

【 潤滑油膜厚さの計算法（線接触の場合） 】

岡山大学大学院自然科学研究科 藤井正浩

1. はじめに

歯車，転がり軸受やトラクションドライブのように極めて狭い接触面積に高い荷重が加えられる接触面では，高圧力下であるにもかかわらず，というより高圧力下ゆえに，接触面の弾性変形ならびに接触面間の潤滑油粘度上昇の効果により油膜が形成されます．この潤滑状態を弾性流体潤滑（EHL）と呼びます．

ここでは線接触の場合によく使用される弾性流体潤滑膜厚計算式を紹介します．

2. Dowson－Higginson の計算法

線接触の場合の弾性流体潤滑状態における流体膜厚の計算には，次の Dowson－Higginson の計算法[1]を用います．Reynolds の式，粘度－圧力の関係式，密度－圧力の関係式および接触部の弾性変形量を連立させて数値解を求めた結果ですが，大変使いやすい式となっています．

$$\frac{h_{\min}}{R} = 2.65 \left(\frac{\eta_0 \bar{u}}{ER} \right)^{0.7} (\alpha E)^{0.54} \left(\frac{w}{ER} \right)^{-0.13}$$

ここで， h_{\min} は最小油膜厚さ (m)， η_0 は大気圧下の粘度 ($Pa \cdot s$)， \bar{u} は平均転がり速度 (m/s)， α は粘度圧力係数 (GPa^{-1})， w は単位幅あたりの荷重 (N/m)，です．また， R および E は次式で表される等価曲率半径 (m) および等価縦弾性係数 (Pa) です．

$$\frac{2}{E} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}, \quad \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

ここで， E_1, E_2 は縦弾性係数 (Pa)， ν_1, ν_2 はポアソン比， R_1, R_2 は曲率半径 (m)，添字 1, 2 はそれぞれ面 1 および面 2 の値を示します．

計算には，潤滑油の粘度および粘度圧力係数が必要ですが，これらの値は温度依存性があります．油膜厚さの計算では，接触部の入口の温度を用いるのが一般的です．

3. 潤滑油粘度の温度変化

潤滑油の粘度は温度の上昇とともに急激に低下します．分子間の引力が温度上昇とともに小さくなるのがその理由です．

粘度の温度依存性については多くの経験式が提案されていますが，広く用いられるのは次の Walther-ASTM 式[2]です．

$$\log_{10} \log_{10}(\nu + 0.7) = A - B \log_{10} T$$

ここで， ν は動粘度 (mm^2/s)， A, B は潤滑油の種類によって決まる定数， T は絶対温度 (K) です．潤滑油の一般性状表では $40^\circ C$ と $100^\circ C$ の粘度が示されていますので，これらの値に Walther の式を適用し， A と m_0 を求めます．

4. 潤滑油粘度の圧力変化

潤滑油の粘度は圧力の上昇にともない増加します。高压粘度の測定結果は、ASME レポート[3]などで出版されていますので参考にしてください。

さて、任意の圧力 $p(GPa)$ における潤滑油粘度は、次の Barus の式[4]により求めることが多いようです。 η_0 は大気圧下の粘度 ($Pa \cdot s$)、 α は粘度圧力係数 (GPa^{-1}) です。

$$\eta = \eta_0 \exp(\alpha p)$$

ここで、粘度圧力係数 α は、圧力、温度、せん断速度などによっても変化するので、潤滑油の一般性状表に示されることはまずありません。大気圧の物性値より粘度圧力係数を推定するための、ナフテン系鉱油についての近似式[5]や鉱油系潤滑油基油評価式がありますが、昨今の低粘度化や環境負荷低減の取り組みの中で多用されるようになっているマルチグレード油、合成潤滑油や生分解性潤滑油などでの評価が課題となっています。

5. 接触状態の指標

接触面には表面粗さで代表される微細な突起が存在し、最小油膜厚さと突起の高さとが同程度になると2面間は油膜で分離されることなく突起同士が干渉する状態となります。この突起間干渉の程度を表す指標として、次の膜厚比[6]があります。

$$\Lambda = \frac{h_{\min}}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}}$$

ここで、 σ_1, σ_2 はそれぞれの面の二乗平均粗さ（表面粗さの標準偏差）です。表面粗さが正規分布に従うとすると、 $\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$ は両面の合成表面粗さの標準偏差であり、合成あらさの突起のほとんどの高さは $3\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$ （いわゆる 3 シグマ）以下と考えられます。したがって、 $\Lambda > 3$ の範囲では、2面間は潤滑油膜で分離されており、弾性流体潤滑状態と呼ばれます。また、 $\Lambda < 3$ では、突起間の干渉が生じ始めることになり、この突起間干渉が生じ始める状態を混合潤滑状態と呼びます。さらに突起間干渉の時間頻度がほぼ 100%となった状態を境界潤滑状態と呼びます。

歯車や軸受の表面損傷を論じる上で潤滑状態を把握することは、大変重要です。

参考文献

- (1) D. Dowson, Proc. Instn. Mech. Engrs., Pt 3A, 182 (1967-68) 151.
- (2) ASTM D 2160.
- (3) ASME Pressure-viscosity Report, ASME (1953).
- (4) C. Barus, Amer. J. of Sci., 45 (1893) 83.
- (5) 潤滑ハンドブック, 養賢堂 (1974) 265.
- (6) T. E. Tallian, ASLE Transactions, 10 (1967) 418.