

## 穿孔法による残留応力測定について（その2）

三上 隆男<sup>\*1</sup> 松田 昌悟<sup>\*2</sup>  
 Mikami Takao Matsuda Masanori

前回は、ASTM E837-08 規格とその他の穿孔法関連の文献を参照して、均一応力場における穿孔法の基礎理論と穿孔装置の概要について解説した<sup>(1)</sup>。今回は、同規格で規定する不均一応力場の取り扱いと IIC が導入した精密穿孔装置 (ICHD) について解説する。

キーワード：残留応力測定、穿孔法、ICHD、ひずみ解放、ロゼットひずみゲージ、穿孔装置

### 1. はじめに

穿孔法は、世界で最も広く使用されている残留応力測定技術の一つである。測定手順は簡単に要約すると以下の6つの基本ステップから成る。

(図1、図2参照)

- ・ 特殊な3要素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。
- ・ ロゼットひずみゲージからの配線を静ひずみ計に接続する。
- ・ 穿孔装置を測定対象部品上に設置し、そのドリル位置をロゼットひずみゲージの中心に合わせる。

- ・ ゲージ回路のゼロバランス後、ドリルを用いて小径の浅い穴（例：φ2.0mm×深さ2.0mm）をロゼットひずみゲージの幾何中心を通るように穿孔する。

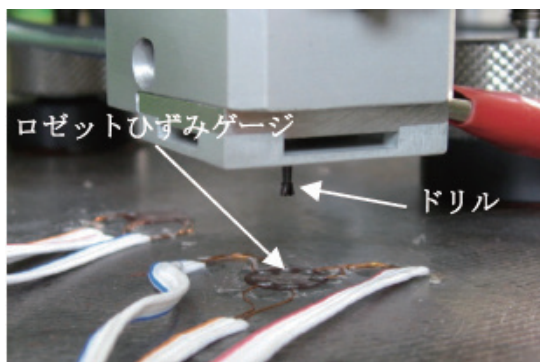


図1 穿孔法

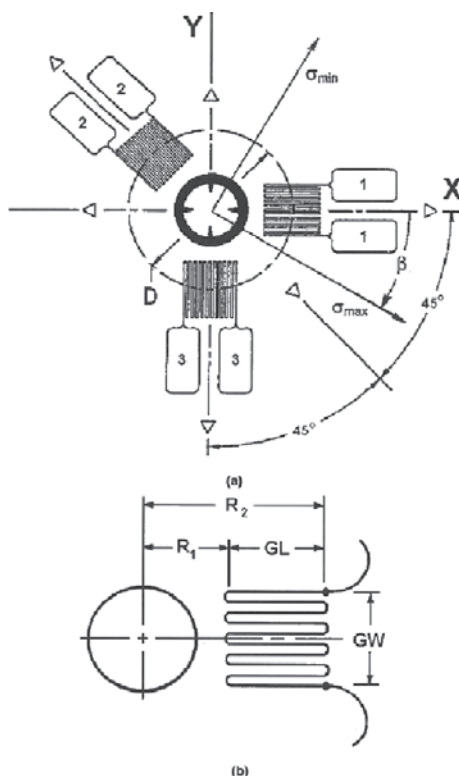


図2 ロゼットひずみゲージの接着<sup>(2)</sup>

\*1：技師長 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 部長

- ・ 穿孔により解放されるひずみを測定する。
- ・ 測定されたひずみから残留応力とその方向を解析する。

これらの手順は比較的容易であり、ASTM 規格 E837-08<sup>(2)</sup>に規定されている。この試験法は面内応力勾配が小さい場所での残留応力分布測定に適用でき、応力が深さ方向にほぼ一定（“均一” 応力）を保っているか（図3 (a) 参照）、または深さ方向にかなりの変化がある（“不均一” 応力）場合（図3 (b) 参照）を対象としている。また、測定対象物は、穿孔径に比べて十分小さい厚さを有する“薄肉”または穿孔径に比べてかなり大きい厚さを有する“厚肉”としている。薄肉の測定対象物に対しては均一応力の測定のみを規定し、厚肉の測定対象物に対しては均一応力および不均一応力の両方について規定している。

