

赤外線による温度場の可視化とその応用

稲垣 照美¹⁾

Thermal Visualization Using Infrared Thermography and Its Application

Terumi Inagaki

ABSTRACT

An infrared thermography has a convenient feature that we can diagnose two-dimensional temperature fields nondestructively and simultaneously at every picture element. When using the infrared thermography, we can acquire the temperature information on various object surfaces by detecting the thermal energy (infrared energy) emitted from there. It has widely been applied to various engineering, industrial and medical utilizations. This paper describes the visualization technique using the infrared thermography, and various examples of the adaptation. Here, not only some example for heat flow visualization but also some example for nondestructive testing is described. Furthermore, the outline including the principle of an infrared spectrum thermometer is described while introducing the measured principle.

Keywords: Thermal visualization, Infrared thermography, Temperature measurement

1. 緒 論

赤外線サーモグラフィーは、対象物から発せられる熱エネルギーを感知し、その表面温度をリモートセンシングに評価する手段であるとともに、複雑な形状を有する二次元温度場をリアルタイムにかつ画素毎に診断・評価することが可能な手段でもある。そのため、この手法は、工学、理学、医学あるいは産業界を始めとする様々な分野で広く利用されている。一方、伝熱学の分野においては、赤外線サーモグラフィーによる伝熱面温度の定量計測が一般的に困難とされ、むしろこれを可視化手段として有効に利用されることの方が多かったと言える。すなわち、加熱・冷却された固体壁面や自由界面などからの伝熱量を非接触かつ正確に計測することが難しい。これは、計測体系に付随する未知な放射物性や幾何学的な取り扱い(形態係数など)が複雑なためである。一方で、赤外線サーモグラフィーを利用する際には、最小検知寸法、最小検知温度差、そして取得した熱画像の歪みなどにも十分な配慮が必要となる。

*原稿受付 2008 年 12 月 1 日

1) 正会員 茨城大学 工学部機械工学科
(〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1)
E-mail: hotaru@mx.ibaraki.ac.jp

ここでは、赤外線サーモグラフィーによる伝熱計測の定量的な適応性や有効性を広く示すため、自由界面を有する水平有限矩形容容器内のベナールセル対流を一例として取り上げ、気液界面温度場の可視化や伝熱計測に赤外線サーモグラフィーを応用した事例についてまず紹介する。気液界面伝熱現象を解明する上では、赤外線サーモグラフィーのような非接触な計測が望ましいと言える。また、赤外線非破壊診断法の一例として、乾燥砂漠地帯の地雷探査に赤外線サーモグラフィーを応用した事例について紹介する。さらに、生物活動に由来する温度場の可視化への応用についても紹介する。最後に、加熱や冷却された固体壁面温度の定量的な温度計測への試みとして新たに考案した赤外線分光放射温度計測の概略についても紹介しておく。

2. 赤外線サーモグラフィーの特徴

一般に、生産工程など様々な熱的外乱が介在する過酷な環境条件下において、加熱・冷却された固体壁面や自由界面などから電磁波として放射される熱エネルギーを定量的に検知し、対象表面の温度場を精密に計測することは難しい技術と言える。さらに、そこからの対流やふく射に由来する伝熱量を非接触かつ正確に計測することはさらに困難が増す。こ

れは、計測体系に付随する未知な放射物性や幾何学的な取り扱い(形態係数など)が複雑なためである。

赤外線サーモグラフィには、前述したように対象物の表面温度を非接触で評価できるとともに、複雑な形状を有する二次元温度場をリアルタイムにかつ画素毎に診断・評価することが可能な特徴を備えている。最新の赤外線サーモグラフィ装置は、1990年頃に市販されていた応答性 $1.0[\text{Hz}]$ 程度の機械走査型から進化し、可視域の CCD デジタルビデオカメラによる動画像と同等の応答性を有した熱画像を構成でき、しかも液体窒素冷却やスターリング冷却を何ら必要としない仕様になっている。様々な高速現象にも対応可能な赤外線高速ビデオカメラも開発されている。したがって、最新の機器では応答性(赤外線高速ビデオカメラも含めて)に特段の問題もないが、熱画像生成時間が遅い旧式機械走査型の場合、3.1 で述べるタイムトレースモードなどを利用して計測対象の任意ポイントやライン上の温度を計測していた。しかしながら、赤外線サーモグラフィを利用する際には、新式・旧式ともに最小検知寸法⁽¹⁾、最小検知温度差⁽²⁾、そして取得した熱画像の幾何学的なひずみ⁽³⁾などに十分な配慮が必要である。

最小検知寸法とは、赤外線サーモグラフィが有意に温度計測可能な対象物の最小寸法であり、撮影距離にも依存する。すなわち、計測対象物の寸法だけではなく、撮影距離にも十分に配慮する必要がある。最小検知温度差とは、赤外線サーモグラフィが有意に対象物の温度を識別可能な最小温度差であり、熱画像歪みとともに正確な熱画像を構成する上で重要な影響因子である。これらの詳細については、赤外線サーモグラフィに付随する計測の不確かさについても記述してある文献(4)も参照されたい。伝熱量の定量計測に際しては、計測対象である伝熱面と同一の放射・熱物性を有する検定資料を作製し、予め真の温度と赤外線サーモグラフィが検出する温度について同一使用環境条件下で校正しておくことが望ましい。あるいは、予め計測対象の放射率に合致した値を赤外線サーモグラフィ装置に設定して計測することも次善の策である。

