

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 3 日現在

機関番号：11401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22760293

研究課題名（和文） 非線形超音波成分の検出によるボルト-ナット締結状態の評価に関する研究

研究課題名（英文） Evaluation of Bolt-Nut Fastening Condition Using Nonlinear Ultrasonic Components

研究代表者

福田 誠 (FUKUDA MAKOTO)

秋田大学・大学院工学資源学研究科・講師

研究者番号：50507671

研究成果の概要（和文）：本研究では、ボルト締結時のボルト締結状態を評価するために、有限振幅超音波をボルトに入射させ 2 次高調波成分の検出を行った。発生した 2 次高調波の検出を効率良く受波するため、圧電振動子の接着位置をナットの側面として透過法により超音波を送受波した。音響試料は鉄製の六角ボルトであり、デジタルトルクレンチを用いてトルクを負荷した。締結前後で 2 次高調波が 10 dB 程度増加することが確認できた。この発生源は、ボルトとナットのネジ山間の接触面積が増加したことにより、接触部で Contact Acoustic Nonlinearity が生じたものと考えられる。また、締結により、ボルトが塑性変形したため、2 次高調波が増加した可能性も考えられる。なお、これらの結果は、これまでの研究で行っていた、ボルト頭部からの送受波結果と一致している。さらに、軸力に対する 2 次高調波の増加分について検討した結果、最適とされる軸力の前後で増加分に変化があることを確認した。よって、締結時に 2 次高調波を検出することでボルトの締結状態の評価を行える可能性を示すことができた。

研究成果の概要（英文）：This study examines the use of ultrasonic second harmonic components in the quality control of bolt-fastened structures. An improved method for detecting the second harmonic components, from a bolt fastened with a nut, using the transmission method is constructed. A hexagon head iron bolt was used in the experiments. The bolt was fastened using a digital torque wrench. The second harmonic component increased by approximately 10 dB before and after the bolt was fastened. The sources of second harmonic components were contact acoustic nonlinearity in the screw thread interfaces of the bolt-nut and were the plastic deformation in the bolt with fastening bolt. This result was almost same compared with previous our method. Moreover, increase values of second harmonic components are changed at the normal axial force. Consequently, usefulness of the novel method for detecting second harmonic ultrasonic components generated from fastened bolt was confirmed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：超音波工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：①計測工学，②機械材料・材料力学，③解析・評価

1. 研究開始当初の背景

ボルトは構造物の締結のために数多く使用されており，このボルトに緩みや疲労破壊による損傷が生じた場合，ボルトの破断や締結物の脱落など重大な事故に繋がる可能性がある．このような事故を防ぐために，様々なボルトの締結評価法が実用化されている．一般的に広く普及している評価方法として，例えば超音波の音速や伝搬時間の変化を利用した超音波軸力計があるが，温度変化の影響を受けやすいため補正が必要である．また，ロードセルを利用して軸力そのものを測定する方法もあるが，ロードセルを埋め込んだ特殊なボルトやワッシャが必要になる等の問題がある．よって，補正が不要で，様々なボルトを1つのシステムで評価できる手法が要求される．

現在，超音波を用いた非破壊検査の分野で2次高調波を用いた探傷法が研究されている．固体の接触面に大振幅の有限振幅超音波を伝搬させると接触面が衝突を繰り返すことにより2次高調波が発生する，いわゆる接触型音響非線形性(CAN: Contact Acoustic Nonlinearity)が知られている．また，塑性変形により生じる転位や閉じた亀裂などの初期段階での欠陥においても2次高調波が発生する．著者らは，2次高調波を利用して，ボルト締結状態の評価の可能性について検討してきた．これまでの研究では，トルクの増加に伴って2次高調波の発生量も増加することが実験的に明らかとなっている．2次高調波の発生源としては，①ボルト・ナットのネジ山の接触面で生じるCAN，②締結によりボルトが塑性変形し，内部に生じた転位などの欠陥，の2つが考えられている．しかし，それぞれがどの程度の割合で生じているかという検討は行われていない．

