

研 究 調 査 報 告 書

# 最 近 の 赤 外 放 射 計 測

平 成 13 年 3 月

社 団 法 人 照 明 学 会

赤 外 放 射 の 計 測 に 関 す る 研 究 調 査 委 員 会

赤外線計測に関する研究調査委員会研究調査報告書

「最近の赤外放射計測」  
目次

第1章	本委員会の構成と運営	
1.1	まえがき	1
1.2	委員会の構成	1
1.3	委員会の運営	1
第2章	基準赤外放射源	
2.1	赤外放射における標準	6
2.2	赤外放射標準	8
2.3	サーモグラフィと分光放射率測定による遠赤外ヒータの標準化	10
第3章	赤外放射の計測	
3.1	全放射	16
3.2	分光放射の計測	17
3.3	FT-IR分光光度計による赤外放射スペクトルの校正技術	21
第4章	赤外線応用計測(サーモグラフィ)装置の性能とその応用事例	
4.1	サーモグラフィ装置性能と種類	26
4.2	サーモグラフィ装置の課題と対策	28
4.3	サーモグラフィ装置の応用事例	32
第5章	赤外放射源の分類に関する考察ならびに赤外放射熱に関するシミュレーション解析	
5.1	赤外放射源の分類に関する考察	38
5.2	拡散面・鏡面とからなる三次元閉空間内の放射伝熱	42
5.3	赤外放射加熱される平板上含水物中の放射照度及び発熱パワーの分布特性	48
第6章	将来展望	
6.1	赤外放射と計測	53
6.2	関連する赤外放射の波長域と計測技術	53
6.3	遠式外放射(低フォトンエネルギーの赤外放射)の応用開発の進展	54



## 第1章 本委員会の構成と運営

### 1.1 まえがき

赤外線工学の発展は、赤外放射の計測技術の進歩に追うところが大きい。このことは他の分野においても同様である。本学会では昭和62年10月より平成2年4月まで、「遠赤外放射の測定と応用技術」の表題で調査報告書が出されている。それ以来、約10年が経過して、半導体、マイクロエレクトロニクス技術の進展で、新しい検出器、計測機器が開発され、赤外放射の計測および赤外線応用計測においても大きな発展が見られた。

本調査報告書は、平成10年6月から平成13年3月までの2年10カ月にわたる「赤外放射の計測に関する研究調査委員会」の活動の成果をとりまとめ、若干の補筆をしたもので、基準放射源、計測機器から赤外線応用計測及び若干の関連分野を含む全8章で構成されている。

### 1.2 委員会構成

委員会の構成は以下のように、委員長1、副委員長1、幹事2、委員8の計12名である。

- 委員長 松井 松長 (財団法人日本産業科学研究所)
- 副委員長 河本康太郎 (社団法人日本電球工業会)
- 幹事 笹森 宣文 (東京都立産業技術研究所計測応用技術グループ)
- 幹事 谷口 正成 (東北文化学園大学科学技術学部応用情報工学科)
- 委員 梶 英俊 (松下寿電子工業(株)坂出事業部技術部)
- 委員 木村 嘉孝 (TKエンジニアリング(株)技術部)
- 委員 鈴木 健一 (松下電子工業(株)電子総合研究所照明技術部)
- 委員 玉重 繁良 (広島職業能力開発促進センター電子系)
- 委員 中尾 久徳 (名城大学理工学部電気電子工学科)、(平成10年度は幹事)
- 委員 湊 秀幸 (電子技術総合研究所大阪ライフエレクトロニクス研究センター)
- 委員 宮永 俊之 (財団法人電力中央研究所狛江研究所)
- 委員 谷治 環 (埼玉大学工学部電気電子システム工学科)

### 1.3 委員会の運営

期間中の本委員会では、委員会を11回、研究会を3回、講演会を1回、見学会を6回、以下のように開催した。

#### (1) 委員会の開催

##### 第1回委員会

開催日:平成10年8月28日(金)

開催場所:照明学会・会議室

議 事: 委員会の設置趣旨説明、委員会の運営方針の討議、他

話題提供: 「赤外線による象牙の真偽の判別法」

「紫外・赤外域の放射環境とくらし」

「赤外域における天空放射の分光分布と空間分布」

#### 第2回委員会

開 催 日: 平成10年11月26日(木)

開催場所: 電総研大阪ライフエレクトロニクス研究センター・会議室

議 事: 平成11年2月の3学会共催研究会への参加者およびテーマの決定、他

話題提供: 「低温物体の分光放射特性の測定」

「常温物体の反射率から放射率の求め方」

「常温環境における微弱赤外分光放射測定技術」

#### 第3回委員会

開 催 日: 平成11年3月5日(金)

開催場所: 照明学会・会議室

議 事: 平成11年度幹事交替の承認(中尾→谷口)、他

話題提供: 「ホログラフィ干渉計測法とプリント配線板の熱ストレス解析への応用」

「太陽電池の分光特性および太陽光発電と視程」、その他

#### 第4回委員会

開 催 日: 平成11年6月1日(火)

開催場所: 小牧市、日本ガイシ(株)小牧事業所・会議室

議 事: 日本ガイシ(株)の会社概要と小牧事業所の事業内容の説明、他

話題提供: 「水平線付近の赤外放射分布について」

「赤外線撮像技術の変遷」。

#### 第5回委員会

開 催 日: 平成11年9月8日(水)

開催場所: 埼玉大学工学部電気電子システム工学科・会議室

話題提供: 「赤外分光放射照度の測定条件と標準化」

「反射率、透過率の測定による放射率の算出」、その他

#### 第6回委員会

開 催 日: 平成11年12月17日(金)

開催場所: 東京都立産業技術研究所・会議室

議 事: 平成12年2月の3学会共催公開研究会の予定テーマについて、

都立産業技術研究所の概要紹介、他

話題提供: 「光の三原色、物体色の三原色および光の放射、吸収」

「赤外線によるコンクリートの非破壊検査」

「赤外線リフロー技術」。

#### 第7回委員会

開催日：平成12年3月6日(月)

開催場所：福井大学工学部・会議室

議事：第2回公開研究会「赤外線関連応用技術」の概要、他

話題提供：「赤外放射加熱される平板上含水物中の放射照度および発熱パワー分布特性」、「赤外線による文化財などの鑑定について」

「ジャイロトロン の原理、特徴、応用、今後の展望」

#### 第8回委員会

開催日：平成12年7月28日(月)

開催場所：照明学会・会議室

話題提供：「最近の赤外分光装置用アクセサリ」

「熱赤外画像解析によるコンクリートの浮き・ひび割れ調査」、その他。

#### 第9回委員会

開催日：平成12年11月10日(金)

開催場所：東北文化学園大学科学技術学部・第4会議室

議事：委員会報告書の執筆について、他

話題提供：「電気接点のアーク放電と熱の問題」

「赤外線画像センサーを用いた快適エアコンの研究」

「赤外線照射による酸化第一銅基板の電気特性」

「サーモグラフィ装置の現状とその応用」

「サーモグラフィ装置の測定事例」

#### 第10回委員会

開催日：平成12年12月18日(月)

開催場所：照明学会・会議室

議事：委員会報告書の執筆分担について

平成13年2月の2学会共催の公開研究会について、他

#### 第11回委員会

開催日：平成13年3月19日(月)

開催場所：照明学会・会議室

議事：委員会報告書の編集、次期赤外関連委員会について、他

#### (2) 研究会の開催(日本赤外線学会と共催)

##### 第1回研究会

開催日：平成11年2月12日(金)

開催場所：東京、(株)島津製作所東京支社

テ ー マ:「赤外線反射率測定による放射率の算出」(笹森宣文)  
「PVDF薄膜を用いた焦電型赤外線イメージセンサ」(藤塚徳夫)  
「自動車用サーモパイル素子」(廣田正樹、他1名)  
「衛星搭載用焦電型検出器の開発」(石垣武夫、他1名)  
「8万画素非冷却赤外線カメラ」(高橋進男、他4名)  
「256×256画素小型非冷却赤外線カメラ」(田中雄高、他3名)

#### 第2回研究会

開 催 日:平成12年2月18日(金)  
開催場所:東京、(株)島津製作所東京支社  
テ ー マ:「レーザー光混合によるコヒーレントテラヘルツ波発生とその応用」(松浦周二)  
「LHDの電子密度計測用CO<sub>2</sub>レーザー偏光計の開発」(秋山毅志、他6名)  
「KRS-5の光熱偏向効果による赤外分光吸収計測— ステップ操作FT-IR  
分光法による測定—」(湊秀幸)  
「赤外線カメラを使用したトンネル検査車」(宮田信裕)

#### 第3回研究会

開 催 日:平成13年2月16日(金)  
開催場所:東京、グランドヒル市ケ谷  
テ ー マ:「オゾン観測センサILASの軌道上特性評価」(石垣武夫)  
「赤外線通信技術のデジタル情報家電への応用」(池田豊)  
「赤外線イメージスキャナの開発」(一ノ瀬修一)  
「ユニカラーバーコード」(浦野好子)

#### (3) 講演会の開催

赤外放射に関する公開講演会(照明学会・東北支部、日本赤外線学会共催)

開 催 日:平成12年11月10日(金)

開催場所:東北文化学園大学科学技術学部・第4会議室

講演題目:「電気接点のアーク放電と熱問題」

石田広幸・東北文化学園大学科学技術学部

「赤外線画像センサを用いた快適エアコンの研究」

工藤堅治・東北電力(株)研究開発センター

「赤外線照射による酸化第1銅基板の電気的特性」

末広輝男・東北工業大学工学部

「サーモグラフィ装置の現状とその応用」

山越孝太郎・NEC三栄(株)赤外機器開発部

「サーモグラフィ装置の測定事例」

加藤久和・日本アビオニクス(株)マーケティング部

(4) 見学会の開催

第1回見学会

開催日:平成10年11月26日(木)

電子技術総合研究所大阪ライフエレクトロニクス研究センター (尼崎市)

第2回見学会

開催日:平成11年6月1日(火)

見学先:日本ガイシ(株)小牧事業所 (小牧市)

第3回見学会

開催日:平成11年9月8日(水)

見学先:埼玉大学工学部電気電子システ工学科研究室 (浦和市)

第4回見学会

開催日:平成11年12月17日(水)

見学先:都立産業技術研究所照明実験室、赤外線実験室 (東京都)

第5回見学会

開催日:平成12年3月6日(月)

見学先:福井大学工学部遠赤外領域開発研究センター (福井市)

第6回見学会

開催日:平成12年11月10日(金)

見学先:東北文化学園大学科学技術学部メディアセンター、コンピュータ室、  
光応用計測研究室 (仙台市)



## 第2章 基準赤外放射源

赤外放射の加熱作用は古くから産業に應用されており、近年とくに遠赤外放射の効果が注目されているが、その効果を判定するためには、効果が生ずると考えられる物体の入射面での放射束の波長的な属性すなわち遠赤外域で分光放射照度を測定する技術がなければならない。しかし、この技術は現状ではほとんど未開発である。赤外域での放射測定は今までのところ、放射体の放射面上からの放射の発散状態すなわち放射輝度あるいは放射束発散度の測定、及び放射体表面の放射率(吸収率)の測定について重点的に行われている。本章では、このような事情を前提として、赤外放射における標準の概念と実際の赤外放射標準について述べた後、放射体の分光放射率測定による遠赤外放射体(以後遠赤外ヒーター)の標準化について概説する。

### 2.1 赤外放射における標準

#### 2.1.1 はじめに

赤外域の放射測定を行う場合、放射や材料の光学特性(吸収、透過、反射)における波長選択性が問題となるため、分光放射測定を行うことが必要となる。本節では、赤外域の分光放射標準の現状について報告する。

#### 2.1.2 赤外域の分光放射標準に対する考察

赤外域の分光放射標準としては、標準放射源と標準検出器に大別できる。標準放射源は理論から導かれる分光放射量(分光放射輝度、分光放射強度など)をもつ放射源、すなわち黒体標準と、2次標準としての白熱電球や放電灯などである。標準検出器は放射束の大きさを電力に置換して測定する絶対放射計と、2次標準としての検出器などである。

標準放射源を用いる場合には、被測定光源との比較において測定光路上の波長特性の影響を相殺できること、測定波長域において分光応答度のよい検出器を利用できることなどが利点となる反面、黒体標準においては温度の不確かさの影響や温度目盛の変更の影響を受けること、高温かつ均一な放射源が必要であるために黒体炉が大型でありかつ使用できる温度点が限定されること、および、測定器の値付けにおいては媒質中(例えば大気中の $\text{CO}_2$ や $\text{H}_2\text{O}$ など)の吸収が影響することなどが問題となる。

標準検出器は標準放射源と逆の長所短所をもつ。放射源とは関係なく特定範囲における分光放射束を絶対測定できることから、その位置での分光放射照度が求められ、この位置に被測定器を置くことで値付けを行うことができる。しかし、放射源の測定においては、測定光路上の波長特性波長特性や媒質中の吸収が影響する。電力目盛の不確かさは放射測定に比べてはるかに少ないので、絶対放射計は電力目盛変更の影響を受けない。絶対放射計は小型であるが、機械的に弱く、分光応答度も低い。

黒体標準においては高温の温度定点の研究が行われており<sup>1)</sup>、温度の不確かさが低減されることにより高精度な標準放射源の実現が期待されている。また、液体ヘリウム温度で動作させることでSN比を向上させた絶対放射計(極低温放射計)の研究も行われており<sup>2)</sup>、標準検出器の高精度化も期待されている。

### 2.1.3 電子技術総合研究所における赤外域分光放射標準の設定

わが国では、黒体標準放射源の研究<sup>3)</sup>や絶対放射計による放射測定(全放射照度標準)の研究<sup>4)</sup>などが古くから行われていたが、ハロゲン電球を2次標準とする波長250nm~2500nmにおける分光放射照度標準の研究<sup>5)</sup>により、現在の日本における赤外域分光放射標準が確立された。

#### (1) 分光放射輝度標準の設定

分光放射照度標準の設定においては、まず、石英窓付きタングステンリボンフィラメント電球(GE製30A/T24/13)を2次標準とする波長250nm~2500nmにおける分光放射輝度標準が設定された。1次標準としては、金点黒体放射源(1338.58K(金定点の温度目盛はIPTS-68を使用)、ニッケルチューブ黒体放射源(1520K~1570K)、グラファイトチューブ黒体放射源(約2500K)の3種類の標準放射源が用いられた。ニッケルチューブ黒体放射源とグラファイトチューブ黒体放射源の温度は、金点黒体放射源の温度定点より校正された光高温計を用いて測定された。

#### (2) 分光放射照度標準の設定

分光放射照度標準用ハロゲン電球(定格100V500W,ウシオ電機製JPD100V-500WCS)が製作され、これを2次標準とする分光放射照度標準が設定された。

分光放射照度標準の設定方法としては、前記の分光放射輝度の2次標準と分光ルミナンスファクタが既知の拡散反射板( $BaSO_4$ )とを用いることで分光放射照度を設定する方法と、相対分光放射照度標準(分光放射輝度の2次標準と拡散反射板を利用)と別途用意した全放射照度標準<sup>4)</sup>とにより分光放射照度を設定する方法とが用いられ、分光放射照度としては両者の平均値が採用された。

この分光放射照度2次標準は、シンクロトロン放射との比較による補正や、1990年国際温度目盛(IITS-90)採用に伴う修正等が行われ<sup>6)</sup>現在に至っている。

### 2.1.4 赤外域分光放射標準のトレーサビリティ

日本の国家標準として正式に供給されているのは前記の分光放射照度標準である(分光放射輝度標準については供給されていない)。これを入手する場合には、計量法計量標準供給制度(JCSS制度:Japan Calibration Service System)によって認定された校正事業者によって、トレーサビリティのある分光放射照度標準の供給をうけることができる。

分光放射照度標準の供給を行っている校正事業者は、ミノルタ、日本電気計器検定所、東芝ライテック、

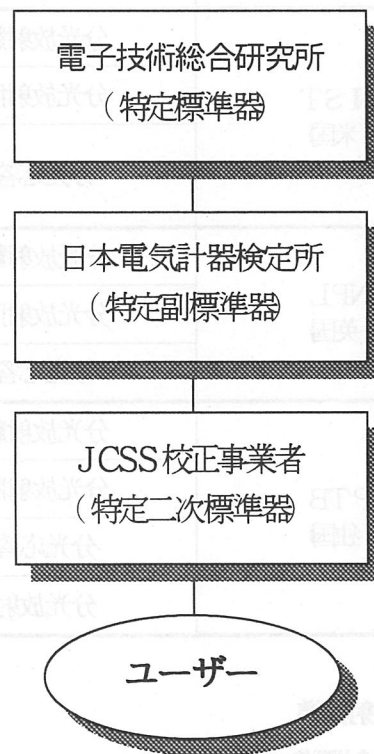


図2.1 分光放射照度のトレーサビリティ

トプコン、浜松ホトニクス、松下電子工業、スガ試験機(2001年3月現在)である。詳細な情報は、経済産業省 製品評価技術センターのホームページ(<http://www.nite.go.jp/asse/jcss/jcss.htm>)より入手することができる。また、波長200nm～1150nmにおける分光応答度標準については、電子技術総合研究所の依頼試験を通じて入手することができる。

他国の赤外放射標準確立の状況を表2.1で示す。日本の標準確率の状況は、他国に比べて遅れており、早急な対応が望まれるところである。

表2.1 各国の赤外放射標準確立の現状

標準研究機関	標準量	波長範囲
電子技術総合研究所 (日本)	分光放射輝度(供給なし)	200nm ~ 2500nm
	分光放射照度	
	分光応答度(依頼試験のみ)	250nm ~ 1150nm
NIST (米国)	分光放射輝度	200nm ~ 2500nm
	分光放射照度	200nm ~ 2400nm
	分光応答度	200nm ~ 1800nm 2 $\mu$ m ~ 20 $\mu$ m
NPL (英国)	分光放射輝度	200nm ~ 2500nm
	分光放射照度	
	分光応答度	200nm ~ 20 $\mu$ m
PTB (独国)	分光放射輝度	200nm ~ 2500nm
	分光放射照度	
	分光応答度	
	分光放射束	

## 2.2 赤外放射標準

### 2.2.1 空洞放射標準

前述したように、赤外域での分光放射輝度の測定は広く実施されており、その標準には各種の黒体炉(空洞放射体)が用いられている。これらの中で、鈴木<sup>7)</sup>らの開発したSiC空洞による分光放射輝度標準は、その目盛りが近赤外域で、従来の測光の放射目盛りに接続されているため、測光標準による測定との整合性の点で有用性が高い。

この標準の実体は、矩形の開口を持った円筒形の空洞であって、放射体としてのSiCの放射率 $\epsilon$ が、遠赤外域で0.8以上であるところから、ほぼ $\epsilon=0.99$ の疑似黒体とみなすことができる。

この放射(開口面内の $0.3 \times 3 \text{ mm}$ の面積)を紫外・可視・近赤外の分光放射輝度標準(リボンフィラメント電球)の放射と波長 $2 \sim 2.5 \mu\text{m}$ で比較して、空洞の分光放射輝度を求め、この値をプランクの式に代入して温度 $T$ を求める。そして、この温度 $T$ から今度は他の波長の分光放射輝度を算出して、標準として使用する。点灯の条件は入力電力一定とする。入力 $350 \text{ W}$ のときで空洞内の温度は約 $1180 \text{ K}$ である。

### 2.2.2 放射輝度標準から放射照度標準への変換<sup>9)</sup>

鈴木らの放射体で、空洞を形成する円筒部の開口部以外の分光放射輝度を測定してみると、放射率を一定と仮定したときの温度むらは、円筒全面で $\pm 3 \text{ K}$ 程度であって、非常に均一性がよい。そこで、空洞の背面(開口の反対側)の円筒部について代表的な数箇所の分光放射輝度を、空洞部の分光放射輝度と比較して目盛り付して、この数箇所での測定値を平均すると、その値を円筒全面からの放射の分光放射照度 $E(\lambda)$ の相対値 $E'(\lambda)$ と考えることができる。

円筒部の前面に、円筒部からの放射だけが取り出せるような開口を持ったアパーチャ(遮光板)を取り付けて、適当な距離で、放射の吸収のない波長域に透過域を持つ帯域フィルタを通して熱形検出器(サーモパイル)への放射を与え、その応答 $V$ を求める。この値と帯域フィルタの分光透過特性 $T(\lambda)$ から、分光放射照度 $E(\lambda)$ を次式で求めることができる。

$$E(\lambda) = K \cdot E'(\lambda) = \frac{V \cdot E(\lambda)}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda} \quad (2.1)$$

ここで、 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ は帯域フィルタの透過の上限と下限である。

このように、SiC空洞による分光放射輝度標準から分光放射照度標準を導けることが確かめられたが、この鈴木らによるSiC空洞放射体は波長 $10 \mu\text{m}$ 以上まで使用するにはやや放射照度が低いので、構造が相似で長波長まで使用できる放射体を検討し、図2のものを用いることとした。分光放射照度標準としての実効放射面積は約 $8 \text{ cm}^2$ である。アパーチャは二重構造として、放射体からの加熱による受光側の面の温度上昇を $2 \text{ K}$ 程度に押さえている。放射体の温度は約 $930 \text{ K}$ で、電力は $400 \text{ W}$ である。

図3はこのSiC円筒分光放射照度標準の分光放射照度の一例である。なお、この放射源に逆二乗の法則を適用するときの仮想光中心は、円筒面とアパーチャの間になる。

### 参考文献

- 1) 山田善郎ほか:  $1100^\circ\text{C}$ 以上の新しい実用温度定点, 計測自動制御学会第38回学術講演会, 計測自動制御学会, pp.117-118 (1999)
- 2) 齋藤一朗ほか: 極低温放射計の導入による測光・放射測定の高精度化, 平成6年度照明学会全国大会, p.305 (1994)
- 3) 佐戸根範次: 熱放射標準の確立に関する研究, 電試研究報告, 第565号 (1958)
- 4) 大場信英: 放射束の絶対測定, 電試研究報告, 第675号 (1967)
- 5) 鈴木守ほか: 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, 電総研研究報告, 第742号

