

補助事業番号 2019M-190

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

補助事業者名 九州工業大学・教授・野田 尚昭

## 1 研究の概要

「固着ナット」の実用化に当たって必要とされる耐緩み、高疲労強度のボルト・ナット寸法ならびに形状依存性を明らかにし、汎用性を確認することで、本技術の締結体としての優位性を実証した。

## 2 研究の目的と背景

ボルト・ナット締結体は、使用頻度、重要度が高い機械要素で産業界にひろく普及しているが、振動の激しい使用条件では、緩みやすいこととまれに破損する課題は残されている。破損事例の90%以上は、「疲労に起因」しており、そのほとんどは「ボルトの緩み」が原因であるとも言われている。従って、ボルトの信頼性・安全性を確保するためには、主として耐緩み性に勝れ、かつ疲労強度信頼性をも兼備し、なおかつ安価で使い易いことが理想的であるが、これまでそのような3拍子揃ったねじ締結体の実用化は成功していない。

## 3 研究内容

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 (<http://www.mech.kyutech.ac.jp/fracture/index.html>)

### (1) 耐緩み性向上に関する研究

この(1)の研究では、M12のピッチ差  $\alpha = 30, \alpha = 40, \alpha = 50 \mu\text{m}$  の試験片(図1参照)を用いて、緩み試験および3次元FEM解析を行った。図2に、通常ナットを使用する際の、4つの過程の模式図を示す。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。そして、ピッチ差等の影響因子が緩み止めへ及ぼす影響を考察した。

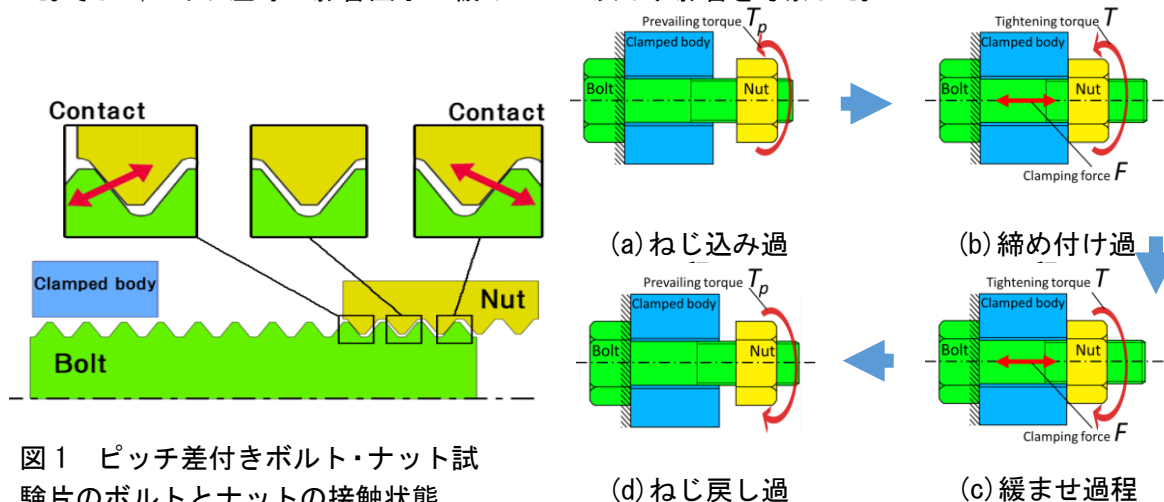


図1 ピッチ差付きボルト・ナット試験片のボルトとナットの接触状態

図2 (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

図3に本研究で明らか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3のようにプリベリン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3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。なお、ピッチ差 $\alpha = 35, 40, 50 \mu\text{m}$ の結果は、いずれも実験値と解析値に少し誤差はみられるが、ほぼ一致していることを確認している。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。

