

非線形超音波によるボルト締結状態評価への一検討

A Study of Bolt Conclusion Evaluation Using Nonlinear Ultrasonic Waves

○福田誠, 今野和彦

○Makoto FUKUDA and Kazuhiko IMANO

秋田大学 大学院工学資源学研究科
Graduated School of Engineering and Resource Science,
Akita University

キーワード: 非線形超音波(nonlinear ultrasonic waves),
二層型圧電振動子(double-layered piezoelectric transducer),
ボルト(bolts), ナット(nuts), 軸力(axial force)

連絡先: 〒010-8502 秋田県秋田市手形学園町 1-1
秋田大学 大学院工学資源学研究科 電気電子工学専攻
福田誠, Tel: 018-889-2494, Fax: 018-837-0406, E-mail:mfukuda@gipc.akita-u.ac.jp

1. はじめに

機械構造物の組み立てにボルト締結が多用されている。過剰の締め付けや緩みは、ボルトの破損や脱落などの事故につながる恐れがあり、ボルトの保守点検が必要となる。ボルト軸力の測定法としては、トルク管理法、超音波法、ひずみゲージ法、ロードセル法などが知られている⁽¹⁾。トルクレンチを用いてトルク管理する方法が一般的に行われているが、同種のボルトでもトルクと軸力がばらつくことが指摘されている。また、超音波によりボルト中の超音波伝搬時間や音速を測定する方法では温度による影響を受けるため補正が必要となる。また、ひずみゲージ法やロードセル法は、特殊なボルトやワッシャを用いる上、全てのボルトを検査するにはコストがかかりすぎるため、現実にはサンプル検査となる問題がある。このような理由から、補正が必要

なく、さらに全てのボルトを簡易に検査できる、新しいボルト-ナットの締結状態の検査法が要求される。

そこで、超音波を用いた非破壊検査の分野で最近注目されている非線形超音波を用いる手法に着目する。金属などの固体の接触面や不完全接合面では、有限振幅の大きな音圧の超音波が入射されたときに、接触面の繰り返し打撃、あるいは摩擦すべりにより、連続体に比べて 2 次高調波あるいは分調波などの非線形成分が著しく発生することが見出され、接触型音響非線形性(CAN: Contact Acoustic Non-linearity)という名前で見られるようになった⁽²⁾。また、塑性変形した部分には転位や閉じた亀裂が多数存在し、それらに有限振幅超音波が入射された場合にも 2 次高調波などの非線形超音波が発生することが明らかとなっている^(3,4)。この研究分野の開拓により、工業

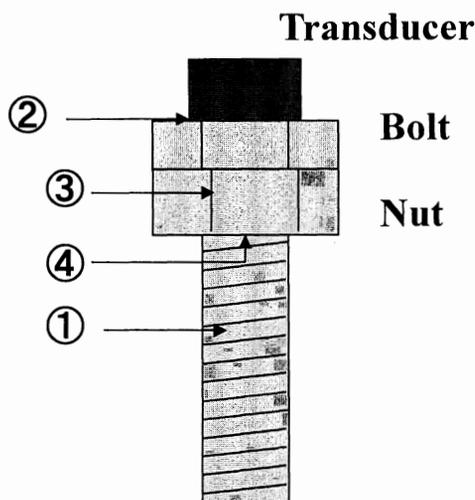


図1 ボルトからの2次高調波発生源

材料の非破壊検査に非線形超音波の利用が進められてきた⁽³⁻⁷⁾。これまでの有限振幅超音波を用いた非破壊検査の研究対象は亀裂などの欠陥検出や溶接部などの接合面の状態計測などが主である。著者らはこの原理をボルト-ナット締結状態の検査に利用できると考えた⁽⁸⁾。

本研究では、著者らが以前提案した二層型圧電振動子を用いた2次高調波検出システムにより、締結状態のボルトから2次高調波を検出し、ボルト締結状態評価の可能性について検討する。

2. ボルトからの2次高調波発生源

締結されたボルトから発生する2次高調波の発生源としては、図1に示す①～④が考えられる。すなわち、超音波伝搬過程に累積的に非線形ひずみが積み重なって生じる成分(第1図の①)、超音波トランスデューサとボルト間の接触状態によるCAN(第1図の②)、ボルト-ナットのネジ山間の接触状態によるCAN(第1図の③)、および、ボルトを締結することで生じた塑性変形(第1図の④)である。よって、これら全てを同時に可変として検討すると、2次高調波が締結前後で変化したとしても、変化の原因がどこにあるのか検討しにくくなる。本研究では、はじめに、①、②、③

