

平成22年6月10日現在

研究種目：若手研究(スタートアップ)  
 研究期間：2008～2009  
 課題番号：20860020  
 研究課題名(和文) 非線形超音波を用いたボルト締結状態の評価システムに関する研究  
 研究課題名(英文) Bolt Conclusion Evaluation System using Nonlinear Ultrasonic Pulse Waves  
 研究代表者  
 福田 誠 (FUKUDA MAKOTO)  
 秋田大学・工学資源学部・電気電子工学科・助教  
 研究者番号：50507671

研究成果の概要(和文)：本研究は非線形超音波の一種である2次高調波を用いたボルト締結状態の評価システムの構築を目的としている。2次高調波の検出には、1 MHzと2 MHzの2種類の共振周波数を有する二層型圧電振動子(DLPT)を用いる。二層型圧電振動子は、基本波(1 MHz)を送波する際には並列接続に、2次高調波(2 MHz)を受波する際には直列接続にそれぞれ切り換える。実験には、呼び径12 mm、長さ100 mmの六角ボルトを用いた。ボルトを20 kN程度の軸力で締結した結果、締結前と比べて2次高調波の検出量が15 dB程度だけ急激に増加した。2次高調波を検出することによるボルト締結状態評価への可能性を示すことができた。

研究成果の概要(英文)：This study investigates the use of ultrasonic second harmonic components in the quality control of bolt fastened structures. The second harmonic components from a fastened bolt were detected using a double-layered piezoelectric ultrasonic transducer (DLPT). The fundamental ultrasonic pulse waves (1 MHz) are transmitted when the DLPT is electrically connected in parallel, while the second harmonic ultrasonic components (2 MHz) are detected when the DLPT is connected in series. A hexagon head bolt (the diameter and length of the screw are 12 mm and 100 mm) was used in the experiments. The bolt was fastened by an axial force of 20 kN. The second harmonic component increased by approximately 15 dB before and after the bolt was fastened.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,330,000	399,000	1,729,000
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,530,000	759,000	3,289,000

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

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、ロードセル法などが知られている<sup>(1)</sup>。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、ひずみゲージ法やロードセル法は、特殊なボルトやワッシャを用いるため、全てのボルトを検査できず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が要求される。

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) という名前で知られるようになった<sup>(2)</sup>。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高調波が発生することが明らかとなっている。この研究分野の開拓により、工業材料の非破壊検査に高調波の利用が進められてきた<sup>(3-6)</sup>。

## 2. 研究の目的

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。この原理はボルト・ナット締結状態の検査にも利用できると思われる<sup>(7)</sup>。ここで、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、ボルトを締結することで生じた塑性変形(図1の①)、ボルト・ナットのネジ山間においてCAN(図1の②)、2次高調波は探触子とボルト間の接触状態によるCAN(図1の③)、そして、超音波伝搬過程で発生する非線形効果(図1の④)によるものである。

研究代表者は、二層型圧電振動子(DLPT: Double-Layered Piezoelectric Transducer) という2枚の同一特性の圧電振動子を逆分極に貼り合わせたトランスデューサを用いて2次高調波を感度良く検出するシステムを構築している<sup>(8)</sup>。2次高調波検出感度を従来法と比べて相対的に80dB向上できており、本システムの応用例として、ハーモニックイメージングや塑性変形させた金属棒から発生する2次高調波検出が行われた<sup>(9,10)</sup>。さらに、本システムをボルト締結状態の評価への適用に着目し、ボルトを締結したことによる塑性変形部から発生する2次高調波成分の検出が行われている<sup>(7)</sup>。上述の①の塑性変形のみ注目するため、②～④からの2次高調波発生は一定となるようにして実験を行った。すなわち、②のボルト・ナット間のCANに関し

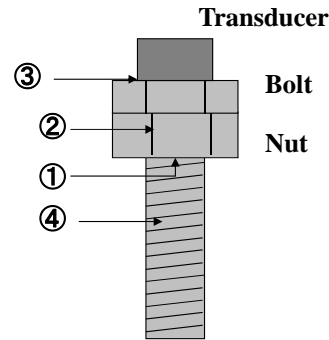


図1 締結ボルトからの2次高調波発生源

ては、ナットを用いて一度締め付けたのち、ナットを取り外して測定を行うことで、ボルト・ナット間のCANの影響を受けずに済む。また、③の探触子接触によるCANに関しては、探触子をボルトに接着して固定すれば2次高調波発生量を一定とできる。最後に、④の伝搬過程に関しては、ボルト自体が変わらなければボルト締結前後でも2次高調波発生量が一定と考えられる。

