

2019M-190号

小型自動車等機械振興補助事業の完了報告書

2021年 5月 24日

公益財団法人 J K A

会 長 笹 部 俊 雄 殿

〒 804-8550

住 所 福岡県北九州市戸畑区仙水町1番1号

氏 名 九州工業大学・教授・野田 尚昭 印

補助事業名「2019年度 使用中の耐緩み性と疲労強度に勝れ、かつ安価なボルト・ナット締結体「固着ナット」の実用化研究 補助事業」

上記補助事業は、 2021年 3月31日完了したので、「自転車等機械振興事業に関する補助事業の選定の基準及び補助の方法に関する規程」第16条の規定に基づき、下記書類を添えて報告します。

記

- 1 事業の実施内容及び成果に関する報告書（別紙1）
- 2 事業の収支決算に関する報告書（別紙2）
- 3 取得物件に関する報告書（別紙3）
- 4 事前計画／自己評価書（別紙4）
- 5 補助事業概要の広報資料（別紙5）

事業の実施内容及び成果に関する報告書

1 事業名

2019年度 補助事業名「使用中の耐緩み性と疲労強度に勝れ、かつ安価なボルト・ナット締結体「固着ナット」の実用化研究 補助事業」

2 事業の実施経過

(1) 事務手続き関係

2019年	4月 4日	交付決定通知受理 (4 / 1 付)
	4月 24日	誓約書・振込依頼届・前金払申請書提出
	6月 6日	補助金受領 (5,000,000円)
	11月 28日	継続研究 (複数年) に関する承認申請書提出
2020年	4月 27日	状況に関する報告書提出
	4月 28日	補助金精算申請書提出
	7月 8日	補助金返還 (2,924円)
	6月 3日	前金払申請書提出
	6月 30日	補助金受領 (5,000,000円)
	11月 9日	状況に関する報告書提出
2021年	5月 28日	事業の実施内容及び成果に関する報告書提出 (予定)
	5月 28日	補助金精算申請書提出 (予定)

(2) 事業関係

[課題1] ピッチ差の緩み止めに及ぼす影響の解明 (M12ねじ)

2019年	7月 9日	マイクロスコープ入荷 (キーエンス(株)製)
	7月 22日	プリベリングトルクの3次元モデルの有限要素法解析 開始 (九州工業大学)
	8月 1日	M12締め込み試験片製作 (イワキ工業(株))
	~ 23日	
	9月 9日	プリベリングトルクの実験 (富士精密株式会社)
	9月 10日	破面観察開始 (九州工業大学)
2020年	5月 7日	マイクロスコープワイドレンジZレンズTR (100~1000) 入荷 (キーエンス(株)製)
	7月 28日	解析用ワークステーション 入荷 (日鉄プラント設計(株))

3 研究実施内容及び成果

(1) 耐緩み性に優れ高強度で安価なボルト・ナット締結体に関する研究実施内容

①耐緩み性向上に関する実施内容

表1に研究に使用したピッチ差を付与したボルト・ナットの緩み，強度に対する影響要因とその値を示す。締結体の寸法を，M12ボルト・ナット締結体を例として図1に示す。試験片（ボルト・ナット）の機械的性質および加工法は表2の通りである。図2に，通常ナットを使用する際の，4つの過程を示す。本研究はそれぞれの過程において，各ピッチ差を用いてトルクや締結力の計測を行った。図2の過程(c)の緩みは，緩み試験を用いて緩ませる方法と，トルクレンチなどを用いて緩ませる方法の2種類を行った。図3に各過程におけるボルト・ナット締結体の模式図を示す。

表1 試験片の寸法と形状

要 因	寸法/形状			目 的
呼び径	M16	M12	M30	直径の影響
ピッチ差 α (μm)	15～40	30～50	20～40	ピッチ差の影響
ボルトねじ底の曲率 半径 ρ (mm)	0.29～0.87	0.25	0.51	ねじ底曲率半径 (形状)の影響
ナット高さ H (mm)	－	10.5, 14.0	－	ナット高さの影響

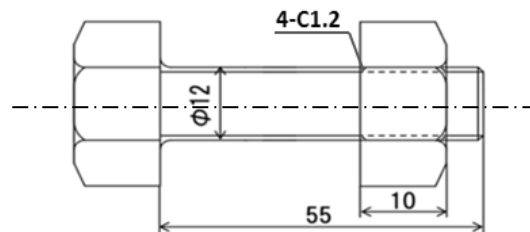


図1 M12 ボルト・ナット試験体

表2 ボルト・ナットの材料特性(JIS)

	材 質 (強度区分)	ヤング率 E(GPa)	ポアソン比	降伏応力 σ_y (MPa)	引張強度 σ_b (MPa)	加 工
ボルト	SCM435(8.8)	206	0.3	800	1200	転造(黒染)
ナット	S45C(8)	206	0.3	530	980	切削(精度 $\pm 0.003\text{mm}$)

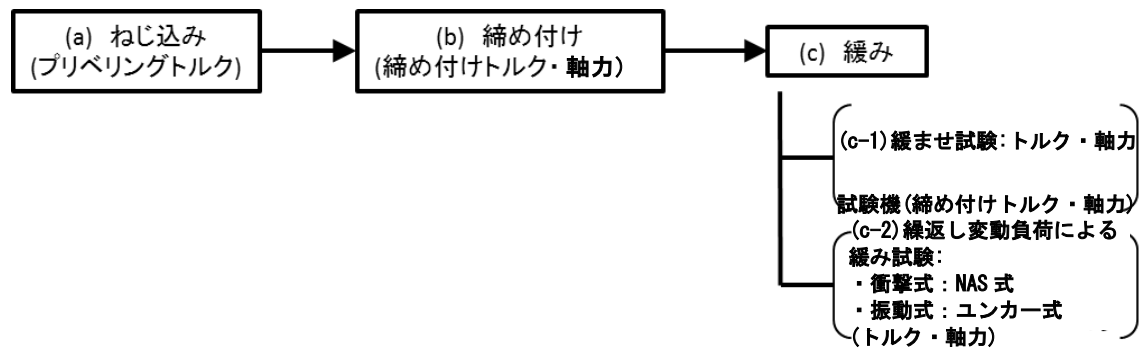


図2 研究の手順(詳細項目)

