

論文・解説

25

MBD/MBRの実現に向けた、繊維強化樹脂複合材内部における微視的破壊現象の可視化／評価技術

Technology of Visualization and Evaluation of Microscopic Fracture Behavior Inside Fiber Reinforced Plastic Composite Material for Implementation for MBD/ MBR

河村 力^{*1} 高橋 拓也^{*2} 住田 弘祐^{*3} 杉山 哲也^{*4} 上田 政人^{*5}
 Chikara Kawamura Takuya Takahashi Hirotsuke Sumida Tetsuya Sugiyama Masato Ueda
 米山 聡^{*6} 轟 章^{*7} 宮永 俊明^{*8} 西田 健二^{*9} 横関 智弘^{*10}
 Satoru Yoneyama Akira Todoroki Toshiaki Miyanaga Kenji Nishida Tomohiro Yokozeki
 樋口 諒^{*11}
 Ryo Higuchi

要 約

低燃費のための車両軽量化と、人命保護のための衝突安全性能向上の両立は自動車開発における大きな課題であり、その解決には構造技術だけでなく材料技術の革新が重要である。材料技術の革新には、車両機能からバックキャストした、効率的な技術開発が必要である。マツダでは、そのためのイネーブラーとして、材料開発から車両開発までを机上で行う Model Based Development/Model Based Research (MBD/MBR) の構築を進めており、微視的な現象のモデル化に取り組んでいる。そのために、モデルを検証するための微視的な現象の可視化・評価技術が必要である。

本稿では、車体軽量化に高い効果が期待できる複合材料を題材に、微視的な現象の可視化・評価技術を構築した事例を紹介する。可視化には SPring-8 の放射光を用いた CT 撮像と独自の In-situ 試験装置を組み合わせ、密度差が小さな材料であっても、負荷過程の変形挙動を観察可能な技術を構築した。評価には繊維や樹脂の特徴点を活用した Digital Volume Correlation (DVC) を用い、材料の内部まで含めた変形量を定量評価可能な技術を構築した。

Abstract

Achieving both weight reduction of vehicles for low fuel consumption and improvement of crash safety performance for human life protection is a major task in car development. Innovation of material technology as well as structural technology is important to achieve such a task. Innovation in material technology requires efficient and effective technological development that is backcasted from vehicle functions. As an enabler, Mazda is building Model Based Development/Model Based Research (MBD/MBR) that handle the process from material development to vehicle development on the desk, working on modeling microscopic phenomena. We need techniques for visualizing and evaluating microscopic phenomena to verify the model.

In this paper, we will introduce an example of constructing a visualization and evaluation technology for microscopic phenomena using composite materials, which are highly expected to reduce the weight of the vehicle body. For visualization, we combined CT using synchrotron radiation with our original in-situ test equipment, and constructed a technology that can observe the deformation behavior of the loading even for materials with a small density difference. For the evaluation, we used a Digital Volume Correlation (DVC), which utilizes the characteristic points of fibers and resins, and constructed a technology that can quantitatively evaluate the amount of deformation including the inside of the material.

*1,3,9 技術研究所
Technical Research Center

*4,8 日鉄ケミカル & マテリアル(株)
NIPPON STEEL Chemical & Material Co., Ltd.

*6 青山学院大学
Aoyama Gakuin University

*2,7 東京工業大学
Tokyo Institute of Technology

*5 日本大学
Nihon University

*10,11 東京大学
Tokyo University

Key words : Materials, Non-ferrous material, Test/Evaluation, Synchrotron X-ray, Composite

