熱処理した鋼のX線による残留応力の測定について*

本 山 盛 太 郎** 米 谷 茂*** 堀 沢 寛**

On the Measurement of Residual Stress in Heat Treated Steel by X-Ray Method

by

Moritaro MOTOYAMA,

(Engineering Laboratory, Nissan Motor Co., Ltd., Yokosuka)

Shigeru YONETANI

(Training Institute for Engineering Teachers of Yokohama National University, Yokohama)

and Hiroshi HORIZAWA

(Engineering Laboratory, Nissan Motor Co., Ltd., Yokosuka)

On the measurement of residual stress in the quenched steel and in the tempered steel, comparative studies have been made both of the X-ray method and the mechanical method, differing in the measurement procedure and in the principle, and their results have respectively been investigated. After the plates or the cylinders were removed in succession from the outer layer, the resultant strain has been calculated from the surface residual stress measured by the X-ray method in the remaining part during the removal process. Then it is compared with the bulk strain obtained by the measurement of the residual stress made by the mechanical method.

(Received Aug. 2, 1968)

1 緒 言

普通残留応力を求めるには、試料の一部を除去して残った部分の変形を測定して機械的に残留応力を求める。X線の方法では除去後残った部分の表面の残留応力を測定して、これより試料内部の残留応力を求めることが行なわれる。このようにX線の方法と機械的方法については、測定操作上、また原理上その測定方法は異なる。本報告においては、焼入れ、あるいは焼もどしをした円筒および板について、実用的な意味を兼ねて各条件数個の試料を用いて、これらの残留応力をX線的な Schaal 法、および機械的な方法で測定を行ない、両者の結果を比較検討したものである。

X線による残留応力の測定は、回折に寄与する特定の結晶面の格子ひずみの測定に帰着するわけであるが、回折線の移動に影響するものは、格子面間の一様なひずみのほかに、焼入れおよび焼もどしをして変態や、それに伴う大きな塑性変形を経過した試料については、¹⁾ 積層欠陥の存在、²⁾ 粒間応力、³⁾ 相応力などの微視的な応力による影響も考えられて、この測定結果は試料全体の巨視的な尺度で機械的に測定された結果といくぶん

異なる結果が予想される。また、残留応力を求める際、回折線の移動に弾性定数を含む定数を乗じて応力を計算するが、この弾性定数の正確な決定には $\sin^2\psi$ 法を用いて決定することが行なわれている。本実験においては、Schaal 法を用いているが、機械的測定による結果との比較に際して、弾性定数を乗じて求める応力の比較を行わず、Schaal 法によって得られた表面主応力方向の2方向より入射して撮影した回折線のずれより、応力状態を平面応力と仮定して、これより主応力方向の応力に対応する格子ひずみを求め、これと機械的測定によるひずみを対応させて残留応力の測定結果について検討をした。

2 実験方法

X線による応力測定にはガイフェルト社のエレスコープを用い写真法によった。本山らはさきに、この装置によって Schaal 法による残留応力測定について改良や精度などについて検討した結果を報告した。本実験は同様に行なったもので試験条件を略記すると、特性X線：CrK α 、照射面積：4.5 mm $\times$ 3mm、フィルム：サクラNタイプ、管電圧および電流：40 kV—10 $\sim$ 12 mmA、フィルタ：Vフィルタである。

次に、Schaal 法によって表面の主応力方向の格子ひずみを求める式を示す。Schaal 法は試料面法線よ

* 原稿受理 昭和43年8月2日

** 正会員 日産自動車(株)研究所 横須賀市夏島町

*** 正会員 横浜国立大学工教員養成所 横浜市区大岡町

り 45° 傾いた方向より X 線を照射して、回折写真のずれを求めこれから応力を得るものであるが、いずれを Δ 、回折角を θ 、 $\eta = 90^\circ - \theta$ として試料の表面法線より $45^\circ + \eta$ 、 $45^\circ - \eta$ 傾いた方向の格子面間のひずみを $\varepsilon_{45+\eta}$ 、 $\varepsilon_{45-\eta}$ 、試料とフィルムの距離を R とすると

$$\varepsilon_{45-\eta} - \varepsilon_{45+\eta} = \frac{\tan \eta \cos^2 2\eta}{2R} \Delta \quad (1)$$

