

JIER-020

遠赤外放射の測定と応用技術

社団法人 照明学会

遠赤外放射研究調査報告書 目次

第1章 まえがき

遠赤外放射についての関連学協会の活動	松井委員長	1-1	~	4
--------------------	-------	-----	---	---

第2章 遠赤外放射の基礎

2.1 遠赤外放射の概念と波長区分	河本幹事	2-1	~	11
2.2 遠赤外放射の性質				
2.3 遠赤外放射に関連した用語集				
2.4 遠赤外放射の関連分野の一覧				

第3章 赤外放射の標準と計測

3.1 赤外放射標準	伊藤委員	3-1	~	12
3.2 遠赤外放射検出器	宮尾委員	3-13	~	3
3.3 放射計および放射照度計	中川委員	3-14	~	19

第4章 分光放射測定と測定装置

4.1 分光放射測定	松井委員長	4-1	~	8
4.2 分光放射測定装置	宮川委員	4-9	~	25
4.3 分光放射測定用標準	笹森委員	4-26	~	38

第5章 遠赤外放射の放射源

5.1 遠赤外放射源の種類と特性				
5.2 遠赤外ヒータの評価法	宮川委員	5-2	~	16
5.3 遠赤外放射源材料の種類と特性	笹森委員	5-17	~	20
5.4 日常品的諸部材の遠赤外放射特性	笹森委員	5-21	~	25
5.5 自然環境における赤外放射分布	松井委員長	5-26	~	30

第6章 遠赤外放射の作用効果

- 6.1 生体・生理に対する作用効果 松井委員長 6-1 ~ 6
- 6.2 生物に対する作用効果 森田幹事 6-7 ~ 13
- 6.3 物質（有機物・無機物）に対する作用効果 河本幹事 6-15 ~ 20
- 6.4 効果の評価法 河本幹事 6-15 ~ 20

第7章 遠赤外放射（源）の利用法

- 7.1 産業への応用（加熱・乾燥・焼付け） 大塚委員 7-1 ~ 4
- 7.2 暖房機器への応用 大槻委員 7-5 ~ 13
- 7.3 家庭用暖房機器への応用 吉井委員 7-14 ~ 17
- 7.4 食品加工、調理器への応用 米田委員 7-18 ~ 34

第8章 今後の課題と展望

松井委員長 8-1

第9章 あとがき

松井委員長 9-1

第1章 まえがき

ここ数年来、遠赤外線応用製品として多種多様なものが開発され、市販されてきたが、昭和63年～平成元年辺りで峠を越した観がある。ところで、この種の製品はすべて熱的な赤外放射を利用したものであるが、これらの多くに共通する点は、遠赤外放射体の素材がセラミックスであること、および照射対象が人体あるいは食品であることが指摘され、特に常温の放射体として利用されているものについては、その効果に疑問がもたれる。

照明学会においても、これに対処して昭和62年10月に「遠赤外放射研究調査委員会」を設置し、これらの常温放射体から最近開発された高温放射体までを含めて、それらの作用効果、測定法および応用について調査研究を進めてきた。

一方、産業界におけるこのような動きに対応して、通産省においても昭和63年～64年（平成元年）の2カ年にわたり（社）日本ファインセラミックス協会遠赤外線セラミックス産業対策調査研究委員会に委託して、調査研究が実施された。また、（財）大阪科学技術センターにおいても平成元年度に赤外線応用技術調査委員会を設置して、この問題に対処している。これらの他にも日本電熱協会、日本遠赤外線協会をはじめ、各地方にも遠赤外線関係の研究団体が結成され検討が進められてきた。

ところで、遠赤外放射の一方の大きな応用分野である加熱、乾燥、暖房などの放射のエネルギー利用の分野では、高温放射源即ち高エネルギーの遠赤外放射を使用しているために、これまでややもすると被加熱物や背景放射（環境）、大気の影響（吸収、放射）などが軽視されてきた。これが前記のような常温放射体の誤った利用法を惹起したものと考えられる。今後はこのような点に留意した技術開発が望まれる。

本報告書は、平成2年4月までの2年6カ月に亘る遠赤外放射研究調査委員会の活動の成果をとりまとめたもので、測定法、応用から問題点に至るまで、遠赤外放射利用の現状を述べたもので全8章からなっている。各章の内容は次の通りである。

第1章 まえがき

第2章 遠赤外放射の基礎

第3章 赤外放射の標準と計測

第4章 赤外分光放射測定と測定装置

第5章 遠赤外放射源

第6章 遠赤外放射の作用・効果

第7章 遠赤外放射の利用

第8章 今後の課題と展望

第9章 あとがき

なお、委員会の構成は以下の通りで、委員長・幹事・委員の計15名である。

「遠赤外放射研究調査委員会」委員構成

委員長	松井 松長	(福山大学工学部)
幹事	河本康太郎	(東芝ライテック(株))
	津田川 勝	(立命館大学理工学部)
	森田 政明	(松下電器産業(株))
委員	伊藤 和喜	(電子技術総合研究所)
	大槻 操	(古河電気工業(株))
	大塚 弘真	(北陸電力(株))
	笹森 宣文	(東京都立工業技術センター)
	高橋 恭介	(東海大学工学部)
	中川 靖夫	(埼玉大学工学部)
	毒島 溥	(日本電気(株))
	宮尾 亘	(東京工科大学工学部)
	宮川 実	(財)電力中央研究所)
	吉井嘉寿憲	(松下寿電子工業(株))
	米田 達雄	(広島県立食品工業技術センター)
	(中途退任委員	沖津康三(北陸電力(株)),
		下村文彦(浜松ホトニクス(株))

また、委員会の開催回数は計11回で、審議経過は下記の通りである。

委員会経過(開催地の記入のないのはすべて東京)

第1回委員会(昭和62年11月6日)

委員会設置の趣意説明、委員会の運営方針の審議、研究調査項目と分担分野の決定。提出資料 6件。

第2回委員会(昭和63年1月29日)

福山大学における微弱遠赤外放射の分光測定、電総研における遠赤外放射の標準。提出資料 6件。

第3回委員会(昭和63年4月22日)

日本赤外線協会の活動状況について(後藤事務局長)。情報交換。提出資料 8件。

第4回委員会(昭和63年7月21日、福山)

遠赤外放射の分光測定方法および関連事項について、放射の食品への応用、公開研究会開催について。提出資料 9件。

第5回委員会(昭和63年12月8日)

こたつ用コルツ赤外線ランプについて、赤外放射環境と生体、研究会の共催について。提出資料 5件。

第6回委員会(平成元年3月16日)

赤外放射による面暖房について、探知・計測系に用いられる空間フィルタについて。提出資料 7 件。

第7回委員会（平成元年6月13日）

公開研究会の開催について、情報交換。提出資料 3 件。

第8回委員会（平成元年8月25日、京都）

長波長赤外放射と材料のインターアクションについて。提出資料 5 件。

第9回委員会（平成元年11月21日）

公開研究会の開催について、委員会報告書の執筆要項、情報交換。提出資料 7 件。

第10回委員会（平成2年2月8日）

F T I R分光装置（都立工技センター所有）の性能と動作説明、遠赤外放射の波長区分について、遠赤外放射の非熱効果について、学会全国大会シンポジウムについて、報告書のまとめ方について。提出資料 9 件。

第11回委員会（平成2年4月10日、大阪）

学会誌遠赤外放射特集号について、次期新設委員会の趣旨について、委員会報告書のまとめ方について。提出資料 4 件。

提出、登録資料 計 70 件。

公開研究会の開催（共催も含め計7回）

第1回研究会（昭和63年9月30日）

最近の遠赤外線応用に関連する技術動向 5 件

（照明学会 光放射の応用関連計測研究専門部会と共催）

第2回研究会（昭和63年11月25日）

遠赤外線放射源とその測定 6 件

（照明学会 光の発生・関連システム研究専門部会並びに光放射の応用・関連計測研究専門部会と共催）

第3回研究会（平成元年2月10日）

赤外線技術全般 5 件

（電気学会光応用視覚技術委員会、照明学会光放射の応用関連計測研究専門部会、赤外線技術研究会と共催）

第4回研究会（平成元年6月13日）

最近の遠赤外線放射源とその応用 5 件

（照明学会光放射の応用・関連計測研究専門部会と共催）

第5回研究会（平成元年9月6日）

赤外放射の測定とその応用 7 件

（平成元年電気・情報関連学会連合大会シンポジウム、照明学会光放射の応用・関連計測研究専門部会と共催）

第6回研究会（平成2年2月9日）

赤外線技術全般 4件

(電気学会光応用視覚技術委員会、赤外技術研究会、照明学会光放射の
応用・関連計測研究専門部会と共催)

第7回研究会(平成2年4月10日)

遠赤外放射応用技術の動向と新展開 6件

(照明学会全国大会シンポジウム、光放射の応用・関連計測研究専門部会
と共催)

見学会(2回)

第1回見学会(昭和63年7月21日)

福山大学工学部 赤外線研究施設の見学

第2回見学会(平成元年8月25日)

立命館大学理工学部 共通研究施設見学

(松井)

第2章 遠赤外放射の基礎

2.1 遠赤外放射の概念と区分波長

2.1.1 赤外放射の歴史

「赤外放射」は今から約200年前の西暦1800年頃、イギリスの天文学者として有名なハーシェル (Frederick William Herschel, 1738~1822) によって物理的にその存在が確認されて以来¹⁾、時代の推移とともに、少しずつ応用される分野が広がってきたが、用途開発が急速に進み、日常生活においても広く活用されるようになってきたのは、1960年代以降になってからのことである^{2), 3)}。

その利用状況の変遷をみると、赤外放射応用技術の端緒となった初期の自動車工業や木材工業など、産業中心に利用されていた時代から、今日では、これらに加えて電気・電子工業や食品工業、プラスチック工業、通信、情報処理など、業種的にも多岐に亘ってきているとともに、防犯システムや家庭用機器、家庭用品などの民生用機器や、鉄道など運輸・輸送業の分野などにも広く活用されるようになってきている。

また、このような赤外放射の利用技術の開発、発展の経過に伴い、「赤外放射」が更にいくつかの種類に区分されて基礎技術や応用技術の開発が進められるようになってきたが、近年、赤外放射の中の波長の長い部分の区分域である「遠赤外放射」が特に注目され、遠赤外放射の利用技術の拡大や応用製品の商品化が大いに進んでいるのは、よく知られている通りである^{4), 5)}

ところで、これらの応用開発や商品開発が進んでいくにつれて、「遠赤外放射」の概念や区分波長についての標準化や統一化が十分に行われていない分野があるため、技術分野間や場合によっては個々の技術者・研究者間で概念や波長区分が必ずしも同じでなく、このことが原因で関連商品や関連の技術についての共通理解が得られなかったり、議論が噛み合わなかったり、また実際の商品に関係したトラブルが発生して、消費者・使用者の不信感を誘起したりすることがある^{6), 7)}。

そこで以下に、「遠赤外放射」の概念と区分波長についての現在までの状況と標準化の動向について、まとめてみることにした。

2.1.2 「遠赤外放射」の概念と区分波長の標準化は何故必要か？

最近急速に注目度が高くなっている遠赤外放射応用商品に、いわゆる「遠赤外グッズ」といわれている各種の商品がある。これらの中には、例えば「遠赤外ふとん」、「遠赤外毛布」、「遠赤外ベスト」などの衣類や「調理用の遠赤外セラミック」や冷蔵庫の食品保存用に使用されている「遠赤外シート」、更には「遠赤外サウナ」などがある。

そして、これらの商品の中には、「遠赤外〇〇〇〇」とネーミングしたことにより、売上げが倍増したものもあるとの由である。

これらの商品の「遠赤外放射」との関連の機構の詳細については、本報告書の別の章でも述べられているが、一例として「遠赤外ふとん」について述べると次の通りとなる。すなわち「遠赤外ふとん」というのは、遠赤外放射性のセラミック粉末を塗着した繊維によ

る布を使用した蒲団ことであり、人体の体温によって暖められ、プランクの法則により「遠赤外放射」を放出すると商品紹介されている。

この場合、この使用条件により人体に対して遠赤外放射によるエネルギーが伝達されるかとか、その結果人間に本当に何がしかの作用効果があるか、といったような議論はこの主題ではないので触れないこととするが、プランクの放射則により電磁波が放出されているとしても、遠赤外放射の波長範囲が明確に標準化されていない場合には、その電磁波が遠赤外放射かどうかの評価が画一的にできないことになり、製造社と使用者との間で同一の理解にならないことがあり、誤解が生じてしまう恐れがある。

このことは、加熱用の「遠赤外ヒータ」についても同じことであり、製造社のカタログなどで、ヒータの遠赤外放射束の値を表示する場合に、やはり使用者との間に理解の違いを生じる原因になってしまう。

また、「遠赤外サウナ」については、消防法との関連で業界団体による自主規制が協議・検討されている。更に、「遠赤外〇〇〇〇」というネーミングをする上で、一定の基準を設けることを検討している業界団体の動きもある。

これらの動きに対しては、「遠赤外放射」の概念と波長区分の明確化・標準化が基本的必要条件であり、これがなければ、いかなる規制も基準もその有効度が著しく低くなることが容易に想定されるであろう。（「遠赤外放射」の紛れのない概念付けがなければ、その基準や法律（法律が出来たとして）の適用の対象となるかどうかすら、明確に判定出来なくなる恐れがある。）したがって、遠赤外産業の発展や円滑な展開のためには「遠赤外放射」の明確な概念付け、なにかんづく区分する波長域の標準化を優先的に進める必要があることが明らかであろう。

2.1.3 赤外放射の区分波長

「遠赤外放射」の区分波長に関連する事項について述べる前に、「赤外放射」の区分波長について簡単に触れておくこととする。

周知のように、赤外放射も遠赤外放射も共に、電磁波の一特定区分波長域の放射であることを、要素として概念付けられる。（詳しくいうと、遠赤外放射は赤外放射の更に一部分になる。）

この区分する波長については、赤外放射の方は、760nm ~ 1mmの区分波長により国際的にもほぼ統一され、共通理解が得られている。即ち、赤外放射の短波長側の区分は、前述のハーシェルが赤外放射を発見した経過により「人間の可視波長域の長波長限界」によってなされ、概念的にも実際的にも数字的にも明確である。（厳密にいうと、人間の視感覚には若干の個人差があり、人間の可視波長域の長波長限界というのは、1点の波長に特定し難い面がある。CIEの国際照明用語集 第4版—International Lighting Vocabulary—4th Edition）では、この限界波長を「およそ 760 nm から 830 nm の間にある」としている⁸⁾。）

表 2-1 無線通信に使用する周波数帯および波長帯呼称

周波数帯の番号	周波数の範囲	波長による区分	形容詞的表示に対する略語	慣習的呼称
4	3kHz~30kHz	ミリメートル波 (100,000~10,000m)	VLF (Very Low Frequency)	長波
5	30kHz~300kHz	キロメートル波 (10,000~1,000m)	LF (Low Frequency)	
6	300kHz~3,000kHz	ヘクトメートル波 (1,000~100m)	MF (Medium Frequency)	中波-中短波
7	3MHz~30MHz	デカメートル波 (100~10m)	HF (High Frequency)	短波
8	30MHz~300MHz	メートル波 (10~1m)	VHF (Very High Frequency)	超短波
9	300MHz~3,000MHz	デシメートル波 (1~0.1m)	UHF (Ultra High Frequency)	極超短波 } マイクロ波
10	3GHz~30GHz	センチメートル波 (0.1~0.01m)	SHF (Supper High Frequency)	
11	30GHz~300GHz	ミリメートル波 (0.01~0.001m)	EHF (Extreme High Frequency)	
12	300GHz~3,000GHz	デシミリメートル波 (0.001~0.0001m)		

本表は国際電気通信条約無線通信規則に基づいて作成したものである。

また赤外放射の長波長区分限界の方は、無線通信などに使用されるマイクロ波の短波長限界と一致している。マイクロ波の短波長限界については、無線通信の分野では「国際電気通信条約 無線通信規則」により区分が決められている内の、周波数帯番号 10 および 11 の範囲に属する電磁波をマイクロ波と慣用的に呼称しており（即ち、マイクロ波の短波長限界は 1 mm 一表2-1 参照）、こちらの方も実用的、数字的に明確である⁹⁾。

2.1.4 遠赤外放射の区分波長の現状

前項で述べたように、赤外放射の概念付けのための区分波長は明確かつ広くコンセンサスが取れているが、遠赤外放射については、特に短波長側の区分波長（長波長側の区分波長は赤外放射の長波長側の区分波長と一致する）が、関連している分野によって異なっており、必ずしも全ての分野を通してその概念や区分波長についての共通理解が得られていないのが現状である。現在の代表的な分野における状況の一例をまとめたものを図2-1（次頁）に示す。（なお、図2-1 に掲げたのは、国際規格・国家規格・団体規格およびこれらに準ずるもの、並びに各技術分野で発行されている技術ハンドブック的な公開出版物に記載されているものに限定した。個人の著作物、論文・資料など文献に記載されているものおよび個人的に伝えられた見解などは、第三者の批評やスクリーニングなどを経ていくことが確認できず、本項のポイントである“広く共通理解を得て標準化を行う”という要件を具備していない可能性が大きいので、同じ組上に乗せるべきでないと判断し、一切割愛させていただくこととした。）

この図2-1 によると、遠赤外線線の短波長側を区分する波長の数字は、分野によって実に 3μm から50μm にまで亘っていることが分る。これらを更に細かく分析的にみると、

	波長 (μm)	0.78	1.0	10	100	1000
①光学技術ハンドブック (1) 山地良一) 朝倉書店 (昭43)		0.76	1.3	60		
		近赤外線		遠赤外線		
②Handbuch fur Beleuchtung (Bundesrepublik Deutschland(1975)		0.78	1.4	3.0		1000
		IR-A		IR-B	IR-C	
③IEC International Electrotechnical Vocaburary, Chap. 841(1989)		short wave IR		mean w IR 2.0 4.0	long wave infrared radiation	
④新版 電気工学ハンドブック 電気学会 (昭63)		0.78	2.0	4.0		1000
		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)		0.78	2.0	4.0		1000
		近赤外放射		中赤外	遠赤外放射	
⑥電気専門用語 (No. 2電気加熱) 電気学会 (平 2)		0.78	2.0	4.0		1000
		近赤外放射		中赤外	遠赤外放射	
⑦工業大事典 平凡社 (昭36)		0.76		5.0		400
		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)		0.76		5.0		1000
		近赤外線			遠赤外線	
⑨IES Lighting Handbook IES of North America (1981)		0.77	1.4	5.0		1000
		near infrared		intermediate	far infrared	
⑩リモートセンシング・ノート (昭50)		0.75	1.5	15	100	
		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)		0.75		20		1000
		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)			2.5	25		
		近赤外	普通赤外	遠赤外		
(13)理化学辞典 岩波書店 (昭37)		0.77		15	30	1000
		近赤外線		中間赤外	遠赤外線	
(14)McGraw-Hill Encyclopedia of Science & Technology (1971)		0.8	2.5	50		1000
		near IR		intermediate IR	far IR	
(15)Dictionary of Scientific & Technical Terms, MGH(1974)		0.75	2.5	50		1000
		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、あくまで例示であり、CIEが正式に authorizeしたものではないので、この図には入れなかった。

図2-1 遠赤外放射の波長区分例

4 μm ~ 5.6 μm の範囲と、15 μm ~ 50 μm の範囲の2つのグループに分けることができる。前者は主として、赤外放射をパワー（エネルギー）として利用する分野における専門技術的または学術的理由や背景などにより概念付けと区分が行われていると考えられるのに対して、後者はリモートセンシングや遠赤外分光分析、赤外通信など、赤外放射を情報処理関連に利用する分野における専門技術的または学術的理由や背景などにより概念付けと波長区分が行われていると考えられる。

2.1.5 IEC「国際電気技術用語集」による波長区分

前項の図2-1の③に示した区分は、IEC（国際電気標準会議）によって制定されている「国際電気技術用語集」（IEC International Electrotechnical Vocabulary）により標準化されている区分波長である¹⁰⁾。

このIECの国際電気技術用語は、主として「産業用電気加熱」の分野を対象として標準化されたものであるが、区分の論拠も明確かつ妥当と考えられ、日本工業標準調査会（工業標準化法により通商産業省内に設置された標準化推進のための組織）の付託により組織されたIECの日本国内委員会（（社）電気学会内に組織されている）でも支持され、日本としても（通商産業省経由）正式に賛成投票したものである。

したがって、これからの日本のJISや各団体規格の制定に際しては、GATTのスタンダード・コードなど^{11), 12)}により、通商産業省の標準化に対する基本方針として、このIEC規格と整合が図られることになる。図2-1の⑤赤外加熱用語集（日本電熱協会規格）や、⑥電気専門用語などはこの基本方針に沿ったものである。また、当照明学会においては、定款により、「電熱」も対象とする関連分野としているので、この「産業用電気加熱」を対象として制定されたIEC「国際電気技術用語集」に準拠しても良いと考えられる。

ただし、このIEC国際規格はあくまで産業用電気加熱の分野における標準化であるから、他の分野（例えば、医学や赤外通信、リモートセンシング、天文学、セラミック材料関係など）に対してまで自動的に適用される訳ではない。これら他の分野との間において赤外放射の波長区分や遠赤外放射の概念を統一化・共通化を図ろうとすれば、相互にコンセンサスを得るための作業が必要であることはいうまでもない。

もっとも、この分野間のコンセンサスを得る作業を進める前提として、それぞれの分野において、まずその分野内の意見のまとめを公式に実施する必要があることはいうまでもない。そうでなければ、コンセンサスを得るべき事柄についての調査・検討のレベルが合っていないからである。

図2-1により明らかのように、産業用電気加熱の分野においてはこの作業を「工業標準化」の精神に基づき、わが国の団体規格や国家規格を始めとして、国際規格も制定されている（図2-1の③、⑤、⑥）。また、図2-1を作成するに当たって、種々調査した結果によれば、国際規格とまではいかなくとも、国家規格や団体規格として赤外放射の波長区分や遠赤外放射の概念を明確に制定している分野はこの「産業用電気加熱」分野以外には見当

らなかった。ただし、当委員会の調査不足の可能性もあるので、お気づきの点があれば、ご教示下さることをお願いしたい。

2.1.6 CIE「国際照明用語集」と赤外放射の波長区分

前項の状況により、当照明学会（の遠赤外放射研究調査委員会）においても、産業用電気加熱分野の標準化結果（図2-1の②、IECの国際電気技術用語）をそのまま採用しても良いとも考えられるが、実は照明の分野においても、団体規格や国家規格、国際規格などが制定されている。そこで本節では、照明分野における「赤外放射の波長区分」や「遠赤外放射の概念」の標準化の状況を簡単にまとめておくこととする。

照明分野においては、国際組織であるCIE（国際照明委員会）により、照明関連技術用語の国際的標準化が進められている。CIEの中に「照明用語」技術委員会が組織され、活動の成果として「国際照明用語集」（International lighting Vocabulary）が制定・刊行されている。ただし用語の概念というのは、学術の進捗や時代の伸展などに応じて変化していく要素があるので、この「照明用語」技術委員会は常置的委員会になっており、一旦刊行した用語集についても常に見直しが進められ、必要な時期に改訂版が刊行されてきており、1989年に第4版が発行されている⁸⁾。

わが国においては、CIEの国内団体である社団法人日本照明委員会がCIEの「照明用語」技術委員会に対して代表委員を1名専任しており、日本の意見をこの代表委員を通じて反映させることにより、国際の場の議論に参画している。「国際照明用語集」の刊行や改定版の発行に当たっては、CIE加盟各国の投票による採決があるが、日本の投票はこの代表委員によって行われており、上記第4版については、手続的にはわが国は条件付きで賛成の投票をした。

この国際照明用語集の第4版には、「遠赤外放射の概念」については標準化されていない。（第3版以前についても同じ。）ただし、赤外放射については概念が標準化されており、その概念の説明文と共に図2-1②と同じ波長区分が示されている。この波長区分は国際照明用語集の第1版と第2版には示されてなく、第3版になって始めて示されたものであるが、第3版には「赤外放射のスペクトル範囲は人によって異なり明確に定義されていない。CIEの技術委員会 E-2.1.2は780 nmと1 mmとの間を以下（省略。図2-1②と同じ）の様に区分している。」という備考（注）が付けられており、CIEの正式の標準化ではなく、あくまで例示に過ぎないことが示されている¹³⁾。

上で述べられている、この区分が例として挙げられたCIEの技術委員会の会合というのは、調べてみると1963年の第15回CIEウィーン大会における技術委員会「E-2.1.2：紫外・赤外放射源」の会合であり、出席していた西ドイツ（当時）の代表によって例示されている。そして、その内容は図2-1の②と同じである¹⁴⁾。つまり、西ドイツの代表委員によって、西ドイツの国家規格（？）の内容が例示されたものであることが分る。

この備考（注）は、第4版では削除されてはいるが、第3版刊行後第4版の最終原案に

対する CIE加盟各国の賛否投票までの期間において、CIEの「照明用語」技術委員会および関連の技術委員会において、この西ドイツが例示した区分を CIEの国際照明用語に正式に採用するという議論も審議も決定も無かった。

そこでわが国からは、第4版の賛否投票に際して、この点に関し「(1) 何ら公式に議論することなく、1国の国家規格を CIEの国際規格に採用するのは CIEの精神にもとる。(2) またこのまゝ発行すれば、世界各国にあたかも CIEが（実際には全く議論していないにも拘らず）正式に議論して決定したかのような誤解と虚偽を与える。(3) 産業用電気加熱の分野ではあるが、IECが（図2-1の③のような）赤外放射の波長区分を正式に標準化している（CIE国際照明用語集は、照明分野の IEC国際電気技術用語集を兼ねるという取決めができています）ので、同じ IECの電気技術用語として調整が必要である。」という3つの論点を明示した上で、この3点を折り込んで修正するか、または修正しない場合にはその理由を明確にすることを条件として、「条件付き賛成」の投票を行った¹⁵⁾。

ところが実際には、日本の修正意見は採用されず、またその理由も明確にされないままに、第4版が刊行されてしまった。

遠赤外放射研究調査委員会の議論では、この CIE国際照明用語集の第4版の波長区分を採用しようとの意見もあったが、以上の日本としての経過もあり、遠赤外放射の区分波長については照明学会として継続審議とすることとした。

2.1.7 IEC「国際電気技術用語」による区分の根拠

赤外放射を区分する波長については、区分はあくまで便宜上の理由によるとして、学術上の論拠など無くてもよいとの意見も無くはないが、専門用語としては学術的（または業界的）必然性のある理由によった方がよいことは自明である。殊に、異なった分野間において、別の区分波長を標準化している場合には、これの統一化を図ろうとする場合、それぞれの区分の背景となる必然的理由が明確になっていれば、コンセンサスを採るための議論を進め易い。

そこで、各位のご参考にしていただくために、前々項で述べた産業用電気加熱の分野において標準化されている IECの国際電気技術用語による遠赤外放射の区分波長の根拠について、今までの IECにおける議論その他の内容を基に、若干触れておくこととする。

(a) 赤外電球の放射との区分

赤外加熱技術の産業への応用についての過去の経過を、放射源の立場から見ると、初期のガラス製管球による赤外電球だけの時期から、赤外電球の他に、ガラス管球とは全く構造の異なっただけの「遠赤外ヒーター」も使用されるようになった時期へと変遷してきている。

「遠赤外ヒーター」は、応用面の波長的適合性を改良することを目的として開発・製品化されたものであり、赤外電球に比べて長波長域の放射束を多く放射している。そのため、

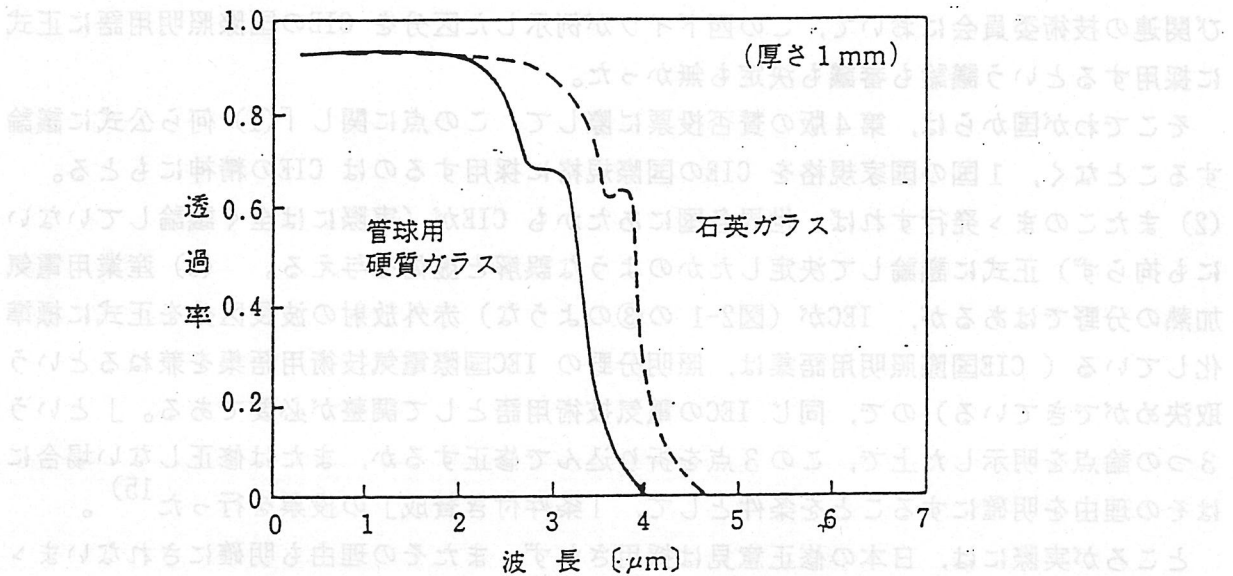


図 2-2 代表的な管球用ガラスの分光透過率

この遠赤外ヒーターからの放射の主波長域を赤外電球からのそれと区分することが必要となり、区分する波長が検討された。

赤外電球はその構造上、使用しているガラス管球の、放射に対する透過限界よりも長波長の放射は少量しか放出されない。図2-2 に代表的な管球用ガラスについての赤外域の分光透過特性を示す。ガラスの種類によって若干の違いはあるが、放射に対する透過限界波長はほぼ $4\mu\text{m}$ と見なすことができる。IECでは、これらの検討結果を根拠のひとつとして波長 $4\mu\text{m}$ をもって赤外放射を区分し、 $4\mu\text{m}$ よりも長波長の赤外放射を遠赤外放射とすることとした。

(b) 分子レベルにおける赤外放射の作用機構との関連

赤外放射の波長域においては、光子のエネルギーが小さいので、赤外放射が物質や生体に吸収されても、原子間の結合などに直接影響したりすることなく熱エネルギーに変換されることが多い。しかし、「赤外写真」などの例でも分るように、一部の波長域の赤外放射は写真作用（光化学作用）を促進することができる。（この内容については、6.3項で詳述する。）

このことから、光化学作用促進の可能性が全く無くなる波長により赤外放射を区分することは意味のあることと考えられる。光化学作用の促進の全く無い状態とは、分子スペクトルでいうと、振動状態および回転状態の遷移だけによるスペクトルが現れる状態である。これらはそれぞれ振動領域、回転領域と呼ばれる。光化学作用の促進が無くなる波長はこの振動領域の短波長限界に一致すると考えられる。振動領域の短波長限界はほぼ $2.5\mu\text{m}$

～4 μm であるといわれている¹⁶⁾。しかし、この波長を一波長に特定することは困難であるようにも思われる。

2.1.8 遠赤外放射の概念

現在、照明学会において「照明専門用語研究調査委員会」（小原 清成 委員長）が組織され、この度「照明専門用語」の原案が作成された¹⁷⁾。この中では、遠赤外放射の概念については具体的に記述されているが、区分波長については前々項までに述べたような諸般の状況により、CIEと同様に色々な実例を例示するに止めている。

前項までに詳細に述べてきたように、赤外放射の区分波長を議論する上で、遠赤外放射の概念そのものも重要なので、この「照明専門用語」の原案を含む各種の規格（用語集）類やハンドブック、データブック、辞典類などに記述されている「遠赤外放射」の概念をまとめたものを表2-2（次頁）に示す。

2.1.9 まとめ

別に遠赤外放射関連産業に限ったことではないが、生産者が製品やサービスの生産、供給、流通などの適正化・公正化を図ることは、使用者・消費者にこれらを提供するに当り重要なことである。特に、本格的国際化時代が到来して、製品やサービスの関係する範囲が国際的に広くなり、また使用者・消費者個々の製品やサービスに対する選択に関する行動も多様化、高度化してきている最近の状況においては、これらの重要性は一層増大しつつあるといっても過言ではないであろう。

このような状況においては、何事についても適切な標準化が重要な施策のひとつとなってくる。

本報告書で述べられているように、最近、遠赤外放射に関連した産業や商品についての話題性や注目度が大きくなってきている。また、それと共に、一方では生産・流通面の状況に比べて標準化面の対応が遅れており、そのことが使用者・消費者に対する不都合や誤解の端緒になっているとの指摘もある。

本報告書の本項は、遠赤外放射関連の標準化の中では一番の基本ともいえる「遠赤外放射」の概念と区分波長についての現状をまとめたものである。現状は残念ながら全ての分野に互って共通理解が得られている概念と区分波長はまとまっていない。本報告書がきっかけのひとつとなって、産業用電気加熱以外の分野についてもコンセンサスが得られるような区分波長の標準化が進められることを願っている。

（河本）

参 考 文 献

- (1) Hackforth, H. L., (和田正信, 中野朝安 共訳) : 赤外線工学, 近代科学社 (昭38)
- (2) 森田 政明 : 赤外線加熱技術の開発とその経緯, 照学誌, 73, 5, (平元) 267
- (3) 河本 康太郎 : 遠赤外線放射セラミックス応用上の諸問題, 繊維機械学会誌, 42, 12, (平元) 623
- (4) 根岸 直樹, 菊池 真 : 医学における遠赤外線応用, 照明学会公開研究会資料 No. AR-88-4 (昭63)
- (5) 松井 松長, 玉重 繁良 : 民生用遠赤外線応用製品に関する調査, 照明学会公開研究会資料 No. AR-88-8 (昭63)
- (6) 河本 康太郎 : 遠赤外放射の概念と波長区分 (1) — エネルギー利用の立場から 電情連大予稿集 9-2 (昭61) 2-29
- (7) 阪井 清美 : 遠赤外放射の概念と波長区分 (2) — 遠赤外分光分析の立場から, 電情連大予稿集 9-3 (昭61) 2-33
- (8) CIE International Lighting Vocabulary, 4th Edition (1987)
- (9) テレビジョン学会編 : テレビジョン画像工学ハンドブック, オーム社 (昭55)
- (10) IEC International Electrotechnical Vocabulary, Chap. 841 (1989)
- (11) GATT Standard Code : 貿易の技術的障害に関する協定, 昭和54年12月
- (12) 日本工業標準調査会編 : 工業標準化推進長期計画の策定に関する建議, 平成 2年 6月
- (13) CIE International Lighting Vocabulary, 3rd Edition (1967)
- (14) CIE Publ. No. 11 : CIE Compte Rendu, 15th Session CIE Vienna (1963)
- (15) Propositions for amendments from Japanese National Committee to Draft for voting : Comite E-1.1, (1983)
- (16) 玉虫 文一 ほか編 : 理化学辞典 第3版増補版, 岩波書店 (昭57)
- (17) 電気学会 電気用語標準特別委員会, 照明学会 照明専門用語研究調査委員会 : 電気学会 電気専門用語集「照明」(最終原案) (平 3)

表2-1 遠赤外放射を含む赤外放射の作用効果と応用分野（最近の新聞・雑誌などの出版物による）

区 分	作用の説明	効果の具体的内容	応用例と応用製品例
加 熱	放射加熱	<ul style="list-style-type: none"> ○加熱の省エネと加熱速度up ○電子機器、OA機器における加熱 ○熱化学反応促進 ○溶接 ○特定の場所の融雪 	<ul style="list-style-type: none"> ○ガラスの溶融・徐冷、プラスチックプラスチック成型品の歪除去、陶磁器の電子工業の半田リフロー、単結晶成 ○PPCの定着（トナー焼き付け） ○感熱式複写機 ○光ビーム溶接、光ビーム半田付け ○関ヶ原新幹線軌道の融雪装置
	乾燥、硬化、接着、焼付	<ul style="list-style-type: none"> ○塗膜などの乾燥、硬化の省エネ ○印刷インキなどの乾燥の省エネ 	<ul style="list-style-type: none"> ○塗料・塗膜の乾燥、絶縁ワニスの乾熱硬化性樹脂の硬化、接着剤の乾燥 ○プリント基板への印刷
	農水産物、食品の加工	<ul style="list-style-type: none"> ○保存性の向上 ○食品加工の省エネと食感向上 ○家庭用調理器 ○輸送重量の削減 ○保温 ○脱色 	<ul style="list-style-type: none"> ○農水産物の乾燥（海苔、鱈節、魚干乾燥果物、牧草など） ○製パン、米菓、竹輪、焼きのり、さの焼き上げ、乾麺の乾燥・熟成、焼石焼きいも器、てんぷら用セラミック ○赤外グリル、赤外オープン・トース ○天草、い草などの輸送 ○パック食品の保温、ハンバーガーな ○天草の晒し
生体への伝熱	人体への放射伝熱	<ul style="list-style-type: none"> ○マイルドな暖房（快適暖房） ○温熱感効率up ○高速暖房 	<ul style="list-style-type: none"> ○床暖房 ○遠赤外こたつ ○遠赤外ストーブ
	人体への健康作用	<ul style="list-style-type: none"> ○疲労回復の促進、保温 ○保温、安眠 ○低温での発汗促進 ○美容、美肌 ○育毛促進 	<ul style="list-style-type: none"> ○健康下着、健康靴下 ○健康ふとん、遠赤外ブランケット ○遠赤外サウナ ○遠赤外ビーム ○遠赤外ヘア・ドライヤー
	医 療	<ul style="list-style-type: none"> ○リュウマチ痛の軽減、温灸 ○歯槽膿漏の予防 ○結石除去 ○腫瘍の消失 ○人体組織の無血切離 	<ul style="list-style-type: none"> ○遠赤外ビーム ○遠赤外歯ぶらし ○近赤外レーザー+光ファイバー ○近赤外レーザー ○遠赤外レーザー・メス
	保 温	<ul style="list-style-type: none"> ○植物の生育促進 ○卵、雛の生育促進 	<ul style="list-style-type: none"> ○植物工場における赤外による保温 ○孵卵器、育雛器
	生体への熱作用	<ul style="list-style-type: none"> ○ダニの駆除 ○殺菌 	<ul style="list-style-type: none"> ○遠赤外掃除器
そ の 他 (非熱効果など)	水分蒸発促進 (水の水素結合の離間促進)	<ul style="list-style-type: none"> ○食品の水分調節の工程改善 ○木材の乾燥の品質改善 	<ul style="list-style-type: none"> ○めん類の水分調節
	物質内部への浸透性大 でんぶんのα化促進 水とアルコールの分子間結合促進	<ul style="list-style-type: none"> ○みその醸造 ○石焼きいも ○酒類の熟成 	<ul style="list-style-type: none"> ○遠赤外醸造機 ○遠赤外石焼きいも鍋
	水の活性化	<ul style="list-style-type: none"> ○野菜の鮮度保持 ○コーヒーの味の改良 ○植物育成 	<ul style="list-style-type: none"> ○遠赤外シート（冷蔵庫用） ○遠赤外コーヒー・カップ ○遠赤外活水器
測 定 , 探 査 , 分 析		○放射されている赤外線を検知・分析	○赤外放射温度計、赤外放射計、赤外赤外 ITV、サーモグラフィ、暗視赤外分光放射計、赤外 CCD、気象等
		○別置の赤外放射源からの赤外線のパターンの時空間的変化を検知・分析	○赤外分光光度計、赤外ガス分析計、
		○（全 上）（医療応用）	○赤外瞳孔計、赤外ホログラフィーにターンの診断、熱パターンによる人体
情 報 処 理		<ul style="list-style-type: none"> ○赤外通信（情報伝達） ○赤外リモート・センシング 	<ul style="list-style-type: none"> ○赤外通信装置、宇宙通信用赤外受信 ○家電機器用リモート・スイッチ、人赤外防犯装置

(注) この表は、主として最近5年間の業界新聞・雑誌などの記事の内容をまとめたものであるが、全ての項目について、遠赤外放射研究調査で議論した訳ではない。したがって、ここに挙げた項目の中には当委員会として検証や確認を充分に行っていないものも含まれている。近、関連業界で話題になっていることとしてご理解いただきたい。

第3章 赤外放射の標準と計測

3.1 赤外放射標準

遠赤外放射の波長範囲は一義的に定められていない。波長範囲の区分については本報告の2章に記述されているので参照されたい。本節では、赤外放射標準設定の研究経緯と実用的な観点から、近赤外も含めて25 μm 程度迄の赤外波長域を対象とする。これまで赤外標準の設定は数 μm 程度の近赤外域が主でそれより長波長の赤外域ではごく一部の放射量について標準が出来ているに過ぎないのが実状である。

本節文中の用語は、「放射」と「光」とを同義語として扱い、努めて「放射」を用いるが慣用的にしばしば「光」を使うことがある。また、「遠赤外」を「赤外」のように一般化して使うことがあるのを、予めお断りしておく。

3.1.1 赤外放射量とその標準

電磁波の中でOptical Radiation と呼ばれている波長領域では放射の量をエネルギー-或はパワーで表し、空間内の位置と分布に応じて幾つかの放射量が定義¹⁾されている。赤外放射量の標準は、1) 黒体に関するPlanckの放射則、2) 放射の電力による置換測定²⁾、を基礎にして決められている。

3.1.1.1 黒体に基づく放射標準

黒体に近似した放射体を作り、その分光放射量をPlanckの放射則から計算して求める。分光放射輝度 $L_e\lambda$ に関しては

$$L_e\lambda = 2\varepsilon c_1 \lambda^{-5} / \{ \exp(c_2 / \lambda T) - 1 \}$$

で与えられる。 ε は放射体の放射率、 $c_1 = c_2 h = 5.9548 \cdot 10^{-17} [\text{W}\cdot\text{m}^2]$ 、 $c_2 = c h/k = 1.4388 \cdot 10^{-2} [\text{m}\cdot\text{K}]$ 、 λ は放射される波長[m]、 T は放射体の温度[K]、である。放射体は放射率を1に近づけるため一般に空洞形に作られ、いわゆる空洞放射体を形成する。空洞の形状は円筒又は円錐が多く用いられている。全体の構造は、この空洞放射体を周囲から電力で加熱する電気炉の形式が一般的であり、黒体炉とも呼ばれる。図1は黒体の構造の例^{3), 4)}を示す。黒体の条件を満たすには、空洞内部の温度分布が一様でかつ実効放射率が1であることを要し、安定な出力を得るために温度を一定値に保持することが必要である。空洞放射体の実効放射率は円筒形や円錐形について材料の放射率と形状に基づいて計算する方法が報告^{5), 6)}されている。

黒体放射量の評価に際して起こりうる誤差要因は、1) 温度測定、2) 放射率の評価、3) 放射面積の評価 が主なものである。

3.1.1.2 絶対放射計による放射標準

検出器として放射測定のための標準に利用される絶対放射計 (Electrical Substitution Radiometer: ESR) は熱型検出器の一種である。基本的な構造は 図2⁷⁾⁻⁹⁾ のようなもので、放射を電力で置換して測定できるようになっている。一般の熱型検出器の特性と共に、放射による加熱と電力によ

る加熱が等価になるように特別な注意をしている。ヒータを持つために熱容量が増大し高感度を得るのが難しく、分光放射測定用には不向きなため全放射測定用が主となる。構造及び動作の形式にサーモパイル型とボロメータ型がある。

サーモパイル型は受光面側に電気ヒータを取り付け、受光面の裏側或は周辺にサーモパイルを取り付けた構造である。ヒータ電流を零として放射入力の有無の場合に対応したサーモパイルの熱起電力を初めに測定してこれらの熱起電力の差 ΔE を求め、次に放射の入力を零に保ちヒータ電流が零の場合の熱起電力を測定した後熱起電力の増加が ΔE になるようにヒータ電流を増加するとこの際ヒータに加えた電力が入力放射量に相当するという原理に基づいている。

ボロメータ型は抵抗温度計の一種である。放射の入力がない場合に一定のバイアス電流 I_0 を流しておく。放射が入るとボロメータは加熱されて電気抵抗が増加しバイアス電流は減少するので、印加電圧を増加してバイアス電流は常に一定値 I_0 になるようにしてその時の電気抵抗増加分 ΔR と抵抗値 R を測定する。次に、放射が入っていない場合に放射の入力で生じたと同じ抵抗値の増加 ΔR が生じるようにバイアス電流を増加する。このバイアス電流値を I_c とすると、この二つの場合の供給電力の差 $(I_c^2 - I_0^2)R$ が入力放射量に相当するという原理によっている。

絶対放射計による測定は放射の受光面における量が得られるため大気吸収が多い赤外領域では、放射源による放射の標準に比べると放射の利用面での値が判る利点がある。

絶対放射計による測定の誤差要因は、1)放射による加熱と電力による加熱の相違、2)放射吸収率の評価、3)受光面積の測定、4)ヒータ供給電力の測定、等があり、これらの低減に努力が払われている。

3. 1. 2 赤外放射の二次(常用)標準

赤外領域での二次標準としては光源ではタングステン電球又はヒータ形式の白熱放射体が、検出器ではサーモパイルのような熱型検出器が、一次標準を基にして校正した上で使用されている。

3. 1. 2. 1 標準放射源

a. 簡易形黒体

放射面が平面或は空洞の簡易形黒体が参照用の放射標準として市販されている。黒体条件と温度の絶対値についての合理的なデータが明示されていないものが多いので、使用に当たっては何等かの方法で黒さと温度について確認することが望ましい。

b. 白熱タングステン電球

フィラメントからの放射を利用する場合はガラスバルブが $3\mu\text{m}$ 付近から長い方の波長域で透過率が急激に低下して不透明になるため、ほぼ近赤外域での標準に限られる。分光放射輝度標準用にはフィラメントにリボン状のタングステンを用いた白熱電球が使われている。放射輝度の値は黒体の値と比較して校正される。(分光)放射照度標準用には直線またはコイル状のフィラメントを単一鉛直面内に配置した形式の白熱電球が主に用いられるが、ハロゲン電球も利用されている。(分光)放射照度の値は黒体或は絶対放射計を基に比較測定により校正される。

c. グローバー

炭化珪素を棒状に焼結したもので、電流で加熱して使用するものが分光用に利用されている。放

射率は $15\mu\text{m}$ 位までの波長域で0.8程度¹⁰⁾であり、 $40\mu\text{m}$ まで波長依存性は小さいことも報告されている。¹¹⁾ 発光部を空洞形黒体に近似させて放射率を大きくかつ波長依存性を小さくしたものが分光放射輝度標準光源として使われている。図3¹²⁾はこの形を示すもので、空洞部の開口は分光器のスリットの形にしてある。供給電力450Wの場合に温度約1290 Kで波長域2-20 μm にわたり放射率は約0.99を得ている。

3. 1. 2. 2 標準検出器

熱型検出器は受光面に放射吸収の良い物体(黒化物)をコーティングして光りの吸収を高めると共にその波長依存性を小さくしているのが最大の特徴であり、感度の波長依存性が少ないために様々な分光分布の光に対するパワー測定の誤差を低減できるので標準検出器として利用される。ただし、遠赤外領域では分光吸収率に波長依存性をもつ黒化物が多いため、標準検出器として使用するにはこの点を十分に確認しなければならない。種類はサーモパイル、ボロメータ、焦電素子、等がある。

a. サーモパイル

構造及び出力電圧の測定が比較的簡単で高感度が得られるために放射測定の初期からよく使われている。基本構造は熱電対と同様であるが温接点部分を箔形にしたもので、光吸収を増加するために箔の上に黒化物をコーティングしてある。高感度とするためには、放射吸収の大きなことと並んで受光部の熱容量と外部への熱伝導の小さいことが必要なため微小構造としている。温度測定用の熱電対と混同しないためにラジエーションサーモカップル(Radiation Thermocouple)とも呼ばれている。この箔形温接点をもつ熱電対を多数受光面上に並べ、電気的には直列に接続したものがサーモパイルである。光照射により生じる熱起電力が小さいため高感度の電圧測定器が得られなかった頃は、大きい出力電圧を得られるサーモパイルがよく利用されたが、電圧測定が雑音レベル近くまで進歩している現在では熱電対の方が雑音の点で有利なことが知られている。

図4はサーモパイルの構造例を示している。受光部は薄い金属箔でその上に白金黒、金黒、カーボンブラック、等のような黒化物をコーティングしているが、分光吸収率は長波長側で低下するものが多い。受光部は金箔の上に金黒をコーティングしたものが、熱抵抗と熱容量が小さくかつ光吸収が大きくて最良といわれている。入射した放射量を規定するためには受光面積を確定する絞りをもち構造が必要である。熱電対材料はBi-Sb, Bi-Ag,のような金属或は半導体で熱電能の大きい材料がよく使われる。

b. ボロメータ

一種の抵抗温度計で、素子材料によって金属ボロメータと半導体ボロメータがあり、動作温度は常温或は冷却温度の何れかに分かれている。サーモパイルと同様に標準検出器として使用できるが、バイアス電流や負荷抵抗等の動作条件や測定装置が、サーモパイルに比べて複雑であり利用度は少ない。

c. 焦電素子

誘電分極が温度により変わることを利用したもので、原理的に直流動作はできないため応答度の校正用標準に使われることは少ないが、分光感度比較測定の際に簡易的な参照用標準検出器としては利用されている。

3. 1. 3 放射源および検出器の校正

放射輝度 L_e の放射源から出て検出器に入る放射束 Φ_e は真空中では次式で表される。

$$d^2 \Phi_e = L_e \cdot dA_1 \cdot \cos \theta_1 \cdot dA_2 \cdot \cos \theta_2 \cdot \Omega_0 / l^2$$

但し、 A_1, A_2 ：放射源および検出器の面積， θ_1, θ_2 ：放射の射出角および入射角， l ：光源と検出器間の距離， Ω_0 ：単位立体角である。この関係は測光の基本法則を示すもので放射源の放射量又は検出器の応答度の相互間で何れか一方と幾何学的条件が既知であれば検出器出力の測定により他方を確定できることを示しており、放射量や検出器応答度の校正に利用されている。

校正は時間的に変化しない定常放射に対して行う、いわゆる直流動作の、使い方をするのが普通である。入力放射を一定周波数でチョッピングして測定する交流動作では検出器の時定数に対してチョッピングの周期を十分長くすること、及びチョッピングによる検出器出力信号波形の変化による補正、が必要となる。

3. 1. 3. 1 標準による直接測定

黒体や絶対放射計を標準にして他の光源や検出器を校正するには 図5 のような測定系が使われる。

黒体を用いてサーモパイルの応答度 r を校正する場合は 図5 (a) のような測定系を用い、 r は次式³⁾で求められる。

$$r = (V_b - V_s) / \sigma F \varepsilon (T_b^4 - T_o^4)$$

V_b ：黒体放射によるサーモパイル出力電圧， V_s ：シャッタからの放射によるサーモパイルの出力電圧， σ ：Stefan-Boltzmann 定数， F ：光学系の幾何学的関係で決まる係数， ε ：黒体の放射率， T_b ：黒体の温度， T_o ：サーモパイル冷接点の温度，である。

絶対放射計による校正は 図5 (b) のような測定系で、二次標準とする放射源について動作条件および絶対放射計との距離を規定して、放射源から絶対放射計に入射する放射束を測定する。この値と絶対放射計の受光面積から受光面における放射照度が得られる。

黒体または絶対放射計についての測定における誤差要因は3. 1. 1に記した通りであるが、それらの他にも十分注意を要する誤差がある。

まず赤外域の全放射測定では大気中の水蒸気や炭酸ガスによる吸収の誤差を避ける必要があるので、光路の吸収量を評価して補正する方法、光路の雰囲気を乾燥空気又は不活性ガスで置換して吸収の少ない状態にする方法、或は同一光学系を用いた比較測定方法等、が採られる。その他の場合には測定条件として大気中に含まれる水蒸気量や光路の長さを規定しておき、校正値の適用に際しては同じ条件を前提とすることが必要である。光学系の幾何学的条件設定の不正確、放射源および検出器の特性の経時変化や温度依存性、等による誤差も無視できない。

3. 1. 3. 2 標準との比較測定

一般的には校正された標準器を用いる比較測定がよく行われる。この場合は 図6 のような比較測定系で同一の位置に標準と被検の光源或は検出器を置き換えて測定する。この際、標準と被検の光源のパワーレベルが異なる場合にはそのパワーレベルの間で検出器応答度の直線性の成立を前提としている。

比較測定では光学系の幾何学的条件はほぼ同じとなりこれに基づく誤差が軽減できる。しかし、

放射の分光分布や配光，並びに検出器感度の入射角依存性や受光面内の感度むらが同時に存在する
ような場合にはやはり誤差が生じる。従って，比較する標準と被検の放射源或は検出器の構造およ
び特性が同様なことが望ましい。標準と被検の両者の間で構造或は特性が異なる場合にはそれに基
づく誤差の評価が必要である。

3.1.4 赤外放射標準の確度

赤外放射の標準に関する測定の正確さは黒体からの放射量，絶対放射計の測定値，黒体或は絶対
放射計に基づく標準電球の放射量や検出器応答度の校正值，等について与えられるが，評価の総合
的な誤差を幾つかの文献についてみた例を 表1 に示した。

それぞれの測定において誤差の評価が示されているが，測定値の確度は不明である。複数の独立
した方法による測定を一つの放射量の校正に適用して比較することにより確度を推定する方法は有
効なものと考えられ，精密測定ではしばしば行われている。また，国際的には世界10ヶ国程の国
立研究所の間で放射量に関する測定の国際比較を行い相互間の一致を確かめる試みがあり有益と考
えられるが，今までのところ遠赤外域では実現していない。

赤外域の分光放射照度標準は $2.5\mu\text{m}$ 程度までの近赤外領域において数ヶ国で設定されているに過
ぎない状況である。一部では $20\mu\text{m}$ に及ぶ領域の分光放射輝度標準の設定が行われているが分光放
射照度はまだ実現に至っていない。

(伊藤)

文献

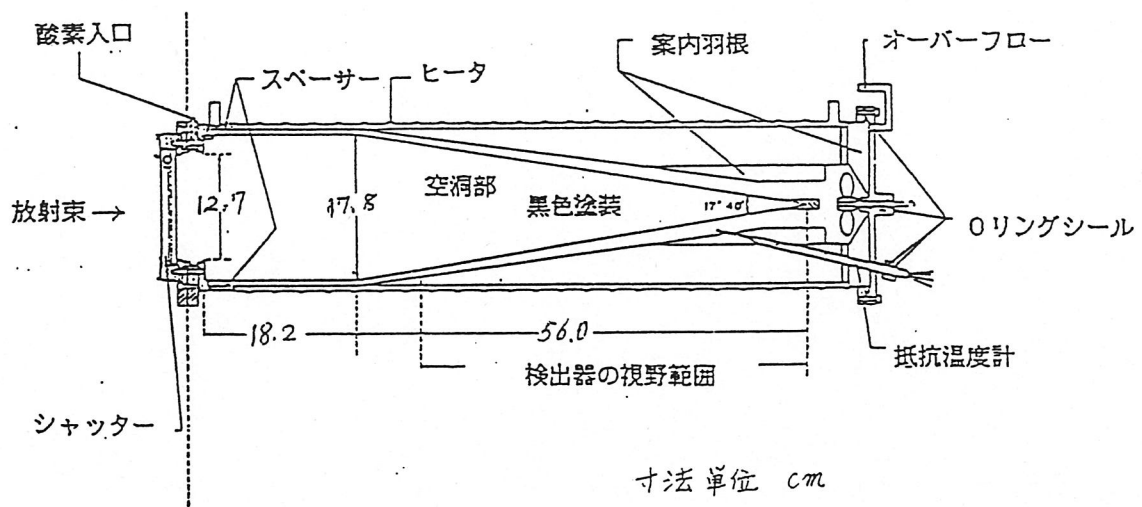
- 1) CIE Publ.No.17.4 (1987) : International Lighting Vocabulary
- 2) CIE Publ.No.65 (1985) : Electrically calibrated thermal detectors of optical radiation
- 3) R.E.Bedford : A low temperature standard of total radiation, Can. J. Phys. 38 (1960) 1256-1278
- 4) J.H.Walker, R.D.Saunders, and A.T.Hattenburg : The NBS scale of spectral radiance, Metrologia 24 (1987) 79-88
- 5) A.Gouffe : Corrections d'ouverture des corps-noirs artificiels compte tenu des diffusions multiples internes, Rev. d'Optique 24 (1945) 1-10
- 6) J.C.DeVos : Evaluation of the quality of a blackbody, Physica 20 (1954) 669-689
- 7) E.J.Gillham : Recent investigations in absolute radiometry, Proc. Roy. Soc. A 269 (1962) 249-276
- 8) M.Eppley and A.R.Karoli : Absolute radiometry based on change in electrical resistance, J.Opt. Soc. Amer. 47-8 (1957) 748-755
- 9) 大場信英 : 放射束の絶対測定, 電試研報 第675号 (昭42)
- 10) S.Silverman : The emissivity of GJover, J. Opt. Soc. Amer. 38-11 (1948) 989
- 11) W.Y.Ramsey and J.C.Alishouse : A comparison of infrared sources, Infrared Phys. 8

- (1968) 143-152
- 12) T.Nagasaka and M.Suzuki : Silicon carbide infrared cavity radiator, Appl. Opt. 16-9 (1977) 2358-2359
- 13) 鈴木, 南条, 羽生, 長坂, 上田, 湊 : 紫外・可視・近赤外域における分光放射輝度・照度標準の確立, 電総研研報 第742号 (昭48)
- 14) F.Riehle and B.Wende : Establishment of a spectral irradiance scale in the visible and near infrared using the electron storage ring BESSY, Metrologia 22 (1986) 75-85
- 15) N.P.Fox, P.J.Key, F.Riehle, and B.Wende : Intercomparison between two independent primary radiometric standards in the visible and near infrared : a cryogenic radiometer and the electron storage ring BESSY, Appl. Opt. 25-14 (1986) 2409-2420

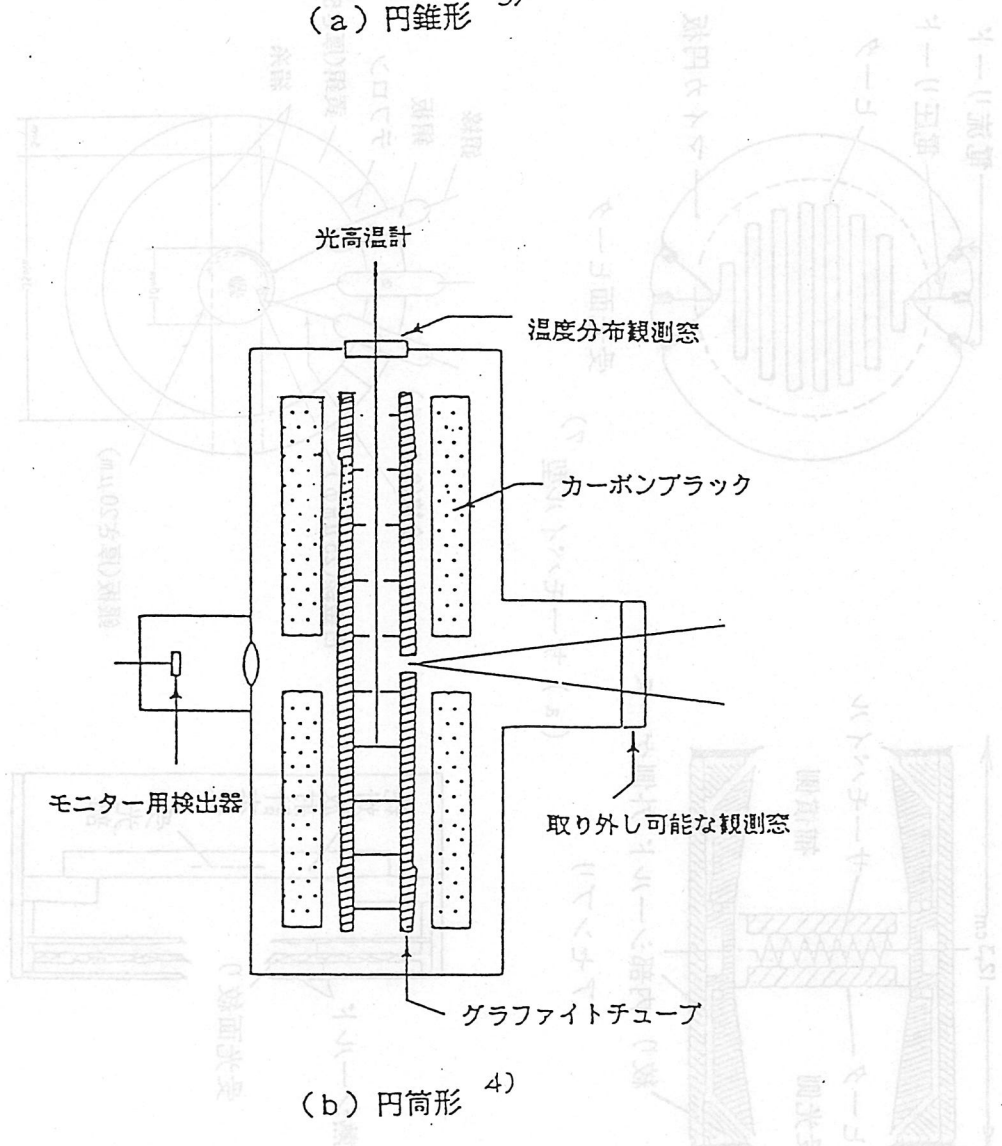
表 1 放射標準に関する測定の誤差

校正の量または値 備考

検出器応答度	波長域 測定誤差 (%)	40°C-150°C 黒体の全放射 ±0.3	黒体によるサーモ パイルの校正 文献 3)
分光放射輝度	波長 (nm) 測定誤差 (%)	250 500 2000 ±2.2 ±1.1 ±1.4	黒体によるタンゲ ステン電球の校正 文献 13)
分光放射照度	波長 (nm) 測定誤差 (%)	225 655 2400 ±2.09 ±0.62 ±0.34	黒体によるタンゲ ステン電球の校正 文献 4)
分光放射照度	波長 (nm) 測定誤差 (%)	400-1000 ±0.8	SOR によるハロ ゲン電球の校正, 文献 14)
検出器応答度	波長 (nm) ESR/SOR	676 799 1.0013 0.9990	同一検出器をESRと SORで校正した場合 の比 文献 15)

