

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：11401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820170

研究課題名(和文)非線形超音波を用いたボルトの軸力評価システムに関する研究

研究課題名(英文)A Study of Bolt Conclusion Evaluation System Using Non-linear Ultrasonic Waves

研究代表者

福田 誠 (Fukuda, Makoto)

秋田大学・工学(系)研究科(研究院)・講師

研究者番号：50507671

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：ボルト締結評価に2次高調波を用いるには、CAN(Contact Acoustic Non-linearity)の発生源であるねじ山の接触面積(長さ)と、超音波の波長の関係が重要であることが、有限要素解析および実験により確かめられた。それにより、2次高調波を検出する位置や、本手法を適用できるボルトの長さ・径などにも影響を及ぼすことが考えられた。さらに、実用ではシール材・接着剤なども用いられており、使用する材質の超音波透過特性を把握しておくことが本手法には重要であることもわかった。

研究成果の概要(英文)：To use second harmonic ultrasonic waves for bolt conclusion evaluation, the relation between the contact area (length) of bolt-nut surfaces that are generated second harmonic waves because of CAN (Contact Acoustic Non-linearity) and wave length of ultrasonic waves was confirmed using FEM simulation and several experiments. Therefore, location for detecting second harmonic waves or applicable bolt length and diameter were also influenced. Moreover, in practice, seal or adhesive are used, whose characteristics for ultrasonic transmission or absorption will be required to evaluate bolt conclusions.

研究分野：超音波工学

キーワード：非線形超音波 ボルト ナット 軸力 2次高調波 有限要素法 反射係数 圧電振動子

1. 研究開始当初の背景

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、超音波法、ひずみゲージ法などが知られている。しかし、超音波を用いるほとんどの手法において温度による影響を受けるため、補正が必要となる。また、ひずみゲージ法は、特殊なボルトやワッシャを用いるため、全てのボルトに適用するにはコストパフォーマンスが悪く、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、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を提案している。

金属などの固体の接触面に大音圧である有限振幅超音波が入射されたときに、接触面の非線形振動により2次高調波あるいは分調波などの非線形成分が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。また、塑性変形部でも転位や閉じた亀裂が多数存在し、それらが非線形振動したときに調波が発生することが明らかとなっている。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、これまでに申請者はボルトの塑性変形やネジ山間のCANによる2次高調波の検出を実験的に確認している。しかし、ボルト-ナット接触面において2次高調波が発生する条件や、ボルト内部を伝搬する過程などについては、明らかになっておらず課題が残っている。

2. 研究の目的

本研究では、有限振幅超音波が金属界面等に入射したとき、非線形振動が生じ、非線形超音波(2次高調波・分調波等)が発生するという超音波の非線形性を利用して、ボルト-ナットの締結状態の新しい検査法を開拓する。ボルト-ナット締結状態における非線形超音波の発生・伝搬を有限要素法によって解析し、これを明らかにした上で、二層型圧電振動子(DLPT)を用いた有限振幅超音波の発生と非線形成分の検出を感度良く、反射法で行えるシステムを構築する。軸力とボルト締結状態から検出される非線形成分の関係を、ボルトの材質やサイズといった様々な面から検討し、これまでにない新しいボルト-ナットの締結状態の評価法の確立を目指す。

3. 研究の方法

(1)有限要素解析により、超音波伝搬過程にCANを模擬した要素を配置し、2次高調波の発生と伝搬の様子を解析する。

(2)ボルト-ナット接触部分での反射係数を測定し、多重反射の影響についても考察する。

(3)締結にシール材などが使われることを想定し、接着面積や厚さを変えた検討を行う。

4. 研究成果

(1)有限要素解析によるシミュレーション結果の一例を図1に示す。波長とCANの長さの関係により、2次高調波の発生と伝搬に違いが確認できた。CAN部の長さが波長に対して短い時は、2次高調波が点音源から発生するように拡散していく。そのため、CAN部から離れた位置での2次高調波の検出は、減衰により困難であると考えられるが、ある程度広範囲にCAN現象を捉えることが可能である。一方、CAN部の長さが波長に対して同程度か長い時は、2次高調波は入射波とほぼ同じビーム幅で伝搬していくことがわかり、比較的遠方での検出も可能であるが、送波振動子、CAN部、受波振動子がほぼ一直線に並んでいなければ検出が難しいことが明らかとなった。

