

技術寄稿（第3回）

「ねじ締結体のゆるみ寿命推定法

・残存軸力予測法」

（後編：実証試験による

基本的な考え方の確認）

◇寄稿者

東京都立大学 システムデザイン学部

システムデザイン学科 客員研究員

工学博士 晴山 蒼一 氏

技術寄稿「ねじ締結体のゆるみ寿命推定法・残存軸力予測法」 (後編：実証試験による基本的な考え方の確認)

東京都立大学
晴山 蒼一

本稿は技術寄稿「ねじ締結体のゆるみ寿命推定法・残存軸力予測法」(前編：基本的な考え方)⁽¹⁾に続き、実証試験により基本的な考え方の確認を行った結果をまとめたものです。内容については、日本機械学会論文集⁽²⁾、日本ねじ研究協会誌⁽³⁾およびSAE Technical Paper^(4,5)に掲載された小生のゆるみに関する論文に加筆修正し解説するものです。

1 ゆるみ現象観測の内容

本報では大型フォークリフトでの静的ゆるみ現象および実機稼働時の動的ゆるみ現象の観測結果から、前編で示した基本的な考え方が実機でのボルトのゆるみ現象に適用できるのかを検証する。

1.1 試験車両および初期締付け条件

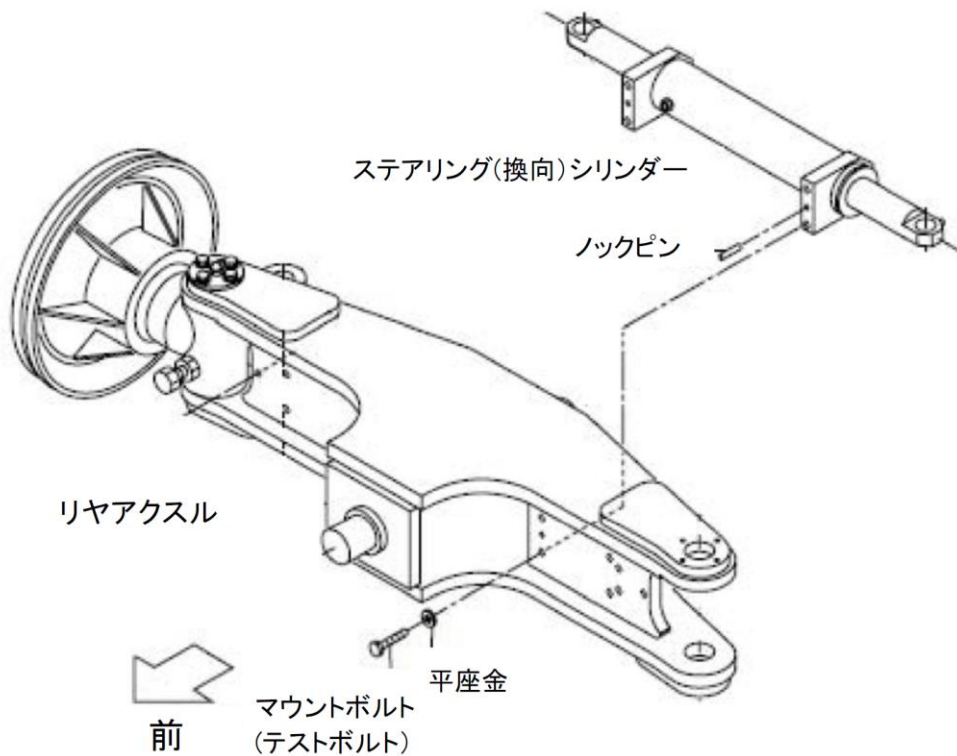
図1は、客先の現場でゆるみ測定を行う産業車両(積載能力16トンの大型フォークリフト)を示す。フォークリフトには、ステアリング(換向)用シリンダが装着されており、マウントボルトでリヤアクスルに固定され稼働時に繰返し外力を受ける。2本のマウントボルトでゆるみ傾向(締付け力低下)の計測を行った。1本はマシン油潤滑でもう1本は嫌気性接着剤(Loctite 262)を用いて締結した。本研究では締付け時の潤滑剤の違いによるゆるみ止め効果も検証する。表1に示す所定の締付けトルクで締付ける。表には、締付け条件と初期締付け力(軸力)も併せて示している。図2にテストボルトの締結状態とその仕様を示す。テストボルトは前述のとおり、図中の模式図に示すような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。ロック(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。本報では、まず試験ボルトの締付け力(軸力)低下傾向(ゆるみ挙動)を観測し整理する。試験車両を客先の鉄鋼ヤードに持ち込み、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内圧が残り、停車位置も平坦でなかったりして正しく零点が取れていない。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)およびその低下量を計測した。



図1 現場でのゆるみ測定を行う大型フォークリフト

表1 締付け条件（締付けトルクと初期締付け力）

締付け方法	計測方法	
	マシン油 (ISO 粘度区分 VG 46)	嫌気性接着剤 (LOCTITE#262)
締付け条件 (潤滑剤)		
締付けトルク (N・m)	233	268
初期軸力 (kN)	63.6	55.2



ボルト：M16(細目)、長さ：50mm、強度区分：8. 8

ひずみゲージ：BTM-6C

(東京測器研究所製)

図2 テストボルトの締結状態とその仕様

1.2 陥没型（静的）ゆるみ現象における軸力低下傾向

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、テストボルトの軸力(締付け力)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計測した。図3は締付けの約18分後から13時間後までの試験ボルトの軸力（締付け力）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測されたが、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。トラックに積まれ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4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。この観測結果は、前編で示した両対数紙での波形のプロット結果と同様に両対数紙上で良好な線形傾向を示している。

