技術紹介

穿孔法による残留応力測定について（その1）

三上　隆男 [*1]
Mikami Takao

構造材料内には一般に残留応力が存在する。残留応力は、その大きさ、符号（引張か圧縮か）によって、有益か不利益かのどちらかになる。一般的に、引張の残留応力は有害であり、すでに存在している残留応力に供用応力が重畳した場合、その残留応力が疲労損傷の支配的な因子となることがある。そのため、種々の方法で残留応力の測定が行われている。ASTM 規格 E837-08 では穿孔法による測定法について、測定対象物の肉厚（薄肉または厚肉）や深さ方向の応力分布（均一または不均一）に応じて種々規定している。

本報では、ASTM 規格とその他の穿孔法関連文献を参照して、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する。

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

1. はじめに

構造材料内の残留応力を測定する方法には多くの種類があるが、測定後の部材の完全さの程度によって3種類のカテゴリ：非破壊法（non-invasive）、部分破壊法（semi-invasive）、完全破壊法（totally destructive）に分類できる。

種々の残留応力測定方法を鋼材に適用した場合について、その測定深さの比較を**図1**に示す[(1)(2)]。

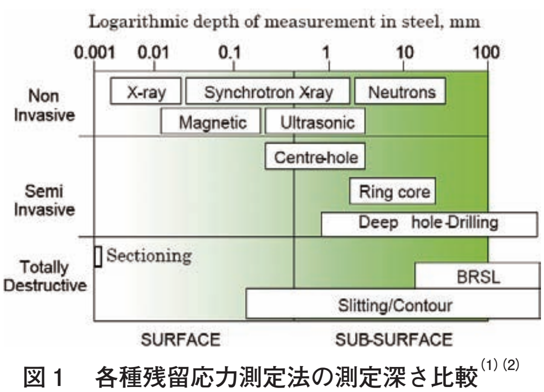

図1　各種残留応力測定法の測定深さ比較[(1)(2)]

非破壊法には通常のX線回折法（X-ray）、中性子回折法（Neutrons）、超音波法（Ultrasonic）および磁歪法（Magnetic）があるが、残留応力の測定深さは表面近傍に限定される。通常の低エネルギーX線（例：IICの非接触残留応力測定装置X3000）では、測定深さは鋼材の場合10～20μmであるが、高エネルギーシンクロトロンX線（Synchrotron X-ray）では約10mmまで測定できると言われている。中性子回折法はさらに透過力が強く、鋼材の場合約40mmまで測定できる。超音波法は、鋼材に適用した場合、2mmの深さまで測定できる。

部分破壊法と完全破壊法は両者とも材料除去により解放されるひずみの測定に依存している。

部分破壊法には穿孔法（Centre Hole Drilling）、Ring Core法およびDHD（Deep Hole Drilling）法がある。穿孔法は2～4mmの深さまで測定可能であり、Ring Core法は15mmの深さまで測定実績がある。DHD法は鋼材の場合、750mmの深さ

*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

まで測定実績がある[2]。

破壊法には古くから広く実施されている切断法（Sectioning）の他に Slitting/Contour 法、BRSL（Block Removal, Slitting and Layering）法、固有ひずみ法などがあり、板厚方向全体の残留応力測定が可能である。しかし、これらの方法は測定対象物を完全に破壊してしまうので、さらに測定を行うことは不可能である。

本報では部分破壊法に属する穿孔法について紹介する。DHD 法については IIC REVIEW No.42「DHD 残留応力測定について」に紹介している[2]。

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六つの基本ステップから成る。

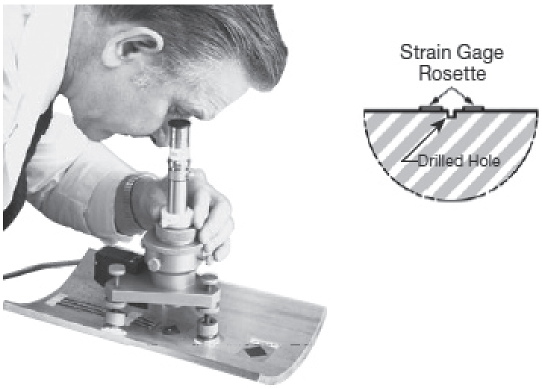

図 2　穿孔法[4]

・ 特殊な 3 要素ロゼットひずみゲージを試験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（**図 2** 参照）を試験部品上に設置し、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、ドリルを用いて小さく浅い穴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。

・ 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[3]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、または深さ方向にかなりの変化がある（“不均一”応力）場合を対象としている。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 規格とその他の穿孔法関連文献を参照して、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する。

2. 穿孔法の基礎理論

残留応力を有する物体に穴をあけると、その位置で応力が解放される。自由表面（この場合は穴表面）に対して垂直なあらゆる面は必然的に一つの主軸であり、その軸上ではせん断および垂直応力はゼロである。穴表面でのせん断応力や垂直応力の除去は、すぐ近くの周囲領域の応力を変化させ、それに対応して試験対象物の表面の局所ひずみを変化させる。これは Mathar が最初に提案した穿孔法の基礎となる原理である[6]。

実際には、**図 3** に示すように穴の周囲に配置された特殊なロゼットひずみゲージにより、穿孔にともなう半径方向の部分解放ひずみを 3 箇所で測定する。

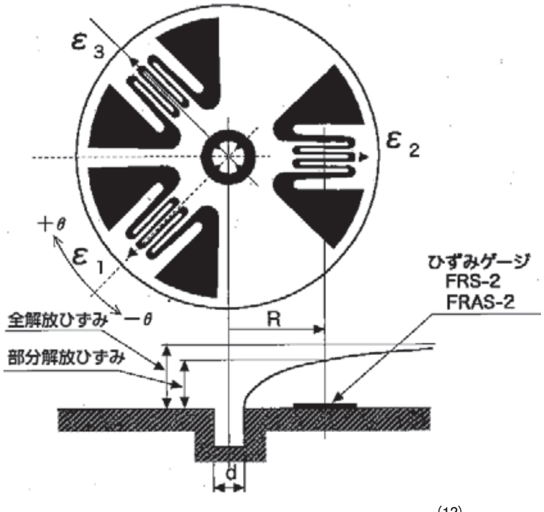

図 3　穿孔法によるひずみの測定[12]