1. はじめに

低燃費のための車両軽量化と、人命保護のための衝突安全性能の向上を両立することは自動車開発における大きな課題であり、その解決には構造技術だけでなく材料技術の革新が有効な手段となる。材料技術の革新には、超ハイテン化やアルミの高強度化・高靱性化等があるが、特に軽量化に有望な材料として炭素繊維等を用いた複合材料がある。複合材料は母材と強化繊維の組み合わせだけでなく、繊維の含有率・配向・層構造といった材料構造に関する設計因子が多く、車両の要求機能に対して高度な制御が可能である。反面、その材料構造により複雑な挙動をとるため、最適解の探索には材料スケールの因子から車両スケールの因子までそれぞれを扱うことが可能なモデルと、それらを繋ぐフレームワークが必要となる。そのため、Fig. 1 に示すようなMBD/MBR⁽¹⁾⁽²⁾を構築し、車両機能からバックキャストした革新的な材料開発や、新材料の車体機能における価値を定量的に算出できるプロセスの構築を目指している。このプロセスを構築する上での大きな課題の一つは材料スケールの因子を取り扱うモデル化技術の確立であり、そのためには微視的な現象の可視化と評価技術が必要となる。以上から、複合材料を用いるマルチマテリアル車体を想定した、衝突性能のMBD/MBR構築に向け、微視的な現象の可視化・評価技術を開発した事例を紹介する。

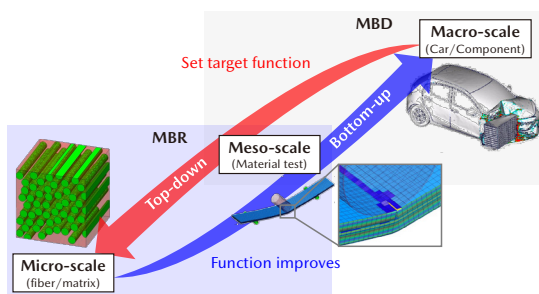


Fig. 1 Vision of Model Based Design and Research

車体の衝突現象の多くは、薄板中空フレームの曲げ変形であり、先行論文⁽³⁾⁽⁴⁾で示したとおり、座屈現象によりその強度特性が決まっていることが多い。そのため部材機能に対しては、材料の圧縮特性が大きく影響を及ぼす。今回対象とする連続繊維強化型CFRPは、Fig. 2に示すように引張強度よりも圧縮強度が低く、また脆性材料であるため、圧縮強度が車両機能に大きく寄与することが推察できる。

そのため、本研究では複合材料を用いた車体において、重要な機械特性である繊維方向圧縮強度の予測モデルの構築に向け、圧縮強度を決める微視的な現象の可視化に取り組んだ。

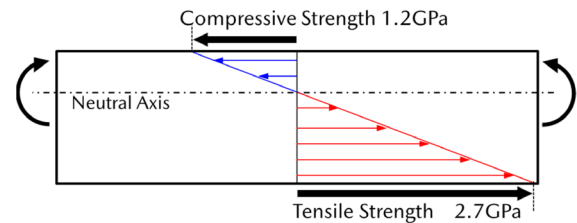


Fig. 2 Stress State under a Bending Frame

2. 可視化実験

2.1 評価対象

連続繊維強化型のCFRPの圧縮強度は、Fig. 3に示すようなキンクと呼ばれる繊維の長手方向の局所座屈によって決まることが、上田らの報告⁽⁵⁾により知られている。先行研究では炭素繊維の体積含有量（以下、 V_f ）が40%前後のものが多く、本稿では車両の構造部材を想定しているため、炭素繊維の V_f が60%と高い点が異なる。また、先行研究は汎用的なX線CTを用いており、繊維一本一本の挙動までは明確にとらえられていないが、樹脂の応力分布や界面の剥離状況までモデル化することを想定しているため、繊維一本一本まで明瞭にとらえることを目指す。