(1973)

6) 西師毅ほか: 分光放射照度標準値の修正と国際比較, 電総研彙報, Vol. 57, No. 1, pp. 52-74(1993)

7) 鈴木守ほか: 照明学会放射の応用研究会資料, AR-76-5(1976)

8) 大谷ほか: 照学誌 79-8, 377(1995)

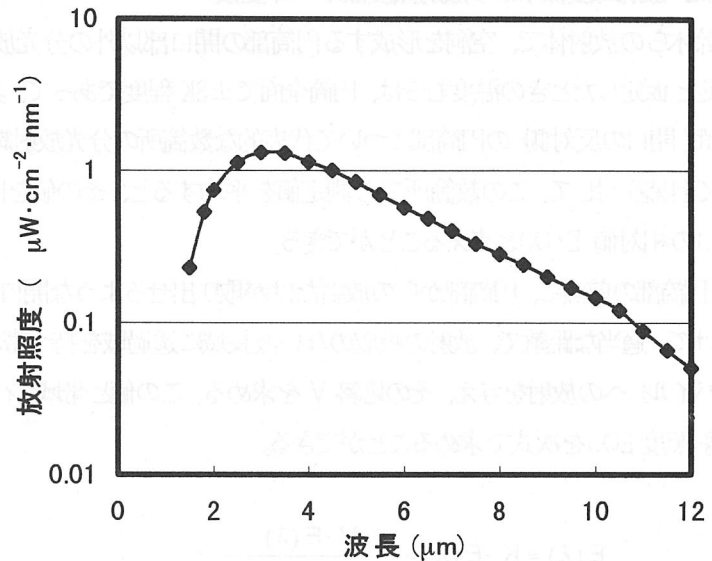
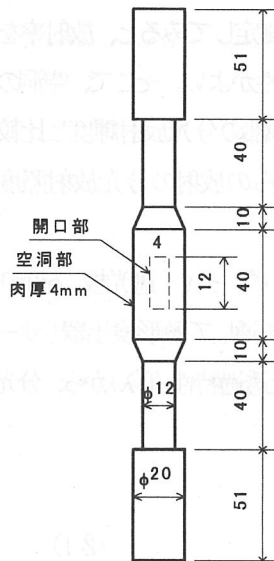


図2.2 SiC空洞放射体分光放射照度標準の概略図

図2.3 SiC空洞放射体の分光放射照度

## 2.3 サーモグラフィと分光放射率測定による遠赤外ヒータの標準化

### 2.3.1 遠赤外ヒータ標準化の必要性

赤外放射エネルギーを得るための赤外ヒータは、大きく近赤外ヒータと遠赤外ヒータとに分けられるが、前者は透明石英管内に封入したタングステン等から成るフィラメントに通電しこれを白熱状態におくことにより、後者は主としてヒータ内部に組み込まれた電熱線への通電によってセラミック系の放射素材で構成されたヒータ表面を加熱することにより、それぞれ互いに波長域の異なる赤外エネルギーを放射する仕組みになっている。

赤外放射源の分類は例えば EC の定義があるが、本報告書 6.1 に記した問題点があると思われるので、ここでは通常我が国で問題なく用いられている上記のような区別を用いておく。

このうち近赤外ヒータが放射するエネルギーとその波長分布は、高温のフィラメントからの黒体放射エネルギーと考えられ、市販の近赤外ヒータの場合、定格時にそのフィラメント温度が何度になるかが与えられている。さらに高温源からの放射の波長分布は一般に広い波長範囲には亘らず、概ね近赤外域に収まるので、近赤外ヒータはそのフィラメント温度によって、どのようなエネルギー放射源であるかを位置づけることが出来る。

因みにフィラメント温度が 2100°C に設計された近赤外ヒータの場合、プランクの式によれば、そこから放

射される全エネルギーのうち 50%が 1.7  $\mu\text{m}$ 以下の波長域で、また 90%が 3.9  $\mu\text{m}$ 以下の波長域で放射されるといことが分かる。

これに対し遠赤外ヒータの場合、その表面を構成するセラミック質としては各種の材料が用いられており、これらはそれぞれに固有の分光放射率をもっている。これを一括して同じ放射特性をもつと見なしたり、もちろん黒体と同等と見なすこともできない。またヒータは寸法、形状が様々なほか、いろいろな定格のものがあ、さらに使用状況に合わせて、いろいろな温度で用いることになる。一般に表面温度は近赤外ヒータに比べ高くないから、放射エネルギーの波長分布もかなり広い波長範囲に亘ることになる。

すなわち遠赤外ヒータの場合、種類の違う、また使用条件の違うそれぞれのヒータ毎に、放射エネルギーの波長分布は様々に異なることになる。例えば黒体に類似した全赤外域に亘って放射率が高い材質から成るヒータ(以後黒体型と称する)と、いわゆる遠赤外域においてのみ高い放射率を示す材質(以後遠赤外型と称する)とでは、おそらくヒータとしての効率や効果も異なることが予見される。

このため遠赤外ヒータの放射特性を互いに比較し、何らかの議論を行うには、その分光放射率特性を考慮した定量化、評価法が必要となる。その必要性についてはこれまでも提起され、一部でその手法が検討されてきたが、未だ不完全なものであり、その測定法自身にも問題を多く残していると思われる<sup>9,10)</sup>。

そこで(社)遠赤外線協会では、通商産業省工業技術院の委託による調査研究委員会等などの場において数年前からこの問題を取り上げて検討を加えており、最近そのプロジェクトの最終年度の報告書が刊行された<sup>11)</sup>。ここではその概要を紹介する。

### 2 3 2 遠赤外ヒータの評価の考え方

遠赤外ヒータの定義あるいは標準化を議論する場合、遠赤外放射の波長域をはじめに決めておく必要がある。しかしこれについても本報告書6.1に記されているような問題点が提起されているので、ここでは特に波長域を特定しないことにする。なお我が国で遠赤外ヒータを利用する加熱技術関連業界で専ら用いられている決め方によれば、3  $\mu\text{m}$ 以上を遠赤外域としているので、適宜この値を引用する。

遠赤外ヒータとしての評価は、そのヒータから遠赤外域のエネルギーがどれだけ多く放射されるかということによって定まる、とここでは仮定する。実用上は、近赤外域のエネルギーにまたがった放射域のヒータの方が効果的な対象物や状況があるかも知れないが、それでは「遠赤外」という名称に合致した評価はできないので、文字通り遠赤外域のエネルギーを集中的に発するヒータとして評価することを考える。

この見方による評価では「そのヒータから放射される全エネルギーのうち何割が遠赤外域の放射エネルギーであるか」(この比を  $\eta_r$  とおく)だけが分かればよいということではない。実際にヒータとして使う場合には、必ず放射以外の形態でのエネルギー放出分(対流損失分など)が伴うので、その分を考慮した「ヒータへの入力のうち何割が放射エネルギーに変わったか」(この比を  $\eta_i$  とおき、ヒータの放射効率ということにする)という因子も知らねばならない。この二つの比の積が「ヒータへの入力のうち何割が遠赤外域放射エネルギーとして放出されているか」という、いわば遠赤外ヒータとしての効率( $\eta$  とする。これを遠赤外域放射効率ということにする)に相当する。すなわち  $\eta = \eta_r \cdot \eta_i$  となる。

以前、日本電熱協会においてこれら二つの因子を用いて遠赤外ヒータの規格化を試みたことがあったが、測定法や数値の根拠に不十分な点を残していると思われる<sup>9)</sup>。

ここで $\eta_r$ という因子は分光放射率によって一義的に与えられると考える。いまあるヒータを例えば表面温度 500℃で用いている場合を想定する。この時の放射エネルギーの波長分布は、プランクの式で与えられる 500℃における黒体からの分光放射発散度と分光放射率とから求まる。こうして求めた曲線から、全波長域に亘る放射エネルギー総量に対して、例えば3  $\mu\text{m}$ 以上と定義した遠赤外域で放射されるエネルギー総量がそのうちどれだけの割合を占めるか(上記 $\eta_r$ に相当する)が求められる。

分光放射率によって遠赤外ヒータを論じる際、上記のようにして求めたヒータからの全波長域に亘る放射エネルギー総量が、これと同一温度、ここでは 500℃における黒体からの全波長域に亘る放射エネルギー総量に対し何割になるか、という数値(全波長域についてのいわば平均的な放射率に相当する)を求め、これを以て評価の尺度としようとする考えにしばしば出会うことがある。これは黒体があらゆる場合に理想的な放射体であるという誤解に導かれた概念である。全く同じ入力エネルギーを得た状態では黒体とヒータとは一般に同一温度にはならず、実際のヒータの方がより高温になるはずである。そうなることで入力に見合う量のエネルギーが放射され、同時に対流放熱ともなってバランスするのである。言い換えれば、加えたエネルギー相当分を近赤外域まで含む広い波長域に亘って分散して放射するのが黒体型であり、対流放熱の増加分にある程度消費されるが、遠赤外域に集中してエネルギーを放射するのが遠赤外型のヒータということになる。

以前には黒体を高効率放射体などと命名した例が報告されたことがあり、放射素材を黒体に近づけようとする努力が払われたこともあったが、その「高効率」という名称は誤解を生み易い。もちろんここで述べた趣旨は、「黒体型放射体の方があらゆる場合に効果的に劣る」ということを意味するものではない。

$\eta_r$ はこのように分光放射率の測定データから計算で求まるほかに、何らかの手段によりヒータからの照射エネルギーを測定し、この測定光路中に(例えば)3  $\mu\text{m}$ のカットオフ フィルターを挿入した時としない時の両方の値から、概ね求める値を実測することが出来る。

一方 $\eta_r$ の方は簡単には実測で求まらない。例えばヒータからの照射を受けているある部分における照射エネルギーの測定値から、そのヒータからの全放射エネルギーを求めるには、幾何学的な形状因子の関与する積分あるいは平均化の計算処理が必要になり、面倒な上、精度の確認が難しい。

### 2 3 3 サーモグラフィと分光放射率の測定からヒータの全放射エネルギーあるいは遠赤外域放射エネルギーを求める方法

#### ①原理

ある放射体のある部分の温度とその表面材質の分光放射率が分かれば、その部分からの放射発散度が原理的に求まるはずである。そしてその放射体の温度分布はサーモグラフィで測れば、ヒータ全体についての $\eta_r$ でも $\eta$ でも直接求められる、という中野ら(電力中央研究所の報告<sup>10)</sup>に則って、さらに測定と検討が実施された<sup>10,11)</sup>。すなわち各ヒータ表面材質の分光放射率測定が実施され、各ヒータのサーモグラムが撮られ、それらをデータ処理することで $\eta_r$ 、 $\eta$ が求められた。

サーモグラフィによる温度分布表示画像は、対象である熱放射物体各部位から撮影カメラ内の該当部位の受光部(画素)に到る熱放射に関するエネルギー情報をすべて、幾何学的位置関係まで含んで(縮尺で、捉えている。いま被測定物が完全黒体であったとすると、ある素子で受けたエネルギーは該当する黒体部位からこの素子に放射されたエネルギーを意味し、この値が何度の黒体のプランクの放射式に当てはまるかを見る(計算する)ことによって、その黒体部位の温度を提示している。逆にサーモグラフィの示す温度分布画像によって、それぞれの温度の部位の放射エネルギー(半球面放射発散度)が計算でも求められることが出来る。

放射体が黒体でなく分光放射率をもった物体の場合にも、放射率を仮に1であるとしたときの温度分布画像が同様で得られるが、このとき各部の温度は真の値ではない。そこで何らかの手段により対象である放射体の代表部位の実際の温度を求めることにする。次にこの値を基準として放射体全体の温度分布画像の温度レベルを補正する。

実際の温度と分光放射率が知られていれば、プランクの放射式に分光放射率を乗じ、それにこの温度を代入した式を全波長域に亘って積分をし、さらにこの温度を示している部位の面積(サーモグラムから求める)を乗じるとその温度域部分からの放射エネルギーが求まる。これを全温度レベルに亘って足し合わせれば、対象物体全体からの放射エネルギーが求まることになる。以上をパネル状ヒータを想定して式で表せば次のようになる。

$$P_r = \sum_{i=1}^N \int_0^{\infty} \epsilon(\lambda) \{E_b(\lambda, T_i) - E_b(\lambda, T_a)\} d\lambda \cdot S_i \quad (2.2)$$

$$\eta_r = P_r / P_0 \quad (2.3)$$

ここで式に用いている用語の意味は次の通りである。

- $P_r$  : 全波長域に亘る放射パワー(W)
- $P_0$  : ヒータへの電気入力(W)
- $\lambda$  : 波長( $\mu\text{m}$ )
- $\epsilon(\lambda)$  : ヒータ表面材質の分光放射率
- $T_i$  : サーモグラフィ画像において同一温度帯域毎に分割し、番号を付したとき、 $i$  番目の帯域の代表温度(K)
- $T_a$  : 周囲環境温度(K)
- $N$  : サーモグラフィ画像における温度帯域分割数
- $E_b(\lambda, T)$  : 温度  $T$  の黒体の半球面分光放射発散度 ( $\text{W}/\text{m}^2/\mu\text{m}$ )
- $S_i$  : サーモグラフィ画像において分割された  $i$  番目の帯域の面積( $\text{m}^2$ )

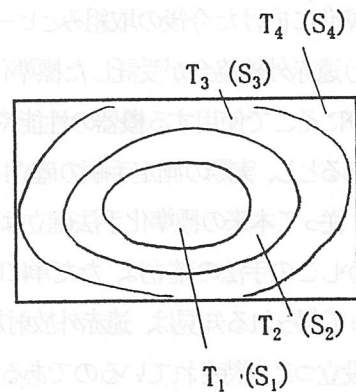


図24 サーモグラフィ画像における温度域分割



かくして放射体からの放射エネルギーが算出される。波長の積分範囲は任意に変更出来るから、例えば  $3\ \mu\text{m}$ 以上と以下に分けて、遠赤外域 近赤外域の放射エネルギーを別々に評価することも出来る。入力エネルギーに対するこれらの比をとることによって、そのヒータの放射効率  $\eta_r$ 、遠赤外域放射効率  $\eta$ あるいは近赤外域放射効率<sup>10)</sup>が求まる。

ここで対象物の代表部位の温度を求めるには、その個所に細い熱電対を貼り付ける等の手段が想定されるが、サーモグラフィ観察によれば、最も細いウラスの熱電対素線を用いた場合でも、装着個所の温度はその周囲より低下しており、真の温度ではないと判断されたため、以下の方法を採用している。すなわち使用したサーモグラフィの検出波長域における放射体の分光放射率(これは既に求めてある)を用いて、放射率として測定された温度分布を補正するのである。

以上は主としてパネル状のヒータを対象とした測定方法であるが、反射板を装着していない棒状のヒータについてもサーモグラフィ画像がどの径方向からみても同一であると仮定することにより、同じような扱いが出来る。

## ②測定結果例

パネル状ヒータ4種と棒状ヒータ2種について、最大定格電力を加えたときの  $2\sim 3\ \mu\text{m}$ 、 $3\sim 8\ \mu\text{m}$ 、 $8\sim 25\ \mu\text{m}$ 、 $25\sim 100\ \mu\text{m}$ の各波長域毎の放射パワーを求め、電力入力に対する比を示している<sup>11)</sup>。

各種の遠赤外ヒータの(全波長域に亘る)放射効率は、棒状ヒータとパネル状ヒータとの間で大きな差はなく、概ね  $60\sim 70\%$ であることが示されている。この値がこのようにいろいろなヒータについて(統一された使用条件ではないが)求められたのはおそらく始めてである。従来一部は遠赤外ヒータの対流放熱は  $50\%$ くらいに達するという意見もあったが、案の定遠赤外ヒータの放射効率はそれ程低くはないことが明らかにされた。

この報告では別途ヒータからの対流放熱分を評価しており、この値からも放射効率の値についてはかなりの確からしさが伺える。

## ③標準化に向けた今後の取組みとヒータの定量的評価を利用した遠赤外ヒータ特性の解明

(社)遠赤外線協会が受託した標準化等に関わる委員会では、上で紹介した方法については、その原理ならびにここで使用する機器の性能や利用の容易性も含めて、標準化の手段としての可能性を認めた段階であるとし、実際の測定手順の確立に当たってはいろいろと詳細な条件の吟味を行う必要があるとしている。従って本来の標準化手法確立は今後の課題であるという。

しかしこの手法の確立は、ただ単にヒータ標準化のためにのみ必要とされているのではない。この試みに伴って得られる知見は、遠赤外放射加熱に関わる定量的な考察をより高度なレベルに高めるためにも大いに役立つと期待されているのである。例えばヒータの放射効率はもちろんその表面温度が高いほど高く、従って表面積が小さく高電気容量(W)のものが高い値を示す傾向にあるであろう。それらがデータにより明確に示されれば、遠赤外ヒータを高温度で用いると対流放熱の寄与分が相対的に大きくなるなどという誤解が消滅するであろう。

また遠赤外域放射効率に関しても、やはり一部 特に欧米の近赤外常識に感わされた研究者達から言われていた、「遠赤外ヒータを高温度で用いると近赤外域放射効率が高くなって遠赤外加熱の効果が薄れる」

る」という説を否定するためにも、この手法は有効である。これらは今後系統的なデータを採り明確これを証明する作業が残っている。

さらに遠赤外ヒータを分光放射率のタイプの違いによって、黒体型と遠赤外型とに大きく分けたとき、いろいろな加熱目的や対象物に対してそれぞれどのような効果あるいは適性があるのか、またこの二つのタイプを高温下で用いたとき、それぞれ遠赤外域放射効率はどうなるのか、などの興味あるテーマについても、これから検討していかなければならない。

#### ④遠赤外加熱装置と遠赤外ヒータ

これまで遠赤外ヒータ単独での評価や標準化が、必要であるという掛け声の割に積極的に行われなかった理由には、もちろんその手法確立に伴う大きな困難が予想されていたためであるが、加熱装置としてみた場合その優劣は装着しているヒータ自体の特性差というよりも、装置のエンジニアリング、すなわち顧客の目的達成のための最適運転条件の装置への組み込み、すなわちソフト技術によるところが大きいからであろう。

しかしそうであっても、やはり遠赤外ヒータ単体としての何らかの評価は必要であることに間違いはない。そのような評価が成されなければ遠赤外加熱の効果を定量的に確認することは難しく、またそのメカニズムの説明も不十分なまま進展しないということもあり得るのである。

#### 【参考文献】

- 9)平成 10 年度通産省工技院委託「遠赤外線用セラミックス系素材の試験評価方法の標準化調査研究」成果報告書(遠赤外線協会、平成 11 年 3 月)。
- 10)平成 11 年度通産省工技院委託「遠赤外線用セラミックス系素材の試験評価方法の標準化調査研究」成果報告書(遠赤外線協会、平成 12 年 3 月)。
- 11)平成 12 年度経済省委託「無機新素材産業対策調査委託調査結果報告書 遠赤外線セラミックス産業対策調査研究」(遠赤外線協会、平成 13 年 3 月発行予定)。
- 12)中野幸夫ら: 電力中央研究所報告、研究報告 T88102「遠赤外線ヒータ放射特性の測定と加熱過程の検討」(電力中央研究所、平成 1 年 5 月)。

## 第3章 赤外放射の計測

### 3.1 全放射

全放射の“全”とは、全波長域にわたる光放射のエネルギーの総和量のことを意味する。

全放射の測定のためには放射計を用いる。(分光放射の測定を行って積分する方法もあるがそれは後述する)

放射計の検知器の特性としては、光放射で扱う波長の紫外・可視・近赤外・遠赤外線までの約  $0.3\sim 30\mu\text{m}$ の波長の光に対してほぼ様な感度を有していることが必要である。ただし、赤外放射の測定に限定している場合はその限りではない。通常はサーモパイル、まれに焦電素子が使われる。

放射計の出力値の校正は、黒体炉や電球からの放射が使われるが、サーモパイルの集熱板に抵抗体を一体化し、その抵抗体を電気入力で発熱させて校正を行う方法もある。

#### 3.1.1 全放射の測定項目

##### (1) 放射束

ある面を単位時間当たり通過する放射エネルギー。ある面とは、放射体の放出面、到達面、あるいは途中の空間の面の何れかを指す。単位は(W)である。

##### (2) 放射照度

放射体表面から放射され、離れた場所を通過している放射束の単位面積当たりの値。単位は(W/m<sup>2</sup>)

##### (3) 放射強度

放射体表面から空間的に広がる立体的な角度を考えた場合、その角度の中に含まれる光放射の量は、放射体からの距離が近くても遠くても一定である。この空間的な角度を立体角という。単位立体角当たりの光放射量が放射強度。単位は(W/sr)、srは立体角の単位ステラジアン。

##### (4) 放射発散度

放射体の単位面積当たりの放射量。単位は(W/m<sup>2</sup>)

##### (5) 放射輝度

放射体の単位面積当たり、単位立体角当たりの放射出力。単位は(W/m<sup>2</sup>·sr)