の関係がある。次に Fig. 1 に示すように主応力方向 1.2 について Schaal 法によるずれを Δ_1 、 Δ_2 とし、このとき 1.2 方向の応力およびひずみを σ_1 、 σ_2 、 ε_1 、 ε_2 とすると、図示の任意の方向のひずみ $\varepsilon_{\varphi, \psi}$ は

Fig. 1. Principal strain $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ in surface and strain $\varepsilon_{\varphi, \psi}$ at arbitrary direction.

$$\varepsilon_{\varphi, \psi} = (\varepsilon_1 \cos^2 \varphi + \varepsilon_2 \sin^2 \varphi) \sin^2 \psi + \varepsilon_3 \cos^2 \psi \quad (2)$$

の関係がある。 $\varphi = 0$ 、 $\psi = 45^\circ + \eta$ 、 $\psi = 45^\circ - \eta$ 、および $\varphi = 90^\circ$ 、 $\psi = 45^\circ + \eta$ 、 $45^\circ - \eta$ の各場合を(2)式に代入すると

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_3 = (\varepsilon_{1, 45+\eta} - \varepsilon_{1, 45-\eta}) \frac{1}{\sin 2\eta} \quad (3)$$

$$\varepsilon_2 - \varepsilon_3 = (\varepsilon_{2, 45+\eta} - \varepsilon_{2, 45-\eta}) \frac{1}{\sin 2\eta} \quad (4)$$

を得る。また(1)式より

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{1, 45-\eta} - \varepsilon_{1, 45+\eta} &= \frac{\tan \eta \cos^2 2\eta}{2R} \Delta_1 \\ \varepsilon_{2, 45-\eta} - \varepsilon_{2, 45+\eta} &= \frac{\tan \eta \cos^2 2\eta}{2R} \Delta_2 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

の関係がある。平面応力状態とすると応力とひずみの関係より

$$\varepsilon_3 + \frac{\nu}{1-\nu} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) = 0 \quad (6)$$

ν : ポアソン比, そこで(3)~(6)式より

$$\varepsilon_1 = -\frac{1}{1+\nu} \frac{\cos^2 2\eta}{4R \cos^2 \eta} (\Delta_1 - \nu \Delta_2) \quad (7)$$

$$\varepsilon_2 = -\frac{1}{1+\nu} \frac{\cos^2 2\eta}{4R \cos^2 \eta} (\Delta_2 - \nu \Delta_1) \quad (8)$$

上式より、表面応力方向 1.2 のひずみが得られる。またヤング率を E とし、応力とひずみの関係を用いると

$$\sigma_1 = -\frac{E}{1+\nu} \frac{\cos^2 2\eta}{4R \cos^2 \eta} \Delta_1 \quad (9)$$

$$\sigma_2 = -\frac{E}{1+\nu} \frac{\cos^2 2\eta}{4R \cos^2 \eta} \Delta_2 \quad (10)$$

が得られる。実験に際しては R は常に 50 mm になるようにし、 $\nu = 0.28$ として試料の (211) 面間のひずみを求めた。また応力を求めるときは $E = 21\,000 \text{ kg/mm}^2$ とした。

実験は、まず、Fig. 2 に示すような 0.4% C の中空円筒を数個油焼入れおよび水焼入れをし、この試料を硝酸によって内層の逐次除去をし、X 線の測定の間は、試料外表の特定の対称 2 点について、Schaal 法による軸方向、および円周方向の回折線のずれを測定して(7)式より軸方向の残留ひずみを求め、また、機械的には内層除去による軸方向の長さを測定した。これらより内層除去によって得られる軸方向の X 線のひずみの変化と機械的ひずみの一致を検討した。

Fig. 2. Size of hollow cylinder specimen.

Fig. 3. Size of plate specimen.

