ジュール発熱による電気抵抗変化を利用した CFRP 構造物の層間はく離検知*

高橋 航 圭^{*1}, 轟 章^{*1}, 松崎 亮 介^{*1}

Delamination Detection for CFRP Structure Using Electrical Resistance Change Due to Joule Heating

Kosuke TAKAHASHI^{*2}, Akira TODOROKI and Ryosuke MATSUZAKI

^{*2} Department of Mechanical Sciences and Engineering, Tokyo Institute of Technology,
2-12-1 I I-58 O-okayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8552 Japan

Delamination of CFRP structure is detected by means of electrical resistance change due to Joule heating in the present study. A CFRP beam is heated up by applying electric current through electrodes mounted on the surface. When the CFRP beam is heated up, the thermal expansion at the part with a delamination is different from that at the undamaged part, and the difference of the thermal expansion affects the electrical resistance change with elevated temperature because CFRP has piezoelectricity. The electrical resistance changes between the electrodes are measured using bridge circuits just like using conventional strain gauge. In addition, the effect of electrode's damage on the electrical resistance change is also considered because the quality of the electrode is important to identify delamination. Electrical resistance change due to Joule heating is measured using a cross-plied CFRP beam with a delamination and electrode's damage, and as a result, delamination detection is even possible with a damaged electrode.

Key Words: Smart Material, Nondestructive Inspection, Diagnostic Technique, Delamination, CFRP, Joule Heating, Electrical Resistance Change

1. 緒 言

炭素繊維強化プラスチック (CFRP) は需要が増大しており、航空機分野では一次構造へも適用され始めている。CFRPの適用にあたり問題となっているのは、目視検知困難な層間はく離を生じやすく、これにより圧縮強度が大きく低下することである。そこで、構造健全性診断の効率化を目的として構造ヘルスマonitoringが提案され、負荷ひずみ⁽¹⁾や振動特性データ⁽²⁾を用いた損傷有無判別法の有効性が実証されている。しかし、航空機は運用前の診断が重要であり、運用前の定常状態で同様の構造ヘルスマonitoringを行うには、加振などで意図的に損傷有無の特徴量を抽出しなければならない。一方で、定常状態構造物を対象とした層間はく離検知方法として、層間はく離部の熱伝達の差異を赤外線サーモグラフィで撮影する方法が提案

されている^(3,4)。この手法は従来の超音波、X線探傷と比べ簡便であるが、外部からの熱エネルギー付与は装置上の制約から複雑形状構造物への適用が難しい。

本研究では、構造加熱方法としてジュール発熱を利用し、温度変化に伴うセンサ出力変化からモニタリングを行う。CFRPの強化材である炭素繊維は高い導電性を有し、電流によりジュール熱を発生する。積層板表面に電極を作成するだけで炭素繊維を熱源として利用でき、高価なシステムを用いずに構造内部から効率的に加熱できる。また、炭素繊維はひずみによる電気抵抗変化(ピエゾ抵抗)を有するため⁽⁵⁾、炭素繊維をセンサとして利用する電気抵抗変化法^(6,7)による損傷検知も同時に可能となる。このシステムは汎用ひずみゲージと同じシステムで計測可能なため簡便、低コストであり、既存構造物にも適用できる。電気抵抗変化法の適用に際して、CFRP構造とは無関係な電極部の欠損による出力変化が課題となっている。一般に、電極部の接触抵抗の影響は4電極法によって軽減できるが、CFRPのような強い電気異方性材料では電流負荷電極の欠損も出力に影響すると報告されており^(8,9)、

* 原稿受付 2008 年 4 月 10 日。

^{*1} 正員, 東京工業大学機械物理工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1 I I-58)。

E-mail: ktakahas@ginza.mes.titech.ac.jp

電極欠損はやはり無視できない。

以上の背景より、本研究では CFRP 構造物の運用前診断を目的とし、ジュール発熱を利用した電極欠損に強い新しい電気抵抗変化測定を実施した。層間はく離、電極欠損がジュール発熱時の電気抵抗変化に及ぼす影響を検討し、層間はく離検知の有効性を示した。

