

量産組立工程での超音波による リアルタイムボルト軸力締結システム

Real-time Bolt Axial Force Fastening System Using Ultrasonic Waves
in Mass Production Assembly Process

津 崎 一 浩¹

Kazuhiro TSUZAKI

原 安 史²

Yasushi HARA

榊 原 利 次¹

Toshitsugu SAKAKIBARA

石 田 司²

Tsukasa ISHIDA

要 旨

量産組立工程における締結力ばらつきを削減するため、自動設備や人による作業に係わらず、締結力が安定するリアルタイムボルト軸力締結システムを開発した。軸力の測定は、超音波方式を用い、精度向上のため、ボルト頭部とプローブ間にギャップを設けた。測定用のボルトは、既存製造工程で成形ができる仕様とした。プローブは超音波を発振し、それが新たに開発した固形式伝搬媒質を介し伝搬され、ボルトの頭部と底面からのエコーをそれぞれ受信する。受信した二つのエコーを同時演算することにより締結中でも測定が安定し、リアルタイムでの軸力測定を実現している。その結果、生産タクトタイムやボルトの製造コストなど、既存条件を変えことなく締結中の軸力測定を実現した。

本技術は、量産締結工程で広く普及しているナットランナー電動締結設備との双方向通信をおこなうことができ、締結力は、あらかじめ設定した軸力値に制御することができ、既存トルク法締付に対し、軸力ばらつきを 1/10 以下まで低減することができた。

ABSTRACT

In order to reduce variations in fastening force in mass production assembly processes, a real-time bolt axial force fastening system was developed to provide fastening force that is stable, whether the work is done by automated equipment or by humans. An ultrasonic wave method is used to measure axial force, with a gap between the bolt head and the probe for increased accuracy. Bolts used for measurement were bolts with specifications that allow for forming by existing manufacturing processes. The probe emits an ultrasonic beam that is propagated by means of a newly developed solid propagation medium and receives echoes separately from the head and bottom of the bolt. Operations on the two received echoes are carried out simultaneously so that measurements are stable even while fastening is underway, realizing real-time axial force measurement. As a result, measurement of axial force during fastening is realized without changing production takt time, bolt manufacturing costs, and other such existing conditions.

This technology is capable of bidirectional communication with nutrunners, the electric fastening equipment that has been widely adopted for mass production fastening processes. It can control fastening force to a preset axial force value, and it has successfully reduced axial force variations to one-tenth or less than what is experienced with existing torque methods of tightening.

1. はじめに

近年、脱炭素への社会的な要請により、車両の電動化が加速している。電動化車両では、通常バッテリーユニットがフロア部にボルト締結されている。そのため、バッテリーの発熱によるボルトの膨張や、走行入力による軸方向応力などによって締結部に、ゆるみや、疲労が生じないよ

う製造時の締結軸力管理が求められる。ほかにも自動車の製造では類似の締結軸力管理工程が多く存在するため、高精度な軸力管理ニーズは増加の一途をたどっている。

現在の軸力測定手法はボルト軸部の伸びを測定する超音波方式や、ひずみゲージ方式、電磁界方式⁽¹⁾などがある。量産組立工程における軸力測定は時間的な制約を伴うため、ソケットによる締付と、測定センサの使用が同時に求

¹ 本田技研工業株式会社

E-mail: kazuhiro_tsuzaki@jp.honda

² 菱電湘南エレクトロニクス株式会社

Table 1 Challenges of axial force measurement methods in mass production assembly

	Measurement during fastening	Layout constraints	Bolt machining	Human judgment
Ultrasonic wave method	Available (Good)	None (Good)	Surface only	Needed
Strain gauge method	Available (Good)	Wiring process (Not good)	Machining and gluing	Needed
Electro-magnetic field method	Not available (Not good)	Sensor size (Not good)	Not needed (Good)	Needed

められるが、Table 1 に示すように電磁界方式で同時に使うことは構造的に容易ではない。また他方式でも測定時のレイアウト制約、ボルトの機械加工やセンサの接着、測定結果の判定においても容易ではない。

それらの要因から、量産ラインでは一般的にトルク法が代用されてきた。しかし、トルク法では部品固有の摩擦係数や接触面積などの個体差影響を受けるため、軸力値が安定せず、通常±30%程度の軸力ばらつきが発生する課題があった⁽²⁾。そのため、下限値でも十分な軸力を保持できるような設計が求められるが、締結物が大きくなると締結に必要な空間や重量が増えることが課題となる。

そこで量産工程でのリアルタイムボルト軸力締結の実現を狙いとして、ひずみゲージ方式や電磁界方式のように工程の複雑化や特殊な計測用ボルト加工、測定結果の判定作業を伴わずに軸力締結実現の可能性を有していると考えられる超音波方式での開発をおこなった。開発目標として、現在の量産条件である締付ソケットレイアウト、タクトタイム、ボルトコストに影響を与えないこととした。加えて既存工程を変更せず、ナットランナーと超音波軸力計の一体化により、ボルトの締結と軸力コントロールを同時におこなえることを必要条件とした。