残留応力が肉厚方向に均一に分布する薄肉板を貫通する穴のような単純ケースに対しては、測定された部分解放ひずみから弾性理論に基づいて残留応力を直接計算することができる。

2.1 貫通穴の解析

図 4 の上図（**a**）は、均一残留応力、σ_x を受ける薄板内のある局所的な領域を示している。任意の点 $P\,(R, \alpha)$ の初期応力状態は極座標で表すことができる。

$$\sigma_r^{'} = \frac{\sigma_x}{2}\left(1+\cos 2\alpha\right) \tag{1a}$$

$$\sigma_\theta^{'} = \frac{\sigma_x}{2}\left(1-\cos 2\alpha\right) \tag{1b}$$

$$\tau_{r\theta}^{'} = -\frac{\sigma_x}{2}\sin 2\alpha \tag{1c}$$

図 4 の下図（**b**）は、小さな貫通穴があけられた後のその板の同じ領域を示す。上述のように穴表面のどの場所でも σ_x（垂直応力）と $\tau_{r\theta}$（せん断応力）はゼロでなければならないから、穴近くの応力は今や全く相違するものとなる。このケースの解は、1898 年に G.Kirsch によって得られ、点 $P\,(R, \alpha)$ の応力は以下の式で与えられる[7]。

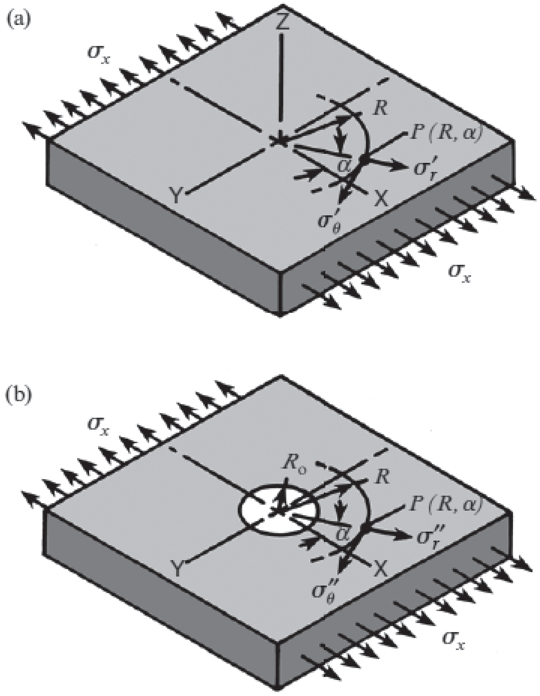

図 4　穿孔前後の点 $P\,(R, \alpha)$ の応力状態[4]

$$\sigma_r'' = \frac{\sigma_x}{2}\left(1-\frac{1}{r^2}\right)+\frac{\sigma_x}{2}\left(1+\frac{3}{r^4}-\frac{4}{r^2}\right)\cos 2\alpha \quad (2a)$$

$$\sigma_\theta'' = \frac{\sigma_x}{2}\left(1+\frac{1}{r^2}\right)-\frac{\sigma_x}{2}\left(1+\frac{3}{r^4}\right)\cos 2\alpha \quad (2b)$$

$$\tau_{r\theta}'' = -\frac{\sigma_x}{2}\left(1-\frac{3}{r^4}+\frac{2}{r^2}\right)\sin 2\alpha \quad (2c)$$

ここで、

$$r = \frac{R}{R_0}\left(R \geq R_0\right)$$

R_0=穴半径

R=穴中心からの任意半径

最終（穿孔後）応力から初期応力を差し引いたものは、応力変化、すなわち穿孔による点 $P\ (R, \alpha)$ の応力解放を与える。それは以下のように表される。

$$\Delta\sigma_r = \sigma_r'' - \sigma_r' \quad (3a)$$

$$\Delta\sigma_\theta = \sigma''_\theta - \sigma'_\theta \quad (3b)$$

$$\Delta\tau_{r\theta} = \tau''_{r\theta} - \tau'_{r\theta} \quad (3c)$$

式（1）と（2）を式（3）に代入すると、緩和（解放）応力の完全な表現が得られる。もし、板材料の機械的特性が均質、等方であり、応力／ひずみ挙動が線形－弾性ならば、これらの式を2軸のフックの法則に代入すれば、点 $P\ (R, \alpha)$ の解放垂直ひずみを求めることができる。結果は以下のように表される。

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E}\left(\Delta\sigma_r - \nu\,\Delta\sigma_\theta\right)$$
$$= -\frac{\sigma_x(1+\nu)}{2E}\left[\frac{1}{r^2}-\frac{3}{r^4}\cos 2\alpha+\frac{4}{r^2(1+\nu)}\cos 2\alpha\right] \quad (4a)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E}\left(\Delta\sigma_\theta - \nu\,\Delta\sigma_r\right)$$
$$= -\frac{\sigma_x(1+\nu)}{2E}\left[-\frac{1}{r^2}+\frac{3}{r^4}\cos 2\alpha-\frac{4\nu}{r^2(1+\nu)}\cos 2\alpha\right] \quad (4b)$$

式（4）は、次式のように任意の半径 $R\ (R \geq R_0)$ 位置の円弧に沿う半径および接線方向解放ひずみが sin 関数で変化することを明示する簡単な形で表すことができる。

$$\varepsilon_r = \sigma_x\left(A + B\cos 2\alpha\right) \quad (5a)$$

$$\varepsilon_\theta = \sigma_x\left(-A + C\cos 2\alpha\right) \quad (5b)$$

式（5）を式（4）と比較すると、係数 A、B 及び C は以下のように定義される。

$$A = -\frac{1+\nu}{2E}\left(\frac{1}{r^2}\right) \quad (6a)$$

$$B = -\frac{1+\nu}{2E}\left[\left(\frac{4}{1+\nu}\right)\frac{1}{r^2}-\frac{3}{r^4}\right] \quad (6b)$$

$$C = -\frac{1+\nu}{2E}\left[-\left(\frac{4\nu}{1+\nu}\right)\frac{1}{r^2}+\frac{3}{r^4}\right] \quad (6c)$$

