

# ひずみスキャンニング法によるオーステナイト系 ステンレス鋼の応力測定†

菖蒲 敬久<sup>\*,\*\*</sup> 水木 純一郎<sup>\*\*</sup> 鈴木 賢治<sup>\*\*\*</sup>  
鈴木 裕士<sup>\*\*\*\*</sup> 秋庭 義明<sup>\*\*\*\*\*</sup> 田中 啓介<sup>\*\*\*\*\*</sup>

## Application of Strain Scanning Method to Stress Measurement of Austenitic Stainless Steel

by

Takahisa SHOBU<sup>\*\*\*</sup>, Jun'ichiro MIZUKI<sup>\*\*</sup>, Kenji SUZUKI<sup>\*\*\*</sup>,  
Hiroshi SUZUKI<sup>\*\*\*\*</sup>, Yoshiaki AKINOWA<sup>\*\*\*\*\*</sup> and Keisuke TANAKA<sup>\*\*\*\*\*</sup>

A strain scanning method was applied to the stress measurement of austenitic stainless steel (SUS304L). The sizes of its gauge volume were a width of 2 mm and a height of 0.2mm, and the grain size of the specimen was 37 micrometers. Enough accuracy of the measured stress was not obtained due to the coarse grain of the specimen. To improve the coarse grain problem, three methods of oscillation were examined such as in-plane rotation, out-of-plane tilt and translation. The translation method can increase the number of the grains by changing the amplitude. For the translation method, the accurate measurement is possible if it is 10000 numbers or more of grains. However, the numbers of the grains by the other oscillations were not enough. For the translation method, a strict parallel between the specimen surface and the translation plane was necessary. It succeeded in adjusting the strict parallel. The residual stress distribution of the shot-peened austenitic stainless steel was measured by our method.

**Key words :** Strain scanning method, Austenitic stainless steel, Synchrotron radiation, Residual stress measurement

### 1 緒 言

原子力用オーステナイト系ステンレス鋼の開発に伴い鋭敏化の抑制などが向上しているが、機械加工、溶接残留応力などを原因とする新たな応力腐食割れも問題となっている。この対策として、ウォータージェット<sup>1)</sup>、レーザーピーニング<sup>2)</sup>の防止対策も取られている。原子力機器の溶接、機械加工部、表面改質部の残留応力評価は、原子力発電の信頼性、事故防止だけでなく、先進的原子炉開発、核燃料処理施設など広範な原子力産業の発展に欠かすことのできない、重要な課題である。

非破壊による残留応力測定手法の1つとしてX線応力測定<sup>3)</sup>と中性子応力測定<sup>4)</sup>がある。通常の管球を用いたX線(以下ラボX線と呼ぶ)応力測定では材料表面、中性子応力測定では材料内部のそれぞれ応力が得られるのに対して、シンクロトロン放射光を用いた応力測定ではこれらの中間領域を担当する。このうち高エネルギー放射光X線による大きな侵入深さを利用した測定手法としてひずみスキャンニング法がある。<sup>5)</sup>本手法は、高エネルギーの入射X線束と受光側のスリットで作られるゲージ体積

(gauge volume)の平均ひずみを測定し、試料を移動してゲージ体積を法線方向に移動させることで、表面下のひずみ分布を迅速に測定する。Fig. 1に、反射法におけるひずみスキャンニング法を示す。この測定手法においては、

- $2\theta$ - $\sin^2\psi$ 法に比べて測定時間が短縮できる。
- 深さ方向の応力分布など3次元測定が可能である。

などの優れた特徴を持っている一方で、

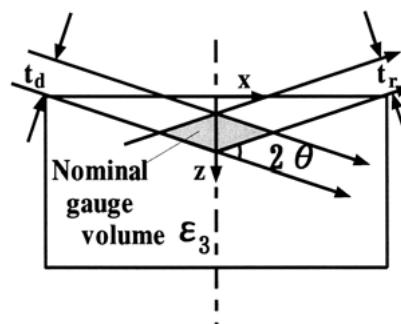


Fig. 1 Configuration of gauge volume.

† 原稿受理 平成 17 年 10 月 11 日 Received Oct. 11, 2005

\* 正 会 員 スプリングエイトサービス(株) 〒679-5148 兵庫県佐用郡三日月町光都, SPring-8 Service Co. Ltd., Sayo-gun, Hyogo, 679-5148

\*\* 日本原子力研究開発機構関西科学研究所放射光科学研究ユニット 〒679-5148 兵庫県佐用郡佐用町光都, Japan Atomic Energy Agency, Sayo-gun, Hyogo, 679-5148

\*\*\* 正 会 員 新潟大学教育人間科学部生活環境学科 〒950-2181 新潟市五十嵐 2 の町, Faculty of Education, Niigata Univ., Igarashi-2-no-cho, Niigata, 950-2181

\*\*\*\* 正 会 員 日本原子力研究開発機構量子ビーム応用研究部門中性子産業利用技術研究ユニット 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根, Japan Atomic Energy, Naka-gun, Ibaraki, 319-1195

\*\*\*\*\* 正 会 員 名古屋大学工学研究科機械理工学専攻 〒464-8303 名古屋市千種区不老町, Dept. of Mech. Sci. and Eng., Nagoya Univ., Chikusa-ku, Nagoya, 464-8603

