

## ナットおよびボルトの座面振れの測定と評価\*

岡田 学<sup>\*1</sup>, 賀勢晋司<sup>\*2</sup>, 吉本 勇<sup>\*3</sup>Measurement and Evaluation of Run-Out  
of Bearing Surfaces of Nuts and BoltsManabu OKADA<sup>\*4</sup>, Shinji KASEI and Isamu YOSHIMOTO<sup>\*\*</sup> Department of Mechanical Engineering, Nagano National College of Technology,  
716 Tokuma, Nagano-shi, Nagano, 381-8550 Japan

For leading to greater fastening performance, the severity for requirement of dimensional and geometrical accuracies of threaded fasteners is increasing. This study, as one of the major factors relating to the above matter, treats the run-out of bearing surfaces of nuts and bolts. The purposes are to solve a probability distribution of the run-out and present related data from measurements for contributing to accuracy control and accuracy improvement. Measurement samples are taken from M 10 and M 10×1.25 nuts and M 10 bolts on the market. It is derived that the run-out theoretically shows a probabilistic feature characterized with the Rayleigh distribution or the similar one. With that statistical feature, all measurement results can be well explained. In brief, it can be said that this study makes the statistical feature of the run-out clear and gives some related data of the actual conditions.

**Key Words:** Fixing Element, Accuracy, Measurement, Nut, Bolt, Bearing Surface, Run-Out, Probabilistic Feature, Rayleigh Distribution

## 1. 緒言

他の機械要素と同様に、ねじについても寸法および幾何形状の精度管理・精度向上に対する要求が高まっている。ねじの精度について日本工業規格を参照すると、ねじ山、ねじ山検査用限界ゲージおよびねじ部品に分けた規定が行われている。ここで、最後のねじ部品に関しては、主なものに JIS B 1021 (ねじ部品の公差方式)<sup>(1)</sup>、JIS B 1071 (ねじ部品の精度測定方式)<sup>(1)</sup>があるが、現在、国際規格の改正、ISO 4759-1:2000 (締結用部品の公差-第1部)<sup>(2)</sup>、に伴って改正作業が進められている<sup>(3)</sup>。

上述のねじ部品関連規格の内容は多岐にわたり、特に幾何偏差について概念的に述べられている測定評価方法をどのように実現するか等、実際上の課題がある。また、実用されるねじ部品の幾何偏差の実データがどのようなものであるかを知ることも精度を議論する上で必要である。しかし、今までのところ、以上のよう

な課題に関連して公表された具体的事例や研究報告は見あたらない。

本研究は、ナットとボルトについての座面振れに関する測定評価を行い、それによりねじ部品の精度管理・精度向上についての技術的問題に一寄与をなそうとするものである。この座面振れは座面直角度に対応し、ねじ部品における幾何偏差の代表的項目である。現行 JIS<sup>(1)</sup>が座面直角度を振れ測定により評価することを規定していることから、本研究もそれに従って検討を進める。

本研究では、まず確率統計的な検討により座面振れの分布形状を予測する。次いで、試作装置により、市販のナット及びボルトをサンプルとした測定実験を行い、測定方法と座面振れデータについての検討結果を示す。なお、ねじ部品の座面の幾何形状は、座面圧分布、トルク係数、ゆるみ発生等、ねじの締結性能に対する直接影響要因と考えられる<sup>(4)(6)</sup>。本研究で得る座面振れに関するデータは、その方面の研究の資料として用いることができると考えている。

## 2. 座面振れの確率統計モデル

$z$ 軸をデータム軸線にとり、それに直交する平面  $A$  を参照平面とし、その単位法線ベクトルを  $k$  とする。

\* 原稿受付 2002年5月1日。

<sup>\*1</sup> 正員, 長野工業高等専門学校(☎ 381-8550 長野市大字徳間716)。<sup>\*2</sup> 正員, 信州大学工学部(☎ 380-8553 長野市若里4-17-1)。<sup>\*3</sup> 正員, 元東京工業大学精密工学研究所。

