

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) の概要について

平成27年3月26日

一般財団法人 素形材センター

目次

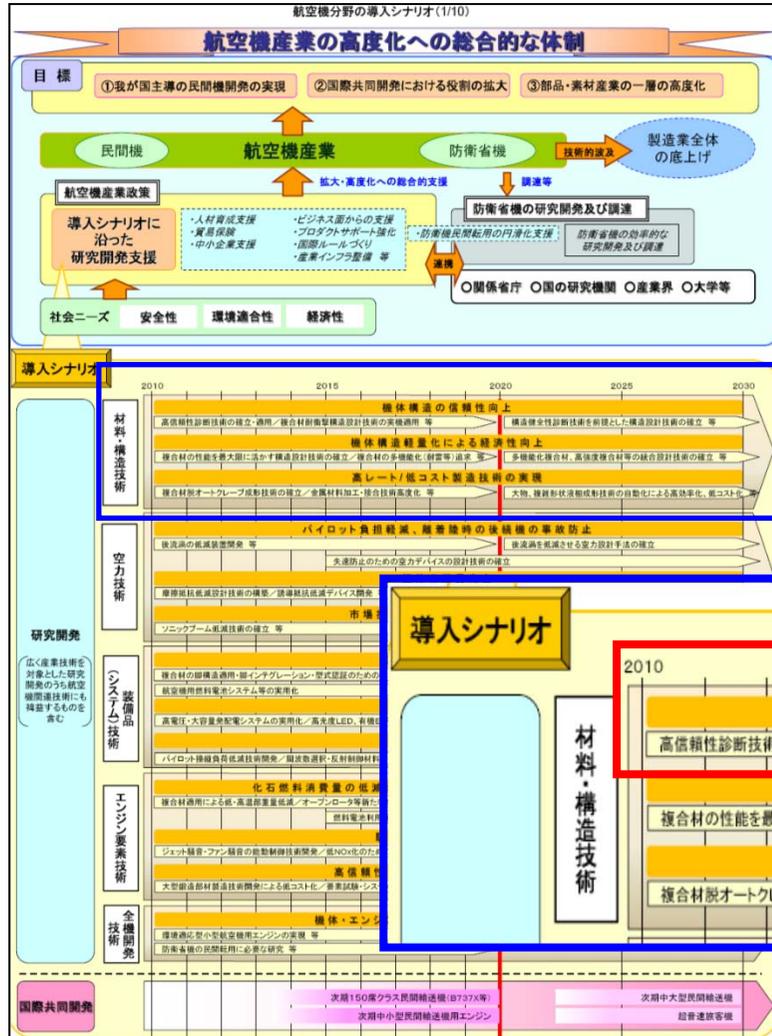
1. プロジェクトの概要
 2. 目的・政策的位置付け
 3. 目標
 4. 成果、目標の達成度
 5. 事業化、波及効果
 6. 研究開発マネジメント・体制等
 7. 中間評価結果
- 目標・成果 個別 資料

1. プロジェクトの概要

概要	航空機の整備、点検作業効率化を図るべく、実飛行環境でも十分なシステム信頼性を有する、光ファイバを活用した複合材構造健全性診断技術を開発する。
実施期間	平成20年度～平成24年度（5年間）
予算総額	10.2億円(委託) (平成20年度:1.8億円 平成21年度:2.3億円 平成22年度:1.8億円 平成23年度:2.2億円 平成24年度:2.1億円)
実施者	一般財団法人 素形材センター (財団法人 次世代金属・複合材料研究開発協会)
プロジェクトリーダー	東京大学 武田 展雄 (教授)

2. 目的・政策的な位置付け

➤航空機産業施策のうち、中核的要素技術に位置づけて、事業を推進している。



経済産業省及び独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)による航空機分野の導入シナリオ

材料・構造技術分野

本事業

3. 目標（平成20年度～24年度）

複雑な航空機構造全般に対応した構造健全性診断システム構築のため、下記4種類のシステムを開発する。

- 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
- 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
- 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
- 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

要素技術	目標・指標 (事後評価時点)	妥当性・設定理由・根拠等
①高信頼性診断技術開発 ②高信頼性システム技術開発 ③センサ機能の拡張	<p>①高信頼性診断技術開発</p> <ul style="list-style-type: none"> ・実用レベルの航空機構造健全性診断を可能とし、その点検効率を大きく改善する構造健全性診断技術を開発する。 <p>②高信頼性システム技術開発</p> <ul style="list-style-type: none"> ・実飛行環境下でも航空機複合材構造の歪分布、損傷などを高速、高精度に計測する高信頼なシステムを開発する。 ・上記計測システムの小型化技術を開発する。 <p>③センサ機能の拡張</p> <ul style="list-style-type: none"> ・センサ機能を拡張し、診断信頼性向上技術を開発する。 	<p>①実用レベルの信頼性をもって構造健全性診断を可能とするシステムは未だ実現されていない。この主な原因は、十分な診断の信頼性が得られていない事にあり、これを実現する目処を得る必要がある。</p> <p>②光ファイバセンサによる計測システムで、厳しい航空機の実運用環境に合致したものはない。実用レベルの構造健全性診断システムの実現には、これに合致したシステムの実現が必要である。併せて航空機に搭載可能な小型システムとすることが不可欠である。</p> <p>③既存の光ファイバセンサ計測システムは、単一の計測目的で構築されており、計測機能拡張の余地がある。計測情報を増やす事により、診断の信頼性向上を追及する。</p>

4. 成果、目標の達成度(1/2)

(平成20年度～24年度)

4種類の航空機複合材構造健全性診断技術の開発に関し、いずれも所期の目標を達成している。

要素技術	目標・指標	成 果	達成度
①高信頼性診断技術開発	① 実用レベルの高信頼性診断を行う為の手法の策定及び診断データの種類、精度を明らかにし、高信頼性診断技術の検証を行う。	① 4種の構造健全性診断システムについて、実用レベルの診断を実現する診断手法とその信頼性を検証した。	① 達成
②高信頼性システム技術開発	② 光ファイバセンサの耐環境性試験、耐久性試験を実施して、高信頼な計測の検証を行い、システム小型化のための検討、試作、検証を行う。	② 光ファイバセンサの耐環境性、耐久性の試験を行って検証した。また、システム小型化の検討に着手し、試作を行って検証した。	② 達成
③センサ機能の拡張	③ 診断の信頼性向上につながるセンサ機能の拡張について検討し、実現の検証を行う。	③ 4種のシステムともに、センサ機能の拡張による診断信頼度の向上の試験を行って検証した。	③ 達成

4. 成果、目標の達成度(2/2)

