

構造ヘルスマモニタリング技術の進展

—航空機用複合材構造への適用と知的ものづくり科学の構築—

東京大学 副学長

大学院新領域創成科学研究科 革新複合材学術研究センター(TJCC)

教授 武田 展雄

1. 緒言

近年、大型機、小型機を問わず、航空機構造への複合材適用が部品や大物一体成形の形で増大している。複合材適用の一番の目的は軽量化であり、それに伴う燃費向上が見込めることである。複合材の適用をさらに拡大するには、複合材製航空機の運航に伴う点検整備作業を効率化して、メンテナンスコストの大幅な低減を実現することが必要である。その為には複合材構造健全性診断技術の開発が重要になってくる。

図1に概要を示すように、動物などの生命体の神経に相当するセンサーを構造に組み込み、脳に相当する診断装置を用いて構造の損傷や歪の状態を検知することを可能ならしめる技術が構造健全性診断技術である。構造ヘルスマモニタリング(Structural Health Monitoring, SHM)技術とも呼ばれている。SHM技術のうち、これまで有力なものとしては二つある。第一は、内部を真空に引いた細い高分子パイプと空気の入ったパイプをポリイミドフィルム上に交互に配置し、構造に貼り付け、各パイプの圧力変化を測定することにより、構造表面に発生するクラックを検出するCVM(Comparative Vacuum Monitoring)法¹⁾である。ただし、層間剥離など複合材積層構造への適用は困難である。第二は、誘電性のポリイミドフィルム上にPZT圧電セラミックス素子を複数配置し、任意のPZT素子をアクチュエータとセンサに選ぶことで、様々な位置と方向に弾性波を伝播させ、その波の変化から内部に生じた損傷を検知することが可能とするSMART LAYER²⁾を用いる方法である。ただし、PZT材料の脆性やノイズ環境下での信頼性などに問題を有する。

われわれのプロジェクトでは、複合材構造を対象として光ファイバーセンサーを使用した構造健全性診断技術開発を推進している。光ファイバーセンサーは強化繊維同様に繊維形状を有し埋め込みにも適することに加え、熱に強く、電磁波の影響を受けないという利点がある。とくに、通常120-190ミクロン程度の厚さをもつCFRPプリプレグ内にも埋め込み可能な直径40ミクロン(コーティング外径52ミクロン)の光ファイバも開発しており、世界の追従を許していない。

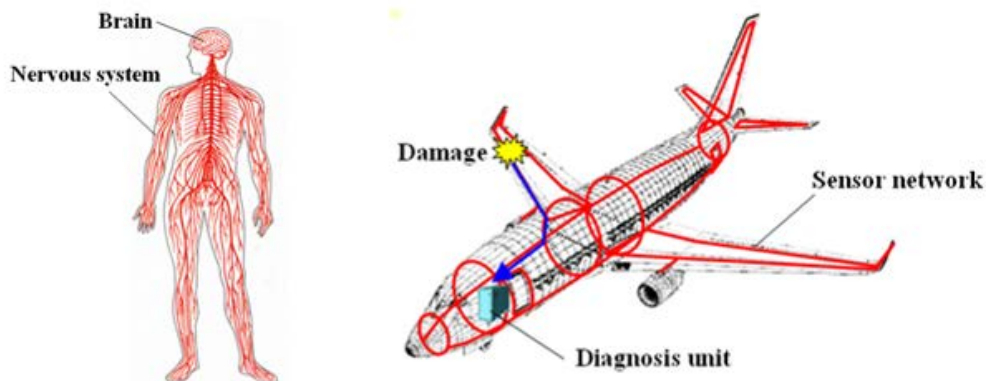


図1 人体の神経ネットワークと航空機のセンサーネットワークの概念

2. 開発の経緯

平成15年度から平成19年度に行われた「次世代航空機用構造部材創製・加工技術開発」において、構造診断技術システムの航空機複合材構造適用に関して基本技術の有効性を確認した。この成果を踏まえて、平成20年度から平成24年度にかけ、経済産業省からの委託を受けて「次

