

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 20 年度

修士論文

高分解能分布型光ファイバひずみセンサによる
CFRP 構造の製造時と運用時における
変形状態モニタリングに関する研究

2009 年 2 月提出
指導教員 武田 展雄 教授

76218 堀井 信司

目次

第 1 章	序論	1
1.1	炭素繊維強化複合材料の構造ヘルスマニタリング	1
1.2	光ファイバセンサ	2
1.2.1	光ファイバ	2
1.2.2	多点型センサと分布型センサ	3
1.2.3	分布型センサの種類と比較	4
1.3	PPP-BOTDA の原理	6
1.3.1	BOTDA の原理	6
1.3.2	PPP-BOTDA の原理	7
1.4	本研究の目的と論文構成	8
第 2 章	大型 CFRP 翼構造供試体の曲げ試験におけるひずみ分布計測	10
2.1	第 2 章概要	10
2.2	大型 CFRP 翼供試体	10
2.2.1	供試体の概要	10
2.2.2	VaRTM 成型法	11
2.3	光ファイバネットワークの貼付け	12
2.3.1	翼供試体内板へのポリイミド光ファイバの貼付け	12
2.3.2	テープ式光ファイバについて	13
2.3.3	テープ式光ファイバの追随性試験	13
2.3.4	翼供試体外板への貼付け	16
2.4	翼供試体曲げ試験におけるひずみ分布計測	17
2.4.1	曲げ試験の概要	17
2.4.2	光ファイバネットワークの構成	18
2.4.3	分布ひずみデータの取得結果と考察	19
2.5	本章のまとめ	21

第 3 章 逆対称積層板の変形に対するひずみ分布計測	29
3 . 1 第 3 章概要	29
3 . 2 逆対称積層板とは.....	29
3 . 3 供試体の概要	30
3 . 4 PPP-BOTDA 計測.....	31
3 . 5 計測結果と考察.....	33
3 . 6 本章のまとめ	33
第 4 章 逆対称積層板のひずみ分布推定と変形モニタリング	36
4 . 1 第 4 章概要	36
4 . 2 逆対称積層板のひずみ 変位関係と変形モード.....	36
4 . 3 ひずみ関数推定.....	38
4 . 3 . 1 分布ひずみデータの処理	38
4 . 3 . 2 最小二乗法による関数推定.....	39
4 . 3 . 3 推定ひずみ関数の妥当性検証	42
4 . 4 有限要素モデルを用いた変形同定アルゴリズム.....	48
4 . 4 . 1 大変形問題における支配方程式.....	48
4 . 4 . 2 非線形支配方程式に対する反復計算アルゴリズム	52
4 . 5 変位同定結果と考察	54
4 . 6 本章のまとめ	55
第 5 章 結論.....	56
参考文献.....	58
修士論文に関する学会発表.....	60
謝辞	61

第 1 章

序論

1. 1 炭素繊維強化複合材料の構造ヘルスマニタリング

近年，航空分野において，従来用いられていたアルミニウム合金などの金属材料に代わり，炭素繊維強化複合材料（Carbon Fiber Reinforced Plastic: CFRP）をはじめとする先進複合材料の使用が急速に進んでいる．これは，CFRP には比強度，比剛性に優れるという特徴があり，金属材料よりも軽量であるため、重量軽減が高効率化およびエネルギー節約を生み出す航空分野への適用が進んでいる^[1]．航空機への適用例としては，Airbus 社が開発した超大型旅客機 A380 では，重量比で 25%^[2]、また Boeing 社が開発を行い 2010 年に就航が予定されている次世代中型旅客機 Boeing787 では重量比で 50%^[3]を先進複合材料で占められることが明らかになっている．

一方 CFRP 構造は，航空機の欲や胴体といった大型構造部材への適用が進むにつれて，大型一体成型の構造物が増えている^[4]．その例として，宇宙用の衛星搭載アンテナや大型宇宙構造物も上げられる．

しかし反面，CFRP には問題点もある．一つに損傷進展の分かりづらさがあげられる．CFRP 複合材料の損傷過程は，トランスバースクラック，層間剥離，そして繊維破断と進むが^[5]，このようなメカニズムは非常に複雑であり，現在でも完全な定式化はされておらず損傷許容設計を難しくしている．

さらに，成型時に生じる熱残留ひずみも問題となる．CFRP は成型を行う際に，樹脂を硬化させるために熱が加えられるが，炭素繊維と樹脂においては熱膨張係数が異なるため，炭素繊維の積層プロセスにおける製造精度によっては，成型後の構造体において熱膨張係数に非対称性が生じる．すると，樹脂硬化後の冷却過程において変形が生じることがあり，高い寸法精度が要求される場合においてしばしば問題となっている．

そこで，構造全体を成型段階から運用段階にいたるまで正確にモニタリングする技術として，構造ヘルスマニタリング技術が注目されている．このヘルスマニタリングとは，構造物にセンサを設置し物理量を観測し、そのデータから構造物の健全性を検証する技術である^[6]．CFRP の製造時，および運用時において構造全体の健全性の検証を行えるようにすることは，非常に重要な課題であると考えられる．

1.2 光ファイバセンサ

1.2.1 光ファイバ

構造ヘルスマニタリングに用いられるセンサは多数存在するが，その中でも光ファイバセンサは最も注目を集めているセンサのひとつといえる．これは，光ファイバが以下の特徴を持つためである^[7]．

- ・サイズが小さいため材料中への埋め込みが容易である
- ・電氣的に無誘導である，電磁界の干渉を受けない
- ・ガラスで出来ているため腐食に強く，耐環境性に優れる
- ・大容量通信分野でも使用されており，低コストである

光ファイバは基本的に光が閉じ込められて伝播するコア(Core)，これを囲むクラッド(Cladding)，それらを保護するための被覆(Coating)からなる．コアの屈折率 η_{core} はクラッドの屈折率 η_{clad} よりもわずかに大きくなっているため，光はコアとクラッドの境界面を全反射して進む^[8]．図 1.1 に光ファイバの模式図を示す．

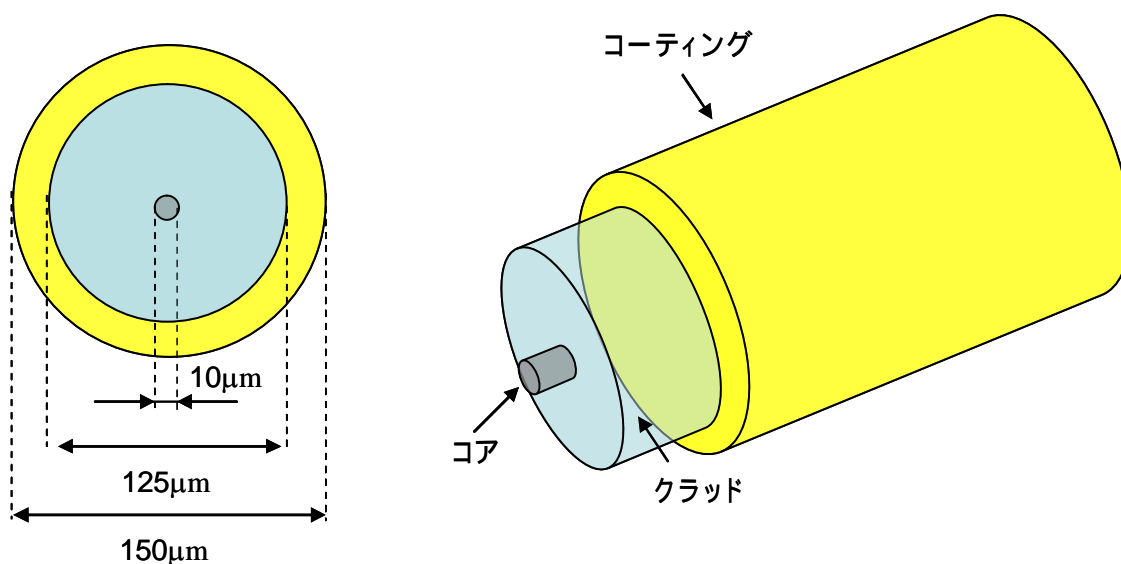


図 1.1 光ファイバ模式図

1.2.2 多点型センサと分布型センサ

光ファイバセンサにはさまざまな種類のものがあるが^[9]，それらを大まかに分類すると，多点型センサと分布型センサに分けられる．2つのセンサの性能の比較を表1.1に示す．

表 1.1 多点型センサと分布型センサの比較

	多点型センサ	分布型センサ
測定位置	センサ部のみ	光ファイバ全長
空間分解能	1mm～数 cm	1cm～数 m
ひずみ分解能	1 $\mu\epsilon$	25 $\mu\epsilon$
温度分解能	0.1	1

多点型センサは一般的に，光ファイバのコアに紫外線を照射し，不規則な縞（回折格子）をつけることで，その一部をセンサ化して用いる．センサ部は光ファイバ上に多点化して設置することができるが，実用上はその点数は有限である．そのため，使用する際はあらかじめ損傷の発生しやすい部位の検討をつける必要がある．しかしながらその反面，空間分解能はセンサ部の加工の間隔で見ると 1cm 程度は可能である．近年の研究では，FBG センサからの反射光のスペクトルより，数 cm のグレーティングに生じるひずみ分布を求める手法なども研究されている．この場合の空間分解能は 1mm 程度，もしくはそれ以上の高精度を得られる可能性があると考えられる^[10]．ひずみ分解能，温度分解能もそれぞれ 1 $\mu\epsilon$ ，0.1 程度と高精度に計測可能である．以上のように多点型センサは，既存のひずみゲージと同じように，狭い範囲の高精度なモニタリングに適していると言える．

一方，分布型センサは，光ファイバそのものをセンサとして用いる．光時間領域反射率測定法 (Optical Time Domain Reflectometry: OTDR) などを用いることで，センサ部は光ファイバ全長にわたるため，構造物全体のひずみを連続的に計測することが可能となる．その反面，空間分解能は高いもので 1cm 程度、低いものでは数 m 程度である^[11]．また，ひずみ分解能，温度分解能もそれぞれ 25 $\mu\epsilon$ ，1 程度と，多点型センサに比べるとその精度は低い．しかし，近年光ファイバ分野で分布型センサの研究が盛んに行われており，さらなる分解能の向上が期待できる．以上のことから，分布型センサは広い範囲の大まかなモニタリングに適していると言える．

以上のように2種類の光ファイバセンサには一長一短があり，用途に合ったセンサを用いることでその性能を最大限に発揮することが出来る．

1.2.3 分布型センサの種類と比較

本節では，本研究で用いた分布型センサについてさらに詳しく述べる．分布型センサに分類されるものは多数存在するが，その中でも現在ブリルアン散乱を用いた 3 種類の分布型センサが注目を集めている．それら 3 種類のセンサについて述べていく．

ブリルアン光時間領域解析法 (BOTDA)

BOTDA は，光ファイバの両端からポンプ光 (パルス光) とプローブ光 (連続光: CW 光) を入射し，2 つの光の間で起こる誘導ブリルアン散乱を利用した解析方法である．ブリルアン周波数変化量が光ファイバに生じる温度変化や軸方向ひずみが比例関係にあることから，光ファイバ経路上の温度分布，軸方向ひずみの計測も可能となった．計測法は原理として光時間領域反射光測定法 (OTDR) の原理を利用している．OTDR とは，パルス状の光を入射し，各位置での後方散乱光を時間ごとに計測することで，光ファイバ経路上の諸特性を測定する技術である^[12]．BOTDA はこの OTDR に誘導ブリルアン散乱を用いた手法である．その空間分解能 Δz_{otdr} は，入力パルス幅 D ，光速 c ，光ファイバコアの屈折率 η_{core} を用いて，次式のように表される．

$$\Delta z_{otdr} = \frac{c}{\eta_{core}} \frac{D}{2} \quad (1.1)$$

式 (1.1) より，空間分解能の向上にはポンプ光とパルス幅を短くする必要があることが分かる．しかしながら，パルス幅を短くするとブリルアンスペクトルの線幅が次第に広がってピーク位置の測定が困難となり，温度，ひずみの分解能の低下につながるため，ある程度以下には短くすることが出来ないとされていた．この限界は音波の緩和時間の 10ns 程度であり，従って分解能の限界は 1m 程度となる．しかしながら，1999 年に Bao らは，ブリルアンスペクトルは非常に短いパルス幅 (1ns 程度) を用いたときには線幅が減少するという現象を実験的に発見した^[13]．

ブリルアン光周波数領域解析法 (BOFDA)

BOFDA は、光周波数領域反射光測定法(OFDR)と誘導ブリルアン散乱を組み合わせた手法である。OFDR とは、光ファイバに入射する光の周波数を掃引し、周波数応答を計測、結果を逆フーリエ変換することで光ファイバ各位置の諸特性を計測する方法である。光ファイバ両端にそれぞれポンプ光とプローブ光（ともに狭いスペクトル幅を持つ CW 光）を入射し、プローブ光の周波数を変化させると、ポンプ光とプローブ光の周波数差に対するブリルアン散乱による複素伝達関数を得る。得られた結果を逆フーリエ変換することにより、光ファイバの各位置でのブリルアンスペクトルが得られ、ブリルアン周波数を同定することができる。

ブリルアン散乱光相関領域解析法 (BOCDA)

BOCDA は光相関領域解析法(OCDR)に誘導ブリルアン散乱を組み合わせた手法である。OCDR では光ファイバの両端から CW 光を入射し、それらのコヒーレンス特性を任意に制御・合成し、2 つの光の相関関係を利用することで光ファイバ各位置での諸特性を計測する手法である。BOCDA ではさらに 2 つの光の周波数を正弦的に変化させる。これにより、光ファイバのある位置において、ポンプ光とプローブ光の周波数差が常にブリルアン周波数となり、それ以外の位置では周波数差が変化するため、誘導ブリルアン散乱は十分に励起されない。この状態で測定されたスペクトルは、各位置におけるブリルアンスペクトルの和となる。したがって、測定領域に周波数差が常にブリルアン周波数となる 1 点のみとなるように設定することで、その点のブリルアン周波数を測定することが可能となる。BOCDA における空間分解能は、式 (1.2) で表される。

$$\delta z_{\text{otdr}} = \frac{v_g \delta \nu_B}{2\pi f_m \delta f} \quad (1.2)$$

ここで v_g は光の群速度、 $\delta \nu_B$ は自発ブリルアン散乱のスペクトル線幅、 f_m 、 δf はポンプ光、プローブ光の周波数変化の周期と大きさをそれぞれ表す。したがって式(1.2)より BOCDA の空間分解能は f_m 、 δf をより大きな値に設定することにより向上させることが出来る。

分布型センサの比較

上記に示した 3 種類のセンサについての比較を，表 1.2 に示す．3 種類のセンサ方式にはそれぞれ特長がある．BOTDA では計測距離は数 10km 程度にわたる静的ひずみを一度に計測可能な方法であり，計測系がシンプルであるためすでに製品化も行われている．BOFDA は BOTDA に比べ SN 比（Signal to Noise Ratio: SNR）の向上が期待される計測方法であるが，現時点では BOTDA 程の精度は出ておらず，また再現性に問題があるなどの改善すべき点が多い．BOCDA はまだ研究段階の技術であるが，他の 2 種類の計測法と異なり，光ファイバの任意の点での動的ひずみを高精度で計測することが可能である．反面，計測系が複雑であるが，現在製品化に向けて研究が行われている．

表 1.2 分布型センサの比較

	BOTDA	BOFDA	BOCDA
測定方法	時間領域測定	周波数領域測定	相関関係を利用
空間分解能	10cm ~	5cm ~	1cm ~
計測距離 - 時間	50m-5 分	50m-5 分	1cm-0.1 秒
特長	長距離 (数十 km) にわたる静的ひずみ計測に適する．製品化は比較的容易．	長距離 (数十 km) にわたる静的ひずみ計測に適する．	任意点におけるひずみ計測に最適．製品化は難しい．

1.3 PPP-BOTDA の原理

1.3.1 BOTDA の原理

本研究ではブリルアン式高分解能分布型光ファイバセンサのひとつである Pulse-prepump Brillouin optical time domain analysis (PPP-BOTDA) システムを採用した．そこで PPP-BOTDA システムの原理について説明していく^[14]．はじめに、BOTDA についてさらに詳しく述べていく．BOTDA は前述のように，光ファイバの両端からポンプ光とプローブ光を入射する．ポンプ光はパルス光，プローブ光は CW 光である．そして，2 つの光の周波数差を変化させながら CW 光の強度を出力端で測定する．CW 光のパワーを周波数差の関数としたものがブリルアンスペクトルである．ここで，ポンプ光は光ファイバ内でのブリルアン散乱を起こすために入射する光である．一方，プローブ光はブリルアン散乱を強めるために入射する．ポンプ光のみを光ファイバに入射すると，まず音響ノイズによる自発ブリルアン散

乱を起点として、誘導ブリルアン散乱が生じる。しかし、この音響ノイズは微弱であるため、自発ブリルアン散乱光もその強度は弱く、そこから生じる誘導ブリルアン散乱光の強度も弱くなる。そこで、音響ノイズの代わりにあらかじめプローブ光を入射することで、ブリルアン散乱を強めることが出来る。光ファイバ内では、先に示したブリルアン散乱により、ポンプ光の周波数がプローブ光の周波数よりも光ファイバ内の音波の周波数分だけ高いときに、ポンプ光の強度がプローブ光に移行する。

ブリルアンスペクトルの中心周波数とその変化量はそれぞれ、ブリルアン周波数 ν_B 、ブリルアン周波数シフト $\Delta\nu_B$ と呼ばれる。光ファイバに軸方向ひずみ $\Delta\varepsilon$ 、温度変化 ΔT のみが生じた場合、これらの値とブリルアン周波数シフトは以下の関係にある。

$$\Delta\nu_B = C_S\Delta\varepsilon + C_T\Delta T \quad (1.3)$$

ここで C_S 、 C_T はブリルアン周波数の変化量と光ファイバ軸方向ひずみ、温度変化を関係付ける値であり、一般的に、各光ファイバ特有の定数である。したがって、この係数 C_S 、 C_T があらかじめわかれば、 $\Delta\nu_B$ を計測することで、光ファイバの軸方向ひずみや温度変化を測定することが出来る。

さらに、ブリルアン散乱の強度は周波数の関数であると同時に時間の関数でもある。この時間は、ポンプ光の入力端から、ポンプ光とプローブ光が相互作用をした位置への往復時間である。そのことから位置との関係もつけることが出来る。そこから各位置での光ファイバに生じる軸方向のひずみや温度変化を測定することが出来る。

1.3.2 PPP-BOTDA の原理

BOTDA は前述のような方式であるため、その空間分解能はポンプ光のパルス幅に依存する。従って、空間分解能を上げるためにはより短いパルス幅を用いる必要がある。しかし、パルス幅を短くしていくと、音波が十分に励起されず、それによりブリルアンスペクトルの線幅が次第に広がり、ブリルアン周波数の同定が困難となる。以上の問題を解決するために、本研究で用いた PPP-BOTDA 方式では、ポンプ光のパルス形状にプリポンプを付加することにより、比較的広いプリポンプ光の幅でフォノンを十分に励起させつつ、狭いパルス幅による高い空間分解能を実現した方法である。この方法を用いた際に得られるブリルアンスペクトルは、BOTDA で得られるスペクトルのブリルアン周波数位置に急峻なピークを持つ形で表される。PPP-BOTDA では空間分解能 100mm での分布ひずみデータの取得が可能となっており^[15]、現在ではこの PPP-BOTDA システムは製品化も行われ、空間分解能 2cm という高性能の計測が可能となっている^[16]。本研究では計測装置として Neubrescope ,NBX-6000(Neubrex 社)を使用している。この装置では空間分解能 100mm、サンプリング間隔 50mm の分布ひずみデータの取得が可能となる。

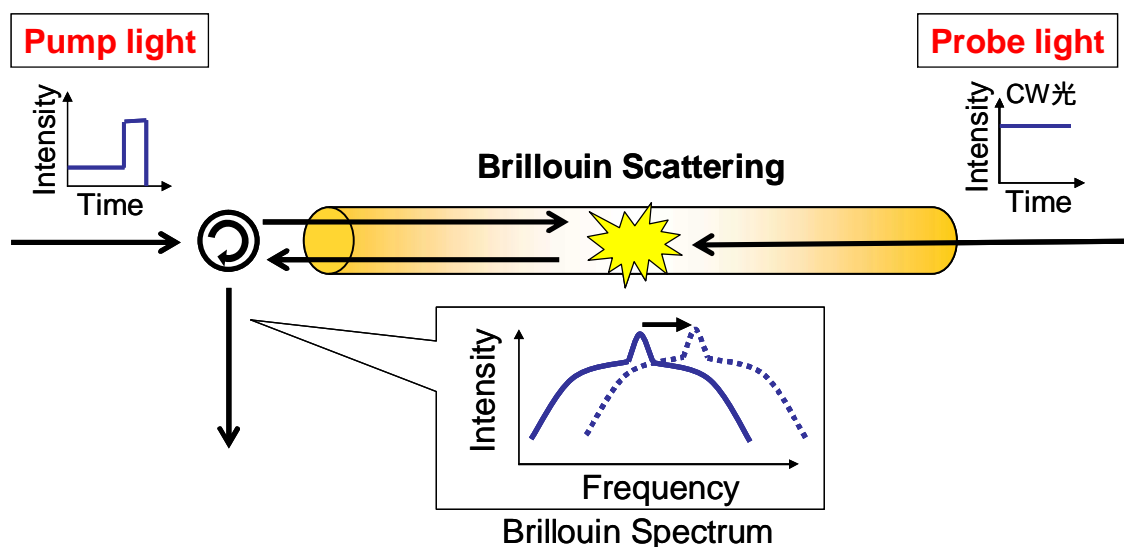


図 1.2 PPP-BOTDA 原理図

1.4 本研究の目的と論文構成

前述のとおり，複合材料構造物における構造全体の製造時から運用時までの一貫したヘルスマモニタリング技術の確立は，非常に重要な課題となっている．現在，構造ヘルスマモニタリングにはさまざまなセンサが用いられている．いままでに光ファイバセンサの一種である Fiber Bragg Grating (FBG) センサを用いることにより，局所的な損傷検知が定量的に行えることは示されている^[17]．本研究では近年 CFRP 構造が大型化しているということを踏まえ，局所的な検知ではなく構造全体のモニタリング手法の確立を目指した．そこで本研究では，構造全体の広範囲な計測が可能である分布型光ファイバセンサの PPP-BOTDA システムに着目した．本研究では CFRP 構造体の製造時から運用時まで構造全体野の一貫したモニタリング技術を実現するために，これら二つの状況でのモニタリング手法の検証を行った．

