

機関番号：32619

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656158

研究課題名(和文) レーザーブレイクダウンプラズマによる衝撃波を用いた微小空間のための音響加振法

研究課題名(英文) Acoustic Tests in a Micro Space based on a Point Source Generated by Laser-Induced Breakdown

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、レーザーブレイクダウンにより理想的な点音源を任意の位置に生成することで、微小空間に対して100 kHz程度の高周波数帯域の音響加振を実現する。音響加振は、スピーカにより加振する方法が一般的であるが、スピーカが音場の特性に影響を及ぼすことや、スピーカの形状や大きさにより空間に配置できないことがある。レーザービームのスポット径を凸レンズにより数十 μm 程度に集光しレーザーブレイクダウンを発生させれば、生成される音源は点音源となることが予想される。この理想的な点音源を微小空間内における任意の位置に配置することができれば、音響加振の適用範囲拡大が期待できる。

研究成果の概要(英文)：This paper proposes a method of acoustic vibration testing based on a point source generated by laser-induced breakdown in the air. A high-power Nd:YAG pulse laser is used in this system for generating the laser-induced breakdown in acoustic fields. Plasma formation can be realized by the laser-induced breakdown if the local intensity of the laser beam reaches $1e+15\text{ W/m}^2$. The shock wave that is yielded by consuming a part of the plasma energy becomes a sound source. Assuming that the laser beam is focused to a small volume through a convex lens and the sound source by the laser induced-breakdown has non-directional property, it is possible to create a point source with this technique. Securing the laser light path installs no device for acoustic excitation in acoustic fields. The system is validated by comparing the resonant frequencies of a micro-space measured by the laser-induced breakdown and calculated by theoretical model.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：レーザーブレイクダウン プラズマ 衝撃波 音響加振 シュリーレン法 膜構造

1. 研究開始当初の背景

音響加振は、スピーカにより加振する方法が一般的であるが、スピーカが音場の特性に影響を及ぼすことや、スピーカの形状や大きさにより空間に配置できないことがあるため、MEMS などの μm オーダーの微小空間内を対象とした音響加振には適さない。本研究では、図 1 に示すようなレーザーブレイクダウン (Laser-induced breakdown: LIB) により理想的な点音源を任意の位置に生成することで、微小空間に対して 100 kHz 程度の高周波数帯域の音響加振を実現する。LIB とは、レーザービームを気体中に集光すると多光子過程により原子・分子が複数の光子を吸収し電子を放出し、カスケード過程によりプラズマを形成させることをいう。このプラズマエネルギーの一部が変換されることで生成された衝撃波が、LIB による音源となる。

LIB に関しては、LIB によるプラズマの生成、爆発の模擬などが検討されている。しかしながら、LIB を音響加振源として利用するための検討はなされていない。レーザービームのスポット径を凸レンズにより数十 μm 程度に集光し LIB を発生させれば、生成される音源は点音源となることが予想される。

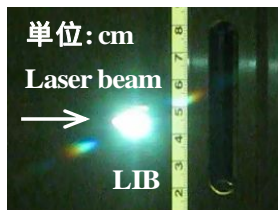


図 1 LIB plasma

2. 研究の目的

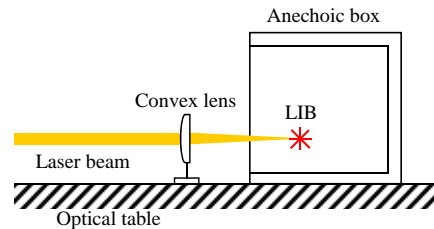
本研究では、LIB により理想的な点音源を任意の位置に生成することで、微小空間に対して 100 kHz 程度の高周波数帯域の音響加振を実現する。音響加振は、スピーカにより加振する方法が一般的であるが、スピーカが音場の特性に影響を及ぼすことや、スピーカの形状や大きさにより空間に配置できないことがあるため、MEMS などの μm オーダーの微小空間内を対象とした音響加振には適さない。レーザービームのスポット径を凸レンズにより数十 μm 程度に集光し LIB を発生させれば、生成される音源は点音源となることが予想される。この理想的な点音源を微小空間内における任意の位置に配置することができれば、音響加振の適用範囲拡大が期待できる。

