

技術寄稿（第 10 回）

「トルク法におけるボルト締付けトルクの ばらつきについて」

（締付け作業に与える工具・
ヒューマンエラーなどの影響）

◇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

「トルク法におけるボルト締付けトルクのばらつきについて」

(締付け作業に与える工具・ヒューマンエラーなどの影響)

東京都立大学

晴山 蒼一

ねじ締結技術は、その締結信頼性を確保する方法の一つとして高い初期軸力を与えることが有力とされている。高い初期軸力を与える方法は各種開発されているが、依然としてトルク法が広く使用されている。トルク法はばらつきが大きいとされている。ここではその原因等について検討する。本稿は、日本ねじ研究協会研究論文集⁽¹⁾掲載された小生の論文「トルク法におけるボルト締付けトルクのばらつきに関する一考察」に加筆修正しまとめたものです。

1 はじめに

ねじは自動車、鉄道車両、建設機械、産業車両、一般機械、電機・電子機器、油圧機器、航空機、インフラ、プラント装置など多くの工業製品で使用され重要な役割を果たしている。ねじは2千年以上の長い歴史を持った機械要素であるにもかかわらず、今日でも締付け不良、ゆるみ、強度不足などのトラブルが後を絶たない。多数のボルトを締付ける場合、締付けトルクはトルク係数や摩擦係数の変動によって初期締付け力（初期軸力）に大きな影響を与える。摩擦係数は締付け時の潤滑状況やねじ面の粗さ・加工精度などから影響を受ける。締付けトルクはトルクレンチ等の着力点位置までの距離と作用する力の積によるものでそれぞれ独立な変数と考えられる。摩擦係数やトルク係数については多くの研究結果があるが、締付けトルクのばらつきについては詳細な検討はなされていない。本研究では、この締付けトルクのばらつきについて検討する。まずトルクレンチの着力点位置や力の方向の誤差と工具自体の誤差が締付けトルクに与える影響を検討する。次に、簡単な締付け試験を3人の作業員で行った締付け作業すなわちヒューマンエラーに基づく締付けトルクのばらつきへの影響を調べた。検討結果および試験結果による締付けトルクのばらつきを90%信頼限界値として整理した。

2 トルク係数および締付けトルクに関する従来の研究

図1は複数のねじ締結における初期締付け力のばらつき（締付け係数 Q ）と締付けトルクのばらつき（締付け作業係数 a ）の関係を模式的に示したものである。ある一对のボルトナットの締結の場合の初期締付け力は図中の青色の点線上の赤点ようになるが、複数のボルトナットの締結の場合の初期締付け力は図中のひし形上の範囲にばらつく⁽²⁾とされている。

トルク法におけるねじ締付けで初期締付け力分布に与える摩擦係数および締付けトルクのばらつき（締付け作業係数 a ）については、山本⁽³⁾、酒井⁽⁴⁾およびねじ締結体設計法（第2版）⁽⁵⁾などで述べられている。

