

**TITEST**  
**TT3000**  
Ultrasonic Bolt Tension Meter  
超音波締付け試験機

# Model : TT3000



非破壊でボルト軸力の測定ができる TT シリーズの高機能機種、TT2000 の基本機能に加え通信機能や操作性を向上。

◆ オールタッチパネル採用

- ・アイコン、メニューバー、テロップ表示により直感的に操作が可能。
- ・大画面 (7.5inch) で手袋をしながらでも操作できます。



TT3000

◆ 多彩な外部インターフェイス

- ・USB・LAN・SDカードにて測定条件や測定結果の管理が可能です



◆ バッテリ式のため、使用場所を選びません。充電中の使用も可能です。

◆ 高分解能

- ・軸力：0.01kN
- ・伸び：0.0001mm
- ・時間：0.1nS

◆ 英語／日本語表示切換機能付き



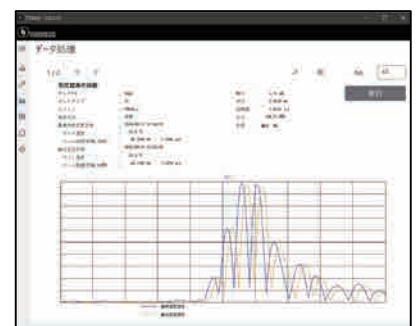
英語表示



日本語表示

◆ データ管理用ソフトを Web から無償でダウンロード

- TT3000 とパソコンで双方向通信が可能、パソコンにてデータ管理ができます。
- 通信方式は USB 通信とイーサネット (LAN) 通信が可能です。
- 締付け前 (基準状態測定)、締付け後 (軸力測定)、経時測定 of 波形データ、ボルトタイプデータを表示・印刷することができます。
- 測定条件、測定結果のデータを外部ファイル (Excel 形式) に保存、読み込みができます。
- TT2000 の測定条件のデータをインポートし TT3000 へ転送できます。(※但し、互換データのみ of 転送になります。)



ソフトウェア画像例

# TT3000 仕様

項目	仕様	
計測方式	超音波/パルス伝搬時間差方式	
測定対象	ボルトの締結力(軸力)	
測定長さ	5.00 ~ 25000.00mm	
適用ボルト径	M5以上(オプションの超音波センサーはM8~、M14~用を用意しています)	
超音波周波数	1 ~ 20MHz	
音速設定範囲	500 ~ 20,000m/s	
測定結果	ボルト軸力、伸び量、伝搬時間、応力、路程時間、路程長さ、温度、波形(画面ハードコピー、CSV形式)、測定条件(CSV形式)	
分解能	軸力	0.1kN、0.01kN(表示選択)
	時間	0.1ns
	伸び	0.0001mm
更新周期	計測値更新	0.04sec(最短)
	画面更新	0.2sec
データ記憶数	2000本/最大ボルトタイプ数:50種類(本体メモリに記憶)	
ボルト温度補正	キー入力方式(-100~+500°C)/自動温度入力方式(K熱電対による温度入力)	
検波方式	全波、正半波、負半波、RF波	
表示画面	カラーTFT7.5型、640×480ドット、抵抗膜式タッチパネル対応	
外部インターフェース	K熱電対入力:1ch、USB(シリアル通信用):1ch、SDカード(SD・SDHC・SDXC、最大64GB):1ch、LAN(TCP/IP):1ch、モニター信号(VGA)出力:1ch、フォトカプラ入力:4ch、フォトカプラ出力:4ch、アナログ出力(4~20mA):1ch最大負荷抵抗500Ω、エンコーダ入力:1ch	
電源	ACアダプタ(入力:100~240V、出力:DC12V 60W) 充電電池(11h連続使用(25°C)、充電時間4時間) ACアダプタで使用しながら充電可能	
使用温度範囲(本体表示部)	-10 ~ 60°C(ACアダプタ使用時)、0 ~ 40°C(バッテリー使用時)結露無きこと	
寸法	H168.1×W250×D64mm(突起部を含まず)	
質量	約1.56kg(バッテリー・ハンドル含む)	
本体ケース材質	ABS	
防水・防塵性能	IP20相当(バッテリー蓋を閉じた状態)	
規格	CE、定電圧指令(2014/35/EU)、EMC指令(2014/30/EU)、RoHS指令(2011/65/EU)	
言語	英語/日本語	
付属品	校正検査成績書、トレーサビリティ体系図、ACアダプタ、リチウムイオンバッテリー、USBケーブル、SDカード、電源コード、超音波センサー用ケーブル、超音波センサー、ハンドル1式、アルミトランク	

