高角 X 線入射による応力勾配を有する材料の残留応力測定[†]

大 谷 眞 一* 吉 岡 靖 夫* 前 野 茂 樹**

Residual Stress Analysis on Materials with Steep Stress Gradient by Using X-Ray Incidence at Higher Angles

by

Shin-ichi OHYA*, Yasuo YOSHIOKA* and Shigeki MAENO**

X-ray stress measurements for isotropic polycrystalline materials are usually carried out by the $\sin^2\psi$ method under the assumption of no stress gradient in X-ray penetration depth. When a steep stress gradient exists in the vicinity of surface layer, however, non-linear $\sin^2\psi$ relation is observed and the $\sin^2\psi$ method cannot be applied on such cases. Although several X-ray stress analyzers have been developed for materials with steep stress gradient in the surface layer, it is desirable to use diffraction data at higher incident angles of ψ_0 as possible as close on 90 degrees in order to determine the both values of surface stress and stress gradient with high accuracy.

In the present study, an X-ray stress analyzer based on Ω geometry was fabricated to enable X-ray incidence at higher angle of ψ_0 . The X-ray detector was positioned on $-\eta$ side against X-ray incident beam. Both of the residual surface stress and stress gradient were determined by use of the $\cos\psi$ method on shot-peened steel and silicon nitride specimens. This prototype stress analyzer was found effective to perform a biaxial or triaxial stress analysis.

Key words : X-ray stress analysis, Residual stress, Stress gradient, Higher incidence technique, Shot-peened steel, Silicon nitride

1 緒 言

X 線応力測定では通常 $\sin^2\psi$ 法が用いられるが、この方法では次の 3 つの仮定のもとに測定が行われる。

- (1) 材料は均質等方性であること。
- (2) 平面応力状態であること。
- (3) X 線侵入深さ範囲内で応力勾配がないこと。

仮定(2)が成立せず、3 軸応力状態を呈する場合には必然的に仮定(3)も成立しなくなる。このような条件では $\sin^2\psi$ 線図はいわゆる ψ スプリット現象を示して曲線となり、 $\sin^2\psi$ 法の適用はできないことがよく知られている。また仮定(2)が成立しても深さ方向に急激な応力勾配が存在すれば、やはり $\sin^2\psi$ 線図は曲線となり、 $\sin^2\psi$ 法は適用できない。これらの場合に対応する測定理論^{1),2)}、方法はすでにいくつか報告されている。

しかし、鉄鋼材料を例にとると、応力勾配が存在して $\sin^2\psi$ 線図が曲線状になるのは、 $\sin^2\psi$ の値が 0.5 以上においてはじめて現れる場合が多い。このために $\sin^2\psi$ 値が 0.5 以下の条件による測定では、 $\sin^2\psi$ 線図を見かけ上直線と認識し、 $\sin^2\psi$ 法から応力を決定することが多い。こうして求められた応力値はあくまでも侵入深さ内での重み付き平均値として取り扱わなければならない。真の応力値を求めていることにはならない。

したがって応力勾配のある材料の測定では、 $\sin^2\psi$ の値ができるだけ 1 に近いところまで入射 X 線を傾けて測定を行うことが必要であるが、既存の応力測定装置に

において $\sin^2\psi$ の値を 0.8 以上に設定した測定を実現するのは特別の配慮を行わない限り困難である。

本研究では上記のような高い $\sin^2\psi$ の値での測定を可能にするための一つの方法として、従来の測定では $+\eta$ 側に生じる回折線を測定していたのに対して $-\eta$ 側に生じる回折線を測定することに注目した。すなわち入射 X 線ビームに対して検出器を $-\eta$ 側に設置することにより、高い ψ 角の設定を可能にし、より 1 に近い $\sin^2\psi$ までの測定が行える装置を試作した。従来の入射 X 線ビームと検出器の位置関係では $\sin^2\psi$ の最大値を高々 0.8 程度までしか設定できないが、 $-\eta$ 側へ検出器を配置したことにより 0.9 位まで設定可能となった。また同時に各種材料の応力測定が最適な特性 X 線と hkl 回折の組合わせで行えるよう配慮し、特にセラミックス材料の応力測定の容易さを重視した。そして $\cos\psi$ 法による応力勾配を有する材料の残留応力測定を行った。適用例としてショットピーニング処理を施した鉄鋼材および研削加工された窒化ケイ素 Si_3N_4 材の応力測定を行い、本装置の有効性および解析の妥当性を確認した。