次章以降における本論文の構成を以下に述べる．

第 2 章では CFRP 構造体の運用時を模擬し，JAXA にておこなわれた VaRTM 6 m 実大翼供試体試験に光ファイバセンサを導入し，大型 CFRP 構造における光ファイバセンサの有用性を検証した．

第 3 章以降では，製造時に熱残留ひずみにより生じる変形をモニタリングするため，同じ原理で特徴的な変形を生じる逆対称積層板を用い，製造時のヘルスマモニタリングの有用性についての検証を行う．

第 3 章では逆対称積層板の変形により生じるひずみ分布の変化を，供試体内部に埋め込んだ光ファイバネットワークにより計測を行い，その計測結果と考察を述べる．

第 4 章では第 3 章で計測した逆対称積層板の分布ひずみデータを用い，構造全体のひずみ分布の推定，および変位同定を行い，その結果と考察を述べる．

第 5 章において本研究を総括し，今後に向けた問題点，課題を述べる．

第 2 章

大型 CFRP 翼構造供試体の曲げ試験における ひずみ分布計測

2.1 第 2 章概要

本章では，運用状態における光ファイバセンサによる変形状態モニタリングの検証を行う．そこで，JAXA（宇宙航空研究開発機構）にて低コスト複合材構造・製造技術の一環として行われた，VaRTM6m 主翼実大試験において PPP-BOTDA システムによる計測を行い，その検証を行った．

はじめに今回用いた大型 CFRP 翼構造供試体の概要と，その作成手法である VaRTM 成型法について説明する．次にポリイミド光ファイバとテープ式光ファイバの接続状況を述べる．そして曲げ試験により得られた PPP-BOTDA システムによる計測データを示し，その考察を述べる．

2.2 大型 CFRP 翼供試体

2.2.1 供試体の概要

今回実験に用いられた大型 CFRP 翼供試体の概要を図 2.1 に示す．この供試体は，上面外板と下面外板で構成され，それぞれの構造は VaRTM 成型法により一体成型されている．図 2.1 はこの供試体を下面外板側から撮影したものである．試験時には，図 2.1 手前側の翼根部において治具で固定される．この翼根部から翼端部までの長さが 6m となっている．



図 2.1 供試体の状態（下面外版）

2.2.2 VaRTM 成型法

今回の試験で用いた 6m 翼供試体は，VaRTM 成型法により作成された．そこでここでは VaRTM 成型法について説明をする^[18]．この成型法は，成型型の上に積層した強化繊維基材（ガラス繊維やカーボン繊維など）を，プラスチックフィルムなどに封入して真空吸引した後に，液状樹脂を注入・含浸して硬化させる FRP 部材の成型方法である．

この成型法の特長として，オートクレーブ（圧力釜）などの大掛かりな設備が不要であること，大型構造物の一体成型が容易であること，そして有機溶剤の揮発が少なく作業環境が良いことが挙げられる．また，従来まで FRP 構造物の成型方法として多用されているハンドレイアップ工法と比較すると，繊維含有率が高くボイド含有率が低い高品質の FRP を成型できるという特徴がある．VaRTM 成型法の模式図を図 2.2 に示す．

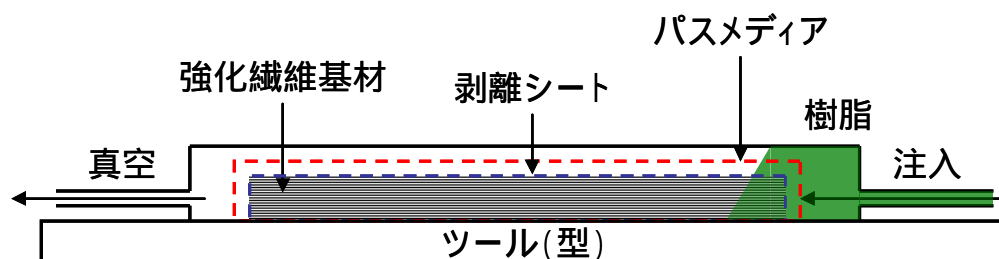


図 2.2 VaRTM 成型法模式図

2.3 光ファイバネットワークの貼付け

2.3.1 翼供試体内部へのポリイミド光ファイバの貼付け

前章で示した翼供試体の内板の上面，下面にポリイミド光ファイバの貼付けを行った．貼付け位置および貼り付け状況を以下の図に示す．ポリイミド光ファイバは内板のストリッガーに沿って設置されている．この貼り付け作業は，株式会社レーザックにより行われた．

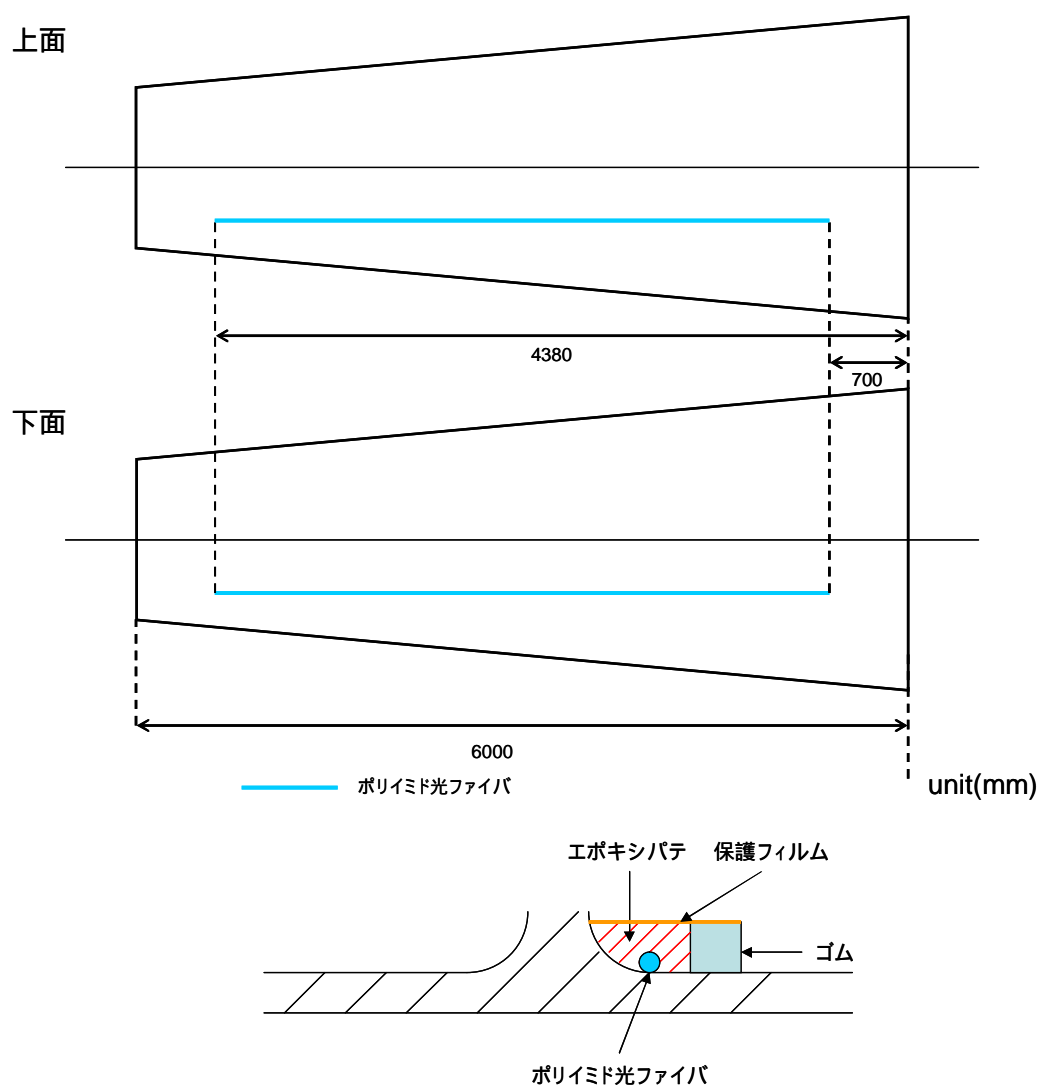


図 2.3 ポリイミド光ファイバの貼り付け模式図

2.3.2 テープ式光ファイバについて

今回の検証には前節のポリイミド光ファイバに加え、テープ式光ファイバを導入した。このテープ式光ファイバはPIフィルム、粘着層、光ファイバにより構成される。図2.4にテープ式光ファイバの模式図を示す。テープ式光ファイバの接着方法は、接着側である供試体の表面を紙やすりでめがきし、アルコールで十分に拭いた上で、テープ式ファイバの下面粘着部を圧着していく。この約24時間後には、供試体と十分に固定される。

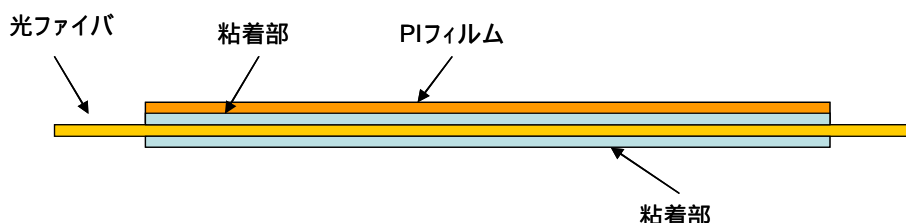


図 2.4 テープ式光ファイバ模式図

2.3.3 テープ式光ファイバの追従性試験

テープ式光ファイバの接着性を実際の供試体の表面に近い供試体で事前に確認するため、検証試験を行った。検証試験には長さ1000×幅25×厚さ7mmのCFRP梁供試体を用い、表面にテープ式光ファイバ、および3点のひずみゲージを図2.5のように配置した。各センサは梁の曲げ方向に対して引っ張り側の表面に設置した。試験方法は、供試体の片端をクランプし、片持ち梁の曲げ試験を行った。クランプした状態での供試体の長さは850mmとなった。荷重条件は、 $x=850\text{mm}$ の位置に集中荷重を与え、 $+y$ 方向へ a)44mm, b)90mmの変位を与えた。試験は各条件により検証A～Cまで3回行った。

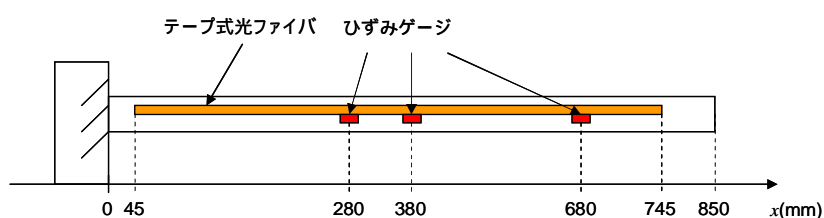


図 2.5 テープ式光ファイバ検証試験供試体概要

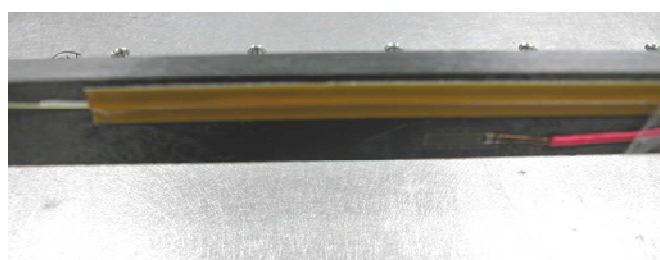


図 2.6 テープ式光ファイバの供試体への貼り付け状態

検証 A

検証 A では，テープ式光ファイバを圧着後，先ほど示した条件での曲げ変形を与え，PPP-BOTDA システムによりひずみ分布の計測を行った．このとき得られた分布ひずみデータと，ひずみゲージによる値を図 2.7 に示す．この結果から，最大ひずみが生じる固定端部 ($x=0$) に近くなるほど妥当なひずみが得られておらず， $x=45\sim 350\text{mm}$ の範囲では分布形状が追従されていないことが分かる．一方で， $x=400\sim 745\text{mm}$ の範囲においては，ひずみゲージとほぼ同じ値でのひずみ勾配が得られていることが分かる．これより，圧着のみの貼付け状態では，ファイバ端部から 350mm 程度の範囲においてひずみ追従性が悪くなることが分かる．その一方，貼付け長が長ければ構造中央部においては妥当なひずみ計測が可能であることが示された．

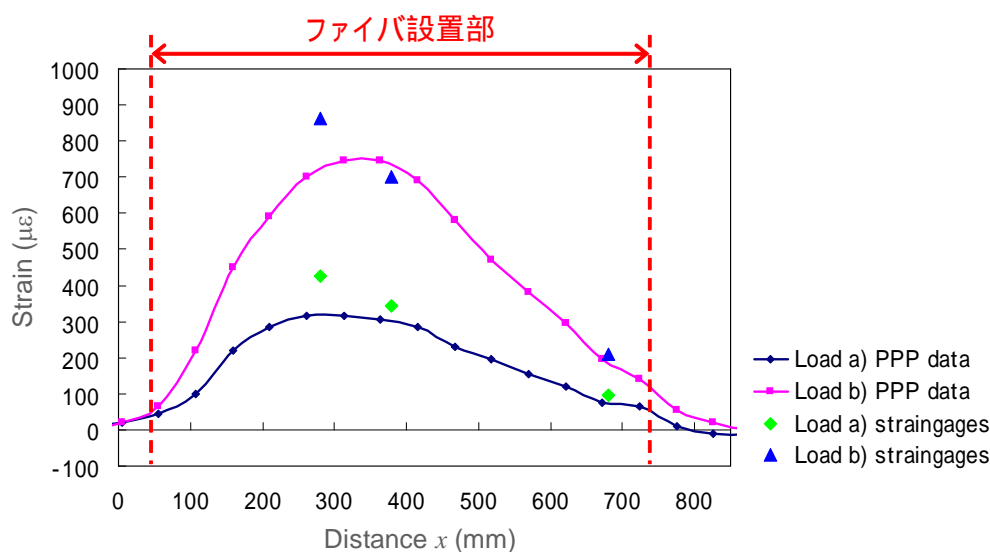


図 2.7 検証 A における PPP-BOTDA とひずみゲージによる結果

検証 B

検証 A で示したように，圧着したテープ式ファイバの端部では妥当なひずみ値を得ることが出来なかった．そこで検証 B ではこの原因として，テープ式光ファイバの構造に着目した．テープ式光ファイバは前節で示したように，PI フィルム，粘着層，光ファイバと剛性の異なる材料が組み合わさった構造となっている．このような構造では各々の層に生じる内部ひずみは等しくなるが，内部応力は異なる値となる．しかしテープの端部においてはこれらの応力が開放され，内部応力を緩和しようとする．そしてこれに抵抗するように，層間の接着部では反力が生じ，各層の剛性差が大きくなる．それに伴い，内部応力の差が大きくなっていく．すると端部の応力開放に対する層間の反力差も大きくなるため，供試体のひずみ分布とは異なるひずみ分布がテープ式光ファイバの各層に生じ，ひずみの伝達

性に影響を与えると予想される．そこで本検証では，ひずみの伝達性の影響を排除することを試みた．その方法は，PI フィルムの層に 10~15 mm 間隔で切れ目を入れ，PI フィルム層に生じる応力を細かく開放することで，下層の粘着層への影響を軽減できると考えた．図 2.8 に本検証で得られたひずみ分布とひずみゲージの値を共に示す．図中では荷重 b) について検証 A で得たデータとの比較を行っている．この結果，端部における大幅な改善は見られなかったが，150mm~300mm の部分において追従性の若干の改善が見られ，特に図中矢印部のサンプリング点においては，約 $100\mu\epsilon$ 程の向上が見られたことが分かる．このことから PI フィルムに切れ目を入れたことにより，応力の解放が行われたということが出来る．

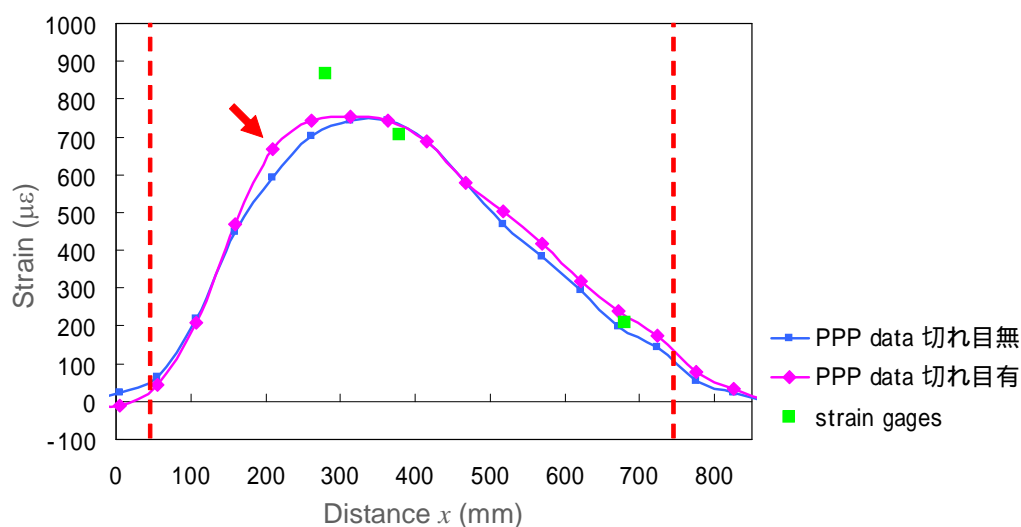


図 2.8 検証 A と検証 B の比較

検証 C

検証 C ではさらに光ファイバ端部での追従性向上を図るため，光ファイバ素線を両端で接着材により固定し，分布形状の変化を検証した．光ファイバ素線の両端を瞬間接着剤によって約 15mm 固定し，検証 A，B と同様の曲げ試験を行った．計測されたひずみ分布を図 2.9 に示す．ここでは，先ほどの検証 B におけるデータと分布形状を比較している．この結果から分かるように，検証 B と比べ光ファイバ端部を接着剤で固定することにより， $x=150\sim 745$ mm において追従性が向上し，ひずみ分布が妥当に再現されていることがわかる．これは光ファイバ端部を接着したことにより，供試体からのひずみ伝達性が向上したためと考えられる．

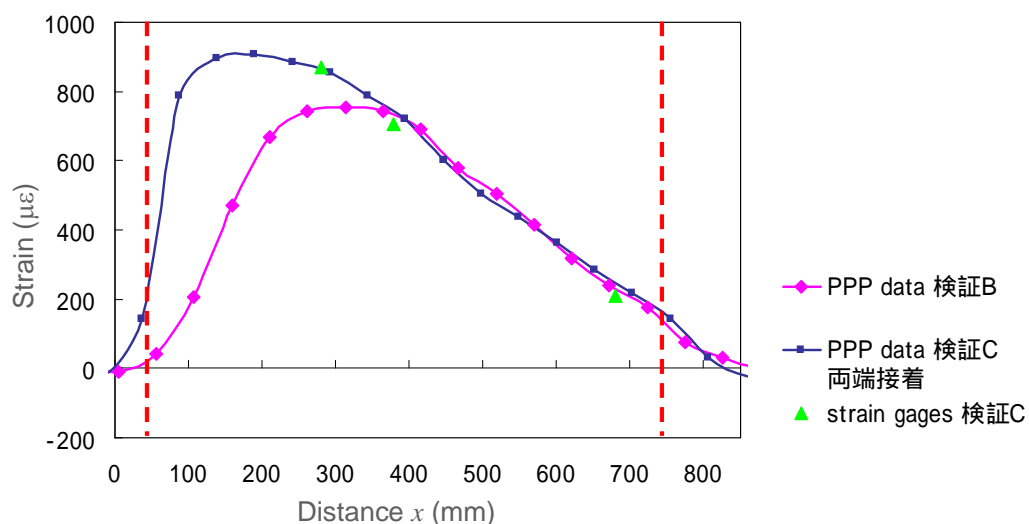


図 2.9 検証 B と検証 C の比較

2.3.4 翼供試体外板への貼付け

前節で示したテープ式光ファイバを供試体外板へ貼り付けた。光ファイバは供試体の下面外板に 2 本貼り付けた。その貼り付け位置、および長さは図 2.10 に示すとおりである。供試体の中心線から 230mm の位置にテープ式ファイバを設置し、各ファイバの長さは 4300mm とした。前節での各検証の結果から、光ファイバ端部での追従性を向上させるため、端部を瞬間接着剤により固定した(図 2.11 左)。さらに光ファイバの素線部を保護するため、接着剤で固定した上からポリウレタンシートにより保護を行っている(図 2.11 右)。

