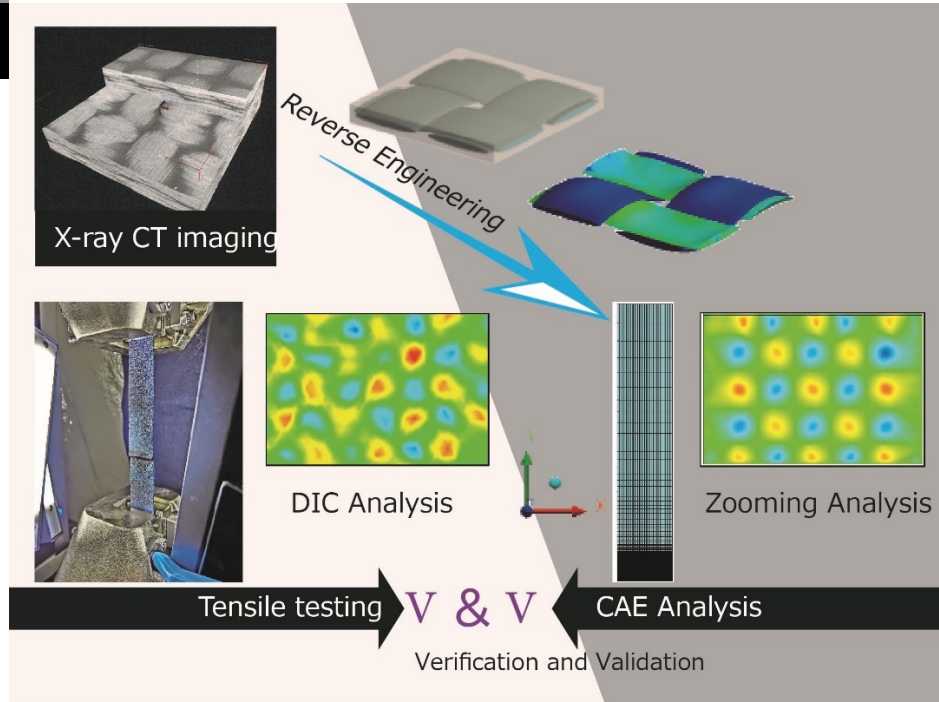


複合材料の単軸引張試験シミュレーション結果の
検証と妥当性確認 (V&V)
- 実測定と均質化解析の融合 -

山本晃司*1○、村上岳*2、井口智*2、宮崎然*2



1 はじめに

1.1. CAE 解析結果の検証および妥当性確認試験

自動車をはじめとした輸送機器の環境負荷低減に向けて車体の軽量化が求められており、CFRP などの複合材料の活用が始まっています。複合材料は金属材料とは異なり、内部構造の複雑さから、応力負荷主軸方向によって複雑な破壊挙動を示すため、精度の高い構造解析モデルの確立が難しい材料です。輸送機器の設計開発においては、構造解析シミュレーション等の CAE (Computer Aided Engineering) 解析の活用が広く行われています。CAE 解析の再現精度を高めることで、開発の効率化、コスト低減が期待されるほか、実測定による評価が難しい複雑構造体、大型構造体の設計に対する信頼性向上が期待されます。

従来の製品設計開発では、CAE 解析のみで設計を完結させることが考えられていた時期もありました。現在では、CAE 解析で得られた結果の妥当性を確認するために、CAE 解析モデルと同条件の実測定を行い、CAE 解析結果と比較検証すること (V&V: Verification and Validation) が重要であると考えられています。その結果、実測定と CAE 解析を両輪とした製品設計を行うことが一般的な社会要求となりつつあります。

本稿では CAE 解析に関連する複合材料の特徴の概要に触れたうえで、熱可塑性 CFRP 織物材を用いた実測定と CAE 解析を比較することで V&V を実施した例を紹介します。

1.2. 複合材料の特徴

前述の通り、複合材料で製作された製品部品・構造物を CAE 解析を実施する場合、良い再現性を得るために律速となる困難な点が多数存在します。表 1 に材料挙動に着目した金属材料と複合材料の違いについてまとめました。それぞれの特徴の概要を、以下に紹介します。

(1) 材料物性値に可制御性がある

複合材料では、材料を構成する素材の種類や配合の割合を調整することで、自由に材料物性値が制御できます。製品設計の自由度が高くなるという意味では大きなメリットと言えますが、その分、検討項目が増えるために製品設計フローが複雑化する傾向があります。

*1 サイバネットシステム(株) メカニカル CAE 事業部
*2 (株)島津製作所 分析計測事業部
○ 責任著者

(2) 材料挙動に異方性がある

繊維系の複合材料では、負荷される応力の主軸方向等によって材料挙動が異なる異方性と呼ばれる特徴があります。これとは対照的に、金属材料については単結晶金属のような特別な例は除いて、材料挙動が負荷応力主軸方向に対して依存性がない、等方性を仮定することが一般的です。材料挙動が等方的な場合、弾性挙動を決定付ける物性値は弾性係数とポアソン比のみであり、単軸引張試験のみから全てを同定することが可能です。ところが、材料が異方性を有する場合、解析のために準備すべき物性値は三次元空間上で定義される3つの直交する方向における縦弾性係数、ポアソン比、せん断弾性係数の合計9つも存在します。当然ながら、これら物性値を同定するためには様々な変形モードにおける試験を実施する必要があります。

