

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15日現在

機関番号：10101
 研究種目：基盤研究(A)
 研究期間：2010～2012
 課題番号：22246027
 研究課題名（和文）パルスレーザーを用いた非接触加振に基づく高周波振動計測／高感度異常検知技術の開発
 研究課題名（英文）Development of High Frequency Vibration Measurement and Health Monitoring System Using Contactless Laser Excitation
 研究代表者
 梶原 逸朗 (KAJIWARA ITSURO)
 北海道大学・大学院工学研究院・教授
 研究者番号：60224416

研究成果の概要（和文）：パルスレーザーを構造物に照射したときに発生するアブレーションを利用した振動計測システムを開発し、100kHz という高周波数帯域においてコヒーレンス特性に優れた周波数応答を高精度に測定できることを検証した。そして、開発した計測技術をボルト緩みなどの異常を検知するシステムへと拡張し、高周波数帯域における特性変動を抽出することにより、微小な損傷を高感度で検知できることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：This study developed a vibration testing and health monitoring system based on an impulse response excited by a laser ablation. High power Nd: YAG pulse laser was used for producing an ideal impulse force on structural surface. It was possible to measure high frequency vibration responses in this system. A health monitoring system was constructed by this vibration testing system and a damage detecting algorithm.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	13,400,000	4,020,000	17,420,000
2011年度	11,900,000	3,570,000	15,470,000
2012年度	7,300,000	2,190,000	9,490,000
年度			
年度			
総計	32,600,000	9,780,000	42,380,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械力学・制御

キーワード：振動解析・試験

1. 研究開始当初の背景

MEMS などの超小型機器から自動車などの大型機器において、非接触かつ広周波数帯域／高周波数帯域において高精度で振動計測できる技術の要求が極めて高い。その代表例として、ハードディスクドライブ(HDD)の高密度化のための振動評価が挙げられる。HDD 用ヘッドアクチュエータ機構において、将来の高密度化を達成するためには、40kHz までの共振応答を抑制することが要求される。研究代表者は、スマート構造における制

御技術を利用して 40kHz 以下の共振応答を大幅に低減し、高密度化につながるサーボ系の広帯域化を実現した。このように、先端機械システムにおいて高周波数帯域での振動特性評価／モデル化／制御系設計に基づく実システムの開発および実用化という観点から、40kHz もしくはそれ以上の帯域の振動特性を非接触かつ高精度で加振・計測する技術の確立が不可欠である。

2. 研究の目的

本研究では、レーザーアブレーションを利用した革新的振動計測技術を開発する。非接触による加振技術は、超小型機器以外にも、自動車やさまざまな移動機構において、実験時における動特性を計測・評価する上で極めて有効になることは疑いの余地がない。さらに、この技術により高周波数帯域のモデル化および制御系設計が可能になり、振動計測・評価/モデル化/制御系設計という一連の流れの中で幅広い応用展開が期待できる。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。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特性変化から微小な不具合を高感度で検知できる可能性がある。したがって、レーザー加振・計測技術とヘルスマonitoring技術の創成は、システムの機能・性能を維持することはもちろん、システムの信頼性・安全性を向上させることにつながる。

3. 研究の方法

(1) レーザー加振により計測される振動特性の評価

100kHz までの高周波数帯域における周波数応答計測を実現するために、レーザー加振による加振力の大きさ、レーザーパワーと加振力との関係、および周波数特性を評価する。ロードセルに直接レーザーを照射すると破損する恐れがあるため、ロードセルにレーザーアブレーション用の金属板を取り付ける手法を導入する。そして、解析的/実験的最適化技術を駆使し、金属の最適な材質、形状、大きさを検討する。レーザー加振は高周波数帯域の入力成分を含むため、センサが共振しオーバーロードとなる恐れがある。これを回避するためのロードセルと加速度センサの感度を検討する。そして、レーザー加振・振動計測技術の体系化を図るため、これらの評価結果を整理する。

