

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 26 年度

修士論文

CFRP ラティス構造リブ部の
微視的構造を考慮した有限要素解析

2015 年 2 月 3 日
指導教員 小笠原 俊夫 教授

47126056 伊井 慎悟

目次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 既存研究・本研究の目的	6
第2章 微視的欠陥を含むリブのモデル化と有限要素法による4点曲げ解析	9
2.1 緒言	9
2.2 本研究で用いる試験片	9
2.3 3次元有限要素解析モデルの準備	12
2.4 X線CTによる断層画像の取得	12
2.5 各要素における弾性マトリクスの定義	15
2.5.1 弾性マトリクスの計算手法	15
2.5.2 試験片の断面研磨画像から V_f の平均値を取得し全要素に適用する手法	18
2.5.3 1要素内の画素の輝度値平均と V_f の関係式から要素ごとに V_f を定義する手法	18
2.5.4 弾性マトリクスの計算手法のまとめ	19
2.6 各要素における繊維方向の定義	22
2.7 解析条件・結果	23
2.8 第2章のまとめ	24
第3章 有限要素モデル化された試験片を用いた4点曲げ試験	25
3.1 緒言	25
3.2 試験方法	25
3.3 試験結果	25
3.4 第3章のまとめ	26
第4章 解析・試験結果の比較による解析手法の妥当性に関する考察	30
第5章 結論	34
付録A X線CT画像を利用した炭素繊維コルゲート複合材の有限要素解析	35
付録B 本研究で用いたプログラム	42
付録C 繊維よれが積層板の曲げ剛性に与える影響の理論的評価	61
付録D 画像相関法の原理	64
参考文献	66
本研究に関する論文・学会発表	68
謝辞	69

第1章 序論

1.1 研究の背景

航空宇宙分野において構造の軽量化・製造の低コスト化は重要なテーマである。構造の軽量化に関しては従来のアルミ合金に替わる新しい材料として炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastic, CFRP) が開発され、すでに多くの航空機・宇宙機の構造部材に用いられている。

CFRP の製造方法には様々なものが存在する。例えば、炭素繊維を一方向に並べ半硬化の樹脂で固めたシート (プリプレグ) を積層し、オートクレーブと呼ばれる加圧炉を用いて百数十度の高温中で4~6気圧の圧力をかけて硬化させる、という製造プロセスが知られている。この手法は産業で実際に適用されており、ボーイング 787 の主翼は巨大なオートクレーブを用いて一体成型される。高温・高圧力によって硬化させるので、安定した品質のCFRPを製造できる点が特長である。しかしながら、オートクレーブは非常に高価で設備を整えるためには巨額の投資が必要となり、CFRP製造コスト増大の一因となっている。

このような背景から、近年では製造の低コスト化の手段としてオートクレーブを用いない製造法 (Out of autoclave manufacturing method) が確立されてきている。例えば、Vacuum assisted Resin Transfer Molding (VaRTM, Figure 1.1) という工法では炭素繊維をフィルムで覆い内部を真空にした後、真空圧を利用して樹脂を含浸させ比較的低い温度で成形する。産業への適用も進んでおり、MRJ (Mitsubishi Regional Jet) の垂直尾翼の製造には同様の手法が用いられている[1]。プリプレグのような中間素材が必要のないことや設備投資が少なくすむことなどから製造費を大幅に削減できる。

Out of Autoclave によって製造された CFRP 構造部材の利用は航空分野だけでなく宇宙分野にも広がりつつある。例えば、ロシアのロケットであるプロトン M では燃料タンクの段間部や燃料タンクとペイロードをつなぐアダプタに CFRP 製のラティス構造が用いられている[2-4] (Figure 1.2, Figure 1.3)。ラティス構造は炭素繊維を一方向に並べた複合材のリブが格子状に配置された構造である。プロトン M のラティス構造の製造には Wet Filament Winding と呼ばれる低コスト製造法が用いられている。これは炭素繊維の繊維束を溝のついた円筒に樹脂を浸しながら巻き付けていき、硬化後に型から取り外すという工法である (Figure 1.4)。ラティス構造は炭素繊維方向の高い比強度・比剛性を活かした構造となっており低コスト製造法も利用できるため、プロトン M のアダプタは従来の金属製のものと比較して約 60%の重量軽減、約 30%の製造コスト削減が達成されている[3]。

CFRP のラティス構造を航空機・宇宙機に適用している例はプロトン M のみであるが、それを対象とする研究は世界中で実施されている。例えば、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) はプロトン M と同様の Wet winding 手法により、ロケットの段間部や燃料タンクと最上部のペイロードを接続するアダプタに CFRP ラティス構造を利用することを研究している[5] (Figure 1.5)。また、ドイツ航空宇宙研究所 (DLR) とロシア中央航空流体力学研究所 (TsAGI) を含むヨーロッパとロシアの 12 の大学や研究機関は、欧州委員会とロシア政府から資金を

得て Advanced Lattice Structures for Composite Airframes (ALaSCA)プロジェクトを3年にわたって実施した。ALaSCA プロジェクトに関する欧州委員会のウェブサイトや最終レポート [6]によると、本プロジェクトは以下の3点を目的としていた。

- (i) ラティス構造の利用による航空機胴体の重量と製造コストの軽減
- (ii) 耐空証明の要求を満たすことのできる最適化されたラティス構造製造方法の開発
- (iii) 製造したラティス構造の耐空性の確認

ALaSCA でモデルとなった航空機は DLR が過去に実施していた Laminar Aircraft Research (LamAiR) の結果として提案されたもので、前進翼を持ちエンジンが胴体後部に配置された短中距離用の旅客機である (Figure 1.6)。胴体設計の最適化の結果、製造方法などに課題が残るもののラティス構造が航空機胴体として有用であることを示し、ラティス構造を構成するリブ配置に関してもパラメトリックスタディを行った [7]。ラティス構造を有する航空機の胴体構造の外観と断面図を Figure 1.7 に示す。製造方法の観点から2重のスキンを持つ構造となっているが、それでもラティス構造の利用によって従来と比べて10%以上の軽量化を実現できるという結果になった。ALaSCA プロジェクトはすでに終了したが、2013年11月より Production Aspects Of Lattice Related Barrel Elements With Advanced Reliability (PoLaRBEAR) と呼ばれる ALaSCA に継ぐプロジェクトがスタートしている。PoLaRBEAR では以下の3点を目的としており、3年にわたって研究が進められる予定になっている [8]。

- (i) 高度に自動化された低コスト胴体製造方法の開発
- (ii) 飛行中におけるラティス構造の高度な信頼性の保証
- (iii) 信頼性のあるラティス構造を設計するための標準の策定

ラティス構造の製造法は硬化時にオートクレーブを用いない Out of Autoclave の一例である。プロトン M で見たように、実際に製造コストや構造重量が大幅に削減されていることが確認されており、将来適用例が増えていくことが予想される。

Out of Autoclave の欠点は CFRP を硬化する際に付与する圧力が比較的 low、内部に予測できない空孔 (ボイド) や炭素繊維のよれといった微視的な欠陥が生じる可能性があることである。MRJ の垂直尾翼の製造法では樹脂を流し込む位置などを調整することでプリプレグを用いた CFRP と同等の品質を実現している [1] が、Wet winding によってラティス構造を製造する際は、繊維束間のボイドや繊維束巻きつけ時の繊維よれが確認されている。JAXA で試作されたラティス円筒構造のリブの断面を X 線 CT によって撮影した結果を Figure 1.8 に示す。様々な形状のボイドや樹脂だまり、炭素繊維束の不規則な配置が確認される。B. Budiansky らによると [9]、CFRP の圧縮破壊においては繊維の局所的な座屈が支配的であり、座屈強度は製造の時点で生じる初期の繊維よれに対し大きく依存する。したがって微視的欠陥が CFRP の品質に与える影響を無視することはできず、それをどのようにして評価するか課題となっている。

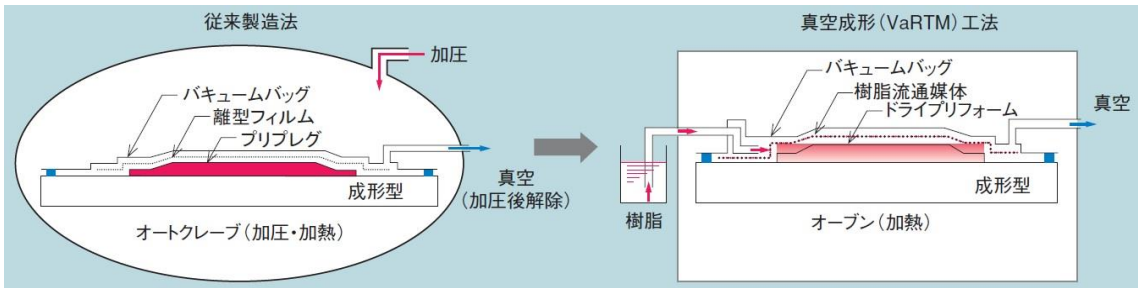


Figure 1.1 Difference between composite fabrication processes

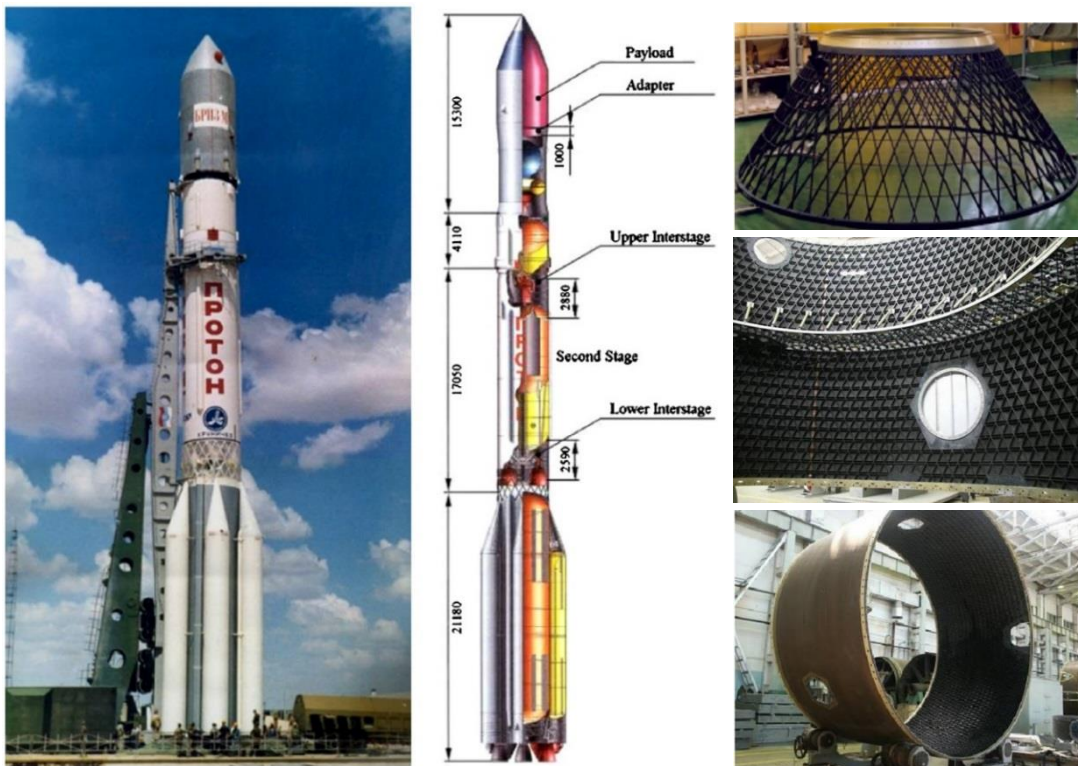


Figure 1.2 Proton-M (left), adaptor between payload and fuel tank (upper right), upper interstage (middle right) and lower interstage (lower right)

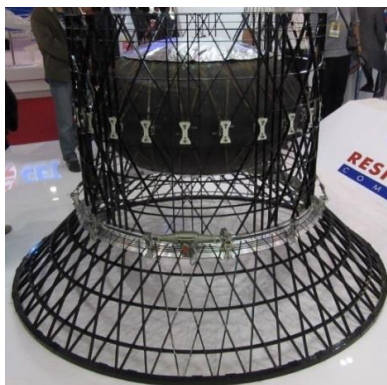


Figure 1.3 Adaptor with lattice structure

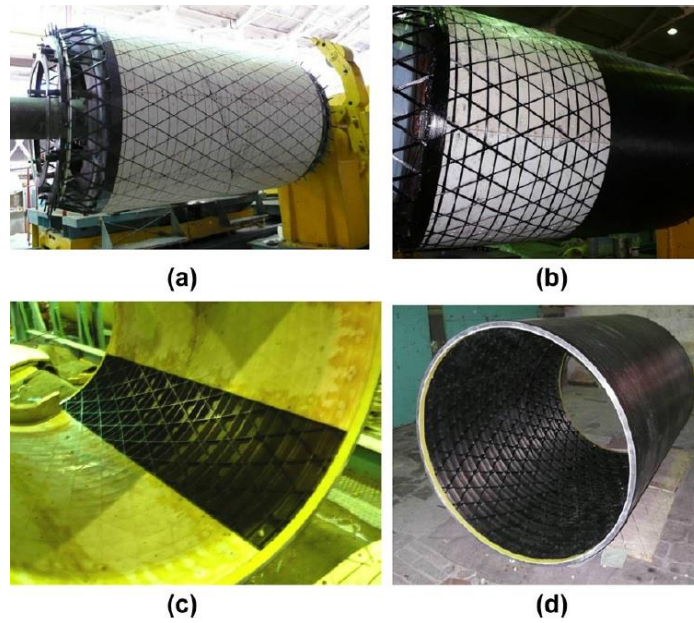


Figure 1.4 Fabrication process of upper interstage of Proton-M

(a) Winding of the ribs (b) Winding of the skin (c) Removal of elastic coating (d) fabricated structure

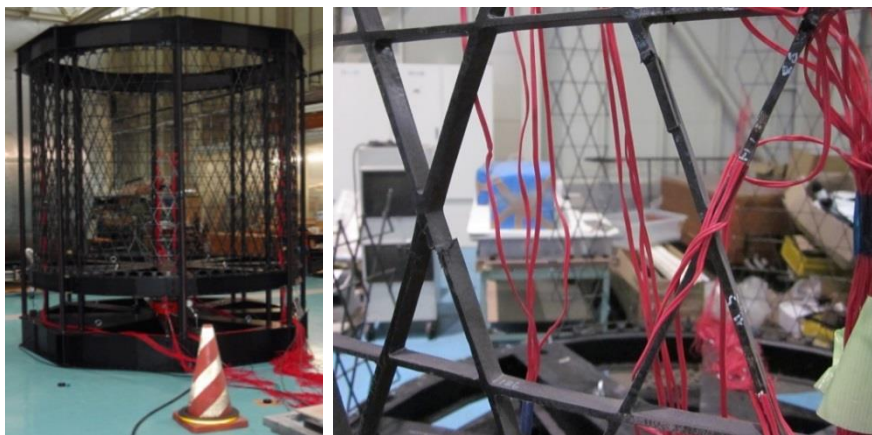


Figure 1.5 Lattice cylinder produced in JAXA (left) and the result of compressive test (right)



Figure 1.6 Aircraft with long fuselage considered in ALaSCA project

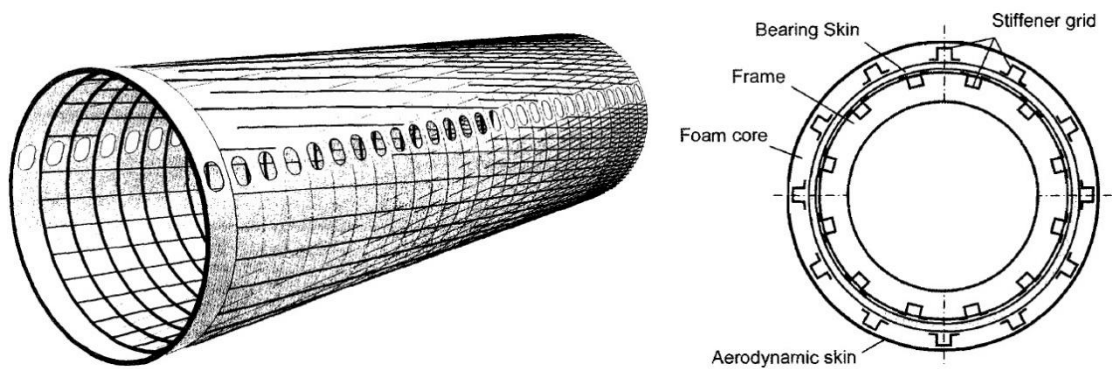


Figure 1.7 Lattice structure applied for airplane's fuselage (left) and cross sectional picture (right)

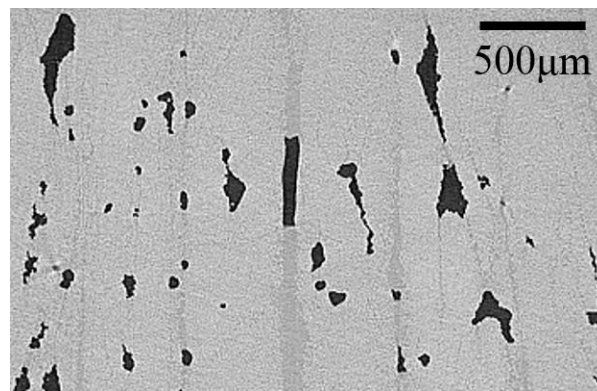


Figure 1.8 Tomographic image of the lattice rib produced in JAXA

1.2 既存研究・本研究の目的

前節で述べた課題に対し、従来の研究では実際に製造された CFRP からその内部に存在する微視的欠陥を含んだ 3 次元モデルを作製する試みが行われてきた。非破壊で CFRP 内部の様子を観察するには X 線 CT (X-ray Computed Tomography) を用いる手法が有効であり 3 次元モデルは X 線 CT によって取得した断層画像を積層することで作製されることが多い。X 線 CT によって得られる断層画像はグレースケールで表現され、画素ごとの明るさ (輝度値) は X 線が透過した物体の X 線吸収係数に依存することが知られている。CFRP に含まれる炭素繊維と樹脂は X 線吸収係数が似ており、取得した断層画像のコントラストが不鮮明になるという問題があった。したがって、樹脂を含まない炭素繊維の 2 次元織物に荷重をかけた際の変位と断面形状変化の予測[10] (Figure 1.9) 炭素繊維のかわりにガラス繊維を用いた複合材 (Glass Fiber Reinforced Plastic, GFRP) の 3 次元モデルの作成[11] (Figure 1.10) などをテーマとした研究が行われてきた。炭素繊維と樹脂のコントラストを改善する研究[12-13] (Figure 1.11) も存在するが、これは繊維を金属やヨウ素などでめっきするという手法であり、CFRP 自体の物性を変化させてしまうという点で実用的ではないといえる。

最近では装置の改良などにより、より細かい解像度かつ比較的良好なコントラストの画像が得られるようになってきている。このような背景から、最新の研究では 3 次元モデルを作製するだけでなくそのモデルを有限要素に分割し解析を実施している。具体的には、CFRP 内部のボイドの位置と大きさを正確に反映した有限要素モデルを作製し、それを用いた破壊特性の予測[14]、C/C コンポジット (Carbon Fiber Reinforced Carbon Composite, 炭素繊維強化炭素複合材料) のボイドを考慮した 3 次元有限要素解析モデルによる熱力学特性の予測[15]などが挙げられる。また S. D. Green ら[16]は 3 次元織物から製造した CFRP の繊維束方向を有限要素解析において一定であるとしている従来の仮定が過剰な簡素化であることを示した。Figure 1.12 では炭素繊維の 3 次元織物がボクセルの集まりとして表現されているが、繊維よれを考慮して作製した(b)のモデルを用いて解析を実施した方が実験と良く一致している。

さらに、Michael. W. Czabaj ら[17]は長方形の断面を持つ CFRP 一方向材において 1 本 1 本の繊維方向を正確に追い、その情報を有限要素解析に用いている。X 線 CT によって得られた断層画像の画素の輝度値を用いて繊維の中心位置を特定し、カルマンフィルターに基づいた繊維中心位置を追跡するアルゴリズムを隣り合った断層画像に適用することで繊維方向を特定している。この研究では CT 画像の解像度が 0.46 [μm]と炭素繊維の直径と比較してかなり細かいため、観察できる試験片の断面は 0.33 [mm] \times 0.46 [mm]と小さくなっているものの、正確に繊維方向とその分布に関する情報を取得することが可能となっている。