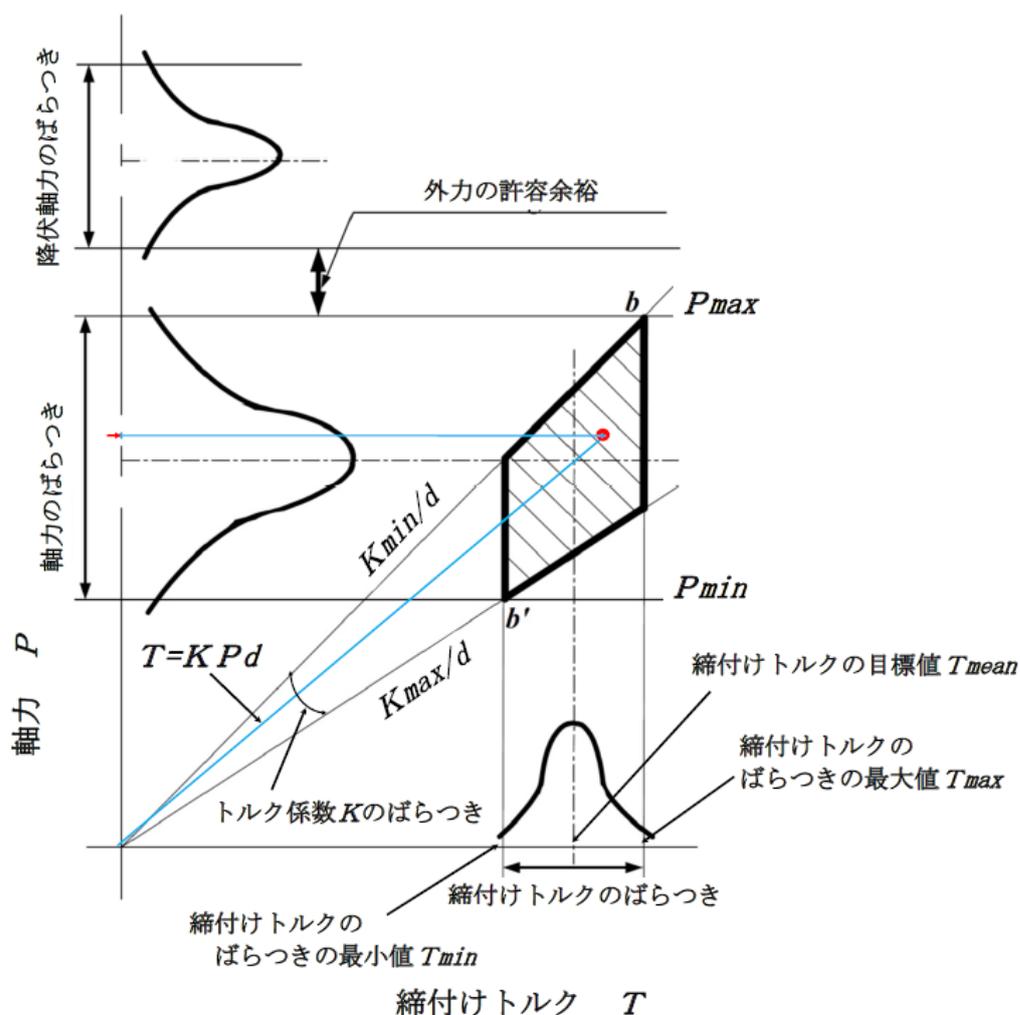


図1 締付けトルクと軸力の関係

それらの内容は下記のとおりである。

- ① 山本：締付けトルクのばらつきの程度をトルクレンチの誤差率として1-3%（手動式トルクレンチ JIS B 4650-1976）で取ることを事例として示している⁽³⁾。なお、手動式トルクツールの要求事項及び試験方法（JIS B 4652-2008）ではトルクツールの許容差を $\pm 4-6\%$ としている。
- ② 酒井：締付けトルクのばらつきは小さくすることは可能であるが、摩擦係数のばらつきを小さくすることは困難な場合が多いとしている⁽⁴⁾。トルク法ではトルクが $\pm 10\%$ 、摩擦係数が $\pm 30\%$ がねじ締結設計の一般的な姿としている。

- ③ ねじ締結体設計法：実際の締付けトルクが $\pm 20\%$ としたボルト軸力のばらつきの概略図を示している⁽⁶⁾。
- ④ Torque Handbook⁽⁶⁾：締付けトルクの公差として特級 ($\pm 5\%$) から 3 級 ($\pm 30\%$) で示されている。ただ、残念ながら参考文献やデータが示されていない。
- ⑤ 川崎⁽⁷⁾：図 2 に示すようにトルクレンチの誤差は $\pm 30\%$ となっている。

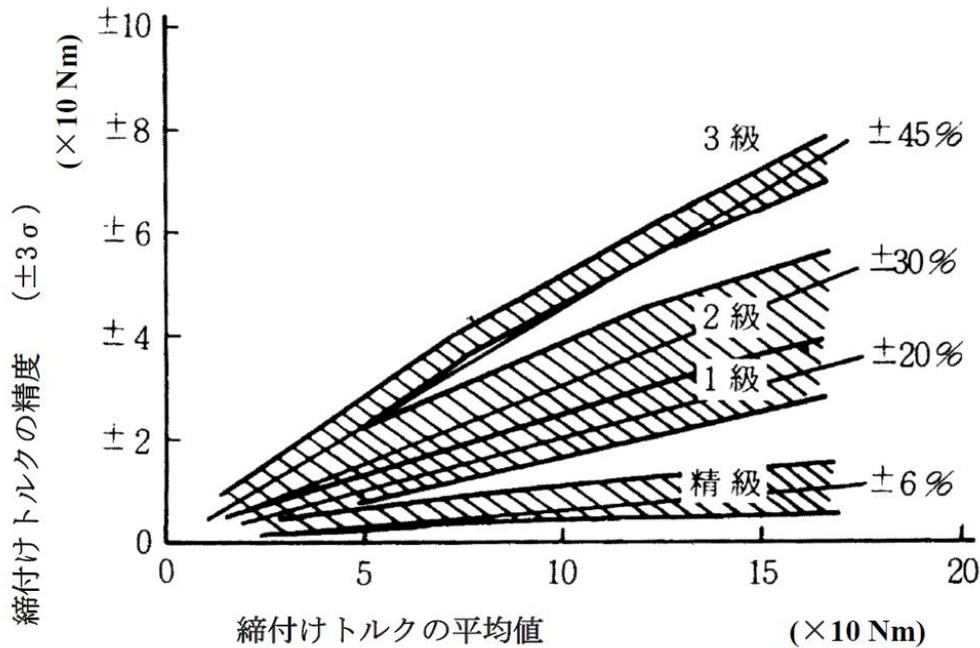


図 2 締付けトルクの誤差

さて、締付けトルク T の基礎式は式(1)で示される⁽²⁾。

$$T = KPd \tag{1}$$

ここで、 T ：締付けトルク， K ：トルク係数， d ：ねじの呼び径

一方、この関係を軸力 P で示すと式(2)となる。

$$P = k(T/d) = kT' \tag{2}$$

ここで、 k ：軸力係数， T' ：単位締付けトルク

得られる初期軸力の最大値 P_{max} および最小値 P_{min} は式(3)および式(4)で示すことができる。

$$P_{max} = k_{max}T_{max} = T_{max}/(dK_{min}) \tag{3}$$

$$P_{min} = k_{min}T_{min} = T_{min}/(dK_{max}) \tag{4}$$

これらの関係を示したのが図3である。図3は図1の関係を正確に示したものである。図中の赤枠で示す面積は初期軸力の最大値 P_{max} となり、緑色で示す面積は初期軸力の最小値 P_{min} となる。

