

繊維配向同定システムTEFODの装置と測定事例

株式会社ベテル ハドソン研究所 羽鳥 仁人

1. はじめに

複合材料は、自動車産業や航空宇宙産業や電子機器の分野において、軽量化や高強度化や高熱伝導化が可能な材料として広く使われるようになり、今後さらに利用が拡大されていく材料である。特に、熱可塑性樹脂を母材とし、炭素繊維やセラミックスフィラーを配合して射出成型で製造された材料は、生産性が高く低コストで製品を製造できるため、幅広く普及している。

複合材料はフィラー径や繊維長、樹脂流動スピード、温度分布、金型形状の影響で、異方性や不均質性を有し、製品の配向の偏りやボイド発生が問題になっている。現状の複合材料内部における繊維やフィラーの配向性評価方法は強度試験、X線CTおよび電磁誘導加熱を利用した検知法が用いられているが、試料を切り出す必要性や測定に長時間を要するなど、簡便で実用的な方法がない。コスト及び所要時間の面から短時間で簡便に配向同定を行える装置が求められている。

このような状況に対応するため、当社では熱拡散率測定法を利用した繊維配向同定システムTEFODを販売している。本稿では、TEFODによる繊維やフィラーの配向同定手法の概要及び測定事例を紹介する。

2. 繊維配向同定システムについて

偏った繊維配向がある場合には、熱物性や材料強度に異方性やムラが生じる。特に、射出成型で製造された繊維やフィラーと熱可塑性樹脂を組み合わせた複合材料は製造方法により、フィラーや繊維の偏りが発生しやすい。配向状態や熱拡散率の異方性評価が必要である。TEFODは、炭素繊維の配向状態に応じて、熱拡散の速さに違いが生じる（熱拡散率の高低の異方性）原理を応用して、面内方向の熱拡散率を測定することで繊維配向を可視化する。

温度変化を赤外線カメラで検出することで、一回の測定で面内の全ての方向の熱拡散率すなわち繊維配向が評価できる。例えば、不連続繊維CFRPは、射出成型やプレス成形により製造されることから、繊維長、樹脂流動スピード、温度分布、金型形状の影響で繊維配向の異方性、不均質性を生じる。理想的には繊維は等方的に均一に配向されるため、熱の広がりが均一になる。しかしながら、現実の条件下では、繊維がある方向に多く配向するため熱の広がりも不均一になる。あるいは、場所により繊維

が偏在する場合があります、繊維量が多い場合は熱拡散率が高くなり、繊維量が少ない場合は熱拡散率が低くなる。

また、繊維と樹脂の複合材料に本手法を適用した結果、面内熱拡散率角度分布と、成形法による繊維配向の傾向は定性的に一致していることが確認されている[1]。

3. 繊維配向同定システムの原理

周期加熱源 $P_0e^{i\omega t}$ によって熱拡散率 κ の試料表面をスポット加熱する。加熱点における温度の交流成分は $T_{ac}=T_0e^{i\omega t}$ と表される。周期加熱源 $P_0e^{i\omega t}$ が周辺に誘起する温度伝播は次式で表せる[2]。

$$T_{ac} = \frac{P_0}{4\pi\kappa r c} \cdot e^{-kr+i(\omega t-kr)} \quad (1)$$

c は単位体積あたりの比熱容量、 r は点熱源からの距離、 k は次式で表される温度波の波数である。

$$k = \sqrt{\frac{\omega}{2\kappa}} = \sqrt{\frac{\pi f}{\kappa}} = \frac{1}{\mu}$$

ここで μ は熱拡散長である。よって(1)式における位相は、

$$\theta = -\sqrt{\frac{\pi f}{\kappa}} \cdot r \quad (2)$$

で与えられる。

TEFODでは面内方向の熱拡散率を測定する。この手法を距離変化法と呼ぶ。

図1及び図2に面内方向の測定（距離変化法）の模式図を示す。

(2)式の r を加熱点からの距離 l とし、横軸に距離 l 、縦軸に位相 θ をプロットする。得られたグラフの傾きは $a=-(\pi f/\kappa)^{0.5}$ となるので、熱拡散率 κ は、

