

結晶方位分布関数を用いた TiCN 配向膜の X 線応力測定[†]江尻 正一* 後藤 昌英**
佐々木 敏彦*** 広瀬 幸雄***

X-Ray Stress Measurement of Textured TiCN Films Using Crystallite Orientation Distribution Function

by

Shouichi EJIRI*, Masahide GOTOH**, Toshihiko SASAKI*** and Yukio HIROSE***

The X-ray stress measurement is an effective method of nondestructive inspection for the residual stress in the surface layer of steel materials. However, the $\sin^2\psi$ method, which is commonly used as X-ray stress measurement, is inapplicable to such anisotropic materials as textured materials because the theory supposes isotropic elastic polycrystalline materials as sample.

The applicable X-ray stress measurement to textured materials was investigated on the assumption that information about each crystallite orientation was deduced by crystallite orientation distribution (ODF). Applied to measure the stress of the titanium carbide nitride (TiCN) film with the $\langle 111 \rangle$ preferred orientation, the residual stress value was determined from the measured lattice strain. The strong compressive stress value was observed in the film. Compared with methods of other models, the result indicated a small difference from the $\langle 111 \rangle$ ideal fiber texture model and was situated between the texture model and $\sin^2\psi$ method.

Key words : TiCN films, X-ray stress measurement, Crystallite orientation distribution function, Fiber texture, Arc ion plating

1 緒 言

近年、窒化チタン (TiN)、炭化チタン (TiC) などのチタン化合物は高い耐摩耗性と優れた摩擦特性を有するため、熱間用金型や工具鋼などに対して有効な硬質被膜材であるとして、その利用が増加してきている。特に、炭窒化チタン (TiCN) は、TiN より摩擦係数が小さく、TiC よりも靱性に優れるため、それらの中間的な性質を持つものとして注目されている。¹⁾被膜の寿命を決める因子として、物理的蒸着法 (PVD) や化学的気相法 (CVD) などの製膜の際に生じた残留応力による影響があると考えられる。製膜条件によっては被膜内に極めて大きな残留応力が存在していることが報告されている点^{2)~4)}から見て、被膜材の内部応力状態を把握することが被膜の寿命を向上させるために重要であると考えられる。

その被膜材の残留応力を非破壊的に測定する方法としては、X線応力測定法⁵⁾が非常に有効な手段として挙げられる。しかしながら、通常よく用いられるX線応力測定法である $\sin^2\psi$ 法では、測定原理として測定試料に対して準巨視的には弾性等方性となる多結晶材料であることを要求するが、TiCN膜においては、被膜を構成している各結晶粒の方位が全体として特定の方向に優先的に偏るような集合組織を示すため、その準等方性の条件を満たさない。よって、このような配向膜に対して $\sin^2\psi$

法で残留応力状態を決定することができない。

圧延鋼板などの集合組織材に対するX線応力測定法としては、集合組織の影響を極点図測定により各結晶の存在確率から求める方法^{6), 7)}や各理想方位の回折強度分布から方法^{8), 9)}そして結晶方位分布関数 (ODF)^{10)~12)}から求める方法¹³⁾あるいは逆に集合組織の影響を全く受けない $\{hhh\}$, $\{h00\}$ 面測定による方法^{6)~8)}などが提案されている。また、近年、配向膜に対しては、各結晶方位が完全に一方向となる理想配向を仮定したX線応力測定法^{3), 14), 15)}が報告されている。

本研究では、結晶の配向性はODFにより与えられると考え、配向膜に対するX線応力測定法を検討した。その際、まず、弾性異方性としてODFを取り入れたX線応力と測定ひずみの関係を求め、X線応力値を算出する決定法を求めた。次に、この決定法をPVD法により製膜されたTiCN膜に対して、実際に適用して応力値を算出し、等方材や繊維配向膜に対して提案されている測定法^{5), 15)}との比較検討を行なった。

2 ODFを用いたX線応力測定法

2・1 座標系

試料座標系 (S)、実験室座標系 (L) 並びに結晶座標系 (C) なる三つの直交座標系を定める。Fig. 1 に示すように、試料表面上のX線照射領域内に原点 O として試料

† 原稿受理 平成 16 年 10 月 12 日 Received Oct. 12, 2004

* 正 会 員 清泉女学院大学人間学部文化心理学科 〒381-0085 長野市上野, Dept. of Culture and Psychology, Faculty of Human Studies, Seisen Jogakuin College, Uwano, Nagano, 381-0085