図4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4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。

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

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

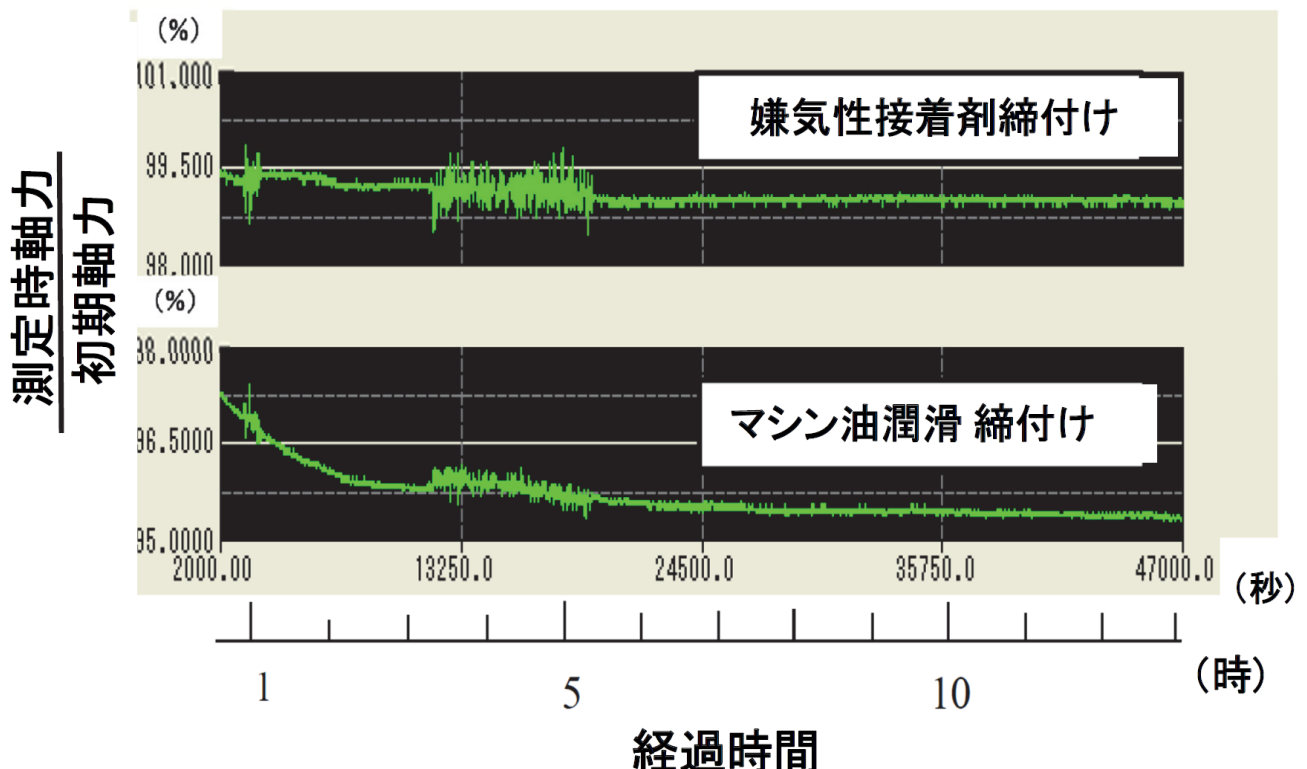


図3 陥没型のゆるみ（真数座標）

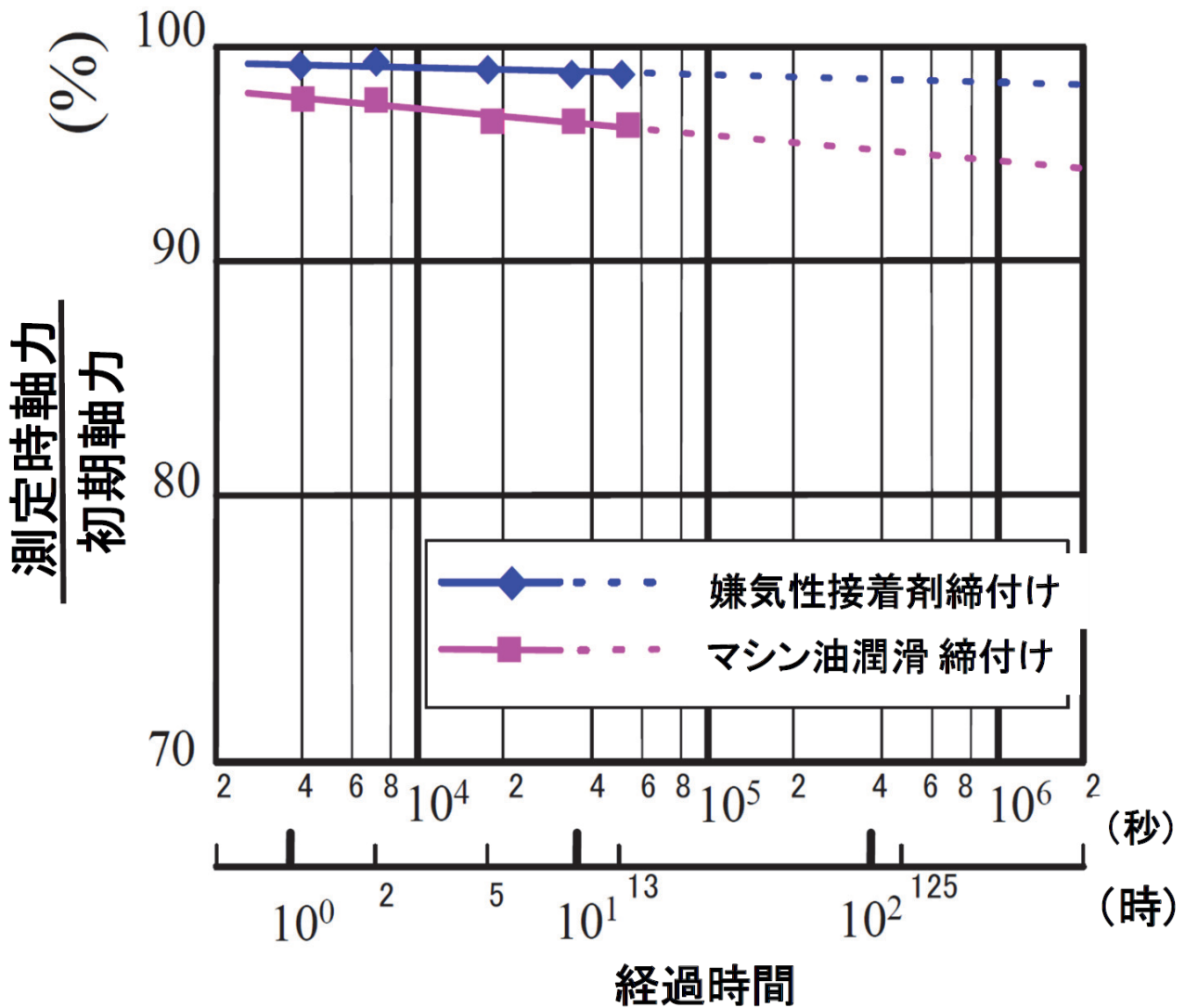


図4 陥没型のゆるみ (両対数座標)

1.3 実働荷重型 (動的) ゆるみ現象における軸力低下傾向

図5は顧客現場での実機稼働時のボルトの軸力 (締付け力) 低下傾向 (ゆるみ現象) を、4日間連続して観測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、軸力 (締付け力) 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、換向操作により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軸力低下傾向であり、縦軸は初期軸力低下率 (測定時軸力 / 初期軸力) 午前と午後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の締付け力 (軸力) の実働作業波形であり、下はマシン油潤滑締付けのものである。縦軸は、初期の軸力 (締付け力) 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6は図5のゆるみ現象観測結果の一部である。初日の稼働開始から1時間程度経過時の観測波形である。上の線図はゆるみ止め方法の一つである嫌気性接着剤を用いて締結したボルトに衝撃荷重が加わったときのボルトの軸力変化を示したもので、一瞬軸力は低下するが瞬時に軸力は元に戻っており、ゆるみ止め効果が

観測できている。一方、下の線図はマシン油潤滑で締結したボルトの軸力変化であり、衝撃荷重により軸力は瞬間的に減少し元に戻らず軸力減少（ゆるみ）が発生している。この軸力減少が蓄積しボルトのゆるみになると考えられる。

図 7 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軸力（締付け力）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 8 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軸力比（締付け力比）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 日目の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零点であり、試験員により測定された締付け力（軸力）比を示す。