3. 研究の方法

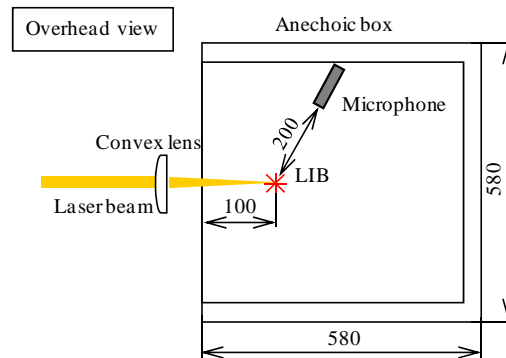
LIB により生成された点音源の音圧、および加振可能な周波数帯域を検討し、音響加振源としての有効性を示す。また、この点音源の音圧とスポット半径、および指向性を調べる。

(1) 音圧の測定方法

図 2 に、LIB による点音源の音圧を測定するためのシステムを示す。光学定盤上にパルスレーザー、凸レンズを配置した。また、本実験では、厚さ 40 mm の木材に厚さ 50 mm のグラスウールを貼付して製作した簡易無響箱を光学定盤上に設置した。なお、この簡易無響箱は、本実験の測定周波数範囲内では有効な音響特性であることを確認している。レーザーの照射光路を確保するため、簡易無響箱の一側面を開放して使用した。LIB の発生位置は、簡易無響箱入り口から 100 mm とした。図 2 のように、簡易無響箱内にマイクロホン (リオン UC-54、測定周波数範囲: 20 Hz ~ 100 kHz) を音源から 200 mm の位置に設置し、スペクトルアナライザ (A/D: NI PXI-5922, Software: キャテック CAT-System) により音圧の時刻歴波形、および音圧のスペクトルを測定した。サンプリング周波数 300 kHz, サンプリング点数は 65536 とした。各条件での測定回数は 10 とした。



(a) Layout of optical system



(b) Layout of microphone in the anechoic box (overhead view) (unit: mm)

Fig. 2 Acoustic vibration testing system using a point source generated by LIB.

(2) 音圧とスポット半径の関係

スポット半径を変化させた際の LIB による点音源の音圧、再現性、周波数特性を調べる。本実験では、表 1 に示した 3 種類の焦点距離の凸レンズを用いた。また、レーザーパルスエネルギーは 335.9 mJ とした。

(3) 指向性

LIB により生成された点音源が無指向性であることを検証する。簡易無響箱内に LIB に

よる点音源を生成し、その音源から 80 mm 離れた 12 箇所にマイクロホンを設置し、音圧を測定した。レーザーパルスエネルギーを 197.4 mJ、凸レンズの焦点距離を 100 mm (スポット半径 25 μm) (Lens L1)とした。

Table 1 Configurations of the three convex lenses used to focus the laser beam

Lens	Focal length f [mm]	Spot radius r [μm]	Area S [mm^2]
Lens L1	100	25	0.0020
Lens L2	200	50	0.0079
Lens L3	300	75	0.0177

(4) LIB による点音源を用いた微小空間の音響加振

スピーカの設置が困難であるアルミニウムパイプ内を微小空間と想定し、LIB による点音源を用いてこの空間内の共鳴周波数を測定する。

本実験で用いるアルミニウムパイプの共鳴周波数を求める。アルミニウムパイプの寸法は外径 20 mm、内径 17 mm、全長 300 mm とした。境界条件は両端開口であるため、開口端補正を考慮したアルミニウムパイプの長さは 310.2 mm となった。アルミニウムパイプの共鳴周波数 f_n [Hz] は、モード次数 n 、音速 c [m/s]、アルミニウムパイプの長さ L [m] とすると式(1)のようになる。