2 試作 X 線応力測定装置の設計方針、概要

Fig. 1 に示すように従来の X 線応力測定装置は通常検出器を回折角の補角 $+\eta$ 側に置いているが、高い ψ 角での測定を行うには測定試料自身が回折 X 線光路の障害になり制約が大きい。そこで試作装置では Fig. 2 に示すように、検出器を $-\eta$ 側にも置くことができ高 ψ 角

[†] 原稿受理 平成 7 年 10 月 2 日 Received Oct. 2, 1995

* 正 会 員 武蔵工業大学 〒158 東京都世田谷区玉堤, Musashi Inst. of Tech., Setagaya-ku, Tokyo, 158

** 学生会員 武蔵工業大学大学院 〒158 東京都世田谷区玉堤, Graduate Student, Musashi Inst. of Tech., Setagaya-ku, Tokyo, 158

入射が可能な構造とした。さらに種々の材料の応力測定を行うには、最適な特性 X 線と hkl 面の組み合わせを用いねばならない。そこで管球の取り替えが容易でかつ測定する回折角 2θ を自由に選択できる構造を必要とした。この 2つの目的に合致する構造とするため、以下のような設計方針を設けた。

(1)測定方式は並傾法で、X 線入射角 ψ_0 に対して回折角の $+\eta$ 側の回折強度曲線および $-\eta$ 側の回折強度曲線のどちらでも測定可能とするため、X 線検出器を X 線管球よりも前方の試料側に設置する方式とした。そのため X 線管球は、管球と試料の路離が長くなり強度の低下が大きいので、各種対陰極がそろっておりかつ出力の大きいフィリップス型管球を使用した。

(2)試料寸法および形状の制約を避けるため、試料は水平に置き、一般の水平型分析用回折装置を垂直に立てた構造とした。

(3)検出器は 1 次元位置検出型比例計数管⁴⁾ (以後 PSPC と呼ぶ) の使用を基本として設計した。またシンチレーション計数管などの走査型 X 線検出器やイメージングプレート⁵⁾の使用も可能な構造とした。

X 線光学配置は Fig. 2 に示すとおりである。この図では、PSPC は $-\eta$ 側にあるが、もちろん $+\eta$ 側に配置することも可能である。また Fig. 3 に製作した X 線応力測定装置の外観を示す。X 線光学系の主要寸法は試料-X 線管球間距離 240mm、試料-PSPC 間距離 150mm で、装置の懐深さは 100mm である。PSPC は試料-PSPC 間距離を考慮して新たに製作したもので、回折角 2θ が約 156° 程度までの回折線 (Cr-K α 線で α Fe211 回折を測定する場合に相当) が測定できるように設計した。製作した PSPC は直線型アノード抵抗線電荷分割型方式⁴⁾で、アノード長は 80mm、測定角度の範囲は 30° である。この PSPC を用いた回折 X 線計数システムは先の報告と同様である⁶⁾。また入射 X 線スリットは X 線強度の減少を軽減するため全反射を利用した X 線導入管⁷⁾ (X-ray Guide Tube, XGT) を使用した。

Fig. 1. Schematic arrangement of conventional X-ray stress analyzer.

