

## 審査の結果の要旨

氏名 嚴 琇炫

最近、VaRTM (Vacuum assisted resin transfer molding) は生産費の節減や成形の簡単さなどの特長のため、宇宙・航空分野にも適用されている。しかし、VaRTMでは、プリフォーム中に樹脂を注入させる際、メディア (resin flow medium) とプリフォームにおける樹脂の流動速度差による樹脂の未含浸や樹脂の流れ方によるドライスポットが生じることがある。また、熱硬化樹脂は硬化過程に生じる収縮による残留応力は、複合材料構造物の剥離や寸法安定性の低下の原因になることがある。そのため、VaRTMによって成形された複合材料構造の品質向上のためさまざまな工夫がされている。その中で一つの方策が最近注目されている光ファイバセンサを用いたプロセスモニタリングやヘルスマニタリングである。これまで、光ファイバセンサを用いた樹脂流動と硬化モニタリングに関する研究がいくつか報告されているが、同じセンサを用いて成形後の構造ヘルスマニタリングを行うことで運用時の信頼性を向上させようとする試みはあまりなされていない。本研究では分布型および準分布型光ファイバセンサシステムとファイバブラックグレーティングを用いて、すなわち樹脂流動と硬化過程をモニタリングする新しい手法を提案するとともに、同じセンサでヘルスマニタリングも行うことを目指している。以下、本論文の構成と内容を示す。

第1章は序論であり、VaRTM プロセスについて解説した後、VaRTM プロセス中に生じる問題点を挙げている。また、複合材料構造の検査方法とヘルスマニタリングについて簡単に説明を加えた。最後に本研究の目的と論文の構成について述べている。

第2章「複合材料構造の構造ヘルスマニタリング」では、複合材料構造の構造ヘルスマニタリングに関する最新の研究の動向について調査を行い、本研究の新規性と独創性を強調している。樹脂流動モニタリングに関する研究、樹脂流動と樹脂硬化を同時にできるプロセスモニタリング、また複合材料構造のヘルスマニタリングとして風車のヘルスマニタリングについて調査し、最後に新しい VaRTM 成形複合材料のヘルスマニタリング方法を提案している。

第3章「光ファイバセンシングシステム」では、光ファイバの全般的な説明をした後、本研究で適用されたファイバブラックグレーティング (FBG: Fiber Bragg grating) センサとセンシングシステムについて概説し、準分布測定が可能である波長分割多重 (WDM: Wavelength division multiplexing) と分布測定が可能で

ある光周波数領域リプレットメトリ (OFDR: Optical frequency domain reflectometry) について原理と適用可能性について考察している。

第4章「分布型センシングシステムを用いた VaRTM のプロセス・ヘルスマニタリングの可能性に関する研究」では、長ゲージ FBG センサをプリフォーム中に埋め込んで、樹脂が含浸した部分としていない部分の温度差による変化を利用して樹脂流動を OFDR で検知する手法を提案し、実験的にその適用性を検証している。また、樹脂の注入の後、樹脂が完全に硬化するまでの経時的変化についても測定した。成形が終わった積層板に3点曲げ試験と引っ張り試験で荷重を負荷し、ひずみ分布を計測することによりヘルスマニタリングの可能性を検討した。

第5章「FBG センサを用いたひずみ変化による樹脂流動モニタリング」では、第4章で発見した VaRTM 成形中のひずみ変化による樹脂流動モニタリングの可能性を検討した。波長分割多重と光周波数領域リプレットメトリを用いて樹脂注入の際に生じる真空圧の開放によるひずみ変化を測定することで樹脂流動モニタリングの可能性を評価した。

第6章「圧縮荷重での繊維挙動」では、真空圧を掛けた時生じるひずみのメカニズムに関して簡単なモデルを提案した。このモデルの有用性を検討するために繊維と光ファイバの顕微鏡観察と繊維の圧縮試験を行った。また、第5章で見いだした特異的な現象として、樹脂が FBG センサに近づける際に生じるひずみ変化を調べる試験を行った。

第7章「風車ブレードのプロセス・ヘルスマニタリング」では、本研究で提案して可能性検討したプロセス・ヘルスマニタリング方法を代表的な VaRTM 成形複合材料構造である風車ブレードに適用した。半径1mの風車ブレードを設計して VaRTM で成形した。ブレード全体の状況を測定するために8連の FBG センサを埋め込んで準分布測定を行った。応力集中が起こりえる部分では100mmの FBG センサを設置して分布測定を行った。プロセスモニタリングとして樹脂流動と樹脂硬化を測った。風車ブレードのヘルスマニタリングとしては曲げ試験、回転試験および自由振動試験を行った。本研究で提案したモニタリング方法で成功的に風車ブレードプロセス・ヘルスマニタリングが可能だった。

第8章は結論であり、本研究の成果について言及している。

本論文は、VaRTM 成形プロセスとそれにより製造された複合材料構造体の品質管理と健全性評価を目的に、光ファイバセンサを用いたヘルスマニタリング手法を提案したものである。さらに提案した手法を風車ブレードのプロセス・ヘルスマニタリングに適用し、その有用性を検証している。このように実証的研究を通して、複合材料構造物の品質保証と使用中構造健全性評価のための新しい手法が提案されている。

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。