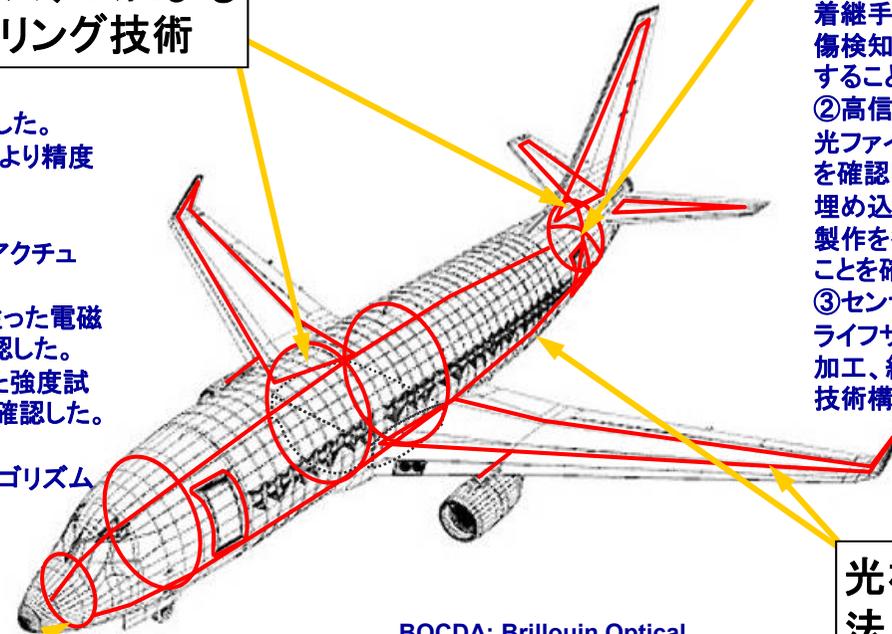
4つの構造健全性診断技術

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

- ①高信頼性診断技術開発
環境温度と損傷長さを同定できることを確認した。温度、歪を同時に付与した環境下で、補正により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
実環境を想定した環境試験により、センサ、アクチュエータの耐久性を確認した。
計測システムに対して、RTCA/DO-160Eに従った電磁適合性試験の一部を行い、その適合性を確認した。
光ファイバの埋め込み複合材供試体を用いた強度試験により、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)
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。

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

- ①高信頼性診断技術開発
FBGセンサや光ファイバを貼付または埋め込んだ複合材供試体を用いてBVIDレベルの衝撃損傷に対する検知試験を実施し、実機適用に必要な信頼性を有する目処が得られた。
実機相当の複合材構造や振動環境下においても衝撃損傷検知が可能であることを確認した。
- ②高信頼性システム技術開発
民間旅客機の複合材前胴構造を想定した実機適用構想を設定し、本構想に基づいて衝撃損傷検知システムを試作した。
振動環境下での自動衝撃検知を可能とするアルゴリズムの改良を行った。
FBGセンサ貼付部の耐久性試験を実施し、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おいて、損傷位置・サイズの推定が可能であることを確認した。



BOCDA: Brillouin Optical
Correlation Domain Analysis
光相関ブリルアン散乱計測

BVID: Barely Visible Impact Damage
目視困難な衝撃損傷

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

- 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、疲労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
光ファイバセンサ自動敷設装置を試作して敷設性を確認した。
埋め込み光ファイバの取出器具を試作して供試体製作を行い、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。

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

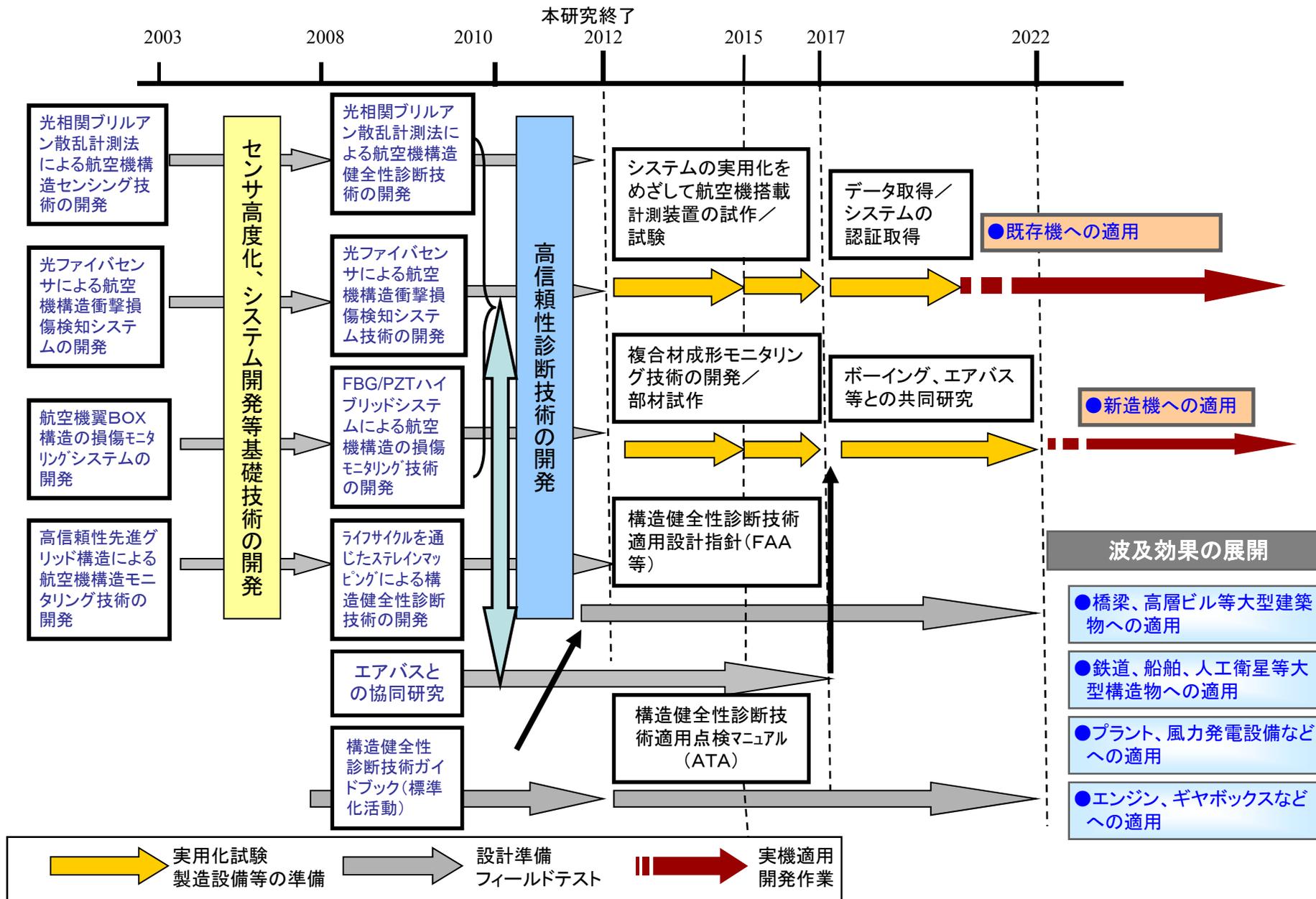
- ①高信頼性診断技術開発
BOCDAによる歪み分布変動から損傷進展を判定するアルゴリズムを開発した。また、垂直尾翼に光ファイバセンサを貼り付けて飛行実証試験を実施し、実運航環境下における計測性能を実証した。
- ②高信頼性システム技術開発
レーザ直接変調法による低コスト散乱計測法の計測速度向上につながる信号精度を向上した。
民間航空機に搭載可能なARINC600仕様にあった装置を試作し、耐環境性を有することを試験で確認した。
- ③センサ機能の拡張(複合材結合部の診断技術の開発・実証)
光ファイバセンサを埋め込んだ損傷検知試験を行い、複合材結合部の内部損傷検知感度を高める手法を確認した。

