

並目一条・並目多条二重ねじ機構に基づく ロックングボルトの転造成形性最適化

天野 秀一^{*1}, 新仏 利伸^{*1}, 沖本 悠暉^{*1}, 竹増 光家^{*2}

志村 穰^{*3}, 長谷川 収^{*4}, 桑原 利彦^{*5}

Rolling Formability Optimization of Locking Bolt Based on Double-Thread Structure Composed of Coaxial Single and Multiple Thread

Shuich Amano^{*1}, Toshinaka Shinbutsu^{*1}, Yuki Okimono^{*1}, Teruie Takemasu^{*2}

Jyo Shimura^{*3}, Osamu Hasegawa^{*4}, and Toshihiko Kuwabara^{*5}

In previous studies, we developed innovative anti-loosening bolts and nuts with a double-thread structure (denoted DTB-IIC) composed of coaxial single and multiple coarse threads. It was also experimentally proven that the DTB-IIC has high anti-loosening performance. In this study, we analytically and experimentally investigated the effects of multiple thread groove depths and rolling methods on the thread rolling formability of DTB-IIC fasteners. The bottom rise rate, which is the ratio of the bottom rise amount of the multi-thread groove to the reference thread height, was set in three ways of 50%, 60%, and 70%. As the bottom rise rate increased, peeling on the thread surface was suppressed and the high temperatures produced by thread rolling decreased significantly, but the loosening resistance against vibration clearly decreased. We compared three typical mass production processes for bolts: the round die method, the flat die method, and the planetary method, with the bottom rise rate set at 50%. It was found that the flat die method had the best rolling formability in terms of screw-thread shape and surface quality. A Finite element simulation consistently reproduced the deformation process of the complex DTB-IIC thread and revealed that the material shear flow due to over-rolling led to the occurrence of surface peeling.

Key words: anti-loosening bolt, double thread mechanism, thread rolling, bottom rise rate, rolling method, rolling formability, strength tests, Junker vibration loosening test.

1. 緒言

ねじ締結体は、取付け取外しが容易なため、極めて使用頻度、重要度が高い機械要素であり、その使用の歴史は古く、社会的にも広く普及している。特に、M24より小さいサイズのねじ (fasteners) は、ねじ転造による大量生産方式が確立されているため、世界中で年間数千億本のボルトが製造されている。しかし、そのような小型のボルト締結体は、使用中の周期的応力 (外力振動) や衝撃力 (荷重) などの動的外力が加わり、ナットの戻り回転によって緩む (締

結力を失う) という問題がある[1]。この緩みの問題は完全には解決されておらず、それに起因する致命的な事故が、今なお世界中で報告されている[2]。このような状況に鑑み、これまで多くの研究者がボルト締結体の緩み現象の究明を試み[3-6]、その防止策や各種緩み止め部品が考案されてきた[7-10]。しかし、ほとんどの市販の緩み止め部品は、厳しい横振動荷重を受けたとき、ナット座面にマクロ滑りが発生し、戻り回転による緩み (自己緩み) を完全には抑止できない、何故ならそれらのほとんどはボルトとナット間およびナットと座面間の摩擦力を強化したものに過ぎないからである[5,11-14]。これに対し、同軸上にねじリードの異なるねじをもち、各々のリードに対応するダブルナット構造をした、二重ねじ締結体 (以後 DTB と呼ぶ) は、非常に優れた緩み止め性をもつことが分かっている[15-17]。その種の締結体では、リードの大きなナットをまず締付け、次にリードの小さなナットを締め付けて、ダブルナット構造とする。DTBの緩み止め機構は、2種類のナットが異なる戻り回転速度をもつために起こる干渉効果に基づく機械的ロ

^{*1} (株)ニッセー 転造研究所

〒409-0502 山梨県大月市富浜町鳥沢 2022

^{*2} ハッピー・サイエンス・ユニバーシティ 未来産業学部

〒299-4325 千葉県長生郡長生村一松丙 4427-1

^{*3} 拓殖大学, 工学部

〒193-0985 東京都八王子市館町 815-1

^{*4} 東京都立産業技術高等専門学校 機械システム工学コース

〒140-0011 東京都品川区東大井 1-10-40

^{*5} 東京農工大学 工学部

〒184-8588 東京都小金井市中町 2-24-16

ックにより高められている。

DTBには種々の構造が可能であるが、筆者らはこれまでの研究で[18-20]、一条並目ねじに多条並目ねじを重畳させた画期的構造のDTB-IIを考案し、その構造、性能、量産プロセスの最適化に関する研究を行ってきた。その結果、Fig. 1に示すDTB-IICが、転造成形性、静的および動的疲労引張強度、耐振動緩み止め性などの観点から総合的に優れた構造であることが分かった[20,21]。DTB-IICは、多条ねじ溝の条数を3に設定し、それから1条を間引き、残り2条を1.5ピッチ間隔で並べ、さらにその溝深さを有効径位置まで底上げした構造を有している。また、この構造ではFig. 1(c)に示すように、シングルナットを締め込むとき、先に装着されている多条ナットも連れ周りに締め込まれるため、最終的なトルク管理は外ナットのみで行うことができ、従来のDTB-I[16]に比べ大幅に使用性(usability)を改善することができた。DTB-IICの量産は、Fig. 1(b)に示す各角度位置の製品ねじ形状を転写した周期的に変化するFig. 2に示す特殊形状の溝を工具表面に有する専用ダイスを用いて、通常のシングルねじボルト(STBと呼ぶ)と同じねじ転造により行われる。これまで、このダイスの特殊溝の加工は、時間がかかり高コストな放電加工により行われていたため実用性が乏しかった。そこで筆者らは前報[21]において、このダイスを高速・高精度かつ高効率に製造できる研削加工システムを完成させた。その結果、ダイスの加工時間と製造コストは大幅に減少し、ダイス溝形状(具体的にはFig. 2(b)に示す平行四辺形溝の長さや深さ)の修正により、ねじ山形状の微調整によるナットの嵌合状態の改善も自在に行えるようになった。

しかし、素材ねじ部表面の細かな材料剥離の発生と、STBの場合に比べて転造直後の素材温度が高いという問題が依然として残った。今後この技術の実用性をさらに高めるには、転造成形性をSTBと同程度にまで向上させた量産技術を確認することが必要である。そこで本報ではこれらの問題を解決するために、多条ねじ溝の底上げ量 β に着目し、それを前報[20]の有効径位置より大きくした修正型DTB-IICを対象として転造シミュレーションと加工性実験を行った。しかるに、本研究の第1の目的は、 β が転造成形性や強度および緩み止め性に及ぼす影響を定量的に評価することである。一方、ボルトねじ部の大量生産方式には一般に丸ダイス式、平ダイス式、プラネタリー式の3種類があるが、これまでは汎用性の高さから丸ダイス式でのみ加工性実験を行ってきた。しかし、実際の製造現場では、特に需要の多いM8-M20のサイズのボルトはほとんど、より高速に加工できる平ダイス式かプラネタリー式によりねじ転造されている。そこで、我々は、前述のダイス研削加工システムを用いて、上記の各転造方式に対応した専用ダイスも開発し、それを用いたねじ転造実験とシミュレーションを行った。本報の第2の目的は、ねじ転造方式がねじ山成形性に及ぼす影響を比較評価することである。