このように、解放ひずみも穴表面からの距離とともに複雑に変化する。**図5**に、主軸 $\alpha=0°$ と $\alpha=90°$ に沿うひずみ変化がプロットされている。図に示されるように、穴からの距離が増加するにつれて解放ひずみは一般に減少する。このため、ひずみゲージ出力信号を最大化するため、穴の縁に近い場所のひずみを測定することが望ましい。一方、穴の付近では急激な解放ひずみ変化のため測定誤差も増加する。ひずみゲージの設計や適用という実用的な面に加えて、これらを考慮すると、ゲージ位置の最適な半径（R）の選定には解析と実験的研究から、$0.3 < r < 0.5$（$r = R_0/R$、R はゲージの長さ方向中心に対する半径）という実用範囲が確立されている。

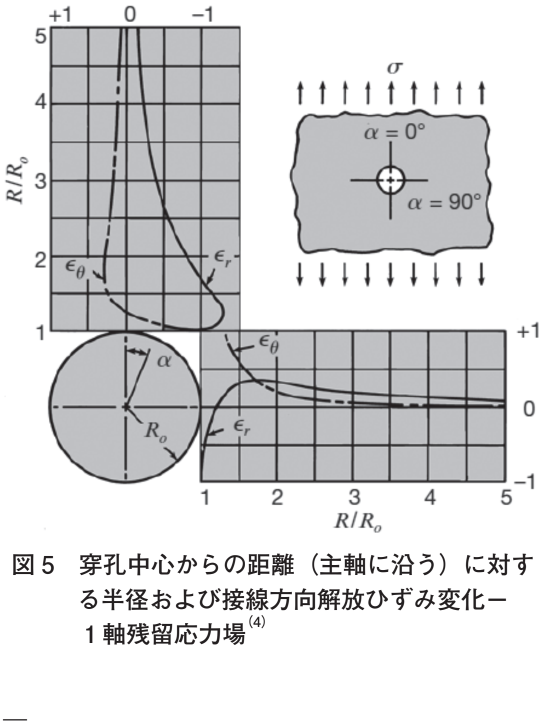

図5　穿孔中心からの距離（主軸に沿う）に対する半径および接線方向解放ひずみ変化－1軸残留応力場(4)

図 5 から α=0°（最大主応力軸方向）では半径方向解放ひずみ ε_r は指定された測定領域で接線方向解放ひずみ ε_θ よりもかなり大きいことがわかる。その結果、残留応力解析用の市販のロゼットひずみゲージは、通常、半径方向解放ひずみ ε_r を測定するためグリッドは半径方向に設計されている。このケースでは、式（5a）のみが直接的に関係する。また、最大主軸に沿う半径方向解放ひずみは初期残留応力に対して反対の符号であることが図から明らかである。これは、式（5a）の中の係数 A、B は常に負であり、α=0° に対しては cos2α=+1 であることによる。

上記の扱いは 1 軸残留応力という単純なケースのみを考慮した。しかしながら、実際には、残留応力は 2 軸であることが多く、二つのゼロでない主応力を有している。この条件は、線形－弾性材料挙動に対して適用できる重ね合わせの原理を解析に適用することにより容易に考慮することができる。再び**図 4** を参照し、1 軸残留応力が X 軸の代わりに Y 軸のみに作用しているとすれば、式（1）と（2）は、cos2α を cos2(α + 90°) または等価な –cos2α に代えることにより適用できる。こうして、Y 方向のみの 1 軸残留応力による点 P (R, α) の半径方向解放ひずみは

$$\varepsilon_r^y = \sigma_y \left(A - B\cos 2\alpha\right) \qquad (7)$$

また、式（5a）に対して式（7）と同様な表記を適用すると

$$\varepsilon_r^x = \sigma_x \left(A + B\cos 2\alpha\right) \qquad (8)$$

両方の残留応力が同時に存在するとき、重ね合わせの原理では式（7）と（8）の代数的な加算が許容され、平面 2 軸残留応力状態による半径方向解放ひずみの一般的な表現は

$$\varepsilon_r = \sigma_x (A + B\cos 2\alpha) + \sigma_y (A - B\cos 2\alpha) \qquad (9a)$$

あるいは、少し違った形式で次式のように表現できる。

$$\varepsilon_r = A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y)\cos 2\alpha \qquad (9b)$$

式（9）は穿孔法による残留応力解析の基礎となる基本的な関係を表す。二つの主応力と角度 α を解析するためには、この関係式を応力解放にともなう測定ひずみの項に変換する必要がある。三つの未知数があるので、完全な解を得るためには三つの独立した半径方向ひずみ測定値が必要である。これら三つの測定結果を式 (9a) または式 (9b) に逐次代入すれば三つの式が得られ、それらから主応力の大きさと方向が同時に解析される。

解放ひずみ測定の一般的な方法は、三つの抵抗線式ひずみゲージを穿孔前に穴の位置を取り囲むようにロゼット形で取り付けるものである。そのようなロゼットの略図を**図 6** に示すが、三つの半径方向ひずみゲージが穴の中心から半径 R の位置がゲージ中心となるように取り付けられる。ゲージ間の角度は任意（しかし、既知でなければならない）であるが、45° 間隔の場合が最も簡単な解析表示となるため、これが市販の残留応力ロゼットの標準となっている。**図 6** に示すように、α_1 は最も近い主軸からゲージ No.1 への鋭角であり、$\alpha_2=\alpha_1+45°$ と $\alpha_3=\alpha_1+90°$ はゲージ番号付の方向に測定した正角度である。**図 6** に示したロゼットのゲージ番号付の方向は時計方向であり、ゲージ No.2 は物理的には 2a に位置しているが、ゲージ番号付の意味では事実上 2b の位置であることに注意しなければならない。ゲージ No.2 の両位置 2a、2b は、後に穴となる領域全体にわたって残留応力が均一であるならば、同じ結果を生じることは式（9a）から明らかである。一般的には、位置 2a は穿孔が偏芯することにより生じる可能性のある誤差を最小化するので、好ましい位置である。しかし、溶接や接合点近くの残留応力測定のようにゲージ設置のスペースが制限され、位置 2a に取り付け不可能な場合は位置 2b としてよい。そうすることにより、測定対象領域に最も接近した位置に穿孔することが可能となる。