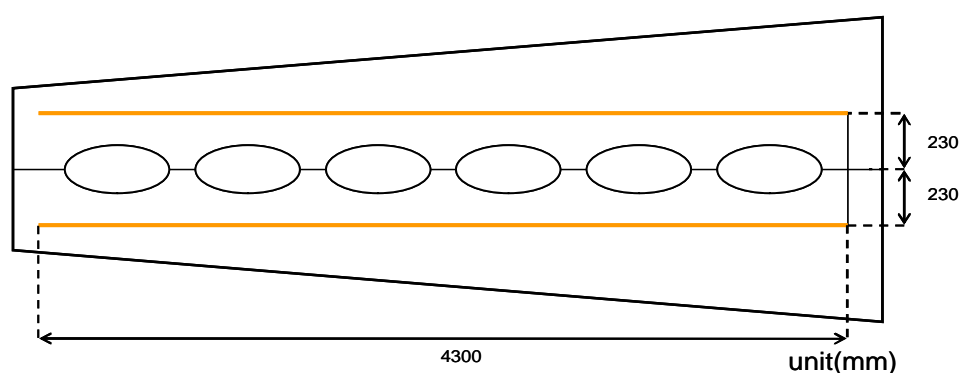


図 2.10 テープ式光ファイバ貼り付け模式図

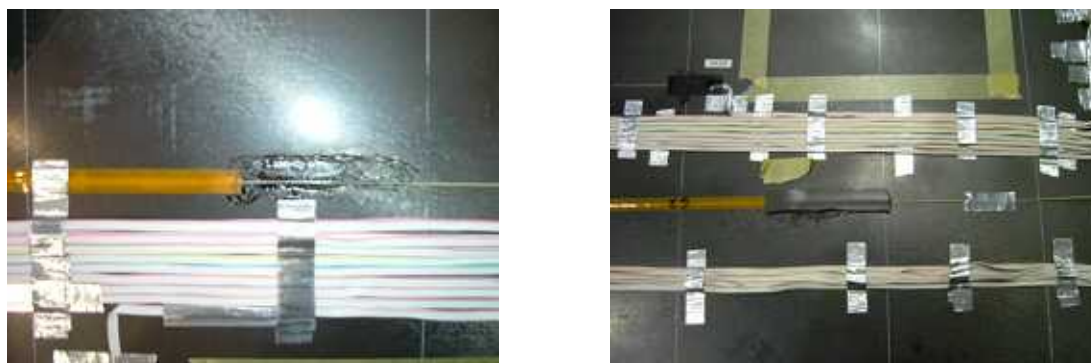


図 2.11 光ファイバの翼供試体への貼り付け状態

2.4 翼供試体曲げ試験におけるひずみ分布計測

2.4.1 曲げ試験の概要

曲げ試験の荷重条件は航空機の飛行中の荷重を模擬し、片持ち梁下曲げ試験、負荷は運用で想定される最大荷重である制限荷重の 40%および 80%の荷重を与えた。図 2.12 には今回の試験において翼供試体に荷重を与えた位置を示している。この図で右端は固定されており、四箇所から荷重を加えた。図 2.13 には試験中の様子を示した。

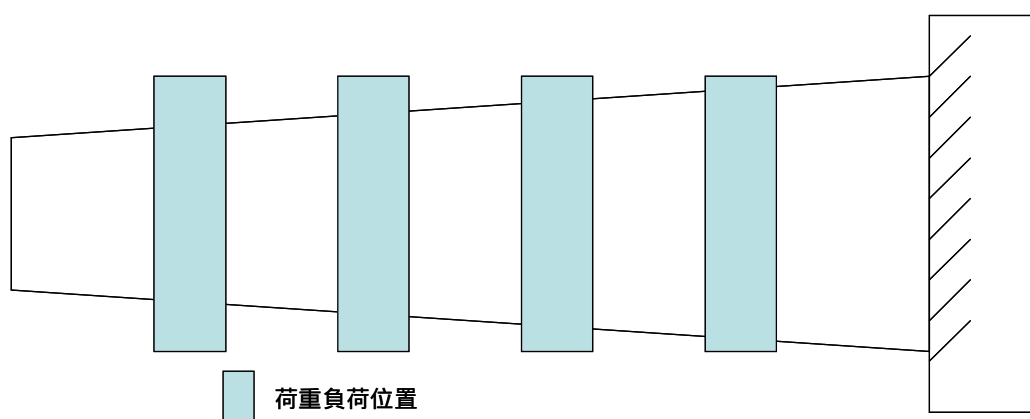


図 2.12 荷重位置模式図



図 2.13 試験中の様子

2.4.2 光ファイバネットワークの構成

今回の試験で設置した光ファイバネットワークの概要を図 2.12 に示す。この図のように、各計測用光ファイバを融着し一つの光ファイバネットワークを構築した。すべての箇所を融着後、光強度のロスのパワーメーターにより確認したところ、その数値は0.83dBとなり、光ファイバネットワークにおいて十分に導通が行われていることを確認できた。なお、PPP-BOTDA システムのポンプ光は内板上面ポリイミド光ファイバ側から、プローブ光は下面外板のテープ式光ファイバ側から入力した。

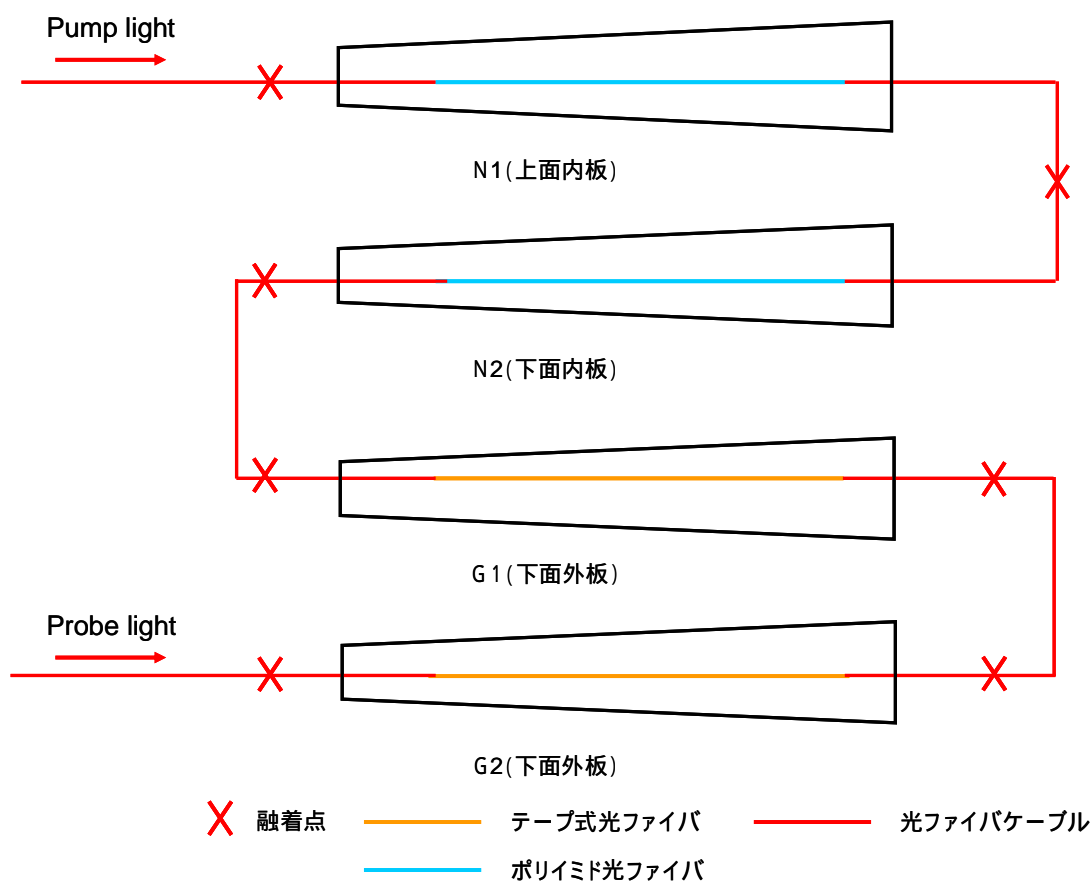


図 2.14 光ファイバネットワークの構成

2.4.3 分布ひずみデータの取得結果と考察

光ファイバネットワークに PPP-BOTDA システムを接続し、得られた計測結果を図 2.16 に示す。この結果は、0%荷重を基準として、40%荷重（上昇・下降）、80%荷重における中心周波数の変化をグラフに示したものである。なお各条件におけるデータは、2 回計測した平均値を使用した。この図より、翼供試体に設置した N1、N2、G1、G2 の各ファイバの位置において、周波数が上方、下方へシフトしていることが分かる。ここで、N1 のファイバは内板の上面に設置されているため、このファイバに対してのみ圧縮荷重がかかっており、他の 3 ラインに対しては引張り荷重が働いている。この図からわかるように、40%荷重の上昇中と下降中については、多少の差はあるもののその差は小さく、ほぼ同じ値で結果が得られていることがわかる。次に、図 2.17~20 に各々の光ファイバについて各荷重条件におけるひずみ計測結果を示した。この結果を見ると、PPP-BOTDA による計測結果では特に N2 の結果において、計測結果に段差が付いていることが分かる。この段差はアクセスホールによる影響を受けているものと考えられる。アクセスホール近傍においては応力集中が生じるため、それによりひずみ分布に変化が生じると考えられる。

次に，供試体下面外板に設置されたひずみゲージと，2ラインのテープ式光ファイバ(G1・G2)でのひずみ計測値の比較を行った．なお，今回比較に用いた翼供試体下面外板に設置されたひずみゲージとテープ式光ファイバの位置関係を図 2.15 に示した．ここで図中の数字は，ひずみゲージの番号を示している．

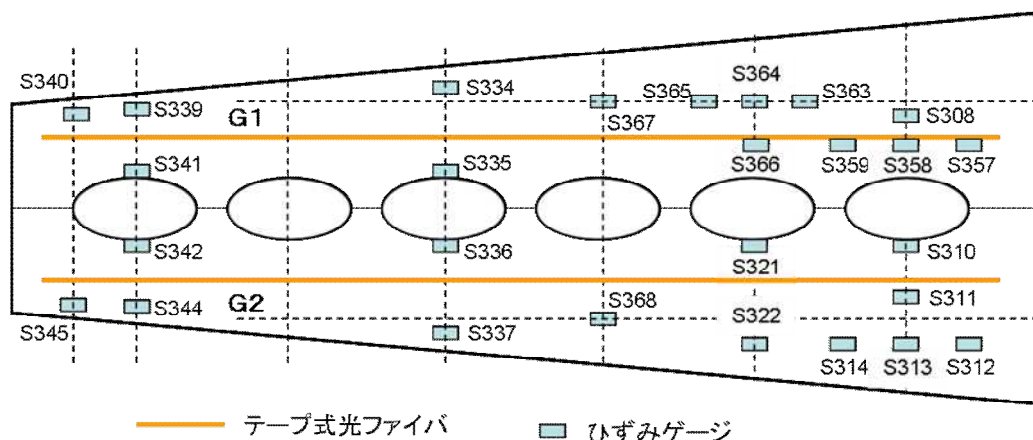


図 2.15 テープ式光ファイバとひずみゲージ設置位置

これらのひずみゲージから得られた計測結果と，N1，G1，G2におけるPPP-BOTDAによる計測結果を比較したものを，図 2.21~27 に示す．これらの図においては， x 座標を翼供試体の翼根部を 0 として，翼供試体の位置に変えている．また，この結果図内において，ひずみゲージのデータを中心側と外側に分けて表示している．これは，図 2.15 からわかるように，テープ式光ファイバを境に，供試体の中心側，または外側にひずみセンサは設置されているので，このように分けて示している．また図中の点線部は，光ファイバの貼り付け部分を表したものであり，数字は図 2.15 と同様に，ひずみゲージの番号を示している．図 2.21 は N1 における比較結果であるが，ポリイミド光ファイバはストリンガーに沿って設置されているのに対し，ひずみゲージはスキン部に設置されている．そのため一概に比較は出来ないが，おおむね良好にひずみを追隨していると考えられる．G2 の PPP-BOTDA による計測結果は，中心側と外側のひずみセンサの計測値の間に入っており，ひずみ分布を良く追隨できていると考えられる．一方，G1 の計測結果を見ると，どの荷重条件においてもひずみゲージ S308 の計測値が，PPP-BOTDA システムによる計測値よりも大きくなっていることが分かる．さらに G1 と G2 の計測したひずみ分布形状を見比べてみる．図 2.27，2.28 に，40%荷重の上昇中と 80%荷重における G1・G2 の計測結果の比較図を示した．この図を見ると，各ラインにおいて計測されたひずみ分布形状は，大体において一致をしていることが分かるが，G1 の位置 700mm~1500mm において，分布形状がきれいに得られておらず，G2 の計測結果とも差が生じていることが分かる．この考察として次のことが考えられる．それはテープ式光ファイバの供試体からのはがれである．G1・G2 は同じ条件で圧着を行い，端部を瞬間接着剤により固定している．そのため翼根部にお

いてのみこのような差が現れているということは、G1 の翼根部において、何らかの作用によりテープ式光ファイバが供試体からはがれ、ひずみの伝達性が悪くなったからではないかと考えられる。

2.5 本章のまとめ

本章では運用状態における変形モニタリング手法の検証として、JAXA にて行われた VaRTM6m 主翼実大試験において、ポリイミド光ファイバとテープ式光ファイバを設置し、PPP-BOTDA システムによる計測を行った。その実験結果は、付近に設置されたひずみゲージの計測値との比較を行ったところ、概ね良好に追従して得られていることが分かった。

一方で、テープ式光ファイバの G1 における計測結果では、翼根部においてひずみ分布の形状ががたつき、ひずみゲージの値との比較においても、その追従性が低くなっていることが確認できた。その原因として、テープ式光ファイバの供試体からのはがれが生じたのではないかと考察した。これは、テープ式光ファイバを実構造物に導入する際の、一つの課題が見つけられたともいうことが出来る。

さらにこの試験においては、このような大型の構造において、1 系統のセンサで一度の計測によりこのように大量のひずみデータを取得することが出来るということの利点も評価することが出来た。

以上の結果から、運用状態での PPP-BOTDA システムによる変形状態モニタリング手法の検証は十分おこなえたといえる。

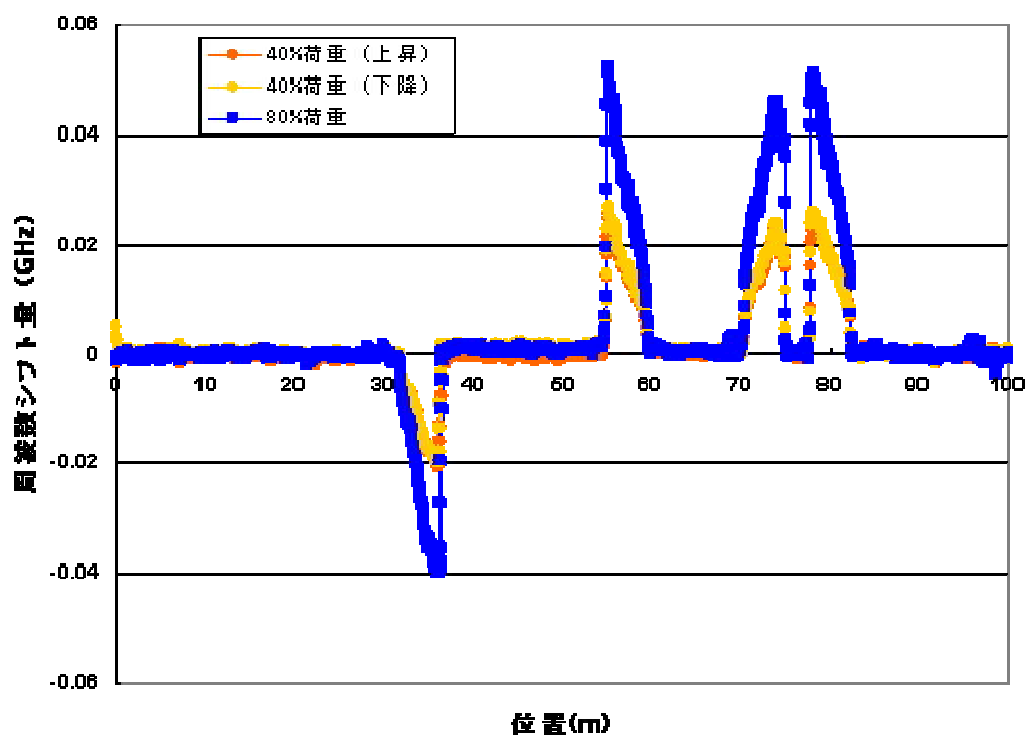


図 2.16 各荷重条件における周波数シフト量

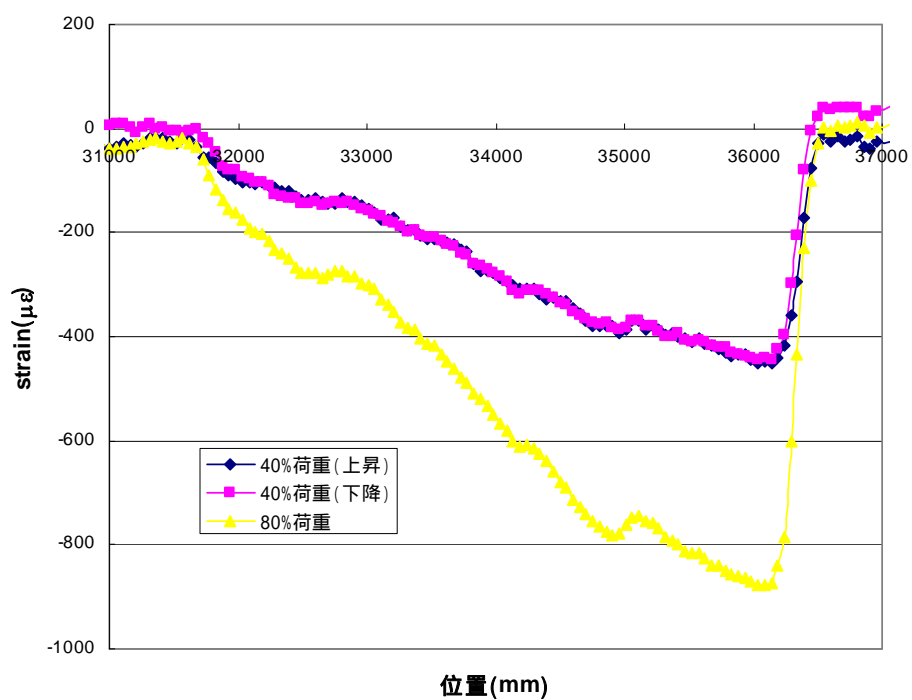


図 2.17 各荷重条件における PPP-BOTDA によるひずみ計測結果 (N1)

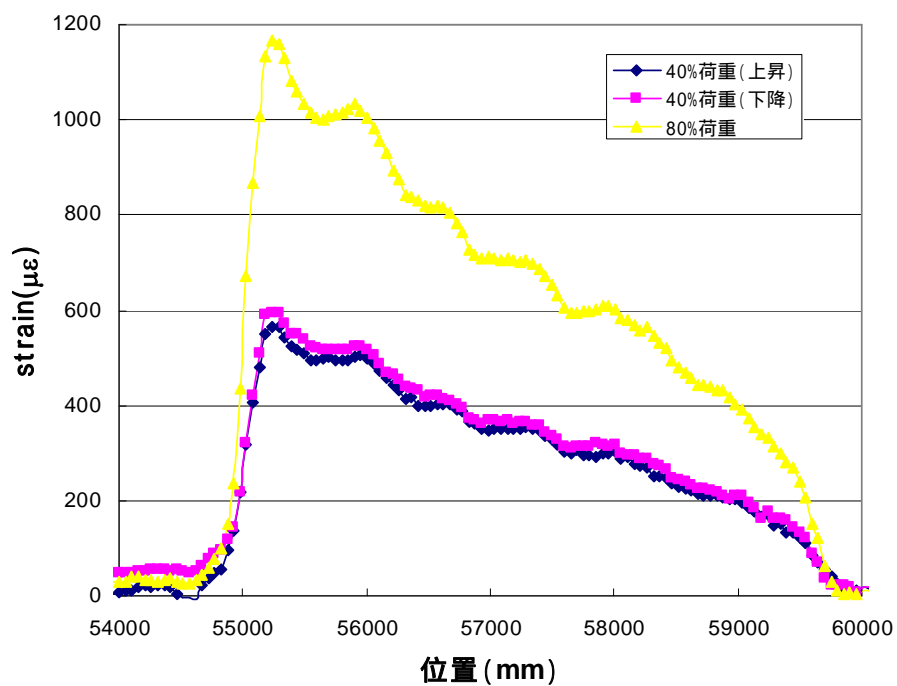


図 2.18 各荷重条件における PPP-BOTDA によるひずみ計測結果 (N2)