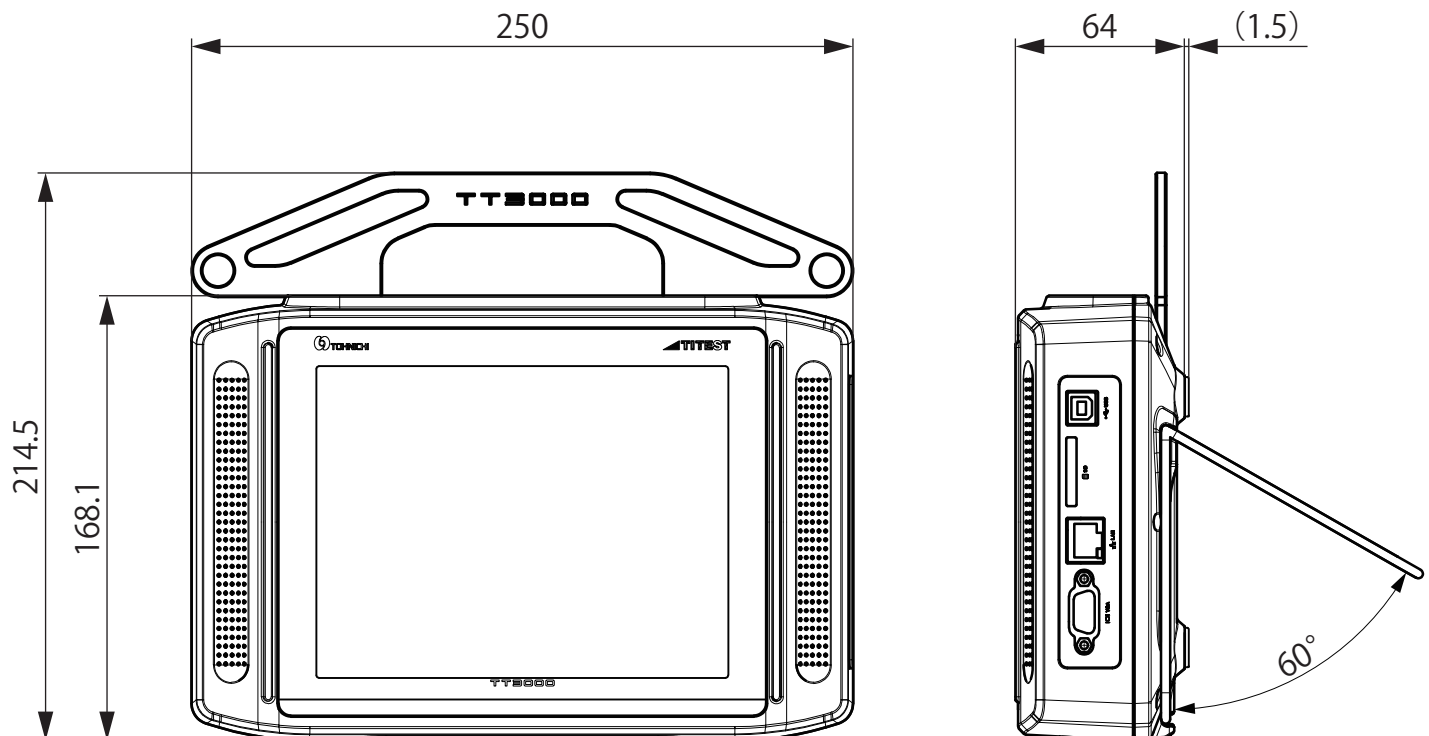
## ■ 超音波センサー



カタログNo.	品名	測定可能ボルト形状(目安)
607	5C6.4N	M8以上、L1<約50mm
608	5C12.7N	M14以上、L1<約2m

※ TT3000はカタログNo.607が標準付属します。

## TT3000 外観寸法



実機での確認も可能です。詳しくはお問い合わせください。

## － TT3000 測定原理 －

締め付け前のボルトの端部に超音波探触子（以下プローブという）を設置し、超音波ビームを入射します。超音波は、ボルトの内部を伝播し、反対面で反射して再びプローブに受信されます。

TT3000の表示画面上では、超音波信号をパルス波形として表示します。

TT3000はこの反射パルスを反射エコーと呼び、この反射エコーから、超音波がボルト内部を伝播した時間を測定し、超音波のビーム路程を求めます。

次に、ボルト締め付け後ボルトの端部にプローブを設置し、反射エコーを測定します。

ボルトに軸力が発生すると、ボルトは弾性的な伸び（ $\Delta l$ ）を生じます。

また、締め付け軸力より、内部を伝播する超音波の音速は遅くなります。

（ $V_1 > V_2$ ）これらの相乗効果により、ボルトに軸力が発生すると、ボルト内部を伝播する音波の伝播時間が大きく変化します（ $\Delta t$ ）。

図の例では、超音波で測定したビーム路程のみかけの変化量（ $\Delta l'$ ）は、

$42.1431 - 42.2904 = 0.1473 \text{ mm}$ となっています。

超音波で測定するとボルトの音速変化分が含まれるため、測定した伸び（ $\Delta l'$ ）は実際のボルトの弾性伸びよりも大きめに变化します。たとえば、鋼材系の材料を用いたボルトが実際に伸びた弾性伸び量（ $\Delta l$ ）は、超音波で測定した値の約  $1/3$  になります。

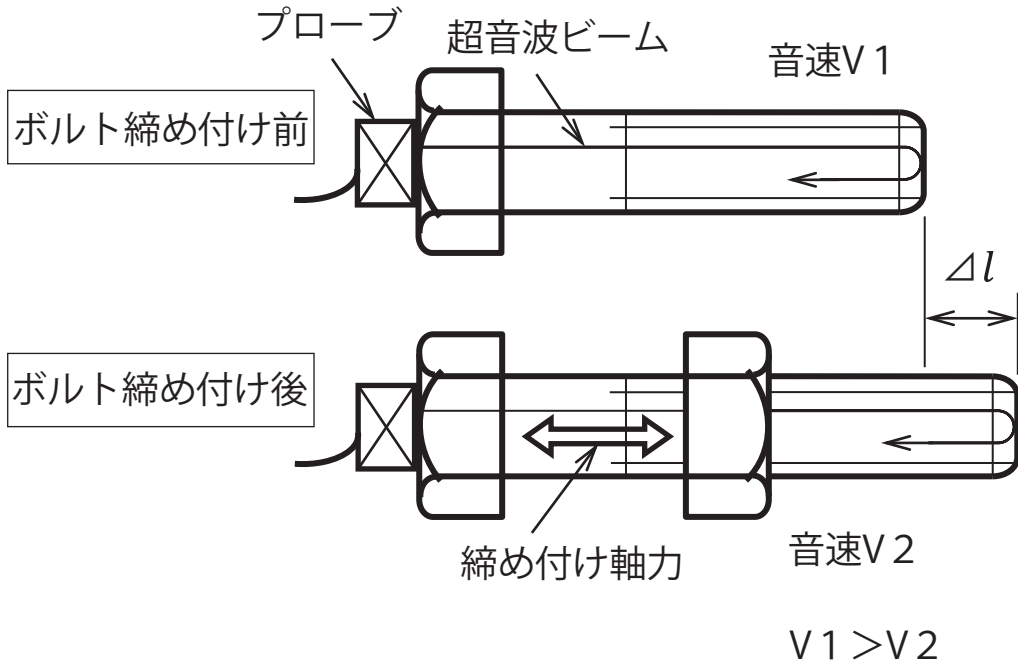
（弾性伸び  $\Delta l \div 0.1473 / 3 \div 0.049 \text{ mm}$ ）

このようにして測定した伝播時間の変化量  $\Delta t$  と、ボルトに加えた軸力との間に、良い相関関係があることから、ボルトの初期状態と締め付け後の状態でのボルト底面エコーの伝播時間差を測定してボルトの軸力、応力を算出することが可能となります。

