

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 1 日現在

機関番号：32619

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26630080

研究課題名(和文) 航空機構造の広域損傷検知のためのレーザー誘起プラズマによるLamb波の生成

研究課題名(英文) Lamb wave generation to detect damage for a wide area of an aircraft using laser-induced plasma

研究代表者

細矢 直基 (Hosoya, Naoki)

芝浦工業大学・工学部・准教授

研究者番号：40344957

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、航空機のような大型構造物に対する広域損傷検知を実現することを目指し、レーザーアブレーション(laser ablation:LA)によるインパルス加振力を用いてLamb波を生成する損傷検知システムを構築した。LAにより生成されるLamb波は、数百kHz程度の広周波数帯域の成分を含むことがわかった。LAにより生成されるLamb波の振幅は、従来法による振幅に比べ数百倍程度と大きく、計測時の平均化回数を大幅に低減できるので、短時間で計測が実現できる。本手法を、貫通亀裂を損傷と想定した損傷検知に適用したところ、Lamb波の伝播を観察すれば損傷を検知できることを示した。

研究成果の概要(英文)：This study aims to realize a non-contact damage detection system for large objects such as an aircraft. Irradiating the target surface with a high-power Nd:YAG pulse laser induces LA and generates Lamb waves. Spectrum analyses on the Lamb waves generated by LA reveal that the Lamb waves contain a broad range of frequency components up to several hundred kHz. The LA-generated Lamb waves have amplitudes several hundred times larger than those generated by conventional laser ultrasonic Lamb waves, improving the SN ratio. The improved SN ratio reduces the required number of measurements, resulting in a shorter measurement time. Thus, the proposed method can be applied to detect damage on a large area of a large structure. The LA-generated Lamb waves were applied to detect a through crack, which was artificially made to simulate damage. Damage causes the reflection and amplitude of the Lamb wave to change, demonstrating the effectiveness of LA-generated Lamb waves to detect damage.

研究分野：機械力学

キーワード：損傷検知 航空機構造 Lamb波 レーザー誘起プラズマ レーザーアブレーション 衝撃波

### 1. 研究開始当初の背景

Lamb 波は、減衰が小さいため伝播距離が長いという特徴を有することから、これを用いた損傷検知に関するいくつかの研究が行われている。従来、PZT 等の接触式デバイスにより単一周波数の Lamb 波[1]が生成されているが、Lamb 波を非接触式デバイスにより生成することができれば、航空機のような大型構造物に対する広域損傷検知を短時間で実現できる。非接触式デバイスにより Lamb 波を生成する手法として、レーザー熱弾性による手法[2]が検討されている。これは対象構造物にパルスレーザーを照射することで、レーザー被照射部の温度を急激に上昇させた際に生じる熱弾性波のことをいう。しかし、レーザー熱弾性により生成された Lamb 波の振幅値が数百 pm と非常に小さく、計測における SN 比を改善するために数百回程度の平均化回数が必要であるため、航空機のような大型構造物に対する広域損傷検知を短時間で実現することは難しい。また、この方法は一部構造で実証された例はあるものの研究段階であり、検知できる損傷の種類や程度も明らかにされていない。従来の接触式デバイスと同程度の振幅(数十 nm 程度)を有する Lamb 波を、非接触式デバイスであるパルスレーザーにより生成できれば、より少ない平均化回数で計測における SN 比を改善することから、大型構造物の広域損傷検知の時間短縮に大きく貢献することが期待できる。

