

---

## 第 5 章

# 弾性波計測によるヘルスマモニタリング

### 5.1 検知可能な損傷の定義

本章では、前章同様、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) 中を伝わる弾性波 (動的ひずみ) の計測による構造ヘルスマモニタリングシステム (SHM) を提案・検証する。

3 章でも述べたが、弾性波を用いた場合には、前章の静的ひずみ計測による SHM で必要となった大きな検査荷重が不要となる。さらに、構造が単純な要素の繰り返しで作られているという点から、弾性波の伝播特性が経路に依存しないということを認めれば、後述のとおり基準データがなくても損傷診断ができる点も利点と考えられる (この点については後述する)。ただし、当然微小な検査荷重は必要であるという点、また微小であるために計測に精度が求められる点、などこれまで考慮する必要のなかった新たな問題点も考えられる。よって、上記の問題を解決するための計測側での工夫が必要となってくる。以下ではその点にも言及しつつ、詳述する。

本章では、第 2 章で明らかとなった

- 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

の四種類の損傷それぞれについて、疎密波・曲げ波を用いて検知する方法を提案するとともに、実際に検知できるのかどうかを、実験・解析により明らかにする (Table 5.1 参照)。本章でも、供試体の数の制約から、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、格子部とスキンの接着不良、につい

では実験により検討することとし、リブ側面の剥離損傷については、上記の結果を再現できる解析モデルを作成した後、その解析モデルを用いて検討することとした。

本研究では、第3章での提案を基に、疎密波・曲げ波を用いた損傷診断手法を Fig.5.1, 5.2 のように提案する。まず疎密波については、第3章の結果から経路毎に構造診断を行う方法が適していることがわかっている。これに加えて、前述のとおり弾性波の伝播特性が経路に依存しないこと(経路無依存性)を仮定するならば、Fig.5.1 のとおり、グリッド構造の各経路端部にそれぞれ圧電素子 ( $C_i$ ) を接着して、等しい疎密波を発生させた場合、各経路において  $C_i$  より等距離 ( $j$ ) に埋め込まれた FBG センサ ( $c_{ij}$ ) で計測される初期到達波は、互いに同一のものとなるはずである。具体例を用いて説明するため、Fig.5.1 において、 $C_2$ 、 $C_4$ 、 $C_6$  の三つの圧電素子及び経路に注目する。この三つの圧電素子を用いて発生させた弾性波を、各経路 ( $i$ ) 中の埋め込み FBG センサで計測した場合、圧電素子より等距離にある  $c_{21}$ 、 $c_{41}$ 、 $c_{61}$  の FBG センサで計測される受振波形は、互いにほぼ同一の波形になると予想される。よって、例えば  $c_{21}$  と  $c_{22}$  の間に損傷が生じた場合、 $c_{21}$ 、 $c_{41}$ 、 $c_{61}$  で計測された波形は互いに同一であるが、 $c_{22}$ 、 $c_{42}$ 、 $c_{62}$  で計測された波形は、 $c_{22}$  のみ異なると予想される。であるならば、逆にこのような計測結果が得られた場合には、 $c_{21}$  と  $c_{22}$  の間に損傷が生じたと判断することが出来る。これが疎密波を用いた場合の損傷診断手法の概略である。

一方曲げ波については、第3章の結果から、リブ3本おきに交点に圧電素子を接着し、各圧電素子を用いてリブ2本分の領域全体を診断する方法が適していることがわかっている。これに加えて、疎密波の場合と同様、弾性波の伝播特性が経路に依存しないこと(経路無依存性)を仮定するならば、Fig.5.2 のとおり、一定の間隔で圧電素子 ( $F_i$ ) を交点部上面に接着して曲げ波を発生させた場合、周囲六方向の、 $F_i$  より等距離 ( $j$ ) に埋め込まれた FBG センサ ( $f_{ij}$ ) で計測される初期到達波は、互いに同一のものとなるはずである。具体例として、Fig.5.2 において、 $F_3$  の圧電素子及びその周囲六方向の経路に注目する。 $F_3$  を用いて発生させた弾性波を、各経路 ( $j$ ) 中の埋め込み FBG センサで計測した場合、圧電素子より等距離にある  $f_{3j}$  ( $j = 1 \dots 6$ ) の FBG センサで計測される受振波形は、互いにほぼ同一の波形になると予想される。よって、例えば  $f_{31}$  のリブに損傷が生じた場合、 $f_{31}$  で計測された波形のみ、 $f_{32} \sim f_{36}$  で計測された波形に較べて異なると予想される。これより、 $f_{31}$  のリブに損傷が生じたと判断することが出来る。これが疎密波を用いた場合の損傷診断手法の概略である。

もちろん損傷による受振波形の変化は、損傷の種類に依存するため、その変化を個別に扱う必要がある。そこで本章では、各損傷について、上述の提案した手法により受信波形がそれぞれどのように変化するかを調べる。上述の手法は、すなわち、「変化さえ起これば、そこに何らかの損傷があると考え」ということなので、これを損傷が検知できることの定義に利用して、「損傷の発生によってその経路及びそ

## 5.1 検知可能な損傷の定義

のリップで計測される弾性波形が変化すること」を本章での損傷検知可能であることの定義とする。

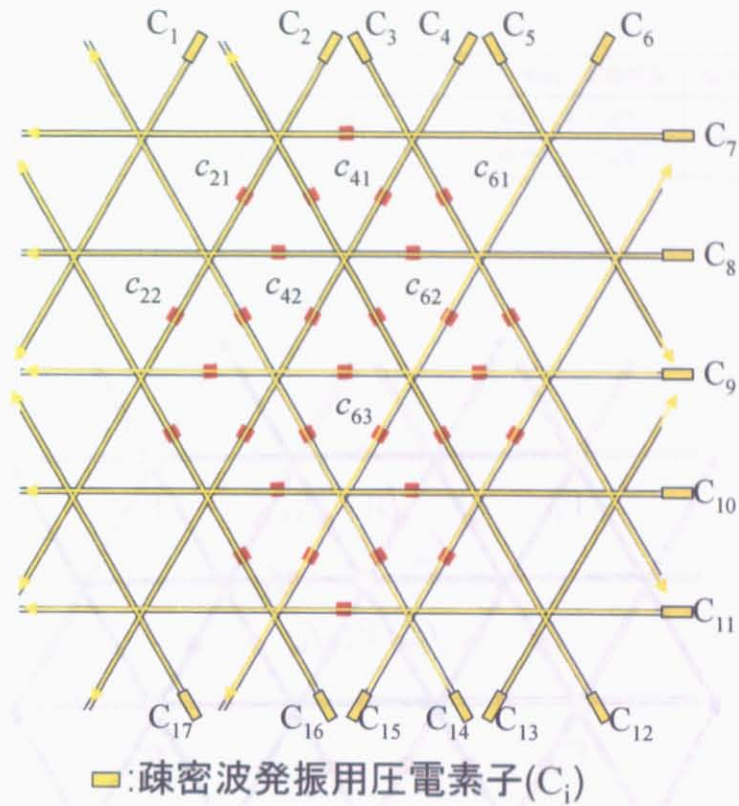


Fig.5.1 Schematic of damage diagnosis method by compressional wave.

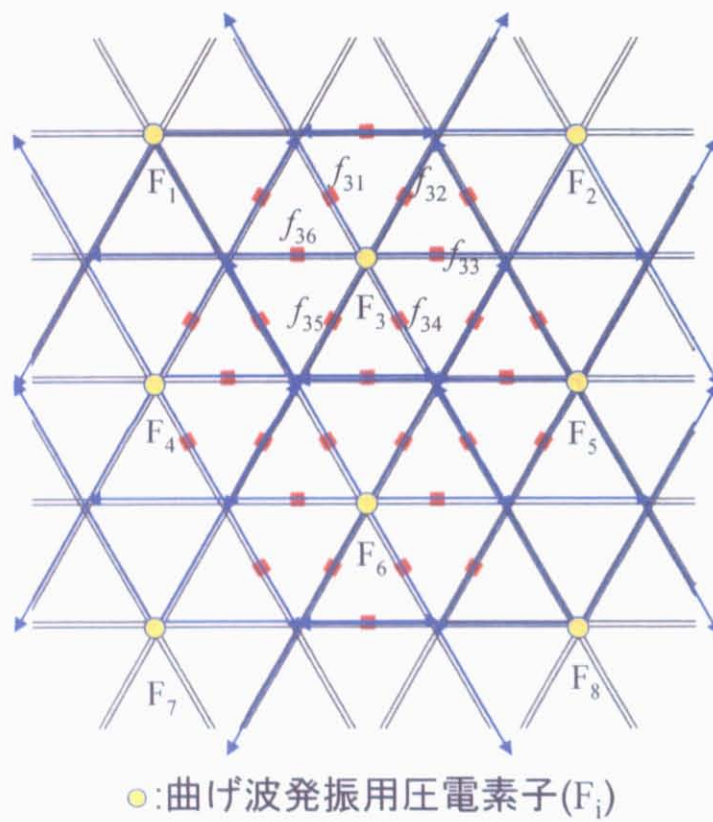


Fig.5.2 Schematic of damage diagnosis method by flexural wave.

## 5.1 検知可能な損傷の定義

---

Table 5.1 Types of damages in AGS v.s. methods for SHM with embedded FBG sensors by monitoring of compressional and flexural waves.