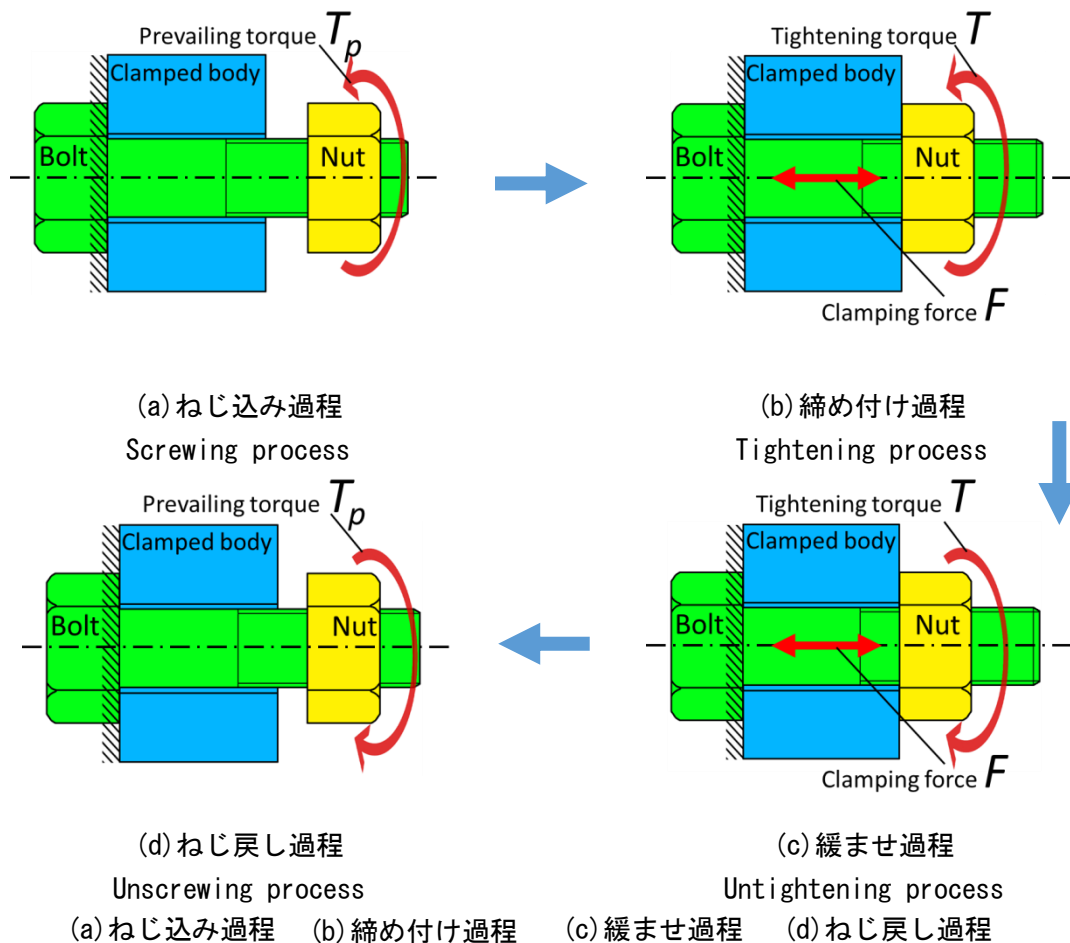


図3 (a)ねじ込み過程, (b)締め付け過程, (c)緩ませ過程, (d)ねじ戻し過程(図2)の説明図

(別紙1)

図3に示す(b)締め付け過程及び(c)緩ませ過程について、締め付けトルク T と締結力 F の関係を測定した。締め付け過程の実験は、図4に示すトルク・軸力試験機を用いて行った。被締結物とボルト頭部は固定して、ナットが被締結物と接触するまでトルクレンチでねじ込み、測定装置でナットを締め付けて、締結力 F を測定した。締め付け試験機NSTシリーズは「JIS B 1084」の規格に示された測定項目を採用し、締め付けトルク・締結力(軸力)・ナットの回転角を計測した。締め付けは、ピッチ差付きナットを締め付ける過程で、トルク増加に変化が起こることがわかっており、その確認のため2種類の締め付けトルクの上限を $T_{25\%}=45\text{Nm}$ 、 $T_{50\%}=85\text{Nm}$ の2水準とした。

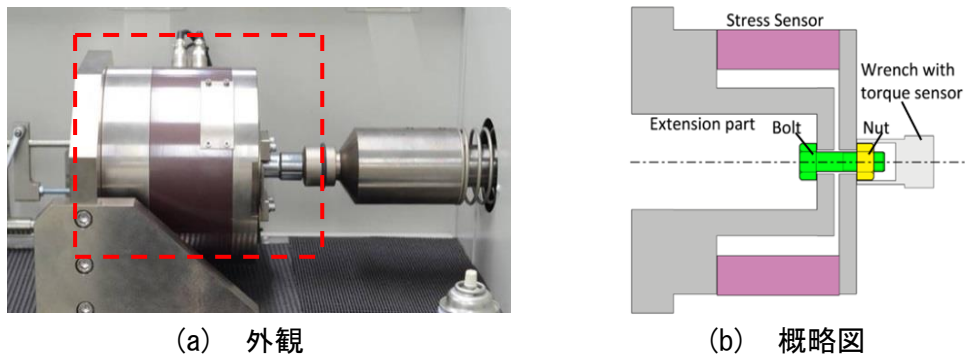


図4 トルク・軸力(締め付け)試験機

②疲労強度向上に関する実施内容

図5に示す疲労試験機を用いて、表1に示すJIS M16のナットに対して、疲労試験を行った。試験片は3種類のねじ谷曲率半径 $\rho=\rho_0$ 、 $\rho=2\rho_0$ ($\rho_0=0.2\text{mm}$)を用いてそれぞれの形状変化における影響を調べた。

(別紙1)

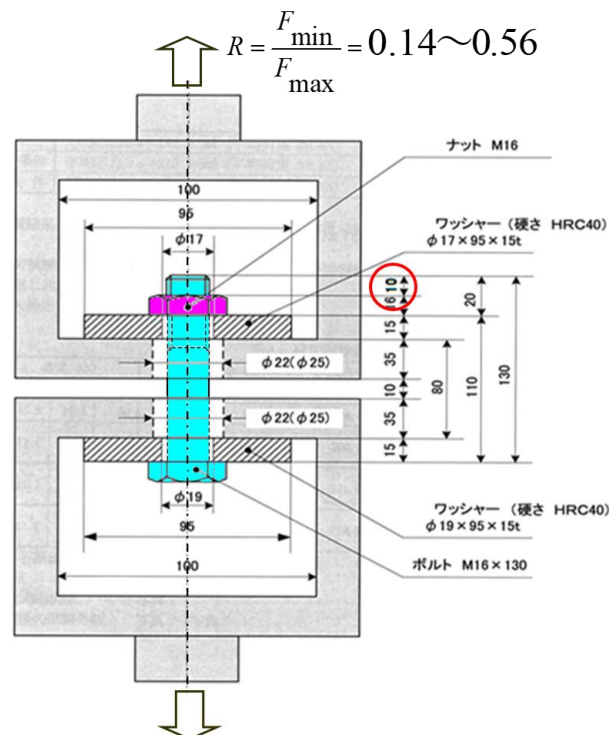


図5 疲労試験機

③緩み止め性能向上と疲労強度向上の両立に関する実施内容

図6に、これまでの研究により得られた疲労強度及び緩み止め性能とピッチ差の関係を示す。図6に示すように、ピッチ差を付与したボルト・ナット締結体に関して、疲労強度を向上させるには、比較的小さいピッチ差を付与する必要がある、また、緩み止め性能を向上させるには比較的大きいピッチ差を付与すべきことがわかってきた。したがって、通常のナット形状へのピッチ差付加では疲労強度と緩み止め性能の両立は難しい。そこで、ナット高さを高くすることで、疲労強度と緩み止め性能の向上を同一のピッチ差範囲で実現させる研究を実施した。具体的には、異なるナット高さとしピッチ差を有するM12 ボルト・ナット締結体を用いて締め付け及び緩ませ過程における締結力と締め付けトルク発生過程とその大きさに対するナット高さによる影響を実験と解析により研究した。