2. 研究の目的

本研究では，軸力に対する2次高調波発生量を測定する．2次高調波を用いて，トルクや軸力を測定することなく，締結時に最適な締結状態が分かる，新しいボルト評価法の可能性を検討する．

3. 研究の方法

2次高調波測定システムを図1に示す．発振器から500 kHz，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}まで増幅して，送波用圧電振動子($k=500$ kHz)

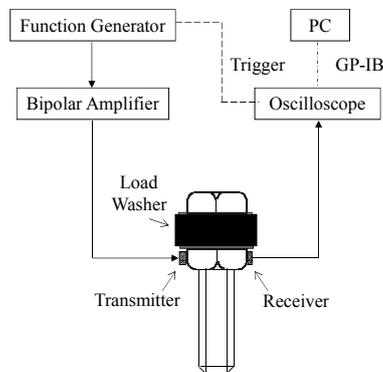


Figure 1 Experimental set-up.

に印加する．ナットおよびボルト中に超音波が送波され，ネジ山でのCANや塑性変形によって2次高調波(1 MHz)が発生する．2次高調波は受波用圧電振動子($k=1$ MHz)で受波する．受波波形をオシロスコープで観測され，データはGP-IBを介してパソコンに取り込まれる．

使用するボルトは，M12鉄製六角ボルトであり，強度区分4.8の一般的なボルトである．本実験の環境は特殊ではなく一般的な場合を想定して行うため，標準トルクは40 N·m，標準軸力は17 kNである．ネジ部の長さは160 mm，探触子間の距離は19 mmである．また，締結およびトルクの測定にはデジタルトルクレンチを，軸力の測定にはワッシャ型のロードセルを，それぞれ用いる．

4. 研究成果

結果の一例として，軸力2.9 kNおよび軸力21.8 kNのときの受波波形とそのスペクトルを図2に示す．強く締結することで，2次高調波成分が10dB程度増加していることがわかる．次に，軸力に対する2次高調波検出量をプロットしたグラフを図3に示す．実験は合計15本のボルトについて行った．なお，図3中の○，●，△はそれぞれ一本のボルトのデータを示している．軸力を増加していくと2次高調波も増加していることが確認できる．また，ほとんどのグラフにおいて標準軸力17 kN(図3の矢印)付近を境に2次高調波の増加の傾きに変化が見られることが確認できる．傾きの違いについては，15本のデータを標準軸力の前後でt検定を行った．その結果，低軸力では傾きが0.7，高軸力では1.3

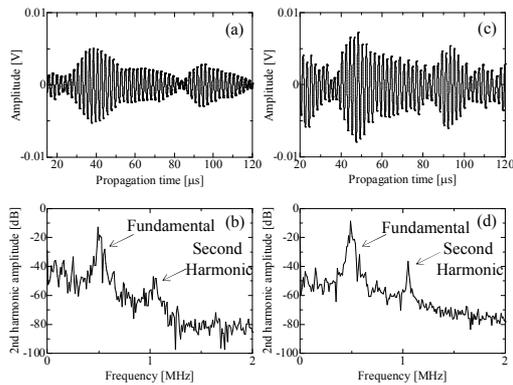


Figure 2 (a) Received waveform and (b) its spectrum on 2.9 kN. (c) Received waveform and (d) its spectrum on 21.8 kN

と有意な差が現れたことにより確認された。

標準軸力を境に傾きが変化したことについて考察する。2次高調波の発生源を考えると、標準軸力以下の領域では、ボルトとナットのネジ山の接触面でCANが主である。ボルトを締結することによりネジ山の接触面積が増加し、CANの発生が増加したためと考えられる。一方、ボルトを強く締結することにより塑性変形が生じる。塑性変形により2次高調波が増加することは過去にも報告されており、標準軸力より大きい領域では、CANに加えて塑性変形部も2次高調波の発生源となったと考えられる。そのため、2次高調波検出量の傾き増加したものと考えられる。

