

論文の内容の要旨

論文題目 メゾ規準に基づく炭素繊維強化プラスチック製
 高压水素容器の強度評価法に関する研究

氏 名 竹本 真一郎

本研究は、低公害、低炭素、脱化石燃料を目指した将来の水素社会の実現のため、燃料電池自動車に搭載される、炭素繊維強化プラスチック（以下 **CFRP**）製高压水素容器の強度信頼性と低コストを両立させる、合理的な強度評価法の確立を目的とする。容器の試験片モデルと小型圧力容器による有限要素解析と試験結果との照合を通じて提示した、メゾ規準に基づく強度評価方法論の妥当性を示す。

第1章では、本研究の背景と目的、進め方と構成を述べる。

本研究では、メゾスケールモデルを用い、**CFRP**を炭素繊維束とマトリクス樹脂を明確に区分し、それぞれの強度モデルを直接的に設定し、炭素繊維束、マトリクス樹脂、そして繊維束と樹脂間に発生する破壊メカニズムを解明していく。フィラメントワインディング（以下**FW**）工法で特徴的なヘリカル巻での繊維束交差により発生する局所的応力集中を主要因とする仮説を立てることから始め、メゾスケールモデルに基づく強度評価方法論の妥当性を、繊維束を交差させた試験片と小型容器を用いて、有限要素解析と試験結果との照合を通じて示していく。

また、本研究により構築する **CFRP** の強度評価手法は、繊維束とマトリクス樹脂の強度モデルを構成する因子を明らかにして行うものであり、**FW** 工法のみならず他の工法による **CFRP** 構造にも共通するものである。よって、本研究成果は、例えば自動車の車体構造など

に用いられる CFRP 構造体の強度評価にも展開可能である。

第2章では、高圧水素容器、CFRP と FW 工法の解説を行う。既往の CFRP の強度評価法を解説し、高圧水素容器の評価に適用するときの課題、問題点を明らかにする。さらに、本研究の中核をなすメゾスケールモデルの特徴や適用等について述べる。

具体的には、既往の CFRP の強度評価法として、古典的な積層理論にもとづくマクロスケール連続体モデルでの評価、そしてミクロとマクロを連成してミクロの不均質構造をマクロに均質化とした、均質化法に代表されるマルチスケール評価を解説する。さらに、CFRP 製高圧水素容器での CFRP の強度評価においては、既往の評価方法の適用が難しいことを述べ、メゾスケールモデルによる評価方法を提案する。そして、高圧水素容器で想定される破壊モードを予測し、メゾスケールモデルで評価が可能であることを示す。

第3章では、FW工法によるCFRP積層構造のメゾスケール引張強度評価を行う。

具体的には、胴部(シリンダー部)FW ヘリカル巻きでの繊維束交差により発生する局所的応力集中を想定し、メゾスケールモデルに基づく強度評価方法論の妥当性を、繊維束を交差させた試験片に関する有限要素解析と二軸引張試験の結果との照合を通じて示す。

CFRPフィラメントワインディング(FW) 工法の特徴を織り込んだ試験片モデルについて、ヘリカル層の90度交差試験片を中心に、フープ層や積層している状態を想定した試験片モデル(図1)について、引張強度に対する実験と解析との比較(図2)から、破壊モードの仮説に対する検証を試みた。