E-mail: okada@me.nagano-nct.ac.jp

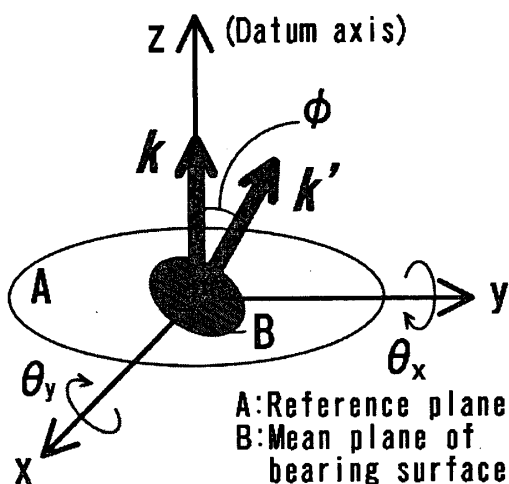


Fig.1 Model of bearing surface

平面Bは、Aをx軸まわりに $\theta_x$ 、ついでy軸まわりに $\theta_y$ だけ回転した平面とし、その単位法線ベクトルを $k'$ とする。その上で、Bを座面の平均平面と考える。 $k = (0,0,1)^T$ とし、ベクトルの回転演算を行えば、

$$k' = (\sin\theta_y \cos\theta_x, -\sin\theta_x, \cos\theta_x \cos\theta_y)^T$$

$\theta_x, \theta_y$ は実際には小さいので、 $k$ に対して $k'$ がなす角度 $\phi (\geq 0)$ は近似的に、

$$\phi = \sqrt{\theta_x^2 + \theta_y^2} \quad (1)$$

既に吉本<sup>(7)</sup>は式(1)の形について、右辺の変数が共に $N(0, \sigma^2)$ の分布を持つ場合の確率統計解析を行っている。ここではその手法を応用し、より一般的に $\theta_x$ が $N(0, \sigma_1^2)$ 、 $\theta_y$ が $N(0, \sigma_2^2)$ の変数である場合の $\phi$ の確率密度関数 $h(\phi)$ を求め、その形状を明らかにしておく。

$w = \phi^2$ とした場合の確率密度関数 $g(w)$ は、

$$g(w) = \int_0^w f_1(w-u) f_2(u) du \quad (2)$$

ここで、 $f_1(u), f_2(u)$ は各々 $\theta_x^2$ および $\theta_y^2$ の確率密度関数であり、例えば $f_1(u)$ は

$$f_1(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} \exp\left(-\frac{u}{2\sigma_1^2}\right)$$

式(2)により、 $\phi$ がとる確率 $P$ を求め、 $P$ を用いて $h(\phi)$ を導くと、

$$\begin{aligned} h(\phi) &= \frac{dP}{d\phi} = \frac{d}{d\phi} \left( \int_0^{\phi^2} g(w) dw \right) \\ &= \frac{2\phi}{k\pi\sigma_1^2} \exp\left(-\frac{\phi^2}{2\sigma_1^2}\right) \\ &\quad \times \left[ \int_0^{\frac{\pi}{2}} \exp\left\{-\frac{1-k^2}{2k^2\sigma_1^2} \phi^2 \sin^2\theta\right\} d\theta \right] \end{aligned} \quad (3)$$

ただし、 $\sigma_2 = k\sigma_1 (k > 0)$ とし、 $u = w \sin^2\theta$ としている。 $\sigma_2 = 0 (k=0)$ の場合には、式(1)は $\phi = \sqrt{\theta_x^2}$  ( $\phi \geq 0$ )となるから、

$$h(\phi) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} \exp\left(-\frac{\phi^2}{2\sigma_1^2}\right) \quad (4)$$

特に、 $k=1 (\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma)$ の場合は、式(3)より、

$$h(\phi) = \frac{\phi}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{\phi^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5)$$

となり、この形はRayleigh分布である<sup>(7)</sup>。

Fig.2に $\sigma_1=1$ とした式(3)~(5)による $h(\phi)$ の形状を示す。なお、式(3)の積分計算は数値積分によっている。

座面をz軸周りに回転させるとして、半径 $r$ の位置における軸方向の座面振れの全振幅を $t$ とする。以下では、この $t$ を座面振れの評価値とする。

$$t = 2r\phi + A_r \quad (6)$$

ここで、右辺第一項は座面の平均面の振れ、第二項は表面のうねり等によって生じる小変動分を表す。なお、一般に第2項が及ぼす統計的影響は小さいと判断されるので、 $A_r$ は確率変数として扱わない。また、同種サンプルの測定において、 $r$ は固定されるので確率変数とはしない。