世代構造部材創製・加工技術開発（複合材構造健全性診断技術開発）」にて開発を実施した³⁾。

平成25年度からは、より実機適用に近づけた開発を行なうべく準備を行なっている。

研究に参画している機関は、三菱重工(株)、川崎重工(株)、富士重工(株)、三菱電機(株)（～2012年）、横河電機(株)、東京大学、(独)宇宙航空研究開発機構（JAXA）である。

3. プロジェクト概要

本プロジェクトでは、下記3点を目的として構造健全性診断技術を開発中である。

- ◆航空機搭載可能な小型のシステムであること。
- ◆温度、湿度、衝撃・振動等の実飛行環境でも航空機複合材構造の歪分布、損傷などを高速、高精度に計測する事が可能な高いシステム信頼性を有すること。
- ◆実用レベルの構造健全性診断を可能とする計測精度、計測範囲等を実現し、これにより航空機の点検効率を大きく改善すること。

本プロジェクトで開発し、現在も継続中の構造健全性診断技術は以下の3点である。

- ▶ 光相関ブリルアン散乱計測による航空機構造健全性診断技術
 - ▶ 光ファイバーセンサーによる航空機構造衝撃損傷検知システム
 - ▶ FBG/PZT ハイブリッドシステムによる航空機構造の損傷モニタリング技術
 - ▶ ライフサイクルを通じたストレインマッピングによる構造健全性診断技術
- それぞれ個別の特徴があり、以下にその概略を示す。

3.1 光相関ブリルアン散乱計測による航空機構造健全性診断技術の開発

光相関ブリルアン散乱計測法(BOCDA)は、光ファイバーにレーザー光を入射した時に生じるブリルアン散乱光の周波数変化から光ファイバーの任意の位置の歪を計測するものである。これを利用して機体運行中に機体構造に生じる歪みの分布や歪発生履歴を計測することで、構造に生じている損傷を検知することを目指している。図2に概要を示す。

設置した光ファイバー全域で任意の位置の動的歪計測が可能であり、任意の複数のポイントを計測するスピード（周波数）と位置同定精度の向上を図っている。しかし、光ファイバー両端からの入光が必要であり、断線してしまうと計測不能となるため、光ファイバーの敷設ルートが重要となる。

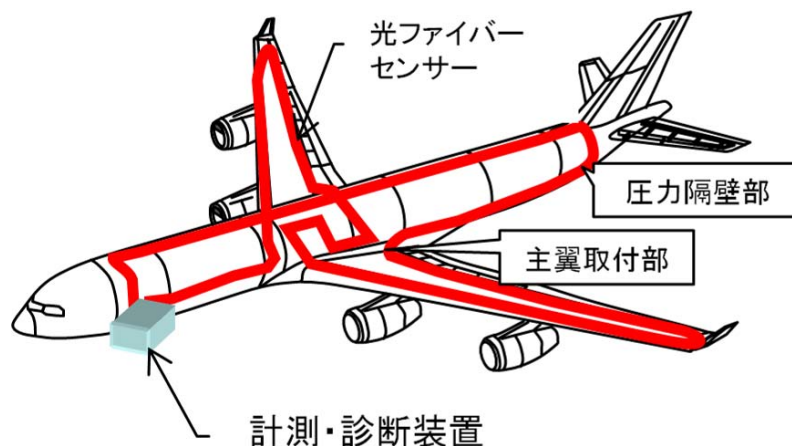


図2 ブリルアン計測システム適用構想

3.2 光ファイバーセンサーによる航空機構造衝撃損傷検知システムの開発

透過光強度計測法と FBG (Fiber Bragg Grating) 光ファイバーセンサーによる衝撃計測法の2

通りの計測方法を適用している。図3に概要を示す。

透過光強度計測法では、光ファイバーの透過光強度（逆に言えば光損失）を計測して損傷を検知する。光ファイバー直近の損傷ならば検知可能である。

FBG センサーによる歪み計測法は、衝撃発生時の衝撃歪（振動）を複数の FBG センサーにて測定し、衝撃位置を同定する方法である。衝撃発生時（リアルタイムのみ）の検知が必要であり、パッシブ（受動的）な損傷モニタリングである。

