

JIER-034

研究調査報告書

赤外放射加熱技術の展望

平成 5 年 1 2 月

社団法人 照明学会

赤外放射加熱技術研究調査委員会

目 次

1	序章		
1. 1	まえがき	(松井松長)	1
1. 2	委員会の構成および活動状況		
1. 3	赤外放射加熱技術開発の経緯	(森田政明)	5
2	赤外放射の基礎法則		
2. 1	波長領域	(玉重繁良)	9
2. 2	放射と吸収		
2. 3	黒体放射		
2. 4	実在する物質からの赤外放射	(谷治 環)	11
2. 5	放射パワーの伝達		
2. 5. 1	伝導		
2. 5. 2	対流		
2. 5. 3	放射		
2. 6	赤外域における水のランベルト吸収係数	(市川真人)	15
2. 6. 1	薄層水の赤外透過率測定上の問題点		
2. 6. 2	常温水のランベルト吸収係数, Lの分光特性		
3	赤外放射加熱の評価方法		
3. 1	赤外放射標準	(西 師毅)	22
3. 1. 1	分光放射パワー標準		
3. 1. 1. 1	黒体放射		
3. 1. 1. 2	シンクロトロン放射		
3. 1. 2	標準検出器		
3. 1. 2. 1	熱型検出器		
3. 1. 2. 2	量子型検出器		
3. 2	赤外放射検出器	(玉重繁良)	24
3. 2. 1	赤外放射検出器の分類		
3. 2. 2	赤外放射検出器の評価方法		
3. 2. 2. 1	応答度		
3. 2. 2. 2	検出能		
3. 2. 2. 3	D*と雑音		
3. 2. 3	熱形赤外放射検出器	(大矢高義)	27

3. 2. 3. 1	焦電形素子		
3. 2. 3. 2	サーモバイル		
3. 2. 3. 3	サーミスタボロメータ		
3. 2. 3. 4	半導体繊維型赤外線センサ		
3. 2. 4	量子形赤外線放射検出器		
3. 2. 4. 1	光起電力形センサ		
3. 2. 4. 2	光導電形センサ		
3. 3	赤外放射の測定	(笹森宣文)	29
3. 3. 1	全放射の測定		
3. 3. 2	放射照度の測定		
3. 3. 3	分光放射の測定		
3. 4	放射率の測定	(笹森宣文)	31
3. 4. 1	全放射率の測定		
3. 4. 2	分光放射率の測定		
3. 5	センサーシステム		
3. 5. 1	焦電素子センサーシステム	(大矢高義)	32
3. 5. 1. 1	人体検知用焦電センサ		
3. 5. 1. 2	焦電ピジコン		
3. 5. 2	撮像デバイス	(毒島 溥)	33
3. 5. 2. 1	サーマルカメラと撮像デバイス		
3. 5. 2. 2	I R C C D		
3. 5. 2. 3	S P R I T E		
4	赤外放射加熱用放射源		
4. 1	赤外放射源	(笹森宣文)	40
4. 1. 1	赤外放射材料に求められる条件		
4. 1. 2	放射率		
4. 1. 3	放射源温度		
4. 1. 4	その他の条件		
4. 1. 5	波長別放射源		
4. 2	レーザ	(毒島 溥)	42
4. 2. 1	原理と特徴		
4. 2. 2	レーザの種類		
4. 2. 3	レーザによる加熱		
4. 2. 4	レーザ加熱の特徴		

4. 2. 5	用途		
4. 3	赤外放射源の特性	(尾谷 賢)	44
4. 3. 1	天然物の遠赤外放射特性		
4. 3. 1. 1	はじめに		
4. 3. 1. 2	試料及び試験方法		
4. 3. 1. 3	結果及び考察		
4. 3. 1. 3. 1	シリカを主成分とする鉱物の放射特性		
4. 3. 1. 3. 2	アルミノ珪酸塩鉱物の放射特性		
4. 3. 1. 3. 3	カルシウム, マグネシウム系鉱物の放射特性		
4. 3. 1. 3. 4	シリカーマグネシア系鉱物の放射特性		
4. 3. 1. 3. 5	その他の鉱物及び焼成物の放射特性		
4. 3. 2	溶射法による遠赤外放射体の特性と暖房器への応用		
4. 3. 2. 1	はじめに		
4. 3. 2. 2	試料及び試験方法		
4. 3. 2. 3	結果と考察		
4. 3. 2. 3. 1	放射特性		
4. 3. 2. 3. 2	暖房器への応用		
5	赤外放射加熱と他の加熱方法との比較		
5. 1	赤外放射加熱の基本的な特性	(大槻 操)	67
5. 1. 1	遠赤外加熱の利点		
5. 1. 2	欠点		
5. 2	応用事例にみる赤外放射加熱と他の方法による加熱特性・効果の比較	(中野幸夫、大槻 操)	68
5. 2. 1	塗装乾燥		
5. 2. 2	食品加工		
5. 2. 3	サウナ		
6	赤外放射加熱の産業応用	(安坂耕一、横内洋文)	75
6. 1	機械工業	(笹森宣文)	77
6. 1. 1	自動車塗装乾燥		
6. 2	電気・電子工業		
6. 2. 1	はんだりフロー装置		
6. 2. 2	各種材料の急速加熱		
6. 3	製紙・繊維工業	(安坂耕一)	79

6. 3. 1	布地の捺染（プリント）工程への適用		
6. 3. 2	製紙工程への応用		
6. 3. 3	オフセット印刷への応用		
6. 4	化学工業	（安坂耕一）	81
6. 4. 1	プラスチック加工への応用		
6. 4. 2	ゴムシートの加熱		
6. 4. 3	塩ビシート上のスクリーン印刷（白色インキ）の乾燥		
6. 4. 4	PETシートにシリコンゴムコーティング		
6. 4. 5	各種樹脂板の加熱		
6. 5	食品工業	（米田達雄）	83
6. 5. 1	真空乾燥における赤外放射加熱		
6. 5. 2	送風乾燥における赤外放射加熱		
6. 5. 3	加熱処理における赤外放射の応用		
6. 5. 4	焙焼における赤外放射の応用		
6. 5. 5	フライ食品の加熱		
6. 6	海外における赤外線加熱の応用例	（中野幸夫）	89
6. 6. 1	赤外放射製紙乾燥システム		
6. 6. 2	赤外放射によるベニヤ板乾燥システム		
6. 6. 3	紛体塗装乾燥システム		
6. 6. 4	自動車ボディ高品位塗装乾燥システム		
6. 6. 5	自動車修理工場用赤外放射スポット塗装乾燥システム		
7	赤外放射加熱の民生応用	（高木健起、吉井嘉寿憲、森田政明）	115
7. 1	民生用に使用されている赤外放射源		
7. 2	暖房用放射源		
7. 3	調理用放射源		
7. 4	その他の分野で使用されている赤外放射源		
7. 5	おわりに		
8	赤外放射加熱の市場動向	（安坂耕一、米田達雄、中野幸夫）	127
8. 1	日本の動向		
8. 2	欧米の動向		
8. 3	用途別市場動向		
8. 3. 1	塗装乾燥等		
8. 3. 2	食品等		

8. 3. 3	その他		
8. 4	今後の見通し		
9	赤外放射の非加熱効果に対する科学的アプローチ		
9. 1	赤外放射の作用と非加熱効果	(河本康太郎)	131
9. 1. 1	電磁波と光子(光子)のエネルギー		
9. 1. 2	光子のエネルギーから見た赤外放射の作用		
9. 1. 3	遠赤外放射の非熱作用		
9. 1. 4	水分子における水素結合の作用と遠赤外放射		
9. 2	低温・常温遠赤外放射利用の研究動向	(森田政明)	137
9. 2. 1	遠赤外放射の生体に対する効果の例		
9. 2. 2	遠赤外放射源としてセラミックスを衣服等に使用した効果の例		
9. 2. 3	遠赤外放射の照射の特殊効果の例		
9. 2. 4	調理に対する遠赤外放射の利用例		
9. 2. 5	加熱・乾燥への応用例		
9. 3	非熱効果検出に関する研究動向	(高橋恭介)	141
9. 3. 1	はじめに		
9. 3. 2	非熱効果の経験的検証		
9. 3. 3	生体内部状況を模した酵素系での研究		
9. 3. 4	常温での微弱遠赤外線照射による非熱効果の水系での検出		
9. 3. 5	その他の研究とまとめ		
10	赤外放射加熱の今後の見通し		
10. 1	技術的見通し	(森田政明、中野幸夫)	152
10. 1. 1	システム化技術		
10. 1. 2	シミュレーション技術		
10. 2	経済的見通し	(河本康太郎)	154
10. 2. 1	エネルギーコストの観点から		
10. 2. 2	電力エネルギー-利用赤外放射加熱技術の特徴		
10. 3	おわりに		
11	あとがき	(松井松長)	156

1 序 章

1. 1 まえがき

赤外線による加熱は、古くて新しい加熱技術である。それは先史時代から天日乾燥や焚き火による加熱として利用されてきた。しかし、これらは赤外放射を意識したものではない。下ってW. ハーシェル以降の赤外放射の加熱エネルギーとしての積極的な利用は、19世紀後半の熱放射理論の確立期を経た後の今世紀に入ってからのことである。中でも1938年の米フォード社における塗装乾燥への赤外放射の応用は特筆事項であり、我が国への導入は大戦後の1940年代である。その後1980年代の赤外線産業の発展期を経て現在に至っている(1.2参照) 照明学会においては、内外の赤外加熱業界の現状を調査すると共に、技術開発の動向を把握するために、平成2年7月に赤外放射加熱研究調査委員会を発足させて調査研究を進めてきた。

本報告書は、平成5年3月までの2年10カ月にわたる委員会の活動成果をまとめたもので、赤外放射の基礎理論、放射加熱の評価法、加熱用放射源、放射加熱の方法、各種産業応用、民生応用、内外の市場動向など全11章で構成されている。

1. 2 委員会の構成および活動状況

委員会の構成は次の通りであって、委員長1、副委員長1、幹事4、委員16の計22名である。

「赤外放射加熱技術研究調査委員会」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)研究技術本部研究所)
幹事	安坂 耕一	((株)ジャード・技術センター)
同	玉重 繁良	(岡山職業訓練短期大学校電子・情報技術科)
同	中野 幸夫	((財)電力中央研究所狛江研究所)
同	谷治 環	(埼玉大学総合情報処理センター)
委員	市川 真人	(日本電熱協会、名古屋大学名誉教授)
同	西 師毅	(工業技術院電子技術総合研究所)
同	重原 敏之	(北陸電力(株)技術研究所) 平成4年4月から
同	大槻 操	(古河電気工業(株)情報通信事業本部)
同	大矢 高義	(竹中エンジニアリング(株)新商品開発部)
同	笹森 宣文	(東京都立工業技術センター光音部)

同	高橋 恭介	(東海大学工学部)
同	高木 健起	(中国電力(株)技術研究センター) 平成4年4月から
同	毒島 薄	(昭和光機製造(株))
同	宮尾 亘	(東京工科大学工学部)
同	森田 政明	(松下電器産業(株)照明研究所)
同	横内 洋文	((株)四国総合研究所バイオ・新素材研究部)
同	吉井 嘉寿憲	(松下寿電子工業(株)坂出事業部)
同	米田 達雄	(広島県立食品工業技術センター)
同	尾谷 賢	(北海道立工業試験場資源エネルギー部)

途中退任

委員	伊藤 和喜	(元工業技術院電子技術総合研究所)
同	大塚 弘真	(北陸電力(株)技術研究所)
同	中村 重七	(中国電力(株)技術研究センター)

委員会の開催回数は12回で、審議経過は下記の通りである。

委員会経過 (開催地の記入がないのはすべて東京)

第1回委員会 (平成2年9月18日(火))

委員会発足趣旨説明。委員会の運営方針の審議。話題提供「赤外線による古文化財等の文字、パターンの識別。

第2回委員会 (平成2年12月13日(木))

学会誌「遠赤外放射」特集号、「赤外加熱技術の開発とその経緯」「赤外線応用技術」などの紹介と説明。公開研究会開催について。

第3回委員会 (平成3年3月20日(水)) (財)電力中央研究所狛江研究所)

学会総合提出の事業報告書および次年度計画案について。北海道工試における赤外加熱関連の研究紹介。話題提供「赤外放射による食品殺菌の工業化例 (UIE代11回コンgres (スペイン) より)。

第4回委員会 (平成4年5月31日(金)) 奈良国立文化財研究所)

学会総会報告。脱臭機能を有する多機能発熱素子の紹介。話題提供「平城宮跡ほかで出土した埋蔵文化財のX線、赤外線による鑑定」、「遠赤外放射体の分光放射特性とエネルギーの分光分布特性について」。

第5回委員会 (平成3年9月17日(火))

公開研究会の開催について。話題提供「遠赤外線ヒータの性能評価ならびに柿の乾燥、電気式フライヤー (揚げかまぼこ用) への応用例」、

「赤外画像装置による建物外壁診断技術の現状と課題」。

第6回委員会（平成3年12月5日(木)）

三学会合同の定例公開研究会の開催について。話題提供「遠赤外線による非熱効果」。

第7回委員会（平成4年3月4日(水)）

学会総会提出の事業報告書および次年度計画案について。委員会としての重点テーマ設定。前期委員会の報告書内容の説明。話題提供「パッシブ赤外線センサー」について。

第8回委員会（平成4年6月10日(水)）

学会からの連絡事項（通常総会、全国大会）。話題提供「放射冷暖房の現状と課題」、「遠赤外加熱の特徴と応用」。

第9回委員会（平成4年8月27日(木)北海道立工業試験場）

学会からの連絡事項（東京支部大会、国際シンポジウム（平成6年）、研究助成など）。平成5年2月の公開研究会について。研究施設紹介（道工試、北電技研）。

第10回委員会（平成4年12月11日(金)）

学会論文賞、研究奨励賞について。部門運営会議の報告。委員会開催案内の時期。本委員会報告書の件。環太平洋照明会議について。UIE（国際電熱連合）第12回大会の発表論文紹介。海外電力会社の赤外放射加熱の研究状況。

第11回委員会（平成5年3月12日(金)）

学会からの連絡事項（部門運営会議、会費改訂案、全国大会）。次期新設委員会（赤外関係）。公開研究会開催の件。委員会報告書の作成要項。

第12回委員会（平成5年6月3日(木)）(株)四国総合研究所

本委員会の報告書原稿の執筆、編集について。学会からの連絡事項（通常総会議案、その他）。

本委員会の設置期間中に開催した研究会は5回、見学会は4回で、その概要は次の通りである。

研究会の開催

第1回研究会（東京、科学技術館第2会議室）

平成2年12月13日(木)、4件

- ・遠赤外放射による水の吸収率と浸透深さの分光特性（市川）
- ・蒸発過程を考慮した赤外線加熱過程の定量的検討（宮永、中野）
- ・水平線付近の赤外放射分布（松井、玉重）

- ・近赤外分光による食品の品質評価（達林）

第2回研究会（東京、機械振興会館）

平成3年2月8日（金）、4件

（電気学会、日本赤外線学会と共催）

- ・赤外放射標準に関する計測（長坂、伊藤）
- ・温度補正を行った分光放射率の測定（笹森、山本）
- ・近赤外光を用いた生体計測法（田村、外4名）
- ・放射光を用いた赤外分光研究（難波）

第3回研究会（東京、機械振興会館）

平成3年12月5日（木）、4件

- ・セラミックス高放射率赤外放射材料とその評価（高嶋）
- ・脱臭機能つき赤外線ランプの家具調こたつへの応用（吉井、梶、西野）
- ・遠赤外線による塗装膜乾燥過程の定量的検討（宮永、中野）
- ・遠赤外分光放射照度の測定の諸問題（中川）

第4回研究会（東京、機械振興会館）

平成4年2月7日（金）、5件

（電気学会、日本赤外線学会と共催）

- ・Ge:Ga遠赤外線検出器の非線形感度（広本）
- ・10 μ m帯HgCdTe結晶の現況と動向（佐賀）
- ・人工衛星搭載オゾン観測赤外センサ（石垣、他）
- ・ミリ波天文学からサブミリ波天文学へ（野口、稲谷）
- ・赤外画像装置による異常診断（宮川）

第5回研究会（東京、機械振興会館）

平成5年2月5日（金）、4件

（電気学会、日本赤外線学会と共催）

- ・非加熱物の化学的变化を考慮した赤外線加熱シミュレーション（宮永、大沼）
- ・新しい赤外線技術による地球環境観測（青木）
- ・赤外線撮像装置とその構成要素の評価方法（増谷）
- ・サブミリ波技術の動向（坂井）

見学会の開催

第1回見学会（平成3年3月20日（水）、東京）

（財）電力中央研究所狛江研究所

第2回見学会（平成3年5月31日（金）、奈良）

奈良国立文化財研究所発掘調査部、および同平城宮跡資料館
第3回見学会（平成4年8月27日（木）、28日（金）、札幌）

北海道立工業試験場、北海道電力（株）総合研究所、北海道立
食品加工研究センター

第4回見学会（平成5年6月4日（金）高松、ほか）

（株）四国総合研究所

工業技術院四国工業技術試験所

（株）タダノ

石丸製麺（株）工場

（松井 松長）

1. 3 赤外放射加熱技術開発の経緯

（1）赤外放射加熱技術の発展の経緯について

アメリカにおいてはすでに昭和13年にフォード社において自動車の車体の塗装の焼き付けに赤外線が使用されたとの報告があり、戦後この技術がアメリカからわが国に導入された。わが国の赤外放射加熱技術は昭和23年頃から始まったものと考えられる。その後約10年間にわたって赤外放射源、測定方法、利用方法など各分野について活発に研究され、この間多くの成果がえられ、実用技術として定着した。

当時高周波誘導加熱の技術も利用が始まっており、両者が新しい加熱の方法として盛んに利用された。赤外放射は物体の表面近傍で吸収されるので、表面塗装の乾燥や焼き付けに適しており、高周波誘導加熱は物体の内部で発熱するので固体全体の加熱や乾燥に適している。この特徴が理解され、徐々に両者の特徴を生かした用途に限定使用されるようになっていった。

当時は電力の需給が逼迫しており、今日と比べ様の無いほど貴重なエネルギーであった。当時の塗料の乾燥手段としては天日乾燥が主であり、ときには燃焼による高温空気が使用されるなどに限られていた。この中で赤外放射乾燥・焼付け・加熱が利用されるようになったのはその優れた効果にあり、貴重な電気エネルギーを使用する価値を認めたことであると言えよう。その代表例として従来の天日乾燥では24時間を要した塗装の乾燥が250Wの赤外線電球2000個を使用した乾燥炉では4分間で可能であると言われている。

（2）赤外放射源について

赤外放射源としては、蒸気ヒータ、ニクロムヒータや炭化珪素発熱体などを

使用していたがやがて反射鏡内蔵のR型の電球が中心になった。このほか、初期には従来の一般電球の型式のS型透明電球に金属製反射鏡を組み合わせて使用する形式のものもあった。また1960年代になって石英管型赤外線電球が実用化され、高密度照射の可能性と併せて使用が広がった。

赤外線電球の特性については昭和27年に日本工業規格JISC-7514が制定され、その後大幅改訂され石英管型赤外線電球が追加された。最も近い見直しは1985年である。

赤外線電球のJIS規格の概要

- ・電球の容量 : R型 125W、250W、375W、
: 石英管型 500W、1000W
- ・電球のフィラメント温度 : 2300K-2500K
- ・放射効率 : 125Wで64%以上、500Wで75%以上
- ・寿命 : 5000時間以上
- ・放射配光 : 放射照度分布の勾配を規定

1970年代に長波長の赤外放射を利用する遠赤外ヒータが利用されるようになった。この理由として考えられるのは、電気に比べエネルギー価格の安価な天然ガスとか石油を使用して赤外線を発生するためには、電球の様に高温の放射体が技術的に困難で、どうしても数100K程度の温度にせざるを得なかった。この放射体の発生する長波長の赤外放射に適した塗料や加熱処理技術が発展し、遠赤外放射が実用化したものと考えられる。これで効果があがったのは長波長の赤外放射で硬化する塗料が開発されたことによる。

比較的低温のヒータを使用した赤外放射加熱技術はすでに昭和30年代に開発検討されており、インフロッドと言う商品名で主として繊維の捺染工程につづく染料の乾燥に使われていた。しかしエネルギーコストなどの理由で高温蒸気乾燥などに替わってしまったものと考えられる。

1980年代には遠赤外放射源を使用した加熱技術の開発が活発に進められ、各種の講習会、研究会が開催された。製造メーカーの中には特殊な効果を強調した表現もあり、消費者から疑問や非難が出るにおよび通産省の主導で新しい研究会が企画され、統一した基準によって普及活動を進めることになった。

遠赤外放射の照射においては、単なる加熱効果ではなく独特の効果があるといわれており、これが放射の非熱効果と言われている。実験検討の段階では色々興味ある現象が観察されていることが報告されているが定量的、定性的なものとしての報告が少ない。

(3) 塗料について

赤外放射加熱・乾燥・焼き付けが普及するにつれ、赤外放射焼き付けに適した特性のメラミン樹脂塗料が開発され、塗膜表面の硬い塗装が比較的容易に出来るようになった。この塗料の開発は、当時発展いちぢるしかつた電気製品、自動車などの金属表面をいりどり、防錆と美観との両面で効果をあげた。今日では建材、金属素材、など表面が直接外部に位置するものは殆ど赤外放射により処理されているといつても過言ではない。

塗料の構成の研究も進み、有機溶剤を必要としたものが水性の塗料に、また粉末直接塗装にと多様化するとともに有機溶剤を除いて環境に対する好ましくない作用を除く様になってきた。

(4) 塗装手段について

塗装手段も、初期の方法として刷毛塗りが中心であつたのが、スプレーガン吹き付け塗装になり、静電塗装方法の開発により従来の方法では塗装が困難であつた部位まで塗装ができ、かつ無駄になる塗料の量が少なくなり、効率の向上、環境の浄化につながつた。

(5) 赤外放射加熱装置の設計について

赤外放射加熱の理論は一般の物理学の原理に基づき構成されている。特徴があるのは表面の赤外放射吸収率、全表面の放射率が関与することで、赤外放射加熱の限界として一般化されている。

赤外放射の加熱要素として、電球、ユニット、バンク、トンネル、など規模と用途に応じて名称が与えられ、それぞれの放射照度が指定されれば必要赤外線電球の個数、照射距離などが設計できる様になっている。現在ではこれらの定数を基準化し、ノモグラフや表から容易に算出できる。

赤外放射装置の使用目的として、加熱、乾燥、焼き付けの各項について少し異なつた常数を使用する必要があるが、これらについては各種ハンドブックなどに詳細に与えられている。

参考文献

単行本

- ・加藤信義編：赤外線技術、電気書院(1956)
- ・Toison, M. : Infrared and Its Thermal Application, Philips Technical Library(1964)

特集雑誌

- ・松田長三郎編：電気評論39.6, 7月合併号(1951)

学会誌など報文

- ・ 東 堯：赤外線乾燥(I)(II)、照学誌、34.117.144(1950)
- ・ 有馬文次：赤外線の乾燥について、電学誌、70.177.(1956)
- ・ 岡田喜義、佐土根範次：赤外線電球による輻射加熱および乾燥の基礎的研究、電試彙報、14.327,419(1956)
- ・ 岡田喜義、佐土根範次：赤外線電球の二三の特性について、照学誌、35.16.(1951)
- ・ 浅野澄忠：SiC発熱体による赤外線ユニットについて、照学誌、35.137.(1951)
- ・ 東 堯：赤外線乾燥について、電学誌、71.529.(1951)
- ・ 加藤信義、竹屋芳夫：赤外線加熱における計算図表、照学誌、36.287.(1952)
- ・ 佐土根範次他：赤外線乾燥の煙草工業への応用、電試彙報、17.81.(1959)
- ・ 岡田喜義、佐土根範次：赤外線電球の全放射束を球形光束計で測定することの可否について、照学誌、37,213,(1953)
- ・ 藤井克人他：石英管型赤外線電球、照学誌、48,110,(1964)
- ・ 森田政明：赤外線加熱技術の開発とその経緯、照学誌、73.267.(1989)
- ・ 照明学会編：照明のデータブック、オーム社(1963)
- ・ 照明学会編：新編 照明のデータブック、オーム社(1968)
- ・ 照明学会編：新編 照明ハンドブック、オーム社(1978)
- ・ 照明学会編：ライティングハンドブック、オーム社(1987)

(森田政明)

2 赤外放射の基礎法則

2. 1 波長領域

赤外線は可視光の長波長端から電波領域の短波長端約 1 mm までの広い領域に位置する不可視光である。さらに赤外線は通常、近赤外、中赤外、遠赤外に分ける。しかし、この分け方は理化学と工学で大きく異なり、さらに同じ分野でも異なっている。また 1988 年をピークとして遠赤外線応用製品が注目された時、その波長区分についても議論の対象となり、当学会研究会及び、委員会（遠赤外線セラミックス産業対策調査研究）が設けられ、赤外線の波長区分を明確にすべく審議がなされてきた。当委員会でも継続して審議してきたが、結論は出ていない。その際に提出された区分波長例を図 2. 1 に示す^{1, 2)}。

2. 2 放射と吸収

放射エネルギーが物質表面に入射すると、その一部 ρ は反射され、一部 α は吸収され、残り τ は透過する。これらの量の間には、エネルギー保存則から次式が成立する。

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (2.1)$$

ここで、キルヒホッフの法則、すなわち物質の放射発散度 M' ($= \epsilon \sigma T^4$) と吸収率 α の比は一定で、同じ温度の黒体の放射発散度 M ($= \sigma T^4$) に等しいという関係から、次式によって $\epsilon = \alpha$ が成立する。

$$M' / \alpha = \epsilon \sigma T^4 / \alpha = M = \sigma T^4 \quad (2.2)$$

これらの式から $\epsilon = 1 - \rho - \tau$ の関係が得られる。

2. 3 黒体放射

黒体はあらゆる温度放射体の性能を論じるときの標準となる基礎概念であり、その放射の分光分布はプランクによって理論的に証明されたものである。黒体は入射光を完全に吸収し、放射する理想的な物体である。

(1) プランクの分布則

プランクは黒体の分光放射発散度 M_λ が次式で与えられることを示した。

$$M_\lambda = \frac{2\pi h C_2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{ch/\lambda kT} - 1} = \frac{C_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1} \quad [W \cdot cm^{-2} \cdot \mu m^{-1}] \quad (2.3)$$

ここで、 M_λ は分光放射発散度、 λ は波長 [μm]、 h はプランク定数、 T は絶対温度、 k はボルツマン定数、 c は光速、 c_1 は第一放射定数 ($2\pi h c^2$)、 c_2 は第二放射定数 (ch/k) である。

図2. 2はいろいろな温度における黒体の分光放射発散度を示している。

(2) ステファン-ボルツマンの法則

式(2.3)を全波長について積分すると、放射発散度Mと絶対温度との関係を表す次式が得られる。

$$M = \frac{2\pi^5 k^4 T^4}{15c^3 h^3} = \sigma T^4 \quad [\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}] \quad (2.4)$$

ここで、 σ はステファン-ボルツマン定数で、 $5.6697 \times 10^{-12} [\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}]$ の値を持つ、

(3) ウィーンの変位則

絶対温度Tと黒体の放射発散度が最大となる波長 λ_m との積が一定であるという関係を示したのがウィーンの変位則である。次式で与えられる。

$$\lambda_m T = b \quad (2.5)$$

ここで、 b はウィーンの変位定数で、 $2897.8 [\mu\text{m} \cdot \text{K}]$ の値を持つ。

(4) 放射光量子に関する式

黒体放射の分光量子発散度 M_q, λ は、式(2.3)を光量子エネルギー $h\nu = hc/\lambda$ で割れば求められ、次式のようになる。

$$M_q, \lambda = \frac{2\pi c}{\lambda^4} \frac{1}{e^{ch/\lambda kT} - 1} = \frac{1.88365 \times 10^{23}}{\lambda^4 (e^{ch/\lambda kT} - 1)} \quad [\text{光量子} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}] \quad (2.6)$$

また、光量子発散度 M_q に関するステファン-ボルツマンの法則は次式で示される。

$$\begin{aligned} M_q &= \frac{1}{c^2} \times \frac{2\pi^3}{25.79436} \times 1.88365 \times 10^{23} \\ &= 1.52041 \times 10^{11} \times T^3 \quad [\text{光量子} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}] \quad (2.7) \end{aligned}$$

さらに絶対温度Tと最大の分光量子発散度を与える波長 $\lambda_{m'}$ との積が一定値となるウィーンの変位則は次式で与えられる。

$$\lambda_{m'} T = c_2 / 3.92069 = 3669.73 \quad [\mu\text{m} \cdot \text{K}] \quad (2.8)$$

参考文献

- 1) 松井松長, 玉重繁良: 遠赤外線とその応用に関する調査, 福山大学工学部紀要, 第10号, pp19~21 (1988)。
- 2) 河本康太郎: 遠赤外放射の概念と区分波長, 照明学会誌, Vol.74, No.12, pp.9~13 (1990)。

- 3) 赤外線技術研究会編：赤外線工学，オーム社，pp.1～22（1991）。
- 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，pp.2～19（1991）。
- 5) R.D.Hudson Jr. : Infrared System Engineering, Wiley-Interscience, 1969。
- 6) W.L.Wolfe and J.G.Zissis : The Infrared Handbook, Office of Naval Research (1978) 。

（玉重繁良）

2. 4 実在する物質からの赤外放射

黒体という理想的な物質からの赤外放射については、前節に述べたとおりである。しかし、実際には厳密な意味での黒体は存在せず、物質はその材料や形状によって決まる固有の赤外放射特性を有する。本説では実際に存在する物質からの赤外放射特性について概説する。

実在する物質からの放射を表わす式は、プランクの放射式にその物質の放射率 ε を乗じた形となる。また、全放射エネルギーを表わすステファン・ボルツマンの式も同様である。実際の放射率は波長により異なるスペクトルを示し、扱いは複雑になるが、全放射率を用いれば、黒体について述べた事項は原則的に、実際の物質にも当てはまると考えてよい。

物質が放射に関してその周囲と熱平衡状態にあるとき、 α を吸収率、 ρ を反射率、 τ を透過率とした場合、エネルギー保存の法則から、 $\alpha + \rho + \tau = 1$ である。キルヒホッフの法則から、黒体は $\rho = \tau = 0$ ， $\alpha = 1$ であり、それ以外の物質では $\alpha = 1 - \rho - \tau$ である。また、放射率 $\varepsilon = \alpha$ であるから、 $\varepsilon = 1 - \rho - \tau$ でもある。

一般に、不透明材料のバルク物質の透過率は小さいことから、その放射率は物質の形状、特に表面状態に依存する反射率 ρ により決定される。従って、同じ物質でも表面が理想的な鏡面 ($\rho = 0$) ならばその放射率は 0 であり、逆に、表面が十分な粗面ならば放射率は 1 に近づく。

実際に赤外放射を得るためには、直接その放射源を加熱して得る方法と、熱媒体を通して二次的に赤外放射を発生させる方法がある。物質からの赤外放射は、分子振動や結晶の格子振動に起因する電磁波である。物質のスペクトル特性は固体と気体では異なり、固体では多くの場合、可視から赤外にわたる連続スペクトルとなる。また、加熱された気体からの放射には可視放射がほとんどなく、その気体特有の赤外放射帯を持つ。

固体の放射源としては、白金、タングステン、ニクロム、カンタルなどの金

属の電気抵抗体が一般的である。しかし、これらの金属を直接熱した場合の放射効率はいさぎよくないことから、最近ではそれらをセラミックスの熱媒体を通して赤外放射を得る形式が開発されている。その具体例を図2.3に示す¹⁾。図中の(3)はアルミニウム金属の分光放射率特性であり、全波長域にわたって低い放射率を示している。(2)チタン酸アルミニウムのセラミックスであり、5 μ m以上の波長域で高い放射率を示している。(1)は高効率の複合セラミックスの赤外放射率特性であり、全波長域において大きな放射率を示している。

その他、種々の赤外放射材料が開発されその放射特性が測定されている。図2.4(a)は赤外放射用の分光放射輝度標準としても利用されている、SiCの分光放射率の測定結果である²⁾。また、図2.4(b)は同じSiCを使用して開発された空洞放射体の空洞部の分光放射率の測定結果である。約10 μ mまでの波長域にわたって0.98以上のフラットな特性を示しており、空洞部を利用することによりこの波長域で疑似黒体として利用できることがわかる。

2.5 放射パワーの伝達

熱エネルギーの伝達過程には伝導、対流、放射の3過程があるが、実際の伝達はこれら3種類の過程が組み合わされた状態で行なわれることが多い。本節では、この3過程について概説した後、放射パワーの伝達に於て問題となる空気による吸収について述べる。

2.5.1 伝導

伝導は、熱エネルギーが物体のある部分から他の部分へ、あるいは接触している他の物体へ、物質の移動や混合によらずに熱が伝達される方式であり、その伝達熱量 Q は次式で表される。

$$Q = \frac{\sigma}{1} A \Delta T \quad [\text{kcal/h}] \quad (2.5.1)$$

ここで、 σ ：熱伝導率 [kcal/h]， l ：伝達区間の距離 [m]， A ：伝達部分の面積 [m^2]， ΔT ：伝達区間の温度差 [$^{\circ}\text{C}$]

式(2.5.1)で、 σ は物体によって異なる定数で、数値が大きいほど伝達が大きいことを示しており、金属材料は大きな値を示し熱の良導体であり、ガラスやプラスチックのように伝導しにくいものは不良導体である。また、空気は伝導率が微小であり、断熱効果として機能することがある。

2.5.2 対流

対流は、熱エネルギーが気体又は液体のような移動可能な流体によって伝達される方式である。流体の一部が熱エネルギーを受けて膨脹し部分的に密度差が生

じて対流を起こす自然対流と、機械的操作によって強制的に対流を起こす強制対流とがある。対流の場合、流体の一部に熱エネルギーを供給する必要がある、この供給部分の伝達熱量 Q は次式で表わされる。

$$Q = a A \Delta T \quad [\text{kcal/h}] \quad (2.5.2)$$

ここで、 a ：伝熱係数 $[\text{kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}]$ ， A ：流体の接触面積 $[\text{m}^2]$ ，
 ΔT ：接触部分の温度差 $[\text{ }^\circ\text{C}]$

a は、流体の材質及び容器の形状、流体移動の仕方など種々の要因によって変化する定数である。強制的な対流を起こすことにより熱エネルギーを送り込む方法として熱風炉があり、ごく一般的な加熱炉や乾燥炉として普及している。

2.5.3 放射

周囲より高温に保たれた物体からは、空間に電磁波が放出され、この電磁波が相手方より低温の物体に直接吸収されることにより熱エネルギーが伝達されるが、この熱伝達方式を放射という。放射は熱媒体を必要とせず、空気中はもとより真空中でも伝達が可能である。放射による伝達熱量 Q は高温側と低温側の物体温度によって決まり、次式により表わされる。

$$Q = 4.88 \{ \varepsilon A (T/100)^4 - \varepsilon_0 A_0 (T_0/100)^4 \} \quad [\text{kcal/h}] \quad (2.5.3)$$

ここで、 ε ：放熱側の放射率， ε_0 ：受熱側の放射率， A ：放熱側の断面積 $[\text{m}^2]$ ， A_0 ：受熱側の断面積 $[\text{m}^2]$ ， T ：放熱側の温度 $[\text{K}]$ ，
 T_0 ：受熱側の温度 $[\text{K}]$

一般に、プラスチックや食品などの高分子物質は赤外放射を良く吸収する物質である。このような高分子物質では、分子は原子と原子の結合した構造を有し、その構造によって固有の振動形態を持つ。この振動には、分子を構成する原子間距離が変化する伸縮振動、原子間結合の方向が変化する変角振動、及びこれらの組み合わせられた振動形態がある。従って、物質を構成する原子と分子、及びその分子構造によってその物質の固有の振動数が決定される。赤外放射を高分子物質に放射するとき、放射の振動数と分子の振動数とが一致すると、一種の共鳴状態となり、放射が物質に吸収され、その分が放射パワーとして伝達される。ここでは高分子物質を例に取ったが、このことは赤外吸収物質全てに当てはまることである。

このようなエネルギー吸収は、分子中に存在する双極子と赤外放射のエネルギーとの総ご作用を介して行なわれる。従って、等極性分子である酸素 O_2 や窒素 N_2 などは振動が対称的で赤外放射にたいして不活性であり、そのエネルギーを吸収することがない。このことから、赤外放射は、酸素と窒素の混合物である空気を加熱することなく、直接物質を加熱することになり、加熱効率を更に高

めることになる。

しかし、水蒸気や炭酸ガスは極性を持つことから、赤外放射を吸収する。一般には空気中に含まれる量が少ないのでその吸収は無視されるが、距離数km～数百kmにわたる大気の測定や赤外放射の精密測定など、一部の分野では精度的にその影響は無視できないことが報告されている^{2, 3)}。水の吸収等については次節を参照願いたい。

また、赤外放射による加熱過程の定量的な検討が、宮永らによって報告されている^{4, 5)}。

参考文献

- 1) 高嶋廣夫：照明学会光放射の応用・関連計測研究会資料，AR-91-20，1991，1-9.
- 2) 中川靖夫：照明学会光放射の応用・関連計測研究会資料，AR-91-23，1991，30-39.
- 3) 中川靖夫ほか：第25回照明学会全国大会予稿集，127，1992，155.
- 4) 宮永俊之，中野幸夫：照明学会光放射の応用・関連計測研究会資料，AR-90-20，1990，11-18.
- 5) 宮永俊之，中野幸夫：照明学会光放射の応用・関連計測研究会資料，AR-91-22，1991，20-29.
- 6) 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，1991.

(谷治 環)

2.6 赤外域における水のランベルト吸収係数

1960年代になり、赤外分光光度計によって水（他、ペンキ溶剤等）試料の赤外域透過率の測定が可能となり、水厚毎の透過率スペクトル特性が公刊される様になった⁽¹⁾。そして今日でも尚国内外で公表されている。しかしその大部分は採用した窓板材の特性等、測定条件が明示されておらず、従って”物性値としての水のランベルト吸収係数”（図2.5）を正しく与えるには至っていない。此を最初に”正確に求める事”を試みたのは、寡聞ではあるが、1971年の文献⁽²⁾であったと思われる。

2.6.1 薄層水の赤外透過率測定上の問題点

(a) 窓板材の選定 水の赤外域吸収率は極めて大きい為に被測透過束は微量となり、透過率測定にあたり薄層水の厚さを規制する二枚の赤外窓板の選定如何は、測定結果のみならず、その後のランベルト値算出処理に大きく影響する。

(1) CaF₂ 下記 KRS-5 に比し水への溶解度は小さく約 1/30 (0.0017g/100gH₂O, 25°C)、又屈折率=約1.4 で水のそれに近い為水との界面での反射も小さく、5mm t, 2枚で透過率約 90%、使い易い利点がある。しかし波長約 7μmより長波で透過率は激減し始め10μm余でほぼ 0 となる為、これら長波域を含む測定は出来ない（黒体放射源の温度約700°Cで最大放射波長は約 3μm、全放射パワの約90%が含まれる波長域は 9μmに至る。従って放射源温度約 700°C以下が関心の対象となる場合には、被測領域として全く不十分である）。

(2) KRS-5 赤色透明のTlBrとTlIの混晶、有毒。KRSはドイツ語で” 溶け出し難い結晶”の意である（数字(5)によって組成が幾分異なる）が、これは潮解性の NaCl板に比しての事で、事実は使用に伴ってかなり溶解し（0.05g/100gH₂O, 室温）、1回の測定20分として3,4回も使えば表面が白濁する。従って水を挟む透過率測定の前後において、KRS-5板単体としての特性を測定確認する配慮を必要とする。又屈折率は水より大きく2.3前後、その為水との界面での反射も大きく、更に数%の吸収率も認められる⁽³⁾。透過率は 2.3mm t, 2枚で約 60%、しかし波長約 30μm以上までこの特性が維持されるので、長波域の測定が可能であり、市販品の入手も容易である。

(b) 薄い層厚の精密測定 既知厚の金属性スペーサによって二枚の窓板の間隙（水厚）d を規制出来るが、水厚を数μmと極めて薄く規制したい場合には正確さの点で極めて不十分である。しかし下記する様に光学的干渉法を利用すれば正確な測定が可能となる。

図2は薄いスペーサによって空気を挟む KRS-5 二枚を被測対象とする場合の、透過率の測定例（但し横軸は波数）であり、一定波数周期の振動波形を得る（但し、d が大きく1mmともなれば振動は消失する）（図2.6参照⁽³⁾）。同グラフ上正確な周期を求める事が出来、次式によって 正確な dを得る。 $d=1/(2 \cdot \text{波数周期})$

尚、水をセルへ入れる操作によって d が変化しない様、十分な実験手段上の配慮が必要となる。

(c) 多重反射 被測定系のセルは、図2.7に示す様に、空気、窓板、水、窓板、空気

からなる 4 界面系となり、各界面で複雑な多重反射及び透過をする。従って厚さ d の水を挟むセルの透過率測定値とランベルト吸収係数値 $L(\lambda)$ (λ は波長) との関係は、単純なものではない。この 4 重の無限級数からなる関係式は筆者等の解析によって始めて与えられた⁽³⁾。他方文献(2)では、下記のように想定し議論の前提としている。即ち、

$$\text{水を含むセルの透過率測定値} = (1-R)(1-A)\exp(-L(\lambda)d),$$

但し R はセル入射面での反射率、 A は二つの窓板での吸収率。共に未知であるが、 d_1, d_2 で測定、二測定値をわり算して此の未知係数を消去、 $d_1 - d_2$ 厚として L を求められる。

筆者等の解析式によれば、明かに上記係数項もまた d 及び λ に依存し此の議論は成立しない。そして此を線図によって簡単に実証した⁽³⁾。

更に又上記に加え、 d が薄く被測波長に接近する場合、次のような干渉現象が透過率スペクトルにみられる。

(d) セル界面における前進、後退波間の干渉現象 図 2.8 にその一例を示す。即ち同図に見る様に、 d が薄い場合、吸収率が相対的に小さい波長域では、水中の前進波と出口窓板との界面での反射後退波は位相的に干渉しあい、“無干渉を前提” とする測定期待状態 (図1) から外れたものとなる。同図で波長約 $3.5 \sim 10 \mu\text{m}$ 域は、前後の波長域に比し吸収率が相対的に小さく前進波と後退反射波との間に干渉を生じ得る。その結果、此の波長領域で d の大きい場合のセル透過率測定値の方が (同一波長で) d の小さい場合よりも大きく観測される波長域が存在する結果となっている。

以上の測定結果並び考察から、(吸収率が小さく従って) 透過率が高く出ている状態では、反射率の大きい窓板を採用している場合、干渉の影響から免れていない可能性が思われる。即ちランベルト値算出の根拠となる水セルの透過率測定データから高透過率値データ分を廃棄する必要がある事を示唆している⁽³⁾。

(e) 近、中赤外域に於ける測定 通常の赤外分光光度計は光学的零位法を動作原理とし測定波長域は $2.5 \sim 25 \mu\text{m}$ となっているのが普通である。上述は此を念頭に置いて述べた。

$0.8 \sim 2.5 \mu\text{m}$ の近、中赤外域のランベルト値を求める為にレシオ法を動作原理とするダブルモノクロメータに拠った。

中赤外の $1.3 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 域では、吸収率は前記波長域よりはるかに小さく、従って d が小さい場合には既に述べた理屈で、反射の大きい窓板 KRS-5 の場合、顕著な干渉を生じ、透過率測定値は振動波形となる。が此を逆用して此の帯域での水の屈折率を求める事に利用出来る⁽⁴⁾。適当に d を大きく選べば無干渉非振動の水セル透過率測定となり、ランベルト値算出の基礎となるデータを得る。

$0.8 \sim 1.4 \mu\text{m}$ の近赤域では更に吸収率は小さくなるが、分光計付属の石英窓板の試料入れボックス ($d=1\text{mm}$) を利用し、簡単に必要なデータを得る事が出来る。

2.6.2 常温水のランベルト吸収係数、 L の分光特性

図 2.9 は L の逆数値、浸透深さ $D (= 1/L)$ の分光特性を示したもの。尚国内 3ヶ所の水道

水及び蒸留水について変化は認められなかった（但し赤色の可視域では透過率測定値はかなり異なった）⁽⁵⁾。

引用文献

- (1) Toison M La: Infrared and its Thermal Application, Philips Tech. Library (1964) 17~19
- (2) Robertson C.W. & Williams D.: Lambert Absorption Coefficients of Water in the Infrared. J. Opt. Soc. Am., 61-10 (1971) 1316~1320
- (3) 市川真人、西岡明久: 中、遠赤外放射に対する水の吸収率と浸透深さの分光特性 照学誌 72-2 (昭63)102~108
- (4) 市川、篠藤、原田、西岡: 近、中赤外放射に対する水の浸透深さと屈折率の分光特性 照学誌 73-10 (昭64) 643~648
- (5) 市川: 遠赤外放射の水に対する浸透深さ 照学誌 74-12 (昭65)792~795
Ichikawa M.: Infrared spectra of penetration depth into water and of water refraction-index, SPIE vol.1157-Infrared Technology XV, San Diego Conf.(1989)

(市川真人)

	波長 (μm)			
	0.78	1.0	10	100
①光学技術ハンドブック (1) 山地良一 朝倉書店 (昭43)	近赤外線		遠赤外線	
②Handbuch für Beleuchtung (Bundesrepublik Deutsch- land (1975)	IR-A		IR-B	IR-C
③IEC International Electro- technical Vocabulary, Chap. 841 (1989)	short wave IR		meau w IR	long wave infrared radiation
④新版 電気工学ハンドブック 電気学会 (昭63)	近赤外放射		中赤外	遠赤外放射
⑤赤外加熱用語集 日本電熱協会 (昭63)	近赤外放射		中赤外	遠赤外放射
⑥電気専門用語(No2電気加熱) 電気学会 (平2)	近赤外放射		中赤外	遠赤外放射
⑦工業大辞典 平凡社 (昭36)	近赤外線		遠赤外線	
⑧新編 照明のデータブック オーム社 (昭43)	近赤外線		遠赤外線	
⑨IES Lighting Handbook IES of North America (1981)	near infrared		intermediate	far infrared
⑩リモートセンシング・ノート (昭50)	近赤外線		中赤外線	遠赤外線
⑪世界大百科事典 平凡社 (昭56)	近赤外線		遠赤外線	
⑫光学技術ハンドブック (2) 三石 明善 朝倉書店 (昭43)	近赤外		普通赤外	遠赤外
⑬理化学辞典 岩波書店 (昭37)	近赤外線		中間赤外	遠赤外線
⑭McGraw-Hill Encyclopedia of Science & Technology (1971)	near IR		intermediate IR	far IR
⑮Dictionary of Scientific & Technical Terms, MGH (1974)	near-infrared rad.		intermediate-infrared rad.	far-infrared radiation

(注) 以上のほか、CIE International Lighting Vocabulary, 4th Edition (1987) に、上記②の区分が示されているが、あくまで例示であるので、本図には入れなかった。

図2.1 遠赤外放射の区分波長例

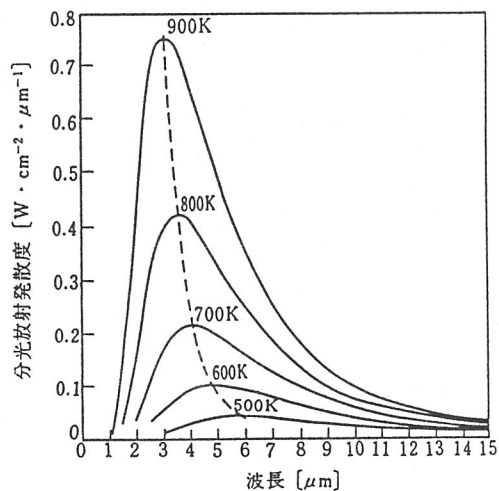


図2.2 黒体の放射発散度

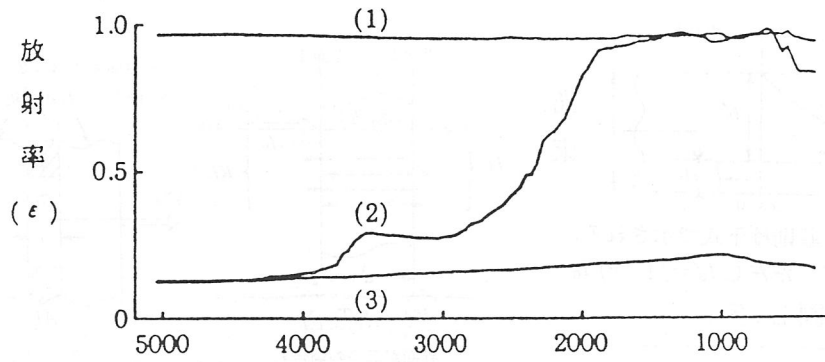
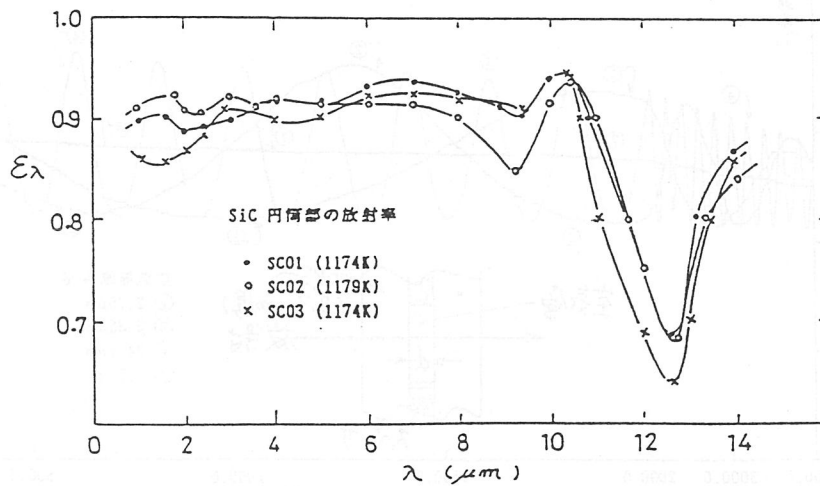
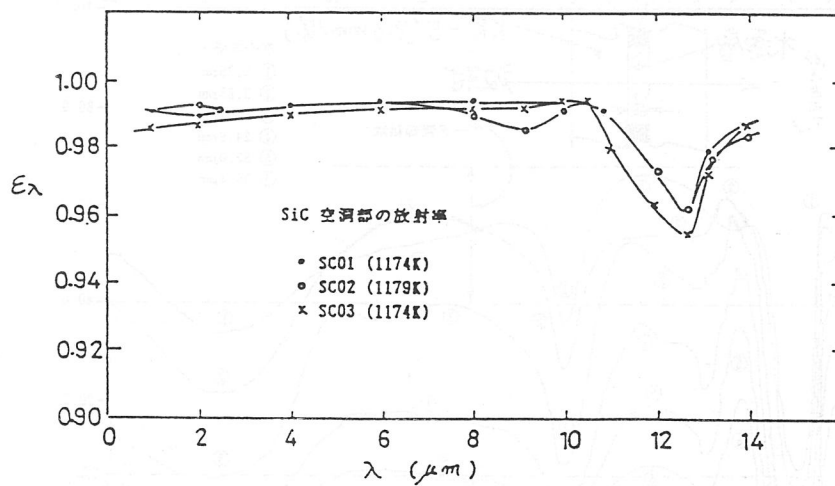