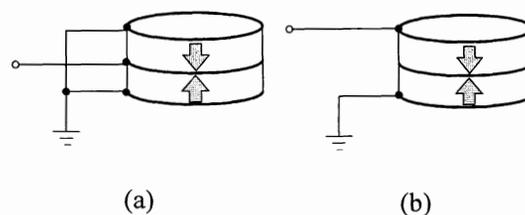


図2 二層型圧電振動子
(a) 並列接続, (b) 直列接続

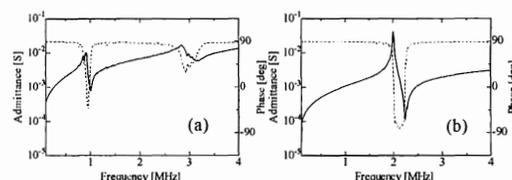


図3 周波数-アドミタンス特性
(a) 並列接続, (b) 直列接続

の条件を一定とし、④のみを可変として検討する。次に、③および④を可変として検討する。①は、同一ボルトを使用することで一定とできる。②はサリチル酸フェニルを用いてトランスデューサとボルトを接着することで一定とできる。③は実験時にナットを取り外すことで、③による発生をゼロとすることができる。

3. 二層型圧電振動子

実験に用いるトランスデューサとして二層型圧電振動子を用いる⁽¹⁰⁾。二層型圧電振動子は、同一特性の圧電振動子を2枚、互いに逆分極となるように貼り合わせる。導電性接着剤を用いて貼り合わせることにより、図2に示されるように電氣的に並列もしくは直列に接続が可能である。貼り合わせる前の圧電振動子単体での共振周波数を f とすると、逆分極に貼り合わせた二層型圧電振動子の共振周波数は並列接続とすることで半分の $f/2$ となり、直列接続では f のまま変わらないという特徴がある⁽⁹⁾。貼り合わせる前の単体での共振周波数が2 MHzの圧電振動子を2枚用いて二層型圧電振動子を構成した場合、それぞれの接続での周波数-アドミタンス特性は図3のように

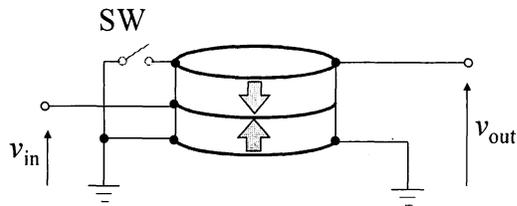


図4 スイッチを用いた
二層型圧電振動子の電氣的接続の切り換え

なる。二層型圧電振動子の共振周波数は並列接続では1 MHz, 直列接続では2 MHz となることが確認できる。このような二層型圧電振動子の特徴に注目して超音波の送受波を考えると, 高調波の発生に十分な音圧の基本波(ここでは1 MHz)を並列接続で送波し, 音響媒質を伝搬中に発生した2次高調波(2 MHz)に対しては, 直列接続で感度良く受波できることが期待できる。

送波時および受波時に二層型圧電振動子の電氣的接続を並列または直列接続となるように, スイッチ(SW)を用いて図4のように結線する方法が考えられる⁽¹⁰⁾。もし, SW を用いずに並列接続と直列接続を同時に行なった場合, 直列接続側の受信ポートが常にアースとなり受波信号を取り出すことができないという問題が生じる。この問題を解決する方法として, 図4のように並列接続側にスイッチ(SW)を設けている。SW をONとした場合, 並列接続(1 MHzの送波)となる。一方, SW をOFFとした場合, 直列接続(2 MHzの受波)となる。このように, 基本波を送波するときにはSW をONとし, 2次高調波受波するときにはSW をOFFとなるように制御することで, それぞれの周波数に対して感度の良い接続方法で超音波の送受波が可能となる。

4. Pulse Inversion Averaging

スイッチ制御された二層型圧電振動子で観測される受波波形は, 2次高調波に対する感度が高いものの, 基本波が支配的であるため基本波をさらに低減できることが望ましい。そ

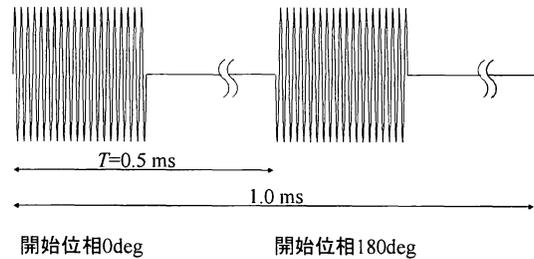


図5 Pulse Inversion Averaging のための駆動信号

こで, 本システムにはアベレージング機能を用いて, 2次高調波のみを観測できるようにパルスインバージョン法を適用する。パルスインバージョン法は互いに逆位相となる基本波パルスを交互に送波し, それらの受波波形を足し合わせることで基本波を打ち消す方法である。パルスインバージョン法は二層型圧電振動子を正位相と逆位相のそれぞれの信号で駆動し, それぞれの受波波形を加算することで容易に行なえる。しかし, 正位相の受波波形と逆位相の受波波形をそれぞれ検出し, 後に加算処理を行なった場合では, 膨大な時間を費やすことになってしまう。そこで, リアルタイムでパルスインバージョン法を行える Pulse Inversion Averaging という方法を新たに提案した⁽¹⁰⁾。