** 学生会員 金沢大学大学院 〒920-1192 金沢市角間町, Graduate Student, Kanazawa Univ., Kakuma-machi, Kanazawa, 920-1192

*** 正 会 員 金沢大学大学院自然科学研究科 〒920-1192 金沢市角間町, Dept. of Mat. Sci. & Eng., Kanazawa Univ., Kakuma-machi, Kanazawa, 920-1192

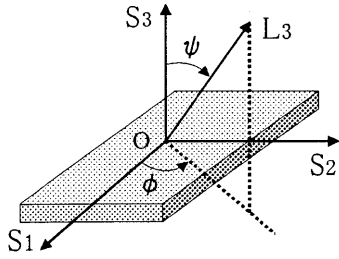


Fig. 1. Definitions of sample and laboratory coordinate system.

表面法線方向が S_3 軸に一致するように、試料形状等で決まる試料座標系を定める。この試料座標系を Euler 角 $(\phi, \psi, 0)$ だけ回転し、X 線回折面法線方向を L_3 軸とする座標系を実験室座標系と定める。そして回折現象に寄与する結晶の一つに注目し、その主軸方位が座標軸と一致するように結晶座標系を定める。

これら三つの座標系間の関係を Fig. 2 に示す。各座標系間の変換は

$$\begin{cases} \gamma_{ij} = R_{ij}(\alpha, \beta, \gamma) \\ \pi^{-1}_{ij} = R_{ij}(\Psi, \Theta, \Phi) \\ \omega_{ij} = R_{ij}(\phi, \psi, 0) \end{cases} \quad (1)$$

によって表されたとする。ここにおいて $R_{ij}(a, b, c)$ は Euler の回転行列である。Fig. 3 および Fig. 4 には π^{-1}_{ij} , ω_{ij} に対する各 Euler 角と回転の関係を示した。

2・2 X 線応力-ひずみ関係

次にこれらの座標変換を用いて試料座標系の応力と実験室座標系の測定ひずみの関係を考える。単結晶における応力 σ_{ij}^C とひずみ ϵ_{ij}^C の間には、次の線形関係が成り立つとする。

$$\epsilon_{ij}^C = S_{ijkl}^C \sigma_{kl}^C \quad (2)$$

但し、単結晶の弾性コンプライアンスを S_{ijkl}^C とした。

式 (2) に対して、次の座標変換

$$\epsilon_{33}^L = \gamma_{3i} \gamma_{3j} \epsilon_{ij}^C \quad (3)$$

$$\sigma_{ij}^C = \pi_{ik}^{-1} \pi_{jl}^{-1} \sigma_{kl}^S \quad (4)$$

を行うことによって、X 線回折によって測定可能な実験室座標系 L_3 軸方向の格子ひずみ ϵ_{33}^L と試料座標系の応力成分 σ_{ij}^S の関係式を得る。

$$\epsilon_{33}^L = S_{33ij}^X \sigma_{ij}^S \quad (5)$$

$$S_{33ij}^X \equiv \gamma_{3a} \gamma_{3b} S_{abcd}^C \pi_{ci}^{-1} \pi_{dj}^{-1} \quad (6)$$

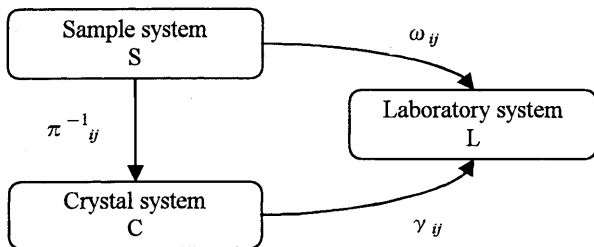


Fig. 2. Relation among three coordinate systems and their orthogonal tensors.

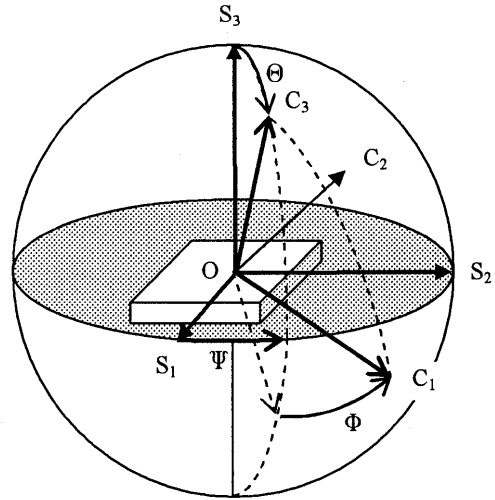


Fig. 3. Rotation matrix π^{-1}_{ij} from sample coordinate system (S) to crystal coordinate system (C) by the angles (Ψ, Θ, Φ) .

