２－１　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）

目　　次

1.　事業の目的・政策的位置付け
1-1.　事業の目的 1
1-2.　政策的位置付け 1
1-3.　国の関与の必要性 2

2.　研究開発目標
2-1.　研究開発目標 2
2-1-1.　全体の目標設定 3
2-1-2.　個別要素技術の目標設定 3

3.　成果、目標の達成度
3-1.　成果 5
3-1-1.　全体成果
3-1-2.　個別要素技術成果
3-1-3.　特許出願状況等
3-2.　目標の達成度 ２７

4.　事業化、波及効果
4-1.　事業化の見通し ３０
4-2.　波及効果 ３２

5.　研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等
5-1.　研究開発計画 ３３
5-2.　研究開発実施者の実施体制・運営 ３３
5-3.　資金配分 ３４
5-4.　費用対効果 ３４
5-5.　変化への対応 ３４

１．　事業の目的・政策的位置付け

１－１．　事業目的

航空機産業においても、近年の航空機の省燃費に対する要請に応えるため、軽量化構造部材として炭素繊維強化複合材料（以下複合材料）が積極的に導入されている。他方、複合材料の詳細な破壊過程、耐久性、耐衝撃性等については、十分に解明されているとはいえず、複合材料構造航空機の長期安全運用のためには、複合材構造の健全性を詳細に把握して異常を検知し、修理、交換を行う運用が必要である。従来は多くの手間と時間をかけて目視、非破壊検査等により構造の検査を実施していた。これが航空機を運航するエアラインの負担となり、更なる複合材適用拡大による省燃費化の進捗を妨げる要因ともなっている。

本プロジェクトに先行し、平成１５年度から１９年度に実施した「次世代航空機用構造部材創製・加工技術開発」では、航空機複合材構造に適用可能な基本技術の開発を実施し、個々の技術について、その基本的な有効性を航空機模擬構造試験等により確認している。実機への適用を考えた場合、複雑な構造様式をとる航空機構造に生じる様々な損傷を実用レベルで検知するためには、これらの診断技術を効果的に組み合わせ、全体として漏れのない構造健全性診断システムを構築する事が必要と考えられる。

先行して実施した研究開発で検証された光ファイバセンサによる構造健全性診断技術を活用し、実飛行環境でも十分なシステム信頼性と実用レベルを有する構造健全性診断を実現する複合材構造健全性診断技術を開発し、航空機の運航に伴う整備、点検作業を効率化して、航空機運用のメンテナンスコストの大幅な低減を実現させる。本プロジェクトでは、これにより航空機への複合材料適用を加速させ、軽量化によるエネルギー使用効率の向上を目的とする。

１－２．　政策的位置付け

我が国の強みである部品・素材技術をいかした機体の全機開発を我が国メーカーが行うことは、我が国の部品・素材メーカーにとっても、技術的競争力や信頼性を獲得する絶好の機会であり、これは、将来の国際共同開発において我が国部品・素材産業の役割を維持・拡大すると共に、我が国の産業基盤全体の高度化に繋がることが期待される。

上述の方向性のために、重点的に支援すべき中核的要素技術のひとつとして材料・構造技術があげられている。具体的には省エネ用炭素繊維複合材技術や、複合材適用拡大の趨勢に伴って必要となる、複合材の高度成形技術や信頼性向上技術等である。本事業はここに位置づけられる。

上記目的達成の為、図１－１の技術戦略マップを策定し、施策に反映している。

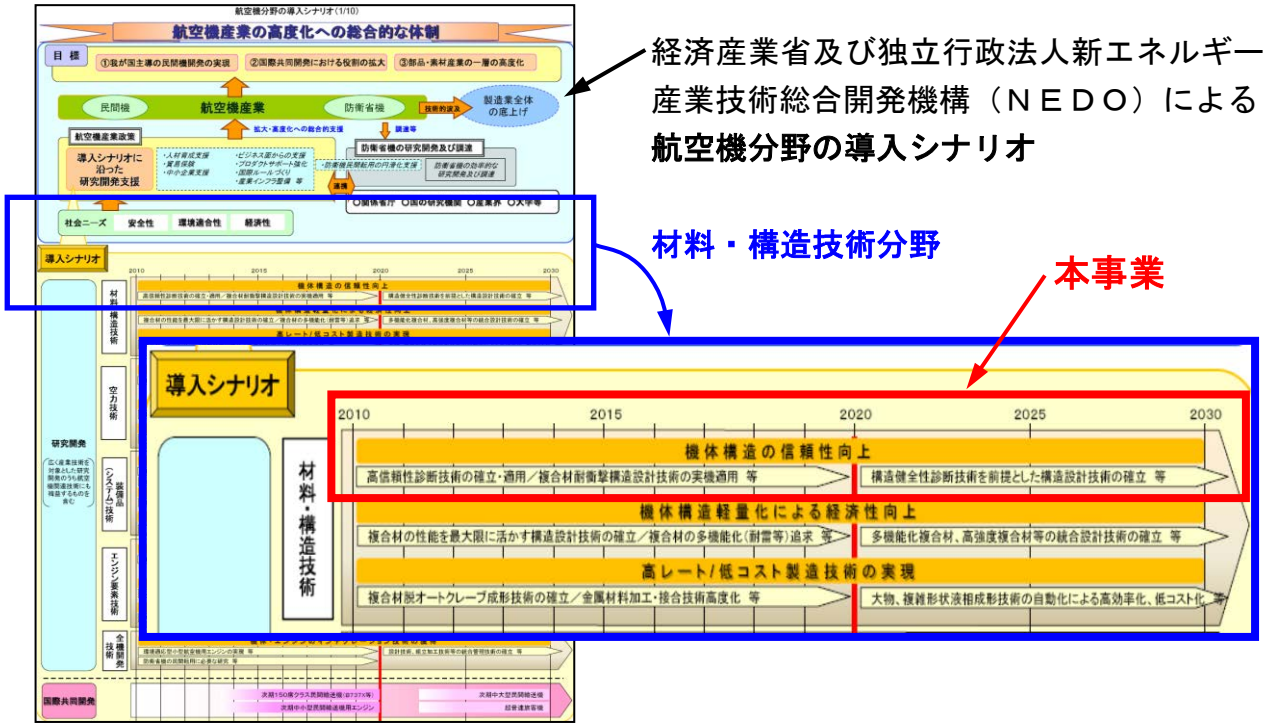


図１－１　本事業の位置づけ

１－３．　国の関与の必要性

本事業はエネルギー使用の合理化に関する法律に基づき、運輸部門のエネルギー使用合理化の促進という国策を遂行しており、国家レベルでの取組が必要である。

また、運輸部門におけるエネルギー需要は年々増加傾向にあり、その対策の一環として、最近注目が高まっている複合材料の使用による軽量化、エネルギー使用の合理化を図ることが、不可欠となっている。即ち、複合材料について構造信頼性向上技術を確立することで、航空機等の輸送機器への先進材料の本格導入を加速させ、運輸部門の更なるエネルギーの使用の合理化を実現する。

他方、本事業で開発する技術は、まだ一般的な普及レベルにまで到達しておらず、その信頼性の実証にも現実には膨大な技術リスクが伴うため、国が積極的に研究開発投資を行い、その成果を産業界に普及していく必要がある。

２．　研究開発目標

２－１．　研究開発目標

複合材料適用による航空機の省エネルギー化推進には、複合材構造の検査、整備を軽減し、メンテナンスコスト削減が必要である。その為に①ブリルアン散乱による歪計測では世界最高水準の分解能、計測速度を有する光相関ブリルアン散乱計測法、②高精度な動的歪計測を行う FBG センサ計測技術、③高精度なラム波（弾性波）計測を行う FBG センサ計測技術、④一本の光ファイバで多数の位置での計測を行う多点 FBG センサ計測技術を基に、計測データから高信

頼な構造健全性診断を行う技術を開発する。これら技術による診断システムを試作し、実飛行環境下で診断の高信頼性を実証することを目標とする。

２－１－１．　全体の目標設定

研究開発目標の達成に向けて、表２－１に示すように全体目標を設定した。

表２－１　全体の目標

目標・指標 （事後評価時点）	設定理由・根拠等
①高信頼性診断技術開発 実用レベルの構造健全性診断を可能とし、航空機の点検効率を大きく改善する航空機構造健全性診断技術を開発する。	メンテナンスコスト削減のためには、複合材構造の状態を確実に診断する、高信頼な診断能力が不可欠である。このためには実飛行環境での確実なシステムの動作が必要であり、下記の技術開発が必要となる。 ①計測結果に基づき高信頼な診断を行う技術 ②計測データを航空機の運用される実飛行環境下で、確実に取得するシステム技術 ③センサの機能拡張により、計測能力を高め、高い計測精度、計測の範囲等を実現する事で、高い診断信頼性を確保する技術
②高信頼性システム技術開発 ・実飛行環境下で航空機複合材構造の歪、損傷などを高速、高精度に計測し、信頼性診断データの計測システムを開発する。 ・計測システムの航空機搭載可能技術を開発する。	
③センサ機能の拡張 センサ機能を拡張し、計測データを活用して診断の信頼性を向上する技術を開発する。	

２－１－２．　個別要素技術の目標設定

前出の４種類の個別要素技術について表２－２に示すように目標を設定した。

表２－２　個別要素技術の目標

要素技術	目標・指標 （事後評価時点）	設定理由・根拠等
Ⅰ．光相関ブリルアン散乱計測法による航空機構造健全性診断技術の開発	①高信頼性診断技術開発 分布歪み計測及び動的歪み計測から、実飛行環境でも実用レベルの高信頼な構造健全性診断を行う技術を開発する。	本技術開発では、従来の建築物等に適用されているブリルアン散乱計測法に比べ、格段に高い空間分解能、計測速度を有する計測法（光相関ブリルアン散乱計測法）により、航空機構造の広範囲の歪情報を精密に計測する事で、高信頼の構造健全性システムを構築する事を目指す。特にブリルアンスペクトルの変動に着目し、更に多くの
	②高信頼性システム技術開発 航空機に搭載可能で、実飛行環境でも高信頼な診断に必要な計測を可能とするセンサおよび計測システムを実現する技術を開発する。	

	③センサ機能の拡張（複合材結合部の構造健全性評価技術の開発・実証） 複合材結合部の内部損傷に関する情報の高信頼性診断技術への反映を図る。	情報を取り出す事で、従来以上の高信頼性診断を実現する。
Ⅱ．光ファイバセンサによる航空機構造衝撃損傷検知システム技術の開発	①高信頼性診断技術開発 実飛行環境でも実用レベルの高信頼な損傷検知を可能とする技術を開発する。	航空機の複合材構造に外部から衝撃が加わった場合、目視では発見が難しい構造損傷を生じることが知られている。本技術開発では、衝撃を受けた際に生じる動的歪および光ファイバの光減衰率の変化の計測により、衝撃の位置、衝撃強度、損傷規模を推定し、航空機構造に生じる損傷を検知するシステムを構築する。更に本システムのサンドイッチパネルへの適用を図る。
	②高信頼性システム技術開発 航空機に搭載可能で、実飛行環境でも損傷検知に必要な計測を可能とする高信頼なセンサおよび計測システムを開発する。	
	③センサ機能拡張（サンドイッチパネルの損傷検知） サンドイッチパネルに対応する損傷検知システムの高信頼性診断技術を確立する。	
Ⅲ．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	①高信頼性診断技術開発 実飛行環境でも実用的な、高信頼な損傷モニタリングを可能とする技術を開発する。	航空機構造で高荷重を分担する Box 構造などの主構造は、アクセスが困難で点検に多くの時間を要する。このような主要構造部位の構造健全性システムには、損傷規模、損傷状況を高い精度でモニタすることが要求される。これらの要求に対応するための高信頼性診断技術、高信頼性システム技術の開発、センサ機能拡張を実施する。
	②高信頼性システム技術開発 航空機に搭載可能で、実飛行環境で高信頼な診断システムを実現する。	
	③センサ機能拡張（衝撃検知能力付与） 衝撃検知機能と併せ、高信頼な損傷モニタリングシステムを実現する。	
Ⅳ．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	①高信頼性診断技術開発 FBG センサによる多点歪計測に基づきストレインマッピングを行う事で、実飛行環境でも実用的な、高信頼な損傷診断を可能とする技術を開発する。	航空機の複合材構造対応し、高信頼な健全性診断を実現するために、歪分布の変化を確実に捉えるストレインマッピングによる高信頼性診断技術および歪分布データを確実に計測する高信頼