(3) 材料挙動に成形履歴依存性がある

素材の組み合わせに限らず、成形履歴にも材料挙動は依存性を示します。複合材料は材料の製造と成形が同時に行われることにも特徴があり、様々な成形手法が適用されています。図1に織物材に対してプレス成形を行ったCAE解析例を示しました。平板状の材料の中央に球面パンチを配置して、面外方向に対して強制変位を与えてプレスしました。前述したように複合材料には異方性があるため、試験片や金型がシンプルであっても、複雑な変形を示すことが分かります。また、図1の(c)、(d)には、繊維方向の単軸引張ひずみが卓越した領域と、せん断ひずみが卓越した領域の拡大図を示しました。前者の領域は繊維の粗密、後者の領域は繊維の交差角が変化しています。これらの変形は明らかに剛性や強度に影響を与えるものであるため、特に曲面形状の成形品では、試験片レベルで評価した物性値だけでは高精度な解析が実現できません。

表1 材料挙動に着目した金属材料と複合材料の違い

特徴	金属材料	複合材料
物性値の可制御性	低い	高い
成形履歴依存性	小さい	大きい
異方性挙動	等方的	異方的
材料データベース	豊富	少ない
破壊モード	単一	複数

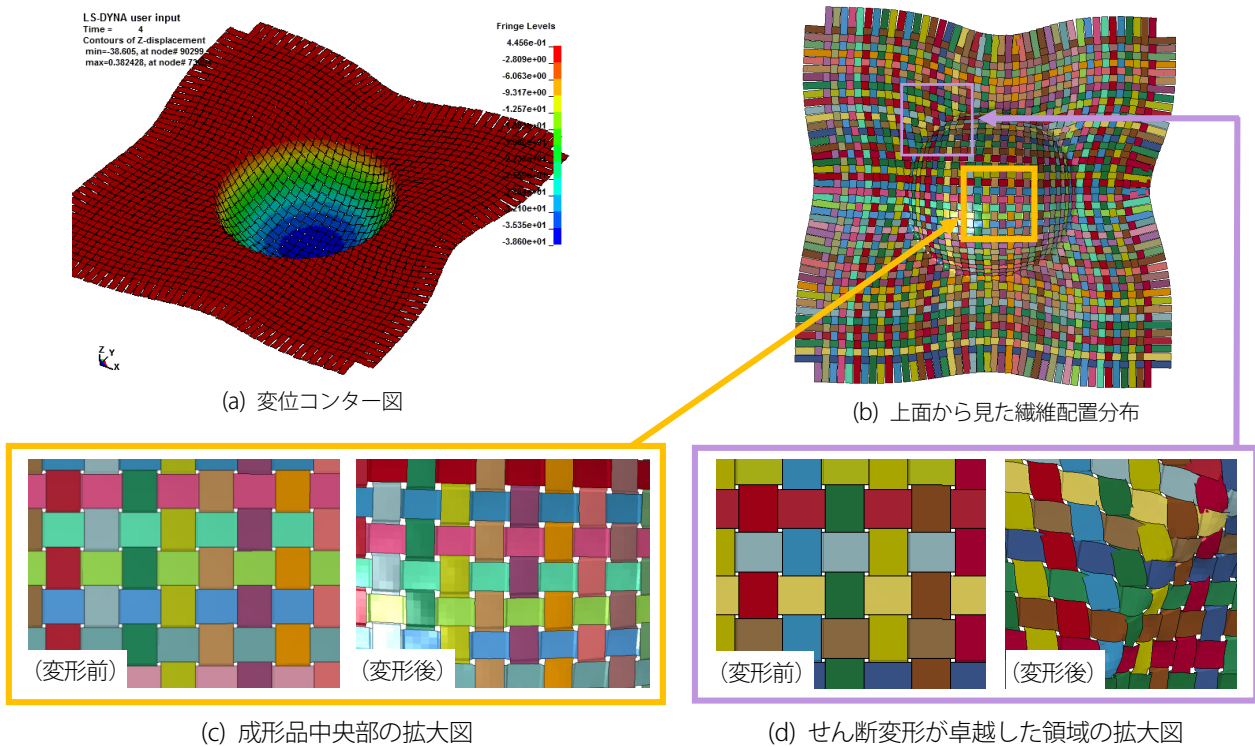


図1 織物複合材料のプレス成形解析例

(4) 破壊モードが複数ある

複合材料の破壊モードは非常に複雑です。一般的に金属材料の破壊は、原子欠陥である転位の発生と移動に支配されており、その発生予測はミーゼスの相当応力^{*3}と呼ばれる単一指標だけを元を実施することができます。ところが、複合材料には材料界面剥離、層間剥離、き裂進展など多様な破壊モードが存在し、さらに数 μm ~mm オーダーの、製品全体のサイズと比較して小さなスケールで局所的に発生する応力集中も破壊の要因となります。いずれの課題においても、弾性係数や強度といった、解析に必要な材料物性値の取得が重要です。一方で、実際、工学設計・解析のための国際アソシエーションである NAFEMS¹⁾が、CAE 解析者に対して行ったアンケートの結果として、複合材料解析で困っている問題の第1位が、2位に圧倒的な大差を付けて材料物性値の取得にあったことを報じています²⁾。

本稿では、上記課題解決のための一手法として、マイクロフォーカスX線CTシステムを用いて得られた熱可塑性CFRP織物材の内部構造データを用いてCAE解析モデルを作成し、均質化法に基づくマルチスケール解析技術³⁾⁻⁵⁾を用いて材料物性値を同定した事例、微視的なスケールにおけるひずみ分布を再現することで破壊挙動を捕捉した事例を紹介し、破壊挙動の捕捉においては、具体的には精密万能試験機とデジタル画像相関法解析ソフトウェアを組み合わせた試験システムから取得した実測定結果とCAE解析結果を比較して評価しました。