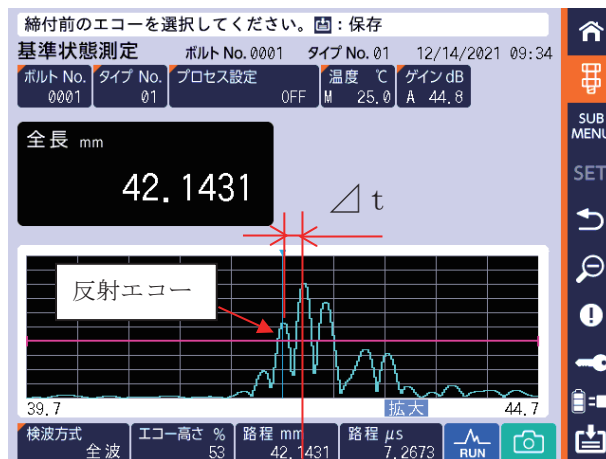
$$\text{ボルト軸力 } F = \frac{\Delta l'}{K \cdot \delta} \times 10^{-3} [\text{kN}]$$

K：材料定数（演算係数）

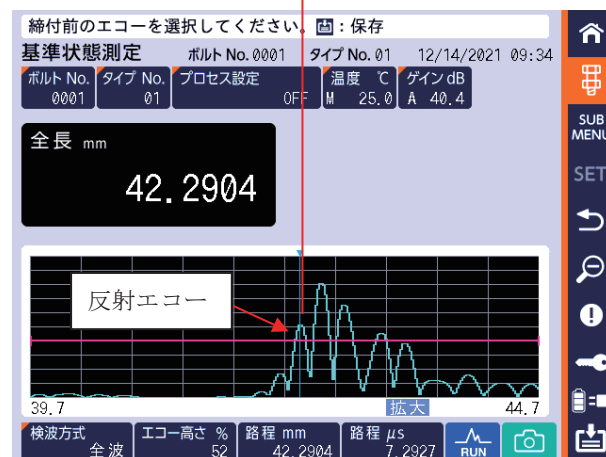
$\delta$ ：コンプライアンス



締め付け前



締め付け後



## － K 値測定について －

K 値（材料定数K）とは、ボルトの伸び量と軸力の関係を示す定数です。

実際には軸力を求める演算に使用する係数であり、材料固有の情報以外に、ボルトの形状に依存する情報が含まれています。よってボルトの材質が同じでも、形状が異なると軸力値のばらつきが大きくなります。測定ボルトの材料、形状が異なる場合は、【係数測定】【K 値測定】にてボルト固有のK 値を求め、その値を使用して軸力測定を行ってください。

### ● TT3000 での測定方法（概要）

- ①ボルトタイプを選択 → ②ボルト温度の入力 → ③締付け前測定を行う →
- ④締付け後測定を行う → ⑤加えた軸力を入力 → ⑥K 値を登録



▲▼: カウンタ変更    ↶: 戻る

係数測定      ボルト No. 0106    タイプ No. 01    2021/12/09 16:14

K 値測定

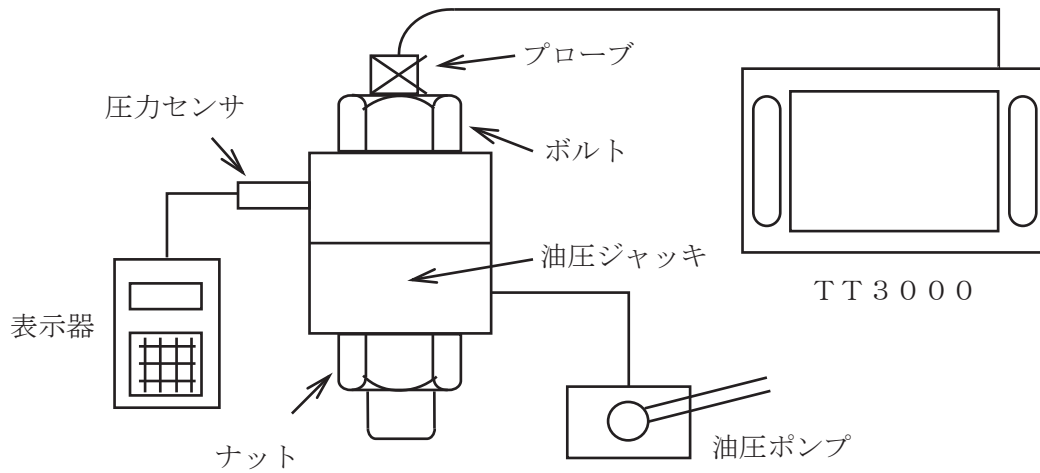
カウンタ	路程変化 [mm]	付加軸力 [kN]	K 値
01	0.2427	20.00	3.30
02	0.2409	20.00	3.27
03	0.2398	20.00	3.26
04	0.2392	20.00	3.25
05	0.2392	20.00	3.25
06	0.2386	20.00	3.24
07	0.2386	20.00	3.24
08	0.2386	20.00	3.24
09	0.2386	20.00	3.24
10	0.2386	20.00	3.24
平均			3.25

測定    登録    削除

K 値測定画面例

- 測定は10回行い、その平均値を求めて登録します。

# — K 値測定例 —



※油圧ジャッキは、アムスラー万能試験機またはボルト軸力校正器 (AFC-20G2：東日製作所) が使用できます。

## ■ 軸力校正器：AFC-20G2（別売）

### ● 超音波締付け試験機 TT シリーズの校正作業用の軸力校正器。

- ・ボルトの締付けをせずに、測定軸力をボルトに加える事ができます。
- ・測定軸力は油圧ポンプ操作で簡単に繰り返し加える事ができます。
- ・付属のボルト測定治具を使用する事で色々なねじサイズ及びねじ長さの軸力測定をする事ができます。