実際に $h(\phi)$ を考察する場合、上述の $\sigma_1$ と $\sigma_2$ を確定するのは困難である。そこで、歯車の偏心に関する統計的解析<sup>(8)</sup>の方法を参照して式(5)による $h(\phi)$ を用いて $t$ の確率密度関数 $g(t)$ を求めると、

$$g(t) = \frac{t - A_r}{4r^2\sigma^2} \exp\left(-\frac{(t - A_r)^2}{8r^2\sigma^2}\right) \quad (t > A_r) \quad (7)$$

この場合、 $t$ の平均値 $\mu_t$ と標準偏差 $\sigma_t$ は、

$$\mu_t = \int_0^\infty g(t) t dt = 2r\sqrt{\pi/2}\sigma + A_r \quad (8)(\text{contd.})$$

$$\sigma_t = \sqrt{\int_0^\infty g(t)(t - \mu_t)^2 dt} = 2r\sqrt{2-\pi/2}\sigma \quad (8)$$

式(7)による具体例として、Fig.3に  $2r=13.6\text{mm}$ ,  $\sigma=4.4 \times 10^{-3}\text{rad}$ ,  $A_r=0.02\text{mm}$  における座面振れ  $t$  の分布を示す。なお、 $\mu_t=0.095\text{mm}$ ,  $\sigma_t=0.039\text{mm}$  である。

### 3. ナットの場合

#### 3.1 測定装置と測定方法

Fig.4に測定装置の主要部を示す。精密に作られた基準ねじ軸①は、サンプルナット⑥をはめ合わせる基準おねじ部を先端部に持つ。①には、つる巻きばね②と球面座（ガイドブッシュ③、球面軸受④、および押し付け具⑤で構成）を装着させ、サンプルナットに予圧を与えるようにしている。基準ねじ軸はステッピングモータにより回転し、電気マイクロメータのプロブ⑦により回転角  $3.6^\circ$  ごとにサンプルナットの座面変位を検出する。

Fig.5に基準ねじ軸を示す。基準ねじ軸はゲージに準じて製作され、その基準おねじ部はメートルねじ用通り側ねじプラグゲージ M10×1.25-GP (JIS B 0251 5H めねじ用) および M10-GP (JIS B 0251 5H めねじ用) に準拠している。図の A, B は各々複列アンギュラー玉軸受の取り付け部である。また、組立後の本装置におけるこの軸の基準おねじ部近傍の軸直角方向振れは数  $\mu\text{m}$  であり、以下の測定結果に及ぼす影響は小さい。

座面振れ測定にあたっては、データム設定が重要である。本研究では上述のような予圧方法により基準おねじ部に安定的にならわさせてサンプルナットの姿勢管理をする。基準おねじ部はゲージに対応する高精度ねじ形状をもつものであり、それに安定的にはまりあうサンプルナットの実用データム形体となる。なお、この設定方法は ISO 4759-1:2000<sup>(2)</sup> の附属書(C)に推奨される方法の考え方に合うものであり、この方法が適切に機能することを座面振れに関する予備的繰り返し実験により確かめている。

サンプルには、Table 1 に示すように、一般に多用される3種類のナットを取り上げる。いずれも JIS B 1181 附属書に規定され、部品等級 A または B と見なされるものである。測定においては事前にメタノールで超音波洗浄する。

#### 3.2 測定結果と考察

Fig.6に座面振れの測定記録例を示す。サンプルナット1回転中の検出変位の最大値と最小値の差を座面振れ  $t$  とする。1回転1周期の変動の上に加わる小変

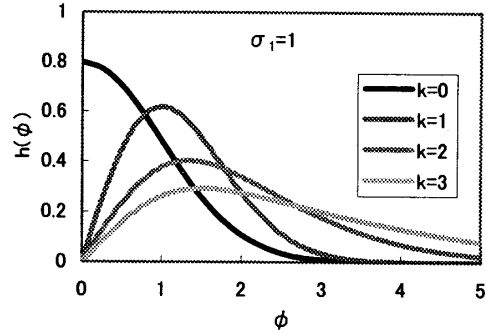


Fig.2 Graphic expressions of Eq.(2)

