

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月25日現在

機関番号：32619
 研究種目：若手研究(A)
 研究期間：2010年（平成22年）～2012年（平成24年）
 課題番号：22686025
 研究課題名（和文） レーザーアブレーション加振による超小型機器の高周波数帯域における非接触振動実験法
 研究課題名（英文） Non-Contact Vibration Testing Based on Impulse Response Excited by Laser Ablation
 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

研究成果の概要（和文）：

本研究では、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(LA)を用いたインパルス加振に基づく非接触振動実験解析法を開発した。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LA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。本手法により、FRF計測における力計測のセンサレス化、LAにより生成されるパルス音源を用いた音響加振、水中構造物の非接触振動試験を実現した。

研究成果の概要（英文）：

I proposed a non-contact vibration testing system based on an impulse response excited by a laser ablation. A high-power Nd: YAG pulse laser is used in this system for producing an ideal impulse force on a structural surface. Therefore, it is possible to measure high frequency frequency response functions (FRF) in this system. I investigated three methods as follows: a method that makes it possible to analyze FRF by only measuring the output (acceleration response) in a laser excitation experiment, a method of acoustic vibration testing using a pulse sound source generated by laser ablation, and a method of a non-contact experimental vibration analysis for underwater structures by pulsed-laser ablation.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	8,500,000	2,550,000	11,050,000
2011年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
2012年度	2,800,000	840,000	3,640,000
年度			
年度			
総計	15,000,000	4,500,000	19,500,000

研究分野：機械工学

科研費の分科・細目：機械力学・制御

キーワード：レーザーアブレーション、プラズマ、非接触、高周波数帯域、超小型機器、振動試験

1. 研究開始当初の背景

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計測することにより、周波数応答関数 (FRF) 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／中周波数帯域の計測に限られている。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 計測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。従って、高周波数帯域の FRF 計測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。

2. 研究の目的

本研究では、レーザーアブレーション(LA)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 MEMS 等の超小型機器のための高周波数帯域における非接触振動実験解析法を提案する。LA 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。本手法は、ナノ秒オーダーの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 LA を発生させ、理想的なインパルス加振入力を点加振で実現させる。これにより高周波数帯域における振動計測を可能にする。

3. 研究の方法

本研究では、図 1 に示すような高出力 Nd: YAG パルスレーザーを用いた非接触レーザー加振システムを構築した。パルスレーザー、凸レンズを光学定盤に設置し、LA を発生させた。

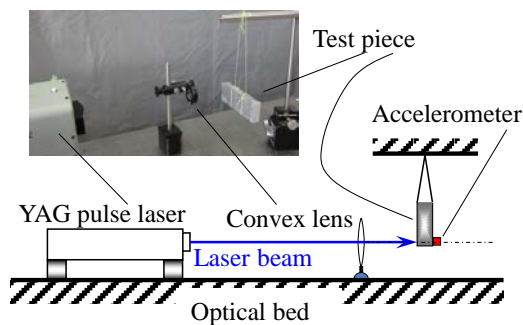


図 1 パルスレーザーを用いた非接触レーザー加振システム

本研究では、主に(1) LA を用いたインパルス加振に基づく振動実験解析法 (FRF 計測における力計測のセンサレス化)、(2) LA により生成されるパルス音源を用いた音響加振

法、(3) LA によるインパルス加振を用いた水中構造物の非接触振動実験法について検討を行った。4. 研究成果において詳細に説明する。

4. 研究成果

(1) LA を用いたインパルス加振に基づく振動実験解析法 (FRF 計測における力計測のセンサレス化)

本研究では、レーザー加振実験において出力(加速度応答)のみの計測で周波数応答関数解析を行う手法を提案した。これにより、力入力計測をセンサレス化することが可能となる。本研究では、レーザー加振力を剛体ブロックを用いてニュートンの第二法則により規格化できることを示した。レーザー加振は、加振力の方向や大きさ、作用時間がほぼ一定であるため、これを事前に計測し規格化できる。次に、高周波数帯域に固有振動数を有する構造物を対象としたレーザー加振実験において、応答のみによる FRF 計測を実現した。まず、計測された応答をフーリエ変換し、これをレーザー加振力で除し、力の大きさと規格化された複素フーリエスペクトルを得る。この絶対値と FEM により得られた入出力振幅比(ゲイン)とを比較評価する。そして、応答のトリガ位置と実際にインパルス入力印加する時間には誤差があるため、応答に含まれるむだ時間を考慮し上記複素フーリエスペクトルの位相特性を補正し、対象構造物の FRF を得る。本手法の有効性を検証すると共に、レーザー加振力の規格化に用いる剛体ブロックの固有振動数の影響、およびレーザー出力とレーザー加振力の関係を明らかにした。

