

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24年5月2日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010～2011

課題番号：22656194

研究課題名（和文）圧電素子のセンサ・発電機能を利用した無電源構造ヘルスマニタリング法の開発

研究課題名（英文）Non-powered structural health monitoring using piezoelectric sensor and energy harvesting

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

研究成果の概要（和文）：本研究では、圧電素子を内蔵したCFRP構造について、圧電素子のアクチュエータ・センサ機能を利用して衝撃損傷・疲労損傷を自動的・実時間で検知する構造ヘルスマニタリング法を開発するとともに、圧電素子の発電機能を利用して得られる電気エネルギーをアクチュエータ・センサネットワーク駆動、および、無線送信に供給する無電源構造ヘルスマニタリングシステムを構築した。

研究成果の概要（英文）：In the present research, a real-time and automatic structural health monitoring (SHM) method to inspect impact and fatigue damages is developed using piezoelectric actuators and sensors attached on the surface of structures. The SHM system is non-powered one using an electric energy generated from a piezoelectric energy harvesting, and the electric energy is supplied to put a network of actuators and sensors as well as a wireless transmitter in motion.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,700,000	0	1,700,000
2011年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	450,000	3,650,000

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：損傷同定、衝撃損傷、損傷予測、構造ヘルスマニタリング、ラム波、CFRP、エネルギーハーベスティング

1. 研究開始当初の背景

(1) 将来の航空機等におけるCFRP構造の構造ヘルスマニタリングについて、現在、世界中の研究機関で活発に研究が行われており、以下の条件を満たす構造ヘルスマニタリング技術を開発することが目標となっている。

- (a) 自動的かつ実時間での損傷モニタリングが可能であること。
- (b) 少ないセンサで、センサから離れた位置にある損傷を高精度に検出できる

こと。

- (c) 故障を生じないセンサネットワークでありモニタリングに必要な電力が小さいこと。

(2) 上記(a)-(b)の条件を満たすために、本研究グループはこれまで、疲労損傷に対しては伝播距離の長いラム波を用いたアクティブセンシングによるき裂・はく離損傷検出法を開発し、また、衝撃損傷に対しては、衝撃荷重同定に基づくパッシブセンシングによ

る衝撃損傷検出法を開発してきた。本研究では、上記(a)(b)の条件に加えて(c)の条件を満たすために、構造物に貼付あるいは埋込の微小圧電素子をセンサとして用いることにより、軽量で故障の少ないセンサネットワークを構築し、さらに、圧電素子の発電機能を利用してワイヤレスの無電源構造ヘルスマonitoring法を開発することを目標とする。

2. 研究の目的

航空機等の軽量化のため、主要構造材料としてCFRPの適用拡大が進んでいる。CFRP構造は衝撃荷重および疲労荷重による損傷により、大幅な残留強度の低下を生じる。そこで、CFRP構造の安全性と信頼性の一層の向上を図るためには、運用中に衝撃損傷および疲労損傷を自動的かつ実時間でモニターし構造物の安全性を予測評価することが極めて重要となる。本研究では、圧電素子を内蔵したCFRP構造について、圧電素子のアクチュエータ・センサ機能を利用して衝撃・疲労損傷を自動的・実時間で検知する構造ヘルスマonitoring法を開発するとともに、圧電素子の発電機能を利用して得られる電気エネルギーをアクチュエータ・センサネットワーク駆動、および、モニタリングデータの無線送信に供給する無電源構造ヘルスマonitoringシステムを構築する。

3. 研究の方法

本研究における主要な研究項目は、以下の二点である。

(1) 衝撃荷重同定に基づく衝撃損傷検出法

FWタンクについて、落錘衝撃試験機を用いて衝撃損傷を与え、衝撃荷重同定に基づく衝撃損傷検出法を確立する。衝撃損傷の検出では、異物衝突時の圧電センサへの弾性波到達時間より衝撃位置を同定し、本研究グループの開発した実験的衝撃荷重同定法に基づいて衝撃荷重履歴を決定する。また、同定された荷重情報より損傷を予測する損傷モニタリングシステムを開発する。