2. 温度上昇に伴う電気抵抗変化

2.1 層間はく離と電極欠損の影響 本研究では、層間はく離を検知対象として提案手法の有効性を検証する。層間はく離は繊維方向の異なる層間で生じるため、単純な CFRP 構造として積層構成 [0/90]_s の直交積層梁を用いた。直交積層梁に層間せん断試験を実施することにより、簡単に層間はく離を生じさせることができる。このとき、層間はく離の形状は図 1 に示すような Z 型となる。負荷に伴ってまず 90° 層にマトリクス割れが生じ、き裂が層間に到達すると層間に沿ってはく離が発生する。

CFRP 積層板表面に作成した電極間の電気抵抗値は、構造の比抵抗と寸法により定まる。構造を加熱すると、炭素繊維の性質により比抵抗は低下し⁽⁹⁻¹⁰⁾ 構造の寸法は増大するが、構造内部に層間はく離が存在する状態と無損傷状態とでは、比抵抗変化と寸法変化の挙動は異なる。ジュール発熱時の電気抵抗変化測定による層間はく離検知は、比抵抗変化をもたらす構造の温度分布の変化と、寸法変化をもたらす熱ひずみの変化の検知である。

提案手法は、構造の温度上昇による電気抵抗の変化率を測定するため、電極欠損による初期電気抵抗の変化は影響しない。また、電極欠損が部分的である場合には、ジュール発熱による構造の温度分布、熱ひずみへの影響は小さく、電気抵抗変化出力には現れないと考えられる。したがって、ジュール発熱時の電気抵抗変化率測定により、電極欠損に関わらず層間はく離の有無を検知するこ

Fig.1 Delamination occurred in cross-plyed beam

とができる。ただし、電極が完全にはく離した場合には、この手法も有効ではない。

2.2 解析的検討 層間はく離および電極欠損が、ジュール発熱による CFRP 構造加熱時の温度分布と熱ひずみに及ぼす影響を解析的に検討する。解析には、汎用有限要素法ソフト ANSYS を用いた。解析モデルは、図 2 に示すように CFRP と電極から構成されている。CFRP 部の形状は、長さ 50mm、幅 15mm、厚さ 1.6mm の三次元梁である。積層構成は [0/90]_s であり、一層の厚さを 0.4mm とした。CFRP モデルの表面中央には、二つの電極モデルが並んでおり、長さ 5mm、幅 15mm、厚さ 0.2mm、中心間隔 15mm である。解析モデルには、3 次元 20 節点連成場ソリッド (SOLID226 要素) を使用し、構造-熱電気解析を実施した。節点数 4072、要素数 592 である。CFRP の要素分割は、長手方向が電極間に位置する部分で 0.625mm、それ以外は 2.5mm、幅方向が 3.75mm、厚さ方向が 0.4mm である。電極の要素分割は、長手方向が 2.5mm、幅方向が 3.75mm、厚さ方向が 0.2mm である。解析に用いた CFRP 部の弾性率には、三菱レーヨン製一方向プリプレグ PYROFIL#380 のデータシートを、抵抗率には Abry らの値⁽¹¹⁾ を、熱伝導率、線膨張係数には代表的な一方向強化材の値⁽¹²⁾ を引用した。電極モデルは、電極と CFRP 間の接触抵抗の模擬が目的であるため、CFRP 部の変形を妨げないように弾性率と線膨張係数をゼロに近い小さな値とした。電極の熱伝導率と、長手方向、幅方向抵抗率は銅の物性値を用い、厚さ方向抵抗率 ρ_t は、実験で得た接触抵抗値 $R_c = 106\text{m}\Omega$ 、電極モデルの面積 S_e 、厚さ t_e を用いて次式のように求めた。