図 1 のように、高出力 Nd: YAG パルスレーザー、凸レンズを光学定盤に設置した。本実験におけるレーザーパルスエネルギーは 0.21 J とした。本実験では、アルミニウム製の立方体ブロック(大きさは 150 mm × 50 mm × 20 mm、質量は 398 g)を対象構造物とした。このブロックの面外モードを計測対象とした。ブロックは吊り下げによる周辺自由支持とした。加速度センサを構造物の計測点に接着剤で取り付け、応答を計測した。

図 2 に、本システムにより得られた自己 FRF を示す。位相特性は、実験結果の位相特性における非共振領域での周波数軸に対する傾きが 0 になるようにむだ時間を求めることで補正した。図 2 においては、比較のため FEM による FRF を重ねて示している。本図より、両者の FRF の振幅、位相特性共に良く一致していることがわかる。これよりレーザー加振力の規格化、および力計測をセンサレス化した FRF 計測が有効であるといえる。

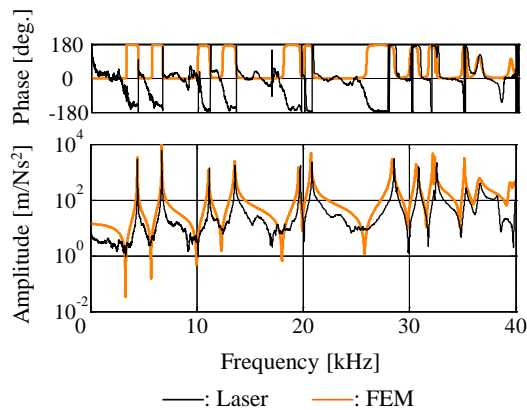


図2 非接触レーザー加振システムにより計測された対象構造物の自己FRF

得られた知見を以下に示す。

- ① ロードセルによる力計測をセンサレス化したFRF計測法を提案した。これにより、レーザー加振力を非接触、かつ理想的な点加振で実現できることから、超小型機器に対する加振が可能となる。
- ② 高周波数帯域に固有振動数を有する構造物のFRF計測において、本手法により計測されたFRFとFEMにより得られたFRFを比較評価することで、FRF計測における力計測のセンサレス化が実現できることを示した。
- ③ 力計測をセンサレス化するために、レーザー加振力を規格化する手法を導入した。

(2) LAにより生成されるパルス音源を用いた音響加振法

本研究では、LAにより生成された衝撃波をパルス音源として用いる音響加振法を検討した。LAでは、高出力のレーザービームを集光し固体にパルス照射すると、表面温度が急激に上昇し、原子、分子、それらのイオン等が爆発的に放出され、プラズマが形成される。このプラズマエネルギーの一部が衝撃波を生成し、これが音源となる。このLAによるパルス音源（以下、LA音源と呼ぶ）は、計測対象音場内に微小片を設置し、それに対してレーザーを照射しLAを発生させるため、音源位置を一定に保つことができるという利点を有する。本研究では、高出力Nd:YAGパルスレーザーを用いたLA音源による音響加振システムを構築した。本実験では、LA音源の音圧、周波数特性の関係を調べ、LA音源が高い再現性を有するパルス音源であることを示した。

図3に、本研究で構築したLA音源による音響加振システムを示す。光学定盤上にNd:YAGパルスレーザー、凸レンズを光学定盤上に設置した。レーザーパルスエネルギーは0.19 Jとした。図3のように、LA音源の音圧を計測するため、LA音源から300 mmの位置

にマイクロホンを設置した。本手法では、LAによるインパルス加振力が作用するターゲットの固有振動数が、音場に及ぼす影響を小さくし、この固有振動数は計測対象周波数よりも大きく設定する必要があるため、1辺が20 mmのアルミニウム製の立方体（質量：21.3 g、固有振動数：70 kHz）を用いた。