本研究では、レーザー誘起プラズマ(laser-induced plasma:LIP)により生成された衝撃波を用いて、非接触非破壊で対象構造物に Lamb 波を生成することを最終目的とする。研究の第 1 段階として、レーザーアブレーション(laser ablation: LA)を用いた Lamb 波の生成を検討し、損傷検知における本手法の適用可能性を調べる。LA とは、高出力パルスレーザーを固体表面に照射することで、プラズマが生成され、固体表面より高温・高密度なプラズマプルーム(原子、電子、イオンなど)が放出されることをいう。固体より放射されたプラズマプルームの運動量(力積)が、レーザー被照射物に対する加振力となる。LA は、振動試験[3]、ボルトの緩み検知[4]、音響試験など様々な分野に用いられている。振動試験[3]においては、LA を用いることで理想的なインパルス加振力を対象構造に作用させることができ、数十 kHz 程度の高周波数帯域までの周波数成分を含むことが明らかにされている。LA によるインパルス加振を用いることで、非接触で広帯域な周波数成分を含む振幅の大きな Lamb 波を生成できることから、従来の損傷検知手法に対して、利点を有する。本手法では、対象構造物のレーザー被照射部に LA によるサブミリメートルオーダーの損傷を有するため、これを実用化するためには、様々な工夫が必要となる。しかし、本研究は、LA により非接触で生成された広帯域な周波数成分を含む振幅の大きな Lamb

波を用いることで、検知できる損傷の種類、損傷の程度などを詳細に調査する上で学術的に大きな意義がある。

### 2. 研究の目的

本研究では、レーザーフルエンスを LA の閾値である  $10^{12}$ - $10^{14}$  W/m<sup>2</sup>以上とするために、レーザービームを平凸レンズで集光し、対象構造物の LA 発生点に照射する。LA により生成される Lamb 波の伝播速度を理論的に得られる伝播速度と比較・評価することで、本手法の有効性を示す。また、LA による Lamb 波を人工的に模擬した貫通亀裂を付与したジュラルミン板を対象とした損傷検知に適用することで、本手法の損傷検知手法に対する適用可能性を示す。

### 3. 研究の方法

#### 3. 1. LA による Lamb 波生成の原理

##### 3. 1. 1. LA 加振

図 1 に LA によりインパルス加振力が対象構造物に作用する原理を示す。固体表面上にレーザービームを照射し、その際のレーザーフルエンスが LA の閾値  $10^{12}$ - $10^{14}$  W/m<sup>2</sup>に達すると、固体表面温度は急激に上昇し、原子、分子およびそれらのイオン等が爆発的に放出され、高温・高密度のプラズマプルームが形成される。固体表面上から質量  $\Delta m$  が速度  $v$  で放出されれば、その運動量は  $\Delta m v$  で表すことができ、これが力積となる。プラズマプルームはレーザービームが照射された固体表面の接平面に対して放射状に放射されるため、力積の方向は固体表面の接平面に対して法線方向成分のみとなる。この力積が構造物に対して加振力となる[3]。

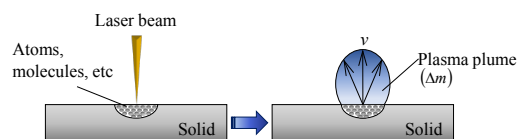


図 1 レーザーアブレーション加振

##### 3. 1. 2. Lamb 波

Lamb 波は薄板構造物中を伝播するガイド波の一種であり、薄板構造物の面内方向にほとんど減衰することなく長距離伝播することができる。Lamb 波は対称モード(Symmetric mode)と非対称モード(Anti-symmetric mode)があり、それぞれ 0 次モードから高次モードが存在する[5]。さらに、励起される Lamb 波の周波数と薄板構造物の板厚の積が小さい領域では 0 次モードのみが励起される[5]。薄板構造物中を伝播する Lamb 波は、損傷部での反射や減衰等により伝播特性が変化するため、これを観測することにより損傷部位が特定できる。本手法では、LA により生成されたインパルス加振力を用いるため、広帯域な周波数成分を含む Lamb 波を同時に生成する。

### 3. 2. Lamb 波の生成

LA により非接触で Lamb 波を生成するシステムを構築する。そして、LA により生成された広帯域の周波数成分を含む Lamb 波に対して、バンドパスフィルタリングして得られた各周波数帯域の Lamb 波の伝播速度と理論的に得られた各周波数帯域の Lamb 波の伝播速度[5]とを比較・評価することで、本手法の有効性を示す。