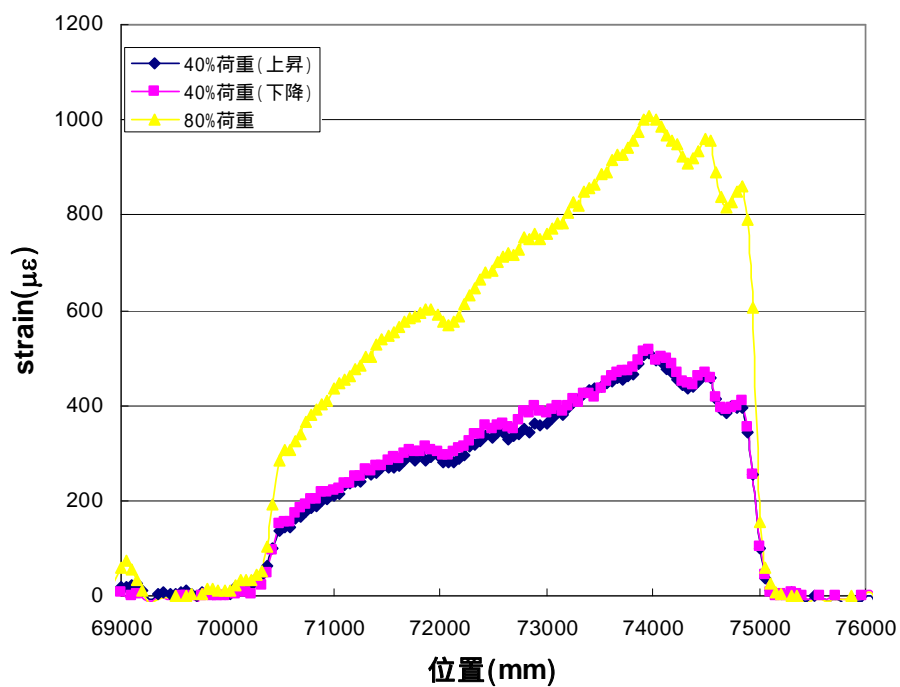


図 2.19 各荷重条件における PPP-BOTDA によるひずみ計測結果 (G1)

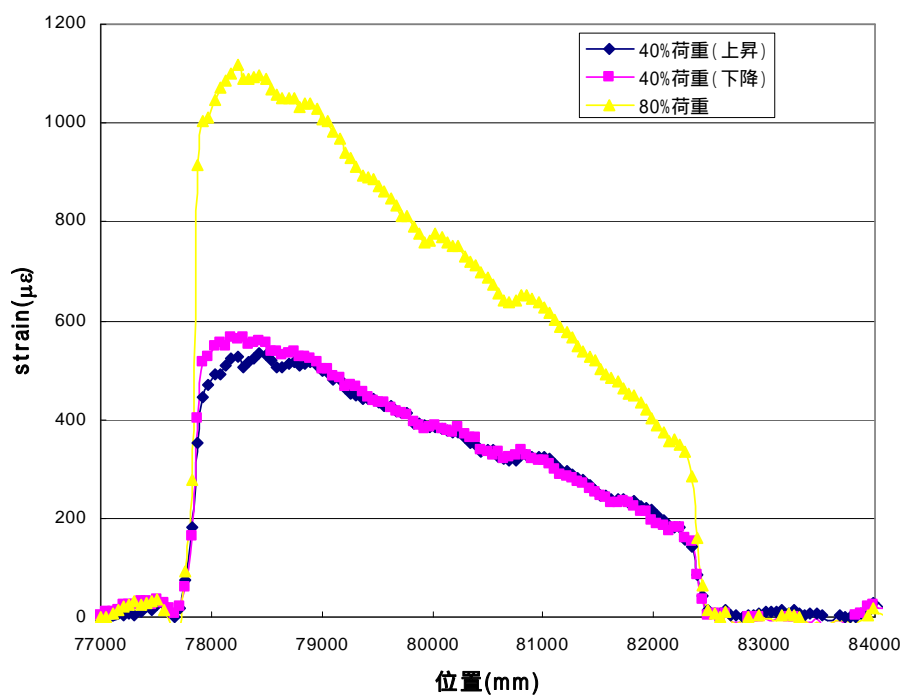


図 2.20 各荷重条件における PPP-BOTDA によるひずみ計測結果 (G2)

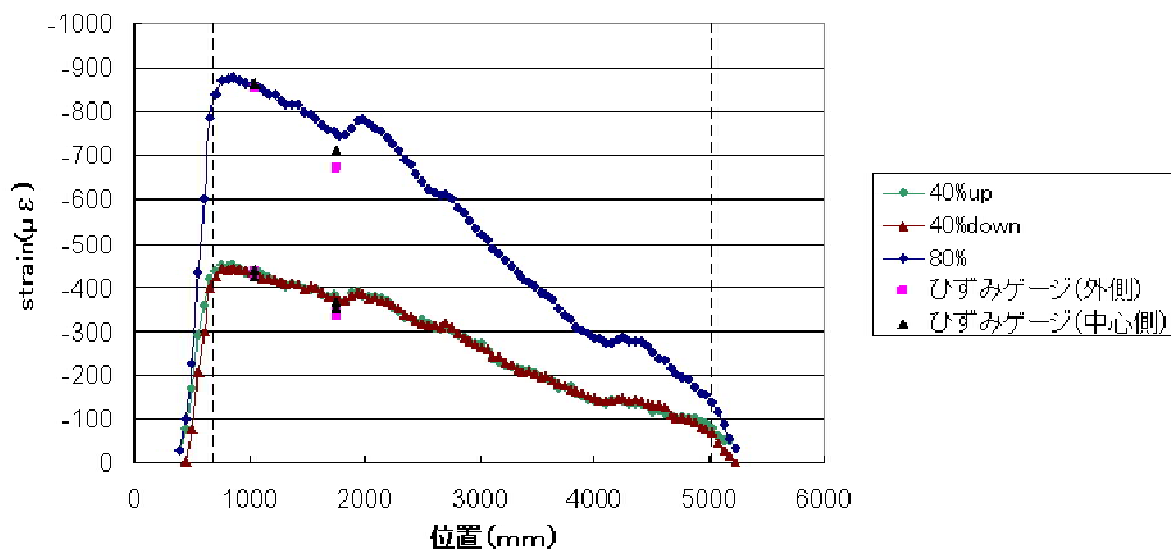


図 2.21 PPP-BOTDA とひずみゲージの計測結果比較 (N1)

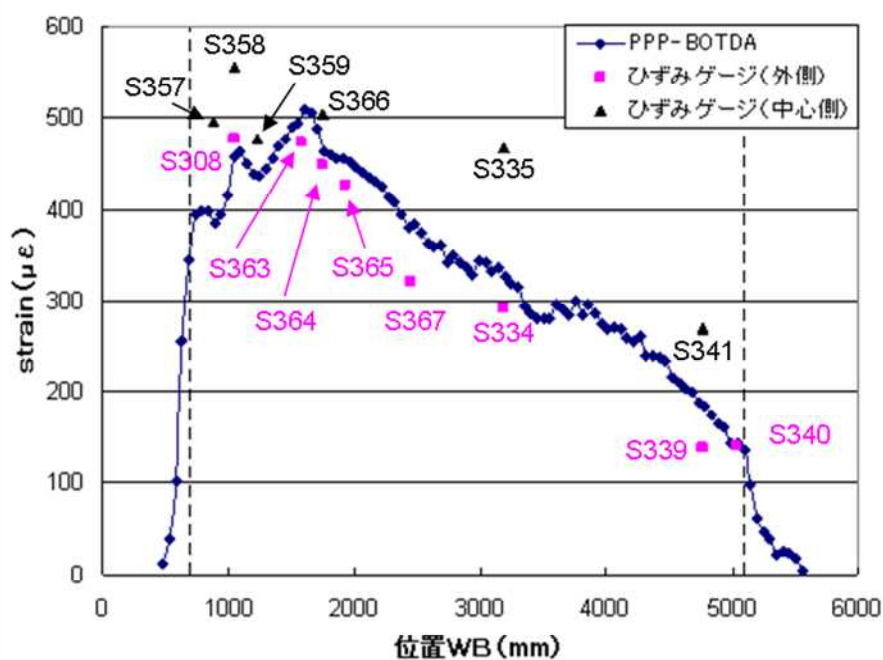


図 2.22 PPP-BOTDA とひずみゲージ計測結果比較 (G1/40%荷重上昇中)

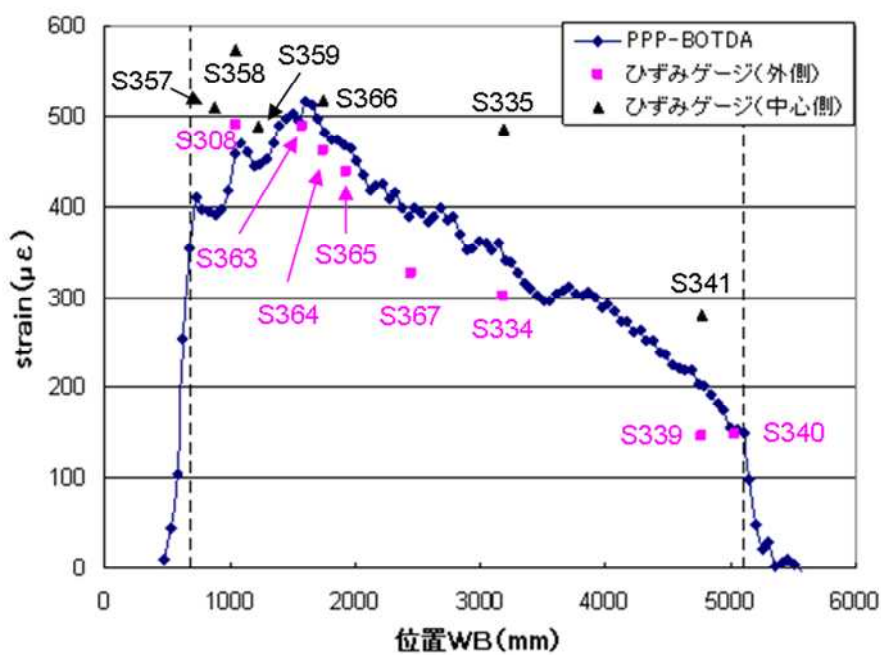


図 2.23 PPP-BOTDA とひずみゲージ計測結果比較 (G1/40%荷重下降中)

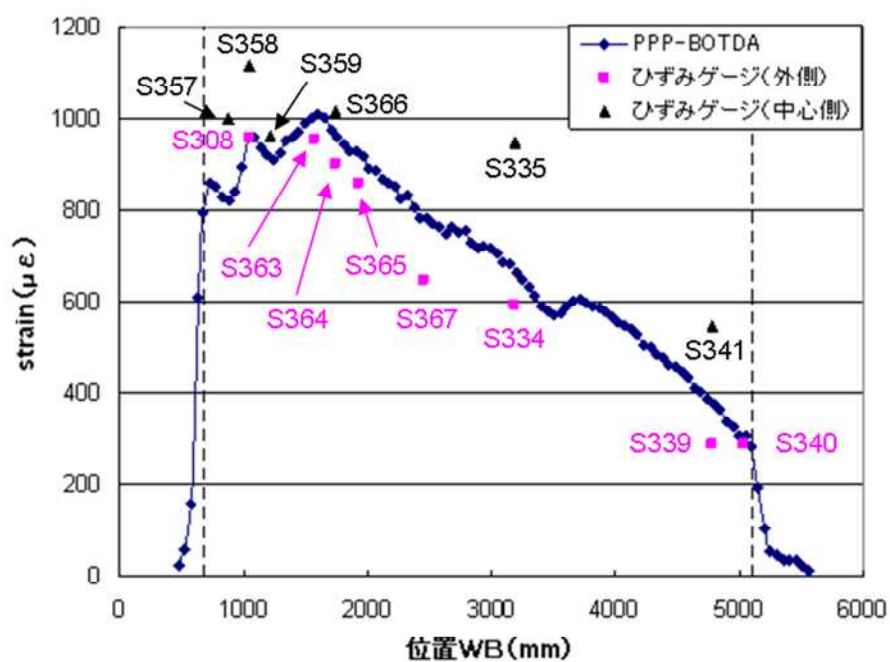


図 2.24 PPP-BOTDA とひずみゲージ計測結果比較 (G1/80%荷重)

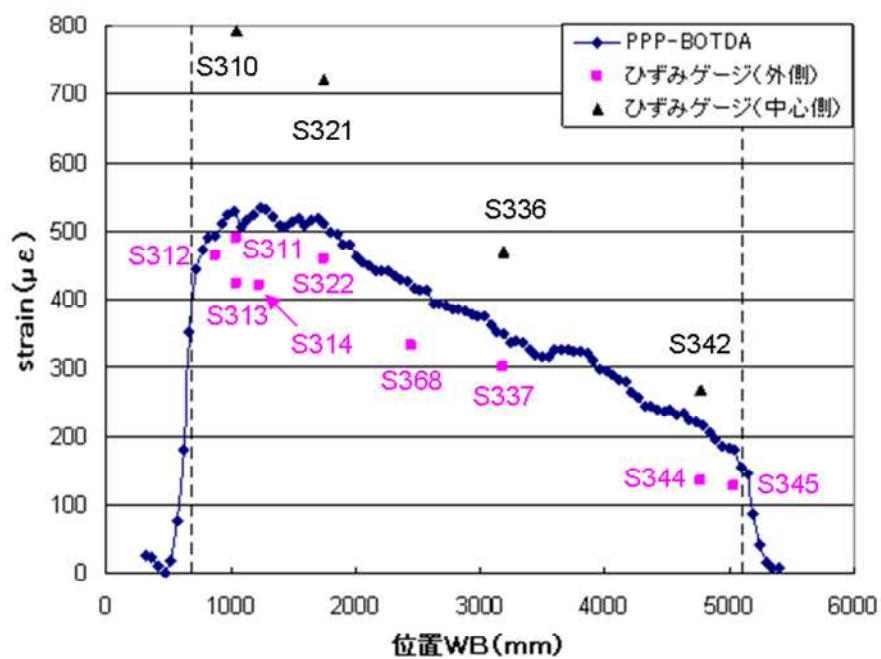


図 2.25 PPP-BOTDA とひずみゲージ計測結果比較 (G2/40%荷重上昇中)

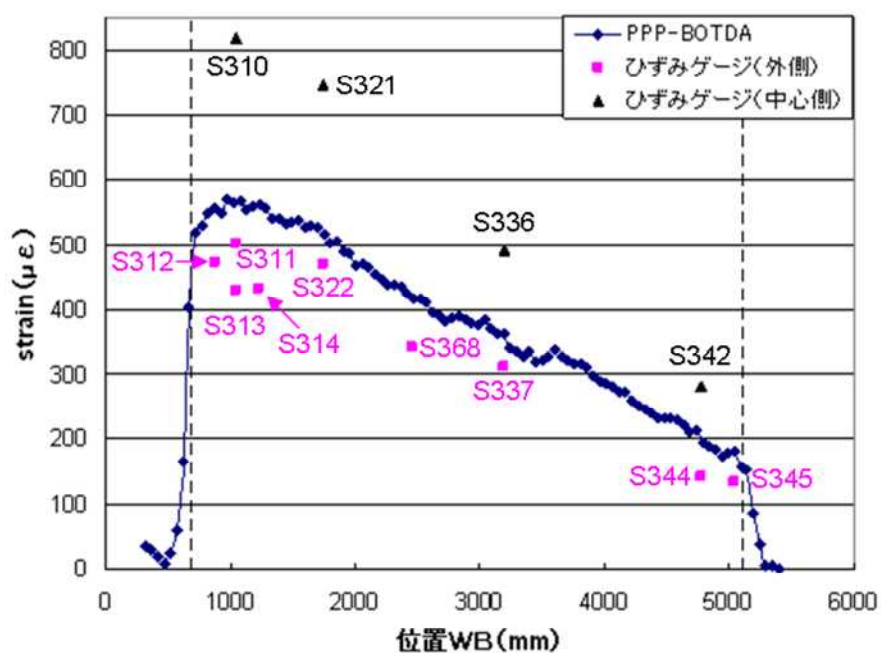


図 2.26 PPP-BOTDA とひずみゲージ計測結果比較 (G2/40%荷重下降中)

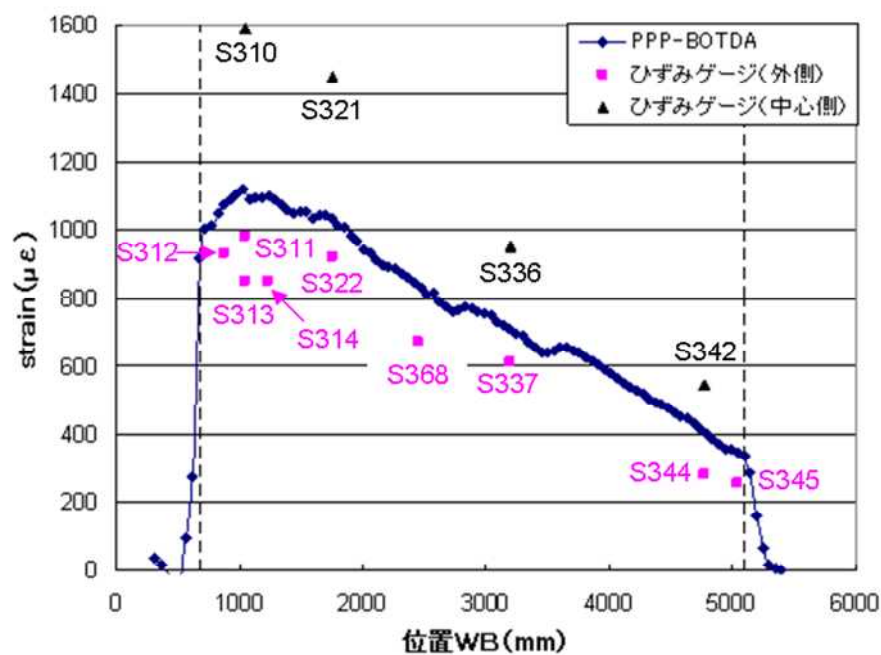


図 2.27 PPP-BOTDA とひずみゲージ計測結果比較 (G2/80%荷重)

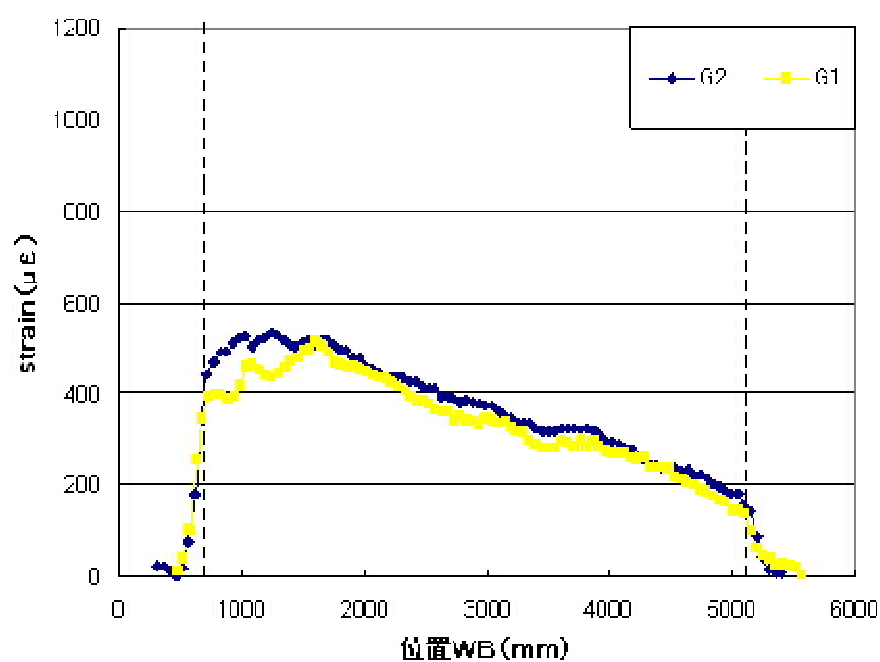


図 2.28 G1・G2 計測結果比較 (40%荷重上昇中)

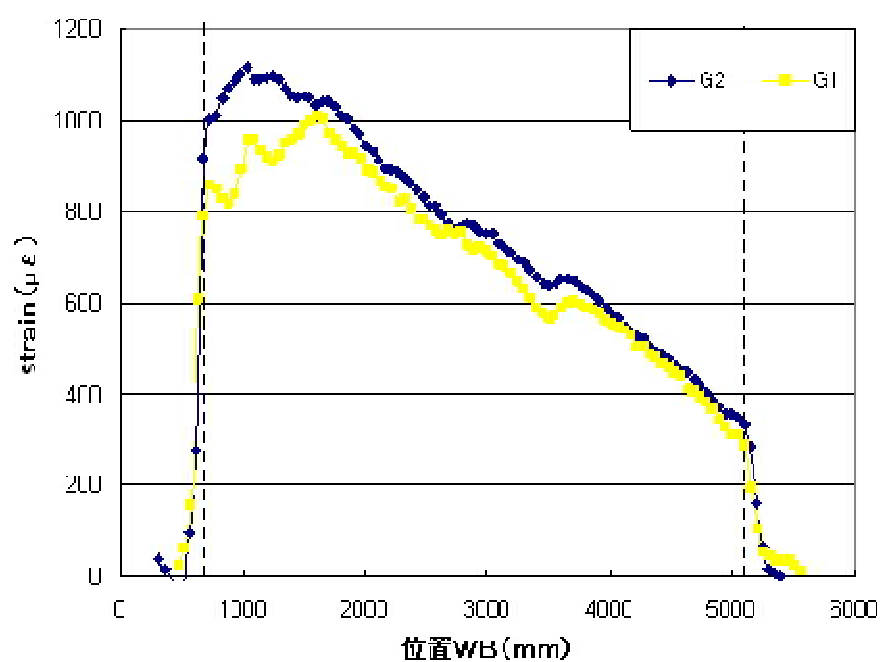


図 2.29 G1・G2 計測結果比較 (80%荷重)