$$\kappa = \pi f / a^2 \quad (3)$$

距離の変化に対する位相の変化を求め、その関係から傾き a を導出し、これを上式(3)に代入して熱拡散率 κ を求める。

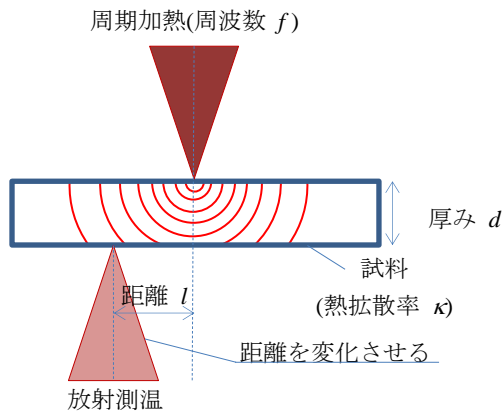


図1 面内方向測定(距離変化法)の模式図

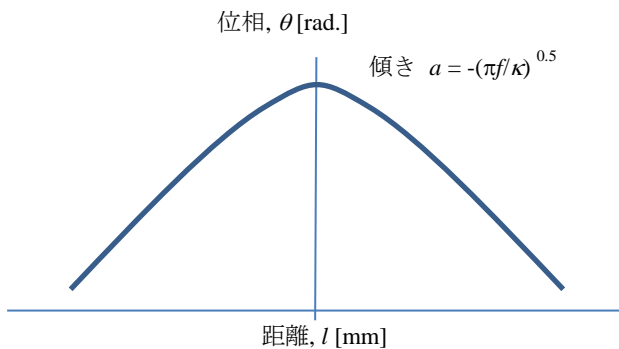


図2 面内方向測定(距離変化法)の測定結果の模式図

4. 測定装置

4. 1. 装置構成

図3に装置の概要を示す。試料を加熱するレーザーと温度分布を観察する赤外線カメラが主な構成要素である。検出素子に赤外線カメラを使うことにより、面内各点の温度変化情報を得ることができ、各点の温度変化の位相と加熱点の位相の差から面内全360°方向の位相遅れ分布が一度に得られることは先に述べた通りである。その位相遅れの直線勾配を求めることで、前節で述べたように、面内の熱拡散率を得ることができる。得られた熱拡散率は、材料内の繊維の含有量と繊維の向きにより異なる。算出された熱拡散率の分布に繊維配向密度関数をフィッティングすることにより、繊維配向状態を知ることができる。また、楕円の関数でフィッティングを行うことでも簡易的に繊維配向状態を知ることができる。本稿では楕円でフィッティングした結果について紹介する。

この装置を応用することで、設計プロセスでは初期トライ時の不具合解析とその結果の設計へのフィードバックを即座に行える利点があり、製造プロセスでは迅速かつ非破壊による分析方法のため製造工程へのインライン化が可能となり、全数計測による不具合流出防止に繋がる。また、不具合発生時には取得したデータをもとに即座に不具合解析に移ることができるため、従来長いと数日かかっていた調査による生産ラインの停止が、本システムにより短時間での通常生産状態への復帰を可能とする。

なお、本技術は名古屋大学で独自に開発された3次元熱

拡散率測定法を応用したものである[3]。

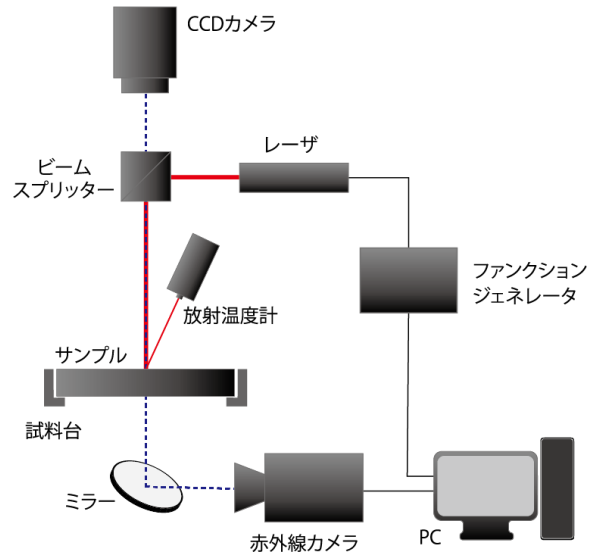


図3 装置概要

4. 2. 楕円分布による繊維配向の定量化

図4に熱拡散率の角度分布を楕円でフィッティングすることにより簡易的に繊維の配向の状態を定量化した図を示す。

フィッティングした楕円の長径を a、短径を b、傾き(長軸の角度)を θ とすると、
 繊維の配向角 = θ
 繊維の配向強度 = a/b
 として定量化することができる。