(2) 力計測のセンサレス化

本手法の大きな特徴の一つが、レーザー照射による非接触加振のため、加振位置およびレーザーエネルギー/パッシブ制御機構で規定される加振力の大きさが常に一定と考えられることである。したがって、各条件で作用させ得る加振力の大きさを体系的に規格化しておけば、計測時に力計測のためのセンサは必要ないことになる。つまり、計測対象の応答さえ計測すれば、システムの周波数応答の獲得が可能になり、実験装置の簡略化および計測の高効率化に大きく貢献する。

(3) ヘルスマonitoring技術

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Monitorng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。レーザー被照射部には加振力のパッシブ制御機構を導入し、加振力特性を調整できる構造とする。システム構築のプロセスにおいて、まず高周波数帯域で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設定した上で、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最適設計を行う。

4. 研究成果

(1) レーザー加振による計測される振動特性の評価

レーザーパワー、被照射金属の材質とサイズ、発生するインパルス加振力と力積などの特性を体系的に整理し、高周波数帯域まで高精度に振動を計測できる技術を開発した。図1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レーザーを設置した。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 $2\mu\text{m}$ に集光したパルスレーザーを構造部表面に照射してレーザーアブレーションを発生させるシステムとした。図2に示すように、レーザー加振による加振力は構造物の入力点にねじで固定したロードセルで測定するが、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 $13.8\text{mm}\times 13.8\text{mm}$ 、厚さ 1.5mm 、質量 0.7g のアルミニウム製平板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、その応答信号を構造物の測定点に接着剤で取り付けた加速度センサで測定した。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。測定した入出力はスペクトルアナライザにより記録し、ま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、測定対象周波数は 40kHz とした。

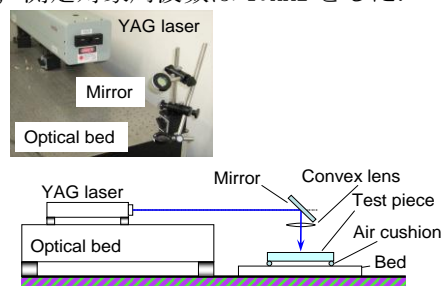


図1 実験システムの構成

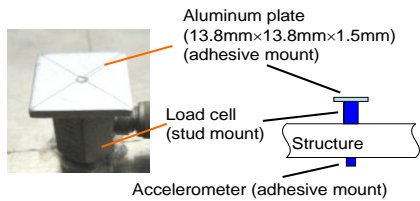


図2 入出力計測部

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を供試体とした(図3参照)。本実験では、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。図4は、ブロックの点1(図3参照)の自己FRF: H11を示している。図の縦軸は下からコンプライアンスの絶対値、位相、コヒーレンスで、横軸は周波数である。図には、比較のためレーザー加振により測定したFRFと従来から使われている打撃試験法により測定したFRFを重ねて示してある。この結果から、高周波数帯域に固有振動数を持つ構造物に対し、レーザー加振させたときに測定されたFRFと従来の打撃試験法で測定したFRFとを比較することで、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。

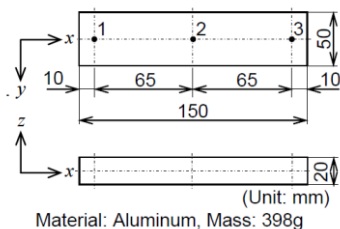


図3 試験対象

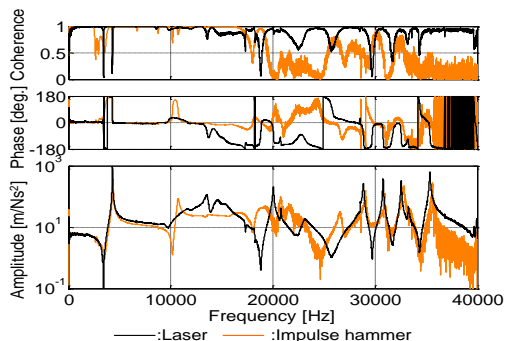


図4 周波数応答計測結果

(2) 力計測のセンサレス化

レーザー照射による非接触加振の特徴と

して、加振力の大きさが常に一定であることを利用し、実験的に得た加振力特性を予め体系的に規格化しておくことにより、センサレスで入出力振動伝達特性を計測できる技術を開発した。