#### 3. 2. 1. LA による Lamb 波生成システム

図 2 に、LA を用いた Lamb 波の生成システムを示す。本システムでは Nd: YAG パルスレーザーを用いる。Nd: YAG パルスレーザーから照射されたレーザー光を平凸レンズにより対象構造物上の加振点で集光することで LA を発生させる。

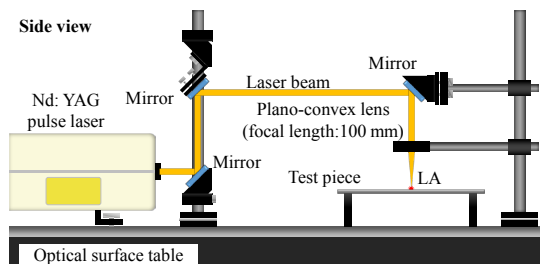


図 2 LA による非接触加振システム

#### 3. 2. 2. Lamb 波の計測方法

図 3 にテストピース上の加振点及び計測点を示す。レーザービームを平凸レンズで集光しテストピース上の加振点に照射することで、LA を発生させる。レーザーパルスエネルギーは 500 mJ とした。テストピースは一辺 400 mm、厚さ 2 mm の正方形のジュラルミン平板とする。計測領域は、LA による加振点から 50 mm 離れた 100 mm × 100 mm とする。図 3 に示す計測領域に対して 100 mm を 2 mm 間隔でスキャニングレーザードップラー振動計(laser Doppler vibrometer: LDV)により計測するため、計測点数は 2601 (51 × 51)点となる。計測におけるサンプリング周波数、サンプリング点数、バンドパスフィルタの周波数、平均化回数は、それぞれ 2.56 MHz, 2048, 0–400 kHz, 10 回とした。LDV により計測された速度を積分することで、変位として計測した。

### 4. 研究成果

#### 4. 1. Lamb 波の計測結果

図 4 に、図 3 における計測領域で最も加振点に近い計測点において計測された Lamb 波の時刻歴波形を示す。また、図 5 は、80 μs 後の Lamb 波の伝播を示している。図 5 のような波動伝播を解析することで、本手法により生成された Lamb 波は、伝播速度が数 km/s 程度であり、広帯域な周波数成分を含み速度分散性を有することがわかった。また、図 4 (170 μs 付近)における S で示したパルスは、

伝播速度がおよそ 378 m/s であることから、テストピース上を伝播している LA により生成された衝撃波であることがわかる。

上述より、図 4 における 150 μs 付近まで(図 4 の L の部分)が Lamb 波であると想定し、この部分のスペクトル解析を行った。図 6 に、図 4 の L に対応するパワースペクトルを示す。図 6 より、本手法より生成された Lamb 波の周波数成分は、400kHz 程度まで含まれており、これは計測におけるバンドパスフィルタの周波数と一致する。

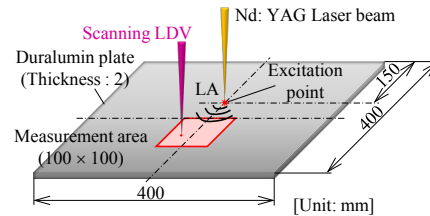


図 3 計測条件

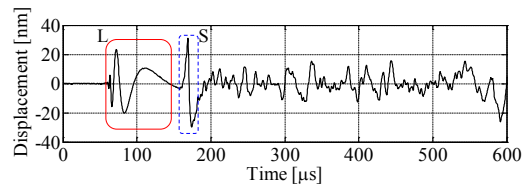


図 4 Lamb 波の時刻歴波形

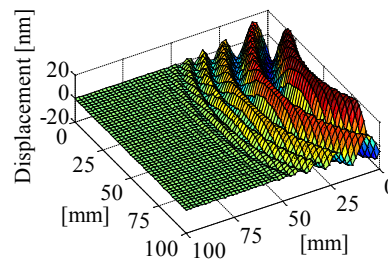


図 5 Lamb 波の伝播 (損傷無し)