AFC-20G2 仕様

精度±2%+1digit

項目	仕様	
軸力測定範囲 [kN]	最小～最大	20～200
	1目盛	0.01
測定ボルト寸法 (参考) [mm]	φ20mm以下、ボルト首下長さ45～最大300	
	M10 (付属治具)	45～80 (測定ボルトと同強度のナット必要)
	M16 (付属治具)	50～85 (測定ボルトと同強度のナット必要)
	M20 (付属治具)	70, 87, 175, 187, 最大300 (測定ボルトと同強度のナット必要)
寸法 [mm]	全高	451
	横幅	438 (本体300)
	奥行	409
本体質量 約 [kg]	55	
電源 AC[V]	100～240V ± 10% 50 / 60Hz	
使用温度範囲	0～40℃ 85%HR以下 (結露無きこと)	

## 参考 超音波によるボルト軸力測定誤差について

いわさき 昭彦  
岩崎 昭彦  
(株)東日製作所

### 概要

超音波によるボルト軸力測定における軸力誤差には、探触子の着脱による接触媒質層の厚さの変化による超音波伝播時間の計測誤差や、ボルトの寸法形状にまつわる演算上の誤差、温度による超音波伝播時間の変化に起因する誤差などが考えられる。そこで本検討では、軸力に関する誤差を理論、実験、数値計算による解析から考察してみた。

### 緒言

超音波によるボルト軸力測定装置が酒井ら<sup>(1)</sup>によって開発されてから十数年が過ぎた。この間装置の改良、測定技術の進歩などにより、超音波によるボルト軸力測定装置は研究用から生産・品質管理まで普及してきた様子である。ところが超音波による軸力測定では、伝播時間計測方法に起因する軸力値の誤差、コンプライアンス<sup>(2)</sup>と呼ばれるモデル化したボルトのばね定数に起因する軸力算出誤差、温度による超音波伝播時間の変化に起因する軸力算出値の誤差等、軸力測定精度に関わる項目が多い。

このため、測定精度が不明確で信頼性に乏しい測定方法であると思われがちであった。

そこで本報告では、滝下らの研究<sup>(3)</sup>を基に、理論・計算機実験または実際のボルトで行った実験結果について報告すると共に、超音波によるボルト軸力測定上の注意点について述べる。

### 基本測定原理

ここでごく簡単に、超音波によるボルト軸力測定原理について述べる。滝下らの研究による軸力演算式を要約すると、図 1 のボルトモデルでは以下に示す式で求められる。

$$\Delta t = t_F - t_0 = \frac{2(1 - kE)\sigma}{V_0} \cdot F \quad \dots (1)$$

$$F = \frac{V_0}{2(1 - kE)\sigma} \cdot \Delta t \quad \dots (2)$$

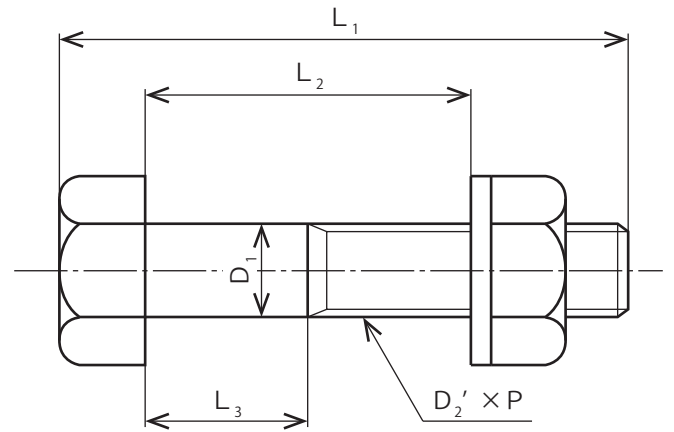


図 1 測定原理のボルトモデル

但し  $\sigma$  は、

$$\sigma = \left[ \frac{0.4D_1 + L_3}{A_1} + \frac{(L_2 - L_3) + 0.4D_2}{A_2} \right] / E \dots (3)$$

であり、伸びと力の比を意味するコンプライアンスである。

$L_2$  ; 締付け部長さ

$L_3$  ; 非ねじ部長さ

$A_1 = D_1^2 \cdot \pi / 4$

$A_2 = D_2^2 \cdot \pi / 4$

$D_2 = D_2' - 0.65P$

$D_2'$  ; ねじ呼び径

$F$  ; 軸力

### 超音波探触子の着脱による伝播時間の変動

一般に超音波軸力測定に用いる探触子は、接触媒質の厚さの変化による伝播時間の変動を避けるために、さらに、探触子設置面と超音波の反射面の仕上げ状態を良くすると測定値が安定する事が知られてる<sup>(4)</sup>。

そこで図 2 に示す探触子ホルダーを用いて、ばねによる押し付け力を 0.044N とし、図 3 のボルトにおける探触子の着脱による伝播時間の変動をパルス反射法により測定した。

伝播時間の測定は図 4 に示すように、第 1 底面反射波 B 1、第 2 底面反射波 B 2、及び、探触子とボルト頭部間にある接触媒質層の影響を除くため B 1 の伝播時間から B 2 の伝播時間を



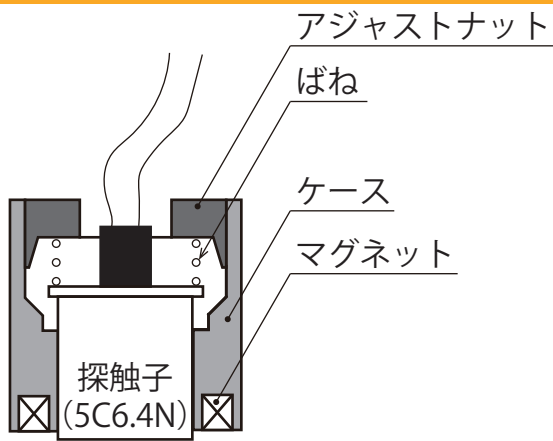
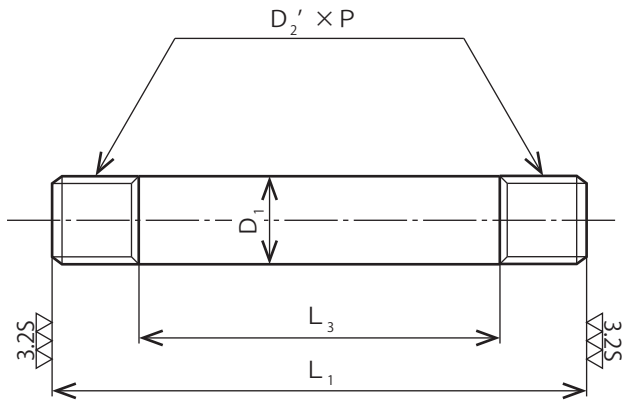


