

研究調査報告書

赤外放射の生体・情報処理応用

平成 16 年 3 月

社団法人 照明学会

赤外放射の情報処理・生体応用に関する研究調査委員会

目 次

第1章 まえがき	1
1.1 はじめに	1
1.2 委員会の構成と活動状況	1
1.3 本書の構成	3
第2章 赤外放射の情報処理・生体応用	4
2.1 生体応用	4
2.1.1 生体画像計測の動向	4
2.1.2 サーモグラフィによる生体画像計測	6
2.1.3 脳機能計測	9
2.1.4 赤外放射の生体への影響	11
2.2 環境応用	14
2.2.1 非破壊診断	14
2.2.2 室内環境と都市環境	23
2.2.3 自然環境放射の計測	27
2.3 植物・生態環境	30
2.3.1 野菜・果物等の非破壊検査	30
2.3.2 植物細胞の糖代謝解析関連	33
2.3.3 殺菌効果	37
第3章 赤外放射応用のための技術	40
3.1 フォトンの物質への作用	40
3.2 光放射計測	44
3.2.1 赤外放射計測	44
3.2.2 赤外分光吸収計測	47
3.2.3 高速赤外放射測定装置	52
3.3 赤外線ヒータ、放射率	55
3.4 赤外放射センサ	59
3.4.1 最近のイメージセンサ及びサーモグラフィ	59
3.4.2 ナロウバンドギャップ半導体	62
3.5 医用への応用	65
3.5.1 ハイパーサーミアへの電磁波加熱利用	65
3.5.2 赤外サーモグラフィ非破壊診断	70
第4章 赤外放射利用の将来展望	72
第5章 あとがき	74

第1章 まえがき

1.1 はじめに

(社)照明学会では、社会のニーズに対応して、これまで赤外線工学における種々の研究分野に関する研究調査を行ってきた。特に、赤外放射による加熱・乾燥、暖房、熱加工等大出力レベルのエネルギー利用分野及び新しい検出器、計測器による赤外放射の計測分野においては過去2期の研究調査委員会の活動により、その分野の発展に寄与してきた。

現在、赤外放射は上記分野のみならず、半導体・マイクロエレクトロニクス技術の発展により、リモートセンシング、レーザー・レーダー、リモートコントロールの信号、情報処理への応用の他、脳機能測定を含む生体画像計測及び植物や生体への影響評価、光分解などの物質へ作用など、多岐にわたって利用されている。このように、これまでの熱放射に重点を置いた赤外放射の利用形態だけでなく、赤外放射の持つフォトンの低エネルギー性と可視光に比べ長波長であるという赤外放射の特徴を生かした利用形態、あるいは研究開発を研究調査するために、平成13年5月に「赤外放射の情報処理・生体への応用技術に関する研究調査委員会」が設置され、約3年間活動してきた。

本報告書は、本委員会で実施された調査研究及び講演を赤外放射の情報処理・生体応用と赤外放射応用のための技術を中心に整理し、若干の補筆をしたものである。将来の赤外放射利用分野における産業の活性化の一助になれば幸いである。

(谷治 環)

1.2 委員会の構成と活動状況

本委員会は当初、松井松長委員長、谷治環副委員長の構成で発足したが、松井委員長の体調が思わしくないため、第2回委員会より、谷治副委員長が委員長を勤めることになった。委員会設置にご尽力いただき、かつ、体調の良い時には委員会にもご出席いただき、貴重なご意見をいただいた松井松長先生に改めて感謝申し上げます。

本委員会の構成は次の通りで、委員長1、幹事3、委員14の計18名である。

〔委員会構成〕(順不同、敬称略)

委員長	谷治 環	埼玉大学 工学部
幹 事	谷口 正成	東北文化学園大学大学院 健康社会システム研究科
同	中島 敏晴	東京都立産業技術研究所 計測応用技術グループ
同	太田 二朗	NEC三栄株式会社 赤外マーケティンググループ
		(平成15年 9月まで)
同	山越 孝太郎	同上 (平成15年10月から)
委 員	松井 松長	財団法人日本産業科学研究所
同	河本 康太郎	千代田工販株式会社
同	湊 秀幸	独立行政法人産業技術総合研究所 光技術研究部門
同	木村 嘉孝	木村技術事務所

同	小野 隆	日本大学 理工学部
同	灰田 宗孝	東海大学 医学部医学科
同	石川 和夫	東京工芸大学 工学部
同	垣鏑 直	足利工業大学 工学部
同	関根 征士	新潟大学 工学部
同	石澤 広明	信州大学 繊維学部
同	加藤 久和	日本アビオニクス株式会社 電子機器営業本部
同	伊東 勇人	松下電工株式会社 中央照明
同	橋本 篤	三重大学 生産資源学部
同	澤井 淳	神奈川工科大学 応用化学科

また、本委員会において話題提供としてご講演いただいた講師は次の通りである。

[講師リスト] (順不同、敬称略)

野呂 誠	横河電機株式会社 R&Dセンター
新里 寛英	株式会社ベテル ハドソン研究所
坂上 隆英	大阪大学大学院 工学研究科
小笠原 永久	防衛大学校 システム工学群

委員会の開催回数は10回で、活動状況は次の通りである。

第1回委員会 (平成13年7月27日)

- ・委員会設置趣旨説明及び委員会の運営方針の審議

第2回委員会 (平成13年11月2日)

- ・公開研究会開催：「光応用計測による農産物の非破壊計測」講師：石澤委員
「光トポグラフの脳機能測定への応用」講師：灰田委員
- ・委員会構成と今後の委員会運営について検討

第3回委員会 (平成14年2月1日)

- ・話題提供：「最近の赤外線カメラとその応用」講師：太田幹事
「赤外領域の放射環境」講師：松井委員
- ・委員会構成と今後の委員会運営について検討

第4回委員会 (平成14年5月10日)

- ・話題提供：「赤外放射検出器について」講師：谷治委員長
「遠赤外ヒータに放射部材として用いられるセラミックスのFTIRによる分光放射率測定方法 (JIS R 1801)」と「遠赤外線用語 (JIS Z 8117)」講師：木村委員
- ・今後の委員会運営について検討

第5回委員会 (平成14年9月4日)

- ・話題提供：「赤外放射に於けるフォトン作用に関する一考察」講師：河本委員

- ・工場見学：NECワイヤレスネットワークス株式会社
- 第6回委員会（平成15年1月16日）
- ・話題提供：「MEMSファブリー・ペローフィルタを応用したCO₂/H₂Oガスセンサ」講師：野呂誠氏（横河電機㈱、R&Dセンター）
 - 「高速赤外放射測定装置の開発」講師：新里寛英氏（㈱ベテル、ハドソン研究所）
 - ・今後の委員会運営について検討
- 第7回委員会（平成15年5月19日）
- ・話題提供：「ペーパー・ハンカチの浸水検出への赤外放射技術の応用」講師：谷口幹事
 - 「アクティブ・サーモについて」講師：阪上隆英教授（大阪大学大学院、工学研究科）
 - ・今後の委員会運営について検討
- 第8回委員会（平成15年9月9日）
- ・話題提供：「建築におけるサーモカメラの利用実態」講師：垣鏑委員
 - 「生体情報を探るための赤外線放射の応用」講師：石川委員
 - ・委員会報告書の内容と執筆分担についての検討 ・新設委員会提案書の検討
- 第9回委員会（平成15年12月18日）
- ・話題提供：「微小赤外放射源の測定技術の検討」講師：中島幹事
 - 「赤外分光法による懸濁細胞の動的糖代謝挙動の把握」講師：橋本委員
 - ・委員会報告書の内容と執筆分担についての検討
 - ・「赤外放射の応用関連学会等年会」への講師の推薦について
- 第10回委員会（平成16年3月8日）
- ・話題提供：「赤外線の殺菌効果」講師：澤井委員
 - 「応答曲面法を利用した赤外線サーモグラフィ鋼板減肉同定法」講師：小笠原永久（防衛大学校、システム工学群）
 - ・委員会報告書内容の検討

1.3 本書の構成

各章の主な内容は以下の通りである。

第1章はまえがきであり、当委員会の設立の背景、目的、構成及び活動状況をまとめた。第2章は実際の赤外放射の情報処理・生体応用について、生体応用、環境応用及び植物・生態環境に分類し、その研究結果をまとめた。第3章は赤外放射応用のための技術について、フォトン物質への作用、要素技術としての光放射計測、赤外線ヒータと放射率、赤外放射センサ技術、及び医学への応用動向などをまとめた。第4章は本委員会の研究調査を踏まえ、これからの赤外放射利用の将来を展望した。第5章はあとがきとして、赤外放射に関する照明学会の今後の取り組みを紹介した。

（中島 敏晴）

第2章 赤外放射の情報処理・生体応用

2.1 生体応用

2.1.1 生体画像計測の動向

1. はじめに

生体内部の情報を非侵襲的に計測する技術は、生物学、特に医学診断では重要であり、超短波長のγ線、X線（X線CT）と超長波長のラジオ波（MRI）を用いる方法が実用化されている。一方、近年のオプトエレクトロ技術、特にレーザ、光ファイバー、微弱光検出法などの発達と生体内での光の振る舞いの解明により近赤外-赤外を用いた生体イメージング技術の実用化が進んでいる。

近赤外-赤外を用いた生体計測には、①透過・吸収を利用するもの（例えば赤血球の光吸収を測定するオキシメータ）、②放射を計測するもの（例えばサーモグラフィ）、③散乱現象を用いるもの（例えばレーザドップラー血流計）などがある。これらの計測手法は赤外光センサーとコンピュータ画像処理の発展とともに、近赤外-赤外による生体イメージングを可能にしている。

2. 生体イメージング

生体内で酸素供給に関わる色素蛋白として血液中のヘモグロビン是有名であり、この色素蛋白は酸素と結合した状態（HbO₂）と解離した状態（Hb）では吸収スペクトルが異なる。ヘモグロビンを含めて、酸素代謝に関する研究は古くから行われており、1942年、Millikanが人間の酸素飽和度モニタに初めて赤外光を用いている。1977年にはJobsisが猫の頭部に近赤外光を照射して透過した光の検出に成功し、その透過光が生体内組織の酸素代謝を反映していることを示した。一方、日本においては1992年に「光断層イメージングシステム研究開発」のプロジェクトが開始した。また、1995年には小泉らが近赤外光を用いた2次元の脳機能イメージングを発表した。近赤外光による脳機能画像計測の原理は、酸素化・脱酸素化ヘモグロビンの濃度変化を、2つ以上の波長の近赤外光を用いて頭皮上から計測し、脳における神経活動に関連した血流の変化を計測する方法である。頭皮上のある位置から近赤外光を照射し、吸収・散乱しながら伝播して減衰した光を約20～30mm離れた頭皮上の別の地点で検出し、大脳皮質領域におけるヘモグロビン濃度の変化から脳血流を計測し画像化するものである。その後の多くの研究により、この技術は臨床装置として製品化されるに至っている。現在では、非侵襲な脳機能検査装置として利用されており、被験者は装置に拘束されずに、計測用の専用キャップをかぶるだけで測定できることで、最近では生後数日の新生児の脳活動についての画像計測例なども報告されている。

今後、赤外光を用いた生体イメージングシステムは、空間分解能の改善やS/Nの向上、ヘモグロビン濃度の絶対変化量測定法の確立など改良の余地はあるが、臨床医学や脳神経科学、リハビリテーションに関連した脳機能計測などの広い分野での利用が期待できる。

赤外センサーを用いて測定物体表面からの温度情報を取り出し、画像化するサーモグラフィは1960年代末頃から非侵襲な画像診断の一部門として応用された。日本では1981年

に健康保険の採用が認められ、広く応用されてきている。表1に日本サーモロジー学会基準のサーモグラフィ検査適用疾患の例を示した。

表1 サーモグラフィ検査適用疾患

適用領域	適用疾患例	診断原理
血行障害	動脈狭窄・閉塞性疾患、静脈瘤、動静脈瘤血管奇形、リンパ浮腫等の疾患、血流に影響を及ぼす薬剤・治療法の効果の経過観察、移植皮膚片の活着状況の判定、インポテンツの病態分析	組織血行流の推定と血流分布異常または異常血管による温度分布異常の発見
代謝異常	多くの皮膚疾患、皮下組織疾患など	組織代謝率の異常部位の発見
慢性疼痛	慢性疼痛性疾患、頭痛、後頭神経痛、三叉神経痛、内臓関連痛、脊髄神経根刺激症状（椎間板ヘルニアなど）などの筋神経疾患および間欠性跛行など	侵害受容器由来の慢性疼痛と血管性疼痛および筋肉虚血性の疼痛の存在部位の温度異常分布の発見
自律神経障害	自律神経疾患、脊髄神経疾患、および交換神経系に影響を及ぼすと思われる神経疾患神経ブロックの効果判定、麻酔深度および部位の判定、Raynaud 疾患の各種負荷による分析、電気刺激の効果判定	自律神経系ことに交感神経系の活動度の神経皮節温度分布 (thermatome) による分析、負荷反応分析
炎 痛	各種表在性急性炎症、リウマチ様関節炎慢性炎症の経過観察や消炎剤の治療効果の判定	炎症による高温の発見と指標化による炎症の程度の判定
腫 瘍	乳房腫瘍、甲状腺腫、皮膚腫瘍、骨肉腫、陰囊水腫、その他の表在性腫瘍、転移腫瘍の発見と悪性度の判定	代謝率の異常による鑑別診断、動静脈吻合による高温皮膚静脈の発見
体温異常	神経性食思不振、温度中枢の異常を思わせる疾患、ショックのモニター	体温の異常と体温の末梢温の較差のモニター

(日本サーモロジー学会基準)

画像診断の多くが構造画像の解析を主体としているのに対して、サーモグラフィによる診断は生理機能画像を診るもので、体表温度の背後に潜む生理的変化を画像化するものである。自然な状況下での体表温度は、体内で発生した熱を体外に放出して体温の恒常性を保つ重要な働きを持っている。流入熱としては血流によって運ばれてくる熱量、深部から伝導されてくる熱量、体表組織そのものの代謝によって生産される熱量がある。一方、流出熱としては放射、発汗や蒸散、対流がある。これらの熱量のバランスが崩れることにより体表温度の変化が生じ、サーモグラフィで異常画像としてとらえられることになる。

近年、快適性や感情等の客観的評価について脳・神経科学分野で様々な研究が行われている。臨床面において、感情等は自律神経系との関連性が高いとされており、自律神経活動を受けて変動する体温調節パラメータ（皮膚温、深部体温、皮膚血流など）を計測し、評価に用いることが試みられている。顔面皮膚温を用いたストレスや感情の評価、顔面皮膚温を用いたポリグラフの開発、顔面皮膚温の空間周波数特徴による個人識別等にサーモグラフィが活用されている。また、世界的な課題となった SARS（severe acute respiratory syndrome；重症急性肺炎症候群）の予防監視対策としてサーモグラフィが空港で使用されている。

今後のサーモグラフィによる画像診断の大きな課題は、温度分解能の改善と画像処理の高速化である。温度分解能を改善する方法としてはロックイン方式とよばれる任意に設定した一定間隔のフレームレートに基づいて画像を取り込み、連続的に演算を行い、刻々と変化する温度変化量からの加算平均化した画像を作成することで温度分解能の改善が試みられている。生体観察においては、心臓の鼓動をトリガーとしたロックイン方式による画像の取り込みを行い、演算処理により温度分解能が改善されることが示されている。赤外センサーの改良とともに画像処理技術の高機能・高速化によって、サーモグラフィによる画像診断の応用範囲がさらに広がるものと期待される。

（石川 和夫）

2.1.2 サーモグラフィによる生体画像計測

1. はじめに

赤外線の世界は1800年にW. Herschelが可視スペクトルの赤色より長い波長の所で熱効果の大きい放射線の存在を発見した事から始まる。生体分野に於ける赤外線の応用は、医療・スポーツ・心理学等の分野で活発に採用された。特に医療分野では、1984年に医用赤外撮像装置のJIS規格が制定され、注目を集めた。自律神経障害・血行障害・代謝異常・慢性疼痛・乳癌等の領域で盛んに研究が行われた。本章では、医用サーモグラフィを使用した人体測定の手法と実施例について記述する。

2.測定手法

人の体温を測定し、病気を判断する手法は、古代から行われている有効な手段の一つです。人の体表面から放射される赤外線を捉え、非接触で体温の異常を温度パターンとして表示できるサーモグラフィが医療用として注目されたのは極めて自然の事かもしれません。サーモグラフィ装置を使用して生体を計測する意義及び測定手法について下記に示す。

(1)生体計測の意義

- ①生体のバイタルサインである体温を体表面温度分布として高精度で測定できる。
- ②X線診断装置など放射線を生体に照射する能動法と異なり生体から自然に放射されている赤外線を受動的に測定する。
- ③測定時間が短く、簡単な取扱いと反復使用が可能なため、日を追って検査する患者

や集団検診に有効である。

④検査結果の出力は、写真と同じ映像であり、客観性がある。

(2)環境条件

人体を測定する場合、体表温度は様々な要因（環境温度・照明・エアコン・ヒータ等）により影響を受ける。特に環境に関しては体表温度に重要な影響を及ぼす事から、規定が設けられている。室内環境条件としては、半裸の状態で $26 \pm 1^\circ\text{C}$ 湿度 60% 全裸の状態で $29 \pm 1^\circ\text{C}$ を可能なかぎり一定に保つ事が望ましいと報告されている。生体の体表温度を決める最も重要な因子は皮膚血流量である。環境温度が高いと血管は拡張し、その結果体温は上昇する。逆に環境温度が低いと血管は収縮し、体表温度は低下する。このため、生体温度と環境温度が平衡となる安定した中立温度を保つ必要がある。

(3)室温への馴化時間

皮膚血流は、交感神経（血管収縮神経）によって調節されている。特に四肢先端部の皮膚血流は、温度調節のみを対象として作動すると考えられている。外気温の低い冬場は交感神経は緊張傾向にあり、四肢体表温度は末梢から著しく温度低下が起こる。このような条件を排除するためには、室温に馴化させるための十分な時間が必要となる。サーモロジー学会では、15分～20分間測定部位を露出させ、室温に順応させる時間を十分に取る事を推奨している。しかし、冬場などは順応性が悪くなる事から、適宜馴化時間を長く取る配慮が必要である。

(4)末梢循環の測定手法

健常人の四肢は、末梢部（爪）が高温を示し、かつ左右対象である。末梢循環障害を有する場合は全体が低温となり、特に末梢部がより低温を示す。サーモグラフィで末梢循環を把握する手法は、冷水負荷試験を行う事により把握できる。冷水負荷試験は、 10°C の冷水に1分間、または、 0°C の氷水に上下肢を浸し、20分間の回復過程を把握する。健常人との回復過程の違いや季節毎の違いにより末梢循環の状態を把握する有効な手法であり、医療現場では糖尿病患者に対する血行動態の把握に使用されている。

(5)サーモ画像事例



負荷前

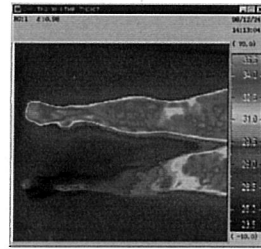
負荷直後

負荷20分

画像1 冷水負荷試験実施例 20分経過しても末梢部の回復が遅い。



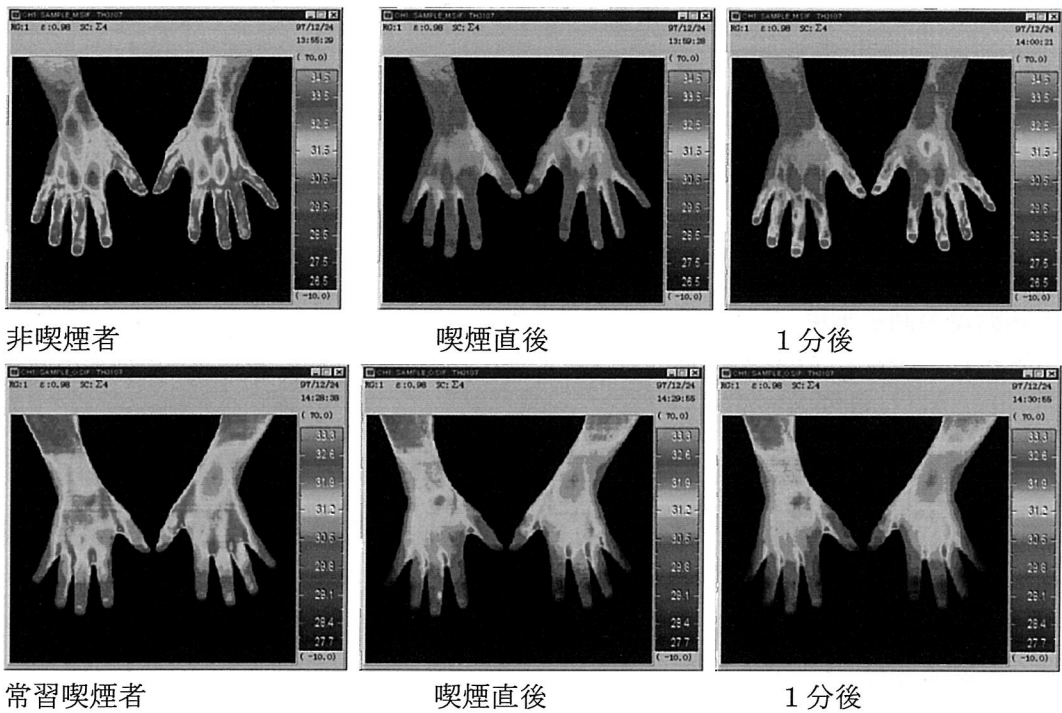
画像 2 薬剤投与後の血流評価



画像 3 動脈閉塞状況の把握

(6)非喫煙者と常習喫煙者との比較

社内にて常習喫煙者（筆者）と禁煙 5 年目の人間との温度比較を行った参考事例である。喫煙者 40 歳・非喫煙者 35 才の比較である。セブンスター 1 本を同時に喫煙し回復過程を撮影した。



画像 4 常習喫煙者と非喫煙者の回復過程の違い

参考文献

- 1) 藤正巖：生理機能画像診断 熱画像検査法 日本サーモロジー学会
- 2) 生理学的検査 7 項目講習会テキスト 社団法人日本臨床検査技師会
- 3) 三栄レポート No. 127

(太田 二期)

2.1.3 脳機能計測

波長 700nm～900nm の近赤外光は比較的体内を透過しやすく、酸化ヘモグロビン (oxy-Hb) と還元ヘモグロビン (deoxy-Hb) の吸収スペクトルが異なることから、パルスオキシメーターなど無侵襲のヘモグロビン測定装置などの生体計測に用いられてきた。この性質を利用し、頭蓋外から無侵襲に頭蓋内のヘモグロビン変化を検出することが可能であること、脳は活性化すると代謝が亢進し、更にその代謝の亢進量を上回って脳血流が増加することから、近赤外光を用いて脳機能を計測することが可能となる。脳機能測定方法には直接的に神経活動を測定する脳波 (EEG: electro encephalo graphy)、脳磁図 (MEG: magneto encephalo graphy) と脳の活性化にともなう脳血流変化を測定する PET: positron emission tomography、SPECT: single photon emission tomography、f-MRI: functional magnetic resonance imaging とともに近赤外光 NIRS: near infrared spectroscopy を利用した光トポグラフィ法がある。光トポグラフィは比較的最近開発された手法であり、その応用は近年急速に拡大しつつある。ここでは日立メディコ製光トポグラフィ装置 ETG-100 を用いた脳機能測定法を説明する。図 1 から 4 は装置の外観、プローブおよびそのホルダー、装着状況、タスクを示す。

頭部に図に示すように片側 9 本、両側で 18 本のガラスファイバーを運動野相当部位に装着し、手の把握運動をタスクとして図 4 の様に負荷し、2 回を積算し、負荷時と安静時の



図 1 ETG-100 装置

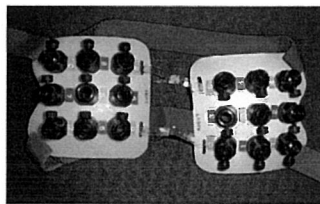


図 2 プローブ

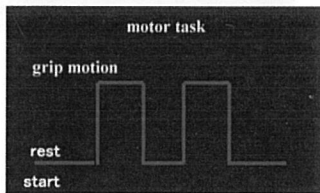


図 4 タスクは 1 分 2 回

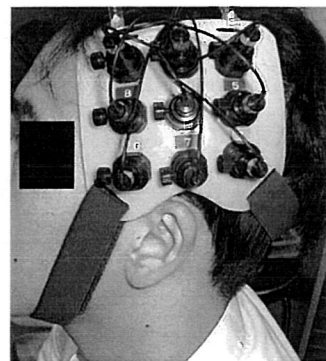


図 3 プローブ装着状況

差をとることで図 5 の様な片側 12 チャンネルのヘモグロビン変化が得られる。これらを 2 次元画像として平均化して表示するのが図 6 の光トポグラフィである。光トポグラフィは経時の変化を表示できる。得られた信号の意味合いについては、光トポグラフィと functional MRI との同時測定を行い検討した。

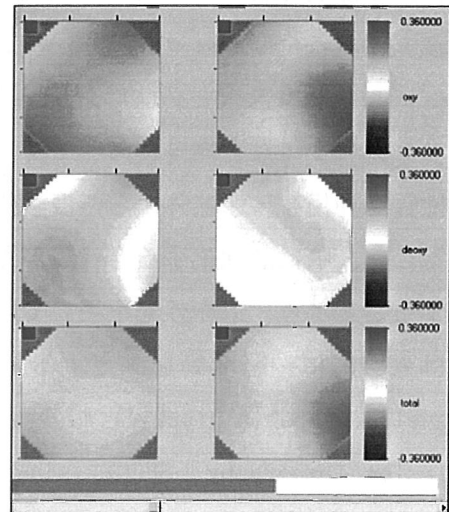
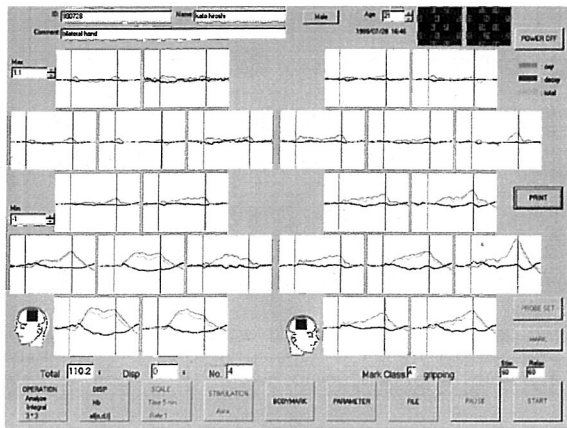


