

複合材料構造の健全性監視のための 組込型超音波診断システム

Embedded ultrasonic diagnosis system for health monitoring of composite structures

岡部洋二 藤林啓司 嶋崎守

Yoji Okabe, Keiji Fujibayashi, and Mamoru Shimazaki

東京大学 生産技術研究所

Institute of Industrial Science, The University of Tokyo (okabey@iis.u-tokyo.ac.jp)

Abstract: In recent years, advanced composite materials have been applied to lightweight structures, such as aircraft and space structures, for the weight saving. However, since the composite materials have complex fracture process, structural health monitoring systems are attracting attention to increase the reliability of composite structures. As one of the systems, the authors developed a broadband Lamb wave propagation system using a macro fiber composite (MFC) actuator and fiber Bragg grating (FBG) sensors. This system can send and receive broadband ultrasonic waves efficiently in a specific direction, and the MFC and FBG can be integrated into composites laminates because of their thinness and low stiffness. We applied this system to detect the typical internal damages in the composite structures. As a result, we succeeded to evaluate the delamination progress in composite laminates from the change in the frequency dispersion characteristic of Lamb waves.

1. 緒言

近年、航空機等の軽量化が必要とされる高速輸送用構造体において、先進複合材料の適用が進んでいる。中でも、炭素繊維強化プラスチック (CFRP) は軽量かつ十分な強度と剛性を有するため、次世代民間旅客機の主構造にも使用されつつある。これにより機体のさらなる軽量化を実現できれば、大幅な省エネルギー化が期待できる。

しかし CFRP 複合材料は、内部に微視的な損傷が累積する複雑な損傷過程を示す。そこで、複合材構造の信頼性の確保と高効率な設計を図るため、構造ヘルスマニタリング技術の開発が進められている。これは、あらかじめセンサを構造部材に組み込んでおき、リアルタイムかつ容易に部材の健全性診断を行うシステムである。その一つに、板構造に沿ってラム波と呼ばれる形態の超音波を送受振し、受振波形の変化から損傷発生を診断する方法がある[1]。ラム波は薄板を伝播する超音波であり、減衰が比較的小さく長距離に渡って伝播するため、構造ヘルスマニタリングに適した超音波の伝播形態である。

ラム波の送受振には、一般的にバルク状の圧電セラミックス PZT 素子が用いられているが、その場合、素子が共振周波数を有するため、用いる超音波は特

定の周波数範囲に限られる。また、その伝播指向性も低いため、様々な伝播経路の波を受振する可能性がある。

その一方で、著者らは近年、光ファイバセンサの一種である FBG (Fiber Bragg Grating) センサによって超音波を受振することに成功している[2-3]。また、NASA で開発された MFC (Macro Fiber Composite) アクチュエータ[4]は、多数の角柱繊維状の圧電セラミックスを樹脂中に埋め込んだもので、超音波発振素子としても使用可能である。そこで我々は、MFC アクチュエータを超音波発振素子に、FBG センサを超音波の受振素子に用いた、新たな超音波送受振システムを構築してきた。MFC も FBG も共振特性を利用せず高い指向性があるため、広帯域なラム波を特定の方向に効率良く伝播させることが可能となる。これにより得られる情報量が飛躍的に大きくなり、損傷診断の精度を高められることが期待される。しかも、どちらも小型・軽量かつ柔軟で破断ひずみが大きいいため、複合材と一体化させることが可能であり、構造ヘルスマニタリングに適している。

本研究では、このシステムを用いて、複合材料内部の剥離損傷を検出することを試みる。剥離損傷は板に平行に発生するため、単にラム波を伝播させたのみでは検出が困難であるが、その剥離部では超音

