

FRPの耐久性評価とヘルスマニタリング技術

Durability Evaluation of FRP and Health Monitoring Technology

武田 展雄

Nobuo TAKEDA

東京大学 大学院 新領域創成科学研究科 先端エネルギー工学専攻 (工学部 航空宇宙工学科 兼任)

〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1

Based on in-situ observation using optical, scanning electron, and/or scanning acoustic microscopes with loading devices, microscopic deformation and damage has been quantified in our laboratory. Moreover, theoretical models have been established for damage evolution. These efforts can provide the methodology for the durability evaluation or the damage tolerance design of composites and the health monitoring. In Japan, a new "R&D for Smart Material/Structure System (SMSS)" project started in October 1998 as one of the Academic Institutions Centered Program supported by NEDO (New Energy and Industrial Technology Development Organization), Japan. The author acts as a group leader in the structural health monitoring group, which consists of 10 research organizations. Our group is currently developing a health monitoring system, which conducts a real-time damage detection and self-diagnosis as well as damage control in light-weight composite structural systems. The research themes include: (1) development of high-performance sensor system technology with newly-developed sensors, (2) development of a damage detection and self-diagnosis system for structural integrity based on micro-mechanical damage identification, and (3) development of application technology for model structures. Some of recent results are summarized for structural health monitoring in composite materials and structures in our on-going project.

Keywords: FRP, Durability, Structural Health Monitoring

キーワード：繊維強化プラスチック複合材料、耐久性、構造ヘルスマニタリング

1. はじめに

複合材料システムは、軽量化、省エネルギー化を目指す分野の構造材料として多くの適用が進められてきた。しかし、従来までの2次構造用部材から主たる荷重を受け持つ1次構造部材としての使用を含め、より過酷な環境下での使用が要求されてきている。このような状況下で、複合材料構造システムの構造健全性 (Structural Integrity)、耐久性 (Durability) を評価し、かつ保証する方法の確立が、構造システムの安全性・信頼性を確保し、設計・製造からメンテナンス・修理までのライフサイクルコストを低減するために求められている。

以上の要求を満たすために現在必要とされる研究開発は、2つに集約できよう。すなわち、(1) 微視損傷

発生・進展プロセスの定式化と破壊確率・残存寿命などの『耐久性評価』、および、(2) 運用中の構造システム中の損傷の種類、位置、サイズを精密に同定し、損傷発生・進展メカニズムとセンサ情報の相関性から、構造健全性をリアルタイムで自己検知・診断、さらには損傷制御を行う『ヘルスマニタリングシステムの構築』である。

2. 損傷許容設計を目指した複合材料システムの耐久性評価

繊維強化プラスチック複合材料(FRP)の耐久性評価の重要性は、NASA, DARPA 等もスポンサーである、1999年7月にベルギーで開催された DURACOSYS 99 (4th Int. Conf. on Progress in Durability Analysis of

Composite Systems)でも強調されていた。とくに、次世代超音速民間輸送機用の耐熱性に優れた炭素繊維強化高分子基複合材料(CFRP)の開発が活発化しているが、耐久性に関する3つの課題、(1)長期耐久性試験、(2)加速試験、(3)寿命推定方法、を中心に研究開発が進められている。日本においても、日本航空宇宙工業会において技術的検討が行われ、研究体制の整備が進められている。ポリイミドなど耐熱樹脂を母材とする炭素繊維強化複合材料の研究開発は日本が技術開発能力を十分発揮できる分野であり、欧米からの期待も高い。また、土木建築分野でも FRP の湿熱環境下での劣化特性の把握と残存寿命の評価は、FRP の応用の鍵を握っている。

筆者らは、複合材料の新規材料開発と損傷許容設計を結びつけるための『複合材料の実験マイクロメカニクス』を提唱してきた¹⁾。すなわち、複合材料製造者は繊維、マトリックス、繊維・マトリックス界面の製造プロセッシングに日夜数々の工夫を凝らし、複合材料構造設計者は主として巨視的力学特性を得るため、詳細な力学的解析による剛性、変形、破損、破壊設計を行っているが、両者の間にはかなりの隔たりがあり、相互理解が不足している。これは、本来直径 10 μ m 程度の繊維で強化された現実の複合材料の微視的破壊プロセスやメカニズムが明らかにされていないためである。現実の複合材料の繊維、マトリックス、繊維・マトリックス界面(層)、または積層板中の各プライが負荷過程にいかに変形し、損傷していくかを可視化する実験マイクロメカニクスの実現によってのみ、現実の微視的破壊プロセスやメカニズムが解明できるし、より現実合う微視的モデリングや理論解析法も構築できるであろう(図 1)。高靱性高分子基複合材料の開発がかなり進んできている現在、この実験マイクロメカニクス法が確立できれば、まず、初期損傷発生を抑制する材料設計の努力により、高信頼性材料開発へのフィードバックの実現を可能とするであろう。また、微視的損傷発生・進展プロセスの理解は、従来までの衝撃後圧縮(Compression After Impact, CAI)強度や初期損傷発生強度(または、歪)による設計から、損傷許容設計の構築へのフィードバックの実現を可能とするであろう。

現在までに、高靱性高分子基複合材料の開発により、CAI 限界歪は 0.4-0.6%程度にまで上昇してきた

のに対し、積層板の初期最弱層破損(トランスバースクラック、90°層クラック)発生歪は 0.5-0.7%程度(図 2)と近接していることから、後者が先進 CFRP 構造の設計因子になりつつある。先進 CFRP 積層板構造の耐久性を評価・保証するには、トランスバースクラック発生、進展、層間剥離発生・進展、繊維破断による最終破断に至るまでの破損プロセス(図 3)の定式化が必要である²⁻¹²⁾。従来はこの定式化が不十分なために、いかなる損傷発生もないように安全率を用いた最大使用可能制限歪により設計が行われている。

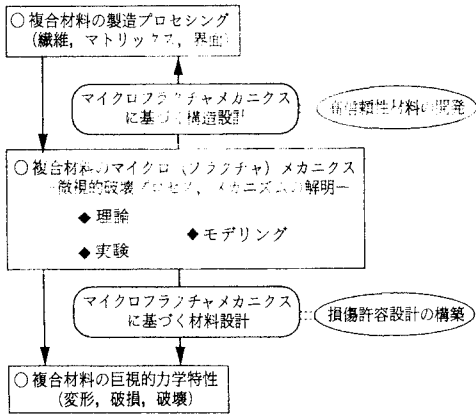


図 1 複合材料の実験マイクロメカニクス

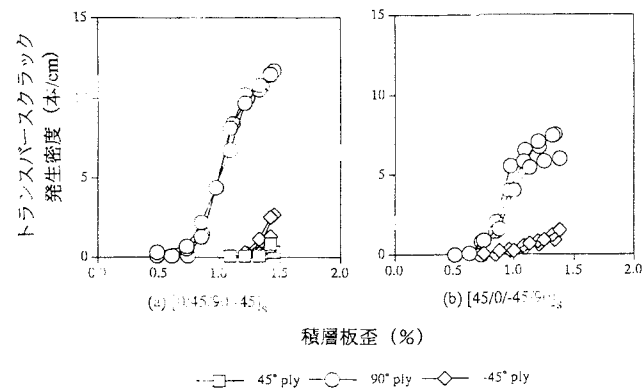


図 2 T800H/3900-2 CFRP 擬似等方性積層板のトランスバースクラック発生密度

トランスバースクラック、層間剥離の発生・進展の負荷中の、軟 X 線、超音波顕微鏡によるその場微視観察に基づく測定例を各々図 4、図 5 に示す。また、損傷進展のキーとなる層間変形・破損プロセスの In-situ SEM/微小細線法による負荷中その場微視観察と理論解析結果¹³⁾との比較を図 6⁷⁾に各々示す。破損プロセスの定式化の成功例を図 7、図 8²⁻⁴⁾に示す。さらに一般的な、任意の力学的、熱的負荷環境下での擬似等方性積層板中のトランスバースクラック、層間剥離