ボルトの塑性変形に関しては、標準軸力は弾性域の締め付け値であり、塑性域は標準軸力より大きな軸力を中心に分布するとされている。しかし、個体差によって標準軸力を少し超えたあたりから塑性する場合もある。本実験で2次高調波の増加の傾きが大きく変化したボルトは、塑性域分布の中では比較的低い軸力で塑性するボルトであったと考えられる。また、この弾性域・塑性域というのはあくまでボルトを棒として見た場合であり、ネジ山などナットと接触する部分は微視的には接触面積が小さいため、低軸力であっても大きな圧力が加わっているものと考えられ、塑性変形が生じていることが推測される。これも2次高調波の発生源となると考えられる。ネジ山表面で塑性変形が生じているかどうかは、今後、電子顕微鏡による観察が必要である。

以上のように、標準軸力を境に2次高調波の増加の傾きに違いがあることを確認できたため、ボルト締結時に軸力やトルクを測定することなく、2次高調波を用いて締結評価を行える可能性を示すことができたと考えられる。今回の検討では、一種類のボルトでの検討であったため、2次高調波超音波を用いた新しい評価法として確立させるためには、今後は径や材質を変えた検討が必要にな

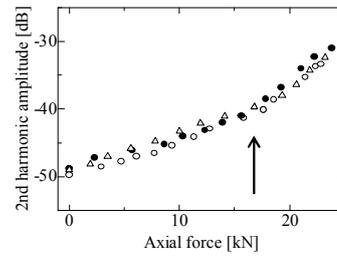


Figure 3 Relation between axial forces and second harmonic components

ると考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

1. M. Fukuda and K. Imano : “The Detection of Second Harmonic Components of Lamb Waves Generated from Fatigue Plate Using a Double-Layered Piezoelectric Transducer”, Jpn. J. Appl. Phys., vol.51, no.7, pp.07GB06-1-5, 2012.
2. M. Fukuda, K. Imano, H. Yamagishi and K. Sasaki : “Detection of the second-harmonic of Lamb waves in fatigue magnesium plates”, Acoust. Sci. & Tech., vol.32, no.6, pp. 271-275, 2011.
3. M. Fukuda and K. Imano : “A novel double-layered piezoelectric transducer for detecting second harmonic ultrasonic pulse waves”, Int. J. Soc. Mater. Eng. Resour., vol. 17, no. 1, pp. 73-77, 2010.

[学会発表] (計 35 件)

1. 福田誠, 原田貴之, 今野和彦 : “固体接触面の接触圧力と2次高調波の関係に関する検討”, 日本音響学会 2013 年春季研究発表会講演論文集, pp. 1363-1364, 2013.
2. 長谷部大樹, 福田誠, 今野和彦 : “光学的手法を用いた Lamé モード Lamb 波のガラス平板表面の振動速度測定”, 圧電材料・デバイスシンポジウム 2013, pp. 127-132, 2013.
3. M. Fukuda, T. Hasebe and K. Imano : “Detection of second harmonic components generated from crack in glass plate using Lamé mode of Lamb waves”, 第 33 回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム講演論文集, pp. 325-326, 2012.
4. M. Fukuda and K. Imano : “A Study of Bolt Fastening Evaluation Using Second Harmonic Ultrasonic Pulse Waves”, The 1st IEEE Global Conference on Consumer Electronics 2012 (GCCE 2012) (Chiba, Japan), Proceedings of GCCE 2012 (CD-ROM), pp. 69-72, 2012.
5. 福田誠, 長谷部大樹, 今野和彦 : “光学的

手法による閉じた亀裂から発生した 2 次高調波超音波分布の測定”, 日本音響学会 2012 年秋季研究発表会講演論文集, pp. 1427-1428, 2012.

6. T. Harada, M. Fukuda and K. Imano : “Detection of Second Harmonic Ultrasonic Components for Evaluation of Solids Interface”, The Society of Instrument and Control Engineerings Annual Conference 2012 (SICE 2012) (Akita, Japan), Paper No. WeA02-02, Proceedings of SICE 2012 (DVD-ROM), pp. 1164-1167, 2012.

7. M. Fukuda, O. Yonai and K. Imano : “Second harmonic ultrasonic components detection generated from fastened bolt”, The Society of Instrument and Control Engineerings Annual Conference 2012 (SICE 2012) (Akita, Japan), Paper No. WeA02-01, Proceedings of SICE 2012 (DVD-ROM), pp. 1160-1163, 2012.