図5 正常対照両手把握運動時のヘモグロビン変化

図6 図5の光トポグラフ

その結果 oxy-Hb と total-Hb と functional MRI 信号とは強い相関を示したが、deoxy-Hb とは相関が殆ど見られなかった¹⁾。これら光トポグラフ信号の意味については拙著を参照されたい¹⁾。

光トポグラフのプロープを前頭部に設置し、言語負荷を加えると左言語野での oxy-Hb と total-Hb の上昇が、後頭葉では光刺激に対して同様の反応が認められ、脳機能を光りにより検出できることが明らかになっている。正常の光トポ信号では図7に示す様に負荷時に oxy-Hb と total-Hb の上昇と deoxy-Hb の減少が認められるが、潜在的な内頸動脈閉塞症の患者での同様の測定を行うと、図8に示すごとく、上記の正常な反応が見られず deoxy-Hb の上昇を示すことが認められる。

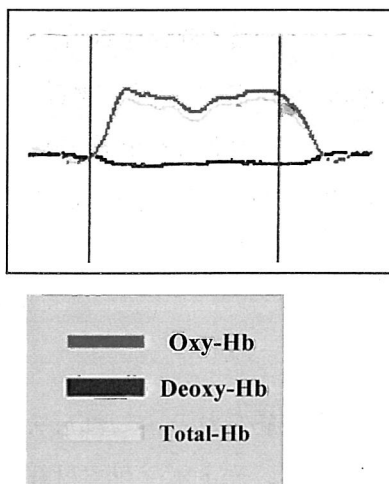


図7 正常脳のヘモグロビン変化のパターン

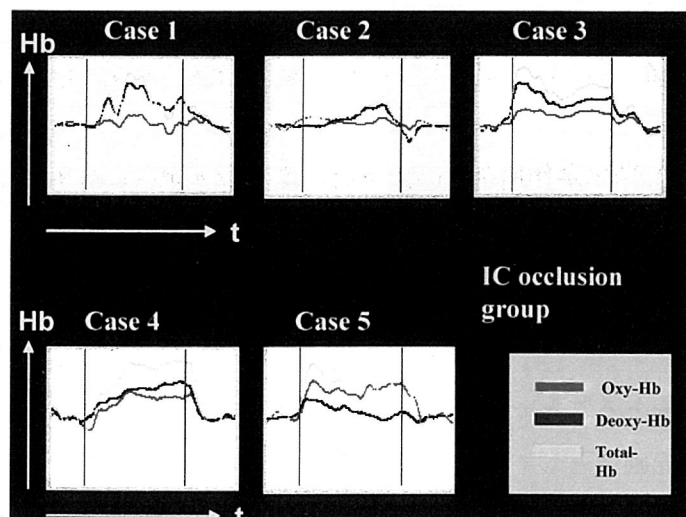


図8 潜在的な内頸動脈閉塞症のヘモグロビンパターン

また、多発脳梗塞患者においても同様の負荷を加えたとき正常パターンが減少することが認められている。これも潜在的脳循環の障害を検出しているものと考えられる。

以上の様に、近赤外光を用いた光トポグラフィは正常脳を対象とした脳機能測定に利用することが可能であるばかりでなく、潜在的な内頸動脈閉塞症のスクリーニングや、多発脳梗塞の脳循環状態の把握にも利用することが可能と思われる。近赤外光による測定の利点は無侵襲であることから、繰り返しや連続測定が行えること、ベッドサイドでの測定も可能であることなどがあげられるが、一方、現在の装置は光りが脳の中でどれだけ散乱されて戻ってくるか、つまり光路長が求まらないことから、ヘモグロビンの絶対値を求めることができない。そのため、患者自身の時間的変化の比較や被験者相互の比較などが難しくなり、今回ご紹介した様に、安静時と手の把握運動をしたときの信号の差をとることで、不確定な要素を相殺するなどの工夫を要するのが欠点である。

参考文献

- 1) 灰田 宗孝：脳機能計測における光トポグラフィ信号の意味, Medix, 36 (2002) pp. 17-21
(灰田 宗孝)

2.1.4 赤外放射の生体への影響

光放射(optical radiation; 紫外放射, 可視放射, 赤外放射 の総称)が人体に照射され、吸収されると、一部は光化学反応を振興させ、一部は吸収された人体の部位において、そのまま熱エネルギーに変換される。後者の変換された熱エネルギーは、その部位の周辺の組織の温度を上昇させることとなる。

光放射の中で、波長の長い赤外放射は光子のエネルギーが小さい(3.1 項で詳述する。)ため、人体に吸収されても、光化学作用を生じることほとんど無い。人体だけでなく、一般の物質に対しても光化学作用を生じることなく、熱エネルギーに変換され、その対象物の温度を上昇させるので、赤外放射は加熱用として利用される。赤外放射を含めた光放射の諸作用を、波長に従ってまとめたものを、表1(次ページ)に示す^{1),2)}。この表1には、利用する上での参考として、作用の他に、代表的な波長区分名称、並びに関連する放射源の種類も合せて記述してある。以下に、この表1の諸作用の中から、赤外放射の生体への作用に関連するものについて述べる。

(1) 人体への温熱効果と温熱感³⁾

人体の組織の温度が適度に上昇した時に得られる感覚を温熱感といい、暖房などの条件設定の基準とされる。赤外放射を人体に照射する場合に、人体が温熱感を感じ始める放射照度は、ほぼ $20\sim 30$ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$] である。更に放射照度が増加して、ほぼ $50\sim 60$ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$] になると、顕著に感じ

られるようになる。温熱感は感覚としても重要であるが、機能的にも体組織の温度を上昇させることによって、体内の血液の循環促進や、新陳代謝の促進を行うので、人体の健康を保持増進する効果がある。

(2) 組織の切離⁴⁾

人体に照射される赤外放射の放射照度が $60 \text{ [W}\cdot\text{m}^{-2}]$ を越えて大きくなると、温熱感を通り越して、熱く(或いは痛く)感じるようになる。更に放射照度が大きくなると、人体の組織が熱傷害や熱炎症を起こし(いわゆる火傷の状態)組織が死滅することとなる。もっと放射照度を上げると、被照射部分の皮膚が炭化したり、蒸発してなくなってしまう。

この状態になるまで赤外放射を照射することは、通常は絶対に避ける必要があることは言うまでもないが、高放射照度の赤外放射を細い(面積の小さい)ビーム状にして皮膚に照射すると、線状の照射部分に添って皮膚の組織が蒸発して無くなり、その部分の皮膚が切離される。これを応用したものが、医療に応用されているレーザー・メスである。

手術の場合、金属メスで皮膚を切離した場合に比べて、術後の融合までの期間が早くなり、手術痕も目立たなくなる、といわれている。

使用されるレーザーは、波長: $10.6 \text{ }\mu\text{m}$ の、遠赤外域の二酸化炭素レーザーである。

参考文献

- 1) 照明学会編:照明ハンドブック, オーム社(昭 53)
- 2) 照明学会編:ライティング・ハンドブック, オーム社(昭 63)
- 3) 花岡 利昌:赤外線温熱生起放射量について, 家政学研究, 22,22,(昭 51) 116
- 4) レーザー学会編:レーザーハンドブック, オーム社(昭 57)

(河本 康太郎)

表 1 光放射の波長区分, 作用効果, 対応する人工光源の種類

波長(nm)	区分	作用効果	関連する人工放射源例	
1	X線			
100	遠紫外放射 UV-C	オゾンの生成 陰イオンの生成 殺菌作用 紫外性眼炎(角膜炎, 結膜炎)	石英低圧水銀ランプ 短波長殺菌ランプ 殺菌ランプ 多金属(カーボン)アーク(灯), (重)水素放電ランプ	
200 280		中紫外放射 UV-B	紅斑作用 日光皮膚炎 [日焼け] ビタミンD生成	医療用 UV-B 蛍光ランプ 光化学用水銀ランプ 健康線用蛍光ランプ
315 320	近紫外放射 UV-A	色素沈着作用 日光色素増強 [日焼け] PUVA(ソラレン光治療) 退色促進 光化学 [光硬化] 蛍光	ブラックライト蛍光ランプ 医療用 UV-A 蛍光ランプ 光化学用水銀ランプ ブラックライト蛍光ランプ	
400		可視放射	青色光網膜傷害 新生児黄疸の光治療 シアゾ式複写 植物の屈光性制御 概日リズム制御 (メラトニン・ホルモン生成制御) 昆虫・魚類の走光性制御 (人間の)視覚 鑑賞・効果演色 光化学 [工業的光合成] 植物の光合成 昆虫の複眼の明順応 植物の光周性制御	高輝度ハロゲンランプ 青色蛍光ランプ 複写用蛍光ランプ 太陽光蛍光ランプ 青色蛍光ランプ, 高圧水銀ランプ 一般照明用光源 効果演色用蛍光ランプ メタルハライドランプ 高圧ナトリウムランプ, メタルハライドランプ 純黄色蛍光ランプ 白熱電球, 遠赤色蛍光ランプ
780	近赤外放射		人体への温熱効果 加熱, 乾燥, 保温 調理 情報処理(OCR)	赤外電球(こたつ用, 医療用) 赤外電球(乾燥用) ハロゲンランプ ハロゲンランプ, レーザ, LED
2[μm]	中赤外放射		サーモビジョン応用 加熱	金属ヒータ, ラジアントバーナ(900°C)
4[μm]	遠赤外放射		加熱, 乾燥, 保温 リモートセンシング レーザ加工, レーザメス	遠赤外ヒータ, ニクロムヒータ 遠赤外ヒータ CO ₂ レーザ
1[mm]	マイクロ波			

(河本 康太郎)

2.2.1 非破壊診断

2.2.1.1 サーモグラフィによる非破壊診断

1. はじめに

近年、設備維持管理の時代と言われ、地球環境問題に対する意識の高まりとともに、新たな設備投資が抑制され、既存設備をいかに効率良く使用し設備維持を図るかが環境問題を含めた最大のテーマとなっている。サーモグラフィ装置（以下サーモトレーサ）は、非接触で見たい設備の温度分布を瞬時に捉える事ができ、異常温度診断が容易に行える事から電力設備・鉄鋼プラント設備・コンクリート設備等のメンテナンス業務で活発に採用されて来た。さらに最近では、これらの用途にとどまらずサーモトレーサを利用した設備保全の有効性が認められ、応用範囲が急激に拡大して来ている。

2. 赤外線の原因

赤外線とは、可視領域の隣にある $0.72\mu\text{m}\sim 1000\mu\text{m}$ の領域を指す。雨上がりに見える虹は、光の分光が色で確認できる。虹は、外側から赤橙黄緑青藍紫である。赤外線は、可視領域で確認できる虹の一番外側が赤色で識別できる事から、赤色の外側にある波長帯域を赤外と呼ぶようになった。（図1）いかなる物体でも絶対零度（ $0\text{K}:-273.15^{\circ}\text{C}$ ）以上であれば、ある赤外波長のエネルギーを放射している。放射エネルギーと波長の関係は、プランクの法則として確立され、後に赤外製品開発の礎となった。赤外波長帯域の中には、水蒸気・炭酸ガス等、赤外線の放射を遮る波長帯がある。このため測定精度に大きく影響を与える。赤外装置を考える場合は、赤外線の透過率の良い波長帯域にセンサ感度を合わせる必要がある。一般的に知られている領域は、赤外線の透過特性が良い $3\sim 5\mu\text{m}$ （短波長）・ $8\sim 13\mu\text{m}$ （長波長）である。（図2）

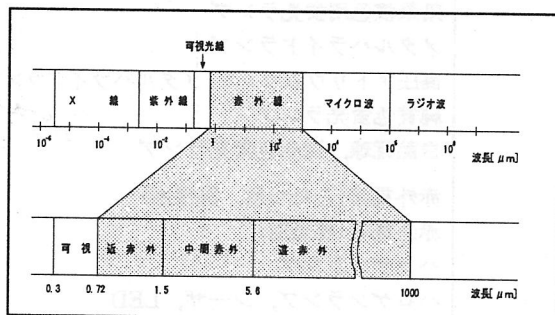


図1 電磁波における赤外線領域

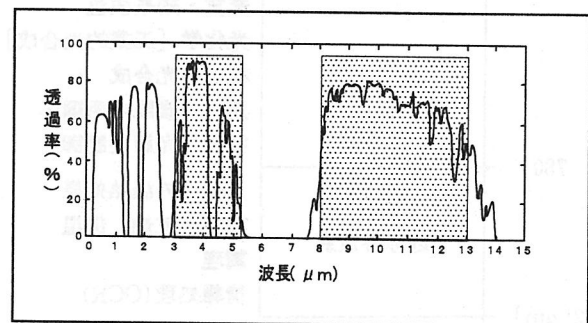


図2 大気の透過率

3. 設備診断への応用（電力設備）

電機設備診断でのサーモトレーサの利用は、ボルトのゆるみ・腐食・圧着不良・経年変化による配電線の切断・不良碍子の発見である。サーモトレーサで電機設備を測定する上で注意する点は、測定する部位が金属であり放射率が低い事である。このため周囲の環境放射が画像内に写りこみ正確な測定ができない場合がある。放射率を事前に知っている場

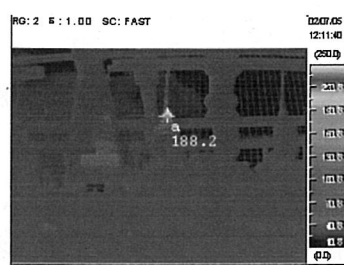
合は、放射率補正機能で実際の温度を把握できる。放射率が不明な場合は、事前に測定箇所放射特性の良いテープを貼るか黒体塗料を塗っておく事をお勧めする。電機設備検査の目的を表1に熱画像例を下記に示す。

表1 電機設備検査

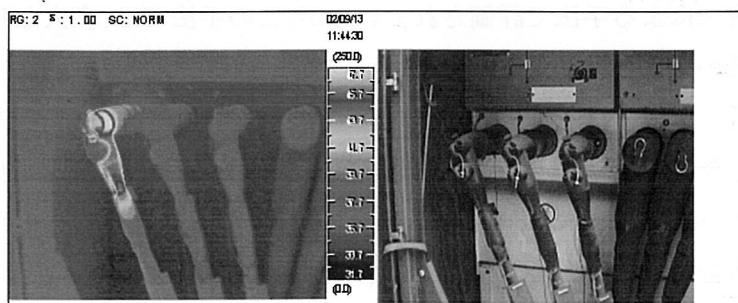
配電設備	配電盤接続部の緩み・腐食 配電線分岐／接続部（クランプ・コネクタ） 過負荷
遮断機	柱状遮断機の投入不良
その他	配電線応力断線ヶ所の検出 碍子絶縁不良 モータ異常加熱



画像1 配電盤内接続部異常



画像2 コンデンサ異常

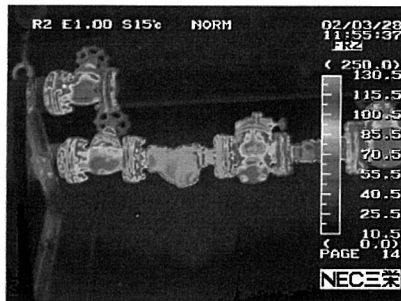


画像3 パットマウントエルボー部異常

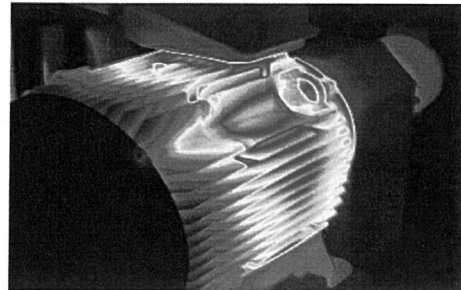
4. 機械設備への応用

機械設備への応用は、モータ・駆動装置・コンベア・軸受け等の異常検知である。発電プラントでは、設備の老朽化に伴う炉壁・煙道・配管等の保温材劣化診断に利用され熱効率の良い運用やメンテナンス時期の決定に利用される。例えば、TH7102MVで煙道・蒸気管等を測定すると、保温材劣化や欠落した箇所が正常な場所より高温に表示される。また、LNG等の冷配管ではその逆に正常な箇所より低温に表示される。機械設備等の測定では、十分な撮影距離が得られない場合や逆に近づけない場合があるため、十分な

分解能を得られない場合がある。この場合は、広角レンズ・望遠レンズを目的に応じて使用することをお勧めする。機械設備熱画像例を画像4、画像5に示す。



画像4 温熱配管



画像5 モータ異常加熱

参考文献

- 1) 三栄レポート NO. 106

(太田 二郎)

2.2.1.2 ペーパーハニカムパネルの浸水検出への赤外放射技術の応用

1 はじめに

ペーパーハニカムパネルは、軽量、強固、ならびに、安価という特徴を有しており、現在、輸送用コンテナ、建築用外装パネル、搬送車両の壁面や床材など、いろいろな分野で使用されている。しかし、本パネルを屋外で長時間放置した場合、雨水等がパネル内に浸透し、パネルの耐久性の劣化要因となる場合がある。従来、パネル内の浸水の有無は熟練者による打音法による手法で評価されているが、この手法では、多大な時間と作業を要し、評価精度も低いと言われている。

一方、最近、建築、構造物の非破壊検査に赤外放射技術を応用した評価方法が検討されている。¹⁾ 今般、パネル内の浸水を非接触で評価する一手法としてサーモグラフィの応用を試み、その有効性が得られた。²⁾ さらに、アクティブサーモの応用を試みた結果、パネル内の浸水を明確に検出できる可能性が得られ、その結果の一部を紹介する。

2 被測定ハニカムパネルの概要

今回の実験では、可搬型シェルタに使用されている電磁遮蔽パネルを被測定ハニカムパネルとした。被測定ハニカムパネルは図1に示すように、蜂の巣状のペーパーハニカムを両面からアルミ板で挟み、接着した構造である。アルミパネル板の厚さは約1mm、ハニカムのペーパーの厚さは約0.2mmである。

なお、ハニカム内には樹脂で硬化したウレタンが挿入されている。また、アルミパネルの表面はフタル酸系塗装、あるいは、ウレタン系塗装が施されている。

3 表面温度の測定と実験条件

被測定ハニカムパネル表面の温度分布、ならびに、温度変化の測定には、市販の赤外線撮像装置(NEC三栄製：TH3104MR)を利用した。

とくに、今回の実験では、以下に示すように、二つの実験条件(実験条件A、実験条件B)で被測定ハニカムパネルの表面温度を測定した。

[1] 実験条件A：

図*.2に示すように、被測定ハニカムパネルの一方を剥離し、ペーパーハニカムの高さ約数ミリのアルミパネルを下にして、水平に固定し、ハニカム面に湯水(約 80℃)を滴下(実験条件A 1)、あるいは、約 10mm 四方、厚さ 10mm の氷片を置き(実験条件A 2)、その時のアルミパネル表面の温度分布とその温度変化を赤外線カメラで検出、測定した。

[2] 実験条件B：

実験方法Aで剥離したもう一方の被測定ハニカムパネル(ペーパーハニカムの高さ：約 45mm)の二箇所直径約 50mm、ペーパーハニカムを取り除き、氷水を注ぎ、図2に示すように、被測定パネルの下部約 50mm から電気ヒータ(AC100V,1200W)でアルミパネルの表面を加熱後、アルミパネル表面の温度分布と温度を測定した。

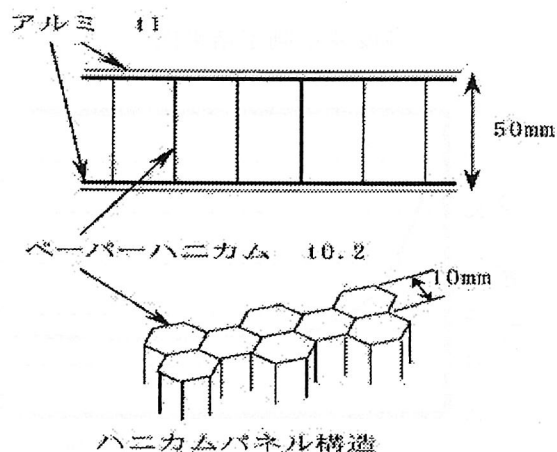


図1 被測定ハニカムパネルの概略図

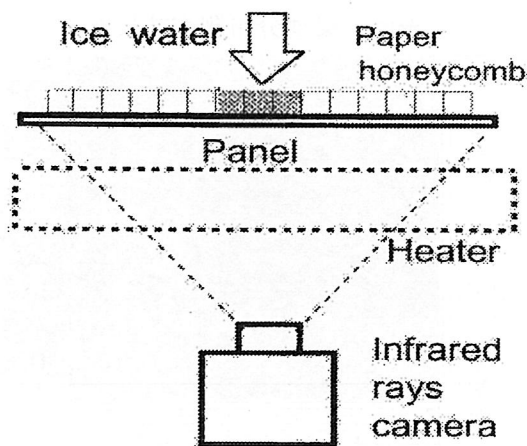


図2 パネル表面の温度測定概略図

4 パネル表面の温度分布と温度変化の測定結果

[1] 実験条件A：

被測定パネルのペーパーハニカムパネルの表面に湯水を滴下(実験条件A 1)し、10秒後のアルミパネル表面の温度分布を測定した結果の一例を図3に示す。また、湯水を滴下直後からアルミパネル表面の温度変化を測定した結果の一例を図4に示す。

さらに、氷片をハニカム面に置き(実験条件A 2)5分後のアルミパネル表面の温度分布を測定した結果の一例を図5に示す。また、氷片をハニカム面に置いた直後からアルミパ

ネル表面の温度変化を測定した結果の一例を図 6 に示す。

湯水を点下した場合、図 3 に示すように、湯水を滴下した個所が最も高い温度を示し、それを中心に同心円状の熱パターンを観測した。また、図 4 に示すように、湯水を滴下した後の同心円中央の温度は湯水点下 10 秒後最も高い温度を示したが、その後、徐々に低下する傾向を観測した。このような傾向を示した要因は湯水が 10 秒後、冷えたためと思われる。

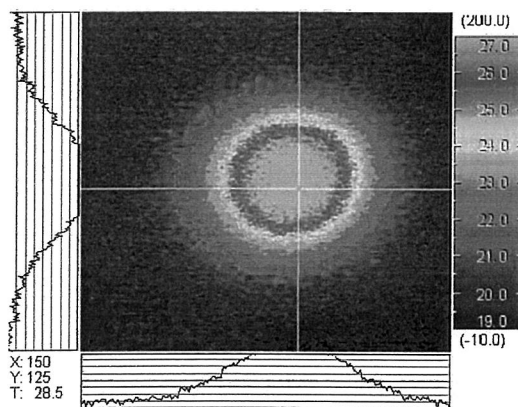


図 3 実験条件 A 1 におけるパネル表面の温度分布測定結果例

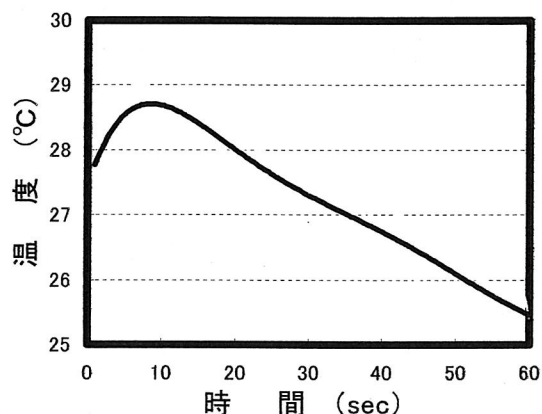


図 4 実験条件 A 1 によるパネル表面の温度変化測定結果例

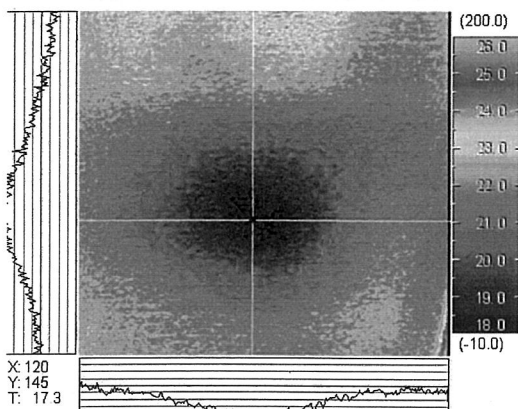


図 5 実験条件 A 2 におけるパネル表面の温度変化測定結果例

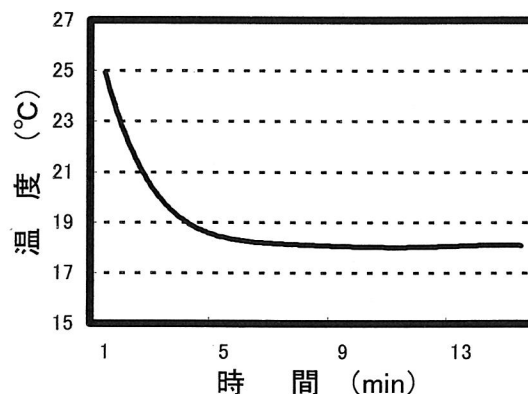


図 6 実験条件 A 2 によるパネル表面の温度変化測定結果例

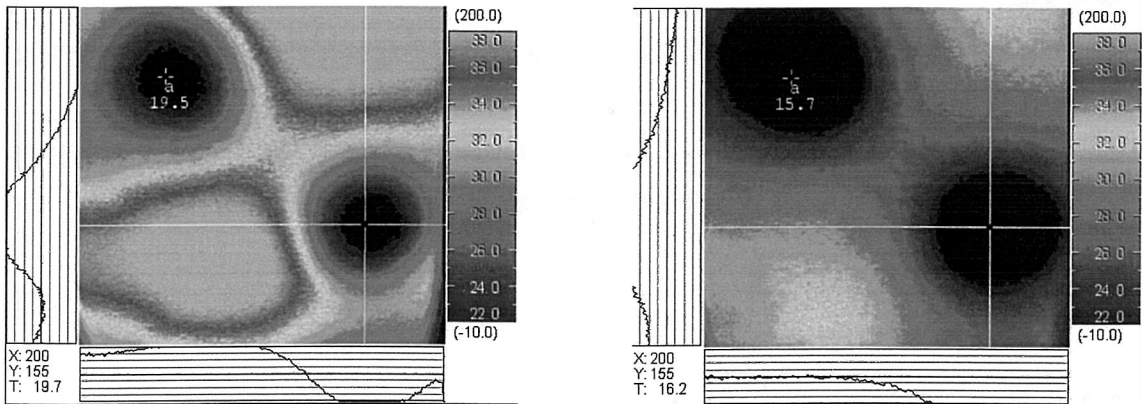
一方、氷片を置いた場合、図 5 に示すように、その個所が最も低い温度を示し、同心状の熱パターンを観測した。また、図 6 に示すように、その中央部分の温度は氷片を置いた直後から急激に温度が低下し、5 分後、ほぼ、一定の温度を示した。このように湯水と比較して、氷が解けるまで長時間低い温度を保った。

