東京大学 大学院新領域創成科学研究科
基盤科学研究系
先端エネルギー工学専攻

平成 19 年度

修士論文

埋め込み FBG センサを用いた
フォームコアサンドイッチパネルの衝撃位置同定

2008 年 2 月提出
指導教員　武田　展雄　教授

66202　秋野　望

目 次

第 1 章　序論 1

1.1　フォームコアサンドイッチ構造 1
1.2　ヘルスモニタリング 5
1.3　本研究の目的 5

第 2 章　ひずみ計測システム 7

2.1　FBGセンサ 7
2.2　AWGフィルタ 10
2.3　SAWDシステム 12

第 3 章　SAWDシステムの基礎検討 15

3.1　FBGセンサの埋め込み損失の評価 15
3.2　SAWDシステムによるひずみ計測性能確認 20
3.3　埋め込みFBGセンサを用いたSAWDシステム 22

第 4 章　衝撃位置同定 26

4.1　供試体の設計 26
4.2　衝撃位置同定手法 29
4.2.1　弾性解析を用いた押し込み位置の変化によるひずみの変化 29
4.2.2　押し込み試験による弾性解析の補正手法 33
4.2.3　位置同定マップの作成 34
4.3　衝撃試験による検証 39
4.3.1　損傷のない場合 39
4.3.2　損傷のある場合 43

第 5 章　結言 47

参考文献 50

本論文に関する学会発表 52

謝辞 53

表 目 次

表 3.1　FBGセンサの反射特性 23
表 4.1　CFRPクロス材の材料物性 27
表 4.2　フォーム材ROHACELL WF51 の材料物性 27
表 4.3　補正係数*R* 35
表 4.4　損傷のない場合のひずみの比 41
表 4.5　損傷のある場合のひずみの比 44

図 目 次

図 1.1　ハニカムサンドイッチ構造 3
図 1.2　フォームコアサンドイッチパネル 4
図 1.3　表面材とコア材の界面の損傷 4
図 2.1　光ファイバの構造 8
図 2.2　FBGセンサの反射・透過特性 9
図 2.3　中心波長の決め方 9
図 2.4　AWGフィルタの回路構成 11
図 2.5　AWGフィルタの透過光スペクトル 11
図 2.6　SAWDシステムの構成 13
図 2.7　AWGフィルタからの透過光強度 14
図 3.1　埋め込み損失測定用の試験片模式図 17
図 3.2　埋め込み損失の測定結果 18
図 3.3　光ファイバの埋め込み断面図 18
図 3.4　埋め込みによるFBGセンサ②の反射光スペクトル変化 19
図 3.5　埋め込みによるFBGセンサ③の反射光スペクトル変化 19
図 3.6　試験片の模式図 20
図 3.7　FBGセンサの反射率とAWGフィルタの透過率 21
図 3.8　ひずみゲージとSAWDシステムで計測したひずみ 21
図 3.9　4 点曲げ試験用の試験片 23
図 3.10　4 点曲げ試験の概要 24
図 3.11　4 点曲げ試験のひずみ計測結果 25
図 4.1　供試体の模式図 28
図 4.2　変位を与えた点 30
図 4.3　ひずみ分布の計算例(1)：x=350(mm), y=250(mm)を中心に変位を与えた場合 31

図 4.4　ひずみ分布の計算例(1)：x=400(mm), y=400(mm)を中心に変位を与えた場合 32
図 4.5　押し込み試験の概要図 35
図 4.6　位置同定マップ(FBG1/2) 36
図 4.7　位置同定マップ(FBG1/4) 37
図 4.8　位置同定マップ(FBG4/2) 38
図 4.9　FBGセンサの反射率とAWGフィルタの透過率 40
図 4.10　インパクトハンマを用いた衝撃試験の概要図 40
図 4.11　損傷のない場合の荷重履歴 41
図 4.12　損傷のない場合のひずみ応答 42
図 4.13　損傷のない場合の位置同定結果 42
図 4.14　落錘衝撃試験機を用いた衝撃試験の試験概要 44
図 4.15　損傷のある場合の荷重履歴 45
図 4.16　損傷のある場合のひずみ応答 45
図 4.17　損傷のある場合の衝撃位置同定結果 46

第1章　序論

1.1　フォームコアサンドイッチ構造

近年、さまざまな構造物において材料の軽量化が求められている。しかし、軽量な材料は一般的に力学的特性が低い。そのため、単一の材料の構成で、軽量で高剛性な部材を作ることは困難である。そこで考案されたのが、2 種類以上の特性の異なる材料を組み合わせた複合材料や複合構造である。

身近な複合材料としては、強度に異方性のある板を張り合わせて強化した合板や、コンクリートを鉄筋で補強した鉄筋コンクリート、グラスファイバ(ガラス繊維)や炭素繊維を樹脂で固めた繊維強化プラスチック(Fiber Reinforced Plastic, FRP)などがあげられる。FRP の中でも、炭素繊維強化プラスチック(Carbon Fiber Reinforced Plastic, CFRP)は比強度が高く、航空・宇宙機をはじめスポーツ用品など様々な分野で用いられるようになってきている。

また、複合構造の例としては、サンドイッチ構造があげられる[1]。サンドイッチ構造は、主として、強度の高い表面の 2 層および強度が低くて軽量な内部の 1 層を含む 3 層から構成され、これら 3 層の一体化により、優れた機能を実現することが出来る。例えば、曲げ荷重やねじり荷重を受ける部材の場合、応力は上・下面の表面で最大となり、中央部の芯層の応力は小さい。そのため、高い強度が必要とされる表面付近と低い強度でも良い芯層を、高い強度を持った均質な材料で構成すると、必要以上に強度の高い重い構造になってしまう。このような部材にサンドイッチ構造を用いると、応力の発生の少ない芯層に軽量材料を配置することができるので、材料の特性を有効利用した軽くて剛性が高い特性を実現できる。

軽量で高剛性であること以外にも、表面材とコア材の組み合わせにより様々な特性を持つ材料を設計できることもサンドイッチ構造の大きな利点である。

サンドイッチ構造の表面材の役割は、使用する状況により様々であるが、主な役割は下記の 3 つに大別でき、これらの中から必要となる特性を持つ材料を用いることになる。

(1)強度部材として使用されるもの

(2)耐熱・耐火・耐食性・緩衝性など機能的特性を基礎に使用するもの

(3)装飾的用途に使用されるもの

表面材に用いられる材料としては、アルミニウム合金やステンレス鋼板などの金属材料や、合板などの木質材料、FRP などのプラスチック系材料などがあげられる。

また、コア材に要求される性能としては次のようなものがあげられ、表面材と同様にその部材に必要な特性をもつ材料が用いられることなる。

(1)軽量性

(2)せん断強さ

(3)圧縮強さ

(4)成型加工の容易さ

(5)表面材とコア材の接着性

(6)温度・湿度変化による寸法安定性

(7)遮音・遮熱性

コア材として、よく用いられる材料としては、金属材料や耐水処理を施したクラフト紙を用いたハニカム(honeycomb, 蜂の巣)構造や、バルサ(メキシコ南部からペルーを原産地とする高木)、プラスチックフォームなどがある。

航空機や船舶等の乗物では、材料の軽量化により高速化や燃費向上などの性能の向上が見込まれるため、CFRP やサンドイッチ構造も用いられるようになってきている。例えば、次世代民間旅客機では、主翼や胴体といった一次構造にも FRP が使用されており、Boeing787 では構造質量の 50%以上、Airbus380 では約 25%以上に FRP を用いている。また、サンドイッチ構造としては、フラップや床板等に、コア材にアルミハニカムを用い、表面材に CFRP を用いたアルミハニカムサンドイッチ構造(図 1.1)が用いられている。しかし、この構造は、損傷等によりハニカムコア内に水が入ってしまうことがあり、それが気温の低下により凍って膨張し、表面材とコア材のはく離をさらに広げてしまうという問題がある。

そこで、表面材にCFRPを用いコア材にフォーム材を用いたフォームコアサンドイッチ構造(図 1.2)の航空機への適用が考えられている[2]。フォームコアサンドイッチ構造は、E4 系新幹線先頭車両[やスウェーデン海軍のコルベット艦の船体ではすでに実用実績がある[3,4]。航空機の外板には、従来、柱のような役割をするストリンガと薄いパネルとで構成されるスキンーストリンガ構造が用いられているが、フォームコアサンドイッチ構造は、この構造と比較して単純で疲労に強く、断熱性、遮音性にも優れ、従来のハニカムサンドイッチパネルに見られるような水進入問題も無いので航空機の外板パネルに適した構造様式であるといえる。さらに、フォームコアサンドイッチ構造は、コア材を設計した形状に整え、その表面にCFRPのプリプレグを貼り付け、一体成形するため、航空機

の機首外板のような複雑な形状も比較的容易に作成することが出来る。しかし、メリットの多いこの構造にも、低速衝撃により、図 1.3に示したような表面材とコア材の界面の損傷が発生しやすいという問題がある。サンドイッチ構造の場合は、表面材とコア材がしっかりと接着されていることにより高い特性を持つため、表面材とコア材のはく離によって構造全体の強度は大幅に低下してしまう。図 1.3からもわかるように、このような内部損傷は、表面材には損傷が発生しない場合も多く、目視発見が困難な点が実用上の最大の問題となっている。また、表面材とコア材の界面にはく離が発生した場合、そのはく離は進展しやすく、はく離に気がつかずそのまま使い続けてしまうと、はく離による強度低下のため、構造全体の破壊につながる可能性もある。そのため、表面材とコア材の界面のはく離の進展を抑制するために、表面材とコア材の界面にクラックアレスターを配置し、進展を抑制するという研究も行われている[5]がまだ実用化には至っていない。航空機の場合、このような損傷が発生する要因としては、雹や滑走路走行中の小石の衝突、点検中のツールドロップなどがある。特に、目視発見が困難である雹による衝撃損傷でも、疲労により損傷が進展し、強度が低下するという報告がある[6]。

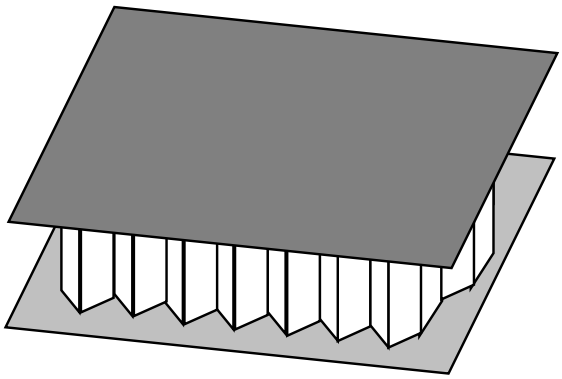


図 1.1　ハニカムサンドイッチ構造

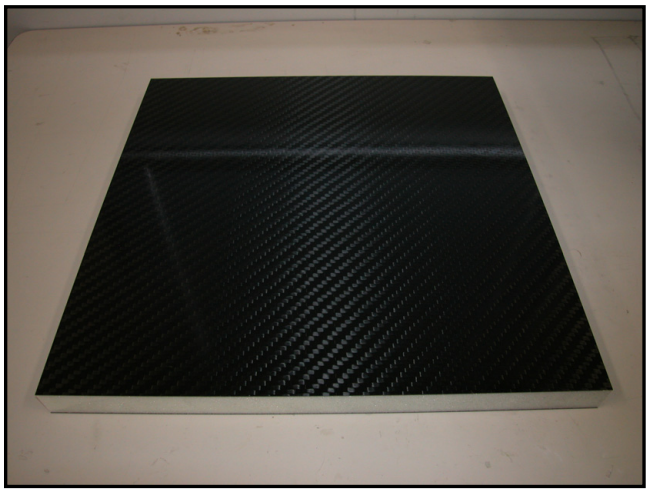


図 1.2　フォームコアサンドイッチパネル

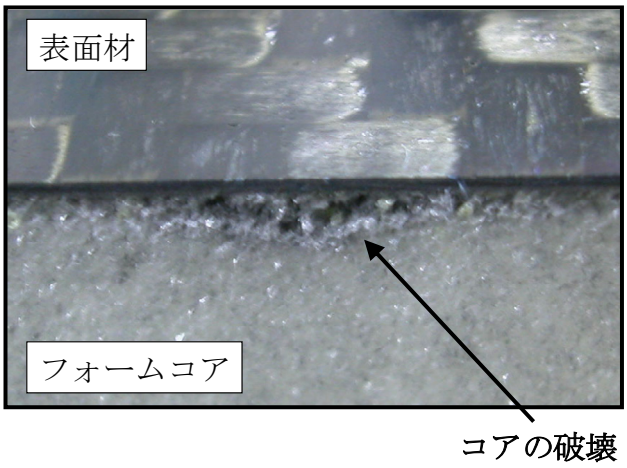


図 1.3　表面材とコア材の界面の損傷

1.2　ヘルスモニタリング

先ほど述べたように、フォームコアサンドイッチ構造を航空機に適用する際に問題となっているのは、表面材とコア材の界面に発生する内部損傷である。現在、航空機の非破壊検査の主な方法は、目視検査、放射線透過検査、超音波探傷検査などがあるが、これらの手法は、航空機のように大きな構造全体に対して行う場合、時間もお金もかかってしまう。また、目視検査の場合は、損傷の判定に熟練技能が必要である。したがって、効率よく大きな構造の損傷を検知することのできるシステムが求められている。そこで、現在、航空機へのスマート構造の適用が考えられている。

スマート構造とは、構造体に生体と同様の機能を付加することを念頭においた構造である。つまり、構造にセンサ(神経)、プロセッサ(頭脳)、アクチュエータ(筋肉)を組み込むことで、外部環境の変化に自身で対応できるようにした構造である。現在は、その第一段階であるヘルスモニタリングの研究が盛んに行われている[7]。ヘルスモニタリングとは、構造材料中に組み込んだセンサによって、構造の健全性を監視するシステムである。センサ機能の発現としては、CFRPのような繊維強化複合材料に対しては、構造に悪影響を与えることなく構造中に設置することのできる光ファイバセンサの適用が考えられている。さらに、光ファイバセンサは、小型・軽量・低損失なとの特性をもち、通信分野における光ファイバの発達とともに計測機器も開発されているため、新しい計測システムとして注目されている。また、アクチュエータ機能の発現としては、圧電素子や形状記憶合金の活用が考えられている。

1.3　本研究の目的

前節で述べたように、フォームコアサンドイッチ構造は、現在のままでは高い安全性が求められる民間航空機に用いることは難しい。しかし、損傷を早期に発見し修理することができれば、航空機に適用することも可能であると考えられる。そこで、本研究では、損傷検知の第一段階として、リアルタイムでのフォームコアサンドイッチパネルの衝撃位置同定を目的としている。

フォームコアサンドイッチ構造は外部から力が加わったとき、局所的には大きく変形するが、構造全体の変形は小さい。また、衝撃荷重はミリ秒単位で発生する現象である

ために、高速・高精度なひずみ計測が必要となる。そこで本研究では、FBG(Fiber Bragg Grating)センサと AWG(Arrayed Waveguide Grating)フィルタを用いたひずみ計測システム(Subaru Active Wave Detection System, 以下、SAWD システムとする)を用いることにした。FBG センサは高精度な計測が可能であり、これを AWG フィルタと組み合わせることにより高速で精度の高い計測が可能となる。また、FBG センサは表面材とコア材の界面に埋め込むこととした。その理由は、前述のように、フォームコアサンドイッチパネルの場合、表面材とコア材の界面のはく離が発生しやすく、実際に用いる際の障害となっているので、将来的には、そのはく離の検知を行うことも考慮に入れたためである。

本論文の構成は以下の通りである。

第 1 章　フォームコアサンドイッチ構造およびそれが適用される背景について説明した。また、ヘルスモニタリングに関しても簡単に説明した。

第 2 章　本研究で用いる FBG センサと AWG フィルタに関して簡単に述べ、さらにこれらを組み合わせた SAWD システムによるひずみ計測の原理について説明する。

第 3 章　まず、フォームコアサンドイッチパネルに光ファイバを埋め込んだ例はほとんどないため、埋め込みによる光損失について検討する。次に、貼り付け FBG センサを用いて SAWD システムにより正しくひずみが計測できることを実験により確認する。最後に、埋め込み FBG センサを用いた SAWD システムでのひずみ応答について説明する。

