超音波振動系におけるねじ結合部に関する研究*

——締結性能に及ぼす座面形状精度の影響——

久米原 宏之** 森 昌 幹**

Study on Threaded Joints in Ultrasonic
Vibration System—Effects of Form Accuracy of Bearing Surface
on Tightening Quality of Threaded Joint—

Hiroyuki KUMEHARA and Masaki MORI

In order to clarify the tightening properties of threaded joints used in ultrasonic vibration system, effects of form accuracy of bearing surfaces on tightening quality of the joints under ultrasonic vibration in the axial direction are investigated. As the results, it is found that the form accuracy of bearing surface influences the tightening quality of threaded joints under ultrasonic vibration. (1) Concerning form accuracy of bearing surface, the tightening quality is affected by the form of bearing

surface as well as the inclination of it to the axis of screw thread. In the case that the form is slightly concave and tightening force is large, critical amplitude A_t at separation between bearing surfaces is large, which means the joint has high tightening quality. (2) Concerning relative inclination in combining bearing surfaces, it is affected by the inclination which is caused by the clearance between both threads. In the case that the relative inclination is the same degree as that by the clearance or smaller than that, the value of A_t depends greatly on tightening force and it increases with an increase of tightening force.

Key words: tightening quality, threaded joint, ultrasonic vibration, form accuracy, bearing surface.

1. 緒 言

強力な超音波振動の応用分野において、その振動系の中に含まれている振動子とホーンなどの結合部には、それらを容易に着脱できるねじによる方法が多く用いられている。しかし、このような結合法を用いた場合には、振動の伝達効率やねじのゆるみという問題が発生する。ねじのゆるみの問題に関しては、最近多くの研究が報告されている¹⁾。一般に外力の作用する方向は、例えば軸方向、軸直角方向および軸まわりの回転方向で大別されているが、いずれも低周波領域での研究が多く、高周波領域、特に超音波領域の振動が作用する場合のゆるみに関する研究はほとんど見られない。そこで、このような場合におけるねじのゆるみ機構を解明する手がかりとして、ねじ結合部の軸方向に超音波振動を作用させた場合の締結状態を共振法を用いて実験的に調べた結果、締付力および潤滑条件が締結状態に影響することがわかった²⁾。引き続き、結合部のゆるみの判定基準の一つとして、座面の分離限界振幅を提案した。ここでは超音波

振動による座面位置での応力振幅が締付力によって生じた座面での平均圧縮応力に達すると、座面分離が生ずるという仮定から計算された振幅値は分離限界振幅の実測値にはほぼ一致することがわかった³⁾。前報まではねじのゆるみに重点をおいて考察したが、超音波振動系としてはねじ結合部によりその振動特性がどのような影響を受けるかが重要な問題である。本報では、特に結合部における座面の形状精度に着目し、それが振動系の特性に及ぼす影響について調べる。これが明らかになれば超音波振動系におけるねじ結合部の座面の形状公差を決めるのに役立つであろう。ただし、ここでは振動系の特性として主に座面分離限界振幅を対象とする。

2. 座面形状精度の表し方およびその測定

試験片の形状寸法を図1に示す。試験片はおねじ部品(以下おねじと呼ぶ)とめねじ部品(以下めねじと呼ぶ)から構成されている。ねじ部はそれぞれ M 10 の切削ねじである。おねじとめねじを組み合わせた場合の試験片全長は供試超音波振動 (20 kHz) の鋼中での波長 λ ($=252$ mm) の 1/2 に等しい長さにとり、座面はめねじ先端から約 $\lambda/8$ に相当する位置に設けられる。一般的には、ホーンや振動子を結合する際に、その結合部を設計段階で無負荷時の振動応力の節の位置に設けている。しかし、振動子系を支持する場合、その振動の節で支持すればエ

* 原稿受付 昭和56年2月16日。昭和54年度精機学会春季大会学術講演会(昭和54年3月30日)および昭和54年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和54年10月9日)ならびに昭和55年度精機学会春季大会学術講演会(昭和55年3月28日)にて発表。

