

転がり軸受寿命計算式の変遷 (3)

転がり軸受寿命研究会*

Historical Review on Life Equation for Rolling Bearings (Part 3)

Technical Committee on Life of Rolling Bearings*

Key Words : rolling bearing, fatigue life, life equation, load rating, modification factor

前編までは転がり軸受寿命の計算式の提案について述べたが、本編では主として国際標準規格 (ISO 規格) の寿命計算式の変遷について述べる。

3. 寿命計算式の ISO 規格の変遷

工業製品としての転がり軸受の発展につれて、転がり軸受寿命計算式制定の要求が強くなり、また、負荷能力の理論や研究の発展もあって国際規格化の気運が高まってきた。

転がり軸受の定格荷重の計算方法に関する標準化が国際的レベルで初めて討議^{36, 37)}されたのは、1934 年の ISA (International Federation of the National Standardizing Associations, 万国規格統一協会) 会議であったが、その後世界大戦もあって進展せず、1945 年になって定格荷重と寿命計算の基本となる概念⁵⁾が発表された。

その後、AFBMA (Anti-Friction Bearing Manufacturers Association, 後に ABMA | 2.15 節 | に改称、米国ベアリング工業会) が主導権を持ってスウェーデンとの間で討議が続けられた。

ISA は 1949 年に ISO (International Organization for Standardization, 国際標準化機構) に改組されたが、1947、1952 年の LUNDBERG & PALMGREN の論文^{6, 7)}によって軸受寿命と定格荷重 (負荷能力) の計算の基礎となる理論がほぼ確立されたので、これに基づいて ISO は 1951 年か

ら 1959 年までの会議によって 1962 年に ISO 推せん規格 R 281 を発行した。

この規格はその後に年代と共に改正されたので、それらを以下に年代を追って略述する。なお、式中の量記号は前編に準じるものとし、本章で新たに用いられる量記号のみを以下に表記する。

3.1 本章で新しく使用する量記号

a_2 : 材料係数 (3.3) ; 軸受特性係数 (3.4)

a_{ISO} : 寿命修正係数

a_m : 環境条件を含む影響因子

a_{xyz} : 寿命修正係数

b_m : 軸受定格係数

C : 軸受の基本動定格荷重

C_a : 基本動アキシャル定格荷重

C_r : 基本動ラジアル定格荷重

C_u : 疲労限荷重

e_c : 汚染度係数

L_{nm} : 修正定格寿命 (modified rating life)

P_a : 動等価アキシャル荷重

P_r : 動等価ラジアル荷重

σ_u : 疲労限応力

3.2 ISO/R 281-1962³⁸⁾

LUNDBERG & PALMGREN 理論^{6, 7)}を基礎とした転がり軸受の寿命と定格荷重に関する最初の国際規格であり、中心となる考え方は現在に至るまで続いている。日本が ISO 転がり軸受部会 (TC 4)

日本トライボロジー学会 (〒 105-0011 東京都港区芝公園 3 丁目 5-8)

Japanese Society of Tribologists (5-8, Shibakoen 3-chome, Minato-ku, Tokyo 105-0011)

* 構成: 岡本純三 (主査・千葉大・名)、間野大樹 (幹事・産総研)、木村好次 (東大・名、香川大・名)、佐藤昌夫 (元 神奈川大)、吉岡武雄 (元 明治大)、似内昭夫 (元 玉川大)、山本隆司 (東京農工大)、高田浩年 (元 日本精工)、三田村宣晶 (日本精工)、佐田 隆 (ジェイテクト)、高木俊行 (不二越)、平岡和彦 (山陽特殊製鋼)、前田喜久男・田中広政 (NTN) 2010 年 10 月現在

の会議に参加したのは1961年からであり、本規格の案はすでに決定していた段階にあったために、日本の意見は入っていない。

なお、本規格に基づいて、日本でも最初の転がり軸受寿命計算の規格として JIS B 1518-1965³⁹⁾ が制定された。

本規格の要点を以下に示す。

- ①転がり軸受の定格寿命 L_{10} （信頼度 90 % の寿命、 10^6 回転単位）の計算式：

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P} \right)^p \quad (S.1)$$

- ②式(S.1)中の指数 p の値：

$$p = 3 \text{ (玉軸受)}, 10/3 \text{ (ころ軸受)} \quad (S.2)$$

- ③式(S.1)中の基本動定格荷重 C の計算式(例)：

$$C = f_c (\text{icos}\alpha)^{0.7} Z^{2/3} D_w^{1.8} \quad \text{：ラジアル玉軸受}^{(註1)}$$

