超音波振動によるねじのゆるみ*

——締結状態の評価——

久米原 宏之** 丸 山 一 男*** 津 田 米 雄†

Self-loosening of Threaded Joints under Ultrasonic Vibration

——Evaluation of Tightening Condition——

Hiroyuki KUMEHARA, Kazuo MARUYAMA, Yoneo TSUDA

As the first step to clarify the self-loosening mechanism of threaded joints under ultrasonic vibration, the development of a new method is reported to evaluate the tightening condition in threaded joints. Where a test specimen with threaded joint is subjected to ultrasonic vibration in the axial direction, the sharpness of resonance Q_1 is measured using resonance method. In the other hand, the sharpness of resonance Q_0 for a uniform bar without threaded joint of the same dimension as a test specimen is measured, and the ratio of sharpness of resonance $\varphi = Q_1/Q_0$ is calculated. Since Q_1 shows the resonating characteristics of ultrasonic vibration through the joint, φ can be used as an evaluating measure of tightening condition in threaded joints. Using this method, the effects of tightening force, lubricating condition and others on the tightening condition are investigated experimentally. The obtained results are as follows: 1) The ratio of sharpness of resonance φ increases with an increase in the tightening force. 2) When silicone grease is used as a lubricant, the tightening condition is the stablest in this experiment. 3) These results approximately correspond to the experiences concerning the tightening technique of the joints in the application field of ultrasonic vibration.

1. 緒 言

超音波加工などにおいて、振動子から発生する超音波の振幅を拡大するために、振動子とホーンを結合した振動系が用いられる。振動子とホーンの結合およびホーンと工具の結合には取付け、分解が容易なねじを用いる場合が多いが、この結合方法にはねじのゆるみという問題がある。

ねじのゆるみに関しては、最近多くの研究が発表され、ゆるみ機構の解明も行われているが、ボルト軸直角方向に荷重が作用する場合や軸のまわりの回転方向に荷重が作用する場合についてがほとんどである¹⁾。軸方向に負荷が作用する場合も低周波領域での研究は見られるが、高周波領域の振動が作用するねじのゆるみに関する研究はほとんど発表されていない。

ねじ結合部の軸方向に超音波振動が作用した場合のねじのゆるみという問題を考察する第一歩として、結合部

の締結状態を共振法を用いて評価する方法を提案し、ねじの締付力および潤滑条件などが締結状態に及ぼす影響をこの方法を用いて調査する。

2. 測 定 原 理

ねじ結合体が十分に機能を果たすための適正締付力はある程度設計段階で設定できるようになっている。しかし、ねじ結合体の結合部には、表面粗さや表面状態などの不安定な因子を含んでいる接合面が存在している。そこで、ねじ結合体に振動が作用した場合をねじ結合部のない一体のものの場合と比較すると振動の伝達の仕方に異なった挙動が現れるものと思われる²⁾。ここで、ねじの軸方向に超音波振動が作用するねじ結合体の締結状態を評価する方法として、一般によく用いられる機械的振動系の電気的等価回路を用いて解析する方法を検討してみる。今機械振動系の動作域を共振周波数のごく近傍に限ると、振動系の機械インピーダンス $\dot{z}$ は集中定数的に取扱え、次式で表される。

$$\dot{z} = r + j\left(\omega m - \frac{s}{\omega}\right) \quad (1)$$

ただし、 m : 機械系質量, r : 機械抵抗, s : ばね定数, ω : 角周波数 ($=2\pi f$)。

* 原稿受付 昭和53年10月20日。昭和53年度精機学会春季大会学術講演会(昭和53年3月31日)にて発表。

** 正 会 員 群馬大学工学部(桐生市天神町1-5-1)

*** 正 会 員 東京工業大学精密工学研究所(横浜市緑区長津田町4259)

† 東京工業大学精密工学研究所

図1 振動速度の周波数特性

共振周波数 f_{m0} は式 (1) の虚数部がゼロとなる周波数であり, 次式で表される.

$$f_{m0} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{s}{m}} \quad (2)$$

また, 駆動力を一定にして駆動周波数を変化したときの振動速度の値をプロットした図1のグラフで, 振動速度極大の値から振動速度の値が $1/\sqrt{2}$ 低下する周波数 (象限周波数) を f_1, f_2 とすると, 共振の鋭さ Q_m は次式で表される.

$$Q_m = \frac{f_{m0}}{f_2 - f_1} \quad (3)$$

そこで, ねじ結合部をもった断面一様の丸棒を結合部のない一様棒と比較すると, 前者において不連続面の存在が減衰に影響すると考えられるので, 減衰に関連した値である共振の鋭さ Q_m を用いてねじ結合部の締結状態を評価することにする. さらに, ねじ結合部をもった棒の場合の共振の鋭さ Q_1 と一様棒の場合の共振の鋭さ Q_0 を比較することによって, ねじ結合部の締付条件が締結状態に及ぼす影響を評価できる. 一般には $Q_1 < Q_0$ であり, Q_1 が Q_0 に近いねじ結合体をもつ棒ほどねじ結合の理想的なものと考えられる.

