

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 18 日現在

機関番号：13601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2012

課題番号：23760094

 研究課題名（和文）多入力圧電繊維アクチュエータを用いたスマート複合材構造の  
損傷モニタリング

 研究課題名（英文）Damage Monitoring of Smart Composite Structures using Multi-input  
Piezoelectric Fiber Actuators

研究代表者：

亀山 正樹（KAMEYAMA MASAKI）

信州大学・工学部・准教授

研究者番号：30302178

研究成果の概要（和文）：本研究では、圧電アクチュエータ・センサを備えた構造物のアクティブセンシングによる損傷モニタリング技術に着目し、ラム波伝播特性に基づく構造物の運用中の健全性評価技術に対してフェイズドアレイ技術を適用することによる、損傷モニタリングシステムの効率化・高精度化の実現可能性に関して検討を行った。

研究成果の概要（英文）：The present research treats damage monitoring techniques of structures with piezoelectric actuators and sensors based on active sensing technology. We examined the extension of phased array technique to structural health monitoring based on Lamb wave propagation characteristics in order to develop an efficient and highly precise damage identification method.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：構造力学

科研費の分科・細目：機械材料・材料力学

 キーワード：ヘルスマニタリング，ラム波，金属コア入り圧電繊維，  
圧電繊維アクチュエータ，損傷同定，フェイズドアレイ技術，  
波伝播特性解析，複合材料

## 1. 研究開始当初の背景

将来の高速車輛や航空機における構造の損傷モニタリングにおいては、少数のセンサで、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が求められている。現在、世界中の研究機関において、種々のセンサおよび信号処理法を用いた構造物の損傷モニタリングの研究が進められており、例えば、伝播距離の長いラム波を用いる方法が世界的に活発に研究されている。

一般的には、ラム波伝播特性に基づく損傷モニタリングではバルク状の圧電セラミックスを用いてラム波を発生しているが、近年では NASA によって開発された圧電繊維複合体 (Macro-Fiber Composite; MFC) をラム波の発生に用いた研究も国内外においていく

つかみられる。MFC アクチュエータは、多数の繊維状の圧電セラミックス (PZT) を樹脂中に埋め込んだものであり、共振周波数がなく指向性を有することから、広帯域のラム波を特定の方向に効率良く発生させることによる損傷検出の高精度化が期待されている。しかしながら、MFC アクチュエータでは全ての圧電繊維が同一方向に並べて埋め込まれており同一の電圧を印加している（単一入力である）ことから、圧電繊維方向から外れた位置に損傷が存在する場合にはその検出方法に問題があり、適用対象となる構造が MFC アクチュエータの寸法（幅）によって限定される、あるいは用いる MFC アクチュエータの大型化・個数の増加に直結すると考えられる。

一方、従来の非破壊検査法の一つである超音波探傷法において、波動の干渉による強め合い・弱め合いの原理に基づくフェイズドアレイ技術を適用した「フェイズドアレイ超音波探傷法」が注目されており、既に小型の超音波探傷システムが市販されている。フェイズドアレイ超音波探傷では、フェイズドアレイプローブを構成する複数振動素子の発信タイミングを制御することにより、複数のビーム構成要素を合成し、意図する方向に走る単一波面を形成するように複数の超音波を発信する。つまり、位相整合技術により電子ビーム形成とビーム走査が可能になり、一つのフェイズドアレイプローブから膨大な数の異なった超音波ビームを生成することができる。そして、この特徴がもたらす検査の柔軟性や検査所要時間の短縮は、非破壊検査技術において大きな意義があるといえる。

産業技術総合研究所において、金属細線をコアとしてその表面をPZTセラミックスで皮膜した、いわゆる金属コア入り圧電ファイバが開発された。金属コア入り圧電ファイバでは金属コア自体が電極となることから、導電性材料の中に埋め込んで共通グランドとすることにより、先述した単一入力のMFCアクチュエータとは異なり、圧電繊維毎に異なる電圧を印加することが可能な圧電アクチュエータ素子を実現できる。さらに、この圧電アクチュエータ素子を用いたラム波伝播特性に基づく損傷モニタリングにおいてフェイズドアレイ技術を適用することでラム波の伝播方向や集束点を電子的にステアリングすることが可能となることが予想され、ラム波を用いた損傷モニタリングシステムの簡素化・高精度化が期待できる。

