

ねじの製造法が締結用おねじ部品の強度に及ぼす影響

—ねじ谷底の残留応力と疲労強度の関係—

萩原 正弥 河崎 一紀* 古川 朗洋**

Effects of the Manufacturing Process for Bolts on their Mechanical Properties

—Relationship between Fatigue Strength and the Residual Stress at the Thread Root—

Masaya HAGIWARA, Kazunori KAWASAKI* and Akihiro FURUKAWA**

The residual stress at the thread root of a bolt induced by thread rolling is one of the major factors influencing the fatigue strength, and the method (hypothesis) to predict the fatigue strength has been investigated. However, the effect of the residual stress has not been verified quantitatively since there are many other variables affecting the fatigue strength data.

This study aims to clarify the hypothesis on the fatigue strength taking into account the effect of residual stress at the thread root. Fatigue tests have been carried out for the heat-treated test specimens after or before thread rolling process. Heat treatment (quenching and tempering) was done in a single batch for each property class.

Experimental data show that the fatigue strength of bolts thread-rolled after heat treatment is about 100% higher compared to bolts thread-rolled before heat treatment in the low mean stress condition, and the difference decreases as the increase of mean stress of the fatigue loading. These results show good agreement with the hypothesis presented assuming that the compressive residual stress is 1200 N/mm² to 1600 N/mm² level.

Key words: Bolt, Fatigue strength, Manufacturing process, Thread rolling, Heat treatment, Residual stress, Fatigue test.

1. はじめに

熱処理後転造されたボルトの疲労強度は、ねじ谷底に発生する残留応力によって、転造後熱処理されたボルトよりも高くなるとされており、吉本¹⁾は、このことを説明するための仮説を提案した。その後、萩原²⁾は、X線回折法によってねじ谷底の残留応力の測定を試み、さらに修正仮説³⁾の提案を行った。しかし、①疲労強度に関係するねじ谷底表面付近の狭い(局所的な)領域の残留応力を正確に測定することが極めて難しいこと、②工程順序の異なる2種類の試験ボルトの製作に際して、同一バッチでの製造(転造及び熱処理)が行われておらず、製造工程順序以外の要因が関与する可能性が排除できないことなどの理由から、提案された仮説を検証する段階には至っていなかった。

そこで本研究では、仮説の検証の第一段階として、まず上述の②の問題を解決し、評価に耐えうる疲労試験データ

を求めることによって仮説の妥当性を定性的に調べ、さらに仮説を適用することによって逆に推定された残留応力のレベルに関し、その実現の可能性を検証するという方針で研究を行った。

2. 疲労強度に関する仮説

2.1 平滑試験片の疲労強度

図1に、平滑試験片の応力-ひずみ線図及び疲労限度線図(Haigh線図)を示す。材料データとしては、回転曲げ疲労試験によって σ_{w0} を求めるのが一般的であるが、西原・櫻井⁴⁾は、疲労強度の平均応力の関係は、材料の真破断応力 σ_T と結んだ線によく表せることを示している。

2.2 局所的応力と切り欠き係数の関係

図2に、ボルトの第1ねじ谷底の応力分布を示す。一般に、疲労設計においては、このような切り欠き試験片に対して、疲労強度の低下割合を表す切り欠き係数(β)を用いるが、石橋⁵⁾は、この β の意味を「疲労に関係する応力は、材料表面から数10 μ m内部の ϵ_0 層の応力である」と説明している。

