

cos α 法を用いたX線残留応力測定の有効性確認

郡 亜美^{*1} 高久 泰弘^{*2} 鈴木 健次^{*3} 中代 雅士^{*4}
Kohri Ami Takaku Yasuhiro Suzuki Kenji Nakashiro Masashi

近年、cos α 法を用いた携帯型X線残留応力測定装置が開発され、可搬性の高さや短時間での測定が可能といった特徴から、現地計測への適用が期待されている。本稿では、標準試験体や4点曲げ試験について、従来法であるsin² ψ 法の計測値と比較し、cos α 法による応力計測値の妥当性を検証した。

キーワード：残留応力、外部応力、内部応力、ひずみ、X線応力計測

1. はじめに

機械部品の品質管理や、構造部材の健全性、安全性評価に残留応力計測が用いられてきている。残留応力計測には、切断法や穿孔法、X線回折法、中性子線法などさまざまな手法が採用されているが、そのなかでも、非破壊で計測が可能であり、かつ容易に計測できることからX線残留応力計測法が広く採用されている⁽¹⁾。

X線残留応力計測法としては、sin² ψ 法が一般的であり、当社でも、sin² ψ 法を採用した可搬型X線応力計測装置（Stresstech社製X3000）により、実験室内でできる試験片サイズの計測だけでなく、現地での応力計測サービスも提供してきた。一方、佐々木らによって、cos α 法と呼ばれる手法を用いた携帯型計測装置が開発され、現地計測への適用が期待されている⁽²⁾⁻⁽⁴⁾。従来のsin² ψ 法は計測実績が十分にあるが、計測対象に対して異なる角度からX線を照射する精密回転機構が必要で、その構造上の制約から計測できないケースが

多くあった。一方、cos α 法を用いた装置は、回転機構が必要なく、小型であることから、計測対象の形状の制約が少なくなり、従来法よりも計測可能な対象物は増えると考えられる。しかし、構造物の残留応力を正しく評価するためには、計測方法の異なるこれら手法によるデータの比較が望まれる。

本稿では、標準試験体の計測や、4点曲げ試験で応力を負荷した状態の試験片についてcos α 法およびsin² ψ 法の計測を行い、それぞれ計測値を比較し値の妥当性について検討した。

2. cos α 法⁽²⁾⁻⁽⁵⁾

結晶を持った金属にX線を照射すると、Braggの条件を満たした結晶粒から回折X線がリング状に発生する。これをデバイリングと言う。X線応力計測の従来法であるsin² ψ 法はデバイリングの一部の範囲しか利用しておらず、角度を変え複数回X線を照射する必要があった。しかし、cos α 法はデバイリング全体を利用するため、X線の単

*1：研究開発センター 研究開発グループ

*2：計測事業部 材料試験部 福浦グループ

*3：計測事業部 材料試験部 福浦グループ 次長 博士（工学）

*4：フェロー 博士（工学） 技術士（金属部門・機械部門・総合技術監理部門） 環境計量士（騒音・振動関係） 一般計量士

一入射のみで応力を計測することができる。そのため、従来の精密回転機構が不要であり、装置の小型化と測定時間の短縮が可能になった。

X線照射点に図1のような試料座標軸XYZを設定する。デバイリングの中心角 α に対するひずみ ε_α は次式で表される。

$$\varepsilon_\alpha = \sigma_x \frac{1}{E} [n_1^2 - \nu(n_2^2 + n_3^2)] + \sigma_y \frac{1}{E} [n_2^2 - \nu(n_3^2 + n_1^2)] + \tau_{xy} \frac{2(1+\nu)}{E} n_1 n_2 \quad (1)$$

ここで、 E はX線のヤング率、 ν はX線のポアソン比である。 $n_1 \sim n_3$ は実験座標系から試料座標系への方向余弦である。式(1)が $\cos\alpha$ 法における応力成分表示における基礎式になる。ここで、基礎式(1)より応力成分を得るために、図1に示されるように回折環の中心角がそれぞれ $-\alpha$ 、 $\pi+\alpha$ 、 $\pi-\alpha$ 、であるような回折ビームから得られるX線のひずみを考え、それぞれ $\varepsilon_{-\alpha}$ 、 $\varepsilon_{\pi+\alpha}$ 、 $\varepsilon_{\pi-\alpha}$ と表し、次のようなパラメータ α_1 を求める。

$$\alpha_1 \equiv \frac{1}{2} [(\varepsilon_{-\alpha} - \varepsilon_{\pi+\alpha})(\varepsilon_{-\alpha} - \varepsilon_{\pi-\alpha})] \quad (2)$$