本研究により、フェイズドアレイ技術を用いたラム波伝播特性に基づく効率的かつ高精度な損傷モニタリングシステムの構築方法が確立されれば、損傷モニタリングを実用化に向けて格段に発展させることが可能となり、将来の航空機や高速車輻等の構造の実時間・自動的な損傷モニタリング法として、その安全性・信頼性の向上に大きく貢献でき実用的意義も大きい。また、本研究において損傷モニタリングシステムに用いる圧電アクチュエータ素子は、印加電圧の自由度の高さから将来の宇宙太陽発電衛星等の大規模宇宙構造物・航空機・回転翼機・タービン等の構造のアクティブ振動制御技術への適用によって振動制御システムの効率化・高精度化をもたらすことが可能となり、同じく構造の安全性・信頼性の向上に大きく貢献でき実用的意義も大きい。

## 2. 研究の目的

本研究では、圧電アクチュエータ・センサを用いたスマートストラクチャとしての複

合材構造を対象とし、ラム波伝播特性に基づく構造物の運用中の健全性評価技術に対してフェイズドアレイ技術を適用することにより、損傷モニタリングシステムの効率化・高精度化を実現することを目的とする。すなわち、(1) 多入力圧電アクチュエータ素子としての「金属コア入り圧電ファイバ/導電性エポキシ樹脂複合材料」の作製、(2) 構造物の形状・振動制御における上記アクチュエータ素子の適用性検討、(3) ラム波を用いた損傷モニタリングにおける上記アクチュエータ素子の適用性検討、を行う。

## 3. 研究の方法

初めに、多入力圧電アクチュエータ素子としての金属コア入り圧電ファイバ/導電性エポキシ樹脂複合材料の試作を行うとともに、同複合材料、およびそれを模擬した複数のMFCアクチュエータを用いて低剛性の平板を対象とした励振実験を行い、提案する損傷モニタリングシステムで用いる圧電アクチュエータ素子の作製方法、およびアクチュエーション機能の検証を行う。

次に、無損傷のアルミニウム合金平板を対象として、平板表面に貼付した複数の圧電アクチュエータ素子に同位相のサインバースト波電圧を印加して発生させたラム波の伝播特性について、数値シミュレーション、および実験による検討を行う。数値シミュレーションでは、擬似スペクトル・ミンドリン板要素を用いた波伝播特性の有限要素解析を行う。本研究では、ミンドリン板要素として36節点要素を用いることとし、要素補間関数にはチェビシェフ多項式を用いている。ラム波の生成に用いるアクチュエータとして、圧電特性が面内等方性を有するPZT圧電素子を用いることを考え、圧電アクチュエータへ印加するサインバースト波電圧は、サイクル数5、周波数200kHzとする。複数の圧電アクチュエータ素子を用いて発生させたラム波の伝播特性について検討を行うことに加え、単一の圧電アクチュエータ素子を用いて発生させたラム波の伝播特性と比較することにより、その有用性について検討を行う。

また、指向性を有するラム波の進行方向を電子的にステアリングすることを目的としたフェイズドアレイ技術の適用による損傷同定の効率化・高精度化の可能性を検討するために、損傷を模擬した円孔、あるいは貫通き裂を有するアルミニウム合金平板を対象として、平板表面に貼付したMFCアクチュエータとPZT圧電センサを用いたラム波伝播特性に基づく損傷検出に関する数値シミュレーション、および実験を行う。数値シミュレーションでは、擬似スペクトル・ミンドリン板要素を用いた波伝播特性の有限要素解析を行う。本研究では、ミンドリン板要素として36節点要

素を用いることとし、要素補間関数にはチェビシェフ多項式を用いている。MFCアクチュエータへ印加するサインバースト波電圧は、サイクル数5、周波数200kHzとする。損傷を模擬した円孔、あるいは貫通き裂の位置は、円孔、あるいはき裂からの反射波についてアクチュエータ・センサ間の伝播時間から得られる伝播距離と、アクチュエータ・センサ配置箇所を用いて推定することができる。

