

機関番号：11401

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2008 ~2010

課題番号：20560392

研究課題名 (和文) 傾斜分極型圧電振動子を用いた有限振幅音波による板状試料の探傷に関する研究

研究課題名 (英文) A study of nondestructive testing with the tilted angle polarization type ultrasonic transducer

研究代表者 今野 和彦 (IMANO KAZUHIKO)

秋田大学・工学資源学研究科・教授

研究者番号：60125705

研究成果の概要 (和文)：

平板中におけるガイド波の発生・検出法としては、振動子と測定試料の間にくさびを挿入することで、平板に超音波を斜角入射させる斜角入射法が一般的である。しかしこの方法では、振動子とくさびおよびくさびと平板の間の接着界面における反射やくさび内部での伝搬減衰が問題となるため、有限振幅のガイド波を発生・伝搬させることは容易ではない。これらの問題を解決する一手法として、分極軸が傾斜しているためにくさびを必要としない傾斜分極型平面振動子(TAPP)を用いる方法が挙げられる<sup>8)</sup>。この方法は、くさびを介さずに有限振幅超音波を平板に斜角入射できる可能性がある。従って傾斜分極型平面振動子を用いて有限振幅のガイド波を発生・検出できれば、より広範囲での閉口亀裂の検出などへの応用が期待できる。本研究では傾斜分極型平面振動子を用いた有限振幅のガイド波の発生・検出の検討をした。

研究成果の概要 (英文)：

The tilted-angle polarization type piezoelectric (TAPP) transducer is used to generate finite-amplitude guided waves in an aluminum plate. The TAPP transducer is directly coupled to the sample without a wedge. The ultrasonic wave generated by the TAPP is analyzed in both time space and time-frequency space. These experiments clearly show that the 1MHz finite-amplitude wave from the TAPP transducer generates the higher harmonic component of a 2 MHz ultrasonic Lamb wave. The possible application of the harmonic wave of the TAPP transducer in nondestructive evaluation is described.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：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：TAPP, 傾斜分極, 探傷,

有限振幅音波

Lamb 波, 亀裂, 高調波, CAN

### 1. 研究開始当初の背景

ガイド波を用いて板状の試料中における非破壊検査の方法としては、振動子と測定試料の間にプラスチック製のくさびを挿入することで、平板に超音波を斜角入射させる斜角入射法が一般的である。しかしこの方法では、振動子とくさびおよびくさびと平板の間の接着界面における反射やくさび内部での伝搬減衰が問題となるため、有限振幅のガイド波を発生・伝搬させることは容易ではなかった。また、板波(ガイド波)の有限振幅音波の利用も殆ど例がなく、この分野では新しい方法は望まれていた。

### 2. 研究の目的

本研究では、圧電振動子と試料となる板状試料の間にくさびを挿入することなしに直接試料に有限振幅の板波を放射し、かつ欠陥などからの反射波に含まれる高調波も受波できるシステムを構築することにある。

### 3. 研究の方法

有限振幅のガイド波の発生・受波

#### 3-1. 送受波用探触子の選定

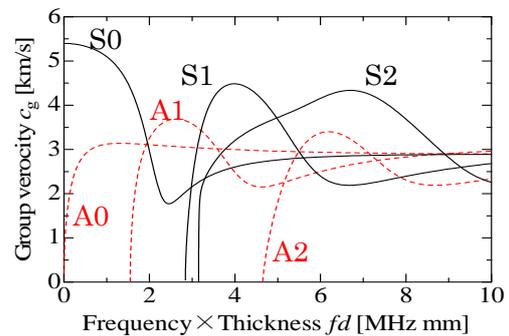
本報告では送波用振動子に傾斜分極型平面振動子(富士セラミックス社製)を用いる。また図1に示すアルミニウム の速度分散曲線を用い、非分散性領域の有限振幅のガイド波を単一で得るために  $fd$  の領域を  $1 \text{ MHz mm}$  とし、臨界面角を  $50^\circ$  と設定した。すなわち、傾斜角が  $50^\circ$  の傾斜分極型平面振動子を用いてガイド波の発生・受波を行う。次に、傾斜分極型平面振動子(傾斜角  $50^\circ$ )の共振周波数をインピーダンスアナライザ(HP 4295A)を用いて測定した。このとき、傾斜分極型平面振動子は横波用の音響結合剤である Shear Gel(アイ・エス・エル社製)を用いてアルミニウム平板(縦波音速  $cl= 6300 \text{ m/s}$ , 横波音速  $ct= 3100 \text{ m/s}$ )に接着した状態で測定を行った。図2(a)に傾斜分極型平面振動子のアドミタンス特性を示す。同図より、共振周波数は約  $1.08 \text{ MHz}$  となった。

