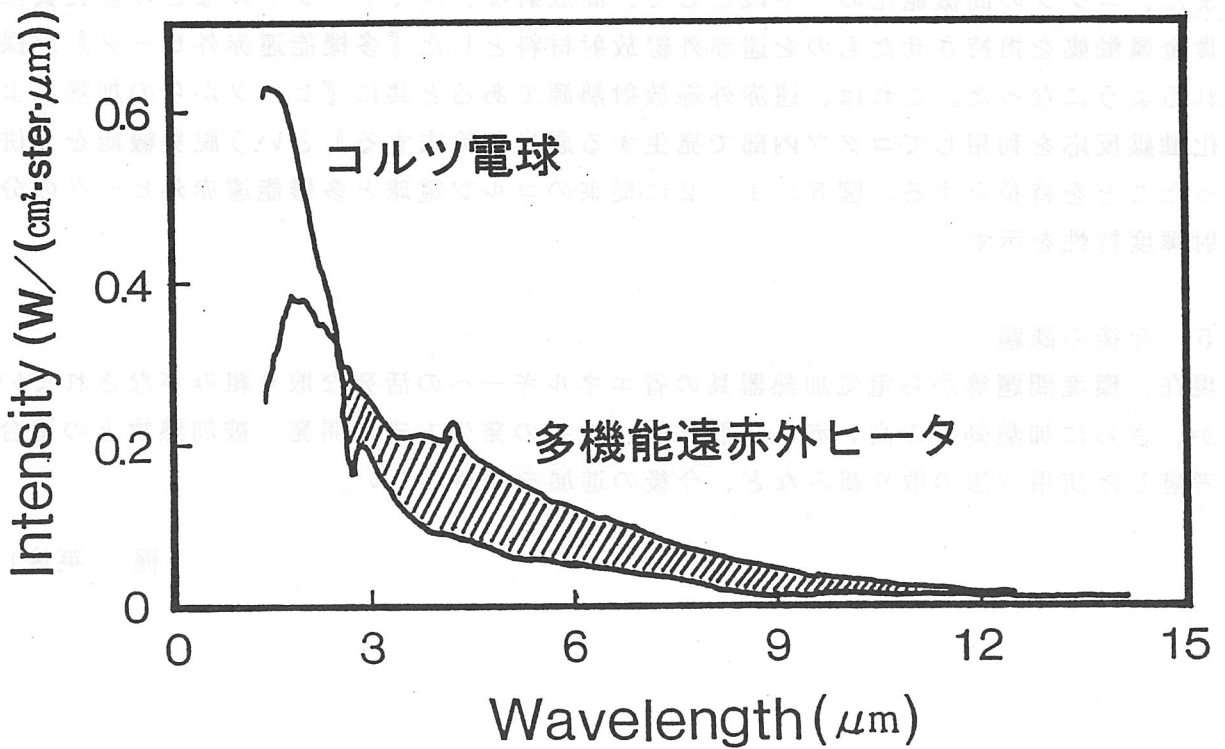


図5. 1. 2 分光放射輝度特性

5.2 工業用赤外放射源

5.2.1 赤外電球

赤外放射の発見以降、150年位の間、赤外放射利用システムに使用されていた人工の赤外放射源は、いわゆる赤外電球が主体であった。これは、赤外電球の基本である一般照明用白熱電球が、当時は、電気エネルギーを簡便に赤外放射に変換する代表的なシステムであったためである。（厳密にいうと、白熱電球は、決して赤外放射を主に取り出すことを意図して開発されたものではないが、結果的な特性で見ると電気エネルギーの赤外放射への変換率が高く、通常の一般照明用の白熱電球でも、70～80%以上である。）

赤外電球は、1879年にエジソンが、一般照明用として世界で初めて実用化した白熱電球と同等のエネルギー変換原理・構造によっており、図5.1に示すような基本構造をしている。

赤外電球は、図5.1に示したように、ほぼ中央部に保持された、コイル状に成形されているタングステン線（これが赤外放射体になる）に電流を流し、その抵抗発熱によって電気エネルギーを熱エネルギーに変換し、タングステン線を加熱して、その熱放射を利用するものである。タングステンの抵抗値を抵抗発熱に適切となるようにするため、使用するタングステンの線径をかなり細く線引する必要がある。そのために、空气中で直接通電して加熱することができなくなり、真空中または、窒素・アルゴンのような不活性気体雰囲気中で通電する必要性が生じ、真空または不活性気体雰囲気を維持するために、（透光性—赤外電球の場合は正確には赤外透過性）の気密容器が必要になってくる。

この透光性の気密容器としては、加工性、気密性、光放射透過性、材料コストなどの点から、通常、ガラス球（または管）や石英管が使用されるが、ガラスや石英は光放射透過性とはいっても、波長 $4\mu\text{m}$ 以上の赤外放射は透過しないので、この構造の赤外電球では、波長 $4\mu\text{m}$ 以上の赤外放射（遠赤外放射）を取り出すことはできない。即ち、赤外電球というのは、本質的に近（または中）赤外放射源であるということができる。

赤外電球は、一般の白熱電球の普及、発達に伴って古くから開発・実用化され、広く利用されている。その結果、IEC規格やJIS規格も制定・普及しており、国内はもとより国際的にも十分な標準化が進められている。

図5.2、図5.3に、前記のJIS規格により標準化されている赤外電球の外観を示す。このJIS規格は、既に述べたGATTのスタンダードコードにより、IEC規格と整合が取れているので、IECに加盟している国であれば、互換性のある特性の赤外電球を簡単に入手することができる。

5.2.2 遠赤外放射源

赤外加熱システムの基本要素である赤外放射源については、前項で述べたように、赤外技術の開発以降長い間、前項で述べた赤外電球が主力であったが、時代の変遷とともに、赤外・遠赤外放射の応用分野が広がってくるにつれて、照射対象物の吸収波長域が $4\mu\text{m}$ 以上の遠赤外域にあるものが多くなり、システムの効率向上のために、波長 $4\mu\text{m}$ 以上の遠赤外域に放射を有する遠赤外放射源の開発が検討され、その結果として遠赤外域の放射率の高いセラミック放射体の使用が検討された。

しかしながら、セラミック材料は一般に固有抵抗が高く、金属のように直接通電して抵抗発熱させ、それ自体の中で簡便に電気エネルギーを熱エネルギーに変換することができ

ないので、基本的には別の熱源をセラミック放射体の近傍に配置し、セラミック放射体を二次的に加熱する構造のもの（遠赤外ヒーター）が開発・製品化された。その基本的な構造の一例を図5.4に示す。

これは、表面にセラミック放射物質を塗着した金属管の内部に絶縁物を介してニクロムなどの金属抵抗発熱体線をコイル状に成形したものを保持した構造（この構造のものがシーズ・ヒーターと呼ばれる）をしており、抵抗発熱体に通電して変換した熱エネルギーを伝導により金属管表面のセラミック放射体に伝熱し、電磁波（赤外放射）に変換して利用するものである。したがって、表面の放射体の温度によって放射波長域が異なってくる。通常の商品としては、表面のセラミック放射物質の温度が定格点灯時、ほぼ 500℃になるように設計されているものが多い。セラミック放射物質の場合、表面温度 500℃の場合で、入力エネルギーのほぼ 50% が遠赤外放射エネルギーに変換されている（赤外域全体で見ると、入力エネルギーの約 90% が赤外放射エネルギーに変換されている）。

図5.4に示したのは遠赤外ヒーターの基本構造であるが、実際的には、この構造を基に更に実用性を向上させた構造の遠赤外ヒーターが種々開発・実用化されている。図5.5にそれらの一例を示す。

これらはいずれも、セラミック放射材料を金属板の表面に溶射などにより塗着したり、成形性の問題の比較的少ない、板状、円筒状、管状やボビン状に成形し、その近傍に抵抗発熱体、その他の熱エネルギー源を配置した構造のものである。但し、これらの図に示したものはあくまで一例であり、実際に市販され、実用されているものは、種類、形式がもっと多種多様である。

更に最近では、アルミナ等のセラミック製の基体上に、適当な抵抗値になるようにタングステンなどの金属や炭素を薄膜状に塗着したり、シート状に展延した金属や炭素を密着させ、更に、その上に、セラミック材料等、高遠赤外放射率の材料を塗着したり、密着させたりし、この抵抗層に通電して電気エネルギーを熱エネルギーに変換し、更に表面のセラミック層に伝達し、セラミック層からの（遠赤外）放射を利用する構造のものも一部で実用化されている。

以上述べてきた間接加熱方式の遠赤外ヒーターは、遠赤外域の放射束は比較的十分に取ることができるが、構造上、どうしてもヒーター内の変換過程における熱エネルギーの伝達速度が遅くなるため、スイッチ・イン後の放射束の安定までの時間が掛かるなどの使用上の問題点もある。この点を改良することを、ねらいのひとつとして、固有抵抗の低いセラミック材料を開発したり、セラミック材料に金属など固有抵抗の低い他の物質を添加することなどにより固有抵抗を下げることなどにより、通電による抵抗発熱を可能にし、直接通電による加熱を利用した方式の遠赤外ヒーターも開発・製品化されている。表5.1に示したネルンスト・グローアやグローバ・ヒーターなどは、その例である。

参考文献

- 1) Hall, J.D. : Industrial Applications of Infrared, McGraw-Hill Book Co., Inc. (1947)
- 2) Hackforth, H.L. : Infrared Radiation, McGraw-Hill Book Co., Inc. (1960)
- 3) 河本 康太郎 : 赤外線技術と赤外放射源の研究, 赤外線技術, 第14号, p3~p20 (1988)

- 4) 河本 康太郎：最近の乾燥技術，総合技術センター，（1997）
- 5) 堀 克彦・編：工業用電気加熱，（財）省エネルギーセンター，（1996）
- 6) 日本電熱協会・編：エレクトロヒート応用ハンドブック，オーム社，（1990）
- 7) 日本電熱協会 遠赤外線委員会・編：遠赤外加熱の理論と実際，オーム社，（平・3）

（河本 康太郎）

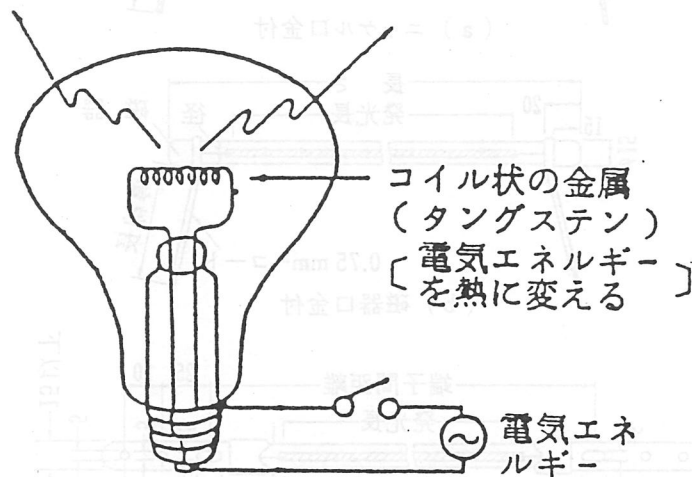


図 5.1 赤外電球の基本構造

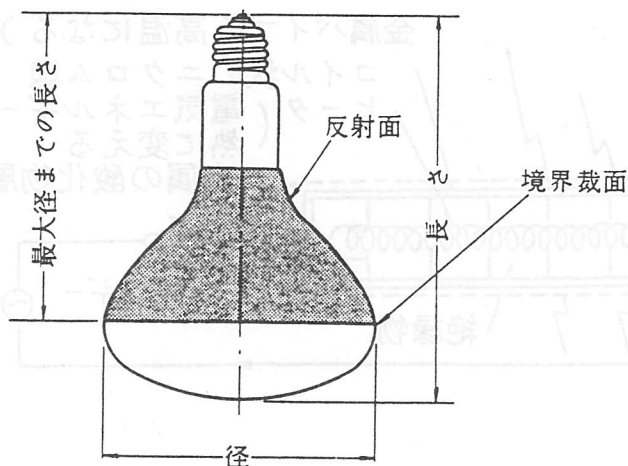


図 5.2 J I S で標準化されている赤外電球 (①R形-JIS C 7514)