	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
疎密波	実験・解析による検討	実験により検討	解析による検討	実験により検討
曲げ波	実験により検討	実験により検討	解析による検討	実験により検討

## 5.2 疎密波による損傷検知

### 5.2.1 試験概要

Fig.5.3 に、疎密波を用いた AGS に対する試験の概要を示す。また Table 5.2 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]<sub>z</sub> 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。

Fig.5.3 中には弾性波発振用圧電素子 (PZT) の位置、及び、FBG センサの各リブ貼付け位置も併示している。PZT としては、3.3 節でも用いた 80kHz 共振型の圧電素子を用い、供試体端部をリブ長手方向に垂直に切断して面を平坦に研磨した後、瞬間接着剤を用いて貼り付けた。一方、多重化した FBG センサは①～④の4箇所のリブの下面中央に、リブ長手方向と平行に、こちらも瞬間接着剤を用いて貼り付けた。3.3 節での検討で明らかになったように、実際には計測のための FBG センサは埋め込まれるが、貼り付けた場合でも、計測自体への影響はほとんどないことがわかっているため、本研究では貼付け FBG センサを用いて検討を行うこととした。

このような疎密波伝播経路を AGS 中に二経路用意し (Fig.5.3 の黄色及び青色の四角で囲まれた経路)、片方の経路に損傷を与え、両経路に疎密波を伝播させた場合の受振波形の違いを調べる。計測システムは、3.3 節での弾性波特性検証に用いた試験装置及び計測系と同じものを用いることとし、その手法 (アベレージング等) も同様に行うこととした。入力波形には、附録 C の Fig.C.3 に示した波形 (正弦波三周期に Hamming 窓関数を掛けたもの) を用い、発振周波数は 81kHz とした。また入力する電圧値の最大値が 50V となるよう電力増幅器により増幅した。それぞれの損傷は、矢印の位置に導入している。そして、青色の四角で囲った経路と黄色の四角で囲った経路、すなわち、損傷のない経路で計測された弾性波形と損傷のある経路で計測されたものを比較し、その初期到達波最大振幅値  $V_p$  の損傷による違いを検討した。実際の損傷診断手法では、5.1 節で提案した統計的異常値検知手法を用いて、全ての経路  $i$  中で発振素子から等距離にある FBG センサで計測される受振波形  $c_{ij}$  について、その  $V_p$  の集合中に異常値が診断されれば、損傷が存在し、異常値のある経路に損傷があることがわかる。

損傷の導入は、繊維破断を伴うクラック及びリブ上面のスプリットイングについては、Autograph(AG-I, 島津製作所)(Fig.F.6 を用い、三点曲げにより損傷を導入することとした。Fig.5.4, 5.5, 5.9 はそれぞれ、三点曲げ試験の概要、試験により発生した繊維破断によるクラック、リブ上面のスプリットイング、を表

す。一方、格子部とスキンの接着不良についての検討では、本章では一般的な航空機の表皮として用いられるアルミ板をスキンと仮定し、これをカップラントにより接着したものを、格子部とスキンが完全に接着した状態と定義する。そして、Fig.5.11 のとおり格子部及びスキンに付着したカップラントを拭取った状態を接着不良(未接着)と定義した。

### 5.2.2 繊維破断によるクラック

Fig.5.12 に、実験により計測された受振波形のうち、特に②と③の位置で計測されたものを示す。図中の点線は計測された実信号を、実線はその信号に対して Hilbert 変換を用いて算出した包絡線をあらわす。この包絡線は、弾性波エネルギー(ひずみエネルギー+運動エネルギー)に比例する値である。この図を見ると、亀裂前で計測される受振波形の  $V_p$  はほぼ同じであるにもかかわらず、亀裂の後ろで計測される受振波形について、損傷のない経路で計測される  $V_p$  に比べて損傷のある経路での  $V_p$  のほうが、小さくなっていることがわかる。これは、亀裂による不連続面において伝播する疎密波が伝わらないことにより、エネルギーの伝播が一部遮断されているためだと考えられる。よって、様々な経路での弾性波伝播を比較し、他の経路に比べて弾性波エネルギーの減少が大きいところを損傷とすることにより、損傷の存在を判定することができると考えられる。

#### 有限要素解析モデルの提案と検証

ここで、5.2.4, 5.3.4 での損傷検知可能性の検討に用いる FEA モデルを 5.2.2 の実験結果を基に構築する。ここではモデルの妥当性を、5.2.2 の実験結果にあるように、繊維破断によるクラックによって、亀裂の後ろで計測される  $V_p$  が小さくなることとし、この現象を再現できる有限要素解析モデルを作成することとした。解析には附録 D に詳細を述べた動的陽解法を用い、計算は汎用有限要素解析ソフトウェア ABAQUS を用いて行うこととした。

Fig.5.6 に解析モデルを示す。AGS 格子部、接着層、スキンは全て 8 節点の 6 面体要素を用いてモデル化し、計算の高速化のため低減積分を行うこととした。さらに低減積分時に問題となるアワーグラスモードについては、アワーグラス剛性を導入することにより抑制している。構造全体は、Fig.5.6 に示したとおり、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 分割とした。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)要素を用いてモデル化した。また接着層、スキンの厚さ方向は分割なし(1 要素)とした。

計算に用いた材料物性は、附録 C で用いた材料の物性 (Table C.1 参照) を与えた。

繊維破断によるクラックは、Fig.5.7 に示したように、リブ長手方向に垂直に二重節点による不連続面を作成することで模擬したこれを、5.2.2 で検討した位置と同様のモデル上の位置に導入した。

解析における初期・境界条件は、附録 C と同様に、リブ端部に Fig.C.3 に示した波形の圧力を、発振圧力の最大値  $P = 2.7 \times 10^4$  (Pa) として与えた。発振周波数は、附録 C で検討したとおり、81kHz とした。

受振弾性波形の評価には、軸方向に埋め込まれた FBG センサによる計測を模擬するため、リブ中央下面 (スキンと反対側) の節点での軸方向ひずみ  $E_{11}$  を用いることとした。得られた波形については、その包絡線を計算し、初期到達波の弾性波エネルギーを定量的に比較することとした。

Fig.5.8 に、解析により得られた弾性波形を示す。グラフの①～④は、それぞれ異なる FBG センサをあらわしており、四つのグラフは各 FBG センサで計測される受振波形をあらわす。Fig.5.8 を見ると、実験の場合と同様に、亀裂前の②の FBG センサで計測される受振波形の  $V_p$  は、損傷の有無にかかわらずほぼ同じであるが、亀裂の後ろ③で計測される受振波形は、損傷のない経路で計測される  $V_p$  に比べて損傷のある経路での  $V_p$  のほうが、小さくなっていることがわかる。よって、実験結果と同様の傾向が得られたので、提案した FEA モデルが妥当であるとみなし、5.2.4, 5.3.4 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。

### 5.2.3 リブ上面のスプリットティング

Fig.5.13 に実験結果を示す。この図のグラフは、特に②と③の位置で計測された電気信号出力の時系列の変化をあらわす。この図を見ると、損傷の有無が計測される受振波形にほとんど影響を及ぼしていないことがわかる。これは、リブ上面のスプリットティングでは、不連続面が疎密波の伝播方向に対して平行なため、5.2.2 の場合とは異なり、疎密波の伝播がほとんど遮断されないためだと考えられる。よって、疎密波を用いてリブ上面のスプリットティングを検知することは難しいと考えられる。

### 5.2.4 リブ側面の剥離損傷検討

リブ側面の剥離損傷に関しては、前述のとおり、有限要素解析 (FEA) を用いて検討を行った。

損傷は、Fig.5.15 に示した位置に、Fig.5.14 のように二重節点によりリブ側面の剥離損傷による不連続面を作成することで模擬した。

解析における初期・境界条件は、附録 C と同様に、リブ端部に Fig.C.3 に示した波形の圧力を、発振圧力の最大値  $P = 2.7 \times 10^4$  (Pa) として与えた。発振周波数は、附録 C で検討したとおり、81kHz とした。

Fig.5.15 に解析結果を示す。図中のグラフは、各受振点で得られた軸方向ひずみの時間変化をあらわ



## 5.2 疎密波による損傷検知

---

す。各グラフの横軸は時間 ( $\mu s$ ) を、縦軸は軸方向ひずみの大きさ ( $\mu\epsilon$ ) を表す。グラフの点線は受振波形を、実線は軸方向ひずみの時間変化に対して Hilbert 変換を利用して計算された包絡線をあらわす。グラフを見ると、弾性波の位相、エネルギー (包絡線の初期到達波最大振幅) どちらも、損傷の発生前後でほとんど変化がない。この結果は、リブ側面の剥離損傷が疎密波伝播に対して影響を与えないことを意味する。すなわち、疎密波を用いてリブ側面の剥離損傷を検知することは難しいと考えられる。

### 5.2.5 格子部とスキンの接着不良

Fig.5.16 に実験結果を示す。図中のグラフは、各 FBG センサで計測された電気信号の時系列の変化について、特に①, ②, ③の位置のものをあらわす。各グラフの横軸は時間 ( $\mu s$ ) を、縦軸は軸方向ひずみの大きさ ( $\mu\epsilon$ ) を表す。グラフの点線は受振波形を、実線は軸方向ひずみの時間変化に対して Hilbert 変換を利用して計算された包絡線をあらわす。接着不良部分は、②のリブ中央に 3cm 分作成した。この図を見ると、①で計測される初期到達波の最大振幅  $V_p$  に変化はないものの、②, ③のリブでは接着不良部がある経路の  $V_p$  が、ない経路に比べて大きくなっているのがわかる。

一般的に、格子部とスキンを接着させた状態でリブに弾性波を入力すると、そのエネルギーの一部がスキン側に移る。よって、スキンを接着すると一般的に  $V_p$  は減少する。ということは逆に、格子部とスキンの間に未接着な部分があった場合には、接着されている場合に比べて、 $V_p$  が大きくなると考えられ、本実験の結果は、この現象をよく説明していると考えられる。よって、様々な経路での弾性波伝播を比較し、他の経路に比べて  $V_p$  が大きい経路には、格子部とスキンの接着不良があると判断できることが示された。