(2) ラム波を用いた損傷検出とその無電源化

疲労損傷の検出においては、圧電素子をアクチュエータとして用いてラム波を発生させ複数の圧電センサでこの応答を計測して、その伝播時間差より損傷位置と大きさを検出するアクティブセンシング法を用いる。このとき、損傷前の伝播時間の情報を必要とせず、損傷後の情報のみから損傷位置を検出する方法を確立する。上記で得られるモニタリング結果を、圧電素子の発電機能を利用してアクチュエータ・センサネットワーク駆動および無線送信に供給することにより、ワイヤレスの無電源構造ヘルスマonitoringシステムを構築する。

4. 研究成果

(1) 衝撃荷重同定に基づく衝撃損傷検出法

① 衝撃荷重位置・履歴同定法

図1に同定実験で用いたFWタンク(Teijin, Ultressa ALT604H)を示す。FWタンクの長さおよび外径はそれぞれ539mmおよび182mmであり、2本の金属ワイヤによって台に固定されている。表面にはPZT圧電センサが4個貼付されている。FWタンクは、内側からアルミライナー、炭素繊維層、ガラス繊維層、樹脂層から成る複雑な構造をしており、各層の厚さや繊維の巻付け角などの詳細は不明である。FWタンクへの衝撃損傷は落錘衝撃試験機により付与する。

最適化手法に基づく位置同定法(Method 1)、および、弾性波の到達時間を用いた衝撃荷重位置同定法(Method 2)の同定結果を、衝撃損傷を生じない場合と衝撃損傷を生じる場合とについて、それぞれ図2および図3に示す。図2、3において、**X**が衝撃荷重の作用位置、**O**、**□**がそれぞれ手法1、2により同定された位置である。手法1における位置同定誤差は損傷を生じないときに平均値7.98mm、損傷を生じるときの平均値9.06mm、最大値14.2mmと損傷の有無にかかわらず高精度の位置同定が行われている。一方、損傷を生じる場合には、図3からわかるように、手法2における位置同定誤差の平均値は11.9mm、最大値は26.4mmと同定誤差がかなり増大している。損傷が生じる場合は、損傷がない場合と比べて弾性波の伝播速度が変化し、位置同定精度の低下を引き起こしていると考えられる。

図4に損傷を生じない場合について、図2のA点の荷重履歴同定結果を示すが、手法1、2とも計測値とよく一致しており、位置と同様に荷重履歴も精度良く同定されていることがわかる。一方、図5に損傷を生じる場合について、図3のC点の荷重履歴同定結果を示す。手法1における荷重履歴のピーク値で評価した同定誤差の平均値は11.7%、最大

