

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 12 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656513

研究課題名(和文)放射音を用いたCFRP構造の異物衝突・衝撃損傷モニタリング法の開発

研究課題名(英文)Development of Monitoring Method of Foreign Object Impact and Impact Damages in CFRP Structures Using Radiated Sounds

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) 3,000,000円、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、運用中の航空機CFRP構造に小石等が衝突するときの荷重位置・荷重履歴を、異物衝突時の放射音を用いて非接触・実時間でモニターする手法を確立するとともに、同定した最大衝撃荷重および荷重～時間関係より、CFRP構造の衝撃損傷の有無・大きさを実時間で評価する手法を開発することを目的とした。すなわち、異物衝突時のマイクロホンへの放射音到達時間から異物衝突の位置を判定し、音圧情報より荷重履歴を推定するとともに、同定した荷重履歴より衝撃損傷を評価する非接触・実時間の異物衝突・衝撃損傷モニタリング法を開発し、CFRP積層板およびCFRPサンドイッチ板により本手法の有効性を検証した。

研究成果の概要(英文)：In the present research, a real-time and non-contact identification method of the location and the history of the impact force acting on the aerospace CFRP structures is developed using radiated sounds occurring at the impact. The real-time method to estimate the occurrence and the extent of the impact damage in the CFRP structures is also developed from the identified force history. That is, the location and the force history are identified from the radiated sounds measured with microphones, and the monitoring method to estimate the impact damage is also developed. The validity of the present method is verified through the application to CFRP laminated plates and CFRP sandwich panels.

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構造 モニタリング 衝撃損傷 放射音 異物衝突

1. 研究開始当初の背景

小石・雹・鳥等が航空機や風車ブレード等のCFRP構造に衝突するときの衝撃荷重位置・衝撃荷重履歴を衝突時の放射音を用いて非接触・実時間でモニターし、発生する衝撃損傷を実時間で評価する手法を確立することを目的とした。放射音計測により荷重位置・荷重履歴を同定し、損傷位置および損傷の有無・大きさを実時間で判定することにより、CFRP構造の安全性の向上、定期検査に要するメンテナンスコストの大幅削減に繋がる。

異物衝突の衝撃荷重位置・衝撃荷重履歴の同定、および、CFRP構造に発生する衝撃損傷の評価は、現在、世界中の航空宇宙研究機関で活発に研究が進められており、センサとして構造表面に貼付あるいは構造内部に埋込みされた圧電センサ・光ファイバセンサ等が用いられている。このようなセンサを用いた異物衝突・衝撃損傷モニタリング法は、本研究グループも過去数年間に亘って研究を進めているが、固体内弾性波の分散性のため衝撃荷重位置の同定精度が良くない点に問題があった。本研究では、本研究グループが最近研究を進めている、センサとしてマイクロホンを用いた放射音計測による非接触の異物衝突・衝撃損傷モニタリング法を開発する。空气中を伝播する音波は、固体内の弾性波のように周波数により伝播速度が変化する分散性が無いため、異物衝突位置・荷重履歴を容易にモニターすることができる長所があり、異物衝突による衝撃損傷評価も容易となる。

2. 研究の目的

本研究では、運用中の航空機や風車ブレード等のCFRP構造に小石・雹・鳥等が衝突するときの荷重位置・荷重履歴を、異物衝突時の放射音を用いて非接触・実時間でモニターする手法を確立する。また、同定した最大衝撃荷重および荷重～時間関係より、CFRP構造の衝撃損傷の有無・大きさを実時間で評価する手法を開発する。本手法により、損傷位置・損傷有無の実時間判定が可能となりCFRP構造の安全性が格段に向上するとともに、現状の定期検査によるメンテナンスコストを大幅に削減することが可能となる。本研究では、異物衝突時のマイクロホンへの放射音到達時間から、異物衝突を監視するとともに、衝撃損傷を評価する非接触・実時間のモニタリングシステムを開発し、CFRP積層板およびCFRPサンドイッチ板により本手法の有効性を検証する。

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)放射音計測によるCFRP構造の非接触・実時間異物衝突監視システムの構築

センサへの放射音到達時間差より異物衝突時の衝撃荷重作用位置を同定し、実験的に決定された衝撃荷重～音圧関係を用いて衝撃荷重履歴を逆問題解析より求める。本手法は非接触音圧計測より、衝撃荷重の作用位置・履歴を決定する点に特徴がある。放射音のセンサ到達時間差を用いた本衝撃荷重位置同定法は、圧電センサ等のCFRP構造内蔵型センサで問題となる弾性波の分散性を生じず、周辺環境の雑音等のノイズが小さい場合、高精度の衝撃荷重同定結果が得られる優れた手法となり得る。また、本同定法は衝撃荷重位置同定が容易であり、実験室レベルでは高精度の同定結果が得られている。一方、実環境下でのCFRP構造では、周辺からの雑音等により衝突音以外のノイズが混入しやすい問題点があり、バンドパスフィルターを用いて衝突音成分のみを抽出することにより、同定精度の向上を図る。