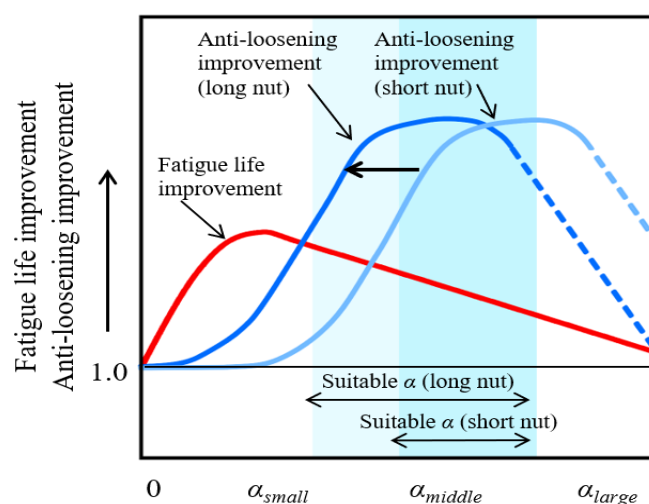


図6 緩み防止と疲労寿命性能の概略図

ナット高さを変えたナットが被締結物と接触するまでトルクレンチでねじ込み、その後、実験装置でナットを締め付ける。実験装置にセンサーを用いて、締め付け過程の締結力を測定した。ねじ締め付け試験機NST シリーズは「JIS B 1084」の規格に示された測定項目を採用し、締め付けトルク・締結力・ナットの回転角を計測した。ボルトの引張応力が降伏応力の25%であるときの締結力を導入する締め付けトルク $T_{25\%}=45\text{Nm}$ までナットを締め付けて実験を行った。緩ませ過程のトルクは実験に用いた装置では測定できないため、トルクレンチを用いて測定した。トルクレンチでナットを緩め、締め付けトルクが10Nm低下するごとに装置から締結力を確認し、ナットが被締結物と離れるまで緩める。

ナットについてはねじ込む際にトルクを作用させる六角部分を簡略化し、2面幅を丸ナットとしてモデル化する。解析ソフトはANSYS16.2 を使用し、準静的、弾塑性、接触を考慮した非線形解析を用いる。

(2) 耐緩み性に優れ高強度で安価なボルト・ナット締結体に関する研究成果

① 耐緩み性向上に関する成果

ナットの緩み止めに関する研究①では、衝撃式緩み試験を、M16のボルト・ナット締結体を用いて行ってきた。本緩み試験装置は、図7に示すようなNAS3350(米国宇宙航空規格)に準拠した衝撃型振動試験機で、繰り返し衝撃をボルト締結体の軸直角方向に負荷する緩み試験である。試験条件は、振動数1,800サイクル/分とし、耐用回数は30,000サイクル(規定寿命)とする。得られた結果は、表3の通り、ピッチ差が30~33 μm で、耐緩み性が得られることが分かった(表3には緩み試験とは別に、ねじ込み過程(ナットが被締結物に接触するまでの過程)で得られるプリベリントルクの結果も併せて示す)。

(別紙1)

本研究では、新たにM12ボルト・ナット締結体を試験片として用いて実験を行った。その際、実験と解析を比較考察することが可能な、ユンカー式緩み試験を採用する。本試験機の概略図を図8に示す。ユンカー式緩み試験は、軸直角方向に被締結物であるプレートを振動させる方法である。この実験を行うために、現在、表1に示すようなM12の試験片で、ピッチ差 $\alpha=30$, $\alpha=40$, $\alpha=50\mu\text{m}$ として緩み試験を行った。

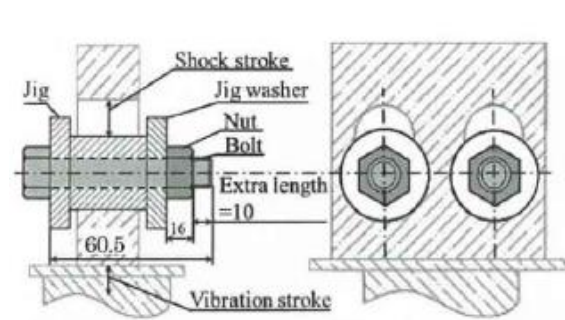


図7 NAS式緩み試験機（従前の方法、シミュレーション解析ができない欠点がある。）

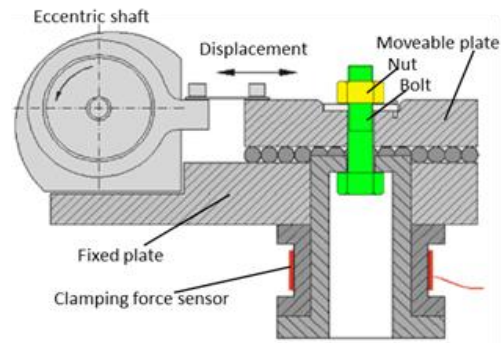


図8 ユンカー式緩み試験機（本事業に用いる方法）

表3 NAS式緩み試験結果

ピッチ差 (μm)	振動回数	緩み始めの振動回数 (判定)※	プリベリング トルク (Nm)	締結力 (kN)
0	751	－	0	24
	876	－	0	24
15	813	－	0	24
	1,528	－	0	24
30	30,000	21,000(△)	30	14～24
	30,000	30,000(○)	30	14～24
33	30,000	30,000(○)	67	1～4
	30,000	30,000(○)	57	1～4

※△:合格でないがほぼ満足, ○:合格

図9にナット寸法M16について、ピッチ差とプリベリングトルクの関係調べた結果を示す。締め込み過程でナットに生じる抵抗トルクであるプリベリングトルクが

(別紙1)

緩みに関係することが分かっており、プリベリングトルクナットとしてJISに、規定がある。表3にプリベリングトルクを求めた結果を示す。図9に、ナット寸法M16について、ピッチ差とプリベリングトルクの関係調べた結果を示す。図9より、ピッチ差の増加と共にプリベリングトルクも増加していることが明らかとなった。