LA音源の再現性、および周波数特性を調べた。図4に、LA音源の音圧の時刻歴波形において音圧発生付近の時間軸を拡大した図を示す。また、図4では、再現性を確認するために10回計測した音圧を重ねて示す。図4をみると、LA音源はパルス幅が約20 μ sであるパルス音源であり、高い再現性を有することがわかる。また、図4より、LA音源は約70 kHz程度の高周波数帯域までほぼ一定の音響加振成分を有するが、スペクトルの大きさは若干変化していることがわかる。これは、LA音源の音圧計測を光学定盤上で行ったため、設置された光学系による反射、暗騒音、マイクロホンの特性などによる影響と考えられる。したがって、LA音源はその発生位置においては理想的なインパルス波形であるといえる。

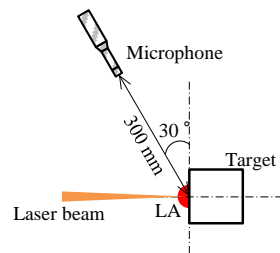


図3 LAによる音響加振システム

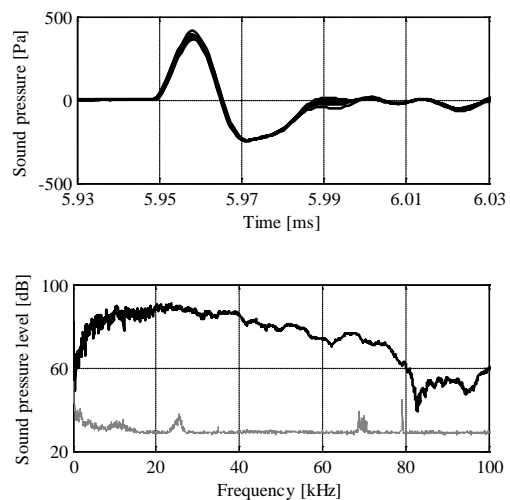


図4 LA音源により生成されたインパルス音源、(上)時刻歴波形、(下)パワースペクトル

得られた知見を以下に示す。

- ① 計測対象音場内に設置されたターゲットに対して、高出力Nd:YAGレーザーをパ

ルス照射することで、LA を発生させ、これにより生成された衝撃波を用いた音響加振システムを構築した。LA 音源は、パルス幅約 20 μs のパルス音源であり、高い再現性を有することがわかった。

(3) LA によるインパルス加振力を用いた水中構造物の非接触振動実験法

本研究では、LA によるインパルス加振を用いた非接触振動実験法による水中構造物の FRF 計測を検討した。レーザー加振は、理想的なインパルス加振力を非接触で入力でき、高周波数帯域における振動計測に有効であるという特徴があり、LA は水中でも同様に発生する。本手法では入出力計測を共に非接触化するために、入力をレーザー加振により作用させ、出力をレーザードップラー振動計 (LDV) で計測した。なお、水中でのレーザー加振力は、既報で提案した剛体振り子法を導入することで事前に規格化した。本実験では、アルミニウム製平板が水に浸された状態を水中構造物と想定し、FRF 計測を実施した。本手法による FRF と水を付加質量としてのみ考慮した FEM 解析による FRF とを比較・評価することで、本手法の有効性を検証した。また、水位が水中でのレーザー加振力、および水中構造物の動特性に及ぼす影響を調べた。さらに、水中構造物のモード特性を同定し、振動モード形が得られることを示した。

図 5 に本実験で用いたレーザー加振システムを示す。高出力 Nd: YAG パルスレーザー、凸レンズを光学定盤に設置した。レーザービームは、凸レンズとアクリルケース (大きさ: 101 mm \times 101 mm \times 101 mm, 板厚: 2 mm) を透過し、対象構造物の加振表面で集光させ、LA を発生させた。レーザーパルスエネルギーは 0.141 J とした。本実験では、水中での応答を非接触で計測するために、LDV を用いた。また、アクリルケース内に水を入れ構造物を浸すことで、水中構造物を模擬した。水中構造物は、材質がアルミニウム製、大きさが 100 mm \times 50 mm \times 5 mm である平板とした。支持方法は、紐で吊るし自由支持とした。

