

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 30 日現在

機関番号：53601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560176

研究課題名(和文)超音波振動による十字型振動体の共振を利用した六角ナットの高精度締付法の開発

研究課題名(英文)Development of the Method of High Precision Tightening Method of Hexagon Nut with Ultrasonic Vibration Resonance by Cross-shape Oscillator

研究代表者

岡田 学 (Okada, Manabu)

長野工業高等専門学校・機械工学科・教授

研究者番号：70249788

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では超音波振動の共振を利用してナットに振動を与えながら締付けを行い、その効果について調べている。複数の振動子を取り付けて振動を合成することができる十字型振動体を使用してより強く加振する振動系を開発して、その効果を調べた。その結果、振動を与えると摩擦トルクが増加する現象が観察された。さらに詳しく調べると、座面では摩擦が減少しているが、ねじ面で摩擦が増加しており、その結果として全体では僅かに摩擦増加になっていることがわかった。

研究成果の概要(英文)：It is known that it is effective in ultrasonic vibration reducing apparent friction, and the method of performing screw tightening with little variation is also studied, it is performed by tightening with the ultrasonic vibration. In use of ultrasonic vibration, a stronger effect can be acquired by using resonance. In this research, the bolt head or the nut was fastened with ultrasonic vibration by vibration resonance, and it is investigated about the effect. The cross-shape oscillator is a kind of oscillation-mixer. Ultrasonic transducers are attached to both ends of horizontal arm of the oscillator. Each size of vertical and horizontal of the oscillator are adjusted to about half of wave length so that it might resonate on the target frequency. Since each ends of the oscillator became the "Anti-node" of vibration and amplitude became the maximum when it resonated, the socket wrench is attached to the bottom end of the oscillator in order to enhance the effect of vibration.

研究分野：機械要素

キーワード： Bolted Joint Tightening Friction Ultrasonic Vibration Resonance

1. 研究開始当初の背景

ボルト、ナット、小ねじ等の締付には締付トルクを指標として締付管理を行うトルク法が多く用いられる。トルク法締付は締付管理が簡便で、分解・組立においてボルト・ナットを繰り返し使用できるなどの利点があるが、締付トルクと締付力（予張力、ボルト軸力）の関係は、ねじ部や座面の摩擦係数のばらつきに大きく影響される^①。これに対して座面やねじ部に油脂類や固体潤滑剤、特殊な薬剤等を塗布して摩擦係数のばらつきを抑制する方法が用いられることもあるが、それによるコスト増加や工程追加は単価が低いねじ類にとっては大きな問題になる。

近年、強力超音波の切削加工への利用などが進んでいるが^②、そこで利用されている超音波振動の効果の一つに摩擦に関する効果（摩擦低減効果、凝着促進効果など）がある。超音波振動が持つ摩擦に関する効果を利用すれば、油脂類や薬剤を用いることなく、座面やねじ部の接触面の摩擦を変化させることが期待できる。

2. 研究の目的

当研究組織では、これまで超音波振動の共振を利用したねじ締結法の開発を行ってきた。これは、超音波振動の摩擦低減効果を利用して摩擦の影響が少ないねじ締結を行うことによって、ボルト軸力（締付力）のばらつきの原因であるボルト、ナット、非締結物の接触面の摩擦係数のばらつきの影響を低減し、ボルト軸力のばらつきが少ない高精度のねじ締結の実現を目指すものである。本研究では振動体を十字型形状とすることによって、これまでの課題だった振動エネルギーの不足を解決し、より強力な超音波振動の効果を得て、ばらつきの少ない精密なねじの締付管理を実現するものである。

3. 研究の方法

(1) ねじ締結と摩擦の関係

ナットの締付トルク T_f とボルト軸力 F_s の関係は次式で表わされる。

$$T_f = \frac{F_s}{2} \left(\frac{\mu_s d_2}{\cos \alpha} + \frac{P}{\pi} + d_w \mu_w \right) \quad (1)$$

ここで F_s はボルト軸力、 μ_s はねじ部の摩擦係数、 d_2 はねじ部の有効径、 α はねじ山の半角、 P はねじピッチ d_w は座面摩擦トルクの等価直径、 μ_w は座面の摩擦係数である。

括弧内第2項は定数であるため、もし同一の締付トルクに対して軸力が増加した場合は、括弧内第1項と第3項の和が減少したことになる。ここで、括弧内第1項と第3項において、摩擦係数以外は定数と見なせるので、同一の締付トルクに対して軸力が増加した場合、ねじ面または座面において摩擦係数が減少したといえる。

