レーザーアブレーションを用いたインパルス加振に基づく 振動実験解析法*

細矢直基^{*1}, 梶原逸朗^{*2}, 反町 仁^{*3}

Vibration Testing Based on Impulse Response Excited by Laser Ablation

Naoki HOSOYA^{*4}, Itsuro KAJIWARA and Hitoshi SORIMACHI

^{*4} Department of Engineering Science and Mechanics, Shibaura Institute of Technology,
3-7-5 Toyosu, Koto-ku, Tokyo, 135-8548 Japan

This paper proposes a vibration testing system based on an impulse response excited by a laser ablation. In conventional vibration testing using an impulse hammer, high frequency elements of over tens of kilohertz are barely present in the excitation force. A high-power YAG pulse laser is used in this system for producing an ideal impulse force on a structural surface. By illuminating a point on a metal with a well-focused (2 μm) YAG laser, atoms, electrons and ions etc. are emitted from the metal. As a result, an ideal impulse excitation force generated by laser ablation is applied to a point on the structure. Therefore, it is possible to measure high frequency FRFs (Frequency Response Functions) in this system. Additionally, a water droplet overlay on the metal is used to adjust the force magnitude of laser excitation. An aluminum block that has nine natural frequencies below 40 kHz is employed as a test piece. The system is validated by comparing the FRFs of the block obtained using laser excitation, an impulse hammer, and FEM. In addition, the relationship between accuracy of FRF measurements and sensitivity of sensors is investigated.

Key Words: Laser Ablation, High Frequency Vibration, Impulse Response, Impact Testing, Frequency Response Function

1. 結 論

実験的に構造物の動特性を得るためには、構造物に加振力を作用させ、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を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精確な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。例えば、ハードディスクドライブの大容量化には磁気ヘッド駆動機構の高周波数帯域における振動問題を実験的に解決し、アーム先端の磁気ヘッドの位置決めの高精度化、現状のサーボ帯域の広帯域化を実現しなければならない⁽¹⁾。従って、高周波数帯域のFRF測定は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。

本論文では、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、レーザーアブレーションを用いたインパルス加振 (以下、レーザー加振と呼ぶ) に基づく振動実験解析法を開発する。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⁽²⁾。本手法は、高出力パルスレーザーを用いる

* 原稿受付 2009年3月26日。

^{*1} 正員, 芝浦工業大学工学部(〒135-8548 東京都江東区豊洲3-7-5)。

^{*2} 正員, 北海道大学大学院工学研究科(〒060-8628 札幌市北区北13条西8)。

^{*3} 芝浦工業大学工学部[現: トヨタ車体(株)](〒448-8666 刈谷市一里山町金山100)。

E-mail: hosoya@sic.shibaura-it.ac.jp

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。

過去に(a)レーザーを用いた加振方法⁽³⁾や(b)準レーザーアブレーションを用いた振動実験法⁽⁴⁾が提案されている。(a)はパルスレーザーのパルス幅が大きく100Hz以下の低周波数帯域を対象としている。また、(b)は熱応力を用いて加振力を発生させる手法で、2kHz以下の中周波数帯域を対象としている。(a)、(b)共にレーザーのパルス幅が0.1msオーダーで理想的なインパルスが発生させることは困難である。従って、高周波数帯域の振動実験を実現することを目的とした検討例は国内外に存在しない。本研究では、パルス幅5nsのパルスレーザーを使用しレーザーアブレーションを瞬時に発生させることにより高周波数帯域の加振を実現する。また、実験者の技術や熟練度に大きく依存する打撃試験法のFRFの測定精度向上を目的として、ハンマーガンの開発⁽⁵⁾や自動打撃加振装置の開発⁽⁶⁾などが検討されてきたが、これらは高周波数帯域におけるFRF測定を実現するための方法ではない。

本論文では、レーザー加振を用いた振動実験システムを構築し、振動実験において高周波数帯域のFRF測定が実現することを示す。本実験では、高出力YAGレーザーを被照射部にパルス照射し、インパルス加振力を作用させる。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、異なる感度のセンサを用いて測定しその影響を考察する。さらに、インパルスハンマー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。

2. レーザー加振を用いた振動実験システムの構築^{(7),(8)}

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）⁽²⁾。金属から質量 Δm が速度 v で放出された場合の運動

量は $\Delta m v$ で表すことができ、これが力積となる。過去の研究では、レーザーアブレーションにより飛翔体を運動させるための推進力は、金属表面に水滴を付着させその蒸発を利用することで増幅できる（より大きな推進力が得られる）ことがわかっている⁽⁹⁾。本システムにおいても同様に、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。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 $\Delta m v + \Delta M V$ 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⁽⁹⁾が報告され、機械加工（穴あけ、切断等）⁽²⁾や医療⁽²⁾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 μ 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 PXI-1042Q, PXI-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。