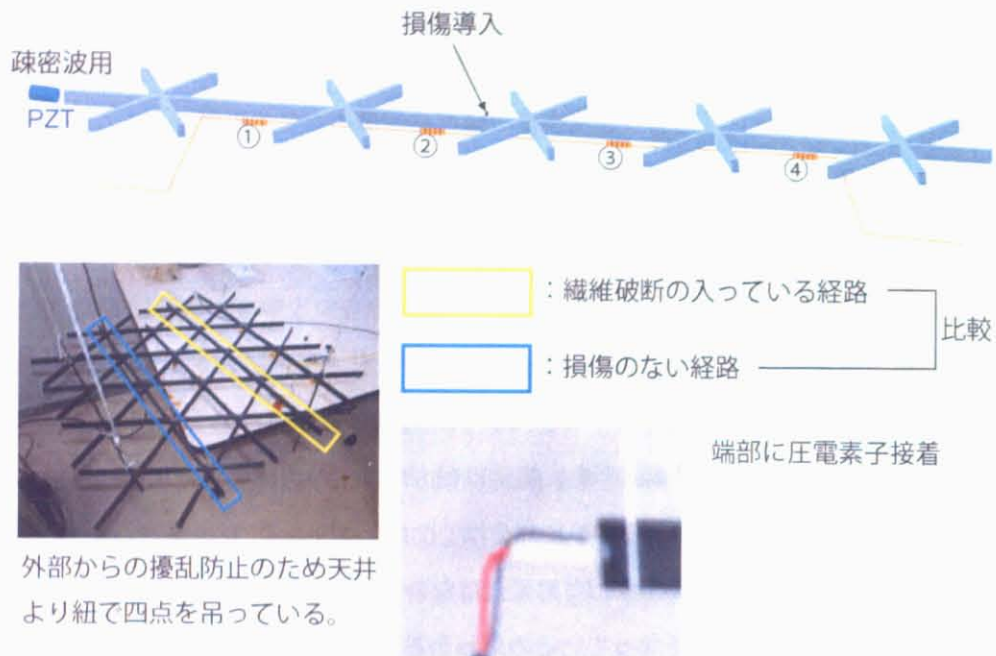
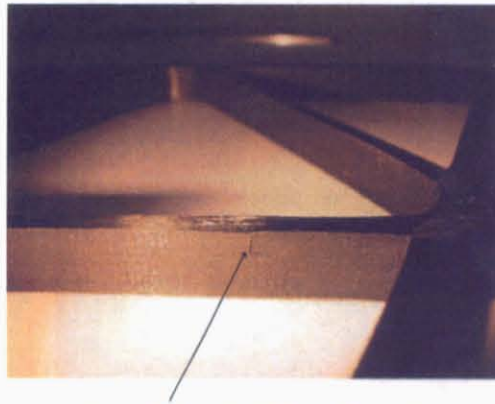


Fig.5.3 Schematic of damage detection test with compressional waves generated at attached piezo-electric transducer. Each lower surfaces of ribs had one attached FBG sensor, which were multiplexed into one optical fiber.



Fig.5.4 Three point bending test configurations for generating a fiber break and a splitting on top surface.



繊維破断によるクラック

Fig.5.5 Photograph representing fiber break.

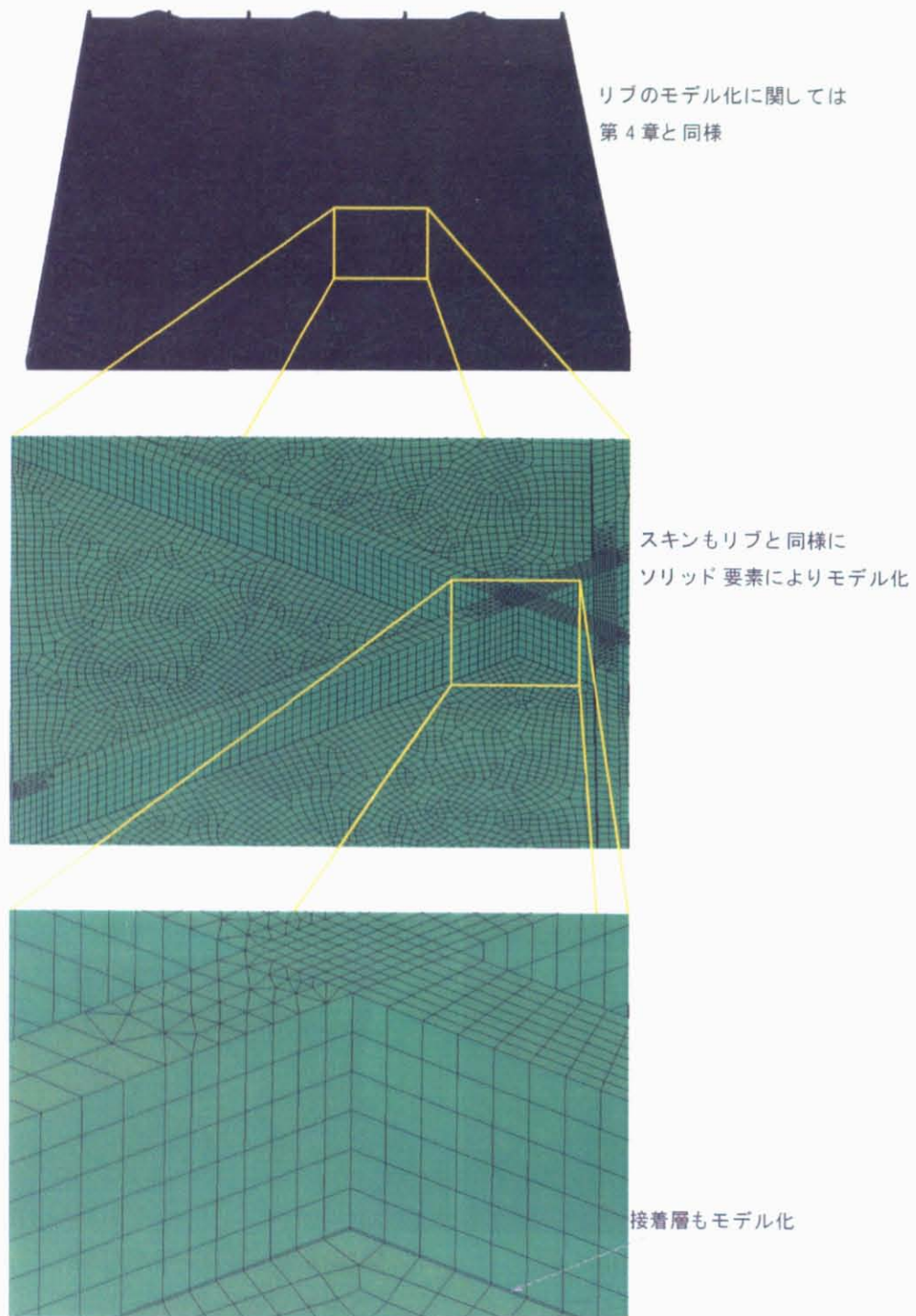


Fig.5.6 FEA modeling of compressional wave propagation.

二重節点により  
繊維破断を表現

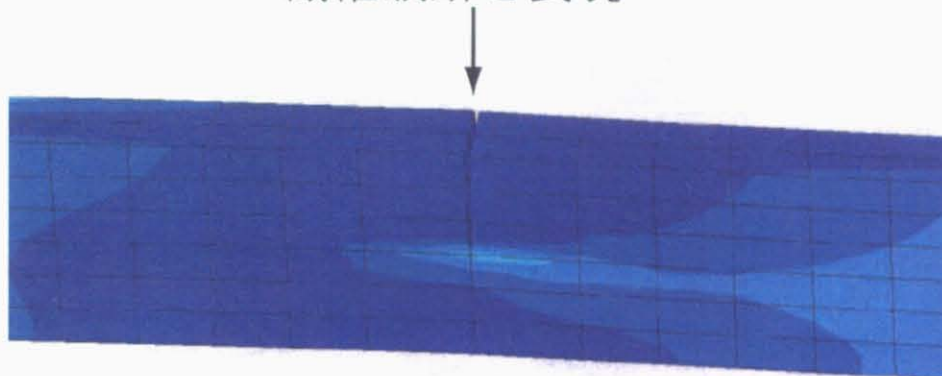


Fig.5.7 Modeling of fiber break induced rib cracking in FEA.

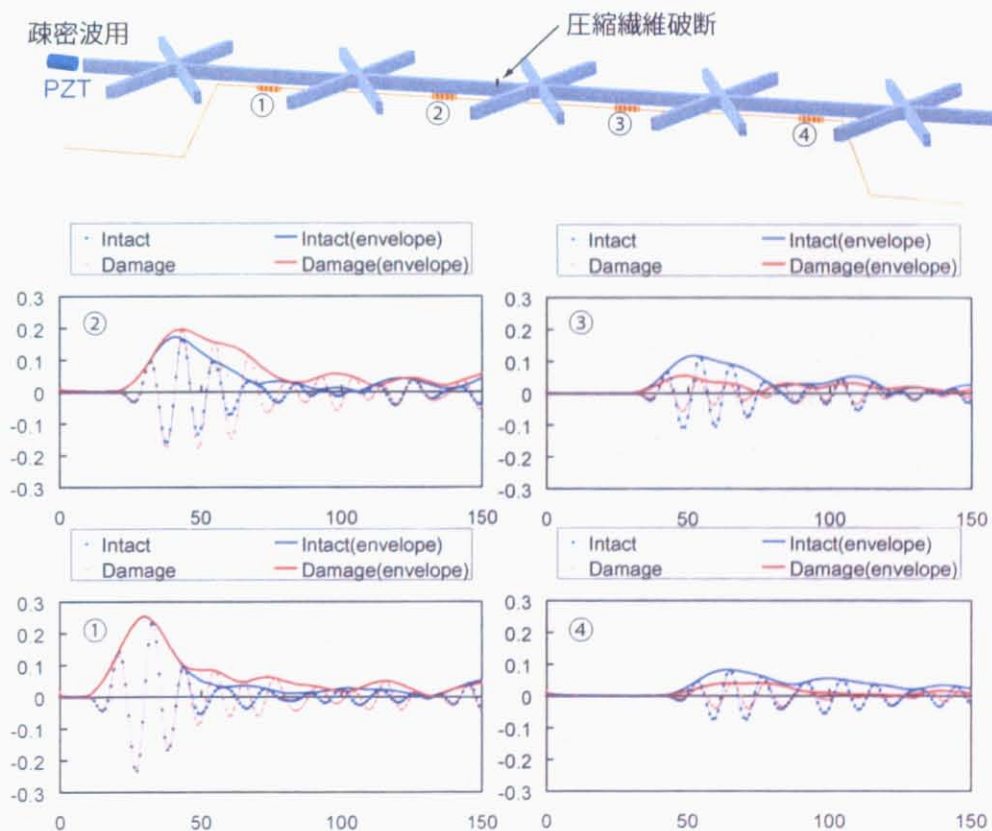


Fig.5.8 Result of the calculation for discussing the effect of fiber break induced rib cracking toward compressional wave propagation in AGS.

マトリックスクラック



Fig.5.9 Photograph representing splitting on top surface of the rib.