このように実際に製造された試験片を用いた 3 次元の有限要素モデルの作製および解析に関する研究は多数存在している。しかしながらボイドと繊維よれの両方を考慮しており、かつ、ある程度の大きさをもった実用的な試験片を用いた解析はまだ行われていない。

そこで、本研究ではラティス構造のリブを例に取り、X 線 CT を用いることでそのリブ内

部の微視的欠陥を考慮した有限要素モデルを作製する手法を構築することを目的とする。また、作製したモデルを用いた解析結果と実際の試験結果を比較することでその手法の妥当性を検証する。ラティス構造に関する既存研究としては、格子を構成するリブの配置のパラメトリックスタディ[18]や構造全体に着目し座屈特性・振動特性を解析によって評価する研究[19-20] (Figure 1.13) が多い。微視的欠陥がラティス構造のリブ部の物性に与える影響は十分に考慮されていないが、ラティス構造の品質保証のためには微視的欠陥が物性にどの程度影響を与えるのか事前に予測しておくことは重要である。

最後に本論文の構成を述べる。第 2 章では X 線 CT によって取得した断層画像データからボイド・繊維体積含有率 V_f ・繊維方向を考慮した有限要素モデルを作製する手法と、その手法によって得られたモデルを用いた有限要素解析の結果を紹介する。第 3 章では解析と同様の条件で実施した試験の結果を説明する。そして第 4 章で試験と解析の結果を比較し、提案した解析手法の妥当性を検証する。第 5 章で結論を述べる。

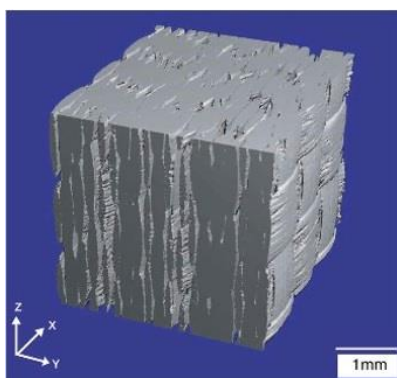


Figure 1.9 Three dimensional model of GFRP

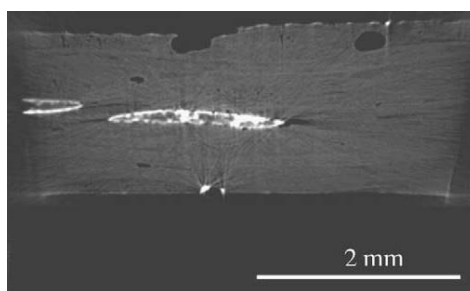


Figure 1.10 Tomography image of carbon fiber plated with gold

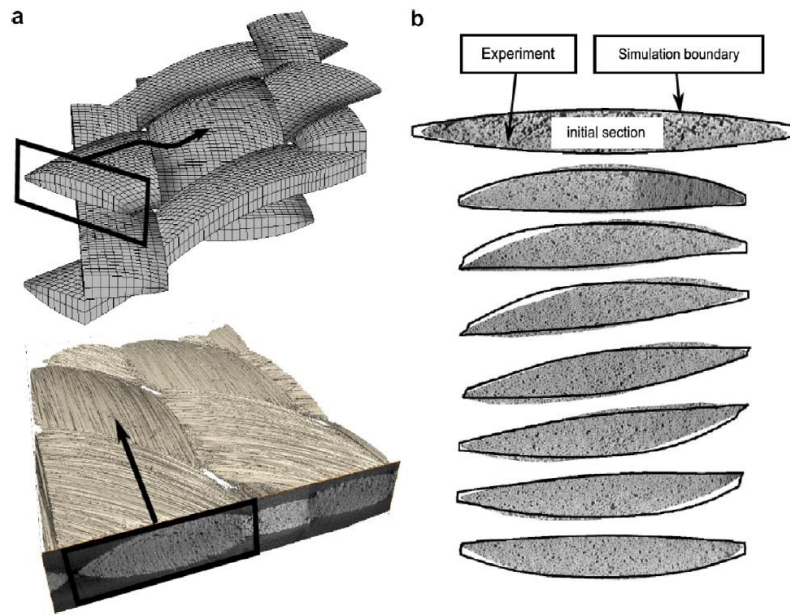


Figure 1.11 Finite element model of carbon fiber fabric (left) and comparison of experimental and simulated boundary under the load (right)

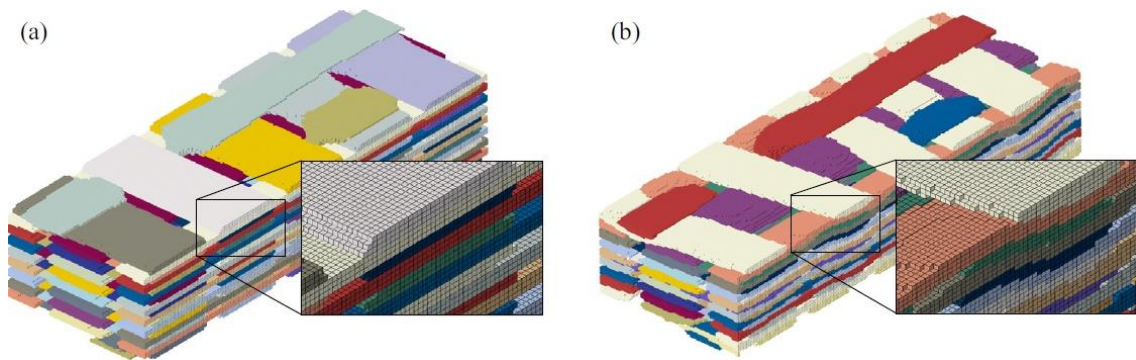


Figure 1.12 Finite element model of three dimensional fabric Model with straight tow (left) and one with misalignment (right)

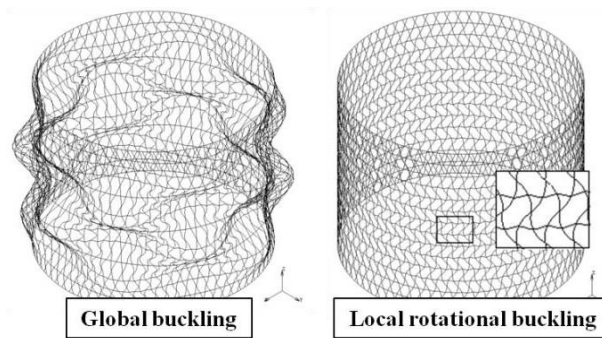


Figure 1.13 Numerical simulation of buckling analysis for lattice cylinder

第 2 章 微視的欠陥を含むリブのモデル化と有限要素法による 4 点曲げ解析

2.1 緒言

本章では微視的欠陥を含むラティス構造リブ部のモデル化手法と、完成したモデルを用いた解析の結果を紹介する。Figure 2.1 を用いて本章の構成とモデル化手法の概要について説明する。まず、モデル化の対象となる試験片をラティス円筒構造から切り出す (2.2)。次に切り出した試験片と同サイズの直方体を用意し、それを六面体要素に分割することで 3 次元の有限要素モデルとする (2.3)。すべての要素に材料情報を与える必要があるが、その情報は切り出した試験片のボイドや繊維方向のよれを反映したものでなければならない。そこで X 線 CT によって試験片の断層画像を撮影し (2.4)、画像情報を自作した Python スクリプトを用いて処理することで 1 要素ごとに弾性マトリクス (2.5) と繊維方向 (2.6) を定義した。そして材料情報を入力した 3 次元有限要素モデルを用いて 4 点曲げ解析を実施し、試験片のたわみ量と荷重の関係式を用いて曲げ弾性率を計算した (2.7)。最後に本章のまとめを述べる (2.8)。次節以降、それぞれのプロセスを詳細に説明する。

2.2 本研究で用いる試験片

本研究で用いる試験片は Figure 1.5 で示されるラティス円筒構造の一部から切り出した長さ 64[mm] の 17 本のリブ部とする (Figure 2.2)。この円筒構造は(株)GH クラフトにて、炭素繊維のテープを樹脂に浸しながら溝のある円筒の成型型に巻き付け、さらにシュリンクテープを巻き付けた後にフィルムをかぶせ、内部を真空にすることで硬化させる Wet winding という工法で製造された。使用した炭素繊維は東邦テナックス製 STS40 (24K)、樹脂はナガセケムテックス製 DENATITE T-769/R3290 (130°C 硬化タイプ) である。繊維巻き付け後は、成型型内部に熱風を吹き込み、外側は断熱を行い、硬化中は成型型を回転させることで内部温度分布を一定に保ちながら硬化させた。この工法は Out of Autoclave の 1 つであり、硬化時の圧力が比較的低いためテープ間のボイドやテープ巻きつけ時の繊維よれが予想される。したがってそれらの微視的欠陥を解析モデルに反映する必要がある。17 本のうち 3 本を任意に選択し、これらの試験片の微視的欠陥を考慮した 3 次元有限要素解析モデルを作製した。3 本の試験片をそれぞれ TP1, TP2, TP3 と呼ぶ。4 点曲げ解析を実施した後、TP1 ~ 3 を含めた 15 本の試験片を用いて 4 点曲げ試験を実施した。残りの 2 本は樹脂埋めと研磨を行い、光学顕微鏡で断面を観察した。これはリブ内の繊維体積含有率を計算するためである。すべての試験片番号・用途・後でリブの曲げ弾性率を計算する際に必要となる断面 2 次モーメントの値を Table 2.1 に示す。本研究では試験片の断面が長方形であるとみなし、試験片断面の長辺 b と短辺 h を用いて以下のように断面 2 次モーメント I を定義した。

$$I = bh^3/12 \quad (1)$$

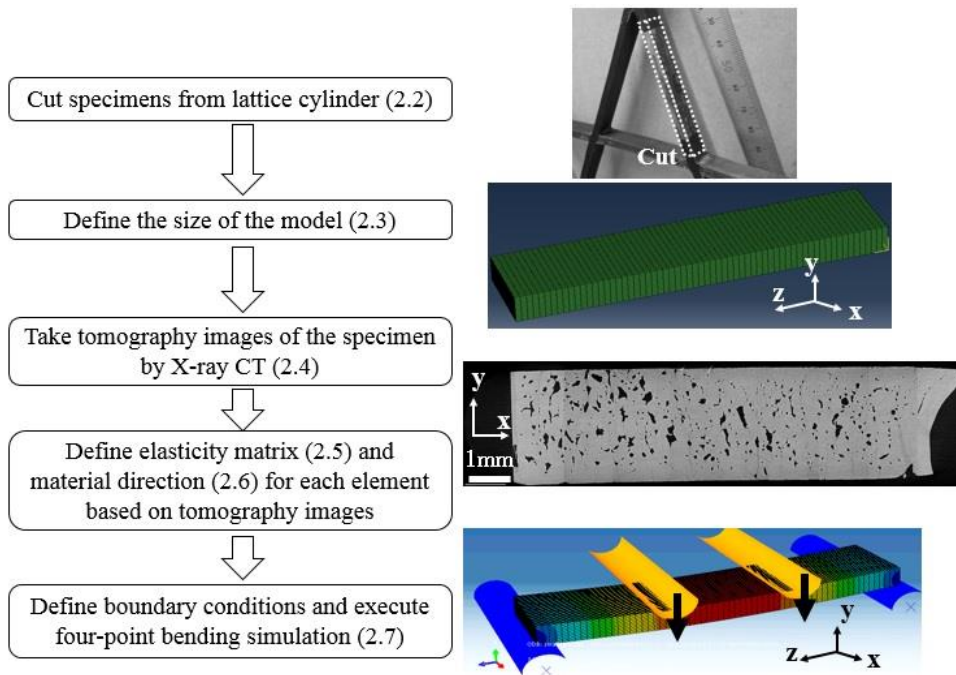


Figure 2.1 Overview of proposed methodology for creating finite element model

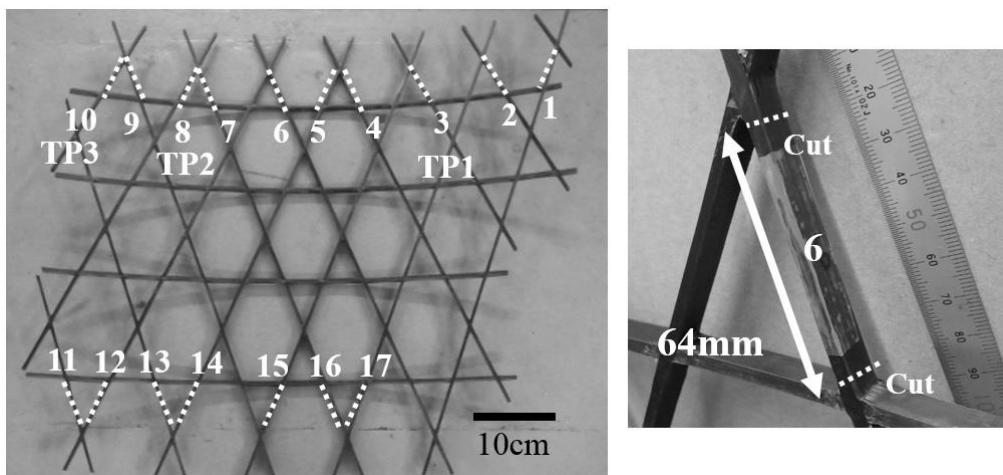


Figure 2.2 Part of lattice cylinder. The numbers correspond to those in Table 2.1.

No. of specimen	Use	Moment of inertia [mm ⁴]
1	Four point bending test	43.8
2	Four point bending test	39.1
3 (TP1)	Four point bending test after generating finite element analysis model	33.4
4	Four point bending test	48.5
5	Four point bending test	44.2
6	Observation of polished cross section	-
7	Four point bending test	44.1
8 (TP2)	Four point bending test after generating finite element analysis model	38.7
9	Observation of polished cross section	-
10 (TP3)	Four point bending test after generating finite element analysis model	33.8
11	Four point bending test	42.0
12	Four point bending test	42.7
13	Four point bending test	45.5
14	Four point bending test	47.5
15	Four point bending test	48.1
16	Four point bending test	47.0
17	Four point bending test	51.3

Table 2.1 Use of the specimens and their moments of inertia

2.3 3次元有限要素モデルの準備

まず、試験片を模擬した直方体を Abaqus CAE 上に用意した (Figure 2.3)。このとき4点曲げ解析時の計算コストを考慮し、z 方向長さは試験片を切り出した 64[mm]ではなく4点曲げ解析を実施する際の支点間距離 51[mm]とした。x 方向長さと y 方向長さはそれぞれ約 11.7[mm]、約 3.43 [mm]となっている。次にその直方体を x 方向 48 要素、z 方向 64 要素、y 方向 14 要素の合計 43008 の六面体二次要素に分割した。1 要素に着目すると実際の寸法は x 方向と y 方向長さが約 245[μm]、z 方向長さが約 789[μm]となっている。

2.4 X線CTによる断層画像の取得

ボイドや繊維よれを考慮した有限要素モデルを作るためには試験片内部を観察する必要がある。本研究では非破壊で CFRP 内部を観察することができる X 線 CT を用いてリブの断層画像を撮影した。X 線 CT のしくみ[21]を Figure 2.4 に示す。X 線が試験片を通過するとき、一定量の X 線は吸収され残った X 線がスクリーンに当たり画像が現れる。X 線の吸収率は物質ごとに異なり、基本的には物質の密度に依存する。試験片を載せた台を 360 度回転させながらスクリーン上で画像を取得しコンピュータで画像を再構成させると試験片の断層画像が得られる。本研究では X 線 CT 画像の取得はサブマイクロフォーカス X 線 CT 装置 Xradia MicroXCT-200 (Carl Zeiss 製) によって行った。撮影時の線源の管電圧は 22 [kV]、管電流は 180 [μA]であり、画像の 1 ピクセルあたりの解像度は 3.83 [μm]であった。試験片右端部の断層画像を Figure 2.5 に示す。1 度の撮影で試験片断面の全領域を撮影することはできなかったため、この画像は x 負方向から正方向に向かって計 9 回撮影しつなぎ合わせたものとなっている。白線の格子で囲まれた正方形が有限要素モデルにおける 1 要素の大きさ約 245 [μm]に相当するので、有限要素モデルは断層画像上では 1 辺 64 ピクセルの正方形となっている。また、1 要素の z 方向長さは 206 ピクセル (789 [μm]) である。

試験片内のすべての微視的欠陥をモデルに反映するためには試験片の全領域を撮影することが望ましいが、断層画像の取得には 1 回で約 7.5 時間を要するため現実的ではない。そこで試験片を左端部 (z 方向 20 要素分)、中央部 (z 方向 24 要素分)、右端部 (z 方向 20 要素分) にわけ Figure 2.6 の白色で示される z 方向 4 要素分の代表部で断層画像を取得し、残りの領域はそれぞれの代表部と同じ材料情報を持つと仮定した。この仮定により試験片 1 本にかかる撮影時間は、7.5 時間 \times 9 枚 \times 3 (左端・中央・右端) = 約 200 時間まで短縮することが可能となる。この仮定の妥当性検証については後の章で詳しく述べる。

試験片の 3 次元モデルを Figure 2.7 に示す。この図は X 線 CT スキャナにより撮影した断層画像を積層することで作製した。このプロセスには VG Studio max 2.2 (Volume Graphics 社) を用いた。xz, yz 平面での断面図を見ると 1 要素の z 方向長さに比べて長いボイドが確認できる。そこで本研究では 1 要素間では同じ xy 断面画像が続くと仮定し進めていく。

次節以降では撮影したこれらの断層画像を Python スクリプトによって処理することでボイドの位置と大きさや繊維のよれを算出し、各要素で材料情報を定義する方法を説明する。

ここでの材料情報とは弾性マトリクス（構成方程式 $\{\sigma\}=[D]\{\varepsilon\}$ の $[D]$ ）と材料方向を指す。

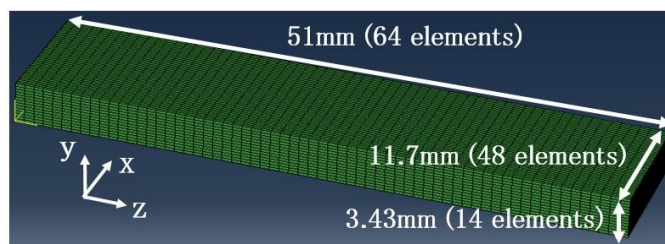


Figure 2.3 Three dimensional model for finite element analysis

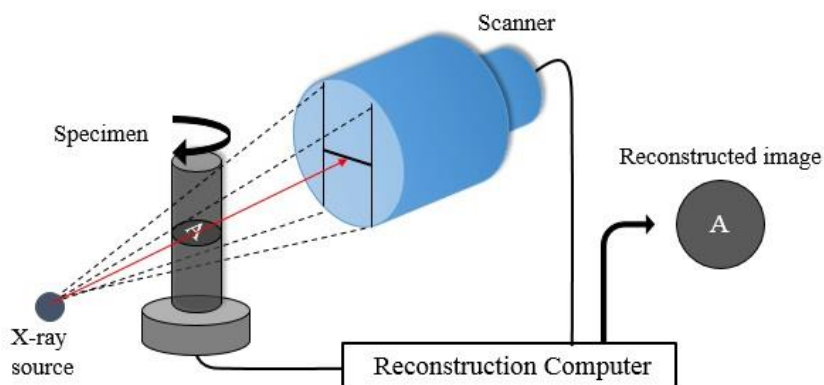


Figure 2.4 How to obtain tomography images by X-ray CT

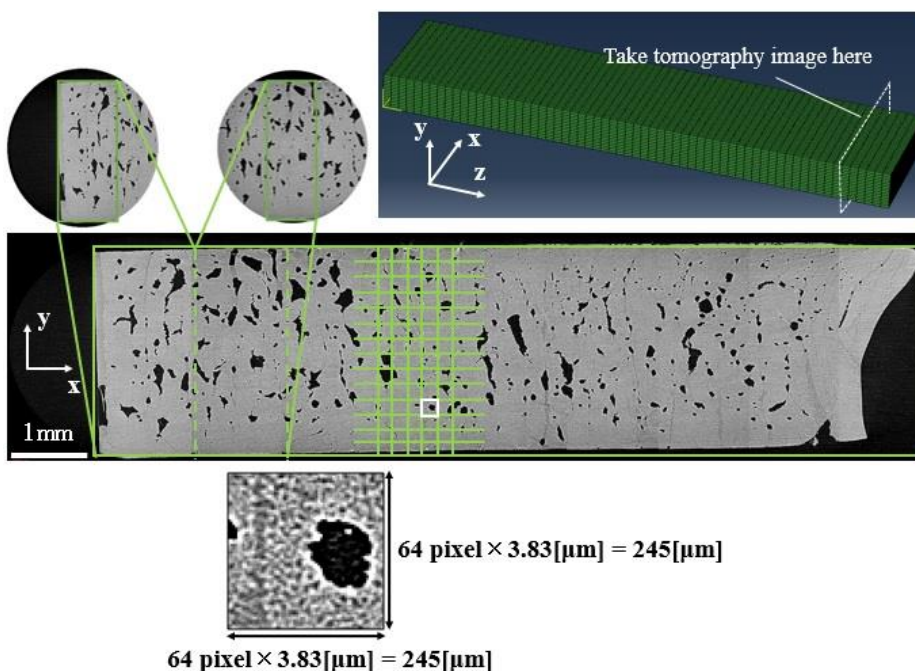


Figure 2.5 Tomographic images of right edge of the specimen and enlargement of one element highlighted by white square