##### (6) 放射率

試料の放射発散度と黒体の放射発散度との比、全放射率とも言う。1～0までの無名数で表される。

#### 3.1.2 放射束(全放射束)の測定

ヒーターなどの放射体から放射されている放射束の総量が全放射束である。

放射計を用いて放射強度の測定を放射体の全周囲にわたって行い、積算することによって

得られる。

放射体が棒状や平面状のような単純な形状の場合には、配光特性が既知のものと同じであるとして、正面の1箇所だけの放射強度を求め、計算によって全空間に放射されている放射束（全放射束）を導き出すことも行われている。JIS C 7514「赤外線電球」の管型の赤外線ランプの場合には、赤外線ランプに直角の位置（正面）で水平放射強度を測り、ガラス管が透明の場合は10.3倍、半透明の場合は10倍で全放射束が求められるとしている。

全放射束と入力電力が求められると、その赤外線ランプの放射効率が分かる。

石油ストーブの場合は、JIS S 3031「石油燃焼器具試験通則」によって、器具の前半球面の空間33箇所を放射熱を測り、その値を積算して放射束を求めるとしている。

## 3.2 分光放射の計測

波長別の放射の評価が分光放射である。全放射と同じ項目数だけ分光放射の項目もあるが、中でも、放射体そのものの性能を表す分光放射率、分光放射発散度、分光放射輝度は測定されることが多い。それに対して、空間を通過している放射量である分光放射照度の測定は、赤外線の波長では標準放射源の入手の関係で未だ若干困難である。

### 3.2.1 赤外分光放射量の表し方

波長幅 $1\mu\text{m}$ 毎の放射強度( $\text{W}/\text{sr}$ )は、分光放射強度( $\text{W}/\text{sr}\cdot\mu\text{m}$ )となる。同様に分光放射発散度は( $\text{W}/\text{m}^2\cdot\mu\text{m}$ )、分光放射輝度は( $\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{sr}\cdot\mu\text{m}$ )となる。実際には $1\mu\text{m}$ 毎では、波長幅は広すぎるので、 $10\text{nm}$ (ナノメートル)で測定したり、面積の単位に $\text{cm}^2$ を使うこともある。その場合は、分光放射輝度では( $\text{W}/\text{cm}^2\cdot\text{sr}\cdot 10\text{nm}$ )という表現になる。

### 3.2.2 分光放射率の測定

黒体炉からの放射出力と、黒体炉と同じ温度の放射体試料からの放射出力を分光放射測定装置で波長別に求め、各波長毎の比を求める。それが分光放射率となる。黒体炉はプランクの放射則に則った赤外放射を行う基準器で分光放射率が1.0として扱う。

測定に際しては、常温の放射体（放射率はどのような値でも良い）からの放射量を測定し、測定器出力がゼロであることを確認する。もしゼロでないときは、すべての測定器出力からその値を取り除く必要がある。冷却型の検出器を用いた場合には必ずこの作業が必要である。

分光放射率は放射体の赤外線放射特性を表す最も基本となる数値ではあるが、その値は放射体の性質を表しているものであって、量的な値ではない。例えて言えば、冷えているストーブでも熱くなっているストーブでも分光放射率は同じ値であるということであり、また波長 $25\mu\text{m}$ の分光放射率が波長 $10\mu\text{m}$ の分光放射率より大きな値であっても、波長 $25\mu\text{m}$ の放射量が波長 $10\mu\text{m}$ の放射量より多いというわけではない。

### 3.2.3 分光放射率の値とその評価

図3.1に分光放射率測定例を表す。各種ハウロウ板は、波長約 $9\mu\text{m}$ で放射率が若干低下している以外は、色の差（白、黒、赤など）、表面状態の差（光沢～無光沢）にほとんど関係なく、一

様に高い放射率を示している。ホウロウ板の有するこの優れた放射特性と耐熱性が、古くからストーブの放射板、煙突、魚焼き器の放射板などの各種赤外線放射体として生かされている。

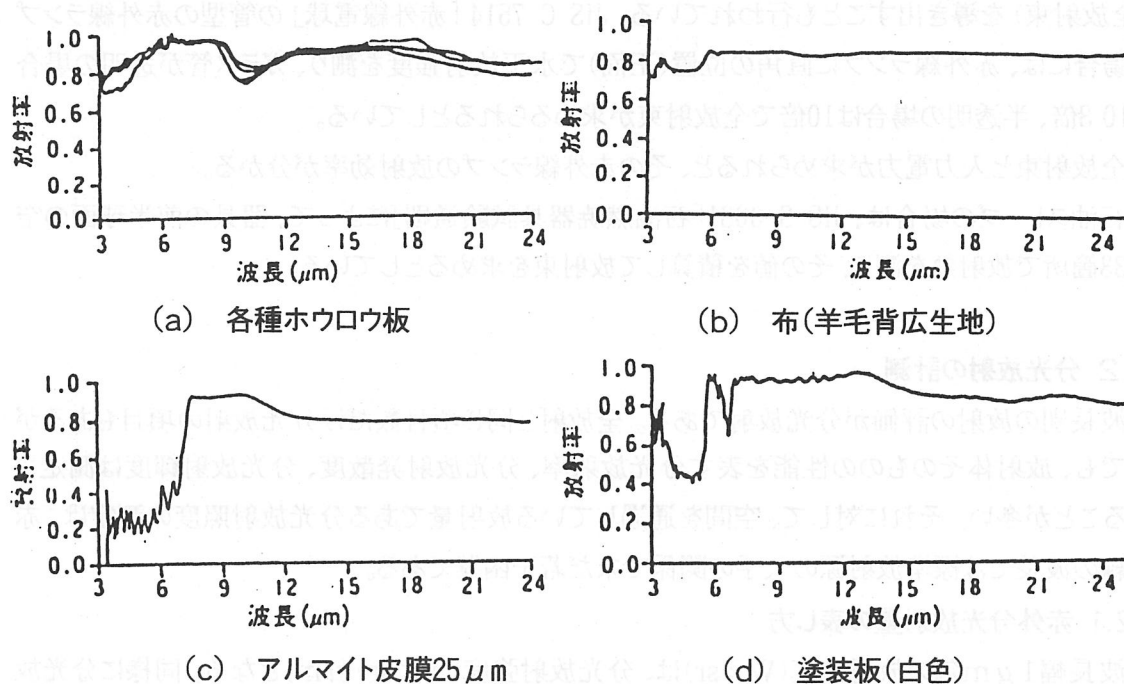


図3.1 分光放射率の測定例

### 3.2.4 分光放射出力の測定

分光放射率から分光放射出力を導き出すには、黒体出力をプランクの放射則によって求め、それに試料の分光放射率を乗ずると分光放射出力となる。あるいは、黒体炉がプランクの放射則に則った放射をしているものと見なして、黒体炉と試料の分光放射量を測定するとそれぞれの分光放射出力が得られる。

多くの放射体は分光放射率の値が温度によって大きく変わることがないので、分光放射率を測定した温度以外の温度における分光放射出力も、その温度での測定を行うことなく計算で求めることができる。求めたい温度における黒体出力をプランクの放射則によって求め、その値に他の温度で測定した放射体の分光放射率の値を乗ずると、求めたい温度の分光放射出力が得られる。

図3.2は木炭、ガスこんろ、電気こんろからの赤外線放射量を測定したデータである。フーリエ変換型分光器は分散型分光器と異なり、測定時間が0.1秒程度の短い時間なので、木炭やガス火のように燃焼が安定していない熱源でも測定が可能である。

図3.2の結果から、炭火からは多くの赤外線放射が行われていることが分かる。これは放射率の高い物質である木炭(炭素)が高温になったために、大量の赤外線の放射が行われていることを意味している。

ガスこんろの場合は、ガス火の成分である高温の炭酸ガスと水蒸気からの赤外線が放射されているにすぎない。電気こんろからは、熱せられたニクロム線と絶縁物からの赤外放射が行われている。

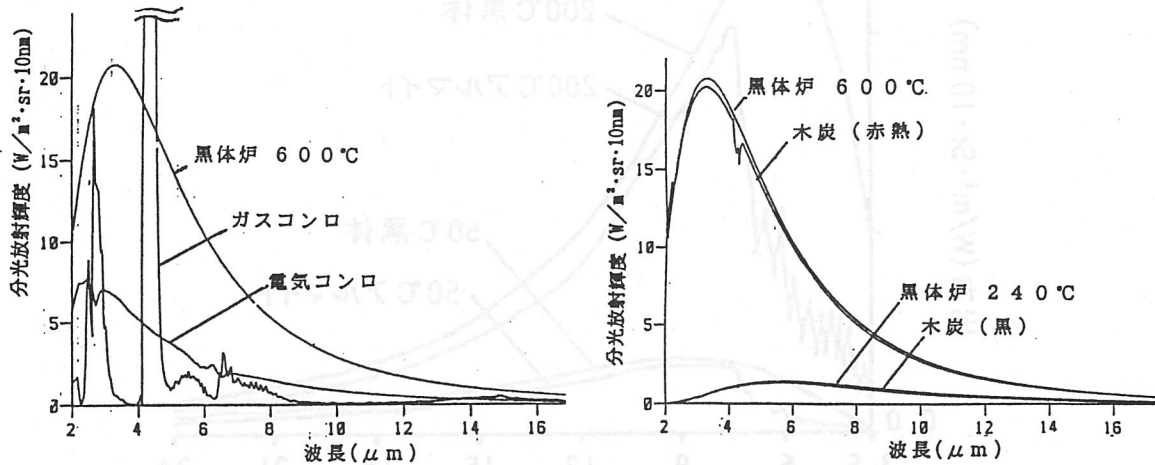


図3.2 炭火やガス火などからの分光放射量

### 3.2.5 分光放射率から全放射関連の量を求める

分光放射出力を積分すると全放射量となる。例えば、分光放射輝度を積分すると放射輝度が得られる。放射体と黒体の全放射量（輝度や発散度）を算出し、その比を求めると、その放射体の全放射率となる。

図3.3に示したアルマイトの全放射率をこうして求めると、200°Cで0.65、50°Cでは0.77となった。分光放射率の値が同一であるのに全放射率が温度の変化によって異なるのは、図3.3で分かるように温度の変化によって、おもな放射を行っている波長域が移動するからである。

### 3.2.6 赤外線反射率・透過率測定による赤外線放射率の算出

放射体の赤外線放射率は同じ温度にした黒体の放射量との比較で求めなければならないが、放射体の温度が数十°C以下であると、放射量が少なくなって高感度の測定器が必要となる。人体の皮膚のように測定中に温度が変化するものでは測定はできない。また、常温の放射体では、周囲からの赤外線の反射の影響で、どのような放射率のものであっても放射率は1.0という値に観測されてしまう。

このようなことから、常温あるいはその近辺の温度の放射体の放射率を求める方法として、試料の温度を上げずに、反射率の測定を行って、 $1 - \text{反射率} = \text{吸収率}$ とし、 $\text{吸収率} = \text{放射率}$ の関係を用いて放射率の算出をする方法がある。赤外線を透過させる物質の場合には反射率の測定の他に透過率の測定も行い、 $1 - (\text{反射率} + \text{透過率})$ を吸収率とする。

図3.4はそのようにして求めた分光放射率の一例である。温度を上昇させて測定した分光放射率の値とほとんど同じ測定結果を得ることができる。

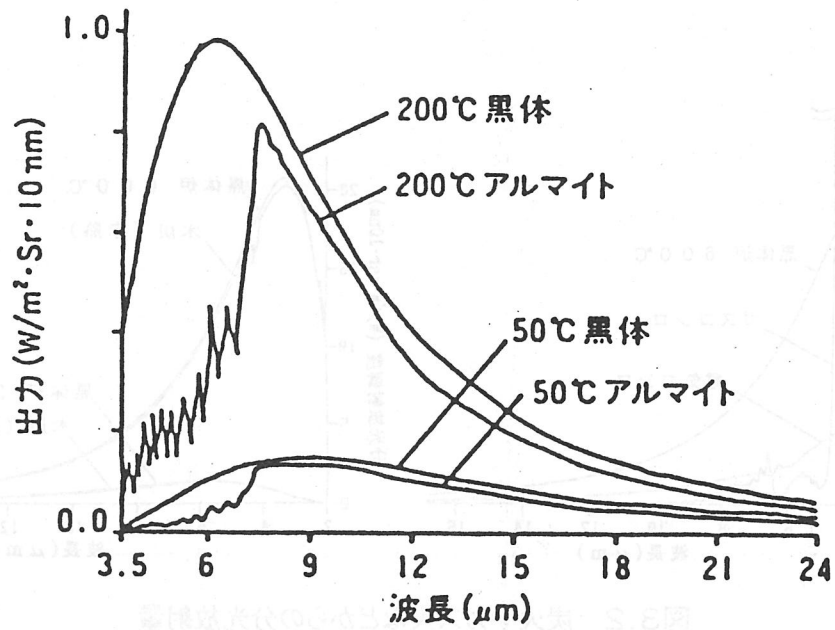


図3.3 アルマイトの分光放射量

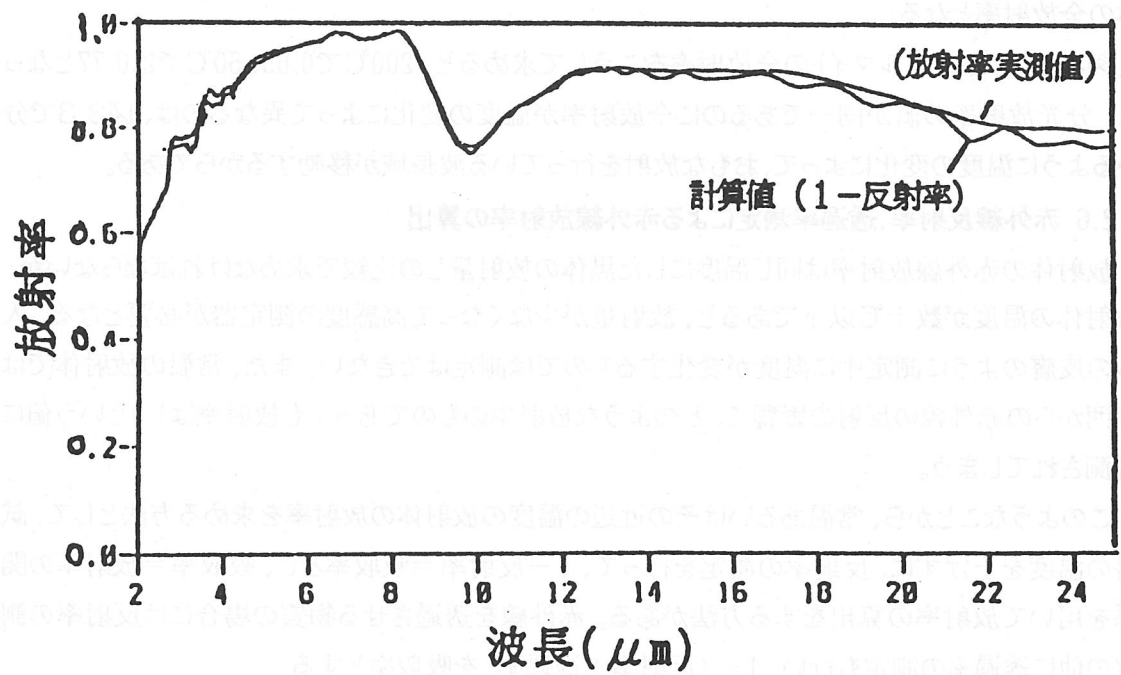


図3.4 反射率から算出した分光放射率の測定例

### 3.3 FT-IR 分光光度計による赤外放射スペクトルの校正技術

#### 3.3.1 赤外分光放射輝度の校正式

航空機や人工衛星等からの地球環境の赤外放射スペクトル測定のため、高分解能の FT-IR 分光光度計が用いられている。そしてその主な目的である“大気温度と湿度探査”では、高精度の温度放射測定(それぞれ、 $0.1^{\circ}\text{C}$ と $1^{\circ}\text{C}$ )が必要とされている。この要求を満たすため、基準として常温(hot)黒体光源と低温(cold)黒体光源を用い、放射測定の校正が飛行中に行われようとしていた。しかし、この方法による予備実験において  $600\text{cm}^{-1} \sim 900\text{cm}^{-1}$  の間等で  $15^{\circ}\text{C}$  位の輝度温度誤差をもたらす校正問題が明らかにされた。このため、H.E. Revercombらは<sup>1)</sup>、hotとcoldの黒体光源を用いた校正において、各分光放射輝度とバックグラウンド放射の差異を複素スペクトルの段階で算出することにより、異常な誤差を除去することができることを示した。問題の原因は、装置自信からの放射輝度(バックグラウンド放射)の位相応答が外部光源からの放射輝度に対する位相応答と異なることに起因するものであった。そして、2つの位相応答の違いをもたらしたメカニズムが干渉計のビームスプリッターからの放射として確認された。以下では、FT-IR 分光光度計における上述のような赤外放射スペクトルの新しい校正技術について簡単に記述する。

H.E. Revercombらによって示された hotと coldの黒体光源を用いる放射輝度校正の関係式の結果は次のようである。今、FT-IR 分光光度計を用いる赤外放射スペクトル測定装置において、その測定系及び光学系の詳細は省略するが、検出器と電子回路等は装置の光学的バンドパスの全波数範囲の入射放射束に対し十分な直線性であると仮定する。この仮定において、装置出力のインターフェログラム  $F$  は、次のように入射の分光放射輝度  $L_{\nu}$  の項で表されることができる。また複素数表示の  $C_{\nu}$  は、(3.2)式によって表される。

$$F(\nu) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} C_{\nu} \exp[i\phi(\nu)] \exp(i2\pi\nu x) d\nu \quad (3.1)$$

$$C_{\nu} = \tilde{F}_{\nu} = R_{\nu} \left\{ L_{\nu} + L_{\nu}^0 \exp[i\phi^0(\nu)] \right\} \exp[i\phi(\nu)] \quad (3.2)$$

ただし、 $x$  : 光路差  $\nu$  = 波数

$\phi(\nu)$  : 装置の光学系と電気系の組み合わせ等における普通の位相応答

$\phi^0(\nu)$  : バックグラウンド放射等における異常な位相応答

$R_{\nu}$  : 装置の分光応答度

$L_{\nu}^0$  : 装置の分光放射輝度(バックグラウンド放射)

$\cdot$  : 複素フーリエ変換記号

(3.2)式は、未校正スペクトル  $C_{\nu}$  と分光放射輝度  $L_{\nu}$  との直線関係を表している。(2)式を hot と cold の黒体光源について書き換えた結果を用い、次の2つの差スペクトルが得られる。



$$C_v - C_{cv} = R_v [L_v - B_v(T_c)] \exp [i \phi (v)] \quad (3.3)$$

$$C_{hv} - C_{cv} = R_v [B_v(T_h) - B_v(T_c)] \exp [i \phi (v)] \quad (3.4)$$

ここで  $B_v$  はプランクの黒体放射輝度に対応し、足字の c、h はそれぞれ hot と cold の黒体光源に関係づけて示している。また装置の分光応答度  $R_v$  と装置の分光放射輝度(バックグラウンド放射)  $L_v^0$  の関係は、(3.3)式、(3.4)式より、各々、次式のように表される。

$$R_v = |C_{hv} - C_{cv}| / [B_{hv}(T_h) - B_v(T_c)] \quad (3.5)$$

$$L_v^0 \exp [i \phi^0 (v)] = C_{hv} \exp [-i \phi (v)] / R_v - B_v(T_c) \quad (3.6)$$

この式において、装置の分光応答度  $R$  は実関数であるが、装置の分光放射輝度(バックグラウンド放射)  $L_v^0$  は複素数である。最終的には、(3.3)式、(3.4)式の比を取ることで、赤外放射スペクトルの校正式は、次の(3.7)式で表される。

$$L_v = \text{Re} [(C_v - C_{cv}) / (C_{hv} - C_{cv})] [B_v(T_h) - B_v(T_c)] + B_v(T_c) \quad (3.7)$$

このように、上記の関係式は、その他の FT-IR 分光光度計を用いた微弱赤外分光放射測定装置についても密接に関係する重要な校正式と考えられる。

### 3.3.2 装置自己放射の補足

FT-IR 分光光度計による分光放射輝度測定において既に報告されているように<sup>1)、2)</sup>、装置内部における熱放射(バックグラウンド放射)は、入射ポート(開口、ミラー、窓板等)からの放射成分、検出器ポート(ミラー、フィルター、検出素子等)からの放射成分、及びビームスプリッタから放射されると推測される成分から成っている。このような FT-IR 分光光度計からの変調された熱放射を理解するため、ショート・ダブルサイド・インターフェログラムと無位相補正インターフェログラムのフーリエ変換によってもたらされる複素数スペクトルについての考察が報告されている<sup>2)、3)</sup>。それによると、上述の3つの熱放射成分は、以下のような異なった位相を有する装置自己放射に寄与する:

- (1) 外部(測定対象)光源からの変調された放射と同じ位相をもつ入射ポートの光学素子からの放射成分。この放射に対する検出器での強度  $I_b$  は、干渉計における光路差  $x$  の関数として次式のように示される。

$$I_b(x, v) \sim 2 |r t|^2 [1 + \cos(2 \pi v x)] \quad (3.8)$$

$r$  と  $t$  は、各々、ビームスプリッタの反射に対する振幅と透過に対する振幅であり、 $\nu$  は波数である。実際には、変調された項のみがインターフェログラムとして検出され、定常項は、ビームスプリッタ、電気系回路等によって抑制される。そして複素フーリエ変換は、正の実数スペクトル  $S_0$  をもたらす。