また、括弧内第1項と第2項の和がボルトのねじれトルク T_s であるため、それと締付ト

ルク T_f 及び軸力 F_s を測定することによって、締付トルクのうちねじ部の摩擦トルク（括弧内第1項）、軸力増加のためのトルク（同第2項）、座面の摩擦トルク T_w （同第3項）の各成分を求める。

初期締付力 F_f を生じさせるためにナットまたはおねじ部品を回転させるのに必要なトルクが締付トルク T_f である。トルク法は、この T_f と F_f との線形関係を利用した締付管理法である。締付トルク T_f を指標とするこの方法は、取扱いが比較的簡単な手動のトルクレンチや動力工具によって実施できるので、作業性に優れた簡便な方法である。しかし、締付トルク T_f の90%前後はねじ面及び座面の摩擦によって消費されるため、初期締付力のばらつきは締付作業時の摩擦特性の管理の程度によって大きく変化する。

本研究ではボルトとナットは自動車などに多用される M10 のものを対象とし、実験では座面とねじ面には二硫化モリブデングリスを塗布した。

(2) 超音波振動の効果

超音波振動の効果の一つに「摩擦低減効果と潤滑改善効果」がある^③。これは「接触している2つの物体の一方または両方に超音波振動を加えながら相対的に滑らせると接触面の摩擦係数が見かけ上、著しく減少する」というもので、この現象は以下のような理由によって生ずるとされている。

- ① 2面間の凝着を振動が引き離すため。
- ② 表面の細かな突起が噛み合うのを振動が妨げるため。
- ③ 振動による圧力変動で、周辺のガスや液体が2面間に引き込まれるため。（スクイーズ効果）

この効果は超音波振動を利用した切削加工における切削力の低減や、塑性加工における抵抗低減に利用されている。

他方では、超音波振動による接触面に平行な振動速度成分によって接触面の間に高速繰り返しの相対運動が生じる場合に高い面圧が作用すると、接触面の凝着が促進される場合がある。この凝着促進効果は超音波金属接合に利用されており、高い面圧下で接触面が面と平行な相対運動をすることによって微小凹凸の平滑化や酸化膜除去が進むことによって面の凝着力が高まり、接触面の摩擦力が増加したり、接合されたりする。

(3) 振動子と振動体

現在、広く使われている超音波振動子としてはボルト締めランジュバン型振動子 (BLT : Bolt-clamped Langevin type Transducer) がある。BLT は使用する周波数で金属部分を含めた振動子全体に定在波を発生して共振を起こすように作られている。従って、使用周波数が高いものほど長さが短い。また、直径が波長に対してある程度以上大きくなると径方向の振動成分が乗るなどの問題が出

るため、直径も使用周波数が高いものほど小さくなる。BLT の最大入力パワーは圧電セラミックスの体積にほぼ比例するため、1 個の BLT が発生できる振動のパワーはある程度上限があり、特に高周波数用のものは大出力化が難しい。

そのような理由から、出力振幅を大きくしたい場合には入力端面に対して出力端面を縮小した振動体（ホーン）が利用されるほか、非常に強力な振動パワーを必要とする用途には、複数の BLT の振動を合成して出力する振動パワー合成体^④が利用される。

本研究では振動パワー合成体の十字型振動体を利用して複数の BLT の振動を合成して強力な振動を発生させ、ねじ締結に応用した。さらに、Y字型振動体についても検討した。

図 1 に十字型振動体の振動の様子を示す。振動体の下端にはソケットレンチを圧入してある。振動体の左右端面には BLT が取り付けられる。振動体は目的の周波数（28kHz）で共振するように、左右及び上下の長さをそれぞれ約 1/2 波長の長さ（89mm）に調整した。振動体を 1/2 波長の長さにすると、共振したときに左右及び上下の端面が振動の「腹」になり、振動体の軸方向の振幅が極大になる。振動体の振動の検討には有限要素解析による解析も利用した。