図 6 に示した水中構造物において、半分を水に浸した状態で計測された自己 FRF を示す。これらは、従来の振動実験では計測困難とされてきた FRF で、図 6 では、比較のため FEM により得られた FRF と重ねて示している。図 6 より、本システム、および FEM により得られた、1~2 次モード (2~3 kHz 付近) の固有振動数、FRF の振幅、および位相を比較すると、両者は概ね一致していることがわかる。これより、本システムにより水中構造物の FRF 計測が実現でき、規格化された水中レーザー加振力は妥当であることがわかる。また、この周波数帯域においては流体の影響

による非線形性は弱いことが確認できる。非線形性の弱い 1 次、2 次に対してモード特性同定を行い、得られた 1 次の振動モード形を図 7 に示す。なお、X-X' は水位を示している。図 7 をみると、本システム、および FEM により得られた振動モード形は定性的に一致していることがわかる。

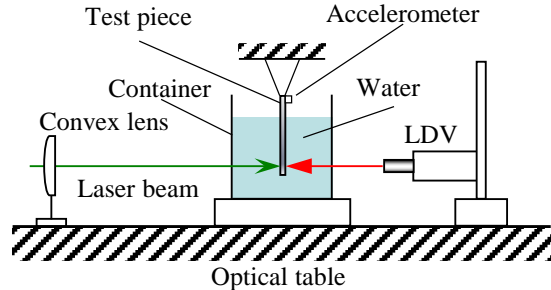


図 5 LA による水中構造物の非接触振動試験システム

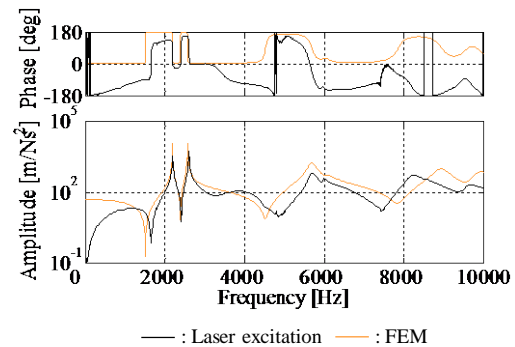


図 6 LA による非接触レーザー加振システムにより計測された水中構造物の FRF

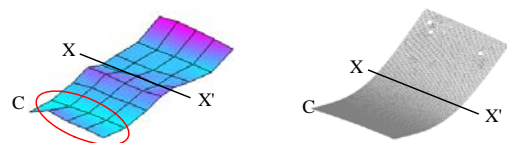


図 7 水中構造物の振動モード形

得られた知見を以下に示す。

- ① レーザーパルスエネルギーと水中におけるレーザー加振力の関係を規格化し、応答を LDV により計測することで、水中構造物に対する入出力計測を非接触化した振動実験法を実現した。
- ② 本システムにより計測された、水中構造物の FRF を、流体の影響を考慮した FEM により得られた FRF と比較・評価することで、従来では困難とされてきた加振入力を水中とした際の FRF 計測を実現できることを示した。
- ③ 非線形性の弱いモードを対象に実験モード解析を行ったところ、水中構造物の動特性が同定できることを示した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 10 件)

- ① Naoki Hosoya, Masaki Nagata, Itsuro Kajiwara, Acoustic testing in a very small space based on a point sound source generated by laser-induced breakdown: stabilization of plasma formation, Journal of Sound and Vibration, (***), 2013, ****-****.(査読有). (in press)
- ② 細矢直基, 矢作修一, 梶原逸朗, レーザーアブレーションによるインパルス加振力を用いた水中構造物の非接触振動実験法, 日本機械学会論文集 C 編, 78 巻 791 号, 2426-2437, 2012. (査読有).
- ③ 細矢直基, 永田将希, 梶原逸朗, レーザーブレイクダウンによる点音源を用いた微小空間の音響加振法, 日本機械学会論文集 C 編, 78 巻 787 号, 770-782, 2012. (査読有).
- ④ Naoki Hosoya, Itsuro Kajiwara, Takahiko Hosokawa, Vibration testing based on impulse response excited by pulsed-laser ablation: Measurement of frequency response function with detection-free input, Journal of Sound and Vibration, (331), 2012, 1355-1365. (査読有).
- ⑤ 宮本大資, 梶原逸朗, 細矢直基, 非接触レーザー加振技術を用いた回転円板の実稼動時振動計測, 日本機械学会論文集 C 編, 77 巻 784 号, 2011, 4402-4412. (査読有).
- ⑥ 中村哲司, 朱艶, 梶原逸朗, 細矢直基, 非接触レーザー加振システムによるマイクロスマート構造の制振特性評価, 日本機械学会論文集 C 編, 77 巻 784 号, 2011, 4413-4424. (査読有).
- ⑦ Itsuro Kajiwara, Daisuke Miyamoto, Naoki Hosoya, Chiaki Nishidome, Loose Bolt Detection by High Frequency Vibration Measurement with Non-Contact Laser Excitation, Journal of System Design and Dynamics, Vol.5(2011), No.8, 1559-1571. (査読有).
- ⑧ Itsuro Kajiwara and Naoki Hosoya, Vibration Testing Based on Impulse Response Excited by Laser Ablation, Journal of Sound and Vibration, (330), 2011, 5045-5057. (査読有).
- ⑨ 宮本大資, 梶原逸朗, 細矢直基, 西留千晶, レーザー加振技術を用いた高周波帯域の特性変動検知に基づくヘルスマニタリング, 日本機械学会論文集 C 編, 77 巻 777 号, 2011, 1760-1771. (査読有).
- ⑩ 細矢直基, 梶原逸朗, 細川恭彦, 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 (FRF 計測における力計測のセンサレス化), 日本