多数のボルトの締付けにおける締付けトルクのばらつきの程度を表す締付け作業係数 a (図1参照) は式(5)で示すことができる。

$$a = (T_{max} + T_{min}) / (2T_{mean}) \quad (5)$$

また、よく知られているように多数本の締付けによる初期締付け力のばらつきは、式(6)に示される締付け係数 Q であらわされる。

$$Q = P_{max} / P_{min} = \{(1 + a)K_{max}\} / \{(1 - a)K_{min}\} \quad (6)$$

式(6)の関係を示したのが図4である。図の横軸は締付け作業係数 a である。また、色別で示した8本の線は K_{max}/K_{min} の値を変えて示したものである。

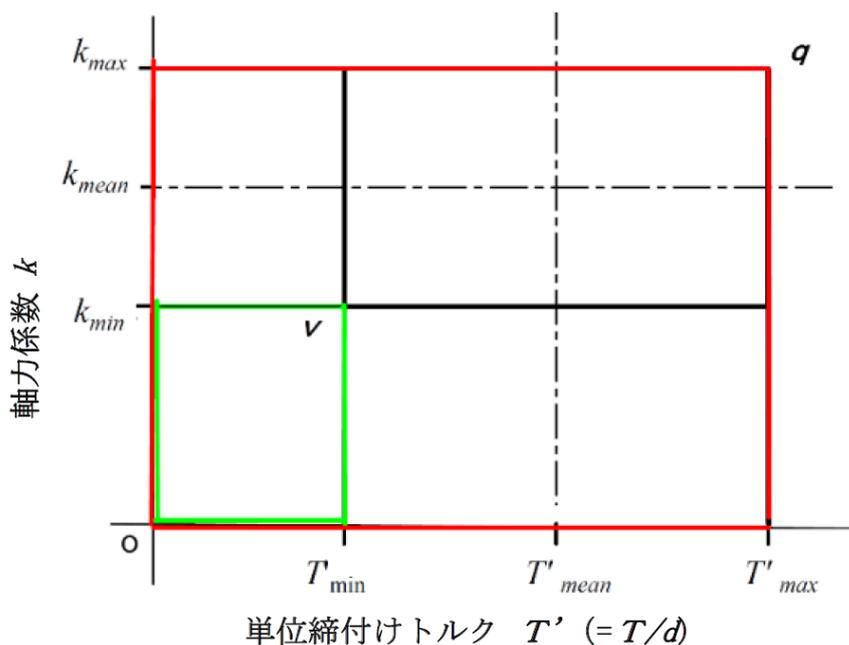


図3 軸力係数 k および締付けトルク T のばらつきによる初期軸力の最大値および最小値の表示

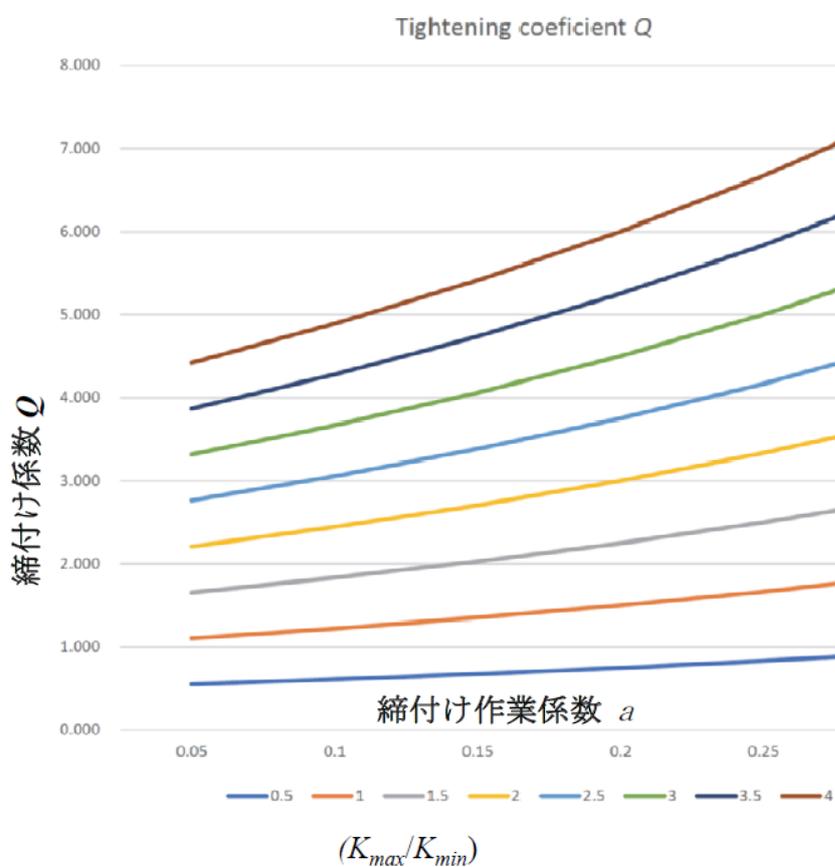


図4 締付け係数 Q の分布の解析結果

3 締付け力分布に与える摩擦係数および締付けトルク（締付け作業係数 a ）のばらつきの関係

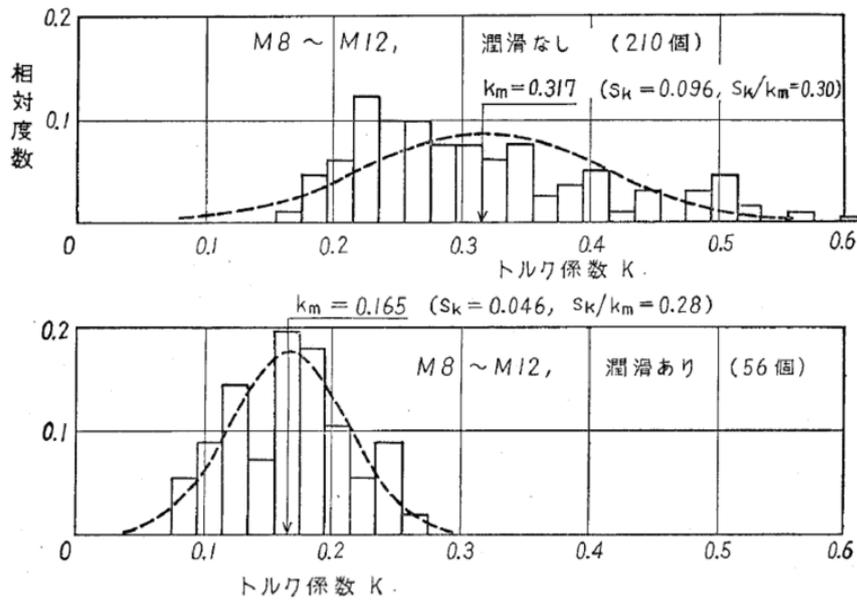
