

# 博 士 論 文

## 題 目

フレネル反射型および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による FRP の RTM  
成形におけるモニタリング手法の開発

高知工科大学大学院 工学研究科 基盤工学専攻

博士後期課程 基盤工学コース

学位区分：博士（工学）

学 籍 番 号：1236007

氏 名：藤岡 玄紘

学位論文審査委員：

主指導教員 高坂 達郎 准教授

副指導教員 楠川 量啓 教授

副指導教員 川原村 敏幸 教授

副指導教員 松本 泰典 准教授

副指導教員 武田 真一 主任研究開発員 材料設計研究部門  
(JAXA)

2022 年 3 月

## 要旨

# フレネル反射型およびレイリー散乱型光ファイバセンサを組み合わせた多機能センシングシステムによる FRP の RTM 成形におけるモニタリング手法の開発

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から注目されている。FRP の適用範囲は拡大しており、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。また従来から、FRP 製品の成形パラメータは試行錯誤的に求められており、製造および開発コストが高いという問題もある。そこで、これらの問題の解決に効果的である、光ファイバセンサを用いたその場プロセスモニタリング技術に注目した。FRP の全成形工程のモニタリングに適用可能なシステムの開発を目指した。

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。センサとして、通信用の標準光ファイバと曲げに対して光学的に高い損失耐性を有する高屈曲光ファイバを使用した。そして、曲げ実験によって、両光ファイバセンサの光損失特性を明らかにした。さらに、曲げ損失を与えた光ファイバセンサによる、樹脂の硬化度測定によって、曲げ損失が硬化度の測定精度に与える影響を明らかにした。最後に、VaRTM(Vacuum-assisted Resin Transfer Molding)法による湾曲形状の GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastics)の硬化度を埋め込んだ光ファイバセンサによって取得した。その結果、埋め込みによる曲げ損失が硬化度の測定精度に与える影響のメカニズムが明らかとなった。

次に、フレネル反射型光ファイバの埋め込み経路最適化ソフトの開発に向けた、曲げ損失シミュレーションの開発を行った。センサをプリフォームに埋め込んだ際に生じる曲げ損失を、光損失特性によって予測する手法を提案し、これを基にした曲げ損失シミュレーションを開発した。また、実測値との比較実験によって、本シミュレーションによる光損失の予測結果が妥当であることが明らかにされた。さらに、これを基に損失が小さく安定した埋め込み経路を決定することで、3 次元・複雑形状 FRP の硬化度が高精度測定できることを示した。

そして、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。ひずみ分布の一次元測定によって、本センサによるひずみ分布の再現性は高く、フローフロント部分ではひずみの急激な変化があることが明らかにされた。そして、測定されたひずみ分布にフレーム間差分法を適用することで、目視観察とよく一致するフローフロントを検出できることが明らかにされた。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へ、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することが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、多機能センサシステムの開発を行った。VaRTM 法による GFRP の成形プロセスを、本多機能センサシステムによってモニタリングし、その結果、フローフロント、温度分布、硬化度をモニタリング出来ることが明らかとなった。

## Abstract

### Development of a monitoring system for RTM molding of FRP by a multifunctional sensing system composed of Fresnel's reflection-type and Rayleigh scattering-type optical fiber sensors

FRP (Fiber Reinforced Plastics) is attracted attention due to its superior mechanical properties such as lightweight, high specific strength, and high specific rigidity in recent years. Therefore, FRP is utilized for advanced products such as an automobile and an airplane. An unevenness of resin cure and a residual deformation may cause during the manufacturing process of FRP products. In addition, manufacturing and development costs of FRP products are high due to manufacturing parameters obtained by the trial and error method. In-situ process monitoring techniques are thought to be very effective to cost reduction and quality and reliability improvement of FRP products. Therefore, many sensors and sensing methods have been developed to monitor material status during the molding process of FRP. Among these sensors, optical fiber sensors are suitable for in-situ process monitoring due to high embeddability, long-term stability, and high accuracy. Therefore, we paid attention to in-situ process monitoring techniques by using optical fiber sensors. We aim to develop a monitoring system that can be utilized in the all-manufacturing process of FRP in this study.

First, a high accuracy DOC (Degree-of-Cure) measurement system was developed that could be applied to 3D and complex shaped FRP by Fresnel's reflection-type optical fiber sensor. Standard optical fiber sensors for communication and high-flexibility optical fiber sensors were used in this study. High-flexibility optical fiber sensor has optically high bending tolerance and developed in recent years. Optical bending loss properties of both optical fiber sensors were obtained by bending experiment. In addition, it was revealed that the mechanism of the effect of optical bending loss on measurement accuracy.

Secondly, a bending loss simulation was developed to aim the development of a deciding system of the optimal embedded path. An optical bending loss prediction method was proposed that based on the optical bending loss property, and an optical bending simulation was developed. It was revealed that prediction bending loss by the simulation is agreed very well with measured optical bending loss from a comparison experiment. In addition, DOC measurement accuracy was improved by an appropriate embedded path of the optical fiber sensor at the VaRTM method.

Thirdly, it was developed that the detection method of flow-front during the impregnation process by using the Rayleigh-scattering based optical fiber sensor. As a result, it could be measured by the optical fiber sensor that strain distribution of preforms during the resin impregnation process with good reproducibility. Besides, the position of flow-front could be estimated from the measured strain distribution using interframe difference precisely with the good agreement of visual observation result. Besides, it was revealed that flow-front shape could be monitored in two-dimension by the single sensor with grid layout.

Finally, the multifunctional sensing system was developed by combinations with Fresnel's reflection-type optical fiber sensor and Rayleigh-scattering-type optical fiber sensor. As a result, it could be measured by the multifunctional sensing system that flow-front, thermal distribution, and DOC of GFRP (Glass Fiber Reinforced Plastics) during the VaRTM (Vacuum-assisted Resin Transfer Molding) process.

## 目次

### 第1章 序論

- 1.1 研究背景
- 1.2 その場成形モニタリング技術・センサ技術
- 1.3 光ファイバセンサによるその場成形モニタリング技術
- 1.4 研究目的

### 第2章 フレネル反射型光ファイバセンサによる3次元複雑形状FRPの硬化度測定手法の開発

- 2.1 緒言
- 2.2 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
- 2.3 局所曲げによる光損失特性
- 2.4 局所曲げによる光損失が硬化度測定に与える影響
- 2.5 VaRTMによる湾曲形状GFRPの硬化度測定
- 2.6 光損失の変化によって測定精度が低下した場合の補正方法
- 2.7 結言

### 第3章 フレネル反射型光ファイバセンサの埋め込み経路最適化ソフトの開発に向けた曲げ損失シミュレーションの開発

- 3.1 緒言
- 3.2 光ファイバセンサをプリフォームに埋め込んだ際の光損失予測法
- 3.3 フレネル反射型光ファイバセンサに生じる光損失シミュレーションの開発
- 3.4 光損失予測を基にしたVaRTMでの硬化度測定精度の改良
- 3.5 光損失量を基にした硬化度測定精度の定量評価
- 3.6 結言

### 第4章 レイリー散乱型光ファイバ分布センサによるフローフロント検出法の開発

- 4.1 緒言
- 4.2 レイリー散乱型光ファイバ分布センサ
- 4.3 VaRTMでのフローフロントの1次元検出
- 4.4 VaRTMでのフローフロントの2次元検出
- 4.5 結言

### 第5章 フレネル反射型とレイリー散乱型センサを組み合わせた多機能センシングシステム

- 5.1 緒言
- 5.2 多機能センシングシステムの構成
- 5.3 VaRTMによるGFRPの樹脂含浸および硬化プロセスのモニタリング
- 5.4 結言

### 第6章 結論

# 第1章 序論

## 1.1 研究背景

近年、二種類以上の異なる材料を組み合わせることにより単一材料では得られない特性を生み出した材料である複合材料が、その高い特性から注目を集め私たちの身の回りの身近な製品から、航空・宇宙分野の先進の製品まで幅広く利用されている。複合材料では、母材(マトリックス)を強化材によって強化する。身近なもので例えるならば、鉄筋コンクリートなどが挙げられ、この場合母材がコンクリートであり強化材は鉄筋となる。複合材料の歴史は古いが、複合材料が航空分野で使用され始めたのは第二次世界大戦時であり、木材にフェノール樹脂を含浸させたものや、ガラス繊維にエポキシ樹脂を含浸させたものが主流であった。戦後にはその優れた特性が評価され、繊維や樹脂に関する研究が精力的に進められてきた。

複合材料が工業分野において注目集める最大の要因となったのは、繊維強化プラスチック(Fiber Reinforced Plastics: FRP)の誕生にある[1, 2]。基本的に FRP は、母材となる樹脂(プラスチック)と強化繊維によって形成される。樹脂(プラスチック)は一般的に金属と比較して軽いが強度は弱いため、優れた強さを持つ細径の強化繊維と組み合わせることによって補強を行い、FRP は双方の材料の優れた特性を併せ持つ画期的な材料となっている。このように、FRP は強化繊維と母材によって形成されているため、その組み合わせによって様々な種類がある。FRP の強化繊維に用いた材料がガラス繊維の場合は GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastics)、炭素繊維の場合 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics)、ボロンの場合 BFRP(Boron Fiber Reinforced Plastics)、アラミド繊維の AFRP(Aramid Fiber Reinforced Plastics)などがある。また、強化される母材の種類も熱硬化性樹脂と熱可塑性樹脂(Fiber Reinforced Thermoplastics: FRTP)といった樹脂に始まり、金属(Fiber Reinforced Metals: FRM)やセラミックス(Fiber Reinforced Ceramics: FRC)などもある。この FRP の最大の特徴を端的に表すと軽くて強いということである。この特性は工業分野において非常に有利なものであり、特に航空・宇宙分野においては、軽いということが決定的に重要であるため FRP の利用が積極的に進められている。軽さが重要な場合、強さを比重量で割った比強度、ヤング率を比重量で割った比弾性率の値で材料の性能を評価することが多い。この、比強度、比弾性率で複合材料と他の金属などの材料を比較すると、複合材料の優位性がはっきりと分かる[1]。金属には 4 の壁と呼ばれる、比強度は  $4.0 \times 10^6 \text{cm}$ 、比弾性率では  $4.0 \times 10^8 \text{cm}$  という壁があり、これを突破するのは容易ではないが、複合材料においては容易に突破することが可能である。また、FRP の第二の優れた特質は設計できる材料であるということである。FRP の強化繊維を積層する際に、一方向にのみに積層した場合は特定の方向にのみ強い一方向強化材になり、ある軸に対して  $+\theta$  と  $-\theta$  の方向に重ねられるとアングルプライとなる。また、このアングルプライの強化繊維の向きが  $(0^\circ \pm 45^\circ / 90^\circ)$  の角度に重ねられている場合、FRP をどの方向に引っ張っても弾性率が同じになる疑似等方性材料となる。このように、FRP では特定の方向の強さを強調したり、疑似等方性を持たせたりと様々な材料を設計することが出来る。

これまでに述べてきたことから、FRP は優れた特徴を数多く有する非常に革新的な材料であると分かる。そのため、以前は金属材料で作られてきたものが、近年では FRP に移り変わっていくなど様々な分野においての活用が進んでいる。しかしながら、同時に問題や課題も多く抱えている材料である。挙げられる問題点としてはコストの高さ、異方性材料であるため強度計算・設計の難しさ、製造方法によっては製品品質の安定性などがある。この中でもコストの高さは FRP の大きな課題となっている。従来から、FRP 製品の開発では、成形された部材に対する力学試験や観察を通して、ボイド率や強度などを求めることにより、性能の妥当性を判断し成形条件を決定している。これは製品の形状等により、含浸に要する時間や温度、圧力等が異なるため、製品に合わせて毎度最適な条件を試行錯誤して求めなければならない。この試行錯誤法による最適な成形条件の決定は非常にコストがかかり、特に大型の製品の場合にはそれが顕著になる。さらに、大型の製品の場合には温度勾配によって樹脂温度や硬化度の不均一化

が生じやすいことが知られており[3], これらによって引き起こされる残留応力は残留変形を引き起こし, 設計形状からの逸脱を招く. 設計形状からの逸脱はすなわち, 高い不良品率をもたらすということであり, 製造コストを増加させて納期を遅らせることにもなる. FRP のコストの高さは, 開発時の問題点によるものだけでなく成形法に依存している部分もある. 現在, 航空機の 1 次構造のほとんどにオートクレーブ成形が用いられている. この成形法では, プリプレグ(繊維に樹脂を含浸して半硬化状態にしたもの)を型に積層し, フィルムで積層面全体を覆って気密し, バギングを行い減圧・脱気したままオートクレーブ(加熱・加圧成形釜)に入れて加熱・加圧し成形する. 加圧状態で尚且つ, 同時に減圧することで樹脂内の気泡を減らし, 繊維への樹脂含浸性を良くすることで高強度かつ高品質の成形品を得ることができる. また, FRP の強度に大きく影響する重要なパラメータ繊維体積含有率(Volume fraction of fiber:  $V_f$ )も, プリプレグを用いる乾式且つ, 加圧成形であることから高い. しかしながら, オートクレーブという大型の設備, プリプレグを保管するための冷凍設備など, 設備投資費用, 設備維持費用が非常に大きいため FRP の高コスト化を助長する原因となってしまう. 以上に示すようなことから, 一般的に FRP は高コストであり, コスト低減を目指した研究は数多く行われている[4]. 開発面では試行錯誤を減らし, 効率的に成形条件や成形手法の開発が行えることが目指され, FRP の内部状態をその場モニタリングするその場成形モニタリング技術が数多く開発されている. 成形面においては, 高コストなオートクレーブ法からの脱却を目指して, 非オートクレーブ(Out-of-Autoclave: OoA)成形法が注目を集め, RTM(Resin Transfer Molding)などの液状複合材成形(Liquid Composite Molding: LCM)の開発が進められている. RTM 法は予め強化繊維プリフォームを成形型に賦形し, キャビコア型を閉じて密閉した状態で母材樹脂を注入, 含浸させて成形する方法である. 複雑形状の製品を一体成形できることや, クローズ成形であるため成形品の両表面が非常に綺麗であること, 製品品質のばらつきが低いことなどから注目が高まっている. しかしながら, RTM 法もプレス機や金型を必要とするため, オートクレーブ法と比較すると安価であるが, 決して安いとは言えない設備投資費用が掛かる. そこで, この RTM 法をさらに安価にするため, 派生した成形法として VaRTM(Vacuum-assisted Resin Transfer Molding)法が開発されている. 成形型(片型のみ)の上に強化繊維プリフォームを積層, 賦形して, プラスチックフィルムなどで封入し, 真空引き後, 液状樹脂を注入含浸する成形法である. VaRTM 法は, 大型・複雑形状の製品を一体成形でき, 大掛かりな設備が不要であることから設備投資費用が安価である. 一方で, 温度を均一にすることが難しく, 厚みや強化構造が一様でないことから, 硬化度の不均一を引き起こしやすいなどの問題点も有している.

近年, センサ技術の発展も相まって, 数多くのその場成形モニタリング方法やセンサ技術の開発が行われ, FRP 成形への応用も進んでいる[4, 5, 6]. RTM などの LCM においては, FRP の成形モニタリングで対象となるプロセスが, 強化繊維プリフォームへの樹脂含浸プロセス, 樹脂の硬化プロセス, そして加熱成形における冷却プロセスとなる. 樹脂含浸プロセスでは, 成形の悪条件によって大きなボイドによる空洞や未含浸部が生じる恐れがあり, 樹脂のフローフロントモニタリングが多く行われている. 樹脂の有無によって様々な物性が大きく変化することから, 数多くのセンサを適用することができ, 研究も多様に行われている. 熱硬化性樹脂を用いた FRP の硬化プロセスでは, 硬化進展に伴って変化する硬化度, 誘電特性, 剛性, 抵抗, 音速, 硬化収縮ひずみなどが, それぞれに対応した手法, センサによって測定される. 冷却プロセスによって生じる成形誘起ひずみは, 残留変形および残留応力に影響を与える重要な情報であり, 光ファイバひずみセンサによって測定される. 表 1 に現在その場成形モニタリングのセンサとして提案されている主なセンサ手法を, 測定対象の成形プロセスとともに示す. 各モニタリング法やセンサ技術などに関する詳細な情報は第 2 章にて記載するが, 現在このように数多くの, その場モニタリング技術やセンサ技術が研究されており, これらによってリアルタイムで測定された FRP の内部情報は, FRP の成形プロセス最適化に用いられている. さらに, 埋め込み型のセンサはそのまま FRP 部材を運用中の構造健全性モニタリングに活用することが可能なものも多いため, 成形から運用中の健全性, そして破棄に至るまでを同じセンサでモニタリングする, ライフサイクルモニタリング技術も注目を集めている.

Table.1.1.1 In-situ process monitoring methods and sensors for FRP molding [4].

Sensor	Subject of measurement	Molding process
Thermocouple	Temperature	All
Pressure sensor	Pressure	Flow
DEA	Dielectrics	Flow and Cure
ETDR	Dielectrics	Flow
DC	Resistance	Flow and Cure
Ultrasonic	Sound property	Flow and Cure
Optical fiber sensor		
Spectroscopy	Absorption spectrum	Cure
Reflectometer	Refractive index	Flow and Cure
EFPI	Strain	Cure and Cooling
FBG	Temperature and Strain	Cure and Cooling
Distribution	Temperature and Strain	Flow, Cure, and Cooling

## 1.2 その場成形モニタリング技術・センサ技術

FRP の成形において注目すべき物性は、プロセスによって異なるが熱硬化性樹脂を用いた FRP の場合、硬化反応、ゲル化、加熱・冷却による変形及び硬化収縮が挙げられ、熱可塑性樹脂を用いた FRP では、冷却時の結晶化度も挙げられる。硬化反応は樹脂の粘度変化を生むため、樹脂の流動性や FRP 内部のボイド成形に大きく影響を与える。ゲル化による剛性変化と加熱・冷却による変形や硬化収縮は、成形誘起応力や寸法精度に大きな影響を与える。また、熱可塑性樹脂の冷却時の結晶化度も FRP の特性に大きな影響を及ぼす重要なパラメータである。これらに加えて、LCM 成形の場合は樹脂含浸プロセスも注目すべき重要なモニタリング対象となる。

従来、成形プロセスにおいて注目する必要があるこれらの物性は、少量のサンプルや単純形状の試験片を用いて、硬化度の場合 DSC(Differential Scanning Calorimeter)を用いた熱分析、粘度や剛性の変化はレオメータや DMA(Dynamic Mechanical Analyzer)によって求められてきた。これらの基礎物性を求めることは FRP の成形条件を決定するために非常に重要なことであるが、実際の成形とは大きく異なる試験条件であるため、正確に実際の成形時における物性変化を予測することは容易ではない。よって、従来の方法であれば、実際の成形においては温度分布や繊維含有率、繊維の方向や分布が予め想定していたものと同じにならない場合、その製品に合わせて毎度条件を求め直す必要がある。これに比較して、その場成形モニタリングでは FRP や型に埋め込んだセンサを用いることによって、実際の成形手法に非常に近い形でのモニタリングが可能である。そのため、その場成形モニタリングは注目を集め、樹脂のその場成形モニタリング手法から始まり、FRP 成形への応用も、序論でも述べているように近年のセンサ技術の発展に伴い進んでいった[4, 5, 6]。以下に代表的なモニタリング技術について記述する。

### 1) 誘電分析(Dielectric Analysis: DEA)

誘電分析(Dielectric Analysis: DEA)では、電極間に誘電体である樹脂が存在するとコンデンサを形成することから、交流電界を印加することで生じる複素誘電率を測定する。成形モニタリングにおいては、誘電損失が顕著な変化を示すため着目される。伝統的に DEA は、ガラス転移点の推定や、対数イオン粘度が機械的な粘性との相関が良いため硬化進展のモニタリングに多く用いられる[7, 8, 9]。DEA のその場プロセスモニタリングへの応用は、誘電分析によって得られた誘電正接やキャパシタンスを用いた硬化度の推定[10, 11, 12, 13]や、樹脂含浸プロセスのフローフロント検出[14, 15]にも応用されている。近年では、埋め込み性能の向上のためにセンサの小型化や多点計測手法の開発なども行われている[16, 17]。このように、DEA では樹脂の含浸

プロセスでフローフロントの検出に応用でき、樹脂の硬化プロセスにおいては樹脂硬化度、粘度を同時に検出できる。しかしながら、センサ部が大きいため埋め込みには適さず、FRP 内部に埋め込んで使用した場合はその部分が欠陥となってしまう。

## 2) ETDR(Electrical Time Domain Reflectometry)

ETDR(Electrical Time Domain Reflectometry)では、信号線とグラウンド線間の誘電体に電磁波が閉じ込められることにより構成される導波路を FRP 内部に埋め込みモニタリングを行う。導波路を伝播する電磁波のモードが樹脂の誘電率および透磁率によって決定されるため、導波路中の樹脂の存在によってインピーダンスが大きく変化し、樹脂と空気の界面では電磁波が反射する。よって、これを利用して ETDR では LCM 成形の樹脂流動モニタリングが研究されており、反射波の伝播時間を求めることによってフローフロントの連続的なモニタリングが可能である[18]。また、樹脂含浸やフローフロントのモニタリングだけでなく、硬化度、温度、ひずみなどをモニタリングする手法も研究が行われている[19, 20, 21, 22]。

## 3) 超音波測定

超音波測定では、成形時の加熱や硬化反応によって、樹脂の動的粘弾性特性および密度が大きく変化するためこれに伴い、FRP の音速と減衰が成形中に変化する。したがって、これらを取得することで、FRP の複素弾性率や硬化度の測定・推定が可能となる。超音波測定の測定法としては、透過法、反射法、ラム波測定が用いられている。超音波測定は、熱可塑性樹脂の硬化進展に従って音速は上昇し、ゲル化点を超えると減衰が硬化完了まで単調に減少することから硬化度のモニタリングに応用される[23, 24, 25]。加えて、超音波測定において樹脂の有無を判別することは容易であるため LCM 成形における樹脂流動プロセスのモニタリングにも適している[26]。超音波測定は非接触でのモニタリングが可能である反面、FRP 内部の局所的な情報を詳細に取得することは困難である。

このように、現在、数多くのセンサ技術やそれを応用した FRP のその場成形モニタリング技術の研究開発が進められている。これらのセンサ・モニタリング技術の中でも、光ファイバセンサを用いたものは非常に先進的であり、多くの利点を有している。光ファイバセンサの種類は多岐に渡り、それに従って FRP の各種物性をモニタリングする技術も数多く開発が行われているため、次節 1.3 で代表的な光ファイバセンサの説明を、近年発表されているモニタリング技術のレビューを含めて行う。

# 1.3 光ファイバセンサによるその場成形モニタリング技術

光ファイバセンサとは、光ファイバを用いて構築された測定システムのことである。光ファイバは、石英ガラスやプラスチックで形成される細径の繊維状の物質であり、一般に、コアと呼ばれる中心部とコアの外側にあるクラッド、そしてそれらを覆う被膜の三重構造になっている。コアはクラッドと比較して反射率が高く設計されており、光はコア部を主として伝播される。主要な光ファイバは 5 種類で、光の伝搬するモード(光の通り道)の数によって「マルチモード(MM)」と「シングルモード(SM)」の 2 種類に大別される。そして、マルチモード光ファイバはコアの屈折率分布によって、「ステップインデックス(SI)」と「グレーデッドインデックス(GI)」の 2 種類に、シングルモード光ファイバは「汎用シングルモード(SM)」, 「分散シフト・シングルモード(DSF)」と「非零分散シフト・シングルモード(NZ-DSF)」の 3 種類に分類される。一般によく使用されている光ファイバは主に汎用シングルモード(SM)とグレーデッドインデックス(GI)である。SM はコア径を小さくすることでモードを 1 つにした光ファイバであり、MM で見られたモードの違いによる伝搬信号の歪みは発生せず、極めて広帯域な特性を有する。SM は、1310[nm]帯に零分散波長(材料分散と構造分散の和により、ある特定の波長の分散が零



になる波長)があるため伝送損失が低く優れた特性を有し、高品質で安定した通信が求められる幹線網に用いられている。一方、GI はコアの屈折率を滑らかに分布させており、標準的には50[ $\mu\text{m}$ ]または62.5[ $\mu\text{m}$ ]のコア径を有している。コアの屈折率を滑らかに分布させることで、SIに見られる伝搬信号の歪みが大きく改善されており、相対的にどのモードの光も同じ速度で伝搬されるようになっている。SM と比較すると伝送損失が大きい、接続が簡単かつ安価であるため、LAN などの近距離情報通信用として広く用いられている。現在、情報通信用として最も使用されている SM 光ファイバはコア、クラッドともに石英ガラスで構成されており、その直径は125 $\mu\text{m}$ と細い。更に、センサ用として直径が80 $\mu\text{m}$ の光ファイバも市販されており、これよりも更に細い直径40 $\mu\text{m}$ の光ファイバも開発されている[27]。光ファイバセンサは細径・繊維状であるため FRP 内部への埋め込みにも適しており、埋め込みの影響も最小限に抑えることが出来る。さらに、光ファイバセンサは構成を変えることによって、樹脂の分子構成、屈折率、温度やひずみなど様々な物性を分布的または局所的に取得することが可能であり、これらの利点を活かした様々な先進的なモニタリング技術が開発されている。以下に代表的な光ファイバセンサによるモニタリング技術について記述する。

#### 1) 光ファイバ分光計

光ファイバ分光計では、光ファイバを用いて分光計を構成することで FRP 内部の分光測定を行う。Fig.1.3.1 に示すように、エッチングによって光ファイバのクラッドを削り、コアからの漏れ光(エバネッセント光)が樹脂から受ける影響を測定する手法が提案されている。この手法では吸収スペクトルを測定し、エポキシ樹脂の場合はエポキシ環の応答ピークが硬化進展に伴い閉環し、消失する様子をモニタリングすることで硬化度の推定が可能である。

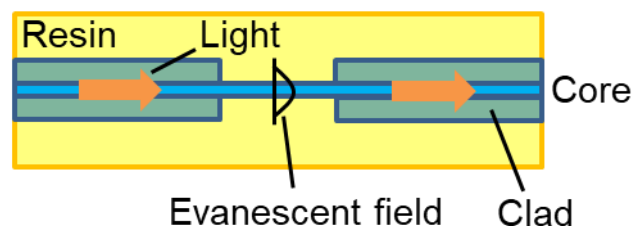


Fig.1.3.1 Schematic view of fiber-optic spectrometer (evanescent-type).