性診断技術の開発	②高信頼性システム技術開発 航空機に搭載可能で、実飛行環境で計測を可能とするセンサおよび計測システムを開発する。	性システム技術を開発する。また診断信頼性向上を図るため、データを取捨選択し、損傷の特徴を効率的に捉える多角的フィルタリング技術、成形硬化時の歪データを取得し、成形から運用にいたるライフサイクルを通じた診断技術を確立する。
	③センサ機能拡張 ・多角的フィルタリング技術、ライフサイクルを通じた計測技術により、診断信頼性を向上する。	

３．　成果、目標の達成度

３－１．　成果

３－１－１．　全体成果

４種類の構造健全性診断システム技術開発の成果として、

Ⅰ．多変量解析手法の能力向上、レーザ直接変調法による低コストシステムの試作・確認、センサ機能の拡張を実施した。

Ⅱ．動的歪計測等による衝撃の位置、規模および損傷規模の検知機能の向上、センサ修理法の試験、サンドイッチパネルへの適用範囲拡大検討を実施した。

Ⅲ．ラム波計測による損傷検知の高精度化を進め、システムの耐環境性に関する確認、センサ機能の拡張を実施した。

Ⅳ．ストレインマッピング手法による診断能力の確認、複合材成形硬化、加工、組立、運用、修理の歪計測の試験を実施し、ライフサイクルを通じたモニタリングが可能であることを確認した。

成果概要を表３－１に示す。

表３－１　成果の概要

要素技術	成果の概要
Ⅰ．光相関ブリルアン散乱計測法による航空機構造健全性診断技術の開発	①高信頼性診断技術開発 マハラノビス・タグチ法を適用した異常診断アルゴリズムの信号前処理、基準状態の学習処理、診断及び表示を統合するソフトウエアを作成し、正常に動作することを確認した。 ②高信頼性システム技術開発 ・レーザ直接変調法による低コスト散乱計測法の計測速度向上につながる信号精度を向上した。 ・民間航空機に搭載可能な ARINC600 仕様にあった装置を試作し、耐環境性を有することを試験で確認した。 ③センサ機能の拡張（複合材結合部の構造健全性評価技術の開発・実証）

	光ファイバセンサを埋め込んだ損傷検知試験を行い、複合材結合部の内部損傷検知感度を高める手法を確認した。
Ⅱ. 光ファイバセンサによる航空機構造衝撃損傷検知システム技術の開発	①高信頼性診断技術開発 ・CFRP 供試体を用いた衝撃損傷検知試験を実施し、「FBG センサでの歪計測」、「埋込光ファイバでの透過光強度計測」による衝撃損傷検知が、検知確率ガイドラインを満足する目処・可能性を確認した。 ②高信頼性システム技術開発 ・民間旅客機複合材前胴構造を対象として、衝撃損傷検知システム実機適用構想を設定し、装置の仕様案をまとめた。また、設定した構想及び装置仕様案に基づき、衝撃損傷検知システムを試作した。 ・航空機搭載に必須な振動環境下での自動衝撃検知を可能とする衝撃損傷検知ソフトウエアのアルゴリズムを改良した。 ・FBG センサ貼付部の耐久性データ取得試験を実施し、所定の耐久性を有することを確認した。 ・埋め込みセンサの修理法に関して特許出願を行い、装置を試作して適用可能性を確認した。 ③センサ機能拡張（サンドイッチパネルの損傷検知） サンドイッチパネルへの損傷検知システムの適用試験を実施し、損傷位置・サイズを推定することが可能であることを確認した。
Ⅲ． 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	①高信頼性診断技術開発 ・実験と FEM 解析の結果を検証しながら損傷診断高精度化を進めた結果、環境温度と損傷長さを同定できることを確認した。 ・接着剥離診断技術は温度、歪それぞれの条件下で精度よく剥離長さを診断できることを確認した。 ②高信頼性システム技術開発 ・実飛行相当の環境試験により、耐久性を有することを確認した。 ・光ファイバの複合材埋め込みクーポンの機械的特性を試験し、機械的特性に影響が出ないことを確認した。 ③センサ機能拡張（衝撃検知能力付与） FBG/PZT ハイブリッドシステムを使用した衝撃検知システム開発として、衝撃検知アルゴリズムを開発した。
Ⅳ. 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の開	①高信頼性診断技術開発 プレッシャーバルクヘッドのボルト継手構造及び接着継手構造、ならびにスカーフ補修部分の疲労損傷検知評価試験を実施し、損傷検出能力を有することを確認した。 ② 高信頼性システム技術開発 光ファイバセンサを複合材構造上へ自動敷設する装置を試作して敷設性を確

発	認した。さらに、埋め込み光ファイバの取出器具を試作して透過光強度損失が許容範囲内であることを確認した。 ③センサ機能拡張 ライフサイクルを通じた計測のため、複合材の成形、加工、組立、運用段階の歪計測を実施し、歪計測技術構築の目処を得た。

３－１－２．　個別要素技術成果

Ⅰ．光相関ブリルアン散乱計測法による航空機構造センシング技術の開発

光相関ブリルアン散乱計測法(BOCDA)は、光ファイバセンサの全長に渡る分布歪みあるいは任意の位置での動的歪みを計測できるという特長を有している。光ファイバ全長がセンサとして機能するため、航空機などの大型構造物に生じる歪み分布の変動から構造健全性を診断することが可能である。光相関ブリルアン散乱計測法の航空機構造健全性診断への適用構想を図３－１に示す。

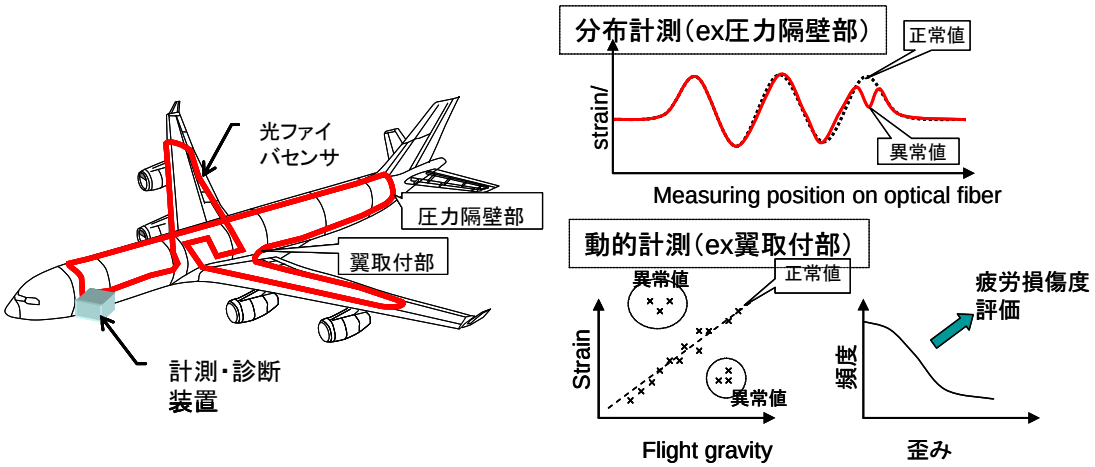


図３－１　光相関ブリルアン散乱計測法による構造健全性診断構想

① 信頼性診断技術開発

BOCDA-SHM 計測システムにおける構造健全性の評価は歪み分布の変動で行う。広範囲かつ多数のサンプリングデータから構造の状態を判定するために、本研究ではこれまでに、マハラノビス・タグチ法を用いた損傷判定技術を開発した。開発した判定技術を適用し、複合材構造のストリンガ接着部の剥離検出に判定技術を適用した結果を図３－２に示す。模擬ストリンガの剥離進展に伴う歪み変化から損傷判定仕様である MD (Mahalanobis Distance)の増大が読み取れる。この判定技術開発により、広範囲かつ多数のサンプリングデータから損傷の進展を判定することが可能である。

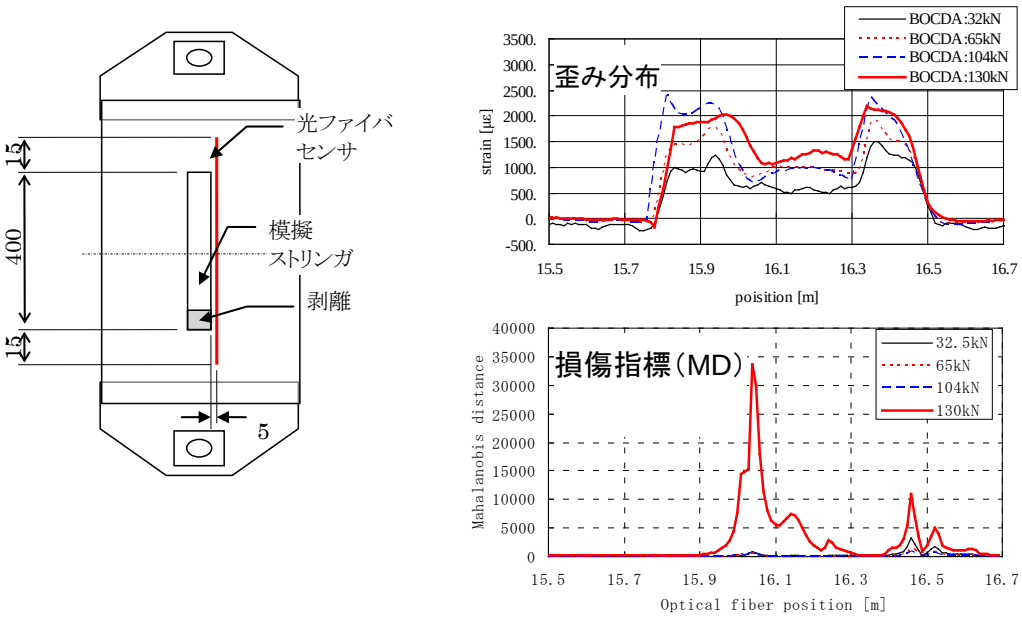


図３－２　BOCDA 計測データ解析への MT 法の適用

② 信頼性システム技術開発

BOCDA-SHM システムでは、運航中の歪み変動を計測するため、計測装置は航空機搭載する必要がある。本研究では、航空機運航環境及び搭載規格に対応可能な BOCDA-SHM システムを試作した。開発したシステムは、機搭載時の環境変動負荷を与え、装置の耐久性及び計測精度への影響を評価し、航空機への搭載が可能であることを確認した。試作した BOCDA-SHM システムを図３－３に示す。このシステムは民間航空機の装備品の搭載標準の一つである ARINC600 シリーズのラックに装着可能なサイズである。また、このシステムは、運航中の光ファイバセンサの温度変化による計測値への影響を補償することが可能である。

図３－３　開発した
航空機搭載型 BOCDA 計測装置

ヘルスモニタリングシステムの信頼性を担保するためには、計測装置に加えて、センサの耐久性も重要である。そこで、センサが運航中に受ける、温度変動、化学物質、機械的環境などの環境変動に対する耐久性を評価し、耐久性を有していることを確認した。

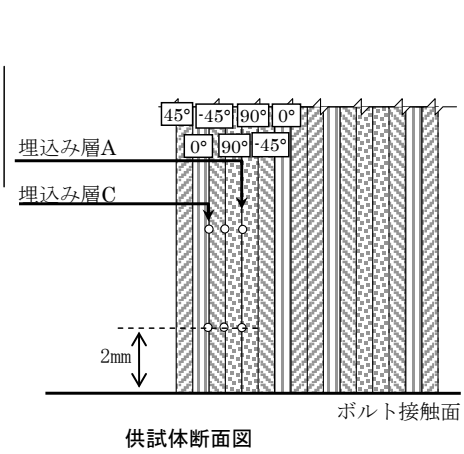
開発した計測装置、センサシステムの飛行実証試験を行い、構造健全性診断に必要な能力を有していることを確認した。