また, 締結状態の評価方法として一様棒の場合の共振の鋭さ Q_0 に対する試験片の場合の Q_1 との比を求め, これを共振の鋭さ比 $\varphi (= Q_1/Q_0)$ と呼ぶことにする. 結合の理想状態では $Q_1 = Q_0$, $\varphi = 1$ となる. 以下この φ 値を用いて締結状態の評価を行うことにする.

3. 実験方法

図2に実験装置の概略図を示す. M10のねじ結合部をもった試験片はめねじ側①とおねじ側②で構成され, これらの詳細を図3に示す. 試験片には機械構造用炭素鋼鋼材 S45C を用いた. ねじ部および座面部は切削

1: 試験片めねじ側, 2: 試験片おねじ側, 3: 振動子.
4: 周波数カウンタ, 5: インピーダンス直視装置, 6: X-Y レコーダ, 7: 静ひずみ計

図2 実験装置の概略図

図3 試験片の形状

加工された状態である. ねじ結合された試験片の全長は超音波の鋼中での波長の $1/2$ に相当する長さのものを使用した. 本実験に用いられた振動子の発振周波数が 20 kHz なので試験片の全長は 126 mm となる. めねじとおねじの締付けは簡便なトルク法を用いて行ったが, その時の初期締付力をおねじ側軸部に貼付したひずみゲージによって検出する. ただし締付力とひずみとの関係はあらかじめ材料試験機を用いて較正しておく. おねじ側の他端面は振動子 (フェライト磁歪振動子) に接着剤を用いて接合され, 振動子と試験片で構成される振動系の振動特性を共振法を用いて測定する. 次に図2を用いて実験手順を示す. 試験片ねじ部のめねじ側①とおねじ側②を市販のトルクレンチを用いて締付ける. そのとき静ひずみ計⑦によっておねじ側軸部のひずみを読みとり, 軸力とひずみとの間の較正図を使って初期締付力も求める. ねじ部が締付けられた試験片と振動子とを接合した複合振動子とその縦振動の節の位置で支持し, フェライト振動子③の電気端子をインピーダンス直視装置⑤に接続する. この振動系の駆動を行うための振動子の電気端子から自由電気インピーダンスの軌跡を測定し,

表1 実験計画

因子	水準
A (締付力)	A ₁ : ほぼ 50 kgf
	A ₂ : ほぼ 100 kgf
	A ₃ : ほぼ 250 kgf
	A ₄ : ほぼ 500 kgf
B (潤滑条件)	B ₁ : 無潤滑
	B ₂ : マシン油
	B ₃ : シリコーングリース
C (ボルト軸部長さ)	C ₁ : 5 mm
	C ₂ : 10 mm

表2 潤滑油剤の特性

	密度 (g/cm ³)	粘度 (cSt)	ちょう度
マシン油 (Esstic 50)	0.894	68.5 (37°C)	—
シリコーングリース (SH 111 高真空用グリース)	1.0	—	220 (60 W)

その結果をベクトルの形で X-Y レコーダ⑥上に描く。複合振動子の共振周波数 $\bar{f}_r$ および象限周波数差 (半値幅) $\Delta\bar{f}$ を周波数カウンタ④を用いて測定する。フェライト振動子の共振周波数 f_r' と半値幅 $\Delta f'$ をあらかじめ測定しておけば、次式によって試験片の共振周波数 f_r および半値幅 Δf から共振の鋭さ Q_1 が求められる³⁾。

$$f_r = \left(1 + \frac{M'}{M}\right) \bar{f}_r - \left(\frac{M'}{M}\right) f_r' \quad (4)$$

$$\Delta f = \left(1 + \frac{M'}{M}\right) \Delta\bar{f} - \left(\frac{M'}{M}\right) \Delta f' \quad (5)$$

$$Q_1 = \frac{f_r}{\Delta f} \quad (6)$$

ただし、 M' : 振動子の質量、 M : 試験片の質量。

実験条件の因子としては、ねじ結合体の機能を果たすために必要とされる締付力 (因子 A)、締結状態に大きく影響を及ぼすと考えられる潤滑条件 (因子 B) およびおねじ軸部の長さ (因子 C) が挙げられる。詳細な実験計画を表1に示す。因子 B の潤滑油の密度と粘度を表2に示す。ねじ部と座面部の潤滑条件はそれぞれベンジン浴中で約 10 min 間超音波洗浄をした後十分乾燥させた状態を無潤滑とし、各種潤滑油を用いる場合は上記のように超音波洗浄した後試験片ねじ部および座面部に潤滑油を塗布した。

