

ボルトゆるみに関する残存締付け力推定およびゆるみ寿命予測法^{*}

晴山 蒼^{**}, 真鍋 健^{***}

HAREYAMA Soichi, MANABE Ken-ichi

本報はSAE Technical Paper (2017-01-0479)にて発表した著者らの論文「Residual Clamping Force Estimation and Lifetime Prediction to Loosening Failure of Bolted Joints」⁽¹⁾を邦文化し、一部割愛し補足説明を加えて解説するものである。特に本解説は、実機開発の中で工業的な有用性・実用性を考慮し、ねじ締結体の残存締付け力（軸力）推定法およびゆるみ寿命予測法としてまとめることを念頭に置いた。

概要

ねじ締結体におけるゆるみ現象は初期締付け力（軸力）の減少と考えられている。ゆるみ止め性能の評価・判断として、ゆるみ止め部品やゆるみ止め方法の相対的な評価がユニカー式ゆるみ試験機などで行われている。先の著者らの論文では、締付け後の締付け力（軸力）減少傾向と作業回数（走行距離）の間には両対数紙においてよい線形関係があることを示した。この関係から、製品開発の初期段階での締付け力の挙動から長時間稼働後の締付け力の低下率を精度よく推定できることを示す。締付け力低下傾向は陥没型ゆるみと実働荷重型ゆるみとして観測し、ゆるみ止め部品／方法の残存締付け力（軸力）推定およびゆるみ寿命予測図表を示した。

1 緒言

日用品、自動車、機械や航空機などはねじ／ボルトなしには存在しえない。ねじ／ボルトは斜面と螺旋の原理によって作られ、2000年以上も機械要素として使われてきた。初期軸力不足、自己ゆるみおよび強度不足などによる事故が今日でも起きている。それは次に示すような問題・課題があったからであろう。

(1) 締結信頼性をいかに維持するか

- ① 高い初期締付け力（軸力）が必要とされ塑性域締付け法などが開発されているが、作業方法やコストなどから多くの場合ばらつきの大きいトルク法を使わざるを得ない
- ② 締付け作業時、ねじ山の破損、くびれ破損などを起こすことがある
- ③ 締結信頼性をいかに確立するか。

^{*} 原稿受付：平成30(2018)年2月16日

^{**} 首都大学東京 理工学研究科 客員研究員, ^{***} 首都大学東京 理工学研究科 客員教授

(2) いかにして破損を防ぐか？(疲労破損、遅れ破壊、等)

- ① 常に高応力で使用される、繰返し外力を受ける
- ② 首下部、ねじ部などに大きな応力集中部がある
- ③ その結果、疲労破損、遅れ破壊などを起こす
- ④ 負荷解析システムおよび疲労寿命推定法の確立

(3) いかにしてゆるみ破損を防ぐか？

- ① ねじ継手には軸方向力、軸直角方向力、曲げモーメントあるいはねじりトルクなどがしばしば加わる
- ② 螺旋形状および陥没の進行により本質的にゆるみを起こしやすい
- ③ ゆるみ破損に対するゆるみ寿命推定法の確立

(4) その他

- ① 多くの種類がある(並目/細目、強度区分、表面処理)
- ② 一つの製品に多数のねじ継手が使われる

- ③ 長期間安全に初期締付け力(軸力)を維持するための適切なメンテナンス作業が必要

これらに関して、著者らはいくつかの論文でその解明に取り組んできた。まず、ねじ継手の最適締付け条件について検討した。機械構造物などに使用されているねじの適正締付け状態とは、外力が加わっても破損しない程度に十分に高い軸力で締付けられた状態で、稼働中に破損あるいはゆるみ等を起こさないこととされている [1,2,3,4]。疲労破損防止について Kumar [5] と Ellis [6] は疲労寿命推定について研究している。著者らも疲労寿命予測法とねじ継手に加わる負荷解析法を示した[7]。

ねじ継手のゆるみのメカニズムや評価法については以下に示すように、いくつかの研究が行われてきた。特に Junker による研究はゆるみのメカニズムや実験室的なゆるみ試験方法について多くの示唆を与えている[8,9]。例えば Clark [10] や Hongo [11]の報告のように、多くの論文はゆるみ試験法やゆるみ止め部品の評価について述べている[10,11,12,13]。JFRI [12]は多くの大学や企業の協力を得て、ゆるみの評価試験を実施した。Yamamoto [13]は Junker の評価結果を紹介している。その中で Junker が振動パワーを評価基準としていることや評価結果などを紹介している。著者らはゆるみ現象の基本的な観測と解析を行った[14]。産業機械のコンポーネントに関してねじ継手のゆるみの測定と解析である[15,16]。

ゆるみについて、本論文では締付け力(軸力)の減少ととらえているが、Naasar からも締付け力損失として扱っている[17,18,19,20]。ゆるみ試験機によるゆるみ止め部品の評価結果についていくつかの論文がある[21,22,23,24]。Yamamoto [21]は Junker の評価試験結果の詳細を紹介している。Kasei [22]はゆるみに関する研究動向を調査し、ゆるみ止め部品や方法などの評価結果をまとめている。最近の研究では、Nassar と Housari [23]はゆるみにおけるねじピッチや初期軸力の効果の

研究している。Yang, Nassar, Wu と Meng [24]は繰返し分割荷重による初期軸力を与えたねじ継手の非線形挙動について述べている。Mao と Nassar [25]は異種金属の異なる結合法について研究している。Kumakura, Hosokawa と Sawa [26]は異なるナット高さの軸方向荷重でのガスケットを用いた継手のゆるみ止め効果の評価を行っている。Sase, Koga, Nishimura と Fujii [27]は種々のゆるみ止め部品のゆるみ止め性能の評価を行っている。

