

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 20 日現在

機関番号：52605

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560252

研究課題名(和文)組込型動的デバイスを用いた知的構造による航空機構造の総合的ヘルスマニタリング

研究課題名(英文)Comprehensive Structural Health Monitoring in Aircrafts with Smart Structure Using Built-in Dynamic Devices

研究代表者

嶋崎 守 (SHIMAZAKI, Mamoru)

東京都立産業技術高等専門学校・ものづくり工学科・助教

研究者番号：20566757

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円、(間接経費) 1,170,000円

研究成果の概要(和文)：近年、民間航空機の機体の主要な構造部材に炭素繊維強化プラスチック複合材料が大幅に適用されつつある。この場合、層間はく離や接着はく離が発生する恐れがあるが、これらは金属材料を用いた従来構造で実施されている目視やタッピング検査では検出が困難である。

そこで本研究では、次世代航空機構造を対象とした総合的ヘルスマニタリングシステムの構築を目指し、組込型動的デバイスを用いて構造材料中に超音波ラム波を伝播させ、その広帯域にわたる周波数分散性の変化に着目した。その結果、損傷長さ、深さ、衝撃荷重および微小クラックを総合的に検知するシステムの可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：In recent years, carbon fiber reinforced plastic (CFRP) composites have been applied to the principle structural members in the latest civil aircraft. In CFRP structures, there is a possibility that some damages such as delaminations in the laminate, debondings in the adhesive layer and so on, occur under cyclic fatigue loadings. In this study, a structural health monitoring technique using a broadband ultrasonic wave propagation system to detect the damages was tested. By using this system, broadband modal dispersion characteristics of Lamb waves propagating in structural members were observed experimentally. Since the thickness of the intact area and that of the damaged area were clearly different, it was expected that the damages will be detected from the changes of the dispersion characteristics. Through the debonding damage detection tests, the relationship between the changes of the modal dispersion characteristics and the damages were investigated.

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：スマート構造 ヘルスマニタリング ラム波 ウェーブレット解析 圧電素子 Fiber Bragg Grating

1. 研究開始当初の背景

近年、民間航空機の機体の主要な構造部材に炭素繊維強化プラスチック(CFRP)複合材料が大幅に適用されつつある。この場合、長期運用による繰り返し荷重や運用中の異物衝突によりスキン材内部に層間はく離等が発生する恐れがある。また、スキン-ストリング構造では、スキンとストリングは接着される場合が多いため、繰り返し荷重により接着はく離が発生する恐れがある。しかし、これらは金属材料を用いた従来構造で実施されている目視やタッピング検査では検出が困難であるため、超音波Cスキャンなどの非破壊検査が必要となり、運用効率が大幅に低減する。そこで、構造ヘルスマニタリング技術によるリアルタイムかつ容易な健全性診断が欧米を中心に注目されている。これによりCFRP複合材料構造の安全性の確保と部材のさらなる軽量設計も期待されている。我々は、組込型動的デバイスである、極細PZTファイバからなるMFC(Macro Fiber Composite)アクチュエータと光ファイバセンサの一種であるFBG(Fiber Bragg Grating)ひずみセンサを用いて、構造部材と一体化した広帯域超音波送受振システムを構築し、CFRP積層板中にラム波を伝播させ、その広帯域にわたる周波数分散性の変化に着目することで、層間はく離の定量的検知にすでに成功している。