本装置では、X 線光学系の角度制御を大小 2 台の市販のゴニオメータで行っている。大ゴニオメータには X 線管球と小ゴニオメータを取り付けてある。小ゴニオメータには X 線検出器 (PSPC) が取り付けられている。したがって X 線入射角 ψ_0 および PSPC の設置角度は独立に行えるため、応力測定に最適な回折線の検索あるいは低回折角の回折線を用いた応力測定でも十分に対応する。本装置の X 線入射角 ψ_0 は時計回りに回転する方向を正として表すと、 $+90^\circ \sim -70^\circ$ の範囲内で設定可能である。

3 試作装置の性能および測定上の問題点

試作した X 線応力測定装置は前述のように検出器を $+\eta$ 側あるいは $-\eta$ 側のいずれへも設置可能である。そこでここでは鉄粉末の応力測定により、PSPC を $-\eta$ 側に配置して応力測定を行った場合の基礎性能および有効性について検討した。

無ひずみ状態の鉄粉末を用いて回折強度曲線の観察を行った。高い ψ 角での回折角を測定する場合の留意事

Fig. 2. Schematic arrangement of PSPC, X-ray tube and specimen.

Fig. 3. Overview of X-ray stress analyzer developed.

項は、 ψ 角の増加につれて試料への照射面積が極度に増加することである。例えば $\psi_0=45^\circ$ であれば面積の増加は 1.4 倍であるが、 $\psi_0=84^\circ$ になれば 9.5 倍となる。PSPC 方式の測定の場合、そのままでは回折線幅が増大するとともにバックグラウンドが傾き、正確な回折角の決定が困難となる。したがって試料上に制限マスクをつけて、強度は低下しても照射面積は不変としなければよい結果は期待できない。Fig. 4 は制限マスクをつけた場合の $\psi_0=0^\circ$ および 84° ($\psi=72^\circ$, $\sin^2\psi=0.9$) における回折強度曲線である。 $\psi_0=84^\circ$ 以上の回折強度曲線を観察したが、たとえマスクをつけてもバックグラウンドが大きく乱れる。したがってフェライト系鉄鋼材料を測定するには $\sin^2\psi=0.9$ ($\psi=72^\circ$) までを測定範囲と判断した。一方、PSPC を $+\eta$ に配置して同様の観察を行ったが、試験片自身が回折 X 線光路の障害となり、回折強度曲線測定の限界は $\sin^2\psi=0.8$ ($\psi=64^\circ$) までであった。

応力測定結果を Fig. 5 に示す。ここではマスクをつけた場合 (●) とつけない場合 (○) の比較を行っている。回折角 2θ は回折強度曲線の吸収補正を行った後に求めた値である。マスク付きの測定結果では、高い ψ 角ま

Fig. 4. Diffraction profile by using PSPC.

Fig. 5. 2θ - $\sin^2\psi$ diagram of Fe powder.

で $\sin^2\psi$ 線図は傾きを持たない直線を示し、算出した応力値も $\sigma = -1 \pm 10$ (95% 信頼限界値) MPa となり無ひずみと見なすことができた。一方、マスクなしの測定結果では $\sin^2\psi$ 値が 0.7 程度までは直線であるが、それ以上になると照射面積増加の影響が現れてきている。したがって大きな ψ_0 角までで応力測定を行う際には、X 線照射面積の制限が必要である。しかしマスクをつける際、照射面の中心と ψ_0 角の回転中心が正確に一致していないと、かえって誤差を大きくする可能性がある。

そこで照射面の中心と ψ_0 角の回転中心の横方向の設定誤差が測定応力値に及ぼす影響を検討した。Fig. 6 に照射面の中心 C と ψ_0 角の回転中心 O および回折 X 線の位置関係を示す。いま $\psi_0=0^\circ$ における装置の回転中心と照射面中心に Δs の右方向の設定誤差があるとする。