2. 実験および解析方法

2.1 修正型DTB-IICのねじ部の構造

前述の理由から、本報では従来のDTB-IICとその改良型を研究対象に使用する。Fig. 1(a)にDTB-IICのねじ部の基

本構造を、(b)に0°から180°位置までねじ半周分の各代表的角度位置におけるねじ山断面形状を各々示す。ここで、多条ねじ溝の底上げ率 β を、Fig. 1(b)に示す底上げ量 α を基準ねじ山高さ h で割り百分率表示した値と定義する。本報ではまず β を有効径位置である50%にした従来型DTB-IICと、それを60%と70%にした2種類の修正型DTB-IICを研究対象とした。各試験片をDTB-IIC50、DTB-IIC60、DTB-IIC70と呼ぶことにする。これらのDTB-IICのねじ転造は、Fig. 2(a)に示すシングルねじ用台形溝の深さを β に合わせて調整した専用ダイスの用いて行われた。Fig. 3にこれら3種類のDTB-IICのねじ断面積比の ξ の周方向の変化を示し、これはDTB-IIの各角度位置における3ピッチ分のねじ断面積を、通常のシングルねじのそれで割ることにより計算される。 β が増加するにつれ、 ξ の最小値は、100%に漸近しており、その分布は直線的になっている。その結果、特にDTB-IIC70のねじ山形状は通常のSTBと変わらなくなっているため、これにより転造成形性の向上が見込める。

2.2 ねじ転造実験

本報でも比較評価のため、加工対象のDTB-IICのねじサイズは前報[20]同様M12×1.75とした。ねじの素材はSS400の生材とSCM435の熱処理材である。ねじ転造実験はDTB-IIC50に対しては、前述の3方式で行い、DTB-IIC60とDTB-IIC70に対しては工具押込み量や転がり数などの条件をフレキシブルに変えられる丸ダイス式でのみ行った。丸ダイス式は油圧式精密ねじ転造盤((株)ニッセー製COMMET

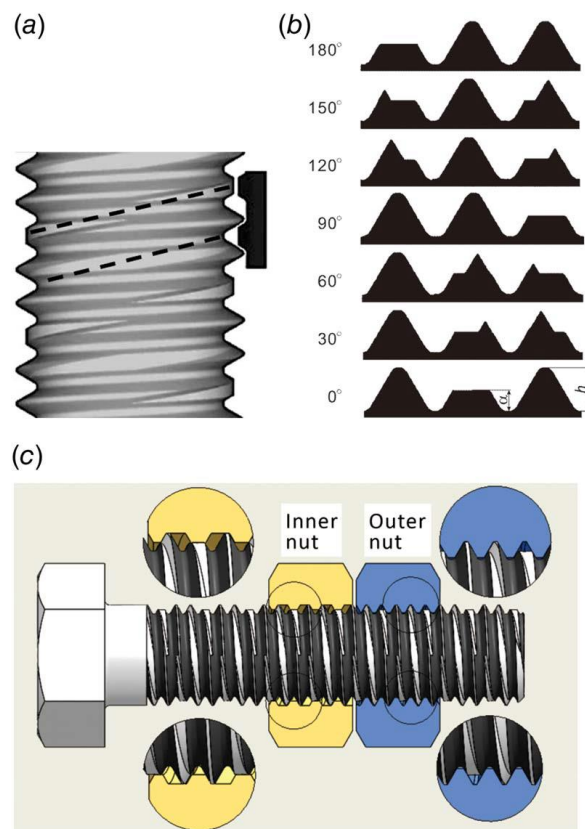


Fig. 1 Thread structure of DTB-IIC: (a) thread structure, (b) cross-sectional profiles, and (c) mating details with two types of nuts

FA-16UN) を用い、専用工具 2 個を左右の工具軸に各々取付け、寄せ転造により行った。加工条件は、工具回転数 62 min^{-1} 、転造時間 2 秒 (約 27 転がり)、ドウェル時間 1 秒である。平ダイス式は、インバータ式ねじ転造盤 (東田機工 (株) 製 HR-FM2) を用い、固定側と移動側に各々専用工具を

取付け、片側スライド方式により行った。加工時間は約 0.45 秒で、転造に 7 転がり、ドウェリングに 2 転がり行われた。プラネタリー式は、ロータリー転造盤 ((株) 阪村機械製作所 SSR-50D) を用い、駆動側の専用丸ダイス工具に対し固定側の専用セグメントダイス工具を適宜偏心させて取付けを行った。加工時間は約 0.33 秒で、転造約 9 転がりである。尚、素材の初期直径と工具押し込み量は、ねじ山成形状態とゲージナットによる検査により適宜調整した。

2.3 転造シミュレーション

ねじ転造シミュレーションは、汎用の FEM 解析ソフト Simufact forming ver.15 を用い、3 次元の解析モデルにより行われた。Fig. 4(a) に円柱状素材の初期 FEM メッシュを示す。計算時間短縮のため、ねじ山約 6 ピッチ分を解析対象領域とし、その初期直径は体積一定の条件から 10.8 mm とした。前報[20]同様、素材の同心円状に内径 8 mm、外径 14 mm のリファインメントボックス (RB と呼ぶ: 指定領域を細かくメッシング) を配置し、その領域を参照サイズ 0.4

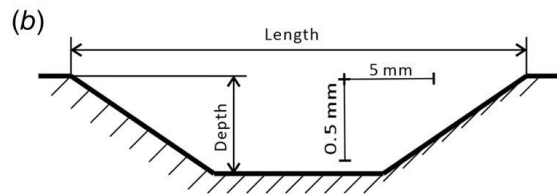
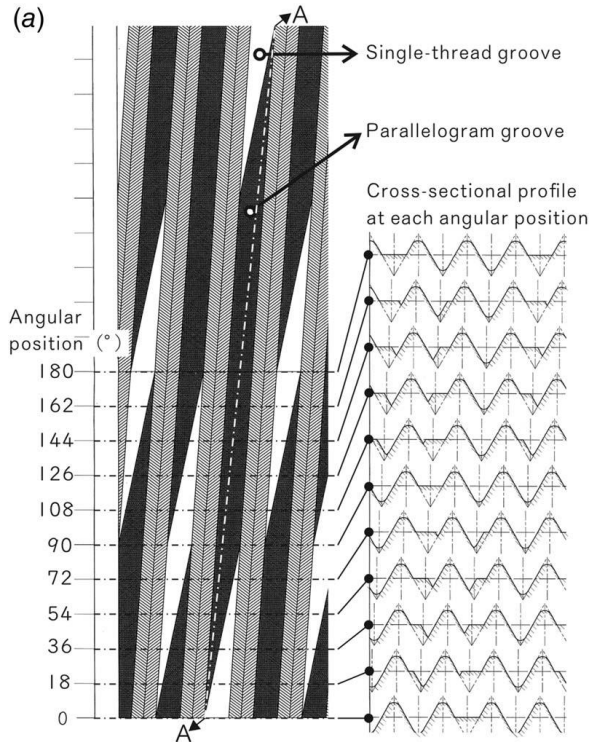