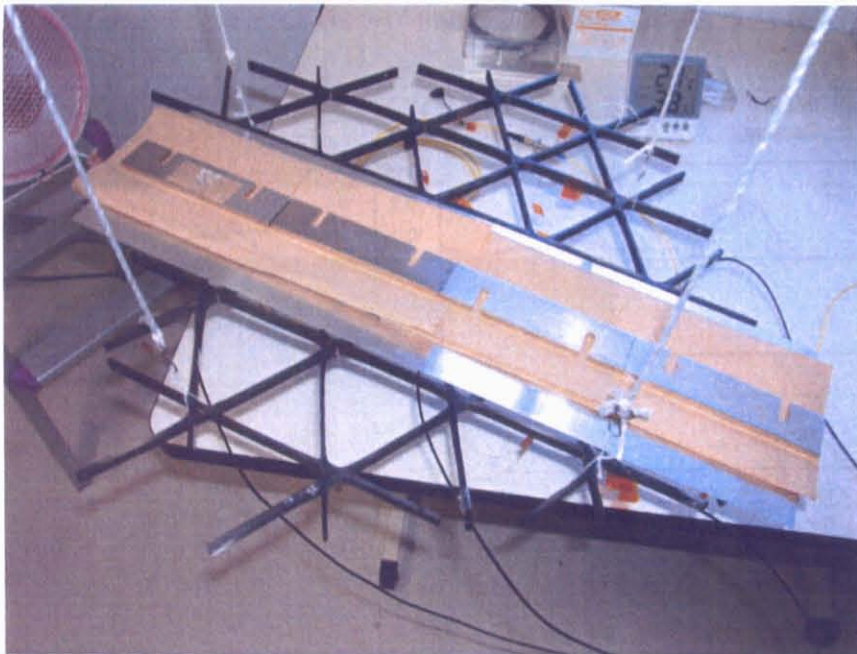


Fig.5.10 Test configuration for discussing conditions of skin adhesion. An aluminum skin was attached with couplant and some weights were placed on top of the skin for the purpose of constant adhesion.

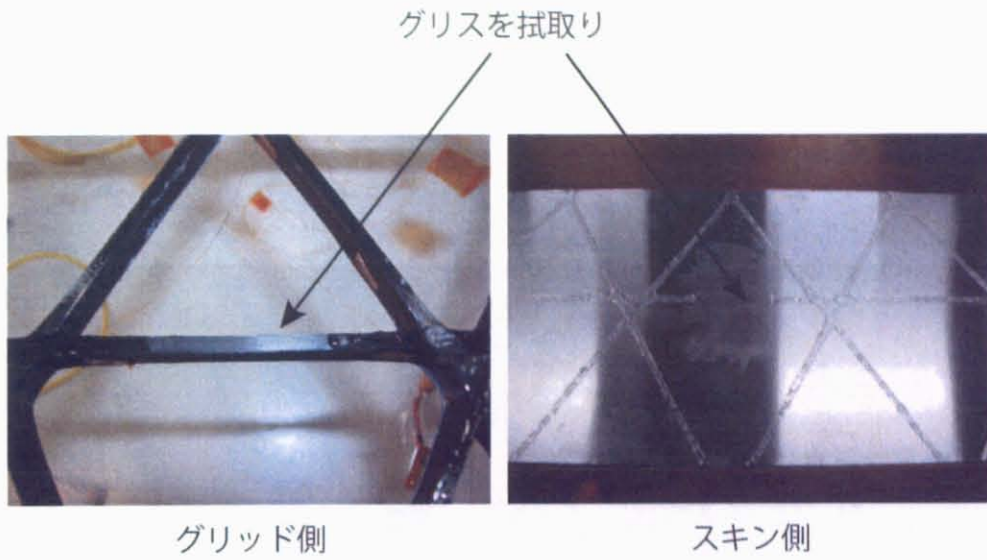


Fig.5.11 Method for introducing non-adhesion area between lattice and skin by removing couplant.

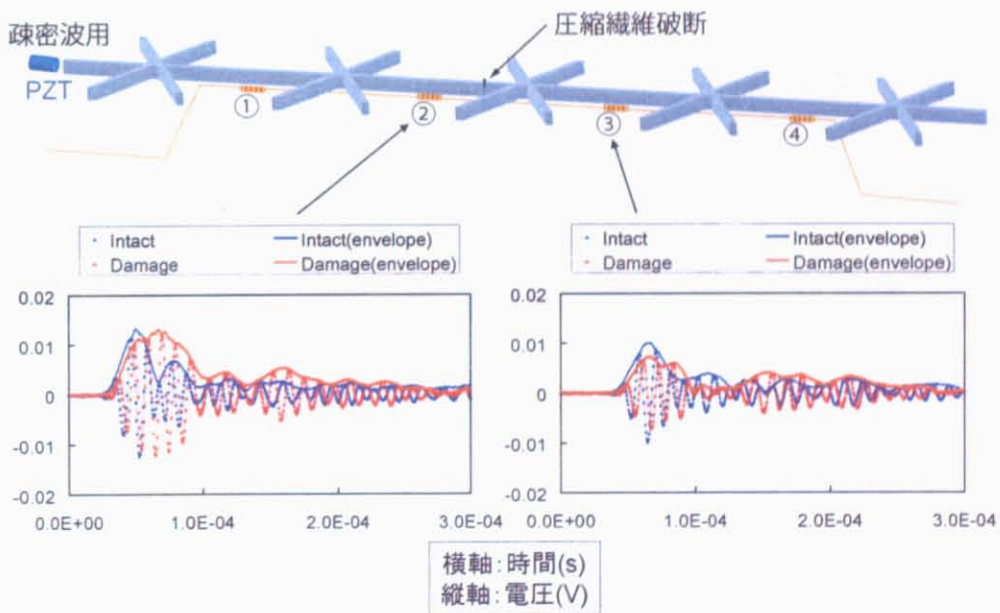


Fig.5.12 Change of the maximum amplitudes of first arrival compressional waves induced by fiber break as illustrated. The amplitudes measured at ③ reduced according to the occurrence of fiber break.

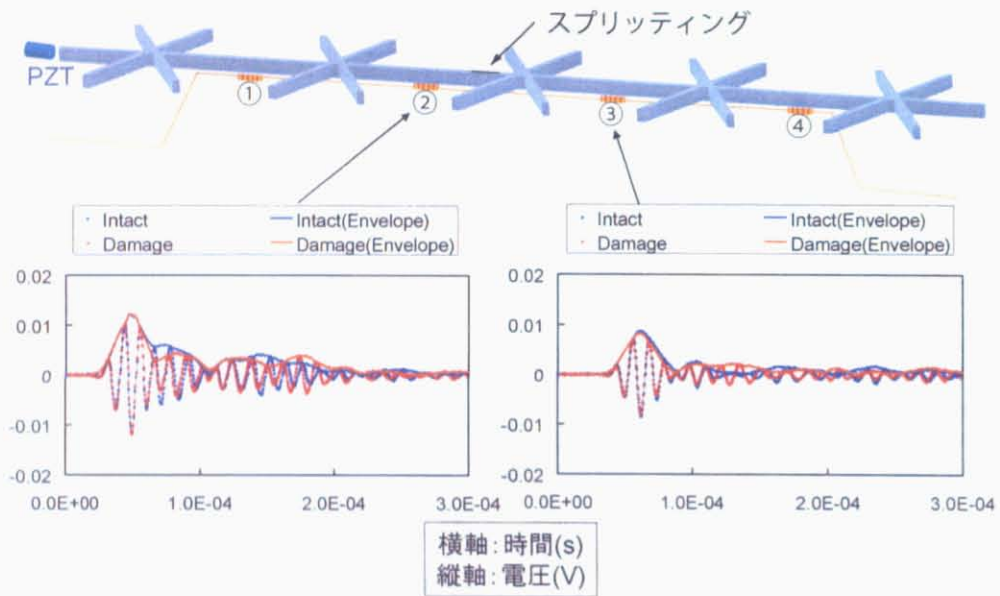
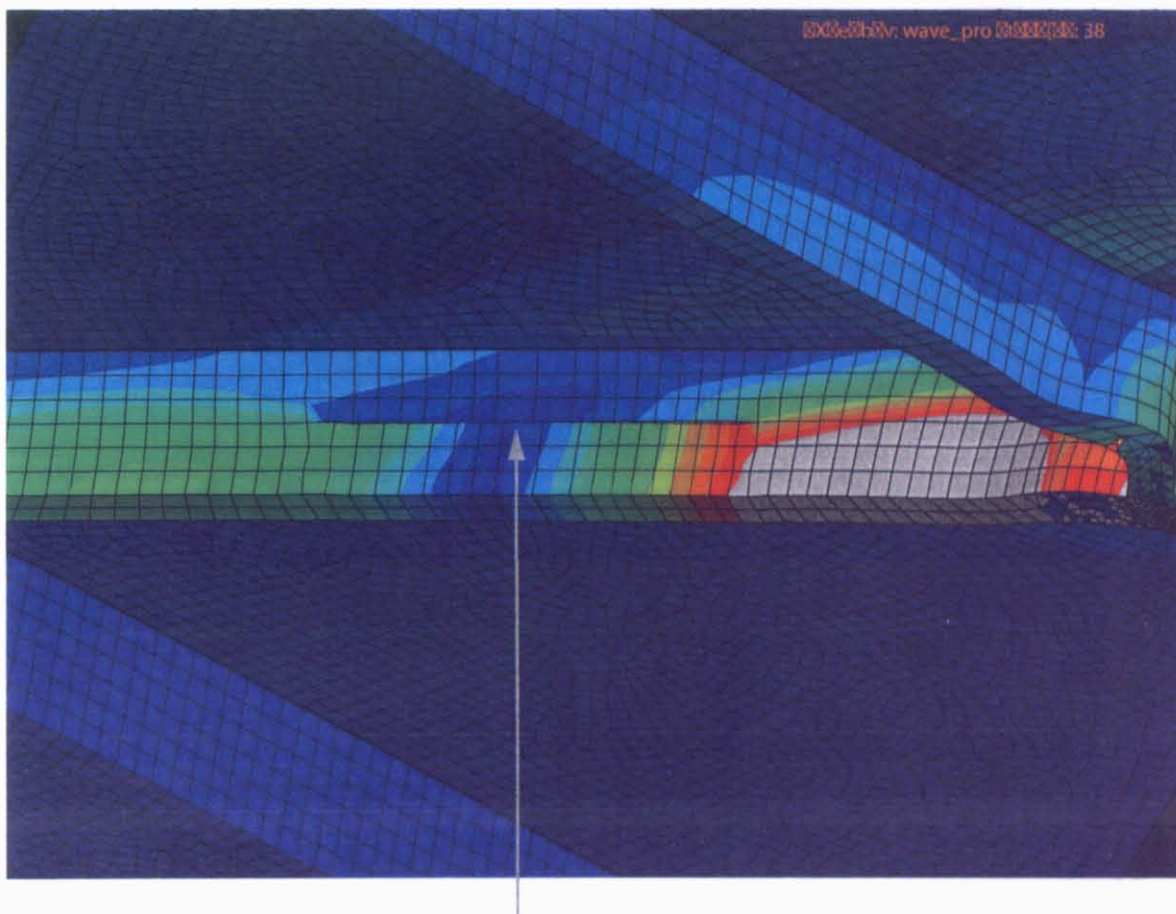


Fig.5.13 Change of the maximum amplitudes of first arrival compressional waves induced by a splitting on top surface of the rib as illustrated.