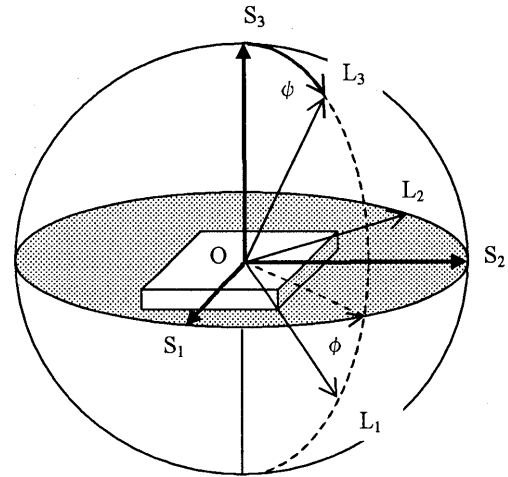


Fig. 4. Rotation matrix ω_{ij} from sample coordinate system (S) to laboratory coordinate system (L) by the angles $(\phi, \psi, 0)$.

X 線回折に関与する各結晶の格子面は L_3 軸に垂直であるが、その L_3 軸周りに回転の自由度を有する。そこで、平均ひずみ ϵ_{33}^L を得るために、回転角 γ に対する回転平均を行う。⁹⁾

$$\overline{\epsilon_{33}^L} \equiv \frac{\oint f(\gamma) \epsilon_{33}^L d\gamma}{\oint f(\gamma) d\gamma} \quad (7)$$

$$f(\gamma) \equiv F(\Psi(\gamma), \Theta(\gamma), \Phi(\gamma)) \quad (8)$$

ここにおいて重み関数 $f(\gamma)$ は、回折に寄与する結晶の存在確率であり、結晶方位分布関数 $F(\Psi, \Theta, \Phi)$ を用いることにより与えられるとした。¹³⁾

$$F(\Psi, \Theta, \Phi) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l \sum_{n=-l}^l W_{lmn} e^{-im\Psi} z_{lmn}(\Theta) e^{-in\Phi} \quad (9)$$

但し、 $z_{lmn}(\Theta)$ は一般化された球面調和関数で、 W_{lmn} はその展開係数である。¹¹⁾

応力成分一定の Reuss モデルを仮定すると、多結晶体に対する X 線応力とひずみの関係は

$$\overline{\varepsilon_{33}^L} = \overline{S_{33j}^X \sigma_{ij}^S} \quad (10)$$

で与えられる。

立方晶・多結晶体の場合、立方晶の弾性コンプライアンス定数 S_{ij}^C を用いると、式 (6) は

$$S_{33j}^X = S_0^C M_{ij} + S_{12}^C \delta_{ij} + \frac{1}{2} S_{44}^C \omega_{3i} \omega_{3j} \quad (11)$$

$$S_0^C \equiv S_{11}^C - S_{12}^C - \frac{1}{2} S_{44}^C \quad (12)$$

$$M_{ij} \equiv \sum_{m=1}^3 \gamma_{3m}^2 \pi_{mi}^{-1} \pi_{mj}^{-1} \quad (13)$$

となる。但し、式 (11) 中の δ_{ij} は Kronecker デルタを意味する。

さらに X 線応力とひずみの関係式 (10) に式 (11) を代入して等二軸応力状態を仮定すると、

$$\overline{\varepsilon_{33}^L} = \left[S_0^C (1 - \overline{M_{33}}) + 2S_{12}^C + \frac{1}{2} S_{44}^C \sin^2 \psi \right] \sigma^S \quad (14)$$

$$\sigma^S \equiv \sigma_{11}^S = \sigma_{22}^S \quad (15)$$

を得る。但し、式 (14) を導出する際、 $M_{ii} = 1$ の性質を用いた。

2・3 X 線応力決定法

無ひずみ状態における試料の回折角 θ_0 の測定誤差をより低く抑えるために、式 (14) から $\sin^2 \psi$ に対する $\overline{\varepsilon_{33}^L}$ の変化割合を求めると、

$$\frac{\Delta \overline{\varepsilon_{33}^L}}{\Delta \sin^2 \psi} = \left(\frac{1}{2} S_{44}^C - S_0^C \frac{\Delta \overline{M_{33}}}{\Delta \sin^2 \psi} \right) \sigma^S \quad (16)$$