図2 探触子ホルダー（断面図）



$L_1 = 150\text{mm}$                        $L_2 = 100\text{mm}$   
 $L_3 = 90\text{mm}$                          $D_1 = 20\text{mm}$   
 $D_2' = 20\text{mm}$                          $P = 1.5\text{mm}$   
 $E = 2.06 \times 10^{11} \text{N/m}^2$              $k = -1.16 \times 10^{-11} \text{m}^2/\text{N}$   
 $V_0 = 5985 \text{m/S}$

図3 ボルトモデル

$P$  ; ねじピッチ  
 $E$  ; ヤング率  
 $k$  ; 音弾性係数  
 $t_0$  ; 往復無負荷伝播時間  
 $t_f$  ; 往復負荷時伝播時間

減算した絶対値 (B 1 - B 2) の、3方法についてそれぞれ20回行った。

実験に用いた機器はシングア라운드ユニット (超音波工業(株)製 UVM-2)、波形及びゼロクロストリガー点の確認用にデジタルオシロスコープ (横河電機(株)製 DL2240) を、超音波探触子は 5C6.4N (日立建機(株)製)、接触媒質にはグリセリンを用いた。表1に実験結果を示す。

表1で、 $r$ は20回測定した往復伝播時間の最大値から最小値を減算したばらつき幅を示し、 $3\sigma t$ は往復伝播時間の標準偏差の3倍である。また $3\sigma$ は、 $3\sigma t$ を(2)式の $\Delta t$ に代入した時の軸力演算値を $D_2$ で除算した、ねじ有効径部応力である。

表1 探触子の着脱による伝播時間と応力の変動

	$r$ (nS)	$3\sigma t$ (nS)	$3\sigma$ (MPa)
B1	10.3	10.2	17.6
B2	9.9	8.4	7.2
B1-B2	4.3	1.5	2.4

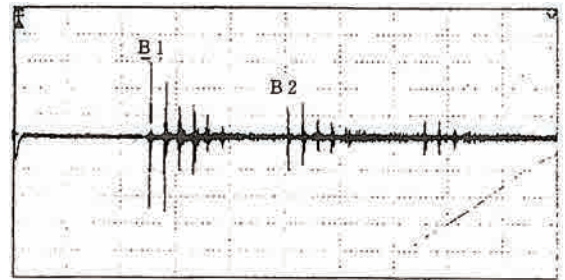


図4 超音波受診波形

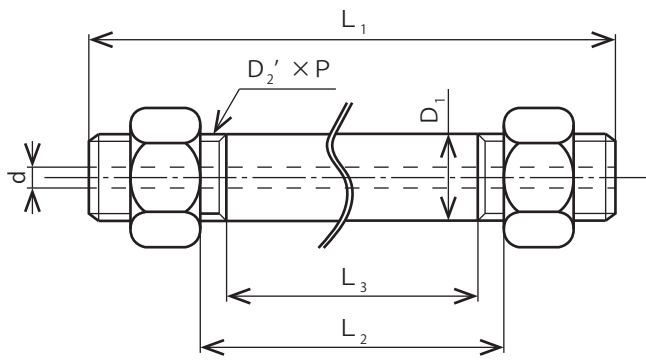
表1より、B 1 - B 2 測定が探触子の着脱に起因する接触媒質の膜厚変化による伝播時間の変動が少ない事がわかる。但し、B 2 測定では2倍の往復伝播時間を計測している事になるので(2)式による軸力演算値も2分の1になり、伝播時間の変動も2分の1される。

図3に示した両端面の仕上げ状態の良いボルトで、探触子を一定の力で押し付けても探触子の着脱により、 $3\sigma t$ の伝播時間、 $3\sigma$ 程度の応力の変動がある。通常このボルトでは、有効径部応力で300MPa程度に達する事から、B 1計測では5.9%、B 2計測で2.4%の変動による誤差であるが、B 1 - B 2計測を行うと0.8%と、ほとんどこの誤差は無視できるほど小さい値となる。

従って、静的な条件下で高い精度を要求する測定で、B 2が安定して測定できるならばB 1 - B 2測定のように2回測定し、比較的簡単に軸力の測定を行う時にはB 2測定を用い、減衰材や探触子設置面及び超音波の反射面の仕上げ状態が悪く、他に軸力の測定手段がない場合に軸力の傾向を知りたいだけならB 1測定と、目的に応じ測定方法を使い分けるのがよいと言える。

### ▶ ボルトのモデル化による軸力演算上の誤差

(3)式で示したように、コンプライアンス $\sigma$ はボルトの寸法形状とヤング率により与えられる。市販されている超音波軸力計の多くは、測定を行うねじ締結体の $\sigma$ をあらかじめ代表値として算出し、個々のボルトの伝播時間計測を行い、(2)式のように軸力を演算している。しかし代表値の $\sigma$ が実際のねじ締結体と一致しない場合がある。例えば、 $\sigma$ は図面寸法を基にモデル化を行い、代表値を算出するが、測定対象のボルト個々の寸法公差や、非ねじ部とねじ



$L_1 = 1342\text{mm}$	$L_2 = 1134\text{mm}$
$L_3 = 1030\text{mm}$	$D_1 = 146\text{mm}$
$D_2' = 151.7\text{mm}$	$P = 3.17\text{mm}$
$d = 22\text{mm}$	$V_0 = 5985\text{m/S}$
$k = -1.16 \times 10^{-11}\text{m}^2/\text{N}$	$E = 2.06 \times 10^{11}\text{N/m}^2$

図5 解析したボルトと各パラメータの標準値

部間に必ずある不完全ねじ部のモデル化法、ボルトのヤング率のばらつきなど、精度に関わるパラメータは多い。その他初期音速 $V_0$ も代表値を用い演算するので、個々のボルトの初期音速のばらつきも、軸力演算上の誤差要員の1つとなり得る。