- (1) 高精度の光学系のあり方
- (2) ゲージ体積と表面の相互作用 (表面効果)
- (3) 無ひずみの格子面間隔が必要

などの課題が指摘されていた。特に(2)については、受光側に有限な発散がある限り必ず発生する問題であり、最近、町屋らによりダブルスリットを用いたひずみスキャンニング法の補正方法が提案された。<sup>6)</sup>また、筆者らによりダブルスリットの間にアナライザを用いたひずみスキャンニング法に対してもその補正方法が提案され、<sup>7)</sup>(2)および(3)の問題は解決された。

本手法の次の課題は、オーステナイト系ステンレス鋼への適用である。これまでに測定された材料は、フェライト系鉄鋼材料である S45C やコーティング材などの結晶粒の細かいもの、集合組織の影響が少ないものであった。<sup>6), 7)</sup>オーステナイト系ステンレス鋼は、上述の材料に比べて粗大粒であり、降伏点も低く、延性材料であり集合組織を生じやすい。特に、空間分解能を向上するためにゲージ体積を小さくした場合、粗大粒の問題は回避となる。本研究では、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304L を用いてひずみスキャンニング法を行い、粗大粒や集合組織に対しても十分に定量的な評価ができる基礎的な測定手法を確立することを目的とする。

## 2 実験方法

### 2.1 試験片

本研究の目的は、ひずみスキャンニング法により応力測定における粗大粒や集合組織に対して有効な測定手法を確立することである。そこで本実験の試験片には、オーステナイト系ステンレス鋼である SUS304L を使用した。Fig. 2 にショットピーニング前の組織写真を示す。供試材は熱間鍛造品であり、溶体化処理として 1373K で 3 時間保持後水冷を行った。なお、平均粒径は Fig. 2 より  $37\mu\text{m}$  であり、通常よりも若干小さいものであった。本供試材から放電加工により切り出して、そのままの焼鈍材 (以下、SUS304L 焼鈍材と呼ぶ:  $20 \times 20 \times 5\text{mm}^3$ ) およびショットピーニング材 (以下、SUS304L ショットピーニング材と呼ぶ:  $20 \times 10 \times 5\text{mm}^3$ ) を作成した。ただし、SUS304L ショットピーニング材について、ラボ X 線を用いた表面測定の結果から、鋼球の粉碎物付着が原因と考えられる  $\alpha\text{Fe}$  の回折が現れたので、粒径  $1\mu\text{m}$  および  $0.3\mu\text{m}$  のアルミナを用いて表面から  $38\mu\text{m}$  ほどバフ研磨除去を施した。このとき後述の  $2\theta\text{-sin}^2\psi$  線図の直線性から研磨による残留応力の影響はないものとも思われ

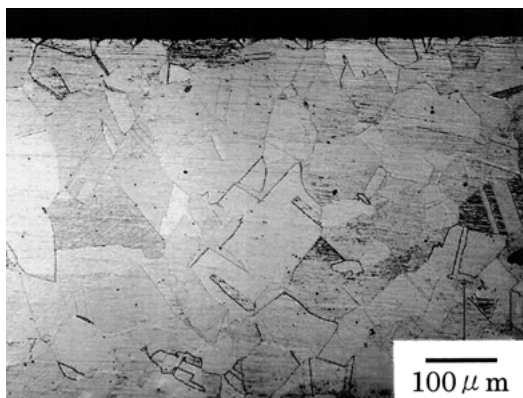


Fig. 2 Microstructure on specimen surface of a SUS304L.

る。ショットピーニングの条件を Table 1 に示す。

なお、予備測定として、作成された試験片の表面応力をオーステナイト系鉄鋼材料の標準測定法<sup>3)</sup>に従い測定した。Table 2 に測定条件を示す。測定条件は、予め回折曲線を測定しピークカウント数が 1000 カウントになるように設定した。

### 2.2 放射光応力測定

本実験には、SPring-8 の日本原子力研究所専用量子構造物性ビームライン BL22XU を使用した。<sup>8)</sup>分光器は、数値結合型二結晶分光器を使用した。X 線のエネルギーは  $70.14\text{keV}$  であり、液体窒素による間接冷却された Si (111) 面により単色化された X 線の光子束 (Flux) は  $6 \times 10^{10}$  photons/sec である。さらに MOSTAB (Monochromator Stabilization<sup>9)</sup>) を使用した振動対策も施されており、X 線強度の変化は毎秒 0.3% 以下と安定している。さらに中流部には Be レンズを挿入し、X 線の集光を施した。このため光源から 120m 離れた位置における X 線の大きさは、半価幅で高さ 0.6mm、幅 1.2mm (レンズを挿入しない場合、高さ 2.2mm、幅 3.2mm) である。測定装置には  $2\theta$  の移動に伴う重力の変動を受けない横振型 4 軸回折計を使用した。Table 3 に本測定条件を示す。回折弾性定数は単結晶の弾性定数を元に Kröner モデル<sup>10)</sup>により得られた計算値を用いた。本測定のアナライザには結晶性の非常によい Ge (111) を使用し、受光側ダブルスリットの間に設置した。これにより空間分解能の高い測定が可能となる。

### 2.3 揺動法

粗大粒や集合組織対策として、本測定では試験片に揺動を施した。ひずみスキャンニング法においては照射面積をできる限り小さくすることが重要であるが、同時に回折に預かる結晶粒の数が減少する。特に粗大粒や集合組織をもつ材料の場合にはその影響は大きい。

Table 1 Conditions for shot-peening.