Fig. 2 Appearance of dedicated rolling die for DTB-IIC: (a) cross-sectional profile at each angular position and (b) A–A cross-sectional profile of the parallelogram groove

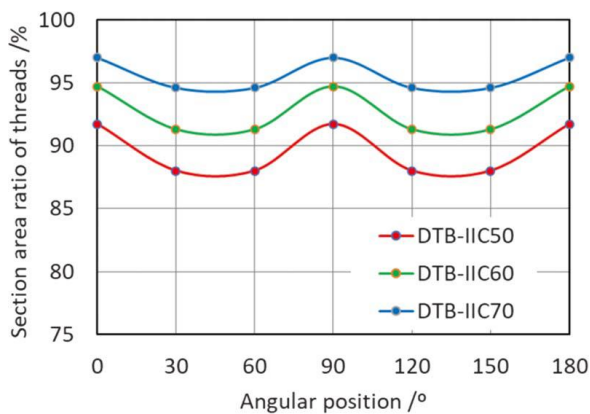


Fig. 3 Comparison of changes in sectional area ratio of screw threads at each angular position

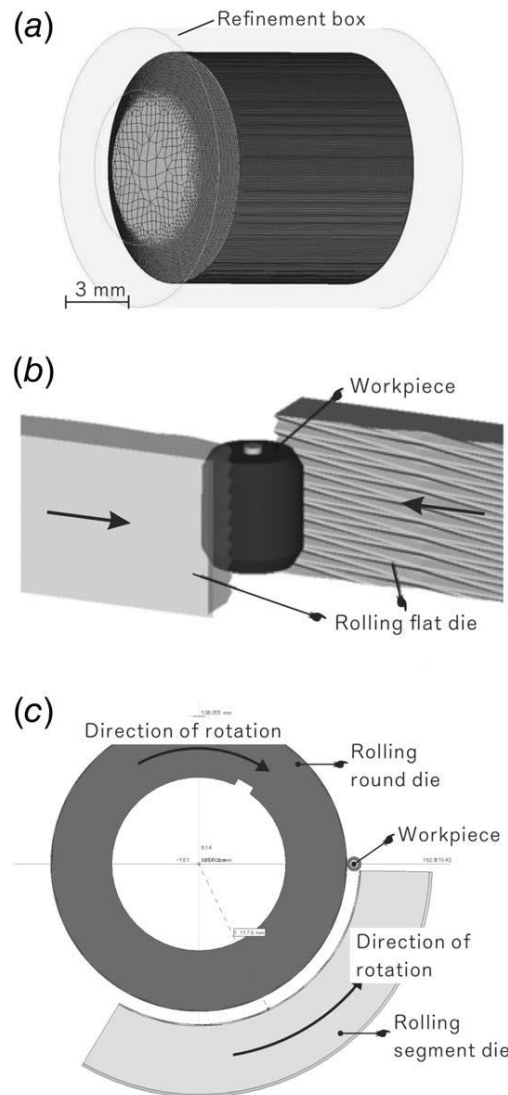


Fig. 4 FEM simulation models: (a) FEM mesh of the workpiece, (b) flat die rolling model, and (c) rotary planetary rolling model

mm の 6 面体要素で分割した。メッシュリゾーニング手順は、ねじ転造プロセス全体を通じて約 20 回実施された。材料特性は、次式で表される AISI 1045 材に対応する応力-ひずみ関係であるとした。

$$\bar{\sigma} = 900\bar{\epsilon}^{0.17} \quad (1)$$

ここで、 $\bar{\sigma}$ (MPa) は相当応力、 $\bar{\epsilon}$ は相当ひずみである。

Fig. 4(b)と(c)に平ダイス式とプラネタリー式の 3 次元ねじ転造シミュレーションモデルを各々示すが、それらにおいて素材は弾塑性体、両工具は剛体である。丸ダイス式は原理的に平ダイス式と同じであるが、実験と同一の加工条件で解析を行うと計算時間が膨大になるため、ここでは割愛する。変形様式は、(b)の平ダイス式では円柱状素材の両側に 2 つの対抗する専用ダイスを配置し、各々を同期させて矢印の転造方向に平行移動させ、同時に両工具を素材半径方向に一定速度で規定量 δ_{max} 押し込み、その後ドウェル工程を経てリリースした。素材の転がり数は、実験同様、転造に 7 回、ドウェルに 2 回とした。プラネタリー式は、実際にはセグメントダイスは固定し、丸ダイスのみ回転させ、その外周を素材が遊星運動してねじが切られる。しかし、そのやり方だと、シミュレーションでは RB は空間位置固定のため、それを素材周りに配置することができない。この問題を解決するために、Fig. 4(c)に示すように丸ダイスの回転中心に対して、セグメントダイスの加工面の曲率中心を規定量偏心させて配置し、両工具を各々矢印の方向に同期回転させて加工を行った。いずれの転造方式でも、全てのダイス加工面には Fig. 2 に示す特殊溝が精密に付与されている。尚、DTB-IIC60 と DTB-IIC70 の転造シミュレーションは、計算が途中で停止することなく安定して解が得られた平ダイス式で行った。 δ_{max} は、体積一定の条件から DTB-IIC50 では 0.64 mm、DTB-IIC60 では 0.67 mm、DTB-IIC70 では 0.70 mm に設定した。

2.4 引張り強度および振動緩み試験

転造された AISI4135 製の 3 種類の DTB-IIC の強度を比較評価するため、静的引張り試験を行った。引張り試験は専用の治具（試験片を荷重方向に自動調心できる）を取付けた（株）島津製作所製のオートグラフ AG-25TB を用いた。M12 のボルト試験片の首下長さは 110 mm、ねじ部長さ 58 mm）である。高さ 12 mm のシングルねじナットを（標点間距離 90 mm）で取り付けた試験片を治具に配置し、引張り速度 5 mm/min 一定で引張試験した。JIS によるボルトの強度区分は 10.9 である。

β が DTB-IIC の耐振動緩み性に及ぼす影響を調べるために、前報[20]同様 ISO16130 に準拠したユンカー式振動緩み試験[22,23]を行った。ボルトの材質は、強度ランク JIS10.9 の SCM415 製クロムモリブデン鋼棒である。試験片は丸ダイス式で転造された β の異なる M12 の 3 種類の DTB-IIC であり、それらの首下長さは 60 mm とした。Fig. 5(a)に示す Vibrationmaster 社製のユンカー振動緩み試験機 J121 が用いられた。この装置では試験中のボルト軸力の変化を試験中逐次測定できる。Fig. 5(b)は、ユンカーテストの原理を示しており、スライダプレートの横振動によるせん断荷重がボルト締結部に加わり、ナットが戻り回転して緩みます。

