ガス軟窒化鋼の X 線残留応力測定*

田 中 啓 介^{*1}, 顧 青 萍^{*2}
御 厨 照 明^{*1}, 秋 庭 義 明^{*1}

X-Ray Residual Stress Measurement of Gas-Soft Nitrided Steels

Keisuke TANAKA, Qing Ping GU,
Teruaki MIKURIYA and Yoshiaki AKINIWA

The X-ray diffraction method was used to measure the residual stress in the compound and diffusion layers of gas-soft nitrided carbon steel (JIS S45C) and low-alloy steel (JIS SCM435). The X-ray elastic constant of the compound layer made of ϵ phase iron nitride was determined experimentally. The residual stress was tension on the surface and gradually changed to compression in the compound layer. The residual stress was compression in the diffusion layer near the interface with the compound layer. The compression zone extended about 0.7 mm for S45C and 0.35 mm for SCM435 from the surface. In this compression zone, an increase in Vickers hardness was observed. The tensile fracture strength of the compound layer measured by the X-ray method was about 600 MPa for S45C, and 700 MPa for SCM435.

Key Words: X-Ray Stress Measurement, Soft Nitriding, Steel, Residual Stress, Hardness, Compound Layer

1 緒 言

鉄鋼部品に耐摩耗性, 耐疲労性, 耐焼付性あるいは耐食性などを与えるために熱処理などによる表面処理を行うことが多い。なかでも低温で行われるガス軟窒化処理は, 処理に伴う変形が少なくまた処理も容易であることから多く利用されている⁽¹⁾。これらの窒化鋼の特性を支配する因子の一つとして, 化合物層および拡散層の残留応力が挙げられ, その高精度の測定が望まれている。拡散層の残留応力は, X線応力測定法を用いて, 通常の鉄鋼材料と同様の標準的方法⁽²⁾によって測定されている⁽³⁾が, 化合物層の残留応力を測定した例は極めて少なく, そのX線弾性定数の測定もほとんど行われてはいない⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

本研究では, 機械構造用炭素鋼(JIS S45C)と機械構造用クロム・モリブデン低合金鋼(JIS SCM435)の2種類の鋼にガス軟窒化を行い, 化合物層および拡散層の残留応力分布をX線的に測定するとともに, 半価幅, 硬さ等も評価した。特に化合物層に関しては, X線の弾性定数を決定し高精度のX線測定を可能にするとともに, 化合物層の破壊強度をX線応力測定をもとに評価した。

2 実験方法

2.1 材料および試験片 実験に用いた材料は機械構造用の炭素鋼(JIS S45C)とクロム・モリブデン低合金鋼(JIS SCM435)の二種類である。これらの化学成

分をTable 1に示す。S45Cは850℃焼準を行った後, 試験片の機械加工した。一方, SCM435は, 850℃より油焼入れし, 600℃ 2hr焼もどしによる調質を行った後, 機械加工した。両材料で製作した試験片を, 570℃±10℃で4.8hrガス軟窒化し, その後油焼入れした。これらの軟窒化材の比較材として, S45Cでは軟窒化処理後, 窒化層を切削により除去した。またSCM435は, 軟窒化処理前の調質材を比較材とした。なお本報では化合物層および拡散層を総称して窒化層と呼ぶことにする。以下, 本報告では軟窒化材は材料名の後にNをつけ, S45CNあるいはSCM435Nと表わすことにする。

Table 2には比較材の平滑丸棒で得た引張り特性を示す。0.2%耐力は, S45Cで470MPa, SCM435で975MPaである。

試験片は2種類の形状を有しており, 直径12mmの丸棒および幅10mm 厚さ4 mm 長さ55mmの平板である。

Table 1. Chemical composition of test materials(mass%).

material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Cu	Ni
S45C	0.434	0.172	0.624	0.022	0.0158	0.093	0.000	0.08	0.040
SCM435	0.35	0.21	0.79	0.015	0.016	0.99	0.15	0.08	0.07

Table 2. Mechanical properties of materials.