α_1 を応力成分表示すると次式で表せる。

$$\alpha_1 = -\frac{1+\nu}{E} \sin 2\psi_0 \sin 2\eta \cos \alpha \cdot \sigma_x \quad (3)$$

したがって、応力 σ_x は次式より求められる。

$$\sigma_x = -\frac{E}{1+\nu} \frac{1}{\sin 2\eta \sin 2\psi_0} \left[\frac{\partial \alpha_1}{\partial \cos \alpha} \right] \quad (4)$$

3. 実験内容

3.1 供試体と計測方法

供試体は、標準試験体として販売されている応力0のパウダーサンプル、ショットピーニングにより高圧縮応力を負荷した標準試験体（高応力標準試験体）を使用した。また、負荷応力値とX線計測結果の関係を比較するために、4点曲げ試験を行った。負荷応力はX線計測部近傍に単軸ひずみゲージを貼り付け、ひずみ値から求めた。試験体は、一般構造物に使用されているSM490とSUS316を用いた。

3.2 X線応力計測装置

X線応力計測装置には、 $\sin^2\psi$ 法ではStresstech社製X3000を使用し、 $\cos\alpha$ 法では、パルステック工業株式会社製 μ -X360nを用いた。それぞれの装置を図2に示す。 μ -X360nはCr管球のみで計測を行った。また、応力算出に用いた物性値は、それぞれメーカー推奨値を採用した。

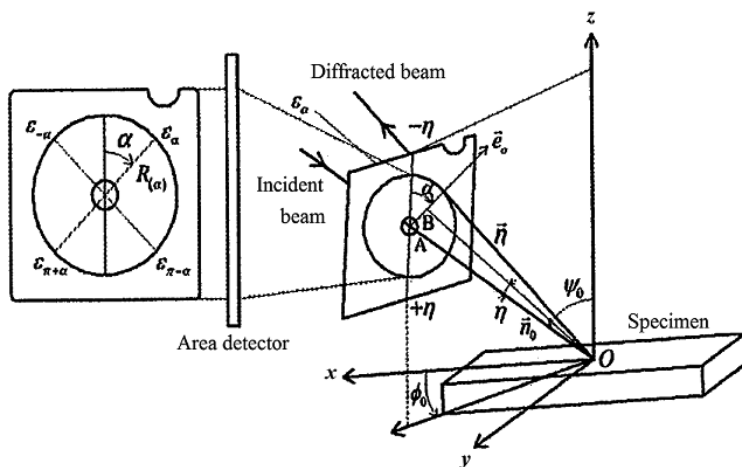
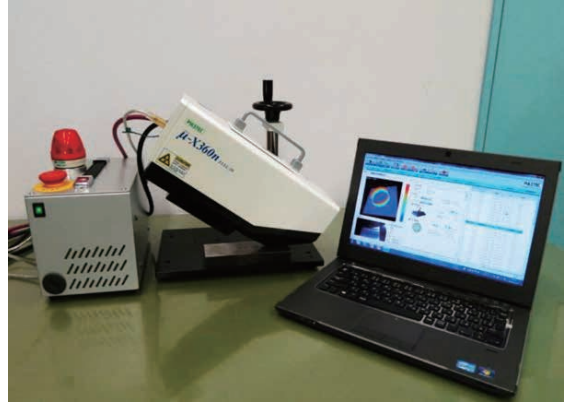


図1 $\cos\alpha$ 法の概略図⁽⁵⁾



(a) X3000 : Stresstech 社製



(b) μ-X360n : パルステック工業株式会社製

図 2 X 線残留応力測定装置

4. 計測結果および考察

4.1 パウダーサンプルによる 0 応力計測

応力 0 の標準試験体として α Fe、 γ Fe、Ni、Al のパウダーサンプルについて計測した。 $\cos\alpha$ 法の計測条件を表 1 に、 $\cos\alpha$ 法および $\sin^2\psi$ 法の計測結果を図 3 に示す⁽⁶⁾。材料学会の X 線応力計測法標準では、鉄粉末試験体の応力推奨値は $\pm 10\text{MPa}$ 以内となっている⁽⁷⁾。図 3 に示すように、 $\cos\alpha$ 法の α Fe 計測結果は $0 \pm 1.7\text{MPa}$ となり、十分な計測精度が確認できた。その他の材料の計測結果においては、 α Fe より多少バラつきは大きくなったが、いずれも $\pm 20\text{MPa}$ 以内であり、 $\sin^2\psi$ 法による計測