第 4 章　衝撃位置同定には、有限要素解析により計算した弾性解析の結果を押し込み試験により補正するため、まずその有限要素法の計算について説明する。次に、押し込み手法による補正手法に関して説明する。さらに、実際の供試体に対して押し込み試験を行い、補正を行った結果を示す。最後に、FBG センサを埋め込んだフォームコアサンドイッチパネルに対して衝撃試験を行い、SAWD システムを用いて高速での多点同時ひずみ応答の計測を行う。さらに、得られたひずみ応答から衝撃位置同定を行い、その結果について考察を加える。

第 5 章　結言

以上により、埋め込み FBG センサを用いた衝撃位置同定が可能なシステムを実証する。

第2章　　ひずみ計測システム

2.1　FBG センサ

光ファイバは光の伝わる部分であるコアと、その周囲にあってコアよりも屈折率の低いクラッドと、これらを保護するための被覆から構成される(図 2.1)。光はコアとクラッドの境界面で全反射しながら伝搬する。コアとクラッドは、一般的に石英ガラスで作られており、コア部分は酸化ゲルマニウム(GeO_2) などを加えることにより屈折率を上げている。FBGセンサを書き込むための光ファイバは、シングルモードファイバが一般的である。シングルモード光ファイバは、コア径が 10μm以下、クラッド径が 125μmのサイズを持つものが一般的である。また、センサ用途の光ファイバの場合、被覆の耐久性、耐環境性や耐熱性等を考慮したポリイミド被覆の適用が妥当であり、その外径も 150μm程度と、通信分野で使用される被覆（いわゆる素線）の一般的な外径 250μmよりも比較的小さくなっている。

FBGセンサは光ファイバのコアにUV光の干渉縞を形成して、周期的な屈折率変化を書き込んだもので、これが回折格子として働く。回折格子の間隔をd、光ファイバの屈折率をnとしたときに、次の式を満たす波長(ブラッグ波長，λ_B)で強い反射が生じ、その他の波長の光は通過する(図 2.2)。

$$\lambda_B = 2nd \tag{2.1}$$

ブラッグ波長は一つの値であるが、実際に計測される反射光スペクトルは波長に対して広がりを持ったガウシアン形状になる。そのため本研究では、図 2.3に示すように、強度が最大強度の半分となる波長を最大強度から直近の 2 点選択し、その中間の波長を反射光スペクトルの中心波長として定め、ブラッグ波長のかわりとして用いる。

中心波長は(2.1)式のように表されるが、屈折率nや格子間隔dはFBGセンサに加わる軸方向ひずみや温度変化などにより値が変化する。FBGセンサに軸方向応力のみが加わり、温度変化の影響を無視すれば（この理由は後述)、シフト量$\Delta\lambda$を表す式は軸方向ひずみε

をパラメータとして、以下のように表現される[8]。

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}=\left[1-\frac{n_0^2}{2}\{p_{12}-\nu(p_{11}+p_{12})\}\right]\varepsilon \tag{2.2}$$

ここで、λ_0はひずみや温度変化のない状態でのブラッグ波長、νはポアソン比、p_{11}, p_{12}はポッケル定数と呼ばれるひずみと屈折率変化を関係づける定数である。この式からわかるように、反射光スペクトルの中心波長はひずみε対して線形にシフトする。また、n_0=1.458, λ_0=1,550nm、p_{11}=0.113, p_{12}=0.252, ν=0.16 として計算すると、ひずみεと中心波長シフト量$\Delta\lambda$の関係は 0.00123nm/με となる。

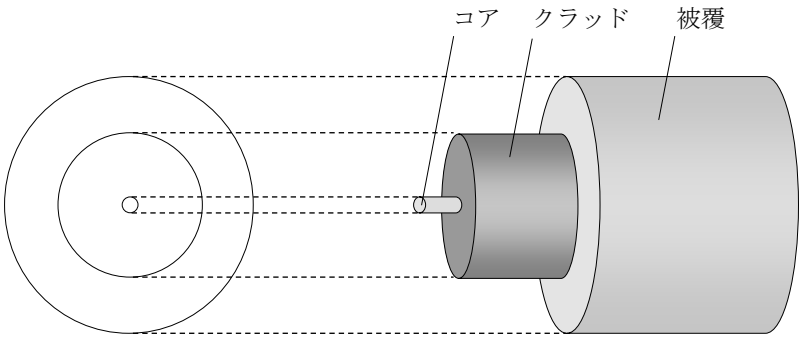


図 2.1　光ファイバの構造

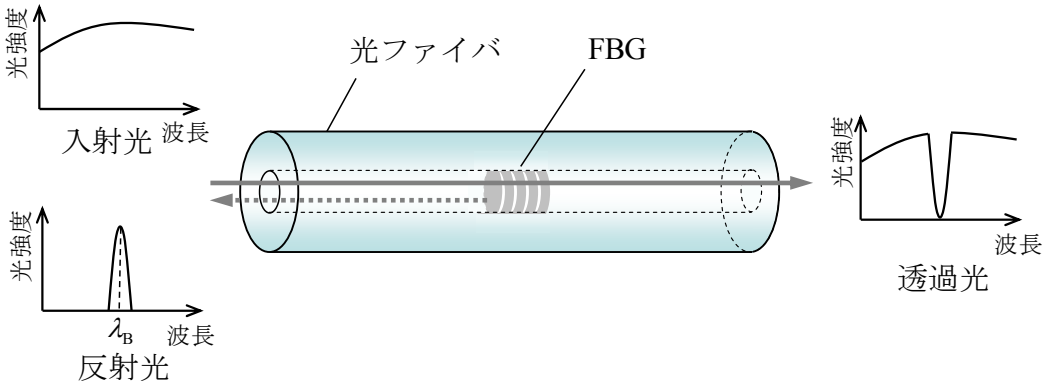


図 2.2　FBG センサの反射・透過特性

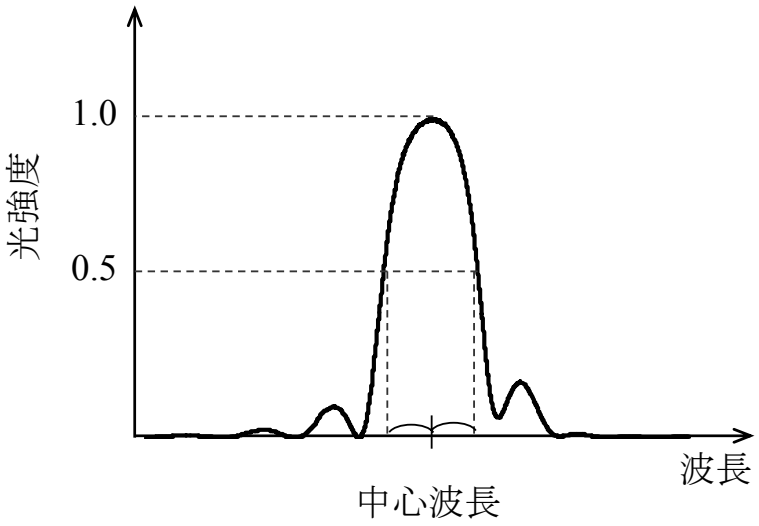


図 2.3　中心波長の決め方

2.2　AWG フィルタ

AWGは、シリコン又は石英等の基板上に石英のクラッドとコアを堆積し光導波路を集積化した平面光回路(Planar Lightwave Circuit, PLC)の一種であり、基板上への石英系ガラス膜の堆積、フォトリソグラフィー、エッチング技術による導波路パターンの形成といった微細加工技術を用いて作成される[9]。このAWGは多チャンネルの波長の合分波を一括して行うことができ、かつ、チャンネル数や波長間隔に対する設計の自由度が大きく、量産性、小型化、信頼性の面で優れており、今後の多チャンネルの波長多重通信のキーデバイスにもなっている。図 2.4にAWGの回路構成を示す。基板上には入射のための導波路、分波のためのアレイ導波路、出射のための導波路が形成されている。本研究では、AWGを波長分波器として用いるので、分波の仕組みについて述べる。

複数の波長λ_1～λ_nが多重化された波長多重光が入射導波路に入射されると、入射側スラブ導波路で回折されて広がり、アレイ導波路に入射する。アレイ導波路は入射側スラブ導波路から導出された光を伝搬する複数の併設された光導波路であり、隣接する導波路はある一定の光路長差ΔLをもって配列されている。このため、アレイ導波路の出力端では各導波路を伝搬した光に相当する分だけ位相にずれが生じる。通常アレイ導波路は、例えば 100 本といったように多数の導波路より成るが、図 2.4においては導波路の本数を簡略的に示してある。アレイ導波路を通過した光は出射側スラブ導波路に到達し、回折により広がるが、それぞれの導波路を通過した光は互いに干渉し、結果的に全体として波面のそろう方向に回折することになる。このとき、アレイ導波路とスラブ導波路の屈折率をn_c，n_s，回折角をθ、アレイ導波路の導波路間隔をdとすると波面が揃う同位相条件は次式で表される。

$$n_s d\theta + n_c \Delta L = m\lambda \tag{2.3}$$

ここでmは任意の整数であり、回折次数である。波面がそろう方向である回折角は波長に依存することから、異なる波長の光はそれぞれ別の方向に回折されることになる。このため、波長の異なる光が出斜側スラブ導波路の出斜導波路側で集光する位置は互いに異なり、それぞれの位置に出斜導波路を設置することにより、波長の異なった光を波長ごとに異なる出斜導波路から出力できる。すなわち、波長のλ_1～λ_nの光を別々に取り出すことが可能となる。本研究で用いたAWGフィルタは出力端が全部で 42 あり、出射ポート 5 から 38 の透過光スペクトルは図 2.5のようになっている。

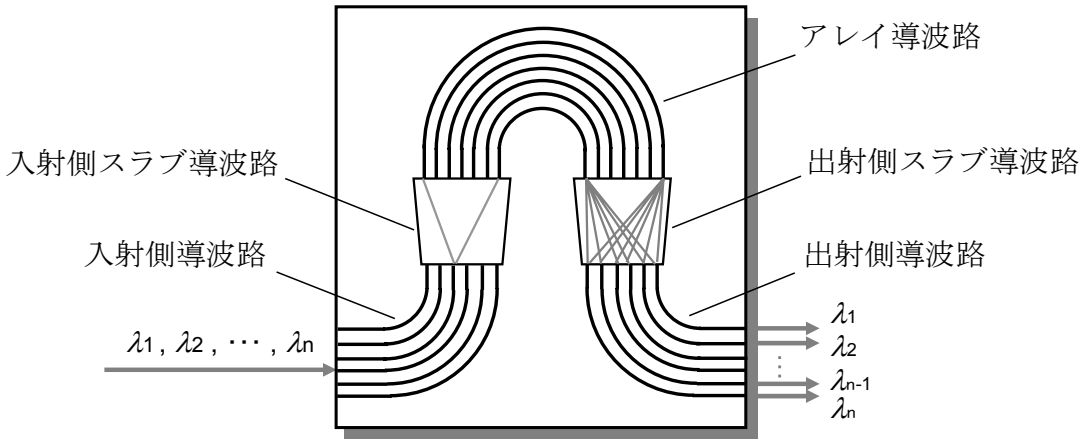


図 2.4　AWG フィルタの回路構成

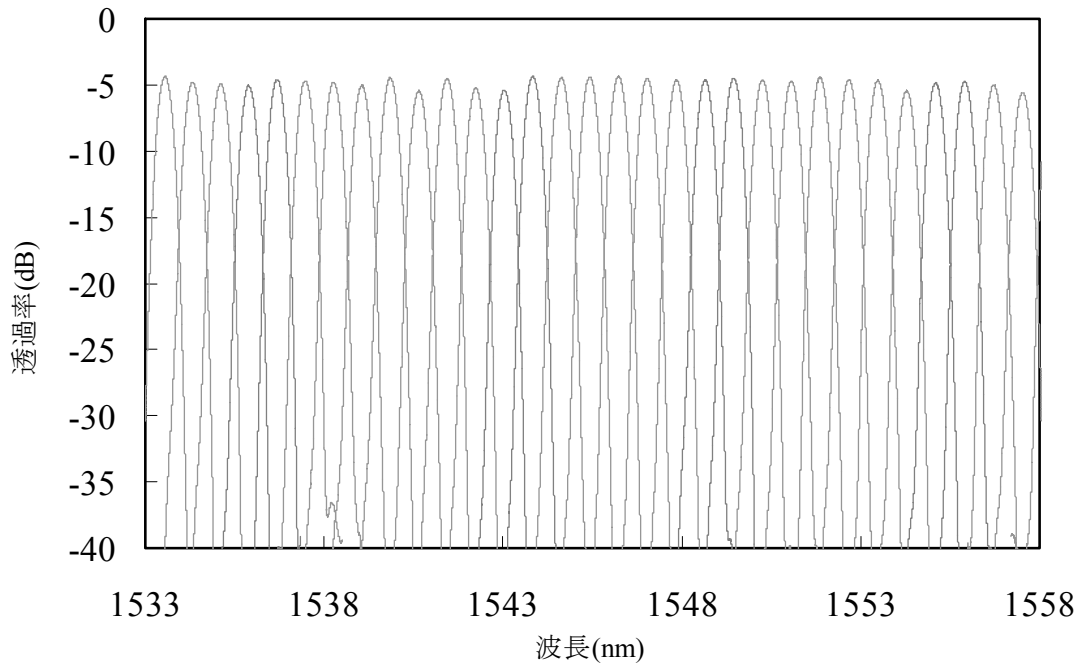


図 2.5　AWG フィルタの透過光スペクトル

2.3　SAWD システム

本研究では、富士重工業、日立電線、東大が共同開発したSAWD(Subaru Active Wave Detection)システム[10]を用いて多点ひずみ同時計測を行う。SAWDシステムの模式図を図2.6に示す。2.1 節で説明したとおり、光源からFBGセンサに広帯域光源を入射すると、ブラッグ波長(λ_B)で強い反射が生じる。反射した光はAWGで分波され、それぞれ分波された光をフォトディテクタで検出する。FBGセンサの反射率を$R(\lambda)$、このFBGセンサの反射光スペクトルの近傍に透過帯域のある、隣接したAWGの出射ポートkとk+1 を選択し、その透過率を$T_k(\lambda)$, $T_{k+1}(\lambda)$とすると(図 2.7)、これらのポートから出力される光強度P_k, P_{k+1}は次式で表すことができる。ただし、隣接したAWGの出射ポートkとk+1 は、kが短波長側の透過帯域をもち、k+1 が長波長側の透過帯域をもつ出射ポートであるとする。

$$\begin{aligned} P_k &= A\int_{-\infty}^{\infty} p(\lambda)R(\lambda)T_k(\lambda)d\lambda \\ P_{k+1} &= A\int_{-\infty}^{\infty} p(\lambda)R(\lambda)T_{k+1}(\lambda)d\lambda \end{aligned} \tag{2.4}$$

ここで、λ は波長、$p(\lambda)$は使用する光源のパワー密度を表す。また、AはSAWDシステム外での外乱による光強度損失を表す定数である。この外乱はセンサの敷設方法や環境変化によって予測できないため、P_k, P_{k+1}の値はλのみに依存せず、変動する可能性が高い。従って、この外乱の影響を取り除くために、P_k, P_{k+1}の比をQと定義する。

$$Q \equiv \frac{P_k}{P_{k+1}} \tag{2.5}$$

FBGセンサに引張ひずみが加わり、反射光スペクトルが長波長側にシフトした場合、出射ポートkを通過する光パワーは減少する反面、出射ポートk+1 を通過するパワーは増加する。一方、FBGセンサに圧縮ひずみが加わり、反射光スペクトルが短波長側にシフトすると、出射ポートkを通過するパワーは増加し、出射ポートk+1 を通過する光強度は減少する。つまり、ひずみが加わると、そのひずみの大きさに比例して反射光スペクトルがシフトするので、P_k、P_{k+1}の値も変化する。それに伴い、これらの比Qも変化するので、Qの変化からひずみの大きさを知ることができる。