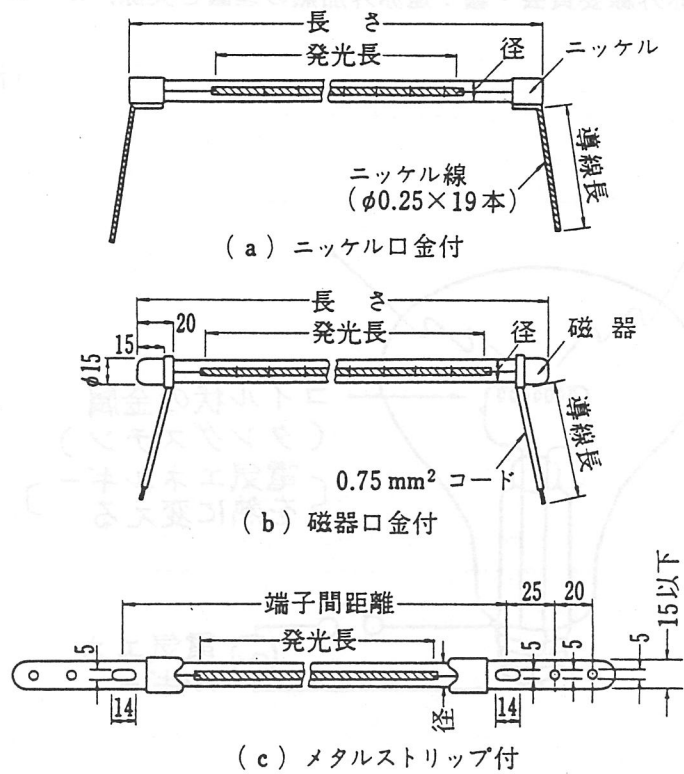


図 5.3 J I S で標準化されている赤外電球 (②管形 - JIS C 7514)

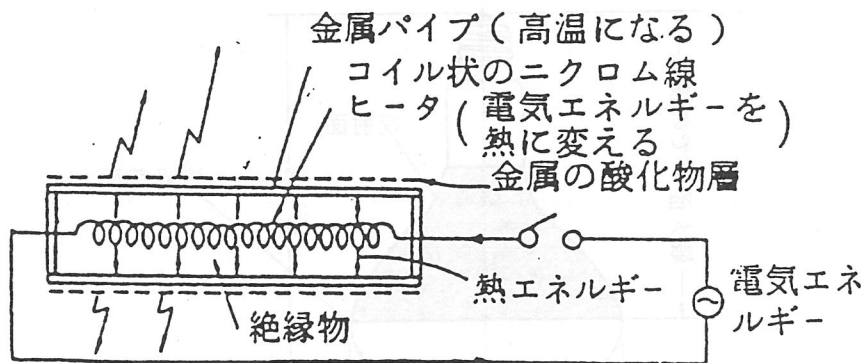
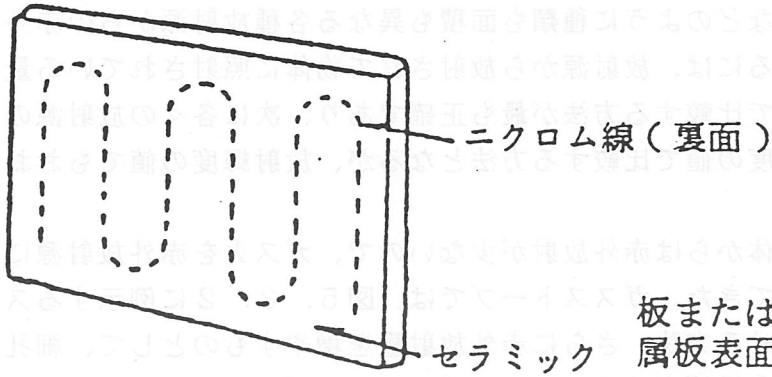
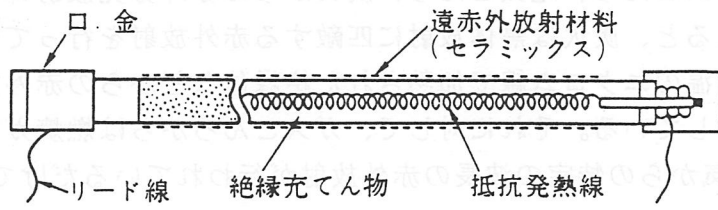


図 5.4 遠赤外放射源の基本構造



板または、金属板表面にセラミック放射材料を塗着したもの

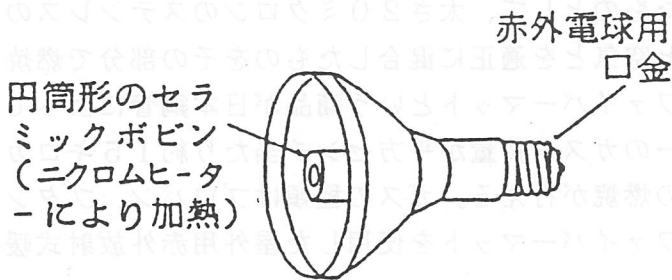


図 5.5 各種の遠赤外放射源

5. 3 ガス（LPG、NLG）と石油による赤外放射源

5. 3. 1 ガス燃焼赤外放射源

図5. 3. 1は、ガスこんろ、電気こんろ、炭火からの赤外分光放射輝度の測定結果の一例である。これによると、炭火は黒体放射に匹敵する赤外放射を行っていることが分かる。電気こんろも、高温のニクロム線で加熱された絶縁体などからの赤外放射を広い赤外波長帯域に亘って放射している。それに対して、ガスこんろからは燃焼ガスの主成分である高温のCO₂と水蒸気からの特定の波長の赤外放射が行われているだけであり、ほとんどの熱量は対流熱となる。

なお、ガス火や炭火などのように種類も面積も異なる各種放射源からの赤外線波長別放射量を正しく比較するには、放射源から放射されて物体に照射されている量を表わす単位である放射照度の値で比較する方法が最も正確であり、次に各々の放射源の面積の大きさを考慮に入れた放射強度の値で比較する方法となるが、放射輝度の値でもおおよその比較は可能である。

このようにガス火単体からは赤外放射が少ないので、ガス火を赤外放射源にさせるための工夫が古くからされてきた。ガスストーブでは、図5. 3. 2に例示するスケルトンを加熱し赤外放射を行わせる方法、さらに赤外放射量を増やすものとして、細孔の開いたセラミック板でガス火を燃焼させるシュバンクバーナーが開発された。図5. 3. 3はシュバンクバーナーの赤外分光放射輝度の測定例である。食品の加熱調理では、耐熱ガラス製のかまぼこ状の赤外放射板や鉄製のアングル材が使用されている。

さらに赤外放射を高めたものとして、太さ20ミクロンのステンレスの繊維を数センチの厚さに積み重ね、ガスと空気とを適正に混合したものをその部分で燃焼させて大量の赤外放射をさせる、高放射ファイバーマットという商品が日本鋼管によって近年開発された。従来の赤外放射型バーナーのガス消費量が平方センチ当たり約15キロカロリーのところ、これは80キロカロリーの燃焼が行える。ガスの種類はプロパン、ブタン、ガス化された灯油などが使用できる。ファイバーマットを使用した屋外用赤外放射式暖房器具の試作品を図5. 3. 4に示す。

ガス燃焼式の赤外放射暖房器具で、体育館や工場などにすでに設置・普及されているものに、図5. 3. 5のガス遠赤外線ヒーターがある。これは、燃焼部で燃焼した高温ガスを赤外放射パイプ内に通し、パイプ表面を約150～400℃に加熱し、パイプ表面の耐熱性塗料から遠赤外線を放射させるものである。排気ガスが漏洩しないようにパイプ内部は吸引ポンプによって負圧にしている。トラックの配送センターや自動車整備工場などのような寒風が吹き抜ける半開放空間でも、赤外放射式の暖房は作業員達に暖房効果を与え、仕事の能率を上げていると言われている。

5. 3. 2 石油燃焼赤外放射源

石油燃焼赤外放射源では、大型の暖房器具としてポット式のストーブがある。これは、鋳鉄製のストーブの内部で石油をガス化して燃焼させ、ストーブ表面を加熱し赤外放射を行うものである。鋳鉄は赤外の放射率が高くストーブなどの赤外放射体として適している。塩分などがかかって赤錆が発生すると錆は進行するので、ワイヤーブラシなどで掻き落とし耐熱黒色塗料を塗る必要がある。鉄板を溶接したストーブも数は少ないが使われている。

小型の石油ストーブでは、ガラス、ホウロウが使用される。どちらも赤外の放射率が高い。ホウロウが割れたり、はがれたりしたときにはタッチアップペイントで補修できるとされている。

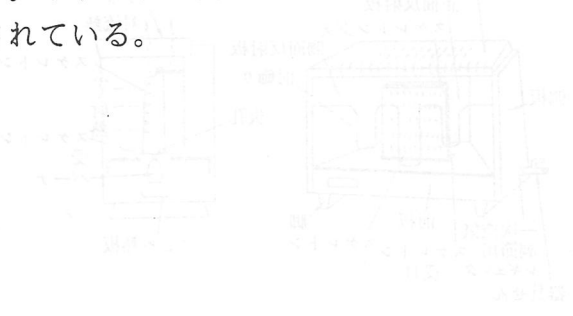
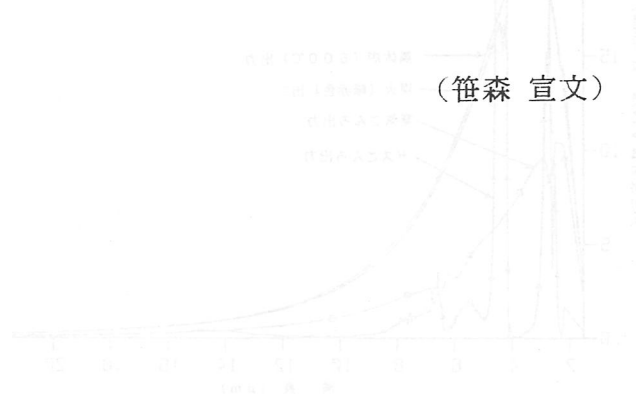


図 2.8.2 小型の石油ストーブの構造図



(笹森 宣文)

図 2.8.3 ホウロウの赤外線放射特性図

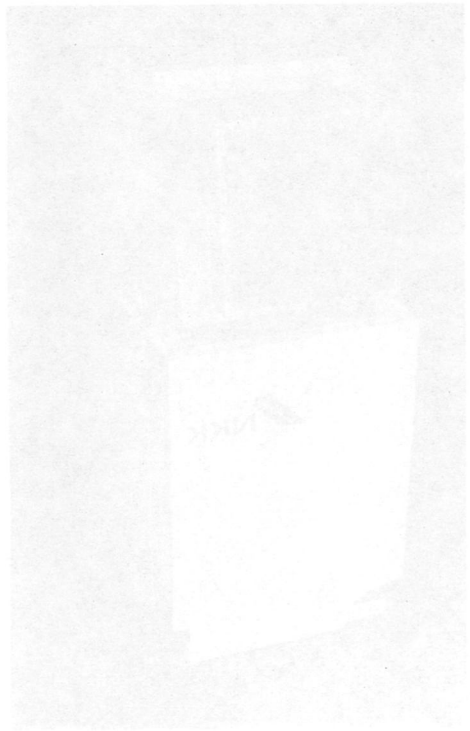


図 2.8.4 タッチアップペイントの缶 (タッチアップペイントは油溶性)