** 正 会 員 群馬大学工学部(桐生市天神町1-5-1)

Fig. 1 Shape and dimension of test piece

ネルギーロスが少ないことがわかっていても、一般的には、その方法は1通りではない⁴⁾。また、棒に応力が作用している場合にみかけの弾性係数に変化がみられ、その共振周波数にも影響を及ぼすことが報告されている⁵⁾。それ故に、振動系に含まれる結合部も振動状態に何らかの影響を及ぼすものと考えられるので、特にその影響が顕著に現れると思われる位置 ($\lambda/8$) に座面を設けることにした。この位置では、超音波振動の変位振幅および応力振幅がいずれもそれらの最大値の70%程度となる。次に、座面分離に影響を及ぼす座面形状精度を調べる際に、図1に示される座面の直角度 s を次のよう

に分けて取り扱う。すなわち、座面の直角度は図2に示されるように、ねじ軸を基準とした座面の傾き φ と中低、中高の程度 C に分けて考えられる。ここで、それらをそれぞれおねじの場合では φ_e, C_e とし、めねじでは φ_i, C_i とする。図3(a)に示されるように、 φ の値はねじ軸に垂直な面に対する座面の傾きとして定義されるが、もしねじ軸が測定用回転軸と一致せず、 β だけ傾いているとすると、 φ はピックアップの最大の振れ Δx を用いて次式から求められる。

$$\Delta x = D \tan(\varphi + \beta) \quad (1)$$

ただし、 D : 座面測定部の直径。

ここで、 $\tan \varphi \ll 1$, $\tan \beta \ll 1$ とすれば

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta x}{D} - \tan \beta \right) \quad (2)$$

めねじの φ_i の測定には、図3(b)に示されるように測定用おねじジグのねじ軸にめねじ試料が取り付けられ

Fig. 2 Classification of form accuracy of bearing surface

φ : Inclination of bearing surface, C : Height of concave ($C < 0$) or convex ($0 < C$)

Fig. 3 Method for measuring form accuracy of bearing surface

る。このジグはその両端面に設けられた両センタを基準にねじ軸と回転軸が一致するように製作されているので Δx を測定することによって φ_i が求められる。おねじの φ_e の測定には、上述のジグを用いて製作されためねじ、すなわちねじ軸に対して垂直な座面をもつ基準めねじをおねじ試料に取り付け、その回転から β を求め、又おねじ座面上の Δx を測定し、式(2)から φ_e を求める。変位の検出部として電気マイクロメータを用いる。 D は19 mm とする。 C の測定には小坂式万能表面形状測定器 (SE-3 型) を用いる。

3. 締結性能の測定

超音波振動がねじ結合部の軸方向に作用した場合のゆるみ判定基準の一つとして提案した座面分離限界振幅³⁾の程度により結合部の締結性能の良否を評価する。図4は座面分離限界振幅測定における装置のブロック図を示

Fig. 4 Schematic diagram of experimental apparatus

す。実験装置は振動子系、振動状態観測系、おねじとめねじ間との相対回転ゆるみ測定系から構成されている。振動子系は電力部、振動子、ホーンおよび試験片から成る。振動子としては、PZT ボルト締めランジュバン型振動子（公称共振周波数 20 kHz, $\phi 56 \times 125$ ）を用いる。ホーンに関しては、材料はチタン合金（Ti-6Al-4V）を時効硬化処理を施し、耐疲労強度を増大したものを用い、形状は振幅拡大率を大きくするために、2 段のステップ型とする。おねじとめねじから成る試験片は所定の締付力で結合されている。試験ねじ部の初期締付力はおねじの軸部に貼付されたひずみゲージから静ひずみ計によって検出される。ひずみと軸力の校正はあらかじめ材料試験機を用いて行っておく。実験に用いられる初期締付力 F_f は 2.5, 5.0, 7.5 kN の 3 水準である。潤滑条件はねじ部、座面部ともに無潤滑とする。座面分離限界振幅は PZT ピックアップ振動子の出力電圧として、mV メータを用いて測定し、その電圧はあらかじめ非接触型の変位計（フォトニックセンサ）から得られた変位振幅と校正しておく。おねじとめねじ間の相対回転変位の測定は光てこの原理を用いて行う。光源としては He-Ne レーザを用いる。レーザ光をビームスプリッタとプリズムを用い