これらのねじゆるみの評価方法は実験室的な評価となっている。それらは定性的な評価に加え定量的に各種ゆるみ止め装置のゆるみ防止性能を相対比較まで出来るようになってきている。Zhao, Lee, Che と Yee [28]は本論文のように対数による方程式をゆるみの問題で提示している。このように多くの研究結果が報告されているにもかかわらず、依然として実機に使われているねじ／ボルトが初期のゆるみ止め性能を、実機稼働時のある期間経過後も保っているのかといった絶対的な評価とはなっていない。この種の絶対的評価法へのアプローチは、これまで著者らの論文 [14,15,16]以外には見あたらない。

本研究はねじ／ボルトのゆるみの原理やゆるみのメカニズムを扱ったものではない。ここではまず「いったいそのゆるみ止め部品（方法）は何万回（何万キロ走行）までゆるまずに締付け力（軸力）を保つのか？」と言った問題を解明する方法を提案していく。

2 両対数紙上での締付け力低下傾向によるゆるみの絶対的評価法の考え方および概要

図1は、建設機械の一種であるホイールローダである。ホイールローダのタイヤは、多くのハブボルトで固定されている。



図1 ホイールローダ

図2は、前論文[14]の結果の一例で、実機稼働時におけるハブボルトのゆるみ傾向の測定結果である。左図の真数座標では初期の段階ではかなりのゆるみが見られるが、その後緩やかなゆるみとなる。右図は、両対数座標（両対数紙）にプロットしたデータを示しており、強い線形関係を示している。本試験結果は製品開発初期の半日程度の短期間での観測結果であるが、長期間稼働の場合でも同様に良い線形関係が得られるかを調べたのが図3である。図は、ホイールローダのフロントアクスルのいくつかのボルトの長期運転（1～6ヶ月）におけるゆるみ傾向（軸力の減少）の観測結果のであり、やはりよい線形性を示している[14]。これらの結果から、短期間のゆるみ現象だけでなく長期間においてもゆるみ傾向は両対数紙上でよい直線性があると考えられる。この線形関係によって、ゆるみ破損に対する残存締付け力（軸力）推定と寿命予測が可能となる。それは模式的には図4のように表示できる。図において、例えば縦軸の残存締付け力90%、80%および70%の水平線を引き、回帰直線との交点の水平軸の値を読むと、即座にその時点までの寿命推定値（走行距離、稼働時間あるいは稼働回数など）を知ることができる。一方、例えば走行距離50万Kmの水平軸の点から垂直線を引き、回帰直線との交点の垂直座標を読むとその時点の残存締付け力推定値を即座に求めることができる。これが簡易ゆるみ寿命推定法の原理である。

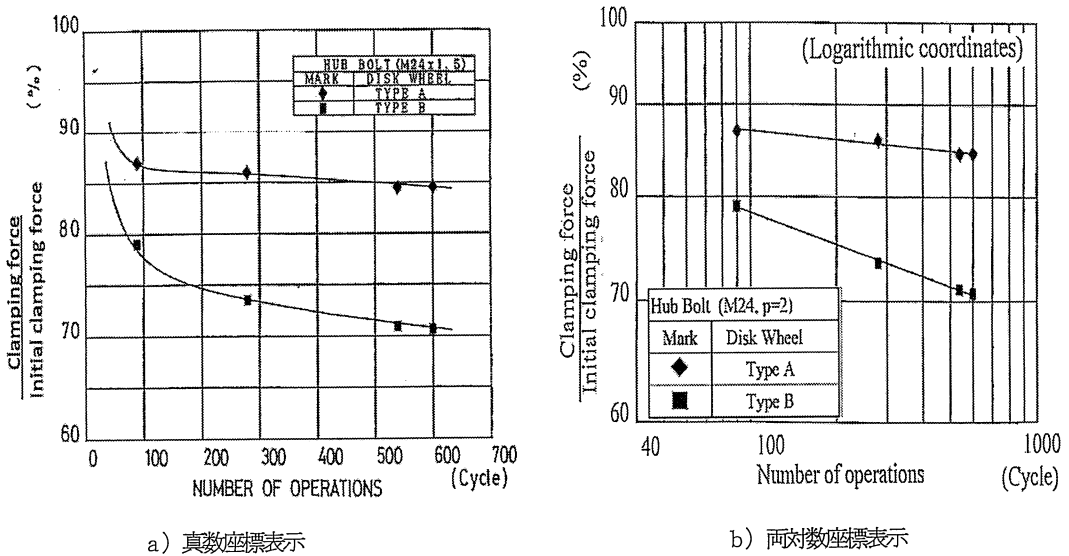


図2 ハブボルトのゆるみ傾向の測定結果

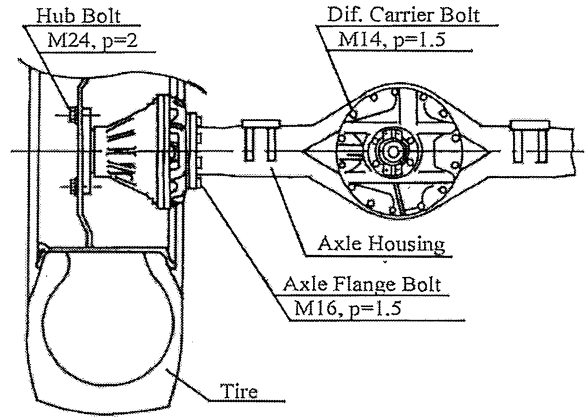
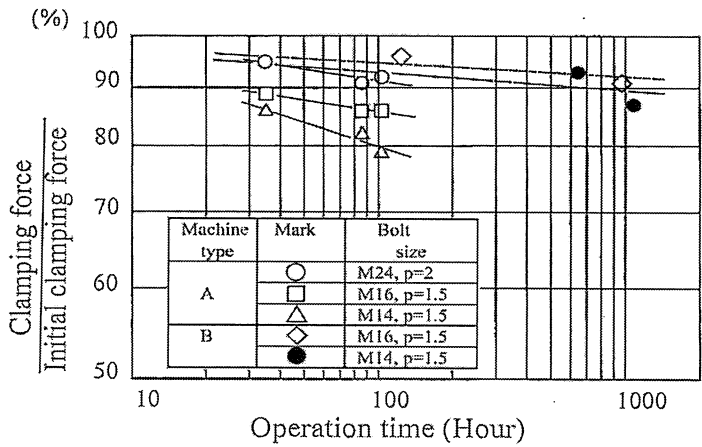