Machine	Tumbler shot machine
Shot particle	Steel ball ( $\phi 0.3$ mm)
Shot time	30 min

Table 2 X-ray conditions for stress measurement with laboratory X-rays.

Material	SUS304L	
	Annealed	Shot-peened
Radiations	Cr-K $\beta$	
Tube voltage	30 kV	
Tube current	10 mA	
X-ray irradiated area	$4 \times 8$ mm <sup>2</sup>	
$\text{Sin}^2\psi$	0 ~ 0.6 (step 0.05)	
Diffraction	$\gamma$ -Fe 311	
$2\theta_0$	148.52 deg.	
Stress constant K	-366 MPa/deg.	
Scanning angle $2\theta$	147 - 152 deg.	145 - 152 deg.
Scanning step	0.1 deg./step	
Preset time	1 sec.	2 sec.

Table 3 X-ray conditions for stress measurement by synchrotron radiation.

Wavelength	0.1768 Å (E = 70.14 keV)
Monochromatic crystal	Si (111)
Sizes of divergent slits	Height = 2.0 mm Width = 0.2 mm
Sizes of receiving slits	Height = 2.0 mm Width = 0.2 mm
Length between DS and O	500 mm
Length between O and RS1	300 mm
Length between RS1 and Ge	850 mm
Length between Ge and RS2	40 mm
Length between RS1 and RS2	890 mm
Analyzer	Ge (111)
Material	Annealed SUS304L Shot-peened SUS304L
Diffraction	$\gamma$ -Fe 331
Diffraction angle $2\theta$	12.335 deg.
X-ray Young's modulus E	222 GPa
X-ray Poisson ratio $\nu$	0.266

一般的に X 線応力測定法においては、X 線侵入深さ内に  $10^4$  個以上の結晶粒が存在する必要があることが報告されている。<sup>11)</sup> 本実験で用いた試験片について、例えば、結晶粒を完全な円と仮定して結晶粒の面積を  $S = (\pi d^2/4)$  とし、照射領域を  $A$  とすると  $A$  の中の結晶粒の数  $N$  は、ラボ X 線の実験においては  $d = 37\mu\text{m}$ 、 $A = 4 \times 8\text{mm}^2$  から、

$$N = \frac{A}{S} = 29767$$

が得られる。放射光の実験においては低角度での測定になることからスリットサイズに比べて照射面積は広がり、 $A = 2 \times (0.2/\sin(12.335\text{deg}/2))\text{mm}^2$  から、

$$N = \frac{A}{S} = 3463$$

となる。回折に預かる結晶はこれよりもさらに少なくなる。そのため、集合組織の影響も考えると結晶粒の数を増やすことは必須である。

そこで本測定では 3 つの揺動法について検討した。Fig. 3 に 3 つの揺動法を示す。①から③はそれぞれ

- ①：法線ベクトルまわりに回転 = 面内回転 (rotation)
- ②：散乱面内から法線ベクトルを傾ける = あおり (tilt; 以下面外回転と称す)
- ③：入射ベクトルと散乱ベクトルを含む散乱面に対して平行移動 = 並進 (translation)

を表しており、照射領域に含まれる結晶粒の数は、

- ①：5202
- ②：6200 (1deg. 揺動の場合)
- ③：16431L ( $L$  は並進させる距離 (mm))

である。揺動の速度は、①が  $12.56(4\pi)$  rad/sec であり、③が 1mm/sec である。②に関しては連続的に揺動を行わず、0.5deg. ずつ傾けながらひずみスキャンニング測定を行った。

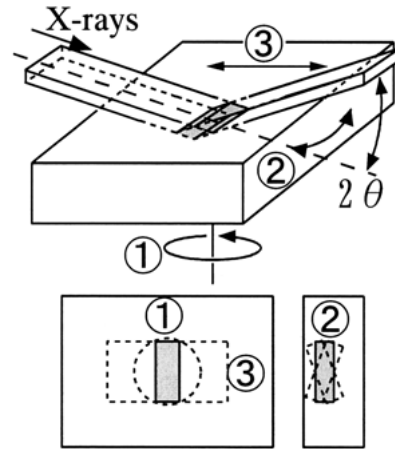


Fig. 3 Types of oscillation methods.

### 3 実験結果および考察

#### 3・1 表面の残留応力

Fig. 4 にラボ X 線で測定した SUS304L 焼鈍材と SUS304L ショットピーニング材の  $2\theta$ - $\sin^2\psi$  線図を示す。図からわかるように、いずれも直線性もよく  $\sin^2\psi$  法が適用できる。また本測定では揺動は行っていないが十分な数の結晶粒を用いて測定しているため、 $\psi$  角による回折強度の変化や回折角度のうねりも見られなかった。

Table 4 に Fig. 4 より求められた表面の残留応力を示す。測定結果からショットピーニングによる残留応力は、等二軸平面応力状態に近いことがわかる。また、SUS304L 焼鈍材もやや引張の残留応力があるが、ほぼ焼鈍されているといえる。

