

解説5

転がり軸受を支える測定技術 —X線応力測定法による転動疲労の評価—

NTN 藤田 工*, 嘉村 直哉**, 金沢大学 佐々木 敏彦***

*ふじた たくみ：先端技術研究所。主として、転がり軸受の材料、熱処理技術、転動疲労寿命に関する研究に従事。博士(工学)。

**かむら なおや：先端技術研究所。主として、X線を用いた転動疲労の評価に関する研究に従事。

***ささき としひこ：人間社会研究域人間科学系 教授。X線、中性子、放射光を用いた応力測定法の研究に従事。博士(工学)。

はじめに

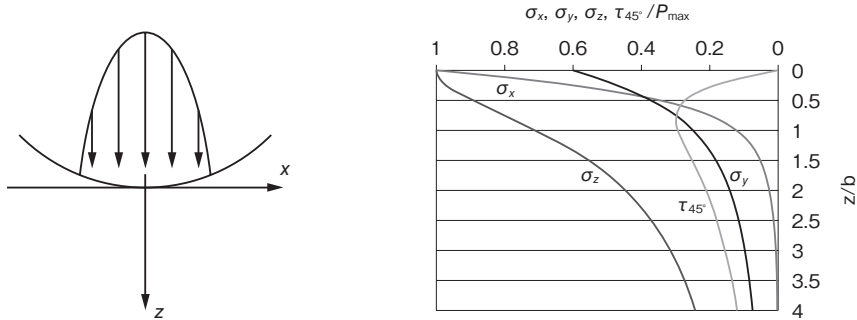
転がり軸受(以下、軸受)の転動疲労は、残留応力、残留オーステナイト量(以下、残留 γ 量)、硬度などの材質の変化を伴いながら進行する現象であり、それらの変化は軸受の使用条件に依存する。このため、残留応力、残留 γ 量、硬度(回折X線の半価幅と対応)を評価できるX線応力測定法(以下、X線分析)は、軸受の使用条件を推定する手段として研究されてきた^{1),2)}。また、転動面下の残留応力、残留 γ 量、半価幅が軸受の負荷回数によって変化する性質があることから、X線分析を転動疲労の進行度(以下、疲労度)や軸受の余寿命の推定に用いようとする研究もなされてきた³⁾⁻⁷⁾。

本稿では、X線分析による軸受の使用条件の推定例として接触応力の推定を取り上げ、その考え方と留意点について解説する。また、X線分析による疲労度と余寿命の推定については、その考え方、最近の研究成果と今後の研究課題について述べる。

X線分析による接触応力の推定

1. 接触応力の推定の考え方

荷重を支持し回転している軸受には、軌道輪と転動体の表層に図1(b)に示す内部応力が繰返し作用する。軌道輪と転動体の表層に塑性変形が起こる程度に大きい接触応力が作用した場合、転動面下では最大せん断応力 τ_{45° がピークになる深さ



(a) 座標系 (y方向は紙面の奥行方向)

(b) $x=0$ における各種内部応力成分

図1 軸受使用時に転動面下に作用する内部応力 ($x=0$ では座標軸方向のせん断応力成分はすべて0)

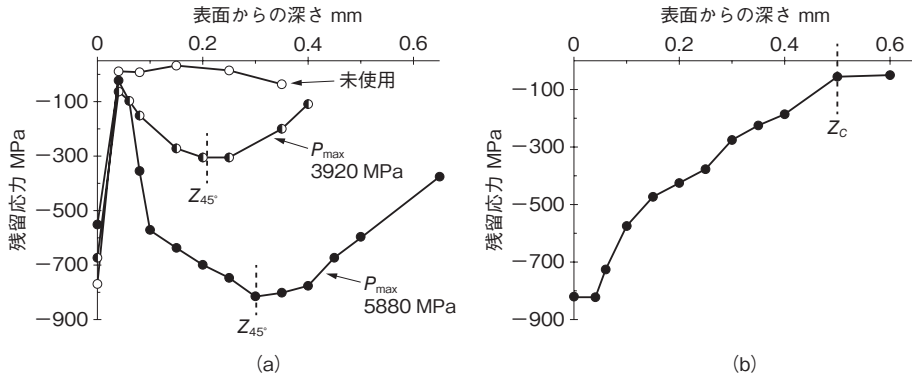


図2 使用後の軸受の残留応力分布の例 [出典：文献2)より転載]