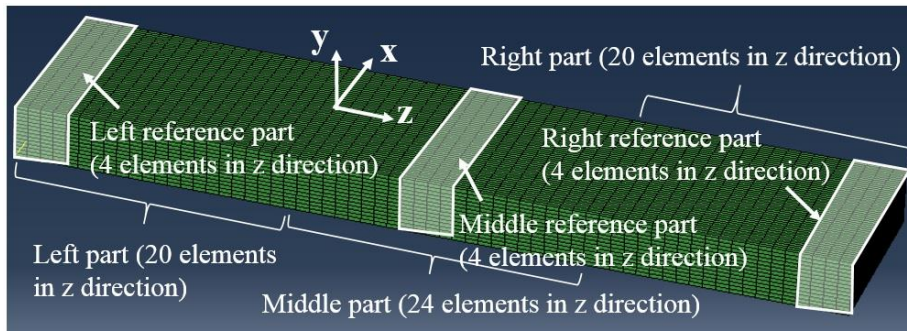


Figure 2.6 Three tomography locations

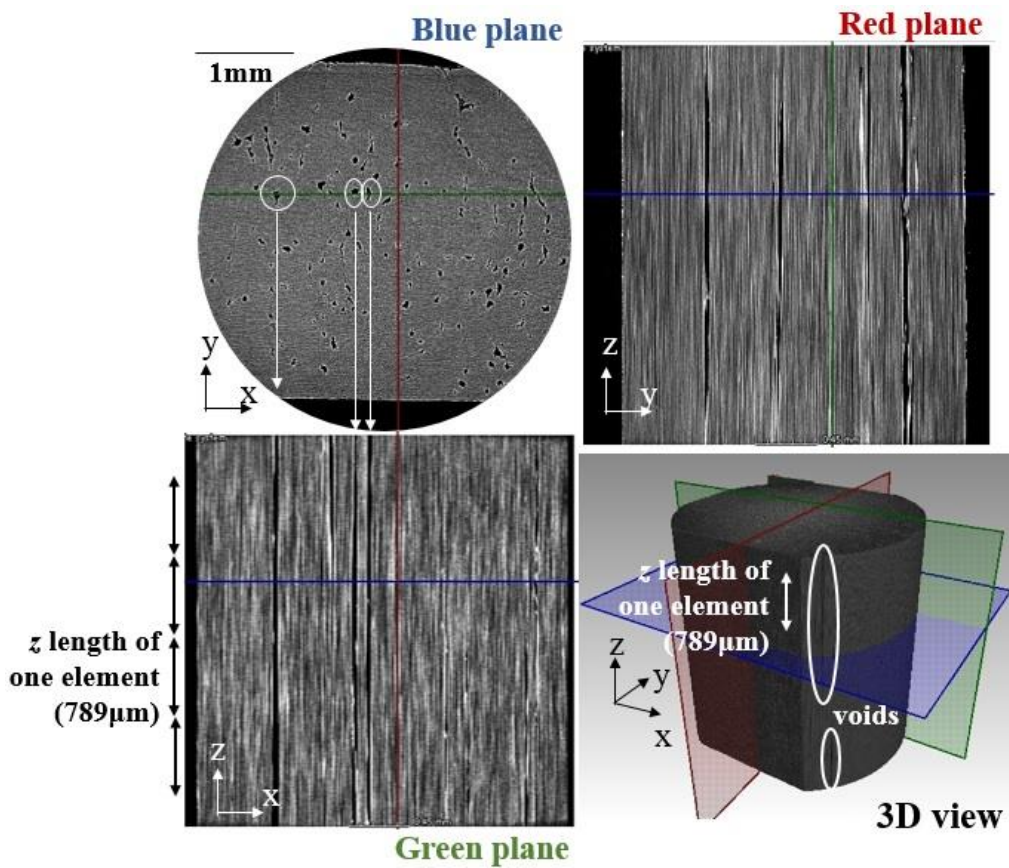


Figure 2.7 Cross sectional and three-dimensional view of the specimen

2.5 各要素における弾性マトリクスの定義

2.5.1 弾性マトリクスの計算手法

前節で述べたように 1 要素内では同じ xy 断面が続くと仮定する (Figure 2.8). また, 試験片は直交異方性であると仮定する. つまり, 試験片は繊維方向に垂直な面において等方性となっている. 繊維方向を 1 とすると, 直交異方性の構成方程式は以下のように表すことができる.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{1111} & D_{1122} & D_{1133} & 0 & 0 & 0 \\ D_{2211} & D_{2222} & D_{2233} & 0 & 0 & 0 \\ D_{3311} & D_{3322} & D_{3333} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{1212} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D_{1313} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D_{2323} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

ただし,

$$D_{1111} = E_1(1 - \nu_{23}\nu_{32})\Delta \quad (3)$$

$$D_{2222} = E_2(1 - \nu_{13}\nu_{31})\Delta \quad (4)$$

$$D_{3333} = E_3(1 - \nu_{12}\nu_{21})\Delta \quad (5)$$

$$D_{1122} = E_1(\nu_{21} + \nu_{31}\nu_{23})\Delta \quad (6)$$

$$D_{1133} = E_1(\nu_{31} + \nu_{21}\nu_{32})\Delta \quad (7)$$

$$D_{2233} = E_3(\nu_{32} + \nu_{13}\nu_{31})\Delta \quad (8)$$

$$D_{1212} = G_{12} \quad (9)$$

$$D_{1313} = G_{13} \quad (10)$$

$$D_{2323} = G_{23} \quad (11)$$

$$\Delta = 1/(1 - \nu_{12}\nu_{21} - \nu_{23}\nu_{32} - \nu_{31}\nu_{13} - 2\nu_{21}\nu_{32}\nu_{13}) \quad (12)$$

1 つの要素を小さな 1 つの CFRP とみなし, それぞれの要素で $[D]$ を計算する. $[D]$ の成分は式 (3-12) で示される. したがって各要素において $E_1, E_2, E_3, G_{12}, G_{13}, G_{23}, \nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}$ の値がわかれば良いことになる. これらの値は Halpin-Tsai の式[22-24]を用いて計算した. Halpin-Tsai の式では CFRP を構成する炭素繊維と樹脂の物性, そして繊維と樹脂が CFRP 内で占める割合 V_f と V_m を代入すると, CFRP 全体としての物性を計算することができる. 計算に用いた炭素繊維と樹脂の物性を Table 2.2 に示す. Halpin-Tsai の式によって $E_1, E_2 (=E_3), G_{12} (=G_{13}), \nu_{12} (= \nu_{13}), \nu_{23}$ を以下のように計算することができる.

$$E_1 = E_{fL}V_f + E_mV_m \quad (13)$$

$$\nu_{12} = \nu_{fLT}V_f + \nu_mV_m \quad (14)$$

$(M, M_f, M_m) = (E_2, E_{fT}, E_m), (G_{12}, G_{fLT}, G_m), (\nu_{23}, \nu_{fTT}, \nu_m)$ として

$$M/M_m = (1 + \xi\eta V_f)/(1 - \eta V_f) \quad (15)$$

$$\eta = (M_f/M_m - 1)/(M_f/M_m + \xi) \quad (16)$$

2-3 方向には横等方性なので G_{23} は以下の式から計算する.

$$G_{23} = E_2/2(1 + \nu_{23}) \quad (17)$$

ξ は複合材中の繊維による強化状態を表すパラメータであり, 繊維形状, 充填状態, 不可状態に依存するもので, 理論解との比較によりカーブフィッティングにより求める. 1 つの材料についても定数とは限らない. 本研究では[22-24]を参考にし, E_2 を求める際には $\xi=1.0$, G_{12} と ν_{23} を求める際には $\xi=2.0$ とした.

次に, 要素内を占める繊維と樹脂の割合 V_f と V_m を計算しなければならないが, Figure 2.8 に示される 1 要素の断面を見ると, 本研究で用いた試験片は 1 要素内におけるボイドの占める割合が大きいので, それを事前に考慮する必要があることがわかる. X 線 CT によって撮影した画像ではボイド域は黒く見えるので, ある輝度値の閾値 (0 から 255 の整数) を設定することで要素の断層画像を二値化した. そしてボイドに相当する輝度値 0 の黒い画素数を数えることにより断面内でボイドが占める割合 V_v を計算した. また, ボイド域におけるノイズを消去するため, 二値化する前には画像全体にガウシアンフィルタをかけた. このフィルタでは着目した画素を中心とする 1 辺 5 ピクセル分の正方形を考慮しており, フィルタをかけた後の同じ位置の画素の輝度値はこの正方形に含まれるすべての画素の輝度値から影響を受ける. 例として, ある 1 要素においてガウシアンフィルタと二値化処理を行った際の画像を Figure 2.9 に示す. 二値化したときの輝度値の閾値は 110 としている. できる限り処理前のボイドの輪郭に一致するよう閾値を設定した. 1 要素は 1 辺 64 ピクセルの正方形なので全画素数は $64 \times 64 = 4096$ ピクセル, 処理後の画像の黒 (輝度値 0) の画素数は 532 ピクセルとなるので, この要素でボイドが占める割合 V_v は約 13.0% であると計算できる.

本研究で用いる試験片の断面は長方形ではないことが予想される. 実際, Figure 2.5 で示した試験片の断層画像では一部が欠けており, 1 要素内のどの領域にも試験片が存在しないときがあった. この場合は Halpin-Tsai の式を用いることができないので, Table 2.3 に示されるようなボイドの物性を仮定し弾性マトリクス $[D]$ を計算した. この仮定により, 試験片の複雑な輪郭を簡単に解析に反映することができていると言える.

次に, V_f と V_m の計算方法について説明する. Figure 2.9 の例で考えると, ボイドを除いた約 87.0% の領域をさらに繊維と樹脂の領域に分割することになる. 撮影した CT 画像では画像の解像度が 3.83 [μm] であるが, 炭素繊維の直径は約 7 [μm] となっているため, 1 つ 1 つの画素を輝度値によって繊維と樹脂に区別することは難しい. そこで本研究では 2 種類の方法を用いて V_f と V_m を計算した.

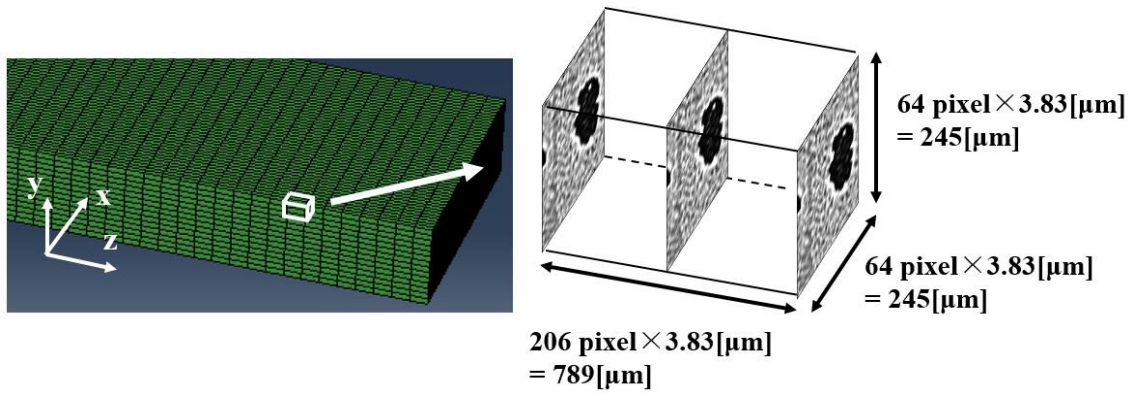


Figure 2.8 Same tomography image in one element in calculating $[D]$

Carbon fiber		Resin	
E_{fL}	240 [GPa]	E_m	2.40 [GPa]
E_{fT}	19.4 [GPa]	ν_m	0.35
ν_{fLT}	0.3	G_m	0.89 [GPa]
ν_{fTT}	0.3		
G_{fLT}	6.89 [GPa]		

Table 2.2 Material properties of carbon fiber and resin utilized for producing lattice ribs

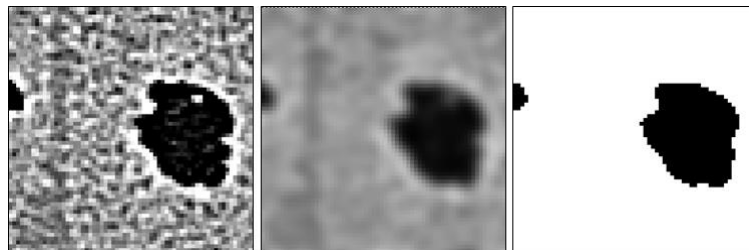


Figure 2.9 Original image (left), after Gaussian filter (middle) and after binarization (right)

E	1.00 [MPa]
ν	0.3
G	0.385 [MPa]

Table 2.3 Properties of void

2.5.2 試験片の断面研磨画像から V_f の平均値を取得し全要素に適用する手法

17本の試験片のうち試験片6のxy断面を研磨し光学顕微鏡で観察したところ, Figure 2.10で示される画像が得られた. この画像を二値化すると, 繊維部が白色(輝度値 255)で表現される. 同じ位置での X 線 CT 画像と比較しながら, ボイドを除いた領域のみに着目し繊維が占める割合を計算したところ $V_f=47.9\%$ となった. この V_f はボイド領域を除いたときの値であることに注意すると, 各要素におけるボイドを考慮した $V_f = V_{f_true}$ と $V_m = V_{m_true}$ は以下のように計算できる.

$$V_{f_true} = (1 - V_v) \times 0.479 \quad (18)$$

$$V_{m_true} = (1 - V_v) \times (1 - 0.479) = 1 - V_v - V_{f_true} \quad (19)$$

Figure 2.9 における例では $V_v=13.0\%$ だったので, $V_{f_true}=41.7\%$, $V_{m_true}=45.3\%$ となる. TP1から作製したモデルの有限要素解析ではこの手法を利用して弾性マトリクス of 計算を行った. この手法ではすべての要素で同じ V_f を用いているため, 例えば 1 要素内に樹脂だまりや繊維密集部が存在するとき, それらを考慮することができていない. V_f はリブ全体の弾性率に大きな影響を与えることが予想されるため, TP2 と TP3 の解析では 1 要素ごとに異なる V_f を定義することにした. 次にその手法を説明する.

2.5.3 1 要素内の画素の輝度値平均と V_f の関係式から要素ごとに V_f を定義する手法

1 要素ごとに異なる V_f を定義するために, X 線 CT によって得られた画像のボイド域以外を任意に選択し, その領域内の全画素の輝度値の平均を計算し, 同じ位置での断面研磨画像と比較することで輝度値平均と V_f の関係式を得た (Figure 2.11). 本研究では試験片の両端で用いる式 eq1, それ以外の領域で用いる式 eq2 の 2 種類の輝度値平均と V_f の関係式を導いた (Figure 2.12). これは試験片の細長い断面形状のために, 試験片の両端とそれ以外の領域では同じ条件で X 線 CT 撮影を実施しても明るさが異なってしまふからである. Figure 2.12 を見ると, 両端の断層画像では視野内に含まれる空気の領域が多いため X 線の吸収が悪く画像全体が明るく見えていることがわかる. 輝度値平均と V_f の関係式を導く際には, 試験片9を用いて端部と中央部において X 線 CT 撮影と断面研磨撮影を行い(Figure 2.13), 輝度値平均 x と V_f の関係をグラフ上にプロットした. x と V_f には比例の関係がみられたため, 最小二乗法によって x と V_f の関係を一次関数として求めたところ, eq1 と eq2 についてそれぞれ以下のような式が得られた.

$$\text{eq1: } V_f = \begin{cases} 1.2651x - 179.05 & (V_f \geq 0) \\ 0 & (V_f < 0) \end{cases} \quad (20)$$

$$\text{eq2: } V_f = \begin{cases} 1.7106x - 224.38 & (V_f \geq 0) \\ 0 & (V_f < 0) \end{cases} \quad (21)$$

Figure 2.14 にプロットした点と eq1, eq2 を示す. プロットした点のいくつかは得られた一次関数から離れており, 後の解析結果への影響が予想されることは注意しておく必要がある. これらの式によって計算される V_f はボイドを除いた領域を対象としているので, ボイドを含んだ $V_f = V_{f,true}$ は式(20)と式(21)から得られた V_f を用いて以下のように計算することができる.

$$V_{f,true} = (1 - V_v) \times V_f \quad (22)$$

2.5.4 弾性マトリクスの計算手法のまとめ

本節で記述した, X 線 CT によって得られた試験片の断層画像を用いた 1 要素ごとに弾性マトリクスを定義するすべてのプロセスは Python を用いたプログラムを自作することで半自動的に行えるようにした. 弾性マトリクス計算手法の要約として Python で記述したプログラムのアルゴリズムを Figure 2.15 に示し, 使用したプログラムを付録 B に掲載する. このプログラムでは, つなぎ合わせた断層画像を構成する 9 枚のうちの 1 枚を読み込み(a), 1 要素に相当する領域を指定し切り取る(b). そしてガウシアンフィルタと二値化の後, 2.5.2 と 2.5.3 で紹介した方法を用いてその要素における V_f と V_m を計算し(d), Halpin-Tsai の式を用いて各要素の弾性マトリクスを計算した(e). 最後にこの 1 要素に対する処理をその画像内のすべての要素で繰り返し(f), 2 番目から 9 番目の画像でも同様の処理を行う(g)ことで全要素の弾性マトリクスを計算した. 本研究では有限要素解析に Abaqus 6.13 を使用したが, Abaqus ではユーザーサブルーチン UMAT を作成することで各要素に弾性マトリクスを定義した.