2. 研究の目的

本研究では、次世代航空機構造対象とした総合的ヘルスマニタリングシステムの構築を目指し、以下について検討した。

- (1) すでに成功している層間はく離の定量的検知手法を、スキン-ストリング接着構造における接着はく離検知へも適用する。
- (2) 上記(1)と同一のデバイス構成で機能を拡張する。すなわち、層間はく離および接着はく離検知に用いるMFCアクチュエータとFBGセンサを全てひずみセンサとして用いた動的ひずみ計測システムを構築し、スキンに異物が衝突した際の衝撃挙動を検知する。
- (3) スキン材に作用する繰り返し荷重の比較的少ない段階では、内部に微小クラックが発生する可能性があり、これが成長して問題となる内部損傷を誘発する。そこで、(1)と同一のデバイス構成で、クラック発生時や成長時に伝播するAE波を捉えることで、微小クラック検知へとさらに機能拡張する。
- (4) MFCアクチュエータとFBGセンサの最適配置を検討した上で、層間はく離、接着はく離、衝撃荷重、微小クラックをすべて検知可能な総合的構造ヘルスマニタリングシステムを構築し、その可能性を検討する。

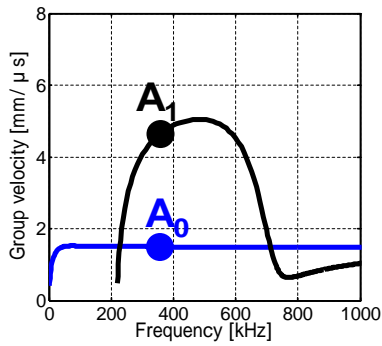
3. 研究の方法

スキン-ストリング構造における接着はく離の定量的検知を可能にすることを目標

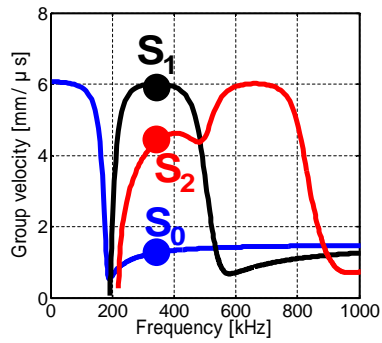
に研究を遂行した。まず、接着はく離の検出に適する超音波送受振システムのデバイスパラメータを検討した。また、受振ラム波の周波数分散性の変化を観察するために最適なMFCとFBGの配置を検討した。さらに、受振ラム波から接着はく離長さを推定可能な指標を検討した。また、衝撃荷重と微小クラックをリアルタイムに検知するために、まず、MFCをひずみセンサとして用いるための動特性を確認し、MFCとFBGによる動的ひずみ計測システムを構築した。そして、構築されたシステムでリアルタイム検知が可能であることを示した。そして、総合的構造ヘルスマニタリングシステムの実用性と有効性を実験から検証した。

4. 研究成果

CFRP積層板の層間はく離の定量的検知手法を、CFRP製スキン-ストリング構造における接着はく離検知へ適用することを目的に、まず、広帯域超音波送受振システムのMFCとFBGのデバイスパラメータを検討した結果、CFRP製スキン-ストリング構造における接着はく離検知のためには、CFRP積層板の理論分散性に基づいて、100~800kHzの周波数帯域でラム波を送受振できなければならない、それには、MFCおよびFBGの長さは6mm以下であることを実験とFEM解析により示した。また、それらの接着条件としては、カップラントジェルによる貼付よりもエポキシ系接着剤による接着の方が安定的に超音波の送受振が行えることを実験により確認した。また、MFCとFBGの最適配置を検討した結果、両デバイスとも高い指向性を有するため、その配置は一直線上に配置すること、また、ラム波の伝播距離が長くなるほど波長の長い伝播モードの振幅が相対的に強くなるため、接着はく離検知のために注目する伝播モードによって伝播距離、すなわち両デバイスの接着間隔を決定するのが有効であることを実験によって示した。さらにはく離進展と周波数分散性の変化の関係に基づいた接着はく離検知手法を検討した結果、まず、MFCを積層板の両面に接着してラム波の対称モードと非対称モードを分けて伝播させ、各モードのより正確な同定を行なった。これにより、はく離終端でのモード変換を詳細に観察した結果、同じ周波数帯域のモードへ変換されるが、どのモードに変換されるのかは理論分散曲線と比較することで説明できることを示した。さらに、損傷検知実験結果から、図1に示すように、350kHz周辺で伝播する損傷部の A_0 モードと健全部の S_0 モードの伝播速度差が大きいため、 A_0 モードから S_0 モードに変換するような伝播速度差の大きなモード変換に着目すれば、図2に示すように、はく離長さによって受振される S_0 モードの到達時間が大きく変化するので、接着はく離長さの定量的検知が可能であることを示した。



