

## 複合材の微小面外変形解析の事例紹介

前田 朝樹<sup>\*1</sup> 滝沢 真実<sup>\*2</sup> 山本 尚樹<sup>\*3</sup> 細谷 昌厚<sup>\*4</sup>  
Maeda Tomoki Takizawa Mami Yamamoto Naoki Hosoya Masaatsu

内部に欠陥がある GFRP（ガラス繊維強化プラスチック）複合材平板の表面に熱を与え、温度差をつけた場合の熱変形解析を有限要素法によって実施したので、その事例を紹介する。内部に欠陥がある GFRP 複合材の表面に熱を与えると、欠陥の存在により熱の伝達の一部妨げられ、微小ではあるが他の部分と比べて変形の様子が異なるため、シェアログラフィ法などを用いて、内部欠陥を検出することが可能になると考えられている。しかしながら、加熱による方法は装置が簡便になるという利点はあるが、内部欠陥が深い位置にある場合には、変形量がレーザーの検出限界よりも小さくなる懸念される。

そこで、欠陥の大きさや欠陥位置（板表面からの距離）をパラメータとした有限要素法による熱変形解析を実施し、欠陥部に生じる微小な変形量を求め、レーザーの検出限界以下となる欠陥の大きさや欠陥位置を確認した。

キーワード：熱変形解析、有限要素法、微小面外変形、亀裂、複合材、GFRP

### 1. はじめに

非接触センシング計測技術のひとつとして、内部に欠陥がある物体に大きな影響を与えない範囲で何らかの外力を加えることにより、欠陥付近に微小な変形を生じさせ、それらにレーザーを照射することによって発生する干渉縞等を計測する技術がある。

このような非接触センシング技術として、レーザーホログラフィ干渉法やシェアログラフィ法<sup>(1)</sup>がある<sup>(2)</sup>。これらは変位量または変位微分をレーザーで捉えるのであるが、この値がレーザーの半

波長より大きくなければならない。本稿では、シェアログラフィ法を例に取り上げる。計測のために対象物に加える外力によって生じる変位微分の大きさが、レーザーの半波長よりも大きいことを事前に確認しておくことは、シェアログラフィ法を効率よく実施するための重要な作業と考える。

本稿では、内部に亀裂のある平板に熱を与え、平板を面外方向に微小変形させた場合、亀裂付近の変位微分がどの程度生じるかを有限要素法を用いた熱変形解析によって確認した。

\*1：計測事業部 計測技術部 解析技術グループ 課長

\*2：検査事業部 技術部 NDE グループ

\*3：計測事業部 計測技術部 解析技術グループ 次長

\*4：技師長

## 2. 加熱法

平板を面外方向に変形させるために平板の片側をヒーターにより加熱した。例えば図1に示す薄い梁の<sup>はり</sup>上面に熱を与えた結果、上面温度が $T_1$ 、下面温度は $T_2$ になり、温度分布は線形に変化しているものとする。この場合、曲率半径 $\rho$ は、

$$\rho = \frac{h}{\alpha \Delta T} \quad (1)$$

ここで $\alpha$ ：線膨張係数

$$\Delta T : T_1 - T_2$$

で示されるように板厚に比例する<sup>(3)</sup>。

次に図1の青線で示したように梁の中央面付近に亀裂があった場合、亀裂内に存在する空気により亀裂から下には温度が伝わりにくくなる。熱を与える時間が数十秒と短い場合、温度差が生じるのはほぼ亀裂から上の部分のみになると考えられるため、亀裂部分の曲げ半径は式(1)の $h$ を $h/2$ としたものになる。亀裂部の変形の模式図を図1に赤線で示した。

また、梁理論によれば純曲げの場合、たわみを $w$ とした場合、

$$\frac{dw}{dx} = \theta, \quad \frac{d^2w}{dx^2} = -\frac{1}{\rho} \quad (2)$$

の関係があるため、曲率半径が一定であれば、

$$\theta = \frac{dw}{dx} = -\frac{1}{\rho} x \quad (3)$$

となって、変位角は線形に減少していくことになる。しかしながら、亀裂があった場合は、図1に赤線で示したように亀裂部の変位が加わるため、この関係が崩されることになる。レーザーによる非接触センシングはこの変位角の乱れを捉えることにより、亀裂の有無を判断することになる。

