

転がり軸受寿命計算式の変遷 (2)

転がり軸受寿命研究会*

Historical Review on Life Equation for Rolling Bearings (Part 2)

Technical Committee on Life of Rolling Bearings*

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

前編では1977年までの転がり軸受寿命計算式の提案について述べたが、本編では引き続いで現在に至るまでの変遷について述べる。

2.11 IOANNIDES-HARRIS の式 (1985)

IOANNIDESとHARRIS¹¹⁾は、転がり軸受寿命が軸受中の応力を受ける体積ごとの残存確率の集積として決まるとして、体積要素ごとに残存確率・疲労限を考慮した疲労基準応力を考えて、LP理論を拡張した。また、軸受の荷重・使用条件・軸受材料に応じた軸受寿命の計算を行わせるために、軸受内の応力を受ける体積要素に対して、次の基本式を与えた。

$$\ln \frac{1}{\Delta S_i} = A_i N^e H (\sigma_i - \sigma_{ui})^c \Delta V_i$$

$$\begin{aligned} H(\sigma_i - \sigma_{ui}) &= 1 : \sigma_i \geq \sigma_{ui} \\ H(\sigma_i - \sigma_{ui}) &= 0 : \sigma_i < \sigma_{ui} \end{aligned} \quad (11.1)$$

この理論で軸受寿命を支配する応力をせん断応力振幅 τ_a としたとき、転がり軸受内輪の寿命残存確率 S は次式のようになる。

$$\ln \frac{1}{S} = A N^e \int_{Br} \int_l \frac{[\max(\tau_a - \tau_u)]^c}{z^h} dldB \quad (11.2)$$

[本提案は軸受寿命を支配する応力・体積要素・残存確率の関係をLP理論よりも詳細に与え、さらに疲労限も考慮したもので、より複雑化した理論である。]

2.12 TALLIAN らの式 (1986)

CHIU ら¹²⁾、TALLIAN ら¹³⁾、TALLIAN^{14, 15)}は、転がり軸受寿命までの応力繰返し数 N が、内部起点疲労による値 N_{ss} および表面起点疲労による値 N_s によって決定されることを考慮し、かつ、 B_{ss} および B_s をそれぞれ内部起点疲労および表面起点疲労に対する疲労限補正量、 Ω 、 Ω_{ss} および Ω_s をそれぞれ補助変数として、次の基本式を考えた。

$$\Omega^{-\beta} = \Omega_{ss}^{-\beta} + \Omega_s^{-\beta} \quad (12.1)$$

$$\Omega_{ss}^{-1/\varsigma} = N_{ss}^{-1/\varsigma} + B_{ss}^{-1/\varsigma} \quad (12.2)$$

$$\Omega_s^{-1/\varsigma} = N_s^{-1/\varsigma} + B_s^{-1/\varsigma} \quad (12.3)$$

また、内部起点または表面起点による寿命に対する累積残存確率 $S(N_{ss})$ または $S(N_s)$ を次式で与えた。

$$-\ln\{S(N_{ss})\} = \prod_i \varphi_i (\Omega_{ss})^{\frac{5\eta}{\varsigma}} \quad (12.4)$$

$$-\ln\{S(N_s)\} = \prod_i \varphi_i' (\Omega_s)^{\frac{\eta}{k\varsigma}} \quad (12.5)$$

疲労ハザード因子 $\varphi_0 \sim \varphi_4$ 、 $\varphi_0' \sim \varphi_5'$ としては、マトリクス強度因子・欠陥きびしさ分布因子(粗さ突起密度因子)・応力分布因子・荷重分布因子・粗さ突起トラクション因子を考え、それぞれ定式化した。 B_{ss} および B_s を次式で与え、試験結果を適用して値を決めた。

$$B_{ss} \doteq 0.3 \varphi_0^{\frac{-\varsigma}{5\eta}} \left(\frac{\sigma_h + \sigma_{h0}}{\sigma_u^{4.6}} \right)^{\varsigma} \quad (12.6)$$

$$B_s = 0.32(\varphi_0 \varphi_1)^{\frac{-k\zeta}{\eta}} \left[f_3(\sigma_u) p_{\max}^{b_1} K \left(\frac{2}{\sigma_u} \right)^{4.6} (\sigma_h + \sigma_{ho}) \right]^c \quad (12.7)$$