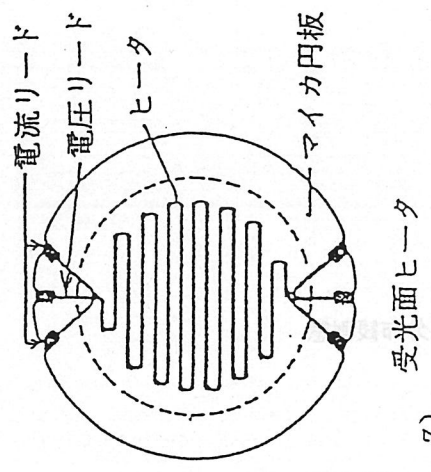
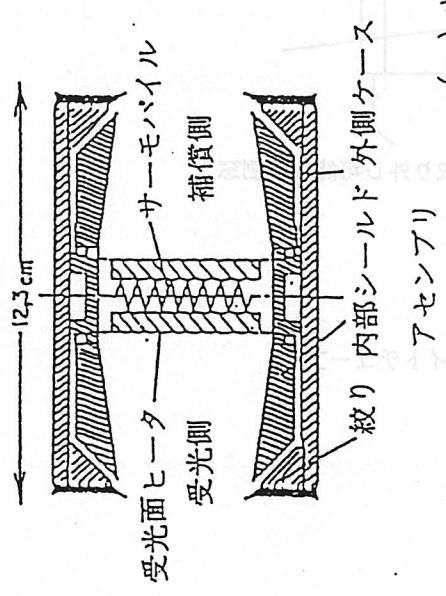


(a) 円錐形 3)

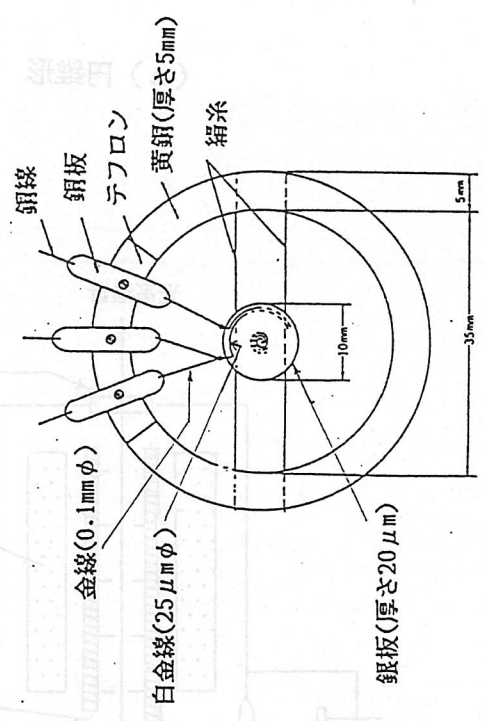


(b) 円筒形 4)

図1 黒体の構造例



(a) サーマロバイル型 7)



絶対放射計本体

(b) ホロメータ型 8), 9)

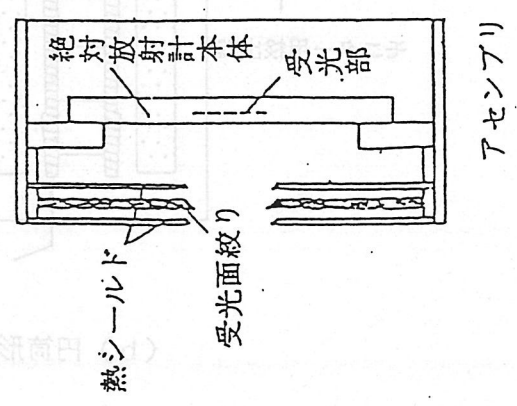
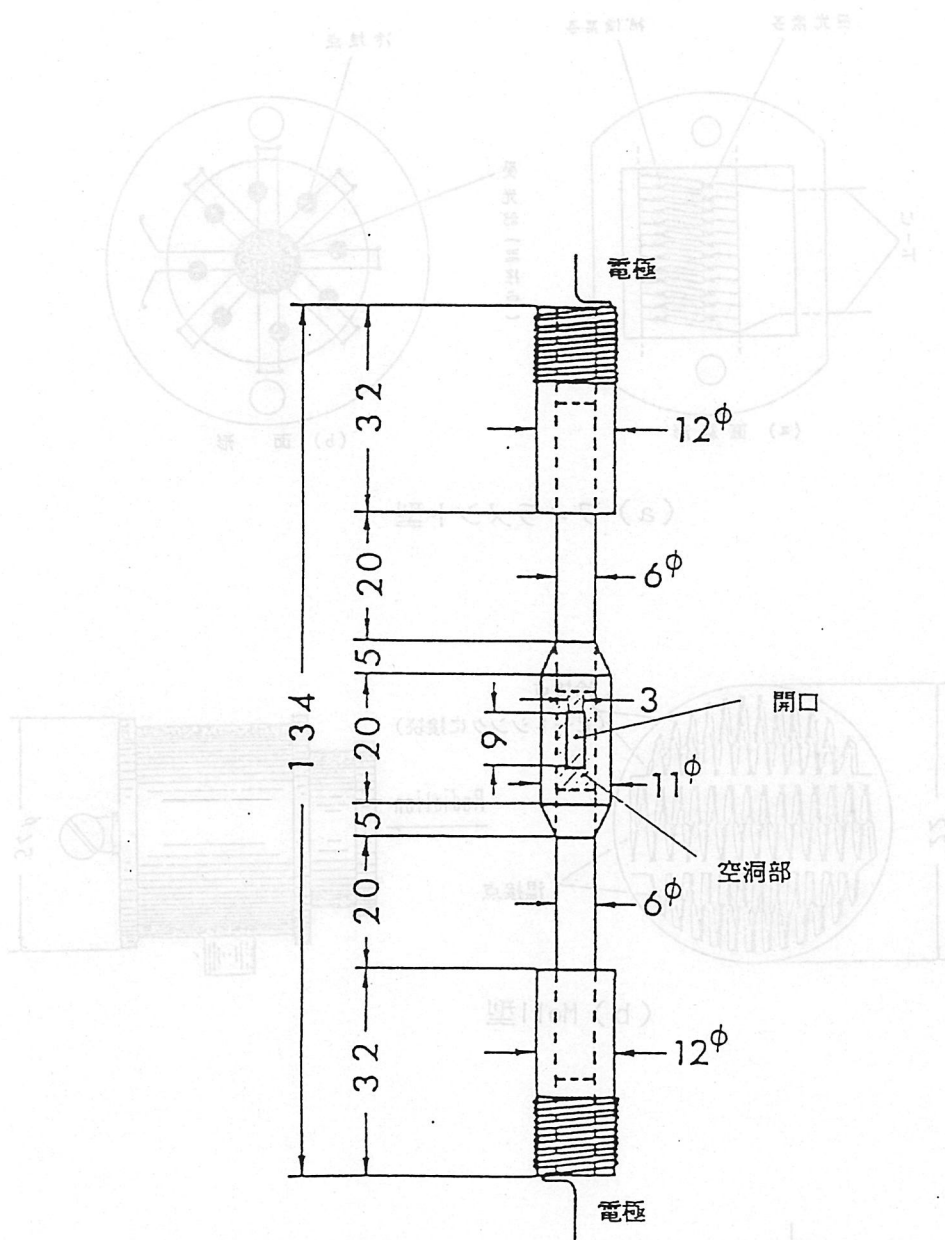


図2 絶対放射計の構造例



数字は寸法 (単位mm)

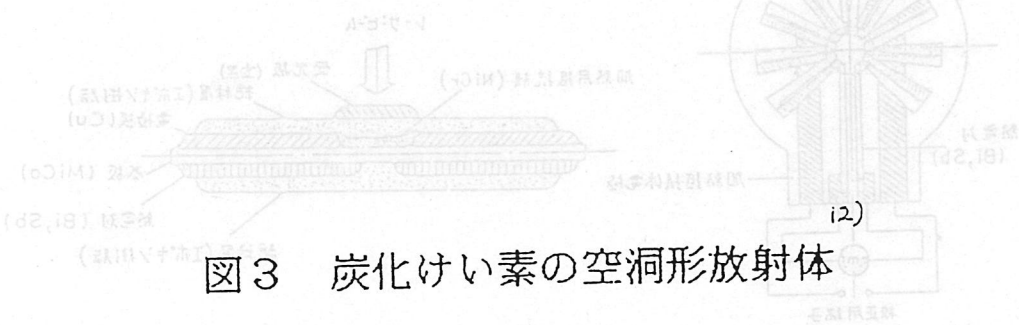
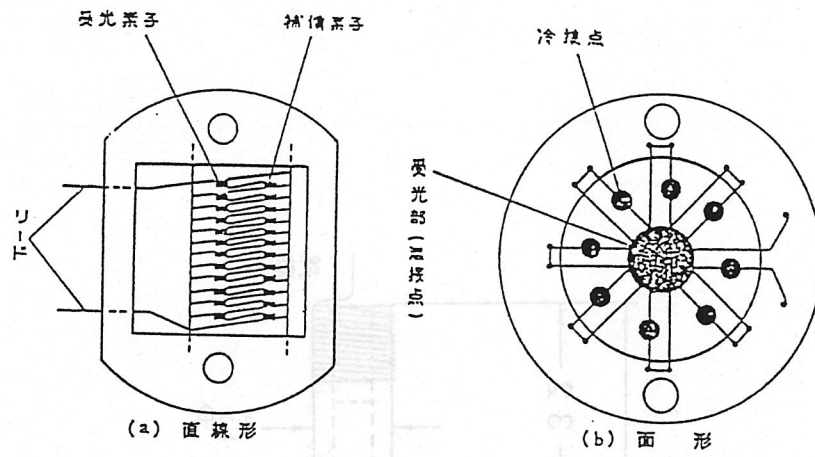


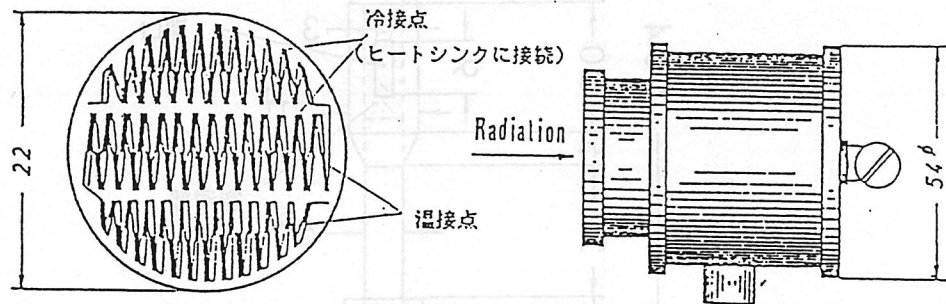
図3 炭化けい素の空洞形放射体

(友研特機炭化炭) 聖徳新書系 (c)

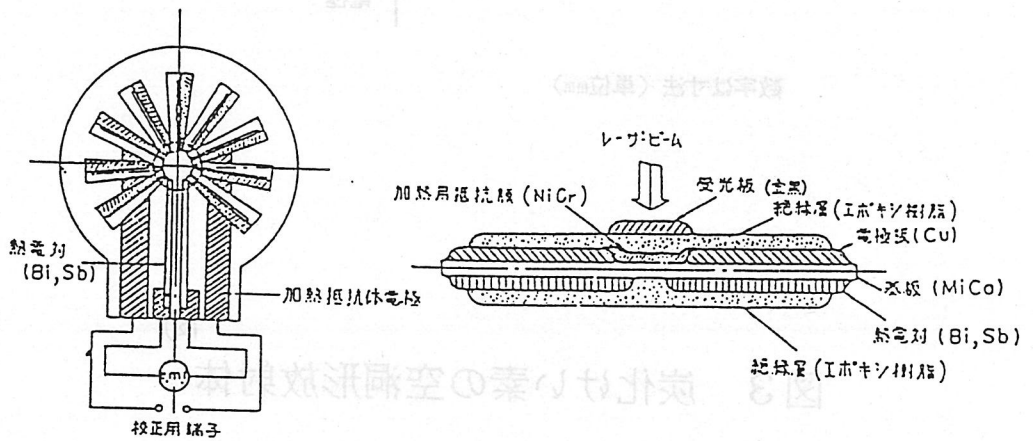
図4 サーチルの構造の概略



(a) フィラメント型

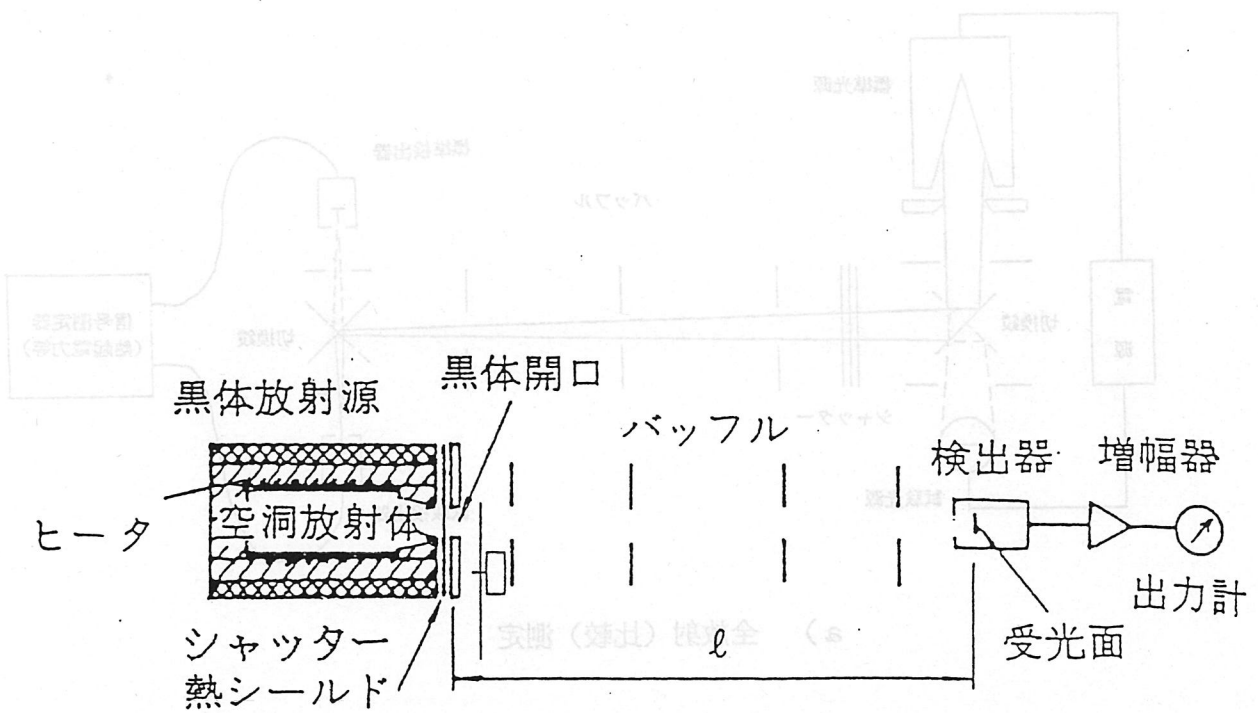


(b) Moll型

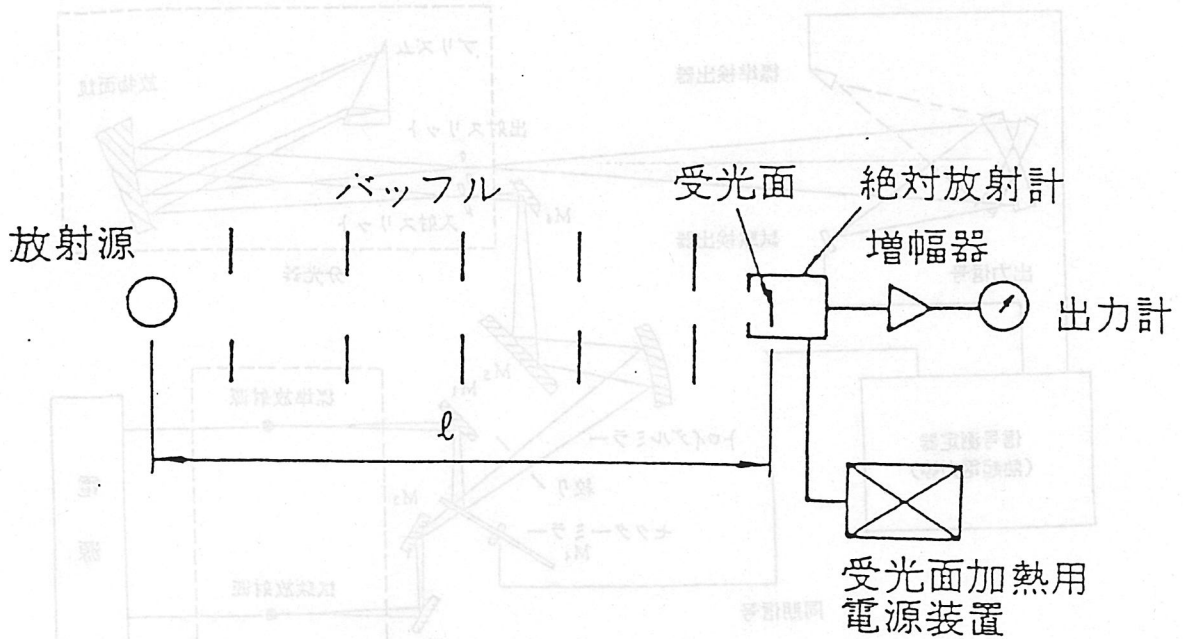


(c) 蒸着薄膜型 (絶対放射計形式)

図4 サーマピルの構造例



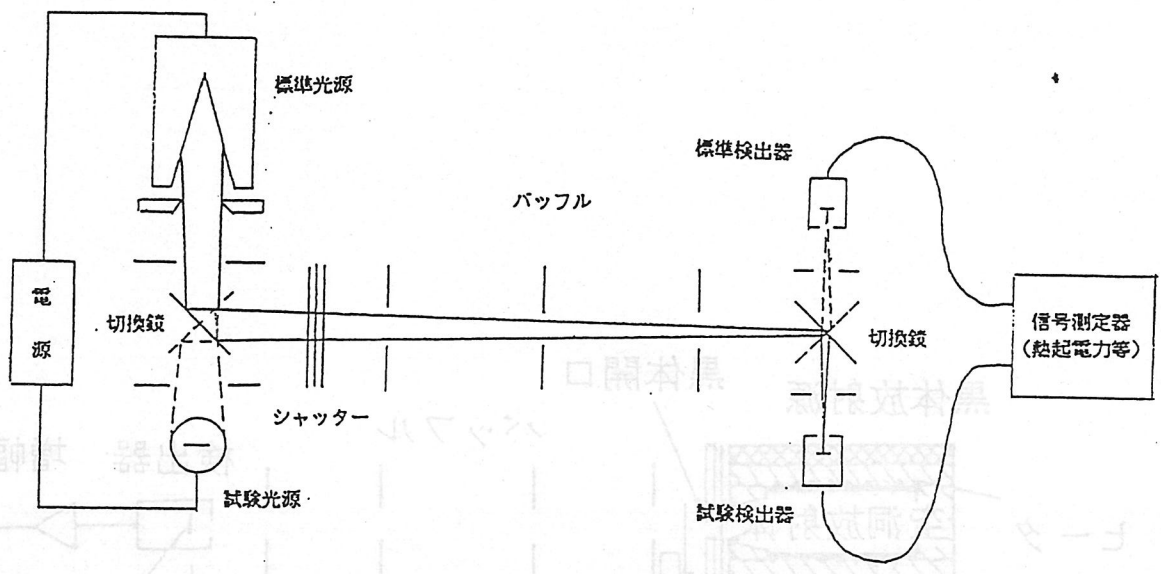
(a) 黒体放射源を用いた放射測定系



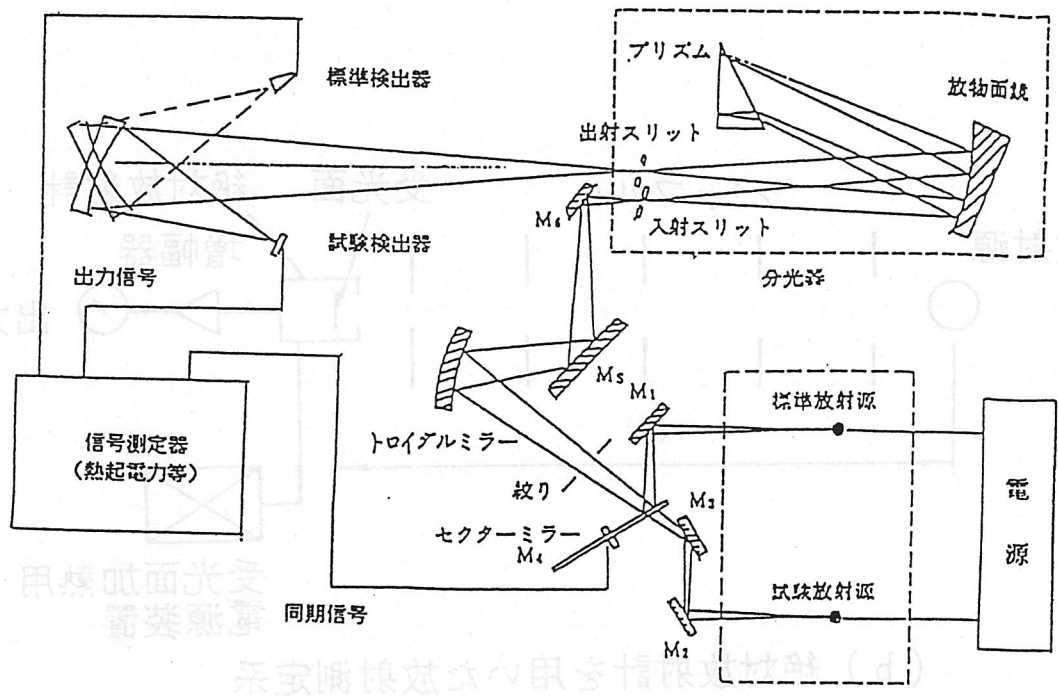
(b) 絶対放射計を用いた放射測定系

図5 基本的な放射測定系

(電熱No.22 1985 p-40より)



a) 全放射 (比較) 測定



b) 分光放射 (比較) 測定

図6 放射の比較測定系の例

3. 2

遠赤外放射検出器

1. ま え が き

従来から照明学会が扱ってきた光という概念は、いままでもなく可視光で、見えない光はその範ちゅうになかった。しかし最近の技術の進歩により、可視光の周辺領域である紫外放射、赤外放射も含めて、光放射 (Optical Radiation) という言葉で代表し、その作用効果を利用した応用技術が開発されてきた。

この特集では、最近話題を呼んでいる遠赤外放射に焦点を合わせ研究動向を紹介することになった。特にそのセンサは半導体技術の進歩により、従来のサーミスタ、サーモパイルなどの熱形センサに較べて遙かに優れた特性をもつ半導体を用いた量子形センサの開発が行われ、技術革新の推進役になっている。ここでは主として新しい量子形センサについて触れたい。

2. 赤外センサ

現在用いられている赤外センサは、熱形と量子形に大別される。熱形センサはサーミスタ、サーモパイル、焦電センサのように、赤外放射のエネルギー吸収による温度上昇を利用しているのに対して、量子形センサは赤外放射を光子 (Photon) として考え、光子入射による半導体中の電子正孔対の生成を利用しているため、検出原理を全く異にしている。したがって、そのセンサ特性は表1のように大きな相違があるので、その用途に応じて選択する必要がある。熱形センサは室温で使用でき、波長選択性がないので、分光器のセンサに適している。量子形センサは感度が

表1 量子形センサと熱形センサの特性上の相違点

項 目	量 子 形	熱 形
波長応答特性	選択性強い	平坦
感 度	高 い	低 い
応 答 速 度	速 い	遅 い
使用温度	冷却必要	室 温
価 額	高 価	安 価
使 用 例	PbS, InSb, HgCdTe 等	サーミスタ サーモパイル 焦電形センサ

† Description and Properties of the Far Infrared Sensors.

* 東京工科大学工学部情報工学科

Wataru Miyao

〒192 八王子市片倉町1404-1

高く、応答も速いのでリアルタイムで赤外パターンをとらえる赤外カメラのセンサとして開発が進められている。ここでは現在赤外カメラなどに用いられている量子形の半導体赤外センサについて述べることにする。

3. 半導体赤外センサの種類

赤外線エネルギー E は光と同様にその振動数 ν に比例して大きく、波長 λ が長いほど小さい。これをエネルギーギャップ E_g の半導体センサで受けるとき、 $E > E_g$ ときに半導体中に電子正孔対ができて信号が発生する。 h をプランク定数、 c を光速とすると、

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} > E_g \dots \dots \dots (1)$$

となり、感度がなくなる最長波長を遮断波長 λ_c といひ、定数 hc を計算すると、

$$\lambda_c (\mu\text{m}) = \frac{1.24}{E_g (\text{eV})} \dots \dots \dots (2)$$

したがって半導体のエネルギーギャップ E_g が決まれば長波長側はどこまで感度のあるセンサであるか決まる。代表的なセンサ材料の例を図1に示す。

さらに材料面から分類すると、赤外線により励起された電子が直接伝導帯に飛び上がる Intrinsic 形と、不純物準

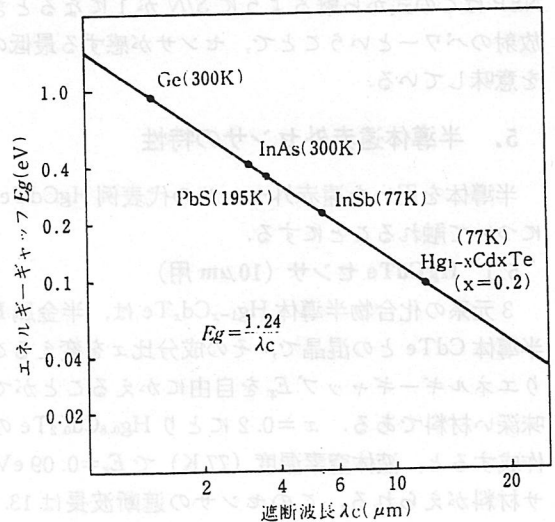


図1 半導体赤外センサの遮断波長 λ_c とエネルギーギャップ E_g の関係

位から電子が飛び上がる Extrinsic 形とがあり, InSb や HgCdTe は前者に属し, 温度によりエネルギーギャップが変化するので波長特性が変わる. これに対し Ge に不純物として Au, Hg, Cu などドーピングしたものは後者に属し極低温に冷やし長い波長のセンサとして使用される.

つぎに構造上から分類してみると, 光電導形 (Photoconductive: PC 形) と光起電力形 (Photovoltaic: PV 形) およびショットキ形 (Schottky) がある. PC 形は薄膜の抵抗体で光入射による抵抗変化を利用しているのに対し, PV 形は pn 接合ダイオードの接合部に光が入射することにより起電力が発生する構造になっている.

4. センサの特性評価法

遠赤外放射のエネルギーは可視光と比べて極めて弱いので S/N を大きくすることは困難で, 低レベル計測の高度な技術が要求される. ノイズも電子回路のほかに赤外線背景ノイズも加わり両面のシールドを完備しなければならない.

入射赤外放射を光チョッパーでパルスに変えてセンサの受光面に一樣にあてる. チョッピング周波数 f_c に同期してロックインアンプにより増幅しノイズを除去する.

受光面積 A_d (cm^2) のセンサに, P (W) のパワーの赤外線が入射し S (V) の出力が得られたとき, その感度 R (V/W) は次の式で求まる.

$$R(\lambda, f, \Delta f) = \frac{S}{P} \text{ [V/W]} \dots \dots \dots (3)$$

一般にセンサを総合的に評価するのに, 比検出能 D^* が用いられている. これは感度/ノイズ比をセンサの受光面積とアンプのバンド幅 Δf で標準化したものである.

$$D^* = \frac{R}{N} (A_d \cdot \Delta f) \text{ [cm} \cdot \text{Hz/W]} \dots \dots \dots (4)$$

さらに赤外線システム設計上重要なものとして, ノイズ等価パワー (NEP) というのがある.

$$\text{NEP} = \frac{P}{(S/N)} \text{ [W]} \dots \dots \dots (5)$$

NEP はこの式から解るように S/N が 1 になるときの赤外放射のパワーということで, センサが感ずる最低のレベルを意味している.

5. 半導体遠赤外センサの特性

半導体を用いた遠赤外センサの代表例 HgCdTe と InSb について触れることにする.

5.1 HgCdTe センサ (10 μm 用)

3 元系の化合物半導体 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ は, 半金属 HgTe と半導体 CdTe との混晶で, その成分比 x を変えることによりエネルギーギャップ E_g を自由にかえることができる興味深い材料である. $x=0.2$ にとり $\text{Hg}_{0.8}\text{Cd}_{0.2}\text{Te}$ の混晶を作成すると, 液体窒素温度 (77 K) で $E_g=0.09 \text{ eV}$ のセンサ材料がえられる. このセンサの遮断波長は $13.8 \mu\text{m}$ になるが感度のピーク波長は $10 \mu\text{m}$ 付近になる. $x=0.3$ の

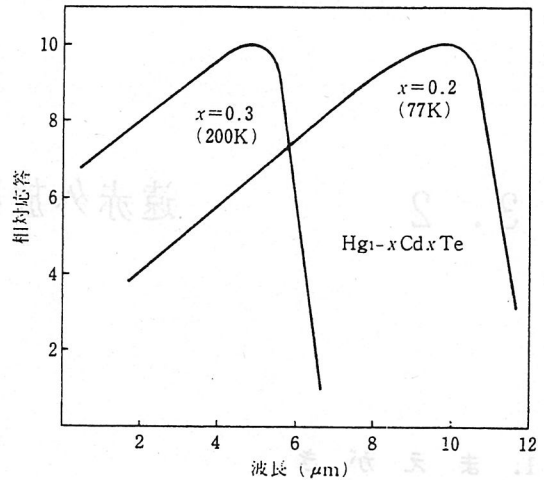


図 2 成分比 x による $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ センサのスペクトル応答の変化

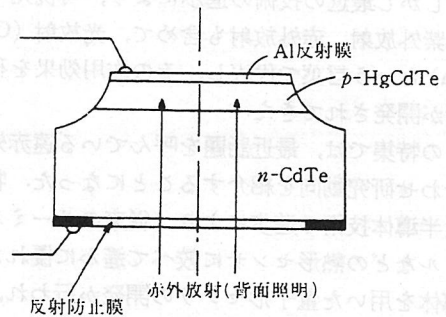


図 3 HgCdTe/CdTe ヘテロ構造の半導体赤外センサの構造

ものと, そのスペクトル応答特性を図 2 に示す.

特に量子効率の高い赤外センサを得るためには, センサ材料の純度が高く結晶性が良くキャリア濃度が小さく, キャリアの移動度が大きいことが要求される. 一般にはブリッジマン炉で十分時間を掛けて, 結晶成長時の温度の均一性を計り作成するが¹⁾, 最近では CdTe 上にエピタキシャル層を形成させ HgCdTe/CdTe のヘテロ構造のものができている. そして図 3 のように赤外線を基板 CdTe 側から入れる背面照射形のものが多い.

$\text{Hg}_{0.8}\text{Cd}_{0.2}\text{Te}$ センサは室温付近の物体からの赤外放射に感度が高く, 気象衛星, 資源探査などのリモートセンシングや人体の温度分布をとる医用の赤外カメラのセンサに最適である.

5.2 InSb センサ (5 μm 用)

インジウムアンチモンは液体窒素温度 (77 K) で, 0.23 eV のエネルギーギャップをもつ III-V 族の化合物半導体で, $5.5 \mu\text{m}$ に遮断波長をもち産業用の赤外カメラのセンサに適している.

センサの構造は, プレーナ形の pn 接合ダイオードが普通で, 表面の p 形層で赤外放射が吸収され, 量子効率があがりやすかった. この点を改善した n^+p 構造のセンサが開発された. キャリア濃度の低い p 形 InSb ($p = 1 \times 10^{13}$

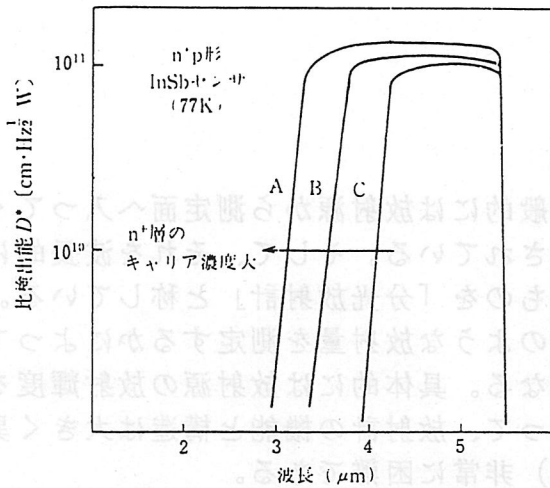


図4 n層のキャリア濃度を変えたときのn+p形InSbセンサのスペクトル応答特性

cm^{-3})の上に液相成長により、キャリア濃度の高いnのエピタキシャル層を作りnp形接合ダイオードを形成する。このn層のキャリア濃度を制御することにより特定の波長領域の赤外放射に対して透明になることが知られている²⁾。例えば $n = 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ に選べば、波長 $3 \mu\text{m}$ から $5.5 \mu\text{m}$ までの赤外線は表面のn層で殆ど吸収されることなく接合に到達するので極めて高い感度のセンサが作成できる。n層のキャリア濃度を変えて試作したセンサのスペクトル応答特性を図4に示す。このようなバンドパス特性をもつ高感度センサとなる³⁾。

6. 赤外 CCD

現在、普通に市販されている赤外カメラは、単一素子のセンサに光学走査で画像化しているものが多いが、リアルタイムの動画をとらえることは困難である。そこで可視のCCDカメラのように、赤外放射のCCDをつくり光学走査不用の高速応答のカメラが開発されるようになった。赤外CCDにはハイブリッド形とモノリシック形の2種類あり、実用の段階に入ってきた。

6.1 ハイブリッド形赤外 CCD

センサに HgCdTe, InSb (77 K) を用い、信号処理を Si の CCD (300 K) で行うのが合理的な使い方であるが、素子数が多くなると中間接続が大変で、その部分でのトラブルが問題になる。比較的信頼性の高い方法として図5のように、Inパッドを用いてセンサ部と画像信号処理部をつなげた例がある。背面照射形の InSb CCD で 64×64 素子のものが開発されている⁴⁾。

6.2 モノリシック形赤外 CCD

センサと信号処理部を一体化しワンチップで作るもので、最近の開発の主流になりつつある。その代表例として

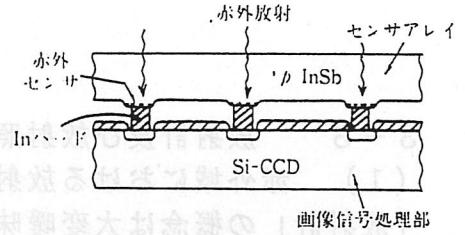


図5 ハイブリッド形赤外 CCD

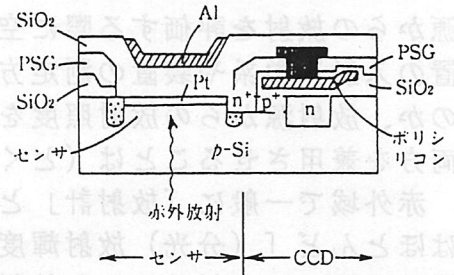


図6 Pt-Siショットキ障壁形赤外 CCD

は、PtSi ショットキ障壁 CCD がある。図6のように背面照射形で、Ptとp形Siの接合部で電子正孔対を作り、信号を隣の CCD へ送り込む、本来 Si は赤外放射の吸収は少ないので感度を上げるためセンサ上部に赤外放射の反射膜をそなえている。これで 512×512 画素のものを作り赤外カメラを製品化している⁵⁾。

7. まとめ

次世代先端技術の一つである光技術は、照明学会の重要な研究分野であり、不可視情報である赤外線の利用はこれからの課題として採り上げていかねばならない。その目玉であるセンサは半導体技術の高度化に伴い、単一素子から多素子化へ大きな進展をみせてきた。しかし依然として材料の問題は多くあり、バイオなど未知の分野への挑戦も益々原点に戻って基礎研究の必要性を痛感している。

参考文献

(宮尾)

- 1) 宮尾亘ほか：CdHgTe 赤外線検出器，東芝レビュー，2 (1972) 157-161
- 2) O.V. Kosogov and M.A. Maramjima : Photodiodes with or the n-type Filter Layer, Soviet Phys. Semicon. 3 (1970) 1467-1469
- 3) W. Miyao et. al. : High Detectivity InSb Infrared Detectors, Toshiba Rev., 96 (1975) 29-33
- 4) 白水俊次ほか：背面入射形 InSb フォトダイオードの赤外特性，赤外線技術，11 (1986) 25-30
- 5) 伝出，木股，油谷，坪井：512×512画素シリコンショットキ赤外イメージセンサ，赤外線技術，15 (1989) 12-18

3-3 放射計及び放射照度計

(1) 赤外域における放射計の概念

「放射計」の概念は大変曖昧であつて、一般的には放射源から測定面へ入ってくる放射パワーの量を定量的に評価する装置とみなされている。そして、それを波長的に分解して分光的な放射量が測定できるようにしたものを「分光放射計」と称している。放射源からの放射を評価する際に空間的に見てどのような放射量を測定するかによつて、装置の入射光学系や装置の測定方法は大きく異なる。具体的には放射源の放射輝度を測るのか、放射源からの放射照度を測るのかによつて、放射計の機能と構造は大きく異なり、両方を兼用させることは（とくに赤外域では）非常に困難である。

赤外域で一般に「放射計」と称されて市販されているもの、（特に分光方式のもの）はほとんど「（分光）放射輝度計」と考えられる。すなわち、何らかの結像系を用いた集光光学系を入射系とした放射量の測定器である。放射温度計なども輝度計形放射計の一種と見ることが出来る。要するに「放射輝度計」は放射体の（放射）面のある部分から発散する放射の量、あるいはそれによつて決まる放射面の温度など、を測る装置である。これに対して「放射照度計」は、測定器の受光面が置かれた位置へ放射体の全体から入ってくる放射の量、あるいはそれによつてもたらされる受光面の温度の上昇などを測る装置である。したがつて、「放射輝度計」は、放射を発生する放射体それ自身の特性が必要な場合（放射面の性能の評価、リモートセンシングによる物体一温度の異なる一の識別など）に有効であるが、放射体から受光面に入る放射の量、例えば、ヒーターによつて加熱される面に入る放射の量やヒーターの種類による人体の温感の相違などの測定には不適當であつて、これらは「放射照度計」を用いなければ測定できない。

これらの放射計のうちで、分光的なもの、とくに分光放射輝度を測定する装置については、第4章で詳しく述べられるので、本節では省略することとして、以下に放射照度計形式の装置について述べることにする。

(2) 赤外域で放射照度を測定するときの問題点

まず、赤外域（とくに遠赤外域）の放射照度測定では、可視および紫外域の放射照度測定とは異なつて、「暗入力＝入射なし」の概念が成立しない。つまり、測定のゼロ点を一義的に決定することができないのである。例えば熱形の検出器を用いた測定器では、受光面と同温の物体からの放射をゼロとみなし、それ以外の物体からの放射には正又は負（低温物体のときは負になる）の出力を示す。したがつて、ある放射体からの放射を測る場合、そのバックグラウンドの温度が受光面と同温でない限り、受光器の視野の中にある全放射の総和が入射される。それ故、比較的低温の小物体からの放射照度を測定する場合は、視野が広いとバックグラウンドの放射成分（一種の迷光と考えてよい）が増加して誤差となるので、測定の目的に応じて視野角を調整し、かつ、何をゼロとするのかをあらかじめ決めておかなければならない。但し、入射角を制限した状態でも、その角度範囲で入射角特性が余弦則に従うことが必要である。

次に、赤外域では波長域によつて大気中の水蒸気 H_2O 及び二酸化炭素 CO_2 による吸収があるので、放射照度の測定にはその補正が必要になる。 H_2O 及び CO_2 の吸収に関するデータは、リモートセンシング用などの野外の大距離（100m以上）については十分詳しいものが発表されている。¹⁾ ²⁾しかし、室内での数m程度の値はほとんど発

表されていない。数m以下の距離でも、波長1.4, 1.9, 2.6~2.7, 5.8~6.0, 6.2~6.6 μm (H_2O), 4.2~4.3 μm , 13~15 μm (CO_2) などの吸収は相当大きく、室温、相対湿度60%程度の雰囲気、距離1m程度でも、2.6~2.7 μm での吸収は最大30%、4.2~4.3 μm では最大60%、5.8~6.0, 6.2~6.6 μm では50%以上になると思われる。³⁾ ⁴⁾したがって、これらに対する補正を行う必要が生ずる(これは放射照度計自身の問題と云うよりは、むしろ標準放射源を用いて校正を行うときの問題である。但し、放射照度計が波長選択性を持っていて、校正用放射源とかなり分光放射特性の異なる放射源を測定するときには、放射照度計自身に対する補正となる)。 H_2O の補正量は空気中の水蒸気の絶対量で決まるので、湿度、相対湿度及び距離についての変数になる。 CO_2 は地表では距離だけを考えればよいようである。

放射照度計(分光的でない)の分光応答度をどのように考えるかも重要な問題であるが、放射照度計の使用目的が主として赤外放射の熱作用の評価にあると考えれば、波長的にはできるだけ平坦でかつ有効波長域も広い方がよいと思われる。したがって、検出器は熱形のものを用いて、窓材を適当に選択する。例えば、長波長の限界が8~9 μm なら CaF_2 、12 μm 程度なら BaF_2 、17 μm 位なら ZnSe 、30 μm 以上なら KRS-5 などである。

(3) 放射照度計の実際例

放射照度の測定は集光系を使用しないで、入射角の範囲で入射角特性を余弦則に近似させなければならないため、入射光学系の効率が低くなって受光面に取入れられる放射の絶対量は、輝度計形式の場合に比べて相当低下する(1~2桁下る)。したがって、スリット形の分光器による分光放射照度測定器は一般には実現困難である。フーリエ変換形分光器は入射量の点で有利であり、「分光放射計」としての市販品もあるが、厳密な意味で放射照度を評価できる段階のものできていないようである。ここでは、「全放射」(広い地域の波長的積分量)検知形のもの例を示す。

a) サーモパイルを用いたもの⁵⁾

図3-3-1にサーモパイルを用いたものの外観を示す。素子としてマンガニン・コンスタンタン熱電対を用いて白金黒化受光面を使用している。装置の使用目的は室内の熱環境の評価(照明器具の効果など)であるため、入射角特性は広い範囲で余弦則に近似させている。窓はポリエチレンフィルム(厚さ30 μm)で、波長3 μm 、7 μm 附近に若干の吸収があるが、50 μm 附近まで十分よい透過を示している。ゼロ点浮動をさけるために熱的な時定数をかなり大きくとって、90%指示に達する時間は6秒、99%では160秒を必要とする。応答度は、0.32 mV/mW/cm²である。

b) 焦電形素子を用いたもの⁶⁾

焦電形素子を用いた放射検出器は交流動作であるため、応答速度を速くできて、ゼロ点のドリフトも少ない利点がある。しかし、チョップなどの入射光断続機構を必要とするため、構造が複雑になり入射角も狭くなるのが欠点であり、放射照度測定には不都合である。この欠点を解消する手段として、断続機構として視野角を広くとれるカメラのシャッターを利用して、単発(パルス)入射を与えて放射照度を測定する装置がa)と同様の目的のために試作された。装置の構成と各部の信号波形を図3-3-3, 4に示す。

断続入射は焦電素子によって微分応答信号として検出されるので、これを交流増幅、同期整流してから積分して入射と比例した出力を得る。焦電素子の黒化は有機材で、窓はポリエチレンである。シャッタ使用による入射角特性の低下を補正するためにZnSeの砂ずり拡散面を使用している。応答速度は0.8秒以下で、応答度は、

2. 8 mV/mW/cm^2 (増幅器付き) である。等価雑音入力 (NEI) は $8 \mu\text{W/cm}^2$ 程度、したがって実用最小入力 0.24 mW/cm^2 程度である。

(中川 靖夫)

3-3 の文献

- 1) H.L.Hackforth, 和田、中野訳: 赤外線工学 P59~65 (1963) 近代科学社
- 2) M.A.Bramson: Infrared radiation P603~612 (1968) Plenum Press N.Y.
- 3) 中川、大谷、谷治: 近赤外域での大気の吸収の評価、平1 照学会全国大会 93
- 4) 中川、大谷、谷治: 近赤外域での大気の吸収の評価(2)、平2 照学会全国大会 115
- 5) 森田政明: 放射照度計の試作 昭51 照明学会全国大会 74
- 6) 谷治環ほか: 赤外放射照度計の開発 照学誌 74-2 (1990), 72~79

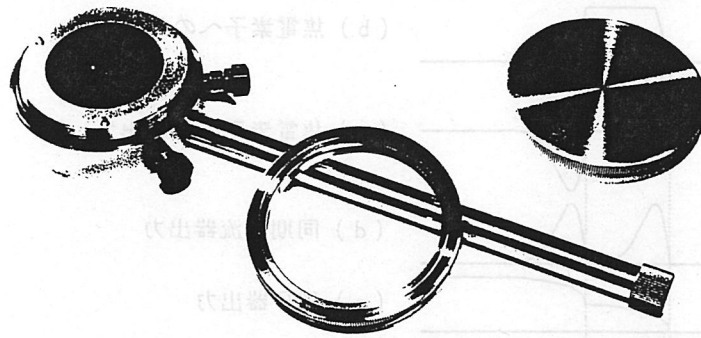


図 3-3-1 サーマパイル型放射照度計

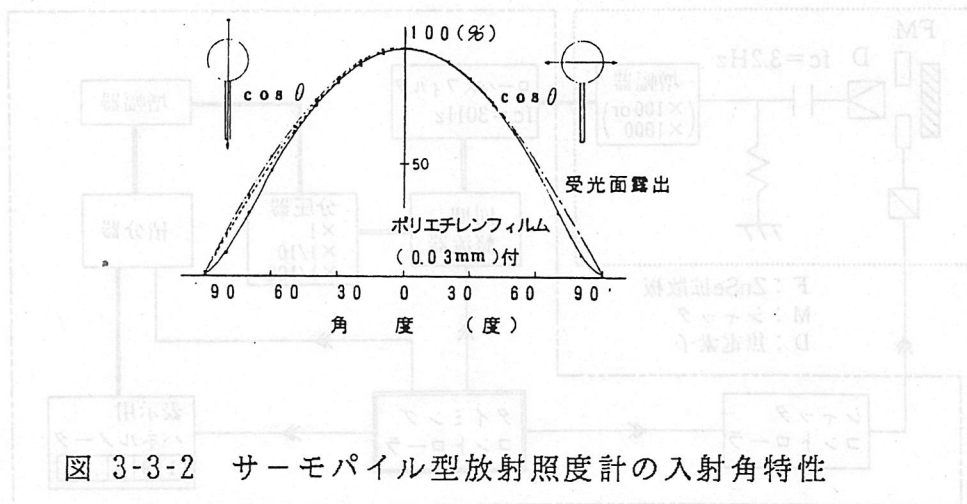


図 3-3-2 サーマパイル型放射照度計の入射角特性

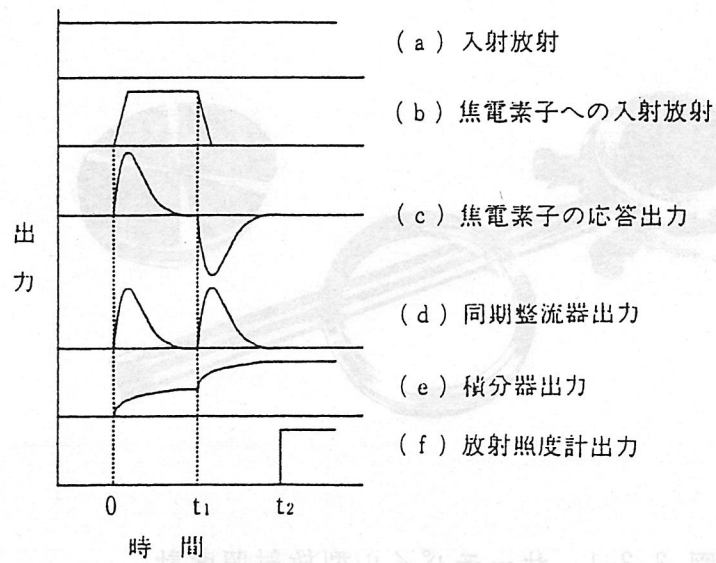


図 3-3-3 焦電型放射照度計の動作原理

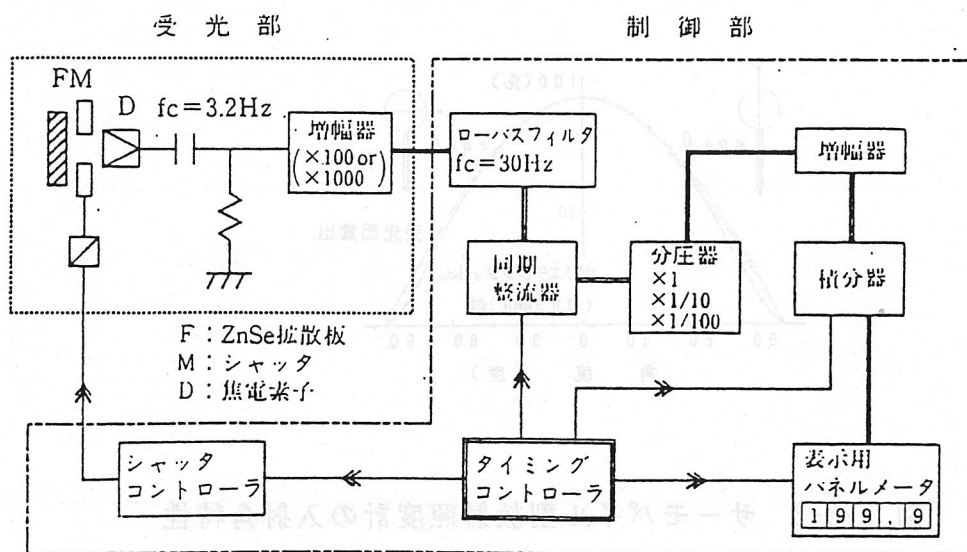


図 3-3-4 焦電型放射照度計の回路構成

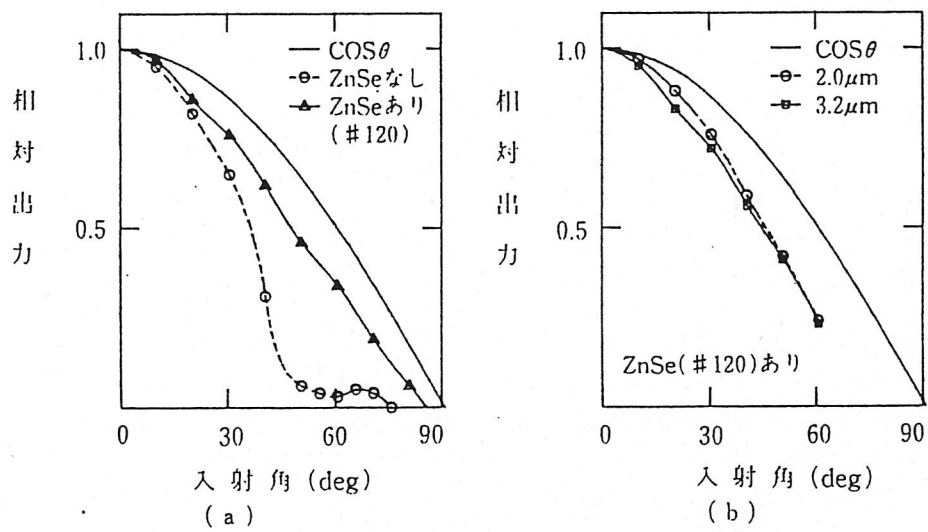


図 3-3-5 焦電型放射照度計の入射角特性

第4章 分光放射測定と測定装置

4. 1 分光放射測定

4. 1. 1 はじめに

われわれの周囲の環境を形成している物体は、自然物あるいは人工物を問わずすべて温度放射体であり、ごく一部のもの（火山、煙突など）を除いて常温の放射体である。このような常温物体からの放射、すなわち微弱遠赤外放射は、これまでの赤外線探知、探査、気象放射学、建築環境学以外の分野では殆ど問題にされることはなかった。ところが、最近民生用遠赤外線応用製品として種々のものが市販され、また放射冷房に多くの関心が向けられるようになってきて、これらの効果を検討し、立証するためにも微弱遠赤外線放射の測定法の確立が要望されている。

ここでは、微弱放射の分光測定法として利用されている2種の赤外線放射計¹⁻³⁾、すなわち超低温基準放射源を用いた分光放射計および常温チョッパと焦電型赤外線検出器を用いた帯域放射計について述べてみたい。

最近、ようやく実用期に入ったフーリエ分光法も、350 K以下の常温放射体を対象にする場合は背景放射（環境放射）の影響を無視することができず、この問題の解決にはなお若干の時日が必要であり、別の機会にゆずることにする。

なお、最近分光放射率を分光放射特性と同義に用いている例が少なくない。しかし、分光放射エネルギーの分光分布を意味するものであって、温度放射（熱放射）のみでなく、放電灯やLEDなどのルミネッセンス（冷放射）をも含めて表現されるものでなければならない。ある物体の放射率 ϵ は波長と温度の関数 $\epsilon(\lambda, T)$ として表されるのが正しいが、多くの場合温度依存性が小さいことから省略して表している。これが一部で常温物体間でも放射率さえ高ければ赤外放射があるという誤解を生み、近年の常温遠赤外線応用製品が氾濫する原因になったと考えられる。

4. 1. 2 遠赤外放射測定の特異性

遠赤外放射の測定も紫外～近赤外放射の場合と原理的には何ら異なるところはない。特に、1000 K以上の高温の放射体の場合は実際の測定においても殆ど同様に扱うことができる。しかし、放射体温度が低下するにつれて環境放射が無視できなくなる。

はじめに述べた通り、測定対象物を含む周囲の環境を構成するすべての物体は温度放射体であるが、対象物が高温の場合にはこれらの環境放射を無視することができる。これに対して低温物体の放射測定においては環境放射が無視できない上に対象物からの放射エネルギーが小さいことが測定を一層困難にしている。これを解決する方法には測定対象と十分な温度差をもった基準放射源を用いる方法、または高利得光学系、高感度検出器、および高利得増幅器を用いる方法などが考えられる。

ここで、遠赤外放射の測定を困難にしている2~3の具体例をあげてみる。

(1) 赤外域 特に3 μ m以上の遠赤外域では、被測定光源の周囲の物体(壁天井、床、空気など)からの放射はすべて背景放射(環境放射)として測定誤差の大きな原因になる(特に300 $^{\circ}$ C以下において)。従って遠赤外域では通常の暗室は無意味であり、また真の暗室は実現不可能である(5.5参照)。

(2) 赤外域では、電波領域の信号発生器のように、任意の波長および出力の信号が容易に得られる装置がない。可視~近赤外で用いられる電球も、3 μ m以上の波長域ではガラス球の吸収のために光源としては使用できない(赤外線電球も同様)。したがって3 μ m以上の長波長域での標準光源は、黒体炉と呼ばれる空洞形の放射体のみが実用的な標準光源であって、その出力の制御は開口面積と温度を変えて行っているのが現状である。

(3) 通常の光学系(可視 紫外域用)の多くは素材ガラスであり、動作波長限界は近赤外(約3 μ m)までであって、遠赤外域ではGeレンズや表面鏡(金属面、表面メッキ鏡)などが必要である。フィルタも可視域のものと比較して特性が悪く、高価である。波長範囲が広く、光学系も検出器も一種類の素子で赤外全域をカバーできないことが多い。このことはまた遠赤外域が他領域に比して開発が遅れていることを物語るものであって、現在でもこの分野の研究者・技術者は自作の測定器を使用している例が少なくない。不可視光であることにこれらのことが重なって、より一層測定しにくくしているといえよう。

4. 1. 3 超低温基準放射源を用いた遠赤外放射の測定法

紫外・可視・近赤外域の放射測定系においては、一般に常温チョッパを用いて入射光を断続している。この場合チョッパ・ブレードが零放射(基準放射源)として動作している。しかし、測定対象が中・低温の場合には十分な感度が得られない。そこで測定系の感度を高め、さらに基準放射源を安定化するために図4.1.1に示す超低温基準放射源とミラー・チョッパを備えた測定系を考えてみる。

同図において熱形赤外線検出器の受光面温度を T_D (室温)、基準放射源の温度を T_1 、被測定放射体の温度を T_2 として、これらが $T_1 < T_D < T_2$ の関係にあるものとする。ここでミラー・チョッパにより基準放射源あるいは被測定放射体からの放射が交互に検出器に入射し、交流信号として出力されるものとすれば、このときの出力電圧 V_0 は

$$\begin{aligned} V_0 &= [\{ N_s(T_2) - N_D(T_D) \} - \{ N_b(T_1) - N_D(T_D) \}] K \\ &= \{ N_s(T_2) - N_b(T_1) \} K \end{aligned} \quad (1)$$

$N_s(T_2)$: 温度 T_2 の被測定放射体の放射輝度
[$mW \cdot cm^{-2} \cdot sr^{-1}$]

$N_D(T_D)$: 温度 T_D の検出器受光面の放射輝度
[$mW \cdot cm^{-2} \cdot sr^{-1}$]

$N_b(T_1)$: 温度 T_1 の基準放射源の放射輝度
[$mW \cdot cm^{-2} \cdot sr^{-1}$]

K: 装置定数 (視野, 有効面積, 検出器感度, 増幅度等)

で表される。すなわち T_2 と T_1 の温度差に基づく放射エネルギーの差に対応した出力がえられることになる。

ここで, $N_s(T_2) \gg N_b(T_1)$ の条件を満たしておれば $N_b(T_1)$ を無視することができるから絶対測定が可能になる。すなわち, この方法は基準放射源の温度 T_1 を T_2 よりも十分低くすることで容易に実現できる。

いま, 測定時の許容誤差が 5% 程度であれば

$$T_1 < T_2 / 2 \quad (2)$$

0. 4% 以下の場合には

$$T_1 < T_2 / 4 \quad (3)$$

とすればよい。たとえば, 被測定放射体の表面温度が 300°C 以上の場合は上記 (2) を適用して $T_1 = 0^\circ\text{C}$ (氷と水) とすることにより, また常温付近の場合には (3) を適用して $T_1 = 77\text{K}$ (液体窒素温度) とすることにより, それぞれの許容誤差内で測定が可能である。

上にあげた寒剤は比較的安価で入手しやすく, 取扱いが平易である。また, このような寒剤を使用することにより一定温度の基準放射源が得られる。ただし, これらの低温放射源の使用時には放射面に霜または露が付着するから容器として Dewar を用いて液面とするのが最適である。

4. 1. 4 中・低温放射体用分光放射計

前節で述べた低温基準放射源とミラー・チョッパを用いる放射測定法に分光器を加えて構成した中・低温放射体用分光放射計を図 4.1.2 に示す。同図において校正用黒体放射源と被測定放射体の面積は等しいものとする。いま, 温度 T_2 の被測定放射体の波長 λ における分光放射輝度を $N_s(\lambda, T_2)$ とし, 温度 T_1 の基準放射源の同一波長における分光放射輝度を $N_r(\lambda, T_1)$ とすればその時の出力電圧 V_s は

$$V_s = \{ N_s(\lambda, T_2) - N_r(\lambda, T_1) \} K \quad (4)$$

で表される。ただし, K は集光光学系を含めた分光放射計の装置定数である。同様にして

校正用黒体炉に対する出力電圧 V_b は

$$V_b = \{ N_b(\lambda, T_2) - N_b(\lambda, T_1) \} K \quad (5)$$

で表される。いま $T_2 \gg T_1$ であるから $N(\lambda, T) \gg 0$ と見なせば上の 2 式はそれぞれ

$$V_s = N_s(\lambda, T_2) K \quad (6)$$

$$V_b = N_b(\lambda, T_2) K \quad (7)$$

$$N_b(\lambda, T_2) = C_1 \lambda^{-5} \cdot [\exp(C_2 / \lambda T) - 1]^{-1} / \pi$$

[$\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$] (Planck の法則)

C_1, C_2 : 第 1, 第 2 放射定数

となる。従って (6), (7) 式により被測定放射体の分光放射輝度 $N_s(\lambda, T_2)$ は

$$N_s(\lambda, T_2) = V_s / K \quad [\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}] \quad (8)$$

で求められる。また被測定放射体の分光放射率 ϵ_s は定義通り

$$\epsilon_s = N_s(\lambda, T_2) / N_b(\lambda, T_2) \quad (9)$$

より算出することができる。

なお、この分光放射計の分光装置は赤外分光光度計（複光束、格子形）を転用し改造した。

4. 1. 5 焦電形検出器を用いた帯域放射計

一般に赤外線ヒータの応用装置の設計においては詳細な連続スペクトルは必要でなく、多くの場合に帯域放射特性を用いても実用上支障がない。中・低温放射体であっても適当な帯域幅を設定して、十分な入射放射束がえられるように工夫すれば簡単な構成の放射計で帯域放射特性を測定することができる。ここで開口面積の大きい集光光学系（表面蒸着形凹面鏡）と高感度検出器を用いた図4.1.3のようなフィルタ形放射計を検討してみる。このシステムでは室温のチョッパ（黒化処理したもの）が基準放射源を兼ねることになり、その温度の変動が問題になるような場合には図4.1.2のようなミラー・チョッパと一定温度の基準放射源を用いねばならない。いま図4.1.3において通常室温チョッパを用いた場合の出力電圧 V_s は

$$V_s = K \{ N_s(T_1) - N_c(T_r) \} \quad (10)$$

$N_s(T_1)$: 温度 T_1 の被測定放射体の帯域放射輝度
 $[\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}]$

$N_c(T_r)$: 温度 T_r のときのチョッパの帯域放射輝度
 $[\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}]$

K : 定数

で表される。従って $N_c(T_r)$ を既知とすれば、被測定放射体と同温度の黒体放射 $N_b(T_1)$ を置いたときの出力電圧 V_b は(10)式と同様に

$$V_b = K \{ N_b(T_1) - N_c(T_r) \} \quad (11)$$

で表される。これより K は

$$K = V_b / \{ N_b(T_1) - N_c(T_r) \} \quad (12)$$

これを次式に代入すれば被測定放射体の帯域放射輝度 $N_s(T_1)$ を求めることができる。

$$N_s(T_1) = V_s / K + N_c(T_r) \quad (13)$$

ただし、 $N_b(T_1)$ は温度 T の黒体の帯域放射輝度である。

ここで、放射計の校正には既知温度のコーン形黒体⁴⁾を使用した。なお、焦電形検出器を用いたこの種のフィルタ形放射計の出力特性は、一般に図4.1.4に示すように被測定放射体の温度とチョッパ温度とが等しいときに最低出力になるようなV字特性となる。なおこのフィルタ形帯域放射計の集光光学系はHerschel式を用いている。

4. 1. 6 測定例

前節で検討した2種の放射計の動作試験を行うために、2、3の試料について、その放射特性を測定した。図4.1.5、図4.1.6 および表4.1.1 にその結果を示す。

図4.1.5 は、分光放射計の基準放射源を77Kで動作させた場合の測定例であって、60℃のジルコニア容射金属板の分光放射特性である。また、図4.1.6 は基準放射源を0℃とした場合の測定例で、290℃のガラス板の分光放射特性である。なお、スリット幅はすべて500μm一定とした。

表4.1.1 はフィルタ形帯域放射計によるガラス板およびアルミナ容射金属板の帯域放射特性の測定結果であって、チョッパ温度（基準放射源）：23.5℃、試料温度：60℃とした場合の測定例である。

4. 1. 7 おわりに

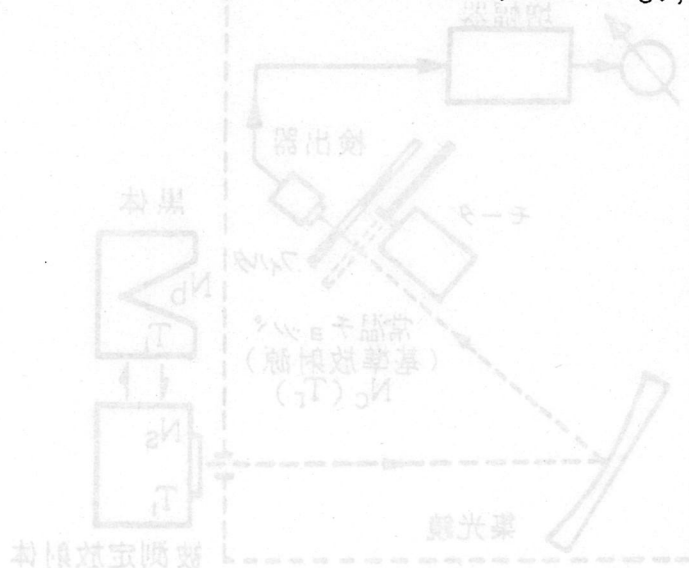
中・低温物体を対象とした2種の分光放射測定法について述べた。この種の測定においては、試料表面温度と基準放射源である黒体炉の温度を等しく設定することが前提である。

また、特に低放射率の試料の測定においては、試料表面で反射して入ってくる周辺物体からの放射（背景放射）の防止に留意すべきことは当然である。光路中の大気による赤外線吸収（大気中のH₂OやCO₂による）は1m以下の距離では大きな影響はない。

(松井)

文献

- 1) 松井松長, 堤捨男, 高木亨: 赤外領域における大気放射の分光分布と空間の測定, 電子通信学会電子装置研究会資料, 電装66・7-11(1966).
- 2) 松井松長: 赤外線探査・探知系における背景放射と大気効果に関する研究, (財)日本産業科学研究所(1986).
- 3) 松井松長, 玉重繁良, 増田真一: 中・低温放射体の分光放射特性の測定法, (財)日本産業科学研究所研究報告, 第4号(1987).
- 4) たとへば, R.D.Hudson, Jr.: Infrared System Eng., John Willey (1969) Chap. 3.