2 評価方法

2.1 CAE 解析の概要

均質化法を用いて材料物性値を予測するためには、解析モデルとなる微視構造の形状を既知量として与える必要があります。汎用CAE解析ツールであるANSYS^{®7)}のマルチスケール解析アドインツールであるMultiscale.Sim^{®8)}は微視構造の形状パラメータを指定するだけで自動的にモデル作成をしてくれる機能が提供されており、図2に示すような様々な微視構造に対応しています。今回はMultiscale.Sim[®]で自動的にモデル作成されたデフォルト構造データ(モデル1)と、後述するマイクロフォーカスX線CTシステムによって取得したデータを用いて作成した構造データ(モデル2)に対して、解析上で仮想的な材料試験を実施しました(以後、数値材料試験と呼称)。

モデル2については、マイクロフォーカスX線CTシステムから出力したDICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) データを画像処理ソフトウェアであるSimpleware^{™Software 9)}に取り込み、繊維束の断面形状や繊維束のピッチ、体積含有率等を同定しました。これ以降の解析作業は全て汎用CAEツールであるANSYS^{®7)}のマルチスケール解析アドインツールであるMultiscale.Sim^{®8)}を用いて行われました。

*3 相当応力とは
解析で得られた多軸応力場の情報を、単軸引張試験の応答と比較できる値に変換した応力指標のこと

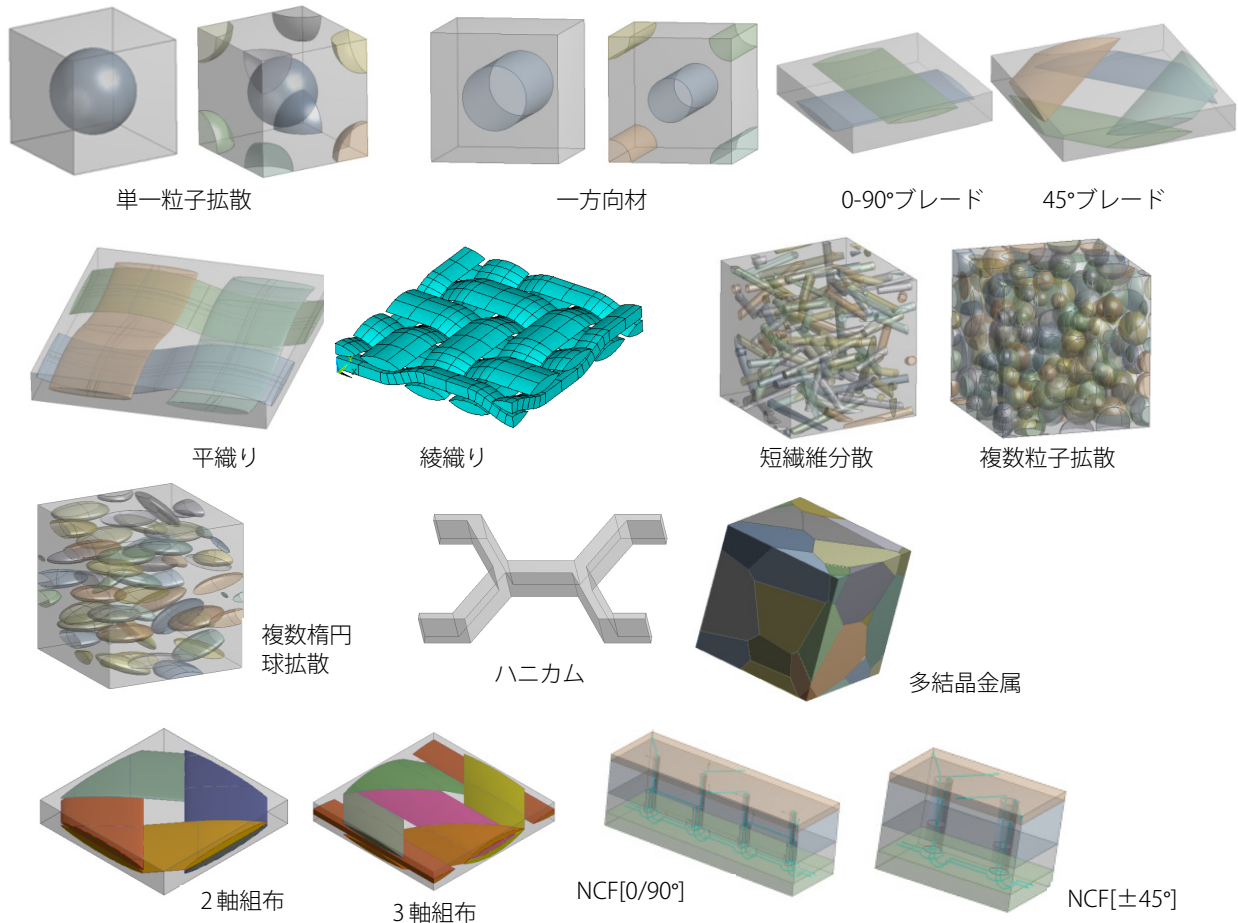


図2 Multiscale.Sim[®]で自動的に作成することのできるモデル作成テンプレートの一覧

CAE 解析においては、理想的な境界条件を簡易に設定することができるため、実測定では、実現が難しいとされている純せん断や等 2 軸試験、体積試験などの変形モードでも容易に数値材料試験を実施できることが特徴です。境界条件として、全方向の周期対称性も仮定できるため、実測定に用いる試験片全体をモデリングする必要はなく、周期対称性が見出せる一つのユニットセルだけで解析が実施可能です。今回は、前述した複合材料の弾性的な異方性挙動を表現するために必要な 9 種の材料物性値を取得するために、3 方向の単軸引張と純せん断の計 6 種類の変形モードにおける数値材料試験をユニットセルに対して実施しました。ここでは、各変形モードの数値材料試験で得られたマクロな応力-ひずみ特性から、全ての材料物性値を同定しました。CAE 解析と並行して、矩形試験片を用いた実測定も実施しました。今回の実測定では単軸引張試験のみを実施したため、縦弾性係数のみを CAE 解析結果と比較して妥当性を検証しました。これに加えて、材料試験時に使用した非接触式伸び幅計から得られた試験片観察画像に対して画像相関法 (DIC: Digital Image Correlation) を用いた各成分ひずみ分布の観察を実施しました。数値材料解析においては、同様のひずみ分布をズームング法と呼ばれる手法で評価することができます。弾性係数と同様に実測結果とこれと比較することで、結果の妥当性を検証しました。以上の解析・分析の流れを図 3 に示します。

2.2 X 線 CT による試験片形状データの取得

図 4 にマイクロフォーカス X 線 CT システム inspeXio™ SMX™-225CT FPD HR と試験片の状況写真、図 5 に単軸引張試験用試験片の寸法を示します。試験片は JIS K7165 B 形で規定された寸法を有しており、材料試験における治具把持部の応力集中による損傷を防ぎ、平行部内で破断させられるようタブを接着しています。本装置は受光部に 16 インチフラットパネルディテクタを搭載しており、CT 撮像における最大撮影視野は約φ400×300 mm となっており、今回のように寸法サイズが大きい試験片の内部観察も可能です。