図 2.3 (1) 複合セラミックス, (2) チタン酸アルミニウム, (3) アルミニウム金属の500°Cにおける分光放射率特性

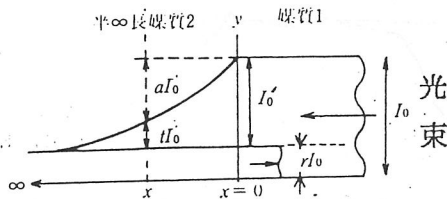


(a)



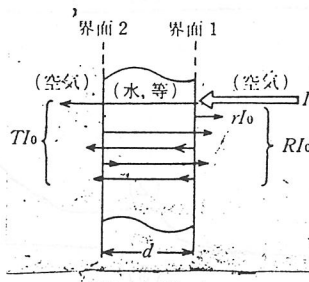
(b)

図 2.4 (a) SiC円筒部, (b) SiC空洞部における分光放射率特性

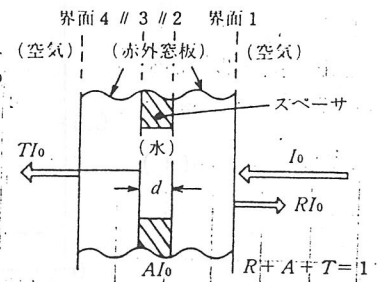


ランベルトの吸収則は下式で示される。
 $I(x) = I_0' e^{-\alpha x}$, ただし $I_0' = (1-r) I_0$

図 2.5



$R + A + T = 1$
 界面が二つの場合



$R + A + T = 1$

図 2.7

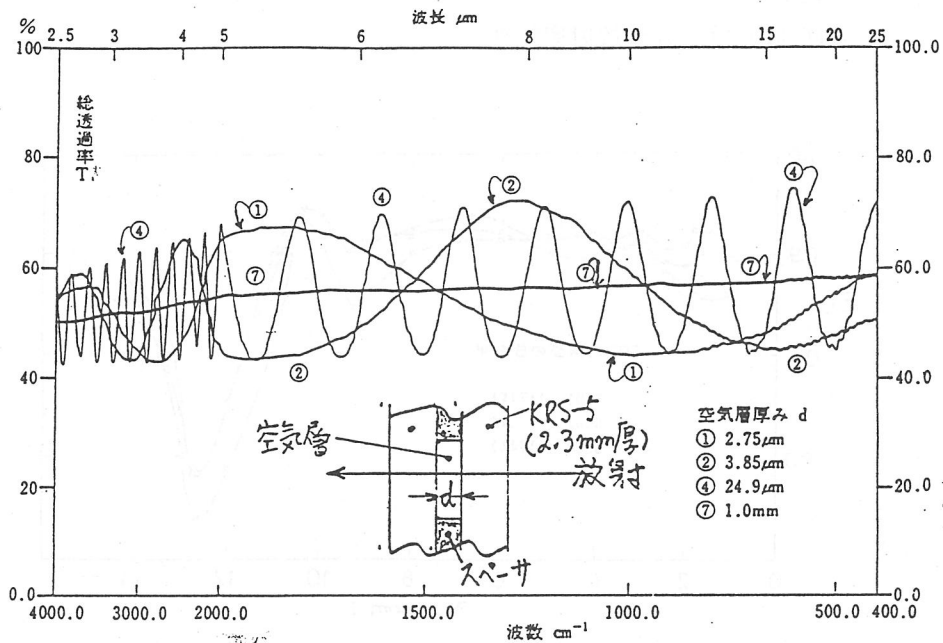


図 2.6 空気層を挟む 2 枚の KRS-5 板の分光透過率 T

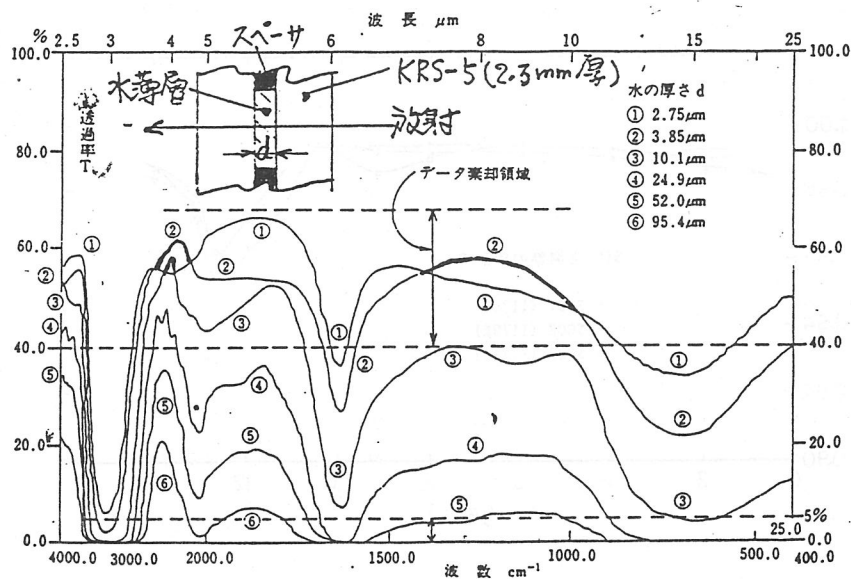


図 2.8 KRS-5 → 水薄層 (厚さ d) → KRS-5 系の透過率 T_測 の測定値

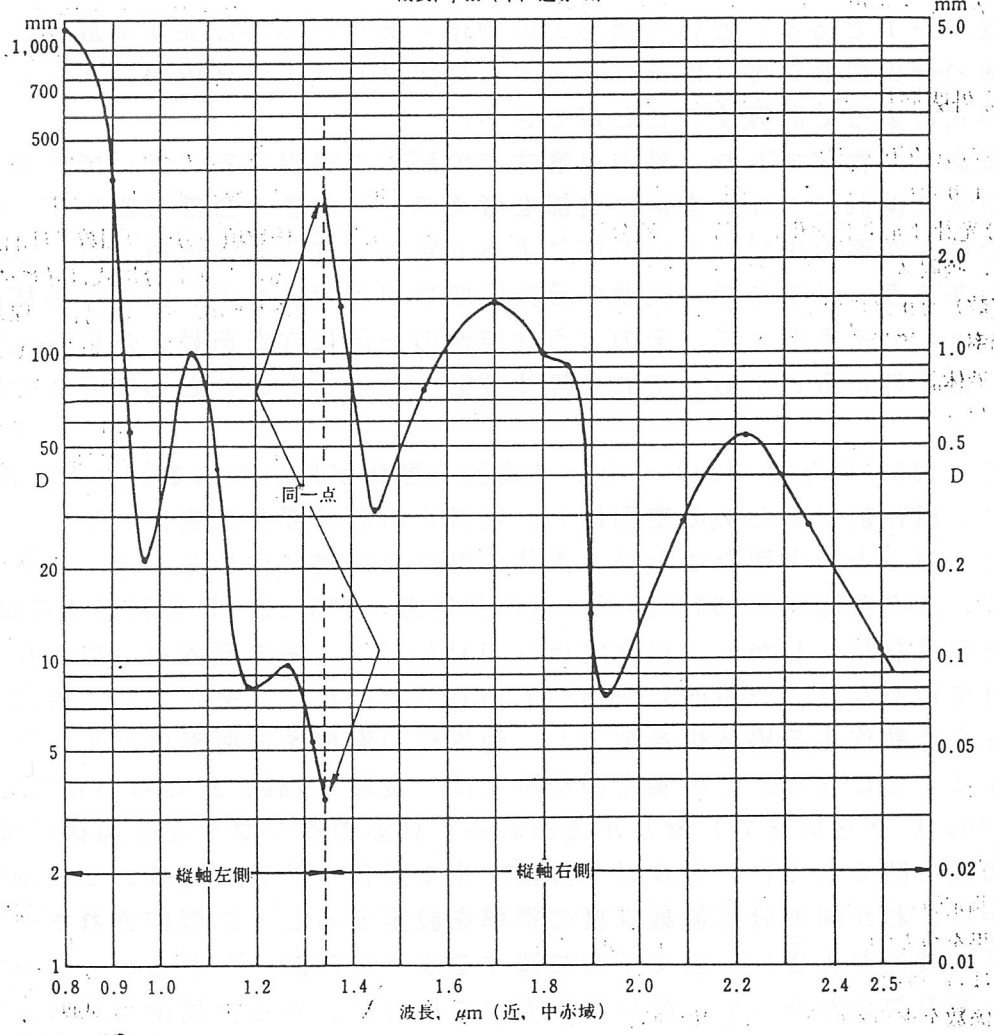
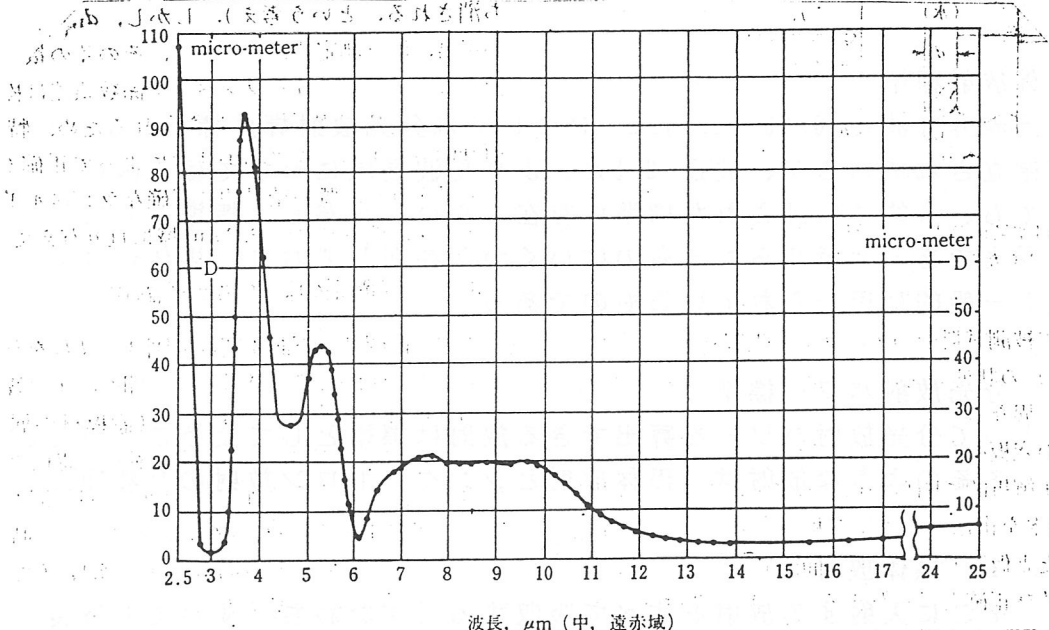


図 2.9 常温水面へ垂直入射, 水中へ浸入した光束 (パワー) が水表面値の $1/\epsilon$ となる浸透深さ $D(D=1/L)$

3 赤外放射加熱の評価方法

3.1 赤外放射標準

近紫外～近赤外（波長 $0.25\sim 2.5\mu\text{m}$ ）については分光放射輝度標準および分光放射照度標準が確立されているが、波長 $2.5\mu\text{m}$ より長波長域については、国内においても海外においても、公的に保証された標準は存在しない。ただし、標準として用いることが科学的に妥当であると考えられるものはいくつか存在しており、黒体炉はそうしたもののの中で最も一般的に用いられているものである。

3.1.1 分光放射パワー標準

理論式によって分光放射パワーを算出できる放射は標準として使うことができる。現在知られているそのような放射は、黒体放射とシンクロトロン放射の2種類である。

3.1.1.1 黒体放射

黒体とは、そこに入射する放射をすべて吸収する（すなわち、すべての波長の放射に対する吸収率が1である）という概念上の物体であり、黒体が発する放射を黒体放射と呼ぶ。黒体の分光放射輝度（または分光放射発散度）は、黒体の温度が与えられれば、プランクの式によって計算することができる。

黒体は概念上の物体であり、厳密な意味での黒体を実現することはできない。ところで、放射が外に漏れてこない空洞の内部を考えると、内壁の各部の温度が一樣であるような状況では、空洞の中ではその温度によって定義される黒体放射に近いものが飛び交っているであろう。（ここで、内壁の分光吸収率が1であれば、完璧な黒体放射であると考えられる。）そう考えて、そのような空洞の一部に穴をあけ、内部を飛び交っている放射の一部を外に取り出し、それを黒体放射（に近いもの）として使っているわけである。

一般には、1000 K とか 2000 K という高温の黒体が用いられる。この場合、黒体は（正確には、黒体放射のための空洞は）、電気炉の芯の部分に置かれる。

黒体放射を使う上で大切なことは、黒体の温度を正確に決めることである。温度定点（たとえば、金の凝固点：1337.33 K、水の三重点：273.16 K）を利用する場合には温度測定の必要はない。しかし、温度定点は 1357.77 K（銅の凝固点）以上にはないし、数も限られているなど、一般的に使いやすいものではない。そこで、一般的には、所望の温度で安定に動作する黒体炉を製作し、動作時の温度を放射温度計または光高温計などで測定することになる。この場合の空洞には、金属（1600 K ぐらいまで）、グラファイト（2700 K ぐらいまで）などが使われる。高温のグラファイト黒体炉は、グラファイトの消耗を防ぐために、アルゴン雰囲気中で動作させる。図3.1に示すグラファイト黒体炉は、わが国の分光放射輝度の標準を設定するときに製作されたものである¹⁾。

黒体炉は、装置が大きい、温度平衡に達するまでに時間がかかる、エネルギーの無駄が多い、などの欠点があって、使い易いものではない。もっと簡便に黒体放射に近いものを得たいという発想から、シリコニット空洞形赤外放射源（図3.2）が作られた²⁾。棒状のシリコニット発熱体と中空棒のシリコニット発熱体を組み合わせて空洞体を作り、

これにスリット状の開口をあけて空洞放射体としたものである。この空洞部の実効放射率は、 $2\sim 20\mu\text{m}$ のほとんどの波長で 0.99 、 $12.6\pm 1\mu\text{m}$ の波長域で僅かに下がって 0.97 であること、電力一定で点灯した場合、分光放射輝度は長時間にわたって安定であることが確認されている。従って、波長 $20\mu\text{m}$ までの赤外放射標準としては、このシリコニット空洞形赤外放射源が推奨される。これを使用するに際しては、温度の校正（あるいはそれに相当する何らかの測定）が必要であるが、分光放射輝度の標準値がついているタングステンリボン電球（分光放射輝度標準電球と呼ばれ、公的機関から入手可能）と比較して、波長 $2\sim 2.5\mu\text{m}$ での分光放射輝度を測定することにより校正するのが、比較的容易で信頼できる方法である。波長 $20\mu\text{m}$ 以上についても、分光放射率の測定をすれば、シリコニット空洞形赤外放射源を標準として利用できると考えられている。

3. 1. 1. 2 シンクロトロン放射

高速電子が磁界によって進行方向を変えるとき、電子軌道の接線方向に放出される電磁波がシンクロトロン放射であり、その強度は理論式から計算によって求めることができる。その波長は、電子のエネルギーなどの条件にもよるが、通常使われている電子蓄積リングの場合、軟 X 線からマイクロ波に及んでいる。従って、極めて広い波長範囲にわたる放射の一次標準になると考えられる。

ところが、シンクロトロン放射の輝度は赤外域では非常に低い（大ざっぱに言って、黒体放射より $1\sim 2$ 桁低い）ゆえ、標準用としても実用としても、使うメリットはほとんど見いだせない。ただし、赤外も波長 $100\mu\text{m}$ を超えると、また黒体放射より強くなる（あくまでも、波長の 4 乗に比例して弱くなる黒体放射に比較しての話であって、シンクロトロン放射も長波長になるにつれて弱くなる）ので、その領域の用途にはまたメリットが出てくる³⁾。

シンクロトロン放射を発生する装置（普通は電子蓄積リング）は、国内だけでも 20 台近くあるが、まだまだ何時でも誰でも使えるというものではない。従って、これを標準として確立しても、トランスファー標準がなければ一般の役には立たない。トランスファー標準としては、現在のところ、前述のシリコニット空洞形赤外放射源が最有力候補であるが、波長域の拡大や精度の向上を目指して、新しいトランスファー標準の開発が必要となろう。

3. 1. 2 標準検出器

3. 1. 2. 1 熱型検出器

一次標準として、いわゆる絶対放射計がある。これは、サーモパイルやボロメータの受光部を直流電力によって加熱できるように作っており、放射束による温度上昇分と直流電力による温度上昇分が等しくなるときの電力測定値から放射束を求めるものである。絶対放射計には、受光部に入射する放射は 100% 吸収されて温度上昇に寄与すること、加える電力は 100% 受光部内で消費されて熱になること、などの理想条件になるべく近い条件を備えていることが要求される。

図3.3は、わが国で作成された絶対放射計の受光部素子である4)。直径10 mmの受光部に二重の渦巻状に巻いた白金線が温度変化を検出するボロメータの抵抗線および電力で加熱するときの抵抗発熱線の二役をする。この絶対放射計を活用して、可視域における放射束の絶対測定、および、タングステン電球からの全放射束の測定が行われた。

絶対放射計は20世紀の早い時期から研究され、1960～70年代に各国の標準研究所において放射測定の一次標準となった。しかし、1980年にシリコンフォトダイオードの自己校正法が発表され、現在ではこの方法によって校正されたシリコンフォトダイオードを放射測定の一次標準としている研究所が多い。ところが、1985年に液体ヘリウムの環境で動作させる極低温絶対放射計が発表され、これを使って自己校正シリコンフォトダイオードより更に1桁以上精密な測定ができたというデータが発表されるに及び、これを用いての放射測定法の研究が1990年頃から各国の標準研究所で始まっている。極低温にすることにより、温度ノイズが小さくなる、(金属の熱拡散度が格段に大きくなるので)放射加熱と電力加熱の等価性がよくなる、等の利点から、極めて高い確度を得られるのである。これまでのところ、可視域において、パワーを安定化したレーザー光を使っての実験において高い確度が確認されている。赤外域においての性能は報告されていないが、やはり高い確度が期待される。ただし、そのためには、安定で強い光源、黒化物の分光吸収率の正確な測定など、周辺技術の充実が必要である。

トランスファ標準としては、サーモパイル、ボロメータ、焦電セル、ニューマチックセル、など、どれでも使える可能性はある。問題はどのようにして校正するかである。相対分光応答度については、シリコニット空洞形赤外放射源による校正の試みがあるが5)、絶対値については、絶対放射計との比較を行った例しか報告はない。

3. 1. 2. 2 量子型検出器

可視域ではシリコンフォトダイオードの絶対分光応答度を自己校正する技術が確立しているが、赤外域においてはまだ確立していない。ゲルマニウムのダイオードで同様のことをやってみようという話があったが、成功したとの報告はない。たとえ自己校正ができなくても、応答度が安定であれば、他の標準を使って校正し、常用標準とすることはできる。相対分光応答度をシリコニット空洞形赤外放射源で校正する方法は開発されているが6)、絶対値の校正についての報告はない。

(谷治 環、西 師毅)

3. 2 赤外放射検出器

赤外放射検出器に要求される特性は、高感度、高速応答、室温動作、高安定、安価などである。これら総てを満足するものはないが、昨今の半導体技術等の進歩により、技術革新の推進役を担う新しい検出器も開発されている。

ここではそれら検出器について評価する場合の基本事項について述べる。

3. 2. 1 赤外放射検出器の分類

赤外放射検出器は現在用いられている検出法から次の二つに大別される。

- (1) 量子型：赤外線を光子としてとらえ光電効果を利用したもの
- (2) 熱型：赤外線の電磁波エネルギーによる物性変化（主として熱作用）を利用したもの

この両者の理想的な分光応答は図3. 4のようになる。

量子型検出器はさらに検出原理から、光伝導型と光起電力型になる。熱型検出器と比べて応答は速く、高感度であることから、最近の撮像装置に良く用いられるようになった。熱型検出器は赤外線の波長に対して一定の感度持っていることから、分光器の検出器として良く用いられている。

量子型検出器はSi, Ge, PbS, PbSe, InSb, HgCdTeなどの材料でつくられているものが多い。熱型検出器はサーモパイル、ボロメータ、焦電型検出器などがある。検出器の構成は単一素子から一次元、二次元へと多素子化が進められている。

3. 2. 2 赤外放射検出器の評価方法

一般に赤外放射検出器の評価は、赤外線を光チョッパを用いてパルス光にして検出器に照射し、その応答でおこなう。チョッピング周波数は高い程有利になるが限界があり、量子型で500～1k, 熱型で10～200位である。

図3. 5に示すように受光面積 A_a [cm²]の検出器に、パルス光を照射しその応答を評価することになる。

3. 2. 2. 1 応答度

赤外放射の入射束を Φ [W]とし、出力電圧を V_o [V]とすると応答度 R_V は次式のようにになる。

$$R_V(\lambda, f_o) = \frac{V_o(\lambda, f_o, \text{rms 値})}{\Phi(\lambda, f_o, \text{rms 値})} \quad [\text{V/W}] \quad (3.1)$$

ここで、入射束も出力電圧も実効値（rms値）であり、入射赤外線の波長 λ [μm], チョッピング周波数 f_o により異なった値となる。電流モードでは次式のようにになる。

$$R_I(\lambda, f_o) = \frac{I_o(\lambda, f_o, \text{rms 値})}{\Phi(\lambda, f_o, \text{rms 値})} \quad [\text{A/W}] \quad (3.2)$$

これは波長 λ の単色光の赤外線照射した場合であるが、一般には黒体炉を

光源として評価することが多い。図3.6で示すように、温度 T [K]の黒体放射からの赤外線の入射束が入射したとすると、その黒体応答度 R_B は次式のようになる。

$$R_B(T, f_0) = \frac{V_0(T, f_0)}{(\sigma T^4) \cdot A_B \cdot (A_d / \pi L^2)} \quad [V/W] \quad (3.3)$$

ここで、 σ はステファン・ボルツマン定数、 A_B は黒体炉の放射面積、 L は黒体炉から検出器までの距離である。

3.2.2.2 検出能

検出器の性能としては応答度と S/N が重要であるが、応答度が大きくても雑音電圧 V_N が大きくなると S/N は大きくとれない。そこで検出器の S/N を評価する値として検出能 D が f のように定義されている。

$$D(\lambda, \Delta f, f_0) = \frac{R(\lambda, f_0, \text{rms値})}{V_N(\lambda, f_0, \Delta f, \text{rms値})} \quad [1/W] \quad (3.4)$$

3.2.2.3 D^* と雑音

どのような受光面積の検出器及び帯域幅の増幅系で測定しても、一義的に検出器の性能を評価できるものとして D^* （比検出能）があり、次のように定義されている。

$$D^* = D(A_d \cdot \Delta f)^{1/2} = R(A_d \cdot \Delta f)^{1/2} / V_N \quad [\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}] \quad (3.5)$$

また、主な雑音には次のようなものがある。

- (1) 熱雑音、(2) ショット雑音、(3) $1/f$ 雑音、(4) 生成・再結合雑音、(5) 放射または光子雑音

参考文献

- 1) 赤外線技術研究会編：赤外線工学，オーム社，pp.115～120（1991）。
- 2) 赤外線技術研究会編：最新のセンシング・分光技術と将来展望，第4回赤外線技術講習会テキスト，pp.35～89（1990）。
- 3) R. D. Hudson, Jr. : Infrared System Engineering, Wiley-Interscience, pp.264～295（1969）。

（玉重繁良）

3. 2. 3 熱形赤外放射検出器

熱形放射検出器とは赤外放射を”熱”として検出し、電気信号に変換出力する素子である。熱形赤外放射検出器は室温で使用でき、赤外放射検出能力は後述の量子形赤外放射検出器と比べ劣るものの応答度の波長依存性もなく、コスト的にも非常に安価であるので汎用の赤外検出器として近年広く普及している。

3. 2. 3. 1 焦電形素子

(1) 焦電センサの経緯

焦電センサの開発が急速に進歩をとげたのは1970年代にはいつてからである¹⁰⁾。当初は検出能力も低く応答速度も遅くまた耐環境性に問題があり、価格も高価であったため普及には時間がかかったが現在では高性能化と共に価格も安価なものでは数百円程度となり熱形センサとしては完全に市民権を得ている。また当初は焦電部もいわゆるシングルエレメントしかなかったが、現在では用途により2～12エレメントのものまで製造されるようになっている。

(2) 焦電現象

一般に絶縁物は誘電体だが、この誘電体の分子には正負の電荷が中和し電氣的に無極性な分子と正負の電荷が分極状態にある有極性分子とがある。有極性分子から構成された誘電体でも一般的には電界をかけないかぎり、それぞれの有極性分子がランダムな方向をむいているため極性を示すことはない¹¹⁾。この誘電体(強誘電体)を一定の方向に極性を持つように分極処理をほどこすことにより、強誘電体は”自発分極”をもつことになる。この自発分極による表面電荷は普通の状態ではイオンの付着等により無極性状態となり電気信号として測定することはできないが、自発分極は温度の関数であるため強誘電体が赤外放射の照射により温度変化を生じると自発分極の量が変化して電気信号として測定することができる、その後自発分極はイオンの付着等により中和され強誘電体は無極性となる¹²⁾。これを焦電現象という。このように焦電センサは温度変化により微分的に信号を得ることができる。焦電材料としては強誘電体のなかから焦電効果の大きなものを使用される。このような材料は十数種類あげられているが現在市販されている焦電センサでは製造及びコストの面から主にセラミック系の材料が多く用いられている。

(3) 焦電センサの特性

焦電センサの特性は①熱型素子の中では最も検出能力が高い。②センサ単体では定常的な赤外放射源の検出が出来ない(チョパ等が必要)。③印加電圧及び負荷抵抗によって応答度、周波数特性が変化する。④焦電材料自信は波長依存性がない、等である。

3. 2. 3. 2 サーモパイル

サーモパイルは熱電対を数十～数百対直列に接続した熱起電力素子である。構造は金黒等の疑似黒体の廻りに熱電対を配置し、赤外放射入力により黒体部が熱せられ、その

熱で熱電対が発電する仕組みである。従って焦電センサと違い直流光が検知可能である。

サーモパイルの特性としては以下の項目がある。①センサ単体で定常的な赤外放射源の検出ができる。②自己発電素子であるためセンサには外部電源が不要、従って電源品質による出力信号への影響及び電圧による応答度依存性はない。③受光部が疑似黒体であるため波長依存性はない。④S/N比がよい。⑤検出能力は焦電センサより2桁程度は劣る。

3.2.3.3 サーマスタボロメータ

サーミスタボロメータはセラミック系NTCサーミスタを板状に加工し、一般的には、受光側素子と温度補償側素子を直列に接続して分圧電圧を出力する。受光側素子は赤外放射入力により抵抗が変化し、それに伴い分圧が変化することにより赤外放射を検出する。従って、サーモパイルと同じく直流光が検知可能である。また素子がNTCサーミスタであるため、受光側素子では周囲温度変化も信号出力してしまう。従って、外部入射を受ける受光側素子と外部からの入射光を受けない様に配置した温度補償側素子を直列に接続してある。サーミスタボロメータの特性としては以下の項目がある。①センサ単体で定常的な赤外放射源の検出ができる。②センサ出力が抵抗分圧であるためバイアス電圧による応答度依存性が生じるが、素子ノイズも同様の依存性があるためS/N比としては変化しない。③波長依存性がない。④受光側素子及び温度補償側素子の抵抗、B定数のアンバランスが原因となり周囲温度の変化で信号出力される。

3.2.3.4 半導体繊維型赤外線センサ

半導体繊維型赤外線センサは東大工学部の柳田博明教授の研究を基に、民間企業3社で1993年に開発された新しい赤外線センサである。

構造は炭素繊維に特殊処理を施すことによりNTCサーミスタ特性をもたせ、それをサーミスタボロメータと同様に受光側繊維と温度補償側繊維を直列に接続した構造となっている。従って、その特性には原理的に似通っているサーミスタボロメータと同様の長所、短所があるが、繊維等の製造が容易であり、構造も単純で、将来の低価格化も期待できる上、検出能力も1桁程度の向上となる（現在市販の物は電源電圧8V時、サーモパイルとほぼ同等の検出能力である）。

3.2.4 量子形赤外放射検出器¹³⁾

現在一般に市販されている量子形赤外放射検出器は大別して次の2種類がある。①光起電力形。②光導電形。前者は赤外放射の入射により起電力を発生するものであり、後者は赤外放射の入射により素子抵抗が変化するものである。

量子形検出器は検出能力が高く、応答速度は速いという特徴がある。また、応答度に波長依存性があり、近赤外用以外のものは一般に冷却して使用される。

3.2.4.1 光起電力形センサ

光起電力形センサの原理を簡単に述べると、赤外放射の入射により素子のPN接合内部の電子が励起されP層、N層に電荷が蓄積され、それがPN接合の電位障壁を引き下

げる。この電位障壁の変化を電圧あるいは電流として取り出すことにより信号が得られる。

材料としてはGe, InGaAs, InAs, InSb等があげられる。また、素子の応答波長範囲は温度及び材料に依って異なるが、 $0.6 \sim 12 \mu\text{m}$ である。これらの素子は冷却することにより D^* (S/N比)は増加するが、長波長側の応答度は低下する特徴がある。

3.2.4.2 光導電形センサ

光導電形センサは真性半導体検出器と不純物半導体検出器の2種類に分類される。

(1) 真性半導体検出器

使用される半導体の種類はPbS, PbSe, HgCdTe等がある。構造はガラス或はサファイア等の基板の上に結晶膜を形成して作られるため、素子面積、形状、素子数が任意に設定できる。動作原理は、HgCdTeの場合、赤外放射の入光により価電子帯の電子が伝導帯に励起され電気伝導度が増加することによる。

PbS, PbSeの特徴は、冷却することにより、①応答波長限界が長波長側へ移行する、②応答時間が遅くなる、③応答度特性は向上する。なお分光応答度特性は $2.2 \mu\text{m} \sim 3.8 \mu\text{m}$ にピークを持つ。

HgCdTeの特徴は、素子温度を -196°C 以上にすると、 D^* は低下し、波長は短波長側に移行する。従って、液体窒素冷却をしなければならない。しかし、検出能力、応答速度が良好であるため、最近では多素子の赤外CCDとしても応用されている。また、 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ の波長範囲で高い応答度を示す。

(2) 不純物半導体検出器

不純物半導体検出器はGeやSiに不純物を高濃度に添加した素子であり、液体ヘリウムで 4.2K 程度まで冷却しなければならない。分光応答度特性は、 $1 \sim 40 \mu\text{m}$ までで、不純物によって応答波長範囲が決まる。

(大矢高義)

3.3 赤外放射の測定

3.3.1 全放射の測定

(1) 全放射とは

全放射の全は、可視光から赤外までの全波長域に亘る出力の総和を意味している。全放射の測定には放射計を用いる。放射計は放射熱を受ける検知部と、それを表示する表示部で構成されている。放射計によって放射照度、放射強度などが測定される。

放射計で赤外線ヒータの出力を測定する場合には、概略 $0.3 \sim 30 \mu\text{m}$ の光に対してほぼ一様な応答度を持つ黒化処理された検知部が必要である。赤外線ヒータは、名前は赤外線でも可視光から遠赤外線までが放射されているからである。

(2) 黒化処理

検知器受熱面の黒化処理には、金黒*1、すす*2、黒色塗料*3、NiP(ニッケルリン)*4、黒色酸化金属*5などがある。

*1 金黒の作成方法、特徴、特性などを詳細に記述した論文「放射束の絶対測定」電気試験所研究報告第675号 大場信英氏著によると、金黒 (gold black) は、0.5~2torrの圧力の窒素中などで金を蒸発させて作成する。蒸発した金の原子は直径10nm程度の微粒子に固まり、これらが互いに付着し合い、多孔質で光の吸収率が高い層を形成すると書かれている。その他、「熱型放射検出器」電子技術総合研究所調査報告第177号 伊藤和喜氏の論文にも詳しく述べられている。

*2 すずについては、前記*1の他、照明学会研究会資料「遠赤外放射の測定例」1988.11.25 笹森著などがある。広い波長域に亘って吸収率が高く、製作も容易であるが、作り方によって性能にムラが出ること、剥がれ易いことなどが欠点である。

*3 黒色塗料は、3M社ベルベットコーティングが、分光吸収率のデータも発表されており広く使われている。その他、国産のシリコン系艶消し黒色塗料も良い性能である。黒色塗料の技術資料として、照明学会「遠赤外放射研究調査委員会」報告書平成3年4月発行などがある。

*4 ニッケル リンは、波長が0.5 μ mから1.55 μ mの範囲で、反射率が0.16~0.18%と金黒の1/3以下、黒色ペイントの1/10の値という報告が、アンリツテクニカルNo.60 1990に記載されている。波長10 μ mでは反射率は若干高くなって1%ということである。

*5 黒色酸化金属には、黒化銅、黒色アルマイトなどがある。

3.3.2 放射照度の測定

机に照射される明りの量を、単位面積当たりの光の単位である照度 (ルクス) で表すように、赤外線ヒータから離れた任意の場所に於ける単位面積当たりの赤外線放射出力が、放射照度 (W/m^2) と定義されている。

放射照度の測定は、値付けされた放射計を用いるか、黒体を用いた比較測定または放射照度標準電球との比較測定で行う。一般的な黒体 (炉) は温度が1,000 $^{\circ}C$ 程度、口径が25mm程度なので、赤外線ヒータに比べると出力は低い。そのため温度が高く出力が大きくとれる電球を出力標準にするのである。

検知器の受熱部は風による出力の変動を避けるために、周囲より幾分か凹んだ所に設定されている。従って、検知器の視野角が理論的に必要な180度 (半球面) の範囲は確保されてなく、60度程度のもも珍しくはない。このため、例えば棒状の赤外線ヒータに接近して測定した場合には、実際の出力よりも低い測定結果となることに注意しなければならない。

3.3.3 分光放射の測定

赤外線ヒータ等の放射源からの放射出力を、波長別に分けて測定するのが分光放射の測定である。この測定は (ほとんど必ず) 赤外線の波長別出力の基準器である黒体との比較測定によっている。このため検知器の波長特性はフラットである必要はない。

(1) 分光放射輝度 ($W/m^2 \cdot sr \cdot \mu m$)

分光放射出力の測定項目の中では、分光放射輝度の測定が多く用いられている。

ヒータ等の表面の単位面積当り (m^2)、単位立体角当り (sr)、単位波長当り (μm) に放射されている出力を意味している。面積として cm^2 、波長としてnm (ナノメー

ター)を使うこともある。

測定の際、空気中の炭酸ガス、一酸化炭素、水蒸気などは赤外線を吸収して減衰させる。またそれらの量の多少が赤外線の吸収の量に大きく影響を与える。しかし、分光放射輝度の測定では、測定器に対して黒体と被測定物である赤外線ヒータ等を等距離に設置することによって、これらの誤差要因を無くしている。

分光放射の測定では、分光放射輝度(放射体から放射されている量)の測定は黒体との比較測定であり、しかも狭い立体角内の放射量の測定であるので比較的容易である。しかし、分光放射照度(放射体から離れているところに届いている量)の測定は絶対値の測定であり、測定箇所の半球面全部から入射している放射量を測定しなければならないなどのことから、大変難しいとされている。

(笹森宣文)

3.4 放射率の測定

放射率とは、黒体(理想的な赤外放射を行うもの、3.1.1.1参照)からの放射量と測定物からの放射量との比である。黒体は同温度では最大の放射を行うものであり放射率は1.0、測定物の放射率は0.0~1.0の間の値を持つ。

放射率は吸収率と同じ値である。つまり沢山吸収する物は沢山放射するという性質を持っている。放射率は赤外線ヒータ及び白熱電球などの温度放射を利用する物体の性能を表す基本的な要素の一つである。

3.4.1 全放射率の測定

全放射率の全は、全波長域に亘る全を意味している。全放射率の測定は同温度、同面積の放射体と黒体からの放射量を放射計で測定し、比をとることによって求める。

測定で注意すべき点は、①全ての物が赤外の放射源となっていることから、不要な放射が測定器に入射しないように、室温に保った、複数の、黒色の穴開き遮光板を黒体と放射計の間に使用すること。②放射体の面積と黒体の面積を同じにするためのアパーチャーを使用すること、などである。小径の穴開き遮光板または放物面鏡を使用して放射計の視野を狭くし、放射輝度の測定のようにすれば、周辺から放射計への入射は無くなるのでこれらの配慮はなくても良い。

全放射率は、各波長の放射率の値(分光放射率)の単純平均ではない。黒体からの全放射量に対する放射体からの全放射量の比である。

放射体の分光放射率が分かっている場合には、計算によって全放射率を求める方法もある。それには、まずプランクの放射則を用いて黒体からの分光放射量を求め、それに放射体の分光放射率の値を掛けることによって放射体からの分光放射量を求める。それらの波長別の値を全波長域に亘って積分し、その比をとることによって全放射率を放射計に依らずに算出するのである。この方法は分光放射率が温度によって変わらない物の場合には、一度分光放射率を測定しておけば、任意の温度に於ける全放射率は測定することなく計算で求めることができる便利な方法である。

3.4.2 分光放射率の測定

黒体の分光放射輝度と放射体の分光放射輝度との比較を波長別に行うことにより、放

射体の分光放射率（波長別放射能力）が求められる。

図3.7に分光放射率測定装置の概略図を示す。

放射率は放射体の赤外放射特性を表す最も基本となる数値である。分光放射率が求められれば、分光放射輝度、分光放射強度、全放射率、全放射発散度、全放射輝度などが算出できる。

放射率はこのように基本的な数値ではあるが、その値は放射体の性質を表しているものであって、量的な値を表しているものではない。

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、放射率は同じ値である。また波長 $25\mu\text{m}$ で分光放射率が1.0に近い大きな値であっても、それは赤外放射量が波長 $25\mu\text{m}$ で多くなっているというわけではない。同様に、波長 $25\mu\text{m}$ の放射率が波長 $10\mu\text{m}$ の放射率より高い場合でも、それだけで波長 $25\mu\text{m}$ の放射量が波長 $10\mu\text{m}$ の放射量より多いというわけではない。

3.5.1 焦電素子センサシステム

焦電センサシステムは焦電素子の性能の改善に伴って、急速に発展をとげている。ここでは焦電素子を利用した人体検知用焦電センサ及び焦電ビジコンについて解説する。

3.5.1.1 人体検知用焦電センサ(4)

人体検知用焦電素子は、常温で使用でき、高い検出能力を有しながら、きわめて安価であるため、防犯用をはじめHA、OA、FA用として幅広く利用されている。

一般的な焦電素子としては単素子のものが多く、人体検知用としては1～12素子のもの、特に現在では2及び4素子が主として使用される。その理由は、人体検知用センサは人の動き（侵入、動作）をある程度広範囲に検出する必要があるからである。つまり、センサの視野内を人間が横切る時に生じるエネルギー変化を検出し、かつ、24時間動作による耐久性からの要求を満足するために、チョッパ式ではなく、ある程度多素子化して多くの情報を処理することにより、人間と動物との識別を行なっている。また、人体検知用焦電素子の窓材には $7.5\mu\text{m}$ カットオフフィルタを用い、人間以外の遠赤外放射の影響を軽減させている。

またこれらの焦電素子は、視野の設定、検出能力向上の目的で一般的に光学系（反射鏡、フレネルレンズ等）と組み合わせて使用される。以下に各々の素子について解説するが、特殊防犯用素子については各社オリジナルのものが多い。

(1) シングルエレメント（単素子）

焦電部が1つのエレメントであり、主に人体検知用というより温度計測他の分野でチョッパと組み合わせて使用されてきた。最近まで防犯用として一部利用されていたが現在では殆ど使用されていない。但し、ローコストの人体検知用としては現在でも使用されている。

(2) ツインエレメント（2素子）

焦電部を2素子に分割しており、分極方向を逆にして2素子を直列接続したものである。両方の素子に同時に赤外放射が入射すれば、両素子に同じ大きさの反対符号の信号が発生するので相殺される。これによりセンサ周囲温度の急激な変化や検知視野内の急

激な温度変化に対しての影響が軽減され、単素子のものよりも安定した動作が得られる。

(3) デュアルツイン (4素子)

ツイン素子を2組内蔵しており、各々の素子を上下に並べ、両素子の出力から同相信号が得られた時のみ検知信号を出力するように電気回路で処理を行ない、移動物体の高さ、大きさの判別を可能にしたものである。この素子を用いることにより、ツイン素子で問題として残されていた人間以外の赤外放射源 (小動物等) の識別が可能となった。

(4) クロスデュアルツイン (8素子)

この素子は特殊な光学系 (反射鏡) と組み合わせ、1つのセンサで360°全周にわたって人体検知を行なう防犯センサ用として開発された。従来、この全周センサ用素子としては均一な視野を得るためにシングルエレメントしか使用することができなかったが、この素子の開発により全周にわたって均一なデュアルツイン効果のある視野が構成できるようになった。

3.5.1.2 焦電ビジコン15)

焦電ビジコンは、物体表面の2次元温度分布を非接触で計測するために開発された。構造は一般に使用されているTVカメラのターゲットを焦電センサに置き換えたものである。動作は、2次元焦電形センサ上に結像された入射赤外放射による温度分布像により、2次元焦電形センサの電子ビーム走査側 (裏側) には物体の表面温度分布に対応した電圧分布が生じる。この電圧分布を電子ビームで読みだす仕組みである。但し、焦電形であるため連続検出にはチョッパは必要となる。また、応答度の波長依存性がないため近赤外から遠赤外にかけて使用される。

3.5.2 撮像デバイス

3.5.2.1 サーマルカメラと撮像デバイス

赤外放射検出器を用いて、物体の温度分布 (正確に言えば赤外放射密度分布) 像を得る装置をサーマルカメラあるいはサーマルイメージングシステムという16)18)。赤外放射検出器とサーマルカメラの技術開発は、軍用に負うところが大きい。サーマルカメラを軍用では、FLIR (Forward Looking InfraRed system) といっている。単素子の赤外放射検出器を用いて撮像する場合には、垂直と水平の2方向の機械的な走査機構と組み合わせられる。赤外線像をリアルタイムで撮像するには、フレーム数は少なくとも15フレーム/秒以上になるが、それには高速な走査機構が必要になる。

複数個の赤外放射検出器を直線状に並べた1次元アレイや、平面的に並べた2次元アレイ (FPA: Focal Plane Array ともいう) を用いれば、走査機構はそれだけ簡単にでき、検出能力も高くできる。アレイ状の検出器は、一般に撮像を目的にしているので「撮像デバイス」といわれる。

赤外線撮像デバイスの製作は難しくそれだけに高価であるが、これを使用した撮像システム全体で見れば、走査機構が簡単になり低コスト化、小型化、高感度化が可能となるなど総合的なメリットが大きい。そのため現在の技術開発の主流は、撮像デバイスを用いる方向である。市販されている実用的なサーマルカメラも、単素子の赤外放射検出

器を用いたものから、アレイ状の検出器の撮像デバイスを用いたものになりつつある。

可視光での撮像に広く普及している固体撮像素子の Si-CCD は、機械的な走査機構を全く持たない。これと同じように走査機構のないサーマルカメラの方式を staring type (凝視型:「ジッと見る」の意味)といている。サーマルカメラの主な性能指標は、解像度(空間分解能)と温度分解能(等価雑音温度差:NETDや最小分解可能温度差:MRTDなどで表される)で評価される。十分な解像度と温度分解能を有する staring type は、サーマルカメラの理想といえる。

一般に解像度は素子(画素)数に比例するから、実用的な解像度を得ようとする、素子数は少なくとも数万個以上は必要である。例えば、解像度が 200×200 で素子数は 4 万個、可視テレビジョンと同じにするなら 20 万個以上となる。素子数が数万個以上あれば staring type にできるが、そうでないときは走査機構と組み合わせて使用することになる¹⁷⁾。

アレイ状の検出器とそれと組み合わせられる走査方式には、並列(パラレル)走査と直列(シリアル)走査およびこれらの中間をとった直並列走査の 3 つの方式がある。

並列走査は、リニア(直線状の 1 次元)アレイ検出器を走査方向に対して直角に配置する。各検出素子は独立した走査線を担当する。走査線を 1 本分ずらすインターレース走査によって、素子数の 2 倍の走査線にする方式が多い。走査は 1 軸(水平)でよいので機構は簡単になるが、素子とその増幅器を含めた応答度が一様でないと、走査線にムラのある映像になってしまう。

直列走査は、リニアアレイ検出器を走査方向に並べるもので、走査は単一の素子の場合と同じように水平と垂直の 2 方向が必要である。このとき各素子の出力信号を素子間隔と走査速度で決まる時間だけ遅延させ、最初の素子から順に最後の素子までその信号を重畳する。信号は素子数に比例して加算されるのに対して、雑音は素子数の平方根に比例するので、S/N 比は素子数の平方根に比例して改善される。これが TDI (Time Delay Integration) 方式といわれる技術である。信号処理は並列走査に比べると複雑になる。走査機構は並列走査のように単純化されず、高速な走査が必要である。ただし、各素子の応答度のバラツキは信号の加算によって平均化されるので、走査線にムラのないきれいな映像になる。

直並列走査は、並列走査の簡単な機構で広い視野(画像領域)を走査できる利点と、直列走査の S/N 比改善の利点の両方を合わせた方式である。検出素子は 2 次元アレイとなる。

代表的な撮像デバイスである IRCDD と SPRI TE およびそれらを用いたサーマルカメラについて簡単に述べる。

3.5.2.2 IRCDD¹⁶⁾

IRCDD (InfraRed Charge Coupled Device) は、可視光での固体撮像素子の Si-CCD と同じ機能を、赤外線に適用することを目的に開発されたものである。IRCDD には次の 2 タイプがある。1 つは、CCD 自身が赤外線に対して応答度を有し、そこで得た電荷(信号)を CCD 機能で転送し外部へ出力する方式で、受光部と信号転送部は同じ素材基板の上に作られるのでモノリシックタイプといわれる。もう 1 つは、赤外

放射検出素子をアレイ状に並べたものに赤外線を受光（信号発生）させ、CCDはその電荷を転送する機能だけを受け持つ方式で、受光部と信号転送部は別の素材になるのでハイブリッドタイプといわれる。後者の方が波長域や検出能力について原理的には優れるが、数万個もある素子どうしを欠陥なく接続する必要があり、製作することが難しい。そのため民生用で市販されているという意味での実用は、前者が先行している。

最も早く実用されたモノリシックタイプにSiショットキーバリアIRCCDがある。素子数は 256×256 や可視テレビ並のもの（ 500×500 程度）が実用されている。そのカットオフ波長は中間赤外域の約 $4 \mu\text{m}$ で、波長帯域としてはやや狭い。このIRCCDを用いたサーマルカメラの温度分解能（NETD）は、 $0.1 \sim 0.2 \text{ }^\circ\text{C}$ が実現されている¹⁸⁾。

ハイブリッドタイプでは赤外線を受光部にInAsやHgCdTeを用い、信号転送部にはSi-CCDを用いるものが多い¹⁷⁾。波長帯域は受光部の素材で決まるが、それだけに選択の自由度がある。

3.5.2.3 SPRITE¹⁹⁾

SPRITE（Signal Processing In The Elementの略で、「素子内信号処理」の意味。本来は方式を表すことばであるが、この方式による素子の固有名詞にもなっている）は直並列走査に最適な検出器として開発されたもので、簡単な構造の検出素子自体がTDI動作をする。通常の直列走査でTDI方式の場合には、個々の検出素子に増幅器と遅延回路が必要だが、SPRITEではそれらが不要となるのが大きな利点である。

SPRITEは短冊状の細長い検出素子（HgCdTe）数本（実用されているものは4または8）からなっている。その1本がリニアアレイ1本に相当する。直列走査の方向に細長い素子を置き、その両端にバイアス電圧を加える。そのバイアス電圧によって、検出素子（半導体）の長さ方向にキャリアは移動する。このときキャリアの移動速度と、検出素子上に作られた赤外像の走査速度が一致させれば、赤外光で励起された素子中のキャリアは赤外像の進行と共に移動しながら、各部分で励起されたキャリアを蓄積し続け、素子の末端では大きな出力となる。このようにして信号の重畳を素子自体が行う。1本の素子でおおよそ10個分の素子からなるリニアアレイによるTDIに相当する。

SPRITEを用いたサーマルカメラは、 $10 \mu\text{m}$ 帯の遠赤外域で、走査線はおおよそ500本程度と可視テレビ並、その温度分解能（NETD）は、 $0.1 \sim 0.2 \text{ }^\circ\text{C}$ が実用レベルである。