図 2.8.5 タッチアップペイントの赤外線放射特性図

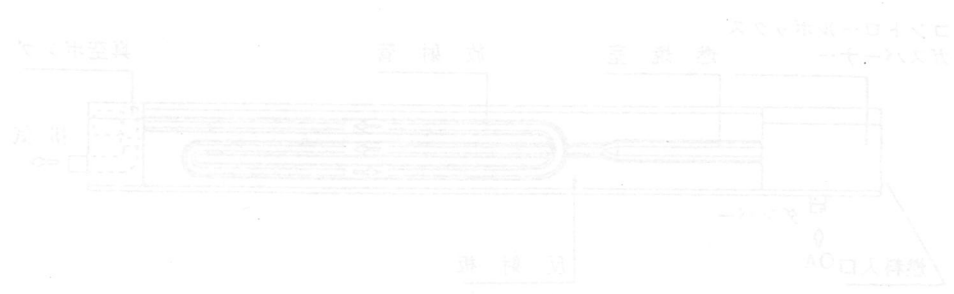


図 2.8.6 タッチアップペイントの構造図

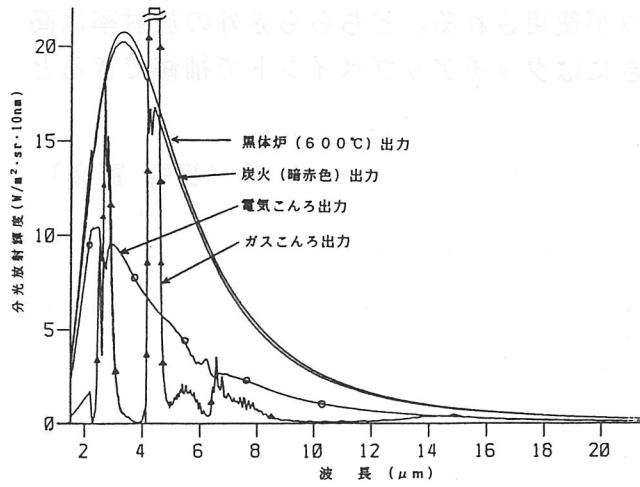


図5.3.1 熱源からの赤外分光放射輝度測定例

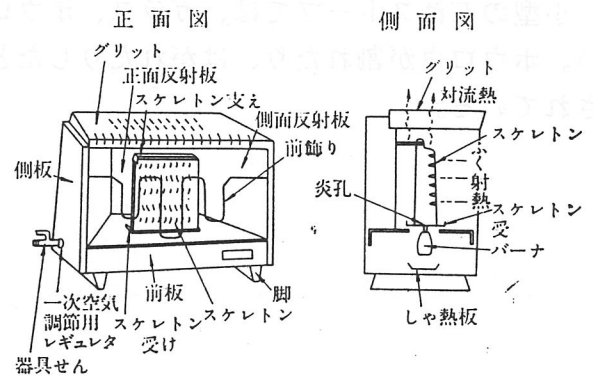


図5.3.2 スケレトンの外観

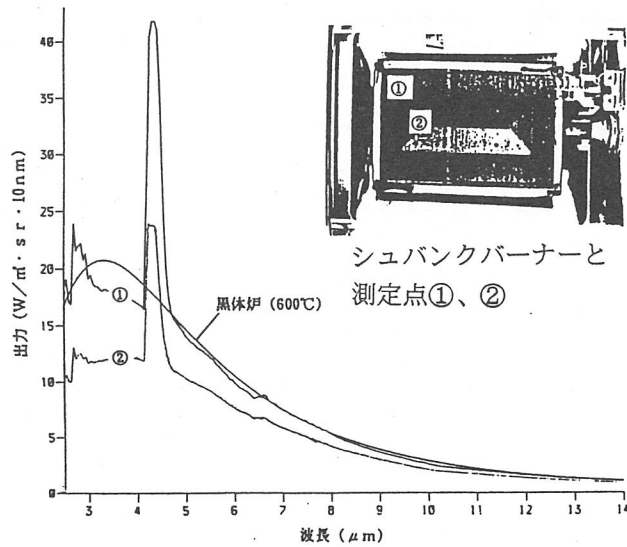


図5.3.3 シュバンクバーナーの赤外分光放射輝度測定例

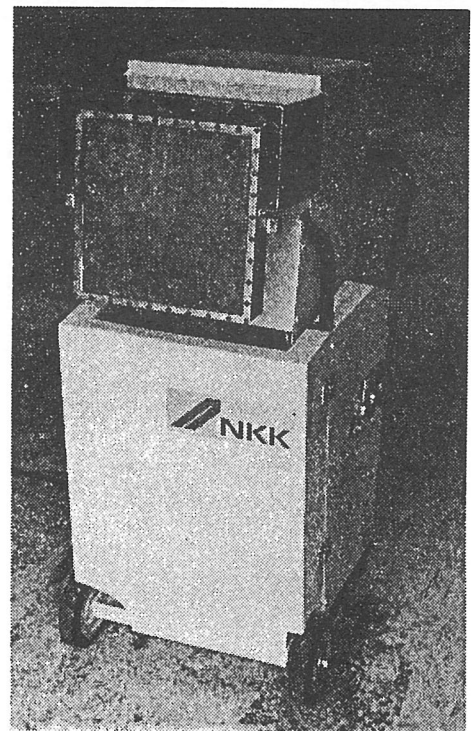


図5.3.4 ファイバマット使用の赤外放射暖房器具 (左上方四角形がファイバマット)

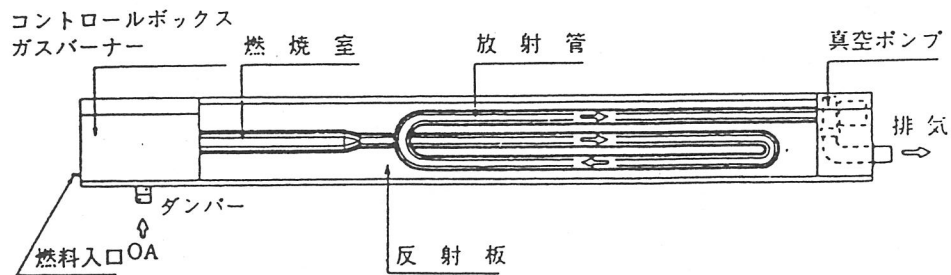


図5.3.5 ガス遠赤外線ヒータの一例

5. 4 光源の光放射特性

光放射のエネルギーを積極的に利用するのが加熱であり、温度上昇を望まないものが一般照明である。本項では照明光源から放射される光放射エネルギーについて述べる。照明光源は、電気エネルギーを可視放射に変換することを目的とした装置であるが、光源からは可視放射だけでなく、紫外放射、赤外放射も同時に行われる。

表5. 1は光源に加えられた電気エネルギーが光放射エネルギーに変換された場合の構成内容をまとめたものである。入力電力の内、電球では0.1~0.2%、蛍光灯では0.5%、水銀ランプ、メタルハイドランプでは約2%、高圧ナトリウムランプでは0.3%が紫外放射に変換される。紫外放射の比率は可視放射や赤外放射などに比べて小さいが、変褪色などの作用を持っている。

一方、赤外放射は光源の種類により大きく異なる。白熱電球では80%以上が赤外放射になり、放電灯では低圧ナトリウムランプを除けば50%前後が赤外放射となっている。そのため、照明用光源を使用して加熱などのために赤外放射を積極的に行うには、配光制御の容易さも含めて白熱電球が適している。反対に熱の影響を避けるには放電灯を使用することが望ましい。白熱電球を使って熱対策を行うには熱線カットフィルターを使用する。なお、表5. 1の表から明らかなように、伝導・対流にも入力エネルギーが使われ、照明器具や周囲の空気の温度上昇の原因となる。

表5. 2は被照面の照度が1,000 lxになった時の紫外放射、可視放射、赤外放射を含めた放射照度(W/m²)への換算係数である。この換算係数は可視放射に標準分光視感効率を掛けて求めた光束(照度)と光放射エネルギーの総量(放射照度)との比率である。同じ照度であっても白熱電球は放電灯に比べて放射照度が高くなっている。これは赤外放射成分の比率が放電灯より白熱電球の方が大きいことに起因している。照明器具は配光特性が整備され照度計算が容易であるため、照度計算結果及びこの換算係数を利用すれば、被照面が受ける熱量を簡単に予測することができる。

(引用文献)

- 1)L.R.&T.1-1-8
- 2)L.R.&T.3-2-131
- 3)L.D.A.3-6-18
- 4)J.I.E.S4-4-263
- 5)L.D.A.5-9-39
- 6)L.T.25-1-17
- 7)CIE publication No.20(1972)

(向阪 信一)

表5. 1 各種光源のエネルギー配分¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾ (単位：%)

		波長域別放射エネルギー						放射合計 (全波長域)	対流伝導
		紫外放射 ~380nm	可視放射 380~ 780nm	赤 外 放 射					
				0.78 μm ~1.4 μm	1.4 μm ~2.7 μm	2.7 μm~	0.78 μm ~		
白熱電球	100W		9.0	36.0	32.0	16.0	84.0	93.0	7.0
白熱電球	1000 W	0.1	11.9	38.2	29.2	15.6	83.0	95.0	5.0
ハロゲン電球 (3000K)	500W	0.2	14.0				80.3	94.5	5.5
ハロゲン電球 写真撮影用	1000 W		17.0	41.0	28.0	12.0	81.0	98.0	2.0
蛍光灯 [°]	40W	0.5	18.8	0.5	0.2	40.0	40.7	60.0	40.0
水銀ランプ [°] (蛍光型)	400W	2.1	14.8				58.6	75.5	24.5
メタルハライドランプ [°] (蛍光型)	400W	2.3	20.5				57.7	80.5	19.5
高圧ナトリウム ランプ [°]	400W	0.3	30.0				47.2	77.5	22.5
低圧ナトリウム ランプ [°]	180W		35.5				4.5	40.0	60.0
太陽直射光	—	6.1 (~400nm)	51.8 (400~ 800nm)	29.4 (0.80 μm ~1.4 μm)	12.7 (1.4 μm ~3.0 μm)		42.1	100	—

表5. 2 各種光源の1000 lx当たりの放射照度

白 熱 電 球	放射照度 (W/m ²)/1000 lx	放 電 灯	放射照度 (W/m ²)/1000 lx
LW100V100W	57	蛍光灯 [°] FL40D	11
JD110V150W/E	56	FL40W	10
小型ハロゲン電球 (赤外線反射膜付き)	45	FL40WW	10
J220V1000W (下面ガラス付器具)	43	FL40D・SDL	15
JR12V50WFKM5 (干渉反射膜付)	12	FL40W・SDL	14
		水銀ランプ [°] HF400X	12
		メタルハライドランプ [°] M400	11
		MF400	10
		高圧ナトリウムランプ [°] NH360	7
		NH360F	8
		演色改善型高圧ナトリウムランプ [°] 150W (高彩度型)	14
		低圧ナトリウムランプ [°] (35W)	5
		小型演高演色型メタルハライドランプ [°] (250W)	8

6. 加熱機器・装置とその制御システム

赤外放射加熱は、既に述べたように、放射の様態によるエネルギー伝達を利用した加熱方式である。即ち、電気、ガスなどの一次エネルギーを一旦赤外放射のエネルギーに変換して対象物に投与し吸収させ、その部位で熱エネルギーに変換し、対象物を加熱する。

[一次エネルギーを放電プラズマのエネルギーに変換し、それをコヒーレントな赤外放射に変換して対象物に投与する加熱方式は、特にレーザー加熱と呼ばれる。また、波長域が異なるが、電気エネルギーをマイクロ波のエネルギーに変換して対象物に投与する加熱方式（マイクロ波加熱）も放射による加熱方式である。]

赤外放射（電磁波—赤外放射だけでなく、マイクロ波加熱も同様。）は、光速で伝搬し、対象物に投与・吸収されると、その部位ではほぼ瞬間的に熱エネルギーに変換される。したがって（熱源からの）熱エネルギーの伝熱速度は、他の様態の伝熱（伝導や対流）に比べて非常に速く、加熱に要する時間を短縮することができる。

放射の様態による伝熱方式のもうひとつの特徴は、伝導（や対流）に比べて、ある条件の下では、熱エネルギー伝達の時間密度（単位時間当りの伝達されるエネルギー量）を大きくすることができることである。これは、伝導や対流による伝熱の場合は伝達される熱エネルギー量が熱源の温度（の1乗）に比例しているのに対して、放射による場合は熱源の温度の4乗に対応しているためである。（マイクロ波の場合は、放射エネルギーの利用であるが、伝達されるエネルギー量は、赤外放射の場合とは異なる。）

したがって、熱源の温度がある程度高い場合には、放射による伝熱方式（赤外放射による伝熱方式）を利用した方が、時間当りに多くの熱エネルギーを伝達することができるが、反面、逆に熱源の温度が低い場合には、放射による方式では、熱エネルギーの伝達量が少なくなるという問題点がある。したがって、放射による伝熱を利用することが適している場合は、熱源の温度が低くとも500℃程度以上の場合であるので、赤外放射利用の加熱機器や加熱システムの設計に当っては注意が必要である。

参考文献

- 1) 進藤 純男：世界各国の電熱統計，電気加熱技術情報，3-01，p1～p5（1982）
- 2) 堀 克彦・編：工業用電気加熱，（財）省エネルギーセンター，（1996）
- 3) 日本電熱協会・編：エレクトロヒート応用ハンドブック，オーム社，（1990）
- 4) 日本電熱協会 遠赤外線委員会・編：遠赤外加熱の理論と実際，オーム社，（平3）
- 5) 赤外線技術研究会・編：赤外線工学—基礎と応用，オーム社，（1991）
- 6) Hackforth, H.L. : Infrared Radiation, McGraw-Hill Book Co., Inc. (1960)
- 7) Hall, J.D. : Industrial Applications of Infrared, McGraw-Hill Book Co., Inc. (1947)