$$\rho_t = R_c \frac{S_e}{t_e} \quad (1)$$

解析に用いた各値を表 1 に示す。繊維方向 x 、繊維直交方向 y 、厚さ方向 z とし、括弧内は横弾性係数、ポアソン比の方向である。

加熱硬化後の室温における成形残留応力を算出するため、硬化温度 400K を応力ゼロの状態とし、室温 300K まで冷却した。この室温状態で、図 2

Fig.2 FEM model

Table1 Material properties for FEM analysis

	CFRP			Electrode		
Direction	x (xy)	y (yz)	z (zx)	x (xy)	y (yz)	z (zx)
Young's modulus [GPa]	141	10	10	-		
Shear modulus [GPa]	5.0	0.15	5.0	-		
Poisson's ratio	0.3	0.4	0.3	-		
Resistivity [Ω m]	2.93e-5	4.16e-2	4.82e-2	16.8e-9	16.8e-9	3.98e-2
Thermal expansion coefficient [$10^{-6}/\text{K}$]	0.90	30	30	-		
Thermal conductivity [W/m K]	3.1	0.59	0.59	401		
Heat transfer coefficient [$\text{W/m}^2 \text{ K}$]	10.0					
Stefan-Boltzmann constant [$\text{W/m}^2 \text{ K}^4$]	5.6704e-8					
Emissivity	0.90					

に示す解析モデル表面の破線上における成形残留ひずみを取得した。続いて、ジュール発熱による CFRP 構造の加熱を模擬するため、一方の電極モデル上の中心節点に定電流 2.0A を負荷し、他方の電極モデル上の中心節点を 0V として解析モデルを加熱し、解析モデル表面に室温 300K の空気との熱伝達、輻射の境界条件を与えて解を収束させた。収束後の温度分布、熱ひずみを図 2 に示す解析モデル表面の破線上で取得した。熱ひずみは、ジュール発熱後のひずみからジュール発熱前 300K における成形残留ひずみを差し引くことで算出した。

同様の解析を、幅方向に貫通した層間はく離を持つ貫通はく離モデル、CFRP 部は無損傷で電極のみを欠損させた電極欠損モデルで実施した。層間はく離は、硬化温度 400K の応力ゼロ状態で同一座標に二重に節点を定義して結合を分離し、室温 300K に冷却することで模擬した。層間はく離の位置は解析モデル中心とし、形状は実際に生じる層間はく離を考慮して図 1 で説明した Z 型とした。層間はく離の寸法の影響を調べるため、図 1 に示す層間はく離寸法を 3mm, 5mm, 7mm, 9mm としてそれぞれ解析した。電極欠損は、一方の電極端を図 3 のように 1/8 だけ取り除くことで模擬した。以上により取得した CFRP 表面の熱ひずみ分布、温度分布から層間はく離と電極欠損が電気

抵抗変化へ及ぼす影響を考察した。

続いて、ジュール発熱による層間はく離検知が、実構造において頻発する埋没はく離にも適用可能であることを解析的に確認する。解析方法は貫通はく離モデルと同じであるが、層間はく離を直交積層梁の幅方向に貫通させず、解析モデルの中央に幅方向長さ 7.5mm として図 4 に示すように梁内部に埋没させた。これを埋没はく離モデルと呼ぶことにする。層間はく離寸法は、貫通はく離モデル同様 3mm, 5mm, 7mm, 9mm とした。

2.3 解析結果と考察 解析結果のうち、9mm の貫通はく離モデルと電極欠損モデルの結果を図 5(a)-(d) に示す。図 5(a) は温度分布、(b)-(d) は熱ひずみである。図 5 の横軸は図 2 の解析モデル表面の破線上の位置、(a) の縦軸は無損傷モデルの温度上昇 ΔT_0 に対する温度上昇 ΔT の割合であり、(b)-(d) の縦軸は無損傷モデルの熱ひずみ ϵ_0 に対する熱ひずみ ϵ の割合である。熱ひずみの結果は図 5(b) が繊維方向、(c) が繊維直交方向、(d) が厚さ方向である。

貫通はく離モデルの結果を見ると、図 5(a) の電極間温度分布では層間はく離上部で無損傷モデルよりも高温になっている。図 5(b)-(d) の熱ひずみ分布を見ると、層間はく離上部において繊維方向、繊維直交方向の熱ひずみが大きく変化している。これらの結果を考察すると、まず温度分布の変化は、層間はく離上部から下部への熱伝達の妨げに