$$f_n = \frac{nc}{2L} \quad (1)$$

式(1)よりアルミニウムパイプの共鳴周波数を計算したところ、5 kHz 以下の周波数範囲に 9 個の共鳴周波数が存在した。

LIB による点音源を用いた微小空間の共鳴周波数を測定するための音響加振システム、および音響特性の測定方法について述べる。図 3 に実験装置の概略図を示す。光学定盤上にパルスレーザー、凸レンズ、簡易無響箱を配置し、簡易無響箱内にアルミニウムパイプ、マイクロホンを設置した。マイクロホンとアルミニウムパイプの開口端との距離は 150 mm とした。全長 300 mm のアルミニウムパイプの任意の位置に LIB を発生させることを可能にするために、凸レンズの焦点距離は 300 mm (スポット半径 75 μm) (Lens L3)、レーザーパルスエネルギーは 335.9 mJ とした。図 3 に示すように加振位置 l は、レーザー照射側のアルミニウムパイプの開口端から 72.5 mm (Point 1)、25.9 mm (Point 2) の 2 種類とした。Point 1 は 4 次モードの節、Point 2 は 1 ~ 9 次モードを全て励起できる位置である。測定条件は、サンプリング周波数 50 kHz、サンプリング点数は 65536、測定における平

均化回数は 10 とした。出力はスペクトルアナライザにより記録した。LIB 発生後の消費されなかったレーザーパルスエネルギーは、ビームディフューザーにより拡散させた。

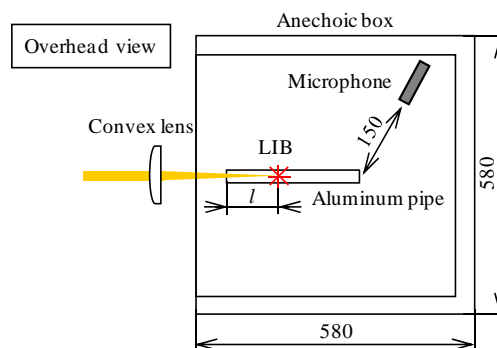


Fig. 3 Acoustic vibration testing system in a micro-space using a point source generated by LIB (Unit: mm) .

4. 研究成果

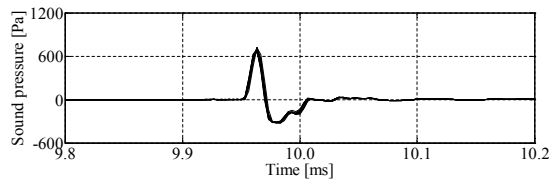
(1) 音圧とスポット半径の関係

図 4 に、LIB による点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。これらの時刻歴波形においては、トリガーポイントはおよそ 10 ms、時間軸のフルスケールは 220 ms である。図 4 では、再現性を確認するために 10 回測定した音圧を重ねて示している。また、音圧の最大値の平均をそれぞれ示している。図 5 は、図 4 に対応するパワースペクトルの平均値を示している。図 4 を見ると、LIB により生成された点音源はパルス幅の短い (パルス幅 20 μs) ほぼ理想的なインパルスであり、高い再現性を有していることがわかる。また、スポット半径により音圧の大きさが変化するが、パルス幅はほぼ同一であることが確認できる。図 5 より LIB による点音源は、高周波数帯域までほぼ様な音響加振成分を有するインパルス状の波形であるが、パワースペクトルの大きさが若干変化している。これは、簡易無響箱を一側面開放して測定したことや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、LIB の発生位置においては、理想的なインパルス波形である点音源と予想される。

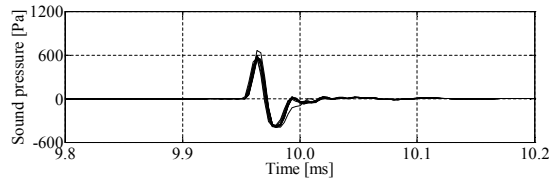
(2) 指向性

図 6 に、10, 30, 50, 70 kHz のそれぞれの周波数における各点での音圧レベルを示す。簡易無響箱内において対称な測定点 (例えば、測定点 i, xii) における音圧の時刻歴波形、およびそのパワースペクトルを比較したところ、両者はほぼ一致していることを確認した。図 6 を見ると、各周波数における音圧レベルの差はおよそ 4 dB であったが、これはマイクロホンによる測定点の位置のずれ、LIB の発生位置のずれなどの影響が考えられる。した