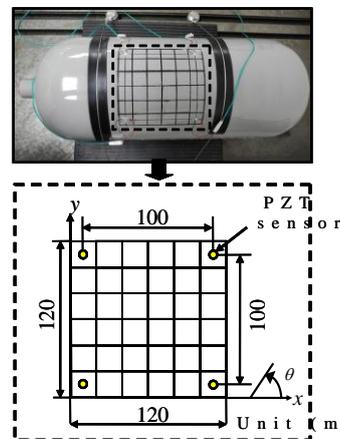


図1 FWタンク

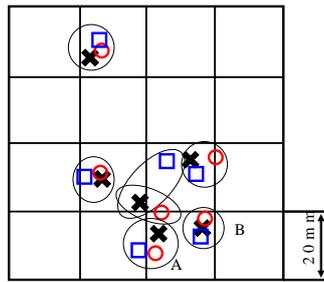


図2 衝撃損傷のないときの位置同定結果

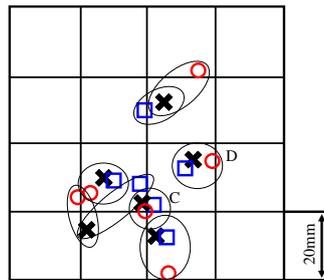


図3 衝撃損傷のあるときの位置同定結果

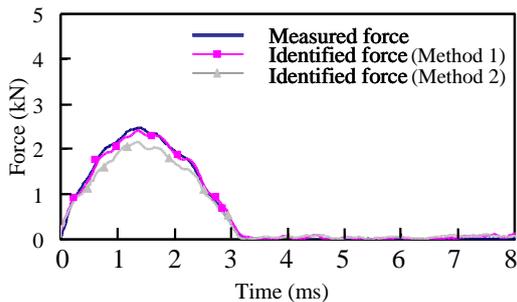


図4 損傷のないときの荷重履歴同定結果

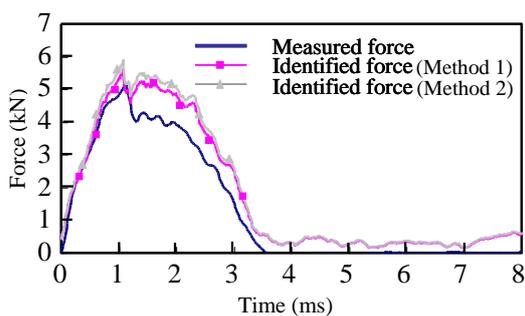


図5 損傷のあるときの荷重履歴同定結果

値は 18.0 %であるのに対し、手法2における同定誤差の平均値は 29.9 %、最大値は 65.3 %となり位置同定誤差の大きさを反映して大きな履歴同定誤差を生じている。

② 最大衝撃荷重と損傷面積の関係

図6に衝撃エネルギーと最大衝撃荷重の

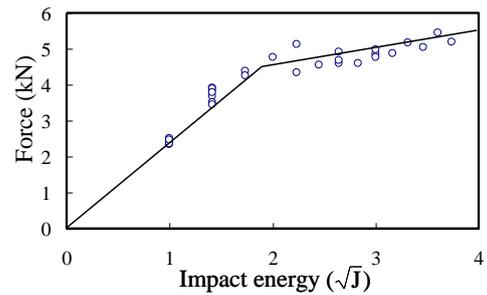


図6 衝撃エネルギーと最大衝撃荷重

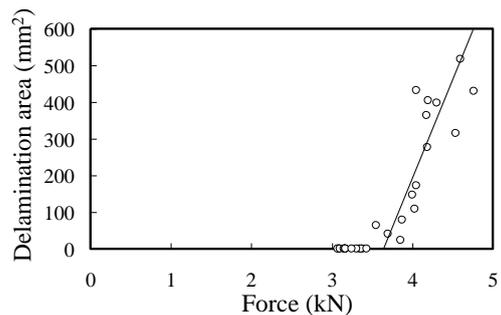


図7 最大衝撃荷重とはく離面積の関係

実験値との関係を示す。衝撃エネルギーが 4 J 程度で衝撃損傷を生じており、衝撃損傷を生じるエネルギーレベルで最大衝撃荷重は折線状の挙動を示す。また、図7に示す最大衝撃荷重とはく離面積の関係からわかるように、4 kN 弱の最大荷重からはく離を生じており、最大荷重の増加に伴いはく離が大きく進展する。

(2) ラム波を用いた損傷検出とその無電源化

① FWタンクのラム波による損傷検出法

試験片として用いるFWタンクは図1と同じである。図8に示すように、き裂を模擬した長さ 40mm、幅 2mmの貫通切欠きが導入されている。なお、切欠きの円筒軸に対する配向は 135°である。検査領域は一辺が 150mmの正方形領域であり、各辺に直径 10mm、厚さ 0.5mmの円板形のPZT圧電素子(富士セラミックス、C-64)が 30mm間隔で 5 個貼付

