

赤外線カメラによる熱イメージングと 可視化熱分析への応用

森川 淳子, 橋本 壽正

(受取日: 2011 年 6 月 24 日, 受理日: 2011 年 10 月 8 日)

Thermal Imaging and Visual Thermal Analysis Using Infrared Camera

Junko Morikawa and Toshimasa Hashimoto

(Received June 24, 2011, Accepted Oct. 8, 2011)

A recent advance in thermal imaging is overviewed with the actual imaging results using an infrared camera applied to the micro-scale heat transfer observation. The micro-scale visual thermal analysis and the lock-in thermography are presented. The latent heat's generation and dissipation at minus temperature during freezing of biological plant and animal cells are visualized that clarifies the thermal diffusion effect on crystallization and the vitrification. The on-lamellae thermal analysis of *n*-alkane visualizes the early stage of anisotropic lamella formation. The crystallization front of polymeric spherulite of poly(ethylene oxide) visualizes the temperature rise of ~ 200 mK. The basic results of lock-in thermography visualizing the in-plane thermal diffusivity and the thermal interface are presented with a modulated spot heating method using a diode laser that is used to generate a thermal wave inside the specimen. A promising future of micro-bolometer sensor is introduced.

Keywords: thermal imaging, visual thermal analysis, Infrared Camera

1. はじめに

Pentium III の小型パッケージ化のため、放熱材料の開発が脚光を浴びたのは、90 年代後半であったが、その後、放熱に関する技術開発は、電気自動車、次世代照明用の材料開発へと展開された。エネルギー産業における熱の解析は、原子力・太陽光発電において、新たな解析手法の必要性を生み出し、住宅の断熱性や衣服、食品保存など、より身近な分野で日常的に熱を考える機会が増えた。さらに、次世代 DNA 解析や、医療用途に、マイクロ熱解析が使われ始めている。このような背景の中で、熱伝導性への関心が高まると、熱伝導率・熱拡散率がテンソル量であり、対象とする物質の異方的な物性が重要となることから、熱の拡散現象

の 2 次元的な可視化が重要となった。¹⁾

赤外線カメラは、通常、サーモグラフィーとして温度分布を計測する機器として普及しているが、量子型であるインジウム・アンチモン型 (以下 InSb)、水銀・カドミウム・テルル型 (以下 MCT) は、温度に関して高感度なばかりでなく、高速でもあり、熱分析用温度センサーとして有効である。熱は伝播速度が遅いが、ミクロスケールであれば、温度変化を十分な時間分解能で追跡することができる。本報では、赤外線カメラを用いた可視化熱分析 (一定昇降温下での試料温度の観測, DTA に対応) と視野内の一部に温度変化を与えたときの熱の伝播を観測して熱物性を求める方法について、応用例と可能性について論ずる。

2. 可視化熱分析：測定の方法論

2.1 背景：各種赤外線センサー

赤外線センサーは、形状から単独素子、リニアアレイ、平面アレイ（Focal Plane Array: FPA）に、測温原理からは熱型（サーモパイルなど）と、バンド電子の遷移を使う量子型に大別される。量子型は、感度と応答性に優れていて、**Fig.1**に示したように、3～5 μmに感度（ D^* ）を持つInSb型と8～12 μmに感度のあるMCT型が市販されている。どちらの波長帯も試料温度を反映しているが、赤外吸収分光法などでは、MCTが用いられている。**Fig.1**から明らかなように、赤外線に対しては、InSb型が最も高感度でかつ高速応答であることから、熱分析用途には適している。従来用いられてきたゴーレイセルやサーモパイル型では、赤外線を熱に変換するため、検出能は低い。また、レーザーフラッシュ法などの物性測定には、時定数の長い熱電対やサーミスタに替わって単独の赤外素子が使われているが、本報では、温度画像を高速に得る2次元アレイについてのみ論じる。

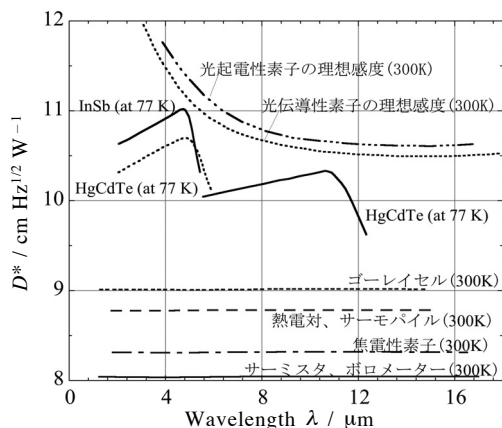


Fig.1 Sensitivity ($D^* = (S/N \cdot \Delta f^{1/2}) / (P \cdot A^{1/2})$) of infrared sensors; S : Signal, N : Noise, P : Incident energy [W cm^{-2}], A : Photo sensitive area, Δf : Noise bandwidth [Hz].