入射 X 線平行ビームが照射マスク幅より大きい場合、照射面内の回折 X 線は照射面の中心に代表され、PSPC に入射する。PSPC は装置の入射 X 線中心に対して 2η に設置してあるので、測定される回折線は ΔL だけ右方向に移動し、回折角は $\Delta 2\theta$ だけ高角度にシフトすることになる。 ΔL は X 線入射角 ψ_0 に依存し、生じる回折角誤差 $\Delta 2\theta$ は幾何学的関係から次式となる。

$$\Delta 2\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta L}{R}\right) = \tan^{-1}\left\{\frac{\Delta s}{R} \cdot \frac{\cos(\psi_0 - 2\eta)}{\cos \psi_0}\right\} \quad (1)$$

ここで、 R : PSPC-試料間距離

2η : 回折角 2θ の補角

式(1)から求めた $\Delta 2\theta$ - $\sin^2\psi$ 線図は非線形とはなるが、 $\sin^2\psi$ が 0 から 0.9 までの範囲で $\Delta 2\theta$ - $\sin^2\psi$ 線図の傾き M から応力誤差 $\Delta\sigma$ を求めた。その結果、本装置での試料-PSPC 間距離 ($R=150\text{mm}$) でフェライト系鉄鋼を測定する場合、右方向の設定誤差 $\Delta s=+0.1\text{mm}$ 当たり応力誤差 $\Delta\sigma=-29\text{MPa}$ 生じることが判った。また低回折角の回折線を測定する場合には設定誤差 $\Delta s=0.1\text{mm}$ 当たりでさらに大きな応力誤差 $\Delta\sigma$ を生じる。

以上のことから大きな X 線入射角 ψ_0 までで応力測定を行う際には照射面積制限用マスクを付ける必要があり、

Fig. 6. Relation between the error of diffraction angle $\Delta 2\theta$ and misalignment Δs in X-ray geometry.

さらに照射マスクの中心と ϕ 角の回転中心は可能な限り厳密に合わせることが重要となる。

4 応力勾配を有する材料の測定例

4・1 ショットピーニング処理材の X 線応力測定

ショットピーニング処理を施した鉄鋼材 HT800 の X 線応力測定をまず行った。

試験片は、長さ 60mm、幅 18mm、厚さ 3mm に機械加工した平板を使用し、加工時の残留応力を除去するため 600°C、3 時間保持後炉冷による応力除去焼なましを行った。その後ショット径 $\phi 0.9\text{mm}$ (HRC53)、ショット圧力 0.2MPa、カバレッジ 90% の条件で試験片にショットピーニング処理を行い X 線応力測定に供した。

応力測定は Cr-K α 線による $\alpha\text{Fe}211$ 回折を測定した。先の鉄粉末の結果をもとに、X 線入射角は $\sin^2\psi$ が 0～0.9 まで 0.025 間隔そして各点 2 回ずつの計 74 点を設定した。測定方向は、試験片長手方向 (LD) および試験片横手方向 (TD) の 2 方向である。2 θ - $\sin^2\psi$ 線図を Fig. 7 に示す。試験片長手方向 (●) および直角方向 (○) とともに $\sin^2\psi=0.6$ 程度までは直線に見えるが、 $\sin^2\psi$ 値 0.7 以上の線図上に明瞭な湾曲があり、深さ方向に残留応力勾配が存在することが認められる。また X 線入射角を $+\psi$ 側と $-\psi$ 側に設定して測定を行い ψ スプリット現象の有無を調べたが、試験片長手方向および試験片横手方向ともそれぞれ $\sin^2\psi$ 線図に変化は見られなかった。そこで X 線侵入深さ内において残留応力が平面応力状態でかつ深さ方向に直線状の応力分布を有すると仮定した $\cos\psi$ 法による 2 軸応力解析を行い、表面応力および応力勾配を決定した。Fig. 7 中に $\cos\psi$ 法による解析結果から求めた近似曲線を実線で示す。大きな $\sin^2\psi$ 値での測定点は一部近似曲線に一致していないものの、 $\sin^2\psi$ 値 0.8 以下では測定値と近似曲線はほぼ一致している。Table I に $\cos\psi$ 法により表面応力値および応力勾配を求めた結果を示し、 $\sin^2\psi=0.6$ までの範囲で $\sin^2\psi$ 法により残留応力を求めた結果も併記した。