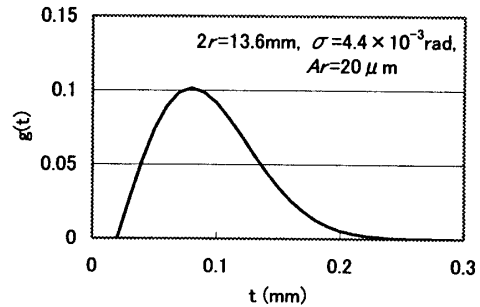
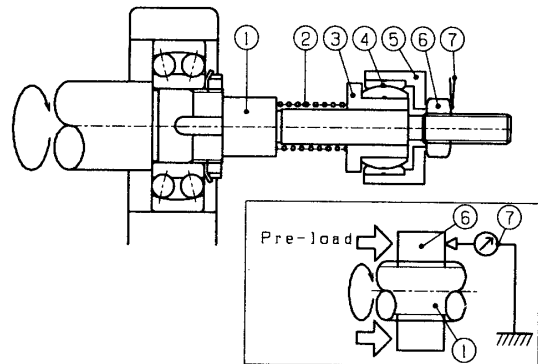


Fig.3 An example of distribution based on Eq.(7)



- ①:Reference threaded axle      ②:Coil spring
- ③:Guide bush                      ④:Spherical bearing
- ⑤:Push head                      ⑥:Sample nut      ⑦:Probe for run-out

Fig.4 Main part of measurement apparatus for nuts

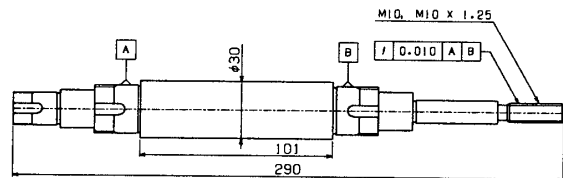


Fig.5 Reference threaded axle for nuts

動分が式(6),(7)の  $A_r$  に対応する値となる。

Fig.7に六角ナット2種類と小形ナットについて、測定によって得られた座面振れ  $t$  の度数分布（分割幅

Table 1 Nut Samples

No. 1	No. 2	No. 3
Hexagon nut 1	Hexagon nut 2	Small type hexagon nut
M10	M10×1.25	M10×1.25
Product grade A or B		
JIS B 1181, Annex		

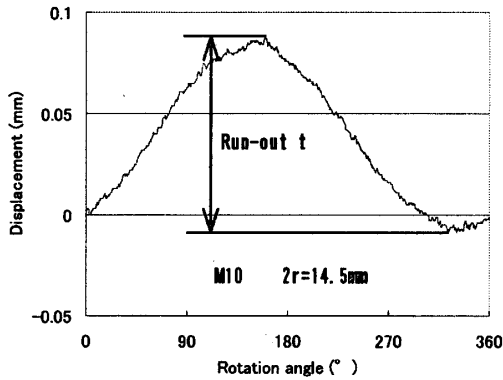
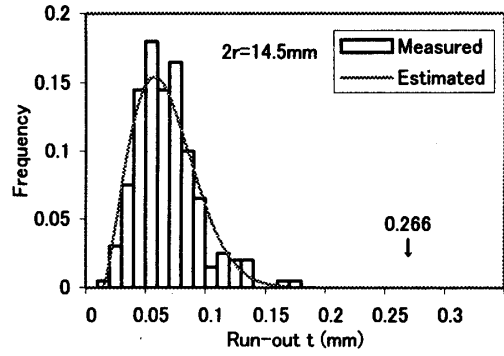


Fig.6 An example of measurement record (Hexagon nut 1)

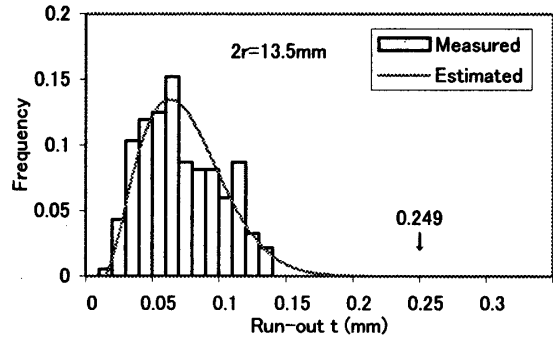
0.01mm) と、式(7)をそれらに当てはめて得られた分布曲線を示す。このあてはめにおいては、実測値より得られた試料平均と試料標準偏差の値を  $\mu_i$ ,  $\sigma_i$  の各々の推定値  $\hat{\mu}_i$ ,  $\hat{\sigma}_i$  とし、式(8)により、 $\sigma$  と  $A_r$  の推定値を求めている。図中の印(↓)とそれに付した数値は、JIS B 1071 に注記される部品等級 A, B に対する座面直角度公差  $1^\circ$  (座面傾き角) に対応する位置と値を示している。なお、サンプル数は各場合とも 200、測定円直径  $2r$  は各々 14.5mm, 13.5mm および 12.2mm である。Table 2 に Fig.7 に対応したサンプルの種類ごとにまとめた統計量の値を示す。