[2] 実験条件 B :

ペーパーハニカムを取り除いた箇所に氷水を注ぎ、アルミパネルの表面をヒータで 20

秒間加熱後、その表面の温度分布を測定した結果の一例を図7に示す。図7(a)は加熱10秒後、(b)は加熱30秒後を示す。また、加熱後の氷片中央部分の温度変化を測定した結果の一例を図8に示す。

図7の(a)と(b)に示すように、アルミ表面を加熱した場合、加熱後のアルミ表面は全体的に温度は上昇し、その後、冷水箇所の表面温度の低下する傾向を観測し、それ以外の箇所は徐々に低下する傾向を観測した。その傾向は図8に示すように、冷水箇所の表面温度は加熱直後、急激に低下し、おおよそ、2分後、一定の温度を示した。



(a) 加熱10秒後

(b) 加熱30秒後

図7 実験条件Bによるパネル表面の温度分布測定結果例

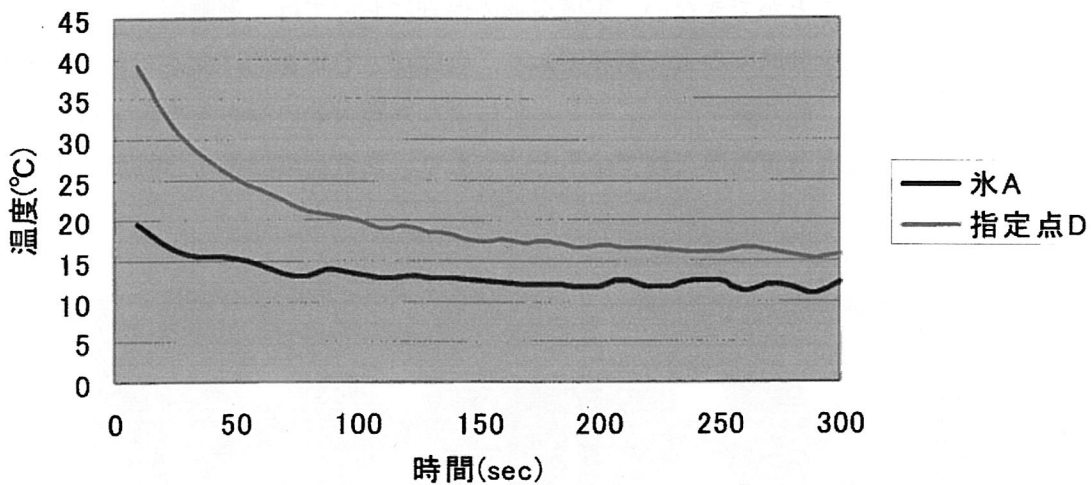


図8 実験条件Bによるパネル表面の温度測定結果例

5 おわりに

今回、ペーパーハニカムパネルの浸水評価にサーモグラフィ装置の応用を試みた。その結果、湯水を点滴した場合、その直後、中央部分の温度の上昇する傾向を観測されたが、

滴下した1分後の温度はパネル温度と同一となり、湯水を観測することが困難となった。

また、パネル表面に氷片を置いた場合、氷片を置いた部分のパネル表面の温度の低下が観測され、10分程度経過後でも冷水の存在の観測が可能であった。一方、さらに、パネル表面を加熱した場合、アルミパネル表面の温度分布から氷水の位置を明確に確認することができた。今後、屋外に放置した場合のパネル内の浸水検出に本手法の有効性について調査、検討を行う必要がある。

参考文献

- 1) 赤外放射の計測に関する研究調査委員会:"最近の赤外放射計測",照明学会研究調査報告書 JIER-069,(2001)
- 2) 谷口,家名田,中鉢,高木,赤間:"ペーパーハニカムパネルの浸水検出への赤外放射技術の応用に関する実験的検討",照明学会全国大会講演論文集,148,(2003) p.207

(谷口 正成)

2.2.1.3 新しい赤外線サーモグラフィ法

赤外線サーモグラフィ法により、剥離の位置および形状が視覚的に測定できるため、赤外線サーモグラフィ法はコンクリート構造物の保守点検作業において有用である。しかしながら、これまでの赤外線サーモグラフィ法においては、剥離が存在する深さについては画像からは判断することができない。実構造物の保守においては、剥離深さの情報は補修および補強の緊急度を判断する上で重要であり、剥離深さを定量的に測定できる非破壊検査手法が必要である。赤外線サーモグラフィ法により剥離欠陥の深さを推定するためには、ある時刻における温度分布画像だけでは不十分であり、熱負荷開始後から熱が被測定物中

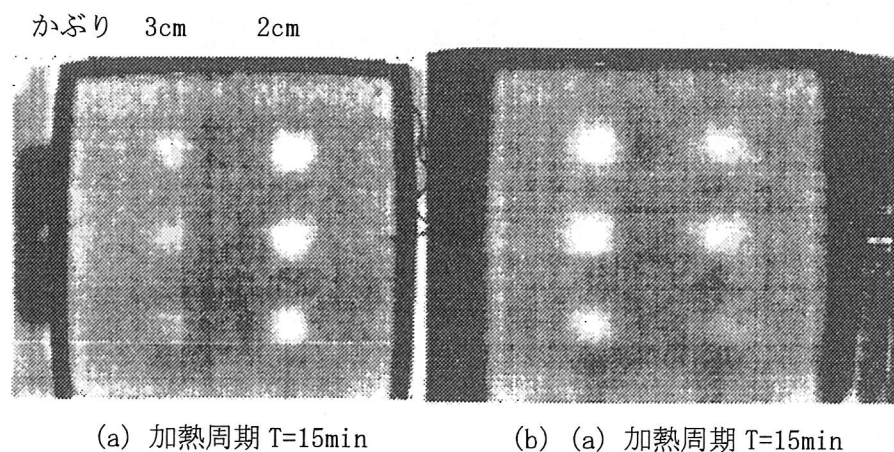


図1 ロックイン赤外線サーモグラフィによる位相遅れ画像

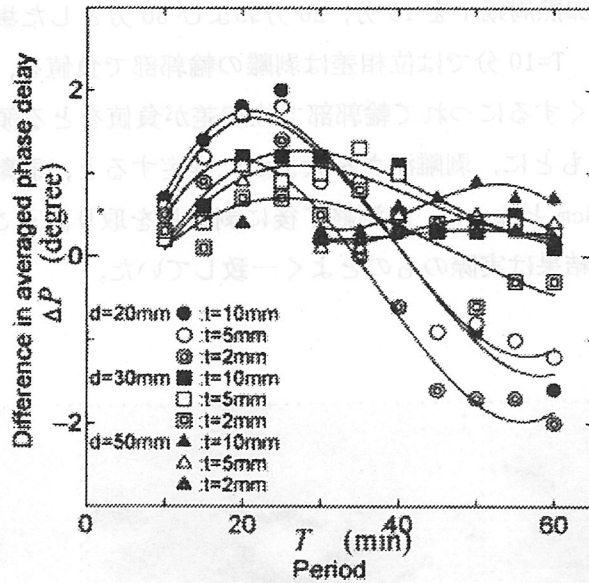


図2 加熱周期と位相差の関係

を伝わり、やがて剥離に達して断熱温度場が現れ始めるという非定常な過渡現象に関する計測データが必要である。著者は、欠陥深さの推定が可能な赤外線サーモグラフィ法として、周期変動熱負荷時の温度分布を熱負荷に関する参照信号に同期させて計測し、温度変動の振幅および位相遅れの分布をもとに欠陥を検出・計測するロックイン赤外線サーモグラフィ法を開発している¹⁾。ここでは、人工剥離欠陥を有するコンクリート試験体および剥離を有する実構造物の剥離診断に、ロックイン赤外線サーモグラフィ法を適用した結果²⁾³⁾を示す。ロックイン計測のための参照信号に正弦波を用い、正弦値が正の時加熱、負の時冷却を行った場合の試験体表面の温度変動をロックイン計測し、参照信号からの位相遅れを求めた。加熱装置から放射される赤外線の試験体表面での反射の影響を除去する目的で、冷却過程半周期分のデータを有効データとしてロックイン処理を行う、半サイクルロックイン計測を行った。人工剥離欠陥を有するコンクリート試験体に対し、加熱周期 T を10分から60分まで5分きざみに設定し、試験体表面の温度変動をロックイン計測した。得られた画像の一部を図1に示す。図のように、深さ5cmまでの人工剥離欠陥に対しては、欠陥が存在する部分において顕著なコントラスト変化が現れ、これをもとに剥離欠陥の検出が可能であった。また、剥離欠陥部のコントラスト変化は、従来型赤外線サーモグラフィ法に比べて、加熱や放射率の不均一などの影響を受けにくいことがわかった。

次に、剥離深さ、位相遅れおよび加熱周期の関係を調べた。種々の欠陥深さおよび加熱周期に対して得られた位相差（剥離部と健全部の位相差）を図2に示す。図より、欠陥深さが大きくなるにつれて位相差は大きくなり、ある加熱周期でピークを取った後減少しさらに負の値をとることがわかる。また、位相差がピークを取る加熱周期は欠陥が深い程長くなる。次に、この関係を用いて、ボックスカルバート床版下面に実際に発生した剥離

の深さ推定を行った。加熱周期 T を 10 分, 20 分および 30 分とした場合に得られた位相遅れ画像を図 3 に示す。 $T=10$ 分では位相差は剥離の輪郭部で負値を, 中心部で正值をとり, T を 20 分, 30 分と長くするにつれて輪郭部で位相差が負値をとる領域が内部へ拡大している。図 2 の関係をもとに, 剥離深さを大まかに推定すると, 剥離輪郭部で 0~1cm, 剥離の中心付近では 2~3cm となった。計測終了後に剥離片を取り除くことにより, 剥離深さを実測した結果, 推定結果は実際のものとはよく一致していた。

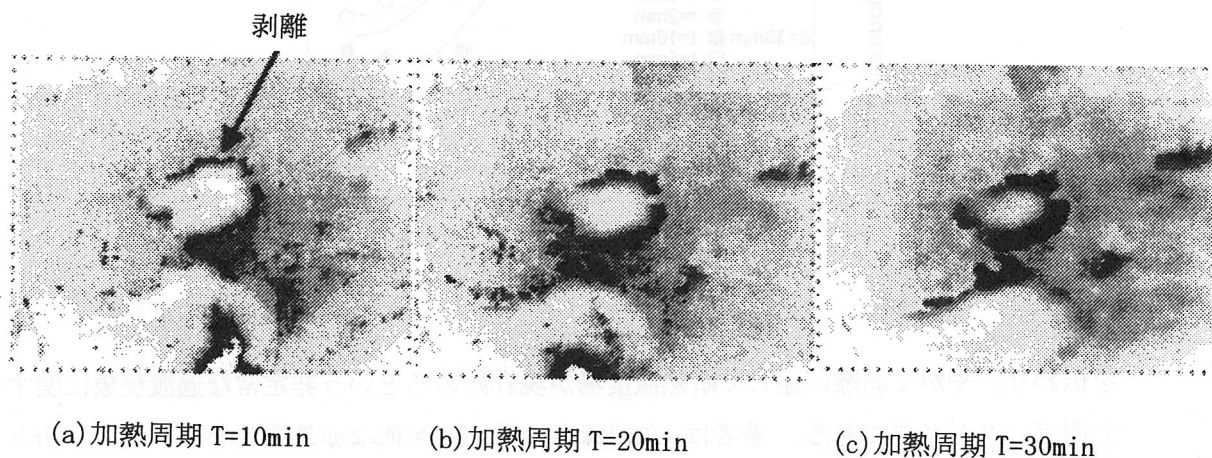


図 3 ロックインサーモグラフィ法による実構造物の剥離検出結果

参考文献

- 1) T. Sakagami, S. Kubo, Y. Teshima: Fatigue crack identification using near-tip singular temperature field measured by lock-in thermography, SPIE Proceedings, Vol. 4020, (2000), pp. 174-181.
- 2) 阪上, 久保ほか: ロックイン赤外線サーモグラフィによるコンクリート構造物の非破壊検査, 日本機械学会講演論文集, No. 014-1, (2001), pp. 6-15-16.
- 3) 阪上, 久保ほか: ロックイン赤外線サーモグラフィによるコンクリートの剥離計測技術の開発, 日本非破壊検査協会春季大会講演概要集, (2001), pp. 63-64.

著者: 大阪大学大学院工学研究科 助教授 阪上隆英 (本委員会での講演資料の抜粋)

2.2.2 室内環境と都市環境

はじめに

建築学は大きく分けると計画、環境工学・設備、構造、材料の4分野に分けられる。加えて、建築人間工学や海洋建築学なども含まれ幅広い。空間的な対象で分類すると、室内、建物単体、建物集合体、都市、地球と広がる。赤外線カメラを研究に応用する分野は環境工学が多いが、構造や材料の研究でも利用されていると聞き及ぶ。ここでは「建築環境工学」に限定した内容を概説する。

1) 室内環境に関する研究

温熱環境工学では人体と環境の間の経路別熱収支量を見積もることが重要である。簡単のために、裸体で定常時の熱平衡は下式で定義できる。

$$S = M - W - (C_{res} + E_{res}) \pm C \pm R - E_{sk} \pm C_d \quad (1)$$

ここに、 S : 蓄熱量 (W/m^2)、 M : 代謝量 (W/m^2)、 W : 外部仕事 (W/m^2)、 C_{res} : 呼吸乾性放受熱量 (W/m^2)、 E_{res} : 呼吸湿性放熱量 (W/m^2)、 C : 対流放受熱量 (W/m^2)、 R : 放射放受熱量 (W/m^2)、 E_{sk} : 蒸汗放熱量 (W/m^2)、 C_d : 伝導による放受熱量 (W/m^2)

室内で安静にしていることを想定すると、外部仕事 W は無視できる。また、正確さを問う場合は別であるが、運動していない場合は呼吸による放受熱量も無視しても支障はない。従って、1式は次式で置き換えられる。

$$S = C_p \times m \times \overline{\Delta t_b} = M_{sk} \pm h_c \times (t_s - t_a) \pm h_r \times (t_s - MRT) - h_e \times (p_s - p_a) \quad (2)$$

ここに、 C_p : 人体の比熱 ($W/h \cdot k g$)、 m : 体重 ($k g$)、 $\overline{t_b}$: 平均体温 ($^{\circ}C$)、 M_{sk} : 皮膚面からの放熱量 (W/m^2)、 h_c : 対流熱伝達率 ($W/m^2 \cdot ^{\circ}C$)、 t_s : 平均皮膚温 ($^{\circ}C$)、 t_a : 気温 ($^{\circ}C$)、 h_r : 放射熱伝達率 ($W/m^2 \cdot ^{\circ}C$)、 MRT : 平均放射温 ($^{\circ}C$)、 h_e : 蒸発熱伝達率 ($W/m^2 \cdot ^{\circ}C$)、 p_s : 皮膚面の水蒸気圧 (mmHg)、 p_a : 水蒸気圧 (mmHg)

以上の定義から推察できるように、皮膚温または平均化された皮膚温が生理指標として重要となる。室内環境に関する研究では、赤外線カメラは表面温度、特に人体の皮膚面の温度を測定するのに用いられているが、熱収支の計算には $\pm 0.1^{\circ}C$ の精度が要求されることが定量評価には問題となった。

2) これまでの赤外線カメラの利用実態

赤外線カメラが市販され始めた1970～1980年代は、液体窒素を充填する必要があり、取り扱いが面倒なことに加え、温度の分解能が悪く、画像のスキャンにも時間が掛かった。しかも、これら致命的な欠点があるにも関わらず高価であった。つまり、残念ながら研究上の要求を満たしていなかった。その様な背景から、その頃は自作のサーモカメラを使った研究例が多かった。従って、サーモカメラはあくまでも壁面温度や皮膚温の分布を把握するのに用いられ、定量的なデータを入手するためには使われてこなかった。定量データは、もっぱら接触法、つまりセンサを貼り付けて測定する方法が利用されてきた。

3) 最近の赤外線カメラの利用実態

前述したように、10年ほど前は前述した液体窒素を用いるサーモカメラが主流だったが、最近では非冷却センサなどを内蔵したサーモカメラが普及している。もちろん、現在でも皮膚温の測定などには接触法が主流であるが、最近では±0.1℃以下の精度のサーモカメラが市販されている。

実際の使用例を図1に示す。使用したサーモカメラはニコンのサーマルビジョンである。これらは、睡眠中の被験者の着衣表面温度と皮膚温の変化を撮影した画像である。皮膚温に関しては温度分布が詳細に観察でき、室温が同じでも湿度の違いで手足の抹消部の皮膚温が違ってくることが確認できる。これらの画像データから曝露部位の平均皮膚温をかなりの精度で推定することが可能となってきた。

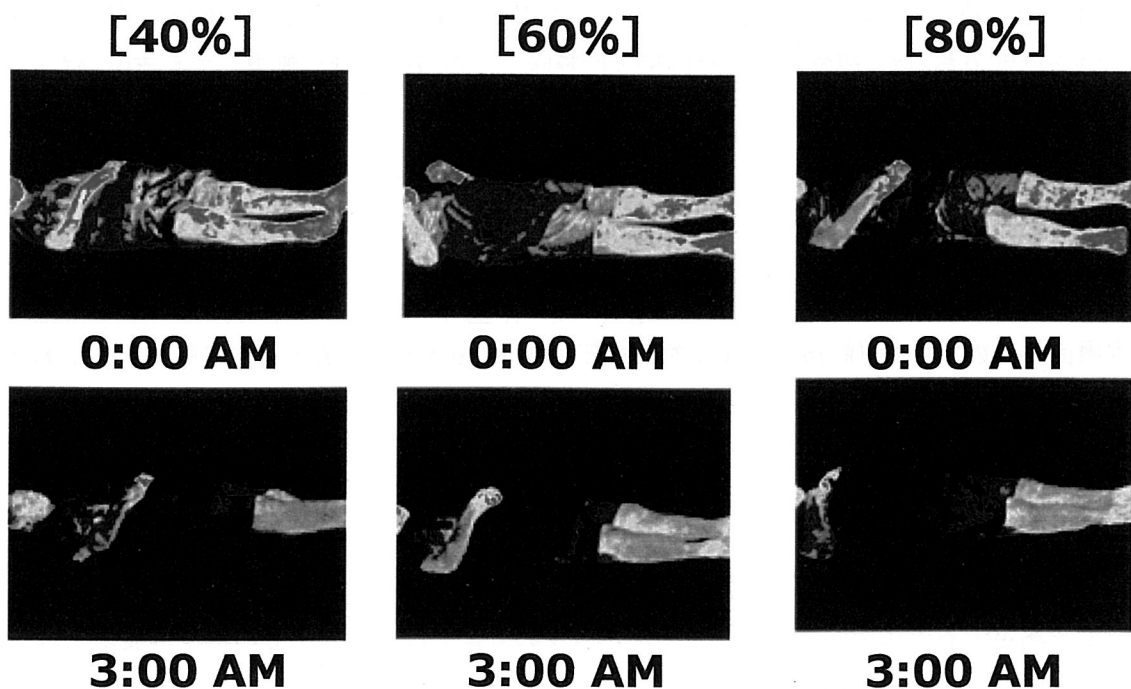


図1 睡眠時の被験者の露出部の皮膚温分布

2) 屋外環境に関する研究

屋外環境の研究では、最近注目されているヒートアイランドの実態調査に使用されてきた。特に、冬期は建物の断熱性能を定性的に把握するために建物の壁面温度を測定したり、夏期はコンクリート壁が昼間吸収し、加熱された状態の表面温度を測定するために用いられてきた。屋外の場合は、熱収支に±0.5℃程度の精度で十分なので、数値計算のための定量データとして利用されてきた。

ここに、東京工業大学大学院梅干野研究の研究^{1), 2)}を紹介する。住宅街などの屋外環境の熱放射環境を測定するために全球熱画像収録システムを開発している。使用しているサーモカメラの仕様を表1に示す。精度は±1.0℃程度のものである。画像の一例を図2に示す。全球熱画像と呼んでいるのは、対象建物を含め周囲を撮影角度など自動的にスキャンしながら測定するシステムのことである。

表1 全球熱画像収録システムに使用された赤外線カメラの仕様

波長範囲	3～5 μm, 6～8 μm, 8～12 μm
センサ	(1) InSb (2), (3) HgCdTe
温度分解能	(1) (2) 0.15℃, (3) 0.1℃ (30℃黒体)
精度	±1.0℃

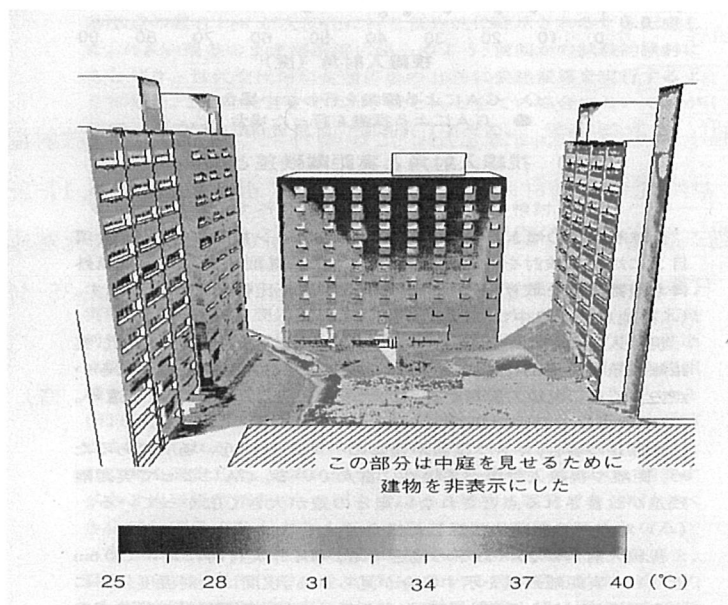


図2 団地を撮影した全球熱画像 (参考文献2より引用)

3) 赤外線カメラを用いた測定の問題点

赤外線放射カメラは、物体表面からの放射エネルギーを温度に変換して表示する測定器なので、表面温度そのもの測定する測定器ではないことを理解して利用する必要がある。以

下に、問題点を列挙する。

- (1) 対象表面からの赤外線放射エネルギーの分布を十分考慮する必要がある。もし、測定部位の反射エネルギーの分布とセンサの波長特性がずれた場合は周辺の影響が生じ、誤差がでる。
- (2) 人体皮膚表面の放射率は0.95～0.98とされている。未知の物質の表面温度を測定する場合、放射率の簡易測定（J I S A1423）が参考になる。実際には反射成分も入射することになるので TGS (Thermal Glay Scale) を同一画面に写し込み、温度分布を測定する必要がある。
- (3) 測定センサの温度が一定であることが必須条件となるので、室温を定常で制御する場合は問題ないが、室温の変化が大きい場合は誤差を生みやすい。

おわりに

今後も赤外線カメラを用いた研究は多くなるであろう。しかし、人体の皮膚表面温度を測定する目的では、前述の問題点以外に椅子などと接している伝導部分や接していても椅子の背と人体が近接している部分の皮膚温はカメラ位置から撮影できない問題がある。短焦点レンズ(広角)のカメラの開発や単に表面の温度や温度分布を測定だけでなく、熱収支を見積もるような付加的な機能が付いたシステムが開発されると、もっと利用頻度が高まると思われる。

参考文献

- 1) 梅干野晃, 内山一雄 その他: 多重分光熱画像を用いた建築外部空間における放射温度計測に関する基礎的研究, 日本建築学会計画系論文報告集, No. 459 (1994) pp. 17-25
- 2) 浅野耕一, 梅干野晃 その他: 建築外部空間における熱環境解析のための3次元熱画像の作成方法に関する研究, 日本建築学会計画系論文報告集, No. 508 (1998) pp. 35-41

(垣鏝 直)

2.2.3 自然環境放射の計測

赤外放射を利用した冷・暖房、探査・探知システム等を考える場合、まず背景となる環境からの放射特性を把握しておく必要がある。本節では、自然環境放射の分光測定装置について簡単に述べた後、分光測定例を紹介する。

環境からの赤外放射と言っても、近赤外（波長 3 μm 以下）と中・遠赤外（3 μm 以上）では、それぞれの成因も分布特性も異なる。近赤外域は測定対象が太陽放射およびその散乱、反射成分であり、従来の装置に集光光学系を付加すれば測定可能である。これに対して、中・遠赤外域では測定対象が大気、地表、海面などからの自己放射（熱放射）であるから、常温の放射体で低レベルであり、長波長域での光学系の分光透過特性、又は分光反射特性、検出器の分光感度などに十分配慮する必要がある。

(1) 近赤外用分光放射計

図 1 に示したような石英プリズムを用いたスリット型分光器をベースにした分光放射計であって、可視域より波長 4 μm まで測定可能である。

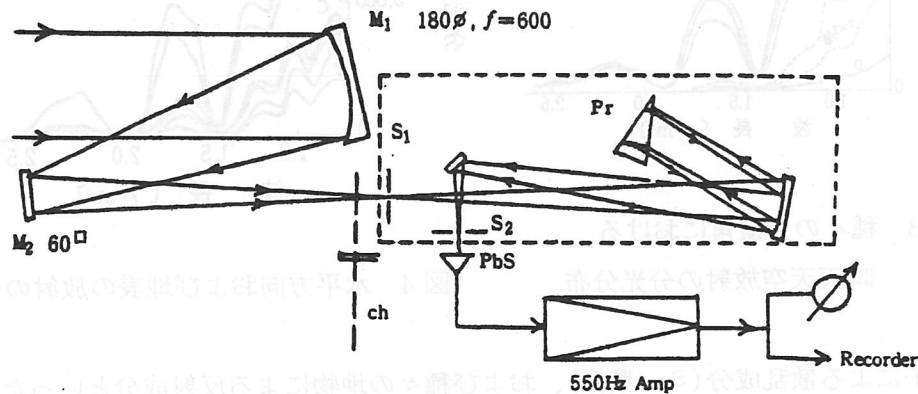
(2) 中・遠赤外用分光放射計

図 2 に示したような NaCl プリズムを用いた複光束型分光光度計をベースにした分光放射計を使用して測定した。平面鏡 M1 は直径 60cm の Al 蒸着鏡、基準放射源 RS は内面を黒化した液体窒素入り Dewar を用いた。

検出器は真空熱電対、測定波長域は 2.5~15 μm である。

(3) 環境放射の分光分布

赤外域の環境放射は、前述の通り 2つの成分に区分される。一方は約 6000K の太陽放射の直射成分、地球の大気分子による散乱成分（レイリー散乱）、雲、霧、煙などの比較的大