第 3 章

逆対称積層板の変形に対するひずみ分布計測

3.1 第 3 章概要

CFRP 構造体の製造時の問題点として、熱残留ひずみの影響があげられる。炭素繊維と樹脂においてはその熱膨張係数が異なるため、積層プロセスでの製造精度によっては、構造体において変形を生じることがある。そこで本章からは、この製造時の問題に着目し、製造時の変形モニタリング技術の検証を行っていく。まず本章では、分布型の光ファイバセンサである PPP-BOTDA システムを用い、逆対称積層板内に埋め込んだ光ファイバネットワークから変形によって生じるひずみ変化の計測を行い、その結果と考察を示す。はじめに本研究で用いる逆対称積層板について示し、続いて実際に作成した逆対称積層板の供試体についての説明をする。そして計測された分布データの結果を示し、それについての考察を述べる。

3.2 逆対称積層板とは

逆対称積層板は、本来炭素繊維方向を板の中立面に対して対称に積層するものを、非対称に積層し成型を行うものである。その積層構成を対象積層板と比較して示す。逆対称の積層構成では、図中点線の中立面に対して、面外方向における熱膨張係数の非対称性から、樹脂硬化後の降温時における熱収縮によって特徴的な変形を示す。図 3.1 に逆対称積層板の示す各変形モードを示す。

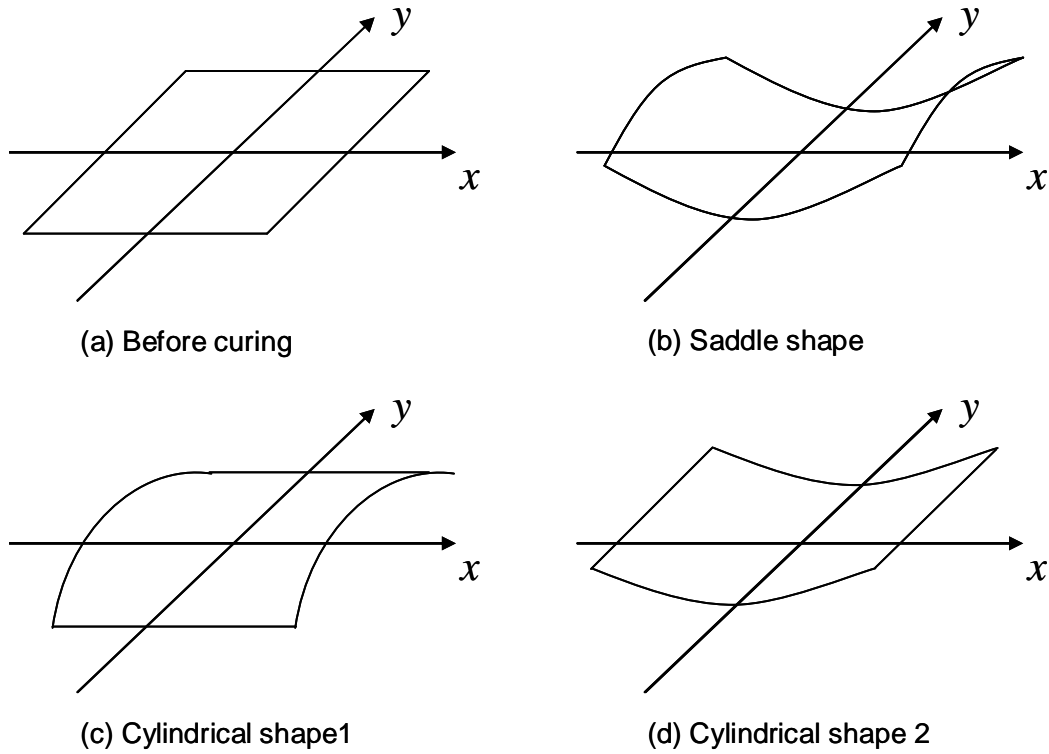


図 3.1 逆対称積層板の示す各変形モード

積層板の面外方向変位を古典積層理論を元にして計算すると，図中(b)のサドル型変形を示すことが知られている．しかし実際には，図中(c)，(d)のシリンダー型変形も発生する．M.W.Hyer は種々の逆対称積層板の硬化後の形状に関してこれらを確認するとともに，これらの形状は古典積層理論では表せないと指摘した．そして，正方形の $[0_n/90_n]_T$ の積層板に対して，ひずみ - エネルギー停留問題として扱うことで変形モードに関する解析を行った^[19]．さらに A.Hamamoto 等は温度との関係についてさらに発展させた解析を行い，実験値との良い一致も見出している^[20]．さらに構造の形状が温度変化によって変化するという点に着目し，スマート材料としての適用を目指した研究も行われている^[21]．

本検証では，Hyer の研究において考察されている逆対称積層板のひずみ - 変位関係式や解析結果を参照しながら検証を進める．

3.3 供試体の概要

本検証では，正方形の逆対称積層板を作成し，内部に埋め込んだ光ファイバネットワークから分布ひずみデータを取得した．供試体の大きさは $410\text{mm} \times 410\text{mm}$ ，積層構成は $[0_4 90_4 0_4 90_4]$ のサドル型， $[0_8 90_8]$ のシリンダー型の二つのモードを示す供試体を作成し，各モードについて計測を行った．光ファイバネットワークの埋め込み位置は図 3.2 に示す．

面外方向の z 方向に関しては，中立面からの距離が等しくなるよう，1ply/2ply 間および 15ply/16ply 間の 0° 方向に各 5 ラインを埋め込んだ .1ply/2ply 間で取得されるデータを ε_x^{-h} ，15ply/16ply 間で取得されるデータを ε_x^{+h} とする．プリプレグには東レ T700S/2500 を用い，オートクレーブ成型機を使用して成型を行った．

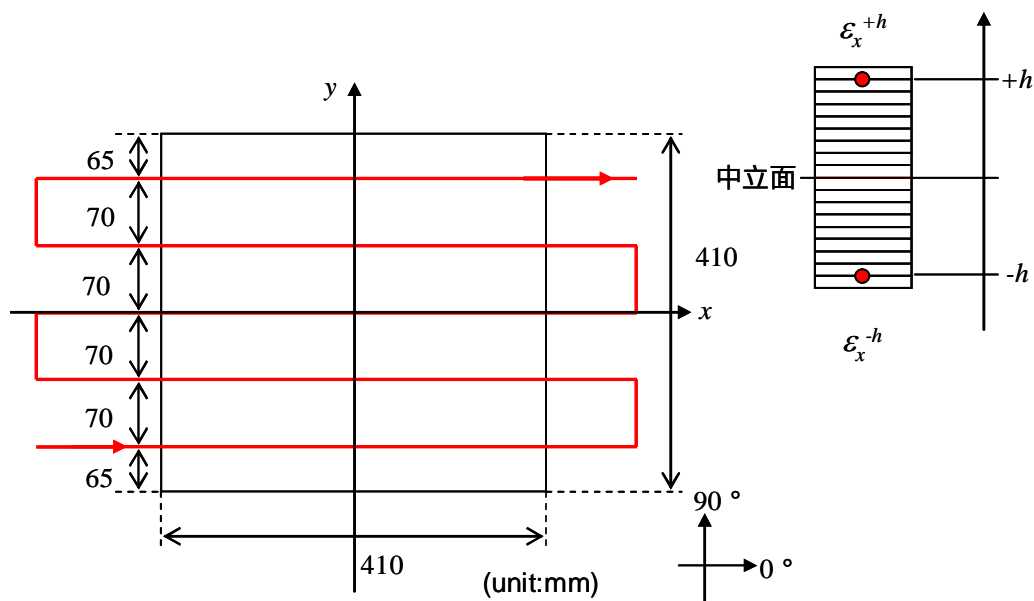


図 3.2 供試体と光ファイバネットワーク

3.4 PPP-BOTDA システムによる計測

前項で示した供試体の積層後，オートクレーブ成型からバッグオフの過程の中で，熱変形により生じる分布ひずみのデータを PPP-BOTDA システムを用いて計測を行った．今回用いた PPP-BOTDA システムでは，空間分解能 10cm，サンプリング間隔 5cm での分布ひずみデータの取得が可能となっている．オートクレーブ成型法は，樹脂を含浸させた繊維のシートであるプリプレグを必要枚数積層し，バックをかぶせた後，真空吸引をし，オートクレーブ内にて加圧・過熱して成型する手法である．この成型中，樹脂を高温で硬化させるため，成型後の構造体にはいくらかの不均一な熱残留ひずみが発生してしまう．そこで，成型により生じるこの熱残留ひずみの影響を無くし，純粋に変形によるひずみ分布の変化のみを得るため，計測を行うタイミングを次のように設定した．まず変形前の状態は，オートクレーブ内で温度が完全に降温し，かつ真空をひいた状態で，供試体に変形を生じさせないようにした時点とした．変形後については常温常圧下に供試体を取り出し，完全に変形を生じた状態での計測を行う．これらの差をとることで，熱残留ひずみの影響を無くし，変形により生じるひずみ変化の計測を行った．なおこのひずみ計測の際に，レーザー変位計測装置での実測変位の計測も合わせて行った．図 3.3 に計測中の様子，図 3.4 には今回用いた計測系の概要を示す．

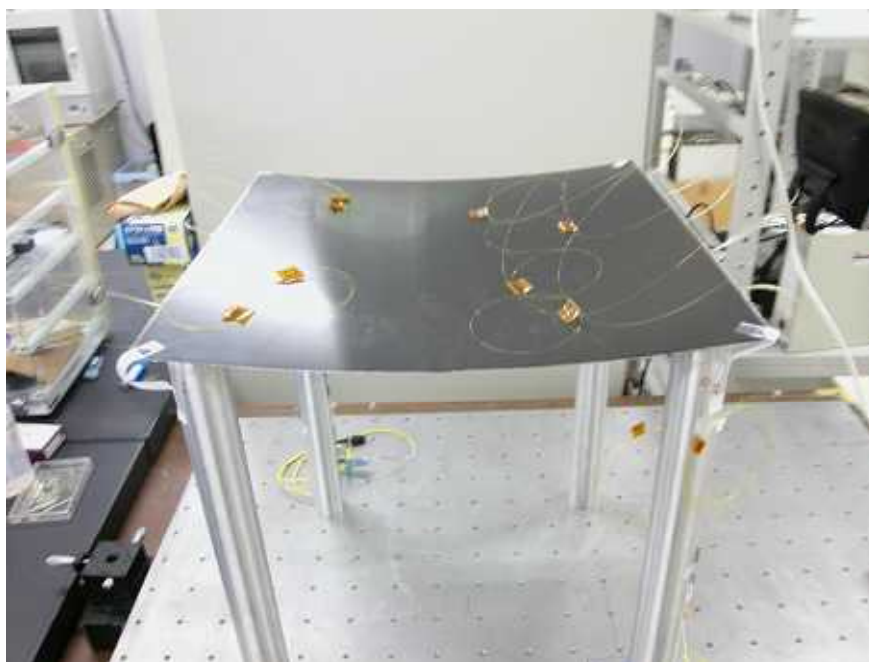


図 3.3 シリンダー型供試体の計測の様子

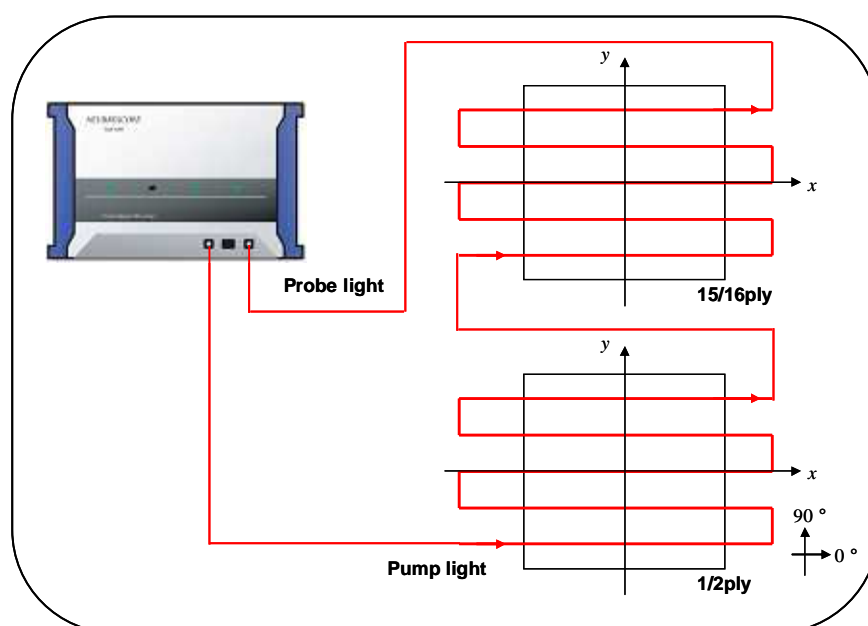


図 3.4 PPP-BOTDA システムによる計測系

3.5 計測結果と考察

図 3.5, 3.6 に今回の実験で得られた PPP-BOTDA システムでの計測による結果を示す。図 3.5 はシリンダー型変形, 図 3.6 はサドル型変形で, それぞれ 1/2ply 間, 15/16ply 間での取得データを示している。埋め込み部分の各 ply 間それぞれ 5 か所において, 中心周波数が変化していることが分かる。これらの計測結果から分かるように, 各埋め込み部においては変形前の状態で, すでにある程度の中心周波数の変化があり, さらに変形後の計測で, 上下方向へと中心周波数がシフトしていることが分かる。この結果から見ると, 変形により生じる中心周波数の変化は, シリンダー型の 15/16ply 間およびサドル型の 1/2ply 間では周波数がマイナス方向へ, シリンダー型の 1/2ply 間およびサドル型の 15/16ply 間ではプラス方向へそれぞれ変化していることが分かる。マイナス方向への変化は圧縮力, プラス方向への変化は引張り力をそれぞれ表している。また, 変形前の状態ですでに周波数の変化が生じているのは, 供試体成型時における熱残留ひずみなどの影響により生じたものである。そこで, 変形後の計測結果から変形前の結果を差し引くことで, 変形により生じる周波数変化量を得ることが出来る。さらに, この周波数変化量を光ファイバ固有の値であるひずみ校正值でわることで, 熱残留ひずみなどの影響を無くし, 純粋に変形によってのみ生じたひずみ変化を取得することが出来る(式(1.3))。なお, サドル型変形の 1ply/2ply 間においては, 光ファイバが一部断線し, 4 ライン分の計測結果しか得られていないことに注意してほしい。

3.6 本章のまとめ

本章では, 成型時に生じる熱残留ひずみによる変形を模擬し, 同じ原理で特徴的な変形を生じる逆対称積層板を用い, 変形により生じたひずみ分布変化の取得を試みた。逆対称積層板の示す二つの変形モードであるシリンダー型, およびサドル型の供試体を作成し, 内部に埋め込んだ光ファイバネットワークから, PPP-BOTDA システムを用いてひずみ分布データを取得した。CFRP 構造物の製造時には, 構造内に不均一な熱残留ひずみが発生してしまうが, 今回の計測ではその影響を無くし, 純粋に変形により生じるひずみ分布の変化を取得することが出来た。

次章では, 本章で計測した逆対称積層板の変形による分布ひずみデータを元に, 逆対称積層板全体のひずみ分布推定と, 変形状態をモニタリングするため変位同定を行っていく。

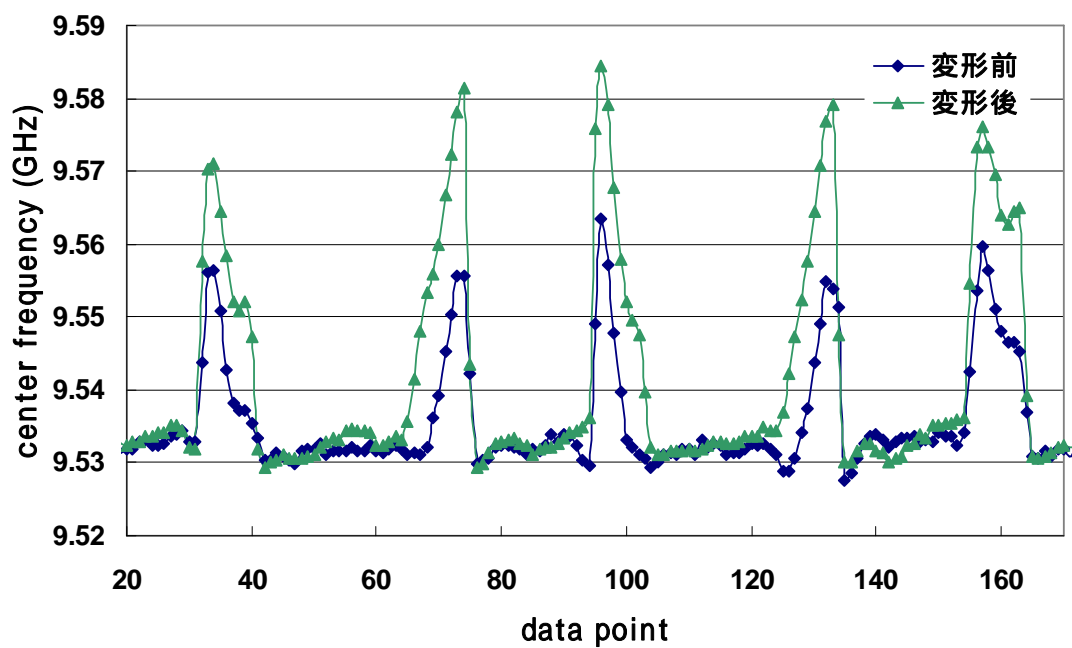
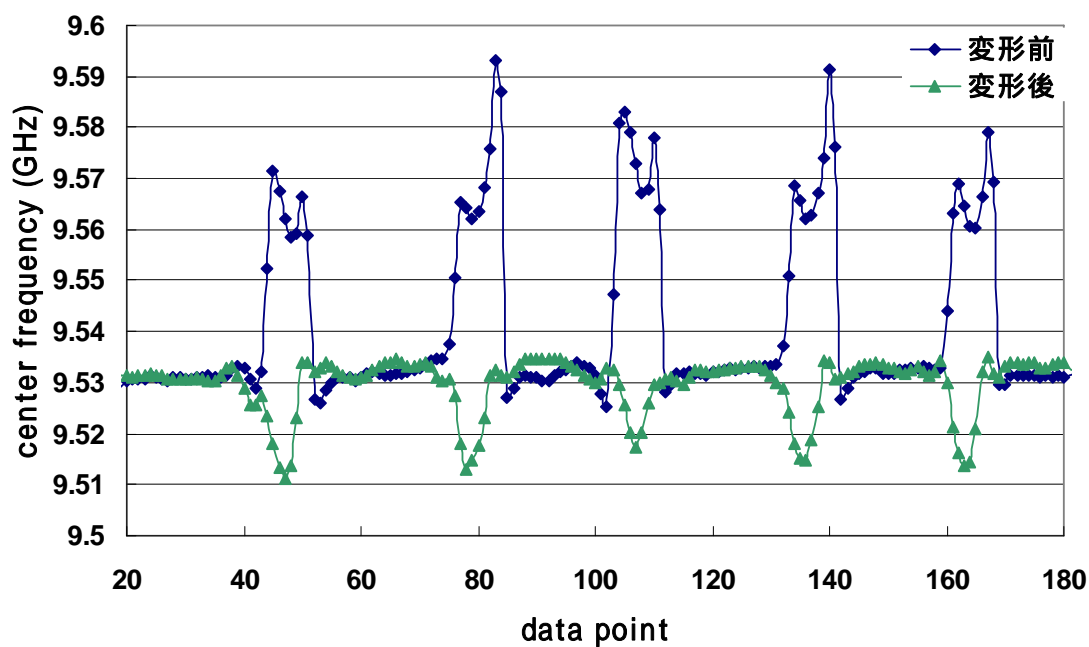
a) 1ply/2ply 間計測結果 (ε_x^{-h})b) 15ply/16ply 間計測結果 (ε_x^{+h})

