

# 放射光によるショットピーニング材の残留応力分布評価†

秋庭 義明\*      田中 啓介\*      鈴木 賢治\*\*  
柳瀬 悦也\*\*\*      西尾 光司\*\*\*\*      楠見 之博\*\*\*\*\*  
尾角 英毅\*\*\*\*\*      新井 和夫\*\*\*\*\*

## Evaluation of Residual Stress Distribution in Shot-Peened Steel by Synchrotron Radiation

by

Yoshiaki AKINIWA\*, Keisuke TANAKA\*, Kenji SUZUKI\*\*, Etsuya YANASE\*\*\*,  
Koji NISHIO\*\*\*\*, Yukihiro KUSUMI\*\*\*\*\*, Hideki OKADO\*\*\*\*\* and Kazuo ARAI\*\*\*\*\*

The in-depth distribution of residual stresses in shot-peened steels was measured by using high energy X-rays from a synchrotron radiation source. The relation between the  $2\theta$  and  $\sin^2\psi$  was obtained with the side-inclination method ( $\psi$  diffractometer). The distribution of residual stresses was first evaluated by the nonlinearity of the  $\sin^2\psi$  diagram by a simplex method. The estimated stress agreed with the distribution determined through the  $\sin^2\psi$  method by using Cr-K $\alpha$  radiation combined with the conventional surface removal method. A new method was proposed to estimate the stress value of the distributed residual stress. The new method was a combination of the side-inclination method and the iso-inclination method ( $\omega$  diffractometer) to maintain the penetration depth constant. The  $\sin^2\psi$  diagram could be approximated by the linear relationship. The evaluated stress distribution agreed well with the distribution obtained by the surface removal method.

**Key words** : X-ray stress measurement, Synchrotron radiation, Shot peening, Residual stress, High energy X-rays

### 1 緒 言

機械構造部材の破壊の大部分は部材表面を起点とする。特に疲労破壊や応力腐食割れに対しては、表面近傍の引張残留応力の影響が極めて大きく、破壊強度の向上には表面処理による圧縮残留応力の導入が有効となる。圧縮残留応力の導入手法としては、従来からショットピーニングが用いられており、近年では施工の簡易さや材料深部までの圧縮層の形成を目的としたウォータージェットピーニング<sup>1)</sup>やレーザピーニング<sup>2)</sup>が開発されている。これらの表面処理に際しては、極表面での応力のみならず、その加工層である0.1mmから1mm程度までの内部の応力分布が重要であり、その高精度な測定が品質管理に際して求められる。

X線回折法は、結晶材料の残留応力を測定する手法として有力な手法であり広く用いられている。しかしながら、侵入深さが浅いため、表面近傍の情報しか得られず、内部の応力分布を得るためには、電解研磨等によって逐次表面層を除去しながら測定する必要があり、多くの時間と労力を必要とする。これに対して放射光では高輝度かつ高エネルギーのX線を得ることができ、より内部の

情報が得られるため、逐次除去によらずに非破壊的に応力分布が評価できる可能性がある。柳瀬ら<sup>3)</sup>は高エネルギーの放射光を用いて、 $\sin^2\psi$ が0から0.5までの範囲で、通常の $\sin^2\psi$ 法による応力評価が可能であることを示した。また、X線入射角を一定にすることによって、侵入深さが近似的にほぼ一定となる測定方法を提案している。<sup>4)</sup>しかしながら、入射角が大きい場合には、 $\sin^2\psi$ が大きくなるにつれて侵入深さが浅くなる問題があった。

本研究では、高エネルギー放射光を用いて、ショットピーニング処理された鋼板の残留応力を測定し、表面下の残留応力分布を $2\theta$ - $\sin^2\psi$ 線図の非線形性より検討した。ついで、侵入深さが厳密に一定となる条件で測定を行い、材料表面下の残留応力分布を評価する手法について検討した。

### 2 実験方法

#### 2.1 供試材および試験片

供試材は中炭素鋼 (JIS S45C) で、機械加工後に850℃で1時間保持した後に炉冷した。熱処理後の機械的性質は、降伏応力が319MPa、引張強さが583MPaである。試験片は4×10×56mmの直方体である。10×

† 原稿受理 平成14年10月15日 Received Oct. 15, 2002  
\* 正会員 名古屋大学工学研究科 〒464-8603 名古屋市千種区不老町, Dept. of Mech. Eng., Nagoya Univ., Chikusa-ku, Nagoya, 464-8603  
\*\* 正会員 新潟大学教育人間科学部 〒950-2102 新潟市五十嵐二の町, Faculty of Ed. Human Sci., Niigata Univ., Igarashi, Niigata, 950-2102  
\*\*\* 正会員 日本原子力研究所 〒619-0215 京都府相楽郡木津町, Japan Atomic Energy Res. Inst., Souraku-gun, Kyoto, 619-0215  
\*\*\*\* 川崎重工(株) 〒673-8666 明石市川崎町, Kawasaki Heavy Industries, Ltd., Kawasaki-cho, Akashi, 673-8666  
\*\*\*\*\* (株)神戸製鋼所 〒651-8585 神戸市中央区脇浜町, Kobe Steel, Ltd., Chuo-ku, Kobe, 651-8585  
\*\*\*\*\* (財)高輝度光科学研究センター 〒679-5198 兵庫県佐用郡三日月町, Japan Synchrotron Radiation Res. Inst., Sayou-gun, Hyogo, 679-5198  
\*\*\*\*\* (財)新産業創造研究機構 〒678-1205 兵庫県赤穂郡上郡町光都, The New Industry Res. Org., Akou-gun, Hyogo, 678-1205