図5はトルク係数の実験結果の一例である⁽⁸⁾。この実験結果は、機械式の締付け試験機で行われたものと考えられ、乾燥条件締付けと潤滑条件締付けで、 K_{max}/K_{min} はそれぞれで2.87および2.71と算出できた。締付け時の潤滑条件が異なっても K_{max}/K_{min} の値がほぼ同じなのは機械式の締付け試験機でおこなわれた実験結果であり、締付け作業にヒューマンエラーの影響がないことによるものと考えられる。

一方、締付けトルクのばらつきについては辻⁽⁹⁾からいくつか示唆に富んだ指摘がある。

図6に示すようなトルクレンチによる締付け作業では着力点位置のずれと力の作用方向のずれが、ヒューマンエラーとして締付けトルク値に誤差を与える。その誤差 α の最大値は図7の結果からここでは5%とする。ボルト軸中心位置と着力点の距離を L_t とすると着力点距離は次式となる。

$$L_t = (1 \pm \alpha)L_{mean} \quad (7)$$

ここで、 α ：誤差率（5%では $\alpha = 0.05$ ）， L_{mean} ：理論着力点距離



$K_{max} = 0.475$
 $K_{min} = 0.159$
 $K_{max}/K_{min} = 2.87$

$K_{max} = 0.241$
 $K_{min} = 0.089$
 $K_{max}/K_{min} = 2.71$

図5 トルク係数 K の実験結果の一例



図6 トルクレンチでの締付け作業姿勢

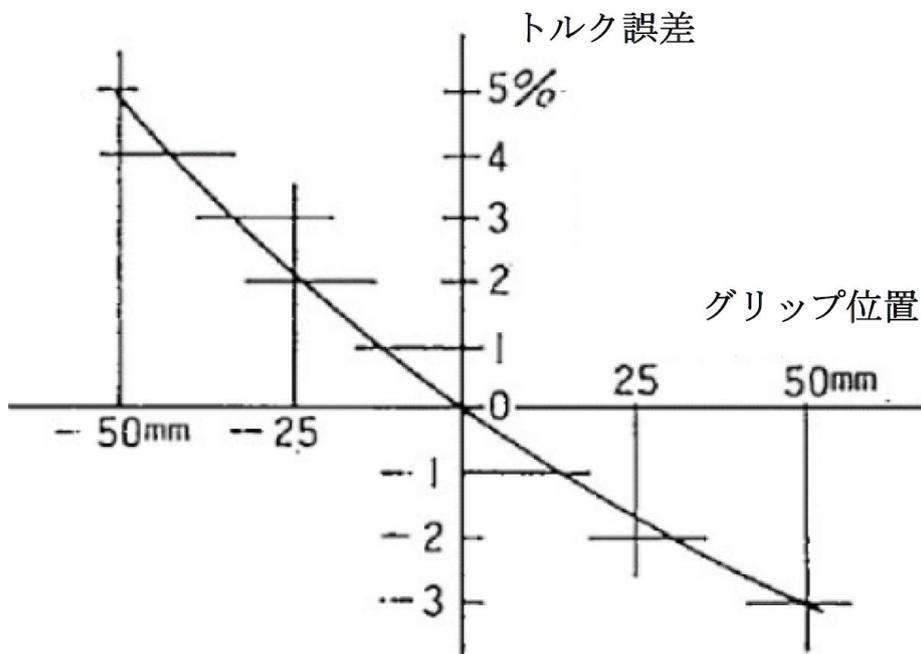
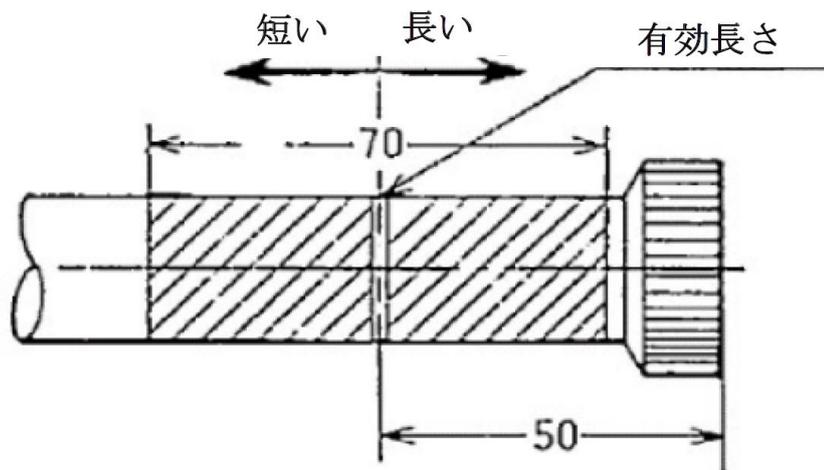