本報では、ASTM 規格における不均一応力場の取り扱いと IIC が導入した精密穿孔装置（ICHD）について解説する。

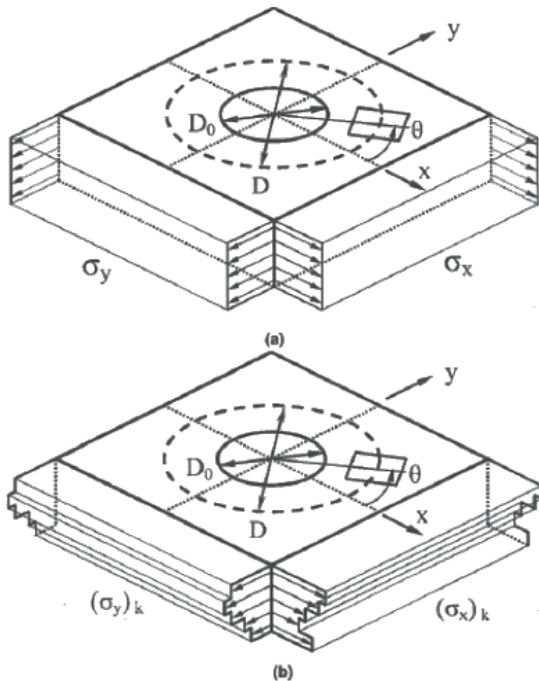


図3 測定対象位置に作用する残留応力<sup>(2)</sup>

## 2. 測定方法

ASTM E837-08 では深さ方向に不均一な残留応力分布を有する測定対象物に対し、図4に示す Type A または Type B のロゼットひずみゲージを用いる場合は、20段階の等しい穿孔ステップで小刻みに穿孔し、ステップ毎に解放されるひずみを測定するよう規定している。

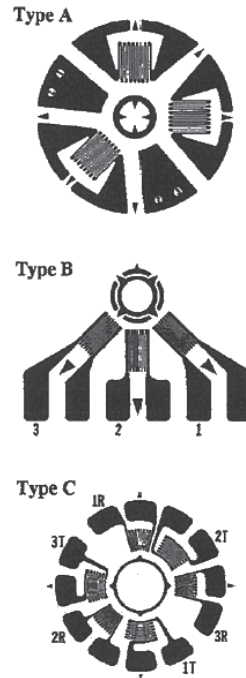


図4 穿孔測定用ロゼットひずみゲージ<sup>(2)</sup>

同規格で規定している最大測定穴深さは 1.0mm であることから、穿孔ステップは 0.05mm (=1.0/20) とする必要がある。この 0.05mm の穿孔ステップを実現するために、穿孔装置は穴の深さを  $\pm 0.004D$  ( $D$  はひずみゲージ円直径) 以内で制御できるものであることを規定している。具体的には、通常よく使用するゲージは  $D = \phi 5.14\text{mm}$  なので、 $\pm$  約 0.02mm 以内の精度で深さ制御できればよいことになるが、0.05mm の要求深さステップに対して 0.02mm の精度では足りない。実際にはミクロン (0.001mm) オーダーで深さ制御できることが望ましい。

### 3. 残留応力計算法

穴の位置に元々存在していた残留応力は、穿孔によって解放されたひずみから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。

不均一応力の場合は、穿孔ステップ  $j$  完了後に測定される表面ひずみの解放は、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ックス

$\bar{b}_{jk}$  = せん断応力に対する校正マトリックス

$E$  = 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

$\varepsilon_j$  =  $j$  穿孔ステップが実行された後に測定された解放ひずみ

$\nu$  = ポアソン比

$\theta$  =  $x$  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

穿孔過程中、最初の穿孔ステップによる材料の除去は、そのステップ内の穴境界で解放される残留応力に直接関係する表面ひずみ解放 (ゲージ位置で) を生じさせる結果となる。2 番目のステップによる材料の除去は、二つの効果を生じる。最初に、構造剛性が変化するため、最初のステップに対応する材料層内で付加的な応力解放があり、それに対応してゲージ部で付加的なひずみ変化が生じる。次に、2

番目のステップの穴境界で解放したひずみにより、ゲージ部で付加的なひずみ変化が生じる。このように、たとえ 2 番目の穿孔ステップが残留応力を含んでいなくても、最初の穿孔ステップに対応する材料層内での付加的な応力解放があるため 2 番目のステップでゲージ部に付加的なひずみ変化が生じる。