そこで伝播時間計測以外の各パラメータを一つずつ $-10\% \sim +10\%$ 変化させた時の軸力演算値に与える影響度を、図5に示すボルトモデルで解析してみた。解析にあたり、(2)式の伝播時間以外の項をRとしてまとめ、(4)式に示すように簡略化した。

このRの変化が軸力Fの変化に対応する。また中空ボルトでも軸力の算出ができるように、(3)式にて用いた $A_1$ を $A_1 = \pi(D_1^2 - d^2) / 4$ 、 $A_2 = \pi(D_2^2 - d^2) / 4$ とした。

$$F = \frac{V_0}{2(1 - kE)\sigma} \cdot \Delta t = R \cdot \Delta t \quad \dots (4)$$

解析結果を図6に示す。解析対象としたパラメータは、 $L_2$ 、 $L_3$ 、 $D_1$ 、 $D_2'$ 、 $d$ 、 $P$ 、 $V_0$ 、 $E$ とした。図から、 $P$ 、 $L_3$ 、 $d$ 、 $D_2'$ は $\pm 10\%$ で入力してもほとんど軸力の誤差として表れない。ところが、 $D_1$ は約 $\pm 18\%$ 、 $L_2$ は約 $\pm 9\%$ に、 $E$ では約 $\pm 3\%$ 、 $V_0$ では $\pm 10\%$ の軸力誤差として表れる。以上より軸力の算出を行う際には、 $D_1$ 、 $V_0$ 、 $L_2$ 、 $E$ の順序で精度よく求めておかなければならない事がわかる。具体的に $D_1$ について示せば、1mmの誤差(0.7%)があったとすると、1.2%の軸力誤差となる。実際の測定作業でよく起きる問題であるが、非ねじ部長さがねじ部との境界部分にある不完全ねじ部により明瞭でない時は、(4)式によりあらかじめ軸力誤差を求めておくとよい。

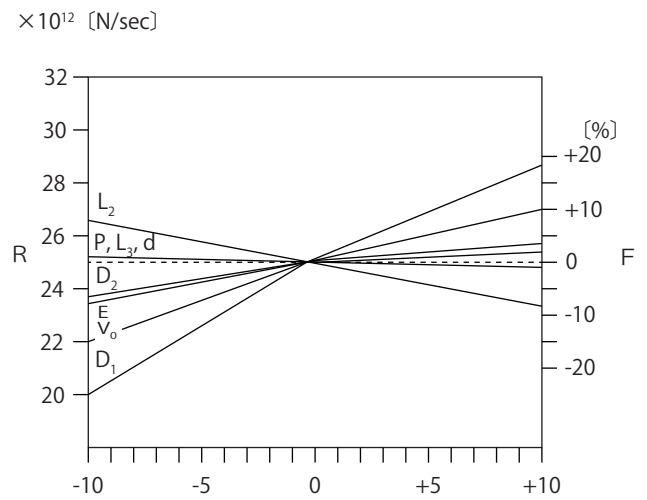


図6 各パラメータの標

### ▶ 温度変化による伝播時間の変動が軸力測定値に及ぼす影響

温度が変化する時ボルト各部の寸法と音速は、温度に依存して変化する事が知られている。そのためボルト締付け前の超音波による測定と、締付け後の超音波による測定の間温度変化がある場合、両者の測定値をそのまま用いて比較する事ができない。そこで、温度によるボルトの寸法及び音速変化を考慮した温度補正を行う必要がある<sup>(5)</sup>。

一般に、温度 $20^\circ\text{C}$ の鋼材のボルト全長を $L_0$ 、音速を $V_0$ とすると、ある温度 $T$ におけるボルト長さ $L$ と音速 $V$ は次式のように表される。

$$L = L_0 (1 + \alpha \Delta T) \quad \dots (5)$$

$$V = V_0 (1 + \beta \Delta T) \quad \dots (6)$$

ただし、 $\Delta T = T - 20$ を基準温度化し、線膨張係数 $\alpha$ ( $1/^\circ\text{C}$ )、音速の温度計数を $\beta$ ( $1/^\circ\text{C}$ )とする。

ねじ締結体の場合、ボルトと被締結体の線膨張率が等しく、かつ同一温度であれば、温度変化によらず軸力は一定である。つまり超音波によるボルト軸力測定では、温度変化によらず伝播時間差が一定であればよい。ここで、温度変化による超音波往復伝播時間の変化率(以下温度係数とする)を $\gamma$ ( $1/^\circ\text{C}$ )、ある温度 $T$ ( $^\circ\text{C}$ )における往復伝播時間を $t_h$ 、温度 $20^\circ\text{C}$ の往復伝播時間を $t_0$ とすると、(7)式になる。この温度計数 $\gamma$ はボルトの線膨張と、温度による音速変化の影響を含んだ値である。

$$t_h = t_0 (1 + \gamma \Delta T) \quad \dots (7)$$

(7)式から締付け前後の往復伝播時間差を求めると、(8)式が得られる。ここで $\Delta t$ は締付け前後の往復伝播時間差、 $t_f$ は基準化温度 $\Delta T_f$ ( $^\circ\text{C}$ )時の締付け後往復伝播時間、 $t_0$ は基準化温度 $\Delta T_0$ ( $^\circ\text{C}$ )時の締付け前往復伝播時間である。

$$\Delta t = t_f (1 + \gamma \Delta T_f) - t_0 (1 + \gamma \Delta T_0) \quad \dots (8)$$

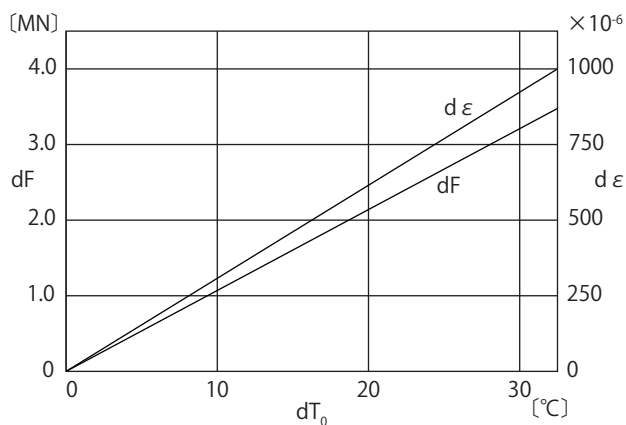


図7 温度誤差  $dT_0$  と軸力誤差  $dF$ 、ひずみ誤差  $d\varepsilon$  の関係

ここで、締付け前、締付け後の温度差をそれぞれ  $dT_F$ 、 $dT_0$ 、伝播時間誤差を  $dt$  とすれば、往復伝播時間差は (9) 式となる。

$$\Delta t + dt = t_f \{1 + \gamma (\Delta t_f + dT_f)\} - t_0 \{1 + \gamma (\Delta t_0 + dT_0)\} \quad \dots (9)$$