を得る。これより X 線応力は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \sigma^S &= \frac{1}{\frac{1}{2} S_{44}^C - S_0^C \frac{\Delta \overline{M_{33}}}{\Delta \sin^2 \psi}} \cdot \frac{\Delta \overline{\varepsilon_{33}^L}}{\Delta \sin^2 \psi} \\ &= \frac{-\cot \theta_0}{S_{44}^C - 2S_0^C \frac{\Delta \overline{M_{33}}}{\Delta \sin^2 \psi}} \cdot \frac{\Delta 2\bar{\theta}}{\Delta \sin^2 \psi} \end{aligned} \quad (17)$$

但し、無ひずみ状態での Bragg 角を θ_0 で表した。また、右辺第二式導出の際、測定ひずみに対して Bragg の回折条件を用いた。

一般的に $\overline{M_{33}}$ の変化割合は、 ψ を変数として有するため、式 (16) の右辺における応力の係数は $\sin^2 \psi$ の一次関数とはならない。よって通常、測定 $\sin^2 \psi$ 線図は非線形となると考えられる。

特に、各結晶方位がランダムである準等方材の場合、 $\overline{M_{33}}$ の変化割合は、重み関数が $f(\gamma) = 1$ として与えられるため、

$$\frac{\Delta \overline{M_{33}}}{\Delta \sin^2 \psi} = 3\Gamma - 1 \quad (18)$$

$$\Gamma = (\gamma_{31}\gamma_{32})^2 + (\gamma_{32}\gamma_{33})^2 + (\gamma_{33}\gamma_{31})^2 \quad (19)$$

となり、等二軸応力状態に対する $\sin^2 \psi$ 法における X 線応力算出式を得る。⁵⁾

$$\begin{aligned} \sigma^S &= \frac{1}{S_{11}^C - S_{12}^C - 3S_0^C \Gamma} \cdot \frac{\Delta \overline{\varepsilon_{33}^L}}{\Delta \sin^2 \psi} \\ &= -\frac{1}{2} \cdot \frac{\cot \theta_0}{S_{11}^C - S_{12}^C - 3S_0^C \Gamma} \cdot \frac{\Delta 2\bar{\theta}}{\Delta \sin^2 \psi} \end{aligned} \quad (20)$$

3 試験片および測定方法

3・1 試験片

使用した試験片は長さ 60mm、幅 8mm、厚さ 4mm の高速度工具鋼 (SKH51) を基板材料とし、その表面にアークイオンプレーティング法で TiCN 膜を被覆させたものである。その膜厚は約 2.3 μ m である。Table I にその製膜条件を示す。

3・2 結晶配向性

Fig. 5 に TiCN 膜から得られた $\phi = 0, 15, 30, 45, 60^\circ$ におけるそれぞれの X 線回折パターンを示す。特性 X 線として Co-K α 線を用いた。 $\psi = 0^\circ$ における測定結果では、 $2\theta = 42.8^\circ$ に現れる 111 面と $2\theta = 93.9^\circ$ に現れる 222 面が強い回折強度を示し、 ψ 角が増すごとに強度が弱くなる。このことより基板上に生成された TiCN 膜は試料表面法線方向に 111 面が非常に強く配向している。

3・3 極点図測定

TiCN 膜の配向性の調査および ODF の決定を目的として、X 線回折により極点図を作成した。X 線には Cu-K α 線を用い、111, 200 および 220 面について測定し、Schulz の反射法によって極点図を作成した。そのときの測定条件を Table II に示す。

3・4 残留応力測定

残留応力測定には側傾法 X 線回折装置を用い、TiCN420 面を測定した。その測定条件を Table III に示す。TiCN 膜は試料表面法線方向に 111 面が非常に強く配向

Table I. Conditions of film preparation.

Bias voltage	-150 V
Arc current	80 A
Processing time	1.8 ksec
Process gas	N ₂ , CH ₄
Vacuum	1.33 Pa

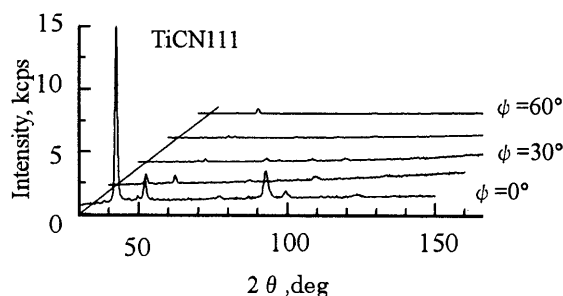


Fig. 5. Diffraction pattern of TiCN film.