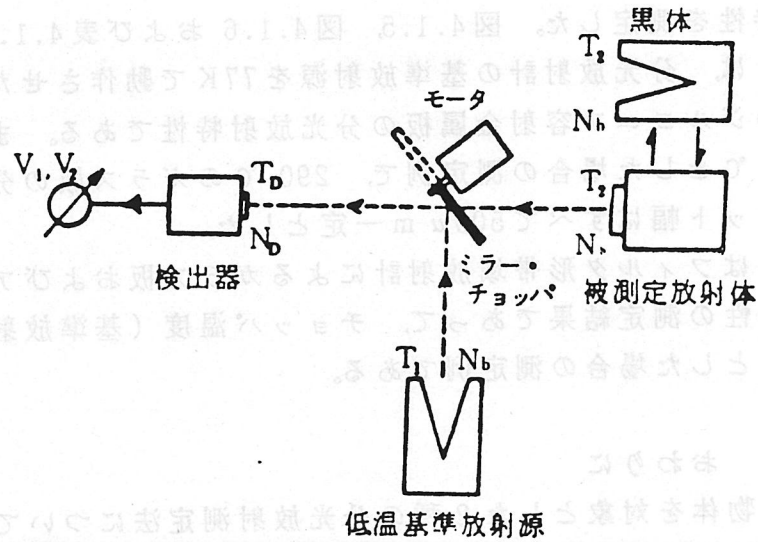


図 4. 1. 1 低温物体からの放射エネルギーの測定法

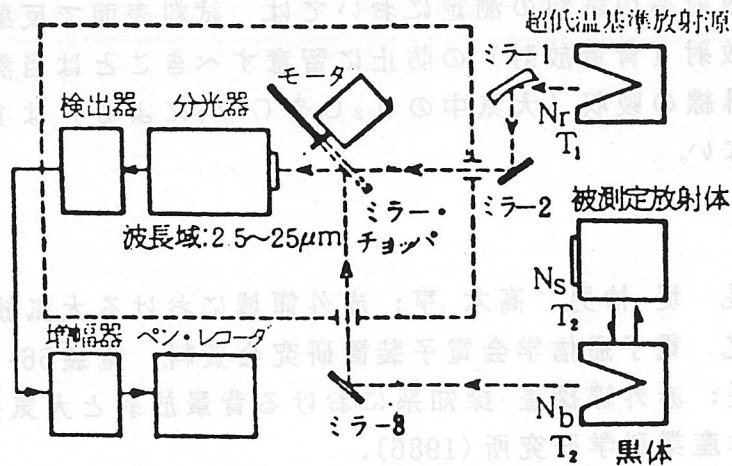


図 4. 1. 2 中・低温物体用分光放射計の構成

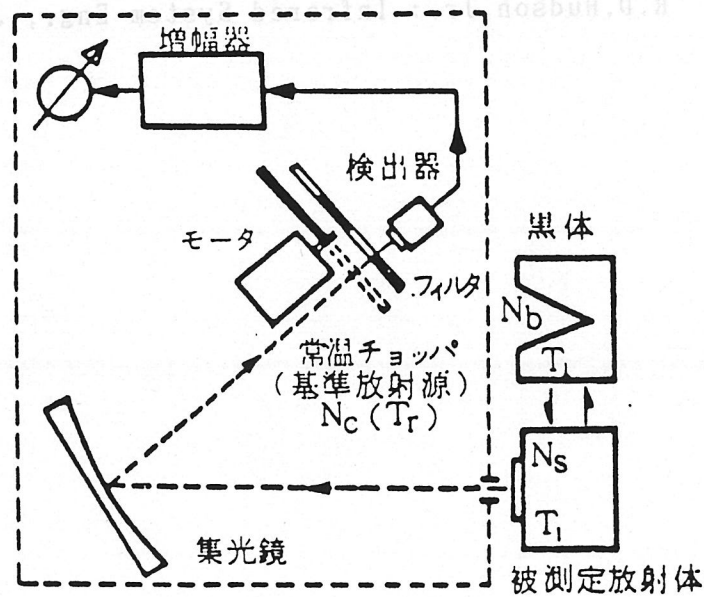


図 4. 1. 3 フィルタ形帯域放射計の構成

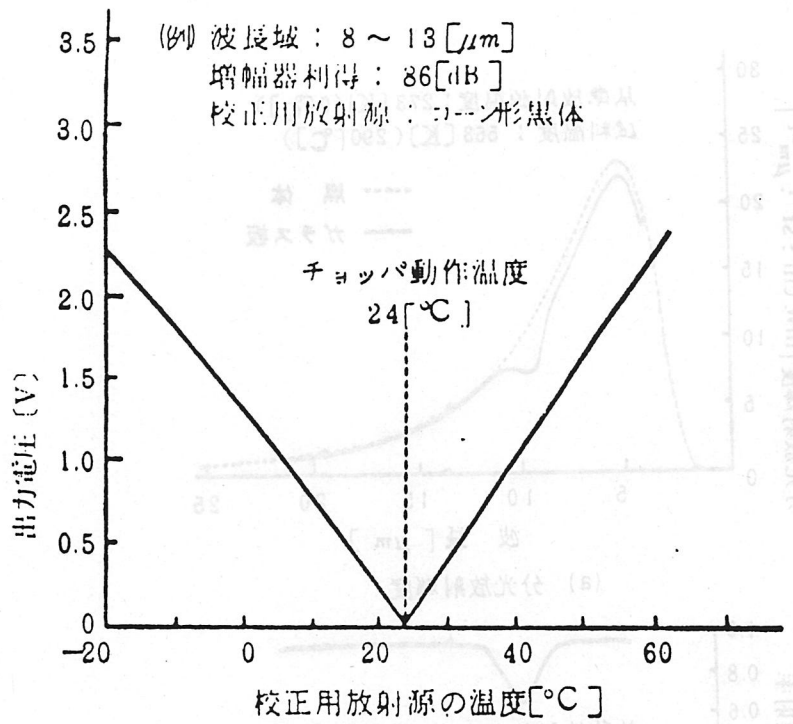
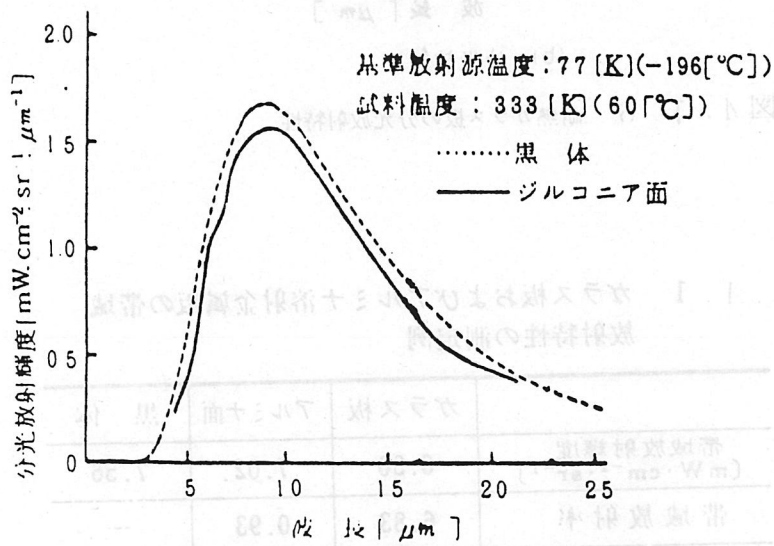
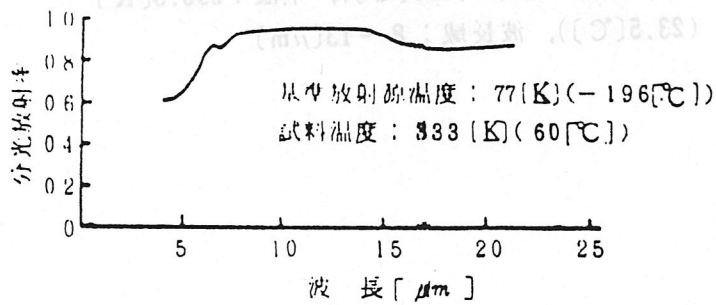


図 4. 1. 4 フィルタ形帯域放射計の出力特性
(室温 24°C の場合)

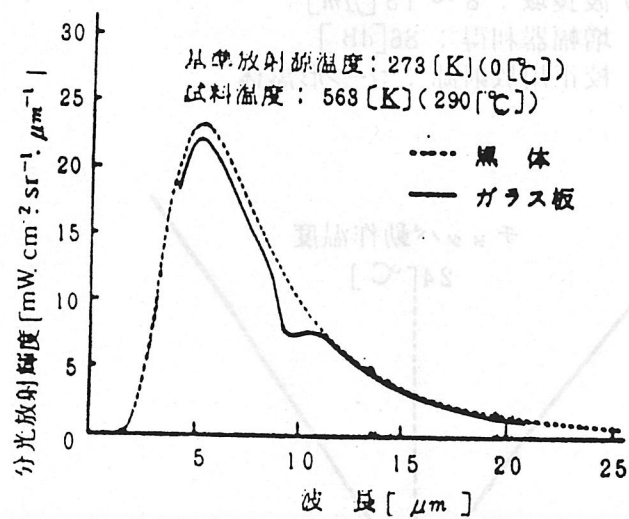


(a) 分光放射輝度

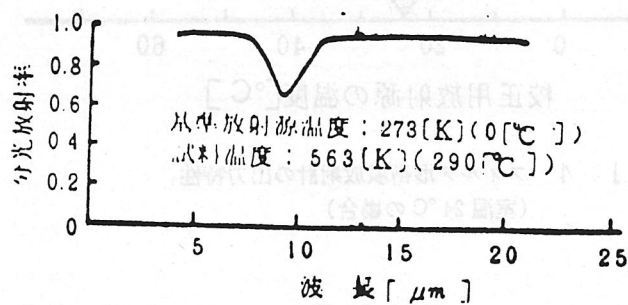


(b) 分光放射率

図 4. 1. 5 ジルコニア溶射金属面の分光放射特性



(a) 分光放射輝度



(b) 分光放射率

図 4. 7. 6 耐熱ガラス板の分光放射特性

表 4. 1. 1 ガラス板およびアルミナ溶射金属板の帯域放射特性の測定例

	ガラス板	アルミナ面	黒体
帯域放射輝度 ($\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$)	6.30	7.02	7.56
帯域放射率	6.83	0.93	—

試料温度: 333 [K] (60 [°C]), 室温: 296.5 [K] (23.5 [°C]), 波長域: 8 ~ 13 (μm)

4 分光放射測定と測定装置

4.2 分光放射測定装置

分光放射測定装置で測定される見かけの放射スペクトルは、その温度における放射の状態を直感的に知るには良いが、異なった温度での放射や、異なった放射体との比較には不向きである。このため、一般には分光放射率を測定し、しかるのち黒体放射を使用して任意の温度の分光放射スペクトルを求める。このように放射体の分光的性質は放射率で得た方が汎用性である。以下放射率測定を念頭に置いて述べる。

4.2.1 放射率

1) 一般的な定義

J I S の照明用語で定義されている放射率 ε は任意の放射体の放射発散度を W_m 、完全黒体のそれを W_b で示せば

$$\varepsilon(T) = W_m(T) / W_b(T) \quad (1)$$

である。放射率は(1)式のように単純な形をとるとは限らず、一般には、波長と温度との関数である。すなわち、

$$\varepsilon(\lambda \cdot T) = W_m(\lambda \cdot T) / W_b(\lambda \cdot T) \quad (2)$$

ここで、(1)式のごとく示したものを”全放射率”、(2)式の場合を”分光(スペクトル)放射率”と呼んで区別している。また、分光放射率が波長に関係なく一定である放射体を”灰色放射体”、分光放射率が波長毎に異なる放射体を”選択放射体”という。なお、一般に放射計は、それを構成する光学系の波長特性により検出波長帯域は有限である。したがって、これによって得られる放射率は(2)式で表示されるべきものであり、波長帯域を明示すべきである。

2) 半透明体の放射率⁽¹⁾

ガラスやフィルムなどの半透明体では入射した放射の一部の放射は透過し、その内部で反射、透過の過程をたどる。また、不透明体と思われるものでも、薄い層でみればこのような過程を考えることができる。いま、ある面が放射平衡の状態にあるとき、入射する放射についてその面で吸収、反射および透過を考えこれを比率であらわすと、キルヒホッフの法則から(3)式が成立つ。

$$\varepsilon + \rho + \tau = 1 \quad (3)$$

ここで、 ρ は反射率、 τ は透過率である。

また、半透明体では、透過光が物体内を透過する過程で多重反射をするので、これを考慮すると、放射率は次のように与えられる、

$$\varepsilon = (1 - \rho) \cdot (1 - \tau) / (1 - \rho \cdot \tau) \quad (4)$$

ここで ρ は表面における反射率、 τ は表面の薄い層で測定される透過率である。一方入射光はその内部を反射、透過しながら透過して行くので、測定される見掛けの反射率、透過率は ρ , τ とは異なり

$$\rho^* = \rho \{1 + \tau^2(1 - 2 \cdot \rho)^2 / (1 - \rho^2 \cdot \tau^2)\} \quad (5)$$

$$\tau^* = \tau(1 - \rho^2) / (1 - \rho^2 \cdot \tau^2) \quad (6)$$

ように与えられ、(3)式は(7)式のように書換えられる。

$$\varepsilon + \rho^* + \tau^* = 1 \quad (7)$$

(7)式までの検討は、ランバートの余弦則が成立つ放射面（完全拡散面）に適用できるが、金属などの放射率には一般に角度依存性があり、ランバートの余弦則からずれるので、垂直方向以外には適用できない⁽²⁾。

(4)式を次式のように、吸収係数 α 、透過距離 d を使用して (9) 式のように表わし、

$$\tau = \exp(-\alpha \cdot d) \quad (8)$$

$$\varepsilon = (1 - \rho) \cdot (1 - \exp(-\alpha \cdot d)) / (1 - \rho \cdot \exp(-\alpha \cdot d)) \quad (9)$$

これを $\alpha \cdot d$ の大きさについて考察すると、

(a) $\alpha \cdot d \ll 1$ の条件では

$$\varepsilon \doteq \alpha \cdot d \quad (10)$$

となる。すなわち、吸収が小さい（透明度が大きい）放射体の放射率は吸収係数に比例する。また、

(b) $\alpha \cdot d \gg 1$ の条件では

$$\varepsilon \doteq 1 - \rho \quad (11)$$

となり、吸収が大きい放射体（不透明体）の放射率は反射率の測定からでも得られる。

3) 固有放射率⁽³⁾

その物体の放射率というとき”その物体が十分な純度で十分な厚さを持ち、十分に平らな表面をもった物体を構成していて、その物体が孤立して温度が一樣な定常状態にある”とき、この物体の固有の放射率を定義できる。この前提はかなり非現実的であるが、金属などの物性論的検討にはこの仮定が必要である。

4) 実効放射率

放射温度測定や伝熱実験で必要としている放射率は、その測定を行なおうとしている現実の条件で求めたものを使用することの方が実験に有効な結果を与える。

放射率は、(1)および(2)式で定義されるが、この場合分母、分子からの放射のみを測定しているのではなく、測定対称から検出器までのガス物質や光学材料による吸収あるいは検出器の分光感度など、光学的な種々の制約のもとで測定している。また、放射率が1でない放射体では、周囲からこの放射体に入射した放射の一部が反射され、これが入射してくる。さらに吸収物質からの放射もある。このような種々の条件を考慮すると、(1)式は、次のように定義する方が現実的である。

$$\varepsilon(\lambda \cdot T) = \{ (W_m(\lambda \cdot T) + W_r(\lambda \cdot T)) \cdot \tau(\lambda) + W_o \} / \{ W_b(\lambda \cdot T) \tau(\lambda) + W_o \} \quad (12)$$

ここで、 W_m は測定対象からの放射、 W_r は反射されてくる雰囲気からの放射、 W_o は吸収ガスからの放射、 $\tau(\lambda)$ は光学系を含めた光路の透過率である。

実効放射率という用語は、物質の固有放射率以外に測定その他の条件が入り込んでいる可能性のあるものについて、実効的などという意味で使われ、その内容はかならずしも一致していないが、理論的な検討も行なわれている⁽³⁾。

4.2.2 分光放射率の測定法

上述のように放射率の定義は物体の性質によって異なるので、放射率の測定もその性質を十分把握して行なうことが重要である。ここでは、遠赤外線ヒータの測定を目的として不透明体の分光放射率の測定法について述べる。

不透明体の分光放射率の測定法には a) 黒体放射と比較する方法、b) 反射率から求める方法などの方法がある。b) は(11)式に示したように、不透明放射体(固体)の放射率 ε と反射率 ρ との関係を利用して、反射率を測定して放射率を得ようとするものである。反射率の基準となるものには通常ミラーが用いられ、測定用の光源からの光を測定対象およびミラーで反射させ、これを比較して反射率を求める。この方法は可視光域で常用されているが、赤外域では高輝度の光源が容易に得られないこと、特に高温放射体の場合には放射体自体からの放射分が大きくなり、補正が面倒になるなどあまり用いられない。a)の方法は放射率の定義から基本的な方法であり、赤外域で多く用いられている。以下a)の方法について述べる⁽⁴⁾。

図42-1に示すような実用的な放射測定系を考える。放射計に入射する放射量は、これを放射計の出力電圧で表わすと次式のようなになる

$$E_b(\lambda \cdot T_1) = k \cdot F(\lambda) \cdot [W_b(\lambda \cdot T_1) \cdot \tau(\lambda) + W_o] \quad (13)$$

$$E_m(\lambda \cdot T_1) = k \cdot F(\lambda) \cdot [\{\varepsilon(\lambda) \cdot W_b(\lambda \cdot T_1) + \{1 - \varepsilon(\lambda)\} \cdot W_r(\lambda \cdot T_r)\} \cdot \tau(\lambda) + W_o] \quad (14)$$

$$W_o = \int B(\lambda \cdot T') \{ \delta\tau / \delta Z \} dz \quad (15)$$

ここで λ は波長、 T は温度、 τ は測定光路の透過率、 $k \cdot F(\lambda)$ は光学系の波長特性を含め

た放射計の変換係数であり、 W_o は測定光路中のガスからの放射、 $B(\lambda \cdot T')$ は黒体放射である。また、添字 b, m および r, o は黒体炉、測定対象および雰囲気、光路からの放射を示す。

(13)、(14)式から、放射率は(16)式のように求めることができる。

$$\varepsilon(\lambda \cdot T_1) = \frac{E_m(\lambda \cdot T_1) \{W_b(\lambda \cdot T_1) + W_o / \tau(\lambda)\} + E_b(\lambda \cdot T_1) \{W_b(\lambda \cdot T_1) + W_o / \tau(\lambda)\}}{E_b(\lambda \cdot T_1) \{W_b(\lambda \cdot T_1) + W_r(\lambda \cdot T_r)\}} \quad (16)$$

(16)式では W_r および W_o の評価が必要である。 W_r は一般に雰囲気温度を使用して評価できるが、 W_o は吸収の強い帯域では無視できなくなり、補正も面倒である。

図42-1 実際の放射測定系

1) 測定対象の温度が高い場合

測定対象の温度が雰囲気温度に対して高く、 $W_b(\lambda \cdot T_1) \gg W_o(\lambda \cdot T_r)$ の条件が成立つ場合には、 W_r および W_o が無視できるので、(16)は次式のように、出力電圧の比として得られる。

$$\varepsilon(\lambda \cdot T_1) = E_m(\lambda \cdot T_1) / E_b(\lambda \cdot T_1) \quad (17)$$

2) 反射鏡の利用

測定対象に代えて、理想的な反射鏡を置き次式を得る。

$$E_o(\lambda \cdot T_o) = k \cdot F(\lambda) \cdot [W_r(\lambda \cdot T_r) \cdot \tau(\lambda) + W_o] \quad (18)$$

(13) および (14) 式からそれぞれ (18) 式を引き、その比をとると次式が得られる。

$$\varepsilon(\lambda \cdot T_1) = \{E_m(\lambda \cdot T_1) - E_o(\lambda \cdot T_o)\} / \{E_b(\lambda \cdot T_1) - E_o(\lambda \cdot T_o)\} \quad (19)$$

この方法には理想的な反射鏡が必要であるが、実用的には高反射率の鏡であれば、 W_r の影響は軽減できる。これにより低温の測定も容易となる。

3) 二温度法⁽⁵⁾⁽⁶⁾

温度 T_1 に対して、同じ測定条件で温度 T_2 の測定を行ない次式を得る。

$$E_b(\lambda \cdot T_2) = k \cdot F(\lambda) \cdot [W_b(\lambda \cdot T_2) \cdot \tau(\lambda) + W_o] \quad (20)$$

$$E_m(\lambda \cdot T_2) = k \cdot F(\lambda) \cdot [\{\varepsilon(\lambda) \cdot W_b(\lambda \cdot T_2) + \{1 - \varepsilon(\lambda)\} \cdot W_r(\lambda \cdot T_r)\} \cdot \tau(\lambda) + W_o] \quad (21)$$

(13)、(14)式および(20)、(21)式から次式が得られ、

$$\varepsilon(\lambda \cdot T) = \{E_m(\lambda \cdot T_1) - E_m(\lambda \cdot T_2)\} / \{E_b(\lambda \cdot T_1) - E_m(\lambda \cdot T_2)\} \quad (22)$$

放射率は二つの温度における測定値の差の比として得られる。この方法は、 W_r 、 W_o の影響を原理的には消去できるが、測定法に問題がある表面温度を二度にわたって測定しなければならない欠点がある。

以上示したように比較法では光路中の吸収および背景光の影響は原理的に消去できる

特徴がある。

4.2.3 分光放射率測定装置

分光放射率測定装置は基本的には図42-2に示すように、検出器と分光器とで構成される。(吸収測定用の分光装置では測定放射源の代りに高輝度の光源を使用し、光源と分光器の間に試料を置く)分光器は分光素子と集光光学系とで構成され、分光素子には回折格子や干渉計あるいはフィルターなどが用いられる。現在最も多く使用されている分光器は、回折格子を使用した分散方式であるが、近年干渉計を利用したフーリエ変換方式が用いられるようになってきた。また、基準となる放射源には黒体炉が用いられる。

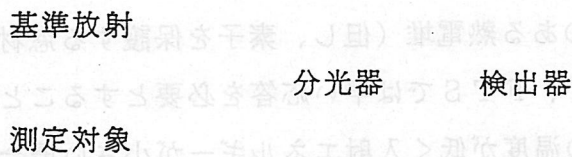


図42-2 分光放射率測定系

4.2.3.1 基準放射源

黒体放射は実用的には黒体空洞を温度調節するよう構成された黒体炉によって得られる。黒体炉の性能は黒体空洞の壁の黒さと温度の一樣性とから評価されている。黒体空洞の形には円筒、球、円錐および変形円錐があり、これらの空洞が一樣な温度に調節されいるときの壁の黒さは、たとえば、図42-3に示すようにその開口の大きさとの関係で検討されている⁽⁷⁾。また、高温の黒体炉では空洞温度を一樣に温度調節することは技術的に難しい問題であり、これについては等価温度の考え方で評価されている⁽⁸⁾。市販の黒体炉は比較的高温で使用するものが多く、空洞の大きさも限られ、温度調節も電熱線に依るものがほとんどであるが、低温用のものは黒体空洞を水槽や油槽で調節する簡便なものでも実用できる。なお、比較用の基準放射源にシリコニットなどの高温放射体や艶消し塗料を用いている場合があるが、この場合はこれら放射体との比エネルギーが得られ放射率とは異なる。

図42-3 円筒空洞の放射率⁽⁷⁾

4.2.3.2 検出器

検出器の出力 V_o は図42-4のような検出系では次式のように

$$V_o \propto k \{W_m(T_m) - W_d(T_d)\} \quad (23)$$

測定対象からの放射と検出器からの放射の差に比例する⁽⁹⁾。ここで K は変換係数、 $W_m(T_m)$ 、 $W_d(T_d)$ 、 T_m 、 T_d は測定対象および検出器からの放射と温度である。すなわち、測定対象と検出器の温度が等しいときには検出器出力は0となり、測定対象の温度が低いときには(−)の信号が得られる。また、 T_m と T_d の差が小さい常温の測定では V_o が小さくなるので検出器出力は雑音に埋もれ、測定が困難になる。

微小なエネルギー測定における検出器の検出能力は検出器の雑音透過エネルギーで評価されるが、常温測定のように T_m と T_d 差が小さい場合には、まず V_o を大きくする工夫が必要である。後述の低温放射源を利用する方法はこの応用である。

検出器には広い波長範囲で感度のある熱電堆(但し、素子を保護する窓材の特性で制約される)が多く用いられているが、F T Sでは早い応答を必要とすることから焦電素子が用いられる。また、測定対象の温度が低く入射エネルギーが小さい場合には光量子型で冷却して使用する素子(HgCaTe, Ge α メータ など)が用いられる。

図42-4 放射測定原理説明図

4.2.3.3 分光器

1) フィルター型分光器

遠赤外線ヒータの性能評価には必ずしも詳細なスペクトルは必要でない。たとえば、経時変化など特定の波長域の変化が分ればよい場合には、フィルタを用いた簡易な分光システムの方が役に立つことが多い。松井ら⁽¹⁰⁾は図42-5に示すような構造のシステムを試作し、遠赤外線ヒータの評価を行なっている。このシステムではセクターに詰め込んだフィルタで1.5-4.5 μ m、8-22 μ m、22-33 μ m、1.5-45 μ mのそれぞれの帯域の放射を測定し、遠赤外線ヒータの評価を行なっている。このようなシステムは構造が簡単であり、取扱いが容易であるなどの特徴がある。また、円盤状の基盤に回転方向に直線状に波長領域が変化するように多層膜を蒸着したフィルター(C V F)を使用して、広い帯域を自動的に分光するシステムも市販されている。図42-6に示すシステムでは二ヶのC V Fを使用して1.42~5.6 μ mおよび5.63~14.5 μ mの間を161に分割して(波長間隔はスリットで規制され等間隔ではない)分光し、データ処理によって連続したスペクトルが得られ

るようになっている。このシステムの光学系は望遠鏡と一体になっており、移動も可能であり、後述のフーリエ変換方式と違った応用が期待できる⁽¹¹⁾。

図42-5 フィルター式分光測定装置⁽¹⁰⁾

図42-6 CVFを使用した分光装置の光学系⁽¹¹⁾

2) 分散型分光器

a) 回折格子の分解

分散素子にはほとんど回折格子が用いられている。回折格子として最も多く用いられているエシェレット格子は鋸歯状の切り口を持った平面格子で、この面に入射してくる放射は、波長が $\Delta\lambda$ だけ異なれば、 $\theta = m \cdot \Delta\lambda / (d \cdot \cos \theta)$ だけ回折角の異なった光に分散される。回折格子の理論分解能は、単位長さ当りの回折格子の溝の数に比例して大きくなるが、回折格子を含めた光学系では出射スリットSに含まれる λ と $\lambda + \Delta\lambda$ の光は $\theta = S/f$ だけ異なり、出射スリットに含まれるスペクトル巾 $\Delta\lambda$ は

$$\Delta\lambda = S \cdot d \cdot \cos \theta / m \cdot f \quad (24)$$

で与えられる。また、分解能 Re は

$$Re = \lambda / \Delta\lambda = \nu / \Delta\nu \quad \Delta\nu = | \lambda^{-2} \cdot \Delta\lambda | \quad (25)$$

で定義される。ここで、 $\Delta\lambda$ はスリット巾Sに含まれるスペクトル巾（波長分解）、 ν は波数（ $\nu = 1/\lambda$ ）、 $\Delta\nu$ は波数分解、 θ は回折角、 d は回折格子の溝の巾、 S はスリット巾、 f は光学系の焦点距離、 m は回折光の次数である。

図42-7は代表的な分光光学系について波数分解を計算したもので、 $\Delta\nu$ は波長が大きくなると波数分解は小さくなり、遠赤外域では波数分解に関してのみ注目すれば、後述のフーリエ分光器に較べて必ずしも劣らない。

エシェレット格子の波長に対する回折光の強さは、ブレイズ波長（一次）を頂点とする山なりの分布を示すとともに、 $\lambda/2$ 、 $\lambda/3$ の二次、三次の高次の光が同時に現われる。このため、回折格子を使用した分光装置ではこれら高次の次数の重なりを除くことが重要となる。一般には一次の光を測定し、高次の光はフィルターを使用してカットする。また、一つの回折格子で回折できる波長範囲にも制約があるので、広い波長範囲の分光では何枚かの回折格子を必要とし、通常の2.5~25 μm の波長範囲をカバーする赤外分光分析計では二枚の回折格子を切替えている。

図42-7 回折格子型分光器の分解の一例⁽¹²⁾

b) 明るさ

輝度Brの放射体の像を1 : 1で入射スリット上に結像させたとき、出射上での放射エネルギー量Erは

$$E_r = Br \cdot S \cdot l \cdot Tr \cdot A \cdot f^{-2} \cdot \Delta\lambda \quad (26)$$

となる。ここで、Brは光源の輝度、Trは分光システムを構成する検出器、光学材料を含めた光路中の透過率、lはスリット高さ、Aは光束の有効断面積である。通常分解能を大きくするためにスリット巾を狭くするが、試料の温度が低い場合には入射エネルギーが小さくなり測定が不能となる。しかし、遠赤外線ヒータのように放射が連続スペクトルの場合には、分解能は小さくても必要な情報は得られるので、スリット巾を広げて測定することも可能である。

c) 分散型分光放射測定システム

分散型の分光システムは物質の吸収スペクトル測定用として設計されたものが市販されている。これらの装置は高輝度の光源を内蔵し、分光器の前または後で光を二つに分け、それぞれの光路に試料とブランクを置いて、吸収スペクトルを測定するようにしている。これに対して放射測定では、黒体または試料が光源の代りになり、光路も基本的には一つでよいので、これらシステムの流用にはかなりの改造が必要である。

単光束のシステムでは黒体炉および試料を測定したときの検出器出力Eb Esは(23)式から、近似的に

$$E_b(T) \doteq K\{W_b(T) - W_d(Tr)\} \quad (27)$$

$$E_s(T) \doteq K\{W_s(T) - W_d(Tr)\} \quad (28)$$

となる。ここで、Trは通常雰囲気温度であるから、試料温度が高く、 $W_b(T) \gg W_d(Tr)$ の条件が得られれば、放射率εは出力の比として次のように得られる。

$$\epsilon = E_s(T) / E_b(T) \quad (29)$$

また、中温度の場合にはWd(Tr)が安定していないと誤差の原因となるので、検出器を一定の温度に調節する必要がある。

一方、試料温度が常温のように低い場合は検出器温度そのものが得られにくくなるので、冷却型の検出器を使用するなどの工夫が必要であるが、松井ら⁽¹³⁾は図42-8に示すようなミラーチョッパーを使用した複光束分光器に低温の基準放射源を置いたシステムを提案している。このシステムでは黒体から得られる検出器出力は

$$\begin{aligned} E_b(\lambda \cdot T) &= K\{W_b(\lambda \cdot T) - W_d(\lambda \cdot Tr)\} - \{W_d(\lambda \cdot Tr) - W_L(\lambda \cdot T_L)\} \\ &= K\{W_b(\lambda \cdot T) - W_L(\lambda \cdot T_L)\} \end{aligned} \quad (30)$$

同様に試料からは

$$E_s(\lambda \cdot T) = K\{W_s(\lambda \cdot T) - W_L(\lambda \cdot T_L)\} \quad (31)$$

が得られる。ここで、 W_L は低温基準放射源の放射輝度、 T_L は同じく温度である。いま、基準放射源の温度を雰囲気温度より十分低くとれば、試料温度が常温でも十分な検出器出力が得られ、 $W_b(\lambda \cdot T) \gg W_L(\lambda \cdot T_L)$ の条件では(17)式と同様にして放射率が得られる。また、このシステムで、基準放射源に液体窒素を使用して、天空の分光放射測定を行なっている。

分散型分光装置の出力は一般にペンレコーダに直記しているものが多く、放射率などの計算や補正を行なうとき不便である。しかし、近年出力をデジタル化して収録する方法が広く行なわれるようになってきており、データの取扱いは便利になっている。

図42-8 低温放射源を利用した分光システム⁽¹³⁾

3) フーリエ変換分光方式

a) 原理とシステムの概要

半透明鏡(BS)で二つに分けた光のうち一方の光の光路長を変化させ、検出器上に結像させた干渉光を検出器入力とすると、

$$I(X) = \int B(\nu) \cos(2\pi) \cdot \nu \cdot \Delta\nu \quad (32)$$

のような信号成分が得られる。これをインターフェログラムという。また、上式は

$$B(X) = \int I(\nu) \cos(2\pi) \cdot \nu \cdot \Delta\nu \quad (33)$$

のようにフーリエ変換される。すなわち、インターフェログラムをフーリエ逆変換したものは、入射光のスペクトル分布を表わす。これを利用したものがフーリエ変換分光法(以下FTSと呼ぶ)である。

FTSによるシステムは主として分光吸収測定に応用されており、このために設計されたシステムが市販されている。その一例を図42-9に示す。装置の主要な部分は干渉計と検出器および計算機システムで、このほか吸収測定のための光学系から構成される。装置の心臓部は干渉計で、一般にマイケルソン型が用いられている。計算機システムは、干渉計の制御やインターフェログラムをフーリエ逆変換するのに不可欠であるが、このほか得られたスペクトルを黒体放射などの基準値と比較するなど、一般には通常の分光分析で必要な計算プログラムが内蔵されており、データの利用は便利である。

図42-9 市販のフーリエ変換分光システムの一例⁽¹⁴⁾

b) 干渉計

干渉計は入射光を二つに分ける半透明鏡と反射鏡および一方の反射鏡の反射位置を変化させる駆動部からなっている。反射鏡の移動距離は原理的には無限大であるが、このような移動は不可能であり、実際には波数分解 0.5-cm の場合10-20mm 移動させている。

半透明鏡 (BS) の材質は測定 (透過) 波数域を規制する。BS の効率 η は、透過率 T、反射率 R とすると $\eta = R \cdot T$ できまり、R、T が 0.5 のとき最大となる。吸収は効率を低下させるので、BS には吸収の無い物質を基盤にし、これに反射物質として誘電体多層膜を蒸着したものが用いられる。また、反射膜に $R=0.5$ に近いものを得るためには屈折率が $n > 3$ の材質を選ぶ必要がある。このような制約のもとで、基盤には KBr, Si, 反射膜には Ge が多く用いられ、これらの材質による測定波長範囲は大略 2.5-25 μm および 2-40 μm である。また、これより長い波長域ではマイラーフィルムやグリッドワイヤーが用いられている。

薄膜の透過率や反射率は波数 ν 、屈折率 n および厚さ d によって支配され、その効率は次式によって与えられる⁽¹⁴⁾。

$$\eta = 2R_0(1-R_0)^2(1-\cos\theta) / (1-R_0^2-2R_0\cos\theta)^2 \quad (34)$$

$$\theta = 4\pi \cdot \nu \cdot n \cdot d \cdot \cos i \quad (35)$$

ここで R は基盤と反射膜との境界の反射率、i は反射膜の屈折率である。上式から $\theta = m \cdot \pi$ すなわち、 $2\nu \cdot n \cdot d \cdot \cos i = m$ を満足する $\nu = m \cdot \nu$ 毎に 0 となるので、効率もこの波長で 0 となる。効率が 0 となる波長の間隔は、薄膜では比較的広いが、フィルムのような厚いものでは狭くなる。このため、Ge の薄膜では基盤の透過域をカバーできるが、フィルムのように厚い場合には広い波長域をカバーするのに、厚さの異なった何枚かの BS を用意する必要がある。図 42-10 はマイラーを使用した場合の効率の一例を示したもので、10~100 cm^{-1} の遠赤外域の測定では、3 個の BS が必要である。

図 42-10 マイラーを使用した BS の効率⁽¹⁴⁾

c) 検出器入力

一般に放射測定システムでは、検出器入力を光チョッパーで断続して出力の安定化を計っている。しかし、フーリエ変換分光装置では、比較的高速で光路差を繰返し変化させ、得られるインタフェログラムを積算・平均化処理して、解析用インタフェログラムを得るようにしている。これによってランダムノイズが低減されるので光チョッパーは

使用していない。

d) データのサンプリング間隔⁽¹⁵⁾

フーリエ変換するために行なわれるインタフェログラムのサンプリング間隔は

$$\Delta X \leq 1/2 \nu_{\max} = 1/2(\nu_2 - \nu_1) \quad (36)$$

で行なわれ、スペクトル分布上でのデータ点数 Mは

$$M = L/\Delta \nu = 2\nu_{\max} \cdot L \quad (37)$$

となる。これらの関係から $\nu_{\max} = 100\text{cm}^{-1}$ の遠赤外域では $L = 10\text{cm}$ とすると、必要なデータ数は2000となる。一方可視光域で $\nu_{\max} = 10000\text{cm}^{-1}$ とすると $2 \cdot 10^5$ のデータ点数となり、計算は容易ではなくなる。このため、フーリエ分光は遠赤外域で実用され始め、計算機の発達とともに近赤外域でも応用できるようになってきた。現在 10000cm^{-1} 程度までの分光ができるシステムが市販されている。

e) 分解とアポダイゼーション⁽¹⁵⁾

()式に示したよう原理式の積分の上下限は無有限大であるが、実際には干渉計の構造上可動鏡の移動距離には制約があるので、(32)式は次式のように有限とならざるを得ない。

$$B(\nu) = \int I(X) \cdot \exp(-i2\pi\nu X) \cdot \Delta \nu \quad (38)$$

このため、

$$R(X) = \begin{cases} 1, & |X| \leq L \\ 0, & |X| \geq L \end{cases} \quad (39)$$

のような方形関数を導入して

$$B_1(\nu) = \int I(X) \cdot R(X) \cdot \exp(-i2\pi\nu X) \cdot \Delta \nu \quad (40)$$

のように書き換える。ここで、 $R(\nu)$ のフーリエ変換を $O(\nu)$ とすると、上式は

$$B_1(\nu) = B(\nu) \cdot O(\nu) \quad (41)$$

$$O(\nu) = 2L \cdot \text{sinc}(2\pi\nu L) \quad (42)$$

となって、得られるスペクトルは真のスペクトルとは異なった歪んだものとなる。また、(32)式は sinc 関数であり、大きな副極大を持つので好ましくない。このため、出来るだけ副極大を除く操作を行なう。これをアポダイゼーションという。アポダイジング関数には二等辺三角形などの関数があり、測定条件により選定される。

また、ここで $O(\nu)$ は分解波数を定める装置関数に相当する。(42)式から分解波数は

$$\Delta \nu = L/2L \quad (43)$$

で定義される。

f) 位相誤差⁽¹⁵⁾

インタフェログラムは理論的には $X=0$ に対して、完全に対象でなければならない。し

かし、実際には波数によって光路差が少し変化し、非対象性が現れる。また、インターフェログラムの最初のサンプリング点が $X=0$ の点から外れると、結果的には歪を受けたことになる。このような原因で現れる誤差を位相誤差といい、フーリエ分光で現れる代表的な系統誤差である。

g) システムの応答性

F T Sにおいて入射光量と比例関係にあるのはインターフェログラムである。検出器の飽和現象や応答遅れあるいは位相誤差やアボダイゼーションなど分光装置の応答性に疑問も出されている⁽¹⁶⁾が、図42-11に示すように出力の直線性はよい⁽¹⁷⁾。

図42-11 任意の波数における分光放射測定装置の出力特性例

4.2.3.4 分散方式とフーリエ干渉方式の比較⁽¹⁵⁾

分散方式とF T Sとで、大きく異なるものはS N比と明るさである。

1) S N比

分散方式ではスペクトルの要素が n 個で1個当たり t の測定時間が必要であるとすれば、全走査を完了するのに $n \cdot t$ の時間がかかり、1要素を測定中他の $(n-1)$ 要素の情報は捨てられる。これに対して、F T Sでは同じ観測時間 $n \cdot t$ の間に、 n 要素を同時に測定する。したがって、光学系の効率が等しいとすれば、S N比は分散方式では \sqrt{t} に、また、F T Sでは $\sqrt{n \cdot t}$ に比例すると考えてよい。したがって、F T Sは分散型に較べて \sqrt{n} 倍優れていることになる。また、 n は走査帯域巾に相当するから、走査帯域巾がひろいほどF T Sの法が有利となる。今、測定波数帯域を $500 \sim 10 \text{cm}^{-1}$ 、分解を 0.5cm^{-1} とすると $n = \nu_1 - \nu_2 / \Delta \nu \approx 1000$ であるからS N比は30以上となる。

また、F T Sでは一回の可動鏡の走査でこのデータがえられるが、一般に可動鏡は繰返し動作させ、インターフェログラムを積算することが出来るようになっているので、S N比は更に改善できる。いま、積算回数を m 回とすれば更に \sqrt{m} 倍改善できるので、 $\sqrt{n \cdot m}$ 倍良いデータが得られる。

2) 明るさ

光学系が光を取込む量の目安として分光器の明るさを表わす量 E を、分光素子の有効開口面積 A と光を取りだす出射口が分光素子の中心に対して張る立体角 Ω とで、 $E=A \cdot \Omega$ のように定義すると、分散型とF T Sとでは次のような関係がある。

$$E_g = (1/f)(A_g/R_g) \tag{44}$$

$$E_f = 2\pi \cdot A_f/R_f \tag{45}$$

ここで、Rは分解能、添字 g, F は分散型およびF T Sを示す。ここで、A、Rが同じとすれば、その比は

$$E_F/E_g = 2\pi \cdot f/l \quad (46)$$

となる。一般に分散型の f/l は30程度であるから、F T Sは分散型に較べ極めて明るい。

4.2.4 出力の表示方法について

F T Sの出力は通常波数に対して得られ、必要に応じて波長変換して表示できるようになっている。これに対して分散型では入射スリットが波長分解を決めるので出力は波長表示で得られ、便宜上波長のほかに波数を併記している。しかし、波数表示と波長表示とではエネルギー単位が異なる。波長表示、波数表示にはそれぞれ特徴があり、熱的応用では波長表示でもよいが、分子構造の解析や反応など化学の分野では光量子エネルギーが問題となるので、波数表示のデータが必要である。一般に黒体放射のスペクトルは多くは波長で表示したものが示されているが、波数表示では図42-12のようになり、ウィーンの変位則は次式のように表わされる⁽¹⁷⁾。

$$\nu_{\max}/T = 1.961 \quad (\text{cm}^{-1}/\text{k}) \quad (47)$$

このように表示方法によって放射エネルギーが最大となる波数あるいは波長は単に逆数関係にないので、データを利用する立場からは出力表示の仕方は明確にして置いた方がよい。

(宮川)

参考文献

- 1) H.C.McMahon;Thermal radiation from Partially transparent reflecting bodies,
J.opt.soc.america, Vol 40, No 6, P.376, 50'
D.L.Stiewalt;Infrared spectral emittance measurement of optical materials,
Appl.opt.Vol.5, No.12, P.1911, 66'
- 2) 松村; 固体の熱輻射スペクトル、分光研究、Vol.18, No.1, P.1,
- 3) 高田; 放射率の概念と一般理論、高温学会誌、VOL 8 No 1 P 5 82'
- 4) 宮川; 遠赤外分光放射測定に関する調査、電中研調査報告、T86091, 87'
- 5) Dwight Weber;Spectral emissivity of solids in infrared at low temperature,
j.opt.soc.america, vol.49, No.8, p.815
- 6) 松井ほか; 室温付近における固体の分光放射率の一測定法、
赤外線技術研究会資料、1982
- 7) Chandos,R.J;Radiometric properties of isothermal diffuse wall cavity sources,
Appl.opt. Vol.13, No.9, 74'
- 8) 服部; 実効温度による空洞放射体の特性表示、S I C E 論文集、
Vol.15, No.6, P.139, 79'
- 9) 佐土根; 熱放射標準に関する研究、電総研研究報告、No.565
- 10) 松井; 低温物体の分光放射特性の測定、赤外線技術、No.14, P.21, 88'
- 11) 宮永、中野; 赤外線加熱過程に関する定量的検討(その1)一分光吸収特性を考
慮した一次元熱移動解析一、電中研研究報告 T88038 89'
- 12) 宮川; 赤外域放射スペクトルの測定とその応用、電中研研究報告 275050、76'
- 13) 松井ほか; 室温付近における固体の分光放射率の測定、分光研究、
Vol 20 No 5 P 298 71'
- 14) K.Sakai; Michelson-type fourier spectrometer for the infrared,Appl.opt.,
Vol11, No.12, 9.2894, 72'
- 15) 南; フーリエ分光法、計測と制御、Vol 13 No 31 P 272 74'
- 16) 錦田ほか; 赤外法により材料分析ー基礎と応用ー、P.39, 講談社サイエンスフィク 86'
- 17) 中野、宮川; 遠赤外線放射体の分光放射率測定方法ーフーリエ変換赤外分光光度
計による方法一、電中研研究報告、T87109 88'

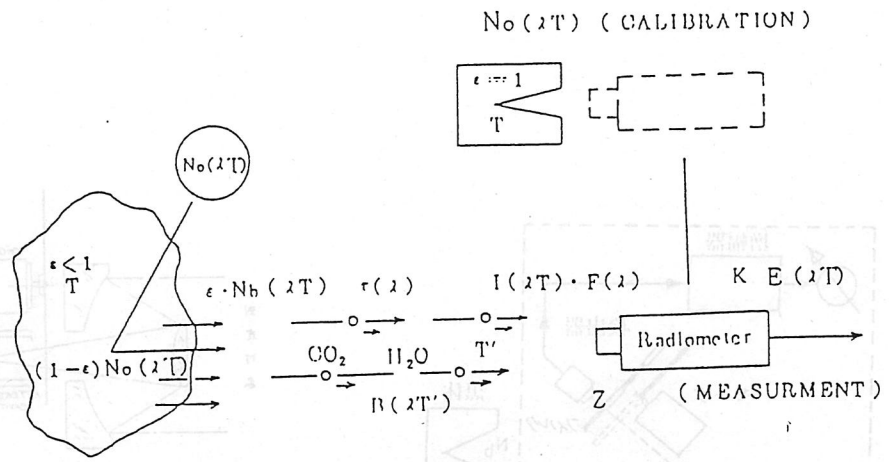


図42-1 実際の放射測定系 (4)

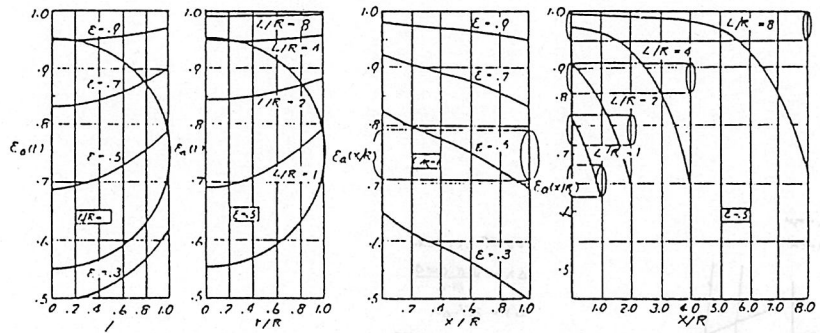
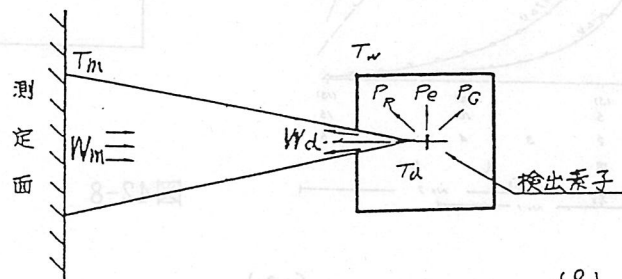


図42-3

円筒空洞の放射率 (4)



放射測定 の原理説明図 (9)

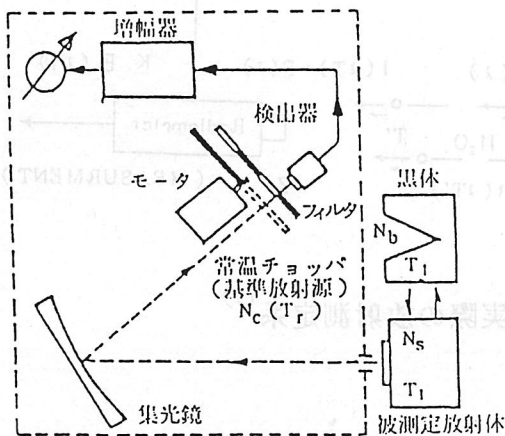


図42-5 フィルター式分光測定装置 (10)

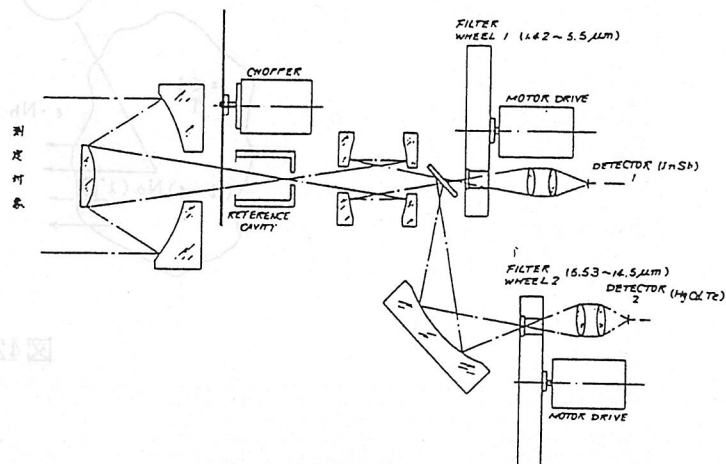


図2-1 分光放射測定装置の光路図
(11) 赤外線分光エネルギー計

図42-6 CVFを使用した分光システム (11)
(MINARAD SYSTEM INC. SA-400型)

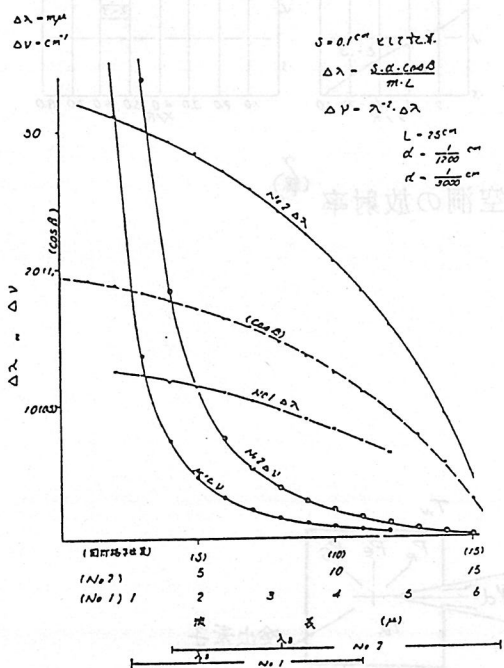


図42-7 回折格子型分光器の分解の一例 (12)

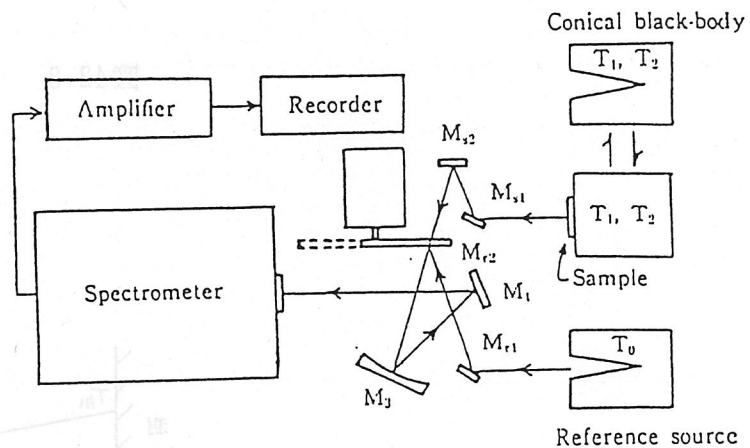


図42-8 低温放射源を利用した分光システム (13)

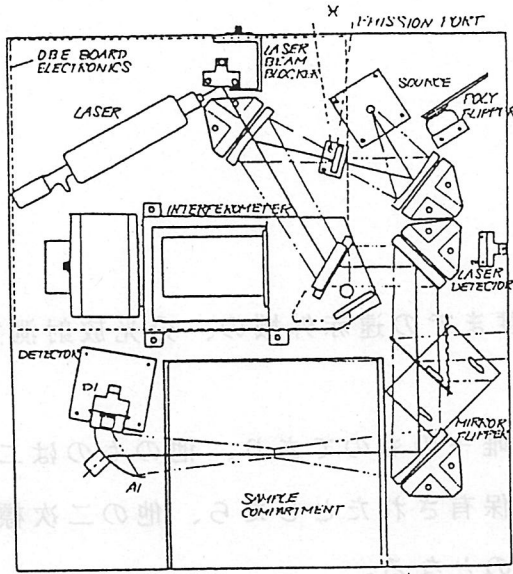


図42-9 市販のフーリエ変換分光システムの一例
(日本パナオラッド社 FTS-65型)

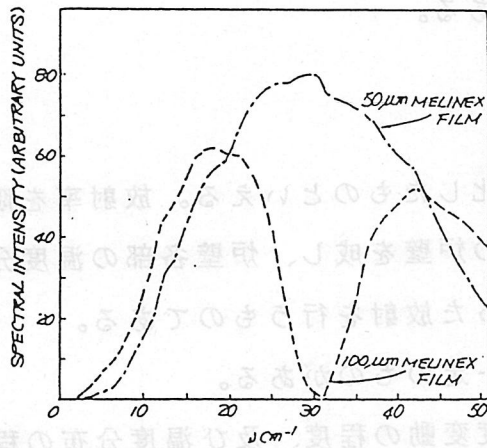


図42-10 マイラを使用したBSの効率 (14)

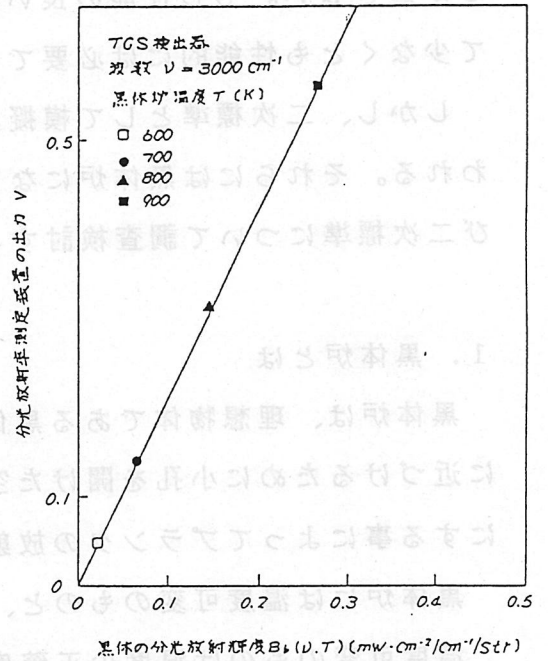


図42-11 分光放射測定装置の出力特性例 (14)