Nair らは[28]、1つの光ファイバセンサで EFPI(Extrinsic Fabry-Perot Interferometer)とエバネッセントセンサを構築した、ひずみ、温度、樹脂の屈折率および架橋反応を同時にモニタリングすることが出来る多機能センサシステムを提案している。また、この多機能センサをオートクレーブ成形による GFRP の硬化中の吸収スペクトル、樹脂の屈折率、ひずみの同時測定を行っている。Wang らは[29]、光ファイバセンサは用いずに、GFRP の強化繊維であるガラス繊維がその場での硬化モニタリングに使用できることを示している。ガラス繊維を伝播するエバネッセント光の吸収に注目し、硬化度の推定を行っている。また、この手法はシランカップリング剤の検出にも使用できることを示している。

#### 2) 光ファイバ反射計

光ファイバ反射計では、Fig.1.3.2 に示すように端部でのフレネル反射を基にしたフレネル反射型と、Fig.1.3.1 に示している分光計と同じ構造でエバネッセント波を用いるエバネッセント型がある。フレネル反射型とエバネッセント型の光ファイバ反射計は、どちらも光ファイバと樹脂の屈折率が異なることによって生じる反射率の変化を利用している。樹脂の屈折率が密度と温度に依存して硬化進展によって屈折率も変化する。その変化が単調増加であることから、屈折率変化より硬化度を推定することが可能である。また、空気と樹脂の屈折率が大きく異なることから、樹脂含浸工程でのフローフロントを検出することは容易であり利用することが出

来る．しかしながら，分布測定を考えたケースでは多数のセンサを要するためあまり実用的ではない．光ファイバ屈折率センサは，応答速度が速くコストが低いという特徴を有する．

Lekakou らは[30]，樹脂含浸工程におけるフローフロントのモニタリングおよび，エポキシ樹脂の硬化進展モニタリングをエバネッセント型のセンサを用いて行っている．エバネッセント型のセンサによって，樹脂の硬化進展をモニタリングし，従来のレオロジーデータと一致するゲル化点を取得できることを示している．Afromowitz らは[31]，硬化過程における熱硬化性樹脂の屈折率変化をフレネル反射型のセンサを用いて取得，熱分析によって得られた硬化度との関係を比較している．その結果，屈折率変化と硬化度の関係が硬化温度によって異なることを示している．Liu らは[32]，フレネル反射型のセンサで測定された光量を硬化完了時の光量によって正規化することで硬化度を求める方法を提案している．

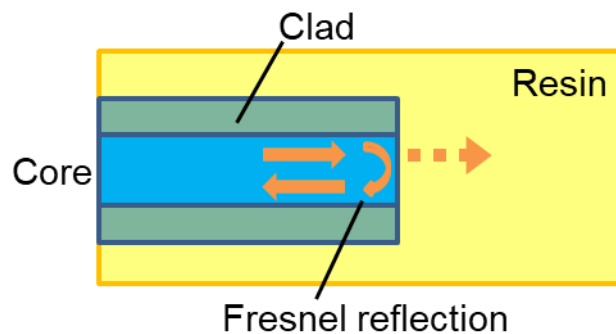


Fig.1.3.2 Schematic view of Fresnel's reflection-type fiber-optic reflectometer.

### 3) EFPI センサ

EFPI センサは，Fig.1.3.3 に示すように入射用と反射用の二本の光ファイバを，ガラス管(キャピラリ)内で空隙(ゲージ長)を挟んで突き合わせた構造を持つ．キャピラリと光ファイバは通常接着剤などを用いて固定されており，ギャップ長と無関係に接着部の間の距離(ゲージ長)を決めることが可能である．EFPI センサの最大の特徴は精度が高く温度の影響を受けにくいことにある．一方で，構造を見ればわかるように非常に壊れやすいという欠点があり，埋め込み性という観点から後述の FBG(Fiber Bragg Grating)センサに大きく劣ってしまう．

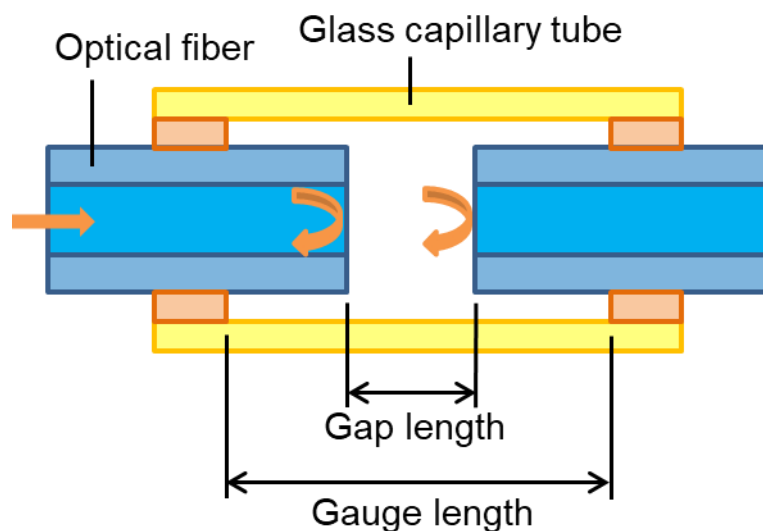


Fig.1.3.3 Schematic view of EFPI sensor.

Kalamkarov らは[33], FRP の引き抜き成形を行う際に生じる残留ひずみの測定に EFPI センサを用いている。Jiang らは[34], EFPI センサと参照用の EFPI センサの二種類を用いることで, 白色光干渉法を基にした高解像度のひずみ測定技術を提案している。Yu らは[35], EFPI センサと FBG センサを組み合わせた多機能センサを提案し, ひずみおよび温度の計測を行っている。Yu ら[35]や, Nair ら[28]の研究でも見られるように, EFPI は多機能センサの一部として組み込まれ, 使用されている場合がある。

#### 4) FBG センサ

FBG センサは, 光ファイバのコア部の一部分に対して, 周期的な屈折率変化を持つ格子が形成されている。FBG センサの一般的な製造法は Fig.1.3.4 に示すようなマスク処理が一般的である[36]。位相マスクは, 石英ガラス基板の表面に周期的な凹凸を形成したものであり, 位相マスクにコヒーレント光を垂直入射することで, 多くの回折光に分割される。このうち, +1 次光と-1 次光の重ね合わせによって作られる干渉縞を利用して, 光ファイバのコア部にグレーティングを形成する。位相マスク法では同一の特性を持つ FBG センサを再現性良く作製できる。Fig.1.3.5 に示すように FBG センサに広帯域光を入射すると, 格子間隔比例したブラッグ回折光が反射し, この中心波長のシフト量が温度と軸ひずみの増分に比例する。よって, ブラッグ波長の波長シフト量から, 温度および軸ひずみを得ることが出来る[37]。FBG センサは高いひずみ感度を有しており(一般的には  $1\mu\epsilon$ ), 安定性も高く, FRP への埋め込み性にも優れる。そのため, 構造健全性モニタリング(Structural Health Monitoring: SHM)において, FRP の内部ひずみを測定するセンサとしては, FBG センサが最も多く用いられている。さらに, FBG センサではひずみの分布的な測定が可能であり, EFPI や反射型光ファイバセンサなどと組み合わせて多機能センサの一部としても用いられるなど, FBG センサに関する多様な研究が行われている[38]。FBG センサは成形誘起ひずみの測定によく用いられるが, それ以外にも樹脂のゲル化やガラス化といった, 硬化過程における相転移点の測定などにも応用がなされている[39, 40]。

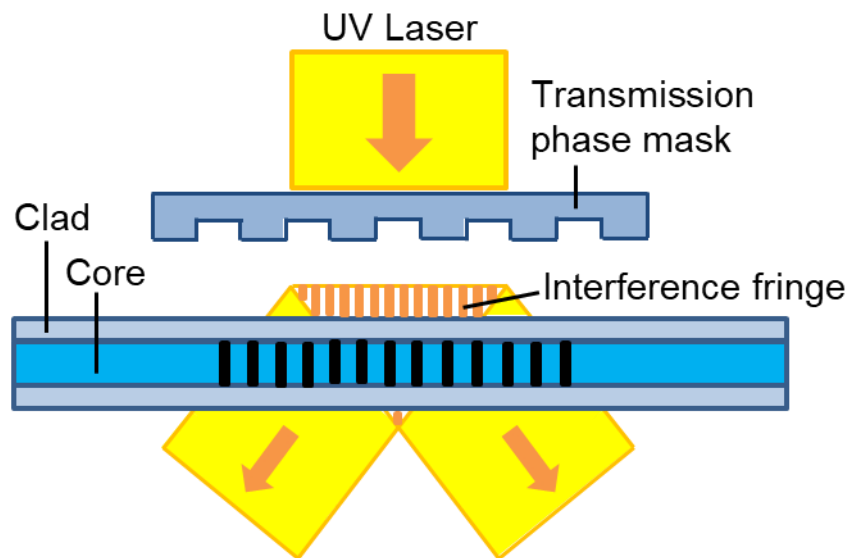


Fig.1.3.4 Schematic view of FBG manufacturing by phase mask method.

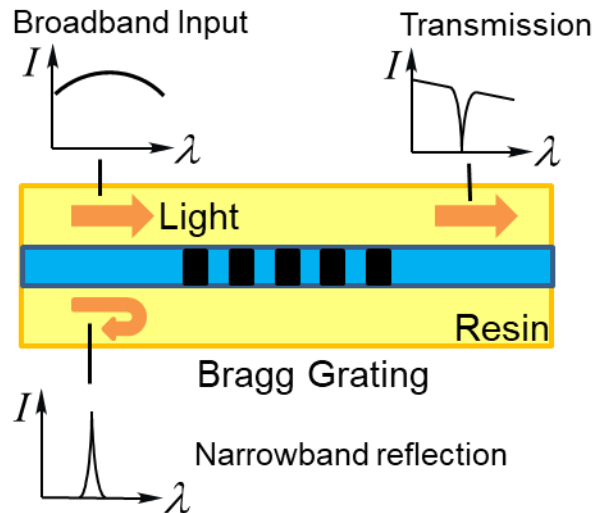


Fig.1.3.5 Schematic view of broad band light incident FBG sensor and optical spectra.

#### 5) B-OTDR

B-OTDR(Brillouin Optical Time Domain Reflectometer)では、ブリルアン散乱を時間の関数として測定することで、光ファイバの長さ方向に沿った任意の位置の関数としてブリルアン周波数シフトを測定することが出来る。この周波数シフト量が光ファイバセンサに加わる温度並びにひずみに対して線形に変化することから、周波数シフトより温度・ひずみの分布測定を行うことが出来る。空間分解能は光パルスの幅によって決まり、B-OTDRの基本システムでは、空間分解能とひずみや温度の測定精度はトレードオフの関係にある。EFPIセンサやFBGセンサのようなセンサ部を持たないため、数十から数百メートルの分布測定が可能であることから、大型FRP製品への適用が期待されており、水口らは[41]、B-OTDRによって大型CFRP構造のライフサイクルモニタリング手法の提案を行っている。

#### 6) レイリー散乱型光ファイバ分布センサ

レイリー散乱型光ファイバ分布センサ(Rayleigh Scattering-Based Optical Frequency Domain Reflectometer)では、光ファイバの導波路の不整合により生じるレイリー散乱の分布を周波数領域反射計によって測定する。レイリー散乱光は入射光と同じ周波数で戻る散乱光(周波数シフトを生じない散乱光)であり、散乱光が発生した場所の光ファイバの損失変動に伴い散乱光の強度が変化するという特徴を持っている[42]。レイリー散乱光は周波数シフトを生じないが、1mmの高い空間分解能を有し、空間周波数に注目することによって空間周波数シフト量から温度やひずみ分布を得られる。Wangらは[43]、 $\phi$ -OTDR(Phase-sensitive Optical Time Domain Reflectometry)とB-OTDRを組み合わせたセンシング技術を提案し、レイリー散乱とブリルアン散乱より得られた情報を統合することで、高感度の動的絶対ひずみの測定が可能であることを示している。伊藤らは[44]、B-OTDR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システムによって、ひずみおよび温度の同時測定を行っている。その結果として、非一様な温度とひずみの同時分布測定が可能であると示している。

1.3節では光ファイバセンサによる先進的なFRPのその場成形モニタリング技術について述べてきた。このように、光ファイバセンサの種類は様々あり、構成を変えることによってFRPの様々な物性のモニタリングを行うことができる。そのため、光ファイバセンサを用いた多様なモニタリング技術の研究が盛んに行われている。そこで、筆者らも光ファイバセンサを用いたモニタリング技術に注目し、LCM成形におけるFRPのライフサイクルモニタリングが可能な多機能センサシステムの開発を目指した。

## 1.4 研究目的

本研究の目的は、高精度で LCM 成形における FRP の内部情報をライフサイクルモニタリングできる光ファイバセンサを用いた多機能センサシステムの開発である。

筆者らは、数多く開発されている光ファイバセンサの中でも、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に注目した。フレネル反射型光ファイバセンサはセンサの運用・製造コストも低く、光学系もシンプルであり、このセンサは非常に高精度で樹脂の硬化度を測定することが可能である。そして、レイリー散乱型光ファイバ分布センサは高い空間分解能を有し、センサ部を持たないため大型の FRP 製品のモニタリングにも適用が可能である。このことから、筆者らは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に着目し、これらのセンサを用いた多機能センサシステムの構築を目指した。この目標を達成するためのアプローチとして、以下に示すことを行った。

- 1) 3次元複雑形状の FRP の硬化度測定に適用可能な、フレネル反射型光ファイバセンサを用いた高精度硬化度測定システムの開発
- 2) レイリー散乱型光ファイバ分布センサを用いた VaRTM 成形の樹脂含浸プロセスにおけるフローフロント検出システムの開発
- 3) 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ることによる多機能センシングシステムの開発

## 第2章 フレネル反射型光ファイバセンサによる3次元複雑形状

### FRPの硬化度測定手法の開発

#### 2.1 緒言

近年、FRPは優れた機械的特性を有することや、大型・複雑形状製品の一体成形も用意であるということから、航空機の胴体や翼、自動車のボディのような大型で複雑な形状を持つ、先進のFRP製品への適用が進んでいる。こういった、大型で複雑な形状のFRP製品においては温度勾配によって、硬化度の不均一化や樹脂特性のばらつきが生じ易いことが知られている[3]。樹脂の硬化不良を無くし、硬化を完全なものにするための最も単純な解決法は、樹脂が完全に硬化するまで、余剰時間を持たせてFRP製品を炉の中に入れておくということである。しかしながら、これでは製造サイクルが低下し、炉の稼働時間も増加することからコストも増加する。そのため、センサを用いて硬化度を測定し、製品ごとの最適な成形時間を硬化度から決定することは、製造サイクル向上のためにも、コスト低減のためにも重要である。

一方で、大型・複雑形状のFRPに限らず、単純な板材のような形状においても樹脂硬化プロセスや内部応力によって生じる残留変形は問題となっており研究が行われている。Wisnomらは[45]、CFRPプリプレグによって作られた非対称積層板(AS4/8552)に生じるスプリングインに関して、これには冷却中の熱応力が大きく影響するが、熱応力だけではなく硬化収縮もまた影響を与えるということを示している。また、Mezeixらは[46]、一方向性のCFRP積層平板のスプリングバックシミュレーションを行い、硬化プロセス中に生じる樹脂の形態変化による体積の変化は残留応力を与えることがあり、これがスプリングバックに寄与することを示している。このように、単純な形状でも熱応力だけでなく応力や硬化収縮によっても残留変形が生じることがあり、これらの変形には樹脂の硬化プロセスも寄与しており、硬化度のモニタリングにおいては最終的な硬化度のみだけでなく、そのプロセスをモニタリングすることも重要であることを示している。

こういった問題を解決するために、硬化プロセスをその場モニタリングすることは製造コストの削減、製品の品質・信頼性の保証といった観点から非常に有効である。硬化度をその場モニタリングする手法としては、伝統的に誘電分析(DEA)[7~13]が多く用いられているが、センサ部が大きいためFRPに埋め込むとその部分が欠陥となってしまう。また、非接触での測定が行えるということから、超音波を用いたFRPの硬化モニタリングも行われている[23, 24, 25]。しかしながら、超音波測定ではFRP内部の局所的な情報を詳細に取得することは困難である。

これらの手法と比較して、細径・繊維状の光ファイバセンサはFRP内部への埋め込みが容易であり、その影響も最小限に抑えることが可能であるため、筆者らは光ファイバセンサによる硬化度モニタリング手法に注目した。FRPの成形プロセスモニタリングに用いられる光ファイバセンサの種類は、第1章3節で紹介したように多数あるが、その中でも筆者らはフレネル反射型光ファイバセンサを用いて硬化過程におけるFRPの硬化度を得る方法に注目した。本センサは単純な光学系を持ち、光ファイバの端部を切断するだけでセンサを製造できるため運用コストも低く、高速・高精度で樹脂の硬化度を測定することができるという特徴を持つ。これまでも、フレネル反射型光ファイバセンサを用いて、硬化度をモニタリングする方法についての研究が行われている[31, 32]。高坂らは[47, 48]、フレネル反射型光ファイバセンサに生じる後方散乱光の影響を除去し、樹脂の屈折率をリアルタイムモニタリングする手法を提示している。さらに、後方散乱光の影響を除去し、樹脂の屈折率をリアルタイムモニタリングする手法を提示している。Vacherらは[49]、フレネル反射型光ファイバセンサを用いて樹脂の硬化度をその場モニタリングし、その結果が樹脂硬化度の推定方法として従来から使用されており信頼のあるDSCによる測定結果とよく一致することを示している。しかしながら、この手法では校正を必要としている。これらの研究では、FRP内部の硬化度のその場測定が可能であることが示されているが、適用範囲は樹脂または板材のような単純形状のみであり実用的な3次元形状への

適用は行われていない。3次元形状への適用を考慮した場合、フレネル反射型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的とした。目的達成のアプローチとして、まず、光ファイバに発生してしまうそもそもの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、硬化度測定への採用を試みた。高屈曲光ファイバは近年開発が進んでいる高い曲げ損失耐性を有する光ファイバであり、曲げ損失を低減させる方法としてモードフィールド径を減少させる方法、クラッドの屈折率を抑える方法や、低屈折率のトレンチを追加する方法など種々提案されており、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も明らかにされている[50, 51, 52]。しかしながら、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。そこで本研究では、6~2mm までの非常に小さい曲げ半径を与えることによって生じる損失特性を、標準および高屈曲光ファイバについて調べた。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明らかにするため、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った。また、本センサによる硬化度測定の妥当性を検討するために、Kamal model を用いたシミュレーション結果との比較を行った。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明らかにするため、VaRTM 法によって製造された湾曲形状のGFRP プレートに光ファイバセンサを埋め込み、硬化度測定を行った。最後に、VaRTM 法の硬化度測定に本センサを適用して、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、硬化度曲線の補正を行った。

## 2.2 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

本センサは、光ファイバセンサ端面にて生じるフレネル反射を利用しており、フレネル反射の概略図を Fig.2.2.1 に示す。反射光量は、式(2.2.1)に示すように、平面光波の垂直入射の式で表すことが出来る。

$$R = \frac{I_r}{I_i} = \frac{I - I_b}{I_i} = \frac{(n_{eff} - n)^2}{(n_{eff} + n)^2} \quad (2.2.1)$$

ここで、 $R$ は端面での反射率、 $I_r$ は端面からの反射光量、 $I_i$ は端面への入射光量、 $I$ は測定される光量、 $I_b$ は途中経路からの反射および戻り光、 $n_{eff}$ は光ファイバの有効屈折率、 $n$ はメディアの屈折率を表している。

本測定手法において、正確な屈折率を得るためには、戻り光 $I_b$ および入射光量 $I_i$ を正確に知る必要がある。しかしながら、 $I_b$ を正確に測定することは困難であり、また端部からの正確な端面への入射光量 $I_i$ も接続損失に再現性がないため、求めることが困難である。そのため、正確な屈折率を得るためには、この戻り光 $I_b$ および入射光量 $I_i$ を除去する必要がある。そこで、あらかじめ屈折率が既知であるメディアにおける反射率を参照用として測定する。本研究では参照メディアとして空気( $n_{air}: 1.00$ )を用いて、測定された空気からの参照光量を $I_{air}$ とすると、光量と屈折率の関係は以下の式(2.2.2)で表すことができる。



$$\frac{I_{air} - I_b}{I_i} = \frac{(n_{eff} - 1)^2}{(n_{eff} + 1)^2} \quad (2.2.2)$$

よって、式(2.2.1)および(2.2.2)によって $I_i$ を消去することが出来る。しかしながら、安定した屈折率測定を行うには $I_i$ を消去するだけでなく、 $I_b$ が $I_{air}$ に与える影響も防ぐ必要がある。そこで、測定された光量の変化 $\Delta I$ に着目すると、基準温度 $T_s$ （室温、 $T_s$ : 27.0℃）でのエポキシ樹脂の屈折率 $n_s$ をあらかじめ取得しておくことで、測定光量の変化に伴う樹脂の屈折率変化 $\Delta n$ は以下の式(2.2.3)で表すことができる。

$$I = \Delta I + I_s \text{ when } n = \Delta n + n_s \quad (2.2.3)$$

ここで、 $I_s$ はある基準の光強度であり、これらの式を用いることによって、屈折率変化 $\Delta n$ を次式(2.2.4)および(2.2.5)によって $\Delta I$ の関数として表すことが出来る。

$$\frac{\Delta n}{n_{eff} + n_s} = \frac{\eta_s(1 + \eta_s) + \eta_{air}^2 v \pm (1 + \eta_s)\sqrt{\eta_s^2 + \eta_{air}^2 v}}{1 - (\eta_s^2 + \eta_{air}^2 v)} \quad (2.2.4)$$

$$\eta_{air} = \sqrt{R_{air}} = \frac{n_{eff} - 1}{n_{eff} + 1}, \eta_s = \sqrt{R_s} = \frac{n_{eff} - n_s}{n_{eff} + n_s}, v = \frac{\Delta I}{I_{air} - I_b} \approx \frac{\Delta I}{I_{air}} \quad (2.2.5)$$

ここで、 $\eta$ は振幅反射率、 $v$ は正規化光強度変化を表している。無次元光量 $v$ に着目すると、参照メディアである空気からの反射光量 $I_{air}$ の値は $I_b$ より十分大きいため、 $I_b$ が与える影響を取り除くことが出来る。

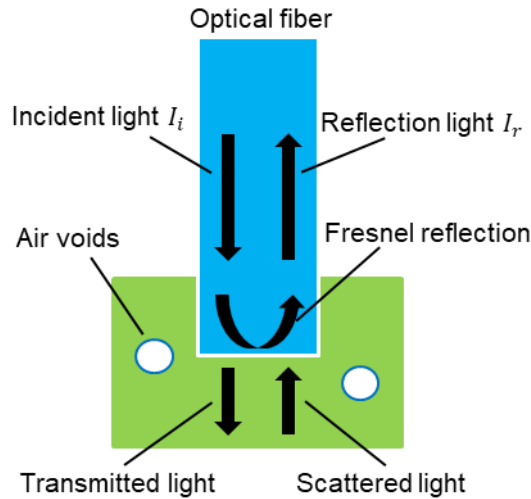


Fig.2.2.1 Fresnel's reflection at the end flat of the optical fiber sensor in resin.

