逐次表面除去法で測定した残留応力分布の有限要素法による補正

中本 久志* 巖 希哲* 高島 一郎**
横幕 俊典* 田中 啓介***

Finite Element Correction for Residual Stress Distribution Measured by X-ray Surface Removal Method

by

Hisashi NAKAMOTO*, Kitetsu GEN*, Ichiro TAKASHIMA**,
Toshinori YOKOMAKU* and Keisuke TANAKA***

The X-ray diffraction technique is widely used for measuring the residual stress on metal surfaces. Since the penetration depth of X-rays is shallow, the surface removal method has been adapted to measure the in-depth distribution of the residual stress. The measured stress distribution needs to be corrected to take into account of the redistribution due to surface removal. In this study, the correction of measured stress was performed using finite element analysis (FEA). For FEA, we prepared multi-layer solids with differential thermal coefficients of expansion. Uniform temperature change caused continuous residual stress distribution in the solids. Step-by-step surface layer removal of a flat plate and a cylinder was carried out in simulation, and then the matrices for stress correction were obtained. FEA correction for entire surface layer removal was confirmed to be identical to the theoretical solution. In the case of local surface removal, it was clarified that the correction matrix obtained for a particular residual stress distribution is applicable to arbitrary stress distribution. Using this method, the difference in the stress correction for entire surface layer removal and local surface removal was determined and it was applied to residual stress distribution correction for a carburized steel bar. Moreover, we have discussed in depth how the stress correction for the entire surface layer removal can be applied for the local surface removal.

Key words:

Residual stress, X-ray diffraction, Surface layer removal, Stress redistribution, Finite element analysis, Correction matrix

1 緒 言

構造部材の残留応力測定方法として X 線応力計測^{1), 2)}は、比較的安価で現場での測定も容易であることから産業界で多用されている。

X 線による応力測定では部材の表面応力（厳密には表面下数十ミクロン程度の領域の平均的な応力）が測定される。そのため浸炭、ショットピーニング、高周波焼入れなどの表面処理材について深さ方向への応力分布を求めるには、必要な深さまで電解研磨などによる表面除去を繰返し、その都度 X 線応力測定を実施することになる。ただし、表面除去は部材中の応力場を変化させるため測定された値に対して補正が必要となる。従来から、この補正には板や丸棒の測定対象面を全面あるいは全周にわたって均一に除去した場合（以下、これを全面除去と称する）に対する Moore と Evans の理論解³⁾がよく用いられている。しかし、現実の部品では一般に部分的除去にならざるを得ず、部分除去に対する残留応力分布の補正方

法を確立しておくことは実用的に意義がある。

そこで本研究では、Hornbach⁴⁾や Savaria ら⁵⁾の方法と同様に、あらかじめ深さ方向に適当な応力分布を発生させた固体において、その表面を逐次除去した場合の残留応力分布を有限要素法（FEM）により解析し、この結果をもとに除去後の表面測定応力から、除去前の残留応力分布を求める方法を検討した。ただし、本論文では初期応力として温度分布で与える既往の方法^{4), 5)}とは異なり、固体全体が均一温度にある状態で除去による応力再配分が起きるような新たな方法を採用し、補正式を導いた。まず、本手法を用いて板と丸棒における全面除去に対する補正応力分布を求め、これらを前記の理論解と比較することによって解析方法の妥当性を検証した。

全面除去に対する補正後と、部分除去に対する補正後の応力分布（つまり除去前の残留応力分布）は本来合致しなければならないが、このことは浸炭材の X 線残留応力実測結果に本方法を適用することにより確認した。

† 原稿受理 平成28年12月12日 Received Dec. 12, 2016 ©2017 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 ㈱コベルコ科研 機械・プロセスソリューション事業部 〒651-2271 神戸市西区高塚台
KOBELCO RESEARCH INSTITUTE, INC., Mechanical and Chemical Process Engineering Division, Nishi-ku, Kobe 651-2271.

** ㈱コベルコ科研 高砂事業所 〒676-8670 高砂市荒井町新浜
KOBELCO RESEARCH INSTITUTE, INC., TAKASAGO Laboratories., Arai-cho, Takasago 676-8670.

*** 正 会 員 公益財団法人 名古屋産業科学研究所 〒464-0819 名古屋市千種区四谷通
Nagoya Industrial Science Research Institute, Chikusa-ku, Nagoya 464-0819.