図3 長期間稼働時のゆるみ傾向の観測結果（両対数座標）と測定ボルト

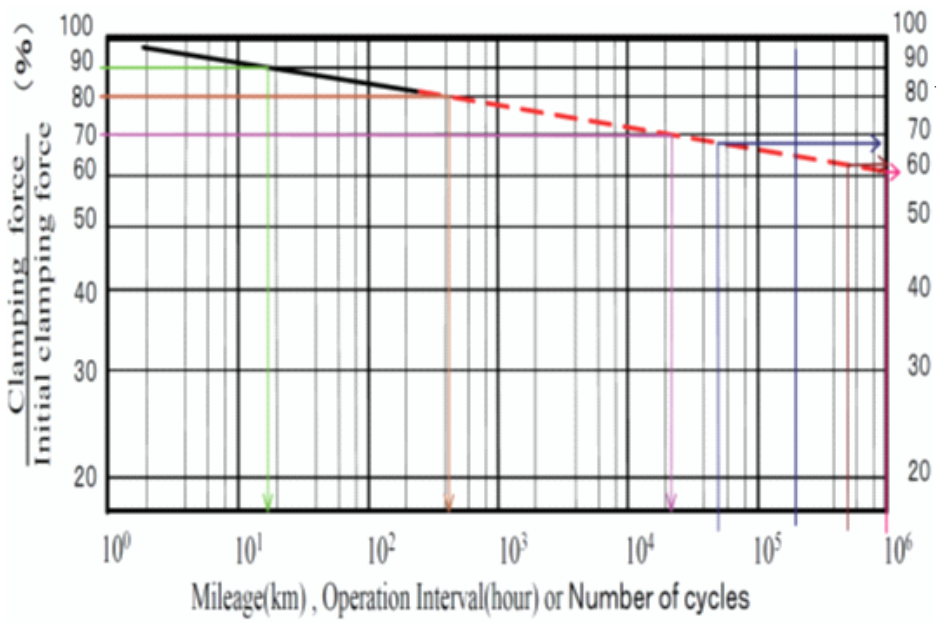


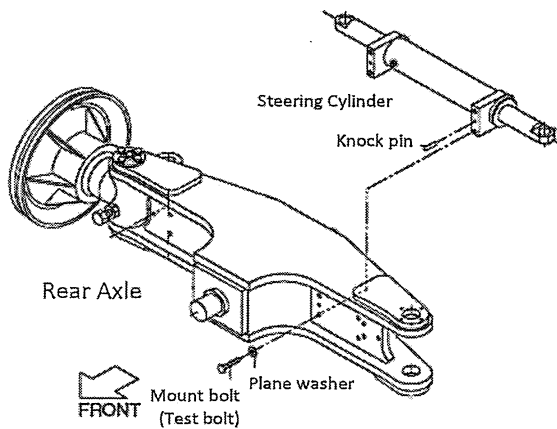
図4 ゆるみ破損に対する残存締付け力（軸力）推定と寿命予測法の基本的な考え方

3 試験車両および初期締付け条件

図5は、客先の現場でゆるみ測定を行う産業車両（積載能力16トンの大型フォークリフト）を示す。フォークリフトには、ステアリング用シリンダが装着されており、マウントボルトでリヤアクスルに固定され稼働時に繰返し外力を受ける。2本のマウントボルトでゆるみ傾向（締付け力低下）の測定を行った。1本はマシン油潤滑でもう1本は嫌気性接着剤（Loctite 262）で締結した。本研究では締付け時の潤滑剤の違いによるゆるみ止め効果も検証する。表1に示す所定の締付けトルクで締付ける。表には、締付け条件と初期締付け力（軸力）も併せて示している。図6にテストボルトの締結状態とその仕様を示す。テストボルトは前述のとおり、図中の模式図に示すようにフォークリフトのリヤアクスル部のステアリング用シリンダのマウントボルトである。ノック（ダウエル）ピンが使用されているので、ピンが横方向の外力を受ける。したがって、試験ボルトには主に軸方向荷重と曲げモーメントが作用すると考えられる。本論文では、まず試験ボルトの締付け力（軸力）低下傾向（ゆるみ挙動）を観察し整理する。試験車両を客先の鉄鋼ヤードに持込み、3日間客先のオペレータに自由に使ってもらった。昼休みの休憩時や作業終了後もシリンダには残圧が残り、停車位置も平坦でなかったりして正しく0点が取れていない。ただし、稼働初日の試験開始時と4日目の朝の終了時はテストスタッフが平坦な場所で、常温でシリンダ残圧も取除き締付け力（軸力）低下量を計測した。



図5 現場でのゆるみ測定を行う大型フォークリフト



Bolt : M16×1.5 Length : 50mm, Grade 8.8
 Strain Gage : BTM-6C
 (Tokyo Sokki Kenkyujo CO.,LTD)

図6 テストボルトの締結状態とその仕様

表1 締付条件（締付けトルクと初期締付け力）

Tightening method	Calibrated wrench method	
	Machine oil (ISO Viscosity Grade 46)	Anaerobic adhesive (LOCTITE #262)
Tightening condition (lubrication)		
Tightening torque (N·m)	233	268
Initial clamping force (kN)	63.6	55.2

4 残存締付け力（軸力）推定法

4.1 陥没型初期ゆるみの進行とその回帰直線

工場での締付け作業の初期段階から顧客の現場への輸送まで、テストボルトの締付け力（軸力）低下傾向を測定した。ゆるみ傾向はテストボルトの中心に貼られたボルトゲージにより測定した。図7は締付けの約18分後から13時間後までの試験ボルトの締付け力（軸力）低下傾向を真数座標で示したものである。初期締付け力の約数%の比較的大きい締付け力減少が早い段階で観察されたが、それ以降締付け力はゆるやかな低下傾向である。締付けの約1時間後にテストフォークリフト