波伝播経路の厚さが減少するため、ラム波の広帯域に渡るモード分散性が変化する。よって、本システムの広帯域特性を利用して、層間剥離の新たな検出手法を提案する。

2. システム構成

図1に超音波受振素子として用いるFBGセンサの概略図を示す。これは、光ファイバ中の光が伝播するコアにおいて、屈折率を軸方向に周期的に変化させて形成したセンサである。このFBGセンサに広帯域の光を入射させると、FBGのグレーティング周期と有効屈折率に比例して、ブラッグ波長の狭帯域な光成分のみが反射する。そのためセンサ部にひずみが加わるとブラッグ波長がシフトし、ひずみを計測することが可能となる。このFBGセンサに対し、日立電線㈱と共同で開発した、AWGフィルタを波長フィルタとして用いた高速光波長検出システムを用いることで、超音波伝播による高速なひずみ変動を検出することができる。

次に図2に超音波発振素子として用いるMFCアクチュエータの構成を示す。これは、NASA Langley Research Centerで開発された薄くて柔軟なアクチュエータで、極細の角柱状の圧電セラミックスPZTを一方方向に並べてエポキシ樹脂に埋め、その上下面に電極を接着したものであり、面内の一方方向に比較的大きなひずみを発生させることができる。

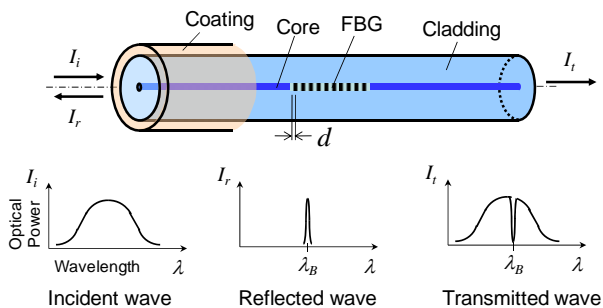


図1 FBGセンサの概略図

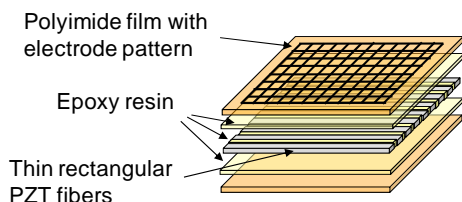


図2 MFCアクチュエータの構成

バルク状のPZT素子と比べると、これらは共振特

性を利用しないため、超音波の発振強度と受振感度は低い、極めて広い周波数特性を有し、強い指向性も有するため、超音波の伝播経路が明確である。また、MFCは厚さ0.3mm程度、FBGは直径0.1mm程度と小型・軽量であり、柔軟で破断ひずみも大きい、積層板と一体化が可能であり、大ひずみ下においても破断せずに高い信頼性を有する。よって構造ヘルスマニタリングシステムに適したデバイスである。そして図3に、広帯域超音波送受振システムの全体図を示す。ファンクションジェネレータで生成した電圧信号を高速バイポーラ電源で増幅してMFCに入力し、超音波を発生させる。そして、積層板を伝播したラム波をFBGセンサで受振し、高速光波長検出システムによってブラッグ波長シフトを電圧信号に変換した後、デジタルオシロスコープに表示する。

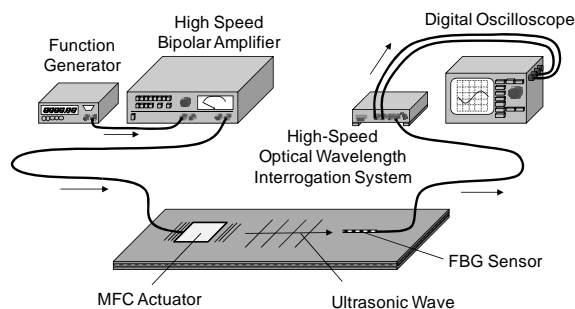


図3 広帯域超音波送受振システムの構成

3. ラム波の広帯域モード計測

まず、本システムの広帯域特性を検証するため、CFRP疑似等方性積層板(T700S/2500、[45/0/-45/90]_s、厚さ3.4mm)に広帯域ラム波を伝播させた。用いたMFC(M-2814-P2、Smart Material Co., Ltd.)は幅14mm、厚さ0.3mmで、長さは6mmになるように切断した。また、FBG(㈱フジクラ)はセンサ長1.5mm、ポリイミド被覆付きで直径150μmである。これらを100mm離し、MFCは超音波カプラント(Shear Gell、Sonotech社)で、FBGはシアノアクリレート系接着剤でCFRP積層板表面に貼り付けた。