56mm<sup>2</sup>の面を吸引噴射式のショットピーニング機によって処理した。ショット粒には硬さHV = 400の鋳鋼を使用した。Table Iに示す3種類の条件で処理を行った。ショット粒の公称粒径は0.1から0.8mm、噴射空気圧は0.1~0.3MPa(1~3気圧)、カバレッジは60から100%と変化させた。

## 2・2 X線測定条件

放射光による測定に先立ち、残留応力分布の詳細な分布を測定するため、表面層を逐次除去することによって表面下の応力分布を測定した。測定には、回転ターゲットを有するX線回折装置(MAC Science MXP18)を用いた。特性X線にはCr-K $\alpha$ 線を用い、回折面にはFe 211回折を用い、 $\sin^2\psi = 0 \sim 0.6$ の範囲で、0.1間隔で測定した。Table IIに測定条件をまとめる。

高エネルギーX線回折にはSPring-8のビームラインBL02B1を使用した。本ビームラインはX線エネルギーが17~72keVの範囲で測定が可能であり、7軸型のゴ

Table I. Condition of shot peening.

Specimen	Nominal shot diameter (mm)	Air pressure (MPa)	Coverage (%)
HP(No.2)	0.8	0.3	100
MP(No.1)	0.4	0.15	60~70
LP(No.3)	0.1	0.1	100

Table II. X-ray conditions for stress measurement by Cr-K $\alpha$  radiation.

Method	Parallel beam method
Characteristic X-ray	Cr-K $\alpha$
Diffraction line	211
Diffraction angle (deg)	156.41
Filter	V
Tube voltage (kV)	30
Tube current (mA)	200
Scanning speed (deg/min)	1
Preset time (sec)	2

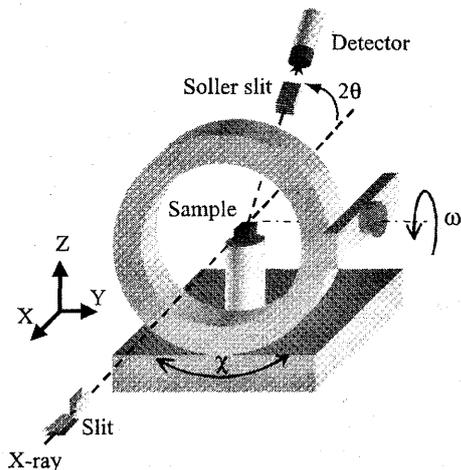


Fig. 1. Experimental setup.

ニオメーターを有している。<sup>5)</sup> Fig. 1にゴニオメーターの概略図を示す。 $\omega$ 軸、 $\chi$ 軸を制御することにより並傾法および側傾法での測定が可能である。

本研究では72keVのエネルギーレベルで実験を行った。波長の校正には鉄粉末を用いた。回折面には孤立ピークが得られる321面および複合ピークである633, 552, 721回折面による多重回折線を用いて測定を行った。回折プロファイルをガウス曲線近似することによって回折角を決定した。Table IIIに放射光による測定条件をまとめる。入射側に縦0.2mm、横2mmのスリットを、受光側には発散角0.03degのソーラスリットを装着した。

測定は $\chi$ 軸を制御することによって、 $\sin^2\psi$ が0から0.9まで0.05間隔で側傾法によって行った。 $2\theta$ - $\sin^2\psi$ 線図の非線形解析に際しては、ショットピーニング処理による表面粗さの影響を考慮して、ショットピーニング処理のままの状態と表面を0.3 $\mu$ mのアルミナ粉によってバフ研磨した状態で行った。Table IIIの( )付きの値はバフ研磨材の測定条件である。Table IVに研磨量および粗さをまとめる。なお、試料は60rpmの回転試料台を用いて面内の平均値として測定した。

次いで、 $\omega$ 軸と $\chi$ 軸を制御することによってX線侵入深さが一定となる条件での測定を行った。

## 2・3 $\sin^2\psi$ 線図の非線形解析

X線により測定される応力は、表面下の応力分布の重み付き平均であり、次式で与えられる。<sup>6)~8)</sup>

$$\langle\sigma_1(T)\rangle = \frac{\int_0^h \sigma(z) e^{-z/T} dz}{\int_0^h e^{-z/T} dz} \quad (1)$$

ここで、 $z$ は表面からの距離、 $\sigma(z)$ は残留応力分布、 $h$

Table III. X-ray conditions for stress measurement by synchrotron radiation.

