

令和元年6月6日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04291

研究課題名(和文) レーザーパルス加振と偏光高速度カメラによる透明高分子材料の非接触非破壊損傷検知

研究課題名(英文) Non-destructive and non-contact damage detection in transparent high polymer materials based on laser excitation and high-speed polarization camera

研究代表者

細矢 直基 (Hosoya, Naoki)

芝浦工業大学・工学部・教授

研究者番号：40344957

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：Nd:YAGパルスレーザーを用いることでレーザー誘起プラズマにより衝撃波を生成し、これを透明体材料に対する非接触非破壊の加振力として用いる。そして、透明体材料に生成されたLamb波を偏光高速度カメラにより計測する。本実験では、ポリカーボネート平板にレーザー誘起プラズマ衝撃波によるインパルス入力を作用させることで、Lamb波を生成した。偏光高速度カメラにより計測されたLamb波の位相速度を調べることで、これが0次のSモードであることを示した。また、このLamb波の伝播を観察することで、ポリカーボネート平板の表面につけられた数十マイクロメートルスケールのスクラッチを、非接触非破壊で検知した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

透明体材料は、タブレット端末やスマートフォンなどの普及に伴い、その需要が近年拡大している。大量に高品質なものを提供するためには、数十マイクロメートルスケールの小さな損傷を迅速に検知し、品質を評価することが重要となる。本手法を用いることで、従来では困難とされてきた、透明体材料の表面につけられた数十マイクロメートルスケールのスクラッチを、数十マイクロ秒の短時間で検知できるようになった。また、本研究を応用することで、従来の機械的な引張試験を実施することなく、非常にやわらかい透明体材料(例えば、ゲル)のヤング率、ポアソン比を非接触非破壊で求めることができるようになった。

研究成果の概要(英文)：An Nd:YAG pulsed laser with a nanosecond order is used to generate a shock wave by laser induced plasma, which is subsequently used as a non-contact, non-destructive excitation force for transparent materials. Then, a polarization high-speed camera measures the generated Lamb wave. In this experiment, an impulse input is generated via a laser-induced plasma shock wave and the phase velocity of the generated Lamb wave in the polycarbonate plate is measured by a polarization high-speed camera. We found that this Lamb wave was in the S0 mode. Observing its propagation can detect scratches on the order of several dozen micrometer on the surface of a transparent plate in a non-contact, non-destructive manner.

研究分野：機械力学

キーワード：レーザー誘起プラズマ 複屈折 衝撃波 弾性波 透明体材料 損傷検知 機械的性質 非接触

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

スマートフォンやタブレット端末の液晶ディスプレイに使用される位相差フィルム、液体レンズ（液体光学素子）に用いられる光学材料など、複屈折性を有する光学用の透明な高分子材料（以下、透明体材料と呼ぶ）が広く普及し、その需要が高まっている。より高品質な透明体材料を低価格で提供するためには、これらに対する損傷や欠陥（以下、損傷と呼ぶ）を製造工程において検知することは非常に重要である。透明体材料の損傷としては、クラック、ピンホール、スクラッチ（ひっかき傷）、デント（くぼみ）などがある。例えば、フィルムの損傷は、連続的な製造工程において、ラインセンサカメラ（線情報を計測）やエリアセンサカメラ（面情報を計測）などにより検知する手法が実用化されている。しかし、これらのカメラでは、およそ $50\ \mu\text{m}$ 以下の損傷は検知できないため、次世代の情報端末ディスプレイ用フィルムの損傷検知においては、これ以上の精度が求められることから、従来とは異なる手法で損傷検知できるようにしなければならない。

2. 研究の目的

本研究では、レーザー誘起プラズマ（Laser-Induced Plasma: LIP）を用いたレーザーパルス加振により、透明体材料に非接触非破壊で弾性波（応力波）を生成し、この弾性波が損傷付近を伝播する際の様子を偏光高速カメラによる複屈折計測に基づき可視化する。波動伝播を観察することで、透明体材料の数十 μm 程度の損傷を非接触非破壊で検知する。