Fig. 2 Experimental system

Fig. 3 Attachment of a load cell and an accelerometer

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)。本論文では, 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。

Fig. 4 Excitation and measurement points

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と比較し検証するため, 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9個の固有振動数が確認できる。また, 図5は対象とした面外モードの一例を示しており, 図5(b), (c)はロードセル取り付け点が大きく変位するローカルモード(図5(c)右はロードセル取り付け部の拡大図)である。FEMによりFRFを計算する際のモード減衰比は0.5%とした。

Table 1 Natural frequencies of the aluminum block

Order	Frequency [Hz]
1st	4174.0
2nd	10222.7
3rd	12724.9
4th	20040.8
5th	28890.6
6th	30983.1
7th	32718.6
8th	35576.9
9th	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入力特性は、再現性が高く非常に安定していることを確認した。なお、FRF測定における平均化回数は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。

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のがわかる。図6(b)ではいくつかのピークが観測できる。ロードセルで測定された加振力は、レーザーアブレーションによる加振力と構造物とロードセル間の相互作用により生じた力を含んでおり、これが構造物に外力として作用している。

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. これはロードセルの取り付けをFEMにおいて厳密にモデル化していないことが原因として考えられる. 本実験においては, 高周波数帯域のFRFを測定するために, ロードセルをねじで固定している. 先に述べたように, FEモデルにおいてはロードセルの質量, 慣性モーメントを考慮したがねじ穴や締め付けトルク等は考慮していない. 図5(b), (c)を見

るとFEMによる固有値解析よりロードセル取り付け点のローカルモードが10~15kHz付近で確認できる. モード特性, 特に節の位置を含めたモード形状はロードセルのモデル化による影響を受けやすいといえる. 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, 11, 12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, 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, 11, 12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. しかしながら, 20kHz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確認できる. また, レーザー加振によるFRFは1kHz以下の周波数帯域においてコヒーレンス特性が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13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_{11}) by laser excitation and impulse hammer

Fig. 13 Auto FRF(H_{22}) by laser excitation and impulse hammer (0~2kHz)

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

Fig. 14 Auto FRF(H_{11}) with water droplet 10 μ l and 20 μ l

Fig. 12 Cross FRF(H_{31}) by laser excitation and impulse hammer

3.6 水滴量とFRFの精度 レーザー加振における水滴量の変化とFRFの精度の関係を明らかにする。また、レーザー加振における水滴の有無とFRFの精度の関係についても検討する。

3.6.1 水滴量10 μ lと20 μ lの違い 図14は、水滴量10 μ lと水滴量20 μ lで測定された点1の自己FRF: H_{11} を比較のため重ねて示している。図14を見ると全周波数帯域において両者のFRFは良く一致しているが、水滴量10 μ lより水滴量20 μ lのFRFのコヒーレンス特性が若干良いことがわかる。高周波数帯域においてより高精度なFRFを得るためにはレーザーパワーと発生しうる加振力の大きさという観点から、適切な水滴量があると考えられる。

3.6.2 水滴の有無によるFRFの精度 図15は、水滴量 $10\mu\text{l}$ と水滴なしで測定された点2の自己FRF: H_{22} を比較のため重ねて示している。水滴なしで測定されたFRFの精度は全周波数帯域において大幅に低下していることが確認できる。レーザーアブレーションの際に水滴を付着させるとこの水滴が蒸発し、より大きな加振力を発生させることができ、これが相対的なSN比向上に寄与しているといえる。また、レーザー加振において水滴を付着させることで、加振力の大きさを調節できることもわかった。

3.7 FRF測定におけるロードセルの感度 ロードセルの感度がFRFの測定精度に及ぼす影響を調べる。3.6節において、水滴を付着させることでより大きな加振力を発生させることができ、高周波数帯域において高精度なFRFを測定するためには、適切な水滴量があることを示した。本節では高感度ロードセルを使用することで相対的なSN比向上を試み、FRFの測定精度とロードセルの感度の関係を検討する。表2に本論文で検討したロードセルの感度を示す。(a)は精度良くFRF測定ができた低感度ロードセル、(b)が検討する高感度ロードセルである。

Fig. 15 Auto FRF(H_{22}) with water droplet $10\mu\text{l}$ and without water droplet

Table 2 Experimental conditions

	Load cell		Water droplet [μl]	Laser output [mJ]
	Type	Sensitivity [mV/N]		
(a)	208A03	2.248	10	650
(b)	208C02	10.93	10	650

Fig. 16 Auto FRF(H_{22}) by condition (a) and (b)