8. 長谷部大樹, 福田誠, 今野和彦 : “光学的手法を用いた Lamb 波の 2 次高調波分布の測定”, 計測自動制御学会東北支部第 274 回研究集会, no. 274-3, 2012.

9. 福田誠, 米内巨樹, 今野和彦 : “ボルト締結評価のための音圧と 2 次高調波の関係の考察”, 日本素材物性学会平成 24 年度(第 22 回)年会講演要旨集, pp. 31-32, 2012.

10. 福田誠, 米内巨樹, 今野和彦 : “2 次高調波超音波を利用したボルト締結評価に関する検討”, 電子情報通信学会技術研究報告, NLP2012-36, pp. 55-58, 2012.

11. M. Fukuda and K. Imano : “A novel method for detecting second harmonic ultrasonic components generated from fastened bolts”, The 19th International Symposium on Nonlinear Acoustics (Tokyo, Japan), Paper No. 2p P02, 2012.

12. M. Fukuda and K. Imano : “Detection of second harmonic ultrasonic components of Lamb waves generated from fatigued magnesium plate”, ACOUSTICS 2012 (Hong Kong, China), Paper No. 5aEAa11, Programme, Abstracts and Papers (DVD-ROM), pp. 5aEAa11-1-6, 2012.

13. M. Fukuda, T. Harada and K. Imano : “Detection of Second Harmonic Ultrasonic Components Generated in Solids Interface”, 9th International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators (IWPMA 2012) (Hiroaki, Japan), Paper No. 1aPA05, Book of Abstracts, pp. 8, 2012.

14. 福田誠, 米内巨樹, 今野和彦 : “ボルト-ナット締結体からの非線形超音波の検出に関する検討”, 日本音響学会 2012 年春季研究発表会講演論文集, pp. 1383-1384, 2012.

15. 米内巨樹, 福田誠, 今野和彦 : “2 次高調波超音波を用いたボルト締結状態の評価に関する一検討”, 計測自動制御学会東北支部第 271 回研究集会, no. 271-9, 2012.

16. 福田誠, 今野和彦 : “疲労を受けた金属板からの 2 次高調波 Lamb 波の発生と検出”, 圧電材料・デバイスシンポジウム 2012, pp. 93-94, 2012.

17. T. Harada, M. Fukuda and K. Imano : “Detection of second harmonic ultrasonic components for evaluation of solids interface”, 電子情報通信学会技術報告 EMD2011-66-EMD2011-105, pp. 147-150, 2011.

18. M. Fukuda, K. Imano, H. Yamagishi and K. Sasaki : “Second harmonic components detection of Lamb waves from fatigued metal plates”, 第 32 回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム講演論文集, pp. 195-196, 2011.

19. M. Fukuda, K. Imano, H. Yamagishi and K. Sasaki : “Detection of second harmonic components of Lamb waves passed through fatigue tested magnesium plate”, 2011 IEEE International Ultrasonics Symposium (2011IUS) (Orlando, USA), Paper No. P2B-8, 2011.

20. 福田誠, 今野和彦, 山岸英樹, 佐々木克浩 : “疲労負荷を受けた平板からの 2 次高調波 Lamb 波の検出”, 日本音響学会 2011 年秋季研究発表会講演論文集, pp. 1307-1308, 2011.

21. M. Fukuda, K. Imano, H. Yamagishi and K. Sasaki : “The detection of second harmonic components of Lamb waves generated from fatigue plate using a double-layered piezoelectric transducer”, The Society of Instrument and Control Engineerings Annual Conference 2011 (SICE2011) (Tokyo, Japan), Paper No. FrC02-03, Proceedings of SICE 2011 (DVD-ROM), pp. 1966-1971, 2011.

22. 福田誠, 今野和彦, 山岸英樹, 佐々木克浩 : “疲労負荷を受けた金属平板からの 2 次高調波 Lamb 波の検出”, 平成 23 年度第 1 回非線形超音波の基礎と応用に関する研究会資料, pp. 7-11, 2011.