二重節点によりリブの横割れをモデル化

Fig.5.14 Details of the FEA model in Fig.5.6. The damage was modeled with duplicated nodes.

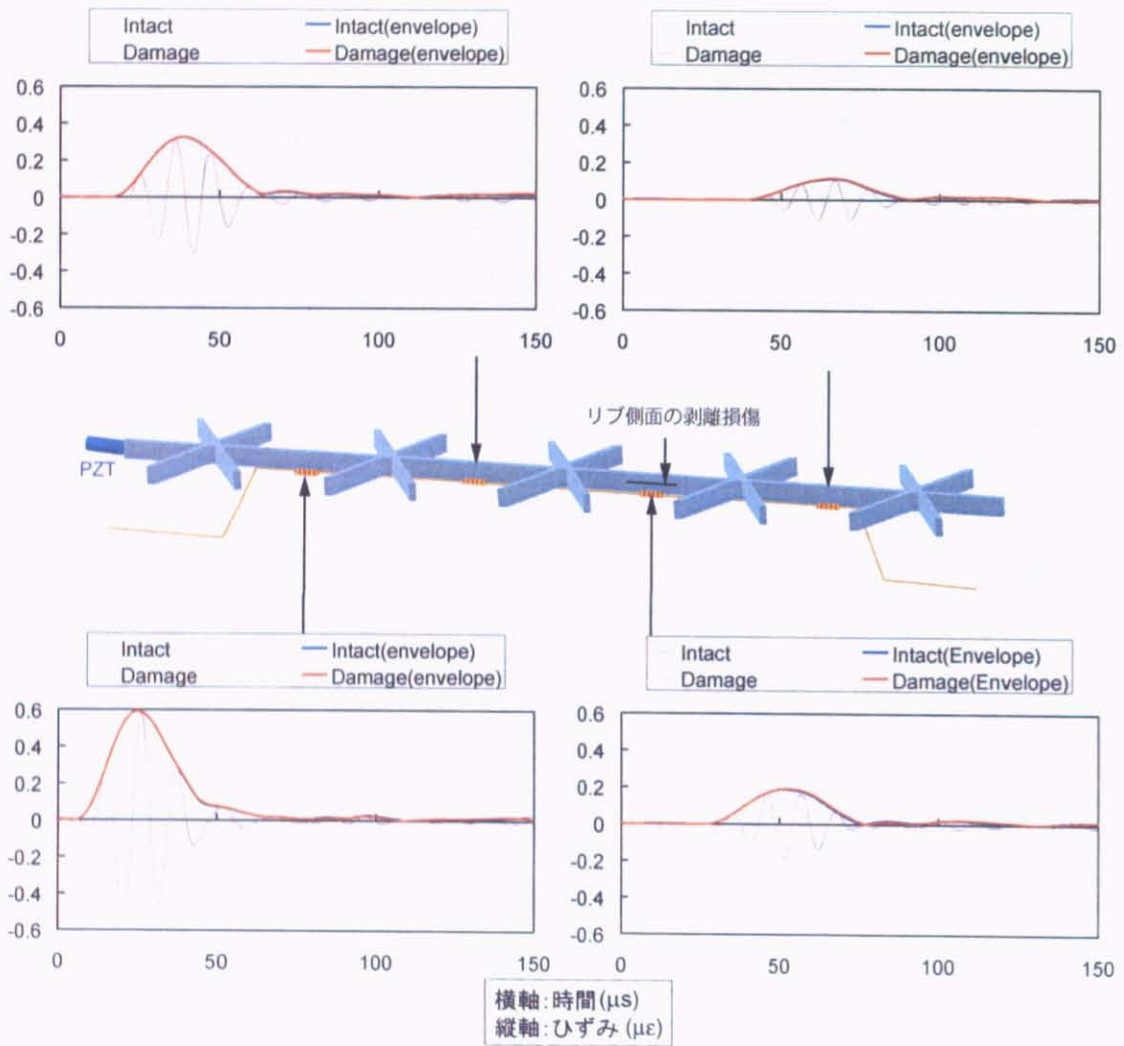


Fig.5.15 Change of the maximum amplitudes of first arrival compressional waves induced by delamination of a rib.

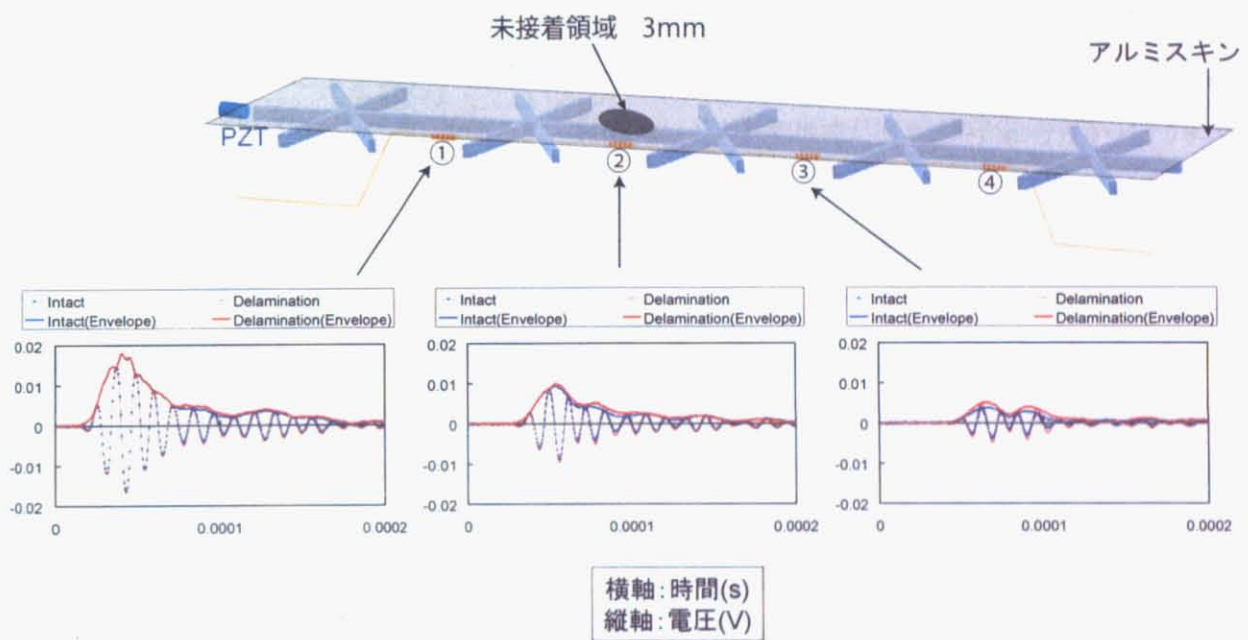


Fig.5.16 Change of the maximum amplitudes of first arrival compressional waves induced by non-adhesion between lattice and skin. The amplitudes measured at ③ increased according to non-adhesion.

Table 5.2 Sizes of AGS specimen. All characters correspond to Fig.1.11

---

<i>A</i>	526.8	$\pm 0.2$	(mm)
<i>B</i>	550.9	+0.16, -0.14	(mm)
<i>a</i>	105.0	$\pm 0.1$	(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)

---

### 5.3 曲げ波による損傷検知

#### 5.3.1 試験概要

Fig.5.17 に、曲げ波を用いた AGS に対する試験の概要を示す。供試体には 5.2 節と同様のものを用いたので、供試体サイズは Table 5.2 と同じであり、材料物性は Table 2.1, 2.2 と同様である。

Fig.5.17 中には、弾性波発振用圧電素子 (PZT) の位置、及び、FBG センサの各リブ貼付け位置も併示している。PZT としては、3.3 節でも用いた 80kHz 共振型の圧電素子を用い、これを図のように交点上部中央に瞬間接着剤により貼り付けた。一方、多重化した FBG センサは同図中の PZT を中心に①～⑥の 6 箇所のリブの下面中央に、リブ長手方向と平行に、こちらも瞬間接着剤を用いて貼り付けた。曲げ波の場合も、3.3 節での検討で明らかになったように、FBG センサの計測性能が埋め込みか貼付けかどうかに依存しないことから、貼付け FBG センサを用いて検討を行うこととした。

この状態で、六つの経路のうちからひとつを選んで損傷を与えて曲げ波を伝播させた場合の各リブに貼付けた FBG センサから得られる受振波形の違いを調べる。計測システムは、3.3 節での弾性波特性検証に用いた試験装置及び計測系と同じものを用いることとし、その手法 (アベレージング等) も同様に行うこととした。入力波形には、附録 C の Fig.C.3 に示した波形 (正弦波三周期に Hamming 窓関数を掛けたもの) を用い、発振周波数は 40kHz とした。また入力する電圧値の最大値が 50V となるよう電力増幅器により増幅した。以上で、損傷のない経路で計測された弾性波形と損傷のある経路で計測されたものを比較し、その初期到達波最大振幅値  $V_p$  の損傷による違いを検討した。実際の損傷診断手法では、5.1 節で提案した統計的異常値検知手法を用いて、 $F_i$  の圧電素子より発生させた弾性波が圧電素子より等距離にある FBG センサで計測される受振波形  $f_{ij}(j = 1 \dots 6)$  について、その六つの  $V_p$  中に異常値が診断されれば、損傷が存在し、異常値のある経路に損傷があることがわかる。

導入する損傷、及び、損傷導入方法は、5.2.1 で示した方法と同様とした。

#### 5.3.2 繊維破断によるクラック

Fig.5.18 に、実験により計測された受振波形のうち、特に①と②の位置で計測されたものを示す。繊維破断によるクラックは、図中①のリブの中央より発振側に近い位置に導入した。図中の点線は計測された実信号を、実線はその信号に対して Hilbert 変換を用いて算出した包絡線をあらわす。この包絡線は、弾性波エネルギー (ひずみエネルギー + 運動エネルギー) に比例する値である。この図を見ると、クラックのないリブで計測される受振波形の  $V_p$  に比べてクラックのあるリブの  $V_p$  のほうが、小さいことがわかる。こ