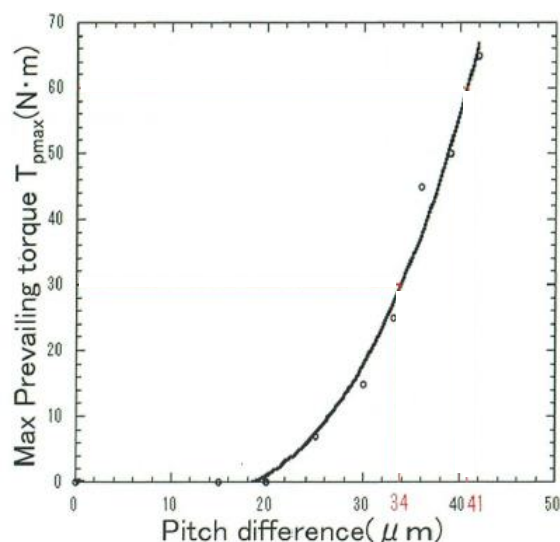


図9 ネジ込み過程のピッチ差とプリベリングトルクの関係(M16)

図10に本研究で明らかになった締め付けトルク T と締結力 F の関係を示す。図3のねじ込み過程から締め付け過程の初めでは、図10のようにプリベリングトルクより大きな締め付けトルクを作用させると締結力 F が生じ始める。図10の点Gでは、最大締め付けトルクで、締結力 F も最大となる。この点G、すなわち $T_{25\%}=45\text{Nm}$ 、 $T_{50\%}=85\text{Nm}$ となる点からナットを緩ませていく。最初のG-Guの間、ナットはボルトと一体となって回転し、締結力 F は殆ど変化しない。ナットとボルトがすべり始めると(Gu)、締め付けトルクと共に締結力が減少していく。締結力 $F=0$ においてもトルクが残留するので、これを T_p^u と定義する。この残留プリベリングトルク T_p^u が、緩み止めに対して直接的に関係しているものと考えられる。この残留トルク T_p^u は、締め付けトルク $T_{25\%}$ の方が $T_{50\%}$ の場合より大きく緩み防止上有利になるものと推察される。

図11に3次元FEM解析に用いたモデルと境界条件を示す。図12, 13, 14にそれぞれピッチ差 $\alpha=35, 40, 50\mu\text{m}$ における締結力 F とトルク T の関係を示す。これらの図において、(a)はボルトの降伏応力(800MPa)の25%相当の締め付けトルク $T_{25\%}=45\text{Nm}$ (軸力 $F_{25\%}=16.8\text{kN}$)、(b)は50%相当の締め付けトルク $T_{50\%}=85\text{Nm}$ (軸力 $F_{50\%}=33.4\text{kN}$)まで締め付けた結果で、実験結果と解析結果を示す。図12, 13, 14のいずれも実験値と解析値に少し誤差はみられるが、ほぼ一致していると言える。この違いは、締め付け前のねじ込み過程で、ボルト・ナットのねじ面間に摩耗片が介在し、プリベリングトルクの増加に対して、軸力上昇が抑制されることが原因と考えられる。

(別紙1)

ピッチ差の有無による締結力 F とトルク T の関係の差は、緩み止め挙動そのものと見なせるので、それを明らかにしたことは本研究の重要な成果である。

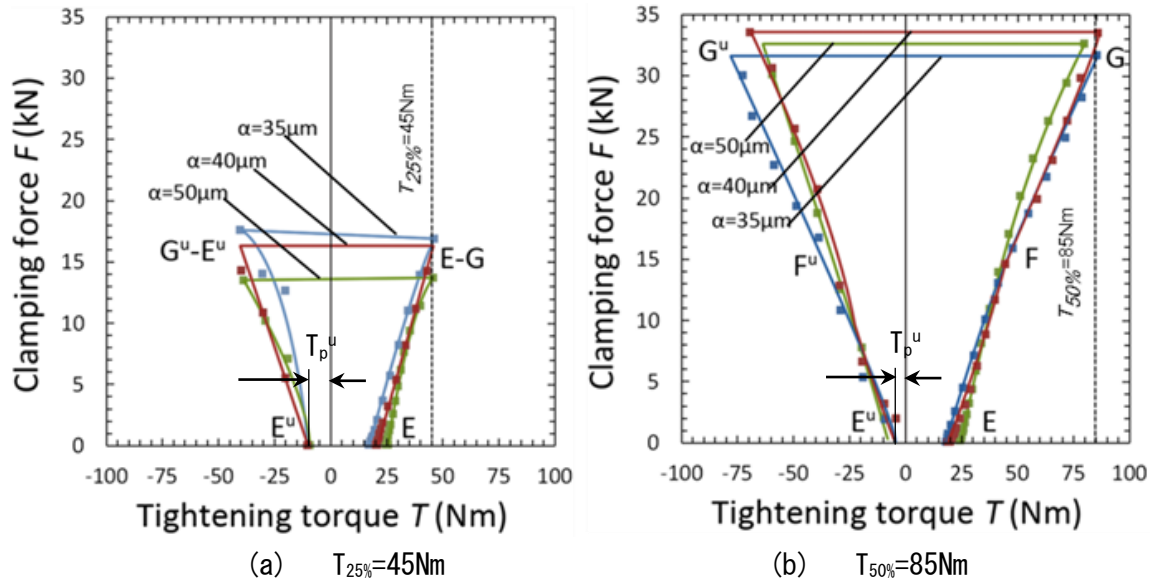
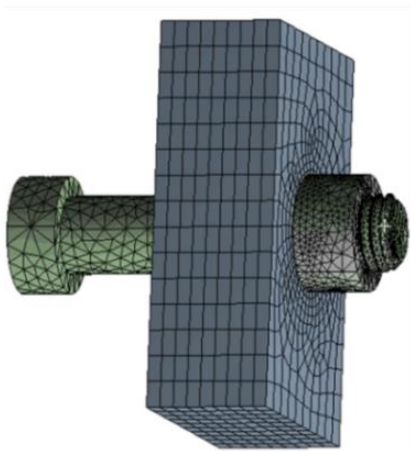
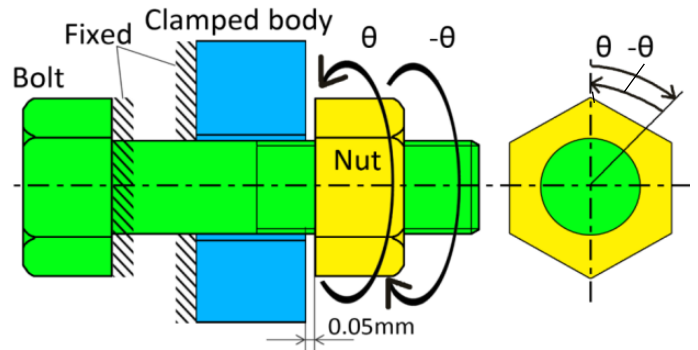


図 10 締め付け・緩ませ試験結果 (M12)



(a) FEM mesh model for M12 bolt nut.