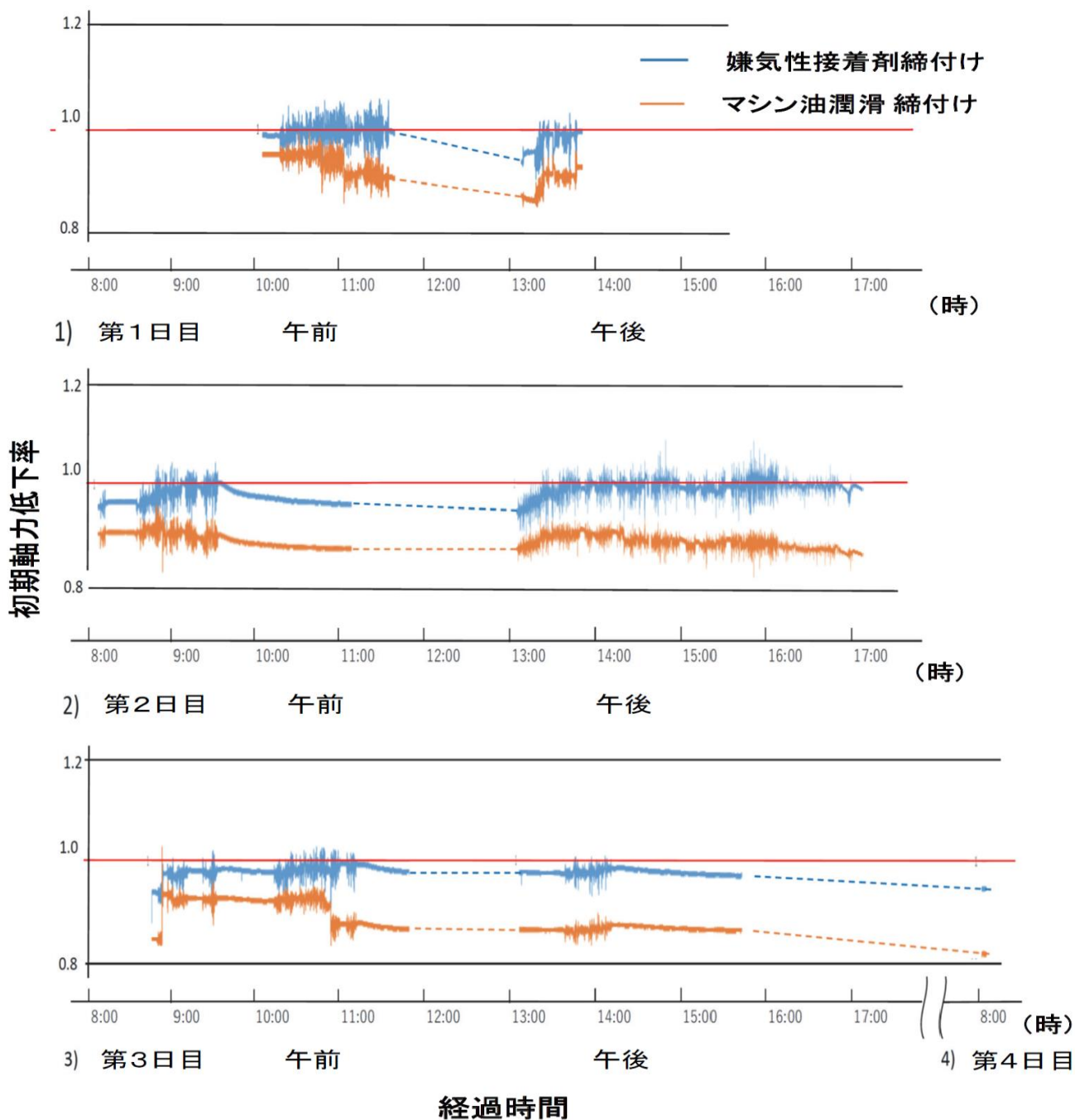


図 5 実稼働時のゆるみの生波形（真数目盛）

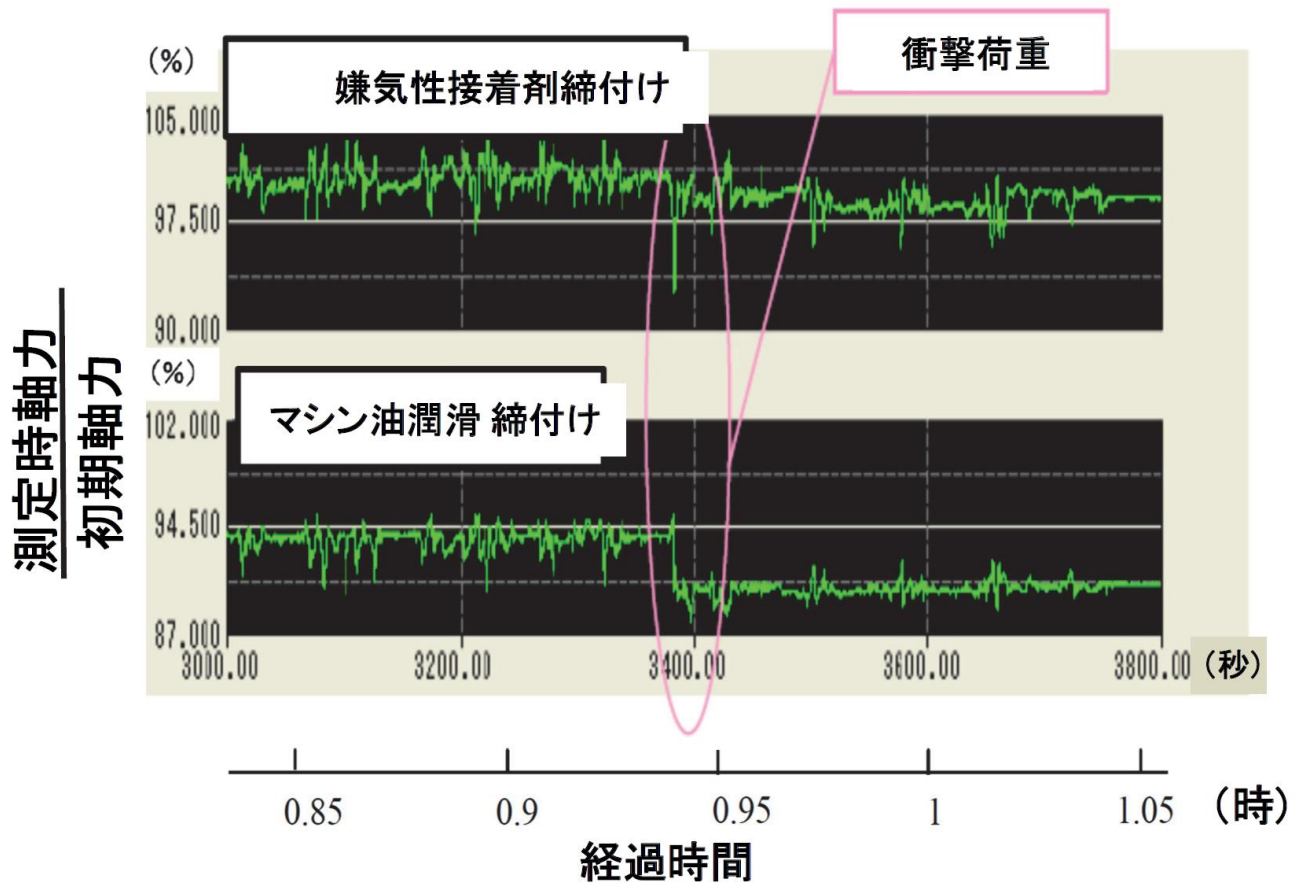