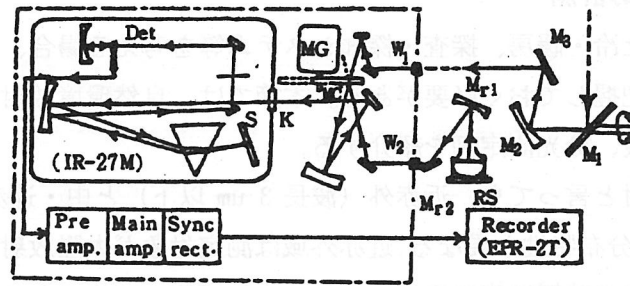
M₁ : 集光凹面鏡 ($\phi=180$ [mm], $f=600$ [mm])

M₂ : 折返し平面鏡 (60 [mm] 角形) Ch : 光チョッパー

S₁ : 入射スリット Pr : 石英プリズム

S₂ : 出射スリット PbS : 光導電形検出器

図 1 近赤外用分光放射計の光学系



- | | |
|--------------------------|----------------|
| M_1, M_3, M_{R2} : 平面鏡 | MC : ミラー・チョッパー |
| M_2, M_{R1} : 球面鏡 | MG : 電動発電機 |
| RS : 基準放射源 | K : 窓 (KRS-6) |
| W_1, W_2 : 入射窓 | S : スリット |

図2 中間赤外用分光放射計の光学系

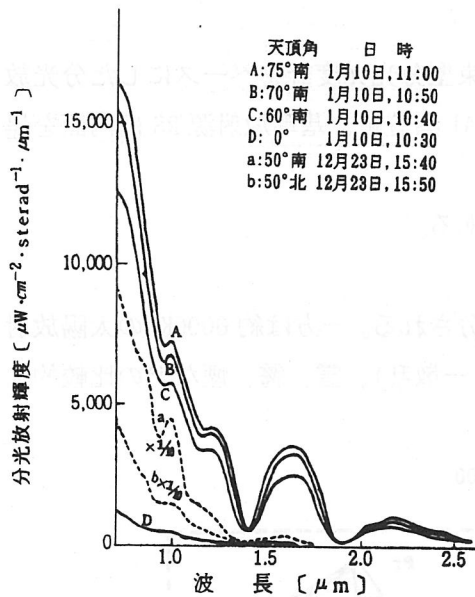


図3 種々の天頂角における
晴天天空放射の分光分布

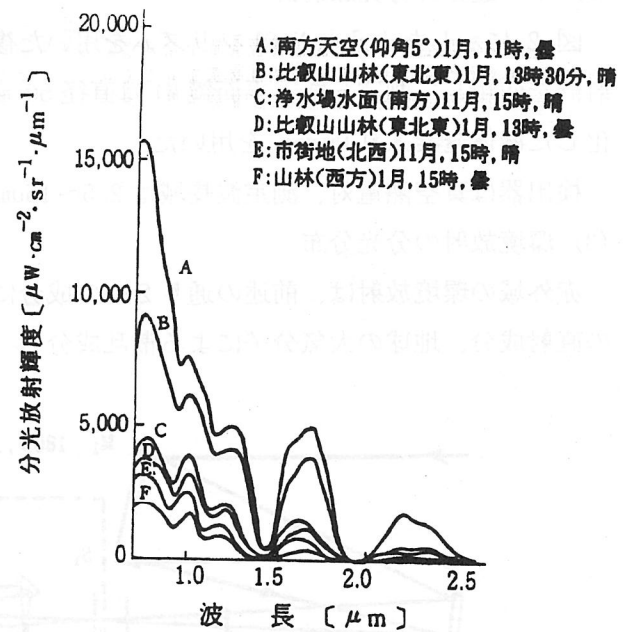


図4 水平方向および地表の放射の分光分布

きな粒子による散乱成分(ミー散乱)、および種々の地物による反射成分といったいずれも太陽放射に起因するものである(図3, 図4)。他方は、諸々の地物および大気層からの自己放射(熱放射)でいずれも常温であるから放射のピーク波長 $10\mu m$ 付近(ウィーンの変位則)である(図5, 図6)。当然、夜間の地上付近の空間では前者の太陽放射の散乱・放射成分は消滅して後者のみとなる。昼間は両者が共存するために、約 $0.5\mu m$ (可視域)と約 $10\mu m$ の2つのピークが存在し、放射成分は $3\sim 4\mu m$ 付近を谷とするV字型の分布特性となる。

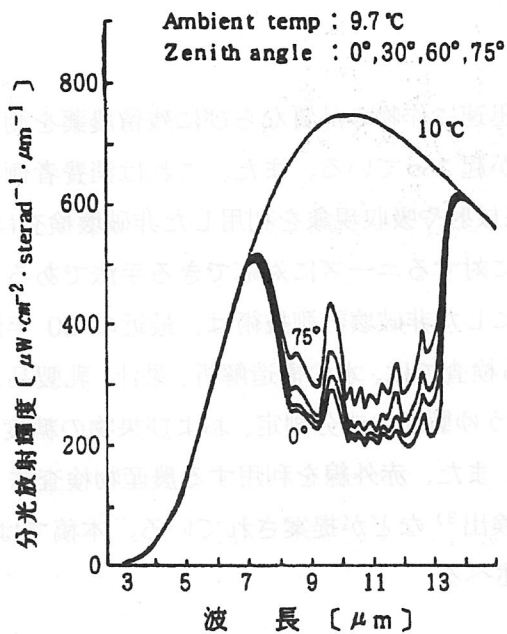


図5 夜間の晴天天空放射の分光分布 (冬季)

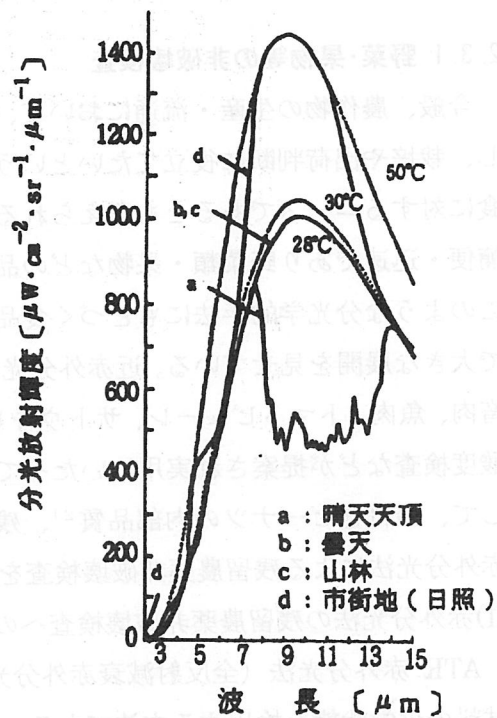


図6 夏季の天空および地表放射の分光分布

谷の位置は、気象条件により若干変動することになる。

ここで大気中の CO_2 、 H_2O 、 O_3 などのガスは、約 $3 \mu\text{m}$ 以下の短波長放射(近赤外)に対して吸収ガスとなり、それ以上の長波長域(中赤外)では熱放射体として振舞う(大気放射)。

図5において天空放射(大気放射)が天頂角と共に増加しているのは、大気層の見かけの厚さが増加するからである。さらに長波長側では、微弱な放射が遠赤外域まで徐々に減少しながら分布している。

環境放射のような微弱赤外放射の分光測定装置として、昨今ではFT-IR分光装置が可成普及して来ているので、更に高精度、高分解の測定も可能であろう。なお、天空放射の空間分布、海面からの放射空間分布に関しては文献(4)を参照願いたい。

参考文献

- 1) 松井松長：赤外線探査・探知計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)
- 2) 松井松長：赤外域における天空放射の分光分布と空間分布、研究報告、第6号、(財)日本産業科学研究所(1992)
- 3) 松井松長：低温物体の分光放射特性の測定、赤外線技術、第14号(1988)
- 4) 松井、近藤、玉重：水平線付近の赤外線分布、日本赤外線学会誌、1、2 (1991)

(松井 松長)

2.3 植物・生態環境

2.3.1 野菜・果物等の非破壊検査

今般、農作物の生産・流通において、簡易で迅速に作物の品質ならびに残留農薬を測定し、栽培や出荷判断に役立てたいというニーズが起こっている。また、これは消費者側の食に対するニーズであるとも考えられる。赤外線放射や吸収現象を利用した非破壊検査は、簡便・迅速であり野菜類・果物などの品質検査に対するニーズに対応できる手法である。このような分光学的手法にもとづく食品を対象にした非破壊計測技術は、最近の20年間で大きな展開を見せている。近赤外分光法による検査では、水の構造解析、果汁、乳製品、畜肉、魚肉、トマトピューレ、サトウキビ、しょうゆ製品の成分測定、および果物の糖度・酸度検査などが提案され実用にいたっている¹⁾。また、赤外線を利用する農産物検査法として、殻付きピーナツの内部品質²⁾、残留農薬検出³⁾などが提案されている。本稿では、赤外分光法による残留農薬非破壊検査を中心に述べる。

(1) 赤外分光法の残留農薬非破壊検査への適用

ATR 赤外分光法（全反射減衰赤外分光法）は、試料表面層での赤外線の吸収情報から、試料の化学状態を検出する方法である。図1に ATR 赤外スペクトル測定の野菜類への適用の概要を示す。赤外干渉光がプリズム内を導波する間にエバネッセント光が試料表面において吸収され、この吸収光が、試料の残留農薬に関する情報を含んでいる。すなわち、農薬の有効成分によって、吸収される赤外線の波長が異なり、農薬の濃度が吸収の強弱になってスペクトル上に現われることを利用したものである。反射回数の多い ATR プリズム（たとえば、Spectra Tech. Inc.製水平型 ATR）を用いることにより最も良好な結果を示すこと、および、測定した ATR スペクトルに PLS 回帰分析をほどこしたところ、安定した検量線が得られることも明らかになった³⁾。これらの結果をもとに、現在長野県の主要な野菜産地において残留農薬の簡易非破壊計測として実用段階に移行している。

このように ATR 赤外分光法は、①測定時間が約10分という迅速性、②熟練を必要としない簡便性、③格段の消耗資材を必要としない低コスト性などの点で農作物生産の現場計測ニーズに対応したものであるといえる。しかしながら、果実類や穀類などプリズム面に密着できない試料には適用が困難である、あるいは試料葉片を切り出し、測定ごとにプリズムを洗浄する必要があるなど効率面で問題点も残されている。また後者の問題点は、測定の安定性にも影響することが指摘されている。

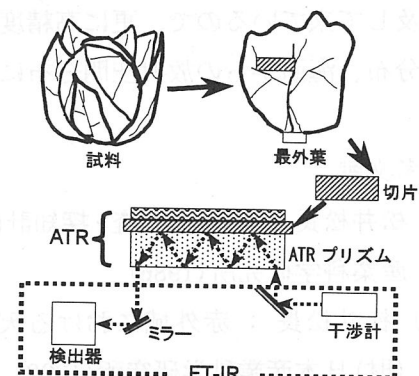


図1 ATR 赤外分光法による野菜類の残留農薬検査

前述の問題点を解決するため、拡散反射赤外分光法の適用が検討されている。図2に拡散反射法によるスペクトル測定の概要を示す。ATR 赤外分光法の場合のように葉の切片を切り出して装着する、および測定ごとにプリズム面洗浄する必要はなく、試料を載せて試料台の高さを調整することが測定準備のすべてである。このようにして測定したレタスの拡散反射スペクトルの例を農薬成分の特性吸収と比較して図3に示す。これらの一次微分スペクトル(図4)を用いて作成した PLS 検量線が、精度が良好であることが判明した⁴⁾。図5の PLS 検量線をもとに、試料の安全性を確認できる可能性が見出せる。すなわち、安全基準値に対して危険率を乗じた閾値(たとえば係数0.8を乗じた値)を設定し、検量線による予測値との比較によって安全性を確保する手法³⁾が考えられる。このように危険率を設定することは、安全基準値を超える可能性の高い未知試料を「基準値以下」と誤判別する第二種の過誤を回避できる。

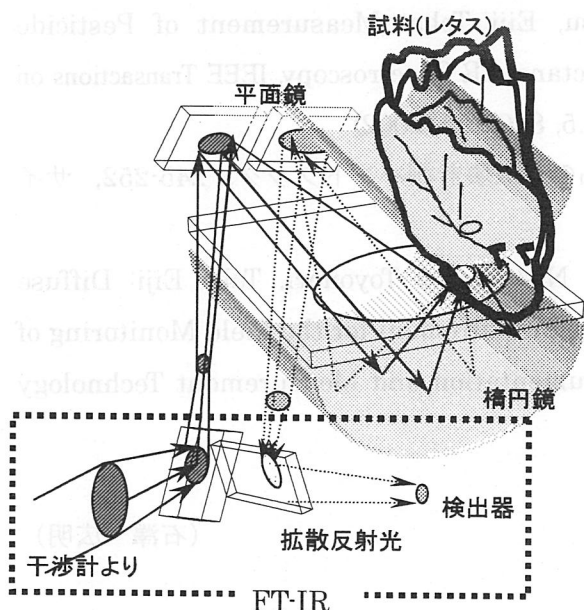


図2 拡散反射赤外分光法による野菜類の残留農薬検査の概要

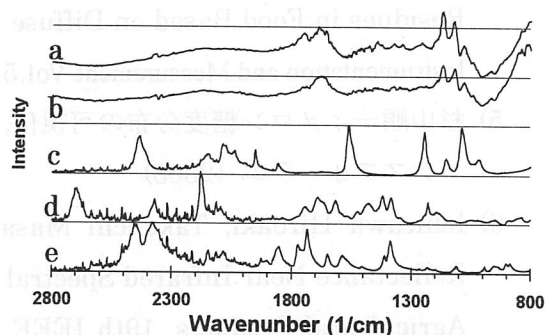


図3 レタスおよび農薬有効成分標準試料の拡散反射赤外スペクトル

- (a) 安全基準値を超える試料, (b)未検出試料
- (c)殺虫剤フェンバレート標準試料
- (d)殺虫剤メソミル標準試料, (e)殺菌剤ベノミル標準試料

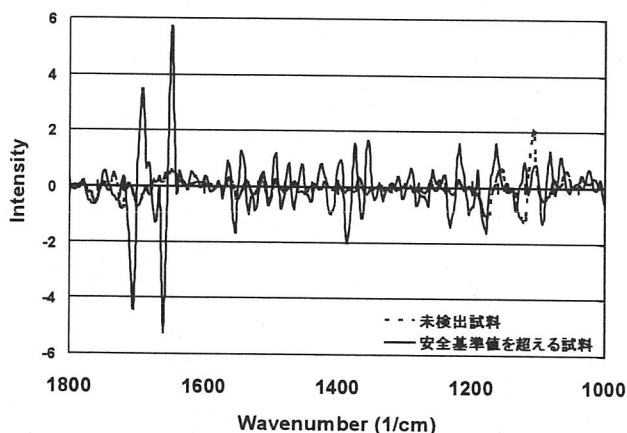


図4 拡散反射一次微分スペクトル

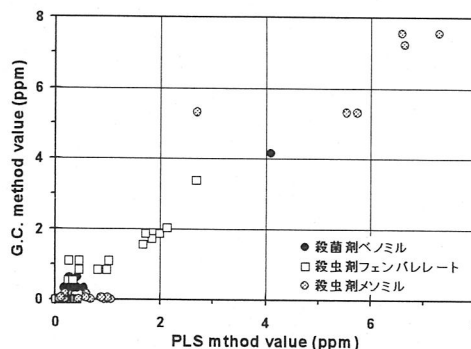


図5 PLS 検量線

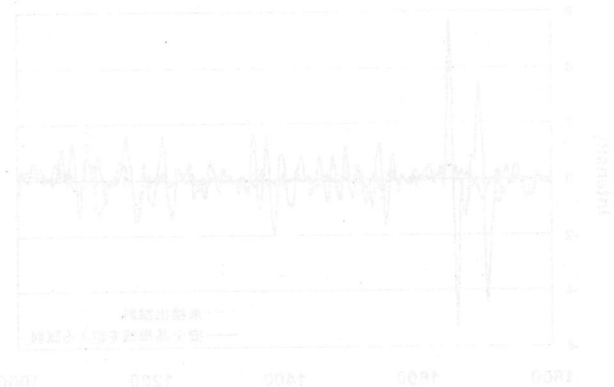
(2) 赤外面像法の適用

分光計測の結果をもとに、分光画像による非破壊検査が試みられている。たとえば、マルチスペクトルカメラを利用したメロン糖度可視化についての研究⁵⁾や、近赤外カメラに干渉フィルターを装着したリンゴの生育観測⁶⁾などが報告されている。

参考文献

- 1) たとえば河野澄夫編：食品の非破壊計測ハンドブック,サイエンスフォーラム (2003)
- 2) 守田和夫：赤外線放射計による殻つきピーナッツの非破壊品質評価,食品の非破壊計測ハンドブック, 253-259, サイエンスフォーラム (2003)
- 3) 石澤広明, 鳥羽栄：全反射減衰赤外分光法によるハクサイ残留殺虫剤の非破壊計測, 農業機械学会誌, 62(6), 106/114 (2000)
- 4) Hiroaki Ishizawa, Toyonori Nishimatsu, Eiji Toba: Measurement of Pesticide Residues in Food Based on Diffuse Reflectance IR Spectroscopy, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement Vol.51, No.5, 886/890 (2002)
- 5) 杉山順一：メロン糖度分布の可視化, 食品の非破壊計測ハンドブック, 245-252, サイエンスフォーラム (2003)
- 6) Ishizawa Hiroaki, Takeuchi Masahiko, Nishimatsu Toyonori, Toba Eiji: Diffuse Reflectance Near-Infrared Spectral Image Measurement for the Field Monitoring of Agricultural Products, 19th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, 3-6 (2002)

(石澤 広明)



2.3.2 植物細胞の糖代謝解析関連

バイオプロセスのモニタリング・制御を目的とした計測において、赤外線の利用が注目を集めている。生物関連分野では、これまで近赤外分光分析が中心であり、多くの研究・応用がある。近赤外分光スペクトルは、中赤外域で得られる基本スペクトルの倍音・結合音であるため、非常に複雑であり、解析にはケモメトリクス手法が多く用いられる。一方、中赤外分光分析は、各官能基の基本振動の情報などの理論的な基礎が存在し、解析も官能基の帰属波数帯だけを用いる単回帰で十分なことが多い。ここでは、代謝の起点となる糖類の中赤外分光特性とその発酵プロセスなどへの応用を目指した研究例を紹介する。

単糖・二糖類の赤外分光スペクトル解析

図1に水溶液中の4種類の単糖（グルコース、フルクトース、ガラクトース、マンノース）の指紋領域におけるスペクトルを示す¹⁾。1200 cm^{-1} ~950 cm^{-1} の領域では、スペクトルパターンが糖によって大きく異なっていることがわかる。また、果汁モデルを想定した単糖類・二糖類の混合糖水溶液の赤外分光スペクトルは、スペクトルの加成性を仮定して計算により合成した赤外分光スペクトルとよく一致し、指紋領域での精度の高い加成性が示された²⁾。ナシ、モモ、ブドウ、リンゴ、ミカンの模擬果汁の吸光度スペクトルから通常法で求めたグルコース、スクロース、フルクトースの濃度と実際の濃度の関係では、相関係数は0.985となりPLS解析などには若干劣るものの良好な結果が得られている（図2）。

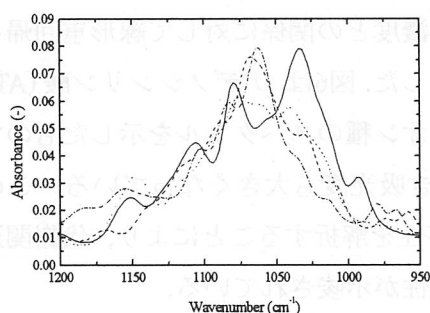


図1 指紋領域における水溶液（1 M）中の単糖スペクトル。— グルコース、--- マンノース、.... ガラクトース、-.- フルクトース

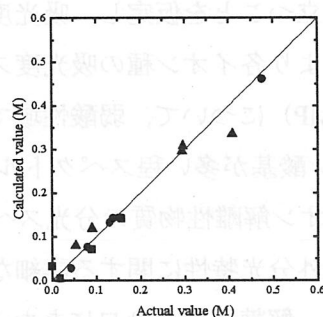


図2 赤外分光スペクトルに基づいた推定値と調整値との比較

懸濁植物細胞の糖代謝計測

懸濁細胞の活動の場である培地では、培養の初期状態として存在する成分以外の成分が細胞によって創り出されることが多い。ここでは、懸濁植物細胞としてタバコ（TBY-2）細胞、培地としてスクロースが主成分のMS培地を用い、FR-IR/ATR法により培地成分を測定した例を示す³⁾。図3より、培養開始5日後のスペクトルパターンはスクロースのパターンと異なり、グルコースとフルクトース混合物のスペクトルパターンに酷似していること

が確認された。そこで、このスペクトルがスクロース、グルクトース、フルクトースの3成分からなるとの仮定で計算した各糖濃度、および従来法としてHPLCを用いて求めた各糖濃度の経時変化を図4に示した。両者の経時変化は定性的・定量的に類似しており、FT-IR/ATR法が植物細胞培養過程の糖代謝計測に有効な手段であることがわかる。

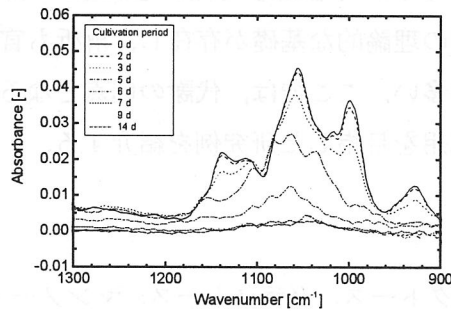


図3. 植物細胞培養過程におけるMS培地中の糖スペクトルの変化

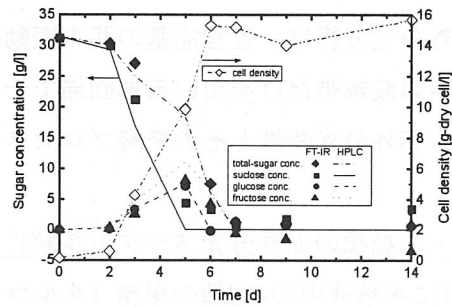


図4. MS培地中の各糖濃度と細胞濃度の経時変化

イオン解離性代謝関連物質の赤外分光解析

代謝経路・回路では、多くのイオン解離性代謝物質が重要な役割を果たしている。図5は、グルコース-6-リン酸 (G6P) の赤外分光スペクトルに及ぼすpHの影響である⁴⁾。スペクトルがpHの変化に対して連続的に変化し、主要ピークが顕著に消長している。そこで、各イオン種の吸光度スペクトルはpHによらず一定であり、各イオン種のスペクトルの加成性が成り立つことを仮定し、吸光度と各イオン種の濃度との関係に対して線形重回帰を行うことにより各イオン種の吸光度スペクトルを抽出した。図6は、アデノシンリン酸(ATP, ADP, AMP) について、弱酸性域で支配的となるイオン種のスペクトルを示したものである⁴⁾。リン酸基が多い程スペクトルは複雑化していき吸光度も大きくなっている。このように、イオン解離性物質の分光スペクトルのpH依存性を解析することにより、代謝関連物質の中赤外分光特性に関する詳細な情報を得る可能性が示唆されている。

つぎに、解糖系の入り口にあたるG6Pからフルクトース-6-リン酸 (F6P) への異性化反

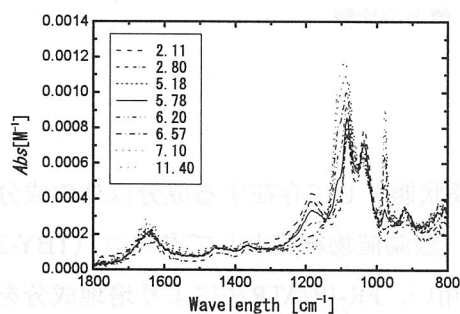


図5 G6P水溶液スペクトルに及ぼすpHの影響

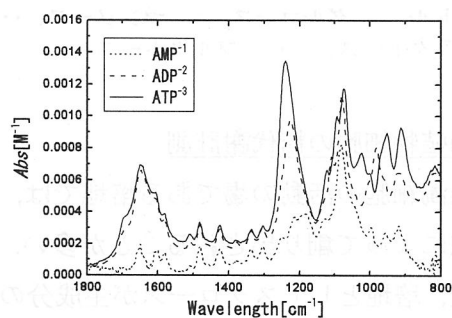


図6 抽出されたアデノシンリン酸イオンのスペクトルの比較

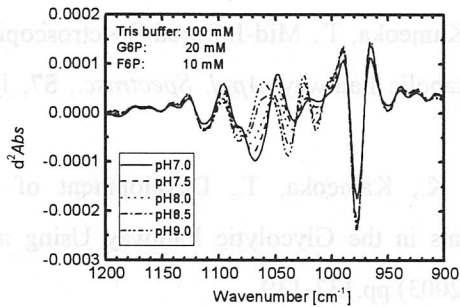


図7 G6P-F6P-Tris混合溶液の2次微分スペクトルに及ぼすpHの影響

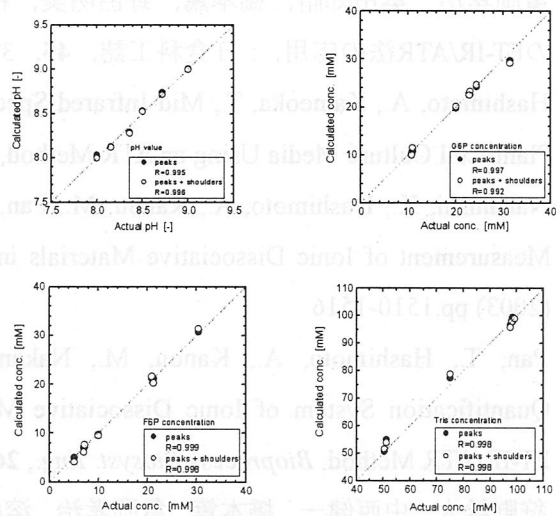


図8 pHおよびG6P, F6P, Tris濃度に関する調整値と推定値の比較

応系に着目し、中赤外分光法を援用したイオン解離性生体物質の定量法⁵⁾について説明する。図7は、各成分濃度は一定でpHのみが異なるG6P-F6P-Tris溶液の指紋領域における吸光度の2次微分スペクトルである。スペクトルが類似したG6P, F6Pの混合系を対象とするため、吸収ピークの抽出が容易な2次微分スペクトルを用いた。混合溶液のスペクトルは、pHによりそのパターンが微妙に変化することがわかる。そこで、各解離成分に起因する吸収波数を決定した後、各解離成分のスペクトルの加成性を仮定し、各解離成分の吸収波数における2次微分値を用いることにより、G6P-F6P-Tris溶液中の各解離成分濃度の線形重回帰分析を試みた。その際、pHの緩衝成分であるTrisのイオン解離平衡関係からpHを推定し、そのpHに基づいてG6P, F6P, Tris濃度を求めた(図8)。その結果、pHと各成分濃度はその実測値と極めて良好に一致し、中赤外分光法によりイオン解離性代謝物質の同時定量が可能となった。