(b) Boundary conditions.

図 11 3次元 FEM 解析モデル (M12)

(別紙1)

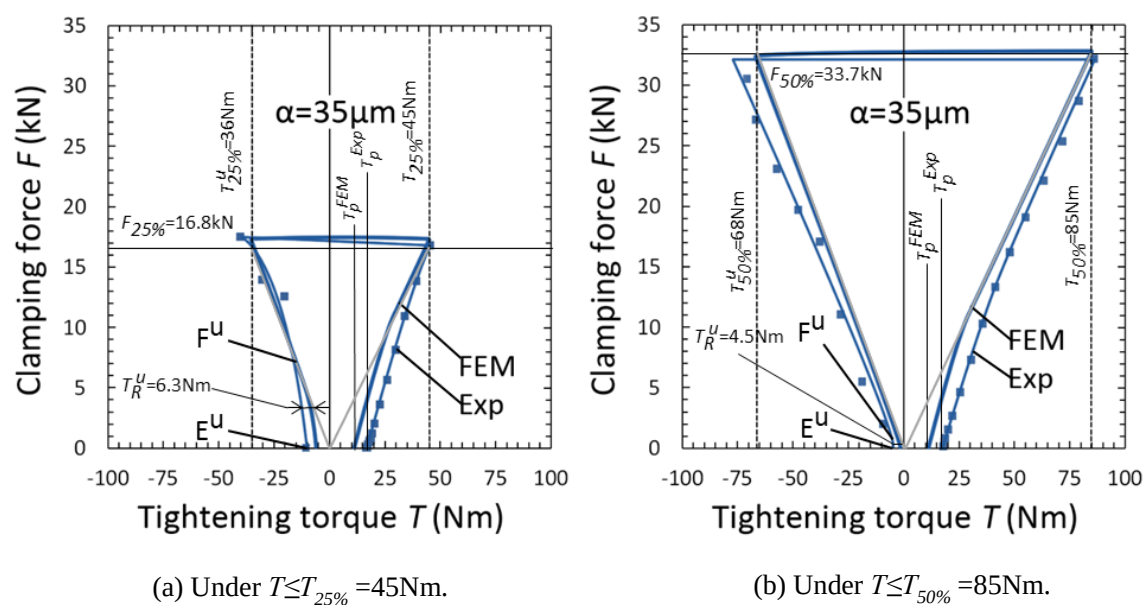


図 1 2 締め付け・緩ませ解析結果 ($\alpha = 35$)

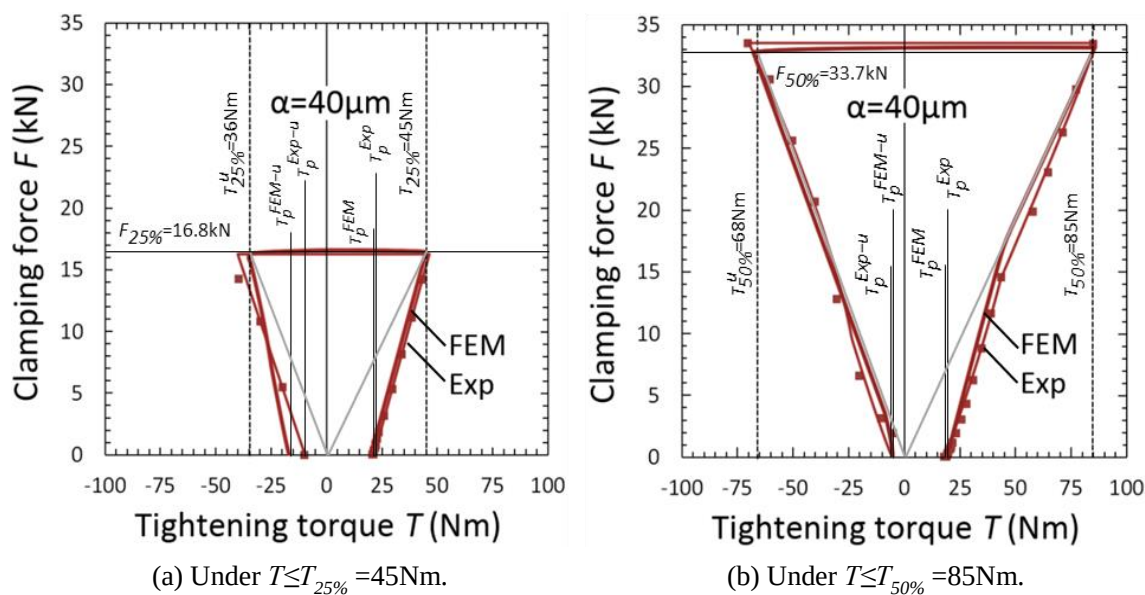
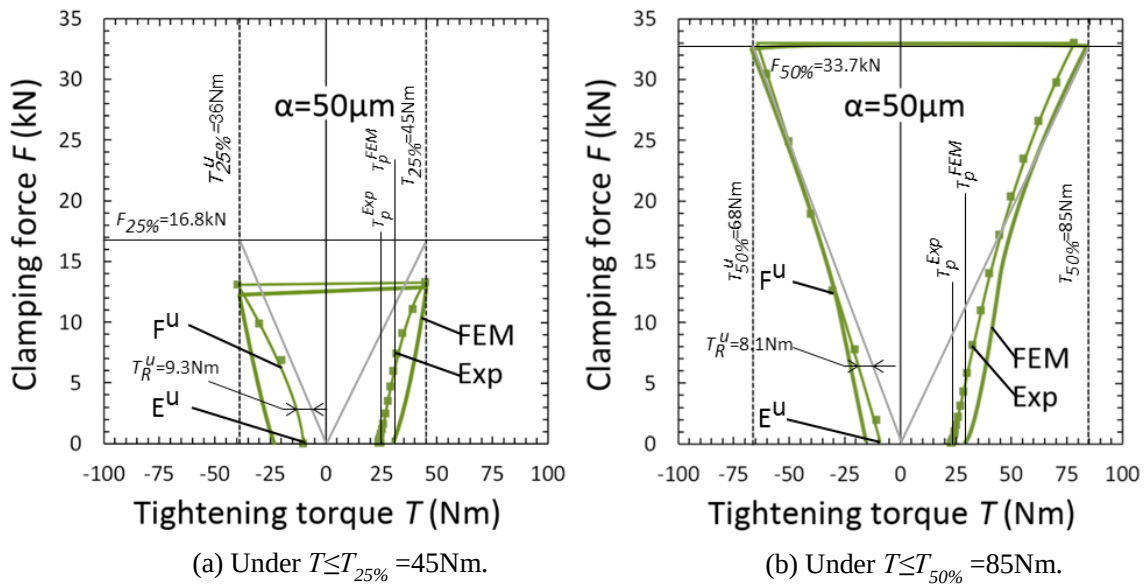


