
第 3 章

埋め込み多重化 FBG センサを用いたヘルスマモニタリングシステムの提案と検証

3.1 埋め込み多重化 FBG センサによるひずみ計測システムの提案

本章では、第 2 章で明らかになった CFRP 製先進グリッド構造 (AGS) を用いる際に考慮すべき損傷について、これを検知するための構造ヘルスマモニタリング (Structural Health Monitoring : SHM) システムを提案する。

1.3 節で述べた背景を考慮すると、SHM システムには、

- 考慮すべき損傷が検知できること。
- 信頼性の高いシステムであること。
- システム製造・運用が容易で、低コストであること。

の 3 点が求められる。また、第 1 章で述べたように、AGS では構造全体にどのようなモードの荷重が加わったとしても、各リブにおいてはリブ軸方向荷重のみを考慮すればよいため、損傷発生により力学的に内部構造が変化した場合、その影響は各リブ軸方向ひずみに現れると考えられる。これを考慮し、本研究において著者は、以下に述べる「多重化した FBG センサを埋め込んだひずみ計測システム」を提案する。そこでまず、FBG センサについて概説した後、このセンサの AGS への適用方法を提案する。

3.1.1 Fiber Bragg grating (FBG) センサ

Fiber Bragg grating (FBG) センサとは、近年、構造に加わるひずみを計測するセンサとして、従来の金属線の電気抵抗値の変化を利用したひずみゲージに代わって注目を集めているセンサである [3][33][43]。Fig.3.1 に FBG センサの概略図を示す。この FBG センサは、光ファイバを用いたひずみセンサである。光ファイバは、光の導波路である石英ガラスコア (Core)、その周りの同じく石英ガラスでできているが屈折率がコアよりも少し小さく製造されているクラッド (Cladding)、そして樹脂等を用いてガラスを保護するための被服、の三層で構成されている。この光ファイバ内に光を入射すると、内側のコアと外側のクラッドの屈折率の違いから、Snell の法則により定まるある角度より浅い角度の光は、その境界で全反射されるため、ほとんど損失なく光がコア内を長距離伝播する。通常センサに用いられるような単一モード光ファイバであれば、コア部分の直径は、5~10 μm 程度となっている。

FBG センサとは、この光ファイバを用いたセンサの一種で、光ファイバのコアに予め紫外線によって励起される材料を混ぜておき、紫外線やレーザーの照射によって屈折率周期構造を形成したものである (Fig.3.1 参照)。広帯域の光を入射すると、その周期構造に対応した光の干渉が起こり、狭帯域の光が反射される。その屈折率周期構造がセンサに加わるひずみ量によって変化するため、それに応じて変化する反射光の波長からひずみを計測できる。

均一なひずみがかわると、その反射光スペクトルは形状を保ったまま異なる波長の光を反射するようになる。この反射波の波長変化 $\lambda_B(\text{nm})$ は、

$$\lambda_B = 2n_{\text{avg}}\Lambda \quad (3.1)$$

という式で計算され、Bragg 波長と呼ばれる。ここで、 n_{avg} はグレーティング部のコアの平均屈折率であり、 $\Lambda(\text{nm})$ はグレーティング部の格子間隔である。この式からもわかるとおり、Bragg 波長 λ_B はコアの平均屈折率 n_{avg} と格子間隔 Λ に依存し、コア部分にひずみや温度がかわると、それに応じて起こる光弾性効果による屈折率の変化、格子間隔の変化、により Bragg 波長 λ_B が変化する。この変化から、ひずみや温度が計測される。

このセンサは、Bragg 波長以外の光は透過させるので、異なる n_{avg}, Λ をもつセンサを直列に接続し、透過した別の波長の光を別の FBG 部で利用すれば、ひとつの光ファイバ中に多数のセンサ部を作成することも可能である。

以上、この FBG センサを用いる利点をまとめると、

- 石英ガラス材料で作成されているため、電磁誘導による雑音がない。

3.1 埋め込み多重化 FBG センサによるひずみ計測システムの提案

- 火花を出す危険性がないので防爆性がある。
- 腐食に強い。
- 軽量。
- 多重化により、一本の光ファイバ中に多数の計測点を作成できる。
- 長距離伝播が可能なので大型構造に適している。

となる。

ここで、具体的に中心波長の変化からどのように FBG センサに加わるひずみが計算されるのかをより詳細に説明する。式の導出過程については附録 A において述べるが、計測された反射波長変化 $\Delta\lambda_i$ より、式 3.2 を用いて、FBG センサに加わるひずみ $\varepsilon_i^{\text{OF}}$ が計算される [34]。

$$\begin{aligned}\frac{\Delta\lambda_i}{\lambda_i} &= \left[1 - \frac{n_i^2}{2} (p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})) \right] \times \varepsilon_i^{\text{OF}} \\ \Leftrightarrow \varepsilon_i^{\text{OF}} &= \frac{1}{\left[1 - \frac{n_i^2}{2} (p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})) \right] \lambda_i} \times \Delta\lambda_i \\ \Leftrightarrow \varepsilon_i^{\text{OF}} &= C_i \times \Delta\lambda_i\end{aligned}\tag{3.2}$$

ここで ν はポアソン比を、 p は光弾性係数をあらわし、これらの値は光ファイバの材料固有の物性値である (Table 3.1 にまとめる)。(3.2) 式からわかるとおり、あらかじめ各 FBG センサの中心波長 λ_i 、平均屈折率 n_i 、がわかっているならば、反射光中心波長の変化 $\Delta\lambda_i$ から FBG センサに加わるひずみが計算できる。

3.1.2 AGS への適用

本研究では、この FBG センサを用いて AGS 中の各リブの軸方向ひずみを計測するシステムを提案する。Fig.3.2 にその概念図を示す。複数の多重化 FBG センサを、AGS のリブを構成する炭素繊維に平行に埋め込み、各リブ中央に FBG 部を置くことにより、AGS 中の全リブに生じる軸方向ひずみを常時計測することができる。

Fig.3.2 の詳細であるが、AGS には多重化された FBG センサを複数本埋め込む。この FBG センサに、光源 (Light Source) より広帯域の光を、光スイッチ (Optical Switch) を通して入射する。各光ファイバ中の FBG 部には、互いに異なる平均屈折率 n_i 及び格子間隔 Λ_i のものを用いることにより、それぞれ異なる波長 λ_i の狭帯域光を反射させ、それが再び光スイッチを通して波長計測器 (FBG monitor) に送られる。構造にひずみがかかると、埋め込まれた各 FBG センサにもそれに対応したひずみがかかる。すると、対応する狭帯域反射光の中心波長が式 (3.2) の関係式に基づいて変化する。この異なる波長の反射光それぞれの波長変化から、どの位置にどの程度のひずみが生じているのかを調べることができる。

このシステムの利点としては、以下のようなものが挙げられる。

- CFRP は炭素繊維と樹脂から構成されるが、FBG センサも光ファイバ (繊維) であることから、炭素繊維に沿って埋め込むことにより、材料の機械特性を下げることなく埋め込むことができる。またセンサ側から考えると、センサが炭素繊維によって保護されることになるので、半永久的にこのセンサを用いることができる。
- これまでの CFRP 構造への適用 [34][35] に較べて、構造のほとんど全てが CFRP 一方向材料で構成されているため、より一層、容易に FBG センサを埋め込むことができる。
- AGS はトラス構造なので、各リブでは、多くの荷重はリブ軸方向荷重として負担される。よって、発生するひずみもリブ軸方向ひずみが支配的となる。前述のように埋め込んだ FBG センサは、リブの軸方向ひずみしか計測することができないが、この構造特性であれば計測すべきひずみは軸方向ひずみのみで十分であり、換言すると、FBG センサを用いるのに適した構造といえる。
- さらに面内荷重が加わった場合、AGS はトラス構造と考えられるので、各リブの長手方向には均一なひずみが生じる。このことは、各リブに埋め込む FBG センサが一つで十分であることを意味する。よって大型の構造でも、構造全体を簡単に診断することができ、FBG センサはこの目的を達成するのに最適であると考えられる。
- 1.4.3 のとおり、AGS の製造方法はロボットを用いて自動積層により行われている。この製造過程に上記の FBG センサの埋め込みは容易に組み込むことが可能である。すなわち、この SHM システムによる製造時間・コストの増加はほとんどない。

以上で提案したシステムは、軸方向ひずみであれば、静的・動的両方のひずみ計測に用いることができる。本章の以降の節では、静的・動的ひずみを計測する計測システムを具体的に提案し、このシステムを用いて、静的・動的ひずみ計測が適切に行えることを検証する。

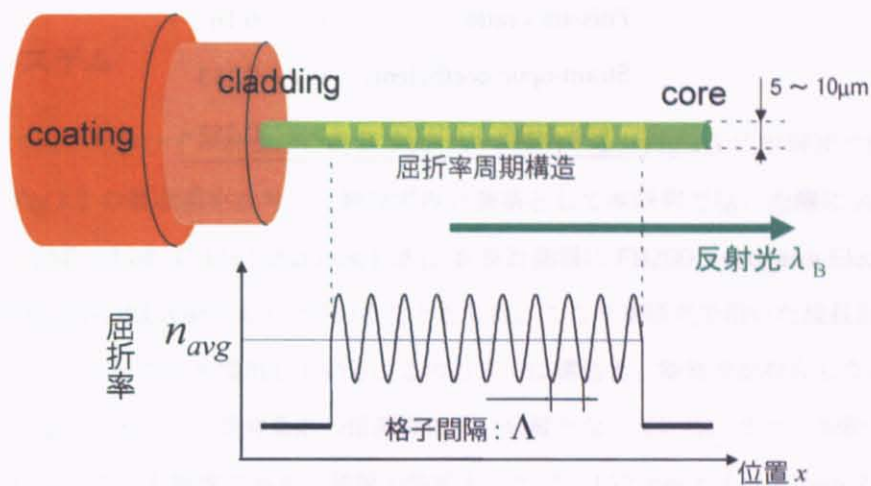


Fig.3.1 Schematic of fiber Bragg grating (FBG) sensor, a general configuration.

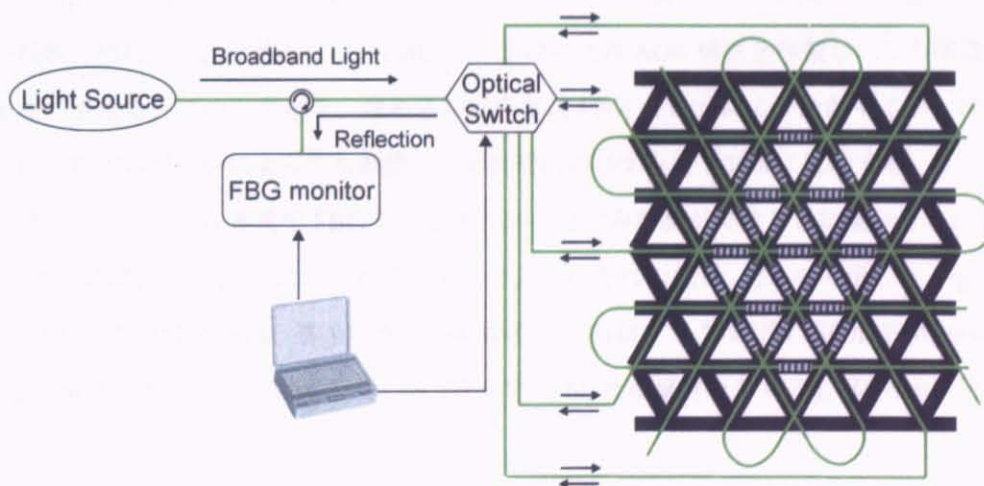


Fig.3.2 Schematic of strain measurement system with multiplexed FBG sensors embedded in Advanced Grid Structure (AGS).

Table 3.1 Mechanical and optical properties of conventional optical fiber.

Poisson's ratio	ν	0.16
Strain-optic coefficients	p_{11}	0.113
	p_{12}	0.252

3.2 静ひずみ計測の検証

3.2.1 計測システム

まず、本研究で用いた静ひずみ計測用の計測系について説明する。Fig.3.3 に本研究で提案するひずみ計測系を示す。Fig.3.2 の概念図を参考に、静ひずみ計測系として本研究では、光源に ASE 広帯域光源 (LA158D-16FSS1, Mitsubishi Cable Industries, Ltd.)、波長計測器に FB200(Yokogawa Electric Co.)、光スイッチに OSW8108(THORLABS Inc.)を用いることとした。ここで本研究で用いた波長計測器 FB200 であるが、ポリクロメーター方式を採用している。この方式では構造上、稼動部が存在しないので、装置自体がコンパクトになるとともに、長寿命かつ信頼性の高い装置となっている。また、稼動部がないことより計測が高速で行えることも特徴である。装置の性能としては、1527nm から 1567nm の範囲で 1pm の波長解像度があり 50pm の波長確度を有する。その他、各計測系の性能は、図に示したとおりである。さらにこの計測系は、LabView により光スイッチと波長計測器を最適に PC 制御することができ、これにより理論的には最高 100Hz で計測することができる。

3.2.2 試験概要

本節では、Fig.3.3 に示した計測系及び AGS 中に埋め込んだ FBG センサを用いた、静的なひずみ計測システムの性能を検証する。具体的には、FBG センサ埋め込み AGS 構造を作製し、この構造に負荷を与えひずみを生じさせる。このひずみを、埋め込んだ多重化 FBG センサにより計測するが、同時にリブ表面に貼り付けたひずみゲージによっても計測し、それぞれのひずみをリブ毎に比較する。そして両者のひずみが等しければ、埋め込み多重化 FBG センサを用いてひずみ計測ができると結論付けられる。

Table 3.2 に本試験に用いた供試体のサイズを示す。それぞれの値は、1.4.4 で示した Fig.1.11 の記号に対応している。この供試体は、各リブ毎に 34 枚の一方材プリプレグ (T800H/E011604-1M, Bryte Technologies, Inc.) を高さ方向に積層している (交点では 68 枚積層されている)。材料物性は、Table 2.1 と同様である。

Fig.3.4 に FBG センサとひずみゲージ (KFG-1N-120-C1-11L3M3R, Kyowa Electronic Instruments Co., Ltd.) の埋め込み・貼り付け位置を示す。この供試体では、各リブの長手方向中央に FBG センサとひずみゲージが一对、埋め込み・貼り付けられている。埋め込まれた FBG センサの高さ方向の位置は、リブの配向方向毎に異なり、 $+60^\circ$ 、 -60° 、 0° 方向のリブはそれぞれ、10 枚目と 11 枚目の間、11 枚目と 12 枚目の間、12 枚目と 13 枚目の間に埋め込まれている。すなわち、4, 8, 10, 13, 17 番のリブに埋め込まれた

FBG センサは 10 枚目と 11 枚目の間、2, 3, 7, 9, 14, 18 番のリップに埋め込まれた FBG センサは 11 枚目と 12 枚目の間、1, 5, 6, 11, 12, 15, 16, 19 番のリップに埋め込まれた FBG センサは 12 枚目と 13 枚目の間に埋め込まれている。Table 3.3 に各リップ番号とその位置に埋め込まれている FBG センサの中心波長の対応を示す。各 FBG センサは半値幅が約 0.3nm のものであり、センサ長は 10mm である。一方、ひずみゲージは Fig.3.4 に示したように、各リップの底面に貼り付けてある。

Fig.3.5 に本試験構成を示す。本試験では供試体の両端を単純支持した上で、三点曲げ荷重を、万能型引張圧縮試験機 Instron1185(4400R)(Fig.F.7) を用い、試験速度 1.0(mm/s) で与えた。計測は、上記の三点曲げ荷重を 1000N 与えた状態で、底面に貼り付けられたひずみゲージでリップ長手方向ひずみ $\varepsilon_i^{SG}(i = 1 \dots 19)$ を計測する。同時に、埋め込まれた FBG センサの Bragg 反射光の中心波長変化 $\Delta\lambda_i(i = 1 \dots 19)$ を、広帯域 ASE 光源 (LA158D-16FSS1, Mitsubishi Cable Industries, Ltd.)、光スイッチ (AQ8203, ANDO Electric Co.)、スペクトルアナライザ (Q8384, ADVANTEST) を用いて計測した。ここで、用いた計測系が 3.2.1 で提案したものと異なるのは、他の試験においてスペクトルアナライザによる詳細なスペクトル計測を行う必要があったためであるが、別途、両計測系での計測結果の比較も行っており、3.2.1 で提案したものをを用いても、同様の結果が得られると考えられる。ここで用いたスペクトルアナライザの波長解像度は、1530-1570(n)m 帯域、すなわち C-band 帯域において 10pm、波長確度は 20pm である。この中心波長変化 $\Delta\lambda_i$ より、式 (3.2) を用いて、FBG センサに加わるひずみ $\varepsilon_i^{OF}(i = 1 \dots 19)$ を計算する。そして、 ε_i^{OF} と ε_i^{SG} を比較した。

ここで計測結果の比較にあたり、 ε_i^{SG} はリップ底面のひずみであり、厳密には ε_i^{OF} とは異なる位置のひずみを計測していることになる。そのため、高さ方向の位置のずれの補正として、式 (3.3) を用いて ε_i^{SG} を ε_i^{mSG} に変換した上で、 ε_i^{mSG} と ε_i^{OF} を比較することとした。

$$\varepsilon_i^{mSG} = \frac{Z_i^{OF}}{Z_i^{SG}} \varepsilon_i^{SG} \quad (3.3)$$

ここで、式 (3.3) 中の Z_i^{OF}, Z_i^{SG} はそれぞれ、FBG センサの高さ方向埋め込み位置、ひずみゲージの貼り付け位置を、Fig.3.4 中の座標を用いて定義したものである。各リップでのこれらの座標値を Table 3.4 にまとめた。

3.2.3 計測結果

Fig.3.6 に埋め込み FBG センサにより計測されたひずみ ε_i^{OF} と、接着ひずみゲージによって計測されたひずみ ε_i^{mSG} を比較したグラフを示す。このグラフを見ると、 ε_i^{mSG} と ε_i^{OF} の値は、全てのリップにおいてほぼ等しい値となっている。このことから、埋め込んだ多重化 FBG センサを用いて AGS のひずみが計測

3.2 静ひずみ計測の検証

できることが示された。

結果中のわずかな計測誤差の原因としては、

- AGS 成形時の樹脂の流動性によって FBG センサのリブ高さ方向の埋め込み位置が予想される埋め込み位置と異なっている。
- 光ファイバ中の FBG 部の推定が不正確である。
- そもそもひずみゲージの計測精度に問題がある。

といった点が考えられる。このことは、成形の工夫、FBG センサの計測位置の正確な把握など、埋め込み後の FBG センサ位置をより正確に把握する技術が求められていることを意味する。ただし、実際には最大でも数十 $\mu\epsilon$ 程度のひずみ差しかなく、ひずみゲージの計測精度に十分迫れているとも考えられるので、今回の検討の限りでは本計測系がリブ長手方向のひずみを計測できると結論付けてよいと考えられる。と同様に、この計測系のひずみ計測誤差は现阶段では $\sim 50\mu\epsilon$ としておくのが妥当だと言える。

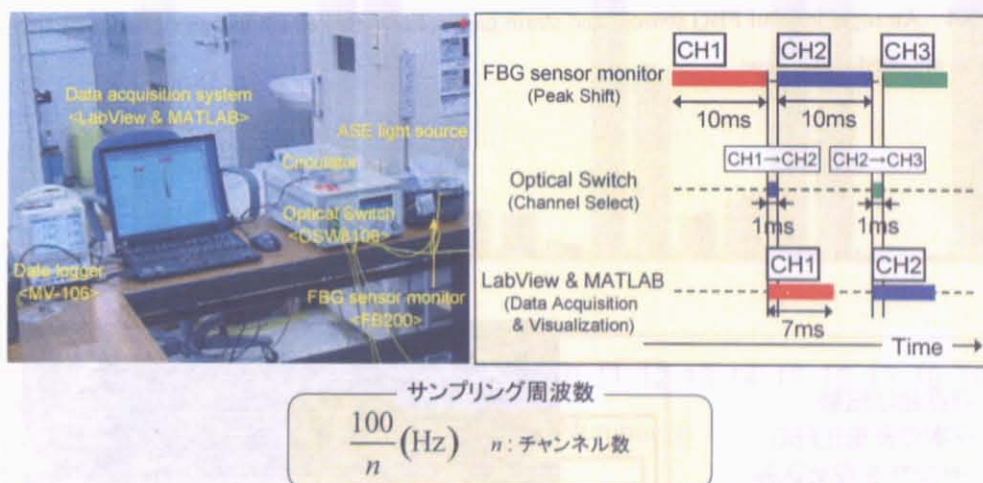


Fig.3.3 Basic configuration of static strain measurement system used in this research.

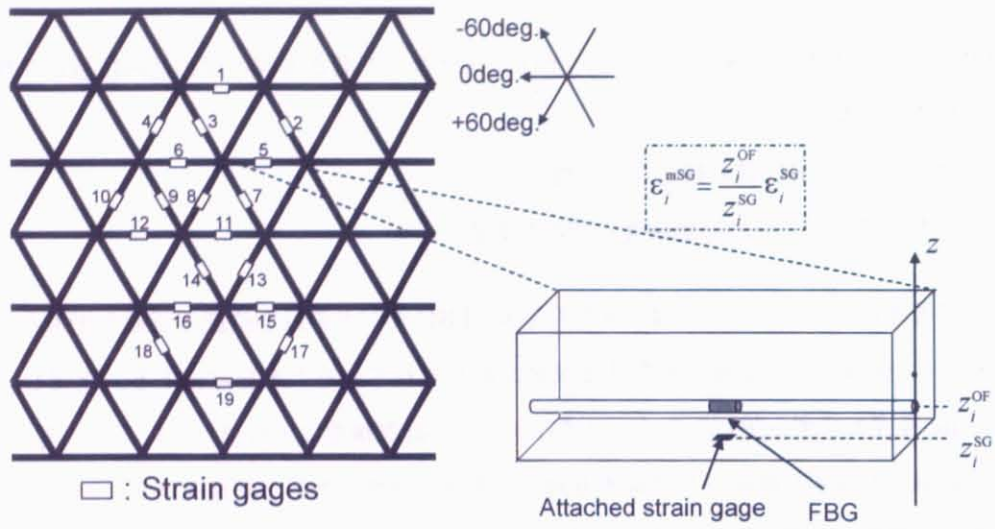


Fig.3.4 Arrangements of FBG sensors and strain gauges. Each marked rib has an embedded FBG sensor and an attached strain gauge.

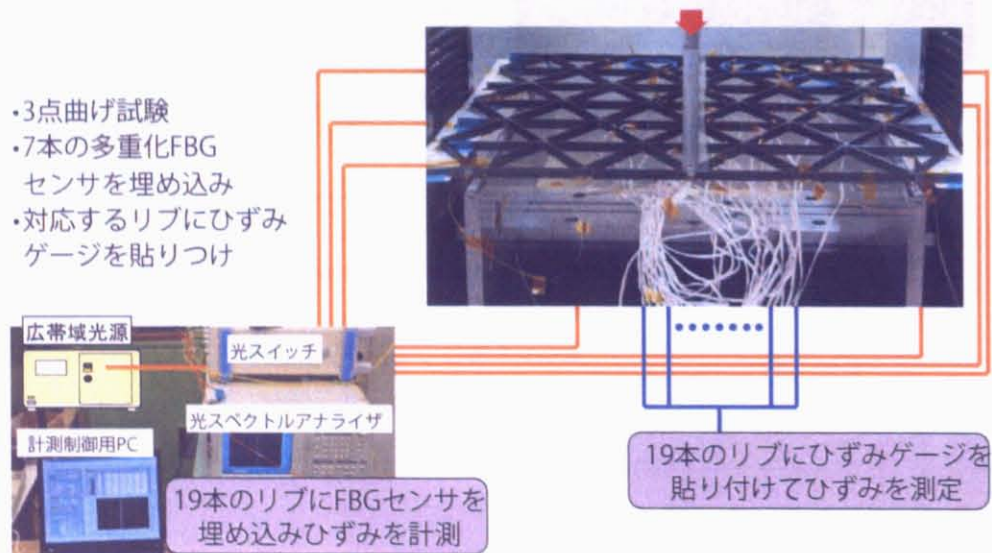


Fig.3.5 Test Configuration for verification of the strain measurement with embedded FBG sensors.