図３－４　飛行実証試験状況

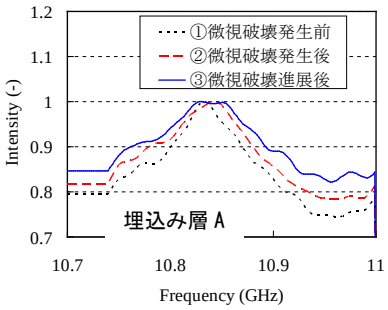
③ 複合材結合部の構造健全性評価技術の開発・実証

航空機構造への複合材料の適用が拡大してきており、各複合材部材の結合部には機械的な結合が多く用いられている。この様結合箇所はモニタリング重要部位であるが、点検性（アクセス性）が悪い場合が多い。そこで、本研究では、BOCDA による複合材結合部の健全性評価技術開発を行っている。

複合材ボルト結合部近傍に光ファイバセンサを埋込み、ボルト周辺に発生する損傷の発生をモニタする試験を実施した。光ファイバセンサ埋込み位置を直近の強化繊維方向と一致させることで損傷検知感度が高くなることを見出した（図３－４参照）。損傷検知確率の評価実験を行い、ファイバ埋込み位置での損傷は 100%検出できることを確認した。



供試体断面図



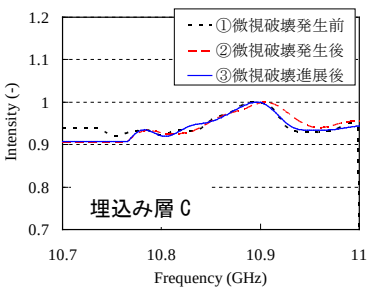


図３－５　複合材ボルト結合部損傷検知試験結果

Ⅱ．光ファイバセンサによる航空機構造衝撃損傷検知システム技術の開発

①高信頼性診断技術開発

衝撃損傷検知システムに適用する 2 種類の検知手法（「FBG センサでの歪計測による手法」及び「透過光強度計測による手法」）について、信頼性データ取得・評価を実施し、以下の成果を得た。

a)「FBG センサでの歪計測による手法」に対する信頼性データ取得・評価

FBG センサを表面貼付した CFRP 供試体を用いて、BVID（Barely Visible Impact Damage：目視点検困難な衝撃損傷）レベルの衝撃損傷の検知試験を実施した。その結果は、米国の統合運用規格指針（JSSG2006）記載の複合材構造 NDI（Non-Destructive Inspection：非破壊検査）に対する損傷検知確率ガイドラインを満足し、本手法について、複合材構造点検・整備への適用に必要な信頼性を有する目処が得られた。

また、JASTAC 協同研究の一環として、エアバスドイツブレーメン工場にて、エアバス側が用意した複合材構造供試体に衝撃損傷検知システムを適用し、衝撃損傷検知試験を実施して、実機相当の構造供試体やサンドイッチ構造においても衝撃損傷検知が可能なことを確認した（供試体及び検知結果の一例を図３－５に示す）。

さらに、振動環境下での衝撃検知試験を実施し、実機振動環境下での衝撃損傷検知が可能であることを示した（実施状況、検知結果の一例を図３－６に示す）。

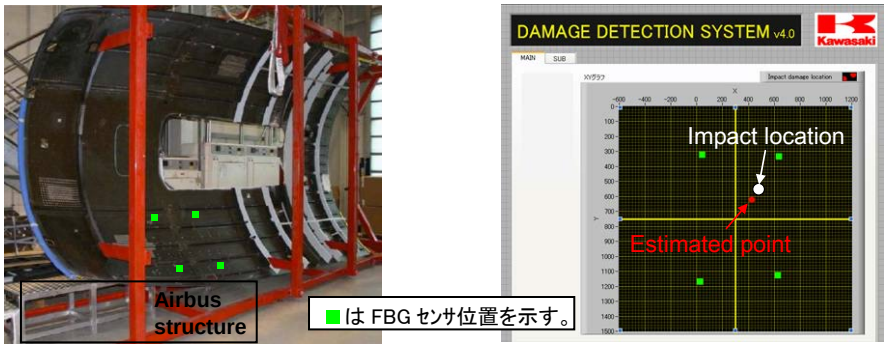


図３－５　Composite fuselage panel 供試体及び衝撃損傷検知結果

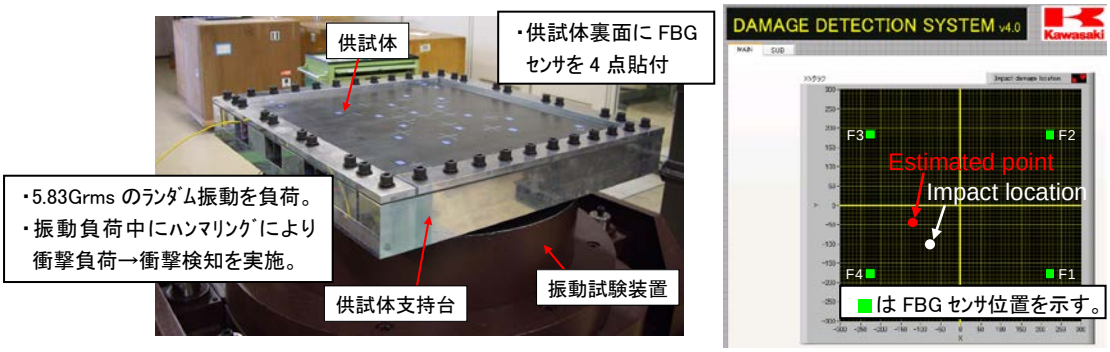


図３－６　振動環境下での衝撃検知試験実施状況及び衝撃検知結果

b)「透過光強度計測による手法」に対する信頼性データ取得・評価

埋込光ファイバによる衝撃損傷検知が検知確率ガイドラインを満足するための、埋込位置改良の指標となるデータを取得できた。また、表面貼付光ファイバによる衝撃損傷検知が検知確率ガイドラインを満足する可能性が得られた。

②高信頼性システム技術開発

a)耐久性データ取得・評価

機体構造表面へ貼付する場合の FBG センサに対する耐久性データ取得・評価として、高温、低温、高度/気圧、減圧、過圧、温度サイクル、湿度、温水浸漬、燃料浸漬、溶剤浸漬、引火性に対する耐久性データ取得試験を実施し、所定の耐久性を有することを確認した。

b)実機適用を考慮したシステム仕様の検討及びその試作

150 席クラス民間旅客機複合材前胴構造を対象として、衝撃損傷検知システム実機適用構想を設定するとともに（図３－７に構想を示す）、計測・診断装置の構成品のうち、航空機搭載用のものを新規に開発する必要がある FBG センサモジュールについて、その仕様案をまとめた。また、設定した構想、仕様案に基づき、衝撃損傷検知システムを試作した（図３－８に試作したシステムを示す）。

さらに、衝撃損傷検知ソフトウェアについて、振動環境下での衝撃検知機能を強化するため、そのアルゴリズムを改良した。

一方、大型複合材パネル構造への細径光ファイバ埋込で必要となるプリプレグ積層時の細径光ファイバ自動実装実現に向け、細径光ファイバ貼付ユニットを試作し、貼付トライを行って自動実装の可能性を示した。