次に、Fig. 3 に示す 0.4% C の数個の板を水焼入れをし、板の上下面を逐次腐食除去をし、板の上下の対称な点について、除去過程の表面の残留ひずみを測定し、これより次に述べる式によって除去に伴う長手方向のひずみを計算し、これと機械的方法による実測結果と比較検討した。

外表除去過程の試料の X 線的な表面ひずみより、板の除去に伴う長手方向のひずみを求める式を述べる。板の厚さを $2z_0$ とする。板の長手方向の残留応力を ${}_0\sigma_x$ 、 ${}_0\sigma_y$ とする。これは中央面に対称で厚さのみの関数とする。いま両面より除去をして厚さ $2z$ になったとする。このときの板の表面の残留応力を ${}_0\sigma'_x$ 、 ${}_0\sigma'_y$ とする。いま焼入れの場合であるから ${}_0\sigma'_x = {}_0\sigma'_y$ 、 ${}_0\sigma'_x = {}_0\sigma'_y$ と考える。すると次のつりあい式が成立する。

$${}_0\sigma'_x = {}_0\sigma_x + \frac{1}{z} \int_z^{z_0} {}_0\sigma_x dz \quad (11)$$

両辺に z をかけ、次いでこれを微分すると

$$\frac{d({}_0\sigma'_x z)}{dz} = \frac{{}_0\sigma'_x}{z} + \frac{d({}_0\sigma'_x)}{dz}$$

これを z より z_0 まで積分すると、 ${}_0\sigma'_x(z_0) = {}_0\sigma'_x(z_0)$ であり

$${}_0\sigma_x = {}_0\sigma_x' - \int_z^{z_0} \frac{{}_0\sigma_x'}{z} dz \quad (12)$$

また、板を $2z$ まで外層除去したとき、残った部分に一樣に付加する応力を σ_x とすると

$$\int_z^{z_0} {}_0\sigma_x dz = z\sigma_x \quad (13)$$

である。(13)式に(12)式を代入し、 ${}_0\sigma_x'$ 、 σ_x に対応するひずみを ${}_0\varepsilon_x'$ 、 ε_x として応力とひずみの関係

$${}_0\varepsilon_x' = \frac{1}{E}({}_0\sigma_x' - \nu {}_0\sigma_y') = \frac{1}{E}(1-\nu){}_0\sigma_x' \quad (14)$$

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}(1-\nu)\sigma_x \quad (15)$$

を用いると

$$\varepsilon_x = \int_z^{z_0} \frac{{}_0\varepsilon_x'}{z} dz \quad (16)$$

を得る。(16)式より表面の残留ひずみ ${}_0\varepsilon_x'$ より ε_x を求め、機械的測定による ε_x と比較できる。

次に、中空円筒について、板の場合と同様な実験を行なった。中空円筒として、試料組成 0.4 % C の Fig. 4 に示す 11.3 mm ϕ 長さ 80 mm のものを水焼れをし、これを 100, 200, 300, 400°C の各温度に焼もどしをした。各条件数個の試料を熱処理をし、これらについて外層より逐次除去を行ない、X 線的には Schaal 法で除去過程の試料表面の対称な 2 点についての平均の軸方向、円周方向の残留ひずみを求め、これより次に示す式によって、除去によってもたらされる軸方向のひずみを計算し、これと機械的測定によるひずみとの比較を行なった。

Fig. 4. Size of solid cylinder specimen.

除去過程の試料の表面の軸方向、および円周方向の残留ひずみ ${}_0\varepsilon_z'$ 、 ${}_0\varepsilon_t'$ より軸方向のひずみ ε_z を求める式を示す。円筒は軸方向、円周方向および半径方向に ${}_0\sigma_z$ 、 ${}_0\sigma_t$ 、 ${}_0\sigma_r$ なる残留応力を持ち、これらの応力は半径 r の関数であるとする。そして軸方向に試料は充分長いとする。いま、試料を半径 r_0 から r まで除去したとする。このとき残った円筒に除去によって一樣な応力が付加するとする。するとこの円筒の外表面の軸方向および円周方向の残留応力を ${}_0\sigma_z'$ 、 ${}_0\sigma_t'$ とすると、軸方向の力のつりあい式として次の式が成立する。

$${}_0\sigma_z'(r)\pi r^2 = {}_0\sigma_z(r)\pi r^2 + \int_r^{r_0} 2{}_0\sigma_z\pi r dr \quad (17)$$

(17)式を微分すると

$$\frac{d{}_0\sigma_z}{dr} = 2\frac{{}_0\sigma_z'}{r} + \frac{d{}_0\sigma_z'}{dr}$$

上式を r より r_0 まで積分すると、 ${}_0\sigma_z(r_0) = {}_0\sigma_z'(r)$ であるから

$${}_0\sigma_z = -2 \int_r^{r_0} \frac{{}_0\sigma_z'}{r} dr + {}_0\sigma_z' \quad (18)$$