本測定手法における硬化度は式(2.2.4)および(2.2.5)によって得られる屈折率変化曲線を用いることによって計算される。樹脂の硬化過程で温度変化がある場合、温度による影響は光ファイバの有効屈折率 $n_{eff}$ と樹脂の屈折率 $n_s$ のどちらにも表れる。しかし、樹脂の屈折率に比べると光ファイバの屈折率への温度の影響は十分に小さいため無視することができる。したがって、式(2.2.4)および(2.2.5)から得られる、ある時間における屈折率変化 $\Delta n$ は樹脂の屈折率の温度依存性のみを含むというように考えられる。屈折率の温度依存性は硬化前後ともにほぼ線形の関係となる。しかしながら、硬化後の温度依存性においては、ある温度(参照温度 $T_r$ )を境にして



やや異なるため、硬化後の樹脂の温度依存性にはバイリニア曲線を用いている。そのため、屈折率変化を硬化度 $\alpha$ と温度 $T$ の関数として $\Delta n(\alpha, T)$ とすると、樹脂の屈折率変化の温度依存性は以下の式(2.2.6)および(2.2.7)で表すことができる。

$$\Delta n_s(0, T) = \frac{dn}{dT}(0) \times (T - T_s) \quad (2.2.6)$$

$$\Delta n_s(1, T) = \frac{dn}{dT}(1) \times (T - T_s) + \Delta n_s(1, T_s) \quad (2.2.7)$$

ここで、 $dn/dT(\alpha)$ は硬化度 $\alpha$ における屈折率の温度依存性を表し、 $\alpha = 1$ の時は硬化領域、 $\alpha = 0$ の時は未硬化領域の温度依存性を表している。硬化度 $\alpha$ を未硬化時の曲線から完全硬化時の曲線への線形的な遷移パラメータとして定義すると、任意の硬化度および温度において測定される屈折率変化 $\Delta n(\alpha, T)$ は以下の式(2.2.8)で表される。

$$\Delta n(\alpha, T) = \Delta n_s(0, T)(1 - \alpha) + \Delta n_s(1, T)\alpha \quad (2.2.8)$$

よって、式(2.2.6)と(2.2.7)を式(2.2.8)に代入して、硬化度 $\alpha$ について解くことによって式(2.2.9)が得られる。

$$\alpha = \frac{\Delta n(\alpha, T) - \frac{dn}{dT}(0)(T - T_s)}{\Delta n_s(1, T_s) + \left\{ \frac{dn}{dT}(1) - \frac{dn}{dT}(0) \right\} (T - T_s)} \quad (2.2.9)$$

式(2.2.9)によって、硬化度を得ることは可能であるが、 $\Delta n_s(1, T_s)$ が基準温度に依存しているため、実際の硬化度測定を考えた場合にはこの指標は使いにくいという問題点がある。そのため、新たに参照温度 $T_r$ における $\alpha = 0$ および $\alpha = 1$ の屈折率変化量である、 $\Delta n_r(1, T_r)$ を定義して用いることで実際の硬化度測定でも使いやすいものに改良した。 $\Delta n_r(1, T_r)$ は、

$$\begin{aligned} \Delta n_r(1, T_r) &= \Delta n(1, T_r) - \Delta n(0, T_r) \\ &= \Delta n_s(1, T_s) + \left\{ \frac{dn}{dT}(1) - \frac{dn}{dT}(0) \right\} (T_r - T_s) \end{aligned} \quad (2.2.10)$$

であるため、

$$\alpha = \frac{\Delta n(\alpha, T) - \frac{dn}{dT}(0)(T - T_s)}{\Delta n_r(1, T_r) + \left\{ \frac{dn}{dT}(1) - \frac{dn}{dT}(0) \right\} (T - T_r)} \quad (2.2.11)$$

が成り立つ。ここで、硬化度の計算に使用される $dn/dT(0)$ 、 $dn/dT(1)$ および、 $\Delta n_r(1, T_r)$ の3つのパラメータは樹脂に固有のものであり、標準光ファイバを用いて取得している。Fig.2.2.2に本研究で使用しているエポキシ樹脂を加熱硬化させた際の屈折率変化の模式図および、硬化度の計算に必要なパラメータの関係を示す。また、本研究において、標準および高屈曲の両光ファイバの硬化度計算に必要な各種のパラメータは、標準光ファイバで取得された共通のものを使用している。Table.1に標準光ファイバによって取得された、ARALDITE™ LY5052の共通の硬化度計算パラメータを示す。

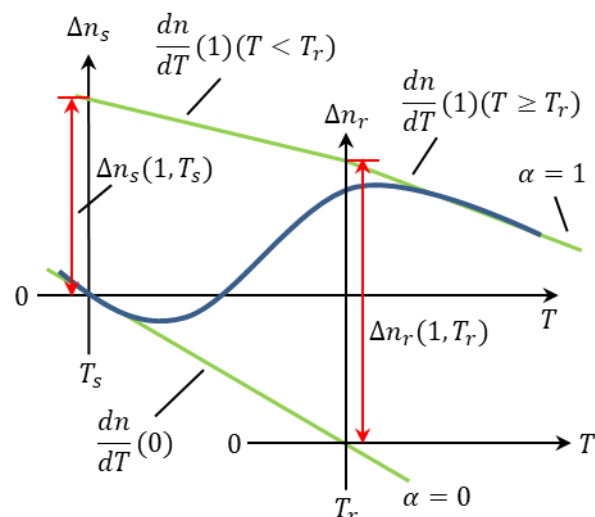


Fig.2.2.2 Schematic view of typical refractive index variations of heat curing resin and various parameters for degree-of-cure (DOC).

Table.2.2.1 Calculation parameters of DOC of ARALDITE™ LY5052 – ARADUR™ 5052CH.

$dn/dT(0)$	$-3.85 \times 10^{-4}$
$dn/dT(1)(T < T_r)$	$-1.56 \times 10^{-4}$
$dn/dT(1)(T \geq T_r)$	$-2.87 \times 10^{-4}$
$\Delta n_r(1, T_r)$	$4.92 \times 10^{-2}$
$T_r$	$101^\circ$
$n_s$	$1.51$

## 2.3 局所曲げによる光損失特性

### 2.3.1 実験方法

本研究には、通信用として一般的に使用されている標準光ファイバとともに、近年開発された曲げに対して光学的に強い高屈曲光ファイバ(e-Bend®光ファイバ、昭和電線ケーブルシステム株式会社)を使用している。本研究では、光ファイバセンサに曲げによって生じる損失を反射法によって測定した。Fig.2.3.1.1 に光ファイバセンサに局所曲げを与えて、光損失を測定するための光学系を含めた実験システムの概略図を示す。

まず、光学系について説明する。本研究では光源として SLD (Super Luminescent Diode)光源 (THORLABS PM Benchtop S5FC1018P, 中心波長 1310nm, 最大出力 30mW, 帯域幅 45nm)を使用した。受光器としては、光パワーメータ (THORLABS Optical Power and Energy Meter, Dual-Channel Benchtop Console, PM320E)を使用している。SLD 光源から照射された光は、ファイバ内を伝播して、曲げ損失部や接続部でいくらかのエネルギーを失いながら、ファイバの端部に到達する。ファイバの端部では、光が空気とガラスの境界で屈折率の不一致によってフレネル反射を起こし、反射光は再び損失部を通過して、サーキュレータを介して光パワーメータに伝わる。なお、本研究では SLD 光源を採用しており、この光源は極めて高い長期安定性を有しているため、光源の光強度モニタリングは行っていない。

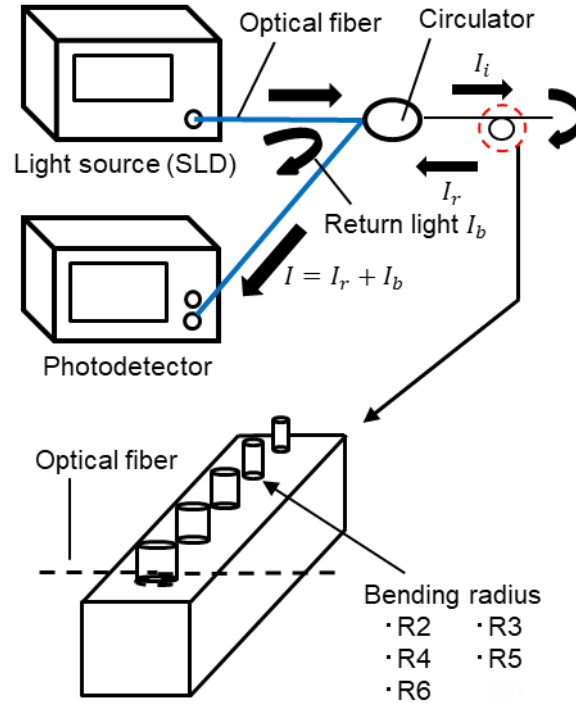


Fig.2.3.1.1 Schematic view of the optical system and a bending jig for measuring optical loss by bending.

次に、光損失を与えた方法について説明する．反射光量損失 $L$ は、損失を与える前の初期状態での空気からの反射光量を $P_1$ ，損失を与えた状態での空気からの反射光量を $P_2$ として、以下の式(2.3.1.1)で定義した．

$$L = -10 \log_{10} \frac{P_1}{P_2} \quad (2.3.1.1)$$

光ファイバセンサに与えられる曲げ損失は、任意の曲げ半径および損失部長さ(光ファイバセンサを治具に巻き付ける角度)を、半径 2, 3, 4, 5, 6 mm の棒状治具に光ファイバを巻き付けることによって与えた．また、本研究では実際に使用する状況を想定しているため、センサ部となる光ファイバ端部以外には、被膜が付いた状態で実験を行っている．したがって、実際の曲げ半径は棒状治具の半径とは異なっており、光ファイバの実際の曲げ半径と棒状治具の半径の関係を表した模式図を Fig.2.3.1.2 に示す．ここで、光ファイバの中立軸の曲げ半径を $R_{of}$ とし、治具の半径は $R$ として定義する．光ファイバの直径を $d$ (標準および高屈曲光ファイバともに $125[\mu\text{m}]$ )、光ファイバの被膜厚さを $t_i$ (標準光ファイバは $t_s = 32.5[\mu\text{m}]$ ，高屈曲光ファイバは $t_h = 42.5[\mu\text{m}]$ )とすると、光ファイバの曲げ半径 $R_{iof}$ は式(2.3.1.2)で表すことができる．

$$R_{of} = R + t_i + \frac{d}{2} \quad (2.3.1.2)$$

最後に、反射光量損失の測定方法について説明する．光ファイバが棒状治具に対して水平になるようにテープで固定し、所望の角度となるように光ファイバを $45^\circ$ から $360^\circ$ まで $45^\circ$ 毎の角度で治具に巻き付けた．また、反射考量の測定は角度毎に 3 回ずつ行った．角度 $\theta$ を与えた時の曲げ長さ $l$ は、以下の式(2.3.1.3)で得られる．

$$l = 2\theta R_{of} \quad (2.3.1.3)$$

よって，単位長さ当たりの曲げ損失 $dL/dx$ は以下の式(2.3.1.4)として定義することができる．

$$\frac{dL}{dx} = \frac{L}{l} = \frac{L}{2\theta R_{of}} \quad (2.3.1.4)$$

そして，本研究ではこの値を曲げによる光損失特性と定義する．

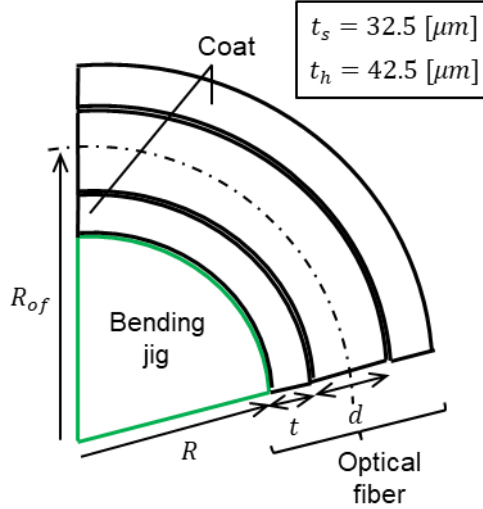


Fig.2.3.1.2 Schematic view of an optical fiber sensor with jacket wound on a bending jig.

## 2.3.2 光損失特性の測定結果および考察

Fig.2.3.2.1 に標準光ファイバの光損失と巻き付け長さの関係を，Fig.2.3.2.2 に高屈曲光ファイバの結果をそれぞれ示す．これらの図から，光損失は巻き付け長さに比例することが分かった．また，曲げ半径が小さくなると損失曲線の勾配が大きくなることも分かる．一方，曲げ損失と曲げ半径の関係について両対数のグラフで表したとき，線形の関係になることがこれまでの研究で明らかにされている[52]．そのため，本研究で対象とした非常に小さい曲げ半径においてもこの関係が成り立つことを明らかにするため，標準および高屈曲光ファイバの光損失率について，横軸に曲げ半径の対数値 $\log R_{of}$ ，縦軸に光損失率の対数値 $\log dL/dx$ をとってグラフに表すと，Fig.2.3.2.3 のようになる．この図より，標準および高屈曲のどちらの光ファイバセンサについても， $\log dL/dx$ と $\log R_{of}$ は線形関係となっており，非常に小さい曲げ半径でも曲げ損失の対数値と曲げ半径の対数値は線形の関係を示すことが分かった．すなわち，

$$\log \frac{dL}{dx} = a + m \log R_{of} \quad (2.3.2.1)$$

ということであり，光損失率は半径の関数として以下の式で表すことが出来る．

$$\frac{dL}{dx} = AR_{of}^{-m} \quad (2.3.2.2)$$

それぞれの光ファイバセンサに関してパラメータを求めると，Table.2.3.2.1 に示される値を得ることが出来た．よって，式(2.3.2.2)を用いることによって，光ファイバを 3 次元形状 FRP に埋

め込んだ場合の光損失量およびその安定性を予測することが可能となった。

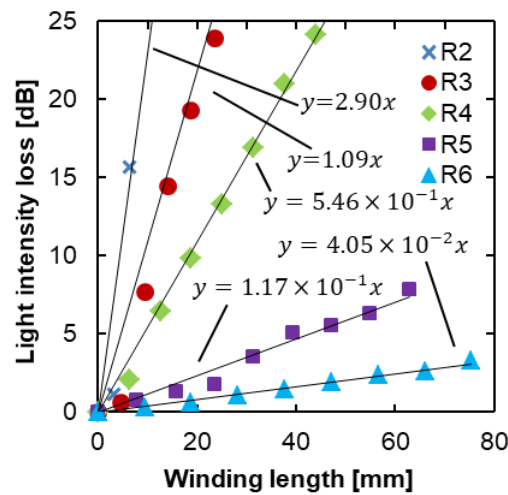


Fig.2.3.2.1 Relationship between optical bending loss of standard optical fiber sensor and winding length.

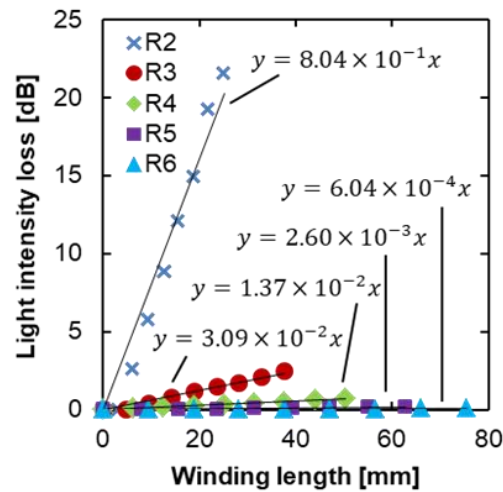


Fig.2.3.2.2 Relationship between optical bending loss of high-flexibility optical fiber sensor and winding length.

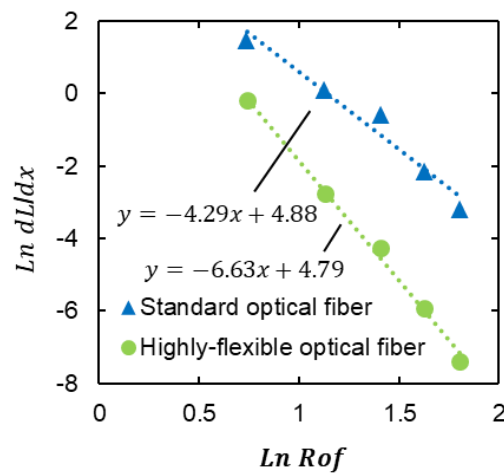


Fig.2.3.2.3 Logarithmic graph of relationship between the bending radius  $R_{of}$  and the slope of the loss.

Fig.2.3.2.4に標準および高屈曲光ファイバの曲げ半径( $R_{of}$ )に対する mm 当たりの光損失率を、実験より求めた関係式(2.3.2.2)とともに示す。この図から、光損失率は曲げ半径と非線形の関係にあり、標準光ファイバセンサの光損失率は高屈曲光ファイバセンサよりはるかに大きいことが分かった。高屈曲光ファイバセンサでは曲げ半径が 3mm から 2mm になると光損失率が  $6.18 \times 10^{-2}$  [dB/mm]から  $8.04 \times 10^{-1}$  [dB/mm]へと急激に増加している。一方、標準光ファイバセンサでは曲げ半径が 6mm の時点で光損失率は  $4.05 \times 10^{-2}$  [dB/mm]であり、これは高屈曲光ファイバセンサでは曲げ半径 3mm の値とほぼ同等である。また曲げ半径が 5mm 以下になると、光損失率が急激に増加することが明らかとなった。

この測定結果から、高屈曲光ファイバセンサは標準光ファイバセンサと比べて光損失量がずっと小さいだけでなく、より小さい曲げ半径で光損失量の急激な増加を抑制することも出来る。もし、測定中に曲げ半径が変化してしまった場合、光損失の急激な変動が測定光量に影響を与えることは明白である。よって、標準光ファイバは 6mm 以上、高屈曲光ファイバでは 4mm 以上の曲げ半径であれば光損失率の変化が小さく、安定した測定を期待できることが分かった。

Table.2.3.2.1 Parameter of optical bending loss properties of standard and high-flexibility optical fiber sensor.

	Standard optical fiber sensor	High-flexibility optical fiber sensor
$A$	$1.31 \times 10^2$	$1.21 \times 10^2$
$-m$	4.29	6.63

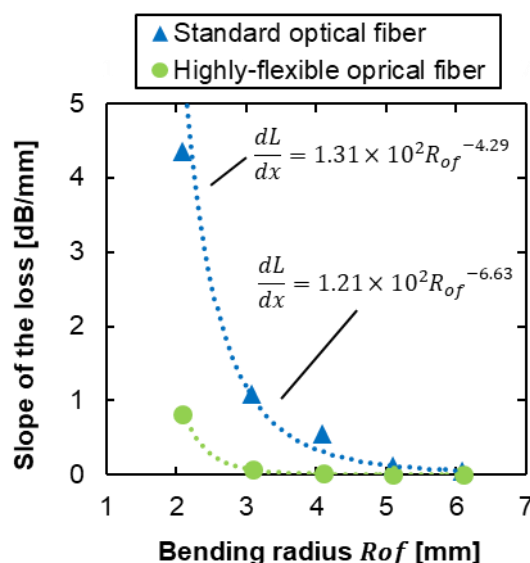


Fig.2.3.2.4 Relationship between the bending radius  $R_{of}$  and the slope of the loss.

## 2.4 局所曲げによる光損失が硬化度測定に与える影響

### 2.4.1 実験方法

本研究では FRP の母材樹脂として、エポキシ樹脂(主剤 ARALDITE™ LY5052, 硬化剤 ARADUR™ 5052CH, Huntsman Advanced Materials Europe BVBA, 混合比 100:38)を使用している。そこで、まず、Fig.2.4.1.1 に示すシリコン製の小さい型にエポキシ樹脂を流し込み、光ファイバと熱電対を樹脂に埋め込み、樹脂の硬化度測定を行うことで光損失が硬化度の測定精度に与える影響を明らかにした。シリコン型の形状をこのようにしているのは、台形状の型を用いることで型内壁からの反射光の影響を低減し、型の厚さを 2mm と薄くすることにより硬

化反応熱による過熱を防止するためである．硬化度測定に用いたフレネル反射型光ファイバセンサによる硬化度測定装置は，第2章3節で光損失特性の測定に使用したのと同じであった．エポキシ樹脂は，室温 25℃から 140℃までを 1 時間で昇温し，その後 140℃を 1 時間保持することによって硬化させた．光ファイバセンサには 20, 50, 80, 99%の光損失が生じるように局所曲げを Fig.2.3.1.1 と同様にして与え，標準および高屈曲光ファイバセンサそれぞれについて硬化度曲線を求めた．なお，実験で各光ファイバセンサに与えた損失と曲げ半径及び曲げ角度の条件を Table.2.4.1.1 に示す．また，本光ファイバセンサによる硬化度測定結果の妥当性を評価するために Kamal model を用いたシミュレーション結果と比較した．以下に用いた Kamal model のモデル式を示す．また，そのパラメータを Table.2.4.1.2 に示す．

$$\frac{d\alpha_{DSC}}{dt} = (K_1 + K_2\alpha_{DSC}^m)(1 - \alpha_{DSC})^n \quad (2.4.1.1)$$

$$K_1 = A_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right), K_2 = A_2 \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right) \quad (2.4.1.2)$$

ここで， $R$ は気体定数[J/mol・K]， $E_1, E_2$ は活性化エネルギー[J/mol]， $m, n$ は反応次数， $A_1, A_2$ は係数， $T$ は温度[K]， $\alpha_{DSC}$ は硬化度を表している．また，本研究で使用しているエポキシ樹脂においてはピークが一つしか現れない．そのため， $K_1$ は0に限りなく近く，尚且つ硬化度曲線の立ち上がりの振る舞いが測定結果とよく一致する値 $10^{-6}$ を採用し用いている．

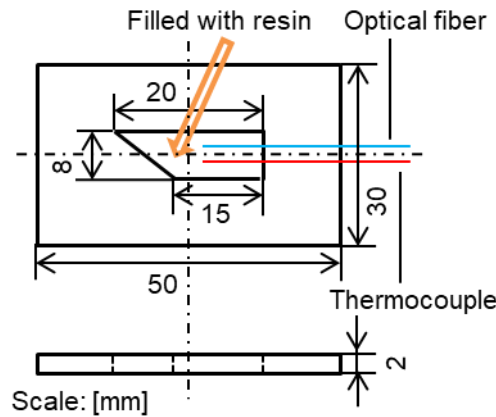


Fig.2.4.1.1 Silicon mold for cure monitoring of epoxy resin.

Table.2.4.1.1 Bending loss condition of standard and high-flexibility optical fiber sensor.

Bending loss %	Bending radiuses mm	Bending angles °
Standard optical fiber sensor		
20	5	90°
50	5	360°
80	5	720°
99	5	1620°
High-flexibility optical fiber sensor		
20	4	450°
50	4	1260°
80	4	3060°
99	4	23760°

Table.2.4.1.2 Bending loss condition of standard and high-flexibility optical fiber sensor.

$m$	0.349
$n$	1.76
$E_2$	$5.08 \times 10^4$
$A_2$	$7.33 \times 10^4$
$K_1$	$10^{-6}$
$R$	8.32

## 2.4.2 実験結果および考察

Fig.2.4.2.1 に標準光ファイバセンサを用いて測定されたエポキシ樹脂の硬化度測定結果をシミュレーション結果とともに示す．標準光ファイバで測定された硬化度曲線は，硬化開始直後は緩やかに硬化進展が進み，ある時間から急激に硬化反応が進み，以降緩やかに最終硬化度に達する，典型的なエポキシ樹脂の加熱硬化進展の振る舞いを示している．さらに，本センサによって測定された硬化度曲線はシミュレーション結果ともよく一致している．そのため，本測定システムによる硬化度測定結果は妥当であると評価できる．また，Fig.2.4.2.1 より，標準光ファイバによる硬化度曲線は，損失量に関わらず，互いにほぼ等しいことが分かる．また，標準光ファイバに光損失を与えることによる最終的な硬化度への影響は，最大でも 3% 程度である．このことから，光損失は結果的に標準光ファイバによる硬化度の測定精度にほぼ影響を与えないことが分かった．

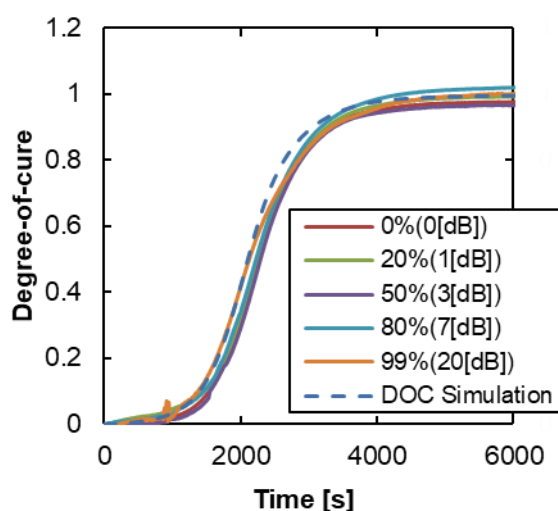


Fig.2.4.2.1 DOC curves for epoxy resin measured by standard optical fiber sensors with bending loss with simulation curve (Bending radius: 5 mm).

次に，高屈曲光ファイバセンサによる硬化度の測定結果をシミュレーション結果とともに Fig.2.4.2.2 に示す．図から，高屈曲光ファイバで測定された硬化度曲線もシミュレーション結果とよく一致しており，こちらの測定結果も妥当であると評価できる．また，高屈曲光ファイバにおいても 99% の損失を与えて測定された硬化度曲線を除けば，損失に関わらず硬化度曲線が互いにほぼ等しく，最終的な硬化度に損失が与えた影響は最大でも 2% 程度であるため，光損失が測定精度にほぼ影響を与えていないことが確認された．一方，99% の硬化度曲線に他の曲線と比較して，大きな差が生じた理由は，高屈曲光ファイバの巻き付けが実験の過程において緩んだために生じたものと考えられる．曲げ損失の少ない高屈曲光ファイバに 99% の損失を与えるため，何周も光ファイバを治具に巻き付けており，その状態で接着剤によって軽く止め



ていただけのため、光ファイバの復元力によって緩みが生じたものと考えられる。

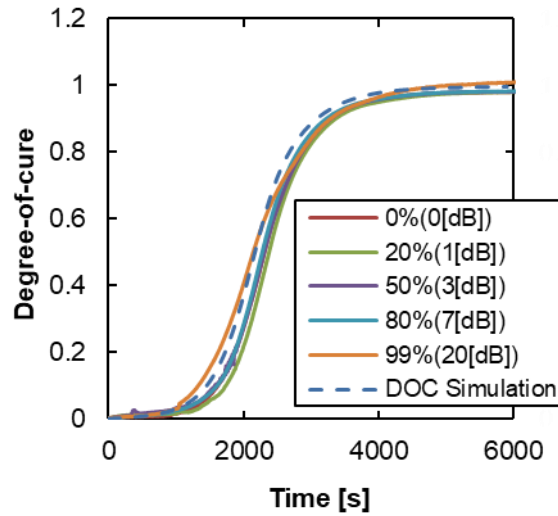


Fig.2.4.2.2 DOC curves for epoxy resin measured by high-flexibility optical fiber sensors with bending loss with simulation curve (Bending radius: 4 mm).

