

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560821

研究課題名(和文) 指向性圧電素子を用いたCFRP積層板の損傷モニタリングシステムの開発

研究課題名(英文) Development of damage monitoring system for CFRP laminates using directional piezoelectric elements

研究代表者

遠山 暢之(TOYAMA, NOBUYUKI)

独立行政法人産業技術総合研究所・計測フロンティア研究部門・主任研究員

研究者番号：60344165

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、CFRP積層板に内在する衝撃損傷を、一箇所のみに配置した圧電アレイ素子を用いて検出・位置同定することが可能な損傷モニタリングシステムを開発することを目的としている。特定のラム波に対して顕著な指向性を有する複数の圧電素子を放射状に配列させたセンサ網およびラム波励起用の発信素子からなる圧電アレイ素子を設計し、CFRP積層板およびアルミニウム板上に設置してアクティブセンシング試験を実施した。各圧電素子で検出された損傷からの反射エコー振幅を比較し、また反射エコーの到達時間を計測することによって、損傷検出およびその2次元位置を同定する手法を開発することができた。

研究成果の概要(英文)：This study develops arrayed-transducers consisted of directional piezoelectric elements for damage monitoring of thin carbon fiber reinforced plastics (CFRP) laminates. A directional piezoelectric element for the low-frequency Lamb mode was designed and its performance was evaluated. The directional piezoelectric elements were applied to the pulse-echo method to detect damage in thin plates and their usefulness was demonstrated.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学、複合材料・物性

キーワード：超音波探傷 非破壊検査 構造ヘルスマニタリング 複合材料 衝撃損傷 ラム波 圧電素子

1. 研究開始当初の背景

(1) 近年の主力旅客機においては、機体の大幅な軽量化のために、胴体や主翼などの主要構造部材として炭素繊維強化プラスチック (CFRP) 積層板の適用が加速しているが、この CFRP 積層板においては、飛石や雹等の衝突による面外衝撃荷重により、容易に衝撃損傷が発生するという問題が指摘されている。このような衝撃損傷は構造体の圧縮強度および剛性の著しい低下を引き起こすことから、構造体の安全性を確保するためには頻繁な定期検査が不可欠となる。しかし、一般にこれらの衝撃損傷は内部損傷であるため、目視による検査が困難であり、従来検査に用いられている X 線や超音波探傷は非常に労力と時間がかかるといった問題がある。そのため、特に CFRP 構造体においては面外衝撃荷重の発生位置とそれによる衝撃損傷の有無を運用中に把握するモニタリングシステムの開発が強く求められている。

(2) CFRP 構造部材のような薄板構造を対象とした損傷検出技術としては、長距離伝播能を有するラム波を用いた手法が注目されている。CFRP 積層板の衝撃損傷検出を目的とした研究例としては、積層板表面あるいは内部に埋め込まれた圧電セラミックス素子を用いた AE 手法やアクティブセンシング手法が試みられており、衝撃損傷の場所の同定さらには衝撃損傷のサイズ同定に関する報告がなされている。しかしながら、これらの研究においては多数の箇所に超音波センサを設置する必要がある、あるいは超音波センサを表面走査させる必要があるため、センサ網の設置や検査に非常に手間と時間がかかるといった問題点がある。

2. 研究の目的

本研究では、CFRP 積層板に内在する約 1 インチ径の衝撃損傷を、一箇所のみ配置した超音波アレイセンサを用いて検出・位置同定することが可能な全方位損傷モニタリングシステムを開発することを目的として、具体的には下記の研究を遂行する。まず、衝撃損傷検出に適した励起周波数とラム波モードの選定およびその励起・受信を行う指向性圧電素子の形状最適設計・性能評価を行う。次に、それらからなる放射状アレイセンサを設計し、全方位に渡ってラム波を放射・受信するアクティブセンシングシステムを構築する。さらに得られる受信信号を基にして、衝撃損傷を検出・位置同定することが可能な波形解析手法を開発し、実証試験を行う。

3. 研究の方法

(1) CFRP 積層板の衝撃損傷検出のための最適な励起周波数とラム波モードの選定および指向性を有する圧電素子形状の設計

被検体として用いる CFRP 積層板およびアルミニウム板に対するラム波分散曲線を理論的に導出し、高次ラム波モードの遮断周波

数を導出する。併せて分散の影響を低減させるために、遮断周波数以下の狭帯域トーンバースト波を励起信号とする。さらに損傷検出には短波長が有利であることから、遮断周波数以下で存在する S_0 モードおよび A_0 モードのうち短波長の A_0 モードを選定する。