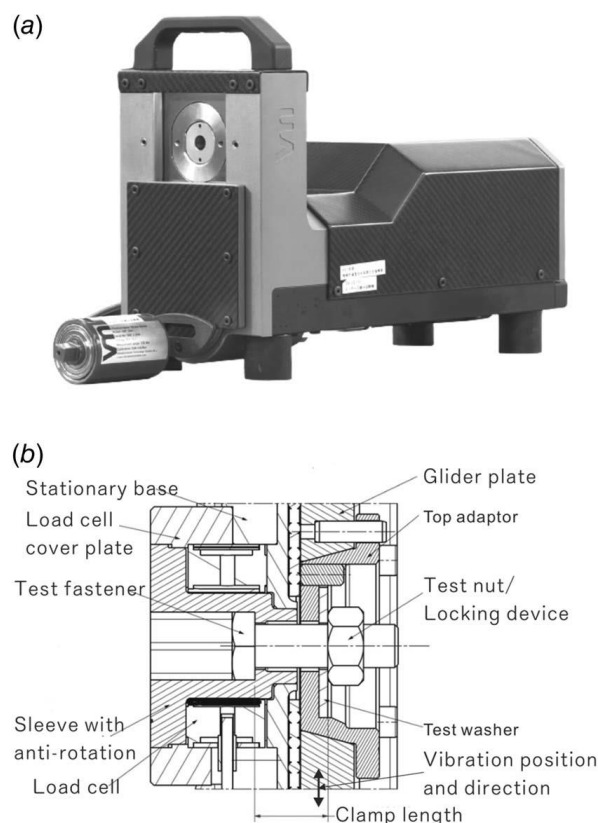


Fig. 5 Vibration loosening test apparatus: (a) Junker fastener test bench and (b) cross-sectional schematic diagram

この試験装置では、初期負荷軸力 F_M 、振動板 (glider plate) の有効横方向変位量 A 、振動周波数 f 、負荷繰返し数 N 、が任意に変更可能である。 F_M は実際の使用環境を考え 20 kN に設定し、また、前報[21]の結果（シングルナットで締め付けた通常のシングルねじボルトの自己緩みの条件）から $A = 0.80$ mm とした。 f は最も厳しい条件である 12.5 Hz に設定し、 N が 2000 サイクル（約 160 秒）を超えた時点、またはボルト締結部の緩みが明らかになった時点を試験終了とした。尚、前述のように、DTB-IIC は外ナットを締め込むときに内ナットも連れ回りして締め込まれるので、ここでは F_M は後で装着するシングルナットの締結トルクのみを加減することにより調整し、先に締め込む多条ナットの逆戻しは行わなかった。二硫化モリブデンを潤滑剤として使用し、ナット締結前にボルトねじ面に塗布した。全ての DTB-IIC 試験片に対し、同一条件で 3 回ずつ Junker 試験を行った。

3. 結果および考察

3.1 底上げ率 β の転造成形性への影響

Fig. 6(a)-(c)に FEM シミュレーションにより得られた β の異なる 3 種類の DTB-IIC の最終のねじ山成形状態における相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}$ の分布を比較して示す。Fig. 7(a)-(c)では、転造実験で得られた各 β の DTB-IIC の半周分の平面展開したねじ山形状を比較した。これらの図は、DTB-IIC の円周方向 $0^\circ \sim 180^\circ$ 位置までを 15° 間隔で 12 分割し、各角度位置におけるシングルねじ 3 ピッチ分のねじ山を（株）東京精

密製 SURFCOM 1800G により形状測定し、それらをつなぎ合わせて作成した。Fig. 8(a)と(b)は形状測定した DTB-IIC50 と DTB-IIC70 の 0°位置のねじ山と、各々に対応する多条ナットの幾何学的な嵌合状態である。DTB-IIC50 と DTB-IIC70 の 0°と 45°位置における FEM シミュレーションにより得られた各工具押込み率 η ($\eta = (\delta/\delta_{\max}) \times 100\%$, δ : 各成形段階での工具押込み量, δ_{\max} : 最終工具押込み量)におけるシングルねじ 3 ピッチ分の工具溝への材料充填状態の推移を Fig. 9 に示す。

まず、Fig. 6 と Fig. 7 を比較すると、いずれの DTB-IIC も最終的なねじ山成形状態は解析と実験でよく一致しており、十分な高さのねらい通りの形状が全周にわたり得られている。また、 β が上がるにつれねじ山形状は通常のシングルねじのそれに次第に近づいていることが明確に分かる。しかし、その結果 Fig. 8 より DTB-IIC70 では、多条ねじ溝と多条ナットとの見かけ上の接触面積は DTB-IIC50 に比べ著しく減少しており、これは耐振動緩み性に悪影響を及ぼす可能性大である。Fig. 6 の ϵ を比較すると、全体的に大差はないが、 β が上がるにつれ δ_{\max} が若干増加するため、一条ねじ溝底部近傍領域の ϵ はわずかに大きくなっている。一方、多条ねじ溝底部近傍領域の ϵ は逆に β が上がるにつれ小さくなっている。その理由は Fig. 9(a)より、DTB-IIC50 では $\eta = 63\%$ で浅い工具溝はほぼ充填が完了しており、この溝底部の材料はその後過転造状態になる。これに対し、DTB-IIC70 では工具溝の充填が完了するのが $\eta = 75\%$ とかなり遅れ、過転造の度合いが緩和されるためである。過転造領域近傍

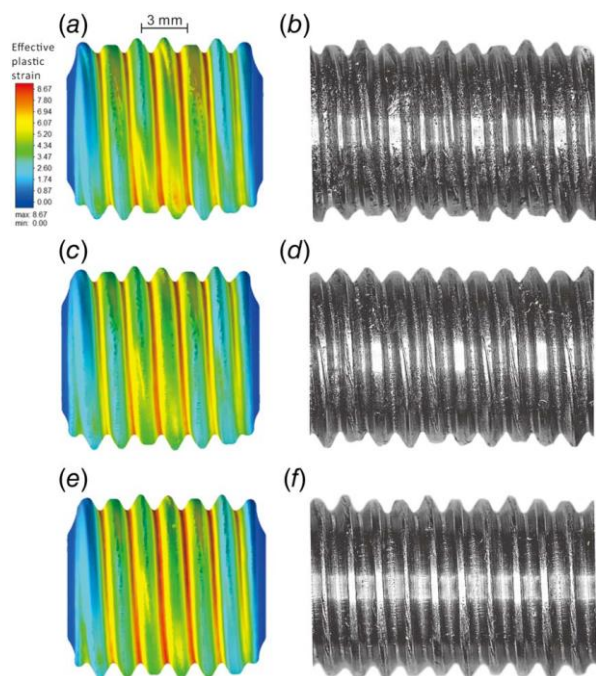


Fig. 6 Comparison of equivalent plastic strain distributions ascalculated by FEM simulations and final products in experiments for three types of DTB-IICs: (a) DTB-IIC50 by FEM, (b) DTB-IIC50in the experiment, (c) DTB-IIC60 by FEM, (d) DTB-IIC60 in the experiment, (e) DTB-IIC70 by FEM, and (f) DTB-IIC70 in the experiment