まず、はじめにレーザー加振力の大きさをニュートンの第二法則により事前に規格化した。剛体ブロックは、計測対象周波数範囲で剛と仮定できる材料、形状、寸法を有する金属とする。そして、FEMによる固有値解析に基づき、剛体ブロックの固有振動数が計測対象周波数に対して十分に高くなるような材料、形状、寸法を選定した。次に、加速度センサを取り付けた剛体ブロックを周辺自由支持となるように吊り下げ、それを直接レーザー加振し、得られた加速度応答と剛体ブロックの質量から加振力を算出することにより、加振力の大きさを体系的に規格化する。最後に、測定の対象となる構造物の計測点に加速度センサを取り付け、レーザー加振した際の加速度応答の複素フーリエスペクトルをレーザー加振力で除し、その絶対値(FRFの振幅比)を評価し、さらに計測時のむだ時間を決定して位相特性を補正することにより、力計測をセンサレス化したFRF計測を実現した。

図5に示す剛体振り子法によりレーザー加振力を同定する。剛体ブロックの質量 M [kg]を電子天秤で計測し、加速度センサで計測されたレーザー加振時の加速度応答のスペクトル $A(\omega)$ [m/s^2]を求めれば、ニュートンの第二法則($F = MA$)によりレーザー加振力 $F(\omega)$ [N]を得ることができる。レーザーによる加振力が理想的なインパルス入力の場合、計測における加速度センサの取り付け誤差やランダム誤差等の影響がなければ、 $F(\omega)$ は計測対象周波数範囲内においては一定となるはずであるため、全周波数において平均化しレーザー加振力 F を求めた。

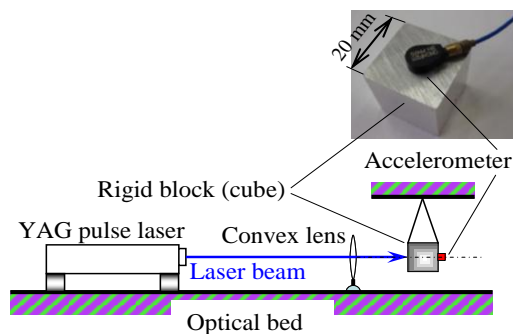


図5 加振力規格化のための剛体振り実験

次に、振動実験により計測された時刻歴波形の一例を図6に示す。応答のトリガポジションと実際にインパルス入力作用する時間には誤差があり、これがむだ時間 L となる。

入出力計測において同じLが含まれれば, FRFの位相特性は正しく表現される. しかし, 本手法では力入力の計測を行わずLが未知となるため, それを推定し複素フーリエスペクトルを補正する必要がある. 本研究では, 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Lを決定した.

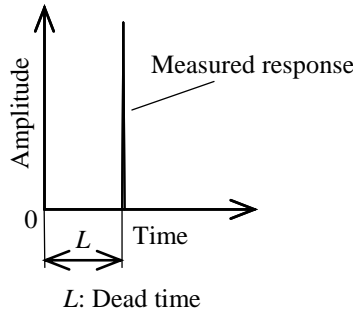


図6 計測におけるむだ時間

本手法を用いて図3に示すブロックの周波数応答を得るため, ブロックの面外方向の振動特性を計測した. ブロックの支持条件は, 吊り下げによる周辺自由支持とした. また, 吊り下げ点からブロック上面までの距離を200mmとした. ブロックの一点をレーザー加振した際の複素フーリエスペクトルをレーザー加振力で除し, 力の作用時間に関して補正することで得た自己FRFを図7に示す. 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Lを約1.3msと決定し補正した. 図7には, 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.