面センサーの実際の測定感度は、素子のアンプ込みの感度ムラ、ドット抜け、窓材・レンズを通した光量低下、レンズの f 値、口径食や周辺光量低下、サンプルの反射率や輻射率など、光学的な複数の要因によって変化する。このため擬似黒体板を用いて、測定条件ごとの輻射率強度-温度校正が必要となる。

Fig.2には、黒体の輻射強度の最大値を与える波長の絶対温度によるシフト（Wien's displacement law）を示すが、赤外線カメラは、波長測定ではなく、特定の波長域で受光した赤外線エネルギー総量を観測する。観測されるのは光量であり、Stefan-Boltzmann lawを適用して温度に換算される。量子型赤外線センサーは高感度であるが、熱雑音に起因するダークカレントを除くため、素子を冷却する必要がある。一方、熱型センサーは、非冷却で簡便な反面、感度や速度の点で、精密計測には不向きとされてきた。最近になり、非冷却型、特にボロメーター型素子の画素ピッチの微細化が進み、空間分解能が向上するとともに、素子の熱設計等により、温度分解能も向上している。**Table 1**に2010年に入手可能な代表的赤外線カメラの仕様を示す。

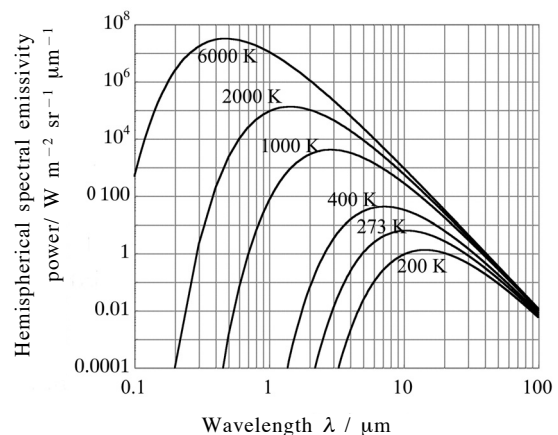


Fig.2 Intensity of black body radiation at different absolute temperatures as a function of wavelength.

Table 1 Specifications of infrared FPA sensors of IR camera.

	量子型	量子型	熱型
detector	InSb	MCT	VO _x
spectral range	3～5 μm	3.7～4.8, 7.7～9.3 μm	7.5～13.5 μm
pixel pitch	30×30～15×15 μm ²	30×30～15×15 μm ²	38×38～17×17 μm ²
resolution	320×256～640×512	640×512	640×480
Integration time	10～3 μs	10 μs	10～40 ms
full frame rate	100～432 Hz	117～240 Hz	30～60 Hz
NEI / NETD	18～25 mK	20 mK	35～50 mK

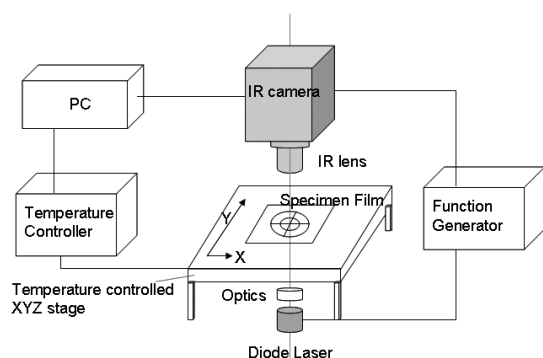


Fig.3 Setup for micro scale thermal analysis and lock-in thermography with a modulated spot heating using a laser diode.

2.2 可視化熱分析

2.2.1 装置群

筆者らが開発した装置について紹介する。量子型のInSb赤外線カメラを用いて、高倍率赤外線顕微鏡レンズ装着下で、各種物質を昇降温させ、融解・結晶化過程で生じる潜熱を画像として観測するミクロスケール熱分析装置を**Fig.3**に示す。

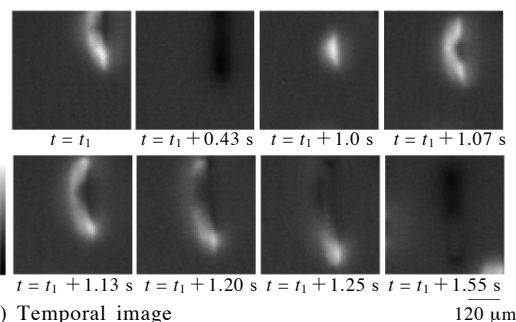
本装置は、カメラ系の他に、温度制御可能な試料台、小型半導体レーザーを用いた温度変調加熱装置、xyzステージから成り立っている。一定昇降温によるDTAのほか、平板試料の一部に点または線状に交流的な加熱により発生させた温度波の伝播する様子を観測することができる。これらは、赤外線カメラが熱電対などと比較して、高速であることを利用して、熱が面内に拡散する様子を観測し、基準点を例えば加熱点など面内において、ロックイン画像解析する装置として展開している。また、解析にあたって、温度像では差が少ないことが多く、明確に表現できないので、各スタック画像の温度の時間変化分を強調した画像で表現する（微分画像）。

