

令和元年6月3日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06043

研究課題名(和文)ねじ結合部の動的強度保証を実現する新しいフランジ付ナットの国際規格提案

研究課題名(英文) Proposal of new nuts with flange with quality assurance of dynamic performances for bolt/nut assembly as an ISO product standard

研究代表者

萩原 正弥 (HAGIWARA, Masaya)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：90134840

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：ボルト・ナット結合の設計最適化の観点から、組合せるボルトに対してフランジ付きナットの仕様を最適化するための指針として、次の成果を得た。(1) 現行のフランジ付きナットでは、フランジ部の剛性が高いためねじ山の負荷能力に余裕が大きく、二面幅及び高さを減少させる軽量化設計が可能である。(2) 二面幅を減少させた軽量化フランジ付きナットは、現行品に比べ、ボルトねじ谷底の局部的応力を低下させる効果があり、その程度にはナットの半径方向変位及び面取りを含む座面側不完全ねじ山の剛性が影響する。(3) 軽量化フランジ付きナットの試作を行い、精度及び品質について現行規格を満たしていることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

この研究で得られた知見は、ボルト・ナット結合全般に対して、ねじ締結部の信頼性向上(動的特性の保証)及び軽量化に直接寄与する具体的な成果を多く含んでおり、それ自身、学術的な意義がある。さらに、国際規格化が実現できれば、自動車産業をはじめとする世界の工業全般に対して大きな貢献が期待でき、その社会的意義は大きい。

研究成果の概要(英文)：The following guidelines were obtained concerning the optimal design for nuts with flange mated with bolts: (1) The flanged part increases the rigidity against the radial deformation of nut, and leads to boost the loadability of mating threads; (2) newly proposed light weight nuts with flange decrease the local stress on the thread root of bolts mated. The stress level is affected by the incomplete thread and the geometry of countersink of nut bearing surface side; (3) no harmful effects were observed during the manufacturing process and the quality assurance tests for the newly designed nut.

研究分野：機械工学

キーワード：機械要素 締結用部品 フランジ付きナット 動的性能 品質保証 軽量化 国際標準化

### 1. 研究開始当初の背景

締結用部品（ボルト及びナット）の機械的・機能的性質に関しては、個々の部品の品質保証は極めて高い水準に達していると考えられているが、設計において、部品の組合せとして発現される動的特性は十分には考慮できておらず、ねじ結合の総合的な性能及び信頼性向上の観点からナットの仕様を最適化しようとする発想には繋がっていない。

本研究課題で対象とするフランジ付きナットは、従来の六角ナットにおける座面の面積不足を解消するために考案された製品であり、その形状や寸法は経験的に決められている。一方、この製品は、六角ナットに比べて設計の自由度（設計変数の数）が格段に大きく、それらを調整することによって、動的性能の向上と併せて最適化（軽量化）も実現できる可能性がある。

### 2. 研究の目的

従来、ねじ結合の特性評価の上で“実験結果のばらつき”として取り扱われてきた因子を含めたナットの仕様（形状、寸法及び精度）と、ナットの膨張・収縮変形、及びそれによって生じる第1ねじリードのかみあい状態が、締付けや疲労及びゆるみというねじ締結体の動的性能（特性）に及ぼす影響を総合的かつ定量化して評価することで、ボルト・ナット結合体の信頼性と経済性を両立できる新しいナットの設計方式を確立し、その成果として具現化される新しいフランジ付きナットをISO/TC 2に提案することで、国際標準化に繋げようとしている。

### 3. 研究の方法

研究は、通常の六角ナット、ISO規格のフランジ付き六角ナット及び二面幅、高さ、フランジ形状などを変化させた新しいフランジ付きナットを対象とし、(1) かみあいねじ部の静的強度、(2) 組合せるボルトの疲労強度、(3) 耐ゆるみ性能、(4) 締付け時の特性などについて、関係すると思われる因子を体系的に変化させた実験及びその影響を説明するためのFE解析モデルの構築を行い、シミュレーションで把握される特性によって、ナット仕様の最適化を行うとともに、(5) 最もきびしい条件で軽量化フランジ付六角ナットの試作を行い、製品の製作性及び品質に関する確認を行った。FE解析では、それぞれ、(1) 実験を併用して正確に設定したナットの材料特性を組入れた2次元弾塑性FE解析による荷重-伸び線図の再現、(2) ナット座面側の不完全ねじ山及び面取りの影響を考慮するための3次元解析におけるズームモデルの適用、(3) 3次元ボルト・ナット結合モデルによるナットの膨張・収縮変形量の推定及び3次元直交座標系剛体-ばねモデルによるねじ面及び座面のすべり軌跡の把握及び摩擦係数の逆推定を試みる。