5. 事業化、波及効果(1/3)

1. 本開発の成果を基に、各計測装置の統合化を図り、航空機搭載用計測装置を試作し、データ取得を行って認証取得につなげる。
2. 当局(FAA*1等)による構造健全性診断技術レギュレーションやATA*2による点検マニュアルの整備状況が整い次第、まず、既存機への適用を図り点検作業の効率化を図る。
3. 複合材構造に光ファイバーを埋め込んで成形を行う際、モニタリングを行い、成形プロセス開発期間短縮、品質の安定化につなげる。運用時モニタリングも行えるのでライフサイクルモニタリングが行える高付加価値部品として納入可能となる。
4. エアバス等と連携を図り実用化を加速する。
5. AISC-SHM*3活動を通じ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努力する。
6. 運用時のデータ蓄積により革新的複合材構造設計技術の確立につながる。
7. 上述の動きとあわせ風力発電設備、橋梁等の大型建築物、人工衛星等への適用を推進する。

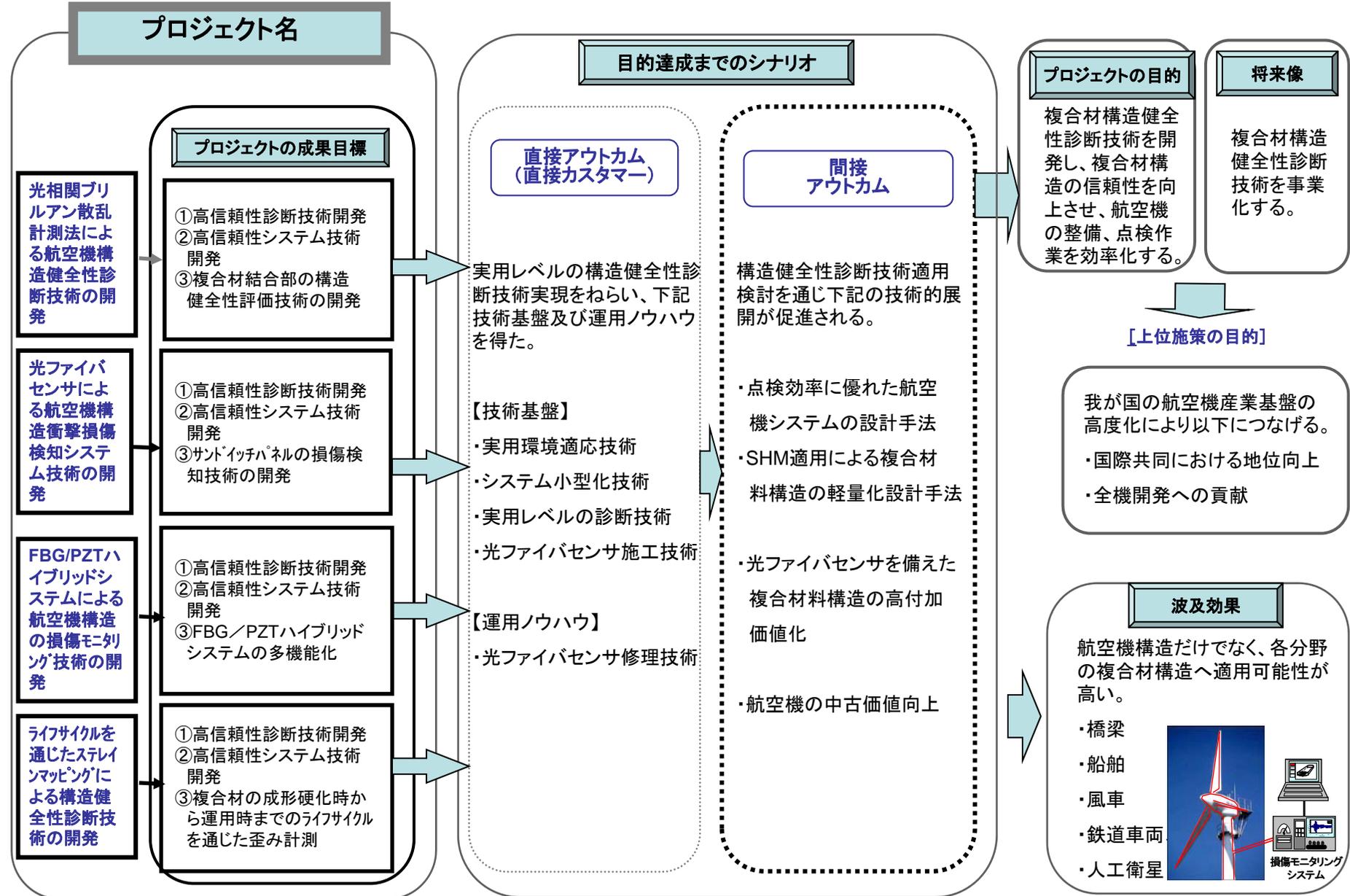
- * 1: FAA: Federal Aviation Administration 連邦航空局
* 2: ATA: Air Transport Association 航空運送協会
* 3: AISC-SHM: Aerospace Industry Steering Committee for SHM
構造健全性診断技術標準化準備委員会

5. 事業化、波及効果(2/3)



5. 事業化、波及効果(3/3)

プロジェクトのアウトカム(プロジェクトの成果が及ぼす効果等)



6. 研究開発マネジメント・体制等(1/2)