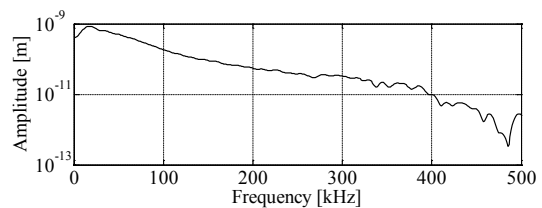


図 6 Lamb 波のフーリエスペクトル

#### 4. 2. 各周波数域における Lamb 波の伝播速度

広帯域な周波数成分を含む LA により生成された Lamb 波の伝播速度を調べるため、計測された Lamb 波に対してデジタルフィルタを用いて各周波数帯域にフィルタリングし、本手法および理論的に得られた各周波数帯域の伝播速度を比較する。

図 7 は、理論的に得られた Lamb 波の分散曲線[5]を示しており、比較のため本手法から得られた波動伝播速度を黒丸で重ねて示している。図 7 より、本手法により得られた Lamb 波の伝播速度は、理論値と比べ最大で 4%程度の誤差であることがわかる。

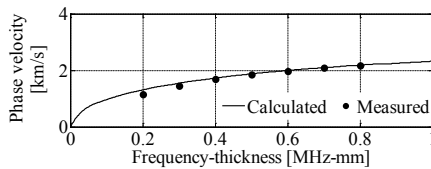


図7 Lamb波の分散曲線（位相速度）

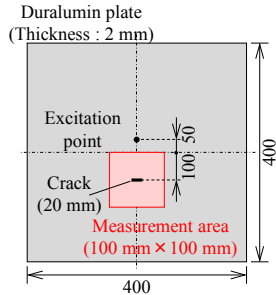


図8 貫通亀裂

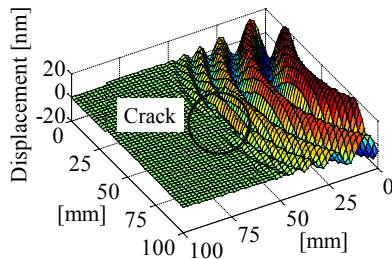


図9 Lamb波の伝播（損傷有り）

#### 4. 3. 損傷検知の実現

広帯域の周波数成分を含む Lamb 波の伝播の様子を観察することで、貫通亀裂を有するジュラルミン平板をテストピースとした損傷検知を検討する。図8に、テストピースにおける損傷位置を示す。テストピースの材質や大きさ、LAによる加振条件、計測領域、計測条件は4. 1. 節と同様にした。図8に示す位置に幅0.2 mm、長さ20 mmの人工貫通亀裂を損傷として設けた。

図9に、損傷がある場合における80  $\mu$ s後のLamb波の伝播を示している。損傷部において、Lamb波が大きく変化していることがわかる。これより、貫通亀裂に対しては、LAにより生成された広帯域な周波数成分を含むLamb波をそのまま用いることで、検知可能であることがわかる。今後、本手法により生成されたLamb波が広帯域な周波数成分を含むという特徴を活用し、損傷の種類や程度の検知に用いるLamb波の周波数成分を調べたり、LAによる対象構造の損傷を防ぐ手段を検討したりしていく。

#### 4. 4. まとめ

本研究では、航空機のような大型構造物に対する広域損傷検知を実現することを目指し、高出力Nd:YAGパルスレーザーを対象構造物表面に照射しLAを発生させ、LAによるインパルス加振力を用いてLamb波を生成し、

応答をスキニングLDVで計測することで、入出力を非接触とした損傷検知システムを構築した。

LAにより生成されるLamb波に対してスペクトル解析を行ったところ、このLamb波は数百kHz程度の広周波数帯域の成分を含んでいることを明らかにした。また、このLamb波の各周波数帯域における伝播速度と理論的に得られた伝播速度とを比較したところ、最大で約4%の誤差であることがわかった。したがって、本システムを用いたLAにより生成されたLamb波は有効である。