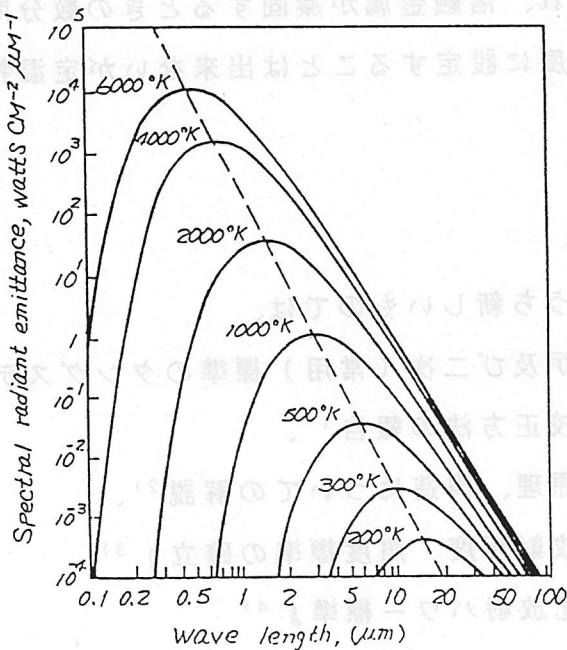
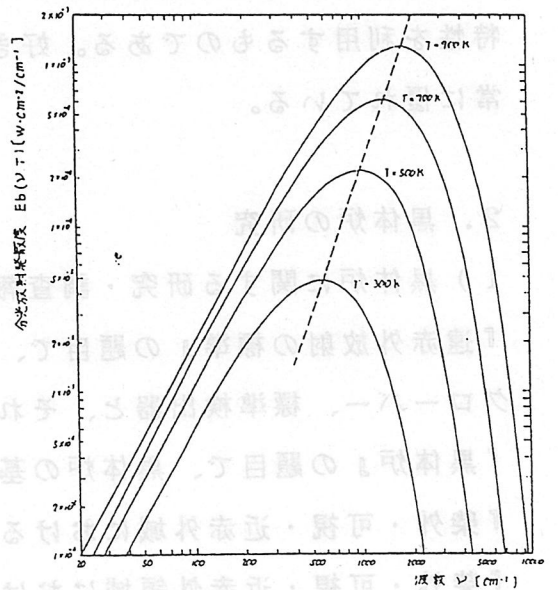


図42-12 プランクの法放射則 (17)
a) 波長表示 4-25



b) 波数表示

4.3

分光放射測定用標準

はじめに

ここでは近赤外から波長 $20\sim 30\mu\text{m}$ 程度までの遠赤外域の、分光放射測定用の標準放射体について述べる。

光放射で標準といえるものは黒体炉が唯一のものであり、他のものは二次標準にしか過ぎない。もし性能の良い黒体炉が保有されたとしたら、他の二次標準はすべて少なくとも性能的には必要ではないものとなる。

しかし、二次標準として模擬黒体を始め、各種のランプやヒーターがしばしば使われる。それらには黒体炉にない優れた特徴があることから、ここでは黒体炉および二次標準について調査検討するものである。

1. 黒体炉とは

黒体炉は、理想物体である黒体を現実化したものといえる。放射率を限りなく1に近づけるために小孔を開けた空洞形状の炉壁を成し、炉壁各部の温度分布を一様にする事によってプランクの放射則に則った放射を行うものである。

黒体炉には温度可変のもの、温度が一定のものがある。

温度可変のものは温度の正確度及び温度変動の程度、及び温度分布の程度によって黒体炉の性能が左右されるが、望みの温度が何時間でも得られるので使用には便利なものである。

温度一定のものは定点黒体炉と呼ばれ、熔融金属が凝固するときの数分間の定温特性を利用するものである。好きな温度に設定することは出来ないが定温特性は非常に優れている。

2. 黒体炉の研究

- 1) 黒体炉に関する研究・調査報告のうち新しいものでは、
『遠赤外放射の標準』の題目で、黒体炉及び二次（常用）標準のタングステン電球、グローバー、標準検出器と、それらの校正方法の報告¹⁾、
『黒体炉』の題目で、黒体炉の基礎、原理、構造についての解説²⁾、
『紫外・可視・近赤外域における分光放射輝度・照度標準の確立』³⁾
『紫外・可視・近赤外領域における分光放射パワー標準』⁴⁾

『紫外・可視・赤外領域における黒体放射の精密数値表』⁵⁾
『工業用放射標準の研究』の題目で、放射率の低下を補償する考え方の研究⁶⁾
『技術試料：黒体炉』として、市販されている黒体炉の性能一覧表⁷⁾などがある。

2) 古くは、

『円筒型黒体の黒さに就いて』⁸⁾、
『炉壁の温度分布が一様でない時の球型黒体炉の黒さについて』⁹⁾、
『丸窓と底のある円筒型黒体の黒さ』¹⁰⁾、
『熱放射標準の確立に関する研究』¹¹⁾、

3) 放射温度の計測を主体にした黒体炉については

『放射計測の標準としての黒体炉』の題目で、JIS C 1612 (放射温度計の性能表示方法通則)に基づく黒体炉の特性の紹介¹²⁾、

『放射温度計標準用のアンチモン点黒体』¹³⁾

『放射温度計校正用の比較黒体炉』¹⁴⁾

『放射温度計試験用の大開口黒体炉の開発実験』¹⁵⁾

『放射温度計校正用標準黒体炉』¹⁶⁾

『高精度実用黒体炉の試作』¹⁷⁾

『実用型定点黒体炉の試作』¹⁸⁾

『大開口定点黒体の試作』¹⁹⁾

『実用的なパラジウム点黒体の試作』²⁰⁾

『すず点黒体炉の開発』²¹⁾

『金点黒体の精度評価』²²⁾

『円筒空洞の実効温度』²³⁾

『実効放射率の数値的評価』²⁴⁾

などの資料が目につく。電子技術総合研究所によって分光放射の標準として、計量研究所では放射温度の標準として黒体炉を研究していることがうかがえる。

3. 黒体炉の校正

黒体炉は、その温度を知ることによってプランクの放射則あるいはステファン・ボルツマンの法則から分光放射発散度、全放射発散度を求めることが出来るものである。

黒体炉を使用するときには、空洞部を形作っている炉壁表面の温度を黒体炉の温度として知りたいわけであるが、実際には炉壁内部に埋め込んだ測温素子によって温度を測定している。このため、炉壁表面と炉壁内部との場所の違いによって若干温度誤差を生じていることがある。また測温素子の固有誤差も指示値には誤差となって加わることとなる。

そこで黒体炉の真の炉壁温度を知るために定期的な校正が必要となっている。

ここに黒体炉の校正の一例を記す。(米国エレクトロ・オプティカル社製黒体炉付属の取扱い説明書による)

3. 1 校正時間

50 ~ 600 °C ; 5000 時間

80 ~ 1000 °C ; 2000 時間

500 ~ 1500 k ; 1000 時間

3. 2 校正方法 (図1参照)

1) 校正された熱電対を、100 °C以下の温度の黒体炉の開口部に挿入し、炉底部に直接接触させる。

2) 黒体炉の温度を上昇させる。

600 °Cまでの温度の校正であるなら605 °Cにセットする。

1000 °C " 1005 °C "

3) 温度が安定した後、少し温度を下げるようにセットし直し、再び安定したところで黒体炉の測温素子と挿入した熱電対の出力を記録する。

4) 3を繰り返す、校正表をつくる。

5) 100 °C以下になってから挿入した熱電対を取り出して終了となる。

なお本方法では、炉底部とそれ以外の炉壁部との温度差については言及していないが、それを懸念するならば炉内各部の温度を熱電対で測っても良いだろう。

4. 疑似黒体

黒体炉は放射に関する基準器であり、最も優れた性能を持っているものであるが、強いて挙げればいくつかの欠点がある。それは

1) 価格が高い。(最低でも100万円以上)

2) 安定するまでに時間がかかる。(温度にもよるが昇温時間は30分から1時間必要)

3) 形状寸法が大きい。

4) 重量が重い。

- 5) 入手の容易な黒体炉は温度上限が1000℃程度である。
- 6) 板状の放射体の場合には、基準器も板状の方が測定し易い場合がある。
- 7) 定点黒体炉は温度が決められており、使用時間も数分と短い。

黒体炉の持つこれらの欠点を考慮したものとして疑似黒体が挙げられる。

以下黒体炉以外で標準器としての可能性を有する赤外放射体について述べる。

この場合の赤外放射体の使い方は、それを適当な加熱器で加熱することによって標準的な赤外放射を行わせようとするものである。

4. 1 3M社製ベルベットコーティング

これは一種の工業用塗料で色調は艶消黒である。色素16%、溶剤（ビヒクル）84%の割合、色素はカーボンブラック20%、二酸化珪素80%とされている。特別な装置や技術を必要とせず、通常の吹き付け塗装や刷毛塗り塗装で程度の良い艶消し塗装が得られるものである。

分光放射率の値に図2のグラフと、耐熱温度149℃というデータがメーカーから発表されている。厳密にいうと、塗装の仕方で性能は若干異なることが予想される。

4. 2 テンピル社製ピロマルク

これはシリコンを主体とした耐熱無機セラミック塗料で、耐熱温度427～1371℃までで各種の色調があると発表されている。

黒色ピロマルクの放射率は、研磨インコネルに塗布した場合で0.94、ステンレススチールに塗布した場合で0.90であるとメーカーによって発表されている。

耐熱性を得るために、塗料を塗布した後の乾燥条件などに細かい指示があり、若干の設備と処理技術が必要とされる。

4. 3 遠赤外線放射塗料

遠赤外線放射用として、分光放射率のデータを発表して市販している塗料である。

(株) ジャパン・センサー・コーポレーションの”高温用黒体塗料”は耐熱温度1000℃、放射率は0.94で波長依存性がないとしている。

(株) 服部ハイテックの”遠赤外線放射塗料”は、耐熱温度500℃、分光放射率は図3の値と発表している。

オキツモ(株)の”遠赤外線放射塗料”は、耐熱温度600℃、分光放射率は図4の値と発表している。

住友化学工業（株）の”スミセラム”は完全無機質の塗料で、耐熱温度1000℃、分光放射率は塗料の種類によって若干異なっているが図5の値を発表している。

4. 4 耐熱塗料

ここに掲げた塗料は放射率のデータは発表されていないものの、予備実験において分光放射率の値が高く、しかも波長の変化に対してほぼ一定の値を持っていることが確認されたものである。

（株）アサヒペンの耐熱塗料黒は、耐熱温度600℃のシリコーン樹脂塗料で、スプレー缶入りなので使い勝手は非常に良く、関係者の間でベルベットコーティングに代わる塗料として使用されている。メーカーでは、ストーブや自動車のマフラーなどの高温になる箇所を保護するのを主な用途としており、放射率のデータの発表は行っていない。

東京熱化学工業（株）の耐熱塗料”サーモジン”黒色は、耐熱温度650℃のエポキシ変性シリコーン樹脂で、ストーブなどの熱器具の表面保護用に使用されているものである。

4. 5 黒化テープ

裏に粘着剤加工を施したテープあるいはシート状の用紙の表面を黒化処理したものであって、放射体の表面に張り付けることによって一定の高い放射率を得ることが出来るものである。

日油技研工業（株）の”黒体テープ”は、耐熱温度は130℃、波長6.5～14 μ mでの反射は最大6%、透過は最大5%、波長5.6 μ m以下での反射、透過はそれ以下の値であると発表している。標準の寸法は28×21cm、はさみやナイフで小さく切って使うことが出来る。構造は図6のようである。

以上、分光放射測定用の標準放射体として黒体炉とそれに関する研究報告(表題)の紹介、黒体炉の校正法、黒体炉に代わる各種の放射体について述べた。現在はコンピュータが発達しているので、分光放射率が1.0でない放射体であっても正しい値をコンピュータに記憶させることによって標準放射体として用いることが可能である。

(笹森)

以 上

参考文献

- 1) 伊藤 和喜；赤外線技術（1988）第14巻 P43

- 2) 河本 康太郎 ; 紙と周辺技術(1989) No.1 P39
- 3) 鈴木 守ほか ; 電総研研報 第742号 (昭48年)
- 4) 鈴木 守ほか ; 電試調報 第167号 (1970)
- 5) 鈴木 守ほか ; 電総研研報 第715号 (昭45年)
- 6) 上瀧 致孝 ; 電試研報 第558号 (昭32年)
- 7) 赤外線技術 (1986) 第11号 p 87
- 8) 山内二郎 ; 電試研報 第378号 (昭10年)
- 9) 上瀧 致孝ほか ; 電試彙報 第19巻 第10号 (1955)
- 10) 中路幸謙 ; 電試彙報 第18巻 第10号 (1954)
- 11) 佐土根範次 ; 電試研報 第565号 (昭32年)
- 12) 佐久間史洋 ; 赤外線技術 (1990) 第17号 p 2
- 13) 伊藤 寿 ; 計測自動制御学会論文集 第12巻 第2号 (昭51) p 127
- 14) 服部 晋ほか ; 計量研報告 第35巻 第3号 (1986) p 55 技術報告
- 15) 服部 晋 ; 計量研報告 第36巻 第1号 (1987) p 17
- 16) 藤原哲雄ほか ; 計量研報告 第37巻 第1号 (1988) p 20
- 17) 伊藤 寿 ; 計量研報告 第30巻 第4号 (1981) p 1
- 18) 佐久間史洋ほか ; 計量研報告 第31巻 第4号 (1982) p 42
- 19) 服部 晋 ; 計量研報告 第33巻 第2号 (1984) p 35
- 20) 花田百合雄ほか ; 計量研報告 第34巻 第4号 (1985) p 7
- 21) 藤原哲雄ほか ; 計量研報告 第37巻 第1号 (1988) p 11
- 22) 服部 晋 ; 計測自動制御学会論文集 第12巻 第3号 (昭51) p 363
- 23) 服部 晋 ; 計量研報告 第30巻 第3号 (1981) p 28
- 24) 山本 弘 ; 応用物理 第38巻 第6号 (1969) p 618 (96) 研究ノ一ト

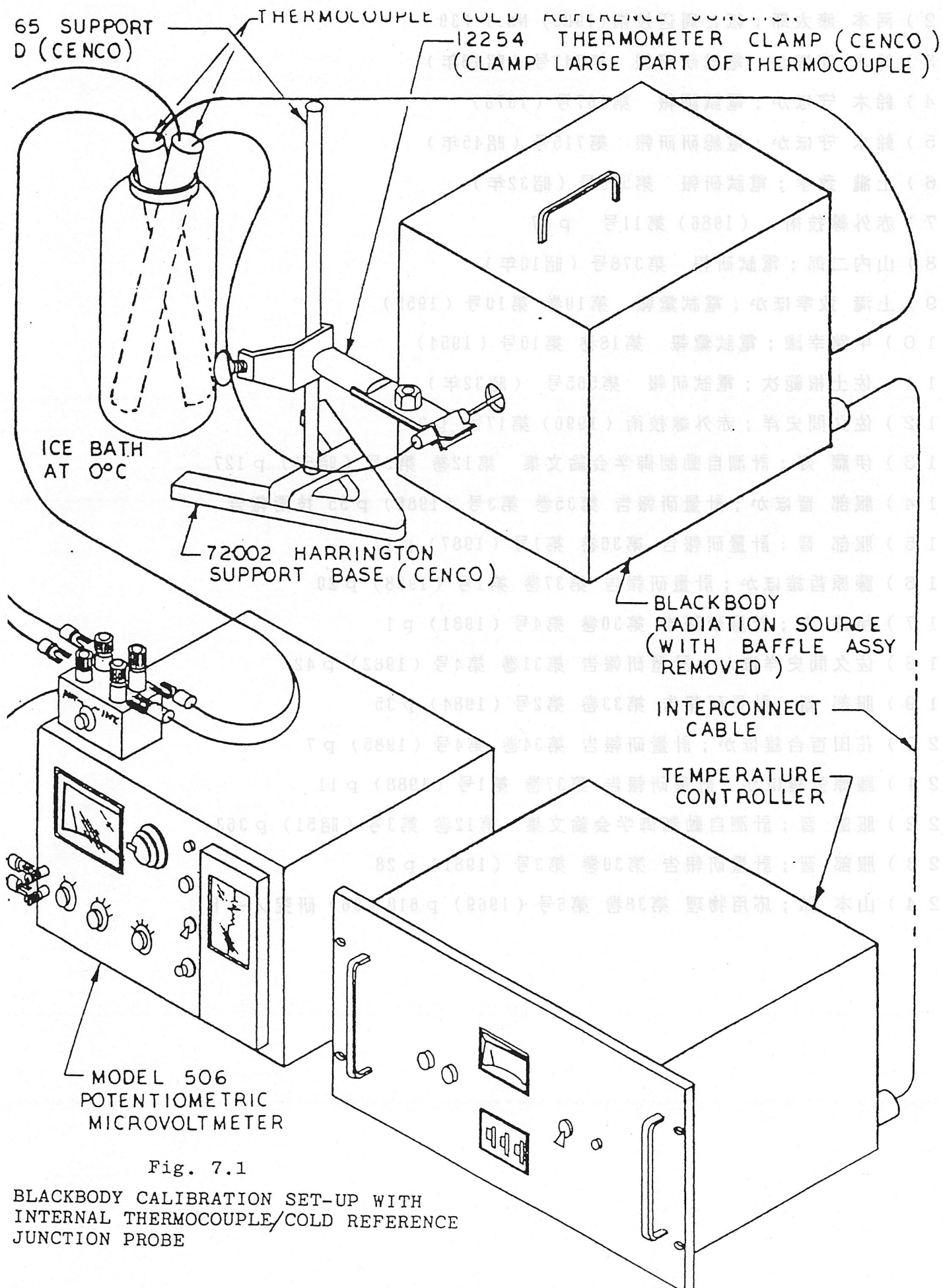


Fig. 7.1

BLACKBODY CALIBRATION SET-UP WITH
INTERNAL THERMOCOUPLE/COLD REFERENCE
JUNCTION PROBE

図1 黒体炉の温度校正方法

SOLAR ABSORPTANCE OF NEXTEL 2010 (AMBIENT)
 (Measured by TRW, Inc., Using a Beckman DK2A Spectrophotometer)

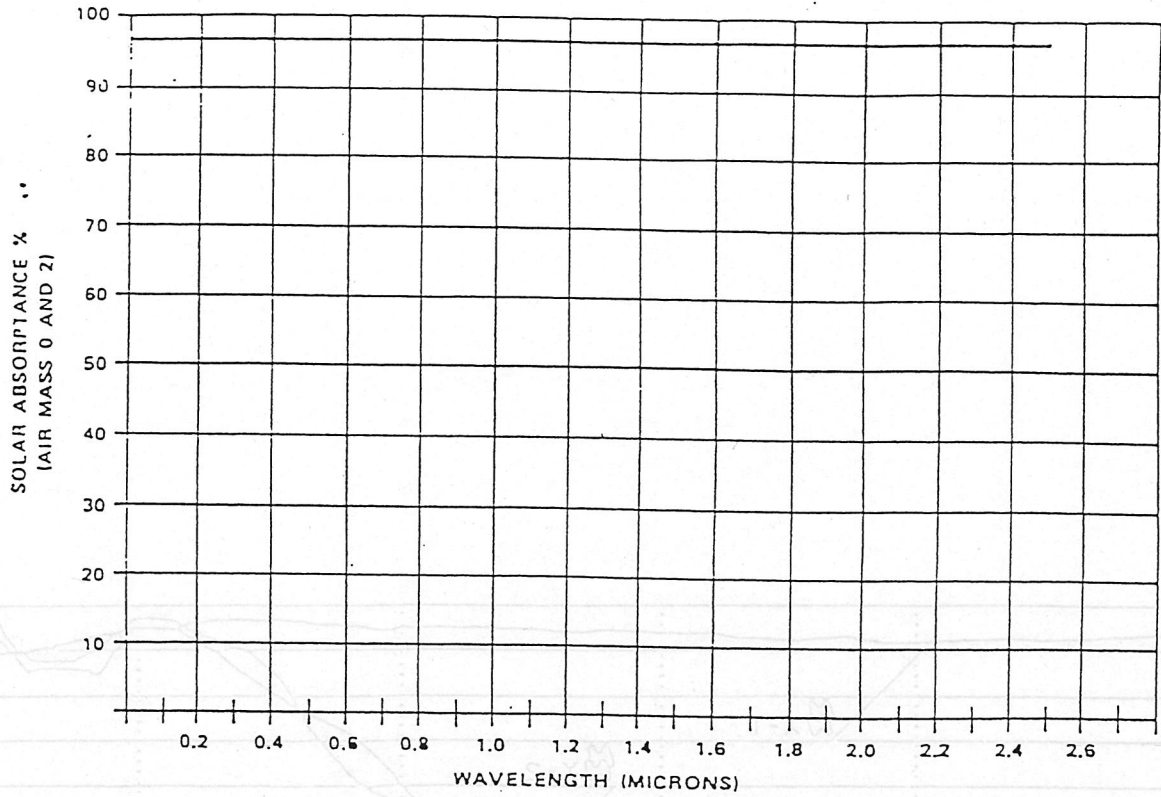


FIGURE 1

NORMAL EMITTANCE OF NEXTEL 2010 AT 200°F
 (Tested by TRW, Inc., Using a Paraboloid Reflectometer)

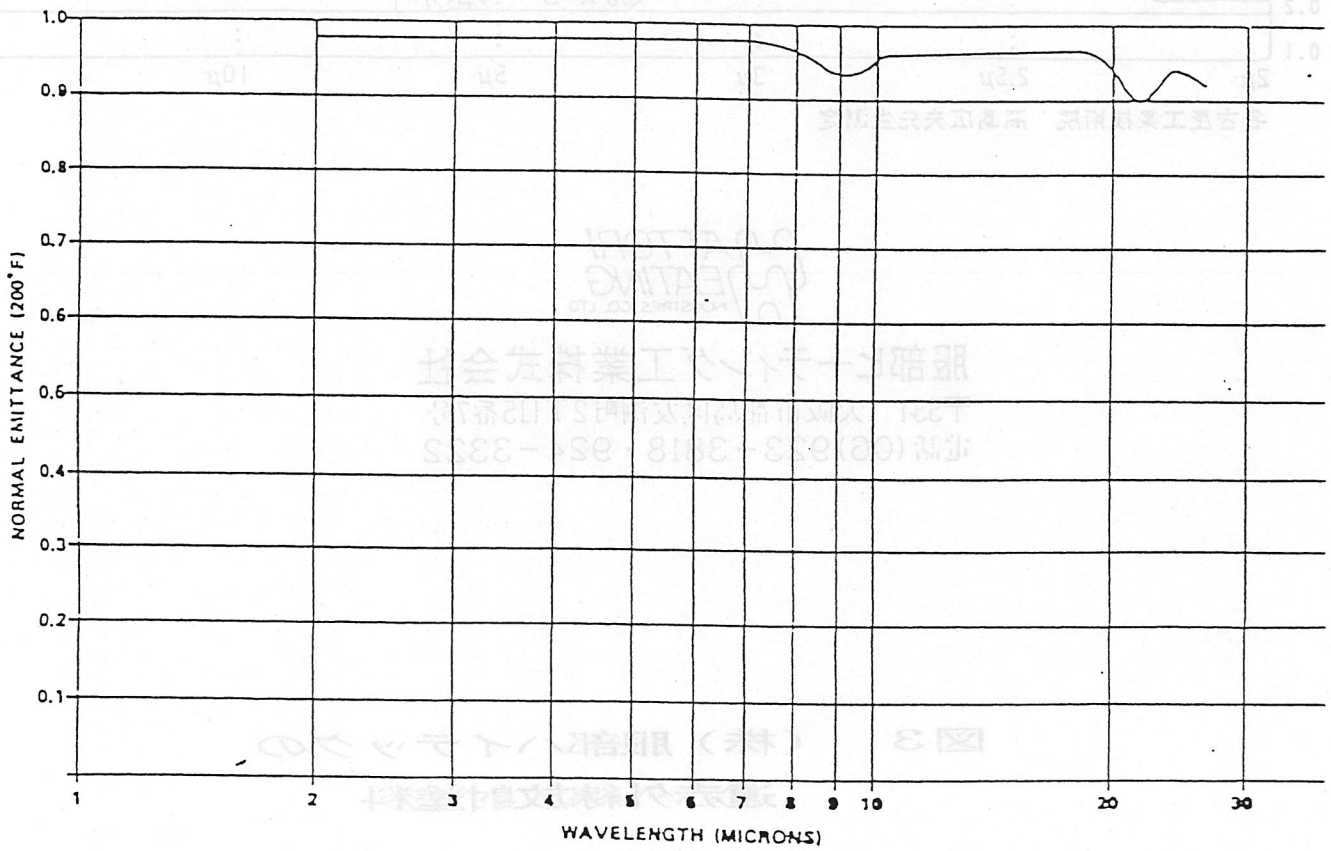
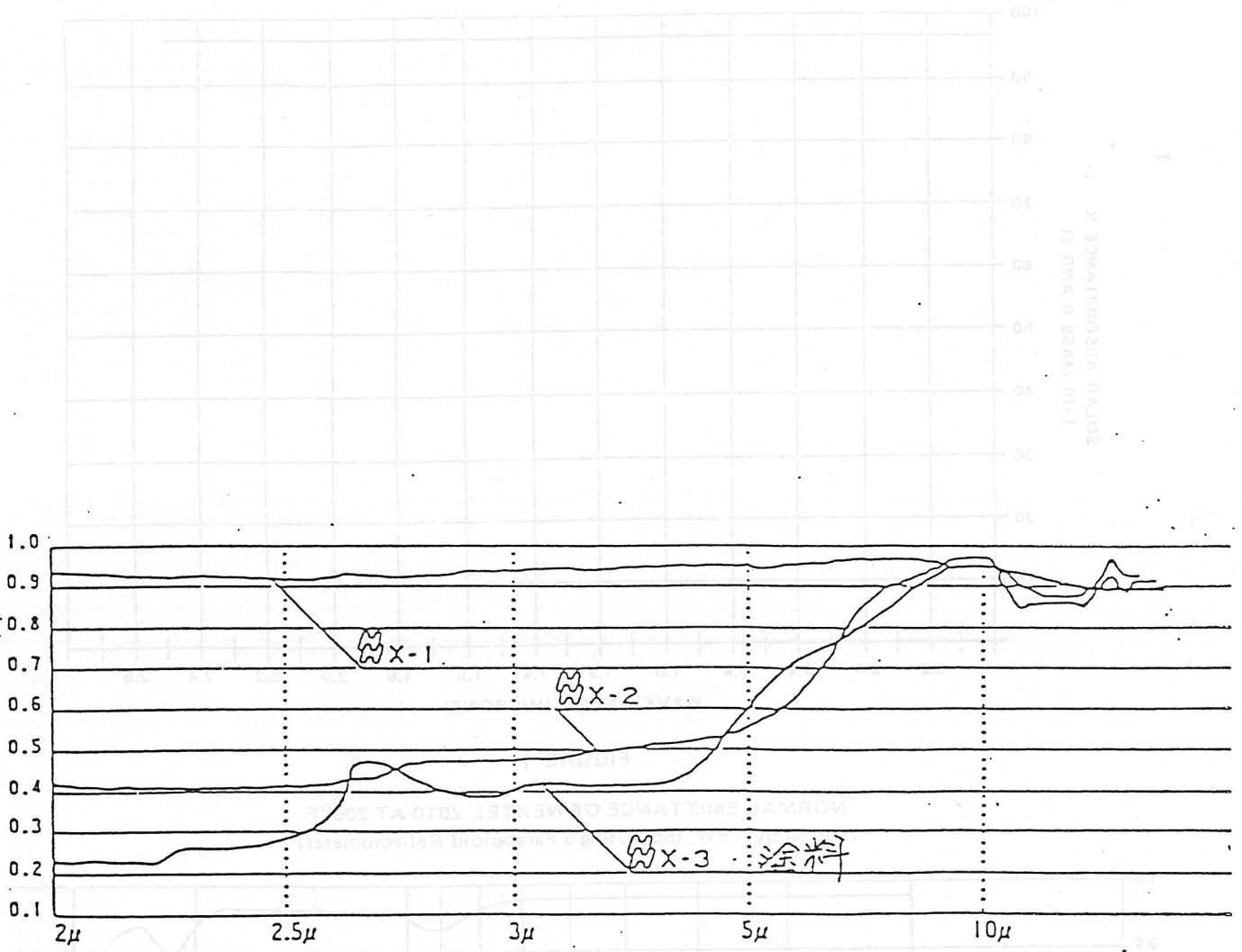


図2 3Mベルベットコーティングの分光放射率

SOLAR ABSORBANCE OF NEXTEL 2010 (AMBIENT)
 (Measured by TRW, Inc. Using a Beckman DK2A Spectrophotometer)



名古屋工業技術院 高島広夫先生測定



服部ヒーティング工業株式会社
 〒534 大阪市都島区友通町2丁目5番7号
 電話(06)923-3818・924-3322

図3 (株)服部ハイテックの
 遠赤外線放射塗料

特長

遠赤外線放射塗料

W-500、W-600

短波長域での放射率は低く、長波長域での放射率が高い

高効率輻射塗料

B-600

全波長域で放射率が良い

500°Cにおける分光放射率曲線

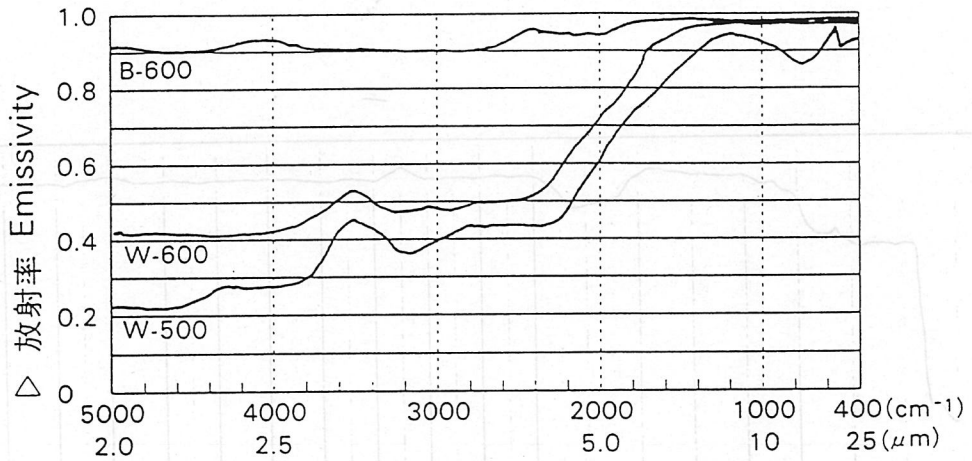
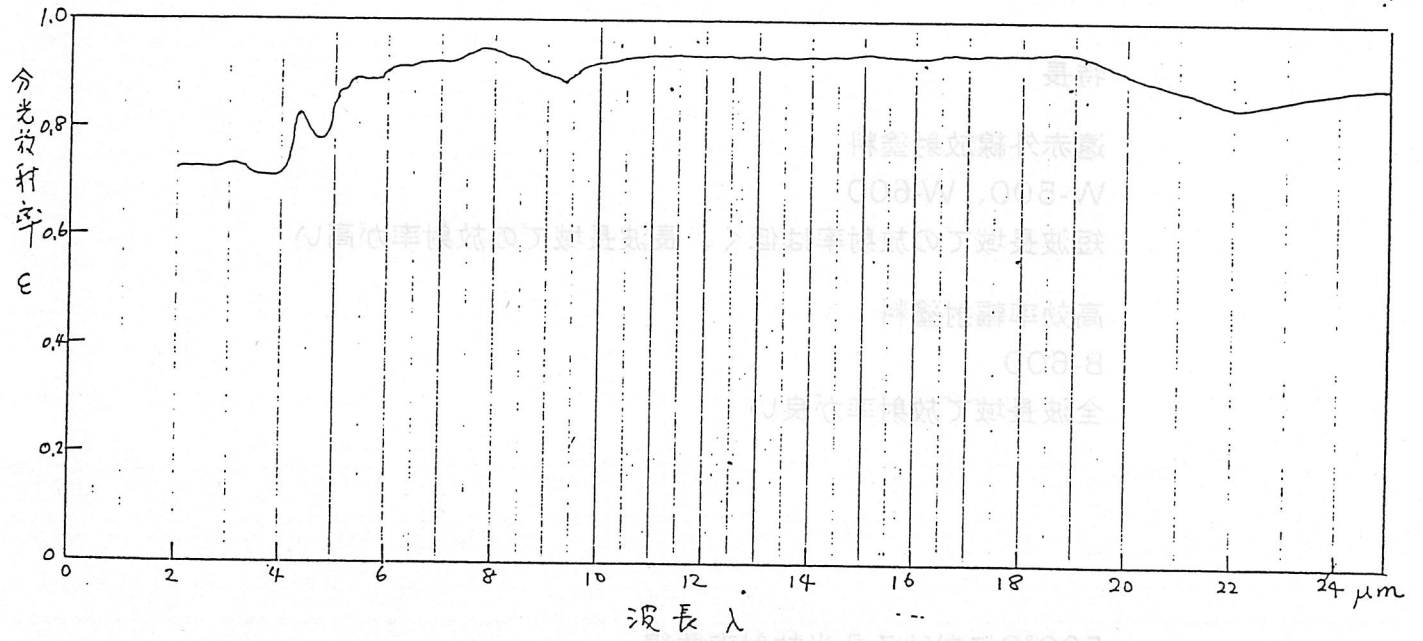
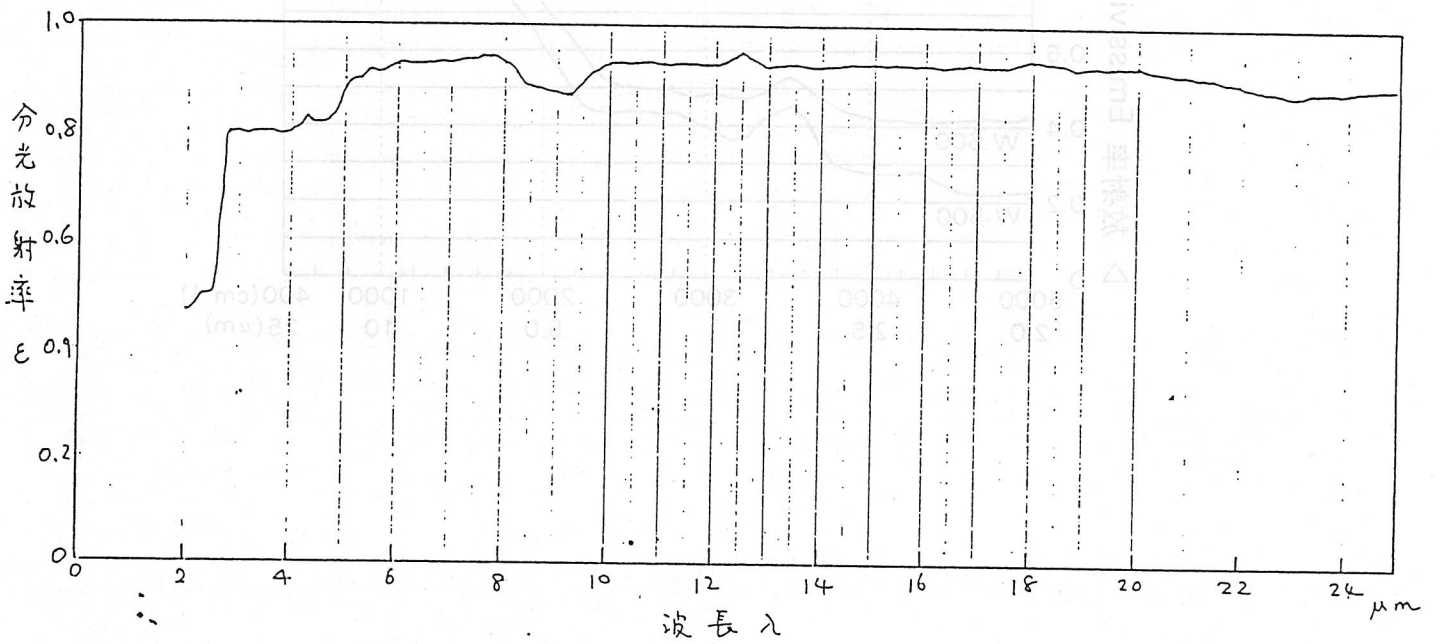


図4 オキツモ(株)の
遠赤外線放射塗料

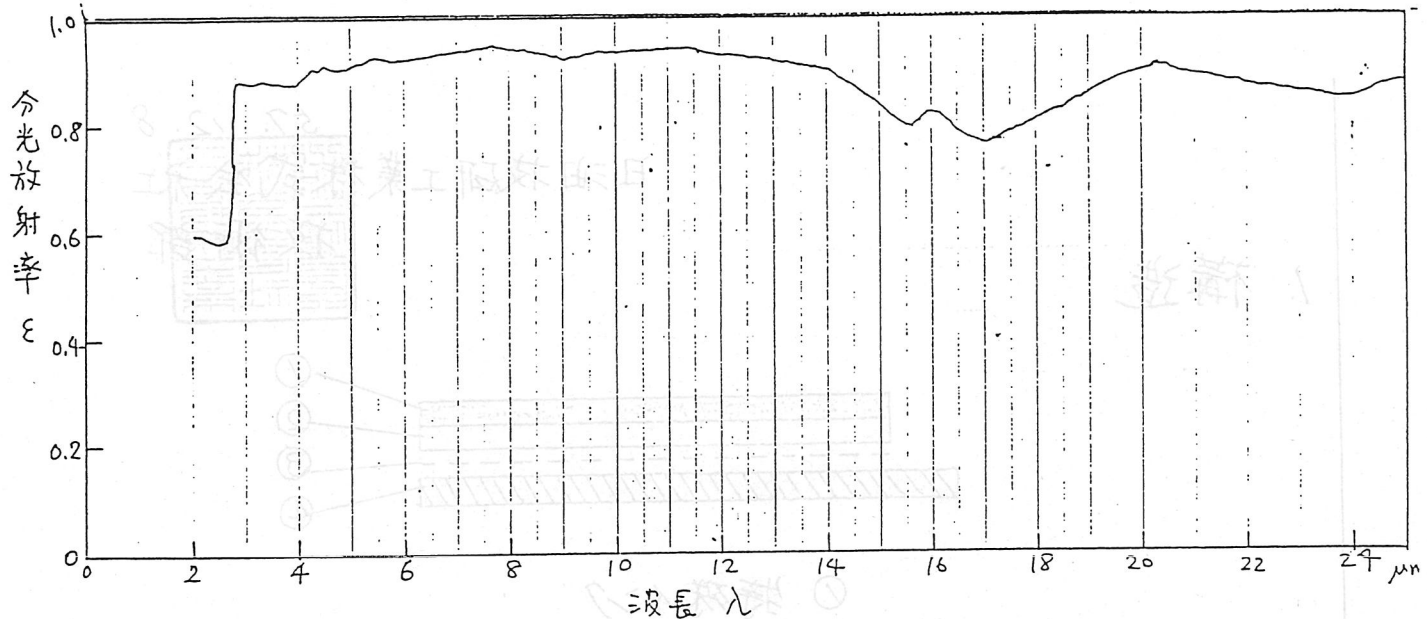


スミセラム P-400B

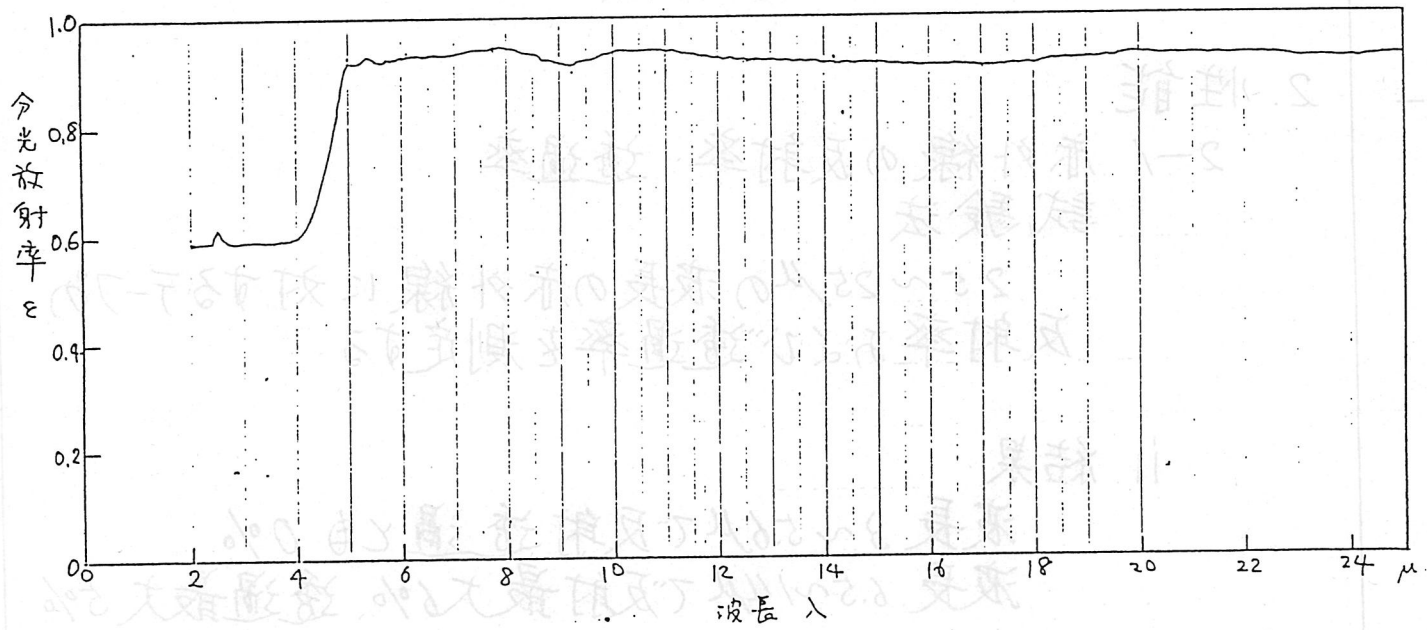


スミセラム PN-1350

図5(A) スミセラムの
分光放射率



スミセラム S-208B



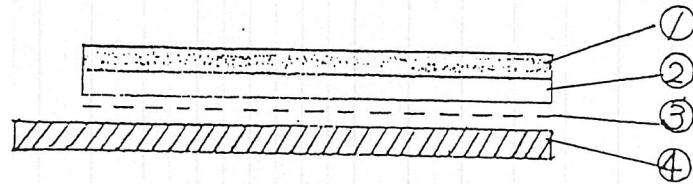
スミセラム S-16A

図5(B) スミセラムの
分光放射率

日 本 工 業 形 状 研 究 所 (株) の
日 本 工 業 形 状 研 究 所 刊 行



1. 構造



- ① 特殊インク
- ② ポリエステルフィルム
- ③ 耐熱性粘着剤
- ④ 離型紙

2. 性能

2-1 赤外線 の 反射率・透過率

i. 試験法

2.5~25 μ の波長の赤外線に対するテープの
反射率および透過率を測定する

ii. 結果

波長 3~5.6 μ で反射透過とも 0%

波長 6.5~14 μ で反射最大6%、透過最大5%

2-2 試験面とテープ面との温度差

i. 試験法

温度勾配熱板の試験位置にテープを貼付し、
所定位置の試験面とテープ面との温度を表面
温度計を用いて測定する。

図6 日油技研工業(株)の
黒体テープの構造・性能

5.2 遠赤外線ヒーターの評価法

遠赤外線ヒーターの特徴は一般に分光放射率で評価されているが、これを利用した加熱・乾燥装置では、伝熱の一様性や長期間使用したときの経時変化が問題になる。これらに関するデータは分光放射率を除いて製造者からはほとんど明らかにされていない。また分光放射率にしてもカタログデータには明確でないものもあり、遠赤外線ヒーターの性能に関する評価法は確立していない。

遠赤外線ヒーターの評価項目としては 1) 分光放射率 2) 表面温度分布、3) 応答特性、4) 機械的強度 さらにはこれらの5) 経時変化が上げられよう。本章では主として筆者らが行なった評価結果ならびに方法について述べる。⁽¹⁾

5.2.1 遠赤外線ヒーターの表面温度

1) 表面温度測定

遠赤外線ヒーターの評価に際してもっとも基本的な測定項目は表面温度である。表面温度の測定は温度測定の中ではもっとも難しいものの一つで、これは測温表面と雰囲気との間に温度差があると、表面近傍に温度境界層が生じ、測温体と測温表面の熱平衡が得られにくくなることによるものである。一般に熱平衡を得やすくするため、より薄い

(細い) 測温体を使用し、さらに伝熱を良くするため測温面に埋め込む、接着剤で固定するなどの工夫が行なわれる。しかし、遠赤外線ヒーターの場合は表面がセラミックス質のものが多く、埋め込むことは難しいので、接着材で固定せざるを得ない。筆者らは当初薄膜型の熱電対を使用した。接着面積が大きくなる(15mm角程度)、長期の使用で機械的に剥がれやすいなどの問題があったので、必要に応じてテフロン被覆の0.1mmφの熱電対を使用した。熱電対にはさらに細いものもあるが、熱電対の溶接を考えると実用的には0.1mmφが限界であろう。また、接着剤には高温に耐えるセラミック系の接着剤(東亜合成化学 アロンセラミック C,D,E,W 型)を使用した。

温度分布の測定には赤外面像装置の利用が簡便であるが、温度の絶対値を求めるには放射率補正が必要である。測定値の補正は測定した分光放射率を利用すればよいが、出来れば画像中に熱電対温度を配してこれを参考にすると良い。

なお、ヒーター表面の温度は一様でないので、分光放射率の測定では、予め赤外面像装置で温度分布を測定し、測温点と放射測定点とに温度差がないことを確かめて測定を行なっている。

2) 表面温度分布

ヒーターの表面温度分布は、加熱源である内部の電熱線の配置を反映して現れる。棒状ヒーターでは、中央部は一般に一様であるが、両端では端子部の温度を低くするため、端子部に向って温度は低くなるよう（図52-1a参照）電熱線を配している。また、平板型では、小型で焼結型のものは比較的一様であるが、大型（300mm*400mm）のものは棒状と同じように周縁部の温度は低く、温度の一様性もよくない（図52-1b参照）。また、中央の一様な部分が二ヶ所に分れているものもある（図52-1c参照）。

図52-1 赤外面像による遠赤外線ヒーターの表面温度の一例

a) 棒状ヒーター⁽¹⁾ b) 面状⁽²⁾ c) 面状⁽¹⁾

5.2.2 分光放射率の測定

分光放射率の測定には、黒体放射と比較する方法が多く用いられている。分光装置にはフィルター方式、分散方式、およびフーリエ変換方式（FTSと呼ぶ）などがあるが、最近ではFTSが多く用いられるようになってきている。本項では筆者らが使用しているFTSを用いた測定方法について述べる。

1) 分光放射測定システム⁽²⁾

測定に用いている分光システムの概要を図52-2に示す。このシステムは吸収測定用の分光装置（日本パナラット FTS-65型）をベースにしたもので、No1（分光領域4000~400cm⁻¹）および No2（400~10cm⁻¹）の二つの分光器で構成されている。両者をつなぐ中央の外部放射取込用の光学系は、二個の軸はずし球面鏡を使用している。このシステムは原理的には単光束法で、試料の分光放射率は同一温度の黒体炉と試料の放射を切替えて比較している。試料と黒体炉は右側の球面鏡で切替えるようになっているが、切替えた場合の測定条件を合わせることが難しく完全な調整が出来なかったため、現在は黒体炉と試料を自動式の移動架台で移動し置き換えるように改造している。なお、試料位置は光学系の視野内の表面温度が一様であれば特に制約はないが、一般的には試料表面に焦点を合せて測定する。

図52-2 分光放射率測定システム⁽²⁾

2) 放射率の測定

この測定システムでは試料の放射率は、次の三つの過程を経て得られる。

- a) 黒体炉を所定の温度に調整し、分光放射輝度を測定する ($E_b(\lambda \cdot T)$ の測定)
- b) 試料の表面温度を黒体炉温度に調整し、分光放射輝度を測定する ($E_s(\lambda \cdot T)$ の測定)
- c) データ処理装置に収録されているそれぞれの分光放射輝度から試料の分光放射率を計算する。

測定は通常ヒーターの定格に近い入力を与えて行なっている。このためヒーターの温度は大略 300~600℃ と高温になり、4.2章 (17) 式を満足できるので放射率は(1)式によって計算できる。

$$\varepsilon(\lambda \cdot T) = E_s(\lambda \cdot T) / E_b(\lambda \cdot T) \quad (1)$$

この計算はデータ処理部に内蔵している解析プログラムで行なわれる。

3) 測定例

このようにして得られた試料の分光放射輝度ならびに分光放射率の代表例を図52-3に示す。横軸は波長で示してあるが、本システムは基本的には波数表示で出力するが、必要に応じて波数または波長を選んで出力できる。

図52-3 遠赤外線ヒーターの分光放射率測定例⁽³⁾

4) 温度特性

放射率は一般に温度で変化することが知られているが、実験に供した多くの遠赤外線ヒーターは、上述の温度範囲では、温度による放射率の変化はほとんど認められず⁽²⁾ (図52-4参照)、これより低温でも大きな変化は無いものと推定される。したがって、分光放射率については測定が容易な高温で測定するとよい。

図52-4 分光放射率の温度依存性⁽³⁾

5) 表面温度測定の影響

黒体との比較法は、黒体放射 (炉) と测温対象との温度が同一という条件で得られる。

一般に黒体炉の温度は炉の温度制御とともに検討されているので、実用的には十分な精度でえられるが、測定対象については上述のようにその表面温度の測定は難しく、測定精度は一般に低いと考えられる。

温度変化が放射輝度に与える影響は放射輝度 $N(\lambda)$ の変化率

$$\Delta N(\lambda)/N(\lambda) = K \cdot \Delta T / T$$

で考察できる⁽³⁾。ここで係数 K は、 $N(\lambda)$ にプランクの式を用いた場合、図52-5のようになる。図で明らかなように高波数（短波長）域で、且つ温度が低い場合にその影響が大きい。一般に常温雰囲気における高温物体の表面温度の測定誤差は（－）側にでる。すなわち、実際よりも低い温度を測定する。このことは（1）式で計算される放射率は真値よりも小さいを与える。また、短波長域でこの影響が大きいので、この帯域の評価には注意が必要である。温度測定値の誤差評価はむずかしい問題で、絶対的な方法がないが、5.2.1項で述べたように熱電対の取り付けに十分注意するとともに、赤外面像と併用して測定値を検討するとよい。また、放射率の性質から1以上の値の有無、特に短波長のスペクトルの異常な変化などが評価の判断材料として利用できる。

図52-5 放射輝度の変化率⁽⁵⁾

6) 低温放射体の測定

低温放射体の分光測定を難しくする主要な原因は、光路中ガスによる吸収と光学系からの背景ノイズである。これらを原因とする障害は、比較測定では原理的には消去できる。しかし、測定温度が低い場合には、検出器入力小さく相対的にノイズ成分が大きく、ふらつきにより変化分の消去が困難になる。光路中ガスの主要なものはH₂OおよびCO₂で、遠赤外域に多くの線スペクトルがある。この影響を取り除くためには光学系を真空にする、乾燥空気、窒素ガスで置換するなどの方法があるが、放射測定のように光学系が分光装置の外部につながっている場合には、窓材の選択が難しい。光学系からの背景ノイズは、ミラーの汚れや質の悪さに原因するミラー自体からの放射および集光系以外からの迷光である。光学系からの放射はこれを冷却することによって減少させることができるが、実用的にはかなり難しい。

なお、4章で述べたように低温の基準放射源と比較する方法は常温の放射体の測定に有効であるが、本測定システムでは、ミラーチョッパーが使用できないので応用できない。しかし、検出器に冷却型を用いることにより、これと同じ効果が得られる。

7) 黒体炉の設定位置について⁽⁶⁾

黒体炉の設定は、取扱説明書などでは集光光学系の焦点に黒体炉の窓が位置するよう説明している。しかし、黒体炉の性能は黒体炉の壁の黒さで評価されているので、黒体炉は光学系の焦点が底面に合うよう設置するべきである。

比較法では、黒体放射と試料の放射を比較するとき光路中の吸収の影響は消去されるが、光路長に差があれば、完全な消去はできない。黒体炉の窓に合わせるか底面に合わせるかは、光路長の差として現われる。この影響は吸収の強い帯域（CO₂ 4.3 μ m H₂O 6.3 μ m 帯）で顕著に現れる。図52-3の4.3 μ mおよび6.3 μ m帯域に見られるノイズはこの影響と考えられるものである。なお、黒体炉の窓は出来るだけ小さい方が良いが、焦点を底面に合わせると光束が窓に懸かり誤差の原因になる。

5.2.3 放射効率の測定

電気入力に対する放射伝熱量の大きさ、すなわち放射効率は、放射体の分光放射率が既知であれば、温度を測定することによって計算によって求めることができる。しかし、実際には分光放射率や表面温度の測定には問題が多いので、出来得れば放射伝熱量のほか対流伝熱量を求め、これと電気入力とからヒーターの熱収支を検討しながら放射効率を求めると良い。

なお、対流伝熱量は水平円柱については代表温度を与えることによって容易に計算することができるが、面状放射体については平板の置き方によって対流損失が大きく変わり、水平に置いた場合には上面と下面とで異なる。また、縁の影響も大きいことなど問題が多い。ここでは棒状ヒーターについて熱収支を検討し、平板型については温度データから直接熱放射量を求めた結果について述べる⁽³⁾。

1) 棒状ヒータ

a) 表面温度の測定

表面温度の測定には0.1mm ϕ の熱電対および赤外線画像装置を使用した。熱電対は円筒断面の頂部に温接点ができるように引っ掛け、引張りを与えて接触させるようにした。この位置は、円筒断面の下部からの対流による境界層が剥離して若干厚くなったところで外気の影響を受けにくいところである。また、長さ方向には中央部、両端部およびこれらの中間の5ヶ所に設置し、赤外面像装置で全体の温度分布を表示させ、熱電対の温度値を参考にして放射率補正を行ない、この画像から5cm間隔毎の温度値を読み取った。このようにして得た温度分布を図52-6に示す。ここで*印は測定値を、実線はこの温度値を多項式近似で示したものである。

図52-6 遠赤外線ヒータの表面温度分布測定例（棒状）⁽³⁾

b) 熱伝達量の計算

熱伝達量は1 cm毎の放射および対流伝熱量を計算し、これを長さ方向に積算して求めた。

: 放射伝熱量

放射伝熱量は次式で求めた。

$$Q_r = \sum \sum [\epsilon(\lambda) W_b(\lambda_i \cdot T) - W_a(\lambda_i \cdot T_a)] A_j$$
$$W_b(\lambda_i \cdot T) = C_1 / \lambda_i \exp(C_2 / \lambda_i \cdot T) - 1$$

ただし、 $W_b(\lambda_i \cdot T)$ は温度における黒体の分光放射発散度、 $W_a(\lambda_i \cdot T_a)$ は温度 T_a の雰囲気中の分光放射発散度、 $\epsilon(\lambda_i)$ ；試料の分光放射率、 λ は波長、 T は温度、 C_1 、 C_2 はプランクの定数、 A は表面積、添字 i 、 j は任意の数である。

: 対流熱伝達量

ヒーターを水平にして使用したと仮定して、これからの対流熱伝達量 Q_c を水平円柱自然対流熱伝達として計算した。自然対流熱伝達では、一般に次の関数型をとることが知られている。(7)

$$Nu = c (Gr \cdot Pr)^m \quad (6)$$

ここで、 $Nu = \alpha d / \lambda$ ；ヌセルト数、 $Gr = g \beta d (t - t_a) / \nu$ ；グラスホフ数、 $Pr = \nu / a$ ；プラントル数、 c 、 m ；定数、である。また Nu を求めることにより、熱伝達量 Q_c は次のように求めることができる。

$$\alpha = Nu \cdot \lambda / d \quad (7)$$

$$Q_c = \sum [\alpha_j (t_j - t_a) \cdot A_j] \quad (8)$$

ただし、 α は平均熱伝達率、 g は重力の加速度、 β 、 λ 、 ν 、 a は流体の膨張係数、熱伝導率、動粘性係数、温度伝達率、 d は円柱の外形、 t_j は円柱の表面温度、 t_a は周囲流体の温度である。なお、定数 c 、 m の値は $(Gr \cdot Pr)$ の値によって、本実験の範囲では $c = 0.53$ $m = 0.25$ が与えられている(8)。なお、対流伝熱計算式は文献(9)で修正されているが、文献(8)の方が簡略であり、指定された伝熱条件では同じ結果が得られる。ただし、物性値の一部が改定されているので物性値は文献(9)を使用する必要がある。

d) 結果

表52-1に示すように熱収支には最高10~20%の差がみられた。この結果は端子部の損失を考慮すると、伝熱実験としては妥当な値である。測定精度は表面温度の測定精度に直接関係するが、一連の結果から温度測定は実用的に十分な精度で測定されたものと考えられる。

表52-1 遠赤外線ヒータの熱収支計算例⁽²⁾

2) 面状ヒータ

面状放熱体の対流熱伝達の計算は温度が一樣な場合は上記伝熱資料に与えられているが、温度が一樣でない面状ヒータにはこれらの計算式は適用できない。また、棒状ヒータの経験から温度測定に注意すれば実用上十分な精度で放射効率を求めることができるので、面状ヒータについては放射伝熱量のみ求めた。表面温度は補正した赤外面像データを使用した。また、表面温度は一樣でないので、画像処理プログラムを利用して16階調の等温度ヒストグラム(図52-7参照)を作り、得られた温度と領域を使用してそれぞれの領域の放射量を計算し、これを積算して全放射量を求めた。得られた結果の一例を表52-2に示す。

図52-7 面状ヒータの表面温度分布ヒストグラム

表52-2 面状ヒータの放射効率計算例⁽²⁾

3) 定格入力と放射効率

定格入力に対する放射効率は大略50~60%であるが、入力の低下により、表面温度とともに放射効率も低下する。したがって、放射効率のみを考えれば、高温で使用すればよい。また、当然のことながら放射は短波長成分が多くなる。

5.2.4 遠赤外線ヒータの経時変化

遠赤外線ヒータは、使用を繰返している間に表面材質の酸化、あるいは表面と表面下の材質の熱膨張率の相違による表面層の剝離によって、放射面の表面性状の変化、これにともなう放射特性の変化が、また、放射面を加熱するための電熱線の劣化による発熱量の低下などが懸念される。

この項では、市販の遠赤外線ヒータを供試体とした、長期間の課電暴露試験による経時変化についてのべる。⁽¹⁰⁾

試験に供した遠赤外線ヒータは、市場に広く出回り、入手可能なものを選んだ。

1) 試験の方法

面状ヒータは放射面を下側にし、棒状の場合とともに水平にして、コンクリート床面の室内に釣り下げる形で設置した。

電圧は断続して印加し、周期はON-3 時間、OFF-1 時間とした。通電開始前および開始後 300, 600, 900周期毎に分光放射率、表面状態（目視による外観点検、写真撮影）の測定を行ない、1500周期の試験を行なった。

雰囲気は使用条件によって大きく異なりヒータに与える影響も大きいが、この試験では雰囲気は換気のほかは特に調整していない。

2) 試験結果

試験の結果は表52-3に示すように種々の異常が発生した。

表52-3 連続課電試験結果 (10)

a) 表面温度および放射輝度の変化

繰返し課電を経る内に定格電圧を印加したときの放射面温度が低下する遠赤外線ヒータがあった（図52-8参照）。温度低下の発生は使用温度が高いヒータに顕著である。また、試験期間を通じて表面温度の最大値と最低値の差が最大値の10%を越えたヒータは8種あり、この温度低下分を全放射輝度の低下分に換算すると、最大値の20-50%に相当する。すなわち、これらの遠赤外線ヒータでは使用を重ねるうちに放射パワーが20-50%低下したことになる。この現象は電熱線の劣化に起因するものと考えられる。

図52-8 放射面温度の経時変化 (10)

b) 分光放射率および表面状態

電熱線の断線や放射面の大規模な剥離によって4種のヒータが使用不能になった。しかし、これらを除いたものの多くでは分光放射率や表面状態などの経時変化は見られなかった。また、分光放射率に変化があったものもその変化はせいぜい10%程度である。

5.2.6 セラミック熔射被膜の耐熱衝撃性

溶射被膜の耐熱衝撃性の試験法として、試験片を500℃以上の加熱および水冷の繰返しによって調べる方法がある⁽¹¹⁾。この方法により尾谷らは⁽¹²⁾金属にセラミックを熔射した試料の試験を行なっている。この試験では試料を600, 700, 800℃に加熱した後水冷し、これを最高30回繰返し、被膜の亀裂、剥離の有無を調べている。この結果基盤にセラミックスを直接熔射したものは600℃では異常が認められなかったが、700℃では剥離

が生じた。また、耐酸化性材料 (Ni-Cr合金) をセラミックス被膜の下地被膜として基盤表面にコーティングした試験片は、700℃では異常は生じなかったが、800℃で剥離が生じた。これらのことから基盤に直接熔射したものでは基盤に生成される酸化膜により剥離しやすくなる。また、より高温では金属材料とセラミックス被膜との熱膨張係数の違いが剥離の原因となっていると指摘している。

(宮川)

