レーザー加振技術を用いた高周波振動計測に基づくヘルスマニタリング

Health Monitoring based on High Frequency Vibration Measurement with Laser

○正 梶原 逸朗 (北大) 細矢 直基 (芝工大)

Itsuro KAJIWARA, Hokkaido University, N13, W8, Kita-ku, Sapporo 060-8628
Naoki HOSOYA, Shibaura Institute of Technology

This paper proposes a vibration testing and health monitoring system based on an impulse response excited by a laser ablation. In conventional vibration testing using an impulse hammer, the excitation force hardly includes high frequency element over tens of kilohertz. High power YAG pulse laser is used in this system for producing an ideal impulse force on structural surface. It is possible to measure high frequency FRF (Frequency Response Function) in this system. And water droplet overlay on the metal is used to adjust the force magnitude in laser excitation. A health monitoring system is constructed by this vibration testing system and damage detecting filter. A microscopic damage of structures can be extracted by detecting fluctuations of high frequency vibration response with this health monitoring system. The vibration testing system is validated by comparing an aluminum block's FRFs that are obtained by laser excitation, impulse hammer and FEM.

Key Words: Laser Ablation, Impulse Response, Impact Testing, Health Monitoring, Frequency Response Function, Modal Analysis

1. 結 論

実験的に構造物の動特性を得るためには、構造物に加振力作用させ、ロードセル、加速度センサ等で入出力を測定することにより、周波数応答関数 (Frequency Response Function: FRF, 以下 FRF と略記する) を得る。加振力はインパルスハンマや加振器などにより作用させることが一般的であり、特にインパルスハンマを用いた打撃試験法は、装置が簡便であるため振動実験において広く利用されている。しかし、打撃試験法は実験者の技術や熟練度に大きく依存し、かつ理想的なインパルス加振力作用させることが不可能で数 kHz 以下の低/中周波数帯域の測定に限られている。そのため、数十 kHz 程度の高周波数帯域に固有振動数を有する構造物に対して正確な FRF 測定を行うことが困難である。これが実現できれば高周波数帯域における実験モデルの構築や実験モデルに基づいた有限要素モデルの検証等が可能になることから、振動実験解析法の発展に大きく寄与し工学的に非常に有用であるといえる。また、システムの性能のみならず、信頼性を高めるために、システムに生じた故障や異常を高感度で検知することが重要になっている。従来、さまざまな計測技術を用いて、このような検知を行う方法が検討されてきたが、非常に微細な故障(クラック)を簡便かつ高感度で検知する体系的な手法・技術はまだ確立されていない。構造物の振動特性の変動から、極微細な故障を検知する手法・技術の構築が望まれている。

著者らは、高周波数帯域における加振力を構造物に作用させるために、レーザーを用いたインパルス加振実験法(以下、レーザー加振と呼ぶ)による振動計測を検討している^{(2),(3)}。

レーザーアブレーションとは、高出力レーザーを集光し固体に照射することで、固体表面温度を急激に上昇させ、原子、分子、およびそれらのイオン等を爆発的に放出させることをいう⁽¹⁾。本手法は、高出力パルスレーザーを用いることにより、被照射面で瞬時にレーザーアブレーションを発生させ、理想的なインパルス加振入力を実現させる。これにより高周波数帯域における振動測定を可能にする。レーザー加振により片持ちはりの FRF 測定を行い以下の知見が得られている。(1)片持ちはりの FRF を測定することでレーザー加振により少なくとも 40kHz までの高周波数帯域の加振力を非常に再現性良く作用させることが可能であることがわかった。また、ロードセル、加速度センサの感度や取り付け方を適切に選定することで、センサの共振によるオーバーロードを防止することが可能であることがわかった。(2)レーザー被照射部に水滴を付着させ、金属のアブレーションだけではなく水滴の蒸発を利用することで加振力の大きさのパッシブ制御が可能であることを示した。しかしながら、レーザー加振による FRF 測定の実用化のためには、得られる FRF の精度をさらに向上させなければならないことも明らかとなった。