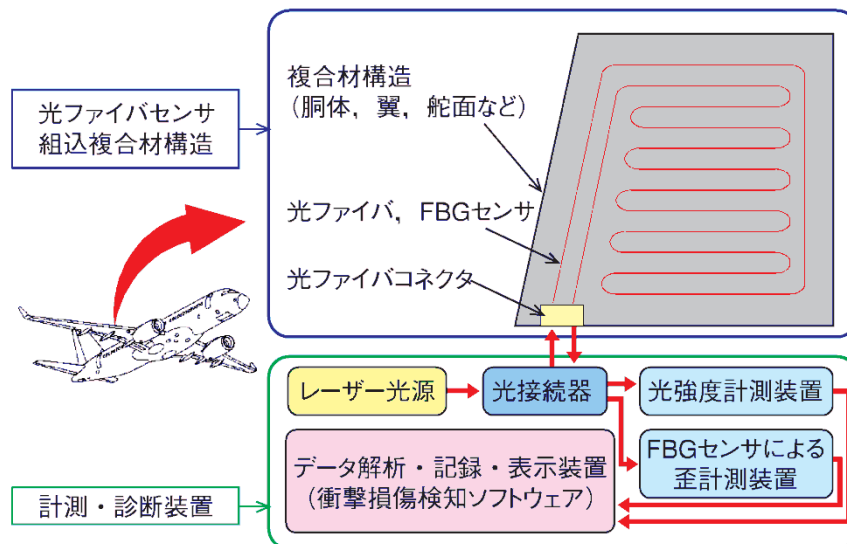


図3 衝撃損傷検知システム適用構想

3.3 FBG/PZT ハイブリッドシステムによる航空機構造の損傷モニタリング技術の開発

複合材構造中に発生/進展する損傷を評価するための技術であり、PZT (Piezoelectric transducer) を超音波発信素子とし、FBG ファイバーセンサーを超音波受信素子として構成される。PZT から発信されたラム波を FBG 光ファイバーセンサーで捉え、そのラム波波形の違いを捕らえてラム波伝播経路中の構造損傷を検知する。図4に概要を示す。