2. 超音波による軸力測定原理と課題

2.1. 超音波方式の軸力測定原理

軸力とは締付により伸びたボルト軸部が元に戻ろうとする力であり、ボルト長変化による伸び量を測定することで軸力が把握できる。伸び量と、ボルト中を伝わる超音波の伝搬時間変化量は比例関係にあるため、超音波測定では伸び量に代え、締付前後の伝搬時間差を利用している。

Fig. 1 に超音波による基本的な軸力測定原理を示す。

最初は無負荷ボルトの頭部にプローブを密着させ、超音波を発振し、底面エコー受信までの伝搬時間(t_1) μ s を記録する。締付後も測定をおこない伝搬時間(t_2) μ s を取得することで締付前との伝搬時間差が算出される。伝搬時間は材料固有の音速を乗算することで長さ(x) mm に換算するこ

とができる。この値にボルトのばね定数(k) N/mm を乗算することで軸力値(F) kN が算出される。

軸力値の算出は、式(1)のようにあらわされる。

$$F = k(x_2 - x_1) \quad (1)$$

2.2. 測定基準点の設定方法

測定の基準点は、取得された数波長分のエコーにゲートを設定して取得する。ゲートとは、波形を監視する時間位置と区間、及び高さレベルのことを指している。通常の設定位置は、ボルトの締付に伴うエコーの時間方向移動や、測定長の変化などによる減衰を補うため、1波目から3波長幅程度の広い区間かつ、波形ピーク位置より低く配置する。

測定基準点の設定方式は一般的に波形の変化影響が少ないゼロクロス方式が使用されている⁽³⁾。ゼロクロス方式はゲート位置を超える高さの波長が、ゼロ基線と最初に交差する位置(Zero-cross point)を基準点として設定する方式である。基準点の設定方法を Fig. 2 に示す。

2.3. 超音波方式の課題

超音波による測定はプローブをボルト頭部面に一定圧で密着させておこなう。しかし至近距離にある頭部エコーの識別ができないため、純粋なボルト長ではなく、プローブに内蔵された振動子(T)と、底面エコー(B1)間の距離(T-B1)を測定している。

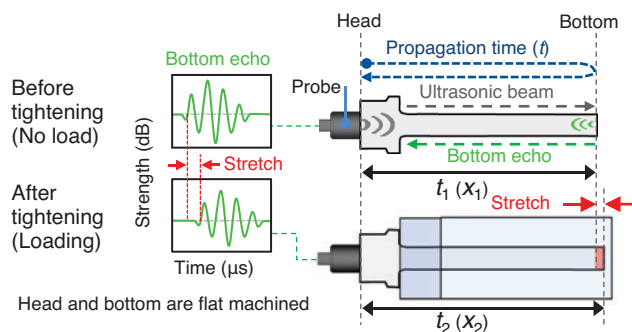


Fig. 1 Principle of axial force measurement by ultrasonic waves

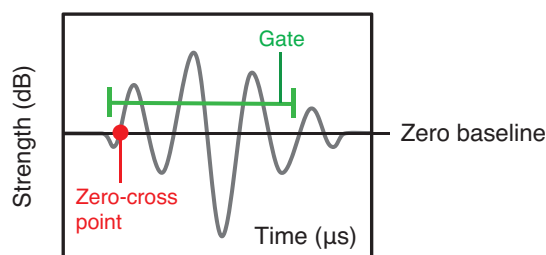


Fig. 2 Reference point setting method for echo

Fig. 3 にプローブ構造とボルト接触の概要を示す。

振動子は一般的に圧電セラミックス (PZT) を用い保護板層で覆われている^{(4), (5)}。振動子から発振された超音波は保護板と伝搬媒質の柔軟層を経て、ボルトに伝搬する。この際、プローブの押付荷重や搭載位置が変化すると、柔軟層の厚みが変化し、測定距離に影響を与える。

対策としてボルトの平面度、直角度、面粗度などについて高い形状精度が求められる⁽⁶⁾。それにより超音波測定用ボルトは高精度な切削加工を施す必要があった。

更にプローブと測定面間に空気が存在すると、音響インピーダンス特性の急激な変化から超音波が減衰し、測定不良が発生する⁽⁷⁾。空気層排除には柔軟な伝搬媒質が必要となるため、微細な空気層まで充填できる液体伝搬媒質が用いられている。しかし、既存量産組立工程に液体塗布工程を加えるには、追加のタクトタイムや、コストがかかるため容易ではない。

またプローブ位置や、ボルトの形状精度が確保された場合でも、軸力印加によるボルト内応力や、ひずみ影響による音響特性の変化⁽⁸⁾から、エコー出力や時間位置が安定しなくなることがある。Fig. 4 に代表的な変化例を示すように、締付により 1 波目のエコー出力が低下した場合、ゲートから外れ、ゼロクロスポイントが 2 波目に移動し、測定距離が 1 波長分ずれてしまう課題があった。このような計測基準のずれは、誤測定につながるため、測定者による確認やゲート位置調整などによる修正が必要であった。