3. 赤外線による可視化の応用事例

3.1 ベナールセル対流と気液界面現象

計測には、赤外線サーモグラフィ装置(NEC 三栄製 TH3100MR, スターリング冷却方式, Hg-Cd-Te センサ, 検出波長域 $8\text{--}13[\mu\text{m}]$, 温度測定範囲 $50\text{--}2000[^\circ\text{C}]$, 画像生成時間 $0.75[\text{s}]$, 最小検知温度分解能 $0.1[^\circ\text{C}]$)を使用し、任意の水平走査ライン(あるいはポイント)上の温度を時系列でサンプルするタイムトレースモードも画素毎の非定常な温度計測に適用した。この装置の場合、一つの熱画像は 239 本の水平走査ラインで構成され、ある 1 つの水平ラインを走査して次の走査までに $3.125[\text{ms}]$ を

要する。なお、この走査時間 $3.125[\text{ms}]$ の中には CRT 表示時間 $1.25[\text{ms}]$ が含まれているため、1 つの画像生成時間が $3.125[\text{ms}] \times 239[\text{本}] \div 0.75[\text{s}]$ となる。Fig. 1 は、実験装置の概略を示したものである。伝熱面は、上から銅箔(厚さ $30[\mu\text{m}]$)、銅板(厚さ $3[\text{mm}]$)そして熱源であるラバーヒーター(縦 $100[\text{mm}] \times$ 横 $100[\text{mm}] \times$ 厚さ $1.5[\text{mm}]$)の順に張り合わせ、周囲を十分に断熱した厚さ $10[\text{mm}]$ の水平なアクリル矩形容器(濡れ縁底面積 $100[\text{mm}] \times 100[\text{mm}]$)の底面に固定してある。ここでは、銅箔及び銅板を用いることにより伝熱面温度を一定にした。伝熱面(加熱面)温度の計測は、予め検定した直径 $100[\mu\text{m}]$ の C-A 熱電対を銅箔の裏面にスポット溶接して行った。実験は、専用暗室内に赤外線サーモグラフィ装置の検出部と計測対象(気液界面)を、最小検知寸法と最小検知温度差も考慮することにより $0.45[\text{m}]$ の位置で実施した。実験装置には、作動流体として動粘度 ν が 30, 50, 100, 300, 350, 500[cst] の 6 種類のシリコンオイルを充填してある。液層深さ δ を 5, 10, 15, 25[mm]と変化させ、それぞれの条件につき加熱面温度が約 $80[^\circ\text{C}]$ になるまで徐々にジュール加熱した。さらに、気液界面においてどのような流動が生じているのかを確認するため、アルミパウダーを用いた流動パターン可視化も可視域の CCD デジタルビデオカメラで実施した。

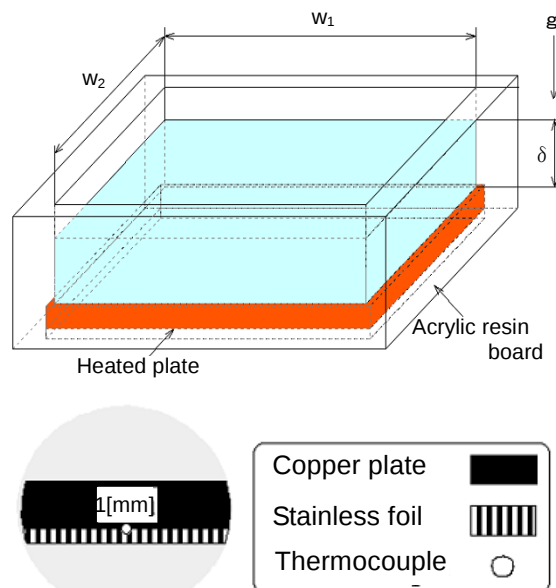


Fig.1 A schematic illustration of experimental apparatus

W_1, W_2 : 容器寸法
 g : 重力加速度
 δ : 液層厚さ
 Ra_l : 液層側レイリ数 ($=g\beta(T_s - T_w)\delta^3/\nu^2 \cdot Pr_l$)

Fig. 2は、 $\nu=100$ [cst] , $\delta=10$ [mm]において加熱面熱流束を $q=170.0$ [W/m²] $\rightarrow$ $q=589.0$ [W/m²] と増加させながら、気液界面に発生したベナールセル構造の時間的な変遷を赤外線サーモグラフィにより可視化した一例⁽⁶⁾である。加熱量が増加するにつれて、それぞれのベナールセルが合体を繰り返しながらその大きさを増し、セル数が 4×4 構造から 3×3 構造へ変化している様子がわかる。Fig. 3は、 $\nu=50$ [cst] , $\delta=15$ [mm]において $q=142.0$ [W/m²] $\rightarrow$ $q=697.0$ [W/m²] と加熱量を増加させながら、大きなセルが崩壊して乱流へ遷移する非定常な熱流動現象 (1.0[Hz]以下の現象) を可視化した一例である。一方、Fig. 4は、熱画像とアルミパウダーによる可視化画像を比較したものである。特に、(c)と(d)ではセル数 4×4 の構造が観察でき、いずれの図からも熱的現象と流動現象が良好に対応していることが観察できる。それぞれ添字 l, s, w は液層、加熱壁面、気液界面を意味し、 β と Pr は体積膨張率とプラントル数である。なお、流体力学ハンドブック⁽⁶⁾より、この条件に対する液層側の臨界レイリ数 $Ra_{l, crit}$ (ベナールセル発生条件) は 1124 であり、いずれの実験条件もこの値をクリアしている。