したがって、各々の応力深さと穴深さの組合せに対して、表面ひずみ変化と残留応力とを関係づけるために異なる校正マトリックス  $\bar{a}_{jk}$  と  $\bar{b}_{jk}$  が必要となる。

校正マトリックス  $\bar{a}_{jk}$  と  $\bar{b}_{jk}$  は、穿孔ステップ  $k$  内の単位応力に起因する  $j$  穿孔ステップにおける解放ひずみを示す。図 5 は、穴を合計 20 ステップで深さ 1mm (0.05mm×20) まで穿孔する場合において、4 ステップ (0.05mm×4=0.2mm) まで進めた状態の穿孔断面を示す。

この図の物理的な意味を解説すると以下のようになる。

- ・ ステップ 1 では、 $\bar{a}_{11}$  のみが解放ひずみに影響する。
- ・ ステップ 2 では、 $\bar{a}_{22}$  だけでなく、穴の深さの増加によりステップ 1 で穿孔した部分の剛性が変化し、これに起因する解放ひずみ (これを  $\bar{a}_{21}$  と表現する) が重畳するので、結局、ステップ 2 で測定される全解放ひずみは  $\bar{a}_{22}$  と  $\bar{a}_{21}$  の影響を受ける。
- ・ ステップ 3 では、同様に、 $\bar{a}_{33}$  だけでなく、穴の深さの増加によりステップ 1 およびステップ 2 で穿孔した部分の剛性が変化し、これらに起因する解放ひずみ (それぞれ  $\bar{a}_{31}$ 、 $\bar{a}_{32}$  と表現する) が重畳するので、結局、ステップ 3 で測定される全解放ひずみは  $\bar{a}_{33}$ 、 $\bar{a}_{31}$ 、 $\bar{a}_{32}$  の影響を受ける。
- ・ ステップ 4 では、同様に、 $\bar{a}_{44}$  だけでなく、穴の深さの増加によりステップ 1 ~ ステップ 3 で穿孔した部分の剛性が変化し、これらに

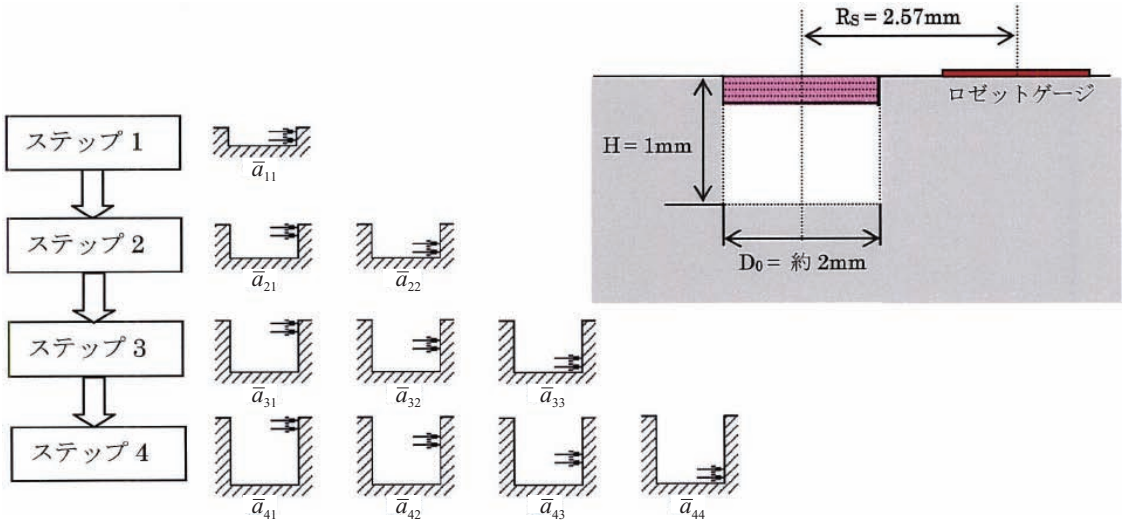


図5 校正マトリクス $\bar{a}_{jk}$ の説明

起因する解放ひずみ（それぞれ $\bar{a}_{41}$ 、 $\bar{a}_{42}$ 、 $\bar{a}_{43}$ と表現する）が重畳するので、結局、ステップ4で測定される全解放ひずみは $\bar{a}_{44}$ 、 $\bar{a}_{41}$ 、 $\bar{a}_{42}$ 、 $\bar{a}_{43}$ の影響を受ける。