(2)衝撃荷重同定によるCFRPサンドイッチ板の実時間衝撃損傷評価法の開発

同定した衝撃荷重履歴を用いて、衝撃損傷の有無・大きさを評価する手法を開発する。衝撃荷重を受けるCFRP構造では、衝撃エネルギーが小さい場合、層間はく離・マトリックスき裂・繊維破断等の損傷を発生せず荷重～時間関係は滑らかな半正弦波状を示す。一方、衝撃エネルギーが大きい場合には損傷を発生し、荷重～時間関係はのこぎり刃状を示す。このように、同定した衝撃荷重履歴により、損傷の有無を容易に判別できる。また、最大衝撃荷重と損傷面積に関する実験データあるいは解析データより、同定した最大衝撃荷重から損傷の大きさを評価することも可能となる。

4. 研究成果

(1)放射音計測によるCFRP構造の非接触・実時間異物衝突監視システムの構築

放射音を用いたCFRP積層板の実験的衝撃荷重同定

図1に示すように、非接触型センサである

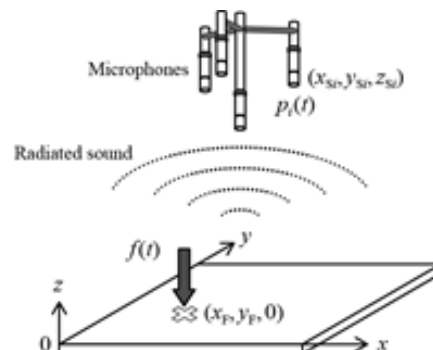
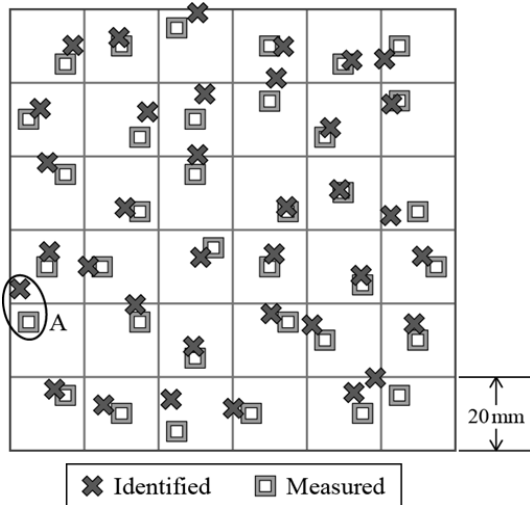


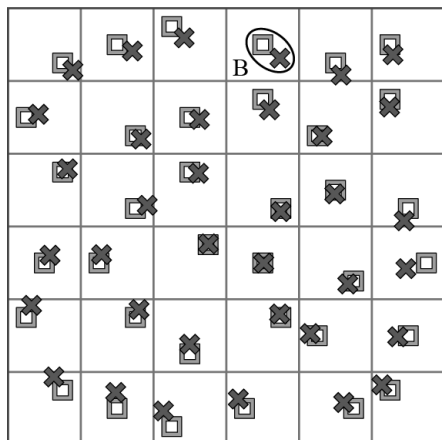
図1 CFRP積層板における衝撃時の放射音計測

マイクロホンを用いた衝撃荷重の位置・履歴同定法を検討した。この放射音を用いた衝撃荷重同定法は、圧電センサ等の接触型センサ音計測で問題となる多モードの弾性波が混同することによる衝撃荷重位置同定の困難さを避けることができるのに加え、構造物へのセンサ貼付による欠陥の導入を避けることができる利点がある。

本研究では、マイクロホンへの放射音到達時間差より異物衝突時の衝撃荷重作用位置を同定し、実験的に決定された衝撃荷重～音圧関係を用いて衝撃荷重履歴を逆問題解析より求める。図2に騒音が無い場合の荷重位置同定結果を示す。図2(a)はインパルスハンマ先端にソフトチップ(ゴム製)を用いた同定結果、図2(b)はハードチップ(プラスチック製)を用いた同定結果を示す。チップの硬さに拘らず、同定結果(Identified)は計測結果(Measured)と数mm程度の誤差でよく一致していることがわかる。このように、異物衝突時のマイクロホンへの放射音到達時間を用いて、異物衝突位置を正確に監視することができる。