(a) 損傷部

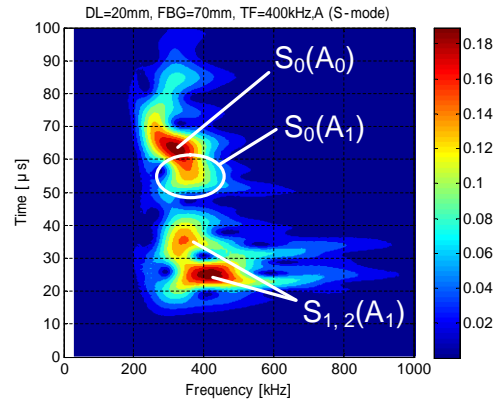


(b) 健全部

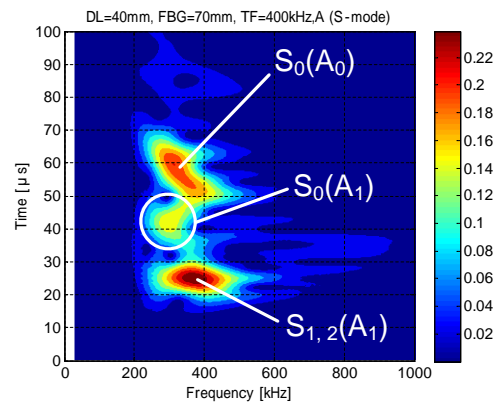
図1 損傷部と健全部での伝播速度

MFC アクチュエータの動的ひずみセンサとしての特性を検討した。MFC アクチュエータと光ファイバセンサを試験片に接着し、同試験片に衝撃を付加して両センサの計測結果を時間領域と周波数領域で比較することで、MFC アクチュエータの動的ひずみセンサとしての特性を検討した。その結果、MFC アクチュエータは光ファイバセンサと比較して、衝撃によるひずみのセンシングについては同等の性能を有することを確認した。また、動的ひずみ計測システムを検討した。微小な衝撃により伝播する AE 波を、超音波送受振システムと同じデバイス構成で構築が可能であるかを検討した。その結果、超音波送受振システムと同一のシステム構成で、すなわち、試験片に接着された MFC アクチュエータと光ファイバセンサで、衝撃により伝播する弾性波と微小な衝撃により伝播する AE 波を計測可能な動的ひずみ計測システムが構成できた。さらに、衝撃による受振ひずみの関係、また微小クラック発生にともなう受振ひずみの関係を検討した。実験では負荷点や大きさを変化させて衝撃荷重をスキンに負荷し、各 MFC アクチュエータの受振ひずみがどのように変化するか調べた。各計測結果から、その振幅の大きさと到達時間から負荷の大きさと付加点の位置同定が概ね可能であることを確認した。

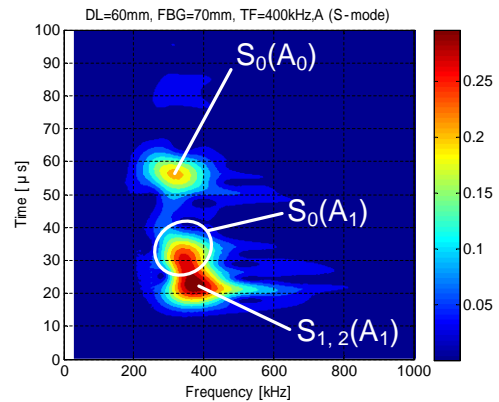
損傷長さの定量的検知の可能性を実証してきたので、損傷深さの定量的検知の可能性を検討した。深さの異なる人工的損傷を導入