のトラックへの積み込み作業が行われ、振動波形が観察されている。トラックに積み客先まで搬送されている間にも同様に振動波形が観測されている。

図8は、これらの約13時間の波形を両対数座標（両対数紙）でプロットしたものである。トラック積載、運搬、および積下ろし作業の振動波形は中心値をプロットしている。これらの波形にはフォークリフトの実際の作業はほとんどなく、大半が陥没型のゆるみ現象を捉えていると考えられる。この観察結果は、図2および図3と同様に両対数紙上で良好な線形傾向を示している。

図8の結果は、次の回帰式で表すことができる。

$$\log r = a + b \times \log h \quad (1)$$

ここで、h: 作業時間 (hr)

r: (測定時残存締付け力)/(初期締付け力)

a, b: 定数

この式(1)を図8の結果に適用すると、嫌気性接着剤の締付けでは回帰式(2)が得られ、マシン油潤滑締付けでは回帰式(3)が得られる。これらの2つの回帰式は、陥没型ゆるみの回帰式となる。

$$1000 \times \log r = 1996 - 0.571 \times \log h \quad (2)$$

$$1000 \times \log r = 1989 - 9.137 \times \log h \quad (3)$$

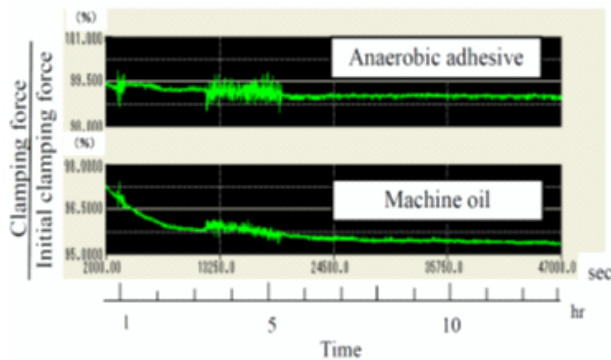


図7 陥没型のゆるみ (真数座標)

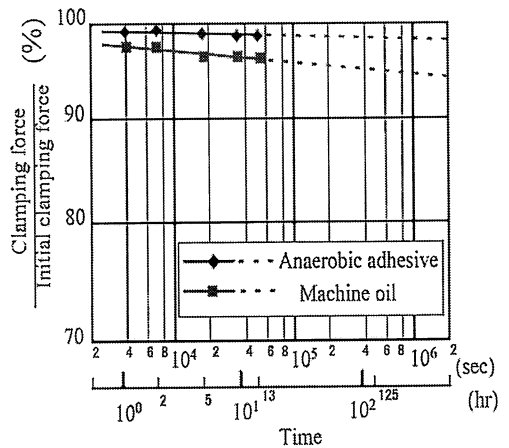


図8 陥没型のゆるみ (両対数座標)

(次号に続く)

ボルトゆるみに関する残存締付け力推定およびゆるみ寿命予測法* (後編)

晴山蒼一**, 真鍋健一***

HAREYAMA Soichi, MANABE Ken-ichi

本報は SAE Technical Paper (2017-01-0479) にて発表した著者らの論文「Residual Clamping Force Estimation and Lifetime Prediction to Loosening Failure of Bolted Joints」⁽¹⁾を邦文化し、一部割愛し補足説明を加えて解説するものである。特に本解説は、実機開発の中で工業的な有用性・実用性を考慮し、ねじ締結体の残存付け力(軸力)推定法およびゆるみ寿命予測法としてまとめることを念頭に置いた。

4.2 実動荷重型ゆるみ(動的)の波形観測とその回帰直線

図9は顧客現場での実機稼働時のボルトの締付け力(軸力)低下傾向(ゆるみ現象)を、4日間連続して観察した結果を真数座標で示している。顧客のオペレータはテスト用フォークリフトを自由に使用し、操作条件は特にオペレータに要請していない。したがって、締付け力(軸力)測定では、路面の傾斜、試験車両の停止姿勢、測定部材の温度、シリンダ内に残る内圧など、多くの要因の影響が含まれる。図は、ボルト締付けから実際の機械稼働終了までのボルトの締付け力低下傾向であり、午前(AM)と午後(PM)の実稼働時の観測データを示しており、経過時間も図に示している。最初の締付けから4日目朝の合計の経過時間は86.5時間である。上段の波形は嫌気性接着剤で締付けられた試験ボルト締付け力の実働作業波形であり、下は潤滑締付けのものである。縦軸は、初期の締付け力(軸力)の減少率として示している。両方の波形は、テストフォークリフトの実際の運転時のすべてのデータを示し、総実稼働時間は約15.5時間である。夜間の作業停止時のデータは省略している。

図10は、作業開始前および作業終了時の車両停止時における波形の概略の締付け力(軸力)比の変化を示している。オペレータがテストフォークリフトを自由に使用したため、締付け力は大きく変化している。図10の開始点は、試験開始前夜のテストフォークリフト停止姿勢における締付け力比(軸力比)である。他のプロット点は、朝と昼の車両運転開始前と作業終了時の軸力比を示す。試験前夜と4日目朝の最後のプロット点は、常温で平坦な路面で停止姿勢をとったときの0点であり、試験員により測定された締付け力(軸力)比を示す。

図10の波形を両対数紙にプロットすると、図11のようなグラフが得られる。路面と停止姿勢の影響で、いくつかの点は直線上にないように見えるが、ほとんどの点は回帰線上にあり、締付け力(軸力)低下傾向

* 原稿受付:

** 首都大学東京 理工学研究科 客員研究員, *** 首都大学東京 理工学研究科 客員教授

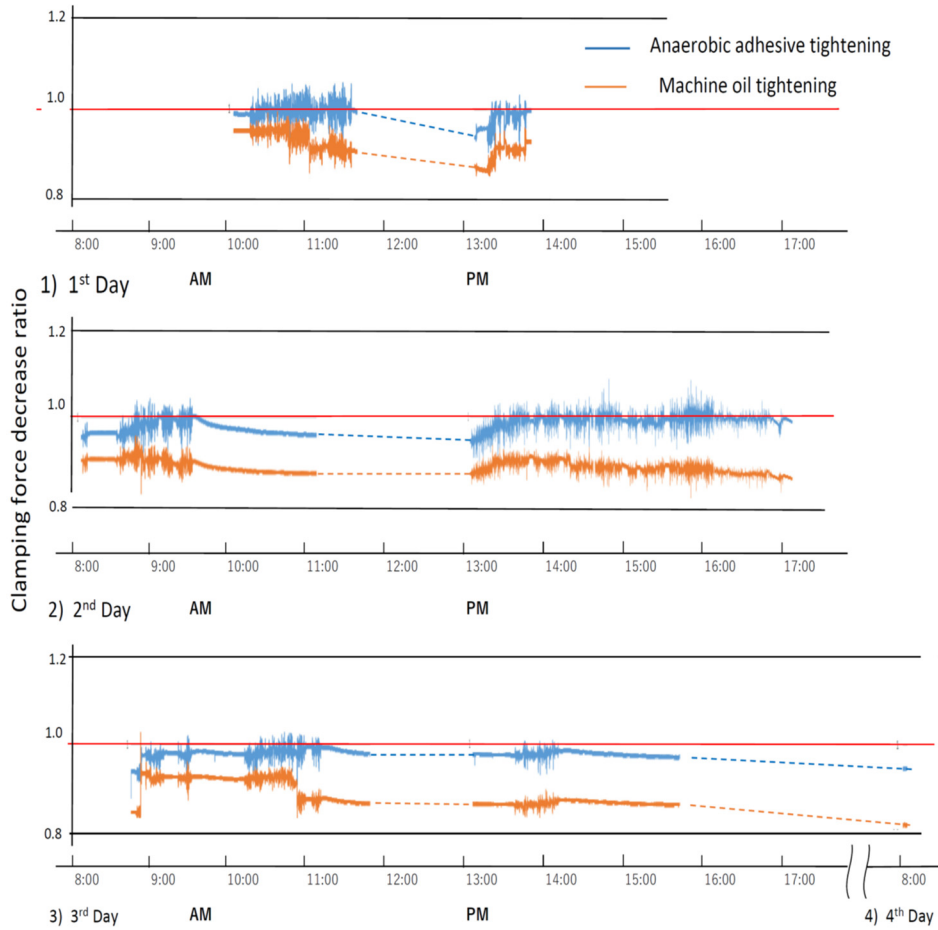


図9 実稼働時のゆるみの生波形（真数目盛）

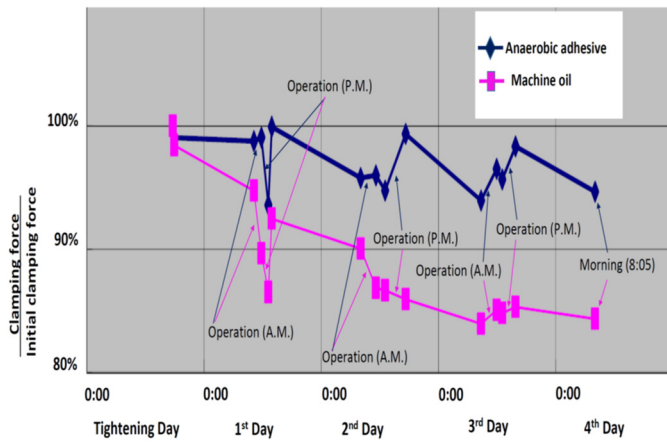


図10 実稼働時のゆるみの波形の概要（真数目盛）

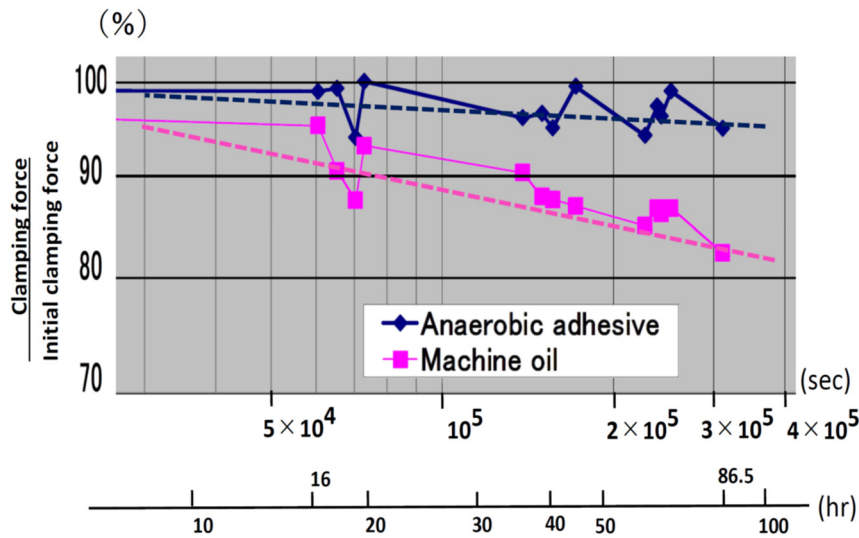


図1.1 実稼働時のゆるみの波形の概要 (両対数目盛)

はやはりよい線形にあると判断した。

以下の回帰式は、これらの実動荷重型のゆるみの関係を示している。

$$\log R = A + B \times \log H \quad (4)$$

ここで、

H: 作業時間 (hr)

R: (測定時残存締付け力)/(初期締付け力)

A, B: 定数

式(4)は、この例のように稼働時間を横軸で表したものである。自動車のように走行距離を横軸に用いる場合は式(5)が適用できる。建設機械のように横軸を操作回数とすると、式(6)となる。

$$\log R = A' + B' \times \log L \quad (5)$$

$$\log R = A'' + B'' \times \log N \quad (6)$$

ここで、

L: 走行距離(Km)

N: 作業回数 (Cycle)