図 3.5 シリンダー型変形における変形前・変形後の計測結果

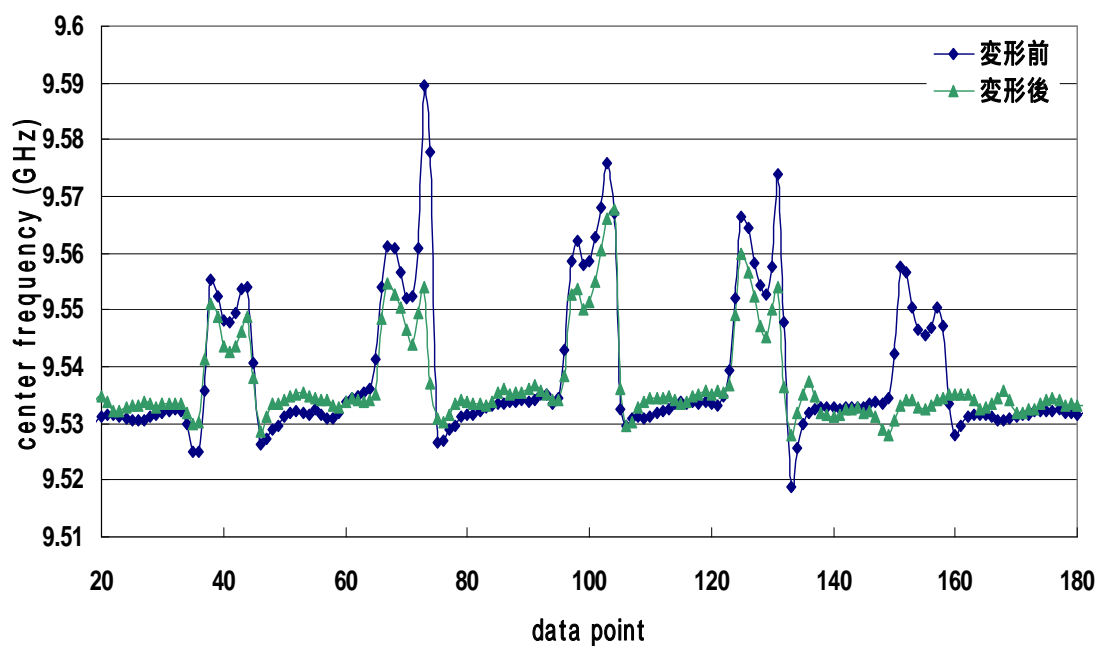
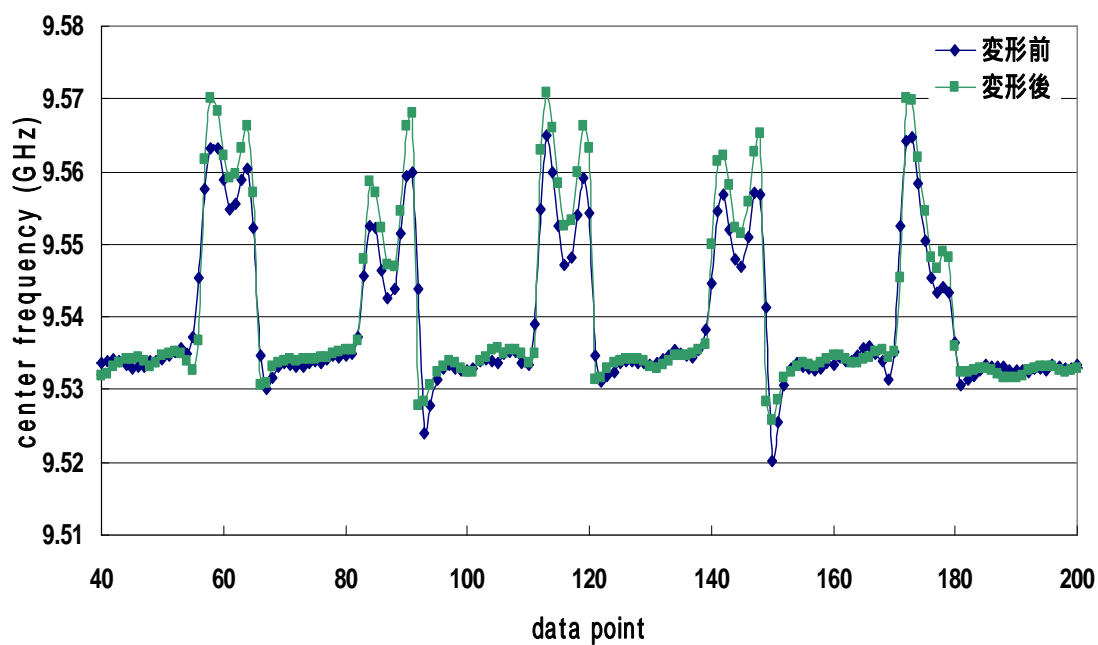
a) 1ply/2ply 間計測結果 (ε_x^{-h})b) 15ply/16ply 間計測結果 (ε_x^{+h})

図 3.6 サドル型変形における変形前・変形後の計測結果

第4章

逆対称積層板のひずみ分布推定と変形モニタリング

4.1 第4章概要

変形モニタリングの手法として、構造のひずみ値から変位状態を推定する形状同定システムがある。いままでにも FBG やひずみゲージなどの多点型のセンサを用いて、離散データから形状を同定する研究は多く行われているが^{[22],[23]}、対象となる構造、変形に対して適当なひずみデータを得ることが難しく、実構造を想定した形状同定を行うには至っていない。しかし、本研究で用いる PPP-BOTDA システムでは高分解能での分布型ひずみデータが取得可能であり、十分なサンプリング点数が確保できることから、実構造物の複雑なひずみ分布の再現も可能となる。そこで、このデータを用いることにより、実構造物にも適用可能な変形同定モニタリングの構築を行い、製造時に熱残留ひずみにより生じる変形を構造全体にわたりモニタリングする手法を提案していく。前章において、PPP-BOTDA システムにより取得した二つの変形モードを示す逆対称積層板での分布ひずみデータを用い、供試体全体におけるひずみ分布の推定、そして変形同定を行う。さらに変形同定を有限要素法に拡張させ、その結果を考察する。

4.2 逆対称積層板のひずみ 変位関係と変形モード

既往の研究において Hyer は、正方形の逆対称クロスプライ積層板の変形を解析的に求めるため、はじめにその中立面における面外方向変位 w を式(4.1)のように表した。

$$w(x, y) = \frac{1}{2}(ax^2 + by^2) \quad (4.1)$$

ここで、 x 方向の曲率を表す係数を a 、 y 方向の係数を b とし、 $a > 0$ 、 $b < 0$ であればサドル型、 $a > 0$ 、 $b = 0$ であればシリンダー型となる。一方、板のひずみ - 変位関係は式(4.2)に示すとおりである^[24]。

$$\varepsilon_x(x, y, z) = \varepsilon_x^0 - z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (4.2a)$$

$$\varepsilon_y(x, y, z) = \varepsilon_y^0 - z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \quad (4.2b)$$

$$\gamma_{xy}(x, y, z) = \gamma_{xy}^0 - 2z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad (4.2c)$$

ここで，各式右辺の第1項 ε_x^0 ， ε_y^0 ， γ_{xy}^0 は中立面における各方向の面内ひずみであり，第2項は曲げひずみ成分である．そして Hyer の研究では，面内ひずみ成分の項に板の大変形時における関係式，式(4.3)を適用している．

$$\varepsilon_x^0(x, y, z) = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \quad (4.3a)$$

$$\varepsilon_y^0(x, y, z) = \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \quad (4.3b)$$

$$\gamma_{xy}^0(x, y, z) = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} \quad (4.3c)$$

ここで u と v は，中立面における x ， y 方向の面内ひずみである．そして，式(4.3a)，(4.3b)の第2項，(4.3c)式の第3項では，面外変位 w によって付加的に生じる x ， y 方向の伸びによる長さ変化分を，二次近似にて考慮している．逆対称積層板は，そのサイズや板厚に対して曲率の大きい変形を生じることから，これらの式が採用されている．そして Hyer は，式(4.1)を式(4.2)から(4.3)に代入し，さらに面内変位 u ， v について，クロスプライ積層板の対称性から生じる境界条件を考慮することで，各方向の面内方向変位とひずみ式を，面外変位関数 w^0 の係数 a ， b を用いて次式(4.4)，(4.5)のように設定した．

$$u(x, y) = cx - \frac{a^2 x^3}{6} - \frac{abxy^2}{4} \quad (4.4a)$$

$$v(x, y) = dy - \frac{b^2 x^3}{6} - \frac{abx^2 y}{4} \quad (4.4b)$$

$$\varepsilon_x^0(x, y) = c - \frac{aby^2}{4} \quad (4.5 a)$$

$$\varepsilon_y^0(x, y) = d - \frac{abx^2}{4} \quad (4.5 b)$$

$$\gamma_{xy}^0(x, y) = 0 \quad (4.5 c)$$

ここで、係数 c, d は、古典積層理論にて求められる x, y 方向の一定ひずみ値となる。既往の研究ではこれらから、ひずみエネルギーに関する汎関数の停留点を与える係数 a, b, c, d を求め、積層板のサイズや積層構成をパラメータとし、安定な面外変形の形状 a, b について検証を行っている。その結果においては、正方形の一辺の長さが小さいほど古典積層理論における解に近いサドル型の変形モードが現れ、ある程度大きくなった時点でシリンダー型の変形モードが現れることが示されている。そして積層構成の中で、0 度層と 90 度層の数が等しければ、サドル型の変形モードにおいて $a=-b$ という関係が成り立つことも示されている。

4.3 ひずみ関数推定

4.3.1 分布ひずみデータの処理

前章で計測されたひずみデータを用いて、サドル型およびシリンダー型の変形に対する各 ply 間でのひずみデータを次式のように求める。

$$\varepsilon_{x,i}^{+h} = \varepsilon_{xB,i}^{+h} - \varepsilon_{xA,i}^{+h} \quad (4.6 a)$$

$$\varepsilon_{x,i}^{-h} = \varepsilon_{xB,i}^{-h} - \varepsilon_{xA,i}^{-h} \quad (4.6 b)$$

ここで添え字の i はデータ点を示しており、同じ位置のデータ点について処理をしていることとなる。式 (4.6 a) は、式 (4.2 a) における $z=+h$ のデータ、式 (4.6 a) は $z=-h$ のデータとなる。一方逆対称積層板では、4.2 項で示したように、 ε^0 が面外方向変位 w に対して非線形な関係式を持つ非ゼロ項となってしまう。このひずみ - 変位関係をそのまま推定に用

いると、推定パラメッタ a, b の非線形特性を考慮しなければならない。これを簡便にするため、式 (4.6) で得られた分布ひずみデータ ε^{-h} と ε^{+h} について、面内ひずみと曲げひずみの切り分けを行った。式 (4.2a) の $\varepsilon_x(x, y, z)$ を用いると次式 (4.7) のような処理となる。

$$\varepsilon_{x,i}^{D0} = \frac{1}{2} \{ \varepsilon_x(x=h) + \varepsilon_x(x=-h) \} = \frac{1}{2} (\varepsilon_{x,i}^{+h} + \varepsilon_{x,i}^{-h}) \quad (4.7 \text{ a})$$

$$\varepsilon_{x,i}^{DB} = \frac{1}{2} \{ \varepsilon_x(x=h) - \varepsilon_x(x=-h) \} = \frac{1}{2} (\varepsilon_{x,i}^{+h} - \varepsilon_{x,i}^{-h}) \quad (4.7 \text{ b})$$

ここで添え字の D はデータであること、0 は中立面での面内ひずみ成分、B は曲げひずみ成分であることを示しており、得られた $\varepsilon_{x,i}^{D0}$ と $\varepsilon_{x,i}^{DB}$ を分布ひずみデータとして推定に用いる。

4.3.2 最小二乗法による関数推定

前節で設定した分布ひずみデータを用いて、層間での二次元平面上（ここでは xy 平面）に対し、ひずみ分布関数 $\varepsilon_i^D(x, y)$ のフィッティングを行う。ここで、 p はデータのひずみ成分の方向 (x, y, xy) のいずれかを指す。サンプリング位置 (x_i, y_i) における分布ひずみデータの値を ε_i^D とする。このとき、ひずみデータベクトル ε_p^D を次のように設定する。

$$\varepsilon_p^D = [\varepsilon_1^D \quad \cdots \quad \varepsilon_i^D \quad \cdots \quad \varepsilon_N^D]^T \quad (4.8)$$

N^D は構造内に存在するデータ点の総数である。次に、フィッティングする関数を設定する。構造のグローバルな変形によるひずみ分布を表現するには、多項式などの線型方程式で十分である。

$$\mathbf{m}^\varepsilon = [m_1 \quad \cdots \quad m_k \quad \cdots \quad m_M]^T \quad (4.9)$$

このとき、導出する推定パラメータは m_k であり、その総数を N^M とする。推定パラメータベクトル \mathbf{m}^ε を次のように設定しておく。

$$\mathbf{m}^\varepsilon = [m_1 \quad \cdots \quad m_k \quad \cdots \quad m_M]^T \quad (4.10)$$

このとき、ひずみデータベクトル ε_p^D と推定パラメータベクトル \mathbf{m}^ε の関係は次のようになる。

$$\varepsilon_p^D = \begin{bmatrix} f_1(x_1, y_1) & \cdots & f_M(x_M, y_M) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f_n(x_n, y_n) & \cdots & f_M(x_N, y_N) \end{bmatrix}^T \mathbf{m}^\varepsilon = \mathbf{G}^\varepsilon \mathbf{m}^\varepsilon \quad (4.11)$$

式(4.11)は ε_p^D と \mathbf{m}^ε に関する支配方程式であり、二つのベクトルの関係を表す \mathbf{G}^ε は、 N^D 行 N^M 列のマトリクスである。関数フィッティング問題では一般的に最小二乗法が用いられる。最小二乗法は、推定値とデータ値の残差について、その二乗ノルムの和を最小化することで妥当な推定値を得る手法であり、評価関数(4.12)式を最小化する問題となる^[24]。

$$J = (\varepsilon_p^D - \mathbf{G}^\varepsilon \mathbf{m}^\varepsilon)^T (\varepsilon_p^D - \mathbf{G}^\varepsilon \mathbf{m}^\varepsilon) \rightarrow \min \quad (4.12)$$

この式は、どのデータ点についても同様に取り扱い、すべてのデータに対して最も推定誤差が小さくなるよう解を導く。しかし分布ひずみデータでは、そのサンプリング点の分布形状によりデータの信頼性が異なるという特性を持っている。そこで本研究では、各データの信頼性を定量的に表した重みマトリックス \mathbf{W}^R を用いて、重み付き最小二乗法による推定を行う。

$$\mathbf{W}^R = \text{diag}(W_1^R \quad \cdots \quad W_i^R \quad \cdots \quad W_N^R) \quad (4.13)$$

W_i^R はデータ点 i への重みである。重み付き最小二乗法では、次の評価関数を最小化する。

$$J = (\varepsilon_p^D - \mathbf{G}^\varepsilon \mathbf{m}^\varepsilon)^T \mathbf{W}^R (\varepsilon_p^D - \mathbf{G}^\varepsilon \mathbf{m}^\varepsilon) \rightarrow \min \quad (4.14)$$

この(4.14)式では、重み値が大きいデータ点ほど、誤差が小さくなるような推定パラメータを求めることが出来る。すなわち、推定結果における、データ信頼性が低いデータ点の影響度を定量的に低くすることが出来る。このような重み付き最小二乗法において、式(4.13)を最小とする推定パラメータは、次の式(4.15)のように求めることが出来る。

$$\mathbf{m}^\varepsilon = [\mathbf{G}^{\varepsilon T} \mathbf{W}^R \mathbf{G}^\varepsilon]^{-1} \mathbf{G}^{\varepsilon T} \mathbf{W}^R \varepsilon_p^D \quad (4.15)$$

このような推定問題では、マトリクス \mathbf{G}^ε の構造が重要となる。すなわち推定パラメータ \mathbf{m}^ε

を決定するには、パラメータ数 N^M よりデータ数 N^D が多く、マトリクス G^E が縦長の構造となっている必要がある。分布ひずみデータでは、一本の光ファイバから十分な数のひずみデータが得られるため、パラメータ数 N^M に対する自由度が高くなり、複雑なひずみ分布形状の推定も可能となる。これが、最小二乗法によるひずみ関数推定の基本的な流れとなる。

最小二乗法は、データの誤差分布が正規分布であるとして構築された手法であり、そのときに最も良い推定結果を得ることが出来る。しかし、本研究で用いている PPP-BOTDA システムでは、その計測誤差分布は正規分布とは異なる形状を示す。そこで本研究では、取得した計測誤差分布形状を示すデータにより適した推定法とされる、Biweight 法を用いて推定を行うこととした。Biweight 法は、推定値とデータ値の残差に応じて、各データ点への重みを調節しながら繰り返し計算を行い、外れ値の影響が少ない推定結果を得ることが出来る。特に PPP-BOTDA システムでの計測誤差分布では、尖度が高く、外れ値が多い分布形状を示すときに良い推定精度が得られることが示されている。

はじめに、式 (4.8) から (4.15) に示した重み付き最小二乗推定によって初期設定パラメータ \mathbf{m}_0^E を求める。次に、繰り返し回数 s における、データ点 i の規格化残差 v_{is} を、推定パラメータ \mathbf{m}_s^E より求められるひずみ分布関数 $\varepsilon_{ps}^E(x, y)$ を用いて、式 (4.16) のように求める。

$$v_{is} = \frac{\varepsilon_{ps}^E(x_i, y_i) - \varepsilon_i^D}{\sigma_{F0}} \quad (4.16)$$

ここで σ_{F0} は、PPP-BOTDA システムの計測精度である。次に、規格化残差 v_{is} より、重み調節因子 w_{is}^{adj} を次式のように決定する。

$$w_{is}^{\text{adj}} = \begin{cases} \left(1 - \frac{v_{is}}{cq_s}\right)^2 & |v_{is}| < cq_s \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.17)$$

ここで c は、重みを 0 とする基準の定数であり、Biweight 法では $c=6\sim 9$ を用いるが、本検証では $c=9$ とした。 q_s は、規格化残差 $|v_{is}|$ の中央値である。

$$q_s = \text{median}(|v_{is}|) \quad (4.18)$$

w_{is}^{adj} は 0~1 の範囲で、規格化残差の絶対値 $|v_{is}|$ が大きくなるにつれ、幅が小さくなるよう連

続的に決定され、 $|v_{is}|$ が極めて大きい外れ値である点では0となる。

この重み調節因子より、各データ点の重みを次のように設定する。

$$W_{is}^{\varepsilon} = w_{is}^{\text{adj}} W_i^R \quad (4.19)$$

W_i^R は分布ひずみデータの信頼性に応じて決定された各データ点への重みであり、式(4.13)で示したものである。この W_{is}^{ε} の対角マトリクス $\mathbf{W}_s^{\varepsilon}$ を用いて、繰り返し回数 s における重み付き最小二乗推定解 $\mathbf{m}_s^{\varepsilon}$ を求める。

$$\mathbf{m}_s^{\varepsilon} = \left[\mathbf{G}^{\varepsilon T} \mathbf{W}_s^{\varepsilon} \mathbf{G}^{\varepsilon} \right]^{-1} \mathbf{G}^{\varepsilon T} \mathbf{W}_s^{\varepsilon} \boldsymbol{\varepsilon}_p^D \quad (4.20)$$

この計算は、次式(4.21)の終了条件を満たすまで繰り返される。

$$\sum_{i=1}^N \left| w_{is}^{\text{adj}} - w_{i(s-1)}^{\text{adj}} \right| < 0.01 \times \sum_{i=1}^N w_{is}^{\text{adj}} \quad (4.21)$$

ここで適用した Biweight 法は、データの計測誤差分布が正規分布に近いほど、繰り返し回数が少なくなり、最小二乗法で得られる推定値に近くなる。一方で、多数のデータ点の中に外れ値が入ってしまえば、そのデータ点の重みのみを調節してくれる、ロバストな推定法である。これによって、PPP-BOTDA システムの計測誤差分布形状に適当な、ひずみ関数 $\varepsilon_p^E(x, y)$ の推定が可能となった。

4.3.3 推定ひずみ関数の妥当性検証

前項で示した重み付き最小二乗法をひずみ分布関数の推定を行っていく。関数の推定には、出来るだけデータ点との残差が小さい推定結果が得られるよう、フィッティング関数を示していく。しかし、今回検証で用いている逆対称積層板では、ひずみ関数の形状は示されているため、その関数をフィッティング関数として用いることで、真値に近い結果が得られると考えられる。そこで、4.2項で示した Hyer の面外変位式、ひずみ式をもとに、フィッティング関数を設定した。係数 a, b を用いた面内ひずみ式は、式(4.5a)となる。また、曲げひずみに関する式は、式(4.2a)の第二項に(4.1)を代入することで、次式(4.22)が得られる。

$$\varepsilon_x^B(z) = -za \quad (4.22)$$

式 (4.5a) と (4.22) より, 面内ひずみおよび曲げひずみのフィッティング関数と, 係数 a , b との関係は, 次の式 (4.23) から (4.25) によりまとめることが出来る.

$$\varepsilon_x^{E0}(x, y) = A_1 + A_2 y^2 \quad (4.23)$$

$$\varepsilon_{x,z=+h}^{EB}(x, y) = B \quad (4.24)$$

$$A_2 = -\frac{ab}{4}, B = -ha \quad (4.25)$$

ここで添え字の E は推定ひずみであることを示している. ひずみ分布関数の推定は, 係数 A_1, A_2, B が推定パラメタとなる. ここで, a, b については, 前述のようにシリンダー型の変形では $b=0$ となる. そのため, フィッティング関数においても, シリンダー型では式 (4.25) の関係から, $A_2=0$ となる. シリンダー, およびサドル型におけるひずみ分布推定の結果を図 4.2, 4.3 に示す.