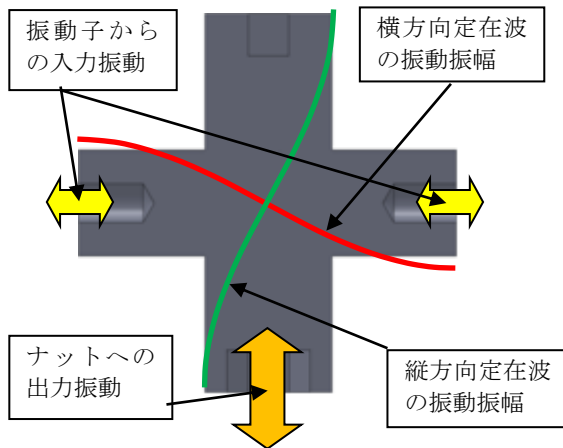


図 1 十字型振動体の共振

4. 研究成果

(1) 十字型振動体（振動子 2 個の場合）

図 2 に開発したレンチの外観を示す。締付にはプレート型トルクレンチを使用し、たわみプレートに歪みゲージを貼って締付トルクを測定した。各部のひずみ測定には多点測定可能なゲージアンプを使用して、各部の測定値を同期させながら記録した。試料のボルトとナットは各 5 組を使用した。図 3 に超音波振動を与えた場合の軸力と締付トルクの各成分の平均の増加率を示す。ある程度の変動はあるが、この場合は超音波振動を加えることによって同一の締付トルクにおいて振動を加えない場合よりも軸力は同じか僅かに減少し、ボルト軸ねじれトルクは増加し、座

面の摩擦トルクは減少している。ボルト軸ねじれトルク T_s は「ねじ部の摩擦トルク」と「軸力増加のためのトルク」（式(1)の括弧内の第 2 項に関する成分で、軸力に対して一定の比）の和であるので、この場合は超音波振動を加えることによってねじ部の摩擦トルクが増加しているといえる。

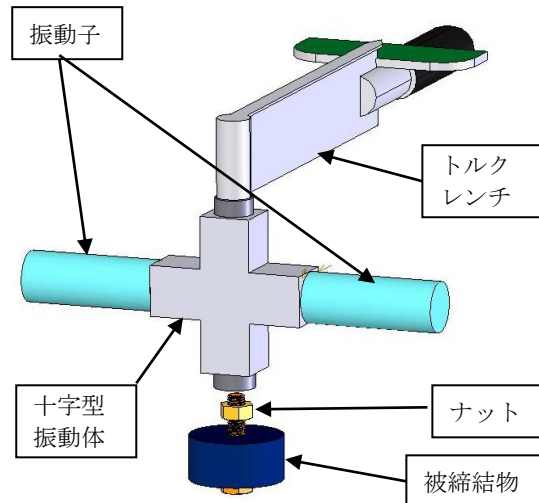


図 2 十字型振動体を利用したレンチの外観（振動子 2 個の場合）

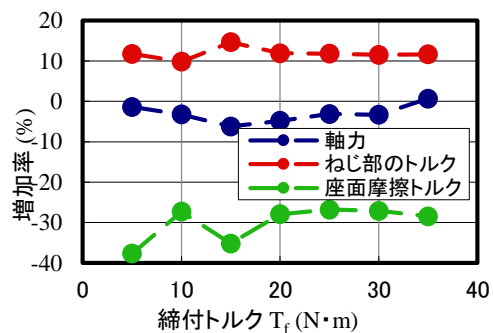


図 3 軸力とトルク成分の増減率（振動子 2 個の場合）

(2) 十字型振動体（振動子 4 個の場合）

図 4 に 4 個の振動子の振動を合成してナットを加振するレンチを示す。水平方向に伸びる腕を増やせば、振動子をさらに増やすことも可能である。さらに、振動子の軸を、ねじの軸線に対して食い違いを与えることによって、ナットにねじの軸線方向の縦振動だけでなく、ねじの軸線まわりの回転振動も加えることができる（図 5）。図 6 に振動を付加した場合の軸力の変化率を示す。特に大きな締付トルクが加わった場合に軸力が大きく変化しており、十字型振動体を使って複数の振動子の振動を合成して対象物を加振すれば超音波振動によって接触面の摩擦を大きく変化させることができることがわかった。このとき、座面では振動方向は接触面に垂直、ねじ部では接触面に斜め方向の振動となる。座面では接触面に垂直な振動によって

超音波振動の摩擦低減効果が生じ、ねじ部では接触面に平行な振動成分と高い面圧によって凝着が促進されて摩擦が増大する。食い違いありの場合は特に締付トルクが低い部分で摩擦係数の変化が大きい。