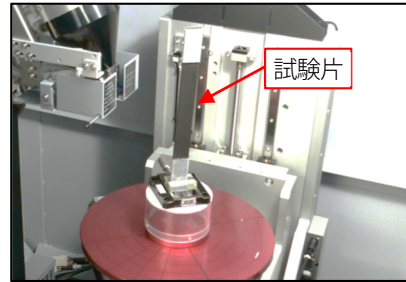


図 4 X 線 CT 撮像風景

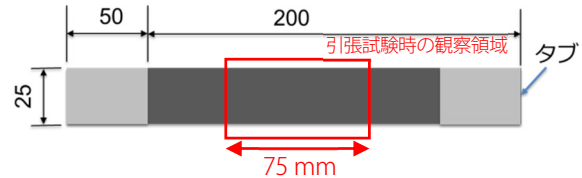


図 5 X 線 CT 撮像、単軸引張用試験片の寸法

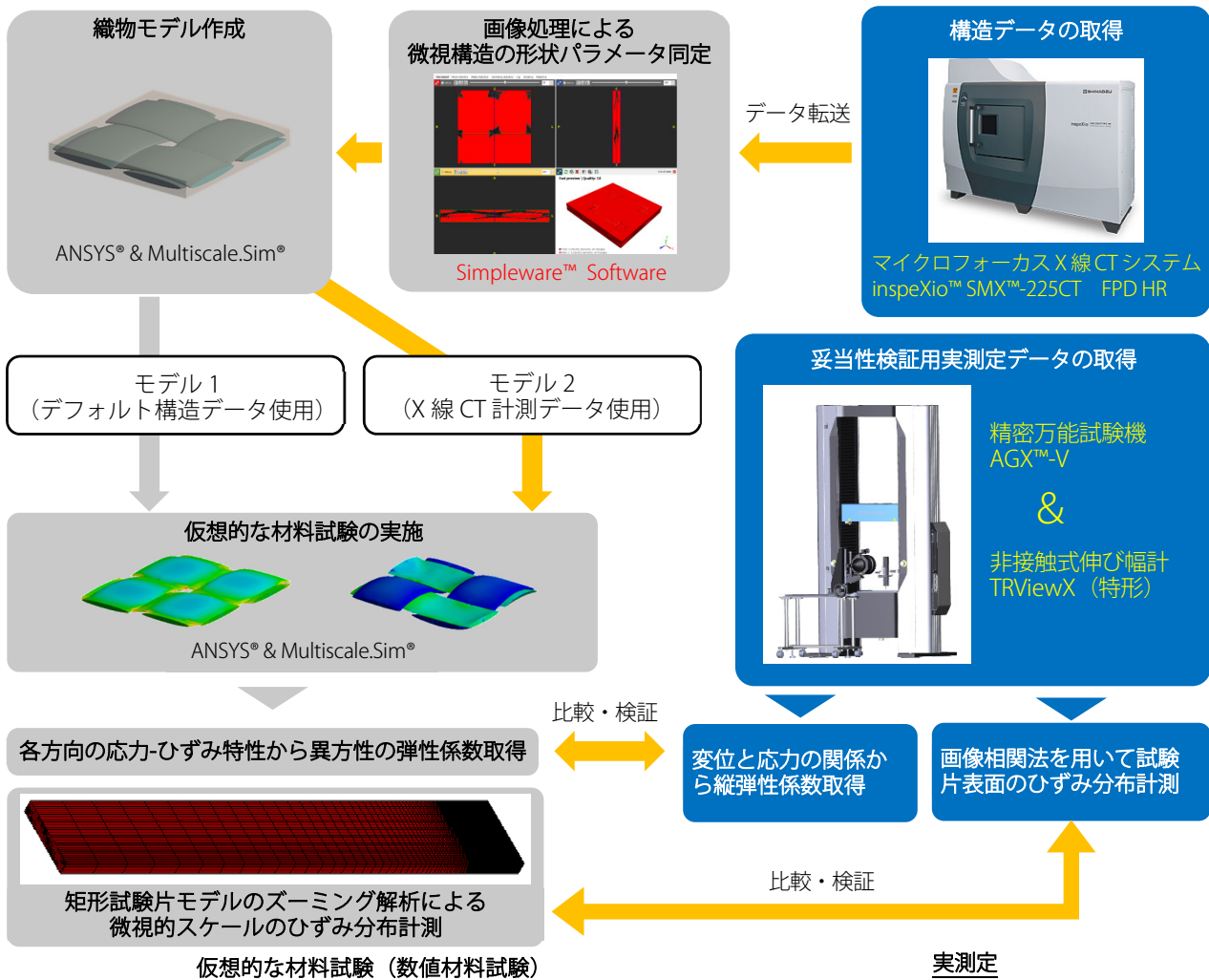


図 3 解析・分析のフロー

2.3 単軸引張試験（実測定）データの取得

図6に試験風景を示します。単軸引張試験（実測定）においては島津精密万能試験機 AGX™-V および非接触式伸び幅計 TRViewX (SP.1.0.0) を用いて、荷重と同期した画像データを取得し、DIC 解析ソフトウェア GOM Correlate 2016 (GOM GmbH 製) を用いて DIC 解析を実施し、ひずみ計測および微視的な領域における各成分ひずみのコンター図等を取得しました。DIC 解析は物体表面のランダムパターンを物体の変形前後で比較し、対象物の変形量等を調べる手法です。画像から変位の計測やひずみ分布解析が可能であり、試験対象にセンサーを接触させる必要がないこと、複雑な光学系が不要であることが特徴です。そのため、DIC 解析は大型構造物や高温下における部材、顕微鏡下における微小部材のひずみ分布解析といった、従来の技術では測定困難であった状況下で適用できるため、広い分野で応用展開されています。試験条件については、JIS K7165 を参考にして、試験速度は 1 mm/min、つかみ具間距離は 136 mm に設定しました。弾性係数を測定するためのひずみ計測には、DIC 解析ソフトウェアの標準機能である仮想ひずみゲージ機能を用い、ゲージ長 50 mm の標点を元に算出したひずみを求めました。弾性率算出の際には、ひずみ 0.05% から 0.25% の領域の応力とひずみの関係から求めました。