Wave length (nm)	0.01718 (0.01697)	
Monochromatic crystal	Si 311	
Diffraction plane	Fe 321	Fe 633, 552, 721
Diffraction angle $2\theta_0$ (deg)	12.88 (12.72)	25.45 (25.14)
Detector	Scintillation counter	
Solar slit (deg)	Divergence 0.03	
Preset time (sec)	10 (4)	
Scan speed (deg/step)	0.02	

( ): Condition for buffed specimen.

Table IV. Conditions of polishing.

Specimen	Removal depth $z$ ( $\mu$ m)	Roughness $R_a$ ( $\mu$ m)
HP	0	0.615
	9.5	0.352
MP	0	0.469
	6.5	0.147
LP	0	0.375
	8.8	0.135

は板厚,  $T$  は侵入深さである. 試験片厚さが, 侵入深さ  $T$  に対して十分大きいとすると次式となる.

$$\langle \sigma_1(T) \rangle = \frac{1}{T} \int_0^h \sigma(z) \exp(-z/T) dz \quad (2)$$

また, X線で測定される回折角も重み付き平均応力で表されるため, 回折角は次式で与えられる.

$$\begin{aligned} \langle 2\theta_{\phi\phi} \rangle = & -\frac{2(1+\nu)}{E} \tan \theta_0 (\langle \sigma_1(T) \rangle \cos^2 \phi \\ & + \langle \sigma_2(T) \rangle \sin^2 \phi) \sin^2 \phi \\ & + \frac{2\nu}{E} \tan \theta_0 (\langle \sigma_1(T) \rangle + \langle \sigma_2(T) \rangle) + 2\theta_0 \end{aligned} \quad (3)$$

ここで,  $\theta_0$  は無ひずみ状態の回折角である. ショットピーニング材については, 異方性がなく等二軸状態と考えられ, また本研究のように回転試料台を用いて面内の平均的な値を測定する場合,  $\langle \sigma_1(T) \rangle = \langle \sigma_2(T) \rangle$  であるため,  $\phi=0$  のとき次式となる.

$$\begin{aligned} \langle 2\theta_{\phi\phi} \rangle = & -\frac{2(1+\nu)}{E} \tan \theta_0 \langle \sigma_1(T) \rangle \cos^2 \phi \\ & + \frac{4\nu}{E} \tan \theta_0 \langle \sigma_1(T) \rangle + 2\theta_0 \end{aligned} \quad (4)$$

ここで,  $\langle \sigma_1(T) \rangle$  は式 (1) より得られる.  $\langle \sigma_1(T) \rangle$  が内部方向に分布を有する場合,  $\psi$  角の変化とともに侵入深さが変化するため,  $2\theta$ - $\sin^2 \psi$  線図は非線形となる. 本研究では, X線によって逐次表面研磨で得られた結果から表面除去の影響を補正した後の残留応力分布をもとに, 式 (4) によって  $2\theta$ - $\sin^2 \psi$  線図を求め, 実験結果と比較した.

次いで, 実験的に得られた  $2\theta$ - $\sin^2 \psi$  線図をもとに, シンプレックス法を用いて残留応力分布の予測を行った.<sup>9)</sup> このとき, 逐次表面除去で得られる補正前の測定応力分布に対して最適化を行い, その分布形を三次の多項式とした.

$$\sigma_r = a_0 + a_1 z + a_2 z^2 + a_3 z^3 \quad (5)$$

圧縮残留応力が消失する位置での残留応力およびその勾配をゼロとし, 最適化変数は  $2\theta_0$ , 圧縮残留応力深さ, および三次多項式の係数のうちの2つの合計4つである. その結果をもとに, 後述のように表面除去の効果を補正して残留応力分布を求めた.

#### 2.4 侵入深さ一定法

前述のごとく, X線法によって測定される応力は, 試料内部方向の重み付き平均であり, 式 (1) で与えられる. このとき,  $\psi$  角の変化によらず侵入深さを一定にすることができれば,  $2\theta$ - $\sin^2 \psi$  線図は直線となり, 非線形解析によらずに残留応力が評価できる.

並傾法におけるX線経路についての模式図を Fig. 2 に示す. 図中の  $\omega$  は, X線の入射角度である. ここで, 側傾法に対する  $\chi$  軸回転を重畳すると, X線の侵入深さは次式で表される.<sup>4)</sup>

$$T = \frac{\cos \chi \sin \omega}{\mu} \frac{\sin(2\theta_0 - \omega)}{\sin \omega + \sin(2\theta_0 - \omega)} \quad (6)$$

ここで,  $\mu$  は線吸収係数である. 試料面法線と回折面法線のなす角度  $\psi$  は,  $\chi$  と  $\omega$  を用いて次式のようになる.