2007年03月30日 受理

*名古屋工業大学大学院工学研究科機能工学専攻

** (株) 青山製作所

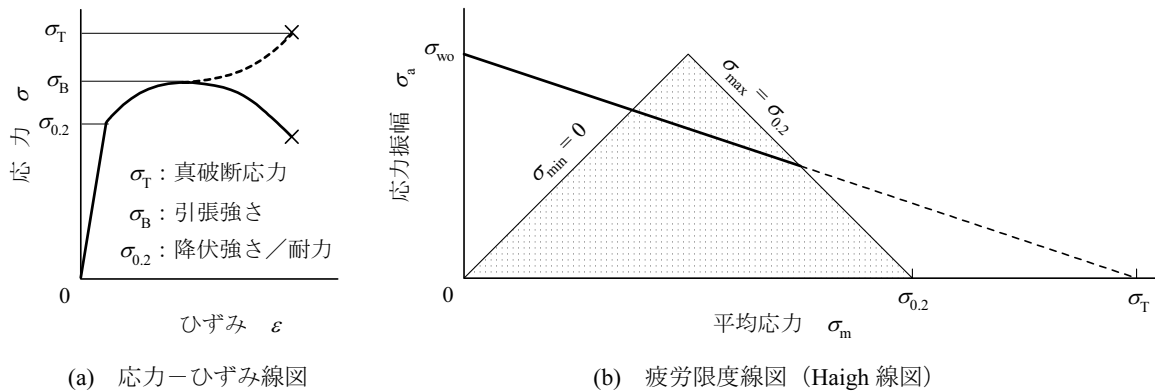


図1. 材料（平滑試験片）の機械的性質と疲労強度の関係

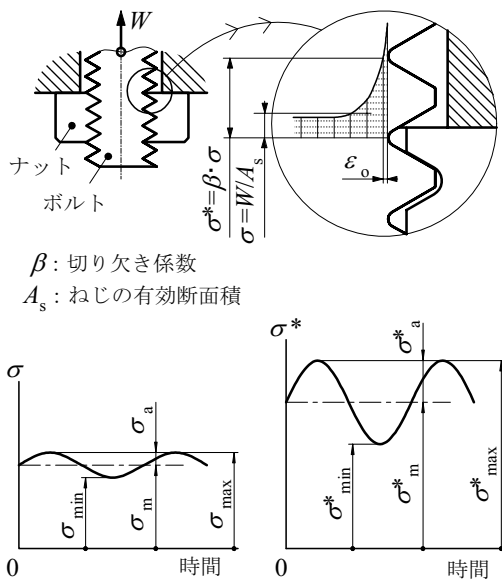


図2. ボルト第1ねじ谷底の応力分布

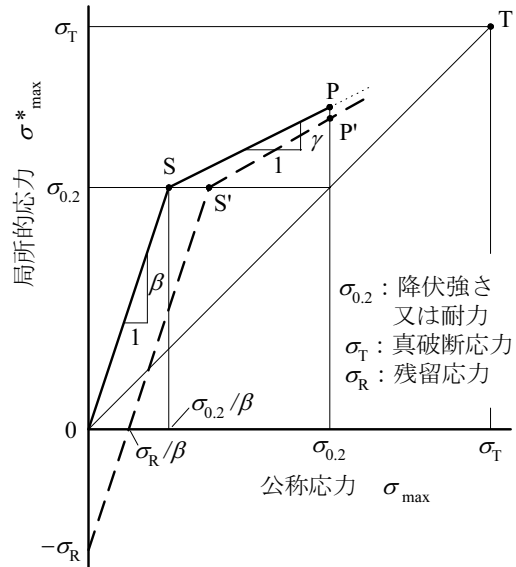


図3. 局所的応力と公称応力の関係

2.3 残留応力の影響

図3は、図2に示したボルトの第1ねじ谷底ε0層の局所的応力σ*_{max}と公称応力σ_{max}の関係を示している。まず最初に残留応力σ_Rがない場合（実線）について説明する。この場合、外力Wの最大値が増加し、局所的応力σ*_{max}が材料の降伏強さσ_{0.2}に等しくなるS点で局所的な降伏が起こる。吉本の仮説¹⁾では、弾完全塑性体を想定し「局所的最大応力はを超えない」という仮定のもとに疲労限度線を求めているが、実際の材料では、局所的応力も若干増加する。この間の様子は、材料によってさまざまであろうが、静的破壊の過程を考えれば、実際の応力は最終的に真破断応力σ_Tまで増加し、このとき、局所的応力と公称応力の区別はなくなると考えられる（T点）。そこで、ここでは、図3のS点とT点を直線で結んだ特性を仮定する。

ねじ谷底のε0層の場所に軸方向の圧縮残留応力σ_Rがあれば、外力Wが作用しない状態でσ*_{max}=−σ_Rとなり、全体は破線のように変化すると考えられる。

図4は、このような仮定を用いて描いた疲労限度線図である。疲労限度線図は、公称応力で表示するのが一般的であるため、強度がそれぞれ1/βになると考える必要がある。したがって、疲労限度線図上では、ボルト第1ねじ部の疲労強度は、A-S-Pのような折れ線で表され、圧縮の残留応力がある場合には、その線がA'-S'-P'のように右に移動することになる。その結果、平均応力の低い範囲では、残留応力は疲労強度に大きな寄与を及ぼし、平均応力が高い範囲では、その影響が極めて小さいことが予見される。