赤外線カメラを高速温度センサーとして得られる熱画像は、バルクサンプルの平均的なデータとして解析される従来法と異なる視点を与える可能性がある。熱波の拡散は非常に遅く、熱絶縁体で温度変化を、1 Hz前後で動的に観測するには、1 mm²以内の視野の観測が好ましい。そのため、ミクロスケール熱画像の取得には、可視・近赤外で用いられるレンズ群は不透明で転用ができないので、赤外波長域を透過するマイクロレンズの設計が必要となる。

2.2.2 可視化熱画像の例

Fig.4(a)は、試料台上に置いた植物表皮細胞試料を、一定速度で冷却したときの冷凍過程で生じる結晶化発熱と、細胞内または細胞外への熱拡散を捉えた画像である。図の

(a) Temporal image



(b) Temporal image

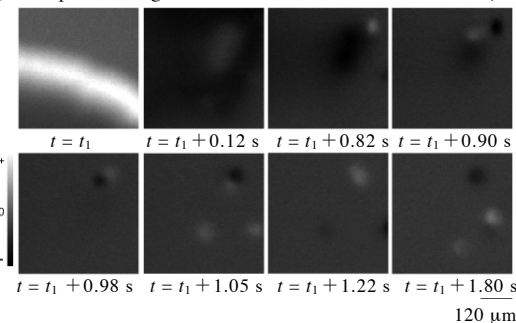


Fig.4 (a) Time derivative image of the latent heat during freezing of onion-skin cells.

(b) Time derivative image of the latent heat during freezing of tobacco cells in the medium.

明るい部分が温度の高い部分で、msecオーダーの変化を読み取ることができる。細胞壁に囲まれた細胞内の水は、細胞単位で結晶化する様子がわかる。

Fig.4(b)はタバコ細胞を冷凍保存液中で冷却したときの、赤外線画像である。まず、左上のように、保存液が凍結するときの大きな発熱が現れ、この結晶化フロント潜熱が進展し、続いて、細胞1個ずつが結晶化発熱の様子を捉えたものである。細胞単位の相対的結晶化潜熱および結晶化温度の測定により、保存液を変化させたときの細胞のガラス化を確認する方法として有効であることを示した。²⁻⁴⁾

2.2.3 解析例

赤外線画像からどのような熱分析が可能になるのか。一定速度で冷却したDTA型の結果をいくつかの例で解説したい。

a) 植物表皮細胞の冷凍過程

Fig.5(a)は、植物表皮細胞の室温での赤外線画像である。図中の番号は、視野内で凍結した順番を示す。5つの細胞内のアルファベットの位置での赤外線画像から、指定された各ピクセルでの冷却過程で求めた温度の時間変化を**Fig.5(b)**に示す。一種のDTA曲線に相当するものである。全体として過冷却して、-8℃で結晶化し、一旦全体的に昇温した後、

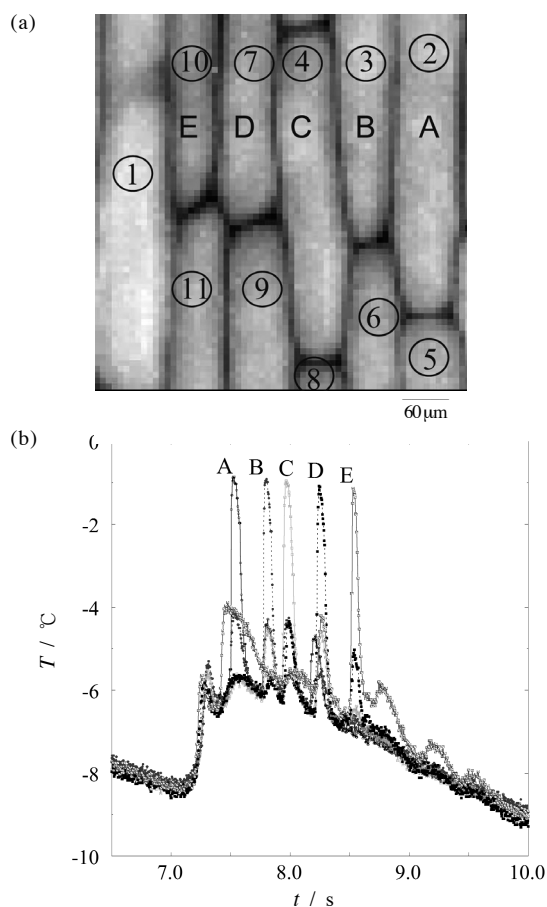


Fig.5 (a) Infrared image of onion-skin cells.
(b) Two dimensional thermal analysis of onion-skin cells in cooling at different pixel positions of A – E in Fig.5(a).