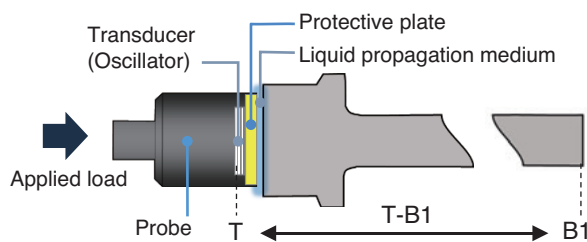


Fig. 3 Overview of probe structure and bolt contact

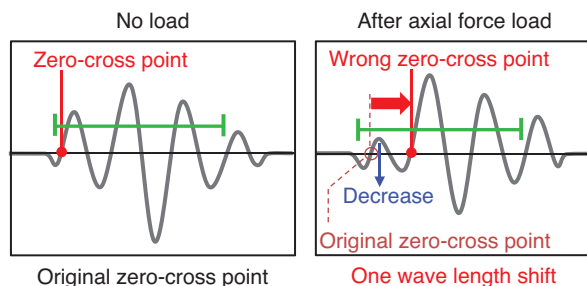


Fig. 4 Effect of changes in echo output on measurements

3. 超音波によるリアルタイム軸力締結システム概要

量産組立工程における締結力ばらつき削減のため、超音波方式によるリアルタイム軸力締結システムを開発した。基本システムの構成を Fig. 5 に示す。

超音波軸力計は、締付用ナットランナーと一体化させ、相互通信による協調制御を取り入れた。

軸力測定用のプローブはナットランナー先端にある交換式の締付ソケット内部に、ばねで保持される。ボルト頭部に接触させると密着し、即時ボルト長を計測する。プローブはスリップリングを経由し超音波軸力計と電氣的に接続されており、ナットランナーに締結開始の信号を送る。ボルト長は締結中もリアルタイムに測定され、軸力値に変換される。規定軸力に達すると、締結力を制御し停止させる。

測定方式は、プローブ位置や、ボルト形状精度に影響されない手法を開発した。プローブとボルト間にギャップを設け、ボルト底面エコーに加え、新たに頭部面エコー (S) も測定できるようにした。

これにより、プローブ位置に関わらず、常に純粋なボルト長を得られる測定手法を考案した。

更にゼロクロスポイント移動の課題に対し、波形変化時でも、ポイントを追従し続けるプログラムにて解決した。

伝搬媒質は、液体に代え柔軟なエラストマー素材とすることで、繰り返し使用することができ、塗布工程を不要とした。加えて高硬度樹脂材と一体構造とすることで、非変形部を設け、対ボルト面への搭載状態を安定化させた。

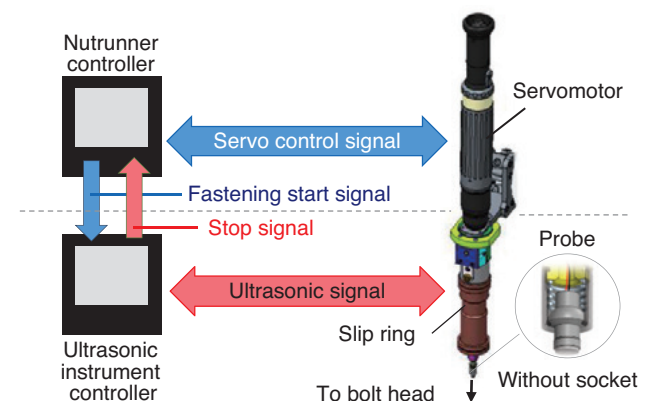


Fig. 5 Basic system configuration

4. 新しい測定方式と適用技術

4.1. 量産工程適用のための測定方式

4.1.1. ギャップを設けた測定方式の効果

量産締結工程は、自動設備や人的スキルのばらつきな

ど、プローブ位置の変動要因が存在する。それらに影響されない測定手法として、ボルト頭部にへこみ形状を設け、頭部と底面エコーを同時に測定する S-B1 測定方式を開発した⁽⁹⁾。Fig. 6 にギャップ構造と測定方式を示す。

これにより、ボルト両端エコーの相対な時間差がリアルタイムで把握できるようになり、プローブ位置に関わらず、純粋なボルト長を測定できるようになった。

その結果、作業スキルなどに影響されることなく、ボルト長の変化を正確に捉えることができ、プローブ位置や部品精度の課題を解決した。また既存方式はプローブ振動面が鋼材のボルトに接触するため、振動子の割れを誘発することがあった。S-B1 方式採用の結果、剛体物への直接的な接触を避けることができるようになった。

4.1.2. 測定基準点のずれ防止機能

軸力測定時の波形変化に自動追従するオートトラッキング機能を開発した。従来測定方式は作業者が波形を注視し、ゼロクロスポイントに変化が見られた場合、波形ゲインやゲート位置調整などの修正を手動で実施していた。同機能は、超音波探傷用途では既に使用されており、エコー変化に対しゲート位置を追従させる方法が使用されていた。