3. 研究の方法

図1に透明体材料に伝播した Lamb 波の計測システムを示す。本実験では、透明体材料として大きさ $130\ \text{mm} \times 130\ \text{mm}$ 、板厚 $5\ \text{mm}$ のポリカーボネート平板を供試体として用いた。

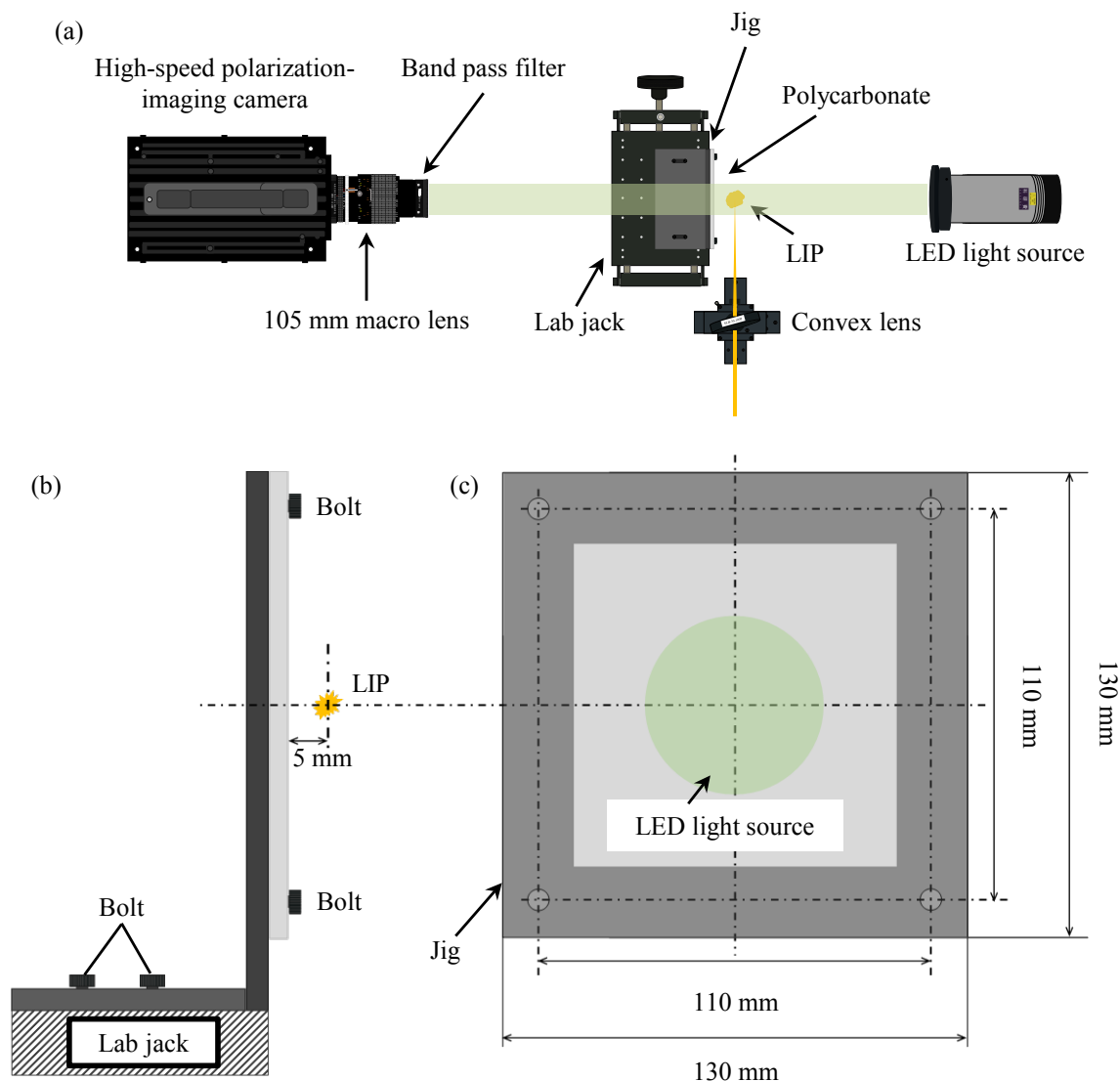


図1 LIP 衝撃波によるインパルス加振を用いた S_0 モードの Lamb 波の生成及び可視化システム。

図1(a)に示すように、光学定盤上に設置した Nd:YAG パルスレーザー(Continuum inc., surelite III-10: wavelength, 1064 nm)からのレーザー光を、平凸レンズで集光することで、ポリカーボネ