これらの可視化例は時間的な変遷が小さな熱流動現象であったが、最新の赤外線サーモグラフィを利用することで動的な変化の大きい熱流動現象の表面温度場でも可視化することが可能である。なお、文献(5)では、気液界面から実験空間への伝熱量を定量的に計測した事例についても述べてあるので合わせて参照されたい。この際、シリコンオイル表面において真の温度と赤外線サーモグラフィが検知する温度を予め校正してある。

一般に、気液界面の熱流動現象に関わる物理量を接触型センサで捉えることは困難と言われているが、この事例は非接触型の赤外線サーモグラフィならではの特徴を証明しているものと考えられる。なお、加熱や冷却固体壁面における放射物性の取り扱いや対流伝熱量の計測法については、それぞれ例えば文献(7), (8), (9)を参照されたい。

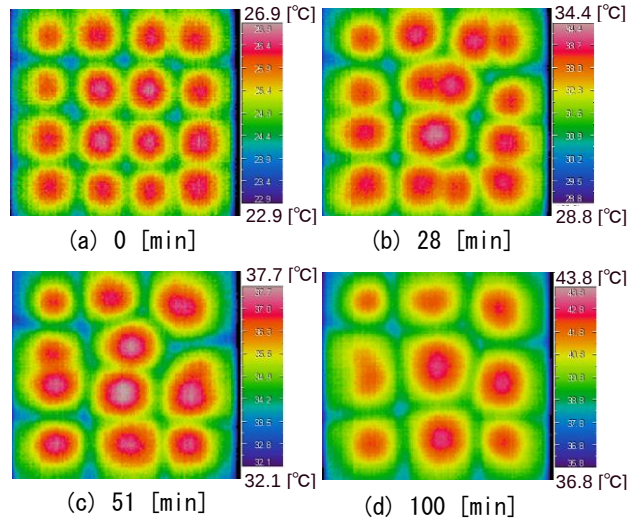


Fig. 2 Transient thermal patterns on gas-liquid interface.

$$\left[\begin{array}{l} \nu=100 \text{ [cst]}, \delta=10 \text{ [mm]}, \\ q=170.0 \text{ [W/m}^2\text{]} \rightarrow q=589.0 \text{ [W/m}^2\text{]} \end{array} \right]$$

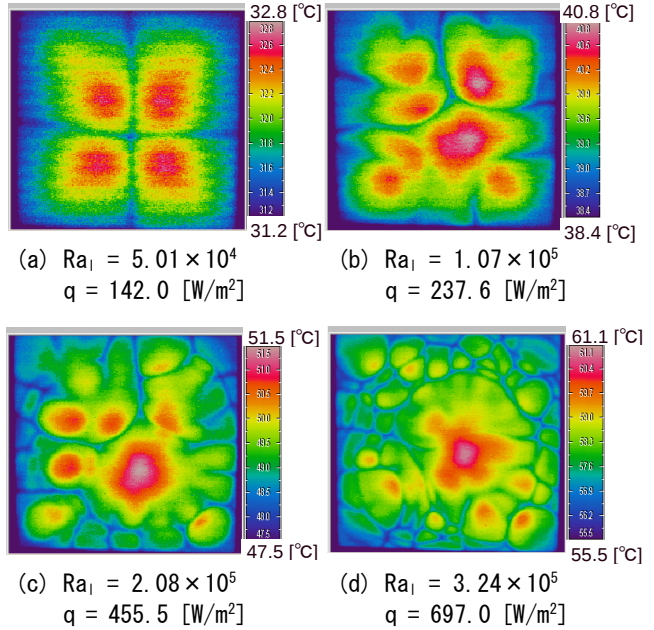
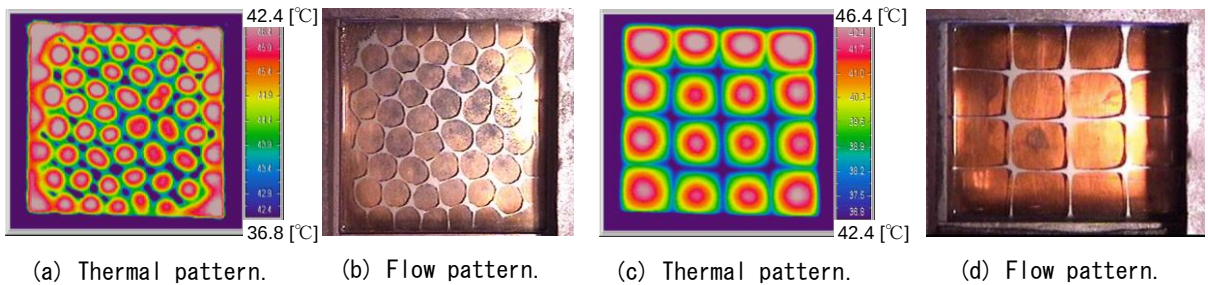