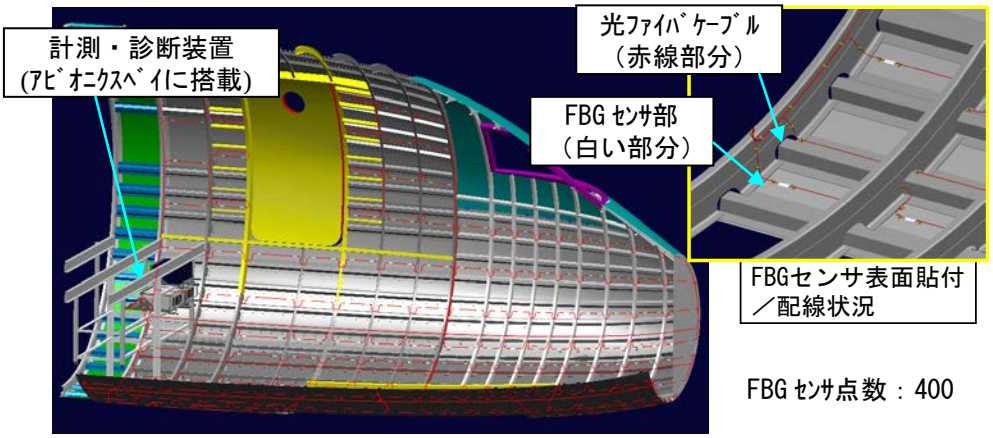


図３－７　衝撃損傷検知システム実機適用構想（FBG センサ表面貼付場合）

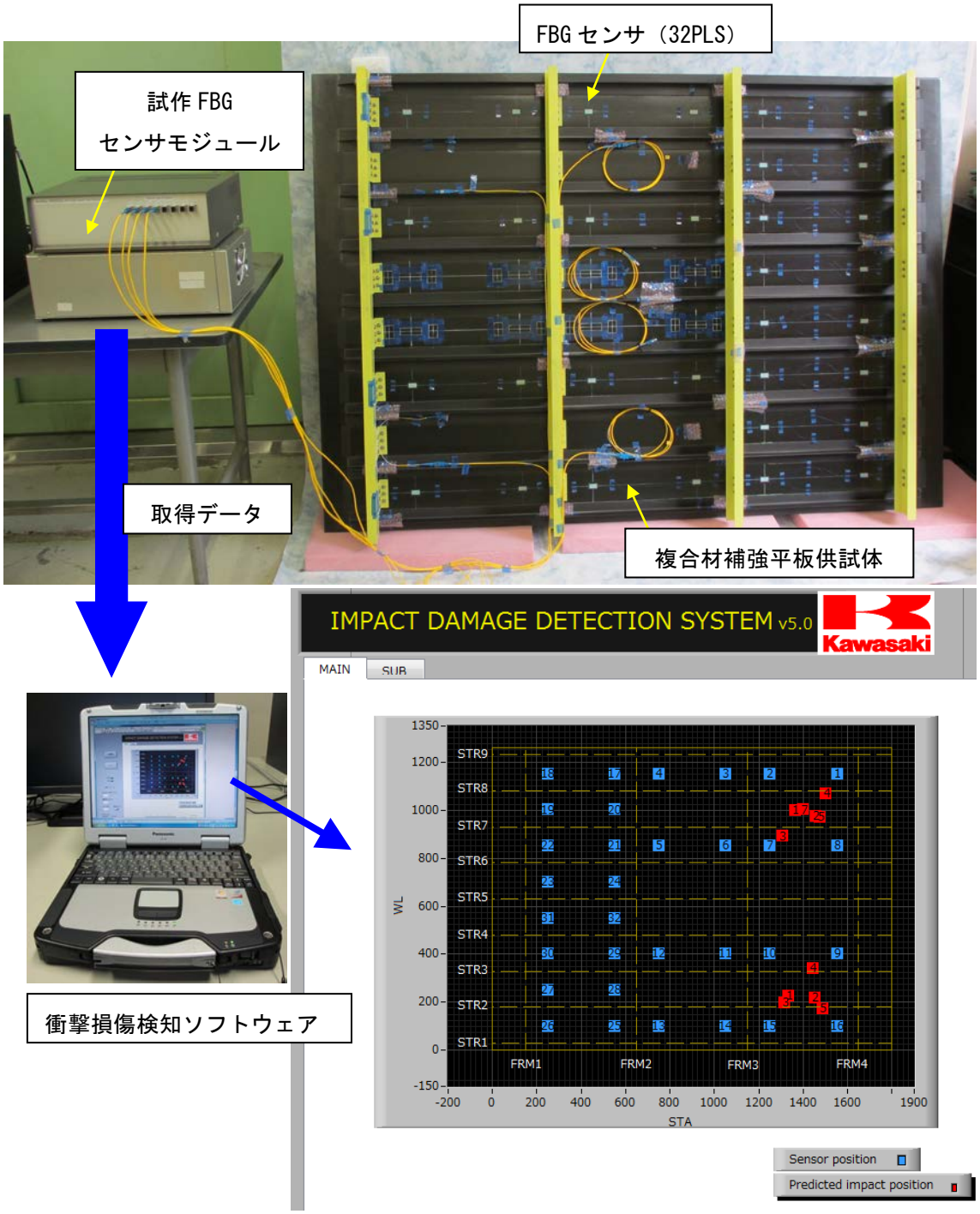


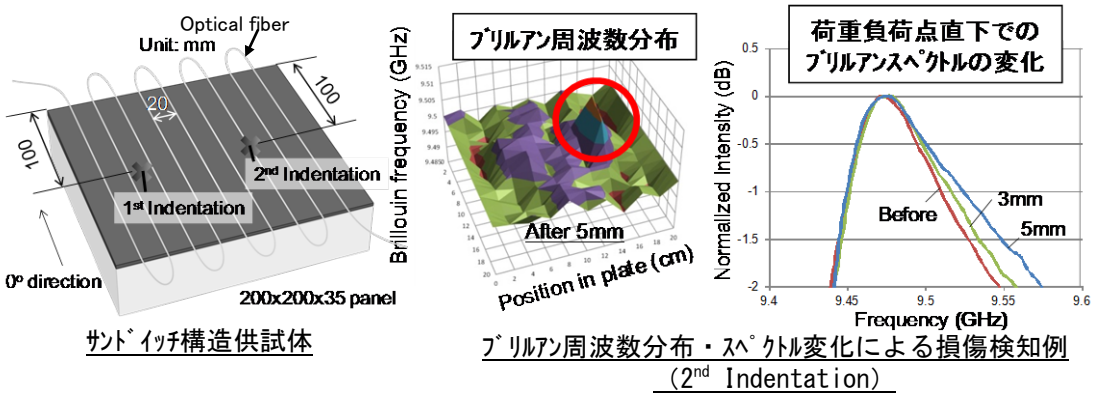
図３－８　衝撃損傷検知システム

c) 修理方法の検討・試作

複合材構造埋込光ファイバの修理方法を設定し、特許出願を行った。また、修理装置を試作し、その修理装置を用いて修理トライを行い、本修理方法の適用可能性を示した。

③サンドイッチ構造の衝撃損傷検知手法設定

サンドイッチ構造に対しては、光ファイバネットワークでの分布歪計測(PPP-BOTDA:Pre-Pump Pulse-Brillouin Optical Time Domain Analysis)による衝撃損傷検知手法について検討した。本手法評価のため、試作した光ファイバ埋込サンドイッチ構造供試体に対し、準静的押込荷重負荷を行い、材料構成・荷重負荷位置によらず損傷位置・サイズを推定することが可能であることを示した。損傷検知例を図３－９に示す。また、実機適用を想定し試作した供試体を図３－１０に示す。



サンドイッチ構造供試体

ブリルアン周波数分布・スペクトル変化による損傷検知例
(2nd Indentation)

図３－９　準静的押込荷重負荷での損傷検知

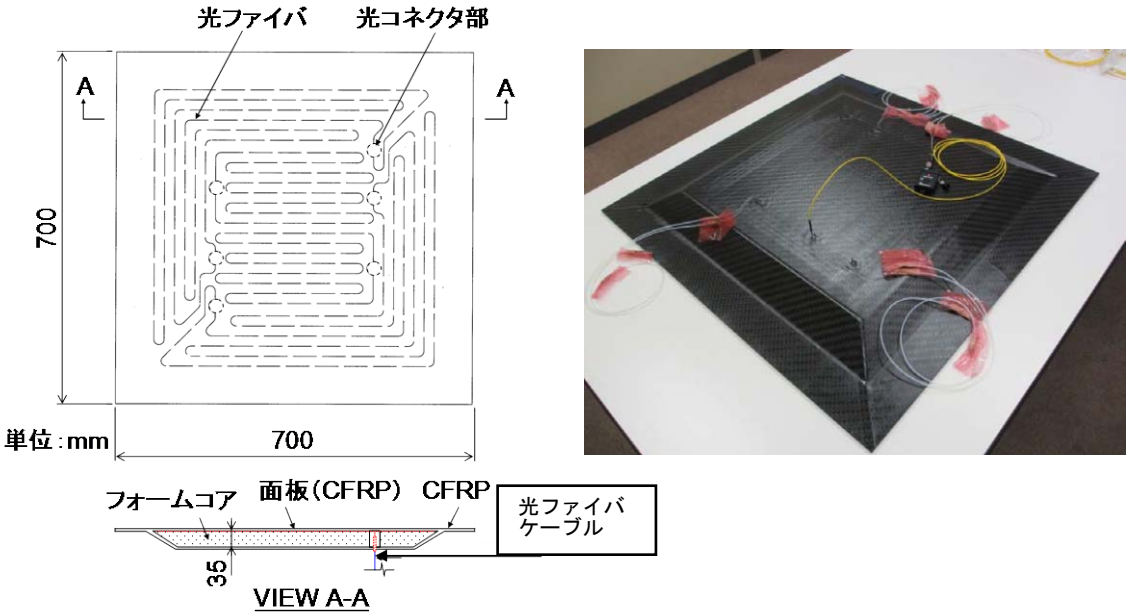


図３－１０　光ファイバ埋込サンドイッチ構造供試体

Ⅲ．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

本技術は、複合材構造に発生/進展する損傷を検知するための技術であり、PZT（$Pb(Zr, Ti)O_3$）圧電素子をラム波発振素子、FBG（Fiber Bragg Grating）光ファイバセンサをラム波受振素子として使用している。図３―９に示すように、ラム波は構造の状態変化（損傷の発生/進展）に伴い変化する。本技術は、健全時のラム波を基準に、損傷の発生及び進展に伴い変化するラム波の変化を定量的に評価することにより、複合材の構造健全性を評価するものである。

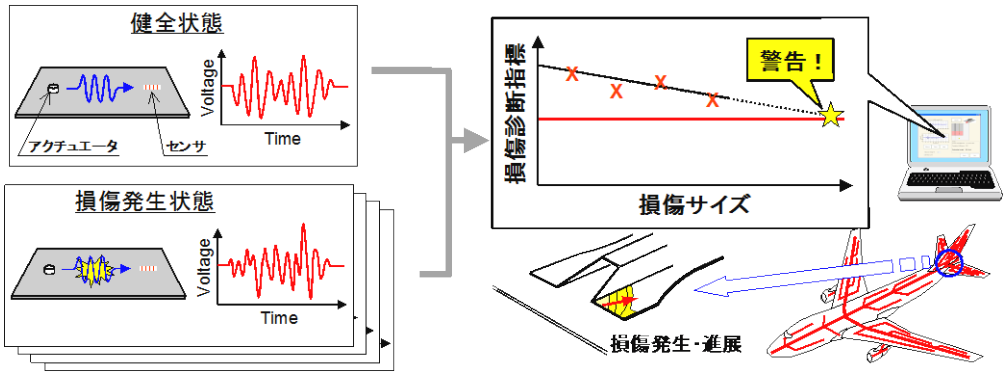
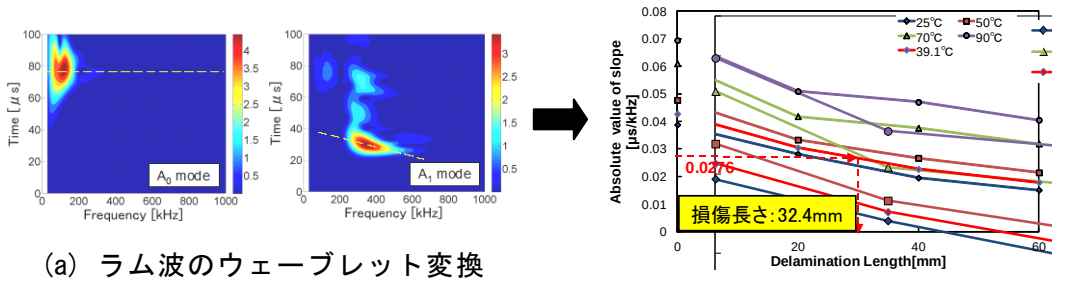


図３―９　損傷モニタリング技術の概要

①高信頼性診断技術開発

a) 広帯域ラム波送受振システムの試作および診断信頼性の確認

当該システムは、広帯域発振が可能な PZT と FBG センサを用いてラム波の計測を行っており、広帯域ラム波に含まれる複数のラム波モードを総合的に解析評価できる特徴を有する。これを利用することにより、損傷診断精度の高精度化を目指している。実験と FEM 解析の結果を検証しながら研究を進めた結果、A_0，A_1 モードの変化から、環境温度と損傷長さを同定できることを確認した(図３－１０)。



(a) ラム波のウェーブレット変換の一例

(b) 損傷長さと同定パラメータの関係

図３―１０　広帯域ラム波診断技術概要

b)狭帯域ラム波計測システムによる診断技術の信頼性向上

接着はく離診断技術の信頼性向上を目指し、各種供試体(FHI 製, Airbus 製)を用いて、検知確率(PoD：Probability of Detection)の評価を行うと共に、航空機搭載を想定した環境条件下での接着はく離診断技術の開発・評価を行った。その結果、温度とひずみが同時に付与される環境下においても、温度、ひずみの影響を補正することにより、接着はく離長さを高精度で診断できることを確認した。

②高信頼性システム技術開発

a)環境負荷によるセンサの計測能力への影響確認

FBG/PZT センサシステムの耐環境性能を評価するために、航空機搭載環境を考慮した各種環境試験を実施した。その結果、表３－２に示す条件下で、センサシステムが十分な耐久性を有することを確認した。

表３―２　環境試験の条件と試験結果

	条件	時間	結果
高温暴露	85 ℃	2000 hrs	十分な耐環境性を有している。
低温曝露	-65℃	2000 hrs	同　上
温水浸漬	80℃	1000 hrs	同　上
作動油浸漬	70 ℃	2000 hrs	同　上
湿度雰囲気	70℃,95%	2000 hrs	同　上
温度変化	-65～80℃	2000 回	同　上
高圧暴露	200kPa	2000 hrs	同　上
低圧暴露	11.6kPa	2000 hrs	同　上
燃料浸漬	40℃	2000 hrs	同　上

b)光ファイバセンサの埋め込みが複合材料の機械的特性に及ぼす影響の評価

細径光ファイバを埋め込んだ供試体と埋め込んでいない供試体とを用いて各種クーポン試験を実施し、細径光ファイバの埋め込みが複合材料の機械的特性へ及ぼす影響を評価した。統計処理を施したデータを検証した結果、細径光ファイバの埋め込みによる機械的特性の低下はなく、細径光ファイバの埋め込みが複合材の機械的特性に影響しないことを確認した。

c)航空機搭載可能とするシステム小型化の検討

航空機へのシステム搭載を目指し、PZT 信号増幅装置のボード化等を行い、装置の小型化を行った。更に、小型化を行ったシステムに対して、RTCA/DO-160E に従い、電磁適合性試験の一部を行い、その適合性を確認

した。

d)センサ埋め込み手法、修理手法の検討

新造機／経年機に適用可能な取扱性に優れる光ファイバセンサの開発を行った。図３－11に示す通り、コネクター体型となっている本センサは簡便に抜き差しできる仕様となっており、実装作業の効率化に貢献できる。

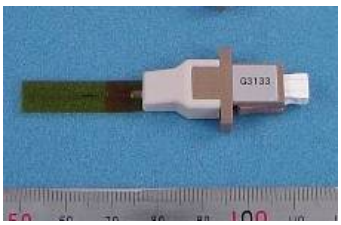


図３－１１　開発したセンサ

③損傷モニタリングシステムによる衝撃検知の基本原理の確認

当該システムの付加価値向上のため、新たなデバイスを必要としない衝撃検知手法の開発を行った。ラム波に比較して大きなひずみを発生し、かつ、計測時間を要するような衝撃についても、現デバイス構成で計測可能なことを確認した。また、4 つの FBG センサで同時に計測したひずみデータに、ウェーブレット変換等を適用することにより、衝撃位置を同定できる位置同定アルゴリズムを開発した。

Ⅳ．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の開発

①高信頼性診断技術開発

プレッシャーバルクヘッド部分構造としてボルト継手構造および接着継手構造の疲労損傷検知評価試験を実施した。その結果、ボルト継手構造については、FBG センサのボルト穴周りの残留ひずみの検出能力を確認した。また、接着継手構造については、接着剥がれの進展による FBG センサのひずみ変化を測定し、接着剥がれの検出能力を確認した（図３－１２）。さらに、スカーフ補修構造の疲労損傷検知評価試験を実施した。スカーフ補修パッチの剥がれの進展と FBG センサのひずみ変化の関係を調べることにより、光ファイバセンサの補修パッチ剥がれの検出能力を確認した（図３－１３）。