IRCCDおよびSPRITEを用いたサーマルカメラは、波長域は異なるが空間分解能と温度分解能はほぼ同じ程度で実用されている。これらの性能は、実用レベルとしてほぼ十分であり、今後は取扱の容易さや低価格化が焦点になろう。

参考文献

- 1) 鈴木 守 ほか：電総研研報，742号（1973）2章

- 2) Nagasaka, T. and Suzuki, M.: Appl. Opt., 16 (1977) 2358
- 3) 西 師毅：シンクロトロン放射技術，富增多喜夫編著，工業調査会（1990）13章
- 4) 大場信英：電試研報，675号（1967）3章
- 5) 伊藤和喜：昭和58年照学東京支部大会（1983）17
- 6) 湊 秀幸ほか：平成4年電気関係学会関西連大（1992）G13-18、電気学会計測研究会資料（1992）IM-92-28
- 7)
- 8)
- 9)
- 10) 平野 均：焦電センサ，赤外線技術第5号（1980）64
- 11) 阿部 節次：2編電気物理，電子工学ポケットブック，高木 昇，オーム社（1974）2-14
- 12) 山香 英三：赤外線検出器Ⅱ，第1回赤外線技術講習会テキスト，赤外線技術研究会（1974）52
- 13) 赤外線検出素子，浜松ホトニクス㈱カタログ（1992）
- 14) 羽根田 薫，大江 益男：竹中エンジニアリング㈱技術資料（1983）
- 15) 山香 英三：焦電型ビジコン管，赤外線センサ，トリケップス技術資料第24号，トリケップス（1979）66-
- 16) 例えば、センサ機能調査専門委員会編「最近のセンサ」，電気学会（オーム社）（1988）
- 17) 宮本義博，増谷光正：HgCdTe走査型IRCCDとその応用，赤外線技術，（1990）18-46
- 18) 木股雅章，坪内夏朗：赤外カメラ，テレビ学会誌，46-5（1992）559
- 19) 安田 升，飯田 潔：SPRITE型赤外線検知器とその応用，赤外線技術（1990）18-40

（笹森宣文）

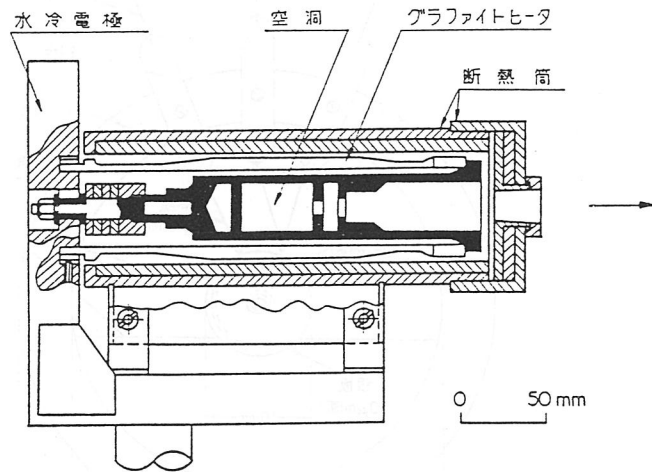


図3. 1 グラファイトチューブ高温黒体炉の構造

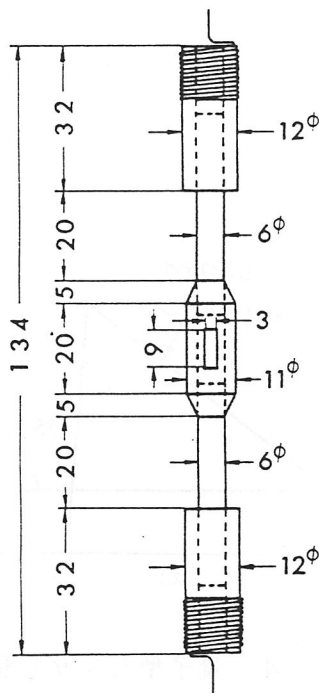


図3. 2 シリコニット空洞形赤外放射源の構造

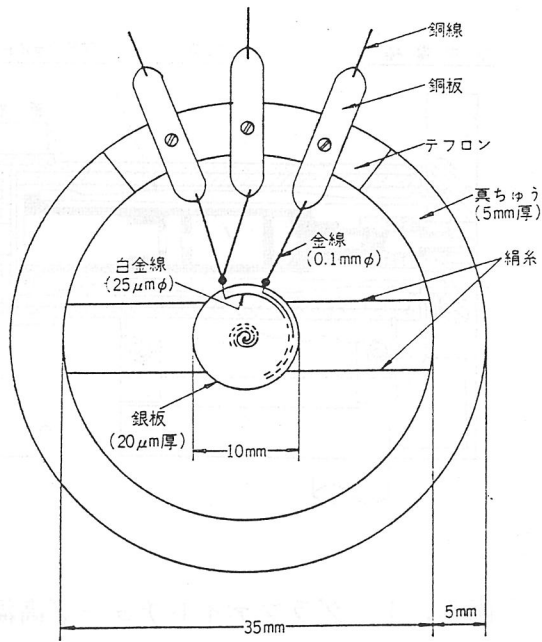


図3.3 絶対放射計の受光部素子の構造

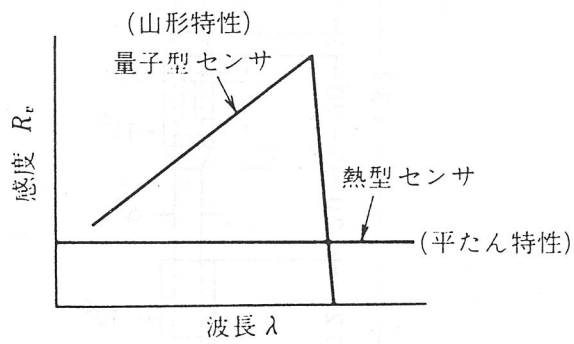


図3.4 量子型センサと熱型センサのスペクトル特性の相違

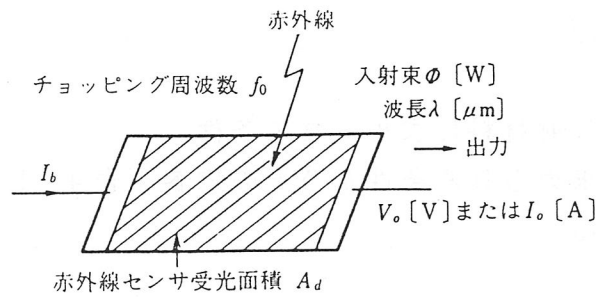


図3.5 赤外線センサの応答度測定

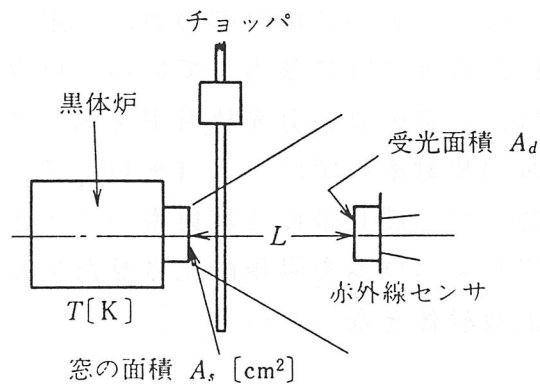


図3.6 黒体炉でのセンサ評価

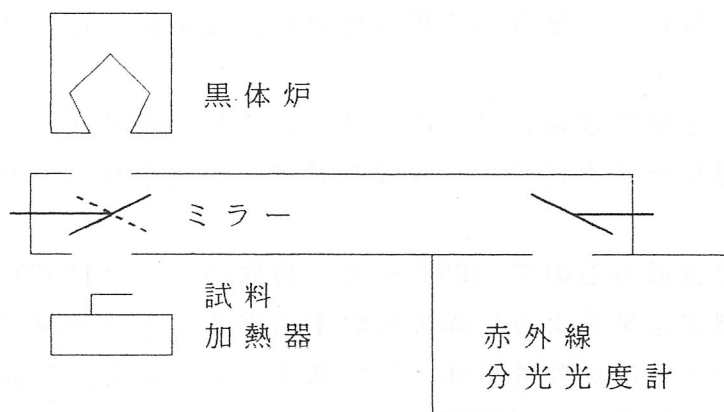


図3.7 赤外線分光放射(率)測定器

4 赤外放射加熱用放射源

4. 1 赤外放射源

4. 1. 1 赤外放射材料に求められる条件

赤外放射材料に求められる条件及びその内容を表4.1.1に表し、以下その内容について述べる。

4. 1. 2 放射率

放射体の放射率は高い方が望ましいが、実際のヒータや放射体では数%の違いはほとんど問題にはならない。実際の加熱で重要なのは、放射率よりも赤外放射パワーを表す分光放射照度、全放射照度の値である。

表で灰色体というのは、波長毎の放射率の値が一定であるものを指し、黒色塗料や銀色塗料の特性がほぼこれに該当している。ロウソクや樟腦のススを付着させた黒化面も、ほぼ一定の高い分光放射率を示している。(図4.1.1)

一般の物質は波長毎の放射率の値が一定(平坦)ではない、選択放射体と呼ばれている。また目的とする波長帯域で放射率を変化させた物質も同じく選択放射体と呼ばれる。アルミニウムを陽極酸化させたアルマイト類は一般的に図4.1.2のように選択放射体となっている。

4. 1. 3 放射源温度

使用温度の区分を、中温約150℃迄、中高温400℃迄、高温をそれ以上と仮に分けてみる。

中温区分では、木や紙、布は高い放射率である。これは例えばサウナの壁は木で出来ており、遠赤外線放射が行われていることから理解される。しかし、火災に対する安全性や商品価値などから選ぶとガラス(使用例:パネルヒータ)、セラミックス(暖炉)、ほうろう板(煙突)、塗装板(電気ストーブ)などとなるだろう。

中高温では、金属では鋳鉄(ストーブ)、塗料で耐熱塗料、各種のセラミックス(遠赤外線ヒータの材料)、各種溶射加工(遠赤外ヒータ)、ほうろう板などがある。

ほうろう板は普通のもので400℃程度、特殊のものは1000℃の温度に耐え、図4.1.3の測定結果のように赤外放射率も高く、赤外放射材料として優秀な材料である。かつては赤外放射体としてストーブの煙突、石油ストーブの燃焼筒に使われており、今は魚(餅)焼き器に多く見かける。高温ではセラミックス、溶射加工がある。

溶射とは、セラミックス、サーメット（セラミックスと金属の混合物）、金属、合金などの粉末材料を高温（約3000℃）で瞬間熔融し、高速度で被加工物表面に衝突させて皮膜を作る技術である。溶射加工によって、放射率の低いシーズヒータ表面を高い放射率に変え、遠赤外線ヒータとして市販しているものもある。

4. 1. 4 その他の条件

温度衝撃とは、ヒータ点灯時のような急激な温度上昇、或いは高温のヒータに水がかかった時のような急激な温度低下に対して、割れ、ヒビ、剝離などの現象の有無を意味している。

剝離性とは、ヒータや放射体の表面物質の剝がれ易さであって、クリーンルームでの使用や、食品の加熱の際には重要な要素となっている。

4. 1. 5 波長別放射源

(1) 近赤外線放射源

近赤外線放射源としては、高温で使われることから、ニクロム線を熱源にした赤外線ヒータ、タングステンフィラメントを用いた赤外線ランプが主に使用されている。

赤外線ヒータは、ニクロム線からの近赤外線の放射と管壁の石英ガラスパイプからの長波長の赤外放射が行われている。

赤外線ランプは高温のタングステンフィラメントからの近赤外放射が主な成分である。ガラス管からの長波長の放射も幾分か加わる。

(2) 遠赤外線放射源

遠赤外線放射源は、セラミックパイプの中にニクロム線を装着したもの、金属に溶射したもの、金属板に塗装を施したものなどがある。どれも放射率の高い物質を選んでいる。

形状は平板状、パイプ状、ボビン状、円盤状など、また柔軟性を持つものもある。

(笹森宣文)

4. 2 レーザ

4. 2. 1 原理と特徴

現在、実用されている赤外線源は、一般に温度放射（黒体放射）によっている。しかし、レーザの放射（通常「発振」という）は、温度放射によらない放射である。レーザ（LASER）は、Light Amplification by Stimulated Emission の頭文字をとってつくられた単語で、「誘導放出による光の増幅」という意味である。その原理の詳細は他書を参考にされたい¹⁾。

レーザの最大の特徴は、通常の温度放射光と違って、波長帯域が狭く（波長純度が高い）、位相がそろっている（Coherent）ことである。これによりビームをほぼ回折限界まで小さく絞ることができ、放射エネルギー密度を高くできる。

4. 2. 2 レーザの種類

現在発振が実験的に確認されているレーザの波長域は、軟X線（極端紫外線）から遠赤外線（マイクロ波領域もあるが、それは「メーザ」と呼ばれる）の広い範囲に亘り、波長の数では数百におよぶ。しかし工業的に実用されているものは、そのうちのほんのわずかである。

現在および近い将来において、赤外放射加熱に実用的な意味で適用できるものは、YAGレーザ（ $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ ）、CO₂レーザ（ $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ ）、それに半導体レーザ（ $\lambda = 0.8 \sim 1.6 \mu\text{m}$ ）の3種であろう。実用レベルでの出力は、YAGレーザでCW発振（連続光）数KW、パルス発振（ピークパワー）数百KW～数MW。CO₂レーザは、CW発振20KW程度。半導体レーザは出力が小さくCW発振で数10mW（単素子）～数10W程度（多素子）である。

4. 2. 3 レーザによる加熱

対象物に赤外線を照射し続ければ、その対象物は赤外線を吸収して加熱され（温度が上昇）、ときには燃焼したり熔融、蒸発したりしてその原形を保ち得ないこともある。本報告書での「加熱」は、その対象物が比較的大きくて、加熱されても原形をほぼ保っている状態を、主に想定していると考えられる。この点、レーザを放射加熱に応用している実例は、本報告書で想定している加熱とはいささか異質である。すなわち、大出力のレーザ光を小さく絞って、対象物を加熱して温度上昇させるだけでなく、熔融、蒸発させることが多い。このことを利用したのが「レーザ加工機」であって、実用されて久しい。加熱対象の原形をほぼ保ったままの単純な加熱に利用される場合は、むしろ少ない。

4. 2. 4 レーザ加熱の特徴^{1), 2)}

レーザによる加熱の特徴をまとめると次のようである。

- ①時間・空間的に精密な加熱ができる。
- ②特に小面積の加熱に適す。
- ③逆に、広い面積を同時に加熱することには適さない。
- ④エネルギー密度が高く、短時間で加熱ができる。
- ⑤加熱の制御（パワー、時間、位置）が精密、かつ比較的容易にできる。
- ⑥エネルギーの変換効率（レーザ出力／入力電力）が低い。

YAGレーザの場合、フラッシュランプ励起で約1%、半導体レーザ励起で約7%程度。CO₂レーザで約10%である。半導体レーザは入力の電気エネルギーを直接的に光のエネルギーに変換するので、その効率はおおよそ10~20%と比較的高い。

⑦装置が高価で、比較的大型である。ただし、加熱対象が極小（ μm オーダー）ならば、小型で安価な半導体レーザが利用できる。

4. 2. 5 用途

レーザによる熱処理プロセスの一方法として加熱があるが、溶融あるいは蒸発（蒸散）を伴わないという面からは、特殊な用途に限られる。現状での応用例では、レーザ加工機を用いた表面加熱があり、金属材料の部分的な焼き入れや焼き鈍しがある³⁾。

将来、装置の価格が下がり小型になれば、先述したレーザ加熱の特徴を活かして、燃料の燃焼を利用した赤外線加熱や電熱による赤外線源では難しい分野に、普及する可能性はある。例えば、自由に文字やパターンを変えられる精密な「焼き印（絵）」加工機があり、実用されてはいるが広く普及するには至っていない。

これと同じようなものでレーザマーカがあり、半導体、金属、プラスチック、セラミクスなどに、比較的小さな文字やパターンを刻印するもので、これとても対象物の表面の一部を強いレーザ光によって瞬時に蒸発させるものである。

参考文献

- 1) 宮崎俊行 他：「レーザ加工技術」（1991年5月）、産業図書。
- 2) 安永暢男：「レーザが変える加工技術」（1992年4月）、海文堂。
- 3) レーザ学会編：「レーザープロセッシング」（1990年3月）、日経技術図書。

（毒島 溥）

4. 3 赤外放射源の特性

4. 3. 1 天然物の遠赤外放射特性

4. 3. 1. 1 はじめに

遠赤外はその放射による伝熱の特徴を生かし、加熱・乾燥など多くの分野に応用が提案され、実用化されている。また用いられる放射材料に関しても既に多くの総説が報告されている¹⁾。それら放射材料の多くは、その用途より耐熱性が必要なことから無機材料である事が多く、これらの出発原料として天然物が考えられ、その放射特性を把握する事は材料開発を進めるうえで重要な要素となる。そこで、主に北海道で採取された天然鉱物30種の放射特性について検討を行った。これまで天然物の分光放射特性に関する報告はあまり見られない。

4. 3. 1. 2 試料及び試験方法²⁾

遠赤外放射特性測定に用いた天然物の一覧を 表 3. 3. 1 に示す。

赤外放射エネルギーの測定はMINARAD SYSTEM 社製SA200、黒体炉は CI社のSR2-23を用い測定した。測定試料は天然物を200 mesh under に粉碎し、蒸留水にてスラリー状としたものを、軟鋼 (S S 4 1 50×50×0.8mm) に膜厚数百 μ m程度に塗布し、風乾後放射エネルギー測定用ヒーターに設置し用いた。試料表面温度の測定は予めS S板に接着したKタイプ熱電対 (線径 0.1mm ϕ) により行った。測定温度は150°Cである。

4. 3. 1. 3 結果及び考察

4. 3. 1. 3. 1 シリカを主成分とする鉱物の放射特性

珪素が主成分である5種類の鉱物の放射特性を 図 3. 3. 1 に示す。

シリカの結晶度は珪石、シリカブラック、白土の順に高く、軽石・珪藻土は非晶質シリカからなる。また、シリカブラックとは5%前後の炭素を含む珪酸から成っている。いずれもSiO₂に起因する9.2 μ m付近での放射率の低下が見られ、特に珪石では顕著に現れている。シリカブラックを除く4種の鉱物はほぼ同様の放射特性を示しており、結晶性は放射特性には余り関与しない事がうかがわれる。シリカブラックは低波長側での放射率の低下がみられず、全波長域にわたりフラットな放射率を示している。これは5%程度含まれている炭素によるものと思われ、図 3. 3. 2 に示した木質系炭素の放射特性と良く似た傾向を示した。

4.3.1.3.2 アルミノ珪酸塩鉱物の放射特性

天然物としては比較的多い鉱物として、アルミノ珪酸塩鉱物がある。これら6種の鉱物と成分組成が同一なフライアッシュを珪酸分の多い順に図3.3.3に示す。

フライアッシュを除く鉱物では、低い放射率を示す4 μ m付近から高い放射率に移行する立ち上がりの違いにより頁岩、カオリンとパーライト、ゼオライト、野幌粘土、ベントナイトグループに分けられる。前者は比較的なだらかな放射率の上昇を示すが、後者は5~6 μ mで急激な上昇を示す。成分的にはほぼ同様のフライアッシュは2~5 μ mの低波長領域で顕著な違いを示した。また、これらいずれの物質も4.3.1.3.1項で述べたシリカに起因すると思われる9.2 μ m付近での放射率の低下が見られた。

次に、ゼオライトを用い結晶性と放射特性との関係を検討した。その結果を図3.3.4に示す。天然ゼオライト（クリノプチロライト）は700°C以上で熱処理をする事により徐々にゼオライト構造を消失し、1000°Cを越える処理ではゼオライトからクリストバライトに移行する³⁾。原石、800°C・1000°C熱処理物いずれも低波長域での3 μ mを除き、ほとんど全体の放射特性に変化がなく、4.3.1.3.1項の結果からも結晶構造は放射特性に大きな影響を示さないものと思われ、これは材料設計を行う場合に重要な要素となる。

4.3.1.3.3 カルシウム、マグネシウム系鉱物の放射特性

天然物のアニオンの放射特性に及ぼす影響を検討するためマグネシウム、カルシウムの各種塩の放射特性を検討した。その結果を図3.3.5に示す。マグネシウム、カルシウム共にアニオン種が放射特性に大きな影響を与えており、またマグネサイト、カルサイトの比較より3.4, 3.9, 11.4, 14 μ mの高い放射率は炭酸塩に起因するものと思われる。これらの結果より、放射特性のパターンから塩類をある程度推察する事は可能であり、材料設計にも応用できるものと思われる。

4.3.1.3.4 シリカーマグネシア系鉱物の放射特性

シリカーマグネシア系鉱物の放射特性を図3.3.6に示す。タルク、かんらん岩はほとんど同様の放射パターンを示し、4.3.1.3.2項で報告したシリカーアルミナ系とも良く似た放射特性であった。これは主成分であるシリカの放射特性が支配的である事を示している。セピオライトは前者とは全く違ったパターンを示した。これは、4.3.1.3.3項で考察したようにアニオン（水

酸基)の違いに起因するものと思われる。

4.3.1.3.5 その他の鉱物及び焼成物の放射特性

天然物及びその加工物(赤泥、レンガ)の放射特性を図3.3.7に示す。ドロマイトはマグネサイト(図3.3.5-1)、カルサイト(図3.3.5-4)双方の特徴をそのまま示し、珪灰石はシリカの放射パターンを示した。一方、珪酸ジルコンではシリカ系とジルコンとの比較よりジルコニアの特性が支配的である事が分かった。この様に、どちらの特性がより反映されるかはその組み合わせにより一様ではない。アルミノ-珪酸塩鉱物に分類され窯業製品として身近にある長石(焼き物の釉薬)、レンガはいずれも4.3.1.3.1項の放射パターンを示した。ただし、原料は同じでも焼成方法の違いによる通称赤レンガ(酸化雰囲気焼成)、黒レンガ(還元雰囲気焼成)の比較では低波長域での放射特性に微妙な違いを示した。これらも今後の材料設計において興味のあるところである。

参考文献

- 1) 例えば高島廣夫著「遠赤外線の利用とその技術」応用技術出版(1986)、日本電熱協会編 電熱 No22 p1(1985)、清水他著「遠赤外線利用の最新技術」工業技術会出版(1988)など。
- 2) 尾谷他：北海道立工業試験場報告，No278，p115(1988)。
- 3) 荒木他：北海道立工業試験場報告，No170，p37(1966)。
本田他：北海道立工業試験場報告，No276，p1(1978)。

4.3.2 溶射法による遠赤外放射体の特性と暖房器への応用¹⁾

4.3.2.1 はじめに

遠赤外の放射による加熱特性を生かし各種応用機器が開発されている。その放射体の製造方法としては、焼結、溶射、塗料が実用化されているが、中でもプラズマ溶射法によるセラミック放射体の製造は複雑な形状にも容易に適用できるなどの利点を有している。本来、溶射技術は各種機械部品等への耐摩耗性、耐熱性等の改善を図りその機能性を高めるための表面処理技術として開発されてきており、それらの溶射用セラミック粉末が各種用意されている。そこで、溶射法により作成した6種のセラミックの放射特性を把握すると共に固形燃焼

用暖房器に応用し、その暖房効果について検討を行った。

4.3.2.2 試料及び試験方法

遠赤外放射体作成に用いたセラミック試料を表4.3.2に示す。

供試体は基材（SS41、50×50×3mm）をプラスト処理後、直接プラズマ溶射（METECO 7M）し調整した。放射率の測定はMINARAD SYSTEM 社SA200により行った²⁾。試料の表面温度測定にはK熱電対を用いた。測定温度はいずれも200℃である。

暖房器への応用試験にはコージェライト、クロマイトサンドを用い、図4.3.8に示すような固形燃料用暖房器（ホクダン（株）製 MC-IS型）の表面に左右半々に溶射しその表面温度の変化を測定した。左側がクロマイトサンド、右側がコージェライトである。

4.3.2.3 結果と考察

4.4.2.3.1 放射特性

6種の試料の放射特性を図4.3.9に示す。これらはいずれも高い放射率を示す材料であり、その特性としては二つのグループに分類される。いわゆるチタニア、クロミア、クロマイトサンドは高効率放射体、アルミナ、ジルコニア、コーディエライトは遠赤外放射体である。次に、これら各種材料のブレンドによる放射特性への影響を検討するため、遠赤外放射特性を示す比較的安価なアルミナを基材とし、高効率放射特性を示すチタニアを表4.3.3に示す混合比でブレンドしたものの放射特性を検討した。その結果を図4.3.10に示す。チタニアの添加量が増加するに従い5.5μm以下及び11μm以上でのアルミナ特有の放射率の低下は徐々に改善され、40%チタニア混合物では、100%チタニアの放射特性とほぼ同様になった。これらの結果より、溶射法による個々の素材の放射特性を把握しておく事により、簡単なブレンド法で任意の放射材料の設計がある程度可能である事が分かった。この様に、複雑な形状の物にも容易にセラミック皮膜の作成が可能な溶射法は遠赤外放射体の製造技術としても極めて有効な方法である事が認められた。

4.3.2.3.2 暖房器への応用³⁾

遠赤外は加熱効果の高い電磁波であり、他の伝熱（対流、伝導）に比べ、①熱媒体が電磁波である（クリーンである）、②空気による熱損が小さい、③指向性を与える事が可能、④多くの物質に対し吸収特性の高い波長域である等の理由から暖房用としても注目される場所である。オイルコークス専焼ストー

ブに溶射法によりコーゼライト、クロマイトサンドのセラミックコーティングを施し表4.3.4に示す燃焼試験を行った。燃焼量は燃焼空気の制御により行った。その時のストーブのサーモグラフを図4.3.11に示す。材料の違いにより表面温度が異なることが分かる。両セラミックの放射特性から推察される表面温度とは一致していないが、これは溶射された皮膜の熱伝導率・比熱等の熱特性、表面構造（粗さ）の違い等による自然対流による冷却効果など、諸特性が複雑に関与しているためと考えられる。表4.3.5に各燃焼状態におけるストーブ放射面（2,720cm², 正面：960 側面：1,760）から人体への放射エネルギー量を示した。なお、全放射率：0.9、人体表面温度：30°Cとして計算した。また、放射エネルギーが暖房として人体にどのような作用を与えるかを検討するために、コーゼライトの発熱体を用い手掌部を加熱、その際のエネルギー密度と血流量との関係等も検討されている。

参考文献

- 1) 赤沼他：北海道立工業試験場報告, No289, p51(1990).
- 2) 尾谷他：北海道立工業試験場報告, No278, p115(1988).
- 3) 尾谷他：北海道立工業試験場 共同研究報告書 課題No5 (1989).

(尾谷 賢)

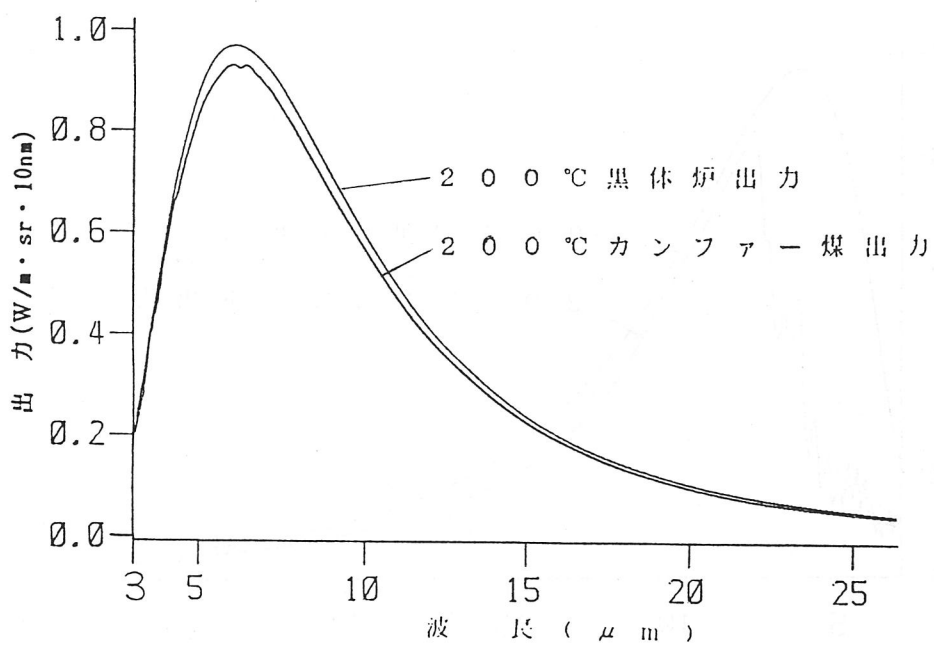
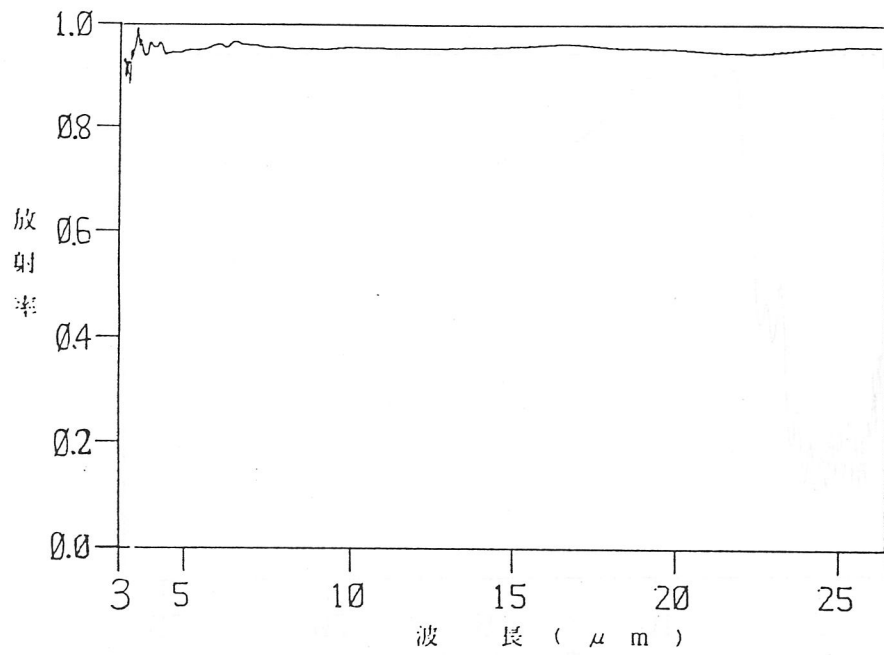


図 4. 1. 1 ススの分光放射特性

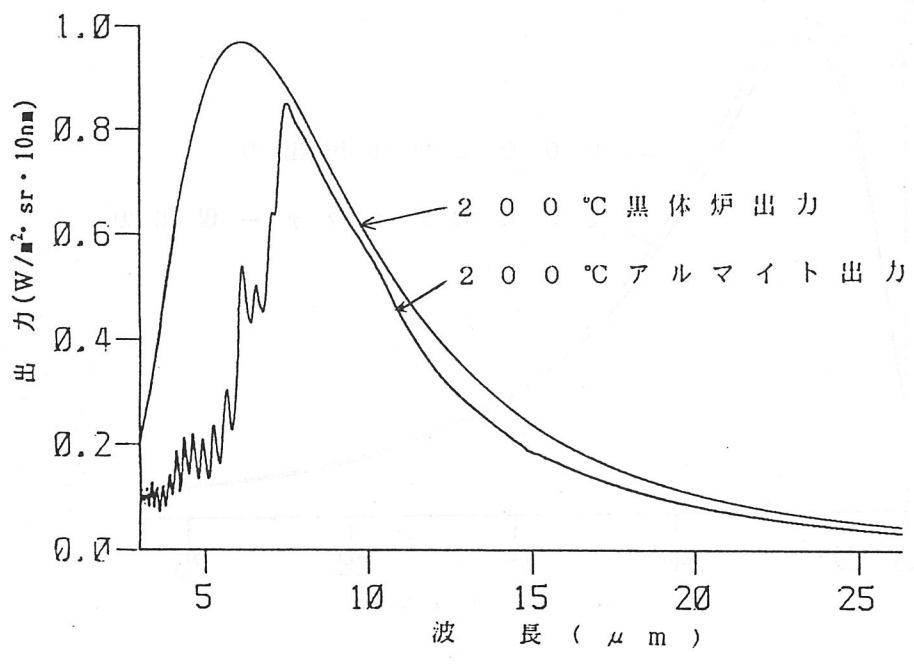
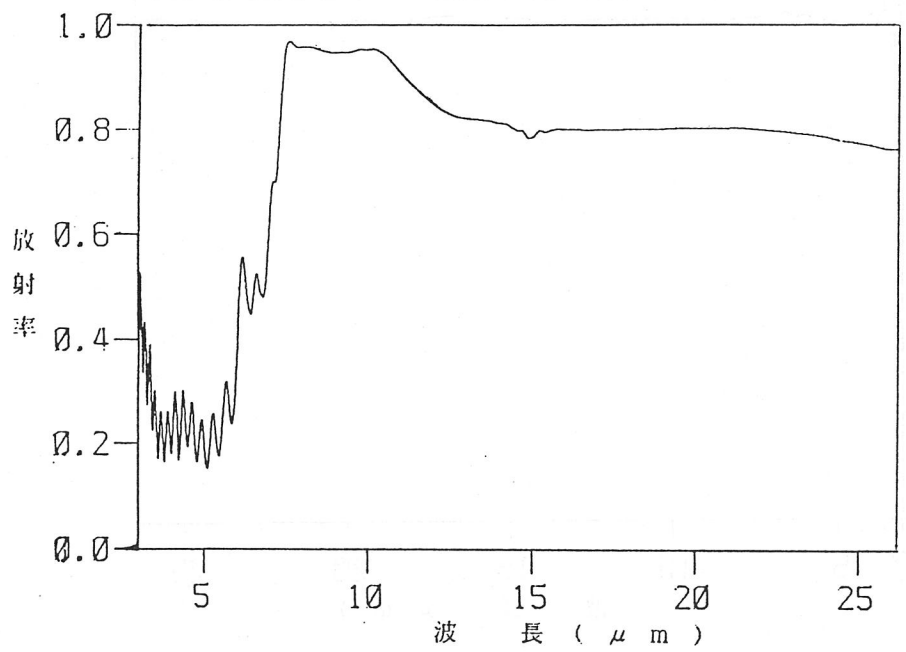


図 4. 1. 2 アルマイトの分光放射特性

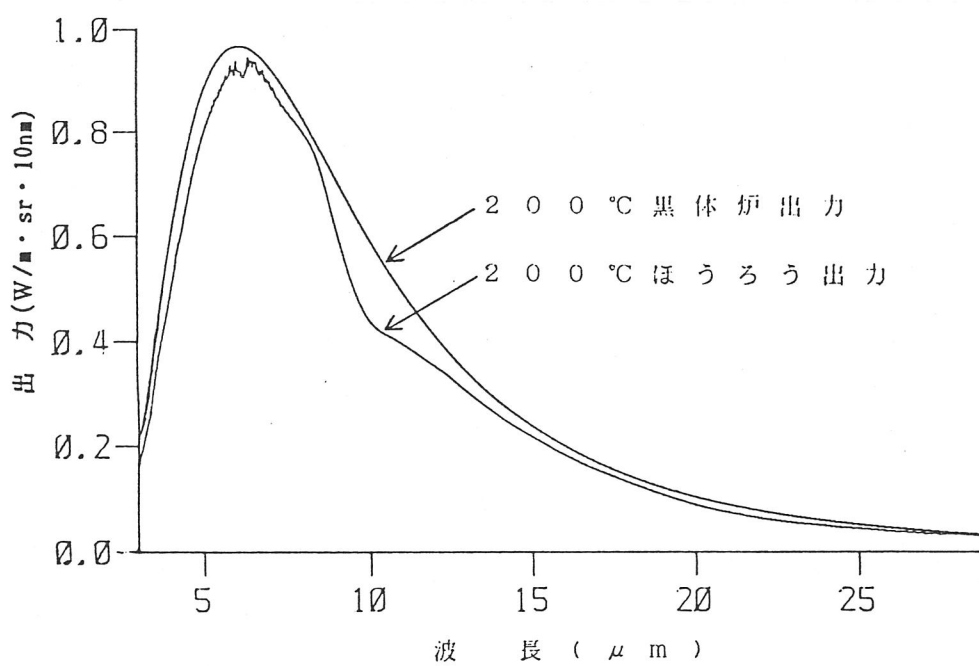
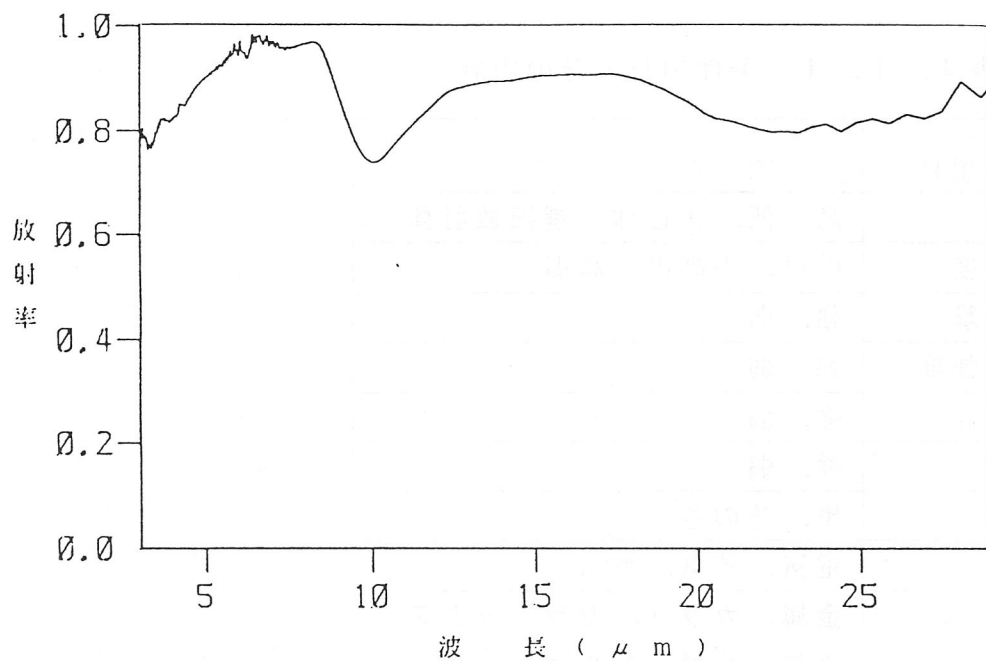
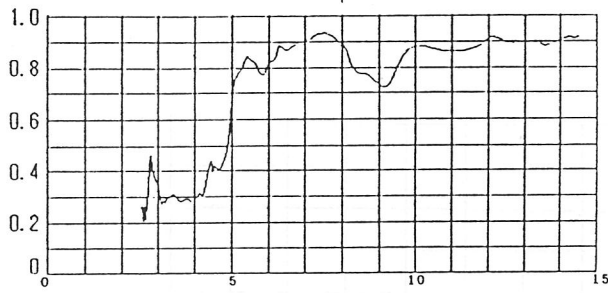


図4. 1. 3 ほうろうの分光放射特性

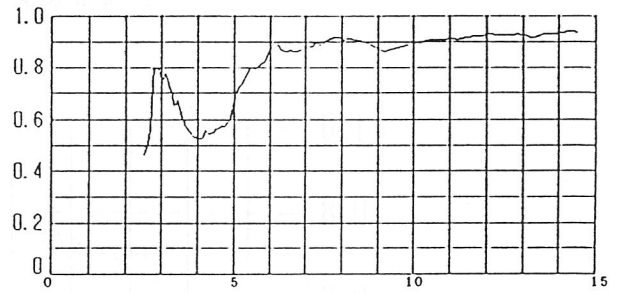
表 4. 1. 1 条件項目とその内容

条件・項目	内 容
放射率	高. 低. 灰色体. 選択放射体
使用温度	中温. 中高温. 高温
温度衝撃	強. 弱
機械的強度	強. 弱
耐腐食性	強. 弱
剝離性	強. 弱
色調	黒. その他
熱源	電気. 蒸気. ガス
素材	金属. ガラス. セラミックス. 塗料. 溶射. アルマイト類

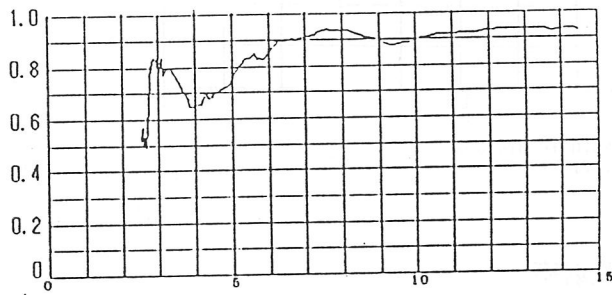
1-1 珪石



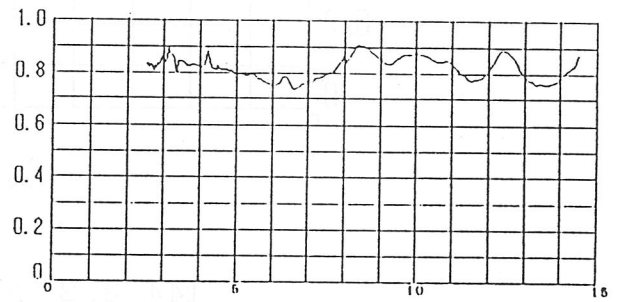
1-4 珪藻土



1-2 白土

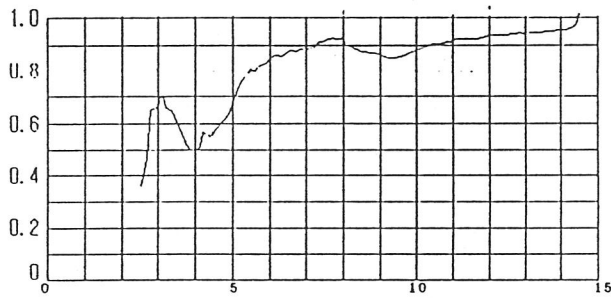


1-5 シリカブラック



X AXIS : WAVELENGTH in Microns
Y AXIS : EMISSIVITY

1-3 (軽石)



- (1) 珪石
- (2) 白土
- (3) 軽石
- (4) 珪藻土
- (5) シリカブラック

図 4. 3. 1 珪酸化合物の分光放射率
Fig. 4. 3. 1 Spectral emissivity of silicate minerals

木質系炭素

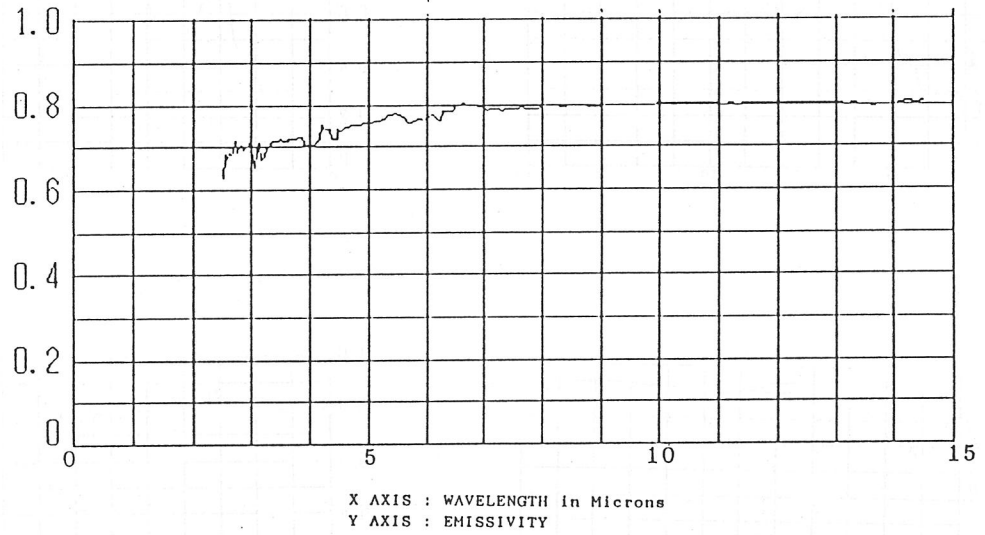
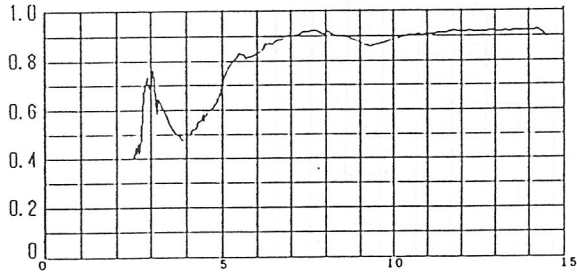
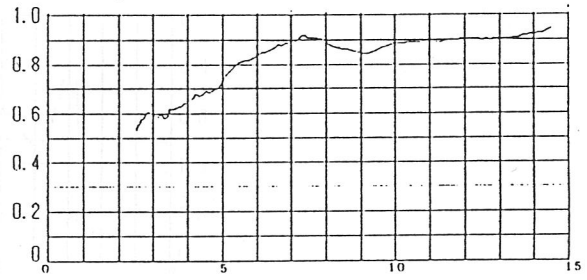


図4.3.2 炭素の分光放射率
Fig.4.3.2 Spectral emissivity of carbon

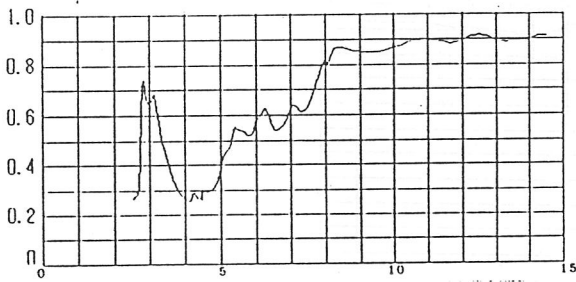
3.1 パーライト



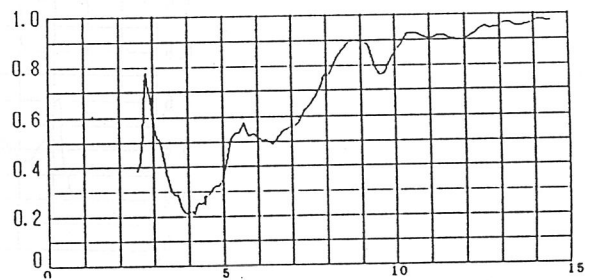
3.5 フライアッシュ



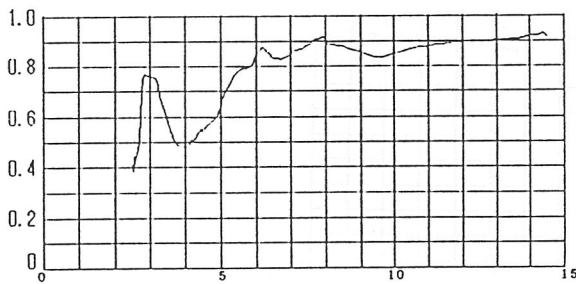
3.2 珪石



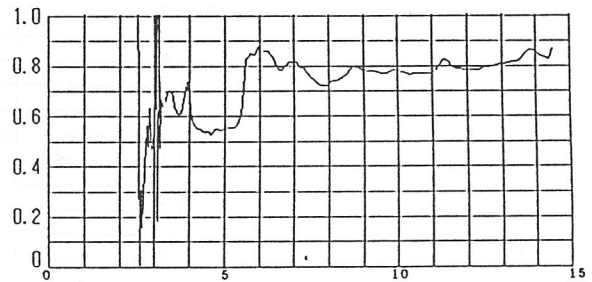
3.6 カオリン



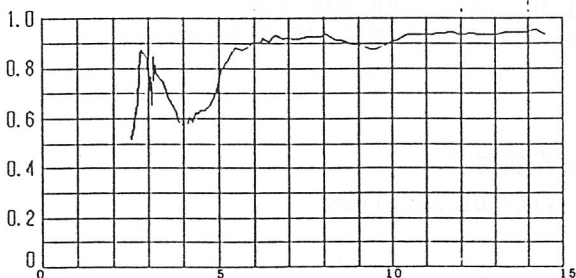
3.3 天然ゼオライト



3.7 ベントナイト



3.4 野幌粘土

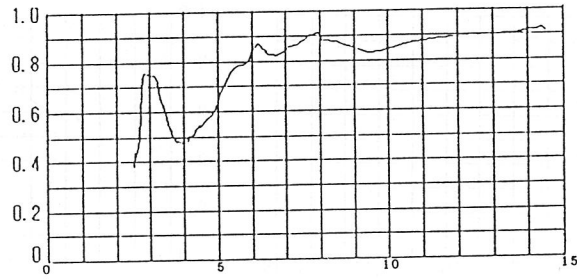


X AXIS : WAVELENGTH in Microns
Y AXIS : EMISSIVITY

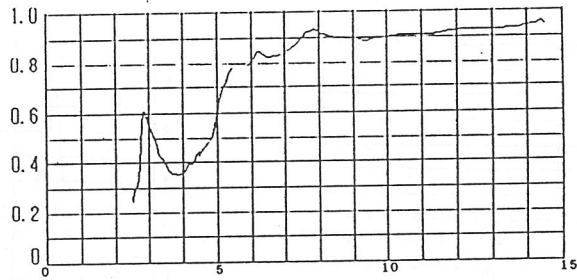
- | | |
|-----------|--------------|
| (7) パーライト | (11) フライアッシュ |
| (8) 珪石 | (12) カオリン |
| (9) ゼオライト | (13) ベントナイト |
| (10) 野幌粘土 | |

図 4. 3. 3 アルミノ珪酸塩の分光放射率
Fig. 4. 3. 3 Spectral emissivity of aluminosilicate minerals