（河本 康太郎）

6.1 加熱対象物に対する必要放射照度

(1)必要温度の決定：赤外放射加熱の応用例は、加熱、乾燥、焼付けが中心である。対象とする応用が加熱なのか焼付けなのかにより必要とする加熱到達温度が異なるので放射源の種類を変える必要がある。一般の塗装焼付けなどの比較的低放射照度ではR型赤外線電球が使用できるが金属部品の焼き嵌めなどでは石英管型赤外線電球を使用する必要がある。

(2)塗料の焼付け必要温度：

表6.1.1 塗料の硬化温度と加熱時間を

対象となる塗料の種類は、熱硬化性のよいメラミン樹脂、尿素樹脂、フタル酸樹脂などが適している。硬化温度と加熱時間を表6.1.1に示す。塗料は単体では存在するのでなく鋼板や木材などの表面に塗装固定される。基材は原則として温度上昇は必要なく、塗料の固定に必要な範囲で温度が確保されればよい。

種 類	焼付け温度[°C]	時間 [分]
メラミンフタル酸樹脂塗料	110-130	10-20
フタル酸樹脂塗料	140	20-25
フェノール樹脂塗料	110以下	
ハイリット [®] ラッカー	70	20
焼付け黒ワニス	180	15
調合 [®] イント	140	30-
油性プライマー	150	15
油性パテ(0.22mm)	130	20
油性サーフェーサー	130	20

(3)放射照度と温度上昇

塗装面が放射を受けた時の温度上昇は、各種の定数を決めれば計算により推定できるが、実際の加熱条件の特定が困難なため現実には現実と合致しない場合が多い。従って温度上昇は実測値を使用するのが最も簡単で正確である。図6.1.1に代表例を示す。放射照度と温度上昇の関係を赤外線電球からの照射距離をパラメータとして示してある。

R型赤外線電球を使用した場合には塗料の色により温度上昇が若干異なるが、遠赤外放射源ではこの色彩による温度上昇の違いが小さくなる。但し遠赤外放射が主である低温放射源と、R型赤外線電球とで照射した場合の塗料内部の温度分布は、図6.1.2に示すようにおおいに異なる。実際にはこのような厚みに塗装することは少ないが、低温放射源で加熱すると、表面の温度上昇が大きく内部の温度上昇が小さくなる。これは基盤との固定が十分でないのに表面が固化し、塗膜としては不具合の原因になる。従って

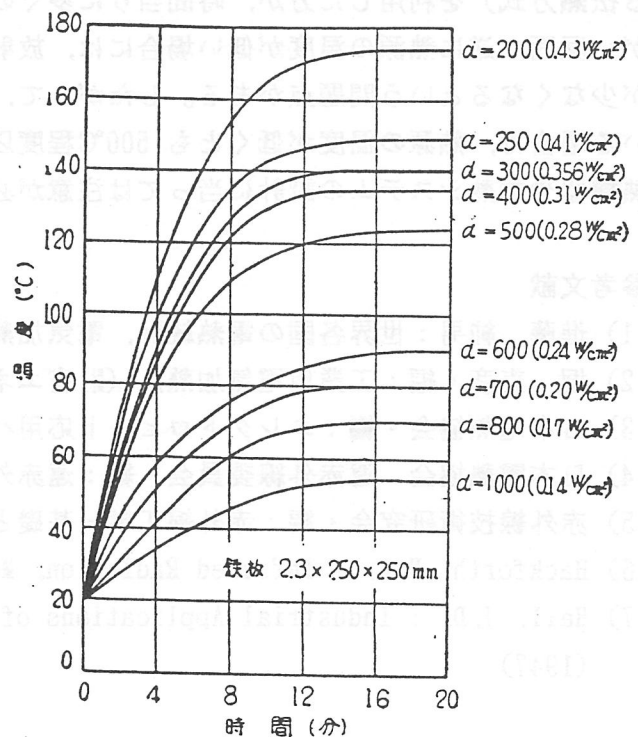


図6.1.1 放射照度と表面温度

赤外線加熱炉を計画する場合、使用する赤外放射の波長と加熱対象物の特性、特に塗料の厚みを勘案して使用する放射源を選定する必要がある。

所定の温度上昇を実現するためには必要放射照度を設計する必要がある。温度上昇は鉄板の厚みにかかわらず時間経過とともに一定の温度に到達するので、加熱の所要時間の調節に使用できる。

(4) 照射装置

R型赤外線電球では、電球の容積の限界から電球1個当たりの電気入力は250W又は375Wであるため、電球の効率を75%と仮定すると単位面積当たり0.8Wまたは1.3W程度になる。反射板を応用して、周囲に放散される赤外放射を集めないと、高い赤外放射照度は得られにくい。

このため複数の赤外線電球を集めて反射板を利用した照射装置をユニットと呼び、複数のユニットで構成した、照射装置をバンク、内部に照射物を収納して外部(主として上部)から照射できるようにした形式をトンネルと呼んでいる。この複合した照射効率は70%~80%に達する。

石英管型赤外線電球では、管径が10mm程度で管長270mmで1000Wの入力になるので単位面積当たり6W程度になる。対象物によるが過電圧で点灯すると最大放射照度が160W/cm²になる。これは太陽放射の1600倍の放射使用度であり1000℃から2000℃の加熱温度が得られる

(5) 照射装置の設計

照射対象を鉄板としその厚さ、色、風速をパラメとして所要の温度を得るための放射照度算出のためのグラフを図6.1.3に示す。簡易的には十分使用できる。

(6) 参考文献

- ・加藤信義：赤外線技術加熱とその応用 電気書院 1961.10
- ・照明学会：照明データブック 第1版 オーム社 1954
- ・佐土根：塗料の赤外線乾燥 色材協会関西支部塗装講演会 1958.8

(森田 政明)

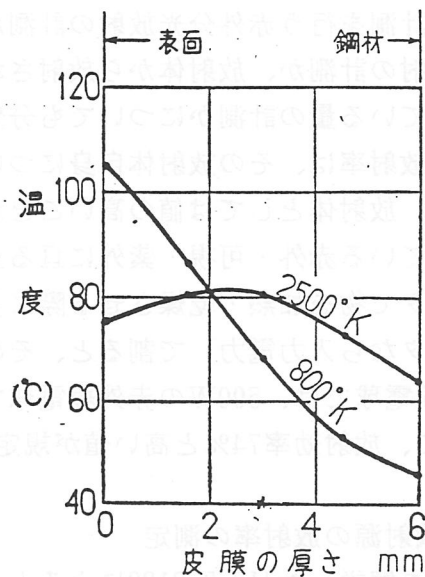


図6.1.2 塗料表面温度と内部温度

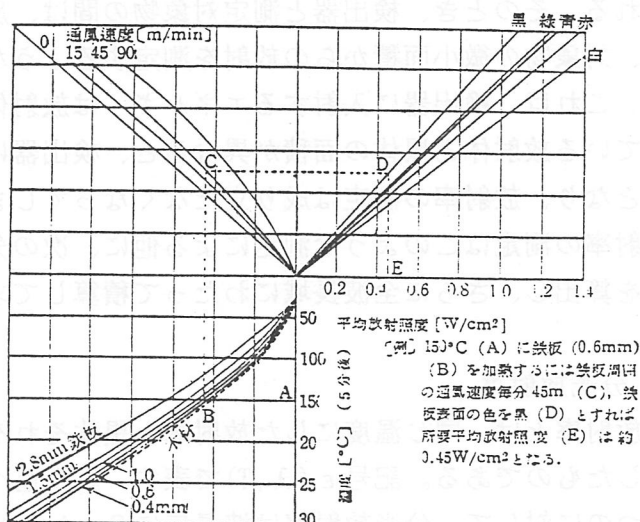


図6.1.3 所要温度上昇を得るための放射照度

7. 赤外放射の計測

赤外放射の計測は、全波長域に亘る赤外放射を合算した全放射に関する計測か、あるいは波長毎の計測を行う赤外分光放射の計測かに分類される。また、放射体から放射されている赤外放射の計測か、放射体から放射されて空間を通過している量あるいは被加熱物などに照射している量の計測かについても分類される。

例えば、放射率は、その放射体自身について可視・赤外放射のしやすさの性質を表した項目であり、放射体としては値の高いことが望ましい。また、全放射束は赤外線ヒータから放射されている赤外・可視・紫外に亘る全波長域を合算した全放射量を表す項目であり、赤外線ヒータで物を加熱・乾燥させる際に重要な量となっている。全放射束を入力パワー（電気ヒータなら入力電力）で割ると、そのヒータの効率が求められる。例えば、JIS C 7514 赤外線電球では、500Wの赤外線電球では、500Wの電気入力に対して赤外放射出力が370W以上で、放射効率74%と高い値が規定されている。

7.1 赤外放射源の放射率の測定

光学用語を解説したJIS Z 8120によると、「放射率とは熱放射体の放射発散度と、それと同じ温度における黒体の放射発散度との比。量記号 ε で表す。（英、米 emissivity）」と規定されている。また、「放射発散度とは、放射体から発散される放射束を、その面積で割った値。単位はワット毎平方メートル ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) である。」と規定されている。

実際には、放射発散度の測定の代わりに、放射輝度の測定で放射率が求められることが多い。放射輝度とは、単位面積、単位立体角当たりの放射束で、単位はワット毎平方メートル毎ステラジアン ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$) である。

7.1.1 全放射率

全放射率の測定は、全波長域にフラットな感度を有している検出器を用いて、同じ温度にした放射体と黒体それぞれの放射エネルギーを測定し、その比を計算することによって求められる。そのとき、検出器と測定対象物の間は、反射鏡あるいは孔空き遮光板などを用いて、対象物の微小面積からの放射を測定するような光学系が構成されていなければならない。これは、検出器に入射するエネルギーは放射体の面積の大小によって変わるので、測定している放射体と黒体の面積が異なると、検出器に入射する放射量は放射率とは無関係な値となり、放射率の測定は成り立たなくなってしまうからである。

全放射率の測定はこのような測定による他に、次の分光放射率の測定値をもとに分光放射輝度を算出し、さらに全波長域にわたって積算して求める方法もある。

7.1.2 分光放射率

分光放射率とは、同じ温度にした放射体と黒体それぞれの放射エネルギーの比を波長別に測定したものである。記号 $\varepsilon(\lambda, T)$ で表す。先に述べた全放射率が0~1.0の間の一つの値を持つのに対して、分光放射率は波長毎に0~1.0の値を持ち、データの数が膨大な量となることから、グラフで表されることが多い。

分光放射率は、温度(T)と波長(λ)に依存する表現をしているが、多くの放射体は多少の温度の変化によっては分光放射率の値が変化することはない。

分光放射率・全放射率は放射体の赤外線放射特性を表す最も基本となる数値ではあるが、その値は放射体の性質を表しているものであって、量的なものを表しているわけではない。例えて言えば、冷えているストーブでも熱くなっているストーブでも分光放射率・全放射率は同じ値であるということであり、またある波長で分光放射率が1.0に近い大きな値であっても、それはその波長で赤外線放射量が最大値であるというわけではない。

7.1.3 黒体

黒体 (Blackbody) とは、入射した放射を、波長、入射方向及び偏光状態に関係なくすべて吸収する理想的な熱放射体である。別名、完全放射体とも言う。同一温度の熱放射体では、どの方向、どの波長でも最大の分光放射輝度を持つ。黒体は全放射率、分光放射率共に1.0の値であり、放射率の測定における基準器である。理想物体である黒体に近似させた現実の物が黒体炉である。

黒体炉は、吸収率の高さ、つまり黒さを形状を空洞にすることで実現し、温度の均一さはヒータの巻き方と材質で実現している。市販のものは口径1~0.5インチ、温度範囲50~1,000°C程度のものが多い。

黒体炉の一種に、定点黒体 (炉) がある。これは、熔融した物質は凝固する温度が一定の決まった値であり、凝固する際しばらくの間その温度を維持する性質を利用したものである。高温の熔融物質としては金属が使われる。定点黒体炉を使用すれば、温度についての誤差は考えなくて済む。