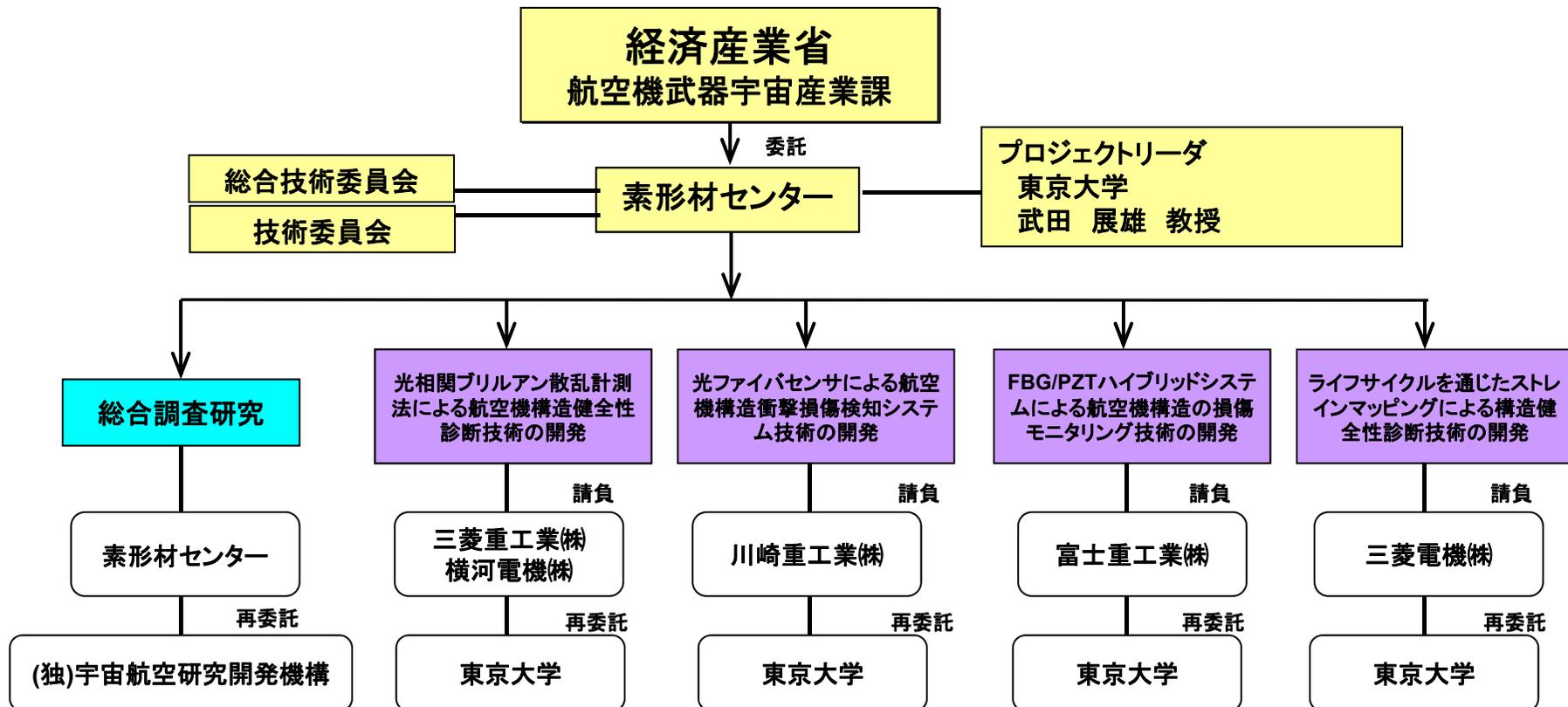
・平成20年度～24年度の5年計画で実施中である。

	H 2 0	H 2 1	H 2 2	H 2 3	H 2 4
複合材構造健全性診断技術開発 (H 2 0～H 2 4) ・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 ・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 ・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 ・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			
		高信頼性診断技術の開発			
				高信頼性診断システムの実証	

6. 研究開発マネジメント・体制等(2/2)

(平成20年度～24年度)

- ・素形材センターが経済産業省からの委託を受けて実施した。
- ・プロジェクトリーダーとして東京大学 武田展雄教授を選任した。
- ・5企業、1大学、1独法の連携により研究開発を推進中である。



7. 中間評価の結果

提 言	対 処 方 針
<p>我が国は材料技術に強みがあり、技術の応用範囲も広い。推進すべき分野である。複合材料関連技術では、日本の優れた複合材料技術を生かして、知的財産権保持または国際標準化によって、世界をリードする戦略をとるのが望ましい。我が国独自の技術として早期確立が望まれる技術については、事業化及び認証取得に向け、産学官の連携によるスピード感を持った取り組みが必要である。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 引き続き我が国の強みを一層強化すべく、取組みを推進してまいりたい。世界をリードしていくため、我が国からの規格策定の場への出席なども含め検討してまいりたい。 ○ 事業化及び認証取得を加速するため、産学官の連携等、適切な体制構築に努めてまいりたい。

評価小委員会のコメント	対 処 方 針
<p>航空機用の素材等として先進的なスペックの素材開発を行うに際しては、提案公募型のみならず、計画研究型の開発手法が適していることもあり得ると思われるので、より良い研究開発メカニズムのあり方についても検討することが望ましい。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 先進的なスペックの素材開発を行うに際して、より効率的・効果的に進めるための研究開発メカニズムのあり方についても検討して参りたい。

目標・成果 個別 資料

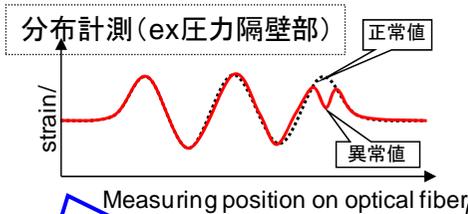
目標・成果(1/9)

【平成20年度～平成24年度個別成果概要】

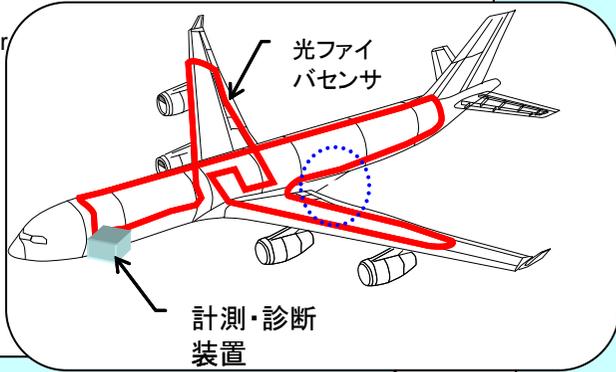
I. 光相関ブリルアン散乱計測法(BOCDA)による航空機構造健全性診断技術の開発

●BOCDA-SHM適用構想

歪み値の変動による損傷検知技術の開発。
BOCDA計測による分布歪み、動的歪み出力の変動から、航空機構造の損傷発生を診断する技術を開発する。



このグラフはひずみ分布の模式図を示している。
横軸は光ファイバセンサ長さすなわち計測位置、
縦軸は各計測位置でのひずみを示している。
ひずみ分布の変動から供試体の損傷状態を判定できることを示している。

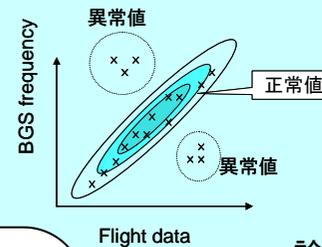


●複合材結合部診断技術開発



- 複合材構造のクリティカルポイントの一つである、複合材結合部の損傷診断技術を開発する。
 1. BOCDA計測に対応した光ファイバセンサ埋込み技術開発
 2. BOCDAによる複合材損傷診断技術を開発する。

●高信頼性診断技術開発



診断アルゴリズム概念図

- BOCDA計測データから構造健全性を診断するためのアルゴリズムを開発し、診断信頼性向上、診断省力化を目指す。

●高信頼性システム技術開発 (計測システム開発)



- 運航中のセンサ温度変動を補償できるBOCDA計測技術を開発する。
- 航空機に上記技術を反映した航空機搭載型計測装置を試作する。

(センサシステム開発)