また、受波用探触子には、従来より利用されている斜角探触子を用いる。本研究では有限振幅音波が伝搬していることを確認するため、2次高調波を受波できるような斜角探触子を作製した。斜角探触子のアドミタンス特性を図2(b)に示す。同図より、共振周波数は約  $2 \text{ MHz}$  となった。

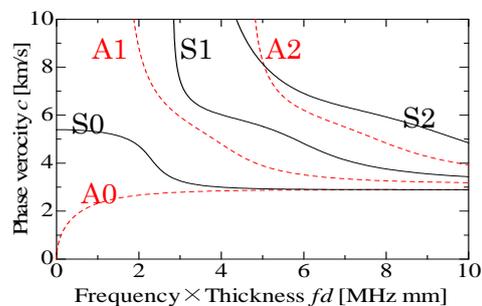
#### 3-2. 測定システム

有限振幅のガイド波の発生・受波のための測

定システムを図3に示す。本測定システムでは、発振器から周波数  $1.08 \text{ MHz}$  のバースト正弦波 5 波を発振し、高周波増幅器(T145-4716A-AK)で電力  $1.2 \text{ W}$  まで増幅する。そして、低域通過フィルタ(DF-1700)により入力信号に含まれる2次以上の成分を除去し、整合器(T020-4734A)を介して傾斜分極型平面振動子に印加する。傾斜分極型平面振動子からアルミニウム平板に超音波が斜角入射される。このとき、入射角より伝搬中にガイド波の1種であるLamb波が発生すると考えられる。このLamb波がアルミニウム平板中をある程度伝搬することで非線形効果により2次高調波が発生する。そして、受波用斜角探触子で受波される。このとき、傾斜分極型平面振動子と斜角探触子は Shear Gel を用いてアルミニウム平板に接着し、伝搬距離は  $200 \text{ mm}$  とした。

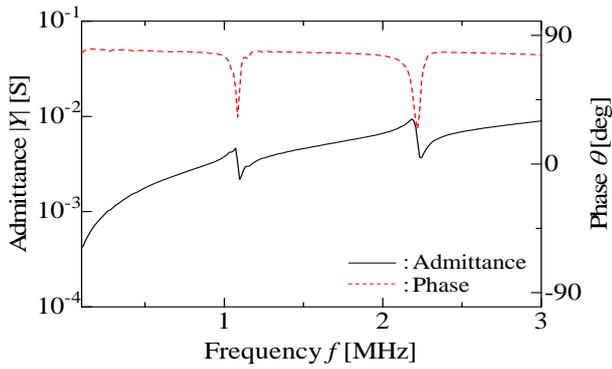


(b) 群速度

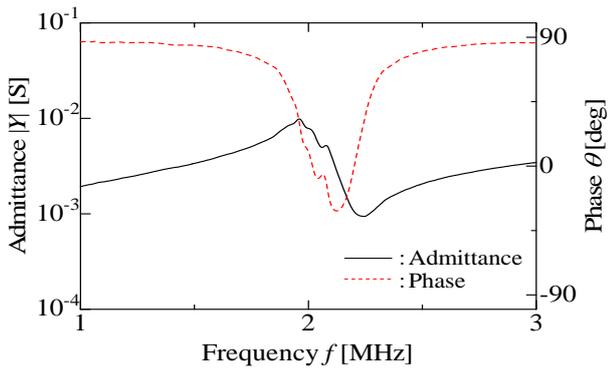


(a) 位相

図1 速度分散曲線



(a)傾斜分極型平面振動子



(b)受波用斜角探触子

図2 アドミタンス特性

#### 4. 研究成果

##### 4-1. 受波波形

本測定により得られた受波波形にパルスインバージョンを行った後の波形およびその周波数スペクトルを図4に示す。パルスインバージョンとは、正相と逆相の駆動による波を重ね合わせることで基本波とその奇数倍の周波数成分を持つ波を除去し、偶数次の高調波を抽出する方法である<sup>9)</sup>。なお、同図(b)は、パルスインバージョン前の基本波の振幅で正規化している。同図(a)より、伝搬時間が $40\ \mu\text{s}$ と $85\ \mu\text{s}$ のときにガイド波が発生していることが確認できる。しかし、同時に波形が分散していることも確認できる。従って、波形から伝搬モードを特定することは困難であるため、加算波形に対して伝搬モード判別を行う必要がある。