図7 着力点位置の誤差

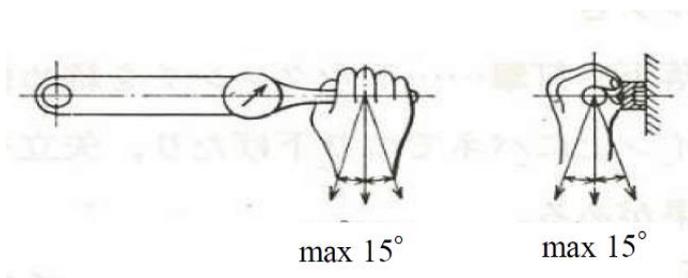


図8 締付け作業方向の誤差

一方、トルクレンチにトルクを与える力の作用方向のずれは図 8 のように示されている。直角方向と水平方向のずれの最大値・最小値は±15 度とされている。ここでトルクレンチに与えた力を F とすると直角方向と水平方向双方の作用方向のずれが同じく θ 度の時の実際にトルクレンチにかかる力を F'' とするとその関係式は式(8)となる。

$$F'' = \cos^2 \theta F \quad (8)$$

ずれの角度がともに 15 度としたとき式(8)は下記の通りとなる。

$$F'' = 0.933F \quad (9)$$

正確に力を与えた時との誤差 β は次式となる。

$$\beta = (F - F'')/F = 0.067 \quad (10)$$

さらにここで工具のばらつき γ の最大値を JIS B 4652-2008 にある 6%ととると、トータルの誤差率 η は次式のとおりとなり、締付け作業係数 a は 10.3%となる。

$$\eta = \sqrt{(\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2)} = 0.103 \quad (11)$$

さてここで α 、 β および γ の各誤差率は最大値となっており、それらを 3σ ととらえると標準偏差 σ および 90%信頼限界値 ($1.645 \times \sigma$) は表 1 のようになる。表にはトータルの誤差率 η も示した。

この場合、式(5)の締付け作業係数 a は次式となる。

$$a = 0.043 \quad (12)$$

すなわち、4.3%となるが、誤差がより大きいときおよび工具の管理状況、作業者の目線の方向のずれなどが加わると締付け作業係数 a はさらに大きくなると考えられる。

表 1 ヒューマンエラーの解析結果

	誤差			
	着点位置 (α)	作用方向 (β)	工具 (γ)	全体 (η)
最大変動幅 (3σ)	±0.05 (±5%)	±0.067 (±6.7%)	±0.06 (±6%)	-
標準偏差 (σ)	1.667	0.171	2.0	2.6
90%信頼限界 (1.645σ)	2.742	0.282	3.3	4.3

4 締付け試験による締付け作業係数 a の検証

ここでは簡易な締付け試験装置を用いて締付け作業係数 a の検証を行った結果を述べる。図 9 は用いた締付け試験装置である。締付け試験は、作業者が締付けトルク値で作業を行いトルクセンサとトルクメーターを用いてその実トルク値を測定しばらつきの程度をチェックした。締付け時のボルトに加わる軸力、ねじりトルクおよび等価応力などは図 10 に示すデータ検出器で測定した。測定値はパソコンに収録した。測定結果の一例を図 11 に示す。

実験では、すべての試験ボルトにひずみゲージを貼付ける場合、貼付けと測定に時間がかかるため、軸方向張力 P とねじりトルク T_s を測定するため前述のデータ検出用テストブラケット（検出器）を使用した。予備試験において、ボルトと検出器間の軸方向張力とねじりトルクはひずみゲージを用いて測定し、ボルトと検出器の測定結果は図 11 に示すように完全に一致していることを確認した。締付け試験は実験計画法により表 2 に示すような割付けで 3 名の作業者により同じ試験を実施した。したがって、繰返し数は 3 回となる。試験条件の詳細（要因と水準）は表 3 に示すとおりである。

図 12 は実験結果の一例で、実験中の締付けからゆるめまでの過程の軸応力 σ の変化とトルク係数 K の変化を記録したものである。実験結果は正規分布に従うと仮定して試験を行ったが、Excel の SKEW 関数と KURT 関数を用いた歪度と尖度を調べたトルク係数 K の結果が図 13 である。また、図 14 は軸力係数 k について同様の結果を示した。