の発生・進展プロセスの定式化にもある程度の目途が付きはじめている¹⁴⁻¹⁶⁾。

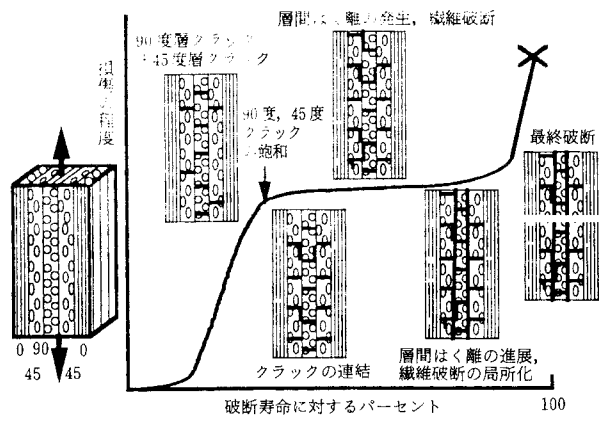


図3 複合材料積層板の繰返し負荷サイクル中の
損傷発生／進展プロセス

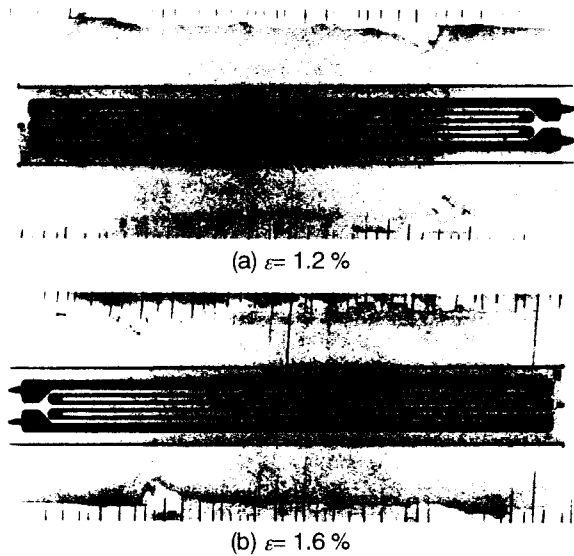


図4 軟X線による擬似等方性 CFRP 積層板
(IM600/PIXA-M)の損傷観察例

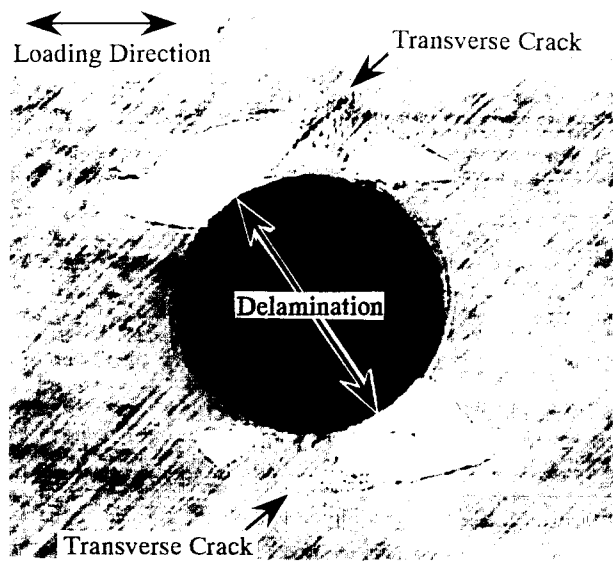
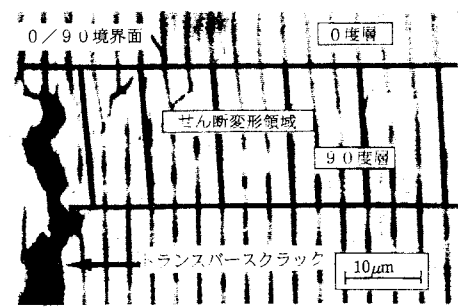
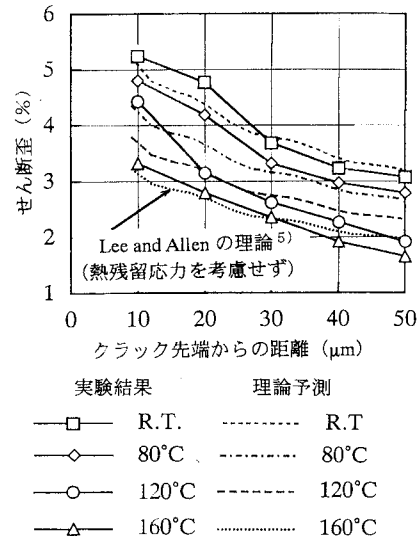


図5 高解像度超音波顕微鏡による擬似等方性 CFRP 積層板
(T800H/3631)の円孔周りの負荷下その場損傷観察例



(a) In-situ SEM／微小細線法による実験結果



(b) 実験結果と予測解析結果の比較

図6 T800H/3631 CFRP 直交積層板のトランスバース
クラック先端近傍の層間せん断変形

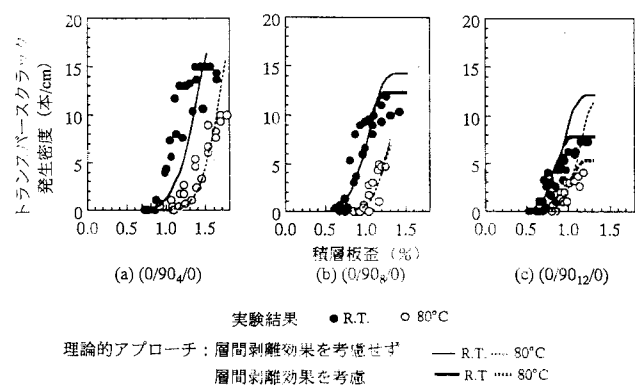
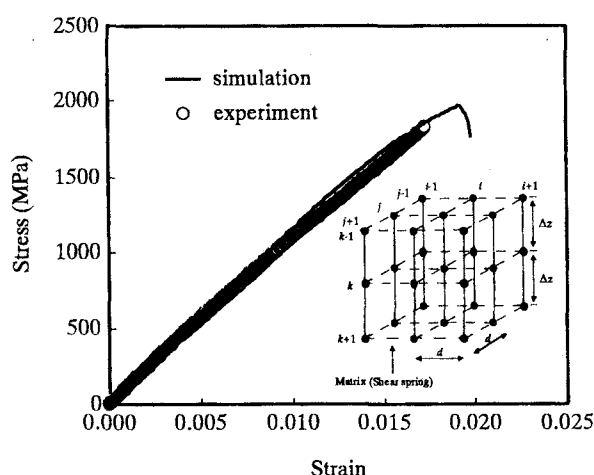
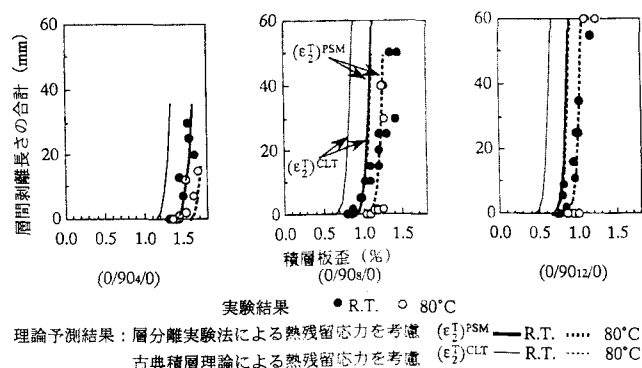


図7 T800H/3631 CFRP 直交積層板のトランスバースクラッ
ク発生密度の実験結果と予測解析結果

また、繊維破断を伴う最終破断強度の予測も実験結果をよく説明できるレベルに達しつつあり¹⁷⁻²²⁾、長期耐久性評価のための手段が徐々に整いつつある。樹脂の塑性変形、繊維・樹脂間剥離を考慮した Shear-lag 理論に基づく繊維応力伝達をもとに、繊維破断の 3 次元モンテカルロシミュレーションによる最終破断までに至る応力-歪線図の予測結果を、実験結果とと