3.2 静ひずみ計測の検証

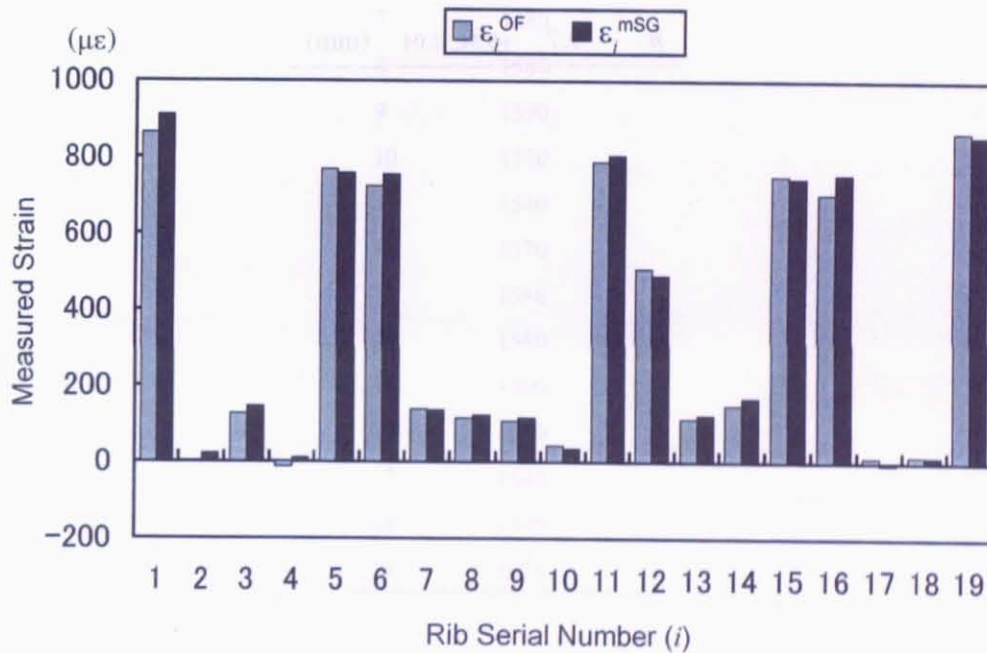


Fig.3.6 Comparison of measured strains between by embedded FBG sensors (ϵ_i^{OF}) and by attached strain gages (ϵ_i^{MSG}).

Table 3.2 Sizes of AGS specimen. All characters correspond to Fig.1.11

<i>A</i>	526.8	± 0.2	(mm)
<i>B</i>	550.9	+0.16, -0.14	(mm)
<i>a</i>	105.0	± 0.1	(mm)
<i>b</i>	182.1	+1.39, -1.01	(mm)
<i>l</i>	93.2	+1.41, -1.09	(mm)
<i>t</i>	1.8	+0.33, -0.27	(mm)
<i>h</i>	9.7	+0.34, -1.04	(mm)

Table 3.3 Center of wavelengths (CWLs) of FBGs.

rib num.	CWL (nm)
1	1556
2	1540
3	1590
4	1540
5	1590
6	1580
7	1580
8	1580
9	1590
10	1530
11	1540
12	1570
13	1580
14	1580
15	1590
16	1580
17	1540
18	1540
19	1556

Table 3.4 Height positions of embedded FBG sensors. Those embedded in each rib directions (-30, 30, 90 degrees) were placed between different plies of prepregs.

Rib axis	Embedded plies	Z_{OF} (mm)
-30 degree	between 10 and 11	-4.12
+30 degree	between 11 and 12	-3.53
90 degree	between 12 and 13	-2.94

3.3 動ひずみ (弾性波) 計測の検証

本節では、3.1 節で提案した計測系を用いて、構造内部を伝播する弾性波により生じる動的なひずみを計測するシステムについて提案・検証する。

弾性波を扱う際には、静的なひずみを用いる場合に較べて、以下に示すような点に注意する必要があると考えられる。

- 力学的な釣合の安定を考える際に、速度・加速度の項を含めて考えなければならなくなるため、構造の状態を考える際に時間の項を考慮しなければならない。
- これまでは考慮する必要のなかった物理量 (粘性等の減衰) も気にしなければならない。
- 高速で計測を行うことになるので、計測に要する時間を考慮する必要がある。
- 非常に微小 (1 μe 程度) なひずみを計測しなければならないため、計測される物理量の精度に注意が必要となる。

しかし逆に、これらの注意点を解決すれば、動的ひずみ計測では、

- 大きな検査荷重が不要。
- ひずみの大きさの他に、到達時間、周波数など、より多くの情報を損傷診断に用いることができるため、様々な SHM 手法が考えられる。

といった利点もある。以上のような背景から、CFRP を用いた構造の非破壊検査手法として、弾性波の適用はこれまで様々な研究がなされてきた [53][54][55]。

ここでまず、AGS 及びそこに埋め込まれた FBG センサ計測系を用いた場合の弾性波及びその計測の利点を述べる。まず前述した利点のほかに、AGS 固有の特徴として、特に弾性波の減衰に関して、

- 構造全体が細長いリブの組み合わせで構成されており、弾性波の伝播経路が準一次元に制限されるため、他の三次元弾性構造に較べて減衰が小さく、その結果、より大きな構造となっても適用可能。
- 一般的に炭素繊維軸方向に伝播する弾性波は減衰が小さいため、波の伝播経路が常に繊維に平行 (リブ長手方向) となる AGS では、減衰が小さい。

といった利点が挙げられる。さらに本研究では、検討する弾性波の種類として、特に弾性波の中でも媒質の振動方向が波面と垂直となる疎密波 (縦振動、compressional (longitudinal) wave、とも呼ばれる)、平行となる曲げ波 (曲げ振動、flexural (bending) wave、とも呼ばれる)、を用いることとした。これらの波は、

3.3 動ひずみ (弾性波) 計測の検証

弾性波の中でも比較的low周波数帯域の波であり、波の減衰が小さいのでより遠方まで伝播するため、広範な構造全体の検知に適している。

本研究では、3.1 節で提案したひずみ計測系を用いて、AGS に発生させた弾性波を計測し、その伝播特性の変化から生じる損傷を検知する方法を考える。そのための基礎的検討として本章では、これら疎密波・曲げ波を今回提案している計測システムを用いて計測できるのかどうか、提案する発振方法により疎密波・曲げ波を AGS 中に発生させることが出来ているのかどうか、疎密波・曲げ波は AGS 内をどのように伝播するのか、といった AGS 中を伝わる弾性波の伝播特性を調べた。そして、明らかとなった弾性波の伝播特性を考慮した損傷診断手法を提案した。

3.3.1 計測システム

Fig.3.7 に本研究で用いた FBG センサによる弾性波計測システムの概要を示す。

本研究では以下の手順で弾性波を発生・計測する。

- ① PC で作成した発振波形を Function Generator に送る。
- ② Function Generator においてこの信号を電圧信号に変換し、電気アンプで増幅する。増幅された電圧が圧電素子 (附録 B) によって圧力信号に変換され、素子の接着された構造を加振し、AGS 内に弾性波を発生させる。
- ③ 弾性波は、3.1.1 と同じ原理により、FBG に加わる軸方向ひずみの時間履歴として計測される。
- ④ 反射された狭帯域光はサーキュレータにより入射光とは異なる経路に導かれ、光アンプで増幅される。光アンプを用いるのは、本研究で用いる弾性波により発生するひずみは $1\mu\epsilon$ と非常に小さいので、このひずみによって生じる FBG センサからの反射光の中心波長の振動も非常に小さい。そのため、光アンプにより反射光強度を増幅する必要がある。また後述するように、光強度の変化から弾性波を計測するが、各 FBG センサのフィルタ特性が異なるため、そのままでは弾性波強度の絶対的な評価が出来ない。そこで、常に一定の反射光強度を保つことで、考慮すべきフィルタ特性を AWG フィルタのフィルタ特性のみに限定するためにも用いられる。
- ⑤ 増幅され一定の強度となった反射光は、AWG フィルタにおいて、予め選択した二つのフィルタを通過した光に分離される。
- ⑥ フィルタリングされた光は Photo Detector において、圧力信号から電圧信号へと変換される。
- ⑦ 変換された電圧信号の強度をオシロスコープにおいて時系列データとして高速計測する。

以上の流れから、電圧信号の強度振動が FBG センサに加わる軸方向ひずみの振動に対応していることが

わかる。

ただしこの計測方法では以下の点を常に留意しなければならない。計測される弾性波によるひずみ変化→スペクトル中心波長の変化→フィルタリングされる光量の変化→電気信号の変化、と換算した場合、その大きさは大体、数十 (mV) 程度となる。対して、オシロスコープでの計測時に混入する電磁ノイズは約数百 (mV) である。そのため、この電磁ノイズ除去の目的でアベレージングを行う。これは、一定回数以上の弾性波の入力及び計測を行い平均化するという手法で、電磁ノイズが白色雑音であるため、中央極限定理により計測回数を増やし平均化を行うと、有意な信号は常に残るが、ノイズは除去されるという原理を利用している。これにより、多くの雑音の中から有意な信号を取り出すことができる。

このシステムの最大の利点は、反射光スペクトルの中心波長をスキャンすることなく光強度のみを用いている点にある。このため物理的な可動部分がなくなり、FBG センサを用いて高速にひずみを計測することができる。

ここで一点、注意しなければならない点として、FBG センサと AWG フィルタの温度に対する敏感性がある。この計測誤差を減らし、よりよい計測を行うため、AWG フィルタには温度調節機が接続されている。これにより、実験は常に一定の条件の下で行うことができる。

Arrayed Waveguide Grating (AWG) フィルタ

ここでは、この計測システムの中心的な役割を果たす Arrayed Waveguide Grating (AWG) フィルタ [56][57][58] について説明する。AWG は、入出力導波路、2 つの幅広なマルチモード導波路であるスラブ導波路、および長さの異なる多数のシングルモード導波路であるアレイ導波路から構成される。

光は、スラブ導波路で回折により広がり、アレイ導波路に入射する。アレイ導波路は、あらかじめそれぞれ長さが ΔL ずつ異なるように作成しておく。これにより出力端 (スラブ導波路に入射する際) において、各波長ごとに、導波路長さの差に依存した位相差が生じた状態となる。すると、各波長ごとに後半のスラブ導波路終端において回折により強めあう (集光する) 位置が変わる。よって、各位置から光を取り出すことにより、波長ごとに光を分解できる。

この AWG の特徴として、

- 平面光波回路 (Planer Lightwave Circuit, PLC) の精密な製造技術により非常に広帯域で高密度な光合波・分波器が 1 つの AWG で実現できる。
- 石英系であるため、光ファイバとの整合性・接続性がよい。
- 温度依存性が小さくできる。

3.3 動ひずみ (弾性波) 計測の検証

といった点が挙げられる。ここで PLC とは、石英基板上に光ファイバ製造技術と半導体微細加工技術を組み合わせて作られた石英ガラス光導波路であり、本研究で用いられている AWG フィルタも PLC が応用されている。

3.3.2 FBG センサによる弾性波計測システムの確認

ここでは、提案した計測システムを用いて弾性波を計測することができるのかを確認するため、CFRP 一方向複合材料中に埋め込んだ FBG センサにより弾性波が計測できることを確かめる。Fig.3.8 に試験の概要を示す。供試体には、簡単のため CFRP 一方向プリプレグを積層したのち成形した矩形断面棒を用いることとした。供試体のサイズは、Fig.3.8 右上に示す。この供試体の下面端部付近 (圧電センサを貼り付ける位置の近く) に FBG センサを繊維と平行に埋め込んだ。同様に供試体の端部側面に圧電素子を市販の瞬間接着剤を用いて接着した。そして、FBG センサと圧電素子の両方で供試体端部での弾性波の計測を行った。弾性波の入力には、反対側の端部側面に計測に用いたものと同様の圧電素子を接着し、発振素子とした。そして、後述するが、疎密波を発生させる場合には青色の圧電素子の位置に素子を貼付け、曲げ波を発生させる場合には緑色の圧電素子の位置に素子を貼付ける (Fig.3.8 参照)。そのため、ここでの検討においても、疎密波・曲げ波双方の発振・受振点の組合せで検討を行った。入力波形には、附録 C での検討結果を踏まえて、疎密波、曲げ波それぞれ、80kHz, 40kHz の周波数の正弦波三周期に Hamming 窓関数を掛け合わせた波形を用いている。

Fig.3.9, 3.10 にそれぞれ、疎密波・曲げ波を発振した場合の試験結果を示す。これらの図を見ると、疎密波・曲げ波どちらの場合でも圧電素子を用いて計測された受振波形と FBG センサを用いて計測された受振波形の位相が一致していることがわかる。以上の結果より、疎密波・曲げ波どちらを発振した場合においても、少なくとも圧電素子を用いた場合と同程度の弾性波計測が FBG センサで計測できることが確認できた。

3.3.3 疎密波・曲げ波の検証

次に、先程のように圧電素子を貼り付けて発振した場合に、AGS 内に疎密波・曲げ波がそれぞれ発生しているのかどうかを確認するため、埋め込み及び貼付け FBG センサを用いた弾性波計測を行った。Fig.3.11 に試験の概要を示す。供試体には、先程同様、簡単のため CFRP 一方向プリプレグを積層したのち成形した矩形断面棒を用いることとした。供試体のサイズは、Fig.3.11 右上に示す。この供試体の下面中央に FBG センサを埋め込み、また、上面中央には FBG センサを貼り付けた。そして供試体の端部側面に接着した圧電素子を用いて発振し、疎密波・曲げ波双方について、上下両 FBG センサで計測された

弾性波を比較する。これは、疎密波の変形は長手方向の変形のため上下面での変形が常に同じとなるのに対し、曲げ波の場合は供試体が曲げ変形をしているため上下面が互いに圧縮・引張変形となると考えられるため、この上下面の変形の位相を調べることにより、同位相であれば疎密波が、逆位相であれば曲げ波が、発生していると考えたためである。入力波形には、附録 C での検討結果を踏まえて、疎密波、曲げ波それぞれ、80kHz, 40kHz の周波数の正弦波三周期に Hamming 窓関数を掛け合わせた波形を用いている。この試験において貼付け・埋め込み両 FBG センサを用いているのは、第 5 章において弾性波に関する多くの試験を行う際に FBG センサを再利用する必要があるため、リブ表面に貼り付けた FBG センサでも埋め込み FBG センサと同様に弾性波が検知できるのかを本試験のもうひとつの検討項目としているためである。

Fig.3.12, 3.13 にそれぞれ疎密波・曲げ波を発振した際の試験結果を示す。まずこれら二つの図を比較すると、疎密波・曲げ波どちらの場合においても、FBG センサの貼付け、埋め込みの違いによる計測される弾性波の強度には違いがないことがわかる。このことは、AGS リブに埋め込まれた FBG センサが貼り付け FBG センサと同じ環境にあるということ、すなわち、CFRP 積層板に FBG センサを埋め込んだ場合に見られる内部局所応力などによって生じる不均一なひずみ等が発生していないということを意味する。このことは、3.1 節で述べた AGS であるからこそ FBG センサを埋め込んで計測しやすいということの意味していると考えられる。そしてこの結果はまた、埋め込み FBG センサ計測システムの検討の代わりに、貼付け FBG センサを用いて構わないことを意味している。

さらに、Fig.3.12, 3.13 の第一到達波の位相に注目すると、疎密波の場合は計測された弾性波が同位相になっているが、曲げ波の場合には位相が逆転している。よって、Fig.3.11 のように発振用圧電素子を貼り付ければ、疎密波・曲げ波を発振させられることがわかった。

3.3.4 AGS 中を伝わる弾性波の伝播特性の評価

最後に、疎密波・曲げ波の AGS 中の伝播特性を調べるため、様々な位置のリブ表面に FBG センサを貼り付け、疎密波・曲げ波それぞれの伝播特性を様々な角度より調べた。

疎密波の指向性評価

まず疎密波を発振した場合、交点において疎密波がどのように進むのかを検討した。Fig.3.14 に試験の概要を示す。供試体には、3.2 節でも用いた AGS を用いることとした。よって供試体サイズは、Table 3.2 と同様である。この供試体中より Fig.3.14 のような部分を一箇所選び、図のように A, B, C 各リブの中央上面にリブ軸方向に FBG センサを貼り付けた。弾性波の入力には、供試体端部に接着した圧電素子を用

3.3 動ひずみ (弾性波) 計測の検証

いた。入力波形には、附録 C での検討結果を踏まえて、80kHz の周波数の正弦波三周期に Hamming 窓関数を掛け合わせた波形を用いている。計測後は、各 FBG センサで計測された弾性波について、弾性波エネルギーを調べるためその包絡線を計算し、初期到達波の最大値を比較した。弾性波の包絡線は Hilbert 変換を用いて計算されるが、この包絡線が弾性波伝播エネルギーに比例することがわかっている [59]。

Fig.3.17 に試験結果を示す。この図は、各 FBG センサでの初期到達波の最大値を、B のリブの値で正規化した値を表している。また、実験とまったく同じ条件の下で行った有限要素解析により計算された値も併せて示している (有限要素解析については、附録 D に詳しく示した)。この図を見ると、実験・解析双方の場合において、AGS 中を伝播する疎密波が交点において直進しやすく、A や C のリブには逆に分散しにくいことがわかる。すなわち、疎密波の AGS 中の伝播特性として指向性が確認された。

曲げ波の等方伝搬性評価

つぎに、AGS 中に曲げ波を発生させる場合には、Fig.3.15 のとおり AGS の交点部上面に圧電素子を接着することになるが、このように交点より発振した場合に、交点より曲げ波がどのように進むのかを検討した。Fig.3.15 に試験概要を示す。供試体には、疎密波同様、3.2 節でも用いた AGS を用いることとした。よって供試体サイズは、Table 3.2 と同様である。図中の交点に接着した圧電素子より曲げ波を入力し、周囲 6 本のリブにどのように伝播されるのかを調べるため、各リブ中央下面にリブ軸方向に FBG センサを貼り付けた。入力波形には、附録 C での検討結果を踏まえて、40kHz の周波数の正弦波三周期に Hamming 窓関数を掛け合わせた波形を用いている。曲げ波についても、疎密波同様、計測後には各 FBG センサで計測された弾性波の包絡線を計算し、初期到達波の最大値を比較した。

Fig.3.18 に試験結果を示す。この図は、各 FBG センサにより計測された曲げ波及びその包絡線を表している。Fig.3.18 を見ると、A から F で計測された初期到達波の最大値、位相が互いにほぼ全て等しいことがわかる。このことから、AGS の交点部上面より曲げ波を発振させた場合、AGS の格子構造やオフセットにかかわらず、曲げ波が全てのリブに対して均等に伝播することが確認された。

疎密波・曲げ波の減衰特性評価

最後に、疎密波・曲げ波が AGS 内を伝播するに従い、どの程度減衰するのかを検討した。Fig.3.16 に試験概要を示す。供試体には、疎密波同様、3.2 節でも用いた AGS を用いることとした。よって供試体サイズは、Table 3.2 と同様である。疎密波については図中の青い圧電素子より、曲げ波は図中のオレンジ色の圧電素子より発振することとし、①～④の各リブ中央下面にリブ軸方向に FBG センサを貼り付けて、弾性波を計測した。入力波形には、附録 C での検討結果を踏まえて、疎密波、曲げ波それぞれ、80kHz、40kHz の周波数の正弦波三周期に Hamming 窓関数を掛け合わせた波形を用いている。この試験において

も、各 FBG センサで弾性波を計測した後、その包絡線を計算し、初期到達波の最大値が弾性波の伝播に従って、どの程度減衰するのかを調べた。

Fig.3.19, 3.20 に試験結果を示す。図中のグラフは、①～④の対応する FBG センサで計測された弾性波を表している。Fig.3.19 を見ると、疎密波では減衰があるものの④の位置でも明確に弾性波を計測することができる。対して、Fig.3.20 を見ると、④の位置ではほとんど弾性波が計測できていないことがわかる。。このことは、前述同様、疎密波がリブを長距離伝播させるのに適していることを意味するとともに、曲げ波は長距離伝播には用いるのが難しい、ということの意味している。この理由としては、

- 前述のとおり疎密波は指向性があるため、伝播経路上を直進するエネルギーが発散しにくい。
- 曲げ波は、交点において変形モードを変えることなく様々な経路に分散されて伝播すると考えられるので、どうしても減衰が大きくなってしまふ。
- さらに疎密波は変形モードが減衰の小さい CFRP 繊維方向となっているのに対して、曲げ波は変形モードが樹脂のせん断剛性に依存するため、減衰が大きくなってしまふ。

といったことが考えられる。

3.3.5 考察

以上の点を考慮した上で、改めて、本研究で検討している疎密波・曲げ波を SHM に用いる方法を考えてみる。

まず疎密波については、指向性・長距離にわたって伝播させることができる、という性質がある反面、他の経路へ伝播しにくいという問題点もある。よって疎密波を用いた損傷検知を行う場合には、グリッド構造の各直線経路上の端部にそれぞれ圧電素子を接着し、経路ごとに構造診断を行う方法を提案する (Fig.3.21 参照)。

一方曲げ波については、逆に長距離にわたって伝播させることができない反面、全ての経路へ均等にエネルギーを伝播させることができる。よって、曲げ波を用いた損傷検知を行う場合には、例えば、リブ 3 本おきに交点に圧電素子を接着し、リブ 2 本分の領域全体を診断するという方法を提案する (Fig.3.22 参照)。

3.3 動ひずみ (弾性波) 計測の検証

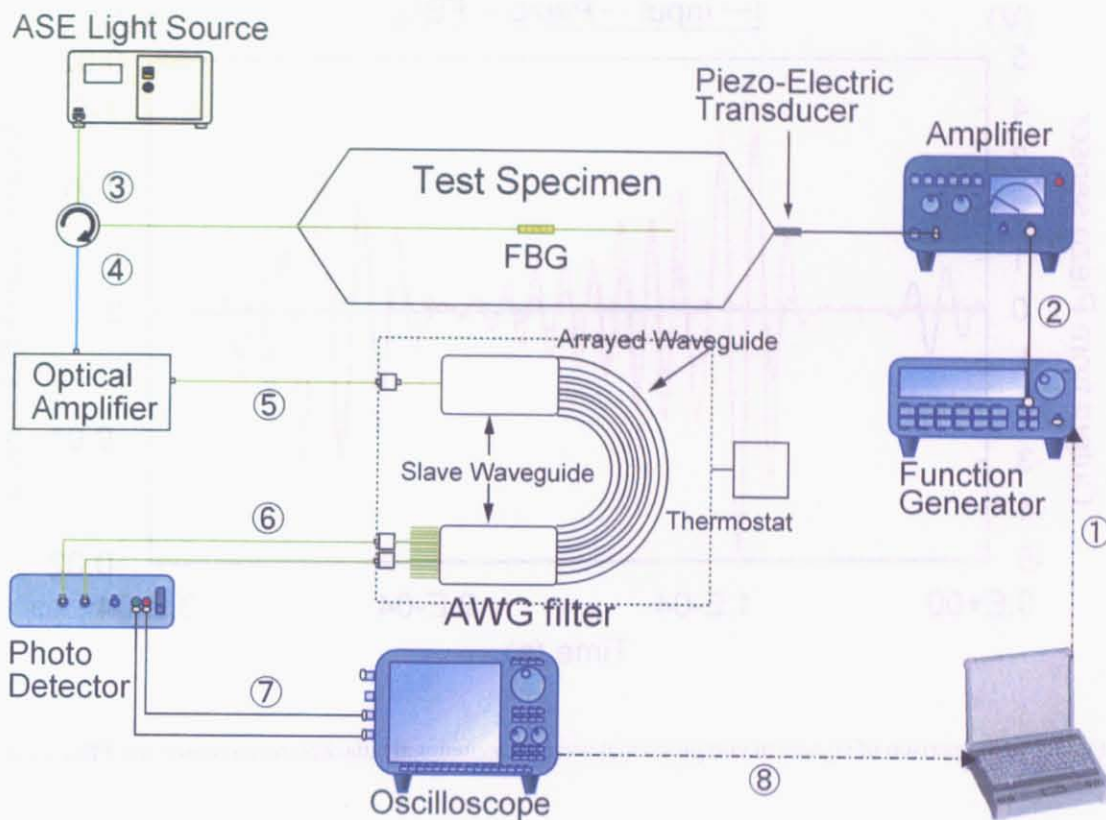


Fig.3.7 Elastic wave measurement system with embedded FBG sensors.