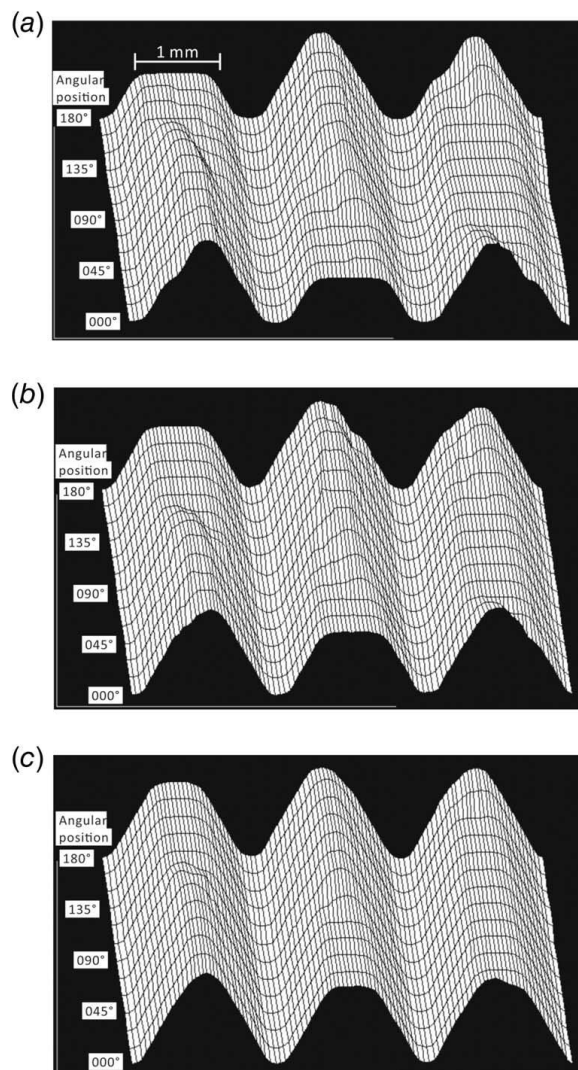


Fig. 7 Comparison of DTB-IIC rolled thread shapes in experiments: (a) DTB-IIC50, (b) DTB-IIC60, and (c) DTB-IIC70

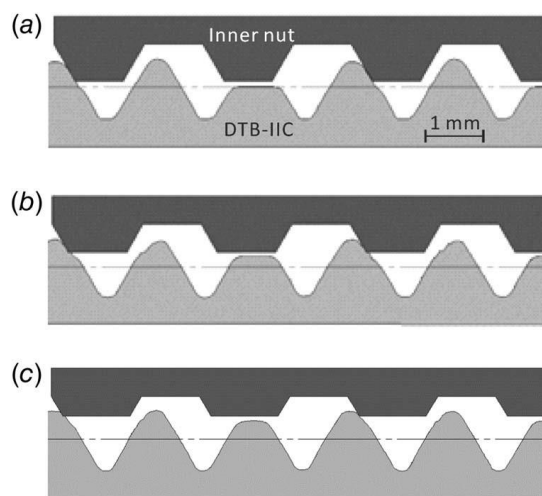


Fig. 8 Comparison of mating conditions between DTB-IICs and inner multi-thread nuts in experiments: (a) DTB-IIC50, (b) DTB-IIC60, and (c) DTB-IIC70

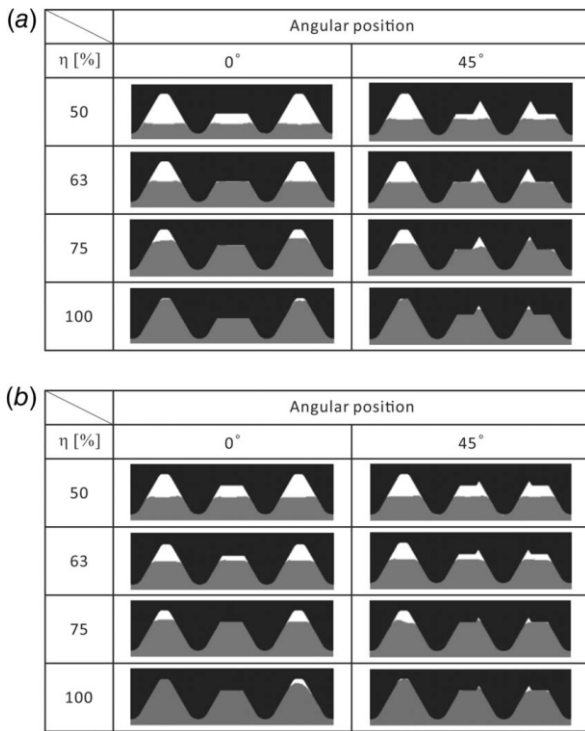


Fig. 9 Comparison of filling-up state in each die groove cross section, as calculated by FEM simulations: (a) DTB-IIC50 and (b) DTB-IIC70

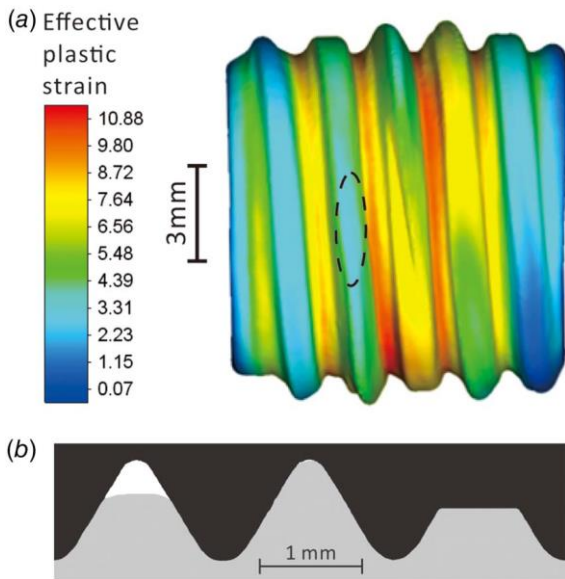


Fig. 10 Final deformation state for DTB-IIC50 rolled by the planetary method, as calculated by FEM simulations: (a) effective plastic strain distribution and (b) filling up state at 90 deg position

の材料は、大きなせん断変形を伴いながら同一の1条つる巻線上で円周方向へ流動し、その結果、材料剥離が発生しやすくなる。すなわち過転造の度合いが減れば、材料剥離は抑制される。実際、**Fig. 10**に示す AISI 1045 (SS400) 生

Table 1 Bolt surface temperature after thread rolling

| Bolt specimen | Surface temperature [°C] | |
|---------------|--------------------------|-----------|
| | AISI 1045 | AISI 4315 |
| DTB-IIC50 | 105 | 110 |
| DTB-IIC60 | 82 | 100 |
| DTB-IIC70 | 68 | 70 |

