

穿孔法によるプラスチック材料の残留応力測定技術

三上 隆男^{*1} 夏井 一樹^{*2} 福本伸太郎^{*3}
Mikami Takao Natsui Kazuki Fukumoto Shintaro

これまで、ASTM E837 規格⁽¹⁾⁽²⁾で規定されている穿孔法による残留応力測定技術について、その関連論文⁽³⁾⁻⁽⁶⁾を参考として解説⁽⁷⁾⁽⁸⁾を行うとともに、当社における穿孔法の検証試験結果について報告⁽⁹⁾⁻⁽¹³⁾してきた。この技術は金属材料だけでなくプラスチック材料にも適用できるが、プラスチック材料に適用する場合は、専用の穿孔装置が必要である。本稿では、当社が導入したプラスチック用穿孔装置とそれによる残留応力測定事例などについて紹介する。

キーワード：残留応力測定、穿孔法、プラスチック、ひずみ解放、ロゼットひずみゲージ

1. はじめに

近年、プラスチック産業は飛躍的に発展し、工業分野への適用が著しく進んでいる。これにより、新しい合成物質が伝統的な材料にとってかわり、構造、形状および生産プロセスの革新的な見直しが行われている。

プラスチック材料がここまで広範囲に使用されるようになった理由は、安価、軽量、加工の容易性および所要の機械的性質を持つ製品の設計が可能なことである。したがって、プラスチック材料の高精度で詳細な機械的特性の把握が、ますます必要となってきた。このような背景があるため、これらの材料の加工プロセスによって生じる残留応力の値を知る必要性が生じてきている。

また、ポリマー射出成型におけるポリマー溶融フロー、圧力分布、不均一温度場および密度分布は全て残留応力の発生原因となりうる。発生した残留応力はプラスチック部品の機械的特性に影響

を与え、最終形状を変化させ、寸法不安定性とクラック発生の可能性を増加させることに加えて、製品の寿命を減少させうる。残留応力は、プラスチック製品内に一般的に存在するが、型設計、材料およびプロセスパラメータを含む広範囲な変量に依存するため、その大きさの予測が困難である。

したがって、プラスチック部品内に存在する残留応力を何らかの方法で測定することが重要である。非破壊法である X 線法はプラスチック材料が非結晶のため適用できない。現時点では、準非破壊法の穿孔法が唯一の有力な測定方法と考えられるが、金属用に用いられている一般的な穿孔装置はドリルをエアタービンにより高速（約 40 万 rpm）で駆動しているため、そのまま使用すると穿孔中にプラスチックが溶融してしまうという問題がある。この問題を解決するため、電気モーターにより低速でドリルを駆動する技術が SINT Technology 社（イタリア）により開発された。当社ではこの装置を導入し、測定サービスを開始したので、その概要を紹介する。

*1：フェロー 博士（工学）、技術士（機械部門）、環境計量士（騒音・振動関係）、一般計量士、JSNDI ひずみ測定・レベル 3

*2：計測事業部 計測技術部

*3：研究開発センター 研究開発グループ

2. 測定システム

ASTM E837 規格では、深さ方向に均一および不均一な残留応力分布を有する測定対象物に対する測定法について規定されている。実務で遭遇するほとんどのケースでは不均一な残留応力分布を有しており、これに関する規定が実務上は最も重要である。そのような背景があり、2013年に不均一な残留応力分布の測定に重点を置く内容にASTM E837 規格が改定⁽²⁾された。

ここで、試験体が金属の場合の不均一な残留応力分布測定の一般的な手順は、下記のとおりである。

(1) 穿孔法用ロゼットひずみゲージを測定対象部品上の測定対象位置に貼り付ける。

通常、図1に示す Type A または Type B のロゼットひずみゲージを用い、たとえば Type A の場合、図2(a)のように試験体の表面に接着する。3方向にひずみゲージが存在するので、3方向の解放ひずみを測定できる。

