

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 20 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360376

研究課題名(和文) 圧電素子を内蔵したCFRP構造のスマートセンシング・アクチュエーション

研究課題名(英文) Smart Sensing and Actuation of CFRP structures with Piezoelectric Materials

研究代表者

福永 久雄 (FUKUNAGA, Hisao)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：50134664

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,100,000円、(間接経費) 4,230,000円

研究成果の概要(和文)：将来の航空宇宙機用CFRP構造の安全性と信頼性の一層の向上を図るためには、圧電素子を内蔵したスマート複合材構造の適用により、衝撃荷重により発生する損傷を自動的に検知する構造ヘルスマニタリング法を確立することが重要となる。また、運航中の構造振動を軽減するためには、圧電アクチュエータによる効果的制振を行うことが必要となる。本研究では、圧電センサ・アクチュエータを内蔵したCFRP複合材構造について、運航中に実時間で自動的に損傷を検知する構造ヘルスマニタリング法を構築するとともに、圧電アクチュエータによる効果的振動制御法を発展させることにより、安全性と信頼性に優れたスマート構造を開発する。

研究成果の概要(英文)：In the future CFRP aerospace structures, it is important to develop smart CFRP structures, i.e., development of structural health monitoring method to detect the impact damages automatically, and also development of vibration control method to reduce the structural vibration effectively. In the present research, the real-time and automatic structural health monitoring method as well as the effective vibration control method based on semi-active and self sensing techniques are developed for the CFRP structures with piezoelectric sensors and actuators.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：CFRP 圧電素子 センサ アクチュエータ スマート構造 構造ヘルスマニタリング セミアクティブ
制御 セルフセンシング

1. 研究開始当初の背景

航空宇宙機の主要構造材料としてCFRPに代表される高性能複合材料が適用されつつある。CFRP構造は軽量・高強度という利点に加え、圧電素子からなるセンサ・アクチュエータを構造内に埋込むことができるという利点を有する。圧電素子を内蔵したスマートCFRP構造は、運航中に衝撃損傷を自動的に検知する構造ヘルスマニタリング能力を有する。さらに、圧電素子により構造振動を自動的に制御することも可能となり、高性能で静粛な航空機の実現が可能となる。このスマート構造は構造ヘルスマニタリングと制振特性を兼ね備えた将来の高性能で安全性に優れた航空機構造として注目され、世界の航空宇宙開発機関で活発に研究が進められている。本研究では、本研究グループのこれまでの研究成果を基に、圧電素子を内蔵したCFRP構造の構造ヘルスマニタリング法と振動制御法を発展させて実構造への適用を目指すことを目的とする。

CFRP構造は、面外からの衝撃荷重に対して層間はく離等の損傷を生じやすく、CAI（損傷後圧縮）強度等の著しい低下を生じる。この衝撃損傷によるCAI強度低下は、航空機主翼構造の主要な設計基準となっており、CFRP構造内部の衝撃損傷を自動的・実時間で検出する構造ヘルスマニタリング法の確立が重要となる。本手法では、圧電センサ応答より衝撃荷重位置・履歴を同定し、同定した最大荷重から損傷の大きさを予測する。本研究では、航空機翼・胴体構造の主構造要素であるCFRP補強パネルについて衝撃損傷を検出する構造ヘルスマニタリング法の確立を主要な目標とする。

一方、CFRP構造の振動制御では、本研究グループが現在研究を進めているセルフセンシングアクチュエーションによるセミアクティブ制御法を確立する。圧電素子のセルフセンシングアクチュエーションでは、圧電アクチュエータをセンサとしても用いるためセンサが不要となりセンサ計測が困難な宇宙構造物への適用が容易となる。また、セミアクティブ振動制御により、アクティブ振動制御におけるスピルオーバー不安定性を生じない安定な制御が可能となる。本研究グループは、振動モード別のセルフセンシング・セミアクティブ振動制御法を開発し、アルミ板の振動制御でその有用性を検証している。本研究では、CFRP積層板についての多モード振動制御法を確立することを主要な目標とする。

2. 研究の目的

将来の航空宇宙機用CFRP構造の安全性と信頼性の一層の向上を図るためには、圧電素子を内蔵したスマート複合材構造の適用により、衝撃荷重により発生する損傷を自動的に検知する構造ヘルスマニタリング法を確立することが重要となる。また、運航中