よって、温度による伝播時間誤差は (9) 式 - (8) 式から、次式で表される。

$$dt = t_f \cdot \gamma \cdot dT_f - t_0 \cdot \gamma \cdot dT_0 \quad \dots (10)$$

また  $dT_f$  と  $dT_0$  の影響度は等しいと見なし得るので、ここでは締付け前の誤差のみを考え、(11) で表す。

$$d_t = t_0 \cdot \gamma \cdot dT_0 \quad \dots (11)$$

次に、温度誤差  $dT_0$  とひずみ量との関係を検討する。応力  $\sigma$ 、ヤング率  $E$ 、ひずみ  $\varepsilon$  の関係は、伸びを  $\Delta l$ 、原長を  $l$  とすると、(12) 式で示される。

$$\sigma = E \cdot \varepsilon = E \frac{\Delta l}{l} \quad \dots (12)$$

定義の  $\Delta l = \sigma \cdot F$ 、及び (2) 式より

$$\Delta l = \Delta t \cdot \frac{V_0}{2(1 - kE)} \quad \dots (13)$$

$$l = \frac{t_0 \cdot V_0}{2} \quad \dots (14)$$

であるから、ひずみ  $\varepsilon$  は

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta t}{t_0(1 - kE)} \quad \dots (15)$$

となる。ここで  $dT_0$  によるひずみの誤差を  $d\varepsilon$  とすると、(15) 式より

$$d\varepsilon = \frac{d_t}{t_0 \cdot (1 - kE)} \quad \dots (16)$$

(11) 式を代入して、

$$d\varepsilon = \frac{\gamma \cdot dT_0}{1 - kE} \quad \dots (17)$$

この式により、ひずみ誤差  $d\varepsilon$  はボルトの寸法形状に左右されず、温度係数  $\gamma$ 、温度誤差  $dT_0$ 、音弾性係数  $k$ 、およびヤング率  $E$  により

表されることがわかる。

図7に、図5のボルトモデルでの温度誤差  $dT_0$  による軸力誤差  $dF$ 、ひずみ量誤差  $d\varepsilon$  の解析結果を示す。

$dT_0$  は  $0^\circ\text{C}$  から  $32^\circ\text{C}$  まで変化させ、ひずみ量誤差を (17) 式により求め、次に (12) 式より応力を算出し、応力に断面積  $A_1$  を乗算し、軸力の誤差を求めた。解析にあたり、 $\gamma = 1.1 \times 10^{-4} (\text{}/^\circ\text{C})$  とした。

図5のボルトモデルでは、 $d\varepsilon = 32.4 \times 10^{-6} (\text{}/^\circ\text{C})$  程度のひずみ量の誤差になる。

例えばこのボルトが  $4.5\text{MN}$  ( $275\text{MPa}$ ) で締結されている場合、温度誤差  $dT_0$  が  $1^\circ\text{C}$  の時には約2%程度の軸力の誤差となって現れる。従って、高い応力で締結されているほど温度誤差の影響が少ないと言える。

### ▶ 各ボルトの温度係数と、温度係数の誤差が軸力値に与える影響

次に実際のボルトにより、(7)、(8)、(9) 式で用いた温度計数  $\gamma$  を実験により求めてみた。

実験の方法は、前記のシングア라운드装置によるパルス反射法で、B1 - B2測定とした。まず恒温水槽 (ヤマト科学(株)製、BH-71) 内に試料とするボルトを水浸させ、 $10^\circ\text{C}$  から  $60^\circ\text{C}$  まで充分時間をかけて変化させ、各設定温度における超音波往復伝播時間をプロットした。プロットしたデータは文献<sup>(5)</sup>を参考に、常温付近での実験点をできるだけよく表すと思われる直線を引き、(18) に定義した式により温度計数  $\gamma (\text{}/^\circ\text{C})$  を算出した。

またこの実験で用いた接触子は、特記なきものは  $5\text{C}12.7\text{N}$  である。実験に用いたボルトの寸法形状、材質、算出した温度計数  $\gamma$  の一例を図8、表2に示す。

$$\gamma = \frac{T_{60} - T_{10}}{T_{10} \cdot \Delta \text{temp}} \quad \dots (18)$$

$\gamma$  : 超音波往復伝播時間の温度計数 ( $\text{}/^\circ\text{C}$ )

$T_{10}$  :  $10^\circ\text{C}$  での超音波往復伝播時間

$T_{60}$  :  $60^\circ\text{C}$  での超音波往復伝播時間

$\Delta \text{temp}$  : 温度差  $50^\circ\text{C}$

表2に示すように温度計数  $\gamma$  は、鋼材系で、 $1.04 \times 10^{-4} \pm 0.06 \times 10^{-4} (\text{}/^\circ\text{C})$  程度であることがわかった。またアルミニウム系では約70%程度大きく、オーステナイト系ステンレスのSUS304では約50%程度鋼材の  $\gamma$  より大きい値を取り、温度変化により超音波往復伝播時間がかなり大きく変化することがわかった。