しかし軸力測定では、ボルト頭部と軸部の変化量が異なるため、それぞれの変化量に応じてゲート位置を追従させる 2 ゲートトラッキング機能を新たに開発した⁽¹⁰⁾。

Fig. 7 に 2 ゲートトラッキング方式の概要を示す。

本機能は、1 kHz 程度の高周波で発振されている超音波パルスに同期して、各ゲートが個別に伝搬時間を取得する。各ゲートでは前回取得した伝搬時間との差を算出し、ゲート位置を補正している。この結果、ボルト締結に伴うエコー時間位置の変化量に対し、ゲート位置も追従するため、ゼロクロスポイント設定に必要な 1 波長幅までゲートを狭く設定することができる。したがって誤測定要因の発生を抑え、計測基準点の確認や修正作業を不要とした。

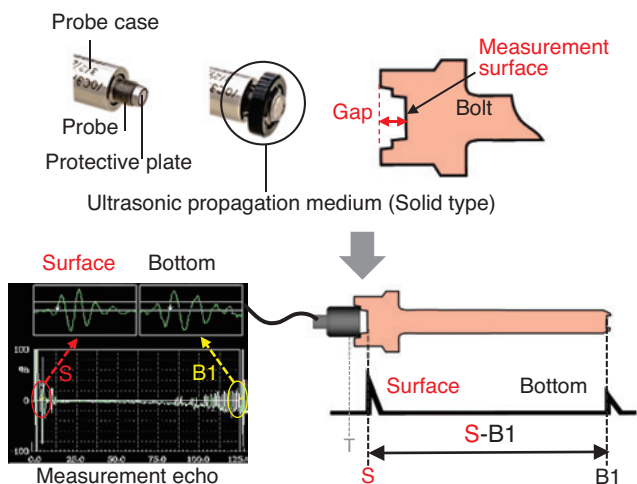


Fig. 6 Gap structure and measurement method

4.1.3. 締結状態の安定性判断機能

軸力値で締結管理を実施するにあたり、作業者の技量によらず軸力締結をおこなえることが必要となる。2 ゲートトラッキング機能などにより作業者の負担を軽減しているが、締付や、測定の異常を検出し、締結状態の判断を自動でおこなえる機能が求められている。

締結状態を判断する手法として、取得エコーの周波数特性を用いたエラー判別機能を開発した⁽¹¹⁾。本機能は、プローブの傾きや、振動子摩耗、異物、ボルト異常など、周辺状態の変化により、波形形状が変化することに着目している。あらかじめエラー状態の波形を高速フーリエ変換 (FFT) し、中心周波数、ピーク周波数、比帯域幅⁽¹²⁾の 3 項目をデータベース化した。そして締付時の測定波形と比較してエラーの有無を自動的に判別する。

Fig. 8 に正常時とエラー時の FFT 分析例を示す。

エラー判別は、プローブがボルトに接触した時点から、締付完了までおこなわれる。エラーと判断された際は、ナットランナーを停止する制御とした。

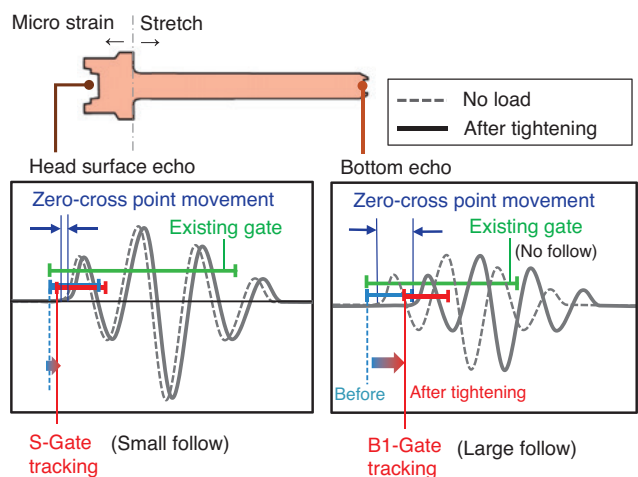


Fig. 7 Operational schematic diagram of newly developed two-gate tracking method

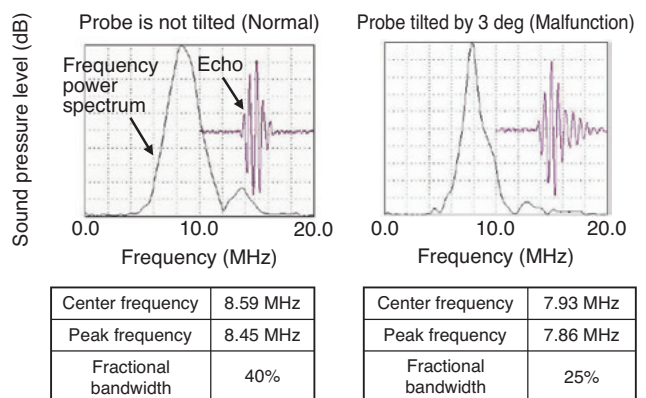


Fig. 8 Examples of normal and malfunction FFT analysis

4.2. 量産工程適用のための固形式超音波伝搬媒質

締結作業工程を増大させないため、液体に代わる固形式の伝搬媒質を開発した。Fig. 9 にその形状を示すように本媒質は硬度 15⁽¹³⁾ 程度の比較的柔らかなエラストマー素材を用いた超音波伝搬部と、高硬度樹脂材 (ポリプロピレン: PP) を用いた固定部のハイブリット構造としている。