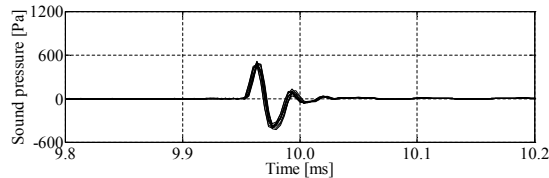
がって、音源と測定点の距離が同一であれば、測定される音圧レベルはどの位置においてもほぼ同一であり、LIB により生成された点音源は無指向性であるといえる。



(a) Convex lens L1 ($f=100$ mm) (average of peak sound pressure: 698.9 Pa)



(b) Convex lens L2 ($f=200$ mm) (average of peak sound pressure: 577.1 Pa)



(c) Convex lens L3 ($f=300$ mm) (average of peak sound pressure: 480.3 Pa)

Fig. 4 Time responses of sound pressure generated by LIB (energy $E = 335.9$ mJ) .

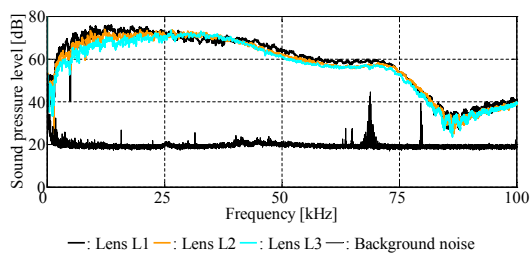


Fig. 5 Power spectra of sound pressure generated by LIB for three convex lenses.

(3) LIB による点音源を用いた微小空間の音響加振 (共鳴周波数の測定結果)

LIB による点音源でアルミニウムパイプ内を加振した際の時刻歴波形を図 7 に示す。図 7 より、30 ms 程度の残響音が確認できる。図 8 は、図 7 に対応するパワースペクトルを示している。図 8 では、2 種類の加振位置でのパワースペクトル、および暗騒音を重ねて示している。図 8 より、Point 1 では、4 次モードが消滅しそれ以外のモードが卓越していることから、4 次モードの節を LIB による点音源で音響加振できているといえる。また、Point 2 では 5 kHz 以下の全てのモードが励起

されていることがわかる。100 Hz 付近に観察されるピークは、暗騒音による影響と考えられる。表 2 に、本手法、および式(1)の理論値から得られたアルミニウムパイプの共鳴周波数を示す。表 2 より、理論値と実験値の誤差は最大で 1.2 %程度であることから、LIB により生成された点音源を用いることで共鳴周波数が測定できることがわかった。

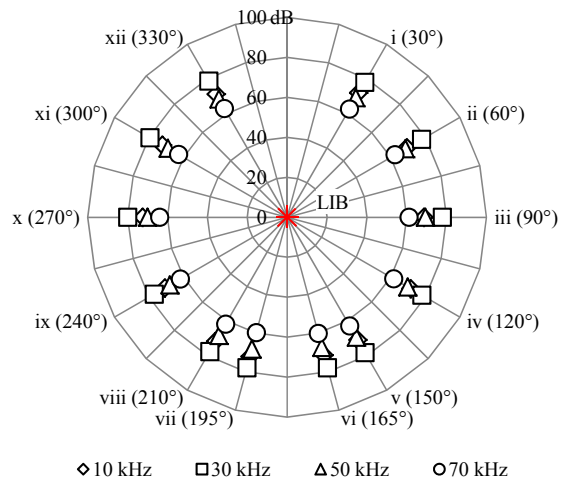
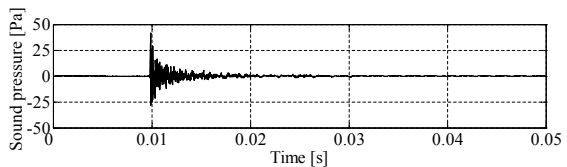
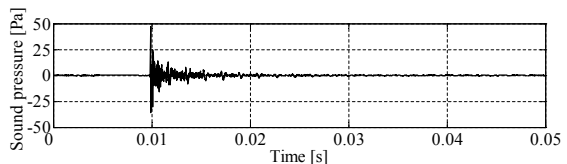


Fig. 6 Star plot of the sound pressure levels and measurement positions in each frequency.