以下、長手方向を例にして考察を行う。 $\sin^2\psi=0.6$ まで直線近似を行った測定値は、

$$\text{長手方向応力} \quad -393\text{MPa}$$

であるのに対して、応力勾配を考慮した $\cos\psi$ 法では、

$$\text{表面応力} \quad \sigma_s = 16\text{MPa}$$

$$\text{応力勾配} \quad A = -64\text{MPa}/\mu\text{m}$$

という値が得られた。この $\cos\psi$ 法の測定結果から重み付き応力値を算出すると -336MPa となり、 $\sin^2\psi$ 法で求めた値と近い値となる。

多くの実測例から、一般に、ピーニング処理は表面そのものに大きな圧縮残留応力を付加するものと考えられている。しかし本実験のように大きな $\sin^2\psi$ 値まで測定すると、ピーニング表面そのものの残留応力は比較的小さくかつ深さ方向に大きな応力勾配を生じているにもかかわらず、あたかも大きな圧縮残留応力が存在するような $\sin^2\psi$ 線図を示す。すなわち表面残留応力を小さな $\sin^2\psi$ 値の範囲で測定し $\sin^2\psi$ 法で算出して評

Fig. 7. 2 θ - $\sin^2\psi$ diagram of shot-peened HT800.

Table I. Results of residual stress of shot-peened HT800.

Direction	$\sin^2\psi$ method	$\cos\psi$ method	
	Residual stress σ_{res} , MPa	Surface stress σ_s , MPa	Stress gradient A , MPa/ μm
LD	-393 ± 9	16	-64
TD	-515 ± 7	-14	-105

価すると、実際は材料強度上かなり危険側になることもあり得る。

4・2 研削加工した窒化ケイ素の X 線応力測定

続いて研削加工した窒化ケイ素 Si_3N_4 の X 線応力測定を行った。試験片は常圧焼結された Si_3N_4 の表面をバフ研磨により、高さ 3mm、幅 4mm、長さ 40mm の JIS 試験片の形状に仕上げたもの (バフ材) と、さらに 170/200 番のダイヤモンド砥石により研削加工されたもの (研削材) の 2 種類である⁸⁾。なお研削方向は試験片長手方向に対し直角としている。Table II に機械的性質およびかさ密度を示す。また Table III に研削加工条件を示す。

この 2 種類の試験片の表面 3 カ所の残留応力測定を行った。応力測定は、V-K α 線による 411 回折 (回折角 $2\theta=153.00^\circ$) を測定した。X 線入射角は $\sin^2\psi$ が 0～0.8 まで 0.1 間隔の 9 点とした。応力測定方向は試験片長手方向 (研削直角方向) および試験片横手方向 (研削方向) の 2 方向とした。

鈴木らは本試験片の X 線の弾性定数を測定しており、Cr-K α 線による 411 回折の X 線の弾性定数 $E/(1+\nu)$

Table II. Mechanical properties of Si_3N_4 specimen.⁸⁾

Young's modulus E , GPa	Poisson's ratio ν	Bulk density ρ , g/cm ³
298	0.268	3.22

Table III. Grinding condition for sintered Si_3N_4 .⁸⁾

Method Grinding	Up-cut, non-spark-out SDC170/200N 100B
Circumferential speed	2000 m/min
Work speed	10 m/min
Cutting depth	20 μm

$=230\text{GPa}$ としている。⁹⁾したがって本測定における $V-K\alpha$ 線による 411 回折での応力定数 K は鈴木らが求めた X 線の弾性定数値から換算し, $K=-480\text{MPa/deg}$ とした。

Fig. 8 にバフ研磨材の $2\theta-\sin^2\psi$ 線図の一例を示す。試験片長手方向 (●) および試験片横手方向 (○) とともに良好な直線を示している。このような場合は $\sin^2\psi$ 法の適用が可能である。測定値は,