	Yield strength $\sigma_{0.2}$ (MPa)	Tensile strength σ_B (MPa)	True tensile strength σ_T (MPa)	Reduction of area ϕ (%)
S45C	470	693	1217	46.5
SCM435	975	1057	1729	39.5

* 原稿受付 1996年4月5日。

^{*1} 正員, 名古屋大学工学部 (〒464-01 名古屋市千種区不老町)。^{*2} 名古屋大学大学院。

残留応力分布等の詳細な測定は丸棒について行い、平板は、化合物層のX線弾性定数の測定と強度評価に使用した。

2.2 X線測定条件 X線応力測定は、回折用ディフラクトメータ(島津XD-610, XD-3A)に平行ビームスリットを装置し、通常の $\sin^2\psi$ 法で行った。Table 3にX線条件を示す。光学系として並傾法を採用し、CrK α 線を用いた。本材料の化合物層は ϵ 相Fe₃Nであったが、Fe₃Nの103回折を、また鉄は211回折を用いた。各回折プロフィルの半価幅中点を回折角とした。 $\sin^2\psi$ 法において、 $\sin^2\psi$ は0から0.7まで0.1刻みで8点を基本とした。さらに、同一条件で3回の測定を繰返し、その平均値を回折角として採用した。X線の侵入深さは、Fe₃N(103)とFe(211)回折で大差なく $\sin^2\psi$ が零の値は5 μ m位で $\sin^2\psi$ が0.7となると2 $\sim$ 3 μ mと浅くなる。応力定数はFe211に対しては、標準値⁽²⁾ $S = -318\text{MPa/deg}$ を使用した。一方、化合物層に対しては、後述のように $S = -611\text{MPa/deg}$ を用いた。

窒化層の残留応力分布測定では、試験片の表面層を逐次電解研磨除去し、X線測定を繰返した。得られた残留応力分布を、表面除去による応力の再配分を考慮した補正を行った⁽⁶⁾。

また半価幅の測定は、 $\sin^2\psi = 0$ のプロフィルの半価幅を測定した。

化合物層の変形破壊特性は、次項の4点曲げ装置を使用し、負荷ひずみとX線測定した応力との関係より求めた。

2.3 X線の弾性定数の測定 X線の弾性定数の測定には内スパン22mm外スパン44mmの4点曲げ治具に、平板試験片を装着し、負荷ひずみ ϵ_A を0から1600 $\times 10^{-6}$ まで400 $\times 10^{-6}$ ごと5段階のひずみを負荷した。引張り面にX線を照射し、負荷ひずみはX線照射面に貼付したひずみゲージで測定した。各ひずみに対して3回の測定を行い、その平均値より $\sin^2\psi$ 線図を求めた。 $\sin^2\psi$ は0から0.5までの6点とした。各ひずみで得られた $\sin^2\psi$ 線図より、X線の弾性定数の決定は次のようにした。

平面応力状態のとき、回折角 2θ と面内応力 σ_x, σ_y との関係は次式で与えられる⁽⁷⁾。

$$2\theta = -2 \frac{1+\nu}{E} \tan\theta_0 \sigma_x \sin^2\psi + \frac{2\nu}{E} \tan\theta_0 (\sigma_x + \sigma_y) + 2\theta_0 \quad (1)$$

ここで、 θ_0 は無ひずみ回折角、 ψ は試料面法線と回折面とのなす角、また E と ν がX線のヤング率とポアソン比である。式(1)より、 x 方向の応力 σ_x は、 $2\theta - \sin^2\psi$ 線図の傾き M に比例する。

$$\sigma_x = S \cdot M \quad (2)$$

ここで

Table 3. X-ray condition for residual stress.

Method	Parallel beam method	
Characteristic X-ray	Cr-K α	
Diffraction line	Fe211	Fe ₃ N103
Diffraction angle (deg)	156.41	134 $\sim$ 137
Filter	V	
Tube voltage (kV)	40	
Tube current (mA)	30	
Scanning speed (deg/min)	1	
Preset time (sec)	2	

$$S = -\cot\theta_0 [E/2(1+\nu)] (\pi/180) \quad (\text{MPa/deg}) \quad (3)$$

$$M = \partial(2\theta) / \partial(\sin^2\psi) \quad (\text{deg}) \quad (4)$$

である。ここで S が応力定数と称される。

X線コンプライアンス $S_2 = 2(1+\nu)/E$ は、 $\sin^2\psi$ 線図の傾き M の σ_A に対する変化率より次式で求まる。

$$S_2 = 2(1+\nu)/E = -\cot\theta_0 (\partial M / \partial \sigma_A) \quad (5)$$

一方、 $\sin^2\psi$ 線図の $\sin^2\psi = 0$ における回折角 $2\theta_{\psi=0}$ の σ_A に対する変化率より $-S_1 = \nu/E$ が求まる。

$$-S_1 = \nu/E = (\cot\theta_0/2) (\partial 2\theta_{\psi=0} / \partial \sigma_A) \quad (6)$$