計算に際して、表面起点疲労に対する粗さ突起ハザード因子・トラクション因子には油膜パラメータ Λ ・突起傾斜の影響を考慮した。本理論を公表済の転がり軸受寿命試験結果に適用し、多くのデータによる検証の重要性を述べている。

[本提案では、LP理論を発展させて内部起点疲労・表面起点疲労ごとの複数ハザード因子を考え、疲労限・表面粗さ等も考慮した。より詳細に展開した理論である。]

2.13 IOANNIDES らの式 (1989, 1995, 1999)

GOODALL-WUTTKOWSKI ら¹⁶⁾、SNYDER ら¹⁷⁾、IOANNIDES ら¹⁸⁾は IOANNIDES-HARRIS¹¹⁾理論に基づき、寿命の基礎式を次式で表した。

$$\ln \frac{1}{S} \approx \frac{(\tau_0 - \eta' \tau_u)^c V N^e}{z_0^h} \quad (13.1)$$

ここに、 η' は δ_r を付加的な応力として次式で表している。

$$\eta' = 1 - \frac{\delta_r}{\tau_u}$$

異物混入と疲労限を考慮し、潤滑の影響も考慮した軸受寿命計算式として次式を与えた。

$$L_{naa} = a_1 a_{SKF} \left(\frac{C}{P} \right)^p \quad (13.2)$$

a_{SKF} は潤滑・異物混入・疲労限を考慮した寿命補正係数で、玉セットのピッチ径・回転速度から求めた基準粘度値 ν_1 に対する潤滑剤動粘度 ν の比 κ 、軸受の P_u 値、潤滑係数 η_b と汚染度 η_c 値をパラメータとする $\eta_c P_u / P$ と a_{SKF} との関係線図等を用いて求めるようにした。また、係数 (Stress Life Factor) a_{SLF} を

$$a_{SLF} = \text{func.} \left(k, \frac{\eta_c P_u}{P} \right) = \frac{A}{\left\{ 1 - \left(\frac{\eta_b \eta_c P_u}{P} \right)^w \right\}^{\frac{c}{e}}} \quad (13.3)$$

として付加応力に関する係数 η_a 、 η_b 、 η_c のそれぞれの計算式等も示し、 $\eta_a = 1$ 、 $\eta_b = 0 \sim 1$ とすると $a_{SLF} = a_{SKF}$ となることを示している。

[本提案は、異物混入による短寿命化と疲労限導入による長寿命化を理論化し、パラメータとそれ

を与える図式等を通して、これらの計算を可能としたものである。]

2.14 LOROESCH, ZWIRLEIN, LOESCHE らの式 (1982, 1989, 1995)

LOROESCH¹⁹⁾、ZWIRLEIN ら²⁰⁾の寿命実験に基づく疲労限応力の推定を発展させて理論化し、LOESCHE²¹⁾、LOESCHE ら²²⁾は von MISES 相当応力 σ_v を基準応力、VR を積分領域体積とする次の軸受寿命基礎式を与えた。

$$\ln \frac{1}{S} \propto N^e \int_{VR} \left(\frac{\sigma_v - \sigma_u}{\sigma_y - \sigma_u} \right)^c dV \quad (14.1)$$

さらに、異物混入と疲労限を考慮し、潤滑の影響も考慮した軸受寿命計算式として次式を与えた。

$$L_{na} = a_1 a_{23} \left(\frac{C}{P} \right)^p \quad (14.2)$$

$a_{23} = s a_{23II}$; $s = \text{func.}(f_s, V)$; $f_s = C_0 / P_0$; $V = 0.3 \sim 3$ [本提案では、異物混入による短寿命化と疲労限導入による長寿命化を理論化し、パラメータとそれを与える図式等（前項とは異なるもの）を通してこれらを計算可能にした。]