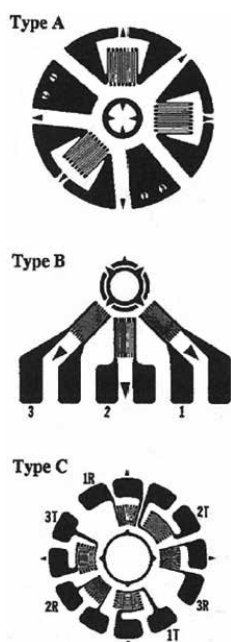


図1 穿孔測定用ロゼットひずみゲージ⁽²⁾

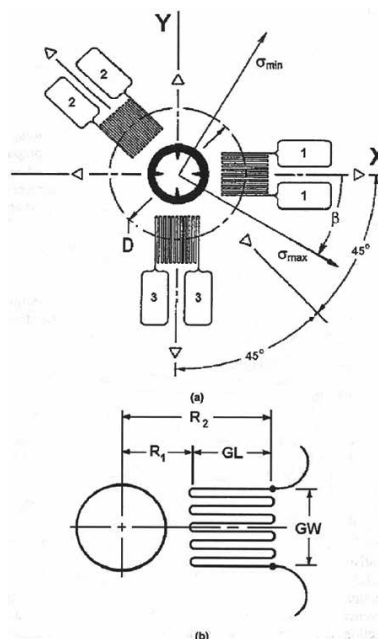


図2 ロゼットひずみゲージの接着⁽²⁾

- (2) ロゼットひずみゲージからのリード線を静ひずみ計に接続する。
- (3) 穿孔装置を試験体上に設置し、顕微鏡を使ってエアタービン駆動のドリル位置をロゼットひずみゲージの幾何中心に合わせる。
- (4) ドリルを前進させて、ゲージのベース（厚さは約0.05mm）を貫通させて試験体の表面に接触させる。これは「ゼロ深さ検知」と呼ばれる重要な手順である。このドリルの接触が電気回路により検知されると、電子制御装置は自動的にドリルの前進を停止するとともに、エアを遮断してドリルの回転を停止する。この深さ位置をゼロ点（試験体の表面）とする。
- (5) ゲージ回路のゼロバランス後、ドリルにより小径の浅い穴（例： ϕ 約2.0mm で深さ1.0mm まで）を穿孔する。
- (6) 穿孔は通常、段階的に0.05mm × 20 ステップで行い、各ステップで3方向の解放ひずみを測定する。

(7) 穿孔後に顕微鏡により実際に穿孔された穴径と偏芯量を測定する。

(8) 測定された各ステップの解放ひずみから ASTM E837 規格で規定されている計算方法にしたがって残留応力とその方向を解析する。

以上が金属用の穿孔装置の場合の概略手順である。プラスチックの場合は、エアタービン駆動のドリルを使用すると、高速回転のため発熱してプラスチックが溶融してしまう。そのため、低速回転のモータ駆動としている。また、プラスチックが不導体であるため、(4) 項の電気回路による「ゼロ深さ検知」ができないため、後述するように特別な方法を採用する必要がある。

図3と図4にそれぞれ、金属用穿孔装置とプラスチック用穿孔装置の外観写真を示す。

プラスチック用穿孔装置の電気モータは回転数が200rpmで、取り外しが可能であり、(3) (7) 項の作業時には顕微鏡に交換する。顕微鏡に交換した状態の写真を図5に示す。なお、空気源や空気配管は不要となり、システムは穿孔装置本体、デジタル静ひずみ計、電子制御装置および制御用PCで構成される。



図4 プラスチック用穿孔装置
(電気モータを取付けた状態)



図5 プラスチック用穿孔装置
(顕微鏡を取付けた状態)



図3 金属用穿孔装置

3. 不均一残留応力の計算法

プラスチック材料の場合も金属の場合と全く同様に計算できる。以下に、計算手順の概要を示す。詳細は文献⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁸⁾を参照していただきたい。

穴の位置に元々存在していた残留応力を、穿孔によって解放されたひずみから2次元線形弾性論に基づく数学的関係を用いて評価する。解放ひず

みは穴内部の材料に元々存在していた残留応力に依存する。

不均一応力分布の場合、 j 穿孔ステップ完了後に測定される表面の解放ひずみは、全ての穿孔ステップ $1 \leq k \leq j$ において元々材料内に存在していた残留応力に依存し、次式で表すことができる。

$$\begin{aligned} \varepsilon_j = & \frac{1+\nu}{E} \sum_{k=1}^j \bar{a}_{jk} \left((\sigma_x + \sigma_y) / 2 \right)_k \\ & + \frac{1}{E} \sum_{k=1}^j \bar{b}_{jk} \left((\sigma_x - \sigma_y) / 2 \right)_k \cos 2\theta \\ & + \frac{1}{E} \sum_{k=1}^j \bar{b}_{jk} (\tau_{xy})_k \sin 2\theta \end{aligned} \quad (1)$$