れは、疎密波の場合と同様に亀裂によりリブ中に不連続面が生成されたため、その面を通して伝播するはずの曲げ波が伝わらないためだと考えられる。よって実際には、六本のリブで計測された  $V_p$  の中に、他の五本に比べて  $V_p$  が小さい、すなわち、異常値と診断される値が存在する場合には、そのリブに繊維破断による亀裂ありと判定することが出来ると考えられる。

### 5.3.3 リブ上面のスプリットティング

Fig.5.19 に実験結果を示す。この図のグラフは、①から⑥の周囲六本のリブで計測された電気信号出力の時系列の変化を表す。スプリットティングは、図中①のリブの中央より発振側に近い位置に導入した。図中の点線は計測された実信号を、実線はその信号に対して Hilbert 変換を用いて算出した包絡線をあらわす。この包絡線は、弾性波エネルギー(ひずみエネルギー+運動エネルギー)に比例する値である。この図を見ると、損傷の有無が計測される受振波形、特に  $V_p$  にほとんど影響を及ぼしていないことがわかる。これは、リブ上面のスプリットティングでは、不連続面が曲げ波の伝播方向に対して平行なため、5.3.2 の場合とは異なり、曲げ波の伝播がほとんど遮断されないためだと考えられる。よって、曲げ波を用いてリブ上面のスプリットティングを検知することは難しいと考えられる。

### 5.3.4 リブ側面の剥離損傷検討

リブ側面の剥離損傷に関しては、前述のとおり、有限要素解析 (FEA) を用いて検討を行った。

損傷は、Fig.5.20 に示した位置に、Fig.5.14 のように二重節点によりリブ側面の剥離損傷による不連続面を作成することで模擬した。

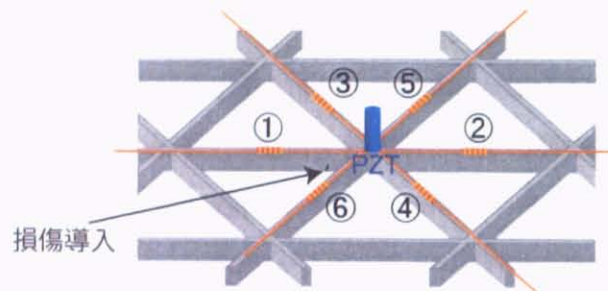
解析における初期・境界条件は、発振する交点部上面に Fig.C.3 に示した波形の圧力を、発振圧力の最大値  $P = 2.7 \times 10^4$  (Pa) として与えた。発振周波数は、附録 C で検討したとおり、40kHz とした。

Fig.5.20 に解析結果を示す。図中のグラフは、各受振点で得られた軸方向ひずみの時間変化をあらわす。各グラフの横軸は時間 ( $\mu s$ ) を、縦軸は軸方向ひずみの大きさ ( $\mu\epsilon$ ) を表す。グラフの点線は受振波形を、実線は軸方向ひずみの時間変化に対して Hilbert 変換を利用して計算された包絡線をあらわす。グラフを見ると、②で計測される初期到達波の最大振幅  $V_p$  が、他のリブで計測されたものに比べて大きいことがわかる。これは、リブにこの剥離損傷が発生したことによって、リブの曲げ変形剛性に寄与するせん断剛性(リブ側面内のせん断変形)が低下したため、リブが変形しやすくなり、その結果、FBG 部での軸方向変形が大きくなったためだと考えられる。よって実際には、六本のリブで計測された  $V_p$  の中に、他の五本に比べて  $V_p$  が大きい、すなわち、異常値と診断される値が存在する場合には、そのリブの側面に剥離損傷があると判定出来ると考えられる。

### 5.3.5 格子部とスキンの接着不良

Fig.5.21 に実験結果を示す。図中のグラフは、各 FBG センサで計測された電気信号の時系列の変化について、①から⑥の周囲六本のリブで計測されたものをあらわす。スキン未接着部分は、②のリブ中央に 3cm 分作成した。各グラフの横軸は時間 ( $\mu s$ ) を、縦軸は軸方向ひずみの大きさ ( $\mu\epsilon$ ) を表す。グラフの点線は受振波形を、実線は軸方向ひずみの時間変化に対して Hilbert 変換を利用して計算された包絡線をあらわす。この図を見ると、②で計測される初期到達波の最大振幅  $V_p$  が、他のリブで計測されたものに比べて大きくなっているのがわかる。これは、5.2.5 でも述べたとおり、格子部とスキンの間に未接着な部分があった場合には、接着されている場合に較べて格子部を伝播する弾性波のエネルギーが大きくなるため、 $V_p$  が大きくなると考えられる。よって、5.2.5 と同様に、六本のリブで計測された  $V_p$  の中に、他の五本に比べて  $V_p$  が大きい、すなわち、異常値と診断される値が存在する場合には、そのリブにおいて格子部とスキンの接着不良部があると判定出来ると考えられる。

入力圧電素子を中心に周囲6本のリブで計測される信号を比較。



交点中央に圧電素子接着

外部からの擾乱防止のため天井より紐で四点を吊っている。

Fig.5.17 Schematic of damage detection test with flexural waves generated at attached piezo-electric transducer. Each lower surfaces of ribs had one attached FBG sensor, which were multiplexed into one optical fiber.



### 5.3 曲げ波による損傷検知

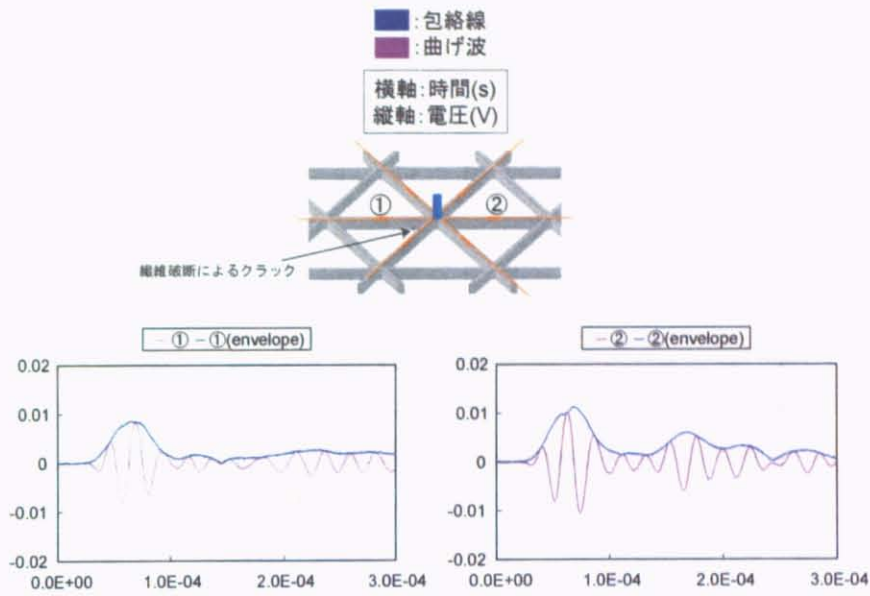


Fig.5.18 Change of the maximum amplitudes of first arrival flexural waves induced by fiber break as illustrated. The amplitudes measured at ① reduced according to the occurrence of fiber break.

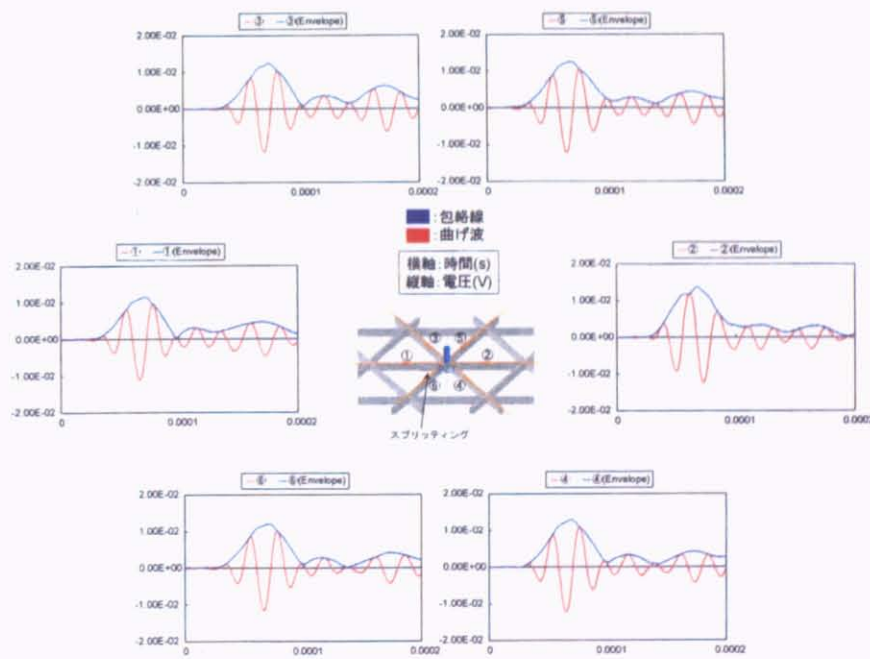


Fig.5.19 Change of the maximum amplitudes of first arrival flexural waves induced by a splitting on top surface of the rib as illustrated.

