

令和6年度 機械知能・航空実験II A班

ファイナ⁴ X線回折による応力の測定

東北大学 機械知能・航空工学科
ファイナメカニクスコース 高・松隈研究室

学籍番号 C2TB1505

千葉 匠

共同実験者 シダーサダヌコンダ，川口朋也，蔦森公亨，
吉村悠太

実験日 2024年10月30日

提出日 2024年11月6日

連絡先 chiba.takumi.s4@dc.tohoku.ac.jp

目次

1	目的	2
2	原理	2
3	実験装置	4
4	実験方法	5
5	実験結果	5
6	考察	8
7	残留応力測定法について	9
7.1	X 線回折	9
7.2	ひずみゲージ法	9
7.3	穿孔法	10

1 目的

機器・構造物の代表的な損傷である疲労き裂や応力腐食割れなどには、部材中に存在する残留応力が深く関わっている。残留応力とは、外力が作用しないとき部材内部で釣り合いを保って存在する応力である。機器・構造物には残留応力と外力による応力が重畳して負荷されるので、一般に圧縮残留応力が存在する場合には引張残留応力が存在する場合に比べて、疲労強度が向上する。また残留応力が引張の場合には応力腐食割れが生じるが、圧縮の場合には生じない。代表的な残留応力計測法の一つに X 線回折を用いた手法があり、機械材料に負荷された応力も計測できる。本実験では、X 線回折のなかで一般的な手法である $\sin^2\psi$ 法により残留応力ならびに負荷応力を計測する。

2 原理

X 線回折による応力測定では、多結晶材料の結晶格子面間隔のひずみから応力を求める。本測定法は非破壊で計測でき、数十 μm オーダーの表面層の応力を計測できるなどの利点がある。

回折に与える結晶の格子面間隔を d 、回折角 θ とすると Bragg の式から

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (1)$$

となる。式 (1) を θ で微分して格子面間隔 Δd を求めると以下のようなになる。

$$\Delta d/d = -\cot \theta \cdot \Delta \theta \quad (2)$$

ここでひずみ ϵ_ϕ を、格子面間隔変位 Δd_ϕ 、ひずみがない場合の格子面間隔 d_0 、回折角 θ_0 とひずみが存在する場合の回折角 θ_ϕ で近似的に表すと以下のようなになる。

$$\epsilon_\phi = \Delta d_\phi/d_0 = -\cot \theta_0 \cdot (\theta_\phi - \theta_0) \quad (3)$$

試料表面では表面層の応力を取り扱うので平面応力状態を仮定し、試料表面の測定位置を原点とすると、主ひずみ $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ は、主応力 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 、ポアソン比 ν 、縦弾性係数 E から次式で表される。

$$\epsilon_1 = (\sigma_1 - \nu\sigma_2)/E \quad (4a)$$

$$\epsilon_2 = (\sigma_2 - \nu\sigma_1)/E \quad (4b)$$

$$\epsilon_3 = -(\nu(\sigma_1 + \sigma_2))/E \quad (4c)$$

試料表面の直行座標系での応力 σ_x , σ_y とひずみ ε_x , ε_y は, 上式から

$$\varepsilon = (\sigma_x - \nu\sigma_y)/E \quad (5a)$$

$$\varepsilon_y = (\sigma_y - \nu\sigma_x)/E \quad (5b)$$

$$\varepsilon_z = \varepsilon_3 = -\nu(\sigma_x + \sigma_y)/E \quad (5c)$$

となる. 任意の Φ , Ψ の方向に対するひずみ $\varepsilon_{\Phi\Psi}$ は, ε_1 , ε_2 , ε_3 により次式のように表される.