また, 次章で述べるように, 本解析によって板と丸棒における補正応力分布の特徴が大きく異なることが明らかになったが, この原因について考察を加えた. 最後に部分除去において除去面積を種々に変えて FEM 解析を行うことによって, 補正応力に及ぼす除去面積の影響を評価し, 部分除去時の残留応力分布の補正に対する全面除去解の適用限界について検討した.

2 有限要素法による応力変化の解析方法

2・1 補正行列による応力補正

Fig. 1 に応力勾配のある物体表面の一部を逐次除去した場合の応力緩和過程を模式的に示した. 第 i 回目の除去において, 深さ d における応力 $(\sigma_d)_i$ の第 $i-1$ 回目からの変化量は次式で表わされる.

$$(\Delta\sigma_d)_i = (\sigma_d)_i - (\sigma_d)_{i-1} = -(K_d)_i(\sigma_m)_i \quad (1)$$

ここで $(K_d)_i$ は, 次式で定義するように深さ d における応力の変化量を i 層除去時の表面の応力値 $(\sigma_m)_i$ で除したもので, 補正係数と定義する.

$$(K_d)_i = -\frac{(\sigma_d)_i - (\sigma_d)_{i-1}}{(\sigma_m)_i} \quad (2)$$

Fig. 1 Schematic of stress redistribution caused by surface removal (Note: $i = 0$: initial surface).

なお, 表面応力値 $(\sigma_m)_i$ は FEM 解析で求めるものであるが, 実験においては計測値となるべきものであるため, 本解析においても以後, 計測応力と称した. この補正係数 $(K_d)_i$ を簡略のため K_{di} と表記し, ここで新たに次式の補正行列 K を導入する.

$$K = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & K_{11} & 0 & 0 & 0 & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & K_{21} & K_{22} & 0 & 0 & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & K_{31} & K_{32} & K_{33} & 0 & \cdot & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & K_{d-1,1} & K_{d-1,2} & K_{d-1,3} & K_{d-1,4} & \cdot & K_{d-1,d-1} & 0 \\ 0 & K_{d1} & K_{d2} & K_{d3} & K_{d4} & \cdot & K_{d,d-1} & K_{dd} \end{bmatrix} \quad (3)$$

求めるべき補正後の応力行列 σ_c は, 式 (1) から計測応力行列 σ_m に K を乗じて以下で算出できる.

$$(\sigma_c)_i = (\sigma_m)_i + \sum_{i=0}^d (K_d)_i (\sigma_m)_i \quad (4)$$

ただし元の表面 ($i=0$) においては $(\sigma_c)_0 = (\sigma_m)_0$ である.

具体的には, 後述の FEM 解析によって逐次除去毎に評価したい物体内部の各節点応力を求め, これを上記の式 (2) および式 (3) に適用すれば補正係数 K_{di} および補正行列 K が得られることになる.

各形状 (平板, 丸棒), 表面除去条件 (全面, 部分), 材料物性値 (線膨張係数の方位依存性) 等に対してそれぞれ個別の補正行列が定まるが, 仮想的に設定した基準の計測応力分布に対しそれぞれの補正行列を適用して, 式 (4) から求めた補正応力値を比較することで各種の影響因子を評価した. また Moore と Evans により導かれた全面除去に対する理論解と比較することにより本補正法の解析上の妥当性を検証した.

2・2 FEMによる数値解析

Fig. 2 に示す平板 ($20 \text{ mm}^W \times 10 \text{ mm}^H \times 50 \text{ mm}^L$) および丸棒 ($10 \text{ mm}^\phi \times 50 \text{ mm}^L$) に対する有限要素モデル (8 節点ソリッド要素, 1/4 対称) について, 第 1 層 (材料 1) の線膨張率を $2.36 \times 10^{-5} / \text{K}$, 第 2 層 (材料 2) をその 1/2 とし, 全体に一定温度上昇 (100°C) を与えることにより物体内に初期応力を発生させた. ヤング率およびポアソン比については両層とも同一値 ($E=205 \text{ GPa}$, $\nu=0.3$) とした. なお, 標準条件として各層には等方の線膨張率を付与したが, 特定方向のみ線膨張率を変えたモデルや, 実際の表面硬化材の残留応力分布を想定して Fig. 3 に示すような平板で線膨張率が表面から内部にかけて徐々に変化した多層材 (15 層材) についても本報で検討した.