うに、凍結は細胞単位で独立に起こり、画面内の細胞壁に囲まれた細胞の温度上昇開始の順番からわかるように、細胞は必ずしも並び順には凍結を開始していないことがわかる。**Fig.5(b)**では、結晶化潜熱による5～6℃の鋭い温度上昇と、1～2℃ほどの温度上昇の2通りのピーク群が観測されている。このうち、水の結晶化による昇温では、A-Eのすべてのピクセルで-1℃前後まで温度が上昇していることが観測されている。一方、温度上昇幅の小さいピークは、結晶化によるものではなく、周囲の細胞の結晶化熱の拡散による温度上昇であることが、**Fig.5(b)**のピーク位置の重なりから示唆される。細胞壁の存在が、連続的に結晶化しない理由のひとつと思われる。⁶⁾

Fig.6は、熱補償型DSCと赤外線カメラによるDTAの比較である。横軸のスケールが全く異なるので、注意が必要

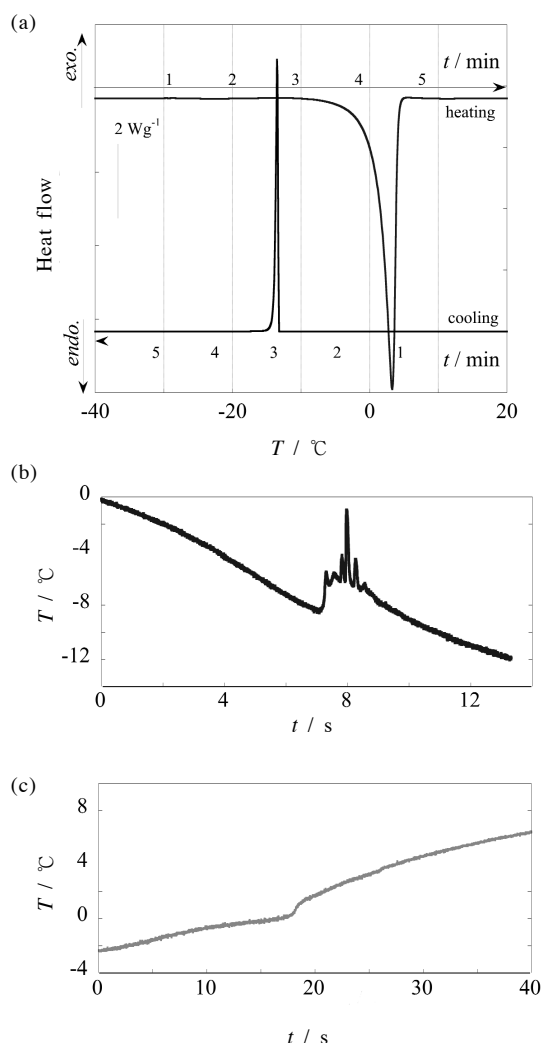


Fig.6 Comparison of heat flow curves measured with (a) heat compensation type DSC, and (b) infrared thermal imaging, in thermal analysis of onion-skin cells on heating and cooling.

であるが、2次元の可視化熱分析により、潜熱発生マイクロスケールにおける特徴が、赤外線カメラでは高い分解能で観測されている。また、昇温過程では、赤外線画像による温度変化はシングルピークを示し、従来法とよく対応している (**Fig.6(c)**)。

b) 直鎖状炭化水素の相転移

直鎖状の炭化水素である*n*-アルカンは、六方晶から等方相へ転移する融解と、その直下に斜方晶⇄六方晶間の固相転移があり、有機物質の相転移研究のモデルとして、古くから研究対象となってきた。**Fig.7**は、融解状態の*n*-pentacosane ($C_{25}H_{52}$)を毎秒0.6℃で冷却したときの発熱を、

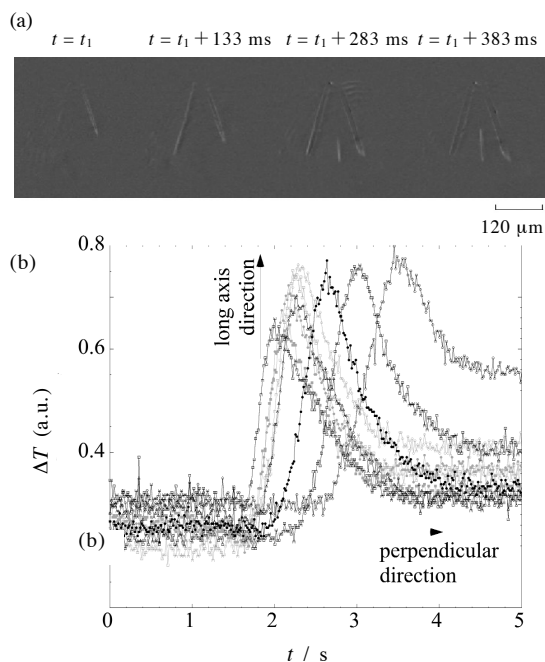


Fig.7 (a) The exothermic latent heat of crystalline lamellae of $C_{25}H_{52}$ in cooling (-0.6 K min^{-1}) from the isotropic to the hexagonal phase, (b) time developments of intensity profiles of the exothermic heat front of the anisotropic lamellae growth of $C_{25}H_{52}$ by each $3 \mu\text{m}$ step.