#### 3・2 揺動法を用いない応力測定

まず、オーステナイト系ステンレス鋼である SUS304L の残留応力測定を行う場合に、揺動法が必要であるか確認した。

Fig. 5 に SUS304L 焼鈍材について揺動を行わずに測定した  $\gamma$ -Fe 331 反射の回折角、およびピーク強度をそれぞれ黒丸および白丸で示す。各深さにおける回折角およびピーク強度の決定は測定されたプロファイルに対してガウス曲線を用いてフィッティングより求め、同時に得られる標準誤差をエラーバーとして Fig. 5 中に示した。

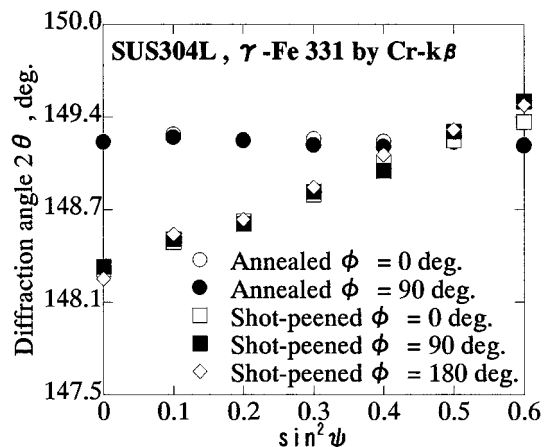


Fig. 4  $2\theta$ - $\sin^2\psi$  diagram of annealed and shot-peened SUS304L with laboratory X-rays.

Table 4 Surface residual stress of annealed and shot-peened SUS304L with laboratory X-rays.

Specimen	$\phi$ (deg.)	Residual stress (MPa)
Annealed	0	23.0
Annealed	90	22.5
Shot-peened	0	-620
Shot-peened	90	-673
Shot-peened	180	-699

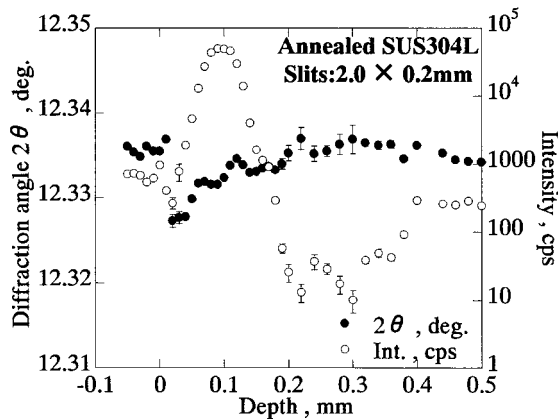


Fig. 5 Change in diffraction angle and peak intensity of annealed SUS304L without oscillation.

アナライザを用いたひずみスキャンニング法であるにもかかわらず、表面から  $200\mu\text{m}$  まで回折角が単調増加している。この理由は、Fig. 9 で示される面外回転  $0\text{deg.}$ 、深さ  $0.1\text{mm}$  における高回折強度部であり、この原因は粗大粒や集合組織の影響であると考えられる。ひずみスキャンニング法においてはゲージ体積に含まれる結晶粒からの回折を平均的に測定し、そのゲージ体積内のひずみを求める。ある特定の領域に粗大粒や集合組織が発生している場合には次のようなことが考えられる。Fig. 6 にひずみスキャンニング測定におけるゲージ体積と粗大粒や集合組織および回折中心の位置関係を示す。深さ (depth)  $0.01\text{mm}$  においてはゲージ体積の下方部に粗大粒や集合組織が含まれ、この領域からの回折を測定することにな

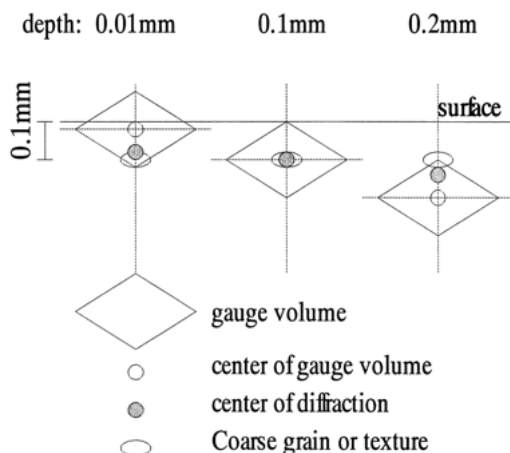


Fig. 6 Relationship between gauge volume and coarse grain or texture.

る。ゆえに回折中心はゲージ体積の中心よりもかなり下に位置することになる。深さ  $0.1\text{mm}$  においてはゲージ体積と回折中心は一致するが、逆に深さ  $0.2\text{mm}$  においては、回折中心はゲージ体積の中心よりもかなり上に位置する。ひずみスキャンニング法では装置系の中心はゲージ体積の中心と一致しているため、上述のように回折中心がゲージ体積の中心と異なる場合、回折角はシフトする。ゆえに今回の場合、ゲージ体積の中心と回折中心の差は深さ  $0$  から  $0.2\text{mm}$  においては単調増加しており、そのため Fig. 5 のような回折角のシフトが発生していると考えられる。この問題を解決するためには揺動法を適用することが必要である。