Pulse Inversion Averaging を行なうには, 図5に示すように正位相と逆位相の信号が交互になるような駆動信号が必要となる。このような信号で圧電振動子を駆動し超音波を送波すると, 反射されて圧電振動子に戻ってくる反射波も互いに逆位相となる。そこで, 正位相の信号が発振されてから逆位相の信号が発振されるまでの時間 T でアベレージングすることによって, リアルタイムで基本波が打ち消され2次高調波抽出が可能になると考えられる。

5. 2次高調波検出実験

5.1. 2次高調波検出システム

2次高調波超音波を用いたボルト締結評価

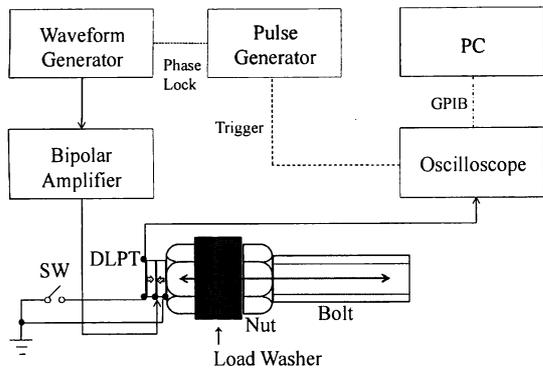


図 6 実験システム

システムを図 6 に示す。任意波形発振器を用いて図 5 に示される 1 MHz バースト正弦波 20 波の信号を正位相および逆位相を交互に発振し、高周波増幅器により 100 V に増幅する。二層型圧電振動子を並列接続として駆動し、超音波はボルトに送波される。ボルト端面で反射されて戻ってくる超音波には、ボルトの塑性変形部において生じた 2 次高調波が含まれていると考えられる。反射波は同一の二層型圧電振動子を直列接続として受波する。二層型圧電振動子の電気的接続はスイッチにより自動制御され、並列接続時には SW-ON、直列接続時には SW-OFF とする。受波波形はオシロスコープで観測される。また、Pulse Inversion Averaging を行うことで基本波成分を打ち消し、リアルタイムの 2 次高調波検出が行う。

なお、使用するボルトは鉄製六角ボルトであり、ネジ径：12 mm，長さ：100 mm，締め付けトルク：40 N-m(強度区分 4.8 の一般的なトルク)とした。トルクはデジタルトルクレンチを用いて制御する。なお、図 6 中のナットおよびロードワッシャは取り外して実験する。

5.2. ボルトの塑性変形により生じる 2 次高調波の検出

はじめに、計測時にナットを外してボルトのみの状態とし、ボルト締結による塑性変形のみ起因する 2 次高調波成分を検出する。

ボルト締結前の受波波形とスペクトルを図

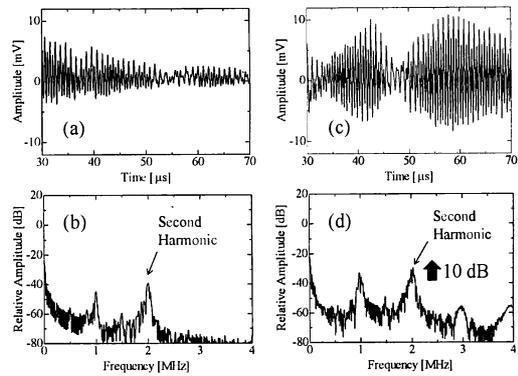


図 7 実験結果

- (a) 締結前ボルトでの受波波形と、(b)スペクトル。
(c) 40 Nm で締め付けたボルトでの受波波形と、(d)スペクトル

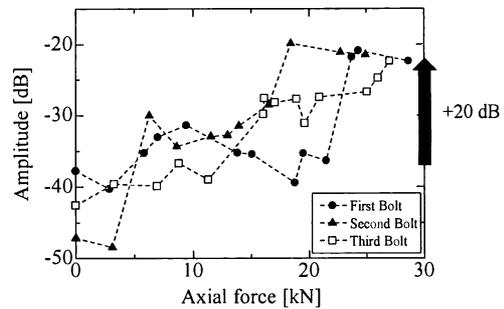


図 8 軸力と 2 次高調波振幅との関係

7(a), (b)に、40 Nm で締結後の受波波形とスペクトルを図 7(c), (d)にそれぞれ示す。締め付け前と比べて締め付け後では、2 次高調波が約 10 dB 程度増加した。これが塑性変形により発生した 2 次高調波であると考えられる。