ートの平板上の加振点近傍で LIP 衝撃波を生成した。そして、LIP 衝撃波によるインパルス加振力によりポリカーボネートに Lamb 波を非接触非破壊で生成した。レーザーパルスエネルギーは 940 mJ とした。本研究で生成される Lamb 波に含まれる周波数成分はおよそ 400 kHz となることから、Lamb 波の S モードの 0 次が計測対象となる。図 1(b)に示すように、ポリカーボネート平板と LIP 衝撃波との位置(以下、standoff distance と呼ぶ)は、5 mm とした。また、供試体は固定治具に M6 の 4 本のボルトで固定した。

図 1(c)に供試体に生成された Lamb 波の撮影領域を示す。図 1(c)に示すように、供試体中央部に LIP 衝撃波を生成し、その点を中心に、およそ 50 mm × 50 mm を撮影領域とした。撮影条件は、露光時間を 1 μ s、ピクセルサイズを 1,024 × 1,024 pixel (複屈折位相差計測時のピクセルサイズを 512 × 512 pixel)とした。撮影における平均化回数を 30 回とした。光源は、緑色 LED とした。Lamb 波は、偏光高速カメラ(Photron Limited, CRYSTA PI-1P)により複屈折位相差として撮影される。

4. 研究成果

図 2 に、LIP 衝撃波によるインパルス加振力が作用したおよそ 7 μ s, 9 μ s, 11 μ s, 13 μ s に計測された Lamb 波をそれぞれ示す。複屈折位相差は、Lamb 波の相対的な振幅の大きさに対応している。図 2 を見ると、時間経過と共に円状に広がることが確認できる。また、本システムにより計測された Lamb 波の位相速度は、それぞれ、(i) 831 m/s, (ii) 962 m/s, (iii) 1386 m/s であった。