Fig. 2 3D-models of local surface removal of (a) two-layer plate and (b) cylinder.

Fig. 3 3D-model of local surface removal of a multilayer plate.

昇温後, 平板においては 1 層目の全表面あるいは中央部の $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ の正方領域について, 所定の深さ毎に要素を削除して深さ方向の応力分布を求めた. 表面近傍の厚さ方向の要素分割は 0.01 mm 以下とし, 除去深さに

対して十分細かくした。丸棒においては要素分割の都合上、外周の全面または中央の $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 正方領域部の円筒状要素を削除して、平板と同様な解析を行なった。

Fig. 4 は平板を対象とした解析において初期に発生させた長手方向応力コンターである。ここでは、最表面で圧縮、表面から 2 mm において引張に反転するような応力分布を発生させた。その後、逐次部分除去を進め、一例として除去深さ 1.5 mm における長手方向応力コンターを Fig. 5 に示す。部分除去によって除去部周辺の応力分布は初期状態から大きく変化していることがわかる。なお、除去面内において中央の $2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ の領域ではほぼ一定の応力となった（図は省略）ことと、後述の応力測定における X 線照射径が $1\text{ mm} \phi$ であることから、補正行列算出時の応力値としては除去面の中央部の値を用いた。

Fig. 4 Longitudinal stress contour of a plate before local surface removal.

Fig. 5 Longitudinal stress contour of a plate after local surface removal.

2・3 残留応力測定方法

逐次表面除去による残留応力の実測は SCM415 (0.16C-0.20Si-0.75Mn-0.95Cr-0.16Mo 鋼) の浸炭焼入れ材を対象に行なった。熱処理は $920\text{ }^{\circ}\text{C}$ にて 2.5 hr の浸炭および 2.5 hr の拡散処理後、 $840\text{ }^{\circ}\text{C} \times 0.5\text{ hr}$ 油焼入れ、 $160\text{ }^{\circ}\text{C} \times 2\text{ hr}$ 焼戻しを行なった。試験片表面の逐次除去は電解研磨により行い、2・2 節で述べた領域に全面および部分研磨を行なった。Table 1 に X 線応力測定条件を示す。

Table 1 Conditions for X-ray residual stress measurement.

Equipment: Rigaku micro port X-ray stress measuring equipment			
Characteristic X-ray	Cr-K α	Filter	V
Tube voltage	40kV	Tube current	30mA
Crystallographic planes	α -Fe(211)	Diffraction angle ($2\theta_0$)	156.4°
Beam diameter	ϕ 1 mm	ψ angle (°)	0,21,30,38,45
X-ray irradiation time	120sec/ ψ		
Method of the measurement	iso-inclination	ψ angle oscillation	$\pm 2^\circ$

X 線のビーム径は $1\text{ mm} \phi$ とし、研磨領域の中央部に照射した。また、X 線回折強度曲線の LP および吸収補正を実行し（線吸収係数 850.4 cm^{-1} ）、回折ピーク位置の決定は半価幅中点法により行なった。また、応力定数 $K=-318\text{ MPa/deg}$ とした。

3 解析および実験結果

3・1 平板の残留応力補正

Fig. 6 に平板の $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 正方領域を深さ 1.5 mm まです部分除去した際に得られた補正行列 K を示す。本行列の特徴として、補正行列の全成分が負であること、同じ深さにおいて 1 列目の値が非常に小さく除去ステップが進むと大きくなっていること、同ステップにおいては対角行列側ほど値が大きいこと、が挙げられる。式(4)からわかるように、補正行列の全成分が負となるということは、計測応力 $(\sigma_m)_i$ が引張領域にあれば第 2 項の補正応力項が負になり、逆に計測応力が圧縮応力領域にあれば補正応力項が正になることを意味している。

Fig. 7 に除去後の残留応力値、すなわち計測応力がいずれのケースとも同一と仮定（○印データ）して、これに本手法で求めたそれぞれの補正行列を適用して片側全面除去および部分除去に対する補正後の長手方向残留応力分布を示した。仮定応力分布としては任意の分布でよいが、ここでは全面除去によって得られる除去後の応力分布を与えた。全面除去に対する補正值は Moore らの理論解（破線）と合致している。除去深さが浅い範囲（ $\leq 0.4\text{ mm}$ ）では全面除去と部分除去の差異は小さいが、これを超えると明らかに両者の差異が大きくなるため、部分除去に