$$\cos \psi = \cos \chi \cos(\theta_0 - \omega) \quad (7)$$

すなわち, 式 (6) を用いて, 任意の  $\chi$  角を与えることに

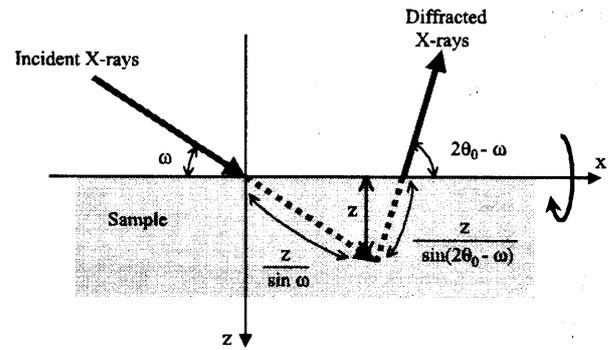


Fig. 2. Penetration of X-rays.

よって, 侵入深さ  $T$  が一定となるような  $\omega$  を求めることができる. なお, 柳瀬ら<sup>4)</sup> は入射角  $\alpha$  を一定とする条件を適用し, 近似的に侵入深さが一定となる方法を提案している. このとき,  $\alpha$  と  $\chi$ ,  $\omega$  は次式で関係する.<sup>4)</sup>

$$\sin \alpha = \cos \chi \sin \omega \quad (8)$$

この方法では  $\alpha$  が小さい場合には侵入深さがほぼ一定となるが,  $\alpha$  が大きくなるとその誤差が大きくなる. そこで本研究では, 式 (6) をもとに  $\chi$  角として, 0, 15, 25, 30, 40, 45, 50, 55, 60, 70deg を基本とし, 侵入深さが一定となる  $\omega$  を求めた. なお, 侵入深さは  $\psi=0$  における侵入深さ  $T_0$  に対する比 ( $T/T_0$ ) が 0.3, 0.5 および 0.7 の三種類について測定した.  $\psi=0$  における侵入深さは次式となる.

$$T_0 = \frac{\sin \theta_0}{2\mu} \quad (9)$$

321 および 633, 552, 721 回折に対する  $T_0$  はそれぞれ 95, 186  $\mu\text{m}$  である. なお, 線吸収係数は  $5.902\text{cm}^{-1}$  である.

侵入深さ一定の条件のもとで測定された応力  $\langle \sigma_1(T) \rangle$  は, 式 (1) で積分範囲を  $\infty$  に拡張し, ラプラス変換を用いることにより残留応力分布  $\sigma(z)$  へと変換できる.

### 3 実験結果

#### 3.1 逐次研磨による残留応力分布

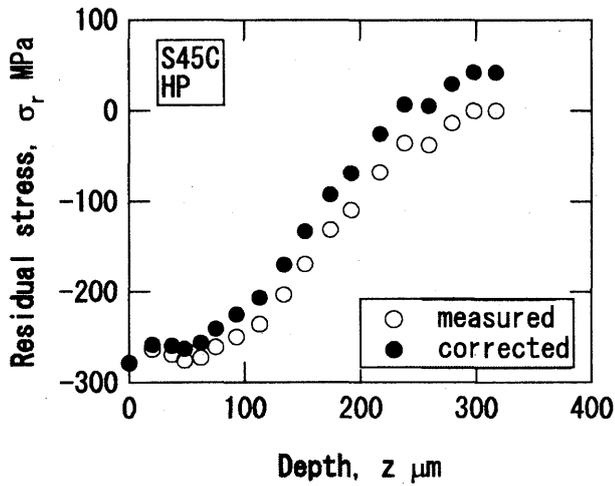
三種類の条件でショットピーニング処理された材料の残留応力分布を, Cr-K $\alpha$  特性X線を用いて, 電解研磨による逐次研磨法によって測定した. 得られた結果を Fig. 3 に示す. 図中の白抜き印は測定値, 黒塗り印は表面除去の補正を行った結果である.<sup>10)</sup>

$$\begin{aligned} \sigma_R(z) = & \sigma_m(z) + 2 \int_0^z \frac{\sigma_m(\xi)}{h-\xi} d\xi \\ & - 6(h-z) \int_0^z \frac{\sigma_m(\xi)}{h-\xi} d\xi \end{aligned} \quad (10)$$

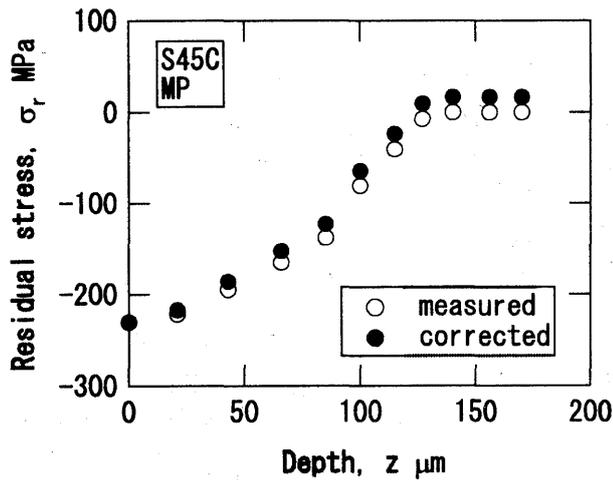
(a), (b) および (c) はそれぞれ, HP, MP, LP 材の結果である. 表面の残留応力値はそれぞれ, -280, -230, -220 MPa で, 条件の厳しい HP 材が圧縮残留応力が最も大きい. また, 圧縮残留応力の深さは, それぞれ約 300, 140, 70  $\mu\text{m}$  である.