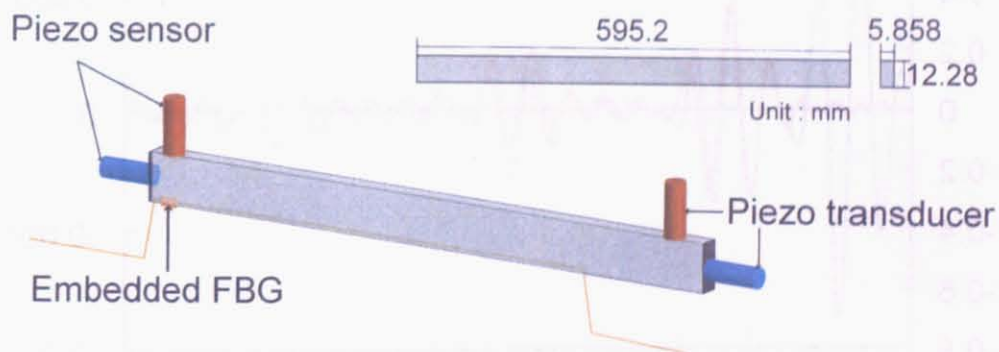


Fig.3.8 Schematic of test configuration for the verification of compressional and flexural waves measurement with FBG sensors. All columns represent attached piezo transducer. An FBG sensor was attached at the end of the bar on the bottom side.

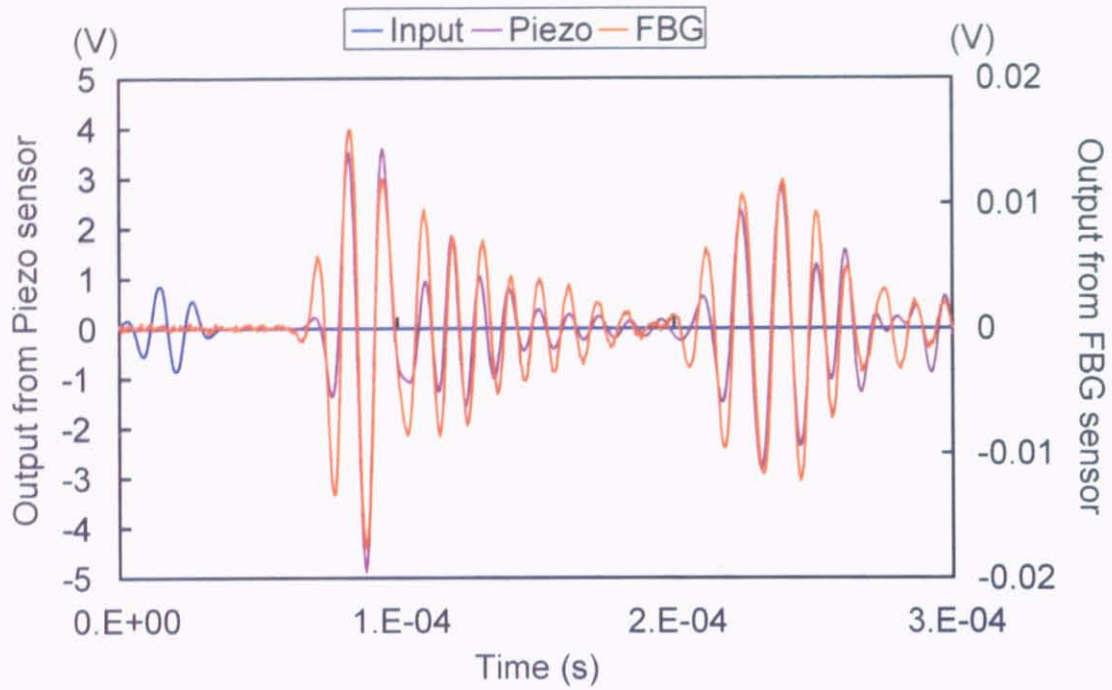


Fig.3.9 Comparison of signals of compressional wave measured with attached piezo sensor and FBG sensor.

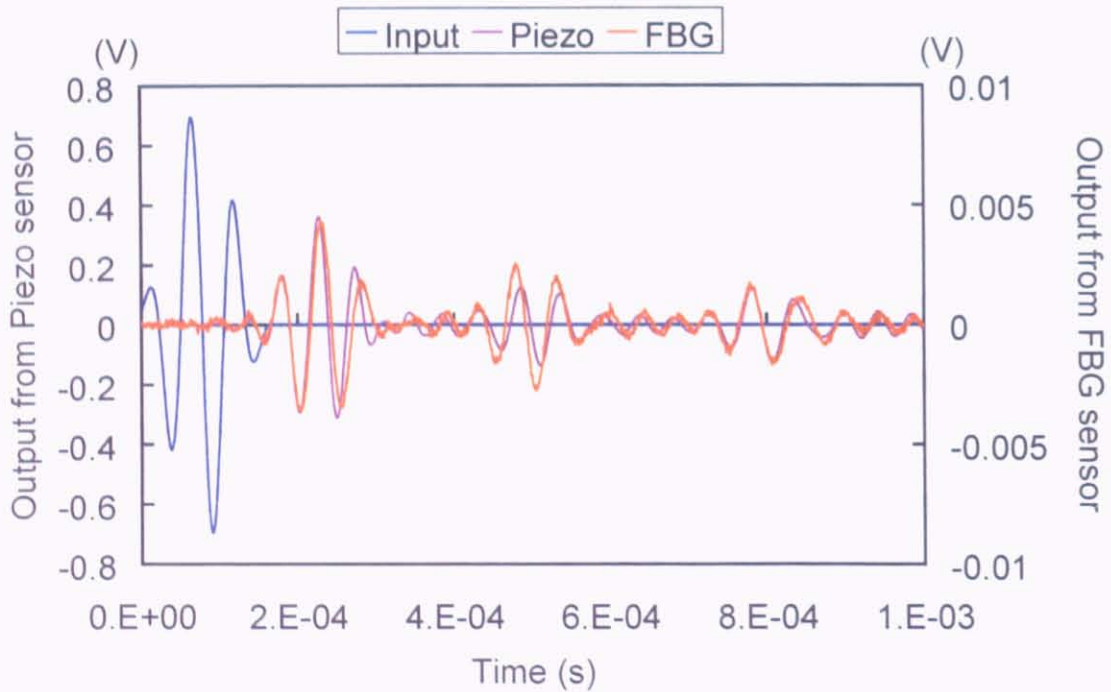


Fig.3.10 Comparison of signals of flexural wave measured with attached piezo sensor and FBG sensor.

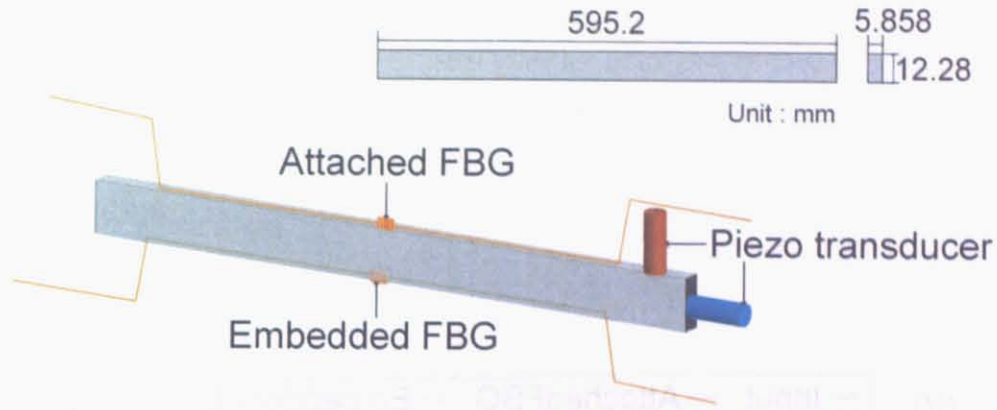


Fig.3.11 Schematics of test configuration for the verification of compressional and flexural waves generation. All columns represent attached piezo transducer. Two FBG sensors were embedded and attached at the center of the bar on bottom and top sides of the specimen, respectively.

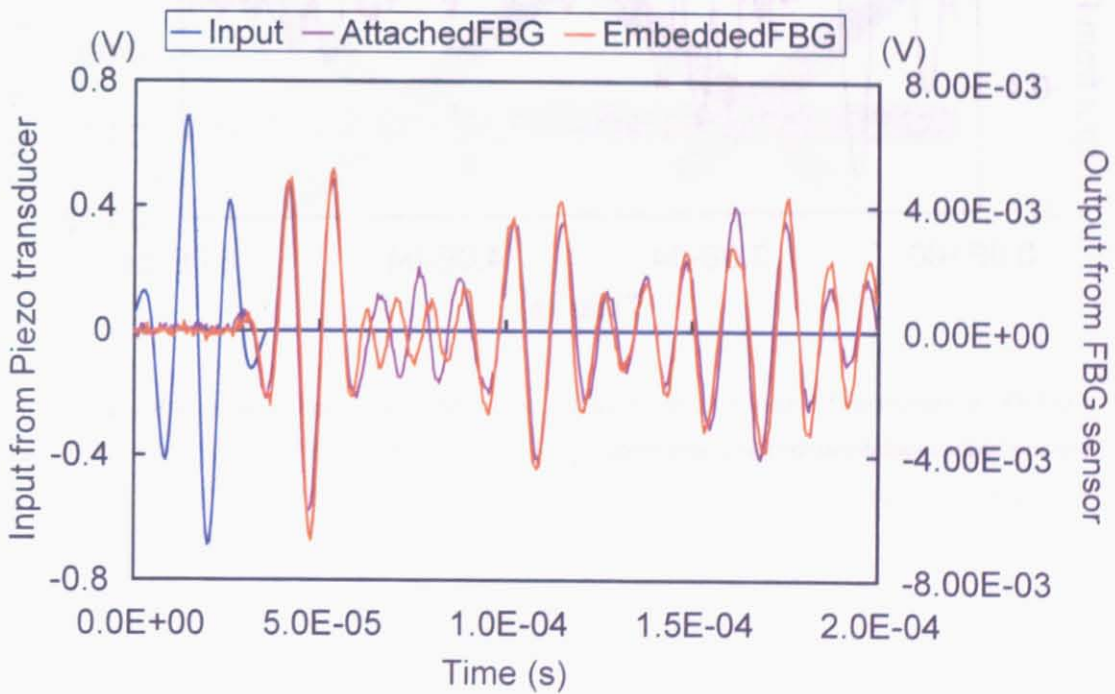


Fig.3.12 Comparison of signals of compressional wave measured with attached and embedded FBG sensors on top and bottom surfaces of the bar, respectively.

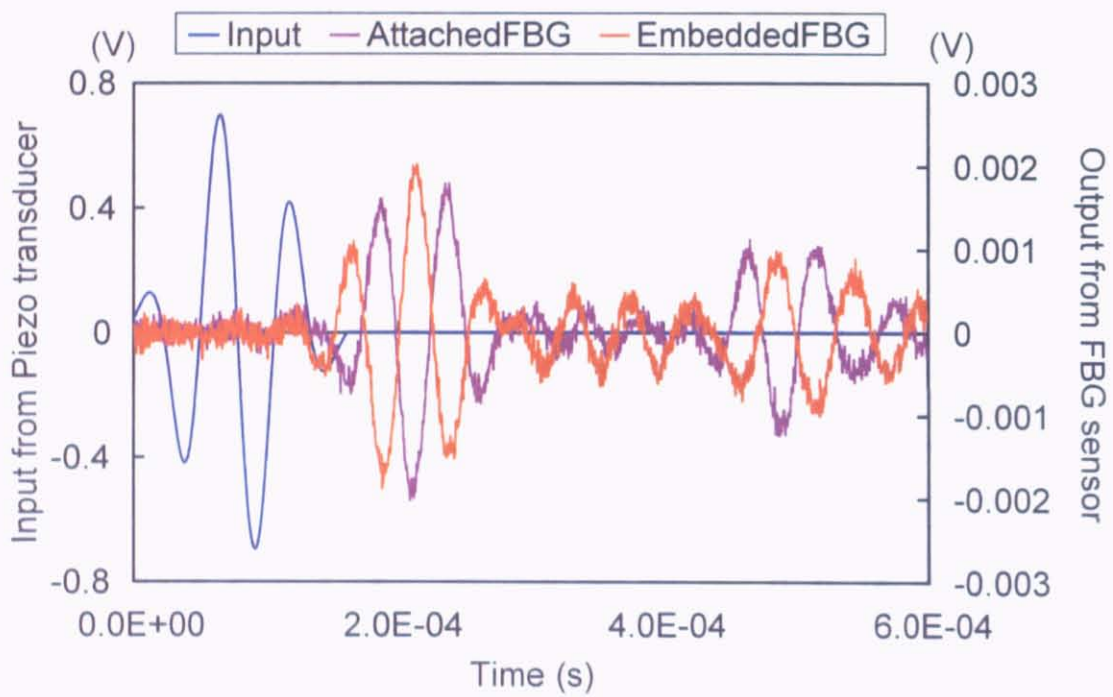


Fig.3.13 Comparison of signals of flexural wave measured with attached and embedded FBG sensors on top and bottom surfaces of the bar, respectively.

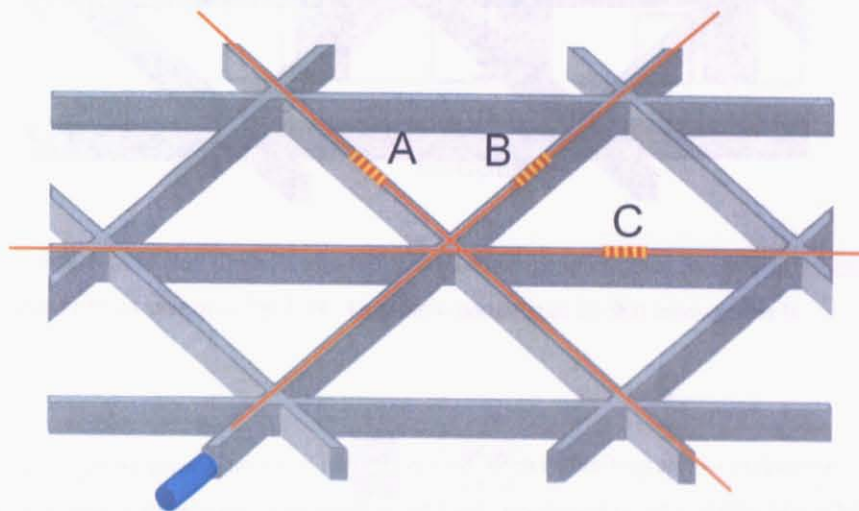


Fig.3.14 Schematics of test configuration for the verification of compressional wave propagation in AGS. All columns represent attached piezo transducer. Three FBG sensors were attached at different ribs of AGS as illustrated.

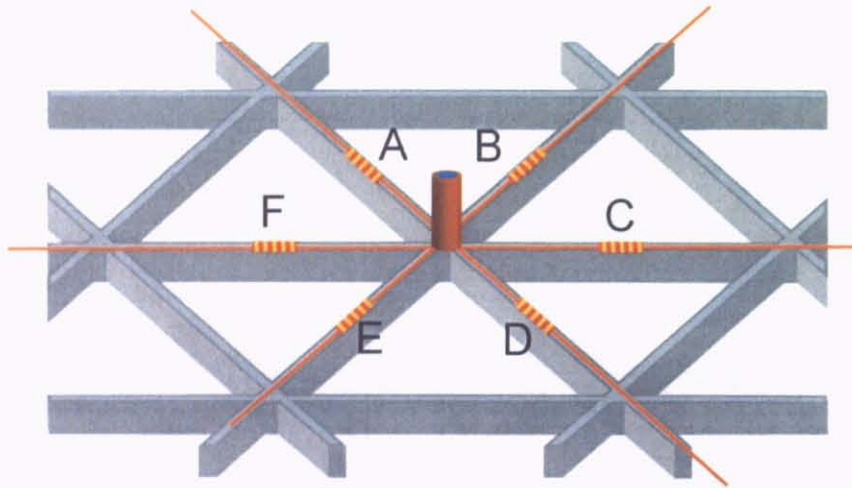


Fig.3.15 Schematics of test configuration for the verification of flexural wave propagation in AGS. All columns represent attached piezo transducer. Six FBG sensors were attached at different ribs of AGS as illustrated.

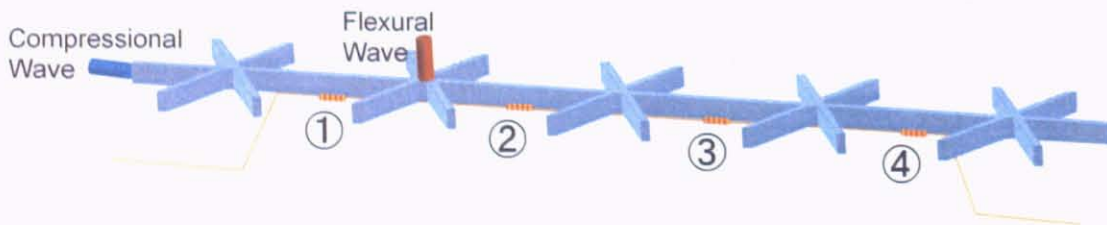


Fig.3.16 Schematic of test configuration for the verification of attenuation of compressional and flexural waves in AGS. All columns represent attached piezo transducer. Four FBG sensors were attached at the bottom surfaces of series of ribs.

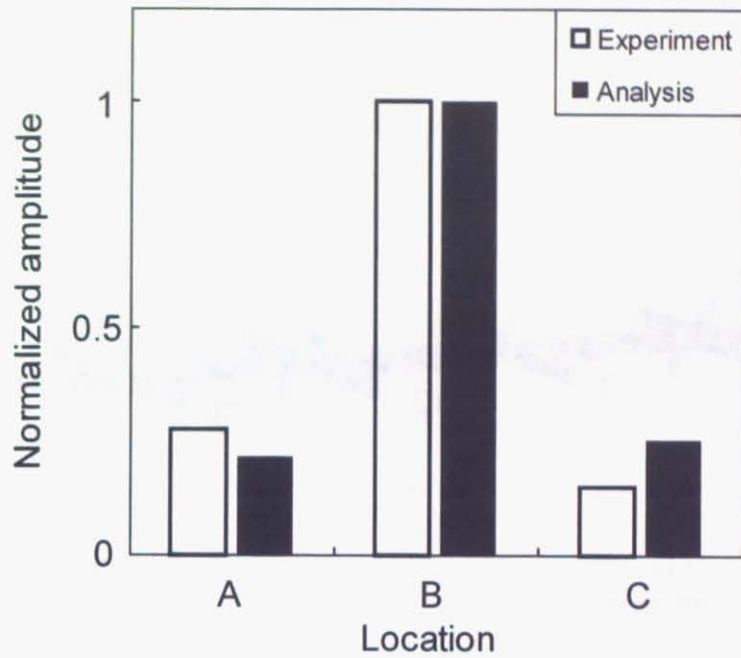


Fig.3.17 Comparison of maximum amplitudes of first arrival compressional waves which were measured in three different ribs as shown in Fig.3.14. They were normalized by that measured at B.

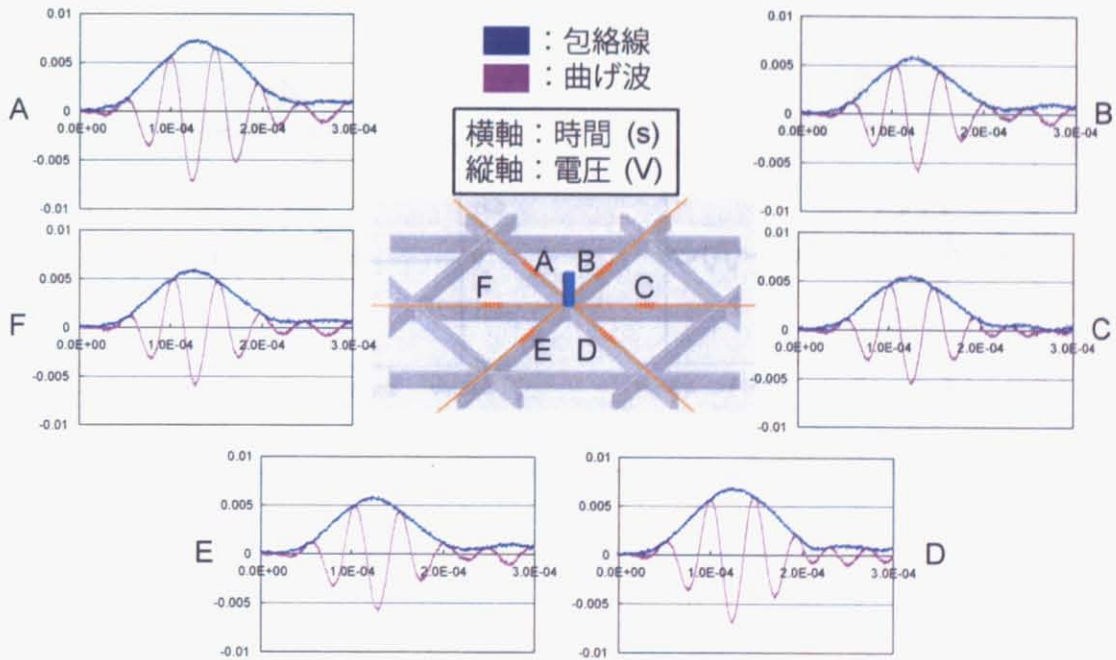


Fig.3.18 Comparison of signals of flexural wave measured at six ribs connected to input intersection.