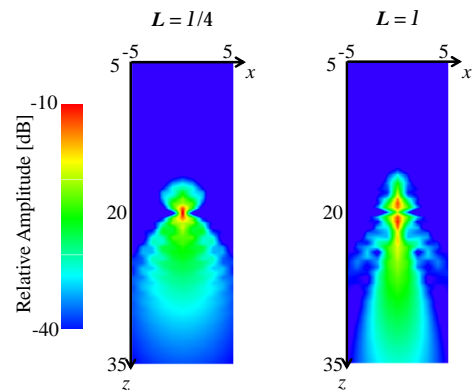


図1 有限要素解析によるCAN部の長さに対する2次高調波音場

(2)連続波超音波を用いて反射係数を測定した結果の一例を図2に示す。ボルト軸力の増加に伴って反射係数が低下することが確認できた。また、多重反射の影響を検討するため、ナット2個をボルトのヘッドから離れた位置で締め付け、ナットから超音波を送波し、ボルトヘッドで2次高調波の検出を試みた。軸力と2次高調波の検出量に相関を確認できなかったが、伝搬距離の増加と、ボルト内部の多重反射による2次高調波の減衰が影響しているものと考えられる。

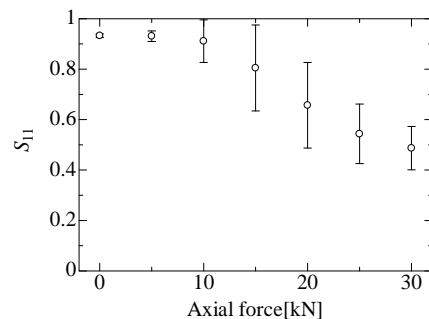


図2 ボルト軸力と反射係数の関係

(3) ねじ部にシール材などの接着剤・結合剤が塗布されている場合を想定し、固体同士を接着し、結合剤の面積や厚さを変えて、超音波の反射係数を測定した。結果の一例を図3に示す。その結果、振動子直径の4/5以上の面積で結合されていれば、ほとんどの超音波エネルギーが透過し、それ以下になると徐々に透過量が減少し、3/10程度の面積でほとんど透過しない結果となった。

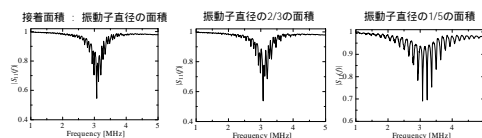


図3 接着面積による超音波反射係数

以上の結果をまとめると、解析および実験により、ボルト締結評価に2次高調波を用いるには、CANの発生源であるねじ山の接触面積(長さ)と、超音波の波長の関係が重要であることがわかった。それにより、2次高調波を検出する位置や、本手法を適用できるボルトの長さ・径などにも影響を及ぼすことが考えられた。さらに、実用ではシール材・接着剤なども用いられており、使用する材質の超音波透過特性を把握しておくことが本手法には重要であることもわかった。

今後は、ねじ部での反射特性を、解析・実験の両面から詳しく検討を行い、新しいボルト締結評価法の実現を目指す。

#### 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 : "Evaluation Method of the Bolt Conclusion Using the Scattering Parameter for Ultrasonic Waves", J. Inst. Industrial Appl. Eng., 査読有, vol. 3, no. 2, pp. 80-84, 2015.
2. M. Fukuda, T. Harada and K. Imano : "Application of high-polymer adhesive tape to closed-crack detection using second-harmonic ultrasonic pulse waves", Acoust. Sci. & Tech., 査読有, vol.36, no.2, pp. 175-177, 2015.
3. 福田誠, 米内巨樹, 今野和彦 : "軸力に対する二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 A, 査読有, vol. J96-A, no. 8, pp. 590-592, 2013.

[学会発表](計 23 件)

1. 福田誠, 今野和彦 : "ボルト軸力に対す

る超音波の反射係数の変化に関する検討", 日本音響学会 2016 年春季研究発表会講演論文集, pp. 1301-1302, 2016.

2. M. Fukuda and K. Imano : "Second Harmonic Components Generation for Size and Number of Micro-Cracks Using Finite Element Method", Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics, vol. 36, no.1P2-6(USB Memory), 2015.

3. M. Fukuda and K. Imano : "A Study of Relation between Scattering Parameter for Ultrasonic Waves and Axial Force in Bolt Conclusions", International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2015 (ATEM'15) (Toyohashi, Japan), Paper No. OS6-16, Abstract book (USB Memory), p. 87, 2015.

4. 福田誠, 今野和彦 : "S パラメータによるボルト締結トルクと超音波の反射係数の関係についての検討", 日本音響学会 2015 年秋季研究発表会講演論文集, pp. 1195-1196, 2015.

5. 福田誠, 杉浦竜也, 今野和彦 : "有限要素法を用いた微細き裂に対する2次高調波発生量の検討", 日本音響学会 2015 年春季研究発表会講演論文集, pp. 1193-1194, 2015.