締付け試験は、限られた条件で締付け本数も少なかったため、十分な正規分布性はない結果となっている。

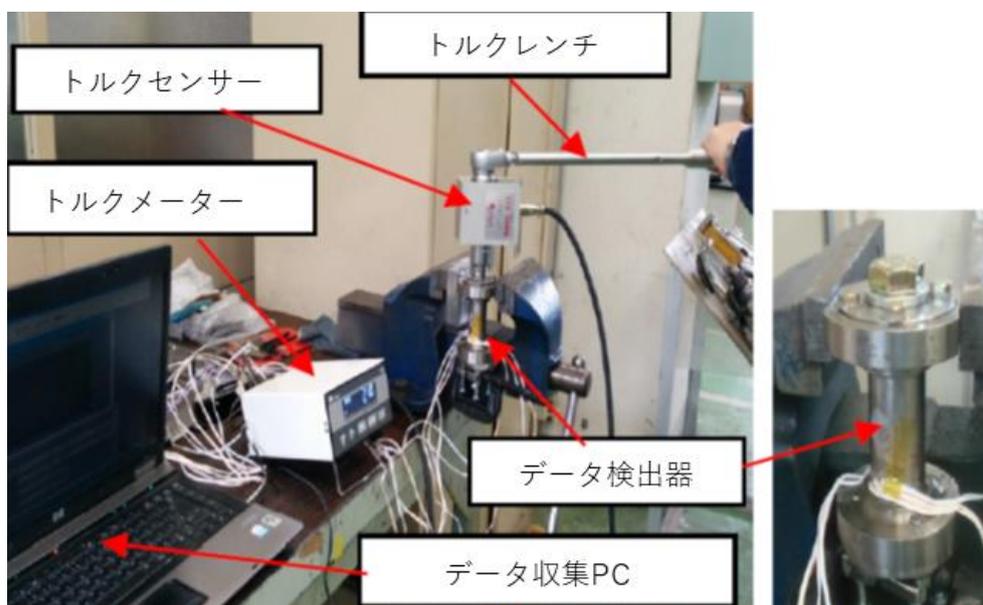
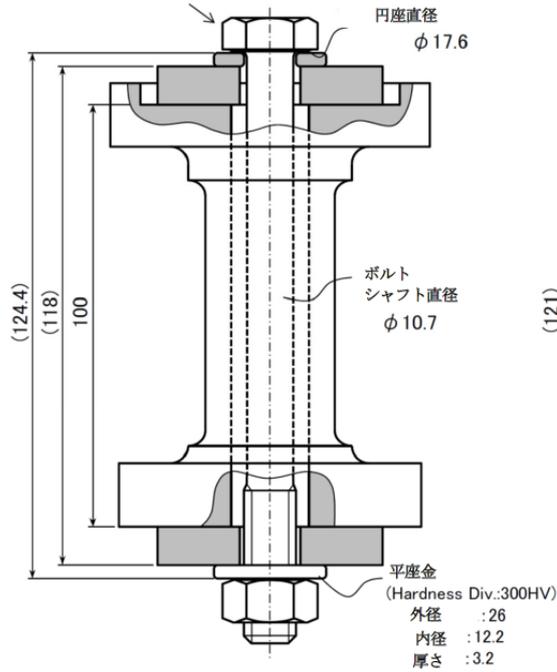


図 9 締付け試験装置

M12 並目ねじ
(ピッチ: 1.75)

公称長さ: 140, ねじ部長さ: 36

座付き六角ボルト



M16 並目ねじ
(ピッチ: 2)

