

## 2次元検出器方式による $\cos\alpha$ 法を用いた残留応力測定手法について

For residual stress measurement method using a  $\cos\alpha$  method by the two-dimensional detector system

パルステック工業株式会社	野末 秀和	Hidekazu Nozue	Member
パルステック工業株式会社	内山 宗久	Munehisa Uchiyama	Member
パルステック工業株式会社	加藤 達也	Tatsuya Kato	Member
パルステック工業株式会社	澁上 静也	Seiya Fuchigami	Member

### Abstract

The on-site residual stress measurement by the conventional XRD method is difficult because of the size of the equipment. For mainly on-site measurement and also using in the production line, we have developed the portable x-ray residual stress analyzer which is compact size e and short measurement time. The analyzer is using  $\cos\alpha$  method, not  $\sin^2\psi$  method which is used for conventional XRD stress measurement, and measure the stress from the complete Debye ring information by single angle X-ray exposure. In this report, I present an overview of the measurement principal of the X-ray residual stress measurement by  $\cos\alpha$  method and its advantages.

**Keywords:** Residual stress measurement, On-site, Highly portable, X-ray diffraction,  $\cos\alpha$  method, Debye ring

## 1. 緒言

一般に生産される機械金属の構造物や部品は、製造工程のなかで機械加工や熱処理、溶接、表面処理など様々な加工が施され、その際の引張りや圧縮といった残留応力が生じる。

この残留応力は、製品の強度や寸法精度に悪影響を及ぼすだけでなく、応力バランスが崩れると変形や破壊に繋がるおそれがあるため、大きな力が作用する箇所や形状変化が起きやすい箇所は、残留応力の大きさ、作用する方向や分布状況など正確に把握し、事前に事故やトラブルの対策を講じる必要がある。

残留応力測定手法として、近年X線回折による残留応力測定手法が注目を集めている[1-3]。しかし、従来の計測装置は、大型のX線照射装置や冷却装置を有することから、広い装置設置面積を必要とし、更にセッティングや計測に多大な時間とコストを必要としながら、限定的な範囲でしか使用できないという問題があった。現場において残留応力値を容易に把握できるようになれば、品質管理や安全対策、予防保全に大きく貢献することがで

連絡先:野末秀和, 〒431-1304 静岡県浜松市北区細江町中川 7000-35, パルステック工業株式会社 技術部  
E-mail: hide-nozue@pulstec.co.jp

きる。

そこで、可搬性に優れ、現場において残留応力値を容易に計測できるX線残留応力測定装置「 $\mu$ -X360」の測定原理の概要と、予測される $\cos\alpha$ 法の有効性を考察して測定精度を検証した結果を報告する。また、現場測定の一例も報告する。

## 2. 2次元検出器方式によるX線応力測定の有効性

### 2.1 $\cos\alpha$ 法の概要

Fig.1 に  $\cos\alpha$ 法の概要を示す。[4-8]

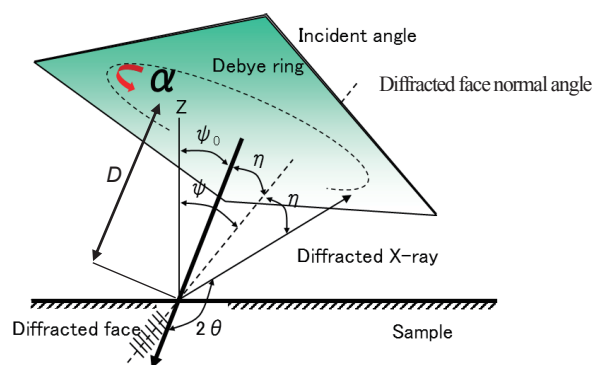


Fig.1 Outline of the  $\cos\alpha$  method

ここで、 $\eta$  は Bragg 角の補角、 $\psi_0$  は試料面法線と入射

X線ビームとのなす角,  $D$  は測定試料から 2 次元検出器までの距離とする。

回折環 (以後, デバイ環とする) 全体を取得し, 無応力試料を基準に測定試料のデバイ環の位置 (歪  $\theta$ ) を求めることで, 残留応力を算出する。

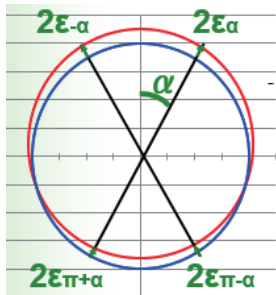


Fig.2 Acquire the full Debye-Scherrer ring. The magnitude of strain is determined from the detected position of the Debye-Scherrer ring