Fig. 5 から  $0.2\text{mm}$  から  $0.3\text{mm}$  の間の回折角の誤差が他の深さでの回折角の誤差に比べると非常に大きいことが挙げられる。この理由は、対数スケールで示したピーク強度の深さ依存性を見ると回折角の誤差が大きい領域における強度は極端に弱いことからわかり、この強度が弱い原因も粗大粒や集合組織による影響であると考えられる。詳細については、3・4 節でふれる。

以上の結果から粗大粒や集合組織による回折に預かる結晶粒の数の不足および偏りがこのような結果を起している可能性が高い。

### 3・3 面内回転揺動法を用いた応力測定

Fig. 7 に 2・4 節で示した揺動法の 1 つである“面内回転”を施して測定した SUS304L 焼鈍材の回折角およびピーク強度を示す。Fig. 5 に比べると格段に回折角が安定している。これは回折に預かる結晶粒の数が増加したためである。しかしながら、ピーク強度の深さ依存性においては、2つのピークが存在していることがわかる。これは揺動により測定領域を広げたために揺動を行う前には測定されなかった別の集合組織の影響であり、本手法はオーステナイト系ステンレス鋼のような集合組織を含む材料に対して、不十分である。

### 3・4 面外回転揺動法を用いた応力測定

“面外回転”を行うことは法線ベクトルを散乱面からずらすことになり、回折に預かる結晶粒の数そのものはあまり増加しないが、回折に預かる結晶粒そのものは変化する。微小結晶や集合組織などにより偏った方向を向いている結晶粒に対しては、この揺動法が効果的であることが期待される。

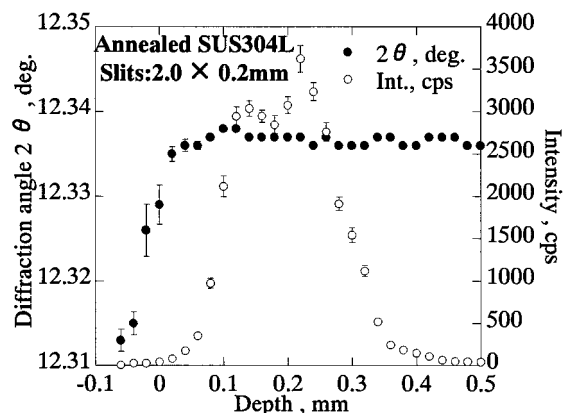


Fig. 7 Change in diffraction angle and peak intensity of annealed SUS304L with rotating oscillation.

Fig. 8に面外回転を少しずつ行った場合の $\gamma$ -Fe 331 反射の回折角の深さ依存性を示す。0deg.はFig. 5と同じ法線ベクトルが散乱面に含まれている状態である。これに対して他の4つのグラフはすべて同じ振る舞いを示し、深さ0.1mm付近で不連続な変化を示している。この原因は内在する集合組織の影響であると考えられる。Fig. 9に面外回転と深さに対する強度の2次元マップを示す。等高線は対数スケールで薄い色から濃い色に向かって強度の増加を表している。また斜線で示した領域は、強度が0のところである。面外回転0deg.、深さ0.1mmのところにも最も強い強度の領域があり、この部分に集合組織があると考えられる。そして、この周りはその集合組織が0の領域が存在していると考えられる。

本来の面外回転揺動では今回のように1つの面外回転位置に対して独立に測定することはなく、これらの平均として測定することになる。そこでこの5つのプロファイルを加算した結果をFig. 10に示す。独立に測定されたデータと比べると、エラーバーが小さくなり、測定精度が向上している。しかしながら強度に関しては、深さに対していくつもピークを作っていることから集合組織による影響が強く現れており、本手法はオーステナイト

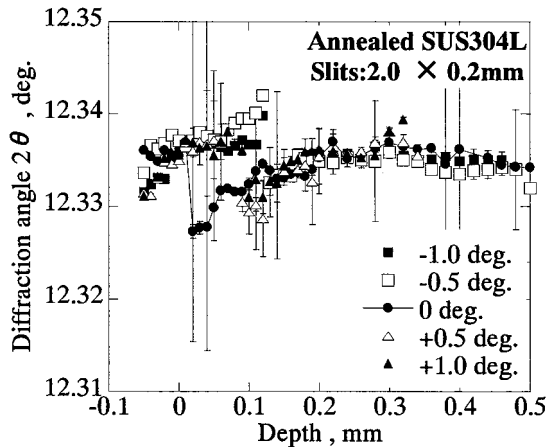


Fig. 8 Change in diffraction angle of annealed SUS304L with tilt oscillation.

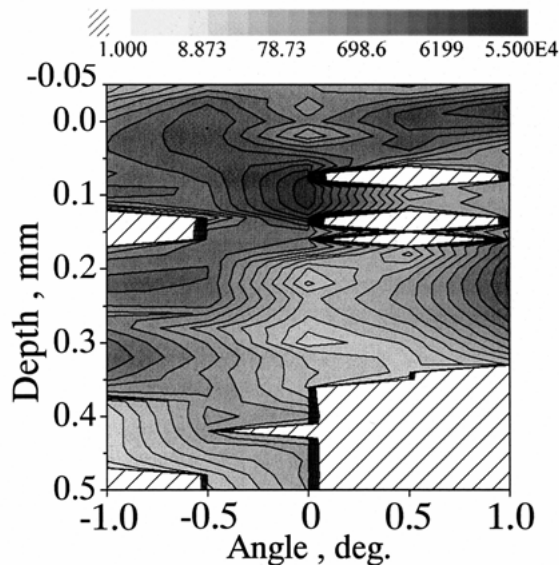


Fig. 9 Intensity map of annealed SUS304L.