##### 4-2. 伝搬モード判別

本研究では、バースト波でガイド波を励起したことから、包絡線の速度である群速度によるモード判別が適切であると考えられる。そこで今回は、得られた波形に対して時間情報を残したままの周波数分布が得られるウェーブレット変換を用いて周波数-伝搬時間の分散曲線を用いて伝搬モード判別を行った。

伝搬モード判別結果を図6に示す。同図より、基本波および2次高調波共にS0モードLamb波の分散曲線上に分布が重なっている

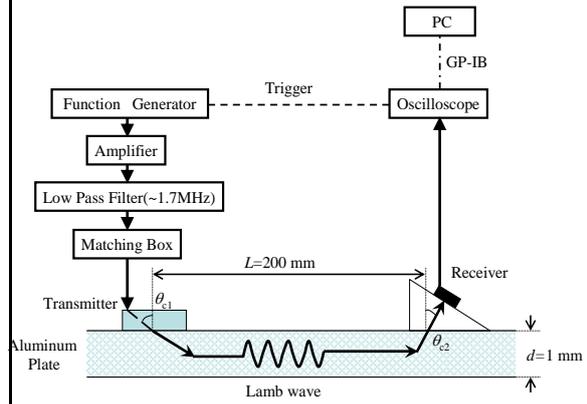
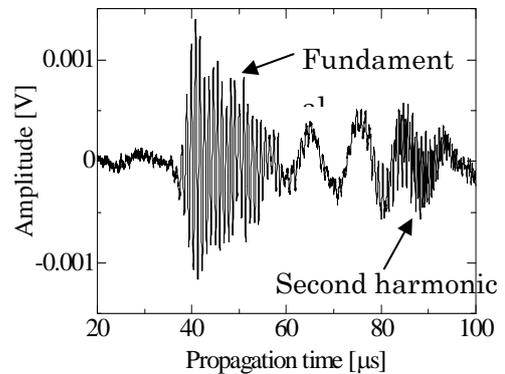


図3 測定システム

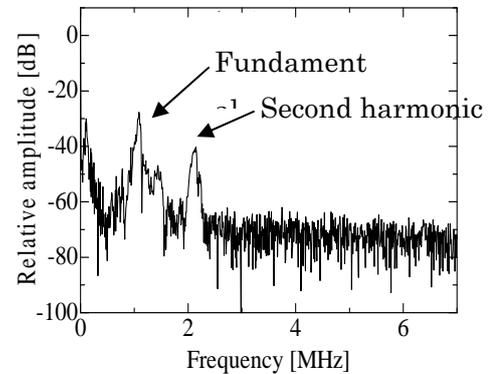
ことが確認できる。従って、得られた基本波と2次高調波の伝搬モードはS0モードLamb波と推定される。よって、アルミニウム平板中における有限振幅のS0モードLamb波の発生を確認した。

##### 4-3. 考察

図4(a)において、伝搬時間が $40\sim 60\ \mu\text{s}$ の範囲で波形が分布していることが確認できる。この原因として、fdを低周波領域に設定したことでLamb波の指向性が弱くなり、さらに本測定システムにおいて使用したアルミニウム平板の板幅が有限であるため、平板の左



(a) 加算



(b) 周波数スペク

図4 加算波形および周波数スペクトル

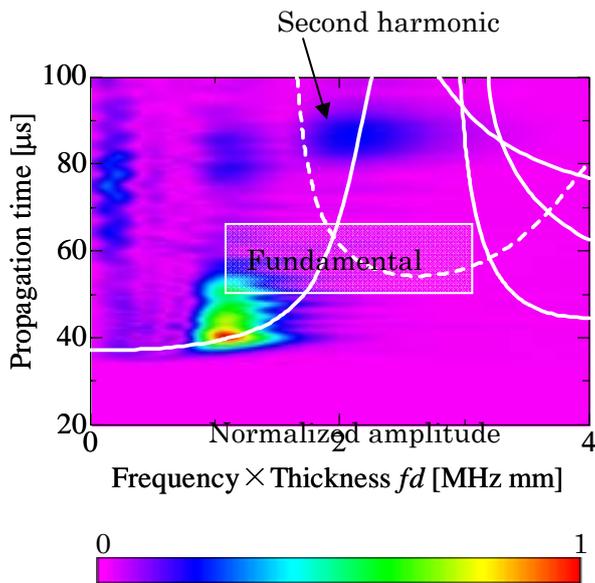


図5 伝搬モード判別結果

右の壁面からの反射波が受波されたことが考えられる 10)。

また図 4 (b) より、基本波がパルスインバージョンを行う前に比べ約 30 dB 減少し約 2 MHz の成分が現れていることが確認できる。この結果から、有限振幅の S0 モード Lamb 波の 2 次高調波の発生を明瞭に検出できたと考えられる。