各実験条件に対して得られた結果について三元配置の分散分析を行い、各因子の共振の鋭さ比 ϕ に及ぼす影響を統計的に検定した。

実験に用いられる試験片のねじ部の精度測定を実験前

図4

に行う。測定項目はおねじの外径、有効径、ピッチ、座面およびねじ面の表面粗さ、めねじの内径、有効径、ピッチおよび座面の表面粗さである。

4. 実験結果および考察

4.1 試験片の精度測定

ねじの寸法精度および表面粗さの測定結果をそれぞれ図4(a), (b)に示す。めねじの有効径と内径は JIS はめあい等級 5 H、おねじの有効径と外径は JIS はめあい等級 4 h で、従来の JIS 1 級程度のねじである。ピッチ誤差については、累積ピッチ誤差がおねじ側で $-3 \sim 20 \mu\text{m}$ 、めねじ側で $-11 \sim 5 \mu\text{m}$ の範囲であった。おねじのフラック面および座面の表面粗さは $6 \mu\text{m} R_{\text{max}}$ 程度である。

4.2 締付けトルクと締付力との関係

ねじ部、座面部の潤滑条件が変わると各部の摩擦係数が異なるので同一締付けトルクで締付けても締付力は等しくはならない。この締付力はねじ結合における締結状態を大きく左右するのでこれを把握することは必要である。そこで、あらかじめ上述のねじを用いて潤滑条件を変えた場合、トルク法によってねじの締付けを行い、さらに締付けトルクと締付力との関係も実験的に求めておく。図5に締付けトルクと締付力との関係を示す。図5から、本実験に用いられた締付けトルクの範囲内では、各種潤滑条件に対して締付けトルクの増加とともに締付力もほぼ比例的に増加している傾向がみられる。マシン

図5 締付けトルクと締付力との関係

油の場合は無潤滑やシリコングリースの場合に比べ同一締付けトルクで締付けても高い締付力が得られている。そこで締付力に大きく影響を及ぼしていると考えられる各種潤滑条件における摩擦係数を次式で示される締付けトルクと締付力との関係式から求める⁴⁾。ただし、ここでねじ面の摩擦係数 μ_s と座面の摩擦係数 μ_w を等しいと仮定する。

$$T_f = \frac{1}{2} F_f \{ d_p (1.15 \mu_s + \tan \beta) + d_w \cdot \mu_w \} \quad (7)$$

ただし、 T_f : 締付けトルク、 F_f : 締付力、 d_p : おねじの有効径、 β : ねじのリード角 ($\tan \beta = p/\pi d_2$, p : ピッチ、 d_2 : 有効径の基準寸法)、 μ_s : ねじ面における摩擦係数、 μ_w : 座面における摩擦係数、 d_w : 座面における摩擦トルクの等価直径 (面圧が均一に分布し、有効外径 D_o 、内径 D_i とすれば、 $d_w = 2(D_o^3 - D_i^3)/(3(D_o^2 - D_i^2))$ で計算される)。

本実験で用いられる試験片の場合、ねじ部は M10 の並目ねじであるから平均摩擦係数 $\bar{\mu}_s$ は次式のように示される。

$$\bar{\mu}_s \doteq \frac{1}{1.30} \left(\frac{T_f}{F_f} - 0.024 \right) \quad (8)$$

図6 自由電気インピーダンス軌跡記録例

実験値を代入して得られた各種潤滑条件での $\bar{\mu}_s$ は、マシン油の場合 0.23、シリコングリースの場合 0.30、無潤滑の場合は 0.40 程度である。上述の潤滑条件の中ではマシン油を用いた場合が摩擦係数が最も小さかった。