結果とほぼ同等であることを確認した。

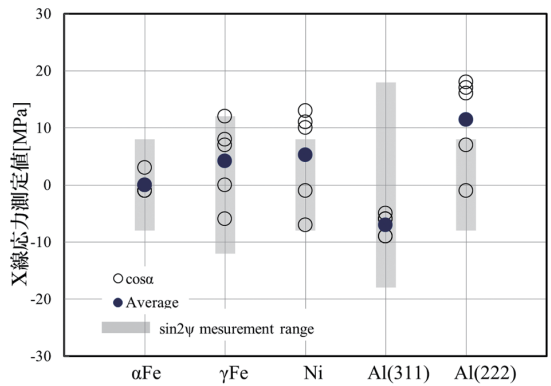


図 3 各パウダーサンプル計測結果⁽⁶⁾

表 1 パウダーサンプルの X 線応力測定条件

材質	αFe	γFe	Ni	Al	
測定方法	cosα法				
管球	Cr -Kα	Cr -Kβ		Cr -Kα	
回折面	211	311	311	311	222
回折角	156.4	148.5	158.3	139.0	156.1
管電圧	30kV				
管電流	1.0mA				
X線照射径	φ2.0mm				

4.2 高応力標準試験体の計測結果

ショットピーニング加工により、表面に高圧縮応力を残留させた校正用標準試験体について計測した。材質はFe（炭素鋼）、SUS316、IN718の3種類であり、それぞれの試験体の計測条件を表2に、計測結果を図4に示す⁽⁶⁾。図中の着色領域は標準試験体メーカーの公称値である。各試験体の計測値は、 $\cos\alpha$ 法、 $\sin^2\psi$ 法ともに公称値の範囲内に収まった。表2に示すように、SUS316LとIN718の計測では、 $\cos\alpha$ 法ではCr-K β 線、 $\sin^2\psi$ 法ではMn-K α 線で計測している。Cr-K β は $\lambda=2.08487\text{\AA}$ 、Mn-K α は $\lambda=2.10314\text{\AA}$ と波長が異なるが、今回の計測では、この違いによる計測結果への影響は認められなかった。

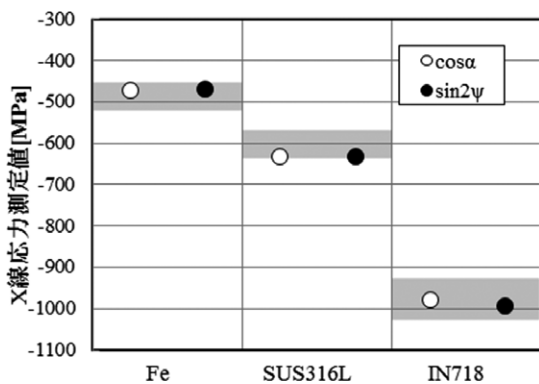


図4 高応力標準試験体の計測結果⁽⁶⁾

4.3 4点曲げ試験

μ -X360nによる4点曲げ試験計測風景を図5に示す。試験片は、SM490とSUS316でそれぞれ板厚2mm、3mmの短冊試験片(W22mm×L110mm)を用いた。試験片のX線計測点の周囲4方向に1枚ずつ、計測点の裏側に1枚のひずみゲージを貼り付け、5点のひずみから応力を算出した。X線応力計測条件は高応力標準試験体と同じである。SM490の計測結果を図6、図7に、SUS316の計測結果を図8、図9に示す⁽⁶⁾。SM490、SUS316ともに全ての試験片で、 $\cos\alpha$ 法と $\sin^2\psi$ 法は、初期値の圧縮応力から負荷荷重による応力変化において傾き1の直線関係が得られた。

