

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01279

研究課題名（和文）レーザー誘起プラズマ衝撃波加振と偏光干渉計による大型構造物の広域非破壊検査

研究課題名（英文）Non-destructive inspection of large structures based on laser-induced plasma shock wave excitation technique and polarization interferometer

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） 14,360,000円

研究成果の概要（和文）：航空機など、大型構造物の欠陥や損傷の検出は、検査員の目視による方法が一般的である。しかし、判定結果には個人差によるばらつきがあり、工数や費用の低減は見込めない。そこで、Lamb波を用いた非破壊検査法が検討されている。研究代表者は、レーザー誘起プラズマ（Laser-Induced Plasma: LIP）加振により生成されたLamb波を用いる手法を提案した。本手法では、非接触非破壊で亀裂を検出でき、2601点をおよそ40分で計測できた。

本研究では、既存の偏光干渉計とLIP衝撃波加振を組み合わせる。本システムによりLamb波の伝播を面計測することで、広域非破壊検査をより短時間で実現する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スキャニングレーザー Doppler 振動計や3軸加速度計を用いた多点計測による振動実験を、本システムで置き換えることができれば、振動実験における工数や費用が低減される。そして、あらゆる機械製品の動的設計の効率化、機械学習を活用するための莫大な計測データの取得にも寄与する。さらに、従来、困難とされてきた非定常応答を面計測できるため、例えば、ハードディスク落下時の耐衝撃性やディスクの空力安定性などの解析にも役立つ。

研究成果の概要（英文）：Inspectors have demonstrated visual inspection to detect damage or failure of large-scale structures such as aircraft. Therefore, the inspected results vary because of the differences among individuals, resulting in non-cost-effective and time-consuming approaches. The Principal Investigator of this study has been studying the detection of damage to structures using Lamb wave propagation with laser-induced plasma (LIP) shock waves for the input and a scanning laser Doppler vibrometer for the output. This method can provide non-destructive testing (NDT) for a structure with an inspection area of 100 mm × 100 mm square with 2601 points in approximately 40 min, but the inspection time must be less.

In this study, a commercially available high-speed polarization interferometry for the output that can simultaneously measure multipoint vibration responses combined with LIP shock wave excitation for the input was used to visualize Lamb wave propagation in NDT in a shorter measurement time.

研究分野：機械力学

キーワード：レーザー誘起プラズマ 衝撃波 非破壊検査 Lamb波 偏光干渉計

1. 研究開始当初の背景

航空機や風力発電機のタービンブレードなど、大型構造物の欠陥や損傷の検出は、検査員の見視による方法が一般的である。しかし、判定結果には個人差によるばらつきがあり、工数や費用の低減は見込めない。また、検査員の育成には莫大な時間がかかる。

上述の問題点を解決するために、Lamb 波を用いた大型構造物の非破壊検査法が検討されている。Lamb 波は、減衰が小さく伝播距離が長いという特徴を有する。そのため、圧電素子などの接触式デバイスにより生成された Lamb 波を用いた非破壊検査法が、いくつも検討されている。しかし、これらの方法では、接触式デバイスを用いるため、短時間で広域を、遠隔で検査することは不可能であった。

研究代表者は、大型構造物の広域非破壊検査を短時間で実現するために、レーザー誘起プラズマ (Laser-Induced Plasma: LIP) 加振により生成された Lamb 波を用いる手法を提案した。図 1 に示すように、高出力パルスレーザーを加振点近傍に集光すると、高温高密度のプラズマルームが形成される。このプラズマが周囲に超音速で広がるとき、衝撃波が生成される[N. Hosoya, et al., Int. J. Mech. Sci. 140 (2018) 486-492]。この衝撃波が非接触非破壊のインパルス加振力となる。本手法では、生成された Lamb 波をスキャニングレーザードップラー振動計 (Laser Doppler Vibrometer: LDV) で計測する。本手法を用いることで、非接触非破壊で人工的に設けた亀裂を検出でき、さらに、接触式デバイスでは 100 点計測 (検査領域は 100 mm × 100 mm) におよそ 6 時間を要していたものを、本手法では 2601 点計測でおよそ 40 分に短縮することに成功した。