実際にSAWDシステムを用いてひずみを計測する際には、事前にスペクトラムアナライザで計測しておいたFBGセンサの反射率とAWGフィルタの透過率からFBGセンサの各中心波長λ_{cwl}に対するQ値を計算しておく。

$$Q = f(\lambda_{CWL}) \tag{2.6}$$

この関係を用いて、実験で計測したQ値から中心波長を計算し、ひずみが 0 の時の中心波長からのシフト量を計算することでひずみを知ることが出来る。ただし、Q値から中心波長λ_{cwl}を同定するためには、Q値とλ_{cwl}が 1 対 1 対応である必要がある。すなわち、式(2.6)の関数fが対象としている範囲内で連続で、かつ、単調増加もしくは単調減少でなくてはならない。さらに、このシステムにおいて注意しなければいけない点は、AWGフィルタの透過光スペクトルが、システム内部の温度変化によってシフトしてしまう点である。本研究で用いたSAWDシステムにはこの温度補償機能がないため、実験の際には環境温度が一定になるように特に注意を払い、次章以降の実験を行った。

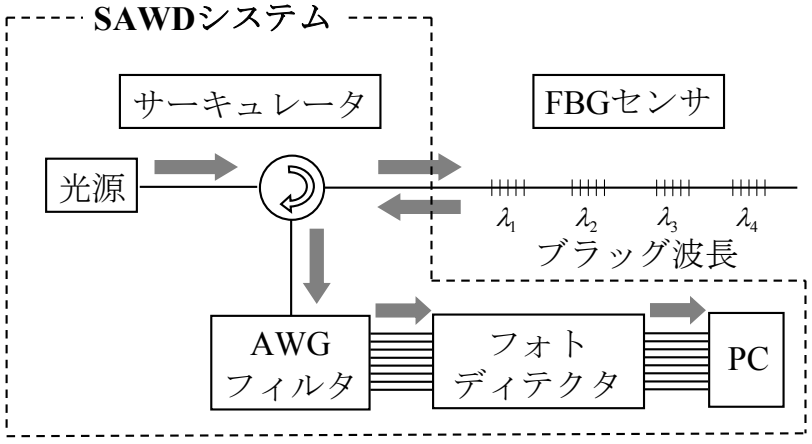


図 2.6　SAWD システムの構成

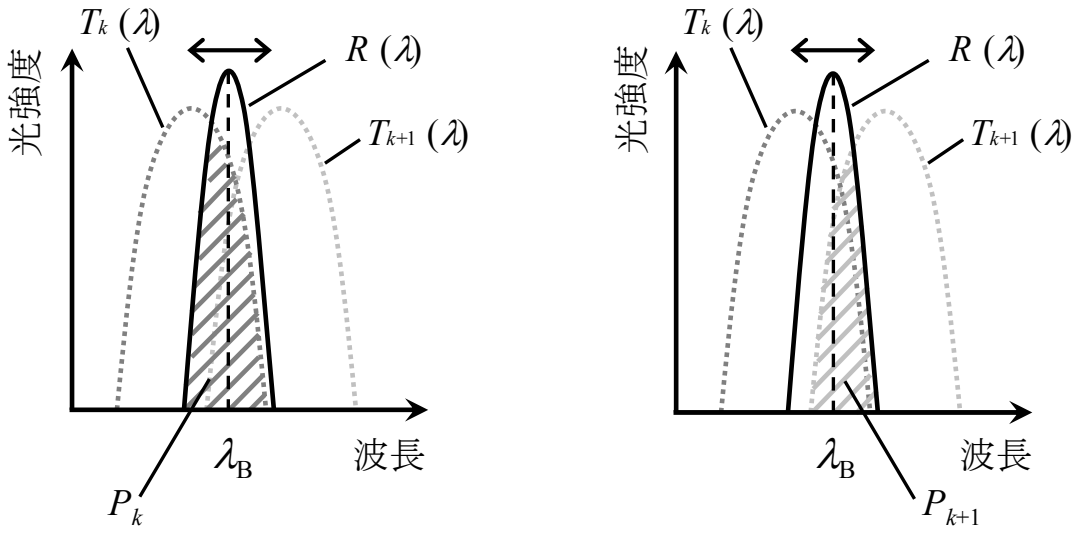


図 2.7　AWG フィルタからの透過光強度

第3章　SAWD システムの基礎検討

3.1　FBG センサの埋め込み損失の評価

一般的に、サンドイッチ構造の表面材に FRP を用いる場合には、織物材を用いることが多い。織物材は、布のような柔軟性を持つため、例えば航空機の機首構造のような平面ではない構造にも適用しやすいためである。CFRP の織物材には、面内方向のみが織ってある 2 次元織物材や、面内方向だけでなく面外方向にも繊維を配向してある 3 次元織物材などがある。本研究では、サンドイッチ構造の表面材に 2 次元織物材である CFRP クロス材を用いた。

CFRP クロス材とフォームコア界面に光ファイバを埋め込む場合、繊維が一方向ではなく炭素繊維と光ファイバが垂直になる部分が生じてしまうので、マイクロベンド等により光損失が発生すると考えられる。SAWD システムでは、光強度の変化を測定するために強度があまりにも低くなってしまうと、ひずみの計測精度が低下する可能性がある。そのため、まず、光ファイバセンサの埋め込みによる光強度損失を評価するための実験を行った。

試験片の模式図を図 3.1に示す。試験片は、CFRPクロス材(東邦テナックス)のプリプレグ$(0,90)_2$の上に光ファイバを配置し、さらにその上にフォームコアを置いて、簡易オートクレーブで一体成形を行った。コアには、PMI(ポリメタクリルイミド)をベースとした硬質プラスチック独立気泡(クローズドセル)発泡体(ROHACELL WF51，Rohm社)を用いた。表面材とコア材を同じ長さにすると、真空を引いた際に、表面材の厚さの分だけ、端部で光ファイバが曲がってしまい、そのまま成形されてしまうため、端部での光損失が大きくなってしまう。そのため、本実験では、表面材をコア材より 5mm短くし、端部で曲がりにくいように工夫した。成形の際に試験片端部で光ファイバが折れてしまうことがあるので、その保護のために端部にはポリイミドチューブを用いた。使用したポリイミドチューブは内径が 180μm、肉厚が 19 μmのものである。また、埋め込んだ光ファ

イバは、一般的な、クラッド径が 125μmのシングルモードファイバであり、下記の 5 種類の特性を持った光ファイバである。①～⑤は図 3.1中の番号と対応している。②③のFBGセンサのセンサ長は 1mmで、④⑤のFBGセンサのセンサ長は 1.5mmのものを用いた。また、②のFBGセンサのみセンサ部分がCFRPクロス材の繊維と垂直になる方向に埋め込んであり、その他の③④⑤は、FBGセンサのセンサ部分が繊維と平行になるように配置した。

① 通常の光ファイバ
② 通常の光ファイバを用いた FBG センサ(FBG 部分がクロス材の繊維と垂直)
③ 通常の光ファイバを用いた FBG センサ(FBG 部分がクロス材の繊維と平行)
④ 曲げに強い光ファイバを用いた FBG センサ
⑤ 曲げに強い光ファイバを用いた FBG センサ

成形前後の光の透過光強度の差は、図 3.2のようになった。計測には、狭帯域の光源(AQ4211, 安藤電気)と光センサ(AQ2732, 安藤電気)を用いた。図 3.2より、通常の光ファイバの場合の損失は大きいが、曲げに強い光ファイバを用いた方はほとんど光損失が発生していないことがわかる。通常の光ファイバを CFRP の一方向材に埋め込んだ場合には、ほとんど損失が発生しないため、クロス材を用いたことにより損失が発生してしまったということになる。クロス材を用いた場合には、試験片内で炭素繊維方向と光ファイバの方向が直行している部分が存在するので、その部分で損失が発生していると考えられる。

また、光ファイバを埋め込んだ CFRP クロス材とフォームコアの界面の断面写真を図 3.3に示す。炭素繊維方向と光ファイバの埋め込み方向が平行になっている部分では、クロス材中に光ファイバが半分程度まで含まれているのに対して、繊維方向と光ファイバの方向が垂直になっている部分では、コアとクロス材の間の樹脂中に含まれていることが観察できる。

次に、埋め込みによる FBG センサからの反射光スペクトルの形状変化も計測した。図 3.4, 図 3.5に FBG センサ②③からの埋め込み前後の反射光スペクトルの形状変化を示す。繊維方向と平行に埋め込んだ FBG センサ③では、反射光スペクトル形状にほとんど変化は見られないが、繊維方向と垂直に埋め込んだ FBG センサ②では、スペクトル形状が大きく変化してしまっていることがわかる。これは、繊維方向と垂直に埋め込んだことにより、FBG センサに不均一なひずみ分布が加わったためであると考えられる。また、FBG センサ③ではほとんど反射光強度が低下していないが、FBG センサ②では約-3dB 反射光強度が低下してしまっていることがわかる。

後で述べるが、本研究では 500mm×500mm のフォームコアサンドイッチパネルを用いるため、光ファイバの埋め込み長さは全部で約 2m になる。そのため、通常の光ファイバでは光損失が大きく、ひずみ変化による光強度の変化を計測できない恐れがある。よって、本研究では、曲げに強い光ファイバを用いた FBG センサを採用することとした。また、FBG センサは、光強度の低下が少なくスペクトル形状の変化もほとんどない、クロス材の繊維方向と平行に埋め込むこととした。さらに、供試体を作成した際に、ある程度の光損失が発生してしまっても SAWD システムを用いて精度の良いひずみ計測を可能とするために、FBG センサの反射特性の検討を行った結果、FBG センサの半値幅は広い方が良く、クロス材の繊維と平行な方向に埋め込むにはセンサ長が 6mm 以下である必要があるため、FBG センサのセンサ長は 1.5mm とした。

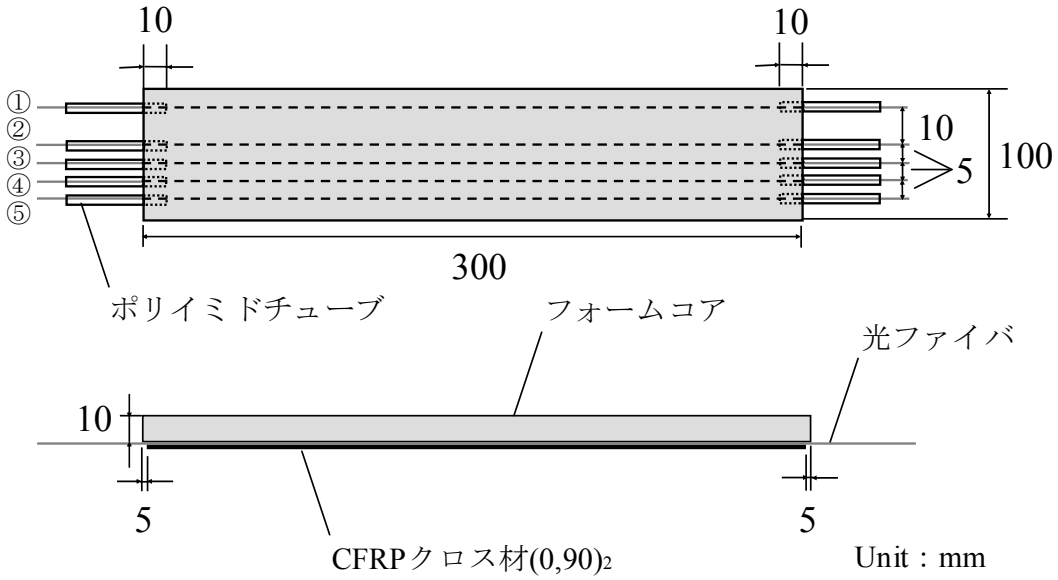


図 3.1　埋め込み損失測定用の試験片模式図

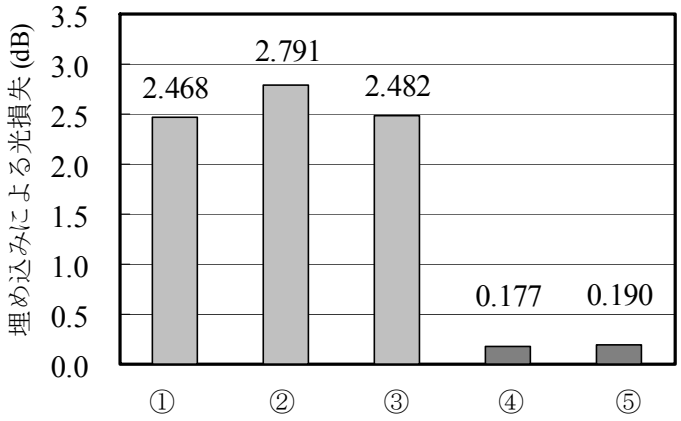


図 3.2　埋め込み損失の測定結果

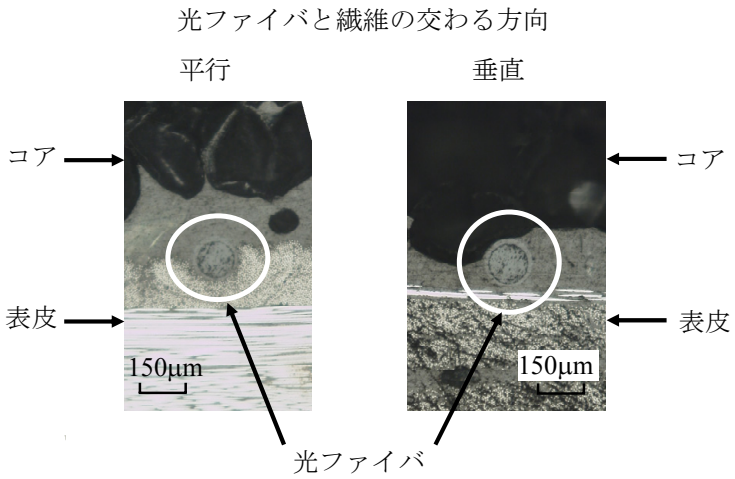


図 3.3　光ファイバの埋め込み断面図

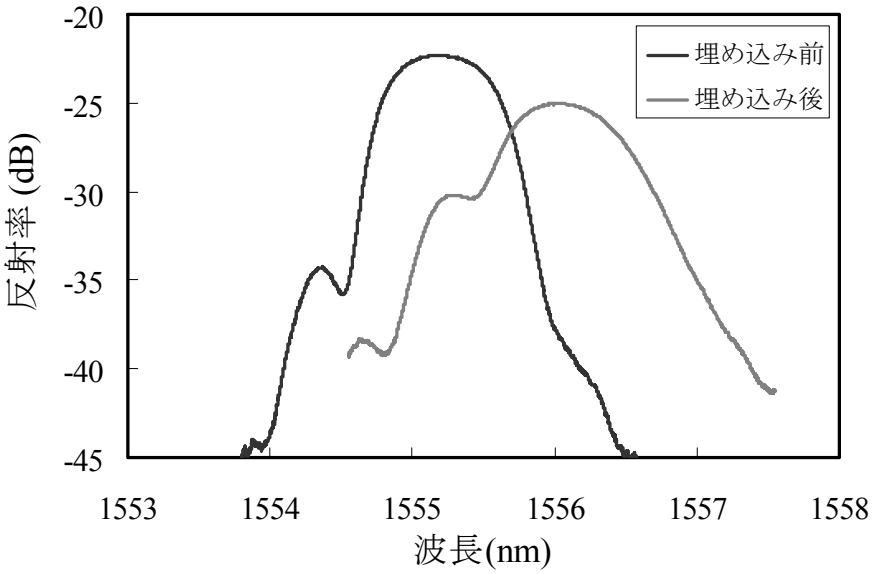


図 3.4　埋め込みによる FBG センサ②の反射光スペクトル変化

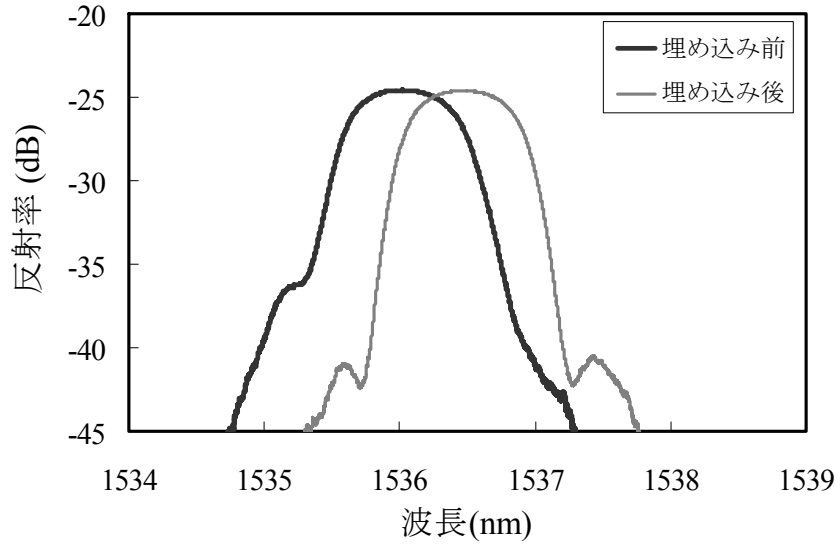


図 3.5　埋め込みによる FBG センサ③の反射光スペクトル変化

3.2　SAWD システムによるひずみ計測性能確認

SAWDシステムによるひずみ計測の精度を確認するために、FBGセンサとひずみゲージを貼り付けた試験片に対して引張試験を行い、SAWDシステムとひずみゲージにより計測したひずみを比較した。試験片形状を図 3.6に示す。試験片には、CFRPの一方向積層板(T700S/2500, 東レ)$[0]_8$を用いた。ひずみゲージはゲージ長が 1mmのものを用いた。計測にはAWGのポート番号 12～15 を使用し、第 2 章に示したひずみ計測手法を適用する。FBGの反射光スペクトルおよびAWGフィルタのポート 12～15 の透過特性(スペクトル)を図 3.7に示す。FBGセンサの中心波長とひずみの関係は 1.104pm/μεであり、FBGの初期中心波長(ひずみが 0με)とAWGフィルタの各ポートの波長特性を考慮した結果、ひずみが 0～650μεの間は、AWGの出射ポート 12 と 13 からの出力パワー比$Q_{12\text{-}13}$を用いてひずみの換算を行い、650～1300μεの間はAWGの出射ポート 13 と 14 からの出力パワー比$Q_{13\text{-}14}$を用い、1300～1950μεの間はAWGの出射ポート 14 と 15 からの出力パワー比$Q_{14\text{-}15}$を用いることとした。