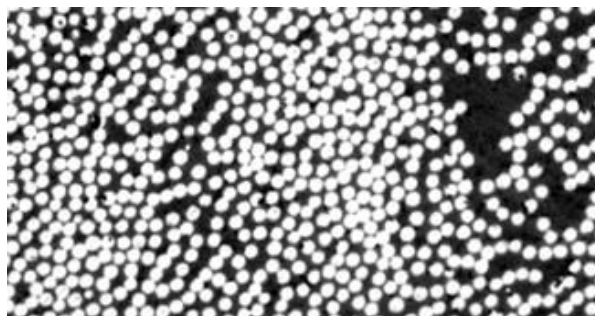


Figure 2.10 Polished cross sectional image of specimen 6

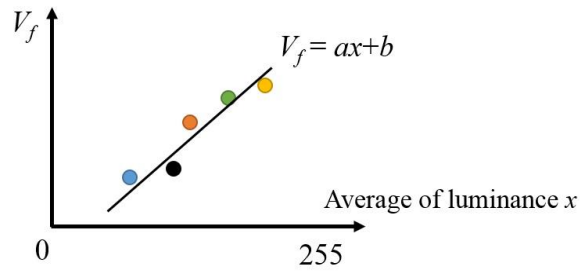
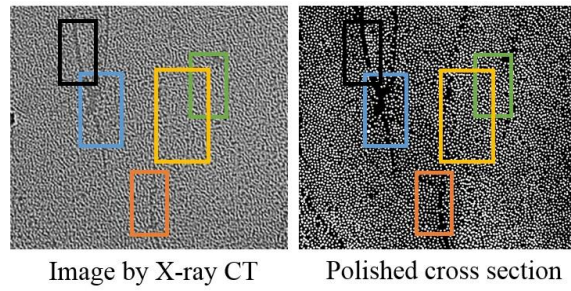


Figure 2.11 Process for obtaining the equation expressing the relationship between the average value of brightness and V_f in one element

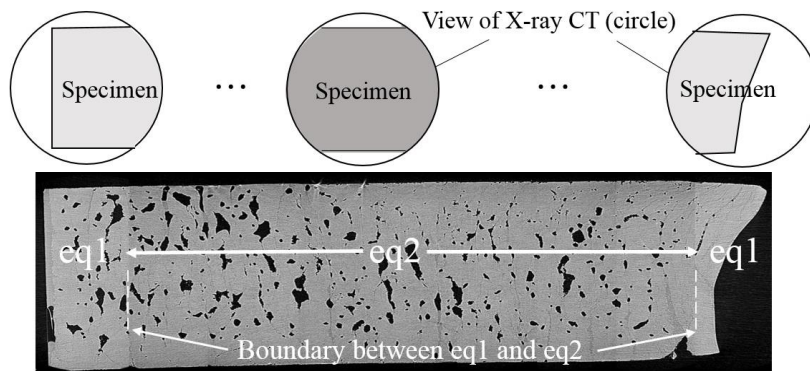


Figure 2.12 Two different equations for the edge (eq1) and the middle (eq2) of the specimen

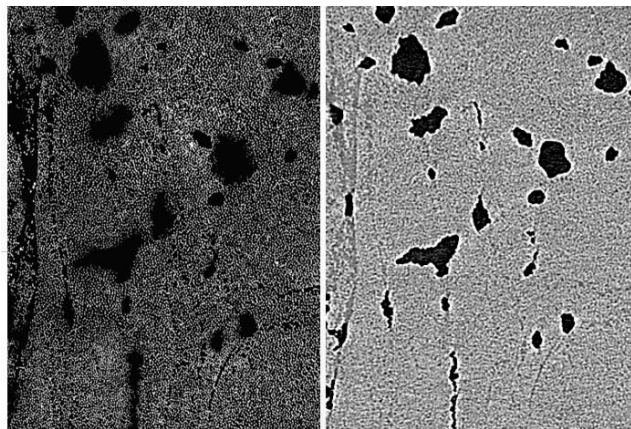


Figure 2.13 Polished cross sectional (left) and tomography image (right) of specimen 9 used for calculating eq2

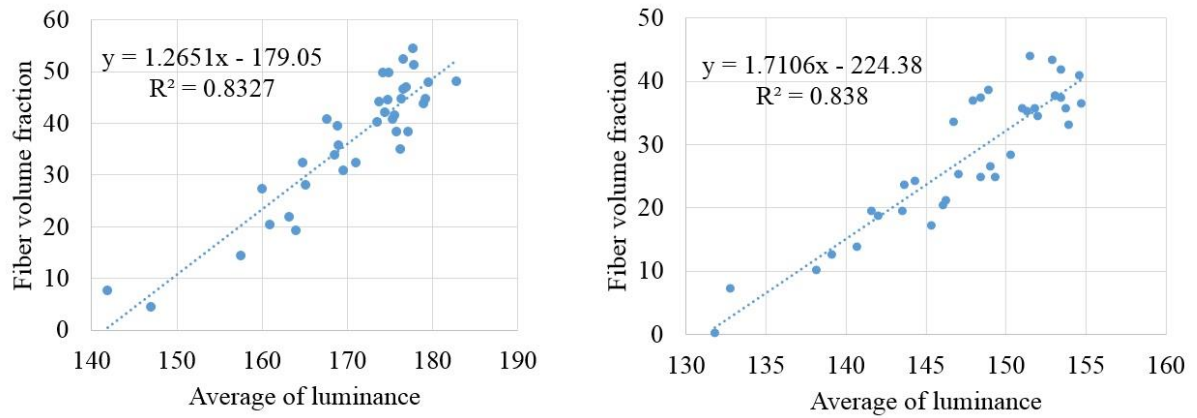


Figure 2.14 Equations defining the relationship between the average value of brightness and V_f in one element (eq1 in left and eq2 in right)

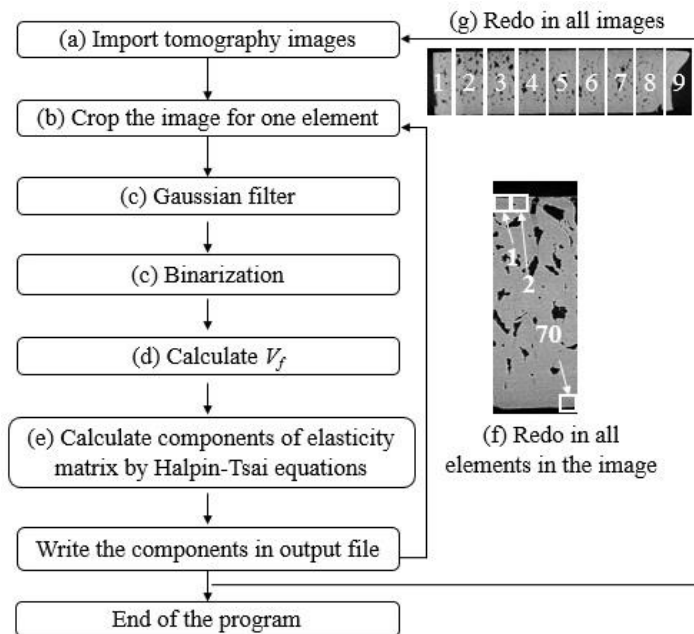


Figure 2.15 Algorithm used for calculating elastic matrix [D] of each element

2.6 各要素における繊維方向の定義

本研究では 1 つの要素内では繊維方向が一定になっていると仮定する。各要素の繊維方向は、画像相関法 (Digital Image Correlation, DIC) によって計算した。詳細は付録 D で紹介するが, DIC では 2 枚の画像を比較して注目した領域の移動ベクトルを計算することができる[25-26]。隣り合った 2 枚の CFRP 断面画像を用いるとその画像間における注目した領域での繊維方向およびその分布を 3 次的に取得することができる[27]。繊維方向の計算は Strain Master 8.1.2 (LaVision GmbH) を用いて行った。Figure 2.16 は X 線 CT によって得られた 2 枚の画像を示しており, DIC によって赤色の着目した領域が x 方向に 0.63, y 方向に -4.14 ピクセル移動したことがわかる。この 2 枚の画像は 1 要素の z 方向長さに相当する間隔 (206 ピクセル = 789 [μm]) だけ離れているので, この要素における繊維方向は $(x, y, z) = (0.63, -4.14, 206)$ となる。一般に, あるベクトル (dx, dy, dz) が z 軸となす角度 θ は,

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{|dz|}{\sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2}} \right) \quad (23)$$

となるので, この場合 $\theta = 1.16^\circ$ となる。本研究で用いる画像の解像度は 3.83 [μm] となっており, 繊維を 1 本ずつ特定できるほどではなっていない。したがって DIC によって得られた結果は繊維 1 本の方向を追って得られたものではなく, 繊維と樹脂が作り出す模様, ボイド, 樹脂リッチ部の移動ベクトルであるといえる。これらは大域的に繊維方向に沿っていると考えられるため繊維方向に一致するとみなすことができる。

Abaqus 6.13 で有限要素解析を行う際は, 自作した Python プログラムを用いて DIC で得られた結果から全要素の材料方向 (=繊維方向) を計算し, ユーザーサブルーチン ORIENT を用いて要素ごとに繊維方向を定義した。使用したプログラムを付録 B に掲載する。

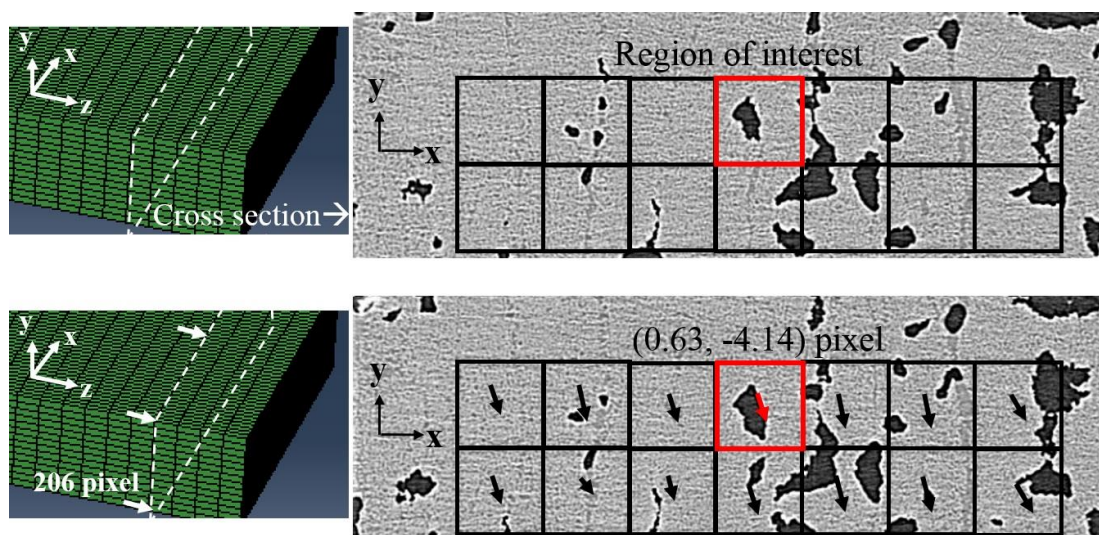


Figure 2.16 Calculation of the fiber direction using two tomography images

2.7 解析条件・結果

Abqaus 6.13 を用いて 4 点曲げ解析を行った。4 点曲げ解析では試験片を 2 つの支点で支え、上部から 2 つの圧子を近づけ変位を与える (Figure 2.17)。圧子間の距離は支点間の距離の 1/3 と設定した。解析では圧子と支点は剛体表面を用いて表現した。試験片の x 方向と z 方向の剛体変位を拘束し、圧子に y 方向負の変位 -1.0 [mm]を与えた。試験片の最下点の変位 y_{max} と 2 つの圧子 (もしくは支点) が受ける荷重 P を出力し、梁理論から得られる以下の両者の関係式を用いて曲げ弾性率 E を計算した。

$$y_{max} = -23PL^3/1296EI \quad (24)$$

L は支点間の距離 (=51 [mm])、 I は試験片の断面 2 次モーメントである。TP1, TP2, TP3 の I の値は Table 2.1 に掲載してある。

TP1 の解析結果を Table 2.4 に示す。曲げ弾性率は 72.7 [GPa]となった。ポイドと繊維よれが曲げ弾性率にどれくらい影響を与えているか評価するため、ポイドがあり繊維よれがないと仮定した場合、ポイドがなく繊維よれもないと仮定した場合の解析も実施した。まずポイドのみを考慮したとき、曲げ弾性率は 80.8 [GPa]となった。つまり繊維よれが原因で曲げ弾性率が約 10%低下していることがわかる。また、ポイドも繊維よれも存在しないと仮定すると曲げ弾性率は 97.8 [GPa]となった。このとき、TP1 の弾性マトリクスを計算する際に試験片に含まれるポイドを出力したところ、平均 10.0%となった。ポイドと繊維よれの両方について、これらの微視的欠陥が試験片の曲げ弾性率低下に影響することを確認できた。

TP2 と TP3 については、2.4.2 で導いた各要素内の輝度値平均と V_f の関係式を用いて繊維が試験片の中に占める割合を考慮している。2 つの試験片に同じ式を適用するのは、式(20)と式(21)に汎用性があるかどうか検証するためである。また、TP1 での「共通の V_f を全要素に与える」という手法を TP2 と TP3 に適用した場合の結果を見るため、 V_f の式によって要素ごとに計算された V_f の平均値を全要素に与えた場合の解析も実施した。

TP2 の解析結果は、すべての要素に異なる V_f を与えた場合、曲げ弾性率は 63.4 [GPa]となった。また TP2 の試験片の平均 V_f を式(20)と式(21)を用いて計算すると、 $V_f=0.368$ となった。TP1 に用いた手法が TP2 でも適用できるか確認するため、この値をすべての要素に与えて再び解析を実行したところ試験片の曲げ弾性率は 65.3 [GPa]となった。TP1 では $V_f=0.479$ としていたが、本研究で用いた試験片は位置によって V_f が異なることが想定されるので、異なる値を用いている。TP3 についても同様に解析を行ったところ、すべての要素に異なる V_f を与えた場合曲げ弾性率は 70.1 [GPa]となり、試験片の平均 V_f は $V_f=0.377$ となった。すべての要素を $V_f = 0.377$ と仮定した場合の結果は 70.2 [GPa]となった。TP2 と TP3 の解析結果をまとめたものを Table 2.5 と Table 2.6 に示す。すべての要素に同じ V_f を与えた 2.4.1 の手法でも、要素ごとに異なる V_f を定義した 2.4.2 の手法でもほぼ同様の結果を得ることができた。

2.8 第2章のまとめ

第2章では試験片の微視的欠陥を考慮した有限要素解析モデルを作製する手法について説明した。本研究では試験片のX線CT画像・Pythonによる画像処理・画像相関法を用いて要素ごとに弾性マトリクスと繊維方向を計算した。また、この手法を用いて用意した有限要素解析モデルを用いて4点曲げ解析を実施した結果を紹介した。次章ではTP1, TP2, TP3を含めた15本の試験片において実施した4点曲げ試験について、その実施要領と結果を説明する。

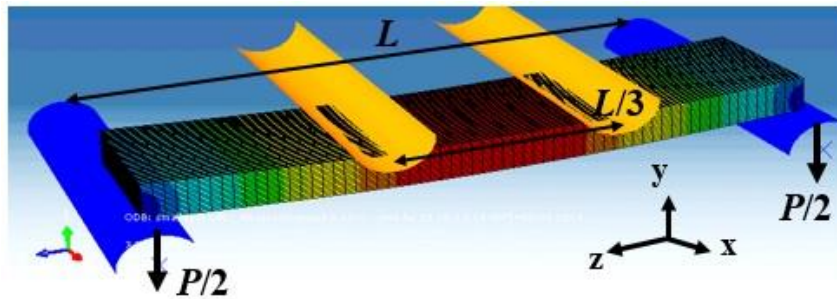


Figure 2.17 Four point bending simulation

Condition	Bending modulus [GPa]
With void and fiber misalignment	72.7
With void and without fiber misalignment	80.8
Without void or fiber misalignment	97.8

Table 2.4 Result of TP1

Condition	Bending modulus [GPa]
Different V_f for all elements	63.4
Same V_f for all elements ($V_f=0.368$)	65.3

Table 2.5 Result of TP2

Condition	Bending modulus [GPa]
Different V_f for all elements	70.1
Same V_f for all elements ($V_f=0.377$)	70.2

Table 2.6 Result of TP3

第3章 有限要素モデル化された試験片を用いた4点曲げ試験

3.1 緒言

前章で提案した微視的欠陥を含む有限要素モデル作製方法の妥当性を検証するため、モデル化の対象となった試験片を含む15本の試験片を用い4点曲げ試験を実施した。本章ではその実施方法(3.2)と試験結果(3.3)を説明し、最後に本章のまとめを述べる(3.4)。

3.2 試験方法

4点曲げ試験には、Figure 2.2, Table 2.1 に示されたラティス円筒構造から切り出した長さ64 [mm] の試験片15本を用いた。試験片6と9はこれまでのプロセスですでに使用してしまったため試験の供試体とはなっていない。試験は使用可能な治具を用い、できる限り4点曲げの標準規格であるASTM D6272-02に近づけて実施した(Table 3.1)。標準規格通りに試験ができなかったのは試験片サイズが小さかったためである。圧子間の距離は解析と一致させるため支点の1/3の長さとした。試験の様子をFigure 3.1に示す。試験片の中央部には変位計を設置し、最下点のたわみ y_{max} を測定する。また、2つの圧子または支点にかかる荷重 P も測定し、式(24)から曲げ弾性率を計算する。

3.3 試験結果

15本の試験片において、試験片の最下点のたわみと圧子にかかる荷重の関係をFigure 3.2からFigure 3.4に示す。5本ずつ、3つのグラフに分けて示す。凡例に書かれている番号は試験片番号を表す。線形部の傾き(P/y_{max})を用いて計算した各試験片の曲げ弾性率と曲げ強度をTable 3.2に示す。曲げ弾性率の平均値は67.6 [GPa]、標準偏差は5.46 [GPa]、曲げ強度の平均値は652 [MPa]、標準偏差は27.7 [MPa]であった。曲げ強度 σ_{max} は試験片が最大荷重を受けた際に発生した応力のことで、以下の式より計算した。

$$\sigma_{max} = F_{max}L/bh^2 \quad (25)$$

F_{max} は破壊時の荷重である。また、試験片の断面積と曲げ弾性率の関係、断面積と曲げ強度の関係をFigure 3.5に示す。断面積が小さくなればなるほど曲げ弾性率・曲げ強度ともに大きくなる傾向が読み取れる。どの試験片でも内部に含まれる繊維の本数は同じにならなければならないが、断面積が小さい試験片は V_f が大きくなっているためだと考えられる。破壊様相については、2種類観察することができた。試験片4以外はすべて圧子の直下で圧縮破壊が発生し、板厚方向へ進展、貫通すると荷重がほぼゼロとなっている(Figure 3.6)。繊維方向に沿った割れ(スプリット)も確認することができた(Figure 3.7)。これはもともと繊維方向に沿って比較的大きなボイドが存在していたためだと推測できる。試験片4のみ圧子間で圧縮破壊した(Figure 3.8)。

3.4 第3章のまとめ

第3章では4点曲げ試験の実施要領とその結果について説明した。この試験は第2章で紹介した有限要素解析と同じ条件の下で実施されており、有限要素解析モデル作製に用いた試験片をそのまま試験でも使用した。次章では解析結果と試験結果の比較を行い、本論文で提案した有限要素解析モデル作製の手法の妥当性について議論する。

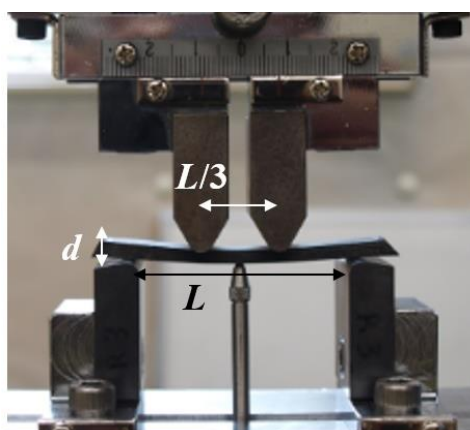


Figure 3.1 Four point bending test

	ASTM D6272-02	Our experiment
Distance between support points (L)	15-17 times of d	51 [mm]
Distance between load points	$L/3$ or $L/2$	17 [mm] ($=L/3$)
Span (l)	More than $1.2L$	64 [mm] ($>1.2L$)
Thickness (d)		3.2-3.7 [mm]
Radii of support and load points (r)	5.0 [mm] (at least 3.2 [mm])	3.0 [mm]
Velocity of load points (R)	$R=0185*0.01*L^2/d$	1.4 [mm/min]