### 4. 研究成果

(1) かみあいねじ部の静的強度に基づくナット形状の最適化

M10、強度区分8のフランジ付きナット（スタイル2、270HV）と、強度区分14.9相当の試験用マンドレル（453HV）の組合せについて、ナットの高さを減少させることによってかみ合いねじ山のせん断破壊を起こし、ナットの（引張）材料特性を厳密に設定したシミュレーションによってその挙動（荷重-伸び線図）が正確に再現できることを確認した（図1）。規格品のナット高さを70%程度にしても、ねじ山の負荷能力は、ボルトの最大破断荷重（強度区分8.8の場合58kN）に比べて十分に大きく、ナットが過剰設計であることがわかる。次に、シミュレーションによってせん断破壊荷重に及ぼすフランジ部の影響を調べた結果、ねじ山のせん断破壊強度には、特にナット座面側の膨張変形量が大きく関与しており（図2）、この変形量をコントロールすれば、ナットの大幅な軽量化が可能であることがわかった。

(2) ナットの仕様が組合せるボルトの疲労強度に及ぼす影響

ISO 4161 (JIS B 1190) で規定される M10 強度区分 10 に相当するフランジ付き丸ナット（二面幅 15mm 相当、高さ 9.7mm）と、(1) の結果をもとに、新しく設計した軽量

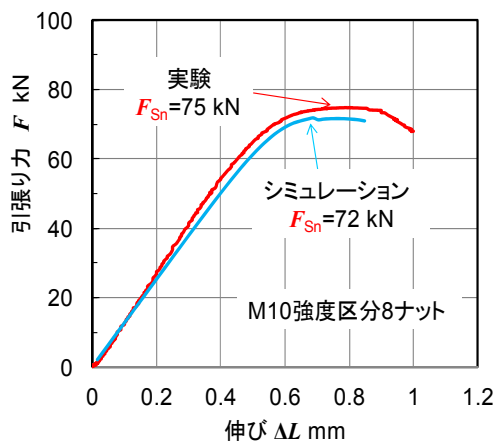


図1 ねじ山の破壊シミュレーション

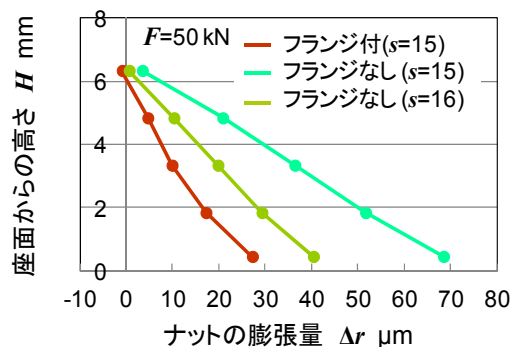


図2 ナットの膨張変形量

フランジ付き丸ナット（二面幅 13mm 相当，高さ 8.4mm）を同一材料から製作し，それぞれに対し，強度区分 10.9 のボルトとの組合せに対して，疲労試験（打切り繰返し数  $5 \times 10^6$ ）を実施したところ，平均荷重の比較的高い条件（ $\sigma_m = 0.8 R_{p0.2} : R_{p0.2}$  はボルトの規格耐力の最小値）において，同程度のボルトの疲労強度が実現でき，また平均応力の比較的低い応力比  $R_s = 0.1$  の条件では，軽量フランジ付きナットと組合せたボルトの疲労強度の方がむしろ僅かに（10%程度）高くなるという結果が得られた。

2次元軸対称FE解析によって破壊箇所となるボルト第1ねじ谷底の局所的応力分布について調べたところ，ナット高さの減少は，ねじ谷底の応力集中の増加に繋がるが，二面幅の減少によって，ナットの半径方向の剛性が低下し，第1ねじ谷底の応力集中が緩和されることが定性的にわかった。ただし，実際のねじ谷底の応力には，ナット座面の不完全ねじ部や，ねじのリード角に起因するねじ面のすべり現象が影響を及ぼす。そのため，疲労強度を定量的に評価するためには，ボルト・ナット結合を正確に再現した3次元モデルによる解析が不可欠であるが，必要な要素数を考えると，現実的にその直接的な実施は難しい。そこで，本研究では，要素分割を段階的に緻密化する“ズーム法”の適用を試みた。