Fig.2.4.2.1 および Fig.2.4.2.2 から、標準および高屈曲光ファイバの硬化度曲線がよく一致していることが分かる。このことから、製造方法や構造の異なる高屈曲光ファイバを用いて硬化度を算出する場合でも、標準光ファイバによって取得したパラメータを用いることができると分かった。これは、一度、樹脂の硬化度算出用パラメータを取得すれば、光ファイバの材質が石英ガラスのフレネル反射型光ファイバであれば、パラメータを再取得する必要がなく、共通のパラメータとして用いることができることを示している。

#### 2.4.3 光損失量が硬化度の測定精度に影響を与えなかった理由

光損失が本硬化度測定システムに影響を与えないことは、曲げを与えた状態での硬化度測定によって実験的に明らかにされた。この理由は、第2章2節において示した、硬化度の計算に用いられる屈折率変化に関する式(2.2.4)および(2.2.5)に着目することで説明することができる。式(2.2.4)および(2.2.5)から、屈折率変化の計算において無次元光量 $v \approx \Delta I / I_{air}$ のみが光量の影響を受けることが分かる。光損失が発生した場合 $v$ は $v_{loss}$ となり式(2.4.3.1)に示すようになる。

$$v_{loss} = \frac{L(t)\Delta I}{L(0)I_{air}} \quad (2.4.3.1)$$

ここで、損失 $L$ は時間 $t$ の関数であり、測定開始時の光強度に対する測定光量の変化 $\Delta I$ に影響する損失 $L(t)$ は、硬化度の測定中に反射光強度に含まれ継続的に測定されている。一方、空気からの反射光量 $I_{air}$ は光ファイバのセンサ部となる先端面が樹脂に触れる前に、初期値として一度だけ取得しているため $I_{air}$ に影響する損失は $L(0)$ となる。したがって、硬化度の測定中を通して損失量の変化が生じていない場合 $L(t)$ は $L(0)$ と等しくなり $v = v_{loss}$ となるため、損失の量は屈折率変化に影響を与えず、硬化度の測定結果にも影響を及ぼさないことが確認できる。しかしながら、このことは、損失量の変化が硬化度測定中に起こってしまった場合には、測定結果に大きな影響を及ぼすことを示している。そのため、光ファイバを完全に固定していない状態での硬化度測定では、光損失が測定結果に影響を及ぼすことが予想される。

## 2.5 VaRTM による湾曲形状 GFRP の硬化度測定

### 2.5.1 実験方法

本実験では Fig.2.5.1.1 に示される R3 および R4 のコーナーを有した型の上に平織りガラスクロス (KS2750, 日東紡(株), 目付幅 100[g/m<sup>2</sup>], 幅 40[mm], 長さ 190[mm]) を 10 枚積層した。そして, 真空パックを行い, VaRTM 法を用いて, 第 2 章 4 節で用いたものと同じエポキシ樹脂を注入・含浸させ, 室温で硬化させた。このとき, 光ファイバセンサと熱電対をガラスクロス 5 枚目と 6 枚目の間に埋め込み, 第 2 章 4 節と同じ光学系を用いて硬化度測定を行っている。

VaRTM(Vacuum assisted RTM)法は, 代表的な OoA 成形法である RTM 成形が派生した方法であり, Fig.2.5.1.1 にも示されるように成形型(片型のみ)の上に強化繊維基材を積層し, プラスチックフィルムなどで封入し真空引きをした後, 液状樹脂を注入・含浸して硬化させる FRP の成形法である。長所としては, 大型・複雑形状の製品を一体成形できることや, 大掛かりな設備が不要であり, 設備投資費用が比較的小さいということが挙げられる。一方で, 温度を均一にすることが難しいことや, 厚みや強化構造が一樣でないため硬化度の不均一を引き起こしやすいことなどが問題点として挙げられる。

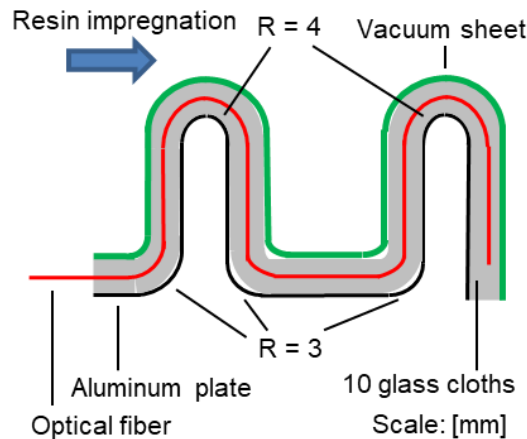


Fig.2.5.1.1 Experimental set-up for cure monitoring on curved GFRP plate during VaRTM.

### 2.5.2 実験結果

Fig.2.5.2.1 に標準および高屈曲光ファイバセンサによって測定された硬化度と時間の関係を示す。図より, 標準光ファイバによって測定された最終硬化度は 2.4, 一方で, 高屈曲光ファイバは 1.0 となっており, 標準光ファイバでは大きな誤差が生じていることが分かった。これは, 真空引きの過程で光ファイバの曲げ半径が変化し, それに伴い光損失量が変わったためであると考えられる。標準光ファイバは生じている損失が大きいため, 光損失量の変化も大きく測定精度が大きく低下したと考えられる。また, 生じている損失が小さい高屈曲光ファイバでは光損失量の変化が小さく, その結果, 測定精度への影響も小さかったと考えられる。

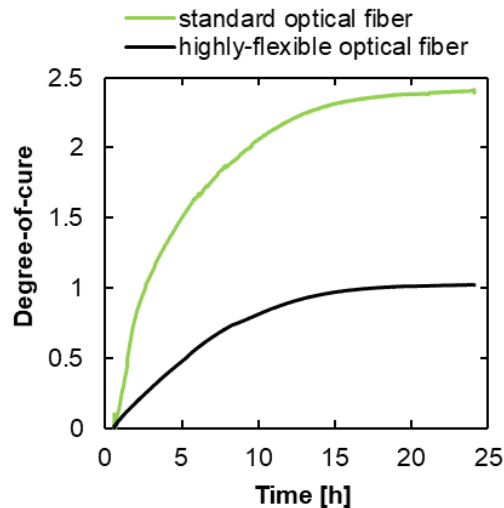


Fig.2.5.2.1 Relationship between DOC and time measured by standard and high-flexibility optical fiber sensors embedded in curved GFRP plate.

### 2.5.3 VaRTM における光損失量の推移

VaRTM 法の成形過程における光損失量の安定性を調査するため、光ファイバセンサの先端に樹脂が付着しないように埋め込み、樹脂含浸開始から光量が安定するまでの空気からの反射光量を測定した。Fig.2.5.3.1 に標準および高屈曲光ファイバセンサで測定された測定光量の変化を示す。図から、樹脂含浸を開始すると両光ファイバともに、ほぼ同じ傾向で光量の増加が起こっていることが確認される。樹脂含浸を開始した時点で急激に光量が増加し、光ファイバセンサの先端に樹脂が到達した後も光量の増加、すなわち損失の減少が続いている。ガラスクロスに樹脂が含浸した部分は真空圧から大気圧へと変化しているため、ファイバの拘束力は減少する。そのため、埋め込まれた光ファイバは樹脂含浸過程において動きやすくなっていると考えられ、その結果、曲げ変形を解消するように光ファイバが移動して曲率が小さくなり、損失が減少したと考えられる。

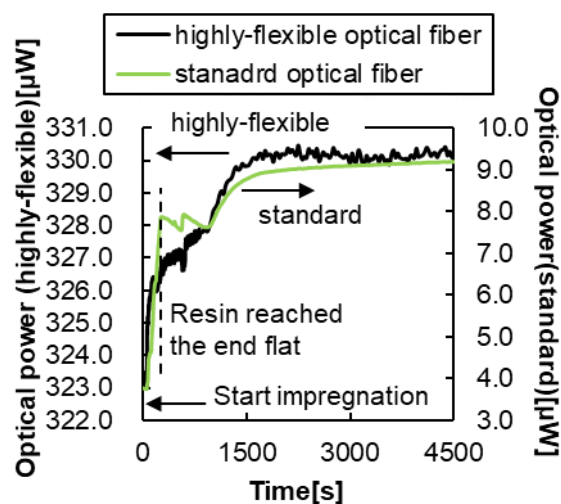


Fig.2.5.3.1 Measuring optical power change during resin impregnation process on VaRTM method measured by the standard and high-flexibility optical fiber sensor.

一方、曲げ損失の変化量に注目すると、樹脂含浸開始から損失変化が安定するまでに標準光ファイバでは  $4.0 \mu\text{W}$  から  $9.0 \mu\text{W}$  と 2 倍以上の光量の変化が起こっている。しかしながら、高屈曲光ファイバでは  $323.0 \mu\text{W}$  から  $330.0 \mu\text{W}$  と 2% 程度の変化である。これは、高屈曲光ファイバに生じているそもそもの損失が非常に小さく、それに伴って光量損失の変化も小さくなるためである。したがって、光ファイバに生じている損失を小さく抑えれば樹脂含浸による光量損失の変化が与える影響はほとんどなくなり、精度良く硬化度を測定することが出来る。そのため、3 次元形状の製品に本光ファイバを埋め込んで測定を行う場合は、損失が起きにくい高屈曲光ファイバの使用および損失が小さくなる埋め込み経路を決定することが推奨される。

## 2.6 光損失の変化によって測定精度が低下した場合の補正方法

### 2.6.1 補正方法

第 2 章 5 節の結果から、本センサシステムを VaRTM 法の硬化度測定に適用した場合、硬化度の測定精度が不安定な光損失によって低下することが確認された。しかしながら、この不安定な光損失はある時間が経過した後は安定することが明らかにされた。したがって、硬化度曲線にエラーが生じた場合でも補正することが出来ると考えられる。

第 2 章 4 節で示したように、硬化度の測定中に光損失量の変化が起こった場合、屈折率変化の計算式の中で、測定光量の影響を受ける無次元光量が式(2.4.3.1)になる。空気からの反射光量  $I_{air}$  は硬化度の測定前に初期値として 1 度だけ取得されるため、光ファイバセンサの先端に樹脂が着いてからも光損失量の変化が続いてしまうと、測定値と実際の値の不一致によって硬化度に誤差が生じてしまう。Fig.2.6.1.1 に、VaRTM 法の樹脂含浸工程において、光ファイバセンサによって測定される光量の変化の模式図を示す。

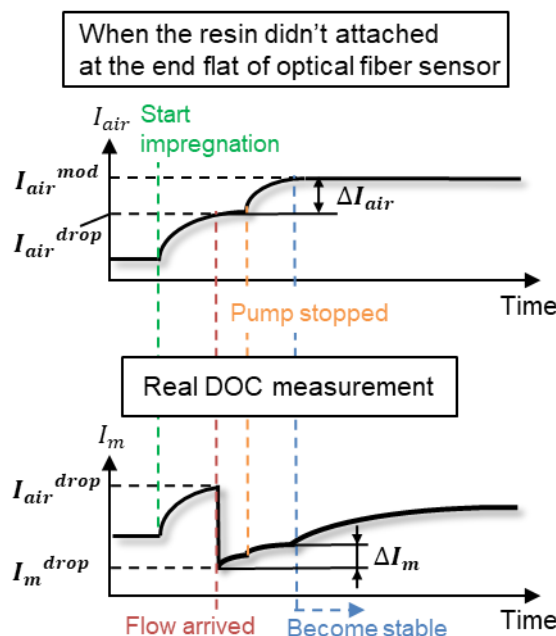


Fig.2.6.1.1 Schematic diagram of an optical power changing during the resin impregnation process in the VaRTM method.

$I_{air}^{drop}$  は光ファイバセンサの先端に樹脂が付着して反射光量が低下する直前の空気からの反射光量であり、 $I_m^{drop}$  は光ファイバセンサの先端に樹脂が付着した直後に測定されるエポキシ樹脂からの反射光量を示している。また、 $\Delta I_{air}$  と  $\Delta I_m$  はそれぞれ、 $I_{air}^{drop}$  および  $I_m^{drop}$  を基準

とした光量の変化量を示している。

第2章5節に示す，実測結果 Fig.2.5.3.1 から明らかにされたように，含浸された樹脂が光ファイバセンサの先端に到達した後も，光損失の変化はある時間まで続いている．ここで，ある時間以降は，光損失量の変化が無くなり光量が安定していることから，その点での空気からの反射光量 $I_{air}$ を屈折率変化の計算に使用すれば，正しい硬化度を求めることが出来る．しかし，当然ながら樹脂がセンサの先端に付着した後は，空気からの反射光量 $I_{air}$ を直接測定することは出来ない．そのため，光損失量の変化が安定した時点での $I_{air}$ を樹脂の屈折率から $I_{air}^{mod}$ として推定する必要がある．第2章2節に示す，式(2.2.1)および式(2.2.2)を用いることで，測定光量と屈折率の関係を以下の式(2.6.1.1)で表すことが出来る．

$$\frac{I_m - I_b}{I_{air} - I_b} = \frac{(n_{eff} - n_s)^2 (n_{eff} + 1)^2}{(n_{eff} + n_s)^2 (n_{eff} - 1)^2} = K \quad (2.6.1.1)$$

ここで，硬化度と途中経路からの反射および戻り光 $I_b$ は，樹脂が光ファイバセンサのセンサ部に到達する前後でほぼ同じであると仮定すると， $\Delta I_{air}$ および $\Delta I_m$ は式(2.6.1.1)を用いることで，以下の式(2.6.1.2)として表すことができる．

$$\Delta I_{air} = \frac{\Delta I_m}{K} \quad (2.6.1.2)$$

したがって， $I_{air}^{mod}$ は以下に示す式(2.6.1.3)を用いて，光ファイバセンサによって測定されている樹脂からの反射光量 $I_m$ より求められる．

$$I_{air}^{mod} = I_{air}^{drop} + \Delta I_{air} \quad (2.6.1.3)$$

この式(2.6.1.3)によって得られる $I_{air}^{mod}$ を，硬化度の計算に適用することで硬化度曲線のエラーを補正することが出来ると考えられる．そこで，第2章5節の Fig.2.5.2.1 に示されている標準光ファイバセンサによって測定された大きくエラーを生じている硬化度曲線の補正を行った．

## 2.6.2 補正結果

光損失量の変化が起きている VaRTM 成形における樹脂含浸中とその付近の標準光ファイバセンサによって測定された光量に注目した．Fig.2.6.2.1 に光ファイバセンサの先端に樹脂が付着して測定光量が低下した直後から，樹脂の含浸プロセスが完了して，光損失量の変化が安定するまでの測定光量と時間の関係を示す．この図から，本実験においては 6500 付近で光損失量の変化が安定していることが分かる．したがって， $\Delta I_m$ は光損失量の変化が安定した点(6500 秒)での測定光量 0.602  $\mu\text{W}$ から，光ファイバセンサの先端に樹脂が付着した直後に測定される光量 $I_m^{drop}$ の 0.396  $\mu\text{W}$ を引くことで，0.206  $\mu\text{W}$ と得られる．したがって， $\Delta I_{air}$ は式(2.6.1.2)より 18.4  $\mu\text{W}$ となるため， $I_{air}^{mod}$ が式(2.6.1.3)より，40.6  $\mu\text{W}$ であると求められる．この $I_{air}^{mod}$ を用いて安定点である 6500 秒から硬化度の計算を行った．

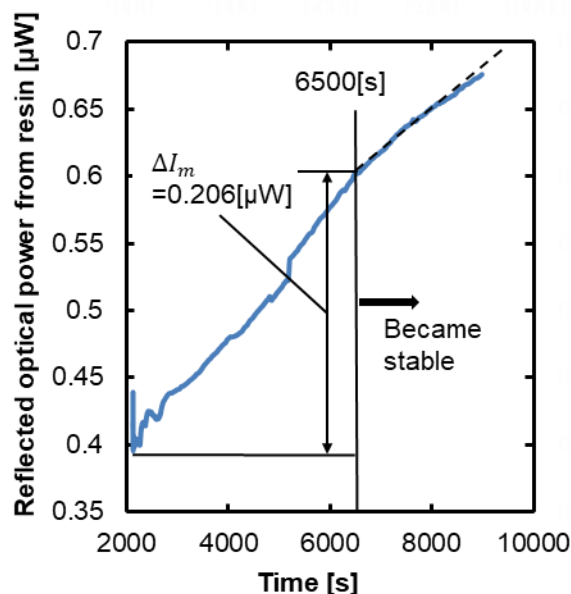


Fig.2.6.2.1 Relationship between the reflected optical power from resin and time measured by the standard optical fiber sensor.

Fig.2.6.2.2 に標準光ファイバで測定された硬化度曲線に対して補正を行った硬化度曲線を示す．図に示されている補正された空気からの反射光量 $I_{air}^{mod}$ を用いた硬化度曲線以外は Fig.2.5.2.1 に示されているものと同じである．この図から，高屈曲ファイバセンサで測定された硬化度曲線と比較してやや誤差を生じているものの，従来と比較すれば誤差は非常に小さくなっていることが分かる．このように，曲げ損失が安定した時点の空気からの反射光量を推定し，硬化度の計算に用いて補正を行うことによって大きな曲げ損失が生じる場合でも補正が可能であることが明らかとなった．

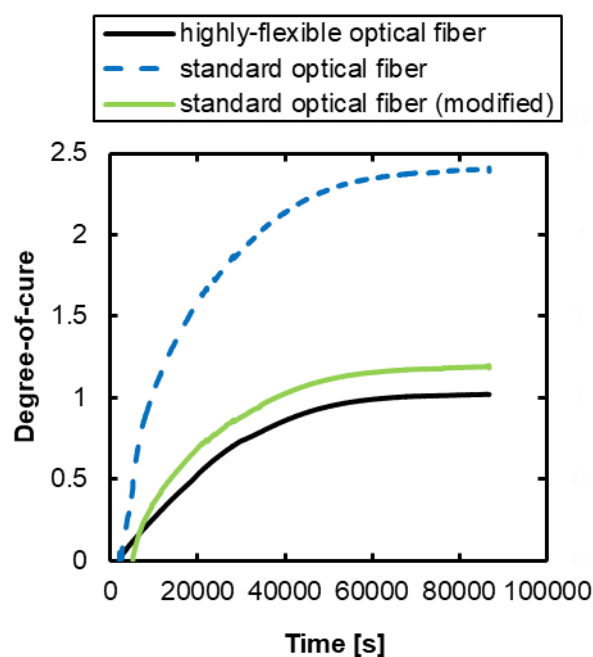


Fig.2.6.2.2 Relationship between DOC and time by calculated with using the modified reflection light intensity from air  $I_{air}^{mod}$ .

## 2.7 結言

第2章では、局所曲げによる標準光ファイバおよび高屈曲光ファイバの光損失特性を明らかにし、曲げ損失および3次元形状FRPへの光ファイバセンサの埋め込みが硬化度の測定精度に与える影響を調査した。その結果、光損失の量はフレネル反射型光ファイバセンサによる硬化度測定の精度に影響を与えないことが明らかとなり、高屈曲光ファイバセンサも標準光ファイバセンサと同じようにFRPの硬化度測定に用いることが可能であると確認された。一方、VaRTM成形では曲げ損失がある時間まで不安定であり、それが硬化度測定の精度に大きな影響を与えていることが明らかになった。しかしながら、光ファイバセンサに生じている損失が小さければ、光量損失が変化することによる影響をほとんど受けないため、3次元形状の製品では損失を小さく抑えることができる高屈曲光ファイバの使用および埋め込み経路で硬化度の測定を行うことが推奨される。最後に、今後の本測定の適用範囲の拡大を考慮すれば、高屈曲光ファイバセンサでも厳しい埋め込み条件が考えられるため、硬化度曲線に誤差が生じてしまった際の補正方法を提案した。その結果、この補正方法によって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することが可能であると分かった。

## 謝辞

本研究の一部は、総合科学技術・イノベーション会議(CSTI)、内閣府・戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「革新的構造材料」(資金提供期間:JST)の助成を受けたものである。

## 第3章 フレネル反射型光ファイバセンサの埋め込み経路最適化

### ソフトの開発に向けた曲げ損失シミュレーションの開発

#### 3.1 緒言

第2章で示したように、筆者らはFRP製品の開発コスト低減、品質・信頼性の向上、および製造サイクルの向上に効果的である、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に適用可能な硬化度測定システムの開発を行ってきた。その結果として、本センサをVaRTM成形での硬化度測定に用いた場合、不安定な光量損失によって硬化度の測定精度が低下してしまうケースがあるということが明らかとなった。一方で、曲げによって生じる損失が標準光ファイバセンサと比較して非常に小さい高屈曲光ファイバセンサでは、そもそも埋め込みによって生じた損失が小さかったため、光損失量の変化も小さく、その結果として、測定精度への影響もほとんど無かった。このことから、第2章での結論は、曲げ損失耐性の高い高屈曲光ファイバセンサの使用が、3次元形状の製品における硬化度測定では推奨されるというものであった。当然のことながら前述の通りではあるのだが、近年のFRPの製品への適用範囲の拡大を鑑みると、高屈曲光ファイバセンサを用いても厳しいような、より複雑な形状やより大型な製品へ埋め込んで、硬化度測定に使用したいという状況も十分に想定される。したがって、今後の本センサによる硬化度測定の適用範囲拡大を目指すならば、非常に厳しい埋め込み条件での安定かつ高精度の測定が求められる。

VaRTM成形の硬化度測定において、本センサによる硬化度の測定精度が低下してしまう原因は、第2章での結果からFig.3.1.1に示すように樹脂の含浸によって光ファイバセンサの曲げ部で、曲げ半径や埋め込み状態が変化してしまうことによる光曲げ損失の不安定さにあることが明らかにされている。樹脂を含浸すると、強化繊維プリフォームは樹脂を吸収し膨張する。このプリフォームの膨張によって、コーナー部の光ファイバセンサの曲率が変化する。さらに、これだけではなく埋め込まれた光ファイバセンサは曲げひずみエネルギーを持っており、真空圧および光ファイバセンサと強化繊維プリフォームの間の摩擦力によって、光ファイバセンサの埋め込み状態が保持されている。しかし、樹脂が含浸した部分は真空圧から大気圧へと変化しているため、ファイバの拘束力は減少する。よって、埋め込まれた光ファイバセンサは樹脂含浸プロセス中に、この曲げひずみエネルギーを開放するように容易に移動してしまう。この光ファイバセンサの移動によって、埋め込み状態が変化してしまうことで曲げ損失が不安定になってしまう。一方で、この曲げ損失の不安定さも、そもそ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。このことから、光損失が小さく、安定した光ファイバセンサの埋め込み経路を決定することは、硬化度の高精度測定に効果的である。そこで、筆者らは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的とした。本研究では、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。まず、フレネル反射型光ファイバセンサをプリフォームに埋め込んだ際の光損失を予測する手法を提案した。そして、この光損失予測法を基とした、光曲げ損失シミュレーションソフトの開発を3D CADソフトのRhino 3Dを用いて行った。また、我々の提案する光損失予測法の結果およびシミュレーションの結果を、実測値と比較することで予測手法とシミュレーションの妥当性を評価した。さらに、この光曲げ損失予測を用いることでVaRTM成形での硬化度測定精度の改良を試みた。最後に、本光曲げ損失シミュレーションの実用化と、最適埋め込み経路シミュレーションの開発に向けて、光損失量を基にした硬化度測定精度の定量評価を行った。



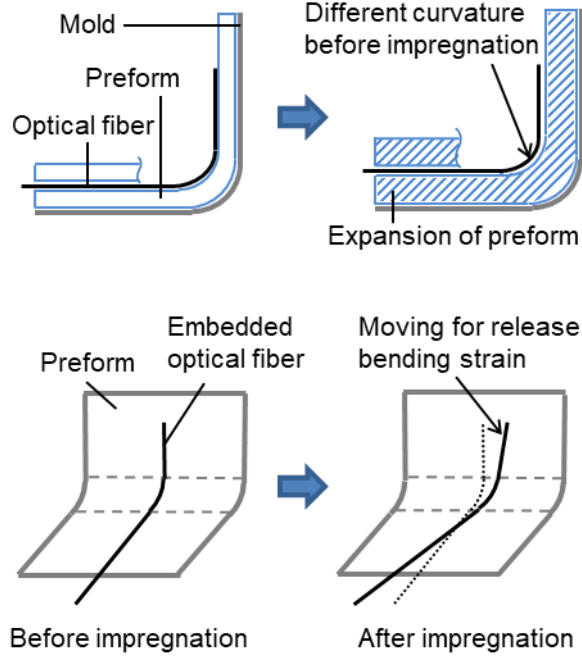


Fig.3.1.1 Mechanism of the optical bending loss change during the resin impregnation process at VaRTM.