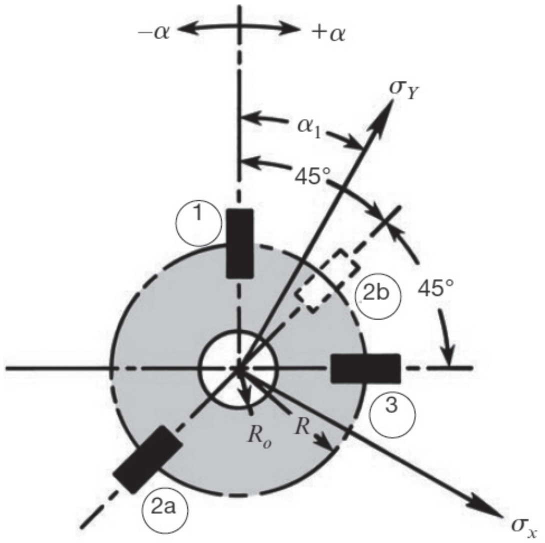

図6　残留応力測定のためのロゼットひずみゲージの配置[(4)]

式（9b）は以下のように、ロゼットの各ゲージに対して1回、角度を変えて合計3回記述することができる。

$$\varepsilon_1 = A\left(\sigma_x + \sigma_y\right) + B\left(\sigma_x - \sigma_y\right)\cos 2\alpha \qquad (10a)$$

$$\varepsilon_2 = A\left(\sigma_x + \sigma_y\right) + B\left(\sigma_x - \sigma_y\right)\cos 2(\alpha + 45°) \qquad (10b)$$

$$\varepsilon_3 = A\left(\sigma_x + \sigma_y\right) + B\left(\sigma_x - \sigma_y\right)\cos 2(\alpha + 90°) \qquad (10c)$$

式（10）を主応力とそれらの方向について連立解析すると、その結果は以下のように表示できる。

$$\sigma_{\max} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{4A} - \frac{1}{4B}\sqrt{\left(\varepsilon_3 - \varepsilon_1\right)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)^2} \qquad (11a)$$

$$\sigma_{\min} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{4A} + \frac{1}{4B}\sqrt{\left(\varepsilon_3 - \varepsilon_1\right)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)^2} \qquad (11b)$$

$$\tan 2\alpha = \frac{\varepsilon_1 - 2\varepsilon_2 + \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}$$

ここで、α は最も近い主軸からゲージNo.1への角度（正の場合はゲージ番号付方向、負の場合はその反対方向）である。

ゲージNo.1から最も近い軸への角度をより好都合に定義するために α の方向を逆にし、上記の符号規約を維持した場合、

$$\tan 2\alpha = \frac{\varepsilon_1 - 2\varepsilon_2 + \varepsilon_3}{\varepsilon_3 - \varepsilon_1} \qquad (11c)$$

式（11）について以下の点に注意する必要がある。これらの式は一般のロゼットひずみゲージ用のデータ換算式に見掛け上は非常によく似ているが、その差異は大きい。係数 A、B は試験材料の弾性特性を含んでいるだけでなく、解放応力に相対的な解放ひずみの減衰項を含んでいる。さらに､式（11a）と（11b）の項の符号が一般のロゼット式に対して逆になっていることがわかる。これは､A､B が常に負であることによる。したがって、式（11a）は式（11b）よりも代数的に大きいので、前者が最大主応力を表すことになる。

式(11c)は一般の3要素直角ロゼットひずみゲージと同じであるが、どちらの主応力がゲージNo.1を基準としているかを決定する上では、異なって解釈しなければならない。以下の規則がこの目的のために使用できる。

$\varepsilon_3 > \varepsilon_1$：$\alpha$ は $\sigma_{\max}$ を基準とする。

$\varepsilon_3 < \varepsilon_1$：$\alpha$ は $\sigma_{\min}$ を基準とする。

$\varepsilon_3 = \varepsilon_1$：$\alpha = \pm 45°$

$\varepsilon_2 < \varepsilon_1$：$\sigma_{\max}$　$at + 45°$

$\varepsilon_2 > \varepsilon_1$：$\sigma_{\max}$　$at - 45°$

係数 A、B の適切な値を決定するにあたっては、十分な考慮を払う必要がある。式（6）で代数的に定義されているように、これらはKirsch解によって課された条件に合致するときにのみ適用される。この解は、均一応力を受ける薄肉で、幅広い板を貫通する穴周りの座標系 (r, α) で各点の応力分布を与える。しかし、**図5**と**図6**を比較すると、ロゼット内のひずみゲージグリッドは有限な面積を有するので、それらは**図5**に示されるような変動ひずみ分布を感知することが明らかである。したがって、各ゲージの出力はグリッド面積全体の平均を表す傾向となる。さらに、グリッド

は大抵、平行線で構成されており、それらは半径方向グリッドの中心線上で一直線ではないので、半径方向とはならない。そのため、ゲージは半径方向ひずみだけでなく、接線方向ひずみに対してもわずかに感度を有する。その結果、より正確な係数の値は、式（4）をそれぞれのゲージグリッド面積について積分することにより得ることができる。このようにして定義された有限ひずみゲージ面積を考慮した係数は、式（6）で定義された点における係数と区別するため、ここでは $\overline{A}, \overline{B}$ と示す。$\overline{A}, \overline{B}$ を得るための一つの方法は、実験校正でそれらを測定することである。実験校正が正しく実施されれば、これが係数を評価する最も正確な手段となり得る。

ロゼット内の個々のゲージは、場所的に変化するひずみ場において異なる位置に効果的に存在している。その結果、各ゲージに作用する軸方向および横方向解放ひずみは、均一ひずみ場にゲージが存在している場合と同様な関連性はない。貫通穴とブラインド穴の両方に対して、係数 C（実際には、その積分または校正により得られた、$\overline{C}$ - 式(6)参照）の評価には正確な補正が必要である。しかし、横感度が非常に小さい（約 1%）ロゼットゲージを用いれば、横感度についての補正は必要ではない。例えば、Kabiri[(8)]は横感度（1 軸残留応力のケースで）を無視することによる誤差は、測定やデータ変換過程における不確かさに比べて無視し得ることを示している。