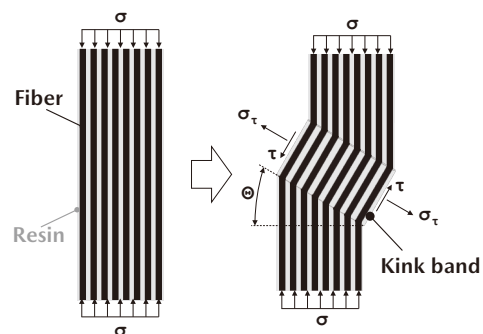


Fig. 3 Microscopic Behavior that Determines Compression Strength

2.2 評価方法

(1) 評価設備

現象を把握しモデル化するには、材料内部まで含めた観察が必要であり、FIB-SEMやX線CTなどの方法が一般に利用される。しかし、FIB-SEMは試料をイオンビームで削り内部断面を得る破壊分析であるため、原理的に負荷過程の挙動をとらえられない。また、一般的なX線CT装置では、炭素繊維と樹脂の密度差が小さくCT像の細部が不明瞭となる。これは、CT像の基となるX線透過像において、X線の波長が短く試料を良く透過するほど内部の密度差に起因する投影が薄くなる等、トレードオフ関係があることによる。そのため、一般的X線源の約10億倍輝度が高い

アンジュレータ放射光源を利用することで、試料のX線透過性を維持しつつ、内部投影コントラストに差が出るような放射光の波長条件を選び、目的に合うように繊維と樹脂を分別可能とする方法を見出した。その放射光CT撮像には Fig. 4 に示す SPring-8 の BL-24XU を使用した。

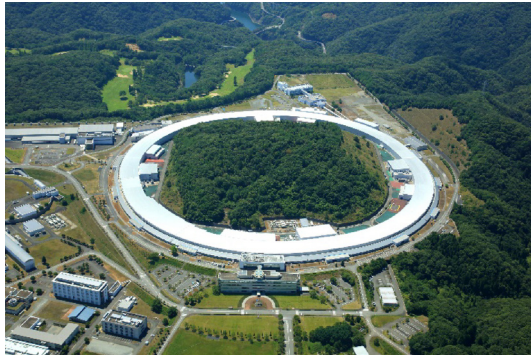


Fig. 4 Exterior of SPring-8⁽⁶⁾

(2) 評価方法

本評価では圧縮負荷過程の材料内部の変形挙動を撮像する必要があるため、独自に設計した装置を用い評価した。

a. 試験片と圧縮負荷条件

評価には母材をエポキシ樹脂、繊維に東レ(株)製炭素繊維の T700SC を用いた。エポキシ樹脂は日鉄ケミカル & マテリアル(株)にて独自開発したものを用い、オートクレーブにて成形後、機械加工にて試験片形状に切り出した。Fig. 5 に試験片形状と In-situ 圧縮試験装置の概略図と外観を示す。In-situ 圧縮試験装置のインナーケースと OUTER ケースについては、X 線の透過率を考慮した材料・板厚としつつ、必要な解像度から検出器との距離等を考慮した寸法としている。また、上部にアクチュエーターを設け、撮像時に負荷を掛けられる機構とした。

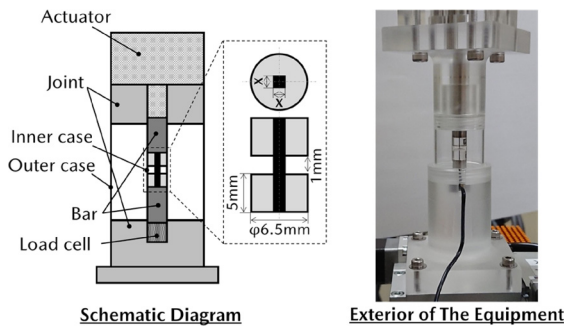


Fig. 5 In-situ Compression Test Equipment

b. 評価条件

X 線 CT 撮像にあたり、試験片挙動の全体をとらえることを目的とした投影型と、視野範囲は狭くなるが、より明瞭に現象をとらえることが期待できる結像型の 2 つの方法で撮像を行った。投影型と結像型の評価手法の差を Fig. 6 に、評価条件と画像の情報を Table 1 に示す。一般的な CT 撮像方法である投影型は、試験片を透過した X 線を直

接検出器で撮像するのに対し、結像型はフレネルゾーンプレートを用いる。可視顕微鏡と同様に、直接拡大した上で撮像を行うため、高い分解能を得られる撮像手法である。本計測でも、理論的な分解能は投影型に対し結像型は約 4 倍に向上した。一方で、視野は検出器の容量に律速するため、4 分の 1 に狭まる。この 2 条件での撮像を行うことで、キंक発生部位の特定をすると同時に、キंक発生直前の繊維界面の剥離の有無まで含めて評価する。