LAにより生成されるLamb波は、従来のlaser ultrasonicにより生成されるLamb波に比べ、生成されるLamb波の振幅が数百倍程度と大きいため、計測におけるSN比が良く計測時の平均化回数を大幅に低減できることから、短時間での計測が実現できる。これより、本手法は大型構造物の広域損傷検知に利用できる。

LAにより生成されたLamb波を、貫通亀裂を損傷と想定した損傷検知に適用したところ、このLamb波は、損傷部で反射したり、損傷部通過前後における振幅が変化したりすることがわかった。したがって、これらを観察することでLAにより生成されたLamb波は損傷検知に利用できる。

#### <引用文献>

- [1] C. Devivier, F. Pierron, P. Glynne-Jones, et al., 2016. Timeresolved full-field imaging of ultrasonic Lamb waves using deflectometry. *Exp. Mech.* 56, 345–357.
- [2] M.S. Harb, F.G. Yuan, 2015. A rapid, fully non-contact, hybrid system for generating Lamb wave dispersion curves. *Ultrasonics* 61, 62–70.
- [3] N. Hosoya, I. Kajiwara, K. Umenai, 2016. 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. *J. Vib. Control* 22, 3649–3658.
- [4] F. Huda, I. Kajiwara, N. Hosoya, et al., 2013. Bolt loosening analysis and diagnosis by non-contact laser excitation vibration tests. *Mech. Syst. Signal Pr.* 40, 589–604.
- [5] J.L. Rose, 2004. *Ultrasonic Waves in Solid Media*. Cambridge: Cambridge University Press.

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計15件)(査読有)

- [1] N. Hosoya, I. Kajiwara, K. Umenai, S. Maeda, 2017. Dynamic characterizations of underwater structures using noncontact vibration tests based on nanosecond laser ablation in water: evaluation of passive vibration suppression with damping