(a) 損傷長さ 20mm



(b) 損傷長さ 40mm



(c) 損傷長さ 60mm

図2 損傷長さと S₀ モードの到達時間の関係

した供試体を用い、損傷深さと受振ラム波のモード分散性の変化との関係を詳細に調べた。その結果、図3に示すように、健全部と損傷部の境界で発生するラム波の伝播モードの変換状況に着目することで得られる特定モードの到達時間によって、損傷深さの定量的検知が可能であることを示した。

以上より、本研究では、超音波ラム波の伝播による損傷長さ、深さ、衝撃荷重および微小クラックを総合的に検知するシステムの可能性を示した。

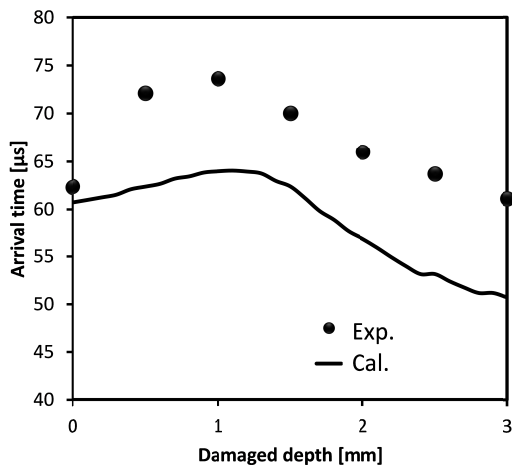


図3 損傷深さと S_0 モードの到達時間の関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

嶋崎守、“スマート構造を適用したアクティブ振動制御と構造ヘルスマニタリング”、検査技術、査読無、第18巻、第3号、2013、pp. 27-32、

中野公彦、大橋壘、岡部洋二、嶋崎守、中村弘毅、渡辺尚子、“パラレルファクタ分析法を用いた光ファイバセンサ出力の検出”、日本機械学会論文集(C編) 査読有、78巻、789号、2012、pp. 1410-1419
Yoji OKABE, Keiji FUJIBAYASHI, Mamoru SHIMAZAKI and Hideki SOEJIMA, “Damage Detection in Aircraft Composite Materials Using a Built-in Broadband Ultrasonic Propagation System”, Journal of System Design and Dynamics, 査読有, Vol. 5, No. 5, 2011, pp. 966-981

〔学会発表〕(計18件)

Mamoru Shimazaki, Makoto Sakamoto, and Manabu Ono, “Fundamental Study of Structural Health Monitoring by Lamb Waves Propagation”, 29th Annual Meeting of the American Society for Precision Engineering, Boston, USA, 2014 (講演予定)

嶋崎守、倉内優太、“超音波ラム波の伝播による構造ヘルスマニタリングのための送振波に関する基礎的研究”、日本機械学会関東支部第20期総会・講演会講演論文集(CD-ROM) 2014、講演番号 20913

嶋崎守、松本航、“圧電繊維アクチュエータを用いた損傷の定量的検知”、日本機械学会関東支部第20期総会・講演会講演論文集(CD-ROM) 2014、講演番号 20915

嶋崎守、鈴木翔平、石鍋善郎、“産業プラント配管の減肉損傷長さの定量的検知”、数理科学会第32回数理学講演会講演論文集(CD-ROM) 2013、講演 No. B401

嶋崎守、石鍋善郎、鈴木翔平、“スマート構造による損傷検知に関する研究”、日本

機械学会 Dynamics and Design Conference 2013 講演論文集(USBメモリ) 2013、講演番号 532

嶋崎守、鈴木翔平、石鍋善郎、“圧電繊維アクチュエータを用いた構造ヘルスマニタリングに関する基礎的研究”、日本機械学会関東支部第19期総会講演会講演論文集、2013、pp. 283-284