公称長さ: 140, ねじ部長さ: 44

座付き六角ボルト

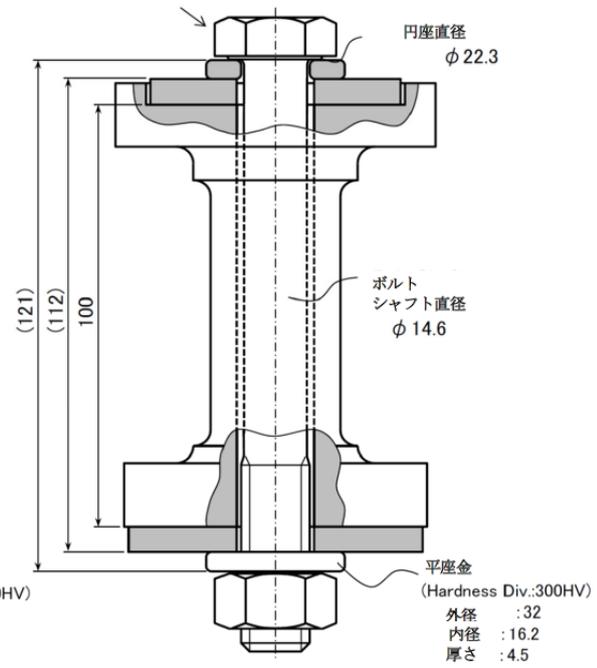


図 10 ボルトに加わる軸力、ねじりトルクおよび等価応力などのデータ検出器

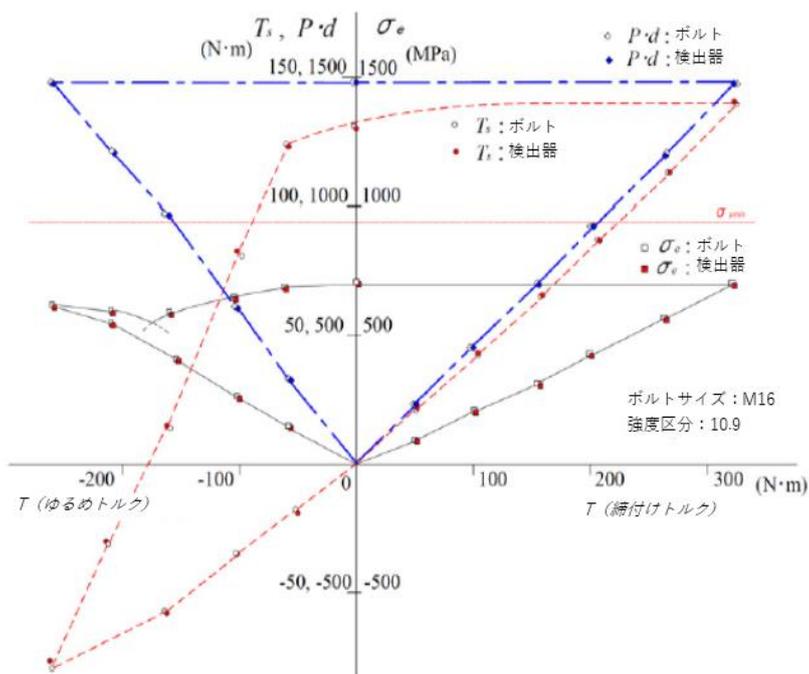


図 11 ボルトおよび検出器でのボルトに加わる軸力、ねじりトルクおよび等価応力などの測定結果の比較

表2 実験計画法での直交表による実験条件の割り付け $L_8(2^7)$

	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2
因子	a	b	ab	c	ac	e	d

潤滑	レンチ	相互作用	強度区分	相互作用	誤差	ボルトサイズ
1: なし	1: プリセットタイプ		1: 8.8			1: M12
2: Loctite 263	2: ダイヤルタイプ		2: 10.9			2: M16

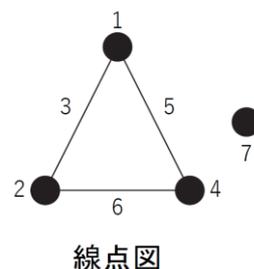
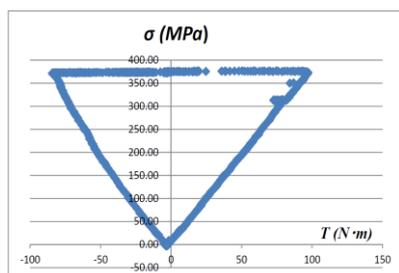


表3 目標締付けトルクと使用工具 (締付け作業係数 $a = 0.2$)

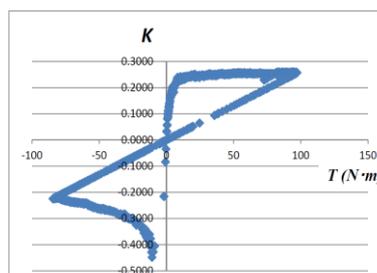
ボルト詳細	M12 (有色クロメート処理)				M16 (有色クロメート処理)			
	8.8		10.9		8.8		10.9	
強度区分	8.8		10.9		8.8		10.9	
潤滑	なし	あり	なし	あり	なし	あり	なし	あり
締付けトルク [N·m]								
理論目標トルク	85.1	68.9	124.6	101.2	213.7	172.2	313.8	252.0
作業表示トルク	86	68	124	102	214	172	314	252
締付け工具 (レンチ) プリセット形レンチ 旭金属工具 (株)	LQK 280N (40-280 N·m)				LQK 420N (60-420 N·m)			
締付け工具 (レンチ) ダイヤル形レンチ 京都機械工具 (株)	CMD 143 (30-140 N·m)				CMD 484 (100-480 N·m)			

潤滑なし：潤滑剤を使用せず

潤滑あり：ねじフランク面にLoctite 263を使用



a) 軸応力 σ



b) トルク係数 K

図12 締付けおよびゆるめ過程でのねじ締付け特性値の挙動



図 13 トルク係数Kのばらつきの頻度分布

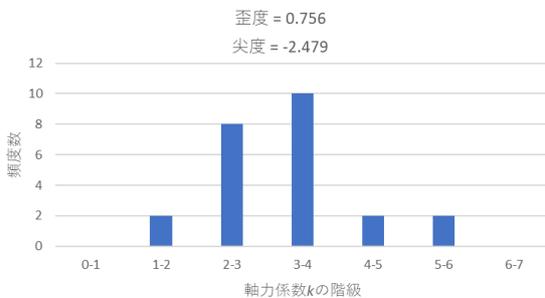


図 14 軸力係数kの頻度分布

表 4 は全実験結果から軸力係数 k 、トルク係数 K 、ねじ山間摩擦係数 μ_s および座面間摩擦係数 μ_w のばらつきの程度を求めた結果である。

表 5 は表 2 に示した要因と水準による試験条件での試験結果を分散分析表としてまとめたものである。通常この種の実験では潤滑条件が試験結果に大きく影響を与えるが、本実験ではボルトの強度区分および潤滑と工具の交互作用が有意となっている。各作業員による締付けトルクのばらつきを正規化して 90%信頼限界値として示したのが表 6-a)である。式(12)による試算結果 4.3%とは異なって平均値では 10.0%の結果となっているが、これは解析と実験の差である。解析では前述の通り考慮しきれていない誤差が含まれていないため小さな値となっているが、実験は作業者の目線の方向のずれや熟練度なども影響して締付け作業係数 a は大きくなったものと考えられる。ただし、熟練度は人の問題に関連する可能性がありここでは触れないことにする。図 6-b)は乾燥条件締付けと潤滑条件締付けの全データで締付け作業係数 a をまとめたもので、摩擦係数とヒューマンエラーによる締付けトルクのばらつきの影響が含まれていると考えられる。このヒューマンエラーも含まれる締付け作業係数 a (締付けトルク) のばらつきについては今後関係各方面での詳細で大規模な実験結果が待たれる。