試験片を材料試験機に取り付け、変位速度 0.5 (mm/min)で準静的な引張試験を行った。FBG センサは SAWD システムに接続した。ひずみゲージは、ひずみアンプに接続し、ひずみアンプからの出力電圧は、SAWD システムで用いている PC で同時に計測した。計測結果を図 3.8に示す。SAWD システムとひずみゲージのひずみは非常に良く一致しているので、SAWD システムはひずみを精度よく計測でき、本研究で用いるひずみセンサとして十分に機能すると判断することができる。

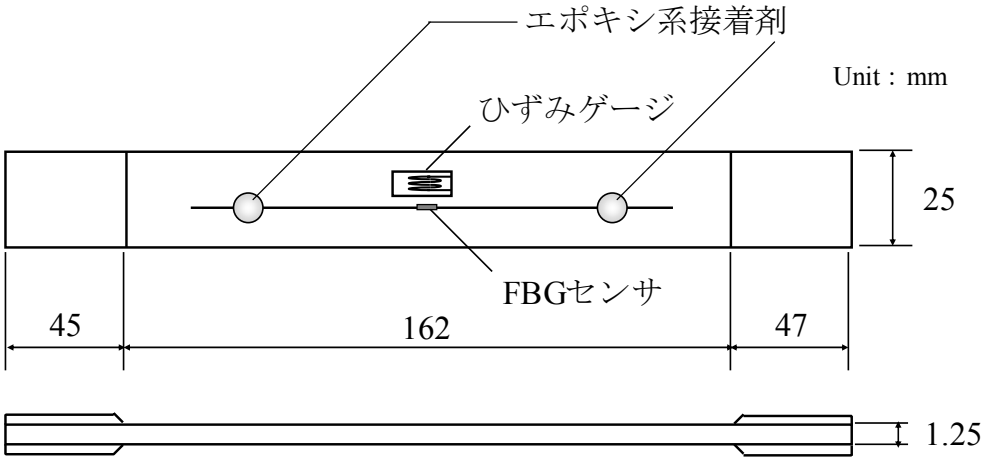


図 3.6　試験片の模式図

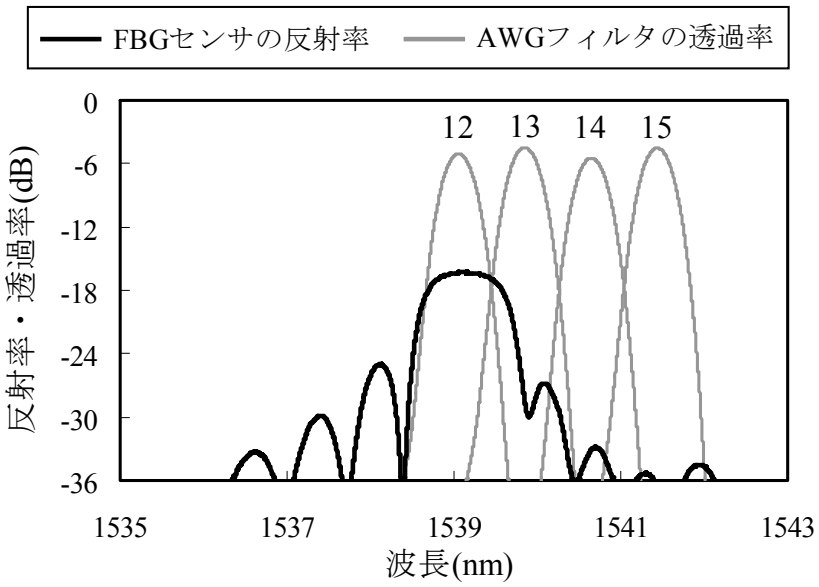


図 3.7　FBG センサの反射率と AWG フィルタの透過率

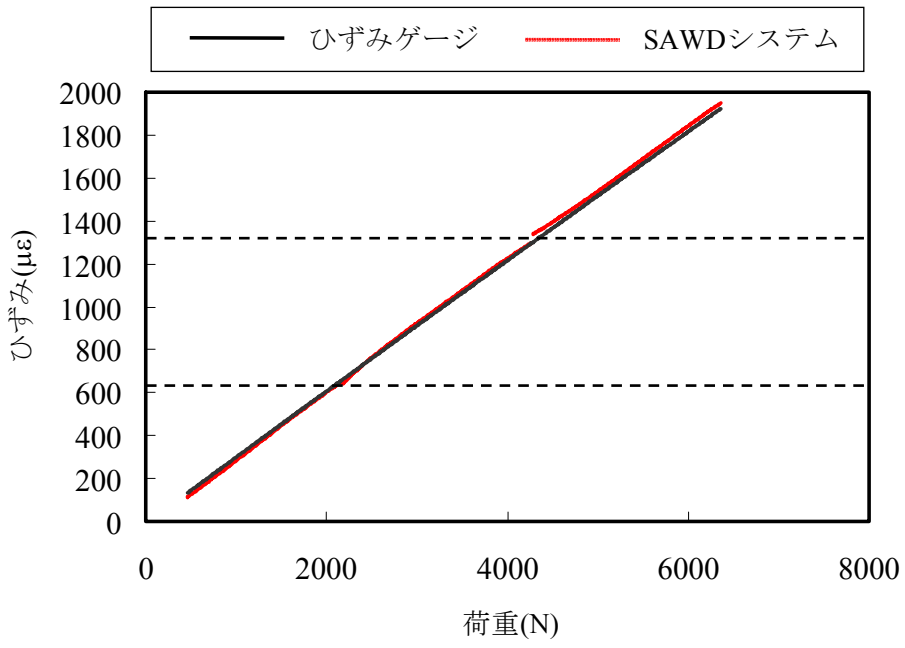


図 3.8　ひずみゲージと SAWD システムで計測したひずみ

3.3　埋め込み FBG センサを用いた SAWD システム

最後に、CFRPクロス材とフォームコアの界面に埋め込んだFBGセンサを用いたSAWDシステムの検証を行った。図 3.9に示した試験片を用いて 4 点曲げ試験を行った。試験片は表面材にCFRPクロス材$(0,90)_2$を用い、コアにはROHACELL WF51 を用いた。フォームコアとCFRPクロス材の表皮の界面に、FBGセンサの書き込まれた部分(1.5mm)がCFRPクロス材の表皮の繊維方向と同じ方向になるように 2 本埋め込んである。また、FBGセンサは曲げに強い光ファイバ(HEATOP300, 東京特殊電線)に書き込まれたものであり、センサ長は 1.5mmである。これは、先の 3.1 節で検証した結果に基づいて埋め込み損失を低減するためである。なお、FBGセンサの特性は、SAWDシステムに適した波長特性を考慮したものであり、フジクラ(株)にセンサの設計および製造を依頼したものである。埋め込み前のセンサ特性を表 3.1に示す。また、比較のためにFBGセンサを埋め込んだ位置の表面にひずみゲージ(ゲージ長 1mm, 共和電業)を貼り付け、SAWDシステムでひずみを計測するのと同時にひずみゲージでひずみを計測した。用いた計測機器を図 3.10に示す。フォトディテクタおよびひずみゲージアンプからの出力（電圧によるアナログ出力）は、全てA/D変換ボード(DAQCard-6062E, National Instruments Co.)を通してサンプリング速度 10HzでPCに収録した。曲げ荷重は材料試験機(オートグラフAG-I, 島津製作所)を用いて与えた。その際の試験条件は、変位速度 0.5mm/min、最大変位 2mmとした。計測したひずみを図 3.11に示す。本試験では、センサを設置した試験片中央部は純曲げ状態となり厚さ方向にひずみ勾配が均一になるはずである。そのため、ひずみゲージ同士、FBGセンサ同士のひずみの大きさは一致し、さらに、中立軸からの距離の遠いひずみゲージの方がFBGセンサに比べてひずみが大きくなるはずである。しかし、今回の試験の結果では、FBGセンサ同士のひずみの値は一致しておらず、ひずみゲージに対する大小も一致していない。その理由として、埋め込みの影響で、FBGセンサの中心波長シフト量とひずみの関係が変化してしまったことが考えられる。そのため、埋め込みFBGセンサを用いる場合には、FBGセンサごとにその補正を行う必要があることがわかった。

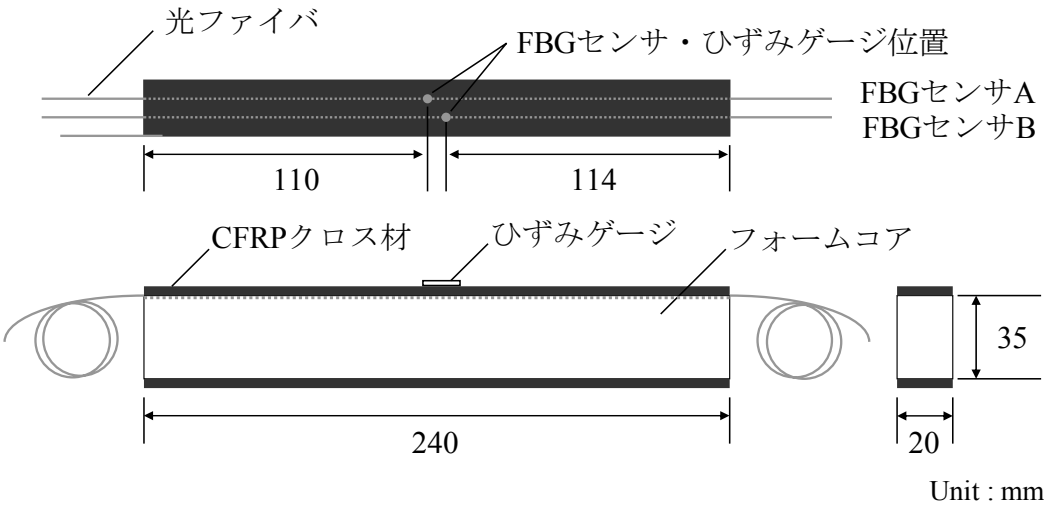


図 3.9　4 点曲げ試験用の試験片

表 3.1　FBG センサの反射特性

	中心波長 (nm)	反射率 (%)	半値幅 (nm)
FBG A	1546.18	87.90	0.98
FBG B	1552.34	87.96	1.08

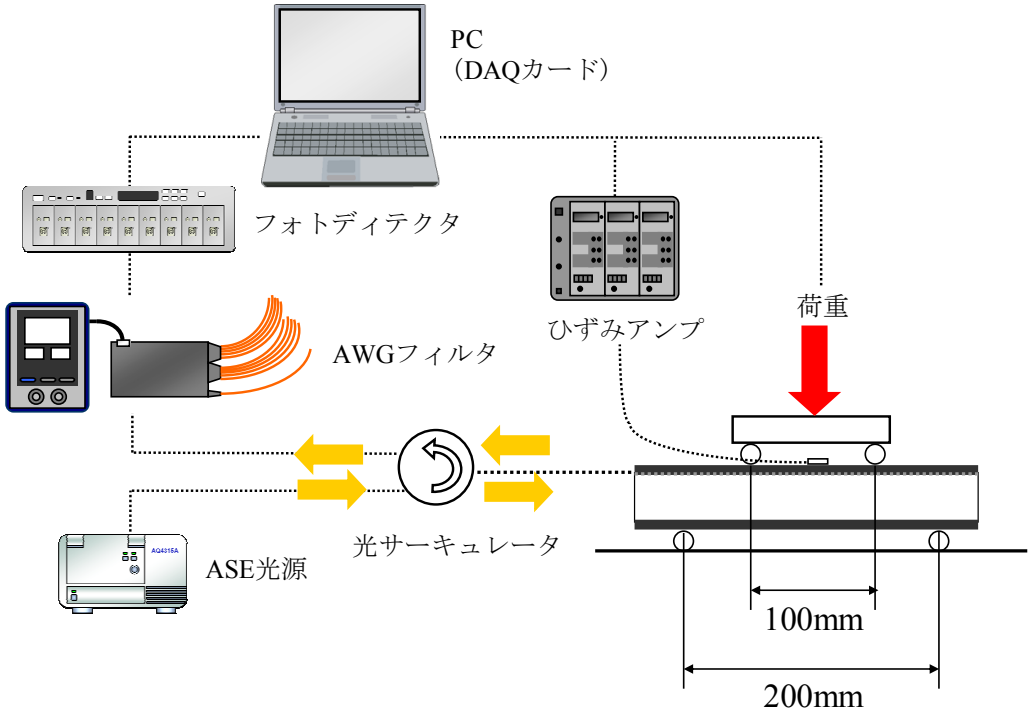


図 3.10　4 点曲げ試験の概要

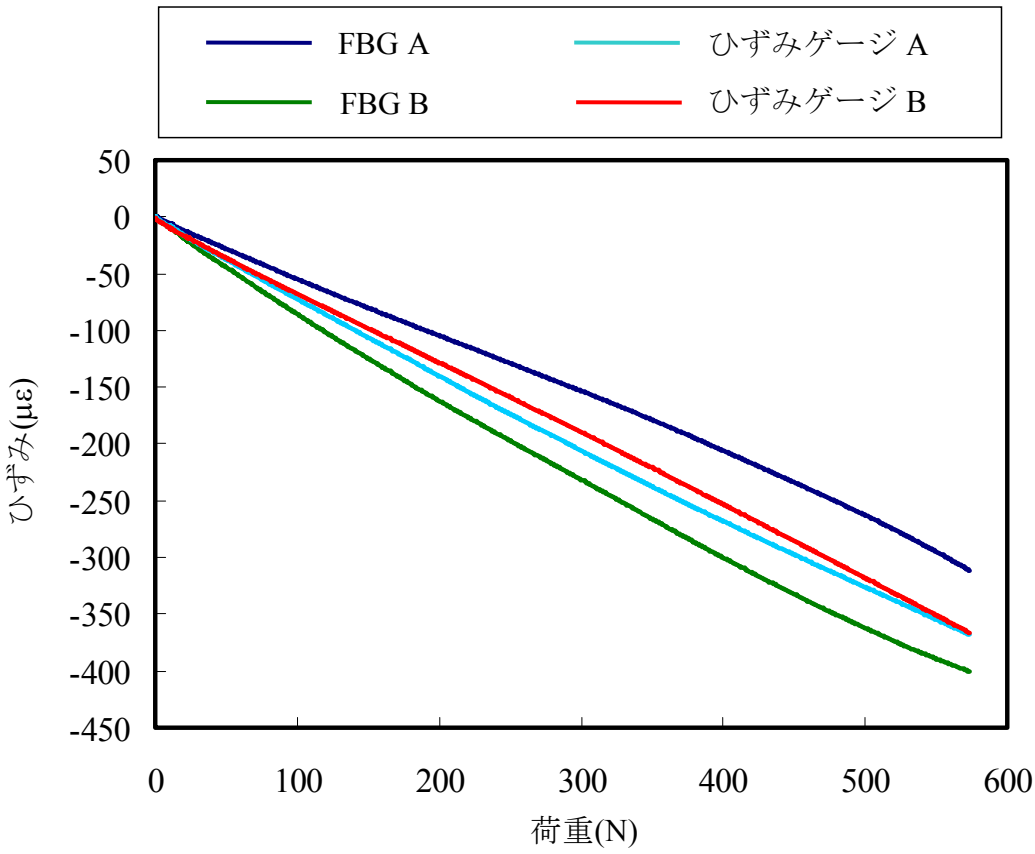


図 3.11　4 点曲げ試験のひずみ計測結果

第4章　　衝撃位置同定

4.1　供試体の設計

本研究では、第 3 章での予備実験に用いたCFRPクロス材(東邦テナックス)とフォーム材(ROHACELL WF51)によって、供試体を作製した。それぞれの材料物性を表 4.1[11]，表 4.2[12]に示す。表 4.1において、下付き添え字 1，2 はCFRPクロス材の面内方向を表し、下付き添え字 3 は面外方向を表す。これらの材料は、民間航空機の機首構造に対するフォームコアサンドイッチ構造の適用を目的とした研究[11]で用いられていたものと同様である。また、従来の航空機のストリンガ間隔は約 510mmであるので、ストリンガ間の衝撃位置同定をすることを想定し、供試体の大きさは 500mm×500mmとした。なお、供試体は川崎重工業(株)に作製を依頼した。