本研究で採用した 3D CAD ソフトの Rhinoceros 3D は、1998 年に作成され、それ以来デザイナーや建築業界においては最も人気が高く、信頼のある NURBS ベースのソフトウェアである [53]。また、Rhinoceros には、精度上の制約条件が無く、建築、航空機などの分野から医療機器といった精密機器分野まで適用可能である。Rhinoceros 上で動作するプログラミング環境・言語である Grasshopper は Python や C 言語を用いたプログラムも組み込むことが可能である。Python が最適化プログラムに適したプログラミング言語であることはよく知られており、Rhinoceros と Grasshopper による最適化の研究も見受けられる [54]。PAVILION COCOON\_FS (POHL ARCHITEKTEN Co., Ltd.) と呼ばれる GFRP で構成されたパビリオンでは、ジオメトリの最適化ツールとして Rhinoceros と Grasshopper が用いられている [55]。

### 3.2 光ファイバセンサをプリフォームに埋め込んだ際の光損失予測法

光ファイバセンサに生じる全光曲げ損失  $L$  が以下の式 (3.2.1) に示すように、光ファイバ長に沿った局所損失を積分することによって得られることは良く知られている。

$$L = \int \frac{dL}{dx} (R(x)) dx \quad (3.2.1)$$

ここで、単位長さ当たりの光曲げ損失  $dL/dx$  は曲げ半径  $R(x)$  の関数であり、これを我々の研究では光曲げ損失特性として第 2 章において定義している。光損失特性は、第 2 章の式 (2.3.2.2) で表され、光ファイバセンサの中立軸の曲げ半径  $R_{of}$  は光ファイバセンサが曲げられている状態によって、以下の式 (3.2.2) に示すように 2 つパターンがある。また、Fig.3.2.1 に光ファイバセンサの中立軸の曲げ半径  $R_{of}$  と、型のコーナー半径  $R$  の関係の概略図を示す。

$$R_{of_{outer}} = R + t_i + \frac{d}{2} \quad (3.2.2)$$

$$R_{of\,inner} = R - t_i - \frac{d}{2}$$

光ファイバセンサが曲げを有する形状のプリフォームに埋め込まれた際、そのコーナー部で生じる局所的な曲げ損失は、光損失特性を表す式(2.3.2.2)を用いて、以下の式(3.2.3)で表すことが出来る。

$$dL = A\varphi r_{of}^{1-m} \cos^{m-1} \theta$$

$$R_{of} = \frac{r_{of}}{\cos \theta} \quad (3.2.3)$$

$$r_{of\,outer} = r + t_i + \frac{d}{2}, r_{of\,inner} = r - t_i - \frac{d}{2}$$

ここで、 $\varphi$ はコーナー部分の角度、 $r_{of}$ はコーナーの面の曲率半径 $r$ で光ファイバセンサが曲げられたときの光ファイバセンサの中立軸の曲げ半径、 $\theta$ はコーナーへの進入角と本研究では定義しており、コーナーの垂直断面に対するセンサの進入角度を表している。光ファイバセンサを任意形状の製品に埋め込んで使用した場合でも、基本的に局所曲げ損失はコーナー部でのみ生じる。したがって、光ファイバセンサを任意形状の FRP 製品に埋め込むことによって生じる全光損失 $L$ は、式(3.2.1)および式(3.2.3)から、以下の式(3.2.4)によって求めることが出来る。

$$L = \sum_{i=1}^N dL_i = A \sum_{i=1}^N \varphi_i r_{ofi}^{1-m} \cos^{m-1} \theta_i \quad (3.2.4)$$

ここで、 $N$ は光ファイバセンサが曲げられているコーナーの数、 $i$ はコーナーの ID 番号を表している。以上のことから、式(3.2.4)と光損失特性を用いることで、光ファイバセンサに生じる全光損失 $L$ を求めることが出来る。

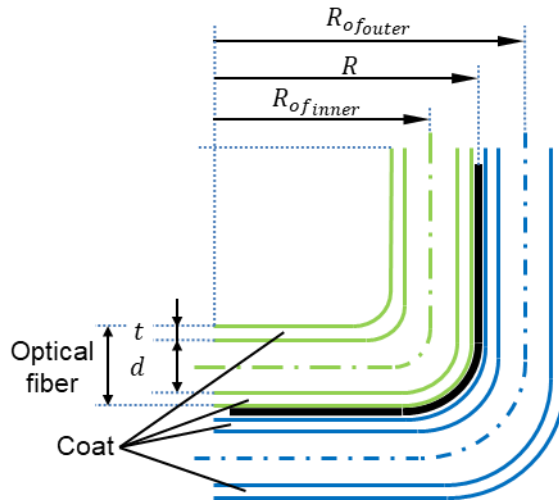


Fig.3.2.1 Schematic view of the relationship between the actual bending radius of optical fiber sensors  $R_{of}$  and the corner radius of the mold  $R$ .

### 3.3 フレネル反射型光ファイバセンサに生じる光損失シミュレーションの開発

#### 3.3.1 光曲げ損失シミュレーション

第3章2節にて提案した光損失予測法を基にして、3D CAD ソフトである Rhinoceros 3D(Rhino 7)および、Rhinoceros 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 を用いて試みた。

本シミュレーションの概要は、CAD ソフトである Rhinoceros を用いて、まず、光ファイバセンサが埋め込まれる型やプリフォームを描写して、そのサーフェス上に実際に配置したい状態の光ファイバセンサを模した曲線を Fig.3.3.1.1 に示すように描写する。

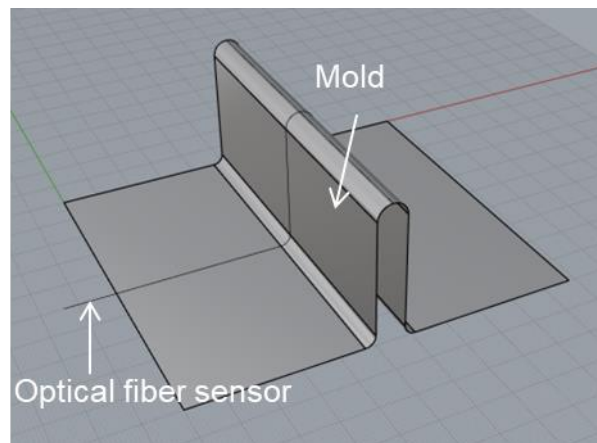


Fig.3.3.1.1 Mold and bending optical fiber sensor drawing by Rhinoceros of 3D CAD soft.

そして、その光ファイバセンサを模した曲線を選択すれば Grasshopper によって作成したプログラムによって、自動的にその光ファイバセンサに生じている全光損失が計算されるというものである。Grasshopper で作成した光ファイバセンサに生じている全光曲げ損失 $L$ を求めるプログラムのアルゴリズムは、第3章2節で提案した光損失予測法に基づいており、式(3.3.1.1)で表される。また、それを模式図として表したものを Fig.3.3.1.2 に示す。

$$L = \sum_{i=1}^i L_i(\rho_i)\Delta l \quad (3.3.1.1)$$

ここで、 $i$ は要素の ID 番号、 $\rho_i$ は要素ごとの曲率半径、 $\Delta l$ は要素の区間長さを表している。まず、選択された光ファイバセンサを模した曲線を微小要素に分解する。そして、その要素ごとに曲率を取得し、光損失特性を用いて要素ごとに生じている光損失を求める。そして、最終的にそれらを総和することによって全光損失を計算している。Fig.3.3.1.3 に例として、実際に型および光ファイバセンサを描写し、生じる光曲げ損失をシミュレーションした結果を示す。

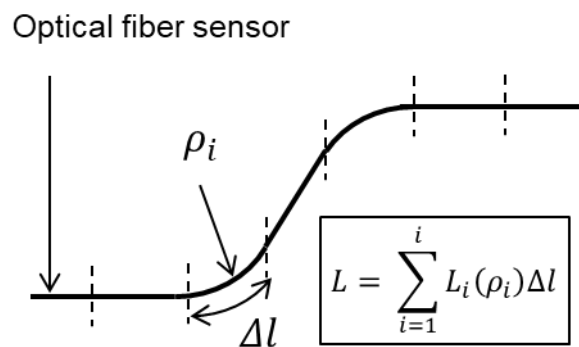


Fig.3.3.1.2 Schematic view of a conception of calculation optical bending loss with formula.

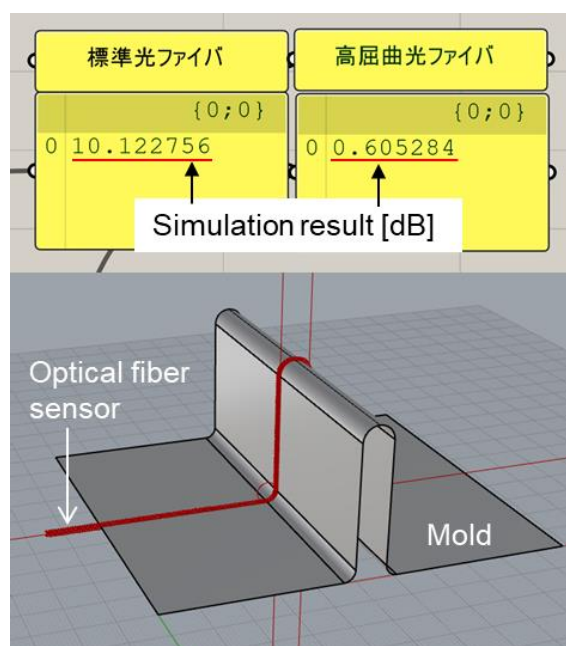


Fig.3.3.1.3 An example of simulation result of optical bending loss.

### 3.3.2 光曲げ損失予測およびシミュレーションの妥当性を評価のための実験方法

我々の提案する光曲げ損失予測法および、シミュレーションによって取得された予測光損失を、実際の測定値と比較することによって妥当性を検討した。実験には、標準および高屈曲光ファイバセンサを用いており、光学系は第2章の Fig.2.3.1.1 に示すものと同様である。また、光損失は反射法で測定しており、第2章で示している式(2.3.1.1)によって、光ファイバセンサに生じている光曲げ損失を求めている。

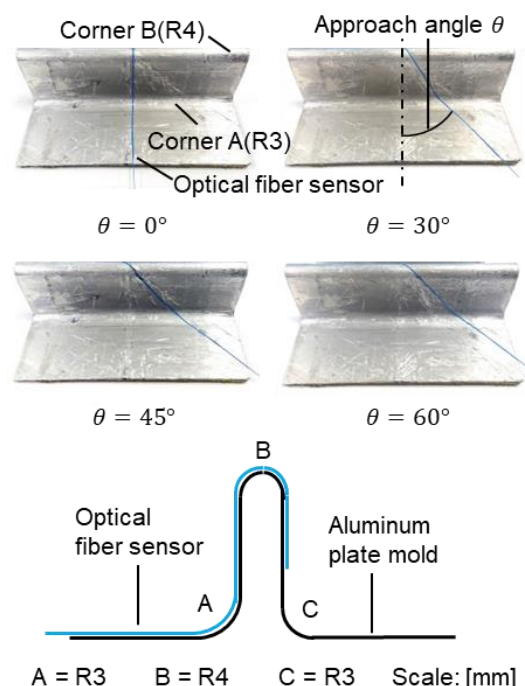


Fig.3.3.2.1 Bending state of optical fiber sensors on the curved mold.

Fig.3.3.2.1 に示すように湾曲した形状の型に、標準および高屈曲の両光ファイバセンサを添わせるように配置して光曲げ損失を測定している。両光ファイバセンサはコーナーA( $r_A=3\text{mm}$ ,  $\varphi_A=\pi/2$ )およびコーナーB( $r_B=4\text{mm}$ ,  $\varphi_B=\pi$ )で曲げられている。また、コーナーへの進入角 $\theta$ を $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ の4つの条件で光ファイバセンサを配置して、測定を条件ごとに3回ずつ行った。予測損失曲線は、この実験条件を式(3.2.4)に適用して、以下に示す式(3.3.2.1)を用いることで求められた。

$$L = A \cos^{m-1} \theta \left( \frac{\pi}{2} r_A^{1-m} + \pi r_B^{1-m} \right) \quad (3.2.2.1)$$

### 3.3.3 結果および考察

Fig.3.3.3.1 および Fig.3.3.3.2 に、それぞれ標準と高屈曲光ファイバセンサの測定された光損失量とコーナーへの進入角の関係を予測損失曲線とシミュレーション結果と共に示す。Fig.3.3.3.1 と Fig.3.3.3.2 に示されている、測定光損失量のエラーバーは、測定された光損失の最大値と最小値として示されている。これらの図から分かるように、我々の提案している光曲げ損失予測法による予測損失曲線およびシミュレーション結果は、測定値と非常によく一致していることが分かる。したがって、我々の提案する光曲げ損失予測法および光曲げ損失シミュレーション法は妥当であり、光ファイバセンサがプリフォームに埋め込まれたときの初期光損失を予測するのに効果的であることが明らかとなった。また、光損失量とコーナーへの進入角の関係は、予測損失曲線および式からも分かるように $\cos$ の関数となっており、コーナーへの進入角が大きくなるほど損失は小さくなるということが明らかとなった。

第2章5節の結果から、VaRTM成形において曲げ部を有する埋め込み条件で、フレネル反射型光ファイバセンサを用いて硬化度測定を行う際には、樹脂含浸工程においてある時間まで光損失が不安定であり、この不安定な光損失によって硬化度の測定精度が低下するケースがある事が明らかとなっている。そのため、この条件下で安定かつ高精度の硬化度測定を行うために

は、埋め込んだ際に光ファイバセンサに生じる初期光損失が小さいことが重要である。また、安定性という観点では、コーナーへの進入角に対する光損失の勾配が小さいほど、光損失を維持することに適している。損失変化の勾配に着目すると、Fig.3.3.3.1 および Fig.3.3.3.2 から、両光ファイバセンサともに進入角  $0^\circ$  付近および、 $60^\circ$  以降は勾配が小さくなっている。しかし、進入角  $0^\circ$  というのは、光ファイバセンサに生じる光損失量が最も大きく、曲げひずみエネルギーも最も大きくなる、最も厳しい埋め込み条件である。したがって、VaRTM 成形で曲げ部を有する埋め込み条件において、安定した高精度の硬化度測定を行う際には、コーナーに  $60^\circ$  以上の進入角を持たせて光ファイバセンサを埋め込むことが推奨される。一方で、コーナーへの進入角が  $15^\circ$  から  $45^\circ$  の間は、損失変化の勾配が大きい。これは、樹脂含浸によって光ファイバセンサが移動することによって生じた曲げ状態の変化が小さくても、大きな損失の変化を生じってしまう恐れがあるということであり、埋め込み条件としては適していない可能性がある。

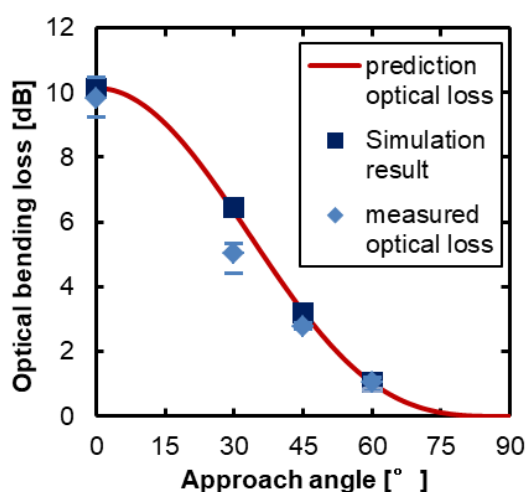


Fig.3.3.3.1 Simulation result of total bending loss of standard optical fiber sensors with the measured loss and the prediction optical loss curve.

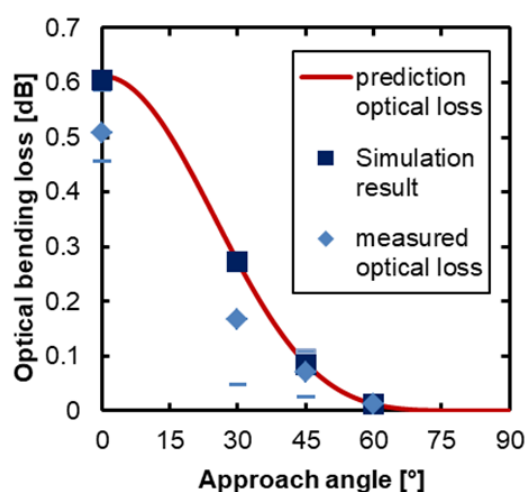


Fig.3.3.3.2 Simulation result of total bending loss of high-flexibility optical fiber sensors with the measured loss and the prediction optical loss curve.



### 3.4 光損失予測を基にした VaRTM での硬化度測定精度の改良

#### 3.4.1 実験方法

第3章2節および3節から、プリフォームに埋め込んだ際の光ファイバセンサに生じる光損失を予測することが可能となった。そして、この結果を用いることによって、VaRTM 成形における硬化度測定精度を向上させることが出来ると考えられる。そこで、第3章3節の結果と考察を基に、適切であると考えられる埋め込み経路を設計して VaRTM 法による湾曲形状 GFRP の硬化度測定を行った。

VaRTM 成形には、Fig.3.3.2.1 に示すものと同じ型を使用しており、Fig.3.4.1.1 に示すように平織りガラスクロス(KS2750, 日東紡(株), 目付 100g/m<sup>2</sup>)を、長さ 200mm, 幅 40mm に切ったものを 10 枚重ねて積層した。硬化度測定用の標準光ファイバセンサと熱電対はガラスクロスの 5 枚目と 6 枚目の間に埋め込まれている。また、光ファイバセンサの埋め込み条件は、各コーナーへの進入角が 0° と 60° の 2 つの条件がある。硬化度測定用の光学系は、第2章3節に示すものと同様であり、母材であるエポキシ樹脂は第2章4節に示しているものを使用している。また、標準光ファイバセンサによって測定された硬化度曲線は、Kamal model によるシミュレーション結果と比較することで、妥当性の検討している。

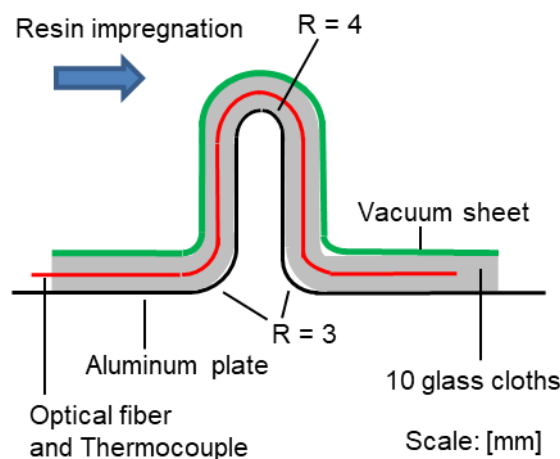


Fig.3.4.1.1 Experimental set-up for DOC monitoring of curved GFRP plate made by VaRTM.

#### 3.4.2 硬化度測定精度の改良結果

Fig.3.4.2.1 に、コーナーに対して 0° または 60° の進入角度で埋め込まれた標準光ファイバセンサによって測定された硬化度と時間の関係を、Kamal Model によるシミュレーション結果と共に示す。この結果から、コーナーに対して進入角 0° で埋め込まれた標準光ファイバセンサによる硬化度曲線は、製造の初期段階で急激に増加している。これは、進入角 0° が厳しい埋め込み条件であり、この埋め込み条件が大きく、不安定な光曲げ損失を生じさせることに起因している。そして、この不安定で大きな光曲げ損失は、硬化度の測定精度の低下を招くため、この条件の硬化度曲線は最終値 1.4 に収束するようなエラーを生じており、シミュレーション結果と比較することでも正しくないことが明らかである。一方で、コーナーに対して進入角 60° で埋め込まれた標準光ファイバセンサによる硬化度曲線は、室温での等温硬化であるため緩やかに増加していき、最終的に 0.9 付近に到達している。この結果は、シミュレーションの結果と非常によく一致しており、光ファイバセンサの埋め込み経路を設計することが、VaRTM 法での高精度かつ安定した硬化度測定に効果的であることが明らかとなった。

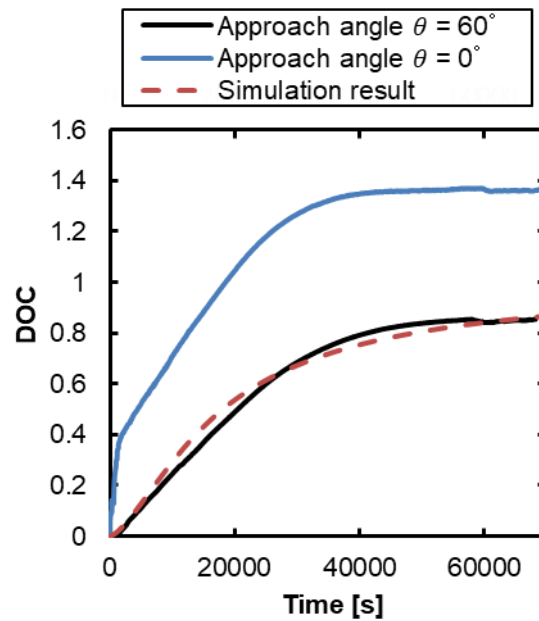


Fig.3.4.2.1 Relationship between DOC and time measured by standard optical fiber sensors that has a 0° or 60° approach angle to the corner.

### 3.5 光損失量を基にした硬化度測定精度の定量評価

#### 3.5.1 実験方法

第3章4節では、コーナーへの進入角が 60° 以上であれば、光ファイバセンサに生じる曲げ損失が小さく、損失変化の勾配も小さいことから、適切な埋め込み条件であるとして硬化度の測定を行った。そして、その結果として適切な埋め込み経路を決定することによって、硬化度の測定精度が向上することが明らかとなった。しかしながら、現状では埋め込み条件を最も安全側に設定しているだけであって、実用ということ考えた場合には使いづらい。実用を考えた場合には、光ファイバセンサの埋め込み経路が制約されるケースも十分に想定され、常に最も安全側の条件で埋め込むことが出来ないことも想定される。また、製品によっては必要以上の精度での硬化度測定を行うように設計することになるため、光ファイバセンサの埋め込みに余計な時間と手間をかけることになってしまうことも考えられる。そこで、実用的と考えられる、光ファイバセンサの損失量によって測定精度の定量評価を行い、損失量を VaRTM 成形での硬化度測定精度の指標とすることをを行った。

硬化度の測定精度の定量評価するための実験は、Fig.3.4.1.1 に示す VaRTM 成形法と同じ条件で、エポキシ樹脂の代わりに、粘度が同程度であるシリコンオイル(信越シリコン, KF-96-1000CS, 信越化学工業(株))を流入させて、樹脂含浸プロセス中の空気からの反射光量を測定することで行った。このとき、光ファイバセンサは、ガラスクロスの5枚目と6枚目の間に埋め込まれているが、Fig.3.5.1.1 に示されるように、センサ部となる先端は真空パックの外に出しており、樹脂含浸プロセスが終了するまで、継続して空気からの反射光量を測定できるようにしている。光ファイバセンサの埋め込み経路は任意であり、埋め込み後真空引きを行った時点での損失量を初期損失として定義している。樹脂含浸中に生じる光量の変化率は、本来の硬化度測定では光ファイバのセンサ部があると想定される場所  $P_A$  に含浸液が到達したときの空気からの反射光量で、含浸プロセスが終了して光量が安定したとき  $T_{stable}$  の空気からの反射光量を除することで求めた。測定は、任意の埋め込み経路によって得られる損失が生じた光フ



ファイバセンサによって 31 回行われた。そして、損失が 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8[dB]となるように平均を求めた。6[dB]に関して求めているのは、今回の実験では初期損失が 6[dB]となるデータを複数回取得することが出来ず、再現性の確認が出来なかったためである。

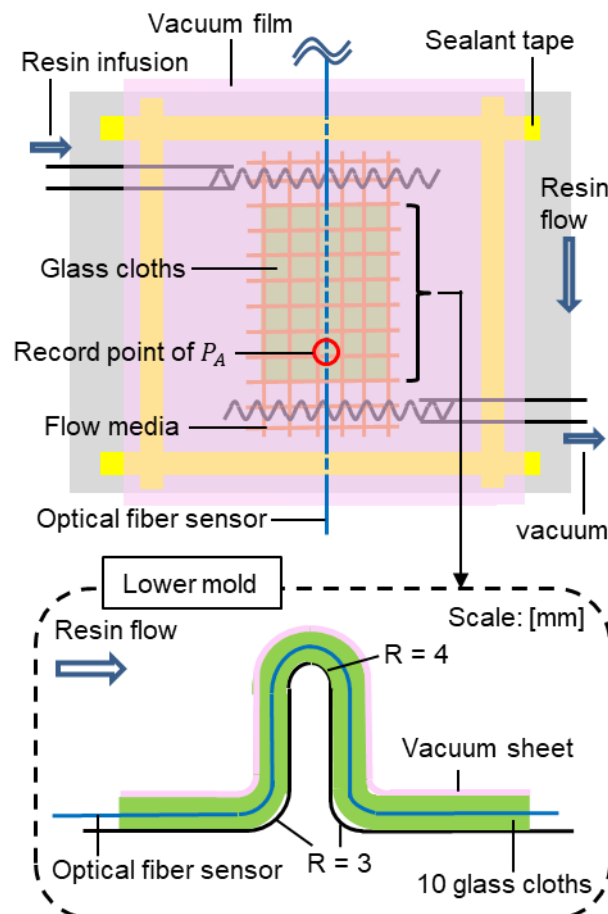


Fig.3.5.1.1 Schematic view of experimental set-up by VaRTM method for measuring optical bending loss change rate.

### 3.5.2 結果および考察

Fig.3.5.2.1 に損失量毎に初期損失毎に樹脂含浸工程で生じる光量の変化率の平均値をエラーバーと共に示す。また、エラーバーは最大値および最小値を示している。この結果から、初期損失が 1~2[dB]であれば想定される硬化度の誤差は 10%程度であり、実用の際は初期損失が 2[dB]以下となるように光ファイバを埋め込むことが推奨される。しかし、初期損失が 2[dB]の場合、誤差が 20%近くになることがあったため、精度が要求される測定においては 1[dB]以下の損失となるように埋め込むことが推奨される。初期損失が 3[dB]以上の場合、基本的には損失が増えるほど、光量の変化率は大きくなり、誤差の範囲も広がっていくと思われる。4[dB]および 7[dB]の測定結果は、上述の傾向から外れているように見える。これは今回測定できた 4[dB]および 7[dB]のデータが少なかったことが原因であると考えられる。初期損失が 8[dB]の平均の光量変化率が 20%程度となっているが、最大誤差は約 50%であり最小は約 5%と非常に大きな差がある。よって、損失が大きくなると硬化度測定の安定性が著しく低下することが明らかとなった。一方、今回の測定結果からも第 2 章の結果と同様に、樹脂含浸工程中に生じる光量の変化は成形の初期段階のみで生じていることが確認された。よって、この影響は我々の

提案している補正方法によって、補正を行うことで除去可能であると考えられる。

この実験結果から、Fig.3.5.2.1 に示すように線形近似曲線を求め、これを用いて第 3 章 3 節に示した損失シミュレーションプログラムに改良を加えた。これによって、Fig.3.5.2.2 に示すように、シミュレーションした埋め込み経路での目安測定精度が表示される。

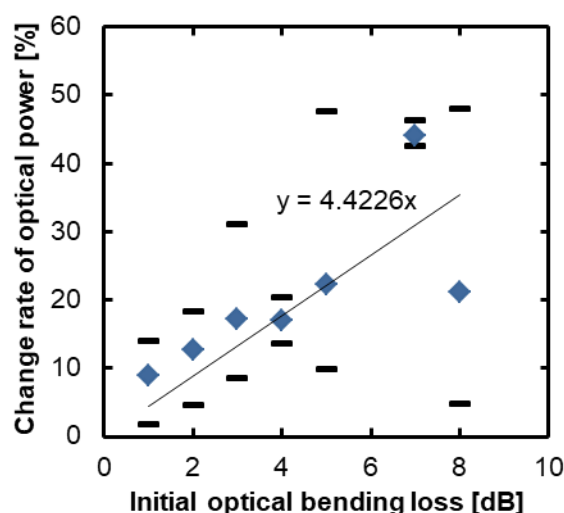


Fig.3.5.2.1 Relationship between the change rate of optical power during resin impregnation process and the initial optical bending loss.