Fig. 5 Measured sample of form accuracy of bearing surface (in case of internal thread)

Table 1 Experimental conditions

Factor	Level
Tightening force F_f kN	2.5, 5.0, 7.5
Form of bearing surface of internal thread C_i μm	-35 (CC 35), -10 (CC 10), 0 (F 0), 10 (CV 10)

Note: CC—Concave, F—Flat, CV—Convex

Fig. 6 Effects of accuracy of bearing surface of internal thread on A_i

て 2 本のビームに分け、おねじおよびめねじの試験片の側面に接着されたミラーに投射する。相対回転変位は超音波振動の加振前後のおねじおよびめねじからの反射光の振れの差として求められ、それはそれぞれの試験片から 1 m 程度離れた所に置かれたオプティカルディテクタと変位計を用いて測定される。おねじ、めねじ間の相対回転変位は上述の方法から測定された相対的な振れ角の 1/2 である。

4. 実験結果および考察

4.1 座面分離に及ぼす座面形状の影響

図 5 はめねじ座面形状精度のうち C_i の測定結果の一例を示す。座面は切削仕上面でその表面粗さは $3 \sim 6 \mu\text{m}$ R_{max} 程度である。おねじ座面の C_e はほぼ 0 である。本実験では、めねじ座面の形状だけを CC (Concave) 型, CV (Convex) 型および F (Flat; C_i がほぼ 0 のもの) 型に作製し、表 1 に示される実験条件の各要因のすべての組合せで座面分離限界を調べる。図 6 は上述の条件のもとで測定された座面分離限界振幅 A_i と C_i との関係を示す。いずれの形状の場合にも締付力の増加とともに A_i が増加する傾向がみられる。特に $C_i = -10 \mu\text{m}$ の場合ではそ

の傾向が顕著である。図中に締付力による座面の平均圧縮応力とその座面位置における超音波振動による応力振幅の値が等しいときに座面が分離し始めるという仮定による次式から求めた分離限界振幅³⁾の計算値を示す。

$$A_i = \frac{4F_f \cdot c}{\pi E \omega (D_o^2 - D_i^2) \cos \frac{\omega x}{c}} \quad (3)$$

ここで、 F_f : 初期締付力、 E : 試験片材料のヤング率、 ω : 試験片の共振角周波数、 D_o , D_i : 座面の外径および内径、 c : 試験片材料中の縦波音速度、 x : 試験片中央からの距離。

これは締付力が大きくなると A_i が大きくなっている実験値の傾向とほぼ一致している。しかし定量的には差がみられる。これは座面が切削仕上面であるから、粗さやうねりなどが影響しているためと思われる。このことは接合状態が悪いと空隙部が増え、超音波振動の伝達特性に悪影響を及ぼす⁶⁾ということから次のように考えられる。締付力については、これを増大すると空隙部が減少し伝達特性が向上し、共振しやすくなり、限界振幅も増大する。又座面の仕上に関しては、同じ形状精度表示でも切削仕上面は研削仕上面に比べ粗さやうねりが大きいので接合面間に空隙部が多く存在し、共振を困難にするので分離しやすくなる。その結果空隙のない理想的な接合状態を前提とした計算値よりも限界振幅が小さくなったものと考えられる。しかし、座面が切削仕上面の場合でも、締付力 $F_f = 7.5 \text{ kN}$ のとき、 $C_i = -10 \mu\text{m}$ で A_i が最も大きい値となり、分離し難く、 $C_i = 0 \mu\text{m}$ では A_i は小さくなり分離しやすいことを示しており、分離限界振幅は座面形状に依存している傾向がみられる。次に実験前後の座面の形状変化については、図5に示される実験後の座面の形状をみると CC 型形状の場合では実験前のそれと比べほとんど変化はみられないが、CV 型形状の場合では座面のねじ穴付近に変形した部分がみられ、CV 型 $C_i = 10 \mu\text{m}$ の場合では座面内側から 0.5 mm の範囲にわたってその変形が顕著である。これはその部分が締付け時に大きい圧力を受けたため塑性変形したものである。そこで締付け時の両座面間での圧力分布を定性的に調べるために市販の圧力判別シート（プレスケール、 0.2 mm 厚）を用いた。図7は締付力が 7.5 kN で、めねじ座面形状が CC, F 及び CV 型の場合の圧力分布状態の一例を示す。色の濃淡は圧力の大小を表しており、濃くなった部分の圧力は高いことを示す。圧力の概略値は圧力標準色との比較法により求めることができる。図7(a)に比較法による測定値から圧力分布の概略を示す。F 型形状の場合でも座面の内側の方が外側よりも圧力が高い傾向を示していることがわかる。こ