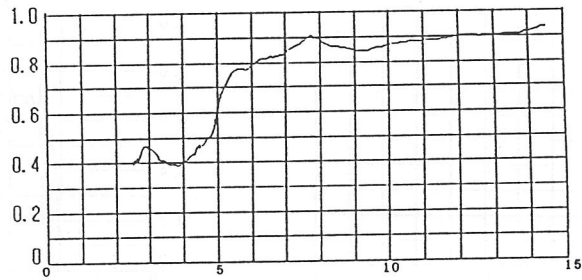
4-1 天然ゼオライト (原石)



4-2 天然ゼオライト (800°C焼成)



4-3 天然ゼオライト (1100°C焼成)

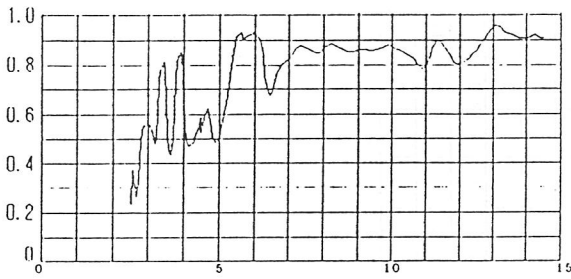


X AXIS : WAVELENGTH in Microns
Y AXIS : EMISSIVITY

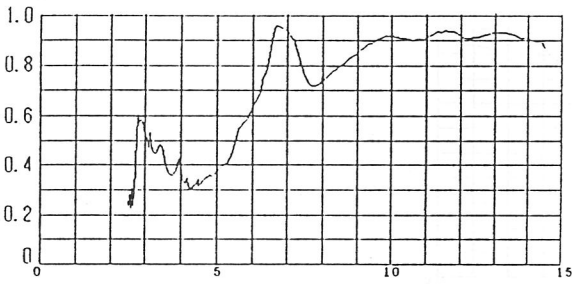
- (14) ゼオライト (SiO₂ 65, Al₂O₃ 15) 土幌原石
- (15) ゼオライト (SiO₂ 65, Al₂O₃ 15) 800°C焼成品
- (16) ゼオライト (SiO₂ 65, Al₂O₃ 15) 1100°C焼成品

図4.3.4 ゼオライトの分光放射率
Fig. 4.3.4 Spectral Emissivity of Zeolites

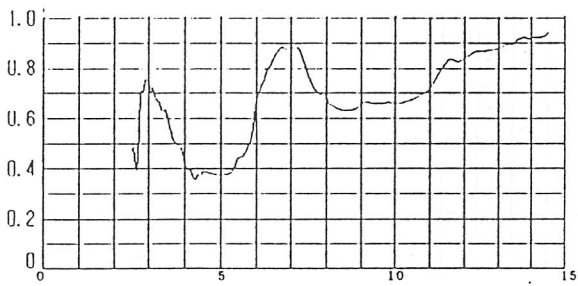
5-1 マグネサイト



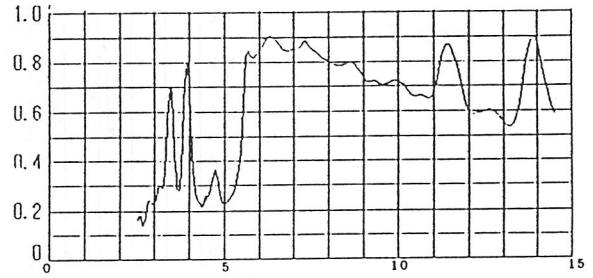
5-2 マグネシア



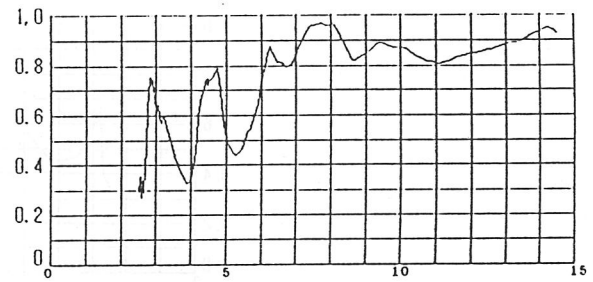
5-3 Mg(OH)₂ 水酸化マグネシウム



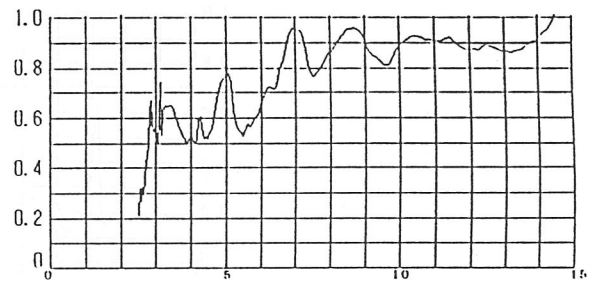
5-4 石灰石



5-5 セッコウ



5-6 アパタイト



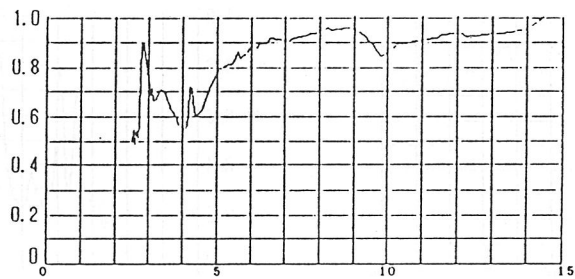
X AXIS : WAVELENGTH in Microns
Y AXIS : EMISSIVITY

- (17) マグネサイト
- (18) マグネシア
- (19) 水酸化マグネシウム

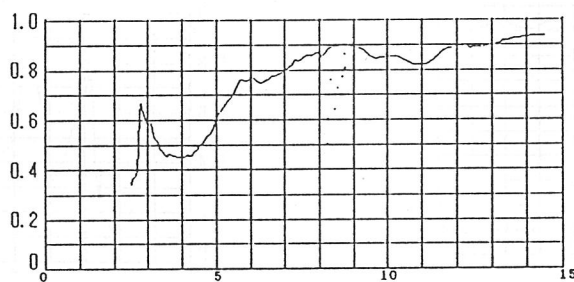
- (20) 石灰石
- (21) セッコウ
- (22) アパタイト

図4.3.5 カルシウム、マグネシウム化合物の分光放射率
Fig. 4.3.5 Spectral emissivity of calcium, magnesium minerals

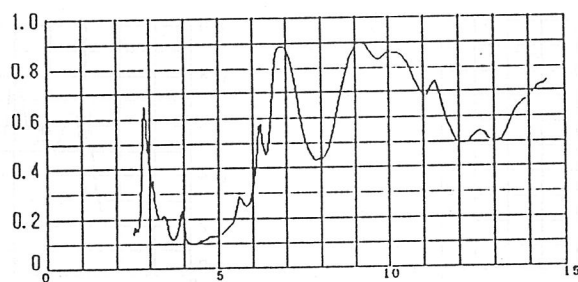
6-1 タルク



6-2 かんらん石



6-3 セピオライト

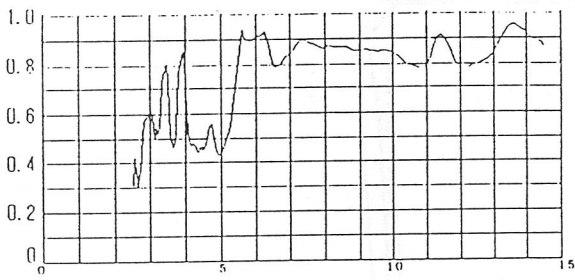


X AXIS : WAVELENGTH in Microns
Y AXIS : EMISSIVITY

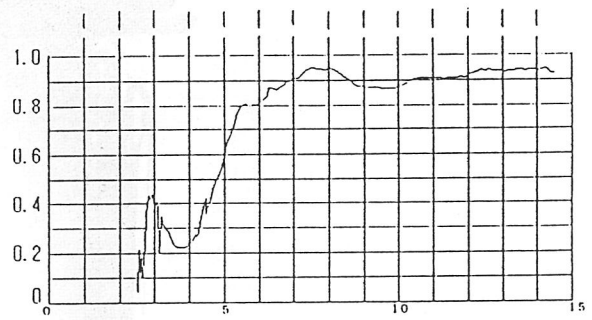
- (23) タルク
- (24) かんらん石
- (25) セピオライト

図 4. 3. 6 マグネシウム珪酸塩の分光放射率
Fig. 4. 3. 6 Spectral emissivity of magnesio-silicate minerals

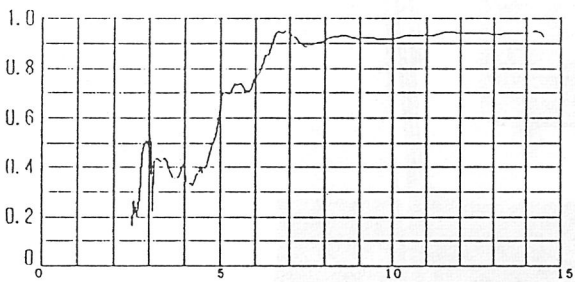
2.1 トロマイト



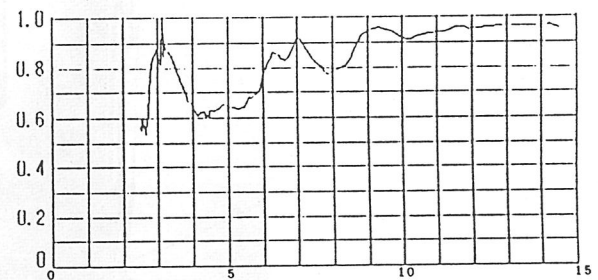
2.5 長石



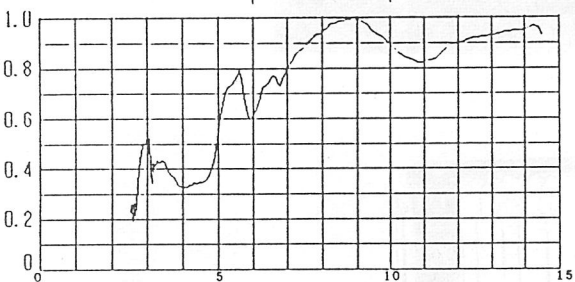
2.2 ケイ灰石



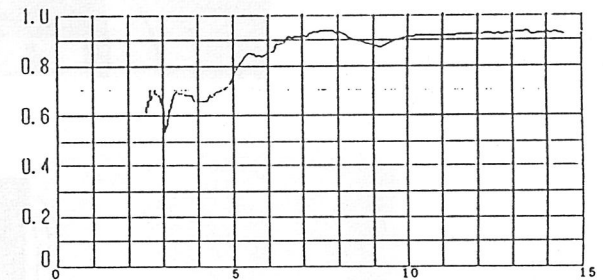
2.6 赤レンガ



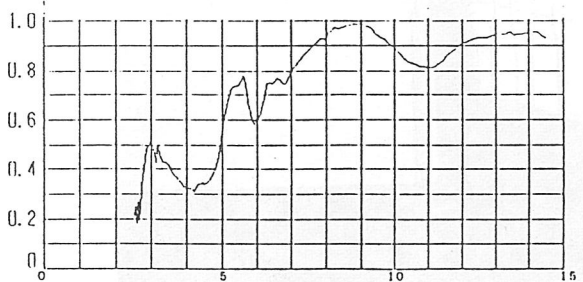
2.3 珪酸ジルコン



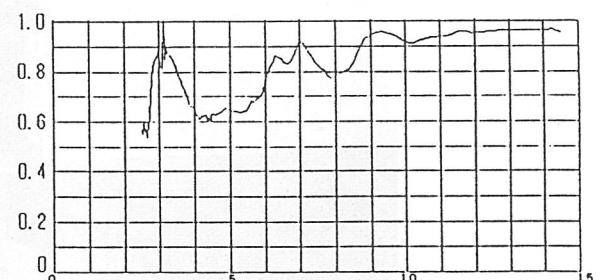
2.7 黒レンガ



2.4 ジルコン



2.8 赤泥



- (26) トロマイト
- (27) 珪灰石
- (28) 珪酸ジルコン
- (29) ジルコン

X AXIS : WAVELENGTH in Microns
Y AXIS : EMISSIVITY

- (30) 長石
- (31) 赤レンガ
- (32) 黒レンガ
- (33) 赤泥

図 4.3.7 その他の鉱物及び焼成物の分光放射率

Fig. 4.3.7 Spectral emissivity of several minerals and ceramics

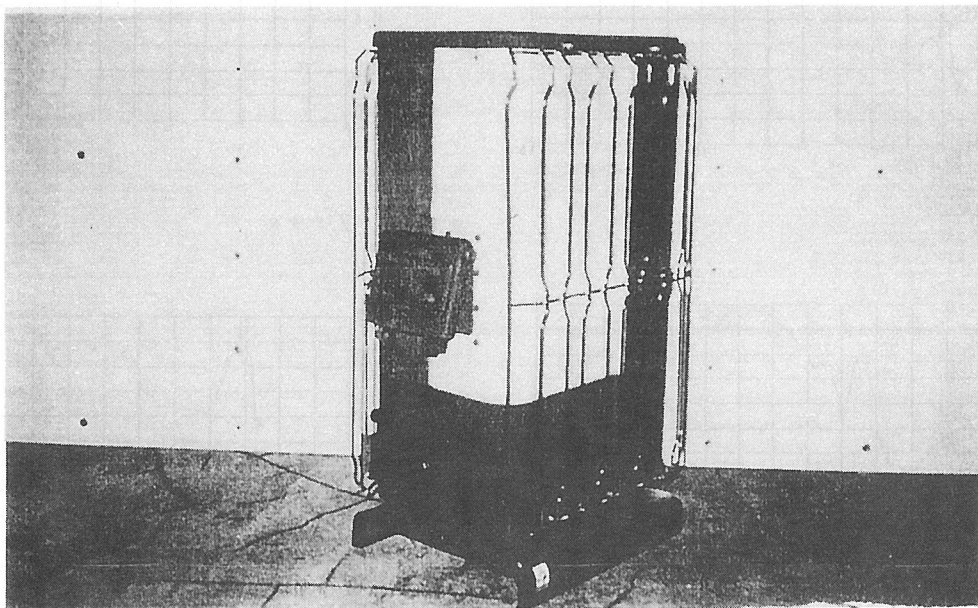
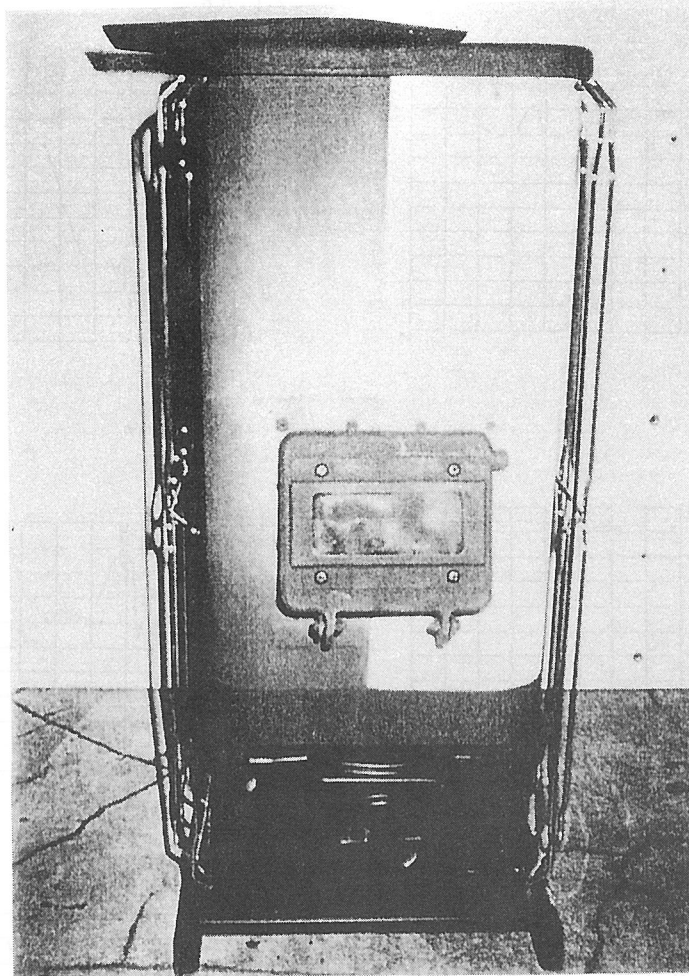
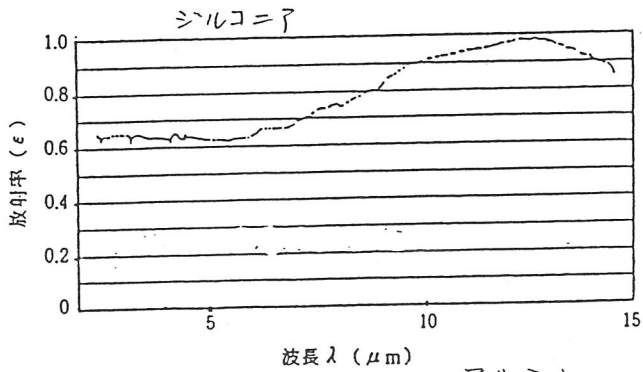
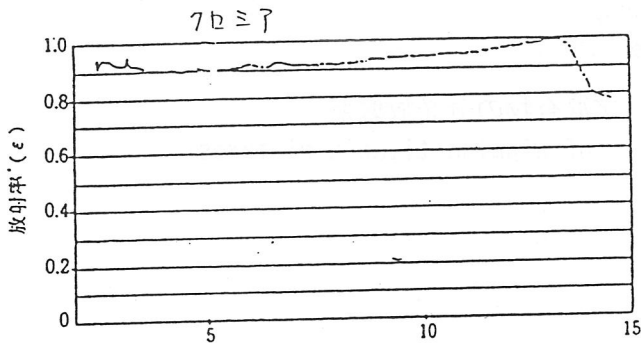
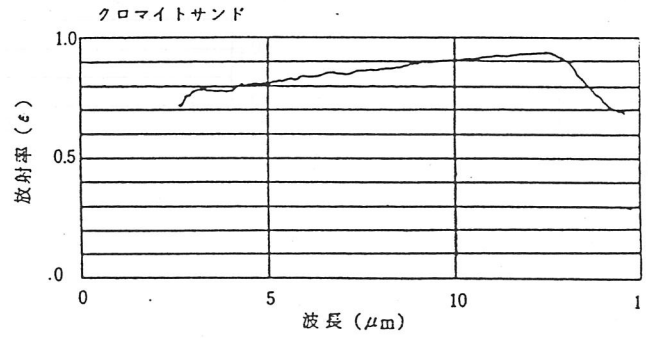
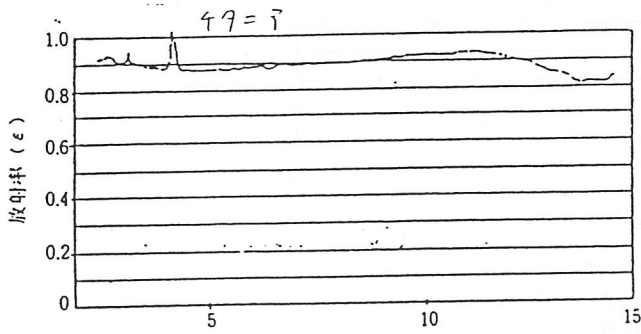
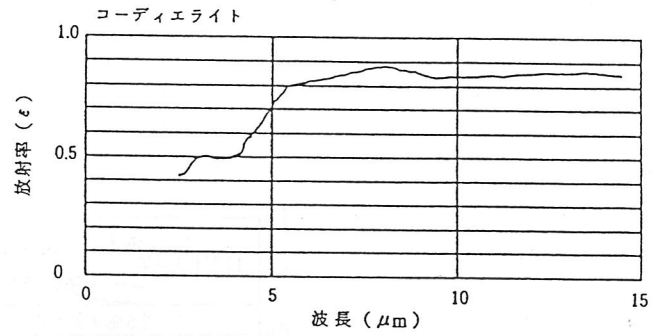
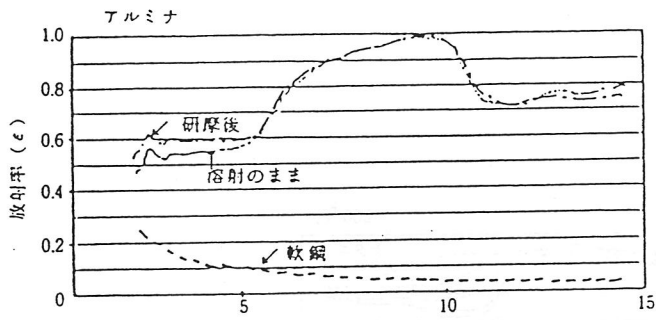


図4.3.8 セラミック溶射したストーブ
Fig. 4.3.8 Photograph of a ceramic coated stove by thermal spraying



アルミナ
チタニア
クロミア
ジルコニア

コーディエライト
クロマイトサンド

図4.3.9 溶射法による各種セラミックスの分光放射率

Fig.4.3.9 Spectral emissivity of ceramics by thermal spraying method

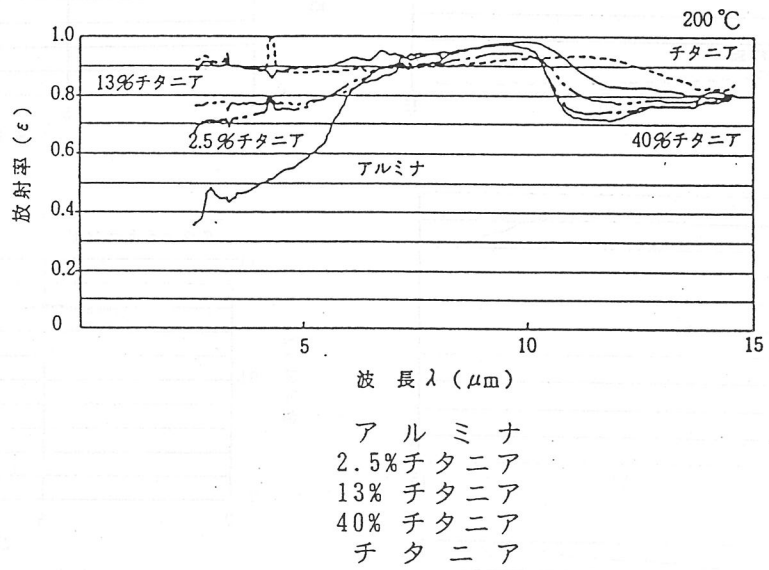
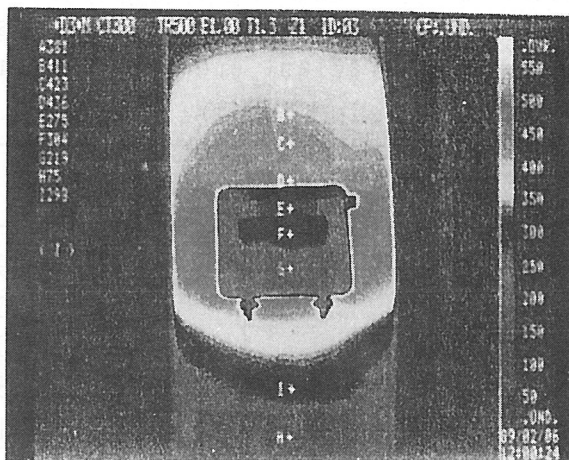
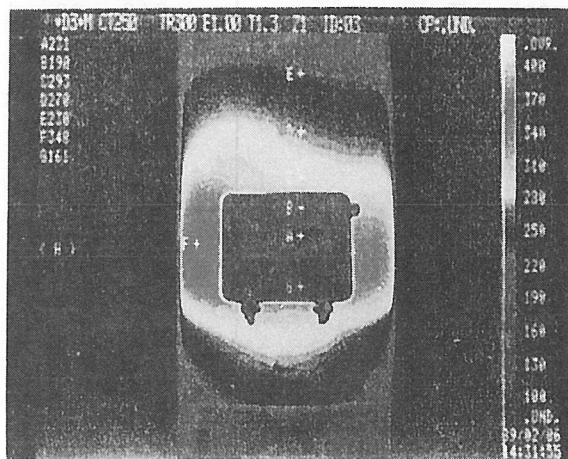


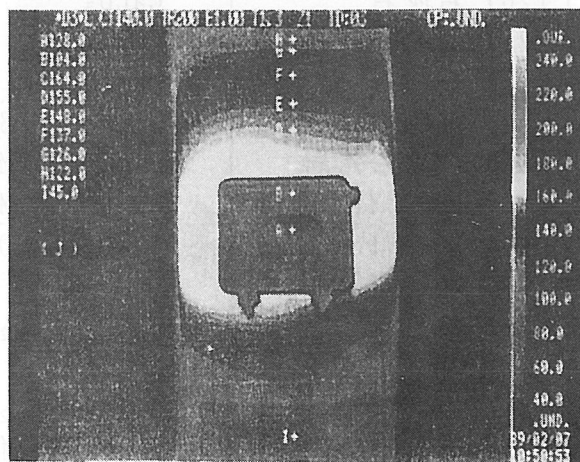
図4.3.10 アルミナーチタニア混合物の分光放射率
Fig. 4.3.10 Spectral emissivity of alumina-titania mixtures



燃焼 (0.86 kg/h
空気取入れ口目盛り 4)



燃焼 (0.45 kg/h
空気取入れ口目盛り 2)



燃焼 (0.26 kg/h
空気取入れ口目盛り 0.5)

試作ストーブ正面のサーモグラフ

図4.3.11 燃焼試験におけるストーブのサーモグラフ
Fig.4.3.11 Thermograph of stove in combustion test

表 4. 3. 1 遠赤外放射特性測定試料

Table 4.3.1 Natural mineral samples of far-infrared radiant energy measurement

鉱物名	主成分 (wt%)
(1) 珪石	SiO ₂ 97~99
(2) 白土	SiO ₂ 88~90, Al ₂ O ₃
(3) 軽石	SiO ₂ , Al ₂ O ₃
(4) 珪藻土	SiO ₂ 85~88, Al ₂ O ₃ 5
(5) シリカブラック	SiO ₂ 82, Al ₂ O ₃ 6, C 5
(6) 炭素	C
(7) ハーライト	SiO ₂ 70~75, Al ₂ O ₃ 12
(8) 貢岩	SiO ₂ 60, Al ₂ O ₃ 18
(9) セライト	SiO ₂ 65, Al ₂ O ₃ 15 長万部産
(10) 野幌粘土	SiO ₂ 60, Al ₂ O ₃ 19
(11) フライッシュ	SiO ₂ 45, Al ₂ O ₃ 20 オーストラリア炭
(12) カオリン	SiO ₂ 45, Al ₂ O ₃ 35
(13) ベントナイト	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , MgO
(14) セライト	SiO ₂ 65, Al ₂ O ₃ 15 士幌原石
(15) セライト	SiO ₂ 65, Al ₂ O ₃ 15 800℃焼成品
(16) セライト	SiO ₂ 65, Al ₂ O ₃ 15 1100℃焼成品
(17) マグネサイト	MgCO ₃
(18) マグネシヤ	MgO
(19) 水酸化マグネシウム	Mg(OH) ₂
(20) 石灰石	CaCO ₃
(21) セツコウ	CaSO ₄
(22) アパタイト	Ca ₅ (PO ₄) ₃
(23) タルク	SiO ₂ 60~65, MgO 30~35
(24) かんらん岩	SiO ₂ 50, MgO 50
(25) セピオライト	SiO ₂ 53, MgO 15~25
(26) トロマイト	CaCO ₃ ・MgCO ₃
(27) 珪灰石	CaO, SiO ₂
(28) 珪酸ジルコン	ZrO ₂ , SiO ₂
(29) ジルコン	ZrO ₂
(30) 長石	2MgO, 2Al ₂ O ₃ , 5SiO ₂
(31) 赤レンガ	粘土 (酸化雰囲気焼成)
(32) 黒レンガ	同上 (還元雰囲気焼成)
(33) 赤泥	Fe ₂ O ₃ 40, Al ₂ O ₃ 20, SiO ₂ 15

(組成割合はおおよその目安)

表 4. 3. 2 溶射用粉末材料

Table 4.3.2 Composition of powders for Thermal Spraying

試 料	組 成 (w t %)
アルミナ	Al ₂ O ₃ : 98.5, SiO ₂ :1.0
チタニア	TiO ₂ :99
クロミア	Cr ₂ O ₃ :96, TiO ₂ :2
ジルコニア	ZrO ₂ :91, MgO:8
コーディエライト	SiO ₂ :50, Al ₂ O ₃ :33, MgO:11.6, Fe ₂ O ₃ :3.4, TiO ₂ :1.2
クロマイトサンド	Cr ₂ O ₃ :45, Al ₂ O ₃ :15, Fe ₂ O ₃ :27, MgO:10

表 4. 3. 3 アルミナ-チタニア系溶射用粉末組成

Table 4.3.3 Composition of Alumina-Titania Powders for Thermal Spraying

試 料	組 成 (wt%)
アルミナ	Al ₂ O ₃ :98.5 SiO ₂ :1
2.5%チタニア	Al ₂ O ₃ :96 TiO ₂ :2.5
13%チタニア	Al ₂ O ₃ :87 TiO ₂ :13
40%チタニア	Al ₂ O ₃ :59 TiO ₂ :40
チタニア	TiO ₂ :99

表 4. 3. 4 燃焼試験

Table 4.3.4 Condition of combustion test

空気取り入れ口目盛り	0	0.5	2.0	4.0
燃焼量 (kg/h)	0.14	0.26	0.45	0.86
排ガス温度 (°C)	89	115	230	340
排ガス酸素濃度 (%)	15.5	15.5	12.5	8.5
排ガスNox (ppm)	50	50	80	80

燃料：オイルコークス

表 4. 3. 5 ストープからの放射エネルギー量

Table 4.3.5 Radiant energy of stove

燃焼量 (kg/h)	0.26	0.86
平均放射エネルギー量	0.109	1.008
最大放射エネルギー量 λ_{max} (μm)	0.159 6.3	1.568 3.7
最小放射エネルギー量 λ_{max} (μm)	0.059 7.7	0.258 5.7

放射エネルギー量 (kcal/cm²·h)

5 赤外放射加熱と他の加熱方法との比較

5. 1 赤外放射加熱の基本的な特性

赤外放射加熱、特に遠赤外加熱が他の加熱方法とどのように違うか、その利点、欠点という形で考えてみる。

5. 1. 1 遠赤外加熱の利点

(1) 遠赤外線は空気にはほとんど吸収されないので、直接、非加熱物表面に到達し吸収されて加熱効果をあらわす。これに対し、他の加熱方法、たとえば熱風加熱等の対流伝熱による方法は高温の空気を媒体にして被加熱物に熱を伝える。その際の空気と被加熱物との間の熱抵抗がかなり大きいので物体の温度上昇はたいへん時間がかかる。後述の塗装乾燥の比較例を参照。

高温の熱処理油等の中で加熱する伝導伝熱方式の場合には熱抵抗はたいへん小さいので、油等の熱媒体の温度が既に上げられている場合には加熱時間は短いですが熱媒体の温度上昇に要する時間も含めてトータルの加熱時間としてとらえた時には遠赤外線加熱に歩がある。

(2) 一般的に遠赤外領域に大きな吸収特性を示す有機材料等のごく短時間で加熱できるなど、特に著しい加熱効果をあらわす。同じ放射加熱であっても近赤外線加熱によるよりもさらにその加熱速度は早い。アクリル板を遠赤外ヒータ、近赤外ヒータによって加熱した場合の温度上昇の違いを図5. 1に示す。遠赤外線加熱の最大の特長である。他の加熱方法によった場合にはその材料が持つ比熱、熱伝導率によって決まる温度上昇速度しか得られない。

(3) エネルギーの強さが、熱源、被加熱物それぞれの絶対温度の4乗差に比例するので、熱源温度のわずかな変化によって加熱効果を大幅に変えられる。

(4) 電磁波が直進する性質を利用して、放射を集中、分散あるいは被加熱物の一部をマスキングすることにより、他の加熱方式では困難な部分加熱などのテクニックを活用できる。

(5) 電磁波のエネルギーレベルが低いため、化学作用が少なく純粋に加熱効果のみを期待できる。

(6) 人体などの生体に与える温熱効果が穏やかなので、暖房に利用する場合、ソフトな温感が得られる。

5. 1. 2 欠点

(1) 物体の表面加熱であるため、厚い材料の加熱がやりにくい。他の加熱方法に比較して加熱速度の差が出にくい。遠赤外線の浸透深さは物質の種類、入

射する遠赤外線の波長により、かなり幅があるが、一般的には入射した放射エネルギーが吸収されて半減する深さでみた場合、約50～100 μm くらいのオーダーである。きわめて薄い表面層で吸収されて熱にかわることがわかる。

(2) 電磁波の直進性、および空気に対する加熱効果がほとんどないことから被加熱物が熱源からの放射の陰になる場合には、加熱効果が得られないので、複雑な形をした立体物の加熱には工夫を要する。

(3) 被加熱物の周辺の雰囲気移動がないので、水分乾燥を行う場合、表面層近くの飽和水蒸気層を人為的に除去する必要がある。

(大槻 操)

5. 2 応用事例にみる赤外放射加熱と他の方法による加熱特性・効果の比較

5. 2. 1 塗装乾燥^{3, 4, 5)}

対流伝熱を利用した熱風乾燥炉では、塗膜の表面から乾燥が始まるため、塗膜の内部に取り残された溶剤が乾燥の進んだ表層の塗膜を破るようにして外部に放出され、塗膜の質を低下させる原因になっている。また、塗膜に投入できるエネルギー密度も放射式乾燥炉と比較して小さいことから、高温でのキュアリングが要求される塗料には不向きである。

一方、高輝度近赤外放射ランプ、あるいは遠赤外ヒータ等を利用した赤外放射乾燥炉では、赤外放射の塗膜への優れた浸透性（遠赤外放射は表面から数10 μm の深さまで浸透しながらその持っているエネルギーを熱に変換していく）から、塗膜の表面と内部とをほぼ同時に加熱乾燥することができる。これによって、比較的厚い塗膜でも表面を劣化させることなく短時間で乾燥でき、品質向上に寄与している。

熱風加熱、あるいは赤外線ランプ加熱などの方式と比較した場合、遠赤外線加熱方式には次のような利点がある。

- 1) ランニング・コストの低減
- 2) 装置のコンパクト化
- 3) 塗装時間の短縮
- 4) 塗装品質の向上¹⁾
 - イ) 塗膜が硬くなる
鉛筆硬度で1～2ランクアップ
 - ロ) ピンホール、発泡現象の低減
 - ハ) 白化現象の低減
 - ニ) 表面平滑性、艶、クリア塗装の透明度向上
 - ホ) 木製品の塗装の目やせの低減

ランニング・コストの低減、塗装時間の短縮を実現できた事例として金属銘板の焼付け乾燥を熱風加熱炉から遠赤外線加熱炉に転換したケースを表1に紹介する²⁾。

また、従来、塗料の溶剤には有機溶剤が多く使用されてきたが、環境規制の強化に伴い、有機溶剤の使用に対しても規制が強められている。このため、塗料の無公害化をはかるため、水性塗料や粉体塗料の開発が進められている。通常、これらの乾燥、キュアリングにはより密度の高いエネルギー源が必要とされ、エネルギー密度の高くとれる近赤外放射式乾燥装置の開発、導入が進められている。

5. 2. 2 食品加工

A) 干し柿⁷⁾

従来、干し柿（あんぽ柿）の製造は、大部分、天日乾燥にたよっていたが、遠赤外放射を利用した乾燥装置の導入によって、以下のような効果をあげている。

- ① 乾燥日数の大幅短縮
 - ・ 従来の27日から4日へ
- ② 品質の向上
 - ・ 糖度の増加（図3）
 - ・ ビタミンCの増加（図4）
 - ・ 色合いの向上

上の②で述べた効果については、必ずしも機構が明確になっているわけではないが、他の文献等^{7, 8)}でも同様の効果が指摘されている。遠赤外放射を用いることによって、食品が本来もっている風味、色合い等をあまり損なうことなく加熱、乾燥できる。

B) 牡蠣の冷凍保存前の焙焼⁹⁾

牡蠣を冷凍保存する場合、生の牡蠣をそのまま冷凍すると解凍した時に多くのドロップが牡蠣の外に出て、製品価値が低くなる。そのため、冷凍する前に牡蠣の表面に遠赤外放射を照射することによって表面部分を加熱処理して牡蠣の表面に被膜を構成し、解凍時にドロップが流出しないようにして製品価値を高めている。

遠赤外放射は食品に非常によく吸収されるので、比較的短時間のうちに食品の表面を加熱処理するのに適している。同様の機構は、製麺の乾燥工程にも導入されており、生麺の表面に遠赤外放射を短時間照射することによって、麺の

表面が糊化して麵線の強度が増すため、麵の伸びや切れが減少し、生産性が向上するなどの効果が報告されている^{10,11)}。

5. 2. 3 サウナ

遠赤外放射式のサウナは、従来の対流式サウナと比較して、サウナ室の室温を抑制しつつ人体へ熱を供給できる。両サウナの効果の差異は、放射を中心にした伝熱と、対流を中心にした伝熱とに対する人体の反応の差異と見ることができる。いくつかの報告には、遠赤外放射式のサウナは、対流式サウナと比べて、のぼせない、心臓への負担が軽い、発汗性や保温性が優れている、疲労の回復がはやい等の効果が指摘されている^{12,13)}。これらの効果の因果関係すべてに対して完全な証明、解釈が与えられているわけではないが、表2および表3に示すように、種々の科学的アプローチがなされている。

参考文献

- 1) 池上 : 電熱 , 21('85)10
- 2) 大槻 : ケミカルエンジニアリング , 32('87)1
- 3) J. R. Bush; "Electric Infrared Process Heating : State-of-Art Assesment", EPRI Report EM-4571, (Mar. 1987)
- 4) J. Cohen; "Supporting Business with Infrared Processing", EPRI Journal, Oct./Nov. 1987, pp.28-33.
- 5) R. Whitaker; "Shining Promise for Infrared Paint Curing", EPRI Journal, Sept. 1989, pp.27-31.
- 6) 鈴木、村田 : 「遠赤外線による柿の乾燥」, 電熱, No.55,1991, pp.8-15.
- 7) 島田、小山田 : 「遠赤外線による緑葉の乾燥効果－遠赤外線の歯学的応用に関する研究 第一報－」、九州歯科大学進学過程研究紀要、第8号、1977年、pp.29-35.
- 8) 島田 : 「遠赤外線によるい草の乾燥効果－遠赤外線の歯学的応用に関する研究 第三報－」、九州歯科大学進学過程研究紀要、第11号、1980年、pp.39-46.
- 9) 藤堂 : 「遠赤外線カキ加熱装置」, 電熱, No.30, 1986, pp.32-35.
- 10) 四国総合研究所 : 「新しい食品加工技術をめざして、製麵への遠赤外線照射技術」、総研だより.
- 11) 中野 : 「製麵への遠赤外照射に関する基礎的検討」、照明学会誌、第74巻、第12号、平成2年、pp.23-25.
- 12) 川口 : 「遠赤外放射のサウナへの応用」, 電熱, No.30, 1986, pp.52-56.

13) 大阪ガス：「ガス遠赤外線サウナおよびガス温水ヒータの健康面の効果について」.

(中野幸夫、大槻 操)

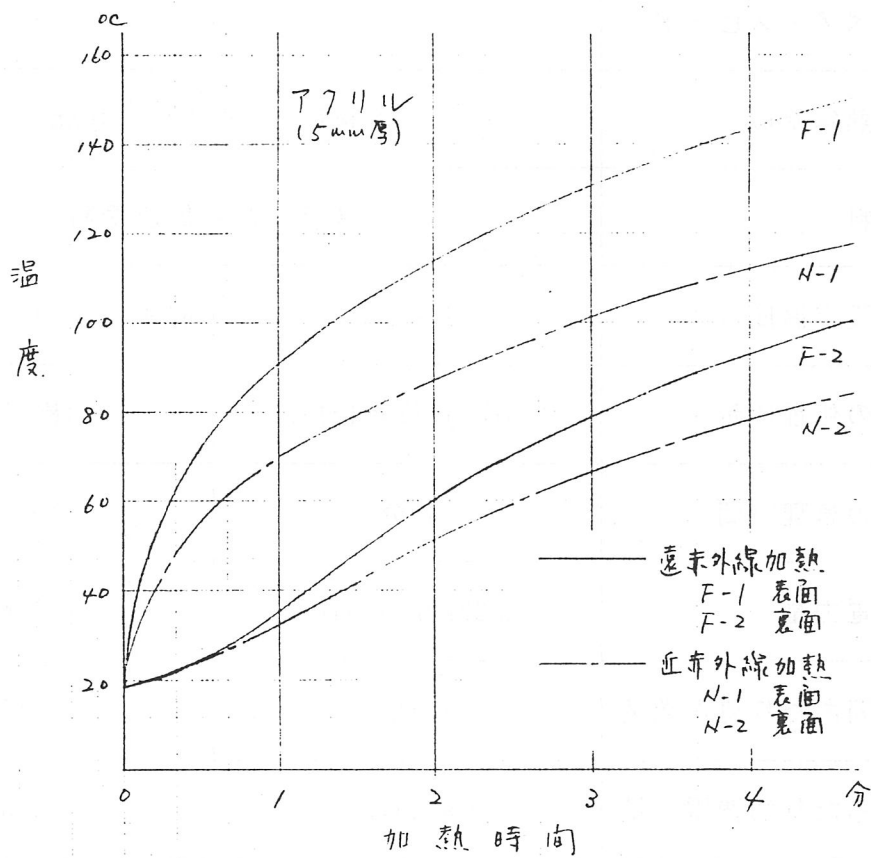


図5.1

表1 遠赤外線加熱と熱風加熱方式の経済比較²⁾

	熱風加熱炉	遠赤外線加熱炉
設備容量	200V 6KW	200V 6.3kw
加熱部寸法 (mm)	高700×幅600×奥行450	長1,700×幅450
材料の入れ方	42×59cmの網板に材料を載せ炉内に挿入。網板は13枚収容可能	コンベア上に材料を並べ、順番に炉内に搬送
コンベア・スピード		0.5m/min
被加熱物基板	黄銅板 1×120×140mm	
塗料	メラミン系黒色塗料	
炉内設定温度	120℃	前段 170℃ 後段400℃
1回の処理数量	156枚(12枚×13段)	3枚/列
1回の処理時間	40分	3.7分/列
消費電力量	2.22kwh/40min	2.23kwh/hr
1時間あたり処理数量	234枚	642枚
1枚あたり消費電力量	9.49wh	3.5wh

表2 遠赤外放射サウナと従来のサウナとの比較 (I) ¹²⁾

遠赤外放射 サウナの効果	効果の確認手法	比較結果	
		遠赤外放射サウナ	従来のサウナ
のぼせない*	鼓膜温度の測定**	37.8~38.0℃	39.2~39.7℃
	被験者の申告	のぼせなし	のぼせあり
心臓への負担が 軽い	心拍数の測定	125拍/分 急歩に相当	180拍/分 高速ランニングに 相当

* : のぼせは視床下部の温度が39℃以上になると発現するといわれている

** : 視床下部に近い鼓膜の温度を測定している

表3 遠赤外放射サウナと従来のサウナとの比較 (II) ¹³⁾

遠赤外放射 サウナ効果	効果の確認手法	比較結果
心臓への負担が 軽い	心仕事量*の測定	入浴経過時間に対する心仕事量が遠赤式のほうが対流式より全体的に小さい
	サウナ室温の測定	同量の受熱量を得る時のサウナ室の設定温度は遠赤式のほうが対流式より9～19℃低い
	受熱量の測定	
発汗が優れている	体重変化量／体重の測定	受熱量は遠赤式のほうが対流式よりも小さいのに、体重変化量／体重は遠赤式のほうが大きい
保温性が優れている	体表面のサーモグラフ	入浴後の温度低下は遠赤式のほうが対流式よりも小さい
疲労回復がはやい (乳酸のWash Out 効果が高い)	乳酸変化率の測定	遠赤式では乳酸の量が一旦上昇し、その後低下した(筋肉内に蓄積された乳酸が血中に洗い流されて処理されたことを示唆している) 対流式では乳酸の量が上昇しなかった

* : 心仕事量 = 最高血圧 × 心拍数

6 赤外放射加熱の産業応用

概 要

赤外放射加熱は、電気及びガスを加熱源とし、主としてセラミック材料を放射源として、加熱・乾燥・硬化・軟化・反応促進の分野で近年急速に工業的に利用され始め、最近では食品製造にもかなり普及してきている。さらに民生用、常温域での利用とその応用は目覚ましいものがある。その目的は省エネルギー・品質向上にあるのがほとんどであるが、健康関連の製品も目立っている。放射加熱のうちでも波長の長い赤外放射加熱は、対流を利用する熱風加熱・熱源と接触させる伝導加熱と比較して次の点で優れており、積極的に産業応用されてきた。

1. 省エネルギー：ワークへの熱吸収効率が良いので短時間で加熱される。
エネルギー消費量の低減
2. 品質向上：表面と内部の温度差の少ない均一性の高い加熱であるので、塗装膜の性能向上（硬度・色調・平滑度）、品質のバラツキの無さによる歩留の向上等大きな効果がある。
3. 生産性向上：バッチ式加熱炉と比較して連続式加熱炉になるので、大幅な時間短縮と省力化に寄与する。
設備設置スペースの減少
4. その他：水分の乾燥特に微量水分、残留水分の除去に顕著な効果が認められ、また熟成・日持ち向上・殺菌等特殊な分野にも使用されている。

赤外放射加熱には次の作用効果と利点がある。

1. 乾燥：水切乾燥・脱水乾燥・インキ、ワニス、捺染、塗料の乾燥がありワークが赤外域に吸収帯がある場合、熱風乾燥と比較して乾燥時間が短いことから設備のコンパクト化とランニングコストの低減化が図られ、また連続運転ができるため自動化ができ省力化もできる。
2. 硬化・焼き付け：塗装・樹脂の硬化・加硫等があり、上記同様の利点の他、塗装の場合硬度が向上し、ピンホール・発泡現象が抑えられる。
3. 加熱加工：プラスチック成型加工・歪徐去加工等があり、内部まで均一加熱できるので不良品が減少し歩留が向上する。
4. 予熱・保温：真空成型加工・中空成型加工等があり、均一な温度分布

が取れる特徴と内部まで均一加熱できる特徴で利用されている。

5. 焼成・焼き上げ

食品の製造工程に利用され、味の向上・時間短縮・品質の安定化・燃費の低減・自動化（職人の排除）等大きな効果を上げている。

6. 暖房

対流式と違い放射加熱であるのでスポット暖房に効果がある。

次に産業分野別に応用例を示す。

1. 機械・金属・自動車

塗装乾燥・焼き付け硬化、洗浄乾燥、水切り乾燥、マーキング印刷焼き付け、接着、植毛加熱

2. 電気・電子

印刷回路のペースト・レジストの乾燥・焼き付け、ハンダ付けリフロー、塗装乾燥・焼き付け硬化、洗浄乾燥、水切り乾燥、マーキング印刷焼き付け、ワニス乾燥、電線の加硫

3. 樹脂・ゴム

加熱軟化、加熱硬化、余熱、加熱、乾燥、発砲スチロールの加熱減容、加硫、シュリンクフィルムの収縮、塗装乾燥、接着硬化

4. 木材・建材

余熱、乾燥、塗装乾燥・焼き付け、接着、合板の目止め・上塗り、プリントの乾燥・接着、パルプ乾燥、

5. 紙・印刷

水分乾燥、印刷インクの乾燥、表面コートの乾燥、糊付け乾燥紙器の接着

6. 食品

魚・肉類・水産練製品・菓子・パン類の焼き上げ、焙煎、焙焼、解凍、保温、調質、乾燥、濃縮、殺菌

7. ガラス・窯業

ガラス板の予熱・徐冷、ビン・アンプルの予熱・乾燥・殺菌、タイル・陶器・セメント・瓦の生地予熱・塗装予熱乾燥・印刷乾燥・施釉予熱、加硫

8. 繊維・織物

染色・捺染乾燥、ヒートセット、不織布の接着

9. 農林水産

野菜・薬草・いぐさの乾燥、家畜類の孵卵・育すう、暖房

10. 民生用

暖房・サウナ・温熱治療等以上のように赤外放射加熱はあらゆる産業分野で利用されているが、万能では無く次のような欠点もあるので良く理解した上で使用した方が良い。

1. 表面層での急速加熱であり、内部へは伝導加熱になるので厚い材料の加熱には不向きである。
2. 赤外領域に吸収帯のない材料、熱反射率の高い材料の加熱は赤外放射の性質上不向きである。
3. 放射は直進性であるので影の部分ができる複雑な形状のワークやワーク同士で影ができる場合は照射方法に気を付けなければいけない。
4. 粉体乾燥加熱には不向きであるので工夫を要する。

(安坂耕一、横内洋文)

6. 1 機械工業

6. 1. 1 自動車塗装乾燥

赤外線による物体の加熱は、赤外放射エネルギーを物体が吸収して初めて温度上昇するというのがその原理であって、この点が他の対流あるいは伝導による加熱現象の、温度そのものが伝達される加熱方式と根本的に異なるものである。

このことから、赤外放射加熱によって物体が発熱する場所は、必ず物体の内部となっている。これは赤外放射エネルギーを吸収する部分（厚さ）が必ず必要であるからである。この厚さは物体の赤外線の吸収率（正しくは吸収係数）でそれぞれ異なり、吸収率の高い物ではわずか数 μm のこともあるが、普通は数十 μm である。また波長によっても異なり、一般的には遠赤外線では吸収する距離は短くなる。

この現象から、厚手の物あるいは熱容量の大きな物を、表面から内部まで一様に加熱するなどの場合には、赤外放射加熱は適していないこともある。

赤外放射加熱の特徴を発揮するのは、表面近傍の加熱、薄物の全体加熱、凹凸のある表面の一様な加熱などである。

赤外放射による自動車の塗装乾燥は、この表面近傍の加熱・凹凸表面の加熱という点で有効な方法である。もちろん自動車に限らず塗装乾燥全体について適している方法といえる。