2.2 ブラインド穴の解析

穿孔法の理論的背景は、均一な平面応力を受ける薄肉の幅広平板を貫通して穿孔された小孔に基づく上述の取扱いにおいて開発された。しかし、残留応力解析が必要とされる通常の機械部品や構造部材は任意のサイズと形状を有し、薄肉で平なことは稀であるため、均一な平面応力を受ける薄肉の幅広平板という条件は実際の典型的な試験対象物からはほど遠いものである。穿孔法を適用するほとんどのケースで、測定対象物は厚肉であり、浅い“ブラインド”穴が用いられる。ASTM 規格 E837-08 では、Type A のロゼットひずみゲージ（**図 7（a）**参照）を適用した場合、薄肉とは厚さが 0.4D 以下、厚肉とは 1.2D 以上と規定している。ただし、D（$= 2R$）はゲージ円直径である。例えば、$D = \phi\ 5.14mm$ の場合、薄肉とは約 2.0mm 以下、厚肉とは 6.2mm 以上となる。

平面応力場にブラインド穴を穿孔すると、非常に複雑な局所応力状態を生じ、正確な解は弾性理論からはもはや得られない。しかし、幸運にも Rendler と Vigness[(9)]によって、ブラインド穴の応力分布の性質が貫通穴の場合と非常に類似することが実証されている。したがって、ブラインド穴を穿孔することによる解放ひずみは、式（9）によって記述されているように、穴と同心の円弧に沿って sin 関数的に変化する。適切なブラインド穴係数 $\overline{A}, \overline{B}$ を用いれば、式（11）のデータ換算関係式はブラインド穴にも適用できる。これらの係数は理論的な考察から直接的に計算できないので、実験的な手段：すなわち、実験校正または有限要素法解析のような数値解析により得る必要がある。

何人かの異なる研究者が、ブラインド穴の残留応力解析について有限要素法による研究結果を発表している。Schajer[(10)]により開発された係数は ASTM 規格 E837-08 に取り込まれており、**図 7** に均一応力の場合の各種ロゼットゲージに対する係数（貫通穴とブラインド穴の両方）をグラフで示す。**図 7** からブラインド穴係数の方が貫通穴係数よりも大きいことがわかる。

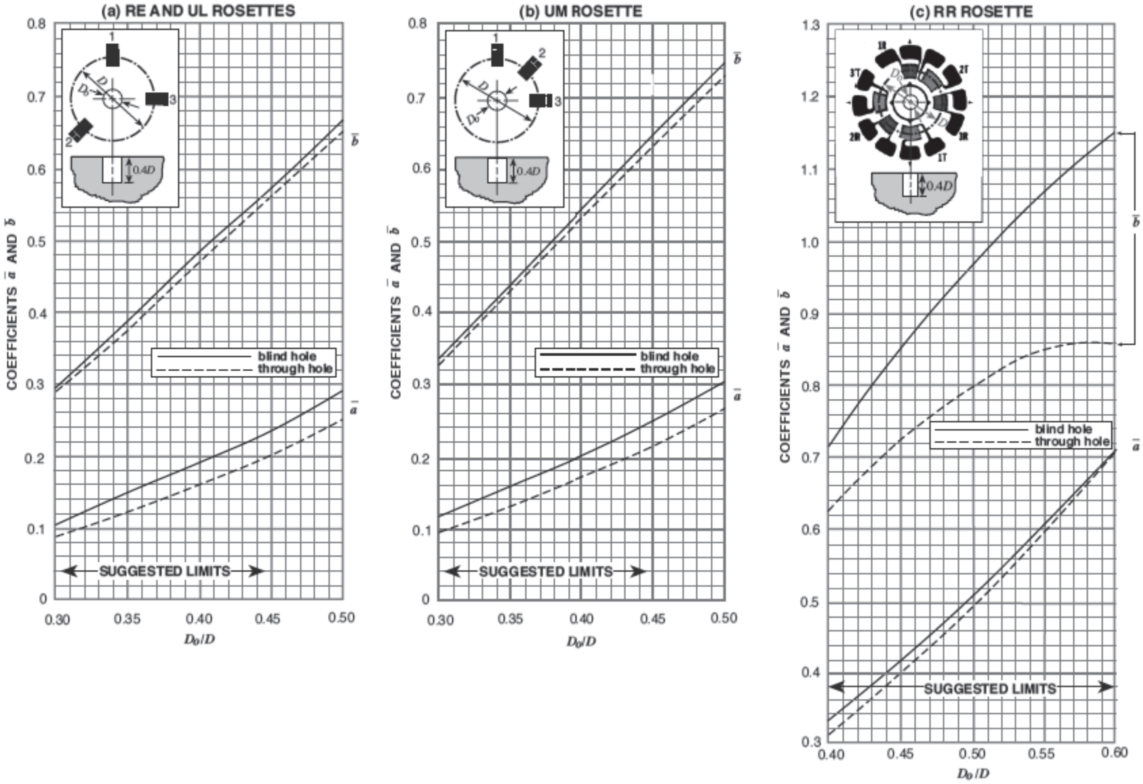

図 7　ASTM E837 に準拠した Micro-Measurements 社製の残留応力測定ロゼットゲージ用の無次元穴深さに対する全深さデータ変換係数 $\bar{a}$, $\bar{b}$ (4)

貫通穴の手順に比べて、ブラインド穴解析はもう一つの独立変数；すなわち、無次元穴深さ、Z/D（**図 8** 参照）が必要となる。したがって、係数は一般的な関数形で次のように表現できる。

$$\bar{A} = f_A\left(E, \nu, r, Z/D\right) \tag{12a}$$

$$\bar{B} = f_B\left(E, \nu, r, Z/D\right) \tag{12b}$$

解放ひずみは穴深さの増加にともなって一般的に増加(割合を減少させながら)する。したがって、ひずみ信号を最大化するため、穴は通常、少なくとも Z/D=0.4（ASTM 規格 E837-08 では最大深さとして Z/D=0.4 を規定）に相当する深さまで穿孔する。