光ファイバ機能試験

- 運航中に光ファイバセンサが受ける環境変動(温度、湿度、燃料浸漬、疲労荷重など)に対して十分な耐久性を有していることを確認する。

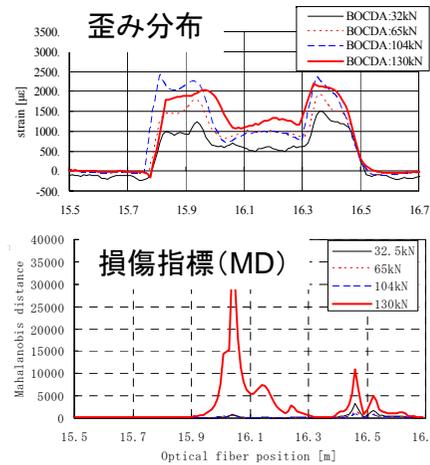
目標・成果(2/9)

【平成20年度～平成24年度個別成果概要】

I. 光相関ブリルアン散乱計測法(BOCDA)による航空機構造健全性診断技術の開発

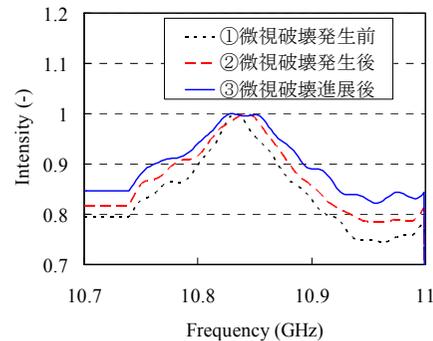
●高信頼性診断技術開発

- BOCDA計測による歪み分布変動から損傷進展を判定するアルゴリズムを開発した。



●複合材結合部診断技術開発

- BOCDA計測による複合材結合部の損傷検知確率の高い部位埋込み位置を見出した。



●高信頼性システム技術開発 (計測システム開発)

- 航空機搭載型BOCDA計測装置を試作した。
 - 温度補償機能
 - ARINC600適用サイズ
 - 振動、衝撃、温度環境耐久性及び計測精度を確認、飛行実証試験によりそれを実証した。



飛行実証試験状況

(センサシステム開発)

- 運航中に光ファイバセンサが受ける環境変動(温度、湿度、燃料浸漬、疲労荷重など)に対して十分な耐久性を有していることを確認した。



環境付与状況

評価環境	結果
温度(高温/低温)環境	○
湿度環境	○
温水環境	○
燃料環境	○
作動油環境	○
温度サイクル環境	○
高圧/低圧環境	○
疲労環境	○

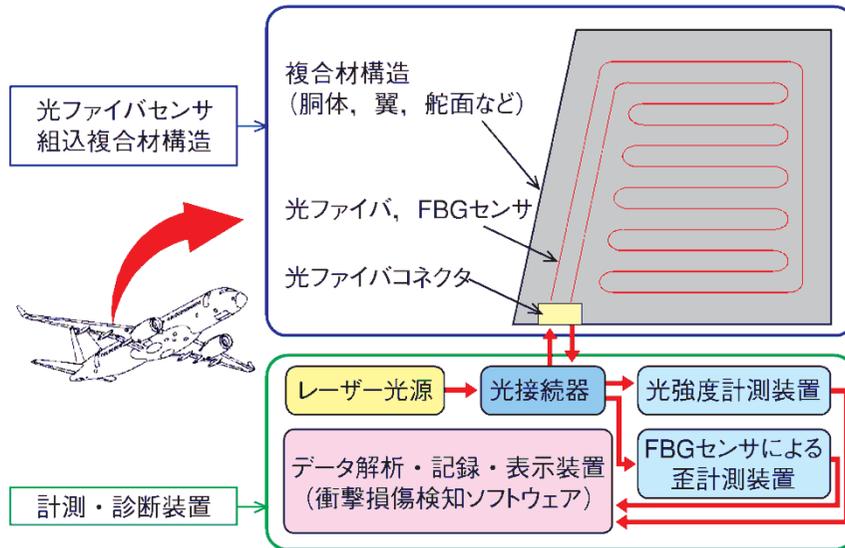
目標・成果(3/9)

【平成20年度～平成24年度個別成果概要】

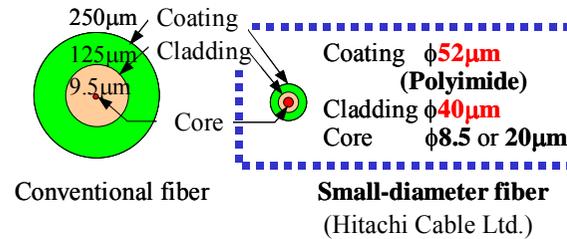
Ⅱ. 光ファイバセンサによる航空機構造衝撃損傷検知システム技術の開発

航空機複合材構造を対象とした衝撃損傷検知システム技術を開発する。

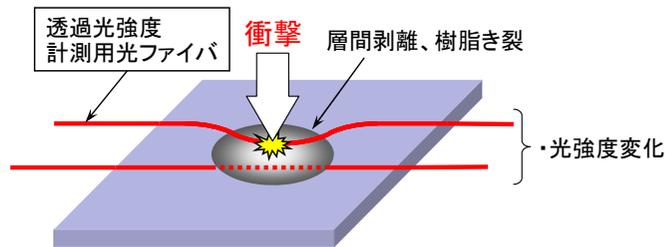
- ・システムの信頼性・耐久性の実証
- ・実機適用に向けてシステムを高度化
- ・サンドイッチ構造へ適用するための要素技術を開発



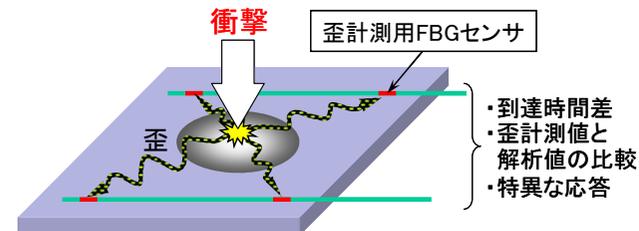
- ・複合材構造に組み込んだ(埋込または表面貼付) 光ファイバセンサからの情報により、衝撃損傷を検知し、その位置と損傷程度を診断して表示
- ・埋込場合は細径光ファイバを適用



衝撃損傷検知システム



(a) 透過光強度計測による手法



(b) FBGセンサでの歪計測による手法

主な衝撃損傷検知手法

目標・成果(4/9)

【平成20年度～平成24年度個別成果概要】

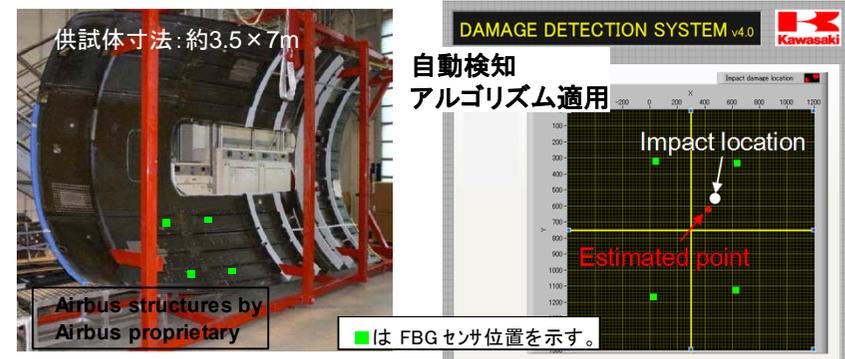
Ⅱ. 光ファイバセンサによる航空機構造衝撃損傷検知システム技術の開発

①高信頼性診断技術開発

- ・FBGセンサや光ファイバを貼付または埋め込んだCFRP供試体を用いてBVIDレベルの衝撃損傷に対する検知試験を実施し、実機適用に必要な信頼性を有する目処が得られた。
- ・実機相当の複合材構造や振動環境下においても衝撃損傷検知が可能であることを確認。