むすび

本研究では、傾斜分極型平面振動子を用いた有限振幅ガイド波の発生実験を行った。その結果、S0 モード Lamb 波の 2 次高調波の発生をしたため、有限振幅の S0 モード Lamb 波の発生を確認できた。傾斜分極型平面振動子が 2 次高調波の発生に有用であることを示せた。今後は、傾斜分極型平面振動子を用いた有限振幅の Rayleigh 波や他の伝搬モードの Lamb 波の発生実験、有限振幅の S0 モード Lamb 波の欠陥検出への応用に関する検討などを行う予定である。

参考文献

- 1) 西野 秀郎：“非破壊計測のためのガイド波の基礎と展望”，非破壊検査 第 52 巻 12 号，pp. 654-661 (2003)
- 2) 杉元 幸郎，和高 修三：“超音波による非破壊検査技術”，日本音響学会誌 61 巻 11 号，pp. 671-676 (2005)
- 3) Masaya Watanabe, Morimasa Nishihira, and Kazuhiko Imano：“Detection of Defects on Reverse Side of Metal Plate Using MHz-Range Air-Coupled Lamb Wave”，Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 45, No. 5B, pp. 4565-4568 (2006)
- 4) Kunihoro Horie, Morimasa Nishihira, and Kazuhiko Imano：“Real-Time Measurement of

- Acoustic Properties of Coating Material Using Surface Wave and Plate Wave”，Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 44, No. 6B, pp. 4333-4335 (2005)
- 5) 奥村 毅，佐藤 雅美，川嶋 紘一郎：“漏洩レイリー波の非線形性を用いた閉じたき裂の深さ測定”，非破壊検査第 53 巻 3 号，pp. 159-164 (2004)
  - 6) 今野 和彦，武藤 梓：“有限振幅音波を用いた閉口クラックからの 2 次高調波の検出”，素材物性学会雑誌 第 20 巻 1 号，pp. 12-18 (2007)
  - 7) Makoto Fukuda, Morimasa Nishihira, and Kazuhiko Imano：“Real Time Extraction System Using Double-Layered Piezoelectric Transducer for Second-Harmonic Ultrasonic Pulse Waves”，Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 45, No. 5B, pp. 4556-4559 (2006)
  - 8) Kazuhiko Imano：“A tilted angle polarization type piezoelectric transducer for plate wave generation”，IEICE Electronics Express, Vol. 4, No. 10, pp. 340-343 (2007)
  - 9) Qingyu Ma, Yong Ma, Xiufen Gong, and Dong Zhang：“Improvement of Tissue Harmonic Imaging Using the Pulse-Inversion Technique”，Ultrasound in Med. & Biol., Vol. 31, No. 7, pp. 889-894 (2005)
  - 10) 林 高弘，田中 豪：“有限幅を持つ平板中のラム波伝播”，日本機学会論文集中 (A 編) 72 巻 717 号，pp. 743-748 (2006)

## 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 14 件)

1. 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
2. 今野和彦：“非線形超音波成分検出による固体接合部の一評価法”，素材物性学雑誌，vol. 23, no. 1, pp. 19-24, 2010
3. K. Imano：“Experimental study on the mode conversion of Lamb wave in a Metal plate of stepped thickness using optical detection”，Int. J. Soc. Mater. Eng. Resour., vol. 17, no. 2, pp. 201-204, 2010.
4. M. Fukuda and K. Imano：“A novel system using double-layered piezoelectric transducer for detecting sub-harmonic components of ultrasonic pulse waves”，Int. J. Soc. Mater. Eng. Resour., vol. 15, no. 2, pp. 42-45, 2008.
5. M. Fukuda, M. Nishihira and K. Imano：

“Novel detection system using double-layered piezoelectric transducer in same polarization direction for sub-harmonic components generated from plastic-deformed metal rod”, Jpn. J. Appl. Phys., vol. 47, no. 5, pp. 3899-3903, 2008.