Fig.3 FEM model with electrode's damage

Fig.4 FEM model with buried delamination

起因すると考えられる。二つの電極は積層板の片面にあるため、ジュール発熱により積層板の表面が加熱されるが、層間はく離の存在によって構造下部への伝熱が妨げられ、無損傷時と比べ表面部の温度上昇が大きくなるのである。図 5(b)で表面層の繊維方向熱ひずみに増減が見られるのは、層間はく離の形状が Z 型であり左右非対称の変形をしたためと考えられるが、増減の大きさは同程度あり全体的に見ると出力は小さいと言える。図 5(c)の繊維直交方向で無損傷モデルに対して大きなひずみが生じているのは、表面 0° 層の樹脂は線膨張係数の小さい中間 90° 層の炭素繊維に変形が拘束されるが、層間はく離によって 90° 層と分離すると線膨張係数の大きい樹脂が自由に膨張し、繊維直交方向熱ひずみが大きくなるためである。一方で、厚さ方向の熱ひずみは、樹脂の熱膨張のみであり炭素繊維に影響されないので、図 5(d)のように層間はく離有無の影響は小さい。

電極欠損モデルの結果を見ると、図 5(a)の温度

分布は欠損している右側の電極近傍で温度上昇がやや大きくなっており、図 5(b)-(d)の熱ひずみ分布も解析モデルの右側で無損傷モデルより大きい。この温度上昇は、電極欠損による初期電気抵抗の増加によりジュール熱の発生量が大きくなったためであるが、9mm の層間はく離モデルの結果と比べ無損傷モデルとの差異は小さい。熱ひずみが大きくなったのは、温度上昇の影響であり、温度上昇と同様に変化量は小さい。

梁表面における温度分布、熱ひずみの変化を全体的に見るため、図 2 中の CFRP 表面破線上の分布を平均化した結果を図 6 に示す。図 5 で示した層間はく離寸法 9mm の結果に加え、3mm, 5mm, 7mm の結果も同様に平均化して層間はく離寸法の影響も考察した。縦軸は、無損傷モデルの変化量に対する割合を図 2 中の破線上で平均化した値、横軸は温度分布、繊維方向熱ひずみ、繊維直交方向熱ひずみ、厚さ方向熱ひずみである。

温度分布と熱ひずみのうち、層間はく離寸法の

Fig. 5 Comparison of (a) temperature, (b) longitudinal strain, (c) transverse strain and (d) strain in thickness direction on CFRP surface with those of the undamaged model when the model with delamination or electrode's damage is heated up

Fig. 6 Deference of temperature and strain distributions of model with damage from those of undamaged model

影響が大きいのは繊維直交方向の熱ひずみであり、層間はく離寸法の増加にしたがって急激に増加している。繊維直交方向熱ひずみ以外の变化は、層間はく離寸法 9mm のときでも平均 10%以下に留まっており、層間はく離の影響は小さい。電極欠損モデルの結果も 10%以下の变化であり、層間はく離 9mm の結果と区別可能である。すなわち、層間はく離は寸法の増大に伴ってジュール発熱時の繊維直交方向熱ひずみを急激に増大させ、この寸法変化が、測定される CFRP の電気抵抗変化出力に影響する。電気抵抗変化とひずみの変化には比例関係があると考えられることから⁽¹³⁾、解析結果を考慮すると、無損傷時と比較して 10%の電気抵抗変化を閾値とすることで、直交積層梁に生じる 10mm 程度の Z 型層間はく離が検知できることになる。一方で、電極欠損が及ぼす温度分布、熱ひずみへの影響は 10mm 程度を対象とした層間はく離検知に対して小さく、電気抵抗変化法の課題であった電極欠損に左右されずに、層間はく離を検出可能と判断できる。

続いて、埋没はく離モデルの解析結果を図 6 と同じように平均化した結果を図 7 に示す。縦軸、横軸は図 6 と同じである。埋没はく離モデルのもつ層間はく離の面積が貫通はく離モデルと比べて小さいために健全時との差異は小さくなったが、温度分布、熱ひずみに及ぼす層間はく離の影響は、図 6 に示した貫通はく離モデルのときと同じ傾向にある。つまり、埋没はく離であっても、表面層の繊維直交方向熱ひずみが層間はく離寸法増大に伴って急激に増加している。したがって、提案手法により埋没はく離も検出可能であることが確認された。