深さに対する解放ひずみの一般的な変化を**図 8** に示すが、この場合、ひずみは Z/D=0.4 での値を 100％として正規化されている。データは、解放ひずみ関数が穴径とゲージ円直径との比（D_0/D）の影響を受けることを示すため、異なる 2 人の研究者の実験結果を記載している。両ケースとも均一 1 軸（平面）応力で、試験体は最大穴深さに比べて厚肉であるという条件である。図中にプロットされたカーブは、残留応力が穴深さ方向に均一であるとき、予想される代表的な応答と考えられる。

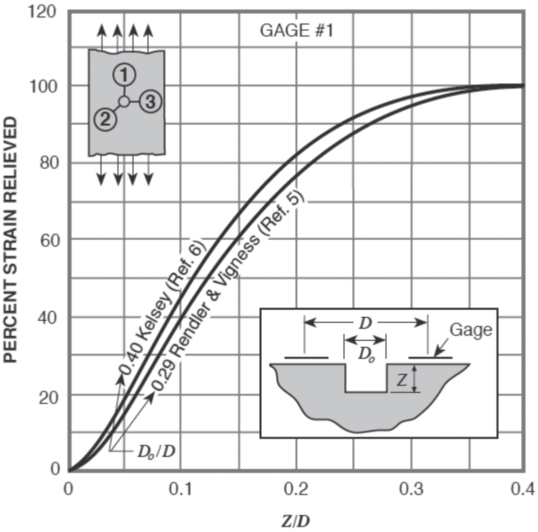

図8　ゲージ円直径に対する穴深さの比と解放ひずみの関係
（ひずみは Z/D ＝ 0.4 で 100%に正規化）[4]

Rendler と Vigness による研究の重要な貢献の一つは、与えられた如何なる材料特性、E、ν に対しても係数 $\bar{A}$, $\bar{B}$ は単純な形状関数であり、全ての幾何学的に類似したケースに対して一定であることを実証したことである。これは、一度、特別なロゼット形状に対して係数が決定されれば、ロゼットサイズは上にも下にもスケール調整でき、穴径と深さが同様にスケーリングされたとき、同じ係数が適用できることを意味する（もちろん、同じ材料を仮定して）。$\bar{A}$, $\bar{B}$ から材料依存性を取り除き、形状依存性のみを残そうとするいくつかの異なるアプローチがなされている。Schajer[11] により提案されたものをここでは紹介する。Schajer は、以下のように定義される二つの新しい係数 $\bar{a}$, $\bar{b}$ を導入した。

$$\bar{a} = -\frac{2E\bar{A}}{1+\nu} \tag{13a}$$

$$\bar{b} = -2E\bar{B} \tag{13b}$$

式（6）との比較から、貫通穴に対しては、少なくとも $\bar{a}$ は材料依存ではなく、$\bar{b}$ はポアソン比にほんのわずか依存することがわかる。Schajer は、ブラインド穴では、0.25 ～ 0.35 の範囲のポアソン比に対して $\bar{a}$, $\bar{b}$ は 2%以下で変動することを有限要素法計算から見出した。

2.3 データ変換と解釈（ブランド穴）

ASTM 規格 E837-08 では、8 段階の等しい深さステップで穿孔し、各段階で測定ひずみと測定穴深さを記録することを推奨している。これは、残留応力が深さ方向に本質的に均一かどうかを判断し、それにより、応力計算に均一応力分布用の係数 $\bar{a}$, $\bar{b}$ を適用することの妥当性を検証するためのデータを得る目的で行うものである。段階的な測定がなされない場合は、応力の均一性についての推測を行うことは無意味であり、計算された残留応力は相当な誤差を含むものとなる。応力が深さ方向に変化するときは、計算された残留応力は常に、実際の最大値よりも低い。

試験片の表面から穴の底面までの応力均一性を実証する絶対的な基準は現時点ではない。しかし、穴深さに対する解放ひずみの段階的データは、不均一応力分布を検知する二つの異なる方法に用いることができる。その一つは、各深さ増分に対して測定ひずみデータの合計と差、それぞれ、$\varepsilon_3+\varepsilon_1$ と $\varepsilon_3-\varepsilon_1$ を計算することである[3]。データの各組合せを、前項で解説したように穴深さがひずみゲージ円の平均直径の 0.4 倍に等しいとき（Z/D=0.4）のひずみ値の分数で表す。正規化された穴深さに対するこれらの％ひずみをプロットする。これらのグラフは**図9**に示される曲線に非常に近いものとなる。**図9**の曲線から外れることは、本質的な応力不均一性またはひずみ測定誤差のどちらかを意味する。どちらのケースでも、測定データは均一応力分布用の係数 $\bar{a}$, $\bar{b}$ を用いた残留応力計算には適用できない。