表4 軸力係数 k 、トルク係数 K 、ねじ山間摩擦係数 μ_s および座面間摩擦係数 μ_w のばらつき

特性 統計値	軸力係数 k	トルク係数 (ナットファクター) K	トルク比 η	ねじ山間摩擦係数 μ_s	座面間摩擦係数 μ_w	総合摩擦係数 $\mu (\mu_s = \mu_w)$
平均	3.156	0.350	0.504	0.276	0.289	0.283
95%信頼限界 最大	4.996	0.562	0.661	0.419	0.535	0.467
95%信頼限界 最小	1.316	0.139	0.347	0.132	0.043	0.099
99%信頼限界 最大	5.578	0.628	0.711	0.465	0.613	0.526
99%信頼限界 最小	0.734	0.072	0.297	0.087	-0.035	0.041

表5 実験計画法による分散分析結果

因子	平方和	自由度	不偏分散	分散比	P値	寄与率	判定
ブロック(*R)	0.2669	2	0.1335	0.2691	0.7677	0.0000	
A	0.0581	1	0.0581	0.1172	0.7369	0.0000	
B	1.6172	1	1.6172	3.2604	0.0911	5.0753	
C	7.5694	1	7.5694	15.2607	0.0014	32.0191	**
D	0.0167	1	0.0167	0.0337	0.8568	0.0000	
AB	5.0976	1	5.0976	10.2773	0.0059	20.8300	**
AC	0.0251	1	0.0251	0.0507	0.8250	0.0000	
誤差	7.4401	15	0.4960			42.0756	
不適合	0.4518	1	0.4518	0.9052	0.3575		
純誤差	6.9882	14	0.4992				
計	22.0911	23				100	

表6 締付け作業係数 a の実験結果

a) ヒューマンエラー (90%信頼限界値)

作業者	標準偏差 σ (%)	締付け作業係数 a (%)
A	6.6	10.8
B	4.0	6.5
C	7.8	12.7
平均	6.13	10.0

b) 乾燥および潤滑条件でのばらつき (90%信頼限界値)

潤滑条件	標準偏差 σ (%)	締付け作業係数 a (%)
乾燥	8.1	13.3
潤滑	3.5	5.8

5 まとめ

本研究では、多数のボルトの締付けにおけるヒューマンエラーから影響を受ける初期締付け力のばらつき (締付け係数 Q) への影響について考察した。その結果をまとめると以下のとおりである。

- 1) 締付けトルクのばらつき（締付け作業係数 a ）と摩擦係数のばらつきは互いに独立な現象ととらえ、それぞれによる締付け係数 Q への影響の程度を検討した。
- 2) 摩擦係数は初期締付け力のばらつきに大きく影響することはよく知られているが、ヒューマンエラーによる締付けトルクのばらつきも初期締付け力のばらつきに影響を与えるものと考え、締付けトルクのばらつき（締付け作業係数 a ）について検討した。
- 3) 締付け作業係数 a の試算結果の平均値は 90%信頼限界値で 4.3%となった。一方、簡単な締付け試験装置を用いて、ヒューマンエラーを加味した締付けトルクのばらつきが締付け係数 Q へ与える影響について検討した。その結果、3人の作業員による締付け作業係数 a のばらつきの平均値は 10.0%であった。

ヒューマンエラーを加味した締付けトルクのばらつきは締付け条件によっても大きくばらつく可能性がある。関係各方面での総合的な検討や実験が待たれる。

参 考 文 献

- (1) 晴山, 真鍋, 小林, トルク法におけるボルト締付けトルクのばらつきに関する一考察, 日本ねじ研究協会研究論文集(2024), Vol. 2, No. 3, pp. 1-5.
- (2) “JIS B 1083, ねじ締付け通則 (2008),” 日本規格協会.
- (3) 山本, ねじ締結の原理と設計 (2007), 養賢堂, p. 77.
- (4) 酒井, 増補ねじ締結概論 (2008), 養賢堂, p. 24.
- (5) 日本ねじ研究協会, ねじ締結体の設計法 第2版 (2022), pp. 180-181.
- (6) TORQUE HANDBOOK Vol. 10 (2023), 締付けトルクの公差, 東日製作所, p. 40.
- (7) 川崎ら, 締付トルク管理とその方法について, 精密機械 42-6 (1976), 108-113.
- (8) 渡邊ら, ねじ締付機構設計のポイント [改訂3版], 日本規格協会 (1982) p. 221.
- (9) 辻, ゆるみ破壊 その原因と対策・解析・診断・保全 (昭和 55 年), 経営開発センター, pp. 267-283.

■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