#### 3.2 $\sin^2 \psi$ 線図の非線形解析

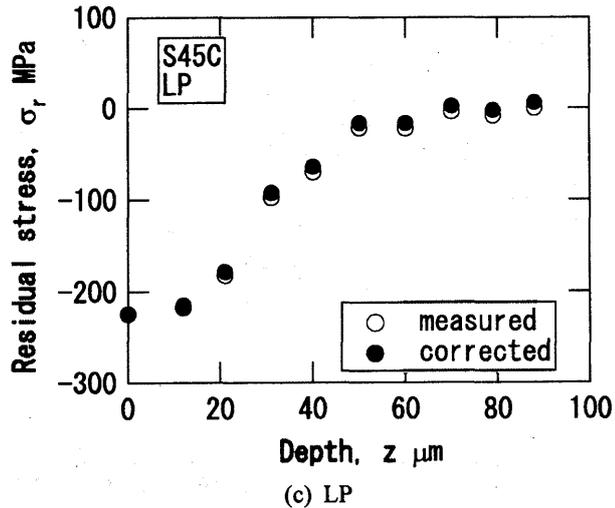
まずはじめにショットピーニング処理のままの表面状態で, 高エネルギー放射光による測定を行った. Fig. 4 に MP 材の  $2\theta$ - $\sin^2 \psi$  線図を示す. 図中の○印は実験結果で,



(a) HP



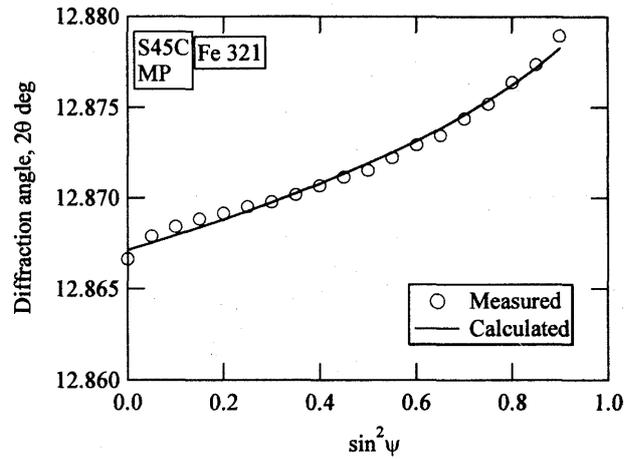
(b) MP



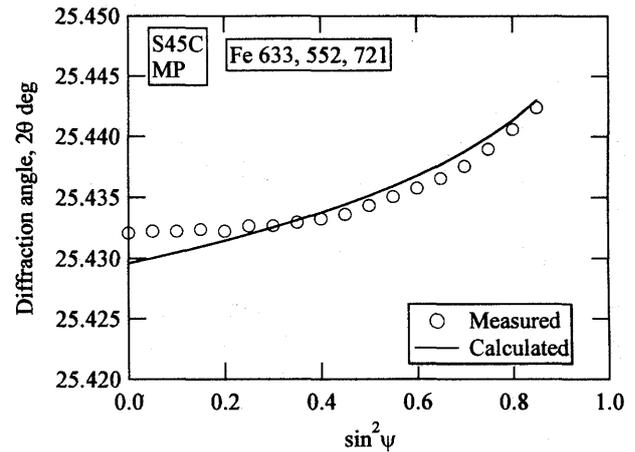
(c) LP

Fig. 3. Residual stress distribution measured by Cr-K $\alpha$  radiations.

実線は Fig. 3 の残留応力分布にもとづく計算結果である。ただし、計算では  $\sin^2\psi$  線図全体としての誤差が最小となるように  $2\theta_0$  を変数とした。ここで X 線の弾性定数は、柳瀬ら<sup>3)</sup>と同じ値を用いた。両回折結果を比較すると、侵入深さの深い 633, 552, 721 回折の方が 321 回折に比較して非線形性が顕著である。また、実測値と計算値を比較すると、321 回折では、両者はほぼ一致する



(a) 321 diffraction.



(b) 633, 552, 721 diffraction.

Fig. 4. Relation between diffraction angle and  $\sin^2\psi$ .