Fig. 7 Pressure distribution of bearing surface

れは従来からの報告にみられるように、ボルト、ナットを用いて締結された締付片における圧力分布状態によく似た傾向を示している⁷⁾⁸⁾。CV 型座面では内側での圧力が著しく高くなっており、そのために座面の変形が生じたものと思われる。わずかな中低型である CC 型 $C_i = -10 \mu\text{m}$ の座面の場合では、圧力がほぼ一様に分布している傾向がみられる。以上のことからこのような圧力分布状態が図6の分離の難易を示す A_i の大きさに関係しているように思われる。よって、丸山の報告⁹⁾による締付け時における座面の変形状態を考慮に入れて、締付け前にあらかじめ座面の変形を予測し、締付け終了後に座面での圧力分布が一様になるような座面形状に仕上げるのが良いと思われる。よって締結性能に及ぼす座面形状精度を考える場合に、上述のような各種座面形状の変形状態を把握することが重要である。

4.2 座面分離に及ぼす座面の傾きの影響

この節で用いられる試料の座面は研削仕上面で、おねじ、めねじいずれの座面ともその表面粗さは $1.5 \mu\text{m R}_{\text{max}}$ 以下である。図8は図3に示される方法を用いて試験片座面の傾き φ を求めるための Δx の測定結果の一例を示す。図8(a)はおねじ測定ジグ（材料 SKS3 を熱処理後、ねじ部をテーパ状に研削仕上、振れは 10^{-8} 程度）にめねじ試料を取付け、取外しを6回行い再現性を調べた結果を示す。図から、それらの結果は6回ともほぼ等しく、再現性の良いことがわかる。表2は本実験で取り扱うおねじとめねじの座面の傾きとそれらを組み合わせた場合の座面の傾きの和、すなわち組み合わせた場合の最悪状態での相対的な傾き $\varphi_i + \varphi_e$ を示す。図9はおねじ、めねじ座面の相対的な傾き $\varphi_i + \varphi_e$ と座面分離限界振幅 A_i との関係を示す。JIS では六角ボルトおよびナットの座面の傾きがそれぞれ 1° 以内のものを上級のランクとしている¹⁰⁾ ので本実験で用いられる試験片はすべて上級に相当している。図から、 $\varphi_i + \varphi_e$ が 0.1° より大きいものはそれより小さいものに比べ分離限界振幅

Fig. 8 Measured samples of bearing surface roughness and inclination of bearing surface to axis of screw thread

Table 2 Inclination of bearing surface and inclination caused by clearances between pitch diameters (deg)

Inclination of bearing surface of external thread φ_e	0.02			0.04		
Inclination of bearing surface of internal thread φ_i	0.00	0.38	0.68	0.00	0.14	0.90
Sum of inclinations (Relative inclination) $\varphi_e + \varphi_i$	0.02	0.40	0.70	0.04	0.18	0.94
Inclination caused by clearances γ	0.08	0.08	0.02	0.09	0.09	0.04

Fig. 9 Relationship between relative inclination of bearing surfaces between external thread and internal one and critical amplitude at separation between bearing surfaces