赤外線カメラで撮影したものである。**Fig.7(a)**はスタックされた写真群のある瞬間の温度分布を示す。中央部に明るく見える部分が、結晶化発熱している部分である。面測定の特徴を活かして、結晶化フロントの成長速度などの情報が得られるが、例として、 $C_{25}H_{52}$ の融液からの結晶化初期のラメラ析出過程を解析した。潜熱の赤外線画像の時間微分像は、結晶核発生後、紡錘状ラメラが長さ方向（長軸）に成長し、ある長さ（ $160 \sim 200 \mu\text{m}$ ）に達した後、初期の成長方向と垂直な方向（短軸）に成長を始める様子を捉えている（**Fig.7(a)**）。この時間微分像から紡錘状ラメラの長さ方向（長軸）と短軸方向に $3 \mu\text{m}$ 間隔の空間ピッチで抽出した結晶化過程の熱分析プロファイルを**Fig.7(b)**に示す。紡錘状ラメラ成長フロントの潜熱発生による温度上昇ピークの方向依存性は、ラメラの異方的な成長に対応する。このピーク位置の変化から、結晶化（ラメラ形成）速度を求めると、初期成長方向とその垂直方向の成長速度には、20倍の差異があることを見出した。

(c) 高分子球晶の形成過程

高分子物質の多くは、結晶化に際し、核を中心点とした球晶構造をとる。代表的な結晶性高分子であるポリエチレ

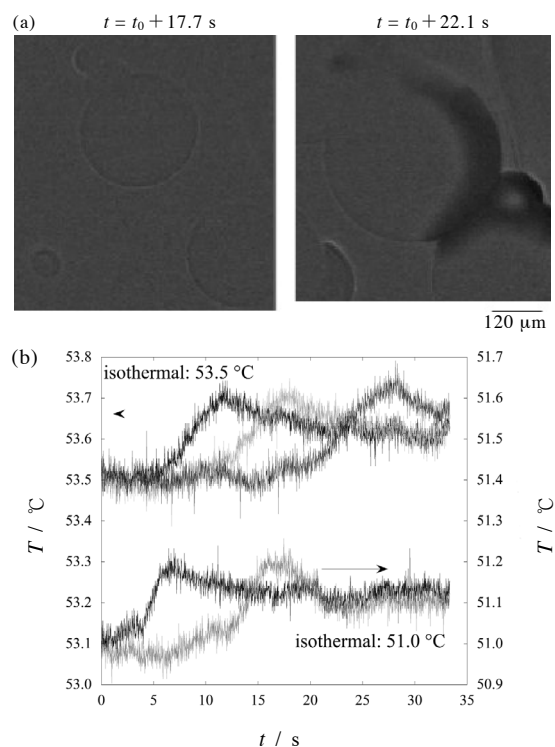


Fig.8 (a) Time differential image of exothermic thermal front of crystallization of poly(ethylene oxide) (PEO: $M_v = 100,000$) in cooling (-30 K min^{-1}) from the liquid to 42°C . (b) Temperature profiles of the pixels in the exothermic heat front of the spherulite in the radial direction by each $12 \mu\text{m}$ step in the isothermal crystallization at 53.5°C and 51.0°C .

ンオキサイド（PEO）を融液から急冷し、 42°C にて等温結晶化させた場合の、球晶成長の様子を顕微赤外線カメラで観察した熱画像の微分像を**Fig.8**に示す。直径が $50 \mu\text{m}$ 程度の大きさになると、球晶の結晶化発熱のフロントが明瞭に識別されている（**Fig.8(a)**）。精密温度制御により、 0.5°C ごとに等温結晶化を行い、球晶形成のフロント面での温度上昇の定量化を試みた。写真中の特定位置で、 $12 \mu\text{m}$ 間隔のピクセルに注目し、各ピクセルの温度の時間依存性をプロットした結果が**Fig.8(b)**である。輻射率補正を液体、固体状態にて行い、温度上昇を見積もった結果、潜熱による温度上昇は約 200 mK 程度であった。温度は測定対象の熱環境に左右され、絶対測定は困難であるが、球晶先端のみで発熱し、その温度変化を実験的に求めた最初の例である。

赤外線カメラで得られるのは、あくまでも物体からの輻射強度である。輻射強度は、物質の輻射率、反射率、さらに温度、相状態に依存し、かつ温度に対する変化率は物質

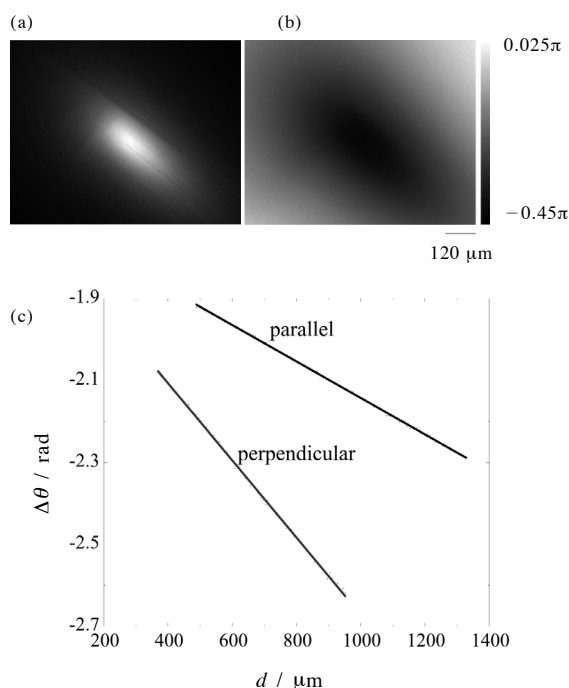


Fig.9 Infrared thermal image of a carbon cloth irradiated with a modulated spot heating at 0.26 Hz. (a) a magnitude image, (b) a phase image, and (c) the plot of phase ($\Delta\theta$) vs. distance d in the parallel and the perpendicular to the carbon fiber direction.