ものの、X 線侵入深さがほぼ倍となる 633, 552, 721 回折では、両者の差が大きくなる。この傾向は他の材料でも同様であった。この原因として、表面粗さによる X 線吸収量の変化や応力の解放の影響が考えられる。<sup>9)</sup>そこで、次に表面をバフ研磨によって Table IV に示す量だけ研磨除去した後の測定を行った。HP, MP 材について 633, 552, 721 回折で得られた  $2\theta$ - $\sin^2\psi$  線図を Fig. 5 に示す。プリセットタイムが短い場合若干データのばらつきが大きいが、実験結果と計算結果はよく一致する。これより表面の粗さが大きい場合の非線形解析には注意が必要であることがわかる。なお、ここで用いた残留応力分布はバフ研磨による表面除去を考慮して補正し直したものである。バフ研磨に関しては、焼なまし材の Cr-K $\alpha$  線による測定 ( $\sin^2\psi = 0 \sim 0.6$ ) によって、残留応力が導入されないことを確認している。

実験的に得られた非線形な  $2\theta$ - $\sin^2\psi$  線図をもとに、残留応力分布の逆問題解析を行った。解析には、非線形が顕著である 633, 552, 721 回折の実験結果を用いた。Fig. 6 に HP, MP 材に対する計算結果を示す。図中実線が計算結果である。(a) の HP 材では、100  $\mu\text{m}$  以下の表面近傍で若干実験値の方が圧縮に大きい、中間領域および残留応力が消失する深さはよく一致する。(b) の

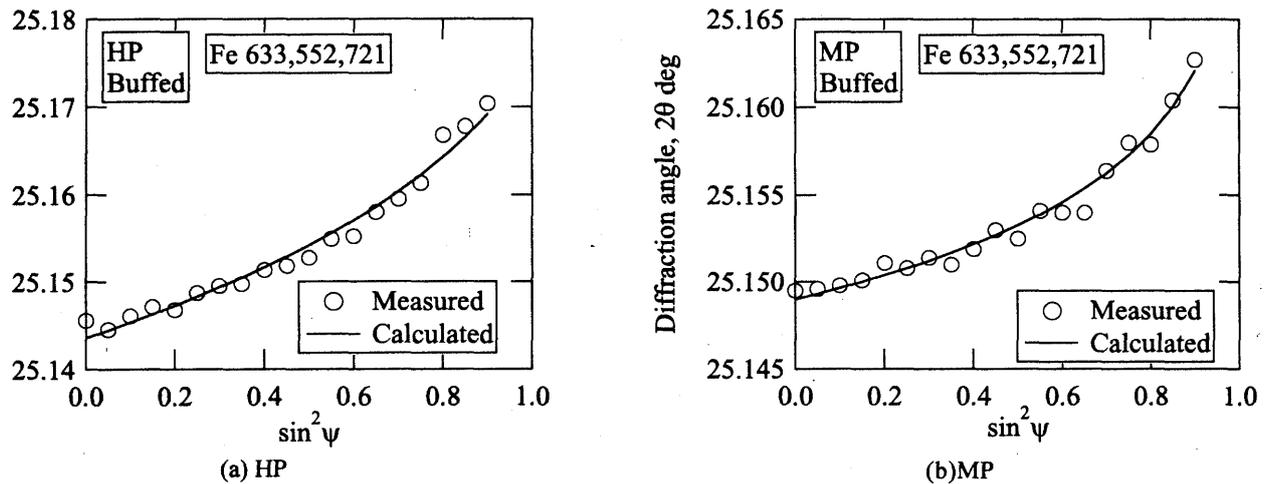
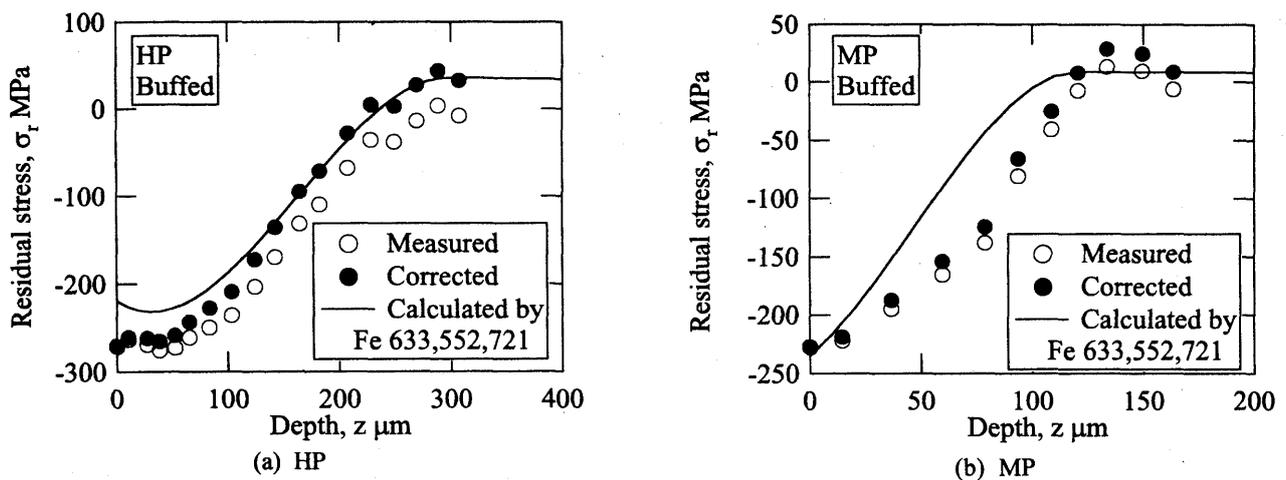
Fig. 5. Relation between diffraction angle and  $\sin^2 \psi$ .