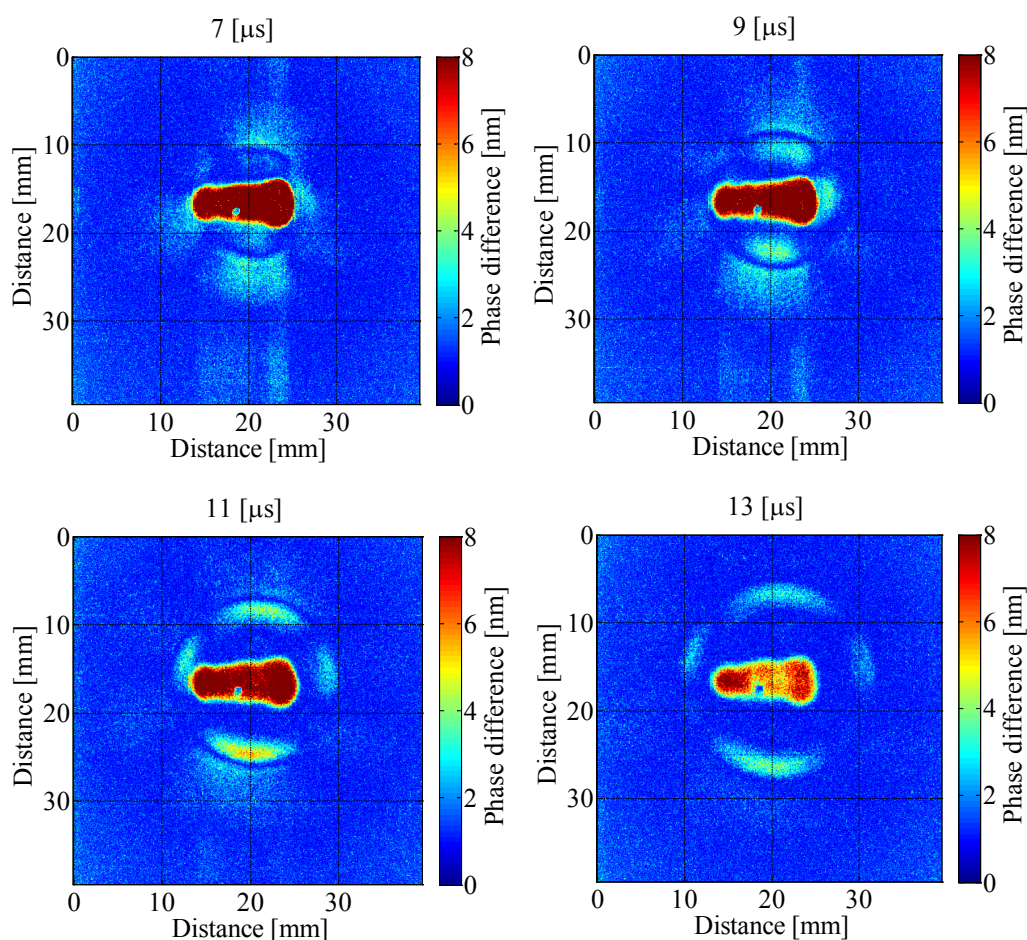


図 2 可視化された S₀モードの Lamb 波

本システムを用いることで、ポリカーボネート平板の表面の数十 μ m スケールのスクラッチを検知できることを示す。本実験では、ポリカーボネート平板の板厚を 5 mm とした。図 3 に人工的なスクラッチを顕微鏡(VHX-6000)で撮影した画像を示す。このスクラッチは、LIP 中心からおよそ 7 mm 離れた位置にある。

図 4 に LIP 衝撃波生成後の 5 μ s から 14 μ s の 10 μ s 間の S₀モードの Lamb 波の様子を示している。図 4(a)が損傷無し、図 4(b)がスクラッチがある場合をそれぞれ示している。図 4(a)と(b)の 6 μ s, 7 μ s, 10 μ s, 11 μ s を比較すると、S₀モードの Lamb 波が伝播する際に、複屈折位相差が小さい領域(丸の部分)が存在することが確認できる。これは、スクラッチの位置と一致していることから、LIP 衝撃波により S₀モードの Lamb 波を生成し、この伝播の様子を観察すれば、数十 μ m 程度のひっかき傷を検知できる。