図6 衝撃波形の観測結果

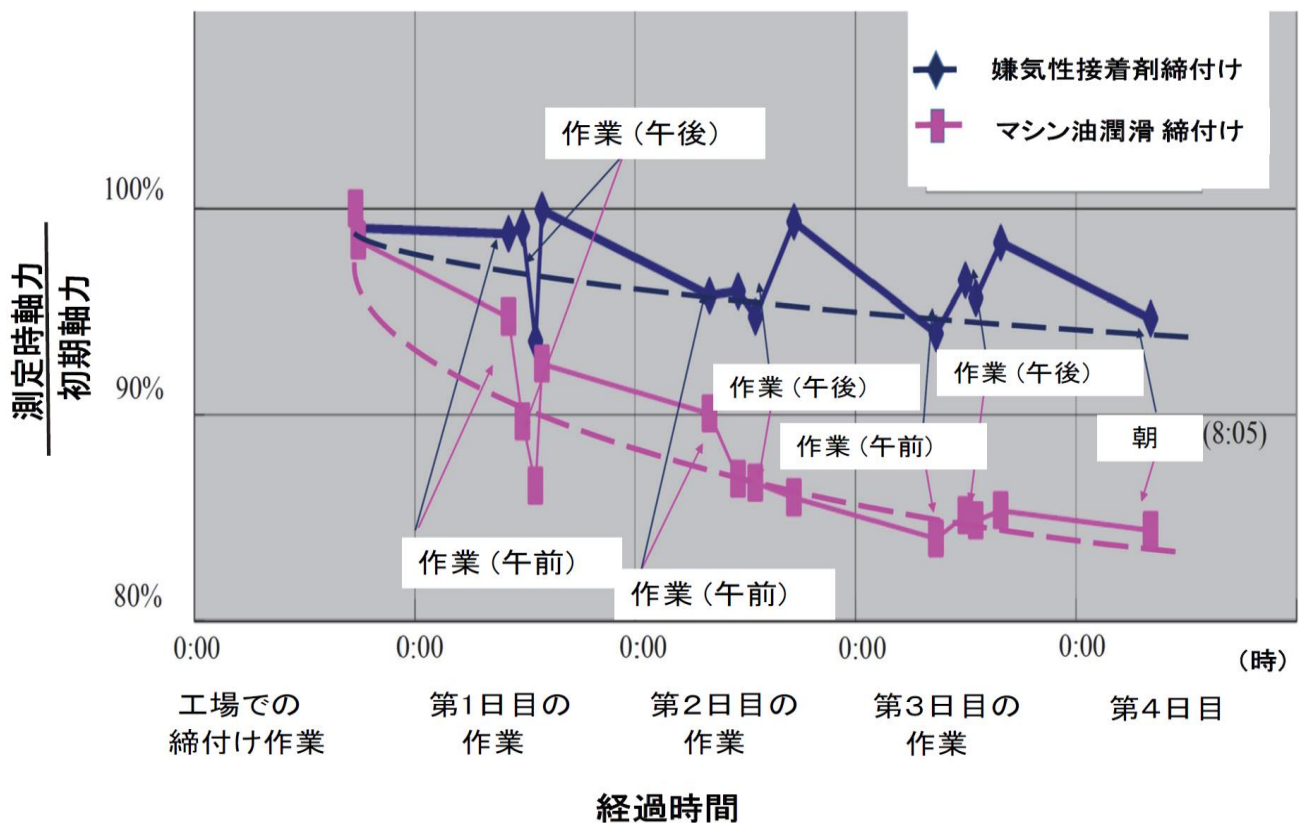


図7 実稼働時のゆるみの波形の概要 (真数目盛)