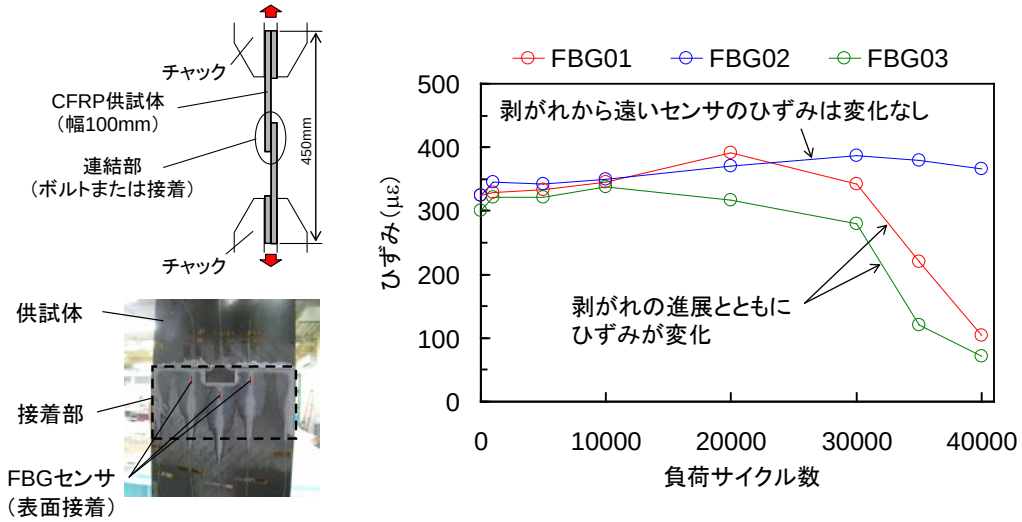


図３－１２　接着継手損傷検知評価試験結果

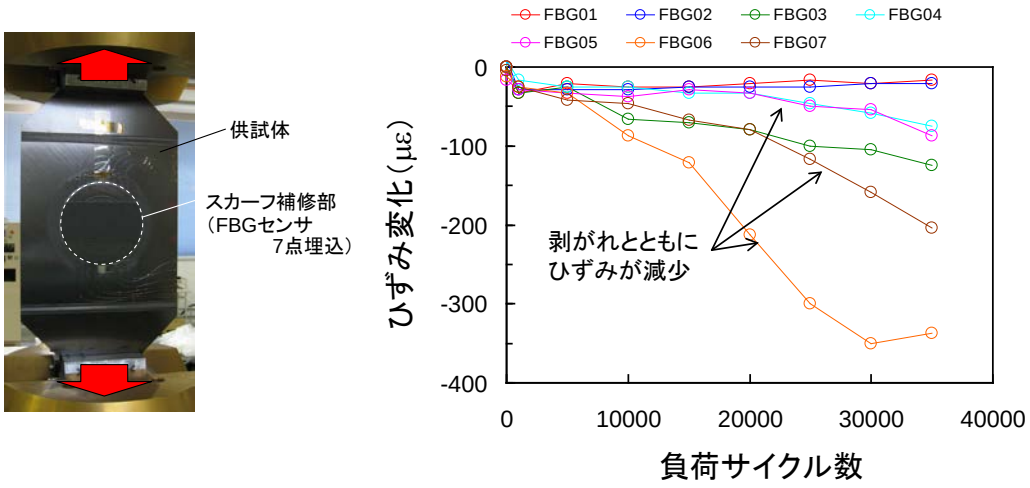


図３－１３　スカーフ補修損傷検知評価試験結果

② 高信頼性システム技術開発

プレッシャーバルクヘッドを想定した光ファイバ実装方法を検討した。具体的には、応力集中が発生する補強材まわりのような立体形状部材へ光ファイバ敷設が可能な実装方法を開発した。光ファイバ実装器具の試作およびバルクヘッド模擬供試体への敷設試験を行い、敷設性を確認した（図３－１４）。

さらに、成形モニタリングに適した埋込み光ファイバの取出し方法を検討した。取出し器具の試作および成形前後での光ファイバ透過光強度損失の評価を行い、成形モニタリングへの適用可能な損失レベルであることを確認した（図３－１５）。

図３－１４　光ファイバ自動敷設実証試験結果

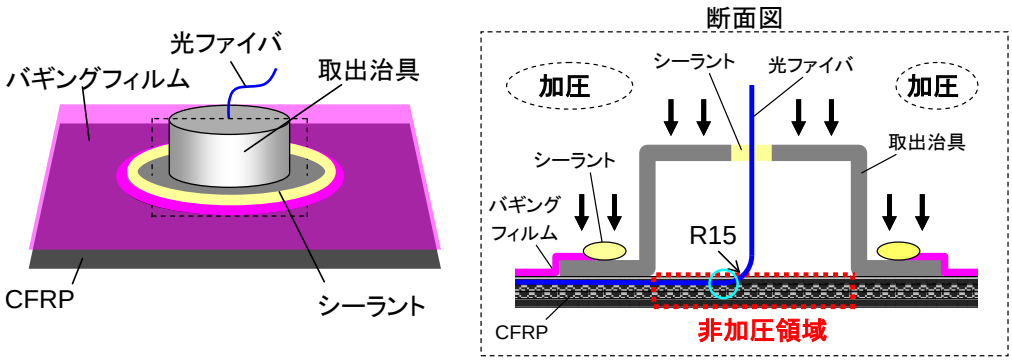
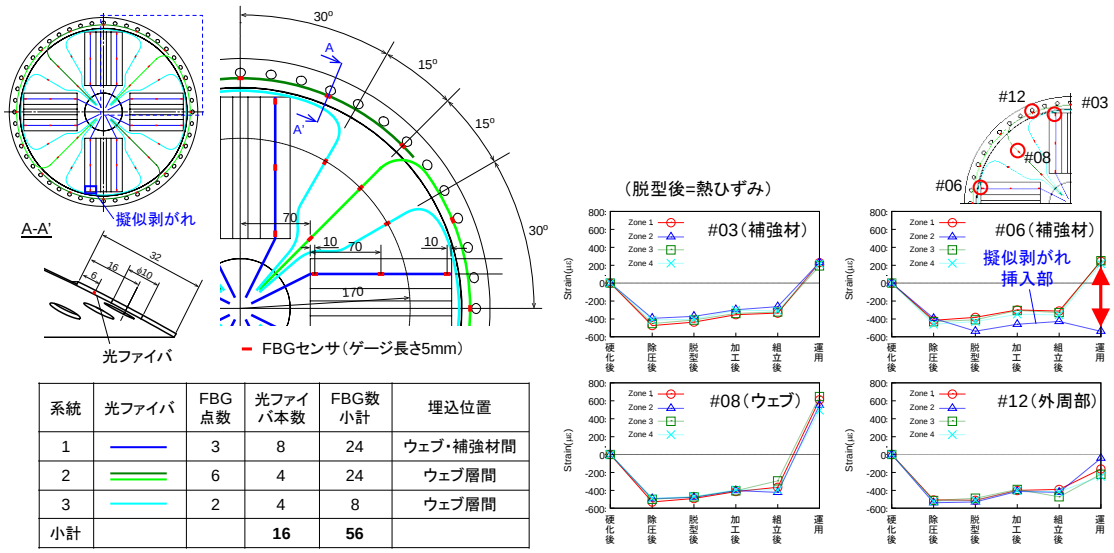


図３－１５　埋込光ファイバ取出し実装方法の検討および評価

③ ライフサイクルを通じた高信頼性診断技術

複合材構造のライフサイクル中に発生するひずみについて、まずステージごとにクーポン試験片を用いてモニタリング試験を行った。さらに、プレッシャーバルクヘッド供試体によるライフサイクルひずみモニタリング試験を実施し、成形、加工、組立、運用段階で発生するひずみを成形時に供試体内に埋め込んだ光ファイバセンサにより連続して計測した。この２つの結果を比較したところ、ひずみ変化の傾向が概ね一致することを確認した（図３－１６）。さらに、供試体中に挿入した擬似はがれ付近センサで測定したひずみが変化し、その傾向は、①の部分構造供試体による試験結果と一致した。これにより、ラ

イフサイクルひずみ計測技術構築の目処が得られた。



系統	光ファイバ	FBG点数	光ファイバ本数	FBG数小計	埋込位置
1		3	8	24	ウェブ・補強材間
2		6	4	24	ウェブ層間
3		2	4	8	ウェブ層間
小計			**16**	**56**	

図３－１６　ライフサイクルモニタリング試験結果

３－１－３．　特許出願状況等

表３－４に特許・論文等の件数を示す。

要素技術	論文数	論文の被引用度数	特許等件数(出願を含む)	特許権の実施件数	ライセンス供与数	取得ライセンス料	国際標準への寄与
Ⅰ.光相関ﾌﾞﾘﾙｱﾝ散乱計測技術	５		６				
Ⅱ.衝撃損傷検知技術	５		３				
Ⅲ.FBG/PZT 損傷ﾓﾆﾀﾘﾝｸﾞ技術	７		４				
Ⅳ.ﾗｲﾌｻｲｸﾙ構造健全性診断技術	３		１				
Ⅴ.総合調査	１						
合計	２１		１４				

表３－５に論文、投稿、発表、特許のリストを示す。

「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の開発」の発表において、米国SAMPE Outstanding Paper Awardの2010年度第2位、2011年度第3位を獲得、表彰された。

表３－５　論文、投稿、発表、特許リスト

	題目・メディア等	時期
論文	Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Space Technology Japan「Damage Detection in CFRP Laminates by Ultrasonic Wave Propagation Using MFC Actuator and FBG Sensor」	H21.5
	日本機械学会論文集 A 編「組込型広帯域ラム波送受振システムによる CFRP 接着構造の剥がれ損傷検知」	H22.4
	Smart Materials and Structures「Delamination detection in composite laminates using dispersion change based on mode conversion of Lamb waves」	H22.11
	素形材11月号「航空機用構造材料の技術研究開発動向」	H22.11
	川崎重工技報 第 171 号「複合材構造の健全性診断・損傷進展防止技術」	H23.1
	スバル技報「航空機複合材構造のラム波による健全性診断技術の開発」	H23.6
	Journal of System Design and Dynamics「Damage Detection in Aircraft Composite Materials Using a Built-in Broadband Ultrasonic Propagation System」	H23.7
	日本航空宇宙学会論文集, Vol.59「多重化 FBG 光ファイバセンサの動歪計測による CFRP フォームコアサンドイッチ構造の衝撃同定」	H23.8
	日本機械学会誌「複合材構造に組み込み可能な超音波診断システム―ラム波モード変換を利用した剥離検知―」	H23.9
	KAWASAKI TECHNICAL REVIEW, No.171「Structural health monitoring and suppression of interfacial cracks in composite airframe structures」	H23.9
	検査技術, Vol.16, No.10「複合材構造の健全性診断技術」	H23.10
	三菱重工技報 Vol. 48, No. 4「航空機運航コストを低減させる構造健全性診断システムの開発」	H23.10
	SAMPE Journal, Vol. 47「Life Cycle Structural Health Monitoring of Airframe Structures: Strain Mapping Using FBG Sensors」	H23.3
	三菱電機技報 6月号「光ファイバセンサを用いた複合材料構造の健全性診断技術」	H25.6