エラストマー素材は容易に形状を変化させる特性のため、プローブとボルト頭部間の充填に適している。しかしエラストマー単体を用いた先行確認では、50% を越える圧縮状態が数十回程度繰り返されると、亀裂や塑性変形が生じ短期間で伝搬媒質としての機能を損なう可能性があった。また軟材のため、一定形状の維持が容易ではなく、プローブ位置がボルトに対し不安定になってしまうことや、エラストマー素材自体の固定方法にも課題があった。そのため PP 材との二色成型パーツとすることで課題を解決した。

4.2.1. 媒質固定方法とプローブ位置安定化の効果

固定方法は Fig. 10 に構造を示すようにねじ式とした。PP 材部に適切な長さの雌ねじ形状を設け、雄ねじ形状が設けられたプローブ先端にねじ込むことで、エラストマー材と振動面が接触する位置で固定される。固定された伝搬媒質の PP 材部はボルト側に設けられたへこみ (リセス) 形状一段目の位置決め部とかん合し、プローブ位置の安定性を確保している。エラストマー材部は二段目のへこみである測定面に接触し、超音波伝搬をおこなう。ねじによる着脱式とすることで、交換性にも配慮した。

4.2.2. エラストマー素材の耐久性

エラストマーの耐久性を確保するため、PP 材のボルト接触面 (Fig. 10 の a 面) からエラストマー材の飛び出し量を規制し、50% 以下の圧縮率としている。耐久性確認のため、ボルト形状への圧縮を繰り返す試験を実施した。その

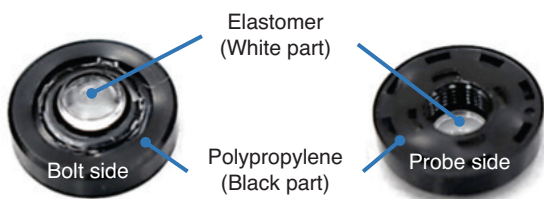


Fig. 9 Solid type ultrasonic propagation medium

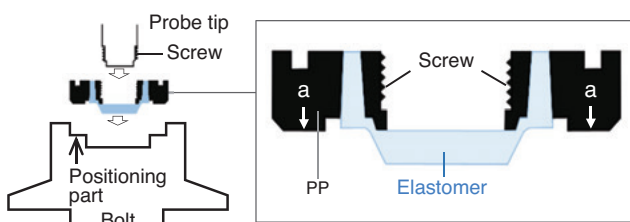


Fig. 10 Cross-section and peripheral layout of ultrasonic propagation medium

結果 15 万回経過後に一部分が白化する事象を確認したが、形状や伝搬特性は正常な測定機能を有していた。仮に 1 日 1,000 回の締付作業を伴う量産工程であった場合、延べ 150 日分の締付作業に相当する耐久性を確認した。試験後の固形式伝搬媒質状態を Fig. 11 に示す。

4.3. 量産工程適用のためのプローブ浮き防止構造

締結工程では、作業状態などの外的要因により、締結設備に傾きが発生することが考えられる。この時プローブの一部に浮きが発生すると密着が外れ測定不良となる可能性がある。対策として、プローブと設備の接続部分をばねによりフローティング保持することで、設備の傾きに影響されない構造とすることができる。しかし Fig. 12 に一般的な円筒状プローブをベースにした構造を示すように、汎用プローブを用いてフローティング機能を設けると、ボルトの端部から離れた場所に支点を設ける構造となってしまう。そのため、ボルト測定面からのプローブ可動域が 1.5 deg 程度と狭く、外的要因に対する傾きの対応には限界があった。

そこで大きな傾きに対応するため、プローブ構造を見直し、ボルト端部に近い位置にもフローティング機能を追加した。

Number of samples: 48

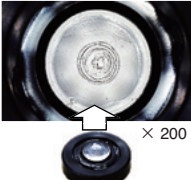
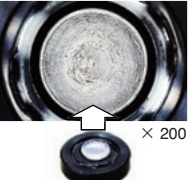
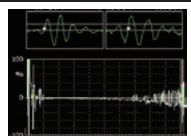
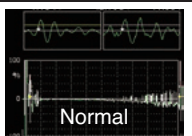
Number of compressions	0	150,000
Elastomer state	 × 200	 × 200
Change in outer diameter	(Standard ± 0.05)	-0.01 to +0.03
Change in thickness (mm)	(Standard ± 0.05)	-0.02 to +0.02
Measured echo		