の構造振動を軽減するためには、圧電アクチュエータによる効果的制振を行うことが必要となる。本研究では、圧電センサ・アクチュエータを内蔵したCFRP複合材構造について、運航中に実時間で自動的に損傷を検知する構造ヘルスマニタリング法を構築するとともに、圧電アクチュエータをセンサとしても用いるセルフセンシングアクチュエーションによるCFRP構造の効果的振動制御法を発展させることにより、安全性と信頼性に優れた航空宇宙機用スマート構造の開発を目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、圧電センサ・アクチュエータを内蔵したCFRP積層板および補強パネルについて、構造ヘルスマニタリング法および効果的振動制御法を発展させる。主要な研究項目は以下の通りである。

(1) 衝撃荷重同定に基づく構造ヘルスマニタリング

圧電センサを内蔵したCFRP積層板・補強パネル構造について、実験的に得られた伝達関数を用いて異物衝突による衝撃荷重位置と荷重履歴を同定し、同定した衝撃荷重位置・荷重履歴の情報より、損傷の位置および大きさを実時間で予測する構造ヘルスマニタリング法を開発する。

(2) セルフセンシング・セミアクティブ振動制御

セルフセンシング・セミアクティブ振動制御では、アクチュエータ電圧をセンシングしながらスイッチ切替えによる効果的なセミアクティブ振動制御を行う。本研究ではCFRP積層板についての多モード制御でその有効性を検証する。

4. 研究成果

(1) 衝撃荷重同定に基づく構造ヘルスマニタリング

CFRP積層板の衝撃荷重位置・履歴同定
図1に示す4隅固定のCFRP積層板について、インパルスハンマ打撃時に表面に貼付した4個の圧電センサの応答を用いて、衝撃荷重位置および荷重履歴の同定を行う。荷重位置同定では、4個のセンサへの到達時間差より打撃点を同定する。なお、異方性の強い

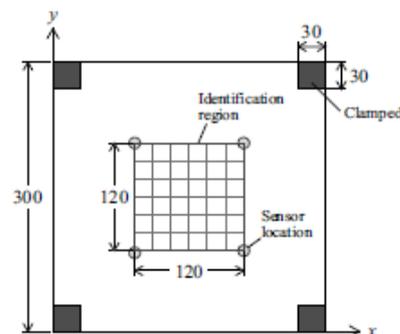
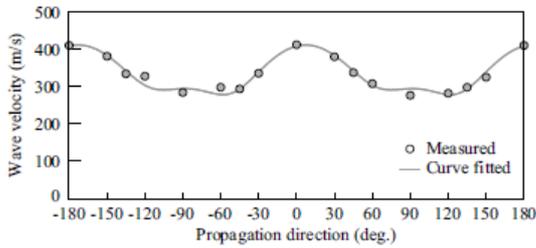
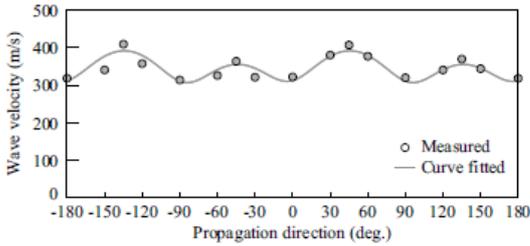


図1 CFRP積層板 (unit: mm)



(a) CFRP1 : $[0_2/45_2/-45_2/90_2]_s$



(b) CFRP2 : $[45_2/-45_4/45_2]_s$

図2 弾性波伝播速度の方向依存性

CFRP積層板では、図2に示すように、繊維方向の伝播速度は繊維と直角方向の伝播速度に比べて非常に大きく、弾性波伝播速度が繊維配向角により大きく異なる。この影響を考慮して荷重位置同定を行う。図3にCFRP1(図2(a)の積層構成)の荷重位置同定結果を示す。ここで、X印が計測結果、印が同定結果を示す。両者の誤差は最大で数mm程度でありよく一致していることがわかる。

図3のA点およびC点を打撃したときの衝撃荷重履歴の同定結果を図4(a)(b)に示す。荷重履歴は1周期が短く、さらに、二度たたきも生じており、非常に複雑な荷重履歴となっているにもかかわらず、同定結果は計測結果と良い一致を示す。