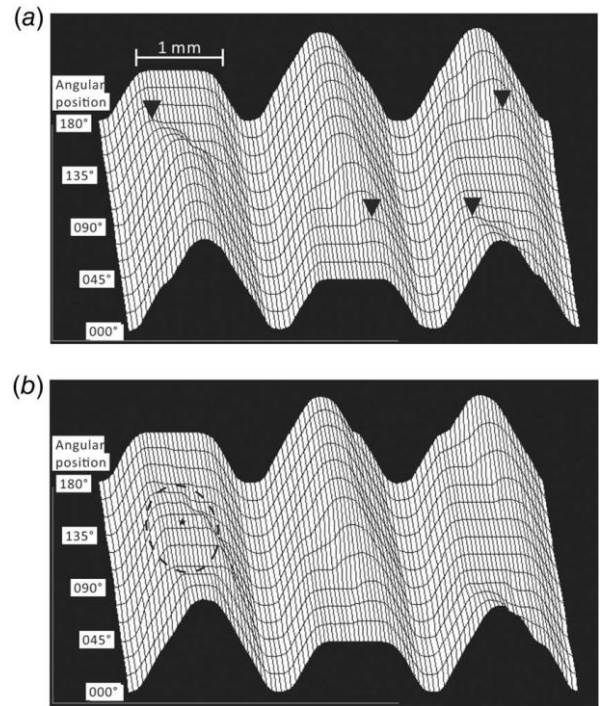


Fig. 11 Comparison of rolled thread shapes for DTB-IIC50s in experiments: (a) flat die method and (b) planetary method

材の製品ねじ表面を比較すると、(a)の DTB-IIC50 では所々に細かな剥離が発生し粗い面になっているのに対し、(b)の DTB-IIC70 ではねじ底に僅かに剥離はあるが、比較的滑らかな面が得られている。一方、AISI 4135 (SCM435 材) では熱処理材では、DTB-IIC50 でも剥離の発生はほとんどなかった。**Table 1**に転造成形直後の M12 各種 DTB-IIC の表面温度の比較を示す。これより、底上げ率 β が上がるにつれ温度は明らかに低下しており、特に DTB-IIC70 が DTB-IIC50 に比べその程度が顕著である。これらのことより、当初の目論見通り β を 50%以上、上げることにより転造成形性は確実に改善されることが分かった。

3.2 転造加工法のねじ山成形性への影響

転造実験では素材の初期直径と工具押込み量を適宜調整したため、いずれの方式でも一見すると十分な高さのねじ山が全周にわたり成形され、ゲージナットによる検査にも合格した。そこでより詳細にねじ山成形状態を評価するために、**Fig. 6**同様、**Fig. 11**で各転造方式で得られた DTB-IIC50 の半周分のねじ山形状を平面展開して比較した。その結果、**Fig. 11**(a)の平ダイス式では、全断面において狙い

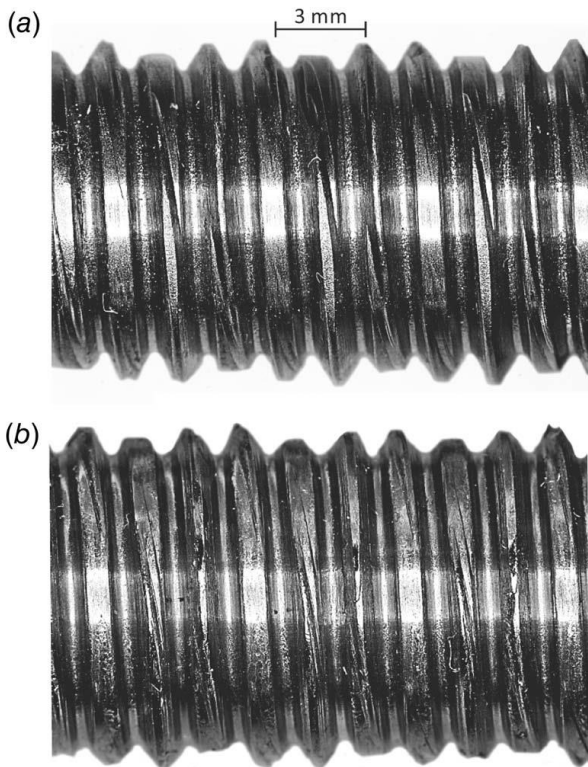


Fig. 12 Comparison of final products rolled by flat die and planetary methods in experiments: (a) flat die rolling and (b) planetary rolling

通りのねじ山が成形されており、特に 45° と 135° 位置の \blacktriangledown 印で示した近傍領域の微小ねじ山の高さも、Fig. 7(a)に示す丸ダイス式に比べ十分盛り上がっていた。しかし、これは金型加工精度の問題もあるので、必ずしも転造方式に起因するとは言えない。これに対し、Fig. 11(2)に示すプラネタリー式では、解析結果同様、左側螺旋ねじの \star 印の位置を中心に $45^\circ \sim 135^\circ$ 位置にかけて破線の楕円領域の完全ねじ山の高さが不足している。しかし、中間と右側の螺旋ねじは狙い通りに成形されていた。Fig. 12(a)と(b)に平ダイス式およびプラネタリー式で転造された AISI 1045 製 DTB-IIC50 のねじ表面性状を示す。Fig. 10(a)に示す丸ダイス式で転造した場合に観察された材料の表面剥離は、これら 2 方式ではほとんど発生せず、特に平ダイス式では最も滑らかな加工面が得られていた。この主な原因は、丸ダイス式に比べ、転造時の素材の総転がり数が三分の一以下になることと、かつ素材とダイスとの接触面積が大きいことによると考えられる。

3.3 引張り強度試験

Fig. 13 に引張り試験より得られた荷重-ストローク線図を示す。ボルト試験片は全てねじ抜けることなく標点間の一部がくびれ正常破断した。これらの結果を比較すると、全ての DTB-IIC 試験片の引張り強さ F_B は、JIS B 1050 の強度区分 10.9 ボルトの最小引張り強さ 67.4 kN を超えており、かつ β による影響もほとんど見られない。