ただし、

- \bar{a}_{jk} = 等方応力に対する校正マトリクス
 - \bar{b}_{jk} = せん断応力に対する校正マトリクス
 - E = ヤング率
 - j = これまでの穿孔ステップ数 (通し番号)
 - k = 穿孔ステップの順番
 - ε_j = j 穿孔ステップが実行された後に測定された解放ひずみ
 - ν = ポアソン比
 - θ = x 軸からのひずみゲージ角度
 - $(\sigma_x)_k$ = 穿孔ステップ k 内の x 方向垂直応力
 - $(\sigma_y)_k$ = 穿孔ステップ k 内の y 方向垂直応力
 - $(\tau_{xy})_k$ = 穿孔ステップ k 内の xy せん断応力
- なお、校正マトリクス \bar{a}_{jk} の定義 (\bar{b}_{jk} も同様) については図 6 を参照し、その技術的な意味に

については参考文献 (8) を参照していただきたい。

3.1 ひずみデータ

各穿孔ステップにおける 3 方向の累積測定ひずみ $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ をグラフにプロットし、データが全体的に滑らかな傾向であることを確認する。本質的に不規則な値や明確に大きくはずれた値が存在しないかどうかを調べる。必要な場合は場所を変えて穿孔試験を繰り返す。

測定されたひずみ $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ の各組に対して以下の組合せひずみベクトルを計算する。

$$p_j = (\varepsilon_3 + \varepsilon_1)_j / 2 \quad (2)$$

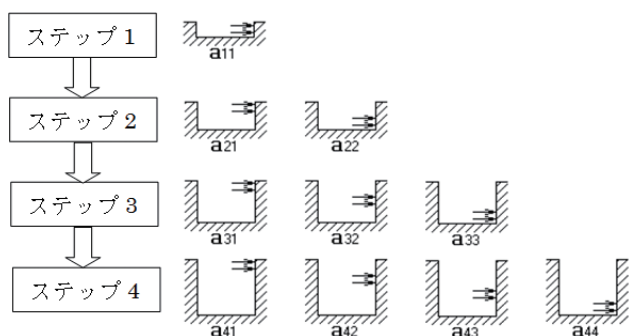
$$q_j = (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)_j / 2 \quad (3)$$

$$t_j = (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)_j / 2 \quad (4)$$

ここで、下付き文字 j は連続する 3 方向測定ひずみ $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ の組に対応する式 (1) で定義した穿孔ステップの通し番号を表す。

3.2 応力計算法

各穿孔ステップ内の残留応力は、積分法 (Integral method) ⁽¹⁾⁽²⁾ を用いて下記のように対応する測定ひずみのマトリクス方程式を解くことによって計算できる。式 (1) にも示されているように、材料の代表的な機械的性質であるヤング率: E とポアソン比: ν が必要となる。



注: 右図は 0.05mm ピッチで 4 ステップ穿孔した状態をピンク色で示している。

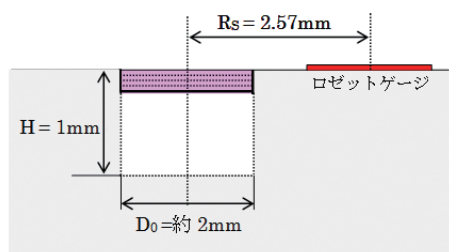


図 6 校正マトリクス \bar{a}_{jk} の定義 (例: ステップ 4 まで穿孔された状態)

$$\bar{a}P = \frac{E}{1+\nu}p \quad (5)$$

$$\bar{b}Q = Eq \quad (6)$$

$$\bar{b}T = Et \quad (7)$$

これらの式で \bar{a} および \bar{b} は校正マトリクスを、 P 、 Q 、 T は k 穿孔ステップ内のそれぞれ、等方応力、 45° せん断応力マトリクスを表し、

$$P_k = ((\sigma_y)_k + (\sigma_x)_k)/2 \quad (8)$$

$$Q_k = ((\sigma_y)_k - (\sigma_x)_k)/2 \quad (9)$$

$$T_k = (\tau_{xy})_k \quad (10)$$

また、組合せひずみマトリクス p 、 q 、 t は式(2)～式(4)に定義されている。

Tikhonov 正規化⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁶⁾によるデータのスムージング計算により最終的に得られた P 、 Q 、 T を用いて、カーテシアン応力を次のように算出する。

$$(\sigma_x)_j = P_j - Q_j \quad (11)$$

$$(\sigma_y)_j = P_j + Q_j \quad (12)$$

$$(\tau_{xy})_j = T_j \quad (13)$$

主応力とその方向を次のように算出する。

$$(\sigma_{\max})_k, (\sigma_{\min})_k = P_k \pm \sqrt{Q_k^2 + T_k^2} \quad (14)$$

$$\beta_k = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{-T_k}{-Q_k}\right) \quad (15)$$