上式で負荷応力 σ_A は、負荷ひずみ ϵ_A に機械的弾性定数 E_M を乗ずることによって求まる。なお、化合物層に対する機械的弾性定数は報告されていないため、鉄鋼材料と同一とみなし206GPaを使用した。

2.4 無ひずみ回折角の決定 化合物層は単相であるが、試料表面から内部に入るに従って回折角が変化することがある。このときの、無ひずみ状態の回折角は次のようにして求まる。式(1)において $2\theta = 2\theta_0$ とすると、このときの $\sin^2\psi$ は

$$\sin^2\psi = \frac{\nu}{1+\nu} \frac{\sigma_x + \sigma_y}{\sigma_x} = \frac{2\nu}{1+\nu} \quad (7)$$

となる。ここで等2軸 $\sigma_x = \sigma_y$ を仮定した。化合物層に対しては後述のように $\nu = 0.287$ となったので、 $\sin^2\psi = 0.446$ に対応する回折角が無ひずみ回折角である。

2.5 硬さ測定および微視的観察 窒化層の硬さ分布は、マイクロビッカース硬さ計を用い押込荷重0.49N(50gf)で、2つの方法で測定した。一つは丸棒を樹脂に埋め込み、横断面をバフ研磨後、横断面上で分布を測定した。もう一つの方法は、丸棒を表面から電解研磨し、その研磨除去後に測定することを繰返した。硬さは10点の平均値を硬さとした。

横断面の化合物層および拡散層の微視組織は走査型電子顕微鏡(SEM)及び光学顕微鏡により観察した。さらに表面近傍での窒素および鉄の濃度分布は電子線マイクロアナライザ(島津製作所製 EPMA-8705)により測定した。

(a) SEM sectional photograph.

(a) SEM sectional photograph.

(b) Beam scans of N and Fe.

Fig.1 Compound and diffusion layers of S45CN.

(b) Beam scans of N and Fe.

Fig.2 Compound and diffusion layers of SCM435N.

3 実験結果および考察

3.1 窒化層の組織観察 Fig.1にはS45CN丸棒試験片の横断面の表面近傍の(a)SEM写真, およびEPMAで測定した(b)NとFeの線分析の結果を示す。化合物層の厚さは、測定箇所で若干のバラツキが見られたが平均すれば約22 μmである。化合物層を観察すると、試験片表面近傍は空孔を含んでいるが、内部には含まれていない。化合物層下の材料内部には拡散層が広がっている。Nの量は表面で大きく内部で小さくなるのに対して、Feは表面から内部に入るに従って増大する。拡散層で少し内部に入るとNもFeもほぼ一定になる。

Fig.2には、SCM435N丸棒の同様な図を示すが、この場合化合物層の厚さは約10 μmであり、化合物層の表面近傍には空孔が認められる。

平板に関しても、同様の組織観察を行ったが、丸棒との差異はなかった。

X線回折による観察結果では、化合物層は六方晶のε相(Fe₃N)単相で、他の窒化鉄の相の回折は認められ

Fig. 3 Change of diffraction angle with distance from surface (Round bar).

なかった。Fig.3には、丸棒のFe₃N(103)回折の無ひずみ回折角の化合物層内での変化を示す。表面では約134°であり、拡散層の界面に近づくとき徐々に増大し137°に近づく。この傾向は両材料で大差ない。なお、六方晶

(a) $2\theta - \sin^2\psi$ diagram.

(b) M and $2\theta_{\psi=0}$ against applied strain.

Fig.4 Determination of X-ray elastic constants for compound layer of S45CN(EP=0 μm).

Fe₃NのJCPDSカードNo.1-1236の格子定数($a=0.2695$ nm, $c=0.4362$ nm)を使用し, CrK α 線による103回折の回折角を求めると $2\theta=136.31^\circ$ となる. 一方六方晶 ϵ -Fe₃N-Fe₂NのJCPDSカードNo.3-0925の格子定数($a=0.2700$ nm, $c=0.4371$ nm)では $2\theta=135.71^\circ$ となる. つまり表面ではFe₃N-Fe₂Nに近く, 内部に従ってFe₃Nに移って行く. このように格子面間隔が表面から深さとともに減少することは, Somersら⁽⁴⁾によっても報告されている. ガス軟窒化鋼の化合物層中の窒素の量が表面で大きく, 格子面間隔も大きいのにに対して, 界面に近づくに従って窒素の量も低下し格子面間隔も小さくなるものと理解される.

