

令和 5 年 4 月 19 日現在

機関番号：34419

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14684

研究課題名（和文）レーザーアブレーション加振による誘起固有振動の時空間スケーリング

研究課題名（英文）Scaling study of natural vibration induced by laser ablation

研究代表者

三上 勝大（Mikami, Katsuhiko）

近畿大学・生物理工学部・講師

研究者番号：20722763

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：レーザー照射時に生じる振動現象の時空間ダイナミクスを追究し、検証を行った。具体的な検証項目は、振り子などの物理的な加振とレーザーによる加振の違い、アブレーションを介さない光熱弾性波を用いた時の時空間ダイナミクス、そして、アブレーションを介したプラズマ発生を伴う際の時空間ダイナミクスの3点である。

物理的およびレーザーによる加振の違いとして、高次振動発生が最も異なることを明らかにした。光熱弾性波による時空間ダイナミクスは、熱拡散方程式で説明可能な線形現象であることを見出した。アブレーションを介した場合は、変位計測ではなく速度計測により評価可能であることを明らかにするに至った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

レーザー光による物体の加振は、質量を持たない光子により運動エネルギーが発生するため単純なニュートン力学では説明できない。したがって、光の吸収過程から振動発生に至るまでに何らかの物理現象を介する。加えて、レーザー光による加振は物体の固有振動を計測する可聴音領域の周波数に着目する場合、その変位量は評価物体サイズに対して極めて小さいサブマイクロメートルオーダーであり、ナノ秒パルスを用いた計測に対して極めて長い数ミリ秒継続する振動を対象とするため、そのオーダーは桁違いである。本研究では、レーザー加振現象の時空間ダイナミクスを追究し、その間接的な加振機構、桁違いのオーダーの学術的問いへアプローチした。

研究成果の概要（英文）：We investigated the spatio-temporal dynamics of the vibrational phenomena that occur during laser irradiation. Three specific contents were considered: the difference between physical excitation (e.g., pendulum) and laser excitation, the spatio-temporal dynamics of photo-thermal elastic waves without ablation, and the spatio-temporal dynamics in the case of plasma generation with ablation.

The most distinct difference between physical and laser excitation was found to be the generation of higher-order vibrations. We found that the spatio-temporal dynamics due to photo-thermal elastic waves is a linear phenomenon that can be explained by the thermal diffusion equation. Additionally, it was found that the ablation case can be evaluated by velocity measurement instead of displacement measurement.

研究分野：レーザー計測

キーワード：レーザー 振動 計測 固有振動 弾性波

1. 研究開始当初の背景

打音検査による検査原理をレーザー技術に置換することで、高速・遠隔・定量評価が可能なレーザー共鳴周波数解析 (以下、レーザー RFA : Resonance Frequency Analysis) の研究が進められている。この技術は、トンネルなどのコンクリートインフラ構造物の内部欠陥検査や、整形外科インプラントの設置強度診断など、土木や医療など複数の領域で実用化研究が推進されている。レーザー RFA は、レーザーパルスを物質に照射することで試料表面を急加熱させ、プラズマ化を伴ったアブレーションにより噴出したブルームの反作用で、誘起する弾性波を利用する。このレーザー照射による弾性波誘起を「レーザー加振」と定義される。このレーザー加振による被照射試料の固有振動をレーザー振動計や加速度センサーで計測して解析することで、打音検査を高速・遠隔・定量評価が可能なレーザー技術により置換できる。図 1 に、レーザー光が被照射試料に照射された際に生じる現象の時間および空間スケールを示す。レーザー RFA では ns オーダーのレーザーパルス照射後 ms オーダーの固有振動が計測対象となる。空間スケールでは、数百 μm オーダーのレーザー集光径を照射するが、レーザー RFA では nm 程度の振幅量を計測するとともに、mm 以上の被照射試料全体のサイズ形状や機械的物性で決定される固有振動が対象となる。従って、レーザー加振の入力に対し、被照射試料系に依存した加熱・アブレーション・衝撃波の各伝達関数の結果が、固有振動の出力と考えることができる。本研究の学術的な「問い」は、「時空間スケールが異なるレーザー照射で生じる被照射物質との相互作用から固有振動に至る一連の物理現象の中で、いかに伝達し、スケールアップされるか？」である。