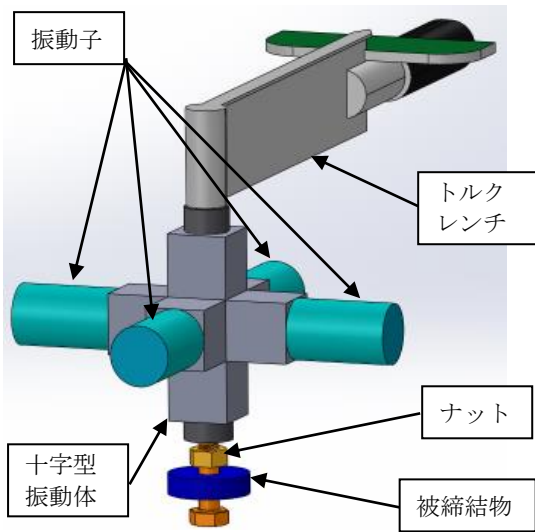


図4 十字型振動体を利用したレンチの外観 (振動子4個の場合)

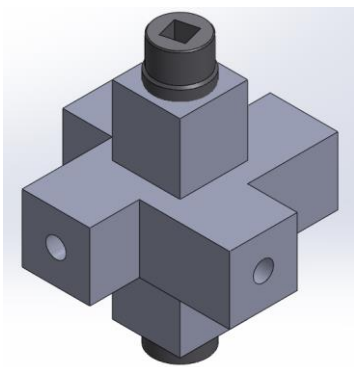


図5 振動子の軸線に食い違いを与えた十字型振動体

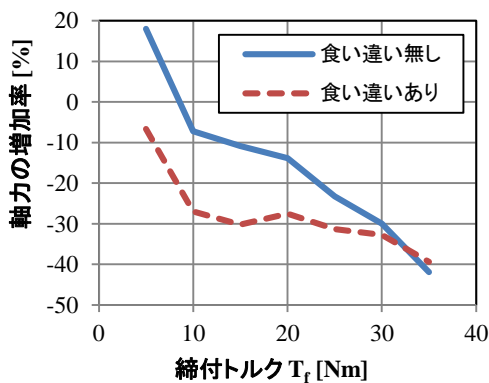


図6 締付時に振動を付加した場合の軸力の変化率 (振動子4個)

(1) Y字型振動体 (振動子2個) の場合
将来の市販化や産業化にはコンパクトで電動化などに対応しやすい形状が適する。そ

こで、十字型振動体よりもスリムな形状でありながら複数の振動子の振動の合成が可能な手法としてY字型振動体を利用したレンチを製作した。これについて締結実験を行ってその有効性を確認すると共に、十字型振動体を利用した場合との比較を行った。装置の外観を図7に示す。

図8に十字型振動体、Y字型振動体、振動無しの場合の締付トルクに占める座面摩擦トルクの大きさを示す。ねじ軸方向の超音波振動を与えることによって座面の摩擦トルクが減少していること、及びその効果が十字型振動体とY字型振動体で同程度であることがわかる。このとき、締付トルクと軸力の関係は十字型振動体、Y字型振動体、振動無しの場合で大きな違いは無く (図9)、座面では摩擦が減少しているが、(1)式より、ねじ部では摩擦が増加していることがわかる。

本研究の目的は「より強力な超音波振動の効果を得て、ばらつきが少ない精密なねじの締付管理を実現する」ということであるが、図10に示すように、超音波振動を加えることによってばらつきは増加しており、「精密な締付」の実現には課題を残した。

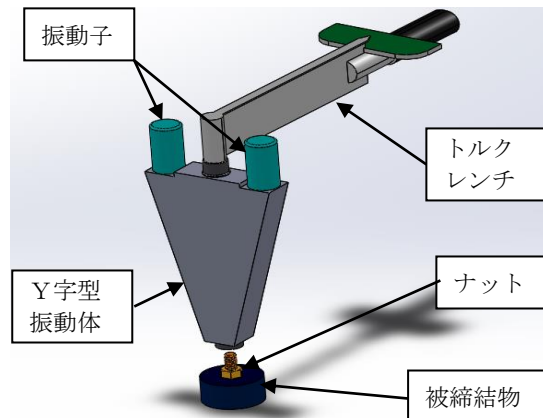


図7 Y字型振動体を利用したレンチの外観

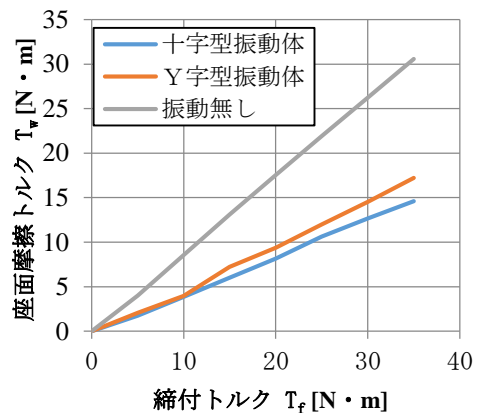


図8 締付トルクに占める座面摩擦トルクの大きさ (十字型振動体、Y字型振動体、振動無しの場合の比較)