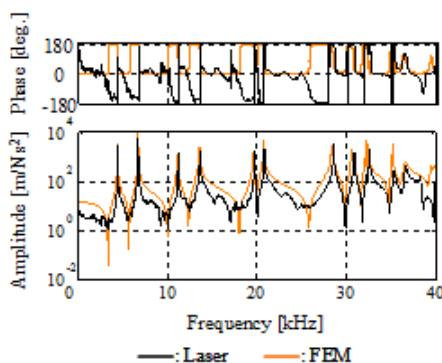


図7 点1における自己周波数応答

(3)ヘルスマニタリング技術の開発

レーザーアブレーションによるインパルス加振力で構造物を振動させたときの高周波帯域の振動特性変化を検知することで, 簡易かつ低コストで実現可能なヘルスマニタ

リング技術の開発を行った. レーザーを用いたヘルスマニタリング技術の一つとして, 構造物に締結されたボルトの緩みを異常状態と想定し, その異常を検知する技術を開発した. まず, 複数のボルトを締結したアルミニウム製ブロックについて, ボルトの締結トルクの大きさを変えて緩み条件を変えながら, その周波数特性を計測し, 得られたデータを統計的に処理して各状態の単位空間を作成した. 次に, 判定の対象とする未知の計測データに対し, 作成した単位空間からの距離をRT (Recognition-Taguchi)法により計算し, 各状態に対する距離を比較することでボルト緩みの検知, また緩み位置の特定を行った.

ボルトの緩みに対する周波数特性の変化を調べるため, 構造物として150mm×50mm×20mmのアルミニウム製の直方体ブロックに呼び径M6のネジ穴を空けワッシャと共にM6のステンレス製キャップボルトを締めつけたものを供試体とした(図8). ただし, ネジ穴は図8のように5箇所あるが, ボルトはBolt1, Bolt3, Bolt5の3箇所のみ取り付けした. レーザーによる加振点は同図に示す位置(図8の黒丸)であり, 出力応答は加振点の裏にあたる計測点に加速度センサを取り付け計測した.

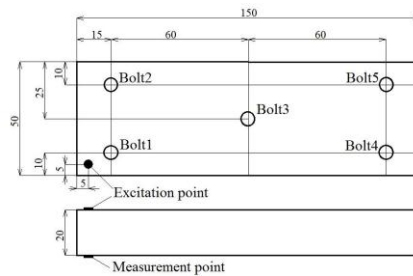


図8 ボルト締結の供試体

本実験で使用するボルトの標準締めつけトルクは業界標準で2.6Nmと定められている. そこで, 3つのボルトを締めつけトルク2.6Nmで締めつけた状態を正常とし, これに対しボルトを締めつけるトルクが2.6Nm未満の状態を異常とした. ここでは, 表1のように正常な状態と6種類の異常な状態の計7種類の状態について, 周波数特性を調べた. なお, ボルトの締めつけは東日製SF6N型トルクレンチを用いて手動で行った.

表1 締結トルク条件

Condition	Tightening torque (Nm)		
	Bolt 1	Bolt 3	Bolt 5
Normal	2.6	2.6	2.6
Damage 1	2.0	2.6	2.6
Damage 2	2.6	2.0	2.6
Damage 3	2.6	2.6	2.0
Damage 4	1.4	2.6	2.6
Damage 5	2.6	1.4	2.6
Damage 6	2.6	2.6	1.4

表2と表3に、計測されたパワースペクトルのデータを用いて RT 法に基づく診断を行った結果を示す。ここで、表2は0-25kHz帯域での結果を、また表3は25-40kHz帯域での結果である。表における左端の縦の欄が、10個のパワースペクトルで定義された単位空間を表し、それ以外の縦の欄が正常および異常状態にて計測した一つのサンプルに対する評価値(各状態との距離)を表す。この値が小さいほど、該当する単位空間の状態に属する可能性が高いことを示す。表2の結果から、低周波数帯域を診断範囲に定めると、状態が一致している場合と状態が異なる場合の値の差が小さく、異常の検知および特定が困難であることが明らかになった。一方、表3の結果から、高周波数帯域を診断範囲に定めれば、状態が一致しているときに0.2~1程度の値を、異なる状態のときにほぼ2以上の値をとるため、異常の検知および特定が可能であることが示された。