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\Phi\Psi} &= \varepsilon_1 \cos^2 \Phi \sin^2 \Psi + \varepsilon_2 \sin^2 \Phi \sin^2 \Psi + \varepsilon_3 \cos^2 \Psi \\ &= (\varepsilon_1 \cos^2 \Phi + \varepsilon_2 \sin^2 \Phi) \sin^2 \Psi + \varepsilon_3 (1 - \sin^2 \Psi) \end{aligned} \quad (6)$$

ここで $\varepsilon_1 \cos^2 \Phi + \varepsilon_2 \sin^2 \Phi$ をより式 (7) となり, 右辺に式 (5a) の ε_3 と式 (5c) の ε_3 を代入して, 式 (8) となる.

$$\varepsilon_{\Phi\Psi} = \varepsilon_x \sin^2 \Psi + \varepsilon_3 (1 - \sin^2 \Psi) \quad (7)$$

$$\varepsilon_{\Phi\Psi} = \{(1 + \nu)\sigma_x \sin^2 \Psi\}/E - \nu(\sigma_1 + \sigma_2)/E \quad (8)$$

式 (8) を $\sin^2 \Psi$ で微分し, $\varepsilon_\Psi = \varepsilon_{\Phi\Psi}$ とすると, 以下のようになる.

$$\partial \varepsilon_\Psi / \partial \sin^2 \Psi = \{(1 + \nu)\sigma_x\}/E \quad (9)$$

したがって, 式 (3) と式 (9) から, 式 (10) となる.

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \{E/(1 + \nu)\} \cdot (\partial \varepsilon_\Psi / \partial \sin^2 \Psi) \\ &= \frac{-E \cot \theta_0}{2(1 + \nu)} \cdot \frac{\pi}{180} \cdot \frac{\partial 2\theta_0}{\partial \sin^2 \Psi} \\ &= KM \end{aligned} \quad (10)$$

式 (10) より, $\sin^2 \Psi - 2\theta$ 線図の勾配 $M[\text{deg}]$ と, 定数 $K[\text{MPa/deg}]$ (応力定数) から応力 σ_x を求めることができる. 主な応力定数を表 1 に示す.

Table1: Stress constant method

測定試料	X 線	回折面	回折角 (2θ) deg	応力定数 MPa/deg
α -Fe	Cr K α	(2 1 1)	156.1	-317.9
	Co K α	(3 1 0)	161.4	-233.9
γ -Fe	Cr K α	(2 2 0)	128.7	-628.5
	Cr K β	(3 1 1)	148.5	-369.2
	Cu K α	(4 2 0)	140.5	-534.2
Al	Cr K α	(1 1 1)	156.6	-166.3
α -Ti	Cu K α	(2 1 3)	138.9	-290.6
Cu	Cr K α	(2 2 0)	127.3	-402.9
	Cr K β	(3 1 1)	146.0	-248.7
	Cu K α	(4 2 0)	144.7	-258.8

3 実験装置

一般的な装置の全体構成の概略を図 1 に示す．図 1 に示した装置は，ゴニオメータに X 線管ならびに検出器が取り付けられ，試料を固定したままで応力を計測できる．なお，X 線管を固定し，検出器や試料をゴニオメータにより走査する形式の装置もある．本実験では，X 線管には Cu 管を使用し，検出器には 2 次元位置敏感型検出器を使用して計測した．

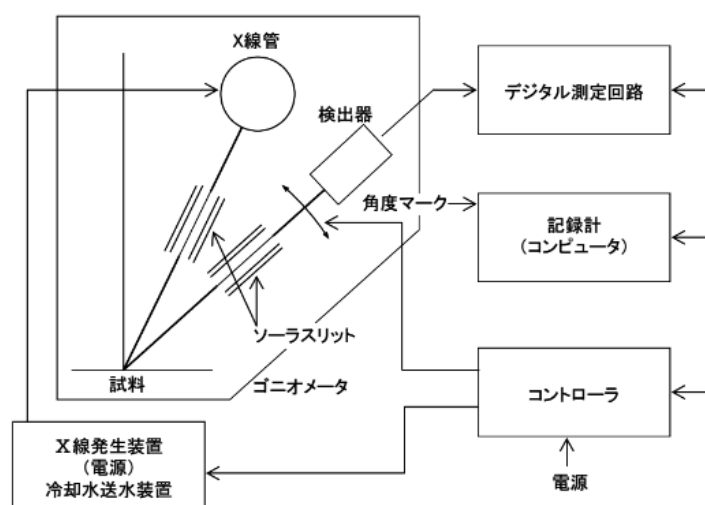


Fig.1: Schematic of the overall configuration of a typical device.