図6 試験風景

マイクロX線 CT システム inspeXio SMX-225CT FPD HR は、観察したデータを DICOM 形式、STL (Standard Triangulated Language) 形式、その他画像・動画データで出力可能です。

図9に破断後の試験片の写真を示します。試験片は平行部で破断が生じており、タブ端・タブ内破壊等のない良好な単軸引張試験が実施できていることがわかります。

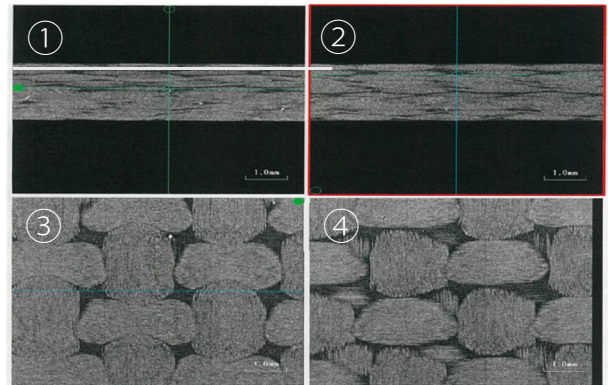


図7 試験片のMPR画像

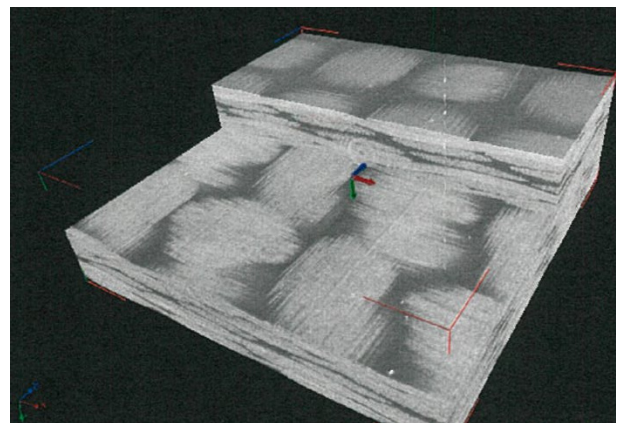


図8 試験片のVR画像

3 評価結果

3.1 材料定数の同定

図7にMPR (Multi Planer Reconstruction) 画像を示します。MPR 画像は撮影された CT 画像を仮想空間に配置し、任意断面画像を表示する機能で、CT 画像①に対して互いに直交する断面画像 (②、③)、更に任意角度での断面画像を表示することができます。また必要な断面画像を拡大して表示することもできますので、詳細な確認や観察を行うことができます。この MPR 画像では、具体的には①が試験片の中央付近の断面を示し、②と③は①の断面像から指示した縦と横の直交する断面をそれぞれ表示しています。④は②の断面から炭素繊維の配列方法、界面などを観測しやすい角度で抽出した任意断面画像です。図8に、試験片を CT 撮像した画像を VR (Volume Rendering) 表示し、一部分を拡大したものを示します。VR 表示は 3 次元ソフトウェアの VGSTUDIO MAX を使用することで作成可能であり、より実物に近い形で繊維、樹脂の状態を立体的に観察することができます。