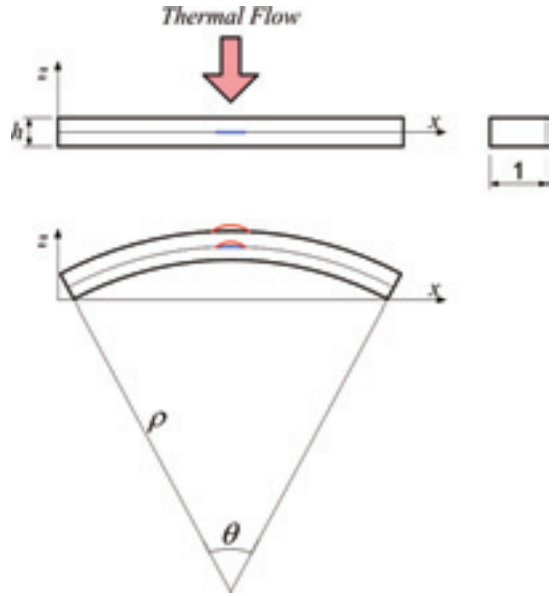


図1 梁の熱曲げ模式図

## 3. 有限要素法による熱変形解析

### 3.1 解析の概要

有限要素法を用いて、複合材（GFRP、ガラス繊維強化プラスチック）の微小面外変形解析を実施した。解析の対象は図2に示すような複合材の平板とし、亀裂が板中央にあるものとした。亀裂の位置は表面から板厚の半分の位置にあるものとし、亀裂の形状は正方形とした。加熱領域は同図の黄色の正方形で示した領域であり、300mm×300mmの正方形とした。また今回の解析では、解析対象領域を500mm×500mmとした。

加熱による面外方向の変形を模擬するために、以下のように解析を2段階に分けた。

(1) ヒーターにより対象部位を加熱しているが、解析では熱流束を与えることにより対象部位加熱を模擬し、時々刻々の温度分布状態を求める（熱伝導解析）。与えた熱流束は最大で $1.0 \times 10^{-2} \text{W/mm}^2$ であり、図3に示すように上昇時間は2秒、保持時間を8秒としその後15秒で0となるように設定した。

(2) 熱伝導解析で得られた温度データを 0.05 秒刻みで解析モデルに入力し、温度差によって生じる変形を計算する（熱変形解析）。解析は 25 秒間を対象とした。

なお、この解析には汎用の有限要素法プログラムである ABAQUS を用いた。

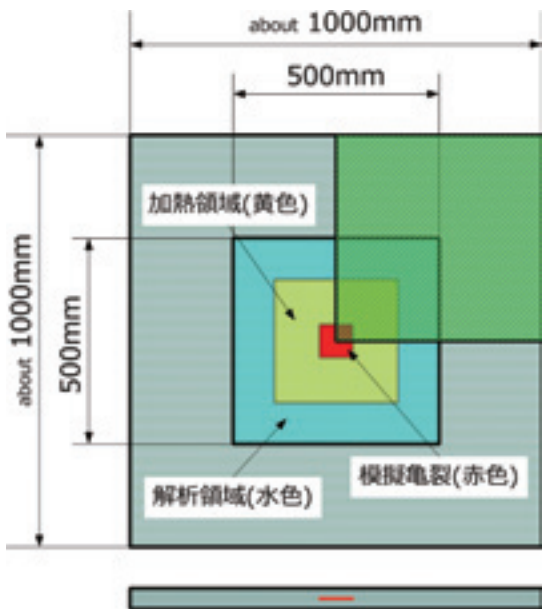


図2 解析の対象とした GFRP 平板の模式図

## 3.2 解析モデル

### 3.2.1 メッシュ分割図

解析に用いたモデルを図4～図6に示す。対象部位のメッシュサイズは板の厚さ方向には6分割、面内方向は亀裂部付近は1.25mmとなるようにし、それ以外の箇所は最大でも13mm程度となるようにした。微小変形であることから精度を高める必要があるため、使用した要素は20節点の6面体要素（高次の立方体要素）とした。