Table 3.1 Testing methodology

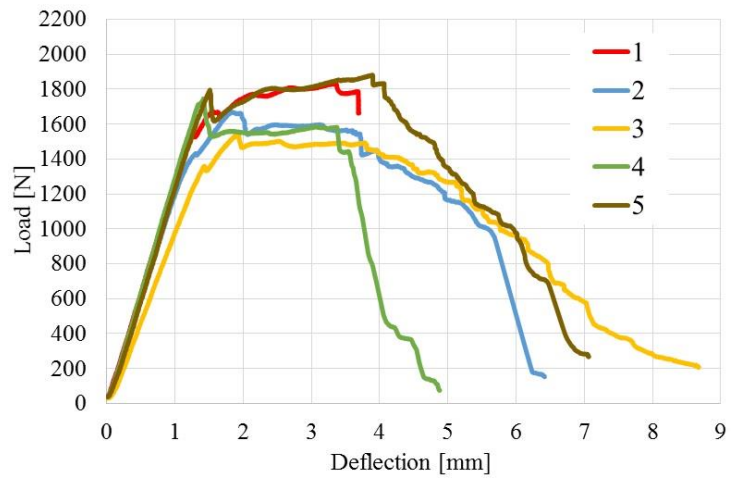


Figure 3.2 Result of four point bending test 1

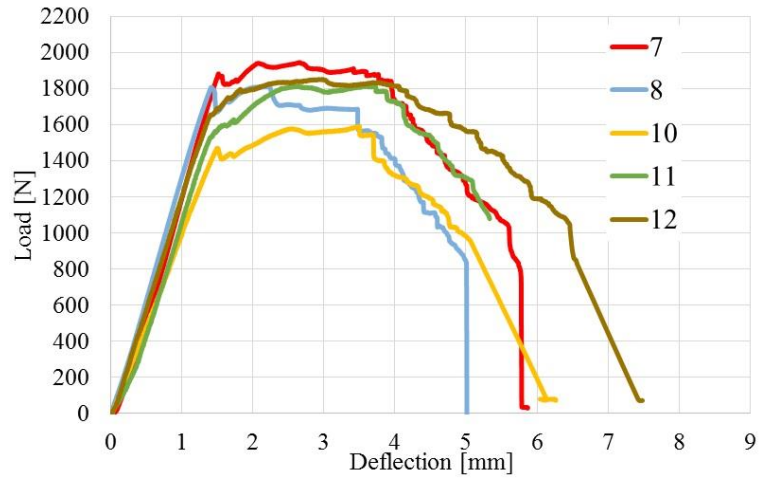


Figure 3.3 Result of four point bending test 2

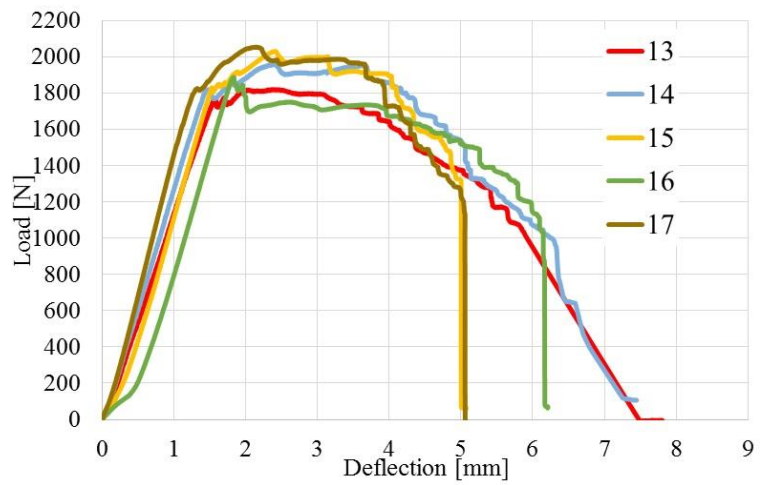


Figure 3.4 Result of four point bending test 3

No. of specimen	Bending modulus [GPa]	Bending strength [MPa]
1	68.4	649
2	72.5	645
3 (TP1)	73.2	644
4	64.3	583
5	67.1	665
7	68.2	682
8 (TP2)	81.1	694
10 (TP3)	70.7	670
11	65.5	658
12	67.7	662
13	60.9	674
14	64.5	606
15	57.9	668
16	61.9	631
17	69.4	560
Average	67.6	652
Standard deviation	5.46	27.7

Table 3.2 Bending modulus of the specimens calculated by test results

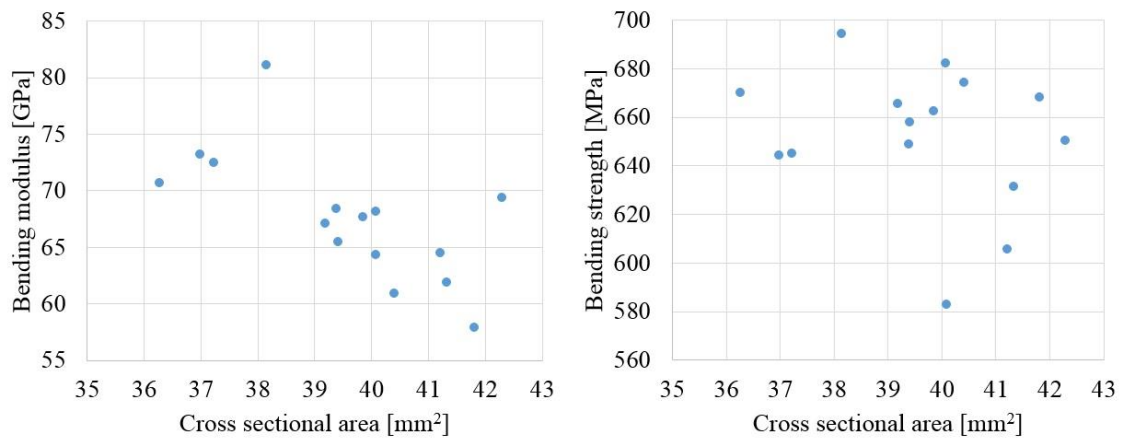


Figure 3.5 Relationship between cross sectional areas and bending moment (left) and cross sectional areas and bending strength (right)



Figure 3.6 Specimen broken under loading points (specimen 13)



Figure 3.7 Split along the fiber direction (specimen 16)



Figure 3.8 Specimen broken between loading points (specimen 4)

第4章 解析・試験結果の比較による解析手法の妥当性に関する考察

本研究では3本の試験片の微視的欠陥を考慮した有限要素解析モデルを作製し解析を行った。解析結果と試験結果をまとめたものをTable 4.1に示す。TP2とTP3は、輝度値の平均と V_f の関係式に従い要素ごとに V_f を定義した場合の解析結果となっている。TP1とTP3については解析結果と試験結果は良く一致しており、本研究で提案した有限要素解析モデル作製手法によって曲げ弾性率を1%以内の誤差で予測することができた。

TP1の有限要素モデルに定義された繊維方向とz軸がなす角度の分布をFigure 4.1に示す。本研究では試験片を3つの部分に分けそれぞれの代表部で断層画像を取得していたので、それぞれの部分ごとに角度分布を示した。Table 4.1のRight part, Middle part, Left partはFigure 2.6に描かれたそれらの場所と一致する。繊維方向の分布図を見ると、両端部は中央部と比べて繊維方向のz軸からのずれが大きく、そのばらつきも大きくなっていることがわかる。ラティス円筒構造を製造する際、リブが交差する部分では2つの異なる方向の繊維束が交互に重なっていく。そのため試験片の両端に相当するリブ交差部に近い位置では繊維のよれが大きく、試験片の中央部に相当するリブ交差部から離れた位置では繊維よれが比較的小さくなることが予想できる。したがってFigure 4.1に示す繊維方向の分布は製造方法を反映した妥当なものだと言える。正しい解析結果を得るためにはX線CT撮影を少なくとも端と中央の2箇所で行うべきであることがわかる。

TP2とTP3の解析では、TP1に用いた手法がTP2で適用するか確認するためすべての要素に同じ V_f の値を適用した解析も実施した。本研究で実施した解析ではそれぞれの要素に異なる値を定義したときの結果を比べて大きな差は見受けられなかった。しかしながら、一定とした V_f の平均値自体は輝度値平均と V_f の関係式を用いて試験片ごとに異なる値を使うべきである。本研究で用いたラティス構造を構成する樹脂は場所によってその量が異なることが製造方法から予想されるからである。

TP2の解析結果は試験結果と一致していない。解析結果を左右する主要な原因としては、繊維方向の分布が正しく定義されていない、各要素における繊維体積含有率 V_f が正しく定義されていない、の2つが考えられ、これらのどちらか、もしくは両方が試験と解析の結果の差を生んでいると考えることができる。まず、TP1と同様にTP2の有限要素に定義された繊維方向とz軸がなす角度の分布をFigure 4.2に示す。TP2の右端と左端における繊維方向分布のピークが異なっているが、低コスト製造法で製造された試験片にはもともとそのような繊維よれが存在していた可能性が十分に考えられる。TP1で確認することができた両端と中央部の繊維方向分布の違いは製造方法に起因するためどの試験片においても同様の傾向が出てくることが予想される。実際にTP2でも中央部の繊維よれが他の領域と比べて小さくなっていることがわかり、TP2の各要素に定義された繊維方向の分布に明らかな間違いがあるとは断定することができない。ただし、X線CT撮影を行った位置が試験片の両端だったので、繊維よれが過大評価されている可能性は考えられる。断層画像の撮影箇所を増やすことでこの問題は解決できるが、撮影時間が長くなってしまいうちに気を付けな

ればならない。

次に各要素における繊維体積含有率 V_f が正しく定義されていない点について考察する。TP2 と TP3 の全要素の V_f は、輝度値の平均式を用いて式(20)と式(21)によって計算されており、輝度値平均と V_f には比例関係がある。TP2 の曲げ弾性率は試験結果と比べて低い値となっているので全体的に TP2 の断層画像が暗く写っていることが予想される。本研究では断層画像（輝度値平均）と研磨画像（ V_f ）の比較をすることで式(20)と式(21)を得たが、その時点で2本の直線からずれた点が存在していた。そこで2本の直線それぞれにおいて直線との最大のずれを考慮し、y切片を修正した新しい式を用いて再解析を実施した（Figure 4.3）。

$$\text{eq1: } V_f = \begin{cases} 1.2651x - 170.40 & (V_f \geq 0) \\ 0 & (V_f < 0) \end{cases} \quad (26)$$

$$\text{eq2: } V_f = \begin{cases} 1.7106x - 215.34 & (V_f \geq 0) \\ 0 & (V_f < 0) \end{cases} \quad (27)$$

解析結果から得られた曲げ弾性率の値は 78.9 [GPa]となっており、試験結果 81.8 [GPa]に近づくものの、TP1 と TP3 ほどの精度での予測はできていない。2.4.2 では、たとえ同じ条件で撮影しても試験片の両端と中央部では視野内に含まれる空気の面積が異なり X 線の吸収具合も変わってくるため画像の明るさが異なってしまうことを説明したが、試験片の厚さや両端の形状も画像の明るさに影響を与えるので、同様のことは異なる試験片についてもいえる。つまり同じ中央部であっても試験片によって画像の明るさが異なるという現象が起きうる。したがって、どのような試験片のどの位置でも使うことのできる輝度値平均と V_f の関係式を得る必要がある。そのためには Figure 4.4 で示されるように試験片とほぼ同じ X 線吸収係数を持つ物質を継ぎ足し、断面形状を円柱に近づけることが必要になる。

本研究で提案した手法によって、試験片の微視的欠陥を考慮した有限要素モデルを作製し、そのモデルを用いた解析結果と試験結果の比較から手法の妥当性を確認することができた。また、より正確なモデルを作製するための改善点も明確にすることができた。このモデル化手法は材料の特徴に依存しているので、すべての CFRP に適用できるわけではないということは注意すべきである。X 線 CT 画像の二値化を応用したボイドの考慮は、ボイドとそれ以外の領域の輝度が画像上で明確に区別化されていれば良いので基本的にはどのような CFRP にも応用することができると考えられる。しかし、DIC を用いた繊維よれの計算は主にボイドや樹脂だまりの移動ベクトルを繊維の移動ベクトルと認識しており、繊維方向に沿ったボイドや樹脂だまりが存在しない CFRP の場合、正しい繊維方向を計算できない可能性がある。本研究で用いたラティス構造のリブは、一方向材かつオートクレーブを用いない製造方法であり本手法を適用することのできる条件がそろっていたと言える。

No. of specimen	Bending modulus (simulation)	Bending modulus (test)
3 (TP1)	72.7 [GPa]	73.2 [GPa]
8 (TP2)	63.4 [GPa]	81.8 [GPa]
10 (TP3)	70.1 [GPa]	70.7 [GPa]

Table 4.1 Results of simulations and tests

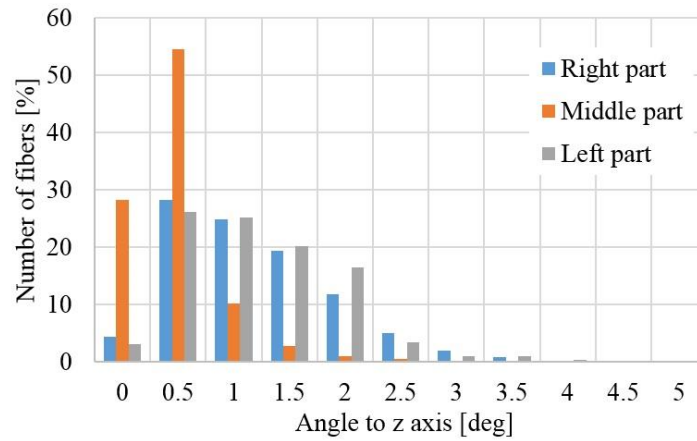


Figure 4.1 Fiber angle distribution (TP1)

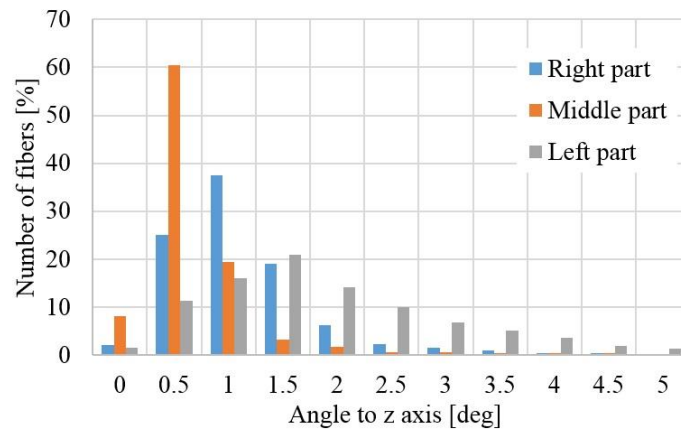


Figure 4.2 Fiber angle distribution (TP2)

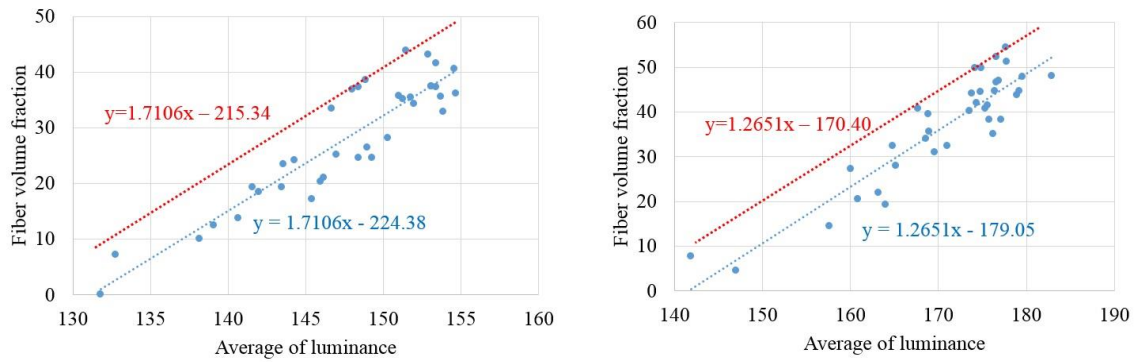


Figure 4.3 Equations used for recalculation (red) and conventional equations (blue)

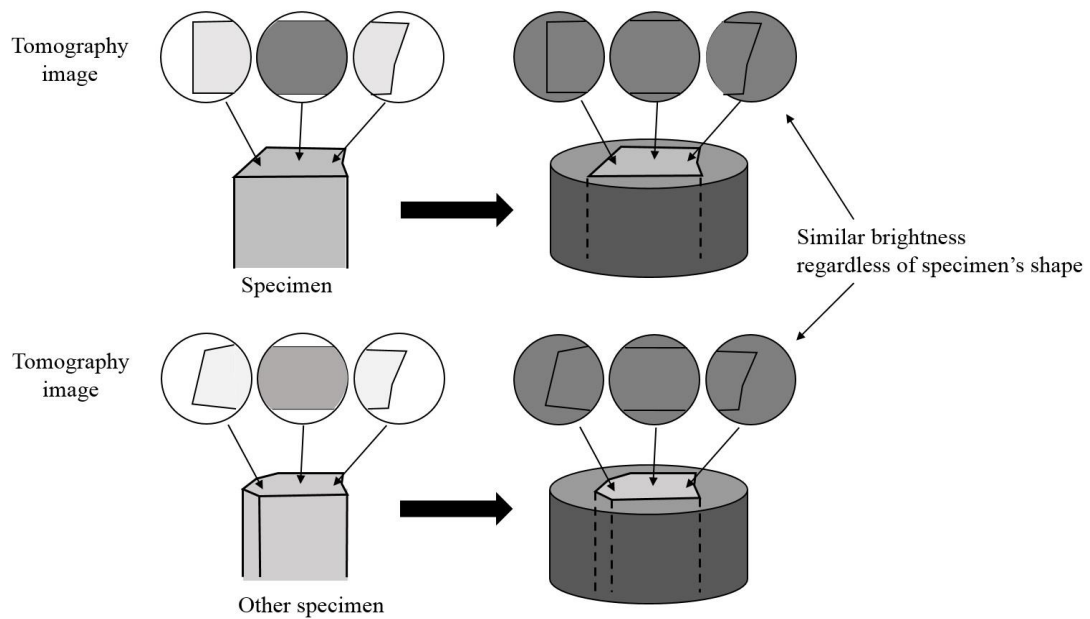


Figure 4.4 Possible alternative for the improvement of tomography images

第5章 結論

本研究では、X線CTを用いてCFRPラティス円筒構造のリブ内部の微視的欠陥を考慮した有限要素モデルを作製する手法を構築すること、作製したモデルを用いた解析結果と実際の試験結果を比較することでその手法の妥当性を検証することの2点を目的としていた。

第1章では序論としてオートクレーブを用いない低コスト製造法で製造されたCFRPにはボイドや繊維よれといった微視的欠陥が存在する場合があります、それらを有限要素解析に反映する必要があることを説明した。第2章ではラティス構造のリブを対象として試験片の微視的欠陥を考慮した有限要素解析モデルを作製する手法について説明し、そのモデルを用いた4点曲げ解析の結果を述べた。第3章では解析モデルを作製するのに用いた試験片を含む15本の試験片を用いて実施した4点曲げ試験の実施要領とその結果を紹介した。そして第4章で解析結果と試験結果を比較し、解析手法の妥当性について考察した。

3本のうち2本の試験片に関しては、作製したモデルを用いた解析結果と実際の試験結果から得られる試験片の曲げ弾性率はほぼ一致することから、解析手法の妥当性を示すことができたといえる。ただし残り1本の解析と試験の結果が異なっていたことから、X線CT画像を取得する領域や、本研究で使用した各要素に定義される繊維体積含有率 V_f と断層画像の輝度値平均の関係式の汎用性については改善の余地があると言える。また、解析手法に関して以下のことが提案できる。

- ・断層画像の取得は少なくとも試験片の中央部と両端で撮影する必要があること。
- ・解析モデルの要素に与える V_f は、要素ごとに定義しても全要素の平均値を与えても得られる曲げ弾性率の値はほぼ同じになること。しかしながら、平均値を得るための V_f の値自体は輝度値平均と V_f の関係式を用いて試験片ごとに異なる値を使うべきである。

付録 A X線 CT 画像を利用した炭素繊維コルゲート複合材の有限要素解析

A.1 緒言

本研究ではラティス構造のリブを例にとり、ボイドや繊維よれを考慮した有限要素モデルの作製および解析の実施、そして試験との比較によるモデル作製プロセスの妥当性検証を行った。ここでは有限要素の材料方向を要素ごとに定義し解析を実施した例として、炭素繊維コルゲート複合材を対象とし、X線 CT によって取得した断層画像を積層することで作製した 3 次元モデルを用いた有限要素解析の結果を紹介する。また、解析結果と実験値で得られた物性を比較することでこの手法の妥当性を議論する。

A.2 解析プロセス

Figure A.1 は本研究のプロセスを示したフローチャートである。まず、試験片となる炭素繊維コルゲート材を用意し、X線 CT スキャナでその断層画像を撮影した(A.3)。それらの画像を積層し、試験片に相当する部分のみを残すことで試験片の 3 次元モデルを得た(A.4)。次に、そのモデルを有限要素解析ソフトウェアにインポートし、メッシュの生成を行った(A.5)。本研究で用いるコルゲート材では要素ごとに材料方向を定義する必要があるためそのためのサブルーチンを実際に研磨した断面を観察することで作成した(A.6)。最後に有限要素解析を行い、物性を実験値と比較することでプロセス全体の妥当性を議論する(A.7)。次節以降でそれぞれのプロセスについて詳しく説明する。