4. プラスチック用穿孔装置による測定事例

試験体は PEEK 450G 樹脂の円板 ($\phi 100\text{mm} \times t 15\text{mm}$) である。この樹脂は高い耐熱性を有し、自動車部品、電気・電子部品に広く普及しているものである。図7に示すように、ロゼットひずみゲージの第1軸(図2参照)は円板の半径方向としている。

4.1 ゼロ深さ検知

プラスチック材料は一般的に不導体であるため、ドリルが表面に到達したことを電気回路で検知する方法は適用できない。そこで、以下の手順によりゼロ深さ検知を実施した。

- (1) 既知の厚さのアルミテープをロゼットひずみゲージの表面に接着する。(図8参照)
- (2) アルミテープを一方の電極として、「ゼロ深さ検知」のシーケンスをスタートし、アルミテープの表面が検知されてドリルが停止した位置を仮のゼロ点とする。
- (3) 穿孔装置のマニュアル機能を用い、アルミテープの厚さにロゼットひずみゲージのベース厚さを加算した距離だけ穿孔する。この手動穿孔は、ボタン操作により制御用 PC 画面に表示されるドリル送り量(0.001mm 単位)を見ながら行う。本事例では、厚さは両者とも 0.05mm なので、0.1mm の手動穿孔を行った。

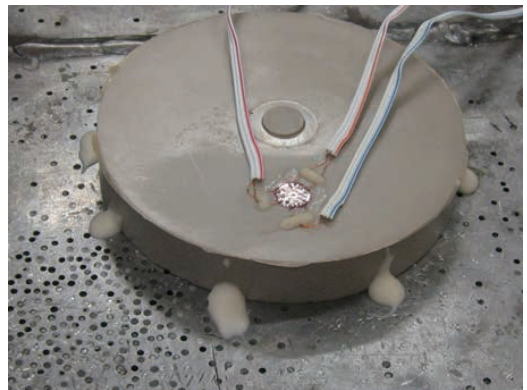


図7 試験体に接着されたロゼットひずみゲージとその配線

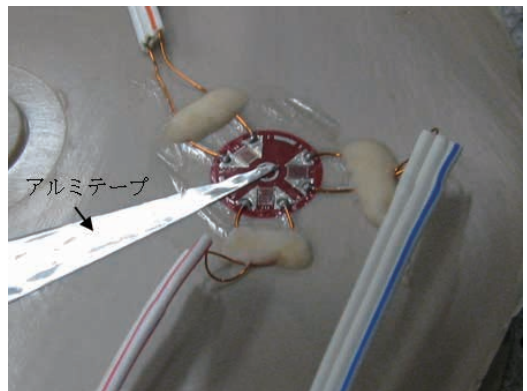


図8 アルミテープの接着

(4) 前項のステップにより、ドリルは試験体の表面に到達したものとみなし、この位置を実際のゼロ点（ゼロ深さ位置）とする。

4.2 解放ひずみの測定結果

穿孔中の様子を図9に示す。切り屑が大量に生成されている。これはプラスチック材料の特徴である。穿孔後のロゼットひずみゲージの様子を図10に示す。本試験では均一応力理論に基づく評価も合わせて実施する目的で、深さ 2.0mm まで 0.05mm ピッチで 40 ステップの穿孔を行った。穿孔後に顕微鏡で穴径を測定した結果は、 $\phi 1.88\text{mm}$ で偏芯量は 0.02mm であった。