- (2) 検出器ポートの光学素子からの放射がビームスプリッタの方へ放射され、次に干渉計において変調された後に検出器へ戻される成分(アンバランス放射成分)。この放射に対する位相は、 $x = 0$  に対し入射ポートの放射から  $\pi$  だけ異なり、対応する強度  $I_u$  は次式のように示される。

$$I_u(x, \nu) \sim |r|^2 + |t|^2 - |r|^2 |t|^2 \cos(2\pi \nu x) \quad (3.9)$$

そして複素フーリエ変換は負の実数スペクトル  $S_u$  をもたらす。

- (3) ビームスプリッタ内の体積放射(放射率  $\epsilon_{bs}$ )と推察されている  $\sin$  波変調の放射成分<sup>1)</sup>、<sup>2)</sup>。この放射成分に対する位相は、 $x = 0$  に対し入射ポートの放射から  $\pi/2$  だけ異なり、対応する強度  $I_i$  は次式のように示される。

$$I_i(x, \nu) \sim \epsilon_{bs} [1 + |t|^2 + |r|^2 - 4|r|t| / \pi \sin(2\pi \nu x)] \quad (3.10)$$

そして正の光路差  $x$  の定義に依存する符号で、純粹に虚数のスペクトル  $S_i$  をもたらす。

図3. 5は<sup>3)</sup>、固定波数  $\nu$  において、複素平面での両側インターフェログラムの複素フーリエ変換  $S(\nu)$  とそのスペクトル成分をベクトル表示で示している。これらのスペクトル成分の各々は装置の位相応答  $\phi$  だけ回転されている(図3. 5)。この位相シフトは、普通は光路差ゼロ( $x = 0$ ) に対する読みとり誤差等によるものである。スペクトル  $S_0$ 、 $S_u$ 、 $S_i$  の3成分の合成スペクトルは、装置の変調された熱的自己放射スペクトル  $S_s$  として表される。

この自己放射  $S_s$  のため、FT-IR 分光光度計は、測定対象の外部光源から入射する放射スペクトル成分  $S_e$  のみではなく、位相応答  $\phi_m$  を有し、複素スペクトル  $S$  と称する  $S_e$  と  $S_t$  の合成スペクトルを検出する。測定された  $\phi_m$  は、 $S_0$  と  $S_u$  によって装置の位相応答  $\phi$  から異なる。次式のような位相補正<sup>4)</sup> は、複素スペクトル  $S$  の量  $S$  をもたらす。

$$S(\nu) = S(\nu) \exp[-i\phi_m(\nu)] \quad (3.11)$$

長い光路差範囲での片側インターフェログラムに対し、 $\phi_m$  は波数  $\nu$  に対しゆるやかな変化の関数でなければならない。

もし量  $S_u > S_b$  で、外部放射光源からの入力放射強度が安定に減少していくとすると、測定されるスペクトル値  $S$  は、(3.12)式のように入力放射  $S_e$  と入力(または入射)ポートからの放射量  $S_b$  が  $S_u$  と等価であるとき、最小値を通る。

$$S_e + S_b = S_u \quad (3.12)$$

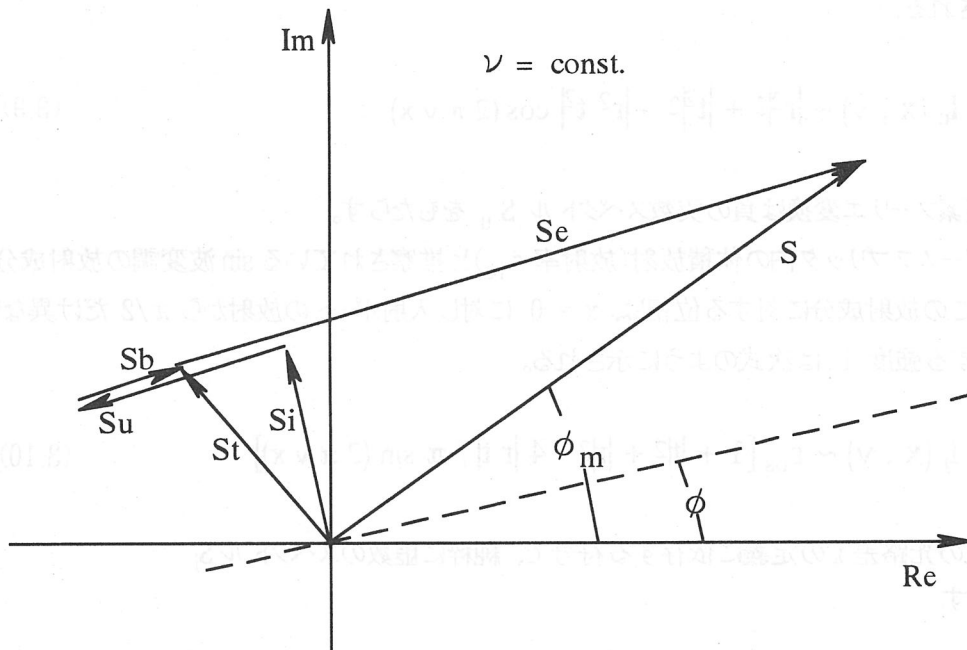


図3.5 固定波数 $\nu$ で、複素平面における両側インターフェログラムの複素フーリエ変換  $S(\nu)$  とそのスペクトル成分のベクトル表示。

- $S_b$  : 入力ポートからの(balanced)放射の複素スペクトル。
- $S_u$  : 検出器ポートからの(unbalanced)放射の複素スペクトル。
- $S_t$  : ビームスプリッタから発生すると仮定される放射の複素スペクトル。
- $S_e$  : 外部光源からの入力放射の複素スペクトル。
- $S$  : 結果として生ずる複素スペクトル。
- $\phi_m$  : 検出されたスペクトル  $S$  の位相応答。
- $\phi$  : 装置の位相応答(differential phase)。

そして  $S_e$  がまだ減少中であっても、(3.11)式で記述した位相補正とともに得られる複素スペクトル  $S$  の量  $S$  はこの最小値を通過の後、上昇すると推測される。また、もし各スペクトル成分において(3.13)式の関係が満足される場合、

$$S_i \ll S_e + S_b - S_u \quad (3.13)$$

測定される位相応答  $\phi_m$  は入力放射と無関係となり、そして装置の位相応答  $\phi$  の値に近くなる。

更に、J.Schreiber et. al. らは<sup>3)</sup>、上記のような理論的考察とともに、液体窒素温度と室温の間で作動する黒体型放射光源を試作し、FT-IR 分光光度計における熱的自己放射によって生じる効果を実験的にも実証した。これらの研究結果の報告は、FT-IR 分光光度計における微弱赤外放射の精密校正技術において非常に重要な意味をもつと考えられる。

### 参考文献

- 1) H.E.Revercomb, H. Buijs, H. B. Howell, D. D. LaPorte, W. L. Smith, and L. Sromovsky, "Radiometric calibration of IR Fourier transform spectrometers: solution to a problem with the high-resolution interferometer sounder", Appl. Opt. 27, 3210-3218 (1988).
- 2) C. Weddigen, C. E. Blom, and M. Hopfner: "Phase correction for the emission sounder MIPAS-FT", Appl. Opt. , 32, 4586-4589(1993).
- 3) J. Schreiber, T. Blumenstock, and H.Fischer: "Effects of the self-emission of an IR Fourier-transform spectrometer on measured absorption spectra", Appl. Opt., 35, 6203-6209(1996).
- 4) P.R.Griffiths and J.A. de Haseth, Fourier Transform Infrared Spectrometry (Wiley, New York, 1986) pp.93-120.

## 第4章 赤外線応用計測(サーモグラフィ)装置の性能とその応用事例

### 4.1 サーモグラフィ装置の性能と種類

#### 4.1.1 サーモグラフィ装置の基本構成と性能

サーモグラフィ装置は基本的には光学系と赤外線センサで構成されており、さらに、走査機構を組み合わせたものである。その走査方式には機械的走査と電氣的走査があり、装置の機能を大きく左右する。

従来のサーモグラフィ装置は図4.1に示すように、赤外線センサに単素子を用いて、光学系(ミラーやプリズム、他)で機械的に走査するタイプが主流となっていた。一方、近年の目覚ましい赤外線センサの開発により、単素子から一次元アレイに、さらに、二次元アレイに移行しつつある。また、S/Nを改善するためTDI(Time Delay and Integration)走査をセンサ内で行うSPRITE(Signal Processing in The Array)型のセンサやPtSiやInSbのFPA(Focal Plane Arrays)いわゆる二次元アレイも実用化されている。

一方、サーモグラフィの主な性能指標として測定温度範囲、最小検知温度差、最小検知寸法、水平解像度、視野角、走査線数、フレームタイム等が挙げられる。とくに、最小検知温度差 NETD(Noise Equivalent Temperature Difference)はサーモグラフィ装置の光学系や回路系を含めた総合感度指数として次式のように表される。

$$NETD = \Delta T / (S/N) \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (4.1)$$

上式に示すように、NETDは装置のS/Nが1となる対象物の温度差 $\Delta T$ で表され、装置の温度分解能を示す。したがって、赤外線センサの種類によってNETDが異ってくる。例えば、図4.2に示すように、短波長のセンサ素子(InSb)は長波長のセンサ素子(HgCdTe)と比較してNETDは低い。

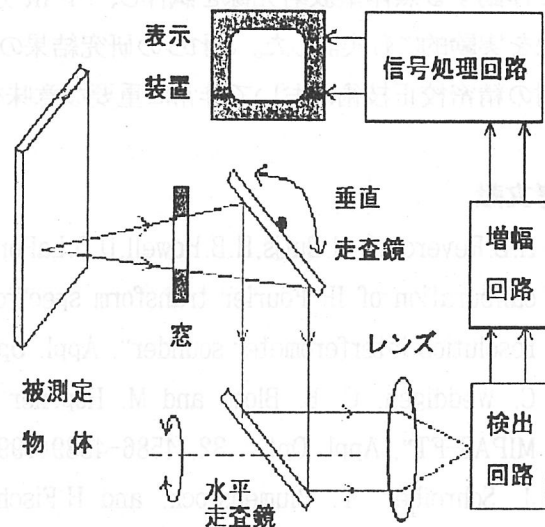


図4.1 赤外線検出部の概略構成図

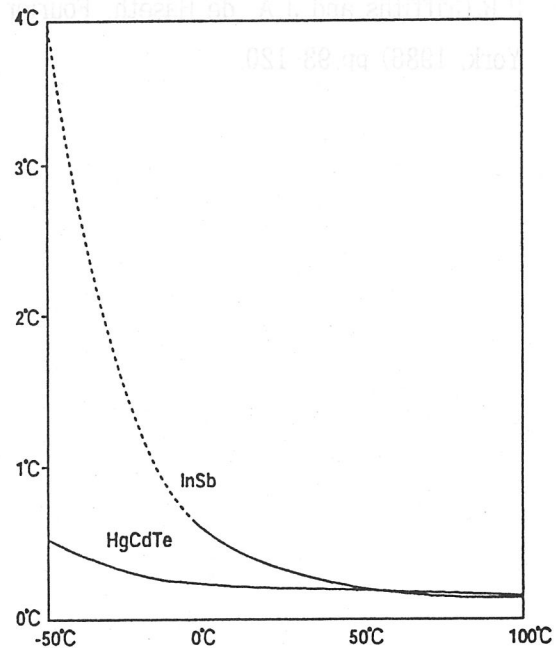


図4.2 長波長、短波長の最小検知温度差

#### 4.1.2 サーモグラフィ装置の種類

##### (1) 測定方式

サーモグラフィ装置の測定方式には、事前に放射されている赤外線エネルギーを測定するパッシブ方式と外部から熱や力を加えて測定するアクティブ方式がある。パッシブ方式は主にITS、火災監視、火山監視、電力設備診断、敷地内進入監視、密魚監視、ごみピット火災監視用として利用されている。

一方アクティブ方式はセラミックのクラックや内部欠陥の検出、建造物の外壁剥離診断、トンネル診断、配管からのガス漏れ検出等に利用されている。

##### (2) 赤外線センサ

赤外線を検出するセンサには、量子型センサと熱型センサ大別される。量子型センサはInSb、InAs、HgCdTe、PbSe等が使用され、応答速度が速く、感度が極めて良い特長を有している。なお、検出特性に波長依存性があり、冷却が必要である。

一方、熱型センサはボロメータ、焦電素子、サーモパイル等が使用され応答速度が遅く、感度が低い、波長依存性が少なく、冷却が不要である。

##### (3) 冷却方式

サーモグラフィ装置には、赤外線センサを冷却する方式と非冷却方式がある。冷却方式には、表4.1に示すような手法が使用されている。

一方、非冷却(室温、約300K)方式では、熱型センサのマイクロボロメータやフェロエレクトリックを使用し、室温にて使用できる大きな特長を有する。

##### (4) 用途別

サーモグラフィ装置を用途別に分類すると表4.2に示すように4種類に大別できる。

表4.1 赤外線センサの冷却方法

液体窒素 (-196℃、77K)	液体窒素をデュワー瓶に注いで直接冷却する
ジュールトムソクライオスタツ (-186℃、87K)	高圧アルゴンを冷却媒体として、ジュールトムソン効果を利用して液化冷却する
電子冷却 (約-80℃、約200K)	電子冷却器(ペルチェ素子)を用いて冷却する
スターリングクーラ (-196℃、77K)	コンプレッサによりヘリウムガスの断熱膨張を利用して冷却する

表4.2 サーモグラフィの用途別区分

温度測定機能を備えたもの	定量温度データ測定や温度スケールを目安値として使用
温度スケールを持たないもの	白黒輝度やカラー分布のみで表示し、定性的な測定に使用、
超高感度／高速計測の性能を持ったもの	微小な温度分布や高速現象の測定に使用
多波長／波長選択の性能を備えたもの	材料の分光放射率に合わせて測定に使用。

## 4.2 サーモグラフィ装置の課題と対策

### 4.2.1 誤差の影響とその対策

サーモグラフィ装置は他の接触式温度測定装置と比較して誤差を生ずる要因が多い。

とくに、低温領域では、被測定物体の放射率、背景雑音、伝搬経路での吸収散乱装置の安定度が大きく影響する。

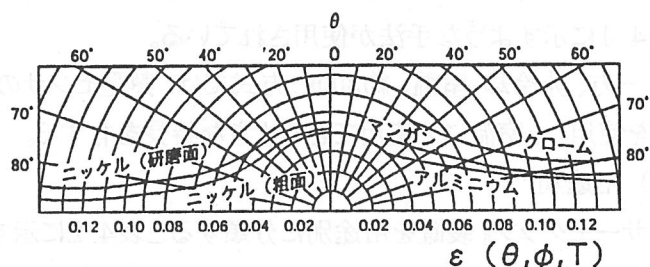
#### (1) 放射率の補正

放射率は被測定物体の表面状態、形状、あるいは、波長や温度の影響を受ける。したがって、真の温度を測定するには、放射率の補正が必要となる。

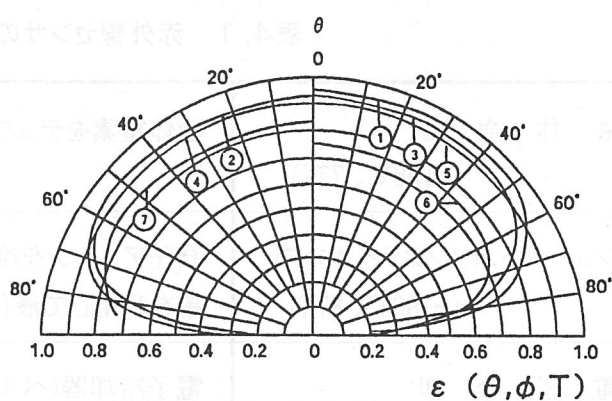
また、放射率の補正には、図4.3に示すように、被測定物体の物理定数の調査、被測定物体と黒体との放射エネルギー比の測定、あるいは、図4.4に示すように、被測定対象物と既知対象物の温度の比較が必要である。

#### (2) 背景雑音

被測定物体を屋外で測定する場合、



(a) 金属の指向放射率



- ① 湿った氷    ② 木材    ③ ガラス
- ④ 紙          ⑤ 粘土    ⑥ 酸化銅
- ⑦ 酸化アルミニウム

(b) 電気絶縁体の指向放射率

図4.3 放射率の指向特性

図4.5に示すように、太陽光の直射、反射、あるいは、天空の散乱光が、また、屋内でも周辺の物体からの迷光、反射光が背景雑音として影響を与える場合がある。

その対策として、被測定物体以外の光を遮蔽する。なお、太陽光のような場合、バンドパスフィルタ(BPF)を使用したり、長波長のセンサを使用したりする。

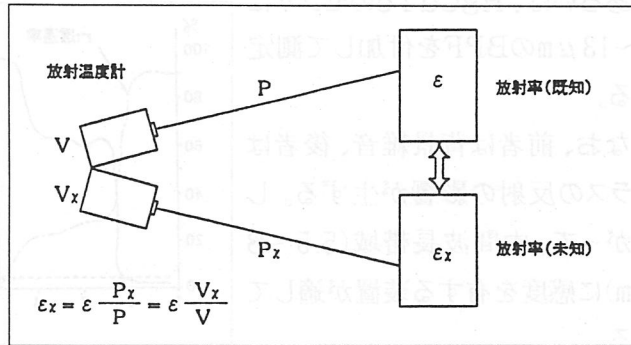


図4.4 放射率の測定

(3) 伝搬経路の吸収

大気中を通過する赤外線吸収には水蒸気(H<sub>2</sub>O)、炭酸ガス(CO<sub>2</sub>)、オゾン(O<sub>3</sub>)、一酸化炭素(CO)、亜酸化チツソ(N<sub>2</sub>O)、メタン(CH<sub>4</sub>)等がある。

とくに、その対策として、BPF(水蒸気の場合:8~12 μm)を使用する(図5.5参照)。なお、塵埃の影響が無視出来ない場合があり、環境を十分考慮する必要がある。

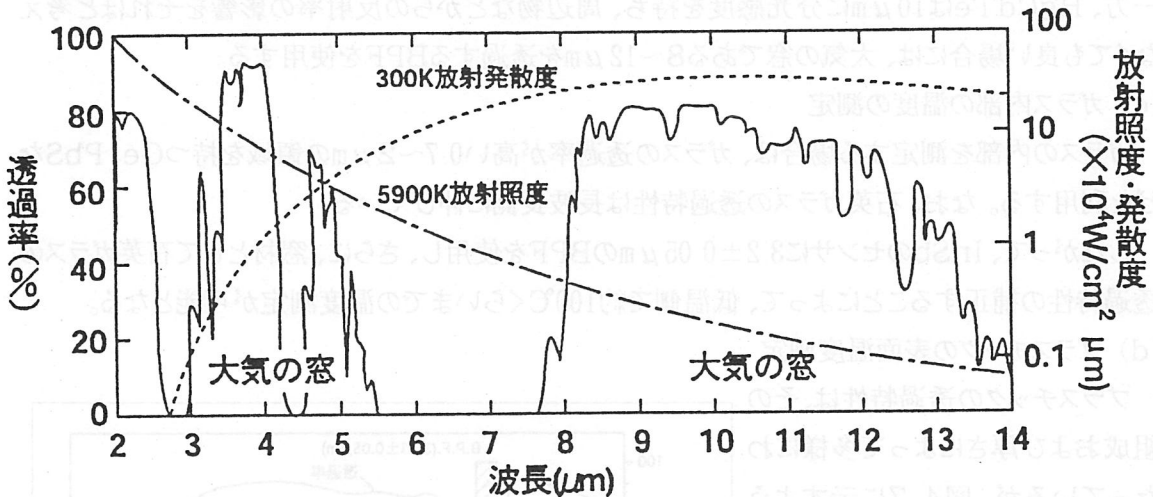


図4.5 大気の透過率、太陽の放射照度、地表面の放射発散度

4.2.2 ガラス等の表面温度の測定とその対策

(1) ガラスの透過率、放射率、反射率

一般に、ガラスは可視光(0.3~0.7 μm)を透過するが、図4.6に示すように、約2 μm付近より透過率が下がり、4.7 μm以上では透過しなくなる。また、反射率は8~13 μmで増加する。したがって、ガラスの表面温度の測定には、InSbのセンサに4.8~5.2 μmのBPFを付加する。



あるいは、HgCdTeのセンサに8~13 $\mu\text{m}$ のBPFを付加して測定する。

なお、前者は背景雑音、後者はガラスの反射の影響が生ずる。したがって、中間波長帯域(5.5~8 $\mu\text{m}$ )に感度を有する装置が適している。

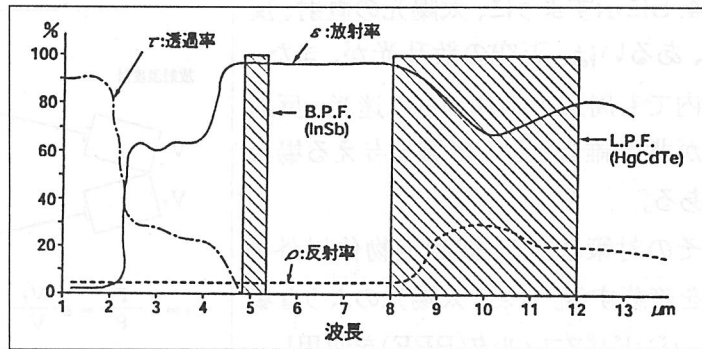


図4.6 ガラスの透過率、放射率、反射率

また、その場合、大気の水蒸気の吸収帯に相当するため赤外線

の減水が生ずるため気温、湿度、および、測定距離を基にして補正する必要がある。

(b) ガラスの表面温度の測定

ガラスの表面温度の測定については、放射率の高い約4.8~12 $\mu\text{m}$ の波長を検出するセンサを使用すれば可能である。なお、センサの分光感度、大気の吸収を考慮に入れると次の2種類に分けられる。