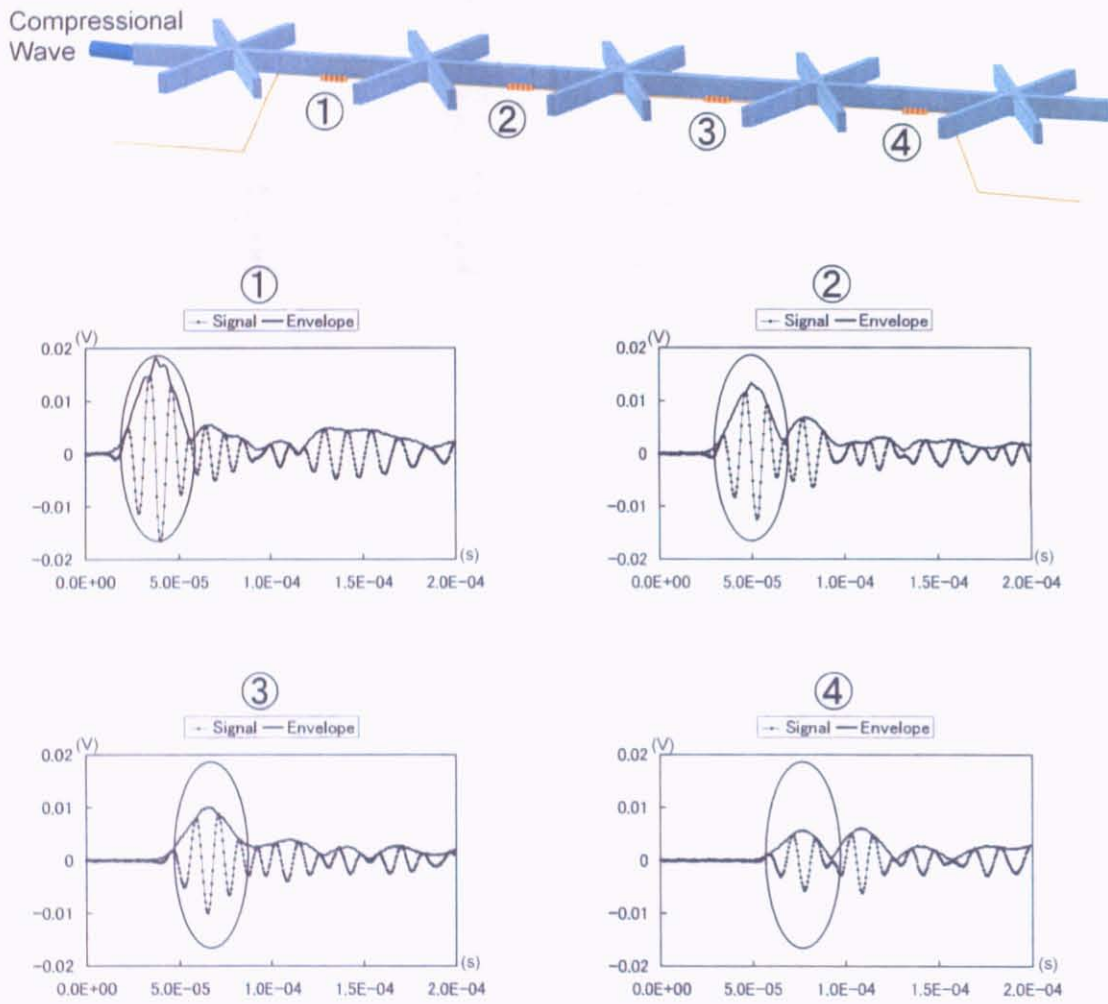


Fig.3.19 Verification of attenuation of compressional wave in AGS measured with attached FBG sensors.

3.3 動ひずみ (弾性波) 計測の検証

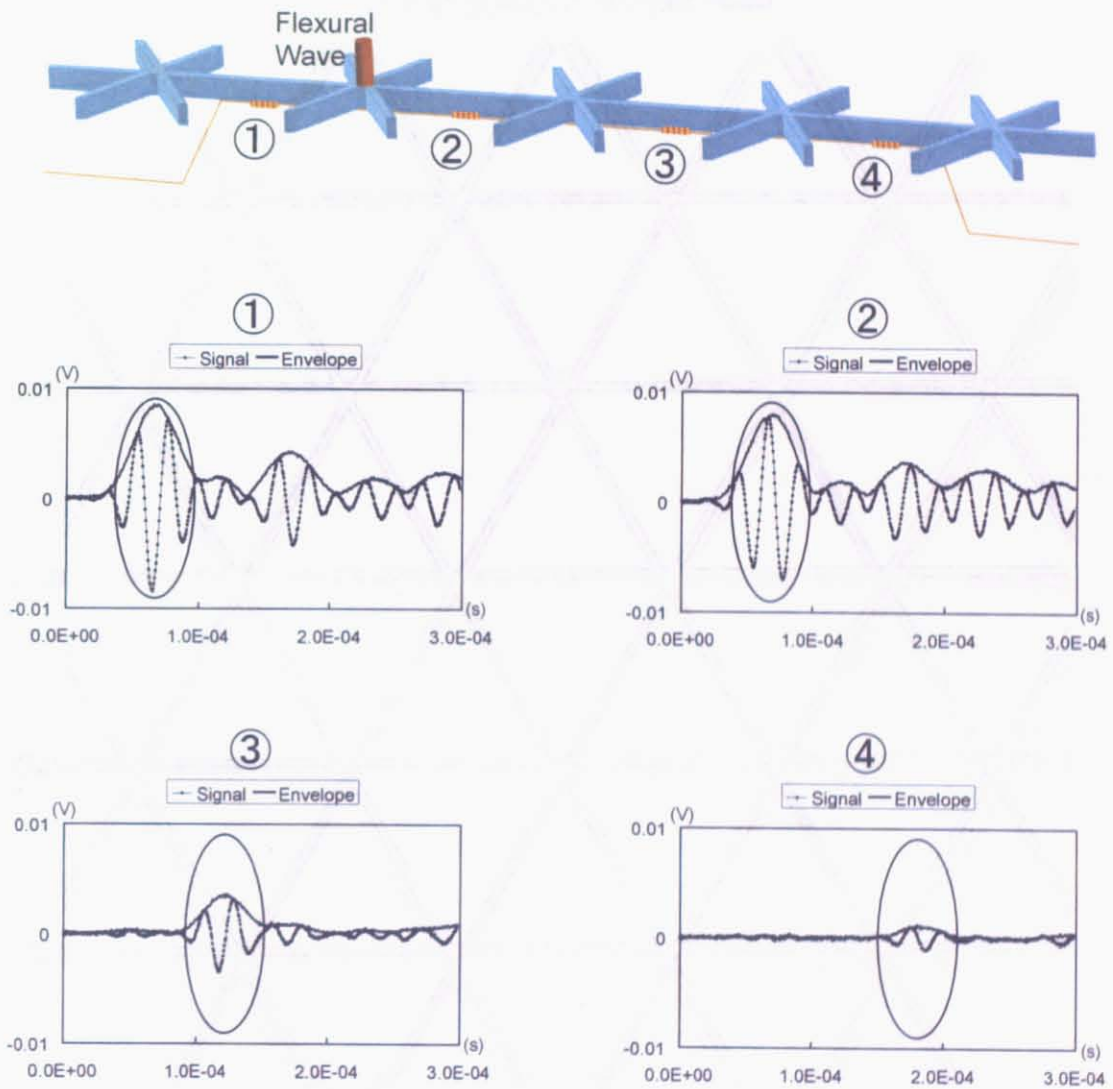


Fig.3.20 Verification of attenuation of flexural wave in AGS measured with attached FBG sensors.

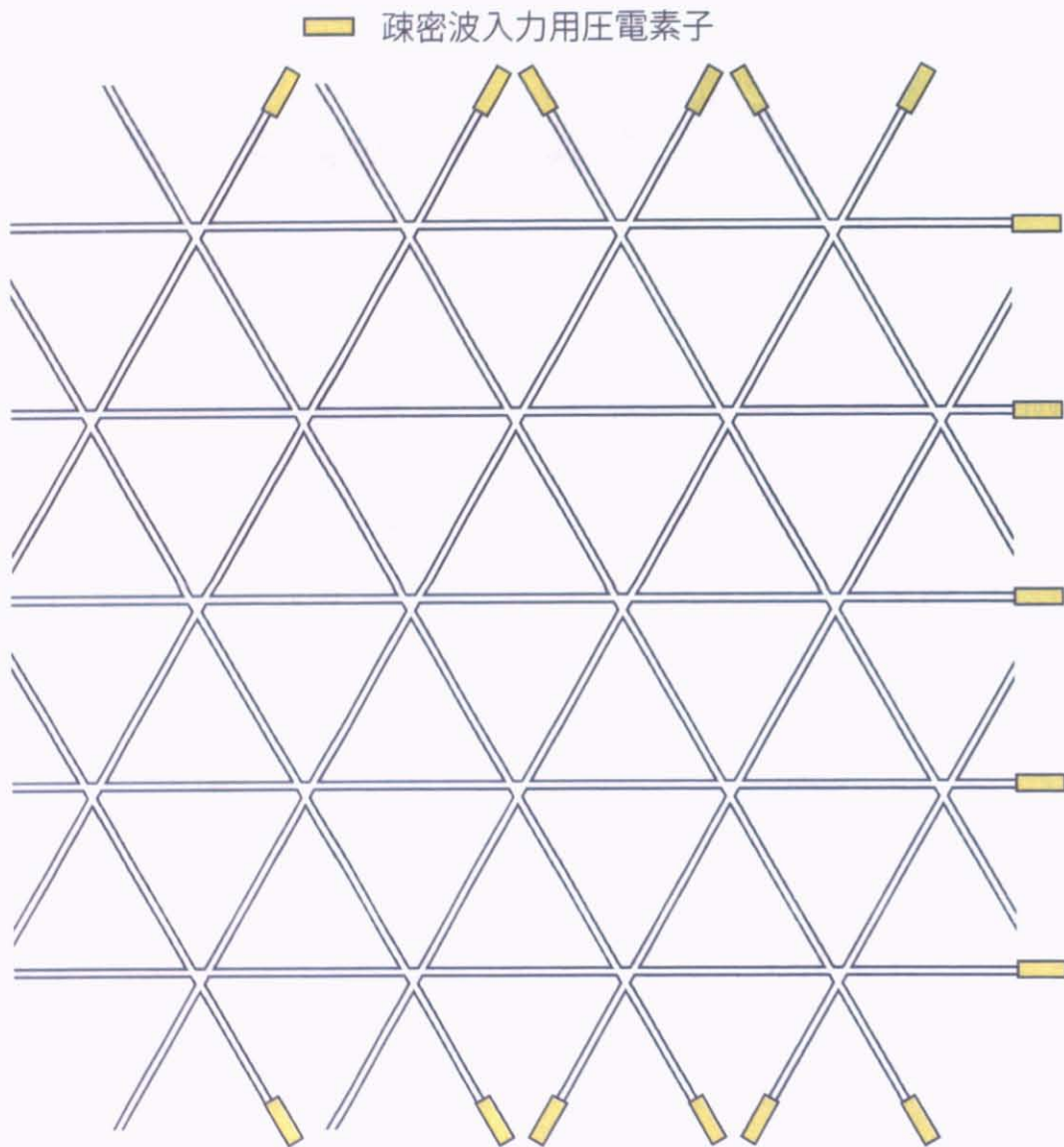


Fig.3.21 Schematic of SHM system by using compressional wave, an conceptual proposal.

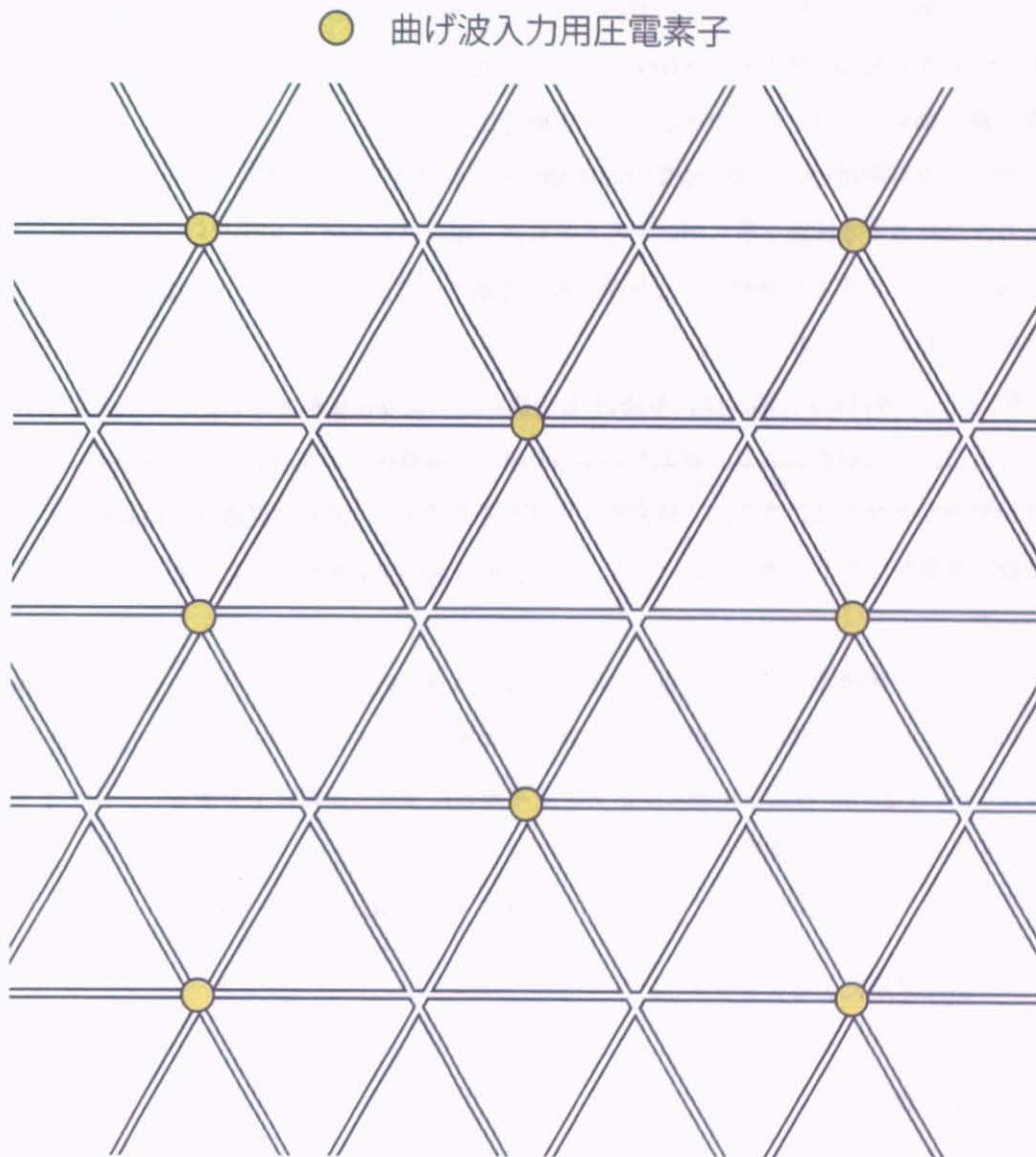


Fig.3.22 Schematic of SHM system by using flexural wave, an conceptual proposal.

3.4 まとめ

以上、本節では第2章で明らかにした AGS 中に発生する可能性のある損傷に対する最適な SHM システムとして、多重化した FBG センサを AGS の各リブに構造成形段階より埋め込み、構造中に発生する、静的・動的な歪から損傷診断を行う SHM システムを提案した。そして、まずは埋め込んだ FBG センサが、実際に静・動両ひずみを計測できることを実験的に確認した。

さらに静ひずみ計測については、結果中の計測誤差の原因について考察した上で、今後の FBG センサの埋め込み方法に対する課題を明らかにするとともに、現状のものでも少なくともひずみゲージの代替としては十分な精度でひずみを計測することができ、であるならば、多重化した FBG センサを用いたほうがより効率的であることがわかった。

一方、動ひずみ(弾性波)計測では、AGS 中を両波がどのように伝播するのか、その伝播特性を実験的に明らかにした。この検討により、疎密波の AGS 中の伝播特性として指向性が、曲げ波の AGS 中の等方伝搬性が明らかとなった。さらに、疎密波・曲げ波それぞれの AGS 中伝播時の減衰特性を調べたところ、疎密波の減衰特性が予想通り小さいこと、及び、曲げ波の減衰特性はそれに較べるとかなり大きいことがわかった。

以上の結果から、疎密波を用いた損傷検知を行う場合には、Fig.3.21 のように、グリッド構造の各直線経路上の端部にそれぞれ圧電素子を接着し、経路ごとに構造診断を行う方法を、曲げ波を用いた損傷検知を行う場合には、Fig.3.22 のように例えば、リブ3本おきに交点に圧電素子を接着し、リブ2本分の領域全体を診断するという方法を提案した。

ここで改めて、第2章を振り返ると、本研究の仕様の下で、AGS において考慮すべき損傷は、

- リブの繊維破断によるクラック
- リブ上面のスプリットティング
- リブ側面の剥離損傷
- リブ-スキンの接着不良

であった。対して、本章で明らかにしたように、埋め込み多重化 FBG センサによるひずみ計測システムを利用した SHM システムとして考えられるものには、

- 面外からの一点集中曲げ荷重に対して、埋め込まれた FBG センサにより計測される静ひずみ分布の変化を利用する方法。

3.4 まとめ

- 自重による AGS 面内荷重に対して、埋め込まれた FBG センサにより計測される静ひずみ分布の変化を利用する方法。
- 構造に疎密波を発生させ、埋め込まれた FBG センサ各点で計測された動ひずみの変化を利用する方法。
- 構造に曲げ波を発生させ、埋め込まれた FBG センサ各点で計測された動ひずみの変化を利用する方法。

の4つの方法がある。以降の章では、各損傷パターンに対してそれぞれどの損傷診断方法を用いるのが適切であるのかを、順次明らかにしていくとともに、どのような方法で損傷診断を行えばよいかを提案し、それを検証する。Table 3.5 に損傷と、各手法の組み合わせを示した。以降の章ではこの表に基づき、損傷診断手法を検討する。

Table 3.5 Types of damages in AGS v.s. methods for SHM with embedded FBG sensors.

	繊維破断によるクラック	リブ上面のスプリットティング	リブ側面の剥離損傷	格子部とスキンの接着不良
一点集中 曲げ荷重	実験・解析により 検討	解析による検討	実験により検討	×
面内圧縮 荷重	解析による検討	解析による検討	実験により検討	×
疎密波	実験により検討	実験・解析により 検討	解析により検討	実験により検討
曲げ波	実験により検討	実験により検討	×	実験により検討

第4章

多点静ひずみ計測による構造ヘルスマニタリング

4.1 検知可能な損傷の定義

本章では、3.2節において提案・検証した、多重化した埋め込みFBGセンサを用いたCFRP先進グリッド構造(AGS)中のリブ軸方向の静ひずみ計測系を用いて、第2章で明らかとなったAGSで考慮すべき損傷を検知する構造ヘルスマニタリングシステム(SHM)を提案・検証する。

第2章において、AGSに生じる損傷としては以下のもののみ考慮すれば十分であることを明らかにした。

- リブの繊維破断によるクラック
- リブ上面のスプリッティング
- リブ側面の剥離損傷
- 格子部とスキンの接着不良

そこで本章ではまず、これらの損傷が軸方向ひずみ計測結果から検知できるのかどうかを明らかにする。そして、検知できることがわかった損傷については、実際に計測結果からどのように損傷を検知するのかを検討する。

ここで損傷が検知できるためには、損傷発生前後で計測される物理量に何らかの変化が生じていなければならない。よって、まずは損傷発生前後でのひずみ差 $\Delta\epsilon$ を実験・解析的に調べていく。ただし実際の検討では、AGS供試体の数的制限があるため、すべての損傷について実験的に検討することができない。そこで本研究では、リブの繊維破断によるクラック、リブ側面の剥離損傷、については実験により検討す

ることとし、リブ上面のクラックについては、上記の結果を再現できる有限要素解析 (FEA) モデルを作成した後、そのモデルを用いて検討することとした。また、格子部とスキンの接着不良についての検討は、第5章の弾性波を用いた検討のみを行うこととした。

さらに静ひずみによる SHM では、リブにひずみを発生させるための検査荷重が必要となる。この検査荷重としては、人為的に加える荷重と、自重等により常時加わる力の二つが考えられる。人為的に加える荷重としては、駐機時の航空機体に対して特定箇所を押す、大きな試験機にかけて試験荷重を加える、など、いずれにしても曲げ荷重、特に一点集中荷重を加えることが想定される。一方、常時加わる力としては、航空機体が基本的に薄肉構造で構成されることから翼ボックス構造、圧力隔壁、胴体などのいずれの適用箇所の場合においても、自重や内圧によって AGS に生じる荷重としては面内荷重が想定される。以上を考慮して本研究では、検査荷重として、外部より特定の部位を押すことを想定した面外一点集中曲げ荷重、及び、自重・内圧等による面内荷重を用いて検討を行うこととした。

Table 4.1 に、各損傷の種類と検査荷重の種類のリブの組み合わせに対して、本章で行った検討方法をまとめる。

ここで「損傷が検知可能である」ことの定義として、ここでは「損傷が発生した場合に、損傷したリブ及びその周辺のリブで計測されるひずみ変化が他のリブに較べて異常値とみなせるほど大きい」と定義する。

4.1.1 本研究での誤差の考え方

ここで異常値の取り扱いに先立ち、本研究における誤差の定義を述べる。まず第3章において計測器のひずみ計測性能について言及した。その際、

- AGS 成形時の樹脂の流動性によって FBG センサのリブ高さ方向の埋め込み位置が予想される埋め込み位置と異なっている。
- 光ファイバ中の FBG 部の推定が不正確である。

といった要因によって、実際に構造に加わっているひずみと異なる値が計測される可能性があることを述べた。しかしながら本研究で注目しているのはあくまで損傷前後での相対的なひずみ差であり、計測位置の正確性は考慮する必要がない。よって計測性能による雑音は考えなくてもよい (計測器の電磁雑音の大きさは数 $\mu\epsilon$ 程度なので、後述の誤差要因から較べると無視できる)。本章では、「損傷前後で生じるひずみ差のうち、損傷以外の影響によって生じるもの」を誤差要因と定義する。この場合、考えられる要因としては、

4.1 検知可能な損傷の定義

- 計測器の接続状態の違い。
- 検査環境 (温度、湿度など) の違い。

の二つが挙げられる。そしてこれらのうち最大のものを実用上考慮しなければならない誤差と考える。本研究で用いる計測機器の精度であれば、接続状態の違いを含めても、約 $1\mu\epsilon$ 程度の分解能がある。対して、試験環境 (温度、湿度) が季節や時間帯、天候などによって違うという要因は、第 1 章で述べたとおり、空港において航空機の駐機中に行うことを想定した本研究での SHM システムの場合、(温度保証システムを想定していないので) 誤差要因と考える必要がある。(4.1) 式は、温度変化に対する FBG センサの中心波長の変化を示した式である。

$$\frac{\Delta\lambda_{avg}}{\lambda_0} = \frac{n_0^3}{2} \left\{ \frac{2}{n_0^3} \frac{dn_0}{dT} + (p_{11} + 2p_{12})\alpha_s \right\} \Delta T \quad (4.1)$$

この式より仮に 5°C の温度変化があった場合、 $40\mu\epsilon$ 程度の (実際には生じていない) ひずみ差が本研究での誤差と考えられる。

4.1.2 統計的異常値検知手法

ここでは、あるデータ集合の中から異常値を見つける方法を述べる。具体的には、統計学に基づく「取得データの中に存在している異常値を見つけ出すために、データ集合全体がある分布に所属していると仮定してデータを検定し、その検定に外れたデータを異常値と判断する」という異常値検定手法を説明する。

異常値とは、そのデータだけは残りのデータが所属する集合とは別の集合に属するデータであると考えられる。よって異常値検知手法の基本は、あるデータが残りのデータと同じ集合に属すかどうかを判断する手法ということになる。

異常値解析には様々な種類があるが、ここでは正規分布に従う標本中の単一異常値を正負の区別なく見つける手法について説明する。その理由であるが、まず、AGS 中に損傷が発生した場合、AGS の特徴であるフェールセーフ性のために、損傷が発生した際のひずみ変化 $\Delta\epsilon$ が損傷したリブの周辺にのみ現れ、それ以外の部分のひずみはほとんど変化しない。このことから以下のような仮定を考える。