$$C = 3.647 f_c (\text{icos}\alpha)^{0.7} Z^{2/3} D_w^{1.4} \quad \text{：ラジアル玉軸受}^{(註2)}$$

$$C = f_c (\text{icos}\alpha)^{0.7} \tan\alpha Z^{2/3} D_w^{1.8} \quad \text{：スラスト玉軸受(単列)}^{(註1.3)}$$

$$C = f_c Z^{2/3} D_w^{1.8} \quad \text{：スラスト玉軸受(単列)}^{(註1.4)}$$

$$C = f_c (iL_{we}\text{cos}\alpha)^{7/9} Z^{3/4} D_w^{29/27} \quad \text{：ラジアルころ軸受}$$

$$C = f_c (iL_{we}\text{cos}\alpha)^{7/9} \tan\alpha Z^{3/4} D_w^{29/27} \quad \text{：スラストころ軸受(単列)}^{(註3)}$$

$$C = f_c L_{we}^{7/9} Z^{3/4} D_w^{29/27} \quad \text{：スラストころ軸受(単列)}^{(註4)}$$

(S.3)

- ④式(S.1)中の動等価荷重 P の計算式：

$$P = V X F_r + Y F_a \quad (S.4)$$

- ⑤ f_c 値を $D_w \text{cos}\alpha / D_{pw}$ 値に応じて与え、さらにころ軸受の場合には、ころと軌道輪の接触状況およびころの案内状況に応じた6段階の数値で与える。

3.3 ISO 281/I -1977⁴⁰⁾

ISO/R 281-1962 からの最初の改正であるが、軸受寿命に関する知識の増加と材料の進歩に伴うもので、主要な変更点は概略次の通りである。

なお、本規格に基づき JIS B 1518-1981⁴¹⁾ が制

定された。本規格および JIS 規格制定の過程に関する詳細は、文献^{42~44)} に詳しい。

- ①式の量記号の単位を SI 単位系とする。

- ②寿命計算式の量記号の変更：

$$L_{10} = \left(\frac{C_r}{P_r} \right)^p \quad \text{：ラジアル軸受} \quad (S.5a)$$

$$L_{10} = \left(\frac{C_a}{P_a} \right)^p \quad \text{：スラスト軸受} \quad (S.5b)$$

- ③各種係数の採用による補正定格寿命 L_{na} の計算式の導入：

$$L_{na} = a_1 a_2 a_3 \left(\frac{C_r}{P_r} \right)^p \quad \text{：ラジアル軸受} \quad (S.6a)$$

$$L_{na} = a_1 a_2 a_3 \left(\frac{C_a}{P_a} \right)^p \quad \text{：スラスト軸受} \quad (S.6b)$$

信頼度係数 a_1 の値は、信頼度 90 % の 1.00 に対して信頼度 99 % の 0.21 までの数値で与えている。材料係数 a_2 は特別の材料または製造方法で経験により 1 より大きい値や小さい値をとることができるが、 $a_3 < 1$ のときは $a_2 < 1$ とする。使用条件係数 a_3 は十分な潤滑状態（外部異物がないことも含めて）のときは 1 とし、そうでないときは 1 より小さいとする。

- ④動等価荷重 P_r （または P_a ）の計算式(S.4)から回転係数 V を削除する。

$$P_r \text{ (または } P_a) = X F_r + Y F_a \quad (S.7)$$

- ⑤ころ軸受の f_c 値は、軸受形式ごとにとり得る最大値を、 $D_w \text{cos}\alpha / D_{pw}$ 値に応じて与える。

なお、④の回転係数の廃止に関しては、規格審議時は当時の研究と経験の結果とされたが、その内容は不明であった。しかし、後の研究⁴⁵⁾により、ほぼ妥当であることが示された。

3.4 ISO 281 : 1990⁴⁶⁾

軸受の製造および応用技術の進歩により、前項の規格を改正した。その際に表題の /I を規格本体とし、/II を本体についての技術面の解説とする計画であったが、最終的には /II を ISO TR 8646 : 1985（技術報告書）として、本体とはしなかった。本規格の ISO 281/I -1977（前項）からの主要な変更点は概略次の通りである。