図 1 3 締め付け・緩ませ解析結果 ($\alpha = 40$)

図 1 4 締め付け・緩ませ解析結果 ($\alpha = 50$)

② 疲労強度向上に関する成果

図 1 5 にねじの形状を変えた場合 ($\rho = \rho_0$, $\alpha = 0$, $\rho = 2\rho_0$, $\alpha = 0$, $\rho = 2\rho_0$, $\alpha = 15$) の S-N 曲線を示す。図 1 5 より、ねじ谷底半径を大きくすることで、疲労限度は通常のボルト・ナット締結体より約 30% 向上し、80MPa となった。次に、ナットにピッチ差 $\alpha = 15 \mu\text{m}$ を付与することで、 $\rho = 2\rho_0$ 、疲労限度は、100MPa と 25% 向上した。ボルトねじ谷底半径の大曲率化およびピッチ差を有するボルト・ナット締結体 ($\rho = 2\rho_0$, $\alpha = 15$) では、標準形の場合 ($\rho = \rho_0$, $\alpha = 0$) より疲労強度が約 70% 向上し、大幅に改善されることがわかった。ボルトのナット嵌合内におけるねじ底からの疲労試験と併行して、疲労破壊に対する応力シミュレーション解析を行った。また、応力解析に基づいて作成される耐久線図を用いて破壊リスクを評価して、疲労試験結果と比較・考察した。図 1 6 (a), (b) は、解析によって得られた応力値を用いて作成した耐久線図である。図 1 6 (a), (b) において、ねじ谷底曲率を大きくすることにより、危険度が高いねじ底が、相対的に安全側へ移動した。また、図 1 6 (a) より、ピッチ差なしの場合は No. 1~3 の谷底が危険であり、図 1 6 (b) より、ピッチ差付与の場合は、No. 5~7 の谷底が相対的な危険度が高い。これらの解析結果は、疲労試験によるボルトの破面観察結果とよく一致している。

(別紙1)

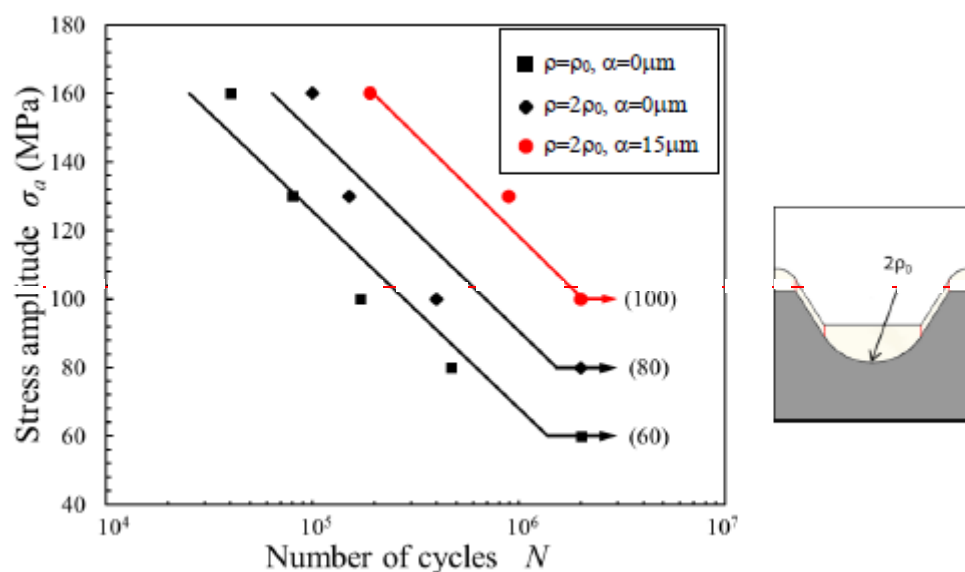


図 1 5 S-N 曲線 ($\rho=\rho_0$, $\alpha=0$, $\rho=2\rho_0$, $\alpha=0$, $\rho=2\rho_0$, $\alpha=15$ ($\rho_0=0.2\text{mm}$))

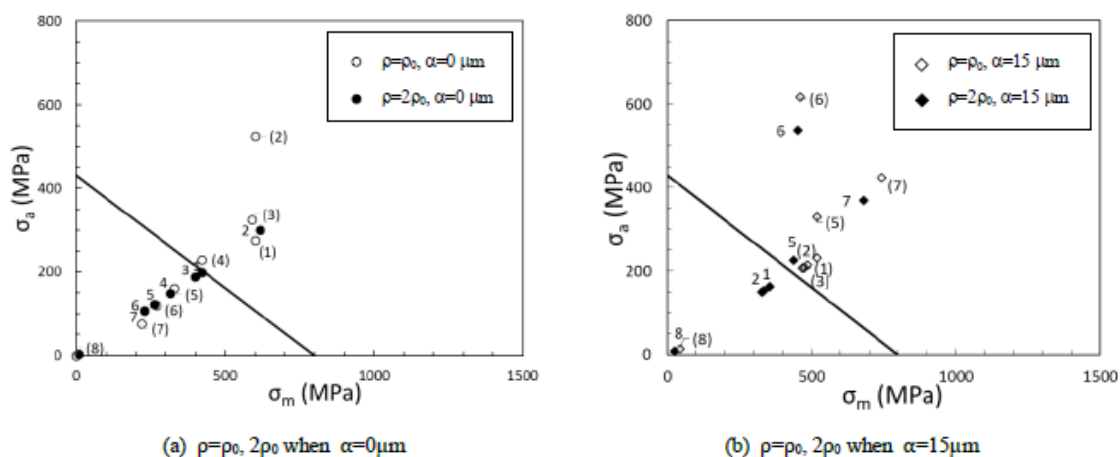
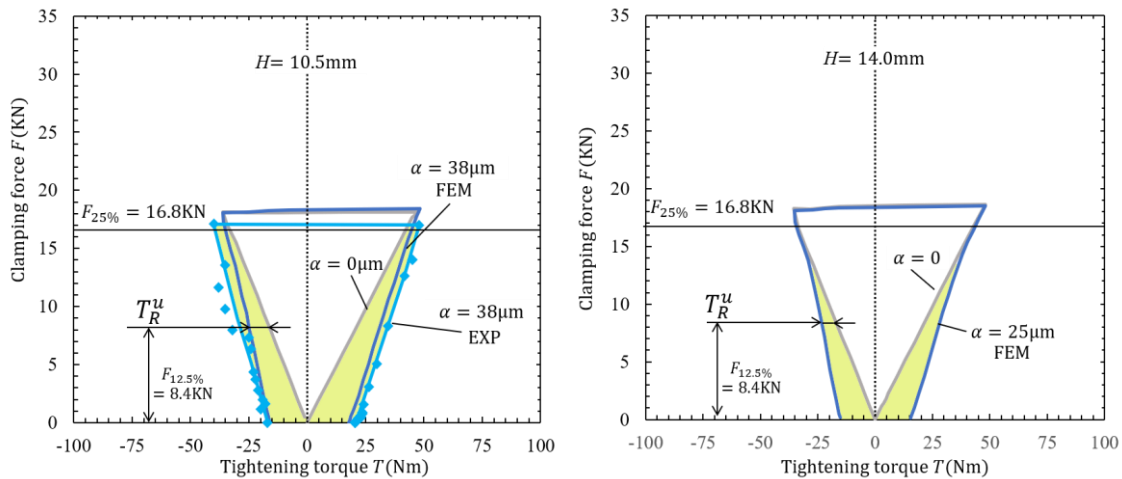