Table 1 Detail of Test Condition and Resulting Image

	Projected X-ray CT	Imaging X-ray CT
Energy (keV)	15	10
Exposure Time (sec)	0.1	0.4
Defocus (mm)	20	2
Image Resolution (nm/pixel)	325	87
The Number of Pixels (pixel)	2048 × 2048 × 2048	2048 × 2048 × 1148

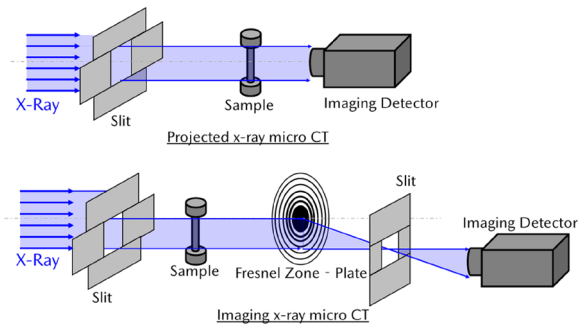


Fig. 6 Measurement Methods of Projected and Imaging X-ray Micro CT

3. 実験結果

3.1 荷重特性

今回用いる試験片は、一般的な CFRP の圧縮強度を取得する試験片よりも評点部の寸法が小さい。そのため材料の不均質性や亀裂進展の影響の差から、評点部の寸法が小さくなることにより強度が変化する、寸法効果が発生するリスクや、治具・タブ構造の剛性等により適切な圧縮負荷できないリスクがある。そのため In-situ 圧縮試験装置の妥当性確認のため、JIS K7018 Type A2 に準拠した一般的な圧縮強度との比較を行った。圧縮試験装置治具での圧縮強度の評価は Fig. 7 に示すとおり、同一の試験片・タブと圧縮試験装置の内管を切り出した物を組みたてて万能試験機にて圧縮した。計測した強度の比較結果を Fig. 8 に示す。JIS 規格と In-situ 圧縮試験装置で取得した圧縮強度には大きな差はなく、適切な圧縮試験が出来ていることを確認した。

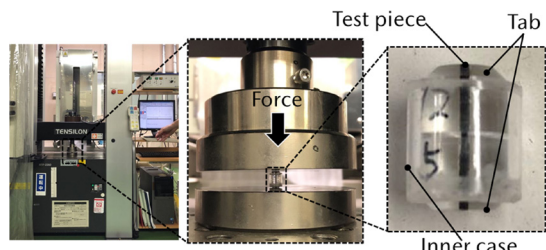


Fig. 7 Evaluation of Compression Strength in a Simulated In-situ Test Equipment

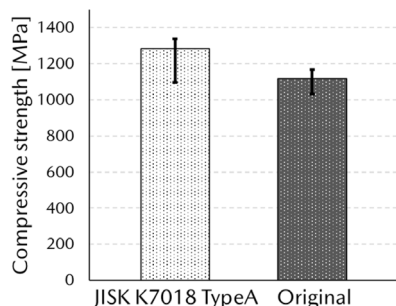


Fig. 8 Comparison of Compressive Strength between JIS K7018 Type A1 and In-situ Test Equipment

3.2 撮像結果

無負荷状態における、繊維直行方向の撮像結果を Fig. 9 に示す。撮像の目的は、繊維の正確なアライメントと繊維界面の剥離状態を確認することだが、投影型でも繊維と樹脂を明確に判別可能で、目的を達成できることが分かる。結像型では更に繊維と樹脂の境界が明瞭にとらえられており、より精度の高い情報を期待できる。以上から、マイクロモデルの構築に有効な画像を取得可能であることを確認できた。

