超音波振動系におけるねじ結合部に関する研究*

——ねじ結合部を振動子とホーンとの間に置く場合——

久米原 宏之** 森 昌 幹**

Study on Threaded Joints in Ultrasonic Vibration System

—The Case where Threaded Joints Are Located between Transducer and Horn—

Hiroyuki KUMEHARA and Masaki MORI

The threaded joints, located between transducer and horn in the ultrasonic vibration system, affect vibrational characteristics. The report deals with threaded joints experimentally, taking the accuracy of screw thread and tightening torque, as well as measuring method of the perpendicularity of the screw thread axis to contact surface. As a result, the resonant frequency of screw thread with high accuracy is almost equal to the theoretical one. The larger the tightening torque is, the higher the Q factor becomes. Screw thread with low accuracy reveals modes other than the expected ones, and its vibrational characteristics can be improved by use of stud bolts.

Key words : threaded joint, ultrasonic vibration, accuracy of screw thread, tightening torque, resonant frequency, horn, perpendicularity

1. 緒 言

超音波加工などに用いられる強力超音波振動系は一般に振動子、ホーンおよび工具から構成されている。上述の構成要素の結合にはろう接、はんだ付け、ねじ結合が用いられるが、その中でも着脱が簡便なねじを用いて行うことが多い。しかし、ねじ結合部ではゆるみ、破損および振動伝達特性に問題がある。これらの問題を解決するために、超音波振動系におけるねじ結合部に関する研究を行い、その一環としてホーンの先に工具を結合する場合を想定した条件、すなわち振動による変動応力の比較的大きい振動系の先端から $\lambda/8$ (λ :波長)の位置にねじ結合部を置いて、締付条件と結合状態の関係をインピーダンス法やアドミッタンス法を用いて検討した。更に加振振幅を増大していった場合、ねじ結合部での応力振幅に限界があることを見出し、この振幅を座面分離限界振幅として提案した^{1)~4)}。それらの結果からねじ結合部の締付け力、接合面の形状精度および潤滑条件が結合状態に影響し、それが振動系の特性にも影響していることがわかった。又、上述の知見をまとめ、ある程度の締付基準が得ら

れた。引き続いて、振動系における振動の腹の位置にねじ結合部がある場合として、ホーンと工具取付用の丸棒とのねじ結合部を振動系の先端から $\lambda/2$ の位置に置いた場合について同様の検討を行った⁵⁾。従来から、ねじ結合部を腹に置いた場合、その結合部の振動特性に及ぼす影響は少ないとされていたが、上述の結果よりねじ結合部の形状・寸法が振動系の特性に影響することがわかった。

本報では更に、超音波振動系の振動子とホーンとの間のねじ結合部について検討する。振動子としては、最近広く応用されているボルト締めランジュバン型の電歪振動子を用いるが、この振動子の出力端となる接合面はラッピングなどによる精密仕上が施されている。このことは、その接合面がホーンや工具などの構成要素からなる振動系の入力端であり、ここでの取付け不具合はその先に取り付けられる要素の振動状態に悪影響を及ぼすことが考えられるからであろう。しかし、ねじによる結合において、その接合部の形状精度や粗さに対する明確な加工基準はほとんどみられない。そこで、加工基準の指針を得るために接合部の形状精度、特にねじ軸に対する接合面の相対傾きに関して検討する。まず、ねじ軸に対する接合面の相対傾きの測定方法についても、その簡易測定法の確立も必要とされることから、仮想中心によるねじ軸の接合面に

* 原稿受付 昭和58年2月15日、昭和57年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和57年10月20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 Schematic diagram of experimental apparatus

Fig. 2 Shape and dimension of test piece

対する直角度を用いた簡便な測定法を提案する。次に、ねじ結合部の形状精度および締付けトルクを因子として取り上げ、それらが振動系の特性に及ぼす影響について実験的に検討する。