選定した周波数の A_0 モードを効率的に送受信することが可能な圧電セラミックス素子の形状を設計する。現在までに得られている知見を基に、高アスペクト比の圧電素子を採用することとし、長手方向のサイズを A_0 モードの半波長に等しくする。

以上の指針を基に CFRP 積層板およびアルミニウム板上に設計・作製した一对の圧電素子を貼り付け、ラム波 A_0 モードの送受信を行い、十分な SN 比で損傷エコーが得られるかどうかを確認する。さらに設計した圧電素子の指向性評価試験を行うとともに、レーザー超音波映像化技術を用いて衝撃損傷部を伝播するラム波の挙動を詳細に解明する。

(2) 超音波アレイセンサの設計および損傷検出・位置同定手法の開発

最適設計した複数の指向性圧電素子からなる放射状アレイセンサの設計を行い、アクティブセンシング用の発信・受信素子を被検体上に設置する。励起されたラム波の伝播挙動を超音波映像化技術を用いて可視化し、アレイセンサの最適設計にフィードバックさせる。

励起・伝搬したラム波は損傷部で反射し、その反射エコーは各受信素子で検出される。ここで、各受信素子は指向性を有しており、長手方向が高感度になるため、各反射エコーの振幅を比較することで定量的に衝撃損傷の方位を導出する。さらに反射エコーの到達時間を基にしてセンサ - 損傷間距離を導出し、最終的に両者を組み合わせた衝撃損傷の位置同定手法を開発する。

4. 研究成果

(1) 指向性圧電素子の設計および性能評価

50kHz の低周波のラム波に対して感度指向性を有する圧電素子の設計および指向性評価試験を行った。

長さ L 、幅 W 、厚さ t の直方体形状の圧電素子を採用し、長さ振動モードを用いることで指向性を発現させることを試みた。すなわち、長さおよび幅方向では長さ振動モード、厚さ方向では厚み振動モードによりラム波を検出することになる。長さ振動モードの場合、入射するラム波の半波長がセンサ長に一致した際に高感度になるため、ラム波に対する長さ方向の感度を最大にするために、 L を検出対象である 50kHz の A_0 モードの半波長に一致させることとした。幅については $L > W$ とし、厚さについては共振周波数を 2MHz 以上になるように設計した。

以上の指針によって長さ方向のみを高感度させ、幅および厚さ方向の感度を意図的に低下させることによって指向性を発現さ

せることとした。

供試材には 1000×1000×1mm のアルミニウム板および CFRP 積層板を用いた。圧電素子の形状を決定するために、厚さ 1mm の各薄板を伝播するラム波 A_0 モードの理論分散曲線を導出し、50kHz に対応する半波長として約 7mm を得た。これより指向性圧電素子として用いる PZT 素子 (C-6、富士セラミックス) のサイズを L: 7mm、W: 1、3、5mm、t: 0.5mm とした。

三種類の幅を有する圧電素子をアルミニウム板上にそれぞれ瞬間接着剤で接着し、受信素子とした。発信素子には 7×1×0.5mm の 10 個の圧電素子を受信素子から 100mm の距離上に接着し、ラム波の入射角度を 0~90° 間で 10° 間隔ごとに变化させることにより、圧電素子の感度指向特性を測定した。任意波形発生装置を用いて 1Vp-p、50kHz、5 サイクルトーンバースト波にハニング窓関数を施した電圧信号を高速バイポーラ電源で 100 倍増幅した後、発信素子へ入力した。受信素子で検出されたラム波 A_0 モードの信号はオシロスコープに直接送信し、100 回の平均化処理を行った後、最大振幅値の測定を行った。

図 1 に 1、3、5mm の幅を有する受信素子を用いて行った最大振幅の入射角度依存性の結果を示す。いずれの幅の受信素子においても、入射角度が受信素子の長さ方向に一致した際に最も感度が高く、入射角度の増加に伴い感度が非線形に低下した。また同様の実験を CFRP 積層板についても実施し、図 1 に合わせて結果を示す。CFRP 積層板は異方性を有するものの、ほぼアルミニウム板と同様の結果が得られた。以上によりラム波 A_0 モードに対して顕著な指向性を有する高アスペクト比形状の圧電素子を設計し、所望の性能を得ることができた。