今後の展望

中赤外分光法を利用した動的糖代謝に関連した研究例をとりあげたが、タンパク質については研究論文数も非常に多く、スペクトルの解析方法も確立されてきている。また、オリゴ糖の重合度推定法や、生体内において重要な役割を果たしているトレハロースの機能解明などといった新しく興味深い研究も行われている⁶⁾。今後、バイオプロセス工学分野等において様々な応用が可能になるものと思われる。

参考文献

- 1) 亀岡孝治, 奥田知晴, 橋本篤, 野呂明美, 椎木靖彦, 伊藤健介, FT-IR/ATR法を用いた糖水溶液の赤外分光分析, 日食科工誌, 45, 3 (1998) pp.192-198

- 2) 亀岡孝治, 奥田知晴, 橋本篤, 野呂明美, 椎木靖彦, 伊藤健介, 食品の糖成分分析へのFT-IR/ATR法の応用, : 日食科工誌, **45**, 3 (1998) pp.199-204
- 3) Hashimoto, A., Kameoka, T., Mid-Infrared Spectroscopic Determination of Sugar Contents in Plant-Cell Culture Media Using an ATR Method, *Appl. Spectrosc.*, **54**, 7 (2000) pp.1005-1011
- 4) Nakanishi, K., Hashimoto, A., Kanou, M., Pan, T., Kameoka, T., Mid-Infrared Spectroscopic Measurement of Ionic Dissociative Materials in Metabolic Pathway, *Appl. Spectrosc.*, **57**, 12 (2003) pp.1510-1516
- 5) Pan, T., Hashimoto, A., Kanou, M., Nakanishi, K., Kameoka, T., Development of a Quantification System of Ionic Dissociative Materials in the Glycolytic Pathway Using an FT-IR/ATR Method, *Bioprocess Biosyst. Eng.*, **26**, 2 (2003) pp.133-139
- 6) 狩野幹人, 中西健一, 橋本篤, 亀岡孝治, 溶媒効果を考慮した二糖類の赤外分光解析, 日食科工誌, **50**, 2, (2003) pp.57-62

(橋本 篤)

2.3.3 殺菌効果

近年の流通経路の拡大化・複雑化および嗜好性の変化（低塩化、低糖化）に伴い大型の微生物災害が多発してきている。いかに微生物を制御するのか、殺菌するのかということは、食品・医療だけでなく他の多くの分野においても、重要な課題となっている。様々な殺菌・抗菌技術が開発されてきているが、殺菌技術の中核を担っているのは依然として加熱殺菌であり、赤外線加熱形態（輻射）の特徴を生かした殺菌プロセスの構築が期待されている。ここでは、赤外線の殺菌効果およびその応用に関する論文をまとめ概説する。

島田¹⁾は、細菌懸濁液を対象にして赤外線による殺菌実験を行っている。赤外線照射加熱された懸濁液の温度が伝導加熱による温度以下の条件でも殺菌効果は赤外線加熱の方が伝導加熱を上回っていた。ただし、この実験においては、懸濁液の温度条件が揃っていないため、効果を単純に比較するのは困難であった。そこで橋本ら²⁾は、赤外線加熱と伝導加熱による温度変化を一致させた条件下で、殺菌効果の比較を行った。懸濁液のバルク温度が同じ条件において、赤外線照射加熱の方が伝導加熱よりも効果的であった。また、高い耐熱性を有する細菌芽胞に対しても赤外線加熱は殺菌効果を示ことが報告されている³⁾。殺菌効果は照射エネルギーの増加に伴い増大し、さらに照射初期において芽胞の熱活性化が認められた。赤外線照射による懸濁液のバルク温度変化の範囲における伝導加熱では、活性化は認められなかった。この熱活性化については、濱中ら⁴⁾も固体表面上の芽胞について報告している。活性化された芽胞は、その後の発芽過程で耐熱性および薬剤抵抗性の喪失が起こる。したがって、赤外線照射によるこの活性化は、他の手段などと組み合わせることにより、より低温で芽胞の殺菌ができる可能性を示している。

赤外線の殺菌機構については、細菌がストレスを受けた際の抗生剤に対する感受性変化を調べることで検討されており、赤外線照射加熱と伝導加熱による大腸菌の感受性変化の傾向は同じであり、同様な損傷を受け死に至ると考えられた。しかしながら、その殺菌効果および損傷の程度は、伝導加熱よりも赤外線加熱の方が大きかった^{5,6)}。赤外線の殺菌効果は、細菌懸濁液の表面近傍領域における赤外線エネルギーの吸収と、バルク温度の上昇の2つに起因すると考えられる。そこで、懸濁液の表面近傍領域での影響を検討するために、懸濁液を下部から強制的に冷却し、懸濁液のバルク温度を細菌の致死温度以下に保った状態で、赤外線を照射した。この条件でも、赤外線照射により殺菌効果が認められた^{7,8)}。赤外線を照射したときの懸濁液の表面近傍の温度変化について計算すると、表面の極めて薄い領域の温度は上昇し、バルク温度が40℃であっても致死温度以上になりうることを示唆された^{7,8)}。したがって、バルク温度が致死温度以下であっても、細菌が表層部の高温領域に侵入することでストレスを受け、さらにこのストレスが繰り返されることが推測される⁹⁾。赤外線照射による殺菌の優位性は、熱輻射の特徴に起因するものであるといえる。

赤外線の殺菌操作への応用に関する報告は、近年若干ではあるが増加傾向にある。田辺¹⁰⁾は煮干しイワシの乾燥方法として赤外線乾燥を取り上げ、乾燥時間が大幅に短縮でき、

さらに生菌数を大きく減少できることを報告している。村松ら¹¹⁾は、そば粉を対象に検討を行っている。通風加熱と比較すると、極めて短時間で生菌数を 10^2 個/g以下まで低下させることが可能であった。Jamesら¹²⁾は卵の表面殺菌として赤外線照射を試み、温度測定より卵内部に影響を与えずに表面殺菌できる可能性を報告している。またHabbarら¹³⁾は、蜂蜜の殺菌方法として赤外線をマイクロ波と比較している。マイクロ波加熱より温度上昇に時間がかかるものの赤外線加熱でも十分に基準以下まで殺菌が可能であることを示している。濱中ら¹⁴⁾は、小麦および大豆の表面の殺菌を赤外線で行い、短時間の照射で有効な殺菌効果を得たことを報告している。また、間欠的に赤外線照射することで試料内部への影響を軽減し、かつ殺菌が達成できる可能性を示している。

1970年代にMolinら¹⁵⁾が、医薬用のガラス器具の殺菌法として、赤外線の利用を報告している。通常、乾熱滅菌器の内部温度が所定の殺菌温度に到達するのに数時間を要するのに対し、赤外線処理では30秒程で芽胞をほぼ全滅させており、非常に高い滅菌効果を示している。また医療へ応用という観点から、各種レーザーによる殺菌効果が調べられている。Watsonら¹⁶⁾は7つの異なった波長のレーザーの殺菌効果を、寒天平板に塗布された菌について比較している。同じエネルギー量でも、 $10.8\mu\text{m}$ の赤外波長を持つ CO_2 レーザーが、短時間で殺菌効果を発揮している。また細菌懸濁液の系では CO_2 レーザーによりバルク温度が 50°C でも、90%以上の殺菌効果を示すことから、熱的效果以外になんらかの付加的な効果の存在を推測している¹⁷⁾。レーザーを利用した特定波長の生体への影響を検討することは、遠赤外線の殺菌機構を解明する上でも極めて重要である。

これまで赤外線においては、加熱・乾燥に付随するものとして殺菌効果が扱われてきた感がある。近年、微生物制御技術の重要性が高まっており、クリーンな操作環境を提供でき、また熱風・冷風・真空など他の手段と組み合わせて使用することも可能である赤外線は、「殺菌」という領域においても、そのポテンシャルは高いと言える。

参考文献

- 1) 島田, 遠赤外線の殺菌効果, 九州歯会誌, 36, (1982) pp.307-313.
- 2) 橋本, 清水, 五十嵐, 生理的リン酸緩衝溶液中に浮遊する細菌の殺菌に及ぼす遠赤外線の影響, 化学工学論文集, 17, (1991) pp. 627-633.
- 3) J. Sawai, M. Fujisawa, T. Kokugan, M. Shimizu, H. Igarashi, A. Hashimoto and H. Kojima, Pasteurization of bacterial spores in liquid medium by far-infrared irradiation, J. Chem. Eng. Jpn., 30, (1997) pp. 170-172.
- 4) 濱中, 内野, 胡, 安永, *Bacillus subtilis* 孢子および *Aspergillus niger* 孢子に対する赤外線照射の殺菌効果, 農機学誌, 64, (2002) pp.69-75.
- 5) J. Sawai, K. Sagara, H. Igarashi, A. Hashimoto, T. Kokugan and M. Shimizu, Injury of *Escherichia coli* in physiological phosphate-buffered saline induced by

- far-infrared irradiation, J. Chem. Eng. Jpn., 28, (1995) pp.294-299.
- 6) J. Sawai, K. Sagara, M. Miyagawa, T. Kokugan, M. Shimizu, H. Igarashi, A. Hashimoto and H. Kojima, Injuries in exponential phase cells of *Escherichia coli* suspended in physiological phosphate buffered saline by far-infrared irradiation, J. Chem. Eng. Jpn., 30, (1997) pp.669-676.
 - 7) A. Hashimoto, J. Sawai, H. Igarashi and M. Shimizu, Effect of far-infrared irradiation on pasteurization of bacteria suspended in liquid medium below lethal temperature, J. Chem. Eng. Jpn., 25, (1992) pp.275-281.
 - 8) A. Hashimoto, J. Sawai, H. Igarashi and M. Shimizu, Irradiation power effect on IR pasteurization below lethal temperature of bacteria, J. Chem. Eng. Jpn., 26, (1993) pp.331-333.
 - 9) J. Sawai, K. Sagara, S. Kasai, H. Igarashi, A. Hashimoto, T. Kokugan, M. Shimizu and H. Kojima, Far-Infrared Irradiation-Induced Injuries to *Escherichia coli* at below the Lethal Temperature, J. Ind. Microbiol. Biotechnol., 24, (2000) pp. 19-24.
 - 10) 田辺, 煮干しエイワシの油焼け防止-IV遠赤外線乾燥, 千葉県水産試験場研究報告, No.49, (1991) pp.55-62.
 - 11) 村松、大日、大池, 遠赤外線照射によるそば粉の初発菌数の低減に関する研究 (第 1 報), 長野県食品工業試験場報告, No.17, (1989) pp.71-76.
 - 12) C. James, V. Lechevalier and L. Ketteringham, Surface pasteurization of shell eggs, J. Food. Eng., 53, (2002) pp.193-197.
 - 13) H.U. Hebbar, K.E. Nandini, M.C. Lakshmi and R. Subramanian, Microwave and infrared heat processing of honey and its quality, Food Sci. Technol. Res., 9, (2003) pp.49-53
 - 14) 濱中、内野、胡、安永、フセイ、赤外線を利用したコムギおよびダイズの表面殺菌, 農機学誌, 65, pp.64-70 (2003).
 - 15) G. Molin and O. Milin, Dry-heat sterilization of Pharmaceutical Glassware Using Hot Air or Infra-red Radiation, Acta Pharm. Suec., 12, (1976) pp. 475-484.
 - 16) I.A. Watson, G.D. Ward, R.K. Wang, J.H. Sharp, D.M. Budgett, D.E.S. Stewart-Tull, A.C. Wardlaw and C.R. Chatwin, Comparative Bactericidal Activities of Lasers Operating at Seven Different Wavelengths, J. Biomed. Opt., 1, (1996) pp. 466-472.
 - 17) G.D. Ward, I.A. Watson, D.E.S. Stewart-Tull, A.C. Wardlaw, R.K.Wang, M.A. Nutley and A. Cooper: Bactericidal action of high-power Nd:YAG laser light on *Escherichia coli* in saline suspension, J. Appl. Microbiol., 89, (2000) pp.517-525.

(澤井 淳)

第3章 赤外放射応用のための技術

3.1 フォトンの物質への作用

3.1.1 赤外放射と紫外放射と光環境^{1),2)}

太陽からの放射エネルギー（以下、放射 (radiation)）の中で地表に到達する部分には、波長で言えば、ほぼ 300 nm から 3,000 nm までのエネルギーが連続して（波長的に切れ目無く）含まれている。良く知られているように、人間に対し視覚を生じさせる波長範囲は、ほぼ 380 nm から 780 nm の間であり、可視放射 (visible radiation) と呼ばれる。太陽からの放射には、この可視放射が含まれているので、人間の目に入ると視覚が生じ、明るく感じることになる。したがって、太陽からの放射は光と呼ばれる。

光が存在する環境のことを光環境 (lighted environment) という。光環境には必ず光源がある。人間の（地球上の）光環境の場合、最も重要な光源は太陽であるが、太陽だけとは限らない。太陽以外の各種の人工光源からの光も光環境を構成している。

地球上の光環境の重要構成要素となる人工光源は、元来、人間の視覚や視作業を支援することを第1義として開発・製作されたものであるから、人工光源から放射される光は、可視放射で構成されるように設計されてはいるが、実際的にその光の全てが可視放射だけで構成されていることは無く、太陽からの放射同様に、視覚支援には全く寄与しない紫外放射や赤外放射が不可分的に構成要素の一部となっている。したがって、人間が人工光源や太陽光の下で（視）作業をすると、人体が、これら紫外放射や赤外放射の照射を不可分的に受けしてしまうことになる。（太陽からの放射に含まれている、紫外放射・可視放射・赤外放射を総称して「光放射 (optical radiation)」という。）

また、光環境の要素だけで無く、医療や産業分野などにおいて、光放射の応用開発が進み、一般照明用以外の光源（例えば、医療用光源、コピー用の光源、OA機器用光源、印刷用の光源、光化学産業用光源、耐候性試験用光源、溶接用アークなど）が人間と共存、広く利用される機会が増えているが、これらの光源（光放射源）からの光にも紫外放射や赤外放射が含まれていることは、光環境の場合と全く同様である。むしろ利用分野によっては、始めから紫外放射や赤外放射を主要構成要素としている放射源も利用されており、人間が紫外放射や赤外放射の照射を受ける機会も多い。

紫外放射や赤外放射が、人間が照射を受け、毒にも薬にもならなければ別に問題にはならないが、既に述べたように、光はエネ

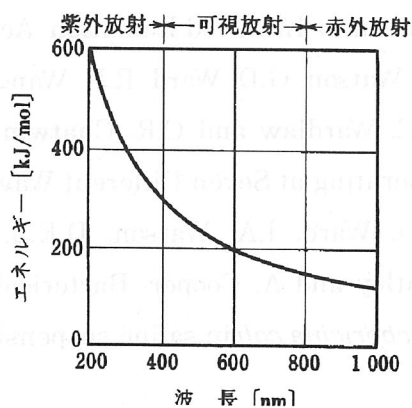


図1 光放射(光子)のエネルギー

ルギーであるから、人体が光の照射を受け、吸収すると、いろいろな作用を生じる。中でも、波長の短い紫外放射は、光子（フォトン）のエネルギーが大きく（図 1 参照。）、人体に吸収されると、何らかの光生物的作用効果、時には光生物的傷害を及ぼす可能性がある。これらの諸作用についても注意を払い、必要があれば適切な管理をすることが重要となってくる。

即ち、光環境に紫外放射夜赤外放射が存在する可能性がある場合は、それらの放射の作用や効果についての正確な知識を持ち、種々の影響、特に傷害が発生する可能性について正確に検討した上で光環境設計を行うとともに、傷害の発生を防止する措置をとっておくことが重要である。

3.1.2 フォトンのエネルギーと作用³⁾⁻⁷⁾

放射による様態のエネルギーが対象物に投与されると、一部は反射され一部はそのまま透過し、残りはその対象物に吸収される。この吸収された部分は、一般的にはフォトンのエネルギーの大きさ（図 1 参照。）によって、一部分が解離、分解、重合、架橋などの光化学作用や、細胞の励起などの光生化学作用などを推進し、結果として対象物に変化をもたらす。残りの部分は、その対象物を構成する分子の振動エネルギーなどに変換され、最終的には熱エネルギーに変換される。

種々の調査結果による人体や諸物質を構成する分子の代表的な原子間の結合エネルギーを表 1 に示す。

表 1 分子における代表的な原子間の結合エネルギー

化学結合	結合エネルギー [kJ・mol ⁻¹]	化学結合	結合エネルギー [kJ・mol ⁻¹]
C≡N (ニトリル)	875	C-O	364
C≡C	837	S-H	364
C=O	728	N-H	352
C=C	607	C-C (脂肪族)	335
C=S	540	C-O (エーテル)	331
C-C (芳香族)	519	C-Cl	327
C-H (アセチレン)	507	S=S	318
C-F	498	Si-H	314
O=O	498	Si-C	293
O-H	460	C-N (ニトロメタン)	285
C-H (エチレン)	444	C-S	276
H-H	436	O-O (過酸化物)	268
C-H (メタン)	410	Cl-Cl	243
Si-O	373	N-N (ヒドラジン)	155

表1より明らかなように、通常の分子を校正する代表的原子間の結合エネルギーは150 [kJ・mol⁻¹] よりも大きい。したがって、光化学反応や光生化学反応は、光子のエネルギーが150 [kJ・mol⁻¹] (図1より、ほぼ波長：800 nmの放射に相当) より大きい、従って、波長：800 nmより短い波長の放射によって促進されることになるので、赤外放射(波長830 nmよりも長波長の光放射)は、人体や物質に吸収されても、光化学作用や光生化学作用を及ぼすことなく、熱エネルギーに変換されることが多いと考えられる。したがって、赤外放射は加熱の目的に良く利用される。

実際的には、写真など、一部の光化学反応は赤外放射によっても促進される場合(赤外写真)がある。ただし、その光化学反応の進行に寄与する光子のエネルギーは、せいぜい60 [kJ・mol⁻¹]程度(波長：2 μmの近赤外放射)までである。

更に波長が長くなってくると光子のエネルギーが一層小さくなるので、人体や諸物質に吸収されても、分子や原子の振動エネルギーや回転エネルギーに変換されるだけで、励起エネルギーや分子の解離エネルギーなどには変換されなくなる。分子や原子の振動エネルギーや回転エネルギーはそのまま熱エネルギーに変換され、その対象物の温度上昇をもたらす。この境界となるエネルギーの値は分子や原子の種類によって異なるが、大略30 [kJ・mol⁻¹]程度といわれている。このエネルギーに相当する光子の波長は、ほぼ4 μmである。したがって、赤外放射の中でも波長4 μmよりも長い領域の赤外放射(=遠赤外放射)は、人体や諸物質に照射され、吸収されると、単に熱エネルギーだけに変換されるので、副作用の無い、効率の良い加熱を行うことが出来る。光放射の波長(光子のエネルギー)と物質や人体への作用の様態をまとめたものを、図2に示す。

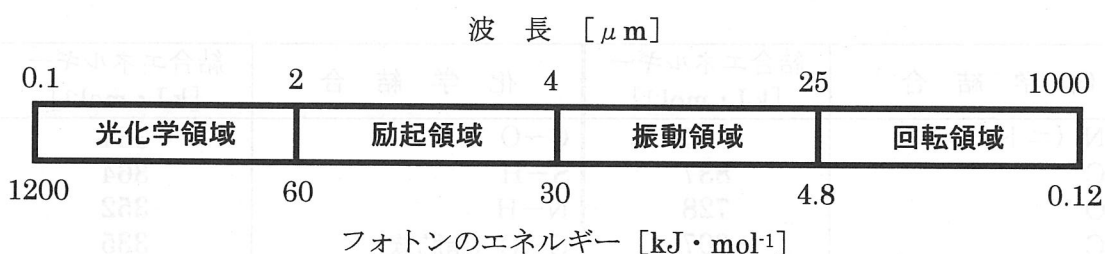


図2 光放射の波長(光子のエネルギー)と分子に吸収された後の反応の様態区分

3.1.3 遠赤外放射の非熱作用^{8)~10)}

前項において、遠赤外放射(波長4 μm以上の赤外放射)は、生体や物質に吸収されると、回転エネルギーや振動エネルギーへの変換過程を経て、最終的には熱エネルギーに変換される、と記述したが、作用するエネルギーの閾値が小さい反応に対し、遠赤外放射が

直接作用する場合がある。これは、熱エネルギーへの変換過程を経ないので、“遠赤外放射の非熱作用 (non-thermal effect of far infrared radiation)” と呼ばれる。

この“遠赤外放射の非熱作用”の一例として、水における水素結合の離間が上げられる。水分子は、その特異的構造により水素結合力が誘起し、水分子同志が水素結合により凝集する（水のクラスターと呼ばれる）。この水分子の水素結合エネルギーは、ほぼ $12\sim 30$ $[\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}]$ 程度であり、フォトンのエネルギーに換算すると、 $4\sim 10\ \mu\text{m}$ となり、遠赤外放射の波長域の放射のエネルギーに相当する。したがって、水分子の水素結合の離間は、遠赤外放射により、直接的に充分可能であり、これが“遠赤外放射の非熱作用”の一例である。

参考文献

- 1) Hall, J.D. : Industrial Applications of Infrared, McGraw-Hill Book Co., Inc. (1947)
- 2) Hackforth, H.L. : Infrared Radiation, McGraw-Hill Book Co., Inc. (1960)
- 3) 日本電熱協会・編：エレクトロヒート応用ハンドブック，オーム社，（平 2）
- 4) 日本電熱協会 遠赤外線委員会・編：遠赤外加熱の理論と実際，オーム社，（平 3）
- 5) 赤外線技術研究会・編：赤外線工学—基礎と応用，オーム社，（平 3）
- 6) 堀 克彦・編：工業用電気加熱，(財)省エネルギーセンター，（平 8）
- 7) 河本 康太郎：最近の乾燥技術，総合技術センター，（平 9）
- 8) 河本 康太郎：赤外線技術と赤外放射源の研究，赤外線技術，第 14 号，p3～p20（昭 63）
- 9) 乾 泰宏：特定課題 R6-28「赤外放射の非熱効果」調査報告，日本照明委員会誌，9-02，p12～p16（平 4）
- 10) 河本 康太郎，楽本 直人：遠赤外加熱の将来展望，エレクトロヒート，No.84，p1～08（平 7）

（河本 康太郎）

3.2 光放射計測

3.2.1 赤外放射計測

物体からの赤外放射量を測定することは、その物体の性能評価や赤外領域における放射・吸収のし易さ、また透過や反射の程度を知る上で重要な意味を持つ。

(1) 全放射計測

全放射の「全」は、全波長域にわたる光放射エネルギーの総和量を言う。全放射測定には放射計を用いるか、または、分光放射測定結果を積分する方法がある。

放射計のセンサとしては、サーモパイルが多く使用されている。このセンサは約 1~40 μm の波長領域において、ほぼ一定の応答感度を有している。

以下に全放射の測定項目を示す。詳しくは JIS Z 8120 光学用語を参照されたい。

- ① 放射束：ある面を単位時間あたりの通過する放射エネルギー。「ある面」とは、放射の放出面、到達面あるいは途中の空間中の面のいずれかを指す。単位は(W)。
- ② 放射照度：与えられた面上のある点を含む微小面積要素に入射する放射束を、その微小面積で割った値。単位は(W/m²)。
- ③ 放射強度：点放射源から、与えられた方向の微小立体角内に出る放射束を、その立体で割った値。単位は(W/sr)。
- ④ 放射発散度：与えられた面上のある点を含む微小面積要素から出る放射束を、その微小面積で割った値。単位は(W/m²)。
- ⑤ 放射輝度：放射源の表面上のある点において、その点を含む微小面積要素の与えられた方向への放射強度を、その面に垂直な平面上にこの面要素を正射影した面積で割った値。単位は(W/ m²·sr)。
- ⑥ 放射率：放射体の放射発散度と、それと同じ温度における黒体の放射発散度との比。全放射率とも言う。1~0 までの無名数で表される。

(2) 放射率測定

放射率測定には種々の測定器が使用されるが、分光放射率測定では赤外分光光度計（分散型やフーリエ変換型）の分光機能を利用することが多い。放射の基準となる赤外放射源としては黒体炉を用いる。測定は、試料表面からの放射と、試料表面と同温の黒体炉からの放射を比較することで放射率が求められる。試料の表面温度を正確に測定し、黒体炉の温度と同じにすることが重要である。温度センサの感温部は可能な限り熱容量が小さいことが望ましく、また、センサを試料表面に取り付ける方法についても、熱抵抗や熱伝導誤差を限りなく小さくする等の注意が必要である。表面温度が 150℃程度までは比較的容易に測定が可能であるが、高温になると測定誤差が大きくなる。例えば 400℃付近での±2℃程度の誤差は、放射率に換算すると約 0.02 の違いを生じることになる。

(3) 反射率・透過率測定¹⁾

反射率は正反射率の値に拡散反射率の値を加えた全反射率を指しており、同様に透過率は全透過率を指す。全反射率及び全透過率の測定方法、正反射率や正透過率の測定方法を図1に示す。ここでは、赤外分光光度計（例えば、FT-IR（フーリエ変換赤外分光光度計））を用いた反射率及び透過率測定方法の一例をあげる。内面に金蒸着処理を施した積分球とTGS 検出器を組み合わせた反射率測定装置を、FT-IR の試料室に設置し測定する。反射率測定位置（試料取り付け位置）に何も装着しない状態で反射出力が零であることを確認した後、金表面鏡の反射出力及び試料の反射出力をそれぞれ測定し、その比を取れば試料の全反射率が求められる。ただし、ここでは金表面鏡の反射率を100%とした時の相対測定であるが、金表面鏡の代わりに校正された標準反射板を用いることで、トレーサブルな測定も可能である。透過率は、上記の反射率測定で使用した積分球を用い、入射孔に試料を設置した場合と設置しない場合の出力の比を取ることで求められる。