Table II. Conditions of pole figure measurement.

Characteristic X-ray	Cu-K α
Tube voltage	40 kV
Tube current	200 mA
Monochromator	Graphite (0002)
Scan speed	180 deg/min

Table III. Conditions of X-ray stress measurement.

X-ray tube	Co-K α
Tube voltage	30kV
Tube current	20mA
Diffraction plane	TiCN420
Diffraction angle	141.14 deg
Scanning method	Fixed ϕ method
ϕ angle (deg)	0
ψ angle (deg)	35, 37, 39, 41, 43 71, 73, 75, 77, 79
Peak determination	Gaussian fitting

しているため、結晶学的方位関係より、420面測定においては $\psi_1 = 39^\circ$ および $\psi_2 = 75^\circ$ 付近に X 線回折強度が得られると考えられる。そして、それ以外の ψ 角では、420面測定での回折強度が得られないため、測定は $\psi_1 = 39^\circ$ および $\psi_2 = 75^\circ$ 付近においてそれぞれ 2° おきに 5 点ずつ 3 回測定した。なお、TiCN 膜の X 線応力値算出においては、TiCN 単結晶の弾性コンプライアンスが不明であったため、また測定回折角の値は TiC よりも TiN の回折角の値に近かったため、TiCN 単結晶の弾性コンプライアンスとして TiN 単結晶の値 ($S_{11}^C, S_{12}^C, S_{44}^C$) = (2.17, -0.38, 5.95)1/TPa¹⁶⁾ を代用した。

4 実験結果および考察

4.1 集合組織

Fig. 6 に X 線回折実験から得られた TiCN の極点図を示す。本試験片は試料表面法線方向に $\langle 111 \rangle$ 配向しているため、111 面は $\psi = 0^\circ$ 、200 面は $\psi = 54.7^\circ$ そして 220 面は $\psi = 35.3^\circ$ 付近において強度が大きいことがわかる。これら 3 つの極点図から Bunge の集合組織解析法¹²⁾ を用いて、結晶方位分布の状態を球面調和関数で級数展開することにより展開係数を算出して ODF を決定した。¹⁷⁾

Fig. 7 および Fig. 8 に $\phi_2 = 45^\circ$ 断面における ODF の理想方位および本試験片の強度分布を示す。なお、図中の角度は、式 (1) に用いた回転角とは次の関係式が成立つ。¹⁰⁾

$$\phi_1 = \Psi + 90^\circ, \phi' = \Theta, \phi_2 = \Psi - 90^\circ \quad (21)$$

Fig. 8 に示すように本試験片の ODF 結果は ϕ_1 によらず $\phi' = 55^\circ$ 付近で強度が大きくなっており、Fig. 7 と比較すると、本試験片が試料表面法線方向に $\langle 111 \rangle$ 配向を有していることが確認できる。

4.2 残留応力

Fig. 9 に各 ψ に対する回折ピークの強度とそのときの 2θ の値を示す。Fig. 9 の回折強度分布をガウス曲線で近似することにより、回折強度が極値となる 2 つの角 (ψ_1, ψ_2) = (39.80°, 74.49°) を求めた。回折角の値に関しては、 $\psi-2\theta$ 線図においてそれぞれの ψ_1, ψ_2 付近で直線近似を行い、(ψ_1, ψ_2) における回折角 ($2\theta_1, 2\theta_2$) = (139.86°, 142.84°) を求めた。このように回折ピークの強度は $39^\circ, 75^\circ$ 付近のみ極めて大きいため、Fig. 10 に示すように、その $\sin^2\psi$ 線図は不連続な非線形性を有し