- materials, *J. Vib. Control*, XXX, XXX-XXX. DOI: 10.1177/1077546317710158
- [2] N. Hosoya, R. Umino, A. Kanda, I. Kajiwara, A. Yoshinaga, 2017. Lamb wave generation using nanosecond laser ablation to detect damage, *Journal of Vibration and Control*, XXX, XXX-XXX. DOI: 10.1177/1077546316687904
- [3] N. Hosoya, M. Mishima, I. Kajiwara, S. Maeda, 2017. Non-destructive firmness assessment of apples using a non-contact laser excitation system based on a laser-induced plasma shock wave, *Postharvest Biol. Technol.* 128, 11-17. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2017.01.014
- [4] N. Hosoya, I. Kajiwara, K. Umenai, 2016. 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. *J. Vib. Control* 22, 3649-3658. DOI: 10.1177/1077546314564693
- [5] H. Shigemune, S. Maeda, Y. Hara, N. Hosoya, S. Hashimoto, 2016. Origami robot: a self-folding paper robot with an electrothermal actuator created by printing. *IEEE/ASME T. Mech.* 21, 2746-2754. DOI: 10.1109/TMECH.2016.2593912
- [6] N. Hosoya, Y. Terashima, K. Umenai, S. Maeda, 2016. High spatial and temporal resolution measurement of mechanical properties in hydrogels by non-contact laser excitation. *AIP Advances*, 6, 095223-1-095223-8. DOI: 10.1063/1.4964305
- [7] N. Hosoya, M. Nagata, I. Kajiwara, R. Umino, 2016. Nano-second laser-induced plasma shock wave in air for non-contact vibration tests. *Exp. Mech.* 56, 1305-1311. DOI: 10.1007/s11340-015-0089-y
- [8] N. Hosoya, R. Umino, I. Kajiwara, S. Maeda, T. Onuma, A. Mihara, 2016. Damage detection in transparent materials using non-contact laser excitation by nano-second laser ablation and high-speed polarization-imaging camera. *Exp. Mech.* 56, 339-343. DOI: 10.1007/s11340-015-0089-y
- [9] S. Maeda, T. Kato, Y. Otsuka, N. Hosoya, M. Cianchetti, C. Laschi, 2016. Large deformation of self-oscillating polymer gel. *Phys Rev. E* 93, 010501-1-010501-5. DOI: 10.1103/PhysRevE.93.010501
- [10] N. Hosoya, S. Baba, S. Maeda, 2015. Hemispherical breathing mode speaker using a dielectric elastomer actuator. *J. Acoust. Soc. Am.* 138, EL424-EL428. DOI: 10.1121/1.4934550
- [11] Y. Zhang, T. Hiruta, I. Kajiwara, N. Hosoya, 2015. Active vibration suppression of membrane structures and evaluation with a non-contact laser excitation vibration test. *J. Vib. Control* XXX, XXX-XXX. DOI: 10.1177/1077546315599302
- [12] S. Maeda, T. Kato, H. Kogure, N. Hosoya, 2015. Rapid response of thermo-sensitive hydrogels with porous structures, *Appl. Phys. Lett.* 106, 171909-1-171909-4. DOI: 10.1063/1.4919585
- [13] N. Hosoya, S. Yaginuma, H. Onodera, T. Yoshimura, 2015. Estimation of the auto frequency response function at unexcited points using dummy masses. *J. Sound Vib.* 337, 14-27. DOI: 10.1016/j.jsv.2014.09.033
- [14] N. Hosoya, I. Kajiwara, T. Inoue, K. Umenai, 2014. Non-contact acoustic tests based on nanosecond laser ablation: generation of a pulse sound source with a small amplitude. *J. Sound Vib.* 333, 4254-4264. DOI: 10.1016/j.jsv.2014.04.050
- [15] F. Huda, I. Kajiwara, N. Hosoya, 2014. Damage detection in membrane structures using non-contact laser excitation and wavelet transformation. *J. Sound Vib.* 333, 3609-3624. DOI: 10.1016/j.jsv.2014.04.008
- [学会発表] (計 15 件)
- [16] 吉永敦, 奥村洋平, 細矢直基, 神田淳, 岩崎紗綾, 梶原逸朗, レーザーアブレーションを用いた Lamb 波の生成 (金属チップによる損傷防止), 日本機械学会 [No.XX-X] Dynamics and Design Conference 2017 USB 論文集, 2017, No. XXX, (2017.8.29-9.1). 愛知大学, 愛知県豊橋市.
- [17] 小田一心, 梶原逸朗, 細矢直基, レーザーを用いた音響加振に基づく閉空間内の異物検知, 日本機械学会 [No.XX-XX] Dynamics and Design Conference 2017 USB 論文集, 2017, No. XXX, (2017.8.29-9.1). 愛知大学, 愛知県豊橋市.
- [18] N. Hosoya, A. Yoshinaga, A. Kanda, R. Umino, I. Kajiwara, Excitation system based on laser-induced plasma to generate Lamb wave, *International Conference on Engineering Vibration (ICoEV2017)*, (2017.9.4-7). Sofia, Bulgaria.
- [19] M. Mishima, N. Hosoya, I. Kajiwara, S. Maeda, 2016. Quality assessment of apples based on modal analysis using laser-induced plasma shock wave. *Proceedings of International Conference on Noise and Vibration Engineering (ISMA 2016)*, pp.2279-2285, CD-ROM, (2016.9.19-21). Leuven, Belgium.
- [20] 新倉孝典, 細矢直基, 橋村真治, 実験モード解析によるボルト締結体の軸力検