表2 0-25kHz帯域データによる判別結果

Standard	Object						
	Normal	Dmg 1	Dmg 2	Dmg 3	Dmg 4	Dmg 5	Dmg 6
Normal	0.50	0.41	0.17	0.21	1.69	0.94	1.07
Damage 1	2.49	2.30	1.25	5.05	3.51	2.85	1.74
Damage 2	1.00	0.71	1.08	1.30	1.24	1.44	1.06
Damage 3	1.11	0.90	1.94	2.73	2.52	3.02	2.15
Damage 4	0.89	1.11	2.18	1.99	0.74	1.54	0.63
Damage 5	1.51	0.80	0.79	1.33	1.79	0.73	0.60
Damage 6	2.96	2.59	1.20	5.16	3.40	3.01	0.85

表3 25-40kHz帯域データによる判別結果

Standard	Object						
	Normal	Dmg 1	Dmg 2	Dmg 3	Dmg 4	Dmg 5	Dmg 6
Normal	0.23	1.31	4.56	2.04	3.24	6.64	4.51
Damage 1	1.21	0.43	6.76	2.86	2.29	6.11	4.04
Damage 2	0.84	3.15	1.11	3.19	3.79	4.14	4.69
Damage 3	1.68	2.81	9.57	1.30	4.07	5.50	3.59
Damage 4	1.90	0.87	7.79	4.27	1.04	6.34	3.63
Damage 5	1.79	3.10	6.65	3.90	3.55	0.43	3.22
Damage 6	2.89	4.28	11.99	3.87	4.51	4.90	0.50

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 14 件)

(1)Hosoya, N., Nagata, M. and Kajiwara, I., Acoustic testing in a very small space based on a point sound source generated by laser-induced breakdown, Journal of Sound and Vibration, 査読有, (in press).

(2)Hosoya, N., Kajiwara, I. and Hosokawa, T., 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, 査読有, Vol. 331, 2012, pp.1355-1365, doi:10.1016/j.jsv.2011.10.034.

(3)細矢直基, 永田将希, 梶原逸朗, レーザーグ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), 査読有, 78巻, 787号, 2012, pp.770-782, doi:10.1299/kikaic.78.770.

(4)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試験法, 日本機械学会論文集(C編), 査読有, 78巻, 791号, 2012, pp.2426-2437, doi:10.1299/kikaic.78.2426.

(5)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), 査読有, 77巻, 773号, 2011, pp.102-113, doi.org/10.1299/kikaic.77.102.

(6)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), 査読有, 77巻, 777号, 2011, pp.1760-1771, doi:10.1299/kikaic.77.1760.

(7)Kajiwara, I., and Hosoya, N., Vibration testing based on impulse response excited by laser ablation, Journal of Sound and Vibration, 査読有, Vol. 330, Issue 21, 2011, pp.5045-5057, doi:10.1016/j.jsv.2010.09.036.

(8)梶原逸朗, 小原賢也, 非接触レーザー加振システムによる膜構造の真空環境振動試験, 日本機械学会論文集(C編), 査読有, 77巻, 779号, 2011, pp.2662-2672, doi:10.1299/kikaic.77.2662.

(9)Kajiwara, I., Miyamoto, D., Hosoya, N. and Nishidome, C., Loose Bolt Detection by high frequency vibration measurement with non-contact laser excitation, Journal of System Design and Dynamics, 査読有, Vol. 5, No. 8, 2011, pp.1559-1571, doi:10.1299/jsdd.5.1559.