定点黒体炉に使われる金属の種類とその凝固温度は、銅1084.61°C、金1064.17°C、銀961.78°C、アルミニウム660.323°C、亜鉛419.527°C、錫231.928°Cなどである。

7.1.4 分光放射率の測定

分光放射率の測定を行うには、赤外分光器と黒体炉、それに黒体炉と同温度にした被測定物が必要である。

分光器には分光素子あるいは分光光度計を用いる。現在は感度、測定スピード、ノイズ、精度、再現性、分解能などの点でフーリエ変換型赤外分光光度計 (FT-IR) が優れた性能を発揮している。FT-IR以外では回折格子型分光光度計、バンドパスフィルター回転式分光器などがある。

分光放射率の値が求められれば、分光放射輝度、分光放射発散度、全放射率などを求めることができる。

分光放射率の測定は、楕円面鏡あるいは放物面鏡によって黒体炉および同温度の試料の微小箇所からの赤外線放射量を測定器に取り込み、それらの放射量の比を波長別に求めるものである。

分光放射率の測定器は、高温の黒体炉からの放射量で出力が100%、常温の黒体炉または黒色塗料からの放射量で出力が0、その間の入出力特性は直線的であるように調整されていることが肝心である。

黒体炉の温度と試料の温度、黒体炉と試料の測定面積、測定器からの両者の測定位置は同じでなければならない。

図7.1.1 にFT-IRを用いたシングルビーム方式の (赤外線) 分光放射率測定装置の概略図

を示す。黒体炉からの波長別放射出力と、同じ温度にした放射体からの波長別放射出力を求めて比をとると分光放射率の値となる。黒体炉と放射体の測定に順序はない。

7.1.5 分光放射率測定のための方法

円盤上に透過波長の異なる赤外線フィルターを形成したCVF (Circular Variable Filter)を用いた分光放射率測定装置がある。構造が単純であることから振動に強く、軽量なので持ち運びが容易であり、野外の測定も可能である。

なお、CVF方式と同様のもので、複数のバンドパスフィルターを並べた円盤を回転させてその透過波長帯域毎の赤外線出力を求め、大ざっぱな分光放射率を測定する装置もある。

低い温度での分光放射率の測定精度を向上させるために、温度の異なる2台の黒体炉を用いて測定器の直線性を確保した分光放射率測定器もある。

図7.1.2 に示すような回折格子式自記分光光度計を用いたダブルビーム方式の分光放射率測定装置もある。ダブルビーム方式とは、ある波長毎に参照光束と試料光束を交互に測る方式である。測定器内部では、参照光束と試料光束両方の光の強さが同じになるように、参照光束側（黒体炉側）の光路に入れたくさび型（楕型とも言う）の減光器をサーボモーターで移動させ、その移動量がくさびの先に付けたペンで記録用紙に描かれることによって、波長毎の二つの光束の比、すなわち分光放射率がグラフに描かれるものである。

ダブルビーム方式は、測定波長のズレがない、測定イコール記録であるためメモリーや計算機能が不要であるなどの長所があるが、感度が低い、測定に長時間を要する、測定値の精度が低い、測定結果はチャートに描かれたグラフだけで他の計算にそのデータを用いることは全くできないなどの致命的な限界がある。

7.1.6 放射体の温度の測定

分光放射率の測定では、黒体炉と放射体の温度を同じにするという作業が必要であるが、放射体の表面温度を正確に測定することは非常に難しい。

分光放射率の測定は、表面温度の測定であると言っても過言ではない。

温度を測定するセンサには、測温抵抗体、サーミスタ、熱電対などがあるが、形状が小さく、測定精度が優れ、価格も安く、放射体の温度測定に最も適しているのは熱電対である。

放射体の形状は平面あるいは丸棒状などであることから、温度センサは試料に何らかの方法で密着させなければならないが、試料との密着の度合いによって測定結果が変わることがある。また、試料の赤外放射を測定している部分には温度センサは付けられないため、赤外放射の測定位置近傍で温度測定を行わざるを得ない。正確に言えば、赤外放射を測定している場所における表面温度は測られていない。

このため、放射体の温度が正しい値に設定されているかどうかを確認する方法として、黒色塗料のような放射率既知の塗料を試料に塗って赤外分光放射率の測定を行い、正しい放射率の値になるように試料の温度を調節する方法をとることがある。そのための黒色塗料には、3Mブラックや国産品では艶消し黒の耐熱塗料などが用いられる。

図7.1.3 に試料の温度設定を誤った場合の見かけ上の分光放射率の測定結果を示す。

7.2 加熱対象物の反射率（吸収率）の測定

赤外放射加熱を行うには、被加熱物は赤外吸収率が高いことが望ましいが、一般の物は波長約4ミクロン以上の赤外放射の吸収率は高いことが知られており、赤外放射加熱に適している。

試料の吸収率を求めるには、反射率の測定を行い、 $1 - \text{反射率}$ の計算によって吸収率を導き出す方法が一般的である。その際、入射角と反射角を等しくした正反射率を測定する方法では、鏡面反射物体については正しく測定できるが、拡散反射物体では反射率を正しく測定することはできない。拡散反射をする物体の反射率の測定には、積分球を用いて拡散光を全て捉える方法を採用する。このようにして反射率から吸収率を求めた測定例を図7.2.1に示す。

なお、赤外放射率の値は吸収率に等しいというキルヒホッフの法則から、試料を数十℃の温度にして求めた赤外放射率（＝赤外吸収率）の値も同図に併せて描いた。反射率から求めた値と放射率から求めた値はほとんど一致しており、双方の測定方法の精度の高いことが確認された。

図7.2.2 に身の周りの物質の赤外放射率（＝赤外吸収率）の測定結果を掲げる。

(笹森 宣文)