MFCへの入力電圧信号は中心周波数400kHzのサイン波1周期分にハミング窓を掛けたもので、そのフーリエ変換結果とともに図4に示す。約1MHzまでの広帯域であることがわかる。そして、積層板を伝播させFBGセンサで受振した波形を、そのフーリエ変換およびウェーブレット変換結果とともに図5に示す。約900kHz程度までの広帯域に渡る成分を受振しており、ウェーブレット変換結果にはラム波のモード分散性も現れている。よって、本システム

は広帯域なラム波を送受信可能であることが確認できた。

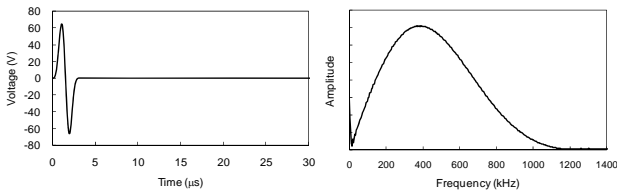


図4 入力電圧信号とそのフーリエ変換結果

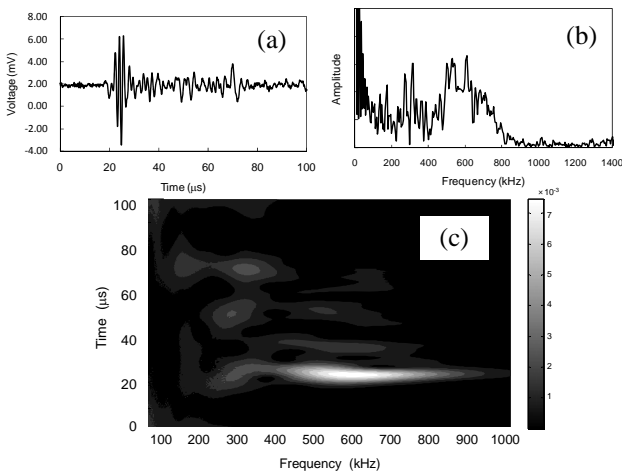


図5 計測結果: (a) 受振波形、(b) フーリエ変換結果、(c) ウェーブレット変換結果

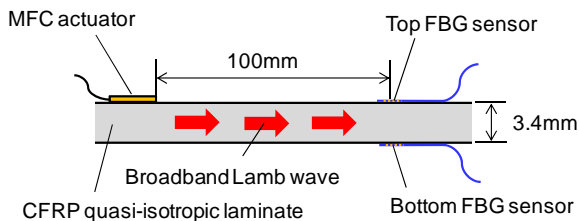


図6 モード分離計測の実験構成

ただし、図 5(c)には複数のモードのラム波が重なって表れている。よって、各モードを分離するため、図6に示すように積層板の下面にも上面のFBGと同じ位置にFBGセンサを設置した。ラム波の対称モード(Sモード)は上下面で同じひずみ成分を有し、非対称モード(Aモード)は上下面でひずみ成分が逆符号となるため、上下2個のFBGで受振した波形を足し引きすることで、対称モードと非対称モードを分離できると考えられる。図7と図8に、実際に上下面の波形を足した場合と差し引いた場合のウェーブレット変換結果を示し、図9に理論的に計算した各モードの到達時間の周波数分散性を示す。こ