ステップ5以降も同様である。

校正マトリクスの値は標準ロゼットパターンに対しては有限要素法（FEM）計算<sup>(5)</sup>によって決定されており、ASTM E837-08規格にそれらの値が一覧表形式で表示されている。

#### 4. 不均一応力の計算手順

##### 4.1 ひずみデータ：

穴深さに対する測定ひずみ $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$ 、 $\varepsilon_3$ 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 $j$ は連続する測定ひずみ $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$ 、 $\varepsilon_3$ の組に対応する穿孔ステップの通し番号を表す。次に、組合せひずみ内の標準誤差を見積る。

$$p_{std}^2 = \sum_{j=1}^{n-3} \frac{(p_j - 3p_{j+1} + 3p_{j+2} - p_{j+3})^2}{20(n-3)} \quad (5)$$

$$q_{std}^2 = \sum_{j=1}^{n-3} \frac{(q_j - 3q_{j+1} + 3q_{j+2} - q_{j+3})^2}{20(n-3)} \quad (6)$$

$$t_{std}^2 = \sum_{j=1}^{n-3} \frac{(t_j - 3t_{j+1} + 3t_{j+2} - t_{j+3})^2}{20(n-3)} \quad (7)$$

ここで、 $n$ はさまざまな穿孔ステップにおけるひずみデータの組番号。加算は $1 \leq j \leq n-3$ の範囲で実行する。

##### 4.2 校正マトリクス：

A型ロゼットを使用する場合は、ASTM E837-08規格のTable 5で与えられる校正データを使用してマトリクス $\bar{a}_{jk}$ と $\bar{b}_{jk}$ を形成する。Table 5の数字は最も一般的に使用されている $\phi 5.14\text{mm}$ 公称サイズのロゼットについて示している。 $\phi 2.57\text{mm}$ ロゼットを使用する場合は、Table 5中の全ての穴と応力深さに0.5を乗じる。 $\phi 10.28\text{mm}$ ロゼットを使用する場合は、全ての穴と応力深さに2を乗じる。

B型ロゼットを使用する場合は、Table 6 で与えられる校正データを使用してマトリクス $\bar{a}_{jk}$ と $\bar{b}_{jk}$ を形成する。C型ロゼットを使用する場合は、代わりにTable 7を使用する。BおよびC型ロゼットは $\phi 5.14\text{mm}$  公称サイズのみが一般に利用できる。

Table 5-7 内の一覧表の数字は穴径 2mm に対応する。測定穴径に一致させるために、数字に(測定穴径/2mm)<sup>2</sup> を乗じて調整する必要がある。

### 4.3 応力計算法：

各穿孔ステップ内の残留応力は積分法<sup>(5)</sup> (Integral method) 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。

$$\bar{\mathbf{a}}\mathbf{P} = \frac{E}{1+\nu}\mathbf{P} \quad (8)$$

$$\bar{\mathbf{b}}\mathbf{Q} = E\mathbf{q} \quad (9)$$

$$\bar{\mathbf{b}}\mathbf{T} = E\mathbf{t} \quad (10)$$

この中で、

$$P_k = \left( (\sigma_y)_k + (\sigma_x)_k \right) / 2 \quad (11)$$

$$Q_k = \left( (\sigma_y)_k - (\sigma_x)_k \right) / 2 \quad (12)$$

$$T_k = (\tau_{xy})_k \quad (13)$$

また、組合せひずみ  $\mathbf{p}$ 、 $\mathbf{q}$ 、 $\mathbf{t}$  は式 (2)-(4) に定義されている。

式(8)は4ステップ穿孔の場合、次式のようになる。

$$\begin{bmatrix} \bar{a}_{11} & & & \\ \bar{a}_{21} & \bar{a}_{22} & & \\ \bar{a}_{31} & \bar{a}_{32} & \bar{a}_{33} & \\ \bar{a}_{41} & \bar{a}_{42} & \bar{a}_{43} & \bar{a}_{44} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{bmatrix} = \frac{E}{1+\nu} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{bmatrix} \quad (14)$$