SM490の計測では、 $\cos\alpha$ 法と $\sin^2\psi$ 法の計測値は同等であった。一方、SUS316では、 $\cos\alpha$ 法と $\sin^2\psi$ 法において、板厚2.0mmで約40MPa、板厚3.0mmで約80MPaの差が生じた。 $\cos\alpha$ 法と $\sin^2\psi$ 法の計測値の差は、 $\sin^2\psi$ 法はMn-K α 線、 $\cos\alpha$ 法ではCr-K β 線を用いたことによるものと考えられるが、詳細は今後の検討課題である。

表2 高応力標準試験片の応力測定条件

材質	Fe		SUS316L		IN718	
	$\cos\alpha$	$\sin^2\psi$	$\cos\alpha$	$\sin^2\psi$	$\cos\alpha$	$\sin^2\psi$
管球	Cr-K α		Cr-K β	Mn-K α	Cr-K β	Mn-K α
回折面	211		311	311	311	311
回折角	156.4		148.5	152.3	150.9	156.0
管電圧	30					
管電流	1.0	6.7	1.0	6.7	1.0	6.7
X線照射径	$\phi 2.0\text{mm}$					

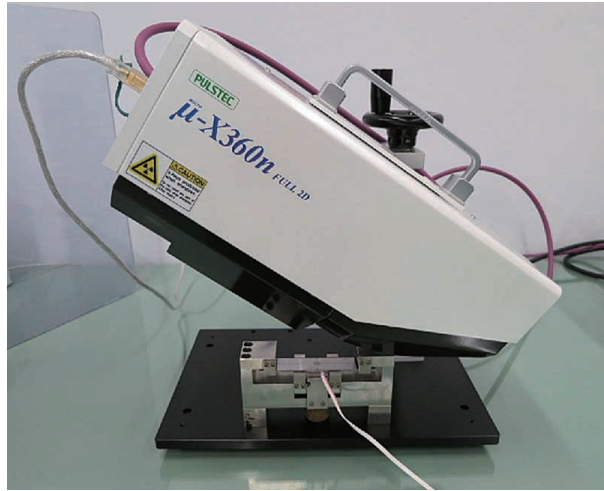


図5 μ-X360nによる4点曲げ試験計測風景

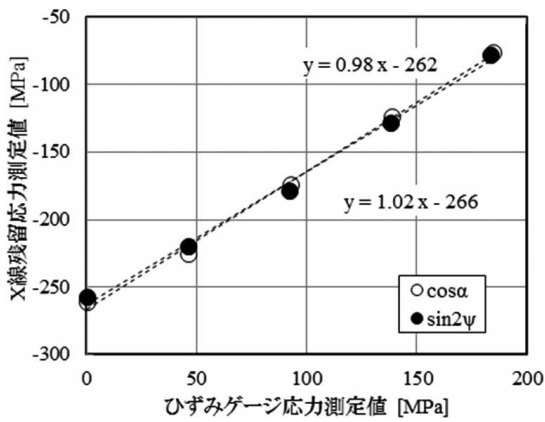


図6 4点曲げ試験応力計測結果 (SM490 板厚 2mm)⁽⁶⁾

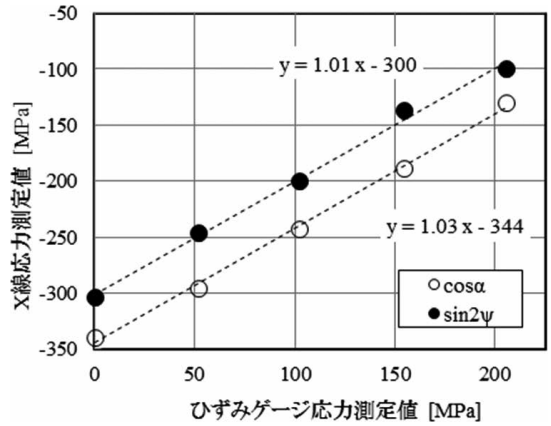


図8 4点曲げ試験応力計測結果 (SUS316 板厚 2mm)⁽⁶⁾

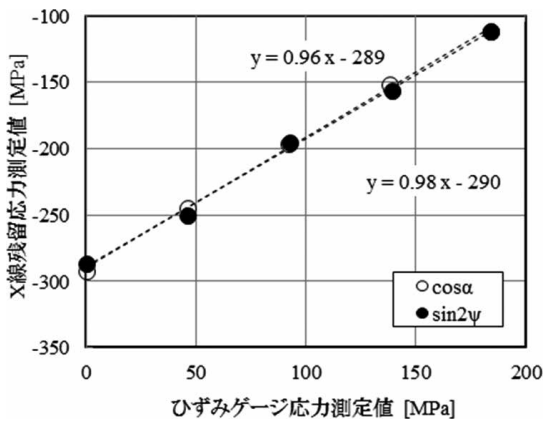


図7 4点曲げ試験応力計測結果 (SM490 板厚 3mm)⁽⁶⁾

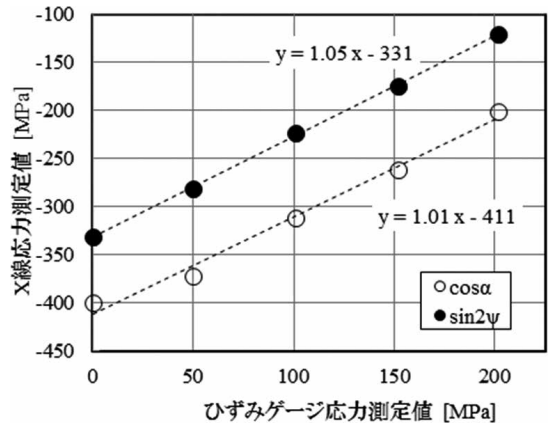


図9 4点曲げ試験応力計測結果 (SUS316 板厚 3mm)⁽⁶⁾

5. まとめ

本稿では、 $\cos\alpha$ 法による応力計測値の妥当性を検証するため、種々の応力条件下における計測値を、従来法である $\sin^2\psi$ 法による計測値と比較し、値の妥当性を検証した。

①種々のパウダーサンプルと、高応力標準試験体の計測では、 $\cos\alpha$ 法による計測値は、 $\sin^2\psi$ 法の計測幅内におさまっており、応力値はほぼ同じであった。