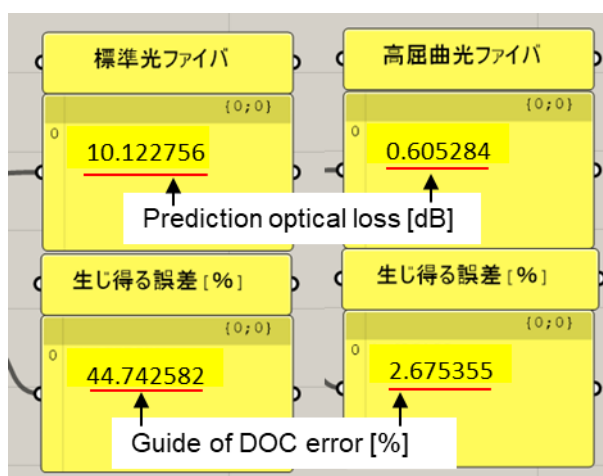


Fig.3.5.2.2 Window of an example simulation result with prediction optical bending loss and guide of measurement accuracy of DOC.

### 3.6 結言

第 3 章では、フレネル反射型光ファイバセンサの埋め込み経路最適化ソフトの開発に向けて、その前身となる曲げ損失シミュレーションの開発を行った。その結果として、我々の提案するフレネル反射型光ファイバセンサに生じる光曲げ損失を予測する手法および光曲げ損失シミュレーションによって、光ファイバセンサがプリフォームに埋め込まれた際の初期光損失を高精度に予測できるようになった。また、この光曲げ損失シミュレーションの結果を基にして、埋め込み経路を設計することは、VaRTM 成形で曲げ部を有する形状の FRP の硬化度測定の高精度化に効果的であることが明らかとなった。また、本光曲げ損失シミュレーションの実用化に

向けて、損失量による硬化度測定精度の定量評価を行った。その結果、高精度の硬化度測定を望む場合、1[dB]以下の初期損失となるように光ファイバを埋め込むことが推奨される。また、この測定結果を基にしてシミュレーションプログラムを改良し、シミュレーションした埋め込み経路での目安測定精度が表示されるソフトへと機能を拡張した。

## 謝辞

本研究の一部は、総合科学技術・イノベーション会議(CSTI)、内閣府・戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「革新的構造材料」(資金提供期間:JST)の助成を受けたものである。また、一部は科研費(20K04182)の助成を受けたものである。

## 第4章 レイリー散乱型光ファイバ分布センサによる

### フローフロント検出法の開発

#### 4.1 緒言

第1章序論でも述べてきたように、FRPのプロセスモニタリングおよびヘルスモニタリング技術は、FRP製品の製造コストを削減し、品質および信頼性を向上させることに非常に有効であると考えられている。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が生じるなど、成形不良が生じる恐れがあるため、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。従来から、フローフロントのその場モニタリングには、フローフロントとともに樹脂の硬化進展、粘度および温度を同時に測定できることから誘電分析が利用されている[14]。しかしながら、誘電分析はセンサ部が大きい埋め込みに向かず、埋め込んだセンサ部が欠陥となってしまうことから含浸工程以降も継続的に使用することは困難である。一方、細径の繊維状であり、埋め込みにも適した光ファイバ屈折率センサでフローフロントを検出することは、空気と樹脂の屈折率が大きく違うことから容易に行える。Wangらは[56]、多数の反射型センサによってフローフロントのモニタリングが可能であることを示している。しかしながら、非常に多数のセンサを要するため、分布測定を考えた場合には実用的ではない。また、樹脂含浸プロセスにおいては、勿論、フローフロントのモニタリングは重要であるが、成形プロセス中のプリフォーム自身の変形もまた、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。RTM成形においてプリフォームを金型形状へと賦形する際の変形挙動は、研究されておりPAM-FORMと呼ばれる解析ソフトなどでも見ることができる。しかしながら、含浸中のプリフォームの変形挙動ということになると、測定できるセンサが無かったことなどもあってこれまでに研究が行われていない。さらに、含浸中にプリフォーム自身が変形する可能性は十分に考えられ、特に近年、成形時間が短縮できるため期待されているHP-RTM(High Pressure RTM)に関しては、樹脂を高圧で射出するため、プリフォーム自身の変形の影響を無視できない恐れがある。したがって、樹脂含浸プロセスにおいて、樹脂の含浸状況のモニタリングのみだけでなく、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。

光ファイバ分布センサは、センサ部を持たず、ひずみおよび温度の分布情報を光ファイバセンサの全長で取得することができ、約 $1\mu\text{m}$ の高いひずみ分解能を有していることから、含浸工程のモニタリングに適用できることが期待される。しかしながら、従来のOTDR(Optical Time Domain Reflectometry)では、空間分解能が低いという欠点を有しており[57]、含浸工程のモニタリングには適していなかった。一方で、近年開発されたレイリー散乱型光ファイバ分布センサは、従来の分布センサの特徴はそのままに、さらに $1\text{mm}$ という高い空間分解能を有している。したがって、本センサによる優れたひずみ分布測定は、FRPの健全性モニタリングに適用できることが期待されている[58]。よって、本センサの優れた空間分解能およびひずみ分布測定によって、RTM成形における受信含浸工程で、プリフォームのひずみ分布の変化を測定できると考えられる[59, 60]。さらに、本センサは樹脂含浸工程のみのモニタリングではなく、FRPの運用中にも引き続き、損傷検出センサとして使用することが可能である[41]。そこで、レイリー散乱型光ファイバ分布センサを用いた樹脂含浸工程のモニタリング手法の開発を目的とした。この目的の達成に向けて、樹脂含浸工程において測定されるひずみ分布挙動からフローフロントの検出が可能であるかを明らかにした。まず、本センサを一方向に埋め込んで、フローフロントの一次元モニタリングを行い、フローフロント位置をひずみ分布挙動から検出する方法を確立した。また、この手法によって検出されたフローフロント位置の妥当性を、ビデオカメラによって撮影し、目視の結果と比較することで評価した。そして、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埋め込むことによって、フローフロントの2次元

モニタリングを行った。

## 4.2 レイリー散乱型光ファイバ分布センサ

本研究において使用した、レイリー散乱型光ファイバ分布センサは、ODiSI A-50 (Luna Innovations Inc.)である。本センサシステムの測定スペックは、測定範囲が1～50m、最小空間分解能が1mm、ひずみ測定範囲が $\pm 10000$ 、ひずみ分解能が $1\mu\text{m}$ 、測定サイクルは5Hzまでであり、ひずみ分布および温度分布を取得する事が可能である。

レイリー散乱型光ファイバ分布センサは、光ファイバの導波路の不整合により生じるレイリー散乱の分布を周波数領域反射計(Optical Frequency Domain Reflectometry)によって測定する。そのため、従来から使用されている光ファイバ分布センサである、ブリルアン散乱型光ファイバセンサのようにOTDRではないため、非常に高い通常 $1\mu\text{m}$ という空間分解能で測定が可能である。これは、1mm当たり数千のデータを取得できるということであり、測定された分布の空間スペクトルを高精度で推定するために十分なデータ量である。光ファイバセンサのレイリー散乱光は、光ファイバを構成する石英ガラスの密度の不均一性、コアの直径の不均一性や不純物によって生じる。したがって、各散乱は部位ごとに特有の周波数分布を呈しており、光ファイバセンサごとの固有指紋情報である。

Fig.4.2.1 にレイリー散乱型光ファイバ分布センサによって、測定されたレイリー散乱光強度分布から、ひずみ分布を取得するメカニズムを示す。一ヶ所でのレイリー散乱光の光量のみでは、温度および、ひずみの情報を得ることはできない[61]。一方、レイリー散乱光の強度を分布測定することで、非常に高い空間分解能で測定を行うことができる。測定されたレイリー散乱光強度分布に、解析領域となるゲージ長を設定し、高速フーリエ変換(Fast Fourier Transform: FFT)処理をすることで、解析領域の空間スペクトルが得られる。この空間スペクトルの周波数は、温度やひずみによって周波数シフトを生じ、周波数シフトの量は、初期のスペクトルと現在のスペクトルの相互相関を計算することによって得られる。そして、この周波数シフト量と温度およびひずみが線形関係となることから、任意部分のひずみや温度を取得することが出来る。なお、ゲージ長範囲内の取得されたひずみは、この変換過程によって平均化されたものである。また、ゲージ長や空間分解能といったパラメータは測定後いつでも変更できるパラメータである。よって、ゲージ長のパラメータを小さくすることによって、短周期で変動するデータを出力することも可能である。また、当然のことであるが、空間分解能を小さくすればするほどゲージが移動する距離が縮まるため、解析を行う箇所が増加し、解析に要する時間は増加してしまう。このように、解析時間は解析範囲と空間分解能によって決まり、トレードオフの関係にある。

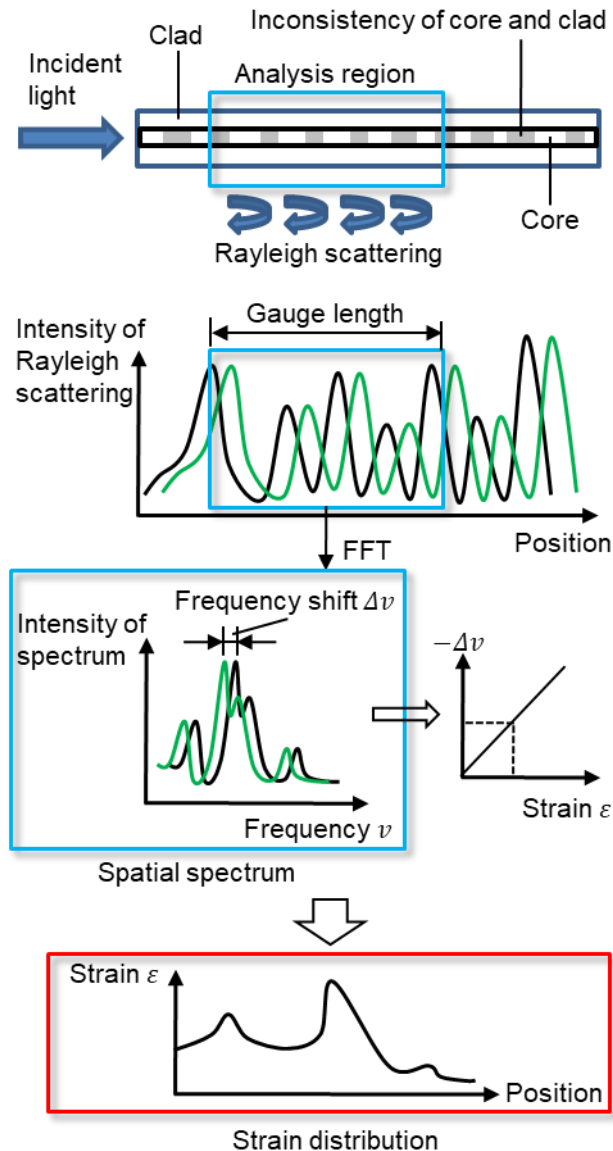


Fig.4.2.1 Rayleigh scattering-based optical fiber sensor and measurement principle of strain distribution.

### 4.3 VaRTM でのフローフロントの 1 次元検出

#### 4.3.1 実験方法

VaRTM プロセスでのフローフロントの 1 次元検出のために、Fig.4.3.1.1 および Fig.4.3.1.2 に示すように、レイリー散乱型光ファイバ分布センサをガラスクロスに、樹脂の含浸方向に対して平行にして埋め込み、ガラスクロスの変形挙動をモニタリングした。さらに、実際の測定を想定した場合は、センサの埋め込み方向に対して、樹脂の流れがいくらかの角度を持っていると考えられるため、Fig.4.3.1.3 に示すように光ファイバセンサが樹脂の流れに対して  $\theta = 30, 45, 60^\circ$  の角度を持つように埋め込んで測定を行った。本研究では、平織りガラスクロス (KS2750, 日東紡(株), 目付幅  $100[\text{g}/\text{m}^2]$ ) を使用し、これを 8 枚積層している。また、光ファイバセンサはガラスクロスの 4 枚目と 5 枚目の間に埋め込まれており、プリフォームの端部付近で下型に接着剤によって固定されている。この実験では、液体樹脂の代わりにシリコンオイル

(KF96-XXXCS, 信越シリコーン, 動粘度 50, 500, 1000 mm<sup>2</sup>/s) を使用しており, 樹脂含浸の様子はビデオカメラで撮影され, フローフロントは目視によっても取得されている. 光ファイバセンサによって取得されたデータの解析条件としては, ゲージ長と空間分解能をそれぞれ 1cm と設定し, データの計測間隔は 1 秒間隔としている. なお, 測定は再現性を確認するために 4 回ずつ行っている.

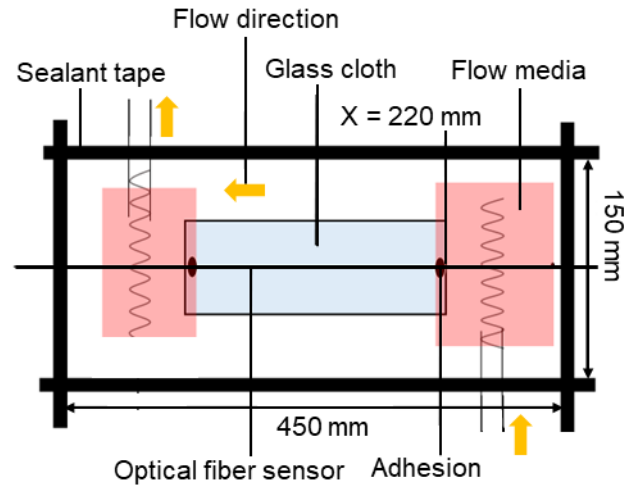


Fig.4.3.1.1 Experimental set-up and location of optical fiber sensor for flow-front monitoring during VaRTM process (X is position in optical fiber sensor [mm]).

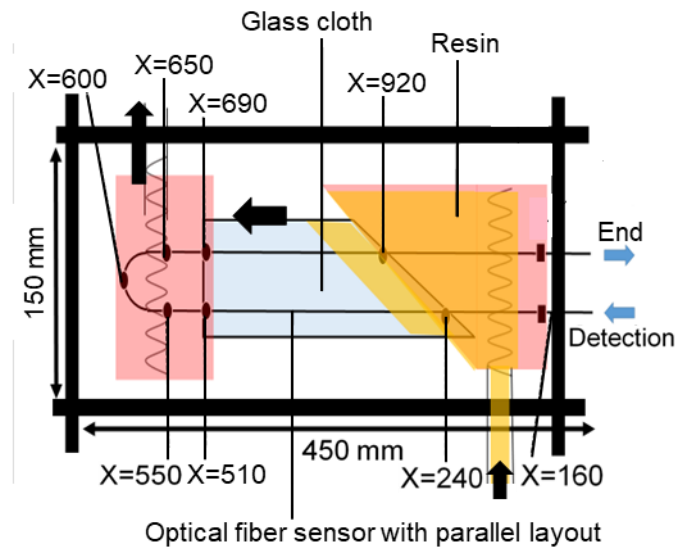


Fig.4.3.1.2 Experimental set-up and location of optical fiber sensor with parallel layout for flow-front monitoring during VaRTM process (X is position in optical fiber sensor [mm]).

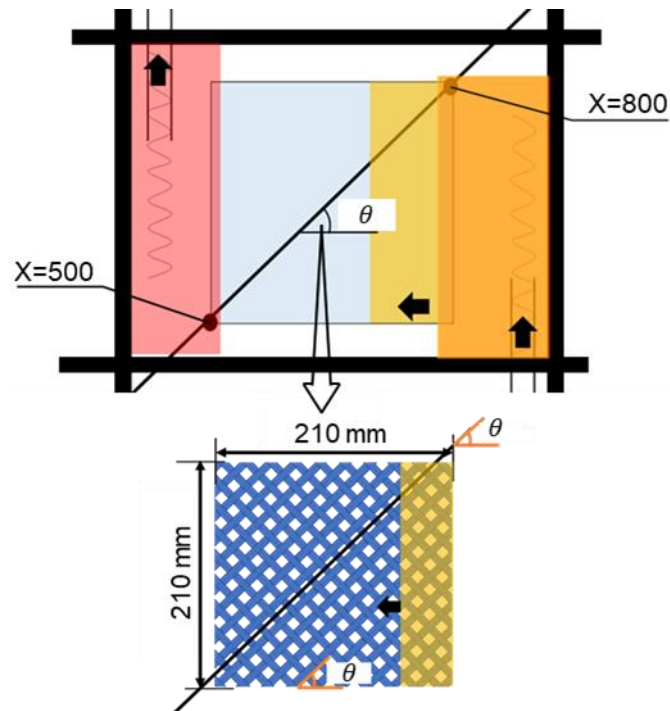


Fig.4.3.1.3 Experimental set-up and location of optical fiber sensor with angle  $\theta$  against the flow direction ( $\theta = 30, 45, 60^\circ$ ).

#### 4.3.2 ひずみ分布の測定結果および考察

Fig.4.3.2.1 に、動粘度が  $50, 500, 1000 \text{ mm}^2/\text{s}$  のシリコンオイルを、含浸させることによって取得されたひずみ分布曲線を示す。また、このときの光ファイバセンサの埋め込み条件は Fig.4.3.1.1 に示すものである。

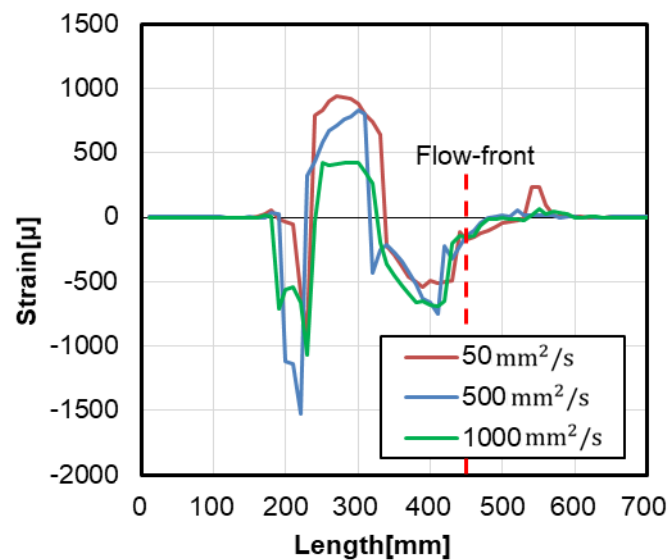


Fig.4.3.2.1 Strain distribution measured by optical fiber sensor using silicon oil viscosity of 50, 500, and  $1000 \text{ mm}^2/\text{s}$  (flow-front position is 45cm).

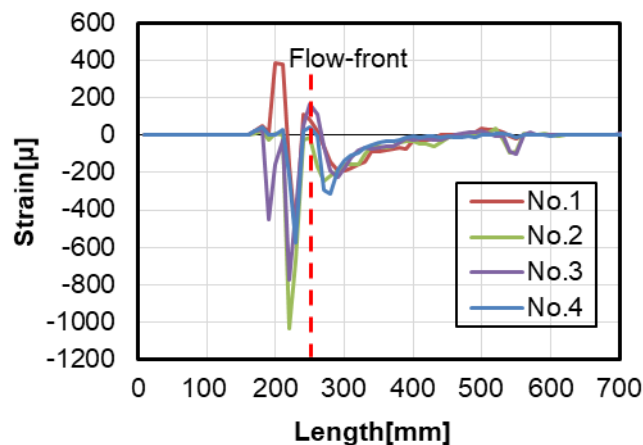
この結果から、含浸液の粘度は、含浸中に測定されるプリフォームのひずみ分布挙動に影響



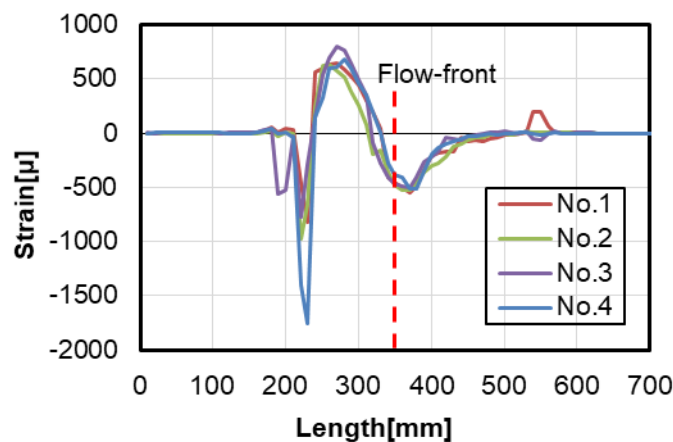
を与えないと考えられる．そのため，本研究では以降の実験で  $50\text{mm}^2/\text{s}$  のシリコンオイルを使用している．

Fig.4.3.2.2 に，動粘度  $50\text{mm}^2/\text{s}$  のシリコンオイルを含浸させ，目視によって観測されたフローフロント位置が  $X=25, 35, 45\text{cm}$  の時のひずみ分布を示す．また，このときの光ファイバセンサの埋め込み条件は Fig.4.3.1.2 に示すものであり，光ファイバセンサの長さが  $240\sim 510\text{mm}$  の区間で測定されたひずみ分布挙動である．これらの図から，樹脂含浸工程において，本光ファイバセンサによって測定されるひずみ分布の再現性が高いことが明らかとなった．

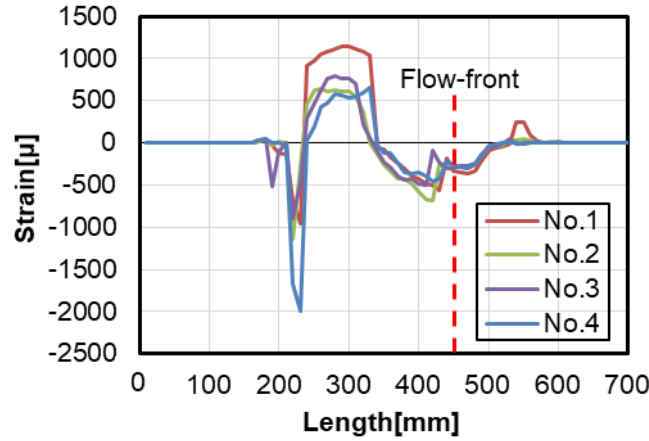
次に，ひずみ分布挙動について注目してみると，まず， $X=22\text{cm}$  の部分で生じている大きなひずみが発生していることが分かる．これは，シリコンオイルがプリフォームに初めて到達したときに生じるものであり，シリコンオイルの含浸によって真空フィルム内外の圧力差が小さくなり，端部で真空引きによって生じていた光ファイバのひずみが減少したためであると考えられる．またこのことから，このひずみは曲げ半径に依存するものであると考えられる．次に，フローフロント位置に注目すると，その近辺で圧縮ひずみが発生し，大きなひずみ変化の傾斜が確認される．よって，このひずみ分布傾斜からフローフロント位置を検出できるのではないかと考えられる．しかしながら，ひずみ分布は複雑であり，フローフロント付近だけでなく，含浸プロセスを通して全体的なひずみ分布の傾向が少しずつ変化する．よって，正確なフローフロント位置を検出するには，このひずみ分布全体の緩やかな変化を取り除き，フローフロント付近で生じるひずみの急激な変化のみを抽出する必要があると考えられる．



(a) Flow-front position is 25 cm.



(b) Flow-front position is 35 cm.



(c) Flow-front position is 45 cm.

Fig.4.3.2.2 Strain distribution of preform measured by optical fiber sensor at various position of flow-front.

#### 4.3.3 フレーム間差分法を用いたフローフロント検出法

4.3.2 の結果から分かるように、フローフロント付近ではひずみの急激な変化が生じており、ひずみ分布の全体的な傾向は複雑であるが、含浸工程において時間とともに緩やかに変化することがわかった。したがって、フレーム間差分法を適用することにより、分布の全体的な傾向を除去し、急激に変化するフローフロント位置でのひずみ変化のみを抽出できると考えた。

注目する時刻 $t_2$ におけるプリフォームのひずみ分布を $\varepsilon(t_2)$ 、その前のある時刻 $t_1$ でのひずみ分布を $\varepsilon(t_1)$ とし、2つのひずみ分布においてフレーム間差分を行うと以下の式(4.3.3.1)が成り立つ。

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon(t_2) - \varepsilon(t_1) \quad (4.3.3.1)$$

測定されるひずみが、プリフォームのひずみ分布を緩やかに変化するバックグラウンドであるひずみ $\varepsilon_B$ と、フローフロントによる急激なひずみ変化であるひずみ $\varepsilon_F$ の合成によるものであると考えると、以下の式(4.3.3.2)が成り立つ。

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon(t_2) - \varepsilon(t_1) \approx \varepsilon_F(t_2) - \varepsilon_F(t_1) \quad (4.3.3.2)$$

したがって、フレーム間差分法を適用することによって、Fig.4.3.3.1 に示すように、注目する時刻 $t_2$ におけるフローフロントの位置が $\Delta\varepsilon$ の負のピークとして得られると考えられる。

Fig.4.3.3.2 に、光ファイバセンサによって測定された 60, 300, 600 秒のひずみ分布に、フレーム間差分法を適用した際の分布を示す。また、このときの光ファイバセンサの埋め込み条件は Fig.4.3.1.2 に示されるものであり、シリコンオイルの粘度は  $50 \text{ mm}^2/\text{s}$  であり、解析条件は 4.3.2 で示したものと同様である。この結果から、フローフロントの進行に伴って、フレーム間差分法によって得られたピークの位置が進んでいるように見える。そこで、Fig.4.3.3.3 に目視によって検出されたフローフロント位置と共に、本センサによって取得されたフローフロント位置を示す。この結果より、センサにより測定されたフローフロント位置と目視によって取得されたフローフロント位置がよく一致していることが明らかとなった。

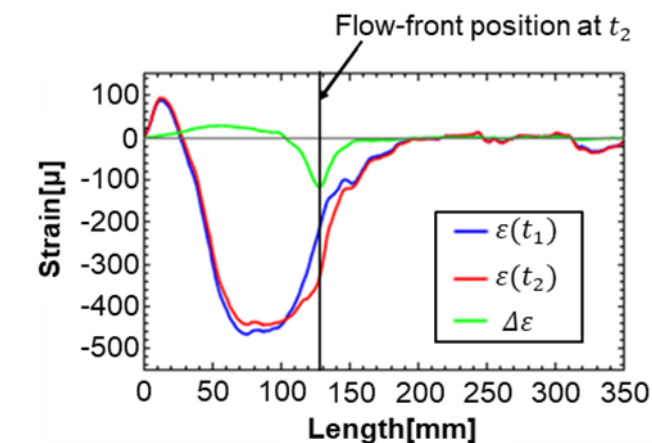


Fig.4.3.3.1 Strain distribution at time  $t_1$  and  $t_2$  with the difference curve between them.