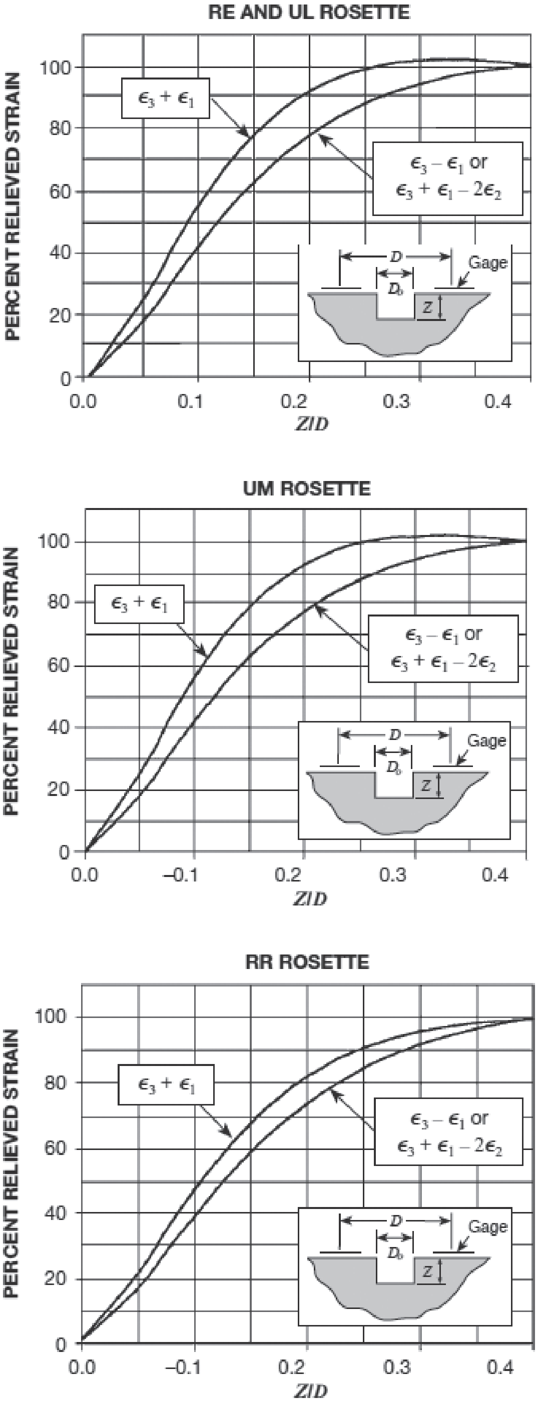

図 9　ASTM E837 に準拠した異なるロゼット型式に対する均一応力場での正規化穴深さと%ひずみの関係[(4)]

主残留応力方向が、**図 6** のゲージ No.1 または 3 に比べてゲージ No.2 の軸方向により近いときは、ひずみ合計 $\varepsilon_3+\varepsilon_1-2\varepsilon_2$ は $\varepsilon_3-\varepsilon_1$ よりも数値的に大きくなる。このようなケースでは、%ひずみデータのチェックは $\varepsilon_3-\varepsilon_1$ に代えて $\varepsilon_3+\varepsilon_1-2\varepsilon_2$ を使って行う必要がある。

Schajer やそれに続く研究者の有限要素法による穿孔法研究では、いかなる深さ増分（最初以外）であっても穿孔により生じる解放ひずみ増分に対するその深さ増分内の残留応力の寄与度は部分的であるとしている。残りの解放ひずみ増分は、穿孔による材料の剛性低下（弾力性が増加）に起因する前の増分内での付加的な残留応力解放によって生じる。さらに、ひずみ増分変化に対する個々の増分内の応力の相対的寄与度は表面からの距離とともに急激に減少する。その結果、最終穴深さ位置における全解放ひずみは、表面に最も近い材料層内の応力に支配的な影響を受ける。$Z/D>0.2$ に相当する穴深さでは、これらのステップ内の応力が測定ひずみに与える影響は非常に小さい。この挙動は**図 8** の正規化ひずみグラフの形状で確認（均一応力に対して）でき、通常、穴深さの最初の半分で全解放ひずみの 80%が生じる。これらの特徴のため、データ変換に用いる解析法に関係なく、$Z/D=0.2$ 以上のステップ内の増分ひずみは、たとえあるにしても、少量であると推定することができる。

なお、残留応力は、最終深さ（たとえば $Z/D=0.4$）における解放ひずみだけを用いて計算してもよいが、ASTM E837-08 では測定誤差を減少させるために 8 段階全ての解放ひずみを用いて計算する平均法を推奨している。

3. 穿孔装置(3)-(5)

3.1 穿孔装置の要件

穿孔法では試験対象物を制御された状態で穿孔する装置が必要である。装置はひずみゲージ円と±0.004D 以内の同芯度で穿孔できる能力を有している必要がある。また、穴の深さは ±0.004D 以内で制御できるものでなければならない。

3.2 穿孔装置の概要

一例として、Vishay 社製の RS-200 Milling Guide を図 10 に示す。

図 10 の上図（a）は顕微鏡をセットして穿孔装置のアライメント調整を実施している状況を示す。

図 10 の中図（b）は顕微鏡を外してエンドミルをセットした状況を示す。エンドミルは頂部のユニバーサル継手を介して手動ドリルまたは可変速電気ドリルで駆動される。

図 10 の下図 (c) は顕微鏡を外して高速エアタービンとカーバイド製カッターを設置した状況を示す。

3.3 使用上の注意事項

欧米を中心とする研究者により、これまで穿孔法に適したいくつかの穿孔技術が調査され、その結果が報告されている。以下にその概要を解説する。

硬い材料を除く全ての材料に適した最も共通的な穿孔技術は、50,000rpm ～ 400,000rpm の高速エアタービンまたは電気モーターで駆動されるカーバイド製ドリルまたはエンドミルを使用している。ボール盤またはパワーハンドドリルを用いる低速ドリルは、機械加工により穴の境界で残留応力を生じさせる傾向があるため、適用が難しい。

非常に硬い材料に対しては、アブレーシブジェット加工も有効である。この方法は、細かな研磨粒子を含む高速エアを小径ノズルを通して測定対象物に噴射するものである。アブレーシブジェット加工は柔らかい材料には適切でない。この方法は、穴の形状や深さを十分な正確さで制御できないので不均一応力の測定には使用するべきではない。