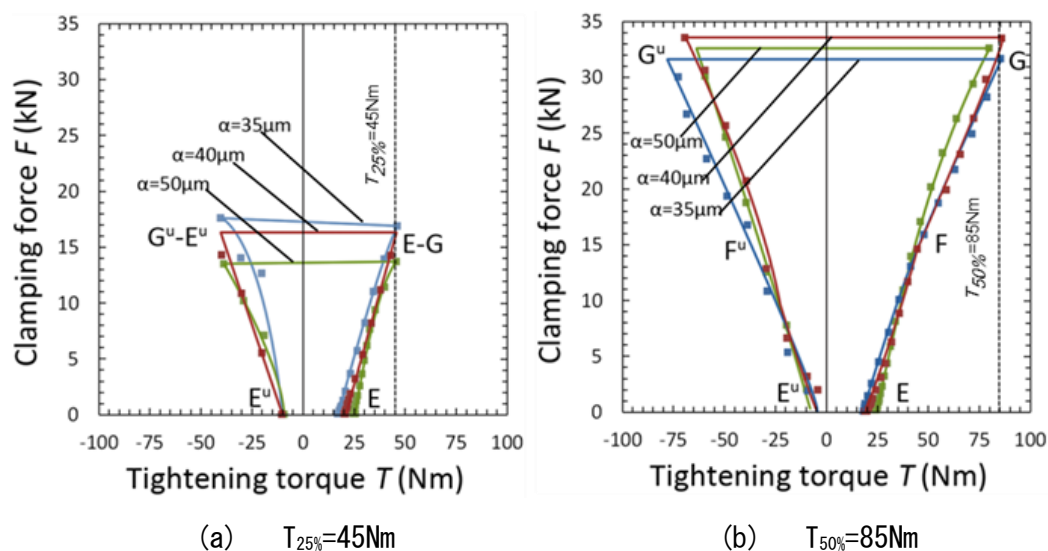


図3 締め付け・緩ませ試験結果 (M12)

## (2) 疲労強度向上に関する研究

この(2)の研究では、M16の3種類のねじ谷曲率半径 $\rho = \rho_0$ 、 $\rho = 2\rho_0$  ( $\rho_0 = 0.2\text{mm}$ )の試験片を用いた疲労試験(図4参照)を行った。そして、それぞれの形状変化における疲労強度向上へ及ぼす影響を調べた。

図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。

次に、耐久線図を用いて破壊リスクを評価した。図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。

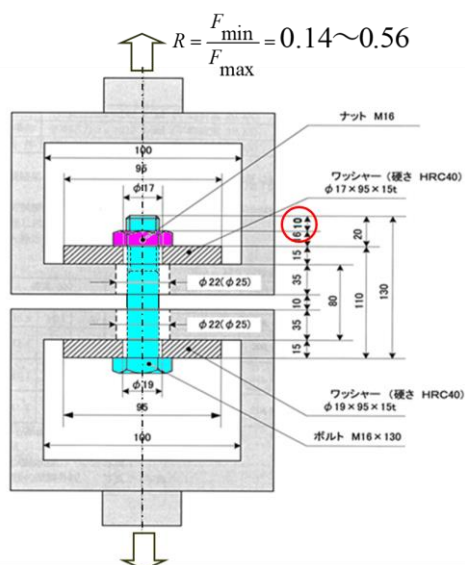


図4 疲労試験機

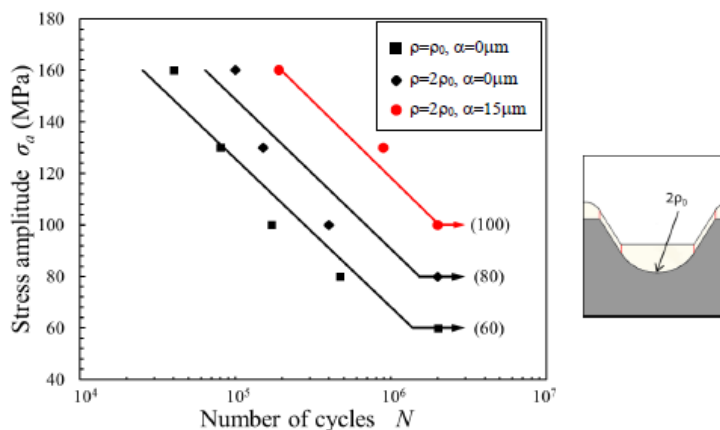
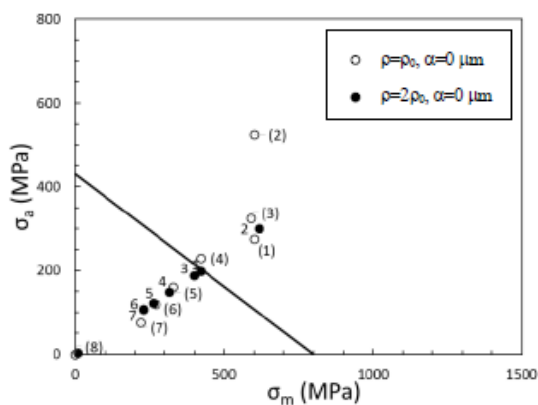
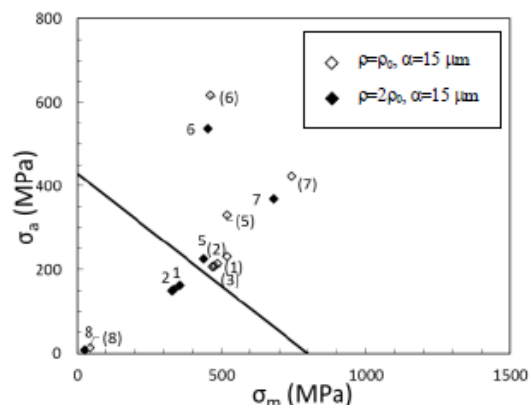