4 実験方法

Ti-6Al-4V 製試験片 (丸棒) の 2 点の応力を塑性変形前と塑性変形後に計測した。

1. 塑性変形前の丸棒の A 点の異なる $\Psi(0^\circ, 20.27^\circ, 29.33^\circ, 36.87^\circ, 43.85^\circ, 50.77^\circ)$ の回折強度のピークを計測した。また、 Ψ を 180° 回転させた $-\Psi$ でも同様に計測した。
2. 塑性変形前の丸棒の B 点 (A 点の裏側) の異なる Ψ の回折強度のピークを計測した。
3. 丸棒をチューブベンダを使って塑性変形させた。
4. 塑性変形後の丸棒の A 点の異なる Ψ の回折強度のピークを計測した。
5. 塑性変形後の丸棒の B 点の異なる Ψ の回折強度のピークを計測した。

5 実験結果

測定した丸棒試験片について、 Ψ と 2θ から、塑性変形前と後の A 点, B 点のそれぞれについて $\sin^2\Psi - 2\theta$ 線図を作成した。塑性変形前の A 点, B 点についての $\sin^2\Psi - 2\theta$ 線図を図 2, 図 3 にそれぞれ示す。また、塑性変形後の A 点, B 点についての $\sin^2\Psi - 2\theta$ 線図を図 4, 図 5 にそれぞれ示す。

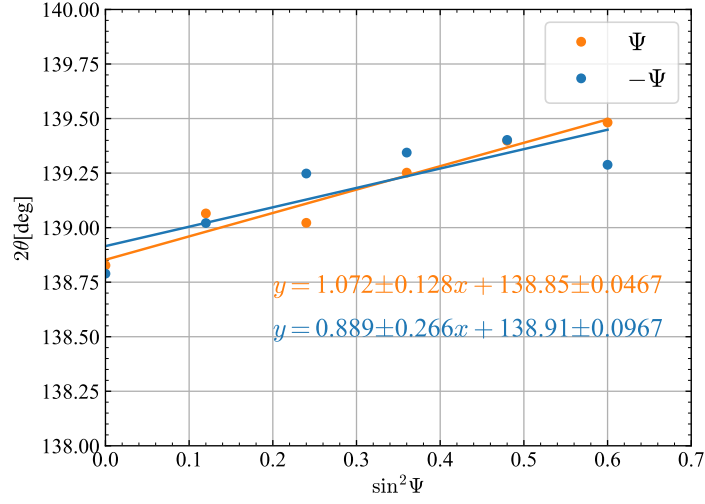


Fig.2: $\sin^2\Psi - 2\theta$ diagram at point A before plastic deformation.

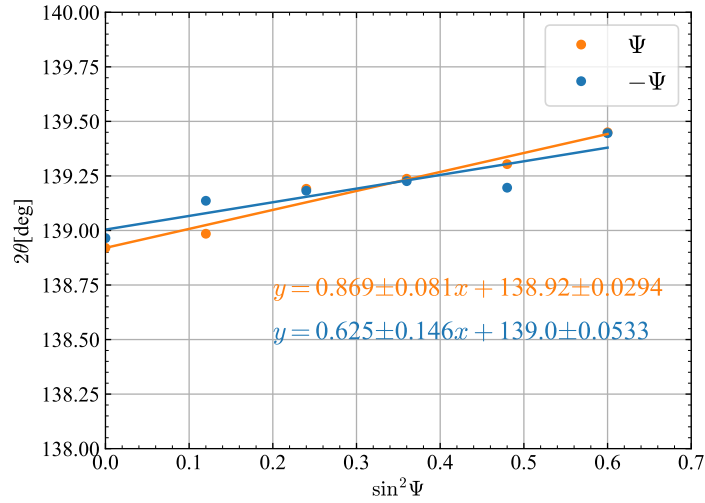


Fig.3: $\sin^2\Psi - 2\theta$ diagram at point B before plastic deformation.