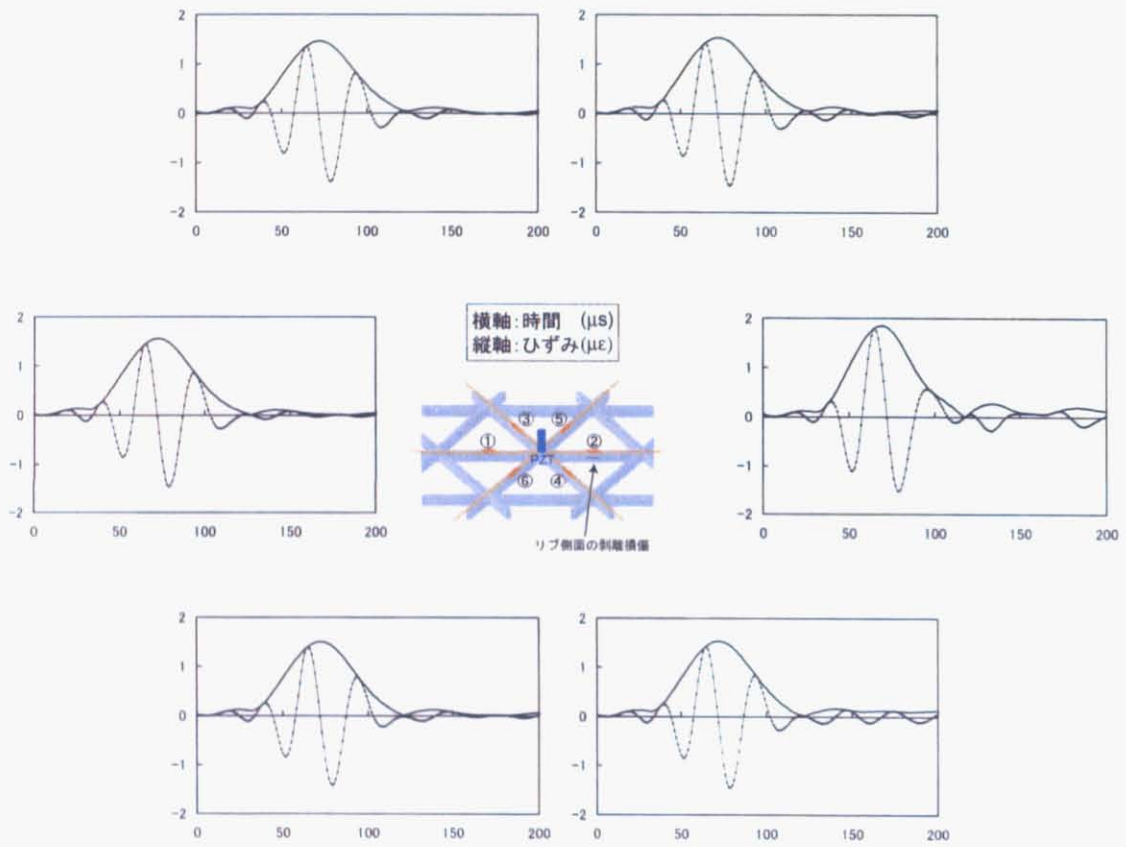


Fig.5.20 Change of the maximum amplitudes of first arrival flexural waves induced by delamination of a rib.

### 5.3 曲げ波による損傷検知

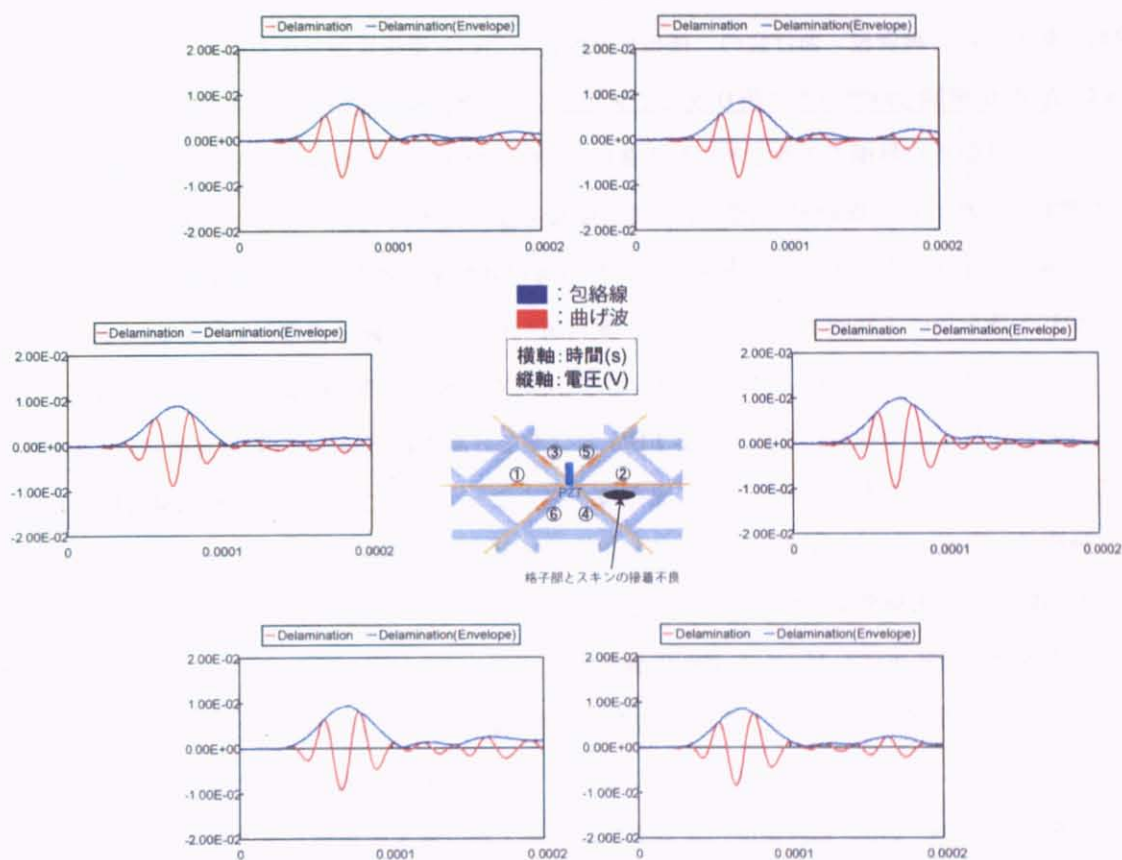


Fig.5.21 Change of the maximum amplitudes of first arrival flexural waves induced by non-adhesion between lattice and skin. The amplitudes measured at ② increased according to non-adhesion.

## 5.4 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(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)について、第3章で提案した埋め込み多重化 FBG センサを用いた計測系により、動的なひずみ(弾性波)計測を行うことで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、疎密波・曲げ波の二種類の弾性波を用いた損傷診断手法を検討した。まず疎密波に関しては、AGS が単純なユニットの繰り返しであること、また、疎密波が非常に単純な波であり、リブ毎の製造時のサイズ誤差を無視できること、を考慮して、様々な経路に弾性波を伝播させ、等距離にある FBG センサで計測される弾性波(初期到達波)の最大振幅を互いに比較する。そして、他の経路での値に較べて大きくまたは小さくなっていることを、すなわち異常値が存在することを、4.1 節でも提案した統計的異常値検知手法を用いて診断することにより、異常値が存在する経路に損傷があると判断する方法を提案した。一方、曲げ波については、交点より入力した波が六方向に一樣に伝播することが明らかとなったので、六方向のそれぞれで埋め込まれている FBG センサで計測された弾性波(初期到達波)の最大振幅を比較する。そして、他の六本に比べて大きくまたは小さくなっていることを、すなわち異常値が存在することを、疎密波と同様に統計的異常値検知手法を用いて診断することにより、異常値が存在する経路に損傷があると判断する方法を提案した。以上の提案された手法を用いて、実際に実験・解析により損傷を与えた供試体で損傷が検知可能かどうかを個別に議論した。

Table 5.3 に検討結果をまとめる。検討の結果、疎密波については繊維破断によるクラック発生時に最大振幅が小さくなること、格子部とスキンの接着不良存在時に最大振幅が大きくなることが明らかになった。また曲げ波については、繊維破断によるクラック発生時に最大振幅が小さくなること、リブ側面の剥離損傷発生時に最大振幅が大きくなること、格子とスキンの接着不良存在時に最大振幅が大きくなること明らかになった。このように、疎密波・曲げ波によって検知可能な損傷が異なることから、両方の弾性波を組み合わせて検知を行うことにより、損傷の種類を区別することが出来ると考えられる。逆に、その他の損傷、特にリブ上面のスプリッティングについては、検知することができないことがわかった。よってこの損傷を検知するためには、別の変形モードを持つ弾性波を用いる必要があると考えられる。特に、リブ側面の剥離損傷との類似関係から、リブ幅方向の曲げ波を用いれば最大振幅の変化が出るのではないかと考えられるが、その場合は FBG センサの埋め込む位置を側表面にしなければならず、こちらの問題も考える必要がある。

いずれにせよ、弾性波を用いる場合であれば、疎密波・曲げ波ともに静的ひずみで検知できなかった損

## 5.4 まとめ

---

傷まで検知できるということがわかった。このことからさらに、静ひずみを用いた損傷検知手法と動ひずみ(弾性波)を用いた損傷検知手法を組み合わせることにより、より詳細に損傷の種類を決定する、損傷診断システムが出来ると考えられる。この点については、第6章でまとめる。

以上、本章の検討でも、第4章同様、1.3.4に示したSHMシステム構築に必要な検討が全ての観点でなされたことは特筆に価すると考える。

Table 5.3 Summary of the possibilities of damage detection under various combinations of possible damage types and two types of elastic waves (compressional and flexural waves).

	繊維破断によるクラック	リップ上面のスプリットイング	リップ側面の剝離損傷	格子部とスキンの接着不良
疎密波	検知可能(最大振幅減少)	検知不可能	検知不可能	検知可能(最大振幅増加)
曲げ波	検知可能(最大振幅減少)	検知不可能	検知可能(最大振幅増加)	検知可能(最大振幅増加)

---

## 第6章

# 結論

### 6.1 本研究により得られた成果

本研究では、近年、再注目されはじめた CFRP グリッド構造 (AGS) に対し、更なる信頼性を向上させ、実用化を促進することを目的として、この構造に最適な構造ヘルスマモニタリング (SHM) システムの構築・検証を行った。本研究では特に AGS を対象として SHM システムを検討したが、今回の SHM システム構築までの流れは、一般的なすべての構造に対する SHM システム構築においても適用可能である。すなわち、一つの構造に対してその SHM システムを、損傷の解明、その損傷にあった計測系及び計測手法の提案、提案された計測手法を用いた SHM 方法の提案、以上全ての実験的な確認、の全てに対して行った研究は過去にない。よって、SHM システム構築までに必要とされる検討事項を明らかにし、その流れに沿って研究を行えば、SHM システムを構築することができることを示したことも本研究の大きな成果であり、その工学的意義は大きいものとする。以下、本論文で得られた結論を列挙する。