- 知, 日本機械学会 [No.16-15] Dynamics and Design Conference 2016 USB 論文集, 2016, No. 353, (2016.8.23-26). 山口大学, 山口県宇部市.
- [21] 秋田涼佑, 梶原逸朗, 細矢直基, レーザープラズマ音響加振・計測による構造ヘルスマニタリング, 日本機械学会 [No.16-15] Dynamics and Design Conference 2016 USB 論文集, 2016, No. 343, (2016.8.23-26). 山口大学, 山口県宇部市.
- [22] 神田淳, 細矢直基, 梶原逸朗, レーザーを用いた完全非接触での Lamb 波生成可視化技術の開発, 可視化情報全国講演会 (2015 京都) 可視化情報, 35(2), 2015, pp.45-46, (2015.10.10-11). 京都工芸繊維大学, 京都府京都市.
- [23] 柴田真太郎, 張月琳, 梶原逸朗, 細矢直基, 高出力レーザーによる音響加振技術を用いた構造ヘルスマニタリング, 日本機械学会 [No.15-7] Dynamics and Design Conference 2015 USB 論文集, 2015, No. 546, (2015.8.25-28). 弘前大学, 青森県弘前市.
- [24] N. Hosoya, R. Umino, A. Kanda, I. Kajiwara, A. Yoshinaga, Lamb wave generation using laser ablation, International Conference on Engineering Vibration (ICoEV 2015), 2015, pp.1674-1681, (2015.9.7-10). Ljubljana, Slovenia.
- [25] Y. Zhang, T. Hiruta, I. Kajiwara, N. Hosoya, Active vibration control of a membrane structure using PVDF actuator, The 4th Korea-Japan Joint Symposium on Dynamics & Control, 2015, (2015.5.21-22). Busan, Korea.
- [26] 山内優幸, 細矢直基, 斎藤寛泰, 松日楽信人, 前田真吾, 粉末状の電極を有する誘電エラストマーアクチュエータの特性, 2015 年 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, (2015.3.11-14). 東海大学, 神奈川県平塚市.
- [27] 比留田稔樹, 張月琳, 梶原逸朗, 細矢直基, 圧電フィルムを用いた膜構造のアクティブ振動制御, 第 27 回[電磁力関連のダイナミクス]シンポジウム, 2015, pp.335-340, (2015.5.14-15). ハウステンボス, 長崎県佐世保市.
- [28] 伊藤祥彰, Feblil Huda, 梶原逸朗, 細矢直基, 非接触レーザー加振を用いた振動計測に基づくアルミニウム平板の損傷検知, 日本機械学会[No.14-43]シンポジウム講演論文集(第 13 回評価・診断に関するシンポジウム), 2014, pp.61-65, (2014.12.11-12). 福岡県北九州市.
- [29] N. Hosoya, I. Kajiwara, K. Umenai, Laser excitation system for measuring frequency response function of underwater structures, Proceedings of International Conference on Noise and Vibration Engineering (ISMA

2014), 2014, pp.1097-1108, CD-ROM, (2014.9.19-21). Leuven, Belgium.

- [30] K. Umenai, N. Hosoya, I. Kajiwara, Vibration Control Evaluation for Underwater Structures Using Non-contact Laser Excitation, Proceedings of 12th International Conference on Motion and Vibration Control, 2014, No. 2A32, (2014.8.3-7). Sapporo, Hokkaido.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

○取得状況 (計 2 件)

名称: METHOD FOR MEASUREMENT OF VIBRATION PROPERTY OF STRUCTURE, AND VIBRATION PROPERTY MEASUREMENT DEVICE(米国), 構造物の振動特性の測定方法および振動特性測定装置(日本)

発明者: 梶原逸朗, 細矢直基  
権利者: 北海道大学, 芝浦工業大学  
種類: 特許  
番号: US 9,291,604 B2(米国), 5750788(日本)  
取得年月日: 2016.3.22(米国), 2015.5.29(日本)  
国内外の別: 国外(米国), 国内(日本)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

細矢 直基 (Hosoya, Naoki)  
芝浦工業大学・工学部・准教授  
研究者番号: 40344957

(2) 研究分担者

梶原 逸朗 (Kajiwara, Itsuro)  
北海道大学・大学院工学研究院・教授  
研究者番号: 60224416

(3) 連携研究者

神田 淳 (Kanda, Atsushi)  
独立行政法人宇宙航空研究開発機構・航空本部・主任研究員  
研究者番号: 40358693