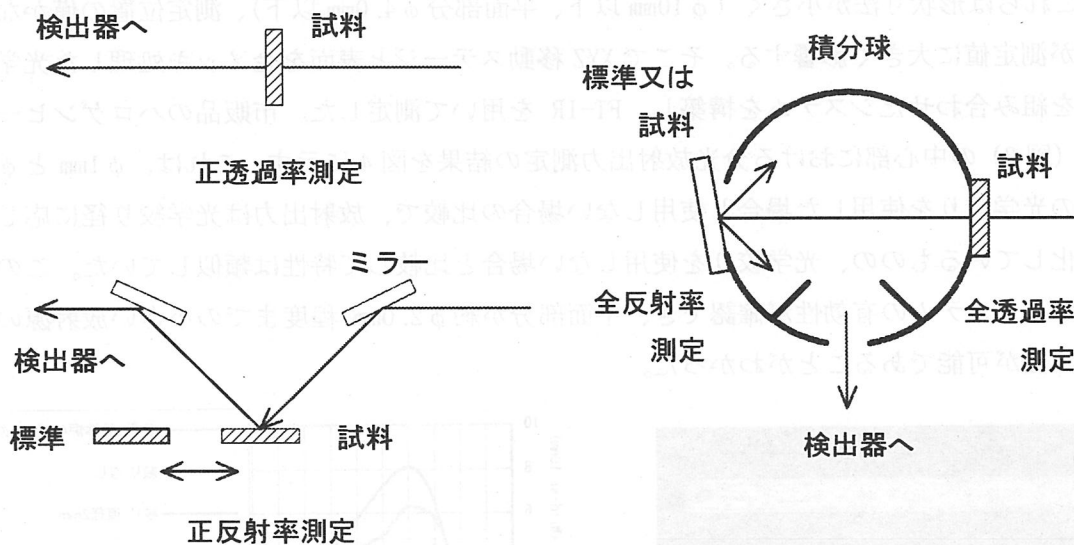


図1 透過率および反射率の測定方法

(4) 反射率および透過率から放射率を算出する方法²⁾

放射体の赤外放射率は、放射体表面と同じ温度にある黒体の放射量との比較で求められるが、放射体の温度が数十℃以下では放射量が少なくなり、高感度の測定器が必要となる。

また、常温の放射体では周囲の物体からの放射を反射してしまうため、どのような放射率の物体であっても放射率は1.0という値に観測されてしまう。このように、常温あるいはその付近の温度の放射体では、反射率測定を行い、放射率=1-(反射率)として算出する方法がある。また、放射体が放射エネルギーを透過する場合には、反射率測定および透過率測定を行い、吸収率=1-(反射率+透過率)とし、吸収率=放射率として算出する。

このようにして求めた分光放射率（計算値）と、温度を上昇させて測定した分光放射率

の値を図2に示す。

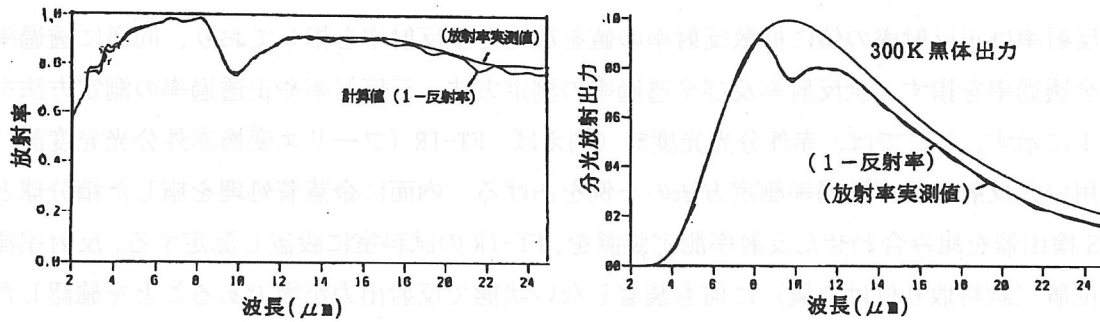


図2 反射率から算出した分光放射率の測定例

(4) 微小赤外放射源の放射出力測定

最近では、センサシステムの赤外放射源として使用される小型ランプや、暖房器などに使われるハロゲンヒーター、カーボンヒーターなどの分光放射特性の評価が求められている。これらは形状寸法が小さく（ $\phi 10\text{mm}$ 以下、平面部分 $\phi 4.0\text{mm}$ 以下）、測定位置の僅かなズレが測定値に大きく影響する。そこでXYZ移動ステージと表面を金メッキ処理した光学絞りを組み合わせたシステムを構築し、FT-IRを用いて測定した。市販品のハロゲンヒーター（図3）の中心部における分光放射出力測定の結果を図4に示す。これは、 $\phi 1\text{mm}$ と $\phi 2\text{mm}$ の光学絞りを使用した場合と使用しない場合の比較で、放射出力は光学絞り径に応じて変化しているものの、光学絞りを使用しない場合と比較して特性は類似していた。この結果からシステムの有効性が確認でき、平面部分が約 $\phi 2.0\text{mm}$ 程度までの小さい放射源の特性評価が可能であることがわかった。

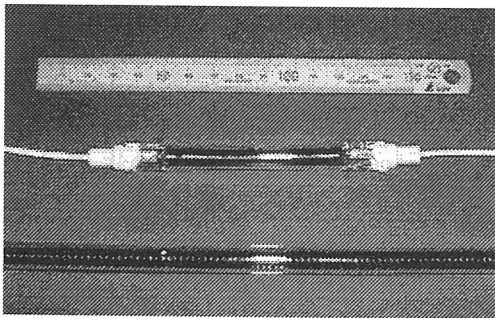


図3 ハロゲンヒーターの外観

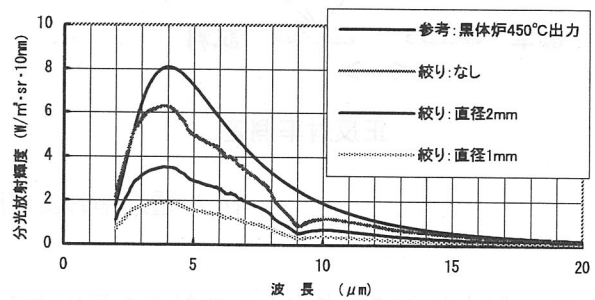


図4 黒体炉出力とハロゲンヒーターの放射出力

参考文献

- 1) 笹森宣文: 赤外線透過率・反射率の測定による放射率の算出, 東京都立産業技術研究所, P46(1999)
- 2) 技術ガイド: 赤外線・紫外線の利用技術, 東京都立産業技術研究所, P28(2000)

(中島 敏晴)

3.2.2 赤外分光吸収計測

(1) はじめに

ある試料の吸収スペクトル測定を行う場合、その試料の物理的、化学的性質によって、測定に有利な方法もあれば、不利な方法もある。例えば、透過率測定法は、表面が滑らかで透明な試料の測定は有利であり、散乱が大きくて不透明な試料は不利であるが、反射率測定法は、どちらかといえば後者の方が有利であると言った具合である。従来、赤外吸収スペクトルは一般的に透過率測定法によって測定されてきた。しかし、透過率測定法では、試料の厚さまたは濃度を適当な範囲に調整する必要があり、かつ微弱な吸収測定は不利かもしれない。ATR(Attenuated Total Reflection)法では、試料を高屈折率のプリズムに接触させて全反射測定により吸収スペクトルを測定するが、その接触面積を広げ、全反射を2段、3段と増やすことによって吸収強度を調整できる測定上の利点がある。一方、ATR法では、入射赤外光を高屈折率のプリズムに導入する必要があるが、空気との界面での反射による損失のために検出器に達する光量が1/2~1/3にも減少し、さらに光学系の調整不足も加わると、1/5~1/10に低下すると言われている。しかし、フーリエ変換赤外(FT-IR)分光器などの出現によって赤外分光測定の精度が著しく向上し、質のよいATR法による吸収スペクトル測定が可能になってきている。ATR法は、最初、化学の分野で多く利用されており、その応用は主に定性的な目的に限られていたが、最近では、表面厚さについてもかなり正確な情報が得られること、さらに表面層の定量分析にも使用できることが明らかにされてきている。本報告書では、吸収スペクトル測定としての透過率測定法、ATR法、或いは、上記では触れていないPAS(Photo-Acoustic Spectroscopy)法については、多くの研究報告書や解説書が出版されているので省略することとする。以下では、最近、進展がみられた光熱偏向効果による赤外分光吸収計測法(Photothermal Deflection Spectroscopy)について調査したので報告する。

従来、光ビーム偏向効果(光熱偏向効果)による吸収測定では、試料周辺媒質として、四塩化炭素(CCl_4)などの液体がよく用いられている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。これは、液体の光学的屈折率の温度係数が比較的大きいことから、試料の発生する熱によってプローブビーム光が大きく偏向し、より高感度の測定が行えるためである。試料周辺媒質として液体を用いる測定は、主に可視域において行われていたが、その後、種々の物質の分子構造に関わる吸収スペクトルの高感度測定などのため、FT-IR分光器を用いることによる測定も試みられている⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾。しかし CCl_4 のような液体を用いる場合では、1)試料への媒質の化学的作用、2)赤外域での媒質自身の複雑な吸収特性の存在、3)媒質用容器の必要性などの問題があり、赤外域での非破壊吸収測定への適用はやや困難と考えられる。次節では、液体の光熱偏向効果による吸収測定のような特別な容器等を必要としない非破壊吸収測定を可能にするため、臭化ヨウ化タリウム(KRS-5)を用いた固体材料の光熱偏向効果による赤外吸収測定の提案手法について概説する⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

(2)測定方法

図 1 は、KRS-5 の光熱偏向効果による吸収測定を行うために構成した光学系のブロック図を示す。この光学系は、固体または液体試料の赤外吸収スペクトルを非破壊的に測定することを目的とし、FT-IR 分光器と組み合わせて使用できるように配慮されている。光学系における KRS-5 の結晶には、検出感度の向上等のため、全面研磨を行った直方体のブロックが使用されている。一方、試料への照射光は、微動 XY ステージ上の KRS-5 ブロックの下側から入射するようになっている。また、図 1(a)における He-Ne レーザからのプローブビーム光(プローブ光)は、KRS-5 ブロックを通過後、約 50cm 後方の光位置検出器へ入射される。この He-Ne レーザ光源は、ランダム偏光のレーザ光源であり、位相板と直線偏光子を用いてその偏光方向を規定するようになっている。

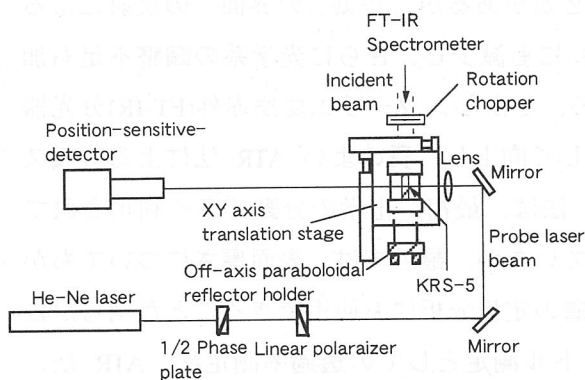


図 1 a) KRS-5 用いた PDS 法の光学系

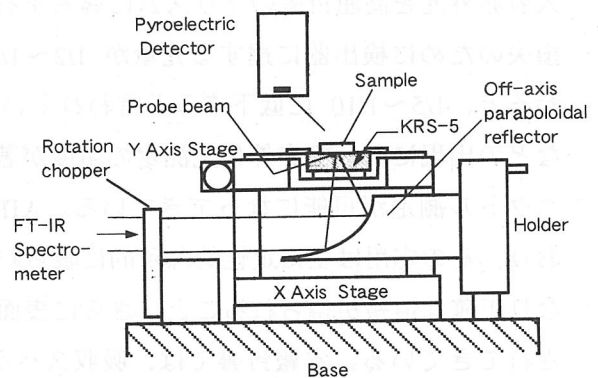


図 1 b) 光学系の垂直断面図

さて、周期的に加熱された透明な固体の結晶における屈折率変化に伴い、結晶中を透過するプローブ光の偏向の大きさ(偏向角度)は、プローブ光自身の偏光方向に大きく依存することが知られている⁽⁹⁾。これは、透明な固体の結晶における光弾性効果によるものであり、この光弾性効果は固体の熱ストレスによって発生する屈折率変化に対応する。図 2 は、KRS-5 におけるプローブ光の偏光方向と光位置検出器による光熱偏向信号出力の関係の測定例を示している。図 2 の結果は、KRS-5 の光弾性効果に対応するものであり、光熱偏向信号がプローブ光の偏光方向によって大きく変化することを示しており、吸収スペクトルの測定においてプローブ光の偏光方向は、光熱偏向信号が最も大きく得られるように直線偏光子の回転角度を規定する必要があることを示唆している。

各種試料の吸収スペクトル測定では、FT-IR 分光器(Bruker IFS-66V)が用いられている。一般に、FT-IR 分光器には、マイケルソン干渉計に代表される振幅分割型の 2 光束干渉計が広く用いられている。この種の干渉計ではビームスプリッターにより分割された 2 光束の干渉より得られる干渉強度曲線(インターフェログラム)を測定し、そのフーリエ変換により赤外スペクトルを得る。また、2 光束干渉計における可動鏡の駆動方式は、連続走査

方式とステップ走査方式に大別される。連続走査方式は、高速スキャンと呼ばれる He-Ne レーザ光のインターフェログラムの内部変調信号と組み合わせられた走査方式として FT-IR 分光器に広く用いられている。一方、ステップ走査方式は、可動鏡をある一定光路差位置で一定時間止めておき、その後、急激にある距離だけ動かし、その位置で再び一定時間止めておくという可動鏡のステップ移動動作を行いながらインターフェログラムを測定する方式である。この方式は、全体として低速走査となりがちであるが、いろいろな応用測定が可能となる長所を持っている。

上記 KRS-5 の光熱偏向効果による吸収スペクトル測定では、試料への入射光は、FT-IR 分光器の干渉計からの出射放射束を回転チョッパーで変調し、図 1 に示す光学系へ入射するようになっている。この際、FT-IR 分光器における測定は、ステップ走査方式によって行われた。従って、光位置検出器における光熱偏向信号に対応するインターフェログラムは、回転チョッパーによる変調信号(5Hz)を参照信号としてロックイン増幅器を用いて測定される。このステップ走査方式の採用の主な目的は、1)各試料の吸収スペクトルを波数(波長)に対して一定の変調周波数による光熱偏向信号出力を得ること、2)低い変調周波数によって大きい光熱偏向信号出力を得ることなどにある。

一方、各波長における試料への入射光強度は、図 1(b)に示すように試料の位置に表面を黒色ペイント(Cat-a-lac)でコーティングされた受光面の焦電性検出器(Molelectron P1-45cc)を設定して校正されている。入射光強度は、波数(cm^{-1}) 1000~5000 において 1mW 以上と推測された。

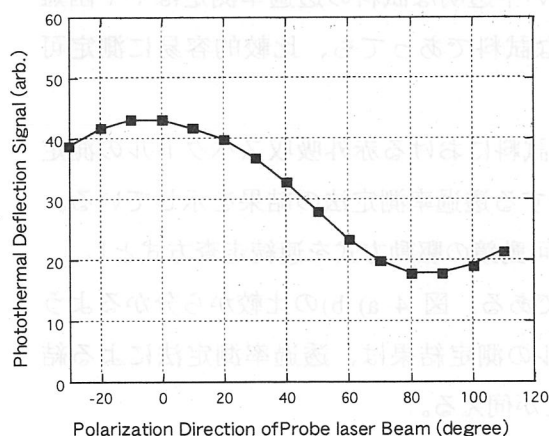


図 2 KRS-5 の光弾性効果の測定例

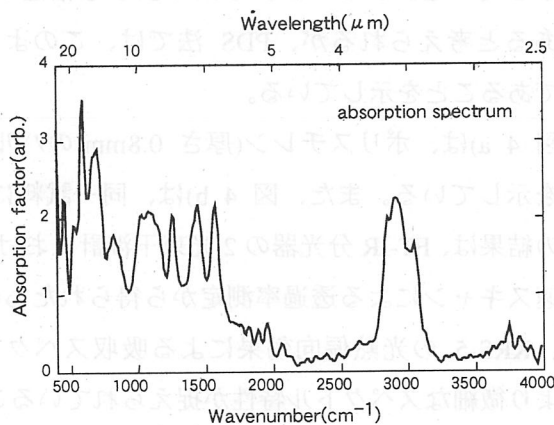


図 3 KRS-5 を用いた PDS 法によるシリコングリスの吸収スペクトル測定例

(3)測定結果と考察

図 1 の光学系における検出感度の見積のため、典型的な周波数特性、及び KRS-5 プロックの熱拡散長などが測定された。この熱拡散長の測定結果は、KRS-5 の熱伝導率、密

度、比熱などの物理常数を用いて理論的に計算した結果と比較することによって吟味された。これらの結果は理論的に算出した結果とよい一致を示した。また、カーボンブラックの試料における測定システムの周波数特性を解析した結果、この周波数特性は、試料とプローブ光間の距離 x によって大きく変わり、 x 値が小ほど周波数特性が向上することを示している。さらに、試料表面の放射照度をパラメータにして吸収特性の最小検出値の見積が行われた。この最小検出値は、入射光強度に大きく依存するが、高感度の吸収測定が可能であることを示唆している。

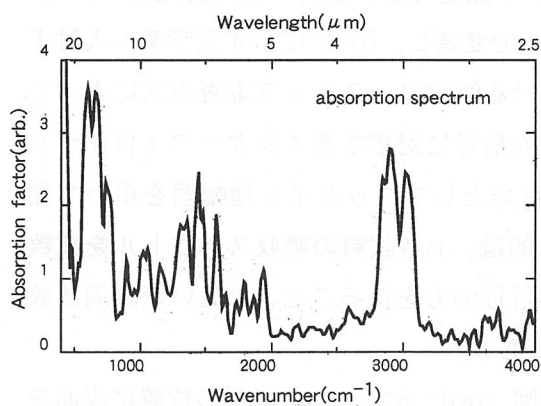


図 4 a) KRS-5 を用いた PDS 法によるポリ
スチレンの吸収スペクトル測定例

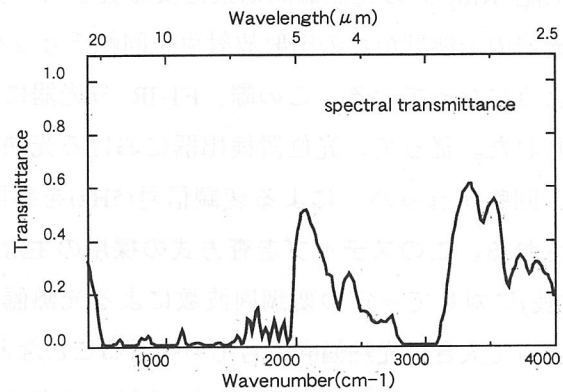


図 4 b) 透過率測定法によるポリ
スチレンの透過スペクトル測定例

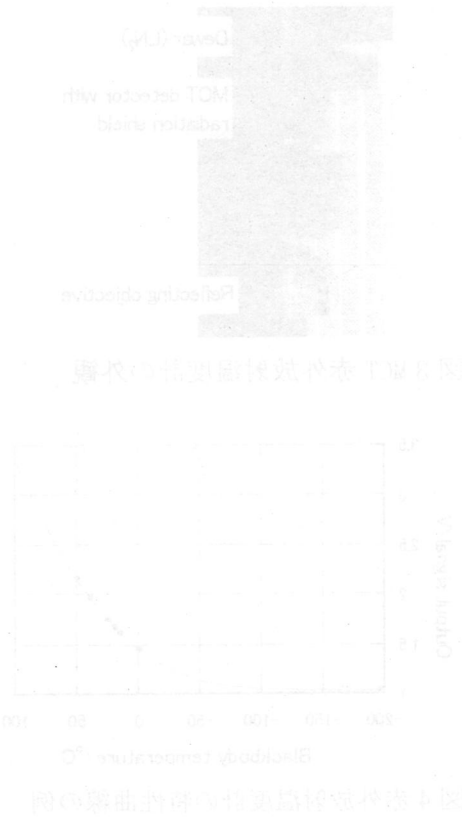
図 3 は、KRS-5 を用いた PDS 法によるシリコングリスの赤外吸収スペクトルの測定例を示している。シリコングリスのような粘性の高い半透明な試料の透過率測定はやや困難であると考えられるが、PDS 法では、このような試料であっても、比較的容易に測定可能であることを示している。

図 4 a) は、ポリスチレン(厚さ 0.8mm)のバルク試料における赤外吸収スペクトルの測定例を示している。また、図 4 b) は、同一試料に対する透過率測定法の結果を示している。この結果は、FT-IR 分光器の 2 光束干渉計における可動鏡の駆動方式を連続走査方式とし、高速スキャンによる透過率測定から得られたものである。図 4 a) b) の比較から分かるように、KRS-5 の光熱偏向効果による吸収スペクトルの測定結果は、透過率測定法による結果より微細なスペクトル特性が捉えられていることが伺える。

参考文献

- (1) A.C. Boccara, D.Fournier, and J.Badoz: "Thermo-optical spectroscopy: Detection by the "mirage effect" ", Appl. Phys. Lett., 36,(1980)130-132.
- (2) W.B.Jackson, N.M. Amer, A.C.Boccara, and D.Fournier: "Photothermal deflection spectroscopy and detection", Appl. Opt., 20,(1981)1333-1344.

- (3) A.Mandelis: "Absolute optical absorption coefficient measurements using transverse photothermal deflection spectroscopy", J.Appl.Phys. , 54, (1983)3404-3409.
- (4) M.J.D.Low, C.Morterra and A.G.Severdia: "An approach to the infrared study of materials by photothermal beam deflection spectroscopy", Material Chemistry and Physics, 10,(1984)519-528.
- (5) P.G.Varlashkin and M.J.D.Low: "FT-IR Photothermal Beam Deflection Spectroscopy of Solids Submerged in Liquids",Appl. Spectrosc., 40,(1986)1170-1176.
- (6) M.J.Smith,C.J.Manning,R.A.Palmer,and J.L.Chao: "Step Scan Interferometry in the Mid-Infrared with Photothermal Detection", Appl.Spectrosc.,42,(1988)546-555.
- (7) H.Minato,A.Nishimoto and Y.Ishido : "Infrared absorption measurement using the photothermal deflection effect of thallium bromide iodide (KRS-5): Examination of basic characteristics", Review of Scientific Instruments, 69,(1998)3896-3901.
- (8) H.Minato, A.Nishimoto and Y.Ishido : "Infrared absorption measurement using the photothermal deflection effect of thallium bromide iodide (KRS-5): Measurement with a stepped-scan Fourier Transform infrared spectrometer", Review of Scientific Instruments, 72, (2001)2889-2892.
- (9) H.J.Seo and S.I.Yun:"Effect of Photoelasticity on Photothermal Beam Deflection in Transparent Solids", Springer Series in Optical Sciences, Photoacoustic and Photothermal Phenomena III, 69, (1992)231.



3.2.3 高速赤外放射測定装置

1. はじめに

機能性材料や半導体材料の新規開発に伴い、熱物性値を正確かつ迅速に測定することが必要となっている。そのためには高速かつ高精度に固体表面の温度変化を測定することが要求される。加えて測定用試料サイズはますます微小化しているため、微小サイズの試料や薄膜試料についての測定では、高速かつ高精度に非接触で測定できる技術の実用化が望まれている。それには非接触で測定できる赤外放射测温技術の応用が適する^{3,4)}。赤外放射温度計の熱物性値測定への応用例として、図1および図2に示す原理のレーザフラッシュ法熱拡散率測定法や周期加熱熱物性測定法の例がある⁵⁻¹¹⁾。

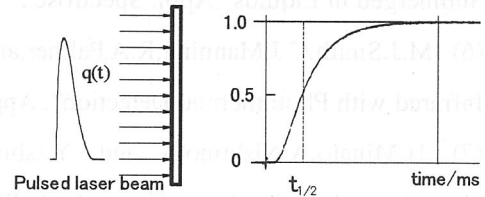


図1 レーザフラッシュ熱拡散率測定法における温度上昇曲線

2. 高速赤外放射温度計の開発

赤外放射温度計の開発では、高速時間応答性、温度分解能、安定性、操作性、小型および低コスト化に留意した。赤外放射温度計は高速時間応答性能を発揮できるように光起電力型 (pv) 素子 (InSb、HgCdTe(MCT)) を用い、チョップを用いない直流検出方式とし、赤外検出素子およびコールドシールド内蔵の液体窒素用デューワー、集光光学系およびI-V変換器で構成した。

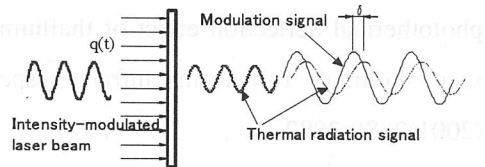


図2 周期加熱熱物性値測定法における加熱変調信号と温度変化信号の位相差

図3にpv-MCT赤外放射温度計の外観を示す。本機は $10\mu\text{m}$ の波長に最大感度を有する。対物側光学系は集効率を高めるためと視野特性を高めるためにカセグレン式ミラー光学系(対物距離:25mm)を用いている。

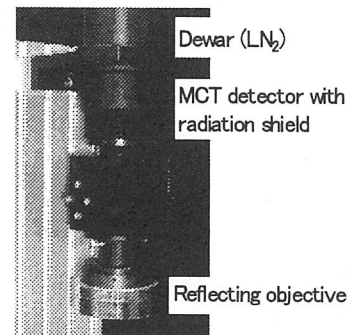


図3 MCT赤外放射温度計の外観

図4に温度-出力の関係を示す。本結果はPlanckの式で近似(相関係数=0.9999)できる。温度分解能は -50°C から 0°C 間で $0.3\sim 0.1\text{K}$ 、それ以上の温度範囲では 0.1K より小さい。

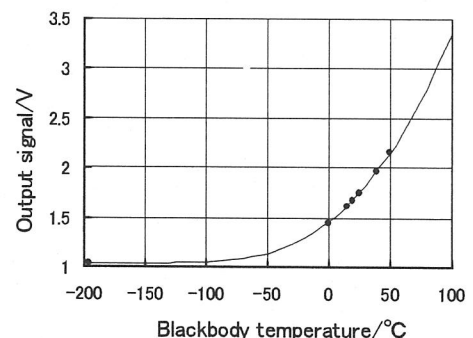


図4 赤外放射温度計の特性曲線の例

時間応答性は3MHz付近まで十分な感度があることを確かめた。図5はMCT放射温度計の時間応答の例を示す。シリコン単結晶試料について100

k Hz で強度変調された半導体レーザービームで黒化した表面を周期加熱した時（図中下段の信号）の試料表面の温度変化（図中上段）の観察例である。高速の加熱と同時に測温が実現できるので図 1 および図 2 に示すような原理で薄膜やコーティングの熱物性値の測定が可能となる

視野特性試験は解像力評価用テストパターン（USAF 1951 1×）を用いて行なった。図 6(a)(b)はテストパターンの一部を二次元的に $10\mu\text{m}$ ピッチで走査して得られた赤外光（約 $10\mu\text{m}$ ）の輝度分布の表示例である。図 6(a)は 2G-2L から 5L（線ピッチ： $223\mu\text{m}$ から $157\mu\text{m}$ ）、図 6(b)は 2G-6L（線ピッチ： $140\mu\text{m}$ ）に対応する。図中の左から 2G パターンのラインを示す数字、水平方向および垂直方向の 3 バーチャートの形状が明瞭に認識できる。

3. まとめ

最近開発された高速赤外放射測温技術について、高速応答性、視野特性を示し、微小領域における高速温度変化の非接触測定に適用可能であることを示した。水銀カドミウムテルル（MCT-pv）放射温度計については、室温以下の温度範囲（ -50°C 付近まで）の測定にも十分な感度があることを示した。

以上で述べた非接触高速放射測温技術は熱物性測定分野のみならず半導体製造分野における開発や品質管理さらに生体関連分野などにおける利用が期待される。

参考文献

- 1) T. Baba and A. Ono, *Meas. Sci. and Technol.*, 12 (2001), 2046-57.
- 2) Y. Nagasaka and T. Baba, *Progress in Heat Transfer New Series: Vol.3* (Ed. by JSME), Yokendo (2000), 127.
- 3) M. Kobayashi, T. Baba and A. Ono, *Japan. J. of Thermophysical Properties (Netsu Bussei)*, 8-3 (1994), 143-8.
- 4) K. Shinzato, J. Ishii, Y. Shimizu and T. Baba, *Proc. of SICE Ann. Conf. 2002 in OSAKA*, (2002), 1435-9.
- 5) J. Ishii and T. Baba, *Japan. J. of Thermophysical Properties (Netsu Bussei)*, 13-2 (1999), 70-2.