れらを比較することで、本計測システムによって S_0 、 S_1 & S_2 、 A_0 、 A_1 の複数モードを分離して受振できていることがわかる。

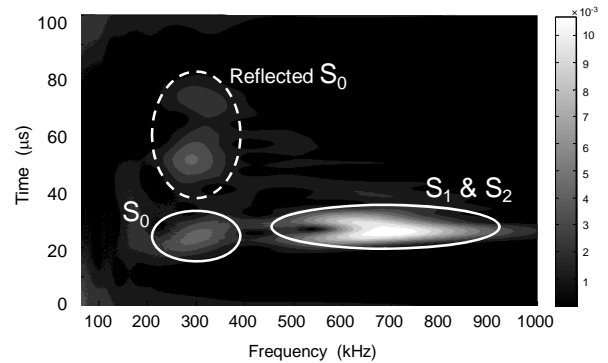


図7 足し合わせた波形のウェーブレット変換

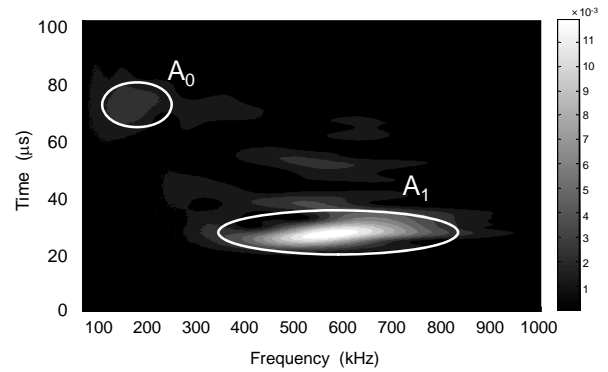


図8 差し引いた波形のウェーブレット変換

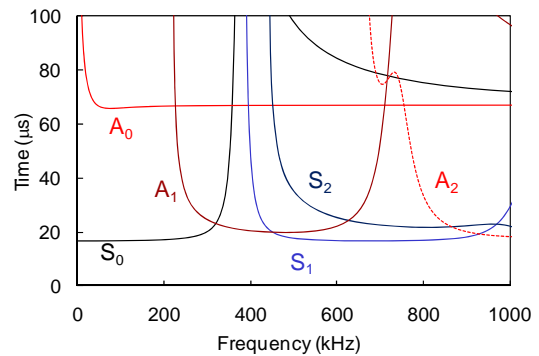


図9 厚さ 3.4mm の CFRP 疑似等方性積層板におけるラム波到達時間の理論分散曲線

4. 積層板中の層間剥離検出

図9のラム波の周波数分散曲線は、伝播媒体の板厚に依存して変化する。例えば、厚さ 1.7mm の積層板における分散曲線を図10にプロットするが、厚さが半分になることで横軸の周波数が2倍に引き延ばされた変化をする。そのため、CFRP 積層板中に各層間の剥がれ損傷である層間剥離が発生すれば、剥

離部での超音波伝播経路の板厚が減少するため、ラム波のモードや伝播速度が変化し、図7と図8のモード分散特性に変化が生じると考えられる。

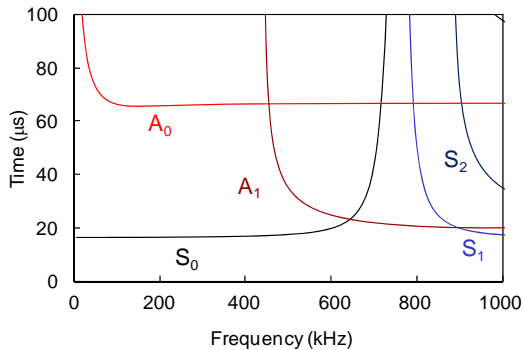


図10 厚さ1.7mmのCFRP疑似等方性積層板におけるラム波到達時間の理論分散曲線

そこでCFRP積層板を成形する際に、中央の90°層間に50μmのテフロンシートを挟み、硬化後に引き抜くことで、積層板の板厚中央に人工的に層間剥離を形成した。作製した剥離の長さLは20mm、40mm、60mmの3種類で、試験片幅方向には長さは一定である。そして、図11に示すように剥離部を通過するように広帯域ラム波を伝播させ、上下面での受振波形を足し引きした後にウェーブレット変換を行った。各剥離長さLで計測した対称モードと非対称モードの結果をそれぞれ図12と図13に示す。図12より、剥離長さの増加に伴い、S1、S2モードの振幅が低下し、S0モードの振幅が相対的に強くなっていることがわかる。同様に、図13の非対称モードでも、剥離進展に伴い、A1モードが低下してA0モードの振幅が相対的に強くなっている。