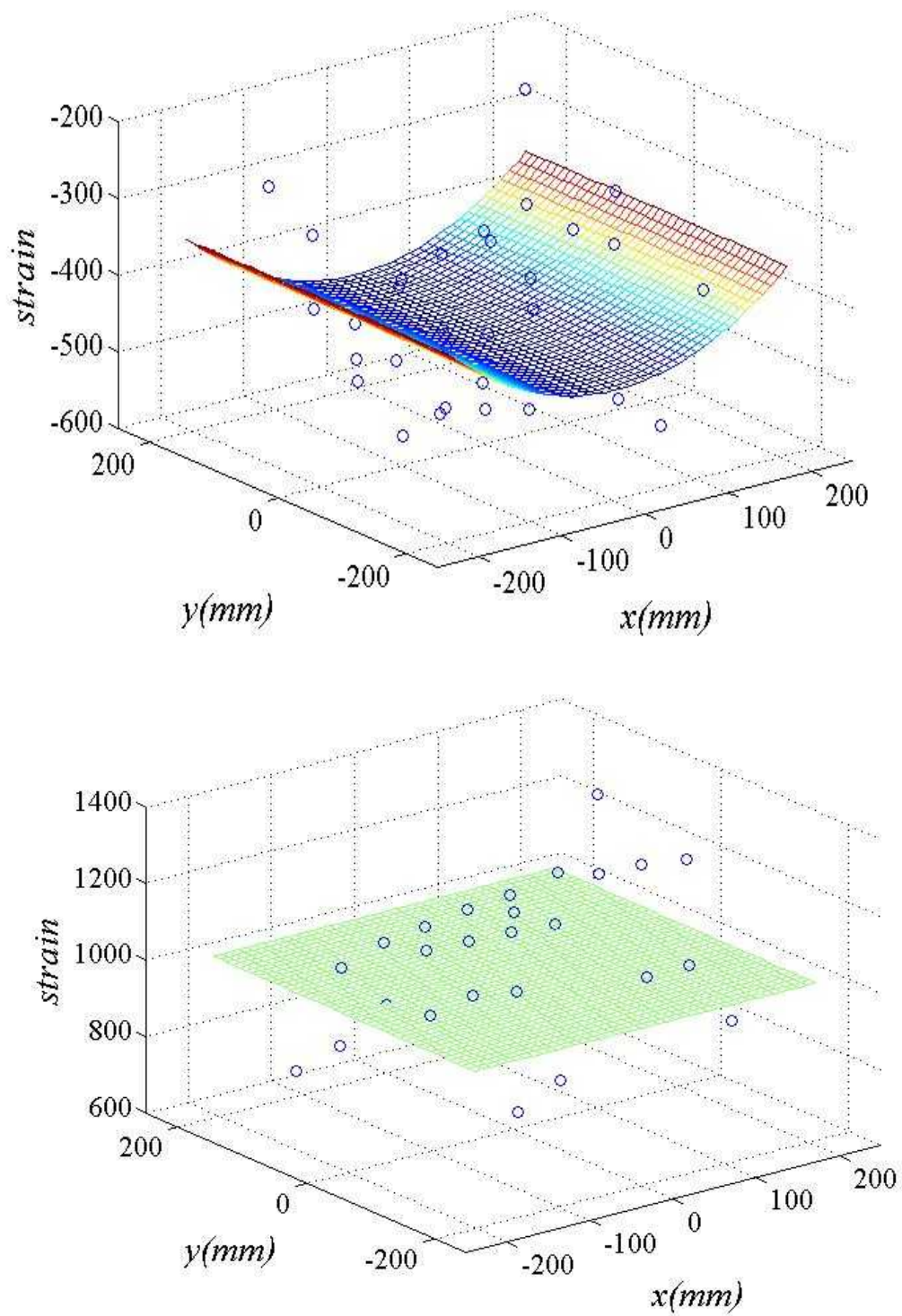


図 4.1 シリンドー型供試体でのひずみ関数推定結果(上：面内ひずみ，下：曲げひずみ)

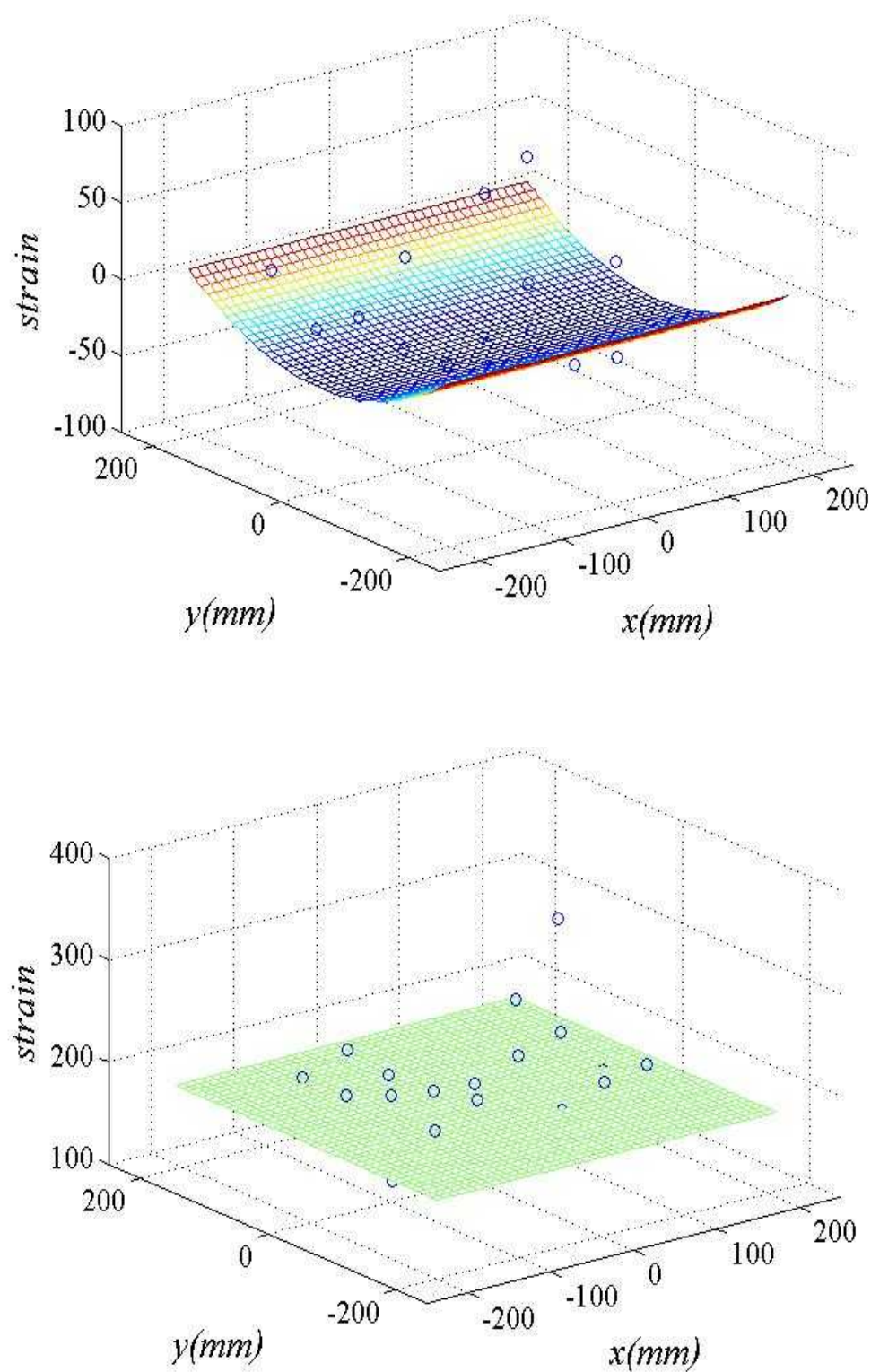


図 4.2 サドル型供試体でのひずみ関数推定結果(上：面内ひずみ，下：曲げひずみ)

求めた推定ひずみ関数は，Hyer の示したひずみ式の形をフィッティングさせている．したがって式 (4.25) の関係を用いれば，推定パラメータ A_2 と B より係数 a, b が得られ，面外方向変位を式 (4.1) から導出することが出来る．これをひずみ分布計測の際にレーザー変位計測装置によりあわせて取得した変位の実測値と比較することで，推定されたひずみ分布関数の妥当性を確かめた．

シリンダー型，サドル型について，導出されたたわみとレーザ変位計測装置による実測変位を重ね合わせて示したもの図 4.4，4.5 である．図中点印は実測変位を表している．これらの図より，サドル，シリンダー型いずれにおいても実測値とおおよそ一致する結果が得られていることが分かる．ここで同定精度の指標である RMS を見てみる．シリンダー型では最大変位約 25mm に対して 1.34mmRMS，サドル型では最大変位約 5mm に対して 0.46mmRMS となり，高い精度での推定が行われたとはいえない．また，特に供試体の端部においては実測値変位との違いが多く見られた．そこで次節以降では，精度の向上を目指し，この変位同定手法を有限要素モデルに拡張させていく．

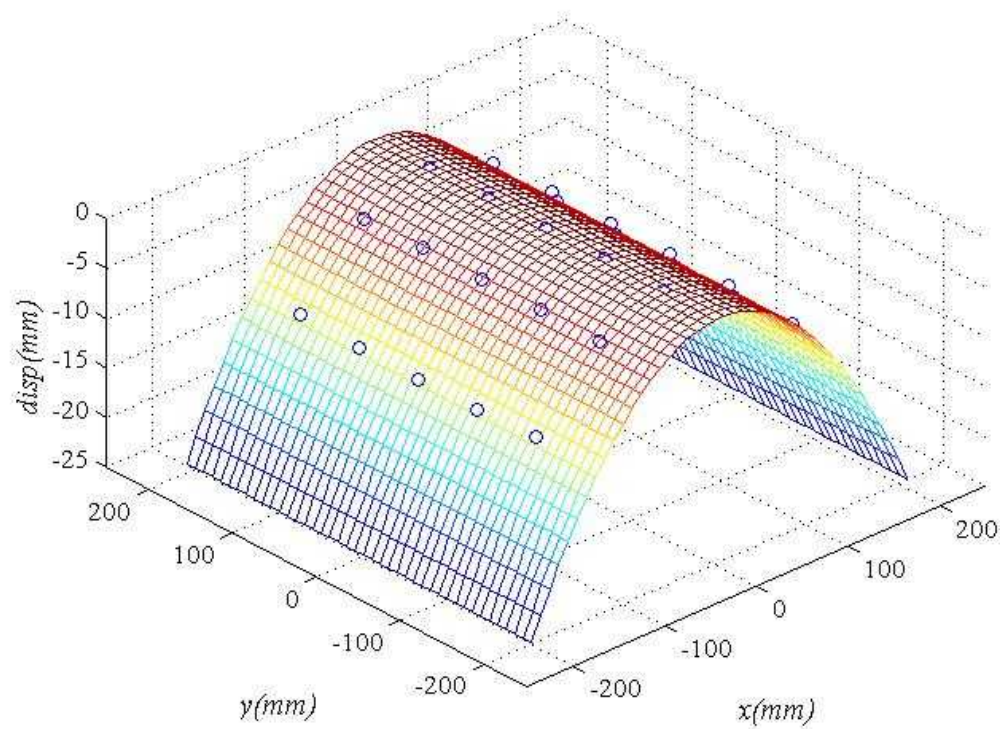


図 4.3 シリンダー型変形の変位同定結果

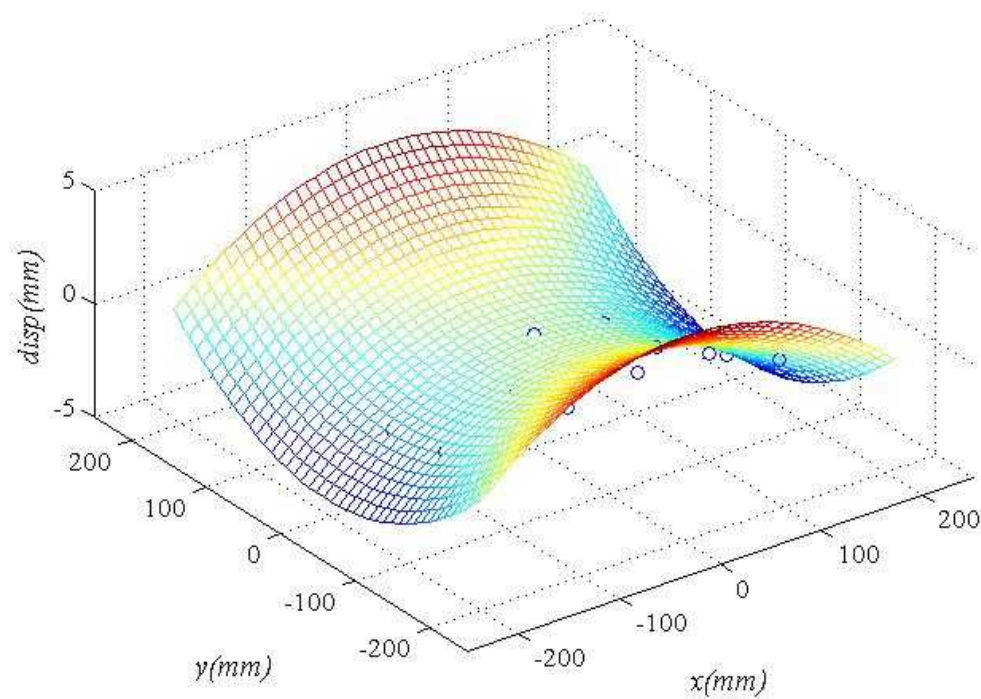


図 4.4 サドル型変形の変位同定結果

4.4 有限要素モデルを用いた変形同定アルゴリズム

4.4.1 大変形問題における支配方程式

はじめに，逆対称積層板のひずみ - 変位関係について，微小変位区間における増分式を示す．本検証で用いている供試体の，有限要素モデルにおける要素分割を示したものが図4.6である．要素サイズは $30 \times 30\text{mm}$ ， $30 \times 25\text{mm}$ ， $25 \times 25\text{mm}$ の四節点長方形板要素で，モデル全体の要素数 N^E は 196，節点数 N^N は 225 である．

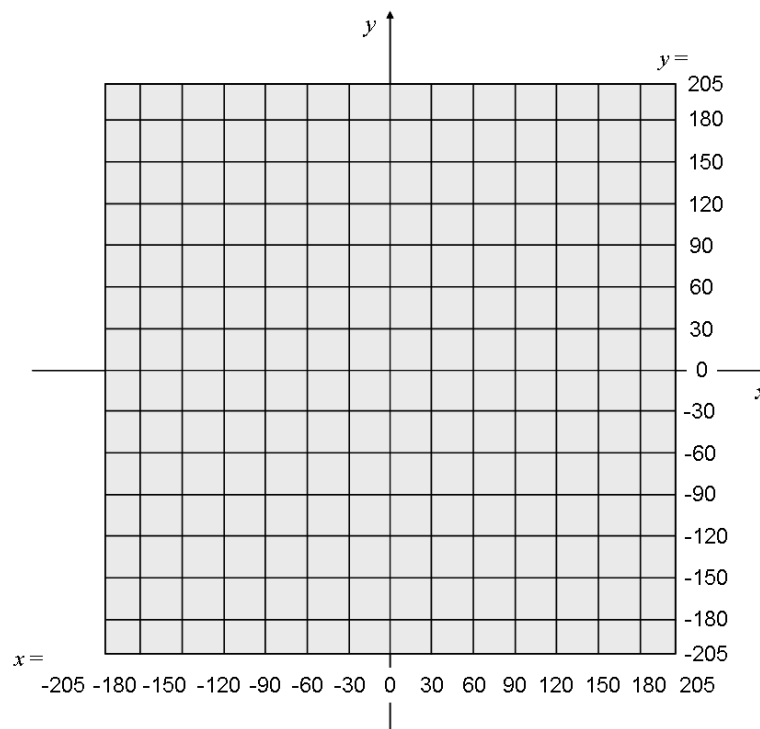


図 4.5 有限要素モデル

ある要素 e について，変分ひずみ $d\varepsilon$ と変分節点変位 $d\delta_e$ の関係を式 (4.26) のように表すことが目的である．

$$d\varepsilon = \bar{\mathbf{B}} d\delta_e \quad (4.26)$$

マトリクス $\bar{\mathbf{B}}$ は，形状関数の微係数からなるが，本検証では節点変位に関して非線形となる．ひずみベクトル ε は，式 (4.27) のように記述できる．

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ -z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\ -z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\ 2z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \\ \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_L^{\text{PL}} \\ \boldsymbol{\varepsilon}_L^{\text{B}} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_{\text{NL}}^{\text{PL}} \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix} \quad (4.27)$$

ここで、右辺の第一項は線形項、第二項は非線形項であり、さらに最右辺において、各ベクトルを面内に関する曲げ成分と曲げに関する成分に分けておく。添え字の PL と B は、それぞれ面内成分と曲げ成分であることを示し、L と NL は線形と非線形を表している。そしてこのとき、各節点で連続性が必要となる u, v, w および x 方向、 y 方向の回転角が節点変位である。ノード i における節点変位を式 (4.28) に示す。

$$\boldsymbol{\delta}_i = \begin{Bmatrix} \boldsymbol{\delta}_i^{\text{PL}} \\ \boldsymbol{\delta}_i^{\text{B}} \end{Bmatrix} \quad (4.28)$$

$$\boldsymbol{\delta}_i^{\text{PL}} = \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \end{Bmatrix}, \quad \boldsymbol{\delta}_i^{\text{B}} = \begin{Bmatrix} w_i \\ \partial w / \partial x_i \\ \partial w / \partial y_i \end{Bmatrix},$$

ここでも、面内成分 $\boldsymbol{\delta}_i^{\text{PL}}$ と、曲げ成分 $\boldsymbol{\delta}_i^{\text{B}}$ に分けて記述しておく。これらのひずみと節点変位の記述より、ある要素 e のひずみ - 変位関係式は線形項と非線形項、面内成分と曲げ成分に分けた形で式 (4.29) のように記述することが出来る。

$$d\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{Bmatrix} d\boldsymbol{\varepsilon}_L^{\text{PL}} \\ d\boldsymbol{\varepsilon}_L^{\text{B}} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} d\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{NL}}^{\text{PL}} \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} \mathbf{B}_L^{\text{PL}} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{B}_L^{\text{B}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{B}_{\text{NL}}^{\text{PL}} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \right) d\boldsymbol{\delta}_e = (\mathbf{B}_L + \mathbf{B}_{\text{NL}}) d\boldsymbol{\delta}_e \quad (4.29)$$

そして \mathbf{B}_L と \mathbf{B}_{NL} を、形状関数を用いてそれぞれ求めていく。はじめに、要素内の変位を適

当な多項式で表す．ここでは面内変位 u, v を双一次関数，面外変位 w を四次多項式とした．面内成分 \mathbf{B}_L^{PL} に関しては，式 (4.30) より式 (4.31)，曲げ成分に関しては式 (4.32) より式 (4.33) のように導出される．

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = \mathbf{N}^{\text{PL}} \boldsymbol{\delta}_e^{\text{PL}} = \mathbf{P}^{\text{PL}} \mathbf{C}^{\text{PL-1}} \boldsymbol{\delta}_e^{\text{PL}} \quad (4.30)$$

$$\mathbf{P}^{\text{PL}} = \begin{Bmatrix} \mathbf{P}_u^{\text{PL}} \\ \mathbf{P}_v^{\text{PL}} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x & y & xy & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x & y & xy \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_L^{\text{PL}} = \mathbf{Q}^{\text{PL}} \mathbf{C}^{\text{PL-1}} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_{L1}^{\text{PL}}(x, y) \\ \mathbf{Q}_{L2}^{\text{PL}}(x, y) \\ \mathbf{Q}_{L3}^{\text{PL}}(x, y) \end{bmatrix} \mathbf{C}^{\text{PL-1}} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial \mathbf{P}_u^{\text{PL}}}{\partial x} \\ \frac{\partial \mathbf{P}_v^{\text{PL}}}{\partial y} \\ \frac{\partial \mathbf{P}_u^{\text{PL}}}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{P}_v^{\text{PL}}}{\partial x} \end{Bmatrix} \mathbf{C}^{\text{PL-1}} \quad (4.31)$$

$$w = \mathbf{N}^{\text{B}} \boldsymbol{\delta}_e^{\text{B}} = \mathbf{P}^{\text{B}} \mathbf{C}^{\text{B-1}} \boldsymbol{\delta}_e^{\text{B}} \quad (4.32)$$

$$\mathbf{P}^{\text{B}} = \begin{bmatrix} 1 & x & y & x^2 & xy & y^2 & x^3 & x^2y & xy^2 & y^3 & x^3y & xy^3 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_L^{\text{B}} = \mathbf{Q}_L^{\text{B}} \mathbf{C}^{\text{B-1}} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_{L1}^{\text{B}}(x, y) \\ \mathbf{Q}_{L2}^{\text{B}}(x, y) \\ \mathbf{Q}_{L3}^{\text{B}}(x, y) \end{bmatrix} \mathbf{C}^{\text{B-1}} = \begin{Bmatrix} -z \frac{\partial^2 \mathbf{P}^{\text{B}}}{\partial x^2} \\ -z \frac{\partial^2 \mathbf{P}^{\text{B}}}{\partial y^2} \\ 2z \frac{\partial^2 \mathbf{P}^{\text{B}}}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix} \mathbf{C}^{\text{B-1}} \quad (4.33)$$

ここで \mathbf{C} は，節点変位と変位 u, v, w を表した多項式の係数を関係付けるマトリクスである． \mathbf{C}^{PL} は，要素 e が含むノードの座標 x_{a-d}, y_{a-d} による 8 行 8 列のマトリクス， \mathbf{C}^{B} は同じく