6. 村田倅夏, 保坂儒人, 福田誠, 今野和彦 : "S パラメータによる積層試料の接着評価法の検討", 日本機械学会 2014 年年次大会講演論文集, no. J0420403, 2014.

7. M. Fukuda, M. Takahashi and K. Imano : "A Study of Bolt Conclusion Evaluation for Ultrasonic Waves Using Scattering Parameter", The 2nd International Conference on Intelligent Systems and Image Processing (ICISIP2014) (Kita-Kyushu, Japan), Paper No. GS1-2, Proceedings of the 2nd International Conference on Intelligent Systems and Image Processing, pp. 44-48, 2014.

8. 杉浦竜也, 福田誠, 今野和彦 : "有限要素法を用いた固体中に存在する微細き裂からの反射波の検討", 日本音響学会 2014 年秋季研究発表会講演論文集, pp. 1373-1374, 2014.

9. 杉浦竜也, 福田誠, 今野和彦 : "微細き裂を有する固体材料中における超音波音場の解析", 日本素材物性学会平成 26 年度(第 24 回)年会 講演要旨集, pp. 25-26, 2014.

10. 福田誠, 高橋一歴, 今野和彦 : "S パラメータを用いた超音波によるボルト締結状態評価法の検討", 日本素材物性学会平成 26 年度(第 24 回)年会 講演要旨集, pp. 23-24, 2014.

11. 福田誠, 今野和彦 : "S パラメータを用いた超音波による固体接着状態評価法の検討", 日本非破壊検査協会東北支部 第 2 回支部会・講演会資料集, p. 2, 2014.

12. 福田誠, 今野和彦 : "固体欠陥部や液体伝搬過程から発生する2次高調波の検出に

関する検討”，平成 25 年度第 3 回非線形超音波による非破壊評価の高度化研究会資料，pp.3-7，2014.

13. 杉浦竜也，福田誠，今野和彦：“閉口き裂を有する固体中を伝搬する超音波音場の解析”，日本音響学会 2014 年春季研究発表会講演論文集，pp. 1247-1248，2014.

14. 高橋一歴，福田誠，今野和彦：“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”，計測自動制御学会東北支部第 285 回研究集会，no. 285-9，2013.

15. M. Fukuda, T. Hasebe and K. Imano：“Second harmonic ultrasonic wave detection in glass plate with clack”，第 34 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. 89-90，2013.

16. T. Sugiura, M. Fukuda and K. Imano：“Detection of second harmonic ultrasonic wave generated from weld defect”，第 34 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. 87-88，2013.

17. 杉浦竜也，福田誠，今野和彦：“閉口き裂を有する固体中の音場分布の解析”，日本非破壊検査協会超音波部門講演会資料，no. UT-00076，pp. 29-32，2013.

18. 山形大，福田誠，今野和彦：“有限面積を有する受波器が超音波音場観測に及ぼす影響”，日本非破壊検査協会超音波部門講演会資料，no. UT-00075，pp. 25-28，2013.

19. 杉浦竜也，福田誠，今野和彦：“閉口き裂の寸法による 2 次高調波超音波の発生量の検討”，日本音響学会 2013 年秋季研究発表会講演論文集，pp. 1367-1368，2013.

20. 杉浦竜也，福田誠，今野和彦：“溶接欠陥を持つ試料から発生する 2 次高調波超音波の検出”，計測自動制御学会東北支部第 282 回研究集会，no. 282-7，2013.

21. 山形大，福田誠，今野和彦：“凹面型圧電振動子による 2 次高調波超音波の音場分布測定”，計測自動制御学会東北支部第 282 回研究集会，no. 282-6，2013.

22. M. Fukuda, T. Harada and K. Imano：“A Study for Suppression of Second Harmonic Ultrasonic Components Generated in Solids Interface”，3rd International Symposium on Laser Ultrasonics and Advanced Sensing (LU2013) (Yokohama, Japan), Paper No. 2B2, Book of Program & Abstracts, pp. 6, 2013.

23. M. Fukuda, T. Harada and K. Imano：“Suppression of Second Harmonic Ultrasonic Components Generated in Solids Interface”，32nd International Acoustical Imaging Symposium (AI32) (Singapore, Singapore), Paper No. P0111, Book of Program & Abstracts, pp. 35-36, 2013.

〔図書〕(計 1 件)

1. M. Fukuda, T. Harada and K. Imano：“Suppression of Second Harmonic Ultrasonic Components Generated in Solids Interface”，Acoustical Imaging Vol.32, Research Publishing, pp. 105-109, 2015.

〔産業財産権〕  
なし

〔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