Fig. 3 Transient thermal patterns on gas-liquid interface.

$$(\nu=50 \text{ [cst]}, \delta=15 \text{ [mm]})$$



$$\left[\begin{array}{l} \nu=300 \text{ [cst]}, \delta=5 \text{ [mm]}, \\ q=410.0 \text{ [W/m}^2\text{]}, Ra_l=1.25 \times 10^3 \end{array} \right] \quad \left[\begin{array}{l} \nu=300 \text{ [cst]}, \delta=10 \text{ [mm]}, \\ q=580.0 \text{ [W/m}^2\text{]}, Ra_l=3.49 \times 10^4 \end{array} \right]$$

Fig. 4 Visualized thermal and flow patterns.

3.2 赤外線地雷探査

赤外線サーモグラフィーは、冒頭でも触れたように、表面温度場をリモートセンシングに評価する手段である。ここでは、赤外線センシングの利点を乾燥・砂漠地帯の地雷探査に応用して、少しでも作業に関わる危険を低減する技術の可能性について述べる⁽¹⁰⁾。すなわち、実計測及び数値シミュレーションの観点から、探査に付随するメカニズム、探査限界および影響因子などについて解説する。

探査実験では、幅 300[mm]、長さ 300[mm]、深さ 400[mm]の木製矩形容器の内壁に断熱材を貼り巡らせ、容器内部に熱物性値が明らかな砂や土を充填して乾燥・砂漠地帯の地中を Fig. 5 のようにモデル化して再現した。容器中央部の地中に模型地雷が埋設してある。この模型は、プラスチック地雷を想定して構成材外部をベークライト樹脂、内部に火薬の代わりに砂を充填してある。実験は、午前 6 時に測定を開始し、翌日午前 6 時に測定を終了する計 24 時間とした。日射量（太陽放射熱流束）、風速、気温、湿度、含水率などの気象因子に加え、地雷上部の地表面温度や埋設地雷周囲の土壤温度や含水率についても予め検定した直径 200[μm]の C-A 熱電対や含水率計（UIZIN 製 UIZ-SM200）で時系列に計測している。また、地表面温度場は、非冷却型赤外線サーモグラフィー装置（NEC 三栄製 TS7302, Hg-Cd-Te センサ、検出波長域 8-13[μm]、温度測定範囲 -50 ~ 2000[°C]）で 3 時間毎に計 9 回計測した。

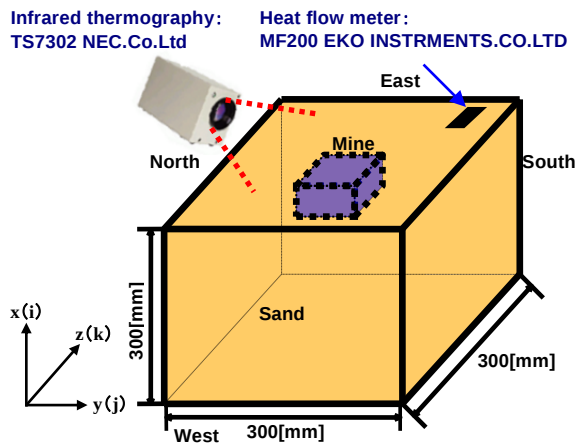


Fig. 5 A schematic illustration of experimental setup

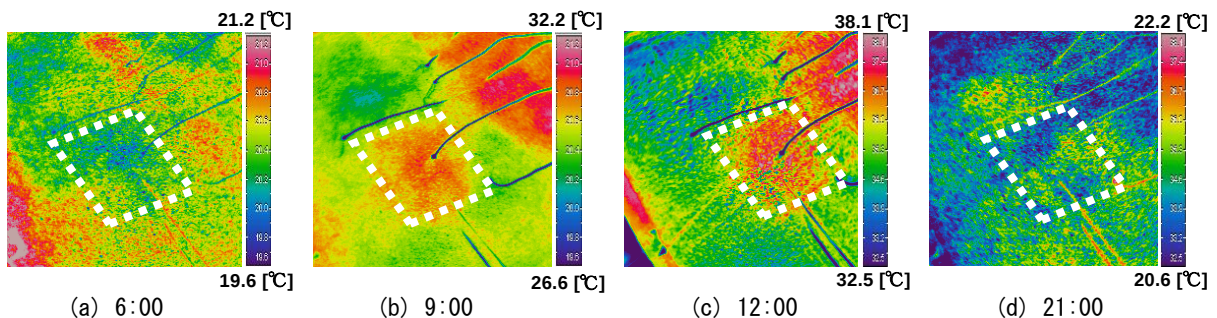


Fig. 6 Transient thermal images on July 14, 2004.