本論文では、レーザー加振を用いた振動計測法により高周波数帯域の FRF 測定を高精度で実現し、システムのヘルスマニタリングを行う技術を提案する。本計測技術では、高出力 YAG レーザーを被照射部にパルス照射し、インパルス加振力作用させる。理想的なインパルス入力を実現されるため、高周波数帯域まで高精度な計測が可能になる。ここで、被照射部にレーザーを直接照射する場合と、測定表面上の微小な水滴を付着させた場合について測定し、両測定結果を比較、評価する。また、インパルスハンマによる打撃試験の結

果とも比較し、本手法の有効性を検証する。さらに、レーザー加振・計測技術の開発および評価を行った上で、システムのヘルスマモニタリング技術の構築を行う。本研究で提唱するレーザー加振・計測技術を用いれば、高周波数帯域の振動応答の変動から微小な不具合を高感度で検知できる可能性がある。本技術では、高周波数帯域を対象とした故障検知フィルター技術を開発し、レーザー加振・計測技術と融合させる。本論文では、提案するヘルスマモニタリングのコンセプトおよびシステムの構成を示す。

2. レーザー加振を用いた振動実験システムの構築^{(2),(3)}

高出力レーザーを構造物にパルス照射し、高周波数帯域の FRF 測定を実現するための振動実験システムについて述べる。

2.1 レーザーアブレーション レーザーアブレーションにより加振力が発生する原理を説明する。図 1(a)に示すようにレーザー光を金属表面に照射するとレーザー光は金属に吸収され、原子、分子、およびそれらのイオン等が放出される。これらがレーザー光を吸収することで高温のプラズマが発生して金属から大量の粒子群（プルーム）が放出される（図 1(a)右側）⁽¹⁾。金属から質量 Δm が速度 v で放出された場合の運動量は Δmv で表すことができ、これが力積となる。構造物に対してより大きな加振力を発生させるためには、図 1(b)に示すようにレーザーアブレーションの際、金属表面に水滴を付着させればよい^{(2),(3)}。水滴はレーザーを透過するため、金属表面においては同様にレーザーアブレーションが発生する。金属表面からの粒子群の放出に加え、金属表面温度の急激な上昇により水滴が蒸発し水滴の質量 ΔM が速度 V で放出されることで運動量は $\Delta mv + \Delta MV$ となり、より大きな力積が得られる（図 1(b)右側）。粒子群、および水蒸気は金属表面から放射状に放出されるため、力積の方向は金属表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。

レーザーアブレーションは、飛翔体の推進に利用した検討例が報告され、機械加工（穴あけ、切断等）⁽¹⁾や医療⁽¹⁾の分野においては実用化されている。

Fig. 1 Excitation force generated by laser ablation

2.2 パルスレーザー 図 2 に高出力パルスレーザーを用いた振動実験システムの概略図を示す。光学定盤上に波長

1064nm、出力 650mJ、パルス幅 5ns の YAG レーザー (Continuum Surelite II) を設置した。様々な形状、大きさの構造物に対して自由支持や固定支持での振動実験を可能とするために、本実験ではミラーによりレーザー光の光軸を偏向した後、凸レンズを用いてスポット径 $2\mu\text{m}$ に集光しレーザーアブレーションを発生させた。

2.3 入出力の測定 レーザー加振による加振力とその応答の測定方法を説明する。図 3 に示すように、レーザー加振による加振力は市販のロードセル (PCB 208A03, 22.7g, 2.248mV/N) を構造物の入力点にねじで固定し測定するが、レーザーアブレーションによるロードセルの破損を防止するために大きさ 13.8mm×13.8mm、厚さ 1.5mm、質量 0.7g のアルミニウム製平板（以下、アルミニウム板と呼ぶ）をロードセル上面に接着剤で取り付け、これに対してレーザーアブレーションを発生させた。応答は市販の加速度センサ (ONOSOKKI NP-3211, 0.5g, 1.004mV/(m/s²)) を構造物の測定点に接着剤で取り付けた。なお、本実験に使用したロードセ