なお、本規格に基づき JIS B 1518-1992⁴⁷⁾ が制定された。

- ①補正寿命計算式(S.6a)および(S.6b)の中の a_2

(注1) $D_w \leq 25.4 \text{ mm}$, (注2) $D_w > 25.4 \text{ mm}$

(注3) $\alpha < 90^\circ$, (注4) $\alpha = 90^\circ$

を“材料係数”から“軸受特性係数”へ名称を変更。ただし計算式に変更はない。

- ②基本動定格荷重計算式に軸受定格係数 b_m (軸受形式に応じた固有値 = 1.3 ~ 1.0) を導入：

$$C_r = b_m f_c (i \cos \alpha)^{0.7} Z^{2/3} D_w^{1.8} \quad \text{：ラジアル玉軸受}^{(\text{注}1)}$$

$$C_r = 3.647 b_m f_c (i \cos \alpha)^{0.7} Z^{2/3} D_w^{1.4} \quad \text{：ラジアル玉軸受}^{(\text{注}2)}$$

$$C_a = b_m f_c (i \cos \alpha)^{0.7} \tan \alpha Z^{2/3} D_w^{1.8} \quad \text{：スラスト玉軸受 (単列)}^{(\text{注}1.3)}$$

$$C_r = b_m f_c (i L_{we} \cos \alpha)^{7/9} Z^{3/4} D_w^{29/27} \quad \text{：ラジアルころ軸受}^{(\text{注}1.3)}$$

3.5 ISO 281 : 1990/Amd.1 : 2000⁴⁸⁾ & ISO 281 : 1990/Amd.2 : 2000⁴⁹⁾

前項の寿命計算式において、 a_2 と a_3 の関係が複雑なのと明確な数値が与えられていなかったのを、これを整理するため ISO TC 4 (転がり軸受部会) では SC 8 (第 8 専門委員会) WG 1 (第 1 作業グループ) を 1995 年に設置して検討を行った。作業目標は LUNDBERG & PALMGREN 理論に各種寿命影響因子、たとえば汚染・油膜厚さ・軌道輪のフープ応力・疲労限等を導入して拡張することである。

WG 1 は審議の結果、ISO 281 : 1990/Amendment (修正) 1 および 2 の原案を決定した。ここに、[Amd.1 : 2000] ISO 281 : 1990 の一部の語句の修正と特殊な形式の軸受の b_m の数値の変更 [Amd.2 : 2000] 寿命補正係数の変更である。ISO はこれを関係国の投票を経て 2000 年に発行した。

本規格の概略は次の通りである。

- ①信頼度 $(100-n)$ % の修正定格寿命 (modified rating life) L_{nm} :

$$L_{nm} = a_1 \cdot a_{xyz} \cdot L_{10} \quad (\text{S.9})$$

- ②信頼度係数 a_1 の S % 信頼度係数値 :

$$a_1 = \left(\frac{\ln \frac{100}{S}}{\ln \frac{100}{90}} \right)^{\frac{1}{e}} \quad (\text{S.10})$$

- ③軸受特性係数 a_2 ・使用条件係数 a_3 の相互関係を考慮し、一体化し発展させた寿命修正係数を life modification factor a_{xyz} とする。

$$a_{xyz} = f(a_2, a_3, a_m) \quad (\text{S.11})$$

a_2, a_3, a_4, a_5, a_m 等は軸受寿命に影響し相互に関係するさまざまな寿命修正係数を表す。

- ④ a_{xyz} に影響し得る相互に関係する因子として、軸受形式・材料・潤滑・環境・汚染粒子・軌道輪内部応力・軸受取付け・荷重等を考える。高品質な転がり軸受材料は良い運転条件下で疲労限界応力 σ_u を示し得る (通常軸受鋼では最大接触応力で 1 500 MPa のオーダー)。

- ⑤潤滑状態の良否を示すパラメータは、粘度比 κ か油膜パラメータ Λ で表す。

- ⑥寿命修正係数は

$$a_{xyz} = a_2 \cdot a_3 \cdot a_4 \cdot a_5 \cdot \dots \quad (\text{S.12})$$

の式で表し、補正定格寿命 (adjusted rating life) の計算式

$$L_{na} = a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot L_{10} \quad (\text{S.13})$$

と併せて計算し、あるいは a_{xyz} を次式のようにも表せる。

$$a_{xyz} = a_2 \cdot a_3 \cdot a_m \quad (\text{S.14})$$

ただし、この規格では a_2, a_3, a_4, a_5 の数値は示していない。

3.6 ISO 281 : 2007⁵⁰⁾

ISO TC 4 は寿命修正係数の数値を与えた規格として、前項規格の改正版を 2007 年に発行した。これは修正定格寿命の計算として多くの図表や計算式を使用したものであるが、それについては佐田^{51, 52)} が詳しく解説しているのので、ここでは概略を述べる。

- ①修正定格寿命の計算式 :

$$L_{nm} = a_1 \cdot a_{ISO} \cdot L_{10} \quad (\text{S.15})$$

- ②信頼度係数 a_1 :

a_1 の計算式を与えると共に信頼度の範囲を拡大し、信頼度 90 % の 1.00 に対して信頼度 99.95 % の 0.077 までの数値で与えた。

- ③寿命修正係数 a_{ISO} :

a_{ISO} に含まれる以下の因子の数値と計算方法を示した。

- (a) 疲労限荷重 : 接触応力 1 500 MPa に相当する軸受荷重を疲労限荷重 C_u とした。

(注 1) $D_w \leq 25.4$ mm, (注 2) $D_w > 25.4$ mm

(注 3) $\alpha < 90^\circ$.