計測した地表面温度場の熱画像の一例を Fig. 6(a)-(d)に示す。これは 2004 年 7 月 14 日に実験を行った可視化結果で、地雷を地表面から 10[mm]の位置に埋設した際に得られた地表面の時系列な二次元熱画像を表したものである。太陽放射が強くなる時間帯では、Fig. 6(b)や(c)に示されるように地雷イメージが地表面で明瞭（地雷上部：高温領域、周辺部：低温領域）となっている。これは、地雷上部の地表面とその周辺部で温度差が大きくなったことに由来する。また、Fig. 6(d)に示されるように、太陽放射が弱くなる夕方にかけて地雷上部と周辺部の地表面温度差が小さくなり、地雷のイメージが次第に不鮮明になっている。一方、夜間から深夜にかけては、日中における地表面から地中への熱流方向が逆転して地中から地表面に向かう熱流が発生する。すなわち、放射冷却現象である。この場合も、地雷イメージが地表面で明瞭（地雷上部：低温領域、周辺部：高温領域）となる。これらの可視化例は、熱拡散率などが地雷本体のそれより地雷周辺部の土壤の値が大きい場合であり、太陽熱放射が地中に浸透していく過程で地雷部が熱抵抗となって地雷上部の地表面温度が日中に上昇し、夜間に低下するのである。熱拡散率などが地雷本体のそれより地雷周辺部土壤の値が小さい場合は、その逆の現象が生じる。この様子を模式的に提示したのが Fig. 7 である。

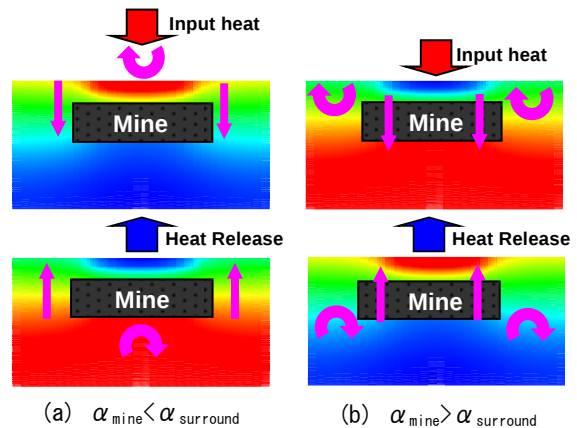


Fig. 7 Detection process of invisible mine
 $\left[\begin{array}{l} (a) \alpha_{\text{mine}} < \alpha_{\text{surround}}, (b) \alpha_{\text{mine}} > \alpha_{\text{surround}} \\ \alpha : \text{Thermal diffusivity} \end{array} \right]$

著者らは、一連の研究の結果、赤外線地雷探査の有効性を証明するとともに、次の幾つかの事実を明らかにした。(1) 太陽放射や自然環境条件を援用した赤外線センシングの地雷探査では、地表面の放射率や日射時間帯により探査に最適な環境条件が存在する。(2) 赤外線地雷探査では、地雷埋設深度が深くなるにつれて地雷上部の地表面とその周辺部の温度差が小さくなって地雷イメージが不明瞭となる。(3) 地表面では、地雷と周辺土壌の熱物性の差が相対的に大きいほど温度差が生じ易く、地雷イメージが明瞭となる。(4) 探査対象領域が地表障害物等で放射率が種々に変化している場合は、探査が難しくなる。これに対して、放射率の特定し易い砂漠地帯では、赤外線地雷探査が比較的容易である。しかしながら、探査対象の地中に地雷以外の埋設物が存在する場合など、赤外線地雷探査に関わる不確定な要素が今なお残っているため、地道でかつ継続的な研究を続けているのが現状である。

3.3 生物活動に由来する温熱現象

赤外線計測の最大の特徴は、非接触（非侵襲）で場を乱さず対象の表面温度場を計測できることにある。また微小な画素毎の温度データを二次元的に、かつ時系列で処理・解析できる利点を有している。したがって、生物の行動観測をより自然な形で行う上でも赤外線サーモグラフィが有効な手段となる。

生物にとってその周囲の温度は重要な環境要因であり、近年、われわれ人間の生活においても、温熱環境の調節はその重要性を増している。さて、社会性昆虫の巣、例えばミツバチの巣の内部では、幼虫に正常な発達を促すよう、常に温熱環境が調節されている。Seeley⁽¹¹⁾によれば、巣内の温度は、周囲の気温に関わらずおよそ 35[°C]に保たれており、この温度は幼虫の成長速度を最大にするとされている。ミツバチは、巣内温度を高めるために飛翔筋を震わせて代謝熱を生じて温度を上げ、冬場はたくさんのハチが巣盤に集まって蜂球を作り、自らが発熱体／断熱材となって巣を暖める。一方、夏場など巣内の温度が過度に上昇すると、ハチは巣内に水を運び、それを蒸発させることにより気化熱を奪って巣内の温度を下げる。また羽を使って巣内に風を送り、換気を行うこともある。一方、幼虫が病気になると、成虫は巣内の温度を上昇させ、あたかも恒温動物が病気の時に見せる「発熱」のようにして病原菌に抵抗するとも言われている⁽¹²⁾。ミツバチは、変温動物であるにもかかわらず、巣内の温度を調節するのである。こうした温度調節は、多くの昆虫で、病気だけではなく、寄生虫が体内に入ったときなど、生命に危機を及ぼす際に多く見られる。このような生物現象に基づいた空調制御システムが人間生活の場にも実現できるとすれば、人工的にコントロールされたシステムよりも人体に優しいことが十分に期待