なお、2003年に大幅改訂されたVDI 2230⁵⁾では、平均応力が0.3R_{p0.2} ≤ σ_m < R_{p0.2}（R_{p0.2}：降伏点又は耐力の規格値）の範囲で、以下の設計値を与えている：

- ・ 転造後熱処理ボルト（SVと表記）で

$$\sigma_{ASV} = 0.85 \left(\frac{150}{d} + 45 \right) \dots \dots \dots (1)$$

- ・ 熱処理後転造ボルト（SGと表記）で

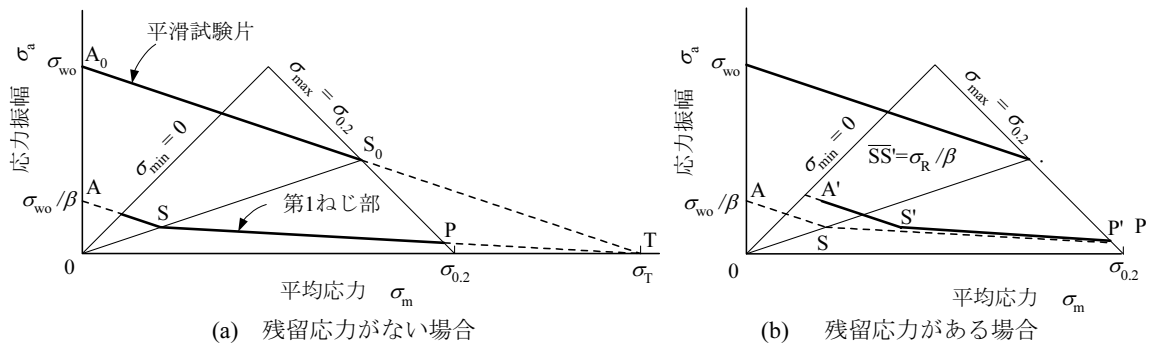


図 4. 仮説をもとに描いたボルトの疲労限度線図

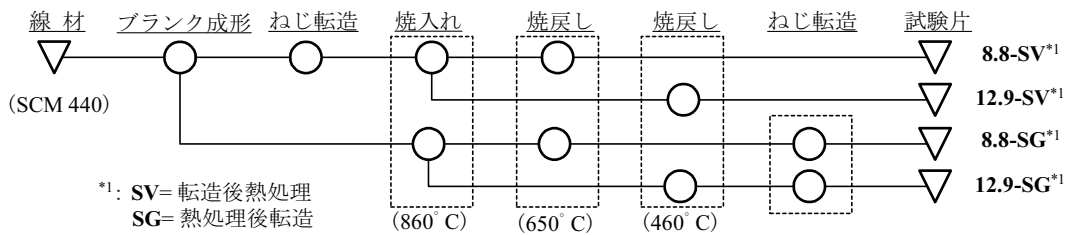


図 5. 試験用ボルトの製造工程

$$\sigma_{ASG} = \left(2 - \frac{\sigma_m}{R_{p0.2}} \right) \cdot \sigma_{ASV} \quad \dots\dots\dots (2)$$

のものを用いており、試験は、JIS B 1081:1997 (ISO 3800:1993)に規定される“組合せ試験法” (14 S-N 試験法) によって、3種類の荷重条件のもとで実施した。

3. ボルト・ナット結合体の疲労試験

3.1 試験方法

図 5 に、試験用ボルトの製造工程の概略を示す。実験に用いたボルトは、M10×1.25、強度区分 8.8 及び 12.9 で、すべて同一ロットの材料 (SCM440) を用いている。熱処理は、それぞれの強度区分ごとに製品とブランクを混在して一度に処理しており、熱処理による機械的性質のばらつきを最少化を図っている。ねじ転造には、油圧式丸ダイス転造盤を用い、転造速度の制御を行った。

ボルトと組合せるナットは、ボルトの強度区分によらず、スタイル 1、強度区分 10 (保証荷重応力 1100N/mm² 相当)