	Optical Fiber Technology 誌 「Fiber Distributed Brillouin Sensing with Optical Correlation Domain Techniques」	H25.10
	横河技報 「高速・高空間分解能な光ファイバ歪み温度布測定技術 BOCDA による航空機構造健全性診断へのとりくみ」	H25.12
	Yokogawa Technical Repot 「Fiber-optic Distributed Strain and Temperature Sensor using BOCDA Technology at High Speed and with High Spatial Resolution」	H26.4
	Development of Structural Health Monitoring Technologies and Next Generation Smart Composite Structures 「Use of distributed sensor networks with optical fibres (Brillouin scattering) for SHM of composite structures」	H26.9
	日本複合材料学会誌 「超音波ラムを用いた接着剥がれ診断技術開発」	H25.11
	日本複合材料学会誌 「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の開発」	H26.1
	日本複合材料学会誌 「光ファイバセンサによる衝撃損傷検知システムの開発」	H26.5
投稿	素形材7月号 「次世代構造部材創製・加工技術開発プロジェクトの概要」	H21.7
	(株)航空新聞社発行 WING10 月 20 日号 「FHI の研究開発状況紹介」	H22.10
	非破壊検査 「航空宇宙機複合材構造の構造ヘルスモニタリング技術の進展」	H23.5
	Todai OpenCourseWare（Todai OCW） 「ビジネスジェットのヘルスモニタリング」	H25.3
	英文科学技術情報誌「Science & Technology In Japan」No.110 「複合材構造健全性診断技術開発プロジェクトの概要」	H25.5
	日本複合材料学会誌 「複合材構造健全性診断技術開発プロジェクトの概要」	H25.9
発表	The US-Japan Conference on Composite Materials 2008 「Damage Detection of Highly Reliable Advanced Grid Structure Demonstrator」	H20.6
	第 3 回複合材料シンポジウム 「高信頼性先進グリッド構造デモンストレータの製造・評価」	H20.10
	第 16 回超音波による非破壊評価シンポジウム 「複合材料構造ヘルスモニタリングの為の広帯域高指向性を有するラム波伝播システム」	H21.1
	SPIE 16th Annual International Symposium 「Verification of the impact Damage detection system for airframe structures using optical fiber sensors」	H21.3
	日本複合材料学会 2009 年度研究発表講演会 「広帯域ラム波の分散特性を利用した CFRP 積層板の剥離損傷検知」	H21.5
	27th International Symposium on Space Technology and Science 「Delamination Detection in CFRP Quasi-Isotropic Laminates Using the Dispersion Characteristic of Broadband Lamb Waves」	H21.7
	航空機用先進複合材技術合同ワークショップ 「Damage Identification in Stiffened CFRP Structures with FBG Optical Fiber Network」	H21.8
	The 7th International Workshop on Structural Heath Monitoring 「Delamination Detection in CFRP Laminates Using the Dispersion Characteristic of Broadband Lamb Waves Excited by MFC Actuator and Received in FBG Sensor」	H21.9
	The 7th International Workshop on Structural Heath Monitoring 「RELIABILITY OF THE IMPACT DAMAGE DETECTION SYSTEM FOR AIRFRAME STRUCTURES USING OPTICAL FIBER SENSORS」	H21.9
	日本機械学会 2009 年度年次大会 「広帯域ラム波の分散特性を利用した複合材料構造中の剥離損傷検知」	H21.9
	東京大学システム創成学第二回学術講演会 「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」	H21.12
	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 「組込型広帯域ラム波伝播システムによる CFRP 積層板中の剥離損傷の検知」	H22.3
	SPIE Smart Structures and Materials & Nondestructive Evaluation 2010 「Life cycle structural health monitoring of airframe structures by strain mapping using FBG sensors」	H22.3
	SPIE Smart Structures and Materials & Nondestructive Evaluation 2010 「Delamination Detection using embedded BOCDA optical fiber sensor」	H22.3
	日本非破壊検査協会・レーザ超音波および先進非接触計測技術研究会 「組込型ラム波伝播システムを用いた広帯域分散性の変化に基づく複合材料中の剥離損傷検知」	H22.4
	5th European Workshop on Structural Health Monitoring 2010 「The strain dependency on the Lamb wave sensing system using FBG sensor and PZT actuator」	H22.7

発表	5th European Workshop on Structural Health Monitoring 2010 「Practical application study of an impact damage detection system for an airframe composite structure」	H22.7
	The 10th International Conference on Motion and Vibration Control (MOVIC2010) 「Damage detection in aircraft composite materials using a built-in broadband ultrasonic propagation system」	H22.8
	日本機械学会 2010 年度年次大会 「広帯域ラム波のモード変換による周波数分散性変化を利用した複合材料中の剥離損傷検知」	H22.9
	日本機械学会 2010 年度年次大会 「AWG フィルタを用いた高速 FBG 計測システムによる CFRP 積層板の衝撃検知」	H22.9
	日本機械学会 2010 年度年次大会 「組込型超音波送受振デバイスを用いた広帯域ラム波の伝播による CFRP 接着構造の剥がれ損傷モニタリング」	H22.9
	The 14th US-Japan Conference on Composite Materials 「Delamination Detection in CFRP Laminates Using a Built-in Broadband Lamb Wave Propagation System」	H22.9
	SAMPE Fall Technical Conference 2010 「Life cycle strain mapping of composite airframe structures for health monitoring by using FBG sensors」	H22.10
	第3回素形材新技術連携シンポジウム 「航空機用構造材料の技術動向と RIMCOF の研究開発」	H22.11
	3rd Asia – Pacific Workshop on Structural Health Monitoring 「Structural health monitoring of CFRP airframe structures by strain mapping using FBG sensors through life cycle」	H22.12
	3rd Asia – Pacific Workshop on Structural Health Monitoring 「Material Qualification for SHM Technology Implementation in Aerospace Field」	H22.12
	3rd Asia – Pacific Workshop on Structural Health Monitoring 「Development of Lamb-wave-based SHM system using FBG/PZT hybrid sensor system」	H22.12
	3rd Asia-Pacific Workshop on Structural Health Monitoring 「Delamination detection in composite laminates using dispersion changes of broadband Lamb waves by mode conversion」	H22.12
	3rd Asia-Pacific Workshop on Structural Health Monitoring 「Impact detection in composite laminates by high-speed FBG measurement system using AWG filters」	H22.12
	3rd Asia-Pacific Workshop on Structural Health Monitoring 「Practical application study of impact damage detection for composite airframe structures using optical fiber sensors」	H22.12
	3rd Asia-Pacific Workshop on Structural Health Monitoring 「Damage monitoring for bolted joint composite by BOCDA measurement」	H22.12
	3rd Asia-Pacific Workshop on Structural Health Monitoring 「Overview of The JASTAC(The Japan Airbus SHM Technology for Aircraft Composite) Project Activities」	H22.12
	平成 22 年度 システム創成学 学術講演会 「複合材構造の動的応答を利用した組込型健全性診断システム」	H23.1
	CAE Power 2011 LS-DYNA カンファレンス 「スマート構造材料の構築における解析的検証 – 超音波伝播解析と形状記憶合金の変形挙動解析 –」	H23.1
	第 2 回複合材料合同会議(JCCM-2) 「AWG フィルタ型高速 FBG センサ計測装置による CFRP 積層板の衝撃ひずみ応答の検知」	H23.3
	第 2 回複合材料合同会議(JCCM-2) 「広帯域ラム波のモード変換に基づいた CFRP 積層板の層間損傷検知における環境温度の影響評価」	H23.3
	第 2 回複合材料合同会議(JCCM-2) 「超音波ラム波の広帯域モード分散性の変化に着目した CFRP 接着構造の剥がれ損傷モニタリング」	H23.3
	SPIE Smart Structures / NDE 2011 「Life cycle strain mapping of composite airframe structures by using FBG sensors」	H23.3
	International Workshop on Smart Materials and Related Technologies 2011 「Built-in broadband ultrasonic system for active and passive health monitoring of composite structures」	H23.6
	JSME/ASME 2011 International Conference on Materials and Processing (ICM&P2011) 「Detection of Impact Strain Wave in Composites by FBG Sensor System with AWG Filter」	H23.6
	The 8th International Workshop on Structural Health Monitoring 2011 (IWSHM 2011) 「Influence of environment condition on the group velocity of the Lamb wave for SHM system」	H23.9
	The 8th International Workshop on Structural Health Monitoring 2011 (IWSHM 2011) 「Detection of Impact Strain Waves in Composites by High-Speed FBG Sensor System with AWG Filter」	H23.9

発表	The 8th International Workshop on Structural Health Monitoring 2011 (IWSHM 2011)「Damage Detection method for CFRP bolted joints using embedded BOCDA optical fiber sensor」	H23.9
	日本機械学会 2011 年度年次大会 「伝播する広帯域ラム波のモード変換を利用した CFRP 接着構造の剥がれ損傷モニタリング」	H23.9
	日本機械学会 2011 年度年次大会 「広帯域ラム波のモード変換に基づく CFRP 積層板の層間剥離検知における環境温度の影響評価」	H23.9
	International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2011 (ATEM '11)「Evaluation of temperature effect on delamination detection in CFRP laminates based on mode conversions of broadband Lamb waves」	H23.9
	International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2011 (ATEM '11)「Detection Technique of Debonding Damage in Composite Bonding Structures Using Broadband Ultrasonic Wave Propagation System」	H23.9
	SAMPE Fall Technical Conference 2011 「Damage detection of composite structures by life-cycle strain mapping using FBG sensors」	H23.10
	次世代ものづくり基盤技術産業展 TECH Biz EXPO 2011 「航空機構造用炭素繊維複合材料と構造健全性診断技術」	H23.10
	第 48 回日本航空宇宙学会関西・中部支部合同秋期大会 「航空機における構造ヘルスモニタリングについて」	H23.11
	12th Japan International SAMPE Symposium & Exhibition (JISSE2011)「R&D of Impact Damage Detection for Composite Airframe Structures Using Optical Fiber Sensors」	H23.11
	12th Japan International SAMPE Symposium & Exhibition (JISSE2011)「Detection of Impact Strain Waves in CFRP Laminates by Smart Ultrasonic System with FBG Sensor and AWG Filter」	H23.11
	12th Japan International SAMPE Symposium & Exhibition (JISSE2011)「Development of the damage diagnosis technology by Lamb wave」	H23.11
	12th Japan International SAMPE Symposium & Exhibition (JISSE2011)「Delamination detection method for CFRP based on dispersion change of broadband Lamb waves considering temperature effect」	H23.11
	12th Japan International SAMPE Symposium & Exhibition (JISSE2011)「Damage detection of composite airframe structures by strain mapping using FBG sensors through life cycles」	H23.11
	12th Japan International SAMPE Symposium & Exhibition (JISSE2011)「Overview of BOCDA-SHM system development」	H23.11
	ｾﾐﾅｰ「航空機材料の将来展望」「複合材構造健全性診断技術開発」	H24.1
	日本複合材料合同会議(JCCM-3)「ラム波分散性を利用した CFRP 積層板の剥離損傷診断における温度変化の補正手法の検討」	H24.3
	日本複合材料合同会議(JCCM-3)「高速 FBG センサ計測装置の非線形応答補正に基づいた CFRP 積層板の衝撃ひずみ波の検出」	H24.3
	SPIE Smart Structures/NDE 2012 「Structural health monitoring of CFRP airframe structures using fiber-optic-based strain mapping」	H24.3
	Ninth Joint Canada-Japan Workshop on Composites 「Temperature Effect on Delamination Detection Method in CFRP Laminates Using Mode Conversions of Lamb Waves」	H24.7
	6th edition of European workshop on structural health monitoring, 2012 「Investigation of the probability of detection of our SHM system」	H24.7
	日本機械学会 2012 年度年次大会 「組込型超音波伝播システムの機能拡張による複合材構造の衝撃挙動検出」	H24.9
	日本機械学会 2012 年度年次大会 「組込型超音波伝播システムの機能拡張による複合材構造の衝撃挙動検出」	H24.9
	第37回複合材料シンポジウム 「光相関ブリルアン散乱計測法を用いた複合材構造の損傷検知技術開発」	H24.10
	第37回複合材料シンポジウム 「実機適用を目指した航空機複合材構造衝撃損傷検知システム技術の開発」	H24.10
	第37回複合材料シンポジウム 「PZT-FBG センサを用いた航空機複合材構造の健全性診断技術の開発」	H24.10
	第37回複合材料シンポジウム 「光ファイバセンサを用いた ライフサイクルストレイン マッピングによる複合材構造の健全性診断技術の開発」	H24.10