2.15 ZARETSKY らの式 (1992, 1996~2005)

ZARETSKY ら²³⁾は、STLE (Society of Tribologists and Lubrication Engineers、米国トライボロジー学会) 活動として、ANSI (American National Standards Institute、米国規格協会) / ABMA (American Bearing Manufacturers Association、米国ベアリング工業会) および ISO 規格における軸受寿命計算式中の寿命補正係数：信頼度係数 a_1 、軸受特性係数 a_2 、使用条件係数 a_3 のそれぞれを次の各項目の通り細分化した。

信頼度：破損確率

軸受特性：鋼種、溶解法、加工法、硬度、残留応力、炭化物、非鉄材料、セラミック材料、軸受再加工・修理、めつき・表面処理

使用条件：荷重（軌道輪変形・ハウジング・取付誤差等）、温度、潤滑（油膜厚さ・枯渇程度・表面粗さ・グリース・添加物・トラクション・水分・フィルター等）

これら項目のそれぞれについて、公表された世

界中の多くの論文に基づき、LF (Life Factor) の式・図・数値等を与えて、計算を可能にしている。

さらに、ZARETSKY ら^{24,25)}、POPLAWSKI ら²⁶⁾は過去の多くの転がり要素試験結果を比較して転がり軸受寿命理論の「HERTZ 応力 - 寿命」関係を論じ、LP 理論基本式(7.1)等に替わる式

$$\ln \frac{1}{S} \propto N^e \tau^{ce} V \quad (15.1)$$

を提案し、軌道を再加工した転がり軸受の寿命計算にも適用した。

[STLE 学会活動として、軸受寿命に与えるさまざまな因子の影響を多数の論文に基づく実験値を用いて数値化した。これとは別に、解析・実験に基づく独自の寿命理論を展開した。]

2.16 高田の転動体寿命式 (1992)

高田²⁷⁾は、LP 理論では直接には考慮されていない転動体も現実には寿命に達し得る事実に基づき、転動体の寿命計算の基本式を解析的に求めた。すなわち、寿命計算の基礎式

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P} \right)^b \quad (16.1)$$

における基本動定格荷重 C の中に、転動体の基本動定格荷重 C_a を次式のように組み入れた。

$$C = (C_i^{-w} + C_e^{-w} + C_a^{-w})^{-1/w} \quad (16.2)$$

$$C_a = (C_{ai}^{-w} + C_{ae}^{-w})^{-1/w} \quad (16.3)$$

C_a を内輪・外輪の寿命との類似性と転動体の特異性とを考慮して理論化し、転動体応力体積係数 ι 、転動体接触係数 κ を導入して、ラジアル玉軸受の転動体の内輪または外輪との接触に対応する基本動定格荷重 C_{ai} または C_{ae} と、内輪・外輪の基本動定格荷重 C_i 、 C_e を、次のように与えた。

$$C_{ai} = C_i \frac{\lambda_{ai}}{\lambda_i} \frac{A_{1a}}{A_{1i}} \left\{ \frac{\gamma Z}{(1-\gamma)\cos\alpha} \right\}^{\frac{e-1}{w}} (\iota e K_i^e)^{-\frac{1}{w}} \quad (16.4a)$$

$$C_{ae} = C_e \frac{\lambda_{ae}}{\lambda_e} \frac{A_{1a}}{A_{1e}} \left\{ \frac{\gamma Z}{(1-\gamma)\cos\alpha} \right\}^{\frac{e-1}{w}} (\iota e K_e^e)^{-\frac{1}{w}} \quad (16.4b)$$

$$C_i = \lambda_i \frac{J_r}{J_1(e)} \frac{2^{\frac{e}{w}}}{0.089115 \times 4^{\frac{2c+h-2}{3w}}} A_i(e) K \left(\frac{f_i}{f_i - 0.5} \right)^{-n} \times \frac{(1-\gamma)^{\frac{n+2c+h-5}{3w}}}{(1+\gamma)^{\frac{e}{w}}} \gamma^{\frac{1}{w}} (i \cos\alpha)^{\frac{c-h-1}{3w}} Z^{1-\frac{e}{w}} D_w^{1.8} \quad (16.5a)$$