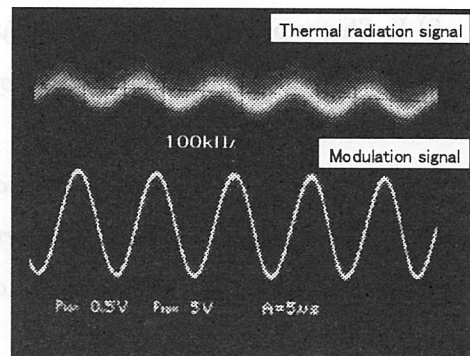
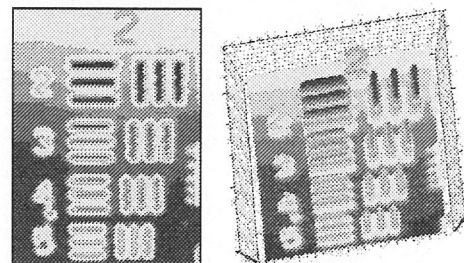
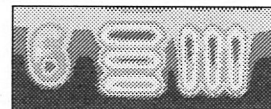


図 5 時間応答の例：シリコン単結晶試料表面温度変化（上）、加熱周期（100 kHz）（下）



(a) テストパターン（USAF1951, 2G-2L~5L, 線間距離：223, 198, 177, 157 μm ）



(b) テストパターン（USAF1951, 2G-6L, 線間距離：140 μm ）

図 6 視野特性：赤外光（約 $10\mu\text{m}$ ）による輝度分布の例

- 6) K. Shinzato, *Proc. of 20th Japan Symposium on Thermophysical Prop.* (1999), 631-4.
- 7) T. Baba and K. Shinzato, *Proc. of 21st Japan Symposium on Thermophysical Prop.* (2000), 244-6.
- 8) T. Baba, *Proc. of 11th Japan Symposium on Thermophysical Prop.* (1990), 449-52.
- 9) K. Shinzato and T. Baba, *J. of Therm. Anal. Cal.*, 64 (2001), 413.
- 10) K. Shinzato and T. Baba, *Proc. of 21st Japan Symposium on Thermophysical Prop.* (2000), 238-40.
- 11) M. Akoshima and T. Baba, *Proc. of 22nd Japan Symposium on Thermophysical Prop.* (2001), 425-27.

(新里 寛英、株式会社ベテル ハドソン研究所)

3.3 赤外ヒータおよびその材質の放射率等に関する新規格

我が国においては、遠赤外領域に特化した技術応用が、加熱あるいはその他の分野において盛んであるが、それに関連して必要とされる規格が(社)遠赤外協会を中心に整備されつつある。

3.3.1 遠赤外線用語 (JIS Z 8117)

①概要

当学会の関連では、既に J I S 規格「照明用語」が制定されており、その中には赤外線の加熱応用に用いる用語も含まれている。しかし我が国では、中でも特に遠赤外領域のエネルギーに着目して、これを加熱あるいはその他の用途に応用しようという産業活動が活発であり、従来の定義、規格ではこれらの新しい分野に、技術的にも、対象分野に関しても適合しない、という問題点が生じてきた。

このため、これら産業界を代表する(社)遠赤外線協会を中心として、遠赤外産業の発展に必要な標準化はどうあるべきかという調査活動がかなり以前から始められており、その成果として「遠赤外線用語」と次項に述べる「遠赤外ヒータ放射部材の分光放射率測定」とが、平成 14 年 3 月に JIS として、正式に制定された。

内容は、1)赤外吸収・放射に関連する基礎的な用語、2)それらに関する物理量とその測定装置に関する用語、3)放射源・赤外ヒータ器具に関する用語、4)加熱装置に関する用語、5)応用に関する用語の合計 121 語から成り、遠赤外関連技術及び関連産業において用いられている、あるいは必要とされるであろう用語をほぼすべて網羅している点が画期的である。

②赤外放射と赤外線

可視放射及びその前後の波長域に属する電磁波は、従来、赤外線、可視光線、紫外線のように、線を接尾語として表現されていたが、近年学術分野を中心に、この領域に関しては線(ray)ではなく放射(radiation)を用いるのが好ましい、という考えが受け入れられ、上記「照明用語」においてもそのように定められている。

しかし我が国の遠赤外産業界とその周辺では、遠赤外線という表現が古くから普く浸透しており、この JIS 原案作成の母体となった遠赤外線協会の名称自体がそれを反映しているという事実、さらに一般消費者にも遠赤外線の方がなじみ深いという経緯もあり、遠赤外線、遠赤外放射の併記(紫外についても同様)となっている。

③赤外線領域内部の波長区分

IEC 規格では、赤外放射の波長域を3つに分け、当該放射の最大パワーを示す波長が $2\mu\text{m}$ 以下の波長域に属するか、 $2\mu\text{m}\sim 4\mu\text{m}$ の間に入るか、あるいは $4\mu\text{m}$ 以上に属するか、によってそれぞれ、近赤外(短波長)放射、中赤外(中波長)放射、遠赤外(長波長)放射と名付けている。

一方我が国遠赤外産業界では、一般的に $3\mu\text{m}$ を境に、近赤外線域と遠赤外線域とに分けるといふ慣行があり、遠赤外線協会でもそれを基準と考えて来た。そこで、JIS では各領域の赤外線毎に、その特性・作用の違いを記述して互いに区別し、波長区分に関しては参考として両論併記としている。

なお IEC の赤外放射関連の定義に関しては、我が国遠赤外業界に好ましくない影響を及ぼす問題点があることが、遠赤外線協会関係者から指摘されており、これに関しては後述する。

④遠赤外線***と遠赤外***

遠赤外放射を与えるために用いるヒータや遠赤外放射を利用した加熱のことを、それぞれ遠赤外線ヒータ、遠赤外線加熱などのように、「遠赤外線」をヒータ、加熱、あるいはその他の用語と組み合わせて用いる場合が、この分野では多く見られる。これらに対応する英語表現は *far infrared heater*、*far infrared heating* であり、*far infrared* の後に *radiation*、*ray* 等を付さないのが通常用法である。

従って、本来これら用語は遠赤外ヒータ、遠赤外加熱のように表現した方が自然と思われるが、この業界では以前から「線」を付して用いる用法も少なくない、との理由から、線を付した用語についても採択されている。

⑤非熱的作用、効果に関する用語

当 JIS の対象分野は主に高温域の熱的効果・作用であるが、応用に関する用語の中に、常温域の熱作用ならびに非熱作用に関する用語を 11 語採択している。

これら分野は、効果があきらかでない、あるいは機構の解明が成されていないなどとして、用語の採択の妥当性に議論のあるところであるが、そのような議論や関連する調査研究を円滑に進めるためにも、基本的概念に関する表現につき、最低限必要であると思われる用語が採択されている。

⑥IEC との対比とその問題点

③の波長区分の所で述べたように、IEC では対象とする放射に関し、そのパワーの最大値が、 $2\mu\text{m}$ 以下、 $2\sim 4\mu\text{m}$ 、 $4\mu\text{m}$ 以上のどの波長域に属するか、によって近赤外、中赤外、遠赤外放射を分けている。

この基準によれば、 $4\mu\text{m}$ 以上の(遠赤外)波長域で放射パワーのピークを示すような黒体は、その温度が 452°C 以下でなければならない、という珍妙な結論が導

かれ、事実欧米では、遠赤外ヒータは低温で使うものなので効率が悪い、と解釈している論文が後を絶たない。

理論的に見ると、放射パワーが最大となる波長とは、黒体の場合、その波長より長波長側で放射するエネルギーがそれより短波長域で放射されるエネルギーの3倍となるような波長であることが分かる。従ってこの区分法は短波長側の寄与を3倍も過大に、長波長側の寄与をその反対に評価している。例えば750℃の黒体ヒータは放射パワーのピークが2.8 μ mであるから、遠赤外より近赤外に近い放射体と位置づけられる。しかし実態は、我が国業界のいう遠赤外域3 μ m以上において放射するエネルギーが、全放射エネルギーの71%を占め、IECのいう遠赤外域4 μ m以上でも50%もの割合を占めているのである。

3.3.2 遠赤外ヒータ放射部材用セラミックスの分光放射率測定(JIS R 1801)

①必要性

遠赤外ヒータから実際に放射されるエネルギーの波長分布を求めることは大変難しい。そこで通常、ヒータに用いられている放射部材(セラミックス)の分光放射率を測定し、これを以てヒータの放射特性を推定することが行われている。

しかし分光放射率の測定法にもいくつかの方法があり、またそれら測定法に関して標準化が成されておらず、測定機関毎に独自の方法に従って測定が成されている状況であるため、相互に結果が一致しないことも多い。このJISはその問題点を克服するため制定されたものである。

②対象とする測定方法

分光放射率測定方法として、現在最も普及しているのはFTIRによる方法であるので、これを対象とした。またこの方法についても、現在レシオ法と称する方法と、試料温度測定に伴う誤差の影響を少なくしようという二点温度標準検量法とが用いられている。本件JIS原案の作成委員会では、両者を統合した形での測定法の原案も検討されたが、最終的に最も基本的なレシオ法に則った方法についてJISが制定された。

③波長範囲

測定結果を表示する波長範囲は2.5~25 μ m、ただし試料温度が500℃未満300℃以上の場合は3.3~25 μ m、300℃未満100℃以上では4.5~25 μ mとする。ヒータが対象であるので、100℃以下の低温での測定には適用しない。

④必要条件

放射部材は上記の波長範囲において、不透明、かつ放射率0.2以上であること

を必要とする。また試料温度の不確かさは $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 以下とする。

⑤校正法

a)横(波長)軸：ポリスチレン膜の赤外吸収スペクトル測定により行う。

b)縦(放射強度)軸：以下のいずれかにより行うことが望ましい。

- ・黒体炉からの放射を100%、それに透過率50%のニュートラルフィルタを挿入した時を50%、光路を遮断した時を0%として、時々確認する。
- ・標準物質((社)遠赤外線協会にSiCが用意されている)につき測定し、添付データと一致することを確認する。

3.3.3 その他

①遠赤外ヒータ表面温度を熱電対を用いて測定する方法

従来TRとして作成されていたものを、正式にJISとして制定するため、製品評価技術基盤機構において原案作成委員会が開かれ、そこでの審議をもとにJIS案が提案されている。

②遠赤外ヒータの分光放射エネルギーの測定方法

(社)遠赤外線協会のもとで原案作成委員会が開かれJIS案が提案されている。なおこの方法の原理ならびに検討の途中経過については、(社)照明学会の「赤外放射の計測に関する研究調査委員会報告書」(平成13年3月)p.10~15の第2章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」に報告されている。

(木村 嘉孝)

3.4 赤外放射センサ

3.4.1 最近のイメージセンサ及びサーモグラフィ

最新の赤外線イメージセンサや赤外線サーモグラフィについて調査すると、イメージセンサについては赤外線学会誌などに見られるが、サーモグラフィへの使用と関連付けられた報告は殆どない、また、赤外線サーモグラフィに関する資料を探しても現在の最新装置について述べられているものはない。映像関係の専門雑誌に製品紹介のかたちでたまに見られる程度である。また4～5年の間の製品開発は目覚ましいものがあるので、発表された記事はすぐに古くなってしまふほどである。従って、ここでは主に、メーカーのカタログや米国フロリダ州オーランドで毎年4月に開催されるS P I E（注1）主催のThermosense Showで発表される資料を参考にしている。

3.4.1.1 世界の製品動向

赤外線サーモグラフィは世界的な流れとして、この4～5年の間にほとんどの製品が2次元センサを使用した電子走査方式になった。現在、世界で販売されている装置の90%以上が2次元センサ型と推定される。何年か前まで主流であった機械走査方式の装置は、特殊な用途向けに残るのみであるといっても過言ではない。

センサの冷却方式も量子型（半導体）センサ（InSb、PtSiなど）には、ほとんどがスターリング冷却器を使用している。7年程前から登場した熱型センサ（マイクロボロメータ、フェロエレクトリックなど）は非冷却方式のため非常に使い勝手が良く、性能も非常によくなってきていることから最近の赤外線サーモグラフィはこのタイプのものが圧倒的に多くなってきている。赤外線検出器の種類は大別すると短波長帯（SW）用と長波長帯（LW）用になるが、そのほとんどが2次元化されており装置の様相が一変してきている。カメラ部の構造が単純になってきたことから信号処理部も一体化され、小型軽量化が一気に進んできた。旧来のカメラ部と信号処理部が分かれた装置は余り見られなくなってきた。分離型のものでも信号処理は汎用のパソコンを使用するものが増えてきた。

表1 検出器の種類と特徴

	短波長帯(SW) 3~5 μ m	長波長帯(LW) 8~14 μ m
検出器	InSb (2次元) PtSi (2次元) MCT (単素子 /電子冷却)	マイクロボロメータ (2次元) フェロエレクトリック (2次元) QWIP (2次元) MCT (単素子)
主な特徴	太陽光影響大きい 室温反射の影響小 大気の減衰比較的大	太陽光影響小さい 室温反射の影響大 大気の減衰比較的小
主な用途	温度計測	温度計測 監視

2次元センサを使用した赤外線サーモグラフィは、表1と表2に示すような検出器のも

のが市販されている。国内メーカーが製造している赤外線サーモグラフィは InSb、マイクロボロメータを用いたものである。米国では、全てのものが製造されている。フェロエレクトリックは、一部赤外線サーモグラフィに使用されているが、ほとんどが監視用途の赤外線カメラ用である。米国では異常監視（犯罪監視、防災監視）や車載前方監視などその用途を広げている。

表 2 世界の赤外線サーモグラフィに使用されている 2次元センサの種類

検出器	PtSi	InSb	InGaAs	QWIP	マイクロボロメータ	フェロエレクトリック
冷却装置	必要	必要	TE	必要	不要	不要
解像度	◎	◎	◎	◎	◎	◎
温度分解能	○	◎	◎	◎	○	○
高速測定	○	◎	○	○	△	△
検出波長帯	短波長 2~5 μ	短波長 2~5 μ	近赤外線 0.9~1.7 μ	長波長 8~9.2 μ	長波長 8~14 μ	長波長 8~14 μ
連続運転	×	×	×	×	◎	◎
用途	温度測定/ 監視	温度測定	欠陥検査	温度測定	温度測定/ 監視	監視

3.4.1.2 世界の開発動向

最近の赤外線サーモグラフィの開発は使用用途や使用目的を明確にして、市場に投入する製品を企画することが多くなってきていると思われる。装置を用途で大別すると、「温度測定用：赤外線サーモグラフィ」、「監視用：赤外線カメラ」になる。前者は定量的に温度測定するもので、後者は定性的な赤外線映像をモニタするものである。表 1、表 2 に最近の開発動向で注目されている 2次元センサをまとめて示している。最も新しいものは QWIP を使用するものであるが、広く普及するのはもう少し先のようなのである。ここまでの 2次元センサが整ったことで、2次元センサを使用した装置の開発は更に進展することになる。InSb や QWIP を使用した高性能・高機能な製品とマイクロボロメータやフェロエレクトリックを使用した小型・軽量で使い勝手の良い製品の 2極化が更に進むと予想される。

3.4.1.3 世界の赤外線センサ

可視カメラと同じような 2次元センサの研究開発は軍需目的で 20 数年前から始められた。民需用に使われ出したのは約十年程前からである。現在の微細加工技術（マイクロマシニング）と半導体技術が加わったことで 2次元センサの研究開発は一気に進んだ。現在、研究開発されている 2次元センサの実用レベルレベルのものを表 3 に示す。多種多様なものがあるが、そのほとんどが米国を中心とした軍需産業での研究開発の成果でありそれが民需用として展開してきている。

表 3 世界で研究開発されている 2 次元センサ

センサ材料	感度波長帯 (μm)	冷却	開発レベル 画素数	実用レベル 画素数
InGaAs	0.9~1.7	電子冷却	320×256	320×256
HgCdTe	2~5	200K	640×480	—
InSb	3~5	77K	1024×1024	320×256
PtSi	1~5	77K	1968×1968	801×512
IrSi	1~8	77K	512×512	—
QWIP	3~19	60K/77K	640×480	320×256
HgCdTe	8~14	77K	1024×1024	256×256
マイクロホメータ VOx	8~14	非冷却	640×480	320×240
マイクロホメータ アモルファスSi	8~14	非冷却	320×240	320×240
マイクロホメータ SOI	8~14	非冷却	320×240	320×240
フェロエレクトリック	1~35	非冷却	320×240	320×240

(加藤 久和)

3.4.2 ナロウバンドギャップ半導体

一般に、光放射検出器は熱形検出器と量子形検出器に大別される。現在、サーマルカメラなどに利用されている赤外放射検出器については既に前項で述べた。本項では、将来有望な量子形の赤外放射半導体検出素子材料として期待されるGaAsN混晶半導体の光学的評価を行い、N組成の増加に伴う電子構造の変化を解明するための研究について紹介する¹⁾。

GaInNは青色発光素子材料として、現在、最も注目されており、そのバンドギャップが大きいことから、ワイドバンドギャップ半導体とも呼ばれている。それに対しバンドギャップの小さい半導体はナロウバンドギャップ半導体と呼ばれる。

GaAsN混晶半導体は、図1に示すような巨大なバンドギャップボウイングがあり、N原子を添加することによる電子の局在化が起こるといった特徴を持っている。バンドギャップボウイングとは、例えば、GaAsにNを添加していくと、バンドギャップはGaAsの1.42eVから立方晶GaNの3.2eVに向かって単調に増大していくのではなく、低N組成域ではバンドギャップが減少し、N組成が更に増加するとバンドギャップが増加するという現象である。これにより、波長0.87 μm から数十 μm までの赤外放射に応答する可能性がある。また、電子の局在化とは、N原子を添加したとき、N原子が他のV族原子よりも電気陰性度ははるかに大きいため、結晶中の電子を束縛するということである。

これらの特徴に加え、GaAsN/GaAsのヘテロ構造は伝導帯バンドオフセットが大きいことから、温度特性に優れた赤外放射半導体検出素子の材料として期待できる。

しかし、この混晶半導体が示す巨大なバンドギャップボウイングのメカニズムやN組成が増加することに伴う混晶半導体の電子構造の変化は未解明である。ここでは、分光楕円偏光解析法を用いて、GaAsN混晶の複素誘電関数を求めることによりN組成増加に伴う電子構造の変化について検討する。

(1) 測定方法及び解析方法

分光楕円偏光解析法は、試料表面のp偏光およびs偏光の反射率を測定し、振幅反射率比 R_p/R_s 、位相差 $\Delta = \Delta p - \Delta s$ を求め、試料面の光学定数や膜厚を決定する方法である²⁾。本研究では、この方法により、複素誘電関数を求め、以下に示される誘電関数と結合状態密度関数の関係式

を用いて解析を行った。

$$\epsilon_2(E) = \sum_{s=1}^M \frac{h^2 e^2}{\pi^3 (\mu^s)^2 E^2} \left| P_{cv}^s(\mathbf{k}) \right|^2 J_{cv}^s(E)$$

ここで、ここで、 μ は電子-正孔の結合状態密度質量、 $P_{cv}^s(\mathbf{k})$ は価電子帯-伝導帯間遷移の運動量行列要素、 $J_{cv}^s(E)$ はs番目の臨界点の結合状態密度関数である。誘電関数モデル³⁾により、 E_1 ギャップおよび E_2 ギャップを次の表に示す式を用いて表すことができる。

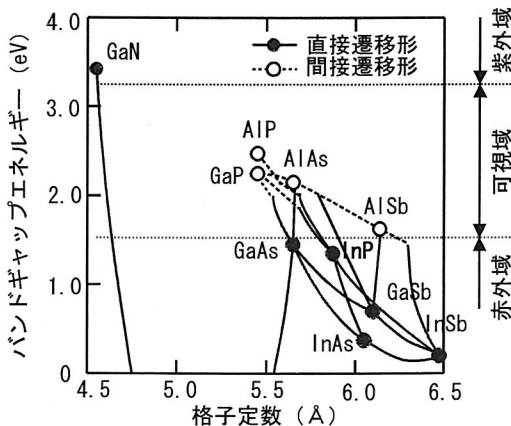


図1 III-V族化合物半導体の E_g と格子定数

E_1 ギャップ	E_2 ギャップ
$\varepsilon = -B\chi_1^{-2} \ln(1 - \chi_1^2), \quad \chi_1 = \frac{\hbar\omega + i\Gamma_1}{E_1}$	$\varepsilon = \frac{C}{(1 - \chi_2^2)^2 - i\chi_2\Gamma_2}, \quad \chi_2 = \frac{\hbar\omega}{E_1}$
Bは振動子強度	Cは振動子強度

これらの関係を用いて、複素誘電関数の解析を行った。

(2) GaAsN混晶の光学的評価

試料作製

GaAsN混晶試料は有機金属気相エピタキシー (MOVPE) 法によって作製された。原料ガスは、TMGa、AsH₃、DMHyである。GaAs (100) 基板の上にGaAsのバッファ層 (200nm) を成長させて良好な成長表面を形成した後、GaAsN層 (100~600nm) を成長させた。ミスフィット転位の形成を避けるために、N組成が増加するほど、膜厚は薄くなっている。

測定および解析方法

分光楕円偏光解析法は、入射角を75°、室温において測定範囲250~900nmで行った。なお、GaAsを測定した結果、酸化膜30Åの存在が確認されたので、他の試料についても同様であると仮定し、逐次近似 (Newton-Raphson) 法により擬誘電関数を求めた。その結果に対して、誘電関数モデルの式をカーブフィッティングさせた。

解析結果

GaAsN混晶 (250~900nm) の複素誘電関数の虚数部 ε_2 を図2に示す。3つのピークが2.9eV、3.1eV、4.8eV 付近に観測される。それらのピークはそれぞれ E_1 、 $E_1 + \Delta_1$ 、 E_2 ギャップに対応している。 E_1 ギャップはL点、 E_2 ギャップはX点での光学遷移に対応している。 E_1 ギャップに対応するピークの高さは、N組成が増加することに伴い減少し、ピークがブロードになる。これは、GaAsにN原子を加えることで E_1 ギャップの光学遷移確率が減少し、同時にN原子による組成揺らぎの影響を強く受けていることを示している。

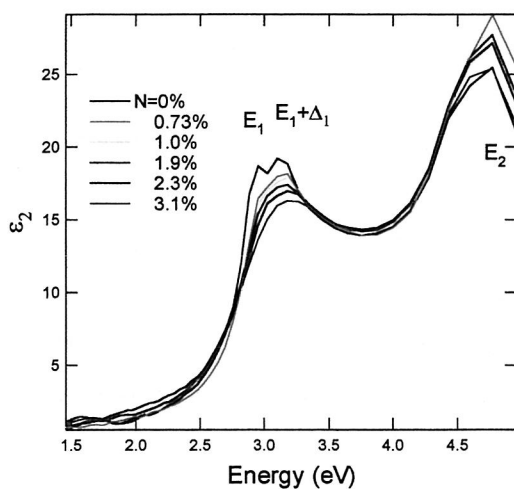


図2 GaAsN混晶の ε_2 のN依存性

図3、図4にGaAsN混晶の E_1 、 E_2 ギャップのピークの広がりを表すブロードニングパラメータ Γ_1 、 Γ_2 を示す。 Γ_1 はN組成の増加に伴い増加している。一方、 Γ_2 は Γ_1 ほど変化していない。これらのことから、わずか数%のN原子の混入によって、混晶組成揺らぎはL点の電子状態に対して強く影響を与えていることがわかる。一方、X点の電子状態に対してはその影響は少ないと考えることができる。

GaAsはバンドギャップが室温で870nmであるため、 Γ 点に対応する E_0 ギャップ付近のN組成増加に伴う電子構造の変化をみるためには、より

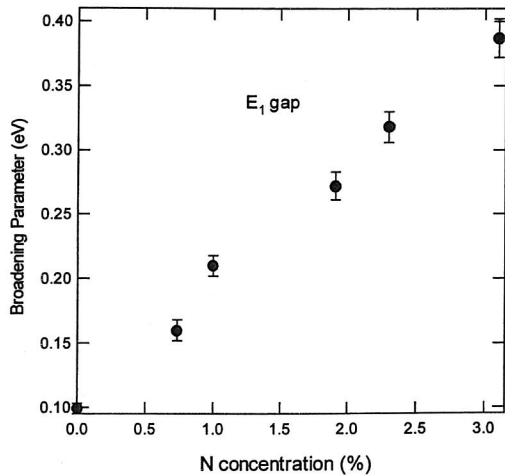


図3 GaAsN混晶の Γ_1 のN依存性

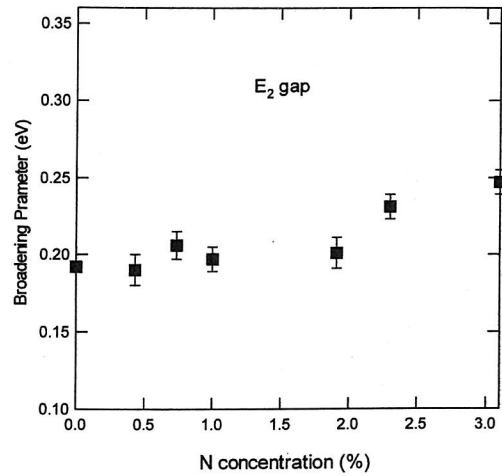


図4 GaAsN混晶の Γ_2 のN依存性

長波長域における測定をする必要がある。そこで波長700~1200nmに対しても分光楕円偏光解析測定を行った。長波長域では、GaAsN混晶の吸収係数が小さく透明領域なので干渉の影響が現れる。そのため、X線回折測定により膜厚を求め、その膜厚を参考にして解析を行った。