また、半径 r までの除去で、半径 r の部分における半径方向の残留応力 ${}_0\sigma_r(r)$ が解放されるから、結果として半径 r の円筒に ${}_0\sigma_r(r)$ なる外圧が加わることになる。すると Lamé の円筒理論から、

$${}_0\sigma_t'(r) = {}_0\sigma_t(r) - {}_0\sigma_r(r) \quad (19)$$

円周方向と半径方向の応力のつりあい式は

$${}_0\sigma_t = r \frac{d{}_0\sigma_r}{dr} + {}_0\sigma_r \quad (20)$$

であるから、(20)式を(19)式に代入すると

$$\frac{d{}_0\sigma_r}{dr} = \frac{{}_0\sigma_t'}{r}$$

上式を積分して、 ${}_0\sigma_r(r_0) = 0$ であるから

$${}_0\sigma_r = - \int_r^{r_0} \frac{{}_0\sigma_t'}{r} dr \quad (21)$$

(21)式を(20)式に代入すると

$${}_0\sigma_t = - \int_r^{r_0} \frac{{}_0\sigma_t'}{r} dr + {}_0\sigma_t' \quad (22)$$

また、半径 r_0 より r までの除去によって残った円筒に生ずる軸方向のひずみ ε_z は

$$\varepsilon_z = 2\nu \frac{{}_0\sigma_r}{E} + \frac{1}{\pi r^2 E} \int_r^{r_0} 2\pi r {}_0\sigma_z dr \quad (23)$$

の関係がある。(23)式に(18)、(20)式を代入し、応力とひずみの関係

$${}_0\sigma_z' = \frac{E}{1+\nu} \left\{ {}_0\varepsilon_z' + \frac{\nu}{1-\nu} ({}_0\varepsilon_z' + {}_0\varepsilon_t') \right\} \quad (24)$$

$${}_0\sigma_t' = \frac{E}{1+\nu} \left\{ {}_0\varepsilon_t' + \frac{\nu}{1-\nu} ({}_0\varepsilon_t' + {}_0\varepsilon_z') \right\} \quad (25)$$

を用いると次の式を得る。

$$\varepsilon_z = 2 \int_r^{r_0} \frac{{}_0\varepsilon_z'}{r} dr \quad (26)$$

したがって、(26)式より X 線の残留ひずみ ${}_0\varepsilon_z'$ から ε_z を計算して、機械的測定による ε_z と比較できる。また、各熱処理のものについて、各条件 2 個の試料について、(9)、(10)式の関係から直接応力を求め、(18)、(21)、(22)式を用いて残留応力分布を計算した。

3 実験結果

3・1 中空円筒に関する実験

この実験は残留応力をもつ部材について、その一部を逐次除去したとき、残った部分に付加する弾性ひずみを X 線的方法と機械的方法によって比較したものである。Fig. 5, 6 に水焼入れ、および油焼入れをしたものについて、内層除去に伴う外表中央部分における X 線の残留ひずみを(7)、(8)式より求めた結果と、試料全体について機械的に測定した軸方向のひずみを示してある。X 線の測定および機械的測定はそれぞれ 2 個および 3 個の試料について測定した。図中横軸は除

Fig. 5. Axial residual strain by X-ray method at the outer surface of cylinder and mechanical axial strain resulted by successive removal of inner layer on water quenched specimens.

Fig. 6. Axial residual strain by X-ray method at the outer surface of cylinder and mechanical axial strain resulted by successive removal of inner layer on oil quenched specimens.

去中の試料内径である。

円筒は内層の除去によって残った部分に一樣に軸方向の変形が現われるわけであるが、水焼入れ、油焼入れいずれの場合も、X線のひずみの変化と、機械的測定によるひずみはほぼ一致する。X線のひずみは試料外表の特定の部分についての局所的な小領域における格子面間距離の移動によるものであり、このため機械的ひずみの測定結果に比べていくぶん分散を示すことは避られない。このように内層除去によって付加するX線のひずみと機械的ひずみの一致は、さきに示した板および円筒の残留応力分布を求める式において、外層除去によって試料内に応力ないしひずみが一樣に付加すると仮定したが、この結果から(14)あるいは(18)、(21)、(23)式より残留応力分布を求めうることがわかる。

3・2 平板に関する実験

板を水焼入れしたときは、残留応力分布は板内一樣で厚さのみの関数で最も単純な分布を示す。Fig. 7

Fig. 7. Strain intransversal direction resulted by successive removal of outer layer on water quenched plate specimens.