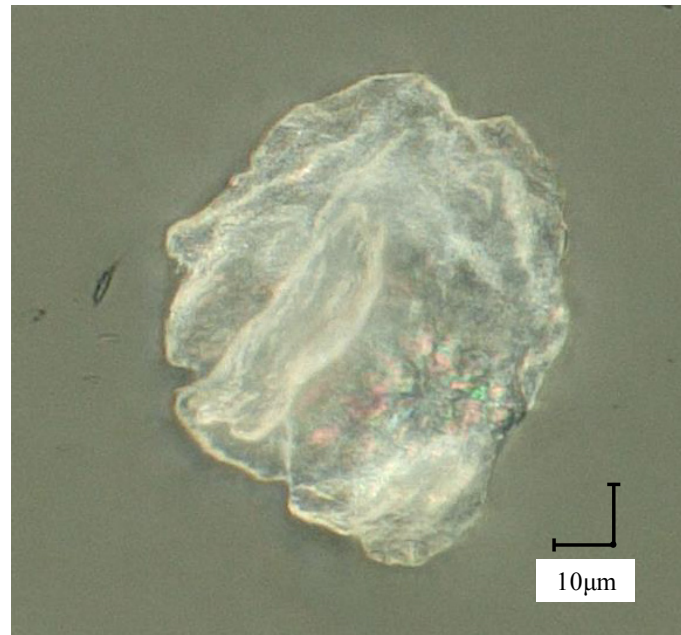
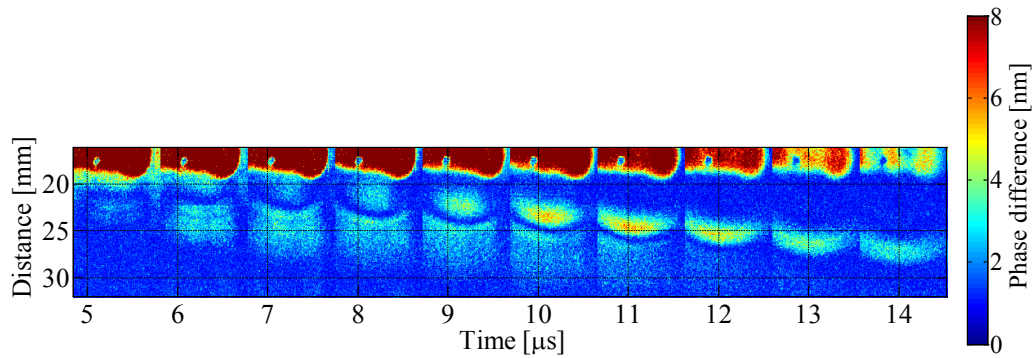
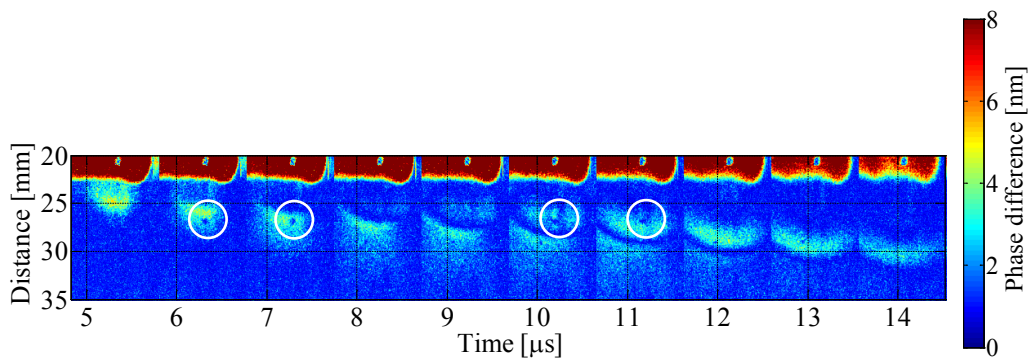


図3 ポリカーボネート平板上の人工的なスクラッチ



(a) 損傷前



(b) 損傷後

図4 損傷検知結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 16 件)

- [1] [Naoki Hosoya](#), Shota Ozawa and Itsuro Kajiwara, Frequency response function measurements of rotational degrees of freedom using a non-contact moment excitation based on nanosecond laser ablation, *Journal of Sound and Vibration* 456, 2019, 239–253. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2019.05.024>
- [2] Itsuro Kajiwara, Shigeki Kitabatake and [Naoki Hosoya](#), and Shingo Maeda, Design of dielectric elastomer actuators for vibration control at high frequencies, *International Journal of Mechanical Sciences* 157–158, 2019, 849–857. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.05.019>
- [3] [Naoki Hosoya](#), Hiroaki Masuda and Shingo Maeda, Balloon dielectric elastomer actuator speaker, *Applied Acoustic* 148, 2019, 238–245. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.12.032>

