

超音波を用いたボルト-ナットの締結状態の評価に関する一方法

A Method for Evaluation of Fastened Condition of Bolt - Nut Using Ultrasonic Waves

○高橋 一歴*, 福田 誠*, 今野 和彦*

○Motoyuki Takahashi*, Makoto Fukuda*, Kazuhiko Imano*

*秋田大学 大学院工学資源学研究科

*Graduate School of Engineering and Resource Science, Akita University

キーワード：2次高調波超音波(Second Harmonic Ultrasonic Pulse), ボルト締結体(Fastened Bolts)
接触型音響非線形性(Contact Acoustic Nonlinearity), 近距離音場限界距離(Near Field Length)

連絡先：〒010-8502 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 : 018-889-2484, Fax : 018-837-0406, E-mail : mfukuda@gipc.akita-u.ac.jp

1. はじめに

ボルトは構造物や機械などの締結に幅広く使用されており, このボルトに緩みや疲労による欠陥が生じた場合, 構造物の倒壊や機械の故障などの重大な事故につながる危険性がある. このような事故を防ぐため, ボルトの締結状態に関する評価法について多くの研究や実用例が存在している. 一つ目の評価法として, トルクレンチを用いて適正トルクまで締め付けるトルク管理法がある¹⁾. 簡易にボルトの締結状態の評価が可能であるが軸力にばらつきが生じてしまうため定量的な評価が行えないといわれている. 二つ目にひずみゲージを用いて, 軸力の変化からボルトの緩みを検出するひずみゲージ検査がある²⁾. この方法はボルトにひずみゲージを埋め込まなければならないため, 全てのボルトへの適用は難しいという問題がある. 三つ目に打音検査がある. 打音検査は簡易に検査を行うことができるが, 熟練度に

よって検査結果が異なることもあるため定量的な検査ができないという問題がある. 4つ目にボルトに超音波を伝搬させて, 音速の変化からボルトの緩みを検出する方法がある. しかし, 音速は微小な変化であり, 温度による変化もあるため補正が必要である³⁾.

そこで, 複数のボルトに対して外部から定量的に検査可能な方法が必要とされる. 過去の研究において, ボルト-ナット間にナット側面から超音波を伝搬させた場合において, トルクの増加に対して2次高調波超音波が増加したと報告がある⁴⁾. トルクの増加に対してボルト-ナット間の接触面積が増加することで発生する2次高調波超音波も増加していると考えられている. 一方, 超音波の音場, 特に近距離音場限界距離を考慮した測定が行われていない.

本研究では, 近距離音場限界距離が影響するの
か検討を行うため, 1~4 MHzの周波数を用いて,

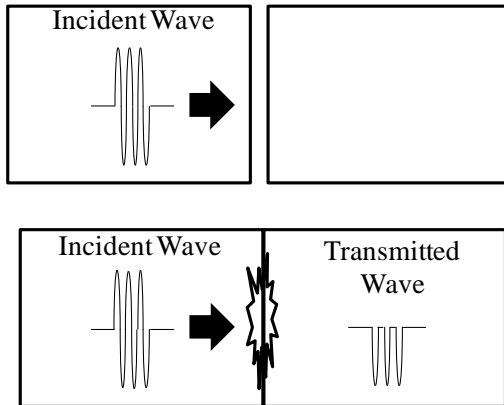


Fig. 1 固体接触面で発生する 2 次高調波

近距離音場限界距離を変化させ、ボルト-ナット間で発生する 2 次高調波超音波への影響について検討を行う。

2.2 次高調波超音波の発生原理

2.1 固体接触面で発生する 2 次高調波

Fig.1 に示すような固体の接触面に大振幅の有有限振幅超音波を伝搬させると、接触面が繰り返して衝突することで透過波や反射波がひずみ、2 次高調波が発生する。この現象は接触型音響非線形性(CAN: Contact Acoustic Nonlinearity)と呼ばれている⁵⁾。

2.2 ボルト-ナット間で発生する 2 次高調波

ボルト-ナットの締結体から発生する 2 次高調波は、Fig.2 に示すようにボルト-ナット間の接触部分で発生していると考えられる。トルクを加えることでボルト-ナット間の接触面積が増加し CAN による 2 次高調波の発生量が増加すると考えられている。過去の研究ではトルクの増加に対して 2 次高調波が増加すると報告されている⁴⁾。しかし、近距離音場限界距離を考慮した測定が行われていない。