23. 原田貴之, 福田誠, 今野和彦 : “固体中の亀裂で発生する非線形振動成分の測定”, 計測自動制御学会東北支部第 266 回研究集会, no. 266-8, 2011.

24. 福田誠, 今野和彦, 山岸英樹, 佐々木克浩 : “疲労を与えた金属板から生じる非線形 Lamb 波の反射法による検出”, 日本素材物性学会平成 23 年度(第 21 回)年会講演要旨集, pp. 9-10, 2011.

25. 福田誠, 今野和彦 : “非線形超音波によるボルト締結状態評価への一検討”, 計測自動制御学会東北支部第 264 回研究集会, no. 264-10, 2011.

26. 福田誠, 今野和彦 : “ボルト-ナット締結体におけるねじ部からの非線形超音波検出”, 日本音響学会 2011 年春季研究発表会講演論文集, pp. 1503-1504, 2011.

27. 福田誠, 今野和彦 : “二層型圧電振動子の作成と非線形超音波を用いたボルト締結状態評価への応用”, 圧電材料・デバイスシンポジウム

2011, pp. 47-48, 2011.

28. M. Fukuda, O. Yonai, K. Yoshida and K. Imano : “Detection of Second Harmonic Ultrasonic Waves Generated from Fastened Bolts”, 第 31 回超音波エレクトロニクス基礎と応用に関するシンポジウム講演論文集, pp. 53-54, 2010.

29. M. Fukuda, O. Yonai, K. Yoshida and K. Imano : “Second harmonic ultrasonic pulse waves generated from bolts fastened with nuts at various axial forces”, The International Conference on Experimental Mechanics 2010 (ICEM2010) (Kuala Lumpur, Malaysia), Paper No. P2.7, Proceedings of ICEM2010 (USB memory), pp.157, 2010.

30. 福田誠, 今野和彦, 山岸英樹, 佐々木克浩 : “疲労負荷を受けた金属材から生じる Lamb 波の 2 次高調波成分の検出”, 日本非破壊検査協会平成 22 年度第 2 回非線形超音波の基礎と応用に関する研究会資料, pp. 15-19, 2010.

31. 福田誠, 今野和彦, 山岸英樹, 佐々木克浩 : “疲労負荷を与えた板材からの非線形超音波検出”, 日本非破壊検査協会超音波部門講演会資料, no.UT-00016, pp. 9-13, 2010.

32. 福田誠, 今野和彦, 山岸英樹, 佐々木克浩 : “疲労試験を行った金属板から生じる 2 次高調波の検出”, 日本音響学会 2010 年秋季研究発表会講演論文集, pp. 1195-1196, 2010.

33. 福田誠, 米内巨樹, 吉田和博, 今野和彦 : “2 次高調波を用いたボルト締結体の軸力評価に関する検討”, 日本音響学会 2010 年秋季研究発表会講演論文集, pp. 1279-1280, 2010.

34. 米内巨樹, 吉田和博, 福田誠, 今野和彦 : “有限振幅超音波を用いたボルトの締結状態の評価に関する一検討”, 日本素材物性学会平成 22 年度(第 20 回)年会講演要旨集, pp. 123-126, 2010.

35. 福田誠, 今野和彦, 山岸英樹, 佐々木克浩 : “疲労試験を行った板材から生じる非線形超音波の検出”, 日本素材物性学会平成 22 年度(第 20 回)年会講演要旨集, pp. 119-122, 2010.

[図書] (計 2 件)

1. M. Fukuda and K. Imano : “A novel method for detecting second harmonic ultrasonic components generated from fastened bolts”, NONLINEAR ACOUSTICS State-of-the-Art and Perspectives, American Institute of Physics, pp. 215-218, 2012.

2. M. Fukuda and K. Imano : “Second Harmonic Detection Generated from Fastened Bolt”, Acoustical Imaging vol. 30, Springer Science + Business Media B. V., pp. 163-168, 2011.

[その他]

研究代表者所属研究室ホームページ

<http://www.ee.akita-u.ac.jp/~imano-lab/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福田 誠 (FUKUDA MAKOTO)

秋田大学・大学院工学資源学研究所・電気

電子工学専攻・講師

研究者番号 : 50507671