12 行 12 列のマトリクスである．

非線形項の $\mathbf{B}_{\text{NL}}^{\text{PL}}$ は、 δ_e^{B} に対する ε の変分をとることで求められる．まず、式 (4.28) における非線形ひずみ成分 $\varepsilon_{\text{NL}}^{\text{PL}}$ を便宜的に次式 (4.34) のように表す．

$$\varepsilon_{\text{NL}}^{\text{B}} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \partial w / \partial x & 0 \\ 0 & \partial w / \partial y \\ \partial w / \partial y & \partial w / \partial x \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \partial w / \partial x \\ \partial w / \partial y \end{Bmatrix} = \frac{1}{2} \mathbf{A} \boldsymbol{\theta} \quad (4.34)$$

ここで、 $\boldsymbol{\theta}$ については、次の式 (4.35) のように式 (4.32) の \mathbf{P}^{B} と \mathbf{C}^{B} を用いて記述することが出来る．

$$\boldsymbol{\theta} = \begin{Bmatrix} \theta_1(x, y, \delta_e^{\text{B}}) \\ \theta_2(x, y, \delta_e^{\text{B}}) \end{Bmatrix} = \mathbf{Q}_{\text{NL}}^{\text{B}} \mathbf{C}^{\text{B-1}} \delta_e^{\text{B}} = \begin{Bmatrix} \mathbf{Q}_{\text{NL1}}^{\text{B}}(x, y) \\ \mathbf{Q}_{\text{NL2}}^{\text{B}}(x, y) \end{Bmatrix} \mathbf{C}^{\text{B-1}} \delta_e^{\text{B}} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial \mathbf{P}^{\text{B}}}{\partial x} \\ \frac{\partial \mathbf{P}^{\text{B}}}{\partial y} \end{Bmatrix} \mathbf{C}^{\text{B-1}} \delta_e^{\text{B}} \quad (4.35)$$

求めた $\boldsymbol{\theta}$ の各成分より、マトリクス \mathbf{A} は次のように表される．

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \theta_1 & 0 \\ 0 & \theta_2 \\ \theta_2 & \theta_1 \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

式 (4.34) の変分をとると、 $d\varepsilon_{\text{NL}}^{\text{PL}}$ と $d\delta_e^{\text{B}}$ に関する式が導出される．

$$d\varepsilon_{\text{NL}}^{\text{PL}} = \frac{1}{2} d\mathbf{A} \boldsymbol{\theta} + \frac{1}{2} \mathbf{A} d\boldsymbol{\theta} = \mathbf{A} d\boldsymbol{\theta} = \mathbf{A} \mathbf{Q}_{\text{NL}}^{\text{B}} \mathbf{C}^{\text{B-1}} d\delta_e^{\text{B}} \quad (4.37)$$

よって非線形項のマトリクス $\mathbf{B}_{\text{NL}}^{\text{B}}$ は次のように求められる．

$$\mathbf{B}_{\text{NL}}^{\text{B}} = \mathbf{A} \mathbf{Q}_{\text{NL}}^{\text{B}} \mathbf{C}^{\text{B-1}} = \mathbf{R}^{\text{B}} \mathbf{C}^{\text{B-1}} = \begin{Bmatrix} \mathbf{R}_1^{\text{B}}(x, y, \delta_e^{\text{B}}) \\ \mathbf{R}_2^{\text{B}}(x, y, \delta_e^{\text{B}}) \\ \mathbf{R}_3^{\text{B}}(x, y, \delta_e^{\text{B}}) \end{Bmatrix} \mathbf{C}^{\text{B-1}} \quad (4.38)$$

分布ひずみデータは x 方向のみで取得しており，ひずみ分布関数によって面内ひずみ $\varepsilon_x^{\text{E0}}$ (x, y) と曲げひずみ $\varepsilon_x^{\text{EB}}$ (x, y) が得られている．そこで，支配方程式の構築に用いるのは，式 (4.27) の 1 行と 4 行に関する成分のみとなる．ひずみデータピックアップ点は各要素 5 点 $p_1 \sim p_5$ とすると，要素 e における支配方程式は，式 (4.31), (4.33), (4.38) で得られたマトリクス \mathbf{Q}^{PL} , \mathbf{Q}^{B} , \mathbf{R}^{B} を用いて，式 (4.39) のように表される．

$$\mathbf{e}_e = \mathbf{g}_e(\delta_e)\delta_e$$

$$\mathbf{e}_e = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^{\text{E0}}(x_{p1}, y_{p1}) \\ \vdots \\ \varepsilon_x^{\text{E0}}(x_{p5}, y_{p5}) \\ \varepsilon_x^{\text{EB}}(x_{p1}, y_{p1}) \\ \vdots \\ \varepsilon_x^{\text{EB}}(x_{p5}, y_{p5}) \end{Bmatrix} \quad \mathbf{g}_e = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_{\text{L1}}^{\text{PL}}(x_{p1}, y_{p1})\mathbf{C}^{\text{PL-1}} & \mathbf{R}_1^{\text{B}}(x_{p1}, y_{p1}, \delta_e)\mathbf{C}^{\text{B-1}} \\ \vdots & \vdots \\ \mathbf{Q}_{\text{L1}}^{\text{PL}}(x_{p5}, y_{p5})\mathbf{C}^{\text{PL-1}} & \mathbf{R}_1^{\text{B}}(x_{p5}, y_{p5}, \delta_e)\mathbf{C}^{\text{B-1}} \\ & \mathbf{Q}_{\text{L1}}^{\text{B}}(x_{p1}, y_{p1})\mathbf{C}^{\text{B-1}} \\ & \vdots \\ & \mathbf{Q}_{\text{L1}}^{\text{B}}(x_{p5}, y_{p5})\mathbf{C}^{\text{B-1}} \end{bmatrix} \quad (4.39)$$

これを全要素についてまとめると，次式のように全体の支配方程式が得られる．

$$\mathbf{e}_e = \mathbf{G}(\delta_e)d\delta \quad (4.40)$$

4.4.2 非線形支配方程式に対する反復計算アルゴリズム

前項で示した非線形支配方程式を持つモデルに対して，以下のような評価関数を最小化することで解を得る．反復計算ではまず， $t=0$ における節点変位の初期値 δ_0 を式 (4.41) のように設定する．ここでは，節点変位がすべて 0 である変形前の状態を初期状態とした．

$$\delta_0 = \mathbf{0}(1125 \times 1) \quad (4.41)$$

またこれに合わせて，初期節点座標も， $\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0$ としておく．さらに，推定パラメータの分散値の初期値 \mathbf{M}_0 を，次のような単位行列として与えておく．

$$\mathbf{M}_0 = \mathbf{0}(1125 \times 1125) \quad (4.42)$$

反復回数 t における支配方程式 \mathbf{G}_t を， $\delta_t, \mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0$ を用いて作成する．このとき求められる増分節点変位 $\Delta\delta_t$ は，式 (4.43) を最小化するよう，式 (4.44) のように求められる．

$$J = (\mathbf{e} - \mathbf{G}\Delta\delta)^T \mathbf{W}^{\text{FE}} (\mathbf{e} - \mathbf{G}\Delta\delta) \rightarrow \min \quad (4.43)$$

$$\Delta\delta_t = (\mathbf{G}_t^T \mathbf{W}^{\text{FE}} \mathbf{G}_t)^+ \mathbf{G}_t^T \mathbf{W}^{\text{FE}-1} (\mathbf{e} - \mathbf{g}(\delta_t)) \quad (4.44)$$

ここで \mathbf{W}^{FE} は、各要素におけるピックアップ点への重みマトリクスである。

式 (4.44) により求められた $\Delta\delta_t$ より、節点変位を次のように更新する。

$$\delta_{t+1} = \delta_t + \Delta\delta_t \quad (4.45)$$

さらに、得られた節点変位から、 x 方向成分 $\Delta\mathbf{u}_t$ と y 方向成分 $\Delta\mathbf{v}_t$ を取り出し、節点座標の更新も行う。

$$\mathbf{x}_{t+1} = \mathbf{x}_t + \Delta\mathbf{u}_t \quad (4.46 \text{ a})$$

$$\mathbf{y}_{t+1} = \mathbf{y}_t + \Delta\mathbf{v}_t \quad (4.46 \text{ b})$$

4.5 変位同定結果と考察

図 4.6 に有限要素モデルにより得られたシリンダー型変形の変位同定結果を示す．図中の丸印は先ほどと同様，レーザー変位計による実測変位の値を示している．図 4.3 の Hyer の式を元にした変位同定結果と比較すると，その構造端部において，実測変位値との差が小さくなっていることが確認できた．なおここではサドル型変形に関する解析を行うことが出来なかった．ここでその原因について今後の課題としてあげておく．シリンダー型の変形と異なり，サドル型においては y 方向においてもひずみ分布が生じる．しかし，前章で示したとおり，今回の検証では光ファイバを x 方向にのみ埋めている．そのため y 方向に関するデータが不足し，有限要素モデルでの解析がうまくいかなかったと考えられる．この解決策として，ひとつは y 方向のデータも取得することが上げられる．供試体に x, y 両方向に光ファイバネットワークを張り巡らせることで，十分なデータを取得すれば可能となるであろう．もうひとつは解析において回転対象の条件を加えることである．Hyer の関係からサドル型における x, y 方向における曲率は， $a=-b$ という関係にあるので，それを有限要素モデルに反映することで解析を行うことが出来ると考えられる．

さらに，ひずみ関数の推定に関して，これまでは Hyer の式に当てはめる形でやってきたが(図 4.1, 4.2)，このような有限要素モデルによる変位同定手法が可能となることにより，ひずみ関数を任意の多項式により近似することが可能となる．これにより，PPP-BOTDA システムにより取得データからさらに精度の高い変位同定手法の確立が可能となることも期待される．

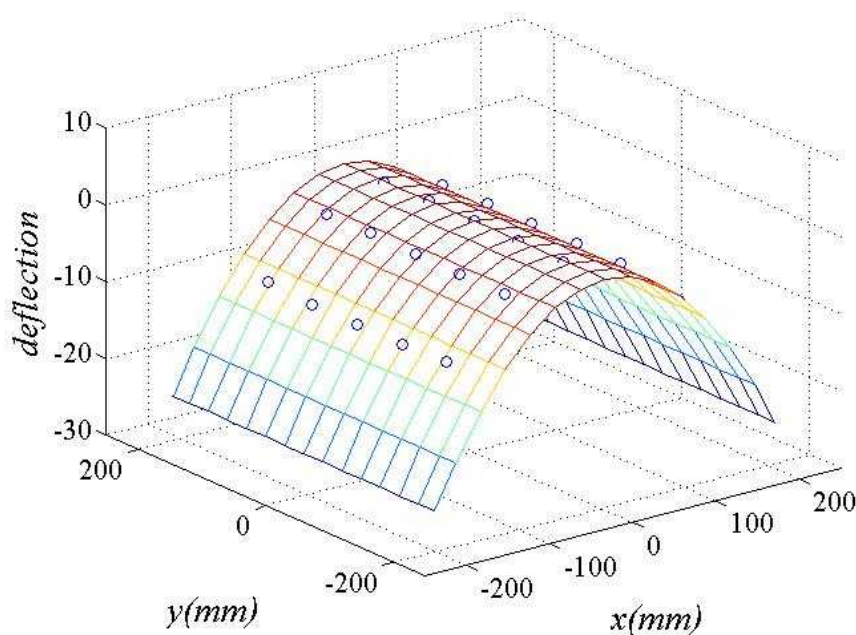


図 4.6 シリンダー型変形の有限要素モデルによる変位同定結果

4.6 本章のまとめ

本章では，前章において取得した逆対称積層板の分布ひずみデータをもとに，まず各変形モードの構造全体のひずみ分布推定を行った．このひずみ分布推定においては，最小二乗法を用いてひずみ分布関数の推定を行っていった．さらに，変形状態のモニタリングを行うため，得られたひずみ分布関数を用いて変位同定も行った．この結果，各変形モードにおいて逆対称積層板の特徴的な変形を，実測値と同じオーダーによって同定することが出来た．さらに有限要素モデルを用いた変形同定アルゴリズムに拡張した．この結果から，今回の検証ではひずみ分布関数を Hyer の式に沿って行ってきたが，有限要素モデルに拡張することで，任意のひずみ分布関数を用い，さらに同定精度を高められることが期待される．

以上のように，CFRP 構造物の製造時の変形により生じるひずみ分布のデータから，構造全体のひずみ分布を推定し，変形状態を同定することが可能となった．このことから，製造時における光ファイバセンサによるモニタリング手法の検証が行われた．

第 5 章

結論および今後の課題

本研究では、ブリルアン式高分解能分布型光ファイバひずみセンサである PPP-BOTDA システムを CFRP 複合材に導入し、製造時および運用時における変形状態のモニタリング手法に関しての検証を行った。

第 2 章では、JAXA でおこなわれた VaRTM6m 主翼実大試験において PPP-BOTDA システムを導入し、運用時における変形状態のモニタリング手法の検証を行った。その結果、得られた分布ひずみデータを付近に設置されていたひずみゲージとの比較を行ったところ、妥当なひずみ分布を取得することが出来ていることが確認された。それとともに、今回の試験で導入したテープ式光ファイバの供試体からのはがれのような現象も確認できた。以上のことから運用時における変形状態のモニタリング手法としての実用可能性の検証を行うとともに、課題点も発見することができた。

第 3 章では、CFRP 複合材の製造時における変形状態のモニタリング手法の検証を行った。CFRP 構造体の製造時に問題となる、熱残留ひずみにより生じる変形を模擬するため、これと同じ原理で特徴的な変形を生じる逆対称積層版を作成し検証を行った。検証には $[0_4 90_4 0_4 90_4]$ のサドル型、 $[0_8 90_8]$ のシリンダー型の二つの変形モードを示す供試体を作成した。そして、内部に埋め込んだ光ファイバネットワークから、PPP-BOTDA システムにより変形によって生じる分布ひずみの変化を計測することができた。

第 4 章ではさらにその取得した分布ひずみデータを用いて、構造全体のひずみ分布を推定し、さらに、特徴的な変形を実測変位と同じオーダーで同定することもできた。さらに有限要素モデルに拡張することでさらなる精度向上の可能性も示すことができた。

このように本研究では、製造時と運用時における変形状態のモニタリングを、分布型光ファイバひずみセンサを用いて検証を行ってきたが、それぞれのケースにおいて変形状態をモニタリングする手法としての十分な検証が行われたであろう。

次に、今後に向けた課題を示していく。

第 2 章の運用段階での検証においては、本研究の検証により実構造物への PPP-BOTDA システム導入の有用性を示すことが出来た。課題として挙げられるのは、今回の検証でも見られたテープ式光ファイバのはがれのような現象であろう。テープ式光ファイバを実構

造物へ応用することを考えると，どのようにはがれの現象を無くすか，あるいははがれを生じた状態においても妥当なひずみ分布を検知する手法の確立が必要となるであろう．

第 4 章においては，分布ひずみデータを用いて，構造全体の分布ひずみ関数の推定と変位同定を行った．今後に向けた課題として，有限要素モデルによる変位同定アルゴリズムの拡張が考えられる．第 4 章のまとめでも述べたように，有限要素モデルに拡張することによりひずみ関数を任意の多項式によりフィッティングすることが可能となる．それにより更なる同定精度の向上を確認するとともに，逆対称積層板だけではなく，様々な構造モデルへの適用を行うことも必要であろう．これにより，製造時における構造の予期せぬ変形をモニタリングする手法としての確立が望まれる．

参考文献

- [1]D・ハル, 複合材料入門, 培風館, 1984.
- [2] <http://www.airbusjapan.com/>
- [3] <http://www.boeing.jp/>
- [4]鵜沢潔, 実用化期の複合材料技術と課題, 1. FRP 成型の現状と将来, Journal of the Society of Material Science, Japan, Vol.55, No.1, pp.131-137, Jan.2006.
- [5]S.Ogihara, N.Takeda, " Experimental characterization of the effects of stacking sequence on the transverse crack behavior in quasi-isotropic interleaved CFRP laminates, " Adv.Composite mater., 9(3), 241-251, 2000.
- [6] 山本鎮男, ヘルスモニタリング, 共立出版, 1999.
- [7]稲田浩一, マルチメディアで夢を送る光ファイバの話, 裳華房, 2001.
- [8]日本機械学会・編, インテリジェント技術 材料・構造, 日刊工業新聞社, 2001.
- [9] 久間和生, 布下正宏, 光ファイバセンサ《基礎と応用》, 情報調査会, 1986.
- [10]S.Huang, M.M.Ohn, M.LeBlane, R.M.Measures, " Continuous Arbitrary Strain Profile Measurements with Fiber Bragg Gratings, " Compos.Part A, Vol. 33, No. 7, pp.971-980, 2002.
- [11]T.Kurashima, T.Horiguchi, H.Iaumita, S.FURUKAWA, and Y, Koyamada, " Brillouin Optical-Fiber Time Domain Reflectometry, " IEICE Transactions on Communication, Vol.E76-B, No.4, pp. 382-390, 1993.
- [12]<http://www.yokogawa.co.jp/>
- [13] X.Bao, A.Brown, M.Demercent, J.Smith, " Characterization of the Brillouin-loss spectrum of single-mode fibers by use of very short(<10-ns) pulses ", Optical Letters, 24(8), 1999.
- [14] 岸田欣増, 李哲賢, 林縄績, 西口憲一, " パルス・ブリポンプ方法を用いた高分解能ブリルアン計測の理論検討, " TECHNICAL REPORT OF IEICE, Vol.47, pp.15-20, 2004.
- [15] 李哲賢, 津田勉, 岸田欣増, " PPP-BOTDA 測定技術を用いた 10cm 分解能ブリルアン分布計測の実現, " 電子情報通信学会技術研究報告, OFT2005-16, 2005.
- [16] 李哲賢, 西口憲一, 宮部美由紀, 牧田篤, 横山光徳, 岸田欣増, 水谷忠均, 武田展雄, " PPP-BOTDA 測定技術を用いた 2cm 分解能ブリルアン分布計測の実現, " 電子情報通信学会技術研究報告, OFT2008-13, P.1-6, 2008.
- [17] 水谷忠均, " 細径 FBG センサによる CFRP 積層板中の初期損傷検出手法の確立, "2004.
- [18] <http://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/431/431011.pdf>
- [19] M.W Hyer, "The room-temperature shapes of four-layer unsymmetric cross-ply

laminates , "J.Composite Materials , Vol.16 , pp318-340 , 1982.

[20] A.Hamamoto , M.W.Hyer , " NON-LINEAR TEMPERATURE-CURVATURE RELATIONSHIPS FOR UNSYMMETRIC GRAPHITE-EPOXY LAMINATES , " int.j.Solid Structure , Vol. 23 , No. 7 , pp.919-935 , 1987.

[21] 堀江正純 , 芳我攻 , 浅沼博 , 小山秀夫 , " 逆対称積層複合材料のジュール加熱による熱変形応答 , " 日本機械学会[No.99-7]Dynamics and Design Conference , 1999.

[22]M.A.Davis , A.D.Kersey , J.Sirkis , E.J.Friebele , " Shape and vibration mode sensing using a fiber optic Bragg grating array , " Smart Materials and Structures , 5(1996) , pp759-765.

[23]R.T.Jones , D.G.Bellemore , T.A.Berkoff , J.S.Sirkis , M.A.Davis , M.A.Putnam , E.J.Friebele , and A.D.Kersey , " Determination of cantilever plate shapes using wavelength division multiplexed fiber Bragg grating sensors and a least-square strain-fitting algorithm , " Smart Materials and Structures , 7(1998) , pp178-188.

[24] 栖原二郎 , 平板の曲げ理論 , 日本鋼構造協会 , 1972.

[25] 中川徹 , 小柳義夫 , 最小二乗法による実験データ解析 , 東京大学出版会 , 1982.

修士論文に関する学会発表

日本機械学会第 15 回機械材料・材料加工技術講演会 [M&P2007]

2007 年 11 月 17 日-11 月 18 日 長岡技術科学大学

講演番号：111

題目：「分布型光ファイバひずみ計測による CFRP 積層板の熱残留ひずみ計測」

謝辞

私の修士課程での2年間は、多くの方々のお力添えなくしてはありえませんでした。

指導教官である武田展雄教授には非常に魅力的なテーマを与えていただいただけではなく、学外での発表や実験の機会を与えていただきましたことに、心より感謝の意を申し上げます。

西尾真由子氏(東大工博士課程)には、右も左も分からない私に、実験の方法、研究の指針を示すだけでなく、発表原稿や資料作成にいたるまで基礎からご指導いただきました。様々な面において未熟なところがあり、本当に度重なるご迷惑おかけしたことをお詫びするとともに、最後まで根気強くご指導いただいたことに心より感謝の意を申し上げます。

水口周氏(東大院新領域)には実験を行ううえで、特に装置の使用方法に関しての多大なるご指導頂きました。本当にありがとうございました。

さらに、6m翼供試体試験の際にお世話になりましたJAXA調布航空宇宙センターの皆様には、今回非常に貴重な実験機会をくださったことに感謝の意を申し上げます。

また研究室の同期である中村達也氏(東大新領域修士課程)、逸見啓氏(東大工修士課程)、山内逸平氏(東大工修士課程)、杉山博氏(東大工修士課程)、中山文博氏(東大工修士課程)とは、同期として楽しく、充実した修士過程を過ごすことが出来ました。

その他、多くの学友、先輩、先生方に支えられ、充実した研究生活を送ることが出来ました。ありがとうございます。

最後になりますが、これまでの私の25年間の人生を様々な面で支えてくれ、何をやるにも理解をしてくれた両親に感謝の気持ちを記し、謝辞とさせていただきます。

2009年2月

堀井信司