2.3 近距離音場限界距離

近距離音場は、音波のビーム幅が変化せずに伝搬するが、遠距離音場になるとビーム幅が拡がり伝搬する。近距離音場と遠距離音場の境界は近距離音場限界距離 N で表すことができる。近距離音場限界距離 N は、振動子の半径を a 、波長を λ とす

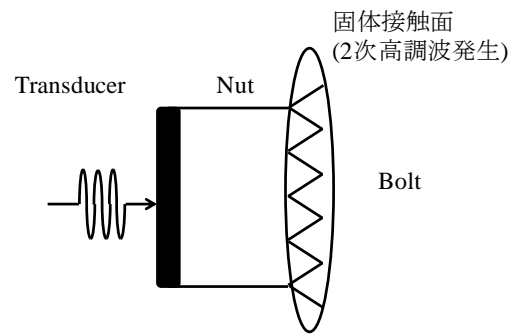


Fig.2 ボルトで発生する 2 次高調波

ると次式(1)で表すことができる。

$$N = \frac{a^2}{\lambda} \quad (1)$$

式より、振動子の半径を一定とすると周波数に比例して近距離音場限界距離が長くなる。

過去の研究において、使用されたボルトは M12 鋼鉄製六角ボルト、振動子の直径は 10 mm、測定は周波数 500 kHz で行われている。この場合、ボルト中を伝搬する超音波の音速は鉄と同様と考え 5950 m/s⁶⁾とし式(1)より近距離音場限界距離は約 2 mm となる。ナット側面からボルトまでの厚さは 4.3 mm 程度であるため、近距離音場限界距離の約 2 倍の長さとなる。

そこで、本研究では振動子の直径を 10 mm、周波数を 1~4 MHz とし、近距離音場限界距離 N を 4.2~17 mm と変化させた場合の測定を行い、ボルト-ナット間で発生する 2 次高調波について検討を行う。

3.2 次高調波検出実験

3.1 測定システム

ボルト-ナット間で発生する 2 次高調波の測定システムを Fig.3 に示す。発振器から周波数 1~4 MHz、バースト正弦波 10 波を発振し、バイポーラ増幅器により $100 V_{pp}$ に増幅して圧電振動子へ印加する。ボルト-ナット間を伝搬した超音波を 2~8 MHz に共振周波数を持つ圧電振動子で受波する。受波した波形は、ベクトルシグナルアナライ

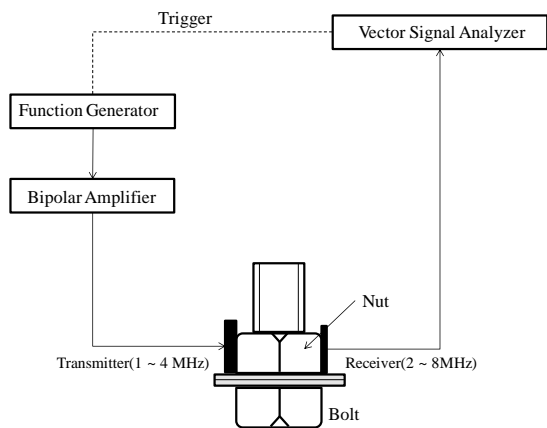


Fig. 3 測定システム

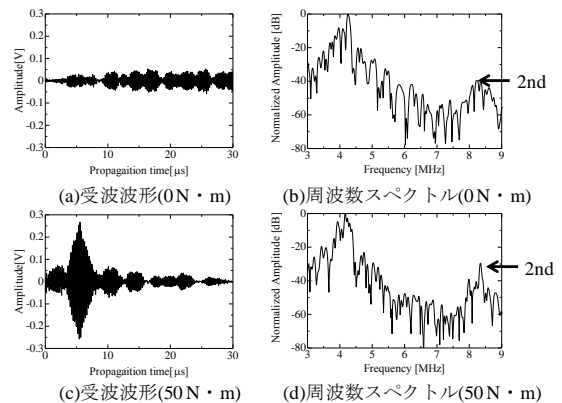


Fig. 5 測定結果(4 MHz)

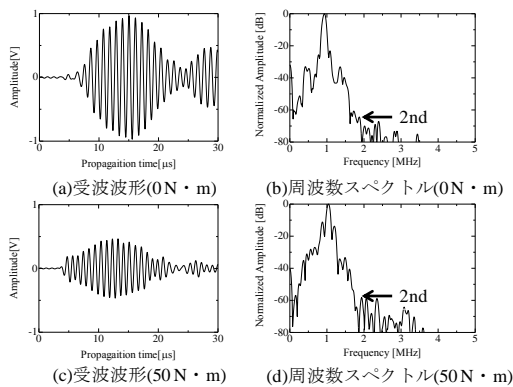


Fig. 4 測定結果(1 MHz)