Fig. 7 Deference of temperature and strain distributions of buried delamination model from those of undamaged model

3. 温度変化に伴う電気抵抗変化の実測

3-1 電気抵抗変化多点同時計測 前項の解析結果で得た層間はく離によるジュール発熱時の熱ひずみの変化を、電気抵抗変化法により実測する。熱ひずみは加熱状態に依存するため、電気抵抗変化率の絶対値変化から層間はく離の有無を判別するには、負荷量と周囲環境（室温、対流等）によって定まる境界条件を測定ごとに一致させねばならないが、これは非常に困難である。

そこで、加熱時の境界条件に左右されずに層間はく離の有無判別をするため、同一構造上で電気抵抗変化率の多点同時計測を実施する。電気抵抗変化率の多点同時計測は図 8 に示す方法⁽¹⁴⁾で行う。この方法により、境界条件が異なる場合でも全ての出力が同様に影響を受けるため、多点での測定結果を比較することで、出力関係の相対的な変化から損傷有無を判別できる。

層間はく離の有無は、ジュール加熱後定常状態になった後の各ブリッジ電圧出力 x_i ($i = A, B, C$) の相対関係で判定する。まず、診断対象のブリッジ出力 $x_{i_monitor}$ を、基準となる無損傷時のブリッジ出力 x_{i_ref} で除し、同一ブリッジ出力の絶対値変化 $\bar{x}_i$ を取得する。

$$\bar{x}_i = \frac{x_{i_monitor}}{x_{i_ref}} \quad (i = A, B, C) \quad (2)$$

続いて、層間はく離発生に伴うブリッジ出力間の相関を取得するため、絶対値変化 $\bar{x}_i$ のうち一つを基準とし、他のブリッジ出力の絶対値変化との比を算出する。本項では、ブリッジ出力 A を基準とする。

$$x'_i = \frac{\bar{x}_i}{\bar{x}_A} \quad (i = B, C) \quad (3)$$

各ブリッジ出力の絶対値変化が境界条件の違いによるものであれば、三つのブリッジ出力に等しく影響するため、式(3)の比は1になるはずである。これに対し、層間はく離によるブリッジ出力の絶対値変化は層間はく離発生部のブリッジ出力に特有であるので、式(3)の比は1から大きく離れるはずである。2章で示した解析結果を踏まえると、電極欠損等の影響により CFRP が無損傷状態でも 10%未満の出力のばらつきが見込まれる。10mm 以上の層間はく離が生じた場合には、繊維直交方向熱ひずみの急増により 10%を大きく上回る出力変化が期待できる。そこで、10mm の層間はく離検知を目的として、10%以上のセンサ出力変化、つまり式(3)の比が 1.1 以上もしくは 0.9 以下のときに層間はく離発生と判断する。

3.2 実験方法 CFRP 梁構造試験片を用いて、ジュール発熱時の構造加熱に伴う電気抵抗変化を測定した。試験片は、三菱レーヨン製一方向 CFRP プリプレグ PYROFIL#380 で成形した $[0_2/90_2]_s$ の直交積層板(250mm×200mm、厚さは 1.7mm 程度)から、長さ 130mm、幅 15mm に切り出した。積層板は、電気炉、真空ポンプ、プレス型治具を用い、130℃、0.7MPa の成形条件を 90 分間一定に保ち成形した。電極は幅 5mm とし、試験片中央から左右

に電極中心間隔 15mm で計七つを電気めっきにより作成した。この銅電極表面にリード線をはんだ付けし、電極保護のためにエポキシ系接着剤でコーティングした。こうして作成された七つの銅電極を図 8 のように三つのブリッジ回路に接続し、三箇所の電気抵抗変化率を同時に測定した。

まず、ジュール発熱による構造の温度上昇を把握するため、電流量と CFRP 温度変化の関係をサーモグラフィ (Mobir@M3) で取得した。試験片のリード線を直流安定化電源 (松定プレジジョン製 PK10-120) に接続し、図 8 中の接地電極で挟まれた三つの電流負荷電極に 0.6A ずつ同時に負荷した。試験片温度が定常となったらサーモグラフィで撮影した。三つの電極への負荷電流量を 0.3A ずつ増やしながら 2.1A までサーモグラフィを撮影し、試験片表面の最高温度を測定した。