発表	第37回複合材料シンポジウム 「複合材構造健全性診断技術開発プロジェクトの概要」	H24.10
	SAMPE Fall Technical Conference 2012 「Life cycle strain mapping by optical fiber sensors for defect and damage detection of CFRP structures」	H24.10
	4th Asia Pacific Workshop on Structural Health Monitoring 「Development status of the Damage Detection Method for CFRP Structures Using Distributed BOCDA Optical Fiber Sensor」	H24.12
	次世代構造部材創製・加工技術開発シンポジウム 「光相関ブリルアン散乱計測法による航空機構造健全性診断技術の開発」	H25.2
	次世代構造部材創製・加工技術開発シンポジウム 「光ファイバセンサによる航空機構造衝撃損傷検知システム技術の開発」	H25.2
	次世代構造部材創製・加工技術開発シンポジウム 「FBG/PZT ハイブリッドシステムを用いた航空機構造の損傷モニタリング技術の開発」	H25.2
	次世代構造部材創製・加工技術開発シンポジウム 「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の開発」	H25.2
	次世代構造部材創製・加工技術開発シンポジウム 「複合材構造健全性診断技術開発の概要」	H25.2
	SPIE Smart Structures / NDE 2013 「Life cycle strain monitoring of composite airframe structures by FBG sensors」	H25.3
	33rd ICAF conference 「Development status of Structural Health Monitoring Technologies using BOCDA」	H25.6
	第 287 回電気材料技術懇話会 「光ﾌｧｲﾊﾞｾﾝｻに｢よる CFRP 構造体の健全性診断技術の開発」	H25.3
	【熊本大学先進マグネシウム国際研究センターシンポジウム】次世代の航空宇宙産業と新材料 「航空機用新材料 FHI における取り組みの紹介」	H25.4
	International Workshop on Structural Health Monitoring 2013 「Developmental Status of SHM Applications for Aircraft Structures Using Distributed Optical Fiber Sensor」	H25.9
	International Workshop on Structural Health Monitoring 2013 「Development Status of Optical Fiber Sensor based Impact Damage Detection Systems for Composite Airframe Structures」	H25.9
	International Workshop on Structural Health Monitoring 2013 「Damage detection Technology For CFRP Structure Using MFC/FBG Hybrid Sensor System」	H25.9
	International Workshop on Structural Health Monitoring 2013 「Outline of the Japanese National Project on Structural Health Monitoring System for Aircraft Composite Structures and JASTAC Project」	H25.9
	第 38 回複合材料シンポジウム 「FBG センサを用いた CFRP プレッシャーバルクヘッド構造のライフサイクルひずみモニタリング」	H25.9
	「フォトニックセンシング最前線」シンポジウム 「光ファイバブリルアン分布型センシングによる航空機ヘルスモニタリング技術の開発」	H25.9
	「フォトニックセンシング最前線」シンポジウム 「FBG 光ファイバセンサを用いた航空機構造健全性診断技術」	H25.9
	″OSA Annual Meeting, Frontiers in Optics 2013″ 中の ″Special Symposium on Advanced Distributed Optical Fiber Systems for Security and Safety Applications″ 「Brillouin Optical Correlation Domain Distributed Fiber Sensors」	H25.10
	4th Asia-Pacific Optical Sensor Conference (APOS 2013) 「Fiber Brillouin Distributed Sensing as Fiber Optic Nerve Systems」	H25.10
	OSA Optical Instrumentation for Energy and Environ- mental Applications 「High Performance Distributed Optical Fiber Sensors for Smart Structures and Environmental Monitoring」	H25.11
	13th Japan International SAMPE Symposium and Exhibition(JISSE-13) 「SHM Technology for Aircraft Structures Using Distributed Optical Fiber Sensor」	H25.11
	13th Japan International SAMPE Symposium and Exhibition(JISSE-13) 「Life Cycle Strain Mapping of CFRP Pressure Bulkhead using FBG Sensors」	H25.11
	13th Japan International SAMPE Symposium and Exhibition(JISSE-13) 「Outline of the Japanese National Project on Structural Health Monitoring System for Aircraft Composite Structures」	H25.11
	日本航空宇宙学会 第 45 期構造部門 談話会・見学会 「三菱電機における宇宙用複合材料開発の取り組み」	H25.11
	7th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM) 「DETECTABILITY ASSESSMENT OF OPTICAL FIBER SENSOR BASED IMPACT DAMAGE DETECTION FOR COMPOSITE AIRFRAME STRUCTURE」	H26.7

特許	出願№2010-058784	「損傷診断システム及び損傷診断方法」	H22.3
	出願№2011-018951	「光ファイバ特性測定装置及び方法」	H23.1
	米国 13/047,517	「損傷診断システム及び損傷診断方法」	H23.3
	出願№2011-127984	「複合材料構造体の埋込光ファイバ修理方法と修理構造及び接続構造」	H23.6
	PCT/JP2012/051754	「光ファイバ特性測定装置及び方法」	H24.1
	米 13/486,649	「複合材構造体の埋込光ファイバ修理方法と修理構造及び接合構造」	H24.6
	EP 12004367.4	「複合材構造体の埋込光ファイバ修理方法と修理構造及び接合構造」	H24.6
	出願№2012-141981	「接着方法及び接着器具、並びに、構造体の製造方法」	H24.6
	出願№2012-254477	「構造体及び構造体の剥離検出方法」	H24.11
	出願№2013-022332	「バギングフィルムの光ファイバ取り出し口用シール装置」	H25.2
	出願№2013-20928	「変位計測装置及び変位計測方法」	H25.2
	米国 13/959,076	「変位計測装置及び変位計測方法」	H25.8
	PCT/JP2013/065148	「接着方法及び接着器具、並びに、構造体の製造方法」	H25.5
	PCT/JP2013/073993	「構造体及び構造体の剥離検出方法」	H25.9

３－２．　目標達成度

表３－６に目標に対する成果概要および達成度を示す。

表３－６　目標に対する成果・達成度の一覧表

要素技術	目標・指標	成果	達成度
Ⅰ．光相関ブリルアン散乱計測法による航空機構造健全性診断技術の開発	①高信頼性診断技術開発 分布歪み計測及び動的歪み計測から､実飛行環境でも実用レベルの高信頼な構造健全性診断を行う技術を開発する。	①　高信頼性診断技術開発 マハラノビス・タグチ法を適用した異常診断アルゴリズムの信号前処理、基準状態の学習処理、診断及び表示を統合するソフトウエアを作成、十分な損傷検知能力を有していることを確認した。	達成
	②高信頼性システム技術開発 航空機に搭載可能で､実飛行環境でも高信頼な診断に必要な計測を可能とするセンサおよび計測システムを実現する技術を開発する。	②高信頼性システム技術開発 レーザ直接変調法による低コスト散乱計測法の計測速度向上につながる信号精度を向上した。 ・民間航空機に搭載可能な ARINC600 仕様にあった装置を試作し、飛行実証試験において健全性評価可能な精度で機体状況を監視できることを確認した。	
	③センサ機能の拡張（複合材結合部の構造健全性評価技術の開発・実証） 複合材結合部の内部損傷に関する情報の高信頼性診断技術への反映を図る。	③センサ機能の拡張（複合材結合部の構造健全性評価技術の開発・実証） 光ファイバセンサを埋め込んだ損傷検知試験を行い、複合材結合部の内部損傷検知感度を高める手法を確認した。	
Ⅱ．光ファイバセンサによる航空機構造衝撃損傷検知システム技術の開発	①高信頼性診断技術開発 実飛行環境でも実用レベルの高信頼な損傷検知を可能とする技術を開発する。	①高信頼性診断技術開発 ・CFRP 供試体を用いた衝撃損傷検知試験を実施し、「FBG センサでの歪計測」、「埋込光ファイバでの透過光強度計測」による衝撃損傷検知が、検知確率ガイドラインを満足する目処・可能性を確認した。 ・実機相当の構造供試体において、開発したシステムが衝撃損傷検知可能なことを確認した。	達成

		・振動環境下での衝撃検知試験を実施し、実機振動環境下での衝撃損傷検知が可能であることを示した。	
	②高信頼性システム技術開発 航空機に搭載可能で、実飛行環境でも損傷検知に必要な計測を可能とする高信頼なセンサおよび計測システムを開発する。	②高信頼性システム技術開発 ・民間旅客機複合材前胴構造を対象として、衝撃損傷検知システム実機適用構想を設定し、装置の仕様案をまとめた。また、設定した構想及び装置仕様案に基づき、衝撃損傷検知システムを試作した。 ・航空機搭載に必須な振動環境下での自動衝撃検知を可能とする衝撃損傷検知ソフトウエアのアルゴリズムを改良した。 ・FBG センサ貼付部の耐久性データ取得試験を実施し、所定の耐久性を有することを確認した。 ・埋め込みセンサの修理法に関して特許出願を行い、装置を試作して適用可能性を確認した。	
	③センサ機能拡張（サンドイッチパネルの損傷検知） サンドイッチパネルに対応する損傷検知システムの高信頼性診断技術を確立する。	③センサ機能拡張（サンドイッチパネルの損傷検知） サンドイッチパネルへの損傷検知システムの適用試験を実施し、損傷位置・サイズを推定することが可能であることを確認した。	
Ⅲ．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	①高信頼性診断技術開発 実飛行環境でも実用的な、高信頼な損傷モニタリングを可能とする技術を開発する。	① 信頼性診断技術開発 ・実験と FEM 解析の結果を検証しながら損傷診断高精度化を進めた結果、広帯域ラム波の解析を行うことにより、環境温度と損傷長さを同定できることを確認した。 ・特定周波数を利用した接着剥がれ診断技術において、温度と歪が同時に付与される環境下においても精度よく接着剥がれ長さを診断可能な事を確認した。	達成

	②高信頼性システム技術開発 航空機に搭載可能で、実飛行環境で高信頼な診断システムを実現する。	②高信頼性システム技術開発 ・実飛行相当の環境試験により、耐久性を確認した。 ・光ファイバの複合材埋込みクーポンの機械的特性を試験し、機械的特性に影響がないことを確認した。	
	③センサ機能拡張（衝撃検知能力付与） 衝撃検知機能と併せ、高信頼な損傷モニタリングシステムを実現する。	③センサ機能拡張（衝撃検知能力付与） FBG/PZT ハイブリッドシステムを用いたシステム開発として、衝撃検知アルゴリズムを開発した。	
Ⅳ．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の開発	①高信頼性診断技術開発 FBG センサによる多点歪計測に基づきストレインマッピングを行う事で、実飛行環境でも実用的な、高信頼な損傷診断を可能とする技術を開発する。	①高信頼性診断技術開発 プレッシャーバルクヘッドのボルト継手構造及び接着継手構造、ならびにスカーフ補修部分の疲労損傷検知評価試験を実施し、損傷検出能力を有することを確認した。	達成
	②高信頼性システム技術開発 航空機に搭載可能で、実飛行環境で計測を可能とするセンサおよび計測システムを開発する。	②高信頼性システム技術開発 光ファイバセンサを複合材構造上へ自動敷設する装置を試作して敷設性を確認した。さらに、埋込み光ファイバの取出器具を試作して透過光強度損失が許容範囲内であることを確認した。	
	③センサ機能拡張 ・多角的フィルタリング技術、ライフサイクルを通じた計測技術により、診断信頼性を向上する。	③センサ機能拡張 ライフサイクルを通じた計測のため、複合材の成形、加工、組立、運用段階の歪計測を実施し、歪計測技術構築の目処を得た。	

４．　事業化、波及効果について

４－１．　事業化の見通し

航空機構造健全性診断システムの事業化には、航空機搭載装備品としての認証を取得する必要がある。また、航空機構造の点検に使用するためには、航空機構造設計条件を踏まえた上で必要となる検知能力を有することを示し、具体的な点検マニュアルとしてまとめる必要がある。現状では、これらを規定するものは存在しないが、今後制度化され、規定が定められていくと考えられる。また構造健全性診断システムにより航空機の点検を行う際の具体的な手順を定めたマニュアルを作成しておく必要もある。

航空機への複合材構造健全性診断システムの適用は、下記のように進捗するものと考えられる。

①航空機搭載計測装置の試作

光相関ブリルアン散乱計測法、光ファイバセンサによる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損傷モニタリングの統合化を図り実際に使用する際の利便性を向上させる。複合材構造へ適用し、点検効率の向上、航空機の安全性確保をねらう。一定期間の試験運用により、データ取得を行うとともにシステムの認証取得へつなげる。その後現行の点検作業（目視、非破壊検査、等）の置き換えによる効率化を実現する。適用先は既存機、派生型機の構造であり、計測用の光ファイバは貼付式となる。

②複合材成形モニタリングへの適用

光ファイバを貼付する方法よりは、複合材に埋め込む方が光ファイバの運用上の保護という面で好ましい。光ファイバを埋め込むのであれば、成形時の歪等のデータを取得することにより、成形プロセス開発期間の短縮や品質安定化につながる。その後の運用時モニタリングも考えると複合材構造のライフサイクルモニタリングが可能となる。複合材構造に光ファイバを埋め込むことによりライフサイクルモニタリングが行える高付加価値の部品として納入することも可能となる。

③ボーイング、エアバスとの連携

現在素形材センターでは、エアバスとの間に協同研究契約を結び、効率的に実用レベルの構造健全性診断システムが実現されるよう研究開発を進めているが、今後も継続の必要があり、場合によってはボーイングとも共同研究する必要がある。