穿孔中の解放ひずみは、深さ 0.05mm ごとにデジタル静ひずみ計により自動的に測定するように

設定した。穿孔終了後の制御 PC の画面を図11に示す。測定された3方向の累積解放ひずみ曲線がウインドウの右下に表示されている。

図12に測定された累積解放ひずみを示す。



図10 穿孔後のロゼットひずみゲージ

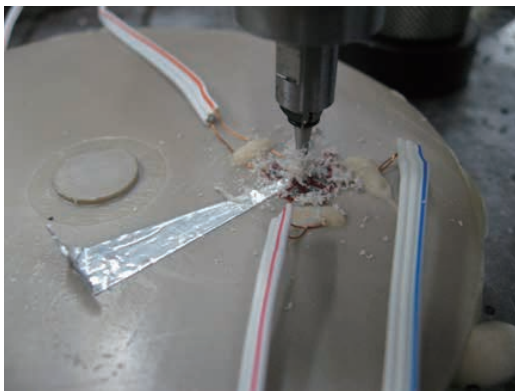


図9 穿孔中の様子

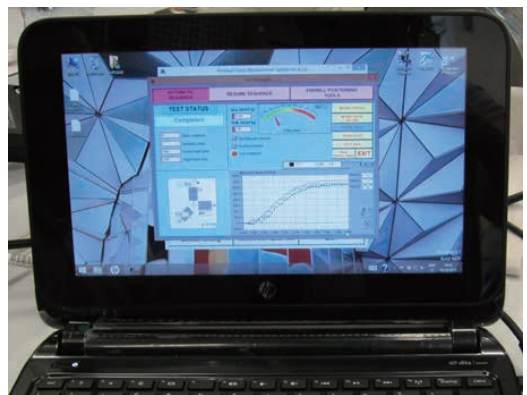


図11 穿孔終了後の制御 PC の画面

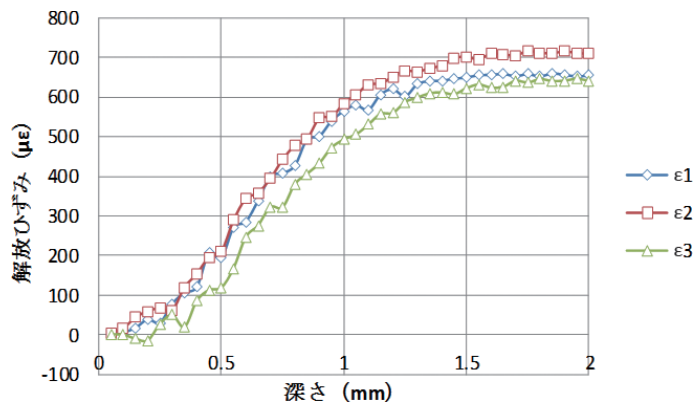


図12 解放ひずみの測定結果

4.3 不均一残留応力の解析結果

試験体（材料：PEEK 450 樹脂）のヤング率： E とポアソン比： ν は、それぞれ、4,000MPa、0.4とし、ASTM E837-13 規格により、深さ 1mm まで残留応力解析した結果を図 13 と図 14 に示す。図 13 は主応力を、図 14 は平面応力の 3 成分を示している。表面近傍で最大主応力は 5MPa で、深さ方向に減少し、1mm 付近では -23MPa 程度となる。図 13 と図 14 から、半径方向と円周方向が主応力方向であり、両者はほぼ等しいことわかる。

材料の引張強度は樹脂メーカーの VICTREX 社のカタログによると、室温で 98MPa であり、強度的には問題となる残留応力レベルではない。

5. おわりに

当社が導入したプラスチック専用の穿孔装置の概要と、ASTM E837-13 規格で規定している深さ方向に不均一な残留応力解析について簡単に解説した。また、一例として、円板試験体（材料は PEEK 450G 樹脂）を測定した結果について報告した。

今後、さまざまなプラスチック材料に適用していく所存であるが、材料によって物性や機械的性質が異なるので、それぞれの材料に応じた適切な穿孔パラメータ（ドリルの送り速度、測定時の遅延時間など）の設定が今後の課題と考えている。