続いて、温度変化に伴う電気抵抗変化率測定のため、三つの電流負荷電極に 2.0A ずつ同時に負荷し、試験片温度が定常になるまで待機した。その後、試験片のリード線接続を直流安定化電源から三つのブリッジ回路に切り替え、放熱中の電気抵抗変化率を測定した。ジュール熱による構造加熱中に測定を行わないのは、ブリッジ回路から供給する電気抵抗変化測定のための低電流と、直流安定化電源から供給されるジュール発熱用の高電流が CFRP 構造内で重複し、ブリッジ出力へ影響するのを避けるためである。

試験片温度が室温まで下がり電気抵抗変化の測定を終了したら、ブリッジ回路 B の電流負荷電極の一部を

Fig.8 Measuring method of multiple electrical resistance changes

Fig.9 Electrode's damage

(a) 1.2 A (b) 2.1 A
Fig. 10 Thermograph of Joule heating

Fig.11 Temperature change due to Joule heating

図9のようにカッターで取り除いた。この電極欠損状態で、同様に直流安定化電源による加熱を行い、放熱中の電気抵抗変化を測定した。さらに、層間せん断試験によりブリッジ回路Bの接地電極間に層間はく離を挿入し、同様に電気抵抗変化を測定した。このとき生じた層間はく離の寸法は11.9mmであった。

3.3 実験結果と考察 ジュール発熱によるCFRP梁自己発熱のサーモグラフィを図10に示す。図10は電流量1.2Aと2.1Aの時の結果であり、CFRP抵抗と比べ接触抵抗が高い電極部が高温になっている。サーモグラフィから取得した試験片表面の最高温度と各電流負荷時の消費電力との関係は図11に示すように直線関係であり、接地電極で挟まれた三つの電流負荷電極に2.1Aずつ流したときの試験片表面の最大温度は333Kであった。

電流2.0Aによる加熱後、冷却中の電気抵抗変化率測定結果を図12から図14に示す。図12が無損傷状態、図13が層間はく離をもつ損傷状態、図14が電極欠損状態である。縦軸が電気抵抗変化率、横軸がジュール加熱後の経過時間を示す。いずれも放熱中の温度低下に伴い電気抵抗が増加する結果が得られた。これは、加熱により減少した電気

抵抗が回復したことを意味しており、温度上昇に伴うCFRP電気抵抗の減少が確認された。図12と図13の結果を比較すると、層間はく離をもつときには、層間はく離発生部であるブリッジ出力Bが相対的に小さくなっていることがわかる。一方で、図14の電極欠損状態の出力は、層間はく離発生時に比べ無損傷状態と同様の出力であり、電極欠損はブリッジ出力に影響しないことが確認された。

層間はく離の検知精度を確認するため、ジュール発熱後定常状態における電気抵抗変化率を x_i として、式(3)によりブリッジ出力間の相関を算出した。層間はく離無しで電極欠損のみの状態で測定した図12、層間はく離寸法11.9mmの結果である図13に加え、異なる試験片を用意して5.5mm, 7.5mm, 14.5mmの層間はく離を生じさせた。それぞれの試験片で無損傷状態の測定により $x_{i, ref}$ を取得し、層間はく離発生後のブリッジ出力を $x_{i, monitor}$ として式(3)の値を得た。結果を図15に示す。図15の横軸は層間はく離寸法(0は電極欠損状態)、縦軸は式(3)の値であり、各値が1の時に健全時と相関関係が等しいことを表す。層間はく離寸法5.5mmの時は、 x_B, x_C ともに1に近い値であるが、

Fig. 12 $\Delta R/R$ due to Joule heating in undamaged state

Fig. 14 $\Delta R/R$ due to Joule heating with electrode's damage

Fig. 13 $\Delta R/R$ due to Joule heating with delamination

Fig. 15 Effect of damage on electrical resistance change

層間はく離寸法の増大に伴って層間はく離発生部の出力 x_B' が小さくなっている。層間はく離寸法 11.9mm の時には 0.8 以下になっており、層間はく離有無判別の閾値を下回っている。一方で、層間はく離が生じていない x_C' は 1 に近い値であり、解析結果から取得した閾値で層間はく離有無が判別できている。以上より、直交積層梁に生じる 10mm 程度の層間はく離が、提案手法により検知可能であることが実験的に確認された。