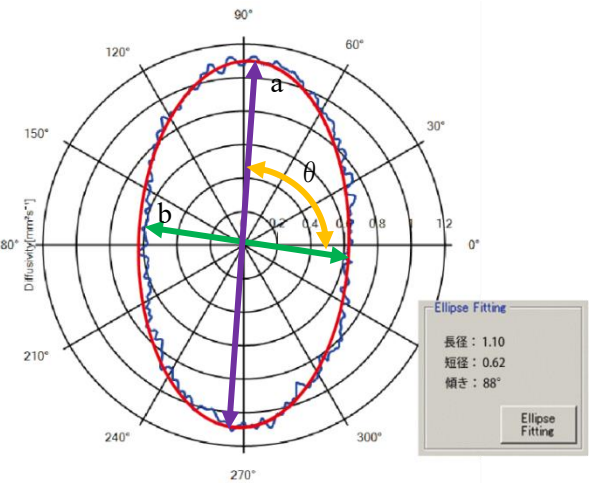


図4 解析結果例 熱拡散率角度分布及び配向強度

4. 3. ロックインサーモグラフィ

ハードウェア的にロックインアンプに搭載された位相検波機能を搭載した赤外線カメラ(以下ロックインサーモグラフィ)を採用すると、解析するためのデータが容易に得られるようになり、解析時間を含む測定時間を短縮することができるが、装置が高価になる。そのため、ロックインサーモグラフィのない赤外線カメラを採用し、ソフトウェアで解析することとした。配向同定および熱拡散率測定の機能を搭載し、短時間で解

析が終了するソフトを開発した。ロックインサーモグラフィは、加熱点直下の輝度の時間変化を基準として、各ピクセルの輝度変化の時間遅れを位相の差として算出した。これにより、ロックインサーモグラフィではない赤外線カメラでもロックインサーモグラフィと同様の結果を得つつ、1点の測定と解析を1分で完了することができるようになった。

5 測定事例

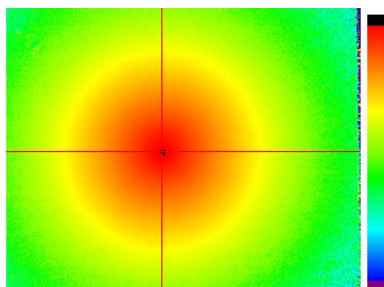
5.1 等方性試料と異方性試料(熱硬化性樹脂と連続繊維)の測定結果比較

等方性試料と異方性試料で熱拡散率分布像を比較する。

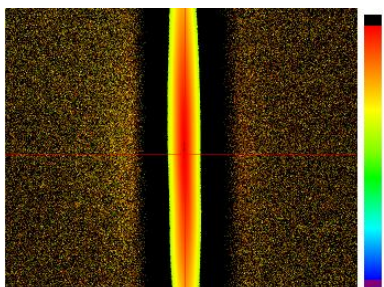
等方性試料として純金属の Ta(タンタル)、異方性試料として一方方向のみに炭素繊維を積層した連続繊維 CFRP を用いた。熱硬化性樹脂と連続繊維(カーボンファイバー)を組み合わせた複合材料である。

等方性試料と異方性試料の赤外線輝度画像を図5に示す。図6に等方性材料と異方性試料の熱拡散率分布画像を示す。赤外線輝度画像では単にそれぞれの材料の輝度分布が観察される。熱拡散率分布画像は、前記した輝度分布画像の時系列データから加熱点を中心とした面方向360度方向の熱拡散率が測定される。

等方性試料は全方向に同じ熱拡散率になるため、ほぼ円の分布になる。これに対し、一方方向のみに炭素繊維を積層した連続繊維 CFRP は一方方向に熱拡散率が高い形状となった。これは繊維の配向に応じて熱の伝わり方に違いが生じているためであり、繊維の配向が熱拡散率の変化を通して評価できることがわかる。

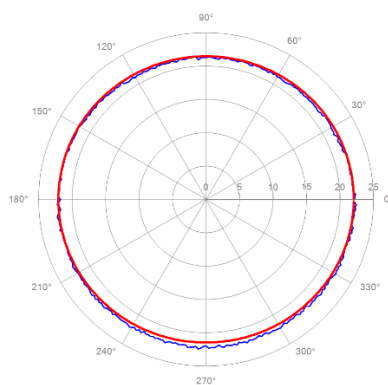


a 等方性試料(タンタル)