赤外線ランプによる加熱装置の一例を写真6.1.1に示す。

赤外放射加熱による塗装乾燥の技術資料には、例えば遠赤外線ヒータ使用の※1、近赤外線ヒータを使用した※2があり、それぞれが他の方式よりも優れていると発表している。また、赤外線の放射による塗装乾燥によると堅固な塗膜が生成されるということが風潮としては伝わっている。

参考文献

- 1) 「遠赤外加熱の理論と実際」, オーム社, p. 149, 自動車補修塗装乾燥
- 2) 近赤外線キュアリングシステム, (株) エス ケイ ケイ (東京)
(笹森宣文)

6. 2 電気・電子工業

6. 2. 1 はんだリフロー装置

プリント基板上の電子部品を能率的にはんだ付けする方式に、はんだリフロー炉がある。これはあらかじめはんだを印刷しておいたプリント基板の上に、電子部品を自動機によって所定の位置に装着し、そこに赤外線の放射、熱風の吹き付け、高温のガス、或いはそれらを併用した加熱源によってはんだを溶かし、はんだ付けを行うものである。

赤外線放射源としては、ハロゲンランプや近赤外線ヒータ、遠赤外線ヒータなど多用化している。図6.2.1に遠赤外線ヒータによるはんだリフローの工程図を示す。

はんだリフロー炉によるはんだ付けは、プリント基板の両面に電子部品を装着して密度を向上させるSMT（表面実装技術）技術の開発に伴って使われ始めたものである。

6. 2. 2 各種材料の急速加熱

実験室的に小型の試料を急速に加熱するときのために、赤外線加熱装置が使用されている。これはハロゲンランプなどからの（赤外）放射エネルギーを、楕円ミラーの反射によって一点に集光させ、その場所に置いた試料を急速に加熱するものである。試料の赤外吸収率や熱容量によって温度上昇の程度に差があるものの、ICのハンダ付けにも使用されるほど急速で、スポット部分だけの加熱も可能である。ハロゲンランプは最大2kW程度である。

真空中に置かれた試料の加熱も可能であり、放射エネルギーを導光パイプで離れた試料まで導く方式もある。

本装置の一例を図6.2.2に、動作特性の一例を図6.2.3に示す。

特徴をまとめると、1) 1,000℃まで約5秒で昇温させることができるほど急速な加熱が可能。2) 急速な昇温、降温特性。3) プログラム温度コントロールにより正確な昇温特性が得られる。4) 焦点の調節によって、2mmφ程のスポット状の部分のみの加熱もできる。

(笹森宣文)

6. 3 製紙・繊維工業

6. 3. 1 布地の捺染（プリント）工程への適用¹⁾

近年、衣服、バッグ等の布地に絵柄や文字をプリントすることの需要が増えている。従来、これらの焼付乾燥は熱風（重油又はガス）により行われていたが、作業能率（時間、労力）の向上や作業環境（熱気・騒音）の改善が望まれていた。この焼付工程に遠赤外線を適用した布地プリント焼付け乾燥機が実用化されている。その仕様は次のとおり

- (1) 名 称 : 電熱式遠赤外線布地プリント焼付け・乾燥機
- (2) 方 式 : 水平型ベルトコンベア方式（速度0～5 m/分）
- (3) 炉本体寸法 : 3 m×1.26 m×1.35 m
- (4) 電気容量 : 200V 10kW（遠赤外線棒状ヒーター1 kW/本×10本）
- (5) 炉内温度 : 室温～170℃ 最高温度200℃
- (6) 照射距離 : 100 mm～200 mm

6. 3. 2 製紙工程への応用²⁾

紙は、木材を原料とするパルプ又は回収した古紙を溶解して製造される。パルプ又は、古紙を一旦ペースト状にした後、シリンダーで圧延、乾燥することにより、製造されるが、この乾燥工程は、仕上がり紙質を左右する重要な工程で、雰囲気相対湿度が6%程度に厳密に管理された乾燥装置が使用される。紙の乾燥工程は通常次の3段階に区分できる。

- (1) 全体が温度上昇する過程
- (2) 含まれている水が一定速度で蒸発する過程
- (3) 仕上げの乾燥過程

この乾燥促進のために、従来は熱風を媒介として、対流および伝導により、熱エネルギーが供給されてきたが、最近、赤外線による加熱の併用が一部で実用化されている。図6.3.1に示すように、乾燥工程に赤外線を利用すること

により、乾燥時間をほぼ半減することができる。図6.3.2は製紙業における乾燥工程の実例を示す。近赤外線（波長：0.76～2 μm）は乾燥設備内部の温度が低くなった部分に使用され、主に紙に含有される水分の分布の平準化用の熱源として利用される。

遠赤外線（波長：4 μm以上）は、乾燥コンベアのその他の加熱乾燥部分に使用される。

〔ボール紙の乾燥への適用例〕

（設計条件）

重 量 : 200 ~ 400 g/

紙 幅 : 2050

仕上り水分 : 44%

生産量 : 1230 /h

（設計設備）

中・遠赤外線ヒーター : 160 kW

生産効率の改善 : 12% up (150kg/hup)

1年間の生産量 up : 750 t/年 (年間稼働時間 5,000 h)

6.3.3 オフセット印刷への応用³⁾

枝葉オフセット印刷における印刷紙の裏移り防止対策として、従来からスプレーパウダーを印刷後、印刷面に塗布しているが、印刷仕上がりが悪くなったり、パウダーによる機器の損傷を早めたりしている。この対策として、印刷後のデリバリ部直前に乾燥システムを装着し、強制乾燥が行われるようになってきた。乾燥方法としては赤外線（近赤外線）と紫外線（UV）が主として用いられているが、高速印刷機では、紙面の通過時間が短いために、十分な乾燥効果をあげることができない。そこで、塗料等の乾燥で効果をあげている遠赤外線を適用し、実用化されている。このオフセット印刷における遠赤外線と近赤外線の比較は表6.3.1の通りである。

参考文献

- 1) 中村重七他：遠赤外布地プリント焼付乾燥機の開発に伴う基礎試験，平成2年照明学会全国大会予稿集 pp.166-167 (1990).
- 2) 河本康太郎：遠赤外線加熱の利用例，製紙・印刷業への応用，生産と電気，42，12，pp.20-26(1990).
- 3) 佐々木完：遠赤外線加熱の応用，オフセット印刷への応用，電熱22(1985)

(安坂耕一)

6. 4 化学工業

6. 4. 1 プラスチック加工への応用

熱可塑性プラスチックシートは、その二次加工で必ず成型のための加熱軟化工程が必要になる。この加熱には精密な温度分布と安全性及び可能な限り短時間加熱が要求される。この概要は日本碍子株池上良一氏※1)より報告されているので紹介する。プラスチックシートの加熱の種類を大別すると

- (1) フィルムの加熱（延伸によるフィルムの強化、シュリンク包装、アニーリング）
- (2) 真空・プレス等による成型前の加熱（卵パック・カップラーメン食品容器、カーペットや内張り等の自動車内装品、冷蔵庫内函、バッテリートレイ・シート等の自動車部品、看板、照明器具カバー）
- (3) エンボス加工の加熱（壁紙、レザー模様）等があり、いずれも赤外放射加熱で軟化させた後加工するものである。プラスチックシートのように平面状の被加熱物は影になる部分がなく、最も赤外放射加熱に適した分野である。しかし、真空成形機の場合のように、ワークの流れがストップした時、安全性のためヒーター装置を逃がす必要性から、加熱装置が解放状態になる例が多く、このような場合には対流損失が大きくなり、熱効率が低下する。この熱損失を少しでもカバーするためには高効率のヒーターが望まれる。また、プラスチックシートの加熱にとって更に重要なことは温度分布精度と温度特性である。実施例として表1に真空成型用加熱装置を示す。

6. 4. 2 ゴムシートの加熱

ゴムシートは熱伝導が悪いので両面加熱を行う必要がある。試料は黒色ゴムシート300×300×0.5tでパネル型インフラジェットSF型ヒーターを使用し、加熱した結果を表2に示す。

加熱条件	照射方法	片側下向き、上下
	照射距離	下側100mm, 上側50mm
	ヒーター表面温度	350℃、400℃
	炉内雰囲気温度	入口114℃、出口193℃
	加熱時間	120sec, 60sec

加熱時間120secで片側照射の場合、表裏の温度差が25℃前後あるが、上下照射の場合加熱時間60secで6～9℃に縮まっている。

6. 4. 3 塩ビシート上のスクリーン印刷（白色インキ）の乾燥

塩ビシートは熱に弱いので低温乾燥しなければならない。したがって時間のかかるのが難点であったが、赤外放射加熱に変えることによって効率よく処理することができる。従来は熱風炉で50℃、45～60minかかっていた。

ワークは150×200×0.2t～0.5tの塩ビシートで白色インクでスクリーン印刷をしたものである。結果を表3に示す。

加熱条件	照射方法	片側下向き
	照射距離	150mm
	ヒーター表面温度	120℃
	炉内雰囲気温度	39～45℃
	加熱時間	3～10min
	ヒーター	インフラジェットCL型

6. 4. 4 PETシートにシリコンゴムコーティング

試料 400×1000 75μ PETシートにシリコン
ゴムを60μコーティングしたもの

加熱条件	照射方法	片側下向き
	照射距離	150mm
	加熱時間	22sec
	ヒーター	インフラジェットFT型

結果 ヒーター表面温度450℃の時、シート温度177℃
ヒーター表面温度400℃の時、シート温度154℃

実際にはシート表面温度140℃で、5m/minのラインスピードで生産している。

6. 4. 5 各種樹脂板の加熱

ABS・アクリル・ポリカーボネートを170℃まで加熱し、時間と変形を見る

試料	300×300×0.5t
加熱条件	照射方法 上下照射
	照射距離 上側130mm, 下側100mm
	ヒーター表面温度 400, 450, 500℃
	ヒーター インフラジェットCL型

結果 シート温度分布が±5℃の範囲で、変形がない条件で
170℃まで加熱した結果を表4に示す。

(安坂耕一)

6. 5 食品工業

食品工業への赤外放射加熱については、乾燥、焙焼、熱交換等の伝熱手段として、利用方法の改善や新規利用が行われている¹⁾。食品は不安定な化学成分の集合体であり、物理的にも複雑な構造であるので、特に、長時間を要する乾燥工程への利用においては、化学変化が進行して外観、香味、物性が低下し、また表面だけの乾燥（上乾き）が進み、ひび・壊れ、表面被膜による乾燥速度の低下等を来し易い。そこで、それぞれの材料特性と加工の目的によって、乾燥方法、温度・時間条件、乾燥度合（完全乾燥、半乾燥、表面乾燥）等が決められる。たとえば、魚介類の素干、調味干等では、たんぱく質変性、脂質酸化、微生物増殖等の抑制のため、40℃以下のできるだけ低温で迅速に乾燥する。ニンジン、タマネギ等は、80℃以上では色上がりが悪くなるし、品質の優れた低水分のものを得るためには、乾燥の初期と終期では熱風の温度と湿度を変えたりする。米菓の類ではヒビ割れを防ぐための適切な乾燥速度がある。また、食品の乾燥においては、水の除去に必要な熱量を効率よく与え、水をいかに効果的に除去するかというシステムを考えなければならない。

6. 5. 1 真空乾燥における赤外放射加熱

食品を真空中に置けば、真空度に応じて水が蒸発または昇華する。理論的には、圧力が4.6 mmHg以下のとき水は液相を保つことができずに固相の氷に変化し、氷から直接に水蒸気として蒸発する。したがって、真空乾燥には、食品を氷結しない圧力（実用的には10～100mmHg）で水を蒸発させる狭義の真空乾燥と、食品をまず凍結し、その状態を保つ圧力（実用的には0.1～1mmHg）で食品中の氷を昇華させる凍結乾燥とがある。

真空乾燥は、高温で加熱すると熱変性、脂質酸化、色・香味悪化等を起こすものとか、復元性を良くしたい食品に適用される。乾燥の初期は、常圧下の乾燥と同様に水分の内部拡散と表面蒸発であるが、乾燥の進行につれ内部蒸発が主役となる。したがって、常圧下における熱風乾燥と異なり、恒率乾燥段階の時間が長いので表面硬化を起す度合が少ない。装置には、棚式、噴霧式、バンド式、被膜式等がある。真空下で食品へ伝熱する方法としては、加熱板へ静置接触、上下加熱板・有鋸アルミ加熱板で圧着、ランプ状・棒状・面状ヒーター（加熱板）による非接触放射加熱、マイクロ波誘電加熱等がある。加熱板の場合、熱源からの伝熱は、抵抗式電熱線組込み法、熱媒体（蒸気、油、水）環流法等がある。

a. 加熱板接触式真空乾燥における赤外放射の応用

食品を加熱板（10～70℃）へ接触する場合の伝熱は、伝導と放射が関与する。したがって、食品への放射伝熱が大きくなるよう、加熱板の放射率を高くすることが有効である。また、ステンレストレイを介して食品を加熱する場合でも、トレイ内面の放射率を高くすることによって、乾燥速度が1.6倍となる²⁾。

b. 非接触式赤外放射型の真空乾燥

赤外ランプや棒状・面状赤外ヒーターを用いた放射伝熱式の真空乾燥装置も多く開発されている。実用機では、食品への熱伝達速度の上昇と均一乾燥が課題である。

図6.5.1は、シーズヒーター組込み式及び蒸気環流式の面状赤外ヒーターの例を示したものである。最近開発された例 3)では、特殊な蒸気圧力調節法により、従来困難であった100℃以下の温度制御および放射体温度の均一化と迅速制御（制御範囲 60～150℃）を可能としているため、乾燥品の温度制御が容易となり、乾燥を加速する条件で運転することができる。また、魚介類の調味干等を対象にした連続化装置も検討されている。

放射加熱の場合、食品以外への照射は、蒸発した水分を加熱することになってコンデンサー負荷を増す。したがって、照射ロスを防ぐ設計上、操作上の配慮が必要である。

液状食品の濃縮・凍結乾燥装置 4)の例（図6.5.2）では、希薄水溶液を50～100mmHgの減圧下で多数のトレイの上を流下させながら、棒状遠赤外ヒーターの放射加熱により濃縮する。適度な液流速により、加熱の均一性と効率を高め、析出した結晶の沈降を防ぐ。40℃以下の低温度で1/10の濃縮を達成している。濃縮液は凍結装置に送られて細氷にされた後、真空下で、多段ベルトコンベア式の遠赤外照射装置により乾燥される。

6. 5. 2 送風乾燥における赤外放射加熱

従来の温風・熱風（30～300℃）を食品に吹き付けて乾燥する強制対流方式には、箱型棚式、ベルト・バンド式、トンネル式、気流式、流動層式、回転式、透気式、噴霧式、泡沫式等がある。熱風は、灯油、プロパン等の燃焼ガスを送り込む直火式と、熱交換で加熱した空気を送り込む間接加熱式とがある。風速は、通常1～5m/sで、3m/s程度が多い。風向は、向流、並流、中央排風、層貫流の各型がある。乾燥の均一化を図るため、反転攪拌（バンド式）、回転攪拌等がある。回転乾燥機のうち、間接加熱式として外火式と蒸気加熱式がある。外火式は胴体を加熱炉で包んで機外より加熱する方式であり、この場合、中間体から食品への伝熱は伝導、放射が関与し、併せて熱風による対流が利用される。乾燥棚での処理量は、果実、野菜類がで5～25kg/m²であり、タマネギの層貫流乾燥では、12kg(100mm層)/m²に対し、60～65℃で8～10hを要する 5)。食品の乾燥に使用した空気は、除湿して再利用または廃棄する。

このような温風・熱風乾燥へ赤外放射加熱を導入する方法は、通常、常温の風を送りながら、赤外ヒーターで食品を直接加熱する。これによって、廃熱を少なくし、効率乾燥による高品質化を図る。応用例については、食品の種類に応じた各種の装置が開発されている。熱源は、電熱式、灯油式、ガス式、蒸気式等がある。

a. 灯油燃焼式遠赤外乾燥機 6) (図6.5.3)

超音波式灯油燃焼ガス（70,000kcal/h）を熱源とする面状赤外放射体（表面温度 150～500℃）で食品を直接加熱し、常温の風を送って乾燥し、または、熱風を併用して焙焼

も可能である。

b. 蒸気式遠赤外しらす乾燥機 7) (図6.5.4)

蒸気を熱源とした棒状赤外放射体+熱風の併用式，連続多段バンド型で，30～70℃，10～40minで乾燥を終了する。

c. アジ塩干用遠赤外乾燥装置 8) (図6.5.5)

上火加熱型（棒状1KW×63本）の常温送風・コンベア式により，25分間乾燥する。

d. ガス燃焼式赤外放射・熱風併用式 9) (図6.5.6)

e. 回転式遠赤外加熱装置 10) (図6.5.7, 表6.5.1)

f. 茶葉の萎凋・乾燥・火入れ 11)

茶の加熱工程は，生葉の萎凋，蒸し熱・いり葉（急速に100℃），揉捻（揉みながら乾燥，35～40℃），乾燥（70℃），火入れ等がある。赤外放射加熱の応用例として，遠赤外萎凋と蒸熱操作とを組み込んだ自動萎凋装置（図6.5.8），荒茶の熱風乾燥後に遠赤外乾燥する装置（図6.5.9, 表6.5.2），製茶仕上げ用の間欠振動トラフ型遠赤外線火入れ機（図6.5.10）を示す。

g. 遠赤外加熱式振動型削り節乾燥機 12) (図6.5.11)

削り節は，一般に品温45～55℃で5～7分間熱風乾燥されている。本機は，送風管，振動板，分散板等を装着したものであり，ヒーター温度150℃，振動数45ヘルツの条件で，乾燥時間の短縮と高品質化が図られている。送風方法については改良の余地がある。

6. 5. 3 加熱処理における赤外放射の応用

a. 遠赤外照射型米飯処理機 13) (図6.5.12)

おいしい米飯の炊き方は，「煮る」→「焼く」→「蒸らす」という3つのプロセスを経ることが必要と言われている。ところが，伸長著しい弁当，給食産業における大量炊飯操作では，異物とみなされる焦げが極力発生しないよう，「焼く」工程に当たる強い加熱が行われず，また水分も多めになっている。このような米飯は，やわらかく，粘りはあっても，米飯本来の風味や歯ごたえに欠け，ベタつきや保存性低下をもたらす。

本機は，炊飯直後の米飯における余分の水を短時間の遠赤外照射によって除去するもの

であり、粘りと歯ごたえのある御飯になると、炊飯業界の評価を受けている。加工用途（白飯、寿司、むすび等）に応じた米飯品質を得るために、ヒーター温度、照射距離・時間の任意設定が可能で、また、均一な照射効果を得るために、攪拌羽根による米飯のほぐしと厚さの調整を行う。外に、排気ダクト、空照射防止用のヒーター自動遮蔽板が取り付けられている。処理米飯は、特に、保温容器詰めでホット米飯として流通する場合に効果が顕著である。

b. 遠赤外半生麺製造装置 14) 15) (図6.5.13)

製麺への赤外放射は、切出した麺線を掛棒にかけ、立体的に移動させながら行う。棒状遠赤外ヒーターによって左右から麺線全体を数秒～2分間照射後、熟成、乾燥工程を経て包装される。短時間照射によって麺線の床落ちを防ぎ、あるいは麺の光沢、弾力性、ゆで時間の短縮をねらいとしている。また、本乾燥に用い、装置の小型化を図っているものもある。

c. かつお節の遠赤外線焼軟機 16) (図6.5.14)

削り節製造では、従来、低水分の原料節を削り易くする目的で、水浸漬、蒸煮（30～60分）及び放冷（1晩）が行われている。遠赤外線焼軟機は、適度な水浸漬後に、10～20分間赤外線照射するものであり、その後短時間（10～30分）の放冷によって切削が可能となり、大幅な時間短縮と成分流出の防止ができ、魚臭も軽減される。

d. 牡蛎、ナマコ、タコの加熱処理 17) (図6.5.15, 表6.5.4, 表6.5.5)

カキをはじめ高水分食品の加熱は、従来ガス式のオーブンあるいはシュバンクヒーターにより行われている。この種の加熱方式に代替して、電気式、ガス式、灯油式等の赤外放射加熱を導入した装置が数多く開発されており、時間短縮、焦げ防止、食味、食感向上、熱効率向上、作業温度環境、安全等のメリットが報告されている

6. 5. 4 焙焼における赤外放射の応用

a. 海苔の焙焼

海苔の焙焼工程では、従来、ニクロム線ヒーター、シーズヒーター等が使用されている。棒状遠赤外ヒーターを用いた自動制御のり焙焼機 18) (図6.5.16) は、焼き色センサによって、ヒーター温度とコンベア速度を自動調節している。前田 9) は、遠赤外ヒーター（14KW）を用い、雰囲気温度160～200℃で海苔を6～12秒間焼くことにより、焙焼時間と使用エネルギーが共に3/4に減じ、炉内温度が50～100℃低くてすみ、色沢、香味、食感の向上を認めている。

b. 遠赤外加熱式焼鳥機 19) (図6.5.17)

c. 珈琲豆の焙煎 20) (図6.5.18)

ピーナツ，アーモンド，大豆，コーヒー豆等の焙煎には，回転方式，平煎り攪拌方式等の遠赤外放射加熱装置が多数実用化されており，均一加熱，時間短縮，酸化抑制，熱効率向上，色沢向上等の効果が言われている。

d. 米菓，ちくわの焙焼

米菓焙焼の予熱（昇温）及び浮かし（水分蒸発，膨化）段階においては，遠赤外照射が有効であり，色付け段階においてはシュバンク加熱が有効である21)。これと同じように，ちくわの坐り及び昇温工程には遠赤外照射が利用されているが，焼き色工程には高温のシュバンク加熱が行われている22) (図6.5.19)。

6. 5. 5 フライ食品の加熱 23)

フライ工場で通常使用されている油槽直火式フライヤでは，伝熱面の過熱のためにフライ油の熱重合・分解が生じて油が劣化しており，まして赤外放射体を底に沈める方法では，その空隙部分のフライ油が過熱されて劣化はさらに促進される。一方，油と接触するフライ鍋内面の放射率を高くすると熱伝達性がよくなり，鍋底の油が局部的に加熱されることが少なく，全体の油が比較的均一に加熱される。それ故，油の劣化（粘度上昇）が抑制され，また油温の変動が小さくなる。なお，揚種への直接的影響は認められない。

6.5.6 参考文献

- 1) 米田：遠赤外放射の食品工業への利用の現状と将来，照学誌，74(12)，796，1990.
- 2) 米田，山岡，守本，前重：食品加熱工程への遠赤外線の利用，昭和62年度加速的技術開発支援事業成果普及講習会資料，広島県(1988.8)25-28
- 3) (株)ハンダテクノ：遠赤外放射型真空乾燥機，HIGH TECH HIROSHIMA，(財)広島県産業技術振興機構(1992)149；水産物等の乾燥方法，特許出願2-249363(1990.9)
- 4) 木村嘉孝：希薄溶液の連続濃縮・凍結乾燥式遠赤外線加熱装置，電熱，30(1986)60-64
- 5) 寺本四郎：食料工学ハンドブック，朝倉書店(1966)370-390
- 6) 小畑，川原，宮本，高田，島田：みりん干用赤外線乾燥機の開発，昭和63年度加速的技術開発支援事業成果普及講習会資料，広島県(1989)27-30
- 7) (株)サムソン：カタログ (1990.5)
- 8) 静岡県水産試験場：昭和57～59年度指定調査研究総合助成事業「利用加工研究」総

合報告書(1985)

- 9) 前田喜朗：月刊フードケミカル，5(9)，(1989)69-71
- 10) 木村嘉孝：遠赤外線利用の最新技術，工業技術会(1987)49-77
- 11) 岩浅 潔：遠赤外線の実際と応用，工業技術会(1989)139-152
- 12) 松本 均：農林規格検査所調査研究報告，10(1986)100-104
- 13) 井尻，久都内，石川，佐々森，西本，福原，米田，前重：遠赤外線照射による炊飯米の品質向上策，平成4年度研究成果普及講習会資料，広島県(1992)15-19
- 14) (株)四国総合研究所：製麺への遠赤外線照射技術，総研だより(1991.7)
- 15) 天海 弘：遠赤外線利用の最新技術，工業技術会(1987)101-113
- 16) 九州電力(株)・帝国ピストンリング(株)：カタログ(1990.12)
- 17) 米田，藤堂，福原：遠赤外線のフライ効果およびカキ加熱への応用，遠赤外線の実際と応用，工業技術会(1989)153-171
- 18) 三井信也ら：食品産業センター昭和57年度開発研究報告書(1982)1，21
- 19) (株)ジャード：カタログ
- 20) (株)ハンダテクノ：カタログ
- 21) 山岡，米田，守本，前重：米菓焙焼に対する遠赤外線の利用，日食工学会第36回大会(1989)No.2109
- 22) 遠赤外線産業協会：加熱効果実態調査報告書，平成4年3月
- 23) 米田，守本，前重：食品フライへの遠赤外線の利用，電気学会，光応用・視覚研究会資料LAV-89-4(1989)33-42

(米田達雄)

6. 6 海外における赤外放射加熱の応用例

6.6.1 赤外放射製紙乾燥システム 1)

製紙業はエネルギー多消費型産業の一つであり、エネルギー効率、生産性、品質の三者をバランスよく向上させることは重要な課題である。図6.6.1 にIRT Finland 社のカタログに示されている製紙の乾燥工程の図解を示す。従来、この工程は蒸気で加熱された複数の乾燥シリンダーによって行われている。しかし、乾燥シリンダーは伝導によって熱を紙に伝えるため、紙の表面が乾燥するにつれて内部に熱が伝わりにくくなり、乾燥効率が低下する。内部まで十分に乾燥させようとする、表面は過熱気味になり、紙質が低下する恐れがある。

図6.6.2 は、乾燥シリンダーを用いた乾燥機において、時間の経過に対する紙内の水分減少を模式的に示したものである。乾燥初期の"Heating"と最終段階の"Final drying process"に要する時間は全体の58%であり、乾燥シリンダーの約60%がこの工程に投入されている。しかし、この間に除去される水分は全体の20%にすぎない。

一方、近赤外放射ランプからの放射は紙内部への浸透性に優れ、高密度のエネルギーを紙の内部に供給することができる。このため、"Heating"と"Final drying process"の工程に近赤外放射ランプを投入することによって乾燥効率を大きく改善することができる。これによって生産性が向上する。

また、紙質の向上には、紙内の水分分布を均一にすることや、紙の表面に施したコーティングを染みや斑を作ることなく乾燥させることが重要である。近赤外放射ランプは輝度の調整が素早く行えるため、紙内の水分分布を測定して瞬時に放射照度を調整し、水分の高い箇所には強い放射を、水分の低い箇所には弱い放射を照射することによって製品の水分分布の均一性を向上させている。さらに、近赤外放射はコーティングに対しても浸透性が高いので、紙の部分とコーティングの部分を同時に加熱することができ、コーティングの染みや斑を防止できる。

その上、IRT Finland 社ではエネルギーの利用効率の向上と紙の厚さ方向の温度分布の均一化をはかるため、図6.6.3 に示すように、近赤外線放射ランプと紙を挟んで反対側にセラミックス板 (Counter Radiator) を設置している。紙を透過した近赤外放射はセラミックス板に吸収されて板を加熱し、板から再放射される赤外放射を再度紙に照射している

2)。
製紙の乾燥工程への赤外放射乾燥システムの導入効果をまとめると以下のとおりである。

a. 品質の向上

- ・製品の水分分布のばらつきを従来の1/4程度にまで改善できる。
- ・コーティングの染みや斑を防止できる。

b. 生産性の向上

- ・コーティングの乾燥工程の効率を従来の3倍程度にまで高めることができる。

・従来の乾燥装置に赤外放射乾燥システムを付加することによって、比較的
低投資で生産能力を2～10%程度増強できる。

6.6.2 赤外放射によるベニヤ板乾燥システム 3)

ベニヤ板は、原木を回転させながら削り出した厚さ1.5 mm程度の薄板を、乾燥、裁断、
接着、プレスして製造される。原木内部の水分分布が一様でないため、削り出した薄板の
含水率も場所によって100%から50%程度までのばらつきをもつ。このため、製品の品質
や歩留まりを向上させるためには、薄板の含水率が一律になるように乾燥させなければなら
ない。

図6.6.4 に、IRT Finland 社とRaute Wood Processing Machinery 社が開発した赤外放
射乾燥システムの概略図を示す。従来の熱風式ベニヤ板乾燥機の中に、応答性のよい近赤
外放射ランプを組み込んでいる。ベニヤ板内の含水量は非接触で測定され、測定値に基づ
いて赤外放射強度を素早く調整している。図6.6.5 に示すように、本システムの導入によ
り、従来の熱風式の場合と比較して薄板内の含水率が均一化している。これによって、
品質が向上するとともに、歩留まりが著しく向上している。諸特性の比較は表6.6.1 に示
すとおりである。

6.6.3 粉体塗装乾燥システム 4)

金属部品の製造業者Moultrie Manufacturing社はバツテル記念研究所材料加工センター
(Battelle Memorial Institute, The Center for Materials Fabrication) およびアメ
リカ電力研究所 (Electric Power Research Institute, EPRI) の支援を受けて粉体塗装
システムを導入している。同社では、従来、ワークの塗装に液体塗料とガス燃焼の熱風炉
を用いていた。しかし、環境規制の強化と業界内の競争激化に対応するため、有機溶剤を
用いる液体塗料から無公害の粉体塗料へと転換をはかり、併せて粉体塗料のキュアリング
に適した高輝度近赤外放射加熱乾燥炉を導入して品質や生産性をも向上させた。表A-2 に
本システムの導入効果を従来のものと比較して示す。また、図6.6.6 は粉体塗料の静電塗
装工程を、図6.6.7 は近赤外放射炉内を進むワークの様子を示している。

6.6.4 自動車ボディー高品位塗装乾燥システム 5)

本システムは自動車メーカーのChrysler社、塗料メーカーのPPG Industries社、赤外放
射加熱機器メーカーのBGK Finishing Systems 社、電機メーカーの
Commonwealth Edison 社、バツテル記念研究所材料加工センターによって共同開発された。
ここでも前項の事例と同様、有機溶剤の使用削減と塗装品質の向上に開発の主眼がおかれ
ている。

自動車ボディーの塗装は、通常、色のついた"basecoat"とその上を覆う透明な "clear

coat”で構成される。ここでは、“basecoat”塗料の有機溶剤含有量を抑え、その結果として塗料が乾燥しにくくなる傾向を強力な近赤外放射ランプを導入して補償している。また、エネルギー密度が高く、塗料への浸透性が強い近赤外放射を用いることによって、従来の“basecoat”よりも膜厚を大きくすることが可能となり、これによって従来より光沢性の高い塗装が可能となっている。また、制御性に優れた近赤外放射ランプを用いることによって、塗料の色や自動車ボディと放射ランプとの距離の変化に応じた最適な制御を容易にかけることが可能になっている。これも品質の向上に大きく寄与している。この新塗料と新乾燥システムの導入により、Chrysler社では従来のどの車よりも優れた塗装の車を生産できるようになったとしている。本システムの導入効果を表6.6.3 にまとめておく。

6.6.5 自動車修理工場用赤外放射スポット塗装乾燥システム 6)

図6.6.8 にIRT Finland 社から発売されているスポット塗装乾燥システムの概略図を示す。様々な塗料に対応できるとともに、様々な部位の様々な大きさの塗装乾燥に対応できる。乾燥時間は塗料の種類にもよるが2~10分程度である。

6.6.6 参考文献

- 1) IRT Finland 社、“IRT-System” brochure.
- 2) IRT Finland 社、“IRT WEBMATE COMBI” brochure.
- 3) O. Viljakainen, J. Kurvinen; “Infra-red Veneer Dryer”, 12th UIE, Sessin I.5, P9, (June 1992).
- 4) J. Cohen; “Supporting Business with Infrared Processing”, EPRI Journal, Oct./Nov. 1987, pp.28-33.
- 5) R. Whitaker; “Shining Promise for Infrared Paint Curing”, EPRI Journal, Sept. 1989, pp.27-31.
- 6) IRT Finland 社、“IRT-500. The Suspended Mobile Paint Curing System” brochure.

(中野幸夫)

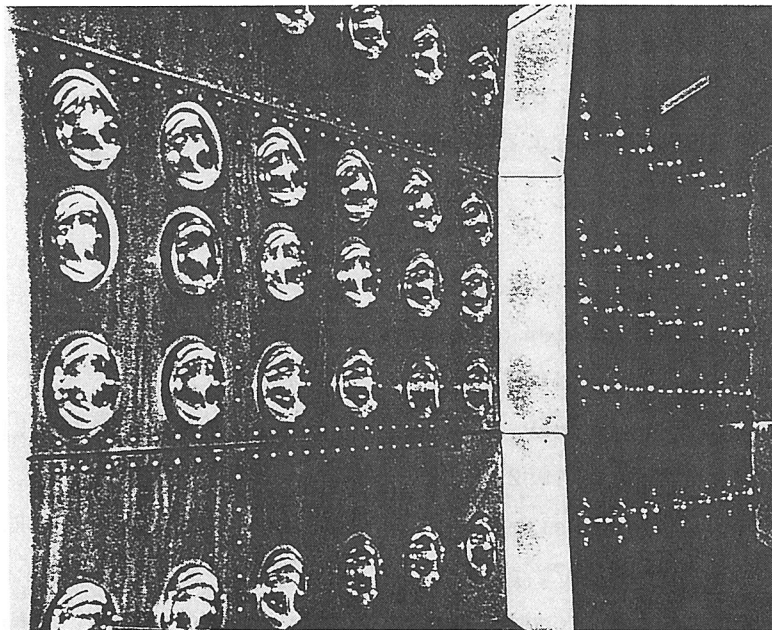


写真6. 1. 1 赤外線ランプ加熱装置

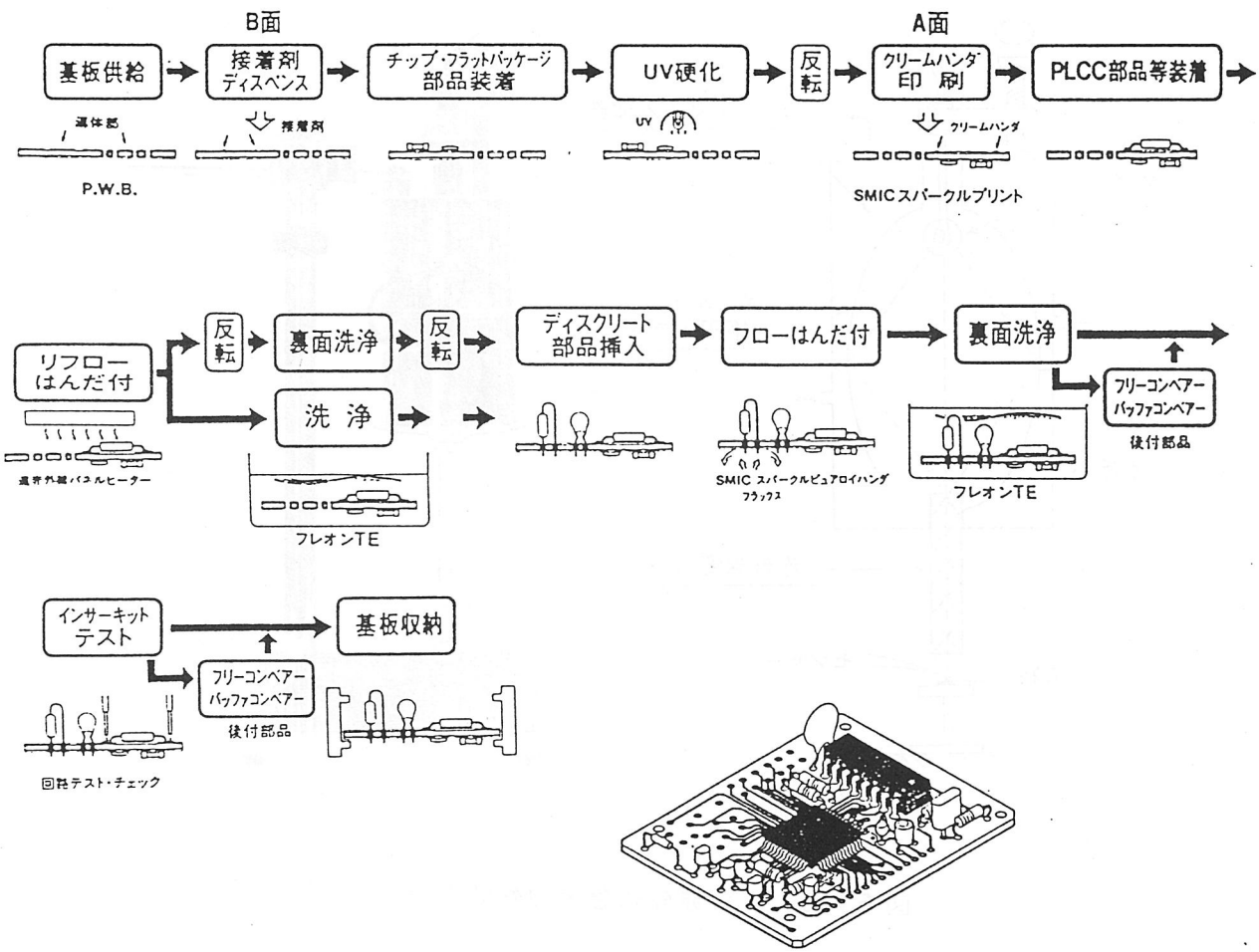


図 6. 2. 1 遠赤外線はんだリフロー炉の一例

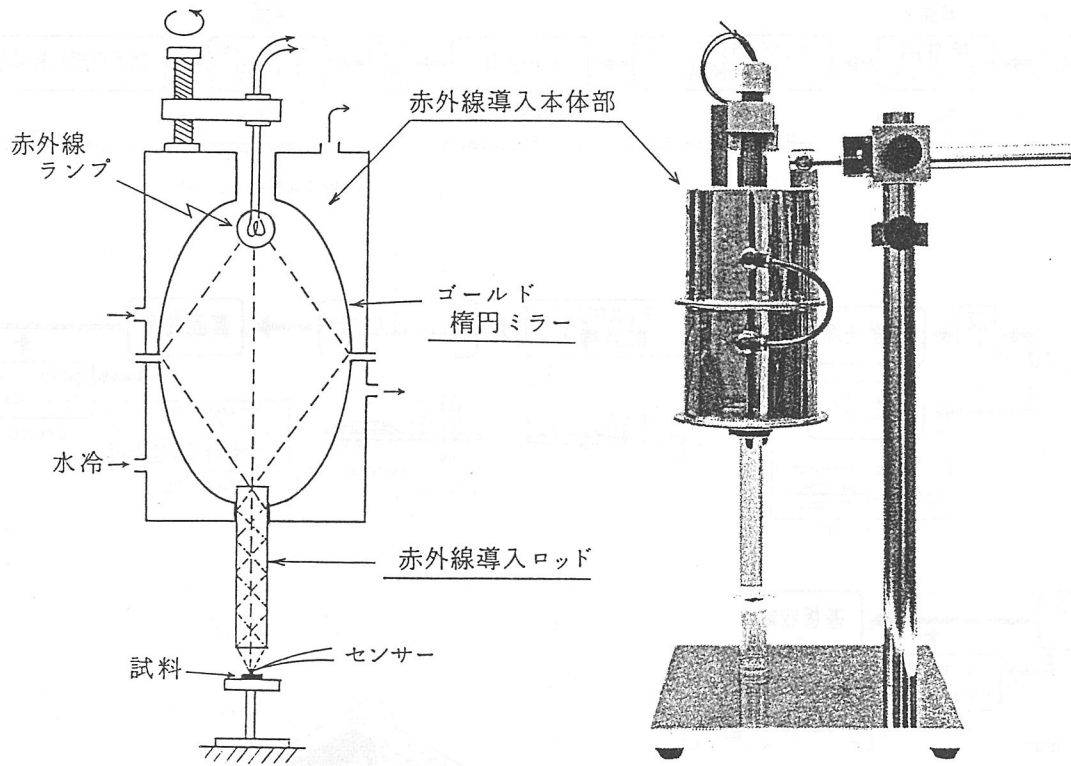
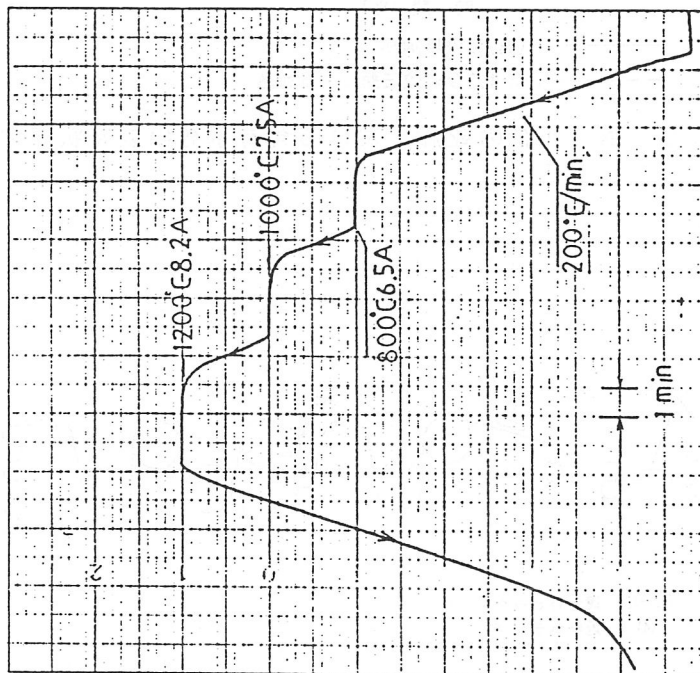
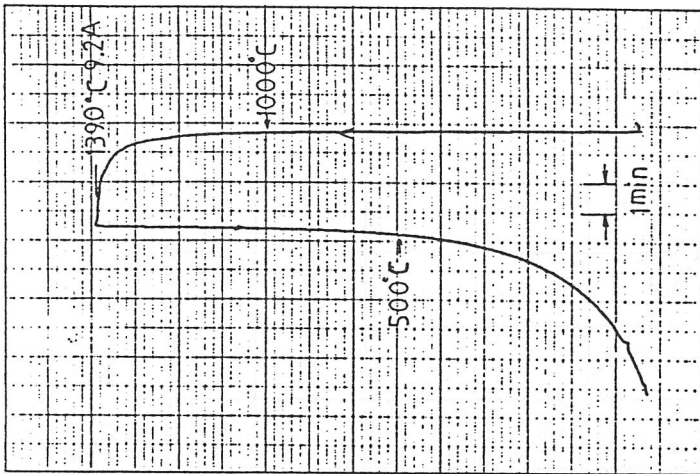


図 6. 2. 2 赤外線急速加熱装置

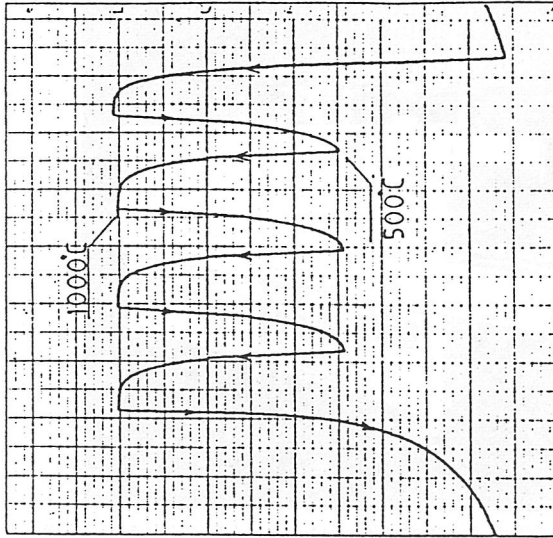
I プログラム温度コントロール
による正確な昇温特性



II 最大昇温速度特性
1000°Cまで約5秒



III 繰り返し昇・降温特性



- ① 赤外線導入ロッド
- ② R 熱電対
- ③ セラミックス (20×20×2t)
- ④ 石英製試料台
大気中 D = 4

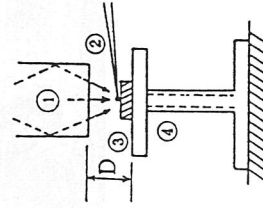


図 6. 2. 3 動作特性

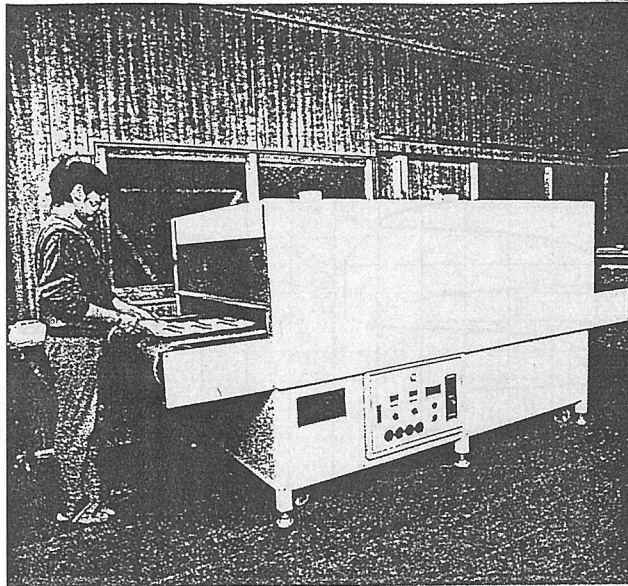


図 6. 3. 1 遠赤外線布地プリント焼き付け乾燥機

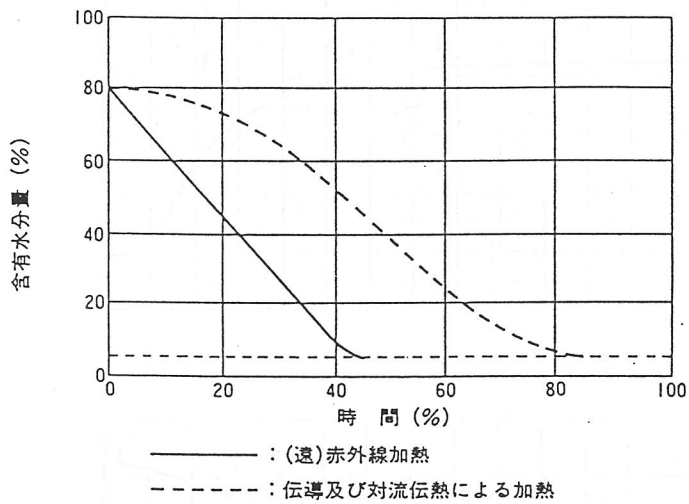
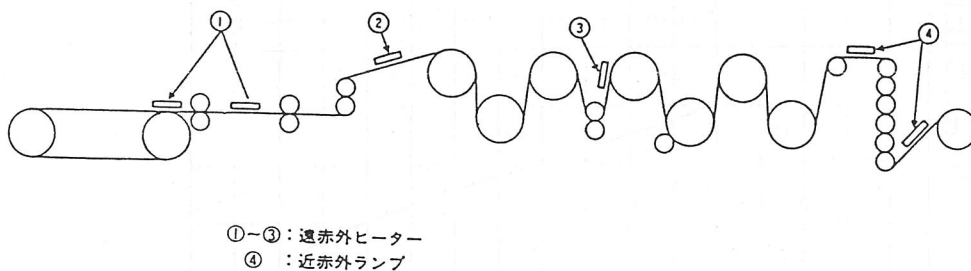


図 6. 3. 2 ボール紙の乾燥における含有水分の蒸発状況の比較



①-③：遠赤外ヒーター
④：近赤外ランプ

図 6. 3. 3 製紙業における紙の乾燥工程の実例

表 6. 3. 1 遠赤外線と近赤外線のアフセット印刷における比較

	項 目	遠赤外線 (B O 型)		近 赤 外 線	
1	波 長	遠赤外 3~25 μ m		近赤外 0.8~2 μ m	
2	ヒータ発熱機構	抵抗線		フィラメント	
3	赤外線放射材料	セラミックス		石英ガラス	
4	可視光線	暗色発光		明暗色発光	
5	乾燥効果		○		○
6	電力消費	10kW	◎	13~27kW	△
7	立上り時間	8~10分	○	1分	◎
8	安全性	シャッター有り	◎	シャッター無し,ランプOFF	○
9	空冷装置	スタンダード	◎	オプションのメーカー有り	○
10	ランプ寿命	10,000時間	◎	5,000時間	○
11	ランプの破損	SUS+セラミックス	◎	石英ガラス	△
12	ランプの交換		○		○
13	ランプの清掃		○		○
14	消灯後の余熱		◎		○

表6. 4. 1 真空成型用加熱の例

製品名	卵パック (PVC)		卵パック (PS)	
ショット時間	4 秒/ショット		4 秒/ショット	
シート寸法	0.16t×980W×1030送り		0.2t×1020W×1070送り	
ヒーター	インフラシュタイン	シーズヒーター	インフラシュタイン	シーズヒーター
加熱方式	上面加熱	上下面加熱	上面加熱	上下面加熱
設備電力	51.0KW	上面 44.2KW 下面 44.2KW 計 88.4KW	51.0KW	上面 44.2KW 下面 44.2KW 計 88.4KW
温度コントロール	ON-OFF15点	手動電圧42点	ON-OFF15点	手動電圧42点
消費電力	33KW	62KW	37KW	65KW
(例)年間節電費 (12時間/日稼働の時)	20円/kWh×29kW×12h/日 ×300日/年=208.8万円/年		20円/kWh×28kW×12h/日 ×300日/年=201.6万円/年	

表6. 4. 2 ゴムシートの加熱

No	照射方法	照射距離 mm		炉内通過時間 sec	ヒーター表面温度 °C	シート温度 °C	
		上段	下段			表面	裏面
1	片側下向き	50		120	400	177	153
2	片側下向き	50		120	350	161	135
3	上下	50	100	60	400	222	203
4	上下	50	100	60	350	182	176