3.2 化合物層のX線の弾性定数の測定 S45Cの窒化材で求めた, 各負荷ひずみ ϵ_A での $\sin^2\psi$ 線図をFig.4(a)に示す. 回折角 2θ と $\sin^2\psi$ の関係は直線に近似される. この直線の傾き及び縦軸との交点 $2\theta_{\psi=0}$ の ϵ_A に対する変化をFig.4(b)に示す. SCM435Nの結果も同様にほぼ良好な直線関係を有していた.

これらの結果から, 式(5), (6)を使用して求まるX線の弾性定数をTable 4に示す. X線のヤング率は, 機械的なものよりかなり大きい. この原因の一つとしては

Table 4. X-ray elastic constant and stress constant.

	X-ray compliance		X-ray elastic constant			Stress constant S MPa/deg
	$(1+\nu)/E$ $10^{-7}/\text{GPa}$	ν/E $10^{-7}/\text{GPa}$	$E/(1+\nu)$ GPa	E GPa	ν	
S45CN (EP=0 μm)	3.74 ± 0.35	8.29 ± 0.72	267	344	0.285	-987
S45CN (EP=10 μm)	6.16 ± 1.34	13.75 ± 1.6	171.1	220	0.287	-611
SCM435N (EP=0 μm)	3.77 ± 0.62	9.27 ± 3.71	265	345	0.303	-973

(a) $2\theta - \sin^2\psi$ diagram.

(b) M and $2\theta_{\psi=0}$ against applied strain.

Fig.5 Determination of X-ray elastic constants for compound layer of S45CN(EP=10 μm).

化合物層の表面近傍には小さな気孔が存在していることが挙げられる. つまり, 機械的方法で測定するひずみは気孔などを含んだバルクとしてのひずみであるのに対して, X線的方法では気孔などを除いた結晶部のみの平均ひずみを測定している. このためX線のひずみは機械的ひずみより, 気孔や割れによる変化分だけ小さくなり, 結果的にヤング率は高くなる⁽⁵⁾. また日原ら⁽⁶⁾は, ガス軟窒化処理した工具鋼(SKD61)の化合物層のX線弾性定数を実測しているが, この値も同様に高い値となっているが, この場合も気孔等が原因であろう.

これより、S45CNに関して表面を $10\mu\text{m}$ 電解研磨すると、気孔がないため、化合物層そのものの弾性定数が得られると考えられる。そこで、電解研磨した試験片($EP=10\mu\text{m}$)に対しても曲げ負荷してX線の弾性定数の測定を行った。この結果をFig.5に示す。

この図より、同様にして求めたX線の弾性定数の結果をTable 4に示す。ヤング率は $E=220\text{GPa}$ で、ポアソン比は $\nu=0.287$ で、 $E/(1+\nu)=171\text{GPa}$ である。この値は、Fe(211)面のX線の弾性定数の標準値⁽²⁾ $E=222\text{GPa}$ 、 $\nu=0.272$ 、 $E/(1+\nu)=175\text{GPa}$ に非常に近い。また、このときの応力定数は $S=-611\text{MPa/deg}$ となり、以下ではこの値を用いて残留応力を求める。

3.3 化合物層の残留応力分布 Fig.6に残留応力測定から得た $\sin^2\psi$ 線図を、(a)S45CN(丸棒)、(b)SCM435N(丸棒)に対して示す。図よりわかる様に、表面から内部に入るに従って、全体的に回折角が高角度側にシフトしている。図中には、回帰直線は表面で右下がりで引張り、拡散層と界面近傍で右上がり引張りとなる。中間の深さでは、 2θ と $\sin^2\psi$ の関係は上に凸となる。これは中間での応力の急勾配を反映しており⁽³⁾、 $\sin^2\psi$ の増大とともにX線侵入深さが浅くなるためである。この場合は、厳密には 2θ - $\sin^2\psi$ 関係の非線形解析が必要であるが、簡単のため直線近似し、その直線の傾きより応力を定めた。

Fig.6 $2\theta - \sin^2\psi$ diagram for compound layer.