2. 本実験に用いる振動系

図1は実験装置の概略を示す。装置は電源および超音波発振系、振動子と試験片がねじ結合されている振動系および振動状態の観測系から構成されている。振動子は市販のボルト締めタイプのランジュバン型電歪振動子（公称共振周波数 20 kHz）を用いる。この振動子にはホーンを取り付けるためのねじがあらかじめ設けられており、そのサイズは M20×1 の細目ねじである。本実験では特にホーン側のおねじに着目し、旋削又はダイスによる切削ねじ（JIS 2 級程度）を用いる。ホーンの先の丸棒が一体に製作された試験片の形状寸法を図2に示す。ホーンの振動子取付け側の接合面は旋削による精密仕上で、その表面粗さは $0.4 \sim 0.6 \mu\text{m} R_a$ 程度である。接合面のねじ軸に対する傾斜についてはねじ軸の精度測定に対して、表面粗さと同様に重要であることから特に注意して仕上げる。その結果、接合面の傾斜による軸方向の振れは $15 \mu\text{m}$ 程度（測定した円の直径 60 mm）である。

3. ねじ結合部の精度測定

3.1 測定方法

振動子と試験片との間のねじ結合部の精度は、各接合面に対するねじの軸線の直角度を対象とする。その

測定方法に関しては、まず試験片のおねじの場合、試験片をその両端面に設けられた両センタで支持し、円筒加工物の仮想中心を用いた真円度測定方法と同様の手法で行う。測定手順は次のとおりである。初めに、センタ支持された試験片を回転しながら、その振動子取付け側の接合面の傾きによる回転軸方向の振れを電気マイクロ

メータを用いて測定し、その結果をペン書きレコーダで記録する。次に同一の回転軸を基準として試験片の1回転を10等分した回転角に対するねじの谷底の位置を図3に示されるように工具顕微鏡を用いて測定する。得られた測定結果から、図3に示される座標系を用い谷底の測定値によって作られる平均円の中心の回転軸に対する偏心量を次のように求める。なお、厳密にはねじの有効径円筒を用いるのが望ましいが、簡便のためにねじの谷底円筒の位置を用いて測定する。

一般的には、ねじの谷底の位置を $y(\theta)$ とすれば、これはフーリエ級数を用いて次のように表すことができる⁶⁾。

Fig. 3 Coordinate used to express the eccentricity between center of mean circle and axis of rotation

$$y(\theta) = C_0 + C_1 \cos(\theta + \phi_1) + \sum_{n=2}^{\infty} C_n \cos(n\theta + \phi_n) \quad (1)$$

回転軸 O と $y(\theta)$ の平均円の中心 O' とのずれ, すなわち偏心量 (C_1, ϕ_1) は式 (1) の第 2 項から求められる。

$$C_1 = \sqrt{A_1^2 + B_1^2} \quad (2)$$

$$\phi_1 = \tan^{-1}(-B_1/A_1) \quad (3)$$

ただし, θ : 回転角, ϕ_1 : 位相角, C_0 : 測定による定数。測定上は, ねじを 1 回転し, 測定円周を N 等分して得られる谷底の位置の読み $y(\theta_i)$ から A_1, B_1 を次のように求める。

$$A_1 = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N y(\theta_i) \cos \theta_i \quad (4)$$

$$B_1 = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N y(\theta_i) \sin \theta_i \quad (5)$$

上述の偏心量をねじの軸方向の 3 か所の位置で測定し, 三つの偏心量のばらつきと接合面の軸方向の振れからおねじの精度を評価する。

次に振動子のめねじに関しては, 丸軸部のあるおねじ (おねじゲージと呼ぶことにする) を振動子のめねじにはめわせて, 接合面に対するめねじ軸の傾きを測定する。まず, 振動子を自重によってねじの負荷側フランク面ではめ合うようにおねじゲージに取り付ける。次におねじゲージを回転させ接合面の傾斜による軸方向の振れを測定し, めねじの軸線の接合面に対する傾きを求める。これを用いて振動子のめねじ部の形状精度を評価する。