図 1 6 耐久線図

③ 緩み止め性能向上と疲労強度向上の両立に関する成果

図 1 7 に緩み止め性能と疲労強度向上の両立のため行った、締め付けおよび緩ませ過程におけるトルク T と締結力 F の関係について実験結果と解析結果を同時に示す。図 1 7 において、(a) はナット高さ 10.5mm 、ピッチ差 $\alpha=38\mu\text{m}$ 、(b) は $H=14.0\text{mm}$ 、 $\alpha=25\mu\text{m}$ 、を用いて締め付けたときの結果であり、点線に実験結果、実線に解析結果を示す。両者の違いは、摩耗片の生成、成長、脱落、粉砕によるトルクのばらつきが解析では表現できていないためと考えられる。また、緩ませ過程のトルクは実験に用いた装置では測定できず、トルクレンチを用いて測定するため、測定誤差が生じていると考えられる。図 1 7 は、いずれも実験値と解析値に多少の誤差はみられるがほぼ一致しており、ナット高さに関係なく解析精度は高いと言える。

(別紙1)



(a) $H=10.5\text{mm}$, $\alpha=38\mu\text{m}$

(b) $H=14\text{mm}$, $\alpha=25\mu\text{m}$

図 1 7 締め付け及び緩ませ過程におけるトルク T と締結力 F の関係 (実験・解析)

図 1 7 (a), (b)に示すピッチ差とナット高さが異なる両者の緩み抵抗トルク T_R^u を比較して示す。実験値、解析値ともに塑性変形や摩耗の影響があるので、ここでは解析値を用いて考察した。図 1 7 のピッチ差の有無によるトルク T と締結力 F の関係の違いは、次式で定義される。

$$T_R^u = T_{12.5\%(\alpha>0)}^u - T_{12.5\%(\alpha=0)}^u \quad (\text{Loosening resistance torque})$$

この範囲を図 1 7 に薄い緑色で示す。ピッチ差の有無によるトルク T と締結力 F の関係の違いは、緩み抵抗トルク (Loosening resistance torque) と見なせる。トルクの代表として、締結力 $F_{25\%}$ の半分である締結力 $F_{12.5\%}$ が生じる時のトルク差を“緩み抵抗トルク $T_R^u = T_{12.5\%(\alpha>0)}^u - T_{12.5\%(\alpha=0)}^u$ (Loosening resistance torque)”と定義して、耐緩み性能を考察できる。

表 4 に図 1 7 (a), (b)それぞれの緩み抵抗トルク T_R^u をまとめて示す。それぞれの緩み抵抗トルク T_R^u はナット高さを高くしてピッチ差を小さくしても変わらないことがわかった。つまり、ナット高さを高くすることで、緩み止め性能を損なうことなく、有効なピッチ差を小さくできる。これによって緩み止めの向上と疲労強度の向上の両立を実現できる。これまでに得られた成果は、論文^{1)~7)}にまとめて発表している。

(別紙1)

表 4 3DFEM の緩み抵抗トルク $T_R^u = T_{12.5\%(\alpha>0)}^u - T_{12.5\%(\alpha=0)}^u$ (Loosening resistance torque)

寸法/形状		緩み止め性能
ナット高さ H (mm)	ピッチ差 α (μm)	T_R^u (Nm) when $F=F_{12.5\%}$
10.5	38.0	8.0
	45.0	16.5
14.0	25.0	6.2
	30.0	14.6

図 18 に緩み止め性能と疲労強度向上の両立のため行った、ボルト・ナット締結体の疲労試験片の概略図を示す。ナットの高さが変わると、ナットのねじ山数が変わり、接触するねじ山数も変わる。図 19 にナット高さ $H=10.5\text{mm}$ 、ピッチ差 $\alpha=38\mu\text{m}$ 及び $H=14.0\text{mm}$ 、 $\alpha=25\mu\text{m}$ それぞれの解析結果を耐久線図と対比して比較した。解析方法は、前述の通りである。

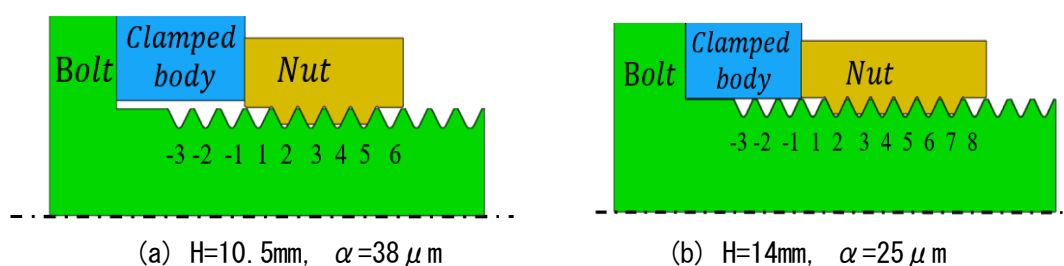


図 18 ボルト・ナット締結体の概略図

これまでの研究でピッチ差付きナットを使用した場合ボルトの右側(図 18 (a)では第4 ねじ山)で破断することがわかった。図 19 に示す結果で右側の2山の安全率を比較すると、例えば最も危険な位置では $H=10.5\text{mm}$ 、 $\alpha=38\mu\text{m}$ では安全率0.42、 $H=14.0\text{mm}$ 、 $\alpha=25\mu\text{m}$ では安全率0.46となり、大きな違いはなくほぼ一致していると言える。つまり、ナット高さを高くしてピッチ差を小さくしても疲労強度は変わらないことがわかった。すなわち、ナット高さを大きくすると比較的小さなピッチ差で緩み止め効果が得られることと、ナット高さを大きくしてもピッチ差のみで疲労強度が決まることが明らかとなった。これらの研究成果より、ナット高さを高くすることで、緩み止め性能と疲労強度を両立できることが示された。これらの成果は、論文^{8)~12)}にまとめて発表している。