Fig.7, Table 2 によれば、座面振れ  $t$  の分布が式(7)を用いて求められた推定分布曲線により、かなりよく表され、特に六角ナット 1,2 の場合には合致の程度が高い。このことは本論文における解析モデルが近似的には妥当であり、座面振れの測定値から式(7), (8)を用いて実際の座面振れの分布形状を推定し、品質評価を行うことができることを意味する。ここで今回の測定結果について、Fig.7 中に印(↓)で示される許容限界値  $t_1$  を考慮すると、合格確率は、六角ナットの場合にはほぼ 100%、小形ナットの場合には 97% と計算される。従って、この小形ナットのような場合には、分布形状を改善する努力が必要であると言える。

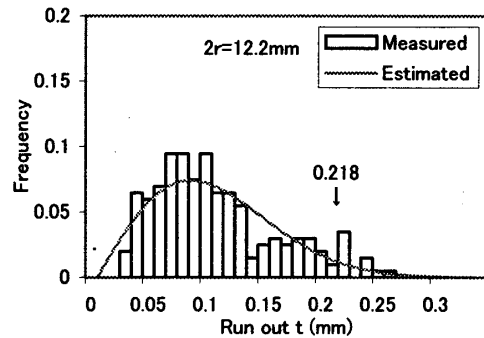
既述のように、式(7)は Rayleigh 分布を  $A_r$  だけ平行移動させた関数であるから、座面振れに関する統計的



(a) Hexagon nut 1



(b) Hexagon nut 2



(c) Small type hexagon nut

Fig.7 Histograms and estimated distribution curves

Table 2 Statistical values of nut samples

Type of nuts	No.1	No.2	No.3
Sample Size	200	200	200
$\hat{\mu}_i$ (estimated value of $\mu_i$ ) [ $\mu\text{m}$ ]	62	70	108
$\hat{\sigma}_i$ (estimated value of $\sigma_i$ ) [ $\mu\text{m}$ ]	26	29	54
Estimated value of $\sigma$ [ $\times 10^{-3}$ rad]	2.7	3.3	6.7
Estimated value of $A_r$ [ $\mu\text{m}$ ]	13.0	13.4	5.4

No.1, 2, 3: Refer to Table 1

検討は Rayleigh 分布をもとに行えばよいことが分かる。

## 4. ボルトの場合

### 4.1 測定装置と測定方法

基本的には、ナットの場合(3.1)と同様の考え方により測定装置を製作した。Fig.8にその主要部を示す。回転軸①とメートルねじ用通り側ねじリングゲージ M10-GR (JIS B 0251 附属書, 6g おねじ用) に準じる基準めねじ②を同心に組み合わせ、サンプルボルト⑥をはめ合わせる。③は内面の左側にめねじを持ち、ダブルナット形式でサンプルボルトを保持するためのホルダーである。これと球面軸受を併用して、サンプルボルトのねじ部が上述の基準めねじに適切にならうように予圧調整する。データム形体はナットの場合と同様にねじ部とし、平均して安定的にサンプルを保持するため、データム部分の長さをできるだけおねじ部全域に広めている。また、電気マイクロメータのプローブ④はサンプルボルトの座面振れ検出用、⑤は座面に近接した円筒部の回転振れ検出用であり、回転角  $3.6^\circ$  ごとに各データを取得する。なお、⑤による検出値は 4.2 においてデータム設定に関する検討を行う際に参考のため用いる。

サンプルボルトには、部品等級 A または B と見なされる M10 六角ボルト (JIS B 1180 附属書) を用い、測定の前にメタノールによる超音波洗浄を施した。サンプルボルトの呼び長さは 50mm (円筒部 25mm, ねじ部 25mm) である。なお、これだけの円筒部長さがある場合、ボルトに対するデータムは首下に近い円筒部に取りの方が JIS B 1021 には適うが、本研究ではねじ部基準により座面振れ評価を行うことに統一する。ボルトの場合のデータム設定については次項で検討を加える。