そこでさらに、剥離長さに対する変化を定量的に評価するため、高次モードに対する0次モードの最大振幅の比を求めた。ここで最大振幅とは、図12と図13における各モードの最大ピークでのウェーブレット係数値である。つまり対称モードでの最大振幅比R_Sは、S₀モードの最大振幅をS₁&S₂モードの最大振幅で割った値、非対称モードでの最大振幅比R_Aは、A₀モードの最大振幅をA₁モードの最大振幅で割った値である。これらを剥離長さに対してプロットした結果を図14に示す。全体的に、剥離長さの増加に伴って値が増加していることがわかる。よって、これらの指標を用いることで、積層板内部の剥離長さを推定可能であると考えられる。

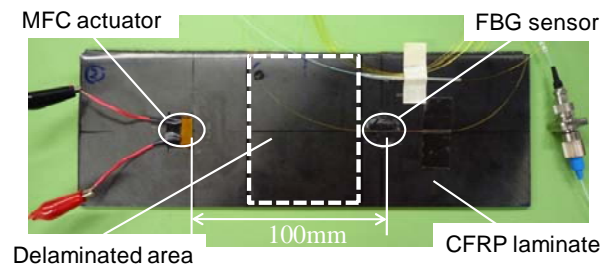
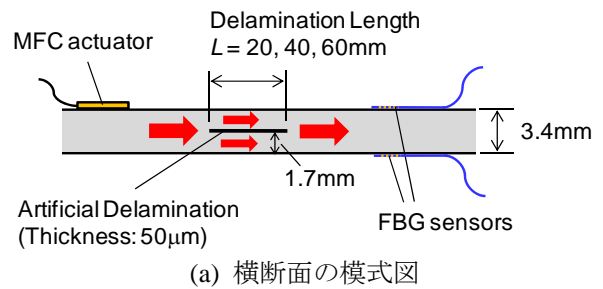