3.2 試験結果及び考察

図 6 及び図 7 に、試験結果と仮説によって得られた疲労限度線図を比較して示す。疲労限度の推定には、表 1 に示す値を仮定した。

これらの結果をみると、平均応力の最も低い応力比 0.1 の条件において、製造方法 (順序) の影響が最も大きく、平均応力が増加するにしたがってその差は減少することがわかる。このような傾向は、2.3 節で述べた仮説によってよく説明できるが、疲労強度の増加が残留応力だけによるものと仮定すれば、強度区分 8.8 及び 12.9 で、それぞれ

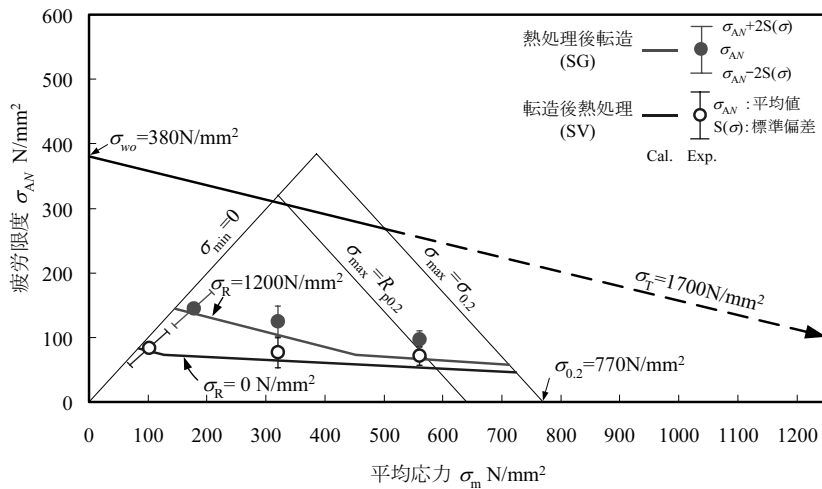


図 6. ボルト・ナット結合体の疲労試験における疲労限度線図 (強度区分 8.8)

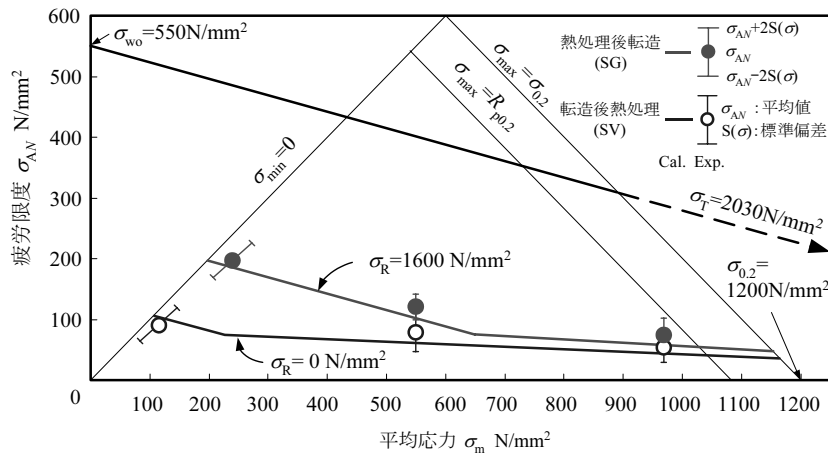


図7. ボルト・ナット結合体の疲労試験における疲労限度線図（強度区分 12.9）

表1. 疲労限度の推定に用いる値の求め方

項目		方法
材料特性	耐力 $\sigma_{0.2}$	測定（平滑試験片）
	引張強さ σ_B	
	真破断応力 σ_T	
寸法特性	両振り疲労限度 σ_{wo}	資料 ⁶⁾ による推定
	外径 d	公称値
寸法特性	谷の径 d_r	規格（6g）の中央値
	谷底丸み r	公称値
	フランク角 2α	
切欠き係数 β	山本の実験式 ⁷⁾	
残留応力値 σ_R	疲労試験結果から推定	

約 1200 N/mm² 及び 1600 N/mm² という極めて高い局所的応力が作用していることになる。

4. 残留応力レベルに関する検証

4.1 残留応力付与のモデル

3.2 節では、仮説を用いて熱処理後転造ボルトの疲労強度の増加を説明しようとする、極めて高いレベルの残留応力を仮定する必要があることがわかった。そこで、ここでは、FEM 解析によって、ボルト・ナット結合体に静的引張荷重を与えることによってねじ谷底に残留応力を発生させ、このことで、局所的負荷の変動がどのように変化するかについて調べた。