$$C_e = \lambda_e \frac{J_r}{J_2(e)} \frac{2^{\frac{e}{w}}}{0.089115 \times 4^{\frac{2c+h-2}{3w}}} A_e(e) K \left(\frac{f_e}{f_e - 0.5} \right)^{-n} \times \frac{(1+\gamma)^{\frac{n+2c+h-5}{3w}}}{(1-\gamma)^{\frac{e}{w}}} \gamma^{\frac{1}{w}} (i \cos\alpha)^{\frac{c-h-1}{3w}} Z^{1-\frac{e}{w}} D_w^{1.8} \quad (16.5b)$$

ラジアルころ軸受についても、同様の考え方で定式化した。

[本提案では、LP 理論で直接には考慮されていない転動体の寿命を、内輪・外輪の寿命との類似性と転動体の特異性とを考慮して理論化し、より一般化した。]

2.17 高田の式 (1994)

高田²⁸⁾は、異物混入と疲労限を考慮した軸受寿命を次式(17.1)で与えた。

$$L_{na} = a_1 a_2 a_3 a_4 a_5 \left(\frac{C}{P} \right)^b \quad (17.1)$$

新たに導入した環境係数 a_4 、疲労限係数 a_5 を算出するため応力集中のない場合の応力 q_0 と、ある場合の応力 q_g 、疲労限応力 q_u 、HERTZ 応力 q を用いて解析し、 a_4 の基礎となる量 A_5 (異物混入による応力増大に起因する寿命減少率) を式(17.2)で、 a_5 の基礎となる量 A_4 (疲労限応力の導入による寿命変化率) を式(17.3)で、それぞれ与えた。指数 b の値は 9 (玉軸受) および 20/3 (ころ軸受) である。

$$A_4 = \left(\frac{q_0 - q_u}{q_g - q_u} \right)^b \quad (17.2)$$

$$A_5 = \left(\frac{1 - \frac{q_u}{q_c}}{1 - \frac{q_u}{q}} \right)^b \quad (17.3)$$

[本提案で、異物混入による軸受寿命の短寿命化、疲労限応力の導入による軸受寿命変化を理論解析し、各々寿命補正係数として定式化し、ISO/JIS 規格の寿命計算式を拡張した。]

2.18 TAKATA らの式 (1995,1996)

TAKATA ら²⁹⁾、高田ら³⁰⁾は、異物混入と疲労限を考慮した補正定格寿命 L_{nas} を次式で与えた。

$$L_{nas} = a_1 a_2 a_3 a_4 a_5 \left(\frac{C}{P} \right)^b \quad (18.1)$$

ここでは軸受特性係数 a_2 、使用条件係数 a_3 を油膜パラメータ Λ の関数として関係図で与え、環

境係数 a_4 を Λ との関係図で P/C 値と「異物環境程度」をパラメータとして与え、疲労限係数 a_5 を P/C 値と Λ との関係図で与えた。さらに、油膜パラメータ Λ を次式

$$\Lambda = H_i \cdot T \cdot R \cdot A \cdot D \quad (18.2)$$

で与え、式中の H_i (せん断発熱による油膜厚さ減少係数)、 T (軸受形式で決まる係数)、 R (速度に関する係数)、 A (潤滑剤の種類と粘度の係数)、 D (軸受寸法の係数) の各量を図または表で与えた。

[従来の軸受特性係数 × 使用条件係数および前記の環境係数・疲労限係数を図式化し、諸パラメータによって数値計算可能としたものである。本提案の方式によって、ISO/JIS 規格の転がり軸受寿命計算式を拡張化でき、従来の計算式に基づく寿命計算値との連続性・関連性を確保できるとともに、使用条件係数等を求める際の潤滑油膜の寿命への影響を、粘度比より理論的な EHL 油膜パラメータとの関係で把握できる。]