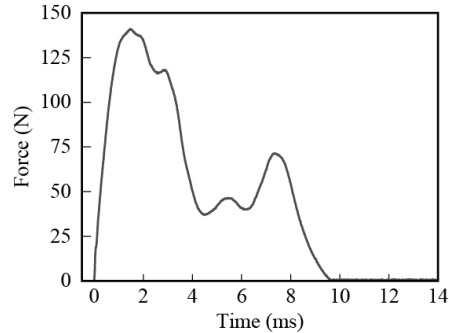
(a) ソフトチップ



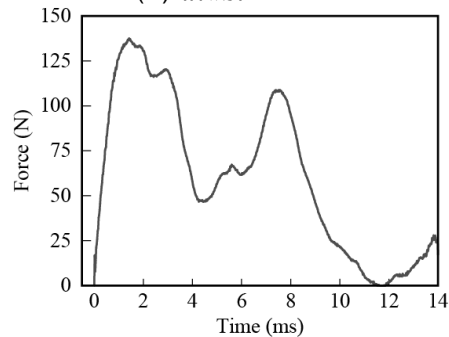
(b) ハードチップ

図2 インパルスハンマ打撃試験における衝撃荷重同定結果

ソフトチップを用いた場合の図2(a)のA点における衝撃荷重履歴同定結果を計測結果と比較して図3に示す。同様に、図2(b)のB点における同定結果を図4に示す。図3～図4の荷重履歴同定結果は、定量的にも計測結果に近く、十分な精度で荷重履歴が同定されていることがわかる。

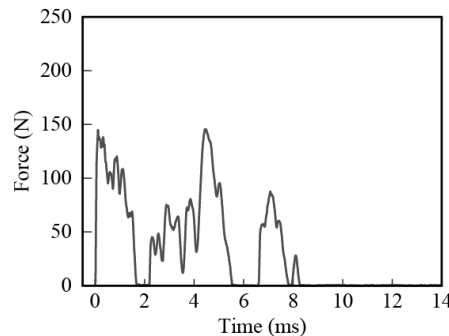


(a) 計測値

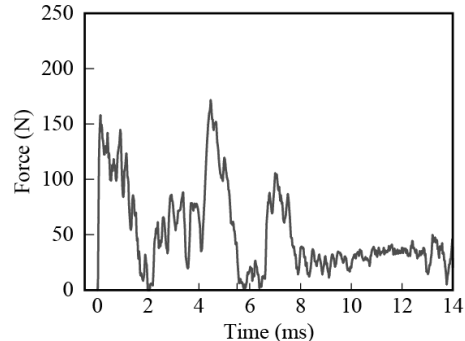


(b) 同定値

図3 荷重履歴同定結果(ソフトチップ)



(a) 計測値



(b) 同定値

図4 荷重履歴同定結果(ハードチップ)

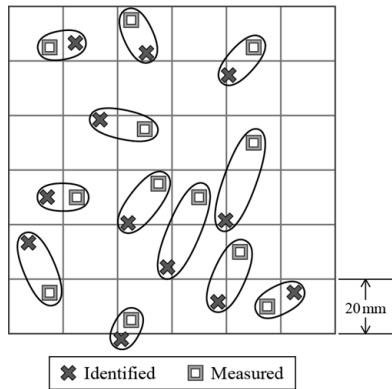


図5 10%の雑音を含む音圧を用いたときの衝撃荷重位置同定結果

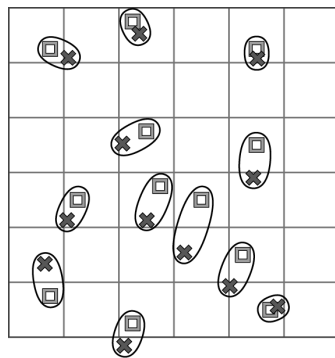


図6 ローパスフィルター(10kHz)で雑音を低減したとき衝撃荷重位置同定結果

実環境下でのCFRP構造では、周辺からの雑音等により衝突音以外のノイズが混入しやすい問題点があり、フィルターを用いて衝突音成分のみを抽出することにより、同定精度の向上を図る。図5は雑音があるときに、フィルターを用いないときの位置同定結果を示す。一方、図6はローパスフィルターを用いて雑音を低減したときの同定結果を示す。ローパスフィルターを用いることにより同定精度がかなり改善されることがわかる。

放射音を用いたCFRP補強板の実験的衝撃荷重同定

図7に示すCFRP補強板について、マイクロホンによる音圧計測により衝撃荷重の位置と履歴を同定する。図8に、補強部およびスキン部における荷重位置同定結果を示す。スキン部では、CFRP積層板とほぼ同程度の精度で荷重位置が同定されている。一方、補強材部では、荷重位置同定精度はスキン部ほど良くない。

図9に補強材部での荷重履歴同定結果を示す。図8のA点における位置同定精度は良くないにもかかわらず、荷重履歴同定結果は計測値とほぼ一致しており、高精度の同定結果が得られている。これは、補強材部では、補強材各点とマイクロホン間の伝達関数が、場所によってほとんど変化しないためと考えられるが、詳細な検討は今後の課題として