A', B', A'', B'': 定数

図1.1の回帰係数を式(4)により求めると、嫌気性接着剤締付けの式(7)と潤滑締付けの式(8)は以下ようになる。

$$1000 \times \log R = 1992 - 8.135 \times \log H \quad (7)$$

$$1000 \times \log R = 1980 - 27.72 \times \log H \quad (8)$$

4. 3 残存締付け力推定

このような回帰式は、ゆるみ止め装置（部品）／方法の残存締付け力（軸力）の推定に使用できる。表2に推定のための試算条件を示す。試験車両は大型のフォークリフトであるため、標準よりも長いサイクルタイムを設定している。表3には、1ヶ月後、1年後、5年後、および10年後の残存締付け力（軸力）の推定値を示す。操作回数Nと経過時間Hの換算率は、 $H = N / 30$ である。式（7）および式（8）にこの換算率を代入することによって、残存締付け力（軸力）が作業時間の関数として得られる。

式（7）および式（8）による残存締付け力の計算結果を表3に示す。締付け力は、潤滑剤の締付けでは1年後で約78%になる。10年経過後には残存締付け力は73%で維持されていると推定される。一方、嫌気性接着剤での締付けでは残存締付け力は、1年間後に約92%程度で維持され、10年間後で約91%程度に維持されると推定される。表3にはまた、式（2）および（3）を用いた陥没型ゆるみにおける残存締付け力の推定値を併せて示す。残存締付け力推定結果を図12に示す。陥没型ゆるみは図7に示したように、早い段階（10時間程度）でサチュレートしているが図12に示すように長時間にわたってはわずかに進行しているとみられる。いずれにしても陥没型ゆるみは実稼働型ゆるみに対しかなり小さい。

ここで、式（9）は表3の試算条件から求めた稼働時間率 w である。

$$w = (\text{作業時間}) / (\text{経過時間}) = 1,800 / (365 \times 24) = 0.205 \quad (9)$$

実稼働時間率 w' は、最初の締付けから4日目朝までの経過時間は86.5時間であり、総実稼働時間が約15.5時間であったことから以下のようなになる。

$$w' = 0.179 (15.5 \text{hr} / 86.5 \text{hr}) \quad (10)$$

表2 残存締付け力（軸力）の推定の試算条件

Prediction Condition Items	Prediction Condition(Time)	Prediction Condition(Number)
Cycle Time of 1 Operation	120(Sec)	120(Sec)
Operation Times / Day	6 (Hour)	6 (Hour)
Operation Days / Month	25 (Days)	25 (Days)
Operations / Month	150 (Hour)	4, 500 (Cycle)
Operations / 1 Year	1, 800 (Hour)	54, 000 (Cycle)
Operations / 5 Years	9, 000 (Hour)	270, 000 (Cycle)
Operations / 10 Years	18, 000 (Hour)	540, 000 (Cycle)

表3 残存締付け力（軸力）の推定値

Estimation Interval	Operations time (hour)	Working Load Type		Depression Type	
		Residual Clamping Force R(%)		Residual Clamping Force R(%)	
		Machine oil	Anaerobic adhesive	Machine oil	Anaerobic adhesive
1 Month	150	83.1	94.2	93.1	98.7
1 Year	1, 800	77.6	92.4	91.0	98.6
5 Year	9, 000	74.2	91.2	89.7	98.5
10 Year	18, 000	72.8	90.7	89.1	98.4

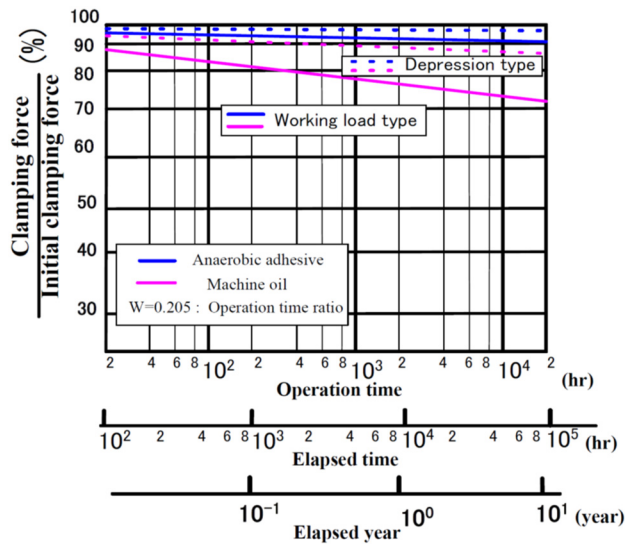


図 1.2 残存締付け力推定結果 (両対数目盛)

4. 4 ゆるみ寿命推定

図9では、上述したように、衝撃的な締付け力の減少および増加が部分的に観察されている。ここでは、簡易ゆるみ寿命推定方法を図1.2に示した両対数紙上での回帰直線の比例関係から求める。比例関係に用いた観測時間と締付け力(軸力)比のデータを表4に示す。表中のデータを用いて、式(1.3)によりゆるみ寿命推定値を求める。表5は、残存締付け力(軸力)に対するその時点のゆるみ寿命推定値を求めたものである。ゆるみ寿命は正味の寿命値に加え、式(1.0)による実稼働時間率 $w' = 0.179$ を考慮した経過時間及び経過年数で求めたゆるみ寿命を併せて示した。

表4 観測時間と締付け力(軸力)比のデータ

Event	Time (hr)	Item	Anaerobic adhesive	Machine oil
Initial tightening time T_0	0	Clamping force (kN)	55.16	63.56
		Residual clamping force (%)	100	100
		Clamping force decrease (%)	0	0
Observation start time T_1	0.3	Clamping force (kN)	54.64	62.57
		Residual clamping force R_1 (%)	99.06	98.44
		Clamping force decrease (%)	0.94	1.56
Observation finish time T_t	86.5	Clamping force (kN)	52.22	53.63
		Residual clamping force R_t (%)	94.67	84.38
		Clamping force decrease (%)	5.33	15.62

$$\log T'_p = \frac{\log T_t - \log T_1}{\log R_t - \log R_1} (\log R_p - \log R_1) + \log T_1 \quad (13)$$