もに図9に示す²²⁾。



3. ヘルスモニタリング技術の現状

以上の耐久性評価方法が確立されてくると、原理的には、構造が受ける歪または荷重の時間履歴が連続モニターできれば、構造の破壊確率・残存寿命などの予測が可能となる。このため、歪、温度または荷重の時間履歴を連続的にモニターするための、光ファイバセンサシステムを中心とするモニタリングシステムが開発されてきた。さらに進んで、損傷発生・進展をモニターする目的で、光ファイバセンサ、形状記憶合金、統合型 AE センサ、などのヘルスモニタリング技術も提案されつつある。これも NSF, DARPA 等がスポンサーとなり、1997 年 9 月、1999 年 9 月に米国スタンフォード大で開催された Int. Workshop on Structural Health Monitoring では、なかなか実用に結びつかないスマート材料・構造よりむしろ、応用上極めて重要で実用化を目指した構造ヘルスモニタリング

技術の研究開発へと研究対象が移りつつあるように感じられた。

日本においても、1998 年度より 5 年間の予定で通産省工業技術院の大学連携型産業技術開発制度『知的材料・構造システムの研究開発』が、大学での基礎研究技術を土台に、産業界との共同研究プロジェクトとして、(財)次世代金属・複合材料研究開発協会(RIMCOF)の取りまとめのもとに開始された。この中の「ヘルスモニタリング技術の研究開発」グループでは 10 研究機関の研究者が、筆者がグループリーダーを務める東京大学の集中研究室に集結し、効率良く研究開発を進めている。構造システムのリアルタイム自己検知・診断、および損傷制御を行うヘルスモニタリングシステムを開発することを目的とし、次のような(1)～(3)の3段階からなる研究開発を行っている。

(1) 高性能センサシステム技術の開発

(a) 光ファイバセンサシステム技術の構築：

- (a-1) 光ファイバセンサ歪・温度・検知技術の開発
- (a-2) 光ファイバセンサ損傷検知システムの開発
- (a-3) 光ファイバセンサ複合化技術の開発

(b) 光ファイバセンサの合目的改質：

- (b-1) 細径センサの開発
- (b-2) コーティングの改質

(c) 形状記憶合金線・箔を用いた損傷制御型複合材料システムの開発：

- (c-1) 残留応力制御によるトランスバースクラック発生抑制技術の開発
- (c-2) トランスバースクラック進展抑制技術の開発
- (c-3) 層間剥離発生・進展抑制技術の開発

(d) 最大値記憶型スマートパッチ技術の開発：

- (d-1) 多種類繊維ハイブリッドパッチの開発
- (d-2) 繊維・マトリックス樹脂改質技術の開発
- (d-3) 判断および通信機能をもつスマートパッチの開発

(e) 光透過型・光反射型損傷センサシステムの開発

(f) 高分解能・耐ノイズ性 AE センサ統合システムの開発

(2) 構造健全性自己診断・損傷制御技術の開発

(a) センサ出力情報と力学量・物理量変化の相関性評

価法の確立：

(a-1) 力学量・物理量変化と光ファイバセンサ出力情報の相関性評価法の確立

(a-2) 力学量・物理量変化と電気抵抗変化情報の相関性評価法の確立

(b) 損傷発生・進展メカニズムとセンサ出力情報の相関性評価法の確立：

(b-1) 損傷発生・進展メカニズムとセンサ出力情報の相関性の実験定量評価

(b-2) 損傷発生・進展メカニズムとセンサ出力情報の相関性の理論予測解析評価

(c) 構造健全性自己診断・損傷制御システムの構築

(3) モデル構造、部分実構造への適用化技術の開発

(a) 航空宇宙用 CFRP 機体構造システム：

(a-1) 補強平板（光ファイバセンサ）－静的負荷、繰返し負荷の場合

(a-2) 補強平板（光ファイバセンサ）－衝撃負荷の場合

(a-3) 補強平板（形状記憶合金）

(a-4) 補強円筒シェル構造

(b) 人工衛星機体コンポーネント

(c) 高速車両用荷重支持体構造

(d) 高層建築構造

上記の研究開発には、東京大学をリーダーに、日立電線、川崎重工業、三菱重工業、三菱電機、清水建設、日立製作所、アエロスパシアル・マトラ、富士重工業、東レ、ファインセラミックスセンターが図 10 に示す個別の目標を達成すべく努力すると共に、構造ヘルスモニタリング技術に関する各種要素技術を具体的に応用しつつある。また、ヘルスモニタリング技術に留まらず、さらにスマートマニュファクチャリング技術、アクティブ・アダプティブ構造技術、アクチュエータ素子開発を統合した航空宇宙機胴体デモンストラータも計画中である。具体的な成果については、RIMCOF が主催する「知的材料・構造システム」シンポジウム²³⁾で公表されている。その主な成果を以下にまとめて示す。