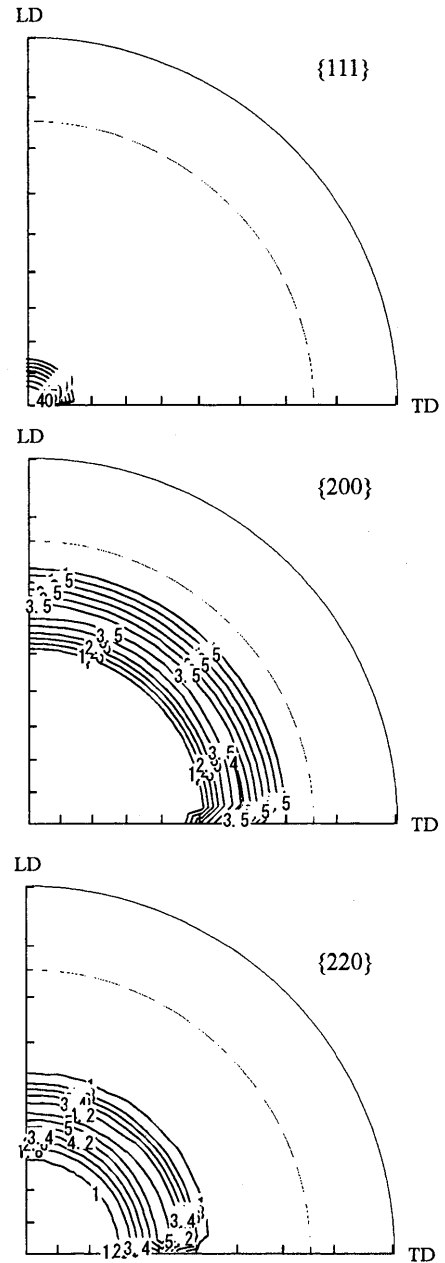
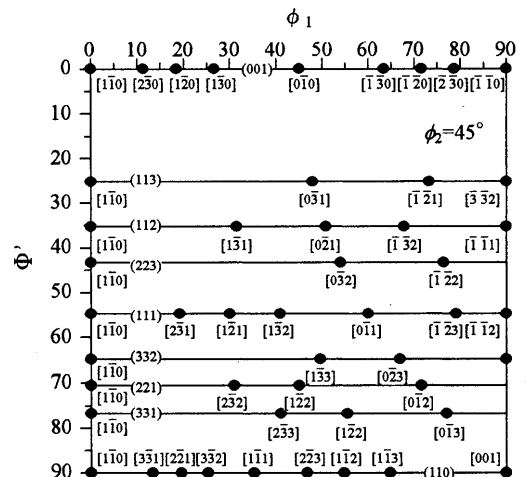
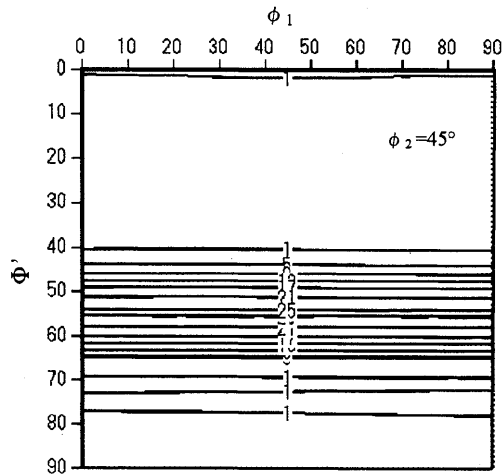
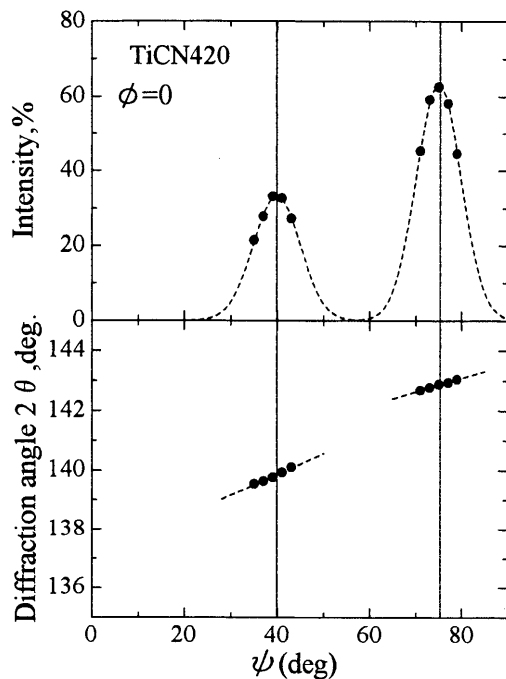


Fig. 6. Pole figures for {111}, {200} and {220}.

Fig. 7. $\phi_2 = 45^\circ$ section of ideal orientation in Euler space.