図 8 に、FEM モデル及び得られた残留応力分布を示す。材料特性値は、平滑試験片モデルにおいて荷重-伸び線図が測定値と一致するように試行錯誤的に設定する方法⁸⁾によって求めており [図 8(b)], これによって、製品の最大荷重点までの挙動がよくシミュレートできることが確かめられている。図 8(c)の例では、予荷重 F は製品の耐力荷重の 75% 程度の値で、巨視的な降伏は起こらないと考えられるが、第 1 ねじ谷底表面には、材料の引張強さを遙かに超えるレベルの圧縮残留応力が発生している。

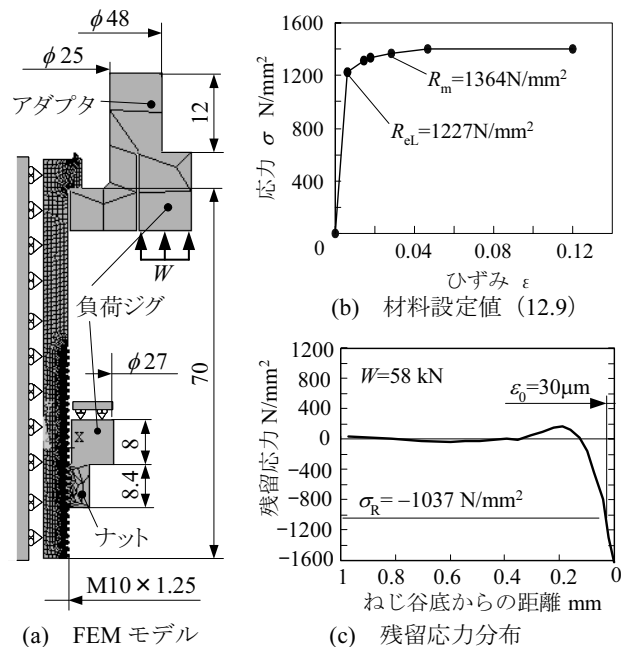


図8. FEM モデル及び発生した残留応力分布の例

4.2 局所的応力と疲労強度の関係

図 9 は、文献 9) に示される値をもとに、 $\epsilon_0 = 30 \mu\text{m}$ と仮定し、図 7 に示したそれぞれの試験での疲労限度の荷重条件のもとで、図 2 に示した局所的応力 σ_m^* 及び σ_a^* を求め、その値と平滑試験片の疲労強度の比較を行った結果である。ねじ谷底に圧縮残留応力が付加された結果、応力比 $R_s = 0.1$ の荷重条件では、局所的平均応力はマイナスとなっているが、文献 4) によれば、この領域での疲労強度は、直線的に増加することが知られており、この結果は、熱処理後転造 (SG) ボルトの疲労強度とよく一致している。また、 $\sigma_m = 0.88R_{p0.2}$ の条件では、試験における最小荷重が予荷重とほぼ等しいレベルとなるため、残留応力が平均応力に及ぼす効果は現れていない。このように、ねじ谷底に残留応力を付与したモデルを用いることで、局所的応力によ

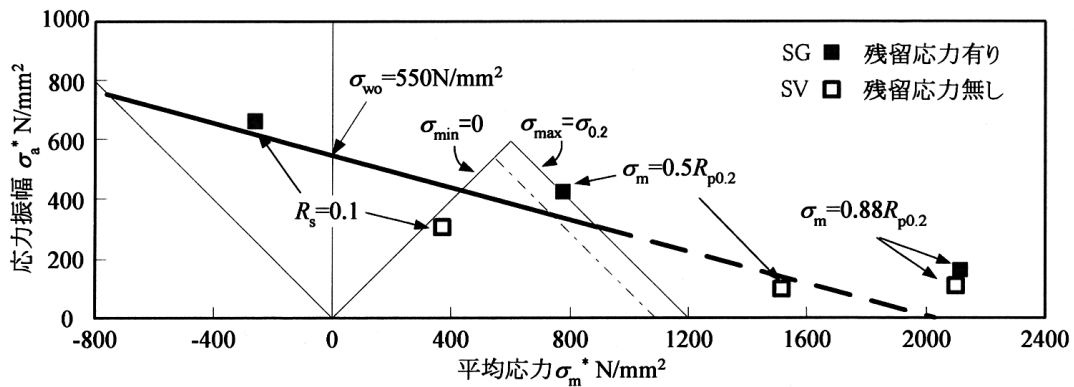


図9. FEM局所的応力に基づく疲労強度の比較 (強度区分 12.9)