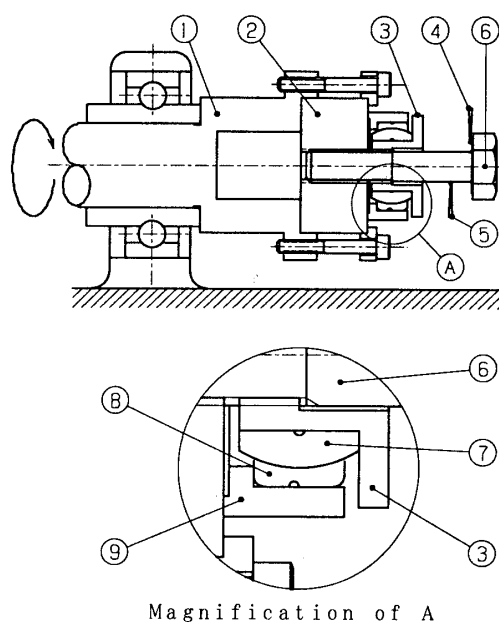
### 4.2 測定結果と考察

ナットの場合と異なり、データム部と座面部に距離があるので、始めに本装置によるボルト保持状況を検討する。そのため、Fig.8においてサンプルボルト⑥の代りに標準ねじゲージに準じて製作したプラグねじを繰り返し保持し、⑤に対応するプローブ2本(並列配置)によりその円筒部の回転振れを測定した。その結果によると、プラグねじ円筒部軸線の角度振れ(全振幅)は  $0.01^\circ$  程度、並進振れ(全振幅)は  $30\mu\text{m}$  程度であった。座面振れ測定においては、前者が重要な留意事項であり、その値には満足できる。後者の値はある程度大きいですが、測定円径  $2r$  に対し充分に小さい。以上により、本装置によるサンプル保持方法に問題は無いと判断した。

Fig.9にサンプル数を 100 として、測定によって得ら

れた座面振れ  $t$  の度数分布(分割幅  $0.025\text{mm}$ ) と、ナットの場合と同様にして式(7)を当てはめて得られた分布曲線を示す。ボルトの場合も式(7)により評価ができることがわかる。印(↓)と付された数値は 3.2 で述べたように、座面傾き角  $1^\circ$  に対応する。また、Table 3 に得られた統計量の値を示す。Fig.9 中に印(↓)で示される許容限界値  $t_c$  を考慮すると、合格確率は、六角ボルトの場合には 99% 以上であり、ほぼ問題無いと言える。

ボルトの場合にはデータムの設定方法が課題である。JIS B 1021<sup>(1)</sup>では座面振れ測定におけるデータム形体は



- ①:Axle                      ②:Reference internal thread  
 ③:Holder                    ④:Probe for bearing surface  
 ⑤:Probe for shank            ⑥:Sample bolt  
 ⑦:Spherical bearing (inner)  
 ⑧:Spherical bearing (outer)    ⑨:Base ring

Fig.8 Main part of measurement apparatus for bolts

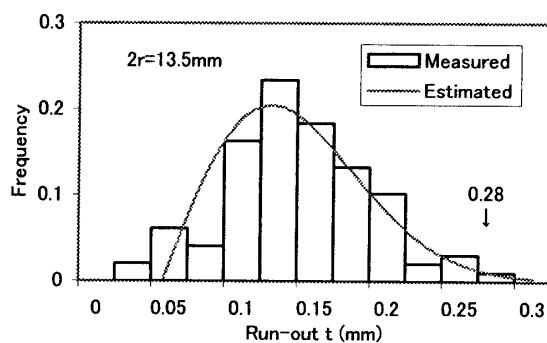


Fig.9 Histogram and estimated distribution curve (M10 hexagon bolt)