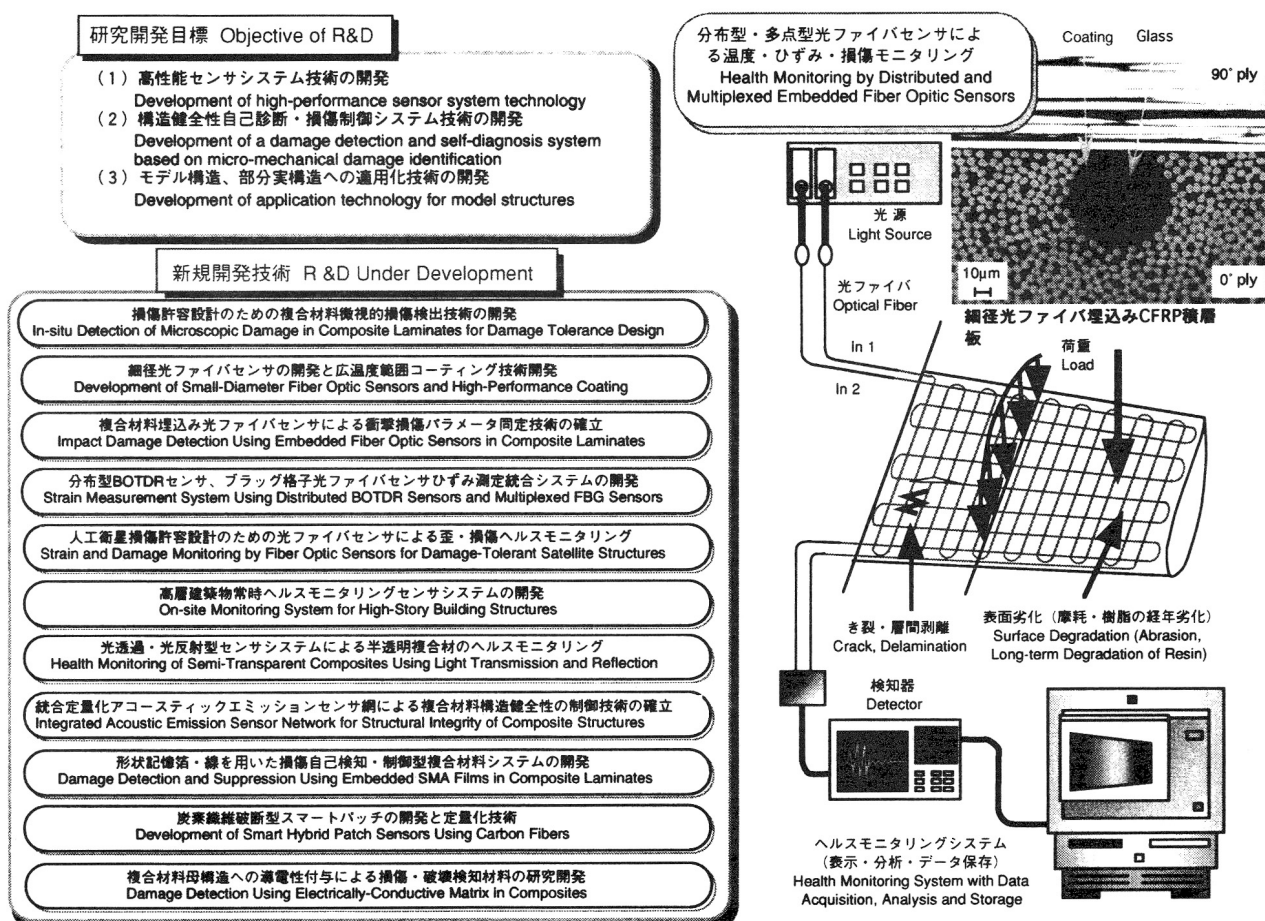


図 10 『知的材料・構造システムの研究開発』プロジェクトにおける「ヘルスモニタリング技術の研究開発」

4. 構造ヘルスマニタリンググループの研究成果

4.1 埋込み FBG センサによる CFRP 積層板中のトランスバースクラックの検出

光ファイバセンサはその軽量性、高強度、小サイズ、柔軟性などの特徴をもつ優れたセンサであり、材料表面あるいは内部に埋込むことにより、歪や温度、クラックを測定する研究が行われている²⁴⁾。しかし、複合材料積層板の損傷として特徴的な破損モードであるトランスバースクラックや層間剥離の検出に直接応用した研究は少ない。筆者らは、これまで蓄積してきた複合材料中の微視的損傷発生・進展プロセスの基礎研究を土台にして、複合材料積層板中に FBG(Fiber Bragg Grating)光ファイバセンサを埋込み、トランスバースクラックの検出への応用を試みている。FBG センサは、広帯域レーザ光を入射させた時、周期的に屈折率の高い格子をもつ FBG センサゲージ部（通常 10mm 程度）で生じるブラッグ回折光の波長が歪によりシフトする現象を利用して歪または温度を測定するものであるが、ここでは 90° 層クラック発生に伴うゲージ部の不均一な歪を検知することに用いる²⁵⁾。

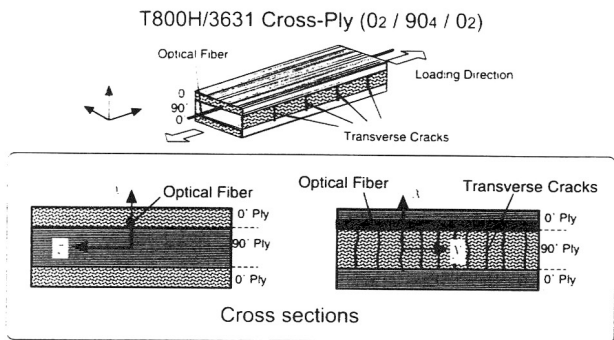
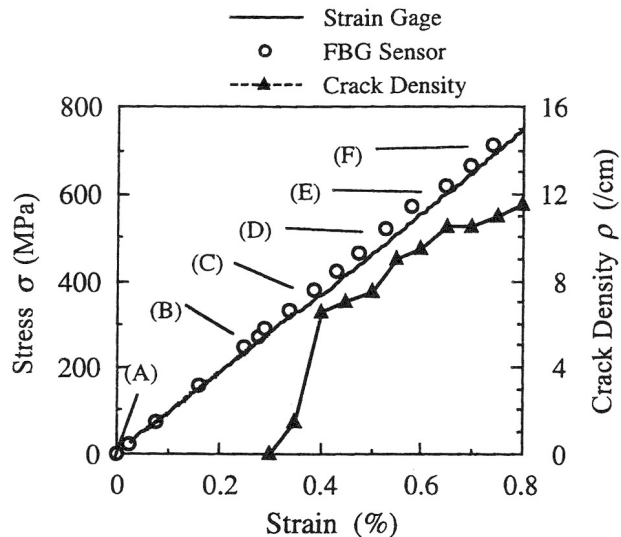
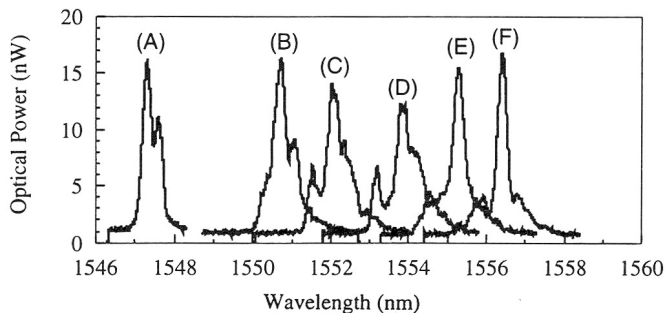


図 11 FBG センサ埋込み試験片

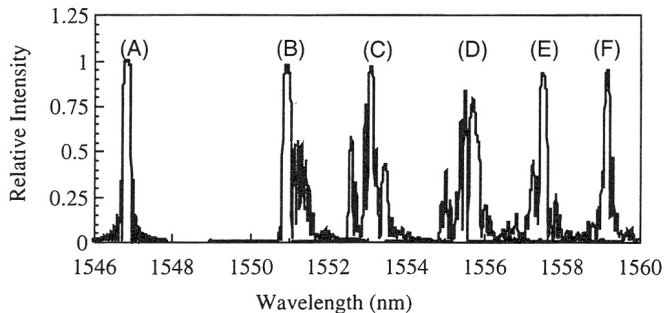
積層構成が $[0_2/90_4/0_2]$ の CFRP 直交積層板の 0°層中に、90°層に隣接するように FBG センサを埋め込んだ（図 11）。準静的引張り負荷をかけながら、反射光スペクトルを光スペクトラムアナライザで測定すると同時に、歪ゲージからの歪 ϵ を、さらにレプリカ法を用いて 90°層クラック密度 ρ を測定した（図 12a）。測定結果（図 12b）によれば、歪が増加するにつれて波長がシフトしているのがわかる。また、90°層クラックが発生するとスペクトル形状が大きく乱れると共に最大ピーク値が低下し、スペクトルの幅が広がっている。クラック密度が飽和すると、再びピークが 1 個になり、細い形状になっていることが確認される。



(b) 応力-歪、クラック密度-歪線図



(c) 反射光波長スペクトル分布の実験結果



(d) 反射光波長スペクトル分布の理論解析結果

図 12 各負荷過程での FBG センサ反射光波長スペクトル分布

測定されたスペクトル形状の変化は、90°層クラックの発生に伴う 0°層中の歪分布によるものと考えられる。そこで、そのスペクトル形状変化を確認するため、理論的にスペクトルのシミュレーションを行った（図 12c）。まず、実験から得られたクラック間隔を用い、MaCartney の解析式²⁶⁾から 0°層中の荷重負荷方向の歪分布を求め、その歪分布によって生じる FBG の屈折率分布とグレーティング周期分布を計算する。次に、モード結合理論と伝達行列法によって、反射光のスペクトルを計算する。測定された 90°層クラックの発生に伴うスペクトル形状の変化が理論解析により、

ほぼ再現されている。実験結果では、クラック密度が 7/cm の付近から急激にスペクトル幅が大きくなっているが、計算結果では、クラック発生初期からスペクトル幅が増加していることがわかる。これは、実験では埋込みに伴う熱残留応力に起因して、埋込み直後にすでに 2 つのピークが現れ、スペクトル幅が広がっているためである。しかし、計算結果を考慮すると、FBG センサをうまく埋込むことができれば、スペクトル幅の測定によってトランスバースクラック発生の検知が可能であることがわかる。さらに、下記の細径 FBG センサを用いれば、さらに実用的な検出が可能である²⁷⁾。

4.2 細径光ファイバセンサの開発

厚さ 125 μ m の CFRP プリプレグ中に容易に埋込み可能な細径（クラッド直径 40 μ m、コーティング直径 52 μ m）光ファイバセンサを世界で初めて開発することに成功した。この細径光ファイバは、通常径（クラッド直径 125 μ m）の光ファイバとほぼ同等の力学的特性を有することに加え、細径であるため 1 枚のプリプレグの繊維方向に埋込まれた場合には、埋込みによる力学的特性の低下はほぼ無視できることに特徴がある²⁸⁾。図 13 からわかるように、埋込み時に、通常径光ファイバの周りに樹脂過多の領域が存在するのに対し、細径光ファイバの周りには樹脂過多の領域は見られず、炭素繊維がきれいに取り囲んでいる。