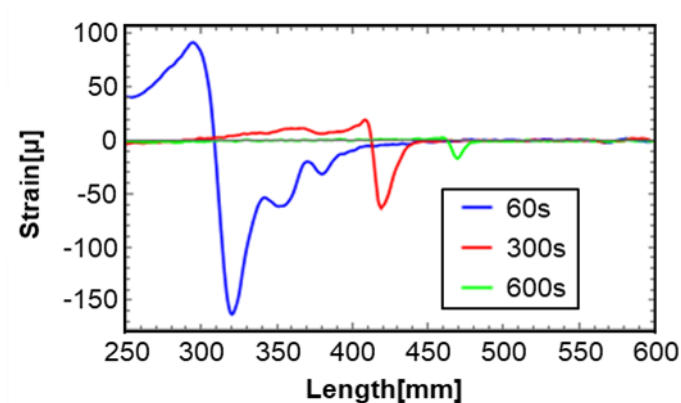


Fig.4.3.3.2 Interframe difference curves at 60, 300, and 600 seconds after starting resin impregnation.

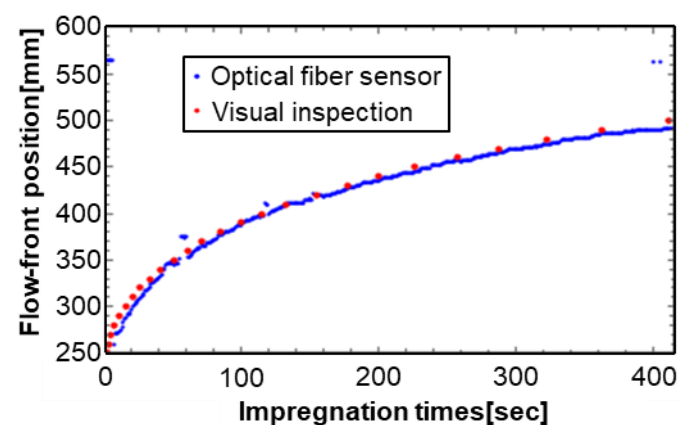


Fig.4.3.3.3 Flow-front positions detected by the sensor and visual observation.

#### 4.3.4 流れの方向に対してセンサの傾きがある場合のフローフロント検出

実際の測定では、光ファイバセンサの方向に対して流れが平行である場合よりも、ある角度を持って流れる場合の方が多いと考えられる。この、角度が大きい場合、相対的にファイバに沿ったひずみ成分が小さくなることから、フローフロントの検出が困難になると考えられる。

したがって、Fig.4.3.1.3 に示すように光ファイバセンサに流れに対しての角度を、 $\theta=30, 45, 60^\circ$  と持たせて測定を行った。その結果を Fig.4.3.4.1 に目視によって測定されたフローフロント位置と共に示す。この結果から、センサの傾斜角が  $30^\circ$  および  $45^\circ$  のときは、目視の結果とよく一致するフローフロントを検出することが出来ることが明らかとなった。しかしながら、 $60^\circ$  については、50～150 秒の間だけフローフロントを示すピークを検出でき、それ以外の区間はノイズによってピークが消えてしまったため検出が出来ていない。この結果から、本センサによるフローフロントの検出には、流れに対しての光ファイバセンサの傾きの制限があることが明らかになった。

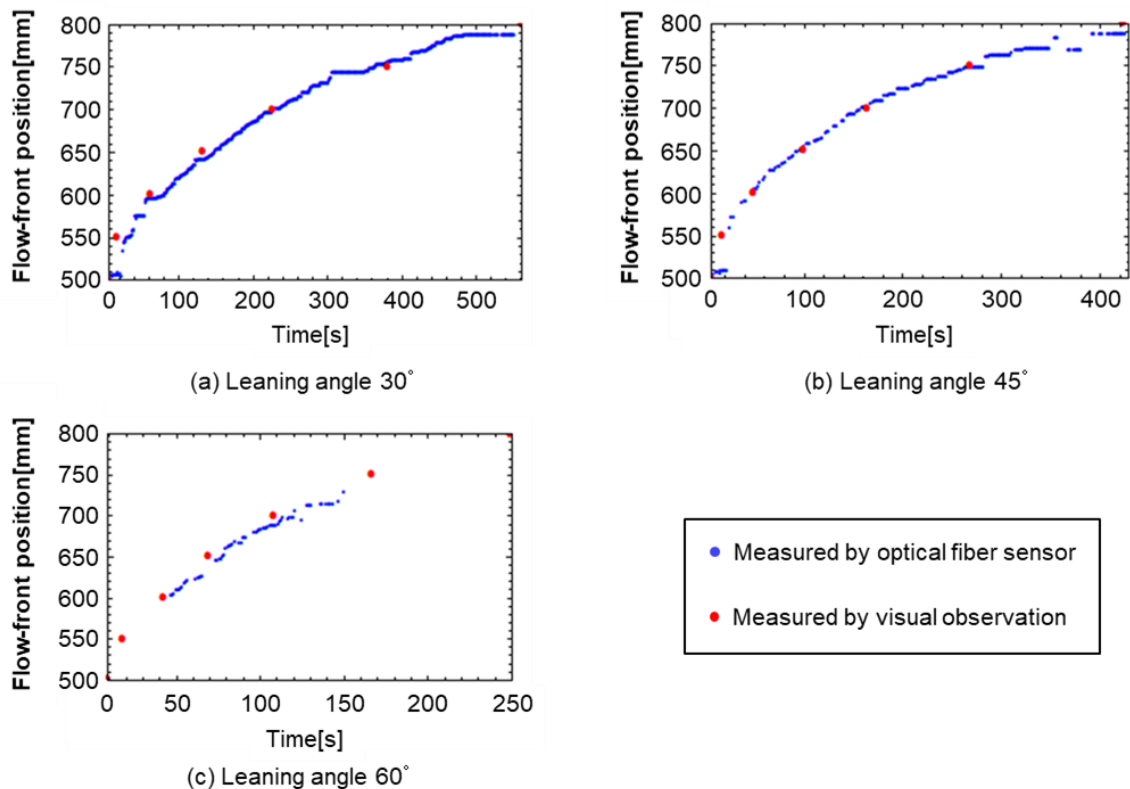


Fig.4.3.4.1 Relationships between flow-front positions measured by optical fiber sensor with leaning angle  $\theta$  and visual observation.

## 4.4 VaRTM でのフローフロントの 2 次元検出

### 4.4.1 実験方法

Fig.4.4.1.1 に示すように、レイリー散乱型光ファイバ分布センサを、フローフロントが 2 次元的に検出できるように、格子状に配置して  $25 \times 25 \text{cm}$  のガラスクロスに埋め込んだ。ガラスクロスは 10 枚積層しており、その 4 枚目と 5 枚目の間に光ファイバセンサを 1cm 間隔でガラスクロスに縫い込んで埋め込みを行っている。また、一本の光ファイバセンサだけを使用しており、含浸方向に対して  $45^\circ$  となるようにして格子状に配置している。粘度が  $50 \text{mm}^2/\text{s}$  のシリコンオイルを含浸させ、光ファイバセンサによって含浸完了まで測定を行い、また、カメラ撮影によって記録することでフローフロントの目視観察も行っている。また、図中に示している X は、光ファイバセンサの長さに沿った測定位置を表している。同様の条件で、測定を 3 回繰り返し行い再現性の確認も行っている。なお、解析条件はゲージ長が 1cm、空間分解能は 1mm

に設定しており，計測間隔は2秒であった．

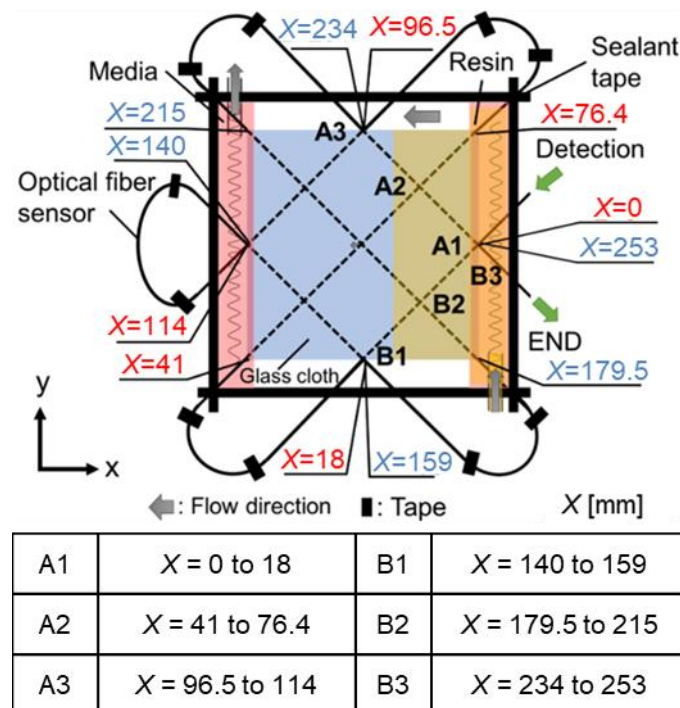


Fig.4.4.1.1 Experimental set-up for two-dimensional flow-front monitoring by embedded optical fiber sensor with grid layout.

#### 4.4.2 結果および考察

Fig.4.4.2.1 に格子状に配置された光ファイバセンサによって測定されたフローフロント位置と，目視観察によって記録されたフローフロント位置の成形時間との関係を示す．なお，この図に示されるフローフロント位置は，すべて光ファイバ長に沿った位置に変換したものである．図より，含浸が開始され初めに樹脂が到達する部分に位置するセンサ区間 A1, A2, B2, B3 の測定部においてフローフロントの検出が開始される．そして含浸が進み，試験片中央部付近ではセンサ区間 A1 と B3 の端部にフローフロントが到達するため，それ以降は代わりにセンサ区間 A3 と B1 によってフローフロントの検出が引き続き行われている．また，センサ区間 A2 および B2 は，検出区間の全体にまたがる区間であるため，樹脂充填開始から終了まで継続的にフローフロントの検出が行われている．そして，この結果より，全区間で光ファイバセンサによって検出されたフローフロント位置は，目視観察による結果と互いによく一致しており，複数個所のフローフロント位置を，単一のセンサを格子状に埋め込むことによって測定できると考えられる．

Fig.4.4.2.2 に光ファイバセンサによって取得されたフローフロント位置の情報から，時間ごとの等高線プロットを作成し，目視によって観察された 200 秒におけるフローフロントの位置と形状と共に示す．図中に示されている格子形状の点線は光ファイバセンサのレイアウトを示しており，赤い曲線はビデオカメラの記録から目視観察によって得られたフローフロントの位置および形状である．この結果から，単一のレイリー散乱型光ファイバ分布センサを格子状に埋め込むことによって，2 次元のフローフロントのモニタリングが精度よく行える可能性が実証された．

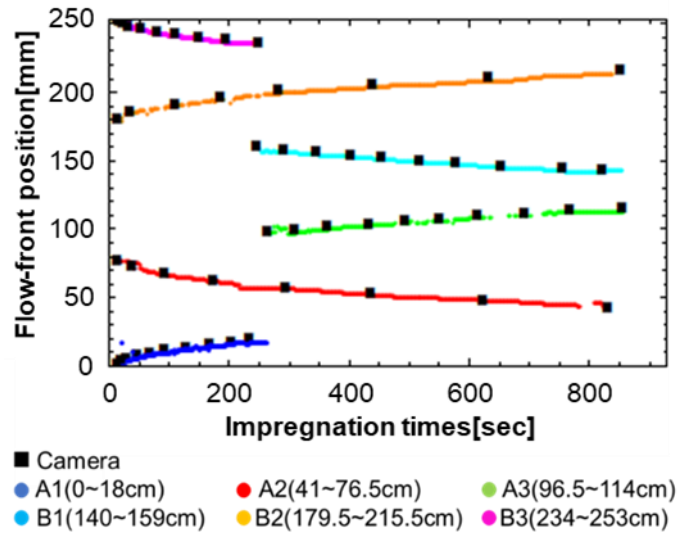


Fig. 4.4.2.1 Flow-front positions along the optical fiber sensor length detected by optical fiber sensor and visual observation.

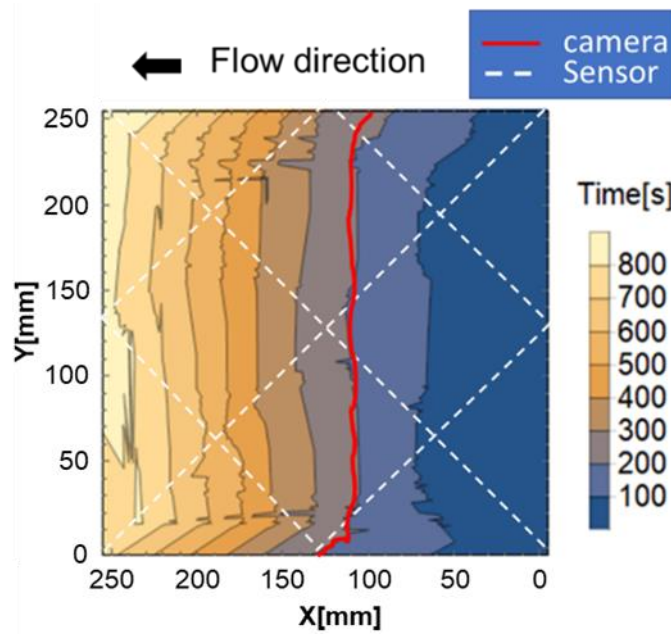


Fig. 4.4.2.2 Flow-front shapes at arbitrary time measured by optical fiber sensor and visual observation by video camera.

## 4.5 結言

第4章では、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構築を目指した。そして、フレーム間差分法を用いて、測定されたひずみ分布からフローフロント位置を推定するアルゴリズムを提案した。その結果として以下の知見が得られた。まず、レイリー散乱型光ファイバ分布センサによって、樹脂含浸プロセス中のプリフォームのひずみ分布を高い再現性で測定できることが明らかとなった。次に、フローフロント位置では大きなひずみ変化が生じ、フレーム間差分法を適用することによって、測定されたひずみ分布から正確にフロ

ーフロント位置を推定できることが明らかとなった．一方で，この手法によるフローフロント検出には，光ファイバセンサの樹脂含浸方向に対する傾斜角度に制限があることも明らかとなった．最後に，単一のレイリー散乱型光ファイバ分布センサを格子形状でプリフォームに埋め込むことによって，フローフロントを2次元的に検出可能であることが確認された．

## 謝辞

本研究は，科研費(20K04182)の助成を受けたものである．



## 第5章 フレネル反射型とレイリー散乱型センサを 組み合わせた多機能センシングシステム

### 5.1 緒言

近年の FRP の適用範囲の拡大により、現在では大型・複雑形状の航空機や自動車といった FRP 製品もよく作られている。これらの製品においては特に、FRP 成形のプロセスを監視することが、製造効率を向上させる、コストを低減させる、製品の品質と信頼性を保証するための重要な技術である。そのため、これまでも紹介してきたように FRP の内部状態をリアルタイムでモニタリングし、成形パラメータの最適化を行う研究が数多く行われている[4, 5]。成形パラメータの最適化を行うには、成形中の FRP の状態を詳細にモニタリングする必要があり、光ファイバセンサを用いたその場モニタリング技術は、埋め込み性の高さや測定精度の高さなど数多くの利点を有しており有用なセンサである。この光ファイバセンサの特性を生かして、製造時に FRP 内部に埋め込まれた光ファイバセンサによって、成形中の FRP 内部の情報を取得し、成形後は運用中の FRP の健全性や損傷を継続的にモニタリングする、ライフサイクルモニタリング技術に関しての研究も行われている[41]。そこで、我々もこの光ファイバセンサを用いたライフサイクルモニタリング技術に注目した。

これまで、第2章および第3章に示した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 FRP の高精度な硬化度測定技術、第4章に示したレイリー散乱型光ファイバ分布センサを用いた樹脂含浸工程におけるフローフロントモニタリング技術の開発を行ってきた。我々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おり、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次元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ている。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[59]、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[58]。そこで、FRP のライフサイクルモニタリングに適用可能な、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目指した。本研究では、樹脂含浸プロセスではレイリー散乱型センサによって、フローフロントを2次元的にモニタリングし、硬化プロセスではレイリーセンサによって取得される温度分布とフレネルセンサによって取得される屈折率変化から硬化度のモニタリングが行えるシステムの構築を目指した。まず、両光ファイバセンサによって取得される情報から、フローフロントおよび硬化度をモニタリング出来るプログラムの開発を行った。そして、VaRTM 成形による板材形状の GFRP プレートに、実際に両光ファイバセンサを埋め込むことで、含浸プロセスから樹脂の硬化プロセスまでのモニタリングを行った。

### 5.2 多機能センサシステムの構成

Fig.5.2.1 に本研究で構成した多機能センサの模式図を示す。基本的なセンサシステムの構成はこれまで第2章および第4章で示してきたものと同じである。フレネル反射型光ファイバセンサは SLD 光源に接続され、フレネル反射光強度を Photo Detector (PD)によって検出する。なお、用いた光源および受光器は第2章に示すものと同じである。レイリー散乱型光ファイバ分布センサに関しても第4章で示したのと同じセンサシステムであり、Luna Technologies Co.,



Ltd.の ODiSI A-50 である。本多機能センサシステムによって、フローフロント，温度，および硬化度を測定するためのプログラムは Mathematica™ (Wolfram Research Co., Ltd.)によって作成された。

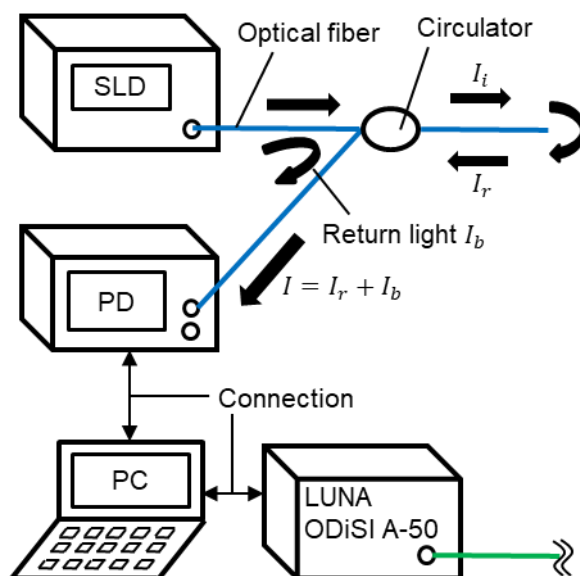


Fig.5.2.1 Schematic view of multifunctional sensing system by Fresnel's reflection and Rayleigh-scattering based optical fiber sensors.

### 5.3 VaRTM による GFRP の樹脂含浸および硬化プロセスのモニタリング

#### 5.3.1 実験方法

Fig.5.3.1.1 に示すようにフレネル反射型光ファイバセンサおよび、レイリー散乱型光ファイバ分布センサをガラスクロスに埋め込み，VaRTM 成形における樹脂含浸および硬化プロセスのモニタリングを行った。ガラスクロスは平織りガラスクロス(KS2750，日東紡(株))，目付  $100\text{g/m}^2$ ， $250 \times 250\text{mm}$  を 10 枚積層しており，両光ファイバセンサはともに 5 枚目と 6 枚目の間に埋め込まれている。なお，レイリー散乱型光ファイバ分布センサに関しては，1 本のレイリー散乱型センサをガラスクロスに  $1\text{cm}$  の間隔で織り込んで，図中の点線で示されるように格子状にして埋め込んでいる。この際，レイリーセンサによって検出されるデータはファイバ長に沿っており，ファイバの根元側の A から B，C，D，E，F と順に測定されている。実験に使用した母材樹脂は，主剤が ARALDITE™ LY5052 で，硬化剤 ARADUR™ 5052CH (Huntsman Advanced Materials Europe BVBA)のエポキシ樹脂であり，これを混合比 100:38 で混ぜたものである。硬化温度条件は，シート状のヒーターによって  $80^\circ\text{C}$  まで 1 時間で加熱し，その後  $80^\circ\text{C}$  を 1 時間 30 分保持した。

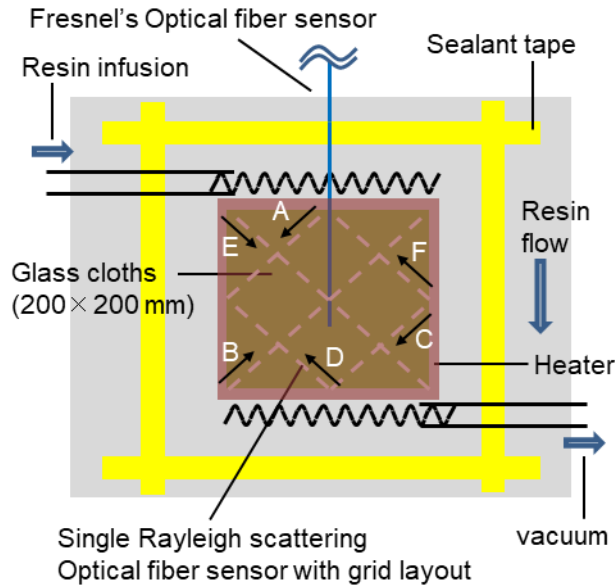


Fig.5.3.1.1 Experimental set-up for monitoring of resin impregnation and cure process by a multifunctional sensing system.

### 5.3.2 実験結果および考察

Fig.5.3.2.1 にレイリー散乱型光ファイバ分布センサによって測定されたフローフロント位置と目視観察によって取得されたフローフロント位置とともに示す。なお、図中にはフローフロントを測定した光ファイバセンサの位置も示している。この結果から、全測定区間において目視によって取得されたフローフロント位置および、レイリー散乱型光ファイバセンサによって測定されたフローフロント位置は、これまでの第4章の測定結果と同様によく一致することが明らかとなった。

今回の実験結果では、第4章の Fig. 4.4.2.1 に示す結果に比較して、フローフロントの測定が行えていない点が増加している。これは、樹脂粘度が高く含浸速度が遅いことによって、設定しているフレーム間隔中に起きる、ひずみ変化が小さいことに起因していると考えられる。含浸速度が遅くプリフォームのひずみ変化が小さい場合、フレーム間差分法によって得られるフローフロント位置を示すピークが小さくなりノイズに埋もれる。そのため、フローフロントを示すピークの検出が困難になってしまう。第4章では実験時間を短縮するために粘度  $50\text{mm}^2/\text{s}$  のシリコンオイルが使用されていたが、第5章において使用しているエポキシ樹脂の粘度は  $1000\sim 1500\text{cps}$  であり、含浸速度は第4章の Fig.4.4.1.1 に示す実験より遅かった。一方、フレーム間隔を広げることによって、検出されるピークを大きくすることが可能である。しかし、計算の過程でループ処理が増加し、処理数が多くなることから大幅にフローフロント出力までの時間が増加する。このように、精度と計算時間にはトレードオフの可能性がある。Fig.5.3.2.2 にビデオカメラで撮影された、樹脂含浸開始から  $570\text{sec}$  の時のフローフロント形状を示す。図から分かるように今回の実験では、フローフロントがファイバの繊維方向に対して角度を有している場合も多かった。特に、図中に示す白の点線で囲まれている範囲に関しては、境界条件によって樹脂の含浸が遅くなっている。そのため、図 5.3.2.1 の(c)および(d)において、 $800\sim 1000$  秒付近のフローフロントの検出が行えていない。第4章の 4.3.4 で示したように、本センサによるフローフロントの検出には、流れに対しての光ファイバセンサの傾きの制限があることが明らかになっている。このことから、フローフロントの検出が困難になっている点が多くあると考えられる。

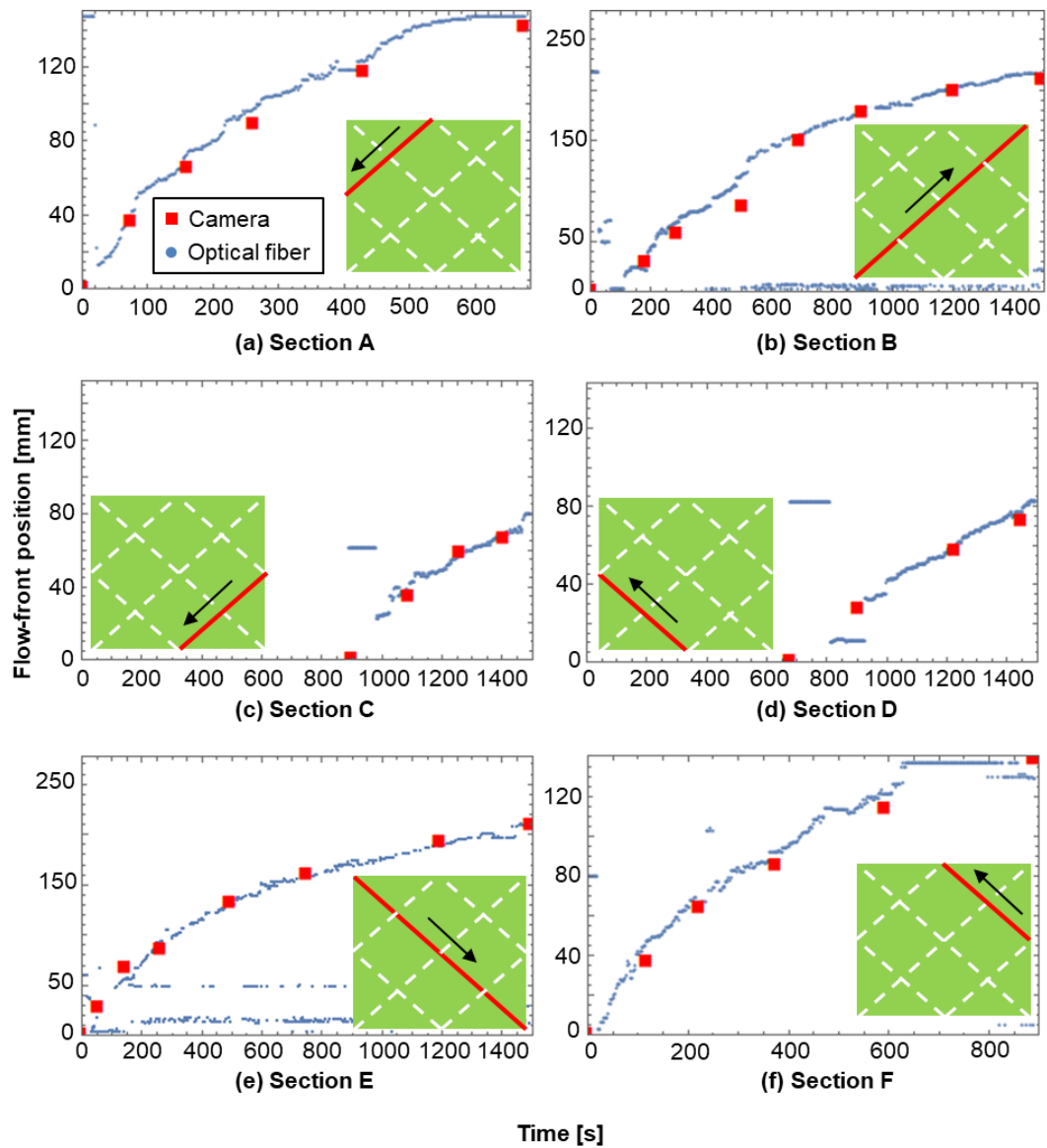


Fig.5.3.2.1 Flow-front positions along the optical fiber sensor length detected by the Rayleigh-type optical fiber sensor and visual observation.