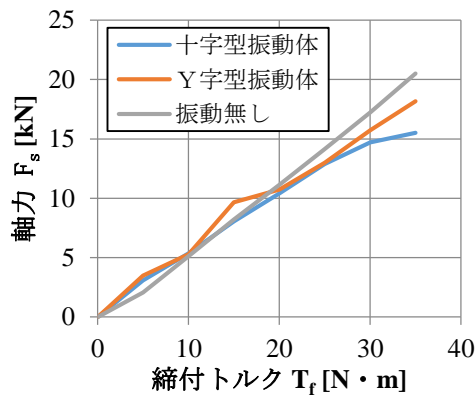


図9 締付トルクと軸力の関係（十字型振動体、Y字型振動体、振動無しの場合の比較）

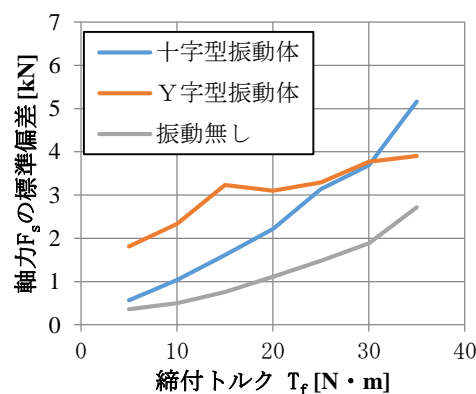


図10 軸力のばらつきのおおきさ（十字型振動体、Y字型振動体、振動無しの場合の比較）

<引用文献>

- ① 山本晃：ねじ締結の原理と設計，養賢堂，(1995)，70-101.
- ② Hiromi Isobe, Keisuke Hara, Akira Kyusojin, Manabu Okada and Hideo Yoshihara : Ultrasonically Assisted Grinding for Mirror Surface Finishing of Dies with Electroplated Diamond Tools, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 8,2, (2007.4), 38-43.
- ③ 日本塑性加工学会 編：超音波応用加工，森北出版，(2004)，39-43.
- ④ 電子情報技術産業協会：超音波工学，コロナ社，(2002).

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 6 件)

- ① 北澤駿, 岡田学 : 超音波の共振を利用したねじレンチの開発 (十字型振動体による加振の場合), 日本機械学会北陸信越学生会 第 42 回学生員卒業研究発表講演論文集, (2013.3).

- ② Manabu OKADA, Tomonari TSUCHIDA Satoshi NAKATSUKA, Yukihiro OTANI and Kouhei KUWABARA : Screw Tightening Methods with Ultrasonic Vibration, Proceedings of The 5th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology, (2013. 5).
- ③ 岡田学, 北澤 駿 : 超音波振動の共振を利用したねじ締結法 (十字型振動体による共振の場合), 日本機械学会 2013 年度年次大会講演論文集, (2013.9).
- ④ 上野 翔一, 岡田学 : 超音波の共振を利用したねじレンチの開発 (3次元振動体による加振の場合), 日本機械学会北陸信越学生会 第 43 回学生員卒業研究発表講演論文集, (2014.3).
- ⑤ 上林 弘力, 栗田 浩, 坂口 正雄, 岡田学 : 超音波振動を利用した歯科インプラントの取り外しに関する研究, 日本機械学会北陸信越学生会 第 44 回学生員卒業研究発表講演論文集, (2015.3).
- ⑥ 岡田学, 上野 翔一 : 超音波振動の共振を利用したねじ締結法 (3次元振動体による共振の場合), 日本機械学会 第 14 回機素潤滑設計部門講演会講演論文集, (2014.4).

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称： ねじ類の締付け方法及び締付け装置
 発明者：岡田学
 権利者：独立行政法人国立高等専門学校機構
 種類： 特許
 番号： 特願 2013-71024
 出願年月日： 平成 25 年 3 月 29 日
 国内外の別： 国内

○取得状況 (計 1 件)

名称： ねじの操作装置
 発明者：岡田学
 権利者：独立行政法人国立高等専門学校機構
 種類： 特許
 番号： 特許第 5704644 号
 出願年月日： 平成 23 年 3 月 29 日
 取得年月日： 平成 27 年 3 月 6 日
 国内外の別： 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡田学 (OKADA, Manabu)

長野工業高等専門学校・機械工学科・教授

研究者番号： 70249788