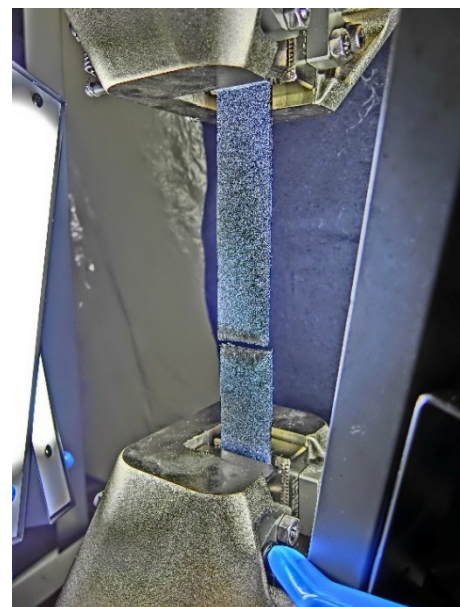


図9 試験片破断後の写真

数値材料試験においては、図 10 に示す 2 種類のモデル(モデル 1 およびモデル 2) を使用しました。モデル 1 は、ソフトウェアに登録されているデフォルト構造データを用いており、繊維束に対して断面形状が一様で、且つ正弦波状のうねりを持った形状を有しています。繊維の体積含有率は、繊維束同士が接触しない範囲で最も大きくなるよう作成しました。一方、モデル 2 はマイクロフォーカス X 線 CT システムによって取得した構造データから同定された形状を元に作成されたモデルです。繊維束の断面形状は一様ではなく、うねりも正弦波からは逸脱しており繊維の断面形状に沿うような形をしています。

数値材料試験によって同定した弾性率と単軸引張試験(実測定)の弾性係数を比較した結果を表 2 にまとめます。また、図 11(a)に単軸引張試験(実測定)および数値材料試験において得られた公称応力-公称ひずみ線図を示します。単軸引張方向の弾性係数は、単軸引張試験(実測定)の結果が 55.46 [GPa]に対してモデル 1 は 32.56 [GPa]となり、大きな誤差を持つ結果となりました。これに対して、モデル 2 の縦弾性係数は 51.75 [GPa]と実測に近い結果が得られています。モデル 1 のように、デフォルト構造データを使用することは簡便に解析できるため便利ですが、今回のように実際の構造とは大きく異なる場合があります。モデル 2 はマイクロフ

ーカス X 線 CT システムにより得られた構造データを解析モデルに反映させることで誤差率が低減したことがわかります。このように材料試験は CAE 解析結果の妥当性確認のために必要であり、今回評価をおこなった熱可塑性 CFRP 織物材の材料物性値は、微視構造の形状に依存しており、マイクロフォーカス X 線 CT システムによる内部構造観察に基づく形状の同定が重要であることがわかります。

図 11(b)に単軸引張試験(実測定)の公称応力-公称ひずみ線図上のポイント A における、試験片表面に生じた y 成分ひずみのコンター図と破断直後の試験片の写真を示しています。コンター図においては、低ひずみが生じている部分は寒色、高ひずみが生じている部分は暖色で着色されています。破断直前には試験片下部に y 成分ひずみの集中がみとめられ、破断箇所とひずみ集中部分が一致していることがわかります。塑性・損傷を考慮に入れた数値材料試験を実施するには破壊に寄与するひずみを成分別に検証する事が重要です。より精微な数値材料試験を実施するには、実測定データに対して DIC 解析を実施し、各成分ひずみの破壊への寄与度を考察することが有効です。

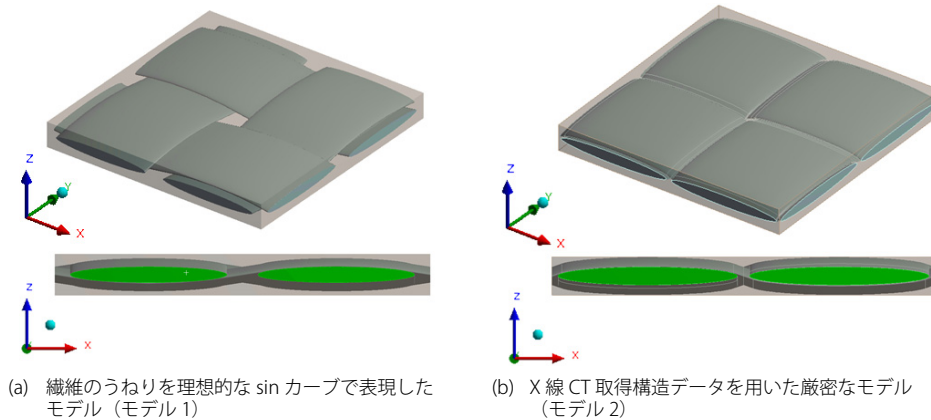
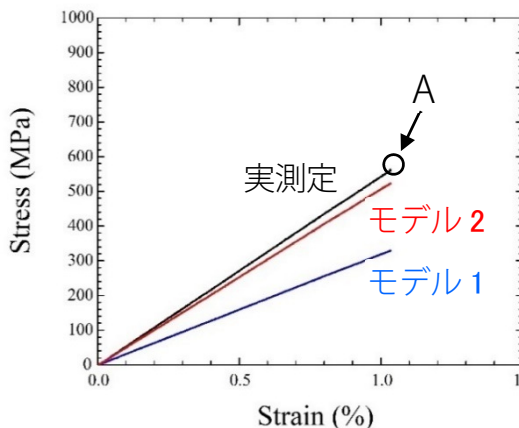