航空機の運航中には、常に数百με程度のひずみが発生しているため、運航中に物体が衝突することにより発生する小さなひずみ変動は常に発生しているひずみ変動に埋もれてしまう可能性がある。しかし、BVID(Barely Visible Impact Damage)の主な原因の一つである点検中のツールドロップは、駐機中に発生し、ひずみも小さいと考えられるので、小さなひずみ変動に対しても大きなひずみ変動に対しても衝撃位置同定が可能である必要がある。そのため、本研究では、ある程度大きなひずみを発生させることができるように供試体の支持条件は 4 隅支持とした。

また、精度の良い衝撃位置同定を行うためには、構造中で大きなひずみが発生しやすい部分にセンサを取り付けたほうが良い。そのため本研究では、500mm×500mm のフォームコアサンドイッチパネルを 4 隅で支持した場合に、どの部分で大きなひずみが発生しやすいかを調べるために、有限要素法解析プログラム ABAQUS6.6-1 を用いて弾性解析を行った。最も大きいひずみが発生するのは、当然、荷重負荷位置の近傍であるが、このひずみを計測して位置同定を行うためには、かなり高い密度でセンサを配置しなければいけないため、現実的ではない。そのため、ある程度荷重負荷点から離れた位置で、ひずみの発生しやすい部分を調べた。その結果、どの位置に荷重を与えてもある程度の大きさのひずみが発生する部分は、供試体の 4 辺の中央の端部に近い部分であった。こ

の結果より、FBG センサは各辺の中心の端部から 20mm の位置の表面材とコア材の界面に、端部と平行になるように埋め込むこととした。以上により、作成した供試体の模式図を図 4.1 に示す。作成した供試体の全体の質量は、1.1kg であった。

表 4.1　CFRP クロス材の材料物性

	CFRP クロス材 (0,90)
E_1 (GPa)	54.9
E_2(GPa)	54.9
E_3(GPa)	8.61
G_1 (GPa)	3.23
G_2(GPa)	3.23
G_3(GPa)	3.53
ν_1	0.052
ν_2	0.33
ν_3	0.33

表 4.2　フォーム材 ROHACELL WF51 の材料物性

	ROHACELL WF51
密度 (kg/m^3)	52
圧縮強度 (MPa)	0.8
引張強度 (MPa)	1.6
曲げ強さ (MPa)	1.6
せん断強度 (MPa)	0.8
弾性率 (MPa)	85
せん断剛性 (MPa)	30
ポアソン比(MPa)	0.42

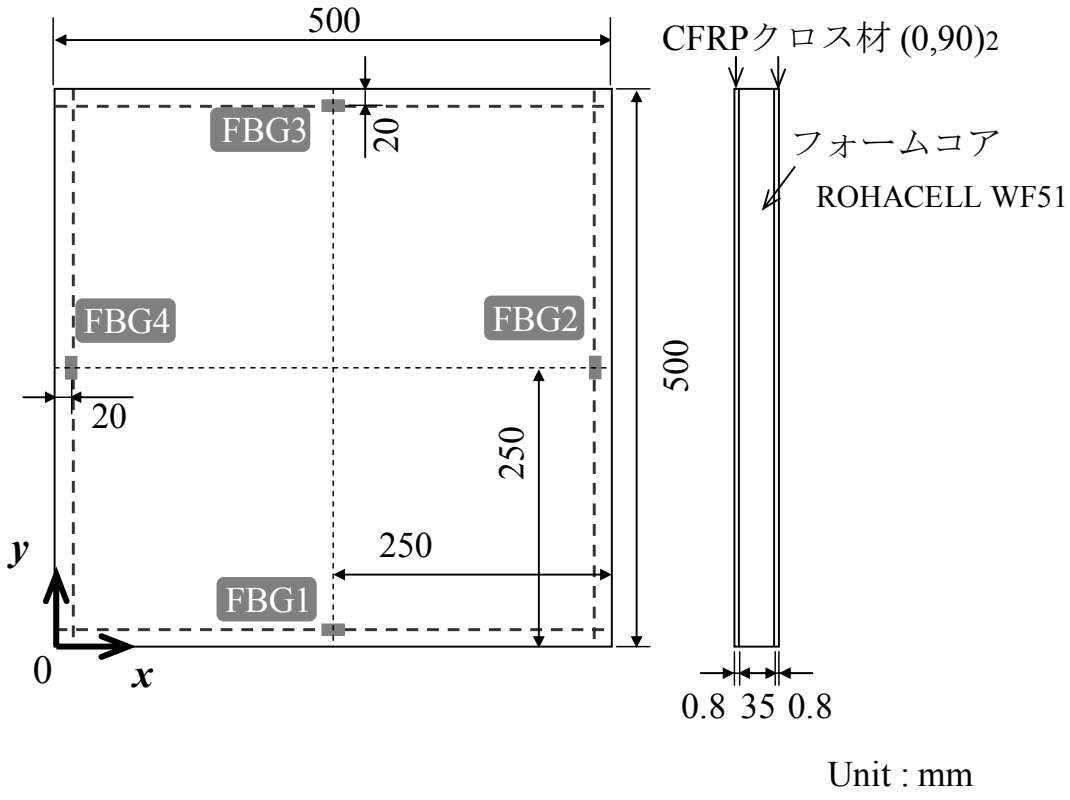

500
CFRPクロス材 (0,90)2
FBG3
20
フォームコア
ROHACELL WF51
FBG4
FBG2
500
20
250
250
y
FBG1
0
x
0.8 35 0.8
Unit : mm

図 4.1　供試体の模式図

4.2　衝撃位置同定手法

低速衝撃におけるサンドイッチパネルの応答は、準静的押し込み試験における応答と同様とみなすことができるという報告がある[13]。実際に衝撃試験を行うと、高次モードの振動も発生するが、フォームコアサンドイッチの場合、高次モードの振動はコアで吸収され、準静的押し込み試験と同じとみなせる供試体全体の変形によるひずみが支配的となると考えられる。また、フォームコアサンドイッチパネルの場合、損傷は荷重負荷点近傍で局所的に発生するため、荷重負荷点からある程度離れた場所におけるひずみは、損傷の有無によらない。そこで、本研究ではまず、荷重が加わった位置によるひずみの変化を、準静的な押し込み試験を模擬した弾性解析により求めることとした。さらに、FBGセンサの埋め込みによる影響を除去するために、実際の供試体に押し込み試験を行い、弾性解析結果の補正を行う。そして、その補正した結果を、実際に計測した衝撃負荷時のひずみ応答と比較することで衝撃位置同定を行う。以下、詳しい手順及び実際の計算・計測結果について説明する。

4.2.1　弾性解析を用いた押し込み位置の変化によるひずみの変化

弾性解析には、有限要素法解析プログラム ABAQUS 6.6-1 を用いて、図 4.1に示した供試体を模擬したモデルを作成した。図 4.2に×印で示した各点を中心とした直径 25mm の円に一様に 0.2mm の変位を与え、その結果生じる各 FBG センサの位置におけるひずみの変化を計算した。そのため、衝撃位置同定を行うのは、図 4.2中の薄い灰色で示した 300mm×300mm の領域とする。図 4.3，図 4.4に弾性解析により計算した、変位を与えた面側の表面におけるひずみ分布例をあげる。

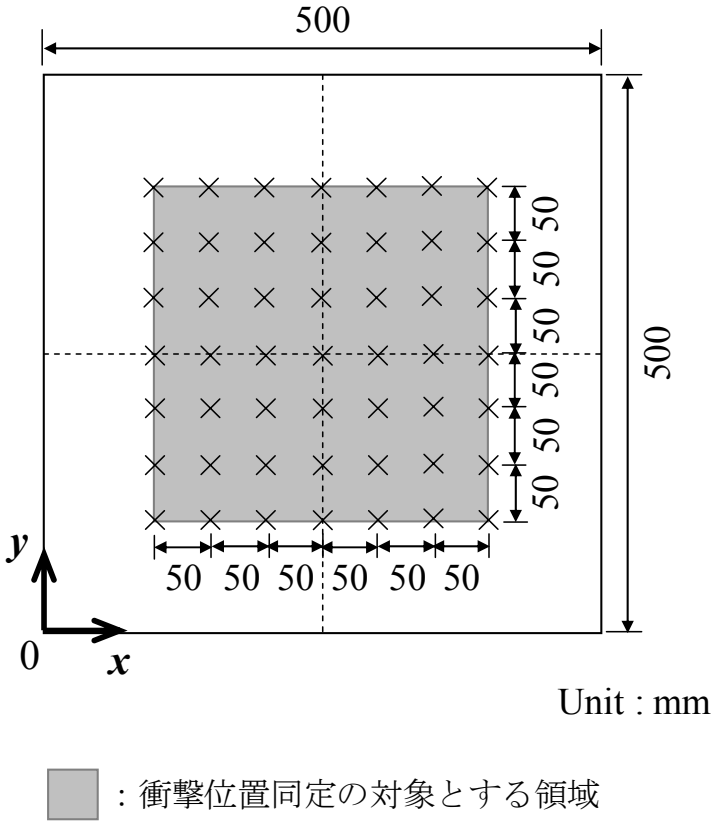

500
500
50
50
50
50
50
50
50
50
50
50
50
y
0
x
Unit : mm
：衝撃位置同定の対象とする領域

図 4.2　変位を与えた点

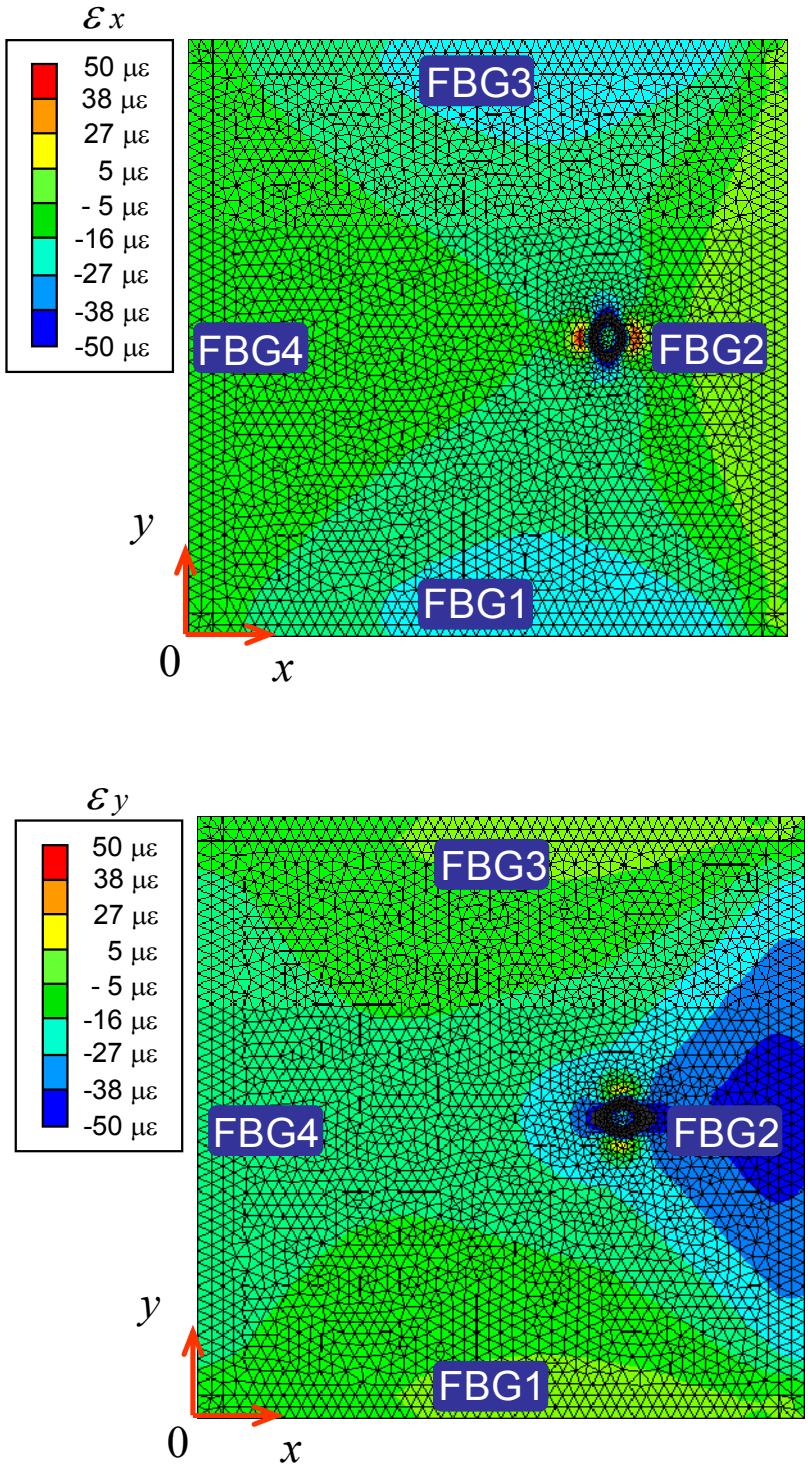
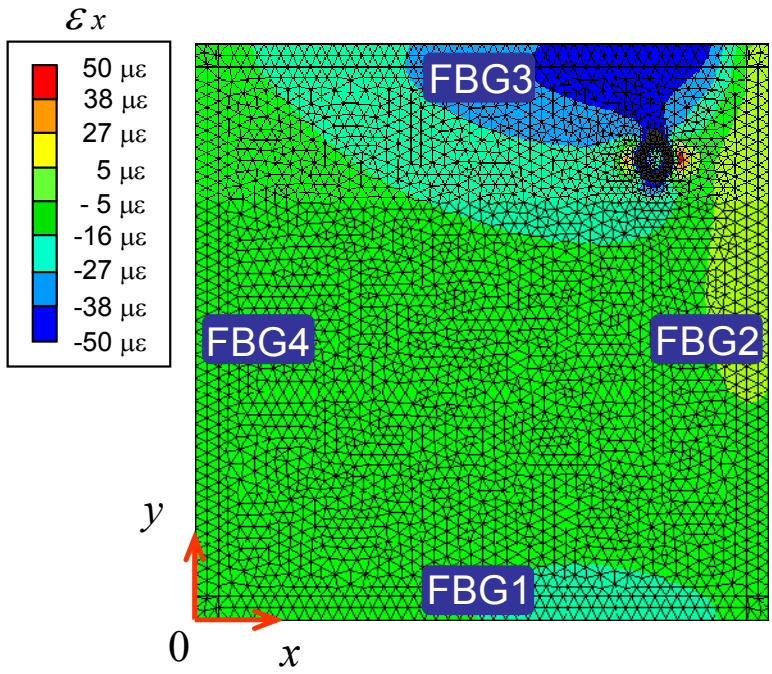