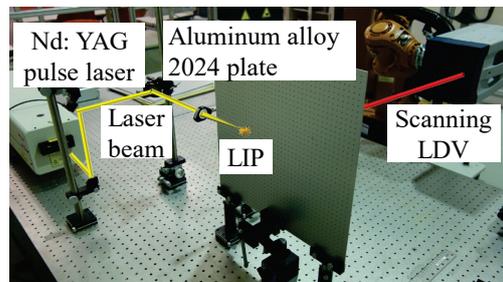


図 1 LIP 衝撃波と LDV による Lamb 波の計測

2. 研究の目的

本研究では、既存の偏光干渉計と LIP 衝撃波加振を組み合わせる。そして、LIP 加振により検査対象構造物に Lamb 波を生成する。この Lamb 波の伝播を本システムにより面計測し、波動伝播の様子を観察することで、広域非破壊検査を短時間で実現する。従来の LIP 加振とスキャニング LDV を組み合わせた手法では、2601 点計測でおよそ 40 分を要していた。この計測時間をさらに短縮する。

3. 研究の方法

図 2 に、本研究で使用した LIP 偏光干渉計を示す。図 2(a)に示すように、光学定盤上に、偏光干渉計を設置した。また、Nd:YAG パルスレーザーを設置し、供試体の裏側近傍で LIP 衝撃波を発生させた。図 2(b)に示すように、ミラーを供試体とした。LIP 生成位置と供試体の表面までの距離 (スタンドオフ距離) は 10 mm とした。そして、LIP 衝撃波により供試体に Lamb 波を生成した。また、計測領域は 37 mm × 80 mm、ピクセルサイズは 96 × 256、撮影速度は 210 kfps とした。これにより、24,576 点の振動応答の同時計測を実現できる。また、比較のため、従来のレーザードップラー振動計を用いて、80 mm の計測線を 1 mm 間隔、計 81 点を 1 点ずつ計測した。

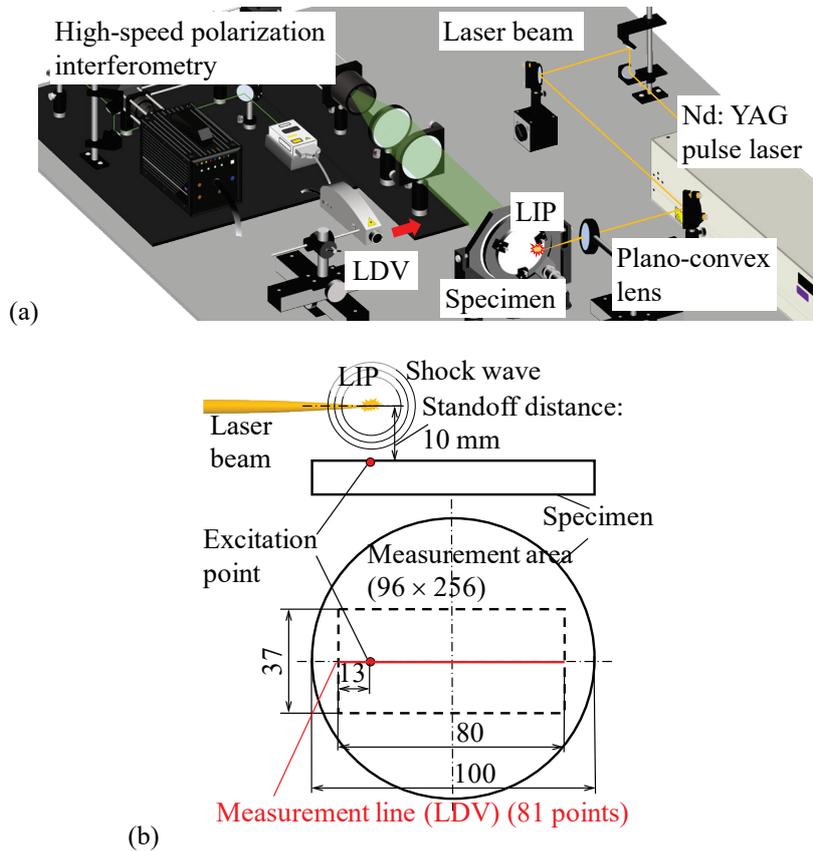


図2 LIP 偏光干渉計による Lamb 波の面計測システム. (a)実験装置概略図, (b)供試体の加振点および計測領域.