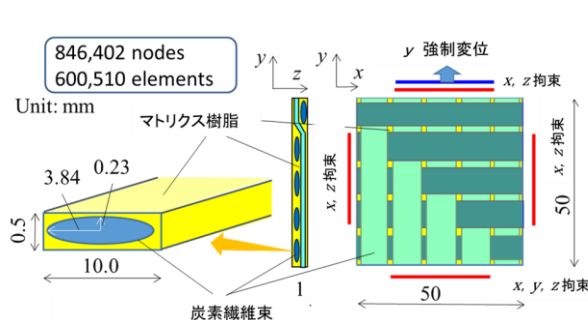


図 1. メゾスケール解析モデル

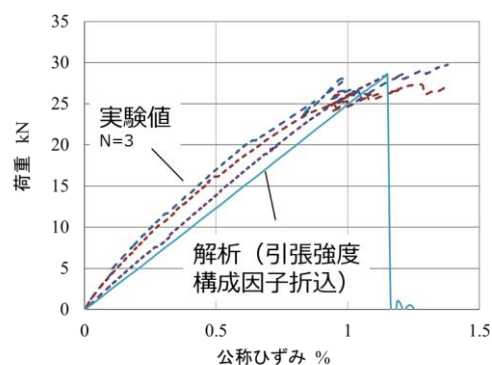


図 2. 引張試験片モデルによる
引張荷重－ひずみ線図

これらの検討によって、炭素繊維束とマトリクス樹脂のメゾ構造を正確に表現するメゾスケールモデルの実験と非線形有限要素解析により、「繊維束異方性」、「樹脂弾塑性」に加え、「引張側樹脂ひずみ速度依存性」、「樹脂強度の引張/圧縮非対称性」、「繊維束直交方向破壊基準」を考慮することで、高圧水素容器のCFRP積層の引張強度と破壊形態を正確に再現する見込みを得た。

第4章では、FW工法によるCFRP積層構造のメゾスケール曲げ強度評価を行う。

具体的には、鏡部（ドーム部）FWヘリカル巻きでの繊維束交差により発生する局所的応力集中を想定し、メゾスケールモデルに基づく強度評価方法論の妥当性を、繊維束を交差させた試験片に関する有限要素解析と3点曲げ試験の結果との照合を通じて示す。

CFRPフィラメントワインディング（FW）工法を模擬した試験片モデルについて、ヘリカル層の90度交差試験片を中心に、フープ層や積層している状態を想定した試験片モデルについて、曲げ強度に対する実験と解析との比較（図3）から、破壊モードの仮説に対する検証を試みた。

これらの検討によって、炭素繊維束とマトリクス樹脂のメゾ構造を正確に表現するメゾスケールモデルの実験と非線形有限要素解析により、引張強度に起因する「繊維束異方性」、「樹脂弾塑性」、「引張側樹脂ひずみ速度依存性」、「樹脂強度の引張/圧縮非対称性」、「繊維束直交方向破壊基準」に加え、圧縮強度に起因する「樹脂粘弾性」と「圧縮側樹脂ひずみ速度依存性」を考慮することで、高圧水素容器のCFRP積層の曲げ強度と破壊形態を正確に再現する見込みを得た。

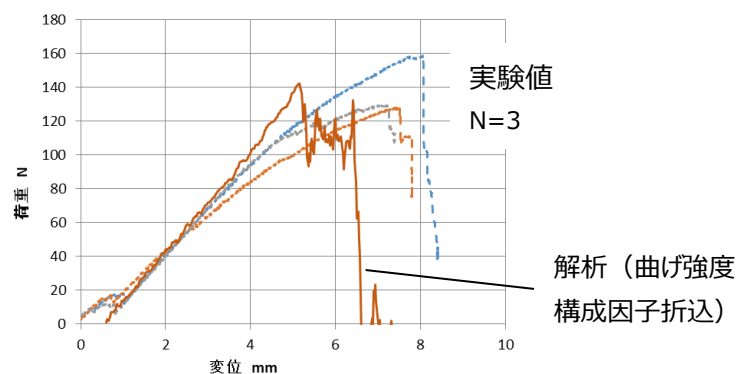


図 3. 曲げ試験片モデルによる曲げ荷重－変位線図

第5章では、小型圧力容器を用いた実部品での破壊モードの予測、評価を行う。

第3章、第4章では、FW工法のヘリカル層に着目した繊維束とマトリクス樹脂とを区分するメゾスケールモデルにより、試験片の強度評価法を検討してきた。この章では、メゾスケール規準に基づく強度評価法を実容器でも適用可能であることを実証していく。