から塑性変形が生じ、 τ_{45° の分布に対応した圧縮残留応力が転動方向に分布するといわれている¹⁾。したがって、接触応力が大きい条件で使用された軸受では、転動方向の残留応力の分布から軸受使用時の τ_{45° の分布に関する情報が得られることになる。

一方、線接触条件での τ_{45° の分布は、式(1)⁸⁾に示すように、接触楕円の短軸半径 b と最大接触応力 P_{max} で決定でき、 b と P_{max} には式(2)に示す関係がある。これらの式から、軌道輪と転動体の曲率和 $\Sigma\rho$ がわかれば、任意の P_{max} に対する τ_{45° の分布が得られるので、図2に示す転動方向の残留応力分布から得られた τ_{45° の分布の情報に基づき最大接触応力 P_{max} が予測できる。これがX線応力測定による接触応力の推定の基本的な考え方である。なお、式(2)は線接触条件での b と P_{max} の計算式である式(4)、(5)から得られる。

$$\tau_{45^\circ} = -\frac{P_{max}}{b} \{z - z^2(b^2 + z^2)^{-1/2}\} \quad \text{式(1)}$$

$$b = \frac{2P_{max}(\theta_1 + \theta_2)}{\Sigma\rho} \quad \text{式(2)}$$

$$\theta_1 = \frac{1 - \lambda_1^2}{\varepsilon_1}, \quad \theta_2 = \frac{1 - \lambda_2^2}{\varepsilon_2} \quad \text{式(3)}$$

$$b = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \frac{Q(\theta_1 + \theta_2)}{L\Sigma\rho}} \quad \text{式(4)}$$

$$P_{max} = \frac{2Q}{\pi bL} \quad \text{式(5)}$$

z : 深さ, Q : 荷重, L : 軸方向の接触長さ
 λ_1, λ_2 : 物体1と物体2のポアソン比
 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$: 物体1と物体2のヤング率

接触応力が大きく、潤滑条件が良好な場合、軌道輪と転動体には、通常、転動方向の残留応力の分布に図2(a)に示すような圧縮残留応力のピークが見られる。この圧縮残留応力の最大の深さは軌道輪と転動体に作用していた τ_{45° が最大になる深さ Z_{45° に対応するので、線接触条件での Z_{45° と b の関係を示す式(6)から求めた b と軸受の諸元から求めた $\Sigma\rho$ を式(2)に代入すれば、 P_{max} の推定値を得ることができる。

$$Z_{45^\circ} = 0.786b \quad \text{式(6)}$$

一方、実際の軸受では、表面粗さよりも油膜厚さが薄い条件や異物が混入する条件で使用されることもあるため、図2(b)に示すような、表層により大きい圧縮残留応力が形成されることがある。このような状況では、圧縮残留応力のピーク位置から接触応力を推定することができない。この場合、一定以上のせん断応力 τ_c が作用していた深さで、検出できるレベルの圧縮残留応力が形成されるという仮定を置き、圧縮残留応力が生成された深さ Z_c から接触応力を推定する方法がある。

図3は式(1)と式(2)を使って P_{max} ごとの τ_{45° の分布を求めたものである。図3において τ_c を仮に600 MPaとした場合、 $P_{max} = 3000$ MPaで使用された軸受の転動体と軌道輪には、図の斜線部の深さで圧縮残留応力が生成されることになり、 $Z \times \Sigma\rho = 0.11$ を与える Z が Z_c になる。この図の横軸は深さに $\Sigma\rho$ を乗じたものになっているが、 $\Sigma\rho$ は軸受の諸元から既知であるため、 τ_c がわかればどの程度の P_{max} で使用されたかを推定できる。

2500~4000 MPaで使用した軸受の圧縮残留応