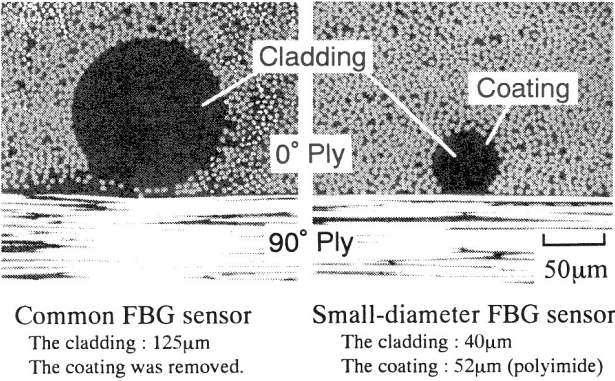


図 13 CFRP プリプレグ中の繊維強化方向に埋込まれた光ファイバ

次に、細径光ファイバに書き込んだ FBG センサの特性を図 14 に示す。通常径 FBG センサと同等のセンサ特性をもっている。また、ポリイミドコーティ

ング層はエポキシ樹脂や他の耐熱樹脂との接着性にも優れ、製造中や実用時の高温暴露にも耐えることが可能である。

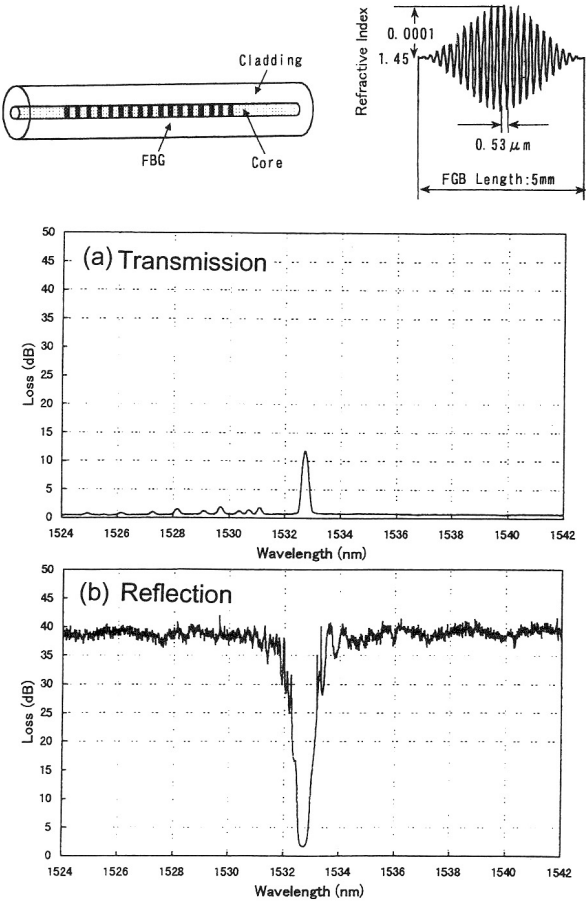


図 14 開発された細径 FBG センサの特性

4.3 埋込み細径光ファイバによる CFRP 積層板の衝撃損傷パラメータの同定

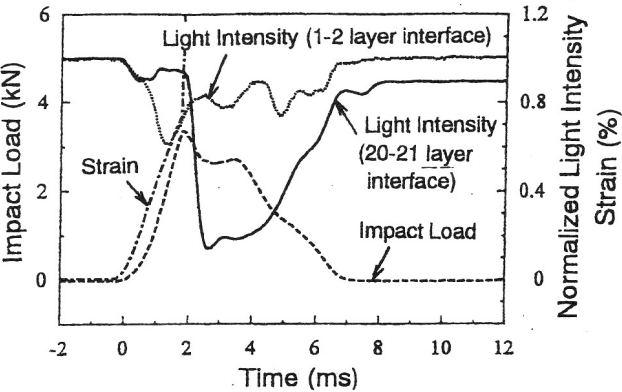


図 15 細径光ファイバ埋込み $[0_2/90_4/0_2]$ 直交積層板の光透過強度、衝撃荷重、試験片表面歪測定結果

埋込み細径光ファイバによる CFRP 積層板が受ける衝撃荷重のリアルタイム検出に成功した²⁹⁾。図 13 に示した細径光ファイバを埋込んだ $[0_2/90_4/0_2]$ 直交積

層板の梁状試験片に、計装化シャルピー衝撃試験機を用いて面外衝撃荷重を与えた。衝撃荷重中の光透過損失を、衝撃荷重、試験片表面に貼った歪ゲージの出力とともに図 15 に示す。衝撃荷重により光ファイバが局所的に変形している間のみ光透過損失が生じると考えられる。光透過損失の最大値は衝撃荷重最大値と比例することが確かめられている。現状では測定器の解析速度に限界がある FBG センサシステムも、急速に進歩しつつあることから、埋込み細径 FBG センサの実用化にも期待がもてる。

4.4 埋込み細径光ファイバによる CFRP 人工衛星構造の歪・損傷検出

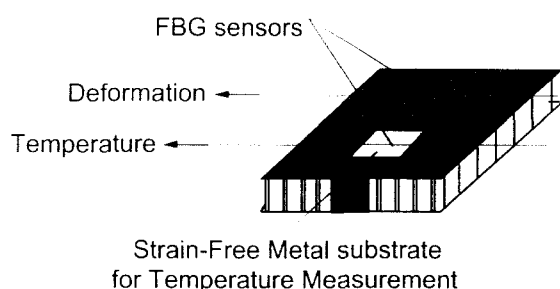


図 16 極薄 CFRP 表皮サンドイッチハニカムパネル構造の埋込み細径 FBG センサを用いた歪・温度同時計測システム

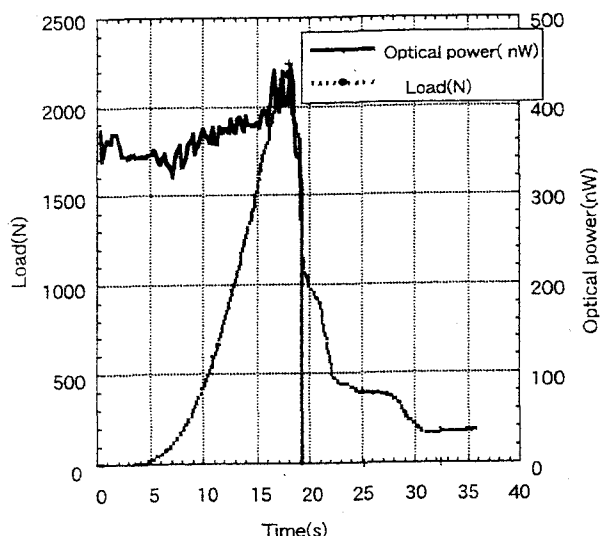


図 17 圧縮荷重を受けるサンドイッチハニカムパネル中の細径光ファイバの光透過パワー変化

極薄 CFRP 表皮を用いたサンドイッチハニカムパネル構造が、過酷な力学的・熱的環境下で運用される人工衛星構造によく使用される。図 16 は、埋込み細径 FBG センサを用いた歪と温度の同時計測システムである³⁰⁾。次世代人工衛星には低コスト化が強く

要求されており、製造中や実用時の構造ヘルスマニタリング技術の達成が肝要である。図 17 に、圧縮荷重を受けるサンドイッチハニカムパネルの、極薄 CFRP 表皮中に埋込まれた細径光ファイバの光透過パワーの変化による圧縮破壊の検出例を示す。

4.5 埋込み SMA 箔による CFRP 積層板中の損傷発生・進展抑制

一般的に、CFRP 積層板中の 90°層には、製造時に引張りの残留応力が残っているため、引張り荷重を受けるとトランスバースクラックが発生しやすい。そこで、形状記憶合金 (SMA) 箔を CFRP 積層板中に埋込むことにより、トランスバースクラックや層間剥離の発生・進展抑制を試みている。これは、感温型 SMA の形状記憶効果、すなわち温度負荷により発生する回復応力（収縮応力）を利用するものである。SMA は“温度誘起によるマルテンサイト相”に応力を負荷することにより、ある応力・温度の変態域において“応力誘起によるマルテンサイト相”へと変態し、また温度を負荷することにより、ある応力・温度の変態域において“オーステナイト相”へと変化する。この応力誘起によるマルテンサイト相からオーステナイト相への変態において形状が回復する。この変態の際に、予め与えた歪を固定して形状を回復させないようにすると回復応力が働く。