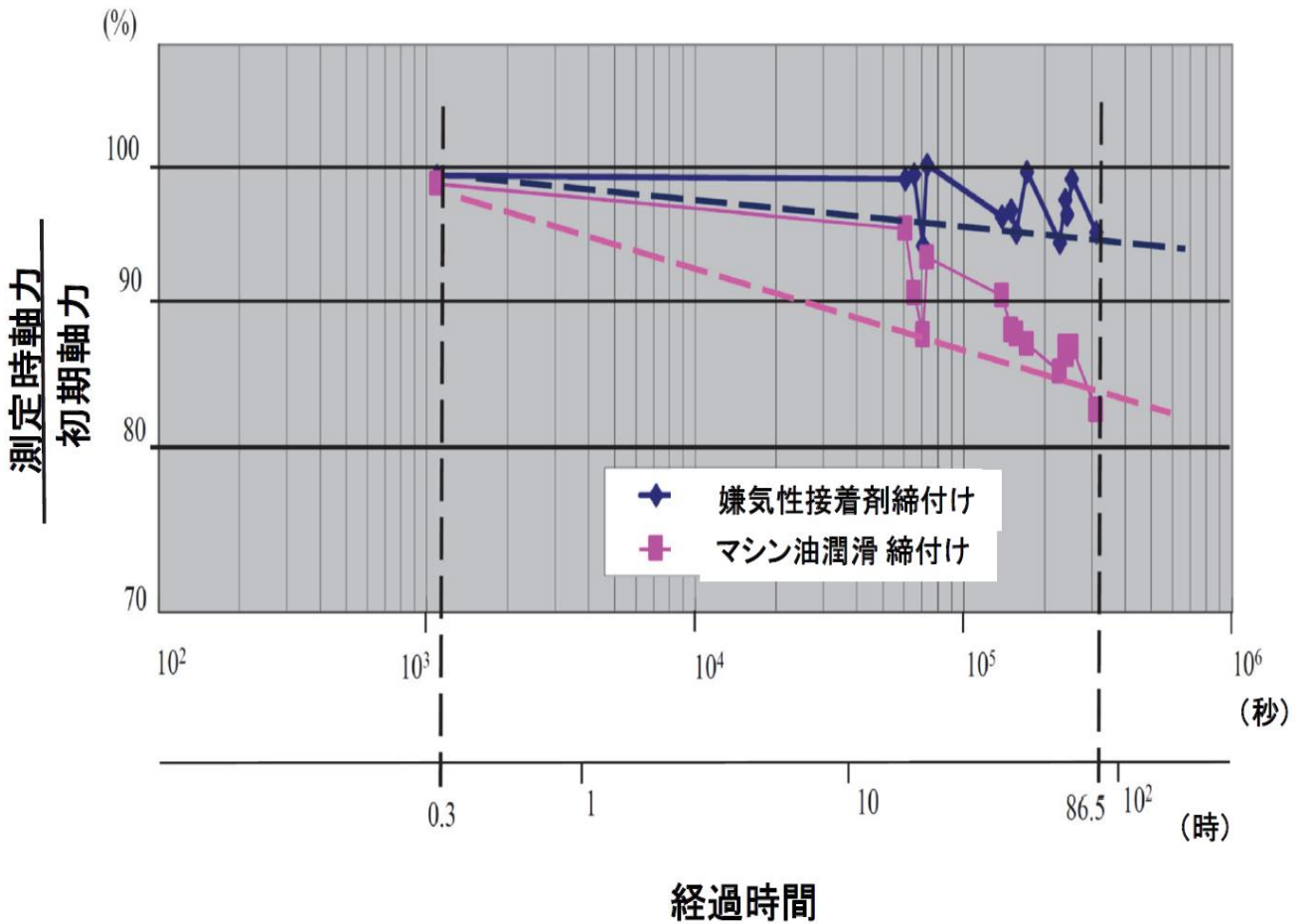


図8 実稼働時のゆるみの波形の概要（両対数目盛）

図7の波形を両対数紙にプロットすると、図8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、回帰直線の下側に来る観測点はなく、軸力（締付け力）低下傾向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 (時)

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。作業回数を指標とする機械の場合には横軸を作業回数とすると、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8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)は以下のようになる。

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

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

2 残存軸力の予測

本章では、陥没型ゆるみ現象における残存軸力予測および実働荷重型ゆるみ現象における残存軸力予測についてまとめて整理した結果を示す。

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年後の残存軸力（締付け力）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。軸力（締付け力）は、マシン油潤滑の締付けでは1年後で約78%になる。10年経過後には残存軸力は約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軸力は、1年後に約92%程度で維持され、10年経過後でも約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軸力の推定値を併せて示す。残存軸力推定結果を図9に示す。図には前編で示したねじ締結ガイドブックのゆるみの判断基準についても併せて示す。陥没型ゆるみは図4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8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。

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。

$$w = (\text{稼働時間}) / (\text{経過時間}) = 1,800 / (365 \text{ 日} \times 24\text{hr}) = 0.205 \quad (9)$$

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 残存軸力（締付け力）の推定の試算条件

前提条件	稼働時間 (H)	操作回数 (N)
1回当たりの操作秒数	120(秒)	1(回)
1日当たりの操作時間	6(時間)	180(回)
1ヶ月当たりの操作日数	25(日)	4,500(回)
推定条件	稼働時間 : H	操作回数 : N
1ヶ月後の推定試算	150(時間)	4,500(回)
1年後の推定試算	1,800(時間)	54,000(回)
5年後の推定試算	9,000(時間)	270,000(回)
10年後の推定試算	18,000(時間)	540,000(回)

表3 残存軸力（締付け力）の推定値

推定期間	稼働時間 (時間)	実働荷重型（動的）		陥没型（静的）	
		残存軸力率（%）		残存軸力率（%）	
		マシン油	嫌気性接着剤	マシン油	嫌気性接着剤
1ヶ月後	150	83.1	94.2	93.1	98.7
1年後	1,800	77.6	92.4	91.0	98.6
5年後	9,000	74.2	91.2	89.7	98.5
10年後	18,000	72.8	90.7	89.1	98.4