InSbは4.7 $\mu\text{m}$ に分光感度のピークを持ち、長波長側は5~6 $\mu\text{m}$ でカットしている。この為ガラスの影響の出ない4.8~5.2 $\mu\text{m}$ のBPFを使用すればガラス表面の温度の測定が可能となる。一方、HgCdTeは10 $\mu\text{m}$ に分光感度を持ち、周辺物などからの反射率の影響をそれほど考えなくても良い場合には、大気の窓である8~12 $\mu\text{m}$ を透過するBPFを使用する。

(c) ガラス内部の温度の測定

ガラスの内部を測定する場合は、ガラスの透過率が高い0.7~2 $\mu\text{m}$ の領域を持つGe、PbSなどを利用する。なお、石英ガラスの透過特性は長波長側に伸びている。

したがって、InSbのセンサに3.2 $\pm$ 0.05 $\mu\text{m}$ のBPFを使用し、さらに、窓材として石英ガラスの透過特性の補正することによって、低温側で約100 $^{\circ}\text{C}$ くらいまでの温度測定が可能となる。

(d) プラスチックの表面温度測定

プラスチックの透過特性は、その組成および厚さによって多様にとわっているが、図4.7に示すようある波長において、その透過特性がほとんど零になる帯域がある。

そしてその帯域で反射率も零であるならば、放射率は1と考えられるので背景の影響なしにプラスチックの表面温度の測定が可能である。

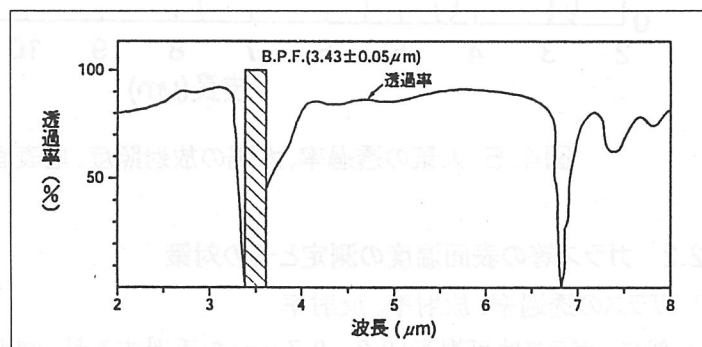


図4.7 プラスチックの透過特性

(e) 炎の温度測定

一般に物が燃焼する時には、炭酸ガス(CO<sub>2</sub>)が生成されるので炭酸ガスの放射(吸収)する波長帯を検出できるセンサを使用すれば、測温が可能であるが、炭酸ガスの放射(吸収)帯の4.25 μmのBPFを使用して放射温度計を設計すると、炎の温度は実際より低く指示してしまう。

この要因は図4.8に示すように、炭酸ガスよ放射された4.25 μmのエネルギーが炎と放射温度計との間にある室温の炭酸ガスによって吸収される為である。その為、室温の炭酸ガスの吸収と重なり合わない部分(4.5 ± 0.05 μm)に検出感度のある放射温度計を設計すれば、光炉中の炭酸ガスに吸収されずに放射温度計に達するので測温が可能となる。

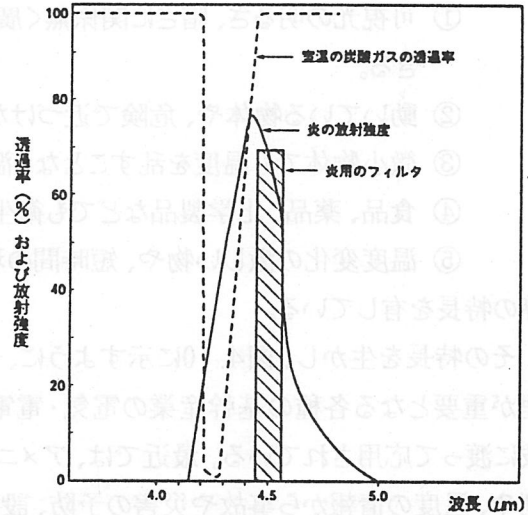


図4.8 炎の放射強度と炭酸ガスの透過特性

(f) 薄膜の温度測定

薄膜で、黒体条件を得ることができない場合は、図4.9に示すように、薄膜を通じて黒体を観測する。ただし、薄膜の反射率が充分小さいことが必要である。

薄膜の温度をTs、放射率をε、透過率をτ、黒体の温度をTbとすると、薄膜を通じて、黒体炉をみると検出器に入るエネルギーは

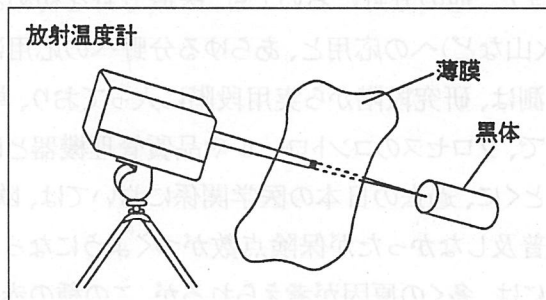


図4.9 薄膜を通した黒体の測定

$$E_1 = (\epsilon \sigma T_s^n + \tau \sigma T_b^n) K$$

$$= \{ \epsilon \sigma T_s^n + (1 - \epsilon) \sigma T_b^n \} K \quad (4.2)$$

一方、黒体そのものをみた時のエネルギーは

$$E_2 = \tau \sigma T_b^n \cdot K \quad \text{ただし、} K: \text{定数} \quad (4.3)$$

したがって、放射温度計で両者を測定した時、同じ針の振れになるように黒体の温度を零位法(Zero-Method)で制御することによって

$$E_1 = E_2 \quad \therefore T_s = T_b \quad (4.4)$$

つまり、その時の黒体の温度が薄膜の温度を測定することが可能となる。

### 4.3 サーモグラフィ装置の応用事例

#### 4.3.1 サーモグラフィ装置の応用分野

赤外線を利用したサーモグラフィ装置は

- ① 可視光の明るさ、暗さに関係無く広い範囲の表面温度の分布を相対的に比較できる。
- ② 動いている物体や、危険で近づけない物でもリアルタイムで温度測定ができる。
- ③ 微小物体でも温度を乱すことなく温度計測できる。
- ④ 食品、薬品、化学製品などでも衛生的に温度計測できる。
- ⑤ 温度変化の激しい物や、短時間の現象でも温度計測ができる。

等の特長を有している。

その特長を生かし、図4.10に示すように、工業関係でも「省エネルギー」を初めとして熱管理が重要となる各種の基幹産業の電気・電電力産業、自動車産業、機械や化学関係など、多岐に渡って応用されている。最近では、アメニティを追求するための官公庁においては、環境計測や、温度の情報から事故や災害の予防、設備の診断、建築・土木における建造物の欠陥や変状の診断においても注目されている。

また、他の分野においても、医療分野を初めとし、教育・研究での気象、農業、林業、自然界（火山など）への応用と、あらゆる分野への応用は広がりつつある。今や赤外線を利用した温度計測は、研究段階から実用段階に入っており、単なる温度測定のみならず、コンピュータとの併用で、プロセスのコントロールや品質管理機器として使用されるようになってきている。

とくに、過去の日本の医学関係においては、欧米諸国のように人体のサーモグラムによる診断は普及しなかったが保険点数がつくようになってからは着実に浸透してきた。この分野への普及には、多くの原因が考えられるが、この種の赤外線応用には、同じ電磁波の仲間であるX線やγ線のような危険性が全く無いという基本的なところもその大きな原因の一つになっている。

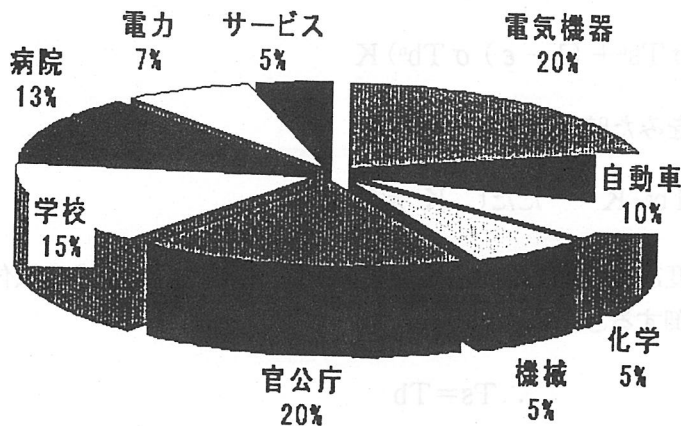


図4.10 サーモグラフィの主な応用分野とその割合

### 4.3.2 温度分布の測定、評価への応用例

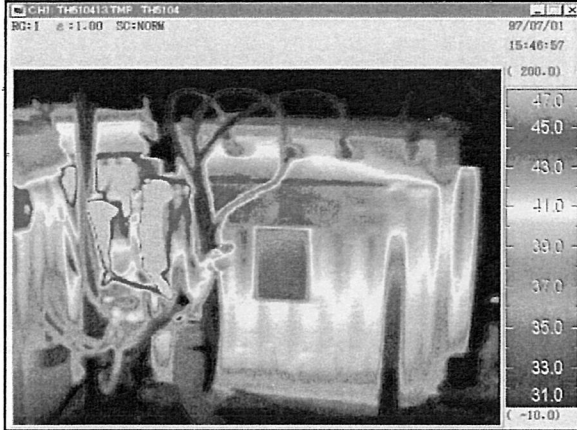


図4.11 電源トランスの表面温度



図4.12 電源配電盤の表面温度

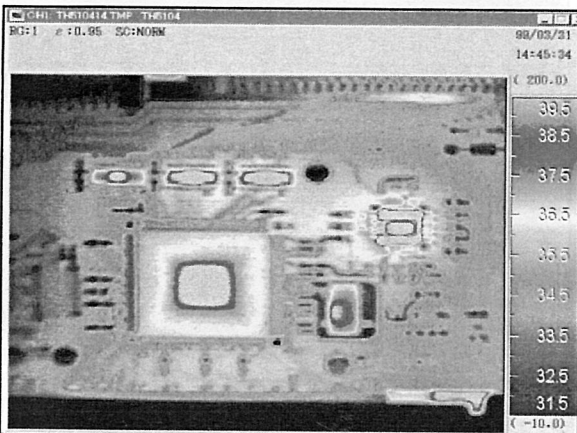


図4.13 プリント配線板表面の温度

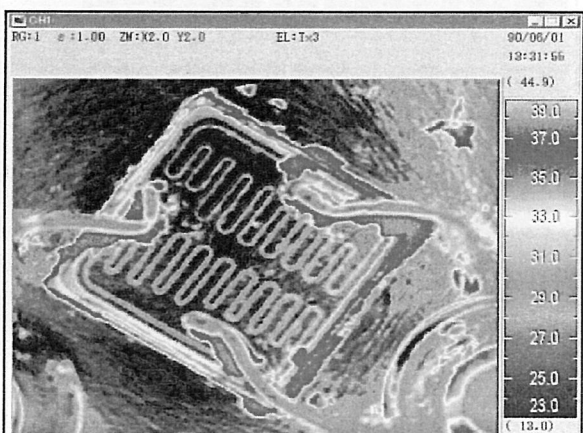


図4.14 ICチップの表面温度分布

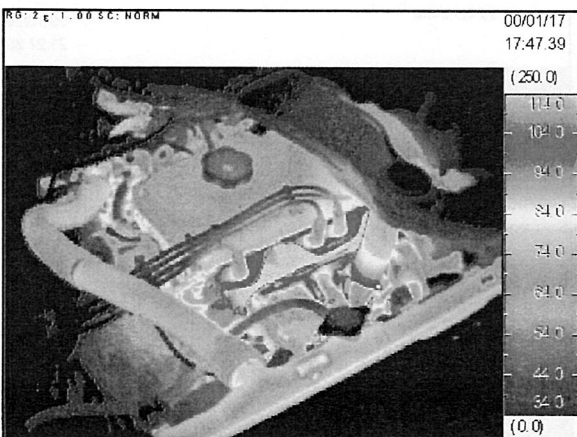


図4.15 自動車エンジンの表面温度

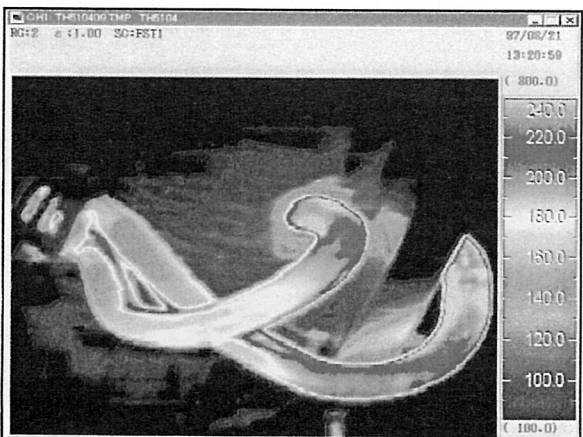


図4.16 二輪車のマフラーの表面温度



図4.17 溶鉱炉の炉壁の表面温度

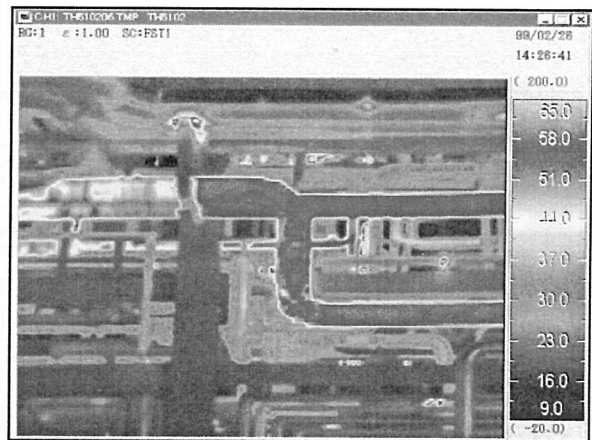


図4.18 配管の表面温度

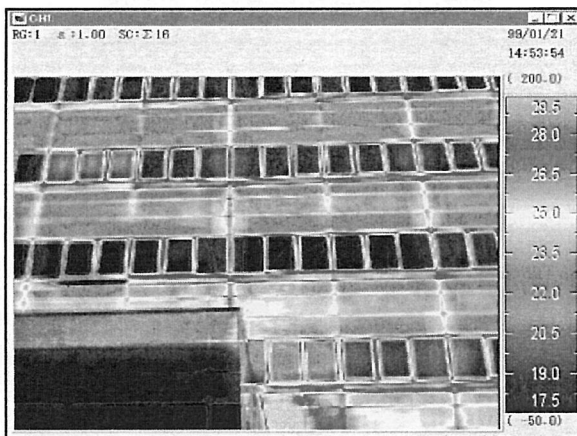


図4.19 建築物の表面温度

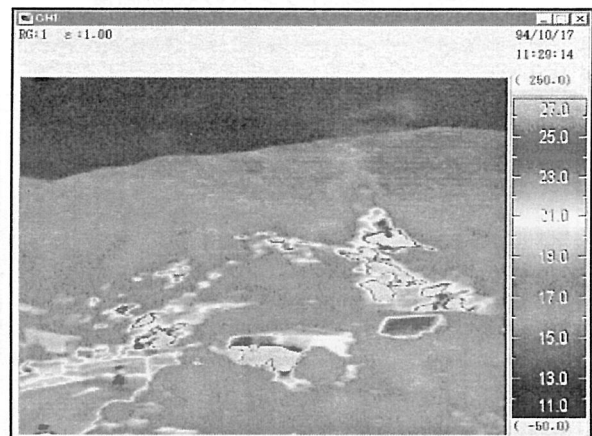


図4.20 地表の表面温度

### 4.3.3 診断、監視への応用例

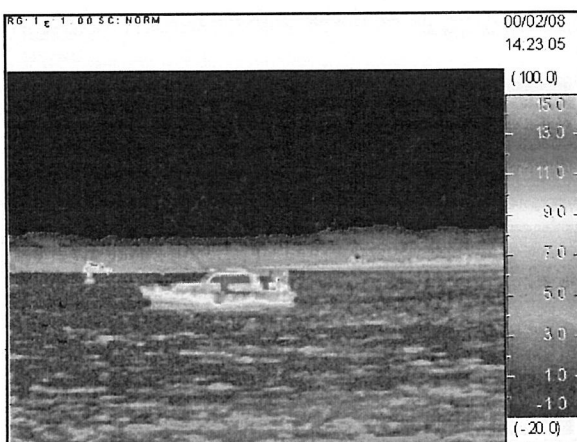


図4.21 海上監視

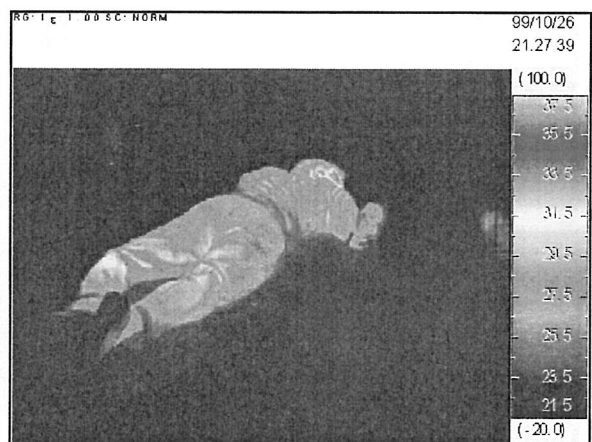
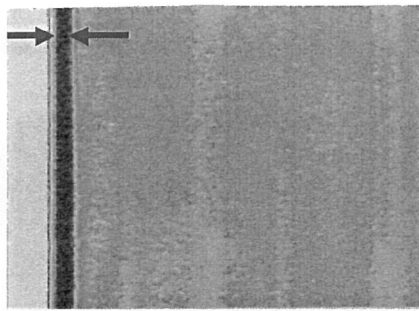
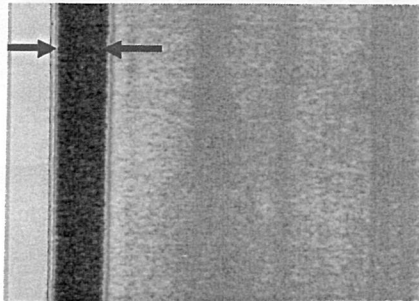


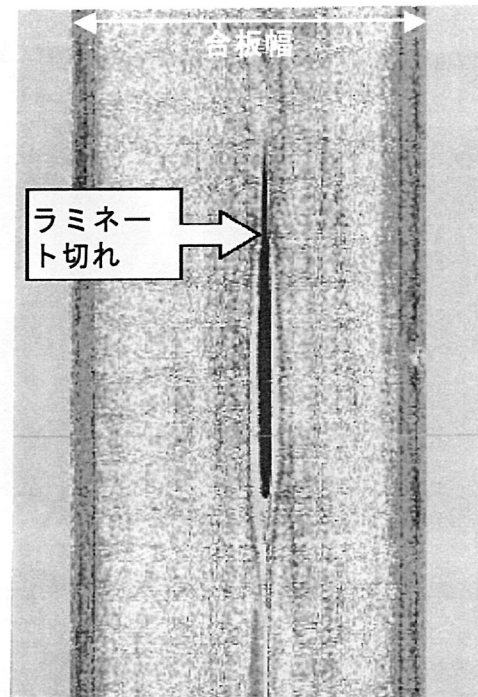
図4.22 人命救助



(a) 正常なラミネート幅の熱画像



(b) ラミネート幅の狭い不良状態



(c) ラミネート切れの熱画像

図4.23 ラミネート加工診断

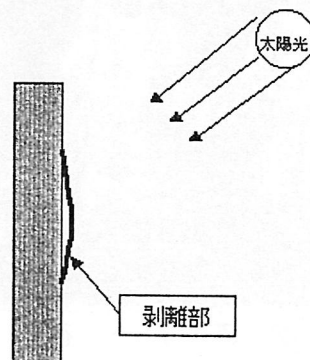
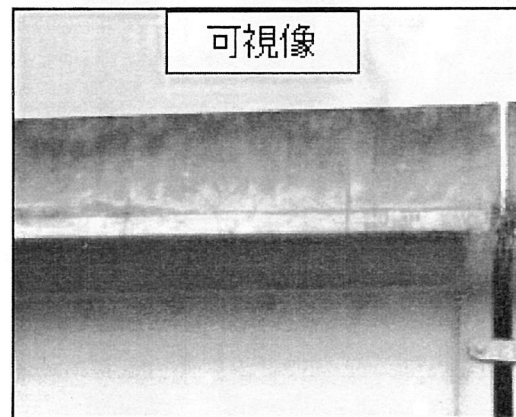
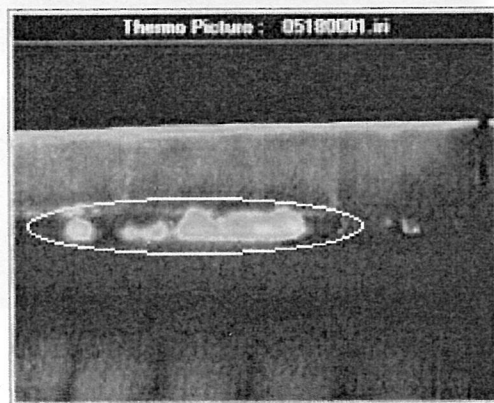
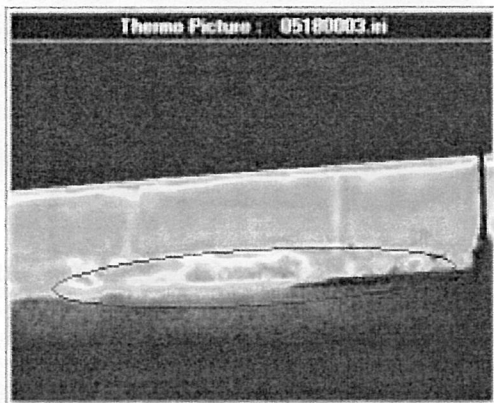
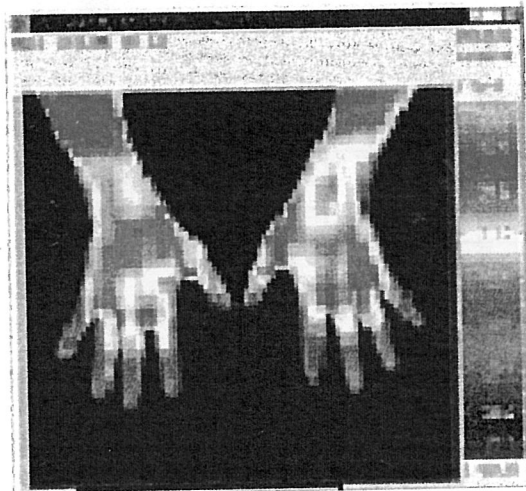
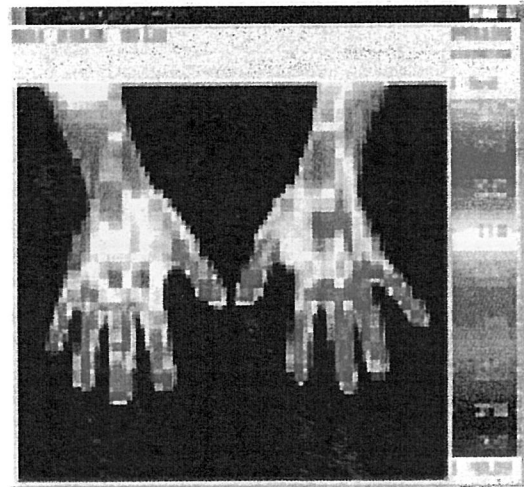