4.3 締付力と共振の鋭さ φ との関係

ねじ結合部のない一樣棒とねじ結合部を有する試験片のそれぞれが振動子に接合された複合振動子系の電気端子自由電気インピーダンス軌跡記録例を図6(a)~(d)に示す。ねじ結合部が存在する試験片の場合(図6(b), (c), (d))のインピーダンス軌跡はほぼ円形を示し、一樣棒の場合(図6(a))に比べるとその直径は小さくなり、インピーダンスも小さくなっている。これは一樣棒が一体のものであるのに対して試験片ではねじ結合部に不連続面が存在しているので、それが振動状態に影響を及ぼしているものと考えられる。また結合する際のねじの締付力をほぼ等しくしても結合部の潤滑条件を変えると、図6(b)~(d)に示されるように軌跡の大きさとインピーダンスともにそれぞれの条件で異なり、締結状態が変わっているものと考えられる。そこでねじ結合部の締結状態の程度を先に述べた共振の鋭さ φ を用いて評価することを試みる。図7に各種潤滑条件における締付力と

(a)

(b)

 $Q_0=4740$

図7 締付力と共振の鋭さ比との関係

共振の鋭さ比 ϕ との関係を示す。この実験結果に対する分散分析を表3に示す。A(締付力)による影響が5%, B(潤滑条件)による影響が1%で有意である。また図7の右側の縦座標に共振の鋭さ Q_1 を示した。図7と表3の結果から、無潤滑およびマシン油を用いて締付けた場合では、締付力が大きくなるほど締結状態はよく、シリコングリースの場合は締付力によらずほぼ一定の傾向を示している。無潤滑では $\phi=0.4$ 程度の割合高い値が得られているがばらつきも大きく不安定である。シリコングリースを用いた場合は ϕ が0.15~0.2の範囲にあるが、締付力によりあまり変化せず安定している。摩擦係数に関してはマシン油を用いた場合が最も小さかったが、提案した方法で評価するとシリコングリースを用いる場合に安定した結合状態が得られている。

超音波加工などの強力な超音波振動を応用している分野では振動子、ホーン、工具を結合する際にグリースな

表3 ϕ 値に対する分散分析

要因	自由度	MS	MS比	判定
A	3	0.046	6.57	*
B	2	0.101	14.43	**
C	1	0.010	1.43	
A×B	6	0.018	2.57	
A×C	3	0.002	0.29	
B×C	2	0.002	0.29	
E	6	0.007		
Me _s	23	0.001		

 $F_9^3(0.01)=9.78, F_9^3(0.05)=4.76$ $F_6^2(0.01)=10.92, F_6^2(0.05)=5.14$ $F_6^1(0.05)=5.99, F_6^1(0.05)=4.28$

**1%で有意, *5%で有意

どを用いて締付けるとよいと従来から報告されている⁵⁾が、上述の結果はある程度これを裏付けている。

5. 結 言

ねじ結合部の締結状態を共振の鋭さ比 ϕ を用いて評価する方法を提案した。この方法を用いて実験を行い、次に示されるような結果が得られた。

- (1) ϕ に及ぼす諸因子のうち締付力(因子A)、潤滑条件(因子B)、ボルト軸部の長さ(因子C)を因子として実験を行ったところ、Aが5%で有意、Bが1%で有意であった。
- (2) 締付力 F_f については、一般に F_f が大きいほど ϕ が大きくなる。
- (3) 潤滑油については、無潤滑の場合締付力が大きくなるにつれ ϕ が大きくなるがばらつきも大きく、不安定な締結状態である。シリコングリースを用いた場合締付力の实用範囲内で安定した締結状態が得られる。マシン油を用いた場合は、摩擦係数が小さく同じ締付けトルクに対し高い締付力が得られるが、 ϕ 値による締結状態の評価ではあまり良くない。
- (4) 共振の鋭さ比 ϕ 値を用いた評価結果は超音波加工等の分野での従来の経験とある程度一致している。

終わりに、本研究を行うにあたり東京工業大学精密工学研究所の吉本勇教授、森米司教授ならびに群馬大学工学部森昌幹教授から貴重な御教示をいただき、また試験片などの製作にあたっては東京工業大学精密工学研究所附属工場職員各位から御協力いただきました。ここに記して深甚なる感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 山本 晃:ねじのゆるみ機構について, 日本機械学会誌, **81**, 716 (1978) 617.
- 2) 松本浩之, 三室 弘, 松森保雄, 中原一郎:縦衝撃を受けた丸棒に生じる応力およびその伝ば, 日本機械学会論文, **29**, 197 (1963) 56.
- 3) 和田八三久:固体の音波物性, 積書店 (1968) 30.
- 4) 山本 晃:ねじ締結の理論と計算, 養賢堂 (1970) 77.
- 5) 島川正憲:超音波工学, 工業調査会 (1975) 80.