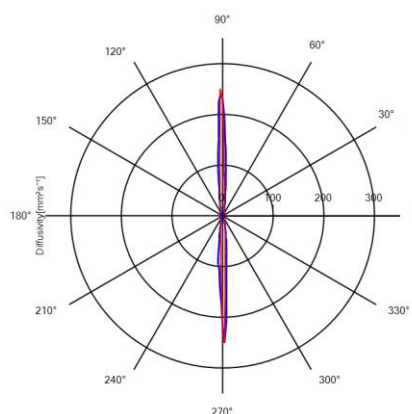


b 異方性試料(連続繊維 CFRP, 一方方向のみに積層)

図5 等方性試料と異方性試料(連続繊維 CFRP, 一方方向のみに積層)の赤外線輝度画像



a 等方性試料(タンタル)



b 異方性試料(連続繊維 CFRP, 一方方向のみに積層)

図6 等方性試料と異方性試料(連続繊維 CFRP, 一方方向のみに積層)の熱拡散率角度分布

5.2 異方性試料(熱可塑性樹脂と不連続繊維)の測定結果比較

異方性試料(熱可塑性樹脂と不連続繊維)の熱拡散率角度分布を図7に示す。

異方性試料として熱可塑性樹脂に不連続繊維(カーボンファイバー)を配合し射出成型により作成したCFRPを用いた。測定した結果は偏った楕円形に近い形となった。この偏りは繊維の配向に応じて熱の伝わり方に違いが生じているためである。また、図6bの連続繊維を一方方向に積層したCFRPの異方性材料に比べ長径と短径の比率が1に近い(円に近い)楕円径となっており、繊維の配向強度が小さいことがわかる。

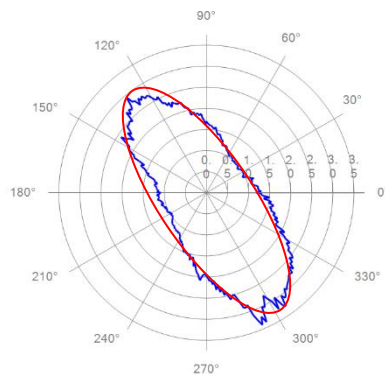


図7 異方性試料(不連続繊維 CFRP, 射出成型)の熱拡散率角度分布

6. まとめ

本データシートでは、熱拡散率測定手法を応用した樹脂内の繊維やフィラーの配向状態及び熱拡散率の評価方法を示した。熱拡散率の分布、射出成型材料の繊維配向など実用的に応用できる事例を示した。本装置が、良否判定や異

常個所の特定を短時間でを行う装置として有効であることが再確認された。より詳細の評価を行う場合は X 線 CT などの他の装置を用いることで相乗効果が発揮される。

主に炭素系複合材料についての評価例を紹介したが、ガラス繊維、セルロースナノファイバー、セラミックスなどをフィラーとして用いた複合材料やの品質評価にも応用できる。

7. 参考文献

- [1] R. Fujita, and H. Nagano, “Novel Fiber Orientation Evaluation Method for CFRP/CFRTP based on Measurement of Anisotropic In-plane Thermal Diffusivity Distribution,” *Composites Science and Technology*, Volume **140**, (2017), pp. 116-122.
- [2] H. Kato, T. Baba, M. Okaji, “Anisotropic thermal-diffusivity measurements by a new laser-spot-heating technique”, *Meas. Sci. Technol.*, **12** (2001) 2074-2080 289.
- [3] 長野方星、藤田涼平、特開2017-3409「配向同定装置、配向同定方法および分布同定装置」

※本データシートに記載された測定結果は典型的な結果を示したもので、個別の測定結果を保証するものではありません。

※本データシートに記載された製品仕様は予告なく変更することがあります。



株式会社ベテル
ハドソン研究所

〒300-0037

茨城県土浦市桜町4-3-18 土浦ブリックビル1階

TEL : 029-825-2620 FAX : 029-307-8451

E-mail : info@btl-hrd.jp

WEB Site : <https://hrd-thermal.jp/>

Facebook : <https://www.facebook.com/bethel.thermal/>