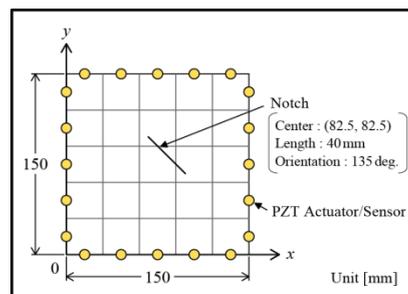


図8 切欠き寸法

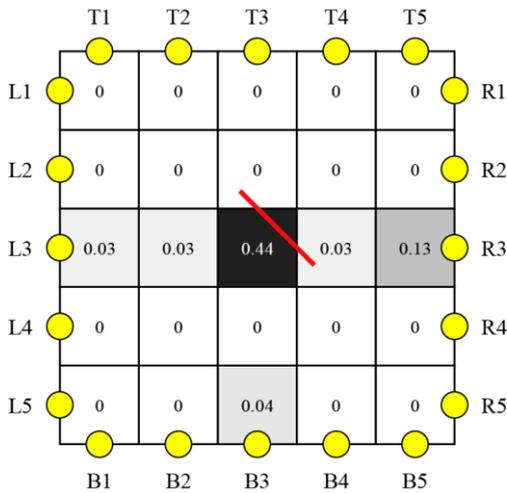


図9 損傷位置同定結果

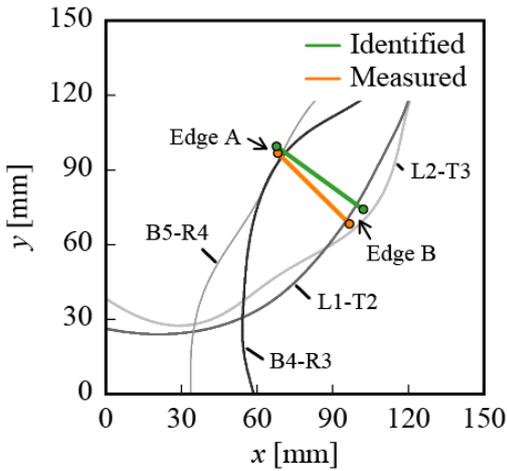


図10 き裂長さ・角度の同定結果

されている。入力波形は、周波数 50kHz、サイクル数 5 のサインバースト信号にハニング窓関数を施した信号を用いる。計測時間は 4ms、サンプリング周期は 0.04 μ s とする。

FWタンクの損傷検出では、き裂検出に有用なアクチュエータとセンサの組み合わせを特定するため、損傷の評価関数 DI (ダメージインデックス) を用いた損傷位置推定を最初に行った。図9に DI を用いた損傷位置推定結果を示す。図において、要素内の数字は各要素の損傷程度を示す。アクチュエータ～センサとして用いた圧電素子は、波が円筒軸方向に伝播する L-R の組み合わせと、円周方向に伝播する B-T の組み合わせを用いた。切欠きが導入されている要素の損傷程度が最も大きく、他の要素は 0 に近い値となっており、損傷位置が精度良く推定されている。

次に、反射波のアクチュエータとセンサ間の伝播時間を用いて、切欠きの長さ、および、角度を求めた。図10に損傷検出結果を示す。

図において、○はき裂端を表している。また、曲線は損傷からの反射波の伝播時間を用いて描かれる反射位置の候補であり、B4-R3 および B5-R4 はき裂端 A を、L1-T2 および L2-T3 はき裂端 B を波が經由する波からの結果である。図より、伝播速度が配向依存性を有する FW タンクの場合においても切欠きの両端をそれぞれ精度良く同定できることが示されている。

② ラム波構造ヘルスマニタリング法の無電源化

ラム波を用いた構造ヘルスマニタリングにおいては、圧電アクチュエータへの入力、圧電センサからの出力、モニタリングデータの無線送信等に電源を必要とする。そこで、圧電発電により構造物の振動エネルギーを圧電素子の電気エネルギーに変換・蓄積してその電力をアクチュエータ駆動、センサ用チャージアンプ駆動、無線送信用電源に使う図11の無電源構造ヘルスマニタリングシステムを構築した。