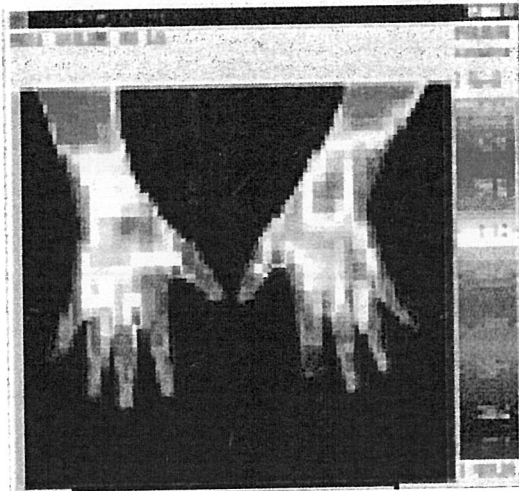
図4.24 道路橋高欄部剥離診断



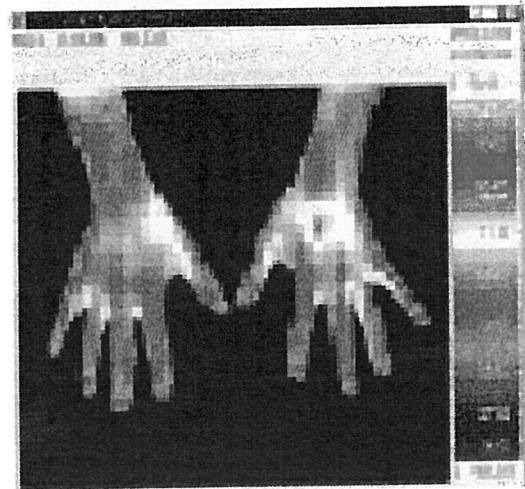
喫煙前



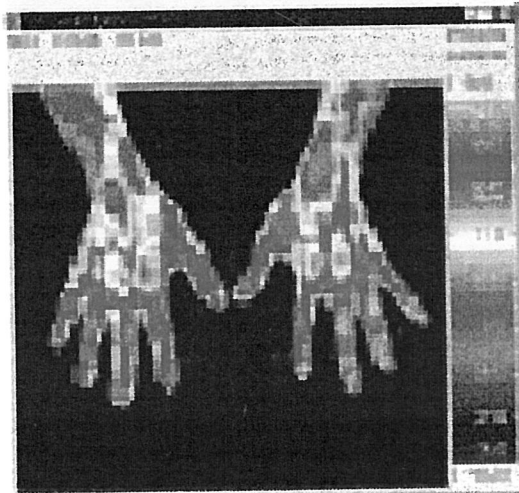
喫煙前



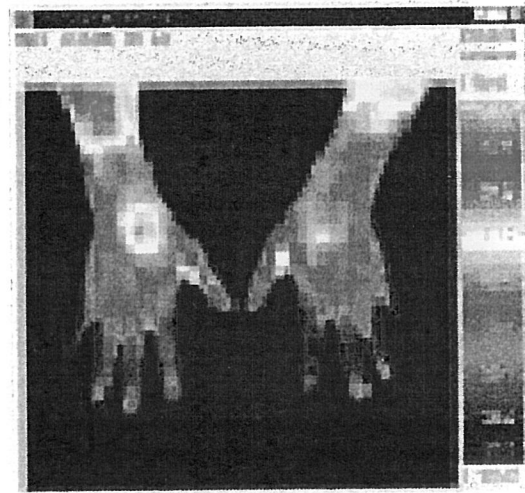
喫煙直後



喫煙直後



喫煙5分後



喫煙5分後

(a) 喫煙常習者

(b) 喫煙非常習者

図4.25 喫煙による自律神経系の診断



図4.26 投薬効果の診断

参考資料(赤外放射に関する公開講演会資料)

- (1) NEC三栄技術レポート「赤外計測の基礎」
- (2) NEC三栄「赤外放射温度計」プロモーションCD
- (3) 日本アビオニクス「赤外線サーモグラフィ装置の測定事例」
- (4) 日本アビオニクス「赤外線サーモグラフィによる非破壊検査」



## 第5章 赤外放射源の分類に関する考察ならびに赤外放射伝熱に関する シミュレーション解析

### 5.1 赤外放射源の分類に関する考察

赤外放射源には様々な種類があり、照明用、加熱用、分光機器用光源から各種のレーザー光源まで幅広い応用分野に亘っているが、ここでは特に赤外加熱に用いられているものを取り上げ、それらが現在どのような分類によって位置づけられており、またそのような分類が関連分野においてどのような問題や生じているかを調査した結果を述べる。

#### 5.1.1 我が国の現状

赤外加熱用放射源は通常我が国では、近赤外ヒーター（赤外電球を含む）と遠赤外ヒーターとに分けられている。この両者を区別する境界の波長や、それぞれの波長域に占める放射エネルギーの割合についてどう評価するかといった点について、統一された定義があったわけではないのだが、実用上問題なく区別されているとよい。

実際に用いられている近赤外ヒーターは、透明石英管にタングステンフィラメントが封入されたタイプのものであり、フィラメントを高温に熱することにより波長1から2  $\mu\text{m}$ の狭い波長域でほとんどのエネルギーを放射するのに対し、大多数の遠赤外ヒーターはその表面がセラミック材質で構成されており、これをいろいろな温度に加熱することにより、波長3から30  $\mu\text{m}$ の広い幅に亘ってエネルギーを放射するという違いがあり、見掛け上近赤外と遠赤外のどちらに帰属させるべきか判断に迷うような放射源は存在していないからである。

遠赤外ヒーターに高出力を期待する場合、その表面温度を600 $^{\circ}\text{C}$ 、耐熱設計されている特別なヒーターの場合には900 $^{\circ}\text{C}$ といった条件で用いることがあり、その際は波長が3  $\mu\text{m}$ 以下の放射エネルギーもかなり含まれるのであるが、放射エネルギーの大半は3  $\mu\text{m}$ 以上の領域で放出されていることは承知されている。従ってこのような比較的高い温度域での使用に対しても、「このヒーターはいま遠赤外ヒーターとして使ってはいない」というようないい方は当然しない。

#### 5.1.2 欧州の状況と EC 国際電気技術委員会

我が国ではかなり以前から、熱的にセンシブルな材料を扱う効率的な低温加熱・乾燥技術として遠赤外加熱の効用が認められ、従来の近赤外加熱とは差別化されたシステムとして、遠赤外加熱技術が欧米とは異なる独自の発展を遂げている。

一方欧州では赤外加熱用には以前から専ら近赤外ヒーターが用いられており、遠赤外ヒーターに関しては、その効果、特長が正しく理解されていないためか、あまり関心を持たれていないようである。従って、赤外加熱やそのヒーターに関する定義、決め方も近赤外ヒーターを基準として、その延長に遠赤外ヒーターを位置づけた形として構築されており、それが EC の用語の中の赤外加熱に関する個所に示されている。しかしその内容には、後で詳述するように、遠赤外加熱の立場からみるといろいろと問題点があると言わざるを得ない。

I EC は電気技術についての標準化などに関わっている国際的な機関ではあるが、欧州中心で

運営されてきたという経緯もあり、これ迄我が国ではあまりこれを重視するという姿勢がなく、用語などの細かな内容まで関心が払われなかったというのが実状のようである。

### 5 1 3 赤外加熱に関する EC の用語とその問題点

#### ①長波長赤外放射／中波長赤外放射／短波長赤外放射

I EC 用語では長波長赤外放射あるいは遠赤外放射を「放射の単色成分の波長が4  $\mu\text{m}$ 以上であるような赤外放射」と定めている。同様に中波長赤外放射(中赤外放射)は「2  $\mu\text{m}$ 以上、4  $\mu\text{m}$ 以下」と、短波長赤外放射(近赤外放射)は「2  $\mu\text{m}$ 以下」としている。

いわゆる近赤外ヒーターは2  $\mu\text{m}$ 以下の波長域でほとんどのエネルギーを放射するので、それから得られる放射は近赤外放射ということになり、混乱は起きない。しかし遠赤外ヒーターは通常の使用条件(温度)のもとでは、主として3 から 20  $\mu\text{m}$  辺りまでの広い範囲に亘ってエネルギーを放射する点に特徴があるのであるが、I EC の定義に従えば中赤外放射と遠赤外放射とを同時に放射しているということになる。しかしこの二つの放射の間に何か被加熱物に対する作用機序の違いがあるかという点、遠赤外放射の吸収の機構からみても4  $\mu\text{m}$  を境にそのような違いがあるとは考えられない。

遠赤外ヒーターと近赤外ヒーターとはその作用、効果に違いがあるので、それぞれのヒーターからの放射は区別する必然がある。しかし遠赤外ヒーターからの放射をわざわざ二つの放射に分けるのはむしろ混乱をもたらす。

#### ②赤外低温放射体／赤外中温放射体／赤外高温放射体

放射体に関しては、I EC 用語ではわざわざ放射体の温度を分類の尺度としている。すなわち低温放射体と称して「最大パワーの単色成分が波長4  $\mu\text{m}$ 以上に相当するような温度を有した放射源」と定めている。同様に中温、高温の放射体に関しては、それぞれの波長範囲を「2 から4  $\mu\text{m}$ の範囲」、「2  $\mu\text{m}$ 以下」と定めている。ヒーターのフィラメント温度がヒーターに固有であるような近赤外ヒーターに対してはこのような決め方が成り立つのかも知れないが、表面温度をそれぞれ状況に合わせて各種温度に制御して用いている遠赤外ヒーターにとっては、真に納得できない分類である上、そのような分類の必然性も感じられない。

いまここに黒体の放射特性を持った放射体があると考え、I EC の定めによると黒体の温度によって低温、中温、高温の3種の放射体が変わるということになる。因みにその3種を区別する温度は、プランクの放射の公式から、452 $^{\circ}\text{C}$ 、1176 $^{\circ}\text{C}$ となる。従って我々の遠赤外ヒーターを例えば600 $^{\circ}\text{C}$ で用いればそれは中温放射体であり、450 $^{\circ}\text{C}$ で用いれば低温放射体ということになる。我々は遠赤外加熱装置に同じ遠赤外ヒーターを配列し、あるゾーンではこれを600 $^{\circ}\text{C}$ で制御し、また他のゾーンでは450 $^{\circ}\text{C}$ で制御するというような方法で、効率的かつ被加熱物にとって好ましいエネルギー投入を追求している。その使用温度の違いで赤外加熱のされ方が変化することは全くなく、適正な温度制御の結果として遠赤外加熱の効果が追求できるのである。

このような温度による放射体の分類によりもたらされる問題点は、この決め方によると、放射体の温度が違うとその種類や使い方は別のものであり、あるいはそれぞれの放射波長域が異なっ

って、それが与える作用、効果も異なるというイメージを、特に遠赤外ヒーターについて、不可避免地に与えることである。この点は①の定義による影響も受けている。すなわち①によって低温放射体が長波長(遠赤外)放射と、中温放射体が中波長放射と、高温放射体が短波長(近赤外)放射と一体のように受け取られてしまうのである。

事実そのような解釈をした論文は少なくなく、遠赤外放射による加熱を行うには遠赤外ヒーターの温度を452℃以下にする必要があるとして比較実験を行い、近赤外ヒーターに比し効率が悪かったというところでもない結論を導いている発表もある<sup>1)</sup>。またしばしば欧米の近赤外ヒーター関係者から、このような解釈に基づいた遠赤外ヒーターに対する誤った評価を聞くことが少なくないのである。

### ③ヒーター温度と放射エネルギー分布

上のような誤解は、実際の放射体からはある波長範囲に亘ってエネルギーを放射しているにも拘わらず、放射エネルギーが最大となる波長のみをもってその放射体を代表させ、その値を例えば Wien の変位則と組み合わせて論じているところから生じている

そこで理解を確実なものにするため、遠赤外ヒーターをいろいろな温度で用いた場合の、放射エネルギーが最大となる波長と、どの波長範囲に占める放射エネルギーがどのくらいの割合になっているかを求めて比較しておく。計算を容易にするため放射体は黒体を仮定する。これを452℃以上900℃迄の間で加熱したとき、そこから放射されるエネルギーの波長域別の割合をプランクの式に基づく公知の数表から求め、最大エネルギー波長とともに示したのが表5.1である。

ここで取り上げた温度は通常遠赤外ヒーターにおいてよく利用される温度域の範囲であるが、いずれの温度でも放射エネルギーが最大となる波長は2から4 μmの間に入るから、IECの定義によればこれらの温度域では赤外中温放射体であるとされる。放射エネルギーが最大を示す波長は4 μm以下であっても、放射エネルギーの波長分布を見ると、放射体温度750℃までは大半の放射エネルギーは4 μm以上の遠赤外放射になっていることが分かる。

表5.1 放射体(黒体)温度と波長域別放射エネルギー比率

放射体温度	最大エネルギー波長	3 μm以上 エネルギー比率	2-4 μm エネルギー比率	4 μm以上 エネルギー比率
452 °C	3 997 μm	90.5 %	24.0 %	75.0 %
500	3 75	87.4	27.9	70.5
550	3 52	85.0	31.6	65.9
600	3 32	81.4	35.0	61.8
650	3 14	77.8	37.8	57.8
700	2 98	74.5	40.2	53.9
750	2 83	71.1	42.9	50.3
—				
900	2 47	61.3	46.5	40.8

プランクの放射式の正しい理解によれば、最大エネルギーを示す波長はそこを境に全体の放射エネルギーを等分する波長ではなく、短波長側は 25%、長波長側は 75%の 1: 3 に分ける波長なのであるから、このピーク波長を基準に用いること、すなわちこれを Wien の変位則に代入して求めた温度を分類の基準に用いることは適切でなく、むしろ混乱をもたらすといえよう。

因みに遠赤外ヒーターを赤外低温放射体として、すなわち 450℃以下の低温域で利用するのは、加熱処理をかなりマイルドに実行させたいときに限られよう。また後述のように遠赤外放射の波長域を 4  $\mu\text{m}$ ではなく 3  $\mu\text{m}$ 以上とすれば、900℃以上でも遠赤外放射が主体ということになる。

放射の波長域を区分するには、それぞれの波長域の放射エネルギーが、被加熱物に対して異なる作用、効果をもたらす可能性があったり、あるいは放射体の材質や構造により大きく変わってくる、といった積極的な理由に基づいて成されるのが普通であろう。そして放射体の分類も、それらが上のような波長域のどの部分を主としてカバーする特性をもっているかによって分けるべきではなかろうか。

#### 5 1 4 遠赤外放射の波長域

既に述べたように EC の定義では赤外放射域を 2  $\mu\text{m}$ と 4  $\mu\text{m}$ とで区切っている。しかしこのうち 4  $\mu\text{m}$ という波長で区切ることにどのような積極的な意味があるのであろうか。遠赤外ヒーターの放射材料を構成しているセラミック材料は、通常 3  $\mu\text{m}$ 近傍から 25  $\mu\text{m}$ 辺りに掛けて高い放射率を有している。また遠赤外加熱の対象となる材質は、ほとんど 3  $\mu\text{m}$ 付近からやはり 25  $\mu\text{m}$ に掛けて高い吸収率を示す。この放射、吸収帯の整合性が遠赤外加熱の具合のよい点である。

なぜそれらの波長域が合致するかといえば、物質の分子振動あるいは格子振動の振動数が波長換算するとこの波長域に相当するからである。遠赤外放射を受けた物質が熱振動を励起されて、それ自身が昇温するのはこの故であって、従って遠赤外加熱の論理からすれば、遠赤外放射の領域は少なくとも 3  $\mu\text{m}$ 辺りからでなければならない。

そのように定めた上、さらに放射体はその温度でなく、それが放射するエネルギーの大半が遠赤外波長域に入っていれば遠赤外放射体であるというように定義すれば、無理がなく、かつきちんとした意味づけが成されることになるであろう。

3  $\mu\text{m}$ 以下の波長域は一括して近赤外波長域として特に問題はないであろう。すなわち従来から意味の不明確な中赤外域をなくすのである。遠赤外ヒーター以外のヒーターは近赤外ヒーターとしてまとめても内容的に不合理な点は起きないと思われるし、それぞれのヒーターが構造、作用、効果の違いで明確に分けられることになりすっきりするであろう。

#### 〈引用文献〉

- 1) D.W. Weisman "Infrared Drying and Curing Systems" Metal Finishing, Vol.96, No.5A, 368(1998).

## 5.2 拡散面と鏡面からなる三次元閉空間内の放射伝熱(改良型光線追跡法を用いた計算方法)

### 5.2.1 はじめに

物体間の伝熱は放射、対流、伝導の形態によって生じる。放射伝熱が物体の温度の四乗の差にほぼ比例するのに対し、伝導や対流による伝熱が温度の差に比例する点で異なる。物体の温度差が大きい場合や高密度の放射エネルギー移動が局所的に生じる状況(赤外放射加熱炉の内部など)においては、放射伝熱がその熱環境の支配要因となる。三次元空間内の物体間の放射伝熱現象を定量的に取り扱うためには、空間内で生じる多重反射や障害物などによって生じる遮へい効果を考慮する必要がある。ただし、実際の状況では特に反射に関して拡散面と物理的特性が異なる鏡面(ガラスや金属表面など)が混在する場合がほとんどである。よって、放射伝熱現象を的確に把握するには、物体表面が拡散面と鏡面の光学性質を併せもつことを前提にすべきである。

拡散面と鏡面からなる閉空間内の放射伝熱解法としては光線追跡法<sup>(1)</sup>が汎用的に使用されているが、場合によっては最も重要なパラメータである「面要素間の形態係数」に大きな計算誤差を招く欠点がある。ここでは筆者らが開発した前記の欠点を克服する解析手法<sup>(2)</sup>について概説する。具体内容を以下に示す。

(1) 形態係数を精度よく計算するため、従来の光線追跡アルゴリズムで用いられている放射束の発生方法を工夫・改良した「改良型光線追跡法」を提案する。

(2) 実際問題の一例として、鏡面反射板付き棒状赤外放射体から照射される放射伝熱量を計算する。その結果を測定結果と比較し、「改良型光線追跡法」を用いた放射伝熱計算方法の実用性を検証する。

### 5.2.2 鏡面形態係数に基づいた放射伝熱の考え方

拡散面および鏡面が混在する閉空間内では、指向性をもつ放射エネルギー移動が生じるため、本来の意味の面要素間の形態係数だけでは放射伝熱現象を定量的に取り扱えない。

本報ではModestが提案した形態係数 $F$ の拡張概念であるSpecularViewFactor(以後、鏡面形態係数 $F^s$ とよぶ)<sup>(3)</sup>を用いる。 $F_{ij}^s$ は、面要素 $i$ 、 $j$ 間の形態係数 $F_{ij}$ に「面要素 $i$ から射出された全放射エネルギーのうちあらゆる鏡面反射を介して間接的に面要素 $j$ に到達する放射エネルギーの割合」を加えた無次元値として説明できる。閉空間に含まれるすべての面要素 $i$ 、 $j$ の組合せについて $F_{ij}^s$ を計算しておけば、Sparrowらの放射伝熱理論に基づいて拡散面および鏡面が混在する閉空間内の多重反射を考慮した放射伝熱現象の定量的な取り扱いが可能になる。この場合、面要素 $i$ に吸収される単位面積あたりの放射伝熱量 $Q_i$ は次式で表される<sup>(4)</sup>。

$$Q_i = \frac{\varepsilon_i}{\rho_i^d} \left\{ \sum_{j=1}^N \psi_{ij} \sigma (T_j + 273.15)^4 - (1 - \rho_i^d) \sigma (T_i + 273.15)^4 \right\} \quad (5.1)$$