(a) Excitation point 1



(b) Excitation point 2

Fig. 7 Time response of sound pressure generated by LIB.

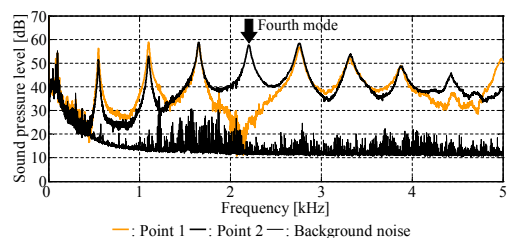


Fig. 8 Spectra of sound pressure level obtained by LIB excited at point 1 (nodal point of fourth mode (orange line)), point 2 (black line) and measured background noise (thin black line).

本研究では、LIB により生成された点音源に基づく音響加振法について検討した。

高出力 Nd: YAG パルスレーザーにより LIB を発生させ、これにより生成された理想的な点音源を用いた音響加振システムを開発した。レーザービームのエネルギー密度を LIB の閾値に到達させ、これを μm オーダーの微小領域で生成するため、レーザービームを凸レンズにより集光する手法を導入した。

LIB による点音源は、無指向性かつ理想的なインパルス波形であり、音響加振源としては数百 kHz 程度の高周波数帯域までの成分を含むことがわかった。また、LIB による点音源の音圧の再現性を確保するためには、レーザーパルスエネルギー、スポット半径を適切に設定する必要があることを明らかにした。

アルミニウムパイプ内を微小空間と想定し、LIB により生成された点音源を用いて共鳴周波数を測定した。本手法、および理論的に得られた共鳴周波数を比較することで、本手法の有効性を示した。本手法は、従来の音響加振法と比べ、スピーカの設置、配線が不要で音場に及ぼす影響がないため、微小空間や密閉空間に対する音響加振を実現できる。また、任意のモードの節の位置を LIB による点音源で加振したところ、当該モードが励起されないことがわかった。これより、LIB による点音源を用いることで、微小空間内の任意の位置を音響加振できることを示した。

Table 2 Comparison of frequencies by theoretical and measurements

Mode	Theoretical [Hz]	Point 1 (Nodal point of fourth mode)		Point 2	
		Experimental [Hz]	Error [%]	Experimental [Hz]	Error [%]
		1st	555	557	0.4
2nd	1110	1101	0.8	1100	0.9
3rd	1664	1660	0.3	1662	0.1
4th	2219	-	-	2206	0.6
5th	2774	2787	0.5	2780	0.2
6th	3329	3313	0.5	3333	0.1
7th	3884	3873	0.3	3873	0.3
8th	4438	4451	0.3	4428	0.2
9th	4993	4980	0.3	4989	0.1

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 4 件)

1. Naoki Hosoya, Itsuro Kajiwara, Tatsuo Inoue, Koh Umenai, Non-contact acoustic tests based on nanosecond laser ablation: generation of a pulse sound, source with a small amplitude, Journal of Sound and Vibration, (333), 2014, 4254-4264. (査読有). <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2014.04.050>

2. Feblil Huda, Itsuro Kajiwara, Naoki Hosoya, Damage detection in membrane structures using non-contact laser excitation and wavelet transformation, Journal of Sound and Vibration, (333), 2014, 3609-3624. (査読有). <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2014.04.008>
3. Feblil Huda, Itsuro Kajiwara, Naoki Hosoya, Shozo Kawamura, Bolt loosening analysis and diagnosis by non-contact laser excitation vibration tests, Mechanical Systems and Signal Processing 40, 589-604, 2013. (査読有). <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymsp.2013.05.023>
4. 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, (332), 2013, 4572 - 4583. (査読有). <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2013.03.035>