図5 S-N曲線 ( $\rho = \rho_0$ ,  $\alpha = 0$ ,  $\rho = 2\rho_0$ ,  $\alpha = 0$ ,  $\rho = 2\rho_0$ ,  $\alpha = 15$  ( $\rho_0 = 0.2\text{mm}$ ))



(a)  $\rho = \rho_0, 2\rho_0$  when  $\alpha = 0\mu\text{m}$



(b)  $\rho = \rho_0, 2\rho_0$  when  $\alpha = 15\mu\text{m}$

図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研究

上述の(1),(2)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(図7参照)から、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ことがわかった。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、異なるナット高さでピッチ差を有するM12 ボルト・ナット締結体(図8参照)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の

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。

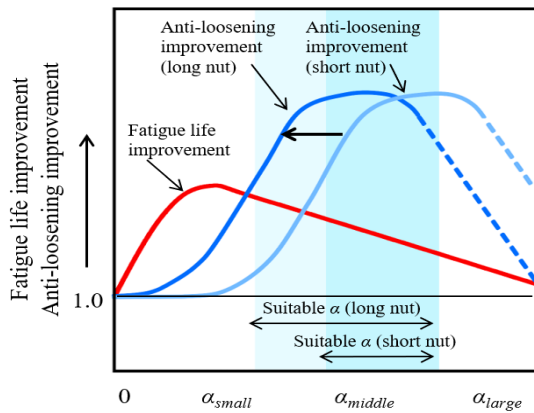
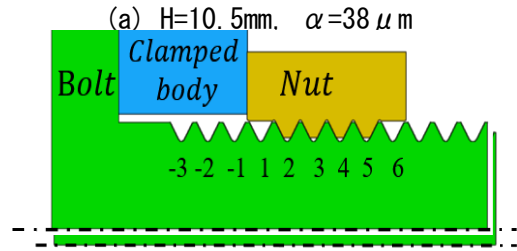


図7 緩み防止と疲労寿命性能の概略図



(a) H=10.5mm,  $\alpha=38 \mu\text{m}$   
(b) H=14mm,  $\alpha=25 \mu\text{m}$

図8 ボルト・ナット締結体の概略図

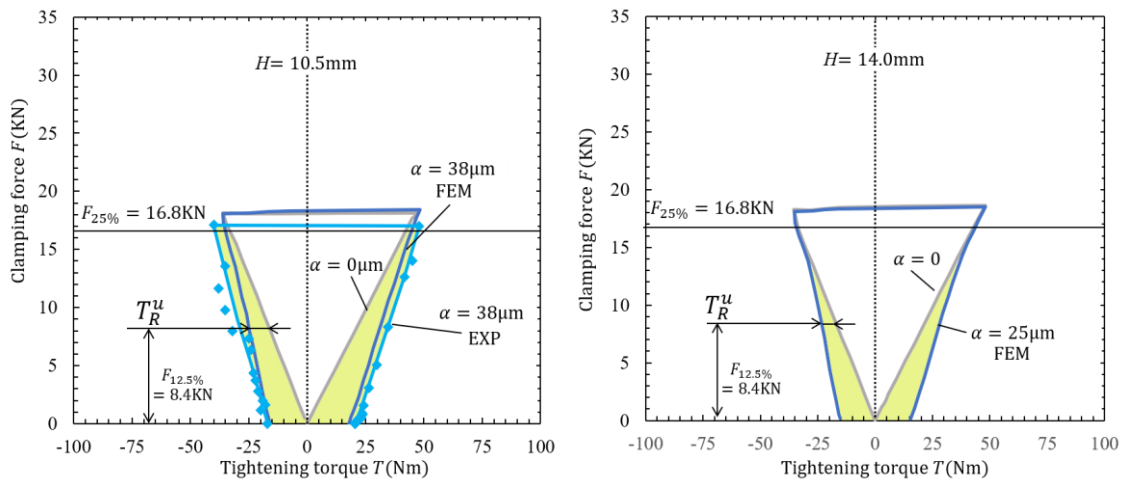
図9に緩み止め性能と疲労強度向上の両立のため行った、締め付けおよび緩ませ過程におけるトルクTと締結力Fの関係について実験結果と解析結果を同時に示す。図9において、(a)はナット高さ10.5mm、ピッチ差  $\alpha=38 \mu\text{m}$ 、(b)はH=14.0mm、 $\alpha=25 \mu\text{m}$ 、を用いて締め付けたときの結果であり、点線に実験結果、実線に解析結果を示す。図9では、いずれも実験値と解析値に多少の誤差はみられるがほぼ一致しており、ナット高さに関係なく解析精度は高いと言える。