実用面を考慮した場合、ナットを外さずにボルト締結状態の評価を行う必要がある。そこで、本研究では、超音波透過法を用いてナットを伴った状態でのボルトからの2次高調波検出について検討する。

## 3. 研究の方法

### (1) 二層型圧電振動子の作成

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により、図2に示されるように電気的に並列もしくは直列にも接続が可能である。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<sup>(11)</sup>。貼り合わせる前の単体での共振周波数が2MHz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の周波数-アドミタンス特性を図3に示す。二層型圧電振動子の共振周波数は並列接続では1MHz、直列接続では2MHz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1MHz)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(2MHz)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。

### (2) ボルトからの2次高調波検出

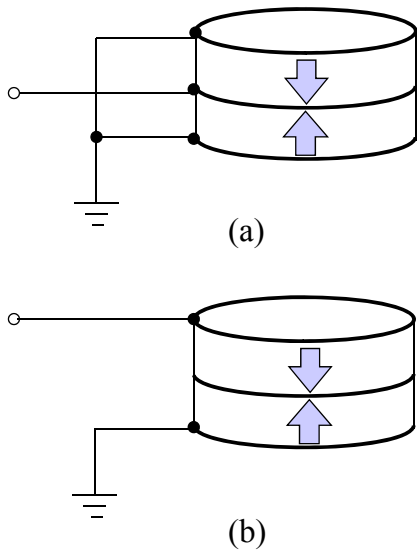


図2 二層型圧電振動子の電氣的接続方法  
(a)並列接続 (b)直列接続。  
(矢印は分極方向)

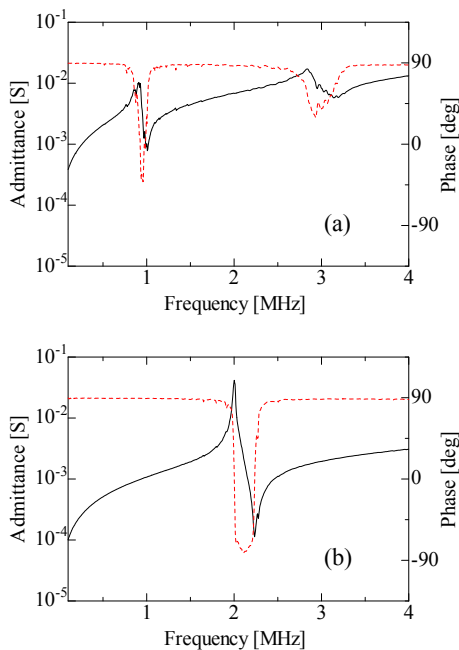


図3 二層型圧電振動子の周波数-アドミタンス特性 (a)並列接続 (b)直列接続。(実線はアドミタンスの絶対値, 破線は位相)

実験に用いたボルト締結状態からの2次高調波検出システムを図4に示す。任意波形発振器を用いて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。送波用圧電振動子(共振周波数:1 MHz)を駆動し、超音波はボルトの頭部よりボルト内に送波

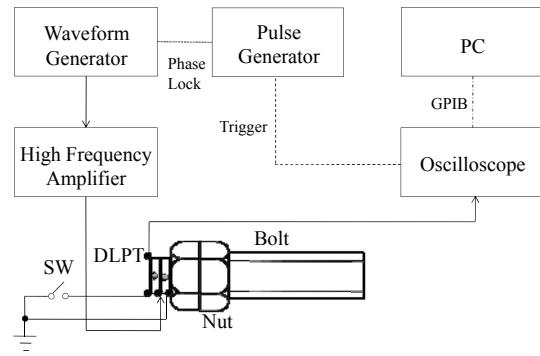


図4 実験システム

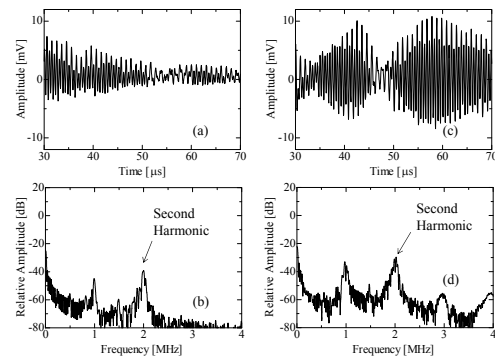


図5 Pulse Inversion Averagingを行った場合の実験結果。(a)ボルト締結前の受波波形。(b)(a)のスペクトル。(c)ボルト締結後の受波波形。(d)(c)のスペクトル。