3.2 精度測定結果

試験片は, 旋削および旋削後更にダイスを用いて精度の悪いねじが加工できる条件を考慮して製作される*。ねじ結合部の精度については, 接合面の軸方向の振れが前述のとおり測定円の直径が 60 mm の位置で $15 \mu\text{m}$ 程度であり, 以下に述べるねじの軸線の直角度と比較して無視できる量である。従って, この接合面をねじ軸の精度測定をする際のデータムとして取り扱うことにする。図 4 は試験片の両端のセンタで支持して回転した場合の回転角とねじ谷底の位置との関係を示す。谷底の位置の測定はねじの軸方向に 3 か所で行った。この間隔は 4 mm でねじの 4 ピッチに相当する。図 4 (a) は旋削ねじ, (b) は旋削後ダイス仕上げした場合を示す。図から, 旋削ねじはダイス仕上げたねじに比べ, 各回転位置における測定値のばらつきが小さく, これらの測定値による平均円の中心のばらつきも

* ハンドダイスでねじの加工を行う場合, ダイスの取扱いの条件によりねじの軸線の蛇行したものができる。

(a) With threading tool

(b) With threading die

Fig. 4 Run-out of minor diameter circle of external thread

小さい傾向がみられる。次にねじの軸方向の 3 か所で測定された谷底の位置 $y(\theta)$ から, 式 (2), (3) により計算された偏心量 C_1 と偏心の位相のずれ ϕ_1 を図 5 に示す。図から破線で示されるダイス仕上げたねじは実線で示される旋削ねじに比べ, 各測定位置での平均円の中心が大きくばらついている傾向がみられる。そのばらつきの範囲は, 直径が約 $200 \mu\text{m}$ の円となり, 旋削ねじの場合の 2 倍程度である。又ダイス仕上げたねじはねじの軸線にねじれの傾向が大きくみられ, 精度が低いねじであることがわかる。実際にダイス仕上げたねじに振動子を取り付ける際に, 振動子全体が軸直角方向の上下左右に蛇行しながらはめあわさっていく様子がみられた。従って, 接合面に対するねじの軸線の直角度をこのように極座標を用いて表すと偏心量

Fig. 5 Accuracy of axis of screw thread

Table 1 Experimental condition

Level	1	2
Factor		
Method of machining	With threading tool	With threading die
Tightening torque Nm	55.0	27.5

やねじれの様子などを明確に把握できる。更に式(1)の高次項成分を解析すれば、ねじの誤差成分がより明らかになり、ねじ加工の精度向上に対して有益な情報が得られる⁷⁾。

一方、振動子にあらかじめ設けられているめねじの軸線の接合面に対する傾きに関しては、前述のようにおねじゲージを用いて測定した結果、その傾きは 0.02° である。ねじ結合部の円筒軸部とねじのはめあい長さの全長が20 mmであるので軸線は直径 $7\mu\text{m}$ の円の範囲内にあるとみなせる。この値は試験片のおねじの精度に比べ無視しうる値であるので、ねじ結合

部の精度については試験片のおねじの精度を用いて評価する。

4. ねじ結合部の精度と振動系の特性との関係

4.1 実験方法

図1に示された実験装置を用いて、超音波振動系の特性を調べる。実験条件については、表1に示されるように因子としてねじ結合部の精度と締付けトルクを取り上げ、それぞれ2水準とする。ねじの締付けトルク T_f に関しては、ねじの締付け力 F_f を用いる方が望ましいが、次式で示されるように $T_f \propto F_f$ の関係⁸⁾が周知であることから、取扱いの簡便な締付けトルクを用いることにする。

$$T_f = K \cdot F_f \cdot d \quad (6)$$

ただし、 K :トルク係数、 d :ねじの呼び径。

共振周波数特性については、発振器からの加振周波数の範囲(16.5~20 kHz)内で、それを徐々に変えながら振動子の側面に貼り付けられたPZTピックアップ素子の出力電圧として電圧計を用いて測定する。同時に周波数カウンタから読み取られた加振周波数に対する振動状態をシンクロスコープを用いて観測する。先端の振幅特性に関しては、試験片先端部付近の挙動を倒立型光学顕微鏡を用いて観測し、同時に静止している場合と振動している場合をそれぞれ写真撮影し、あらかじめ対角寸法のわかっているマイクロビッカースの圧痕により校正し、振幅を測定する。