ここで、

T'_p : ゆるみ寿命推定値

R_p : 残存締付け力 (軸力) 比 (%)

表5 残存締付け力 (軸力) に対するその時点のゆるみ寿命推定値

Tightening Method		Anaerobic Adhesive					Machine Oil				
Residual Clamping Force Ratio (%)	Lost Clamping Force Ratio (%)	$\log(R_p)$	$\log(T_p)$	T_p (hr)	Elapsed Time (hr)	Elapsed Year (Year)	$\log(R_p)$	$\log(T_p)$	T_p (hr)	Elapsed Time (hr)	Elapsed Year (Year)
95	5	1.978	1.748	56.02	313.0	0.04	1.978	0.045	1.11	6.19	0.00
90	10	1.954	4.682	48138.78	268931.7	30.70	1.954	0.908	8.09	45.18	0.01
85	15	1.929	7.784	6.09E+07	3.40E+08	38816.7	1.929	1.820	66.08	369.18	0.04
80	20	1.903	11.074	1.19E+11	6.63E+11	7.57E+07	1.903	2.788	613.38	3426.70	3.91E-01
75	25	1.875	14.577	3.77E+14	2.11E+15	2.41E+11	1.875	3.818	6574	36727	4.19E+00
70	30	1.845	18.321	2.09E+18	1.17E+19	1.34E+15	1.845	4.919	82996	463663	5.29E+01

5 考察 (ゆるみの評価基準)

本研究では、両対数紙上でゆるみ傾向すなわち締付け力 (軸力) の低下傾向と経過時間がよい線形関係にあることを利用し、製品開発初期の短期間のゆるみ傾向の測定結果からある期間経過後の残存締付け力 (軸力) の推定およびゆるみ寿命予測値を求める方法を示した。本研究では残存締付け力 (軸力) レベルを90%~60%で試算したが、実機でゆるみが発生しないと判断できる残存締付け力 (軸力) はどのように設定すべきなのかも今後の重要課題である。

図14に示すように、各種ゆるみ止めの効果は、事例[21]でも評価されている。このような試験結果では、縦軸に残存締付け力 (軸力) を用いることが多い。これらの結果を整理するとゆるみ現象 (軸力低下) は、図15に示すように初期ゆるみ、漸減ゆるみ (領域I) および破局的なゆるみ (領域II) に分けることができそうである。実機で使用できる範囲は漸減ゆるみ領域までで、決して破局的なゆるみ領域への遷移点を越えてはならないと考えられる。

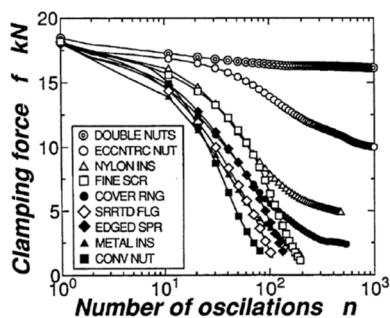


図14 各種ゆるみ止めのゆるみ試験機による試験結果[21]

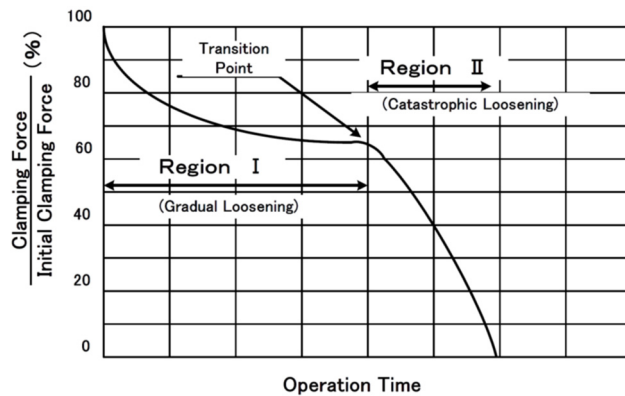


図1.5 ゆるみ現象（軸力低下）の模式化

6 まとめ

ゆるみ止め（部品）／方法の性能評価では、絶対的な評価が不可欠である。本稿では、このような観点から研究と検証を行った。本研究で得られた主な知見は以下の通りである。

- (1) 本論文では、実機稼働時におけるボルト締結部の絶対的なゆるみ止め効果を推定する方法を提案する。
- (2) ねじ／ボルトのゆるみ現象は、陥没型（静的）と実動荷重型のゆるみ（動的）に分けられる。
- (3) ゆるみ現象はボルト締結部の初期締付け力や残存締付け力の低下傾向で把握される。
- (4) ゆるみ現象は両対数座標（両対数紙）上で残存締付け力（測定時締付け力／初期締付け力）と締付け後の作業回数（または作業時間または走行距離）との間で良好な線形関係にある。
- (5) この関係と製品開発の初期段階のゆるみ傾向の観察から、締付け力の挙動を測定することにより、長時間稼働後の残存締付け力とゆるみ寿命を回帰式により推定できる。

最後になりますが、参照した著者らの研究で貴重な実験データを提供いただいたユニキャリア（株）殿、軸直角振動ゆるみ試験機でのゆるみ試験にご協力いただいたハードロック工業（株）殿およびその実験データを提供いただいた日立建機（株）殿には、この場をお借りして御礼申し上げます。また多くの研究者やエンジニアによる高度な研究成果から大きな示唆を得ました。彼らの先駆的な研究に感謝します。

参考資料

1. Hareyama, S. and Kodama, S., "A Study on Confidence Limit for Two Independent Probability Variables in Engineering Problems (Applications to Limit of Transmitted Torque in Disk Clutch and Bolt Axial Tension Control)," JSME International Journal (Series III), 1990, Vol.33, No.2, pp.256-262.
2. Hareyama, S., Manabe, K. and Nakashima, M., "Improving Tightening Reliability on Bolted Joints for Calibrated Wrench Method (An Analysis on Optimum Tightening Torque by Confidence Limit Ellipse),"