に2個の試料について、板の上下面を除去したときの板の表面のX線の残留ひずみから、(10)式より板の長手方向の除去に伴って現われるひずみ ϵ_x を計算した結果と、4個の試料について機械的方法によるひずみ ϵ_x を示す。試料間のばらつきや焼入れの不同性を考慮しても、両者の結果はよく一致することがわかる。

3・3 中実円筒に関する実験

水焼入れ、および 100, 200, 300, 400℃ 焼もどしをした各条件2個の試料について、外層除去過程中的試料のX線の表面残留ひずみより、(20)式を用いて外層除去に伴う軸ひずみ ϵ_z を計算した結果と、また同一条件3個の試料について機械的な軸ひずみを測定した結果を Fig. 8 に示す。また、Schaal 法より直接 $E = 21\,000\text{ kg/mm}^2$ として(9)、(10)式から表面残留応力を求め、(18)、(21)、(23)式より2個の試料について残留応力分布を計算した結果を Fig. 9 に示す。

各条件のものについてX線的に求めた軸ひずみと、機械的測定による軸ひずみとの対応を説明する。まず、焼入れのままのものは、Fig. 9 に示すように、残留応力は三軸応力状態であって、軸方向と円周方向の応力は大きく、それぞれ異なった分布であって板のように単純ではない。この場合軸ひずみの対応は、機械的測定によるものは、外層除去の初期にやや大きなひずみが現われているが、全体として両者のひずみはほぼ一致する。

100, 200℃ 焼もどしのものは、Fig. 9 の残留応力分布において、2個の試料の残留応力は同じ傾向の分布であるがいくぶん差のある分布を示している。Fig. 8 の軸ひずみにおいても、2個の試料のX線の軸ひずみ曲線は焼入れのものに比べてやや分離している。また、機械的ひずみとの対応においては、除去に伴うひずみ曲線の変化の傾向は同じであるが、最終的にひずみの大きさが異なっている。この場合、組織としては、焼もどしによって全体としての残留応力の緩和はあるが、組織的に、マルテンサイトマトリックスより微細

Fig. 8. Axial strain resulting by successive removal of outer layer on the quenched and tempered cylinder specimens.

な ϵ 炭化物の析出、さらに200°C焼もどしのものになると、マルテンサイトはC%濃度の低いマルテンサイトに移行するなどのことがあって、X線の応力測定に際して、格子面間距離の移動に基づく巨視的な応力のほかに、粒間応力などの微視的の応力による影響も考えられる場合である。X線の測定による2本の試料の結果の分散は、焼入れに巨視的の残留応力の不一致に、さらに焼もどしによるこのような組織的な影響が加算した結果によるものであろう。なお、このとき、除去最終時のひずみの値は機械的測定とX線の結果で異なっているが、いま、(20)式を微分すると、 $r(de_z/dr) = -2\epsilon_z'$ の関係があるから、試料内各部について両方法による ϵ_z' を比較すると、これは軸ひずみ曲線 ϵ_z のこう配によって決まるものであるから(20)式による結果とまた異なり、これより両方法による結果の別な検討

Fig. 9. Residual stress distribution in the quenched and tempered specimens.

ができると思われる。よって両方法による軸ひずみ ϵ_z の曲線において ϵ_z の値ばかりでなく、曲線のこう配の一致も重要である。

次に300, 400°C焼もどしの場合は、Fig. 10に示すように、残留応力は焼もどしによって減少しているが、組織的にはセメントの析出、マルテンサイトのフェライトへの分解などがあり、この場合もX線の測定に際して微視的の応力の影響が考えられる場合である。300°C焼もどしのときは、2本の試料によるX線の測定の軸ひずみは小径のところで大きく分離しており、また機械的測定による3本の試料の軸ひずみ曲線はいくぶん差があるが、それぞれについて平均の軸ひずみ曲線を考えると両者の結果は一致するようである。さらに、焼もどし段階の進んだ400°C焼もどしのもは、同じく両方法による各試料の軸ひずみ曲線はいくぶん分散を示す。また、その対応性としては、除去過程初