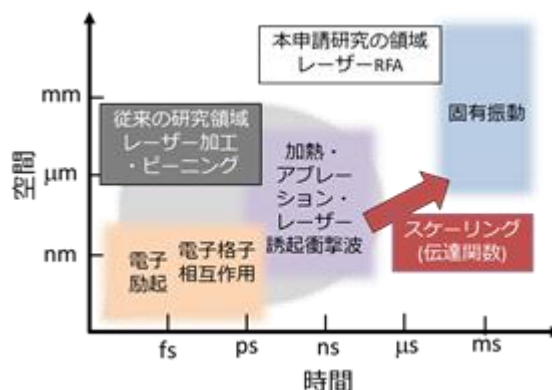


図 1 研究領域の対象時空間スケール

図 1 に、レーザー光が被照射試料に照射された際に生じる現象の時間および空間スケールを示す。レーザー RFA では ns オーダーのレーザーパルス照射後 ms オーダーの固有振動が計測対象となる。空間スケールでは、数百 μm オーダーのレーザー集光径を照射するが、レーザー RFA では nm 程度の振幅量を計測するとともに、mm 以上の被照射試料全体のサイズ形状や機械的物性で決定される固有振動が対象となる。従って、レーザー加振の入力に対し、被照射試料系に依存した加熱・アブレーション・衝撃波の各伝達関数の結果が、固有振動の出力と考えることができる。本研究の学術的な「問い」は、「時空間スケールが異なるレーザー照射で生じる被照射物質との相互作用から固有振動に至る一連の物理現象の中で、いかに伝達し、スケールアップされるか？」である。

2. 研究の目的

レーザー光照射から被照射試料の固有振動の表出に至る物理現象を追究する。本来、質量を持たない光子から運動エネルギーを発生させるニュートン力学では説明不可能な機構および時空間ダイナミクスを明らかにすることが目的である。

3. 研究の方法

(1) 物理的加振とレーザーアブレーションを介した加振の比較

物理的加振として、直径 25 mm、重さ 64.8 g の鉄球を長さ 80 mm の糸に吊った振り子を用いてコンクリート供試体に任意の高さから落として衝突させ、その振動を加速度センサーにより検出した。一方で、レーザー加振ではパルス幅 14 ns、波長 1064 nm の Nd:YAG レーザーを用いてコンクリート供試体に照射し、その振動を加速度センサーにより検出した。本研究で用いたコンクリート供試体は、縦横 300 mm、厚さ 100 mm のサイズであり、深さ 10 mm の位置に模擬的に発泡スチロールを設置することで内部欠陥を模擬したものである。

(2) レーザーアブレーションを介さない光熱弾性波の時空間ダイナミクス

光熱弾性波を原理とする掃引加振方式における、レーザーパラメータの影響を評価するため、本研究では単純な評価試料および実験系を用いた。評価試料は物性が近い 2 種類の単純な金属円板を用いた。金属円板のサイズは直径 50 mm および厚さ 1 mm であり、円周方向を約 1 mm 幅で固定する治具を用いて保持を行った。評価試料の掃引加振を実施するため繰り返し周波数およびパルス幅が任意可変の Nd dope ファイバーレーザー (波長 1060 nm) を用いた。繰り返し周波数の設定にはファンクショナルジェネレータを接続し、ステップ状に周波数を掃引させた矩形波電圧をファイバーレーザーの外部トリガー信号とした。出力されるレーザーパルスは 2 枚の反射鏡を用いることで導光し、ND フィルターにより照射パルスエネルギーの調整を行った。加振レーザーパルスは焦点距離 50 mm のレンズを用いて集光し、評価試料の中央へ照射した。ファイバーレーザーのパルス幅は、ミラーの透過光を PIN ダイオードで計測することで評価を行った。振動計測は、評価試料の裏面中央にレーザードップラー振動計を照射し、対向面に照射される掃引レーザーパルスで誘起する振動を計測した。レーザードップラー振動計は (Polytec 社 Vibro-one)、光のドップラー効果で得られる速度情報を電圧信号とし出力するとともに、速度に基づく情報を位相情報として演算し、変位量の電圧信号が出力される機能を有している。本研究では、掃引加振方式による振動を速度として計測すると同時に、変位量も活用して検証を行った。レーザードップラー計から出力される電圧信号はデータロガーを用いて収録し、得られた時系列データを用いて解析を行った。

4. 研究成果

(1) 物理的加振とレーザーアブレーションを介した加振の比較

振り子およびレーザー照射の両加振方法共に、固有振動の発生およびその持続時間は有意差がなかった。また、レーザー加振のスポットサイズ依存性については、そのサイズに適切な値が有ることが見出された。これは、小さすぎると発生するプラズマブルーム量が減少すること、大きすぎるとレーザーエネルギー密度が減少することで発生するプラズマブルーム量が減少すること、これら2つの現象のトレードオフによって得られるものと考えられる。レーザーアブレーションを介するレーザー加振は、一般的に大面積を高出力レーザーで加振することが重要とされてきたが、その照射パラメータを適切に設定することがより効果的かつ低出力レーザーを活用した検出に有効である指針を示すに至った。

この加振機構のダイナミクスを追究するべく、シュリーレン光学系および熱偏向法による計測を試みた。シュリーレン光学系によるプラズマ挙動の検証については、実験系の構築に至ったが、その計測結果より有意な相関データが取得できていない。今後、現在までのノウハウに追加してプラズマが発生する水平方向からの計測に加え、垂直方向からの計測も組み合わせた三次元計測により追加検証する。一方、4分円ディテクタによるポジションセンサーを活用した熱偏向法による表面変異ダイナミクスについては、その変位量が極めてわずかで有ることから優位な計測結果が得られなかった。これは複数の振動モードが同時に生じるため、各モードの変位が平均化された4分円ディテクタで得られる変位は、その精度も相まって検出および解析が困難であると推測された。