Fig. 11 Results of repeated compression durability test

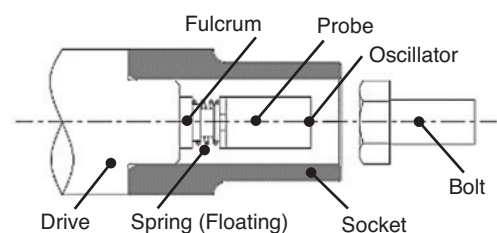


Fig. 12 General structure of probe in tool

更に追加したばねとの接触部分を球状にすることで、全方向に 5 deg の追加可動域を確保した。これにより締結設備のがたつきや、人為的操作による傾きに対し柔軟なプローブの密着性を確保している^{(14), (15)}。

新しいフローティング保持構造を Fig. 13 に示す。

4.4. 量産適用可能な軸力測定ボルト

本開発では軸力測定とプローブ位置の安定化を図るため、ボルト頭部に二つの機能を設ける必要があった。それらに対応するため、量産ボルトをベースに、二段階のリセス形状を追加した。

しかし、汎用プローブ形状をベースとしたレイアウトでは、Fig. 14 に形状を示すように、ボルト軸方向への深ザグリ形状が必要となる。そのため、圧造時の据込み加工限界^{(16), (17)}に影響され、成型が容易ではない。自動車部品の分野では、強度区分 10.9 以下のボルトには、ボロン鋼が多く使用されている^{(17), (18)}。そこで、ボロン鋼でも測定精度を保つことができるボルト頭部リセス形状を設定した⁽¹⁹⁾。

4.4.1. 成形形状の最適化

深ザグリ形状の成型は、材料流動の追従が容易ではない。Fig. 15 に成型解析結果の比較を示すように、金型が鋼材に接触しない領域が出現するなど、成型課題があった。

対策として、圧造成形解析 (DEFORM ver. 11.1, 株式会社ヤマナカコーキン製) にてボルト頭部形状別のパラメトリックスタディによる最適形状を検証した。その結果、リセス径の拡大と測定面の浅底化により、量産同等の均一な加工面圧を得られる形状とした。本形状により既存量産工程や材料を変えることなく、成型性を確保できる見通しがたった。またボルト頭部の形状変更に伴い、対向するプ

ローブ形状も変更が必要となるが、本測定方式では、ボルトとの接触面はプローブではなく、伝搬媒質が担っている。伝搬媒質は樹脂材で成型され、着脱式としているため、ボルト頭部形状に合わせた変更が容易となる。

4.4.2. ボルト量産工程での成型検証

成型解析結果より金型を製作し、量産ラインでの成型検証 (サンプル 1,000 本) をおこなった。Fig. 16 に設定寸法公差に対する各工程能力を示すように、超音波軸力測定で重要となるリセス径及びギャップ深さと測定面間の平行度について一般的な工程能力指数 1.33⁽²⁰⁾ を大きく上回り、成型解析と同等の成形性を得られた。

これらの結果により、超音波軸力測定に必要なボルトの寸法精度が確保できた。追加工程を設けることなく既存量産形状ボルトと同じ成型工程で製造できるようになった。

4.4.3. 疲労強度特性

ボルト軸力印加により、ねじ部からの張力と、フランジ座面部の反発力が交差し、フランジ終端である首下へ応力集中が発生する。Fig. 17 に開発ボルトの断面形状を示す