5.3. ナット伴った状態におけるボルト締結体からの 2 次高調波の検出

実用的には、ナットを取り外して計測することは困難であるため、ナットを伴った状態で評価する必要がある。実験システムは前述の図 6 と同様である。本実験では、ロードワッシャを用いて軸力を測定する。

図 8 に軸力と 2 次高調波の関係について示す。軸力がおよそ 20 kN において、2 次高調波が 20 dB 程度だけ急激に増加していることが確認できる。このボルトでは 20 kN 付近の軸力のときに、塑性変形やねじ山間の CAN とい

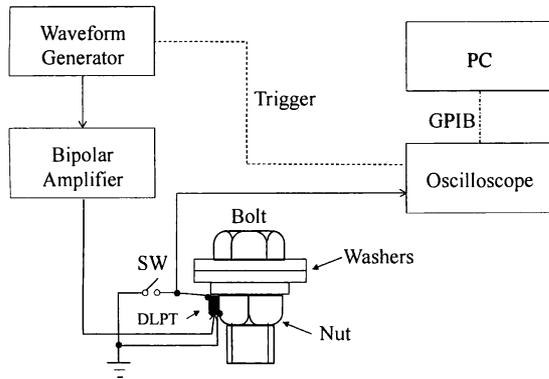


図9 ナット側面にトランスデューサを取り付けたシステム

った2次高調波が増加する現象が生じているものと考えられる。2次高調波をボルト締結状態評価の一手法として用いることの可能性を示すことができた。

5.4. ナット側面からの送受波実験

ここまでの実験ではボルト頭部にトランスデューサを配置し、超音波を送受波した。しかし、実用では、ボルト頭部からは送受波できない状況もある。このような場合でも評価できるようにする必要がある。そこで、図9に示されるような、ナットの側面から送受波する方法について検討した。

ナット側面から送受波して2次高調波検出実験を行った結果を図10に示す。締結前後で約10 dB程度2次高調波が増加する結果が得られた。また、ボルト頭部から送受波する方法でも同時に計測したところ、ナット側面の場合と同様の結果が得られた。よって、ボルト締結状態によって検査法を選択できる可能性が示せた。

6. おわりに

非線形超音波を用いた新しいボルト締結状態評価法を提案した。二層型圧電振動子を用いた2次高調波検出システムにより、ボルトを締結したことにより発生する2次高調波の検出を行った。その結果、締結前後で、塑性変形では2次高調波が約10 dB程度、ナット

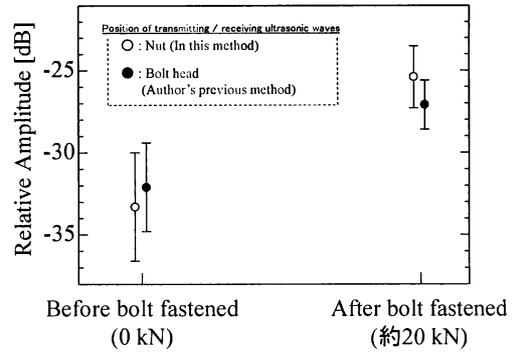


図10 ナット側面から送受波した場合の2次高調波検出結果とボルト頭部から送受波した場合との比較

を伴った状態では約20 dB程度増加した。

また、ナット側面から超音波を送受波する方法でもボルト頭部からの結果と同様に2次高調波の増加が確認できた。以上のように、2次高調波を用いることで、ボルト締結状態評価が行える可能性が確認できた。

今後は、従来の簡便なトルク管理法に、2次高調波を計測を加えた、より精度を高められる新しいシステムの構築が必要と考えられる。

参考文献

- (1) 酒井智次: “増補ねじ締結概論”, 養賢堂, pp.108-113, (2003).
- (2) I.Y.Solodov, N.Krohn, G.Busse: *Ultrasonics*, Vol.40, pp.621-625, (2002).
- (3) 川嶋絃一郎: 非破壊検査, Vol.56, No.6, pp.274-279, (2007).
- (4) M. Fukuda, M. Nishihira and K. Imano: *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.46, No.7B, pp.4529-4531, (2007).
- (5) 小原良和, 山中一司: 電子情報通信学会論文誌A, Vol.J91-A, No.12, pp.1116-1124, (2008).
- (6) T. Ohtani, K. Kawashima, M. Drew and P. Guagliardi: *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.46, No.7B, pp.4577-4582, (2007).
- (7) 今野, 武藤: 素材物性学雑誌, Vol.20, No.1, pp.12-18, (2007).
- (8) M. Fukuda and K. Imano: *IEICE Electr. Exp.*, Vol.6, No.20, pp.1438-1443, (2009).
- (9) 山田博章, 尾上守夫: 非破壊検査, Vol.20, No.11, pp.605-609, (1971).
- (10) M. Fukuda, M. Nishihira and K. Imano: *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.45, No.5B, pp.4556-4559, (2006).