ラム波を使ったアクティブ（能動的）なホットスポットの損傷モニタリングであり、二次接着ストリンガーの接着剥れ (debonding) も検知可能である。

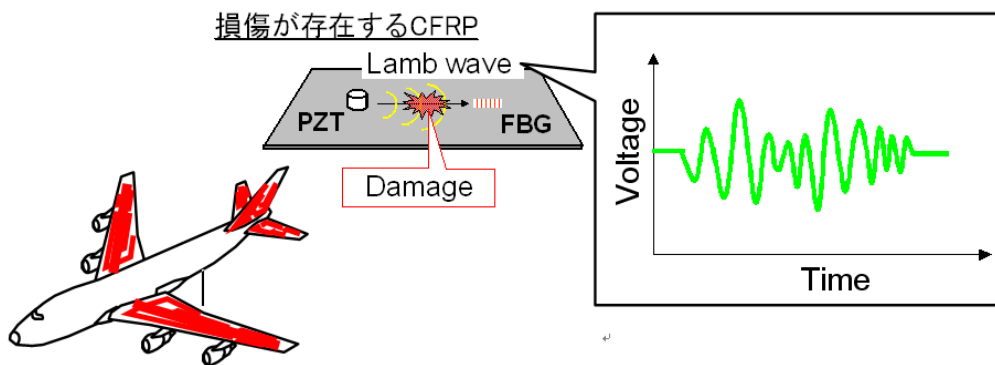


図4 FBG/PZT ハイブリッドシステム

3.4 実飛行環境模擬試験、構造健全性診断技術適用拡大試験等

それぞれのシステムは、RTCA/D0-160E に定義されている実飛行環境を模擬した、温度・気圧の

変化、温水・燃料・作動油・溶剤への浸漬、振動や衝撃、静強度や疲労強度などの各種試験を実施して、動作や精度への影響の確認を行っている。

構造健全性診断技術適用可能範囲拡大の一貫として、ボルト結合部分やフォームコアサンドイッチ構造への構造健全性診断技術適用も研究、試験を実施した。また、ロボットを使った光ファイバーの自動敷設装置、埋め込まれた光ファイバーの交換・修理の方法とその装置を研究し、試作を行なった。試作品のテストも行い、有効性を確認した。

4. エアバス社との協同研究

エアバス社とは2006年より協同で試験を行うなど協力して研究を進めている。試験はエアバス社の部分構造供試体に我々のSHMシステムを搭載して実施し、歪や衝撃、接着はがれの有無やその進展の検知について検知能力を確認した。エアバス社とは今後も協同で研究を進めて、SHMシステムの具体的な適用を研究している。

5. まとめ

航空機構造健全性診断技術は、有人機、無人機共に適用が研究されており、複合材適用拡大のキー技術の一つである。有人機の運航安全性を向上させることはもちろん、無人機でも機体運用中（飛行中）の機体構造の損傷を検知して運用（飛行）継続可否を判断するなどが研究されている。

航空機用の構造健全性診断技術は世界的に研究されており、SAE Internationalの航空宇宙協議会(SAE Aerospace Council)では、構造健全性診断技術の航空機適用におけるガイドブックを発行しようとしている。我々もこの作成作業に参画しており、光ファイバーセンサーも構造健全性診断技術の一つとして記述されている。

複合材機体構造を検査するNDI（非破壊検査）手法は色々と存在するが、機体運航時に検査出来るものはこの構造健全性診断技術だけである。この構造健全性診断技術によって複合材製航空機のメンテナンスにかかる時間とコストを削減することが期待されている。その中には、検査時のヒューマンエラーを減らし、最終的には自動化された検査を可能にすることも考えられている。

今後は、熱にも強い光ファイバーセンサーの特徴を生かして、複合材部品製造時の加熱硬化時から光ファイバーによる工程や品質管理などにも構造健全性診断技術の適用を拡大する方針である。このような研究により、日本の得意分野である複合材と光ファイバーセンサーを組み合わせた健全性診断技術が、787やA350のような複合材製航空機のさらなる拡大・発展を後押しすることを期待したい。

また、埋め込み光ファイバーセンサーはCFRP構造成形中の材料挙動をモニターすることが可能であり、現実の残留ひずみ計測を組み込んだ成形シミュレーション手法が構築されることにより、CFRP構造の品質保証法を確立する上で極めて有用でもある。この技術は、CFRP構造成形技術から知的ものづくり科学へと発展させる可能性を秘めている⁴⁾。

謝辞：

本概要は、経済産業省「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」に関するものである。本技術開発に携わった東京大学、JAXA、各企業等の関係各位に謝意を表す。

参考文献：

- 1) <http://smsystems.com.au/>
- 2) <http://www.acellentsensors.com/Sensors.asp>
- 3) (財)素形材センター，“平成23年度エネルギー使用合理化技術開発等調査報告書 次世代構造部材創製・加工技術開発（複合材構造健全性診断技術開発）”（2012）
- 4) S. Minakuchi, T. Umehara, K. Takagaki, Y. Ito and N. Takeda, "Life Cycle Monitoring and Advanced Quality Assurance of L-Shaped Composite Corner Part Using Embedded Fiber-Optic Sensor", Composites Part A, Vol. 48, 2013, pp. 153-161.