

微小な損傷を検知して、安全に貢献する

航空機用構造部材における構造ヘルスマニタリング技術

航空機の軽量化による燃費向上のために、現在使用されているアルミニウム合金などの金属材料の代替として、軽くて強い炭素繊維強化プラスチック（CFRP）が次世代の航空機の構造部材に大幅に適用されようとしています。特に航空機は、機器の故障や機体の損傷が直接人命に甚大な被害を及ぼす危険性があることから、その保守・点検作業がきわめて重要です。

しかし、CFRPの主な損傷は表面からは目視できない内部で生じ、さらにその形態が非常に複雑であるため、保守作業の際に行う非破壊検査に多大な時間、労力、コストがかかるといった問題があります。

そこで、運用中の損傷の発生や進展をリアルタイムに検知する構造ヘルスマニタリング技術が注目されています。あらかじめ損傷の有無、場所、さらには規模が分かれば、きわめ

て効率的な検査ができ、結果として航空機の安全性確保や保守作業のコスト低減を実現することができるのです。

わが国においても、主に経済産業省の支援で、関連企業、大学、公的研究機関が共同で研究開発を進めています。

ここでは、私たちが現在行っている超音波を利用した航空機用CFRP構造部材の構造ヘルスマニタリング技術について紹介します。

“ホットスポット”の損傷を見逃さない

航空機翼は、スキンと呼ばれる表層とストリンガーと呼ばれるスキンの補強材で構成されています（写真1）。このようなCFRP構造部材の損傷の要因の1つは、一般の金属構造部材の場合と同様に繰り返し荷重、つまり疲労荷重です。リベットやボルトなどの機械接合近くの応力集中部では、疲労によってスキンに層間割れと呼ばれる小さな亀裂が無数に生じ、やがて危険な

層間剥離へと損傷が拡大していきま。あるいは、接着接合されているスキンとストリンガーの界面の剥離がストリンガー端部で発生し、次第に進展していきます。

このような場合、あらかじめ損傷が生じる箇所（ホットスポット）を予測すれば、その部分に超音波を送受信することができる圧電素子を設置し、超音波の受信波形をモニタリングすることで損傷を検知することができます。

しかし、CFRPのような薄板を伝わる超音波には複数のモードが存在し、各モードの速度が周波数や板厚によって変化するというやっかいな面があります。そのため、検出波形が非常に複雑となり一般的には薄板の超音波探傷は難しいとされています。

そこで、超音波の検出波形が比較的単純で、その後の解析が容易になるような圧電素子形状の設計や超音波励起信号の最適化を行う必要があります。写真1の最適設計された一対の圧電素