できる。したがって、著者らは、より快適な温熱空間を医療・福祉施設に提供するため、生物情報、ここでは社会性昆虫であるミツバチの巣内の温熱環境を模した空調システムの設計指針を探った⁽¹³⁾。

研究にはセイヨウミツバチを利用し、埼玉県川越市の蜂場内の日陰に設置した巣（上部に貯蜜圈、中部より下に育児圈が存在）を計測した。Fig. 8 は測定に用いた観察箱の概略を示したもので、巣箱の内部には 3 枚の巣盤があり、約 1 万匹のハチが営巣していた。撮影には非冷却型赤外線サーモグラフィ装置（NEC 三栄製 TH7102MV, Hg-Cd-Te センサ, 検出波長域 8-13[μm], 温度測定範囲-50~2000[°C]）を用い、1.0 [Hz]間隔で時系列に巣盤表面を撮影した。撮影は、2005 年 4 月 27 日 13:00 から同日 16:00 まで計 3 時間行っている。同時に、直径 200[μm]の C-A 熱電対で時系列に巣内各所を計測している。

一例として、撮影した巣盤の可視域および赤外域の画像を Fig. 9 に示しておく。これらの熱画像からも明らかのように、巣盤の表面には多数のハチが分布し、その体温は個体ごとに大きく異なっている。体温の高いハチは巣盤上をランダムに歩き回り、そ

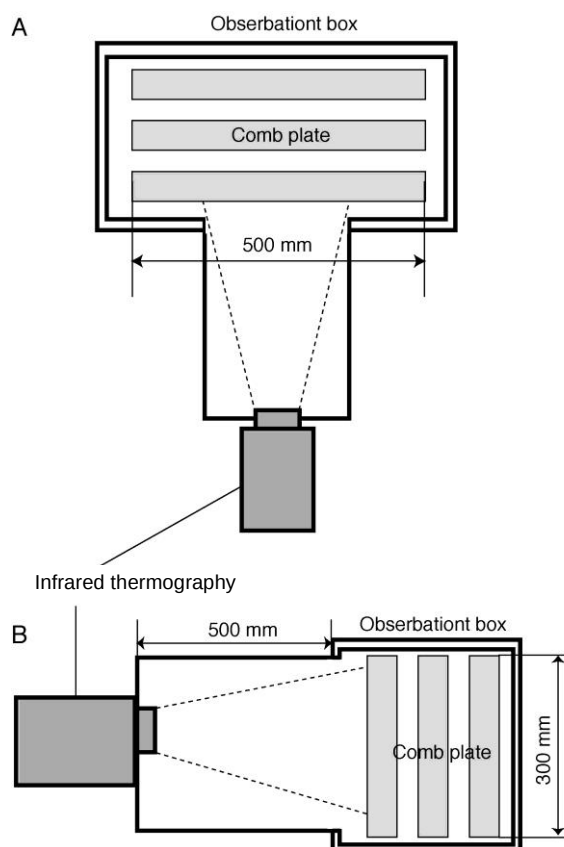


Fig.8 A schematic illustration of observation box for honeybee nest.

(A : overhead view of the box.
B : lateral view of the box.)

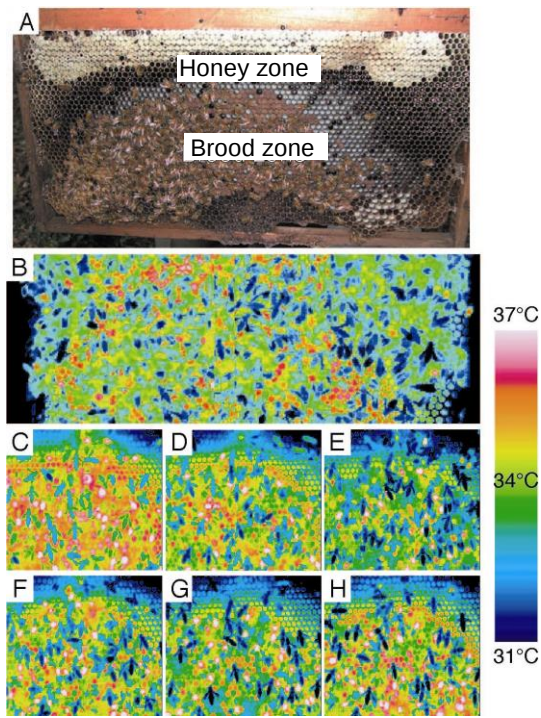


Fig.9 A comb of honeybee (A) and its thermal images (B-H) taken every 5 min from 15:25 to 15:50 on 27 April, 2005. (B) whole surface area of the comb, (C-H) transient of thermal images at the central part of the comb.