Fig. 2 Experimental system

Fig. 3 Attachment of a load cell and an accelerometer

ル、加速度センサの固有振動数はそれぞれ、35kHz、50kHz 以上であることを注記しておく。

加振力の大きさは、アルミニウム板上に水滴を付着させ、この水滴の蒸発を利用することで調節することができる。水滴量は精密スポイト (High Tech lab, L100 4614) により制御した。

測定された入出力はスペクトルアナライザ (A/D; NI PXI1042Q, NI-4472B, Software; キャテック CAT-System) により記録した。高周波数帯域における加振力を作用させることを考えているため、測定対象周波数は 40kHz とした。

3. レーザー加振による FRF 測定

パルスレーザー加振を用いたインパルス加振に基づき、被対象物の表面に付着させる水滴量およびセンサ感度などに関し、種々の条件下で振動測定を行い、高周波数帯域の FRF 測定の有効性を評価する。

3.1 対象構造物の選定 高周波数帯域に固有振動数を有する構造物として、1 次の固有振動数が 4174Hz である

150mm×50mm×20mm, 質量 398g のアルミニウム製の直方体ブロック（以下、ブロックと呼ぶ）を供試体とした（図 4 参照）。本章では、ブロックの面外モードを測定対象とし、加振点数は 2（点 1, 2）、測定点数は 3（点 1, 2, 3）とした。

3.2 FE モデルの構築 レーザー加振で測定された FRF の精度を FEM により得られた FRF と比較検証するため、ブロックの FE モデルを構築した。FE モデルはテトラソリッド要素（メッシュサイズ 2.5mm）、節点数 47136、要素数 29571 とした。本モデルにおいて、ロードセルは剛体要素、加速度センサは質点要素として考慮したが、ロードセルを取り付けるためのねじ穴については考慮していない。本論文では NASTRAN を用いてブロックの固有値解析を行った。得られたブロックの固有振動数を表 1 に示す。本表より測定対象周波数 40kHz 以内に 18 個の固有振動数が確認できるが、本章で対象とした固有振動数は、1, 5, 7, 10, 13, 14, 15, 16, 18 次の 9 個である。また、図 5 は対象とした振動モード形の一例を示している。FEM により FRF を計算する際のモード減衰比は 0.5% とした。

Fig. 4 Excitation and measurement points

Table 1 Natural frequencies of the aluminum block

Order	Frequency [Hz]	Order	Frequency [Hz]
1st	4174.0	10th	20040.8
2nd	6537.6	11th	20999.9
3rd	8388.4	12th	28696.8
4th	9397.2	13th	28890.6
5th	10222.7	14th	30983.1
6th	11675.1	15th	32718.6
7th	12724.9	16th	35576.9
8th	14094.1	17th	36960.7
9th	17418.2	18th	39917.1

Fig. 5 Mode shape of the aluminum block (load cell: point 1)

3.3 FRF の測定 図 4 に示したブロックに対して、加振点を点 1, 2、測定点を点 1, 2, 3 としたときの自己 FRF: H_{11} , H_{22} と相互 FRF: H_{31} を測定した。アルミニウム板を接着剤でロードセルに取り付け、これをブロック上面にねじで固定し、加速度センサはブロック下面に接着剤で固定した（図 3 参照）。これらより得られた入出力から FRF を測定した。FRF 測定では、レーザーアブレーションに加え水滴の蒸発による運動量を加振力として用いるため、アルミニウム板に 10 μ l の水滴を付着させ、パルスレーザーを照射した。レーザー加振による加振力は、再現性が高く非常に安定しているため、FRF 測定において平均化処理が有効であることを確認した。これを踏まえ本実験では、平均化回数は 10 回とした。また、ロードセルに取り付けられたアルミニウム板は、レーザーアブレーションの回数（レーザー加振におけるパルスレーザーの照射回数）の増加に伴い損耗するが、300 回程度の加振回数では FRF 測定に影響を与えなかったことを確認した。これより、本実験におけるアルミニウム板の交換時期はレーザー加振回数 100 を目安とした。