④ 構造健全性診断技術標準化準備委員会活動（AISC-SHM）[3)]

航空機メーカー、装備品メーカー、航空機運航者等による構造健全性診断システムのガイドブックを策定し、その有効性、実現性をまとめて技術の標準化を進め、合理的な規定つくりにつなげていく活動が AISC-SHM で行われており、本研究開発の中で参画しているが、２０１３年に発行された。光ファイバセンサによる構造健全性診断技術が本技術の中で定位置を占め、また

本研究開発の中で開発された技術が標準の一つとして認知されるよう今後も継続して活動していく必要がある。

④当局の装備品としての構造健全性診断システムの規定作成と並行し、ATA[4)]による、航空機運航者の点検作業での本システムの具体的な適用手順の作成が必要となる。

上記事業化への流れを図４－１に示す。

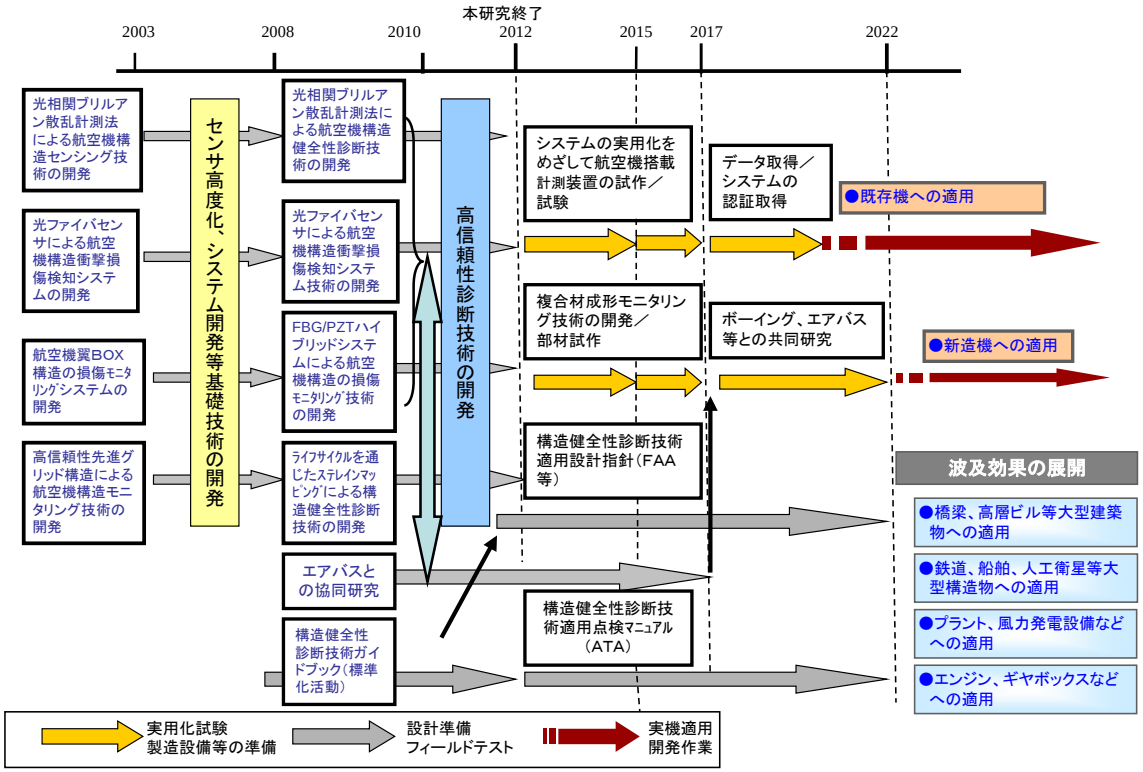


図４－１　構造健全性診断システム事業化への流れ

前述の AISC-SHM 構造健全性診断技術標準化準備委員会には航空機運航者も多数参加しており、運航者の構造健全性診断技術に対する関心は極めて高く、実用レベルの構造健全性診断技術が実現されれば、本システムの事業化の見通しは高い。

本システムの実用化が図られ、運用時のデータが蓄積されていけば設計へのフィードバックが行われ、革新的な複合材構造設計技術の確立につながっていくものと考えられる。

１）FAA：Federal Aviation Administration（連邦航空局）

２）EASA：European Aviation Safety Agency（欧州航空安全局）

３）AISC-SHM：Aerospace Industry Steering Committee for SHM（構造健全性診断技術標準化準備委員会）

４）ATA：Air Transport Association（航空運送協会）

４－２．　波及効果

本研究で航空機構造における厳しい使用環境での、高信頼システム技術が確立できれば、航空機構造以外の複合材構造分野への波及可能性が高い。各技術の具体的応用可能性を以下に示す。

Ⅰ．光相関ブリルアン散乱計測法による航空機構造健全性診断技術の開発

橋梁、建築物、プラント等の大型構造への適用が考えられる。対象に応じて空間分解能、応答性、計測レンジ等を最適化できる柔軟性があることにより、幅広い応用分野の開拓が期待できる。

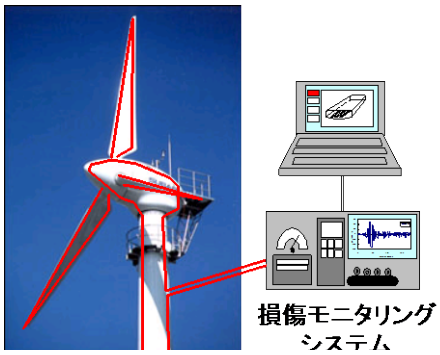
Ⅱ．光ファイバセンサによる航空機構造衝撃損傷検知システム技術の開発

本技術は、衝撃損傷を受ける可能性のある複合材構造全般に適用可能である。鉄道車両、船舶など輸送機器の複合材構造に本技術を適用することで、そのライフサイクルコスト低減、安全性向上などの波及効果が期待される。

Ⅲ. 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

再生可能なエネルギーへの注目が高まる中、風車への需要が高まっており、風車のブレードや鉄塔の損傷モニタリングは当該技術の有望な適用先の１つと考えられる。

現在商用化されている風車の監視システムは多点のセンサを埋め込む必要があるが、本プロジェクトで開発しているシステムは、一つのセンサである程度の広さをモニタリングできるため、現行システムに対して大きなアドバンテージを確保できる。



Ⅳ. 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の開発

高信頼性化によりＣＦＲＰ構造の一層の軽量化を実現できることから、人工衛星の太陽電池パネル等大型構造の軽量化に寄与できる。構造モニタリング技術は、人工衛星の地上環境試験に応用可能で波及効果として有望である。多点ＦＢＧセンサを用いた健全性診断技術は、回転機器など機械設備の保守・点検や空港等セキュリティにも拡張できる。

５．研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等

５－１．　研究開発計画

本事業は、表５－１に示す平成２０～２４年度の５年計画で実施されている。

表５－１　研究開発計画

実施項目／年度	Ｈ２０	Ｈ２１	Ｈ２２	Ｈ２３	Ｈ２４
Ⅰ．光相関ブリルアン散乱計測法による航空機構造健全性診断技術の開発	高信頼性診断技術の開発			高信頼性システム技術の開発	
	複合材結合部の健全性評価基盤技術開発			複合材結合部の健全性評価技術実証	
Ⅱ．光ファイバセンサによる航空機構造衝撃損傷検知システムの技術開発	信頼性/耐久性の実証				
	修理方法の開発			衝撃損傷検知システムの小型化	
	新しい構造様式への衝撃損傷検知システム実機適用技術開発			新しい構造様式への衝撃損傷検知システム実機適用技術実証	
Ⅲ．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	損傷モニタリング/衝撃検知技術の小型・統合化				
	損傷診断技術の信頼性向上			損傷診断技術の高精度化	
	損傷モニタリングシステム耐環境性の評価				
	センサ機能拡張			センサ機能拡張の実証	
Ⅳ．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の開発	診断信頼性向上技術の開発			システム信頼性高度化技術の開発	
	ライフサイクルを通じた高信頼性診断技術の開発			ライフサイクルを通じた高信頼性診断技術の実証	
Ⅴ．総合調査研究					

５－２．　研究開発実施者の実施体制・運営

（１）研究開発実施者の実施体制

開発責任者（プロジェクトリーダ）には東京大学武田展雄教授が選任され、素形材センターが、企業５社、独立行政法人１機関、大学１機関の協力の下に研究開発を実施している。図５－１に平成２４年度の実施体制を示す。

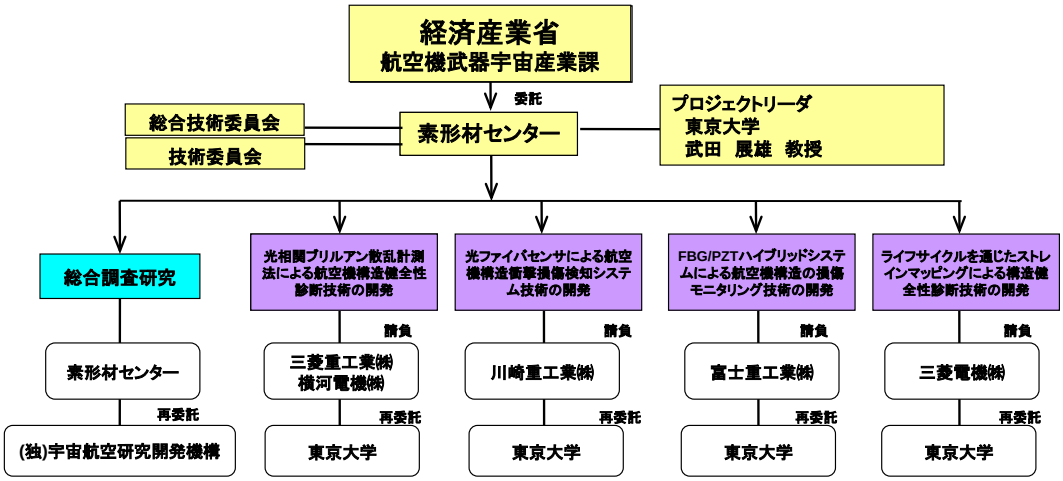


図５－１　事業実施体制

（２）実施体制の妥当性

東京大学武田教授は、光ファイバセンサによる複合材料構造健全性診断技術の研究では日本での第一人者で、本分野においては、海外においても著名であり、本事業の研究開発責任者として最適である。

本事業で取り組む複合材料構造健全性診断技術は、航空機機体構造を対象である為、三菱重工業等の機体メーカーが中心となり、大学等の協力を受けている。すなわち、大学等で検知手法の検討、実験で得られた結果の解析等を行い、機体メーカーで計測装置試作、供試体準備、試験等を行うという体制で各開発項目の実施責任体制は明確で妥当である。

（３）実施者間の連携

目標達成及び効率的実施のために素形材センターに設置した総合技術委員会における外部有識者の意見を運営管理に反映させた。又、四半期に一回程度、主として実施機関で構成される技術委員会等を通じて本事業の進捗把握及び方向付け等を行った。以上より、実施者間の連携は十分とれている。

（４）成果の普及および関与の取り組み

前述の総合技術委員会委員としてエアラインの全日本空輸㈱からも参加願い、本事業の進捗等を理解いただいている。又、実際の機体における本技術適用箇所の調査等で協力願っている。更に、エアバスとも本技術分野に関し定期的に会合を開き、技術交流を実施している。

５－３．　資金配分

本事業の平成２４年度までの予算を表５－３に示す。

個別要素技術研究への内部配分については、作業計画を勘案して各機関と十分調整の上決定しており、妥当なものである。

表５－３　年度予算　　（単位：百万円（税込み））

年度	平成２０	平成２１	平成２２	平成２３	平成２４	合計
合計	180.0	230.0	181.7	220.5	215.0	1027.2

５－４．　費用対効果

計測の要素技術検討は大学、装置試作と試験は企業と分担を明確にし、連携して開発している。製品化の必須機能、仕様情報をエアバスから入手することにより、本事業は非常に効率的に進められ、投入資源以上の効果が得られている。

５－５．　変化への対応

本事業開始から終了時点まで、技術動向・社会情勢・市場ニーズの変化等本事業に影響を及ぼす変化はない。しかし、本技術分野の標準化活動が欧米で開始されており、日本もこの動きに迅速に対応する必要がある。