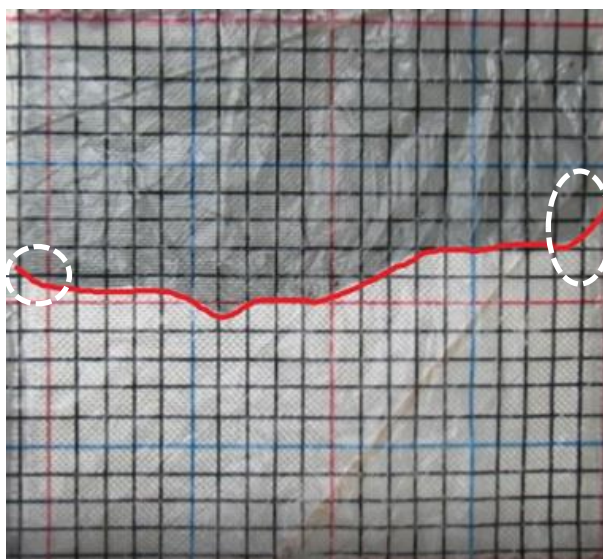


Fig.5.3.2.2 Flow-front shape observed by video camera ( $T=570$  sec).

Fig.5.3.2.3にレイリーセンサとプリフォームに埋め込まれている熱電対によって測定された、硬化過程中の温度変化を示す。レイリーセンサによって取得されている温度は、ベースラインを測定した点からの変化量であるため、その時点で熱電対によって測定された温度を基に変換している。図から、レイリーセンサで取得された温度データには、600 秒付近から乱れが生じている。これは、今回の実験において硬化過程中に空気が入ったことに起因している。レイリーセンサのベースラインは、樹脂を含浸させる前の真空保持状態で取得しているため、真空が破れて大量の空気が流入したことで、外乱を生じている。次に、最終到達温度に注目すると、熱電対は  $74^{\circ}\text{C}$  程度、レイリーセンサは  $82^{\circ}\text{C}$  程度と  $8^{\circ}\text{C}$  程の差が生じている。今回は、外乱の影響もあったため、最終的な温度に 10% ほどの差が生じてしまったものと思われる。しかしながら、センサの感度が高いため測定環境に気を付ける必要があるものの、レイリーセンサを樹脂含浸工程から継続的にしようとして、硬化過程中の温度変化を取得することは十分に可能であると考えられる。

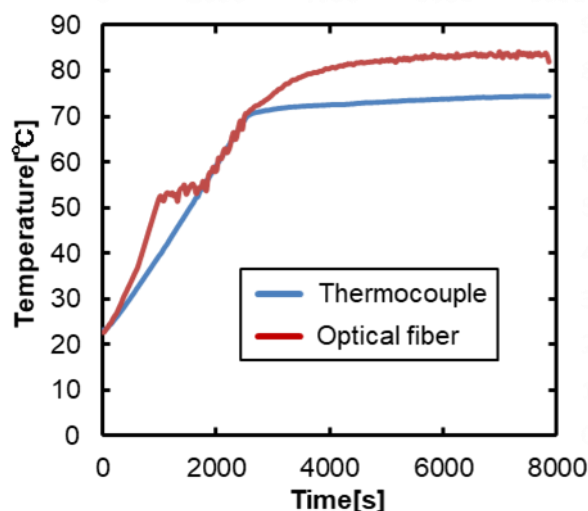


Fig.5.3.2.3 Temperature change during curing process measured by the Rayleigh-type optical fiber sensor and the thermocouple.

Fig5.3.2.4 に熱電対によって得られた温度変化を基に求められた硬化度曲線と、レイリーセンサによって得られた温度変化を基に求められた硬化度曲線を、それぞれによって取得された温度を基に求めたシミュレーション結果と共に示す。この結果から、シミュレーション結果と測定値はよく一致することが明らかとなった。空気が入った影響により、樹脂内のボイドからの反射光を測定したことで、1000 秒および 2000 秒付近でエラーを生じているが、それ以外では精度良く硬化度の測定を行うことが出来ている。最終硬化度に注目すると、熱電対の温度情報を基にした硬化度曲線が 0.924 であり、レイリーセンサによる温度情報を基にした硬化度曲線が 0.958 であり、その誤差は 4%程度であった。このことから、レイリーセンサとフレネルセンサによって、高精度で硬化度の測定を行えることが明らかとなった。

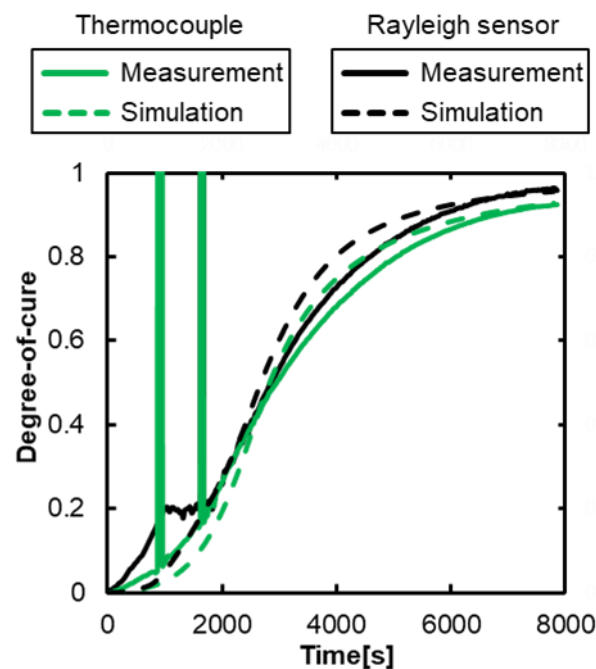


Fig.5.3.2.4 DOC curves measured by Fresnel's type optical fiber sensor (Temperature from thermocouple and Rayleigh sensor).

## 5.4 結言

第 5 章では、RTM 成形による FRP のライフサイクルモニタリングに適用可能な、多機能センシングシステムを、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によって構築することを目指した。その結果、本多機能センシングシステムによって樹脂含浸工程ではフローフロントをモニタリングし、その後継続して硬化工程における樹脂硬化度を精度良く測定できることが明らかとなった。また、レイリーセンサは感度が高く、微小なひずみや温度変化を取得することが可能である一方で、感度の高さゆえに外乱の影響も受けやすい。そのため、安定かつ高精度の測定を行うならば、測定環境や取り扱いに注意が必要であることも明らかとなった。

## 第6章 結論

本研究では、近年高い注目を集め様々な製品への適用が進んでいる FRP について、その成形工程で生じる種々の問題を解決するために、FRP の成形プロセスを光ファイバセンサによってその場モニタリングする手法に焦点を当てた。そして、FRP のライフサイクルをモニタリング可能な多機能センサシステムの開発を目指した。その結果以下の知見が得られた。

- 1) フレネル反射型光ファイバセンサの曲げによる損失特性が、曲げ実験によって明らかにされ、近年開発された高屈曲光ファイバセンサは標準光ファイバセンサと比較して曲げ損失が 1/10 以下であった。
- 2) フレネル反射型光ファイバセンサの硬化度測定の精度に、曲げ損失が与える影響の調査を行い、曲げ損失量は硬化度の測定精度に影響を与えないことが明らかにされた。
- 3) VaRTM 法による湾曲形状 GFRP の硬化度測定によって、硬化度測定中に生じる光損失量の変化は硬化度の測定精度に大きな影響を与えることが明らかとなった。また、この損失量の変化は、樹脂含浸プロセスで生じ、曲げ部を有するプリフォームに埋め込まれた光ファイバセンサの曲げ曲率半径や、曲げひずみエネルギーを解消するように移動することによる埋め込み状態の変化によるものであることが明らかとなった。
- 4) VaRTM 法の硬化度測定に適用した際に、硬化度の測定精度が低下した場合の補正法を提案した。その結果、この補正方法によって、硬化度曲線に大きなエラーが生じた場合でも補正できる可能性が示された。
- 5) VaRTM 法での高精度の硬化度測定には、埋め込みによる損失が小さく、安定した経路で光ファイバセンサを埋め込むことが効果的であることが明らかとなった。また、この最適な埋め込み経路を求めるシミュレーションの開発に向けて、光損失予測法を提案し、光損失シミュレーションを開発した。その結果、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曲げ損失を精度良く推定することが可能となった。
- 6) レイリー散乱型光ファイバセンサによって、樹脂含浸工程におけるプリフォームのひずみ分布を測定した結果、高い再現性を持ってプリフォームのひずみ分布を測定することが明らかとなった。
- 7) レイリー散乱型光ファイバセンサによって測定されたひずみ分布に、フレーム間差分法を適用することによって、フローフロントの位置を正確に検出できることが明らかにされた。一方で、このフローフロント検出手法には、光ファイバセンサの樹脂含浸方向に対する傾斜角に限界があることが明らかとなった。
- 8) レイリー散乱型光ファイバセンサをプリフォームに格子状に埋め込むことによって、フローフロントを 2 次元的に測定できることが明らかとなった。
- 9) 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サシステムによって、樹脂含浸工程におけるフローフロントをモニタリングし、その後継続的に使用して樹脂硬化工程における硬化度を精度良く測定することが可能となった。

## 謝辞

本研究を行うに当たって、ご指導、御鞭撻いただいた高坂達郎准教授にこの場をお借りして心より感謝致します。並びに、査読を担当していただいた、楠川量啓教授、川原村敏幸教授、松本泰典准教授、JAXA の武田真一様に心より感謝致し、お礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] 福田博, 邊吾一, “複合材料の力学序説”, 古今書院, 1989, ISBN978-4-7722-1373-8 C3050.
- [2] 福田博, “複合材料力学入門 第一章 複合材料力学のための弾性学, 材料力学の基礎”, 日本複合材料学会誌, 22, 1, (1996), 19-25.
- [3] P. Olivier, and M. Cavarero, “Comparison between longitudinal tensile characteristics of thin and thick thermoset composite laminates: influence of curing conditions”, *Computers & Structures*, 76, 1-3, (2000), 125-137.
- [4] 高坂達郎, “複合材料成形技術の最前線 3. 近年の FRP 成形モニタリング技術とその応用”, *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, 67, 8, (2018), 819-825.
- [5] T. Fukuda, and T. Kosaka, “Cure and Health Monitoring”, *Encyclopedia of Smart Materials*, (2002), Wiley, 291-318.
- [6] S. Konstantopoulos, E. Fauster, and R. Schledjewski, “Monitoring the production of FRP composites: A review of in-line sensing methods”, *eEPRESS Polymer Letters*, 8, 11, (2014), 823-840.
- [7] J. Mijovic, J.M. Kenny, A. Maffezzoli, A. Trivisano, F. Bellucci, and L. Nicolais, “The principles of dielectric measurements for in situ monitoring of composite processing”, *Composite Science and Technology*, 49, 3, (1993), 227-290.
- [8] D.E. Kranbuehl, P. Kingsley, S. Hart, G. Hasko, B. Dexter and A.C. Loos, “In situ sensor monitoring and intelligent control of the resin transfer molding process”, *Polymer Composites*, 15, 4, (1994), 299-305.
- [9] I. Fraga, S. Montserrat, and J. M. Hutchinson, “Virtification during the Isothermal Cure of Thermosets: Comparison of Theoretical Simulations with Temperature-Modulated DSC and Dielectric Analysis”, *Macromolecular Chemistry and Physics*, 209, 19, (2008), 2003-2011.
- [10] J. S. Kim, and D. G. Lee, “Measurement of the Degree of Cure of Carbon Fiber Epoxy Composite Materials”, *Journal of Composite Materials*, 30, 13, (1996), 1436-1457.
- [11] D.G. Lee, and H. G. Kim, “Non-isothermal in situ dielectric cure monitoring for thermosetting matrix composites”, *Journal of Composite Materials*, 38, 12, (2004), 977-993.
- [12] T. Inada, and A. Todoroki, “Cure monitoring of CFRP using electric capacitance change with applied AC frequency”, *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, 52, 8, (2003), 922-926.
- [13] M. Demleitner, S. A. S. Vazquez, D. Raps, G. Bakis, T. Pflöck, A. Chaloupka, S. Schmörlzer, and V. Altstädt, “Dielectric analysis monitoring of thermoset curing with ionic liquids: From modeling to the prediction in the resin transfer molding process”, *Polymer Composites*, 40, 12, (2019), 4500-4509.
- [14] M. C. Hegg, A. Ogale, A. Mescher, A.V. Mamishev, and B. Minaie, “Remote monitoring of resin transfer molding processes by distributed dielectric sensors”, *Journal of Composite Materials*, 39, 17, (2005)
- [15] B. Yenilmez, and E. M. Sozer, “A grid of dielectric sensors to monitor mold filling and resin cure in resin transfer molding” *Composites Part A*, 40, 4, (2009), 476-489.
- [16] S. Kobayashi, R. Matsuzaki, and A. Todoroki, “Multipoint cure monitoring of CFRP laminates using flexible matrix sensor”, *Transactions of the JSME: A*, 74, 744, (2008), 1104-1110.
- [17] M. K. Moghaddam, A. Breede, A. Chaloupka, A. Bödecker, C. Habben, E. M. Meyer, C. Brauner, and W. Lang, “Design, fabrication and embedding of microscale interdigital sensors for real-time cure monitoring during composite manufacturing”, *Sensors and Actuators A*, 243, (2016), 123-133.
- [18] A. Dominasukas, D. Heider, and J. W. Gillespie Jr., “Electric time-domain reflectometry sensor for online flow sensing in liquid composite molding processing”, *Composites Part A*, 34, 1, (2003), 67-74.
- [19] K. Urabe, T. Okabe, and H. Tsuda, “Monitoring of resin flow and cure with an electromagnetic



- wave transmission line using carbon fiber as conductive elements”, *Composites Science and Technology*, 62, 6, (2002), 791-797.
- [20] G. Pandey, H. Deffor, E. T. Thostenson, and D. Heider, “Smart tooling with integrated time domain reflectometry sensing line for non-invasive flow and cure monitoring during composites manufacturing”, *Composites Part A*, 47, (2013), 102-108.
  - [21] C. Buchmann, J. Filsinger, and E. Ladstätter, “Investigation of electrical time domain reflectometry for infusion and cure monitoring in combination with electrically conductive fibers and tooling materials”, *Composites Part B*, 94, (2016), 389-398.
  - [22] B. M. Lee, K. J. Loh, and F. Lanza di Scalea, “Distributed Strain Sensing Using Electrical Time Domain Reflectometry with Nanocomposites”, *IEEE Sensors Journal*, 18, 23, (2018), 9515-9525.
  - [23] P. A. Fomitchov, Y. K. Kim, A. K. Kromine, and S. Krishnaswamy, “Laser ultrasonic array system for real-time cure monitoring of polymer-matrix composites”, *Journal of Composite Materials*, 36, 15, (2002), 1889-1901.
  - [24] S. Pavlopoulou, C. Soutis, and W.J. Staszewski, “Cure monitoring through time-frequency analysis of guided ultrasonic waves”, *Plastics, Rubber and Composites*, 41, 4-5, (2012), 180-186.
  - [25] A. Wada, C. H. Pak, E. Kitagawa, H. Ito, and Y. Sasaki, “Ultrasonic cure monitoring of GFRP laminates”, *Advanced Materials Research*, 1110, (2015), 82-87.
  - [26] E. Schmachtenberg, J. Schulte zer Heide, and J. Töpker, “Application of ultrasonics for the process control of Resin Transfer Molding (RTM)” *Polymer Testing*, 24, 3, (2005), 330-338.
  - [27] N. Takeda, Y. Okabe, J. Kuwahara, S. Kojima, and T. Ogisu, “Development of smart composite structures with small-diameter fiber Bragg grating sensors for damage detection: Quantitative evaluation of delamination length in CFRP laminates using Lamb wave sensing”, *Composites Science and Technology*, 65, 15-16, (2005), 2575-2587.
  - [28] A. K. Nair, V. R. Machavarama, R. S. Mahendran, S. D. Pandita, C. Paget, C. Barrow, and G. F. Fernando, “Process monitoring of fibre reinforced composites using a multi-measurand fibre-optic sensor”, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 212, (2015), 93-106.
  - [29] L. Wang, S. Malik, D. Harris, and G. F. Fernando, “Self-sensing composites: in-situ cure monitoring”, *Proceedings of SPIE*, 6423, 1, (2007)
  - [30] C. Lekakou, S. Cook, Y. Deng, T. W. Ang, and G. T. Reed, “Optical fibre sensor for monitoring flow and resin curing in composites manufacturing”, *Composites Part A*, 37, 6, (2006), 934-938.
  - [31] M. A. Fromowitz, and K. Lam, “The Optical Properties of Curing Epoxies and Applications to the Fiber-optic Epoxy Cure Sensor”, *Sensors and Actuators*, 21, (1990), 1107-1110.
  - [32] Y. M. Liu, C. Ganesh, J. P. H. Steele, and J. E. Jones, “Fiber Optic Sensor Development for Real-Time In-Situ Epoxy Cure Monitoring”, *Journal of Composite Materials*, 31, 1, (1997), 87-102.
  - [33] A. L. Kalamkarov, S. B. Fitzgerald, and D. O. MacDonald, “The use of Fabry Perot fiber optic sensors to monitor residual strains during pultrusion of FRP composites”, *Composites Part B*, 30, 2, (1999), 167-175.
  - [34] Y. Jiang, and C. Tang, “A high-resolution technique for strain measurement using an extrinsic Fabry-Perot interferometer (EFPI) and a compensating EFPI”, *Measurement Science and Technology*, 19, 6, (2008), 1-5.
  - [35] X. Yu, N. Song, and J. Song, “A novel method for simultaneous measurement of temperature and strain based on EFPI/FBG”, *Optics Communications*, 459, (2020), 1-6.
  - [36] PhoSC 光ファイバセンシング振興協会, “コラム C09\_FBG の製造方法”, <http://www.phosc.jp/cms/article/000040.html>, (2015).
  - [37] Y. J. Rao, “In-fibre Bragg grating sensors”, *Measurement Science and Technology*, 8, 4, (1997), 355-375.
  - [38] G. Luyckx, E. Voet, N. Lammens, and J. Degrieck, “Strain measurements of composite laminates



- with embedded fibre Bragg gratings: Criticism and opportunities for research”, *Sensors*, 11, 1, (2011), 384-408.
- [39] S. Minakuchi, “In situ characterization of direction-dependent cure-induced shrinkage in thermoset composite laminates with fiber-optic sensors embedded in through-thickness and in-plane directions”, *Journal of Composite Materials*, 49, 9, (2015), 1021-1034.
- [40] H. Hu, S. Lia, J. Wang, L. Zu, D. Cao, and Y. Zhong, “Monitoring the gelation and effective chemical shrinkage of composite curing process with a novel FBG approach”, *Composite Structures*, 176, (2017), 187-194.
- [41] S. Minakuchi, N. Takeda, S. Takeda, Y. Nagao, A. Franceschetti, and X. Liu, “Life cycle monitoring of large-scale CFRP VARTM structure by fiber-optic-based distributed sensing”, *Composites Part A*, 42, 6, (2011), 669-676.
- [42] 保立和夫, 村上英昌, “光ファイバセンサ入門”, 光防災センシング振興協会, (2013), 52.
- [43] B. Wang, D. Ba, Q. Chu, L. Qiu, D. Zhou, and Y. Dong, “High-sensitivity distributed dynamic strain sensing by combining Rayleigh and Brillouin scattering”, *Opto-Electronic Advances*, 3, 12, (2020), 200012-1 - 200013-8.
- [44] Y. Ito, T. Obo, S. Minakuchi, and N. Takeda, “Cure strain in thick CFRP laminate: optical-fiber-based distributed measurement and numerical simulation”, *Advanced Composite Materials*, 24, 4, (2014), 325-342.
- [45] M. R. Wisnom, M. Gigliotti, N. Ersoy, M. Campbell, and K. D. Potter, “Mechanisms generating residual stresses and distortion during manufacture of polymer-matrix composite structures”, *Composites Part A*, 37, (2006), 522-529.
- [46] L. Mezeix, A. Seman, M. N. M. Nasir, Y. Aminanda, A. Rivai, B. Castanié, P. Olivier, and K. M. Ali, “Spring-back simulation of unidirectional carbon-epoxy flat laminate composite manufactured through autoclave process”, *Composite Structures*, 124, (2015), 196-205.
- [47] 高坂達郎, 逢坂勝彦, 澤田吉裕, “シングルモード光ファイバを用いた屈折率リアルタイム測定法による樹脂の硬化モニタリング”, *材料*, 59, 5, (2010), 391-397.
- [48] T. Kosaka, K. Deguchi, G. Fujioka and K. Kusakawa, *15TH JAPAN International SAMPE Symposium and Exhibition*, (2017), Tokyo, Japan.
- [49] S. Vacher, J. Molimard, H. Gagnaire, and A. Vautrin, “A Fresnel’s Reflection Optical Fiber Sensor for Thermoset Polymer Cure Monitoring”, *Polymers & Polymer Composites*, 12, 4, (2004), 269-276.
- [50] D. Boivin, Louis-Anne de Montmorillon, L. Provost, N. Montaigne, F. Gooijer, E. Aldea, J. Jensma, and P. Sillard, “Recent Developments in Bend-Insensitive and Ultra-Bend-Insensitive Fibers”, *Proceedings of SPIE*, 7598, 1, (2010).
- [51] L. F. Avila, E. F. Chilcce, and L. C. Barbosa, “Bend Loss insensitive All-Solid Optical Fiber”, *Proceedings of SPIE*, 8257, 1, (2012).
- [52] M. J. Li, “Bend-insensitive optical fibers simplify fiber-to-the-home installations”, *SPIE Newsroom*, (2008), DOI: 10.1117/2.1200803.0966.
- [53] I. Caetano, “Architecture meets computation: an overview of the evolution of computational design approaches in architecture”, *Architectural Science Review*, 63, (2020), 165-174.3
- [54] A. Moskaleva, A. Safonov, and E. Hernández-Montes, “Fiber-Reinforced Polymers in Freeform Structures: A Review”, *Buildings*, 11, 10, (2021).
- [55] F. Jan-Ruben, “Optimizing Digital Organic Freeform Modelling for Fabrication by Using Parameterization With Glass Fibre Reinforced Plastics (GFRP): A Case Study”, *Proceedings of the 30th International Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe*, 2, (2012), 181-190.
- [56] P. Wang, J. Molimard, S. Drapier, A. Vautrin, and J. C. Minni, “Monitoring the resin infusion manufacturing process under industrial environment using distributed sensors”, *Journal of*

- Composite Materials*, 46, 6, (2012), 691-706.
- [57] C. Hong, Y. Zhang, G. Li, M. Zhang, and Z. Liu, “Recent progress of using Brillouin distributed fiber optic sensors for geotechnical health monitoring”, *Sensors and Actuators A: Physical*, 258, (2017), 131-145.
- [58] X. Bao, and Y. Wang, “Recent Advancements in Rayleigh Scattering-Based Distributed Fiber Sensors”, *Advanced Devices & Instrumentation*, (2021), Article ID 8696571.
- [59] Y. Ito, S. Minakuchi, T. Mizudani, and N. Takeda, “Cure monitoring of carbon-epoxy composites by optical fiber-based distributed strain-temperature sensing system”, *Advanced Composite materials*, 21, 3, (2012), 259-271.
- [60] T. Kosaka, “Real-Time and In Situ Monitoring of FRP by Rayleigh Scattering-Based Distributed Sensing”, *Key Engineering Materials*, 843, (2020), 39-44.
- [61] 大越孝敬, “光ファイバセンサ”, オーム社, 東京, (1986), 196-201.