- Proceedings of ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress & Exposition, 2013, Vol. 2B: Advanced Manufacturing, IMECE2013-63387, 12 pages.
3. Hareyama, S. and Manabe, K., "Advantage of Elliptical Confidence Limit Method for Bolted Joint Tightening Reliability," Proceedings of ASME, IMECE2015-50729, 2015, 10 pages.
 4. Hareyama, S., Manabe, K., Shimodaira, T., Naganawa, T., "Experimental Study to Verify Elliptical Confidence Limit Method for Bolted Joint Tightening," Proceedings of the ASME IMECE2016-66336, 2016, 9 pages.
 5. Kumar, R., "Fatigue Life Estimation for Inters in Class 1 Component," ASME Journal of Pressure Vessel Technology, February 1998, Vol. 120, 81-85, 1998.
 6. Ellis, F.V., Sielski, D.R., Viswanathan, R., "An Improved Analytical Method for Life Prediction of Bolting," ASME Journal of Pressure Vessel Technology, February 2001, Vol. 123, 71-74, 2001.
 7. Hareyama, S., Manabe, K., Shimodaira, T. and Hoshi, A., "Working Load Analysis and Strength Estimation for Bolted Joints during Actual Machine Operation," Proceedings of ASME, IMECE2014-39193, 2014, 10 pages.
 8. Junker, G. H., Williams, D. A., "Rules for design and calculation of high-duty bolted joints (PART ONE: BASIC DESIGN)," Sub Assembly, 1973, Vol.11. No.3, pp.22-24.
 9. Junker, G. H., "New Criteria for Self-Loosening of Fasteners Under Vibration," SAE Transactions, 1969, No.690055, pp.314-335.
 10. Clark, S.K., Jerald, J.K., 1966, "Vibratory Loosening of Bolts", SAE Transactions, No.660432, pp.1-10.
 11. Hongo, K., "Loosening and Locking Devices of Bolt-Nut Units (in Japanese)," Science of Machine, Vol.14, No.1(1962), pp.231-238.
 12. JFRI Committee for Research of Bolt Tightening, 1980, "A Research for Tightening Characteristics of High Strength Bolts (Report III) (in Japanese)," The Japan Research Institute for Screw Thread and Fasteners(JFRI), pp.56.
 13. Yamamoto, A., "Loosening of Bolted-Joints (in Japanese)," Fastening & Joining, No.2, pp.1-5, 1972.
 14. Hareyama, S., Hamada, H., Ishimaru, G., "Self Loosening and Strength Estimation of Bolted Joint under Machine Operation (1st Report, Absolute Estimation on the Self Loosening) (in Japanese)," Transaction of JSME (Series C), Vol.54, No.503, 1988, pp.1559-1563.
 15. Hareyama, S., Takada, R., Shimodaira, T., Tamura, K., Hoshi, A., Nakashima, M., "A Proposal for the Absolute Estimation Method on Self-loosening of Bolted Joints during OFF-road Vehicle Operation", International Journal of Automotive Engineering, Vol.3, No.1, pp.47-53, 2012.

16. Hareyama, S., Manabe, K., Nakashima, M., "The Absolute Evaluation and Loosening Life Prediction Method on Self-Loosening of Bolted Joints during Actual Machine Operation," ASME IMECE2012-86415 ,2012.
17. Nassar, S., Matin, P. H., "Clamp Load Loss due to Fastener Elongation Beyond its Elastic Limit," ASME Journal of Pressure Vessel Technology, August 2006, Vol. 128, 379-387, 2006.
18. Nassar, S., Alkelani, A. A., "Clamp Load Loss due to Elastic Interaction and Gasket Creep Relaxation in Bolted Joints," ASME Journal of Pressure Vessel Technology, August 2006, Vol. 128, 395-401, 2006.
19. Nassar, S., Ganganala, M., "Effect of Separating Load Eccentricity on the Clamp Load Loss in a Bolted Joint Using a Strain Hardening Model," ASME Journal of Pressure Vessel Technology, April 2011, Vol. 133/021206, 1-8, 2011.
20. Nassar, S., Matin, P. H., "Cumulative Clamp Load Loss Due to a Fully Reversed Cyclic Service Load Acting on an Initially Yielded Bolted Joint System," ASME Journal of Mechanical Design, April 2007, Vol. 129: 421-433, 2007.
21. Yamamoto, A., "Loosening of Bolted-Joints and evaluation of locking effect for many kinds of locking devices (2) (in Japanese) ", Fastening & Technology, Vol.10, No.6, pp.23-33, 1969.
22. Kasei, S., "Loosening and Locking Technology of Bolted-Joints (in Japanese) ", Science of Machine, Vol.37, No.8, pp.21-26, 1985.
23. Nassar, S., Housari, B. A., " Effect of Thread Pitch and Initial Tension on the Self-Loosening of Threaded Fasteners," ASME Journal of Pressure Vessel Technology, November 2006, Vol. 128, 591-598, 2006.
24. Yang, X, Nassar, S., Wu, Z. and Meng, A., "Nonlinear Behavior of Preloaded Bolted Joints Under a Cyclic Separating Load," ASME Journal of Pressure Vessel Technology, February 2012, Vol. 134/011206, 1-9, 2012.
25. Jianghui, M. and Nassar, S., "Assessment of Different Joining Techniques for Dissimilar Materials", SAE Technical Paper, 2014-01-0790, 2014, doi:[10.4271/2014-01-0790](https://doi.org/10.4271/2014-01-0790).
26. Kumakura, S., Hosokawa, S. and Sawa, T., "Bolt Load Reduction of Bolted Joints under External Axial Load", ASME PVP (Pressure Vessels and Piping), No.367, pp.103-108, 1998.
27. Sase, N., Koga, S., Nishimura, K. and Fujii, H., "Evaluation of Anti-Loosening Nuts for Screw Fastener", Journal of Material Processing Technology, 56.1/4, pp321-332, 1996.
28. Zhao, Y., Lee, C., Che, X. and Yee, C., "Prediction of Stabilizer Bar Retention Bracket Bolt Looseness", ASME PVP (Pressure Vessels and Piping), PVP-Vol.382, pp.161-167, 1999.

(完)