4. 研究成果

(1) 計測された Lamb 波の位相速度

図3に、本システムで計測された Lamb 波の伝播の様子を示す。図3は、37 mm × 80 mm の計測領域を示している。LIP 加振後 9.5 μs において、振幅が大きくなっている領域があり、この中心が LIP 衝撃波による加振点となる。時間が経過するに従い、Lamb 波が加振点から伝播していることが確認できる。

本システムおよび LDV により計測された Lamb 波の伝播から分散曲線を求め、これを解析値と比較する。図4(a)に示すように、面計測された Lamb 波を、奥行き方向を時間として並べ、加振点を含む面で切断することで、図4(b)に示すような断層画像を作成する。この切断面は図2(b)の赤色の直線 (LDV による計測線) に対応する。そのため、LDV により計測された 81 点の時刻歴波形を、縦軸を計測位置として並べ、断層画像を作成することもできる。この断層画像の傾きが Lamb 波の位相速度となる。LIP 衝撃波は理想的なインパルス入力であるため、生成された Lamb 波には様々な周波数成分が含まれる。Lamb 波は速度分散性を持つため、デジタルフィルタを用いて、所望の周波数成分を抽出し、断層画像 (図4(c), 中心周波数 40 kHz で抽出した例) を求める。

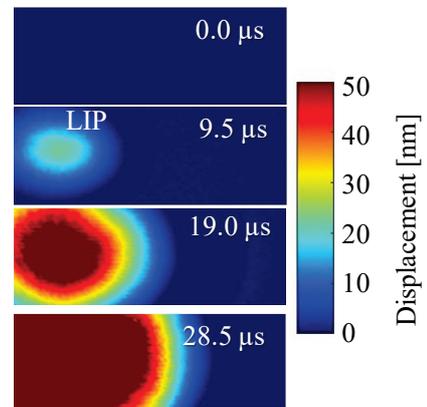


図3 面計測された Lamb 波の伝播

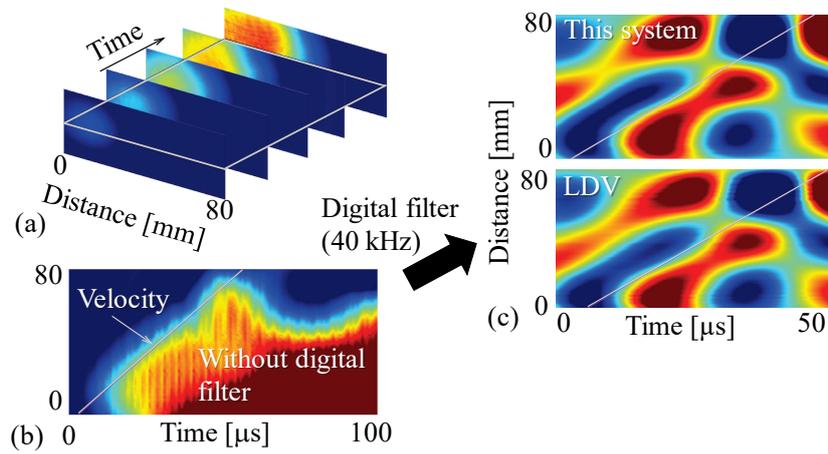


図4 Lamb波の位相速度の算出

図5に、本システム(黒丸)および従来のLDV(白丸)により得られた位相速度の分散曲線を示す。また、図5においては、比較のため、解析値(実線)も重ねて示してある。図5を見ると、本システムにより得られた位相速度は、従来のLDVおよび解析値と良く一致していることがわかる。本システムおよびLDVにより得られた位相速度の誤差およそ数%であった。図4に示すように、位相速度は画像解析より求めることから、若干の誤差を含む恐れがある。しかし、図5より、本システムは十分な精度を有していることから、本システムを用いることで、面計測でLamb波の伝播を可視化できることがわかる。

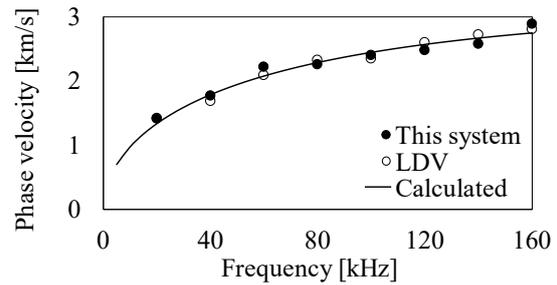


図5 本システムおよび従来のLDVから得られたLamb波の位相速度

(2) 固有振動モード

本システムは、Lamb波の伝播だけではなく、供試体の固有振動モードも計測することができる。図6に、本システムにより得られた供試体の固有振動モードを示す。図6においては、本システムにより得られた固有振動数と括弧内に有限要素解析により得られた固有振動数をそれぞれ示す。本システムにより得られた固有振動モードは、従来の点計測により得られたものとは異なり、24,576点の振動応答に基づき得られているため、非常に詳細な情報を提供できる。また、本システムと有限要素解析により得られた固有振動数の差は数%程度となっていることから、十分な精度を有していることがわかる。