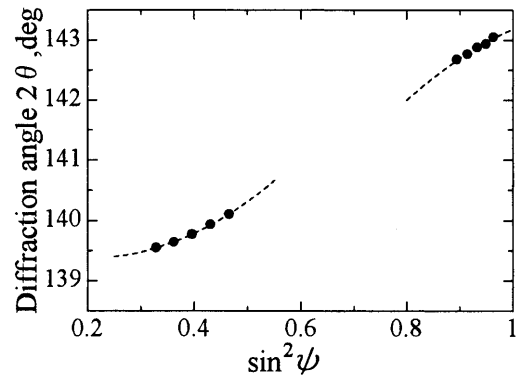
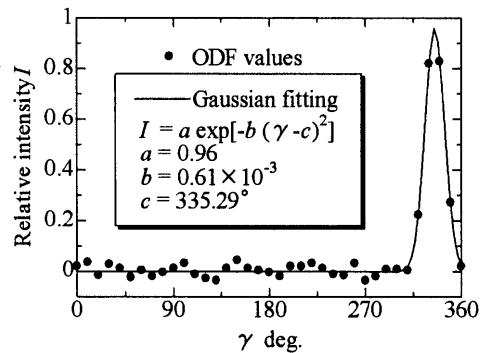
Fig. 8. $\phi_2 = 45^\circ$ section of ODF for TiCN film.Fig. 9. Distribution of diffraction angle and intensity for ψ .

ていた。通常、このような非線形 $\sin^2\psi$ 線図に対して $\sin^2\psi$ 法を適用して $\sin^2\psi$ 線図の直線こう配から応力値を算出することはできない。そのため、本研究においては、測定可能な点が2点のみであることを利用して、測定回折角 2θ および M_{33} の変化割合を、その2点間の傾き

$$\frac{\Delta 2\theta}{\Delta \sin^2\psi} \equiv \frac{(2\theta)_{\psi_2} - (2\theta)_{\psi_1}}{\sin^2\psi_2 - \sin^2\psi_1} \quad (22)$$

$$\frac{\Delta \overline{M_{33}}}{\Delta \sin^2\psi} \equiv \frac{(M_{33})_{\psi_2} - (M_{33})_{\psi_1}}{\sin^2\psi_2 - \sin^2\psi_1} \quad (23)$$

によって与えられるとして、応力値を算出した。その際、 2θ の傾きは、Fig. 10 でのグラフの傾きより求め、一方、 M_{33} は、極点図測定から得られた ODF の結果 $f(\gamma)$ を重み関数として導入して M_{33} に対して積分を行なった。なお、Fig. 11 には、 ψ_1 における 420 回折面に対する $f(\gamma)$ の

Fig. 10. 2θ - $\sin^2\psi$ diagram for TiCN420 diffractions.Fig. 11. Relative distribution of the ODF for rotation angle γ of TiCN420.

変化を示した。以上により、式 (22) および式 (23) の値を求めて、式 (17) に代入することにより X 線応力値を決定した。その値は -6.01 GPa であった。

Table IV には、比較のため、Reuss 近似の $\langle 111 \rangle$ 理想配向膜および準等方材に対する X 線応力測定法^{5), 15), 18)} による算出値を本法の値と共に示した。算出の際には、いずれも 2 点評価法による式 (22) を用いた。いずれの場合の応力値も TiCN 膜に大きな圧縮応力が存在していることを示した。また、本法によって得られた応力値は、準等方性を仮定した $\sin^2\psi$ 法による応力値と $\langle 111 \rangle$ 理想配向膜を仮定した X 線応力測定法による応力値との間に位置した。そこで、準等方材仮定による応力値を 0、 $\langle 111 \rangle$ 理想配向膜仮定による応力値を 1 として標準化して、本法の応力値を換算すると 0.85 となった。一方、Fig. 9 において、 $\gamma = 335.3^\circ$ 付近に存在する分布の半値幅は 21.41° であったため、ランダム配向を 0、 $\langle 111 \rangle$ 理想配向を 1 として、半値幅より本試験片の配向の割合を求めると 0.94 となった。一試料の 420 回折面に対してのみの測定結果であるが、配向の割合 0.94 をもつ試料から

Table IV. Residual stress value σ^s in TiCN film.