2.19 TAKEMURA らの式 (2000)

TAKEMURA ら³¹⁾は、異物混入寿命と疲労限応力を考慮し、かつ内部起点寿命・表面起点寿命を統合した軸受寿命基礎式として式(19.1)を与えた。

$$\ln \frac{1}{S} \propto N^e \frac{(\tau - \tau_u)^c}{z_0^{-h}} V \frac{1}{f(a_c, a_L)} \quad (19.1)$$

これと試験結果・解析に基づき、諸係数補正後の 90 % 定格寿命 L_{able} を、油膜パラメータ Λ 理論を考慮し粘度比 κ で決めるパラメータ a_L 等によって求まる a_{NSK} を用いた次式で提案した。

$$L_{able} = a_1 a_{NSK} L_{10} \\ a_{NSK} \propto F \left[a_L, \frac{P - P_u}{C \cdot a_c} \right] \quad (19.2)$$

[異物混入寿命・疲労限応力を取り入れ、内部起点・表面起点を統合し、 Λ 理論と κ を考慮した潤滑パラメータ、汚染度係数、疲労限荷重を試験・解析に基づき定めた軸受寿命式の提案である。]

2.20 YU-HARRIS の式 (2001)

YU と HARRIS³²⁾は、玉軸受の寿命基礎式として次式(20.1)を提案した。

$$\ln \frac{1}{S} \propto N^e \left(\int_V \tau^c dV \right)^e \quad (20.1)$$

τ には SINES らの多軸疲労基準応力をとり、接

線力・たが応力・表面粗さ・異物混入・残留応力等の影響を考慮し、指数を $c = 31/3$ (LP 理論) でなく $c=4$ として寿命計算式(20.2)を定式化した。

$$L_{10} = \left(\frac{Q_c}{Q} \right)^{\frac{z+x+y}{3}} \quad (20.2)$$

実験結果は LP 理論、IOANNIDES-HARRIS 理論より適合性良好とした。 $(x, y, z : \text{接触領域の指數。})$

[転がり軸受寿命が応力体積に因らずに応力場のみに支配されるとして精密化し構築した基礎式で、潤滑等の寿命への影響は応力場への関与とし、疲労限は式に明示されていないようである。]

2.21 TANAKA らの式 (2002)

TANAKA ら³³⁾、田中^{34,35)}は、分割された応力体積の残存確率から全体の残存確率を求める手法で、異物混入潤滑下および油膜パラメータ Λ を考慮する寿命計算式を提案し、試験結果との対比を示した。分割された応力体積の残存確率は LP 理論を基礎とし、寿命を支配する応力は von MISES の相当応力を用いている(添え字 $i=1, 2, \dots, n$)。

$$L = (\Delta L_1^{-e} + \Delta L_2^{-e} + \dots + \Delta L_n^{-e})^{-1/e} \quad (21.1)$$

$$\Delta L_i = \Delta N_i \propto (\sigma_i^{-c} \Delta V_i^{-1} z_i^{-h})^{1/e} \quad (21.2)$$

$$\ln \frac{1}{\Delta S_i} \propto N_i^e \sigma_i^c z_i^{-h} \Delta V_i \quad (21.3)$$

[本提案は接触部表面での応力集中の影響を、応力体積を分割することで考慮した新寿命計算式である。]

文 献

- 11) E. IOANNIDES & T. A. HARRIS : A New Fatigue Life Model for Rolling Bearings, Trans. ASME, J. of Tribology, **107**, 3 (1985) 367.
- 12) Y. P. CHIU, T. E. TALLIAN & J. I. MCCOOL : An Engineering Model of Spalling Fatigue in Rolling Contact (I), Wear, **17**, 5-6 (1971) 433.
- 13) T. E. TALLIAN & J. I. MCCOOL : ibid. (II), Wear, **17**, 5-6 (1971) 447.
- 14) T. E. TALLIAN : ibid. (III), Wear, **17**, 5-6 (1971) 463.
- 15) T. E. TALLIAN : Unified Rolling Contact Life Model with Rolling Bearings, Wear, **107**, 1 (1986) 13.
- 16) J. GOODALL-WUTTKOWSKI & E. IOANNIDES : The New Life Theory and its Practical Consequences, Ball Bearing J. Special (1989) 6.
- 17) D. R. SNYDER, J. GOODALL-WUTTKOWSKI & S. IOANNIDES : The Status of Ball and Roller Bearing Load and Life