ザで受波波形を観測して、観測した波形の周波数スペクトルを観測する。トルクレンチを用いて0~50 N・mまでを10 N・mずつ加える。

3.2 測定結果と考察

測定結果の一例を Fig.4, 5 に示す。同図より、2次高調波振幅値を読み取り、横軸をトルク、縦軸を2次高調波振幅値とした2次高調波-トルクの間係を Fig.6 に示す。図より、トルクの増加に対して2次高調波の変化は少ないことが読み取れる。また、Fig.4, 5 より、受波波形の振幅値を読み取り、それぞれ0 N・mにおける振幅値を基準として、横軸をトルク、縦軸を振幅比(振幅値/0 N・mの振幅値)とした振幅比-トルクの間係を Fig.7 に示す。図より、1 MHz では振幅比が減少し、4 MHz では増加していることが読み取れる。これは、周波数が4

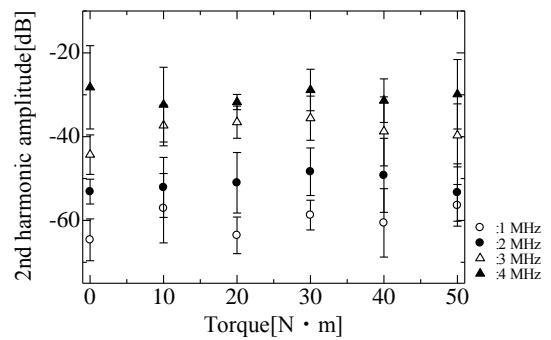


Fig. 6 2次高調波-トルクの間係

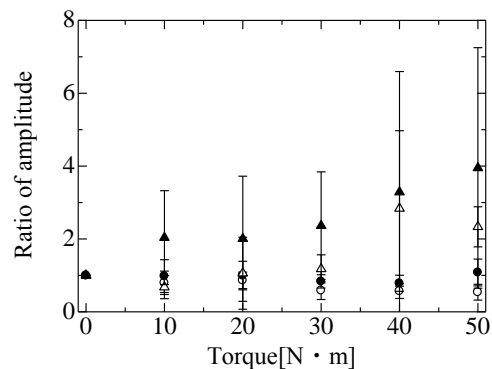


Fig. 7 振幅比-トルクの間係

MHzの場合、近距離音場限界距離は17 mmとなる。これはナットの厚さに対して約4倍となり、トルクを加え接触面積が増加したことで、1MHzの場合よりも効率よく伝搬し、ボルト内部への超音波の透過量が増加したことが考えられる。また、1

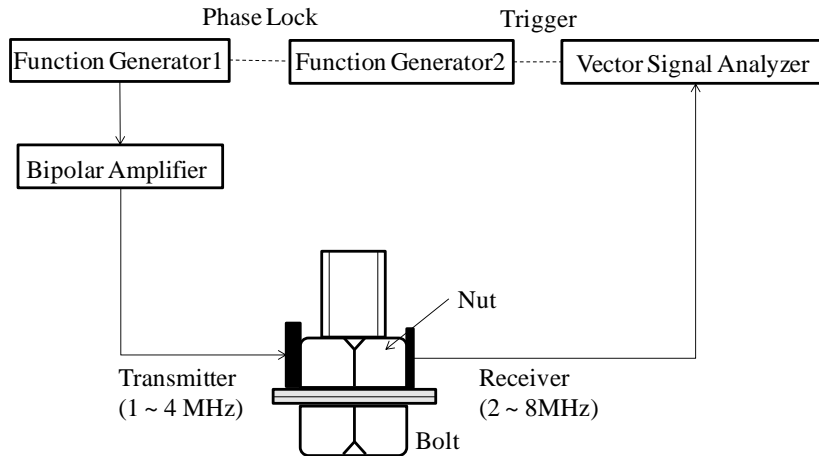


Fig. 8 PIA 法による測定システム

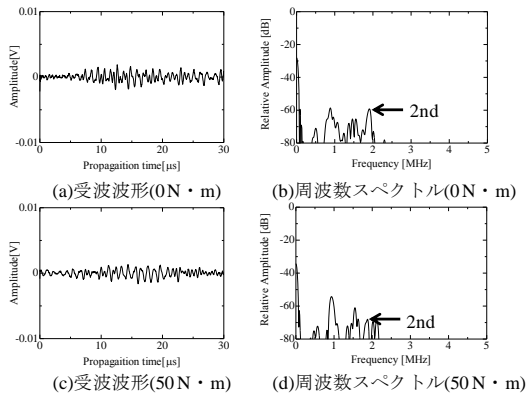


Fig. 9 測定結果(1 MHz PIA)