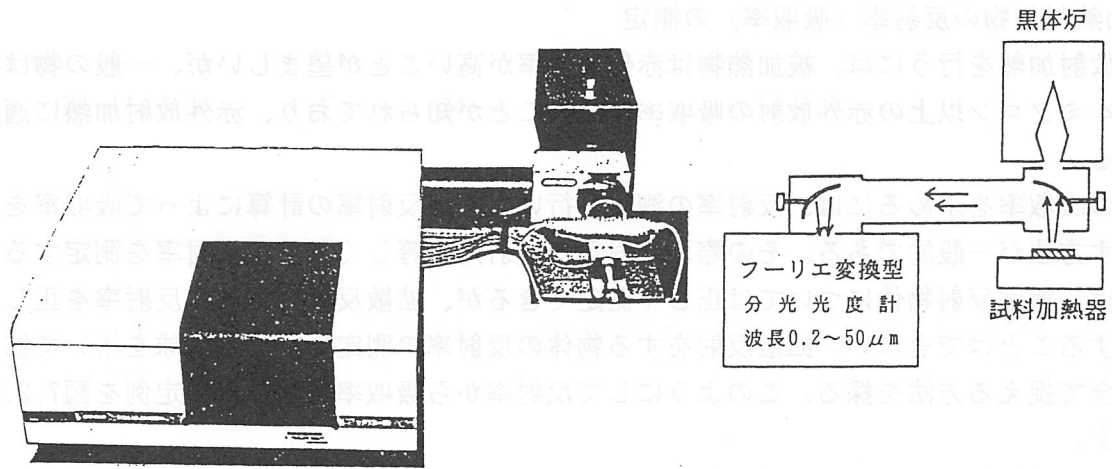


図7.1.1 シングルビーム方式分光放射率測定装置

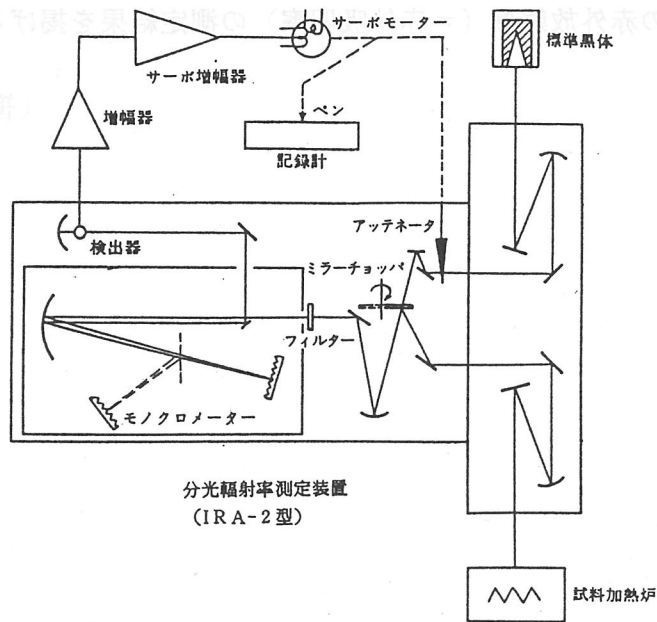


図7.1.2 ダブルビーム方式分光放射率測定装置

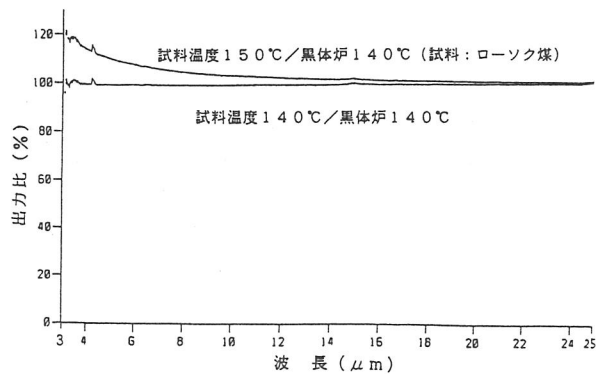


図7.1.3 分光放射率測定 of 失敗例

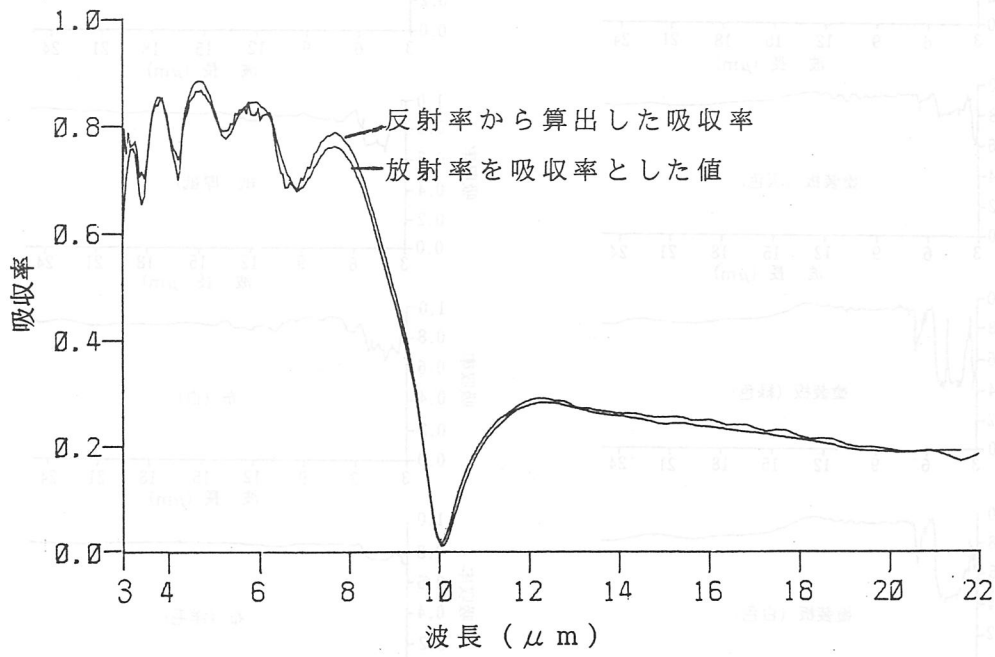


図7.2.1 吸収率の測定結果

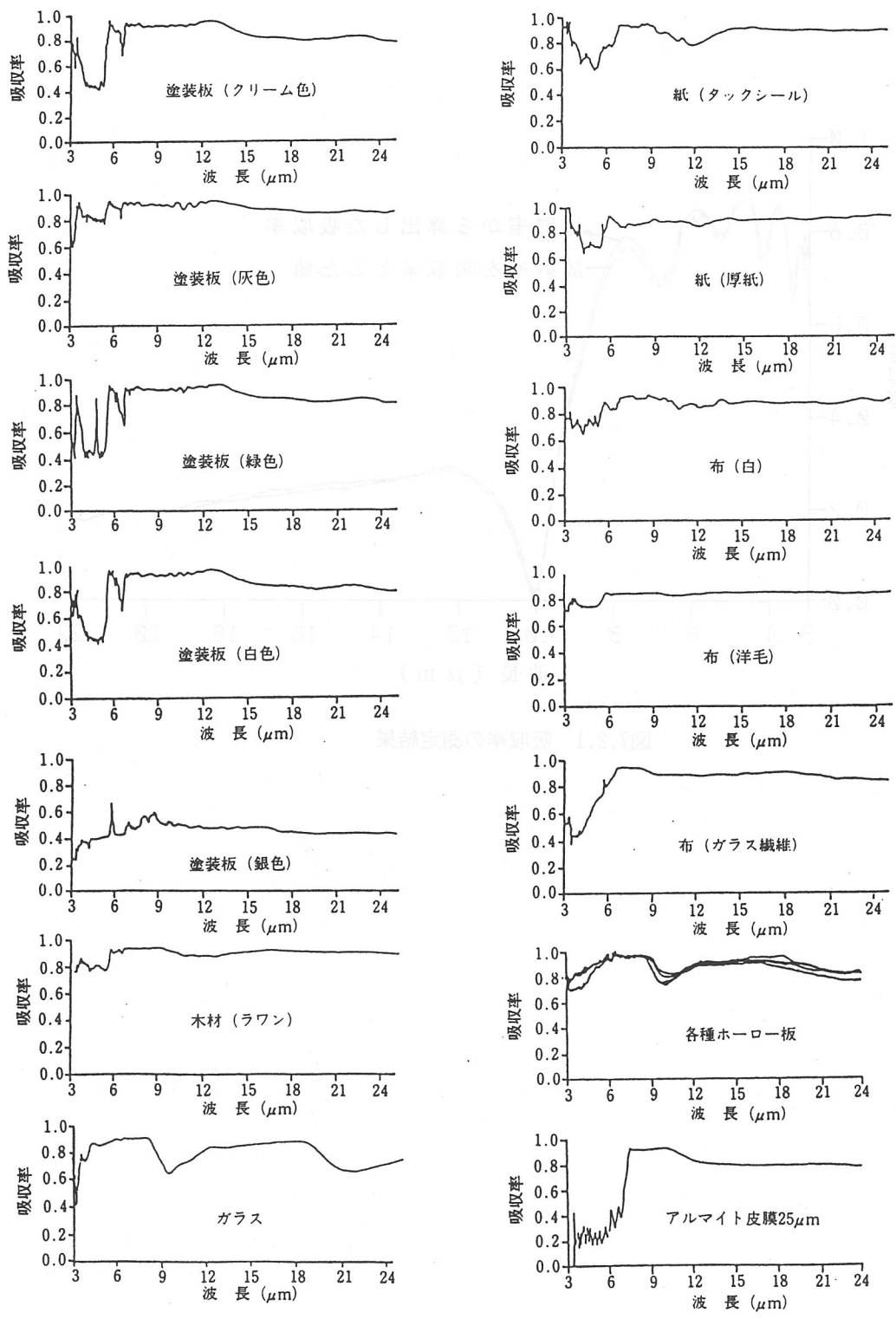


図7.2.2 身の回りの物質の赤外放射率 (吸収率) 測定例

7.3 赤外放射加熱物の表面温度測定

7.3.1 温度測定と温度標準

・表面温度の測定も温度測定と同様であるが、は標準の温度目盛りに基づいたトレーサビリティに準拠した測定方法を使用するのが好ましい。一般の温度目盛りは、水の三重点を基本として金属などの凝固点を温度定点として定めている。温度標準および対象温度計としては、水の三重点と水の沸点を基準として、白金抵抗温度計を使用して亜鉛点までの温度を決定する。これ以上の温度の銀点、金点は白金と10%パラジウムを含む白金熱電対を使用する。金点以上の温度定点、パラジウム点、白金点までは光高温計を使用しプランクの放射則を使用して決定されている。この標準温度計は温度定点を使用し直接校正したもので、実用的にはこの基準温度計を二次標準として比較法によって電気炉などを使用して校正された三次標準温度計、や実用温度計を使用するのが通常である。表面温度計についても、一般の温度測定のトレーサビリティは同様に適用できる。

7.3.2 温度計の種類

温度計として、現在一般に使用されているのは次の各種である。①抵抗温度計 ②熱電対 ③ガラス温度計 ④気体温度計 ⑤機械式温度計 ⑥輝度温度計 ⑦放射温度計 ⑧色温度計 ⑨赤外線カメラ ①から⑤までが接触式温度計で測定点に直接接触または挿入して測定する。⑥から⑨は非接触で温度が測定できる。原理的にはどの温度計でも表面温度の測定は可能であるが、接触式の温度計では接触することによる測定対象物の温度が擾乱を受け、温度が変化すること、測定素子の大きさにより、対象部の測定点の大きさが限定されるなどとの難点がある。また非接触温度計では、その温度計の持つ特性により影響を受けるのは避けられない。例えば放射温度計とか輝度温度計では測定対象物の放射率・分光放射率などが関与することになる。これらの何れの温度計でも表面温度の測定に使用できるが使用に当たっては原理的・实际的に包含する誤差の大きさを推定する必要がある。

7.3.3 熱電対の種類

表7.3.1 熱電対の種類と使用温度

これらの温度計の中で熱電対が最も基本的で且つ普及している。電気的に測定できること、温度対象によって多様な品種が選択できること、比較的安価であることなど特徴がある。表7.3.1に測定範囲と精度を示す。熱電対に限らず全ての温度計は校正して正しい温度目盛りを付して使用する必要がある。

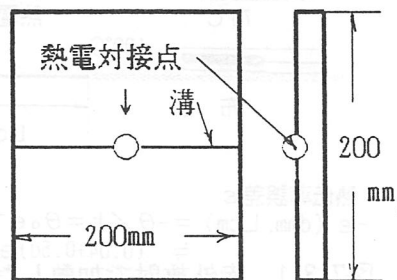
熱電対	適応温度[°C]	精度[%]
貴金属 :PR	-50-1700	0.5- 5
卑金属 :CA, CC, FeC	-200-1200	2-10
特殊金属:WRe	-272-2800	

図3.3.1 表面温度標準 20mm

7.3.4 表面温度計の校正方法

表面温度の標準は公式に定まっていないので、一般の熱電対と同様な方法で線状のまま校正して適切な加工を施し表面温度計として使用する必要がある。同一ロットで生産したものは箔状の表面温度計として使用する場合、同じ校正目盛りを使用することができる。

表面温度の標準として簡易に使用できるものとしては、20mm程度の厚みで、200mm×200mm程度の面積をもつ鋼板の中心部に、使用する熱電対の太



熱電対による温度測定は測定条件によって生じる誤差を少なくするため次の要件を考慮する必要がある。

- ・熱伝導誤差の低減(熱電対の直径の100倍以上、箔状にして接触面積増大)
- ・表面からの乖離誤差(一定圧力で接触、測温点の固定、保温は不可)

図7.3.1, 図7.3.2に熱電対の太さ、表面に沿わせる長さ、熱電対の熱伝導誤差の一例を示す。

・放射による加熱誤差(放射の瞬間遮断、対象物と測定素子の反射率、測定対象物の温度変化の時定数から真の表面温度の推定可能)

・日本電球工業会指定の光源類表面温度計(Ptの箔、厚み/幅=0.1~0.05、測定対象球の直径の長さ範囲を接触させる)

・パテによる固定(熱電対、ガラス温度計、内部発熱体用、電気用品試験所等で採用)

・黒体条件を構築して測定(対象物の熱伝導による誤差の除去、Land Pyrometerの例)

7.3.4 放射による非接触表面温度測定

・一般の対象物：対象物の放射率未定、温度、表面状態の不確かさの解消が課題

・放射率の補正(放射率の推定方法：相対値は可、絶対値は困難、分性と表面実効面積)

・光路の吸収(付加)補正(水蒸気、ガス、高温気体、炎)

・視野角の固定(測定点の大きさ、精度、放射率の角特性)

・赤外放射加熱時の照射されている放射の反射特性と加熱対象物の温度放射の分離の困難

7.3.5 参考文献

・国立天文台：理科年表 丸善株式会社(1995)

・佐土根：温度測定法 日本機会学会関西支部 第8回電熱に関する講習会(1960.12)

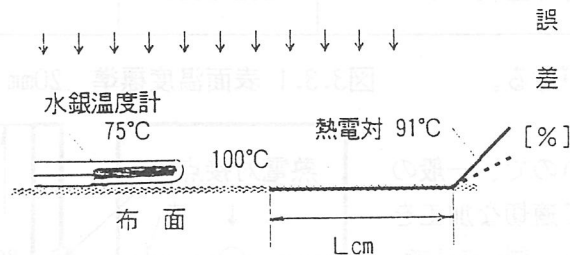
・岡田、佐土根：熱電対による測定 オトメ-ション vol.6, No.9, p19(1961)

・Land, T, BarBar, R: New Pyrometer for Glass and Other Surface: News and Review of Society of Glass Technology. vol.38, p45(1954)

・電子情報通信学会：電子情報通信ハンドブック 第1分冊 p689(オ-ム社)(1988)

・高見、高田：非接触測温方法 計測と制御 vol.4, No.2, p62(1965.12)

赤外放射(500W赤外線電球 10cmから照射)



*熱伝導誤差ε

$$-\varepsilon(\text{dmm}, L\text{cm}) = -\theta / t = \theta_0 e^{-\alpha t} \\ = (0.04 + 0.5d) e^{-0.97L}$$

図7.3.1 赤外放射で加熱した布面の温度測定

表7.3.2 熱電対の特徴

	適応温度[℃]	精度[℃]
貴金属 :PR	-50-1700	0.5- 5
卑金属 :CA, CC, FeC	-200-1200	2-10
特殊金属:WRe	-272-2800	-

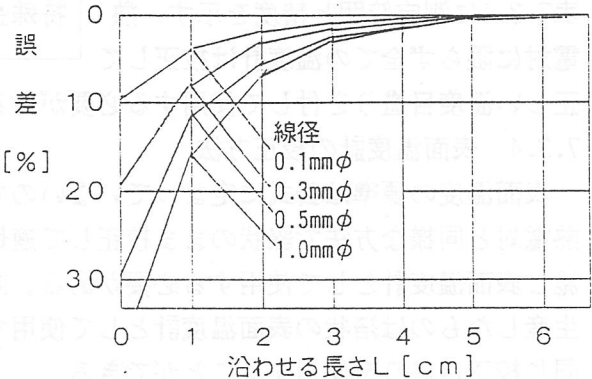


図7.3.2 熱電対と温度測定の誤差

(担当 森田政明 栗原工業株式会社)

7.4 赤外放射源の特性測定

7.4.1 赤外放射源の特性評価の項目

(1)評価項目：赤外放射源の特徴を生かし赤外放射加熱を効率よく使用するには、放射源の定量評価が必要である。対象となる特性としては次のような項目があげられる。各種用語の定義は電気学会電気専門用語、JIS照明用語などに定義されており、ここでは重要と思われる項目のみあげる ①入力 ②放射出力 ③放射配光(放射強度) ④放射照度(分布) ⑤分光放射分布 ⑥放射率 ⑦分光放射率 ⑧放射温度 ⑨分布温度

・入力：赤外放射を発生するもととなるパワーで、電気、ガス、石油などの単位時間当たりの消費一次エネルギーで示す。放射効率の算出に必要、単位は：kWh, J/m³h, J/kg h

・放射出力(全放射束)：放射測定の基本技術で行なう。使用する放射計はサーモパイル、焦電型放射計など波長に対して選択性のない計測器を使用する。赤外線電球の場合はフィラメントからの短波長放射と電球表面などの長波長放射を含め正確に測定する。放射計の受光角特性が余弦則を満足する角度範囲に放射源が全て含まれること。ガス等の燃焼型放射源の場合は炎からの高温の対流成分と放射成分を分離して測定する。放射出力は全空間に放射する放射を測定する必要があるためコンソメトリックに測定できる装置が必要である。放射源の最大寸法の4倍以上の測定距離をとると逆自乗則が適用できるので便利である。