Fig.2 に示したように, デバイ環上の 4 箇所のひずみの組み合わせを利用して, 中心角が  $\alpha$  のときのひずみ  $\varepsilon\alpha$ , それと中心角  $\pi$  だけ異なる  $(\pi+\alpha)$  方向のひずみ  $\varepsilon\pi+\alpha$ ,  $-\alpha$  方向のひずみ  $\varepsilon-\alpha$ , さらに,  $(\pi-\alpha)$  方向のひずみ  $\varepsilon\pi-\alpha$  を用いて, 次式(1)の  $a_1$  を求める。

$$a_1 = \frac{1}{2} \{ (\varepsilon\alpha - \varepsilon\pi + \alpha) + (\varepsilon - \alpha - \varepsilon\pi - \alpha) \} \quad (1)$$

横軸に  $\cos\alpha$ , 縦軸に  $a_1$  でグラフ化すると, Fig.3 に示すような単純な直線関係が得られる。

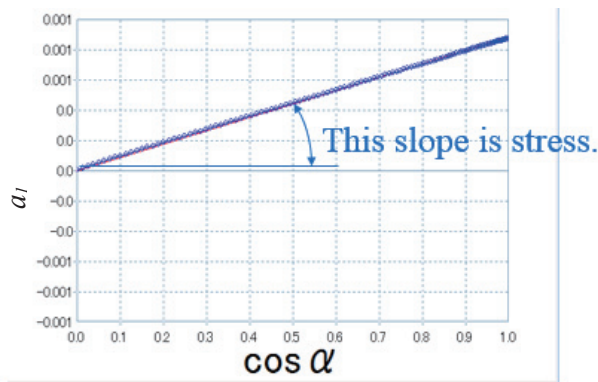


Fig.3  $\sigma_x$  (cos $\alpha$  line)

Fig.3 において, 線形近似した傾きを  $M$ ,  $E$  は縦弾性定数,  $\nu$  はポアソン比として, 次式(2)で応力  $\sigma_x$  を得ることができる。

$$\sigma_x = -\frac{E}{1+\nu} \cdot \frac{1}{\sin^2\eta} \cdot \frac{1}{\sin^2\psi_0} \cdot M \quad (2)$$

## 2. 2 試料距離 : $D$ の設置マージン

$\cos\alpha$ 法は試料距離に応じて取得するデバイ環のサイズが変化するが, Fig.4 に示すように 2 次元検出器にデバイ環が収まれば計測可能となり, 試料のセットはおよその距離で十分である。標準的な計測条件でも  $\pm 5\text{mm}$  程度の範囲を許容するため, 試料もしくは装置のセットは簡易である。

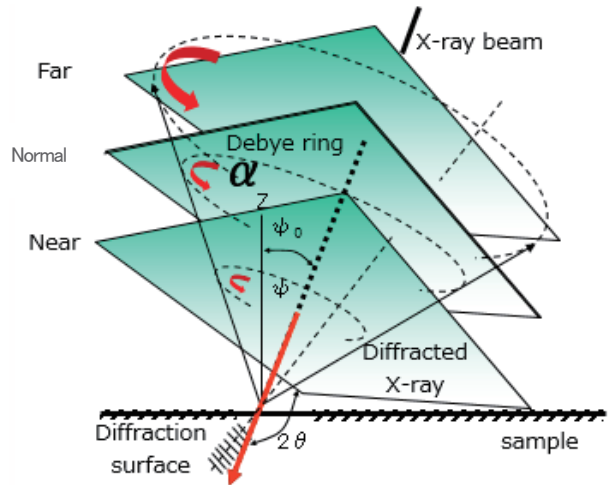


Fig.4  $\cos\alpha$  technique (Change sample distance)

## 2. 3 取得データの信頼性

2 次元検出器ではデバイ環全体 (360 度) のデータを取得するため, 高い再現性と信頼性を実現する。2 次元検出器で得られるデバイ環と結果表示イメージを Fig.5 に示す。

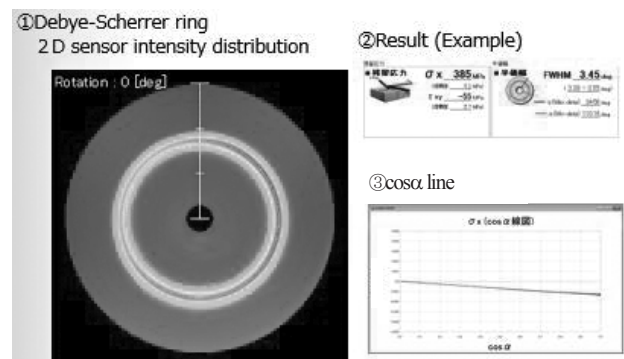


Fig.5 Advantage 2D Full data of Debye-Scherrer ring

## 2. 4 測定の確からしさ

2 次元検出器の大きな特徴であるデバイ環全体のデータ表示は, Fig.6 に示すように試料の組織状態が予測できる非常に有効な情報である。集合組織や配向のような状態が 1 回の計測で確認できるようになる。また, デバイ環の乱れ具合も, 数値化こそ難しいが, 測定の確からしさを判断するのに有効な情報と考えられる。