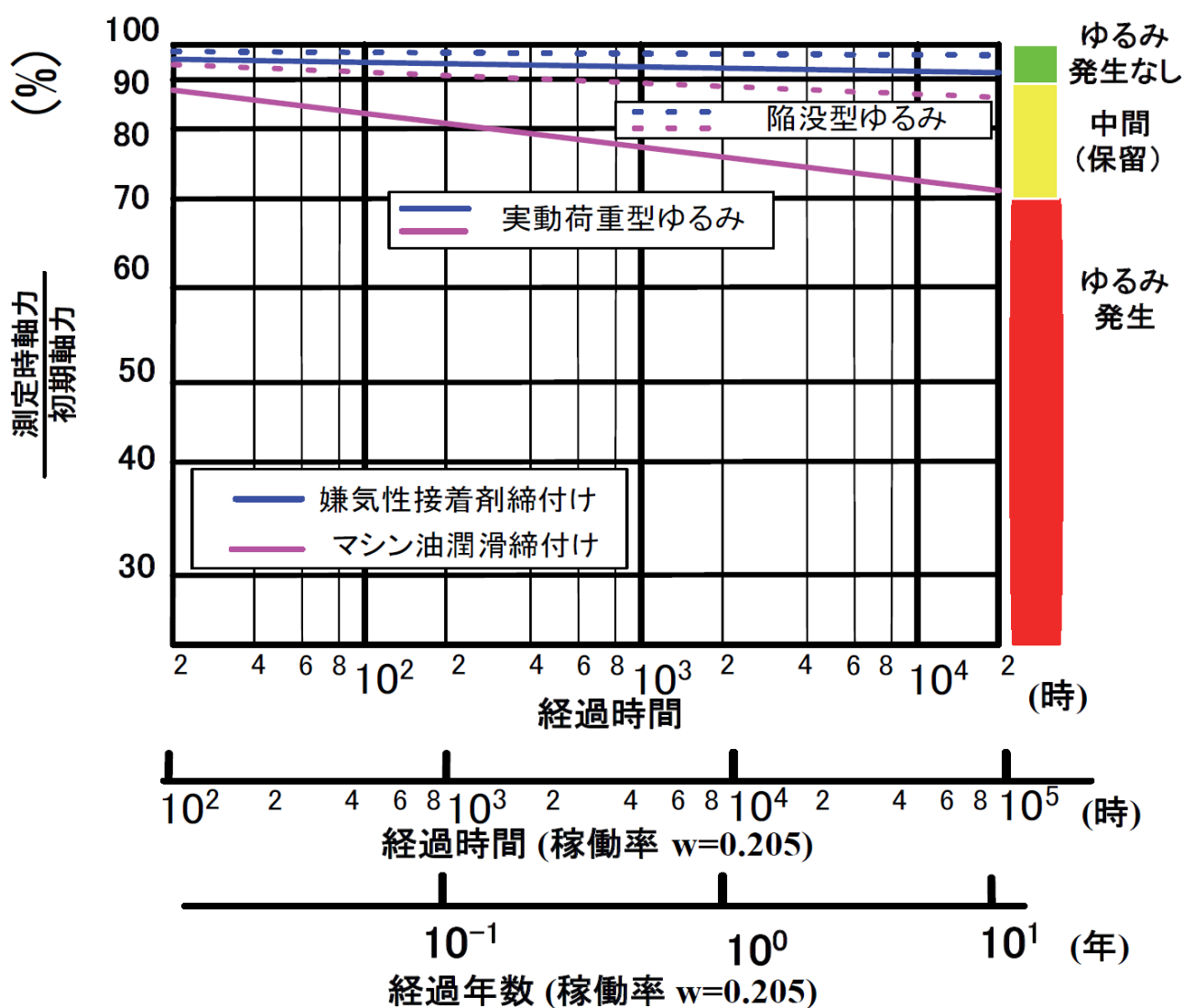


図9 残存軸力（締付け力）推定結果（両対数目盛）

4 ゆるみ破損に対するゆるみ寿命推定

比例関係に用いた観測時間と軸力（締付け力）比のデータを表4に示す。表中のデータを用いて、式(11)によりゆるみ寿命推定値を求める。表5は、残存軸力に対するその時点のゆるみ寿命推定値を本式により求めたものである。ゆるみ寿命は正味の寿命値に加え、式(9)による稼働時間率 $w=0.205$ 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。

図10は表5で求めた寿命推定値をグラフとして示したものである。図の右側の座標は上述の経過年数である。

表4 観測時間と締付け力（軸力）比のデータ

イベント	経過時間（時）	項目	嫌気性接着剤	マシン油
初期軸力 T_0	0	軸力（kN）	55.2	63.6
		残留軸力率(%)	100	100
		損失軸力率(%)	0	0
観測開始時間 T_1	0.3(18分)	軸力（kN）	54.6	62.6
		残留軸力率 R_1 (%)	99.1	98.4
		損失軸力率(%)	0.94	1.56
観測終了時間 T_t	86.5(3.6日)	軸力（kN）	52.2	53.6
		残留軸力率 R_t (%)	94.7	84.4
		損失軸力率(%)	5.33	15.62

$$\log T'_p = \frac{\log T_t - \log T_1}{\log R_t - \log R_1} (\log R_p - \log R_1) + \log T_1 \quad (11)$$

ここで、

T'_p : ゆるみ寿命推定値

R_p : 残存軸力（締付け力）比（%）

表5 残存軸力（締付け力）に対するその時点のゆるみ寿命推定値

締付け方法	嫌気性接着剤					マシン油				
	$\log(R_p)$	$\log(T'_p)$	T'_p (時)	経過時間 (時)	経過時間 (年)	$\log(R_p)$	$\log(T'_p)$	T'_p (時)	経過時間 (時)	経過時間 (年)
95	1.978	1.748	56.02	3130	0.04	1.978	0.045	1.11	6.19	0.00
90	1.954	4.682	48138.78	268931.7	30.70	1.954	0.908	8.09	45.18	0.01
85	1.929	7.784	6.09E+07	3.40E+08	38816.7	1.929	1.820	66.08	369.18	0.04
80	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	1.875	14.577	3.77E+14	2.11E+15	2.41E+11	1.875	3.818	6574	36727	4.19E+00
70	1.845	18.321	2.09E+18	1.17E+19	1.34E+15	1.845	4.919	82996	463663	5.29E+01