図 4.3　ひずみ分布の計算例(1)：x=350(mm), y=250(mm)を中心に変位を与えた場合



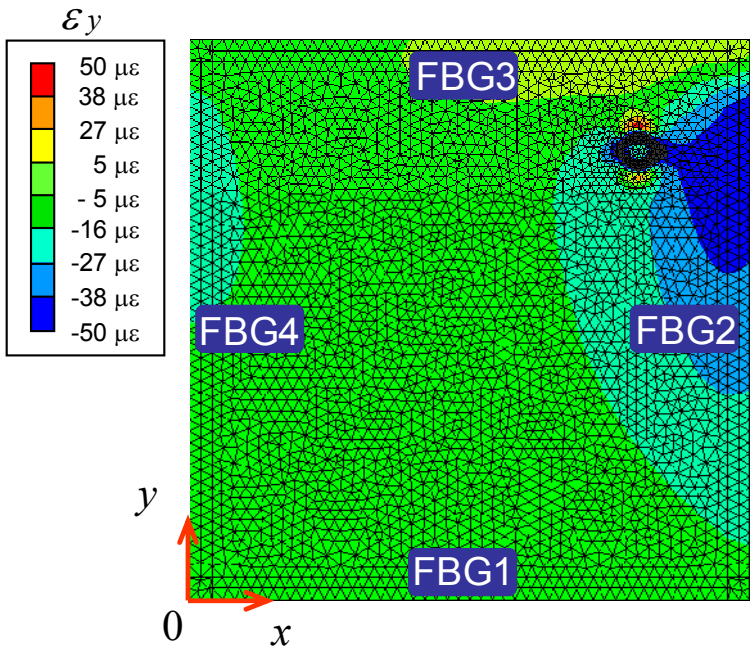


図 4.4　ひずみ分布の計算例(1)：x=400(mm), y=400(mm)を中心に変位を与えた場合

4.2.2　押し込み試験による弾性解析の補正手法

3.4 節で述べたようにフォームコアサンドイッチ構造の表面材とコア材の界面に FBG センサを埋め込んだ場合には、埋め込んでいない状態で計測した値から中心波長シフト量とひずみの関係が変化してしまう。その埋め込みによる影響を除去するために、実際の供試体に押し込み試験を行い、以下に示すような手順で押し込み試験による補正を行う。弾性解析の結果を基にする理由は、押し込み試験の結果には計測誤差が含まれている可能性があるためである。また、ひずみの大きさは、加えた荷重の位置だけではなく加えた荷重の大きさによっても変化してしまう。そのため、荷重の大きさによるひずみ変化の影響を取り除くために、衝撃位置同定を行う際には、各 FBG センサ位置におけるひずみの比を用いることとした。

位置iに変位を与えたときの、弾性解析により計算されたある二つのFBGセンサa,b（本研究では図 4.1 に示すFBG1 からFBG4 の中から選んだ任意の 2 つのセンサ）の位置におけるひずみの比r_iは、次式のように計算される。

$$r_i = \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_b} \tag{4.1}$$

ここで、ε_aはFBG aの位置におけるひずみ、ε_bはFBG bの位置におけるひずみである。同様に、位置iを押し込んだときの押し込み試験により計測したFBG a,b のひずみの比r'_iは、次式のように計算される。

$$r'_i = \frac{\varepsilon'_a}{\varepsilon'_b} \tag{4.2}$$

ここで、ε'_aはFBG aで計測されたひずみ、ε'_bはFBG bで計測されたひずみである。これらを用いて、補正に用いる係数は次式のように求めた。

$$R = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{r_i'}{r_i} \tag{4.3}$$

ここで、nは荷重を与えた点の総数である。上記のようにして求めたRを弾性解析により計算したひずみの比r_iにかけあわせたものを用いて、次節で説明する位置同定マップを作成する。

4.2.3　位置同定マップの作成

図 4.1に模式図を示した衝撃試験に用いる供試体に対して、押し込み試験を行った。押し込みには、重さ 3.6kg、供試体と接する面が直径 25mm の円形のおもりを用いた。おもりを置いた位置は図 4.2に×印で示した点と同様である。また、ひずみの計測には、SAWD システムを用いた。試験の概要を図 4.5に示す。前節で説明した補正手法で、この押し込み試験結果から 4.2.1 節の弾性解析結果の補正を行い、図 4.6，図 4.7，図 4.8 に示す位置同定マップを作成した。その際に用いた補正係数 R は表 4.3に示した。ここでは、次節の衝撃位置同定の際に用いるもののみを示している。実際に押し込み試験および弾性解析を行った点は、図中の格子点に相当する。

次に、実際に計測した衝撃負荷時のひずみ応答から、この位置同定マップを用いて衝撃位置を推定する方法について説明する。3 点のひずみ情報がわかれば衝撃位置は推定できるので、本研究では衝撃負荷位置に近い 3 つ FBG センサ(実際の計測では、4 つの FBG センサのひずみ応答から最も小さいものを除いた 3 つの FBG センサ)を用いてひずみの比を計算する。衝撃位置同定に用いるひずみの比は、衝撃負荷点から最も近い FBG センサ(最も大きなひずみが発生している FBG センサ)のひずみ応答が最大となっている時刻における値を用いることとする。ピーク値のひずみの比を用いる理由は、低速衝撃試験の場合には、1 次モードの変形が支配的ではあるが、高次モードの振動も発生するため、ひずみが小さい間は、高次モードにより振動により発生しているひずみの影響が無視できないためである。さらに、ひずみ応答より計算したひずみの比と位置同定マップを比較し、それぞれのひずみの比から衝撃負荷領域を推定する。そして、3 つの FBG センサのひずみの比から推定された衝撃負荷領域を重ねあわせ、それらが重なった部分を推定した衝撃負荷領域とする。計測されたひずみの比からどの部分を衝撃負荷領域と推定するかは、次節で例を上げて説明する。

実際に航空機のような大きな構造のヘルスモニタリングを行う際には、おおよその損傷部分がわかれば、検査のコスト短縮につながるため、現状では十分であると考えられる。また、特に運航中には、常に様々な要因でひずみが発生しており、高い精度で衝撃位置同定を行うためには、それらの要因を考慮する必要があると考えられる。そのため、本研究ではひずみにそのような外乱が含まれていても衝撃位置同定が可能であるように、衝撃負荷位置の推定領域を 50mm×50mm というある程度の大きさをもった領域とした。

表 4.3　補正係数 R

	R
FBG1/2	0.818
FBG1/4	0.896
FBG4/2	0.909

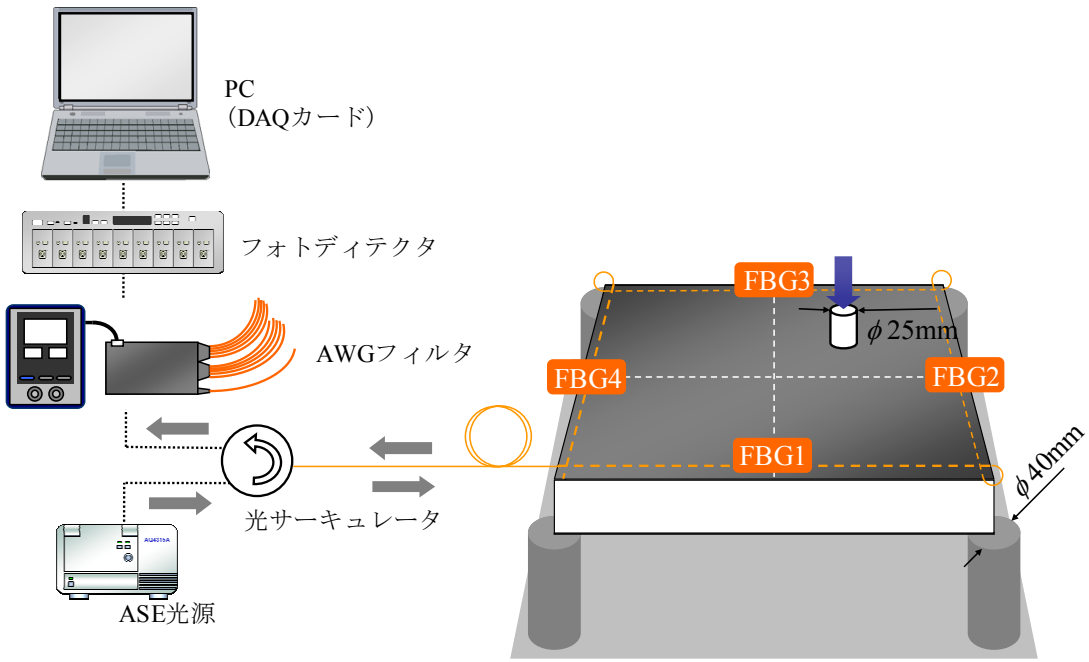


図 4.5　押し込み試験の概要図

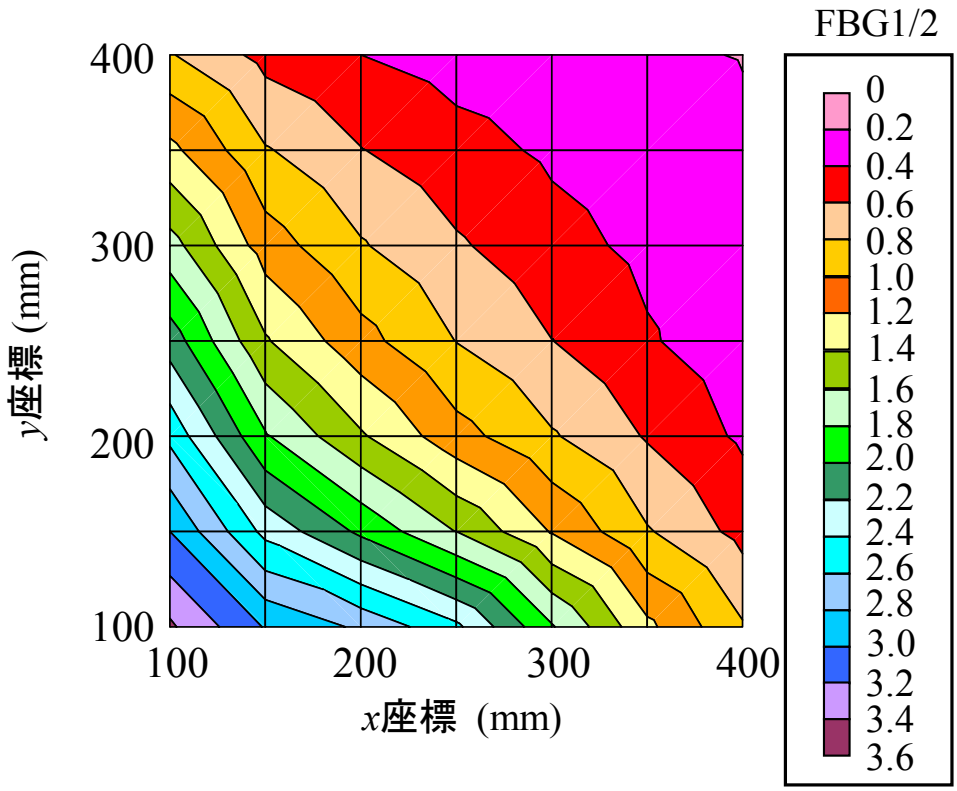


図 4.6　位置同定マップ(FBG1/2)

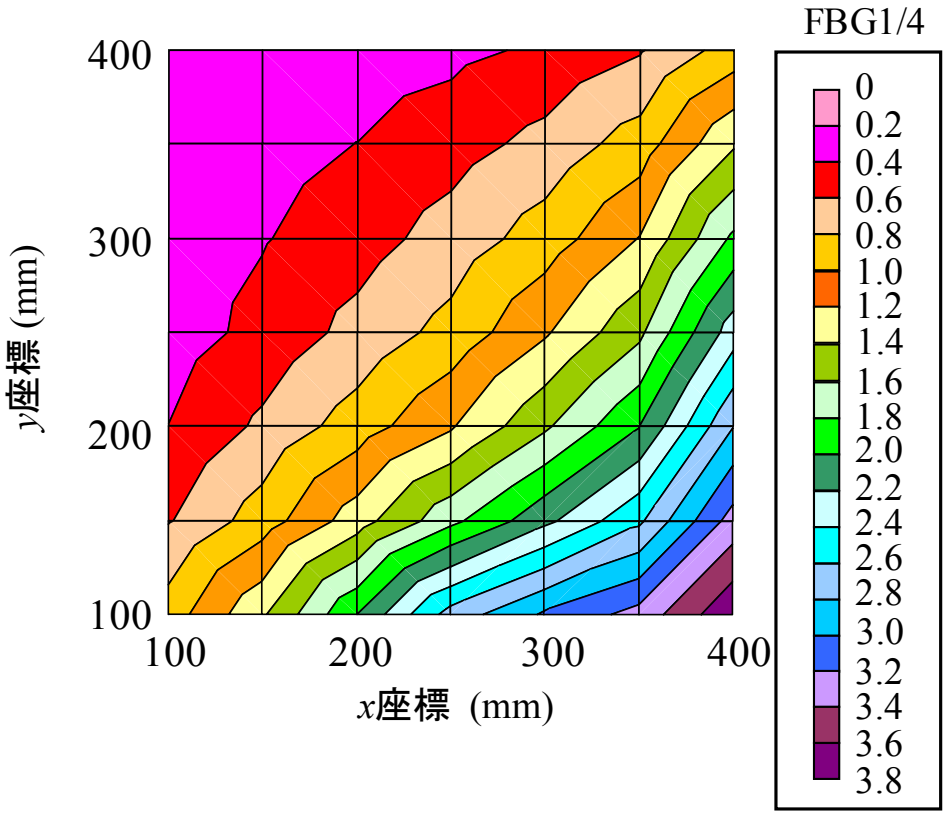


図 4.7　位置同定マップ(FBG1/4)

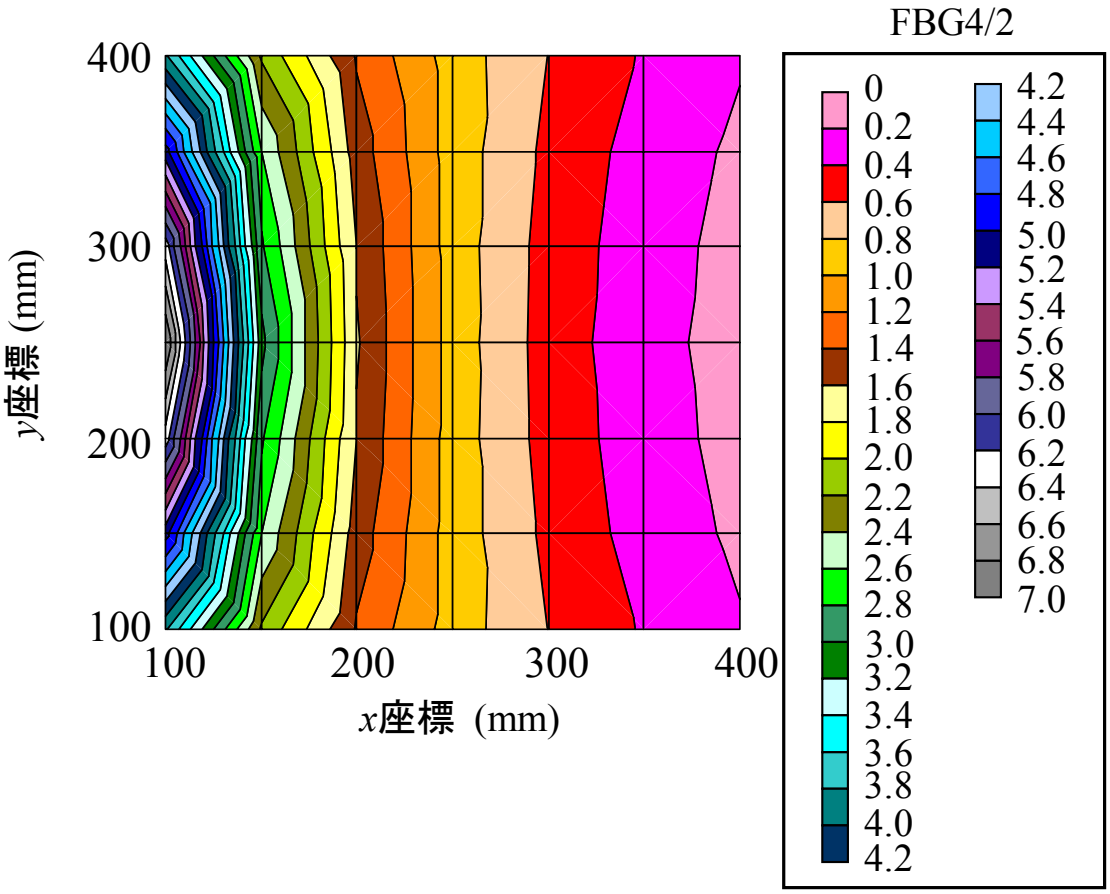


図 4.8　位置同定マップ(FBG4/2)