②高信頼性システム技術開発

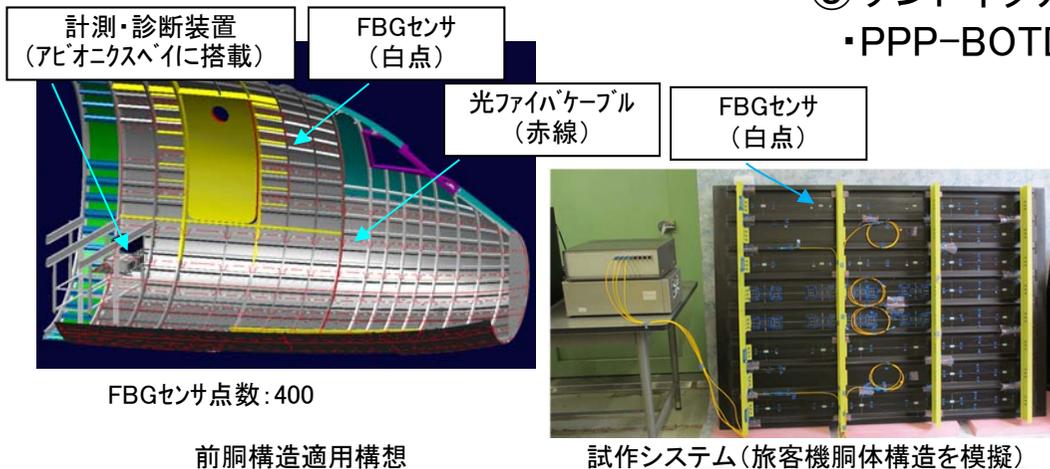
- ・衝撃損傷検知システム実機適用構想を設定し、構想に基づいたシステムを試作した。
- ・貼付FBGセンサについて、温度、湿度、気圧、温水・燃料・溶剤浸漬等に対する耐久性を確認。
- ・細径光ファイバの自動実装用の貼付ユニット、埋込光ファイバ修理装置を試作・評価した。埋込光ファイバの修理方法を特許出願。



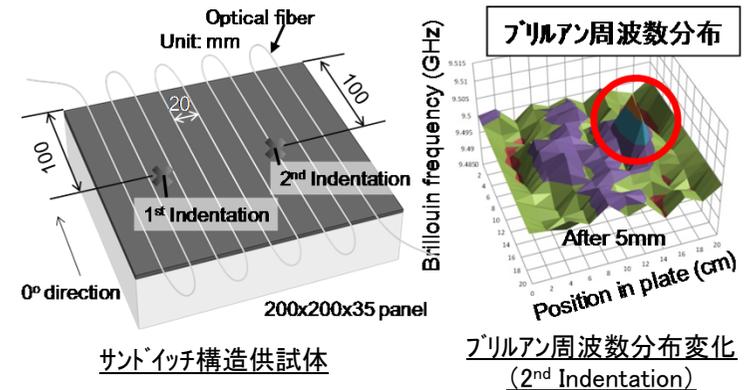
Composite fuselage panel供試体及び衝撃損傷検知結果

③サンドイッチ構造の衝撃損傷検知手法設定

- ・PPP-BOTDA適用で損傷検知可能であることを示した。



衝撃損傷検知システム実機適用構想と試作システム



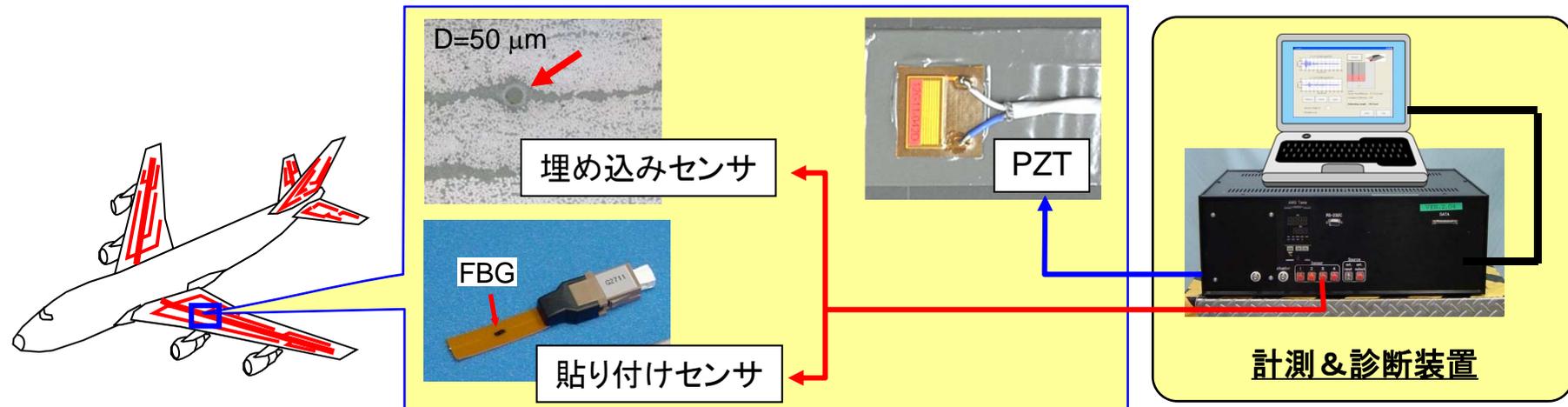
サンドイッチ構造の押込荷重による損傷検知試験

目標・成果(5/9)