この無電源構造ヘルスマニタリングシステムでは、まず圧電発電部で振動エネルギーを電気エネルギーに効率よく変換することが重要となる。そこで、構造部と電気回路部のインピーダンスマッチングにより、発電効率の最適化を図った。次に、アクチュエータへの高周波加振回路、センサ用チャージアンプ回路、無線送信用回路を構成して、はり状の CFRP 材のはく離検出に適用した。その結果、アクチュエータ・センサ部では、電源を用いた構造ヘルスマニタリングシステムと同等のモニタリングシステムが構築可能となった。一方、無線送信システムの無電源化においては、今回の圧電発電では電気エネルギーの蓄積量が不足したため、有効な無線送信システムを構築できなかったが、圧電素子の数を増やす等により、今後より有効な無電源構造ヘルスマニタリングシステムを開発する予定である。

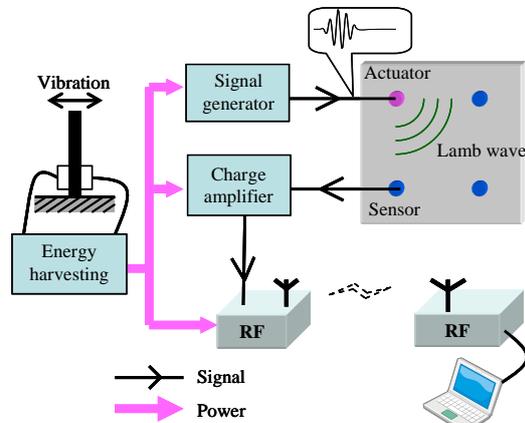


図11 無電源構造ヘルスマニタリング

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 15 件)

1. 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
2. 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
3. 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
4. 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
5. 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(11pp)
6. G. Yin, N. Hu, Y. Karube, Y. Liu, Y. Li and H. Fukunaga, A Carbon Nanotube/Polymer Strain Sensor with Linear and Anti-symmetric Piezoresistivity, J. Composite Materials, 査読有, 45, 2011 年, 1315-1323
7. 福永久雄, (解説)CFRP 構造の衝撃荷重同定と構造ヘルスマモニタリング, 設計工学, 査読無, 45, 2010 年, 320-327
8. 福永久雄, 跡部哲士, (展望)構造物に内蔵したセンサによる構造健全性診断技術, 査読無, 信頼性, 32, 2010 年, 299-306
9. N. Hu, Y. Liu, Y. Li, X. Peng and B. Yan, Optimal Excitation Frequency of Lamb Waves for Delamination Detection in CFRP Laminates, Journal of Composite Materials, 査読有, 44, 2010 年, 1643-1663
10. N. Hu, Y. Karube, M. Arai, T. Watanabe, C. Yan, Y. Li, Y. Liu and H. Fukunaga, Investigation on Sensitivity of A Polymer/Carbon Nanotube Composite Strain Sensor, Carbon, 査読有, 48, 2010 年, 680-687
11. 亀山正樹, 高柳宜孝, 福永久雄, 圧電素子によるエネルギー回収を利用した

CFRP はり構造の準能動的制振, 日本航空宇宙学会論文集, 査読有, 59, 2010 年, 340-348

12. 亀山正樹, 宮本裕二, 福永久雄, 圧電繊維アクチュエータを用いた CFRP 積層板の単一モード振動制御, 日本複合材料学会誌, 査読有, 36, 2010 年, 222-229

[学会発表] (計 7 件)

1. 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
2. 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, JCROSSAR 2011, 2011 年 10 月 12 日, 東京
3. 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
4. S. Atobe, N. Hu and H. Fukunaga, Identification of Impact Force Acting on CFRP Structures Using Experimental Transfer Matrices, 3rd APWSHM, 2010 年 11 月 30 日, 東京
5. N. Hu, Y. L. Liu, H. Fukunaga and Y. Li, Delamination Detection in CFRP Laminates Using A_0 and S_0 Lamb Wave Modes, Fifth International Conference on Fatigue of Composites, 2010 年 10 月 16 日, 南京, 中国
6. S. Atobe, N. Hu and H. Fukunaga, Real-Time Impact Force Identification of CFRP Structures Using Experimental Transfer Matrices, 14th US-Japan Conf. on Composite Materials, 2010 年 9 月 20 日, Ohio, USA

[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

(3) 連携研究者
()

研究者番号：