(10)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), 査読有, 77巻, 784号, 2011, pp.4402-4412, doi:10.1299/kikaic.77.4402.

(11)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), 査読有, 77巻, 784号, 2011, pp.4413-4424, doi:10.1299/kikaic.77.4413.

(12)Kajiwara, I., Harada, H., and Nakano, K., Remote Motion Control of Micro Vehicles by Two-Way Laser Communication Technology, Journal of System Design and Dynamics, 査読有, Vol.4, No.6, 2010, pp.941-952, doi.org/10.1299/jsdd.4.941.

[学会発表] (計 29 件)

(1)Huda, F., Kajiwara, I., Hosoya, N. and

Kawamura, S., Bolted joint loosening detection by using laser excitation, Proceedings of SPIE Smart Structures/NDE 2013, 2013(March 14, Convention Center, San Diego, CA, USA), CD-ROM(No. 8695-109)

(2)Kajiwara, I., Nakamura, S., Zhu, Y. and Hosoya, N., Vibration Control Evaluation of Smart Microstructures with Non-Contact Laser Excitation, Proceedings on The 11th International Conference on Motion and Vibration Control, 2012(October 18, Hilton Ft. Lauderdale Marina Hotel, Fort Lauderdale, FL, USA), CD-ROM (DSCC2012-MOVIC2012-8805).

(3)Honda, S., Watanabe, K, Narita, Y. and Kajiwara, I., Multidisciplinary Design Optimization for Smart Micro-Composite and Experimental Validation by Using Laser Excitation Technique, Proceedings on The 11th International Conference on Motion and Vibration Control, 2012(October 17, Hilton Ft. Lauderdale Marina Hotel, Fort Lauderdale, FL, USA), CD-ROM (DSCC2012-MOVIC2012-8563).

(4)Hosoya, N., Nagata, M. and Kajiwara, I., Acoustic testing in a micro-space based on a point source generated by laser-induced breakdown, Proceedings on ISMA2012 International Conference on Noise and Vibration Engineering, 2012(September 17, The Catholic University of Leuven, Leuven, Belgium), pp.49-58.

(5)Kajiwara, I. and Obara, K., Laser Excitation Vibration Test for Membrane Structures in Vacuum Environment, The Sixth Japan-Taiwan Workshop on Mechanical and Aerospace Engineering, 2011(December 7, Hokkaido University, Hokkaido, Japan), CD-ROM(A02).

(6)Honda, S., Narita, Y., Kajiwara, I. and Nakamura, S., Vibration Testing Method of Smart-Composite with Laser Excitation, Proceedings of The 14th Asia-Pacific Vibration Conference, 2011(December 5-8, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong), pp.1462-1470.

(7)Kajiwara, I., Miyamoto, D., Hosoya, N., and Nishidome, C., Structural health monitoring by high frequency vibration measurement with non-contact laser excitation, Proceedings of SPIE Smart Structures/NDE 2011, 2011(March 9, Convention Center, San Diego, CA, USA), CD-ROM(No. 7984-54).

[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：同上

種類：特許

番号：特願 2012-520295

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：同上

種類：特許

番号：第13/704,439号

出願年月日：2012年12月14日

国内外の別：国外(米国)

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：同上

種類：特許

番号：第11795411.5号

出願年月日：2012年12月17日

国内外の別：国外(欧州)

6. 研究組織

(1)研究代表者

梶原 逸朗 (KAJIWARA ITSURO)

北海道大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：60224416

(2)研究分担者

成田 吉弘 (NARITA YOSHIHIRO)

北海道大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：00137407

小林 幸徳 (KOBAYASHI YUKINORI)

北海道大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：10186778

原田 宏幸 (HARADA HIROYUKI)

北海道大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：9030193

江丸 貴紀 (EMARU TAKANORI)

北海道大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：30440952

星野 洋平 (HOSHINO YOHEI)

北海道大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：903745

本田 真也 (HONDA SHINYA)

北海道大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：90548190