- 損傷したリブおよびその周辺のリブで計測されるひずみ変化が非常に大きいため、その他のデータに比べて異常値であると考えられることができる。
- それ以外のひずみ変化は逆に極めて小さく、4.1.1 で述べた誤差との区別が難しい。よって、これらの小さなデータについては誤差と同等に扱うことができる。

以上の二つの仮定を認めるならば、誤差が一般的に正規分布をするということを考慮して、正規分布より

異常値を見つける手法が本研究でも用いることができると考えられる。

具体的な手法としては、以下の式に基づいて行う方法が有名である。

$$T = \max\left(\frac{|\max x - \bar{x}|}{s}, \frac{|\min x - \bar{x}|}{s}\right) \quad (4.2)$$

ここで x は計測データを、 \bar{x} は平均を、 s は標準偏差をあらわす。そして T が予め決められた閾値を超えていたら、その対応するデータは異常値であると判断する。本研究では、全てのリブの軸方向ひずみの変化 Δe を独立の変数であると考え、計測データ群がその変数の標本であるとみなすことにする。

さらに本研究では、異常値が複数存在する場合についても対応できるように、全データ中に複数の異常値が存在する場合についての異常値検定を行わなければならない。そこで「 k 個の異常値に対する連続的な検定」という方法を用いることとした [60]。

Fig.4.1 に、本研究で AGS に用いる統計的異常値検知手法の概要を示す。

まず、集合全体中に生じうる異常値の数 k を設定する。次に、式 4.2 を以下のように修正する。

$$T_j = \max\left(\frac{|\max x - \bar{x}_j|}{s_j}, \frac{|\min x - \bar{x}_j|}{s_j}\right) \quad (j = 1, 2, \dots, k) \quad (4.3)$$

ここで、 S_j を x_1, x_2, \dots, x_{j-1} を除いたデータ集合として、 \bar{x}_j, s_j はそれぞれ、 S_j の平均、分散を表す。

まず、式 4.3 より T_1 を全データより計算する。 T_1 に対応する x は、全データの中で最も外れた値を意味するため、このデータを取り除く。そして残ったデータから T_2 を計算する。これを最初に決めた値 k まで繰り返し、 T_k まで決定する。以上の k 個のデータを除いたデータ集合には異常値は入っていないはずである。

一方で、 $\lambda_i(\beta)$ を決定する。ここで $\lambda_i(\beta)$ は、

$$P[T_i > \lambda_i(\beta)] = \beta \quad (\text{ただし } i = 1, 2, \dots, k) \quad (4.4)$$

かつ

$$P\left\{\bigcup_1^k [T_i > \lambda_i(\beta)]\right\} = \alpha \quad (4.5)$$

を満たす値とする。この α が検定の水準を決定する。 $\lambda_i(\beta)$ の具体的な求め方については、附録 E に詳しく記述している。

以上の準備の下で、有意水準 α の検定を以下の手順で行う。もし、 $T_k > \lambda_k(\beta)$ であれば、 x_1, x_2, \dots, x_k は異常値であったと判断される。でなければ、 x_k は正常値であったと考え、 T_l を計算する (ただし、 $l = k-1, k-2, \dots, 1$ である)。もし $T_l > \lambda_l(\beta)$ となれば、 x_1, x_2, \dots, x_l が異常値であったと判断される。以上の過程を繰り返し、 $l = 1$ となっても異常値がない場合には、データ中に異常値がないと結論付けられる。

4.1 検知可能な損傷の定義

以降の節で各損傷についての検知可能性を議論する場合には、全て、この方法を用いて損傷したリブ及びその付近のリブからのデータが異常値と判断された場合に、損傷が検知可能であると判定することとした。この方法は、AGS 中に生じる損傷が検知可能かどうかの指標として用いているというほかに、この方法により損傷の存在及びその位置を人間の判断に依らず自動で行うことが可能となったという意味でも重要である。

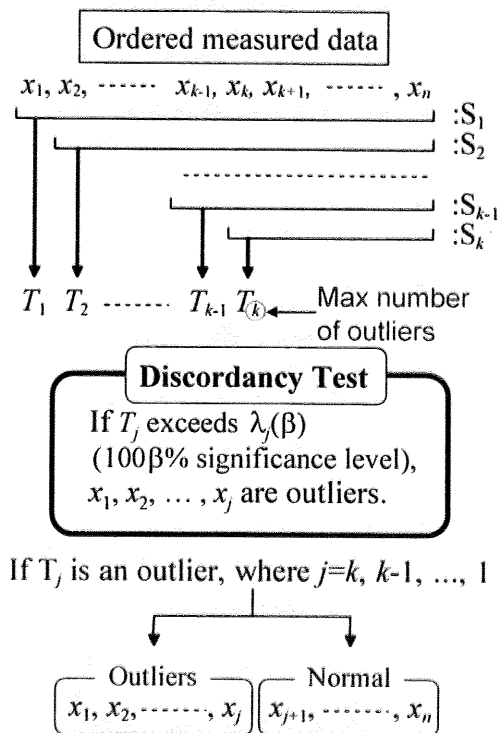


Fig.4.1 Test procedure of consecutive outlier detection.

Table 4.1 Types of damages in AGS v.s. methods for SHM with embedded FBG sensors by monitoring of static strain distribution.

	繊維破断によるクラック	リブ上面のスプリッティング	リブ側面の剝離損傷	格子部とスキンの接着不良
一点集中 曲げ荷重	実験により検討	解析による検討	実験により検討	×
面内圧縮 荷重	解析による検討	解析による検討	実験により検討	×

4.2 面外一点集中曲げ荷重による検討

4.2.1 試験概要

まず Fig.4.2 に、面外一点集中曲げ荷重によるスキンなしの AGS に対する試験の概要を、Fig.4.3 にスキン付の AGS に対する試験の概要を示す。また Table 4.2 に供試体サイズを示す。供試体材料としては、第2章と同様に、格子部については T800/E011604-1(Bryte Technology Inc.) を、スキンについては T800H/EP:3631(Toray Inc.) を [0/+60/-60]_s の積層構成で積層した擬似等方性積層板を、両者の接着にエポキシ系接着剤 (DP-420, 3M) を用いた。よって材料物性値は、Table 2.1, 2.2 と同様である。

この供試体に、スキンなしの AGS については 39 点の FBG センサを 7 本の光ファイバに多重化したものを、その下面に貼り付け、供試体下面のひずみを計測した。FBG センサは、グレーティング長が 10mm、反射率が -3dB でのスペクトル幅が 0.3(nm) のものを用いた。Fig.4.2 の右図に、FBG センサが埋め込まれた 39 本のリブの位置、及び、その通し番号を示す。また Table 4.3 に、各 FBG の通し番号とそれらの埋め込み前の反射光スペクトルの中心波長を示す。ひずみの計測は、Fig.4.2 に示すように四方を単純支持した状態で、図中の治具を用いて図中の交点に一点集中負荷を与え、39 点全ての FBG センサを用いてリブ軸方向ひずみ ϵ_{intact} を計測した。検査荷重は Instron1185 (4400R)(F.7) を用い (試験速度は 1.0mm/s)、1000N(4.72mm) の荷重を用いることとした。

一方、スキン付の AGS については、同様の FBG センサ 29 個を 3 本の光ファイバに多重化したものを、Fig.4.3 左下図に示した 29 箇所のリブ内部に埋め込み、これを用いてリブ軸方向ひずみ ϵ_{intact} を計測した。ひずみの計測は、Fig.4.3 に示すように供試体四隅付近を単純支持した状態で、図中の負荷点に一点集中負荷を与え、29 点全ての FBG センサによりリブ軸方向ひずみ ϵ_{intact} を計測した。検査荷重は、Autograph(AG-I, 島津製作所, F.6) を用い (試験速度は 1.0mm/s)、2000N(4mm) の荷重を用いることとした。

なお計測には、3.2.1 に示した一連の計測器を用いた。

上記のとおり試験を行い、得られたひずみ ϵ_{intact} を無損傷時に計測されるひずみと定義する。その後、構造中に評価したい損傷を与える (Fig.4.2, 4.3, 4.7 参照)。そして、同じ試験条件の下で再び等しい負荷を与え、損傷後に計測されるリブ軸方向ひずみ $\epsilon_{\text{damaged}}$ を再度計測し、 ϵ_{intact} との差を計算する。そして、4.1 節で提案した統計的異常値検知手法を用いて、損傷したリブ及びその周辺のリブで計測されたひずみが、全体のデータの中で異常値と判断されれば、損傷が検知できると結論付けることにする。

4.2.2 リブの繊維破断に関する検討

リブの繊維破断については、Table 4.1 のとおり、実験により検討した。本検討では、20 番及び 27 番二箇所のリブ中央に、電動カッターを用いて Fig.4.2 に示した切欠きをいれ、繊維破断によるクラックを模擬した亀裂とし、損傷の検知可能性を議論した。

Fig.4.4 に試験結果を示す。グラフの横軸はリブ番号をあらわし、縦軸は損傷発生前後でのひずみ変化量 $\Delta\epsilon$ をあらわす。

グラフを見ると、20 番及び 27 番それぞれのリブ及びその周辺のリブでのひずみ変化 $\Delta\epsilon$ がその他のデータに較べて突出していることがわかる。これは、AGS が不静定構造であるため、局所的な損傷が構造全体の変形状態に影響を及ぼさず、損傷の影響がその近傍に限られるという、AGS のフェールセーフ性が示されていると言える。

そこでこの実験結果に対して、4.1.2 において提案した統計的損傷診断手法を適用し、20 番及び 27 番それぞれのリブ及びその周辺のリブでのひずみ変化が全体において異常値と判定されるかどうかを検証した。ここでの検討では、全データ数 $n = 39$ 、最大許容異常値数 k を $k = 5$ 、有意水準 $\alpha = 0.05$ とした。

まず Fig.4.4 の全データ $\Delta\epsilon$ より、 T_1 を計算する。この計算により、 $\Delta\epsilon_{20}$ が x_1 と決定された。次に T_2 を x_1 を除く $n - 1$ 個のデータより計算する。この計算を、 x_5 が計算されるまで行った。これにより、 $\Delta\epsilon_{20}$ 、 $\Delta\epsilon_{27}$ 、 $\Delta\epsilon_{19}$ 、 $\Delta\epsilon_{21}$ 、 $\Delta\epsilon_{24}$ がそれぞれ、 x_1 から x_5 に対応している。このプロセスにより、残りのデータには異常値が存在していないと断定し、選ばれた 5 つのデータのうち、いくつが異常値となるかを判断していく。

ここで $n = 39$ 、 $k = 5$ 、 $\alpha = 0.05$ 、より附録 E に示した計算から λ_i を Table 4.5 のように求めた。

まず、 T_5 と λ_5 を比較する。この比較では、 $T_5 < \lambda_5$ となっているので、 T_5 は正常値であり、 x_5 は外れた値ではないと判定された。次に、 T_4 と λ_4 を比較する。この比較では、 $T_4 > \lambda_4$ となっているので、 x_4 以上のデータ、すなわち、 x_1, x_2, x_3, x_4 が異常値であったことがわかる。

Fig.4.5 に、以上の手順で行われた異常値判定結果を示す。この図において丸印は、統計的異常値検知手法を適用した結果、異常値と判断されたリブを表す。このグラフを見ると、損傷のあるリブ及びその周辺のリブのひずみ変化のみが異常値と診断されていることがわかる。以上の点より、リブの繊維破断によるクラックは本 SHM システムで検知できると結論付けられ、さらに、提案した統計的異常値検知手法により損傷の存在、および、その位置が自動で判定できることがわかった。

センサの不具合による損傷検知能力に関する考察

実際の計測では、製造時の問題や運用中の問題により、仮に全てのリブに FBG センサが埋め込まれていたとしても、それを全て使うことができない場合が考えられる。ここでは Fig.4.5 の結果を基に、その際の、この SHM システムの検知能力について考えてみる。

Fig.4.5 の実験結果及び実験結果に対する異常値検知結果を見ると、特に、損傷したリブの長手方向に連続している両隣のリブが異常値と診断されていることがわかる。これはすなわち、リブに生じた損傷の影響が両隣のリブに主に現れるということを意味している。とするならば、もし多重化した FBG センサがリブ長手方向に連続して埋まっていた場合、何らかの問題によってこの多重化した FBG センサ全てで計測できなくなった際に、異常値を診断することができなくなってしまう。よって本実験結果から、多重化した FBG センサを埋め込む際には、できるだけ交差部において光ファイバを曲げて埋め込むべきであるということが言える。ただし、光ファイバを曲げることは、光強度の損失を伴うため、一本についてあまりに何度も曲げることは非現実的である。

そこでひとつの例として、本研究では Fig.4.6 に示したような、埋め込み方法を提案する。このように、各経路について光ファイバを曲げて埋め込むことにより、全てのひとつの経路が計測できなくなった場合に対しても冗長な計測系となっている。今後は、光強度損失の問題と直線部分をできるだけ短くするという観点から、最適な多重化 FBG センサ埋め込み位置を検討できると考えられる。

有限要素解析モデルの構築

ここで、4.2.4, 4.3.3, 4.3.5 での損傷検知可能性の検討に用いる FEA モデルを 4.2.2 の実験結果を基に構築する。参照データとして、上記の実験において各リブで計測された無損傷時のひずみ ϵ_{intact} を用いることとし、この ϵ_{intact} を再現できるような解析モデルを作成することとした。

Fig.4.7 に計算に用いた解析モデルを示す。本解析では、特に対称性を考慮せずに三次元弾性解析を行うこととした。これは、

- 一点曲げ荷重、すなわち、面外荷重を与えるため、三次元的な変形を計算する必要があるため。
- AGS の場合、スキンが片面にしかつかない場合が多く、その場合は厚さ方向に対称性がなくなる。
- Fig.1.10 に示したとおり、AGS は実際には交点部においてオフセットが存在する。そのため、厳密には y 軸についての対称性が存在しない。
- x 軸についての対称性も、今後このモデルを用いて損傷が非対称な位置に発生した場合についても検討することとしているので、x 軸について対称でない場合も考慮しないといけない。

4.2 面外一点集中曲げ荷重による検討

といった理由から、汎用性を考慮したためである。モデル化には、三次元アイソパラメトリックソリッド要素を用いることとし、曲げ変形であることを考慮して、二次要素を用いた。

Fig.4.7 のとおり、モデルの大部分は六面体要素を用いてモデル化しており、構造全体の厚さ方向を6分割、リブ幅方向を2分割、リブ長手方向は20分割している。ただし交点部においては、材料物性的にも構造的にも不連続かつ複雑な形状をしているため、図のようにオフセットを考慮した上で、交点部はより詳細に要素分割を行った。そして、交点部付近は、リブ部と交点部の粗密をつなぐために、五面体(三角柱)要素の二次要素を用いてモデル化した。

材料物性には、リブには CFRP 一方向材料の材料物性 (Table 4.4) を、リブの局所座標系を考慮しつつ工学定数により与えた。一方、交点部については、積層が二倍に、すなわち繊維含有率がリブの倍であると考えられるため、両積層板の剛性の重ね合わせになると考え、Table 4.4 の材料物性値を一般弾性定数に変換した後、テンソル表記 $[D_{ijkl}]$ を用いて、

$$[D_{ijkl}]_{\text{cross}} = [D_{ijkl}]_0 + [D_{ijkl}]_g \quad (4.6)$$

とした。

境界条件は、4.2 に示した試験条件に基づき、AGS の周辺を単純支持することとし、試験時に治具により荷重を与えた点に対して z 方向 5mm の強制変位を与えることとした。この変位の大きさは、実際に実験時に計測された変位の大きさに対応している。

解析では、静的な(時間次元を考慮しない)有限要素解析を行うこととし、曲げ変形時に問題となることの多い、構造非線形性を考慮することとした。以上の解析を、汎用有限要素解析コード ABAQUS(ABAQUS Inc.) を用いて行った。解析の出力には、FBG センサが埋め込まれている位置の軸方向ひずみを対応する要素について計算することとし、複数個の要素が含まれている場合には、それを平均した値を FBG センサで計測されるひずみと考えることとした。

Fig.4.8 に、無損傷下において、先ほどの実験で各 FBG センサにより計測されたひずみと FEA により計算されたひずみの比較を示す。図中の番号は、各 FBG センサの通し番号で、Fig.4.2 中の図中に示した番号と一致している。この図を見ると、提案した解析モデルにより計算されたひずみ分布が実験結果とよく一致していることがわかる。よって、このモデルは実験において用いた AGS の力学特性をよく再現できるモデルであることがわかったので、4.2.4, 4.3.3, 4.3.5 での解析による検討にもこのモデルを用いることとした。

負荷位置と損傷位置の違いによる検知可能性の確認

さらに実際には、損傷と検査荷重の負荷位置の関係は予めわかっているわけではない。そこで、どのような位置関係においても前述のような大きなひずみ変化が出るのかどうかを確認する必要がある。そこで先ほど妥当性が示された FEA モデルを用い、様々な位置に検査荷重を加えた場合、及び、様々な位置に損傷が生じている場合、であってもこの方法を用いて損傷検知が行えることを確認する。ここでは特に、(1)AGS 中の 5 箇所のリブに Fig.4.2 の繊維破断によるクラックが現れた場合に上記の方法で損傷位置がわかるのかどうかを、さらに、(2)4 つの異なる位置に検査荷重を与えた場合に上記の方法で AGS 中の 2 箇所に生じた同様のクラックが検知できるのかどうかを検討した。

Fig.4.9 に、(1)に関する検討方法及び解析による検討結果を示す。Fig.4.9 左図は、解析時に損傷を仮定した 5 箇所のリブを表している。本解析では、図中の 22, 41, 46, 65, 74 番のリブに繊維破断によるクラックを二重節点によりモデル化した。解析モデル、及び、詳細な解析条件は 4.2.2 に準ずる。右図は、解析により得られた、損傷の発生前後でのリブ下面軸方向ひずみ変化に関するグラフである。横軸は左図の各リブの通し番号を、縦軸はひずみ変化の大きさを表す。図を見ると、22, 41, 46, 65 番のリブでは他のリブに較べて大きなひずみ変化が生じていることがわかるが、74 番ではほとんどひずみの変化が生じていないことがわかる。実際に前述の異常値検知手法を適用してみたところ、Fig.4.10 のように異常値が決定された。ここで検定には、Table 4.7 の検定統計表を用いた。異常値として検定された位置を見ると、22, 41, 46, 65 番のリブの近傍が異常値と診断されていることがわかるが、74 番及びその付近は異常値と診断されていない。これは、左図のような境界条件の場合には 74 番のリブには損傷発生前からほとんど荷重が加わっておらず、損傷が生じて、そもそもひずみの加わらないリブだったために、損傷によるひずみ変化がほとんど現れなかったのだと考えられる。この結果は、実際に AGS 全体を診断する場合、面外より検査荷重を与える方法では構造全体を均等に診断することができないことを意味している。よって、この検査荷重を与える方法の場合には複数個所に検査荷重を加えて損傷診断を行う必要があることがわかった。

一方、Fig.4.11 に、(2)に関する検討方法及び解析による検討結果を示す。Fig.4.11 中央の図は、解析においてクラックを仮定した位置 2 箇所、及び、検討した相異なる 4 箇所の検査荷重位置を表している。また、図中の四つのグラフは、計算の結果得られたリブ軸方向のひずみ変化分布 $\Delta \epsilon$ をコンター表示したものである。この図を見ると、どの位置に荷重を与えた場合においても、損傷の近傍でひずみの変化が顕著であることがわかる。さらに、その変化は、損傷に近い位置に荷重を与えた場合ほど顕著であることがわかる。

4.2.3 リブ側面の剥離損傷に関する検討

リブ側面の剥離損傷についても、Table 4.1 のとおり、実験により検討した。本検討では、15 番のリブ中央に、Fig.4.3 に示したように Autograph(Fig.F.6) 及び直径 30mm の球状押し込み治具を用いて押し込み荷重を加え、リブ側面の剥離損傷を発生させ、損傷発生前後のひずみ差を調べ、損傷の検知可能性を検討した。

Fig.4.12 に試験結果を示す。グラフの横軸はリブ番号 i をあらわし、縦軸はひずみ変化量 $\Delta\epsilon$ をあらわす。

グラフを見ると、15 番のリブにおいてひずみが増加していることがわかるが、他のリブでそれ以上の増加をしていること、さらに、その増加が損傷から離れたリブに現れていることもわかる。損傷から離れたリブで観察されるひずみ差については、損傷前後で試験機からの取り外しをしているために損傷による影響ではない要因によって生じたひずみ差だと考えられる。よって、実際にはこのような誤差が生じることはないが、この結果は同時に、そもそも繊維破断によるクラックの場合に較べて、損傷したリブでのひずみ差が非常に小さいことが原因とも考えられる。このようにひずみ差が非常に小さいことから、次のようなことが考えられる。AGS は CFRP 一方向材料を主構造部材としているので、AGS に加わる全ての荷重はリブの長手方向、すなわち繊維方向の変形により負担される。その繊維方向に平行に埋め込まれた FBG センサにひずみ変化が生じないということは、この損傷が構造に与える影響が小さく、構造の健全性にそれほど影響しないということを意味する。よって、この検査手法で損傷が検知できないという結果は予想しうる結果であり、本実験結果はそのことを示していると考えられる。

実際に前述の異常値検知手法を適用してみたところ、Fig.4.13 のように異常値が決定された。5, 23, 24 番のリブ及びその周辺のリブでのひずみ変化が全体において異常値と判定されるかどうかを、4.2.2 で行った方法により検証した。ここで検定には、全データ数 $n = 29$ 、最大許容異常値数 $k = 5$ 、有意水準 $\alpha = 0.05$ の条件より附録 E に示した計算から求めた λ_i (Table 4.6 参照) を用いた。

Fig.4.13 に、異常値判定結果を示す。この図において丸印は、統計的異常値検知手法を適用した結果、異常値と判断されたリブを表す。このグラフを見ると、損傷した 15 番のリブではなく損傷から離れた 5, 23, 24 番のリブが異常値と診断されていることがわかる。これは、15 番のリブには損傷発生前からほとんど荷重が加わっておらず、損傷が生じて、そもそもひずみの加わらないリブだったために、損傷によるひずみ変化がほとんど現れなかったのだと考えられる。この結果は、実際に AGS 全体を診断する場合、面外より検査荷重を与える方法では構造全体を均等に診断することができないことを意味している。

4.2.4 リブ上面のスプリットティングに関する検討

リブ上面のスプリットティングについては、有限要素解析 (Finite Element Analysis : FEA) による検討を行った。解析モデルには、4.2.2 で妥当性を確認したモデル (Fig.4.7 参照) を用いることとした。Fig.4.15 に解析における AGS 中の各リブの通し番号を示す。本検討では 46 番のリブ中央に、Fig.4.14 中の下の図で示したとおり、46 番のリブのみ幅方向を 5 分割とし、長手方向・幅方向中央の要素 3 つ (3cm に相当) の材料物性値全てを 0 とし、上面に現れる亀裂とした。これは、選択した要素 3 個分の空間がリブ中にあることを表している。なお、高さ方向にも 3 要素分、すなわち、リブの高さ方向半分の位置までこの空間が存在していることとして、合計 9 要素の材料物性値を 0 とした。

解析の境界条件は、実際には四辺が全て固定された状態となるであろうことを考慮して、端部 4 面の x, y, z の 3 自由度を完全固定することとし、Fig.4.14 に示したリブ交差部に強制変位を 5mm 与えることとした。この値は、4.2.2 で検討の際に与えた検査変位と同じ大きさとした。

計算終了後は、全リブの中央下面に FBG センサが埋め込まれていると仮定し、FBG が埋め込まれている位置に相当する要素の軸方向ひずみを、FBG センサが計測するひずみとして算出した。

Fig.4.16 に試験結果を示す。グラフの横軸はリブ番号 i をあらわし、縦軸はひずみ変化量 $\Delta\varepsilon$ をあらわす。グラフを見ると、46 番のリブ及びその周辺のリブのひずみ変化が他のリブに較べて大きいことがわかる。この解析結果に対して、4.1.2 において提案した統計的損傷診断手法を適用し、46 番のリブ及びその周辺のリブでのひずみ変化が全体において異常値と判定されるかどうかを、4.2.2 で行った方法により検証した。ここでの検討では、全データ数 $n = 91$ 、最大許容異常値数 k を $k = 5$ 、有意水準 $\alpha = 0.05$ とした。これらの値より附録 E に示した計算から λ_i を Table 4.7 のように求めた。

Fig.4.17 に、異常値判定結果を示す。この図において丸印は、統計的異常値検知手法を適用した結果、異常値と判断されたリブを表す。このグラフを見ると、損傷のあるリブ及びその周辺のリブのひずみ変化のみが異常値と診断されていることがわかる。以上の結果から、リブ上面のスプリットティングも (ひずみの変化は小さいが) 本 SHM システムで検知できると結論付けられ、さらに、提案した統計的異常値検知手法により損傷の存在、および、その位置が自動で判定できることがわかった。

4.2 面外一点集中曲げ荷重による検討

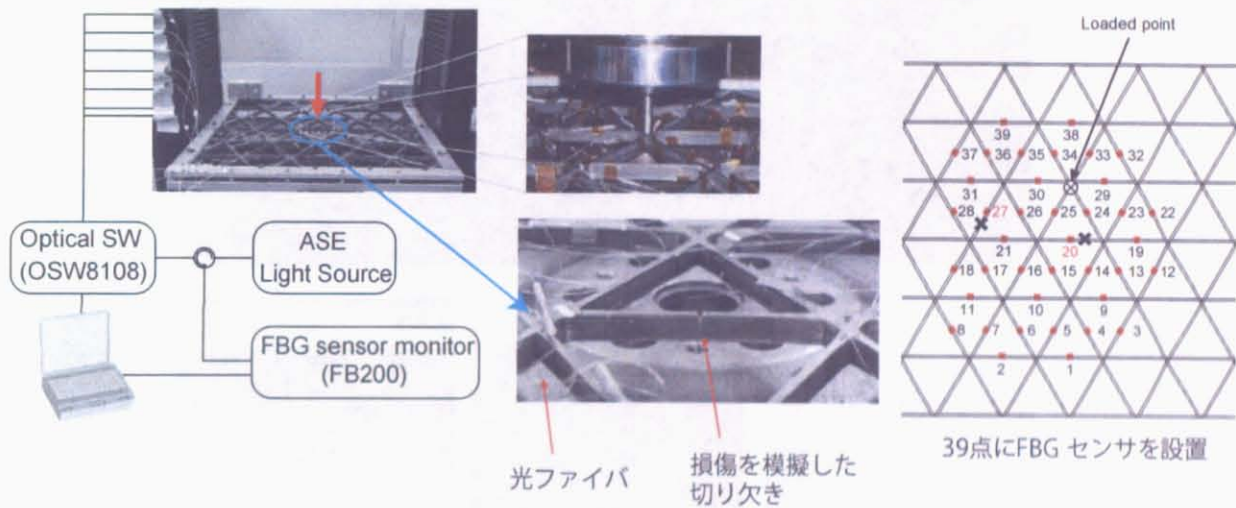


Fig.4.2 Test configuration of one point bending loading for AGS without skin. All four edges were simply supported and the load was applied at the cross section.