機械学会論文集 C 編, 77 巻 773 号, 2011, 102-113. (査読有).

[学会発表] (計 19 件)

- ① Feblil Huda, Itsuro Kajiwara, Naoki Hosoya, Shozo Kawamura, Bolted joint loosening detection by using laser, SPIE Smart Structures/NDE, 8695-109, (査読有), 2013.3.10-14, アメリカ.
- ② Itsuro Kajiwara, Satoshi Nakamura, Yan Zhu and Naoki Hosoya, Vibration control evaluation of smart microstructures with non-contact laser excitation, Proceedings of the Eleventh International Conference on Motion and Vibration Control (MOVIC 2012), CD-ROM, (査読有), 2012.10.17-19, アメリカ.
- ③ Naoki Hosoya, Masaki Nagata and Itsuro Kajiwara, Acoustic testing in a micro-space based on a point source generated by laser-induced breakdown, Proceedings of International Conference on Noise and Vibration Engineering (ISMA 2012), CD-ROM (49-58), (査読有), 2012.9.17-19, ベルギー.
- ④ Itsuro Kajiwara, Daisuke Miyamoto, Naoki Hosoya, Chiaki Nishidome, Structural Health Monitoring by High Frequency Vibration Measurement with Non-contact Laser Excitation, SPIE Smart Structures/NDE, (査読有), 2011.3.6-10, アメリカ.
- ⑤ Naoki Hosoya, Itsuro Kajiwara, Takahiko Hosokawa, Input Sensorless FRF Measurements by Laser Excitation System, Proceedings of International Conference on Noise and Vibration Engineering (ISMA 2010), CD-ROM (1747-1758), (査読有), 2010.9.20-22, ベルギー.
- ⑥ 新里淳, 梶原逸朗, 細矢直基, レーザーブレイクダウンによる非接触加振法を用いた膜構造の振動モード実験, 日本機械学会[No.12-70]シンポジウム講演論文集(第11回評価・診断に関するシンポジウム), 55-59, (査読無), 2012.12.10-11, 川崎.
- ⑦ 朱艶, 梶原逸朗, 細矢直基, マイクロスマート構造のパッシブ/アクティブ併用振動制御—非接触レーザー加振システムによる制振特性評価, 第 55 回自動制御連合講演会 CD-ROM 講演論文集, 1480-1485, (査読無), 2012.11.17-18, 京都.
- ⑧ 小林明莉, 細矢直基, 梶原逸朗, 非接触レーザー加振技術を用いたモーメント加振法による周波数応答関数の推定, [No.12-1] 日本機械学会 2012 年度年次大会講演論文集, (No. J044042) ,(査読無), 2012.9.9-12, 金沢.