される。もう一方のボルト端面に接着された受波用圧電振動子(共振周波数:2 MHz)で、ボルトの塑性変形部やボルト・ナットの接触面で生じた2次高調波成分を含んだ透過波を受波する。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、リアルタイムで2次高調波が検出される。

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。

#### 4. 研究成果

結果の一例として、ボルト締結前の受波波形とそのスペクトル結果を図5(a),(b)に、ボルト締結後の受波波形とそのスペクトルを図5(c),(d)にそれぞれ示す。これらはPulse Inversion Averagingにより基本波成分が打ち消され、2次高調波成分を抽出した後の結果である。締め付け前と比べて締め付け後では、2次高調波が約15 dB程度増加したことが確認できる。塑性変形に注目し、ナットを

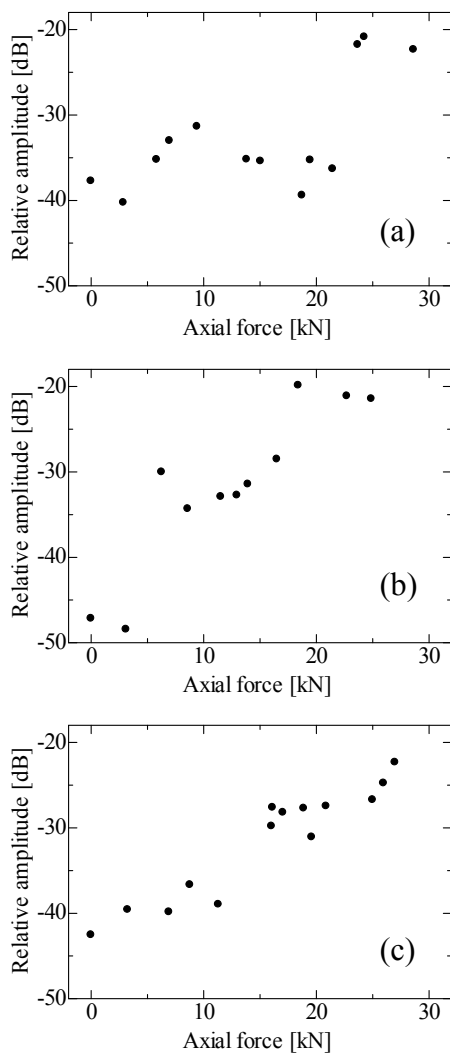


図6 軸力と検出された2次高調波の関係

取り除いて実験をした場合では、ボルト締結前後において約10 dB程度の2次高調波成分の増加を確認できた<sup>7)</sup>。今回の実験では、ナットを伴っていることで、塑性変形による2次高調波に加えて、ボルト-ナット間の接触による2次高調波も検出されたものと考えられる。

図6に、軸力に対する2次高調波検出量の関係について、3本のボルトに対して実験を行った結果を示す。いずれの場合でも、ある軸力において2次高調波が急激に増加していることが確認できる。しかし、その軸力は15~20 kNでばらついている。これは、ボルト-ナット間の接触表面の状態によって、CANにより発生する2次高調波の程度が変化するものと考えられる。この点については、金属材料を接触させた場合の2次高調波発生量のバラつきを検討する必要があると考えられる。

本手法により、2次高調波が急激に増加す

ることが確認され、2次高調波を用いたボルト締結状態の評価への可能性が示せた。しかし、ボルト締結において最適な締め付け状態が2次高調波が急激に増加する前なのか、増加した後なのか、など不明な点も多い。今後は、強度区分や呼び径などの異なるボルトを用いて、同様の検討を行う必要があると考えられる。