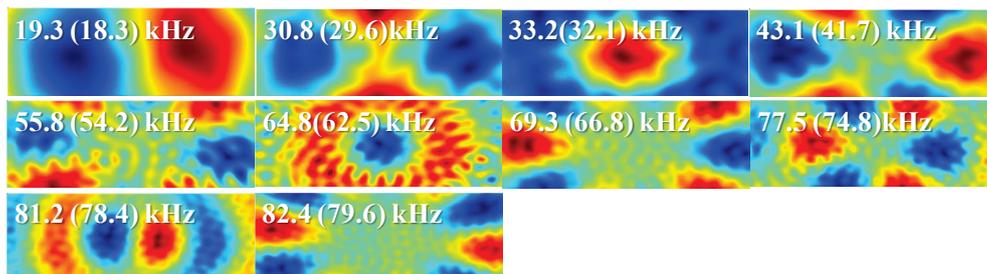


図6 本システムにより得られた固有振動モード形。本システムにより得られた固有振動数と括弧内に有限要素解析により得られた固有振動数をそれぞれ示す。

(3) 非破壊検査への応用

Lamb 波の伝播の様子を観察することで、本システムを用いた非破壊検査の実現可能性を検証する。本研究では、供試体の計測面の裏側に直径 20 mm の円板を付加質量として取り付けることで異常状態を模擬した。図 7 に、付加質量の取り付け位置を示す。本実験では、供試体の中央 (図 7(a)) と、供試体中央から 20 mm 離れた箇所 (図 7(b)) の 2 種類とした。

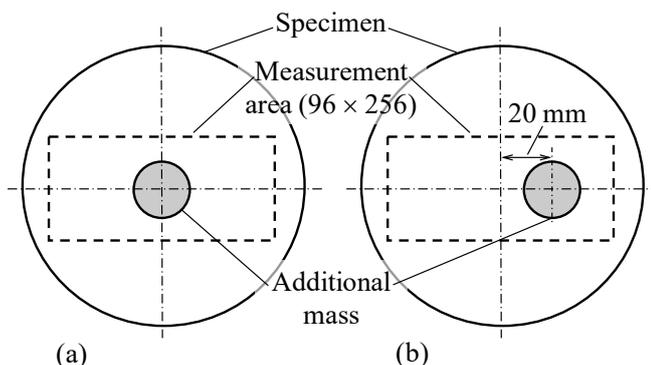


図 7 付加質量の取り付け位置。

図 8 に、本システムによる非破壊検査結果を示す。図 8(a), (c) は、LIP 加振後 9.52 μ s, 14.3 μ s における健全状態での Lamb 波の伝播の様子、図 8(b), (d)

は、LIP 加振後 9.52 μ s, 14.3 μ s における異常状態での Lamb 波の伝播の様子をそれぞれ示している。図 8(a) と (b), (c) と (d) を比較すると、健全状態と異常状態では、付加質量を取り付けた付近の Lamb 波の伝播の様子に変化が確認できる。それ以外の場所では、あまり変化がない。また、図 8(b), (d) では、Lamb 波の伝播の様子に変化が現れた時刻に違いがあるが、これは、付加質量を取り付けた位置が異なるため、Lamb 波が到達する時刻に差が生じたものと考えられる。これにより、質量が付加されたような異常状態を、本システムによる非破壊検査を用いることで、検出できることがわかる。今後、付加質量の位置や検出できる付加質量の大きさなど、本手法の適用限界を検討する。