図3に，解析モデルを示す。(a)のモデルは，ボルト・ナット結合体の状態をほぼ忠実に再現しているが，ねじ谷底の応力分布を求めるには，要素が粗すぎる。そこで，(b)では，ボルトの第1ねじ谷底付近を含む二山程度を切り出し，モデル全体の細要素化に加え，ねじ谷底に沿っ

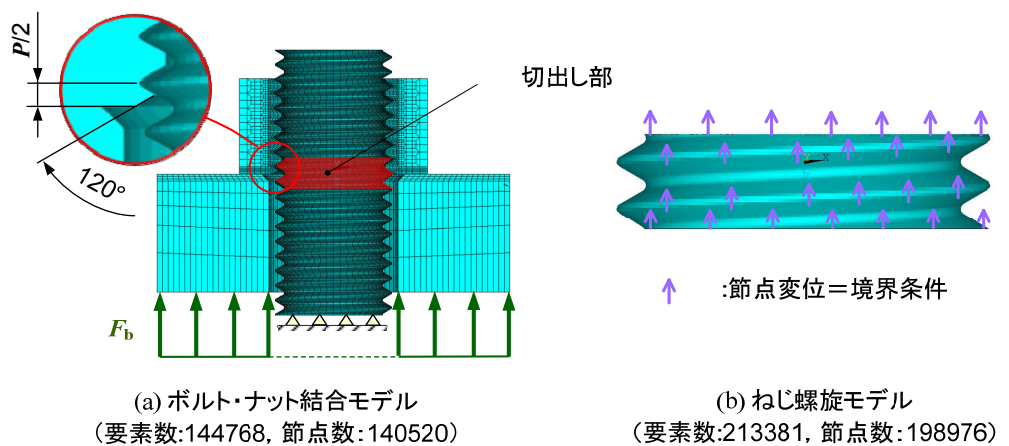


図3 ねじ谷底3次元FE応力解析のためのズームモデル

た要素を選択的に緻密化する。モデルには，元の節点（切り出した端面及び接触ねじ面）の変位及びそれぞれに追加された節点に対して内挿された変位を境界条件として与えている。解析の結果，ねじ谷底の応力は，面取りの影響を含む座面側の不完全ねじの影響を受けて変化し，局所的最大応力は，図4のように，ねじの切り始めの位置（ナット座面側に高さ  $1P$  の山が存在する位置）より少し先になぜかことがわかった。解析に2次元軸対称モデルを使用することも可能ではあるが，その場合には，少なくとも座面側にこの位置でのナットねじ山の状態を再現する必要がある。また，解析結果から，ナット座面側の面取りは，ナットの膨張変形にも影響を及ぼすため，その角度及び深さも設計変数と考える必要があることがわかった。

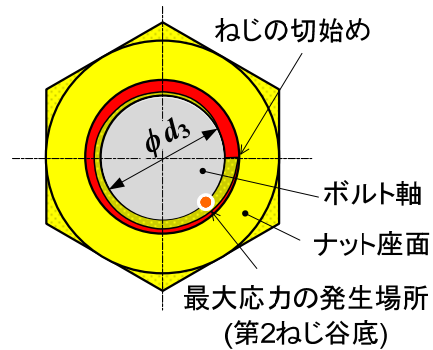


図4 ナットの不完全山とボルトねじ谷底の最大応力位置

### (3) ねじのゆるみに関係するかみあいねじ面及び座面でのすべり軌跡

ねじのゆるみは，ボルトに作用するねじりトルクの蓄積と解放のプロセス（繰返し）によって起こり，軸方向繰返し外力の作用によっても発生するおそれがあるといわれている。そこで，疲労試験機にねじれを拘束する装置を取付け，繰返し荷重（引張り－引張り負荷）下でのボルトのねじりトルクの変化を調べたところ，繰返しサイクルにおいて，負荷時にトルクの増加が起こり，除荷時にはトルクの変化は起こらないという結果が得られた。また，丸ナットを用いて負荷時のナットの半径方向変形を測定したところ，その大きさはねじ面及び座面の潤滑状態の組合せによってかなり変化することがわかった。そこで，これらの結果をシミュレートするため，図3(a)のようなボルト・ナット結合に対し，接触面の要素を緻密化（ただし，ねじ谷底の丸みは省略）したモデルを作り，実験と同様に座面の拘束を行って解析を行ったところ，負荷時には，ナットの変形及びボルトのねじりトルクの挙動に関し，実験とほぼ同様の結果が得られたが，除荷時のトルクの挙動は実験とはかなり異なったものとなった。種々の条件での解