(1)式の $\psi_{ij}$ は次式のようなマトリクス式で表される。

$$\begin{pmatrix} \psi_{11} & \cdots & \psi_{1j} & \cdots & \psi_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \psi_{i1} & \cdots & \psi_{ii} & \cdots & \psi_{iN} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \psi_{N1} & \cdots & \psi_{Nj} & \cdots & \psi_{NN} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1 - \rho_1^d F_{11}^s}{\varepsilon_1} & \cdots & -\frac{\rho_1^d F_{1j}^s}{\varepsilon_1} & \cdots & -\frac{\rho_1^d F_{1N}^s}{\varepsilon_1} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\frac{\rho_i^d F_{i1}^s}{\varepsilon_i} & \cdots & \frac{1 - \rho_i^d F_{ii}^s}{\varepsilon_i} & \cdots & -\frac{\rho_i^d F_{iN}^s}{\varepsilon_i} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\frac{\rho_N^d F_{N1}^s}{\varepsilon_N} & \cdots & -\frac{\rho_N^d F_{Nj}^s}{\varepsilon_N} & \cdots & \frac{1 - \rho_N^d F_{NN}^s}{\varepsilon_N} \end{pmatrix}^{-1} \quad (5.2)$$

本報では以下に示す3つの仮定に従い放射伝熱計算を行う。

- (i) 面要素表面は灰色、放射に対して不透明であり、その射出強度はLambertの余弦則に従う。
- (ii) 面要素は拡散面 ( $\rho^d \neq 0, \rho^s = 0$ )、拡散面・鏡面の複合面 ( $\rho^d \neq 0, \rho^s \neq 0$ ) のいずれかとし、完全鏡面 ( $\rho^d = 0, \rho^s \neq 0$ ) は取り扱わない。面要素表面では次式が常に成立する。

$$\epsilon + \rho^d + \rho^s = 1 \quad (5.3)$$

拡散面・鏡面の複合面を単に鏡面とよぶ。また、鏡面反射率の天頂方向の角度依存性を考慮しない。

- (iii) 気体による放射の射出・吸収を無視する。

### 5.2.3 改良型光線追跡法

鏡面形態係数の数値計算方法として改良型光線追跡法を提案する。この方法では、基本的に面要素から複数の放射束を射出させ、それらを光線追跡することによって鏡面形態係数を計算するが、緒言で述べたように面要素から放射束を射出させる場合、放射束の本数や方向が適切でないと計算誤差が増大するおそれがある。改良型光線追跡法では、このような誤差を生じさせないため、これまでの光線追跡法で用いられる放射束の発生方法（放射束の射出位置や方向を面要素ごとに確率的に決める、あるいは、一義的に決める方法）とは根本的に異なる方法を用いる。すなわち、以下の手順に従って放射束を発生させる。

- ① 空間に存在する一組の面要素を取り出し、面要素の頂点と重心を放射束の射出点（到達点もかねる）として設定し、これらを接続するすべての線分を面要素間を移動する放射束とみなす。
- ② 数値積分法で計算した本来の意味での面要素間の形態係数を放射束群が有する初期エネルギーの総量とし、これを分配して放射束ごとのエネルギーを規定する。この時、面要素の射出点（到達点）に与えられた重み付けに基づき放射束のエネルギー値を個別に決定する。

以上の放射束の発生手順が本報で提案する改良型光線追跡法の最も重要な特長である。詳細な数値計算手順について文献(2)を参照されたい。

### 5.2.4 改良型光線追跡法を用いた放射伝熱計算方法の実用性の実験的検証

実際問題の一例として、鏡面反射体付き棒状赤外放射体から照射される放射伝熱量を計算し、改良型光線追跡法を用いた放射伝熱計算方法の実用性を検証する。

#### 5.2.4.1 計算モデル

図5.1(a)に示すような反射板付き棒状放射体とその下方に設定した照射領域表面で吸収される放射伝熱量を計算する。放射エネルギーの多重反射を考慮するために図5.1(b)のように側壁面を追加し、閉空間モデル化する。面要素モデルは図6.2に示すとおりである。計算に用いる面要素モデルを構築する際、反射板と棒状放射体の曲面形状をできるだけ正確に表現するように、それらの断面方向の分割数をそれぞれ20とした。面要素モデルは全2246面要素からなる。このうち反射板と棒状放射体は1040面要素、照射領域は250面要素 (=25 (x軸) × 10 (y軸)) からなる。

#### 5.2.4.2 計算条件

反射板、棒状放射体、それ以外の固体面（各側壁面および照射領域）の表面温度を、それぞれ

150℃、500℃、15℃の一定温度とする。反射板のみ鏡面とし、それ以外をすべて拡散面とする。反射板、放射体、側壁面、照射領域の放射率 $\epsilon$ 、拡散反射率 $\rho^d$ 、鏡面反射率 $\rho^s$ を、分光測定結果をもとに決めた。反射板については、実験に使用したものを直接分光測定できないので同一素材の平面状サンプルの測定結果を用いた。

分光測定結果のデータに基づいた光学特性に関する計算条件を鏡面ケース (Specular case) とし、表5.2に示す (表中、固体の名称を表す添え字は省略している)。さらに、反射板の鏡面反射率の放射エネルギー移動に及ぼす影響を評価するために、反射板を完全拡散面と見なした拡散ケース (Diffuse case) を併せて設定する。拡散ケースの計算条件を表5.3に示す。反射板以外の条件は表5.2の鏡面ケースと同じとしている。

#### 5.2.4.3 放射伝熱量の測定

(a) 測定室 図5.3に示すように測定室の四方の壁面および天井部を黒体塗料 (米国Tempil社製2500FlatBlack) を全面に塗布した水冷パネルで覆っている。その内部に放射体および可動式の放射伝熱量測定センサを設置した。

(b) 赤外放射体 断面が放物線形をした反射板 (神戸製鋼社製) 付き棒状遠赤外ヒータ (ジャーダ社製BO型) を使用した。形状は図5.1(a)に示したのと同じである。

(c) 放射伝熱量測定センサ 直径6mmのサーモパイル型センサ (米国Dexter社製Model-6M、検知部は直径6mmの円形) を用いた。センサが検知する放射伝熱量とセンサの電圧出力の関係を、黒体炉 (米国Electro-Optical-Industry社製Model215B) とレーザーパワー・メータ (日本科学エンジニアリング社製PM-301) 等を用いてあらかじめ求めた。センサを真ちゅう製水冷容器に組み込み (図5.4参照)、測定時のみ開閉する遮へい板を取り付けた。このセンサはコンピュータで制御可能な移動装置に取り付けた。

(d) 測定手順 水冷パネルおよびセンサ格納容器に冷水を供給・循環させ、パネルおよびセンサ部温度を15℃に保った。また、赤外放射体への供給電力を調整し、放射体の表面温度を500℃に保った。このとき、反射板の表面温度は150℃であった。各温度が時間的に変化しないことを確かめてから放射伝熱量の測定を行った。測定領域は図5.1(a)と同じである。この領域を20 (x軸方向) ×18 (y軸方向) に分割し、各分割領域 (全360箇所) の中心地点の放射伝熱量を順番に測定した。各測定地点の座標と測定値はコンピュータに自動的に記録された。なお、計算モデルと、パネル (モデルでは側壁面) と照射領域の位置関係が異なるが、測定ではパネルとセンサ部の温度が等しく、棒状放射体表面温度 (500℃) より格段に低いことから、位置関係の違いが照射領域での放射伝熱量の分布に及ぼす影響は無視できるとした。

#### 5.2.4.4 計算結果と測定結果の比較

放射伝熱量の計算に先立って、解析モデルの全面要素間の鏡面形態係数の精度が高精度に達成されたことを確認した。鏡面形態係数の計算結果と表6.1および表5.2の計算条件を5.2.2節の(5.1)式に適用し、照射領域に含まれる各面要素における放射伝熱量を計算した。

測定結果および鏡面ケースと拡散ケースの計算結果 (照射領域の放射伝熱量分布を三次元的にプロットしたグラフ) を、図5.5、5.6、5.7にそれぞれ示す。また、照射領域の短尺方向の中央位

置（y軸が0.90mの位置）におけるx軸断面の放射伝熱量分布の測定結果と各計算結果を比較したグラフを図5.8に示す。さらに、照射領域の長尺方向の中央位置（x軸が0.25mの位置）におけるy軸断面の同様のグラフを図5.9に示す。鏡面ケースの計算結果は、測定結果の照射領域における放射伝熱量分布が放射体の中央部でピークをもつ鞍形をしている点などを定性的によく再現している。計算結果は測定結果に比べ8%程度の誤差を生じている。この誤差は主として計算に用いた反射板の反射率に起因している可能性がある。すなわち、実験に用いた反射板の反射率は経年変化等の理由で計算に用いた同一素材サンプルの反射率を下回っていたと考えられる。今後、計算に用いる光学特性の適正な設定方法は重要な課題となる。一方、拡散ケースの計算結果は鏡面ケースに比べ総じて熱量が小さく、ほとんど起伏のない平坦な分布となっており、測定結果とは全く異なっている。この差異は図5.8、5.9のグラフでより明確である。理由は次のように説明できる。すなわち、図5.8（y軸断面の放射伝熱量分布の比較）で照射領域の端部における放射伝熱量を比較すると、拡散ケースの結果が測定結果と鏡面ケースの結果を上回っていることから、拡散ケースでは反射板表面で反射される放射エネルギーの多くが照射領域外へ散逸してしまい、放射体直下の放射伝熱量のレベルが鏡面ケースよりも低下していると考えられる。このことから複雑な形状をした鏡面反射面を拡散面と仮定して放射エネルギー移動を計算すると、実際と全く異なる結果が導かれる可能性が強い。放射伝熱量分布の測定結果と各計算結果（単位は $W/m^2$ ）から照射領域全体での総放射伝熱量（単位はW）を算出し、それらの比較結果を図5.10に示す。拡散ケースの計算結果は約75Wと測定結果の101Wに比してかなり小さく見積もられている（誤差は約26%）。一方、鏡面ケースの計算結果は110Wとなり、比較的精度よく見積もられている（誤差は約8%）。

以上から、「改良型光線追跡法」を用いた放射伝熱計算方法の実用性を検証できた。

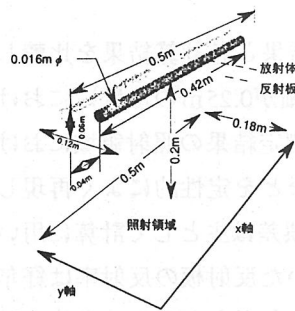
#### 引用文献

- (1) 早坂、工藤、谷口他、放射熱線法による放射熱伝達の解析（二次元モデルでの検討）、日本機械学会論文集B、52巻476号、pp.1734-1739、1986.
- (2) 宮永、中野、拡散面と鏡面からなる三次元閉空間内の放射伝熱—改良型光線追跡法を用いた計算方法—、日本機械学会論文集、65巻635号B編、1999年.
- (3) Modest, M.F.; Radiative Heat Transfer, McGRAW-HILL, Section 6.2, 1993.
- (4) Sparrow, E.M., R.D.Cess; Radiation Heat Transfer Augmented edition, Hemisphere Publishing Corporation, pp.145-169, 1978.

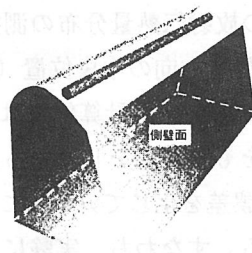
#### 使用した記号

$F_{ij}$	: i,j間の障害物による熱放射の遮へいを考慮する形態係数
$F_{ij}^s$	: i,j間の鏡面形態係数
N	: 空間に含まれる面要素の総数
T	: 温度 (°C)
$\epsilon$	: 面要素表面の放射率 ( $\neq 0$ )
$\rho^d$	: 面要素表面の拡散反射率
$\rho^s$	: 面要素表面の鏡面反射率
$\sigma$	: Stefan-Boltzmann定数 $5.67 \times 10^{-8}$ ( $W/m^2/K^4$ ) ( $0^\circ C = 273.15K$ )
$i, j$	: 面要素の名称





(a) 概要



(b) 解析モデル

図5.1 反射板付き放射体の概要 (a) と解析に用いたモデル (b)

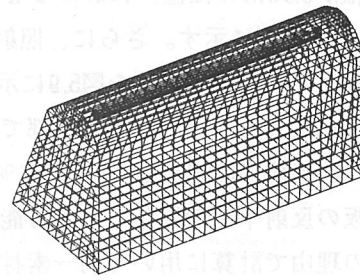


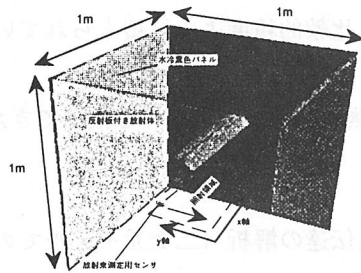
図5.2 (b) の面要素モデル (2246面)

表5.2 解析ケース (鏡面ケース)

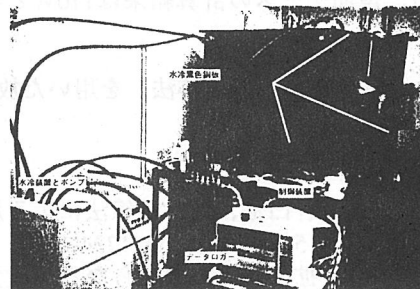
	光学特性			
	温度 T(°C)	$\epsilon$	$\rho^*$	$\rho^s$
反射板	150	0.07	0.30	0.63
放射体	500	0.83	0.17	0.00
側壁面	15	0.98	0.02	0.00
照射領域	15	0.98	0.02	0.00

表5.3 解析ケース (拡散面ケース)

	光学特性			
	温度 T(°C)	$\epsilon$	$\rho^*$	$\rho^s$
反射板	150	0.07	0.93	0.00
その他	表6.1と同じ			



(a) 実験装置の概要



(b) 実験装置の写真

図5.3 実験装置の概要 (a) とその写真 (b)

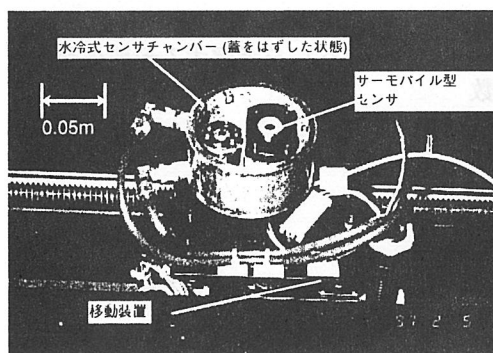


図5.4 放射束測定用センサの写真

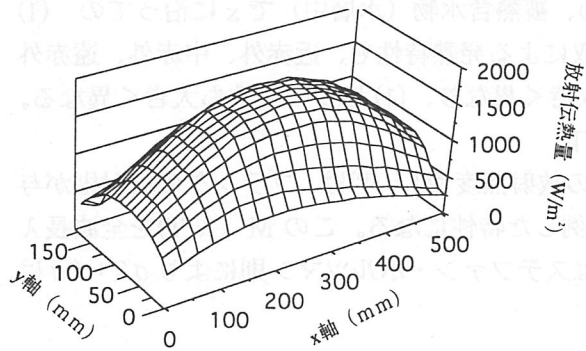


図5.5 照射領域での放射伝熱量分布 (実測結果)

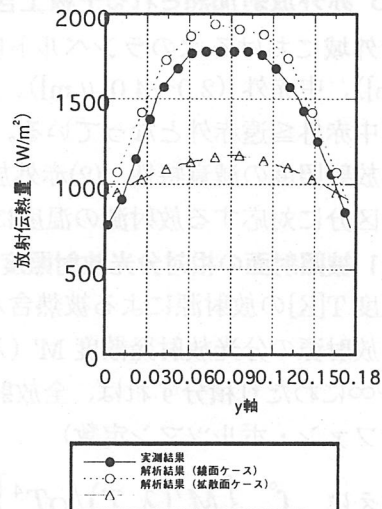


図5.8 y軸方向断面の放射伝熱量分布 (x=0.25m)

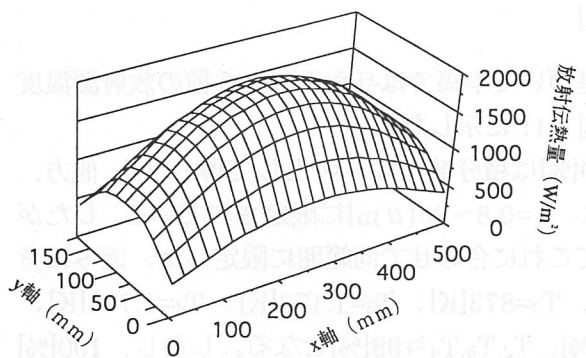


図5.6 照射領域での放射伝熱量分布 (鏡面ケース)

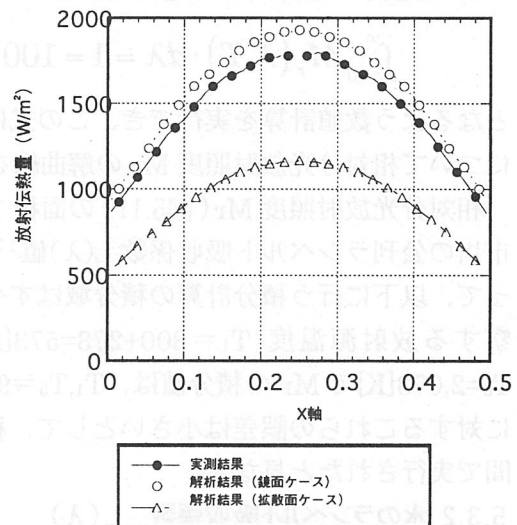


図5.9 x軸方向断面の放射伝熱量分布 (y=0.09m)

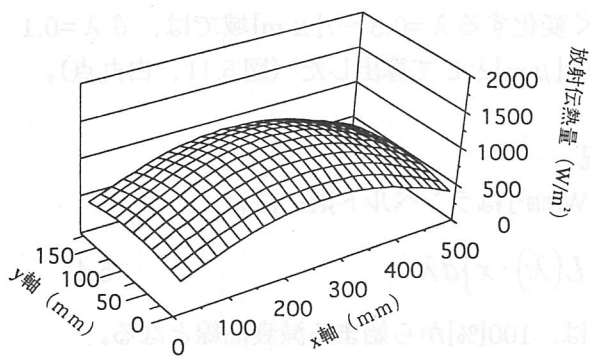


図5.7 照射領域での放射伝熱量分布 (拡散面ケース)

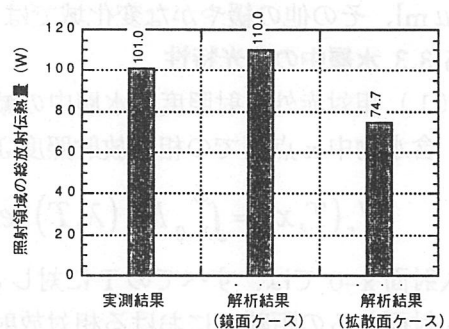


図5.10 照射領域での総放射伝熱量の比較

### 5.3 赤外放射加熱される平板上含水物中の放射照度及び発熱パワーの分布特性

赤外域における水のランベルト吸収係数<sup>1)</sup>は赤外放射の波長区分〔近赤外 (0.8~2.0 [μm])、中赤外 (2.0~4.0[μm])、遠赤外 (4.0~25[μm])〕に依存し、その概数値は近赤外<<中赤外<遠赤外となっている。そのため、被熱含水物(水層中)でxに沿っての(1)赤外放射照度の減衰特性、(2)赤外放射束吸収による発熱特性も、近赤外、中赤外、遠赤外源の区分に対応する放射源の温度によって大きく異なり、(1)と(2)の特性も大きく異なる。

#### 5.3.1 被照射面の相対分光放射照度 $M_r(\lambda, T)$

温度  $T$ [K]の放射源による被熱含水物表面の放射照度  $M(\lambda, T)$ は、プランクの放射則が与える放射源の分光放射発散度  $M'(\lambda, T)$ に比例した特性になる。この  $M'(\lambda, T)$ を全波長  $\lambda=0\sim\infty$ にわたり積分すれば、全放射発散度はステファン・ボルツマン則により  $\sigma T^4$  ( $\sigma$ はステファン・ボルツマン定数)

$$\text{ゆえに } \int_{\lambda=0}^{\infty} \left\{ M'(\lambda, T) / \sigma T^4 \right\} d\lambda = 1$$

$M'(\lambda, T)$ に比例する分光特性となる被照射面の相対分光放射照度  $M_r(\lambda, T) = M(\lambda, T) / \sigma T^4$ と定義し  $M_r(\lambda, T)$ を定式化する。

$$\int_{\lambda=0}^{\infty} M_r(\lambda, T) \cdot d\lambda = 1 = 100 [\%]$$

となるよう数値計算を実行でき、この式に基づいて本稿では与えられた5種の放射源温度について相対分光放射照度  $M_r$ の解曲線を図5.11に示した。

相対分光放射照度  $M_r$ (図5.11)の面積100[%]は積分域  $\lambda=0\sim\infty$ として得られる。他方、市川の公刊ランベルト吸収係数  $L(\lambda)$ 値<sup>1)</sup>は、 $\lambda=0.8\sim 25[\mu\text{m}]$ に限定されている。したがって、以下に行う積分計算の積分域はすべてこれに合わせて同範囲に限定した。因みに考察する放射源温度  $T_1=300+273=573$ [K]、 $T_2=873$ [K]、 $T_3=1,173$ [K]、 $T_4=1,773$ [K]、 $T_5=2,073$ [K]で  $M_r$ の積分値は、 $T_1, T_5 \doteq 97$ [%]、 $T_2, T_3, T_4 \doteq 99$ [%]となる。しかし、100[%]に対するこれらの誤差は小さいとして、積分域  $\lambda=0.8\sim 25[\mu\text{m}]$ にかかわらず  $\lambda=0\sim\infty$ 区間で実行されたと見なす。