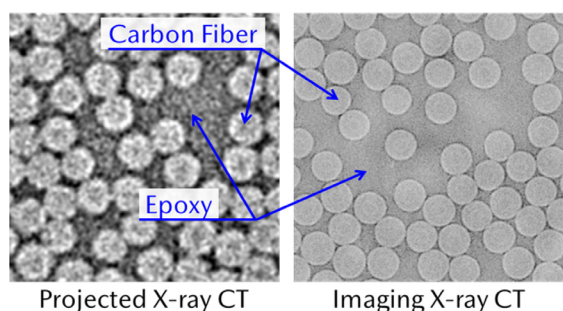


Fig. 9 Comparison of Measurement Results between Projected X-ray CT and Imaging X-ray CT

次に投影型 X 線 CT で撮像した画像から構築した、最大荷重前後の 3 次元画像を Fig. 10 に示す。最大荷重が発生する直前では初期の矩形形状を維持しているのに対し、最大荷重発生後ではせん断帯が発生し、試験片が完全に破断していることが確認できる。しかし、先行文献のような破断前に発生する微小領域での繊維の局所座屈は観察できなかった。これは先行文献に対し、炭素繊維の含有率が高く、局所座屈が発生した後の飛び移り現象が急

激に起こるため、キックが発生した状態で現象を留めることが困難だったためと考えられる。

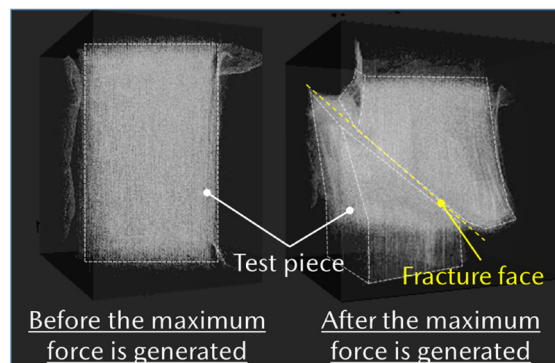


Fig. 10 3D Image before and after Maximum Force

最大荷重発生後の 3D 画像から、繊維方向の断面画像を示したものを Fig. 11 に示す。板厚の中央部と表面部で破断後の繊維の向きは異なるが、繊維の破断面を確認することができた。ここから繊維の初期破断時のせん断帯の角度を算出すると 25 度であり、先行文献で示されるキックバンドの発角は 20 度から 30 度⁽⁸⁾と一致することが確認でき、想定どおりの現象が発生していたことが予測される。

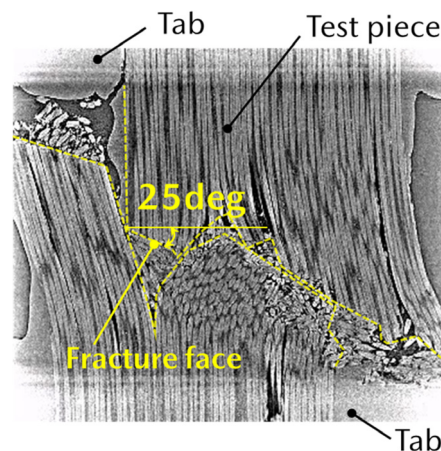


Fig. 11 Measurement Results on Fiber Direction after Maximum Force is Generated

次に評価技術について述べる。モデル化には現象解明のための可視化だけでなく、構築したモデルの精度検証も必要である。実機と解析で定量比較するには、Digital Image Correlation (DIC) 等による表面ひずみの評価技術が有効であるが、今回は材料の内部まで含めた評価と、 μm 単位の変形を追従する必要があるため分解能の向上が必要となる。そこで、炭素繊維や樹脂内部のマーカーを特徴点として利用した Digital Volume Correlation (DVC) を用いた評価技術⁽⁷⁾の開発も行った。評価事例を Fig. 12 に示す。Fig. 10 の最大荷重発生前の 3D 像では確認できなかった、各座標方向の変位を確認することができる。また変位量も連続的に移り変わっており、一定の妥当性があることも確認できた。