このマトリクス方程式 (14) を展開すると次のようになる。

$$P_1 = [p_1 E / (1+\nu)] / \bar{a}_{11},$$

$$P_2 = [p_2 E / (1+\nu) - (p_1 \bar{a}_{21})] / \bar{a}_{22},$$

$$P_3 = [p_3 E / (1+\nu) - (p_1 \bar{a}_{31}) - (p_2 \bar{a}_{32})] / \bar{a}_{33},$$

$$P_4 = [p_4 E / (1+\nu) - (p_1 \bar{a}_{41}) - (p_2 \bar{a}_{42}) - (p_3 \bar{a}_{43})] / \bar{a}_{44}$$

実際には前述のように 20 ステップで穿孔するので、 $P_{20}$  まで計算が必要である。

組合せ応力  $\mathbf{Q}$ 、 $\mathbf{T}$  は同様に計算される (ただし、ポアソン比の項は除く)。

積分法の主な利点と制限は以下のとおりである。

- ・ 積分法は非常に不均一な残留応力分布を解析することが可能である。例えば、ショットピーニングされた部品表面近くの残留応力分布を測定できる。
- ・ 上記に示す関係式は  $P_{n+1}$  の計算に応力項  $P_n$  を使用していることを示す。このように、連続する穿孔ステップでの計算が連成しているので、ひずみ測定と穿孔深さ誤差の重量などの原因で、ステップ  $n$  内での応力が過大見積もりされると、ステップ  $(n+1)$  内ではそれに対応して過小見積もりをもたらす効果を生じる。結果として、ステップ  $(n+2)$  内の応力への影響は非常に小さいものとなる。

式 (8)-(10) による応力計算は、用いられる穴深さステップ数が少ないときに有効である。しかし、上述のように、大きな数の穿孔ステップに対しては、測定ひずみの小さな誤差が計算応力に比較的大きな誤差を生じさせる。この効果を減少させるため、規格では Tikhonov 正規化<sup>(7)-(9)</sup> によるデータのスムージング法を規定している。スムージング後のデータが式 (5)-(7) で計算される標準誤差の 5% 以内になるまで、繰返し計算を行う。

このスムージング計算により最終的に得られた  $\mathbf{P}$ 、 $\mathbf{Q}$ 、 $\mathbf{T}$  を用いて、カーテシアン応力を次のように算出する。

$$(\sigma_x)_j = P_j - Q_j \quad (15)$$

$$(\sigma_y)_j = P_j + Q_j \quad (16)$$

$$(\tau_{xy})_j = T_j \quad (17)$$

主応力とその方向を次のように算出する。

$$(\sigma_{\max})_k, (\sigma_{\min})_k = P_k \pm \sqrt{Q_k^2 + T_k^2} \quad (18)$$

$$\beta_k = \frac{1}{2} \arctan \left( \frac{-T_k}{-Q_k} \right) \quad (19)$$

なお、主応力角度  $\beta_k$  の位置判定は表 1 による。

表 1 主応力角度  $\beta$  の位置判定<sup>(2)</sup>

	$Q > 0$	$Q = 0$	$Q < 0$
$T < 0$	$45^\circ < \beta < 90^\circ$	$45^\circ$	$0^\circ < \beta < 45^\circ$
$T = 0$	$90^\circ$	undefined	$0^\circ$
$T > 0$	$-90^\circ < \beta < -45^\circ$	$-45^\circ$	$-45^\circ < \beta < 0^\circ$

### 5. 精密穿孔装置 (ICHD) について

深さ方向に不均一な残留応力分布を測定するためには、上述のように 0.05mm ステップで精密に穿孔できる装置が必要である。IIC はイタリアの S 社から精密穿孔装置を導入した (図 6 参照)。この装置は Incremental Center Hole Drilling (ICHD) 装置と呼ばれ、穿孔ドリルは約 400,000rpm の高速エアタービンで駆動される。ステップモーター制御により、任意に設定した条件 (穿孔ステップ数と深さ増分) で 1 $\mu$ m の深さ分解能で自動的に穿孔する。解放されるひずみは穿孔ステップ毎にデジタル静ひずみ計により自動的に測定し、試験後に ASTM E837-08 対応の専



図 6 精密穿孔装置 (ICHD)