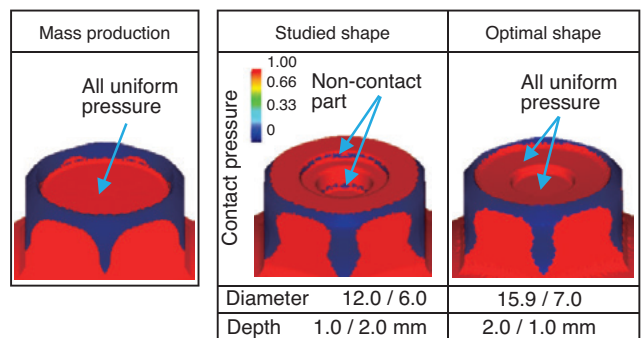


Fig. 15 Comparison of molding analysis

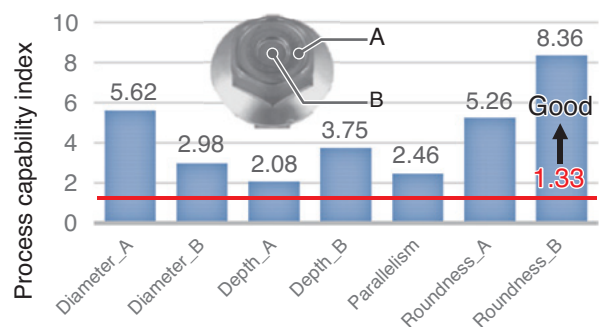


Fig. 16 Tolerance process capability index

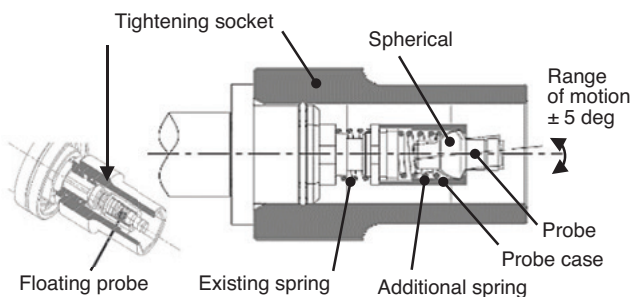


Fig. 13 New floating holding structure for probe

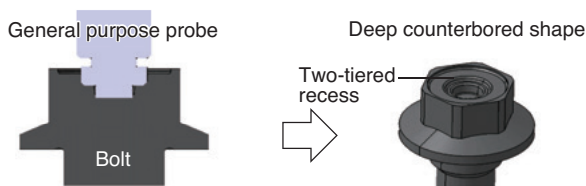


Fig. 14 Deep counterbored shape of bolt head

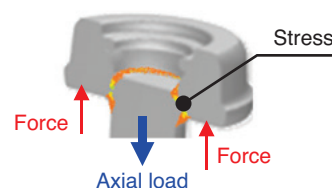


Fig. 17 Stress concentration by bolt fastening

ように、ボルト頭部に2段リセス形状を備えた開発ボルトは、リセス底面からフランジ下面までの距離が、一般的なボルト形状に対し短く、応力集中しやすくなる。そのため長期間の使用による破断に対し十分な性能を確保するため、疲労強度を保証する必要がある。

そこでJIS B 1081⁽²¹⁾に定める引張疲労試験にて、開発ボルト及び量産ベースボルトの疲労強度と破断箇所の比較検証試験をおこない Fig. 18 にその結果を示す。

試験結果は0.2%耐力に対し規格降伏荷重の70%平均応力(ボルトの場合は軸力)条件⁽²²⁾では、量産ベースボルトと同等の疲労強度結果を得られた。更に破断部位は全てネジ部で発生しており、ボルトの頭部へのリセス形状追加による疲労強度への影響がないことを確認した。

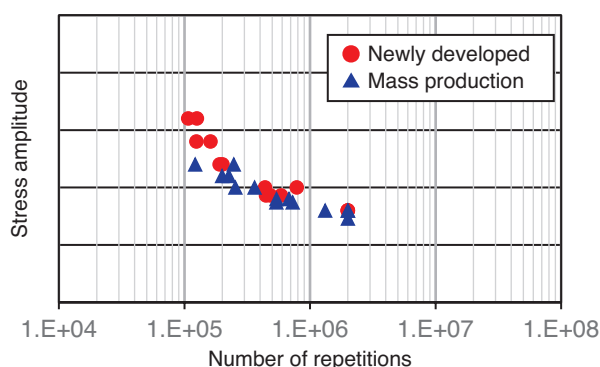


Fig. 18 Fatigue strength comparison test results

5. 締結検証結果

リアルタイムボルト軸力締結システムの締付精度を確認するため、検証を実施した。検証にあたり超音波軸力測定への影響が考えられる六つの誤差因子を抽出し、品質工学手法⁽²³⁾に基づいて実験をおこなった。その結果、ボルト有効径、グリップ長、雌ねじ長、の三つの因子について感度特性が得られた。グリップ長とはボルト首下フランジ部から雌ねじ噛み合い開始位置までの長さ、雌ねじ長とは、雌ねじと雄ねじが噛み合っている部分の実長である。これらの誤差因子は製品単品寸法のばらつきにより発生する。

締付精度の確認においては、量産エンジンに使用され、精度要求が高いM8サイズのボルトをベースとした。またこれら三つの誤差因子について図面の上、中、下限を反映した検証用ボルトを製作した。

確認は検証用ボルトを使用し、各因子のみと、それらの組合せを各5回($n = 5$)ずつ測定した。更に量産工程で1,000本製造した測定用ボルトから30本を追加し、計130回($n = 130$)の軸力制御による締付確認をおこなった。

超音波軸力測定精度の確認は、Fig. 19 に構造を示すように、校正されたロードセルを内蔵した締付試験治具を用いておこなった。試験治具は、雌ねじ部の移動や交換が可能で、グリップ長や雌ねじ長の調整ができる。これにより、ロードセルの測定値と超音波システムの測定値の差から測定精度を求めた。