4.2 振動系の特性

図6(a),(b)は、それぞれ旋削ねじと旋削後ダイス仕上したねじを用いた場合の振動特性を示す。図の横軸は加振周波数および縦軸はPZTピックアップ素子からの出力電圧を示す。図から、旋削ねじを用いた精

Fig. 6 Vibrational characteristics

Fig. 7 Notations used in calculation

度の高い場合とダイス仕上ねじの精度の低い場合の共振周波数を比較すると、それぞれの周波数はほとんど等しく、締付けトルクによらずほぼ一定の値を示す。これらの共振周波数の測定値は図7に示される座標系を用いて図2に示された試験片形状寸法（ただし接合面から丸棒の先端までの形状とする）を次式の共振条件式⁹⁾に代入して得られる共振周波数の計算値、すなわち 18.0 kHz にある程度近い。

$$\tan \beta l_1 = \frac{\frac{S_3}{S_1} \tan \beta l_3 + \frac{S_2}{S_1} \tan \beta l_2}{\frac{S_3}{S_2} \tan \beta l_2 \tan \beta l_3 - 1} \quad (7)$$

ただし、 S_i ($i=1, 2, 3$): 試験片各部の断面積、 $\beta = \omega/c$ ($\omega = 2\pi f$): 波長定数、 f : 共振周波数、 c : 試験片材料中の音速 (5 050 m/s とする)。

実験値と計算値の差については、計算値はホーンのステップ部 ($x=0$) での境界条件が変位の連続と伝達力の連続の場合に得られたものであり、ホーンの形状は $x=0$ で断面が不連続であるために単にステップ型のホーンの場合でも入力側と出力側の直径の比により共振周波数は変化し、その比が大きくなるにつれて半径方向の振動が影響するため共振周波数は減少する傾向がある¹⁰⁾ ことから振動系の共振周波数が小さくなったものと考えられる。更に詳細な検討が必要であると思われるが、実用的には式 (7) から近似値が得られる。

振動特性を詳細にみると、ダイス仕上したねじを用いて締付けトルクが 55 Nm の場合では上述の共振周波数のほかに、それより小さい周波数の約 16.7 kHz でも試験片が縦振動していることが観測された。又、共振周波数より大きい周波数の 19.5 kHz 付近でも縦振動はほとんど観測されないが PZT ビックアップ素子から大きい出力電圧が検出された。そこで市販の圧力判別シート（プレスケール）を用いて締付け後の接合面間の圧力分布を調べたところ旋削ねじの場合ではほぼ一様に分布しているが、ダイス仕上のねじの場合では片当たりが著しいことがわかった。このことはダイス仕上した精度の低いねじを用いて結合した場合では、振

Table 2 Experimental results of amplitude ($T_f=55$ Nm)

Method of machining	Amplitude μm	
	16.66	16.52
With threading tool	0	10
With threading die	1	8

動子とホーンとの接合面間の圧力分布が一様でないために多モードの振動が生じたものと考えられる。 Q 値に関しては、旋削の精度の高いねじの場合に締付けトルク $T_f=55$ Nm のとき約 750、 $T_f=27.5$ Nm のとき約 500、ダイス仕上の精度の低いねじの場合に $T_f=55$ Nm のとき約 600、 $T_f=27.5$ Nm のとき約 500 である。精度が高い場合では締付けトルクの効果が顕著にみられ、締付けトルクが大きいと小さい場合に比べ Q 値が大きい。このことはねじ結合部の締付けトルクを適正トルクまで大きくすれば、振動系内部での減衰は小さくなり共振は鋭くなるものと考えられる。更に、振動系の振幅特性に関しては、締付けトルク $T_f=55$ Nm の場合の旋削ねじ、ダイス仕上したねじそれぞれの試験片の縦振動による先端振幅を測定し、その結果を表2に示す。旋削による精度の高いねじではダイス仕上による精度の低いねじの場合より、共振周波数における先端振幅は大きい。特に精度が低い場合では共振周波数以外の周波数においても微小振幅が認められている。このことは、精度の低いねじによる接合では、振動系の振動特性に予測外のことが生じることを示している。そこで、振動子とホーンとの結合部を図8に示されるように植込みボルトを用いて、ホーンの振動子取付け側のねじをめねじ型にした場合を検討する。締付けトルクを 55 Nm として、試験片ねじ部の精度が低い場合（表1のダイス仕上したねじ軸の精度と同程度）の振動特性を測定した結果、次のような値が得られた。