	Residual stress σ^s , GPa
$\sin^2\psi$ method	-6.42
$\langle 111 \rangle$ Fiber model	-5.94
Present method	-6.01

測定した応力の換算値が 0.94 とならず 0.85 となったことを考えると, 結晶配向の割合, 特にランダム配向の割合が因子として X 線応力値に強く影響している可能性があるかと推察される。これに対しては, 複数の測定や数値計算などにより詳細な検討が必要と考えられる。

本法で仮定した Reuss モデルは応力成分一定という極端な条件におけるモデルである。そのため, 今後はひずみ成分一定を仮定する Voigt モデルやその平均化の Hill モデル, そして結晶粒間の相互作用を取り入れた Kröner モデルによる ODF を取り入れた X 線応力測定を構築し, また, それらの適用限界について検討する必要がある。

5 結 言

試料表面法線方向に強い 111 配向を有する TiCN 膜に対して, 結晶方位分布関数 (ODF) を用いた X 線応力測定法を適用した。その際, 本試験片は非常に強い配向性を示したため, 測定可能な回折強度が大きい 2 つの ψ 角における回折角から応力を決定する方法を採用した。本研究により, 以下のことが得られた。

(1) ODF を用いることによって, 異方性材料に対する X 線応力と測定ひずみの関係が決定できることを示した。

(2) TiCN 膜の極点図測定および ODF の結果により, 本試験片には試料表面法線方向に非常に強い 111 配向を有することがわかった。測定回折面法線軸周りでの ODF 分布の半値幅を利用すると, その配向の割合が 0.94 であった。

(3) 配向性が非常に強く特定の ψ 角付近しか X 線回折強度が得られないため, 不連続の $\sin^2\psi$ 線図となった場合に対しても, 測定 2 点間を結んだ傾きを求めることによって, ODF を用いた X 線応力測定が可能であることを示した。

(4) ODF を用いた本法で測定した結果, 本試験片は非常に大きい圧縮応力を示し, $\langle 111 \rangle$ 理想配向を仮定した X 線応力測定法による応力値と準等方性を仮定した $\sin^2\psi$ 法による応力値との間の値となった。 $\sin^2\psi$ 法による応力値を 0, $\langle 111 \rangle$ 理想配向による応力値を 1 として標準化すると本法による値は 0.85 であった。

最後に, 本研究を行なうにあたり, 試験片の作製, 提供に対してフジタ技研(株)岡崎健一博士の多大なご協力を得ました。また, 測定実験には金沢大学大学院生 (現アロカ(株) 久津将則君, ODF 解析には金沢大学大学院生 (現(株)ナナオ) 林 潤君の助力を得ました。記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 型技術協会・熱間金型の寿命改善委員会編, “熱間用金型の寿命対策”, p.227 (2001) 日刊工業新聞社。
- 2) 松英達也, 英 崇夫, 池内保一, 材料, **45**, 1119 (1996)。
- 3) 江尻正一, 林 政, 佐々木敏彦, 広瀬幸雄, 材料, **46**, 750 (1997)。
- 4) 田中啓介, 伊藤登史政, 秋庭義明, 石井高博, 材料, **52**, 738 (2003)。
- 5) 材料学会編, “X 線応力測定法 (改)” (1981) 養賢堂。
- 6) 本田和男, 細川智生, 皿井孝明, 非破壊検査, **26**, 539 (1977)。
- 7) 本田和男, 細川智生, 皿井孝明, 材料, **27**, 278 (1978)。
- 8) H. Dölle and V. Hauk, Z. Metallkde, **69**, 410 (1978)。
- 9) 八代 勉, 非破壊検査, **30**, 571 (1981)。
- 10) 長嶋晋一, “集合組織”, p.29 (1984) 丸善。
- 11) R. J. Roe, J. Appl. Phys., **36**, 2024 (1965)。
- 12) H. J. Bunge, “Texture Analysis in Materials Science” (1982) Butterworths。
- 13) M. Barral, J. M. Sprauel, J. L. Lebrun, G. Maeder and S. Megtert, Adv. in X-ray Anal., **26**, 149 (1983)。
- 14) 英 崇夫, 富永喜久雄, 藤原晴夫, 材料, **42**, 90 (1993)。
- 15) 田中啓介, 石原啓策, 日本機械学会論文集, A-61, 1971 (1995)。
- 16) K. H. Hellwege ed., “Landolt-Börnstein (Group III, Vol.II)”, p.30 (1979) Springer-Verlag。
- 17) 井上博史, 稲数直次, 日本金属学会誌, **58**, 892 (1994)。
- 18) M. Zaouali, J. L. Lebrun and P. Gergud, Surf. Coat. Technol., **50**, 5 (1991)。