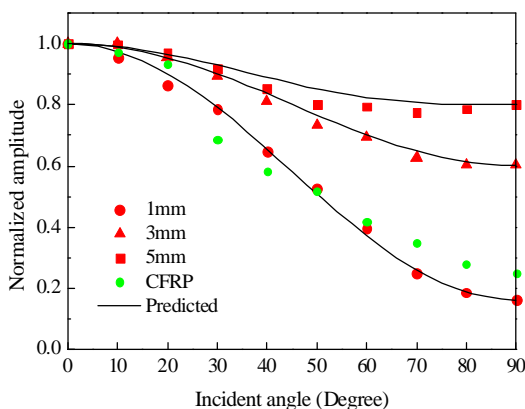


図 1 圧電素子の感度指向性試験結果

(2) 一對の指向性圧電素子を用いたパルスエコー法による超音波探傷試験

設計した指向性圧電素子を受信素子のみでなく、発信素子としても併用し、指向性を活かした非破壊検査手法の提案および検証を行った。本圧電素子に 50kHz の電圧信号を

入力した場合には、長さ方向からラム波 A_0 モードを高効率に発信できる一方、幅方向および厚さ方向には非常に非効率な発信がしない指向性発信素子として利用できる。

図 2 に実験方法の概略図を示す。供試材としては 1000×50×1mm の短冊形状のアルミニウム板および CFRP 積層板を用いた。アルミニウム板についてはき裂を模擬するために、試験片長手方向の中央端部に長さ 10mm の貫通スリットを導入した。CFRP 積層板については衝撃損傷検出を目的として、落錘試験機を用いて約 10J の衝撃エネルギーを試験片中央に加えて、衝撃損傷を導入した。導入した各損傷をパルスエコー法によって検出することを目的として、各試験片の端部に一對の指向性圧電素子 (7×1×0.5mm) を瞬間接着剤で接着し、一方を発信素子として、他方を受信素子として用いることとした。励起信号および計測システムは上述したものと同等のものを使用した。さらに指向性を有していない汎用的な圧電素子との比較を行うために、7×7×0.5mm の圧電素子を用いた実験も併せて行った。

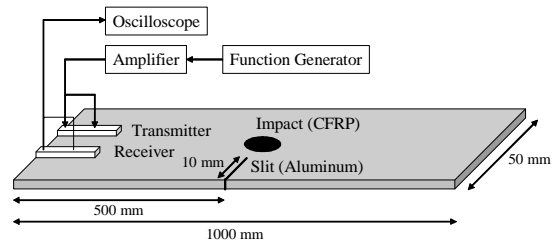


図 2 一對の指向性圧電素子を用いた超音波探傷試験の概略図

図 3 に CFRP 積層板上に接着した 7×7×0.5mm の圧電素子を用いて得られた衝撃損傷の存在していない場合と存在している場合の受信波形を各々示す。指向性のない圧電素子を使用した際に見られた試験片側面に起因する多重反射は現れず、衝撃損傷に起因するエコーを明確に検出することができている。以上の結果より、指向性圧電素子を用いることで特定方向のみの探傷が可能となることを実証することができ、本圧電素子の有用性を示すことができた。

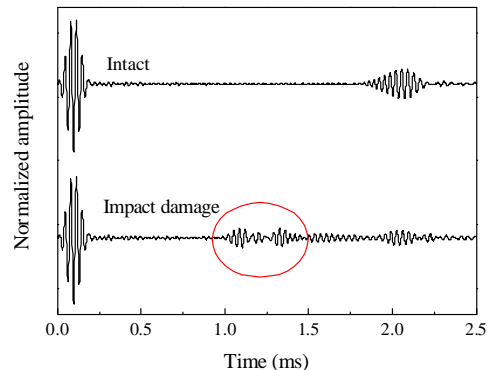


図 3 CFRP 積層板の衝撃損傷検出結果

(3) 放射状アレイセンサの設計および損傷モニタリングシステムの開発

ラム波 A_0 モードに対して顕著な指向性を有する圧電素子を8つ用いて、45度間隔で放射状に配列させたセンサ網を構築し、中央部に全方位に等方的にラム波を放射できる円形の発信子を配置した発信・受信アレイ素子を図4のようにCFRP積層板上に貼り付けた。本CFRP積層板にハンマーによる衝撃損傷を複数導入し、これらを検出さらには位置同定できるかどうかの検証を行った。