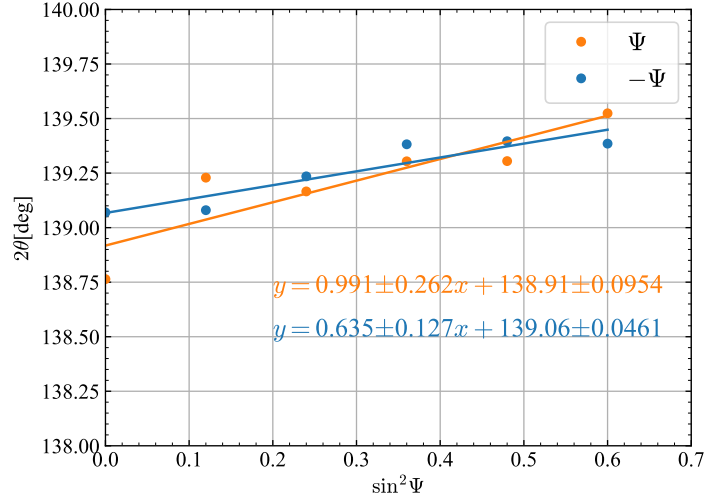


Fig.4: $\sin^2\Psi - 2\theta$ diagram at point A after plastic deformation.

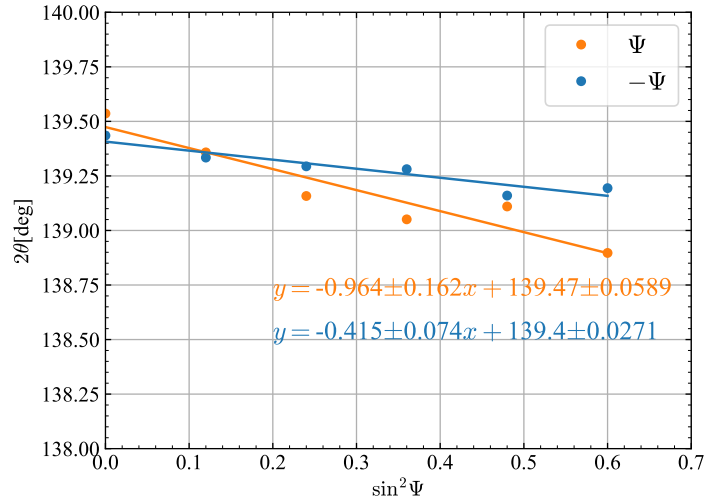


Fig.5: $\sin^2\Psi - 2\theta$ diagram at point B after plastic deformation.

図 2 から図 5 で得られた $\sin^2\Psi - 2\theta$ 線図から、式 (10)、表 1 を用いて、A 点、B 点それぞれの応力と信頼限界を求めた。表 2 に A 点、B 点の応力値とその信頼限界を示す。

Table2: Stress values and their confidence limits at points A and B before and after plastic deformation, respectively.

	応力の最良推定値 [MPa]	上限信頼限界 [MPa]	下限信頼限界 [MPa]
Before bending point A (ψ)	-312	-349	-274
Before bending point A ($-\psi$)	-258	-336	-181
Before bending point B (ψ)	-253	-276	-229
Before bending point B ($-\psi$)	-182	-224	-139
After bending point A (ψ)	-288	-364	-212
After bending point A ($-\psi$)	-185	-221	-148
After bending point B (ψ)	280	233	327
After bending point B ($-\psi$)	121	99.0	142

6 考察

表 2 より、塑性変形前の残留応力は A 点、B 点のどちらも圧縮応力を示した。塑性変形後の残留応力は A 点ではやや値が下がったものの圧縮のままであったが、B 点では引張応力に変化した。

これは塑性変形による応力分布と弾性変形による応力分布の差によって生じたものと考えられる。図 6 に曲げ時の応力と除荷後の残留応力の分布を示す。(b) における AOA' が曲げ加工時の塑性変形によるものであり、BOB' が弾性変形によるものである。曲げ加工時、材料表面において塑性変形による応力が弾性変形によるものよりも小さくなっていることが分かる。荷重を除去すると、スプリングバックが生じて、弾性変形の分の応力が除去されることで (c) のような塑性変形による残留応力が残る。このような塑性変形による非線形な応力分布の結果、曲げ加工の外側である A 点では圧縮応力が残留し、内側である B 点では引張応力が残留したと考えることができる。