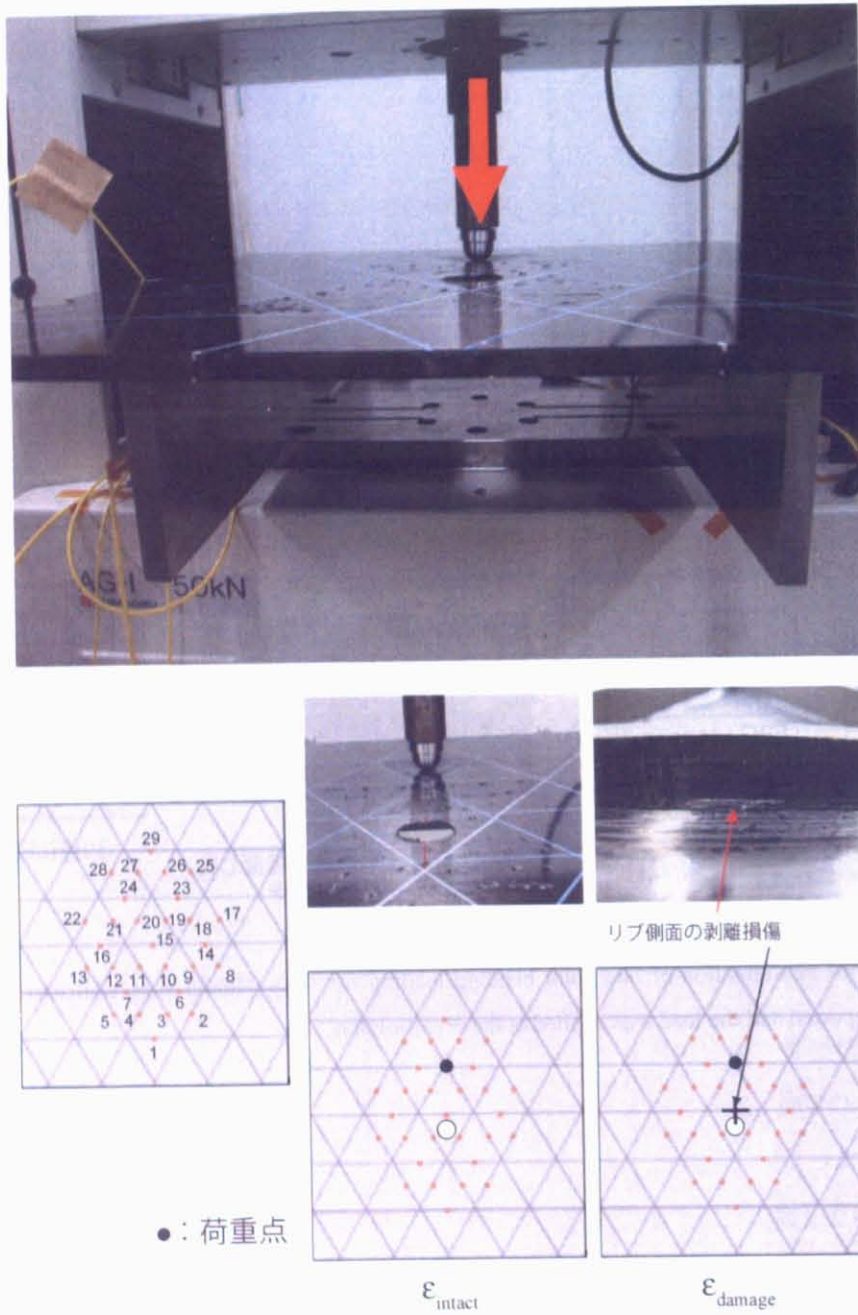


Fig.4.3 Test configuration of one point bending loading for AGS with skin. Four points were simply supported and the load was applied at the cross section.

4.2 面外一点集中曲げ荷重による検討

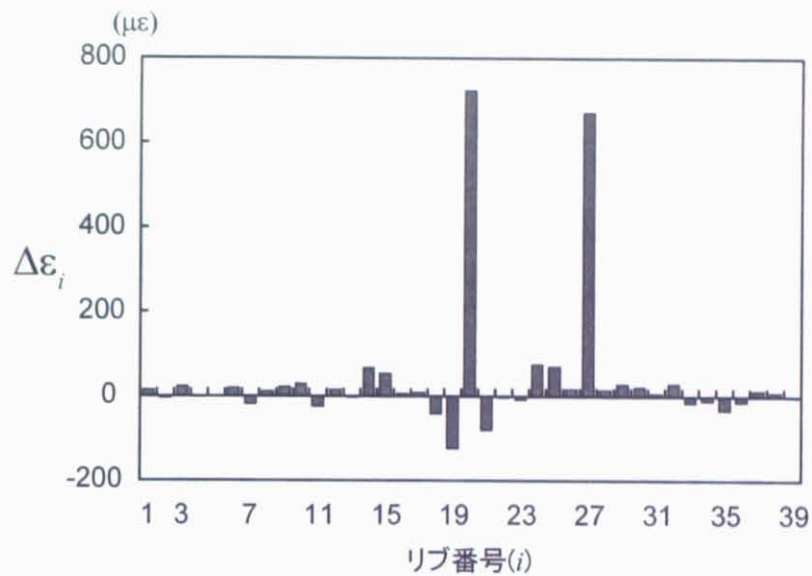


Fig.4.4 $\Delta\varepsilon$ measured at 39 embedded FBG sensors caused by a rib partial cracking.

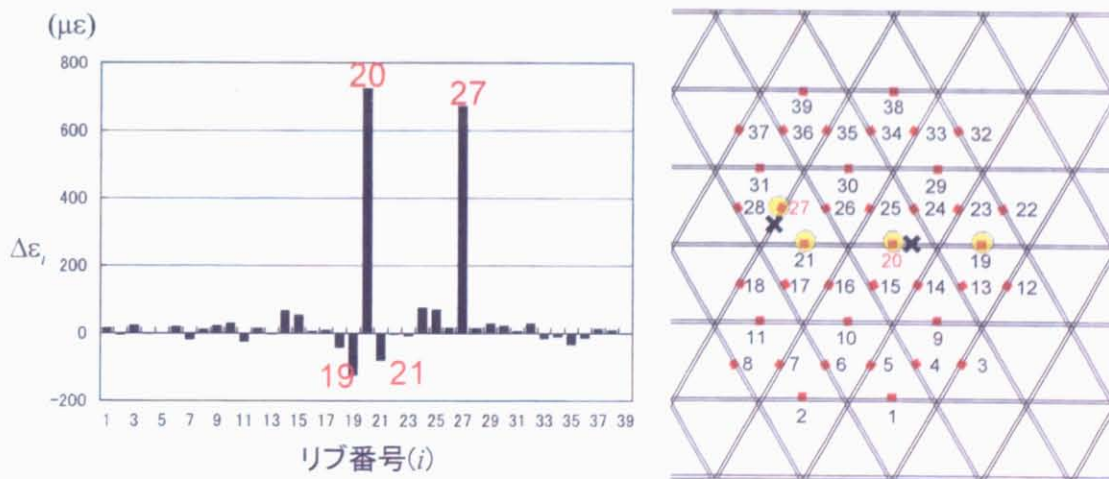


Fig.4.5 Result of damage identification with statistical outlier analysis applied to Fig.4.4.

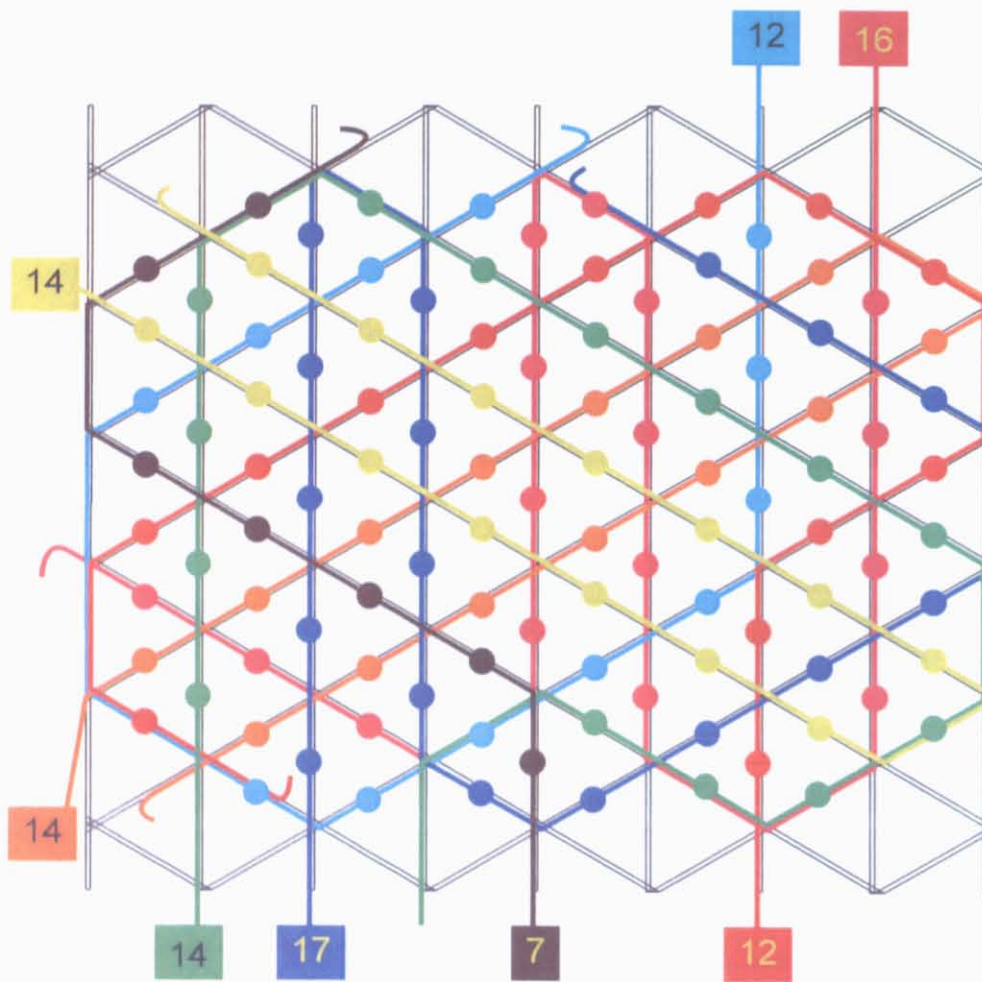


Fig.4.6 An suggested plan of FBGs' arrangement.

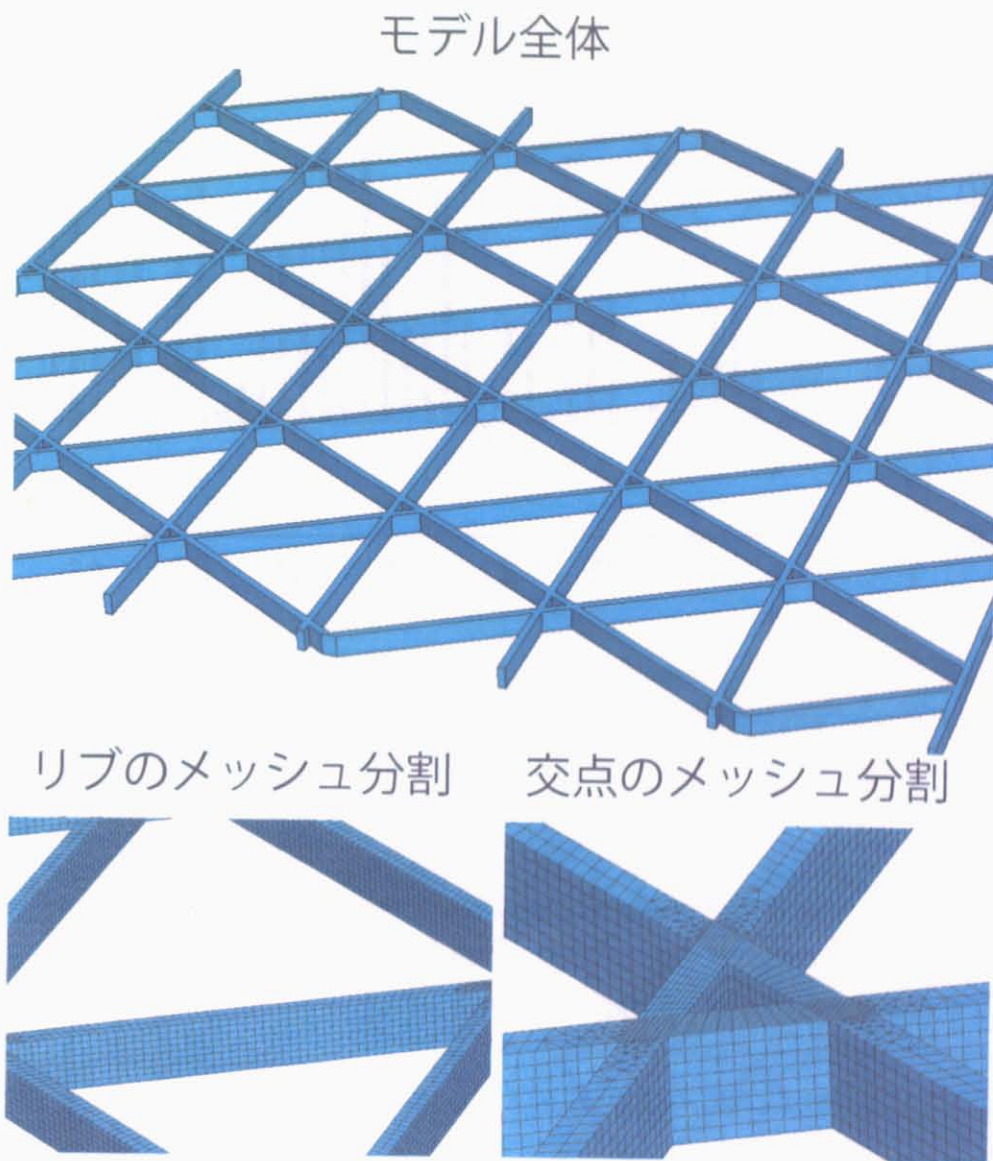


Fig.4.7 FEA model for one point bending loading in order to calculate change of strain distribution caused by various types of damage.

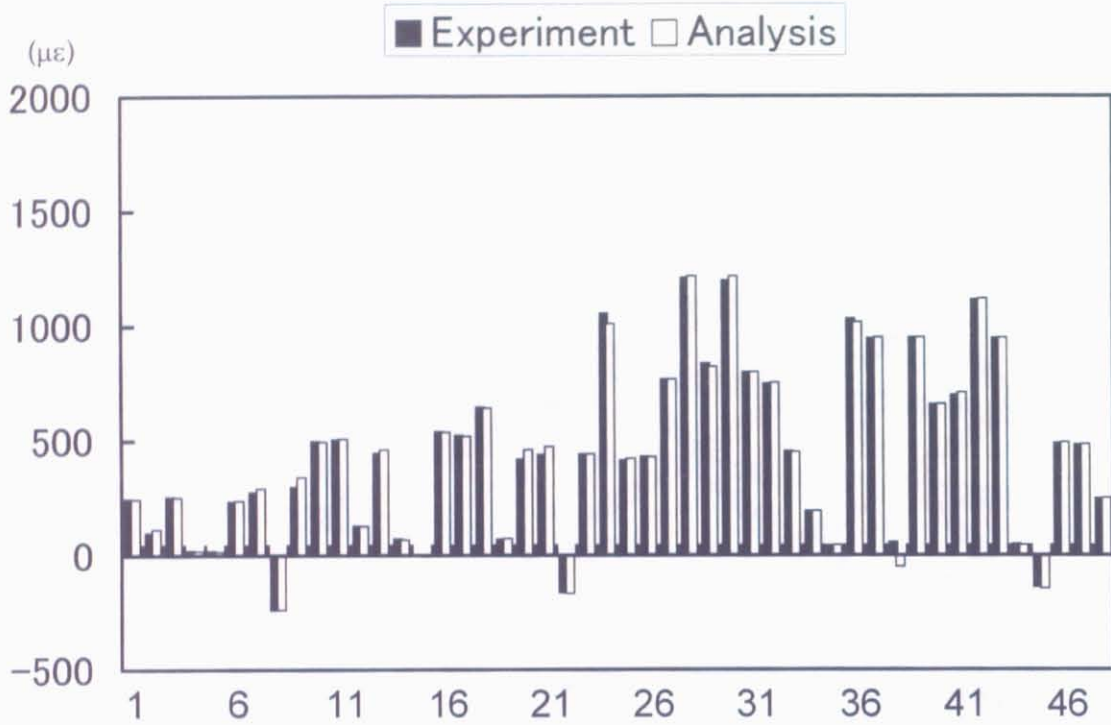


Fig.4.8 Verification of FEA model proposed in Fig.4.7. Strain distribution measured in the experiment (Fig.4.4) were compared with that calculated by FEA.

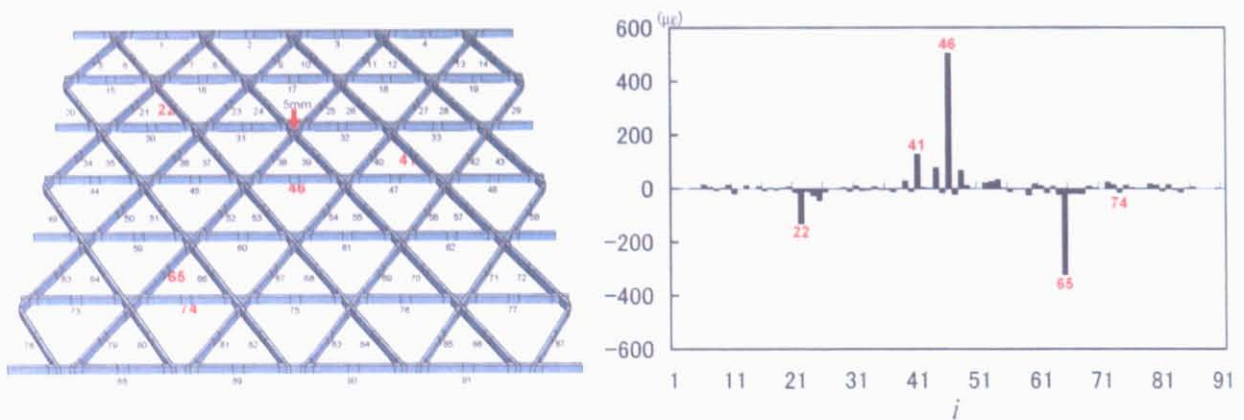


Fig.4.9 Calculated changes of strain distribution ($\Delta\epsilon$) under concentrated loading. Five cracks in different ribs were assumed.

4.2 面外一点集中曲げ荷重による検討

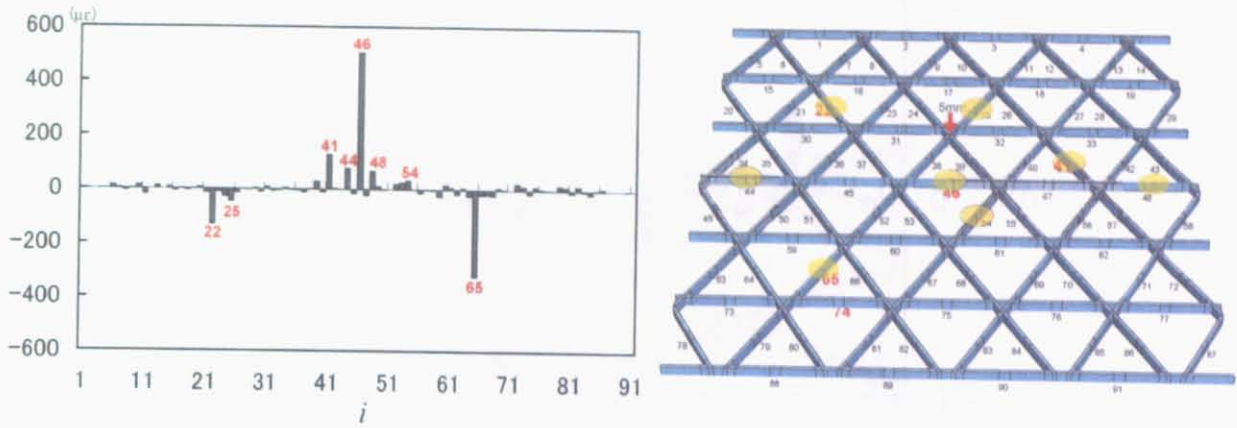


Fig.4.10 Result of the outlier detection method applied to the changes of strain distribution ($\Delta\epsilon$) calculated in Fig.4.9.