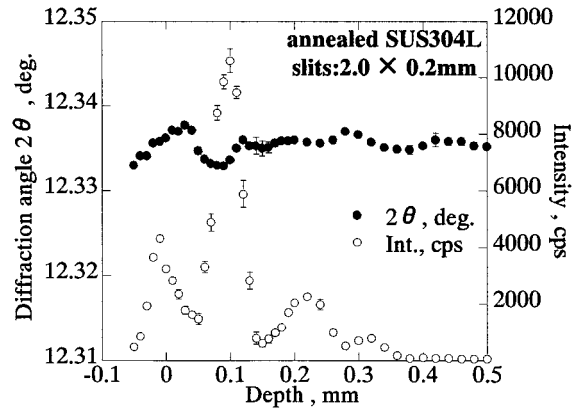


Fig. 10 Change in diffraction angle and peak intensity of annealed SUS304L.

系ステンレス鋼のような集合組織を含む材料に対しては不十分であるといえる。

### 3・5 並進揺動法を用いた応力測定

並進による揺動法はその移動距離により測定される領域が広がるので、回折に預かる結晶粒の数を増やすことができる。試料が大きい場合や平面等二軸応力などに対して有効な手段であると考えられる。

Fig. 11に並進させる距離を変えながら測定した回折角の深さ依存性を示す。黒四角、黒三角、黒丸はそれぞれ揺動させた距離1mm、2mm、4mmを表しており、そのときの照射面積に含まれる結晶粒の数はそれぞれ5322、7182、10903である。並進させる距離を増やすことにより回折角の深さに対する変位量は小さくなり、誤差についても格段に軽減していることがわかる。このことから、回折に預かる結晶粒の数が測定精度に大きく影響している。特に、並進させる距離4mmについては、2・3節でも説明したように結晶粒の数が唯一 $10^4$ 個を超えていることからオーステナイト系ステンレス鋼については今回の並進による揺動がもっとも効果的であることがわかる。並進揺動は面内の空間分解能の低下を招くが、深さ方向の空間分解能は損なわない利点がある。Fig. 11

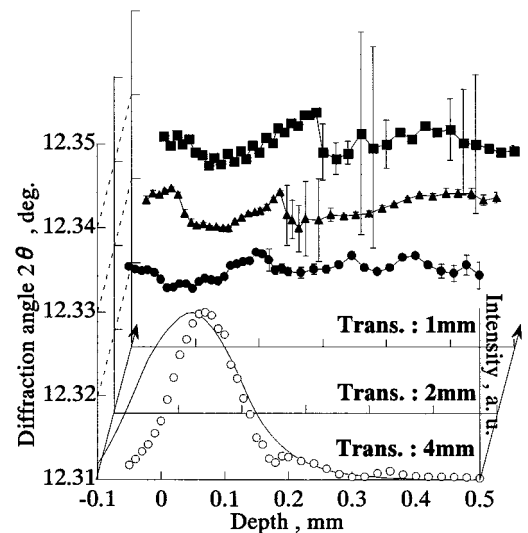


Fig. 11 Change in diffraction angle and peak intensity of annealed SUS304L with translated oscillation. The solid line indicates theoretical curve line.

内の白丸は並進させる距離を 4mm としたときのピーク強度の深さ依存性を示してあるが、この結果についても実線で示された理論計算とを比較するとほぼ同じ振る舞いを示しており、集合組織による影響もかなり緩和していると考えられる。なお、深さが浅いところでは、並進揺動により試料表面がわずかに上下するため、ゲージ体積が測定している深さよりも浅くなる場所が発生し、ゲージ体積内に含まれる結晶数の低下により回折強度が低下していると考えられる。

このピーク強度の深さ依存性の実測と理論計算とのずれ  $20\mu\text{m}$ 、およびダブルスリットとアナライザの中心線のずれ  $50\mu\text{m}$  を考慮して回折角の補正を行った結果を Fig. 12 に示す。表面近傍においても十分補正されていることが明らかである。

なお、並進揺動機構では並進面と試料面の平行度が測定精度に直結するので、十分注意する必要がある。詳細については後述する付録で述べる。

### 3・6 ショットピーニング材の残留応力測定

前節までで、並進による揺動法が効果的であることがわかったので、次に本法を用いて、SUS304L ショットピーニング材の表面の残留応力の実測を試みた。

Fig. 13 (a) に SUS304L ショットピーニング材の測定した回折角およびピーク強度を示す。強度結果から、最も強い強度の 84% を表面とするのに対して、測定結果は  $30\mu\text{m}$  ずれているので表面位置の補正を加える必要がある。<sup>7)</sup> この結果と、深さ 0mm の位置での回折角とラボ X 線による残留応力の値と一致するように、無ひずみの格子面間隔を決定し、応力値を求めた。このとき、3・1 節のラボ X 線の測定結果から表面はほぼ平面等二軸応力であると考えられるので、内部の残留応力は、

$$\sigma_R = -\frac{E}{2\nu} \cdot \frac{d - d_0}{d_0}$$

より求めることができる。ただし、 $E$  はヤング率、 $\nu$  はポアソン比、 $d$  は格子面間の距離である。

前述より得られた結果を Fig. 13 (b) に示す。表面より  $0.35\text{mm}$  の深さまでは単調増加なグラフであり、圧縮応力が徐々に緩和していることがわかる。一方、 $0.35\text{mm}$  より深い位置ではばらつきが大きいが、特に応力が増加減少している様子は見られず、 $0.35\text{mm}$  より深い位置での応力の平均は図中の点線で示すように  $-67\text{MPa}$  であった。本