ねじ部または円筒部に設定することを規定している。そこで、ねじ部をデータムとした場合のデータム軸をZ軸 (Fig.1) とし、円筒部をデータムとした場合のデータム軸  $Z_s$  のZ軸に対する傾きを  $(\theta_{x1}, \theta_{y1})$ 、 $Z_s$  に対する座面平均面の傾きを  $(\theta_{x2}, \theta_{y2})$  とする。そのとき、式(1)の右辺の変数は、 $\theta_x = \theta_{x1} + \theta_{x2}$ 、 $\theta_y = \theta_{y1} + \theta_{y2}$  となる。仮に、 $\theta_{xi}$ 、 $\theta_{yi}$  ( $i=1,2$ ) の分布がすべて  $N(0, \sigma_b^2)$  とすれば、 $\theta_x$ 、 $\theta_y$  は  $N(0, 2\sigma_b^2)$  の分布を示し、円筒部をデータムとした場合に対して標準偏差が  $\sqrt{2}$  倍となり、データム設定の仕方によって座面振れの測定結果にかなりの差異を生じることが予想される。

Fig.10 にプローブ⑤ (Fig.8) により得られたサンプルボルト円筒部の回転振れ (1回転中の最大、最小振れの差) の度数分布を示す。参考値のため、詳しい検討は行っていないが、ボルト軸の曲がりやねじ部の各種誤差が主因と思われる。この振れをサンプルボルトと基準めねじのはめあい部中央点 (すなわちデータム中央点) まわりの傾きに換算してみると、 $0.2^\circ \sim 1.2^\circ$  に達することになり、データム設定の仕方による影響が無視できないことが指摘される。データム設定に関しては、今後、より明確な考え方が必要であると考えられる。

Table 3 Statistical values of bolt sample

Sample Size	100
$\hat{\mu}_1$ (estimated value of $\mu_1$ ) [ $\mu\text{m}$ ]	138
$\hat{\sigma}_1$ (estimated value of $\sigma_1$ ) [ $\mu\text{m}$ ]	48.5
Estimated value of $\sigma$ [ $\times 10^{-3}\text{rad}$ ]	5.5
Estimated value of $A_r$ [ $\mu\text{m}$ ]	45.4

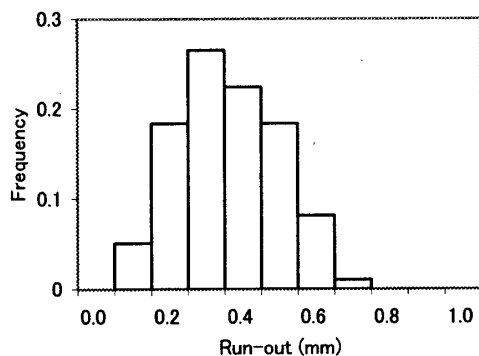


Fig.10 Histogram of run-out of shank

## 5. 結言

ナット及びボルトの座面直角度及び座面振れについて、確率統計モデルを求めた。その検証として、市販の3種類のナット、及びボルトについて、多数のサンプルを用いて測定を行い、その度数分布を求めて確率統計モデルと比較した。その結果、以下の結論を得た。

- (1) 座面振れの確率統計モデルは Rayleigh 分布に基づいて求めることができる。
- (2) 実測によって得られたナットの座面振れの度数分布は解析によって得られた確率統計モデルによってかなりよく表される。よって、Rayleigh 分布に基づく確率統計モデルは妥当である。
- (3) ボルトについても、実測による度数分布は確率統計モデルによる推定分布によってかなりよく表される。ただし、データム設定については、今後検討を要する。

## 文献

- (1) 日本規格協会編集：JIS ハンドブック (ねじ) 2001, 日本規格協会 (2001).
- (2) ISO 4759-1 : 2000 (Tolerances for fasteners – Part 1 : Bolts, screws, studs and nuts – Product grades A, B and C), ISO (2000).
- (3) 吉本 勇：2001年における「ねじ部品の公差方式」標準化の状況, 日本ねじ研究協会誌, 32, 6 (2001) 167-176.
- (4) 岡田 学, 賀勢晋司, 田中道彦：有限要素解析によるボルト, ナットの座面圧分布の検討 (ナットの座面直角度が及ぼす影響(続)), 日本機械学会 2001年度年次大会講演論文集 p193-194, (2001.8)
- (5) 細川修二, 熊倉 進：ねじ締結におけるトルクと軸力および曲げ作用に関する研究 (第1報), 精密工学会誌, 62, 5 (1996) 696-700.
- (6) 賀勢晋司：ねじの回転ゆるみ (主にその機構について), 東工大精研第32回シンポジウム前刷集, (2000) 15-19.
- (7) 吉本 勇：工学統計解析, (1981), 32, 養賢堂.
- (8) 吉本 勇：工学統計解析, (1981), 35, 養賢堂.