<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, “CAN: an example of nonclassical acoustic nonlinearity in solid”, *Ultrasonics*, Vol.40, pp.621-625, (2002).
- (3) 川嶋紘一郎, “接触型非線形超音波を用いた工業材料の非破壊評価・検査 —密着き裂と微細損傷の高調波画像化—”, 非破壊検査, Vol.56, No.6, pp.274-279, (2007).
- (4) 小原良和, 山中一司, “固体内超音波の非線形現象を利用した閉じたき裂の非破壊検査技術”, 電子情報通信学会論文誌 A, Vol.J91-A, No.12, pp.1116-1124, (2008).
- (5) T. Ohtani, K. Kawashima, M. Drew and P. Guagliardi: “Nonlinear Acoustic Evaluation of Creep Damage in Boiler Heat Exchange Tubes”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.46, No.7B, pp.4577-4582, (2007).
- (6) 今野, 武藤, “有限振幅超音波を用いた閉口クラックからの2次高調波の検出”, 素材物性学雑誌, Vol.20, No.1, pp.12-18, (2007).
- (7) M. Fukuda and K. Imano: “Detection of a second harmonic ultrasonic component generated from a fastened bolt using a double-layered piezoelectric transducer”, *IEICE Electr. Exp.*, Vol.6, No.20, pp.1438-1443, (2009).
- (8) 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).
- (9) M. Fukuda, M. Nishihira and K. Imano: “Real Time Detection of Second-Harmonic Components Generated from Plastic-Deformed Metal Rod Using Double-Layered Piezoelectric Transducer”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.46, No.7B, pp.4529-4531, (2007).
- (10) M. Fukuda, M. Nishihira and K. Imano: “Real-time ultrasonic imaging of several order harmonics using a double-layered piezoelectric transducer”, *Electron. Lett.*, Vol.43, No.22, pp.1237-1239, (2007).
- (11) 山田博章, 尾上守夫: “二周波共用超音波探触子”, 非破壊検査, Vol.20, No.11, pp.605-609, (1971).
- (12) D. H. Simpson, C. T. Chin, and P. N. Burns: “Pulse Inversion Doppler: A New Method for

Detecting Nonlinear Echoes from Microbubble Contrast Agents”, *IEEE Trans. UFFC*, Vol.46, No.2, pp.372-382 (1999).

(13) F. C. Simm: “Phase Inversion Wideband Non-linear Imaging: Applications to Tissue Harmonic Imaging”, *J. Med. Ultrasonics*, Vol.26, No.4, pp.285 (1999).

(14) P. N. Burns, D. H. Simpson and M. A. Averkiou: “Nonlinear Imaging”, *Ultrasound. Med. Biol.*, Vol.26, Suppl.1, pp.S19-S22 (2000).

#### 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) Makoto Fukuda and Kazuhiko Imano: “A Novel Double-Layered Piezoelectric Transducer for Detecting Second Harmonic Ultrasonic Pulse Waves”, *Int. J. Soc. Mater. Eng. Resour.*, 査読有, Vol.17, No.1, pp.73-77 (2010)

(2) Makoto Fukuda and Kazuhiko Imano: “Detection of a second harmonic ultrasonic component generated from a fastened bolt using a double-layered piezoelectric transducer”, *IEICE Electron. Exp.*, 査読有, Vol.6, No.20, pp.1438-1443, (2009)

(3) Makoto Fukuda and Kazuhiko Imano: “Detection of sub-harmonic components generated from microbubbles in water using double-layered piezoelectric transducer with aligning polarization directions”, *Acoust. Sci. & Tech.*, 査読有, Vol.29, No.6, pp.399-402 (2008)

[学会発表] (計 15 件)

(1) 福田誠, 吉田和博, 今野和彦: “二層型圧電振動子を用いたボルト締結状態からの非線形成分の検出”, 日本音響学会 2010 年春季研究発表会講演論文集, pp. 1321-1322, 2010 年 3 月 10 日, 電気通信大学, 東京

(2) Makoto Fukuda, Kazuhiro Yoshida and Kazuhiko Imano: “Second harmonic components detection for fastening bolts using double-layered piezoelectric transducer”, 第 30 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論文集, pp. 253-254, 2009 年 11 月 19 日, 同志社大学今出川キャンパス, 京都