本手法では、解析モデルを必要とせず計測データのみを用いて同定を行う。上記に示すように、CFRP積層板のインパルスハンマ打撃時の衝撃荷重位置・荷重履歴は、表面に貼付した4個の圧電センサで十分な精度で同定できることが示されている。また、荷重位置および荷重履歴の同定に要する時間は1ケース2~3秒程度である。解析モデルを必要としない手法であるため、航空機翼のような複雑な構造であっても実時間での荷重同定を行うことが可能となる。

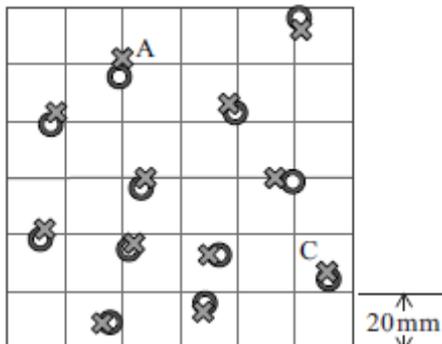
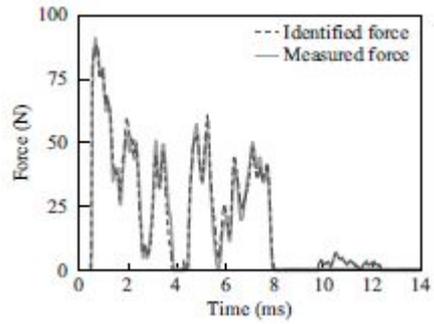
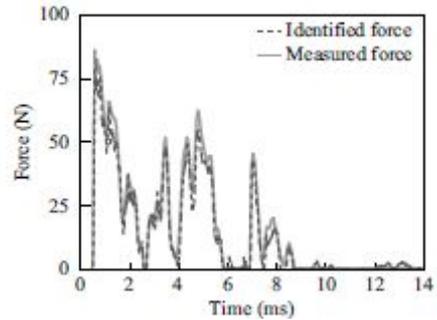


図3 CFRP1の衝撃荷重位置同定結果



(a) A点



(b) C点

図4 衝撃荷重履歴の同定結果

CFRP補強板の衝撃荷重位置・履歴同定

図5に示すT型補強材を有するCFRP補強板について、インパルスハンマ打撃時に表面に貼付した6個の圧電センサの応答を用いて、衝撃荷重位置および荷重履歴の同定を行う。図6に荷重位置同定結果を示す。X印が計測結果、印が同定結果である。CFRP積層板の場合に比べ、弾性波伝播速度から求めた荷重位置同定精度はかなり劣るため、ここでは弾性波伝播速度により初期推定位

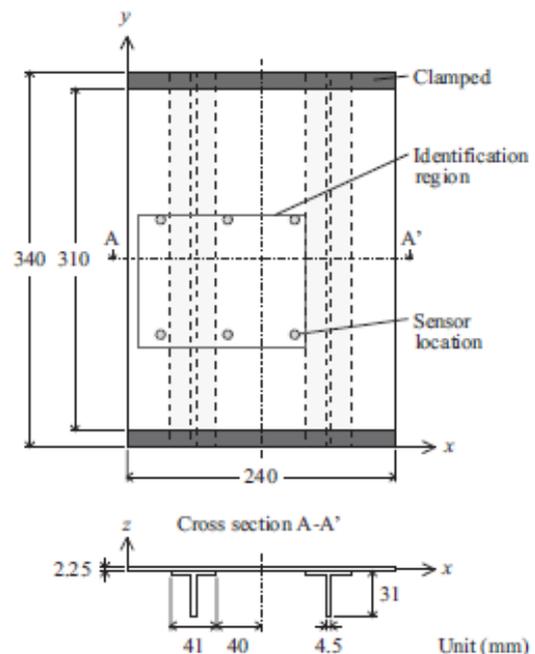


図5 CFRP補強板

置を求め、最適化計算により位置同定の精度向上を図った。位置同定における誤差は最大で 10mm 程度であり、計測結果とよく一致していることがわかる。図7に図6のA点(スキン部)およびC点(補強材部)における荷重履歴同定結果を示す。いずれの場合も同定結果は計測結果とよく一致しており、本手法の有用性が示されている。なお、補強材部はスキン部より剛性が高いため、荷重の作用時間がより短いこともわかる。