残されている。

(2) 衝撃荷重同定によるCFRPサンドイッチ板の実時間衝撃損傷評価法の開発

CFRPクロス材/アラミドコアサンドイッチ板について、放射音を用いた衝撃荷重同定と損傷同定を行う。インパルスハンマ打撃により、サンドイッチ板に衝撃損傷を付加し、そのときの衝撃荷重履歴同定結果を計測結果と比較して図10に示す。衝撃損傷を生じない低荷重での打撃の場合には、(a)に示すように半正弦状の滑らかな荷重-時間関係を示すのに対し、衝撃損傷を生じる場合には(b)のように、損傷発生・進展時にのこぎり

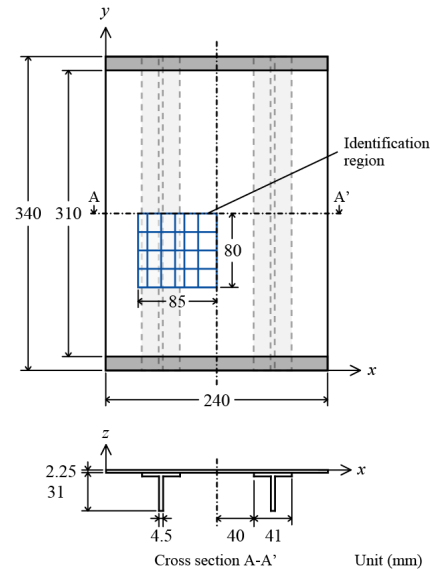


図7 CFRP補強板供試体

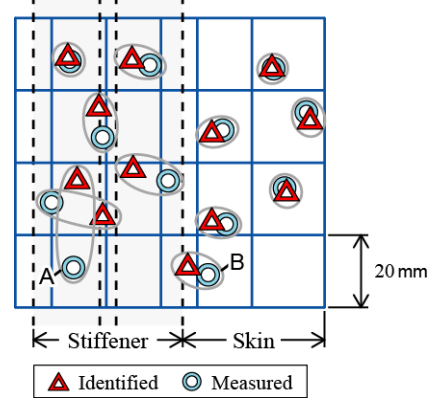


図8 CFRP補強板の荷重位置同定結果

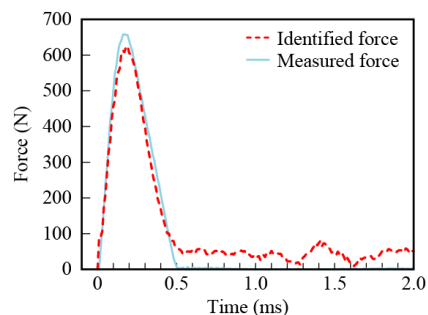
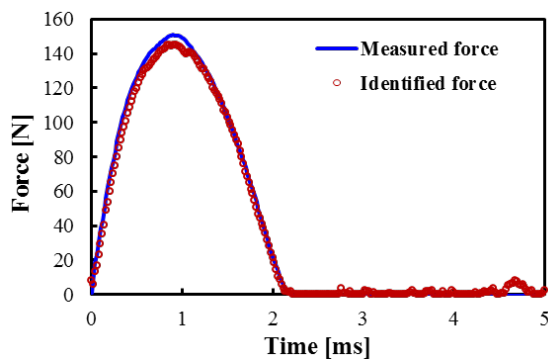
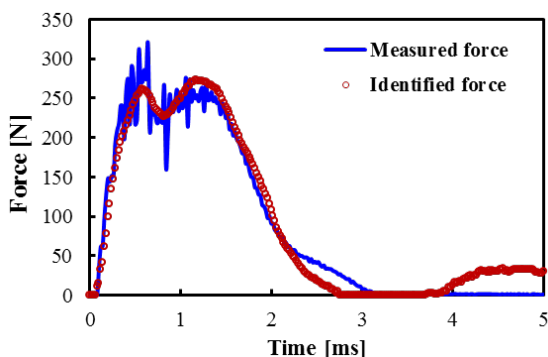


図9 A点(図8)の荷重履歴同定結果

刃状の荷重形状を示す。荷重同定結果は計測結果とよく一致していることより、同定した荷重履歴より、サンドイッチ板が損傷を受けているかどうかを容易に判定できる。また、荷重位置および荷重履歴の同定に要する時間は数秒程度であることより、ほぼ実時間でこの損傷モニタリングを行うことができる。



(a) 損傷の無い場合



(b) 損傷のある場合

図 10 損傷の有無による衝撃荷重履歴結果

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7件)

1. 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
2. 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
3. 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

4. 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>
5. 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>
6. 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
7. 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

[学会発表](計1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

[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

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