化合物層 ϵ 相の残留応力分布をFig.7に示す。丸棒の場合、Fig.7(a)に示すようにS45CNの表面極近傍では引張りで、内部で圧縮になる。SCM435Nでは内部の圧縮はS45CNとほぼ同じで、表面の引張り残留応力は小さい。Fig.7(b)に平板の残留応力分布を示す。SCM435Nでは、内部の圧縮はS45CNの値と同じ位で、表面の引張り残留応力もほぼ等しい。同一条件でガス軟窒化しても丸棒と板材では少し異なるようである。 ϵ 窒化層が出来ると、体積は膨張し、化合物層は圧縮残留応力となる。しかし、 ϵ 相の形成が内部に進行して行くと、最表面の ϵ 相では引張りとなるものと考えられる。

3.4 拡散層の残留応力と半価幅分布 表面から逐次電解研磨して、X線測定を繰返すことからFe(211)面の回折より、残留応力および半価幅分布を求めた。S45CN(丸棒)に対する残留応力および半価幅分布をFig.8に示す。ここで半価幅測定は、X線応力測定での $\psi=0$ のプロファイルにおけるピーク値の半分での回折角の全幅FWHM(Full width at half maximum)である。

化合物層との界面近傍は -200MPa 位の圧縮で、深さ約 0.5mm 内部で零となる。また、半価幅は表面近傍で大きく、約 0.5mm 深さでほぼ一定となった。極表面では半価幅は少し小さくなり、少し内部で極大となる。

SCM435N(丸棒)の同様な結果もFig.8に示す。化合物層との界面近傍で圧縮残留応力は -250MPa 位の大きさ

Fig.7 Distribution of residual stress in compound layer.

で、深さ約0.35mmで零となる。半価幅分布も表面近傍で大きく、深さ約0.35mm程度で、ほぼ一定となっている。

3.5 硬さ分布 Fig.9(a)にS45CNとSCM435Nの切断した横断面について測定した硬さ分布を示す。一方、Fig.9(b)には、表面から電解研磨しながら測定を繰返した硬さ分布を示す。表面で硬さは高く、内部で減少し、ほぼ一定値になる。両材料を比較するSCM435Nの方が硬さは高い。表面から測定した結果では、硬さは表面少し内部で最大となる。これは最表面には気孔などの欠陥を含んでいることに対応する。いずれにしても化合物層の硬さは拡散層より高い。化合物層との界面近傍の拡散層の硬さは、S45CNは320で、SCM435Nは468であった。また、硬さがほぼ一定となる深さは、S45CNで約0.7mm、SCM435Nで約0.37mmである。この一定となる硬さはS45CNでは176で、SCM435Nでは280であり、これらの値はそれぞれ窒化していない比較材の硬さに等しい。これらの硬さがほぼ一定となる深さは残留応力が零となる深さ、および半価幅が一定値になる深さとほぼ一致している。

3.6 負荷ひずみとX線的応力の関係 平板試験片に4点曲げ負荷を連続して行い、各ひずみ ϵ_A において引張り側表面の軸方向応力をX線測定した。Fig.10に

(a) S45CN, (b)SCM435Nについて、 σ_x と ϵ_A の関係を示す。S45CNの場合、次の3種類の測定を行った。まず、ガス軟窒化したままの試験片(EP=0 μ m)の ϵ 相の応力、表面を10 μ m電解研磨除去した試験片(EP=10 μ m)の ϵ 相の応力、さらに表面を電解研磨で24 μ m除去し、化合物層を除いた試験片(EP=24 μ m)のFe相の応力を測定した。なお、EP=10 μ mの場合は2本の試験片に対して測定を行った。一方、SCM435Nでは、2種類の測定を行った。つまり、窒化したままの試験片(EP=0 μ m)の ϵ 相の応力、および表面を電解研磨で化合物層を除いた試験片(EP=12 μ m)のFe相の応力である。

まず、注目されるのはSCM435Nの結果である。 $\epsilon_A=0$ のとき化合物層は引張り、拡散層は圧縮の残留応力である。これに引張りひずみ ϵ_A を負荷すると、拡散層の応力は1000MPaまで直線的に増大するのに対して、化合物層は約700MPaで減少する。この減少は化合物層の割れに起因するものと考えられる。

一方、S45CNの場合、このX線的に検出される化合物層の破壊応力は約600MPaとみなされる。S45CNにおいて、拡散層の応力は600MPaまで直線的に増大し、その後の ϵ_A に伴う増大は小さい。また、EP=0 μ mの場合とEP=10 μ mの場合の結果を比較する。 $\epsilon_A=0$ のとき、前者は引張りで200MPaの表面残留応力を有するのに対して、後者では-400MPaの圧縮である。 ϵ_A が

(a) Distribution of residual stress.