この温度計数を求めるにあたり、温度と超音

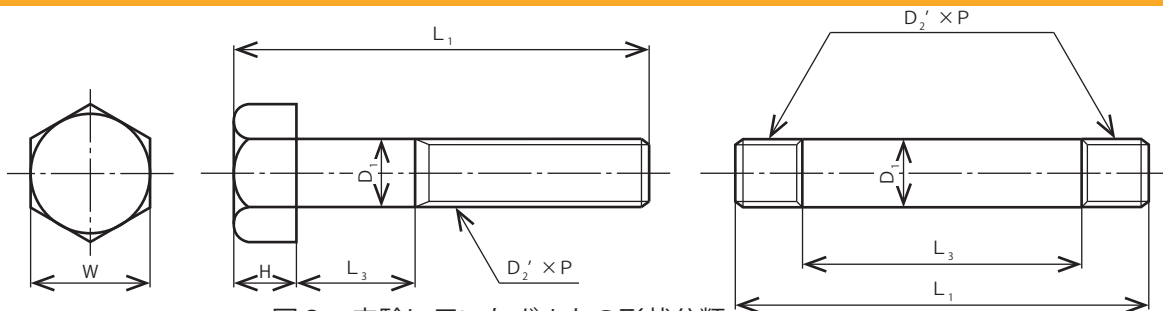


図8 実験に用いたボルトの形状分類

表2 実験に用いた各種ボルトの材質、概略寸法形状、温度計数 $\gamma$ の一例

材質	S50C	S45C	S35C	SCM435	SUS403	SNB-21	SCM435
$L_1$ (mm)		279.7		141.8	142.6	150.0	121.5
$L_3$ (mm)		195.0		66.8	71.8	90.0	—
H(mm)		30.0		12.6	12.9	—	20.0
$D_1$ (mm)		$\Phi 20.0$		$\Phi 20.0$	$\Phi 20.0$	$\Phi 20.0$	—
$D_2'$ (mm)		$\Phi 20.0$		$\Phi 20.0$	$\Phi 20.0$	$\Phi 20.0$	$\Phi 21.0$
P(mm)		1.25		2.5	2.5	1.5	1.5
W(mm)		—		29.8	30.0	—	—
特記	ボルト頭部形状 $\Phi 50 \times 30$ の円筒 図8(a)			図8(a)	図8(a)	両締め 図8(a) 5C6.4N	伸び ボルト 5C6.4N
温度計数 ( $\gamma/^\circ\text{C}$ )	$1.0 \times 10^{-4}$	$1.1 \times 10^{-4}$	$1.1 \times 10^{-4}$	$1.1 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-4}$	$9.8 \times 10^{-5}$	$9.7 \times 10^{-5}$

波往復伝播時間の関係をグラフ化し、直線で結んでみたが、若干の非線形性がある事も認められ、 $\gamma$ は3~5%程度変動する事が明らかになった。

$\gamma$ は(11)式や(17)式で示したように、温度誤差 $dT_0$ に乘算されるものなので、例えば $10^\circ\text{C}$ 温度補正をする時に $\gamma$ の誤差が10%あるとしても $1^\circ\text{C}$ の温度誤差がある時と等しく、図7より非線形性による $\gamma$ の誤差は常温付近で測定するならば、あまり問題にならないと言える。

## ▶ 結言

今回行った検討から、以下の事が言える。

- (1) B1測定よりB2測定の方が、またB2測定より(B1-B2)測定の方が、探触子の着脱による伝播時間測定値の変動が少ない。
- (2) 解析から、主に $D_1$ 、 $V_0$ 、 $L_2$ 、 $E$ の変動が軸力測定値に影響を与えやすいのが確認された。従ってこれらの諸値のばらつきを抑える必要がある。例えば最も測定値に影響を与えやすい $D_1$ では、

ノギスにより $\pm 1\%$ 程度の精度で求めておく事も十分可能であり、解析結果より、実用上ほとんど問題にならない。初期音速 $V_0$ も $\pm 2\%$ 程度で十分求められるので、軸力の誤差は小さいと言える。

- (3) 超音波ボルト軸力測定における温度補正方法を、伝播時間の温度計数 $\gamma$ を用いて表した。また、温度誤差が測定値に及ぼす影響を検討するための、簡単な演算式(17)を作成した。
- (4) 一般的なボルトでは $1^\circ\text{C}$ の温度誤差があると、だいたい $32.4 \times 10^{-6}$ 程度のひずみ誤差、約7MPa程度の応力誤差となって現れる。
- (5) 各種ボルトの温度計数 $\gamma$ を実験により求めた。鋼材系では、 $\gamma = 1.04 \times 10^{-4} \pm 0.06 \times 10^{-4}$  ( $^\circ\text{C}$ )程度であった。また、アルミニウム系のボルトでは約70%程度、オーステナイト系ステンレスSUS304では、約50%程度鋼材系の $\gamma$ より大きい値をとることがわかった。従って、精度良く超音波によるボルト軸力測定作業を行うには、あらかじめ求めておいた $\gamma$ を用いるか、あるいは締付け前後の測定時の温度差を少なくするなどの注意が必要である。
- (6) 温度と超音波往復伝播時間の関係は、若干非線形であることもある。温度と超音波往復伝播時間の関係をグラフ化する際、非線形性が見られる場合には $\gamma$ の値は3~5%程度変動する事もあるが、(17)式及び図7により、常温付近で測定するならばほとんど問題にならない事がわかった。

以上の事が確認された。

謝辞 本検討を行うにあたり、快く資料、文献の提供をして頂いた、小倉幸夫博士、滝下利夫主任技師に深く感謝致します。

## 参考文献

- (1) 酒井・牧野・鳥山、機論 43-366 (1977), 1116
- (2) VDI, 丸山・加勢・沢沢, VDI2230 Blatt1 1986; 高強度ねじ締結の体系的計算法; 日本ねじ研究協会 (1989), 7
- (3) 例えば、滝下・小倉・鈴木、音弾性研究会資料 No4 (1988), 22
- (4) 戸田・福岡・横山, NDI資料21276, (1989.11)
- (5) 中島・丹羽, 非破壊検査 41-3 (1992), 132

## 取扱店

Your Torque Partner  
**TOHNICHI**  
株式会社 東日製作所

トルクの事ならお気軽に、ご相談ください

フリーコール トルク トーニチ  
**0120-169-121**

(フリーコール受付時間: 土・日・祝祭日を除く 8:30~17:15)

URL ▶ <https://www.tohnichi.co.jp>

- 東日製作所製品は改善改良のため予告なく仕様その他を変更する場合があります。
- 不許複製。許可無く Web サイトへの掲載を禁止します。
- ©TOHNICHI Mfg. CO., LTD. All Rights Reserved.