期の径の大きい部分でのひずみの差を調整して考えると、以後同一傾向の曲線となるようである。

4 考察および結言

0.4% Cの炭素鋼材の平板および円筒を水焼入れおよび焼もどしをした試料について、これらを外層除去をしたときの弛緩ひずみをX線の Schaal 法によって求め、また機械的な測定を行なって、両方法による残留応力の測定について比較を行なった。

実験は1条件2～3本の試料について行なったが、実際の比較のためには本来なら1本の試料についての結果の検討が望ましい。しかし、本実験では原理上、X線による測定の場合は、除去外層の表面の局部のひずみの測定であり、そして応力分布を板なら常に中央面に対称とし、円筒なら軸対称と理想な場合を仮定して、全体的な変形による機械的ひずみとの対応を求めたものである。したがって、測定対象が焼入れ後のもののようにこの理想的状態よりいくぶんの偏差を生じやすいものについては、1個の試料についての結果の比較より、たとえ試料間のばらつきを考慮しても数個の試料についての結果の検討を行なうほうがより実用的にも有利な結果を得ると思われる。本実験では機械的測定結果より2本の試料のX線の測定結果のほうがばらつきは大きい。これはX線測定結果のほうが試料間のばらつきにより敏感であるためであろう。

次に、X線の残留応力の測定結果と機械的方法による残留応力の測定結果の比較を行なうとき問題になることは、まずX線の測定の場合のいわゆる回折強度に及ぼす⁵⁾LPA 因子の影響、Schaal 法と機械的測定との精度、および微視的残留応力の影響である。各因子について検討すると、まず LPA 因子による影響としては、本実験のような大きな焼入れ残留応力の値に対する比較を行なうときはさほど影響をもつものとは考えられない。また、測定方法の精度としては、Schaal 法自体このような大きな残留応力の測定の場合、回折線の広がりがあったとしてもかなり精度よく求められ、また機械的測定も方法として試料両端面間の長さを測定するもので最も平易な操作で測定できて精度は出しやすい。したがって、最終的に問題になるのは、微視的残留応力の影響である。

一般に、焼入れしたものはそのマルテンサイト変態を経過することによって著しい格子欠陥をもっている。この程度はC%や、焼入方法の急烈さによって異なることはもちろんである。したがって、本実験のように焼入れの場合X線のと機械的測定の結果のかなりの一致は、一般的な結論とは別に、本実験のような0.4% C鋼の水焼入れしたものについては、焼入れによる微視的応力の影響があるにしても、両方法の結果はかなり一致するということが言えるようである。

次に焼もどしをしたものについては、100, 200°C焼もどしするとき、マルテンサイトマトリックス内の微視的な内部ひずみの回復と微細な ϵ 炭化物の析出がある。この状態はC%によって影響を受けるものである。本実験に現われた両方法によるかなりの差は、焼入時に一致した状態から、X線の場合、微視的な組織の変化とともに微細に析出した ϵ 炭化物などによる粒間応力などからの影響が加わるためこのような差が現われたものと考えられる。したがって、この差もC%や焼入方法や、焼入時の残留応力の状態によって異なるものとなるであろう。

300, 400°C 焼もどし の場合は、一致はいくぶん弱い⁶⁾が、(2 θ)式を微分して求められる表面残留ひずみ σ_z' について対応性を調べると、試料各部では両者はかなり一致するのではないかと考えられる。この場合地はフェライトであり、析出物も凝集して粒間応力として残留応力に影響を及ぼすほどの効果はないと思われるが、組織とは別にこの場合残留応力の値は小さい。このためこのような測定方法の場合、測定方法自体による誤差が結果の信頼度に影響してくるものと思われる。
(昭和43年7月18日 第7回X線材料強度に関するシンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 西山善次, 清水謙一, 日本金属学会会報, **2**, 153 (1963).
- 2) Greenough, G B, Proc. Roy. Soc., **197A**, 556 (1949).
- 3) Reimer, L., Z. Metallkunde, **46**, 39 (1955).
- 4) 本山盛太郎, 榎並豊一郎, 堀沢 寛, 加藤紀久雄, 材料試験, **11**, 33 (1962); 材料, **12**, 835, 882 (1963).
- 5) 日本材料学会編, “X線応力測定法”(1966) 養賢堂