3.4 振動緩み試験

Fig. 15 にユンカー式振動緩み試験における β の異なる 3

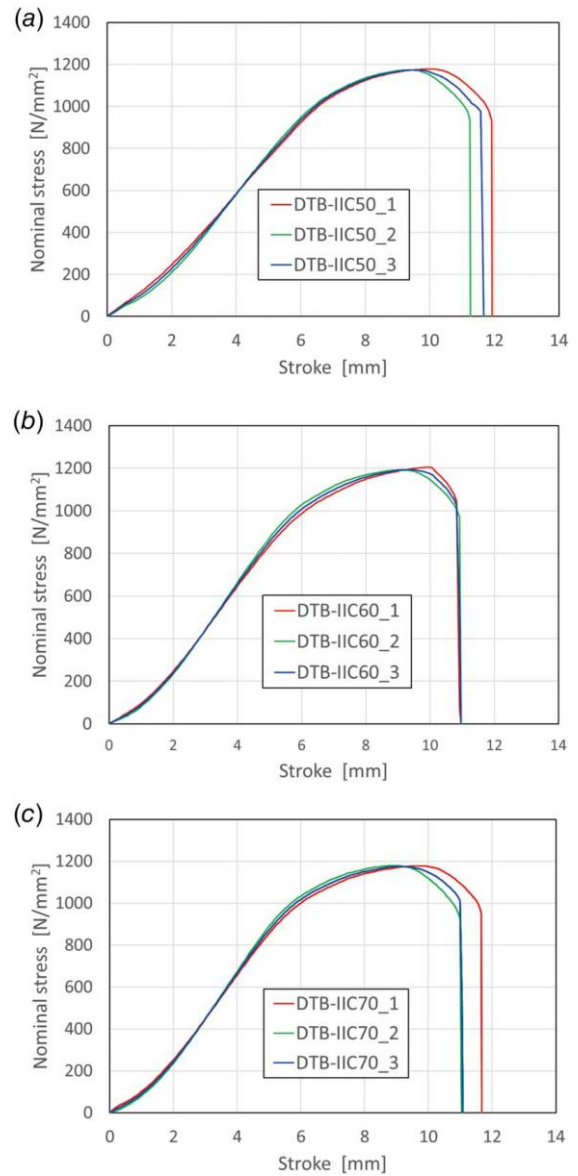


Fig. 13 Tensile strength test results: (a) DTB-IIC50, (b) DTB-IIC60, and (c) DTB-IIC70

種類の DTB-IIC の負荷振動繰返し数に対する残存軸力率 κ の変化を示す。ここで、DTB-IIC 試験片の内多条ナットは手で締め付け、外シングルナットの締め付けトルクのみを調整することにより初期軸力 P_0 を 20 kN に設定した。前報[20]の結果より、 $\beta = 0\%$ の場合と $\beta = 50\%$ の場合とでは振動緩み止め性に差異はなかった。ところが図より、 β が 50% を超え増加すると、 κ は明らかに低下している。具体的には、いずれの場合も、試験開始直後から繰返し数 $N < 50$ で初期緩みが発生し κ は急減するが、その減少率は DTB-IIC50 が約 7% であるのに対し、DTB-IIC60 と DTB-IIC70 では 15% 以上ある。その後、DTB-IIC50 では $N \approx 200$ まで κ は漸減するが、それ以降は一定値となり、(ナットの戻り回転による軸力の低下は停止し)、結果的に最終の κ は 90% 以上あり、これは ISO 基準の Rating-1 (等級-1) を満足している。これに対し、DTB-IIC60 と DTB-IIC70 では κ は $N \approx 1000$ まで漸減し、その後も試験終了まで緩やかではあるが減少し続

4. 結 言

β の異なる DTB-IIC に対するねじ転造シミュレーションと実験、および各種強度および性能評価試験から、以下の知見を得た。

- DTB-IIC の転造成形性は、多条ねじ溝の底上げ率 β を上げることにより向上し、前報[21]で課題として残った材料剥離や加工直後の高い素材温度の問題は解消した。
- 加工方式の違いにより DTB-IIC の転造成形性に明確な差異が現れ、従来用いていた丸ダイス式より、平ダイス式やプラネタリー式の方が材料剥離が発生しにくく、総合的に評価すると、平ダイス式のねじ山成形状態が最も良好であった。
- DTB-IIC の引張り強度やねじ締付け強度は β による影響をほとんど受けず、強度レベルも通常のシングルねじボルト同等で、最小引張り強度を十分超えていた。
- ユンカー式振動緩み試験の結果、 β が 50%を超え増加すると、多条ナットとねじ山との接触面積が著しく減少するため耐振動緩み止め性は低下する。DTB-IIC60 や DTB-IIC70 でも規定負荷繰返し数後の軸力残留率は ISO 基準の Rating-2 (等級-2) を満足した。

記号説明

f = Junker 試験における振動周波数

A = Junker 試験におけるグライダープレートの横方向変位振幅

N = Junker 試験における全振動数

F_M = Junker 試験におけるボルトの初期軸力

α = 多条ねじ溝の底上げ量

β = 多条ねじ溝の底上げ率

δ = ダイスの半径方向押込み量

δ_{\max} = ダイスの半径方向最終押込み量

ε = 平行四辺形突起先端の左右のずれ量

η = ダイスの半径方向押込み率

κ = 軸力残存率

ξ = ねじ山断面積比

参 考 文 献

- [1] Fukuoka, T., 2013, *Threaded Fasteners for Engineering and Design -Solid Mechanics and Numerical Analysis-*, Corona Publishing Co., Ltd., pp. 263-321
- [2] Nishida, S., 1993, *Failure Analysis in Engineering Applications*, Butterworth Heineman Co., Ltd, pp. 68-104.
- [3] Hongo, K., 1964, "Loosening of Bolt and Nut Fastenings," *Trans. of the JSME Ser. I*, **30**(215), pp. 934-939, 10.1299/kikai1938.30.934
- [4] Koga, K., 1969, "Loosening by Repeated Impact of Threaded Fastenings," *Trans. of the JSME Ser. III*, **35**(273), pp. 1104-1111, 10.1299/kikai1938.35.1104
- [5] Yamamoto, A., and Kasei, 1977, "Investigation on the Self-loosening of Threaded Fasteners under Transverse Vibration -A Solution for Self-loosening Mechanism-," *J. of the JSPE*, **43**(508), pp. 470-475,