#### 4. 研究成果

(1) 多入力圧電アクチュエータ素子としての金属コア入り圧電ファイバ/導電性エポキシ樹脂複合材料の作成については、試作を通じて素子の作成方法の検証を行い、加工・成形等における問題点を概ね抽出できた。また、平板を対象とした励振実験による、圧電アクチュエータ素子のアクチュエーション機能（低周波数帯域、数十 Hz 程度）の検証については、同複合材料、およびそれを模擬した複数の MFC を用いたアクチュエーション機能の検討を行い、提案する圧電アクチュエータ素子の有用性を明らかにした。

(2) 無損傷のアルミニウム合金平板を対象として、平板表面に貼付した複数の圧電アクチュエータ素子に同位相のサインバースト波電圧を印加して発生させたラム波の伝播特性に関する数値シミュレーションを行い、複数の圧電アクチュエータ素子を用いて発生させたラム波の伝播特性に指向性が生じていることが確認された（学会発表①）。

本成果は、複数の圧電ファイバを高密度に配置したアクチュエータ素子（アクチュエータ群）を用いて発生させるラム波の伝播特性に、より強い指向性が生じる可能性を示すとともに、本研究で提案する多入力圧電アクチュエータ素子の、ラム波伝播特性に基づく損傷モニタリングにおける有用性を示すものである。

(3) 無損傷のアルミニウム合金平板を対象として、平板表面に貼付した複数の圧電アクチュエータ素子に同位相のサインバースト波電圧を印加して発生させたラム波の伝播特性に関する実験を行い、素子間の個体差、アクチュエータ・センサの配置誤差、等がラム波の伝播特性におよぼす影響は少なからずあるものの、数値シミュレーションと同様に、複数の圧電アクチュエータ素子を用いて発生させたラム波の伝播特性に指向性が生じていることが確認された。

本成果は、複数の圧電ファイバを高密度に配置したアクチュエータ素子（アクチ

ュエータ群）を用いて発生させるラム波の伝播特性に、より強い指向性が生じる可能性を示すとともに、本研究で提案する多入力圧電アクチュエータ素子の、ラム波伝播特性に基づく損傷モニタリングにおける有用性を示すものである。

(4) アルミニウム合金平板を対象として、平板表面に貼付した MFC アクチュエータと PZT 圧電センサを用いたラム波の伝播特性に基づく損傷（損傷を模擬した貫通き裂）の位置同定に関する数値シミュレーションを行い、損傷位置同定が可能であることが確認されたとともに、MFC の繊維方向、すなわち指向性を有するラム波の進行方向と損傷の位置が、損傷からの反射波の特性に大きな影響をおよぼすことが確認された。

本成果により、本研究で提案する多入力圧電アクチュエータ素子を用いて発生させる、指向性を有するラム波がフェイズドアレイ技術の適用によってステアリング可能な場合に、ラム波伝播特性に基づく損傷位置同定、さらには損傷程度同定の効率化・高精度化が期待できる（学会発表②）。

(5) アルミニウム合金平板を対象として、平板表面に貼付した MFC アクチュエータと PZT 圧電センサを用いたラム波の伝播特性に基づく損傷（損傷を模擬した円孔）の位置同定に関する実験を行い、数値シミュレーションと同様に、損傷位置同定が可能であることが確認されたとともに、MFC の繊維方向、すなわち指向性を有するラム波の進行方向と損傷の位置が、損傷からの反射波の特性に大きな影響をおよぼすことが確認された。

本成果により、本研究で提案する多入力圧電アクチュエータ素子を用いて発生させる、指向性を有するラム波がフェイズドアレイ技術の適用によってステアリング可能な場合に、ラム波伝播特性に基づく損傷位置同定、さらには損傷程度同定の効率化・高精度化が期待できる。

#### 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）

〔学会発表〕（計 2 件）

- ① 田中佑樹、亀山正樹、小澤祥輝、複数の圧電アクチュエータ素子により発生させたラム波の伝播特性、日本機械学会北陸信越支部第 50 期講演会、2013 年 3 月 9 日、福井。
- ② 小口遼、亀山正樹、田中佑樹、指向性圧

電アクチュエータを用いたラム波伝播  
特性に基づく損傷検出, 日本機械学会北  
陸信越支部第 49 期講演会, 2012 年 3 月  
10 日, 金沢.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

亀山 正樹 ( KAMEYAMA MASAKI )

信州大学・工学部・准教授

研究者番号 : 30302178