- ⑨ 井上龍生, 細矢直基, 梶原逸朗, レーザーアブレーションにより生成されるパルス音源を用いた音響加振法, [No.12-1] 日本機械学会 2012 年度年次大会講演論文集, (No. J044041), (査読無), 2012.9.9-12, 金沢.
- ⑩ 杉本雅俊, 竹内将人, 梶原逸朗, 細矢直基, 河村庄造, 非接触レーザー加振技術によるボルト緩み検知に関する研究, [No.12-1] 日本機械学会 2012 年度年次大会講演論文集, (No. J044034), (査読無), 2012.9.9-12, 金沢.
- ⑪ 細川恭彦, 細矢直基, 梶原逸朗, レーザー加振技術を用いた非接触周波数応答関数計測によるマイクロカンチレバーの動特性同定, 日本機械学会[No.120-1], 日本機械学会関東支部第 18 期総会講演会講演論文集, 205-206, (査読無), 2012.3.9-10, 津田沼.
- ⑫ 西埜亮太, 梶原逸朗, 細矢直基, 西留千晶, 非接触レーザー加振技術による膜構造の振動モード特性評価, 日本機械学会[No.11-49], 第 10 回 評価・診断に関するシンポジウム 講演論文集, 61-64, (査読無), 2011.12.14-15, 大阪.
- ⑬ 宮本大資, 梶原逸朗, 細矢直基, レーザー加振技術を用いた回転円板の実稼動時振動計測, 日本機械学会[No.11-2]Dynamics and Design Conference 2011 CD-ROM 論文集, (No. 231), (査読無), 2011.9.5-9, 高知.
- ⑭ 永田将希, 細矢直基, 梶原逸朗, レーザーブレイクダウンによる点音源を用いた微小空間の音響加振法, 日本機械学会[No.11-2]Dynamics and Design Conference 2011 CD-ROM 論文集, (No. 650), (査読無), 2011.9.5-9, 高知.
- ⑮ 矢作修一, 細矢直基, 梶原逸朗, レーザーアブレーション加振による水中構造物の非接触振動試験, 日本機械学会[No.11-2]Dynamics and Design Conference 2011 CD-ROM 論文集, (No. 719), (査読無), 2011.9.5-9, 高知.
- ⑯ 細川恭彦, 細矢直基, 梶原逸朗, 打撃試験を用いた高周波帯域の特性変動検知に基づくボルト緩み診断, 日本機械学会関東支部第 17 期総会講演会 講演論文集, 71-72, (査読無), 2011.3.18-19, 横浜.
- ⑰ 細川恭彦, 細矢直基, 梶原逸朗, 打撃試験を用いた高周波帯域の特性変動検知に基づくヘルスマニタリング, 日本機械学会[No.10-8]機械力学・計測制御部門講演会 論文集, CD-ROM, (No. 610), (査読無), 2010.9.14-18, 京都.
- ⑱ 細矢直基, 梶原逸朗, 細川恭彦, 力計測をセンサレス化したレーザー加振実験に基づく FRF 計測, 日本機械学会

[No.10-8]機械力学・計測制御講演会 論文集, CD-ROM, (No. 120), (査読無), 2010.9.14-18, 京都.

- ⑲ 宮本大資, 梶原逸朗, 細矢直基, 櫻井泰貴, 古川崇人, レーザー加振技術を用いた高周波帯域の特性変動検知に基づくヘルスマニタリング, 日本機械学会[No.10-8]機械力学・計測制御部門講演会 論文集, CD-ROM, (No. 656), (査読無), 2010.9.14-18, 京都.

[産業財産権]

○出願状況 (計 3 件)

名称: 「構造物の振動特性の測定方法および振動特性測定装置」

発明者: 梶原逸朗, 細矢直基

権利者: 国立大学法人北海道大学, 学校法人芝浦工業大学

種類: 特許

番号: 特願 2012-520295(日本)

出願年月日: 2012 年 11 月 12 日

国内外の別: 国内

名称: 「Method for Measurement of Vibration Property of Structure, and Vibration Property Measurement Device」

発明者: 梶原逸朗, 細矢直基

権利者: 国立大学法人北海道大学, 学校法人芝浦工業大学

種類: 特許

番号: 第 13/704,439 号(米国)

出願年月日: 2012 年 12 月 14 日

国内外の別: 国外

名称: 「Method for Measurement of Vibration Property of Structure, and Vibration Property Measurement Device」

発明者: 梶原逸朗, 細矢直基

権利者: 国立大学法人北海道大学, 学校法人芝浦工業大学

種類: 特許

番号: 第 11795411.5 号(欧州)

出願年月日: 2012 年 12 月 17 日

国内外の別: 国外

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