

論文内容の要旨

近年、繊維と樹脂を組み合わせた複合材料(Fiber Reinforced Plastics: FRP)が軽量かつ高比強度、高比剛性といった優れた機械的特性をから注目されている。FRPの適用範囲は拡大しており、航空機や人工衛星といった航空宇宙などの先進分野だけでなく、自動車分野にも適用が広がっている。FRP製品の製造工程においては、温度および圧力分布による樹脂の硬化度の不均一化、残留応力による残留変形などの問題が発生する恐れがある。さらに、大型・複雑形状の製品においてはこれらの問題がより顕著となる。そこで従来から、これらの問題を解決するために、FRP製品の最適な成形パラメータを求めることが行われてきた。しかしながら、従来の手法は試行錯誤的なものであるため、大型製品においては非常にコストが掛かるという課題があった。一方で、FRPの製造プロセス中に内部情報をその場モニタリングして、その情報を基に最適な成形パラメータを決定することが、コスト削減や製品の品質や信頼性を向上させることに非常に効果的であると考えられている。そのため、現在では数多くのその場モニタリング技術に関する研究が行われている。また、近年のセンサ技術の発展も相まって、様々なその場モニタリング用のセンサの開発も進んでいる。その中でも光ファイバセンサは、優れた埋め込み性を有し、長期安定性に優れ、高い測定精度を有していることから、その場プロセスモニタリングに有用なセンサであると証明されている。そこで、筆者らは光ファイバセンサを用いたその場成形モニタリング技術に注目した。近年、コストのかかるオートクレーブ成形法からの脱却(Out-of-Autoclave: OoA)を目指して、RTM(Resin Transfer Molding)などのLCM(Liquid Composite Molding)成形の開発が進んでいる。このLCM成形においてモニタリング対象となるプロセスは、樹脂含浸プロセス、樹脂硬化プロセス、そして冷却プロセスであり、この全成形工程のモニタリングに適用可能なモニタリングシステムの開発を目指した。

本研究ではまず、フレネル反射型光ファイバセンサを用いた3次元・複雑形状のFRPに適用可能な高精度の硬化度測定システムを開発した。本光ファイバセンサは樹脂からの反射率の変化を利用しているため、大きな光損失を伴う埋め込みが硬化度の測定精度を低下させる可能性があり、この光損失が測定精度に与える影響を明らかにする必要がある。そこで、フレネル反射型光ファイバセンサを用いて、実用的な3次元かつ複雑形状のFRP製品の硬化度モニタリングが可能な測定システムの開発を目指した。目的達成のアプローチとして、まず、埋め込みによって光ファイバに発生する曲げ損失を低減するために、光学的に曲げ損失耐性の高い、高屈曲光ファイバというものに注目して硬化度測定への採用を試みた。高屈曲光ファイバを用いることで曲げ損失が低下することはこれまでに明らかにされている。しかし、構造や製造方法の異なる光ファイバが、筆者らの提案している硬化度測定方法に適用可能であるかは明らかでない。さらに、これまでに、示されている曲げ損失特性(曲げ半径と光ファイバに生じる曲げ損失の関係)は、ITU-T G.652.D, G.657.A1およびA2規格に準じた最小許容曲げ半径(30[mm]~7.5[mm])付近の損失特性であり、これ以下の非常に小さい曲げ半径においては現在あまり研究が行われていない。そこでまず、両光ファイバセンサの曲げ損失特性を、半径が2~6mmの棒状治具に光ファイバを巻きつけて、その際に生じる損失を反射法によって測定することで明らかにした。次に、光ファイバに生じる局所曲げが硬化度測定に与える影響のメカニズムを、光ファイバに数種類の曲げ半径で曲げ損失を与え、樹脂の硬化度測定を行うことで明らかにした。その結果、光損失の量は硬化度の測定精度に影響を与えないことが明らかとなった。そして、曲げを伴う埋め込みが硬化度測定の精度に与える影響を、VaRTM(Vacuum-assisted Resin Transfer Molding)によって製造された湾曲形状のGFRP(Glass Fiber Reinforced Plastics)プレートに光ファイバセンサを埋め込み、硬化度測定を行うことで明らかにした。その結果、VaRTMでは光損失がある時間まで不安定であり、これが硬化度の測定精度に大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。一方、損失量が小さい場合は光損失の変化が、硬化度の測定精度に与える影響も同様に小さいことが明らかとなった。また、VaRTMの硬化度測定で硬化度の測定結果にエラーが生じてしまった場合の補正方法を提案し、硬化度曲線に大きな誤差が生じてしまった場合でも補正が可能であることを示した。