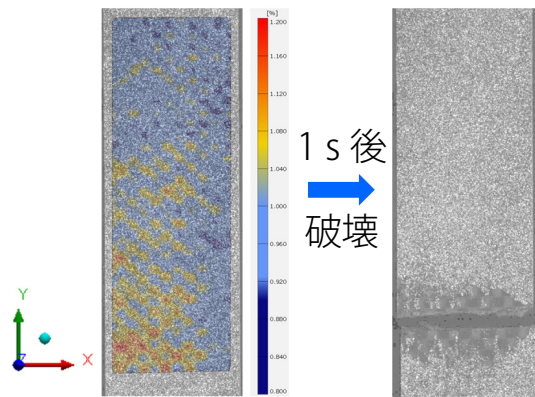
図 10 今回検証した二つの解析モデル

表 2 均質化解析で得られた縦弾性係数と実測定結果との比較

材料	均質化解析 (モデル 1)		均質化解析 (モデル 2)		単軸引張試験 (実測定) 縦弾性係数 (GPa)
	縦弾性係数 (GPa)	実測定との一致率 (%)	縦弾性係数 (GPa)	実測定との一致率 (%)	
CFRP	32.555	58.7	51.751	93.3	55.46



(a) 実測定と数値材料試験における公称応力-公称ひずみ線図による結果の比較



(b) ポイント A における y 成分ひずみのコンター図と試験片破断後の写真

図 11 公称応力-公称ひずみ線図比較図および試験片の破断状況

3.2 微視的な領域におけるひずみ分布の評価

前項比較を行った弾性係数は、試験片の織物のピッチ幅と比較して数倍大きなサイズのひずみゲージで計測された、いわばみかけの応答を反映した値です。実際の複合材料の内部では、剛性が大きく異なる繊維と樹脂が不均質に混ざっているため、たとえ単純な単軸引張試験であっても、ひずみや応力も当然ながら局所的な分布を示します。複合材料の破壊は、不均質な構造内部の応力集中部が起点となって発生するため、無視することのできない現象です。

数値解析試験によって得られた試験片中央部近傍の不均質なひずみ分布を図 12(b)に示します。

これに合わせて、図 12(c)には単軸引張試験（実測定）結果から取得した同スケールの領域をクローズアップした DIC 解析結果を示します。CAE 解析モデルは、計算コストを最小限に抑えるため、単軸引張試験（実測定）で用いた試験片の 1/4 のサイズの矩形モデルを使用しています。さらに、試験片中央部のみ繊維束の形状をモデリングし、それ以外の領域は均質体に設定して数値解析試験を実施しました。繊維束の織のピッチに関連して、低ひずみと高ひずみ状態が交互に表われている様子が、解析・実験の両方で定性的に一致しました。残念ながら、定量的にひずみ値を比較することまでは現時点ではできておらず、今後の研究課題です。