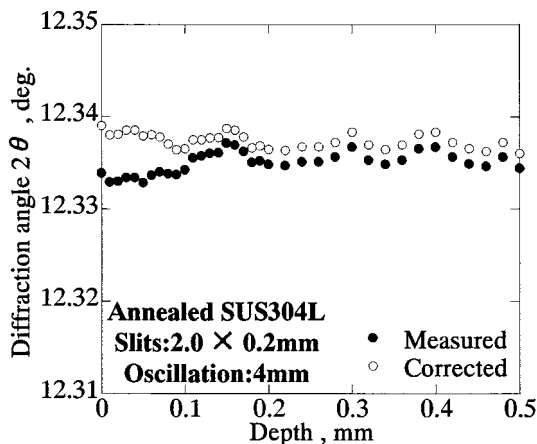
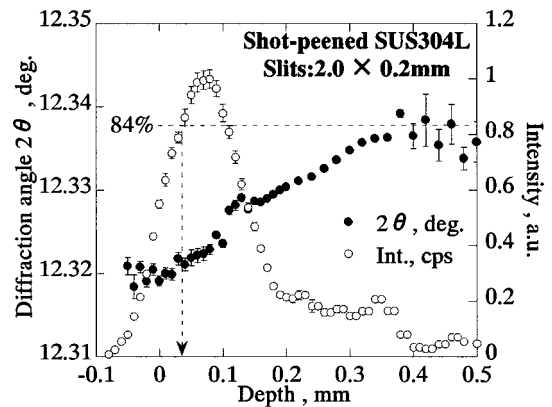
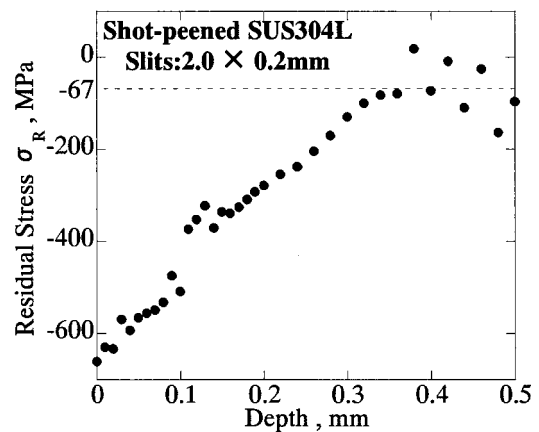


Fig. 12 Correction for strain scanning method of annealed SUS304L with translated oscillation.



(a) Change in diffraction angle and peak intensity



(b) Distribution of residual stress

Fig. 13 Shot-peened SUS304L.

測定手法がオーステナイト系ステンレス鋼でも十分に使用できることがわかった。

## 4 結 言

ひずみスキャン法を粗大粒や集合組織であるオーステナイト系ステンレス鋼へ応用し、試料への各種揺動法による効果を検討した。本研究により得られた結果は次のようになる。

(1) ゲージ体積内に含まれる結晶数が  $10^4$  個を満たさない場合は、ゲージ体積を中心とした回転揺動では回折に預かる結晶粒を十分に増やすことが困難であり、面内回転、面外回転の揺動については、十分な測定精度を得られない。

(2) 並進揺動では、深さ方向の空間分解能を損なうことなく、回折に預かる結晶粒の数を増やすことができ、精度のよい応力測定が可能である。そのためには、測定対象領域に  $10^4$  個程度の結晶数を確保する揺動が必要である。

(3) 並進揺動においては、揺動による回折強度の安定性、深さ方向の空間分解能の確保のために、並進面と試料面との高精度の平行度を必要とする。その調整方法も提案し、実効性を確認した。

(4) 本並進揺動ひずみスキャン法により、オーステナイト系ステンレス鋼のショットピーニングした残留応力分布を測定できた。

本測定の遂行に当たり、日立製作所(株)の大城戸忍氏より素材をご提供いただきました。ここに記して感謝の意を表します。

付録：並進揺動機構における並進面と試料面との平行度の調整

今回、並進揺動を行うために自動送りが可能な装置(神津精機製)を使用した。このときの問題点として、装置の並進面と試料面が平行でない場合には並進揺動に伴い試料表面が上下動し、ゲージ体積に含まれる領域が本体の測定深さの範囲より大きくなってしまふことが上げられる。Fig. 14に入射X線内に試料の一部を含んだ状態で並進揺動を9.2秒の周期で動作させたときの出射X線強度の時間変化を示す。入射X線と平行でない場合には図中のBeforeのように強度が時間変動しており、このような条件で測定を行った場合には前述の問題が発生する。