(別紙1)

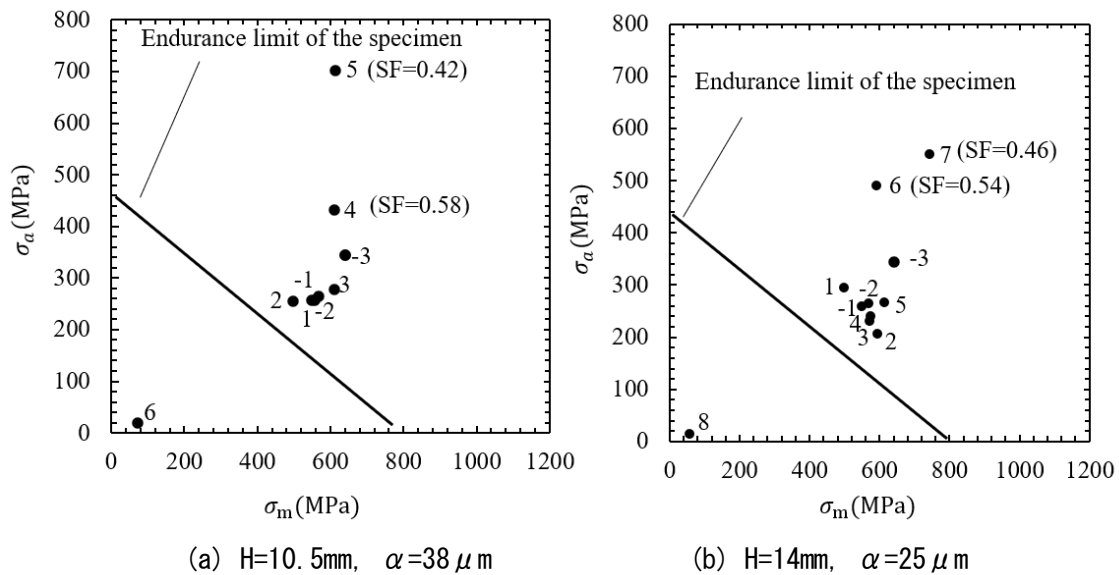


図 19 各ボルトねじ底での耐久線図

4 事業実施に関して特許権、実用新案権等を申請又は取得したときはその内容

特許：1件

ねじ部材

特願 特願2016-008064 特開 特開2017-129188 特許 特6704602 日本国

野田尚昭

5 今後予想される効果

使用中の耐緩み性と疲労強度に勝れ、かつ安価なボルト・ナット締結体「固着ナット」の実用化研究

ピッチ差付きボルト・ナット締結体の実用化に成功すれば、高性能なボルト締結体を安価で提供できる結果、特殊な機構や構造を有する高価な耐緩みボルト・ナット締結体が特殊用途（新幹線車両，大型車輪，航空機，遊具など）に限定されているのに対して、より広い分野で用いられるようになる。その結果，社会全体の安全性を高めることに貢献できるものとする。

6 本事業により作成した印刷物（研究報告書等）

論文・学会発表 12部

(1) Liu, X., Noda, N.-A., Sano, Y., Huang, Y.T., Takase, Y., 3D finite element

analysis of tightening process of bolt and nut connections with pitch difference, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol.372, No.1, (2018年6月).

(2) Kubo, S., Tateishi, K., Noda, N.-A., Sano, Y., Takase, Y., Honda, K., Suitable pitch difference to realize anti-loosening performance for various bolts-nuts diameter, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol.372, No.1, (2018年6月).

(3) Noda, N., Liu, X., Sano, Y., Huang, Y., Takase, Y., Three-dimensional finite element analysis during tightening of bolt-nut connection having slight pitch difference, International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, Vol.8, No.3, pp.494~497, (2019年3月).

(4) 野田尚昭, 劉溪, 佐野義一, 久保周太郎, 黄雲霆, 立石孝介, 高瀬康, ピッチ差を有するボルト・ナット締結体のねじ込み過程の3次元有限要素法解析, 日本機械学会論文集A編, 85巻, 876号, pp.1-14, (2019年1月).

(5) 野田尚昭, 劉溪, 佐野義一, 立石孝介, 王彪, 乾湧人, 高瀬康, ピッチ差を有するボルト・ナット締結体の締め付け／緩ませ過程の3次元有限要素法解析, 日本機械学会論文集, 86巻, 886号, pp.1-12, (2020年-1月).

(6) Noda, N-A., Liu X., Sano Y.u, Tateishi K., Wang B., Takase Y., Three-Dimensional finite element analysis for prevailing torque of bolt-nut connection having slight pitch difference, Journal of Mechanical Science and Technology, Vol.34, No.6, pp.2469-2476, (2020年1月).

(7) Noda N-A., Liu X., Sano Y., Tateishi K., Wang B., Inui Y., Takase Y., Prevailing Torque and Residual Prevailing Torque of Bolt-Nut Connections Having Slight Pitch Difference, Mechanics Based Design of Structures and Machines, Vol.1, No.1, pp.1539-7742, (2020年6月).

(8) Matsunari, T., Oda, K., Tsutsumi, N., Yakushiji, T., Noda, N.A., Sano, Y., Experimental study on the effect of shape of bolt and nut on fatigue strength for bolted joint, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol.372, No.1, (2018年6月).

(9) 小田和広, 松成智彦, 王彪, 野田尚昭, 佐野義一, 立石孝介, 薬師寺輝敏, 乾湧人, ボルト・ナット締結体の疲労強度に及ぼすボルト形状とピッチ差付与の影響, 日本機械学会論文集A編, 86巻, 884号, pp.1-10, (2020年).

(10) 野田尚昭, 王彪, 乾湧人, 劉溪, 立石孝介, 佐野義一, シュウ ベイフェン, 高瀬康, ピッチ差を有するナットのねじ込み過程で生じるプリベリントルクに及ぼすナット高さの影響, 自動車技術会論文集, 51巻, 4号, pp.636 -641, (2020年1月).

(11) 野田尚昭, 王彪, 佐野義一, 劉溪, 立石孝介, 乾湧人, シュウ ベイフェン, 高瀬康, ピッチ差を有するナットの締め付け／緩ませ過程におけるナット高さの緩み止

(別紙1)

め性能および疲労強度への影響, 自動車技術会論文集, 52巻, 1号, pp. 58 -63, (2021年1月).

(12) Noda N-A., Wang B., Oda K., Sano Y., Liu X., Inui Y., and Yakushiji T., Effects of root radius and pitch difference on fatigue strength and anti-loosening performance for high strength bolt-nut connections, Advances in Structural Engineering, pp. 1-14, (2021-5月), DOI:10.1177/ [1369433220988619](https://doi.org/10.1177/1369433220988619).

7 その他

特になし