表6. 4. 3 塩ビシートの加熱

No	照射方法	照射距離	炉内通過時間	ヒーター表面温度	シート厚	試料表面温度
1	片側下向き	150	10min	120 °C	0.2t	62 °C
2	片側下向き	150	5	120	0.2	56
3	片側下向き	150	3	120	0.2	57
4	片側下向き	150	5	120	0.5	56
5	片側下向き	150	3	120	0.5	54

表6. 4. 4 各種樹脂の加熱

No	ヒーター表面温度	炉内雰囲気温度	樹脂名	170°C到達時間	加熱後の樹脂板外寸
1	400°C	148~ 155°C	ABS乳白色	147sec	295×301
			白色	138	287×303
			アクリル	153	295×295
			ポリカーボ	137	297×300
2	450	172~ 177	ABS乳白色	101	300×291
			白色	93	301×294
			アクリル	100	296×295
			ポリカーボ	92	300×300
3	500	198~ 203	ABS乳白色	68	298×296
			白色	67	294×301
			アクリル	69	295×296
			ポリカーボ	67	300×300

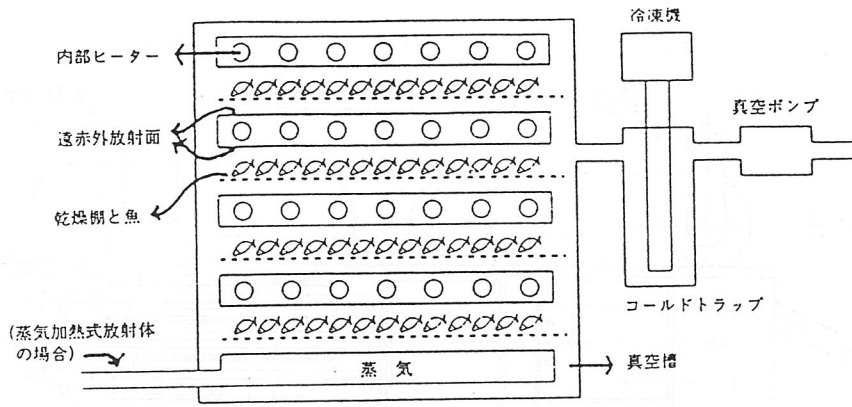


図 6. 5. 1 赤外放射型真空乾燥機の概略図

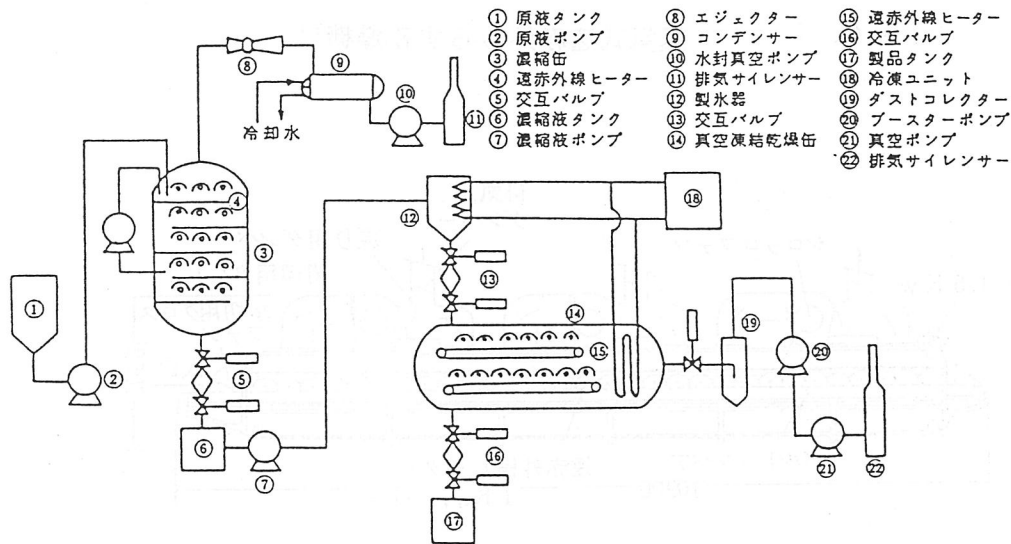


図 6. 5. 2 遠赤外放射加熱式液体濃縮・凍結乾燥装置⁴⁾

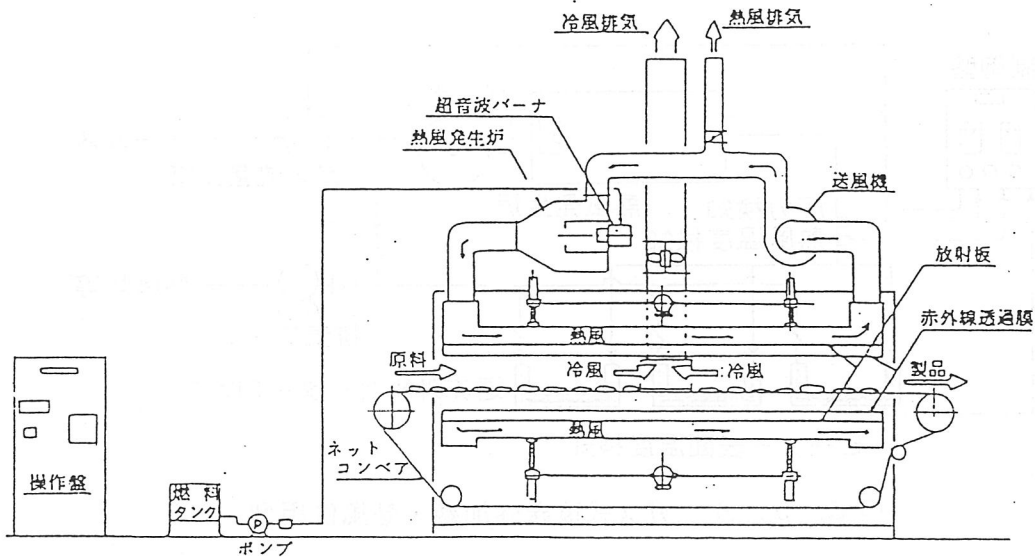


図 6. 5. 3 灯油燃焼式遠赤外乾燥機⁵⁾

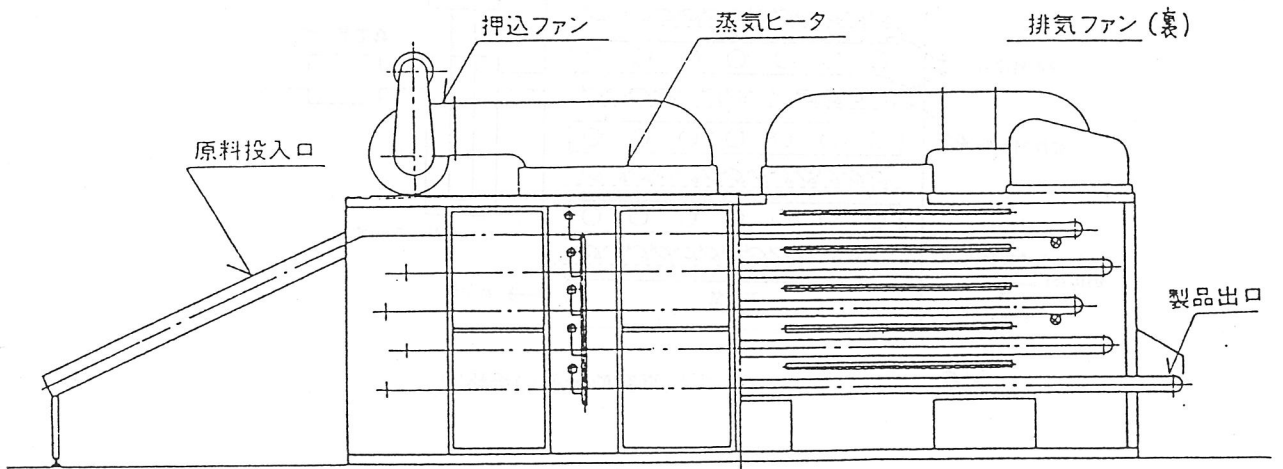


図 6. 5. 4 蒸気式遠赤外しらす乾燥機⁷⁾

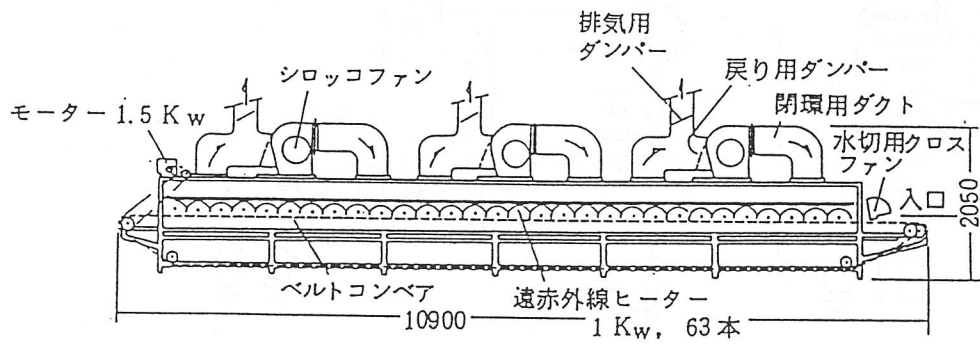


図 6. 5. 5 アジ塩干用遠赤外乾燥装置⁸⁾

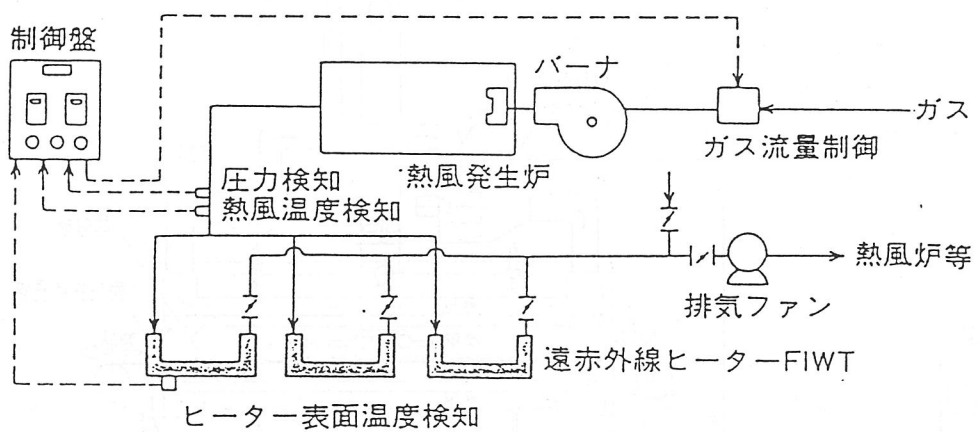


図 6. 5. 6 ガス式遠赤外加熱・熱風併用型

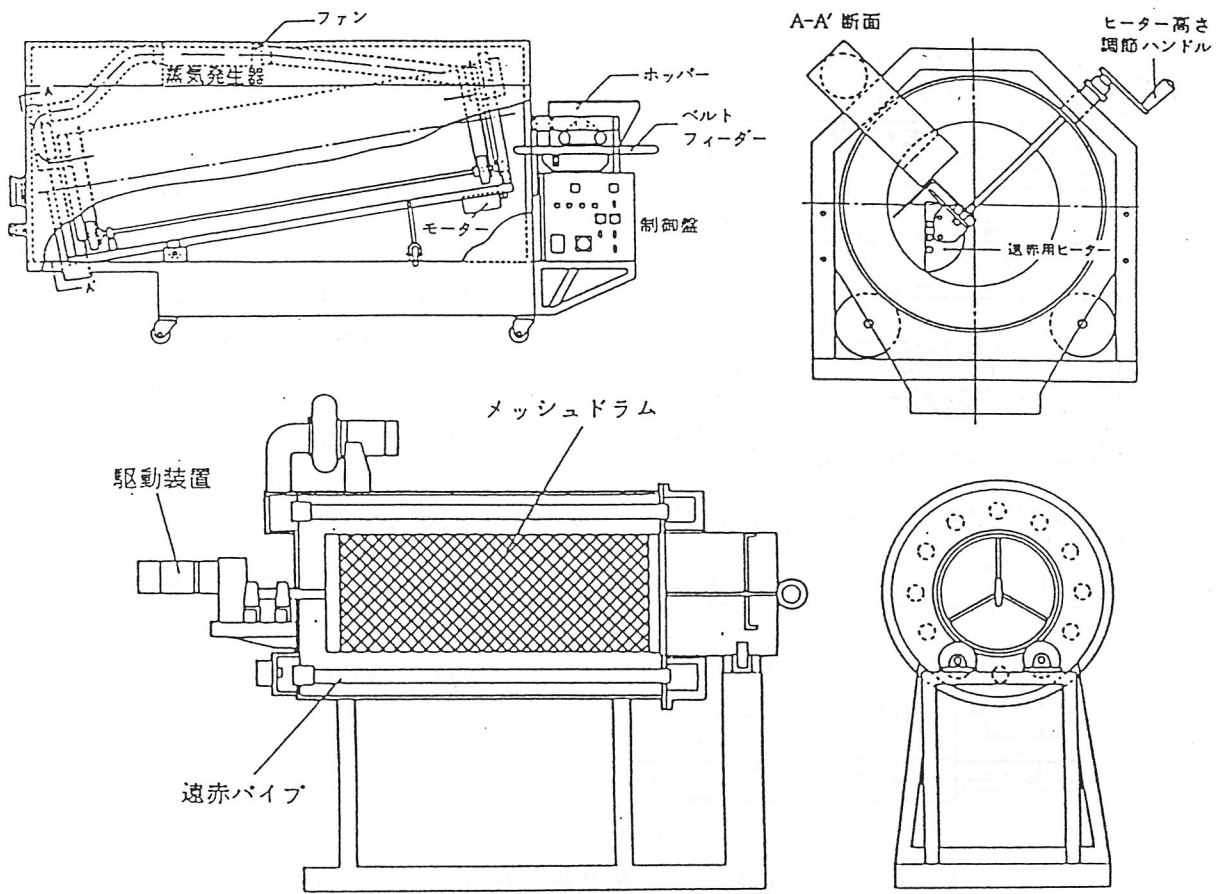
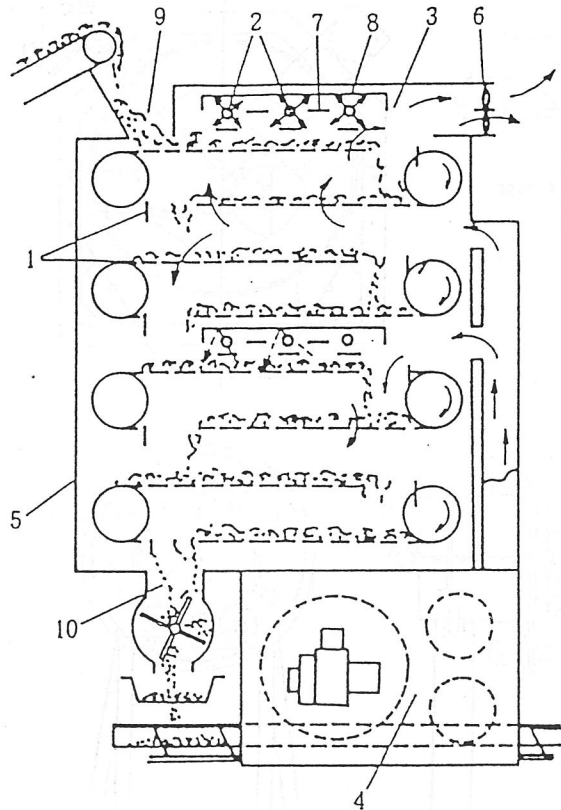


図 6. 5. 7 回転式遠赤外加熱装置¹⁰⁾

表 6. 5. 1 回転式遠赤外加熱装置仕様例¹⁰⁾

加熱ロータリー寸法		600 φ × 2.300 L
加熱時間 (平均滞留時間)		ロータリー回転数 } 調節可能 ロータリー傾斜角度 } 内部ハッフル }
加熱ヒーター	第 1 ゾーン	7.5 kw
	第 2 ゾーン	7.5 kw
	スチーム発生用	8.0 kw
送風ファン	冷却用	24 W
	熱風循環用	62 W
温度制御		ヒーター表面温度 } 3方式切替 室内温度 } 被加熱物表面温度 } (非接触温度計) }
電力制御		各ゾーン毎デジタルゼロクロス比例制御
機器機体外寸		750 W × 3,100 L × 1,400 H



本機は、幅約1mのキャタピラ型無端輸送帯(1)を4段と、1段目と3段目の上に700W遠赤外線ヒータ(2)3本からなる均一加熱装置(3)、40~80℃熱風を毎分10m³程度供給しうる熱風発生装置(4)、機体(5)内の換気を行う排気ファン(6)などで構成されている。加熱装置には、各遠赤外線ヒータの上部・下部に反射板(7)(8)を配置して均等に遠赤外線が照射するように工夫されている。(9)(10)は茶葉の投入口と取出口である。

図 6. 5. 8 遠赤外茶葉萎凋機 (寺田ら, 1985)

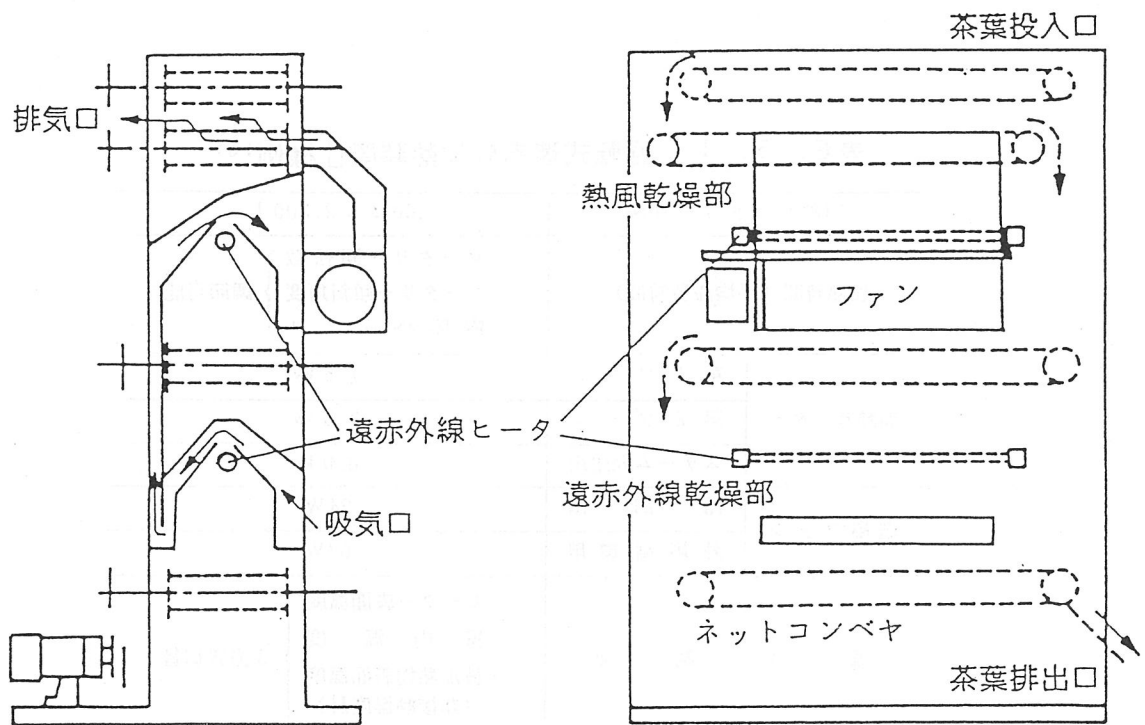


図 6. 5. 9 遠赤外茶葉乾燥機 (中野・吉富, 1987)

表 6. 5. 2 遠赤外茶葉乾燥機による実験結果 (中野・吉富, 1987)

ヒータ出力	[kW]	1.2	1.4
ヒータ表面温度	[°C]	322	384
投入量	[kg/m ²]	1.47	1.47
乾燥時間	[min]	10.0	12.5
熱風温度	[°C]	46.5	47.6
排出茶温	[°C]	61.0	67.6
到達含水率	[% d.b.]	6.2	5.0
乾燥速度	1段	1.10	1.30
	2段 [%/min]	1.57	1.32
	3段	0.84	0.63
熱効率	[%]	21.6	19.3

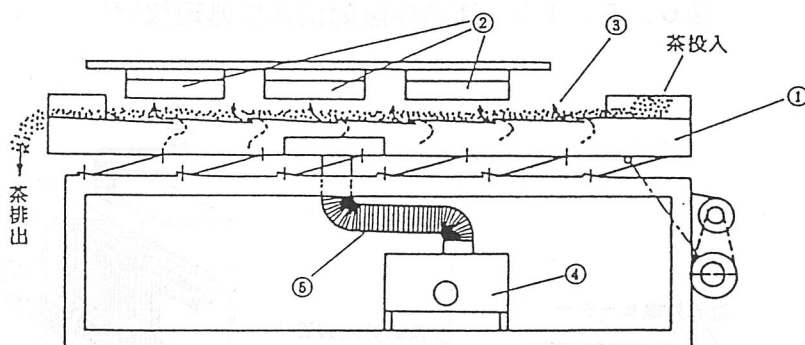


図 6. 5. 1 0 間欠振動トラフ型遠赤外火入れ機 (原ら, 1986)

- ①振動トラフ ②遠赤外線ヒーター ③熱風出口
④ガス燃焼器 ⑤熱風ダクト

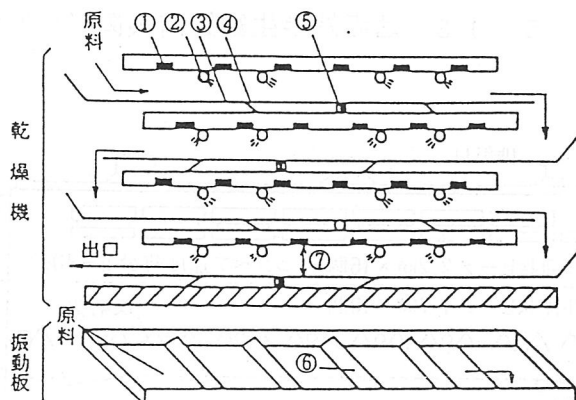
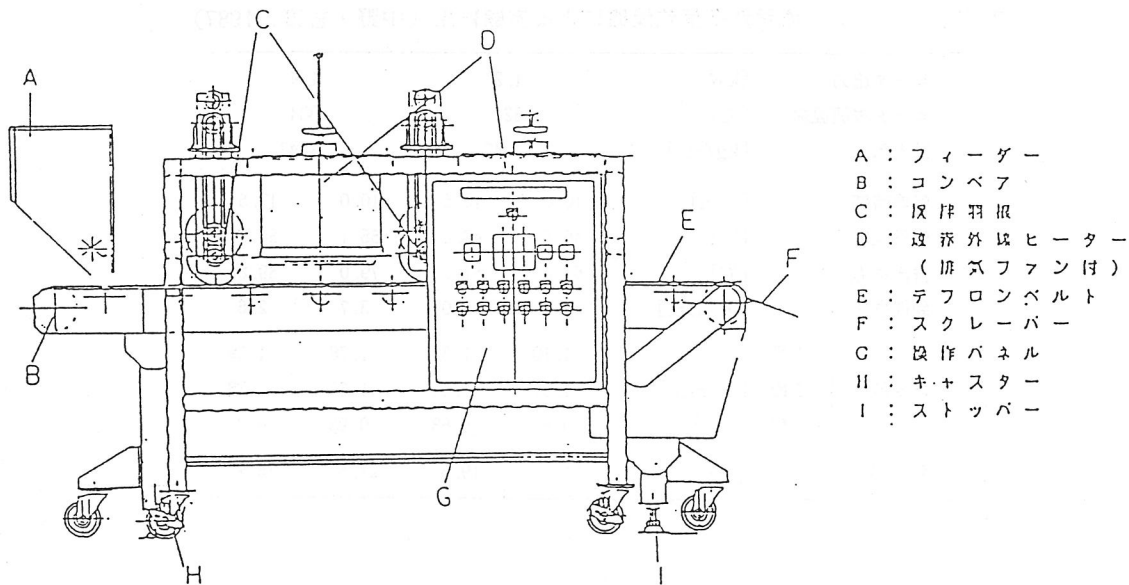


図 6. 5. 1 1 遠赤外加熱式振動型削り節乾燥機¹²⁾

- ① 遠赤外線ヒーター (14×38cm) ⑤ 振動用モーター (振動数 0~60Hz)
② 空気吹込み管 (長さ 15cm) ⑥ 原料分散板 (1.2段に設置)
③ 振動板 (50×255cm) ⑦ ヒーターと振動板との距離 (15cm)
④ 振動バネ



- A : フィーダー
- B : コンベア
- C : 反射羽根
- D : 遠赤外線ヒーター
(排気ファン付)
- E : テフロンベルト
- F : スクレーパー
- G : 設作パネル
- H : キンスター
- I : ストッパー

図 6. 5. 1 2 遠赤外線照射型米飯処理機¹³⁾

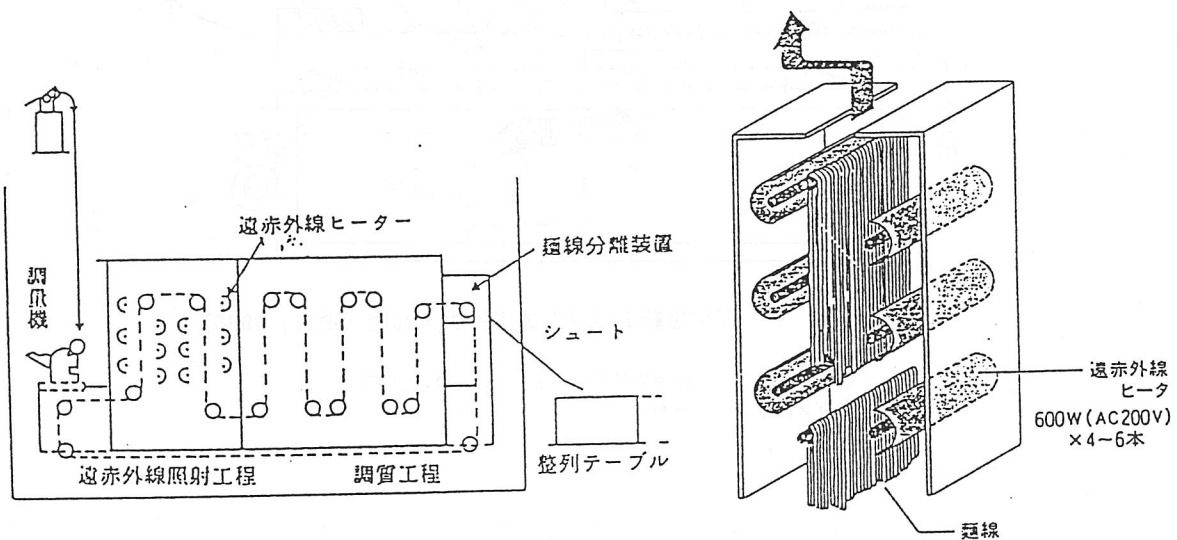


図 6. 5. 1 3 遠赤外線半生麺製造装置^{14) 15)}

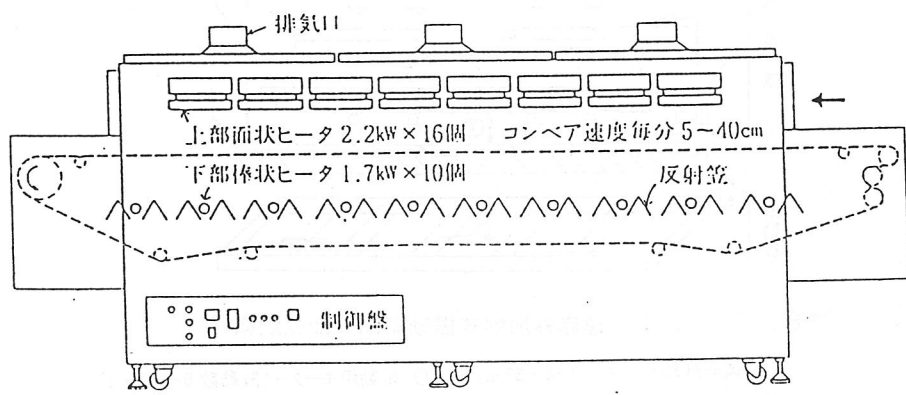


図 6. 5. 1 4 かつお節の遠赤外線焼軟機¹⁶⁾

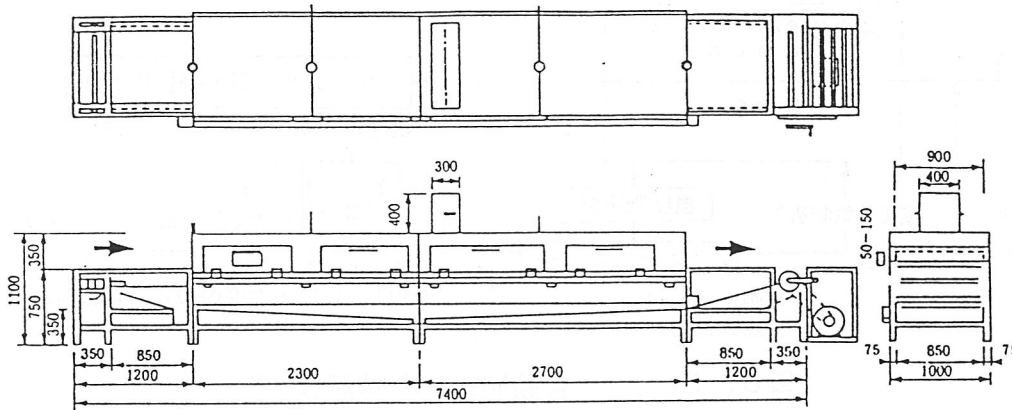


図 6. 5. 1 5 遠赤外線カキ加熱装置¹⁷⁾

表 6. 5. 3 従来装置および遠赤外線カキ加熱装置の仕様¹⁷⁾

	従 来 装 置	遠赤外線カキ加熱装置
加熱方式	L P ガス直火熱	遠赤外線ヒーターによる加熱
装置寸法	16.4×1×1.2 (H) m	7.4×1×1.1 (H) m
L P ガス消費量	4.2 立方 m/h	
定格電圧および周波数		200 V, 50/60 Hz
設備容量		50 kW
生産能力	100 kg/h	100 kg/h
搬送速度	1 m/分	1 m/分
加熱時間	12 分	6 分
装置構造	ベルトコンベア式トンネル炉	ベルトコンベア式トンネル炉

* カキの中心温度目標は 75°C

表 6. 5. 4. カキのガス加熱と遠赤外加熱の比較¹⁷⁾

	ガス加熱(A)	遠赤外線加熱(B)	比率(A/B)
燃費消費量	4.2 m ³ /h	40 kW/h	—
消費熱量	100,800 kcal	34,400 kcal	34%
原油換算消費熱量	129,020 kcal	109,800 kcal	85%
燃料費	1,470 円/h	1,178 円/h	80%
生産量	900 kg	900 kg	100%
設備面積	16.4 m ²	7.4 m ²	45%
加熱時間	12 分	6 分	50%
製品の品質	変色大 縮み大 歩留り小	変色小 縮み小 歩留り大	
作業環境改善	温度・湿度高い	温度・湿度低い	

消費熱量: LPG = 24,000 kcal/m³, 遠赤外線ヒータ = 860 kcal/kWh
 原油換算消費熱量: LPG = 3.268 l/m³, 電力 0.292 l/kWh, 原油 9,400 kcal/l
 燃料費: LPG = 350 円/m³, 電力は高圧(甲) 100 kW 契約, 夏季その他季節
 通算, 基本料金を含む特別料金を適用・29.45 円/kWh

* カキの中心温度目標は 75°C

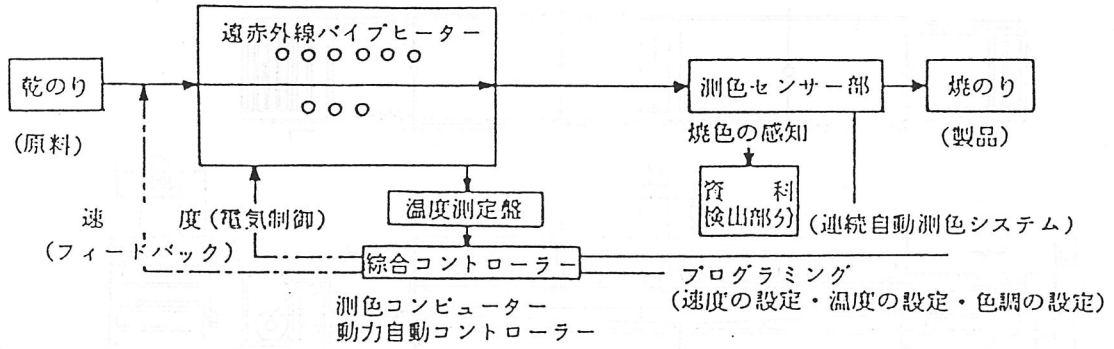
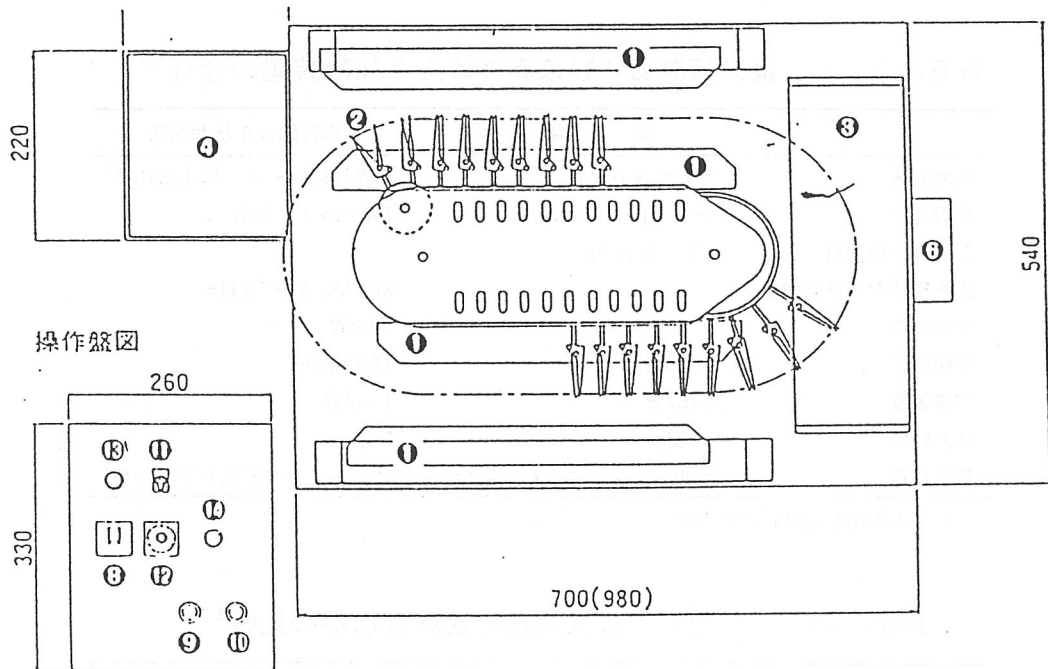


図 6. 5. 16 自動制御のり焙焼機¹⁸⁾



- ① ヒーターユニット
- ② 串クリップ
- ③ たれ櫃
- ④ 受皿
- ⑤ 水櫃
- ⑥ コネクター
- ⑦ 焼きとり串
- ⑧ ブレーカー
- ⑨ ヒーターONスイッチ(緑色)
- ⑩ ヒーターOFFスイッチ(赤色)
- ⑪ コンベヤスイッチ
- ⑫ スピードコントロール
- ⑬ パイロットランプ(白色)
- ⑭ ヒーターランプ(赤色)

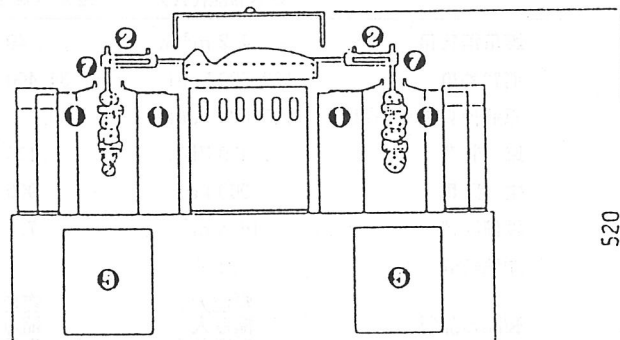


図 6. 5. 17 遠赤外加熱式焼鳥機¹⁹⁾

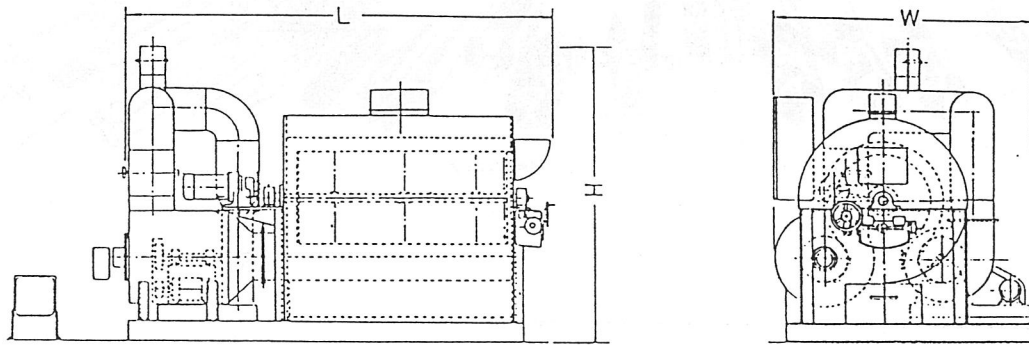


図 6. 5. 18 珈琲豆の焙煎²⁰⁾

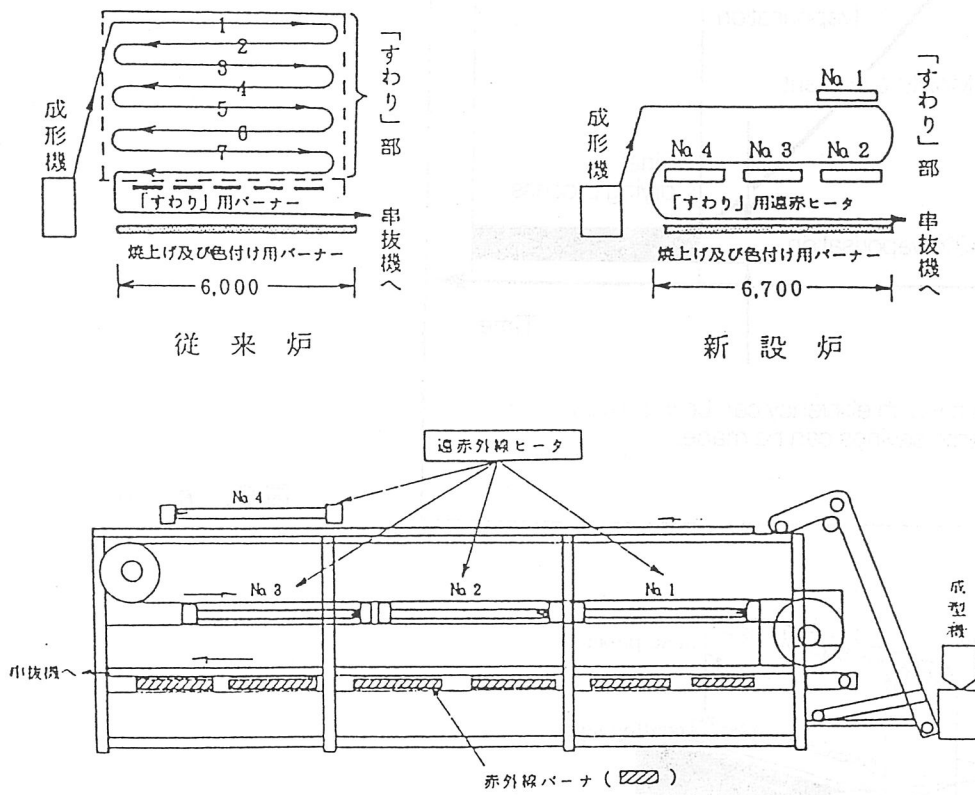
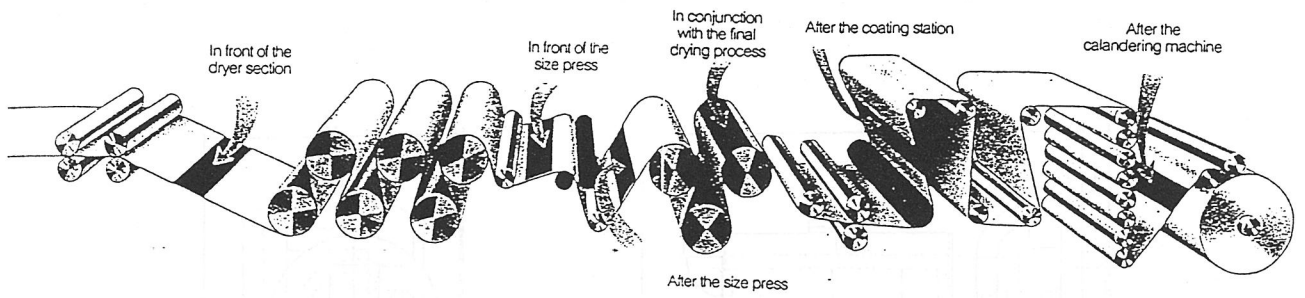
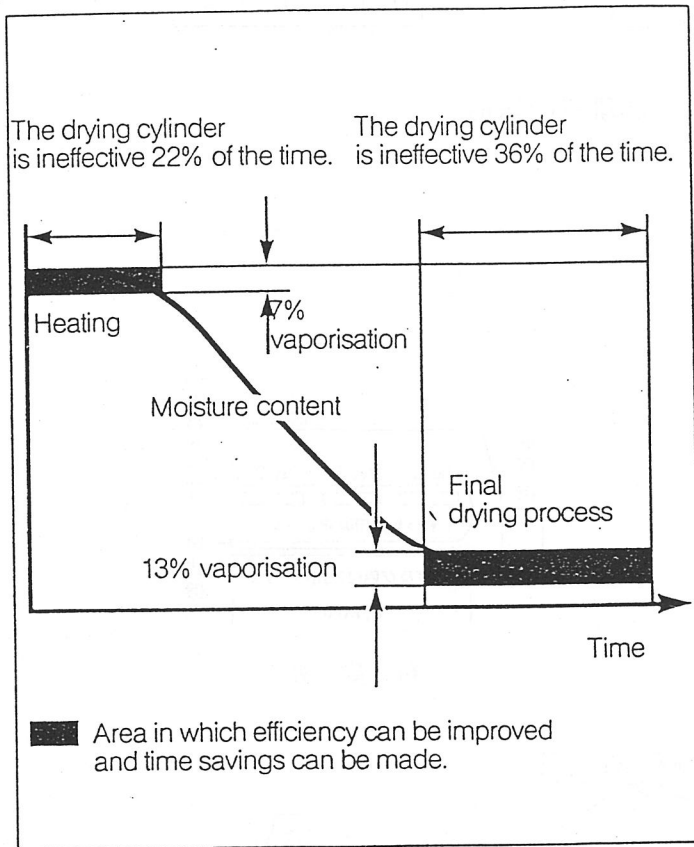


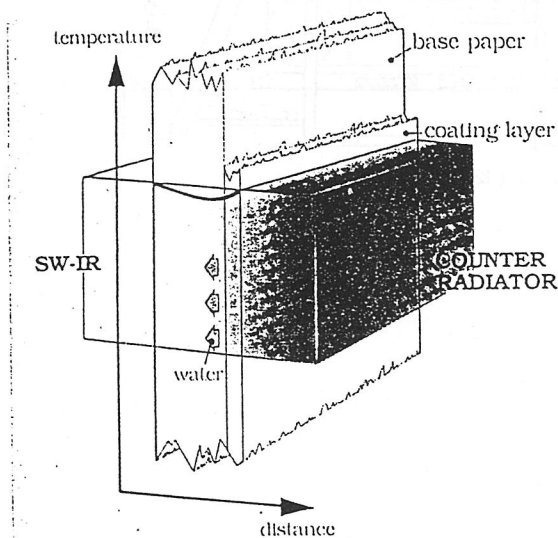
図 6. 5. 19 連続式ちくわ焼き器²²⁾



☒ 6. 6. 1



☒ 6. 6. 2



- Controlled water penetration
- Controlled binder migration
- Coated surface evaporates

☒ 6. 6. 3

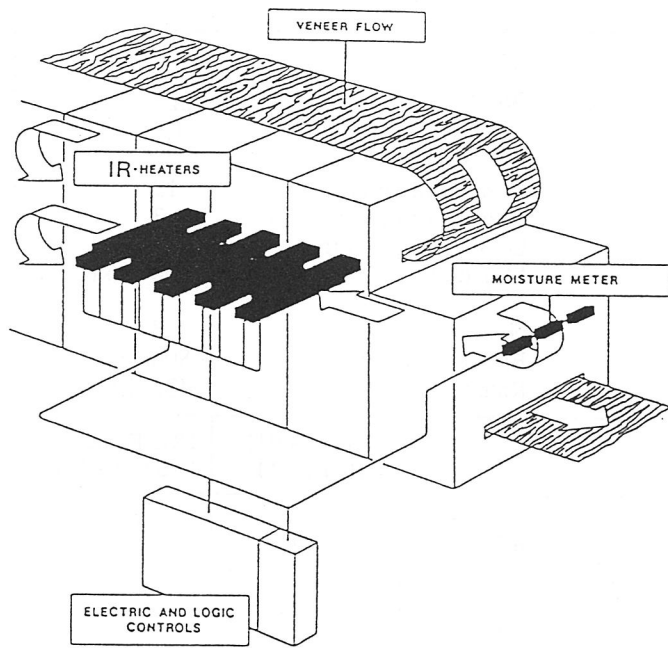


图 6. 6. 4

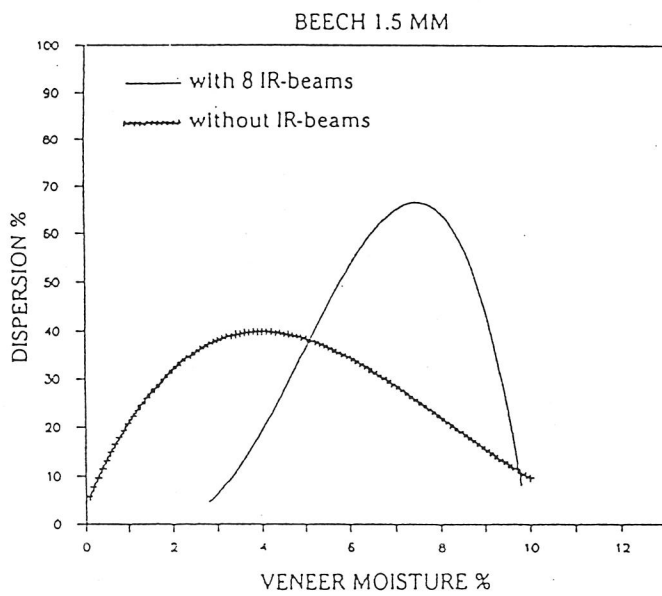


图 6. 6. 5

表 6. 6. 1

Raw material	Beech	670 kg/m ³	
Sheet dimensions	Width	1620 mm	
	Thickness	1.5 mm	
Net dryer	Number of cells	12	
	Number of decks	3	
	Drying temperature	175 °C	
	Moisture	300 g/kg	
Infrared dryer	Number of beams	8	
	Effective width	1 800 mm	
	Rated power	432 kW	
		WITHOUT IR-BEAMS	IR-BEAMS INSTALLED
Line speed	m/min	22	25
Capacity	m ³ /h	3.20	3.65
Mean final moisture	%	3.5	6.5
Energy consumption:			
-heat	GJ/m ³	1.60	1.50
-electricity	GJ/m ³		0.12

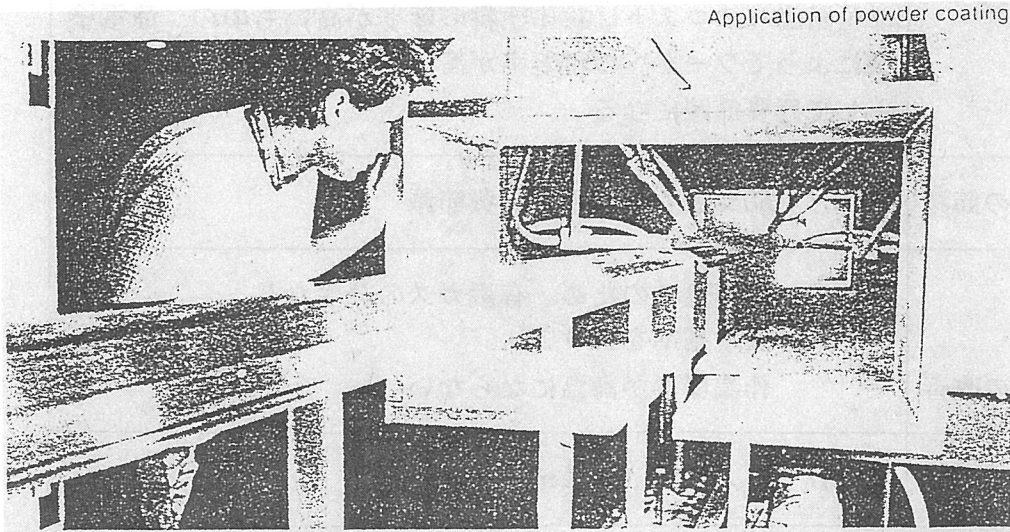


图 6. 6. 6

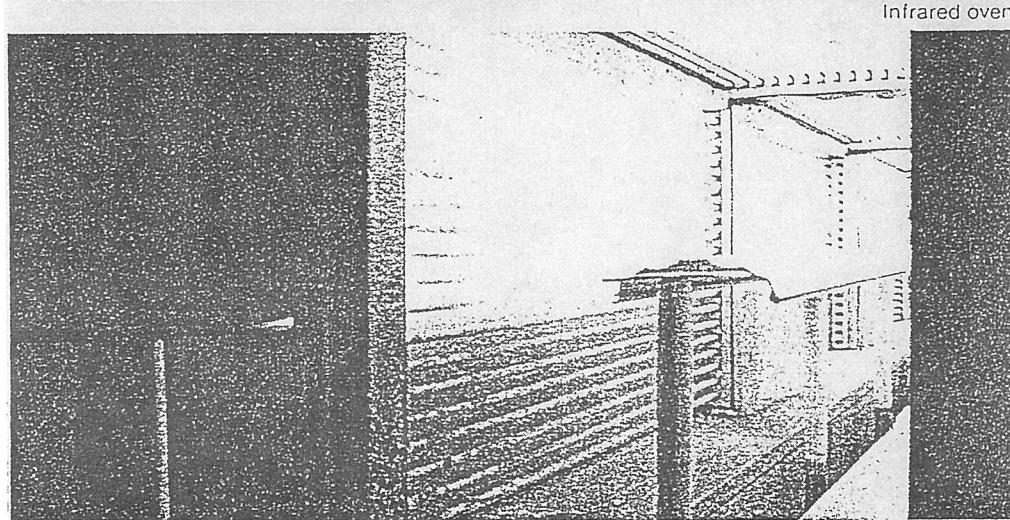


图 6. 6. 7

表 6. 6. 2 近赤外放射による粉体塗装乾燥システムの導入効果^(A-4)