#### 5.3.2 水のランベルト吸収係数 $L(\lambda)$

図5.11 上部(縦軸右側)に  $L(\lambda)$ を  $M_r(\lambda, T)$ と横軸  $\lambda$ を共通にして示した。

なお、波長  $\lambda$ の変化に伴い  $L(\lambda)$ が大きく変化する  $\lambda=0.8\sim 7[\mu\text{m}]$ 域では、 $\delta\lambda=0.1[\mu\text{m}]$ 、その他の緩やかな変化域では  $\delta\lambda=0.2[\mu\text{m}]$ として算出した(図5.11、白丸点)。

#### 5.3.3 水層中の分光特性

(1) 相対赤外放射照度の水層中の減衰状況

含水物中  $x$  点面での相対放射照度  $J_r(T, x)$ [W/cm<sup>2</sup>]はランベルト則に従い

$$J_r(T, x) = \int_{\lambda=0}^{\infty} M_r(\lambda, T) \cdot \exp\{-L(\lambda) \cdot x\} d\lambda \quad (5.4)$$

入射面  $x=0$ では、すべての  $T$ に対し  $J_r(T, x)$ は、100[%]から始まる減衰曲線となる。

入射面からの距離  $x$ における相対放射照度  $J_r$ の数値解は近似的に次式から算出する。

$$J_r(T, x) = \sum_{\lambda=0.8}^{25} M_r(\lambda, T) \cdot \delta\lambda \cdot \exp\{-L(\lambda) \cdot x\} \quad (5.5)$$

区間の相対発熱パワーに対する各放射束分の寄与は計算上それぞれ $\approx 6.1, 25.1, 11.8$ [%] 計 43[%]、すなわち、近赤外源の場合も  $x=0\sim 0.1$ [mm]区間に発熱は集中するが、これは近赤外源に含まれる遠赤外及び中赤外放射束によるものであり、 $x=0.1\sim d_s(\approx 15$ [mm])に至る区間では主として近赤外放射束による分布発熱となる。

### 5.3.5 相対発熱パワーから推論される被熱含水物の加熱特性

赤外放射束が被熱含水物に有効に吸収されて発熱することと被熱含水物の厚さとは密接に関係し、その状況は赤外放射源の温度に強く依存する。

#### (1) 水層厚が薄い場合

1) 宮永、中野<sup>2)</sup>は、ポニビニール水溶液 (0.4[mm]厚) を試料とし、入射照度を同一に調整、遠赤外源と近赤外源との比較検討を行っている。試料には、(1)塗装なし、(2)赤外吸収率大のカーボン黒色塗料、(3)反射率大の銀色塗料 の塗装を施した銅板 (下地) 裏面に密着させ、加熱特性に及ぼす塗料の効果を調べている。実験の放射源温度は本稿のそれとは幾分異なるが、遠赤外源 300[°C]、近赤外源 1800[°C] (図 5.13、表 5.4) から推論される加熱特性は実験結果と定性的によく一致している。

(a) 遠赤外源の実験結果は、下地塗装の種別にかかわらずほとんど同一の加熱特性となる。図 5.12(a)、 $x=0.4$ [mm]では相対放射照度 $\approx 0.2$ [%]すなわち、赤外放射束 $\approx 0$ 、したがって、塗装面の赤外放射の吸収、反射の差異は加熱特性に無関係となる。

(b) 近赤外源の実験結果は、下地銅板の種別に大きく依存している。1800[°C]時は、図 5.12(b)から  $x=D=0.4$ [mm]での相対放射照度 $\approx 38$ [%]、この中には殆ど近赤外放射束しか残っておらず塗装面の赤外反射率に対応する分だけ反射逆行するがそれによる発熱 $\approx 0$ 、黒色塗料塗布の場合は 38[%]分が殆ど塗装面で吸収され発熱パワーとなり遠赤外源に近い昇温特性となる。

2) 下地がない場合などは、近赤外分は吸収され尽くすことなく被熱含水物を貫通し、加熱には無効な放射束として外気へ透過する。

3) 西村<sup>3)</sup>は、ポリビニール水溶液 (0.4, 0.1[mm]厚) を試料とし入射放射照度を同一に調整、遠赤外源と近赤外源との加熱特性の比較実験を行い、1) と同様の結果を得た。

#### (2) 含水層厚が厚い場合

1) 西村<sup>4)</sup>は、ガラス細粒子の含水層 (5, 10[mm]厚、粒子径 4 種) を試料とし、同一入射放射照度に調整、遠赤外源と近赤外源との加熱特性の比較実験を行いその結果を理論解析結果と照合、定性的及びほぼ定量的に両者がよく一致していることを示している。

(a) 遠赤外源の場合、300[°C]時には  $d_1\approx 0.06$ [mm] (図 5.13)、すなわち  $x=0\sim 0.1$ [mm]区間で集中発熱となり、 $x=0.1\sim 5$ あるいは 10[mm]区間では 0。なお、綿密な数値計算の結果<sup>5)</sup>、集中発熱パワーの約 85[%]が蒸発潜熱流源となっている。

(b) 近赤外源 (中、遠赤外放射を含む) の場合、近赤外放射束は含水物の深くまで浸透し吸収分は内部で発熱し媒質全般にわたって加熱する。すなわち、 $x=0.1\sim$ 試料厚 5 あるいは 10[mm]にわたる内部分布発熱パワーの集積も相応して寄与する。このことは予熱期、定率乾燥期を通じ試料裏面の方が表面より一般的に昇温が大きいという奇異な現象を呈する {文献 5}で立証}。遠赤外加熱式のように簡単に予測したり一般的に論じることは難しい。

図5.12(a),(b)は、 $x$ のスケールを短、長に選び、各 $T$ について含水物中で $x$ に沿っての分布を与える解曲線相対放射照度 $J_r(T,x)$ を示す。

理論上は $x=0\sim\infty$ で $J_r(T,x)=0$ となるが、入射照度の90[%]が吸収されれば実用上入射放射束がほとんど熱として有効に利用されたとすれば、発熱部を表す距離 $x$ を有限化できる。この距離を $D$ で表し、図5.12中●点で示した。

(2) 放射束吸収による水層中の相対発熱パワーの状況

$x$ 面での“単位区間長当たり相対発熱パワー $H_r(T,x)$ ”は

$$H_r(T,x) = \int_{\lambda=0}^{\infty} L(\lambda) \cdot M_r(\lambda,T) \exp\{-L(\lambda)x\} d\lambda \quad (5.6)$$

全相対入射照度の内90[%]が区間 $x=0\sim d$ で吸収され発熱パワーとなるとすれば

$$\int_{x=0}^d H_r(T,x) dx = 0.9 \int_{x=0}^{\infty} H_r(T,x) dx \quad (5.7)$$

前項で定義した $D$ の意味合いから、明らかに同一 $T$ に対し、 $d=D$ (図2,3)となる。相対発熱パワー $H_r(T,x)$ の数値解は近似的に次式から算出する。

$$H_r(T,x) = \sum_{\lambda=0.8}^{25} L(\lambda) \cdot M_r(\lambda,T) \cdot \delta\lambda \cdot \exp\{-L(\lambda)x\} \quad (5.8)$$

図5.13に各 $T$ についての相対発熱パワー $H_r(T,x)$ の解曲線を、表5.4に $d$ の計算結果を示した。当然水層中の全発熱パワーは式(5.6)から入射面での全放射照度に一致する。

### 5.3.4 数値計算結果と考察

(1) 水層中の相対放射照度分布(図5.12)及び相対発熱パワー分布(図5.13)

理論式及び数値計算の手続きから、相対発熱パワーを大きく支配しているのはランベルト分光吸収係数である。相対発熱パワー分布(図5.13)の大きな特徴は

- 1) 放射面 $x=0$ 近傍で相対発熱パワー $H_r[\%/ \mu m]$ は、遠赤外線>中赤外線>近赤外線となる。
- 2) 入射する全相対放射照度の約90[%]が吸収されて全相対発熱パワーが90[%]となる表面からの距離 $d$ は、遠赤外線( $T=300\sim 600[^\circ C]$ )時、 $d \approx 0.06\sim 0.12[mm]$ 近傍(表5.4)となり、しかも、90[%]のうち大部分が $x \approx 0$ 近傍に集中している。
- 3) 近赤外線( $T=1800[^\circ C]$ )時、 $d \approx 15[mm]$ となり $x \approx 0$ 近傍を除き、弱い発熱パワーではあるが水層内部へ浸透分布している(表5.4)。

(2) 放射源温度と赤外域の割合、 $x=0$ における相対発熱パワー

1)  $T=300[^\circ C]$ 時、相対入射放射照度 $M_r$ の総面積100[%]において、近、中、遠赤外放射束それぞれによる面積分は計算上 $\approx 0.1, 11.7, 88.1[\%]$ を占め、90[%]が $x \approx 0\sim d_1$ ( $\approx 0.06[mm]$ )区間で、熱パワーに変換されるが、 $x=0$ 面での $H_r$ はそれぞれ $\approx 0, 1.4, 7.7[\%/ \mu m]$ となる。次に表面に近い領域 $x=0\sim 0.1[mm]$ 区間の相対発熱パワーに対する各放射束の寄与は計算上それぞれ $\approx 0, 10.6, 87.9[\%]$ 計98.5[%]すなわち、発熱はこの区間に集中、 $x \geq 0.1[mm]$ 区間では発熱 $\approx 0$ となる。

2)  $T=1800[^\circ C]$ 時、近、中、遠赤外放射束それぞれによる面積分は計算上 $\approx 48.2, 36.1, 13.3[\%]$ を占め、90[%]が $x=0\sim d_2$ ( $\approx 15[mm]$ )区間で熱パワーに変換されるが、 $x=0$ 面での $H_r$ はそれぞれ $\approx 0.1$ 弱、3.7、0.6 $[\%/ \mu m]$ となる。次に表面に近い領域 $x=0\sim 0.1[mm]$

### 5.3.6 本稿の意義と将来展望

被熱含水物が赤外放射加熱される場合、水層中における 1) 相対赤外放射照度  $J_r(T,x)$  の減衰特性、2) 放射束吸収による相対発熱パワー  $H_r(\lambda,T)$  特性 の数値データを実測定で得ることは事実上不可能であり、理論計算によるより他、途はない。上記2特性は漠然と定性的には関係者に理解されてきたと思われるが、定量的な提示は見当たらない。

本稿は、数値計算式(5.5)、(5.8)と図 5.11 の相対分光放射照度  $M_r(\lambda,T)$  (縦軸左側) とランベルト分光吸収係数  $L(\lambda)$  (縦軸右側) から概略的な傾向を見当つけ、理論式(5.4)、(5.6)及び数値計算式から得た解曲線図 5.12、5.13、表 6.4 は、被熱含水物の厚さに応じて放射源の温度すなわち、遠赤外、中赤外、近赤外の採用選択上有力なデータを提供する。

相対入射放射照度の 90[%]が吸収される厚さ  $x$  を  $D$ [mm]、また、入射放射束の 90[%]が吸収され発熱パワーとなる厚さ  $x$  を  $d$ [mm]とすれば、同一放射源温度  $T$ [K]に対し発熱部を表す距離  $x=D=d$ [mm]が有限化される。

与えられる被照射面照度  $[W/cm^2]$  の如何にかかわらずこれを共通に相対放射照度  $M_r(\lambda,T)=100$ [%]としてし、赤外放射加熱炉基本設計事前の参考資料に供した。

わが国の赤外加熱産業界では、低価格、長寿命、消費電力小、多くの産業例で放射加熱効率大の遠赤外放射加熱式が主流。欧米では、わが国とは逆に、量産に適し、熱的即応性を評価されている近赤外放射加熱式が伝統的に主流となっている。

今後、わが国では放射照度を大きく設計することが容易で高温の加熱も可能な中赤外、近赤外加熱方式の採用の実現が期待され、欧米では“省エネルギー”の見地から一部の産業分野で、中赤外、遠赤外加熱方式が見直される傾向にある。

本稿は文献 5)の抄録で、ご指導頂く共著者市川真人先生に感謝いたします。

### 文 献 (5.3 関係分)

- 1) M.Ichikawa: Infrared Spectra of Penetration Depth into Water and of Water Refraction-index, SPIE vol.1157 Infrared Tech.XV, pp.318-328(San Diego Conf.1989)
- 2) 宮永、中野; 遠赤外線による塗装膜乾燥過程の定量的検討、照学光放射の応用研究専門委員会資料、AR-91-20-23, pp. 20~29,(1991,12月)
- 3) 西村他; 塗装膜の赤外線乾燥における内部効果に及ぼす入射スペクトル分布の影響、化工論文集 10-1, pp.124~126(1984)
- 4) 清水; 遠赤外セラミックスの高度利用に関する総合研究(05303007)の内、西村誠; 加熱乾燥における遠赤外効果の予測・予知, pp.28~40(平7年3月) 及び平成6年度遠赤外加熱・乾燥作用効果に関する調査研究報告、遠赤外線協会、日本機械工業連合会、pp.3~23(上記とほぼ同じ内容)(平7年3月)
- 5) 市川、中尾; 赤外放射加熱される平板状含水物中の放射照度及び発熱パワーの分布特性—理論計算と一般的考察—、照学誌、85-2, pp.147~157(2001)

表5.4 相対放射照度が90[%]減衰する距離  $D$ , 全区間の相対発熱パワーが90[%]となる距離  $d$ ,  $d=D$

Ninety percent of input relative irradiance decreases in thickness  $D$  of water layer, Ninety percent of all relative heat generation takes place in thickness  $d$  of water layer, where  $d=D$ .

放射源温度 [°C]	$J_r$ が90[%]減衰する距離 $D$ , 全区間の相対発熱パワーが 90[%]となる領域 $d$ $d=D$ [mm]	$J_r(T, 0)$ 100[%]時 $H_r(T, 0)$ [%/μm] (曲線の始点)
300	$d_1$ 0.06	9.2
600	$d_2$ 0.12	8.6
900	$d_3$ 0.4	8.0
1500	$d_4$ 4.0	5.2
1800	$d_5$ 15.0	4.4

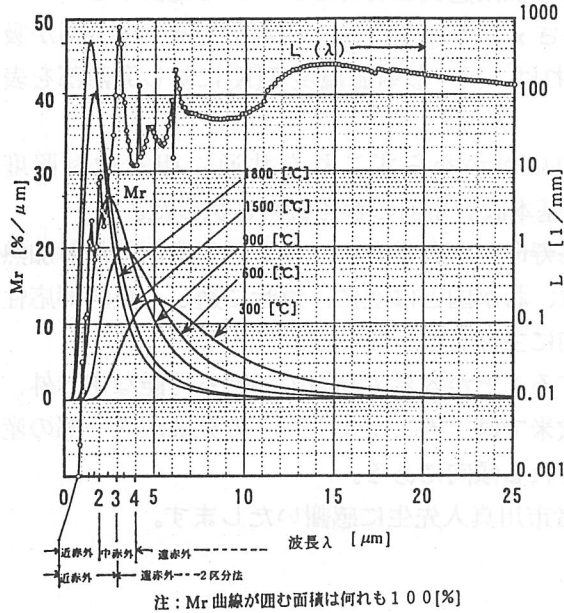


図5.11 相対分光放射照度  $M_r(\lambda, T)$  の5例とランベルト吸収係数  $L(\lambda)$  (曲線上の○印は数値計算上採用した値を示す)  
Spectral relative irradiance with infra-red emitters,  $M_r(\lambda, T)$ , and spectral Lambert absorption coeff.,  $L(\lambda)$ .

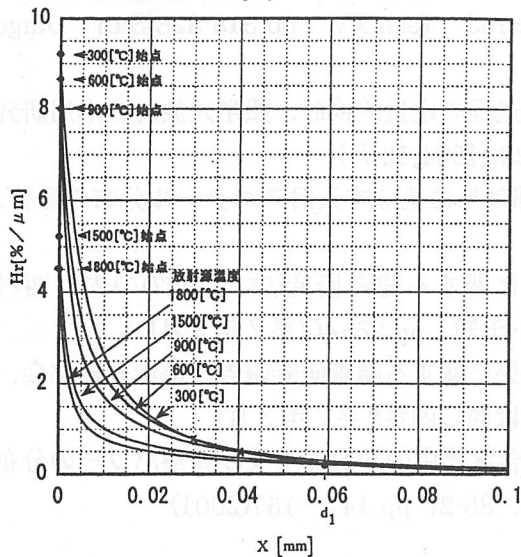


図5.13 相対発熱パワーの水層中分布  
Distribution of relative heat generation in water layer.

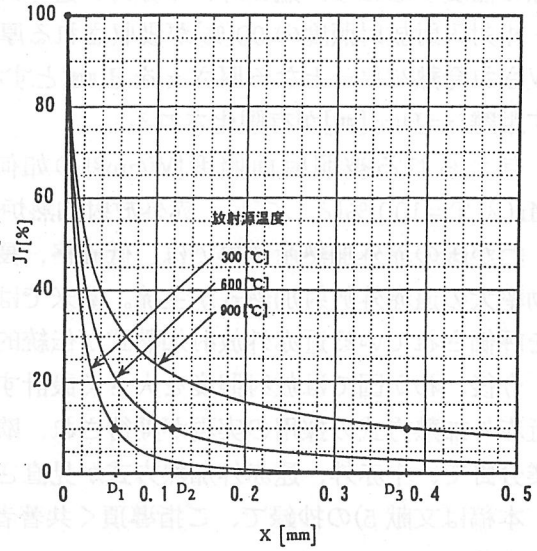


図5.12(a) 相対放射照度の水層中分布  
Distribution of relative irradiance in water layer.

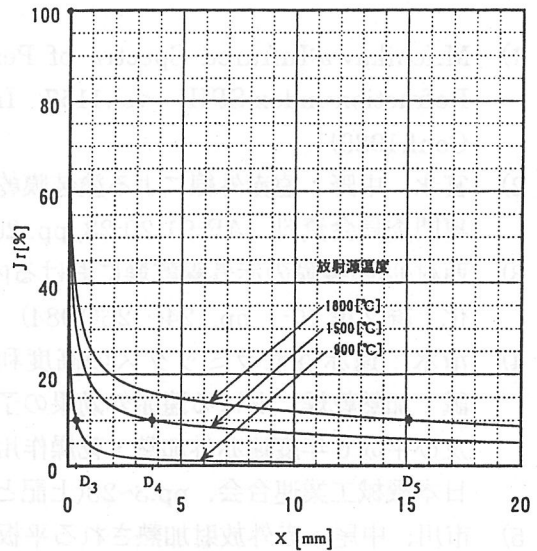


図5.12(b) 相対放射照度の水層中分布  
Distribution of relative irradiance in water layer.

## 第6章 将来展望

### 6.1 赤外放射と計測

前章までのところで、赤外放射の計測に関する基本的事項として、計測の基礎、赤外センサー、計測機器、標準放射源、応用計測、などについて述べてきたが、最後に、まとめとして、これら各項目の今後の動向を含む赤外放射技術の将来展望について、若干の知見を記述することとしたい。

赤外放射に関連する研究を推進する上で、計測を必要とする項目の主なものとしては、次の4つのが上げられる。

- (1) 赤外放射源からの放射束の計測（フォトンの計測，空間分布・時間分布の計測などを含む）
- (2) 赤外材料，赤外応用対象物の計測（（分光）反射率，（分光）透過率，（分光）吸収率，作用スペクトルなど）
- (3) 赤外（分光）応答度の計測
- (4) 赤外放射を利用する計測

以下，上記の(1)～(4)の各項目に関連して，将来展望を述べる。

### 6.2 関連する赤外放射と波長域と計測技術

赤外放射は，通常，波長域： $0.78\mu\text{m}\sim 1\text{mm}$ の放射として定義されるており，その波長域は，可視域に比べると非常に広い。しかし，前章までに述べてきた内容は，一部は，波長域： $50\mu\text{m}$ 程度に亘るものもあるが，そのほとんどは，近赤外放射から中赤外放射にかけてのもので，赤外放射全域のせいぜい5%以下に過ぎない。この理由のひとつは，遠赤外放射についての応用技術が充分開発されていないことによる。遠赤外放射の中でも，波長域： $50\mu\text{m}\sim 1\text{mm}$ の赤外放射については，応用分野もあまり開発されていないし，したがって，この波長域の放射源も開発されていないのが現状である。それ故，計測技術も現状では充分では無く，特に，（分光）放射束の計測については，きちんと国家標準レベルのトレーサビリティを保持して計測できるのは，せいぜい波長域： $0.78\mu\text{m}\sim 4\mu\text{m}$ の，近赤外放射・中赤外放射の範囲までである。

将来動向としては，この応用される波長域が拡大していくにつれて，当然関連の計測技術も開発されていくものと考えられるが，波長： $4\mu\text{m}$ 以上の領域では，構成する赤外放射のフォトンのエネルギーも小さくなってくるため，放射を直接的に計測することが困難になるなどの難点があると共に，特に，波長： $50\mu\text{m}$ 以上の領域については，簡



便な放射源も開発されてなく、また、応用開発の進展についても、必ずしも明確な展望が開けていないなどのこともあり、計測技術についての動向の予測が難しいところである。

### 6.3 遠赤外放射(低フォトンエネルギーの赤外放射)の応用開発の進展

前項で述べたように、遠赤外放射、中でも特に、波長域：50 $\mu\text{m}$ 以上の領域については、今後の応用開発の進展が課題であると考えられるが、この低フォトンエネルギーの赤外放射の応用開発に当たっては、赤外放射そのものの計測の他に、低エネルギーのフォトンの作用や効果の計測が必要であると考えられる。

ただし、この作用の計測についても、作用の結果や効果の現れ方が微弱である可能性があり、簡単ではない。作用の計測の前に、作用の機構やフォトンのエネルギーの伝達機構などが解明されることが必要かもしれない。そのためには、適切な仮説の構築や、作用度そのものの計測が必要となるかもしれない。

## 研究調査委員会報告書の著作権について

本報告書の著作権は（社）照明学会に帰属します。

複写をされる方に

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