(b) Distribution of half-value width.

Fig.8 Distribution of residual stress and half-value width (Round bar).

(a) Cross section measurement.

(b) Surface measurement.

Fig.9 Distribution of Vickers hardness.

増大するとEP=0 μm の場合 $\varepsilon_A=2000\sim3000\times 10^{-6}$ で線形関係が無くなり、 $\sigma_x=600\text{MPa}$ で極大となる。このとき、拡散層の応力 σ_x は ε_A に対して線形的に増大している。一方、EP=10 μm では約 $\varepsilon_A=5500\times 10^{-6}$ まで線形で、その後 ε_A の増大に対して約600MPaで極大値をとる。この極大値はEP=0 μm の場合にほぼ等しい。このことから、約600MPaをS45CNの化合物層が割れる応力とみなしてよいであろう。

以上で明らかとなった、2種の鉄鋼材料の窒化層の特性と、疲労や摩耗などの強度との関係に関しては今後の研究課題としたい。

4 結 論

(1) ガス軟窒化処理によるS45CNの化合物層は主に ε 相(Fe_3N)であり、その厚さは約22 μm で、SCM435Nの化合物層の厚さは約10 μm であった。

(2) 化合物層のX線の弾性定数の測定は、表面を10 μm 電解研磨したS45CN材について行った。化合物層の ε 相のX線の弾性定数の測定結果は、ヤング率 $E=220\text{GPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.287$ で、鉄のX線の弾性定数($E=222\text{GPa}$ 、 $\nu=0.271$)とほぼ一致している。このときの応力定数は $S=-611\text{MPa/deg}$ である。

(3) 化合物層の残留応力をX線的に測定した結果、表面は引張りで、内部では圧縮となる。丸棒の場合S45CNの表面の引張りはSCM435Nより大きいが、板材では同じぐらいである。内部の圧縮残留応力は丸棒、板材ともほぼ一致している。

(4) 拡散層のFeの残留応力は圧縮で、化合物層との界面近傍ではS45CNで -200MPa で約0.7mm近傍で零となる。この近くで半価幅も一定となっている。一方、SCM435Nの界面近傍では -250MPa 位の圧縮で深さ約0.35mmで零となる。半価幅分布もこの深さでほぼ一定となっている。

(5) 拡散層の硬さはS45CNの方がSCM435Nより小さい。S45CNでは深さ約0.7mmで一定値 $H_v=176$ となる。SCM435Nでは深さ約0.35mmで一定値 $H_v=280$ となる。また、これらの深さは残留応力が零となる深さとほぼ一致している。

(6) S45CNの化合物層の引張り破壊応力は600MPaで、SCM435Nの化合物層の破壊応力は約700MPaであった。

謝 辞

本研究で使用了材料はヤマハ発動機(株)よりご提供いただきました。有益なご助言をいただきました同社技術本部基盤技術研究室の安達修平博士、伊藤寿浩氏に心から感謝します。

参 考 文 献

- (1) 大沢 均, 電気製鋼, 49, 43(1978).

(a) S45CN.

(b) SCM435N.

Fig. 10 Change of X-ray stress with applied strain.

- (2) 日本材料学会X線材料強度部門委員会, X線応力測定法標準(1982).
- (3) 寺沢正男, 吉岡靖夫, 浅見克敏, 材料, 16, 991(1967).
- (4) M.A.J.Somers and E.J.Mittemeijer, Metall. Trans., 21A, 189(1990).
- (5) 日原政彦, 八代浩二, 佐野正明, 倉元眞実, 日本材料学会第31回X線材料強度に関するシンポジウム講演論文集, p.101(1995).
- (6) SAE, Residual Stress Measurement by X-Ray Diffraction, SAE J784a, p.62(1971).
- (7) 日本材料学会編, X線応力測定法, p.54(1973) 養賢堂.
- (8) 田中啓介, 峰典明, 鈴木賢治, 川瀬良一, 材料, 448, 99(1991).
- (9) 吉岡靖夫, 佐々木敏彦, 倉元眞実, 非破壊検査, 34, 52(1985).