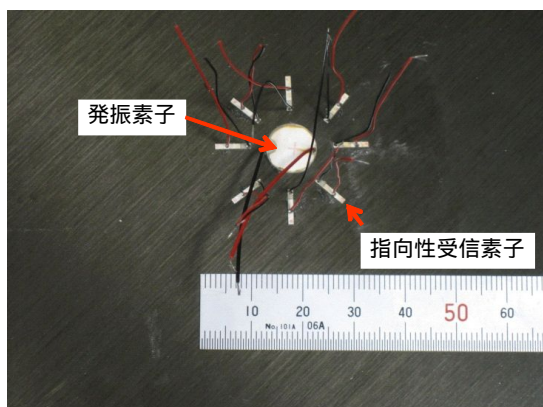


図4 CFRP積層板上に設置した放射状アレイセンサ

図5のようにレーザ-超音波映像化技術の適用によって、円形の発信子から全方位に放射され、CFRP積層板中を伝播したラム波が衝撃損傷部で反射されることが確認できた。その反射エコーを各圧電素子で検出し、各反射エコーの振幅を比較することによって定量的に衝撃損傷の方位を導出することを試みた。さらに反射エコーの到達時間を基にして、センサ-損傷間距離についても併せて定量的に導出することを試みた。

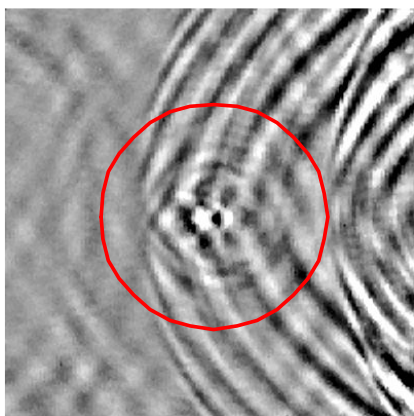


図5 衝撃損傷部のレーザ-超音波可視化像

図6にチャンネル2の長手方向の方位の距離300mmの位置に損傷がある積層板を用いて反射エコーを検出した結果を示す。反射エコーの振幅を比較すると $ch2 > ch1 = ch3 > ch5 > ch4$ となっていることから損傷の方位がチャンネル2の長手方向にあることがわかる。さらに

反射エコーの到達時刻が約0.7msであることから損傷の位置が約300mmであることが評価できた。以上のことから、一箇所にのみ配置した超音波アレイセンサを用いて損傷を検出・位置同定することが可能な全方位損傷モニタリングシステムを開発することに成功した。

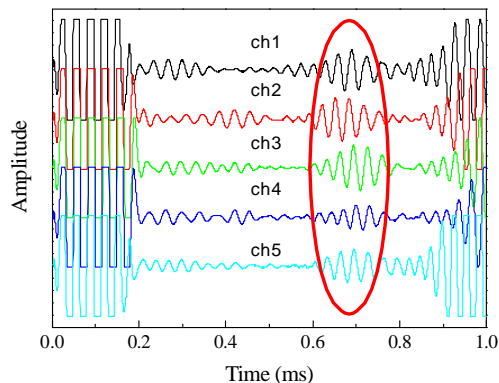


図6 放射状アレイセンサで検出した損傷エコーの比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

遠山 暢之、卜部 啓、津田 浩、指向性圧電素子を用いたCFRP積層板の損傷モニタリング、JCCM-3講演論文集、査読無、2012、626-628

〔学会発表〕(計4件)

遠山 暢之、卜部 啓、津田 浩、指向性圧電素子を用いたCFRP積層板の損傷モニタリング、第3回日本複合材料合同会議、2012年3月9日、京都市

遠山 暢之、卜部 啓、宮内 和秀、山本 哲也、李志遠、津田 浩、CFRP構造物への非破壊検査の適用、平成24年度産総研本格研究ワークショップ、2012年12月10日、名古屋市

遠山 暢之、津田 浩、李志遠、高坪 純治、森谷 信一、ロケット燃焼器へのレーザ超音波可視化探傷技術の適用、安全・安心な社会を築く先進材料・非破壊計測技術シンポジウム、平成24年度産総研本格研究ワークショップ、2013年3月26日、仙台市

遠山 暢之、レーザ超音波伝搬可視化技術を利用した非破壊検査手法の開発、スマート・アクチュエータ/センサ委員会定例会、2014年4月18日、東京都

6. 研究組織

(1)研究代表者

遠山 暢之 (TOYAMA, Nobuyuki)
独立行政法人産業技術総合研究所・計測フロンティア研究部門・主任研究員
研究者番号：60344165