(3) Makoto Fukuda and Kazuhiko Imano: “Detection of second harmonic ultrasonic components generated from fastened bolts”, *The 13th Asia-Pacific Conference on Non-Destructive Testing (APCNDT2009)*, Paper No. PS7-3, 2009 年 11 月 11 日, パシフィコ横浜会議センター, 横浜

(4) Makoto Fukuda and Kazuhiko Imano:

“A novel detection system for second harmonic ultrasonic pulse waves using bonded ring type double-layered piezoelectric transducer”, *The 6th International Conference on Materials Engineering for Resources (ICMR2009)*, Paper No. AP-28, 2009 年 10 月 23 日, 秋田ビューホテル, 秋田

(5) 吉田和博, 福田誠, 今野和彦: “2 次高調波を用いたボルト・ナット締結状態の一評価法”, 日本音響学会 2009 年秋季研究発表会講演論文集, pp. 1225-1226, 2009 年 9 月 17 日, 日本大学工学部, 郡山

(6) 福田誠: “二層型圧電振動子を用いた非線形超音波検出法とその応用”, 第 4 回非線形超音波研究会第 4 回レーザー超音波・先進非接触計測技術研究会合同研究会, pp. 27-32, 2009 年 8 月 10 日, 富山大学五福キャンパス黒田講堂, 富山

(7) 佐藤博仁, 福田誠, 今野和彦: “二層型圧電振動子を用いたサブハーモニックイメージング”, 日本素材物性学会平成 21 年度(第 19 回)年会講演要旨集, pp. 124-127, 2009 年 6 月 16 日, 秋田ビューホテル, 秋田

(8) 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締結状態の一評価法”, 日本素材物性学会平成 21 年度(第 19 回)年会講演要旨集, pp. 116-119, 2009 年 6 月 16 日, 秋田ビューホテル, 秋田

(9) 福田誠, 今野和彦: “ボルト締め付け前後における 2 次高調波検出”, 日本音響学会 2009 年春季研究発表会講演論文集, pp. 1185-1186, 2009 年 3 月 17 日, 東京工業大学大岡山キャンパス, 東京

(10) Makoto Fukuda and Kazuhiko Imano: “SECOND HARMONIC DETECTION GENERATED FROM FASTENED BOLT”, *30<sup>th</sup> International Symposium on Acoustical Imaging (AI30)*, Paper No.24, 2009 年 3 月 4 日, ハイアットリージェンシーモントレー, Monterey, USA

(11) Makoto Fukuda and Kazuhiko Imano: “A Detection of Nonlinear Components of Lamb Wave Generated from Closed Cracks Using Double-Layered Piezoelectric Transducer”, 第 29 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論文集, pp. 353-354, 2008 年 11 月 13 日, 仙台市シルバーセンター, 仙台

(12) 福田誠, 今野和彦: “二層型圧電振動子を用いた Lamb 波の発生と非破壊検査への一応用”, 電子情報通信学会技術研究報告, US2008-35, pp. 19-23, 2008 年 9 月 25 日, 東北大学青葉山キャンパス, 仙台

(13) 福田誠, 今野和彦: “二層型圧電振動子を用いた板波の発生と 2 次高調波の検出”, 日本音響学会 2008 年秋季研究発表会講演論文集, pp. 1351-1352, 2008 年 9 月 11 日, 九

州大学大橋キャンパス, 福岡.

(14) 福田誠, 鎌田真一, 今野和彦: “塑性変形した金属棒断面の観察結果による二層型圧電振動子を用いた2次高調波および分調波の検出結果の考察”, 日本素材物性学会平成20年度(第18回)年会講演要旨集, pp. 3-6, 2008年6月17日, 秋田ビューホテル, 秋田

(15) 福田誠, 鎌田真一, 今野和彦: “塑性変形した金属棒の内部状態と検出された非線形超音波成分との関係”, 電子情報通信学会技術研究報告, US2008-8, pp. 39-43, 2008年4月25日, 電気通信大学, 東京

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称: 超音波を用いたボルトの締め付け状態評価システム

発明者: 今野和彦, 福田誠

権利者: 国立大学法人秋田大学

種類: 特許権

番号: 特願 2009-043657

出願年月日: 2009年2月26日

国内外の別: 国内

[その他]

研究代表者所属研究室ホームページ

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

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

福田 誠 (FUKUDA MAKOTO)

秋田大学・工学資源学部・電気電子工学科・助教

研究者番号: 50507671