また、図2からわかるように解析領域は上下方向、左右方向に対称形であるため、解析モデルは図2の緑斜線で示した領域をモデル化した。

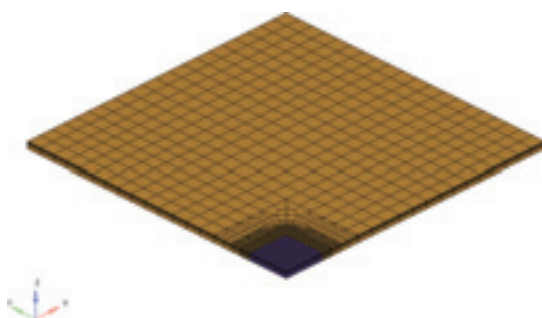


図4 解析に用いたモデル—鳥瞰図

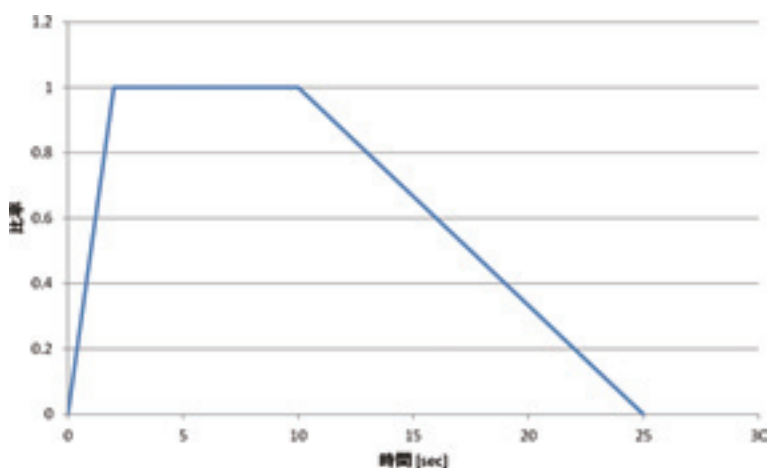


図3 加熱法で複合材の板に与えた熱流束

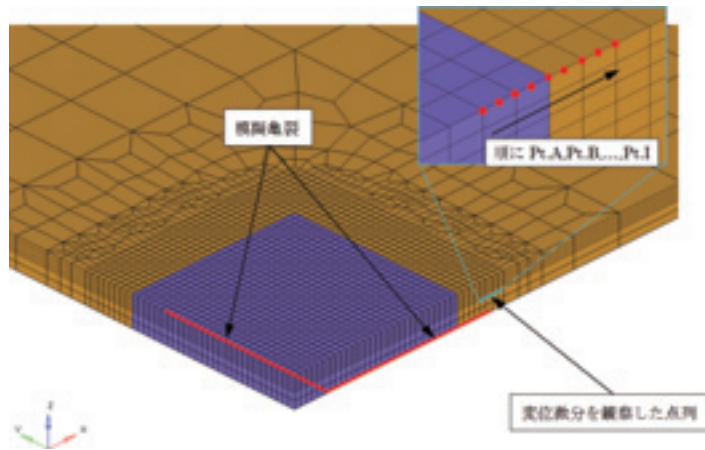


図5 解析に用いたモデル - 図の赤枠部分を拡大したところ

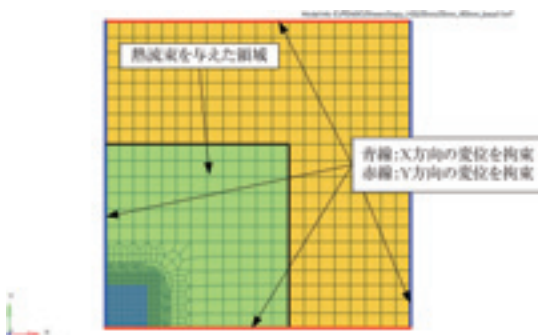


図6 解析に用いたモデル - 平面図

### 3.2.2 物性値

解析で使用した複合材の機械的物性値は、ヤング率は面内方向が約 18GPa、板厚方向は面内方向の約半分、ポアソン比は面内方向が約 0.3、板厚方向を約 0.1 とした。また熱物性値は比熱を約 5000J/(kg·K)、熱伝導率を約 0.4W/(m·K)、密度は 1700kg/m<sup>3</sup> とした。

### 3.2.3 境界条件

解析モデルには、図6に示すように青線上の節点は X 軸方向の変位を拘束し、赤線上の節点は Y 軸方向の変位を拘束した。また、黒丸で示した位置における平板底面の節点には Z 軸方向の変位を拘束した。

### 3.2.4 荷重条件

加熱法における熱伝導解析では、解析の概要で述べたように熱流束を図6に示す領域に与えた。次の熱変形解析では、熱伝導解析で得られた温度を温度荷重として解析モデルの節点に与えた。