上記目的を達成するための鍵を握る SMA 箔と CFRP 層との接着強度を高めるために、各種表面処理法を試みた上で、CFRP 積層板単体の層間剪断強度に匹敵する接着剪断強度が得られた³¹⁾。図 18 に擬似等方性 CFRP 積層板中の 90°層トランスバースクラックの発生・進展を、2% 予歪を与えた SMA 箔の埋込みにより抑制した例を示す³¹⁾。

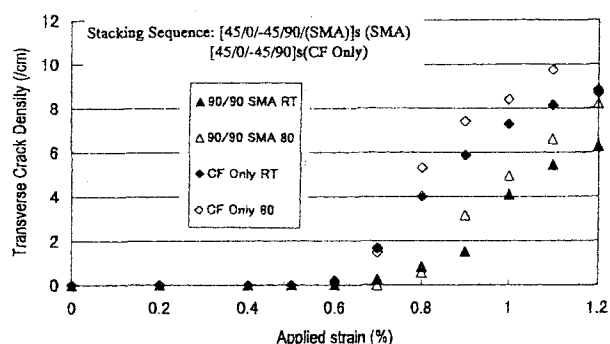


図 18 2% 予歪 SMA 箔埋込みによる擬似等方性 CFRP 積層板中の 90°層クラックの発生・進展抑制

4.6 CFRP、CFGFRP 複合材料の電気伝導特性の定量化

CFRP、CFGFRP（炭素繊維、ガラス繊維のハイブリッド）複合材料中の、引張り荷重下での低破断歪炭素繊維の破断に伴う電気抵抗変化を利用して、除荷後に、過去に負荷された最大歪を記憶しているセンサとして利用する試みがあるが、系統のかつ定量的な解析手法の開発が遅れている³²⁻³⁴⁾。ここでは、一方向 CFRP、CFGFRP 材の繊維破断（図 19）、電気抵抗変化のモデル化を行った³⁵⁾。1 本の炭素繊維が破断しても、隣接繊維の接触により、破断点からある距離 δ_{ec} だけ離れると電流経路は回復する。そこで、DC 直列-並列モデルの概念が提案された（図 20）。さらに、このモデルをもとに、弾塑性 Shear-lag 理論に基づく 3 次元モンテカルロシミュレーションを行い、繊維破断と電気抵抗変化の予測を行った。図 20 に示すように、カーブフィッティングにより $\delta_{ec}=5\text{mm}$ と与えることにより、理論モデルは実験結果を忠実に予測できる³⁶⁾。

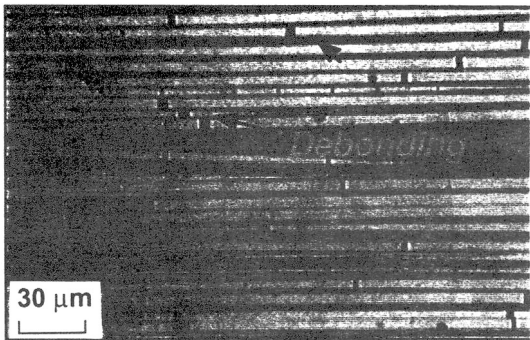


図 19 一方向 CFRP 中の繊維多重破断

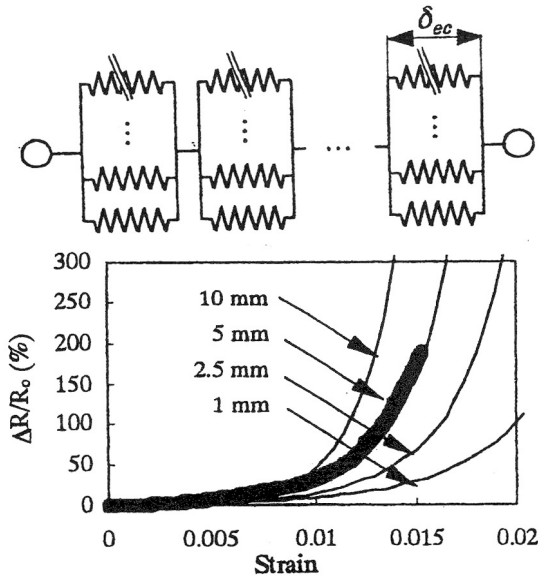


図 20 DC 直列-並列モデルと電気抵抗変化の予測結果

4.7 電気伝導性マトリックスを有する GFRP 複合材料による自己診断機能

電気伝導性のない GFRP の樹脂中に、予め炭素粒子（またはフレーク）を分散させ、炭素粒子相互の接触を利用して導電パスを形成させることにより、より敏感な最大歪記憶型センサを開発中である。CFGFRP 材に比べ、より広い歪範囲に渡り、電気抵抗変化が比例的に生じる（図 21）³⁷⁾。また、除荷後の残留電気抵抗は、与えた最大歪とともに単調に増加する（図 22）。パーコレーション理論を用いた理論解析モデルを利用した、理論モデルの構築も行っている。また、直径数 mm 程度の円柱状センサとしてコンクリート構造に埋込んで自己診断機能を有する歪センサとして利用することに成功している。さらに、構造物に接着する薄板状パッチセンサの開発も進めている。

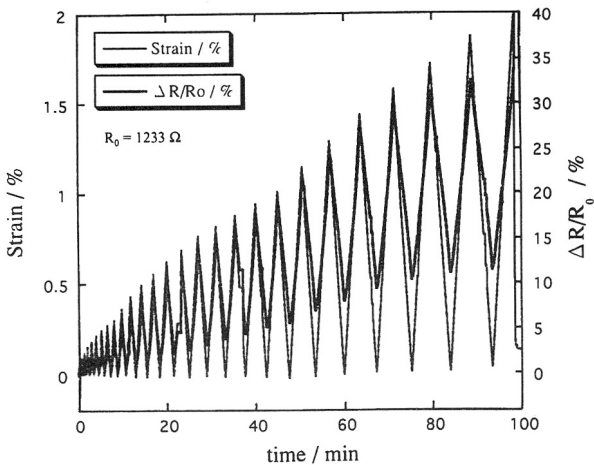


図 21 電気伝導性マトリックスを有する GFRP 複合材料の応力-歪、電気抵抗-歪線図

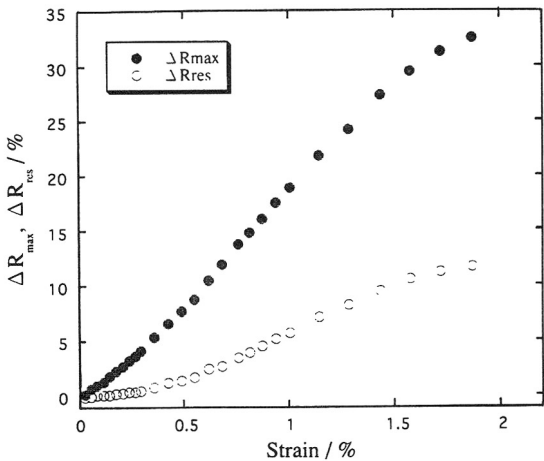


図 22 電気伝導性マトリックスを有する GFRP 複合材料の残留抵抗変化

4.8 統合化 AE センサネットワークシステムによる
複合材料構造の衝撃損傷検出

実用の航空機複合材機体構造への適用を目指した、経験学習方式を用いた統合化 AE センサネットワークシステムの構築³⁸⁾を行っている。このためには、AE センサシステムの実用的な校正を可能とする装置の作製が必要であり、任意 AE 事象発生器の開発を行った。試験構造体の予め決められた複数の場所に、制御された衝撃荷重を与えることが可能なシステム（図 23）である。複数の AE センサからなるネットワークシステムは、校正 AE 信号データを記録、解析し、試験構造体の特性について学習する。その上で、実際に衝撃荷重を受けた場合には、これらの蓄積された学習データをもとに、衝撃荷重の大きさ、場所などの情報をリアルタイムで解析し、表示するものである（図 24）。