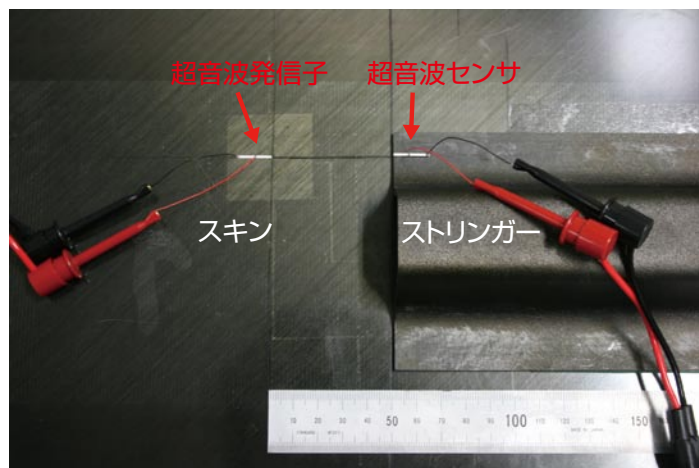


写真1 CFRP製スキン/ストリンガー構造部材に設置した圧電素子

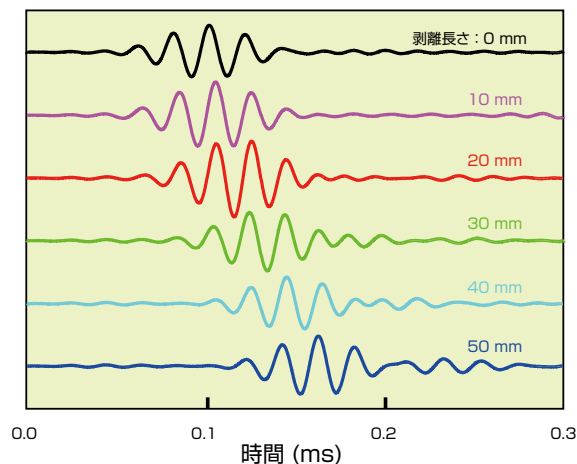


図1 剥離進展に伴う超音波検出波形の変化

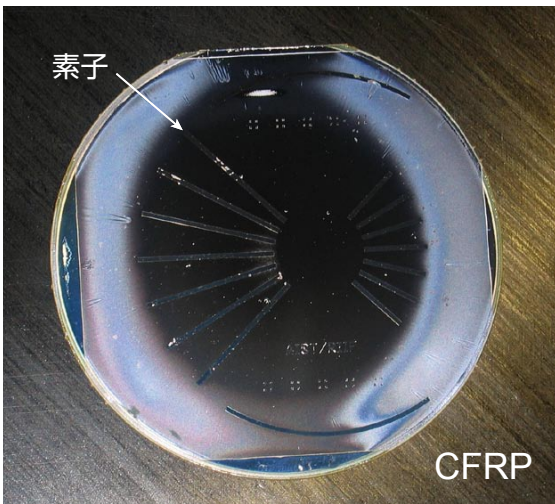


写真2 スキン上に設置した指向性圧電素子からなるアレイセンサ

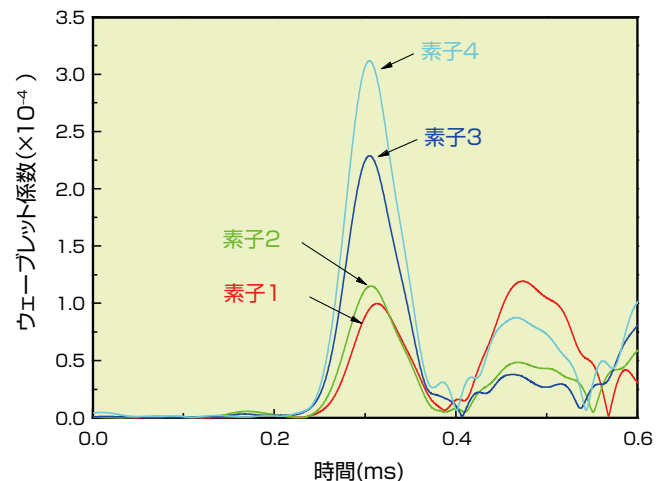


図2 アレイセンサの各素子で検出した信号のウェーブレット係数履歴

子を用いて、スキン/ストリンガー接着界面剥離の進展に伴う超音波波形の変化を捉えた結果を図1に示します。1つの単純な波束が検出され、剥離の進展によって波束の検出される時間が遅れていくことが分かります。

このような超音波の到達時間の変化を捉えることによって、損傷の発生を検知するだけでなく、定量的に層内割れの数や剥離の長さもほぼ正確に評価できることもすでに実証しています。

新機能超音波センサで航空機の“震源地”を同定する

航空機部材におけるもう1つの重要な損傷形態として、運用中の飛石、鳥、雹などの衝突や保守作業時の工具の落下などの衝撃荷重による損傷があります。この場合、いつ、どの場所で衝撃損傷が発生するのかを予測することはできません。そこで、地震の震源地同定と同じ原理で、衝撃荷重が加わった

際に発生する超音波を複数の箇所に設置した超音波センサで検出し、衝撃位置を特定しようという試みがなされています。しかし、航空機のような大型構造体の場合、膨大な箇所にセンサを設置しなければなりません。

そこで、私たちは圧電素子の形状設計を行い、指向性という新たな機能を付与し、それらを組み合わせたアレイセンサとして用いることで、一箇所に配置したセンサのみで音源（衝撃や損傷発生）の場所を同定する広域モニタリングシステムを新たに開発しました。写真2にシリコン基板上に厚さ10 μ mの圧電膜を形成し、微細加工技術を用いて作製した複数の細長い指向性圧電素子からなるアレイセンサを示します。

このようなアレイセンサを用いて衝撃荷重により発生する超音波を検出し、信号処理によって特定の周波数成分の大きさを抽出した結果を図2に示

します。最大強度を示す圧電素子の長軸方向が衝撃荷重の方向であることを示しており、さらに定量的に“震源地”の方位やセンサまでの距離も非常に高い精度で同定することができます。

“痛み”がわかる航空機の実現に向けて

“離陸の際、胴体下面の座標(X,Y)に石がぶつかったみたいだ。だが、安全上問題はない、このままフライトを続けよう”あるいは“主翼の付け根部分の7番目のストリンガー端部に5cmの剥離が生じてしまった。念のためにフライト後に補修をしてくれ”などと飛行機自身が自己検知・診断してくれる安全・安心な軽量航空機の実現を目指して、今後も新たなセンサ創製や信頼性の高い損傷解析技術の開発を進めていきます。

計測フロンティア研究部門
遠山 暢之