6. K. Imano and M. Kondou: “Possibilities of nondestructive evaluation of a pipe using air-coupled ultrasonic wave in the MHz range”, IEICE Electronics Express, vol. 5, no. 17, pp. 668-671, 2008.

7. M. Fukuda and K. Imano: “Detection of sub-harmonic components generated from microbubbles in water using double-layered piezoelectric transducer with aligning polarization directions”, Acoust. Sci. & Tech., vol. 29, no. 6, pp. 399-402, 2008.

8. K. Sasaki and K. Imano: “Analysis of sound field profile formed by conical acoustic probe with pinhole”, IEICE Electronics Express, vol. 4, no. 2, pp. 72-76, 2007.

9. 今野和彦, 武藤梓: “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.

10. K. Imano: “A tilted angle polarization type piezoelectric transducer for plate wave generation”, IEICE Electronics Express, vol. 4, no. 10, pp. 340-343, 2007.

11. K. Saito, M. Nishihira and K. Imano: “Experimental study on intermediate layer made of (0-3) composite materials for use in air-coupled ultrasonic transducers”, Jpn. J. Appl. Phys., vol. 46, no. 7B, pp. 4479-4482, 2007.

12. 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.

13. K. Sasaki, M. Nishihira and K. Imano: “Precise displacement measurements using phase information of 40 kHz ultrasonic waves in pinhole-based air-coupled ultrasonic system”, Jpn. J. Appl. Phys., vol. 46, no. 7B, pp. 4545-4548, 2007.

14. M. Fukuda, M. Nishihira and K. Imano: “Real-time ultrasonic imaging of several order harmonics using double-layered piezoelectric transducer”, Electron. Lett., vol. 43, no. 22, pp. 1237-1239, 2007.

[学会発表] (計 22 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.
2. 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.
3. 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
4. 佐々木澄, 宮川佳久, 今野和彦: “不均一厚さを有する圧電振動子を用いた調波検出”, 日本素材物性学会平成 22 年度(第 20 回)年会講演要旨集, pp. 127-130, 2010.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 石塚直樹, 今野和彦: “固体の接合境界面で生じる非線形超音波の検出”, 日本素材物性学会平成 21 年度(第 19 回)年会講演要旨集, pp. 112-115, 2009.
10. 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.
11. 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.
12. 高村周平, 今野和彦: “平板中のガイド波の伝搬解析”, 計測自動制御学会東北支部第 251 回研究集会, 資料番号 251-10, 2009.
13. 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.
14. M. Fukuda, K. Yoshida and K. 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.

15. 齋木孔明，西平守正，今野和彦：“陥凹部を有する凹面型圧電振動子を用いた第 2 次高調波の検出”，電子情報通信学会技術研究報告，US2008-7, pp. 33-37, 2008.

16. 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.

17. 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.

18. 工藤良太，今野和彦：“光学的方法を用いた Lamb 波の金属板表面の振動速度測定”，日本素材物性学会平成 20 年度(第 18 回)年会講演要旨集，pp. 7-10, 2008.

19. 佐々木孝一朗，今野和彦：“傾斜分極型平面振動子を用いた有限振幅のガイド波の発生実験”，日本素材物性学会平成 20 年度(第 18 回)年会講演要旨集，pp. 11-14, 2008.

高村周平，今野和彦：“FDTD 法を用いた薄板中の弾性波動伝搬解析”，計測自動制御学会東北支部第 244 回研究集会，資料番号 244-5, 2008.

19. 川上淳平，今野和彦：“圧電振動子-固体媒質接着部における接触型非線形超音波に関する検討”，計測自動制御学会東北支部第 244 回研究集会，資料番号 244-6, 2008.

20. 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.

21. 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.

22. R. Kudo and K. Imano：“Optical observation of Lamb wave in metal plate having a stepped thickness”，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. 55-56, 2008.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 2 件)

1. 名称：イメージング方法およびイメージング装置

発明者：今野和彦

権利者：秋田大学

種類：特許

番号：特願 2010-274143

出願年月日：2010-12-8

国内外の別：国内

2. 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：秋田大学

種類：特許

番号：特願 2010-197273

出願年月日：2010-9-9

国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

今野 和彦 (IMANO KAZUHIKO)

秋田大学・工学資源学研究所・教授

研究者番号：60125705

(2) 研究分担者

( )

研究者番号：

(3) 連携研究者

( )

研究者番号：