れに応じて周囲の温度も上昇した。一方、体温の低いハチは長時間その場にとどまり、温度変化がほとんど見られなかった。巣盤の温度は中央部ほど高く、巣盤の周縁部と比べて 8°C 上昇していた。さらに、巣内の温度は一日を通して緩やかに変化し、周期の小さな温度変動がその緩やかな変動に内在していることが明らかになった。また、その変動には、人の快適感と関連の深い $1/f$ のゆらぎ現象が検出された。ミツバチは育児のために巣内温度をおよそ 34°C に保つが、人間は着衣条件でおよそ 24°C が快適な温熱環境と言われている。このように赤外線サーモグラフィーは、生物活動に由来する温熱環境の評価にも有効な手段と考えられる。

したがって、生物情報を模した空調システムを考察するに当たり、温度レベルだけでなく、温度変動幅および温度変動間隔も重要な要素になるものと考えられる。今後は、数値シミュレーションや実験を通して生物情報に基づいた温熱環境の制御法を試作し、それが創造する快適性について人間感性工学的な検証も行いたいと考えている。人体の温度場と快適性を検証した一例については、例えば文献(14)を参照されたい。

3.4 赤外線分光放射温度計

赤外線サーモグラフィーは、前述したように画素毎の二次元的な温度計測が可能のため、複雑な形状を有する対象面の温度をリアルタイムにかつ広範囲

に評価する上で極めて都合が良い。特に、赤外吸収のない気体中（ある程度の赤外吸収があったとしても）で対象となる固体壁面や液体表面の温度場を可視化するには極めて有効な手段である。しかしながら、赤外線センサが感知するエネルギーには、計測対象物から放射されるエネルギーの他に、周辺からの反射エネルギーも含まれるため、計測精度が対象面の放射物性に影響されるという問題がある。すなわち、赤外線サーモグラフィーは、放射率などの放射物性が特定できない対象物の表面温度を定量的に計測することに不向きであると考えられている。この点は、たとえ真の温度との校正を加えることで回避できたとしても、赤外線サーモグラフィーの利点を損なうものでもある。そこで、著者らは、放射率や反射率に加え、周囲の環境条件をなんら推定することなく真の温度を推定できる多色（二色・三色）温度計について一つの提案^{(15),(16)}をしたので、その概略について最後に触れておく。

ここでは、非冷却型赤外線サーモグラフィー装置（NEC 三栄製 TH9100, Hg-Cd-Te センサ, 検出波長域 $8\sim 13[\mu\text{m}]$, 温度測定範囲 $-50\sim 2000^{\circ}\text{C}$ ）内部にそれぞれ異なる検出波長域を有する赤外フィルタを 2 種類あるいは 3 種類付加する方法で検証実験を実施した。Fig. 10 は、三色分光放射温度計について実験装置の概略と高精度化のための赤外線フィルタを示したものである。実験は、専用暗室内に赤外線サーモグラフィー装置の検出部と可視化対象（SKD 鋼を母材として様々な表面処理を施した試験片表面）を、最小検知寸法と最小検知温度差も考慮することにより $0.6[\text{m}]$ の位置で実施した。加熱温度毎に 3 種類の赤外フィルタを切り替えながら計測を実施している。

提案した分光放射温度計に関わる計測原理の概略は、以下である。まず、それぞれの赤外線フィルタが検知する表面温度 T_{rsi} は、センサ周りに成立するエネルギー保存式から以下のように仮定される ($i=1, 2, 3$ は、各赤外線フィルタを意味する.)。

$$T_{rsi}^{ni} = \varepsilon_i T_s^{ni} + \rho_i T_a^{ni} = \varepsilon_i T_s^{ni} + (1 - \varepsilon_i) T_a^{ni}$$

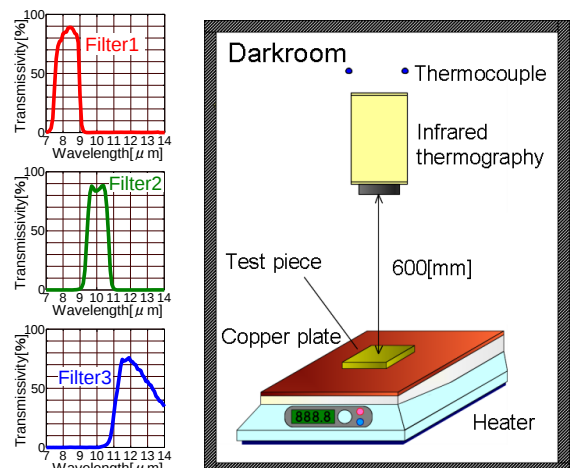


Fig.10 Experimental apparatus and infrared filters.

ここで式中の T_s は真の温度, ε_i と ρ_i ($i=1,2,3$) は放射率と反射率を表す. また, 指数 n_i ($i=1,2,3$) は, プランク則と各赤外フィルタ感度の積を Fig. 10 に示した各赤外フィルタの検出波長域で積分して算出したエネルギー Q_i (各赤外フィルタが検知するエネルギー) を, 黒体温度 T_s に対する一次近似式から求めた値である. さらに, エネルギー保存式に対して, それぞれの赤外フィルタによる放射率を $\varepsilon_1=\varepsilon_2=\varepsilon_3$ と仮定することによって導出される方程式群 $F(T_s), F(T_a)$ から n_i 値が同一の組み合わせとならないように 1 式ずつを選択し, $F(T_s) = F(T_a) = 0$ となる段階で三色放射温度計の解, つまり, 真の表面温度 T_s に対する推定値を得る. なお, 詳細な計測原理や計測結果などは, 直接に本特集とは関連性が薄いと考えられるため, 文献(15)や(16)を参照されたい. 現在, 著者らは, 新しい仮定を導入した三色分光放射温度計について鋭意研究を進めており, 順次報告して行きたいと考えている.