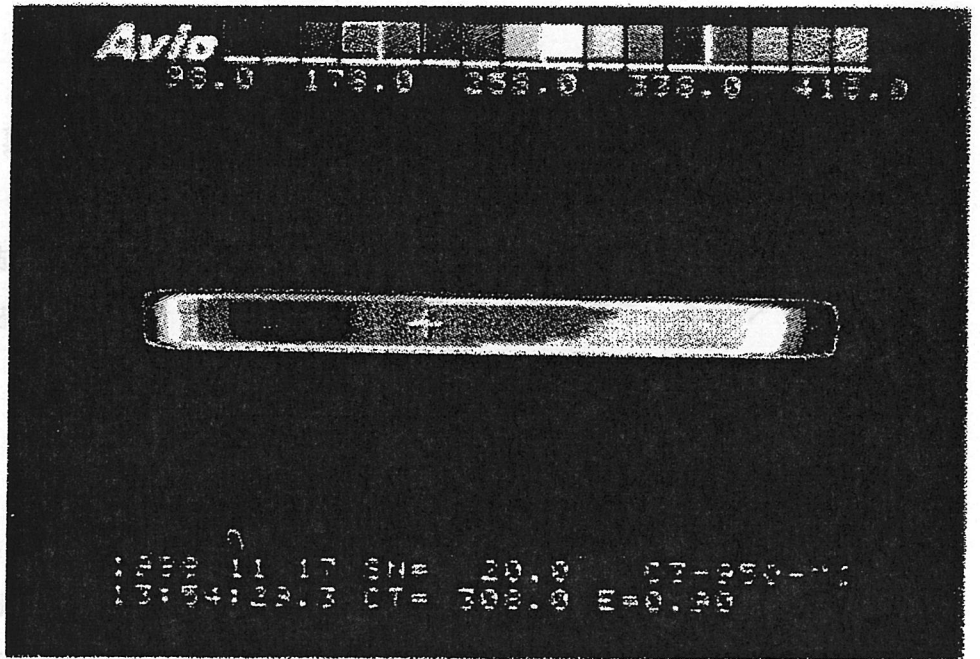
参考文献

- 1) 中の、宮永、宮川；遠赤外線ヒータの評価方法について、最近の遠赤外放射源と関連応用技術の動向 照明学会光放射の応用・関連計測研究会資料、89'6
- 2) 中野、宮川；遠赤外線放射体の分光放射率測定方法—フーリエ変換赤外分光光度計による方法—、電中研研究報告、T87109 88'
- 3) 中野、宮永、宮川；遠赤外線ヒータの放射特性の測定と加熱過程の検討、電中研研究報告、T88102 89'
- 4) 高田；赤外放射による温度測定の基礎、赤外線技術、NO.6, P.2, 81'
- 5) 宮川；遠赤外線放射測定に関する調査、電中研調査報告、T86091 87'
- 6) 宮川、中野；放射計較正時の黒体炉窓位置について一考察、平成2年度応用物理関係連合大会予稿集、
- 7) J.R.HOLMAN, (平田訳)；伝熱工学、P 229 ブレイン図書出版
- 8) 日本機械学会編；伝熱工学資料第3版 P 38
- 9) 日本機械学会編；伝熱工学資料第4版
- 10) 中野、宮川；遠赤外線ヒータの放射特性(その1)—放射特性の経時変化—、電中研調査報告、T89032 90'
- 11) JIS-H8666 セラミック熔射試験方法
- 12) 尾谷ほか；熔射による遠赤外線放射体の開発とその応用、北海道立工業試験場ほか、昭和62度共同研究報告書、昭63.3

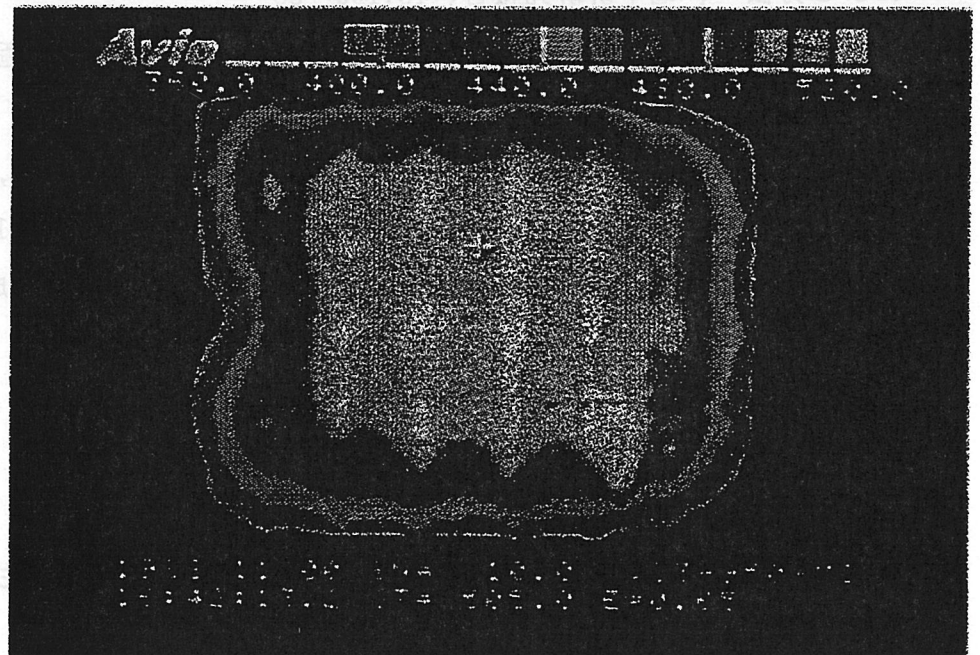
図52-1

代表的な遠赤外線ヒータの
表面温度分布

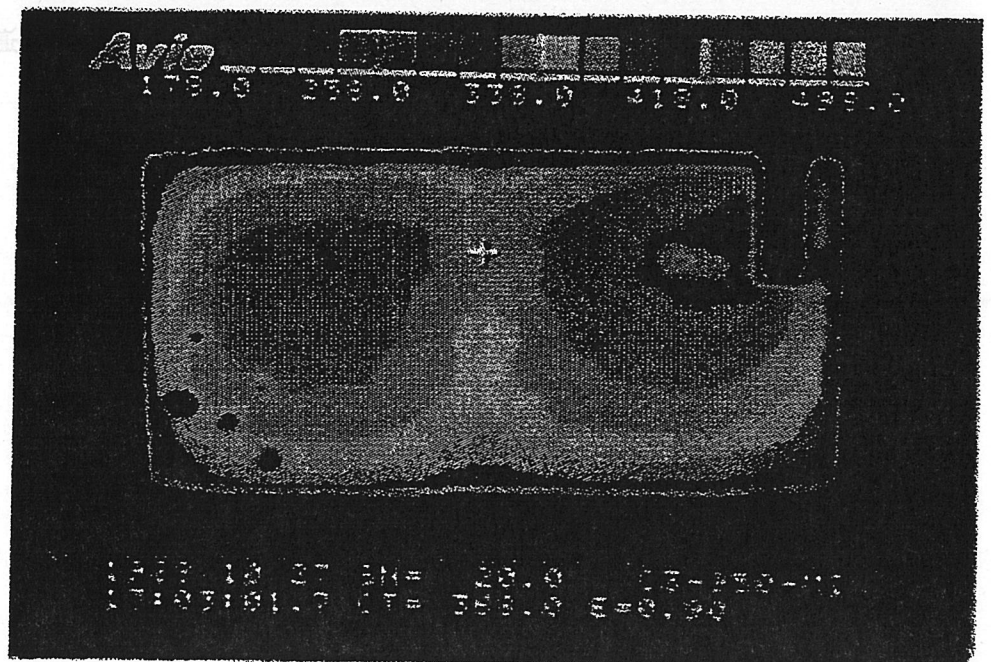
a) 棒状



b) 面状



c) 面状



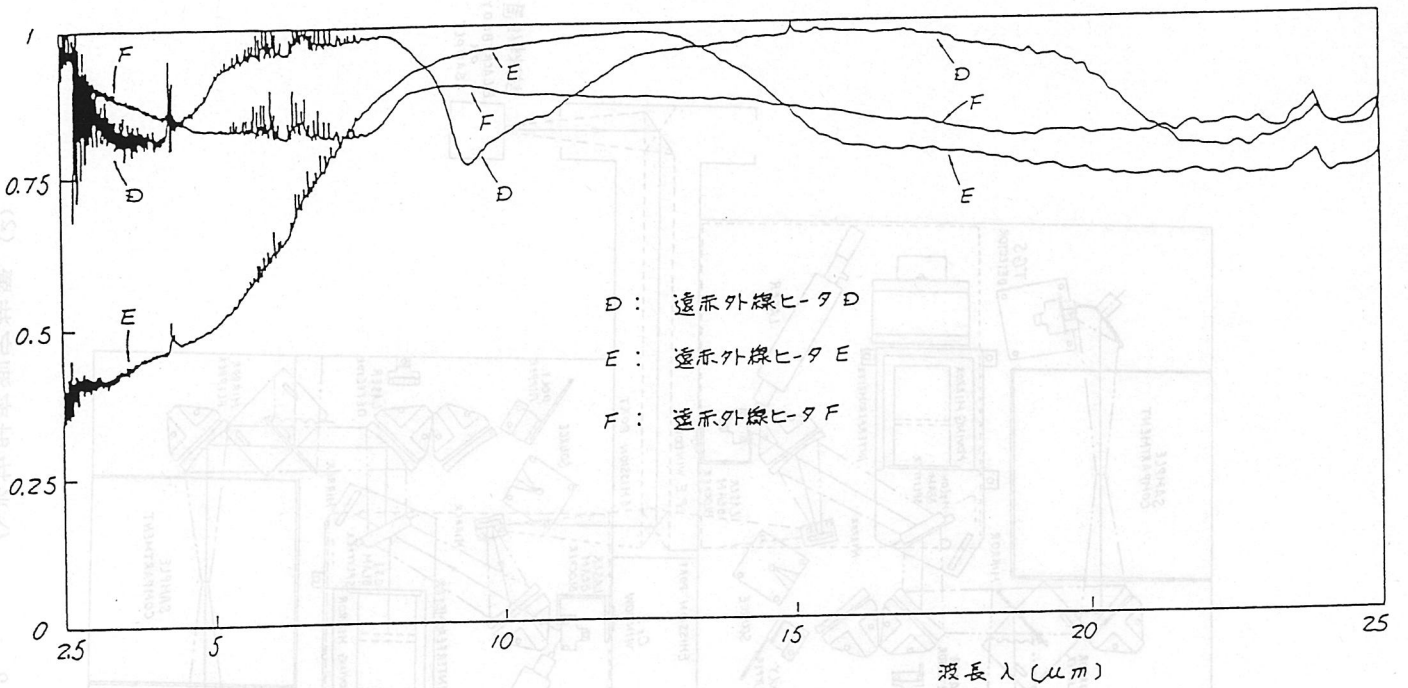
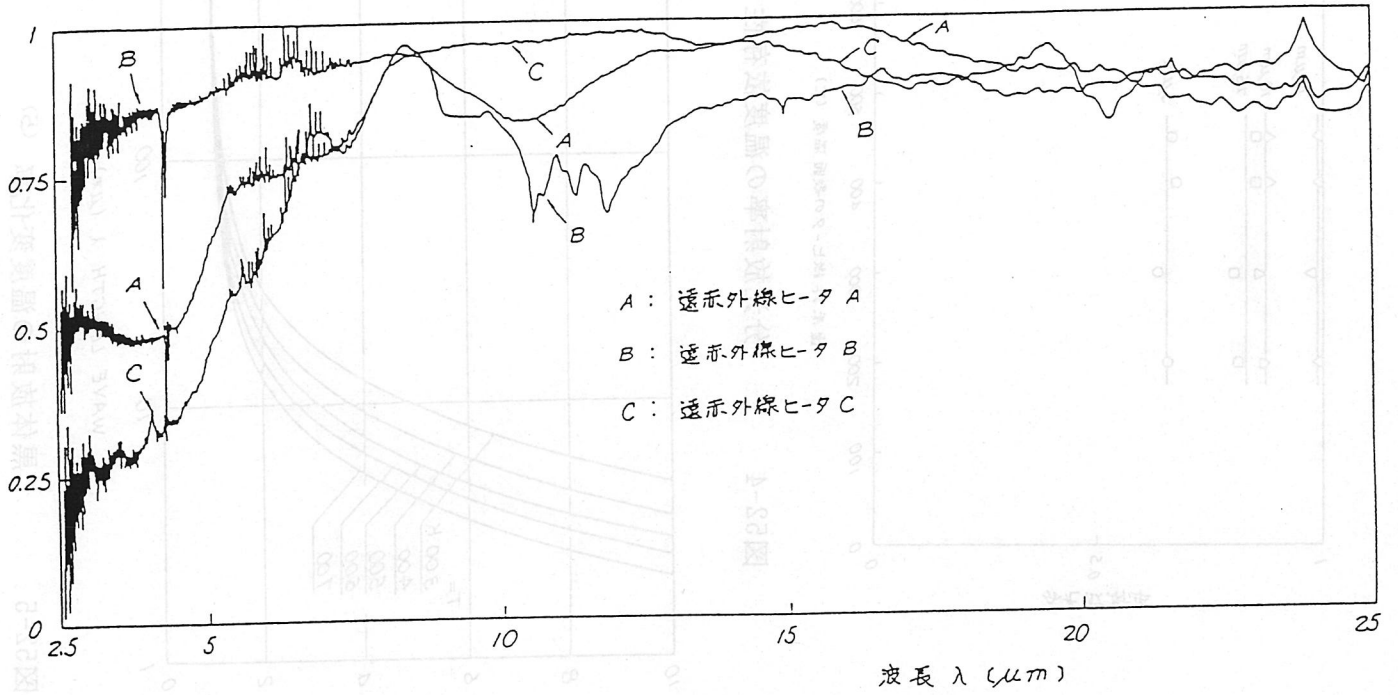


図52-3 代表的な遠赤外線ヒータの分光放射率の測定例 (3)

第2分光器
(低感度用)

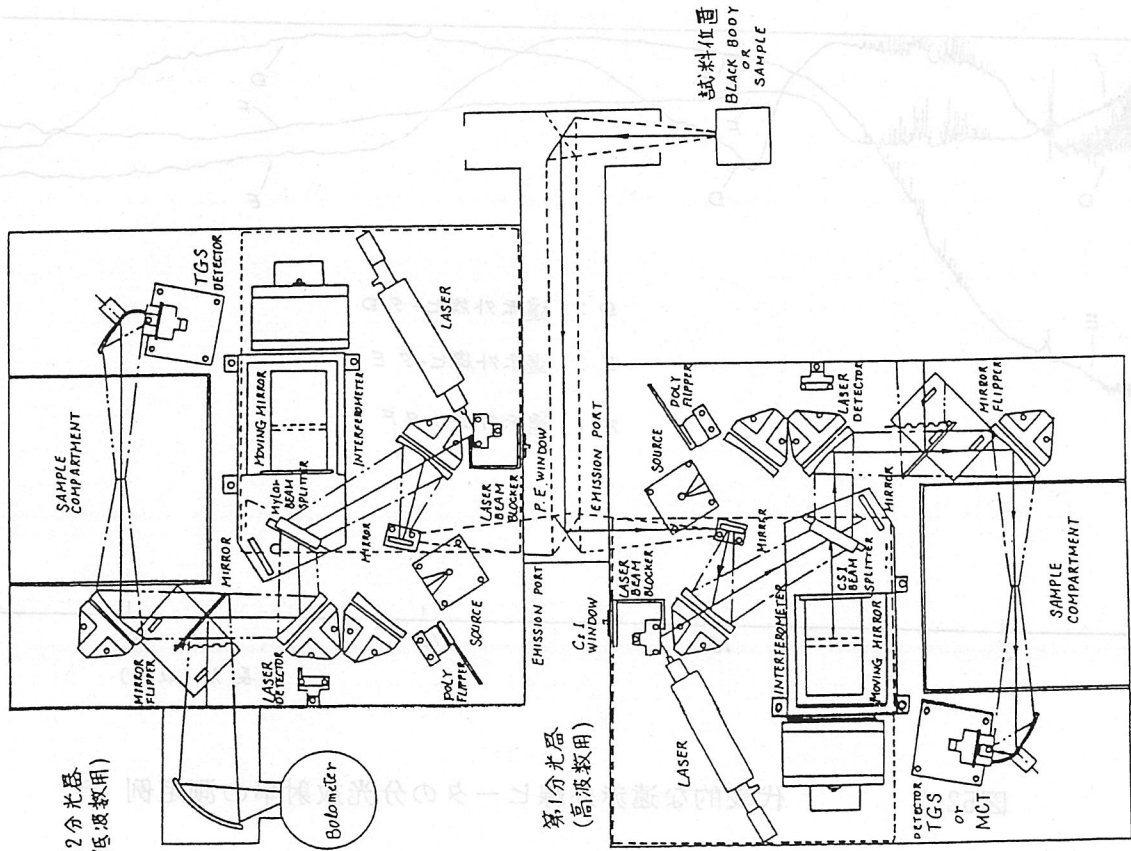
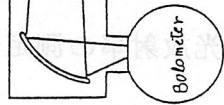


図52-2

分光放射率測定装置 (2)

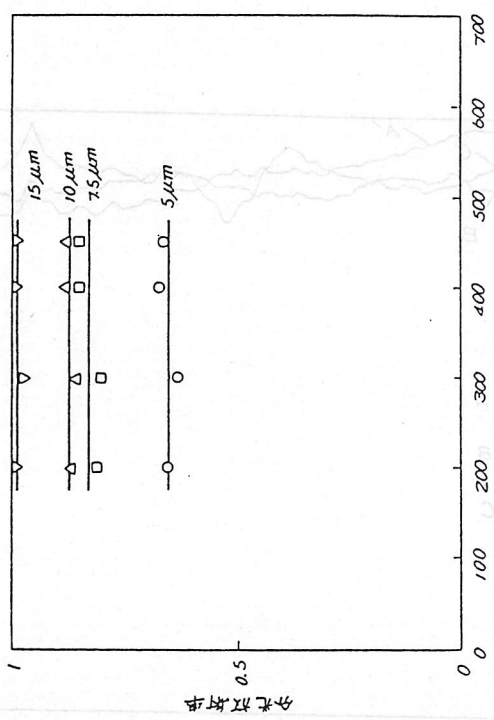


図52-4

分光放射率の温度依存性 (続)

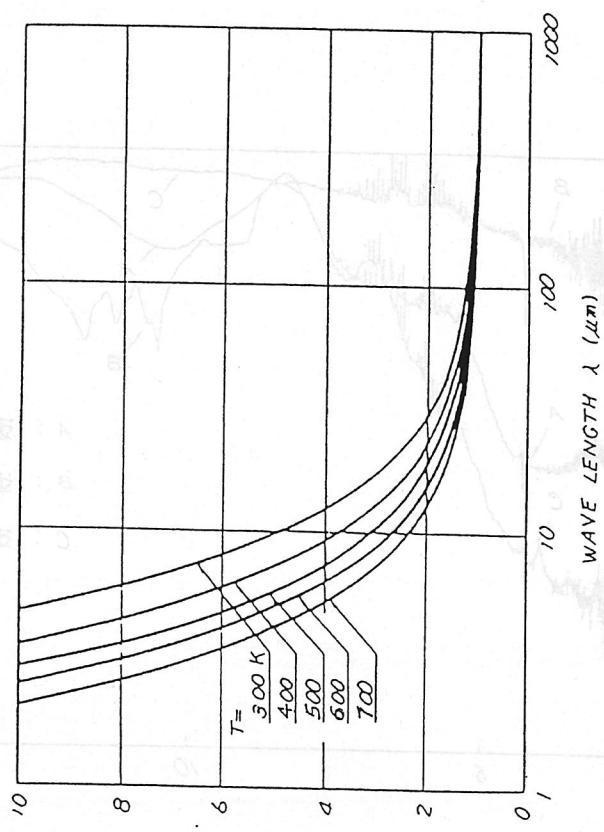


図52-5

黒体放射の温度変化率 (5)

註 文献3)の図中の温度値はミスプリント

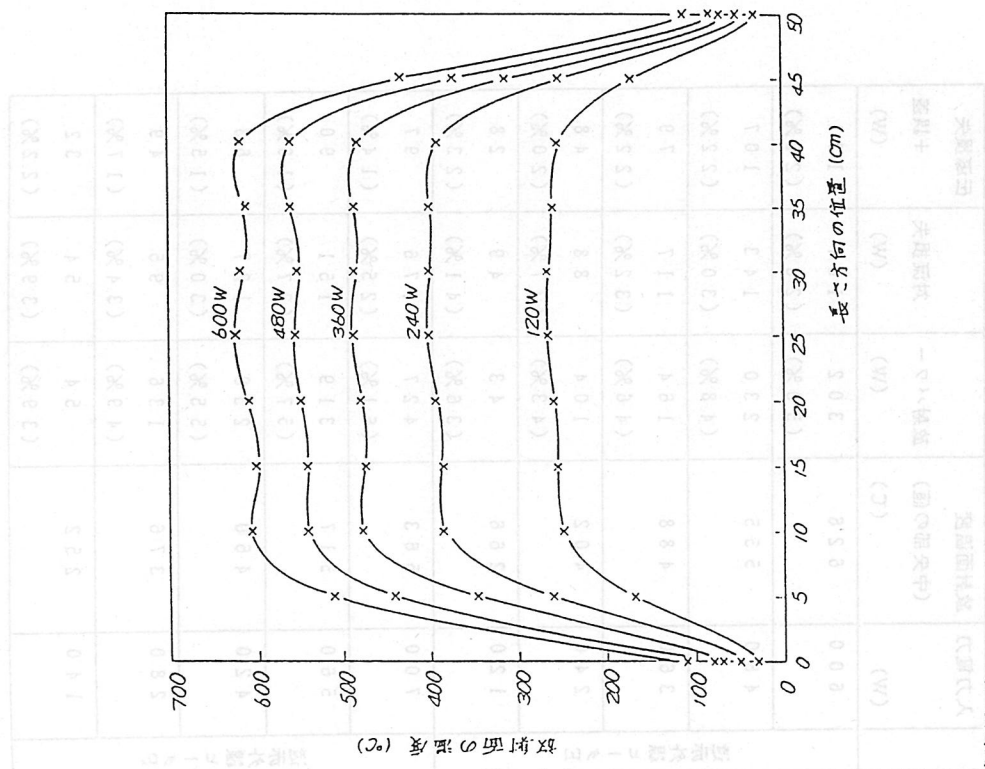


図52-6

棒状遠赤外線ヒータの放射面の温度分布測定例 (電) 3

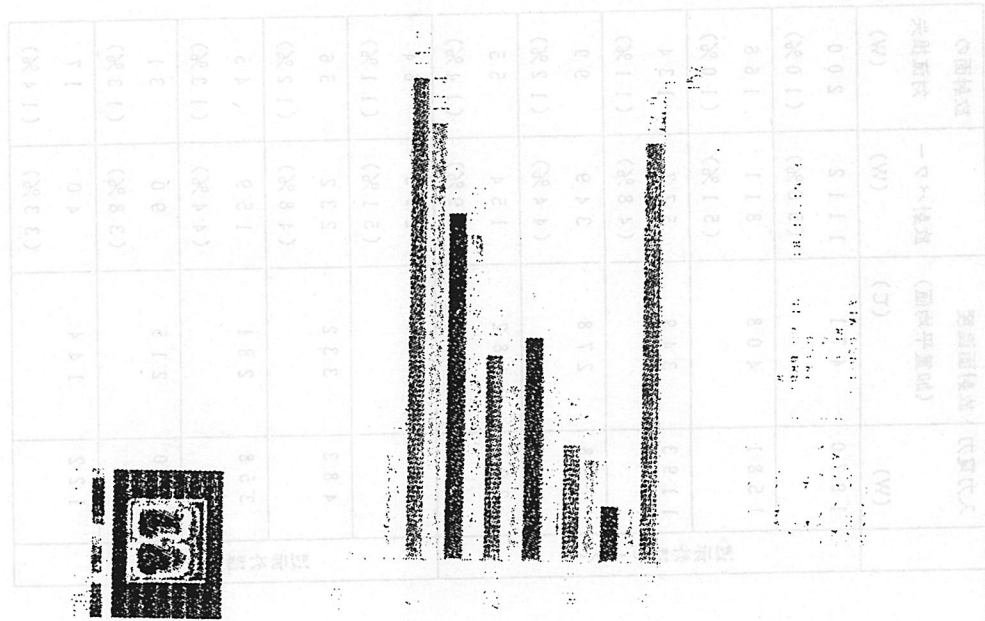


図52-7

面状遠赤外線ヒータの放射面の温度分布測定例

(赤外面像のヒストグラム)

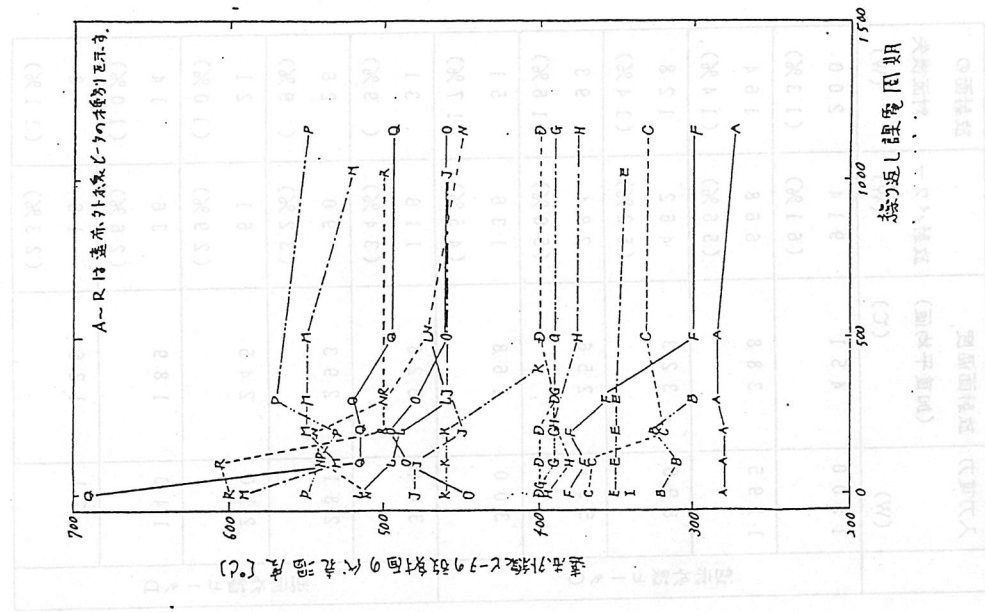


図52-8

遠赤外線ヒータの放射面温度の経時変化 (電) 3

表52-1 遠赤外線ヒータの放射温度、放射パワーおよび対流損失（棒状）(3)

入力電力 (W)	放射面温度 (中央部の値) (℃)	放射パワー (W)	対流損失 (W)	伝導損失 + 放射損失 (W)
600	626	302 (50%)	167 (28%)	131 (22%)
480	555	230 (48%)	143 (30%)	107 (22%)
360	488	164 (46%)	117 (32%)	79 (22%)
240	402	104 (43%)	88 (37%)	48 (20%)
120	266	43 (36%)	49 (41%)	28 (23%)
700	563	427 (61%)	176 (25%)	97 (14%)
560	517	319 (57%)	151 (27%)	90 (16%)
420	460	230 (55%)	127 (30%)	63 (15%)
280	376	136 (49%)	95 (34%)	49 (17%)
140	252	54 (39%)	54 (39%)	32 (22%)

表52-2 遠赤外線ヒータの放射温度、放射パワーおよび対流損失（面状）(7)

入力電力 (W)	放射面温度 (加重平均値) (℃)	放射パワー (W)	対流損失 (W)
1970	471	1112 (56%)	200 (10%)
1581	408	811 (51%)	166 (10%)
1193	349	577 (48%)	134 (11%)
798	278	349 (44%)	99 (12%)
395	182	154 (39%)	55 (14%)
569	366	293 (51%)	64 (11%)
483	332	232 (48%)	56 (12%)
358	281	159 (44%)	45 (13%)
240	215	90 (38%)	31 (13%)
122	144	40 (33%)	17 (14%)

入力電力 (W)	放射面温度 (加重平均値) (℃)	放射パワー (W)	放射面の対流損失 (W)
1500	451	914 (61%)	200 (13%)
1195	388	668 (56%)	164 (14%)
896	323	462 (52%)	128 (14%)
591	256	294 (50%)	93 (16%)
300	168	136 (45%)	51 (17%)
344	328	116 (34%)	31 (9%)
281	293	90 (32%)	26 (9%)
210	245	61 (29%)	21 (10%)
140	189	36 (26%)	14 (10%)
71	126	16 (23%)	8 (11%)

表52-3

市販ヒータの連続課電試験による経時変化⁽¹⁰⁾
(分光放射率、表面状態)

ヒータ No	形状	製造 方法	経 時 変 化
A	P	MS	変化なし
B	P	MS	205-302周期の間で5um付近の放射率が8%程度低下、100周期までに放射面がやや変色、506周期までに放射面の一部が剥離、303-506周期の間で電熱線断線
C	P	S	変化なし
D	P	S	105-204周期の間で放射面がやや変色
E	P	S	変化なし
F	P	S	105-204周期の間で放射面がやや変色
G	P	MS	105-204周期の間でヒータ外形がやや変形
H	P	MSY	1-104周期の間で5um付近の放射率が7%程度低下
I	P	MS	1-104周期の間で放射面の一部が溶融、電熱線断線、
J	P	S	1-101周期の間で5um付近の放射率が10%程度低下、15um付近が6%程度上昇、
K	L	S	1-100周期の間で5um付近の放射率が10%、7.5um付近が7%、15um付近が5%程度低下、397-507周期の間で電熱線溶融断線
L	L	MSY	1-506周期の間で5um付近の放射率が17%程度低下、1161周期までに放射面の2/3程度が剥離
M	L	S	504-1031周期の間で15um付近の放射率が5%程度上昇
N	L	MS	1-104周期の間で5um付近の放射率が16%、7.5um付近が7%、10um付近が2%程度上昇
O	L	MS	変化なし
P	L	MSY	1-104周期の間で15um付近の放射率が4%程度低下
Q	L	MS	変化なし
R	LM	MS	1-1019周期の間で10um付近の放射率が12%程度低下

註 形状 P ; 面状ヒータ P ; 面状ヒータ LP ; ランプ状
 製造 S ; セラミックスの焼結 MS ; 金属面にセラミックスを焼付け
 方法 MSY ; 金属面にセラミックスを熔射

5.3

遠赤外放射材料の種類と特性

1. 遠赤外放射材料に求められる条件

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

表 放射体の条件とその内容

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
剥離性	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

放射率は放射体からの放射パワーと、それと同温度にある完全放射体からの放射パワーとの比で定義され、その数値は放射体の性質を表すものとなっている。放射体の放射率は高い方が望ましいといえるが、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で、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1)

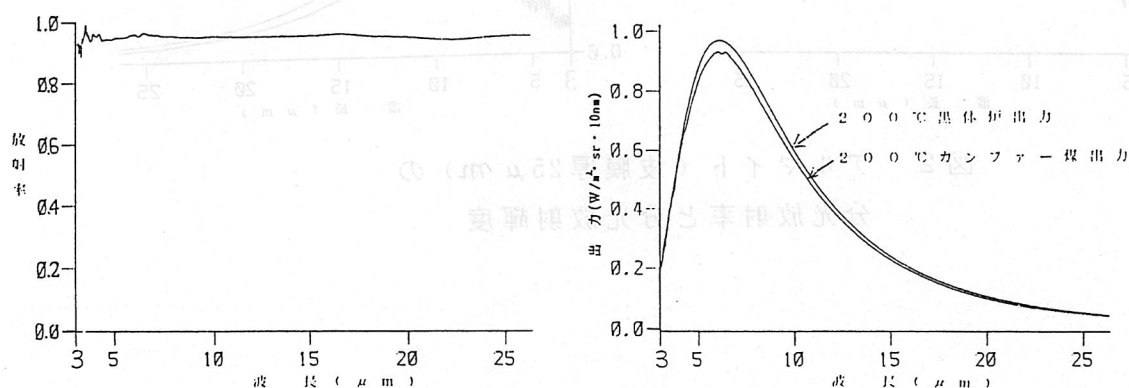


図1 カンファー(精製樟腦)ススの
分光放射率と分光放射輝度

一般の物質は波長毎の放射率の値が一定(平坦)ではなく選択放射体となっている。また特に、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んでいる。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2のように選択放射体となっている。

使用温度を中温、中高温、高温の三つに分類したが、この分け方はここだけのものであり、また明確な温度の区割りを考えているものでもない。仮に三つの区分を約150°C迄、400°C迄、それ以上と分けてみる。

中温区分の材料は放射率だけを見れば身の周りの木や紙、布でも十分な値を持っている。これは例えばサウナの遠赤外放射体が木で出来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。

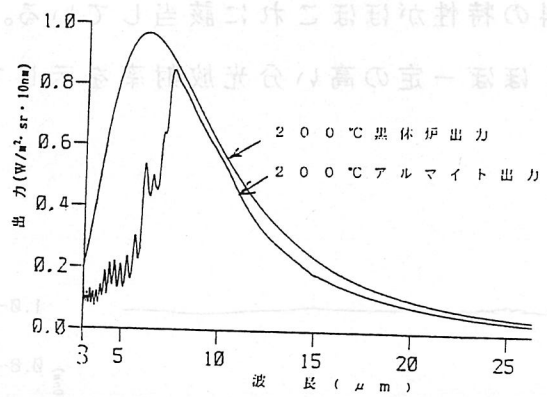
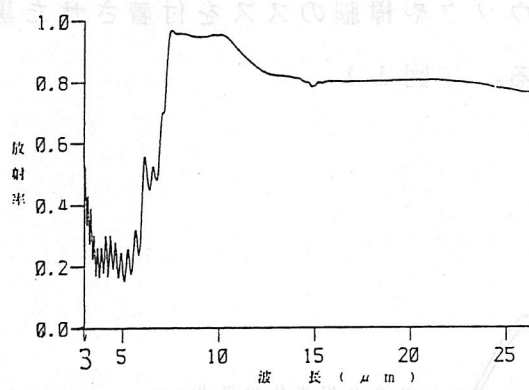


図2 アルマイト (皮膜厚 $25\mu m$) の
分光放射率と分光放射輝度

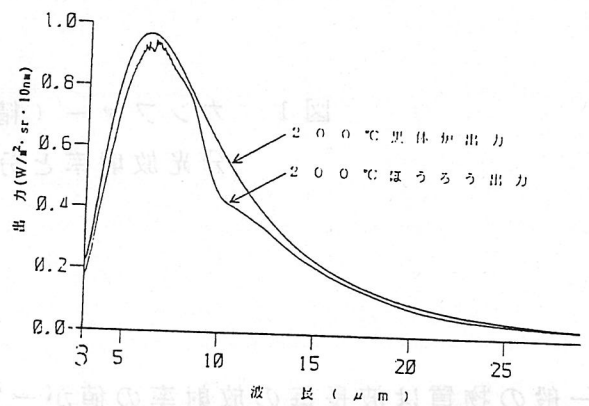
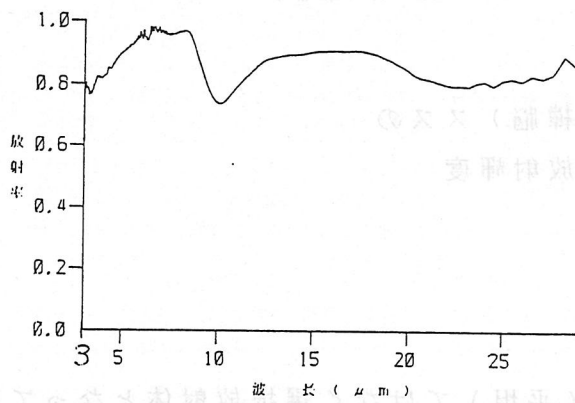


図3 ほうろうの分光放射率と分光放射輝度

中高温では、金属では鋳鉄（ストーブ）、各種のセラミックス（遠赤外ヒータ）、塗料では600℃までの耐熱塗料、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3の測定結果のように遠赤外放射率も高く、遠赤外放射材料として優秀な材料である。以前には遠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いたが、最近ではそれらは他の材料におき代わっており、今は魚焼き器位にしか見かけない。遠赤外放射材料としてのほうろうをもっと見直しても良いのではないだろうか。

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℃）で瞬間溶融し、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ることが行われており、製品も多くなってきている。

その他の項目では、剥離性とはヒータや放射体の表面物質の剥がれ易さであって、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。

（笹森）

5.4

日用品的諸部材の遠赤外線放射特性とその実際

身の回りにごく一般的に使われている建築用部材、衣料用材料などについて遠赤外線分光放射率の測定を行ったので報告する。

1. 測定装置

測定に用いた分光放射率測定装置は、分光部分にFT-IRを用いている。(パイオラッド社製 FTS-65DN型)

これはオリジナルの姿のFT-IRの光学系に反射鏡を設けて外部からの赤外光を導き入れ、その波長別強度を測定するものである。(図1及び写真参照)

この装置には標準光源として黒体炉が付属されている。(エレクトロオプティカル社製 HS 153型)

測定サンプルの温度を上昇させるため、サンプルを裏面から加熱する図2のような加熱器を用いた。

2. 分光放射率の測定

測定は先ず黒体炉の波長別出力を測定する。次に同温度にしたサンプルからの出力を測定して比を求めるとそれが分光放射率として得られる。

分光を行う測定装置は一般的に波長別感度が平坦ではなく、入力の信号とは異なる出力となる固有の装置関数を持つ。従って測定には赤外放射の基準である黒体炉を用いると同時に、サンプルの温度を同じにして装置関数を取り除く方法をとる。(図3及び図4参照)

3. 測定結果

各種サンプルを温度80～150℃にして測定したときの分光放射率測定結果を図5に表し、検討結果を以下に述べる。

1) ホーローは各色、各成分について合計25種類のサンプルの測定を行ったが、ほぼ全てのものが分光放射率は高い値であった。

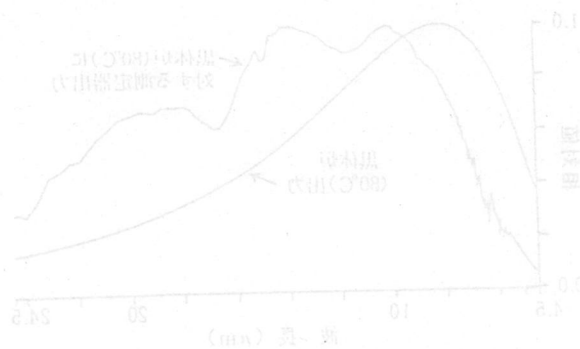
2) ホーローは波長約9 μm と20 μm 以上で放射率が低くなる特異な傾向があるが、これはガラス成分(SiO₂)を含む物質に特有の性質であり、それらの波長で反射率が高くなるためである。

3) アルマイトは目で見た場合には光沢のあるアルミニウムとほとんど変わらずに、どちらも反射率は高く分光放射率が低いように見受けられるが、波長7 μm 以上で極端に高い値となる。

4) アルマイトは、皮膜部分によって光の干渉を起こして、分光放射率が波打つ現象を起こしている。

- 5) カラー着色アルマイトは電解着色法によって作られたものである。目で見える色の濃淡の度合いが、波長 $7\mu\text{m}$ 以下の分光放射率の大小に現れている。
- 6) カラー塗装アルマイトは、アルマイト板に透明感のある塗料を塗ったものである。これも色の濃いものが波長 $7\mu\text{m}$ 以下の帯域で分光放射率が高くなっている。
- 7) カラー塗装アルマイトは、塗料成分の吸収(放射)が、分光放射率に鋭いスペクトルとなって現れている。
- 8) 塗装板は、アルミニウム粉末を混入した銀色塗装が、全波長にわたって分光放射率が0.4程度の低い値をしていた。この値は今回の測定サンプル中例外的なものであった。
- 9) 銀色以外の塗装板は、色にかかわらず波長 $5\mu\text{m}$ 以上では分光放射率は高い値であった。
- 10) 紙・布は一様に高い値をしていた。
- 11) ここで測定したサンプルは、ほとんど全てのものが波長約 $6\mu\text{m}$ 以上では分光放射率が高くなっていた。
- 12) 波長 $3\sim 5\mu\text{m}$ では可視光の吸収特性の傾向を幾分引き継いでいる物が多い。
- 13) 成分が同じで表面状態を加工した物では、粗面にすると若干分光放射率が高くなった。

(笹森)
以上



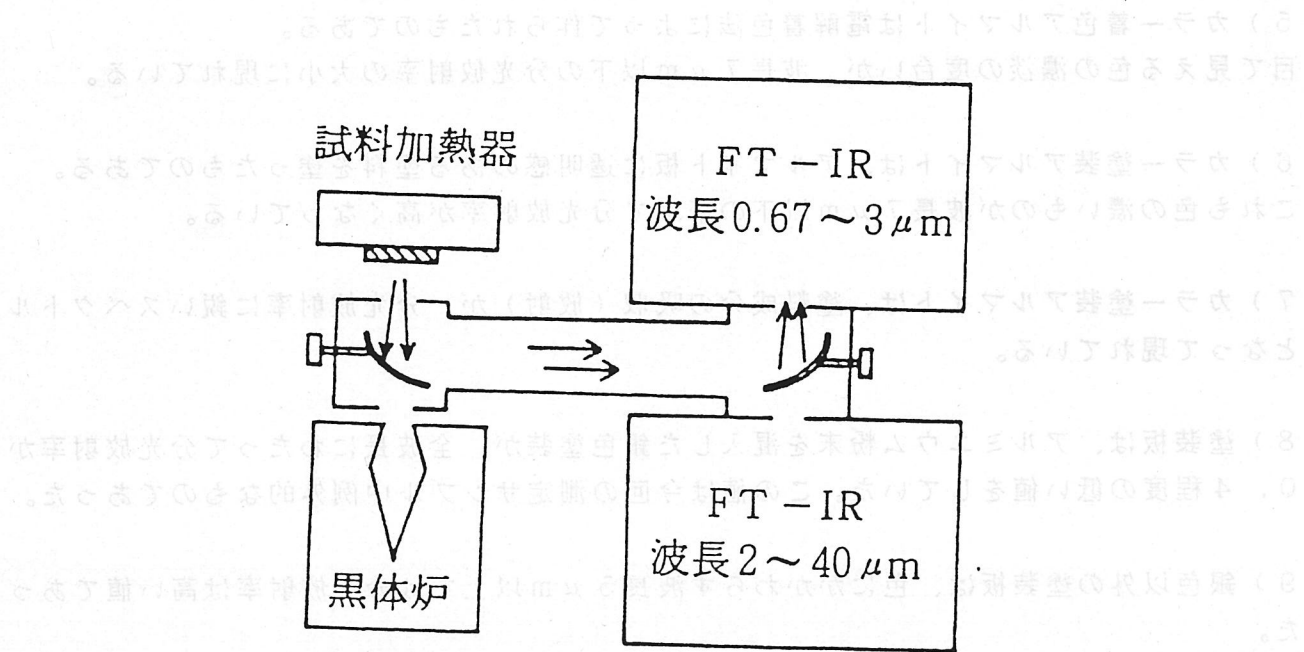


図1 分光放射率測定装置

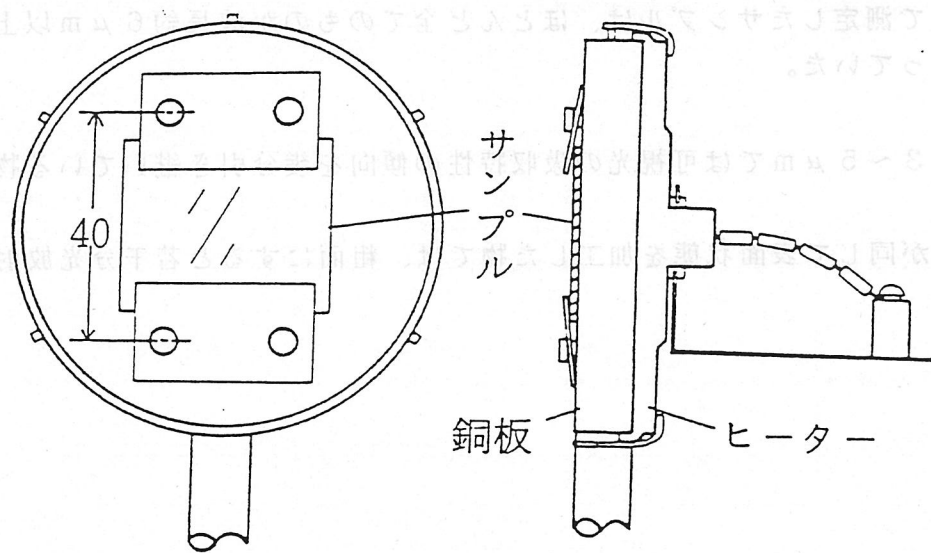


図2 加熱器の外観図

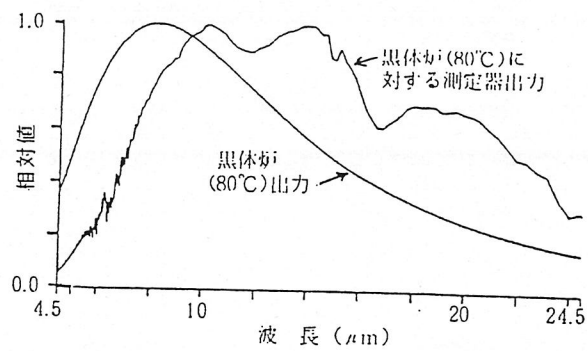


図3 黒体炉 (80°C) に対する測定器の出力

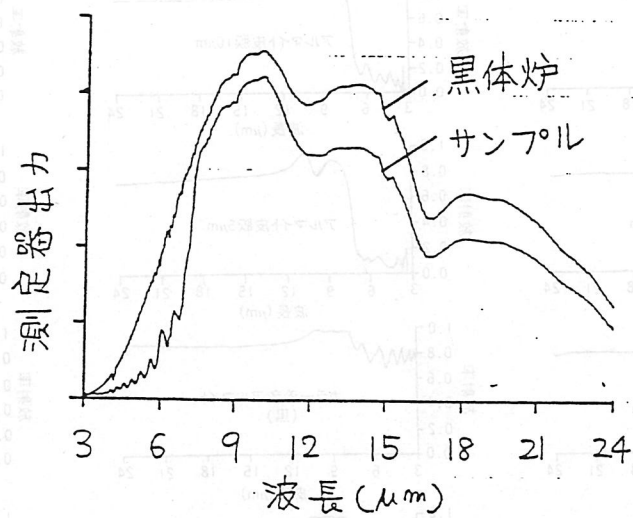


図 4 赤外放射入力に対する測定器の出力

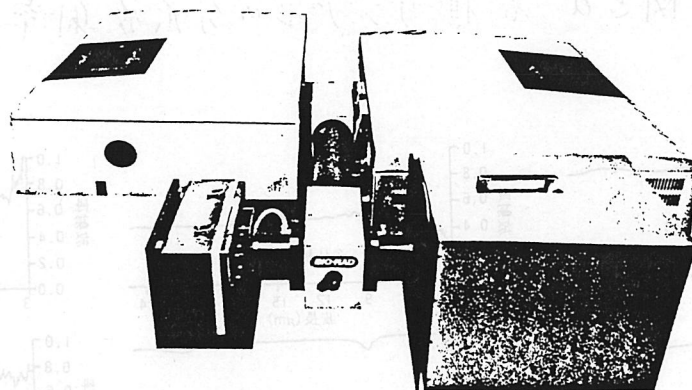


写真 分光放射率測定装置
(バイオラッド社製 FTS 65DN 型)

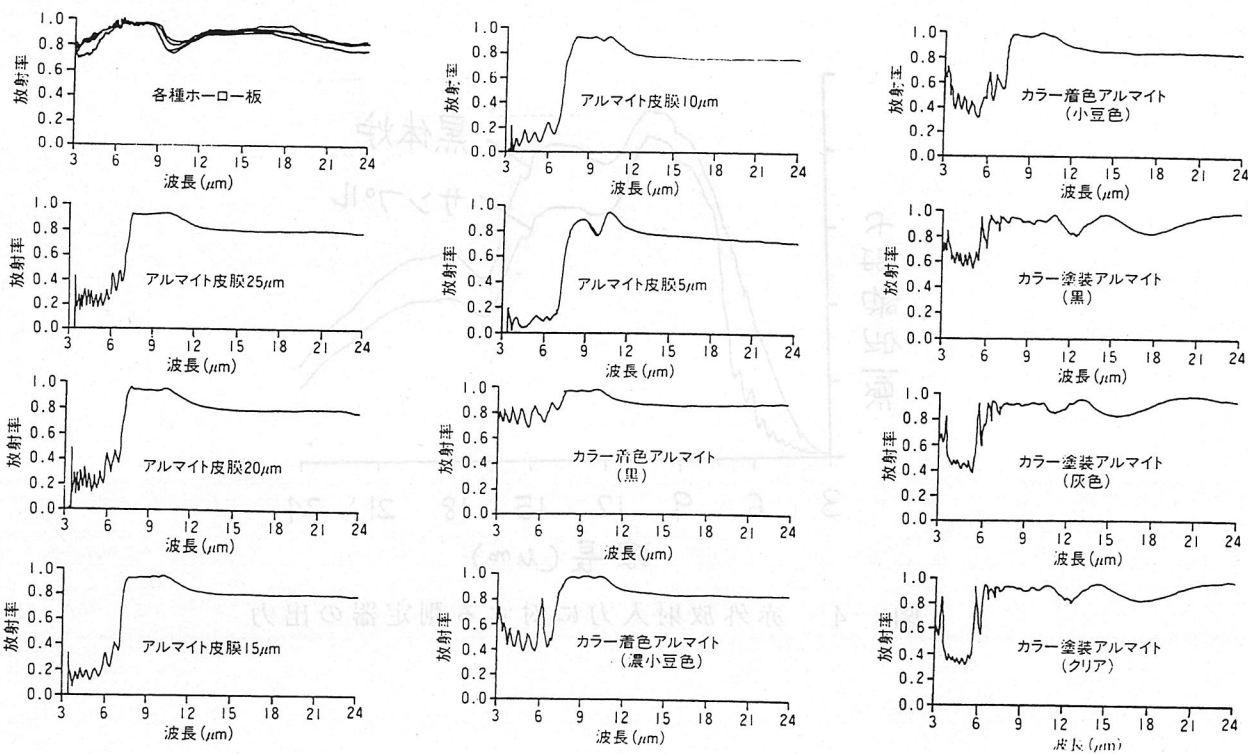


図5a 各種サンプルの分光放射率

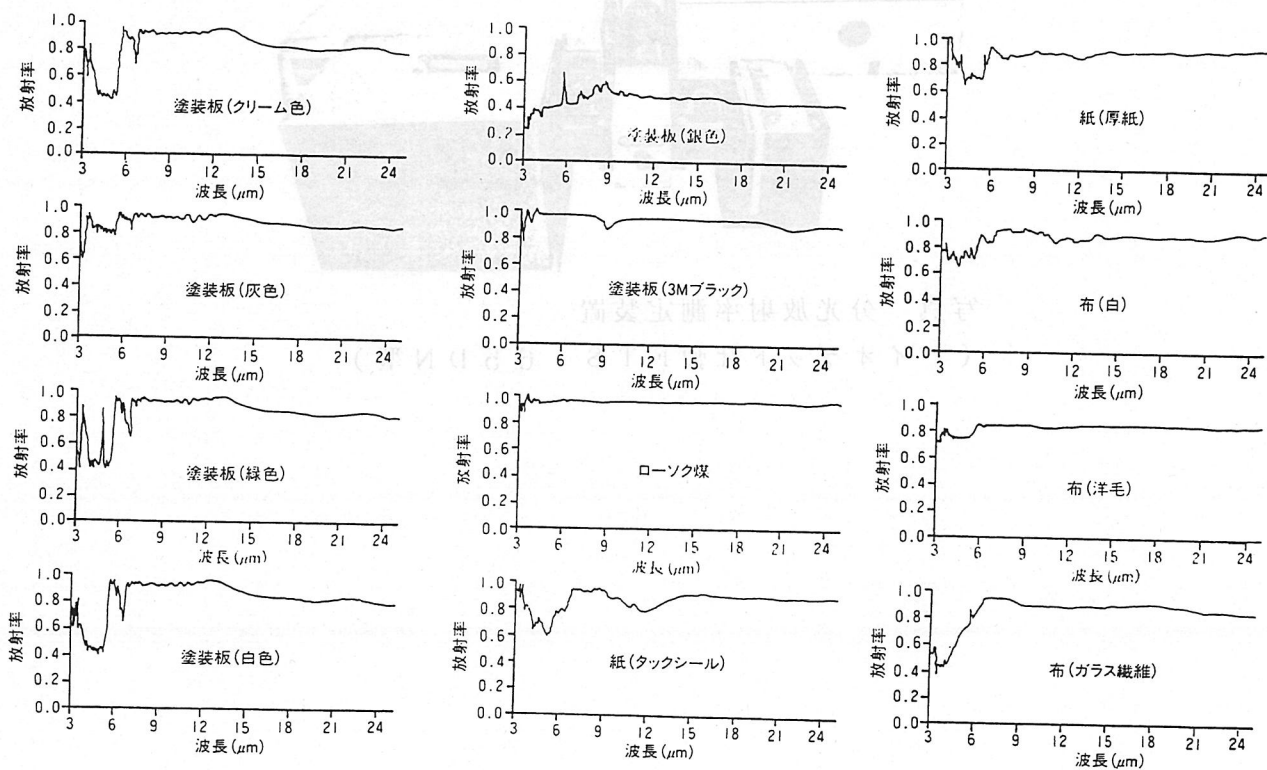


図5b 各種サンプルの分光放射率

5. 5 自然環境における赤外放射分布

5. 5. 1 はじめに

われわれは、日常直接または間接的に太陽放射のもとで生活している。したがって赤外放射の人体に対する影響を考える場合、太陽放射を基準にすることが多い。たとえば、安全性についても地上における太陽放射照度と同程度であれば安全であるという考え方である。図5.5.1に地上における太陽放射の放射照度の分光分布を示す¹⁾。

5. 5. 2 天空および地表放射の分光分布

われわれの周囲の環境を形成している物体は、自然物であると人工物であるとを問わず、すべて温度放射体である。これらの放射スペクトルは、物体を形成している個々の物質固有の分光放射率とその物体の温度によって決まる。

地表の温度は約300Kであるから、われわれは300Kの放射体に囲まれた環境内に居住していて、さらに昼間は約6000Kの太陽放射およびその散乱光、反射光に照射されていることになる。これらの環境放射は次のように分類することができる(図5.5.2参照)⁴⁾。

図5.5.3に近赤外域における天空放射の分光分布の測定例を示す。この波長域の放射は、太陽放射の散乱成分であって可視域に続くものである。同図において波長0.9、1.1 μm における放射輝度の減少は大気中の水蒸気と二酸化炭素の吸収によるものである²⁾。これらは太陽高度、天候により変化する。

遠赤外域の天空放射(晴天時)の分光分布を図5.5.4に示す³⁾。この波長域(4~20 μm)は常温物体からの放射エネルギーの最も大きい波長域(放射領域)であって、この領域の天空放射は大気からの温度放射(大気放射, Atmospheric Radiation)である。すなわち、大気組成中の H_2O 、 CO_2 、 O_3 などの三原子分子からの赤外放射であって、その強度はこれらの気体の温度と濃度(分圧)に依存する。8~13 μm は「大気の窓」と呼ばれる透過率の高い波長域で、天頂角が大きくなるにつれて放射輝度が増加しているのは、大気層の見かけの厚さが増すためである。なお、6~7 μm は水蒸気、14~16 μm は二酸化炭素の強い放射帯(吸収帯)である。

大気放射は前述の通り温度放射であるから、昼夜間において大きな変化はない。曇天時の天空放射は気温と同程度の黒体放射に類似した山形の分布になる。

地表放射はその成因から天空の場合と同様に、波長3 μm 付近を境にして短波長側の散乱・反射領域と、長波長側の自己放射領域に区分することができる。前者は地表物体による太陽光の反射成分であるから、そのスペクトル分布は当然地物の反射特性に依存するが、それ以上に光路中の水蒸気の吸収帯が分布特性を支配している(図5.5.5, 5.5.6)⁴⁾。

長波長側は常温の地物の温度放射領域であり、特殊な地物あるいは人工物体の他は大半が黒体放射に近い灰色体放射(放射率0.7~0.9)である。

5. 5. 3 おわりに

われわれは、常に前節で述べた通り常温放射体に包囲されて生活している。天空といえども例外ではない。特に曇天の場合は黒体放射に近い。このような遠赤外域の自然環境放射は、特殊なものを除けば常温物体からの温度放射であり、放射レベルが低いことから、従来気象放射学や赤外線リモートセンシング以外の分野においては殆ど考慮されなかった。しかし、今後の低温(40~100℃)暖房、生体における低レベル放射の効果などを検討する場合には無視することができない。

なお、本章では海面放射については省略した。

(松井)

文献

- 1) F.S.Johnson: J.Geophys.Res., 57 (1952) 157.
- 2) 松井松長 高木 亨: 分光研究, 18 (1969) 99.
- 3) 松井松長 高木 亨: 分光研究, 16 (1967) 112.
- 4) 松井松長: 赤外線探査・探知系における背景放射と大気効果に関する研究(財)日本産業科学研究所, (1961) 60.