によって異なる。熱分析を行う場合、輻射率の温度依存性とその変化率に注意する必要がある。特に複雑な構造の物体では、ピクセル毎の全画素輻射率補正が必要であり、そのためのアルゴリズム付加装置の開発が進められている。全ピクセルが、光量から正確な温度に変換されることが精密熱分析への関門のひとつである。

2.3 外場変調型

一方、外部から与えた温度変調の拡散を観測することで、熱伝導性に関する情報をスタック画像から得ることができる。

a) ミクロスケールの熱拡散率異方性

光学系で収束させた微弱な変調レーザー光照射により発生させた、 $\sim 5\ \mu\text{m}$ 径の温度波を、カーボクロスに与えたときの表面での伝播を観測した。元の画像は温度プロフィールであるが、クロスの構造に起因した反射率、輻射率の影響を受けるので、以下のような処理を行った。まず、照射点をリファレンスとして、得られた画像スタックをロックイン解析する。すなわち、温度波の減衰振幅、リファレンスからの位相遅れを求めた。室温の寄与を除くため、与えた温度波の振幅のみを抽出して解析している。フォーリ

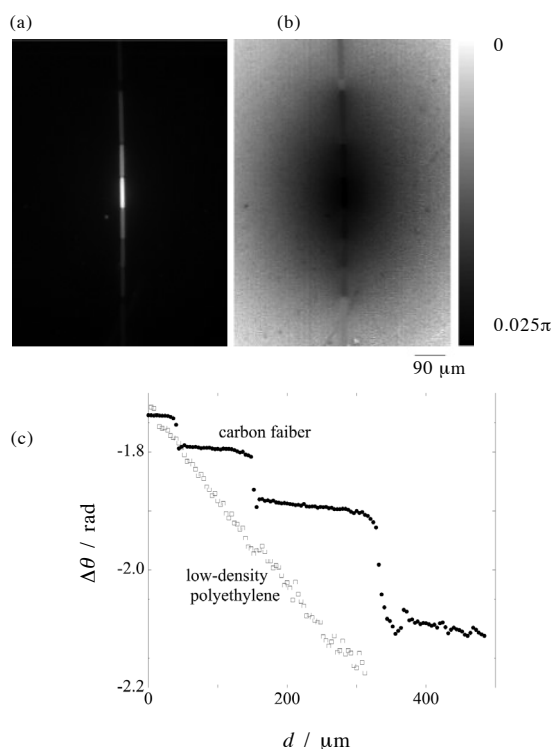


Fig.10 Infrared image of (A) magnitude and (B) phase of a carbon fiber ($10\ \mu\text{m}$ in diameter) embedded in polyethylene thin film, at a frequency 0.03 Hz. C) The surface profile of phase image.

エ変換により振幅像、位相像に変換した結果を **Fig.9** に示す。中心位置の炭素繊維に局所加熱を行うと、温度波の面内方向への伝播が観察されるが、位相像は繊維軸方向にひずんだ分布を示し、繊維配向による熱拡散率の異方性を示した。**Fig.9(c)**は、距離と位相遅れをプロットしたもので、この傾きから、熱拡散率が算定できるが、繊維軸方向とその垂直方向では、4 倍の熱拡散率の差が認められた。

b) 短繊維複合系の熱拡散

上述のように、レーザー光をミクロン径まで集光することにより、例えば繊維 1 本にスポット加熱を行い、繊維軸方向の熱拡散を観測することも可能である。**Fig.10(a),(b)** には、樹脂中に埋め込んだ直径 $10\ \mu\text{m}$ のカーボンファイバー 1 本に、変調したレーザーを照射し、カーボンファイバーと樹脂内を伝播する温度波の熱拡散を観察し、ロックイン法により求めた変調温度画像と位相像を示す。試料は、繊維軸方向へ 1 軸延伸した直後の状態で、繊維は複数の箇所破断し樹脂マトリクスは繊維近傍で塑性変形をおこなっている。**Fig.10(c)** に示す、繊維上と、繊維軸に垂直な方向の樹脂上の位相プロファイルは、大きく異なる勾配を示しており、およそ 500 倍の熱拡散率の差異を示すとともに、

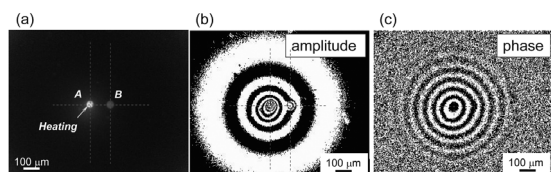


Fig.11 (a) Thermal imaging of a heat wave in a 50 μm thick kapton film launched from the laser structured area. Amplitude (b) and phase (c) distributions are shown. The left side region was illuminated by the laser diode to create heat wave and was modulated at 0.21 Hz frequency.