その結果、M8ボルトの目標締付軸力値22.5 kNに対しばらつき幅が0.96 kN($\pm 3\sigma$)と良好な結果が得られた。

Fig. 20 にリアルタイムボルト軸力締結システムの締結精度検証結果を示す。

これは目標とする軸力値に対して $\pm 2.1\%$ のばらつきであり、トルク法締付時の $\pm 30\%$ ⁽²⁾との比較では、1/10以下まで減少した。

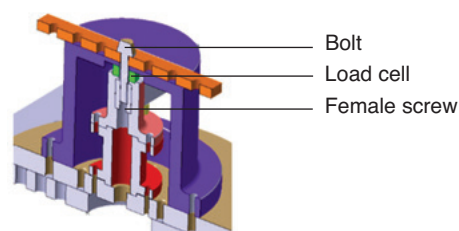


Fig. 19 Structure of test jig

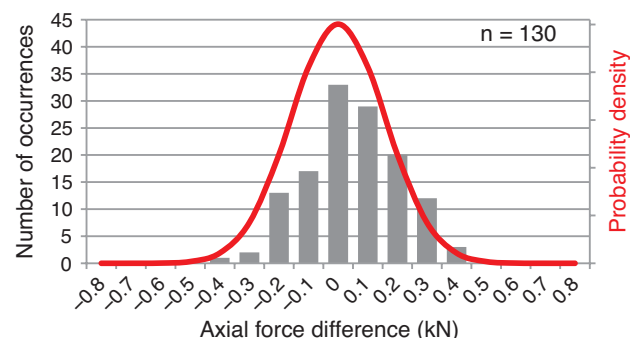


Fig. 20 Accuracy verification results for bolt axial force with this system

6. まとめ

量産組立条件下での軸力測定に適合するリアルタイムボルト軸力締結システムを開発した。

- (1) ボルト頭部にギャップを設けた2ゲート測定方式を開発した。
- (2) 2ゲートトラッキングと、エラー判定機能により、安定した測定結果を得られるようにした。
- (3) 液体に替えエラストマー材を使用した固形式の伝搬媒質の開発と、測定設備の傾きに対応したプローブ保

持構造により、量産環境での使われ方に適合させた。

- (4) 既存の製造方法を変えることなく生産できる測定用のボルト仕様を構築し、製造コストの上昇を抑えた。
- (5) トルク法と比較し、締結時の軸力ばらつきを、1/10以下に抑えることができた。

本技術は幅広い工業製品の生産工程における課題対応や、製品力向上に対する、重要な技術となり得ると考える。

参考文献

- (1) 手嶋康暁, 後藤雄治, 高橋則雄: 電磁現象を利用した高張力ボルトの緩み非破壊検査手法, 非破壊検査, 第61巻, 5号, p. 227-234, (2012)
- (2) 大橋宣俊, 萩原正弥, 吉本勇: 塑性域ねじ締結の特性, 精密機械, 51巻, 7号, p. 1383-1389, (1985)
- (3) JIS Z 2353: 超音波による固体中の音速の測定方法, (2021)
- (4) <http://usmaj.o.oo7.jp/shindoshi.html>
- (5) 重野直樹: 3.5.2 探触子の種類と用途, 非破壊検査技術シリーズ 超音波探傷試験Ⅱ, 日本非破壊検査協会, p. 36-37, (2000)
- (6) 牧野孝之, 酒井智次, 鳥山晴彦: 超音波を利用したボルト軸力測定装置の開発と実用化, 精密機械, 43巻, 2号, p. 227, (1977)
- (7) 伊藤洋一: 強力空中超音波の発生方法とその応用技術, IEICE Fundamentals Review, Vol. 9, No. 3, p. 205-213, (2016)
- (8) 保坂儒人, 今野和彦: ストロボ光弾性法による固体中のき裂と残留応力中を伝搬する超音波の可視化, 素材物性学雑誌, 第27巻, 第1/2号, p. 20-24, (2016)
- (9) 特開 2020-020749 (2020)
- (10) 特開 2020-020763 (2020)
- (11) 特開 2021-148629 (2021)
- (12) JIS Z 2350: 超音波探触子の性能測定方法 (2002)
- (13) JIS K 6253-3: 加硫ゴム及び熱可塑性ゴム—硬さの求め方—第3部: デュロメータ硬さ (2012)
- (14) 特開 2020-019124 (2020)
- (15) 特開 2021-196268 (2021)
- (16) <https://www.nittokog.co.jp/fastenerscatalog/F-TOKUHIN-R.pdf>
- (17) 阿南吾郎, 並村裕一, 長谷川豊文, 隠岐保博: 冷間圧造性に優れた線材の開発, R & D 神戸製鋼技報, Vol. 48, No. 1, p. 39-42, (1998)
- (18) JIS B 1051: 炭素鋼及び合金鋼製締結用部品の機械的性質—強度区分を規定したボルト, 小ねじ及び植込みボルト—並目ねじ及び細目ねじ (2014)
- (19) 特開 2020-020453 (2020)
- (20) 永田靖, 棟近雅彦: 第1章 工程能力指数の定義と評

価規準, 工程能力指数 実践方法とその理論, 日本規格協会, p. 17-24, (2011)

- (21) JIS B 1081 (ISO3800:1993): ねじ部品—引張疲労試験—試験方法及び結果の評価, (1997)
- (22) 萩原正弥: ねじの疲労破壊, 精密工学会誌, Vol. 81, No. 7, p. 623-627, (2015)
- (23) 矢野耕也: 品質工学の基礎とパラメータ設計, 精密工学会誌, Vol. 81, No. 11, p. 1008-1012, (2015)

著 者



津崎 一 浩



梶原 利 次



原 安 史



石 田 司