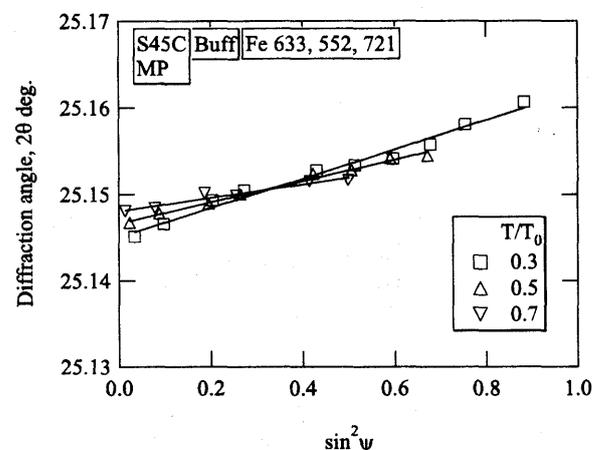
Fig. 6. Residual stress distribution.

MP材についてみると、深さが50～80 $\mu\text{m}$ 程度の間領域では実験結果の方が圧縮残留応力がやや大きい、表面および圧縮残留応力が消失する深さは実験結果と計算結果はほぼ一致する。

高エネルギーのX線によって得られる、高角の $\psi$ までのデータの非線形解析は、非破壊的に材料内部の応力分布を評価する方法として有効であるものの、材料表面の粗さが大きい場合には、表面近傍の情報が重みつき平均として重畳されるため、平滑表面としての計算結果に対して、誤差が大きくなることに注意する必要がある。

### 3.3 侵入深さ一定法

側傾法と並傾法とを重畳させることによって、侵入深さ一定の条件での測定が可能である。Fig. 7にバフ研磨したMP材で得られた $2\theta$ - $\sin^2 \psi$ 線図を示す。これは、Fig. 5 (b)と同じものである。 $T/T_0$ が0.3, 0.5および0.7について測定した。このとき、測定可能な最大の $\sin^2 \psi$ は侵入深さによって制限され、それぞれ0.88, 0.67および0.5までとなる。Fig. 5 (b)では、 $\sin^2 \psi$ が0.5以上では明らかに非線形性が認められるが、Fig. 7では $T/T_0$ が0.3の場合、 $\sin^2 \psi$ が0.88まで $2\theta$ - $\sin^2 \psi$ 線図はほぼ直線で近似可能であり、侵入深さ一定法の有効性が認められる。

Fig. 7. Relation between diffraction angle and  $\sin^2 \psi$  obtained by constant penetration depth method.

直線の勾配は侵入深さが深くなるほど小さくなり、より内部までの重み付き平均を測定していることがわかる。

Fig. 8に残留応力分布を示す。横軸は侵入深さである。図中の丸印および三角印は、それぞれ321回折および633, 552, 721回折で得られた結果である。なお321回折の $T/T_0 = 0.3$ では、X線照射域が試料表面より大き