【平成20年度～平成24年度個別成果概要】

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

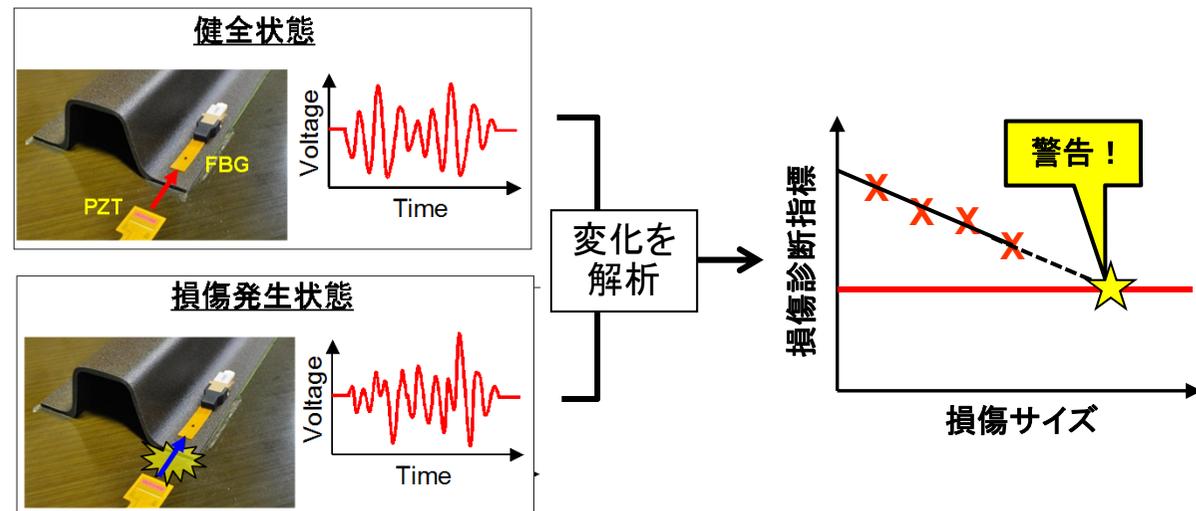
- ◆ 複合材構造の接着剥がれを検知可能な高信頼性損傷モニタリングシステムを開発する。
- ◆ 航空機運用環境下でも損傷診断能力が低下しない耐久性を有することを示す。
- ◆ 機能拡張のため、システム構成を変えずに、衝撃検知が可能なことを示す。



損傷診断の原理:

超音波ラム波の伝搬経路に、損傷等が発生すると、超音波ラム波の振幅や時間履歴が変化する。

損傷発生前後の超音波ラム波の変化を解析し、損傷サイズと損傷診断指標との関係を導出することにより、損傷診断を実施する。



目標・成果(6/9)

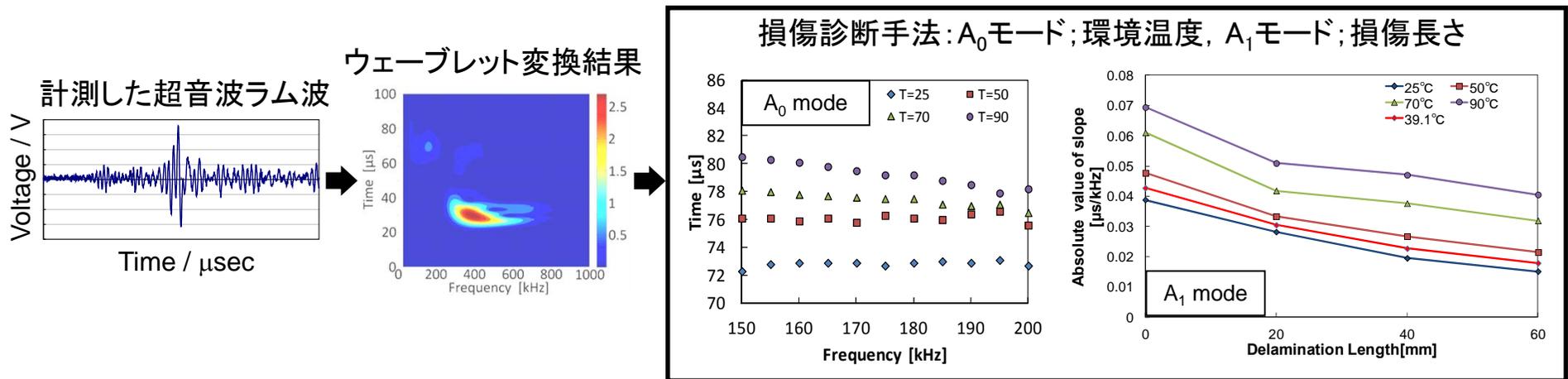
【平成20年度～平成24年度個別成果概要】

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

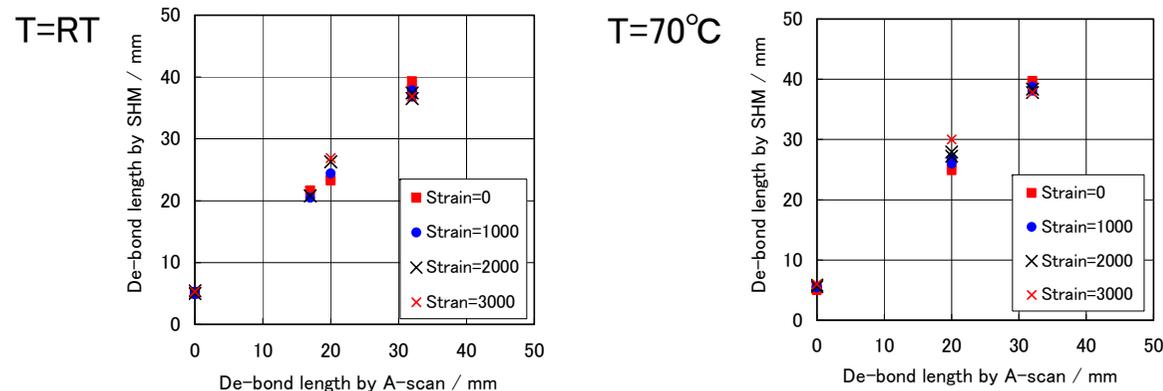
広帯域ラム波を用いた診断精度の高精度化

- ✓ 広帯域超音波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することにより、 A_0 、 A_1 モードの環境温度／損傷サイズ依存性を把握し、高精度な損傷診断が可能となる手法を確立した。



狭帯域ラム波を用いた診断精度の信頼性向上

- ✓ 航空機搭載を想定した環境条件下での評価試験の結果、温度とひずみを同時に付与した環境下(温度RT, 70°C、ひずみ0~0.3%)でも、開発した補正法を適用することにより、接着剥がれ長さを現行非破壊検査法と同等のレベルで診断できることを確認した。



目標・成果(7/9)

【平成20年度～平成24年度個別成果概要】

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

2. 高信頼性システム技術開発

FBG/PZTセンサシステムの耐環境性評価

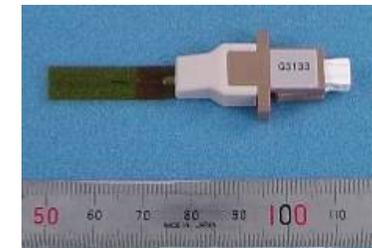
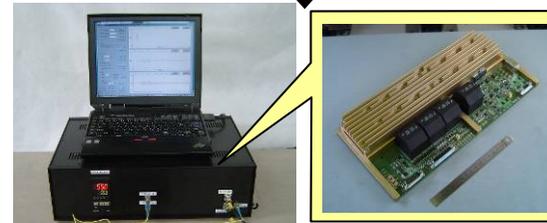
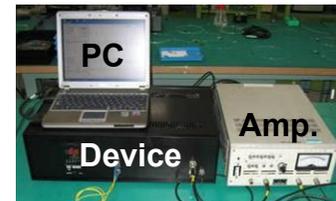
- ✓ 実機搭載を想定した仕様のシステムにおいて、RTCA/DO-160を考慮した環境試験を実施した。実施した環境(高温/低温曝露, 高圧/低圧曝露, 温水/作動油/燃料浸漬, 湿度雰囲気, 温度変化)においてシステムの性能劣化は確認されなかった。