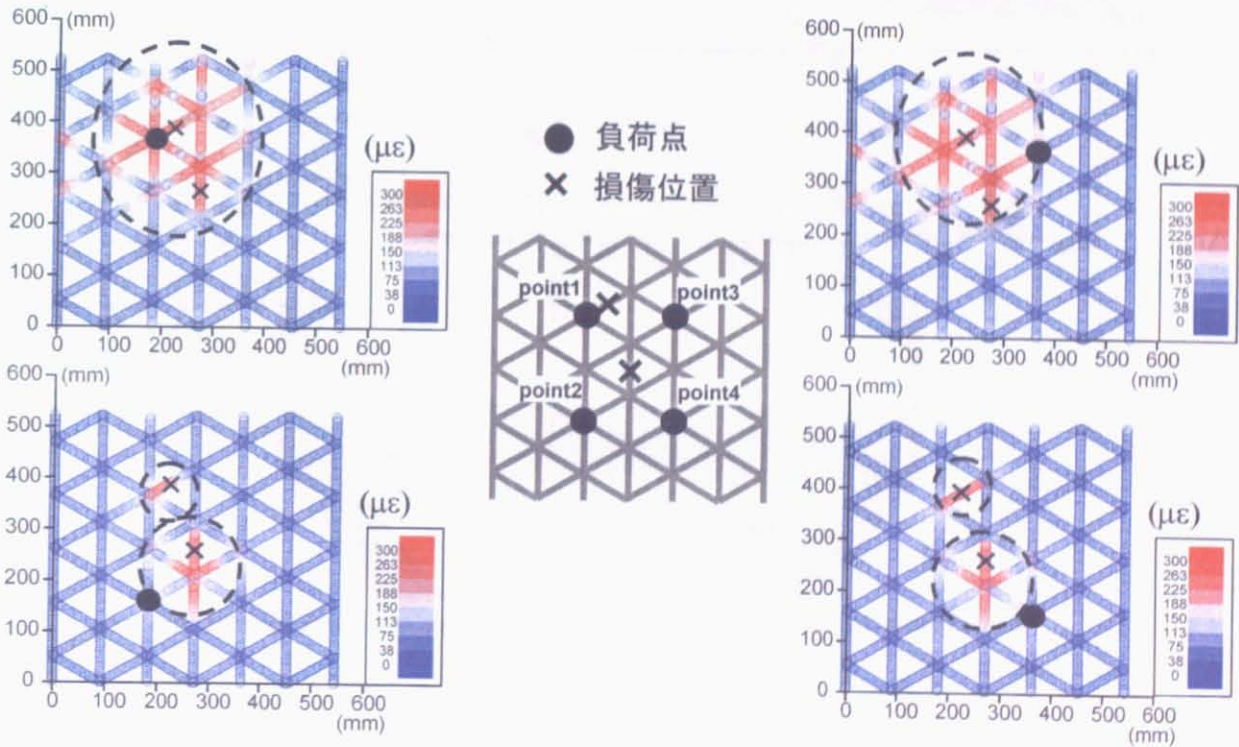


Fig.4.11 Calculated changes of strain distribution ($\Delta\epsilon$) under concentrated loading in four different loading locations. Two cracks in different ribs were assumed.

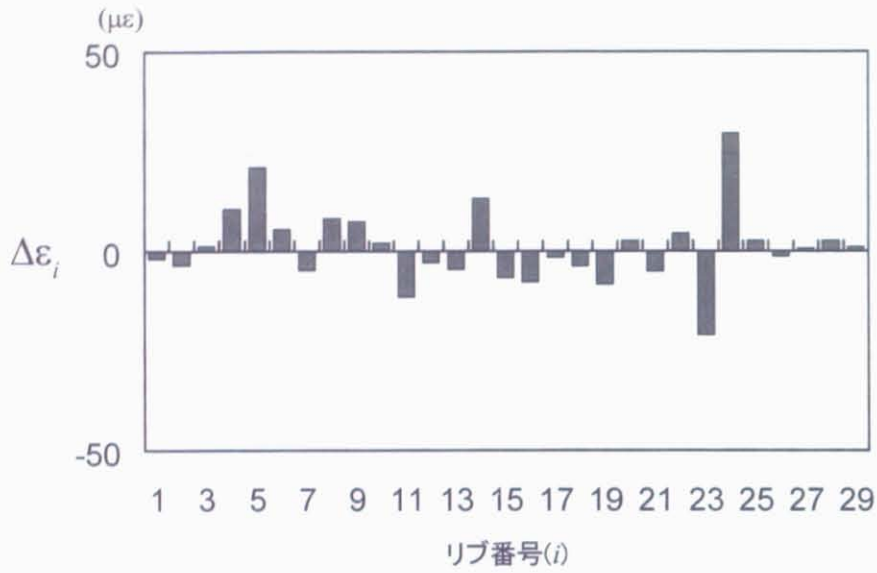


Fig.4.12 $\Delta\epsilon$ caused by a rib delamination measured in the experiment as shown in Fig.4.3.

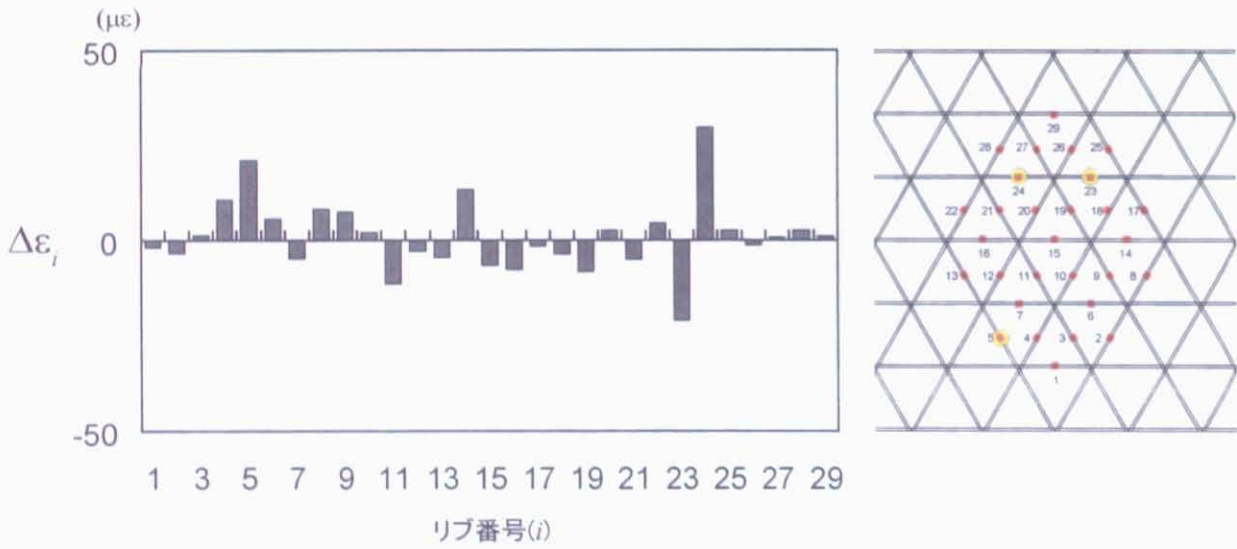


Fig.4.13 Result of the outlier detection method applied to the changes of strain distribution ($\Delta\epsilon$) calculated in Fig.4.12.

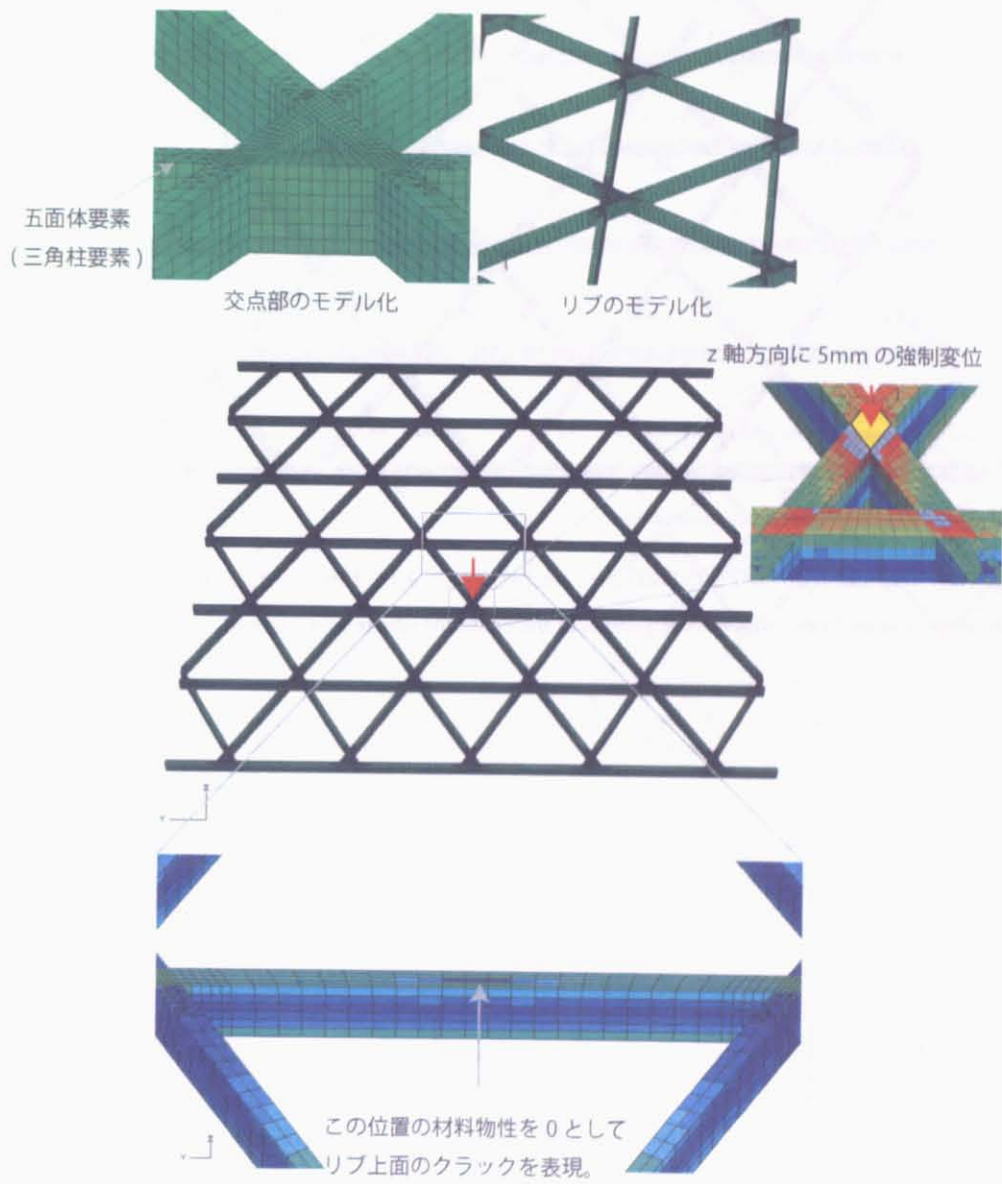


Fig.4.14 $\Delta\epsilon$ caused by a splitting on top surface of a rib.

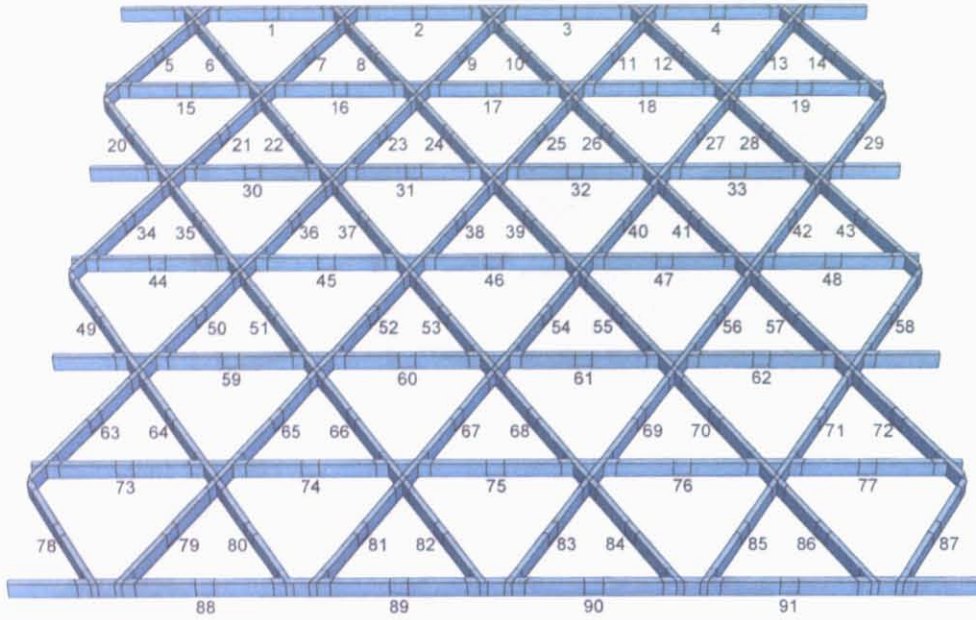


Fig.4.15 Definition of FBG serial numbers referred in Fig.4.16. FBGs were considered to be embedded in lower surface of ribs, which were located in the center of ribs in longitudinal and width directions.

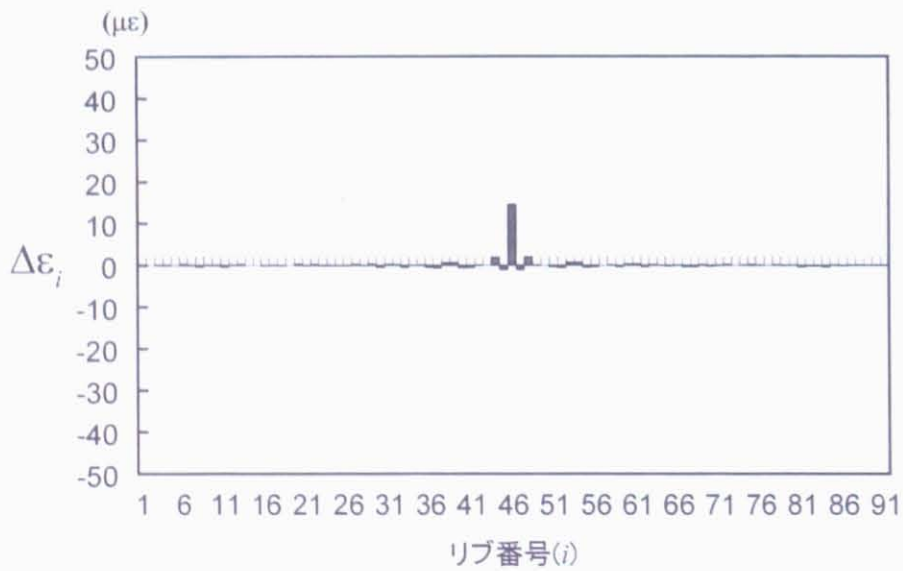


Fig.4.16 Δε caused by a splitting on top surface of a rib.

4.2 面外一点集中曲げ荷重による検討

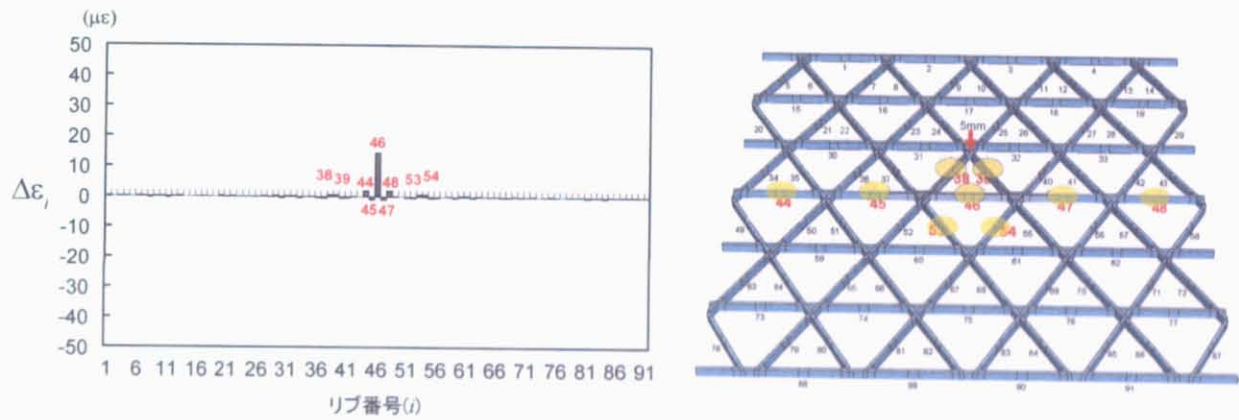


Fig.4.17 Result of the outlier detection method applied to the changes of strain distribution ($\Delta\epsilon$) calculated in Fig.4.16.

Table 4.2 Sizes of AGS specimen. All characters correspond to Fig.1.11

<i>A</i>	526.8	± 0.2	(mm)
<i>B</i>	550.9	+0.16, -0.14	(mm)
<i>a</i>	105.0	± 0.1	(mm)
<i>b</i>	182.1	+1.39, -1.01	(mm)
<i>l</i>	93.2	+1.41, -1.09	(mm)
<i>t</i>	1.8	+0.33, -0.27	(mm)
<i>h</i>	9.7	+0.34, -1.04	(mm)

4.2 面外一点集中曲げ荷重による検討

Table 4.3 List of CWLs of reflected light from 39 FBGs embedded in the specimen.

Rib number	CWL(nm)	(nm)	rib number	CWL(nm)	(nm)
1	1553		21	1537	
2	1557		22	1528	
3	1532		23	1544	
4	1530		24	1544	
5	1536		25	1533	
6	1535		26	1542	
7	1552		27	1541	
8	1531		28	1551	
9	1549		29	1546	
10	1545		30	1542	
11	1541		31	1538	
12	1528		32	1532	
13	1552		33	1529	
14	1540		34	1536	
15	1534		35	1545	
16	1548		36	1550	
17	1543		37	1549	
18	1537		38	1530	
19	1529		39	1534	
20	1533				

Table 4.4 Material properties of T800/E011604-1(Bryte Technology Inc.).

E_1	0deg. tensile modulus	149	GPa
$G_{12} = G_{13}$	Shear modulus	3.25	GPa
$\nu_{12} = \nu_{13}$	Poisson's ratio	0.281	

Table 4.5 Critical values for 5% consecutive test for up to k=5 outliers in a normal sample n=39.

i	$\lambda_i(\beta)$
1	3.31
2	2.88
3	2.69
4	2.55
5	2.47

Table 4.6 Critical values for 5% consecutive test for up to k=5 outliers in a normal sample n=29.

i	$\lambda_i(\beta)$
1	2.90
2	2.58
3	2.42
4	2.33
5	2.27

Table 4.7 Critical values for 5% consecutive test for up to k=5 outliers in a normal sample n=91.

i	$\lambda_i(\beta)$
1	3.31
2	2.91
3	2.71
4	2.59
5	2.50

4.3 面内圧縮荷重による損傷検討

4.3.1 試験概要

Fig.4.18 に、面内圧縮荷重による試験の概要を示す。供試体サイズ、供試体材料は、4.2 節と同様のものを用いた。

面内圧縮荷重による損傷検討では、スキンのない AGS については有限要素解析により損傷検討を行っているため、ここではスキンのついた AGS の供試体についてのみ説明する。スキン付の AGS には、4.2.1 と同様に 29 個の FBG センサを 3 本の光ファイバに多重化したものを、Fig.4.3 左下図と同様に埋め込み、これを用いてリブ軸方向ひずみ ϵ_{intact} を計測した。試験は、Fig.4.18 に示すように、上下面に金属の板をあて、さらに供試体の全体座屈を抑制するために、供試体途中に座屈防止用の金属棒をそえた状態で、上から面内圧縮荷重を加える。検査荷重としては、Autograph(AG-I, 島津製作所, F.6) を用い (試験速度は 1.0mm/s)、2000N(上部治具変位: 4mm) の荷重を用いた。この試験荷重が加わった状態で、29 点全ての FBG センサによりリブ軸方向ひずみ ϵ_{intact} を計測することとした。

なお計測には、3.2.1 に示した一連の計測器を用いた。

上記のとおり試験を行い、得られたひずみ ϵ_{intact} を無損傷時に計測されるひずみと定義する。その後、構造中に評価したい損傷を与える (Fig.4.3, 4.7, 4.21 参照)。そして、同じ試験条件の下で再び等しい負荷を与え、損傷後に計測されるリブ軸方向ひずみ $\epsilon_{\text{damaged}}$ を再度計測し、 ϵ_{intact} との差を計算する。そして、4.1 節で提案した統計的異常値検知手法を用いて、損傷したリブ及びその周辺のリブで計測されたひずみが、全体のデータの中で異常値と判断されれば、損傷が検知できると結論付けることにする。

4.3.2 面内圧縮荷重下での有限要素解析モデル及びその問題点

ここで、AGS に圧縮荷重を与える有限要素解析 (FEA) モデルについて説明すると共に、そのモデルを用いた際の問題点について述べる。ここでは説明のため、無損傷時の面内圧縮荷重下での AGS の変形挙動を解析する。

面内圧縮荷重を検査荷重とした検討においても、用いる FEA モデルは基本的には、4.2.2 で検証済みの Fig.4.14 と同じものを用いることとした。解析に用いた境界条件を、Fig.4.19 に示す。境界条件は、治具との接触面と想定される面に、圧縮方向に強制変位を与えると同時に、その反対側の面の圧縮方向の自由度を固定した。側面に関しては、特に境界条件を与えなかった。

Fig.4.20 に解析結果を示す。この解析では、試みに構造非線形性を考慮せずに解析を行っている。にも

かかわらず図を見るとわかるように、AGS 両端 (圧縮荷重が加わっていない部分) において複雑な曲げ変形が生じていることがわかる。これは、供試体の両端が自由端となっているため、非常に複雑な応力場となっており、荷重の釣り合いを保つためにこのような複雑な変形が起きているのだと考えられる。このように、スキンのない AGS において自由端を有したまま面内圧縮荷重を加えることは現実には非常に不安定な荷重の釣り合い状態となっていることが予想される。実際、既存の研究でも、AGS に対して面内圧縮荷重を与える場合には、円筒形状の AGS を用いる [15][9]、または、四辺を潰し樹脂等で固めた状態で行う [24]、などの方法が採られており、これらは、自由端を持つ AGS での圧縮試験に生じる上記のような問題点を解決するための工夫としてなされたものだと考えられる。

上記のとおり荷重の釣り合いを保つために非常に複雑な変形をしていることから、実際の解析を行った場合に、構造非線形性を考慮した解析時の節点力ベクトルの残差の収束性が非常に悪いという傾向が見られた。また解析結果も、 x 軸対称性のある解析を行ったにもかかわらず、 x 軸について非対称な変形を生じていた。以上の結果は、この解析自体が非常に不安定であることを意味している。以降で紹介する解析による検討は、これらの計算時の問題を含んだ結果となっていることをここで予め述べておく。

4.3.3 リブの繊維破断に関する検討

面内圧縮荷重を試験荷重としたリブの繊維破断に関する検討は、FEA による検討を行った。Fig.4.21 に、用いた FEA モデルを示す。基本的なモデル及び境界条件は、4.3.2 で説明したとおりとした。本解析では、繊維破断によるクラックのモデル化を二重節点を用いて表現することとし、リブ中央に高さ方向半分的位置 (高さ方向 3 要素分) まで亀裂が進展した状態を解析対象とした (Fig.4.21 下図参照)。