- [4] Ayato Minaminosono, Hiroki Shigemune, Yuto Okuno, Tsubasa Katsumata, Naoki Hosoya and Shingo Maeda, Deformable motor driven by dielectric elastomer actuators and flexible mechanisms, *Frontiers in Robotics and AI* 6(1), 2019. <https://doi.org/10.3389/frobt.2019.00001>
- [5] Naoki Hosoya, Takahiko Hosokawa, Itsuro Kajiwara, Shinji Hashimura and Feblil Huda, Evaluation of the clamping force of bolted joints using local mode characteristics of a bolt head, *Journal of Nondestructive Evaluation* 37(4), 2018, 75. <https://doi.org/10.1007/s10921-018-0528-7>
- [6] Hiroki Shigemune, Shigeki Sugano, Jun Nishitani, Masayuki Yamauchi, Naoki Hosoya, Shuji Hashimoto and Shingo Maeda, Dielectric elastomer actuators with carbon nanotube electrodes painted with a soft brush, *Actuators*, 7(51), 2018. <https://doi.org/10.3390/act7030051>
- [7] Itsuro Kajiwara, Ryosuke Akita and Naoki Hosoya, Damage detection in pipes based on acoustic excitations using laser-induced plasma, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 111, 2018, 570–579. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.04.004>
- [8] Naoki Hosoya, Atsushi Yoshinaga, Atsushi Kanda and Itsuro Kajiwara, Non-contact and non-destructive Lamb wave generation using laser-induced plasma shock wave, *International Journal of Mechanical Sciences*, 140, 2018, 486–492. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.03.023>
- [9] Naoki Hosoya, Itsuro Kajiwara, Koh Umenai and Shingo Maeda, Dynamic characterizations of underwater structures using noncontact vibration tests based on nanosecond laser ablation in water: evaluation of passive vibration suppression with damping materials, *Journal of Vibration and Control*, 24(16), 2018, 3714–3725. <https://doi.org/10.1177/1077546317710158>
- [10] Naoki Hosoya, Ryosuke Umino, Atsushi Kanda, Itsuro Kajiwara and Atsushi Yoshinaga, Lamb wave generation using nanosecond laser ablation to detect damage, *Journal of Vibration and Control*, 24(24), 2018, 5842–5853. <https://doi.org/10.1177/1077546316687904>
- [11] Yuelin Zhang, Toshiki Hiruta, Itsuro Kajiwara and Naoki Hosoya, Active vibration suppression of membrane structures and evaluation with a non-contact laser excitation vibration test, *Journal of Vibration and Control*, 23(10), 2017, 1681–1692. <https://doi.org/10.1177/1077546315599302>
- [12] Naoki Hosoya, Michiru Mishima, Itsuro Kajiwara and Shingo Maeda, Non-destructive firmness assessment of apples using a non-contact laser excitation system based on a laser-induced plasma shock wave, *Postharvest Biology and Technology*, 128, 2017, 11–17. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2017.01.014>
- [13] Naoki Hosoya, Yoshiki Terashima, Koh Umenai and Shingo Maeda, High spatial and temporal resolution measurement of mechanical properties in hydrogels by non-contact laser excitation, *AIP Advances*, 6, 2016, 095223-1–095223-8. <https://doi.org/10.1063/1.4964305>
- [14] Hiroki Shigemune, Shingo Maeda, Yusuke Hara, Naoki Hosoya and Shuji Hashimoto, Origami robot: a self-folding paper robot with an electrothermal actuator created by printing, *IEEE/ASME Transaction on Mechatronics*, 21(6), 2016, 2746–2754 <https://doi.org/10.1109/TMECH.2016.2593912>
- [15] Naoki Hosoya, Itsuro Kajiwara and Koh Umenai, Dynamic characterizations of underwater structures using non-contact vibration test based on nanosecond laser ablation in water: investigation of cavitation bubbles by visualizing shockwaves using the Schlieren method, *Journal of Vibration and Control*, 22(17), 2016, 3649–3658. <https://doi.org/10.1177/1077546314564693>
- [16] Naoki Hosoya, Masaki Nagata, Itsuro Kajiwara and Ryosuke Umino, Nano-second laser-induced plasma shock wave in air for non-contact vibration tests, *Experimental Mechanics*, 56, 2016, 1305–1311. <https://doi.org/10.1007/s11340-016-0167-9>
- [招待講演] (計 1 件)
- [1] <Invited Speaker>Naoki Hosoya, Measurements on soft materials, Fluid-driven soft robots: a collaborative workshop, The first IEEE-RAS International Conference on Soft Robotics, Livorno, Italy, April 24-28, 2018.
- [学会発表] (計 13 件)
- [1] Tsubasa Katsumata, Naoki Hosoya, Atsushi Kanda, Itsuro Kajiwara and Takashi Onuma, Visualization of Lamb waves propagating in transparent materials using high-speed camera, The 5th Asia-Pacific Conference on Engineering and Applied Sciences, (APCEAS-0120), 2018, Sydney, Australia.
- [2] Shanshan Cao, Itsuro Kajiwara, Xisheng Lia and Naoki Hosoya, Structural health monitoring based on laser excitation vibration test and wavelet transform, 2017, Eleventh International Conference on Sensing Technology (ICST), 414–419, Macquarie University, Sydney, Australia.
- [3] Mayank Pratap Singh, Itsuro Kajiwara and Naoki Hosoya, Bolt Loosening Diagnosis by Measuring Vibration Responses Excited by Laser Induced Plasma, The 17th Asian Pacific Vibration Conference, 2017, #124, Nanjing, P R China.
- [4] Naoki Hosoya, Atsushi Yoshinaga, Atsushi Kanda, Ryosuke Umino and Itsuro Kajiwara, Excitation system based on laser-induced plasma to generate Lamb wave, International Conference on Engineering Vibration (ICoEV2017), 2017, Sofia, Bulgaria.
- [5] Michiru Mishima, Naoki Hosoya, Itsuro Kajiwara and Shingo Maeda, Quality assessment of apples