4. 結 言

運用前の定常状態にある CFRP 構造物のヘルスマニタリング手法として、ジュール発熱を利用した電気抵抗変化測定による層間はく離検知手法を提案した。直交積層梁を対象に解析を実施した結果、ジュール発熱時には層間はく離の存在で CFRP 梁表面層の繊維直交方向熱ひずみが増大することが示された。これを踏まえ、実験により同一 CFRP 梁上でジュール発熱に伴う電気抵抗変化率の多点同時測定を実施した。結果、層間はく離発生部の出力は相対的に顕著な変化を示し、繊維直交方向熱ひずみの変化を電気抵抗変化計測で検知できることを確認した。また、これまでの電気抵抗変化計測で課題であった電極欠損が及ぼす温度分布、熱ひずみへの影響は層間はく離に比べて小さく、ジュール発熱時の電気抵抗変化率測定によって電極欠損の有無によらず層間はく離検知可能であることを示した。

文 献

- (1) S. Takeda, Y. Aoki, T. Ishikawa, N. Takeda, H. Kikukawa, "Structural health monitoring of composite wing structure during durability test", *Composite Structures* 79 (2007) 133-139
- (2) Y. ZOU, L. TONG and G. P. STEVEN, "Vibration-based model-dependent damage (delamination) identification and health monitoring for composite structures - a review", *Journal of Sound and Vibration*, Volume 230, Issue 2, 17 February 2000, Pages 357-378
- (3) N.P. Avdelidis et al, "Aircraft composites assessment by means of transient thermal NDT", *Progress in Aerospace Sciences* 40 (2004) 143-162
- (4) J. Rantala, D. Wu and G. Busse, "NDT of polymer materials using lock-in thermography with

water-coupled ultrasonic excitation", *NDT&E International*, Vol. 31, No. 1, pp. 43-49, 1998

- (5) N. Angelidis, C. Y. Wei, P. E. Irving, "The electrical resistance response of continuous carbon fibre composite laminates to mechanical strain", *Composites: Part A* 35 (2004) 1135-1147
- (6) Todoroki A., Tanaka Y., and Shimamura Y., "Delamination monitoring of graphite/epoxy laminated composite plate of electric resistance change method", *Composites Science and Technology*. 2002, 62(9), 1151-1160
- (7) Ueda M., Todoroki A., Asymmetrical dual charge EPCM for delamination monitoring of CFRP laminate, *Key Engineering Materials* 321-323,(2006) pp.1309-1315.
- (8) Akira Todoroki, Junji Yoshida, "Apparent Negative Piezoresistivity of Single-ply CFRP due to Poor Electrical Contact of Four Probe Method", *Key Engineering Materials*, 297-300,2005,610-615
- (9) Joung-Man Park, Sang Il Lee, Jin-Ho Choi, "Cure monitoring and residual stress sensing of single-carbon fiber reinforced epoxy composites using electrical resistivity measurement", *Composite Science and Technology* 65 (2005) 571-580
- (10) D. D. L. Chung, "Thermal analysis of carbon fiber polymer-matrix composites by electrical resistance measurement", *Thermochimica Acta* 364 (2000), 121-132
- (11) J. C. Abry, S. Bochart, A. Chateauminois, M. Salvia, G. Giraud, "In situ detection of damage in CFRP laminates by electrical resistance measurements", *Composite Science and Technology* 59 (1999) 925-935
- (12) D. Hull, "An introduction to composite materials" (1981)
- (13) Akira Todoroki and Junji Yoshida, "Electrical Resistance Change of Unidirectional CFRP Due to Applied Load", *JSME International J., Series A*, 47,3 (2004) pp. 357-364
- (14) Kosuke Takahashi, Akira Todoroki Yoshinobu Shimamura, Atsushi Iwasaki, "Statistical Damage Detection of Laminated CFRP Beam Using Electrical Resistance Change Method", *Key Engineering Materials Vols. 353-358* (2007) pp. 1330-1333