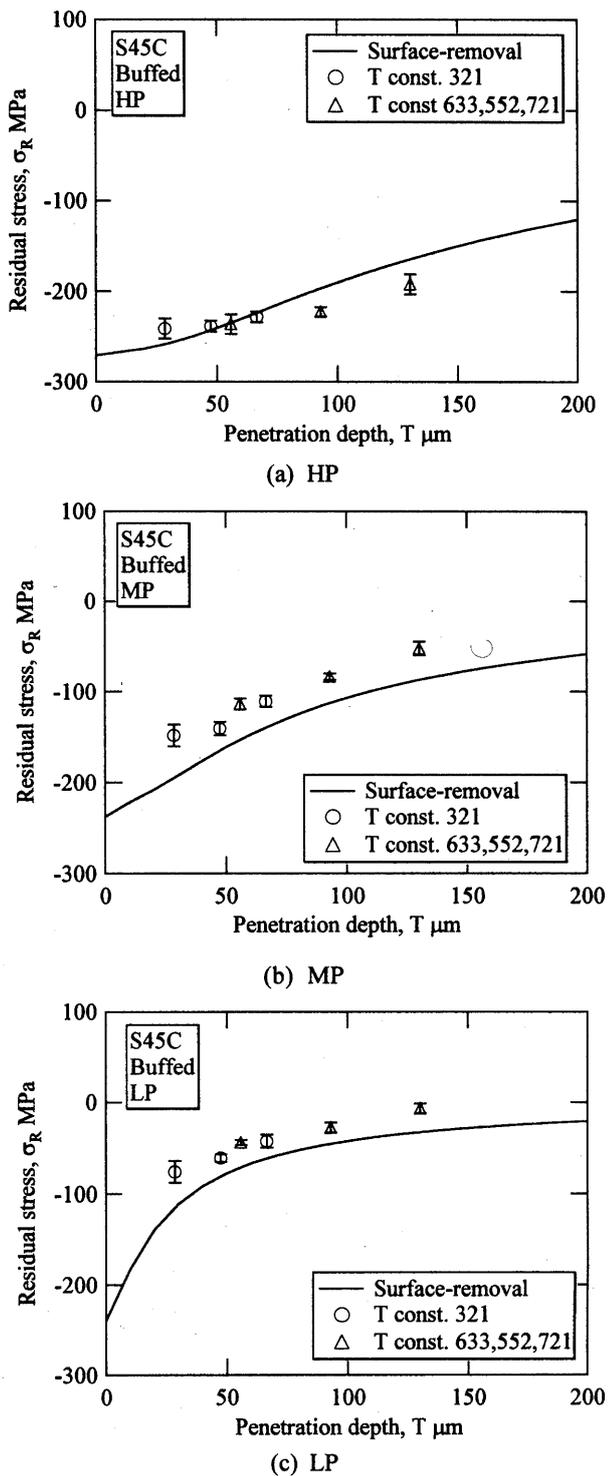


Fig. 8. Residual stress distribution as a function of penetration depth.

くならない範囲のデータ ( $\sin^2\psi = 0.18 \sim 0.88$ ) を用いて応力を算出した。図中の実線は逐次研磨法で測定した残留応力分布を5次の多項式で近似し、重みつきの値として計算したものである。いずれの試料においても測定結果と実線はほぼ一致しており、本手法が応力分布評価法として有効であることがわかる。

#### 4 結 論

高エネルギー放射光を用いて、ショットピーニング処理された鋼板の残留応力を測定し、表面下の残留応力分布を、 $2\theta\text{-}\sin^2\psi$  線図の非線形性より評価した。また、侵入深さ一定法によって残留応力分布を評価する手法について検討した。得られた主な結果を以下にまとめる。

(1) ショットピーニング処理された中炭素鋼の表面下の残留応力分布を、Cr-K $\alpha$  特性X線による  $\sin^2\psi$  法によって測定した。表面では220から280MPaの圧縮残留応力であり、圧縮残留応力層は表面下約70から300 $\mu\text{m}$ であった。

(2) 逐次研磨法にて得られた残留応力分布をもとに予測される  $2\theta\text{-}\sin^2\psi$  線図の非線形性は、実験結果とよく一致した。ただし、表面の粗さが大きい場合には  $\sin^2\psi$  が小さい領域での誤差が大きい。

(3)  $2\theta\text{-}\sin^2\psi$  線図の非線形性をもとに、シンプレックス法で予測した残留応力分布は、逐次研磨法で得られた結果とほぼ一致した。

(4) X線の侵入深さを一定とする測定方法を提案した。得られた残留応力分布は、逐次研磨法によって得られた結果とよく一致し、簡便に応力分布を推定する手法として有効である。

本研究は大型放射光施設 SPring-8 課題番号 2001A 0414 および 2001B0101 で行ったものである。施設利用に際してご助言を頂いた JASRI 池田直氏に感謝します。またショットピーニング処理を頂いた(株)豊田中央研究所の小川一義博士に感謝いたします。

#### 参 考 文 献

- 1) 榎本邦夫, 平野克彦, 望月正人, 黒沢幸一, 斎藤英世, 林 英策, 材料, **45**, 734 (1996).
- 2) 小畑 稔, 久保達也, 佐野雄二, 依田正樹, 向井成彦, 嶋 誠之, 菅野真紀, 材料, **49**, 193 (2000).
- 3) 柳瀬悦也, 西尾光司, 楠見之博, 新井和夫, 鈴木賢治, 秋庭義明, 来海博央, 田中啓介, 材料, **51**, 756 (2002).
- 4) 柳瀬悦也, 西尾光司, 楠見之博, 新井和夫, 秋庭義明, 田中啓介, 材料, **51**, 1429 (2002).
- 5) 野田幸雄, 菖蒲敬久, 池田 直, 日本結晶学会誌, **42**, 12 (2000).
- 6) 英 崇夫, 藤原晴夫, 西岡一水, 材料, **30**, 274 (1981).
- 7) 吉岡靖夫, 佐々木敏彦, 倉本眞實, 非破壊検査, **34**, 52 (1985).
- 8) 鈴木賢治, 田中啓介, 坂井田喜久, 材料, **45**, 759 (1996).
- 9) K. Suzuki, K. Tanaka, Y. Sakaida and S. Machiya, Proc. Int. Conf. Mater. Mech 97, 765 (1997).
- 10) SAE, Residual Stress Measurement by X-Ray Diffraction, J784a, 62 (1971).