長手方向応力 $-44\pm31\text{MPa}$

横手方向応力 $-313\pm42\text{MPa}$

という値が得られた。

次に研削材の測定を行った。まず試験片長手および横手の各方向において $+\psi$ および $-\psi$ 方向の ψ スプリット現象の有無を調べたが, ψ スプリットは存在しなかった。Fig. 9 に研削材表面の $2\theta-\sin^2\psi$ 線図の一例を示す。試験片長手方向 (●) では特に $\sin^2\psi$ 値の小さい範囲で顕著な下に凸の湾曲が見られ, 試験片横手方向 (○) でも緩やかであるが同様な湾曲が観察できた。 $\sin^2\psi$ 法はこのような場合には適用できないが, 仮に $\sin^2\psi=0.6$ まで直線近似を行った応力値は,

長手方向応力 $-421\pm152\text{MPa}$

横手方向応力 $-170\pm52\text{MPa}$

という値が得られた。個々のデータのばらつきは少ない

Fig. 8. $2\theta-\sin^2\psi$ diagram of Si_3N_4 buffed.

にもかかわらず 95% 信頼限界値が大きな値を示しており, $\sin^2\psi$ 法による測定が不適切であることがこれから認められる。そこで $\cos\psi$ 法による応力解析を試みた。解析結果を Table IV に示す。また Fig. 9 には解析結果を用いた近似曲線を示した。図中の測定データは近似曲線上にはほぼ一致している。

得られた結果は

長手方向 表面応力 $\sigma_s=-829\text{MPa}$

応力勾配 $A=153\text{MPa}/\mu\text{m}$

横手方向 表面応力 $\sigma_s=-484\text{MPa}$

応力勾配 $A=124\text{MPa}/\mu\text{m}$

である。本研削材は, 表面は大きな圧縮であり, その直下に大きな引張応力勾配が存在するような圧縮残留応力の急激な減少が見られることが判った。

このような材料の応力測定を行う場合の問題は, 応力勾配の形状と特性 X 線の侵入深さとの関係にある。 Si_3N_4 の測定では $V-K\alpha$ 線による 411 回折または $\text{Cr}-K\alpha$ 線による同じく 411 回折が用いられる。しかし $V-K\alpha$ 線の X 線侵入深さは $8.5\mu\text{m}$, $\text{Cr}-K\alpha$ 線の場合は $10.7\mu\text{m}$ と $\text{Cr}-K\alpha$ 線の方が大きい。もし応力勾配が $V-K\alpha$ 線の侵入深さ内では直線分布をしていれば, $\cos\psi$

Fig. 9. $2\theta-\sin^2\psi$ diagram of Si_3N_4 ground.Table IV. Results of residual stress of Si_3N_4 .

Sample	Direction	$\sin^2\psi$ method	$\cos\psi$ method	
		Residual stress σ_{res} , MPa	Surface stress σ_s , MPa	Stress gradient A , MPa/ μm
Buffed	X1	-44 ± 31	—	—
	X2	-313 ± 42	—	—
Ground	X1	-421 ± 152	-829	153
	X2	-170 ± 52	-484	124

法による解析が可能である。しかしそれより深い領域で直線分布からはずれ応力勾配がなくなるとすれば、Cr-K α 線による測定では $\cos\psi$ 法を適用しても誤差が生じる。そして仮に $\sin^2\psi$ 法で測定するとしても、V-K α 線での測定値の方が Cr-K α 線による測定よりも大きな値になるであろう。

同じ試験片の測定を Cr-K α 線を用いた $\sin^2\psi$ 法で鈴木が行った場合には長手方向応力は $-201 \pm 27.5 \text{ MPa}$ であるのに対して、本測定では $-421 \pm 152 \text{ MPa}$ であり、前者の方が深い部分までの重み付き平均であるため、絶対値が小さくかつ $\sin^2\psi$ 線図も直線に近い。しかし後者は、応力勾配の大きい部分のみを測定しているため測定値も大きく、かつ応力勾配の影響が大きいために $\sin^2\psi$ 線図が曲線状となり、95% 信頼限界値も大きくになっているものと推測される。