が小さく、分離しやすい傾向がみられる。 $\varphi_i + \varphi_e$ が 0.1° より小さい範囲では分離限界振幅は締付力に大きく依存し、締付力が大きい程分離難くなる傾向がみられる。次に、座面の相対傾き $\varphi_i + \varphi_e$ をおねじとめねじを組み合わせたときの有効径差、すなわちすきまによって生ずる傾き量と比較し、検討してみる。そこで、その有効径差による傾きを図 10 に示されるように光源として He-Ne

Fig. 10 Measuring system of inclination caused by clearance between combined pitch diameters

レーザを用い、光てこを応用した方法によって測定する。反射ミラーが側面に貼付されためねじをあらかじめ固定されたおねじにはめ合わせる。ビームをミラーに当てながら、めねじ端部付近に軸と直角方向に 2 N の荷重を加える。負荷前後のミラーからの反射ビームの振れ 2γ を読みとり、 γ を有効径差から生ずる傾きとする。測定結果を表 2 に示す。測定値は $0.02 \sim 0.09^\circ$ の範囲で得られ、この値を図 9 に示す。図から相対傾き $\varphi_i + \varphi_e$ が有効径差による傾きより大

きい範囲では分離限界振幅が小さい。また、有効径差による傾きと同程度の $\varphi_i + \varphi_e$ の場合では、座面分離限界振幅は締付力に大きく依存している傾向がみられる。分散分析した結果からも明らかに締付力、形状精度及びそれらの交互作用が 1% で有意であった。このことは、図 10 の結果により、有効径差から生ずる傾きが相対傾き $\varphi_i + \varphi_e$ を相殺する方向に作用すると考えられるので、相対傾き $\varphi_i + \varphi_e$ を有効径差による傾き程度又はそれ以下にして、締付力を大きくすることが有効であり、締結性能も向上するものと思われる。ゆえに、座面の傾きを指定する場合に、おねじとめねじを組み合わせたときの相対傾き $\varphi_i + \varphi_e$ と有効径差による傾き γ を重要な因子として取り上げ、考慮する必要がある。

4.3 相対回転変位

図 11 はめねじ座面の傾き φ_i とおねじ、めねじ間の相対回転変位 $\Delta\theta$ との関係を示す。 $\Delta\theta$ は精度の悪い場合では締付けトルク T_f に依存していないが、精度が良い場合では T_f に大きく依存している傾向がみられる。図中に次式から求められるねじれ角の計算値 $\Delta\theta_c$ を示す。

$$\Delta\theta_c = \frac{32T_f l}{\pi d^4 G} \quad (4)$$

ここで、 T_f : 締付けトルク、 l : 軸部の長さ (ねじ座面側の第 1 山までの軸部の長さとする)、 d : 軸部の直径、

Fig. 11 Effects of inclination of bearing surface of internal thread on $\Delta\theta$

G: 材料の横弾性係数.

計算に用いられた上記の値に関しては, $d=8.5\text{ mm}$, $G=80\text{ GPa}$, $l=6.5\text{ mm}$ と仮定する. 図中の計算値は精度の良い場合の実験値と傾向がよく一致している. これは締付け時に作用するトルクによっておねじ軸部にねじれが生じ, そのねじれが超音波振動による座面分離によって解除されたものと考えられる.

以上のことから, 座面分離に及ぼす座面形状精度の影響を座面の接触剛性を見地から次のように考える. ねじ結合部における座面の接触剛性に影響する諸因子として, 座面の表面粗さと表面うねり, 座面の加工法, 潤滑状態, 座面のみかけの面積, ねじ部の締付力, ねじ部品の精度およびそれらを組み合わせた場合の精度などが挙げられる. これに関しては, Connolly ら¹¹⁾は2平面の接合部の接触剛性を接合面材料のヤング率や降伏強さなどからなる m 値を用いて評価し, 各種加工法による接触面の表面粗さ, 平面度が接触剛性に及ぼす影響を明らかにしている. すなわち, 単一切れ刃の工具を用いて仕上げられた加工面に関しては, 粗さが大きい程剛性が低下し, また研削加工面ではほとんど粗さに影響されず, 平面度の悪い場合に剛性が低くなりやすいと報告している. これを参照すると, 本研究で取り上げたような座面に関しては, 座面の傾きが大きいものや接合面の圧力分布が軸中心付近に集中するような CV 型形状のものは結合部の剛性が低くなり, そのために座面分離が容易に生じたものと考えられる.