続いて、プリフォームに埋め込まれる光ファイバセンサの最適な埋め込み経路を決定するシミュレーショ

ンソフトの開発を目指した。本研究では、まずその前段階としてプリフォームに埋め込まれる光ファイバセンサに生じる光曲げ損失を予測するシミュレーションソフトの開発を行った。これまでの結果として、VaRTMでの測定精度を低下させる原因である曲げ損失の不安定さも、光ファイバセンサに生じている損失が小さければ影響を無視することができることが明らかとなった。そこで、埋め込みによって光ファイバセンサに生じる損失が小さく、安定した埋め込み経路を設計することで、VaRTM成形においても高精度の硬化度測定が行えると考えられる。したがって、本センサをプリフォームに埋め込んだ際の光損失を、光損失特性を用いて予測する手法を提案した。また、これを基にして3D CADソフトのRhino 3DとRhino 5.0上で動作するプラグインであるプログラミング言語・環境のGrasshopper 3Dを用いて、光曲げ損失シミュレーションソフトの開発を行った。そして、プリフォームに埋め込まれた光ファイバセンサによって取得される実測値との比較実験によって、この損失予測法およびシミュレーションによる損失の予測値が、よく一致していることが示された。また、本シミュレーションシステムの実用化を目指して、硬化度の測定精度を損失量によって定量化し、損失量が硬化度の測定精度の指標となるよう指標化を試みた。

次に、レイリー散乱型光ファイバ分布センサを用いて、樹脂含浸中のプリフォームの変形挙動を測定し、その測定されたひずみ分布からフローフロントを検出する手法の開発を行った。近年では、LCM成形への関心の高まりに伴い、樹脂含浸プロセスでのモニタリングにも注目が集まっている。この樹脂含浸プロセスでは、大きな空洞や未含浸部などの成形不良が生じる恐れがあり、樹脂のフローフロントのモニタリングが数多く研究されている。これに加えて、成形プロセス中のプリフォーム自身の変形も、機械的特性や品質の低下の原因になる可能性があり重要である。しかしながら、含浸中のプリフォームの変形挙動は、測定できるセンサが無かったことなどもあり、これまでに研究が行われていない。したがって、樹脂の含浸状況のモニタリングのみではなく、含浸中のプリフォームの変形を含めてモニタリングを行うことは非常に重要であり、技術的にも非常に新規性が高い。そこで、約 $1\mu\text{m}$ の高いひずみ分解能を有し、最大で 1mm という高い空間分解能を有する、レイリー散乱型光ファイバ分布センサに着目し、樹脂含浸プロセスをモニタリングできる手法の開発を目指した。この目的の達成に向けて、まず、VaRTMで樹脂の含浸方向に対して平行に埋め込まれたセンサにより、樹脂含浸中のプリフォームの変形挙動を取得した。その結果、本センサによるひずみ分布測定の再現性は高く、フローフロント付近においてはひずみの急激な変化が起こることが明らかにされた。したがって、この急激なひずみ変化からフローフロントを推定できると考え、フレーム間差分法によってフローフロントを検出する手法を提案した。その結果、本手法によって測定されるフローフロントは、目視観察されたフローフロントとよく一致することが明らかとなった。さらに、一本のレイリー散乱型光ファイバ分布センサをプリフォームに、格子状にして編み込むことによって、フローフロントを2次的にモニタリング出来ることが明らかにされた。

最後に、フレネル反射型光ファイバセンサとレイリー散乱型光ファイバ分布センサを組み合わせた、多機能センシングシステムの開発を行った。筆者らの提案している、フレネル反射型光ファイバセンサによる硬化度測定手法は、複雑形状FRPの硬化度モニタリングにも適用可能であることが明らかにされている。さらに、製造条件ごとの較正も必要とせず、非常に高精度で硬化度のモニタリングを行うことが出来る。この成果は世界的にも非常にオリジナリティが高いと言える。さらに、レイリー散乱型光ファイバ分布センサを用いたフローフロントモニタリング技術に関しては、フローフロントの2次的なモニタリングだけでなく、含浸中のプリフォーム自身の変形を含めたモニタリングができる可能性が示された。したがって、この成果も非常に新規性および独自性ともに非常に高い測定技術であるといえる。また、レイリー散乱型光ファイバ分布センサはひずみ、温度の分布測定ができ、FRP製品の健全性モニタリングへの適用も期待されている。そこで、これらの優れたモニタリング・センサ技術を組み合わせることによって、FRPのライフサイクルモニタリングに適用可能である、多機能センシングシステムの開発を目指した。この目標の達成を目指して、フレネル反射型光ファイバセンサとレイリー散乱型光ファイバ分布センサを組み合わせたセンサの構築を行った。そして、VaRTM法によるGFRPの成形プロセスを、多機能センシングシステムによってモニタリングを行った。その結果、本多機能センシングシステムによって、2次的な樹脂含浸状況、温度分布、そして硬化度がモニタリング出来ることが明らかとなった。