導入効果	本システムと従来システムとの比較
処理時間の短縮 生産性の向上	本システム：34秒 従来システム：90分 本システム：10,000個／8時間 従来システム：300個／8時間
塗料費の節減	本システム：25%塗料費節減 単体量当りのコストは粉体塗料のほうが高いものの、静電塗装によってワークへの付着率が高い（99%以上）ため、結果として経費節減になる
エネルギー費の節減	本システム：50%近くエネルギー費節減
無公害 作業環境の改善	本システム：粉体塗料のため、有毒ガスの発生なし 環境基準をクリア 作業環境が高温にならない
省スペース	本システム：1/40、（幅2m、長さ9m）

表6. 6. 3 自動車ボディー高品位塗装乾燥システムの導入効果^(A-5)

導入効果	本システムと従来システムとの比較
低公害性	有機溶剤の含有量が大幅に少ない塗料の採用
高品質	なめらかで光沢のある仕上がり 本システムの導入によって塗装の膜厚を従来より厚くすることができるようになったため
柔軟性	塗料の種類、粘度、溶剤の種類や濃度に柔軟に対応できるボディーの形状に対応した放射強度の制御が容易
生産性の向上	処理時間の短縮 "basecoat"塗布と"clearcoat"塗布との間隔を従来の4分から30秒以下にすることができた

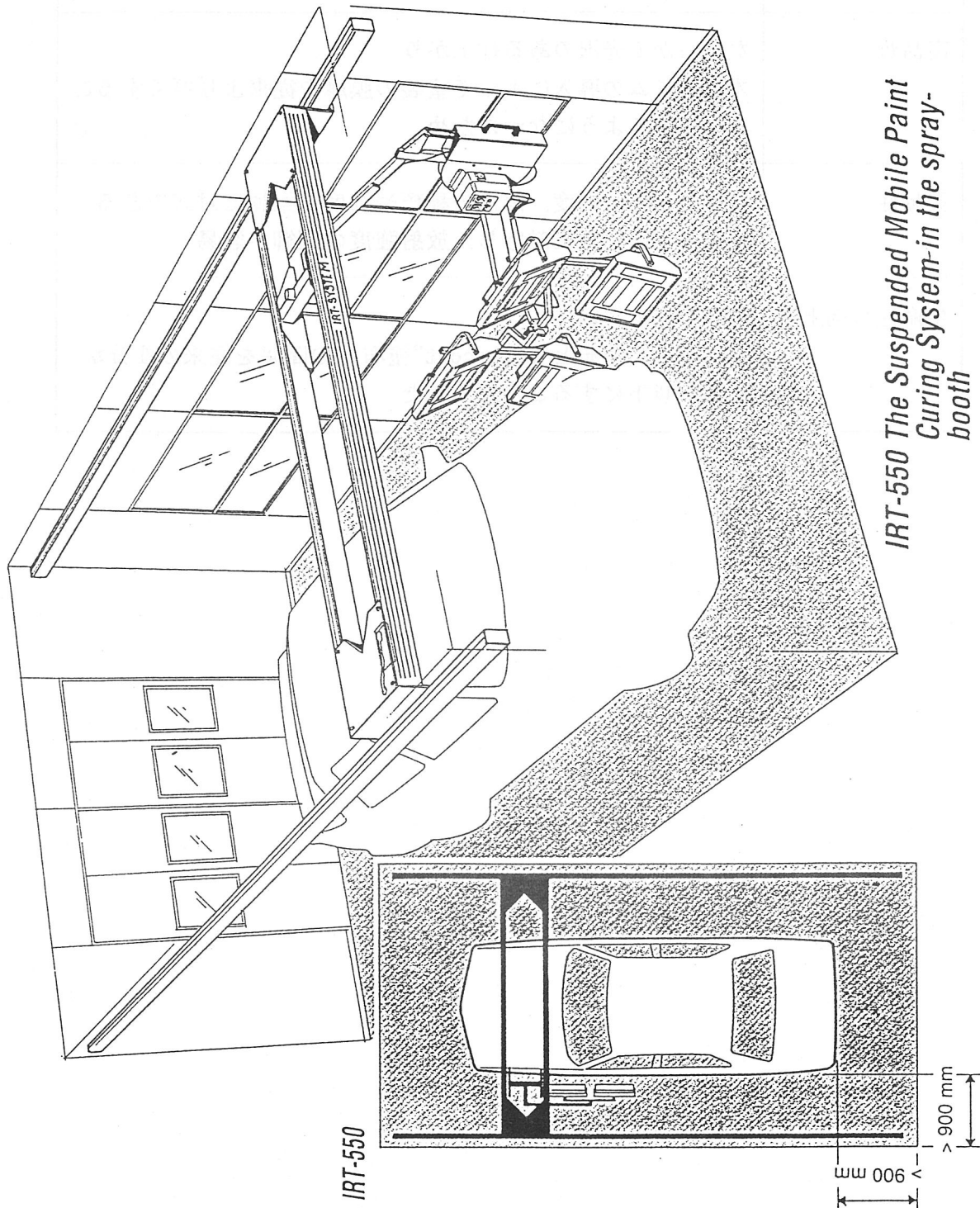


图 6. 6. 8

7 赤外放射加熱の民生応用

7. 1 民生用に使用されている赤外放射源

放射源の一般特性：民生という言葉は軍用に対応するものとしての利用である。この民生用、家庭用に使用されている赤外放射の大半は、暖房用あるいは調理用であろう。特殊な例としてはスポーツジム、家庭の医療・美容などに使用される例がある。これらはその目的のために製作されたもので、一般用途にはなりがたい。

また医療用に使用されている赤外放射源もあるが、医師の管理下で使用されるものについては一般化されていないのでここでは対象外とする。

国外の事情についても最近の情報流通の状況から、欧米で使用されるようになったものは、ほとんど期を同じくして国内でも採用される例が多い。赤外放射の対象放射源としては、石英管に不活性ガスとともに密封された電球型のもの、石英管に封入されているが密封になっていない石英ヒータ、ニクロム線などの発熱体をそのまま露出して使用する形式のもの、ステンレスなどの外管に耐熱電気絶縁体とともに封入されたシーズヒータと呼ばれるものがある。

発熱体は使用温度によって材料が選択される。金属系の発熱体としては高い温度で使用できるものとしてタングステン、タンタル、モリブテン等の金属を使用したものから、用途によつて鉄-クロム-アルミ系、ニッケル-クロム系がある。この他非金属系発熱体としては、カーボン-または炭化珪素系、モリブテン-シリサイド系、ランタン-クロマイド系などが知られている。

7. 2 暖房用放射源

最近の建築物は気密性能が向上しているので少しの加熱で十分暖房効果が上がる。燃焼式熱源を使用する場合のように室内換気を必要としない電気式の暖房器が有効である。従来の暖房用機器としては全室内を放射暖房する例は少なく個人用が主でストーブとコタツに分けられる。

(1) ストーブ用

ストーブ用の放射源としては初期にはニクロムヒーターが主として使用され最近ではタングステンフィラメントヒータ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タングステンフィラメントの方が優れていること、および表面が石英ガラスで構成されているため美観上優れていることに起因するものと考えられる。時代とともに変わっていく状況を概観すると、

・円筒の陶磁器の上にニクロム線を巻いたものを金属製の反射板の中心に取り付けた形式のもの（発熱体温度700～800K）（図7. 1）。

- ・石英のガラス管にニクロムヒータを封入し回転放物面型の金属反射板の焦点部に設置したもの（発熱体温度1000～1200K）（図7. 2）。
- ・石英管にタングステンフィラメントを不活性ガスと共に封入した電球タイプのヒータを金属製の反射板の焦点に設置したもの（発熱体温度2000～2200K）。図7. 3に示すのはタングステンフィラメントとニクロムヒータを使用した2種類のヒータの形式と定格である。ストーブにはこれらのヒータを複数本使用して放射強度を調節している。一般にストーブでは入力調節を行うとフィラメント温度並びに分光分布が変わり、反射鏡の効率が変化するなどの現象が表われるので複数灯数を切り替えて使用することが多い。
- ・石英管の表面に長波長の赤外放射の放射率が高い物質を塗布し、遠赤外放射の比率を高めたもの（発熱体温度1800～2000K）（図7. 4）。
- ・バス・トイレなどの狭い場所で使用する目的に円環に加工した環型のヒータなどが使用されるようになってきている。（図7. 5）
- ・またこれらを首振り式の暖房器具と反射板に取付たもので、従来は発熱体を安定して保持できなかったため、石英管を水平方向に維持していたものを石英管の内部に保持突起をつけることで垂直方向に保持できるようにしたものが見つかわれている。
- ・赤外放射を出すとともに、換気ファンを併用し空気の一部をヒータ周辺を通過させ温風を出す方式のもの、セラミック板の周囲に発熱部を取付け、遠赤外放射と温風を同時にできるようにしたもの（ファンヒータ方式）（図7. 6）。
- ・石英管型赤外線ランプの表面に遠赤外放射物質を塗布し、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。
- ・低温パネルヒータは従来からスチームヒータとして使用されていたが最近ではオイルヒータ、電気ヒータ式低温パネルヒータが使用される例が多くなっている。表面温度が60℃程度で文字どおり長波長の赤外放射を使用している。ただし表面温度が低いため気温の低い場合は放射強度を大きくするために大きな表面積を必要とするなど問題を残すことがある。
- ・電気式の床暖房方式、電気カーペットなども低温式の放射暖房器の特性を持っているが、実用的には接触式の暖房器の範ちゅうに含めるべきと考える。

（2）コタツ用

- ・コタツは本質的には接触暖房と放射暖房の折衷と考えられる。初期のコタツ用放射源は単純な電熱線を磁気製の枠に巻き付けたものであった。この場合は、比較的低温の発熱体のため、放射エネルギーより対流によるエネルギーの方が

大きいため、現行の「ヤグラコタツ」のように発熱部をコタツの上部に位置するのはコタツ内部の過熱のため困難であり、コタツの下部に位置しており、接触と対流による暖房が主であった。

- ・ 1960年頃図7. 7に示すようなレモン型をした赤色ガラスを使用したランプを使用したヤグラコタツが開発された。これはフィラメント温度が2500K程度と高いため、放射エネルギーの方が対流エネルギーに比べ格段に大きい。フィラメントは寒冷地帯では400Wその他の地域では350Wと80Wダブルフィラメント式の電球であった。フィラメントからの放射の最大値は1.1 μ m程度で、皮膚の透過率の大きい波長に放射の最大値が合致することから健康コタツとの名称で広く普及使用された。

- ・ レモン型の放射源は大きさが比較的大きいため、使用上の不便を解消するためレモン型ランプが管型ランプにかわり、さらに図7. 5に示す環型ランプに進展した。

- ・ ランプ反射板に遠赤外放射の放射率の高い塗料を塗布をして、ランプからの放射と反射板からの遠赤外放射の両方を同時に放射するように設計された。またコタツ内の空気を攪拌することにより内部の温度分布を均一に近づけかつ反射板の過度の温度上昇を制限する目的のため換気ファンがつけられた。(図7. 8)

- ・ コタツの高機能化の一手段として石英ランプの表面に多孔質の触媒を塗布し、遠赤外放射の比率を増すと共にコタツ内の臭気を吸収除去する機能を持たせた脱臭コタツ(多機能遠赤外ヒータ)が採用されるようになった。

この石英ランプの原理を応用したヒータは簡単な機構で臭気を吸収・分解するので、コタツ以外に冷蔵庫の製氷室内の不要氷の解凍やトイレ・貯蔵庫などの臭気分解用に使用されている。

- ・ 表7. 1にやぐらこたつの放射源の発展の経緯を示す。

7. 3 調理用放射源

(1) 調理用としては、オーブン、トースタ、ロースタなどがある。これらは純粹に放射応用機器として作用するのではなく、高温空気の対流による加熱作用と放射による加熱作用の併用であって、ヒータとしては主としてニクロムヒーターが使用されてきた。

トースターなどではマイカの板にヒーターを巻き付け平板化したものが主流であった。放射源としては最近石英管型ランプを使用したものが増加している。調理の対象が熱容量の小さいものから大きなものまで多様であること、生の食品から加熱のみのものまで各種の対象がある。また仕上がり時に適切な調理色

を必要とするので、近赤外放射のほかに遠赤外放射も使い、表面と内部の加熱調理のバランスを取るようになってきている。魚、菓子などでは明らかに波長の違いが認められている。表7. 2、表7. 3に長波長放射を使用した場合と、短波長の放射を使用した場合の加熱仕上がり効果の違いを示す。図7. 9に脱臭機能をもち遠赤外放射体を使用したグリルの例を示す。熱源はガスを使用し対流とともに遠赤外放射加熱を付加したものである。

(2) 最近使用が進んでいるハロゲンヒータは、全電化住宅などの加熱源として徐々に使用されるようになってきている。調理器の表面が凹凸のない仕上がりになること、上面が平坦なガラスで構成されるため美観にすぐれ、清掃も容易なこと加熱の立ち上がり時間が短いこと、視覚的に赤く輝いたヒータが美しく見えることなどが魅力になっている。赤外放射の透過率が比較的長波長まで大きく、膨張係数の小さい特殊ガラスの下にフィラメント温度2500K～2600K程度の500Wのハロゲン電球を3本～4本使用し、鍋・湯沸しなどの加熱に使用している。この場合調理の原理は伝導と放射の加熱がほぼ同比率と言われている。ただし使用する調理器の加熱面の赤外反射率が高い場合は反射によって加熱効率が低下するのと、反射によりハロゲンヒータが過熱して不具合になるなど難点もあるので、調理器具を選択する必要がある。図7. 10にハロゲンヒータ用のガラスの赤外放射の分光透過率を示す。

7. 4 その他の分野で使用されている赤外放射源

その他の放射源として、美容のための顔面マッサージ用、サウナバス用、ヘヤトリートメント用、などの放射源が数多く用いられている。これらはいずれも7. 2に述べた暖房用の放射源とほぼ同様の放射特性を持っているものが使用されているが、ここでは紙面の制約もあり詳しくは触れない。

変わった利用法として競走馬の疲労回復に出走後の馬の脚部に遠赤外放射を照射するのが効果が高いとのことで利用がすすんでいるようである。

7. 5 おわりに

赤外放射の民生応用について筆者らが担当したが、これらの分野はメーカ各社の開発が進んでおり、製品になって初めて知るものが多く、新しい研究とか動向とかが把握し難い分野である。メーカ各社の絶えざる努力が積み重なり進歩しているものであることを感じた次第である。貴重な資料を提供下さった関係各位に改めて感謝申し挙げる。

参考文献

- ・ 財団法人 産業研究所：遠赤外セラミックスの技術基盤の整備に関する調査研究(1989)
- ・ 財団法人 大阪科学技術センター：遠赤外放射体の開発利用に関する調査研究報告書（平成2年）
- ・ 赤外線応用技術調査専門委員会：電気学会技術報告(十) 第303号(1989)
- ・ 吉井嘉寿憲，森田政明：赤外放射の生体への作用と赤外放射利用暖房器照学誌 74-788(1990)
- ・ 森田政明：放射環境とその評価 Nat. Tech. Rep., 27-469 (1981)
- ・ 森田政明：赤外放射環境と生体 赤外技術研究会47回定例研究会資料(1987)
- ・ 吉井嘉寿憲，梶英俊：コタツ用コルツ赤外線ランプについて 照明学会遠赤外放射研究調査委員会資料IR-33 (1989)
- ・ 荒木唯志、佐藤久義：遠赤外ヒータの加熱特性について、北陸電力研究報告22号(昭和56年)
- ・ 増田光夫、浅見宏明：遠赤外線を利用した産業用電気加熱に関する調査研究 中国電力株式会社技術研究所時報 第67号(1985)
- ・ 吉井嘉寿憲，梶英俊、西野敦：脱臭機能付き赤外線ランプの家具調コタツへの応用照明学会研究会資料 AR-91-21 (1991)
- ・ 森田政明：赤外放射を利用した家庭電気機器について 中小企業活性化技術支援講習会東京都立工業センター（平成2年）
- ・ 根岸直樹、菊池真：医学における遠赤外線応用 照明学会研究会資料AR-88-4(1988)
- ・ 松岡茂朗：コルツ赤外線管(暖房用)の特性 Nat. Tech. Rep., 27-410 (1981)
- ・ 牧 正雄：赤外線輻射コーティング Nat. Tech. Rep., 35-540 (1989)
- ・ 西川賢二：縦型電気温風器クォーツスリムファンヒータ Nat. Tech. Rep., 30-655(1984)
- ・ 星川水哉：遠赤外輻射暖房器 東芝レビュー 36-1110 (1981)
- ・ 梶野 博：遠赤外線やぐらこたつKY-511FK 東芝レビュー 38-126 (1983)
- ・ 松井松長、玉重繁良、高木亮：赤外放射に対する皮膚の温熱感覚の波長依存性 赤外線技術 12, 18 (1987)
- ・ 河本康太郎：遠赤外線の照明・電熱への応用 セラミックス23-327 (1988)

- ・ 渡辺敦夫：食品産業における遠赤外線の利用 照明学会研究会資料 AR-89-21 (1990)
- ・ 河本康太郎：調理分野における赤外放射加熱利用動向 赤外線学会誌 2-(2)-30 (1992)
- ・ 多田龍太郎：遠赤外線ハロゲンヒータの開発 赤外線学会誌 2-(2)-54 (1992)

(高木健起、吉井嘉寿憲、森田政明)

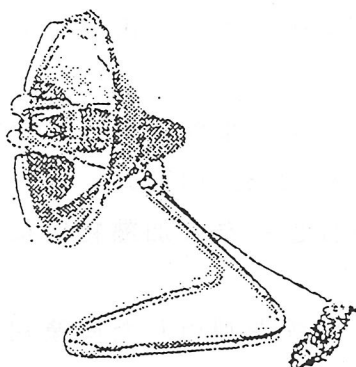


図7. 1 初期の電気ストーブ

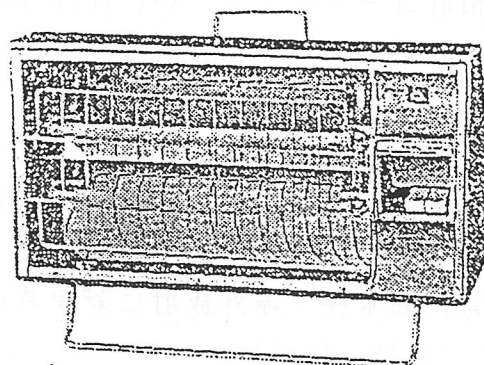


図7. 2 シーズヒータや石英ヒータに放物面を使用した電気ストーブ

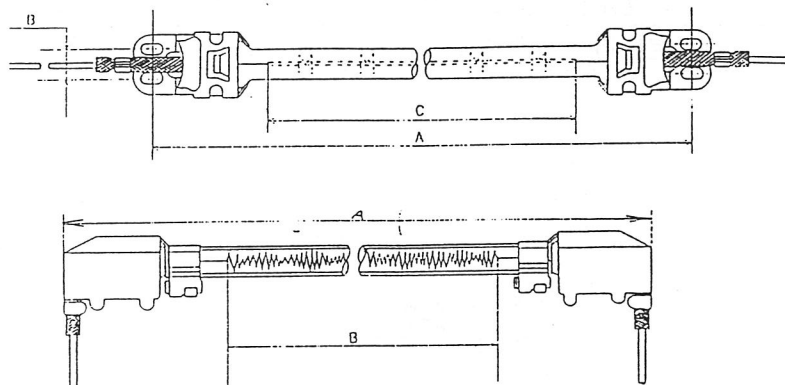


図 7. 3 管型ランプ管型ヒータの例

◆ 基本構成

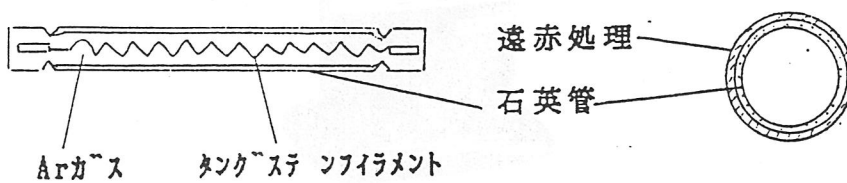


図 7. 4 遠赤外放射ヒータの例

定格

型 式	V	W	寸 法 mm		寿命時間II
	定格電圧	消費電力	A	B	
100V-500W	定格電圧	消費電力	10.5	210	10000 以上

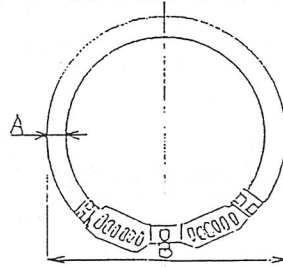


図 7. 5 環型赤外放射ランプ

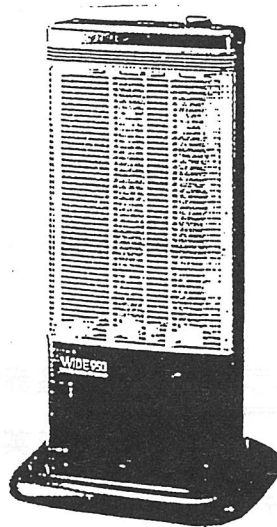


図 7. 6 ファン付きストーブ

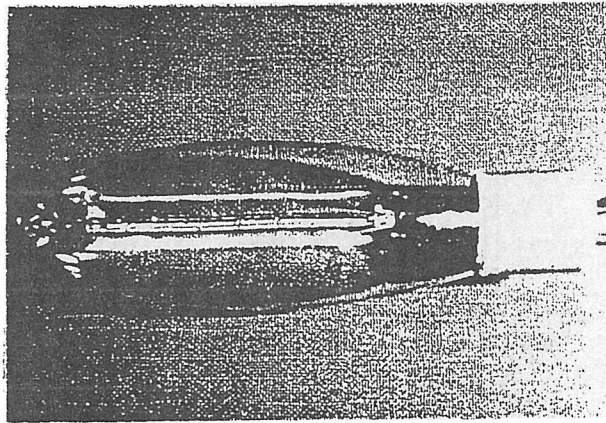


図7. 7 レモン型ランプ

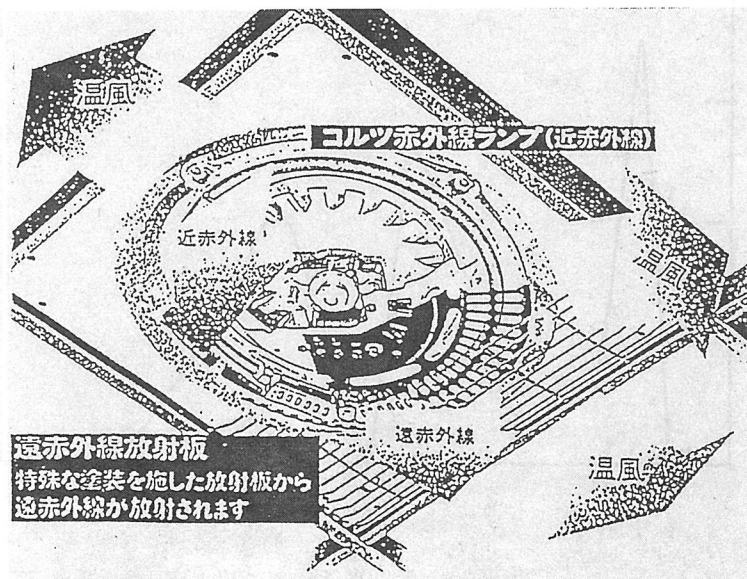


図7. 8 最新のヤグラコタツ放射源

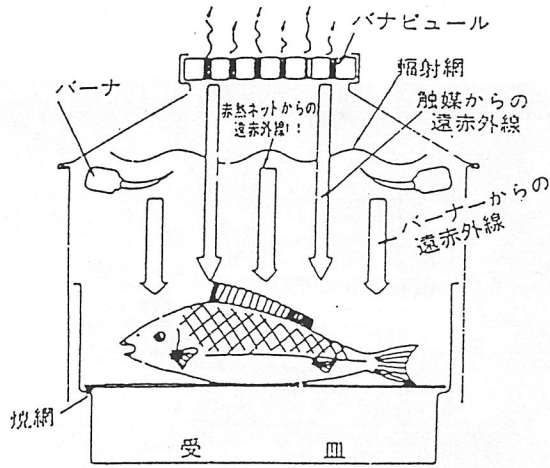


図7. 9 遠赤外放射利用グリルの例

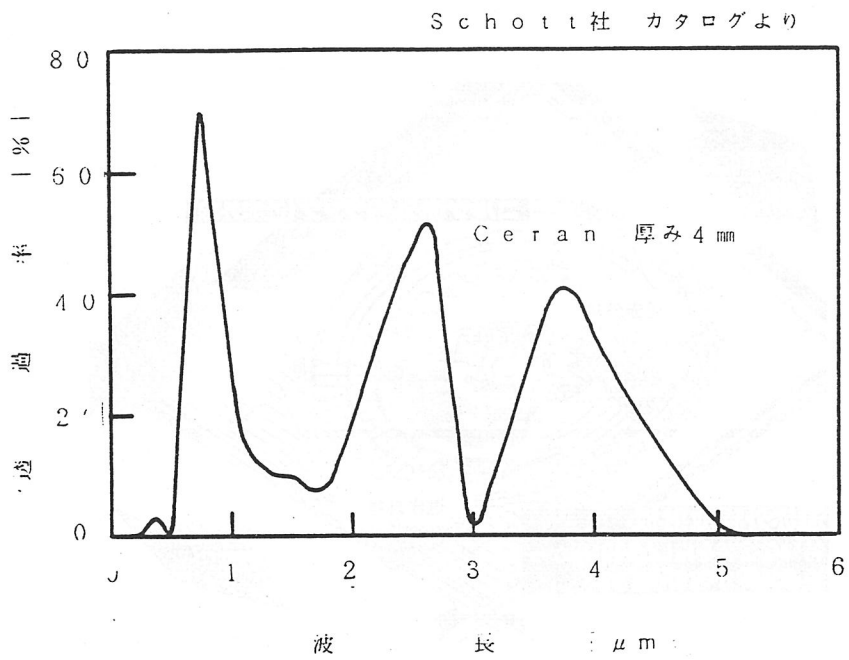


図7-10 ハロゲンヒータ用ガラスの分光透過率

表7. 1 やぐらこたつ用放射源の変遷

年 代	赤外放射源の種類	特 徴
1955	ニクロム線、シーズヒータ、面ヒータ	視感効果、速熱性
1960	赤外線ランプ	
1964	ミラクロンヒータ、石英管ヒータ	発熱部の薄形化 発熱部ので張りなし
1975	コルツランプ、	
1977	温風式ヒータ（PTCヒータ）	
1981	MOSヒータ、面ヒータ	遠赤外放射、ファン付き
1982	SRヒータ	放射の均一化 脱臭作用、遠赤外放射
1988	環形コルツランプ	
1992	高機能コルツランプ	

表7-2 遠赤外放射源と赤外放射源の違いによる調理時間の比較

調理の種類	遠赤外放射源使用	赤外放射源使用	短縮率
クッキー	18分	22分	22%
ミートロール	35分	45分	22%
アップルパイ	32分	47分	32%
シュー	25分	40分	38%
バターロール	17分	27分	37%

表 7-3 遠赤外放射源と赤外放射源の違いによる焼き魚調理の仕上がり比較

	遠赤外処理 石英ヒータ	石英ヒータ	シーズヒータ
焦げ色	適当	やや薄い	薄い
味	やや乾燥きみ	やや生臭い	生臭い
総合評価	○		×

条件 対象：さんま 余熱なし：700W 片面8分、他面7分

項目	遠赤外処理	石英ヒータ	シーズヒータ
焦げ色	適当	やや薄い	薄い
味	やや乾燥きみ	やや生臭い	生臭い
総合評価	○		×

8 赤外放射加熱の市場動向

8.1 日本の動向

遠赤外線応用研究会が1989年にまとめた遠赤外線企業名鑑には1004社の関連企業が集録されている。その中から加熱、乾燥に関連した分野の企業を拾うと約200社が数えられる。また、遠赤外線協会の1992年8月1日現在の会員数は167社で、このうち約6割が赤外放射加熱分野の会員である。このようなことから、200社前後の企業がこの分野に参入していると推測される。

産業研究所が1989年にまとめた遠赤外関連企業のアンケート調査¹⁾によると、1950年代から1960年代前半にかけて赤外放射加熱分野に参入した企業は主として加熱、乾燥の新技术の導入という観点から、また、1960年代後半から1980年前半にかけて参入した企業は主として省エネルギーという観点から参入している。特に、二度の石油危機を契機として参入した企業が多い。1985年頃から、いわゆる「遠赤外線ブーム」が到来して、加熱、乾燥以外で遠赤外放射の利用の可能性を目指す分野（一般に非加熱と呼ばれる分野）に多くの企業が参入した。加熱の分野でもブームに刺激されて企業活動が活発化した。同調査によると、1986年以降製品化件数が大きく増えている。

市場規模については種々の見解が存在して定見がないが、産業研究所の調査¹⁾によると、アンケートに回答した69社（非加熱分野を含む）の1988年の遠赤外事業の売上高は254億円で、一社当りの平均は368万円であった。

遠赤外放射加熱装置の普及度合については、日本電熱協会が1985年時点での普及台数を5万台、設備容量1000MWと推定している²⁾。また、同協会がまとめている電熱需要統計年報によると、1987年度の製造業の電熱用電力消費量は375億kWhで、自家発を含む総電力需要6381億kWh³⁾の5.9%を占める。このうち、遠赤外放射加熱の電力消費量は47億kWhで、製造業部門の電熱需要の12.5%を占めている。

8.2 欧米の動向

1987年に刊行されたアメリカ電力研究所（Electric Power Research Institute, EPRI）の報告書⁴⁾によると、アメリカには赤外放射体や赤外放射加熱機器を製造する企業が約80社ある。アメリカの赤外放射体の売上は年間500万個で、このうち53万個が産業用加熱に供せられている。赤外放射加熱機器は1台8000～12000ドル程度で取り引きされている。赤外放射加熱関連機器全体の市場規模は、アメリカで4000～5000万ドル、ヨーロッパで7000～8000万ドルである。しかし、潜在規模についてはアメリカ市場のほうがヨーロッパ市場より2倍以

上大きいといわれている。アメリカ市場の年間伸び率は10～12%と予測されている。アメリカにおける産業用赤外加熱機器全体の電気容量は400～500MWで、使用電力量は年間15億kWh程度と推定されている。一方、ヨーロッパではアメリカと比較して赤外放射加熱の利用が進んでおり、産業用加熱機器の市場に占める赤外放射加熱のシェアも20%程度といわれている。また、このシェアは5～10年で40～50%に拡大すると予測されている。

8. 3 用途別市場動向

8. 3. 1 塗装乾燥等

塗装乾燥分野における赤外放射の利用の歴史が赤外放射加熱の歴史といっても過言ではない。赤外放射加熱技術は戦後わが国に導入され、赤外ランプを用いた塗装乾燥技術の開発がまず進められた⁵⁾。その後、遠赤外ヒーターが開発され、塗装乾燥ラインに導入された。遠赤外ヒーターは、効率の良さ、長寿命などの長所が評価され、実績を上げた。赤外放射加熱は、1960年代後半以降、自動車の車体塗装、部分補修塗装、部品塗装、家電製品（冷蔵庫、扇風機等）の塗装、自転車の塗装等、主として金属塗装の乾燥・硬化に利用されてきた。また、ワーク洗浄後の水切り乾燥についても、ブラウン管、鏡等を対象にして赤外放射が利用され、生産性の向上に多大の貢献をした。さらに、二度にわたるオイルショックを契機として、赤外放射加熱乾燥炉は省エネルギー炉としての価値が評価され、多くの塗装乾燥ラインに普及した。その後、短時間のうちに乾燥ができること、品質の高い塗装膜が得られることなどの効果が広く知られるようになると、プラスチックの塗装、印刷インキ、マーキングの乾燥等にも利用されるようになった。今後ともあらゆる塗装乾燥の場面で赤外放射の利用が検討され、新しい用途が開発されていくものと推察される。

8. 3. 2 食品等

食品に関連した分野における赤外放射の利用は、食品工場における食品の製造、加工（第二次産業）のほかに、レストランや給食会社などにおける食品の調理サービス（第三次産業）、さらには家庭における食品調理にまで及ぶ。

食品製造における赤外放射の利用は、焙焼、乾燥、熱交換等のあらゆる加熱、冷却工程を対象に検討されており⁶⁾、小さな工程改善を含めると、大多数の工場において赤外放射の利用による伝熱工程の効率化を図っている。赤外放射加熱の利用効果については、

- ①加熱の効率化 ： 加熱時間短縮、加熱効率向上、熱ロス減少、均一加

熱の促進、温度制御性の向上

②制御・操作の単純化：省力化、生産性向上

③食品の品質向上：酸化抑制、栄養価保持、食味・食感向上、歩留り向上（加熱時間短縮、均一加熱の促進による効果を含む）

④作業環境の向上：高温抑制、空気質の改善、クリーン感覚の向上、安全性の向上等が挙げられる。

遠赤外線産業協会がまとめた加熱効果実態調査報告書⁷⁾によると、食品分野への遠赤外放射の利用目的・用途は、一般加熱（65%）が主であり、次いで乾燥（19%）、熟成、殺菌、温蔵等となっている。他産業では、乾燥が圧倒的に多い（67%）のに対し、食品は、焼き上げ、焙煎、ゲル化等のための加熱が多いことを示している。ただし食品の場合、加熱の途上で乾燥を伴うものも多い。利用効果については、生産性の向上（40%）、品質の向上（34%）、作業性・環境の向上、省力化の促進などとなっている。

利用例としては、海苔の乾燥・焙焼、カキ・ナマコ・タコの加熱、調味干の乾燥、シート状食品・米菓の乾燥・膨化、各種の加熱ゲル化、節類の焼軟、魚肉・食肉類の焙焼、茶・海苔の火入れ、ちくわの坐り、炊飯米の脱水等がある。揚げ物・ゆで物に対する用途も増加している。特殊な用途として、酒の熟成、漬物の熟成、みそ・納豆の発酵、殺菌などにも用いられている。装置としては、コンベア型、回転型、真空棚型が多い。

調理サービスの分野においても、食物素材の芯部まで均一に焼き上げることができるなどの特長から、赤外放射加熱は広く用いられるようになってきた。また、自動化することによって食味のばらつきも少なくすることができ、専門の職人でなくてもパートタイマー等で調理が可能な焼き鳥器、焼き魚器等が利用されようになってきた。ファーストフード店、給食会社等では大量に調理を行うため、予熱・保温の工程が必要で、このための赤外放射の利用にも関心が高まっている。

8. 3. 3 その他

赤外放射加熱はプラスチック加工や電気電子部品の加熱加工にも多く利用されている。プラスチック業界では、プラスチックの成型加工時の予熱や軟化、エンボス加工、シュリンク加工などに多く使用されている。また、電気電子部品業界では絶縁ワニスの乾燥や基板のハンダリフローなどに利用されている。水切り乾燥装置も一般的である。さらに、接着剤の乾燥に対する赤外放射加熱の需要も様々な業種において見いだされている。一方、農林水産畜産関係でも徐々に関心が高まり使用例が増えている。医療関係ではサウナ、暖房、温熱治

療、リハビリテーションなどに応用例が見られる。

8. 4 今後の見通し

赤外放射加熱技術は戦後わが国に導入され、約50年の技術開発の蓄積の上に現在を迎えている。その応用分野も産業用、民生用を問わず、あらゆる領域に及んでいる。さらにわが国では1985年頃から「遠赤外線ブーム」が起こり、非加熱と呼ばれる分野ばかりではなく、加熱・乾燥の分野も大いに活性化した。ブーム当初は赤外放射とそれに対する被加熱物の性質に対する理解の不足から様々な誤解や混乱が生じたが、ブームに動機づけられて多くの試行錯誤が行われたのも事実である。その中から新しく実用化にこぎ着けた技術や分野が多くあった。

現在、赤外放射体などの個々のコンポーネント技術はかなり成熟の域に達しているように推察される。しかし、実際の適用技術については普遍的なものではなく、今後も分野や用途に応じてその都度開発されていくものと考えられる。「遠赤外線ブーム」は鎮静化の方向に向かっているが、昨今の地球温暖化問題に対する対策の重点課題として再び「省エネ・省資源」が大きくクローズアップされている。このため、今後、省エネルギー機器に対する優遇措置も一層充実していくものと予測される。赤外放射加熱機器は、エネルギー利用率の向上、製品品質の向上、作業環境の向上等に大きく寄与する可能性が高く、今後も様々な分野、用途で技術開発が進むものと思われる。

参考文献

- 1) 産業研究所；「遠赤外線セラミックスの技術基盤の整備に関する調査研究」、平成元年。
- 2) 日本電熱協会；「国内における昭和60年度機種別電熱需要量の推計」、電熱、No. 35、pp. 19-25、1987年。
- 3) 電気事業連合会統計委員会；「電気事業便覧（平成4年度版）」。
- 4) J. R. Bush；"Electric Infrared Process Heating：State of the Art Assessment"，EPRI Report EM-4571，Mar. 1987.
- 5) 森田；「赤外線加熱技術の開発と経緯」、照明学会誌、第73巻、第5号、pp. 267-271、平成元年。
- 6) 米田；「遠赤外放射の食品工業への利用の現状と将来」、照明学会誌、第74巻、第12号、pp. 796-799、平成2年。
- 7) 遠赤外線産業協会；「加熱効果実態調査報告書」、平成4年3月。

(安坂耕一、米田達雄、中野幸夫)

9 赤外放射の非加熱効果に対する科学的アプローチ

9. 1 赤外放射の作用と非加熱的効果

9. 1. 1 電磁波と光子（光子）のエネルギー

赤外放射に限らず，電磁波（放射）はその波長に対応した光子のエネルギーを持っており，電磁波が物質や生物・生体などに照射され吸収されると，その電磁波の持っている光子のエネルギーの大きさに応じて，種々の作用を及ぼすことが知られている。

例えば，日常よく見られる太陽放射による人間の皮膚の日焼けは，太陽放射中に含まれている紫外放射（一部の波長域の電磁波）のエネルギーによる，光生化学作用（皮膚の部位において，光化学反応が進行している）によるものである。

この光子のエネルギーの大きさは電磁波の波長（周波数）の関数になっており，光子 1個のエネルギーの大きさは次の式で表される。

$$\varepsilon = h \nu \quad [\text{J}] \quad (9.1.1)$$

h : プランクの定数 $(= 6.626 \times 10^{-34} [\text{J} \cdot \text{s}])$

ν : 電磁波の周波数 $[\text{Hz}]$

ここで，

$$\nu = c / \lambda \quad [\text{Hz}] \quad (9.1.2)$$

c : 真空中の電磁波（光）の速度 $(= 2.9979 \times 10^8 [\text{m/s}])$

λ : 電磁波の波長 $[\text{m}]$

であるから (9.1.1)式に代入すると，光子のエネルギーと電磁波の波長との関係は次の式の通りとなる。

$$\varepsilon = h c / \lambda \quad [\text{J}] \quad (9.1.3)$$

(9.1.3)式を具体的な波長の電磁波について計算した結果を表9.1.1 に示す。この表の一番右の欄の数字がそれぞれの波長に対応する光子 1個分のエネ

ルギーであるが、フォトン1個分ではエネルギーの大きさが小さいので、通常はフォトン1 mol 分のエネルギーの総量を Kcal/mol または KJ/mol で表して実用することが多い。この単位は光化学反応を促進するエネルギーの大きさや原子間の結合エネルギーの大きさを表わす場合によく使用される。

また図9.1.1には、このフォトンのエネルギーの紫外、可視、赤外域の部分の状況をグラフに表わしたものである。図9.1.1の縦軸は、上述したフォトン1 mol 分のエネルギーによって示してある。この図により明らかなように、フォトンのエネルギーは電磁波の波長に逆比例しており、波長が長くなるに従って小さくなっている。

9. 1. 2 フォトンのエネルギーから見た赤外放射の作用

電磁波（光放射）が生物・生体や物質に照射され吸収された場合の、その物質や生体に与える作用効果を検討する手がかりの1つとして、物質や生体を構成している原子間の結合エネルギー（解離エネルギー）の大きさがある。これは、もし吸収された電磁波のフォトンのエネルギーの大きさが、その分子を構成している原子間の結合エネルギーよりも大きければ、そのフォトンのエネルギーにより、その部分の結合が解離される可能性が生じることになるからである。（原子の結合が解離されれば、その結果として従来とは異なった別の物質が、そこに生成される可能性が生じることになり、結果としてそこに何らかの作用が及ぼされたということになる。）この変化のプロセスが化学反応であり、電磁波（光放射）のエネルギーによって進行される化学反応のことが、光化学反応と呼ばれる。

表9.1.2に代表的な各種の分子における、それを構成する原子間の結合エネルギーの大きさをまとめたものを示す。この表9.1.2によれば、例えば（水分子における）酸素原子（O）と水素原子（H）の共有結合の場合、結合エネルギーの大きさは110 kcal/molであるから、この大きさに相当するフォトンのエネルギーを持つ電磁波（光放射）の波長は、ほぼ250 nmということになり、電磁波の波長区分としては紫外放射である。（この波長の紫外放射は、地上の太陽放射中にも含まれていない程エネルギーの大きな紫外放射であり、この紫外放射を発生させるには、人工的な特別のシステムによらねばならない。）

表9.1.2の各結合のエネルギーの大きさより考えると（地球上に存在している全ての分子の原子間の結合が、この表9.1.2で網羅できていないということはあるが）、概括的には地球上の物質や生物・生体に対して何等かの化学反応を進行しうるだけのフォトンのエネルギーをもっている電磁波は、波長でいうと、ほぼ800 nm程度までで、それ以上の波長の長い電磁波は、フォトンのエ

エネルギーが余り大きくないので、生体や物質に照射され吸収されても、上で述べたように、その分子の原子間の結合を解離するまでには至らず、原子を励起したり、原子間の振動運動のエネルギーや回転運動のエネルギーに変換されるだけで、化学反応の促進はほとんど期待できないと考えられる。

この化学反応の促進が期待できない波長の長い（したがってフォトンのエネルギーの小さい）波長 800 nm より長波長の電磁波（光放射）が物質などに吸収された後の作用の様態は、波長によって図9.1.2 に示すように区分されることが知られている。前述のように、これらの様態のエネルギー変換は、いずれも物質や生物・生体の分子内の原子間の結合を解離させるところまではいくことはほとんど無いので、波長 800 nm 程度以上の電磁波（赤外放射やマイクロ波、電波などがこれに含まれる。）は、物質や生物・生体に吸収されても化学的变化を与えることは少なく、最終的には熱エネルギーに変換され、結果として吸収した物質や生物・生体が化学的变化を受けることなく温度が上昇する（加熱される）ことになる。赤外放射（波長 800 nm 以上の光放射）が加熱に利用されるのはこの理由による。

但し、赤外放射の中の波長範囲が $0.80 \mu\text{m} \sim 2 \mu\text{m}$ のものは、物質などに対し若干の光化学作用を及ぼすことが知られている。例えば赤外写真はその一例であり、したがって波長 $0.80 \mu\text{m} \sim 2 \mu\text{m}$ の赤外放射は、光化学領域の赤外放射、または別名「写真領域」の赤外放射と呼ばれる。（図9.1.2）

たゞし、遠赤外放射は、既に第1章で述べたように、波長が $4 \mu\text{m}$ より長い範囲の赤外放射であり、フォトンのエネルギーは更に小さくなる方向であるから、物質や生物・生体を構成する分子に吸収されても、構成する原子の振動のエネルギーや回転のエネルギーに変換されるだけであり、他の過程のエネルギー変換は全く期待できず、最終的には全てのエネルギーが熱エネルギーに変換されると考えられる。（加熱用のエネルギーとしては更に質の高いエネルギーであるということが出来る。）

9. 1. 3 遠赤外放射の非熱作用

前項までに述べてきたように、遠赤外放射の作用というのは基本的には、他の（分子の原子間の解離を生じるような）エネルギーに変換されることなく、直接変換された熱エネルギーによる作用ということになり、熱作用（または加熱作用）であるということが出来る。

但しこゝで問題になるのは、分子内の原子間の解離に寄与することが出来ないようなエネルギーの小さいフォトンが、熱エネルギーに変換される過程を経ること無く、物質や生物・生体に作用を及ぼす可能性が全く無いかどうかとい

うことである。もしフォトンのエネルギーが小さい遠赤外放射でも、熱エネルギーへ変換されることなく物質などに作用を及ぼすことがあれば、その作用は（熱エネルギーへの変換の過程を経ない、という意味で）“遠赤外放射の非加熱効果（または非熱効果）”ということができると考えられる。

この“遠赤外放射の非熱効果”の一例と考えられるものに、遠赤外放射による水分子間の水素結合の解離促進がある。以下にこの問題についての要点を述べる。

9. 1. 4 水分子における水素結合の作用と遠赤外放射

気体状態の水（水蒸気）は、水分子が相互にほぼ独立の運動をしている。この相互に独立の運動をしている気体状態の水分子の構造を図9.1.3に示す。水分子を構成している水素原子と酸素原子は共有結合をしており、その結合エネルギーは既に述べたように、ほぼ 110.6 kcal/mol である。

ところで2個以上の水分子が適当な位置関係になると、酸素原子と他の水分子の水素原子との間に吸引力が生じ、相互に結合することが知られている。この結合を水素結合という。この結合の状態を図9.1.4に示す。

この水素結合を生じる理由は、次のように説明されている。即ち、水分子の構造は図9.1.4に示したように、水素原子側と反対側が非対称になっているので、水分子の水素原子と酸素原子の共有結合の水素側は酸素側に対して電気陰性度が大きくなる。互に近い2つの水分子が適当な位置関係になると、1つの分子の水素が他の分子の酸素を引きつけ、しかもこのような位置では電気的反発力は比較的小さいため、正味の吸引力は分子を互に引きつける程度に強くなる場合が多く、このようにして結合が生じる。

この水素結合の結合エネルギーは 2~8 kcal/mol であり、対応する大きさのフォトンのエネルギーを持つ電磁波（光放射）の波長は 3.58~14.3 μm となる。この波長域は真に遠赤外領域 [遠赤外放射：波長 4 μm 以上の赤外放射] であり、したがって遠赤外放射は、水分子相互の水素結合の離間を直接促進する可能性があるということができる。この直接の作用の一例として、水の蒸発促進を上げることができる。水の蒸発というのは、液体の水（水分子が近距離にあり、相互にいろいろな結合力により結合している状態）から水分子1つ1つを分離することが基本になる。したがって蒸発促進には、水分子相互の結合を解離させるだけのエネルギーを供給する必要がある。このエネルギーが蒸発の潜熱（単に蒸発熱ともいう）と呼ばれるもので、良く知られているように 100°C, 1気圧で、539 kcal / kg である。

（液体の）水分子相互を結合させている結合力としては、主なものはファン・

デル・ワールスの分子間力であるが、水の場合には上述の水素結合による結合力が加わる〔水はこの水素結合力が強いので、他の（水素結合の可能性が少ない）液体に比べると、蒸発熱が大きい（表9.1.3 参照）〕。既に述べたように、遠赤外放射は水の水素結合を離間する作用力があるので、水が蒸発している面に、遠赤外放射を照射すると、換算された熱エネルギー量は同じであっても、燃焼などによる熱風を供給した場合よりも、水の蒸発時間の短縮が期待され、したがって遠赤外放射は（水を対象とした）乾燥工程の効率を向上させる作用があると考えられる。

ところで水における水素結合は、離間させるのにエネルギーが必要ではあるが、上述のように結合エネルギーの大きさが、水分子の水素と酸素の共有結合の結合エネルギーの大きさに比べると小さく、比較的離間させ易い。したがって（液体の）水において一旦形成された水素結合は決して固定的、永久的なものではなく、ちょっとした分子振動などのエネルギーによって離間・結合を繰返し、しかもその度に結合する相手を変化させている。また水分子の構造上の理由から、全ての水分子が相互に水素結合している訳ではない。水において、一部分の水分子だけが水素結合により結合して集団になっている状態をクラスターという（図9.1.4）。つまり通常の水においては、一部分の水分子がこのクラスターを形成しているが、そのクラスターの出来方が（普通の状況ではいろいろのエネルギーが常に水に加えられているので）時々刻々変化していることになる。このクラスターの状態の変化は、水素結合の離間（および再結合）が促進されることにより促進される。したがって、遠赤外放射を照射することにより、クラスターの状態の変化を促進できる可能性がある。クラスターの状態を変化させることによって水の何らかの性状が変化するとすれば（その変化が顕著であるかどうかという問題はあがあるが）