破断繊維とマトリクスの界面での温度波の伝播の変化を示す。より詳細に、全画素の変調温度分のプロファイル进行分析すると、マトリクスの塑性変形領域の温度伝播の変化が観測されており、このように、力学的な変形による樹脂の物性変化の様子を、ミクロスケールで鋭敏に捉えることが可能であることを確認した。

c) 空孔欠陥のあるフィルムの場合

さらに、試料内部に微細な欠陥や構造がある場合、温度、あるいは温度波の応答を観測することにより、非破壊の状態、欠陥の分布を調べることが可能である。**Fig.11**には、集束フェムト秒レーザーを用いて、芳香族ポリイミドフィルム（カプトン：厚さ50 μm ）内部に2 μm 間隔、40層の空孔を直径50 μm の円柱状に配置した領域を2つ作成し、さらに、フィルム裏面から、約5 μm 径の変調半導体レーザー光を1つの加工域に照射し、温度波を試料内に発生させた (**Fig.11(a)**)。発生した温度波が、試料内部を伝播するとき、もう一方の加工領域は、均一なフィルム内部の微細な欠陥として振る舞い、その付近では、温度波伝播は歪むことが予想される。実際に、0.21 Hz の温度波を与えて、温度波の変調温度像と位相像を等高線表記により、可視化した結果を、**Fig.11(b),(c)**に示す。

均一な部分では、理論が示すとおり、温度波の位相と、振幅の対数は伝播距離に対して線形に減衰し、等高線は歪まないが、加工領域付近では、位相・振幅ともに、等高線は乱れを生じる。このように、可視化熱画像は物性値を得るばかりなく、熱拡散率をプローブとした構造分布評価技術として可能性を持つと考えられる。

3. 熱伝導界面の可視化

熱伝導界面の制御とその定量化は、未だ大きな課題のひとつである。熱イメージングによりその定量化を試みたが、多層系の界面熱伝達を例に取り挙げる。

ポリイミドフィルム（カプトン75 μm ）2枚の間に、同じカプトンフィルム25 μm または、銅箔（10 μm ）を、種々

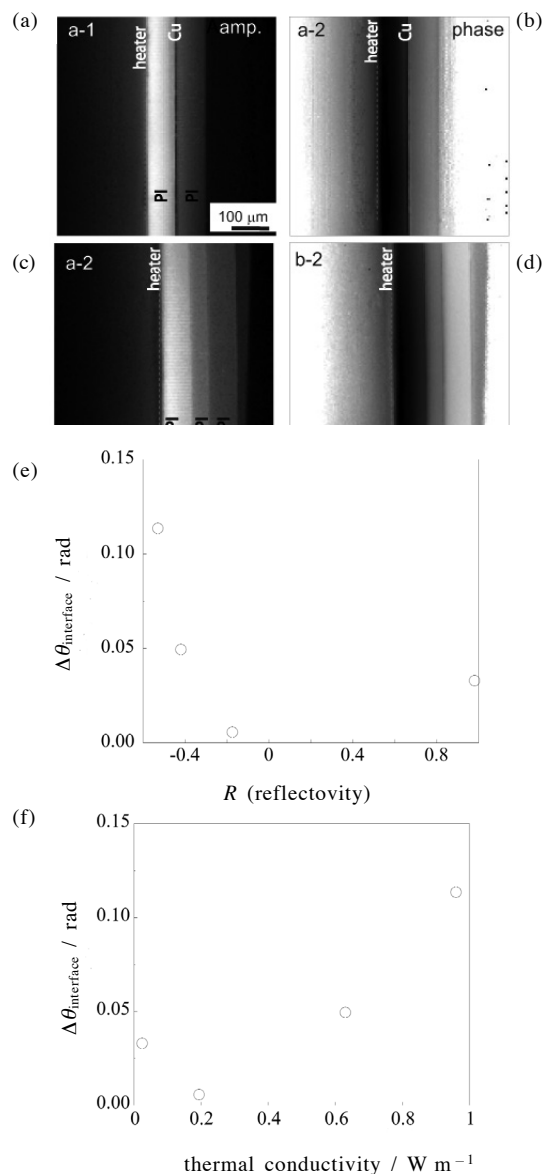


Fig.12 Phase and amplitude image of a sliced section of three layered films; a) amplitude and (b) phase of kapton/Cu/kapton 75/10/75 μm , (c) amplitude and (d) phase of Kapton three layers 75/25/75 μm observed with 0.15 Hz frequency. (e) and (f) the plot of the phase drop on the interface of the layers vs. the reflectivity and the thermal conductivity of the thermal grease in the interface.