### 3.3 解析ケース

以下に示すように3種類の亀裂毎に、板厚を6種類想定した計18種類の解析を行った。

#### (1) 亀裂の大きさ

- ・ 30mm×30mm
- ・ 50mm×50mm
- ・ 70mm×70mm

#### (2) 板厚 (括弧内は亀裂の板表面からの位置)

- ・ 2.25mm (1.13mm)
- ・ 3.0mm (1.50mm)
- ・ 4.5mm (2.25mm)
- ・ 5.4mm (2.70mm)
- ・ 6.0mm (3.00mm)
- ・ 9.0mm (4.50mm)

#### 4. 解析結果

解析で得られた変形図の代表例として、亀裂サイズが70mm×70mm、亀裂位置が表面から1.13mmの場合について、面外方向の変位が最大となった時点での変形の様子を図7に示す。亀裂中央の部分を拡大した図も併せて示したが、これらの図からは亀裂が開いている様子を識別するのは難しい。

解析で得られた、最上面の亀裂中央部に相当する位置と亀裂端部に相当する位置の相対変位をまとめて表1に示す。センシングに使用されるレーザーの波長が656nmの場合、このレーザーによって変位を検出するためには、変位はレーザーの半波長である328nm以上でなければならない。このことより、亀裂サイズが30mm×30mmで、亀裂位置が3.0mmより深いものは相対変位量が $0.175 \times 10^{-4} \text{mm} = 175 \text{nm}$ であるため、熱によって亀裂部が面外方向に変位してもその変位量をレーザーで検出することができないことがわかる。一方で、亀裂サイズが50mm×50mm、70mm×70mm

のものは、亀裂位置が最大の4.5mmでも、レーザーの半波長よりも相対変位量が大きいため、レーザーで変位検出することが可能である。

次に、図5の水色の線上にある節点（線上の節点を同図拡大部の赤丸で示した）の変位を取り出

表1 亀裂中央と亀裂端部における板表面の相対変位

亀裂サイズ [mm×mm]	亀裂深さ [mm]	板厚 [mm]	相対変位 [ $\times 10^{-5}$ mm]
30×30	1.13	2.25	2.701
	1.50	3.00	1.327
	2.25	4.50	0.567
	2.70	5.40	0.416
	3.00	6.00	0.349
50×50	1.13	2.25	7.570
	1.50	3.00	3.700
	2.25	4.50	1.577
	2.70	5.40	1.157
	3.00	6.00	0.973
70×70	1.13	2.25	14.852
	1.50	3.00	7.284
	2.25	4.50	5.183
	2.70	5.40	2.283
	3.00	6.00	1.917
	4.50	9.00	1.606

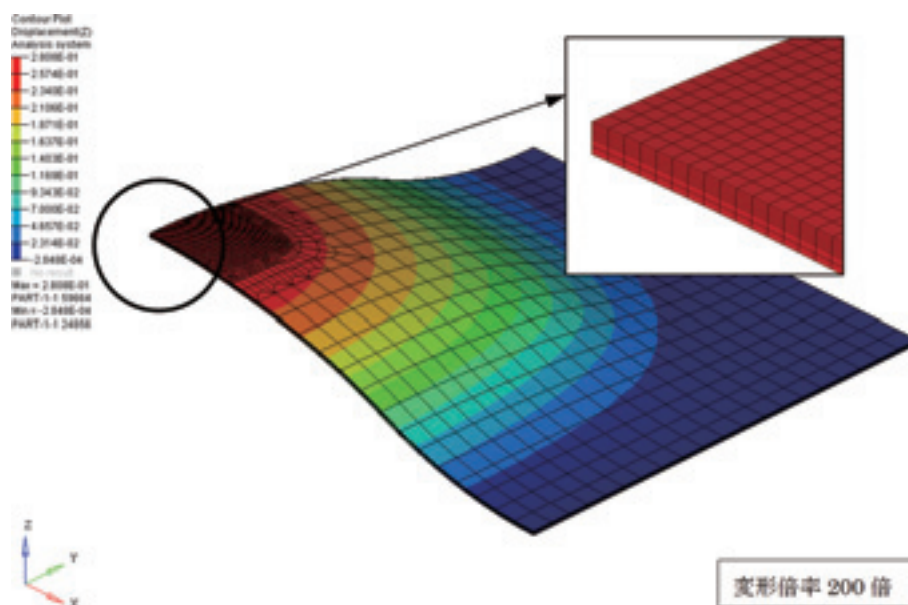


図7 解析結果の例、70mm × 70mm の模擬亀裂、板厚2.25mm



し、各節点間の傾きを以下の式で算出したものをグラフ化した。亀裂がない場合、式 (3) より節点間の傾きのグラフは等間隔となるはずである。グラフ化したもののうち模擬亀裂のサイズが70mm×70mm、亀裂深さが1.13mmと3.0mmのものを図8と図9に示す。また、亀裂がない場合の例として板厚が2.25mmのものを図10に示す。

$$\begin{aligned}
 (\text{節点間の傾き}) &= \frac{(\text{節点間の変位差})}{(\text{節点間距離})} \\
 &= \frac{(\text{節点間の変位差})}{0.625} \quad (4)
 \end{aligned}$$

