

## 審 査 の 結 果 の 要 旨

氏 名 竹本 真一郎

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圧水素容器の強度評価法に関する研究

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、燃料電池自動車の普及を加速することを最終目的とし、搭載される炭素繊維強化プラスチック（以下 CFRP）製高圧水素容器の強度信頼性と低コストを両立させるための、合理的な強度評価法の確立を目標とする。新たな方法論として、炭素繊維束とマトリクス樹脂を明確に区分したうえでメゾ規準に基づき強度モデルを構成することを提案する。強度モデルを構成する因子に関して、試験片を用いた破壊試験と有限要素解析により検討し、「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」、「樹脂粘弾性」、「圧縮側樹脂ひずみ速度依存性」を考慮した強度モデルが、CFRP 製高圧水素容器の破裂圧力を予測するうえで、必要かつ十分であることを明らかにした。さらにその妥当性について、小型圧力容器を用いた破裂試験と有限要素解析により実証した。

第1章では、本研究の背景、目的、構成を述べている。燃料電池自動車開発においてCFRP 製高圧水素容器に関する精度の高い強度評価が必須であることを示し、本研究の社会的意義を明らかにしている。

第2章にて、本研究で対象とする CFRP 製高圧水素容器と、その製造方法に関する基礎事項をまとめている。本研究の中核をなすのは、炭素繊維束とマトリクス樹脂を区分するメゾスケールモデルである。既往の強度評価法の問題点を明らかにすることで、メゾスケールモデルを基軸とする方法論の妥当性と利点を明らかにしている。

第3章では、試験片レベルでメゾスケール規準に基づく強度モデルを検討し、シミュレーションと実験との比較検証を通じた妥当性の検証を行った。想定する破壊形態は、内圧による容器破裂時に胴部で発生する主要な破壊モードである二軸引張破壊とした。フィラメントワインディング製法により生じる繊維束構成を代表させる十字型試験片を作製し、二軸引張破壊試験中の AE 計測および X 線 CT 撮像から、メゾスケールで発生している破壊現象を明らかにした。その破壊現象を適確に表現するための強度モデルを構成する因子として、「繊維束構成則の異方性」、「非線形性の高い樹脂の弾塑性挙動」、「樹脂強度のひずみ速度依存性」、「樹脂強度の引張と圧縮に関する非対称性」、「繊維束の繊維直交方向に関する破壊基準」を考慮することで、高圧水素容器の破裂圧力を精度よく予測可能であることを示した。さらには、繊維束構成の異なる複数の試験片に関して破壊試験とシミュレーシ

ョンによる破壊予測を行い、提案する強度モデルが一般性を有することを示した。

第 4 章では、容器ドーム部で発生する主要な破壊モードと思われる曲げ破壊を検討の対象とし、強度モデルの普遍性を強化した。第 3 章で検討した因子に加え、「樹脂粘弾性を表現するための構成則のひずみ速度依存性」と「圧縮側破壊に関する樹脂ひずみ速度依存性」を考慮することで、曲げ破壊を精度よく予測できること、さらには繊維束構成の異なる複数の試験片に対しても適用可能であることを示した。この成果により、容器の主要な破壊モードのひとつであるドーム部を起点とする破裂を正確に予測できると思われる。

第 5 章では、第 3 章および第 4 章で構築した破壊モデルが、実容器レベルで適用可能かを検証した。小型圧力容器の試作と破裂試験を行い、容器軸対称モデルによるマクロ解析と、メゾスケールモデルによるブーミング解析を組み合わせることで破裂強度を適確に予測できることを実証した。さらには、強度モデルを構成する因子の効果を材料構成則に組み込む均質化法的手法を提案し、ブーミング手法に比して精度は劣るものの、実用に十分耐え得る手法であることを実証した。

第 6 章は結論であり、本研究を総括し今後の展望をまとめた。本研究の成果により、既往の方法論では困難であった CFRP の複雑な破壊現象を適確に捉えることが可能となり、試行錯誤に陥っていた燃料電池自動車用高圧水素容器開発の現状を打開できると期待される。また、メゾスケールモデルを基軸とする方法論は、フィラメントワインディングで成形される高圧水素容器のみならず、平織り CFRP 材料などの他工法による部材にも適用可能であり、将来の展開も大いに期待される。これらの点において本論文の工学的価値が認められ、よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。