析の結果、接触判定時の誤差がその主要因と推測された。そこで、この問題を解消し、ねじ面及び座面でのすべり軌跡を明らかにするため、接触面での要素のさらなる緻密化が可能な剛体要素とばね拘束による単純化ボルト・ナットモデルを新たに考案し、解析を試みた。

図5に、モデル化の概要を示す。図5(a)のような一本ボルト締結体モデルを想定し、横軸を回転方向、縦軸を軸方向として展開すると図5(b)が得られる。横方向のばねはトルクと回転角、縦方向のばねが伸びと軸力の関係を表す。かみあいねじ部は、紙面と垂直な方向（半径方向）にねじ山の半角 $\beta$ だけ傾いており、ボルト及びナットの半径方向の変形に対応するばねを付ける。実験では、被締結部材を締結する代わりに、部材のねじれを拘束しているため、解析モデルでも、被締結部材の下半分及びばねを省略した上で、残った被締結部材のねじれ及び半径方向変位を拘束して接合面に負荷外力を与える。その場合、作用する外力 $W_a$ とボルト軸力 $F_b$ は常に等しくなる。ナットの仕様の違いは、ナットの膨張変形に関係する半径方向のばね定数の違いに置き換えられる。全体モデルからそれぞれのばね定数を求め、ねじ面及び座面の摩擦係

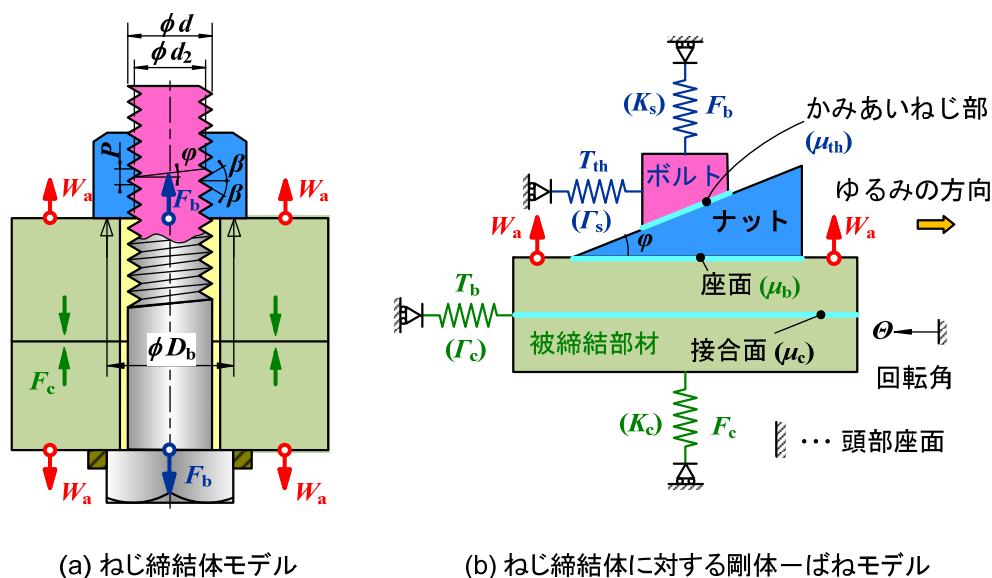


図5 ねじ締結体のモデル化

数を仮定して解析を行ったところ、定性的には、ボルトのねじりトルクの挙動を再現できることがわかったが、座面のすべり発生の条件に実験と大きな差異が生じ、すべり軌跡及びそれに基づくトルク変動の定量化（摩擦特性の逆推定）には至らなかった。継続課題として、剛体-ばねモデルに対応する実験（装置の製作及び測定）を計画している。

#### (4) 締付けに関する特性

上で実施した静的強度実験、疲労試験及びゆるみに関する動的試験においては、負荷として引張り外力の作用を対象としたが、図5(a)に示すようなねじ締結体では、締付け時の特性も重要となる。締付けでは、純粋引張り外力作用下と異なり、ねじ面及び座面で円周方向のすべり運動が発生しており、したがって、それぞれの面での半径方向のすべり挙動も異なってくるものが予測される。そこで、ボルト・ナット試験片及び座面の状態を統一して、純粋引張り負荷及び締付け負荷が作用できる装置を製作し、ナットの膨張変形の測定を試みたが、変位測定用渦電流センサの姿勢誤差等の影響で、両者の明確な違いは確認できなかった。ナットの駆動形体の形状（六角、12ポイントなど）、フランジの有無などの影響を含め、今後、実験及び解析を継続する予定である。