②SM490の4点曲げ試験により、負荷した応力に対する残留応力の変化量、計測値は $\sin^2\psi$ 法と $\cos\alpha$ 法は同等であった。SUS316の4点曲げ試験においても、負荷応力の変化量は $\sin^2\psi$ 法と $\cos\alpha$ 法は同等であったが、計測値については、若干差異が認められた。しかし、これは手法によるものではなく、検出した特性X線の違いによるものであると考えられる。

今回の計測結果では、 $\sin^2\psi$ 法と $\cos\alpha$ 法の計測値は同等であり、両手法の互換性があることが確認できた。今後、 $\cos\alpha$ 法を用いたX線残留応力測定装置の性能を活かし、現地計測へ適用させていく予定である。

参考文献

- (1) 中代雅士、三上隆男、松田昌悟、三谷幸寛、高久泰弘：構造部材内部に閉じ込められた残留応力の計測技術、IHI 技報、Vol.53、No.3、2013、pp.54-58
- (2) 佐々木敏彦、広瀬幸雄：2次元X線検出器イメージングプレートを用いた全平面応力成分の単一入射X線応力測定、材料、Vol.44、1995、pp.1138-1143
- (3) 佐々木敏彦、宮崎利行、内山宗久、三原毅：第12回保守検査シンポジウム講演論文、2013、pp.39-42
- (4) 山田順也、深井康宏、中谷光良、丸山洋一、佐々木敏彦：溶接学会平成24年度秋季全国大会講演概要、2012、pp.352-353
- (5) 藤本洋平、佐藤光、宮崎利行、佐々木敏彦：第48回X線材料強度に関するシンポジウム講演論文集、2014、pp.77-80
- (6) 郡亜美、中代雅士、高久泰弘、鈴木健次：第48回X線材料強度に関するシンポジウム講演論文集、2014、pp.22-25
- (7) 日本材料学会：X線応力測定法標準—鉄鋼編一、2002、pp.73



研究開発センター
研究開発グループ
郡 亜美

TEL. 045-791-3522
FAX. 045-791-3547



計測事業部
材料試験部
福浦グループ
高久 泰弘

TEL. 045-791-3519
FAX. 045-791-3542



計測事業部 材料試験部
福浦グループ 次長
博士(工学)
鈴木 健次

TEL. 045-791-3519
FAX. 045-791-3542



フェロー 博士(工学) 技術士
(金属部門・機械部門・総合技術
監視部門) 環境計量士(騒音・
振動関係) 一般計量士
中代 雅士

TEL. 03-6404-6534
FAX. 03-6404-6044