7.4.2 赤外線電球の放射束測定

(3)赤外線電球の放射測定：JISに定めるR型電球では、反射鏡截面から1m離れた位置で測定する。測定角度は中心から5度間隔で電球截面までの180度の間を測定する。電球の光軸方向は45度間隔で4断面を測定し、その平均の放射強度に球帯係数を乗じ全放射束を算出。電球を光軸を中心に毎分60回転～80回転させて平均放射強度を測定しても差し支えない。図7.4.1にその模式図を示す。全放射束の算定方法は次の式による

$$\Phi = \sum K_{\theta} \cdot H_{\theta} \cdot S^2$$

ここで Φ ：電球の全放射束 (W)

$K(\theta)$ ：方向 θ の球帯係数

$H(\theta)$ ：方向 θ の放射照度 (W/m²)

また簡易方法として、標準の赤外線電球と近似した放射配光、分光分布をもつ赤外線電球については、照明用光源の全光束の測定に使用する球形光束計と放射計を使用して測定することができる。誤差の少ない測定をするためには、測定操作には十分に検討と習熟が必要である。

(4)管型放射源の測定：管の長さの4倍以上の距離を離して放射強度を測定する。一般に管の中央を通り管軸と直角の方向を基準軸とし10度間隔で測定する。管径方向は4方向についてそれぞれ放射配光を測定しその平均値に球帯係数を乗じて算出する。算定方法は(1)式と同様である。管軸方向を0度-180度とする。簡易法としては3照度法と1照度法が使える。管径方向の放射束が大きく変化しない場合は、管軸と90度、管軸と45度及び135度で放射照度を測定し定数を乗じて算出する。

・3照度法 $\Phi_e = [4.78 I_{e_{90}} + 3.6 (I_{e_{45}} + I_{e_{135}})] \cdot S^2$

ここで Φ_e ：管型放射源の全放射束 (W)

$I_{e_{90}}, I_{e_{45}}, I_{e_{135}}$ ：管軸と90度、45度、135度方向の放射照度 (W/m²)

S：管型放射源の管軸との交点から放射照度測定点までの距離 (m)

・1照度法 $\Phi_e = K_{90} \cdot I_{e90} \cdot S^2$

常数 K_{90} の値は、放射源が透明の場合は10.3、不透明の場合は10.0

(5)平面型放射源の放射束測定：放射源の放射面の最大寸法の4倍以上の距離を離して測定し(4)と同様の手順で算出する。円形の場合は直径、方形の場合は対角線の長さ。

7.4.3 放射源の配光測定

7.4.2(2)赤外線電球の放射配光測定と同様手法で測定する。この場合放射計の形式によっては放射計を移動したり、方向を変えると感度に変化するものがあるので注意を要する。対象放射源が燃焼式の場合は、放射計が燃焼排棄ガスの影響を受ける恐れがあるので、対象器具と放射計の間を高速の風を通し放射と対流を分離して測定し対流の影響を受けないように熱源と測定器の間に室温の風を吹かすなどの注意が必要である。

7.4.4 放射照度の測定

放射分布はR型赤外線電球のJISに規定として定められている。電球の放射配光によっては多数の赤外線電球を使用する場合は問題は生じないが、少数の電球を加熱に使用する場合、反射鏡截面から40cm程度の距離で使用すると照度分布に大きなムラが生じるので、管軸方向からの距離によって照度分布の値に制限が定められている。測定器は当然ながら余弦法則に合った受光角特性を持つ必要がある。図7.4.2に受光角特性、図7.4.3に赤外線電球の放射配光と放射照度の例を示す。

赤外放射加熱装置の加熱面上での放射照度の分布は、被加熱物の温度上昇のムラとなり、仕上がりの良否に関係する。一般に水平面上の加熱では赤外放射分布が直接温度分布になる。加熱炉の終端部では放射照度の分布が急峻に変化する。鉛直型の加熱装置では放射源の対流による空気温度の上昇が上下の温度分布を生じる原因となるので放射照度分布を勘案して調節する事が重要である。

7.4.5 参考文献

- ・日本工業規格：JIS C7514 赤外線電球 ・照明学会編：新編「照明データブック」オーム社(1978) ・岡田、佐土根：照学誌、vol.35, p 16. (1951)
- ・岡田、佐土根：電試彙報、vol.17, p347, (1953.2)、照学誌、vol.37, p213, (1953.6)

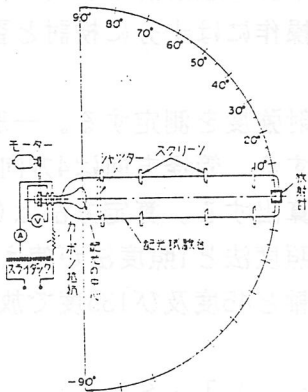


図7.41放射配光測定装置の例 (担当：森田 政明 栗原工業株式会社)

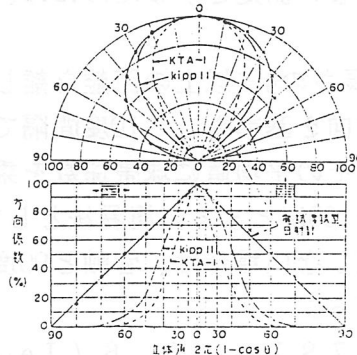


図7.4.2放射計の受光角特性

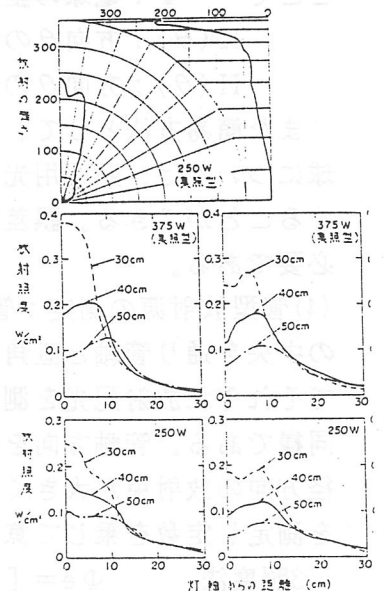


図7.4.3電球の放射配光と放射照度分布

7.5 赤外放射の計測システム

最近の赤外線センサは、検出波長域で差は有るものの、高感度化、多素子化が進み、広範囲の用途に応用される様になった。また、各種赤外線センサを検出器にした装置が多く開発され、一層身じかなものになりつつある。今日では、テレビ等にもよく登場して、馴染みに成った赤外線撮像装置（サーモグラフィ、非接触温度分布計測装置）は、温度に関連する計測分野で、標準装置になったと言ってよい。形状もポータブルからハンディとその小型化が進み、性能に対して価格もかなり安価になってきた⁽¹⁾⁽²⁾。

このような状況下で、サーモグラフィはもっと活用されてよい筈の装置である。それを妨げているのは、まだ装置自体の取り扱い（センサの冷却等）の繁雑さ、得られた映像情報の解析法、計測対象の波長依存性と分光放射率の実際面での扱い等の問題が残されている為である。

赤外放射を利用する加熱技術に対する計測システムとしては放射計、放射温度計等を検出要素としたシステムが考えられるが、その中でも最近特に注目されるようになったサーモグラフィについて述べる。

7.5.1 5～8 μm帯のサーモグラフィ

サーモグラフィの特長は、1) 画像（2次元情報）、2) 非接触法（計測対象に非干渉）、3) パッシブ法（太陽等の照射光が不要）で計測できることなどである。これらの利点から、3～5 μm帯及び8～13 μm帯に検出感度がある2機種（波長域）の装置が製造され、活用されてきた。これは大気窓領域に合致しており、長い光路の測定を考える場合には、水蒸気や二酸化炭素等の吸収帯を避ける意味で、配慮しなければならない必須条件となっていた⁽³⁾⁽⁴⁾。このことから、この中間に位置する5～8 μm帯の装置は、技術的には問題なくとも製造されなかった。

最近になり、この帯域の装置がNS社から販売されて話題になっている。この装置の特長はガラスの分光透過特性及び分光反射特性と興味深い関係があることである。つまり5～8 μm帯は、上記の従来の2機種の波長帯域で、3～5 μm帯より低透過率であり、8～13 μm帯より低反射率の帯域である。このことから、SiO₂系の材料の表面の温度測定には適していると考えられる（図7.5.1, 7.5.2参照）⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

7.5.2 サーモグラフィとその最近の動向

サーモグラフィが測定対象として、必ず長い光路を含んだ仕様にしなければならない場合には5～8 μm帯の装置は実現しなかった。これを裏返せば、それを必要としない屋内の設備及び、比較的小規模のシステム、例えば加熱放射体とその加熱システム等に於ける測定には支障がないことを示している。

このことは、サーモグラフィが従来の計測装置とは別の応用が展開されることを示唆している。その一つは、単機能化（例えば測定温度範囲を狭く）して測定ユニットとして、装置に組み込む場合（目的によっては複数個）である。既に工作機メーカーS社から、工作機の作動中に対象物の温度分布を測定し、それを制御要素にするセンサとしたいと言う

要望がある。現在の計測装置としてのサーモグラフィでは、高価でそれを満足出来ないが、小型化、単機能化、低価格化が進んでいる今後の進展を考慮すると、サーモグラフィ・ユニットとして市場に出るのも、それ程先の事ではないと考えられる。取り敢えず小型化の面では、数年前の家庭用ビデオカメラ位の形状、重量（俗に言うパスポートサイズ）に近いものが販売されるようになってきた。

また他方では、今日でも元気のある映画やアニメ業界で、温度分布の疑似画像のみならず、実際のサーモグラフィからの映像を活用したものが使われていると聞くので、すでに表現の世界では工業分野の域を出ている。

これからのサーモグラフィは、赤外線検出系のさらに高精度化、及びコンピュータ（特にパソコン）のソフトを駆使した、もっと人に優しい（扱いやすい）多機能化が図られた計測装置としては言うに及ばず、あらゆる産業分野に欠かせない広義での計測システムの要素としての、新しい顔が想定できる。そして、絶対温度零度以上のもの、全てのものが赤外線の放射体（温度放射体）であることを考えると、サーモグラフィの応用分野は限りなく広がってくる。

文献

(1) 河田 聡, 桑野幸徳: 光が創るマルチメディア新時代, 三田出版会 (1996.2)。

TV番組 "所さんの目がテン「魔法の光? 赤外線秘密」" 西日本テレビ, 1995.11.12, AM7^h~7^h30^m。

(2) 玉重繁良: 赤外線映像装置の調査資料, 岡山短大赤外線技術応用研究会, IRH5-17 (1994.2), IRH5-20 (1994.3)。

(3) J.M.Lloyd: "Thermal Imaging System", Plenum press (1975)。

(4) G.J.Zissis, etc.(ed.): "The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook", Book 1~8, Infrared Information Analysis Center (1993)。

(5) 岡本芳三: 遠赤外線リモートセンシング熱計測法, コロナ社 (1994.1)。

(6) 玉重繁良: 赤外放射加熱とその応用に関する研究調査委員会第5回資料, IRA-66 (1997.5)。

(玉重 繁良)