CFRP補強板の場合も、本手法では、解析モデルを使用せず圧電センサ応答のみを用いて同定を行っている。位置同定には最適化計算を含むため、CFRP積層板の場合に比べ、同定に要する時間はかなり大きくなる。本研究では、損傷を生じない弾性特性を対象としたが、実験データを蓄積できれば、同定した最大衝撃荷重より損傷の有無および大きさを推定することが可能となる。

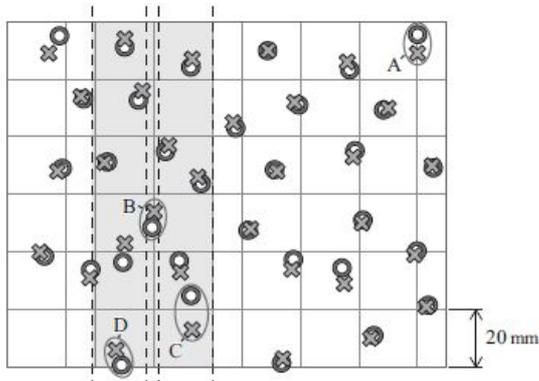
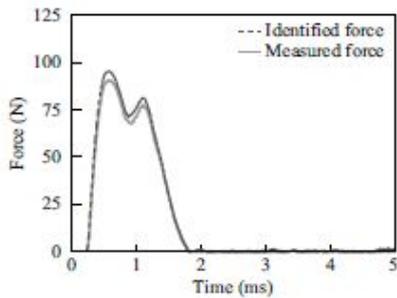
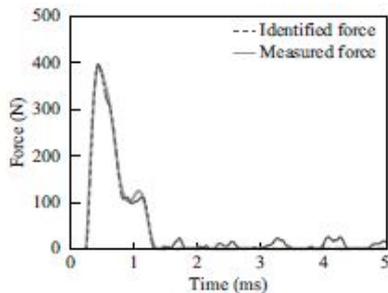


図6 CFRP 補強板の衝撃荷重位置同定結果



(a) A点(スキン部)



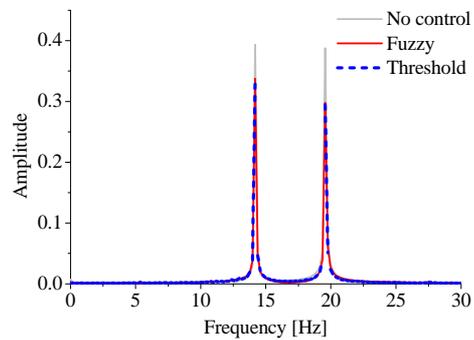
(b) C点(補強材部)

図7 CFRP 補強板の衝撃荷重履歴同定結果

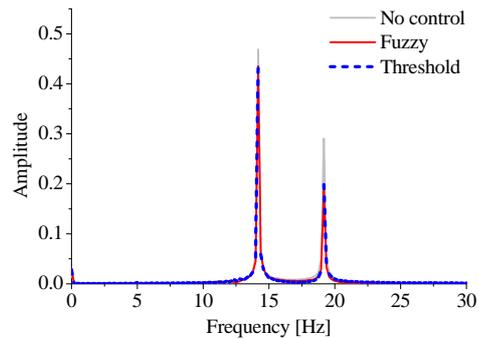
(2) セルフセンシング・セミアクティブ振動制御

圧電素子はアクチュエータおよびセンサとして用いることができ、アクチュエータをセンサとしても使用するセルフセンシング振動制御により効率的制御を行うことができる。ここでは、振動制御法として、セミアクティブ制振におけるしきい値を用いたスイッチ制御を行った。なお、しきい値の決定にはファジー理論を適用して可変とした。

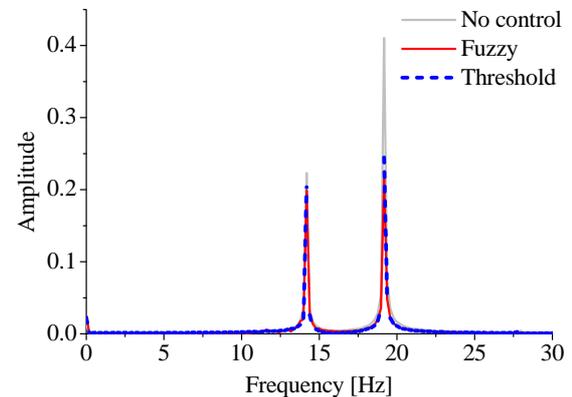
図8に、1次モードと2次モードの3通りの荷重比に対するCFRP積層板の制振効果を示す。制御をしない場合(No control)に対し、しきい値を一定とした場合(Threshold)、Fuzzy理論でしきい値を可変にした場合(Fuzzy)の比較を示す。Fuzzy理論でしきい値を自動的に算出することにより、優れた制振効果が得られていることがわかる。