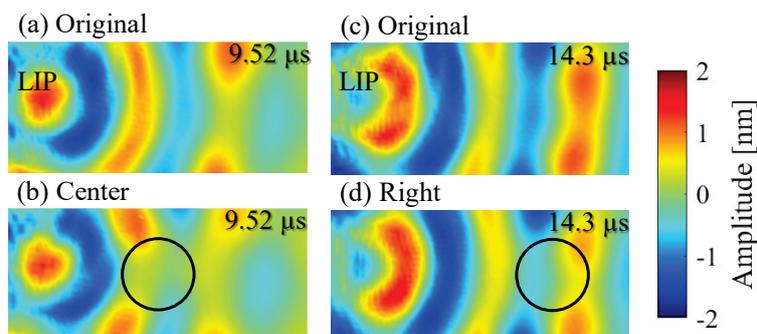


図 8 本システムによる非破壊検査結果 (図中の黒丸の位置に付加質量を取り付け、異常状態を模擬した)。LIP 加振後 9.52 μ s における Lamb 波の伝播の様子、(a)健全状態、(b)異常状態 (中央に付加質量)。LIP 加振後 14.3 μ s における Lamb 波の伝播の様子、(c)健全状態、(d)異常状態 (中央から 20 mm 離れた位置に付加質量)。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Ardi Wiranata, Yunosuke Ohsugi, Ayato Minaminosono, Zebing Mao, Haruyuki Kurata, Naoki Hosoya, Shingo Maeda	4. 巻 8
2. 論文標題 A DIY fabrication approach of stretchable sensors using carbon nano tube powder for wearable device	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Frontiers in Robotics and AI	6. 最初と最後の頁 773056
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/frobt.2021.773056	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Ardi Wiranata, Makoto Kanno, Naoki Chiya, Hozuma Okabe, Tatsuhiro Horii, Toshinori Fujie, Naoki Hosoya, Shingo Maeda	4. 巻 15
2. 論文標題 High-Frequency, low-voltage oscillations of dielectric elastomer actuators	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 11002
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1882-0786/ac3d41	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Naoki Hosoya, Tsubasa Katsumata, Itsuro Kajiwara, Takashi Onuma, Atsushi Kanda	4. 巻 148
2. 論文標題 Measurements of S0 mode Lamb waves using a high-speed polarization camera to detect damage in transparent materials during non-contact excitation based on a laser-induced plasma shock wave	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optics and Lasers in Engineering	6. 最初と最後の頁 106770
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.optlaseng.2021.106770	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Sho Wakata, Naoki Hosoya, Noboru Hasegawa, Masaharu Nishikino	4. 巻 218
2. 論文標題 Defect detection of concrete in infrastructure based on Rayleigh wave propagation generated by laser-induced plasma shock waves	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Mechanical Sciences	6. 最初と最後の頁 107039
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ijmecsci.2021.107039	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Hosoya Naoki, Mita Masakatsu, Lecointre La A.C., Tonegawa Shota, Higuchi Ryo, Yokozeki Tomohiro, Takeda Shin-ichi	4. 巻 58
2. 論文標題 Lamb waves evaluation in CFRP plates with laser shock wave technique	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Structures	6. 最初と最後の頁 105566 ~ 105566
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.istruc.2023.105566	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hiruta Toshiki, Ishihara Hiroki, Hosoya Naok, Maeda Shingo, Takagi Kentaro, Kajiwara Itsuro	4. 巻 33
2. 論文標題 Active vibration control for thin curved structures using dielectric elastomer actuators	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Smart Materials and Structures	6. 最初と最後の頁 035047 ~ 035047
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-665X/ad2880	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計6件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 平田 幸太郎, 森川 颯日, 細矢 直基, 長田 悠希, 丹羽 隼人, 大沼 隼志
2. 発表標題 偏光干渉計による振動モード形の可視化
3. 学会等名 [No.21-55] 日本機械学会 第 17 回「運動と振動の制御」シンポジウム (MoViC2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 桑田堅叶, 長谷川登, 錦野将元, 細矢直基
2. 発表標題 レーザーインパルス加振力の制御
3. 学会等名 日本機械学会機械力学・計測制御部門D&D2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 藤牧礼欧, 前田真吾, 新竹純, 細矢直基
2. 発表標題 天然ゴムを用いた振動センサ
3. 学会等名 日本機械学会機械力学・計測制御部門D&D2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 三田正勝, 富田裕亮, 平田幸太郎, 細矢直基
2. 発表標題 レーザー加振技術により生成されたLamb波を用いたヤング率の計測
3. 学会等名 日本機械学会機械力学・計測制御部門D&D2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Mamoru Suyama, Masakatsu Mita, Lea A.C. Lecointre, Ryo Higuchi, Tomohiro Yokozeke, Shin-ichi Takeda, Naoki Hosoya
2. 発表標題 Characterization of Lamb wave propagation in CFRP plates with a stiffener
3. 学会等名 The 17th International Conference on Motion and Vibration Control (MoViC 2024) and the 20th Asia-Pacific Vibration Conference (APVC2021)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 笹野翔太郎, 磯貝航, 前田真吾, 細矢直基
2. 発表標題 果物の熟度評価のための装着型ソフトアクチュエータ
3. 学会等名 日本機械学会機械力学・計測制御部門D&D2024
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------