4. 結 言

ここでは, 赤外線サーモグラフィーによる伝熱計測の定量的な適応性や有効性を広く示すため, 自由界面を有する水平有限矩形容器内のベナールセル対流を一例として取り上げ, 気液界面温度場の可視化や伝熱計測に赤外線サーモグラフィーを応用した事例についてまず紹介した. また, 赤外線非破壊診断法の一例として, 乾燥砂漠地帯の地雷探査に赤外線サーモグラフィーを応用した事例について紹介した. さらに, 生物活動に由来する温度場の可視化への応用についても紹介した. すなわち, 様々な現象の可視化や温度・伝熱計測に赤外線サーモグラフィーが有効な一手段であることを紹介した. 赤外線サーモグラフィーの最大の特徴は, 対象物から発せられる熱エネルギーを感知し, その表面温度をリモートセンシングに評価する手段であるとともに, 複雑な形状を有する二次元温度場をリアルタイムにかつ画素毎に診断・評価することが可能な手段でことである. そのため, 今後もこの手法は工学, 理学, 医学あるいは産業界などを始めとする様々な分野で広く利用されていくものと考えられる. 本特集記事が少しでも各界に寄与できれば幸いである.

参 考 文 献

- 1) 黒川賢, 稲垣照美, 安久正紘, 岡本芳三: 赤外単素子センサを用いた機械的走査型サーモグラフィー装置の最小検知寸法に及ぼす要因分析, 可視化情報学会誌, Vol.19, No.74 (1999) pp.51-56.
- 2) 黒川賢, 稲垣照美, 安久正紘, 岡本芳三: サーモグラフィー装置の最小検知温度差に関する研究, 日本機械学会論文集(C), Vol.66, No.643 (2001) pp.128-133.
- 3) 黒川賢, 稲垣照美, 笠井豊, 宮本貴範: 機械的走査型サーモグラフィー装置の熱画像ひずみ, 日本機械学会論文集(C), Vol.69, No.679 (2003) pp.77-82.
- 4) Inagaki, T., Kurokawa, K.: HANDBOOK of NONDESTRUCTIVE TESTING (Third Edition); Errors in Infrared Thermography, The American Society for Nondestructive Testing, (2001) The 6th Chapter.
- 5) Inagaki, T., Hatori M., Suzuki T., Shiina Y.: Heat Transfer and Fluid Flow of Benard-cell Convection in Rectangular Container with Free Surface Sensed by Infrared Thermography, J. of Visualization, Vol.9, No.2 (2006) pp.145-160.
- 6) 日本流体力学会編, 流体力学ハンドブック 第2版, (1998), p.292
- 7) Inagaki, T., Okamoto Y.: Surface Temperature Measurement Using Infrared Radiometer Applying Pseudo-grey-body Approximation-Estimation of Radiative Property for Metal Surface, Trans. of ASME J. of Heat Transfer, Vol.118, No.1 (1996) pp.73-78.
- 8) 岡本芳三, 稲垣照美, 関谷将三: 赤外線映像装置を利用した実用的温度計測に関する研究(第1報, 射度係数と放射温度の関係)(共著), 日本機械学会論文集(B), Vol.59, No.568 (1993) pp.232-237.
- 9) Inagaki, T., Okamoto Y.: Measurement of Turbulent Heat Transfer Coefficients Using Infrared Thermography near Ambient Conditions and Its Quantitative Error Estimation, JSME Int. J. (B), Vol.42, No.2 (1999) pp.275-283.
- 10) 稲垣照美, 三好達也, 大森建夫: 乾燥・砂漠地帯の地雷探査に向けた赤外線リモートセンシングの応用と数理モデルによる考察, 日本機械学会論文集(C), Vol.71, No.702 (2005) pp.181-189.
- 11) Seeley, T. D., Honeybee Ecology, Princeton University Press (1985)
- 12) Heinrich, B., Hot-Blooded Insects, Harvard University Press, (1993)
- 13) 干場恵美子, 稲垣照美, 穂積訓, 干場英弘: 生物(社会性昆虫)に由来する温熱環境のゆらぎ特性と赤外線による温度調節行動の可視化, 可視化情報学会誌, Vol.26, No.11 (2006) pp.105-113.
- 14) 稲垣照美, 佐々木竜一, 安久正紘: 赤外線による皮膚温度計測と1/fゆらぎ現象に関する研究, 日本機械学会論文集(C), Vol.67, No.659 (2001) pp.201-208.
- 15) 稲垣照美, 石井敏満, 安久正紘: 多波長域の赤外線サーモグラフィー装置を援用した二色放射温度計の提案とその定量評価に関する研究, 日本機械学会論文集(C), Vol.64, No.624 (1998) pp.199-205.
- 16) Inagaki, T. and Ishii, T.: On the Proposal of Quantitative Measurement by Using Three-colored Technique Combined with Several Infrared Sensors Having Different Detection Wavelength Bands, Int. J. of Infrared Physics and Technology, Vol.41 (2000) pp.325-337.