(a) 1次と2次の荷重比 = 1 : 1



(b) 1次と2次の荷重比 = 2 : 1



(c) 1次と2次の荷重比 = 1 : 2

図8 CFRP 積層板の制振効果

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 18 件)

1. Alamusi, W. F. Yuan, Surina, Y. Li, N. Hu, H. M. Ning, Y. L. Liu, L. K. Wu, S. Atobe and H. Fukunaga, Ultrasensitive Strain Sensors of Multiwalled Carbon Nanotube/epoxy Nanocomposite Using Dielectric Loss Tangent, Applied Physics Letters, 査読有, 103, 2013 年, 221903-1-5 DOI 10.1063/1.4833756
2. Alamusi, Y. Li, N. Hu, L. Wu, W. F. Yuan, C. Chang, Y. Liu, H. M. Ning, J. H. Li, Surina, S. Atobe and H. Fukunaga, Temperature-dependent Piezoresistivity in An MWCNT /epoxy Nanocomposite Temperature Sensor with Ultrahigh Performance, Nanotechnology, 査読有, 24, 2013 年, 455501-1-6 DOI 10.1088/0957-4484/24/45/455501
3. 跡部哲士, 北川剛士, 胡寧, 福永久雄, FRP 複合容器に作用する多点衝撃荷重の実験的同定, 日本複合材料学会誌, 査読有, 39, 2013 年, 167-175
4. K. Makihara, C. Kuroishi and H. Fukunaga, Adaptive Multimaodal Vibration Suppression Using Fuzzy-based Control with Limited Structural Data, Smart Materials and Structures, 査読有, 22, 2013 年, 075031-1-8 DOI 10.1088/0964-1726/22/7/075031
5. H. M. Ning, N. Hu, T. Kamata, J. H. Qiu, X. Han, L. M. Zhou, C. Chang, Y. Liu, L. K. Wu, J. H. Qiu, H. L. Ji, W. X. Wang, Y. Zemba, S. Atobe, Y. Li, Alamusi and H. Fukunaga, Improved Piezoelectric Properties of Poly(vinylidene Fluoride) Nanocomposites Containing Multi-walled Carbon Nanotubes, Smart Materials and Structures, 査読有, 22, 2013 年, 065011-1-9 DOI 10.1088/0964-1726/22/6/065011
6. 跡部哲士, 小林洸貴, 胡寧, 福永久雄, 放射音を用いた CFRP 積層板の実験的衝撃荷重同定, 日本航空宇宙学会論文集, 査読有, 61, 2013 年, 79-85
7. Y. Li, S. Liu, N. Hu, X. Han, L. Zhou, H. Ning, L. Wu, Alamusi, G. Yamamoto, C. Chang, T. Hashida, S. Atobe and H. Fukunaga, Pull-out Simulations of A Capped Carbon Nanotube in Carbon Nanotube-reinforced Nanocomposites, J. Applied Physics, 査読有, 113, 2013 年, 144304-1-7 DOI 10.1063/1.4800110
8. L. Wu, W. F. Yuan, T. Nakamura, S. Atobe, N. Hu, H. Fukunaga, 他 10 名, Enhancement of PVDF's Piezoelectricity by VGCF and MWNT, Advanced Composite Materials, 査読有, 22, 2013 年, 754-780 DOI 10.1080/09243046.2013.764780
9. Alamusi, N. Hu, J. H. Qiu, Y. Li, C. Chang, S. Atobe, H. Fukunaga, 他 8 名, Multi-scale Numerical Simulations of Thermal Expansion Properties of CNT-Reinforced Nanocomposites, Nanoscale Research Letters, 査読有, 8, 2013 年, 1-8 <http://www.nanoscalereslett.com/content/8/1/15>
10. N. Hu, T. Itoi, T. Akagi, T. Kojima, J. Xue, C. Yan, S. Atobe, H. Fukunaga, 他 5 名, Ultrasensitive Strain Sensors Made from Metal-coated Carbon Nanofiller/epoxy Composites, Carbon, 査読有, 51, 2013 年, 202-212 <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbon.2012.08.029>
11. Y. Li, N. Hu, T. Kojima, T. Itoi, T. Watanabe, T. Nakamura, N. Takizawa, T. Inoue, H. Cui, S. Atobe and H. Fukunaga, Experimental Study on Mechanical Properties of Epoxy/MWCNT Nanocomposites – Effect of Acid Treatment, Pressured Curing, and Liquid Rubber,, ASME J. Nanotechnology in Engineering and Medicine, 査読有, 3, 2012 年, 011004-1-8
12. Alamusi, J. M. Xue, L. K. Wu, N. Hu, J. H. Qiu, C. Chang, S. Atobe, H. Fukunaga, 他 6 名, Evaluation of Piezoelectric Property of Reduced Graphene Oxide (rGO)-Poly(vinylidene fluoride) Nanocomposites, Nanoscale, 査読有, 4, 2012 年, 7250-7255 DOI 10.1039/c2nr32185h
13. 跡部哲士, 胡寧, 福永久雄, 実験的変換行列を用いた平板の実時間衝撃荷重同定, 日本航空宇宙学会論文集, 査読有, 60, 2012 年, 48-55
14. S. Atobe, H. Fukunaga and N. Hu, Impact Force Identification of CFRP Structures Using Experimental Transfer Matrices, CMC Computers, Materials & Continua, 査読有, 26, 2011 年, 67-90
15. M. Morii, N. Hu, H. Fukunaga, J. H. Li, Y. L. Liu, S. Atobe, Alamusi and J. H. Qiu, A New Inverse Algorithm for Tomographic Reconstruction of Damage Images Using Lamb Waves, CMC Computers, Materials & Continua, 査読有, 26, 2011 年, 37-66
16. Alamusi, N. Hu, H. Fukunaga, S. Atobe, Y. Liu and J. H. Li, Piezoresistive Strain Sensors Made from Carbon Nanotubes Based Polymer Nanocomposites, Sensors, 査読有, 11, 2011 年, 10691-10723 DOI 10.3390/s111110691
17. Y. Liu, N. Hu, Alamusi, T. Watanabe, Y. Koshin, Y. P. Cao and H. Fukunaga,