図9(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9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9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  $T_R^u = T_{12.5\%(\alpha>0)}^u - T_{12.5\%(\alpha=0)}^u$  ”と定義して、耐緩み性能を考察できる。

表1に図9(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。



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

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

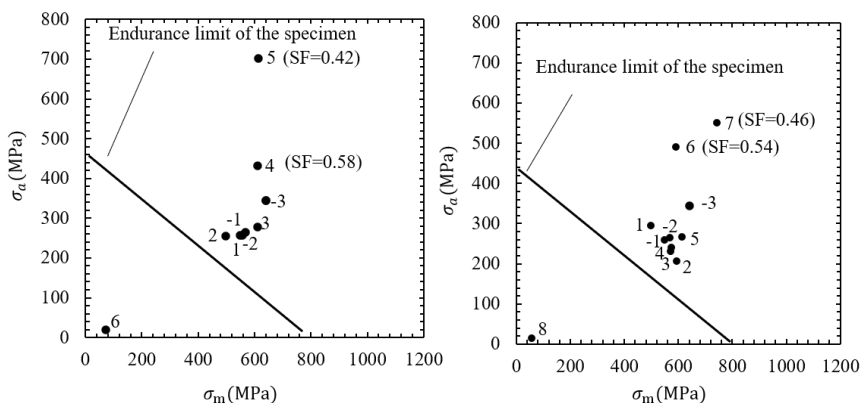
図9 締め付け及び緩ませ過程におけるトルク T と締結力 F の関係 (実験・解析)

表1 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)

図10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10にナット高さH=10.5mm, ピッチ差  $\alpha=38\mu\text{m}$  及びH=14.0mm,  $\alpha=25\mu\text{m}$ それぞれの解析

寸法/形状		緩み止め性能
ナット高さ H(mm)	ピッチ差 $\alpha(\mu\text{m})$	$T_R^u(\text{Nm})$ 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

結果を耐久線図と対比して比較した。その結果、両者の最も危険な位置は、ほぼ一致しており、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。



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

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

図 10 各ボルトねじ底での耐久線図

#### 4 本研究が実社会にどう活かされるかー展望

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。

#### 5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

九州工業大学・野田研究室では、これまでに72名の外国人研究者や留学生を受け入れており、2009年以降、博士と修士合わせて毎年10名以上の留学生が在籍している。日本人学生と留学生の混成研究チームをテーマ別に5~7チーム編成することにより、グローバル研究・教育を研究室レベルで実践している。

そのような取り組みと並行して、種々の企業との共同研究・受託研究を積極的に推進している。これまで革新的な製品開発に関して、5件の産学連携の国家プロジェクトが採択・実施されている。

これらのプロジェクト研究の中に、本研究を含む一連の特殊ボルトの研究開発がある。特殊ボルトの研究開発は、2008年に日本塑性加工学会論文賞を受賞後、実用上の観点から耐緩み性能と高強度を低価格で実現させるために行われてきた。本研究では、これらの研究をまとめるとともに「固着ナット」の製品化を目指して行った。

#### 6 本研究にかかわる知財・発表論文等

**特許: 1件**

**ねじ部材**

特願 特願2016-008064 特開 特開2017-129188 特許 特6704602 野田尚昭

**論文・学会発表等: 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.

## 7 補助事業に係る成果物

### (1) 補助事業により作成したもの

自転車等機械振興補助事業の完了報告書

[http://www.mech.kyutech.ac.jp/fracture/pdf/2019M-190\\_20210630.pdf](http://www.mech.kyutech.ac.jp/fracture/pdf/2019M-190_20210630.pdf)

### (2) (1)以外で当事業において作成したもの

特に無し

## 8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名：九州工業大学 工学研究院

(キューシュウコウギョウダイガク コウガクケンキュウイン)

住 所： 〒804-8550

福岡県北九州市戸畑区仙水町1-1

担 当 者： 教授・野田 尚昭(キョウジュ・ノダナオアキ)

担 当 部 署： 機械知能工学研究系 弾性力学研究室

(キカイチノウコウガクケンキュウケイダンセイリキガクケンキュウシツ)

E - m a i l: [noda.naoaki844@mail.kyutech.jp](mailto:noda.naoaki844@mail.kyutech.jp)

U R L: <http://www.mech.kyutech.ac.jp/fracture/index.html>