そこで並進面と試料面との平行度調整として本研究においては以下の方法を行った。

まず、試料とX線の関係は、Fig. 14内の配置にしておき、試料に対して適当な周期の並進揺動(本測定では9.2秒の周期)を行った状態にしておく。次に試料を試料表面を中心にして面外回転させながら強度収集を行う。測定した結果をFig. 15に示す。図中の各点における測定時間は1秒であり、移動時間は0.5秒以下である。つまり図中の点から点までに要する時間は1.5秒以下であり、並進揺動の周期よりも明らかに短い。このような条件における測定結果は強度の増減が繰り返し現れ、これは並進面と試料面が平行でないためである。ただし、図

中の強度の増減は常に同じではなく、 $\omega = -0.2\text{deg.}$ を中心にして強度の増減振幅は大きくなっている。つまり、本結果は $\omega = -0.2\text{deg.}$ において並進面と試料面とがほぼ平行になったことを示唆しており、実際にこの条件での出射X線強度の時間変化はFig. 14のAfterで示されるようにほとんどない。

ゆえに、並進揺動機構における並進面と試料面との平行度が不完全な場合には、ゲージ体積に含まれる領域が本体の測定深さの範囲より大きくなってしまい、深さ方向の分解能を悪くすることにつながるが、本手法により非常に簡単に並進面と試料面との平行度の調整を行うことができる。

参 考 文 献

- 1) K. Enomoto, K. Hirano, M. Mochizuki, K. Kurowasa, H. Saito and E. Hayashi, "Improvement of residual stress on material surface by water jet peenng", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.45, No.7, pp.734-739 (1996).
- 2) K. Akita, Y. Yoshioka, Y. Sano, K. Ogawa, T. Kubo, M. Obata and H. Tanaka, "X-ray residual stress measurement on weld metal of nickel based alloy", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.54, No.7, pp.690-696 (2005).
- 3) JSMS Committee on X-ray Study on Mechanical Behavior of Materials, "Standard method for x-ray stress measurement -steel-", JSMS-SD-5-02, pp.5-16 (2002).
- 4) JSMS Committee on X-ray Study on Mechanical Behavior of Materials, "Standard method for neutron stress measurement -Steel-", pp.1-8 (2005).
- 5) P. J. Webster, G. B. M. Vaughan, G. Mills and W. P. Kang, "High resolution synchrotron strain scanning at BM16 at the ESRF", Mater. Sci. Forum, Vol.278-281, pp.323-328 (1998).
- 6) S. Machiya, Y. Akiniwa, K. Suzuki, K. Tanaka, T. Kurimura and H. Koguma, "Measurement of residual stress distribution by strain scanning method using High energy x-rays from synchrotron source", Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers, Japan, Vol.71, No.711, pp.1530-1537 (2005).
- 7) T. Shobu, J. Mizuki, K. Suzuki, Y. Akiniwa and K. Tanaka, "Correction of surface aberration in strain scanning method with analyzer", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.55, No.1, pp.101-109 (2006).
- 8) <http://www.spring8.or.jp/ENGLISH/facility/bl/SPring8BL/BL22XU/index.html>.
- 9) T. Kudo, Y. Nishino, M. Suzuki, H. Tanida, T. Hirono and T. Ishikawa, "Stabilization of synchrotron radiation x-ray beam by MOSTAB", Journal of Japanese Society for Synchrotron Radiation Research, Vol.16, pp.173-177 (2003).
- 10) E. Kröner, "Berechnung der elastischen Konstanten des Vielkristalls aus den Konstanten des Einkristalls", Z. Phys., Vol.504, pp.504-518 (1958).
- 11) Y. Sakaida, "Study on correlation between minimum irradiation area and microstructure in micro x-ray stress measurement", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.53, No.7, pp.758-764 (2004).

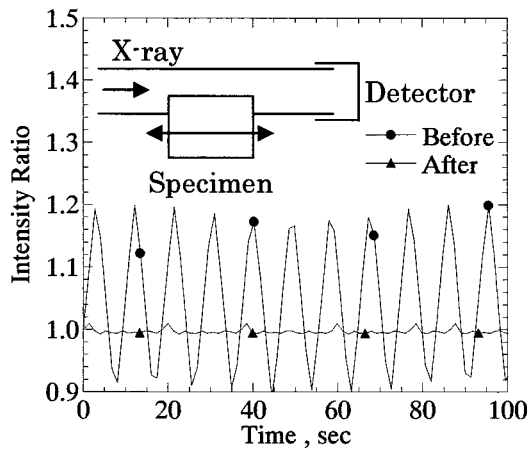


Fig. 14 Time dependence of X-ray intensity.

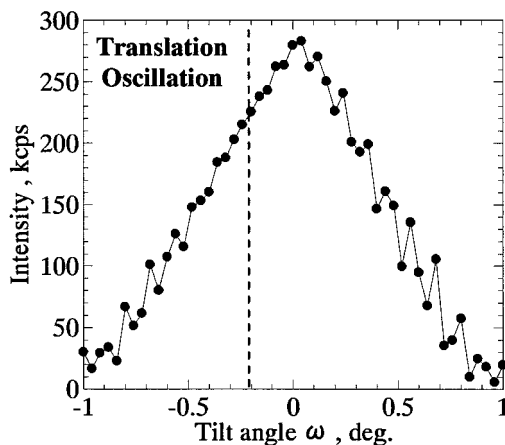


Fig. 15 Profile of with translation oscillation.