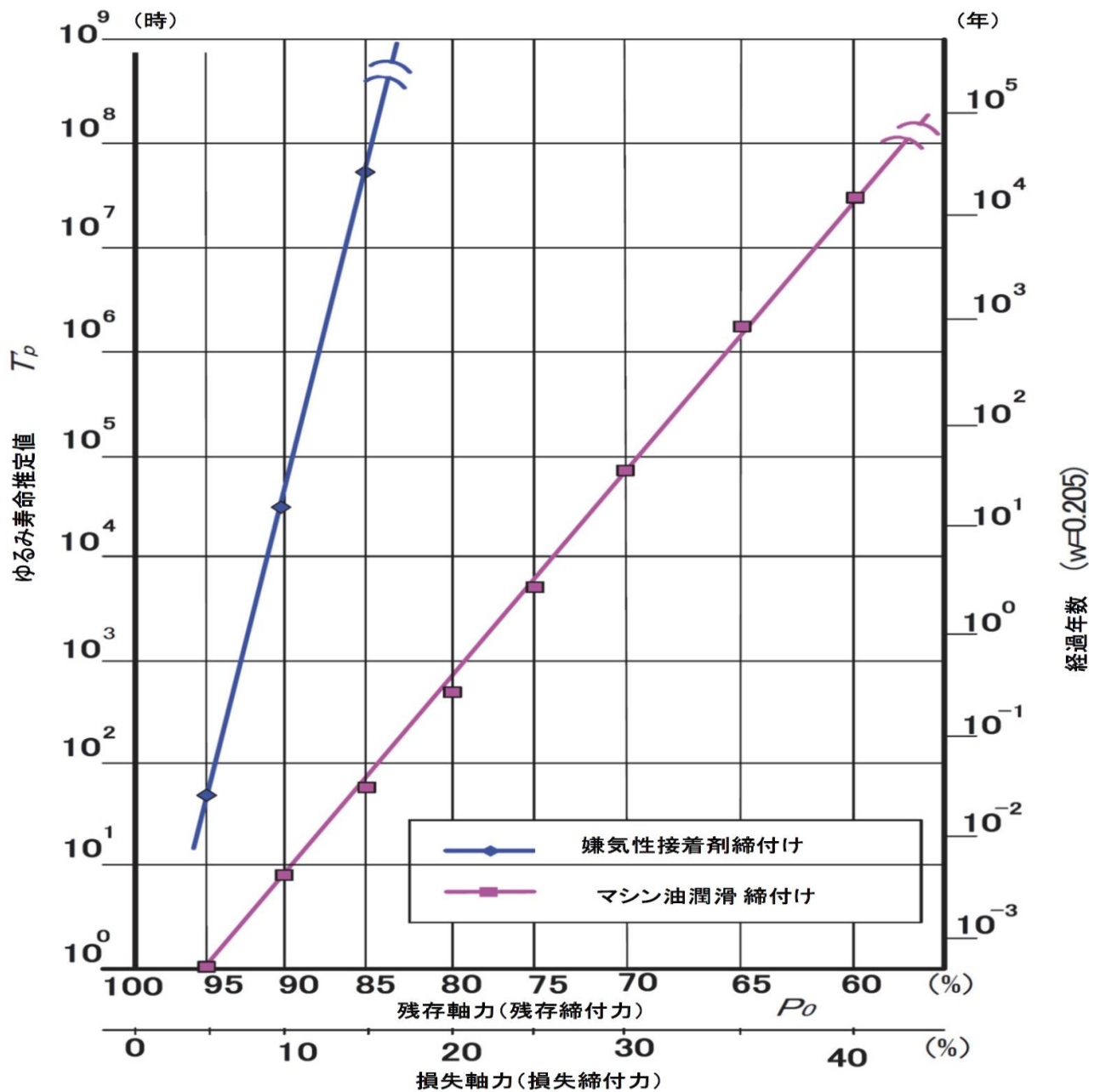


図10 実動荷重型(動的ゆるみ)の寿命推定結果 (両対数目盛)

5 まとめ

各種のゆるみ止め部品の評価は、ゆるみ試験機などを用いた相対的な比較（ゆるむまでの時間など）でそのロッキング性能(ゆるみ防止機能)の評価が行われてきた。しかしながら、実機ではそのゆるみ止めが何万 km 走行までロッキング性能を保っているのかと言った絶対的評価が不可欠であった。本研究では、ゆるみ傾向（ボルト軸力低下）が短期間および中長期間でも両対数紙上でよい線形関係を示すことから、簡易的にゆるみ寿命およびある期間経過後の残存軸力（締付け力）を推定する方法を開発した。

これらの結果はあくまでも建設機械や産業車両でのゆるみ傾向の観測結果から導きだしたものである。このような残存軸力（締付け力）推定やゆるみ寿命推定とそのゆるみの判断基準が多くの製品に適用できるのかの検討が今後の課題でもある。

参考資料

- (1) 晴山, 技術寄稿「ねじ締結体のゆるみ寿命推定法・残存軸力予測法」(前編: 基本的な考え方), ハードロック工業(株)技術ナビ(2021)
- (2) 晴山, 浜田, 石丸, 実機稼働時におけるねじのゆるみおよび強度評価に関する研究(第1報, ゆるみの絶対的評価法について), 日本機械学会論文集(1988), Vol. 54, No. 503, pp. 1559-1563.
- (3) 晴山, 真鍋, 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, 日本ねじ研究協会誌(2018), Vol. 49, No. 5, pp. 131-138, No. 6, pp. 169-178.
- (4) Hareyama, S., Manabe, K., Nakashima, M., Shimodaira, T., Hoshi, A., Residual Clamping Force Estimation and Lifetime Prediction to Loosening Failure of Bolted Joints, SAE Technical Paper 2017-01-0479.
- (5) Hareyama, S., Manabe, K., Kobayashi, S., Loosening Lifetime and Residual Clamping Force Prediction Method on Bolted Joints and Evaluation Criterion of Clamping Force Level for Prevention of Loosening Failure, SAE Technical Paper 2019-01-1111.

■寄稿者紹介

氏名 晴山 蒼一（はれやま そういち）

略歴 昭和44年4月 東洋運搬機株式会社（現：三菱ロジスネクスト）入社

昭和44年5月 同上 技術研究所第2研究室 配属

- ・ 構造物の強度評価システムの確立

- ・ ねじの適正締付けとゆるみ及び強度評価に関する研究に従事

平成元年1月 同上 技術研究所第1研究室室長

- ・ コンテナヤード管理システムの開発に従事

平成7年9月 同上 港湾CHS事業部 副事業部長

平成18年4月 同上 技術開発センター長

平成20年4月 同上 技師長、首都大学東京 非常勤講師

平成22年4月 日立建機（株）技術開発センター テクニカルアドバイザー

平成24年4月 首都大学東京 客員教授、蒼テクノロジー設立

令和3年4月 東京都立大学 客員研究員

⇒ 現在に至る