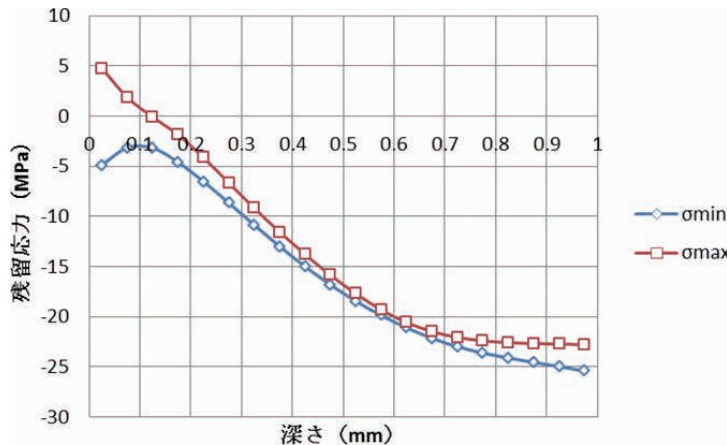


図 13 主応力の解析結果

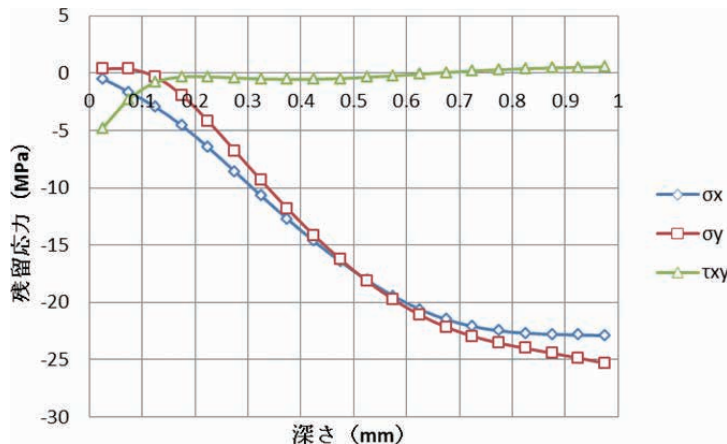


図 14 平面応力 3 成分の解析結果

参考文献

- (1) ASTM E 837-08, Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gauge Method 2008
- (2) ASTM E 837-13a, Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gauge Method 2013
- (3) Technical Note TN-503-6, Measurement of Residual Stresses by the Hole Drilling Strain Gauge Method, Vishay Measurement Group, 2010
- (4) P V Grant, J D Lord, P S Whitehead : The Measurement of Residual Stresses by the Incremental Hole Drilling Technique, Measurement Good Practice Guide No.53, National Physical Laboratory, 2002
- (5) Schajer, G. S. : Measurement of Non-Uniform Residual Stresses Using the Hole Drilling Method, Journal of Engineering Materials and Technology, Vol.110, No.4, 1988, Part I, pp.338-343, Part II, pp.344-349
- (6) Tikhnov, A., Goncharsky, A., Stepanov, V., and Yagola : Numerical Methods for the Solution of III-posed Problems, Kluwer, Dordrecht, 1995
- (7) 三上隆男：穿孔法による残留応力測定法について（その1）、IIC REVIEW、No.48、2012/10、pp.53-65
- (8) 三上隆男、松田昌悟：穿孔法による残留応力測定について（その2）、IIC REVIEW、No.49、2013/04、pp.39-45
- (9) 三上隆男：穿孔法による残留応力測定技術の検証試験（薄肉試験体の場合）、JSNDI SSE シンポジウム（第44回）、2013/01
- (10) 三上隆男、松田昌悟、高久泰弘：穿孔法による残留応力測定技術の検証試験（薄肉試験体の場合）、IIC REVIEW、No.50、2013/10、pp.39-45
- (11) 三上隆男、松田昌悟、高久泰弘、鈴木優平：穿孔ひずみゲージ法による残留応力測定技術（その2）、平成26年度火力原子力発電大会研究発表要旨集、pp.70-71
- (12) 三上隆男、松田昌悟、鈴木優平、高久泰弘：穿孔法による残留応力測定技術の検証試験（厚肉試験体の場合）、IIC REVIEW、No.53、2015/04、pp.37-47
- (13) 三上隆男、松田昌悟、夏井一樹：穿孔法による残留応力測定技術の検証試験（深さ方向に不均一な応力分布の場合）、IIC REVIEW、No.54、2015/10、pp.35-45



フェロー 博士(工学)、技術士
(機械部門)、環境計量士(騒音・
振動関係)、一般計量士、JSNDI
ひずみ測定・レベル3

三上 隆男

TEL. 03-6404-6583
FAX. 03-6404-6044



計測事業部
計測技術部
夏井 一樹

TEL. 045-791-3518
FAX. 045-791-3542



研究開発センター
研究開発グループ
福本伸太郎

TEL. 045-791-3522
FAX. 045-791-3547