図11 人工層間剥離の検知実験

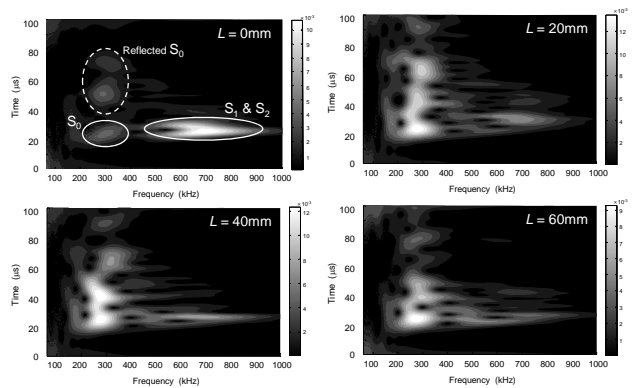


図12 各剥離長さLにおける対称モードの分散性

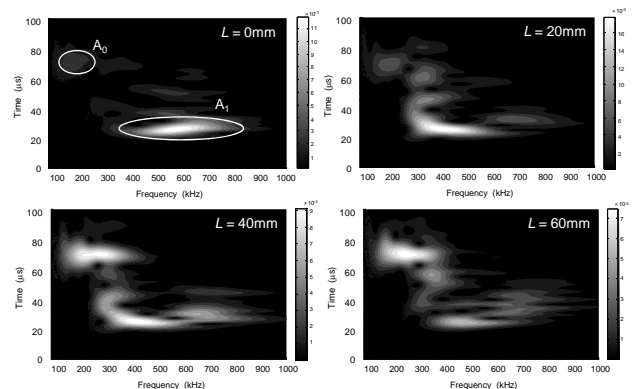
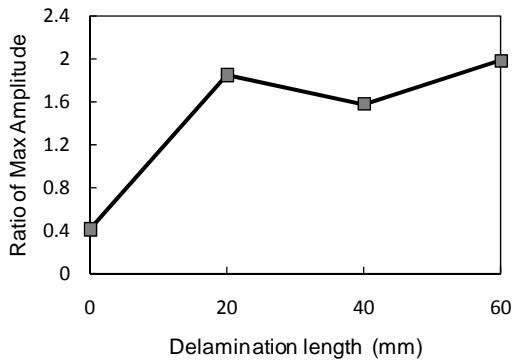
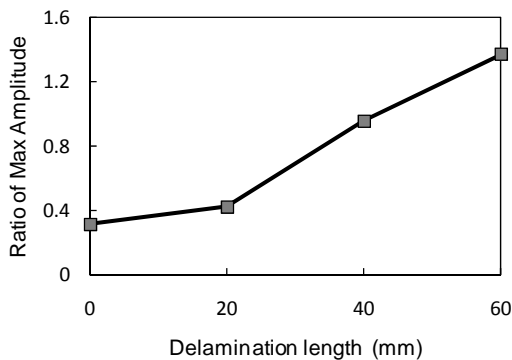


図13 各剥離長さLにおける非対称モードの分散性



(a) R_S (S_0 mode / S_1 & S_2 modes)



(b) R_A (A_0 mode / A_1 mode)

図 14 剥離長さに対する最大振幅比

5. 結言

本研究では、MFC アクチュエータと FBG センサを用いた広帯域超音波送受振システムを新たに構築し、その広帯域特性を評価した。さらに、CFRP 積層板の上下面に FBG センサを設置し、それらの波形を足し引きすることで、対称モードと非対称モードを分離することが可能となった。

次に、CFRP 積層板内部に人工的な層間剥離を導入し、剥離の検出実験を行った。その結果、層間剥離が存在することで低い周波数のモードの振幅が相対的に強くなることがわかった。これは、伝播経路の板厚の減少によってラム波の周波数分散性が変化したためであると考えられる。そこで、高次のモードに対する 0 次モードの最大振幅の比を計算した結果、層間剥離が長くなるほど値が増加していた。よって、異なる次数のモードの相対的な振幅変化を指標として、積層板内部の層間剥離長さを推定可能であると考えられる。

謝辞

本研究は、池谷科学技術振興財団による平成 21

年度研究助成、および経済産業省「民間航空機基盤技術プログラム」のうち中核的要素技術研究として位置付けられた「次世代構造部材創製・加工技術開発」プロジェクトの 1 テーマである「複合材構造健全性診断技術開発」の一環として RIMCOF との契約に基づき実施したものである。関係各位に謝意を表す。

参考文献

- [1] W. Staszewski, C. Boller, and G. Tomlinson, eds., *Health Monitoring of Aerospace Structures*, Chichester: John Wiley & Sons, Ltd., (2004)
- [2] N. Takeda, Y. Okabe, J. Kuwahara, S. Kojima, and T. Ogisu, "Development of Smart Composite Structures with Small-Diameter Fiber Bragg Grating Sensors for Damage Detection: Quantitative Evaluation of Delamination Length in CFRP Laminates Using Lamb Wave Sensing", *Compos. Sci. Technol.*, Vol. 65, No. 15-16, pp. 2575-2587, (2005)
- [3] Y. Okabe, J. Kuwahara, K. Natori, N. Takeda, T. Ogisu, S. Kojima, and S. Komatsuzaki, "Evaluation of Debonding Progress in Composite Bonded Structures Using Ultrasonic Waves Received in Fiber Bragg Grating Sensors", *Smart Mater. Struct.*, Vol. 16, No. 4, pp. 1370-1378, (2007)
- [4] R.B. Williams, D.J. Inman, M.R. Schultz, and M.W. Hyer, "Nonlinear Tensile and Shear Behavior of Macro Fiber Composite Actuators" *J. Compos. Mater.*, Vol. 38, No. 10, pp. 855-869, (2004)