	[K]										
深さ(mm)	0	0.02	0.05	0.1	0.2	0.3	0.5	0.75	1	1.25	1.5
0	0										
0.02	0	-0.0105									
0.05	0	-0.0096	-0.0149								
0.1	0	-0.0096	-0.0134	-0.0228							
0.2	0	-0.0095	-0.0133	-0.0201	-0.0378						
0.3	0	-0.0093	-0.0131	-0.0199	-0.0346	-0.0343					
0.5	0	-0.0088	-0.0126	-0.0193	-0.0343	-0.0300	-0.0550				
0.75	0	-0.0079	-0.0115	-0.0181	-0.0329	-0.0297	-0.0500	-0.0555			
1	0	-0.0070	-0.0103	-0.0163	-0.0307	-0.0286	-0.0501	-0.0517	-0.0470		
1.25	0	-0.0060	-0.0088	-0.0145	-0.0278	-0.0267	-0.0486	-0.0529	-0.0443	-0.0413	
1.5	0	-0.0049	-0.0073	-0.0123	-0.0243	-0.0241	-0.0455	-0.0523	-0.0463	-0.0395	-0.0401

Fig. 6 A correction matrix for local surface removal of a plate.

Fig. 7 Stress correction for local and entire surface removals of a plate.

対して全面除去解を適用すると補正量を過大に評価するので注意を要する。

3・2 丸棒の残留応力補正

丸棒の場合についても、前節の板の場合と同様に全面除去で得られる残留応力分布を計測応力分布として、これにそれぞれの補正係数を適用して補正を行った。例えば周方向応力の場合、Fig. 8(a)に示すように全面除去については Moore らの理論解に一致しているが、部分除去による応力変化量は全面除去の場合よりもかなり大きく、そのため部分除去に対して全面除去解の補正を行うと実際よりも補正量を過小に評価してしまうことがわかる。

この原因として、丸棒の全周除去の場合には常に軸対称応力分布が維持されるのに対して、部分除去の場合には曲げ成分が発生するため、曲げモーメント成分の現れない理論解に比べて応力の変化量が大きくなったものと推定される。

なお、Fig. 8(b)に示すように長手方向応力については部分除去と全面除去で大差ない結果が得られた。ただし、このような特徴は測定対象の寸法や除去領域が特定の条件でのみ見られるものであり、これらが変われば都度補正係数を求める必要があると考えられる。

(a) Tangential stress

(b) Longitudinal stress

Fig. 8 Stress correction for local and entire surface removals of a cylinder.

3・3 実測値の補正例

一例として浸炭処理材（丸棒）について、全面および部分研磨で得られた周方向の実測 X 線残留応力値に対して 3・2 節で述べたそれぞれの補正行列を用いて補正した応力分布を Fig. 9 に示す。未補正の応力分布では、部分研磨の方が全面研磨よりも全体として圧縮残留応力値が大きい側に位置しており、最大で 150 MPa 程度の差異が生じている。この計測応力に補正を行うと両者の差異は ±50 MPa 程度にまで狭まっていることがわかる。この差異は $\sin^2\phi$ 法による X 線応力測定値のばらつきによるものと考えられ、本補正によって平均的には両者間の差異は消失したと思われる。以上により本補正方法の正しさは実験的にも検証できた。

Fig. 9 Stress correction for local and entire surface removals in carburized steel cylindrical bars.

4 考 察

4・1 補正式に及ぼす初期応力分布の影響

第 3 章では補正行列 K を、単調な初期応力分布が得られる二層材の等方線膨張率モデルから算出した。本節では前記の浸炭材で観察されたような複雑な初期応力分布を模擬できるように、多層材でかつ等方線膨張率、あるいは多層材で単軸線膨張率の部分除去モデル (Fig. 3) について補正行列を求めた。そして、仮定したひとつの計測応力分布に対して、第 3 章で使用した補正行列を含めた各補正行列による補正応力分布を比較することで、初期応力分布形態に依存しない補正行列が得られるか検討した。