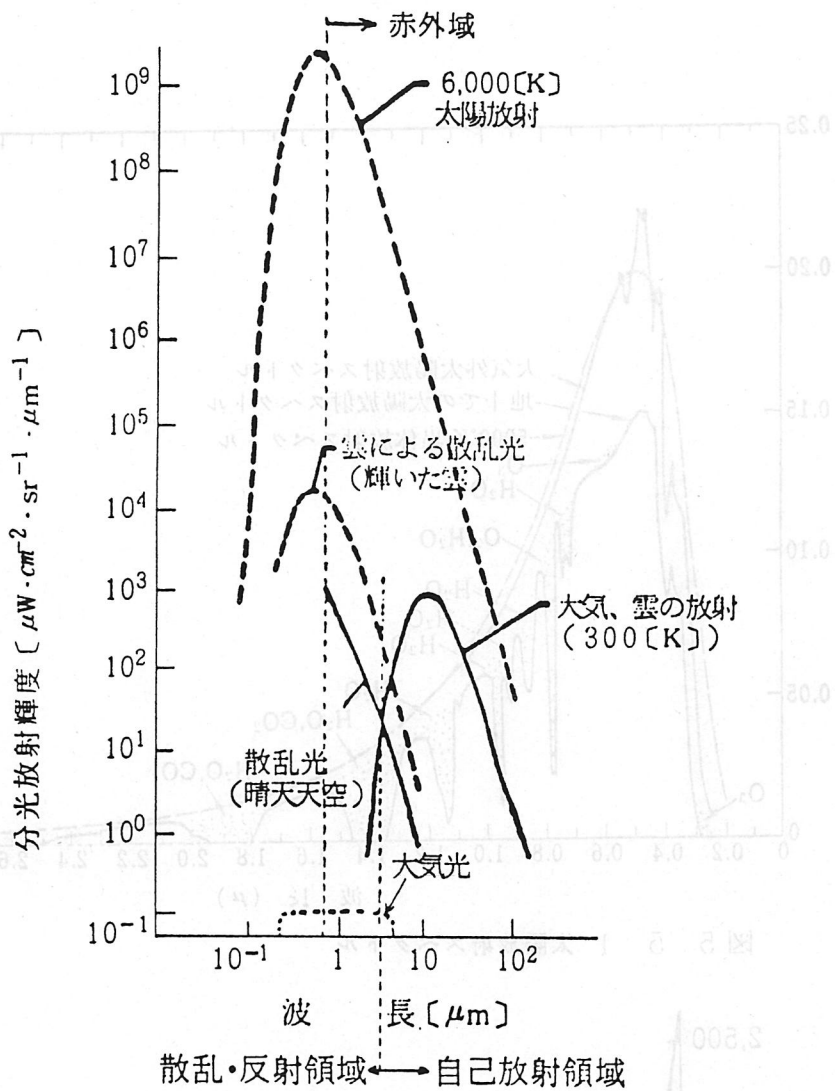


図5 5.2 天空および地表放射の分光

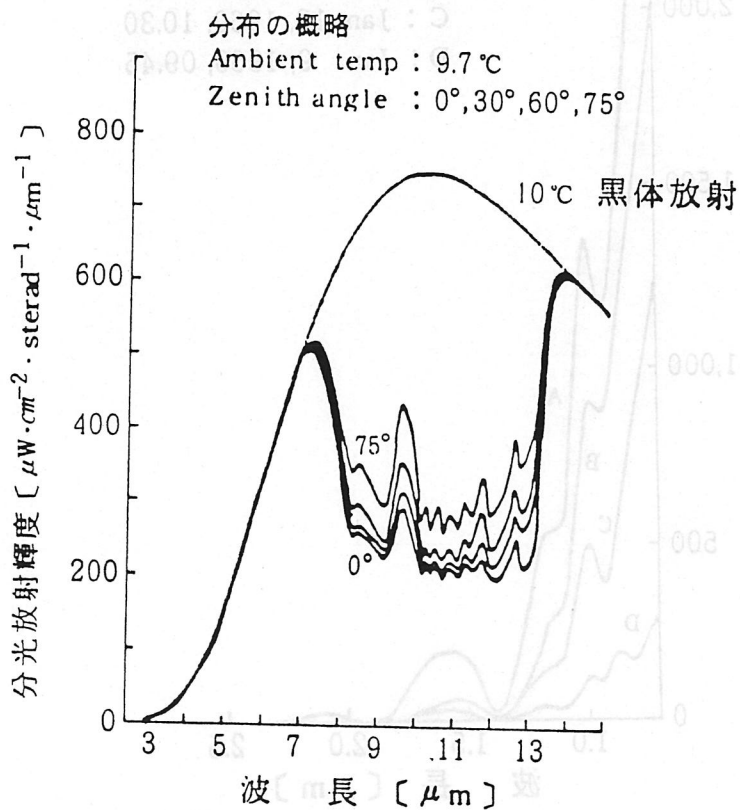


図5 5.4 夜間の晴天天空放射の分光分布(冬季)

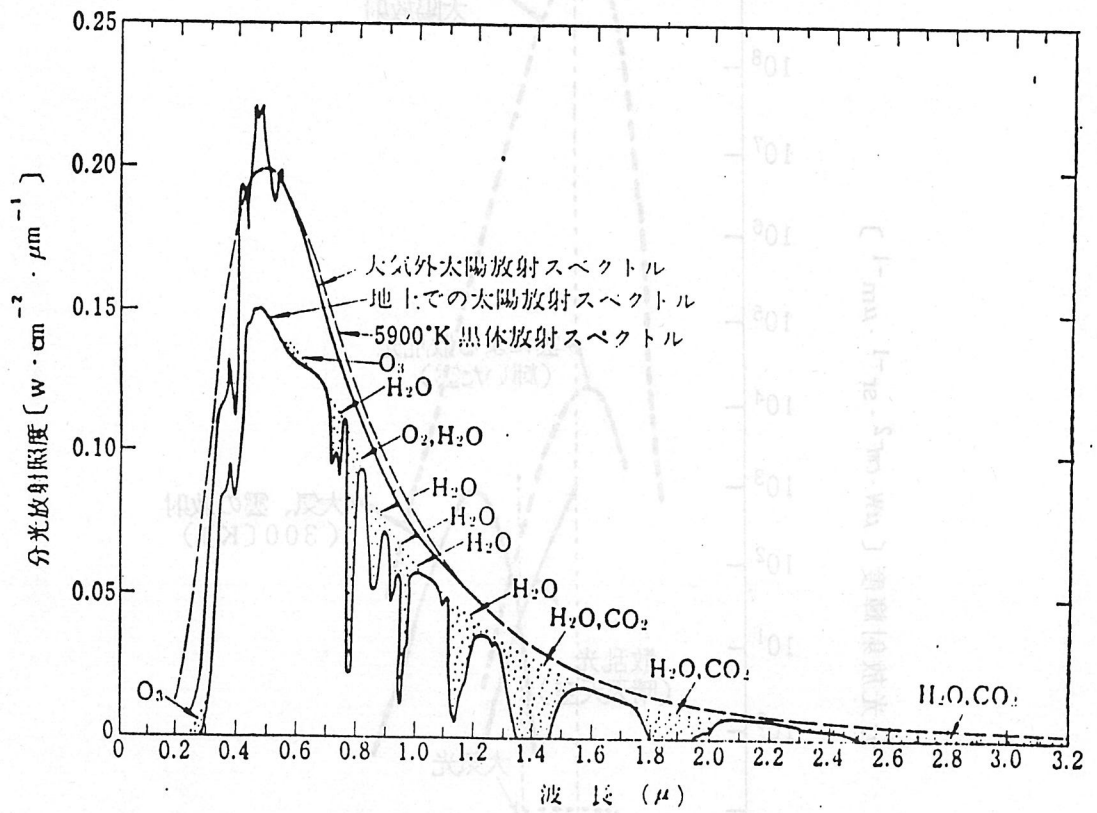


図 5.5.1 太陽放射スペクトル

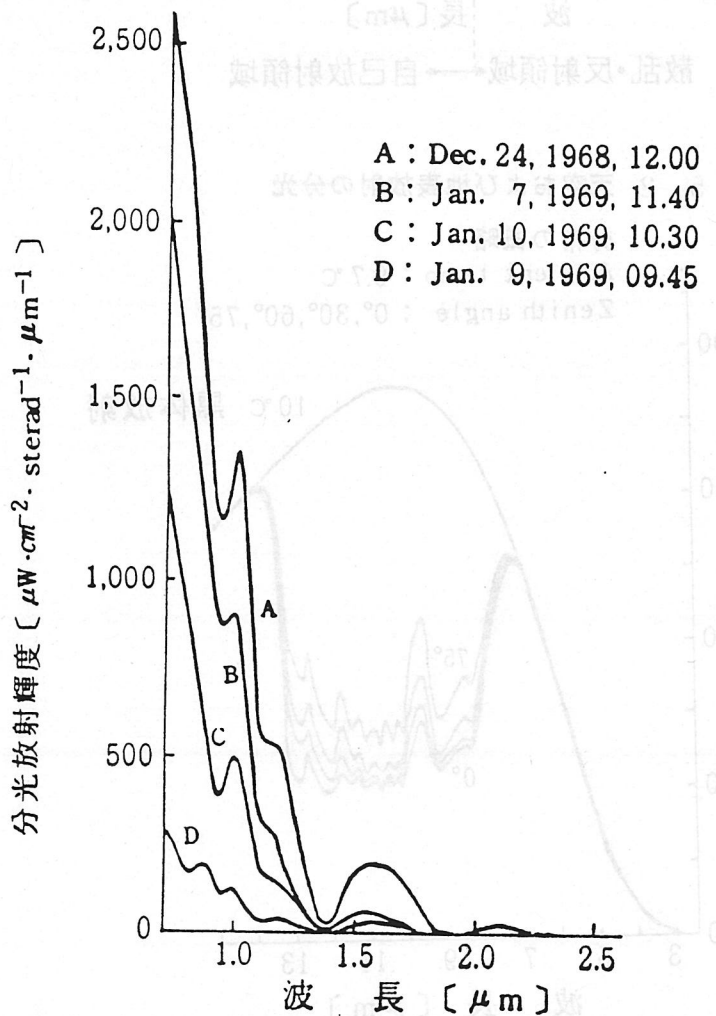


図 5.5.3 近赤外域の晴天天頂放射の分光分布

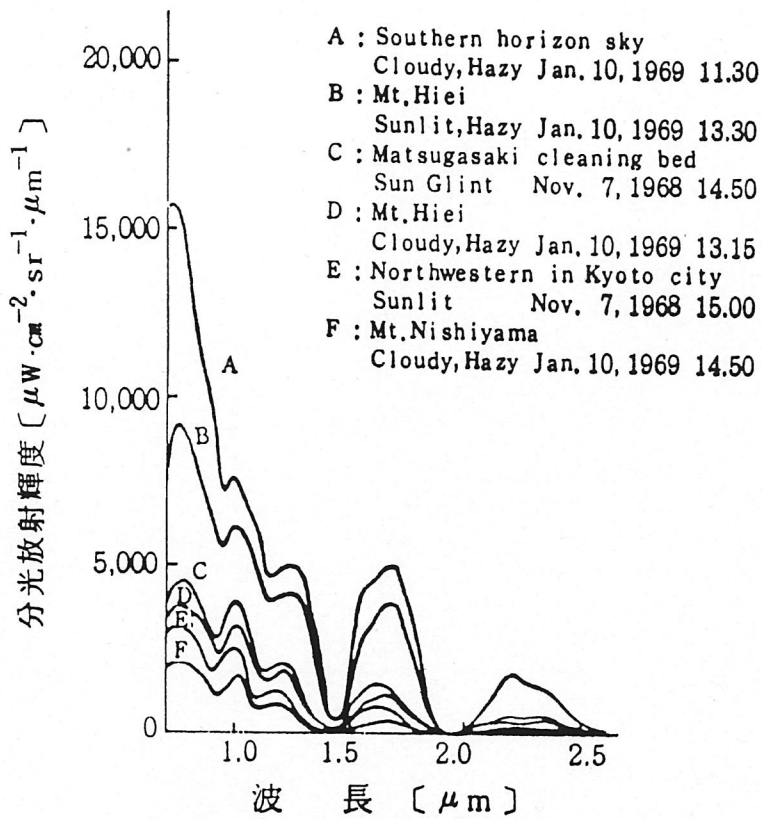


図 5. 5. 5 水平方向および地表の放射の分光分布

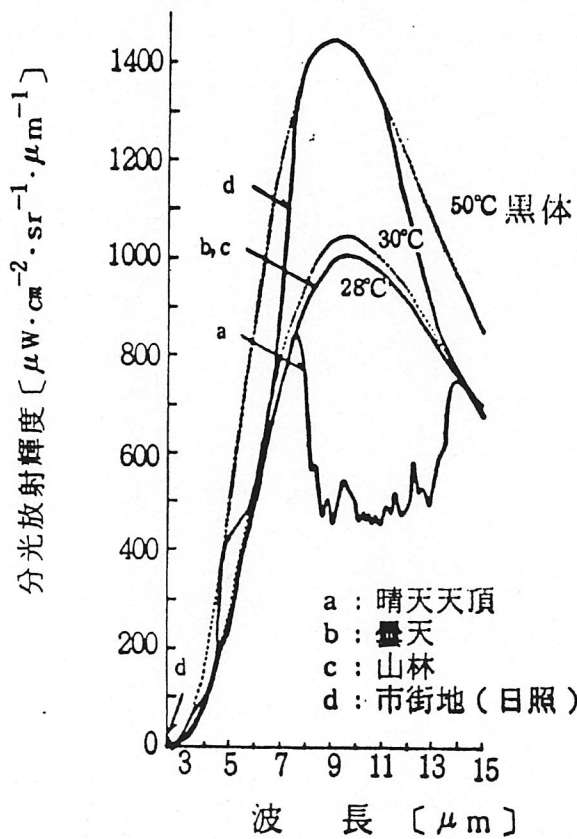


図 5. 5. 6 夏季の天空および地表放射の分光分布

第6章 遠赤外放射の作用効果

6. 1 生体に対する作用効果

6. 1. 1 はじめに

赤外放射の人体に対する作用効果としては、従来より暖房をはじめ、医療、保健、美容などの分野においてその効果が認められている。しかし、赤外放射の受光面としての皮膚の温熱感については充分究明されていない。このようなことから赤外放射に対する皮膚の温熱感覚の波長依存性について感応検査が行われたので、その結果についてのべる。なお、本章では波長 $3\mu\text{m}$ 以下を近赤外放射、それ以上を遠赤外放射と呼称する。

6. 1. 2 赤外域における皮膚の光学特性

皮膚に照射された赤外放射は反射成分を除く他の大部分は皮膚組織内で吸収されて熱エネルギーに変換される。この熱は皮膚組織の温度を上昇させて組織内の感覚器（温度受容器、痛覚受容器）を刺激し、温熱感、痛感をもたらすと考えられている。

皮膚の分光反射率および分光透過率（厚さ $1.0, 1.4\text{mm}$ ）は、それぞれ図6.1.1及び図6.1.2^{1,2)}に示すように $2\mu\text{m}$ 以上の波長域においてはいずれも10%以下であって、入射した赤外放射の長波長成分（遠赤外放射）の90%以上が表皮において吸収されることを意味している。これに対して短波長域の近赤外放射（ $0.75\sim 2.0\mu\text{m}$ ）に対する皮膚の分光透過率は比較的高く、入射した近赤外放射は皮膚組織中で徐々に吸収されて深部まで達することを示している。

6. 1. 3 赤外放射に対する皮膚の温度感覚^{3)~5)}

(1) 実験・調査方法

赤外放射に対する皮膚の温熱感覚の波長による差異を検査する方法としては、次の二つの方法が考えられる。その一つは、異なった波長域の赤外放射に対する皮膚の温感生起最低放射量（閾値）を測定する方法であり、その二は、等放射照度で波長域の異なる赤外放射を被験者の皮膚に照射し温熱感の大小を比較する方法である。

皮膚の温熱感の波長特性の定量的な表現には、前者による測定が必要であり、これまでもこの方法が採用されているが^{1,6)}、十分な環境制御が条件となるため多くの被験者について実施することは容易ではない。

一方、われわれが日常、暖を探る場合、ストーブ、火鉢などの放射を利用した局所的な暖房方式（従来、わが国ではこの方式が主流であった）においては、高レベルの赤外線を浴びる習慣がある。この場合、ある値以上の高温の刺激が温覚および痛覚受容器に加わり、ここで温感や痛感として感じている。従って、このような高放射照度の下における官能検査法が実用上は有用であると考えられる。

ここでは、上記の理由から後者の検査法を採用している。この場合、連続照射

の許容限界値に近い赤外線を照射するために小さな環境の差異（特に温度環境）は検査に殆ど影響しない。このために多数の被験者について調査することが可能であって、これがこの検査法の特色でもある。

照射には次のような帯域放射源を使用している。すなわち、(A) $0.72\sim 2.7\mu\text{m}$ 、(B) $1.5\sim 4.8\mu\text{m}$ および (C) $6\sim 20\mu\text{m}$ の3波長域の赤外放射に対する皮膚の温熱感覚について比較調査を行うために、3種類の放射源A、BおよびCに3種類の帯域フィルタをとりつけ、帯域放射A、BおよびCを得ることとした。帯域放射源A、B、Cの開口部（直径7cm、開口面積 38.5cm^2 ）において $200\text{mW}/\text{cm}^2$ の等放射照度になるように電源電圧を制御し、放射照度の測定にはサーモパイルを用いた。上記の開口部における放射照度は皮膚の連続照射に耐えられる限界値⁷⁾を考慮した値である。なお、その後帯域フィルタD（ $6\sim 9.8\mu\text{m}$ ）を追加し、AとD、CとDの帯域放射に対する検査も行われている。

これらの帯域放射を各被験者の手の甲および頬に照射するが、暴露時間は手の甲が20秒間、頬が15秒間で、終了後に温熱感及び刺激感についての回答を求めている。この場合、4種類の帯域放射から2種類を選び比較する一対比較法を採用し、どちらが「より熱い」かを判別してもらっている。被験者は幼児および高齢者を除く年齢者の健常な男女182名である（帯域Dに関しては27名）。

(2) 調査結果および考察

被照射面すなわち被験者の皮膚の表面の位置における放射照度が等しくなるように各帯域放射源の印加電圧を調整して、手の甲または頬に照射する。3種の帯域放射A、B、CのAとB、AとCおよびBとCの組み合わせで規定の時間だけ暴露した後、温熱感および刺激感の申告を受けている。図6.1.3、6.1.4にこれらの結果を示す。

図6.1.3は全被験者および男女別の温熱感についての調査結果である。全被験者の場合、手の甲については帯域放射AとBとでは「Aの方がより熱い」と答えた者が12.6%に対して、「Bの方がより熱い」と回答した者が84.6%であり、頬の場合は「Aの方がより熱い」が7.1%、Bが90.1%である。いずれも帯域放射Bすなわち長波長赤外放射の方が「より熱い」と感じた者が圧倒的に多くなっている。

帯域放射AとCの温熱感の比較においても、手および頬共に長波長側の「Cの方が熱い」と感じた者がほぼ90%を占めている。これに対して帯域放射BとCについては手の甲の場合Bの53.3%に対してより長波長側のCの方が42.9%であって若干の相違があるが、BとCとの間に大きな差が認められない。

帯域放射Dには、波長域 $6\sim 7\mu\text{m}$ の大気中の水蒸気の吸収帯における温感特性を調査するために帯域Bの代わりとして付加したものであるが、その結果は、それぞれA対BとD対Cとほぼ同様である。

眼以外の人体の感覚器官、とくに皮膚内の感覚器には、本来、光に対する感覚すなわち光覚（明暗感）および色覚（波長に対する感覚）はないと考えてよいが、皮膚は前述の図6.1.1、6.1.2のような分光学的な特性を有することから間接的に照射赤外放射の波長による感覚の差異があっても不合理ではない。つまり異なっ

た波長の赤外放射に対して、皮膚の感覚、特に温熱感に差があると考えるのが妥当である。

前項で述べた帯域放射 A, B, C に対する皮膚の温熱感の差は、これらと同じ波長帯域内の皮膚の分光反射率、分光透過率、および熱伝達特性によって説明される。すなわち、皮膚は $2\ \mu\text{m}$ 以下の近赤外帯域放射 A に対しては比較的高反射率かつ高透過率であるから、表皮内に入射する近赤外放射は比較的少ないが、入射後は直接温度受容器およびその周辺を刺激することになる。従って、照射直後から温かさを感じるが、温熱感が弱く穏やかな温かさである。

これに対して帯域放射 B および C は波長域は全く異なっているが、両帯域共 $2\ \mu\text{m}$ 以上の長波長赤外線が大部分または全部である。図 6.1.1, 図 6.1.2 より両帯域での分光反射率、分光透過率はともに 10% 以下であって極めて吸収率が高く、入射した遠赤外放射の大部分が表皮で吸収されて多量の熱となり、その熱がまず真皮最上部にある痛覚受容器を刺激した後、深部の真皮下層部まで伝達されて温度受容器を刺激するために、強い温熱感を与えるものと考えられる。

このように $2\ \mu\text{m}$ 以下の近赤外放射よりも $2\ \mu\text{m}$ 以上の遠赤外放射の方が皮膚に刺激のある強い温熱感をもたらすことが確認されているが、その他の知見としては、

(1) $2\ \mu\text{m}$ 以上の波長域における温熱感については、波長の違いによる有意の差はない。

(2) 各帯域放射に対する温熱感は、男女、年齢層などの各グループ間での大きな差がない。

(3) $6\sim 7\ \mu\text{m}$ の帯域放射に対する温熱感覚も他の長波長域の帯域放射に対する感覚とほぼ同等である。

皮膚の温熱感覚の波長による差異は、眼のように可視放射が直接網膜に刺激を与えるのとは異なり、皮膚で吸収された赤外放射が熱に変換された後に温度受容器や痛覚受容器を刺激することになる。特に長波長の遠赤外域においては、高い吸収率をもった受光面、すなわち表皮とその背後のセンサ、すなわち温度受容器という受容システムは、丁度熱形光検出器に似た構成である。熱形光検出器の分光感度が受光面の光学特性（分光吸収特性および分光反射特性）により定まると同様に皮膚の赤外放射に対する温熱感覚も物理的には表皮の光学特性により定まることになり、遠赤外域においては波長依存性をもたないものと考えられる。このような温熱感覚の波長依存性は、強いて図示すれば図 6.1.5 のようである。

6. 1. 4 おわりに

遠赤外放射の効果として、一部で生体あるいは食品の内部まで浸透して熱効果をもたらすといわれている。しかし、多くの動植物体の表皮は遠赤外域における透過率は極めて低く（ほぼ 0%）、また皮下組織もほぼ同様であって、正しい表現とはいえない。生体の場合に限ったとしても、表皮で吸収された遠赤外放射は熱となり、伝導で内部へ伝わる。一方表皮下部の網細血管から血流によって体内

各部位に伝わることになる。これに対して近赤外放射は生体の可成り深部（数mm～数cm）まで透過することが確認されていて、種々の利用法が考えられ、実用されている。

(松井)

文献

- 1) T.W.Oppel and J.D.Hardy : J.Clin.Invesat., Vol.16, 517~524 (1937)。
- 2) M.La Toison : Infrared and its Thermal Application, Philips Tech. Lib. 142(1964) ; International edition (1966)。
- 3) 松井松長 玉重繁良 高木 亨: 福山大学工学部紀要, 第8号, 35~43 (1986)。
- 4) 松井松長 玉重繁良 高木 亨, 松井静子: 照明学会全国大会, 47 (1986)。
- 5) 松井松長: 赤外線技術, 12, 18~26 (1987)。
- 6) 花岡利昌, 梁瀬度子, 奥山佳世, 出光祐子: 家政学研究 Vol.22, No.2, 116~123 (1976)。
- 7) 森田政明: National Tech. Rep., Vol. 27, No.3, 469~480 (1981)。

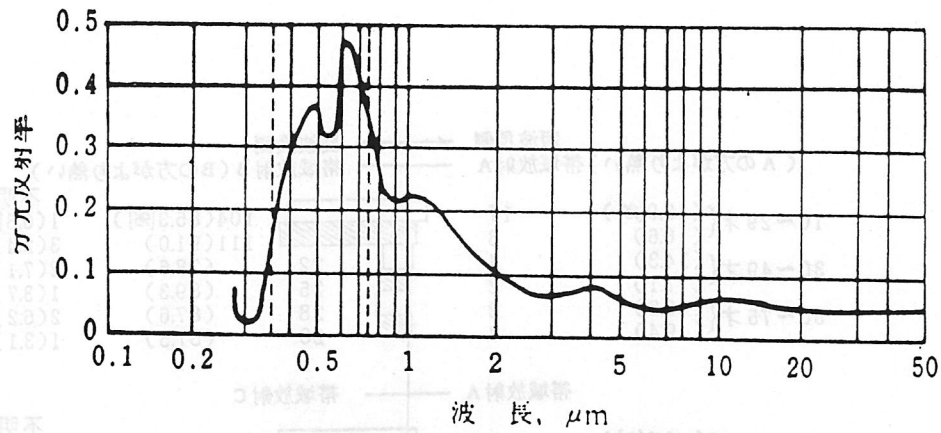


図 6.1.1 皮膚の分光反射率 (白人色素正常者)
(文献²⁾より転載)

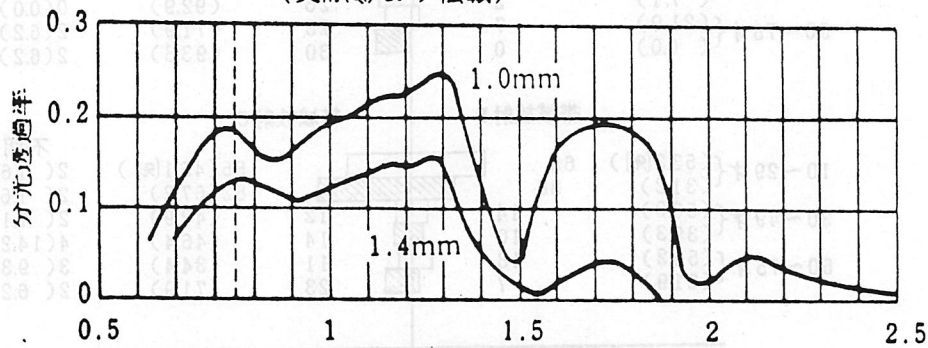


図 6.1.2 皮膚の分光透過率 (厚さ: 1.0, 1.4 mm)
(Hardy らによる。文献²⁾より転載)

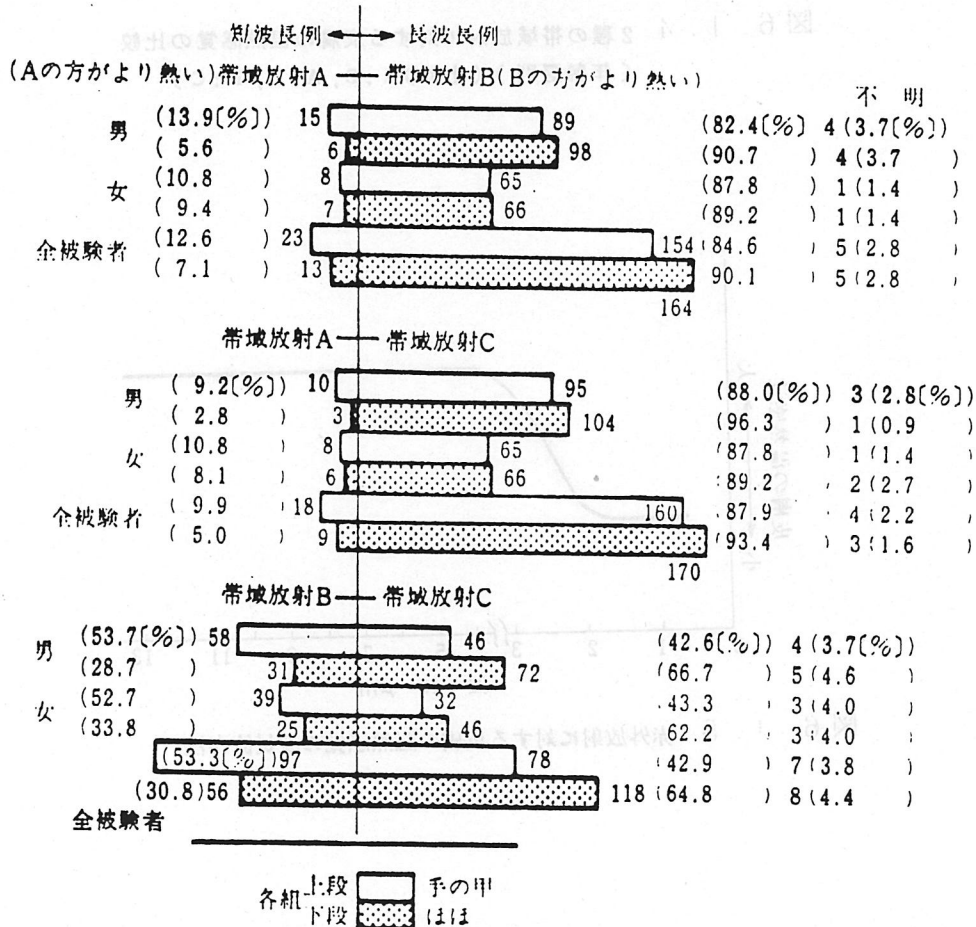


図 6.1.3 2種の帯域放射に対する皮膚の温熱感覚の比較
(上より A:B, A:C, B:C)

例 (上段右側): Bの方がAよりも熱いと回答した人数, %.

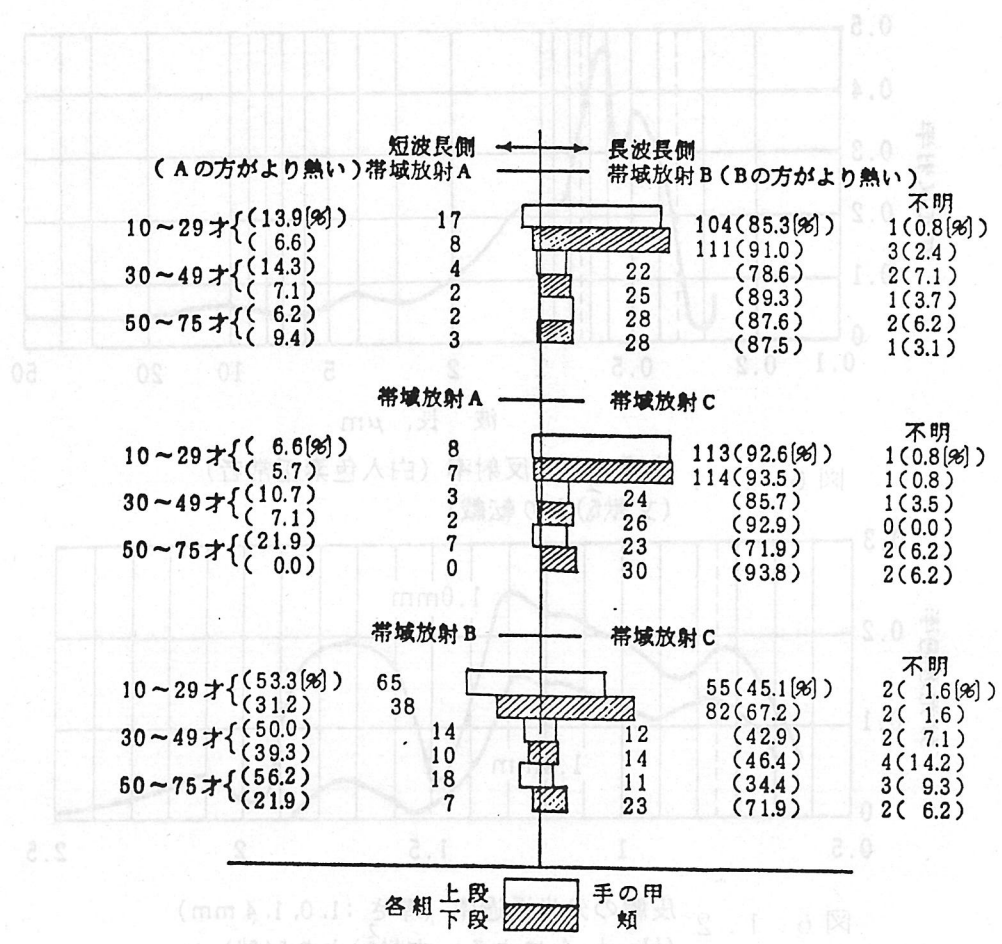


図6.1.4 2種の帯域放射に対する皮膚の温熱感覚の比較 (年齢層別) (上よりA:B, A:C, B:C)

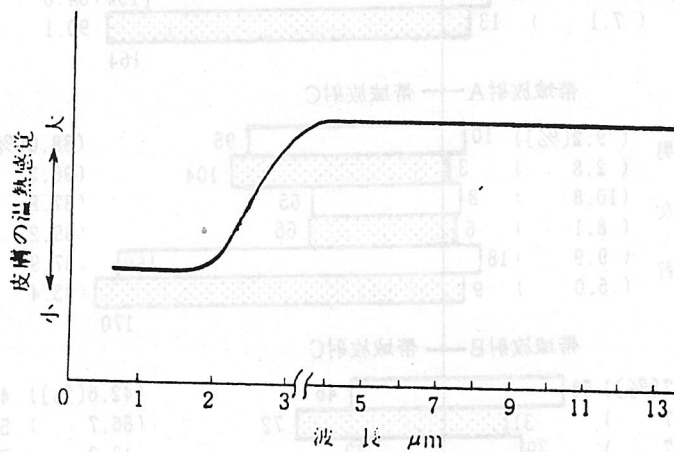


図6.1.5 赤外放射に対する皮膚の温熱感覚の波長依存性

6. 2 赤外放射の生物に対する作用・効果

6. 2. 1 植物に対する作用・効果(1)(2)

人間も含め全ての動物は植物の生成物を収奪してその生命を維持している。人間の生息環境と同じ環境に生息している植物に対しても、太陽放射を中心とし自然放射の作用・効果も考えられる。植物の光放射に対する波長帯域毎の作用効果について、C I EのD i v i s i o n 6 の技術委員会で定義している例を表6-2-1に示す。植物の作用効果の波長特性を図6-2-1に示す。

植物にとって最も重要な光合成の作用関数は、400nm～700nmの波長域に含まれる光量子の数であると定義づけ、これをPAR放射(Photosynthetically Active Radiation)と呼んでいる。また、光形態形成の作用関数の最大値は660nm付近に存在し、光形態形成の逆作用関数の最大値が730nm付近にある。

一方、可視放射の長波長側の限界を780nmと定義しているから、厳密には可視放射の波長域に含まれる700nmの近傍の波長に独特の作用が見られることに注目しなければならない。農学の分野では、700nm以上の波長の放射を遠赤色(Far Red)光と呼び、600nm～700nmの放射の赤色と区分している。実際には表6-2-1に示すように700nm～1000nmの放射は幹の伸長作用をもち、1000nm以上の放射では植物体の温度上昇に寄与するのみである。

植物の葉は太陽放射をうけると温度上昇するが、表面・裏面からの水分の蒸散によって過度の温度上昇を避けている。また植物体自体も光合成に無効な波長の放射は吸収しないようになっている。図6-2-2に植物の葉の赤外反射率を示す。(3)

表6-2-1 植物の作用効果の波長特性(4)

波 長 (n m)	作 用
～280 (U V - C)	短時間に致死作用
280～315 (U V - B)	大多数の植物に有害
315～400 (U V - A)	光形態形成作用
400～510	カロチノイドの吸収、葉緑素の吸収 光合成、光形態形成作用
510～610	PAR帯域中生理反応の比較的低い領域
610～700	光合成作用最大、葉緑素の合成、光周性作用
700～1000	幹の伸長作用
1000～	熱的作用

(C I E D i v i s i o n 6 の定義による)

植物のうち果実や果菜では、熟度によって赤外放射の波長域で反射率が変わるものがある

る。この特性を用いて果実の自動選果装置の選択手段として使用されている。代表的な果実の赤外反射率を図6-2-3示す。(5)

6. 2. 2 動物に対する作用・効果

(1) 動物

a. 家畜(6)

羊、豚、馬、牛などの家畜類では生殖週期の発現が光環境に依存しているものが多い。この光放射には可視放射と近赤外放射(1R-λ)が含まれているものと考えられる。性熟の信号として体内に伝達される経路として、視器官を通して入るものと、頭部組織を通して直接松果体に作用するものが推定されているが、定量・定性的な伝達内容は明確でない。

これらの家畜類では、幼児期には体温調節機能が十分でないため一定期間の保温加熱を行う場合が多い。現在ではほとんどの場合赤外放射が保温用に使用されている。

b. 家禽

鶏、鶉、七面鳥、家鴨などの家禽類は先に述べた家畜類よりさらに光環境に影響を受けやすい。したがって、性周期の発現に光が直接作用していることは確かであるが、家畜に対する作用と同様その詳細は明確でない家禽類も育雛時期には赤外放射が保温用に使用されているのは、家畜の場合と同様である。

c. 爬虫類(7)

ボア-、ガラガラ蛇などの特定の種類の蛇では、目の近傍に赤外放射を感じるピットと呼ばれる一對の器官をもち、餌になるような定温動物が放射する赤外放射を検知し、対象動物を定位する。図6-2-4にその1例を示す。

d. 昆虫その他

昆虫の感覚器官には赤外放射を感じる種類のものは報告されていない。
その他魚類などにも赤外放射を感じるものは報告されていない

6. 2. 3 人に対する作用・効果(8)~(10)

人に対する作用としては主として温熱作用である。その内容としては次の各項が考えられる。

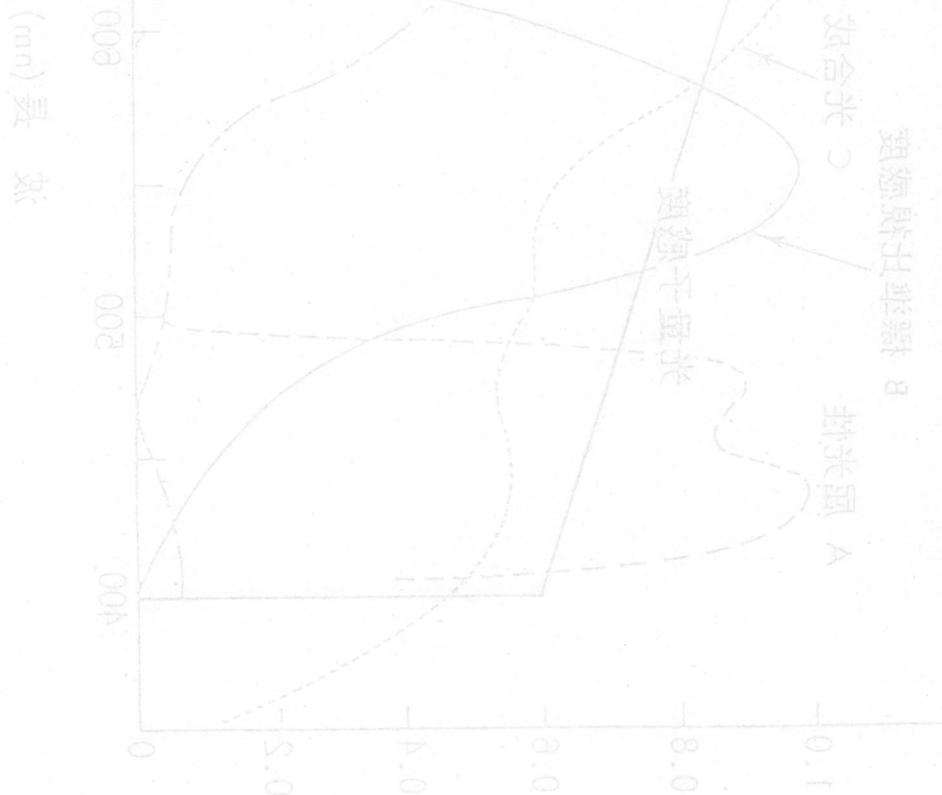
- ①放射照度と温熱感(相当温度)
- ②放射照度と閾値(温熱感・障害・苦痛)
- ③放射の分光分布と温熱感
- ④照射フィールドの大きさやと温熱感
- ⑤照射時間の長さやと温熱感
- ⑥放射照度と身体各部の違いによる温熱感
- ⑦放射による温熱感と温度効果による温熱感
- ⑧皮膚内部に対する透過特性
- ⑨皮膚表面の分光反射特性

これらについては、別項へゆずる。

森田 政明(松下電器産業㈱)

参考文献

- ① 稲田 勝美：光と植物生育（養賢堂）1984
- ② 洞川 他：植物工場工場の光放射技術 Nat. Tech. Rep. 23 135、
（1987）
- ③ Bickford, E. D et al: Lighting For Plant
Growth. Kent State Univ. Press.
（19 ）
- ④ Sarytchev G. CIE Division 6 Tech. Report.
（1987）
- ⑤ 照明学会編：ライティングハンドブック（オーム社）（1987）.
- ⑥ 照明学会編：照明教室 光放射の応用（Ⅰ）（Ⅱ）（1985）
- ⑦ Sharpe, J. H: Appl. Optics. 11, 2902（1972）
- ⑧ 森田 政明：赤外放射環境と生体、赤外線技術研究会第47回定例研究会（1982）
- ⑨ 山田 真祐：家禽・家畜の光受容機構と生理機能について、電気学会 光応用視覚技術
委員会資料 63 2 1（1983）



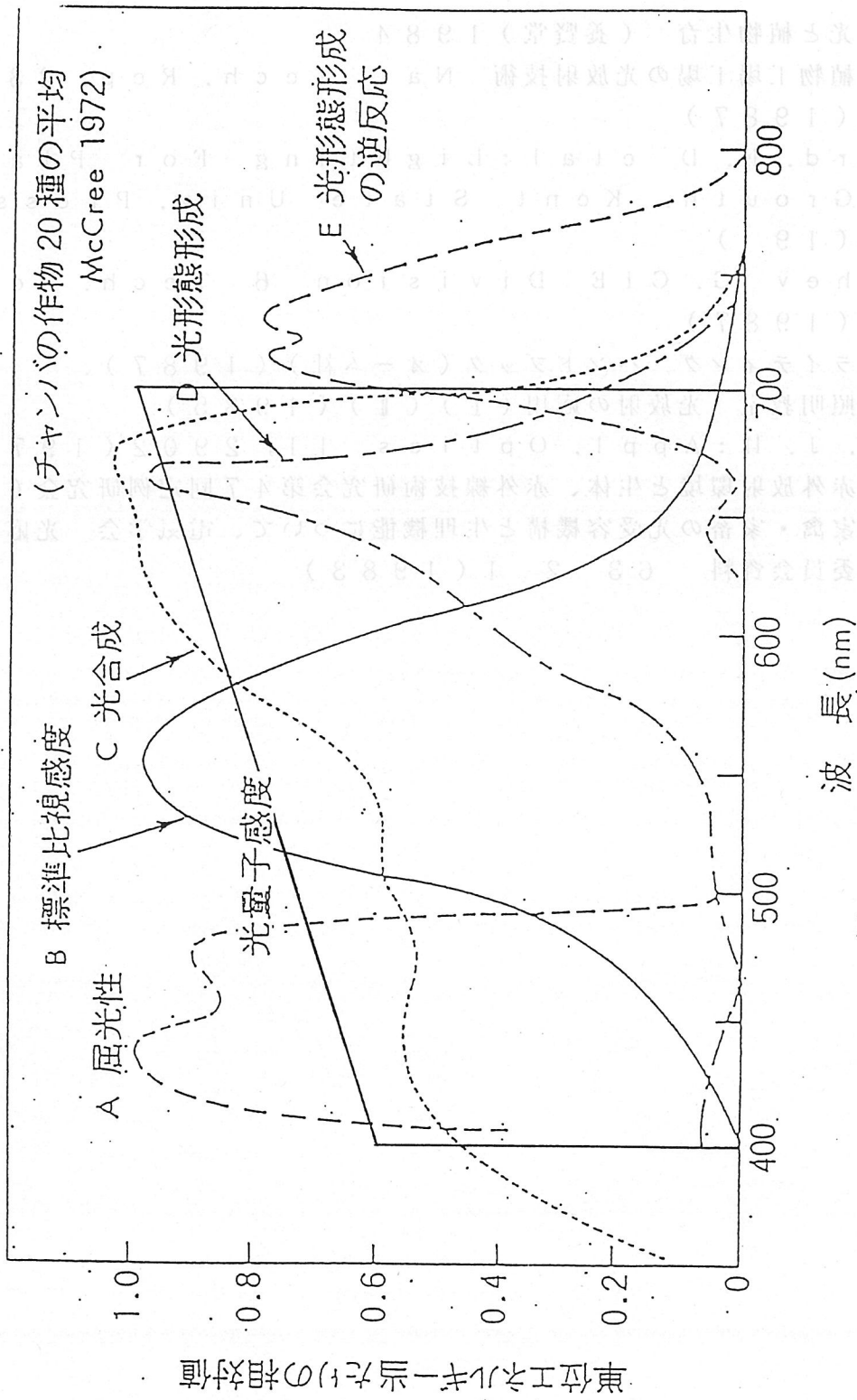


図 6-2-1 植物の作用効果の波長特性

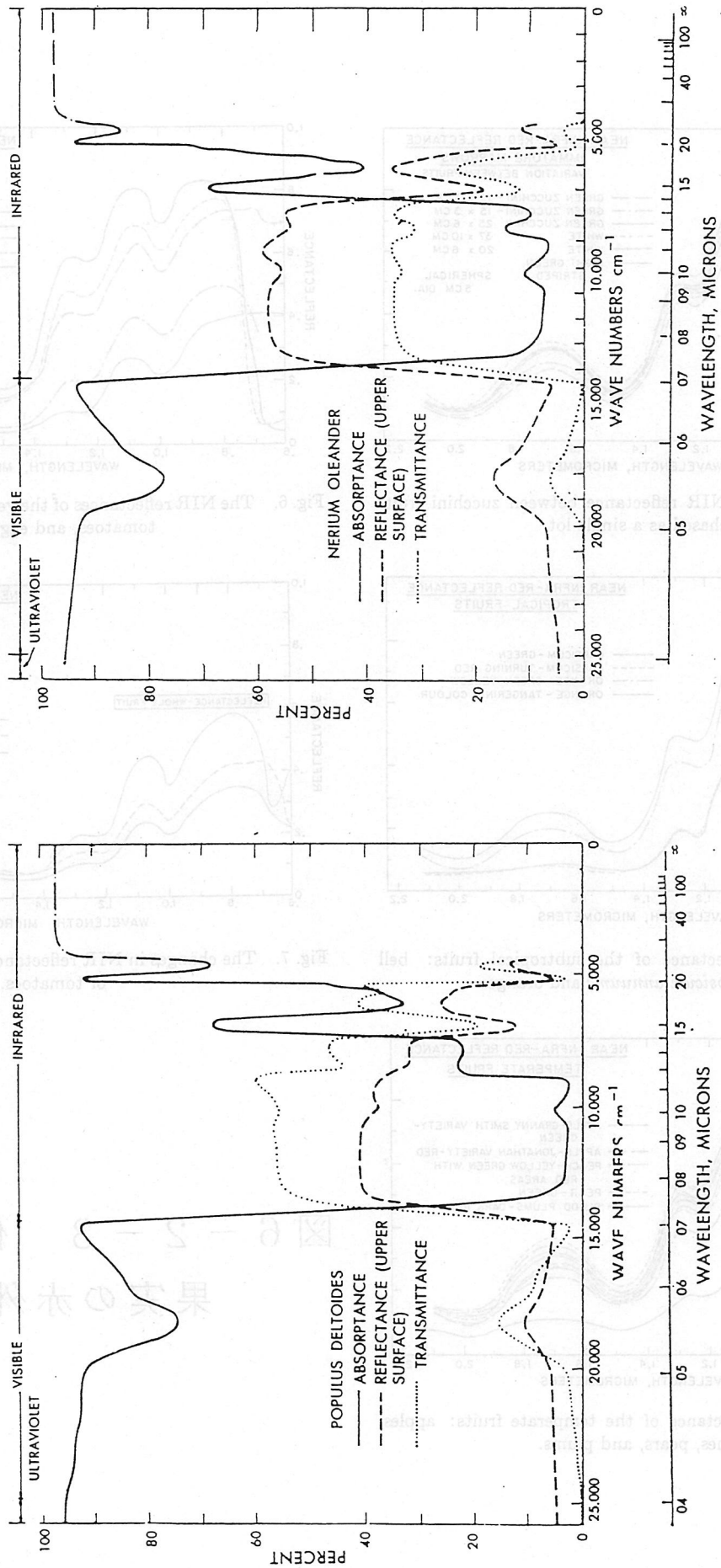


図 6-2-2 代表的な植物の葉の赤外反射率・透過率

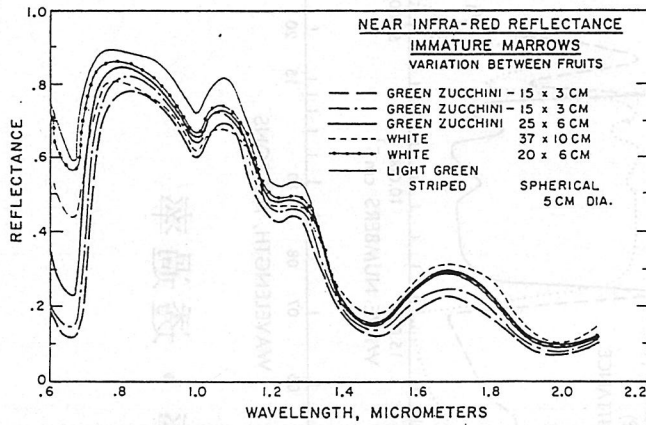


Fig. 3. Variations in NIR reflectance between zucchini fruits purchased as a single lot.

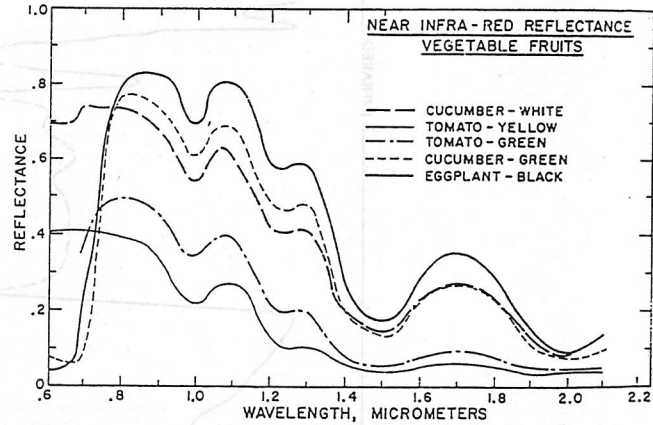


Fig. 6. The NIR reflectances of the vegetable fruits: cucumbers, tomatoes, and eggplants.

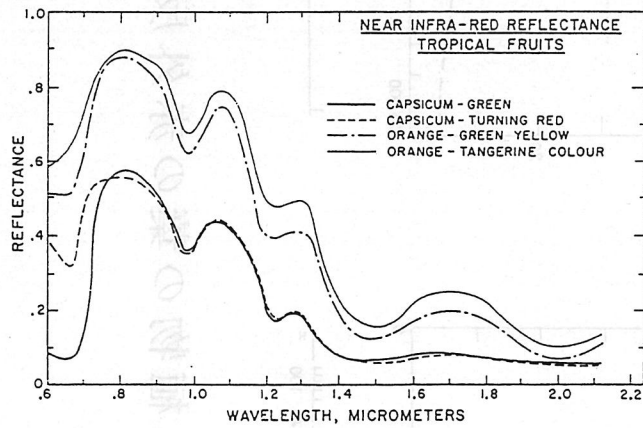


Fig. 4. The NIR reflectance of the subtropical fruits: bell peppers (*Capsicum annum*) and oranges.

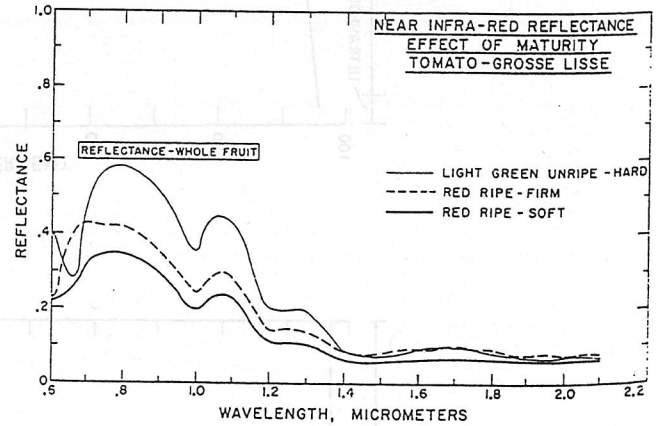


Fig. 7. The changes in NIR reflectances accompanying ripening of tomatoes.

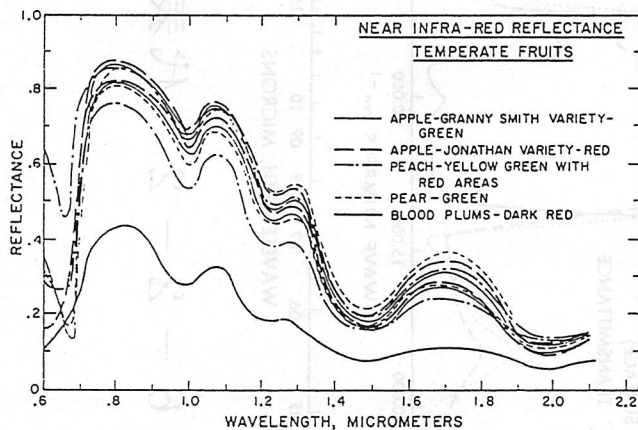
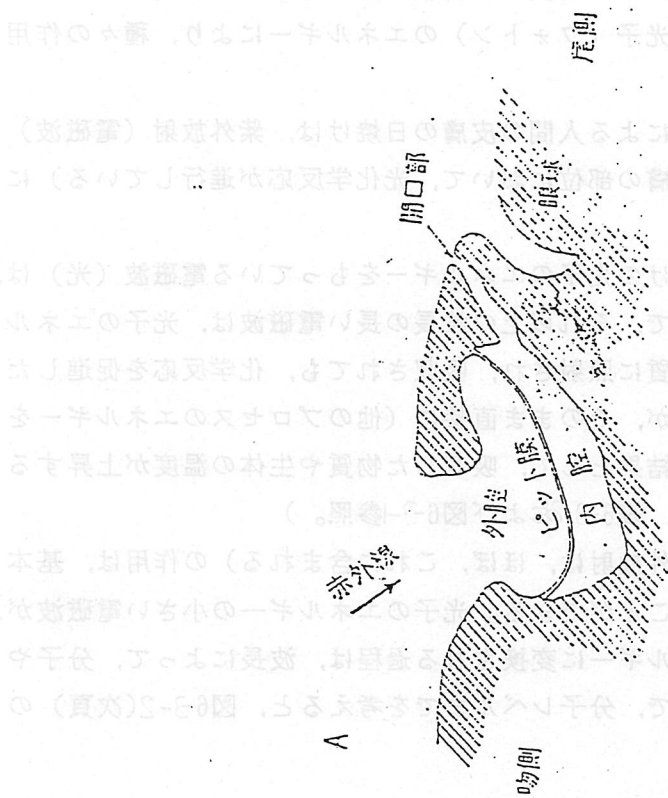
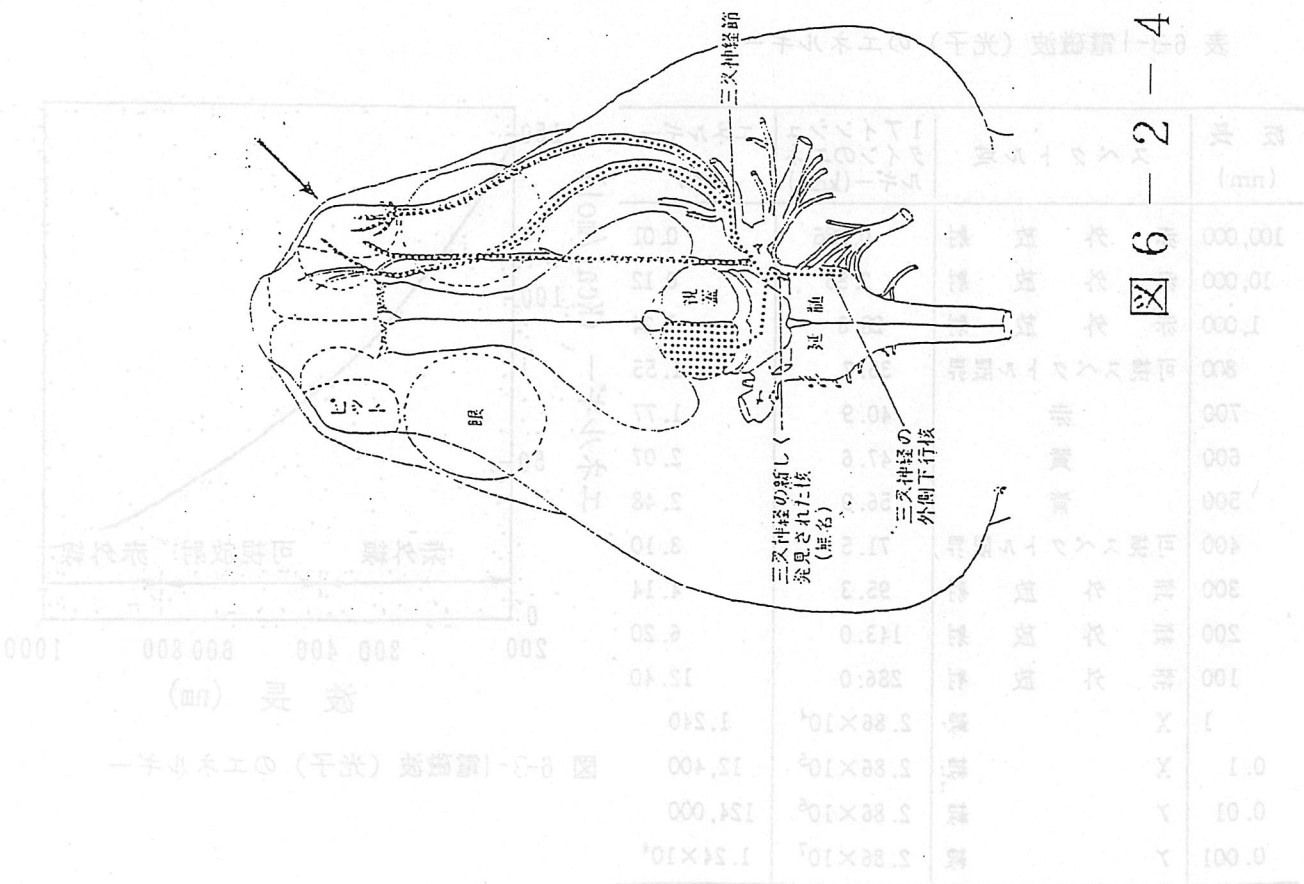


Fig. 5. The NIR reflectance of the temperate fruits: apples, peaches, pears, and plums.