埋め込み光ファイバセンサの複合材への影響評価

- ✓ 光ファイバセンサを埋め込んだ炭素繊維複合材のクーポン試験を実施し、機械的特性への影響の有無を評価した。その結果、細径光ファイバの埋め込みは、複合材の機械的特性に影響しないことを確認した。なお、このような系統的な評価は、世界的に見ても実施されておらず、光ファイバセンサの実用に向けた非常に有益な成果と考えられる。

航空機搭載が可能なシステムの開発

- ✓ 電源供給装置と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。
- ✓ 小型化し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。
- ✓ 取扱性に優れるコネクタ付光ファイバセンサの開発を行った。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。



コネクタ付
光ファイバセンサ

3. 衝撃検知技術の開発

- ✓ 損傷診断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進め、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。

複合材パネルにおける衝撃位置同定結果
(衝撃付与位置を変えて3ケースの試験を実施)

	ケース1	ケース2	ケース3
衝撃付与点 (mm,mm)	(175, 150)	(325, 150)	(325, 250)
同定結果 誤差 (mm,mm)	(208, 169) (+33, +19)	(340, 131) (+15, -19)	(294, 229) (-31, -11)

目標・成果(8/9)

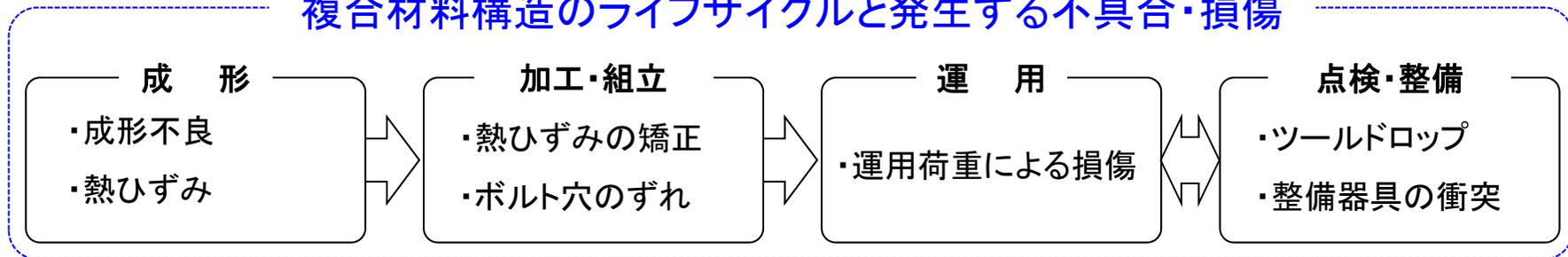
【平成20年度～平成24年度個別成果概要】

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

研究概要

多点光ファイバセンサネットワークにより、航空機複合材料構造に発生するひずみをその一連のライフサイクルにおいてモニタリングし、構造健全性を診断する技術を開発

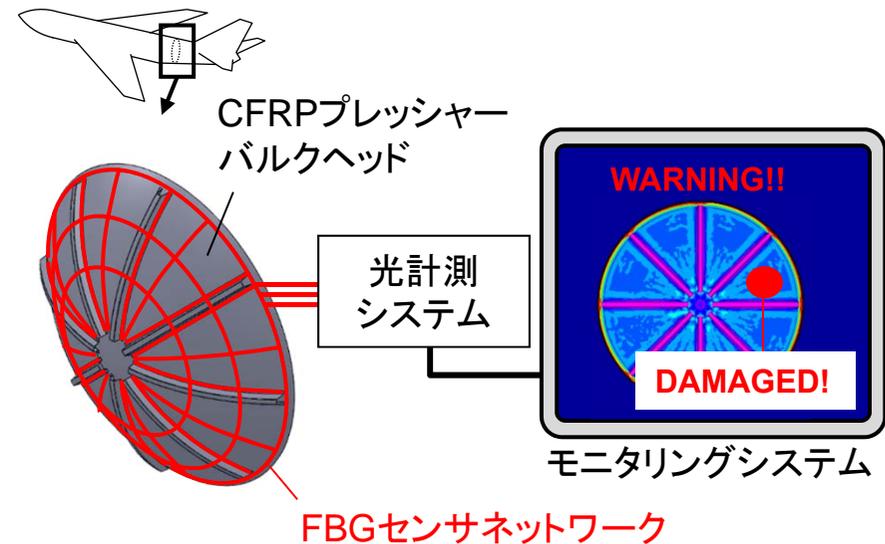
複合材料構造のライフサイクルと発生する不具合・損傷



CFRP構造にFBG^{*1}センサネットワークを実装し、一連のライフサイクルにわたりひずみを計測（ストレインマッピング）



不具合・損傷をひずみ変化から検出



*1: Fiber Bragg Grating

目標・成果(9/9)

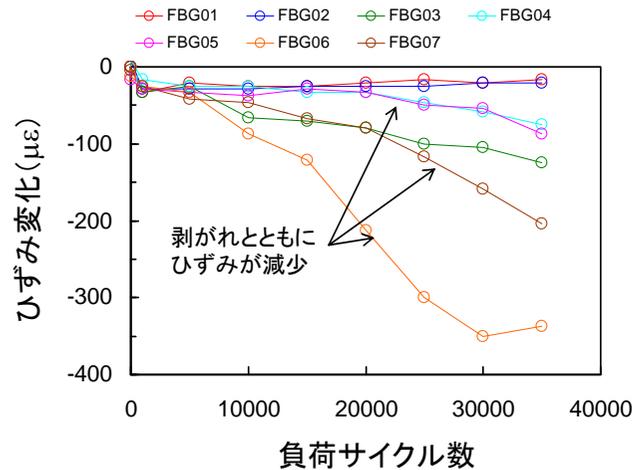
【平成20年度～平成24年度個別成果概要】

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

成果概要

①高信頼性診断技術開発

継手構造・補修構造に発生する疲労損傷検知能力を確認

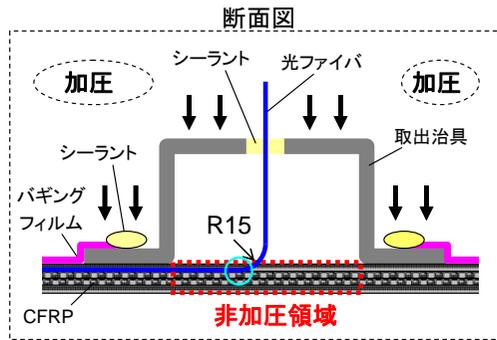


②高信頼性システム技術開発

ライフサイクルモニタリングのための光ファイバ実装技術を開発



光ファイバ接着自動敷設技術



成形時の光ファイバ取出し技術

③ライフサイクルを通じた高信頼性診断技術開発

CFRPプレッシャーバルクヘッドに光ファイバセンサ56点を埋込み、成形、加工、組立、運用にわたるライフサイクルひずみを計測

⇒ 光ファイバセンサのひずみ計測能力を確認