3.4 レーザー加振により得られた FRF の精度 レーザー加振により測定された FRF と FEM により得られた FRF を比較することで、本手法の高周波数帯域における FRF の精度を検証する。

Fig. 6 Measured force by laser excitation

Fig. 7 Auto FRF (H_{11}) by laser excitation and FEM

Fig. 8 Auto FRF (H_{22}) by laser excitation and FEM Fig. 9 Cross FRF (H_{31}) by laser excitation and FEM

図 6 はレーザー加振による加振力を示しており、図 6(a) はロードセルで測定された加振力の時刻歴波形、図 6(b) はそのパワースペクトルを示している。本図より、高出力パルスレーザーによりレーザーアブレーションを発生させることで、理想的なインパルス加振入力となり測定対象周波数帯域においてほぼ一定値となることがわかる。図 6(b) ではいくつかのピークが観測できるが、これはロードセルで測定された入力が構造物の動特性の影響を受けたためと考えられる。

図 7, 8, 9 はブロックの点 1 の自己 FRF: H_{11} 、点 2 の自己 FRF: H_{22} 、点 3-1 間の相互 FRF: H_{31} をそれぞれ示しており、レーザー加振により測定された FRF と FEM により得られた FRF を比較のため重ねて示している。これらの図より両者の FRF は、自己 FRF、相互 FRF 共に高周波数帯域において精度良く測定できていることがわかる。また、高周波数帯域におけるコヒーレンス特性が良いことがわかる。10~15kHz 付近における両者の FRF を見ると、共振峰の数は一致しているが FRF の形状はあまり一致していない。これはブロック上に設定した加振点および測定点がモードの節付近であるため、レーザー加振により測定された FRF の精度はこれらの点のわずかなずれに対して敏感に影響を受けたことが原因として考えられる。高周波数帯域における加振力を作用さ

せるレーザー加振では、ロードセル、加速度センサの取り付け方法や感度が FRF 測定の精度に影響を及ぼすことが考えられるため、今後検討する必要がある。レーザー加振の FRF において 25kHz 付近に観測された共振峰は、加速度センサの横軸感度によって測定された面内振動モードであることを FEM による固有値解析で確認した。

3.5 打撃試験法による FRF との比較 レーザー加振により測定された FRF と打撃試験法により測定された FRF を比較することで低/中周波数帯域における FRF の精度を検証する。図 10 は、点 2 の自己 FRF: H_{22} を示しており、比較のためレーザー加振により測定された FRF と打撃試験法により測定された FRF を重ねて示してある。ただし、レーザー加振と打撃試験法による FRF の測定条件を同一とするため、インパルスハンマによる打撃時の加振力は、アルミニウム板が取り付けられたロードセルを用いて測定した。図 10 を見ると 10kHz 以下の周波数帯域において両者の FRF は良く一致していることがわかる。また、1kHz 以下の周波数帯域、および 10kHz 以上の周波数帯域においては打撃試験法による FRF のコヒーレンス特性が大きく低下していることがわかる。2kHz 以下の周波数帯域を拡大した両者の点 2 の自己 FRF: H_{22} を図 11 に示す。ブロックの質量を M 、加振力を F 、加速度を a としたとき、ニュートンの第 2 法則よりこれらの FRF は $a/F=1/M$ となる。本実験で用いたブロックの質量が 398g であるので、FRF の大きさは 2.51 となる。本図より、レーザー加振による FRF には周期的な小さなピークが観察でき、打撃試験法による FRF と異なっている。これより 1kHz 以下の周波数帯域におけるレーザー加振の FRF を精度良く得るためには、ロードセル、加速度センサの取り付け方法やこれらの感度を適切に選択することが必要であり、今後検討する必要がある。

Fig. 10 Auto FRF (H_{22}) by laser excitation and impulse hammer

Fig. 11 Auto FRF (H_{22}) by laser excitation and impulse hammer (0~2kHz)