このグラフを見ると、亀裂深さが浅いものは各グラフの間隔は等間隔となっておらず、模擬亀裂の端部の上部にある節点間 (Pt.D-Pt.E間、Pt.E-Pt.F間およびPt.F-Pt.G)の傾きがやや大きくなっていることがわかる。

一方で、亀裂深さが3.0mmと深くなった場合には、これらのグラフの間隔はほぼ等間隔となっており、亀裂がない場合とほぼ同様であることがわかる。すなわち、亀裂が深くなると亀裂がない場合との違いを判別するのが難しくなると考えられる。

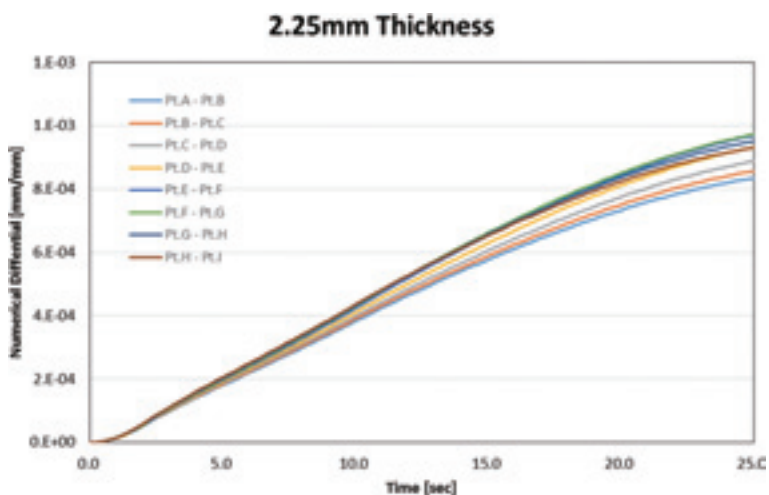


図8 70mm×70mmの模擬亀裂、亀裂深さが1.13mm (板厚=2.25mm)のときの節点間の傾きを示すグラフ

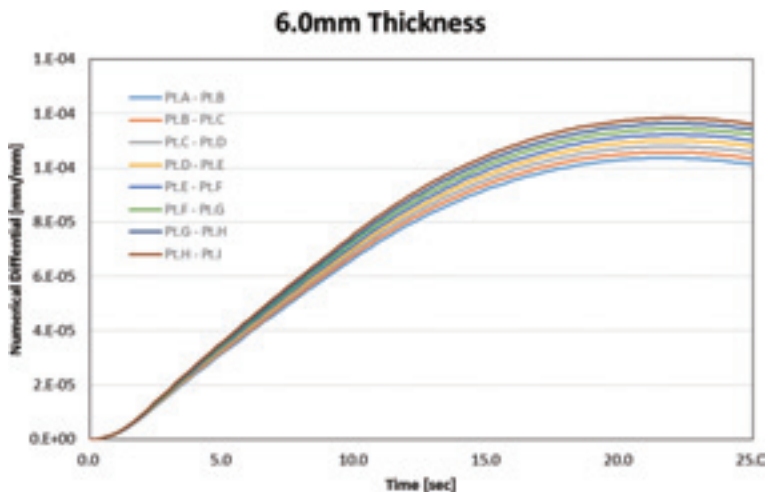


図9 70mm×70mmの模擬亀裂、亀裂深さが3.0mm (板厚=6.0mm)のときの節点間の傾きを示すグラフ

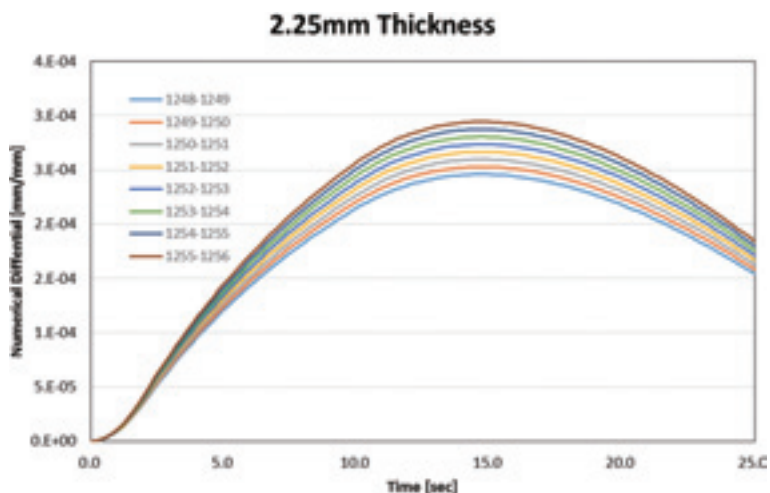


図 10 板厚が 2.25mm、亀裂なしのときの節点間の傾きを示すグラフ

解析で得られた節点間の傾きをまとめたものを表 2 に示す。この表には、併せて隣り合う節点間の傾きの差（例えば Pt.D-Pt.E 間の傾きと Pt.E-Pt.F 間の傾きの差）を算出し、その変動係数（= 標準偏差 ÷ 平均値）を示した。これは各節点間の傾きの差のばらつきを示すひとつの指標である。ちなみに 2.25mm の板厚で亀裂がない場合は 0.64% で

ある。これらの値は今後、実験との比較でどの程度であれば検出可能なのかを調整していく必要があると考える。この作業により、例えば変動係数が 100% 以下のものは検出が難しいとの判断基準とすることができる。

また、この表より変動係数は、亀裂の大きさによらず板厚毎でほぼ一定となっていることがわかる。

表 2 節点間の角度と変位差の一覧

亀裂サイズ [mm×mm]	亀裂深さ [mm]	板厚 [mm]	節点間の角度 [×10 <sup>-4</sup> rad]	変動係数 [%]
30×30	1.13	2.25	5.728~6.663	199.76
	1.50	3.00	1.509~2.024	135.28
	2.25	4.50	0.634~0.872	40.54
	2.70	5.40	0.463~0.630	15.27
	3.00	6.00	0.389~0.527	7.39
	4.50	9.00	0.197~0.265	0.55
50×50	1.13	2.25	5.728~6.663	199.76
	1.50	3.00	2.751~3.316	137.79