(a) Excitation force by laser excitation (condition (a)) and impulse hammer

(b) Excitation force by laser excitation (condition (b)) and impulse hammer

Fig. 17 Time histories by laser excitation and impulse hammer

図16は、水滴量 $10\mu\text{l}$ で測定した点2の自己FRF: H_{22} で、(a)低感度ロードセルと(b)高感度ロードセルで得られたFRFを比較のため重ねて示している。(b)のFRFの精度、コヒーレンス特性が(a)に比べ大きく低下していることがわかる。

FRFの測定精度低下の原因をレーザー加振により得られた加振力の時刻歴波形で検証する。図17は、(a)低感度ロードセル、(b)高感度ロードセルで測定されたレーザー加振による加振力を示しており、それぞれ比較のため(c)インパルスハンマにより得られた加振力を重ねて示している。(a)の加振力は、(c)の加振力に比べ理想的なインパルス加振力であることがわかる。しかし、(b)の加振力は(a)、(c)の加振力と異なりインパルス

加振力ではないことがわかる。レーザー加振による理想的なインパルス加振力は高周波数帯域の加振を実現するが、高感度ロードセルを用いた場合にはオーバーロードが発生しロードセルの出力に加振力以外の信号が含まれることがある。これがFRF測定における精度低下の原因と考えられる。本実験においては加速度センサにはオーバーロードが発生していないと考えられるが、より高感度の加速度センサを用いれば同様にオーバーロードが発生することが予想される。従って、レーザー加振を用いたFRF測定においては、適切なロードセルや加速度センサの感度を選択することで高精度のFRF測定が実現できる。

4. 結 論

レーザーアブレーションを用いたインパルス加振に基づく振動実験解析法を開発し、以下の結論を得た。

1. 高出力YAGパルスレーザーを用いることで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振動実験システムを開発した。本手法ではパルスレーザーを用いるが、入出力測定は市販のロードセル、加速度センサを用いて行うため、一般的な振動実験解析法とほぼ同じである。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、ロードセルにアルミニウム板を取り付けそれに対してレーザーをパルス照射する手法を導入した。
2. 高周波数帯域に固有振動数を持つ構造物に対して本手法を適用し、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. レーザー加振によるFRF測定において高精度なFRFを得るためには、被照射部に適切な水滴量を付着させることが重要であることを振動実験を通して示した。また、レーザー加振による加振力はロードセルと加速度センサを共振させオーバーロードを発生させることがあるため、適切な感度を選択する必要がある。FRF測定におけるオーバーロードは、構造物の大きさ、加振点や測定点の位置、ロードセルや加速度センサの取り付け方や感度に依存するが、これらを適切に選択する

ことでオーバーロードを発生させずにFRF測定が可能になることを示した。

文 献

- (1) Takahashi, M., Kajiwar, I. and Arisaka, T., Optimization of Smart Structure for Improving Servo Performance of Hard Disk Drive, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.75, No.753(2009), pp.1369-1376.
- (2) The institute of Electrical Engineers of Japan ed., *Laser ablation and applications*, (1999), Corona Publishing Co., LTD.
- (3) Koss, L. L. and Tobin, R. C., Laser Induced Structural Vibration, *Journal of Sound and Vibration*, Vol.86(1)(1983), pp.1-7.
- (4) Philp, W. R., Booth, D. J. and Perry, N. D., Single Pulse Laser Excitation of Structural Vibration Using Power Densities Below The Surface Ablation Threshold, *Journal of Sound and Vibration*, Vol.185(4)(1995), pp.643-654.
- (5) Toyo Corporation Team PCB. (online), available from <<http://www.toyo.co.jp/pcb/pdf/Sensor63-66.pdf>>, (accessed 2009-3-16).
- (6) Iwahara, M., Sugiura, T. and Nagamatsu, A., Improvement of Accuracy and Reliability of Experimental Modal Analysis (Invention on Impact Testing and Decrease of Measurement Error), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.64, No.618(1998), pp.538-545.
- (7) Obata, T. and Kajiwar, I., A New Method of Vibration Test Using Laser Ablation, *JSME Proceedings on Dynamics and Design Conference 2007*, (2007), CD-ROM (No.803).
- (8) Hosoya, N. and Kajiwar, I., Vibration Testing by Using Laser Ablation, *JSME Proceedings on Dynamics and Design Conference 2008*, (2008), CD-ROM (No.455).
- (9) Kajiwar, I., Hoshino, K., Ishikawa, H., Shimane, Y., Yabe, T., and Uchida, S., Integrated Laser Propulsion/Tracking System for Laser-Driven Micro-Airplane, *Theoretical and Applied Mechanics Japan*, Vol.53(2004), pp.115-124.