例として、平板の長手方向の補正後応力分布を Fig. 10 に示す。二層材、多層材のいずれの初期応力条件で得られた補正行列を用いても、補正後応力はほぼ同一値であることがわかる。この事実は以下のように考えられる。式 (2) に示すように、補正係数は除去前後の応力変化量 $\Delta\sigma$ を、除去毎の表面計測応力 σ_m で除した無次元数である。FEM 解析において除去量は非常に微小であるので、分布応力であっても、この除去層内においてはほぼ一定応力と見なすことができ、 σ_m で除することによって一定の単位応力分布に対する補正量を算出しているのと同等

である。したがって仮定する初期応力分布にはほとんど依存しない固有の補正行列が得られるものと考えられる。ただし、前述の通り補正係数は σ_m で除するため σ_m の絶対値が極端に小さい場合には $\Delta\sigma$ における誤差が助長され、補正結果に大きな誤差を生じる可能性があるので注意が必要である。このことから補正行列の算出に際しては、ゼロ応力を横切ることがなく、かつ比較的傾斜の緩やかな単純な初期応力分布モデルを使用すれば、精度よい補正行列が得られると考えられる。

Fig. 10 Comparison of corrected stresses for local surface removal using K-matrices derived from different initial stress distributions.

4・2 除去面積の影響

第3章では深さ方向への逐次部分除去を5 mm角の正方形領域としたが、実際には測定対象の形状や測定内容に応じて除去領域は調整される。そこで本節では、平板について種々の面積を有する正方形領域除去に対する補正行列を求め、補正後応力分布に及ぼす除去面積の影響を評価した。Table 2に検討した解析事例の一覧を示す。なお、表中20 mm×50 mmの除去は全面除去に対応する。

Fig. 11はそれぞれの除去領域に対する長手方向補正応力分布を、Fig. 7に重ねたものである。その結果、部分除去に対する補正応力は、除去面積が増加するにつれ全面除去のそれに近づいているが、試験片幅20 mmに対して15.3 mm角の除去でも、2.5 mm角と全面除去に対する補正応力分布のほぼ中間に位置した。また、表面から0.5 mmおよび1.5 mm位置での補正応力値について、除去面積で整理したものを、Fig. 12に示す。表面から0.5 mm以下の浅い領域では補正応力に差異はほとんどないが、それより深い領域では除去面積による影響が顕著に現れた。

次に、部分除去の一事例として、試験体長手方向の除

Table 2 List of the numerical analyses for the stress correction about the local removal area.

Dimension (mm×mm)	2.5 × 2.5	5.0 × 5.0	10 × 10	15.3 × 15.3	20 × 50
Area (mm ²)	6.25	25.0	100	234.1	1000

去は基準の5 mmとし幅方向に全面(=20 mm)除去する場合を取り上げ、補正後応力を全面除去解と比較した。その結果、Fig. 13に示すように両者の補正後応力分布はほぼ同じであった。したがって、長手方向応力については全幅除去を行うことで、その直交方向には5 mm程度の小さな除去でも全面除去と同等の結果が得られることが示された。

Fig. 11 Effect of surface removal dimensions on corrected stress.

Fig. 12 Comparison of corrected stress between local and entire surface removals at depth of 0.5 and 1.5 mm.

Fig. 13 Corrected stress distribution for local surface removal in the longitudinal direction and entire surface removal in the lateral direction.

これより本報の検討範囲では、表面から 0.5 mm 以内の浅い領域では 2.5 mm 角から 15.0 mm 角の部分除去であっても全面除去解が近似的に適用できることが示唆された。ただし、浸炭や高周波焼入れなど表面応力勾配が急峻な表面処理材に関しては、部分除去による補正式を用いて応力分布を推定することが望まれる。

4・3 板厚の影響

所定の除去深さに対して、測定対象が十分な厚みを有していれば応力再分布に及ぼす表面除去の影響は限定的と考えられ、部分除去の場合でも全面除去に対する補正解が適用できる可能性がある。そこで本節では板厚 10 mm (Fig. 2(a)のモデル), 20 mm および 100 mm の二層平板について 5 mm 角の部分除去に対する補正行列を求め、仮定した共通の初期応力分布に対する補正後応力を比較することで試験片厚さの影響を検討した。なお、一層目(除去側)の厚さはすべて 2 mm とした。