A.3 X線 CT スキャナによる断面画像の撮影

本研究では Figure A.2 のような直交して交わる 2 方向の繊維を持つ平織物(T300-1K/RS11)を波形に曲げて、130°Cで 2 時間かけて硬化させたものを試験片として用いる(Figure A.3)。波の波長は 3mm、高さは 3mm である。Figure A.3 に書かれているように Transverse 方向と Longitudinal 方向を定義する。

断面画像は Figure A.3 の白線で囲まれた 1 往復分が入るように、0.01 [mm] 間隔で 228 枚撮影した。撮影に用いた X線 CT スキャナは TOSCANNER-32300 μ FD で解像度は 4.13 [μ m]、1 周の分割数は 2800、積算枚数 12 枚の条件下で撮影した。撮影から画像の再構成が完了するまで約 4 時間を要した。撮影結果を Figure A.4 に示す。枚数を表す数字は Figure A.3 と対応している。試験片の境界のはっきりと映っており、2 方向の繊維が確認できる。

A.4 断面画像積層による 3 次元モデルの作製

この作業は 3 次元データを操作できるソフトウェア VGStudio (Volume Graphics Inc.) を用いて行った。前節で撮影した 228 枚の断面画像を積層し、試験片に相当する白い部分のみを残すことで、もとの試験片を復元した(Figure A.5)。ソフトウェアに内蔵されている適応ガウスフィルタを用いてモデルの表面を輪郭は保ちつつ滑らかにし、さらに体積データから表面データへと変換した

(Figure A.6)。表面は三角形の集合に変換され、STL (Stereolithography) と呼ばれる三角形の頂点の座標を保存するデータ形式を用いて 3 次元モデルを保存した。

A.5 メッシュの作製

前節で作成した STL ファイルは表面データなので、メッシュを生成するためにソリッドを作成する。まず、有限要素解析のプリ・ポストプロセッサの 1 つである Femap にインポートすると、三角形の座標に従って自動的に三角形メッシュとノードが生成される。次に、Figure A.7 のようにノード(白色の点)をつなぎ、曲線(太い白線)を作成する。そして、3 本または 4 本の曲線を選び平面を作成する。試験片を囲むすべての表面を作成した後、表面に囲まれた領域を体積のあるソリッドに変換した。このソリッドを 2 次要素の四面体メッシュに自動分割させた (Figure A.8)。要素数と節点数はそれぞれ 268922、639840 となった。

A.6 材料方向の定義

前節の方法でメッシュを自動作成するとき、繊維束ごとの区切りはできない。そこで Figure A.9 のように、それぞれの要素が Transverse 方向、Longitudinal 方向どちらの繊維に相当するか判断し、材料方向(炭素繊維の方向)を定義しなければならない。本研究では、任意の z 座標において Transverse 方向の繊維が占める領域を不等式で表現し、この領域内に要素の積分点がある場合、その要素は Transverse 方向の繊維であるとみなした。この領域は断面を研磨して撮影した画像を用いて求めた。Figure A.4 で撮影した 5 つの断面を研磨し撮影した。Figure A.10 は X 線 CT で 171 枚目に撮影した箇所を示したものである。Figure A.10 右の L と T はそれぞれ Longitudinal と Transverse 方向の繊維を表す。

Transverse 方向の繊維を平面の集まりと仮定し、その平面方程式を求めることで知りたい領域を数式化した。Figure A.11 のように各断面画像で Transverse 方向の繊維を直線で近似し、その直線が折れる点を通る平面を作った。繊維の断面は四角形に近似されることになる。この領域に入らなかった要素はすべて Longitudinal 方向の繊維とした。

材料(繊維)方向については、Transverse 方向の繊維の場合、平面上にあって z 方向成分が 0 で長さが 1 のベクトル m を計算し、注目する積分点の周辺の 4 つの平面上のベクトルの平均を材料方向と定義した。任意の平面方程式は $ax + by + cz + d = 0$ と書くことができ、その法線ベクトル n は $n = (a, b, c)$ となる。 $m = (p, q, 0)$ とおくことができ、 $|m| = 1$ 、 $n \cdot m = 0$ の連立方程式を解くことで未知数 p と q を計算した。Longitudinal 方向の繊維の場合、要素の材料方向は $(0, 0, 1)$ と仮定した。

A.7 有限要素解析と実験値の比較

Abaqus/Standard 6.12 を用いて有限要素解析を行い、Transverse 方向、Longitudinal 方向の弾性率 E_T 、 E_L を求めた。本研究で用いた試験片と同じ炭素繊維と樹脂を用いた一方向材の物性を Table A.1 に示す。材料方向に関しては前節の定義にしたがってサブルーチン ORIENT を作成し

た。また、計算では幾何学的非線形を考慮した。

7.1 E_T の計算

Figure A.12 で示されるように、試験片の片端の面(白色の面)を x 方向の移動と x 軸周りの剛体回転が起こらないように拘束した。反対側の面に x 方向負の変位を与え、その面における荷重を足し合わせて断面積でわり、応力 σ_T を計算した。断面積は実験値を計算したときに用いたものと同じにしている。 x 方向のひずみを ε_T とすると、 E_T は $E_T = \sigma_T / \varepsilon_T$ により求めることができる。計算の結果、 $E_T = 0.55$ [MPa] となった。

7.2 E_L の計算

E_T と同様に、試験片の片端の面を z 方向の移動と z 軸周りの剛体回転が起こらないように拘束した。反対側の面に z 方向負の変位を与え、その面における荷重を足し合わせて断面積でわり、応力 σ_L を計算した。断面積は実験値を計算したときに用いたものと同じにしている。変位を ε_L とすると、 E_L は $E_L = \sigma_L / \varepsilon_L$ により求めることができる。計算の結果、 $E_L = 5.66$ [GPa] となった。

7.3 実験値との比較

実験値[28]によると、 $E_T = 0.92$ [MPa]、 $E_L = 4.26$ [GPa]であり、 E_T は実験値より小さく、 E_L は実験値より大きいという結果になった。原因としては大きく分けて 2 つあると考えられる。まず 1 つ目は、Transverse 方向の繊維とみなされた要素が少ないということである。Figure A.10 を見てもわかるように、本来の繊維束の断面は楕円形状に近いのにもかかわらず、前節での近似では四角形となっている。実際、生成された要素のうち Transverse 方向の繊維とみなされたのは全体のうち 43%となっていた。本来の試験片の構造を考えると、2 方向の繊維が占める体積比は 1 : 1 になるべきなので、やはり Transverse 方向の繊維を表す要素が少なくなっていると考えられる。繊維束の断面形状を改善することで計算結果をより実験値に近づけることができる。例えば、平面方程式を計算するときに繊維束を少し大きめにとる方法がある(Figure A.13)。2 つ目の原因として考えられるのは、平面の数が少なく繊維方向が正しく定義されていないということである。平面をより細かく分割していき、最終的には曲線の接線方向を材料方向とすることで、より実験値に近い結果が得られると考えられる。また、Longitudinal 方向の繊維を直線と仮定していたので、例えば sin 波の形状とすることで改善することができる。繊維方向を正しく定義するために、ラティス構造のリブ内部の繊維方向を計算するために利用した DIC を用いることも有効な手段であると考えられる。

A.8 結論

本研究では、X 線 CT の結果を用いて従来の方法ではモデル化することが難しい炭素繊維コルゲート材の 3 次元モデルを作成することができた。また、その 3 次元モデルを有限要素解析に用い、2 方向の弾性率を予測することができた。解析結果と実験結果の差は、2 方向の繊維の区切り方と材料方向の与え方によって生じるものであり、今後はその改善が必要である。

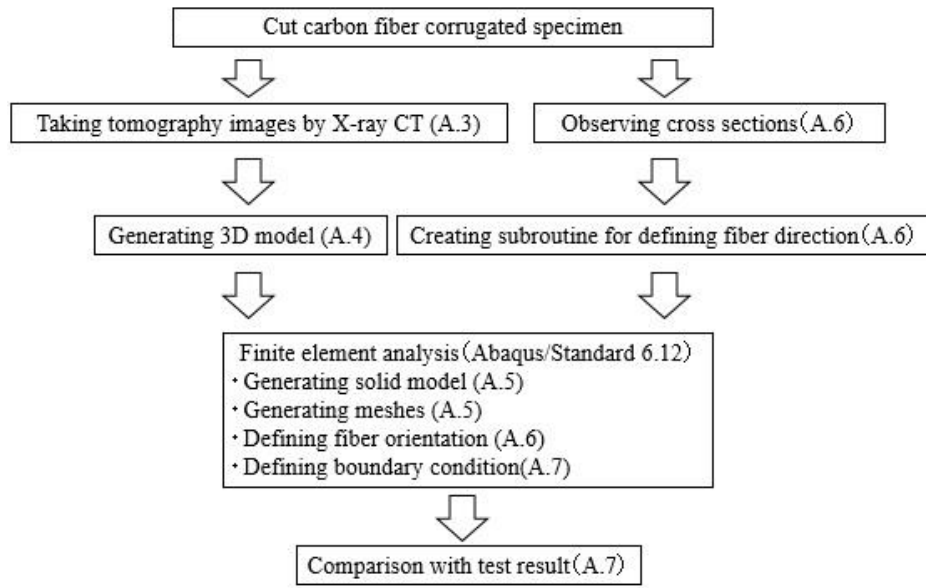


Figure A.1 Overview of the methodology for executing finite element analysis

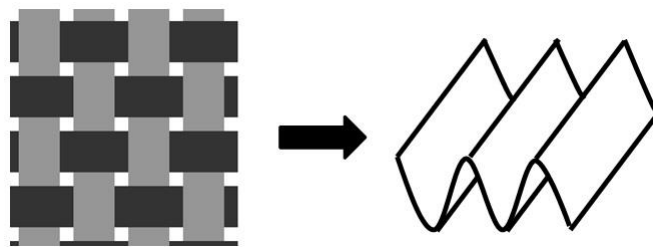


Figure A.2 Plain fabric made of carbon fiber

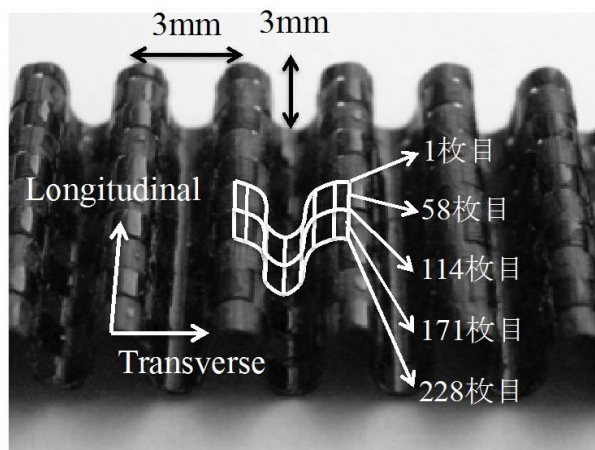


Figure A.3 Tomography location in the specimen

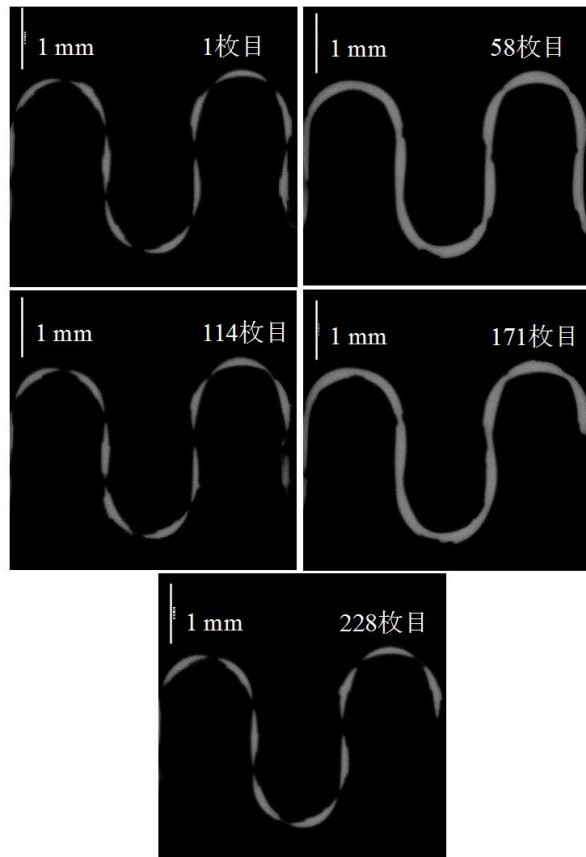


Figure A.4 Tomography images

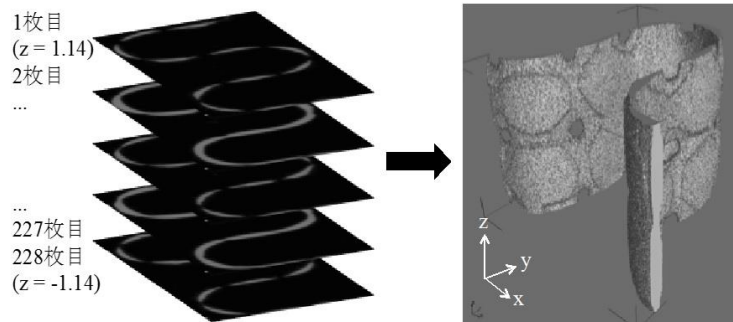


Figure A.5 Three dimensional model generated by stacking two dimensional tomography

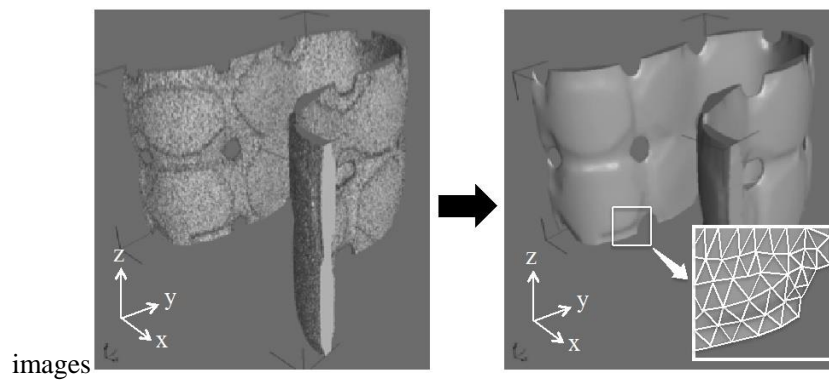


Figure A.6 Model converted into triangle surfaces

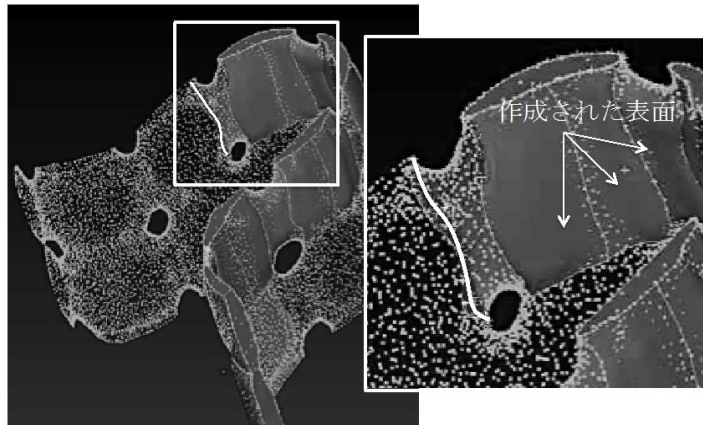


Figure A.7 Regeneration of model surfaces

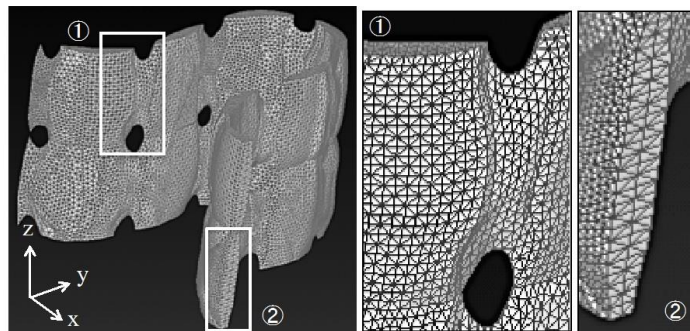


Figure A.8 Generated tetrahedron meshes

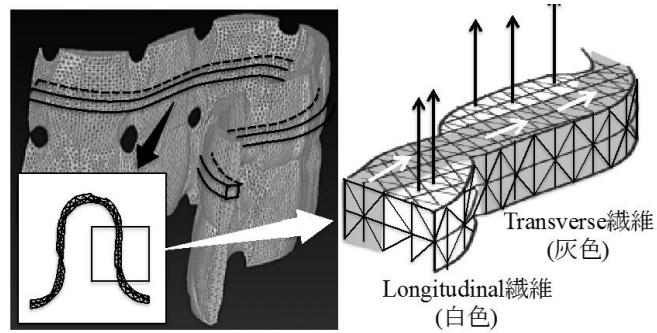


Figure A.9 Differentiation of fiber directions

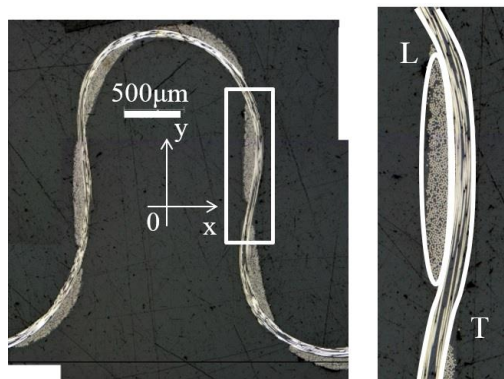


Figure A.10 Polished cross section (L: longitudinal, T: transverse)

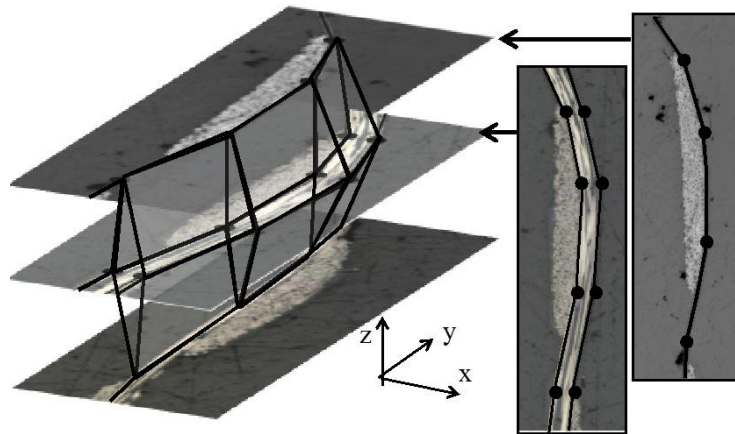


Figure A.11 Planes representing transverse fibers

E_L	E_T	G_{LT}	ν_{LT}	ν_{TT}
147 [GPa]	7.0 [GPa]	4.5 [GPa]	0.30	0.45

Table A.1 Properties of unidirectional CFRP made of same type of fiber and resin

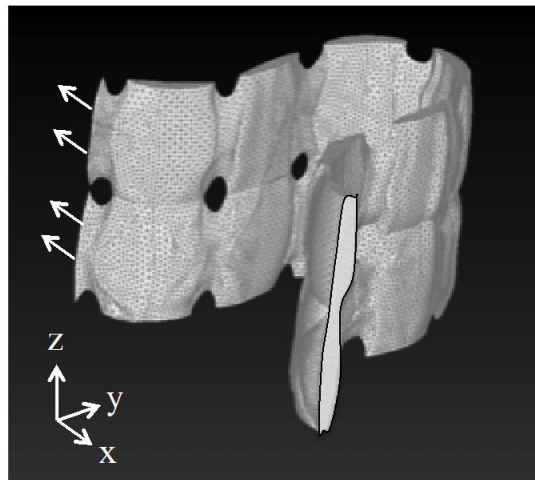


Figure A.12 Calculation of E_T

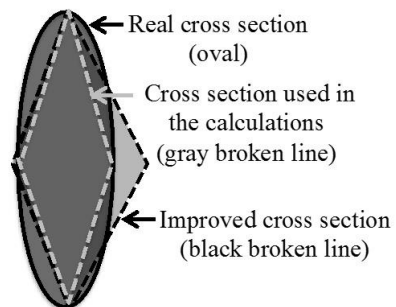


Figure A.13 Cross sections of carbon fiber tow

付録 B 本研究で用いたプログラム

B.1 サブルーチン UMAT (Fortran による)