図 6 - 2 - 3 代表的な
果実の赤外反射率

図 6-2-4 蛇の赤外放射検知機構



蛇の赤外線放射検知機構の模式図 (A) は、蛇の頭部の断面を示している。吻側 (Snout side) と尾側 (Tail side) の両端が示されている。中央には開口部 (Opening) があり、その周囲には外腔 (Outer cavity) と内腔 (Inner cavity) が存在する。内腔にはビット腺 (Pit gland) が位置している。眼球 (Globe) は開口部の上部にあり、赤外線 (Infrared) の照射を受ける。この構造は、蛇が周囲の温度変化を検知するための重要な器官である。

6.3 遠赤外放射の物質に対する作用・効果とその評価

6.3.1 遠赤外放射の物質に対する作用の基礎

遠赤外放射に限らず、電磁波（放射）は、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（フォトン）のエネルギーにより、種々の作用を及ぼす。

例えば、よく知られている紫外放射による人間の皮膚の日焼けは、紫外放射（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。

ところで、化学反応を進行しうるだけの光子のエネルギーをもっている電磁波（光）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、光子の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、化学反応を促進したりすることは、ほとんどなく、大部分が、そのまま直接に（他のプロセスのエネルギーを経ないで）熱エネルギーに変換され、結果として、吸収した物質や生体の温度が上昇する（加熱される）ことになる。（表6-3-1、表6-3-2および図6-3-1参照。）

即ち、波長800 nm以上の電磁波（赤外放射は、ほぼ、これに含まれる）の作用は、基本的には、熱作用（加熱）であるということが出来る。光子のエネルギーの小さい電磁波が、物質や生体に吸収されたあと、熱エネルギーに変換される過程は、波長によって、分子や原子への作用の様態が、若干異なるので、分子レベルまでを考えると、図6-3-2(次頁)のように、区分することができる。

表 6-3-1 電磁波（光子）のエネルギー

波長 (nm)	スペクトル域	17インシュタインのエネルギー(kcal)	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

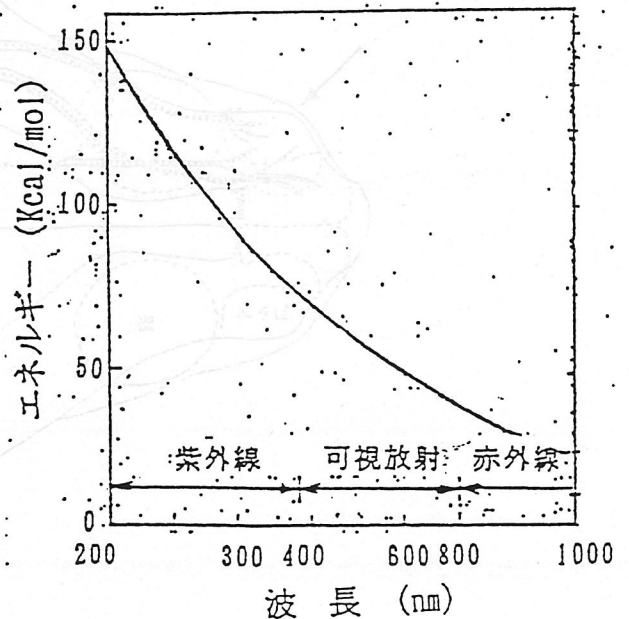


図 6-3-1 電磁波（光子）のエネルギー

図6-3-2によれば、赤外放射の中で、波長範囲が $0.76\mu\text{m} \sim 2\mu\text{m}$ のものは、「写真領域」の赤外放射と呼ばれ、若干の光化学作用を及ぼす可能性が残されているが、遠赤外放射は波長が $4\mu\text{m}$ より長い範囲の赤外放射であるから、光子のエネルギーは更に小さくなる方向であり、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、全てが熱エネルギーに変換されると考えられる。

したがって、遠赤外放射の作用は、基本的には熱作用が主体であると考えられる。

表 6-2-2 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
$\text{C}\equiv\text{N}$ (ニトリル)	209	$\text{C}-\text{O}$	87
$\text{C}\equiv\text{C}$	200	$\text{S}-\text{H}$	87
$\text{C}=\text{O}$	174	$\text{N}-\text{H}$	84
$\text{C}=\text{C}$	145	$\text{C}-\text{C}$ (脂肪族)	80
$\text{C}=\text{S}$	129	$\text{C}-\text{O}$ (エーテル)	79
$\text{C}-\text{C}$ (芳香族)	124	$\text{C}-\text{Cl}$	78
$\text{C}-\text{H}$ (アセチレン)	121	$\text{S}=\text{S}$	76
$\text{C}-\text{F}$	119	$\text{Si}-\text{H}$	75
$\text{O}=\text{O}$	119	$\text{Si}-\text{C}$	70
$\text{O}-\text{H}$	110	$\text{C}-\text{N}$ (ニトロメタン)	68
$\text{C}-\text{H}$ (エチレン)	106	$\text{C}-\text{S}$	66
$\text{H}-\text{H}$	104.2	$\text{O}-\text{O}$ (過酸化水素)	64
$\text{C}-\text{H}$ (メタン)	98	$\text{Cl}-\text{Cl}$	58
$\text{Si}-\text{O}$	89	$\text{N}-\text{N}$ (ヒドラジン)	37

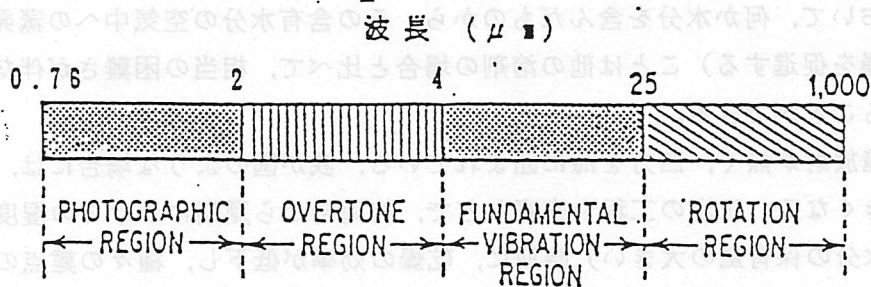


図 6-2-2 赤外放射の分子レベルに於ける作用による区分

6.3.2 遠赤外放射の水に対する非熱的な作用 — 水分子における水素結合の作用と遠赤外放射による水の水素結合の離間

前項において、遠赤外放射の作用は基本的には熱作用が主体であると述べてきたが、熱作用の基礎および応用の実際については、本章の前節迄と次章において詳しく述べられているので、本節の本項目においては、熱的作用以外の作用・効果（熱的作用以外の作用という意味で非熱作用という用語を用いることとする）の一例として、水分子における水素結合への作用について述べる。

水の一般的な物性については、既に種々の文献に詳しく述べられているので、重複は避けるが、水に対する作用について述べる前に、地球上において水が重要である背景となる理由について、若干触れておくこととしたい。

地球は水の惑星といわれ、水は我々人間を含めた生物の生命維持に欠くことができない。表6-1に地球上の地表部分における水の総量と分布を示す。

表 6-1 地球上における水の総量と分布

区 分	地表における平均分布量 (kg/m ²)	総 量 (kg)
海 水	2.7811×10^6	1.413×10^{21}
淡 水	0.001×10^6	0.00051×10^{21}
大陸水	0.045×10^6	0.02283×10^{21}
水蒸気	0.00003×10^6	0.000015×10^{21}
全 量		1.436355×10^{21}

この表によれば、地表部分に分布する水の総量は約 1.44×10^{21} kgで、非常に多いものと考えられる。正確に比較することは困難であるが、他の溶剤（例えばメタノールや、酢酸ブチルなど）と比べて、桁ちがいに多いと考えられる。また、地表の面積的に考えてみると、その70.8%が水（海）で覆われている。（陸地は、わずかに29.2%である。）海の水は当然常に一部分が大気中に蒸発し、空気は水分を含んだ状態となっているので、このような環境において、何か水分を含んだものから、その含有水分の空気中への蒸発を促進する（即ち乾燥を促進する）ことは他の溶剤の場合と比べて、相当の困難さが伴うとは容易に予測することができる。

陸上の国境放射が無く、四方を海に囲まれている、我が国のような場合には、この問題は更に大きくなる。工場の工程や家庭などで、梅雨時から夏期にかけての湿度の高い（空気中の水分の保有量の大きい）時期に、乾燥の効率が低下し、種々の難点の原因となるのは、経験的によく知られているところである。

次に、水（分子）と遠赤外放射との作用において重要であると考えられる水の物性について述べる。水は、気体、液体、固体の3態を、地球上の通常的环境状態においてとるこ

とができる。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。気体状態の水分子の構造を図6-3-3に示す。水分子を構成する水素原子と酸素原子は共有結合をしており、その共有結合の結合エネルギーは、ほぼ110.6kcal/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、水分子の水素原子と酸素原子の共有結合の水素側は水素原子と酸素原子の空間的位置関係から、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つの水分子の水素が他の水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っていく場合が多くその結果、結合が生じる。

水分子の場合はこの水素結合が生じるため、水分子が複数個集まると相互にくっつき易くなる。（図6-3-4 図6-3-5参照）。水の蒸発（乾燥）というのは、集まった状態の（液状の）水分子をそれぞれ独立させ、空気中に放出することであり、当然のことながら、水分子をそれぞれ独立させるには、この水素結合を離間させるための（余分な）エネルギーが必要であることになるから、水素結合を生じの性質のない他の溶剤に比べて、蒸発しにくくなる（乾燥しにくくなる）ということができる。

表6-（次頁）に、代表的な各種溶剤についての特性を比較したものを示す。この表によれば、溶剤の蒸発のし易さを示すと思われる特性項目（蒸発速度、蒸気圧、蒸発熱（気化熱）など）について比較すると、水は他の溶剤（例えばメタノール、エタノール、酢酸ブチルなどの有機溶剤）と比べて、格段に蒸発しにくい（従って、乾燥されにくい）こと

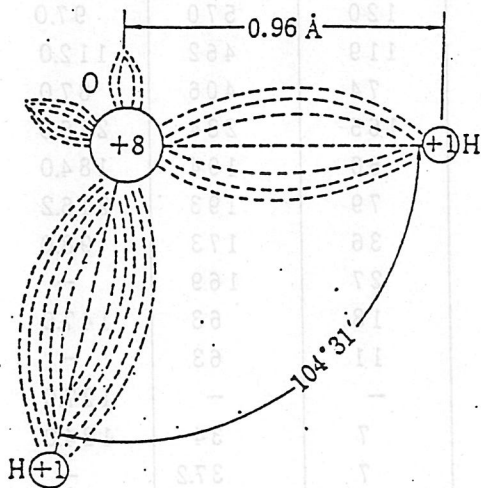
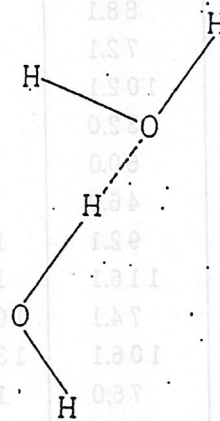


図 6-3-3 水分子の構造



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 6-3-4 水分子の水素結合による結合状態

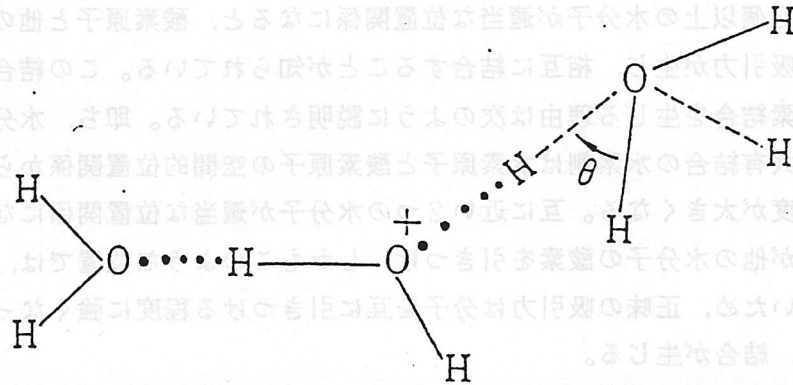


図 6-3-5 多数の水分子の結合状態

表 6-3-4 各種液体 (溶剤) の特性比較

溶 剤	分子 量	沸 点 (純) °C	蒸 発 速 さ (重 量) (酢酸ブテ ル=100)	蒸 気 圧 mm/30°C	酢酸ブテル の同一値対 蒸気圧×分 子量 の比	蒸 発 熱 kcal/kg/30°C
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

が分る。(蒸発速度や蒸気圧などは、真に桁違いに近い差がある。)

ところで、この水素結合の結合エネルギーは、水分子の場合 2~8 kcal/molであり、対応する光放射(電磁波)の波長は3.58~14.3 μ mとなる。この波長はちょうど遠赤外領域に当たり、したがって遠赤外放射は水に直接作用して(吸収された後、熱エネルギーに変換されてから作用するのではなく)水分子相互の水素結合の離間を促進する(離間により水の蒸発が促進される)といふことができる。

水の乾燥の場合、乾燥用エネルギーに遠赤外放射を使用(または併用)するとエネルギー利用効率が改善され、乾燥時間が速くなるのはこのためである。

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、分子間にかんが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。氷を2,000気圧以上に加圧するとこのような配列の変化が起り、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まる。これらはいずれも水より高密度で、圧力が下がると通常の水に戻ることが知られている。通常の水(液体状態)にも水素結合が存在する。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びに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、融点が高く、蒸発熱も大きい。

(河本)

第7章 遠赤外放射（源）の利用法

7-1 産業への応用（加熱・乾燥・焼付け）

1. 遠赤外放射加熱利用

赤外線加熱・乾燥技術が工業の分野で大量使用されるようになったのは、1938年にフォード社が自動車の塗装乾燥・焼付けに利用したのが最初といわれる。

遠赤外放射加熱は、主に工業分野を中心として多くの分野にわたり、加熱技術としての位置をすでに確立しているものと考えられる。

遠赤外放射加熱の工業への応用分野について、以下の表-1に示す。

表-1 遠赤外放射加熱の工業への応用分野⁽¹⁾

業種	応用例
機械器具製造	<ul style="list-style-type: none"> 自動車ボデー塗装乾燥 ・ オートバイマーキング乾燥 自動車フレーム下塗り乾燥 ・ 鋳物塗装乾燥 ・ 家電器具塗装乾燥 変圧器ケース塗装乾燥、注入モールド加熱 家具塗装焼付け ・ 歯磨きチューブ、ビール缶印刷乾燥 コンデンサ塗装乾燥 ・ 粉体塗装乾燥
化学工業	<ul style="list-style-type: none"> プリント基盤乾燥 ・ 塩ビ樹脂ゲル化 ・ 薬品乾燥 ・ アクリル板軟化 印刷インク乾燥 ・ プラスチック成形加工
木材・木製品・建材・紙パルプ	<ul style="list-style-type: none"> 家具、パットの合板乾燥 ・ 合板接着剤の乾燥硬化 ・ 漆器乾燥 割りばし乾燥 ・ 合板塗装乾燥 ・ 石こうボード乾燥 スレートがわら下塗り、上塗り乾燥 ・ 鏡表面文字焼付け 耐火ボード樹脂加工 ・ ラミネート紙焼付け乾燥 壁紙加工処理乾燥 ・ ホワイトボード塗装乾燥
繊維工業	<ul style="list-style-type: none"> 糸の糊付け乾燥 ・ 捺染スクリーン型乾燥 ・ 細巾織物仕上乾燥 布地プリント焼付け乾燥
食品製造加工	<ul style="list-style-type: none"> かまぼこ、ちくわ焼き上げ乾燥殺菌 ・ 米菓焼き上げ 酒の熟成 ・ 冷凍食品の解凍 ・ 肉類乾燥 くん製品の乾燥 ・ 昆布、海産物の乾燥
農水産	<ul style="list-style-type: none"> 養豚暖房 ・ 育すう、ふ卵 ・ 植物促成 養殖（産卵促進 稚魚成育 餌増殖など）

2. 遠赤外放射加熱の産業への実用化例

(1) 捺染スクリーン型乾燥（業種：繊維工業）⁽²⁾

捺染に使用するスクリーン型製作工程における感光乳剤（ジアゾ系現像液）乾燥に応用した例である。スクリーン型の工程を以下に示す。同図の③の工程に遠赤外放射加熱を使用し、大幅な省エネルギーになることがわかった。

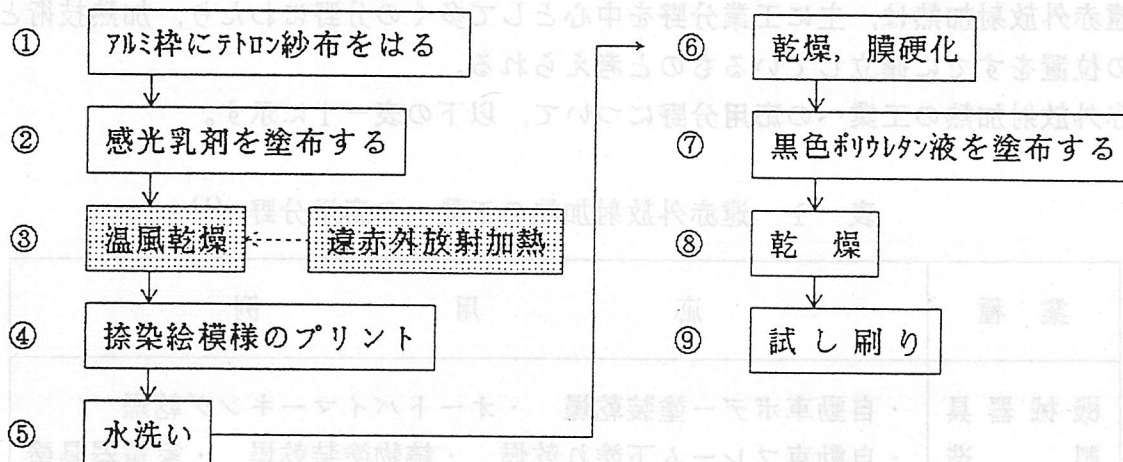


図-1 捺染用スクリーン型製作工程

(2) 細巾織物仕上乾燥（業種：繊維工業）⁽²⁾

細巾織物は、トレーニングウェアや各種下着類に多く使用されているもので、石川県で全国シェアの90%近くを生産している。従来のLPG燃料での乾燥による問題を遠赤外放射加熱に変えることにより、以下のような効果があった。

- ① 厚地のものでも表面と内部を均一に乾燥でき、品質が向上した。
- ② 糊の温度が従来よりうすくてすむため、製品の風合いがよくなった。
- ③ 製品の収縮率が改善され、材質の違いによるバラツキも小さくなった。
- ④ 処理温度が従来より低くなり、ゴムの劣化が少なく弾力性も衰えなくなった。
- ⑤ 厚地と薄地を併用した織物でも均一に乾燥できるようになった。
- ⑥ 乾燥時間は従来より大幅に短縮できた。

(3) 味付け昆布の乾燥（業種：食料品）⁽³⁾

おぼろ昆布味付けの乾燥は、製品の味付け液量および昆布厚さなどによって、乾燥による変色や仕上り幅が変化し易いなど品質が低下する場合がある。遠赤外放射加熱乾燥は、炉内温度が低く均一にでき、従来の乾燥機に比べて乾燥変色、縮みなど品質低下が少なく、かつ電力原単位を大幅に低減することができる。また、従来乾燥機にくらべ炉長が縮小でき工場スペースの縮小に寄与した。

(4) 布地プリントの焼付け乾燥 (業種：衣服) (3)

衣服などへのプリント焼付け乾燥は、主として熱風が使用されている。熱風による焼付け乾燥は、時間がかかり、作業員が常時熱風にさらされ、騒音も発生するなど作業能率が低く、また作業環境の悪化を招く。

遠赤外放射焼付け乾燥機の導入により、乾燥時間を大幅に短縮でき、作業能率の向上と熱気や騒音を解消して快適な作業環境に改善される。

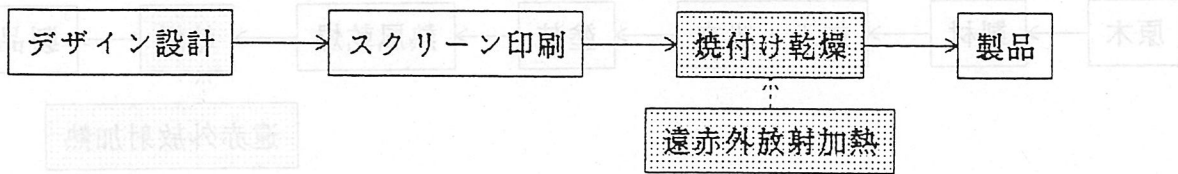


図-2 布地プリント工程

(5) プラスチックの成形加工 (業種：プラスチック成形加工) (3)

熱可塑性プラスチックシートを遠赤外線ヒータで加熱して軟化させた後、シートとあらかじめ用意した型との間の空気を吸引し真空にすると同時に、反対側から高圧空気でシートを型に密着させる成形方法である。

シャープな線の成形品や深絞りの成形加工品を作ることができる。

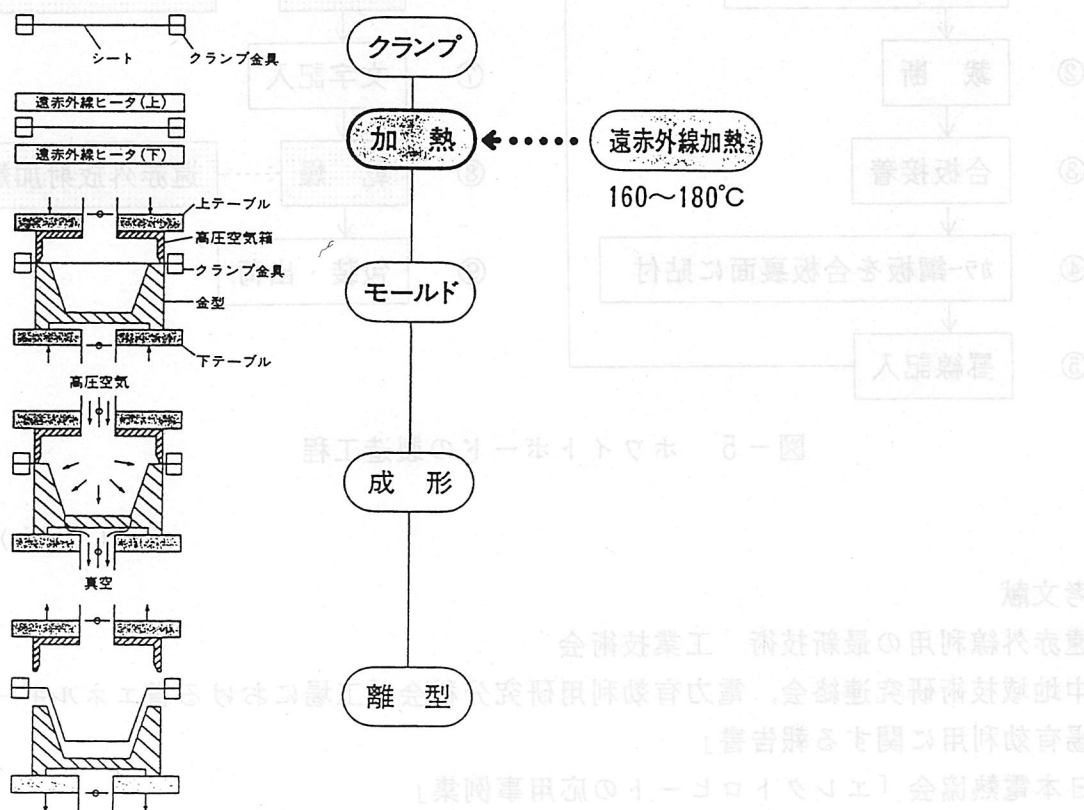


図-3 成形加工工程

(6) 家具の塗装乾燥（業種：家具・装備品）⁽³⁾

家具など木材製品の塗装乾燥は熱風による乾燥が行われている。

高温で乾燥すると、塗膜の表面と内部の熱勾配が大きくなり、塗膜の変色、ピンホール、泡などの塗膜欠陥が発生する。

遠赤外線ヒータによる乾燥では、塗膜内部まで均一に加熱されるので、これらの問題を解決し、乾燥時間を大幅に短縮することができる。

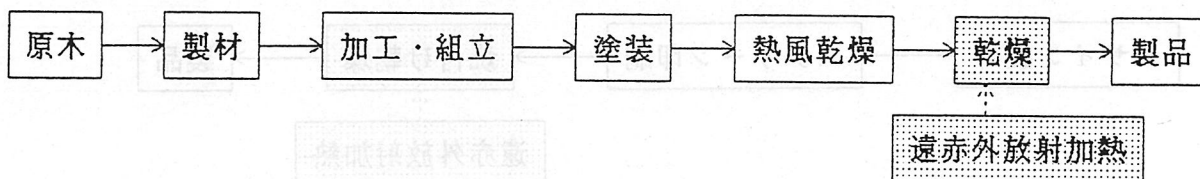


図-4 家具の製造工程

(7) ホワイトボード塗装乾燥（業種：事務用品）⁽³⁾

ホワイトボード（白板）の罫線や文字の塗料乾燥は、天日で行われていた。この工程に加熱効率の高い遠赤外線加熱（加熱温度80℃）を導入することにより、乾燥時間の短縮、塗料の密着性の向上、乾燥用スペースの縮小を図ることができた。

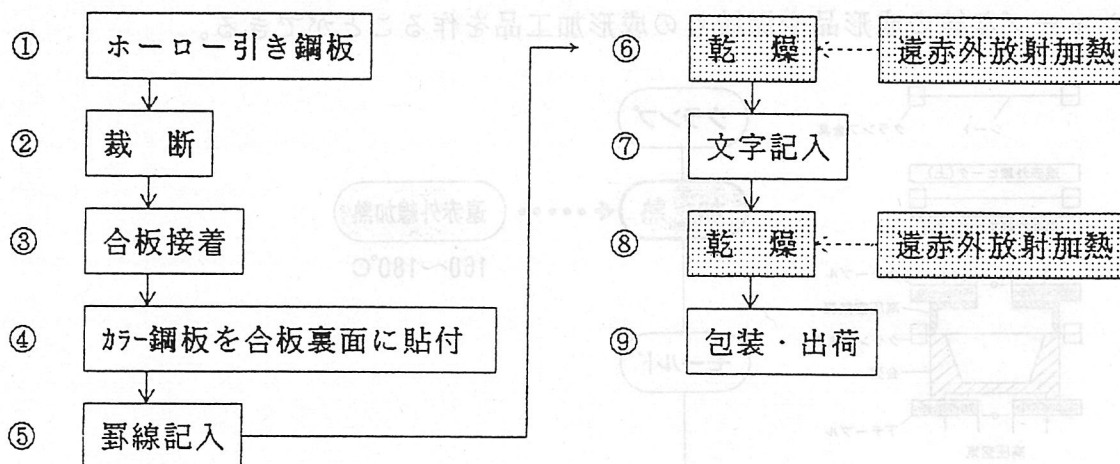


図-5 ホワイトボードの製造工程

(大塚)

参考文献

- (1) 遠赤外線利用の最新技術 工業技術会
- (2) 中地域技術研究連絡会、電力有効利用研究分科会「工場における省エネルギーと工場有効利用に関する報告書」
- (3) 日本電熱協会「エレクトロヒートの応用事例集」

7. 遠赤外放射（源）の利用法

7.2. 暖房機器への応用

(1) まえがき

遠赤外加熱は、放射加熱の一種であり、産業界において大変効率のよい方式として種々の加工分野で採用されているが、暖房の分野においても遠赤外加熱を積極的に利用するものが増えてきている。

従来暖房は、室内空気を暖める対流暖房が主流であったが、この方式は快適な暖房の必須条件である頭寒足熱を実現することが大変むずかしい。特に天井が高い部屋、大空間あるいは階下が駐車場や倉庫等で外気に接している部屋では床付近の温度は、人間の上半身部分（床上1 m位）の温度より7～10℃位低いことも少なくない。したがって、足元の冷え込みを少しでも緩和するためにはいきおい室温を高く設定することになるので、頭部のほてりがひどくなり、また外気との温度差が大きくなる結果、熱損失が大きくなることにもなる。一般には、空気温度がいくら高くても、足元の温度がそれより2℃くらい低いと、人は足元の寒さを感じる。

さらに対流暖房のもう一つの欠点は、部分的な暖房が出来ないことであり、例えば工場のように広い空間に少しの人がいるだけという場合には完全に不向きである。

放射加熱による暖房は、このような対流暖房の欠点をかなりカバーしてくれるものである。

(2). 生理学的立場からみた暖房¹⁾

人の体温は、生体の熱平衡によって決定される。つまり、体内の物質代謝による熱発生と、伝導、対流、放射、水分の蒸発、仕事による熱の出入り等の熱放散とが等しいときの温度が体温であり、健康な平常時には、ほぼ37℃弱である。

$$M = E \pm C \pm K \pm R \pm W \quad \dots\dots (1)$$

M : 熱発生

E : 水分の蒸発による熱移動

C、K、R : 伝導、対流、放射による熱移動

W : 仕事による熱移動

この熱発生量は、人の動作状態により、大きく変化する。通常の生活をしているとき、成人男子の1日の熱発生量は約2500Kcal、女子では2000Kcal位である。これが(1)式の形で、放散され、体温が維持されるのである。放散の機構の違いによる放熱量の割合は、温暖、安静時を例にとると次のようになる。(室内温度が24℃の場合)

放射	:	67%	}	…… (2)
伝導、対流	:	10%		
蒸発	:	23%		

暑熱時には、気道と皮膚の発汗による蒸発が盛んになるので、蒸発による熱放散が90%位になる。

(1)式が成り立つとき、つまり熱発生量と熱放散量がバランスしているとき

は、快適な状態にあるが、熱放散量の方が大きくなると寒さを感じるようになり、皮下血管が収縮して人体表層部への血流が減少して皮膚温度が低下し、周辺との温度差が少なくなると熱放散を減少させる。あるいは体の震えにより熱発生量を増加させ、体温を維持しようとする。

人為的に寒さを感じさせないようにする方法の一つは、衣類の重ね着等による体表面からの熱移動を防ぐことであり、もう一つが暖房である。つまり、人体の周囲環境の温度を高くすることにより、体表面との温度差を少なくして熱放散量を減少させることである。

最も一般的な、空気を加熱する対流暖房は、体表面から伝導、対流による空気への熱放散を減少させて寒さを感じさせないようにするのである。

しかしながら、例えば室内温度が24℃であっても、冬の場合と初夏の場合では冬の方が寒く感じる。これは(2)からわかるように、体表面からの熱損失は、普通の状態では放射による割合が大変多いことから、空気温度が同じであっても、室内の床、壁面、あるいは天井面等の温度が低い冬の方が体表面からの壁面へ向かう放射による熱放散が大きくなり、寒く感じるのである。

(3) 放射暖房の各種の方式

放射暖房といっても、特別の器具、あるいは装置により実現されるわけではない。ほとんど全ての暖房設備は、伝導、対流、放射の3つの伝導形態の組み合わせにより効果を発揮する。その中でも特に放射による効果に主眼をおいたものを放射暖房として区別している。

放射暖房を、形式、熱源の温度により分類したものが第1表であり、熱源の温度により、低温型、中温型、高温型の3つのグループに区分できる。

第1表 放射暖房の種類

区分		低温型	中温型	高温型
温度範囲		100℃以下	200℃位	500℃以上
形式	ストーブ	パネルヒーター (スクリーンヒーター)	パネルヒーター	赤外線ストーブ スポット暖房器
	こたつ	遠赤外線こたつ		近赤外線こたつ
	パネルヒーティング	床暖房 暖房カーペット 天井暖房	天井暖房	

(4). 低温型放射暖房

低温型の放射暖房は、温度が20～100℃前後で使われるもので、人体が触れても火傷をしない程度の低温の広い発熱面から主に放射による放熱を行なうものであり、いわゆるパネルヒーティングと総称されるものである。

その代表的なものが床暖房であり、暖房カーベットも広い意味ではその中に含まれる。

4-1) 床暖房

床暖房は、熱源の種類、発熱体の形状、施行方法等により、多くの種類に分類できる。

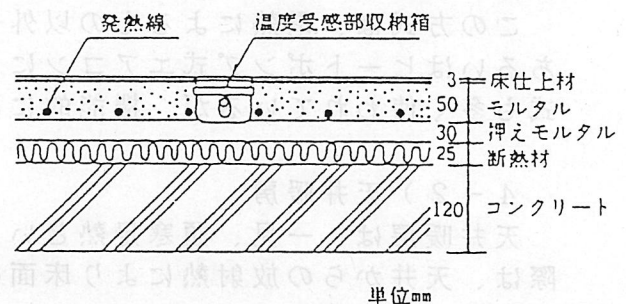
熱源の種類	電気、温水、温風、フロン・ガス
発熱体の形状	線、パネル、シート、パイプ
施行方法	コンクリート埋め込み、床下地材の上に敷設 床下の密閉空間に通風

(1) 電熱線埋め込み方式

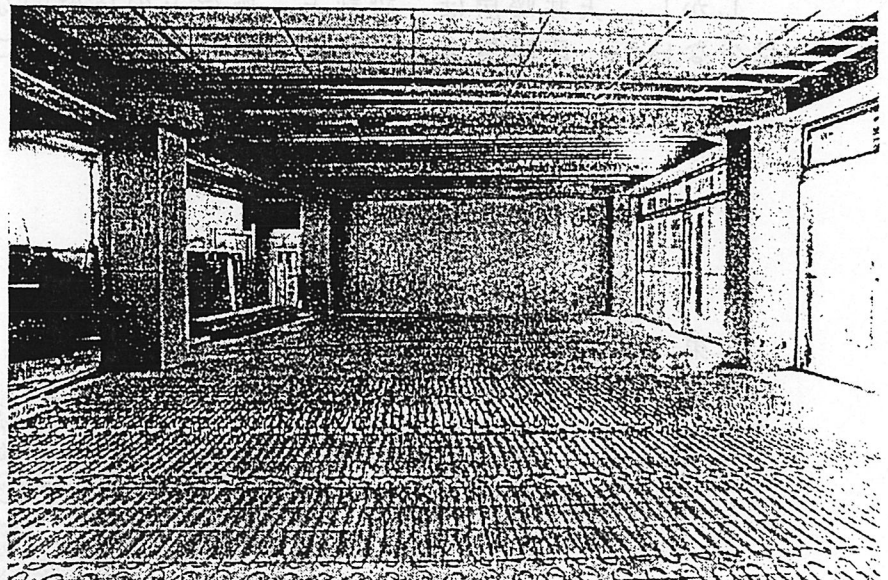
この方式は、第1図に示すように床のモルタル、コンクリート等の中に専用の電熱線を埋設し、床の構造体を暖めるもので、一般ビル、あるいは保育園、老人ホーム等、規模の大きな建物、あるいは防水性が高いことから、浴室、プールサイド等の暖房として使われる。

電熱線を敷設中の様子を第2図に示す。

第1図 埋込み式床暖房の床構造例



第2図
埋込み式床暖房
(エコノヒート[®])の
電熱線の敷設



投入発熱量	主暖房の場合	150～200W/m ²
	補助暖房の場合	70～120W/m ²

また、床のコンクリートの高い蓄熱性を生かして、深夜電力を利用した蓄熱式床暖房として使われることもある。

電熱線の代わりに、幅300~400mmの長尺の電熱シートを敷設する方式、あるいは温水を通すパイプを埋設する方式も同じ考え方にしたいがい、行なわれる。

(2) 電熱パネル方式

主に住宅等、比較的小規模な部屋の床暖房として使われる方式である。

カラー鋼板で外装され、内部に面状(シート)発熱体を組み込んだ、約畳1枚大で厚さが12mmの電熱パネル(第3図)を床の下地材の上に敷き並べ、その上にカーペット等を敷いて仕上げる(第4図)。

この方式は、

間欠的に使われる

早い立ち上がり時間を要求される

部屋が小さく、放熱面積が少ない場合が多い

等の理由で、単位面積の発熱量は高く、 $300\text{W}/\text{M}^2$ 位で、これを使用する状況に応じてスイッチにより低発熱量に切り替え、床温を調節しながら使用する。

これにより得られる室内の温度分布は、部屋の構造、使用状態により異なるが、大体、床温 $25\sim 30^\circ\text{C}$ 、室温 $16\sim 18^\circ\text{C}$ 位になる(第5図)。

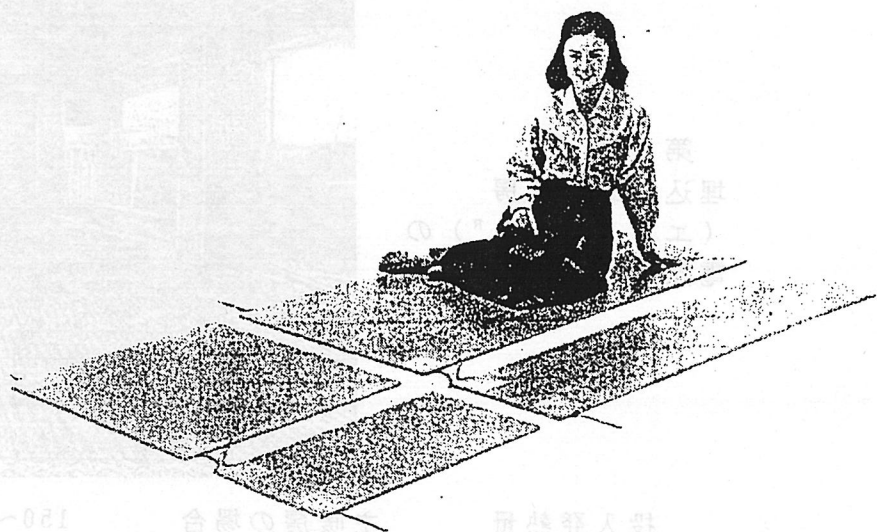
この方式は、電熱によるもの以外に、パネルの中にパイプを組み込み、温水、あるいはヒートポンプ式エアコンにより暖めたフロン・ガスを流し、加熱する方式も多く使われているが、機能的には同じである。

4-2) 天井暖房

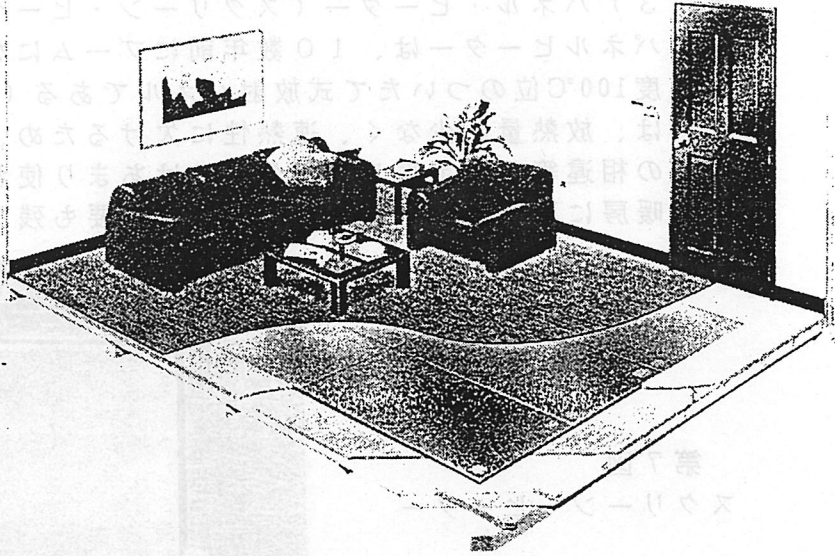
天井暖房は、一見、頭寒足熱という暖房の原則に反すると思われるが、実際は、天井からの放射熱により床面の温度が上がるため、床暖房に似た効果が得られる(第6図)。

しかし、天井暖房は、設計上、施行上の技術的な難しい点が多いため、実施例は少ないが、床暖房より多く取れる利点もあり、これからの暖房方式といえる。

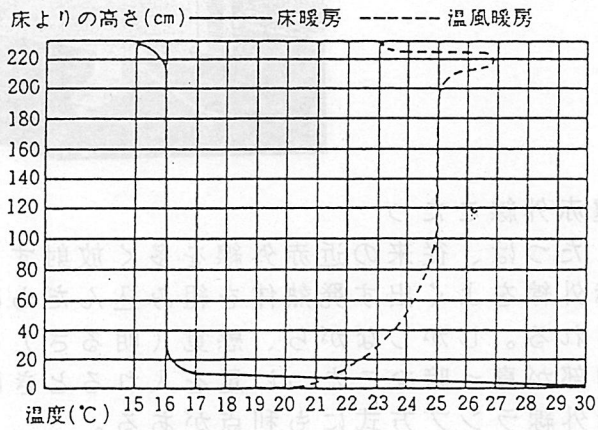
第3図
電熱パネルの外観
(サンサニー・パネル[®])



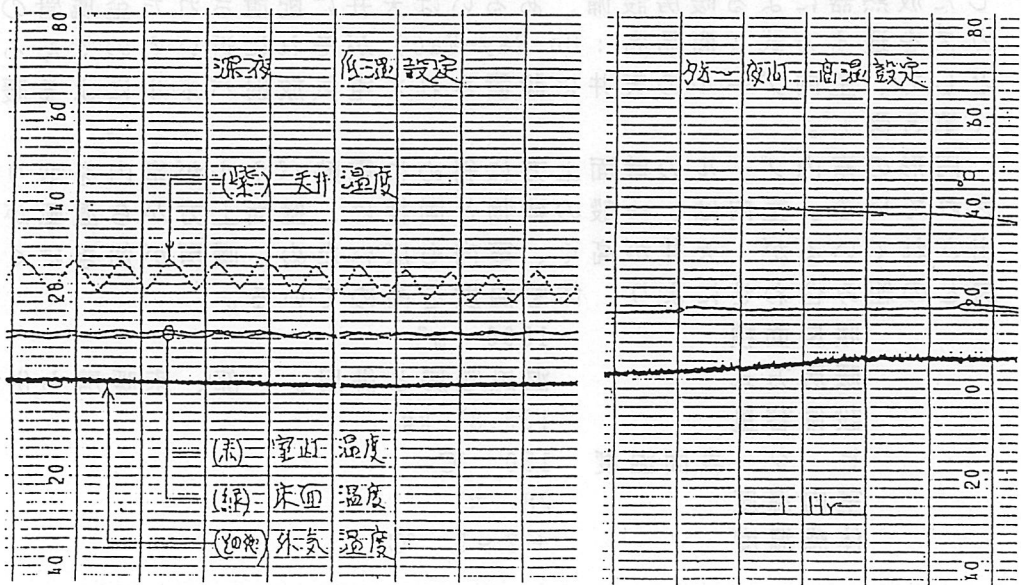
第4図
 パネル式床暖房の
 敷設例
 (サンサニー・パネル^R)



第5図
 床暖房、温風暖房の
 室内温度分布



第6図
 天井暖房の各部の温度

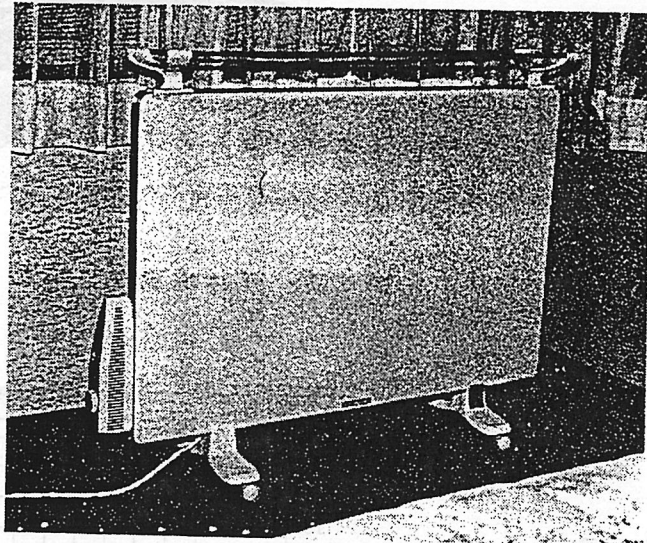


4-3) パネル・ヒーター(スクリーン・ヒーター)

このパネルヒーターは、10数年前にブームになったもので、放熱面積0.5m²、表面温度100℃位のついたて式放射パネルである(第7図)。

これは、放熱量が少なく、速熱性に欠けるため、日本の住宅事情、暖房に対する意識の相違等から定着せず、今日ではあまり使われていないが、書斎、子供部屋等の暖房には最適であるとして根強い需要も残っている。

第7図
スクリーン・ヒーター



4-4) 遠赤外線こたつ

遠赤外線こたつは、従来の近赤外線を多く放射する赤外線ランプのかわりに、長波長の遠赤外線をよく出す発熱体を組み込んだもので、大変マイルドで快適な暖房感が得られる。しかしながら、感覚(明るさ)によっても温かさを感じるものであり、内部が真っ暗なこたつに足を入れるときは、冷え冷えとした感じがある。明るい赤外線ランプ方式にも利点がある。

(5). 中温型放射暖房

この温度領域が暖房に使用される例は少なく、工場建屋等高い天井に蒸気配管した放熱器による暖房設備、あるいは天井に配置された金属管の中に高温の燃焼ガスを通す方式(商品名: Co-Ray-Vac)がそれに近いものである。似たような例として、室内プールの天井に設置された電気放射パネルによる暖房の例を示す(第8図)。

円形の室内プールの壁面上方に斜めに電熱パネルが室内を取り囲むように設置されている。室内は、一般の建物と同様に、壁面上方から温風が下に向けて吹き出されているが、天井が高く、室内も広いため、暖房が効きにくいので、放射暖房との組み合わせにより、体感温度を高めている。

暖房面積	1500 m ²
暖房方式	温風暖房と併用。一部、床暖房も併用。
設備容量	132.8 kw
ヒーター表面温度	150 °C
室内温度	28 °C
体感温度	+2~5 °C

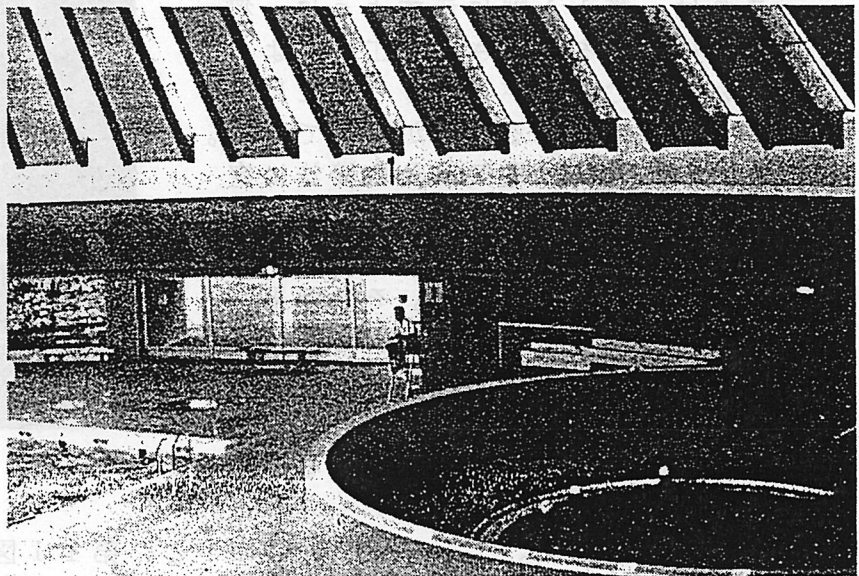
この設備の特徴は、次のようなものである。

(1) 屋内プールサイド等では、温風暖房だけの場合は、気流の影響で、裸の皮膚からの蒸発による放熱が多く、肌寒さを感じることが多い。このような場所で放射暖房を採用すると、皮膚表面からの放熱が大幅に減少し、温かさの感じが非常に強くなる。

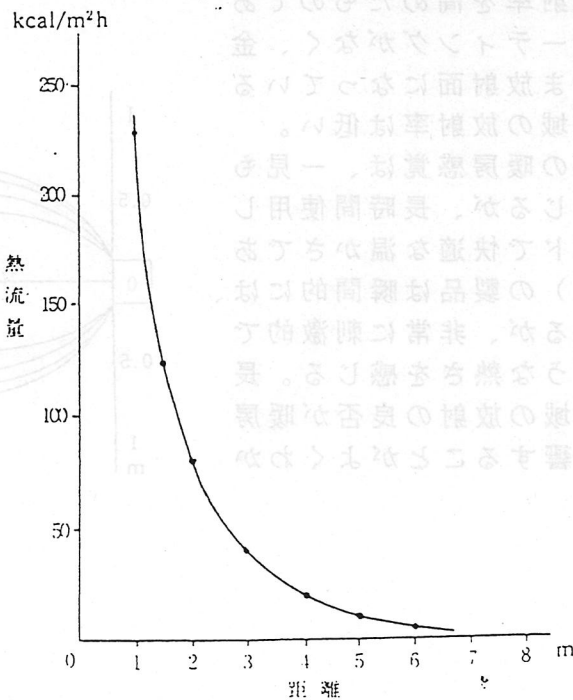
(2) ヒーターパネルが、暖房領域を取り囲むように配置されていて、どの場所においても全身を包みこむように周囲から熱放射を受け、さらに床の表面の温度も上がってくるので、その効果が倍加され、極めて快適な暖房効果をうむ結果となる。

特定の方法からの放射熱流量は、第9図に示すように、ある程度距離が離れると急激に少なくなるが、周囲から包みこむように放射を受ける場合は、熱流密度は少なくても、非常に大きな暖房効果を現わすのである。

第8図
天井暖房パネルを
設置した室内プール



第9図
天井暖房ヒーター
からの熱流量



(6). 高温型放射暖房

高温型放射暖房の身近な代表例は、石英管ヒーターを使った反射型電気ストーブである。これは、赤熱したニクロムヒーターから放射される近赤外線が放射の大部分である。赤熱するガスストーブ、あるいは石油ストーブ等も同じである。これに対して、最近では金属のシーズ・ヒーターを発熱体にした反射型スポット暖房器が遠赤外線暖房器として多く使われている(第10図)。

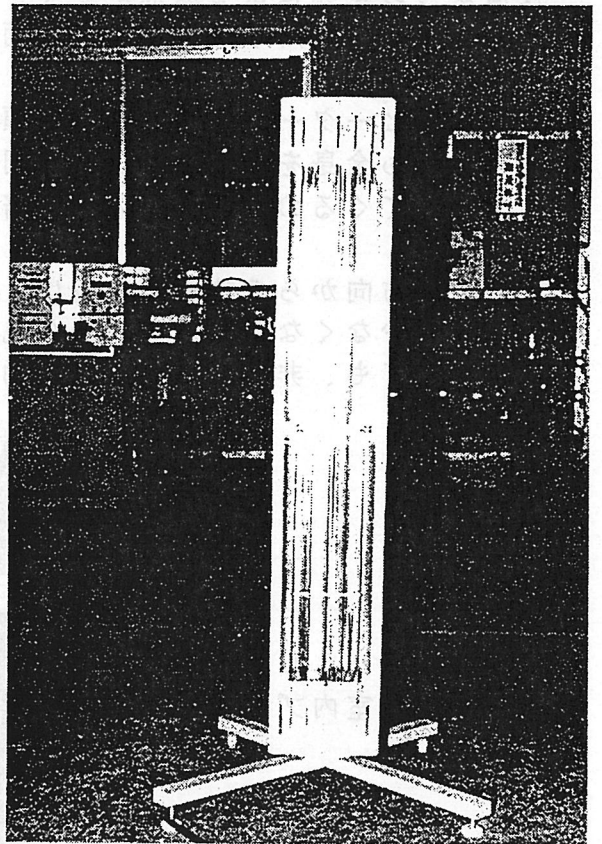
これは、第11図に示すように、狭い範囲に放射を集中させ、工場のように広い場所で、文字どおり、人だけをスポット的に暖めることが目的である。

この暖房器は、電気用品取締法に定められた電気ストーブとして型式認可を受けなければならないため、ヒーターを赤熱させる必要がある。その結果、一般的には近赤外線が強く放射されるが、暖房感覚を向上させるために各メーカーとも遠赤外放射が出やすいようヒーターの表面処理を工夫をしている。

第12図に2種類のヒーターの分光放射率の例を示す。(1)は、表面にある種のセラミックスをコーティングし、遠赤外領域の放射率を高めたものであり、(2)はコーティングがなく、金属表面がそのまま放射面になっているので、遠赤外領域の放射率は低い。

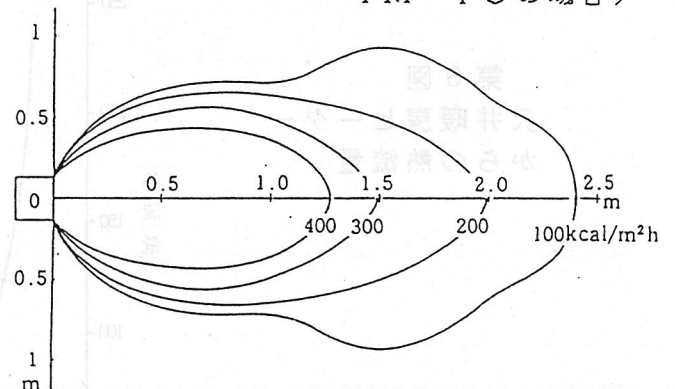
(1)の製品の暖房感覚は、一見もの足りなさを感じるが、長時間使用していてもマイルドで快適な温かさである。一方、(2)の製品は瞬間的には大変温かく感じるが、非常に刺激的でチリチリするような熱さを感じる。長波長の遠赤外領域の放射の良否が暖房感覚に大きく影響することがよくわかる。

第10図 スポット暖房器の例



第11図 スポット暖房器の熱流分布例

(インフラスポットヒータ IM-15の場合)

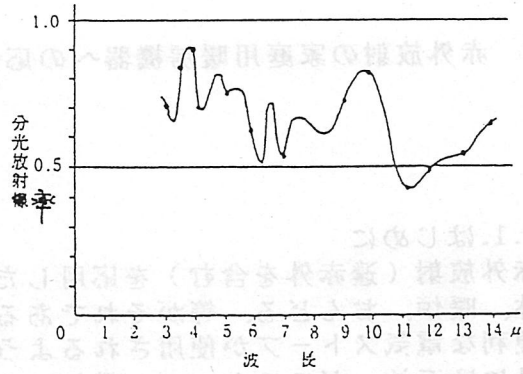
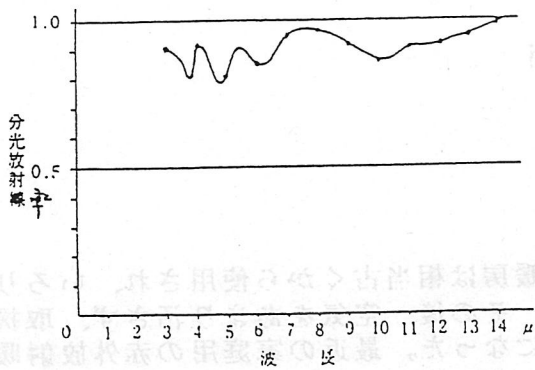


(大槻)

第12図 スポット暖房器の分光放射率

(1) セラミックコーティング

(2) セラミックコーティング無し



参考文献 1) 黒島 「環境生理学」 理工学社

7.3 赤外放射の家庭用暖房機器への応用

7.3.1. はじめに

赤外放射（遠赤外を含む）を応用した暖房は相当古くから使用され、いろり、火鉢、暖炉、おんどん、等がそれである。その後、空気をあまり汚さず、取扱いの便利な電気ストーブが使用されるようになった。最近の家庭用の赤外放射暖房器具には石油、ガスストーブ、電気ストーブ、電気こたつ、カーペット、パネルヒータ、等が使用されている。放射を使用した暖房方式には局部暖房が中心に使用されている。この放射を使用した暖房方式には直接赤外放射を利用するものと空気を暖める方法を併用したものがある。暖房にはそれぞれ特質があるがここでは主として電気エネルギーを用いた赤外放射暖房の放射源を中心に述べる。

7.3.2. 赤外放射暖房器の必要条件

局部暖房に使用される発熱体の必要条件は次の点である。

- ①速熱性があること、
- ②放射照度の調節が容易であること、
- ③容易に移動して使用できる等があげられる。

この目的を達成するために多くの試みがなされてきた。

7.3.3. 局部暖房器の変遷

①電気ストーブの変遷

(1). 初期の電気ストーブは陶磁器性の円筒形ボビンにニクロム線を巻き付け、この発熱体を反射板の中央に取付けたものであった。発熱体及び支持物の熱容量が大きいので、速熱性に難点があった。

(2). 第2期に採用されたものは、シーズヒータや石英管の内部にニクロム線をコイル状に巻き挿入したものを500℃程度の温度で使用していた。放射源の寸法を小さく出来ることから、光学的に設計した反射板を使用して放射の効率的利用が採用された。その後ニクロム線の改良が行われ800℃程度で使用されるようになり、放射照度は更に向上した。ニクロム線の巻き方にも工夫がなされ石英管壁との接触を少なくした花巻きヒータが使用されるようになった。

(3). 最近のものでは、密閉した石英管にタングステンフィラメントとアルゴン等の不活性ガスを封入し2000℃以上の温度で使用する。タングステンフィラメントは熱容量及び冷間抵抗が小さいため速熱性に優れており、反射板と組み合わせが効率的に放射配光を作り出すことができる。

小型のファンモータが組み込まれストーブの上部又は下部からヒータで温まったケース内部の空気を吹き出す温風ファン付きのものが使われている。

(4). ヒータの表面を遠赤外放射の放射率の大きい材料で覆い、遠赤外放射比率を大きくしたものは遠赤外線ストーブと称されている。

②こたつの変遷

(1).こたつは局部暖房と接触暖房を主とした就寝用のものから、放射暖房を活かしたやぐらこたつとなり、1960年頃やぐらこたつ用として、フィラメント温度2200℃程度に設計された大型のレモン形をした着色ランプが初めて放射源として使用された。最大パワーの放射波長が人体組織の透過率の大きい波長域1.1 μ m~1.3 μ mに合致しており、穏やかな暖かさとともにランプの光色が赤橙色で心理的にも温暖感があることから『健康こたつ』として広く使用された。フィラメントに400W/80Wの2段階式を採用して温度調節がきめ細かく出来るようになった。発熱体はやぐらこたつの上部に固定し使用されたがランプの寸法の制限から小型化に難点があった。

(2).放射源の小型化のため、密閉した石英管にアルゴンガスとタングステンフィラメントを封入し、フィラメントの温度を2200℃程度で使用し、支持法に改良を加え耐震性を増した。直視した時の眩しさを下げるため赤色に着色した石英管を使用したり、遠赤外放射の放射率の大きい材料で処理し、この波長帯の遠赤外放射を増やすと共にランプの輝度を下げている。放射源の寸法は格段に薄型化され、檯の骨格部内に収納出来るようになってきている。

(3).環型石英管ランプや複数の石英ランプを使用しこたつ内の放射照度分布を均一に近づけたり、これ等の石英管ランプの近傍に、遠赤外放射の放射率が大きい材料で処理した大きな表面積を持つ金属板で作った低温放射体を設け、遠赤外放射を増やすような工夫がなされている。又小型ファンを使用し、こたつ内部の温度分布を迅速に均一化するようにし、放射源周囲の過熱を防ぐための冷却効果も兼ねたものも採用されている。放射強度の調節も、電子回路式の連続温度調節装置を採用し温度調節が一層きめ細かく出来るようになった。

③パネルヒータの変遷

(1).最初に実用化されたのは、低温ヒータとかオイルヒータと呼ばれるものでオイルを密閉した平板状容器の表面温度を60℃程度に加熱し、その表面からの放射を利用するものであり最高温度に達するのに時間がかかる難点がある。現在もこのタイプのもものは使用されている縦方向に立てて使用するものが多い。最近のもものはヒータの周囲をプラスチックや布でカバーし、適切な表面温度に維持するようになっている。

(2).パネルヒータのはんちゅうに入れるのは若干抵抗があるが、電気カーペットも大面積の面ヒータと考えられる。表面温度は50℃程度以下で任意に調節して使用される。床面に敷いて使用すると、室内の高さ方向の温度分布が均一になりやすく、上下の温度差の少ない暖房が実現できる。暖房機能としては接触暖房と放射暖房、対流暖房の接点に位置するものと考えられる。

7.3.4.赤外放射源の特性

今までに使用されてきた赤外放射源は、ニクロムヒータ、石英管ヒータ、石英管ヒータ+遠赤外放射源、着色ガラス管+タングステンフィラメント電球、着色石英ガラス管+タングステンフィラメント電球、着色石英ガラス管+タングステンフィラメント+遠赤外放射源と移ってきている。遠赤外放射はIR-Aなどの短波長赤外放射に比べ人体に対し小さい放射照度で同じ程度の温熱感をもたらすことが明らかになっている。

図.7-3-1は各種発熱体(コルツ赤外線ランプ、石英管ヒータ、セラミック塗装石

英管ヒータ、SiCセラミックヒータ)の分光放射輝度特性を表したものである。コルツ赤外線ランプの最大パワーの放射波長は $1.2\mu\text{m}$ で近赤外線領域の放射が主体であり、他の発熱体は $3\mu\text{m}$ 付近で、遠赤外線領域の放射が主体である。これらの発熱体を使用して手の甲、アクリル板に照射し、温度上昇を比較した。図.7-3-2は各種発熱体と手の甲の皮膚の温度上昇を比較したもので、手の甲の放射照度は $50\text{mW}/\text{cm}^2$ 一定にした、遠赤外線領域の放射照度の大きい発熱体で照射したものが皮膚の温度上昇、温熱感が大きくなっている。図.7-3-3は各種発熱体とアクリル板の温度上昇を比較したものである、遠赤外線領域の放射照度の大きい発熱体で照射したものがアクリル板の温度上昇が大きくなっている。衣服等の温度上昇は遠赤外線領域の放射照度の大きい発熱体で照射した方が大きくなることが考えられる。

7.3.5.おわりに

赤外放射利用家庭用暖房器について変遷を観察した。赤外放射源は用途によって他の熱源にない作用効果をもっている。特に遠赤外放射源は新しい可能性を持つ放射源として関心がある。セラミックス等の遠赤外放射材料の開発、発生手段の開発等、今後の研究開発に期待したい。

(吉井、森田)

参考文献

- (1). 松井松長: 赤外放射に対する皮膚の温熱感覚の波長依存性、昭和61年照明学会全国大会47(1986)
- (2). 河本康太郎: 遠赤外線の照曜、電熱への応用、セラミックス23-327(1988-4)
- (3). 牧政雄 他: 赤外線輻射コーティング、National Technical Report Vol. 35-540

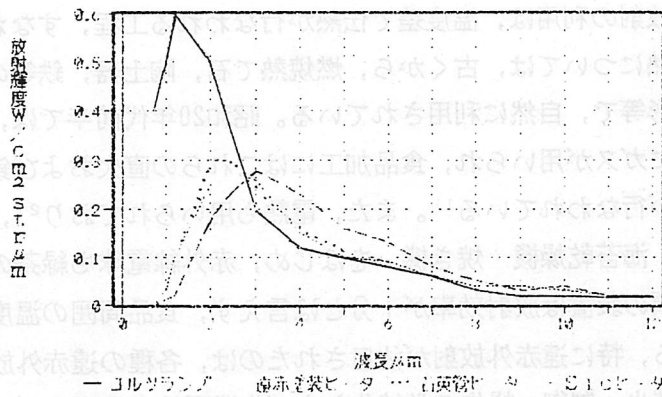


図 7-3-1 各種ヒータの分光放射輝度

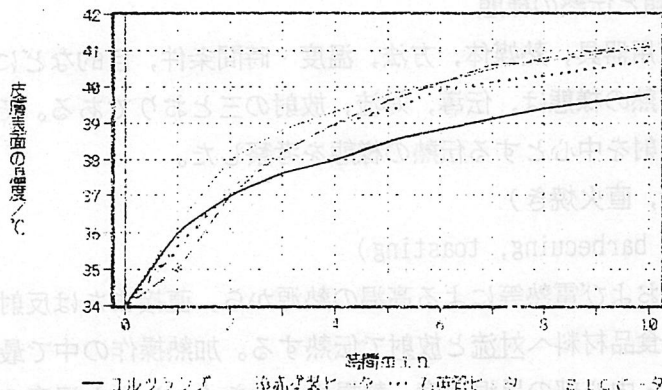


図 7-3-2 各種ヒータによる皮膚表面温度上昇
放射照度 $50 \text{ mW/cm}^2 \text{ const}$

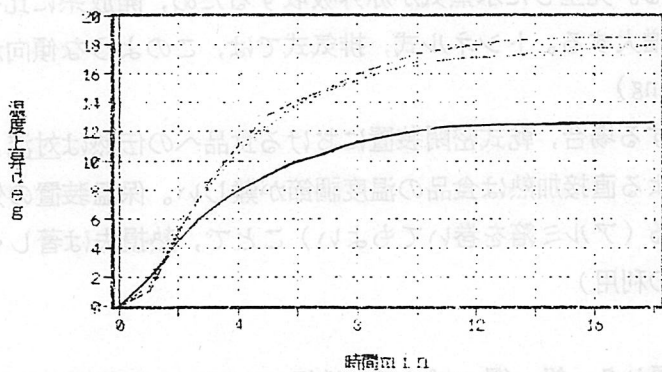


図 7-3-3 各種ヒータによるアクリル板の温度上昇
放射照度 $50 \text{ mW/cm}^2 \text{ const}$

7. 4 食品加工，調理機器への応用

食品加工への遠赤外放射の利用は，温度差で伝熱が行なわれる工程，すなわち加熱および冷却工程が対象となる。放射加熱については，古くから，燃焼熱で石，陶土器，鉄等の鍋類，かまど類を加熱して食品を蒸焼きする形等で，自然に利用されている。昭和20年代前半では，燃焼源は，薪，炭火，たどん，石炭類，一部にガスが用いられ，食品加工にはこれらの直火および鉄材（板，箱，管，籠）等を介しての間接加熱が行なわれている¹⁾。また，電熱も用いられており²⁾，ニクロム線発熱式の煎餅器，自動運行パン窯，海苔乾燥機・焼き機をはじめ，赤外線電球も緑茶の乾燥³⁾や栗の剥皮⁴⁾に利用されている。この頃の装置は放射効率が十分とは言えず，食品周囲の温度調節も難しい点があった。昭和50年代半ばから，特に遠赤外放射が注目されたのは，各種の遠赤外放射体が開発され，加熱時間の短縮，熱ロスの減少，制御・操作の単純化および作業環境安全等のメリットが報道され始めてからであり，今後，なお工夫しだいで一層の効率化が期待できる。そこで，食品加工への遠赤外放射の利用に資するため，食品加熱における伝熱の様態および最近の食品加工，調理機器への応用・研究例のごく一部を整理した。

7.4.1 食品加熱の種類と伝熱の様態

加熱操作の用語は，使用器具，熱媒体，方法，温度・時間条件，目的などに応じて，いろいろの表現がとられているが，伝熱の様態は，伝導，対流，放射の三とおりである。そこで，食品加熱の種類を次のように分類し，放射を中心とする伝熱の様態を考察した。

(1) 空中加熱（直接加熱，直火焼き）

① 開放系 (grilling, barbecuing, toasting)

ガス，薪炭等の燃焼熱および電熱等による高温の熱源から，直接または反射材，放射材を介し，串・網等で空間に支持した食品材料へ対流と放射で伝熱する。加熱操作の中で最も高温を利用する方法であり，材料表面の焦げ・中心部の昇温速度，熱損失が大きく，しかも温度の保持，調節が難しい。したがって，この分野には，遠赤外放射の種々のメリットが適用され，応用例も多い。