MHz において振幅値が減少した原因として、近距離音場限界距離がナットの厚さとほぼ等しく、トルクを加えたことでボルト内部へ伝搬する音波とナットを回りこみ伝搬する音波と別れてしまい、伝搬効率が下がったことが考えられる。

4. Pulse Inversion Averaging(PIA)法によるボルト-ナット間における2次高調波の測定

4.1 測定システム

前述で測定したボルト-ナット間で2次高調波が発生しているか検討を行う。一般的に高調波成分の周波数スペクトルは基本波成分の周波数スペクトルよりも小さくなる。そこで、2次高調波成分を効率よく測定を行うため、アベレージング機能により、リアルタイムで基本波成分を低減させ2次高調波成分を強調する Pulse Inversion

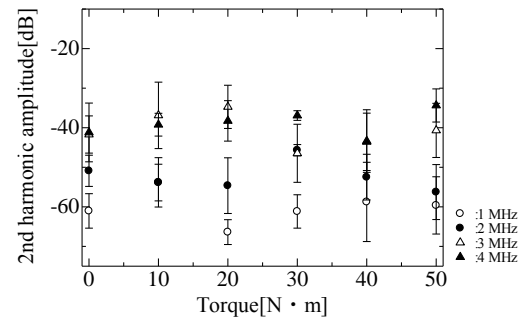


Fig. 10 2次高調波-トルクの関係

Averaging(PIA)法を用いて測定を行う⁷⁾。PIA法による測定システムを Fig.8 に示す。駆動条件は前述と同様に行う。

4.2 測定結果と考察

測定結果の一例として、周波数 1 MHz の場合を Fig.9(a)に受波波形, (b)に周波数スペクトルを示す。周波数スペクトルから2次高調波振幅値を読み取り、横軸をトルク、縦軸を2次高調波振幅とした2次高調波-トルクの関係を図.10に示す。図より、2次高調波が発生していないことが読み取れる。PIA法を用いて2次高調波成分を強調したが、2次高調波のトルクに対する変化が確認できなかった。これより、ボルト-ナット間における2次高調波の発生量は少ないことが考えられる。よって、2次高調波を用いたボルト-ナットの評価は困難であると考えられる。

5. おわりに

本報告では、周波数を変え近距離音場限界距離の2次高調波への影響を検討した。その結果、ボルト-ナット間では2次高調波の発生量が少なく、近距離音場限界距離と2次高調波の関係について検討を行えなかった。しかし、締付トルクの増加に対して受波波形が変化することを確認した。このことから、ボルト内部への音の透過率などから締結評価が可能である可能性を示せた。

今後の課題は、トルクを加えることでボルト内部における超音波の透過率や反射率が変化するか検討を行い、透過率や反射率がボルト-ナットの締結評価に用いることができるか検討を行っていく。

謝辞

本研究の一部は、平成25年度科研費若手研究(B)(25820170)の助成を受けたものであり、ここに謝意を表す。

《参考文献》

- 1)酒井智次：“増補ねじ締結概論”，養賢堂，pp.22-27(2003)
- 2)黒崎 茂，佐々木祐樹，和泉 亨：“ピエゾケーブルを用いたボルト軸力検出の試み”，非破壊検査，第56巻，3号，pp.149-154(2007)
- 3)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，第43巻，2号，pp.89-98(1977)
- 4)福田誠，米内巨樹，今野和彦：“軸力に対する2次高調波超音波の増加分を用いたボルト締結評価に関する一検討”，電子情報通信学会論文誌，Vol.J96-A，No.8，pp.590-592(2013)
- 5)I.Y. Solodov，“Nonlinear NDE using contact acoustic nonlinearity(CAN)”，Proc.1994 IEEE Ultrasonic symposium，pp.1278-1283(1994)
- 6)国立天文台：“理科年表”，丸善出版，pp.434(2011)
- 7) M.Fukuda，M.Nishihira and K.Imano：“Real Time Extraction System Using Double-Layered Piezoelectric Transducer for Second-Harmonic Ultrasonic Pulse Waves”，Jpn.J.Appl.Phys，Vol.45，No.5B，pp.4556-4559(2006)