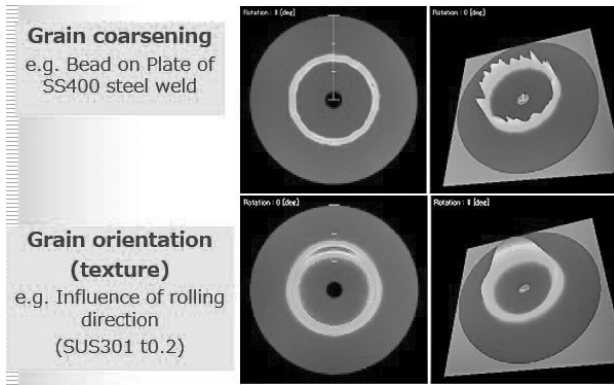


Fig.6 Easy & quick visual analysis

## 2. 5 小型・軽量・省電力

cos $\alpha$ 法は X 線を単一入射させて計測する手法のため、入射角度を変更させる高精度メカ構造が不要となり、従来装置に比べて大幅な小型軽量化が実現できる（センサー一部重量 約 4kg, 大きさ\_W:311, H:154, D:124[mm]）。また、低出力 X 線管の採用で空冷方式を実現し、水冷装置は不要である。さらに、消費電力が低いため、電源が無くてもバッテリーによる計測が可能である。

## 3. 4 点曲げによるひずみゲージとの比較

炭素鋼 S45C の短冊状サンプル(長さ 140mm, 幅 20mm, 厚さ 3mm) に、裏面へひずみゲージを貼り四点曲げ荷重を数段階加え、表面を  $\mu$ -X360 で計測して比較した。使用したひずみゲージは 1G120 (KYOWA 製) とした。また、周囲温度は 25.5 度、湿度は 60% であった。ひずみゲージで得た値 [ $\mu\epsilon$ ] に対しては、ヤング率  $E = 206\text{GPa}$  を掛けて応力換算した。結果を Fig.7, 使用した治具を Fig.8 に示す。また、表 1 に X 線回折条件を示す。

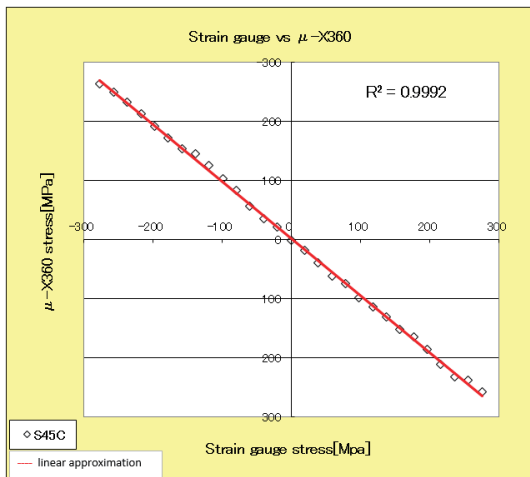


Fig.7 Correlation of strain gauge and  $\mu$ -X360

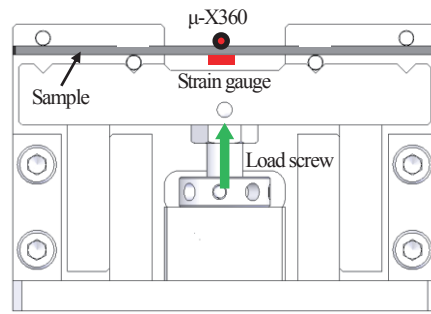


Fig.8 4 point bending jig

Table 1 Measuring conditions of X-ray equipment

Characteristics X-ray	CrK $\alpha$
Diffraction line, hkl	211
Tube voltage [kV]	30
Tube current [mA]	1
X-ray incident angle, $\psi_0$ [deg]	35
Diameter of irradiated area [mm]	2. 0
Young's modulus_E [GPa]	206
Poisson's ratio_v	0. 28
Diffraction angle $2\theta$ [deg]	156. 4
Exposure time [sec]	30

本報告の測定条件において、 $\mu$ -X360 がひずみゲージと高い相関関係を持つことを確認した。また S45C サンプル加工時の残留応力と外的付加応力を含めた応力測定が可能であった。