共振周波数: 17.58 kHz

先端振幅: 9 μm

Q 値: 675

Fig. 8 Shape and dimension of test piece with internal thread

先端振幅及び Q 値のいずれも上述の試験片と一体加工したおねじ型の結合部に比べ増大している傾向がみられる。このことは、おねじとめねじのはめあい部には有効径の差すなわちすきまが存在し、この大きさがある程度接合面の傾きを相殺する作用³⁾がみられるので、振動子と植込みボルト及び植込みボルトと試験片のめねじの2か所の組合せによるすきまが形状精度の低い場合に有効に作用したものと考えられる。又、共振周波数のわずかな増加は試験片めねじ部の空洞による影響が現れたものと考えられる⁵⁾。この方法では、結合するための植込みボルトを必要とするので振動系を構成する部品点数が増すが、精度の低いねじを用いて結合した場合の振動特性の改善には有効であり、加工する際の公差管理上にも有利であると考えられる。

従って、超音波振動系のモデルを考える場合に従来では、振動子とホーンとのねじ結合部は単に機械端子として取り扱われていたが¹¹⁾、上述の結果からこのねじ結合部を振動系の構成要素として厳密に取り扱い、従来のモデルの中にねじ結合部の締付条件や接合面の形状寸法及び精度などを取り入れる必要がある。さらに定量化に関する課題も残されているが、これらについては今後の課題としたい。

5. 結 言

超音波振動系における振動子とホーンとの間のねじ結合部が振動系の特性に及ぼす影響について検討した結果を要約すると次のとおりである。

- (1) 振動子とホーンとの間の結合用ねじの精度が高い場合は振動系の共振周波数特性はある程度理論で予測されるとおりとなり、締付けトルクの大きいときは小さいときに比較し Q 値が大きくなり、締付けトルクの効果は顕著である。
- (2) ねじの精度が低い場合は理論で予測される以

外の周波数で縦振動したり、予測外のモードの振動を生じたりする。

- (3) 結合用ねじに植込みボルトを用いる方法によると、ねじの精度が低い場合の振動特性をある程度改善する効果がみられる。
- (4) 上記の精度とは、主として接合面に対するねじ軸線の直角度で、その一測定方法を提案した。

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、丸山一男助教授に深甚なる感謝の意を表します。また、実験に協力下さいました群馬大学工学部の須田博技官に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 久米原宏之、森 昌幹：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、精密機械、48, 8(1982)1010.
- 4) 久米原宏之、森村弘一、丸山一男、吉本 勇：超音波振動系におけるねじ結合部の特性、日本機械学会論文集、49, 441-C(1983)820.
- 5) 久米原宏之、森 昌幹：超音波振動系におけるねじ結合部に関する研究——ねじ結合部を応力振幅の節の位置に置く場合、精密機械、50, 3(1984)537.
- 6) 中田 孝：工学解析、オーム社(1976)79.
- 7) 吉本 勇：フーリエ解析——転造ねじの真円度、マシナリー(1964, 2)223.
- 8) 山本 晃：ねじ締結の理論と計算、養賢堂(1975)79.
- 9) G. Nishimura and S. Shimakawa: Ultrasonic Mechanical Machining (Part VI), J. Fac. Engg. Univ. of Tokyo 26, 1, (1959) 19.
- 10) A. I. Markov: Ultrasonic Machining of Intractable Materials, Iliffe Books Ltd., London, (1968) 73.
- 11) E. Mori: Analysis of Ultrasonic Exponential Solid Horn with a Tool, Bull. T. I. T. (P. M. E.), 43, (1969) 19.