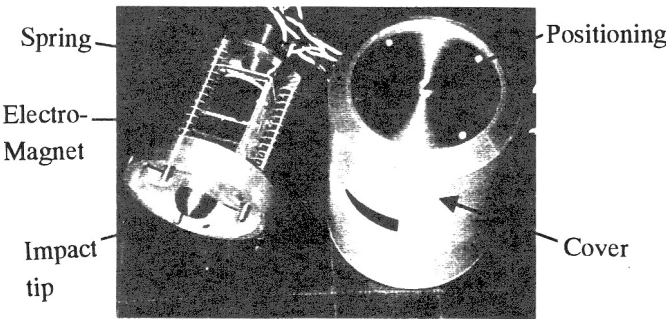


図 23 開発した任意 AE 事象発生器

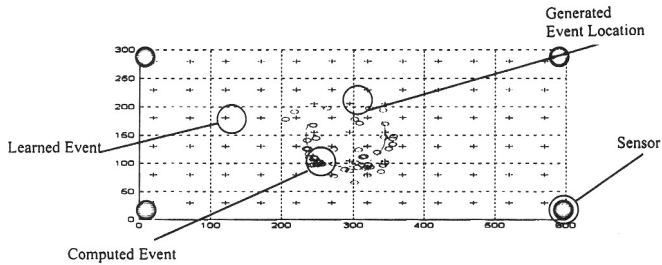


図 24 衝撃荷重の位置同定結果例

4.9 光透過・反射を用いた半透明複合材荷重支持構造の損傷検出

現在日本で開発中のリニアモーターカーにおいて、提案されている荷重支持体構造の一つに、アルミナ繊維強化エポキシ複合材料 (AFRP) 構造を用いたものがある。極低温、強い電磁気環境下で劣化せず、熱侵入が少なく、高強度、高剛性である材料が要求されており、その構造の安全性を保証する技術の確立が実用化への鍵を握っている。幸い、AFRP は半透

明であることから、光透過・反射を用いた内部損傷の検出技術が、このような過酷な環境条件下では有力である（図 25）。トランスバースクラックや層間剥離の発生・進展は、光透過を妨げるため、強い光を当てると影が現れ、光透過率、光反射率の低下をもたらす。設計上重要な剛性低下と光透過像との関係を図 26 に示す³⁹⁾。

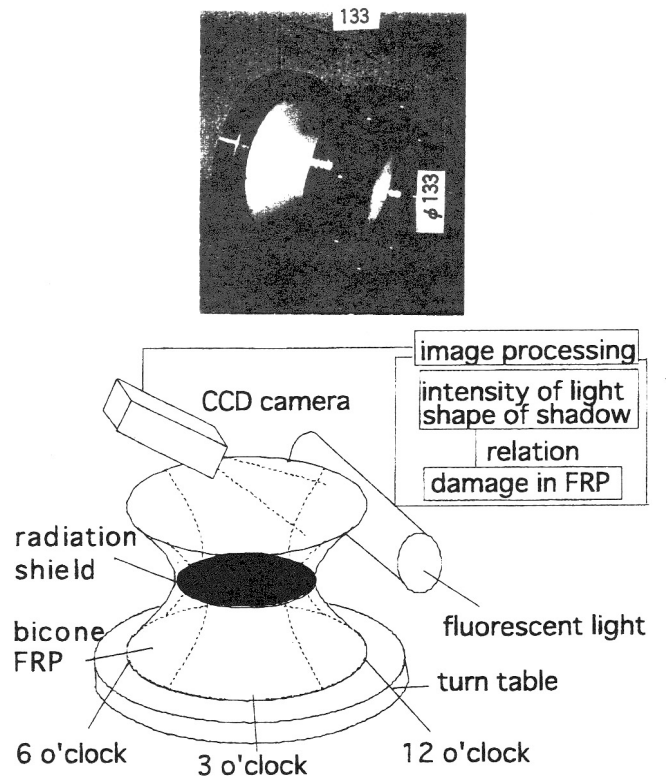


図 25 AFRP 荷重支持体と光透過を用いた内部損傷検出法

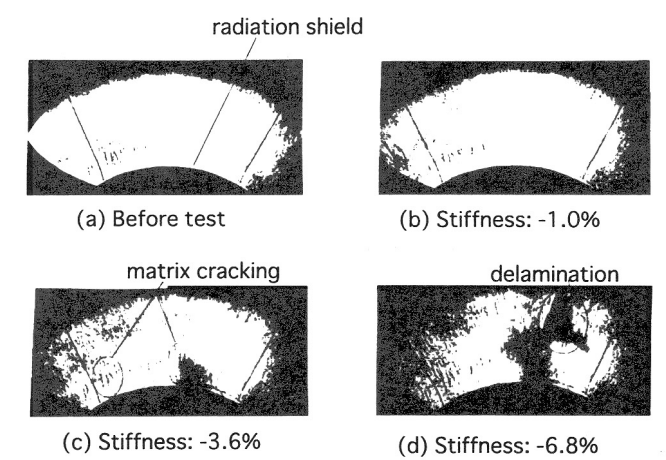


図 26 半透明アルミナ繊維強化エポキシ複合材荷重支持構造の光透過イメージ

4.10 BOTDR、FBG 統合センサによる分布型・局所型歪計測システムの構築

光ファイバに沿っての歪分布が測定可能な BOTDR (Brillouin Optical Time Domain Reflectometry) 法によ

る分布型光ファイバセンサシステムの距離分解能の実用的な改良方法の考案、および、動的歪応答解析方法の提案を行った。また、温度補正を含む BOTDR、FBG 統合センサによる分布型・局所型歪計測システムの構築を行っている⁴⁰⁾。図 27 には開発設計中の CFRP 胴体構造デモンストレータへの適用計画例を示す。

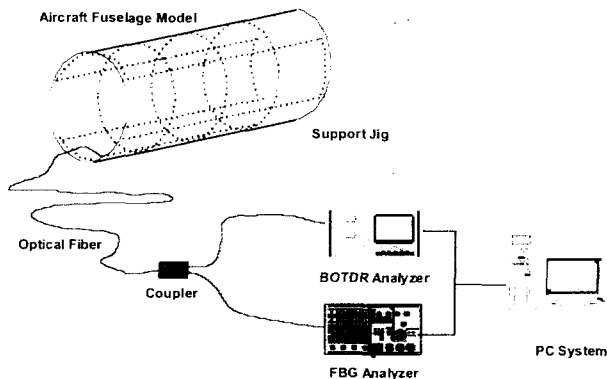


図 27 BOTDR、FBG 統合歪計測システムの適用計画例

4.11 高層建築物用 FBG センサ要素およびリアルタイムモニタシステムの開発

大規模インフラストラクチャの構造ヘルスマニタリングを行う、多点 FBG センサネットワークシステムの構築を行っている(図 28)⁴¹⁾。とくに、都市型地震災害軽減を目指して、建設中の 12 階の高層建築物の履歴型ダンパーの歪、変形、温度などを、すべて多点 FBG センサ要素により計測するシステムを開発している。1 本の光ファイバに 10 数個程度の FBG センサ要素が直列に配置されたものを、光スイッチを用いて数本並列に配置している。履歴型ダンパーの荷重-変位計測例を図 29 に示す⁴²⁾。建設中から、運用時、緊急災害時、補修作業時に至るライフサイクルモニタリングシステムの構築を目指している。

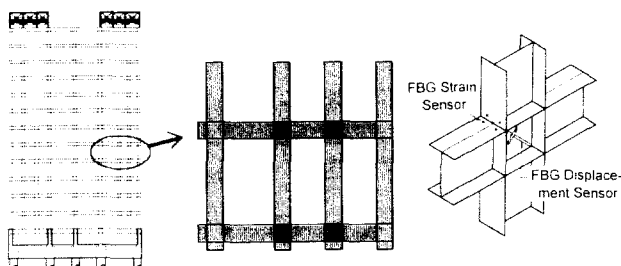


図 28 高層建築物履歴型ダンパーの歪、変形、温度計測用多点 FBG センサシステム

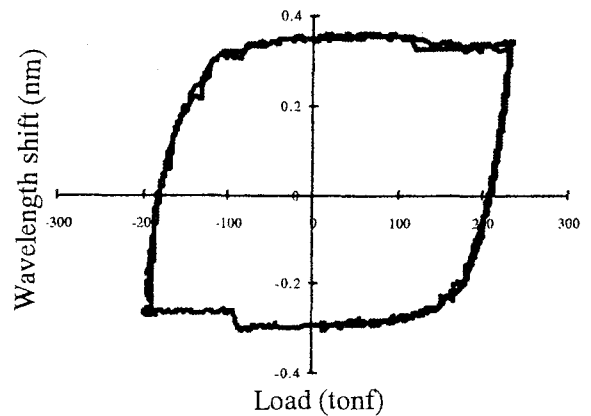


図 29 履歴型ダンパーの荷重-変位計測例

5. まとめ

先進複合材料システムの応用の拡大の鍵を握る、耐久性評価法の確立、および、ヘルスマニタリングシステム技術の構築について、その現状と展望を、現在筆者らのグループが進めている研究分野の成果を中心に述べた。両方の研究が達成できて初めて、先進複合材料システムの信頼性、安全性が保証されることによりライフサイクルコストの低減が可能となり、航空宇宙分野から土木建築分野にわたる幅広い応用が飛躍的に伸びるものと考ええる。欧米諸国に比較しても、先進複合材料開発や製造技術をはじめとして、この分野における日本のポテンシャルはかなり高い。付加価値の高い独自技術を推進するための、本分野における研究開発の一層の発展を大いに期待したい。

