令和 6 年度　機械知能・航空実験 II　A 班

ファイン 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
ファインメカニクスコース　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

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

$$2d\sin\theta = n\lambda \tag{1}$$

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になる．

$$\Delta d/d = -\cot\theta\cdot\Delta\theta \tag{2}$$

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になる．

$$\varepsilon_\phi = \Delta d_\phi/d_0 = -\cot\theta_0\cdot(\theta_\phi-\theta_0) \tag{3}$$

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 ε_1，ε_2，ε_3 は，主応力 σ_1，σ_2，σ_3，ポアソン比 ν，縦弾性係数 E から次式で表される．

$$\varepsilon_1 = (\sigma_1-\nu\sigma_2)/E \tag{4a}$$
$$\varepsilon_2 = (\sigma_2-\nu\sigma_1)/E \tag{4b}$$
$$\varepsilon_3 = -(\nu(\sigma_1+\sigma_2))/E \tag{4c}$$

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

$$\varepsilon = (\sigma_x - \nu\sigma_y)/E \tag{5a}$$

$$\varepsilon_y = (\sigma_y - \nu\sigma_x)/E \tag{5b}$$

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

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．

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

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．

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

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

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．

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

したがって，式 (3) と式 (9) から，式 (10) となる．

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

式 (10) より，$\sin^2\Psi - 2\theta$ 線図の勾配 M[deg] と，定数 K[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: 応力定数表

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

3 実験装置

4 実験方法

5 実験結果

6 考察

参考文献

[1] 金原粲，築地徹浩，青木克己，川上幸男，君島真仁，桜井康雄，清水誠二　『流体力学　シンプルにすれば「流れ」が分かる』実教出版，2022， pp.183-189，pp.201-203

[2] Airliners.net『Boeing 777-200』(2024/7/16 閲覧)
https://www.airliners.net/aircraft-data/boeing-777-200/106