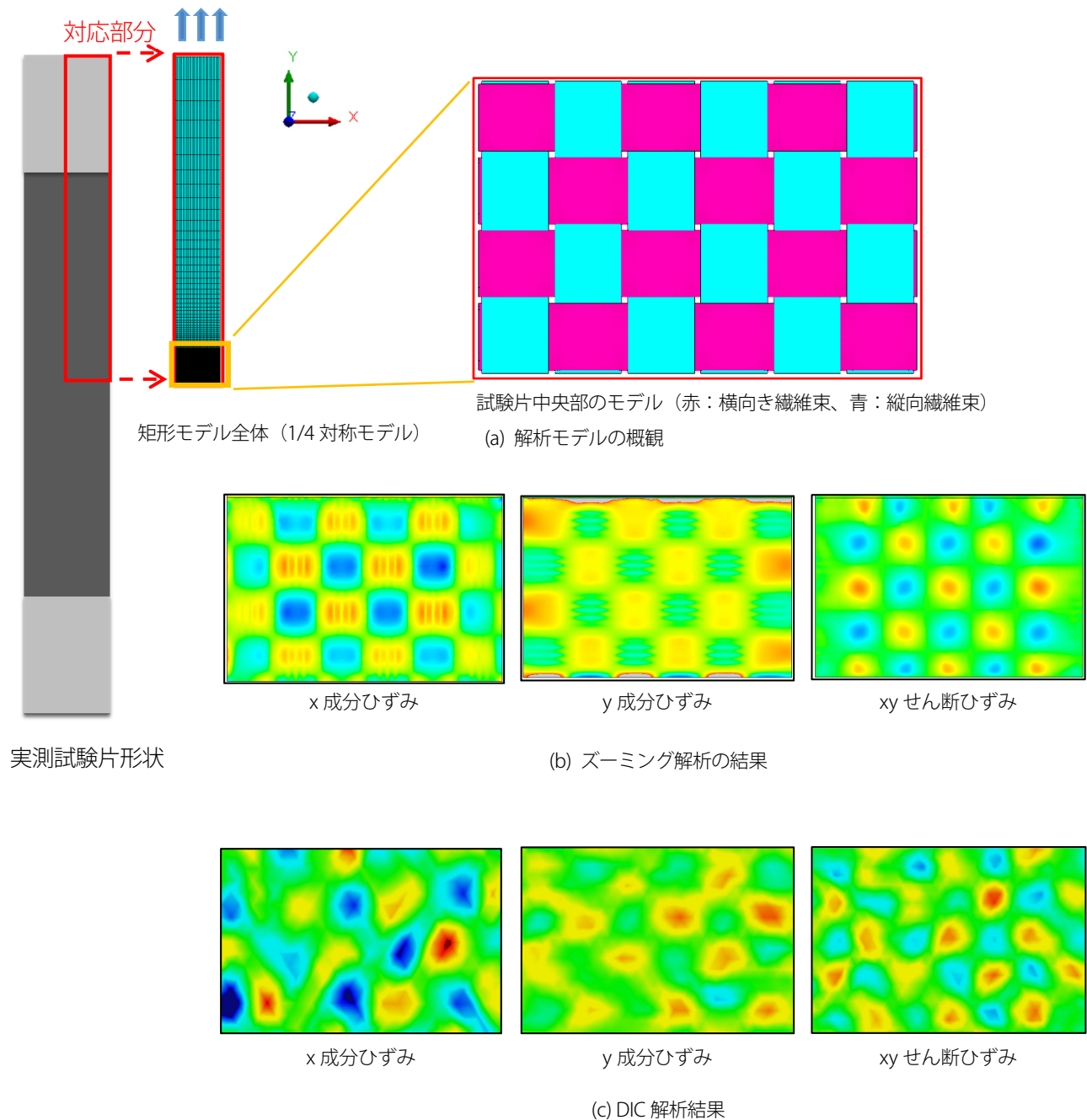


図 12 数値解析試験および単軸引張試験（実測定）における試験片中央部のひずみ分布

4 まとめ

本稿では、代表的な複合材料における CFRP の織物材を例に、異方性の材料挙動を解析的に予測する手法について、その解析に用いる内部構造モデルの検証例、さらに解析結果の妥当性を確認するための実測例を紹介しました。ここでは、マイクロフォーカス X 線 CT システムによって取得した織物材の構造データを参照してモデル化したデータは数値材料試験の精度向上に有効であることが明らかになりました。また、その妥当性を精微に検証するためには、単軸引張試験（実測定）において得られる正確な荷重、ひずみ等の数値データ、そして DIC 解析によって得られた微視的な領域における成分ひずみ分布の評価が有効であることも明らかになりました。

かつて、解析技術は実機による試作レスを目指すためのツールと捉えられている時期がありましたが、現在の認識は変わりました。解析ツールの機能は進化を続けており、現在では複雑な物理現象まで予測できるようになりました。しかしながら、機能向上に伴い解析用途も広がり、また適用問題が複雑化していく中で新たな懸念点も生まれました。それは解析プログラムやその結果の品質が確保されているのかということです。そこで日本計算工学会⁹⁾では、解析の品質を確保するための方法論を確立すべく HQC (High Quality Computing) 研究会を立ち上げ、工学シミュレーションの標準手順書を完成させました^{10)~12)}。本書の中では、解析で得られた結果の妥当性を確認するために、解析モデルと同条件の実測を行って解析結果と比較検証することの重要性が強調されています。国際的にも同様の取り組みは行われておりアメリカ機械学会からも類似のコンセプトが提案されており¹³⁾、解析と実測を両輪とした製品設計を行うことが一般的な社会要求とされつつあります。

特に複合材料では、金属材料と異なり複雑な異方性挙動を持つため、実測のみで製品設計上十分な材料挙動を全て把握することが難しいと考えられます。今回紹介した材料物性値予測の解析技術と実測技術の融合の取り組みが、より効率的な材料設計および製品設計を実施するためのヒントとなれば幸いです。

本稿で紹介したデータは、株式会社島津製作所およびサイバネット株式会社による実測定結果および CAE 解析結果に対する検証と妥当性評価を共同で実施して得られた成果です。

<参考文献>

- 1) <https://www.nafems.org> (2019年9月12日参照)
- 2) Composite Working Group, Composite Survey, NAFEMS, (2014)
- 3) 寺田賢二郎, 菊池昇, 均質化法入門, 丸善 (2003)
- 4) Sanchez, Enrique, Non-homogeneous Media and Vibration Theory, Springer-Verlag, Berlin (1980)
- 5) Terada, K., Kato, J., Hirayama, N., Inugai, T. and Yamamoto, K., A Method of Two-Scale Analysis with Micro-Macro Decoupling Scheme: Application to Hyperelastic Composite Materials, Computational Mechanics, Vol.52, pp.1199-1219. (2013)
- 6) <https://www.jsol-cae.com/product/tool/simpleware/> (2019年9月12日参照)
- 7) <https://www.ansys.com/> (2019年9月12日参照)
- 8) http://www.cybernet.co.jp/ansys/product/lineup/multiscale/multiscale_sim/ (2019年9月12日参照)
- 9) <https://www.jsces.org/> (2019年9月12日参照)
- 10) 白鳥正樹, 中村均, 日本計算工学会におけるシミュレーションの品質保証基準づくり, 日本機械学会 計算力学の品質保証に関する国際シンポジウム (2012)
- 11) 日本計算工学会, 工学シミュレーションの標準手順 第2版, 日本計算工学会 (2015)
- 12) 工学シミュレーションの品質マネジメント 第3版, 日本計算工学会 (2017)
- 13) Guide for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics: ASME V&V 10-2006, Americal Society of Mechanical Engineers (2006)

inspeXio、SMX、および AGX は、株式会社 島津製作所の日本およびその他の国における商標です。
ANSYS は、ANSYS Inc. またはその子会社の米国およびその他の国における商標または登録商標です。
Multiscale.Sim は、サイバネットシステム株式会社の登録商標です。
Simpleware は、Synopsys, Inc の商標です。
VGSTUDIO MAX は、Volume Graphics GmbH の商標です。
その他、本文中に記載されている会社名および製品名は、各社の商標および登録商標です。
本文中では「TM」、「®」を明記していません。

株式会社 島津製作所
分析計測事業部 <http://www.an.shimadzu.co.jp/>

本資料の掲載情報に関する著作権は当社または原作者に帰属しており、権利者の事前の書面による許可なく、本資料を複製、転用、改ざん、販売等することはできません。掲載情報については十分検討を行っていますが、当社はその正確性や完全性を保証するものではありません。また、本資料の使用により生じたいかなる損害に対しても当社は一切責任を負いません。本資料は発行時の情報に基づいて作成されており、予告なく改訂することがあります。

初版発行：2019年12月
© Shimadzu Corporation, 2019