4. モード特性同定への適用

レーザー加振により測定された FRF に対してモード特性の同定を行うことで、従来では困難とされてきた高周波数帯域における振動モード形が実験的に得られることを示す。

振動モード形を観測するために、第3章と同様のブロックに対して、図12に示すように加振点、測定点を設定した。本図の加振点101(図中○)にロードセルを取り付けた。また、測定点101~135(図中○と●)に加速度センサ1個取り付け、これを順次移動することで35個のFRFを測定した。ロードセルはブロック上面にねじで固定し、加速度センサはブロック下面に、取り外しを容易にするために両面テープで固定した。FRF測定では、レーザーアブレーションに加え水滴の蒸発による運動量を加振力として用いるため、アルミニウム板に10 μ lの水滴を付着させ、パルスレーザーを照射した。FRF測定における平均化回数は10回とした。

図13はレーザー加振により実験的に得られた振動モード形を示している。FEMにより得られた図4(a),(b)と図13(a),(b)を比較すると、ロードセルの取り付け位置が異なるにもかかわらず、両者の振動モード形は良く一致していることがわかる。これよりレーザー加振を用いることで高周波数帯域の実験モデルを精度良く構築できることがわかった。

Fig. 12 Excitation (○) and measurement points (○ and ●) of the aluminum block

Fig. 13 Mode shape of the aluminum block

5. ヘルスモニタリングシステム

レーザー加振による高周波数帯域振動計測法を確立し、構造物の振動特性をモニタリングすることにより、その動特性の変動から機械システムの故障・不具合を診断する技術を構築する。構造の内部に損傷が発生した場合、高い周波数帯域におけるモードほど、固有振動数およびモード形の変動が大きくなることが報告されている⁽⁴⁾。従来の損傷に対する動特性変化を評価した研究では、対象とする帯域が数kHz程度であり、極微細な損傷の検出には限界がある。本技術の概念を図14に示す。レーザー照射部は、水滴や緩衝材などと組み合わせた構成とし、(インパルス幅など)加振周波数帯域を調整できる構造とする。まず、周波数応答から高周波数帯域において故障に対し感度の高いモードを特定する。非常に微細な故障(クラック)の場合、このようなモードは極めて高い周波数に存在することが予想される。そして、対象とする周波数レンジを特定したうえで、緩衝材を含むレーザー照射部および故障検知フィルターの設計を行う。本システムにより、今まで不可能であった極めて微細な故障の検知が可能になると考えられる。

Fig. 14 Concept of health monitoring based on high frequency vibration measurement with laser

6. 結 論

レーザーを用いたインパルス加振実験法による振動計測について検討し、以下の結論を得た。

1. レーザー加振により実験的に得られた振動モード形と FEM により得られた振動モード形を比較することで、従来では困難とされてきた高周波数帯域の実験モデルの構築が可能であることを示した。
2. レーザー加振により測定された FRF と FEM による FRF、従来の打撃試験法による FRF と比較することで、従来の振動実験では測定不可能であった高周波数帯域における FRF 測定を高精度で実現できることを示した。ま

た, 従来法に比べ高周波数帯域におけるコヒーレンス特性が非常に良いことを確認した.

3. 本研究で開発した高周波数帯域の振動計測法をベースとし, ヘルスマonitoringシステムを構築するコンセプトを示した.

文 献

- (1) The institute of Electrical Engineers of Japan ed., *Laser ablation and applications*, (1999), Corona Publishing Co., LTD.
- (2) Obata, T. and Kajiware, I., A New Method of Vibration Test Using Laser Ablation, *JSME Proceedings on Dynamics and Design Conference 2007*, (2007), CD-ROM (No.803).
- (3) Hosoya, N. and Kajiware, I., Vibration Testing by Using Laser Ablation, *JSME Proceedings on Dynamics and Design Conference 2008*, (2008), CD-ROM (No.455).
- (4) Shang D., Barkey, M. E., Wang, Y. and Lim T. C., Fatigue Damage and Dynamic Natural Frequency Response of Spot-Welded Joints, *Proceedings on 2003 SAE World Congress*, 2003-01-0695, (2003).