の熱伝導性グリースを介して張り合わせた多層系を作成し、フィルム厚さ方向に温度波を与えて、その伝播の様子を、断面から観測し、界面熱伝達を可視化した例を**Fig.12**に示す。高分子フィルムのみの張り合わせの場合は、周波数を

熱拡散長に対して選ぶことにより、第3層まで温度波は伝播するが、銅箔を介する場合には、温度波は、銅箔層内で面方向へ伝播し、第3層の高分子フィルムへの伝播は難しい様子が、位相像、幅像から示される。一方、高分子フィルムのみの場合には、輻射率の影響を受けない位相像のプロファイルを界面近傍で解析することにより、界面の熱伝導性の様子を定量化することが可能である。界面の熱インピーダンスは、界面のグリースや接着剤の熱伝導率のみには依存せず、界面近傍の物質の熱浸透率によって決まる内部反射率と相関を示した。熱伝導界面の可視化と定量性、ロックイン法が有効であることを示している。

4. 熱型センサーの高感度化

赤外線カメラをセンサーとする熱分析は、可視化熱分析として有望であるが、InSb型素子では、高価であるという高いハードルがある。赤外線カメラの普及は近年著しく、その背景のひとつに、マイクロボロメーターと総称される熱型センサーの高感度化（ならびに低価格化）がある。代表格は酸化バナジウム熱型センサーであり、その素子設計は米国Honeywell社によるものであった。高感度化のための素子伝熱・輻射を考慮した設計は現在でも主流であり、水素化アモルファスシリコンを素子とする場合と、大きく市場を2分する。特に近年の素子ピッチの微細化のスピードは目覚ましく、InSb型に迫る性能を有し、熱分析への応用が現実のものとなりつつある。

5. まとめ

赤外線カメラによるミクロスケールのDTA的応用、熱拡散の観察事例を中心に手法のいくつかを紹介した。熱現象は、高次構造と観測するスケールの関係が重要であるから、ミクロからマクロまで種々のスケールでの測定が必要である。熱拡散率や熱伝導率という時間項を含む分布の物性測定は、いずれのスケールにおいても、材料開発における熱現象の制御の観点から、重要な位置を占めると考えられる。その意味で、熱の可視化技術の進展は、種々の方法の開発と同時に、測定値の精度の向上、および輻射率などの補正法の確立が必須であり、熱分析の新時代へ向けて、まさに第一歩を踏み出したものと考えている。

謝 辞

本研究の一部は、科学技術振興機構・産学イノベーション加速事業【先端計測分析技術・機器開発】の助成により行われた。

文 献

- 1) 橋本寿正, 森川淳子, 熱測定 **33**, 58 (2006).
- 2) T. Hashimoto and J. Morikawa, *Jpn. J. Appl. Phys.* **42**, L706 (2003).
- 3) J. Morikawa, T. Hashimoto, E. Hayakawa, and H. Uemura, *Thermosense XXV Proc. SPIE* **5073**, 148 (2003).
- 4) J. Morikawa, K. Yamamoto, and T. Hashimoto, *BIOS2005 Proc. SPIE* **5697**, 282 (2005).
- 5) A. Minakov, J. Morikawa, T. Hashimoto, H. Huth, and C. Schick, *Meas. Sci. Technol.* **17**, 199 (2006).
- 6) C. Pradere, J. Morikawa, J. C. Batsale, and T. Hashimoto, *Quantitative Infra Red Thermography Journal* **6**, 37 (2009).
- 7) J. Morikawa and T. Hashimoto, *Thermosense XXXII Proc. SPIE* **7661**, 76610S-1 (2010).
- 8) J. Morikawa and T. Hashimoto, *9th International Conference on Quantitative Infra Red Thermography*, Vol.9, p.397, Krakov, July (2008).

要 旨

赤外線カメラを用いた熱イメージングの最近の進歩について、ミクロスケール可視化熱分析と、ロックイン法による変調温度波の解析例を中心に、実際の画像データに基づいて概説する。細胞冷凍過程の潜熱解析、有機分子性結晶の相転移、高分子球晶の形成過程等、可視化熱分析は、ミクロスケールの熱の可視化により、従来の熱分析では得られなかった、空間・時間分布を示す。変調温度波による位相像の可視化は熱伝導性の2次元分布を示す。近年のマイクロボロメーター非冷却型センサーの特徴に付いても紹介する。



森川 淳子 Junko Morikawa
東京工業大学理工学研究科, Tokyo
Institute of Technology
TEL.03-5734-2497, FAX.03-5734-2497, E-mail: morikawa.j.aa@m.titech.ac.jp
研究テーマ: 温度波熱分析, 可視化熱分析
趣味: 水泳



橋本 壽正 Toshimasa Hashimoto
東京工業大学理工学研究科, Tokyo
Institute of Technology
TEL.03-5734-2435, FAX.03-5734-2435, E-mail: hashimoto.t.ae@m.titech.ac.jp
研究テーマ: 材料熱物性・装置開発
趣味: クラシック音楽鑑賞