て残留応力の効果を定性的に説明できることがわかったが、現時点では実際の残留応力の値及び分布は未知であり、その正確な測定が、仮説を検証する上での重要な課題と位置づけられる。

4.3 その他因子の影響

図9の“残留応力あり”のプロット (■) は、より大きな残留応力を与えることで左側にシフトし、疲労強度自体に作用するその他の要因によって上下に変化し得る。

疲労強度自体を変化させる要因としては、①表面粗さの変化、②ピッチの変化、③加工硬化及び/又は脱炭が挙げられるが、このうち①については、疲労強度に差異を生じるような表面粗さの違い¹⁰⁾は生じないと考えられる。また、②については、累積ピッチ誤差の測定を行ったところ、熱処理後転造 (SG) で-0.07%、転造後熱処理 (SV) で-0.12%であった。ボルトのピッチをナットのピッチに対して僅かに縮めると、第1ねじ谷底の応力集中が緩和されることから¹¹⁾、本研究の場合には、SVボルトの方がむしろ有利となっていることがわかる。

一方、③については、SGボルトにおいて、図10に示すような加工硬化が測定されたが、強度区分12.9に限って言えば、その増加量は僅かであり、このことが図9の結果に直接影響を及ぼすとは考えにくい。

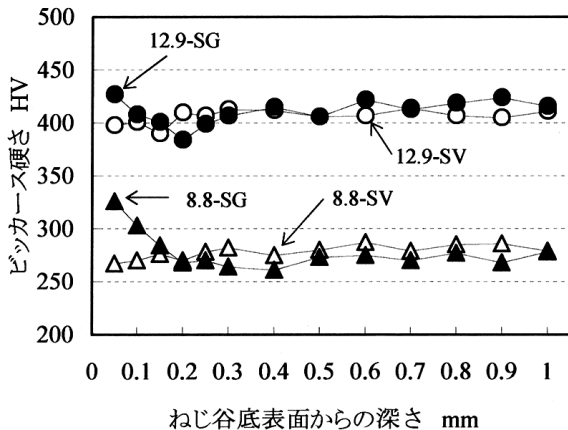


図10. ねじ谷底表面からの硬さ分布

5. おわりに

本論文では、ねじの製造方法 (製造順序) が疲労強度に及ぼす影響を調べるため、条件を厳密に管理した試験片による疲労試験を行い、さらに残留応力に基づく仮説の適用を行った結果、以下の結論を得た：

- (1) 修正した仮説によって、ボルトの疲労強度の変化傾向をよく説明できる。
- (2) 仮説によって推定される局所的な残留応力の値は、強度区分8.8で1200N/mm²、強度区分12.9で1600N/mm²と極めて高い値となった。
- (3) ねじ谷底に残留応力を模擬的に負荷するモデルを用いて、局所的な負荷変動を調べたところ、それぞれの実験結果に対して、平滑材の疲労強度とほぼ近い値となることが確認できた。

引用文献

- 1) 吉本勇, 精密機械, **49**, 1983, 801.
- 2) 萩原正弥, 中原兼文, 吉本勇, 日本機械学会論文集 C編, **55-518**, 1989, 2605-2610.
- 3) M. Hagiwara, N. Ohashi, I. Yoshimoto, Proc. of 9th Int'l. Conf. on Exp. Mech., **3**, 1990, 1255-1261.
- 4) 西原利夫, 櫻井忠一, 日本機械学会論文集, **5-18**, 1939, 93-97.
- 5) 賀勢晋司, 川井謙一訳: 高強度ねじ締結の体系的計算法 (VDI 2230 Blatt 1), 日本ねじ研究協会, 2006, 57-58.
- 6) 日本機械学会編: 金属材料の疲労強度の設計資料 I, 日本機械学会, 1982, 68-73.
- 7) 山本晃: ねじ締結の原理と設計, 養賢堂, 1995, 149-167.
- 8) 奥林敬未, 萩原正弥ほか2名: 機械学会論文集 C編, **72-718**, 2006, 1982-1986.
- 9) 文献7)に同じ, 160.
- 10) Buch, A.: Fatigue Strength Calculation, Trans Tech Publications, 1988, 53/94-96.
- 11) 丸山一男, 日本機械学会論文集, **39-324**, 1973, 2340-2349.