6. 謝辞

本報告で述べた成果の一部(3 節、4 節)は、通商産業省 工業技術院 大学連携型産業科学技術開発プロジェクト「知的材料・構造システムの研究開発」の「ヘルスマニタリング技術の研究開発」グループの研究活動の一環として行われたものである。岸 輝雄プロジェクトリーダーを始め、NEDO、RIMCOF 等の関係機関の各位に、深甚なる謝意を表す。

参考文献

- 1) 武田展雄, 材料システム, **16** (1997), pp. 63-71.
- 2) N. Takeda and S. Ogihara, Compos. Sci. Tech., **52** (1994), pp. 183-196.
- 3) N. Takeda and S. Ogihara, Compos. Sci. Tech., **52** (1994), pp. 309-318.
- 4) S. Ogihara and N. Takeda, Compos. Sci. Tech., **54** (1995),

- pp. 395-404.
- 5) N. Takeda, S. Ogihara and A. Kobayashi, *Composites*, **26**(12) (1995), pp. 859-868.
 - 6) N. Takeda, T. Kosaka and Y. Okabe, *Sci. Engr. Comp. Mater.*, **5**(3/4) (1996), pp. 169-184.
 - 7) N. Takeda, H. Niizuma, S. Ogihara and A. Kobayashi, *Exp. Mech.*, **37** (1997), pp. 182-187.
 - 8) N. Takeda, S. Ogihara, S. Suzuki, and A. Kobayashi, *J. Comp. Mater.*, **32**(1) (1998), pp. 83-100.
 - 9) N. Takeda, S. Ogihara, N. Nakata, and A. Kobayashi, *Comp. Inter.*, **5**(4) (1998), pp. 305-321.
 - 10) N. Takeda and S. Ogihara, *Composites: Part A*, **29** (1998), pp. 1545-1522.
 - 11) S. Kobayashi, N. Takeda, S. Ogihara and A. Kobayashi, *J. Reinf. Plastics and Compos.*, **18** (1999), pp. 1360-1366.
 - 12) N. Takeda L. N. McCartney and S. Ogihara, *Compos. Sci. Tech.*, **60** (2000), pp. 231-240.
 - 13) J. W. Lee et al., *J. Comp. Mater.*, **23** (1989), pp. 1273-1291.
 - 14) N. Takeda, S. Kobayashi, S. Ogihara and A. Kobayashi, *Adv. Compos. Mater.*, **7**(2) (1998), pp. 183-199.
 - 15) S. Ogihara, N. Takeda, S. Kobayashi and A. Kobayashi, *Compos. Sci. Tech.*, **59** (1999), pp. 1387-1398.
 - 16) N. Takeda, S. Kobayashi, S. Ogihara and A. Kobayashi, *Int. J. Fatigue*, **21** (1999), pp. 235-242.
 - 17) W. A. Curtin, B. K. Ahn and N. Takeda, *Acta Mater.*, **46**(10) (1998), pp. 3409-3420.
 - 18) W. A. Curtin and N. Takeda, *J. Compos. Mater.*, **32**(22) (1998), pp. 2042-2059.
 - 19) W. A. Curtin and N. Takeda, *J. Compos. Mater.*, **32**(22) (1998), pp. 2060-2081.
 - 20) T. Okabe, N. Takeda, J. Komotori, M. Shimizu and W. A. Curtin, *Acta Mater.*, **47** (1999), pp. 4299-4309.
 - 21) F. M. Zhao and N. Takeda, *Composites: Part A*, **31** (2000), pp. 1203-1214.
 - 21) F. M. Zhao and N. Takeda, *Composites: Part A*, **31** (2000), pp. 1215-1224.
 - 22) Y. Kamoshida, T. Okabe, N. Takeda and M. Shimizu, *Proc. An. Conf. Am. Compos. Mater.*, (2000), in press.
 - 23) 第 1 回、第 2 回「知的材料・構造システム」シンポジウム講演集, RIMCOF, (1999, 2000).
 - 24) R. M. Measures et al., *SPIE 2071*, (1993), pp. 21-29.
 - 25) Y. Okabe, S. Yashiro, T. Kosaka and N. Takeda, *Proc. SPIE*, Vol. 3893, SPIE, WA, USA (2000), in press.
 - 26) L. N. McCartney, *J. Mech. Phys. Solids*, **40** (1) (1992), pp. 27-68.
 - 27) 武田展雄、宋東烈、岡部洋二、岡部朋永、第 2 回「知的材料・構造システム」シンポジウム講演集, RIMCOF, (2000), in press.
 - 28) K. Satori, Y. Ikeda, Y. Kurosawa, A. Hongo and N. Takeda, *Proc. SPIE*, Vol. 3893, SPIE, WA, USA (2000), in press.
 - 29) H. Tsutsui, T. Sanda, Y. Okabe and N. Takeda, *Proc. SPIE*, Vol. 3893, SPIE, WA, USA (2000), in press.
 - 30) S. Kabashima, T. Ozaki and N. Takeda, *Proc. SPIE*, Vol. 3893, SPIE, WA, USA (2000), in press.
 - 31) T. Ogisu, M. Nomura, N. Andou, J. Takaki, D.-Y. Song and N. Takeda, *Proc. SPIE*, Vol. 3893, SPIE, WA, USA (2000), in press.
 - 32) K. Shulte and Ch. Baron, *Compos. Sci. Tech.*, **36** (1989), pp. 63-76.
 - 33) N. Muto, H. Yanagida, T. Nakatsuji, M. Sugita and Y. Ohtsuka, *J. Am. Ceram. Soc.*, **76**(4) (1993), pp. 185-188.
 - 34) X. Wang and D. D. L. Chung, *Composites: Part B*, **29** (1997), pp. 63-73.
 - 35) D.-Y. Song, N. Takeda, A. Kitano and K. Yoshioka, *Proc. SPIE*, Vol. 3893, SPIE, WA, USA (2000), in press.
 - 36) J. B. Park, T. Okabe, N. Takeda and W. A. Curtin, Submitted for publication (2000).
 - 37) Y. Okuhara, S.-G. Shin, H. Matsubara, H. Yanagida and N. Takeda, *Proc. SPIE*, Vol. 3893, SPIE, WA, USA (2000), in press.
 - 38) J. Saniger and L. Reithler, *Proc. 1st Symp. Smart Mater.*, RIMCOF, Tokyo (1999) 119 & 2nd Symp., (2000), in press.
 - 39) H. Aoyama, K. Tanaka, H. Watanabe and N. Takeda, *Proc. 6th Japan Int. SAMPE Symp.*, SAMPE, Covina, CA, USA (1999), pp. 967-970.
 - 40) T. Yamaura, Y. Inoue, H. Kino and K. Nagai, *Proc. 2nd Int. Workshop on Structural Health Monitoring*, Technomic, PA, USA (1999), pp. 533-542.
 - 41) A. Mita, *Proc. 2nd Int. Workshop on Structural Health Monitoring*, Technomic, PA, USA (1999), pp. 56-67.
 - 42) H. Iwaki, H. Yamakawa and A. Mita, *Proc. 5th Int. Conf. Motion and Vibration Control*, Univ. Tech., Sydney, Australia (2000), in press.