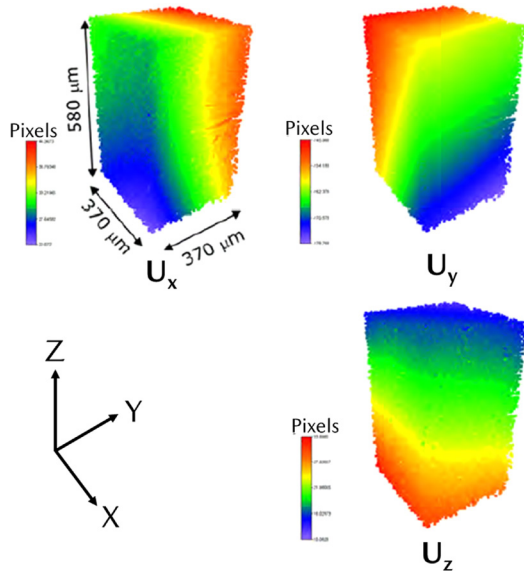


Fig. 12 Measurement Methods of Displacement

4. おわりに

材料から車両機能までの研究開発を机上で実現するMBD/MBRの構築に向け、微視的な現象の可視化・評価技術の構築を試みた。車体軽量化に期待される炭素繊維強化型複合材を対象に、シンクロトロンを活用した放射光X線CTを用い、圧縮負荷過程における材料内部の振る舞いを可視化できる技術を構築した。また従来の投影型から結像型に変えることで、繊維と樹脂の境界を明瞭にとらえることに成功し、マイクロモデル構築に必要なデータを取得できた。加えて、X線CT像を対象にデジタル画像相関法の一つであるDVCを用いることで、材料内部まで含めた変形量を定量評価可能な技術を構築した。

今後これらの可視化・評価技術を用い、材料のマイクロモデルを構築し、MBD/MBRのフレームワークを完成させ、車両機能からバックキャストした材料・構造を導出し、自動車の軽量化開発に貢献する。

公益財団法人高輝度光科学研究センター・大型放射光施設SPring-8での実験は課題番号2019B3054, 2020A3231, 2020A3054, 2020A3389, 2021A3231, 2021A3054で実施しました。ここに厚くお礼申し上げます。

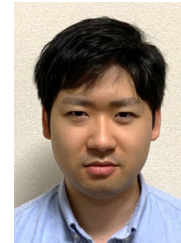
参考文献

- (1) Yuma Miyauchi et al.: Stochastic homogenization analysis of FIB-SEM image-based hierarchical model of sprayed porous ZrO_2 , Mechanical Engineering Letters, Vol.1, pp.1-8 (2015)
- (2) 山川ほか：材料モデルベースリサーチによる多孔質吸音材微視構造設計技術の開発と吸音部品設計への適用, [マツダ技報, No.37, pp.75-80 \(2020\)](#)
- (3) 本田ほか：薄肉中空フレームにおける曲げ強度の質量効率を向上させる断面形状の研究, 自動車技術会学術講演会前刷り集, No.129-14, pp.1-4 (2014)
- (4) 河村ほか：曲げ変形における高エネルギー吸収フレームの開発, [マツダ技報, No.33, pp.118-123 \(2016\)](#)
- (5) Masahito Ueda et al.: In situ observation of kink-band formation in a unidirectional carbon fiber reinforced plastic by X-ray computed tomography imaging, Advanced Composite Materials, pp.31-43 (2016)
- (6) 国立研究開発法人理化学研究所から提供
- (7) Satoru Yoneyama et al.: Measuring Strain Distribution of Knee Cartilage Using Digital Volume Correlation, SEM XIV International Congress on Experimental Mechanics (2020)
- (8) T. J. Vogler et al.: On the axial propagation of kink bands in fiber composites: Part I experiments, International Journal of Solids and Structure, No.36, pp.557-574 (1999)

■ 著 者 ■



河村 力



高橋 拓也



住田 弘祐



杉山 哲也



上田 政人



米山 聡



轟 章



宮永 俊明



西田 健二



横関 智弘



樋口 諒