方策として、マクロスケールレベルでの軸対称モデルによる解析と、試験片モデル程度までに切り出した積層部分のメゾスケールモデルによる部分解析を組み合わせるズームング解析（図4）により、容器レベルでの破壊現象を予測、評価した。小型圧力容器の実験と、マクロスケールの軸対称モデルでの解析結果との比較（図5）を行い、本手法がより正確に実験を再現し、精度よく強度評価が行えることを検証した。

さらに、これらの結果から得られた破壊強度の影響因子を織り込んだ強度破壊則を提案

した．この破壊則をマクロスケールの軸対称モデルに適用，補正した結果（図 5），マクロスケールでの解析においても，破壊強度の予測精度を十分向上させることができた．

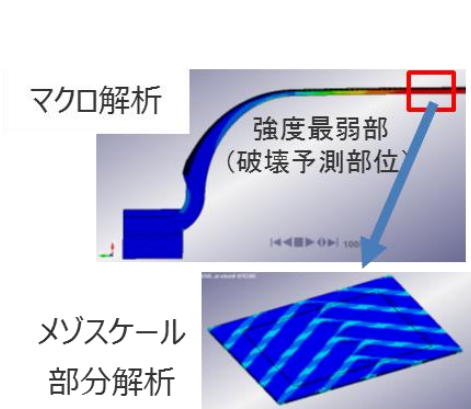


図 4. ズーミング解析

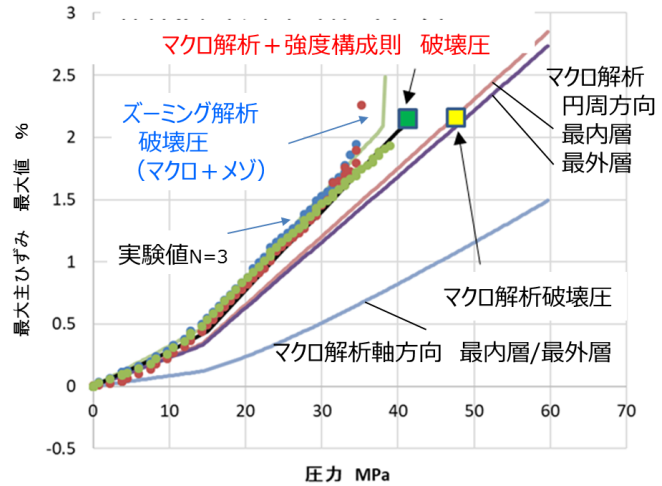


図 5. 小型容器試験によるひずみー圧力線図

第 6 章では，本研究のまとめと今後の展望を述べる．

本研究では，炭素繊維強化プラスチック製高压水素容器の試験片モデルと小型压力容器による有限要素解析と試験結果との照合を通じて，メソスケールモデルに基づく強度評価方法論の妥当性を示した．

炭素繊維束とマトリクス樹脂のメゾ構造を正確に表現するメソスケールモデルの実験と非線形有限要素解析により，引張強度の構成因子である「繊維束異方性」，「樹脂弾塑性」，「引張側樹脂ひずみ速度依存性」，「樹脂強度の引張/圧縮非対称性」，「繊維束直交方向破壊基準」と，さらに圧縮強度の構成因子である「樹脂粘弾性特性」と「圧縮側樹脂ひずみ速度依存性」を考慮することで，高压水素容器のCFRP積層の引張/曲げ強度とその破壊形態を正確に再現する見込みを得た．

さらに，マクロスケールの軸対称モデルとメソスケールの部分モデル解析を併用するズーミング解析と，マルチスケール展開によるマクロ強度構成則を考慮したマクロスケール解析の，2つの手法に対し，それぞれ小型容器試験との比較照合により，本手法が容器の胴部(シリンダー部)破裂に対する強度予測を正確に評価できることを実証した．

今後は，本研究で実験検証できなかった，容器の鏡部（ドーム部）破裂に対する強度予測の適用可能性を実証していく．その際，3次元曲面の積層状態での破壊モードとその強度構成因子を解明するため，容器全体を再現したメソスケールモデルでの大規模解析による強度評価法を検討していく．