[学会発表](計 12 件)

1. Naoki Hosoya, Itsuro Kajiwara, Koh Umenai, Laser excitation system for measuring frequency response function of underwater structures, Proceedings of International Conference on Noise and Vibration Engineering (ISMA 2014), CD-ROM (pp.***-***), (2014.9.15-17), ルーベン(ベルギー). (査読有).
2. Feblil Huda, Itsuro Kajiwara, Naoki Hosoya, Vibration test and health monitoring of membrane structure using non-contact laser excitation, Proc. SPIE 9064, Health Monitoring of Structural and Biological Systems 2014, 90640U (2014.3.9-13), サンディエゴ(アメリカ). (査読有).
3. Itsuro Kajiwara, Naoki Hosoya, Vibration measurement and monitoring of a rotating disk using contactless laser excitation, Dynamic Systems and Control Conference (DSCC 2013), CD-ROM, (2013.10.21-23), スタンフォード(アメリカ). (査読有).
4. Naoki Hosoya, Tatsuo Inoue, Itsuro Kajiwara, Non-contact vibro-acoustic tests based on nano-second laser ablation, 11th International Conference on Vibration Problems (ICOVP 2013), USB (No.248), (2013.9.9-12), リスボン(ポルトガル). (査読有).
5. 馬場駿, 細矢直基, 前田真吾, 梶原逸朗, パルスレーザーを用いた高分子材料の振動試験, 日本機械学会 [No.13-18] Dynamics and Design Conference 2013 USB 論文集, 2013, (No. 256), (2013.8.26-30), 福岡市. (査読無).
6. 新里淳, 梶原逸朗, 細矢直基, Feblil Huda, 非接触レーザー加振法を用いた膜構造のヘルスマニタリング, 日本機械学会

- [No.13-18] Dynamics and Design Conference 2013 USB 論文集, 2013, (No. 530), (2013.8.26-30), 福岡市. (査読無).
7. Feblil Huda, Itsuro Kajiwara, Naoki Hosoya, Shozo Kawamura, Bolted joint loosening detection by using laser, SPIE Smart Structures/NDE, 8695 – 109, 2013. Proc. SPIE 8695, Health Monitoring of Structural and Biological Systems 2013, 869531, (2013.3.10-14), サンディエゴ(アメリカ). (査読有).
 8. 新里淳, 梶原逸朗, 細矢直基, レーザブ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), pp.55-59, (2012.12.10-11), 川崎市. (査読無).
 9. 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, pp.1480-1485 (2012.11.17-18), 京都市. (査読無).
 10. 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 (pp.49-58), (2012.9.17-19), ルーベン(ベルギー). (査読有).
 11. 小林明莉, 滝口康太, 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), (2012.9.9-12), 金沢市. (査読無).
 12. 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), (2012.9.9-12), 金沢市. (査読無).

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 3 件)

名称：非接触式レーザー加振による構造物の振動特性の測定方法
 発明者：梶原逸朗，細矢直基
 権利者：梶原逸朗，細矢直基
 種類：特許
 番号：特願 2012-520295
 出願年月日：2012.11.12
 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：Itsuro Kajiwara, Naoki Hosoya
 権利者：Itsuro Kajiwara, Naoki Hosoya
 種類：特許
 番号：No. 13704439
 出願年月日：2012.12.14
 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：Itsuro Kajiwara, Naoki Hosoya
 権利者：Itsuro Kajiwara, Naoki Hosoya
 種類：特許
 番号：No. 11795411.5
 出願年月日：2012.12.14
 国内外の別：国外(欧州)

取得状況 (計 0 件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 取得年月日：
 国内外の別：

〔その他〕
 ホームページ等

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

(2) 研究分担者

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

(3) 連携研究者

()
 研究者番号：