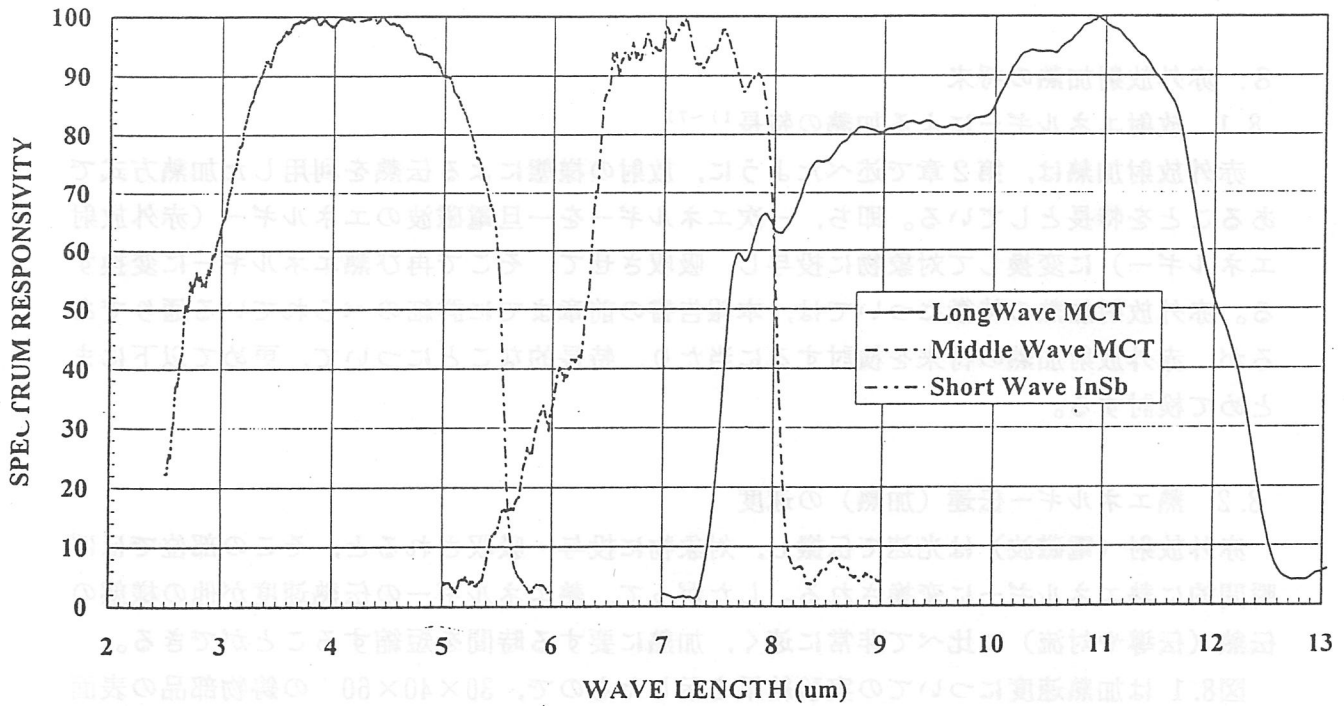


図7.5.1 3波長帯のサーモグラフィの相対分光感度例

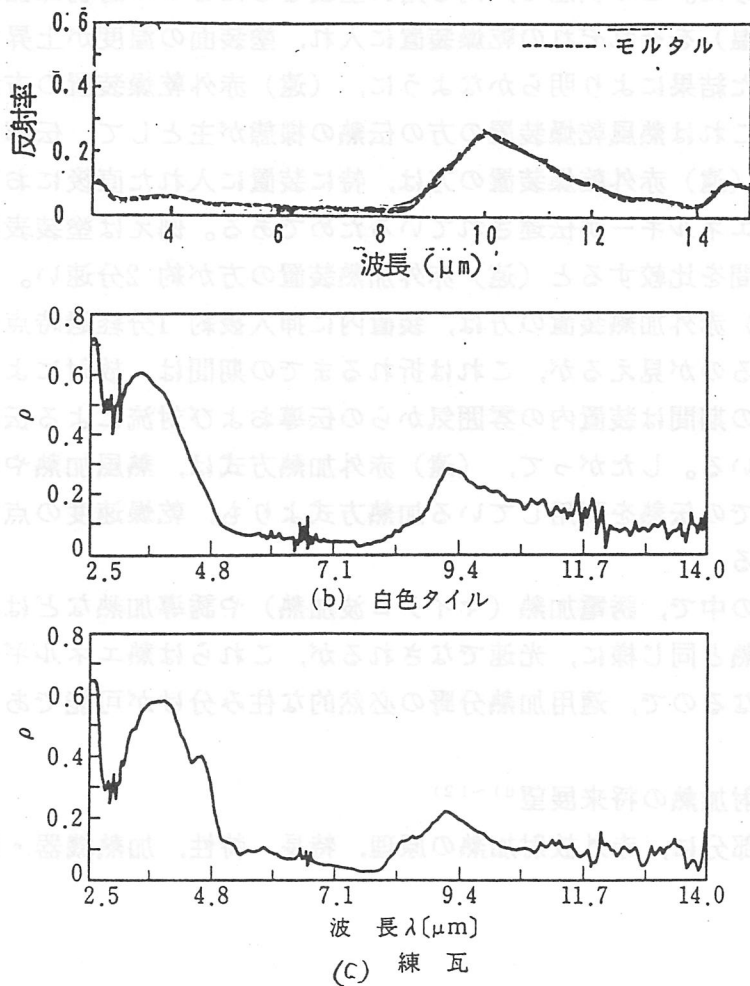


図7.5.2 建築材料の分光反射特性例

8. 赤外放射加熱の将来

8.1 放射エネルギーによる加熱の特長^{1)~7)}

赤外放射加熱は、第2章で述べたように、放射の様態による伝熱を利用した加熱方式であることを特長としている。即ち、一次エネルギーを一旦電磁波のエネルギー（赤外放射エネルギー）に変換して対象物に投与し、吸収させて、そこで再び熱エネルギーに変換する。赤外放射加熱の特徴については、本報告書の前章までに詳細のべられている通りであるが、赤外放射加熱の将来を検討するに当たり、特長的なことについて、更めて以下にまとめて検討する。

8.2 熱エネルギー伝達（加熱）の速度

赤外放射（電磁波）は光速で伝搬し、対象物に投与・吸収されると、その部位ではほぼ瞬間的に熱エネルギーに変換される。したがって、熱エネルギーの伝熱速度が他の様態の伝熱（伝導や対流）に比べて非常に速く、加熱に要する時間を短縮することができる。

図8.1は加熱速度についての実験結果を示したもので、 $30 \times 40 \times 60$ の鋳物部品の表面塗装の乾燥に関するものである。ほぼ同じ大きさの熱風乾燥装置と（遠）赤外乾燥装置を製作し、安定時に、乾燥装置内の温度が 140°C になるように、あらかじめ調節をしておいた。（遠）赤外乾燥装置の方は、入力 50 W の平板形の遠赤外ヒーターを10枚を装置の内壁に取り付けた。この状態で、同じ用に塗装をした2つの鋳物部品（乾燥装置に入れる前の温度は常温）をそれぞれの乾燥装置に入れ、塗装面の温度が上昇する状況を調査した。図8.1に示した結果により明らかなように、（遠）赤外乾燥装置の方が、表面温度の上昇速度が速い。これは熱風乾燥装置の方の伝熱の様態が主として、伝導と対流によっているのに反して、（遠）赤外乾燥装置の方は、特に装置に入れた直後において、主に放射の様態によって熱エネルギーが伝達されているためである。例えば塗装表面が 120°C の温度になるまでの時間を比較すると（遠）赤外加熱装置の方が約2分速い。

また、（遠）赤外加熱装置の方は、装置内に挿入後約1分経過時点に、温度上昇曲線が少し折れているのが見えるが、これは折れるまでの期間は、放射による伝熱が主体的であり、折れた後の期間は装置内の雰囲気からの伝導および対流による伝熱様態によっていることを示している。したがって、（遠）赤外加熱方式は、熱風加熱や抵抗加熱など、伝導や対流の様態での伝熱を利用している加熱方式よりも、乾燥速度の点では有利であるといえることができる。

[加熱方式の中で、誘電加熱（マイクロ波加熱）や誘導加熱などは、エネルギーの伝達速度が赤外加熱と同じ様に、光速でなされるが、これらは熱エネルギーへの変換過程が赤外加熱とは異なるので、適用加熱分野の必然的な住み分けが可能である。]

8.3 赤外放射加熱の将来展望^{8)~12)}

前章までの部分に、赤外放射加熱の原理、特長、特性、加熱機器・装置、関連の計測な

どに関する事項について述べてきた。赤外放射加熱方式は、現在既に他の方式の加熱に互して、差別化された特徴を生かしながら、広く利用されている。現在既に実用されている各種の赤外放射加熱の利用分野については、表2.2（第2章）に示した通りである。

赤外放射加熱が将来明るい展望を持ち得るかどうかの、もうひとつの別の視点は、現在のこれらの利用分野そのものについての将来展望が明るいかどうかということであろう。また、(赤外)放射による伝達されるエネルギーには、この表2.2の他に、いわゆる“非熱効果（非加熱効果）”の応用分野も含めて考える必要があるのかも知れない。これら視点からの見解については、記述するスペースが無いので、本稿では省略する。

以上述べてきた内容が、赤外放射加熱産業振興の一助となり、その結果赤外放射加熱についての明るい将来展望が開けることを期待したい。

参考文献

- 1) Hackforth, H.L. : Infrared Radiation, McGraw-Hill Book Co., Inc. (1960)
- 2) 日本電熱協会 遠赤外線委員会・編：遠赤外線加熱の理論と実際，オーム社（平 3）
- 3) 河本 康太郎：調理分野における赤外放射加熱の利用動向，日本赤外線学会誌，vol. 2, No. 2, (平 4) p1-p9
- 4) 堀 克彦・編：工業電気加熱，(財)省エネルギーセンター（平 7）
- 5) Hall, J.D. : Industrial Applications of Infrared, McGraw-Hill Book Co., Inc. (1947)
- 6) 赤外線技術連合会・編纂：赤外線技術—加熱とその応用，電気書院（昭36）
- 7) 赤外線技術研究会・編：赤外線工学—基礎と応用，オーム社（平 3）
- 8) 科学技術庁監修：21世紀への階段—40年後の日本の科学技術，弘文堂（昭35）
- 9) 週刊ダイヤモンド・編：遠赤外線市場 20兆円の思惑—焼鳥器からセンサー，兵器まで，週刊ダイヤモンド，3. 26号（昭63） p133-p139
- 10) 通商産業大臣官房調査統計部・編：平成 6年 機械統計年鑑，通商産業調査会（平 7）
- 11) 日本電熱協会・編：エレクトロヒート応用ハンドブック，オーム社（平 2）
- 12) 乾 泰宏：特定課題 R6-28「赤外放射の非熱効果」調査報告，日本照明委員会誌，9-02, p12~p16 (1992)

(河本 康太郎)

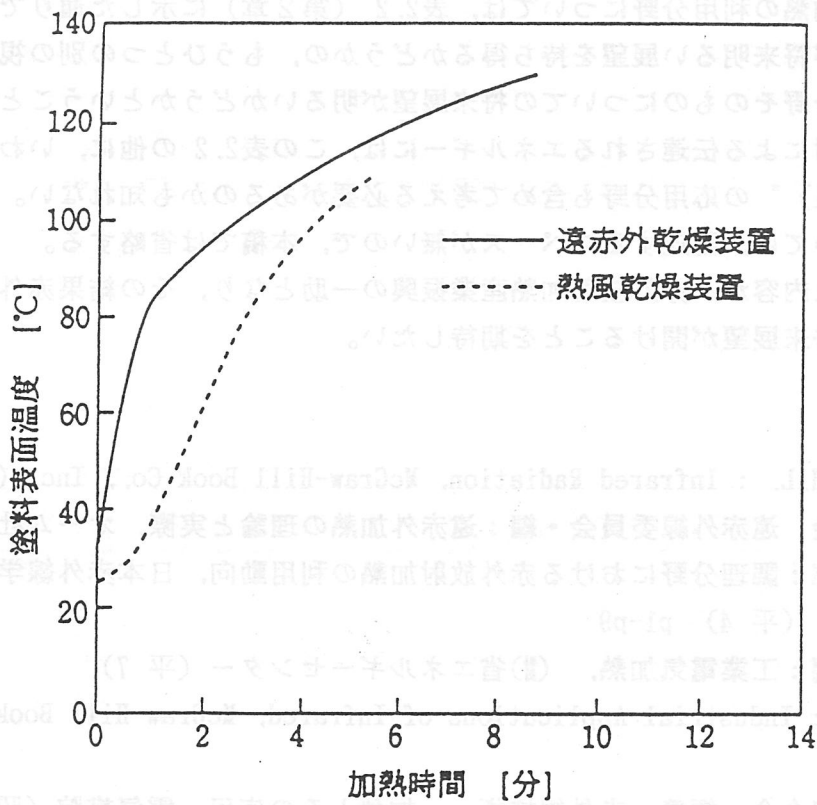


図 8.1 赤外乾燥と熱風乾燥との塗料表面温度上昇の比較

9. あとがき

最近の赤外放射加熱技術について、とりわけ放射加熱のシミュレーション、水の吸収・反射特性、放射源、放射加熱機器などについて、約 2カ年の委員会活動を集約したのが本報告書である。委員各位には多忙な中を執筆して頂いたことに対して謝意を表する次第であります。未解決の問題については新たに発足する次期の赤外線関係研究調査委員会に委ねることにしたい。

おわりに、見学会において種々ご高配頂いた中部電力(株)技術開発本部、ならびに同電気利用技術研究所の関係各位には、厚くお礼申し上げます。次第であります。

(松井 松長)

研究調査委員会報告書の著作権について

本報告書の著作権は(社)照明学会に帰属します。

複写をされる方に

本誌に掲載された著作物は、政令が指定した図書館で行うコピーサービスや、教育機関で教授者が講義に利用する複写をする場合等、著作権法で認められた例外を除き、著作権者に無断で複写すると違法になります。