(2) レーザーアブレーションを介さない光熱弾性波の時空間ダイナミクス

レーザーアブレーションを介する場合、そのプラズマブルームの噴出と光熱弾性波の双方の影響の結果、加振に至ると考えられる。そこで、プラズマブルームの影響を受けない、レーザーアブレーションを介さない光熱弾性波の時空間ダイナミクスを検討した。

パルス幅依存性評価による時間ダイナミクスの評価では、パルス幅が長くなるに従い、その振動ピーク強度は低下した。短い時間幅にエネルギーを集中させることで、熱拡散の影響を少なく加振につながっているためだと考えられる。銅と真鍮を比べると、真鍮の方が銅に比べてパルス幅変化の影響が小さい。これは、熱拡散係数すなわち熱伝導率の違いで生じており、熱伝導が良く拡散が生じやすい銅のほうがパルス幅の変動に対して敏感であると考えられる。このパルス幅依存性は熱拡散方程式に支配されるパルス幅の平方根に比例するフィッティングで表現できることを突き止めている。一方で、照射スポットサイズを変化させ、レーザー誘起振動との依存性を評価することで空間ダイナミクスの追究を実施した。その結果、時間ダイナミクスと同様、熱拡散方程式で表現可能な線形現象で説明可能であることをつきとめた。

アブレーションを介した場合の結果より、変位検出によるダイナミクス評価が難しいことを明らかにした。そこで、ポリテックジャパン社の協力を得てスキヤニング式ドップラー振動計を用いて、変位ではなく速度情報として時空間ダイナミクスの検証試験を行った。この計測では、波長405 nm、平均パワー25 mWのレーザーダイオードを用い、真鍮円盤を評価試料として用いた。その結果、図2で示すようにレーザー加振で生じた熱弾性波による固有振動について可視化に成功した。現在は、この計測結果を用いて、その時間ダイナミクスを含め解析中である。

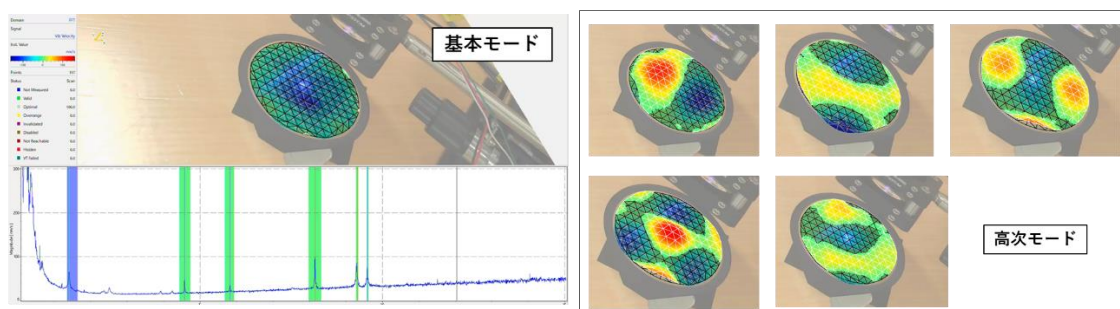


図2 スキヤニング式レーザー Doppler 振動計によるレーザー誘起光熱弾性波の可視化

3年度間を通じた評価によりアブレーションを介した加振については、振り子等を使った物理的加振との差を明らかにすると共に最適化指針を明らかにした。アブレーションを介さない熱弾性波の評価では、依存性評価により熱拡散による線形現象であることを見出し、ダイナミクス可視化および検証を達成した。これらは、レーザー照射で生じる弾性波を用いた可聴音領域に存在する固有振動計測に貢献するものであり、その領域は工業、産業のみならず医療にも波及し得るものである。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Mikami Katsuhiko, Hasegawa Noboru, Kitamura Toshiyuki, Okada Hajime, Kondo Shuji, Nishikino Masaharu	4. 巻 59
2. 論文標題 Characterization of laser-induced vibration on concrete surface toward highly efficient laser remote sensing	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 076502 ~ 076502
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ab9849	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 Mikami Katsuhiko, Sudo Natsumi, Okamoto Yuka, Nagura Takeo, Nakashima Daisuke	4. 巻 22
2. 論文標題 Sweep Pulse Excitation Method for Enhancing Photoacoustic Elastic Waves at Different Laser Irradiation Parameters	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 5025 ~ 5025
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s22135025	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2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Y. Okamoto, K. Mikami, N. Sudo, N. Hasegawa, M. Nishikino
2. 発表標題 Influence of friction in bolt loosening inspection based on laser hammering method
3. 学会等名 Laser Solution for Space and the Earth 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三上勝大、名倉武雄、中島大輔
2. 発表標題 共振効果を利用したレーザー誘起熱弾性波の時空間ダイナミクス
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022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
---------	---------