C 弾性マトリクスを要素ごとに定義するためのサブルーチン

```
C
      SUBROUTINE UMAT (STRESS, STATEV, DDSDE, SSE, SPD, SCD,
# RPL, DDSDDT, DRPLDE, DRPLDT,
# STRAN, DSTRAN, TIME, DTIME, TEMP, DTEMP, PREDEF, DPRED, CMNAME,
# NDI, NSHR, NTENS, NSTATV, PROPS, NPROPS, COORDS, DROT, PNEWDT,
# CELENT, DFGRD0, DFGRD1, NOEL, NPT, LAYER, KSPT, KSTEP, KINC)

C
      INCLUDE 'ABA_PARAM.INC'

C
      CHARACTER*80 CMNAME
      DIMENSION STRESS (NTENS), STATEV (NSTATV),
# DDSDE (NTENS, NTENS), DDSDDT (NTENS), DRPLDE (NTENS),
# STRAN (NTENS), DSTRAN (NTENS), TIME (2), PREDEF (1), DPRED (1),
# PROPS (NPROPS), COORDS (3), DROT (3, 3), DFGRD0 (3, 3), DFGRD1 (3, 3)

C
C ここからは自分で書く
      INTEGER i
      INTEGER j
      INTEGER k
```

```

C
C 弾性マトリクスの成分の格納場所 Kumat を確保 1 要素につき 6*6
      common /Kumatdata/Kumat,Numatcall
      DOUBLE PRECISION Kumat(258048,6)
C
C Numatcall を呼び出しごとに1つずつ増やす (Numatcall=0, 1, 2, ...)
      INTEGER Numatcall
      Numatcall=Numatcall+1
C
C 繰り返し1回目のみ弾性マトリクスを計算した csv ファイルを開き Kumat に入れる
C csv のファイルパスは絶対パスを記述
      if(Numatcall.eq.1)then
          open(50,file='C:\Users\%ii%\Documents\M2\TP2012\Model
$allsmall\umatsmall_1.csv',status='old')
          do k=1,258048
              read(50,*) Kumat(k,1),Kumat(k,2),Kumat(k,3),Kumat(k,4),
$Kumat(k,5),Kumat(k,6)
          end do
          close(50)
C
C Kumat に読み込んだ弾性マトリクスの成分を log ファイルに出力 デバック用
C      open(6)
C      do k=1,258048

```

```

C          write(6,*) Kumat(k,1),Kumat(k,2),Kumat(k,3),Kumat(k,4),
C          $Kumat(k,5),Kumat(k,6)
C          end do
C          close(6)
C
C          end if
C
C Kumat に読み込んだ弾性マトリクスの成分を DDSDE に入力
C          do i=1,6
C              do j=1,6
C                  DDSDE(i,j)=Kumat(6*NOEL-6+i,j)
C              end do
C          end do
C
C 応力の更新
C          STRESS(1)=DDSDE(1,1)*DSTRAN(1)+DDSDE(1,2)*DSTRAN(2)+
C          # DDSDE(1,3)*DSTRAN(3)+DDSDE(1,4)*DSTRAN(4)+
C          # DDSDE(1,5)*DSTRAN(5)+DDSDE(1,6)*DSTRAN(6)+STRESS(1)
C          STRESS(2)=DDSDE(2,1)*DSTRAN(1)+DDSDE(2,2)*DSTRAN(2)+
C          # DDSDE(2,3)*DSTRAN(3)+DDSDE(2,4)*DSTRAN(4)+
C          # DDSDE(2,5)*DSTRAN(5)+DDSDE(2,6)*DSTRAN(6)+STRESS(2)
C          STRESS(3)=DDSDE(3,1)*DSTRAN(1)+DDSDE(3,2)*DSTRAN(2)+
C          # DDSDE(3,3)*DSTRAN(3)+DDSDE(3,4)*DSTRAN(4)+

```

```

# DDSDE (3, 5) *DSTRAN (5) +DDSDE (3, 6) *DSTRAN (6) +STRESS (3)
      STRESS (4) =DDSDE (4, 1) *DSTRAN (1) +DDSDE (4, 2) *DSTRAN (2) +
# DDSDE (4, 3) *DSTRAN (3) +DDSDE (4, 4) *DSTRAN (4) +
# DDSDE (4, 5) *DSTRAN (5) +DDSDE (4, 6) *DSTRAN (6) +STRESS (4)
      STRESS (5) =DDSDE (5, 1) *DSTRAN (1) +DDSDE (5, 2) *DSTRAN (2) +
# DDSDE (5, 3) *DSTRAN (3) +DDSDE (5, 4) *DSTRAN (4) +
# DDSDE (5, 5) *DSTRAN (5) +DDSDE (5, 6) *DSTRAN (6) +STRESS (5)
      STRESS (6) =DDSDE (6, 1) *DSTRAN (1) +DDSDE (6, 2) *DSTRAN (2) +
# DDSDE (6, 3) *DSTRAN (3) +DDSDE (6, 4) *DSTRAN (4) +
# DDSDE (6, 5) *DSTRAN (5) +DDSDE (6, 6) *DSTRAN (6) +STRESS (6)
C
      RETURN
      END

```

B.2 サブルーチン ORIENT (Fortran による)

C 繊維方向を各要素ごとに定義するサブルーチン

```

C
      subroutine orient (t, noel, npt, layer, kspt, coords, basis,
$      orname, nnodes, cnodes, jnum)
C
      include 'aba_param.inc'
C
      character*80 orname

```

```

c
    dimension t(3,3), coords(3), basis(3,3), cnodes(3, nnodes)
    dimension jnum(nnodes)

c
c ここからは自分で書く
    INTEGER i
    INTEGER j
    INTEGER k

c
c 繊維方向の方向余弦の格納場所 Korient を確保 1 要素につき 3*3
    common /Korientdata/Korient, Norientcall
    DOUBLE PRECISION Korient(129024,3)

C Norientcall を呼び出しごとに1つずつ増やす (0, 1, 2, ...)
    INTEGER Norientcall
    Norientcall=Norientcall+1

C
C 繰り返し1回目のみ方向余弦を計算した csv ファイルを開き Korient に入れる
C csv ファイルのパスは絶対パスを記述
    if(Norientcall.eq.1) then
        open(51, file='C:\Users\%i\Documents\M2\TP2012\Model
$allsmall\orientsmall.csv', status='old')
        do k=1,129024
            read(51,*) Korient(k,1), Korient(k,2), Korient(k,3)

```



```

        end do
        close(51)
c
c Korient に読み込んだ方向余弦の成分を log ファイルに出力 デバック用
c     open(6)
c     do k=1,129024
c         write(6,*) Korient(k,1),Korient(k,2),Korient(k,3)
c     end do
c     close(6)
c
    end if
c
c Korient に読み込んだ弾性マトリクスの成分を t に入力
    do i=1,3
        do j=1,3
            t(i,j)=Korient(3*NOEL-3+i,j)
        end do
    end do
c
    return
end

```

B.3 各要素の弾性マトリクスを計算するプログラム (Python 2.7.6 による)

プログラム実行前には Python と Python Image Library をインストールしなければならない。Python コードの実行は Python ファイル(.py) のあるディレクトリにおいて“python ファイル名.py”とコマンドプロンプトで入力する。

```
# -*- coding: utf-8 -*-

import Image
import ImageStat
import csv
import ImageFilter

if __name__ == "__main__":
#
    size = 64          #Element size [pixel]
    yelem = 14        #No. of element in y direction
    col_value = 95    #Threshold, 0~255
#
    for increment_ in range(0,size*yelem,size):
#
#####Copy#####
#Copy the script below until the end for another tomographic image. Specify filename, yfirst, xfirst and xend
#
#Specify the absolute file directory
```

```

filename = "E:/3rdSpecimen/umat/top/141121C_Export0100.bmp"
img = Image.open(filename)

#
yfirst = 56          #First (=top) y coordinate
xfirst = 92          #First (=left) x coordinate
xend = 603          #End (=right) x coordinate

#
#Gaussian Filter
#   img.show()
f = ImageFilter.Kernel((5,5), (1,4,6,4,1,4,16,24,16,4,6,24,36,24,6,4,16,24,16,4,1,4,6,4,1))
img_gaussian = img.filter(f)
#   img_gaussian.show()
#
#Thresholding, modify "col_value" when you want to change the threshold
def filter(col):
    if col>col_value:
        return 255
    else:
        return 0
img1 = img_gaussian.point(filter)
img1 = img1.convert("RGBA")
#   img1.show()
#

```

```

#Make the white pixels into transparent
    datas = img1.getdata()
    newData = []
    for item in datas:
        if item[0] ==255 and item[1] ==255 and item[2] ==255:
            newData.append((255, 255, 255, 0))
        else:
            newData.append(item)
    img1.putdata(newData)
#   img1.save('transparent_from_PIL.png')
    img = img.convert("RGBA")
#   print img.mode   #RGBA
#
#Paste the filtered image onto the original image
    img.paste(img1, (0,0), img1)
#
#Make the black pixels into transparent
    datas_ = img.getdata()
    newData_ = []
    for item_ in datas_:
        if item_[0] ==0 and item_[1] ==0 and item_[2] ==0:
            newData_.append((0, 0, 0, 0))
        else:

```

```

        newData_.append(item_)
    img.putdata(newData_)
#    img.show()
#
#Choose png or bmp for the created file
#    img.save('complete.png')
#    img = img.convert("RGB")
#    img.save('complete0201.bmp')
#
#What have been done: Thresholding the original image and pasting only the black part to the original image
#
#Crop the image
#Specify the first y coordinate
    upper = yfirst + increment_
    lower = upper + size
#Specify the first and the end x coordinate
    for increment in range(xfirst, xend, size):
        left = increment
        right = left + size
        cropsize = (left, upper, right, lower)
        img2 = img.crop(cropsize)
#    img2.show()
#

```

```

#Count the number of black pixels in the cropped image
    count = 0.0
    luminosity_sum = 0
    datas2 = img2.getdata()
    for item2 in datas2:
        if item2[0]==0 and item2[1]==0 and item2[2]==0:
            count = count + 1.0
        else:
            luminosity_sum = luminosity_sum + item2[0]
#    print count
#    print luminosity_sum
#
#Show the data about the cropped image
    stat = ImageStat.Stat(img2)
    print filename
    print cropsize
    if (stat.count[0]-count)>0:
        luminosity_mean = luminosity_sum/(stat.count[0]-count)
    else:
        luminosity_mean = 0
    print luminosity_mean           #stat.mean[0]
#    print stat.count[0]           #number of pixels including transparent ones
    Vv = count*100.0/stat.count[0]  #calculate the Vv

```

```

    print 'Vv= ', Vv, '%'
#Add the expression defining the relationship between the mean luminosity values in CT photos and real photos
#    Vf = (100-Vv)*0.37    #write an equation with luminosity_mean
#    Vf = (100-Vv)*(1.7106*luminosity_mean-224.38)/100    #eq1:middle of specimen
Vf = (100-Vv)*(1.3445*luminosity_mean-191.46)/100    #eq2:edge of specimen
if Vf<0:
    Vf = 0.0
if Vf>100:
    Vf = 100.0
print 'Vf= ', Vf, '%'
Vm = 100.0-Vv-Vf
print 'Vm= ',Vm, '%'

#
#Fiber ('1'is fiber direction) properties
    Ef1 = 240000.0
    Ef2 = Ef1*18.6/230.0
    vf12 = 0.3
    vf23 = 0.3
    Gf12 = Ef1*6.6/230.0

#
#Matrix (isotropic) properties
    Em1 = 2400.0
    Em2 = 2400.0

```

```

vm12 = 0.35
vm23 = vm12
Gm12 = Em1/2/(1+vm12)
#
#Halpin-Tsai
xi = 1.0
eta2 = ((Ef2/Em2)-1)/((Ef2/Em2)+xi)
MMm2 = (1+xi*eta2*Vf/100)/(1-eta2*Vf/100)
xii = 2.0
eta23 = ((vf23/vm23)-1)/((vf23/vm23)+xii)
MMm23 = (1+xii*eta23*Vf/100)/(1-eta23*Vf/100)
xiii = 2.0
eta12 = ((Gf12/Gm12)-1)/((Gf12/Gm12)+xiii)
MMm12 = (1+xiii*eta12*Vf/100)/(1-eta12*Vf/100)
if Vv<100:
    E1 = Ef1*Vf/100+Em1*Vm/100
    E2 = Em2*MMm2
    E3 = E2
    v12 = vf12*Vf/100+vm12*Vm/100
    v21 = v12*E2/E1
    v13 = v12
    v31 = v13*E3/E1
    v23 = vm23*MMm23

```



```

v32 = v23
G12 = Gm12*MMm12
G13 = G12
G23 = E2/2/(1+v23)
if Vv==100:           #only void
    E1 = 1.0          #E1=1MPa
    E2 = 1.0          #E2=1MPa
    E3 = E2
    v12 = 0.3
    v21 = 0.3
    v13 = v12
    v31 = 0.3
    v23 = 0.3
    v32 = v23
    G23 = E2/2/(1+v23)
    G12 = G23
    G13 = G12
#Calculte Dij
delta = 1-v12*v21-v23*v32-v31*v13-2*v21*v32*v13
D11 = E1*(1-v23*v32)/delta
D12 = E1*(v21+v31*v23)/delta
D13 = E1*(v31+v21*v32)/delta
D14 = 0.

```

D15 = 0.
D16 = 0.
D21 = D12
D22 = $E2 * (1 - \nu13 * \nu31) / \text{delta}$
D23 = $E2 * (\nu32 + \nu12 * \nu31) / \text{delta}$
D24 = 0.
D25 = 0.
D26 = 0.
D31 = D13
D32 = D23
D33 = $E3 * (1 - \nu12 * \nu21) / \text{delta}$
D34 = 0.
D35 = 0.
D36 = 0.
D41 = 0.
D42 = 0.
D43 = 0.
D44 = G12
D45 = 0.
D46 = 0.
D51 = 0.
D52 = 0.
D53 = 0.

```

D54 = 0.
D55 = G13
D56 = 0.
D61 = 0.
D62 = 0.
D63 = 0.
D64 = 0.
D65 = 0.
D66 = G23

#
#Create output file
    csvfile = open('umattest.csv', 'a')
    writer = csv.writer(csvfile, lineterminator='\n')
#
    writer.writerow([cropsiz[0], cropsiz[1], cropsiz[2], cropsiz[3], luminosity_mean, Vv, Vf, D11, D12,
D13, D22, D23, D33, D44, D55, D66])
#
    if Vv<100:
#
        writer.writerow([Vf/(100-Vv), 0, 0, 0.0, 0.0, 0.0])
        writer.writerow([D11, D12, D13, 0.0, 0.0, 0.0])
        writer.writerow([D21, D22, D23, 0.0, 0.0, 0.0])
        writer.writerow([D31, D13, D33, 0.0, 0.0, 0.0])
        writer.writerow([0.0, 0.0, 0.0, D44, 0.0, 0.0])
        writer.writerow([0.0, 0.0, 0.0, 0.0, D55, 0.0])
        writer.writerow([0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, D66])

```

```
        csvfile.close()
#
#####Copy#####
```

B.4 各要素の繊維方向の方向余弦を計算するプログラム (Python 2.7.6 による)

```
#!/usr/bin/env python

import csv
import glob
import math

csvfile = open('test.csv', 'a')    #create output csv file
writer = csv.writer(csvfile, lineterminator='¥n')

size = 64                          #element xy size [pixel]
zsize = 206                        #element z size [pixel]
yele = 14                          #number of element in y direction
for ystep in range(0,size*yele,size):

#####Copy#####
#Copy the script below until the end for another DIC output files
#Open all *.txt (DIC output) files
```

```

for file in glob.glob('1B00001.txt'):
    print file, '-'*20

#Open the lines one by one
    for line in open(file, 'r'):

#Exclude the first line
        if (line[0]=='#'): continue;
        itemList = line[:-1].split('¥t')
        numbers = [float(itemList[0]),float(itemList[1]),float(itemList[2]),float(itemList[3])]
#        print itemList, float(itemList[0])
#Specify the region of interest (ex. 91, 604 and 55)
        if (91 < numbers[0] <604):
            if (55+ystep < numbers[1] < 55+size+2+ystep):
                if (numbers[2] != 0):
                    if (numbers[3] != 0):
#                        print numbers
#x,y,z
#                            row1 = float(itemList[0])
#                            row2 = float(itemList[1])
#                            row3 = 1
#dx,dy,dz
#                            row4 = float(itemList[2])

```

```

        row5 = float(itemList[3])
        row6 = zsize
#t11,t21,t31,...,t13,t23,t33
        row7 = row4/math.sqrt(row4**2+row5**2+row6**2)
        row8 = row5/math.sqrt(row4**2+row5**2+row6**2)
        row9 = row6/math.sqrt(row4**2+row5**2+row6**2)
        row10 = -row5/math.sqrt(row4**2+row5**2)
        row11 = row4/math.sqrt(row4**2+row5**2)
        row12 = 0.
        row13 = -row4*row6/math.sqrt((row4*row6)**2+(row5*row6)**2+(row4**2+row5**2)**2)
        row14 = -row5*row6/math.sqrt((row4*row6)**2+(row5*row6)**2+(row4**2+row5**2)**2)
        row15=(row4**2+row5**2)/math.sqrt((row4*row6)**2+(row5*row6)**2+(row4**2+row5**2)**2)
        writer = csv.writer(csvfile, lineterminator='¥n')
        writer.writerow([row7,row10,row13])
        writer.writerow([row8,row11,row14])
        writer.writerow([row9,row12,row15])
if (numbers[3] == 0):
    writer.writerow([0.,1.,0.])
    writer.writerow([0.,0.,1.])
    writer.writerow([1.,0.,0.])
#####Copy#####

```

付録 C 繊維よれが積層板の曲げ剛性に与える影響の理論的評価

本研究では有限要素モデルに与えられた繊維方向の分布を紹介したが，繊維方向のずれがどの程度試験片の曲げ弾性率に影響を与えるのか積層板理論から推算することができるのでここで紹介する．古典積層理論によると，N層からなる積層板にかかる合力 N_x, N_y, N_{xy} ・合モーメント M_x, M_y, M_{xy} と板の中央面におけるひずみ $\varepsilon_x^0, \varepsilon_y^0, \gamma_{xy}^0$ ・板の曲率 $\kappa_x, \kappa_y, \kappa_{xy}$ には以下のような関係がある．合力と合モーメントの正方向を Figure C.1 に示す．

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} \quad (28)$$

ここで， $(i, j) = (1, 1), (1, 2), (1, 6), (2, 2), (2, 6), (6, 6)$ とすると

$$[A_{ij}] = \sum_{k=1}^N [\bar{Q}]_k (z_k - z_{k-1}) \quad (29)$$

$$[B_{ij}] = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N [\bar{Q}]_k (z_k^2 - z_{k-1}^2) \quad (30)$$

$$[D_{ij}] = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^N [\bar{Q}]_k (z_k^3 - z_{k-1}^3) \quad (31)$$

となる． z_k は第 k 層の上面の z 座標を表す (Figure C.2)． $[\bar{Q}]_k$ は繊維方向を考慮した剛性マトリクスであり，以下のように定義される．繊維方向の元座標からの回転の正方向を Figure C.3 に示す．

$$[\bar{Q}]_k = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \quad (32)$$

$$\bar{Q}_{11} = Q_{11} \cos^4 \theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66}) \cos^2 \theta \sin^2 \theta + Q_{22} \sin^4 \theta \quad (33)$$

$$\bar{Q}_{12} = (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66}) \cos^2 \theta \sin^2 \theta + Q_{22} (\cos^4 \theta + \sin^4 \theta) \quad (34)$$

$$\bar{Q}_{16} = (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}) \cos^3 \theta \sin \theta + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66}) \sin^3 \theta \cos \theta \quad (35)$$

$$\bar{Q}_{22} = Q_{11} \sin^4 \theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66}) \cos^2 \theta \sin^2 \theta + Q_{22} \cos^4 \theta \quad (36)$$

$$\bar{Q}_{26} = (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}) \sin^3 \theta \cos \theta + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66}) \cos^3 \theta \sin \theta \quad (37)$$

$$\bar{Q}_{66} = (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{13} - 2Q_{66}) \cos^2 \theta \sin^2 \theta + Q_{66} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta) \quad (38)$$

すべての積層板において繊維方向が一定と仮定すると， $[\bar{Q}]_k$ は一定となるので(30)より $[B_{ij}] = 0$ である．したがって(28)より，

$$\begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{pmatrix} \quad (39)$$