Fig. 14(a)は Moore と Evans の理論解を用いて、全面除去に対する補正後長手方向応力分布に及ぼす板厚の影響を示したものである。全面除去では板厚 100 mm の場合、補正量は、例えば表面から 1.5 mm の位置において高々 4 % 程度(補正前応力:-269 MPa, 補正後応力:-258 MPa)であるが、板厚が減少するほど補正量は大きくなり、板厚 10 mm では 40 % の補正量(補正後応力:-161 MPa)となる。

一方 Fig. 14(b)に示す部分除去では、板厚が 100 mm の場合でも補正量は約 17 % (補正後応力:-224 MPa)と全面除去の場合に比べて大きく現れている。板厚減少とともに補正量は多少大きくなるが、板厚 10 mm でも 20 % 程度(補正後応力:-214 MPa)である。板厚の影響が大きく現れるのは 10 mm よりも更に薄い領域と推定される。

Fig. 14(a), (b)から、それぞれの板厚毎に全面除去と部分除去に対する補正後の応力分布を比較すると、結果的に板厚 20 mm で両者の差異が小さくなったが、これよりも厚い場合は部分除去の補正量の方が大きく、逆に薄い場合には全面除去の補正量の方が大きくなる。つまり、板厚の大きさにかかわらず部分除去に対しては全面除去の補正解は適用できないことが示唆される。

全面除去では板厚変化による長手方向の力とモーメントの釣合いによって単純に応力の再配分が決まるのに対し、部分除去では除去領域周辺の 3 次元の局所的な応力変化を生じることが上記のような差異を生じる要因と考えられる。

5 結 言

逐次表面除去に対する FEM 応力解析によって得られる補正行列を用いた残留応力補正方法を提案した。得られた結論を以下に示す。

- (1) 各層で線膨張率の異なる二層材の有限要素モデルについて全体を一様加熱して自己平衡する応力分布を発生させた後、表面の要素を逐次除去することで残留応力変化の挙動を解析し、応力補正行列 K を求める方法を確立した。
- (2) 全面除去に対する K による補正応力は、均質体の Moore と Evans の理論解と合致し、本モデルの妥当性が検証された。
- (3) 応力補正行列 K はその導出の際に仮定する初期応力分布にほとんど依存せず、その結果、算定される補正後応力分布はいずれの補正行列を用いてもほぼ同じとなることが示された。
- (4) 平板では部分除去による応力緩和量は全面除去より小さいが、丸棒では全く逆の結果が得られた。これは平板では全面除去、部分除去とも片面のみの除去であるのでいずれも曲げモーメントが発生するのに対し、丸棒では全面除去では常に軸対称条件が維持されるので曲げモーメントが発生しないことによるものである。
- (5) 浸炭材の表面近傍の残留応力分布を逐次除去により計測し、本法を適用して補正応力を求めたところ、全面除去でも部分除去でもほぼ同一の補正応力分布が得られ、実験的にも妥当性が検証された。
- (6) 除去領域を因子とした解析的検討により、部分除去であっても試験片表面極近傍において全面除去補正式の適用可能性が示唆されたが、内部に侵入

(a) Entire layer removal

(b) Local removal

Fig. 14 Corrections for the longitudinal stress corresponding to varying specimen thickness.

するにつれ部分除去との差異が顕著となった。また、板厚が十分厚い場合でも部分除去と全面除去に対する解は一致することではなく、部分除去に対しては対応する補正が必須であることがわかった。

参 考 文 献

- 1) JSMS, “Standard for X-ray stress measurement (2002) =iron and steel= (JSMS-SD-5-02)” (2002).
- 2) Residual stress measurement by X-ray diffraction – SAE J-784a, Society of Automotive Engineers (1971).
- 3) M.G. Moore and W.P.Evans, “Mathematical correction for stress in removed layers in X-ray diffraction residual stress analysis”, SAE Transactions, vol.66, pp.340-345(1958).
- 4) Douglas J. Hornbach, Paul S. Prevey, and Perry W. Mason, “X-ray diffraction characterization of the residual stress and hardness distributions in induction hardened gears”, First International Conference on Induction Hardened Gears and Critical Components, pp.69-76(1995).
- 5) V.Savaria, F. Bridier and P. Bocher, “Computational quantification and correction of the errors induced by layer removal for subsurface residual stress measurements”, International Journal of Mechanical Sciences, pp.184-195(2012).