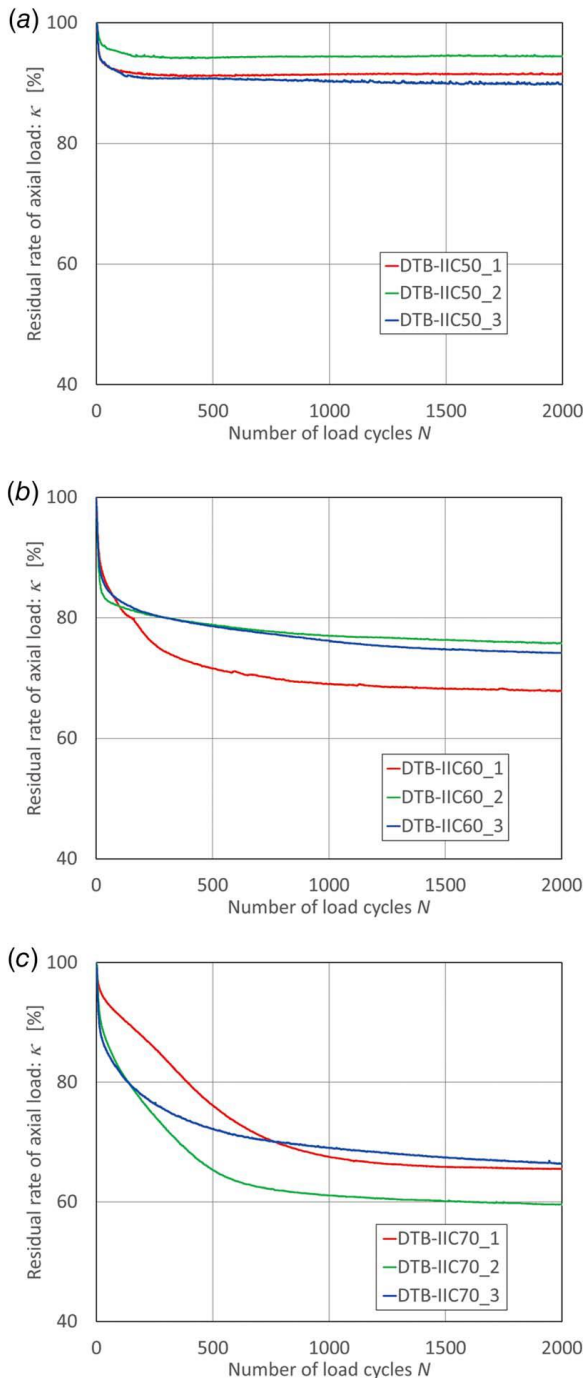


Fig. 14 Variation in residual rate of axial tension in Junker vibration loosening tests: (a) DTB-IIC50, (b) DTB-IIC60, and (c) DTB-IIC70 Tensile strength test results: (a) DTB-IIC50, (b) DTB-IIC60, and (c) DTB-IIC70

けている。その結果、最終の κ は前者では約 75%まで、後者では約 65%まで低下しているが、それでも ISO 基準の Rating-2 (等級-2) は満足し、一般的に使われている各種緩み止め部品に匹敵する性能は有している。これらの結果より、 β は 50%までは DTB-IIC の耐振動緩み性にほとんど影響を及ぼさないが、それを超えると明確に低下することが分かり、今後この改善策を検討する必要がある。

- 10.2493/jjspe1933.43.470
- [6] Jingu, T., 1995, "Relationship between Loosening Response of Bolt-Nut Fastening System and Stress Wave Modes along the Direction of Propagation," *Trans. of the JSME Ser. A*, **61**(586), pp. 1398-1403, 10.1299/kikaia.61.1398
- [7] Izumi, S., Yokoyama, T., Kimura, M., and Sakai, S., 2009, "Loosening-resistance evaluation double-nut tightening method and spring washer by three-dimensional finite element analysis," *Eng. Fail. Anal.*, **16**, pp. 1510-1519, 10.1016/j.engfailanal.2008.09.027
- [8] Miyata, C., 1985, "Proposal of Loosening-Proof Nuts (Stress Distribution in a Bolted Joint and Pressure Distribution on Bearing Surface of Nut)," *Trans. of the JSME Ser. C*, **51**(467), pp. 1833-1837, 10.1299/kikaic.51.1833
- [9] Sase, N., Nishioka, K., Koga, S., and Fujii, H., 1998, "An Anti-loosening Screw-fastener Innovation and its Evaluation," *J. Mater. Proc. Tech.*, **77**, pp. 209-215, 10.1016/S0924-0136(97)00419-6
- [10] Noda, N., Wang, B., Sano, Y., Kawano, R., Liu, X., Inui, Y., and Takase, Y., 2022, "Investigation of loosening resistance based on Junker loosening test of bolt nut connections with pitch difference," *JSAE Trans.*, **53**(2), pp.410-417, 10.11351/jsaeronbun.53.410
- [11] Kase, S., 1985, "On the Self-loosening Mechanism of Bolted Joints under Transverse External Force," *J. of the JSPE.*, **51**(9), pp. 1783-1788, 10.2493/jjspe1933.51.1783
- [12] Ohashi, N., and Ishimura, M., 1985, "On Thread-loosening Test by Transversely Repeated Impact Force," *J. of the JSPE.*, **51**(6), pp. 1264-1268, 10.2493/jjspe1933.51.1264
- [13] Kase, S., Ishimura, M., and Ohashi, N., 1988, "On Self-loosening of Threaded Joints in the Case of Absence of Macroscopic Bearing-surface Sliding -Loosening Mechanism under Transversely Repeated Force-," *J. of the JSPE.*, **54**(7), pp. 1381-1386, 10.2493/jjspe.54.1381
- [14] Ishimura, M., Yamanaka, H., Syoji, Y., Kobayashi, T., and Sawa, T., 2011, "Loosening of Bolted Joints under Transverse Repeated Displacement," *Trans. of the JSME Ser. A*, **77**(781), pp. 1444-1452, 10.1299/kikaia.77.1444
- [15] Nagawa, M., Saito, K., and Noda, N., 2003, "Study on Anti-loosening Super Lock Nuts and Super Lock Bolts (first volume)," *Machine Design*, **47**(8), pp. 35-42.
- [16] Takemasu, T., and Miyahara, H., 2005, "Development of Thread Rolled Anti-Loosening Bolts Based on the Double Thread Mechanism and a Performance Evaluation," *JSME Int. J. Ser. A*, **48**(4), pp. 305-310, 10.1299/jsmea.48.305
- [17] Ø. Karlsena, H. G. Lemua, 2022, "Comparative study on loosening of anti-loosening bolt and standard bolt system", *Eng. Fail. Anal.* **140** 106590
10.1016/j.engfailanal.2022.106590
- [18] Shinbutsu, T., Amano, S., Takemasu, T., and Kuwabara, T., 2017, "Thread Rolling and Performance Evaluation of New Double-Thread Bolt -Study on Development of Antiloosening Bolt Fasteners Based on Coarse-Single Coarse-Multiple Double-Thread Mechanism, 1st Report-," *J. of the JSTP*, **58**(676), pp.404-410, 10.9773/sosei.58.404
- [19] Shinbutsu, T., Amano, S., Takemasu, T., Kuwabara, T., and Shimura, J., 2017, "Thread Rolling and Performance Evaluation of a New Anti-Loosening Double Thread Bolt Combining a Single Thread and Multiple Threads," *Procedia Eng.*, **207**, pp. 603-608.
- [20] Shinbutsu, T., Amano, S., Takemasu, T., Shimura, J., Sakamoto, M., and Kuwabara, T., 2018, "Thread Rolling and Performance Evaluation of Modified Double-Thread Bolt -Study on Development of Antiloosening Bolt Fasteners Based on Coarse-Single Coarse-Multiple Double-Thread Mechanism, 2nd Report-," *J. of the JSTP*, **59**(688), pp. 71-77, 10.9773/sosei.59.71
- [21] Amano, S., Shinbutsu, T., Okimoto, Y., Takemasu, T., and Kuwabara, T., 2024, "Optimization of anti-loosening bolt based on double thread mechanism: Development of ground rolling die and effect of thread accuracy on loosening resistance" *Heliyon*, **10**(2024)e28631, 10.1016/j.heliyon.2024.e28631
- [22] Junker, G., H., 1969, "New Criteria for Self-Loosening of Fasteners under Vibration," *SAE Trans.*, **78**, pp. 314-335.
- [23] Pichoff, F., Kummel, M., and Schiff, M., 2018, " Dynamic Vibration Testing of Fasteners: Fastener Self-Loosening Theory, Vibration Testing Practical Applications, Comparison of the International Standards and Recommendations on How to Set-up a Meaningful Testing Protocol", *Materiaux & Techniques* **106**, 307, 10.1051/mattech/2018029