(b) 汚染度係数：潤滑剤が固体粒子により汚染された場合の寿命低下を汚染度係数 e_c として重汚染 $e_c=0$ から極めて高い清浄度 $e_c=1$ とした。

(c) 粘度比：転がり接触表面の潤滑剤による分離度を示す指標を粘度比 κ （使用潤滑剤の基準粘度に対する実用条件における粘度の比）で与えた。

3.7 ISO/TR 1281-1 : 2008⁵³⁾ & ISO/TR 1281-2 : 2008⁵⁴⁾

[TR 1281-1 : 2008] ISO 281:1990 発行の際に本体から分離された TR 8646-1985 (ISO281/I : 1977 に関する技術報告書) が、新番号を与えられた。ただし内容は同じである。

[TR 1281-2 : 2008] ISO 281:2007 に使用された信頼度係数 a_1 および寿命修正係数 a_{ISO} に関する技術報告書として、新たに発行された。

4. おわりに

転がり軸受の高負荷能力化は常に要求され、現在でも止まることがない。そのための理論的・実験的研究は引き続き行われているが、理論の発展のためには実験による結果を使用して指数・係数を決定することも多い。しかし軸受寿命を支配する要因は多く、さらに材料の本質から派生するばらつきがあるので、その実験には多くの手間と莫大な時間を必要とし、そのため研究の進展速度は大きくはない。

このような状況の中で、今後も軸受寿命の研究や規格化の動向には引き続き注目が集められると推測される。転がり軸受寿命計算式も時代と共に変化し複雑化することが予想されるが、さらに発展することが期待される。

なお、日本トライボロジー学会では転がり軸受寿命計算式の動向等を折々に論じてきた^{55,56)}ので本稿では取り上げなかったが、必要に応じて参照されたい。

文 献

- 36) 赤岡 純：ころがり軸受の規格，精度及び寿命と負荷容量，潤滑，**2**，1 (1957) 42.
- 37) 石井章夫：転がり軸受の基本動定格荷重の計算式に関する解説（1），ベアリング，**23**，12 (1980) 482.
- 38) ISO R 281-1962
- 39) JIS B 1518-1965
- 40) ISO 281/I-1977
- 41) JIS B 1518-1981
- 42) 石井章夫：転がり軸受の回転係数について，潤滑，**21**，12 (1976) 857.
- 43) 岡本純三：転がり軸受の寿命における最近の諸問題，潤滑，**23**，11 (1978) 764.
- 44) 石井章夫：ころがり軸受の定格荷重に関する国際規格の沿革について，潤滑，**32**，5 (1987) 375.
- 45) 岡本純三・大森達夫・神田守：玉軸受の寿命に及ぼす軌道輪回転の影響，トライボロジスト，**41**，3 (1996) 240.
- 46) ISO 281 : 1990
- 47) JIS B 1518-1992
- 48) ISO 281 : 1990/Amd. 1 : 2000
- 49) ISO 281 : 1990/Amd. 2 : 2000
- 50) ISO 281 : 2007
- 51) 佐田 隆：転がり軸受の寿命計算に関する国際規格の動向，トライボロジスト，**52**，3 (2007) 210.
- 52) 佐田 隆：転がり軸受の寿命予測とその研究動向，トライボロジスト，**53**，10 (2008) 659.
- 53) ISO/TR 1281-1 : 2008 Rolling bearings - Explanatory notes on ISO 281 - Part 1: Basic dynamic load rating and basic rating life.
- 54) ISO/TR 1281-2 : 2008 Rolling bearings - Explanatory notes on ISO 281 - Part 2 : Modified rating life calculation, based on a systems approach to fatigue stresses.
- 55) 高田浩年：転がり軸受の疲れ寿命計算式の変遷，日本トライボロジー学会転がり疲れ研究会第 68 回研究会発表講演資料 (1997-10-31) 1.
- 56) 高田浩年：転がり軸受寿命計算式の簡単な展望と雑感，日本トライボロジー学会転がり疲れ研究会第 100 回記念大会講演会資料 (2007-12-6/7) 1.