嶋崎守、石鍋善郎、鈴木翔平、“組込み型動的デバイスを用いた広帯域ラム波の伝播に関する基礎的研究”、数理科学会第31回数理学講演会講演論文集、No. 31、2012、pp. 59-60

嶋崎守、“固体アクチュエータを用いたスマート構造によるアクティブ振動制御”、第3回振動技術展同時開催セミナー、横浜、2012

岡部洋二、渡辺尚子、嶋崎守、“高速光ファイバセンサ計測装置による複合材料積層板の衝撃ひずみ波形の検知”、生産研究、64巻、1号、2012、pp. 91-94

Y. Okabe, N. Watanabe, M. Shimazaki, H. Soejima and T. Ogisu, “Detection of Impact Strain Waves in CFRP Laminates by Smart Ultrasonic System with FBG Sensor and AWG Filter”, 12th Japan International SAMPE Symposium & Exhibition (JISSE12), Tokyo, Japan, 2011, Paper ID SHM-16

Y. Gorai, Y. Okabe, M. Shimazaki, S. Ogihara, H. Soejima and T. Ogisu, “Delamination Detection Method for CFRP Based on Dispersion Change of Broadband Lamb Waves Considering Temperature Effect”, 12th Japan International SAMPE Symposium & Exhibition (JISSE12), Tokyo, Japan, 2011, Paper ID SHM-18

嶋崎守、岡部洋二、“伝播する広帯域ラム波のモード変換を利用したCFRP接着構造の剥がれ損傷モニタリング”、日本機械学会2011年度年次大会講演論文集(DVD-ROM) 2011、講演番号 J044013

五来雄歩、岡部洋二、嶋崎守、荻原慎二、副島英樹、荻巣敏充、“広帯域ラム波のモード変換に基づくCFRP積層板の層間剥離検知における環境温度の影響評価”、日本機械学会2011年度年次大会講演論文集(DVD-ROM) 2011、講演番号 J044014

中野公彦、大橋壘、中村弘毅、岡部洋二、嶋崎守、渡辺尚子、“パラレルファクタ分析法を用いた光ファイバセンサ出力のノイズ除去”、日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2011 講演論文集(CD-ROM) 2011、講演番号 223

Mamoru SHIMAZAKI and Yoji OKABE, “Detection Technique of Debonding Damage in Composite Bonding Structures Using Broadband Ultrasonic Wave Propagation System”, International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2011, Kobe, Japan (CD-ROM),

2011

Yuho GORAI, Yoji OKABE, Mamoru SHIMAZAKI, Shinji OGIHARA, Hideki SOEJIMA, and Toshimitsu OGISU, “Evaluation of temperature effect on delamination detection in CFRP laminates based on mode conversions of broadband Lamb waves”, International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2011, Kobe, Japan (CD-ROM), 2011

Yoji OKABE, Naoko WATANABE, Mamoru SHIMAZAKI, Hideki SOEJIMA, Toshimichi OGISU, “Detection of Impact Strain Wave in Composites by High-speed FBG Sensor System with AWG Filter”, Proceedings of the 8th International Workshop on Structural Health Monitoring (IWSHM 2011), Stanford, USA, 2011

Yoji OKABE, Naoko WATANABE, Mamoru SHIMAZAKI, Hideki SOEJIMA, Toshimichi OGISU, “Detection of Impact Strain Wave in Composites by FBG Sensor System with AWG Filter”, Proceedings of the JSME/ASME 2011 International Conference on Materials and Processing (ICM&P 2011), Corvallis, USA (CD-ROM), 2011

6. 研究組織

(1) 研究代表者

嶋崎 守 (SHIMAZAKI, Mamoru)
東京都立産業技術高等専門学校・
ものづくり工学科・助教
研究者番号：20566757

(2) 研究分担者

岡部 洋二 (OKABE, Yoji)
東京大学・生産技術研究所・准教授
研究者番号：90313006