したがって、波長の長い特性 X 線を用いて表面の極近傍の応力状態を観察するのか、または短い X 線である程度の深さまでの平均的な応力状態を観察するかは測定目的によっても異なると考えられるが、今後解析法も含めて検討する必要がある。

しかし、そのような測定を行うに際して、 ψ 角を大きく設定して測定値を得ることは必要条件であり、本装置はそのような場合に充分適用できるものである。

5 結 言

応力勾配を有する材料の残留応力測定を精度よく行う目的および各種の材料の応力測定を最適の特性 X 線と回折線の組み合わせで行うことを目的とした X 線応力測定装置を開発し、ショットピーニングした鉄鋼材と研削加工した Si_3N_4 の応力測定を行った。得られた結論は以下のとおりである。

(1) 入射 X 線に対して $-\eta$ 側の回折強度曲線を用いて応力測定を行う場合、従来の $+\eta$ 側の回折強度曲線を用いて行うよりも大きな $\sin^2\psi$ 値まで設定できる。

(2) 大きな ϕ_0 角までで応力測定を行う際には、X 線照射面積の制限が必要である。また照射面中心と ϕ_0 角回折中心のずれは応力値に誤差を生じさせるので、位置合わせに細心の注意が必要である。

(3) ピーニング処理された鉄鋼材を応力測定した結果、

$\sin^2\psi$ 線図は $\sin^2\psi=0.6\sim0.7$ 以上で湾曲し、表面下の応力勾配が存在した。ピーニング表面そのものの残留応力は非常に小さく、深さ方向の大きな圧縮の残留応力勾配が存在することが判った。

(4) 研削加工された窒化ケイ素 Si_3N_4 の X 線測定を行い表面は大きな圧縮残留応力であるが表面直下には大きな引張応力勾配があることが判った。

X 線応力測定を行う際には、可能な限り大きな $\sin^2\psi$ 値の範囲で測定してから、 $\sin^2\psi$ 法による応力解析かまたは応力勾配を考慮した解析にするかを定めることが望ましい。その意味で本装置は有効であることが確認できた。また、薄膜の応力測定では回折強度を上げると共に母材からの回折を避けるため、高 ψ 角入射による測定を必要とすることが多いがこの目的にも適していると考ええる。

本研究を遂行するにあたり同和鉱業(株)岩野利彦氏のご厚意により試験片のショットピーニング処理を行って頂きました。また新潟大学鈴木賢治博士に窒化ケイ素 Si_3N_4 試験片をご提供いただきました。ここに記し深謝の意を表します。最後に本研究の一部は平成 6 年度文部省科学研究費補助金一般研究 C (課題番号 06650118) によることを記し、謝意を表する。

(平成 7 年 7 月 20 日 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にて講演)

参 考 文 献

- 1) H. Dölle, J. Appl. Cryst., **12**, 489 (1979).
- 2) 吉岡靖夫, 佐々木敏彦, 倉本眞實, 非破壊検査, **34**, 52 (1985).
- 3) 日本材料学会編, “改著 X 線応力測定法”, p. 92 (1981) 養賢堂.
- 4) 吉岡靖夫, 長谷川賢一, 持木幸一, 材料, **27**, 216 (1978).
- 5) 雨宮慶幸, 神谷信夫, 宮原諄二, 応用物理, **55**, 957 (1986).
- 6) 大谷眞一, 太田省三郎, 長谷川賢一, 御園茂和, 材料, **40**, 825 (1991).
- 7) 中沢弘基, 日本結晶学会誌, **25**, 122 (1983).
- 8) 鈴木賢治, 田中啓介, 材料, **40**, 818 (1990).
- 9) 鈴木賢治, 田中啓介, 材料, **37**, 586 (1988).