第2章ではまず、どのような損傷を対象として SHM を検討するかを検討した。本研究では、一般的に SHM システムが対象とする欠陥のうち製造欠陥・運用欠陥の二つを検討することとした。製造欠陥については、多分に経験的に基づくところが多いので、本研究を進めていくにあたり比較的起こりやすいと考えられる製造欠陥として、格子部とスキンの接着不良を本研究の検討対象とすることとした。一方、運用欠陥の検討に際しては、低速衝撃試験、及び、準静的押し込み試験により詳細な実験を行った。その結果、以下のような結論が得られた。

- 低速衝撃試験により、スキンのない AGS に生じる損傷は、リブの局所圧縮座屈に起因する繊維破断によって生じるリブ亀裂、マトリックスクラック (リブの側面を進展するもの、及び、リブの上面を進展するもの)、引張荷重による繊維破断、に分類することができることがわかった。

- 一般的に AGS は、リブを主構造部材とするため、リブがかなり太くなる傾向にあり、その場合にはリブを二次元の梁のように考えているだけでは考慮できない損傷も発生するため、損傷について検討するには、三次元物体への衝突と考える必要もあることがわかった。
- 上記損傷については、どの順番で損傷が発生するのか明らかにした。一般に、構造 SHM として検知すべき損傷は、できる限り初期の損傷であるべきなので、最初に発生する損傷という意味で言えば、リブの繊維破断によるクラック、リブ上面に発生するスプリッティング、を後述の SHM を検討する章において対象とすればよいことがわかった。
- 一方、スキン付 AGS についての検討は、スキンが CFRP 積層板であった場合についてのみ行った。この場合、スキンに発生する損傷は、既存の研究において既に明らかとなっている CFRP 積層板中に発生する損傷(シアクラック、内部層間剥離、スプリッティング)のみ生じることがわかった。すなわち、スキン付 AGS 中のスキンに生じる損傷は、AGS 格子の影響を受けないことがわかった。
- ただし、本研究では実用のことを考え(詳細は、2.5)、スキンに発生する損傷としては、層間剥離損傷およびスキンのクラック(スキンへの物理的な孔)を除外していいとした。
- 逆にリブに発生する損傷は、スキンを接着したことによる影響を受け、繊維破断によるリブクラックが起きにくくなり、その代わりに、リブ側面のクラックが発生するようになることを明らかにした。
- さらにリブ-スキンの間の剥離損傷については、その接着面積が重要なパラメータとなることがわかった。これは逆に言えば、接着面積をある程度大きくしておくことによってリブ-スキンの間の剥離を起こさないように設計できることを意味する。つまり、 $Tr$  を損傷についての設計パラメータとして今後の設計に用いるべきであることを提案した。

以上の結果から、AGS に生じる損傷として本研究で取り扱うものとしては、

- 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

の4つが挙げられることを明らかにした。

次に、第3章では、上記の損傷を検知するための計測系として、多重化埋め込み FBG センサによるひずみ計測システムを提案した。この計測系は、構造成形段階より埋め込むことができるため、運用時のみならず、成形時・製造時の健全性まで調べることができる。この計測系で本研究中で調べる物理量とし

## 6.1 本研究により得られた成果

---

て、構造中に発生する、静的・動的な歪を考え、これらの物理量の計測可能性・及び精度を検討した。静的なひずみ計測については、実際に埋め込んだ供試体を作成し、検討を行った。この供試体には製造段階において、FBG センサを多重化した光ファイバを複数本埋め込み、光スイッチを用いることにより、最大 100Hz の計測能を持つ計測系を構築し、実験を行った。供試体に曲げ負荷を与えたところ、埋め込んだ FBG センサで計測されたひずみが、供試体に貼り付けたひずみゲージで計測されたものと一致すること、その精度、再現性を明らかにした。一方、動的なひずみ計測については、多重化した FBG センサを貼付け、発生させた弾性波(本研究では疎密波と曲げ波)をそのセンサを用いて計測し、弾性波の伝播特性を解明した。計測には、機械的・電氣的な分派機能を必要としない AWG フィルタを用いて、各 FBG センサからの”ひずみの変動”を計測することにより、弾性波レベルの高速な振動を計測するシステムを構築した。その結果、疎密波についてはその直進性・減衰が小さいことから、AGS 中の任意の経路(一本の連続するリブ群)を検査するのに用いるのがよいと考え、構造の端部に弾性波入力用の自由端を作成することを提案した。曲げ波については、交点上より入力した場合に、交点につながっている 6 本全てのリブに均等にエネルギーが伝播するという特性から、二次元的にリブを検査するのがよいことを明らかにした。その際、減衰による伝播限界距離をリブ二本分、と考えるのが妥当であることも同時に明らかにした。

以上の成果を元に、第 4 章、第 5 章において、それぞれ、静的・動的なひずみ計測による SHM 手法を検討した。

まず第 4 章においては、2 章において明らかにした AGS 中に生じる可能性がある損傷について、実際に AGS に損傷が発生した場合に、計測される各リブの静的ひずみにどのような変化が現れるのかについて、実験・解析により調べた。検査荷重としては、実験室レベルの検討として境界条件が非常にはっきりしている一点集中荷重を検討したほか、翼 BOX 構造への適用の際に自重による面内荷重に対して検討を行うため、面内圧縮力による検討も行った。検討に際しては、計測誤差を考慮して有意なひずみ変化として  $50\mu\epsilon$  以上のひずみ差を生じた場合に、損傷が検知できる可能性があると判断することとした結果、本研究で提案している手法(計測系、静ひずみ計測両方の意味で)を用いて検知できそうな損傷としては、リブの繊維破断、のみであることがわかった。さらに本研究では、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、統計的異常値検知手法を用いることを提案した。この方法は、本研究のシステムで損傷により発生するひずみ変化の情報を扱うのに非常に適している、最適化手法が苦手とする計測・環境誤差による問題をうまく回避し、むしろ積極的に利用して(誤差の分布を用いているということ)いる、などの利点がある。この方法を実験結果に対して用いたところ、損傷位置を正確に検知できることがわかった。

一方、第 5 章においては、弾性波を用いた動的なひずみ計測から、上記の 3 種類の損傷についての検討



を行った。さらに、特にスキン付の AGS については、製造時のスキンの接着不良についても検討対象として、この章において検討を行った。損傷同定方法であるが、疎密波に関しては、AGS が単純なユニットの繰り返しであること、また、疎密波が非常に単純な波であり、各リップごとの製造時のサイズ誤差を無視できること、を考慮して、様々な経路に弾性波を伝播させ、等距離にある FBG センサの信号を互いに比較し、他の FBG センサからの信号に比べて小さな信号となっている経路には、その小さくなり始めた FBG より前の位置に何らかの損傷が存在していると結論付けることとした。一方、曲げ波については、交点より入力した波が 6 方向に一樣に伝播することが、第 3 章で明らかとなったので、6 方向のそれぞれで埋め込まれている FBG センサで計測された弾性波 (初期到達波) の強度を比較し、他の 6 本に比べて小さくなっているところがあれば、その経路に損傷が存在していると考えた。以上の提案を、可能性のある 3 種類の損傷すべてについて実際に実験により検討した結果、疎密波・曲げ波どちらの場合においても、リップ側面の剥離損傷以外の全ての損傷について、伝播されてくる弾性波の強度の変化を見ることにより、検知できることが明らかになった。これは、繊維破断、上面クラック、については伝播経路中に存在していた場合、その亀裂先端において反射が起こり、伝播される弾性波エネルギーが小さくなることを利用して損傷検知を行っていることにあたる。また、スキンの接着不良に関しては、完全に接着されていた場合にスキンへ逃げる弾性波エネルギーが、接着不良により格子部に留まるため、計測される弾性波が見かけ上大きく見えることを利用した損傷検知手法となっている。いずれにせよ、弾性波を用いる場合であれば、疎密波・曲げ波ともに静的ひずみで検知できなかった損傷まで検知できるということがわかった。今回は検討していない項目として、弾性波を用いたリップ側面の剥離損傷検知がある。現段階では、この損傷を検知する方法はないが、この損傷がリップ上面のスプリッティングと類似していることを考えると、弾性波により検知できるのではないかと考えられる。この点を明らかにするところが、今後の課題である。

以上、本研究で提案した計測系及び SHM 方法を用いて計測できる損傷について改めて、Table 6.1 に示す。この表によれば、今回検討した四種類の損傷のうち、提案した四つの方法を用いて検知できるものは、繊維破断によるクラック、格子部とスキンの接着不良、の二種類であることがわかった。ただし考察として、残りのリップ上面のスプリッティング、リップ側面の剥離損傷は、損傷によるひずみ計測への影響が小さいということから、逆に構造にとって重大な損傷でないため、検知する必要がないと考えられる。このことを踏まえれば、結局、本研究では検知しなければならない損傷は全て検知することができたといえる。

## 6.2 本研究からの今後の展開

前述のとおり、本研究の新規性は、これまでの SHM に関する研究が、複合材料・構造の損傷の解明、センサ開発、損傷同定手法開発、と個別に注力されてきたものに対して、ひとつの実構造物に注目しながら

## 6.2 本研究からの今後の展開

これら全てを統合したことにある。よって、この流れを継承して研究を進めるのであれば、今後はこの研究成果を用いてより大きなアプリケーション構造 (主翼端 Winglet の翼ボックス構造) に対しての検証実験を行っていくことが今後の展開として考えられる。実際、本研究で対象とした AGS の主翼端 Winglet の翼ボックス構造を実構造物サイズで製造し検証を行うことが既に決まっており、本研究で得られた成果がその際にも大きく役立つことを期待したい。

一方、このように“統合”に注目して研究を行った理由として、個々の要素研究が既に成熟期に入っていると感じられたことが挙げられる。そのため著者は、その背景から今後はこれら要素技術を統合して様々な構造物に適用していくための研究が必要となると考えた。その結果、本研究では AGS という特定の構造に適用するための SHM システムを構築することができた。この構築までのプロセスは汎用的なものであり、今後、個別の構造に対して SHM システムを構築していく際には、同様の検討を行っていけばよいといえる。このように、SHM システムの構築までの汎用的なプロセスを明らかにし、実際にそれを証明したことが本研究において非常に重要な点である。よって本研究の展開としては、その他の様々な航空機構造や、航空宇宙分野以外の構造にも本研究でのプロセスを適用していくことが考えられる。

Table 6.1 Summary of the possibilities of damage detection under various combinations of possible damage types and several damage detection methods.

	繊維破断によるクラック	リブ上面のスプリットイング	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	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	×
疎密波	検知可能	検知不可能	検知不可能	検知可能
曲げ波	検知可能	検知不可能	検知可能	検知可能