	2.25	4.50	1.135~1.397	41.24
	2.70	5.40	0.827~1.006	15.67
	3.00	6.00	0.696~0.840	7.28
	4.50	9.00	0.357~0.423	0.96
70×70	1.13	2.25	8.344~9.300	198.12
	1.50	3.00	4.019~4.599	135.79
	2.25	4.50	1.658~1.928	40.33
	2.70	5.40	1.205~1.390	15.31
	3.00	6.00	1.012~1.161	7.06
	4.50	9.00	0.517~0.585	0.89

## 5. まとめ

本稿では、模擬亀裂を導入した GFRP 複合材平板の表面に熱を加えて面外方向に変位させた場合、その変位量ならびに亀裂付近で変位の傾きにどの程度の変化があるのかを把握するために、有限要素法による熱変形解析を実施した。その結果、以下のことが判明した。

「亀裂サイズが 30mm×30mm かつ、亀裂位置が板表面より 3.0mm 以上深いところにあるものは、加熱法では変形量がレーザーの検出限界よりも小さくなる。」

今回の解析は、まだ実際のものと比較・検証を行っていないため、定性的なものでしかない。今後は計測された結果との比較・検証を行うことで精度の向上を図る必要があると考える。

## 参考文献

- (1) 滝沢真実、前田朝樹、藤原 貢、細谷昌厚：複合材へのシェアログラフィ法の適用事例、一般社団法人日本非破壊検査協会、第 17 回表面探傷シンポジウム講演論文集、2014、pp.1-4
- (2) John W. Newman : Holographic and Shearographic NDT Applications in Aerospace Manufacturing、Materials Evaluation、2005/7、pp.746-750
- (3) 小松敬治：機械構造 弾性力学、森北出版株式会社、2013、pp.188-189



計測事業部  
計測技術部 解析技術グループ  
課長

前田 朝樹

TEL. 045-759-2127  
FAX. 045-759-2534



検査事業部  
技術部  
NDE グループ

滝沢 真実

TEL. 045-791-3523  
FAX. 045-791-3547



計測事業部  
計測技術部 解析技術グループ  
次長

山本 尚樹

TEL. 045-759-2127  
FAX. 045-759-2534

技師長

細谷 昌厚

TEL. 045-791-3550  
FAX. 045-791-3555