based on modal analysis using laser-induced plasma shock wave, Proceedings of ISMA 2016 - International Conference on Noise and Vibration Engineering and USD2016 - International Conference on Uncertainty in Structural Dynamics, CD-ROM (2279-2285), 2016, Leuven, Belgium.

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 1 件）

名称：振動特性計測用の発射装置、加振力入力具、振動特性計測システム及び振動特性計測方法

発明者：細矢直基，梶原逸朗

権利者：芝浦工業大学，北海道大学

種類：特許

番号：特願 2018-125879

出願年：平成 30 年 7 月 2 日

国内外の別：国内

○取得状況（計 3 件）

名称：METHOD FOR MEASUREMENT OF VIBRATION PROPERTY OF STRUCTURE, AND VIBRATION PROPERTY MEASUREMENT DEVICE

発明者：Itsuro Kajiwara and Naoki Hosoya

権利者：Hokkaido University and Shibaura Institute of Technology

種類：Patent

番号：US 9,291,604 B2

取得年：2016.5.22

国内外の別：国外（アメリカ）

名称：VERFAHREN ZUR MESSUNG DER SCHWINGUNGSEIGENSCHAFTEN EINER STRUKTUR SOWIE VORRICHTUNG ZUR MESSUNG VON SCHWINGUNGSEIGENSCHAFTEN

発明者：Itsuro Kajiwara and Naoki Hosoya

権利者：Hokkaido University and Shibaura Institute of Technology

種類：Patent

番号：11795411.5

取得年：2019.3.27

国内外の別：国外（ドイツ）

名称：PROCÉDÉ DE MESURE D'UNE PROPRIÉTÉ VIBRATOIRE D'UNE STRUCTURE ET DISPOSITIF DE MESURE DE PROPRIÉTÉ VIBRATOIRE

発明者：Itsuro Kajiwara and Naoki Hosoya

権利者：Hokkaido University and Shibaura Institute of Technology

種類：Patent

番号：11795411.5

取得年：2019.3.27

国内外の別：国外（フランス）

〔その他〕

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：前田真吾

ローマ字氏名：Shingo Maeda

所属研究機関名：芝浦工業大学

部局名：工学部

職名：准教授

研究者番号（8 桁）：40424808

(2)連携研究者

連携研究者氏名：神田淳

ローマ字氏名：Atsushi Kanda

所属研究機関名：国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構

部局名：航空技術部門

職名：主任研究員

研究者番号（8 桁）：40358693

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。