用のソフトウェアを用いて残留応力を解析する。この専用ソフトウェアには Kochelmann による解析法<sup>(10)</sup>も取り入れられている。

穿孔システム全体の写真を図 7 に示す。

本システムにより、ある鋼材を測定した結果の一例を図 8 に示す。この例では、深さ方向の応力分布が均一か不均一かを判定するため、 $\phi$ 2mm で深さ 2mm (0.05mm $\times$ 40 ステップ) まで穿孔した。

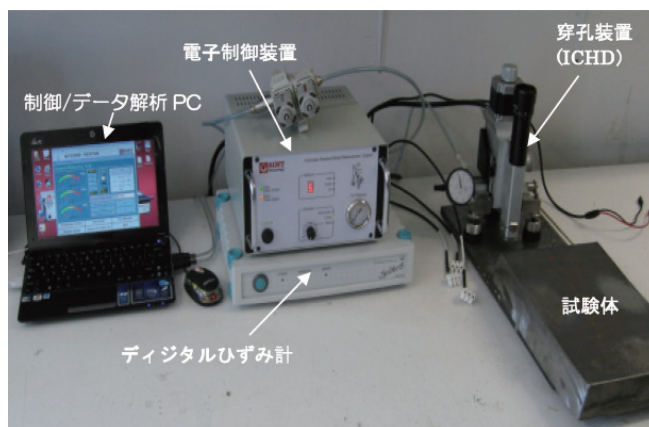


図 7 穿孔システム全体

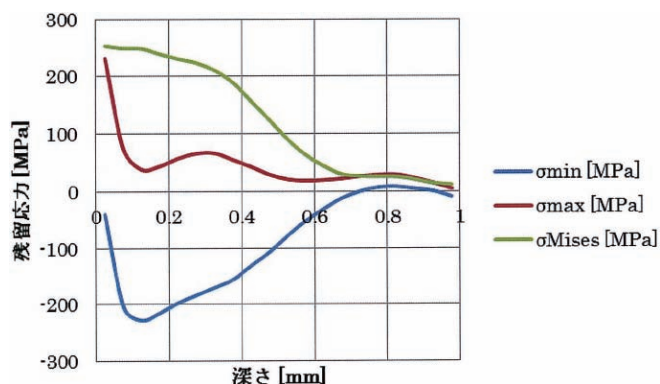


図 8 精密穿孔装置 (ICHD) システムによる測定例

応力は  $\sigma_{max}$ 、 $\sigma_{min}$ 、 $\sigma_{mises}$  で表示している。図から明らかなように、応力分布は不均一であり、表面から深さ 1mm の範囲で残留応力が複雑に分布していることがわかる。 $\sigma_{max}$  は約 230MPa である。

## 6. おわりに

ASTM 規格 E837-08 で規定されている「穿孔ひずみゲージ法による残留応力測定のための標準試験法」について、今回は深さ方向に不均一な応力場を対象として、測定方法と計算方法ならびに精密穿孔装置 (ICHD) の概要について解説した。

## 参考文献

- (1) 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
- (2) ASTM E 837-08, “Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gauge Method”, 2008
- (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: Part I, pp.338-343; Part II, pp.344-349, 1988
- (6) Schajer, G. S., “Application of Finite Element Calculations to Residual Stress Measurements”, Journal of Engineering Materials and Technology, Vol.101: pp.157-163, 1981
- (7) Schajer, G. S., “Hole-Drilling Residual Stress Profiling with Automated Smoothing”, Journal of Engineering Materials and Technology, Vol.129, No.3, pp.440-445, 2007
- (8) Tikhnov, A., Goncharsky, A., Stepanov, V., and Yagola, “Numerical Methods for the Solution of Ill-posed Problems”, Kluwer, Dordrecht, 1995
- (9) Tjhung, T., and Li, K. “Measurement of In-plane Residual Stresses Varying with Depth by the Interferometric Strain/Slope Rosette and Incremental Hole-Drilling”, Journal of Engineering Materials and Technology, Vol.125, No.2, pp.153-162, 2003
- (10) Schwartz, T., Kochelmann, H., “The Hole Drilling Method-The Best Technique for the Experimental Determination of Residual Stresses in Many Fields of Application”, Messtechnische Briefe 29, No.2, pp.33-38, 1993



技師長 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. 03-3778-7965  
FAX. 03-3778-7968



計測事業部  
計測技術部  
部長

松田 昌悟

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