#### (5) 製作性及び製品の品質に関する確認

本研究で得られた知見をもとに、大量生産工程を念頭に置いた製作性、及び製作された製品の品質に関する検証を行った。試験片としては、現在、M6の大型フランジ付き六角ナット（規格外品）として流通している製品のブランクを利用し、穴をM8用に機械加工で抜き、二面幅10mm、高さ5.8mm、フランジ径16mmのM8ナット（強度区分8相当）を、ベントタップ自動加工機で製造した（断面形状は図6参照）。100個の連続加工において、異常は生じず、外観検査及びゲージによるねじ精度検査（6H）にも合格した。また、品質に関しても、表1に示す通り、現行規格品の水準又はそれ以上となっている。提案する新しいフランジ付き六角ナットの二面幅として、現行規格品の1サイズ下の値を選んだ場合、M8



図6 試作したナットの断面形状

が最も厳しい条件（二面幅部の肉厚が 1mm）となる。また、今回の試作品では、硬さが強度区分 8 の下限であり、高さも 0.7D 程度（通常のスタイル 1 ナットは 0.8D 以上）であるため、座面側の面取りを設けていないが、面取り角度を 120° とすれば、その付与による負荷能力の減少は高さの僅かな増加によって十分に補える程度であると考えられる。また、駆動形体である六角部の強度（破壊トルク）は、塑性域締結が可能なレベルにあり、六角以外の形状（例えば 12 ポイント）によるさらなる負荷能力向上の可能性はある。これらのことを総合すると、軽量化と動的性能保証を両立した新しいフランジ付きナットの国際提案は、十分実現性を持っていると結論できる。

表 1 M8, 強度区分 8 の軽量フランジ付き六角ナットと現行規格品との比較

製品	質量 g	硬さ HV	保証荷重 N	ねじ山破壊荷重 N	疲労強度* MPa	破壊トルク** N・m
JIS B 1190	7.8	200-302	31800	>31800	65.0	—
軽量ナット	3.7	200	OK	34000	69.2	50

\*:  $R_s=0.1$  の条件におけるボルトの疲労強度

\*\* : ねじ締付け時の駆動形体（六角部）の破壊トルク

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 0 件）

〔学会発表〕（計 8 件）

- ①古川朗洋, 森下一希, 萩原正弥, 小形二面幅及びスタイル 1 のナット高さをもつ軽量フランジ付き六角ナットの開発, 日本機械学会 2019 年次大会 (2019-09) (講演予定)
- ②Masaya HAGIWARA, Ryota SUZUKI and Yutaka INAGAKI, Effect of Bending Moment on the Fatigue Strength of a Bolt in Bolt/Nut Assembly, The 8th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology (2019-04)
- ③稲垣裕, 萩原正弥, ボルト・ナット結合体におけるボルトねじ谷底の 3 次元応力解析（ズーム法における 3 次元螺旋モデルの作成）, 日本機械学会 2018 年次大会 (2018-09)
- ④平松高宗, 萩原正弥, 締付けにおけるナット膨張変形について, 日本機械学会 2018 年次大会 (2018-09)
- ⑤森下一希, 萩原正弥, フランジ付きナットの形状がボルトの疲労強度に及ぼす影響, 日本機械学会 2018 年次大会 (2018-09)
- ⑥山本将央, 萩原正弥, ナットの仕様がかみ合いねじ部のせん断破壊強度に及ぼす影響, 日本機械学会 2017 年次大会 (2017-09)
- ⑦稲垣裕, 萩原正弥, ナットの不完全ねじ部がボルトねじ谷底の局所的応力分布に及ぼす影響 - ねじ軸直角断面及びねじ山の荷重分布に基づく 3 次元螺旋モデルの作成 -, 日本機械学会 2017 年次大会 (2017-09)
- ⑧Masaya HAGIWARA and Bui Xuan LINH, Optimal Design for Hexagon Nuts with Flange Taking into Account the Fracture Modes of Bolt/Nut Assembly, The 7th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology (2017-04)

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

## 6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：古川 朗洋

ローマ字氏名：(FURUKAWA, Akihiro)

研究協力者氏名：鈴木 涼太

ローマ字氏名：(SUZUKI, Ryota)

研究協力者氏名：稲垣 裕

ローマ字氏名：(INAGAKI, Yutaka)

研究協力者氏名：平松 高宗  
ローマ字氏名：(HIRAMATSU, Takahiro)

研究協力者氏名：森下 一希  
ローマ字氏名：(MORISHITA, Kazuki)

研究協力者氏名：山本 将央  
ローマ字氏名：(YAMAMOTO, Masao)

研究協力者氏名：ブイスワンリン  
ローマ字氏名：(LINH, Bui Xuan)

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。