② 密閉系 (broiling, roasting, baking)

オープン等を用いる密閉系では，熱の放射損失，対流損失が小さくて熱効率が極めてよくなり，水分も逃げ難く蒸焼きとなる。発生した水蒸気が赤外吸収するため，開放系に比べて，食品への放射伝熱は減少し，対流伝熱が増大する。トンネル式，排気式では，このような傾向が小さい。

③ 保温 (heat retaining)

食品を20~70℃で保温する場合，乾式密閉装置における食品への伝熱は対流（自然，強制）が主である。放射型ヒーターによる直接加熱は食品の温度調節が難しい。保温装置の外壁温度が高い場合は，その面の放射率を低くする（アルミ箔を巻いてもよい）ことで，熱損失は著しく小さくなる。

(2) 熱交換（加熱中間体の利用）

① 乾式

燃焼熱による高温の熱源から，鍋，網，パイプ，鉄板，セラミック材等の加熱中間体への伝熱は対流が主であり，燃焼炎の放射率（温度，ガス層長，輝炎等で異なるが，例えば0.1~0.4，噴霧式バーナーでは0.9の部分もある⁵⁾）に応じて放射も幾分関与する。シュバンクバーナーは，この熱交換により，赤外放射体となる。また，電熱等による中間体への伝熱は放射が主であるので，中間体表面の放射率（=赤外吸収率）により，伝熱量に差が生じる。

② 湿式

水、油、蒸気等の流体熱源から、ジャケット、パイプ、プレート、鍋等の中間体への伝熱は対流が主であり、放射も僅かに関与し得る。また、中間体から液体食品への伝熱の場合も同様に考えられる。

(3) 乾式接触加熱（鉄板焼き，フライ炒め等：steak, parching, sauteeing, roasting）

① 開放系

鉄板、鍋、箔、石、食塩等の加熱中間体に定置またはかき混ぜながら接触伝熱するので、直火焼きよりも加熱温度は低く、また温度管理もやや容易である。中間体から食品への伝熱は接触面積に応じた伝導が主であり、放射も関与し得る。また、接触面で発生する水蒸気による食品中への蒸気・水の対流伝熱も有り得る。なお、熱交換面の表面粗さが伝熱の様態および速度に関係する。

② 密閉系

蓋をして加熱する密閉系では、熱の放射損失、対流損失が小さくて熱効率が極めてよくなり、水分も逃げ難い。伝熱の様態は、開放系と同様であるが、水蒸気による対流伝熱が大きく関与するようになる。また、アルミ箔（放射率0.02）による包み焼きにおいては、放射伝熱が殆ど無く、熱効率は著しく悪いが、高温下で温和に加熱するのによく用いられる。この場合の箔から食品への伝熱は、伝導が主となる。なお、品温が上昇した部分から水蒸気が発生するにつれ対流伝熱が大きく関与するようになる。

(4) 油中加熱（deep frying）

油（120～200℃）から食品への伝熱はもっぱら油の対流による。放射については、フライ時の油の放射率が小さいと想定されるので、影響は小さい。鍋から油への伝熱は、伝導、対流、放射の三者とも有意に関与する。放射による伝熱量を増すには、鍋の熱交換面のフライ時の放射率を高くする必要がある。例えば、鍋底内面に高放射材料を溶射したものは油との熱交換が速まり、鍋底の温度が通常より低くなる（油温180℃の時、ステンレス鍋底に比べると10～20℃低い）結果、鍋底での油の過熱による劣化が抑制される⁶⁾。

(5) 水中加熱（boiling, stewing, cooking, blanching）

油中加熱と異なる点は、水（加熱温度 40～140℃）の赤外線透過率が油（加熱温度140～200℃）の場合の1/20～1/40であり、鍋底から油への放射透過距離（99%減衰）が1～2mm程度であるに対し、水または多水分食品へは0.05mm程度以内である。また、水から食品への伝熱については、殆ど水から水への接触伝熱となるので、対流と伝導によるだけで放射は関与しない。なお、水中で透明包装材を介して食品を加熱する場合は、放射伝熱が関与し得る。

(6) 蒸気直接加熱（steaming）

常圧では40～100℃、加圧下では80～150℃の所要温度で蒸気が使用されている。ボイラーで発生した蒸気を、直接食品に導いて加熱するので、もっぱら対流伝熱である。

(7) 乾燥

食品乾燥には、熱風乾燥、加圧乾燥、真空乾燥、油中乾燥等と種々あり、この章に記した水中加熱を除く各種の加熱の種類と伝熱の様態が適用される。乾燥は、遠赤外放射の利用対象として重要で多岐にわたるので、7.4.3 で概説する。

(8) 食品中の伝熱

食品自体では、固形・ペースト状のものは伝導伝熱が主である。放射伝熱の場合は、波長で相違するが、通常、表面から 0.3mm程度以内と考えられる。一方、液体食品の伝熱は対流が主であり、伝導

は大きくない。そして、放射は加熱器壁面からせいぜい0.05mm程度以内であろう。

7.4.2 波長特性および赤外透過距離

(1)放射波長特性

放射源の全熱放射エネルギーは、 $E = 4.88 \varepsilon (T/100)^4$ [kcal/m²h] によって、放射率 ε が高いほど、また絶対温度 T の四乗に比例して放射量が増す。そして、放射主波長は、 λ [μm] = $2898/T$ によって、温度の上昇と共に短波長へ移行する。それで、高温になるほど可視光線の多い熱放射を発生し、550°Cぐらいで赤い色が見えるようになり、1400°Cぐらいでは白熱状態になる。温度によって放射主波長が変わるということは、放射を受ける熱媒体および食品の赤外透過性も変化することであり、条件しだいで伝熱速度に差を生ずる可能性がある。

(2)赤外吸収・透過・反射特性

赤外線は、空気中の塵埃、水蒸気、炭酸ガス等による吸収があるものの、通常の大気加熱系での透過性は極めて良く、食品の表面に直接達して、そこでの吸収特性に応じて発熱する。これに対して、水中、油中のごとき液体加熱系および固体食品中での赤外線の透過性は非常に悪い。しかし、各食品の赤外透過スペクトルからみて、波長によっては、実用上有意な透過性があると推定される。この具体的な透過距離およびその効果に関するデータは極めて少なく、今後の検討課題である。

赤外放射による伝熱においては、媒体を透過しやすい波長帯を放射するよう、ヒーターの温度・波長特性および媒体の透過特性を検討する必要がある。そして、食品に対しても、表面加熱をねらう場合は吸収性の波長を放射するよう、また、できるだけ内部加熱をねらう場合は透過性の波長を放射するよう、ヒーター特性および食品の透過特性を検討することが基本的には必要であろう。さらに、放射熱損失の大きい系には反射板を用い、赤外線の方向転換、集中化制御を図ることが赤外放射の利用において必須である。

(3)赤外スペクトルおよび赤外透過距離

均一な物質の吸光度は、その物質中の光路の長さに比例するという Lambert の法則により、 $\log(I/I_0) = -\alpha d$ から、物質固有の α が求まる。ここに、 I_0 : 入射光強度、 I : 透過光強度、 d : 物質層の厚さ (個・液体では mm)、 α : 吸光係数 (単位層の吸光度)、 I/I_0 : 透過率 (T)、 $\log(I/I_0)^{-1}$: 吸光度 (A)

いま、赤外透過率が 10% ($T = 0.1$) となる層の厚さ (90% 減衰透過距離) を求めるならば、 $d_{T=0.1} = (\log 0.1^{-1}) / \alpha = 1 / \alpha$ となり、物質固有の α の逆数に相当し、入射光強度が 1/10 となる透過距離を示す。これを、赤外透過距離 D で表し、各単波長 λ μm における赤外透過距離は、 $D_\lambda = 1 / \alpha_\lambda$ となる。各赤外スペクトルから算出した D_λ の例を、表 1 に示す。なお、赤外透過率が 1% となる透過距離 (99% 減衰) は、 $d_{T=0.01} = (\log 0.01^{-1}) / \alpha = 2 / \alpha$ となり、 $2D_\lambda$ に相当する。

④大気 (図 1⁷⁾)

大気中での赤外透過率は、 H_2O (水蒸気) による吸収のため、 $6.3 \mu\text{m}$ 付近で最も小さい。この $6.3 \mu\text{m}$ を主波長とする放射温度は、 187°C である。次いで、赤外透過率が小さい波長域は、 $4.3 \mu\text{m}$ (CO_2 吸収、 401°C)、 $2.8 \mu\text{m}$ (CO_2 、 762°C)、 $15 \mu\text{m}$ (CO_2 、 -80°C) 等である。

いま仮に、図 1 から推測して、 $\alpha_{\lambda 6.3} = 30/300\text{m} = 0.1/\text{m}$ とすれば、波長 $6.3 \mu\text{m}$ における赤外透過距離は、 $D_{\lambda 6.3} = 1 / \alpha_{\lambda 6.3} = 10\text{m}$ となる。含まれる水蒸気の濃度に応じて $D_{\lambda 6.3}$ は急激に小さくなる。真空下では、水蒸気量が極めて少ないので非常によく透過する。

表1 赤外透過距離試算値 ($D_\lambda = 1 / \alpha_\lambda$: 90%減衰透過距離, mm)

試料種類	水分%	λ (μm , 括弧内は対応温度 $^{\circ}\text{C}$)									
		3.8 (490)	4.7 (344)	5.3 (274)	5.71 (235)	5.88 (220)	6.13 (200)	6.40 (180)	6.81 (153)	7.02 (140)	9.08 (100)
フライ油	0	0.63	3.3	1.4	0.01	0.14	0.6	0.9	0.03		0.04
水	100	0.14	0.04	0.07					0.03	0.02	
すり身	78	0.11	0.05	0.08							
カキ	82	0.04	0.06	0.10							
みりん干	50	0.06	0.10	0.14							
もち生地	18	0.09	0.14	0.18							
ちくわ表皮	<5	0.12	0.17	0.18							
デンプン	<1	0.04	0.08	0.08							

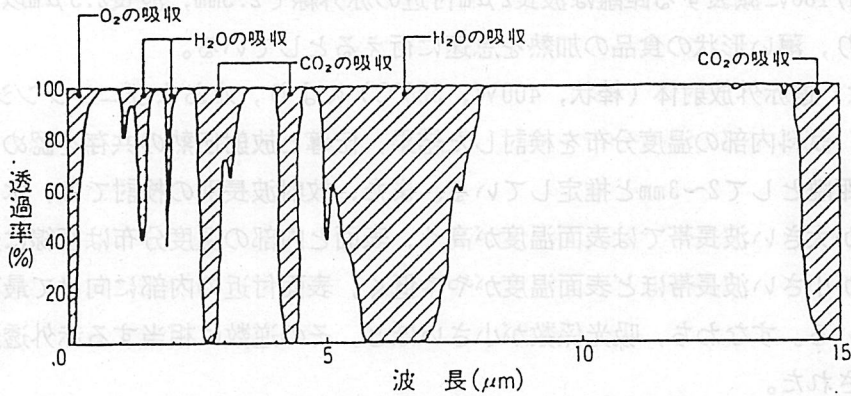


図1 大気透過率 (海面上にて光路長300m)⁷⁾

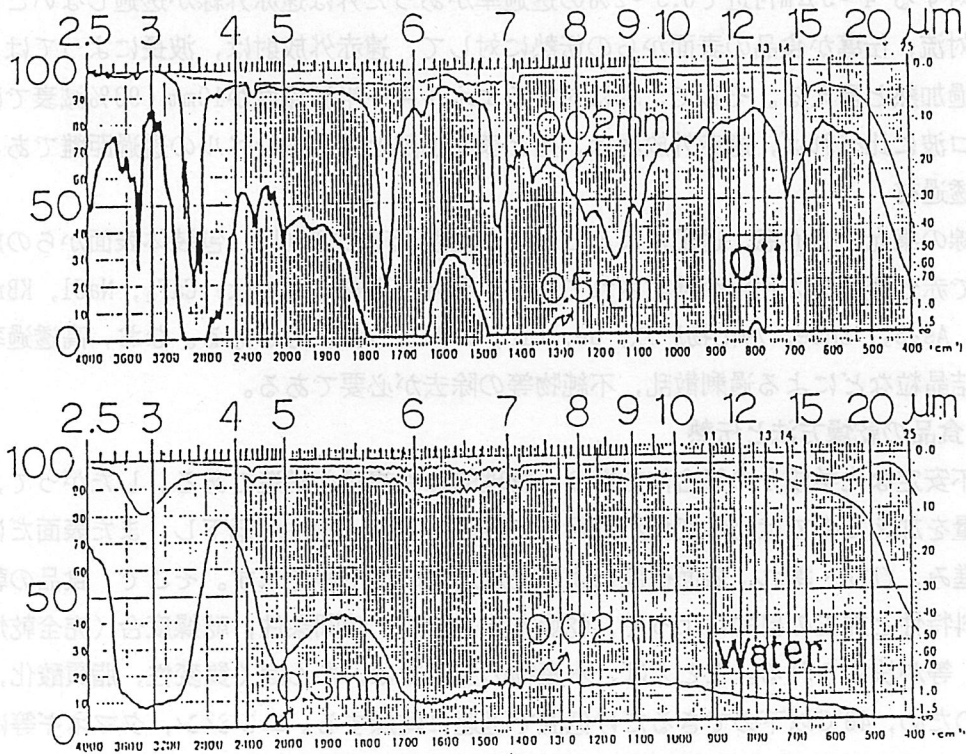


図2 フライ油および水の赤外透過スペクトル⁸⁾

②フライ油と水(図2⁶⁾)

フライ時の油温は180°C程度が多く、このときの鍋底温度は200~220°Cである。そこで、この近辺の温度に対応する主波長と赤外透過距離 D_λ を計算してみると、220°C(5.88 μm)で0.14mm、200°C(6.13 μm)で0.6mmおよび180°C(6.4 μm)で0.9mmとなった。

一方、水中加熱では、40°C(9.26 μm)~140°C(7.02 μm)で0.03mm程度であり、油の場合に比べて1/5~1/30となる。なお、99%減衰透過距離は2 D_λ である。

市川⁹⁾は、水に対して、0.8~1.3 μm の近赤外は1cm~数cmまで入り込み、2.5~25 μm の遠赤外は数10 μm ~0.3mmばかり入った範囲で殆ど全部熱に変わると表現している。

③食品

表1によると、例えば、5.3 μm (274°C)での赤外透過距離 D_λ は、0.1~0.2mm程度である。

渡辺⁹⁾によると、赤外線は食品の表面から吸収され熱に変わりながら減衰する。表面から入射したエネルギーが1/100に減衰する距離は波長2 μm 付近の赤外線では2.5mm、波長2.5 μm 以上のもので0.5mm程度以下であり、薄い形状の食品の加熱を急速に行えるとしている。

佐渡ら¹⁰⁾は、遠赤外放射体(棒状、400W、550°C)により、水およびニンジンジュースの上部20cmから加熱し、試料内部の温度分布を検討した結果、伝導と放射伝熱の共存を認めており、両試料とも放射熱浸透距離として2~3mmと推定している。また、放射波長別の検討では、水の吸光係数(0.7, 2, 10/mm)が大きい波長帯では表面温度が高く、表面と内部の温度分布は直線に近くなった。そして、吸光係数が小さい波長帯ほど表面温度がやや低く、表面付近の内部に向けて最高温度が移行することを示している。すなわち、吸光係数が小さいほど、その逆数に相当する赤外透過距離の大きくなることが実証された。

笹森¹¹⁾は、キウリおよび焼き豚の肉と脂身の厚さ各1mmについて分光正透過率(3~25 μm)を測定し、肉に対する4~5 μm 付近で0.5~2%の透過率があった外は遠赤外線が透過しないことをみている。

以上、対流、伝導が食品の表面からの伝熱に対して、遠赤外放射は、波長によっては、僅かであるが内部透過加熱と言える。そして、水に対するエネルギー半減深度が10mm(90%減衰では33mm)であるマイクロ波に比べれば、遠赤外放射は、殆ど表面加熱と言えるレベルの透過距離である。

④赤外透過材

遠赤外線の集光、透過窓、送風によるヒーター温度低下の抑制¹²⁾、包装体表面からの放射加熱¹³⁾等の目的で赤外透過材の利用が検討されている。赤外透過材としては、CaF₂、NaCl、KBr、CsBr、KRS-5、AgCl、As₂S₃、ZnSe、フッ化物ガラス、Ge、LiF、ポリイミドフィルム等がある。なお、高透過率のものを得るには、結晶粒などによる過剰散乱、不純物等の除去が必要である。

7.4.3 食品の乾燥方法と伝熱

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。したがって、単に蒸発に必要な熱量を加えたので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す。そこで、食品の乾燥は、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、水産物の生干では、たんぱく質変性、脂質酸化、微生物増殖等の抑制のため、40°C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°C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。また、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。

食品の乾燥方法のうち、自然乾燥には、日干しと陰干しがある。日干しは太陽の熱放射を、陰干しは自然風による対流を主として利用するものであり、食品と空気との水蒸気圧差（湿度差）による水の移動を促進して乾燥する。これらは、安価な方法としてまだ多く利用されているが、紫外線および可視光線は食品へ悪影響を及ぼすことが多く、また天候不順、不衛生等の問題点を抱える。一方、人工乾燥は、食品中の水の除去に必要な熱量を人工的に与え、かつ水の除去を効率的に行う条件を設定し、計画生産、高品質化に向けて各種の乾燥方法がある。大別して、常圧乾燥、加圧乾燥、真空乾燥がある。効率よく乾燥するためには、常圧下では必ず送風が必要である。

以下に、食品の乾燥方式について、伝熱の様態を中心に記述する。

(1) 熱風乾燥 (hot air drying, forced convection)

熱風 (30~300°C) を食品に吹き付けて乾燥する強制対流方式である。熱風乾燥方式には、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、熱交換によって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 (回転式) 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、放射も関与し、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°Cで 8~10h で終了する¹⁴⁾。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。廃熱を少なくするためには、常温通風と放射伝熱との組合せが有利であり、種々検討されている。

(4) 被膜乾燥

加熱回転ドラム (特殊な場合は金属ベルト) の表面に液状食品を薄く塗布し、蒸発表面積を拡大した状態でドラムと熱交換して乾燥すると共に、ドラムの回転に従って乾燥物を自動的に剥しとる。したがって、伝熱は接触伝導が主であり、放射が僅かに関与し得る。この方法は、噴霧乾燥に適用できない粘度の高いペースト状のもの、固形物の量が多くて液滴にし難いものを連続的に乾燥する場合に有効である。塗布する食品の厚さ、回転ドラムの温度および回転速度によって乾燥速度が決まる。対象食品には、オブラート、乾燥マッシュポテト等がある。なお、低温で乾燥を行う必要のある時は真空中で回転円筒を駆動させる。

(5) 赤外放射式通風乾燥

岩浅ら¹⁵⁾によると、茶葉の乾燥中における表面電気抵抗値の測定結果から、遠赤外乾燥は、表面が熱風乾燥の場合よりも湿った状態で乾燥し、上乾きが起こり難いことを示している。その上、遠赤外乾燥は水分蒸発が速いという多数のデータがある。さらに、遠赤外放射を利用する通風乾燥は、媒体空気を加熱することが少ないので熱効率がよい。問題点は、放射の影になる部分が多かったり、照度分布に差が大きいと効率が悪く、品質低下を招くことである。したがって、食品のできるだけ全面を均一に照射できるよう工夫する必要がある。

食品は、水をはじめ種々の吸収特性をもつ有機物の集合体で一定の厚さもあるので、塗料乾燥のごとく特定の波長の赤外線が透過・逸散してしまい加熱に利用できないという現象は生じない。したがって、食品に対しては殆ど表面近傍の吸収加熱とも言える放射の利用は、本来、海苔とかシート状食

品のごとく厚さの薄い食品に適している。エネルギー透過力の大きいマイクロ波加熱が部厚い食品にも適用できるごとく、赤外放射加熱の場合でも、厚みのある食品に対しては、透過性の波長を選択的に照射する方がよいといえる。

(6) マイクロ波

電磁波は被加熱部の表面から入って、吸光係数(光)または誘電損失係数(マイクロ波)に応じて吸収されながら内部に入る。したがって、これらの係数が大きい物質ほど電磁波の透過距離は小さくなり、内部の加熱がし難くなる。この電磁波の浸透性を表すのに電力半減深度Dを用いる。2,450MHzでは、水のD値は10mmであり、非常によく内部へ透過する。したがって、厚さのある食品に対しても迅速加熱が可能で、マイクロ波乾燥装置として、単式加熱、通風式、真空式等が実用されている。

(7) 過熱蒸気

蒸気を加熱して低湿度の高温空気をつくり、熱風乾燥と同様に用いられるので、もっぱら対流伝熱となる。ボイラーからの高温蒸気と超音波ノズルで微細化した水とを混合することにより、温度と湿度調整の可能な低温蒸気(20~100°C)を発生させることもできる¹⁶⁾。

(8) 加圧乾燥

大正末期頃から生産の「ぼくだんあられ」で知られるとおり、水分15~40%の食品を耐圧密封容器に入れ、外部から加熱しながら回転させるか、または、乾燥容器に直接加熱空気を圧入し、8~15 kg/cm²、120~150°Cに達した時点で、乾燥容器の蓋を全開し、常圧中に食品を噴出させ瞬間的に乾燥する方法である。加熱して組織が柔軟となり、水分の瞬間蒸発によって組織が膨化し、多孔質構造となる。外部加熱する方法の伝熱は、伝導と放射が主であるが、対流も関与する。加熱空気を圧入する方法では、対流が主である。

(9) 真空乾燥・凍結乾燥

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、水は真空度 4.6mm Hg (Torrとほぼ同じ)以下の真空中で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、①食品を凍結しないで乾燥機に投入し、食品が氷結しない温度と真空度で水を蒸発させる方式(狭義の真空乾燥 vacuum dehydration)、②食品をまず凍結させて乾燥機に投入し、凍結状態を保つ真空度で食品中の氷を昇華させる方式(凍結乾燥 freeze drying)とがある。

真空下で食品へ伝熱する方法として、加熱板へ静置接触、上下加熱板で圧着、有鋳アルミ加熱板ではさむ、赤外灯・棒状ヒーター、放射加熱板、マイクロ波誘電加熱等がある。

熱源から加熱板への伝熱は、熱媒体(蒸気、油、水)循環法、抵抗式電熱線組込み法等があり、その加熱板(10~70°C)と接触伝熱する場合は伝導が主であるが、放射も関与する。食品と離れた位置の赤外灯(~300°C)および放射加熱板(80~150°C)の場合は、放射伝熱が主となる。

なお、放射加熱の場合、ロス熱量によるコンデンサーの昇温を防ぐ設計上および操作上の配慮が必要である。

① 真空乾燥

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いが少ない。通常、真空度は5~100mmHg、品温は水分残存段階で0~

50°Cである。真空乾燥装置には、棚式、噴霧式、バンド式、被膜式等がある。真空乾燥は低温蒸発であるので優れた品質の乾燥製品が得られるが、蒸発に伴い芳香成分の逸散、形状変化、多少の熱変性等が起り得る。これを避けたい場合は、次の凍結乾燥方式を適用する。

②凍結乾燥

食品を-20~-40°Cで凍結させ、真空度 1~0.01mmHgとして、氷の昇華によって乾燥を進める。乾燥速度は、真空度、供給熱量および食品の厚さによって決まる。食品中の氷 1 gが昇華するには約 670 kcalの熱量を要する。凍結乾燥の真空装置は、ポンピングシステムまたはエゼクターシステムが用いられている。前者は、1kgの水蒸気の除去に要する電力は約0.7~1.1KWHで、比較的安価であるが、脱水装置（コンデンサー表面は-30~-60°C）および真空ポンプ油の更新が必要である。後者は、0.1mmHgの真空度を得るためには、4~5 段のスチームエゼクターが必要で装置が大型となり、水蒸気 1 kgの除去に約8~9kgの蒸気と大量の冷却水（18°C以下）が必要である。

処理量が20 t以上（1日）の場合には連続乾燥装置が有利である。個体食品では、乾燥棚そのものがモノレールに懸吊された真空室（トンネル型）を移動、回転円筒内を食品が移動、ベルトコンベア上の食品が加熱部分に接しながら移動等の型がある。一方、液体食品では、真空室内に噴霧され加熱壁で乾燥されたものを掻き落とす、ベルト上に塗布する発泡乾燥、噴霧と同時に氷結しこれを加熱ターテーブルまたは振動棚上で乾燥、噴霧と同時に氷結した微粒子を移動ベルトに受け連続的に乾燥等の型がある。

(10)冷風乾燥

ヒートポンプ方式、冷凍機方式等による凝縮管で除湿した空気（15~40°C）を強制循環対流し、多くは一晩かけて半乾燥する。この方式は常圧にて食品を低温に保って乾燥することが前提なので、放射加熱を利用することは難しい。なお、凝縮管表面ではもっぱら対流・凝縮によって熱交換されているが、凝縮管表面の放射率が高いと凝縮効果の向上につながる可能性はある。

7.4.4 食品への遠赤外放射の応用

多数の文献、資料等のうちの極く一部を整理した。

(1)空中加熱（焙焼、直接加熱）

①焼きのり toasted

海苔の焙焼工程では、従来、一般に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。三井ら¹⁷⁾は、遠赤外棒状ヒーターを熱源とする連続焙焼装置、焼き色測定装置、焼き色センサによるヒーター温度・コンベア速度調節装置からなる自動制御のり焙焼機を開発した。前田¹⁸⁾は、遠赤外ヒーター（14KW）を用い、雰囲気温度160~200°Cで海苔を 6~12秒間焼くことにより、焙焼時間、使用エネルギー量共に3/4に減じ、炉内温度が50~100°C低くてすみ、色沢、香味、食感の向上を認めている。

②ちくわ broiled

現在、ちくわ焼きは一般的にシュバンクバーナーによる対流・放射加熱が主体である。大本¹⁹⁾らは、ちくわ製造へ遠赤外焙焼技術を応用するため、すり身の赤外透過特性、放射体の種類及び温度適性を検討している。それによると、まず、CaF₂セル板とスペーサーで所定の厚さにしたすり身の赤外透過スペクトルを、FT-IRで測定し、それを基に、すり身内部への赤外透過距離（D_λ）を算出した結果、透過主波長の3.8μmでは 0.1mmであり、吸収主波長の6.0μmでは 0.003mmであることを示した。そして、波長の影響を調べるためのモデル加熱試験では、すり身を直径52mm、厚さ30mmに成形

(ポリカーボネート製パイプ)に保持)して熱電対(T, $\phi 0.1\text{mm}$)を表面から0, 5, 10, 15, 20mmの位置に設定し、放射体($\phi 49\text{mm}$)と60mmの距離に置いて加熱した。放射体は、高効率赤外放射体(A)および遠赤外放射体(B)を用い、その表面温度はすり身の吸収波長及び透過波長にそれぞれ対応する温度、すなわち、 204°C (放射主波長 $6.0\mu\text{m}$)、 307°C ($5.0\mu\text{m}$)、 486°C ($3.8\mu\text{m}$)および 683°C ($3.0\mu\text{m}$)としてすり身を加熱した結果、放射体の温度が高いほどすり身の温度上昇が速く、一定の温度に達する消費エネルギーも小さいことを認めた。また、試料表面と内部の温度差は放射体の温度が高いほど大きく、ちくわの表面に適度な焼色がつくまでに中心を 75°C 以上(製造基準)とするには、例えば $\phi 30\text{mm}$ のにぎりちくわでは、放射体温度を 486°C 以下にしなければならないという。次いで、 307°C に設定したA放射体と同レベルの放射エネルギーとなるよう、低効率放射体(S)の温度を 372°C にして、両者の比較を行った結果では、A放射体(放射主波長 $5.0\mu\text{m}$)の方がS放射体(同 $4.5\mu\text{m}$)よりも昇温が速かったという。

③水産物・焼鳥類 roasted

カキ、鶏肉をはじめ高水分食品の焙焼は、従来ガス式のオープ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、灯油式等の遠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^{20)~25)}

④米 菓 baked

山岡ら²⁹⁾は、遠赤外放射材料を溶射したプレート($430\times 260\text{mm}$ 14枚、 $430\times 100\text{mm}$ 10枚)等の脱着が可能なガス燃焼式の試験用焙焼機を製作し、遠赤外線による米菓の焙焼効果を検討している。すなわち、試験区は、アルミナ-チタニア系およびジルコニア-ムライト系をプラズマ溶射した2種類の遠赤板、および対照区として、鉄板、ステンレス板、シュバンク単独である。これらの各試験区によって、あられ製造の常法により調製した米菓生地(水分 18.5%)を焙焼し、予熱、浮かし、色付けの各段階における表面温度、水分蒸発量、膨化度等を測定した。焼成品については膨化率、硬さ、表面色等の物性測定のほか、官能検査により品質を評価し、焙焼効果の指標とした。その結果、ステンレス板では米菓焙焼に必要な 250°C の雰囲気温度に達せず不適であった。遠赤板では、対照の鉄板に比べ、焙焼工程における米菓の表面温度の上昇速度、水分蒸発速度および膨化開始時間がいずれもはやく、焼色も濃く、香味も優れていた。2種類の遠赤板における差異は明白ではなかった。焼成品の焼色においてはシュバンクが遠赤板よりも良好で、香味も優れていた。この実験では、製造時間の短縮及び省エネルギーについては当初期待していたほどの著しい効果は得られなかったが、米菓焙焼の予熱および浮かし段階においては遠赤板の使用が有効であり、色付け段階においてはシュバンク単独が有効であったとしている。

(2)乾式接触加熱(間接焼き、焙煎、焙炒)

①焼芋類 roasted

焼芋への伝熱は、対流、放射、伝導の三者が関与するが、諸パンフレットによる「遠赤外線が芋に深く浸み込む」という表現は適当ではない。また、焼芋に関して、「ふつうの熱の伝導と変わらない。水分の多い食品は表面からせいぜい2mmぐらしか浸透しない²⁶⁾」とあるが、2mm近くも浸透すれば放射効果はありそうである。ただし、2mm近く浸透するかどうかは課題である。

渡辺ら⁹⁾は、石焼芋屋(薪等燃焼式)の石の温度は $250\sim 400^{\circ}\text{C}$ 位でかなり変動が大きいことを確認した後、石の温度を平均的な高温 350°C に設定し、熱電対を表面から1cmと2cmに固定した丸のままの

芋とアルミ箔で包んだ芋の加熱試験を行っている。そして、25分間にわたる加熱の結果、水分蒸発のために、前者（初期重量195.5g）は18.7%の重量減、後者（192.7g）は9.8%減となったが、両者の温度上昇速度が全体的に殆ど同じであったところから、石焼芋は伝導伝熱が主体であり、放射は10%の水分を蒸発させる熱量に過ぎないとしている。確かに、アルミ箔の場合の伝熱が予想以上に抑制されない事実が判明した。石から芋への伝熱は、丸のままでは、伝導、放射、対流の三様態が関与し、アルミ箔では、伝導と対流が主であるので、このデータに基づき、放射の影響がどの程度かを推測してみた。今仮に、芋の初期温度を20°C、終期温度を100°Cとして、蒸発潜熱を含む全供給熱量を計算すると、前者は35.4kcal、後者は25.6kcal（72%）となるので、アルミ箔による伝熱阻止の割合は28%である。この値が放射伝熱の割合と考えるのはやや早計であるが、一つの目安となる。さらに、石の制御温度、芋の表面温度の経時変化が付記されていないので断定はできないが、通常、丸の芋と接触している石の表面温度は、アルミ箔の場合に比べてかなり低くなる可能性が大きいので、この点の解明が望まれる。

高橋ら²⁷⁾は、さつまいも（ $\phi 5 \times 20$ cm）を棒状セラミックヒーター（上下とも400°C）により、照射距離各10cmに密閉系で加熱し、T熱電対（0.2mm）等により試料表面と中心部の初期の温度分布を測定し、伝導加熱式数値計算法による値と比較して、試料内部の熱移動は伝導伝熱が支配的であることを確認している。

太田ら²⁸⁾は、放射率の異なる容器中でサツマイモの加熱実験を行い、遠赤外試験区の還元糖生成量が速いことを示している。

市川⁸⁾は、石焼き栗について、石の温度を200°Cとした時の計算であるが、1.5W程度の放射エネルギーでは、實際上伝導伝熱が主であり、放射効果は無縁だろうと表現している。また、鉄板焼きピフテキも同様としている。

②豆類 roasted

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。

③焼肉 steak

高嶋³⁰⁾は、遠赤外放射効率が特に良い土鍋と金属鍋を比較する考え方の一つとして、肉片を置いて加熱する場合、伝導伝熱が主体だが、両鍋の温度差、熱容量差に加えて、放射伝熱の振動数が異なる筈であり、それが肉片の振動数と適合すれば効率よく焼き上がることになるかと表現している。

(3)油中加熱 fried

食品フライへの遠赤外放射の適用研究については、当初、鍋の底に板状の遠赤外放射体を沈めてフライ効果が検討されている^{31)~34)}。しかし、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³⁵⁾、まして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。そのため、遠赤外放射材料をフライ鍋内面に塗装または溶射する方法で検討されている⁶⁾³⁶⁾。それによると、遠赤外鍋およびステンレス鍋（対照）を用いたフライ試験の結果、①遠赤外鍋は鍋底の温度が10~20°C低くてすむため油の劣化（粘度上昇）が抑制され、また油温の変動が小さくなった。②遠赤外鍋ではフライ油の着色、トコフェロールの減少が観察された。③コンベア式の連続フライヤによる揚げかまぼこの製造においては、揚げの昇温速度、揚げ色、歩留り、保存性、品質等への遠赤外放射効果は

認められなかったとしている。さらに、守本ら^{37) 38)}は、フライ油の劣化防止効果を明確にするために、放射特性既知でタイプの異なる溶射材料をステンレス鍋（対照）にプラズマ溶射して4種類の遠赤外鍋を製作し、水噴霧加熱法³⁹⁾に準じたモデル試験によってフライ効果を詳細に検討している。その方法は、フライ鍋（内径10cm、深さ15cm）および電気ヒーター（300 W）を組み込んだマントルヒーター様の加熱装置（PID制御）から成る、いわゆる直火式フライ装置を用い、フライ油（450g）の中心部（底面から40mm上方）の油温を $180 \pm 1^\circ\text{C}$ に保持し、鍋底付近（底から10mm）へガラス毛细管（内径 0.6mm）を設置して、60ml/hrの蒸留水を連続して8時間注入する。その結果、フライ槽中心部の温度変動中は、いずれの遠赤外鍋でもステンレス鍋の約 2/3に抑えられた。鍋底付近のフライ油温度の経時変化を見ると、ステンレス鍋では温度むらがあり、鍋底からの高温の油が頻繁に熱電対に接触していることが分かった。また、遠赤外鍋では鍋底付近と中心部の温度差が極めて少ないのに対して、ステンレス鍋では鍋底付近の温度が中心部より2~3°C高くなりがちであった。そして、遠赤外鍋では、フライ油の粘度上昇が25~40%も抑制された。この結果から、遠赤外鍋では鍋底の油が局部的に加熱されることなく、全体の油が比較的均一に加熱されていると考えられ、遠赤外放射効果の存在が推定される。しかし、この点については、表面積効果、沸石効果、熱伝導率等の影響を含めた説明が必要である。なお、酸化鉄系の材料は、フライ油の着色、熱酸化等を促進するので、フライ鍋の溶射材料としては適さない。

(4) 乾燥 dried

①水産乾製品

東海水研⁴⁰⁾によると、煮干イワシの遠赤外乾燥（ 40°C 、風速 2.5m/s）は、温風乾燥や天日乾燥と比較して乾燥速度が速く（10時間で完了）、品質成分には差が認められなかった。焼干イワシにおいては、乾燥と焙焼が同時に進行し、 200°C 、風速 0.8m/s の条件下、20分で処理が完了できたという。また、アジ開き干しでは、遠赤外乾燥による製品の表面の艶、色調がやや優れると評価している。

静岡水試⁴¹⁾では、通風型遠赤外乾燥装置（1KW棒状ヒーター、20cm上面4本、15cm下面3本）を用い、7区分の電力量によるアジ開き干しの乾燥時間、歩留り、品温、風温、品質等の関係を検討している。そして、品温が 40°C 以上になると、たん白質が熱変性して白色化し、商品価値が失われること、下面ヒーターが塩汁に汚染されること、歩留りが89%程度のソフト乾燥であること等により、上面加熱型の送風・コンベア式アジ塩干し品用遠赤外乾燥装置（棒状1KW×63本、25分間乾燥）を開発した。

削り節は、一般に品温 $45 \sim 55^\circ\text{C}$ で5~7分間熱風乾燥されている。松本ら⁴²⁾は、送風管、振動板、分散板等を装着した遠赤外加熱式の削り節乾燥機を用い、ヒーター表面 150°C 、振動数45ヘルツで削り節（水分20%）を乾燥した場合、品温が 50°C となり、乾燥時間5分以内で水分14~15%のものを得ている。

小畑ら¹²⁾は、超音波灯油燃焼式の通風型自動赤外乾燥機（70,000kcal/h、熱板表面温度 $150 \sim 500^\circ\text{C}$ ）を開発し、みりん干を対象として熱板の種類による差、赤外透過膜の効果等を認めている。

②茶

茶の加熱工程は、生葉の萎凋、蒸し熱・いり葉（急速に 100°C ）、揉捻（揉みながら乾燥、 $35 \sim 40^\circ\text{C}$ ）、乾燥（ 70°C ）、火入れ等がある。水分（乾量基準）は、生葉35%、揉捻工程の粗揉後10%・中揉後35%・精揉後13%、乾燥後5%程度である。

野菜・茶業試験場等^{15) 40)}では、遠赤外萎凋と蒸熱操作とを組み込んだ自動萎凋装置を開発し、品質のバラツキが少なく、香気、味とも優れた製品を得た。また、荒茶の乾燥工程において、熱風乾燥

後に遠赤外乾燥する装置を開発し、乾燥時間10分、熱効率20%前後（最大21.6%）の結果を得た。これは、従来の熱風通気式乾燥機の乾燥時間が20数分、熱効率が17%前後であることから、乾燥時間が半分に短縮され、熱効率も最大25%向上するといえる。なお、茶の品質については、熱風乾燥との差は認められていない。

製茶仕上げの火入れ工程は、荒茶（含水率5%）を再乾燥して貯蔵性を高めることと、荒茶の貯蔵中に生成した青臭い匂いを加熱によって消滅させ、そして、火入れ茶特有の芳香を形成させる製茶仕上げの一工程である。この工程に遠赤外放射を導入した火入れ機の開発装置例¹⁵⁾によると、振動トラフコンベアを用い、その上部には遠赤外ヒーター、下部からは熱風を送って補助加熱する。そして、トラフの間欠的な振動によって茶を反転・移動させ、均一な火入れを可能としている。この実用機の1種（トラフコンベア2段、熱風80°C、機内上段温度110°C、下段120°C）と従来機（回転ドラムによる直接加熱・熱風併用型）との比較では、水分約2%にする火入れの所要時間は、前者が7分程度、後者が25~35分であり、大幅な時間短縮となった。なお、品質面では、色、香味、フェオフィチン（クロフィル退色の指標）、ピラジン・ピロール（加熱香気の重要な指標）等の検査の結果、両者の差は殆ど無かったと言う。

③野菜類

石谷ら⁴³⁾は、試作した通風式の遠赤外乾燥装置を用い、ヒーター温度100~300°C、入風30°C・30±10%RH、20°C・50%RH、風速2~4m/秒、照射距離13cmの各条件で、2mmおよび4mmにスライスした馬鈴薯を乾燥し、基礎的諸元について検討している。それによると、遠赤外照射は、恒率乾燥期の速度がかなり速くなり、特に試料の厚さが薄い程効果が大きいこと、またヒーター温度が上昇するにつれ恒率乾燥期の乾燥速度がほぼ直線的に上昇し、しかも低水分域に恒率乾燥期がずれ込む傾向を認めた。さらに、乾燥開始後の試料表面温度は蒸発潜熱によって低下するが、遠赤外照射では、乾燥が進むにつれ品温が上昇して入風より高くなり、風速2mで40°C、4mで36°Cとなったことから、品温の上昇防止と乾燥効率を高める意味で風速を高めることが有効としている。

正村ら⁴⁴⁾は、4種類の遠赤外ヒーターを用い、供給電力密度を一定（200W/1.5π×30cm²）として、馬鈴薯（水分75~80%、φ50~60mm×5mm）の乾燥試験を行っている。この場合の各ヒーターの表面温度は310~340°Cとなり、放射主波長5μm付近における放射率の高いヒーターほど、乾燥速度が大きく、最大値で0.055~0.085dry%/hの開きを認めた。放射率が低いと表面温度が上昇するので、放射エネルギー量としてはほぼ同等になる筈であるが、高温ほど対流損失が大きいため、結果的にはそのぶん減少する。ただ、ヒーター温度が310~340°Cの範囲にしては対流損失の差が大きく現れているので、他の要因、すなわち温度の違いで放射主波長が4.97~4.73μmの範囲となるが、この波長付近で馬鈴薯に対する透過特性の違いが影響する可能性もある。各ヒーターの表面温度における分光放射輝度および馬鈴薯自体の赤外透過スペクトルの検討が望まれる。なお、表面温度530°C以上（距離220mm）で、恒率乾燥期間が殆ど見られなくなったという。

伊藤⁴⁵⁾は、市販遠赤外ヒーターを上部に設置した送風機付、試料台往復型風洞（7.5×0.6×0.6m）を用い、キャベツ、カボチャ、ナガネギ、ニンジン、ワサビに対して、遠赤外乾燥（通風温度35~70°C）と熱風乾燥（前者と同温度）との比較を行い、乾燥速度の大幅向上を認めている。品質保持上、遠赤外放射の間欠乾燥法が適しており、また初期には電圧を高くし、乾燥の進行につれ電圧を低くするとよい。

鍋谷ら⁴⁶⁾は、セラミック製遠赤外ヒーターと石英管型近赤外ヒーターの比較を行い、供給電力が

大きい場合は後者による乾燥が速く、供給電力が小さい場合は前者が速いことを認めた。これは、ヒーターの表面温度が低くなると、放射エネルギーのピークが長波長側に移行し、その波長帯における放射率が前者において極めて高いので、両者の放射エネルギーが逆転すると見られる。

⑤真空乾燥・凍結乾燥

木村⁴⁷⁾は、希薄溶液の連続濃縮・凍結乾燥式の遠赤外加熱装置を紹介している。それによると、数%程度の希薄水溶液を50~100mmHgの減圧下で多数のトレー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°C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水にされた後、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。ここでは、各ステップの氷を昇華させるに最適な放射エネルギーを伝達するよう設計されている。

米田ら³⁸⁾は、プレート互換式ヒーターを装着した真空装着により、真空度10mmHgにおいて5種類のプレート(表面温度100°Cまたは200°C)による含水スポンジ(10×14×5cm, 水分86%)の乾燥試験を行い、各プレートの放射エネルギー密度と乾燥速度の相関を認めている。また、熱板上でトレイに入れた試料を凍結乾燥する場合、ステンレス製トレイの内側に溶射または表面処理すると乾燥速度が1.3~1.6倍に上昇することを認めた。なお、溶射等によるトレイ底面の変形がなければ、もっと好成绩になるとしている。

(5)加熱・保温

果樹試験場等³¹⁾では、ウンシュウミカンの高温予措への利用(赤外ヒーター30×40cm, 100W, 表面温度85~90°C)を試み、通常の20°Cにおける予措と同様に果実の赤味を増すことができ、品質低下も認められなかったが、コスト、装置の構造、材質面の課題があるという。

山本⁴⁸⁾は、棒状ヒーター上下各9本による冷凍すり身(300×350×70mm, 初発-17°C)の解凍を行い、温水解凍法(40°C)に近い状況をみている。冷凍すり身は、作業性、品質保持上、裸のまま解凍するのは不利であり、ポリエチレン袋等で包装したまま解凍するので、この条件においては放射伝熱がすり身の表面にまで及ばないので不向きである。ただし、他の接触解凍時の加熱板表面の放射率およびすり身との接触率を高くすることにより、伝熱速度が高まると考えられる。

橋本ら⁴⁹⁾は、棒状遠赤外ヒーターにより、上部照射距離15cmとして、培地上に塗沫した細菌を加熱し死滅効果を検討している。それによると、大腸菌には、ヒーター温度500°C・6分(培地表面63°Cに昇温)で死滅、4分で菌数が約1/10、2分では無効であり、黄色ブドウ球菌には、500°C・4分で死滅、2分は無効、培地5mm重層で死滅しなかったという。

山本⁴⁸⁾は、塩すり身、ケーシング詰かまぼこの坐り工程へ利用しているが、実用効果が得られていない。揚げかまぼこ用成形すり身(70×120×11mm)の坐りでは、適切な条件で良好なちりめんじわと揚げ色が得られ、揚げ加熱時の膨張・収縮が小さいため外形が大きく見えるという。焼きちくわの坐りへの検討では、ヒーター温度(面状)300°C、距離は5cm前後、3分間の照射が必要としている。

石川ら³¹⁾⁵⁰⁾は、厚みのある板付かまぼこへの利用については蒸気の方が加熱速度が速いので適用できないが、薄いカニ風味かまぼこ用すり身シート(2×130×200mm)の処理には適していることを示した。それによると、トンネル状遠赤外加熱装置(放射体400×300mm, 照射距離250mm)を用い、雰囲気温度300°C、65秒が最適で、常法と同様の品質のものが短時間で得られ、装置の小型化が可能としている。なお、この実験では、乾燥防止のために放射体直下50mmにガラス板を介して照射しているので、近赤外放射型の加熱と思われる。

天海⁵¹⁾ は、棒状遠赤外ヒーター加熱式の半生麺製造装置を紹介している。これは、切り出した麺線を掛棒にかけて（島田掛け）立体的に移動させ、麺線全体を左右から均一照射後、調理工程を経て包装する自動システムである。

7.4.5 遠赤外放射式加熱装置・調理機器

遠赤外放射式の各種加熱装置が市販されており、加熱効率、自動化、作業性、安全性等に種々の工夫がなされている。一方、遠赤外放射の有効性からみると、非常によく工夫されたものから、検討の余地の多いものまでである。この項については未整理であるので割愛する。

7.4.6 食品加工への遠赤外放射利用のまとめ

(1) 利用効果

- ①加熱の効率化：時間短縮，熱効率向上，熱ロス減少，均一加熱，温度制御
- 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（時間短縮，均一加熱，温度制御等による効果を含む）
- ④作業環境：高温抑制，空気環境の改善，クリーン感覚，安全性

(2) 留意点

①直進・反射特性

遠赤外線は、紫外線・可視光線と同類の光なので直進，反射の性質がある。したがって，加熱の効率化，均一加熱のためには，放射の陰の部分が少なくなるよう，放射の方向と強度に留意し，また磨きステンレス，アルミ箔等の反射板を有効利用し，あるいは食品を薄く拡げたり，回転，振動，反転により攪拌する等の工夫も必要である。

②透過特性

遠赤外放射加熱は，食品への透過特性からみて，基本的には低水分食品への適用が有利である。

③温度調節

温度の測定と制御の対象には，ヒーター内部発熱体，熱媒体（液・気体），ヒーター表面，雰囲気，食品表面，食品中心等がある。温度制御を迅速に行うには，発熱体またはそれにできるだけ近い部分を対象とするのが有利であり，加えて加熱効率と品質保持の意味から規定される温度，例えばヒーター表面温度または食品温度等を制御する二段階法が正確性，迅速性，効率化，品質面等において優れている。

④均一加熱

均一加熱を図るには，①の外，ヒーターの温度分布，制御，配列の適切化，炉内温度分布，風速分布，反射板の活用，放射方向，反射材利用による方向転換，集中化，照射距離等の検討が必要である。また，放射照度の低い場所に小型のものを置くことも行われている。

⑤ヒーター表面への送風抑制

送風によるヒーター温度の低下を避けるため，放射体にできるだけ風が当たらないよう，風向制御，防風板，赤外透過材によるカバー等の工夫が必要である。

⑥適用性・条件把握実験

放射体の分光放射率・表面温度によって波長・放射量が変わり，また照射距離，照射温度分布，食品の種類等によって遠赤外放射の効果が異なって現われるので，適切な条件把握の実験が不可欠である。

⑦遠赤放射効果を明らかにする際、誤差要因として、放射体・伝熱中間体・熱媒体の形状、熱容量（温度回復力）、表面温度、雰囲気温度、熱伝導率、表面積、沸石効果、熱損失、室温、そして、加熱対象の処理重量・容量、初温、表面温度、照射距離、品質評価等がある。比較実験では、これらの入念なチェックが必要であり、また測定方法の検討が課題である。

⑧赤放射の積極的な利用に加え、工程中の放射損失を減少させる省エネルギー化も必要である。

(3) 課題

①対象食品の照射面積の拡大化，放射照度分布の均一化

②放射体の耐久性向上：加熱時に塩分を含む液汁がヒーター上に滴下し、剥離，腐食等が生じて機能低下，漏電，取替コスト高等の事例がある。

③面状放射体の薄型化，放射体直接通電法

④放射体及び反射体の有効配置，補助放射体の設置

⑤上向き放射体は，食品カスの除去が容易な単純構造とする。

⑥光の性質である伝播速度，直進，反射，吸収，透過，屈折，回折，干渉の有効利用

⑦食品中への赤外透過距離の測定および波長効果の検討

⑧放射・対流・伝導に係わる熱伝達式の確立

⑨装置トータルとしての熱効率の一層の向上，連続化，低コスト化，

(米田)

参 考 文 献

- (1) 谷川英一：水産食品製造加工，丸善出版(1951)
- (2) 住江金之：総合飲食製造法，富山房(1950)
- (3) 立山安雄：赤外線技術，加熱とその応用（赤外線技術連合会施設調査委員会編），電気書院(1956)
- (4) 西岡敬二：電気評論，39(6,7)，(1951)156
- (5) 化学工学協会：化学工学便覧，丸善(1975)276
- (6) 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
- (7) ミノルタカメラ資料：温度の不思議(1987)12
- (8) 市川真人：赤外加熱の話，鮫光，379号(1988)
- (9) 渡辺敦夫：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，産業研究所(1989)53-60
- (10) 佐渡，本多，鍋谷，中嶋，渡辺，清水：遠赤外線照射による食品内部への放射熱浸透距離の測定，日食工学会第34回大会(1987)232
- (11) 笹森宣文：遠赤外線の実際と応用，工業技術会(1989)129
- (12) 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，広島県産業技術振興機構(1989)27-30
- (13) 橋口貞典：遠赤外線殺菌用包材，包装技術23(4)，(1985)314-320
- (14) 寺本四郎：食料工学ハンドブック，朝倉書店(1966)370-390
- (15) 岩浅 潔：遠赤外線の実際と応用，工業技術会(1989)139-152
- (16) 中西文昭：広島県技術情報No.48(1989)6；中国メンテナンスカタログ

- (17) 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
- (18) 前田喜朗：月刊フードケミカル, 5(9), (1989)69-71
- (19) 大本, 米田, 山岡, 守本, 前重：ちくわ製造への遠赤外線の利用, 日食工学会第36回大会(1989)No.2111
- (20) 前田喜朗：遠赤外線利用の実際, 日食工学会第36回大会(1989)15-17
- (21) 佐々木完：遠赤外線装置の食品への利用, New Food Ind, 29(4), (1987)19-24
- (22) 近藤嘉秀：遠赤外線加熱装置選定の要点, 省エネルギー, 37(1), (1985)51
- (23) 宮崎莊平：ガス遠赤外線ヒーターの開発と利用, 省エネルギー, 38(9), (1986)35-39
- (24) 杉本圭一郎：理想的遠赤外線活用とスナック菓子の相性, ジャパンフードサイエンス, 29(3), (1990)56
- (25) 杉山 昌：遠赤外線加熱の食品加工への応用, 食品加工技術, 5(4), (1985)213-220
- (26) 清水賢：朝日新聞夕刊(1988.1.26)5
- (27) 高橋, 本多, 渡辺, 清水研究遠赤外線加熱によるサツマイモの熱処理, 日食工学会第35回大会(1988)No.129
- (28) 太田, 中塚, 田中：遠赤外線加熱による酵素活性への影響, 日食工学会35回大会(1988)No.128
- (29) 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
- (30) 高鳴廣夫：TRIGGER88-6(1988)22-23
- (31) 北陸電技術資料：遠赤外線加熱応用技術(1980)845
- (32) 足立鉄男：九電総研報告書(1982)17
- (33) 石川 正：特許公報(1968)昭50-2421
- (34) 上田 理：遠赤外線の食品への利用, 工業技術会(1988)3-1-30
- (35) 太田静行, 湯木悦二：フライ食品の理論と実際, 幸書房(1976)37-41
- (36) 藤堂, 佐々木, 守本, 米田, 前重：食品産業センター技研報, 10(1987)59-72
- (37) 守本, 米田, 山岡, 前重：遠赤外線鍋におけるフライ効果, 日食工学会36回大会(1989)No.2110
- (38) 米田, 山岡, 守本, 前重：昭和62年度加速事業成果普及講習会資料, 広島県産業技術振興機構(1988)25-28
- (39) 湯木悦二：油化学, 16(1967)351-354
- (40) 農林水産技術会議事務局：昭和59年度特別研究・別枠研究成果の概要(1985)233；昭和61年度特別研究・別枠研究成果の概要(1987)317~322
- (41) 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」報告書(1985)
- (42) 松本 均ら：農林規格検査所調査研究報告, 10(1986)100-104
- (43) 石谷, ミゲール, 平田：遠赤外線による乾燥の効率化について, 日食工学会第34回大会(1987)No.231
- (44) 正村, 佐渡, 本多, 清水, 鍋谷, 中島, 渡辺：日食工誌, 35(5), (1988)309-314
- (45) 伊藤和彦：遠赤外線の食品加工への利用に関する研究(1)野菜乾燥の基礎実験, 日食工学会第34回大会(1987)No.229
- (46) 鍋谷, 中嶋, 渡辺, 正村, 本多, 清水：各種赤外線放射体を用いた野菜類の乾燥, 日食工学会第34回大会(1987)No.230
- (47) 木村嘉孝：遠赤外線利用の最新技術, 工業技術会(1987)49-77

- (48) 山本常治：水産ねり製品技術研究会誌，12(6)，(1986)241-254
- (49) 橋本，本多，五十嵐，清水：遠赤外線食品による殺菌効果に関する研究，日食工学会第34回大会(1987)No.233
- (50) 石川宣次：昭和61年度日本水産学会秋期大会講演要旨集(1986)181；遠赤外線の実際と応用，工業技術会(1989)131-138
- (51) 天海 弘：遠赤外線利用の最新技術，工業技術会(1987)101-113
- (52) 木村嘉孝：遠赤外線利用の最新技術，工業技術会(1987)101-113
- (53) 三谷，ミヅノ，平田：遠赤外線による乾燥の効率化について，日食工学会第34回大会(1987)No.231
- (54) 伊藤和彦：遠赤外線食品加工への利用に関する研究(I)野菜乾燥の基礎実験，日食工学会第34回大会(1987)No.232
- (55) 正村，佐藤，本多，清水，鍋谷，中嶋，坂野，日食工誌，35(2)，(1988)309-314
- (56) 藤本 均：農林規格検査所調査報告書，10(1988)100-104
- (57) 新岡水産試験場：昭和57～59年度指定産地調査報告書「利用加工研究」報告(1988)
- (58) 藤本 均：農林規格検査所調査報告書，10(1988)100-104
- (59) 藤本 均：農林規格検査所調査報告書，10(1988)100-104
- (60) 農林水産省農林規格検査所：昭和59年度指定産地調査報告書「利用加工研究」報告(1988)
- (61) 藤本 均：農林規格検査所調査報告書，10(1988)100-104
- (62) 藤本 均：農林規格検査所調査報告書，10(1988)100-104
- (63) 藤本 均：農林規格検査所調査報告書，10(1988)100-104
- (64) 藤本 均：農林規格検査所調査報告書，10(1988)100-104
- (65) 藤本 均：農林規格検査所調査報告書，10(1988)100-104
- (66) 藤本 均：農林規格検査所調査報告書，10(1988)100-104
- (67) 藤本 均：農林規格検査所調査報告書，10(1988)100-104
- (68) 藤本 均：農林規格検査所調査報告書，10(1988)100-104
- (69) 藤本 均：農林規格検査所調査報告書，10(1988)100-104
- (70) 藤本 均：農林規格検査所調査報告書，10(1988)100-104
- (71) 藤本 均：農林規格検査所調査報告書，10(1988)100-104
- (72) 藤本 均：農林規格検査所調査報告書，10(1988)100-104
- (73) 藤本 均：農林規格検査所調査報告書，10(1988)100-104
- (74) 藤本 均：農林規格検査所調査報告書，10(1988)100-104
- (75) 藤本 均：農林規格検査所調査報告書，10(1988)100-104
- (76) 藤本 均：農林規格検査所調査報告書，10(1988)100-104
- (77) 藤本 均：農林規格検査所調査報告書，10(1988)100-104
- (78) 藤本 均：農林規格検査所調査報告書，10(1988)100-104
- (79) 藤本 均：農林規格検査所調査報告書，10(1988)100-104
- (80) 藤本 均：農林規格検査所調査報告書，10(1988)100-104
- (81) 藤本 均：農林規格検査所調査報告書，10(1988)100-104
- (82) 藤本 均：農林規格検査所調査報告書，10(1988)100-104
- (83) 藤本 均：農林規格検査所調査報告書，10(1988)100-104
- (84) 藤本 均：農林規格検査所調査報告書，10(1988)100-104
- (85) 藤本 均：農林規格検査所調査報告書，10(1988)100-104
- (86) 藤本 均：農林規格検査所調査報告書，10(1988)100-104
- (87) 藤本 均：農林規格検査所調査報告書，10(1988)100-104
- (88) 藤本 均：農林規格検査所調査報告書，10(1988)100-104
- (89) 藤本 均：農林規格検査所調査報告書，10(1988)100-104
- (90) 藤本 均：農林規格検査所調査報告書，10(1988)100-104
- (91) 藤本 均：農林規格検査所調査報告書，10(1988)100-104
- (92) 藤本 均：農林規格検査所調査報告書，10(1988)100-104
- (93) 藤本 均：農林規格検査所調査報告書，10(1988)100-104
- (94) 藤本 均：農林規格検査所調査報告書，10(1988)100-104
- (95) 藤本 均：農林規格検査所調査報告書，10(1988)100-104
- (96) 藤本 均：農林規格検査所調査報告書，10(1988)100-104
- (97) 藤本 均：農林規格検査所調査報告書，10(1988)100-104
- (98) 藤本 均：農林規格検査所調査報告書，10(1988)100-104
- (99) 藤本 均：農林規格検査所調査報告書，10(1988)100-104
- (100) 藤本 均：農林規格検査所調査報告書，10(1988)100-104

第8章 今後の課題と展望

遠赤外放射の利用が見直される一つの契機になったのはオイル・ショック後の省エネルギー対策であると言われている。その一環として高放射率、高安定度の高温放射体材料の開発がとりあげられた。その後、動作温度が下がったにもかかわらず、背景（環境）放射や放射熱伝達理論を無視した結果として、一部で常温放射体有用論という誤った考え方が流布することになった。今後このようなことのないように視野を拡げて他領域の知識・技術を活用したいものである。おわりに、当面早期実現が望まれるもの、あるいは見込まれる事項をあげて今後の展望としたい。

- (1) 簡便な測定器の開発：使用法の簡便な遠赤外用放射照度計、放射輝度計は遠赤外利用技術の開発に不可欠
- (2) 放射冷暖房技術の確立：現在一部で試行されているが、一般化に向けて結露対策、施工方法等まで技術改善が必要である。
- (3) 高性能新素材の開発：分光放射率、分光吸収率が可視・近赤外域で高く、遠赤外域で低い特性（または逆特性）のフィルム状、板状、および塗料の新素材の開発。
- (4) 生物に対する微弱遠赤外放射の効果の確認：生体、微生物などに対する遠赤外放射の作用・効果の調査研究。
- (5) 多重反射を利用した高効率の赤外加熱：現在の吸収波長帯を利用した加熱のみでなく、多重反射を利用した中・高透過率試料の加熱。可視・近赤外域とミリ波・サブミリ波帯の間に位置する遠赤外域であるが、環境放射や生体などに見られるようにその特性は他領域とは大きな相違がある。

1970年頃までの赤外線技術は高温放射体に対するものであり、可視光線と同様の取り扱い方で十分であった。このことが多くの誤解を招く原因になったと思われる。最近、遠赤外放射の水に対する作用、食品のチルド効果などが話題になっているが、いずれも現時点では遠赤外放射によると断定できる科学的な根拠はなく、今後さらに各方面での綿密な調査と実験が必要である。

(松井)

第9章 あとがき

本報告書は、遠赤外放射源、放射測定および測定装置、放射の作用・効果、放射の応用など本委員会における、報告、検討結果を集約したものであって、言わば最近の遠赤外線技術の総集編である。しかし、各委員が多忙な本務の中でまとめたものであり、充分意を尽くしていない事項も多々あるかと思われる。これらについては、次期委員会で引き続き検討されることを期待したい。なお、この報告書が今後の遠赤外線技術の発展に多少なりとも寄与できれば、委員一同の望外の喜びである。

最後に、本委員会の活動に関連して、種々お世話になった関係各位に厚くお礼を申し上げる次第である。

(松井)