Fig.4.22 に計算結果を示す。グラフの横軸はリブ番号 i を、縦軸はひずみ変化量 $\Delta \epsilon$ をあらわす。

グラフを見ると、46 番のリブのひずみ変化が他のリブに較べて大きいことがわかる。そこでこの解析結果に対して、4.1.2 において提案した統計的損傷診断手法を適用した。ここでの検討では、全データ数 $n = 91$ 、最大許容異常値数 k を $k = 5$ 、有意水準 $\alpha = 0.05$ から計算される、検定表 Table 4.7 を用いて行った。Fig.4.23 に、異常値判定結果を示す。この図において丸印は、統計的異常値検知手法を適用した結果、異常値と判断されたリブを表す。このグラフを見ると、46 番及びその周辺のリブが異常値と診断されていることがわかる。以上の結果から、面内圧縮荷重を検査荷重として繊維破断によるクラックを検知する場合にも、本 SMH システムで検知可能であることがわかり、さらに、提案した統計的異常値検知手法により損傷の存在、および、その位置が自動で判定できることがわかった。

4.3.4 リブ側面の剥離損傷に関する検討

リブ側面の剥離損傷の損傷検知可能性については、実験により検討した。

基本的な試験方法については、4.3.1 に詳しく述べたとおりである。損傷は、4.2.3 と同様の方法により導入することとした。

Fig.4.24 に実験結果を示す。グラフの横軸はリブ番号 i を、縦軸はひずみ変化量 $\Delta\epsilon$ をあらわす。

グラフを見ると、15 番のリブにおいてひずみが増加していることがわかるが、他のリブでそれ以上の変化をしていること、さらに、その変化が損傷から離れたリブに現れていることもわかる。損傷から離れたリブで観察されるひずみ差については、特に面内圧縮荷重を検査荷重とした試験においては、損傷前後での試験機からの取り外しによる影響が大きく、これによって生じたひずみ差だと考えられる。よって、実際にはこのような誤差が生じることはないが、この結果は同時に、そもそも繊維破断によるクラックの場合に較べて、損傷したリブでのひずみ差が非常に小さいことが原因とも考えられる。このようにひずみ差が非常に小さいことから、次のようなことが考えられる。AGS は CFRP 一方向材料を主構造部材としているので、AGS に加わる全ての荷重はリブの長手方向、すなわち繊維方向の変形により負担される。その繊維方向に平行に埋め込まれた FBG センサにひずみ変化が生じないということは、この損傷が構造に与える影響が小さく、構造の健全性にそれほど影響しないということを意味する。よって、この検査手法で損傷が検知できないという結果は予想しうる結果であり、本実験結果はそのことを示していると考えられる。

この実験結果に対して、4.1.2 において提案した統計的損傷診断手法を適用してみたところ、どのリブのデータも異常値とは診断されなかった。ただし、ここでの検討では、全データ数 $n = 29$ 、最大許容異常値数 $k = 5$ 、有意水準 $\alpha = 0.05$ から計算される検定表 Table 4.6 を用いた。よって、面内圧縮荷重を試験荷重としてリブ側面の剥離損傷を検知することは困難であると考えられる。これは、4.3.2 で述べたとおり、スキンのない AGS において自由端を有したまま面内圧縮荷重を加えた状態が、非常に不安定な釣り合い状態であり、リブ側面の剥離損傷によるひずみ変化がそれらの不安定性の影響に対してかなり小さく、そのため異常値として検知されなかったと考えられる。いずれにせよ、損傷によって生じるひずみ差が小さく、不安定な釣り合い状態となるような変形では、異常値診断による損傷検知は難しいと考えられる。

4.3.5 リブ上面のスプリットングに関する検討

面内圧縮荷重を試験荷重としたリブ上面のスプリットングに関する検討についても、FEA による検討を行った。解析モデル及び境界条件は、4.3.2 で説明したものをを用いることとした。リブ上面のスプリッ

ティングについては、4.2.4 に示したものと同様の方法でモデル化することとした。

Fig.4.25 に計算結果を示す。グラフの横軸はリブ番号 i を、縦軸はひずみ変化量 $\Delta\epsilon$ をあらわす。グラフを見ると、ほとんどのリブにおいてひずみの変化が大きく現れているのがわかる。この解析結果に対して、4.1.2 において提案した統計的損傷診断手法を適用してみたところ、どのリブのデータも異常値とは診断されなかった。ただし、ここでの検討では、全データ数 $n = 91$ 、最大許容異常値数 $k = 10$ 、有意水準 $\alpha = 0.05$ から計算される検定表 Table 4.7 を用いた。よって、面内圧縮荷重を試験荷重としてリブ上面のスプリッティングを検知することは困難であると考えられる。これは、4.3.2 で述べたとおり、スキンのない AGS において自由端を有したまま面内圧縮荷重を加えた状態が、非常に不安定な釣り合い状態であり、リブ上面のスプリッティングによるひずみ変化がそれらの不安定性の影響に対してかなり小さく、そのため異常値として検知されなかったと考えられる。いずれにせよ、損傷によって生じるひずみ差が小さく、不安定な釣り合い状態となるような変形では、異常値診断による損傷検知は難しいと考えられる。



Fig.4.18 Schematic of test configuration of AGS under in-plane compression loading.

4.3 面内圧縮荷重による損傷検討

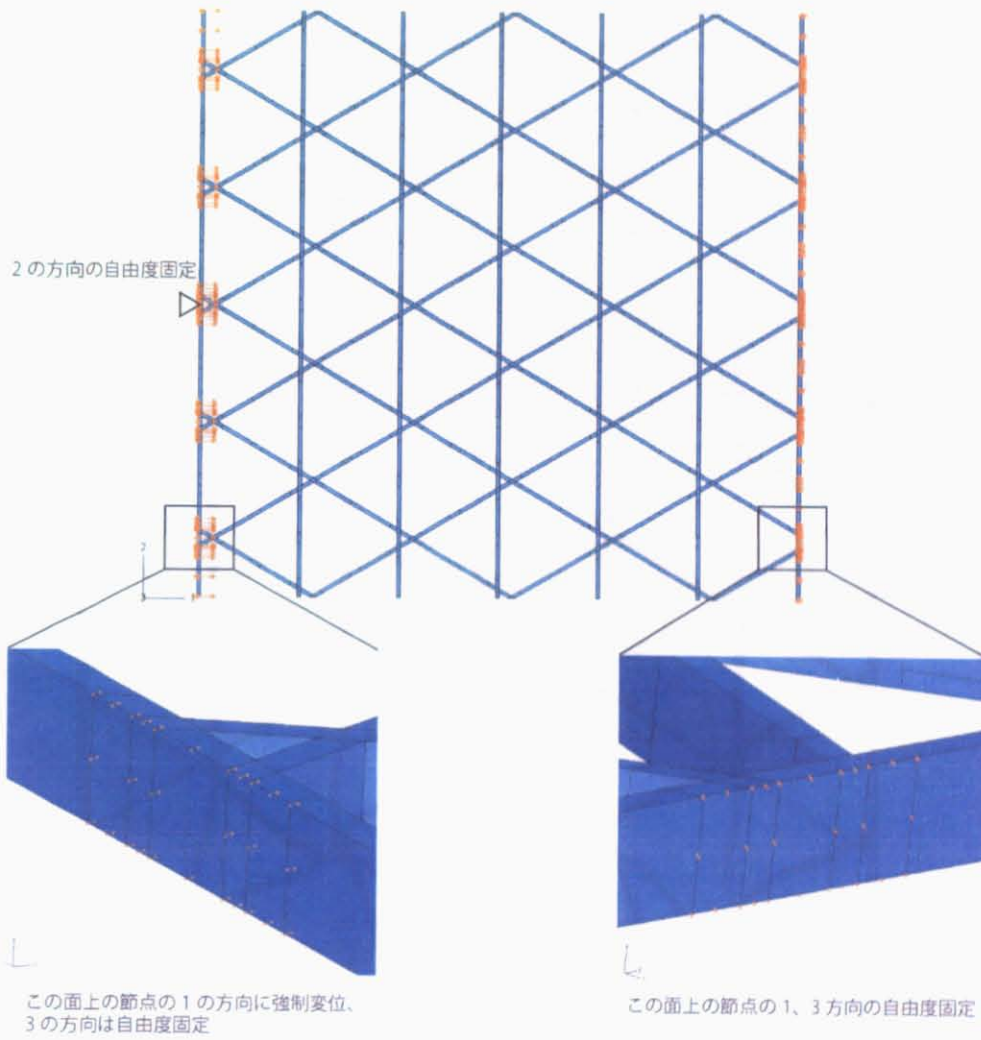


Fig.4.19 Boundary condition of the FEA under in-plane compression loading.

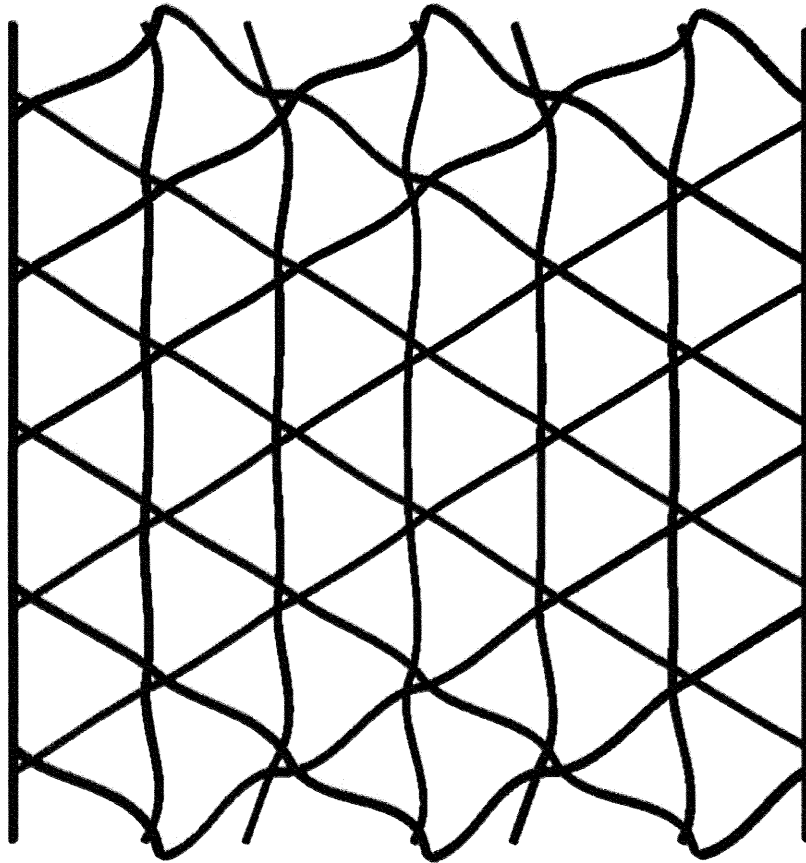


Fig.4.20 Result of FEA under in-plane compression loading.

4.3 面内圧縮荷重による損傷検討

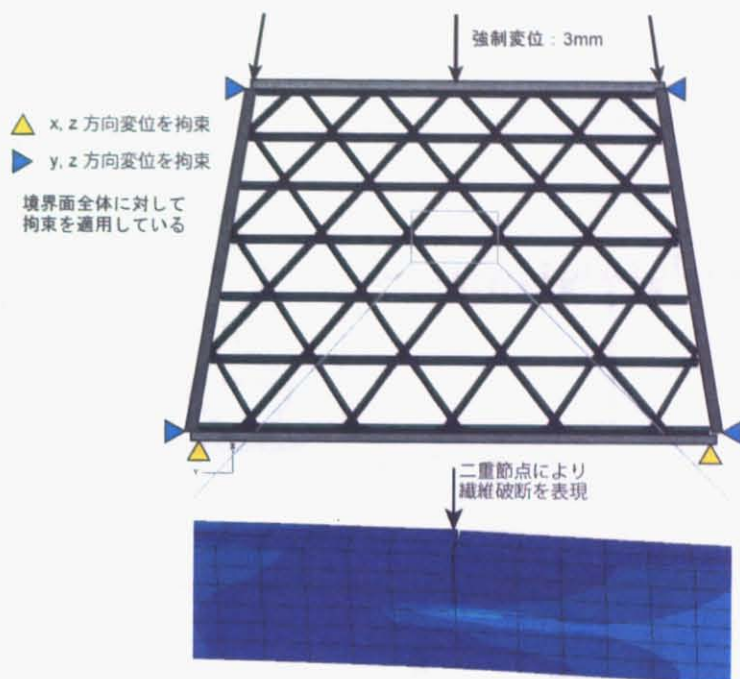


Fig.4.21 FEA model for calculating $\Delta\epsilon$ caused by fiber break.

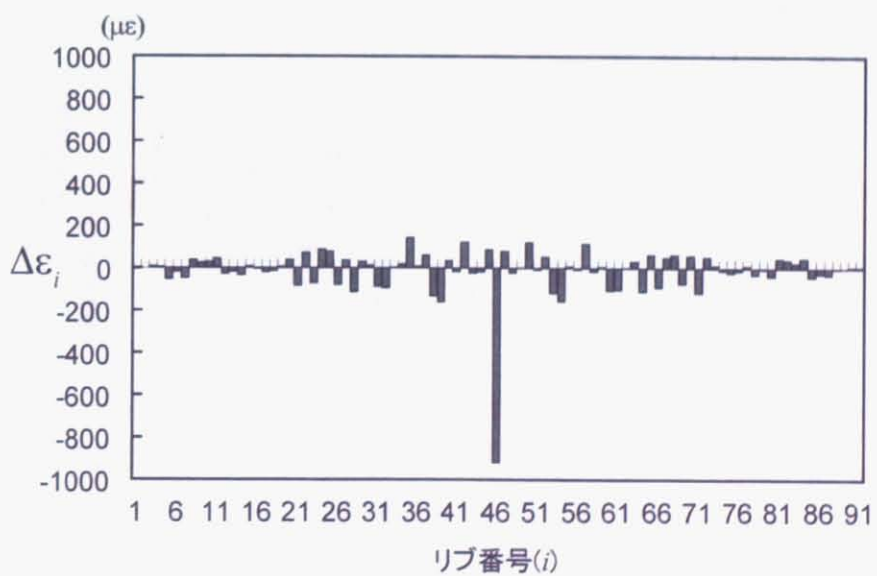


Fig.4.22 Calculated $\Delta\epsilon$ caused by fiber break under in-plane compression loading.

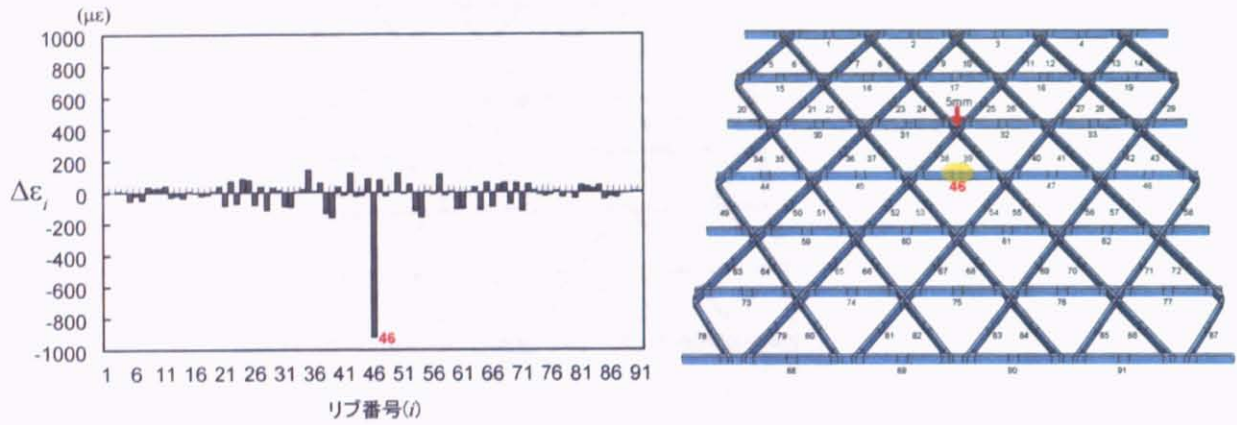


Fig.4.23 Result of the outlier detection method applied to the changes of strain distribution ($\Delta\epsilon$) calculated in Fig.4.22.

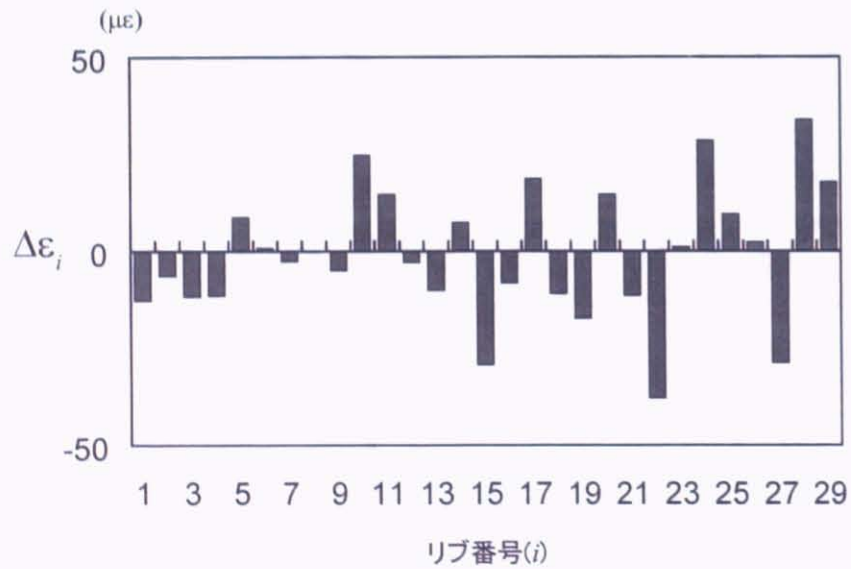


Fig.4.24 Measured $\Delta\epsilon$ caused by a rib delamination under in-plane compressional loading.

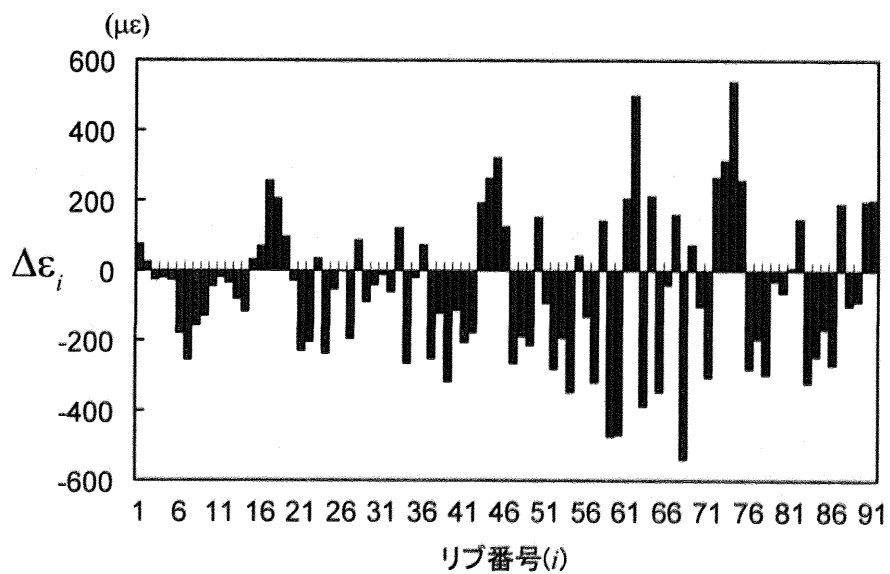


Fig.4.25 Calculated $\Delta\epsilon$ caused by a splitting on top surface of a rib under in-plane compressional loading.

4.4 まとめ

以上、本章では、2章において明らかにした AGS 中に生じる可能性がある四種類の損傷のうち、リブの繊維破断によるクラック、リブ上面のスプリッティング、リブ側面の剥離損傷、の三種類の損傷について、第3章で提案した埋め込み多重化 FBG センサを用いたひずみ計測システムによる損傷検知可能性を実験・解析により明らかにした。検討に際しては、検査荷重として、航空機外部より特定の点に検査荷重を与えることを模擬した面外一点集中曲げ荷重、及び、航空機の自重により生じると考えられる面内荷重を想定した面内圧縮荷重、を検討することとした。その際、AGS の特徴であるフェールセーフ性により損傷が発生した際のひずみ変化 $\Delta\epsilon$ が損傷したリブの周辺にのみ現れ、それ以外の部分はほとんど変化しないという点を考慮し、「損傷が検知可能である」ことの定義として、「損傷が発生した場合に、損傷したリブ及びその周辺のリブで計測されるひずみ変化が他のリブに較べて異常値とみなせるほど大きい」ことと定義した。そしてこの定義に基づき、得られたひずみ変化の情報から損傷位置を同定する手法として、新たに統計的異常値検知手法を用いることを提案した。この統計的異常値検知手法を用いて、損傷のあるリブ及びその周辺のリブでのひずみ変化のみが異常値と診断される場合に、損傷が検知可能であると定義した。

Table 4.8 に検討結果をまとめる。本研究で提案した SHM システムを用いて検知できそうな損傷としては、一点集中曲げ荷重を検査荷重として用いた場合には、繊維破断によるクラック、リブ上面のスプリッティングが、面内圧縮荷重を検査荷重として用いた場合には、繊維破断によるクラックのみが検知できることがわかった。このように、検査荷重ごとに検知可能な損傷が異なることから、二種類の検査荷重を組み合わせて検知を行うことにより、繊維破断によるクラック、リブ上面のスプリッティング、どちらの損傷が発生したのかを区別することが出来ると考えられる。

その他の損傷及び検査荷重の組み合わせの場合には損傷を検知することができないことがわかったが、このことは逆に、それらの損傷が構造の健全性に与える影響が小さいことを意味していると考えられる。これらの損傷を検知する場合には、その損傷により特に敏感に変化すると考えられる物理量、その物理量を計測するのに適した計測系、を別途検討する必要があると考えられる。

さらに、特に繊維破断によるクラックについては、様々な位置に面外一点集中荷重を検査荷重として加えた場合、及び、様々な位置に損傷が生じている場合についてそれぞれ検討し、この損傷検知手法の冗長性を調べた。その結果、実際に AGS 全体を診断する場合、面外より検査荷重を与える方法では構造全体を均等に診断することができないため、複数個所に検査荷重を加えて損傷診断を行う必要があることがわかった。また、検査荷重を加える位置の違いによる損傷の検知能力を調べた結果、損傷に近い位置に負荷

4.4 まとめ

を与えるほど、損傷の近傍でひずみの変化が顕著であることがわかった。

また、面内圧縮荷重下での AGS の変形挙動について FEA を行ったが、その結果、スキンのない AGS において自由端を有したまま面内圧縮荷重を加えることは、現実には非常に不安定な荷重の釣り合い状態となっていることがわかった。このことから AGS を用いる場合には、構造端部の処理方法がきわめて重要となってくることがわかった。

以上、本章の検討により、1.3.4 に示した SHM システム構築に必要な検討が、損傷の分類に始まり、計測系、計測系の感度、損傷検知手法、の全ての観点でなされたことになる。

Table 4.8 Summary of the possibilities of damage detection under various combinations of possible damage types and loadings.

	繊維破断によるクラック	リップ上面のスプリットティング	リップ側面の剥離損傷	格子部とスキンの接着不良
一点集中 曲げ荷重	検知可能	検知可能	検知不可能	×
面内圧縮 荷重	検知可能	検知不可能	検知不可能	×