4.3　衝撃試験による検証

前節で説明した衝撃位置同定手法を、衝撃試験により実証する。どのような衝撃でも位置同定が可能であることを示すため、衝撃試験は、衝撃荷重が小さく損傷が発生しない場合と、衝撃荷重が大きく損傷が発生する場合の 2 通りの試験を行った。

4.3.1　損傷のない場合

供試体は図 4.1に示したものを用いた。実験に用いた FBG センサの反射光スペクトルと AWG フィルタの出射ポートの透過光スペクトルを図 4.9に示す。計測に用いた AWG フィルタの出射ポートは図 4.9において、濃い灰色の線で示した透過帯域を持つものである。インパクトハンマ(Brüel&Kjær，Type8206-001)を用いて衝撃を加え、そのときの FBG1，FBG2，FBG4 のひずみ応答を同時に計測した。衝撃試験の概要を図 4.10に示す。DAQ カードによる計測のサンプリングレートは 30kHz とした。インパクトハンマの荷重履歴および SAWD システムで計測したひずみ応答を図 4.11、図 4.12に示す。SAWD システムがミリ秒単位で、10με以下のひずみを精度よく計測可能なことが確認できた。また、荷重履歴とひずみ応答を比較すると、荷重が大きくなっている間はひずみも増加し、荷重が減少している間はひずみも減少しているので、計測結果からも、準静的な押し込み試験と同じとみなせる 1 次モードの変形が生じていることがわかる。図 4.12に示したひずみ応答から、最もひずみの値の大きい FBG2 のピーク時における各 FBG センサのひずみの比はそれぞれ表 4.4のように計算される。たとえば、FBG1/4 は 1.227 であり 1.2-1.4 の間の値なので、図 4.7においてクリーム色で示されている部分を含んでいる 50mm ×50mm の領域を全て推定された衝撃負荷領域とする。FBG1/2 および FBG4/2 に関しても同様に衝撃負荷位置を推定し、それぞれから推定した領域を重ね合わせたものが図 4.13のようになる。図 4.13において、白い太線で囲んだ領域が、3 つのひずみの比が重なる領域であり、推定された衝撃負荷位置である。この結果より、衝撃位置の推定領域が実際に衝撃を負荷した点を含んでいるので、損傷の発生しないひずみの小さな衝撃に対して、このシステムで衝撃位置同定が可能であることがわかる。

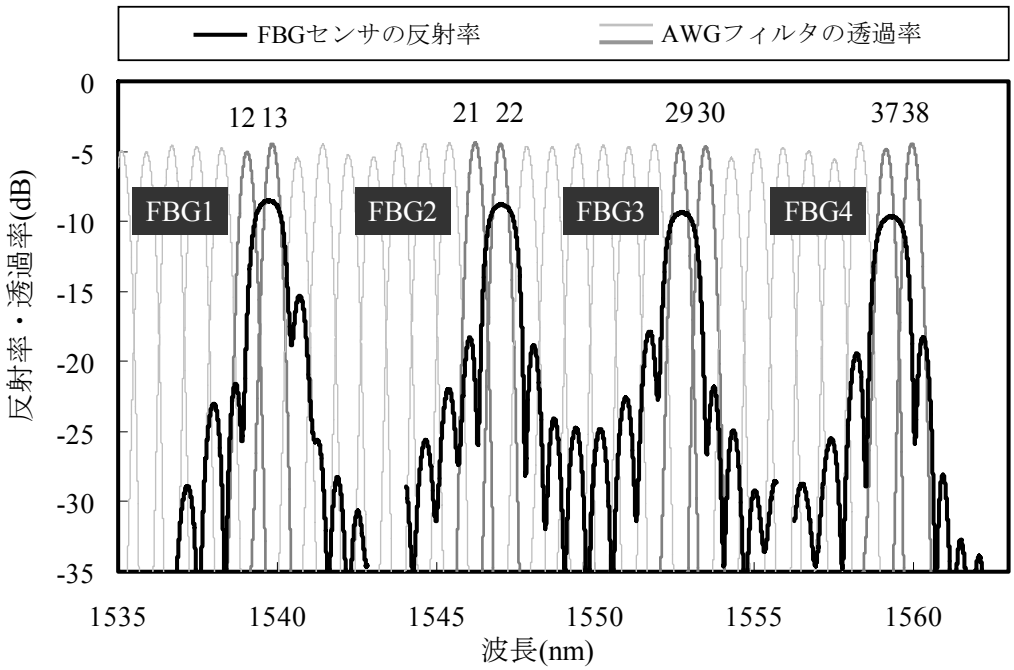


図 4.9　FBG センサの反射率と AWG フィルタの透過率

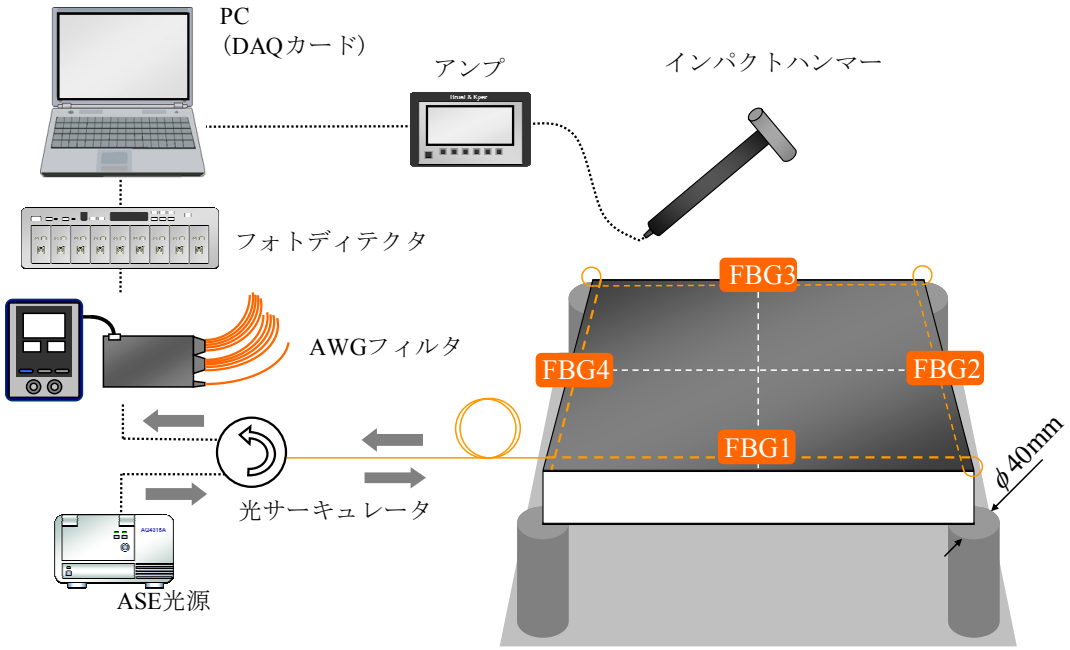


図 4.10　インパクトハンマを用いた衝撃試験の概要図

表 4.4　損傷のない場合のひずみの比

	FBG1/2	FBG1/4	FBG4/2
ひずみの比	0.573	1.227	0.467

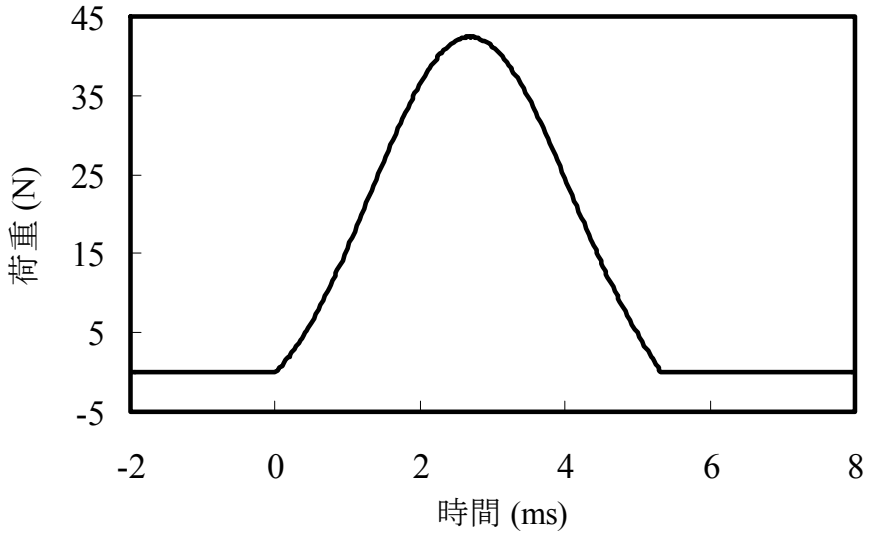


図 4.11　損傷のない場合の荷重履歴

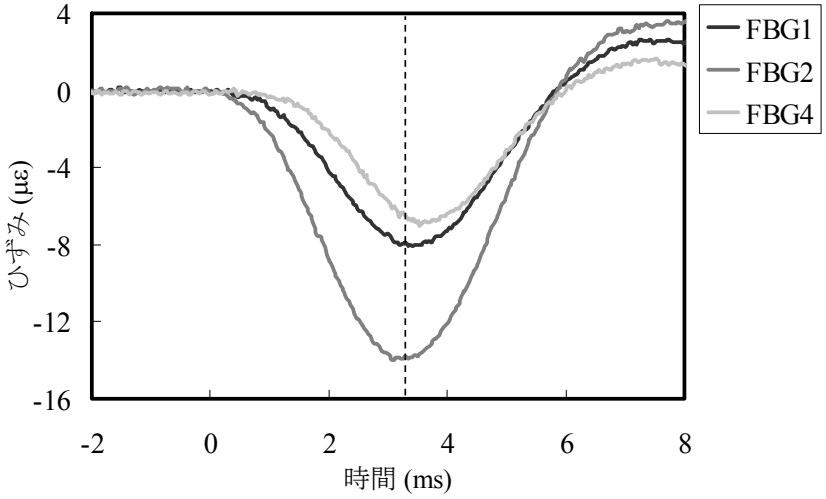


図 4.12　損傷のない場合のひずみ応答

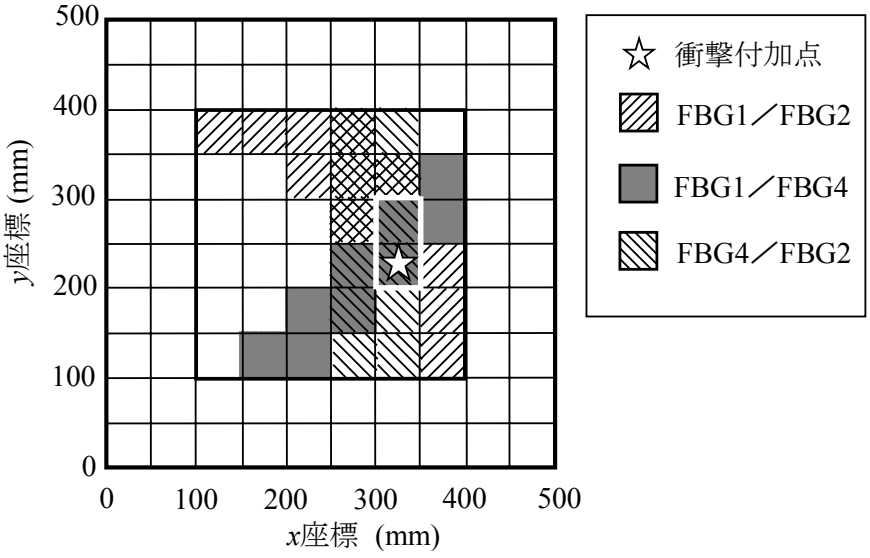


図 4.13　損傷のない場合の位置同定結果

4.3.2　損傷のある場合

供試体は、同様に図 4.1に示したものを用いた。大きな荷重の衝撃試験の試験概要を図 4.14に示す。衝撃には、落錘衝撃試験機(米倉製作所)を用い、高さ 70mm の位置から重さは 5.6kg のおもりを自由落下させた。衝撃負荷位置は、損傷の発生しない場合と同じ位置とした。その際の荷重履歴と 4 つの FBG センサのひずみ応答をそれぞれ図 4.15, 図 4.16に示す。また、このときの衝撃エネルギーは 4.778J であった。この荷重履歴とひずみ応答を比較すると、高次モードの影響も見られるものの、荷重が増加している間はひずみも増加し、荷重が減少している間はひずみも減少しているので、1 次モードの変形が支配的であると考えられる。最も発生するひずみの大きい FBG2 のピーク時における FBG1,2,4 より計算されるひずみの比は表 4.5のようになり、先ほど説明した手法で位置同定すると、図 4.17のようになる。白い太線で囲んだ領域が、3 つのひずみの比により推定された領域が重なる部分であり、推定された衝撃負荷位置である。この結果より、衝撃負荷位置の推定領域は、先の損傷なしの場合と同様であり、実際に衝撃を負荷した位置を含んでいるので、この手法で損傷が発生する場合でも、位置同定が可能であることがわかる。また、この時に発生した損傷によるへこみは約 1.5mm で、航空機の検査において目視発見が困難であるといわれる損傷である。

以上より、本研究で提案した埋め込み FBG センサによるひずみ計測システムおよび衝撃位置同定手法により、損傷の有無によらず衝撃位置同定が可能であることが実証された。