Relative Reflection Intensity of Lamb Waves from Elliptically-shaped Damages in Metallic Plates, Smart Materials and Structures, 査読有, 20, 2011年, 075010-1-11

DOI 10.1088/0964-1726/20/7/075010

18. G. Yin, N. Hu, Y. Karube, Y. Liu, Y. Li and H. Fukunaga, A Carbon Nanotube/Polymer Strain Sensors with Linear and Anti-symmetric Piezoresistivity, J. Composite Materials, 査読有, 45, 2011年, 1315-1323
DOI 10.1177/0021998310393296

〔学会発表〕(計4件)

1. S. Atobe, Y. Tanaka, N. Hu and H. Fukunaga, Impact Force Identification of CFRP Stiffened Panels Using Radiated Sounds, 15th US-Japan Conf. on Composite Materials, 2012年10月1日, Texas, USA
2. Y. Tanaka, S. Atobe and H. Fukunaga, Impact Force Identification of CFRP Stiffened Panels Using Radiated Sound Waves, JISSE-12, 2011年11月10日, 東京
3. 跡部哲士, 樋口暁, 原田邦彦, 福永久雄, 圧電素子による弾性波を用いた平板・殻構造の損傷検出, JCOSSAR 2011, 2011年10月12日, 東京
4. S. Atobe, H. Kobayashi, N. Hu and H. Fukunaga, Real-time Impact Force Identification of CFRP Laminated Plates Using Sound Waves, 18th ICCM, 2011年8月21日, Jeju Island, Korea

〔その他〕ホームページ:

<http://www.ssl.mech.tohoku.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福永久雄 (FUKUNAGA, HISAO)
東北大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 50134664

(2) 研究分担者

胡寧 (HU, NING)
千葉大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 60250685

亀山正樹 (KAMEYAMA, MASAKI)
信州大学・工学部・准教授
研究者番号: 30302178

跡部哲士 (ATOBE, SATOSHI)
東北大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 40586468