図5はGaAsN混晶 (700~1200nm) の複素誘電関数の虚数部 ϵ_2 である。N組成の増加に伴い、吸収端が低エネルギー側へシフトしている。この吸収端のエネルギーは室温でのPL測定のピークエネルギーと一致している。一方、GaAsの E_0 ギャップに相当する1.4eV付近での立ち上がりはGaAsN混晶でも見られる。このことから、GaAsN混晶では、N組成の増加に伴う吸収端のシフトは E_0 ギャップのシフトではなく、新たに形成された吸収端によるものであることがわかる。

(3) GaAsN混晶の光学的評価

N組成の増加に伴って、 E_1 ギャップに対応するL点の電子状態は変化せず、また、 E_0 ギャップ自体は大きなシフトをせず、低エネルギー域に新たな吸収をもたらす電子状態が形成されていることがわかった。つまり、窒素が加わることによる低エネルギー域での電子状態の形成に

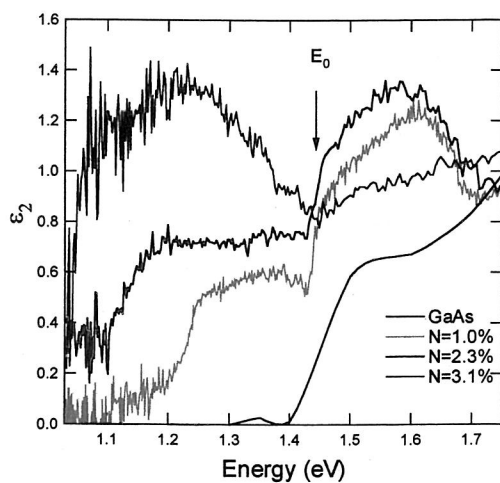


図5 GaAsN混晶の ϵ_2 のN依存性

はL点の電子状態が大きく寄与し、X点の電子状態はあまり寄与しないと考えられる。よって、GaAsN混晶における巨大なバンドギャップボーイングの原因は、新たに形成された吸収端によるものであり、その形成にはL点での伝導帯の電子状態が大きく寄与していることがわかった。

参考文献

- 1) 松本繁：埼玉大学大学院理工学研究科博士前期課程電気電子システム工学専攻修士論文 (2001)
- 2) 赤崎勇：「Ⅲ族窒化物半導体」，培風館 (1999)
- 3) S. Adachi：Phys. Rev., B35 (1987) p.7454

3.5 医用への応用

3.5.1 ハイパーサーミア(がんの温熱治療)への電磁波加熱利用

1) 経緯

ガン細胞は正常な細胞よりも耐熱性が低く、42℃前後で死滅するといわれている。このことを利用して身体(内部)を何らかの手段で加熱することによりがん患者の治療、病状改善、延命を図る温熱治療が、これまでの化学療法、放射線療法と併用する形で、あるいは単独でも、用いられるようになってきた。

従来このための加熱方法としては、全身麻酔の患者の血液を体外に抜き、これを加温して戻す、血液加温体外循環による全身温熱療法が行われていたが、あまりにも患者の身体への負担が過大であるという欠点があった。そこで人体の全身、あるいは患部周辺の局部を、直接電磁波照射することにより加熱する方法が着目されるようになり、現在ではそのうち一部が実用化され、かなりの効果が報告されているようである。この療法に関しては、我が国は旧ソ連、米国などより遅れて検討を始めたが、現在ではもっとも普及しているといわれている。1984年には日本ハイパーサーミア学会が設立され、昨年の大会では2日間にわたって多数の報告が成されている。また本年4月には米国で第9回ハイパーサーミア国際会議が開催される。

2) 方式

ハイパーサーミアにおける加熱手段としては、各種の電磁波が利用され、また検討されている。またそれぞれの電磁波の特性に合わせて、全身療法に用いられるか、あるいは局所療法に用いられるかが区別されている。

①マイクロ波

局所療法として、2.45GHzのマイクロ波を数cmの腫瘍に集中させるよう照射する。浸透距離が数cmであり、表面層で吸収され深部に到達せず、また均一性に劣るとして、あまり利用されていないらしい。ただし健康保険の適用が認められている。

②ラジオ波(RF方式)

局所療法として8~70MHzが利用されているが、日米で方式が異なっている。

- ・平行電極板方式(日本)：2枚の平行電極で照射部分を上下あるいは左右から挟む8MHzの誘電加熱であり、透過性はよく、電極寸法の組み合わせで身体の浅い部分から深い部分(肝臓、胃、膀胱など)まで対応している。新技術開発事業団(当時)の支援システムを受け、京都大学などが装置サーモトロンRF2を開発

した。これはビニル・材木の接着や食品解凍用に実績のある高周波誘電加熱装置メーカーである山本ビニター㈱の既存製品をもとに、人体に適合するようきめ細かく改良して実用化したもので、出力は 1500W、体表面を冷却水で冷やしている。

現在装置は国内外に 100 台以上の実績があり、我が国のハイパーサーミアの主流になっている。例えば静岡日赤病院では 5 年間に 240 人に対し述べ 2300 回、岡村一心堂では抗ガン剤と併用し、年間 80 人に対し、週 3~5 回、述べ 2700 回の処置を行い 70%近い効果があったという。

この方法の欠点としては、皮下脂肪が過熱されるので肥満の人には適用しにくい、また空気(肺)、骨が電磁波に対し邪魔になるといわれているが、肺ガンにはこの方法しかないという反論もある。

この方法にも健康保険が適用されるが、通常この治療は数回繰り返すことで効果を挙げているのに対し、健保適用は 1 回のみとされているという問題が指摘されている。

- ・多電極円周配置方式(米国)：16 個の電極で人体を囲み、位相調整してエネルギーを深部の患部に集中させ、そこでの温度極大を図る方式。そのためのモデル計算を重視し、その結果に合わせて装置を設計、試作しているが、実際の適用においては人体との適合に問題を残し、試験機段階の模様。周波数は 70MHz で脂肪のついた人でも適用可能という。

欠点としては、人体と電極の間におく必要のある水袋が大きく、かつ機構上身体に巻く必要があり(日本方式では電極板の方に付ければよい)、圧迫感が強く、実質的に上下半身、四肢に限定されるといわれている。

- ・その他：高周波アンテナを食道や大腸に挿入して加温する装置(オリンパス製)もあるという。

③遠赤外方式

次の近赤外方式と共に、全身療法である点が特徴的である。もともと米国ウィスコンシン州立大学がん研究センターで開発したエンサーミック社製装置を、東京女子医大の支援のもと、ルカ病院がこれまでに 2 台導入して、4500 回以上の治療を行っている。ただし全身療法は健康保険の適用が未だ認められておらず、我が国ではこの方式はここのみである。

装置の構造は、内側をセラミックス塗装した銅管(この中の空間に患者を入れる)を内側に設けたコイル状ヒータで加熱し、塗装面の温度を高めて遠赤外線を放射させる。昇温に 1.5 時間、温度保持に 1 時間、冷却に 0.5 時間が掛かる。治療

中は身体各部の温度をモニターしながら行う。全身治療であっても、日帰りが可能であるという。

この方法の普及促進のためには、適切な価格での装置国産化とこれまでの知見を活かした改良が必要であると思われるが、現在(株)フジカ製の装置で治験中である。この装置は上半身用と下半身用のカバー(ドーム)が分けられ、かつ取り外し可能の構造となっている。放射材料には有機物発熱体を使用している。また快適感を与えるため乾燥空気による対流を併用し、頭部、頸部を冷却し、頭部温度は40℃以下が保持される仕組みになっている。

④近赤外方式

ドイツで開発され、波長域0.8~1.4 μm の近赤外ランプ[?]を使用、遠赤外より高パワーの2000Wが掛けられる。ルカ病院でも導入して研究中とのこと。

3)ハイパーサーミアの特長、効果

①ハイパーサーミアは42℃でのガン細胞死滅が主目的であるが、上記のそれぞれの方法に共通の、あるいは固有の温熱作用、ガン細胞への影響が研究され、応用も高度化している。患部の末梢血流、酸素濃度、(乳酸)酸性度への影響を介したガン細胞への影響等が研究され、糖分注入や酸素投与併用による効果アップが図られている。

さらに温熱の副次効果や42℃より低温でのマイルド効果(300W照射を1回5~20分、これを一日7~10回行って死滅したという例)も見出されており、42℃死滅よりむしろ、温熱による人体の自然免疫機能活性化を評価している報告もある。

②RF(局所)方式は、もともと放射線治療の専門家が始めたということもあり、放射線と抗ガン剤の併用が基本になっている。併用によって抗ガン剤の効果が増したり、あるいはその量を減らすことが出来たり、という効果がいわれている。この方式を採る側の見解として、表在性腫瘍には放射線単独より温熱併用の方が効果が大きい、深在性腫瘍については昇温確認が困難であり、特定部位についてしか温熱併用による効果拡大を確認出来ず、また温熱単独では効果はない、としている。

一方遠赤外(全身)方式の立場からは、他の療法で症状が改善しない患者や末期症状の患者に対して、温熱処置のみで疼痛緩和や症状のかなりの改善があった例が報告されている。

③一般にハイパーサーミアは軽い静脈麻酔程度で開始出来、副作用がなく、人体

負担が軽いため反復治療が可能のため、より一層の効果に繋がっているとされている。全身方式の場合、総合的に延命効果がより大きく、複数個所のがんにも同時に対処できるという。特に初回の治療から激痛緩和が得られた例が多く報告されている。局所治療方式の場合、複数個所のがんに対しては、1個所ずつ照射することになる。また、1人当たりの治療回数は多めに採られている。

4) 遠赤外加熱技術の立場からの見解

① 遠赤外効果に関する説明

温熱治療従事者による遠赤外効果の説明には、納得できない点が見られる。遠赤外線は深達力が数 cm と大きく、人体内部あるいは深部まで遠赤外線が入る、という説明をよく目にするが、正しくは皮膚表面での吸収である。遠赤外加熱は、加温空気による加熱と違い、表面温度を急上昇させず(事実肌がチカチカしない、ほんわか暖かい、と報告されている)、高いレベルの熱流を保つことが出来るので、結果として深部温度上昇が速い。その効果から電磁波深達という説明が下されたと思うが、機構の説明は誤りである。遠赤外方式は、表面吸収であるが故に深部加温に向かないという反対派が少なくないのであるから、訂正されることを望みたい。

② さらに有効と思われる改良

遠赤外方式では、コイルを銅管の外側に設けた方がよいのではないかと。加温室の換気や外部空気送気を併用している方式が見られるが、適当な温度の空気を深体表面に当てることにより、表面温度上昇を抑え、従来のレベルよりパワーアップが可能になるはずである。これは深部温度上昇に掛かる時間の短縮に繋がるので、より患者負担の軽減、治療効果の向上に寄与するのではないかと。

③ 遠赤外方式の国産化

RF方式同様、医師と正しい遠赤外知識をもった装置メーカーとの本格的共同開発が行われれば、この方式の本来の良さがもっと広く理解されるのではないかと。

④ 健康保険の適用

以前は放射線と併用する場合にのみ適用されていたのが、現在はハイパーサーミア単独でも適用されるようになった。ただし1回しか適用されないこと、そして全身療法、すなわち遠赤外方式には適用されていないなど、本法の普及に問題を残している。

⑤ 新しい技術の可能性

電磁波加熱の周辺では、新しい放射光の利用やその応用の研究がいろいろ行わ

れており、その中には医療への利用を示唆しているものもある。例えば、立命館大学電子光情報工学科放射光生命科学研究室では、ポータブルなシンクロトロン装置による単色あるいは波長可変(高輝度)遠赤外線レーザーの開発と、その応用対象の一つとして新しい医療が挙げられている。このような分野から、がん治療の有効な手段が生まれるかも知れない。

本報告は下記書籍を参考にしてまとめたものである。その他、日本ハイパーサーミア学会、ハイパーサーミアを実施しているいくつかの病院、立命館大学などのホームページを参考に行っている。

参考文献

- 1) 横山正義、竹内隆：がんに効く遠赤外線療法への確信(改定増補版)，かんき出版(1999)
- 2) 前田華郎：遠赤外線と医療革命，冬青社(1997)
- 3) 菅原努、畑中正一：がん・免疫と温熱療法，岩波アクティブ親書(2003)



(木村 嘉孝)

The restoration of the defect inspection is influenced by the thermal diffusion, which determines the localized temperature rise around the defect. The localized temperature rise is poorly detected in the samples with higher thermal conductivity, even if the extent of the applied heat flux is the same. Therefore, it is required to compare the temperature measurement during a short elapsed time after the application of pulse heat flux, when the influence of the thermal diffusion is less dominant. This can be demonstrated in terms of a ratio of the thermal diffusion length δ and the size of the defect d , which characterizes the thermal diffusivity of materials is given as follows:

$$\delta = \sqrt{\alpha t}$$

Here t is an elapsed time and α is the thermal diffusivity which is given in terms of the thermal conductivity λ , the density ρ , and the specific heat c as follows:

3.5.2 赤外線サーモグラフィ非破壊診断：パルス加熱手法による初期う蝕の検出

論文名：Development of a New Diagnosis Method for Incipient Caries in Human Teeth Based on Thermal Images under Pulse Heating (JSME International Journal)

著者：大阪大学大学院工学研究科 助教授 阪上隆英他（本委員会で講演した際の資料の抜粋）

2.1 Basic principles

Pulse heating thermographic NDT techniques have been developed by many researchers, and have been applied for many kinds of engineering materials and structures⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾. Recently a few infrared thermographic NDT systems combined with high-power flash lamp were commercially available. The basic principle of the pulse heating thermographic NDT is illustrated in Fig. 2. When a pulse heat flux is applied to the sample surface, out-of-plane heat flow is generated in the sample. The uniform temperature rise is observed on the surface, if the sample has no defects. If the sample has defects, on the other hand, a local-

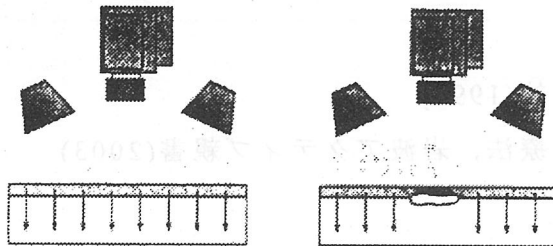


Fig. 2 Schematic of basic principle of pulse heating thermographic NDT

ized high temperature region appears on the sample surface just above the defect due to the insulation effect of the defects. The shape of the high temperature region reflects the defect shape under the surface. Consequently, the location, shape and size of the defect can be estimated from the temperature distribution on the sample surface.

The resolution of the defect inspection is influenced by the thermal diffusion, which degrades the localized temperature rise around the defect. The localized temperature rise is poorly detected in the samples with higher thermal conductivity, even if the intensity of the applied heat flux is the same. Therefore, it is required to complete the temperature measurement during a short elapsed time after the application of pulse heat flux, when the influence of the thermal diffusion is less dominant. This can be discussed in terms of a ratio of the thermal diffusion length d and the size of the defect a . The thermal diffusion length d , which characterizes the thermal diffusibility of materials, is given as follows.

$$d = \sqrt{kt} \quad (1)$$

Here t is an elapsed time, and k is the thermal diffusivity which is given in terms of the thermal conductivity λ , the density ρ , and the specific heat c as follows.

$$k = \frac{\lambda}{\rho c} \quad (2)$$

In order to detect the localized high temperature region due to the defect, d must be much smaller than a . Therefore, for the detection of small defects in materials with high thermal conductivity, the elapsed time t in Eq.(1) must be small. The pulse heating thermographic NDT has advantage of avoiding the degradation of defect identification due to the thermal diffusion. Thus this technique has been effectively applied to the detection of subsurface small delamination or void in the materials with relatively high thermal conductivity such as graphite epoxy composites.

Further, the pulse heating thermographic NDT has an advantage in the quantitative evaluation of the defects. The high-power xenon flash lamp for taking commercial photographs is usually used for applying pulse heat flux to the sample surface. The output power and uniformity of this kind of flash lamp is well adjusted, and this enables us to apply stable and repeatable heat flux to the sample. Then the full-field sequential thermography data are analyzed to obtain quantitative defect parameters such as volume or depth of defects.

Some of the present authors⁽⁸⁾ investigated the practicability of the pulse heating thermographic NDT for delamination defects in several kinds of engineering materials, such as carbon fiber reinforced plastic composites and zirconia ceramic thermal barrier coating materials. Based on the results of these experiments, the present authors expected that the pulse heating thermographic NDT was applicable to the identification of incipient caries. When the thermal properties of the demineralized portion are different from those of the sound enamel, the demineralized portion works as an obstacle in the thermal conduction from surface to inside of the teeth under the application of the pulse heat flux. Thus the localized temperature change appears just above the demineralized portion, and the incipient caries can be identified from this.

2.2 Experimental system

A schematic illustration of the proposed pulse heating thermographic NDT system is shown in Fig. 3. A high-speed infrared thermography with a snapshot InSb 256×256 pixels array detector was employed in this experiment combined with a high-speed digital image capture board and a personal computer. The temperature resolution of the employed infrared thermography was 0.025°C. Full field digital data on the distribution of the infrared radiation energy were

captured every 1/140 s and stored in the hard disk. A xenon flash lamp was employed as the heat source of the pulse heating. Xenon light is an excitation light source without after heat of the light bulb and it has

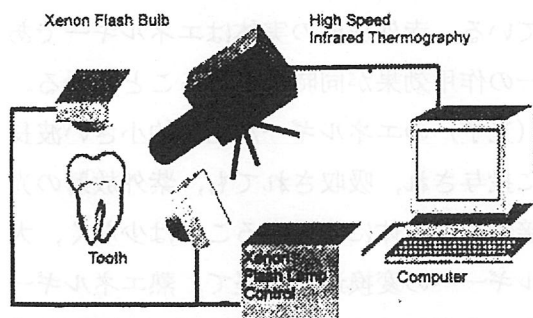


Fig. 3 Schematic of caries inspection system using high-speed infrared thermography and xenon flash pulse heater

a spectrum infrared emission over the short wavelength range below $3\ \mu\text{m}$. An excitation time of the employed xenon flash bulb was 1/1 200 s. The sensitive infrared wavelength range of the employed infrared camera is $3 - 5\ \mu\text{m}$. Therefore the infrared energy from the xenon light bulb reflected at the sample surface does not affect thermography data after the pulse heating. The flash bulb has a ring-like shape with the diameter of 160 mm. It was installed around the lens of the infrared camera.

3.3 Experimental results

Thermal images taken at 1/70 s before and after the flash of xenon bulb, and a visible light image for the tooth sample with 7 days demineralization are shown in Fig. 4. Thermal images and an optical image taken in a similar way for the tooth sample with 28 days demineralization are shown in Fig. 5. The white regions indicated by the arrows in visible images are artificially demineralized subsurface lesions. It was reported in the previous paper⁽⁴⁾ that both sound region and demineralized region on the surface of teeth have high infrared emissivity around 0.97. Therefore these color changes under visible light affect nothing on the emissivity in the infrared measurement. It is found in the thermal images before the flash that demineralized regions are identified as the localized low temperature regions due to the evaporation of the water from the lesion, as shown in the previous paper⁽⁴⁾. It is found in the thermal images after the flash, on the other hand, that demineralized regions can be identified as the localized high temperature regions. It is also found that the higher contrast image of the demineralized region was obtained for the tooth sample with 28 days demineralization. This indicates the possibility of the quantitative evaluation of the degree of demineralization from the quantitative analyses of the obtained thermal images. A method for the quantitative evaluation of the degree of demineralization will be proposed in the next paragraph.

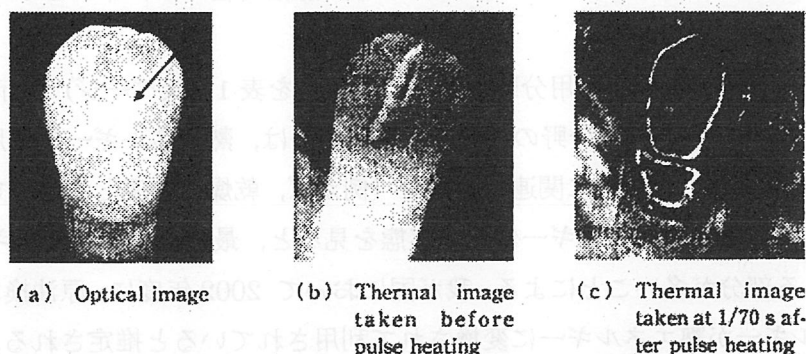


Fig. 4 Identification of demineralized region for 7 days demineralized sample

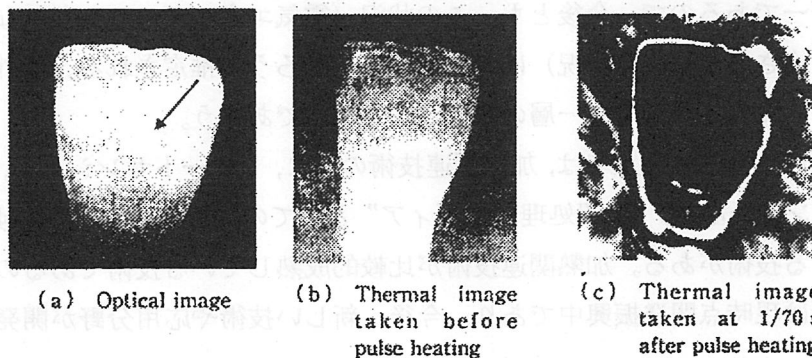


Fig 5 Identification of demineralized region for 28 days demineralized sample

第4章 赤外放射利用の将来展望^{1)~3)}

既に述べたように、赤外放射は、エネルギー伝達の一様態である電磁波の一部分の特定区分波長域 ($0.78 \mu\text{m} \sim 1 \text{mm}$) のものをいっている。赤外放射の実体はエネルギーであり、赤外放射の照射を受けると、このエネルギーの作用効果が同時に生じることとなる。ただし赤外放射の波長域の電磁波は、光子 (光子) のエネルギーが比較的小さい波長域であるので、既に述べたように、物質や人体に投与され、吸収されても、紫外放射の光化学作用のように、光子のエネルギーが直接物質や生体に作用することは少なく、大部分は分子や原子の振動エネルギーや回転エネルギーへの変換過程を経て、熱エネルギーに変換され、吸収された物質や生体の部位の温度を上昇させることとなる (いわゆる加熱作用)。

しかし、光化学作用的な、光子のエネルギーによる直接の作用も全く無いのではなく、赤外放射の中でも波長の短い領域の近赤外放射 (波長域: $0.78 \mu\text{m} \sim 2 \mu\text{m}$) や中赤外放射 (波長域: $2 \mu\text{m} \sim 4 \mu\text{m}$)、および遠赤外放射 (波長域: $4 \mu\text{m} \sim 1 \text{mm}$) の一部の波長域のもの ($10 \mu\text{m}$ 程度まで) については、光子のエネルギーが直接被吸収体に作用を及ぼす可能性がある。これが“赤外放射の非熱効果 (non-thermal effect)” といわれる作用効果である。

また、赤外放射は電磁波の一種であるので、今まで述べてきたエネルギーとしての利用の他に、通信やリモート・センシング、防犯など、情報処理のメディアとしても活用されている。

これらを含めて赤外放射の利用分野をまとめたものを表1 (次ページ) に示す。

表1の各種赤外放射の利用分野の中で、最も広いのは、熱エネルギーの利用 (伝達・投与)、いわゆる加熱および加熱に関連する分野 (例えば、乾燥、熱硬化など) であると考えられる。これは、現在のエネルギー使用の実態を見ると、最終的に熱エネルギーに変換されて利用される部分が多いことによる。我が国において2002年度に、原油換算でほぼ4.0億klのエネルギーが熱エネルギーに変換されて利用されていると推定される。これは、我が国の総電力使用量のほぼ20%に相当する。熱エネルギーは人間の社会生活において重要なエネルギーであるので、今後とも、この状況 (電気エネルギーのかなりな割合が熱エネルギーに変換されるという状況) は変わらないであろうと推定される。赤外放射による加熱技術についても、今後とも一層の振興が図られるであろう。

赤外放射関連技術という点では、加熱関連技術の他に、リモートセンシング、赤外追尾、防犯、人感センサーなど、“情報処理のメディア”としての利用技術や、いわゆる“非熱効果”に関連する技術がある。加熱関連技術が比較的成熟している技術であるのに比べて、これらの技術は現時点開発振興中であり、今後、新しい技術や応用分野が開発されることであろう。

表 1 赤外放射の利用分野と用途の具体例

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

以上述べてきた内容が，赤外関連技術や関連産業振興の一助となり，その結果として，赤外放射関連技術がますます広く普及し，人間社会生活の質の向上と快適化に貢献することを期待したい。

参考文献

- 1) 照明普及会編：光放射の応用 I，II，照明教室 61，62（昭 61）
- 2) 乾 泰宏：特定課題 R6-28「赤外放射の非熱効果」調査報告，日本照明委員会誌，9-02，p12～p16（平 4）
- 3) 河本 康太郎：最近の乾燥技術，総合技術センター，（平 9）

（河本 康太郎）

第5章 あとがき

本研究調査報告書は、熱放射による効果ではなく、赤外放射の持つフォトンの低エネルギー性と可視光に比べ長波長であるという赤外放射の特徴を生かした応用技術に関する研究開発を研究調査するために、「赤外放射の情報処理・生体への応用技術に関する研究調査委員会」で実施された調査研究及び講演を赤外放射の情報処理・生体応用と赤外放射応用のための技術を中心に整理しまとめたものである。

内容は多岐にわたるが、委員会で回を重ねて研究調査を行うほどに研究分野の広がりと同時に、これからの産業応用への発展を予感した。特に、医用への応用や生体環境評価への応用、動植物の生態環境の評価は今後照明学会だけでなく関連分野の研究者、技術者と連携して更なる調査研究が必要であると考えます。

上記のことを鑑み、照明学会において平成16年から「赤外放射環境評価に関する研究調査委員会」を新たに新設することになった。本委員会で十分な解が得られなかった部分についての積極的な解明がなされることを切望する。

最後に、本委員会の活動に関連して各方面の方々に種々お世話になった。とりわけ、委員会において話題提供としてご講演いただいた方々には本報告書の作成にもご協力をいただいた。ここに深く感謝すると共に厚く御礼を申し上げる次第である。また、委員各位には本務多忙な折、報告書を執筆いただき併せて感謝申し上げます。次第である。

(谷治 環)

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。