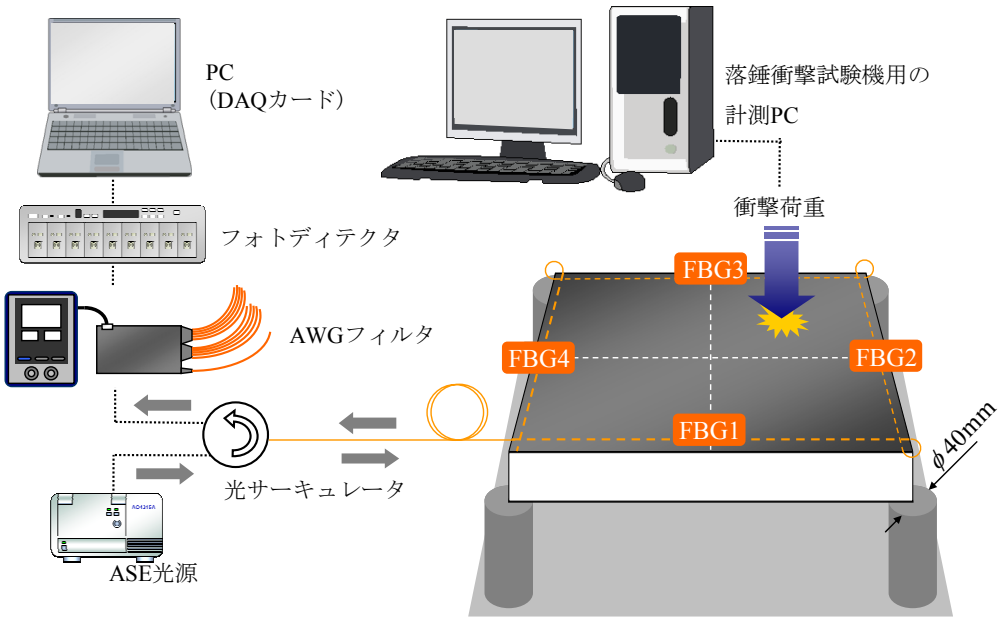


図 4.14　落錘衝撃試験機を用いた衝撃試験の試験概要

表 4.5　損傷のある場合のひずみの比

	FBG1/2	FBG1/4	FBG4/2
ひずみの比	0.527	1.483	0.355

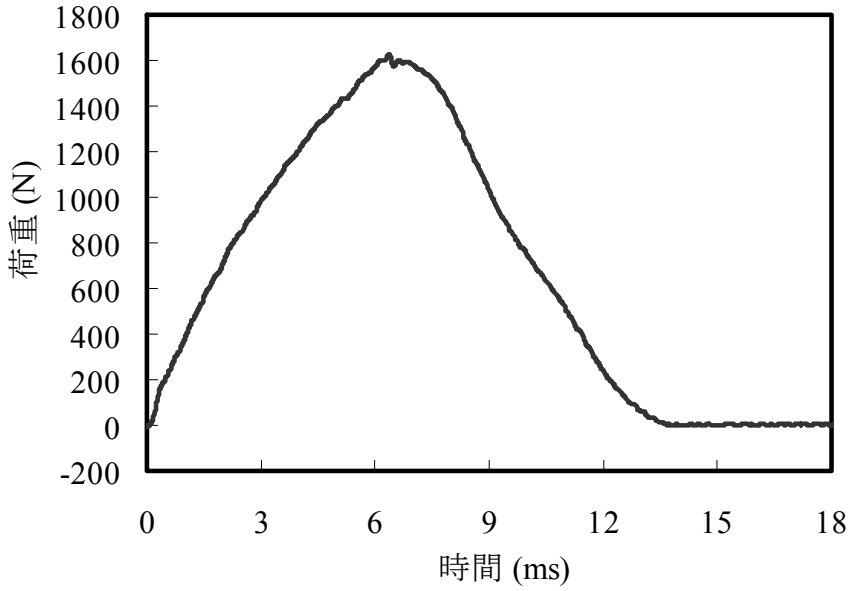


図 4.15　損傷のある場合の荷重履歴

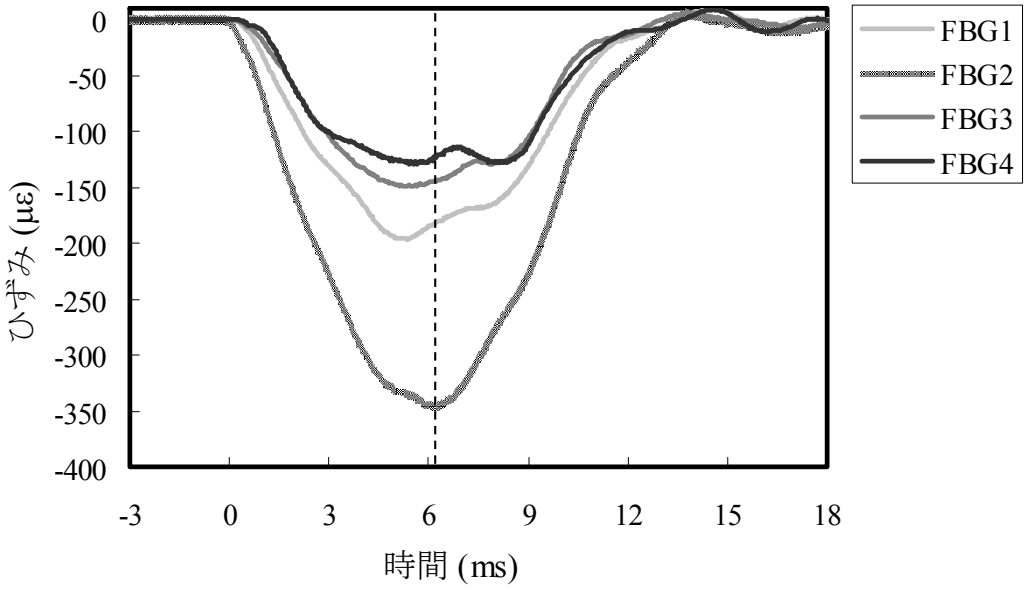


図 4.16　損傷のある場合のひずみ応答

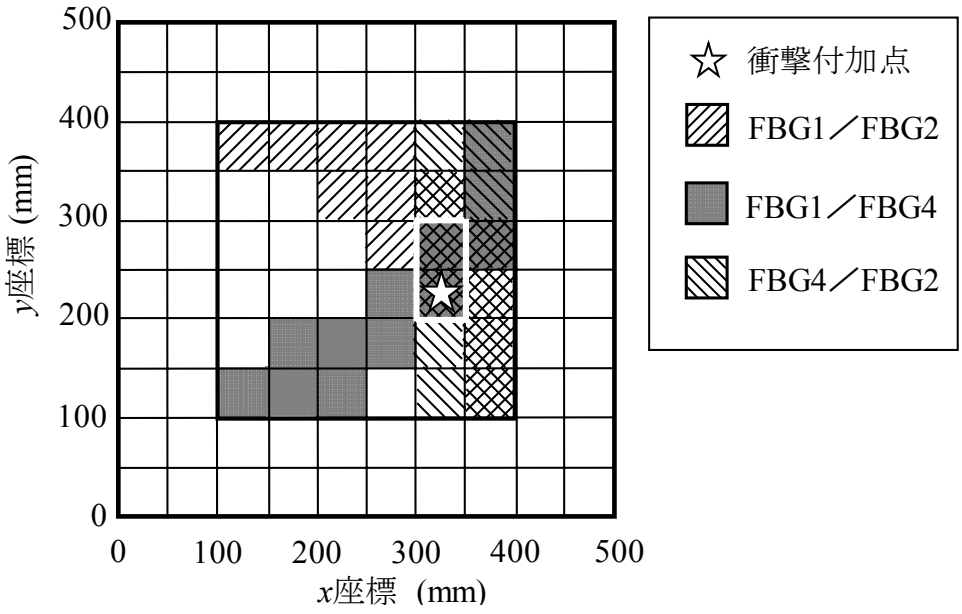


図 4.17　損傷のある場合の衝撃位置同定結果

第5章　結言

本研究では、埋め込み FBG センサを用いた衝撃位置同定を目的とした。

これまで、SAWD システムを用いてひずみを計測している例はほとんどなかったので、まず SAWD システムによるひずみ計測について確認した。FBG センサを CFRP 一方向材の表面に貼り付けた試験片と、FBG センサを CFRP クロス材とフォームコアの界面に埋め込んだ試験片を作成し、ひずみを与えたときの応答を計測した。

FBG センサを表面に貼り付けた試験片は材料試験機を用いて引張試験を行い、同じく表面に貼り付けたひずみゲージとの比較を行った。その結果、貼り付け FBG センサを用いた SAWD システムは正しくひずみが計測できることがわかった。

また、FBG センサをフォームコアサンドイッチパネルに埋め込んだ供試体に対しては、4 点曲げ試験により計測されるひずみの値の検証を行った。その結果、埋め込んだ FBG センサを用いて SAWD システムにより計測したひずみは、表面に貼り付けたひずみゲージと異なる値となった。その原因としては、埋め込みの影響で FBG センサの中心波長シフト量とひずみの関係が事前に計測したものからずれてしまったことが考えられる。そのため、本研究では、衝撃位置同定を行う FBG センサを埋め込んだフォームコアサンドイッチパネルに対して、事前に押し込み試験を行い、ひずみのずれの補正を行うこととした。

次に、有限要素法解析プログラム ABAQUS6.6－1 を用いた、準静的な押し込み試験を模擬した弾性解析により、荷重が加わった位置によるひずみの変化を計算した。ひずみの大きさは荷重の大きさによっても変化してしまうので、その影響を取り除くために、各荷重位置におけるひずみの比をとることにした。弾性解析により計算した押し込み位置によるひずみの比を押し込み試験により補正したものを用いて、押し込み位置とその時のそれぞれの FBG センサでのひずみの比を表す図を作成した。衝撃位置同定には、衝撃試験により計測したひずみ応答のピーク値におけるひずみの比を計算し、それを作成した図と比較することにより位置同定を行った。その結果、この手法で損傷の有無によらず、おおよその衝撃負荷位置が推定できることがわかった。

しかし、今回の衝撃位置同定システムには、いくつかの課題が残っている。

まず、SAWD システムのひずみ計測の精度に関して下記のような課題がある。

(1)温度変化の影響
FBG センサ、AWG フィルタはともに温度により影響を受けるため、ひずみを厳密に計測するためにはその温度変化を計測し、フィードバックを行う必要がある。

(2)FBG センサの埋め込みによる影響
FBG センサを CFRP クロス材とフォーム材の界面に埋め込んだ場合の FBG センサの挙動に関してもより詳しく調べ、埋め込み状態により変化しないようにするか、どのように変化するのかを推定できる必要がある。今回は埋め込んだ各 FBG センサのそれぞれにたいして挙動を計測し補正を行ったが、実際にこのシステムを用いることになった場合には、多数の FBG センサを埋め込む必要があり、FBG センサの応答を一つ一つ計測することは困難であるためである。

(3)大きなひずみが発生した場合の FBG センサの挙動
現在の SAWD システムによるひずみ計測は、事前に計測しておいた FBG センサの反射光スペクトル形状が変化しないという前提に基づいている。しかし、ひずみがある程度大きくなると、反射光スペクトルの形状が、わずかにではあるが変化するため、それに伴って AWG フィルタを透過するパワーが変わってしまう。そのため、現在のシステムでは、スペクトル形状の変化に対する計測誤差を考慮していないこともあり、大きなひずみに対してはひずみ精度が低下してしまう可能性がある。本研究では、顕著なひずみ精度低下が現れることはなかったが、実用的の観点からはさらなる改良が求められる。

また、衝撃位置同定の手法に関しても下記のような課題がある。

(1)リアルタイムでの衝撃位置同定
今回は、計測した後にどこに衝撃があたったのか確認する手法を提案したが、最終的にはリアルタイムで衝撃位置同定できる必要があるので、ひずみ応答から自動的に衝撃位置を同定できるようなアルゴリズムの作成が必要となる。

(2)センサ配置の最適化
本研究では、500mm×500mm の供試体に対して、端部の方に埋め込んだ 4 つの FBG センサを用いて衝撃位置同定を行ったが、どの程度の間隔で FBG センサを配置することが最適なのか検討する必要もあると考えられる。

(3)衝撃荷重同定・衝撃損傷検出

本研究は、衝撃損傷検出の第一段階として行ったものであるため、次のステップとして、衝撃損傷検出につなげる必要がある。衝撃負荷位置とひずみの大きさが分かれば、解析により負荷された衝撃荷重の大きさが推定できる。衝撃荷重の大きさが推定できれば、おおよその損傷の程度も推定できると考えられる。そのため、まず、衝撃負荷時のフォームコアサンドイッチパネルの詳細な挙動の解析が必要である。

参考文献

[1] 宮入裕夫，“サンドイッチ構造の基礎”，日刊工業新聞社，1999

[2] D. Zenkert, A. Shipsha, P. Bull, B. Hayman, “Damage tolerance assessment of composite sandwich panels with localized damage” . Composites Science and Technology 65(15-16), pp. 2597-2611, 2005

[3] A. S. Herrmann, P. C. Zahlen, I. Zuardy, “Sandwich Structures Technology in Commercial Aviation Present Applications and Future Trends”, Proceedings of the 7th International Conference on Sandwich Structures (ICSS-7). Aalborg, August, pp. 13-26, 2005

[4] Y. Hirose, M. Konishi, K. Kosugi, M. Imuta, H. Kikukawa, “Industrial application of CFRP sandwich panel for Aircraft structure ”, Proc Conference ICCM/8, Tenerife, Canary Island, Spain, pp. 355-356, 2001

[5] Y. Hirose, M. Hojo, A. Fujiyoshi, G. Matsubara, “Suppression of interfacial crack for foam core sandwich panel with crack arrester”, ADVANCED COMPOSITE MATERIALS 16 (1), pp. 11-30, 2007

[6] http://www.ims.mstc.or.jp/event_report/express/pdf/h19_salon_no9.pdf

[7] W. Staszewski, C. Boller and G. Tomlinson, “Health Monitoring of Aerospace Structures – SMART SENSOR TECHNOLOGIES AND SOGNAL PROCEEDING-”, WILEY, Chichester, 2003

[8] R. J. V. Steekiste and G. S. Springer, “Strain and Temperature Measurement with FIBER OPTIC SENSORS”, TECNOPMIC publication, 1997

[9] 斎藤恒聡，太田寿彦，虎谷智明，小野義視，“100GHz－16ch AWG モジュール”，古川電工時報，第 105 号，pp. 30-35, 2000

[10] S. Kojima, A. Hongo, S. Komatsuzaki, N. Takeda, “High-speed optical wavelength interrogator using a PLC-type optical filter for fiber Bragg grating sensor”, Proceedings of SPIE 5384, pp. 241-249, 2004

[11] Y. Hirose, K. Kosugi, M. Nishitani, H. Sashikuma, M. Iwata, H. Fukagawa and H. Hukugawa, “The CFRP sandwich panel for aircraft nose structure”, Proc. 23rd Int. Congress Aerospace Sci. , Toronto, Canada, pp. 343.1-343.10, 2002

[12] Q. M. Li, R. A. W. Mines, R. S. Birch, “The crush behavior of Rohacell-51WF structural foam”, International Journal of Solids and Structures 37, pp. 6321-6341, 2000

[13] P. M. Schubel, J. J. Luo, I. M. Daniel, “Low velocity impact behavior of composite sandwich panels”, Composites: PartA 36, pp. 1389-1396, 2005

本論文に関する学会発表

秋野望，水口周，水谷忠均，武田展雄，“埋め込み FBG センサを用いたフォームコアサンドイッチパネルの衝撃位置同定”，日本機会学会　2007 年度年次大会，2007

Nozomi AKINO, Shu MINAKUCHI, Tadahito MIZUTANI, Nobuo TAKEDA, “Impact detection system for foam core sandwich panel using embedded FBG sensors”, 10th Japan International SAMPE Symposium and Exhibition (JISSE-10)

謝辞

本論文を完成させるにあたり、多くの方から多大なるご支援をいただきました。

指導教官である武田展雄教授には、興味深いテーマを与えていただきました。このテーマを通して、研究の難しさやおもしろさを学ぶことが出来ました。心から感謝いたします。

水谷忠均助教には、研究に行き詰った時にはいつも相談にのっていただき、研究に対する考え方も教えていただきました。いつも締め切りぎりぎりになってしまい、ご迷惑をおかけしてしまったことも多かったと思います。心から感謝いたします。

水口周氏(東京大学大学院博士課程)にも、困ったときはいつも相談にのっていただき、的確なアドバイスをいただきました。一人ではどうしようもなくなった時には、助言をいただくだけではなく、手伝っていただいたこともありました。心より感謝いたします。

私の研究が何とか形になったのは、特にこのお二人のお力添えによるものと思っています。本当にありがとうございました。

木元順一氏(川崎重工(株))、筒井寛明氏(川崎重工(株))には、東大では作成できない大きな供試体の作成をしていただきました。感謝いたします。

さらに、武田研究室の皆様には、実験機器の使用法を教えていただき、研究を進めていく中で、いろいろと相談にのっていただき、たくさんの助言をいただきました。また、皆様のおかげで楽しい研究室生活を送ることができました。本当にありがとうございました。

特に、同期の伊藤悠策氏(東京大学大学院修士課程)、齋藤正広氏(東京大学大学院修士課程)、名取和毅氏(東京大学大学院修士課程)には、いろいろと相談にのっていただいたり、教えていただいたりしました。本当にありがとうございました。

その他、先端エネルギー工学専攻の同期をはじめ私を励まし支えてくださった多くの方々に感謝します。

最後になりますが、私の学生生活を生活面で支えてくれた両親への感謝の気持ちを記し、謝辞といたします。本当にどうもありがとうございました。

2008 年 2 月

秋野　望