と表すことができる。ポイドがないと仮定し、繊維方向のよれによって $[D_{ij}]$ がどのように変化するか説明する。繊維方向のよれがない ($\theta=0^\circ$) とき (式番号) より

$$\begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 397031 & 8686 & 0 \\ 8686 & 20007 & 0 \\ 0 & 0 & 6502 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{pmatrix} \quad (40)$$

4点曲げ試験では純曲げ ($M_y = M_{xy} = 0$) となっているので κ_y と κ_{xy} を消去すると、

$$M_x = 393260\kappa_x \quad (41)$$

となる。次に、繊維方向が一様に3度ずれているとき $\theta=3^\circ$ として

$$\begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 394978 & 9706 & 19563 \\ 9706 & 20020 & 141 \\ 19563 & 141 & 7523 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{pmatrix} \quad (42)$$

同様の条件より、

$$M_x = 339789\kappa_x \quad (43)$$

となる。繊維よれがないときと比べて約13.6%曲げ弾性率が低下していることがわかる。式(39)を変形すると、以下の式が得られる。

$$M_x = \left(D_{11} - \frac{2D_{12}D_{16}D_{26} - D_{12}^2D_{66} - D_{16}^2D_{22}}{D_{26}^2 - D_{22}D_{66}} \right) \kappa_x \quad (44)$$

この式を用いて繊維よれと曲げ剛性低下率の関係を表したグラフを Figure C.4 に示す。

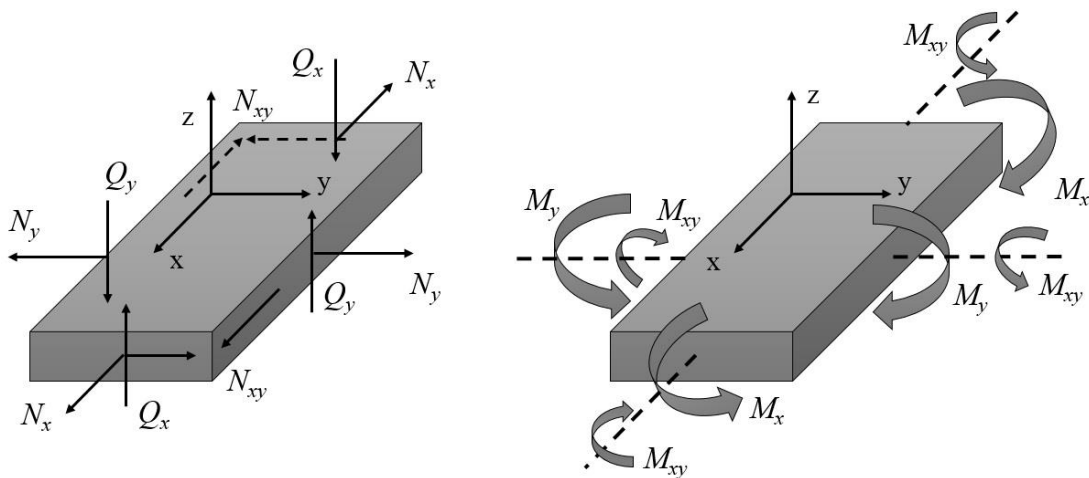


Figure C.1 Positive direction of the resultant force and moment

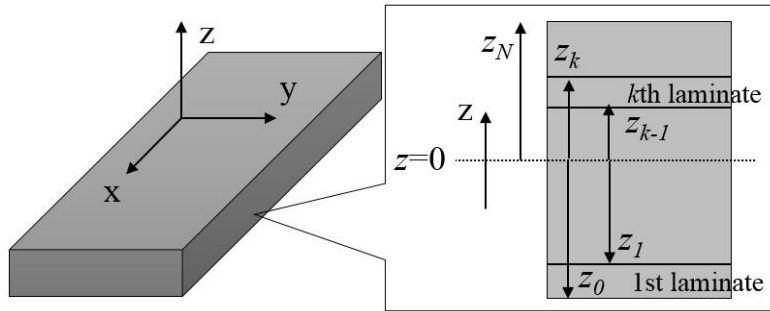


Figure C.2 Laminate configuration

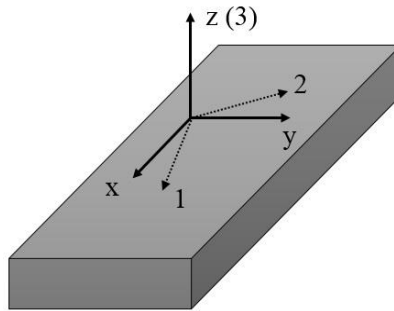


Figure C.3 Positive rotation direction from the original coordinate system

Rotation from x to 1 and from y to 2 is defined to be positive.

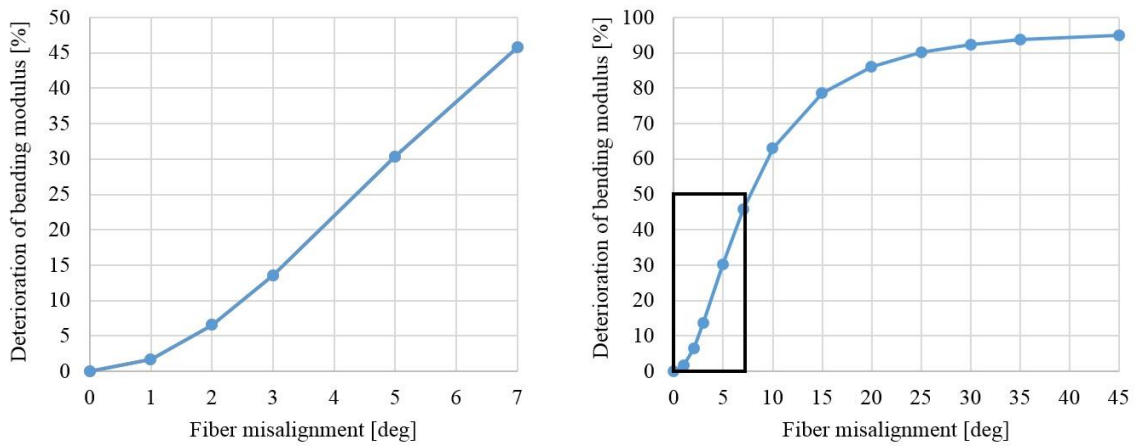


Figure C.4 Relationship between fiber misalignment and deterioration of bending modulus

付録 D 画像相関法の原理 [25]

本研究では各要素の繊維方向は画像相関法 (Digital Image Correlation, DIC) によって計算した。DIC の原理をここで説明する。

DIC はある物体の表面上の変位を測定するための効果的な手法である。この手法を CFRP の変位・ひずみ測定に用いる際には、試験片表面にランダムな模様を吹き付け試験片の変形前と変形後の画像を比較する。画素間の補間を行うことでサブピクセルレベルの正確さで測定することができる。

Figure D.1 を用いて DIC の原理を具体的に説明する。まず着目する領域 (Region of Interest, ROI) の位置と大きさを決める。Figure D.1 の場合では赤色で囲まれた正方形であり、これをサブセットと呼ぶ。サブセットの 1 辺の長さは $2M+1$ ピクセル (M は任意の自然数) とする。ROI の中心となる点 (参照点) の変形前の座標を $P(x_0, y_0)$ とし、変形後の座標を $P'(x_0', y_0')$ とする。このとき、参照点の変位ベクトル (u, v) を用いると $x_0' = x_0 + u, y_0' = y_0 + v$ となる。ROI 内の任意の座標における変形前、変形後の座標をそれぞれ $Q(x_i, y_i), Q'(x_i', y_i')$ と書く。一般に、 Q' の座標は Q の座標を用いて以下のように記述することができる。

$$x_i' = x_i + \xi(x_i, y_i) \quad (45)$$

$$y_i' = x_i + \eta(x_i, y_i) \quad (46)$$

ξ と η を形状関数という。1 次の形状関数を用いたとき、 $\Delta x = x_i' - x_i, \Delta y = y_i' - y_i$ とすると形状関数は以下のように記述することができる。

$$\xi(x_i, y_i) = u + u_x \Delta x + u_y \Delta y \quad (47)$$

$$\eta(x_i, y_i) = v + v_x \Delta x + v_y \Delta y \quad (48)$$

また、2 次形状関数は以下のように記述することができる。

$$\xi(x_i, y_i) = u + u_x \Delta x + u_y \Delta y + \frac{1}{2} u_{xx} \Delta x^2 + \frac{1}{2} u_{yy} \Delta y^2 + u_{xy} \Delta x \Delta y \quad (49)$$

$$\xi(x_i, y_i) = v + v_x \Delta x + v_y \Delta y + \frac{1}{2} v_{xx} \Delta x^2 + \frac{1}{2} v_{yy} \Delta y^2 + v_{xy} \Delta x \Delta y \quad (50)$$

これらの式をそれぞれ式(45)と式(46)に代入することで変形後の座標を変形前の座標を用いて表現することができる。以降は簡単のため 1 次形状関数を仮定して説明していく。このとき、変形後の座標は既知である変形前の座標に加え、 u, v, u_x, u_y, v_x, v_y の 6 つの独立した未知数で表される。まず、 $(u, v, u_x, u_y, v_x, v_y)$ の初期値を設定し、それを評価関数に代入する。評価関数として様々なものが存在するが、最もロバストなもの 1 つとして以下の Zero-normalized cross-correlation が知られている。この関数は変形前後の ROI の相関の強さを表しており、この評価関数が最大値をとるように $(u, v, u_x, u_y, v_x, v_y)$ の組を決定する。

$$C = \sum_{j=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left[\frac{\{f(x_i, y_i) - f_m\} \{g(x_i', y_i') - g_m\}}{\Delta f \Delta g} \right] \quad (51)$$

ただし、

$$f_m = \frac{1}{(2M+1)^2} \sum_{j=-M}^M \sum_{j=-M}^M f(x_i, y_i) \quad (52)$$

$$\Delta f = \sqrt{\sum_{j=-M}^M \sum_{j=-M}^M \{f(x_i, y_i) - f_m\}^2} \quad (53)$$

$$g_m = \frac{1}{(2M+1)^2} \sum_{j=-M}^M \sum_{j=-M}^M g(x_i', y_i') \quad (53)$$

$$\Delta g = \sqrt{\sum_{j=-M}^M \sum_{j=-M}^M \{g(x_i', y_i') - g_m\}^2} \quad (54)$$

評価関数を最大にする未知数の組は、初期解を代入した後ニュートン・ラフソン法などを用い繰り返し計算を行うことで求めることができる。

本研究では試験片表面に吹き付けたランダムな模様ではなく、試験片の断層画像に現れるボイドや樹脂だまりを模様として認識させている。計算は Strain Master 8.1.2 (LaVision GmbH)を用いて実施した。

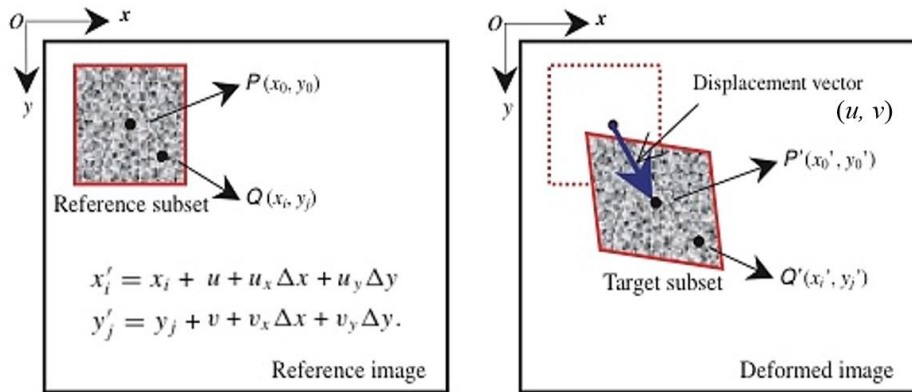


Figure D.1 How to calculate the displacement of the point inside a subset

参考文献

- [1] 山下満広, 坂川亨, 武田文人, 木俣文雄, 子守康裕, “MRJ 尾翼桁間構造適用に向けた A-VaRTM 技術開発”, *三菱重工技報*, Vol. 45, No. 4, pp. 2-5 (2008)
- [2] V. V. Vasiliev, A. F. Razin, “Anisogrid composite lattice structures for spacecraft and aircraft applications”, *Composite Structures*, 76, pp. 182-189 (2006)
- [3] V. V. Vasiliev, V. A. Barynin, A. F. Razin, “Anisogrid composite lattice structures – Development and aerospace applications”, *Composite Structures*, 94, pp. 1117-1127 (2012)
- [4] V. V. Vasiliev, V. A. Barynin, A. F. Rasin, “Anisogrid lattice structures – survey of development and application”, *Composite Structures*, 54, pp. 361-370 (2001)
- [5] 寺島啓太, 紙田徹, 刈沢俊行, 木村學, 青木隆平, 横関智弘, “ロケット上段構造への適用に向けた CFRP ラティス構造の試作評価”, 第 54 回構造強度に関する講演会 (2012)
- [6] Website of European Commission, CORDIS (Community Research and Development Information Service), http://cordis.europa.eu/project/rcn/97744_en.html (accessed on 26th November 2014)
- [7] S. Niemann, B. Kolesnikov, H. Lohse-Busch, C. Huhne, O. M. Querin, V. V. Toropov, D. Liu, “The use of topology optimization in the conceptual design of next generation lattice composite aircraft fuselage structures”, *AERONAUTICAL JOURNAL*, Vol. 117, No. 1197, pp. 1139-1154 (2013)
- [8] Website of VIAM (All-Russian Scientific-research institute of aviation materials), <http://viam.ru/en/news/1549> (accessed on 26th November 2014)
- [9] B. Budiansky and N. A. Fleck, “Compressive failure of fibre composites”, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 41, No. 1, pp. 183-211. (1993)
- [10] P. Badel, E. Vidal-Sallé, E. Maire, P. Boisse, “Simulation and tomography analysis of textile composite reinforcement deformation at the mesoscopic scale”, *Composites Science and Technology*, 68, pp. 2433-2440 (2008)
- [11] J.S.U. Schell, M. Renggli, G.H. van Lenthe, R. Muller, P. Ermanni, “Micro-computed tomography determination of glass fibre reinforced polymer meso-structure”, *Composites Science and Technology*, 66, pp. 2016-2022 (2006)
- [12] Luke P. Djukic, Israel Herszberg, William R. Walsh, Gregory A. Schoeppner, B. Gangadhara Prusty, Don W. Kelly, “Contrast enhancement in visualisation of woven composite tow architecture using a MicroCT Scanner. Part 1: Fabric coating and resin additives”, *Composites: Part A*, 40, pp. 553-565 (2009)
- [13] Luke P. Djukic, Israel Herszberg, William R. Walsh, Gregory A. Schoeppner, B. Gangadhara Prusty, “Contrast enhancement in visualisation of woven composite architecture using a MicroCT Scanner. Part 2: Tow and preform coatings”, *Composites: Part A*, 40, pp. 1870-1879 (2009)

- [14] Yuri Nikishkov, Guillaume Seon and Andrew Makeev, “Structural analysis of composites with porosity defects based on X-ray computed tomography”, *Journal of Composite Materials*, Vol. 48(17), pp. 2131-2144 (2014)
- [15] Joshim Ali, Johar K. Farooqi, Derek Buckthorpe, Allister Cheyne, Paul Mummery, “Comparative study of predictive FE methods for mechanical properties of nuclear composites”, *Journal of Nuclear Materials*, 383, pp. 247-253 (2009)
- [16] S.D. Green, M.Y. Matveev, A.C. Long, D. Ivanov, S.R. Hallett, “Mechanical modelling of 3D woven composites considering realistic unit cell geometry”, *Composites Structures*, 118, pp. 284-293 (2014)
- [17] Michael W. Czabaj, Mark L. Riccio, William W. Whitacre, “Numerical reconstruction of graphite/epoxy composite microstructure based on sub-micron resolution X-ray computed tomography”, *Composites Science and Technology*, 105, pp. 174-182 (2014)
- [18] G. Totaro, Z. Gürdal, “Optimal design of composite lattice shell structures for aerospace applications”, *Aerospace Science and Technology*, 13, pp. 157-164 (2009)
- [19] 吉野駿佑, 青木隆平, 横関智弘, 寺島啓太, 紙田徹, “ラティス円筒構造の座屈特性と最適設計”, 第5回日本複合材料会議 (2014)
- [20] 下出健人, 横関智弘, 青木隆平, 寺島啓太, 紙田徹, “CFRP ラティス構造の衝撃伝播特性に関する研究”, 第56回構造強度に関する講演会 (2014)
- [21] Philip J. Withers, “X-ray nanotomography”, *materialstoday*, Vol. 10, No. 12, pp. 26-34 (2007)
- [22] 武田展雄, 複合材料の力学講義ノート, 50-52 (2011) .
- [23] J. C. Halpin, “Effects of environmental factors on composite materials”, *Technical Report AFML-TR-67-423* (1969)
- [24] J. C. Halpin and J. L. Kardos, “The Halpin-Tsai Equations: A Review”, *POLYMER ENGINEERING AND SCIENCE*, Vol. 16, No. 5, pp. 344-352 (1976)
- [25] 米山 聡, “デジタル画像相関法を用いた変位・ひずみ分布測定”, *非破壊検査*, 59 巻 7 号, pp. 306-310 (2010)
- [26] Bing Pan, Kemao Qian, Huimin Xie and Anand Asundi, “Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review”, *Measurement Science and Technology*, 20, 062001 (2009)
- [27] Akinori Yoshimura, Ryohei Hosoya, Jun Koyanagi and Toshio Ogasawara, “Measurement of Fiber Orientation in CFRP Laminates by Using X-ray Computed Tomography”, *Journal of the Japan Society for Composite Materials*, 40, 4, pp. 146-152 (2014)
- [28] T. Yokozeki et al, “Mechanical properties of corrugated composites for candidate materials of flexible wing structures”, *Composites: Part A: applied science and manufacturing*, Vol. 37, pp. 1578-1586, 2006

本研究に関する学会発表（予定を含む）

- ・伊井慎悟, 吉村彰記, 小笠原俊夫, 横関智弘, 武田展雄, X線 CT 結果から生成した 3次元モデルを用いた炭素繊維コルゲート複合材の有限要素解析, 第4回日本複合材料合同会議 (2013年3月7日~9日)
- ・伊井慎悟, 吉村彰記, 小笠原俊夫, 寺島啓太, 紙田徹, 武田展雄, CFRP ラティス構造リブ部の微視的構造を考慮した有限要素解析, 第39回複合材料シンポジウム (2014年9月18日~19日)
- ・A. Yoshimura, S. Ii, R. Hosoya, J. Koyanagi, T. Ogasawara, K. Terashima, T. Kamita and N. Takeda, "X-ray CT Image-based Measurement and Modeling of Microscopic Defects in CFRP laminates", 20th International Conference on Composite Materials (2015年7月19日~24日)

謝辞

はじめに、研究のテーマや研究の進め方、学会の発表練習、論文添削など修士課程における研究活動に関していつでも丁寧な助言をくださった宇宙航空研究開発機構（JAXA）の小笠原俊夫教授と吉村彰記氏に感謝いたします。進捗報告会が毎週あり大変に感じることもありましたが、おかげで物事を計画的に進める習慣や困難なことに対応する根気強さを身につけることができました。また、学部時代からお世話になっている武田展雄教授、水口周准教授にも武田研究室の輪講で助言をいただき、より良い研究成果につながったことに感謝いたします。JAXA 研修生の皆様とは、研究活動だけでなくプライベートでも楽しい時間を共有することができ、大学を越えたつながりができたことを非常にうれしく思います。

修士課程での活動は研究だけではありませんでした。特に、フランスでの語学学校とインターンシップの経験からは得られたものが多く、これからの人生で役立つことばかりだと思います。フランスでの滞在の機会を与えてくださった東京大学工学系研究科の鈴木真二教授に感謝いたします。

気が付けば学部時代も含め 7 年間も東京大学に在籍していました。この 7 年はあっという間に過ぎ去り本当に充実した時間であったと実感しております。在学中のすべての経験は今後の人生をより良いものにする糧になると確信しています。

最後に、陰ながらいつも私を支えてくださる両親にも感謝しなければなりません。小さいころ頃からよく聞かされた「出会う人とのつながりを大切にすること」を忘れずに社会人生活をスタートさせたいと思います。

2015 年 2 月

伊井 慎悟