この可能性があるひとつの例として議論されているものに、酒類（日本酒、ブドウ酒、ウィスキーなど）の熟成の促進がある。酒類は基本的にはエタノールと水の混合物である。混合した当初は単にエタノール分子と水分子が相互に接近した状態で混在しているだけであるが、エタノール分子と水分子の構造により、次第にお互いに構成原子の一部が相手の分子の隙間に入り込むようになる。（お互いに完全に入り込むまでには時間がかかる。また、完全に入り込んだ状態になると容積が最も小さくなる。）この完全に入り込むことと、従来言われている“熟成が完了する”ことが同じ内容であるかどうかは議論のあるところであるが、水においては水素結合が水分子の相対配置を決める上で重要であるから、この分子が相互に入り込むことと、水素結合の状態とは、関連性があると考えられる。もし、遠赤外放射の照射によって水の水素結合の状況が変

化するなら、遠赤外放射によってエタノール分子と水分子の相対配置に影響を与え、お互いに分子が入り込む状況に変化を与えることになる。〔水素結合は水だけでなく、（液体の）メタノールにも存在する。メタノールの水素結合の作用も（結合エネルギーの大きさは水の場合と異なっている可能性があるが）基本的には水の場合と同じである。〕

このことが酒類の熟成と関連あるかどうかは、今後研究し明らかにする必要があるが、遠赤外放射のフォトンのエネルギーが直接作用する現象のひとつの可能性であると考えられる。また、多くの食品には水が含まれており、それぞれ重要な機能を果たしているので、水の水素結合の状態が食品の何等かの性状に関係しているとするれば、他にも遠赤外放射の作用効果が考えられる。

遠赤外放射とは直接の関連は無いが、水分子の水素結合は他にも種々の作用効果がある。水が固体状態（氷）になると、水分子は水素結合により規則正しく結合するが実際には、分子間にかなりの空間が存在する。これは強力でしかも方向性のある水素結合が、他のすべての分子間力に優先して結晶構造を決定するためである。もし分子間の空間が減少するように水分子の配列を変えれば、分子の相対的な位置はもはや水素結合に最適の状態ではなくなる。

氷が融解すると多くの水素結合が切断されるため、分子を規則正しい配列に保持することができなくなるが、なお残っている水素結合によって、液体の水の多くの異常な性質が現れてくる。水を 0℃ から加熱していくと、4℃ までは収縮し、それ以上では温度の上昇とともに膨張していく。このような現象ならば氷が溶解するときの密度の増加は、いずれも温度の上昇とともに空間に広がった水素結合構造が崩壊していくためである。水の粘度は水の温度が 0℃ から 100℃ に上昇すると 1/10 に減少するが、これも水分子の熱運動の増加により水素結合が崩壊し、水の中の氷状特性が減少するためである。水は 100℃ でもなお水素結合の影響を強く受け、同分子量の他の物質に比較して融点が高く、蒸発熱も大きい。

なお、氷を 2,000 気圧以上に加圧すると分子の配列の変化が起り結晶化する。結晶には全部で 5 種類の結晶型の氷が得られているが、その結晶型は最後の圧力と温度で決る。これらはいずれも水より高密度であるが、圧力が下がると通常の氷に戻ることが知られている。

（河本康太郎）

9. 2 低温・常温遠赤外放射利用の研究動向

9. 2. 1 遠赤外放射の生体に対する効果の例

- ・遠赤外放射の生体に対する温熱感の差異
- ・サウナへの応用と発汗作用、重金属の排泄、血圧上昇の抑制、脈拍・血中乳酸濃度の抑制、代謝量の抑制
- ・関節炎の痛み緩和、糖尿病患者の血糖値低下、炎症の鎮消
- ・ネラックス：遠赤外線放射の健康シート ビーム工業
- ・ヘルストップ：特殊3層構造の腹巻き、軽いので長時間着用しても疲れにくい。防臭、防菌性もある。 ツツミ興産
- ・遠赤外線火鉢：独自開発の「ブラックセラミックス超遠赤外線ヒータ」を使った火鉢。日工
- ・シンカラホット：電気を用いガラスパネルから遠赤外線を放射する。ポータブル型暖房器。インターセントラルヒーターズ
- ・ハイテックテーブルヒータ：食卓用のセラミックヒータで、ひざから下の体を暖める。服部ヒーティング工業
- ・RD-9900：発熱体は鉄板にセラミックスをコーティング。効率よく遠赤外線を放射する暖房器。陽光
- ・ガス遠赤外線サウナPSV：室温100～110℃の電気式は熱気が強く、息苦しかつた。ガス式は低い室温（80～90℃）でも発汗速度が早いので、快適なサウナを楽しめる。サンケイトレーディング
- ・うららきぶん：壁掛け型の電子乾燥ヒータ。パネルをとれば暖房器としても使える。日本鑄工 電子事業部
- ・温暖全線：肩こりや筋肉痛、肉体疲労をやわらげる温熱治療器。卓上スタンドタイプ。 日本軽金属
- ・サニーパワーブラック：柄に遠赤外線放射のセラミックスを混入した歯ブラシ 歯槽膿漏、歯肉炎の予防に。 井田特殊機器
- ・赤外線疲労回復：日経産業新聞 62.8.7
- ・遠赤外線放射の歯ブラシ：日本工業新聞 62.3.16

9. 2. 2 遠赤外放射源としてセラミックスを衣服等に使用した効果の例

- ・セラミック加工繊維製品の温熱 放熱効果のサーモグラフィによる研究
- ・セラシート：遠赤外線放射と蓄熱効果が体にむだな区作用する。健康シート。ツツミ興産
- ・ホシ仙歳檜パット：ヒノキチップを特殊スモーク加工した遠赤外線放射のパ

ット。星製菓

- ・ゼフィール：粉状セラミックスを中綿全面に加工。体を芯から温めるパッド（97 x 185 cm） ピーシーフードプロダクツ株式会社
- ・さわやかさん：吸湿性に優れた抗菌防臭加工のパッド、遠赤外放射で保温する。（105 x 190 cm）
- ・セラミックス・インナーベスト：遠赤外放射を効率よく放射する昭和電工のセラミックスを特殊合成樹脂で加工したベスト。三陽
- ・セラミックシート：敷布の下に入れても直接敷布としても使用できる。桜本プラスチック工業
- ・バイオテックダウン：特殊なトリートメント剤で加工した羽毛掛け布団 西川産業
- ・バイオセラミット：遠赤外線効果のバイオセラミットと羊毛をドッキングした敷布団 西川産業
- ・遠赤外線カーペット：表面温度60℃の低温暖房
- ・遠赤外線毛布、遠赤外線敷布、遠赤外線座布団、遠赤外線防寒服、遠赤外線ボディカバー、サウナ用遠赤外線マット、足温用遠赤外線マット
- ・ヘルストップパー遠赤外線腹巻き
- ・セラミック粉塗れば暖かく一靴下・布団に一：日経産業新聞61.11.11
- ・ソックスに脱臭効果－低温でも遠赤外線放射：日経産業新聞 元.1.26

9. 2. 3 遠赤外放射の照射の特殊効果の例

- ・アロエ酒の熟成促進、保存時の変質抑制、味の向上
- ・ラッキョの漬物の熟成促進
- ・緑葉の乾燥効果、クロロフィルの残存量大
- ・バスミッド：浴槽にひたすと湯質がまろやかになる。直径15cmの遠赤外線放射の円盤。クリーン産業
- ・温泉ボール：浴槽に浸してかくだけで、弱アルカリ性の温泉質になるそう。昭和パッケージ工業
- ・浴槽内遠赤外線マット
- ・オアシス：水を構成する原子・分子の段階で水を活性化させる活水器。雑菌の繁殖を抑える。ホクスイ
- ・セラパワー200：プラスチック容器の中の遠赤外線放射セラミックスが作用、水溶性切削・研削油材の腐敗臭を取り除く。片倉工業
- ・新鮮警備袋：袋に入れておくだけで肉、魚類、野菜などの鮮度を長持ちさせる。昭和パッケージ工業

- ・遠赤カップ：遠赤外線放射のセラミックスフィルムをカップの中に転写。
コーヒがまろやかでマイルドな味になるとか。服部ヒーティング工業
- ・遠赤パック：外装に真空蒸着した断熱材を使い内側をセラミックコーティング。
果物、野菜の鮮度を保つ。服部ヒーティング工業
- ・アポロンシート：セラミックスを製紙原料に混入した遠赤外線放射シート。
使い方はコースターの代わりにまた容器のラベルのようにして
- ・フレッシュパック：生鮮食品をいれ、冷蔵庫に保存すると自然に近い状態で
鮮度を保つ。福谷
- ・貼るだけで生鮮食品を長持ちさせるという。シール状になっている。
昭和パッケージ工業
- ・バイオソール：靴の中に敷くと遠赤外線の放射で、保温、消臭効果がある。
大関化学工業
- ・遠赤外線ダニ駆除機：本体から放射される遠赤外線でダニを殺す。薬剤を使
わないので家庭でも安心。サニックス
- ・遠赤外線ハロゲンヒーター（黒、白）電波新聞 63.4.5
- ・遠赤外線紙 アポロン、遠赤外線紙 不織紙
- ・セラミックペーパー コーセラNC
- ・遠赤外線食品保存材、遠赤外線鮮度保存：日刊工業新聞 61.3.25
- ・生鮮品の鮮度保つー遠赤外線放つプレート：日経産業新聞 61.8.28
- ・萎びた野菜元通りに：日刊工業新聞 62.1.26
- ・野菜の鮮度維持装置：日経産業新聞 62.10.12
- ・遠赤外線放射 コーヒカップ：日刊工業新聞 62.9.15
- ・遠赤外線ダニ駆除：日経産業新聞 62.7.14
- ・空気清浄機も遠赤外線：日本工業新聞 62.9.29
- ・家庭のお風呂を温泉に一遠赤外線放射セラの応用：日経産業新聞 62.9.2
- ・遠赤外線コースター

9. 2. 4 調理に対する遠赤外放射の利用例

- ・揚げ物調理の改善、魚、海老、鳥の唐揚げ改善、かき揚げ改善、
- ・遠赤外線てんぷら鍋、
- ・遠赤外線麺類ゆで鍋
- ・ヤルジャン遠赤外線アルミニウム板を使った焼肉プレート。煙も出にくい。
日本軽金属

9. 2. 5 加熱・乾燥への応用

- ・エポキシ樹脂系接着剤の乾燥硬化
- ・ワニス塗布トランスの加熱乾燥
- ・ユニクロメッキ鋼板の塗料吹付乾燥
- ・テフロンチューブの加熱収縮
- ・米果の焼き揚げ加工
- ・捺染加工乾燥
- ・い草乾燥、山菜・甘茶乾燥、薬草の乾燥・保管
- ・蒲鉾の盛りつけ
- ・石膏ボードの乾燥、衣類乾燥、しらす乾燥、シャツプリント乾燥、ライニング接着剤の乾燥
- ・ガラス繊維の加熱加工、
- ・ホッシーアルハァ：タオル・ハンカチ・靴下などを乾燥する電子パネルヒータ 雨の日も便利。ワールドウエアー
- ・セラコール：何回でも使えるセラミックス炭
- ・遠赤外線調理用炭
- ・遠赤外線ばい煎機：日経産業新聞 61.12.16
- ・遠赤外線ヘアドライア：日本工業新聞 62.5.26

参考文献

- 1) 松井松長、玉重繁良、高木 亨：福山大学工学部 紀要 第8号 35 (1988.3)
- 2) 安坂耕一：燃料及燃焼 54-(10)-721
- 3) 石倉信作(大阪府立産業科学技術総合研究所)：未公開資料
- *セラミック加工繊維製品の温熱・放熱効果のサーモグラフィによる研究
- 4) 足立鉄男：生体生物に対する遠赤外線放射の照射効果について 電気学会 光応用・視覚技術委員会 LAV-82-31, (1982.8.20)
- 5) 石井輝志：塩まき赤外線サウナ 薬事日報 昭52.7.5号
- 6) 荒木唯志、佐藤久義：遠赤外ヒータの加熱特性について、北陸電力研究報告 22号(昭和56年)
- 7) 増田光夫、浅見宏明：遠赤外線を利用した産業用電気加熱に関する調査研究 中国電力株式会社技術研究所時報 第67号(1985)
- 8) TRIGGER 1988.4月号特集
- 9) 大京電子電線株式会社技術資料
- 10) NIKKEI NEW MATERIALS 1987.6.22

(森田政明)

9. 3 非熱効果検出に関する研究動向

9. 3. 1 はじめに

前項9. 1と9. 2で述べられているように遠赤外放射セラミックによる高温・低温を含めいわゆる非熱効果といわれている現象の関与したと考えられる利用例や水との相互作用の可能性が述べられている。これらの現象を整理すると次の様に示せる。

- ① 水の関与する系での現象が多い
- ② 純水の系ではなく、イオン水や生体系など水と他物質との共存系での例が多い
- ③ 常温でセラミックと水系の両物質間で接触および非接触の場合の効果
- ④ 表面温度数100℃以下のセラミックヒーターを輻射加熱源とした乾燥・ばい焼の場合の熱効果以外の効果

このような非熱効果といわれている現象に関する科学的アプローチを行った研究例を述べる。

9. 3. 2 非熱効果の経験的検証

筆者（高橋）が1989年頃から現在まで研究室学生や一般の人延べ約100名に対して行った。非熱効果の経験的検証結果について述べる。

セラミックペーパー（興人製コーセラ）を用い、酒類、タバコに対して、味わいや味感に変化したか、しないかの感覚的なテストを行った。

酒類の場合、普通のガラス製のコップを数個用意し、ツウフィンガー程度の量を注ぐ。セラミックペーパー上に乗せたものと、乗せないものを同上テーブル上で30分放置する。その後、セラミックペーパー上のウイスキーと単に机上のものとの飲み比べると、約85%位の人が味の変化を検出している。その場合、ソフトになり、飲み易くなったとの表現が多いが、辛くなったとの意見もあった。同様のことをビール、日本酒、ワインに対して行ったところ、ビールは気の抜けたビールになりまずくなる方に変化し、日本酒、ワイン類は水っぽくなるとの表現が多かった。また、セラミックペーパー上で遠赤外線（FIR）照射したウイスキーで水割りを作った所、照射しないウイスキーによる水割りに比べ水っぽくなりまずいと表現が多かった。水-アルコール系とセラミックがガラスを介して置かれた系で非熱効果と考えられる現象は有り得ると考えられる。

アルコール度数、7～43%程度の酒類は種々の大きさのエタノールポリマーが水和クラスターを作っているといわれている。水和クラスターのH₂Oの量

や大きさの変化がアルコールの刺激感を変えることからF I R処理によりガラスを介して（電磁波としてのF I Rのガラスによる変換などが考えられるが最大の疑問点）何らかのエネルギー伝達が酒類に行われたと推定される。

タバコの場合は、セラミックペーパー上に5分置いたフィルター付タバコと机の上に置いたものとの吸ってもらって違いを聞いた所、約90%近い人が一口吸って変化があると判定した。変化の方向は軽くなる場合が多いが、辛くなるとの意見もあった。

アジの酢の物では、酢の物を作って二つの小鉢に入れ、一方にセラミックペーパーを乗せ、一方はオープンにして12時間放置してから食べ比べた所、セラミックを乗せた方の酢の味は非常にうすくなっているが、魚の味はうまいと感じ、一方は元の酢の味がしたままであった。

同様な現象が市販の遠赤外線セラミックでも起こっており、いわゆるセラミックによる非熱効果いわれるものは経験的には有り得るといえそうである。

9. 3. 3 生体内部状況を模した酵素系での研究^{1), 2)}

酵素の活性と構造へ及ぼす微弱電磁波（F I R）の効果の表題で研究が行われている。

生体の内部状況をシミュレートし、F I R効果をin vitroで解析し得る系として酵素タンパク質を選び、その機能と構造変化からF I Rの微弱エネルギーによる非熱効果を測定可能なレベルまで増幅して検出し、解析を行っている。

実験は、セラミックヒーター（表面温度68℃）から25cmの所の容器内に試料を入れ、10℃に冷却しながら一定時間照射している。試料として牛血清アルブミン（BSA）、リゾチーム、ジヒドロ葉酸レダクターゼ（DFR）、キサンチンオキシダーゼ（XO）及びアミノ酸を用いている。その結果のまとめとして次の様に述べている。

F I R領域の電磁波は、水分子の回転振動運動と共鳴して、水分子に特異的に吸収される。ここでは、F I Rの非熱効果が水分子の構造化を通して、様々な影響を生体内分子構造と機能に及ぼしているが証明された。即ち、

1. 高分子性の機能的タンパク質である酵素の活性の熱力学的変化から、F I Rの照射によりその構造が、folding な（生体内の存在形態と見なされている）状態に保たれること。これは反応のエントロピー変化が、大きな負の値を取ることから証明した。
2. 酵素反応中間体の生成が促進されるとともに、遷移状態のエネルギーレベル（障壁）が高くなり、反応生成物の生産が抑制された。これは、ここで用いたF I Rの照射装置によって、体内恒常性の保たれている生体内の状況を、

かなり良くシミュレートし得ることを示している。

3. 酵素タンパク質の構成要素であるアミノ酸の解離状態の変化や、溶媒効果による差吸収度の変化から、F I Rの照射により水分子と解離基や疎水基との相互作用が起きていることが証明された。

今後は、常温～体温領域におけるF I Rの非熱効果も、水の構造化を伴うのかどうかを検討する必要があるだろう。私達の体の60%以上は水分であり、赤子では80%にも達している。また、毎日水を1.5リットル以上も摂取しなければ、私達は生きられない。従って、この摂取される水質によって私達の体調も変わることになり、特に癌細胞内の水分子が正常細胞内の水分子より動きやすいことが分かっているので、もしこのF I Rの照射によって水を効率良く構造化できれば、癌の抑制や予防も可能となろう。今後共大いに利用したいものである。

この様に、高分子性の機能性タンパク質のまわりの水がF I Rにより構造化され、またアミノ酸分子がF I Rにより水和（溶媒）効果を受け、分子のまわりの水が構造化されるなど水和水の変化という形でかなり明確に非熱効果を検証したものと考えられる。

9. 3. 4 常温での微弱遠赤外線照射による非熱効果の水系での検出^{3), 4)}

セラミックボールをポリエチレンフィルムに包みビーカーの中の水に漬ける形で非接触で水にF I Rを照射した時(25℃)のpH変化、粘度変化、蛍光色素の蛍光強度変化を測定した結果、次のことが判明している。

- (1)液体クロマトグラフ用の純水では、pH変化、粘度変化のいずれも検出されない。
- (2)K C 1を含む系では、粘度が照射により減少し塩濃度が高い程(0.1、0.5、1mol/l)低下が著しい。1mol/lで30分照射で14%低下した。
- (3)フルオルセインソーダ蛍光色素 1×10^{-5} mol/lの色素溶液では、F I R照射により蛍光波長は変化しないが、強度が増加する。
- (4)水道水ではバラツキはあるが、粘度は増加傾向にある。

これらのことから、F I Rの非熱効果が手持ちの計測器により測定される程度に起こるには、構造化された水の存在、すなわち水溶液ないしは水和水を持った系においてではないかと推定される。

更に構造形成イオンを破壊イオンを含む系について照射方法を変えた場合を含めて実験が行われている。

(1) 実験

微弱放射エネルギーの放射源として、環境科学社製のセラミックボール、st 230とセラパワー、及び市販されているアラミックを使用した。これらのセラミックは、それぞれの形状は異なり、その放射強度、放射中心波長については知られていないが、常温において遠赤外線を放射しているといわれているセラミックボールである。照射方法は、Fig. 9.3.1 に示すように、パイレックス製のビーカーに試料溶液20mlを入れ、セラミックボールを直接試料に接触させる接触照射（以下、接触照射）、ポリラップに包んで試料中に放置した非接触照射（以下、ポリラップ照射）、ガラス外からの非接触照射（以下、ガラス外照射）の3つの照射方法にて試料に微弱放射エネルギーを照射した。なお、照射時間は60min、照射時の温度は、 20.0 ± 0.1 ℃とした。

試料には、液体クロマトグラフ用蒸留水、それを溶媒とした、Fluorescein Na（以下、Fl-Na）、Fluorescein K（以下、Fl-K）、Rhodamine B（以下、Ro-B）の水溶液を用いた。また、検出方法としては、主に、吸収・蛍光スペクトルの測定、動粘度の測定を行った。なお、測定には、吸収スペクトル：自記分光光度計（島津MPS-2000）、蛍光スペクトル：（日立850型）、動粘度：ウベローデ型毛細管粘度計を使用した。

(2) 結果

① 吸収・蛍光スペクトルの測定

Fl-Na（濃度 1×10^{-6} mol/l）水溶液に接触照射させたときの吸収・蛍光スペクトルの変化を Fig. 9.3.2 に示す。セラミックボールを接触照射させることにより、吸光度・蛍光強度に大きな変化が見られた。セラミックボールを蒸留水中へ直接入れると、pH変化があることが知られている。そこで、Fl-NaのpHを変化させたときの蛍光ピーク波長の相対蛍光強度の変化を Fig. 9.3.3 に示す。このグラフに、各種セラミックボールの接触照射による変化を、黒丸でプロットした。これより、接触照射による変化は、pH変化による影響が大きいと考えられる。

次に、Fl-Na、Fl-K、Ro-B水溶液に、ポリラップ照射をすると吸光度には変化が見られず、蛍光強度に変化が見られた。その結果を Fig. 9.3.4、Fig. 9.3.5、Fig. 9.3.6 に示す。なお、このとき共にpHの変化、蛍光波長のシフトは見られなかった。これらより、構造形成イオン（Na⁺）を持つFl-Naでは相対蛍光強度の増加、構造破壊イオン（K⁺）、

（Cl⁻）を持つFl-KとRo-Bでは相対蛍光強度が減少する傾向にあ

ることがわかる。

次に、F 1 - N a、F 1 - K、R o - B (濃度 1×10^{-6} m o l / l) 水溶液に、ガラス外からの非接触照射を行った結果を Fig. 8. 3. 7 に示す。なお、このとき、p H, 吸光度の変化は見られなかった。これより、塩基性色素である R o - B では、蛍光強度が減少したが、酸性色素である F 1 - N a と F 1 - K ではポリラップ照射とは逆の結果が得られた。

② 動粘度の測定

F 1 - N a、R o - B (濃度 1×10^{-6} m o l / l) 水溶液に各照射を行ったときの動粘度の変化を Fig. 9. 3. 8、Fig. 9. 3. 9 に示す。また、Table 9. 3. 1 に F 1 - N a (濃度 1×10^{-6} m o l / l) のセラパワーによるポリラップ照射とガラス外照射の蛍光強度と動粘度の変化を示す。これより、蛍光強度と動粘度の変化に相関が見られるのが分かる。また、ガラス外照射では、蛍光強度の変化と同じように、F 1 - N a では現象、R o - B では減少、または変化なしという結果が得られた。F 1 - N a については、ポリラップ照射とは逆の結果が得られた。

(3) 考察

Fig. 9. 3. 3 よりセラミックを接触照射したものは、p H - 蛍光強度の曲線上に乗っていることから、接触照射は p H 変化による影響が大きいと推測される。しかし、s t 2 3 0 セラミックにおいては、p H 変化が見られないのにもかかわらず蛍光強度が増大していることから、遠赤外線の効果は何らかの形で水溶液に影響を与えていると考えられる。

ポリラップ照射による、F 1 - N a、F 1 - K、R o - B の蛍光測定から、セラミック照射による非熱効果は、色素分子の性質の違いよりも、水溶液中に溶解したイオンによる水和の違いに大きく影響を及ぼしているのではないかと推測される。また、どの色素水溶液でも、 5×10^{-7} m o l / l ~ 1×10^{-6} m o l / l 付近において大きな変化が見られたことから、セラミック照射による非熱効果には、最適な濃度範囲があるのではないかと考えられる。

また、F 1 - N a のポリラップ照射については蛍光強度・動粘度とも増加、R o - B のポリラップ照射については蛍光強度・動粘度とも変化なしか、やや減少する傾向にある。一般に、蛍光の発光効率には溶媒の粘性に依存し、粘性が高い溶液中での蛍光は、分子が運動しにくくなり分子間衝突が減ることにより、発光効率が高くなる。逆に、粘性の低い溶液では、分子間衝突が増え発光効率が低くなることが知られている。また、前年度までの研究結果より、構造破壊イオンを含む水溶液に遠赤外線照射を行うと、構造破壊を受けた水分子クラス

ターをさらに破壊させているという結果が得られている。このことから、構造破壊イオンを持つR o - Bでのセラミック照射による蛍光強度の減少や動粘度の減少は、セラミックから放射されている遠赤外線により水溶液中の水分子クラスターが破壊されるように働いたことにより起こったと考えられる。また、F 1 - N aでのセラミック照射による蛍光強度・動粘度の増加は、セラミック照射により、水溶液中の水分子クラスターが形成されるように働いたためではないかと考えられる。

ガラス外照射のF 1 - N aでは、蛍光強度・動粘度とも減少した。この結果はポリラップ照射とは逆の結果である。ガラスは5 μ m以上の遠赤外線を透過しないのにもかかわらず、このような変化が見られたことから、セラミックから放射された遠赤外線が一度ガラスに吸収され、その結果、波長変換（エネルギー変換）などが起こり、別の形で試料である水溶液に作用し、このような結果が得られたのではないかと考えられる。

これらのことより、遠赤外線の非熱効果には、その効果を与える最適な材料条件があるのではないかと考える。

この様に研究成果が述べられており、水和水の構造形成と構造破壊とが起こり得ると考えられる。特に、ガラスを介したと時、ポリラップ照射とはF 1 - N aで逆の効果が示されているが、F I Rの波長が原因とも考えられ、F I Rの単色光による実験が望まれる。

9. 3. 5 その他の研究とまとめ

「遠赤外線照射の食品風味への影響」⁵⁾についての発表がある。これは2℃前後の冷蔵庫の引き出し状の収納部位に遠赤外線ランプをつけ、食品の風味などについて照射しないものとの比較を検討したものである。

その結果は「遠赤外線照射した食品の中で対照区より好ましい風味を示した食品は次のとおりであり、それらは水分含有量の多いヨーグルト、牛乳、カマンベールチーズ、豆腐、納豆、うどん、そば、スモークサーモン、ぎょうざ、しゅうまい等の食品である。」としており、食品に遠赤外線を照射することにより、食品中の水分子の結合が強化され、保水性が高まるだけでなく、水分を媒体とする酵素の影響により旨味成分の変化が抑制され食品本来の風味が長持ちするとしている。

これらも食品中の水和水ないしは構造水の構造変化がF I Rにより起こり、9. 3. 3で述べたと同様な効果と考えられる。

またF I Rとは異なるが「マイクロ波の非熱作用－化学反応への効果－」と題した発表があった⁶⁾。パルス波を用い、電界の大きさを変え、しかも炭酸水

素ナトリウムの水溶液を同一温度になるようにデューティサイクルを変えて炭酸ガスの発生量を求めたところ、試料は同一温度にもかかわらず、電界が大きい方がCO₂の発生量が大になった。これは反応の活性化エネルギーがマイクロ波電界の作用により低下する結果、反応が促進されるとしている。水とマイクロ波との相互作用により、加熱されると同時に水のクラスター構造の変化が考えられ、それが電界の大きさに関係しているとも推定され、何らかの参考になると思い取り上げた。

以上の研究例をまとめると次のようなことが考えられる。

1. セラミックによる非熱効果は、電磁波すなわちPhotonの形でのエネルギーの授受の結果起きる現象と考えられる。
2. 食品や生体、水溶液等で構造化または水和化した水がFIRにより変化する結果、非熱効果といわれる形に変化して現れる。
3. 微弱な現象を酵素系のように増幅して効果を検出できるような工夫が計測系に求められている。
4. ガラスを介したFIR照射の非熱効果のメカニズムの解明
5. 水の構造化で特にアルコールポリマーに疎水結合した水（水和水）の様な疎水結合水がFIRと強く関係していると考えられる。
6. 色々な観点からと種々の測定手段による精度の高い測定データが望まれる。

参考文献

- 1) 小橋 昌祐：JIRA Report, Vol. 4, No. 8, P-1 (1993)
- 2) 小橋 昌祐：Jasco Report, Vol. 35, No. 1, P-9 (1993)
- 3) 山本 学, 他：1993年度第26回照明学会全国大会講演論文集、P-186~187 (1993)
- 4) 村上 正和：1993年度東海大学光工学専攻修士論文 (1993)
- 5) 本間 清一, 他：日本農芸学会東北支部学術講演要旨 (1988)
- 6) 柴田 長吉郎：第40回応物関係連合講演会予稿集、No. 1-29 P-Q-15 (1993)

(高橋恭介)

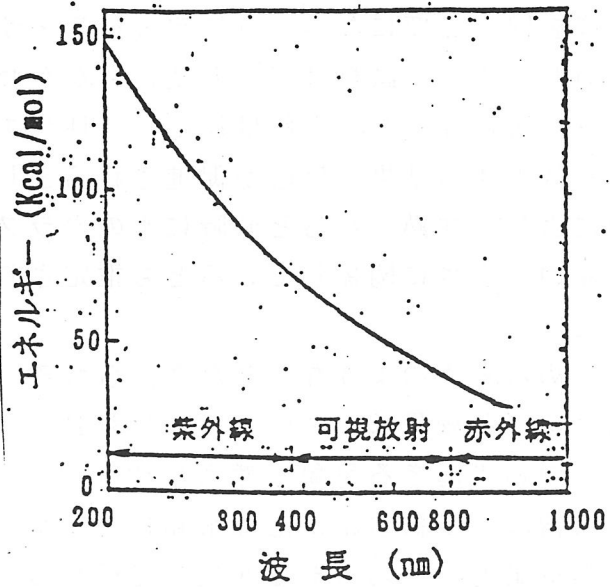


図 9. 1. 1 電磁波 (光子) のエネルギー

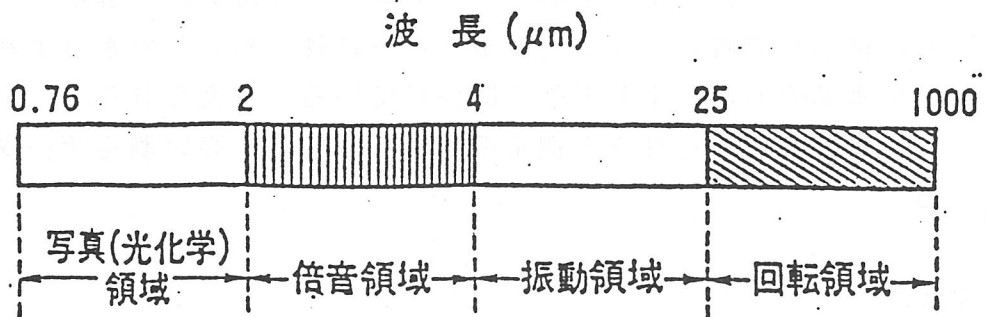


図 9. 1. 2 赤外放射の分子レベルに於ける作用による区分

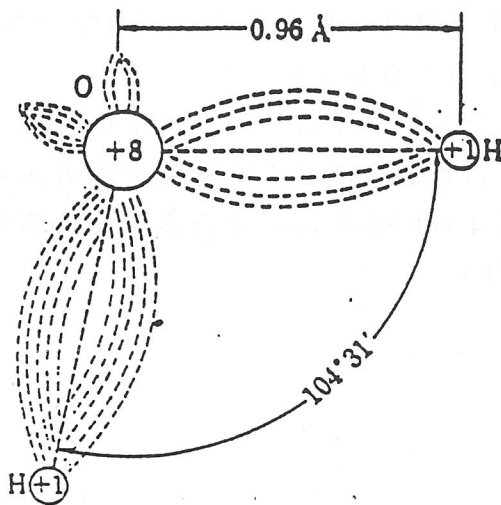
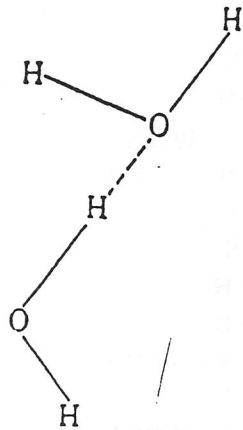


図 9. 1. 3 水分子の構造



二量体の水： $(\text{H}_2\text{O})_2$ の構造
 実線：共有結合，破線：水素結合

図 9. 1. 4 水分子の水素結合による結合状態

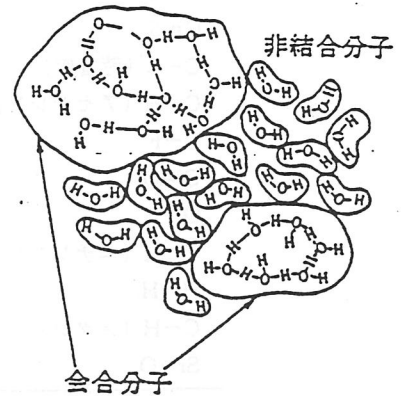


図 9. 1. 5 多数の水分子の結合状態 (クラスター)

表 9. 1. 1 電磁波 (光子) のエネルギー

波長 (nm)	区 分	1 アインシュタインのエネルギー (kcal)	光子 1 個のエネルギー (eV)
100 000	赤 外 放 射	0.286	0.01
10 000	赤 外 放 射	2.86	0.12
1 000	赤 外 放 射	28.6	1.24
800	可視スペクトル限界	35.7	1.55
700	赤	40.9	1.77
600	黄	47.6	2.07
500	青	56.9	2.48
400	可視スペクトル限界	71.5	3.10
300	紫 外 放 射	95.3	4.14
200	紫 外 放 射	143.0	6.20
100	紫 外 放 射	286.0	12.40
1	X 線	2.86×10^4	1 240
0.1	X 線	2.86×10^5	12 400
0.01	γ 線	2.86×10^6	124 000
0.001	γ 線	2.86×10^7	1.24×10^4

表 9. 1. 2 代表的な分子内の原子間の結合エネルギー

化学結合	結合エネルギー kcal/mol	化学結合	結合エネルギー kcal/mol
C≡N (ニトリル)	209	C-O	87
C≡C	200	S-H	87
C=O	174	N-H	84
C=C	145	C-C (脂肪族)	80
C=S	129	C-O (エーテル)	79
C-C (芳香族)	124	C-Cl	78
C-H (アセチレン)	121	S=S	76
C-F	119	Si-H	75
O=O	119	Si-C	70
O-H	110	C-N (ニトロメタン)	68
C-H (エチレン)	106	C-S	66
H-H	104.2	O-O (過酸化物)	64
C-H (メタン)	98	Cl-Cl	58
Si-O	89	N-N (ヒドラジン)	37

表 9. 1. 3 各種液体 (溶剤) の特性比較

溶 剤	分子量	沸点 ℃	蒸発速さ (重量) (酢酸ブチル=100)	蒸気圧 mm/30℃	酢酸ブチル の同一値対 蒸気圧×分 子量 の比	蒸発熱 kcal/kg/30℃
酢酸メチル	74.0	59~60	1,040	265	1,062	105.0
アセトン	58.0	56.1	720	280	875	130.0
酢酸エチル	88.1	77.1	525	120	570	97.0
メチルエチルケトン	72.1	79.6	465	119	462	112.0
酢酸イソプロピル	102.1	89.0	435	74	406	87.0
メタノール	32.0	64.5	370	165	284	276.0
イソプロパノール	60.0	82.5	205	60	194	184.0
エタノール	46.0	78.5	203	79	193	216.2
トルエン	92.1	111.0	195	36	173	98.0
酢酸イソブチル	116.1	118.3	152	27	169	-
イソブタノール	74.1	107~8	83	18	63	147.0
キシレン	106.1	135~45	68	11	63	-
メチルセロソルブ	76.0	124.5	55	-	-	127.0
セロソルブ	90.1	135.0	40	7	34	124.0
シクロヘキサノン	98.1	155~7	25	7	37.2	-
ブチルセロソルブ	118.1	170.6	10	2	12.9	96.5
水	18.0	100.0	38	14	-	579.5

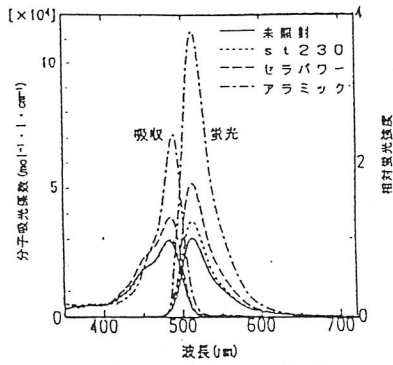


図 9.3.2 FI-Naへの接触照射による吸収・蛍光スペクトルの変化

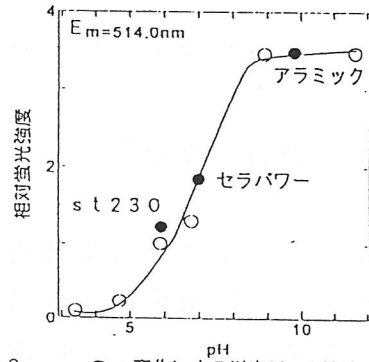


図 9.3.3 FI-NaのpH変化による蛍光ピーク強度の変化

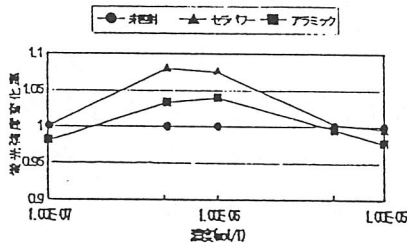


図 9.3.4 FI-Naの'リラップ'照射による蛍光強度の変化率

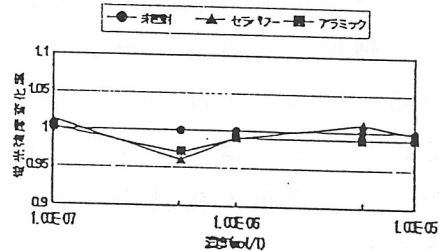


図 9.3.5 FI-Kの'リラップ'照射による蛍光強度の変化率

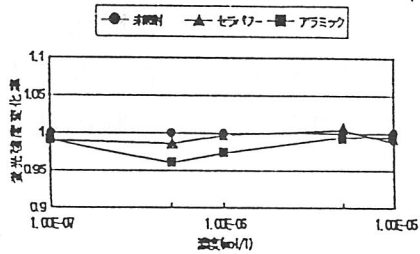


図 9.3.6 Ro-Bの'リラップ'照射による蛍光強度の変化率

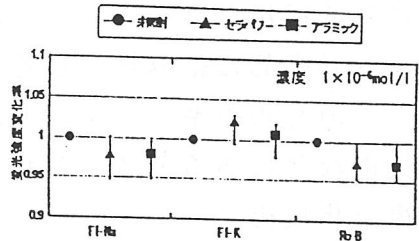


図 9.3.7 各水溶液のガラス外照射による蛍光強度の変化率

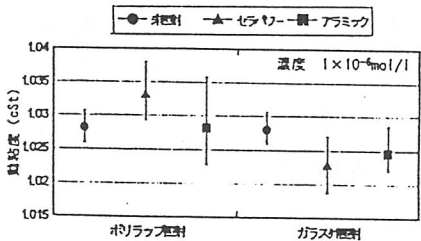


図 9.3.8 FI-Naの各照射による動粘度の変化

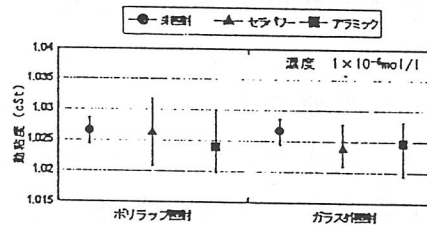


図 9.3.9 Ro-Bの各照射による動粘度の変化

表 9.3.1 FI-Naのビナールによる各照射の蛍光強度と動粘度の変化

	ポリラップ照射	ガラス外照射
蛍光強度変化率	1.075	0.9783
動粘度変化率	1.005	0.9949

*濃度 $1 \times 10^{-6} \text{ mol/l}$

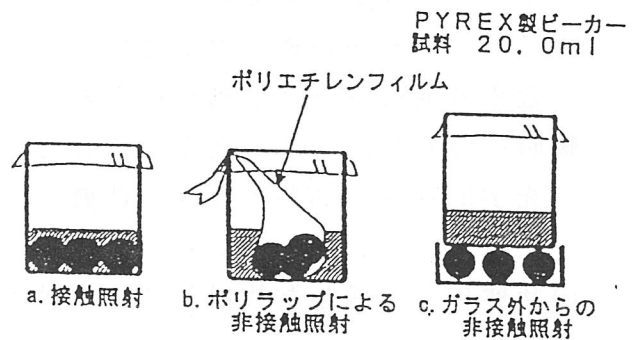


図 9.3.1 照射方法

1 0 赤外放射加熱の今後の見通し

1 0. 1 技術的見通し

1 0. 1. 1 システム化技術^{1, 2)}

赤外放射加熱は戦後わが国に導入され、その後約10年間研究開発が行われ、赤外放射電球を用いた塗装乾燥などを中心にほぼ完成された技術として位置づけられてきた。欧米でも約50年の歴史をもつ成熟した技術としてとらえられている。赤外放射加熱装置の重要なパーツの一つである赤外放射体は、赤外放射電球、高輝度近赤外放射ランプ、遠赤外線ヒーターなど、全般的によく開発されている。今後、製品の品質向上、生産性の向上、省エネルギーなどを一層推進していくためには、赤外放射体などの個々のコンポーネントの開発もさることながら、システム化技術、エンジニアリング技術の開発の重要性が一層増すと考えられる。

一般に、赤外放射加熱はエネルギーコストの最もかかる乾燥とキュアリングの工程に多く採用されている。これらの工程一つ一つをさらに高度化させ、各工程をより効率的に組み合わせることによって、加熱機器の一層の改善が期待される。このためのキーポイントは、複合化技術、コンピュータ制御技術、センサー技術などにあると考えられる。

(1) 複合化技術

乾燥とキュアリングの工程が連続するような場合には、両工程を結合して工程間のエネルギーロスなくすような設計がまず重要になる。また、一般に赤外放射加熱は熱風等の他の加熱方式と共存しやすい。したがって、他の加熱方式の併用によって、夫々の長所を活かして乾燥やキュアリングの工程を最適化することも重要である。例えば、繊維などの乾燥の場合には熱風の併用は効果的である。一次的な熱エネルギーは主として赤外放射によって供給され、熱風は繊維中の水分の除去を促進する。特に、放射効率の低い遠赤外線ヒーターを利用した加熱では、ヒーターから発生する熱を被加熱物の加熱に有効に利用するような工夫が重要である。

(2) センサー技術とコンピュータ制御技術

近赤外放射ランプは高輝度のものが多く開発されており、放射強度の制御も瞬時のうちに正確に行える。このため、放射体と被加熱物との距離、被加熱物の光学的特性、加熱・乾燥の進展状況などを、あらかじめコンピュータに入力したり、あるいは、センサー等でその変化を検出することによって、被加熱物の状態に最も適した放射強度に放射体の出力を瞬時のうちに調整できる。これ

によって、塗膜の品質を向上させたり、含水量の均一な高品質の紙やベニヤ板が生産できるようになっている。

赤外放射加熱機器のコンピュータ制御技術に関しては、最近のマイクロプロセッサの進歩によって、格段に進展している。しかし、制御のための情報を収集するのに必要なセンサー類には課題が多く残されている。例えば、被加熱物内部の水分量の変化を測定するためには、マイクロ波や赤外放射を利用したセンサーが使用されているが、満足のいく測定はまだ難しいようである。したがって、加熱装置の制御性の向上は制御技術そのものよりもセンサー技術の進歩に期待するところが大きい。

10. 1. 2 シミュレーション技術³⁻⁶⁾

一般の加熱過程は、熱と物質の移動が共存する複雑な現象である。さらに被加熱物が熱的に化学変化を起こすような場合には一層である。この現象のコンピュータシミュレーションによる解明は今後の赤外線加熱技術の発展に大きく寄与するものと期待される。シミュレーションによって赤外線による加熱過程を実験せずに予測することや加熱効果の要因を詳細に検討することが可能になるからである。

現状のシミュレーション技術では、さほど複雑な系には対応できないものの、赤外線放射体の分光放射率、被加熱物の分光吸収率、分光反射率などの分光学的特性と比熱、比重、熱伝導率、また、液体の蒸発乾燥過程については蒸発潜熱や蒸発速度を計算条件としてコンピュータに入力することによって、被加熱物内部の温度分布や蒸発量の時間変化のほか、赤外放射のエネルギーが被加熱物内部のどの位置でどの程度熱に変換されているかなどを計算できる。今後、より一般的な形状の加熱装置や被加熱物に対応でき、かつ、操作の容易なソフトウェアの開発に期待がかかる。

参考文献

- 1) 森田：「赤外線加熱技術の開発とその経緯」、照明学会誌、第73巻、第5号、pp. 267-271、平成元年。
- 2) J. R. Bush: "Electric Infrared Process Heating; State-of-the-Art Assessment", EPRI Report EM-4571, Mar. 1987.
- 3) 宮永、中野：「赤外線放射による合成樹脂板の加熱過程の定量的検討」、電気学会論文誌D、110巻9号、平成2年9月、pp. 975-982.
- 4) 宮永、中野：「蒸発過程を考慮した赤外線加熱過程の定量的検討」、照明学会光放射の応用・関連計測研究会資料AR-90-20、1990年12月。

- 5) 宮永、中野：「遠赤外線による塗装膜乾燥過程の定量的検討」、照明学会光放射の応用・関連計測研究専門部会資料AR-91-22、1991年12月。
- 6) 宮永、大沼、中野：「被加熱物の化学的变化を考慮した赤外線加熱シミュレーション」、照明学会光放射の応用・関連計測研究専門部会資料AR-93-1、1993年。

(森田政明、中野幸夫)

10.2 経済的見通し

10.2.1 エネルギーコストの観点から

赤外放射加熱のが単に対象物の温度を上げるだけの目的ならば石油、ガスなど他のエネルギーを利用した加熱手段の方が経済的に有利であることは否定できない。大ざっぱに言って石油のエネルギーコストを1とすれば、NLGガスは2倍電力は4倍と言われている。ただし石油のエネルギーを使用するためには貯蔵施設が必要であるし、石油・ガスなどは排ガスについて環境に対して責任を取る必用上多くの規制をクリアーするためのコストを必要とするので、単純に施設費＋運転費のみで決定することはできない。

赤外放射加熱・なかんずく電気エネルギーによるものがその特徴を発揮して、エネルギーコストを超越して利用されるためには次の条件が確保される必要がある。

10.2.2 電力エネルギー利用赤外放射加熱技術の特徴

およそ技術的な見地で見ると、電気エネルギーの特徴は制御性にあると考えられる。空間的に必要なところへ、必要な時間に、必要な量のエネルギーを供給できることにある。この結果他のエネルギーでは得られない加熱効果が得られる。ここに二・三の例をあげる。

(1) 限られた空間内の加熱

- ・最近の例では、半導体などの表面に化学物質を固着させる方法のひとつとして、CVD (Chemical Vapour Deposit) のため、真空容器中の基盤の加熱に赤外放射が使用されている。これなどは他の手段がなく好適な用途であろう。
- ・純金属の溶接や焼き鈍しを空気中に行なうと不純物が混入し、所期の性能が得られないと言う不具合が発生する。これらの解決のために真空または不活性ガスなかで赤外放射での溶接が実施されている。

(2) 加熱速度の時間的制御

・短時間に瞬間的にエネルギーを供給する例として、宇宙船などの表面材料の熱歪のテストのために使用されている。太陽の放射照度の3000倍(300 W/cm²)程度の放射照度で使用され、瞬間的に加熱できる。赤外放射加熱以外では実現の手段がない。

(3) 高い放射照度の実現

・赤外放射源に適切な反射鏡を組み合わせることで大きな放射照度を実現することができる。放物面鏡の焦点に放射源をその反対側焦点に被加熱物を設置することで、繊維、針金などの材料の焼鈍などに必要な温度を容易に実現できる。(b)項でのべた宇宙用機器の開発試験用放射応用も高放射照度の実現もこの範疇にふくむことができる。

(4) 環境に対する適応性

・他の燃焼方式の放射源を使用する場合は、必ず空気または酸素などの物質が必要である。また燃焼後は燃焼ガスの排出、COやNO_xなどの不用物質の除去が必要である。電気エネルギーによる赤外放射源の場合はこれらの不用物質の除去は発電所などで統一した効率的な方法で処理が可能であり、各個で行なうより効率的でかつ効果的である。

・室内で暖房に使用する場合は換気の必要性が、他の燃焼方式に比べ少なく効率的である。

10.3 おわりに

電気エネルギーによる放射加熱の特徴は、他のエネルギーによる放射加熱では得られがたい制御性、クリーン性にある。この特徴に着目していけば今後も更に発展するものと考えられる。

社会全体が高度技術化していくとき、加熱に必要なとするコストは相対的に低下していく傾向にある。赤外放射加熱が他の手段では実現できない分野に拡大していくことが予測される。

(河本康太郎)

1 1 あとがき

赤外線加熱の評価をはじめ、加熱用放射源、他の加熱方法との比較、放射の産業応用、放射の民生応用、加熱の市場動向、放射加熱の今後の見通しなど、赤外放射加熱の全分野にわたる約3カ年の委員会活動の成果を取りまとめたのが本報告書である。委員各位には本務多忙な中を執筆していただいたことに対して謝意を表する次第であります。放射の分光測定、その他懸案になっている若干の問題については次期委員会に委ねることにしたい。

最後に、本委員会の活動に関連して各方面の方々に種々お世話になった。とりわけ各年度1回の地方開催に際しては、奈良、北海道、香川の各地域の方々に多大のご支援を頂いた。これら関係各位には厚くお礼を申し上げる次第であります。

(松井 松長)