- Ratings at SKF, Proc. 1995 STLE/ASME Tribology Conference in Orlando, ASME 95=TRIB-58 (1995) 39.
- 18) E. IOANNIDES, G. BERGLING & A. GABELLI : An Analytical Formulation for the Life of Rolling Bearings, *Acta Polytechnica Scandinavica, Mechanical Engineering Series* 137 (1999) 1.
- 19) H.-K. LOROESCH : Influence of Load on the Magnitude of the Life Exponent for Rolling Bearings, *Rolling Contact Fatigue Testing of Bearing Steels, ASTM STP 771*, J. J. C. Hoo Ed., (1982) 275.
- 20) O. ZWIRLEIN & H. SCHLICHT : Rolling Contact Fatigue Mechanism — Accelerated Testing versus Field Performance, *Rolling Contact Fatigue Testing of Bearing Steels, ASTM STP 771*, J. J. C. Hoo Ed., (1982) 358.
- 21) T. LOESCHE : New Aspects in the Realistic Prediction of the Fatigue Life of Rolling Bearings, *Wear*, **134**, 2 (1989) 357.
- 22) T. LOESCHE & M. WEIGAND : The Calculation of Fatigue-Life of Rolling Bearings Depending on their Operating Conditions, Proc. 1995 STLE/ASME Tribology Conference in Orlando, ASME 95=TRIB-58 (1995) 3.
- 23) E. V. ZARETSKY (Editor) : Life Factors for Rolling Bearings, STLE SP-34, STLE (1992).
- 24) E. V. ZARETSKY, J. V. POPLAWSKI & S. M. PETERS : Comparison of Life Theories for Rolling-Element Bearings, *Tribology Trans.*, **39**, 2 (1996) 237
- 25) E. V. ZARETSKY & E. V. BRANZAI : Effect of Rolling Bearing Refurbishment and Restoration on Bearing Life and Reliability, *Tribology Trans.*, **48**, 1 (2005) 32.
- 26) J. V. POPLAWSKI, E. V. ZARETSKY & S. M. PETERS : Effect of Roller Profile on Cylindrical Roller Bearing Life Prediction : *Tribology Trans.*, **44**, 3 (2001) 339, 417.
- 27) 高田浩年 : 転動体寿命を考慮したころがり軸受の寿命理論, トライボロジスト, **37**, 12 (1992) 1055.
- 28) 高田浩年 : 転がり軸受の新しい寿命計算法の可能性の検討, トライボロジスト, **39**, 6 (1994) 526.
- 29) H. TAKATA, K. FURUMURA & Y. MURAKAMI : Development of a New Method for Estimating the Fatigue Life of Rolling Bearings, Proc. 1995 STLE/ASME Tribology Conference in Orlando, ASME 95=TRIB-58 (1995) 11.
- 30) 高田浩年・古村恭三郎・村上保夫 : 転がり軸受の新しい疲れ寿命計算式の開発, *NSK Technical J.*, 661 (1996) 1.
- 31) H. TAKEMURA, Y. MATSUMOTO & Y. MURAKAMI : Development of a New Life Equation for Ball and Roller Bearings, *SAE Paper 2000-01-2601* (2000) 1.
- 32) W. K. YU & T. A. HARRIS : A New Stress-Based Fatigue Life Model for Ball Bearings, *Tribology Trans.*, **44**, 1 (2001) 11.
- 33) H. TANAKA & N. TSUSHIMA : Estimation of Rolling Bearing Life under Contaminated Lubrication, *ASTM STP 1419* (2002) 218.
- 34) 田中広政 : 異物混入潤滑条件下での転動疲労寿命予測, *JAST 予稿集宇都宮 2001-11* (2001) 445.
- 35) 田中広政 : 油膜パラメータ (Λ) を考慮した転動疲労寿命予測, *JAST 予稿集東京 2003-5* (2003) 183.