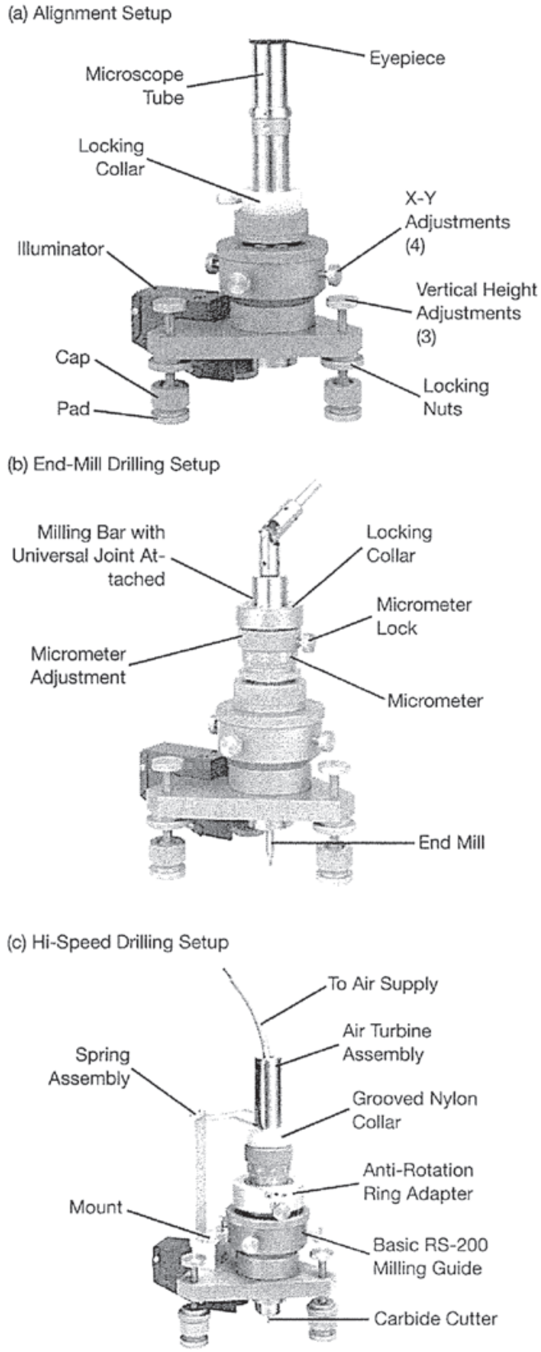

図 10　Vishay 社製 RS-200 Milling Guide(4)

ドリルやエンドミルを使用するときは、カーバイド製“反転コーン”歯科用ドリルまたは小形のカーバイド製エンドミルが切削工具として適切である。市販のカッターは広範囲の適用を考えて設計されており、全てのタイプが穿孔残留応力測定に適しているわけではない。したがって、実績のない材料に対しては、あらかじめ穿孔技術の実証とカッターの選定を行う必要がある。実証は、焼きなまし熱処理された同じ公称試験材料の無応力試験体にロゼットひずみゲージを貼り付けた後、それを穿孔することにより行う。もし、穿孔技術とカッターが十分満足の行くものであった場合、穿孔により解放されるひずみは小さく、一般的には ±8$\mu\varepsilon$ 以内である。

穿孔技術の実証試験で穿孔プロセスにより大きなひずみを示した場合、または、試験材料の加工が難しいことがわかっている場合、適切な潤滑液で穿孔カッターを潤滑することが必要である。使用する潤滑液は電気的に絶縁体でなければならない。水または他の電気的に導体の潤滑液は、ひずみゲージの電気接続部に入り込み、ひずみの読み値に外乱を与える可能性があるため使用してはならない。

カッティング工具端面上のカッティング刃の半径すきま角は 1° を超えてはならない。この制限により、工具の直径の 1％以内で深さが均一であることが確実になり、穴深さの識別の曖昧さを避けることができる。

“反転コーン”カッターはシャンクに向かってわずかにテーパとなっており、その端面部で最大直径を有している。テーパ形状は工具が穴を切削するときに円筒カッティング刃にクリアランスを与える。これは、穴の側面での工具摩擦と局所的な残留応力の生成を最小化するため、望ましいものである。穴直径識別の曖昧さを避けるため、テーパ角は各サイドで 5° を超えてはならない。

穿孔はカッターを軸方向に前進させる方法（前進送り法）で実施すればよい。代替法として、カッターの回転軸を穴の軸から故意にオフセットさせる旋回法を使用してもよい。カッターは軸方向に前進し、その直径よりも大きい穴を生成できるようにするためオフセットは円軌跡を描いて旋回する。前進送り法はその単純さに利点を有する。旋回法はオフセットの選択、端面刃と円筒カッティング刃の使用、および切屑流れの妨げが少ないことにより穴径の調整に利点を有する。

ASTM 規格 E837-08 では、種々のロゼットひずみゲージに対して適切な穴径範囲を規定している。均一および不均一応力測定に対して異なる範囲が適用されている。例えば、均一応力場については、$D = \phi\ 5.14mm$ のロゼットひずみゲージを使用する場合、穴径は $\phi\ 1.52mm$ ～ $\phi\ 2.54mm$ と規定している。測定ひずみの大きさは穴径の 2 乗にほぼ比例して増加する。そのため、この範囲内の大きい側の限界の穴径とすることが望ましい。前進送り法を用いる場合は、カッター直径は目標直径と等しくする必要がある。旋回法を使用する場合は、カッター直径は、目標直径の穴を生成するためのオフセットを選択した上で目標直径の 60％～90％とする必要がある。

4. 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、今回は深さ方向に均一な応力場を対象として、基礎理論や穿孔装置の概要について解説した。

次回は深さ方向に不均一な応力場での測定を対象として解説する予定である。

参考文献

(1) George, D, Kingston, E and Smith, D. J. "Measurement of through-thickness stress using small holes", Journal of Strain Analysis Vol.37 No.2, IMechE 2002, pp.125-139

(2) 三上"DHD残留応力測定法について"IIC REVIEW No.42、2009/10

(3) ASTM E 837-08, "Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gauge Method", 2008

(4) Technical Note TN-503-6, "Measurement of Residual Stresses by the Hole Drilling Strain Gauge Method", Vishay Measurement Group, 2010

(5) 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

(6) Mathar, J., "Determination of Initial Stresses by Measuring the Deformation Around Drilled Holes", Trans., ASME 56, No.4: pp.249-254, 1934

(7) Timoshenko, S. and J. M. Goodier, "Theory of Elasticity", New York: McGraw-Hill, 1951

(8) Kabiri, M., "Measurement of Residual Stresses by the Hole-Drilling Method:Influences of Transverse Sensitivity of the Gage and Relieved Strain Coefficients", Experimental Mechanics 25: pp.252-256, 1984

(9) Rendler, N. J. and I. Vigness, "Hole-drilling Strain-gage Method of Measuring Residual Stresses", Proc., SESA, XXIII, No.2:pp.577-586, 1966

(10) Schajer, G. S., "Measurement of Non-Uniform Residual Stresses Using the Hole Drilling Method", Journal of Engineering Materials and Technology, 110, No.4: Part Ⅰ, pp.338-343; Part Ⅱ, pp.344-349, 1988

(11) Schajer, G. S., "Application of Finite Element Calculations to Residual Stress Measurements", Journal of Engineering Materials and Technology 101: pp.157-163, 1981

(12) 株式会社東京測器研究所　2011-2012「製品総合カタログ」

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

三上 隆男

TEL. 03-3778-7965
FAX. 03-3778-7968