塑性変形後の A 点において圧縮応力がやや下がった原因としては、曲げ加工時の引張応力による組織の変化によって、元々の圧縮応力が部分的に除去されたことが考えられる。

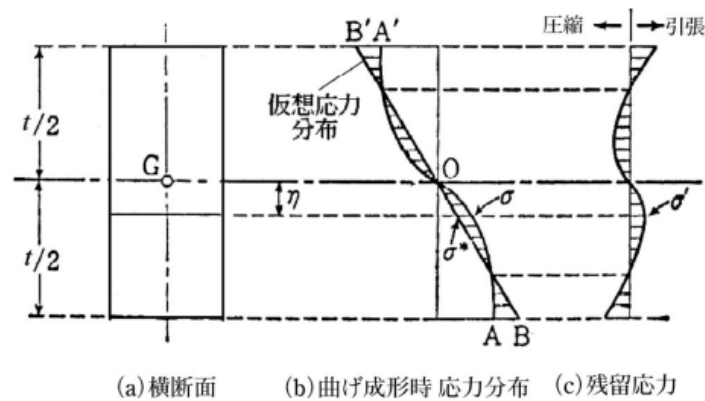


Fig.6: Stress in bending and residual stress after unloading. [2]

7 残留応力測定法について

残留応力の測定法を以下に示す.

7.1 X線回折

金属材料に応力を加えると結晶格子がひずみ、本来の格子間距離より伸縮する. この時 X 線回折が Bragg 条件が式 (1) で生じるため、これから格子間距離を求め、残留応力を算出することができる. X 線応力測定は非破壊、非接触で表面微小領域の測定や応力分布の可視化、3 軸応力解析による主応力の評価などが可能である. 一方、試料表面層の応力しか測定できないことが欠点としてあげられる.

7.2 ひずみゲージ法

まず、測定したい個所数方向にひずみゲージを貼り、その部分のひずみを測定. その後、その部分を含んだ小片を切り出し、再度ひずみ測定を行うことで前者との差を求め、応力を測定する方法である. ひずみゲージ法の利点はひずみを直接測定できることや、測定装置が比較的簡単であることなどがあげられる. 一方欠点は破壊検査であることであり、小片を切り出す際の塑性変形がひずみゲージに影響を及ぼさないよう考慮する必要がある.

7.3 穿孔法

残留応力を有する物体に穴をあけると、その位置で応力が解放される。穴表面でのせん断応力や垂直応力の除去は、すぐ近くの周囲領域の応力を変化させ、それに対応して試験対象物の表面の局所ひずみを変化させる。このひずみをひずみゲージで測定することで残留応力を求めることができる。穿孔法の大きな利点は材料内部の応力分布を計測できることである。欠点は破壊検査であることで、ドリル加工により穴をあけると加工硬化が生じるため、その影響を考慮する必要がある。

参考文献

- [1] 高偉，清水裕樹，羽根一博，祖山均，足立幸志．”Bilingual education 計測工学 Measurement and Instrumentation”. 朝倉書店 (2020)53-63.
- [2] 小山秀夫．”曲げ加工．” 軽金属 58.2 (2008): 84-85.
- [3] 鈴木金属工業 (株) 林博昭．”第 40 回 残留応力測”日本ばね学会 (2024/11/4 閲覧)
<https://www.jsse-web.jp/kandokoro/kan40.pdf>
- [4] 日鉄テクノロジー．”X 線残留応力測定”(2024/11/4 閲覧)
https://www.nstec.nipponsteel.com/technology/physical-analysis/structural/structural_02_xrs.html
- [5] IHI 検査計測 三上隆男．”穿孔法による残留応力測定について（その 1）”(2024/11/5 閲覧)
https://www.iic-hq.co.jp/library/048/pdf/048_12.pdf