5. 結 言

超音波振動系の中で用いられているねじ結合部の座面形状精度が振動系の特性に及ぼす影響を検討した. 得られた主な結論は次のとおりである.

- (1) 座面形状精度のうち平面度に関しては, 形状誤差の大きさが等しいものでも, その形状が中低, 中高の違いによって, それらを締め付けた場合の座面間

の圧力分布状態が異なり, 座面分離現象に影響を及ぼしている. 本実験の範囲では, M10 のねじの締付け時に座面の当たりが良好な CC 型 $C_t=-10\text{ }\mu\text{m}$ の座面形状のものをなるべく大きな締付力で締め付けた場合に座面分離が起こり難く, 締結性能が良いことがわかった.

- (2) 座面の傾きに関しては, おねじ, めねじともそれぞれのねじ軸を基準にその傾きを測定し, おねじとめねじを組み合わせた場合の有効径差から生ずる傾きを考慮して評価した. 両座面間の相対的な傾きを有効径差から生ずる傾きと同程度以下にし, 締付力を大きくした場合に高い締結状態が得られることがわかった.
- (3) おねじとめねじ間の相対回転変位に関しては, 座面分離が生じない範囲ではほとんど回転変位は認められず, 座面分離が起こると回転変位が認められた. この変位は, 精度の良い場合では締付け時のトルクによって生じたねじ軸のねじれ角でほぼ説明できることがわかった.

終わりに, 本研究の遂行にあたり, 有益な御助言を賜りました東京工業大学精密工学研究所の吉本勇教授, 森栄司教授, 丸山一男助教授に深甚なる感謝の意を表します. また, 超音波発振装置などに関し種々御教示いただきました東京工業大学精密工学研究所の津田米雄技官, 実験に協力下さいました群馬大学工学部の須田博技官, 塚原義昭技術補佐員 (現在浅野コンクリート(株)), 当時の学生, 天野雅晴君, 梶沢善郎君, 峰岸豊君, 笹井良祐君に謝意を表します.

参 考 文 献

- 1) 山本 晃: ねじのゆるみ機構に関する研究の展望, 機械の研究, **32**, 1 (1980) 7.
- 2) 久米原宏之, 丸山一男, 津田米雄: 超音波振動によるねじのゆるみ——締結状態の評価, 精密機械, **45**, 8 (1979) 957.
- 3) 久米原宏之, 丸山一男, 津田米雄, 児玉正博: 超音波振動によるねじのゆるみ——座面分離現象, 精密機械, **45**, 12 (1979) 1492.
- 4) 例えば, J. R. Frederick: Ultrasonic Engineering, John Wiley & Sons, Inc., New York, N. Y., (1965) 100.
- 5) S. Takahashi, E. Yamamoto, N. Uetake and R. Motegi: Change of the Ultrasonic Characteristics with Stress in Some Steels and Aluminium Alloys, J. Material Sci., **13**, (1978) 843.
- 6) K. Kendall and D. Tabor: An Ultrasonic Study of the Area of Contact between Stationary and Sliding Surfaces, Proc. Roy. Soc. Lond., A, **323**, (1971) 321.
- 7) 吉本 勇, 丸山一男, 沢 俊行, 西口信幸: ねじ締結体の内力係数 (被締結体が中空円筒の場合), 日本機械学会論文集, **42**, 359 (1976) 2174.
- 8) 伊東 諒: 超音波による接触圧力の測定方法, 非破壊検査, **25**, 10 (1976) 669.
- 9) K. Maruyama: Analysis of the Deformation in Bolted Joints—Solution by Finite Element Method as a Contact, Bull. JSPE, **14**, 1, (1980) 47.
- 10) 吉本 勇: ISO 4759「締結用部品の公差」について, 日本ねじ研究協会誌, **10**, 6 (1979) 206.
- 11) R. Connolly & R. H. Thornley: Determining the Normal Stiffness of Joint Faces, Trans. ASME, Ser. B, **90**, 1, (1968) 97.