## 4. 応用事例

『 $\mu$ -X360』は「現場」での計測を実現する為に開発された装置と言っても過言ではない。cos $\alpha$ 法の採用と2次元検出器の採用により、小型軽量、省電力、簡易設置を実現した『 $\mu$ -X360』の応用事例を示す。

### 4. 1 溶接による残留応力計測例

溶接部には局所的な温度変化に伴う熱膨張や収縮が発生するものの、周囲が拘束された状態となるため変形が妨げられ、溶接部近傍に大きな残留応力が発生する。残留応力が要因で変形や亀裂などの問題に発展する場合があります。応力値の管理・把握、その制御が重要とされている [9]。試料距離  $D$  のマージンが広いことを利用して、測定装置を自動制御ステージにて平行移動させて測定した溶接部近傍の応力分布結果を Fig.9 に示す。ただし、応力方向は溶接線と平行とする。

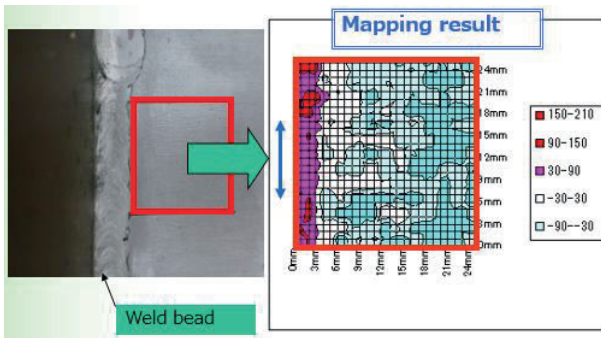
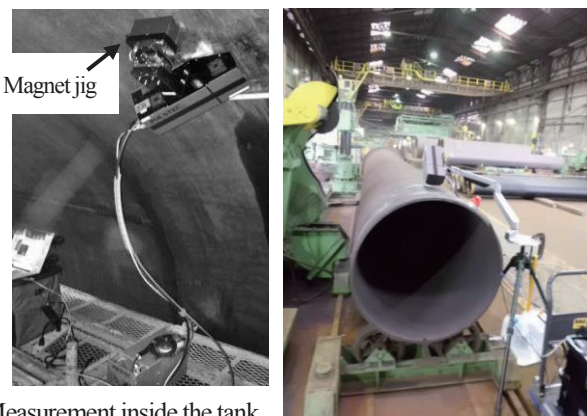


Fig.9 Stress mapping (Only base material)

#### 4. 2 現場測定例

(a)



Measurement inside the tank

Tube\_Welds, Heat treatment

(b)



Tank\_Welds, Tempering effect

#### 5. 結言

X線回折による残留応力測定を、デバイ環全体を計測して行う方法については、従来装置よりも小型軽量化、かつ低線量での測定において、ひずみゲージとの相関が良く、測定に十分な性能が得られた。現場においても持ち運びが簡単で、組織状態が容易に確認でき、測定の確からしさを予測できるという特徴を有している知見を得た。

今後は更なる小型軽量化、簡易測定に取り組み、現場における品質管理や安全対策、予防保全に大きく貢献していきたいと考えている。

#### 参考文献

- [1] 平, 田中, 山崎, “細束 X 線応力測定の一方法とその疲労き裂伝ば問題への応用”, 材料 27, p251, 1978.
- [2] 日本材料学会, X 線応力測定法標準, 養賢堂, 2002.
- [3] 田中啓介, 鈴木賢二, 秋庭義明, 残留応力の X 線評価-基礎と応用-, 養賢堂, 2006.
- [4] 秀, 南戸, “ラジオルミノグラフィイメージングプレートの物理と先端放射線計測への応用”.
- [5] 吉岡靖夫, 長谷川賢一, 持木幸一, “位置検出型比例計数管による X 線応力測定”, 日本材料学会, 1977.
- [6] B. B. He, “Two-dimensional X-Ray Diffraction, ,” John Wiley & Sons, 2009.
- [7] 佐々木敏彦, 広瀬幸雄, “イメージングプレートによる2次元検出回折像を用いた X 線三軸応力解析”, 日本機械学会論文集(A 編)61 巻 590 号, 1995.
- [8] 吉岡靖夫, 大谷真一, 新開毅, “イメージングプレートの細束 X 線解析への適用”, 非破壊検査, 第 39 巻, 第 8 号 p667, 1990
- [9] 王, 大城戸, 波東, 菊池, 千葉, “X 線回折による溶接金属部の非破壊的残留応力測定技術の開発”, 日本材料学会第 49 回 X 線材料強度に関する討論会講演論文集 37-43, 2012.